

기본연구 2003-19

# 에머지 개념을 이용한 해양환경 자원의 가치평가와 정책활용 방안

2003. 12

강대석·남정호

□ 보고서 집필 내역

◆ 연구책임자

- 강 대 석 : 제1장~제5장

◆ 연구진

- 남 정 호 : 제2장~제5장

## 머 리 말

우리나라는 최근 몇 년 동안 규모가 큰 개발사업을 둘러싸고 이를 찬성하는 사람들과 반대하는 사람들 사이에 아주 심한 갈등을 겪고 있습니다. 그 결과 개발사업의 진행이 늦어지고 설계가 바뀌어 사업비용이 증가할 뿐만 아니라, 우리에게 꼭 필요한 물건을 생산하는 일에 들어가야 할 자원과 에너지가 소모적 논쟁으로 사라지고 있습니다. 이 때문에 자연생태계를 이용하거나 보호하여 얻고자 하였던 의도가 빛이 바래는 경우가 아주 많습니다. 이러한 논쟁의 한 가운데에는 자연생태계가 우리 경제에 주는 가치가 얼마나 되는지에 대한 가치논쟁이 자리잡고 있습니다.

그러나 서로 다른 사회경제 조건과 환경에 있는 사람들이 자연생태계가 우리 삶에 기여하는 가치를 바라보는 평가 틀이 다르기 때문에, 개발사업을 둘러싼 여러 가지 의견을 조화하고 조정하는 것은 쉬운 일이 아닙니다. 새만금 간척사업이 환경에 미치는 영향과 사업의 경제성을 다시 평가하기 위하여 만들어진 ‘새만금사업 환경영향 공동조사단’이 새만금 간척사업의 편익-비용평가에 사용한 시나리오가 열 가지나 된다는 것은 이를 보여주는 좋은 예라고 할 수 있습니다.

이렇듯 자연생태계가 우리 삶에 기여하는 가치를 둘러싼 다른 생각들은 자연생태계의 기여가치를 평가하는데 여러 가지 방법이 필요하다는 것을 말해줍니다. 지금까지 우리는 자연생태계를 개발하고 이용하고자 하는 계획을 세울 때 대부분 경제학 방법을 이용하여 자연생태계의 가치를 평가하였습니다. 이러한 경제학 방법들은 자연생태계를 이용하여 우리 삶의 질을 높이기 위한 정책을 수립하고 시행하는데 많은 도움을 주었습니다.

그러나 우리들이 자연생태계가 가지고 있는 여러 가지 많은 기능에 대해 더 많이 이해할수록 지금까지 사용한 경제학 방법의 평가 틀로는 가치를 평가할 수 없는 항목들이 많아지고 있습니다. 이러한 문제를 인식한 경제학자들은 시장에서 사고 팔 수 없는 항목들을 자연생태계의 기여가치를 계산하는데 포함

하기 위하여 많은 노력을 기울였습니다.

그렇지만 여전히 경제학 방법은 시장가격과 자연생태계의 소비자인 인간의 지불의사와 같이 인간 중심의 가치평가체계를 사용하고 있습니다. 이에 대해 자연생태계와 같은 시스템을 전체적인 관점에서 바라보고자 하는 시스템생태학자들은 시장가격과 지불의사가 ‘자연생태계가 우리 경제에 기여하는 진정한 가치’를 제대로 평가하지 못한다고 비판하고 있습니다. 이들은 생태학의 관점에서 자연환경의 가치를 평가할 수 있는 방법을 개발하고 이를 이용하기 위해 노력하고 있습니다.

이제는 인간 중심의 관점에서 자연생태계의 기여가치를 평가하는 경제학 방법과 다른 시각에서 자연생태계의 기여가치를 평가함으로써 생태계 관리에 새로운 안목을 제시할 수 있는 평가방법의 도입이 꼭 필요한 때라고 생각합니다. 이런 점에서 생태학의 입장에서 자연생태계의 가치를 평가하고자 하는 에머지 개념과 방법론을 사례지역을 이용하여 소개하고, 이를 해양생태계 관리정책 수립과 시행에 어떻게 이용할 수 있는 지 보여준 이 연구는 아주 가치 있는 연구라고 할 수 있습니다. 따라서 에머지 개념은 오염과 남획으로 생산성이 줄어 들고 있는 우리나라 연안·해양환경의 관리에 새로운 시각을 제공할 수 있을 것으로 생각합니다.

이 연구를 통해 새로운 해양생태계 가치평가 개념과 방법을 소개한 강대석 책임연구원, 남정호 책임연구원의 노력에 깊은 감사를 드립니다. 또한 외부 자문위원으로서 이 연구의 내용을 다듬고 읽는 이들이 더 쉽게 이해할 수 있도록 좋은 의견을 주신 호서대학교 유승훈 교수, 부경대학교 표희동 교수, 내부 자문위원으로 많은 도움을 주신 조동오 연구위원에게 감사 드립니다. 이 연구가 담고 있는 여러 가지 의견은 한국해양수산개발원의 공식 입장이 아닌 이 연구를 수행한 연구자들의 견해를 밝힙니다.

2003 12월

韓國海洋水產開發院  
院長 李 廷 旭

## 목 차

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 〈요 약〉                          | i  |
| 제 1 장 서 론                      | 1  |
| 1. 연구 배경과 목적                   | 1  |
| 2. 연구방법                        | 4  |
| 제 2 장 에머지 개념과 평가방법             | 5  |
| 1. 에머지 개념                      | 5  |
| 1) 에머지 개념의 등장 배경 / 5           |    |
| 2) 에머지의 정의 / 11                |    |
| 3) 에너지변환 계층구조와 에너지의 질 / 14     |    |
| 4) 최대에머지원리 / 19                |    |
| 5) 통합접근법으로서 에머지 / 20           |    |
| 2. 에머지 평가법                     | 21 |
| 1) 에너지시스템 다이어그램 / 21           |    |
| 2) 에머지 평가표 / 27                |    |
| 3) 에머지 지수 / 28                 |    |
| 3. 에머지 평가 선행연구                 | 37 |
| 제 3 장 사례지역 에머지평가               | 41 |
| 1. 사례지역 개요                     | 41 |
| 1) 영산강 4단계 간척사업 / 41           |    |
| 2) 영산강 4단계 사업지역 갯벌 생태계 현황 / 44 |    |

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 3) 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 수산업 현황 / 45 |    |
| 2. 사례지역 가치평가 선행연구 .....         | 46 |
| 1) 한국산업경제연구원 / 46               |    |
| 2) 해양수산부 / 48                   |    |
| 3) 비교검토 / 49                    |    |
| 3. 사례지역 에머지평가 .....             | 51 |
| 1) 우리나라의 에머지 평가 / 51            |    |
| 2) 사례지역 갯벌 에머지평가 / 59           |    |

#### 제 4 장 에머지 개념의 해양 자원 · 환경관리 적용 방향 ..... 65

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 1. 생태계 가치평가 .....                     | 65 |
| 1) Mai Po 홍수림 사례 / 66                 |    |
| 2) 미국 플로리다 공유수면 무단 점용 재판 사례 / 67      |    |
| 2. 에머지 편익 / 비용평가 .....                | 68 |
| 1) 사업 배경과 개요 / 70                     |    |
| 2) 에머지순산출량(NEY)을 활용한 편익-비용 분석 결과 / 71 |    |
| 3. 환경수용력평가 .....                      | 73 |
| 1) 배경과 수요 / 74                        |    |
| 2) 에머지 수용력 평가 결과 / 74                 |    |
| 3) 에머지 수용력 적용 방안 / 77                 |    |
| 4. 대안평가 .....                         | 77 |
| 1) 배경과 개요 / 79                        |    |
| 2) 에머지 평가 결과 / 81                     |    |

#### 제 5 장 정책제언과 향후 연구방향 ..... 83

|                   |    |
|-------------------|----|
| 1. 정책제언 .....     | 84 |
| 2. 앞으로 연구방향 ..... | 86 |

|      |    |
|------|----|
| 참고문헌 | 88 |
|------|----|

|        |    |
|--------|----|
| 부    록 | 93 |
|--------|----|

## 표 목 차

|         |                                       |    |
|---------|---------------------------------------|----|
| 〈표 2-1〉 | 에머지 용어의 정의 .....                      | 6  |
| 〈표 2-2〉 | 태양에너지 변환도의 예 .....                    | 19 |
| 〈표 3-1〉 | 영산강 4단계 간척사업 개요 .....                 | 43 |
| 〈표 3-2〉 | 경제학 방법을 이용한 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 가치 평가 .. | 47 |
| 〈표 3-3〉 | 한국의 1999년 에머지 흐름 .....                | 54 |
| 〈표 3-4〉 | 한국의 1999년 에머지 흐름 요약 .....             | 57 |
| 〈표 3-5〉 | 한국의 1999년 에머지 지수 .....                | 58 |
| 〈표 3-6〉 | 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 에머지 평가 .....         | 61 |
| 〈표 3-7〉 | 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 기능별 에머지 가치 평가 .....  | 62 |
| 〈표 4-1〉 | Mai Po 홍수림 보전지역 에머지 지수 .....          | 67 |
| 〈표 4-2〉 | 플로리다주 홍수림의 연간 이용 에머지 .....            | 68 |
| 〈표 4-3〉 | 미시시피강 삼각주 수로분화사업 .....                | 71 |
| 〈표 4-4〉 | 미시시피강 삼각주 수로분화사업 에머지 평가결과 .....       | 72 |
| 〈표 4-5〉 | 멕시코와 파푸아뉴기니 리조트 시설 비교 .....           | 74 |
| 〈표 4-6〉 | 멕시코와 파푸아뉴기니 리조트 에머지 지수 .....          | 76 |
| 〈표 4-7〉 | 평가대상 폐수처리방식 기본 사항 .....               | 80 |
| 〈표 4-8〉 | 폐수처리방식의 자원 이용 에머지 분석 결과 .....         | 81 |



## 그림 목 차

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 〈그림 2-1〉 | 경제시스템의 자연환경 이용 .....                      | 8  |
| 〈그림 2-2〉 | 에머지 관점에서 본 환경자원의 시장가격과 경제기여도의<br>관계 ..... | 11 |
| 〈그림 2-2〉 | 에머지와 에너지변환도 계산 다이어그램 .....                | 13 |
| 〈그림 2-2〉 | 가치개념의 비교 .....                            | 15 |
| 〈그림 2-2〉 | 수생생태계의 에너지변환 계층구조 .....                   | 16 |
| 〈그림 2-2〉 | 에너지 시스템 언어에서 사용하는 기호예 .....               | 22 |
| 〈그림 2-2〉 | 에너지 시스템 언어와 에너지법칙 .....                   | 23 |
| 〈그림 2-2〉 | 에너지 시스템 다이어그램 작성과정 .....                  | 24 |
| 〈그림 2-2〉 | 에너지 시스템 다이어그램을 그리는 과정 .....               | 25 |
| 〈그림 2-2〉 | 에머지 화폐비율의 정의 .....                        | 29 |
| 〈그림 2-2〉 | 에머지산출비율과 에머지교환비율 계산방법 .....               | 32 |
| 〈그림 2-2〉 | 에머지 지수 계산 개념도 .....                       | 35 |
| 〈그림 3-1〉 | 사례지역인 영산강 4단계 매립 계획 지역 .....              | 42 |
| 〈그림 3-2〉 | 우리나라의 에너지시스템 다이어그램 .....                  | 47 |
| 〈그림 3-3〉 | 한국경제에 대한 에머지 평가의 요약 다이어그램 .....           | 56 |
| 〈그림 3-4〉 | 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 에너지시스템 다이어그램 .....       | 60 |
| 〈그림 4-1〉 | 연안지역에서 환경부하를 줄이는데 필요한 구역지정 방식 .....       | 78 |
| 〈그림 4-2〉 | 에머지 개념을 이용한 대안 평가 .....                   | 79 |
| 〈그림 5-1〉 | 자연과 인간의 공존을 위한 자연환경의 이용 형태 .....          | 84 |
| 〈그림 5-2〉 | 합리적 의사결정을 위한 정책평가 방법 개발 모식도 .....         | 85 |

## <요 약>

### 제1 장 연구배경과 목적

- 자연환경의 이용과 보전을 조화하기 위한 정책 수립의 필요 조건 중 하나는 자연환경이 우리 경제에 기여하는 진정한 가치를 평가하는 일임. 이러한 평가를 통해 우리가 겪고 있는 환경문제의 심각함과 대응의 시급함을 고려하여 한정된 인력과 자원을 효율적으로 활용하기 위한 정책방향과 대응우선순위를 정할 수 있음.
- 지금까지 자연환경의 가치는 대부분 지불의사(willingness-to-pay)에 기반을 둔 경제학 방법을 이용하여 평가되었음. 그러나 시스템생태학자들은 인간 중심의 지불의사는 자연환경이 우리 삶에 기여하는 바를 제대로 평가하지 못한다고 비판하고 있음.
- 인간의 모든 사회경제활동의 기본 토대인 자연환경 훼손이 지구 차원에서 문제가 되고 있기 때문에 자연환경 관리정책에 새로운 시각을 제시하는 다양한 평가방법들이 필요함.
- 이 연구의 목적은 i) 자연환경이 우리 경제에 기여하는 진정한 가치를 평가하기 위한 노력 중 하나인 에머지(Emergy, spelled with an "m") 개념과 평가방법을 소개하고, ii) 사례지역을 골라 에머지 평가를 수행함으로써 에머지 개념과 평가방법을 자연환경의 가치평가에 어떻게 이용할 수 있는 지 그 구체적인 절차를 제시하며, iii) 에머지 개념이 우리나라 해양환경을 지속가능하게 이용하기 위한 정책에 어떻게 기여할 수 있는지 그 방향을 보여주는데 있음.

## 제2장 에머지 개념과 평가방법

### 1. 에머지 개념

- 미국의 시스템생태학자인 Howrar T. Odum이 제안한 에머지(emergy) 개념은 생태학의 입장에서 자연환경과 경제활동의 관계를 이해하고 정책방향을 제시하기 위한 자연환경 가치평가 방법임.
- Odum은 지불의사에 바탕을 둔 자연환경의 가치 평가는 자연환경이 경제에 기여하는 바를 제대로 평가하지 못한다고 비판하면서, 이를 위한 대안으로 자연환경의 기여가치를 평가하는 데 에너지를 공통 화폐(common currency)로 사용하고자 하였음. 에머지 개념은 지불의사에 기반을 둔 시장 가격과 자연 환경이 우리 사회의 진정한 부에 기여하는 정도는 반비례 관계에 있다고 주장하고 있음.
- 시장가치(market value)는 자연환경의 가치를 이를 구매하는 인간 소비자의 입장에서 평가한다는 점에서 receiver value이며, 에머지 가치는 자연환경의 재화와 용역을 만드는데 들어간 에너지의 양으로 그 가치를 평가한다는 점에서 donor value로 구분할 수 있음.
- 에머지는 ‘한 가지 서비스나 생산물을 만드는 과정에 직접 그리고 간접으로 이미 소모된 한 종류의 이용 가능한 에너지’로 정의되며, 단위는 emjoule임. 여러 가지 환경 자원들을 에너지라는 공통 화폐로 표시함으로써 서로 다른 특성을 가진 자원들을 동일한 기준에서 비교할 수 있게 되는 것임. 에머지 평가는 자연환경의 가치평가에 인간의 용역과 자연 생태계의 일을 모두 포함하려는 시도임.
- 현재 에머지 평가법에서 서로 다른 자원들을 비교하기 위하여 기준으로 삼은 에너지는 태양 에너지임. 이 에머지를 태양에머지(solar emergy)라 하며, 단위는 solar emjoules(sej)임.
- 에머지 개념에 따르면 에너지들은 일을 할 수 있는 능력이 다르기 때문에 서로 다른 에너지를 직접 비교할 수 없음. 이들 에너지를 비교하기 위해서는 비교하고자 하는 에너지들을 기준이 되는 에너지로 바꾸어야 함. 에머지 개념에서는 서로 다른 에너지 사이에 나타나는 일할 수 있는 능력의 차

이를 에너지변환도(transformity)로 나타냄.

- 에너지변환도는 한 가지 자원이 만들어지는데 직접 투입된 에너지와 간접으로 투입된 기준이 되는 에너지량, 즉 에머지를 이 자원의 실제 에너지량으로 나눈 값으로, 에너지 변환도가 클수록 자원의 질은 더 높다고 할 수 있음.

## 2. 에머지 평가법

- 에머지 평가 과정은 크게 세 단계로 나눌 수 있음. 첫 번째 단계는, 평가하고자 하는 시스템을 이루는 요소들이 무엇인지, 그리고 이러한 요소들은 어떻게 연결되어 있는 가 파악한 후 다이어그램을 그리는 과정임. 에머지 평가법에서는 에너지시스템언어(Energy systems language)라는 모델링 언어를 이용하여 다이어그램을 그리며, 이를 에너지시스템 다이어그램(energy system diagram)이라 부름.
- 에머지 평가법의 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 완성한 에너지시스템 다이어그램을 이용하여 에머지 평가표를 만듦. 이를 위해 각 평가요소별로 에너지, 물질, 화폐의 흐름과 같이 각 요소와 흐름에 알맞은 자료를 찾아 에머지를 계산함.
- 이렇게 완성된 에머지 평가표는 세 번째 단계에서 자연환경이 경제에 기여하는 바를 평가하기 위한 에머지 지수(emergy indices)의 계산에 이용함. 이렇게 계산된 지수들은 평가대상 시스템의 상태에 관한 정보를 제공하며, 경제성 평가, 환경영향, 대안선정과 같은 정책결정에 사용할 수 있음.
  - 에머지 지수에는 에머지-화폐비율, 에머지산출비율, 일인당 에머지사용량, 환경부하비율, 에머지 지속가능성지수와 같은 지수들이 있음.

## 제3장 사례지역 에머지 평가

- 1998년 7월 16일 중단된 영산강 4단계 간척사업지역의 갯벌을 대상으로 에머지 개념을 이용하여 자연환경의 가치를 평가하는 절차를 소개하였음. 영산강 4단계 간척사업은 41.4km의 방조제를 쌓아 33,560ha의 매립면적을

확보하기 위한 사업이었음.

- 사례지역 갯벌의 가치를 경제학 방법을 이용하여 평가한 연구는 한국산업경제연구원(1998)과 해양수산부(2000)가 있음. 그러나 에머지 개념을 이용하여 이 지역의 갯벌 가치를 평가한 사례는 없음.
- 한국산업경제연구원(1998)은 사례지역의 갯벌이 가지는 기능을 수산물생산, 수질정화, 심미가치로 구분한 후 각 기능별 기여가치를 평가하였음. 이 연구에 따르면 사례지역의 갯벌은 수질정화가치를 어떻게 평가하는가에 따라 ha당 연간 562만원(인공습지 조성)과 936만원(Odum의 갯벌정화자료 이용)의 가치를 보였음.
- 해양수산부(2000)는 한국산업경제연구원(1998)의 평가결과의 문제점을 지적하고, 사례지역 갯벌의 기여가치를 다시 평가하였음. 그 결과 사례지역의 갯벌은 우리나라 경제에 ha당 연간 741만원을 기여하였음.

## 1. 우리나라 경제의 에머지 평가

- 우리나라 경제가 1999년에 사용한 총 에머지량 중 우리나라 내부의 에머지원(태양, 바람, 조석과 같은 재생가능한 에너지와 석탄, 광물과 같은 재생불가능한 에너지)이 차지하는 양은 13%에 불과하였음. 이는 우리나라 경제는 외부 의존적이라는 것을 보여주는 결과임.
- 재화와 용역의 수입을 통해 우리나라로 들어온 에머지량과 수출로 빠져나간 에머지량의 비율은 4.5로, 1999년 우리나라 경제는 에머지의 관점에서 흑자를 기록하였음. 이는 무역수지 흑자보다 약 3.8배 높은 값이었음.
- 좁은 국토에서 많은 인구가 경제활동을 하는 우리나라의 단위면적당 연간 에머지 사용량은 아주 높았지만, 일인당 국민총생산처럼 생활수준을 나타내는 일인당 연간 에머지 사용량은 선진국 수준에 근접하였음.
- 우리나라의 자연환경이 공급하는 재생가능한 에너지(태양, 바람, 강우, 조석과 같은 에너지)가 수용할 수 있는 인구는 약 226만명에 불과하며, 선진국 수준의 발전을 한다고 가정할 경우의 인구수용력은 1,810만명(전체 인구의 38.8%)이었음. 이는 우리나라 인구가 우리나라의 자연 환경이 부양할 수 있는 수준을 훨씬 초과하였다는 것을 의미함.

- 인간의 사회경제활동이 자연환경에 미치는 영향을 나타내는 환경부하비율은 19.65로 아주 높았으며, 에머지 지속가능성지수는 0.06에 불과하여 현재 우리나라의 사회경제활동이 지속가능하지 않음을 알 수 있음.

## 2. 사례지역 갯벌의 연간 에머지 기여

- 1999년에 사례지역 갯벌로 유입한 자연환경의 에머지 총량은  $5.80 \times 1020$  sej/yr로, 이 중 강우에 의한 에머지 유입이 72.7%( $4.22 \times 1020$  sej/yr)로 에머지 기여도가 가장 높았음.
  - 사례지역 갯벌로 유입하는 에머지 총량을 계산하는 과정에서 중복 계산을 피하기 위하여, 태양, 바람, 강우 중 에머지 유입량이 가장 큰 강우 에머지만 포함하였음. 즉 사례지역 갯벌로 유입한 총 에머지량은 강우와 조석의 에머지를 더한 값임.
- 사례지역의 갯벌이 우리나라 경제에 기여하는 바는 연간 2억 1,700만 Em\$ (2,490억 Em₩)이었으며, 이를 단위면적(ha)으로 환산하면 약 6,475 Em\$ (742만 Em₩)에 해당함.

## 3. 사례지역 갯벌의 기능별 에머지 평가

- 앞에서 수행한 에머지 평가결과는 영산강 4단계 사업지역 갯벌로 유입하는 자연환경의 에머지를 이용하여 계산하였기 때문에 갯벌생태계 내부의 기능에 대해 평가한 한국산업경제연구원(1998)과 해양수산부(2000)의 연구결과와 직접 비교하기는 힘들. 따라서 두 연구에서 영산강 4단계 갯벌의 연간 기여가치를 평가하기 위하여 사용한 갯벌의 기능에 대해 에머지 평가를 수행하였음.
- 에머지 개념을 이용하여 계산한 사례지역 갯벌의 수산물생산가치는 ha당 연간 692만 Em₩이었음. 이 결과는 한국산업경제연구원이나 해양수산부의 결과보다 높은 값임.
- 사례지역 갯벌의 오염정화가치는 ha당 연간 36만원(Odum의 자료를 이용할 경우 78만원/ha/yr)으로, 한국산업경제연구원과 해양수산부의 결과보

다 아주 낮았음, 이러한 차이는 에머지 평가법과 경제학 평가방법 사이의 근본적인 차이를 반영하는 것으로 판단됨.

- 갯벌의 기능별 에머지 가치 계산은 수산물생산과 오염정화 기능이 영산강 4단계 사업지역 갯벌 생태계의 네트워크를 통해 밀접하게 연결되어 있기 때문에중복계산(double counting) 문제를 내포하고 있음. 따라서 각 기능별로 에머지 가치와 경제학 방법을 이용한 가치를 비교하는 것은 의미 있지만, 합계를 비교하는 것은 에머지 방법상 문제가 있는 것으로 판단됨.
- 그럼에도 불구하고 비교를 위해 에머지를 이용하여 계산한 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 수산물생산가치와 오염정화가치를 더하면, ha당 연간 728만원이 되어 한국산업경제연구원(1998)의 결과 중 Odum의 정화능력자료를 이용한 경우를 제외하고는 심미가치나 보전가치까지 합한 한국산업경제연구원이나 해양수산부의 결과보다 높았음.
- 이 연구에서는 에머지 개념에서 생태계의 보전가치나 심미가치를 평가하기 위한 기법이 아직 정립되어 있지 않아 이들 가치를 평가하지 못하였음. 그러나 경제학 방법을 이용한 연구와 마찬가지로 에머지를 이용한 연구에서도 갯벌의 심미가치나 보전가치는 0보다 클 것이기 때문에 영산강 4단계 갯벌의 수산물생산가치, 오염정화가치, 보전가치(또는 심미가치)를 더한 에머지 가치는 경제학 방법에 의한 평가결과보다 더 높을 것으로 판단됨.

## 제 4 장 해양환경 · 자원관리와 에머지 개념

- 에머지 평가법과 경제학 방법은 자원의 가치를 평가하는데 서로 다른 방향에서 접근하기 때문에 두 방법의 통합은 힘들 것으로 보임. 그러나 에머지 평가방법을 기존의 경제학 방법과 병행하여 사용할 경우 경제학과 생태학의 관점에서 해양 자원과 환경을 관리하기 위한 서로 다른 시각의 정책 시사점을 제공할 수 있을 것임.
- 우리나라 연안자원과 환경 관리에 에머지 개념과 평가법을 활용할 수 있는 분야는 i) 생태계 가치평가, ii) 편익/비용평가, iii) 환경수용력평가, iv) 대안평가의 4가지로 구분할 수 있음.

## 1. 가치평가

- 에머지 개념을 이용한 가치평가는 사례지역의 연구를 통해 절차를 소개하였음. 외국의 사례를 보면 Qin et al.(2000)은 홍콩의 Mai Po 홍수림 보전지역에 대해 에머지 평가를 수행한 후, 법제도를 개정하여 Mai Po의 육지부 개발을 제한하고 환경부하를 줄이는 방향으로 정책을 시행할 필요가 있음을 제안하였음.
- 미국 플로리다에서는 84ha의 홍수림을 불법으로 훼손한 사람에 대한 소송에서 벌금을 산정하기 위한 방법의 하나로 에머지 개념을 사용하였음. 어류와 홍수림 목재에 대한 시장가치만을 기준으로 부과금을 산정할 경우 부과금은 수천 달러에 불과하였지만, 에머지를 이용하였을 때는 250만달러로 늘어났음.

## 2. 에머지 편익/비용평가

- 에머지 편익/비용평가는 개발사업의 비용효과성과 정책의 이행성과를 평가하는데 이용할 수 있음. 개발사업이나 정책시행으로 얻게 될 에머지 편익과 이로 인한 에머지 비용을 비교하여, 편익이 비용을 초과하게 되면 개발사업이나 정책이 타당성이 있는 것으로 평가됨.
- Martin(2002)은 미국 미시시피강의 하천수로분화사업에 대해 에머지 평가를 수행하여, 이 사업의 에머지순산출비율(net emergy yield ratios)이 평가대상 두 곳 모두 30을 넘어 비용효과성이 아주 높음을 보여주었음.

## 3. 환경수용력평가

- 에머지 개념은 환경수용력을 평가할 수 있는 수단을 제공하는데, 사례지역의 에머지 평가에서 우리나라의 인구수용력을 계산하여 제시하였음. 에머지 개념은 사회경제활동을 지탱하기 위한 공간환경수용력 계산에도 이용할 수 있음.
- Brown and Ulgiati(2001)는 멕시코와 파푸아뉴기니 연안의 리조트 운영으



로 발생하는 환경부하를 줄이기 위한 면적을 계산하였는데, 멕시코의 리조트는 리조트 면적의 1,800배, 파푸아뉴기니의 리조트는 835배의 훼손되지 않은 생태계가 필요한 것으로 계산되었음.

#### 4. 대안평가

- 에머지 개념은 제안된 개발계획이나 관리계획에 대한 대안들을 동일한 과정을 통해 평가·비교함으로써 기존의 시스템, 제안된 계획, 이 계획에 대한 대안들 중에서 환경친화적이고 지속가능한 성장을 보장하는 대안을 선택할 수 있도록 함. 에머지 개념에 따르면 여러 대안들 중에서 좀 더 많은 에머지를 산출하고 환경에 대한 부하가 작은 대안이 가장 훌륭한 개발대안 또는 정책대안임.
- Geber and Björklund(2002)는 에머지 개념을 이용하여 i) 전통적인 폐수처리, ii) 전통적인 폐수처리방식과 인공습지를 이용한 통합처리, iii) 자연습지를 이용한 처리를 비교하였음. 에머지 투자비율만을 고려할 때 세 가지 폐수처리방식 중 자연습지를 이용한 폐수처리방식이 경쟁력이 가장 높은 것으로 평가되었음.

### 제5장 정책제언과 앞으로 연구방향

- 에머지 개념을 해양 자원과 환경관리에 활용하기 위해 필요한 정책제언과 이 개념의 정책지향성을 높이기 위해 앞으로 필요한 연구방향은 다음과 같이 제시할 수 있음.

#### 1. 정책제언

- 에머지 개념은 해양 환경과 자원 관련 분야뿐만 아니라 육상 환경, 경제 정책, 도시 관리, 역사와 같이 아주 다양한 분야에 적용되어 자연과 인간의 관계를 바라보는 새로운 시각을 제공하였음. 따라서 에머지 개념을 포함한 다양한 평가방법을 해양 환경과 자원 관리에 도입할 수 있는 제도적

장치가 마련될 필요가 있음.

- 환경과 자원 관리와 이용에 관한 정책을 결정할 때 지금까지 해온 것처럼 경제학 방법만을 사용할 것이 아니라 에머지 개념과 같이 똑같은 사안에 대해 다른 시각을 제공할 수 있는 몇 가지 방법을 동시에 사용하면 합리적인 의사결정을 할 수 있을 것으로 판단됨.
- 이를 위해서는 우선 해양 환경과 자원 관리에 활용할 수 있는 평가방법들을 종합적으로 비교·검토하여 서로 보완적으로 사용할 수 있는 평가방법들을 선택할 필요가 있음.
- 해양 환경·자원 관리와 개발 정책을 수립할 때 이렇게 선택된 평가방법들을 어떻게 이용하여야 하는 지 교육하기 위한 정책활용 지침서를 개발할 필요가 있음. 또한 해양 환경과 자원에 큰 영향을 미치게 될 관리정책이나 개발정책을 결정할 때는 반드시 이 지침서를 따르도록 제도화할 필요가 있음.
- 이러한 점에서 에머지 개념과 평가방법의 정책효용성을 검증하기 위한 시범연구사업을 진행할 필요가 있음. 이를 통해 다양한 관리대안이나 개발대안의 비교평가, 최적의 관리대안 제시, 정책이행의 성과 평가와 같은 정책결정과 이행에 직접 활용할 수 있는 시범 연구를 통해 에머지 개념과 평가방법의 적용성을 높일 필요가 있음.

## 2. 앞으로 연구방향

- 지금까지 국내의 에머지 연구에서 사용된 에너지변환도는 극히 일부를 제외하고는 사회경제여건이 다른 외국의 에머지 연구에서 제시한 것들임. 따라서 우리나라 환경과 사회경제 특성을 반영하는 에너지변환도를 계산하기 위한 연구를 진행할 필요가 있음.
- 이 연구의 사례지역 에머지 평가에서도 지적하였듯이 에머지 평가법에서 자연환경의 심미가치나 보전가치에 관한 합의된 평가 틀을 마련하기 위한 연구가 필요함.
- 또한 정책활용 유형별로 에머지 평가지침서를 개발하기 위한 연구를 다학제간 연구로 수행할 필요가 있음. 이렇게 함으로써 평가를 수행하는 연구

자에 따른 에머지 평가의 차이를 최소화할 수 있을 것임.

- 마지막으로, 에머지 개념과 에너지시스템언어를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 평가대상 시스템의 시간에 따른 변화를 예측하기 위한 연구가 필요함. 이를 통해 관리정책의 시행이나 개발계획의 집행이 가져올 장기적인 영향을 평가하고, 정책이나 관리계획을 조정할 수 있기 때문임.

# 제 1 장 서 론

## 1. 연구 배경과 목적

미국의 부통령을 지낸 앨 고어는 지구의 환경문제와 그 근원을 살펴보고, 이를 해결하기 위한 대안을 제시한 베스트셀러 ‘위기의 지구(Earth in the Balance)’에서 인간과 자연의 관계에 대해 다루면서 다음과 같은 재미있는 이야기를 소개하였다(Gore, 1992 : p.259). 미국 14대 대통령 프랭클린 피어스(Franklin Pierce)는 워싱턴주 퓨젯 사운드(Puget Sound) 부근에 살던 인디언인 수콴미쉬족(Suquamish tribe)의 추장 시애틀(Seattle)<sup>1)</sup>에게 그들의 땅을 사고 싶다는 편지를 보냈다. 추장 시애틀은 1855년 피어스에게 보낸 답장에서 “당신은 어떻게 하늘을 사거나 팔 수 있습니까? 땅은 어떤가요?(How can you buy or sell the sky? The land?)” 하고 적었다. 모든 사물이 서로 밀접하게 연결되어 있는 자연의 섭리 속에서 자기들의 소유가 아닌 “신선한 공기(freshness of the air)”와 “반짝거리는 물(sparkle of the water)”로 가득 찬 자연을 사고 판다는 것은 수콴미쉬 인디언에게 “낯선 생각(strange ideas)”이었다.<sup>2)</sup> 추장 시애틀과 인디언들에게 “땅은 우리들의 소유가 아니라, 우리 인간이 땅의 일부분(the earth does not belong to man, man belongs to the earth)”이었다.

우리가 경험하는 모든 사물과 현상은 ‘생명의 그물망(web of life)’에서 유기적으로 연결되어 있기 때문에 특정한 세대 또는 개인의 시·공간 관점이 아니라, 이들 사물과 현상에 알맞는 시간과 공간 크기에서 바라본다면 모두 시스템

---

1) 미국 워싱턴주의 도시인 시애틀(Seattle)은 추장 시애틀의 이름을 따라 지었음.

2) "The idea is strange to us. If we do not own the freshness of the air and the sparkle of the water, how can you buy them?" (Gore, 1992, p.259)

의 발전과 유지에 없어서는 안될 요소들이다. 예를 들어, 자연현상인 태풍을 우리나라의 한 지방이라는 공간과 매년 여름이라는 시간에서 바라본다면 귀중한 생명과 재산의 손실을 가져오는 자연재해이지만, 지구 전체의 공간에서 몇 년 또는 몇 십 년의 시간으로 본다면 지구의 열수지(heat balance)를 유지하는 아주 중요한 자연활동이다. 또한 이러한 사물과 현상이 나타나는 시스템은 외부의 영향뿐만 아니라 내부 요소들이 서로 영향을 미치며 끊임없이 변화하는 ‘역동적인 전체(dynamic whole)’이다.

인간이 자연의 한 가지 구성요소라는 점을 인식하는 사회였던, 인간의 욕구를 충족하기 위하여 정복(conquest of nature)하여야 하는 대상으로 자연을 여기는 사회였던 간에 산업혁명 이전의 인간활동은 그 영향이 아주 좁은 지역에 미쳤기 때문에 인간과 자연의 공존이 어느 정도 가능하였다. 그러나 현대의 산업사회는 “인간들이 사용하는 에너지가 생물권에서 차지하는 몫을 무시할 수 없기 때문에”(Odum, 1994)<sup>3)</sup> 인간의 사회경제활동을 적절하게 관리하지 않을 경우 우리 삶의 근간이 되는 자연환경에 돌이킬 수 없는 변화를 가져올 수 있다.

우리가 현재의 생활 수준을 유지하고자 한다면 자연환경의 개발은 피할 수 없다. 그러나, 이러한 개발이 인류 생존의 토대인 자연환경을 파괴해서는 안되며, 맹목적인 자연환경의 보존도 분명히 우리 삶의 수준을 높일 수 없다는 것을 인식해야 한다.

‘지속가능발전(sustainable developement)’이 1980년대 후반부터 인류의 화두가 된 것은 자연과 인간의 공존을 통해 Homo sapiens의 지속적인 생존을 확보하기 위한 인류 차원의 노력의 결과라 할 수 있다. 2002년 남아프리카공화국의 요하네스버그에서 열린 ‘지속가능발전 세계정상회의(World Summit on Sustainable Development)’는 21세기를 맞아 지속 가능한 사회를 만들기 위한 인류의 지혜를 모으는 자리였다.

자연환경의 이용과 보전을 조화하기 위한 정책 수립의 필요 조건 중 하나는 자연환경이 우리 경제에 기여하는 진정한 가치를 평가하는 일이다. 이러한 평

---

3) As our available energies begin to be a substantial portion of the network, we are capable of damaging our own basis for support if we make changes that we do not understand(Odum, 1994 : p.3).

가를 통해 우리가 겪고 있는 환경문제의 심각함과 대응의 시급함을 고려하여 한정된 인력과 자원을 효율적으로 활용하기 위한 정책방향과 대응우선순위를 정할 수 있다.

지금까지 우리는 자연환경의 가치를 대부분 시장 경제에서 화폐로 표시하는 가격(market value)을 이용하여 평가하였다. 그러나 지불의사(willingness-to-pay)에 기반을 둔 시장경제의 가격은 자연환경과 자원이 우리 경제의 진정한 부(real wealth)에 기여하는 바를 제대로 반영하지 못하고 있다(Odum, 1996). 전통적인 경제적 관점의 가치 평가는 자연환경이 우리 경제에 직접 기여하는 가치만 다루었다. 그러나 그동안 많은 연구들은 자연환경이 우리 경제에 기여하는 기능들 중에는 시장 경제의 가격으로 바꾸기 힘든 항목들도 있음을 밝혀냈다.

추장 시애틀이 주장한 바와 같이 우리가 소유하고 있지 않은 자연환경의 서비스를 시장에서 사고 팔 수는 없다. 그러나 시애틀의 주장이 시사하는 바는, 자연환경의 서비스는 우리의 삶을 유지하는데 반드시 필요하므로 이러한 서비스가 갖는 가치를 수요자의 지불의사에 기초를 둔 시장가격만으로 평가해서는 안 된다는 것이다. 우리는 자연환경은 사고 팔 시장이 없지만 우리에게 언제나 여러 가지 서비스를 제공하고 있다는 점을 깨닫지 못하는 경우가 많다. 따라서 자연환경이 우리의 진정한 부에 기여하는 가치를 제대로 평가하고, 이를 토대로 사회경제활동의 세기와 빠르기를 조절할 필요가 있다.

이용 가능한 자원의 양이 감소하고 있는 지금, 자연환경을 지속 가능하게 이용하기 위한 정책을 수립·시행하기 위해서는 자연환경이 우리에게 직접 기여하는 가치뿐만 아니라 시장경제에서 화폐로 바꾸기 힘든 기능들까지 모두 다룰 수 있는 평가방법이 필요하다. 이러한 흐름에 따라 기존의 경제학 가치평가방법을 개선하기 위한 다양한 노력이 이루어지고 있다. 그러나 경제학 평가방법은 여전히 인간 중심의 지불의사(willingness-to-pay)를 기반으로 하고 있다. 따라서 경제학 방법이외에 자연환경의 가치평가에 대해 새로운 시각을 제시하는 다양한 방법들이 필요하며, 이러한 방법들에 의한 평가를 비교·검토하여 지속가능발전을 이루기 위한 가장 적절한 정책을 결정하여야 한다. 또한 이러한 일을 수행하는 데에는 자연과 인간 사회를 성분 요소들과 과정들로

나누어 연구하는 환원주의 태도(reductionist approach)가 아닌 통합된 관점(holistic approach)이 필요하다.

이 연구의 목적은 1) 자연환경이 우리 경제에 기여하는 진정한 가치를 평가하기 위한 노력들 중 하나인 에머지(Emergy, spelled with an "m") 개념과 평가방법을 소개하고, 2) 사례지역을 골라 에머지 평가를 수행함으로써 에머지 개념과 평가방법을 자연환경의 가치평가에 어떻게 이용할 수 있는 지 그 구체적인 절차를 제시하며, 3) 에머지 개념이 우리나라 해양환경·자원을 지속가능하게 이용하기 위한 정책에 어떻게 기여할 수 있는지 그 방향을 보여주는 데 있다.

## 2. 연구방법

이 연구는 생태학의 입장에서 자연환경의 가치를 평가하는 에머지 평가방법을 소개하는 연구이기 때문에 에머지의 기본 개념과 평가절차는 제2장에서 자세하게 다루었다. 연구 목적에서 언급하였듯이 제2장에서 소개한 개념과 방법을 어떻게 실제 평가에 적용할 수 있는 지 보여주기 위하여 사례 지역을 선정하였다. 사례지역의 선정은 경제학 방법을 이용하여 이미 평가가 이루어졌으나, 에머지 개념을 이용한 가치평가를 수행한 적이 없는 해양생태계를 대상으로 하였다. 이러한 기준을 적용하여 영산강 4단계 간척사업 대상 갯벌을 사례 지역으로 선정하였다.<sup>4)</sup> 영산강 4단계 간척사업의 개요, 평가대상 갯벌의 자연환경과 사회경제 현황은 제3장 ‘사례지역 에머지평가’에서 자세하게 제시하였다. 이러한 에머지 개념과 평가방법을 우리나라 연안 자원·환경관리에 어떻게 적용할 수 있는지 알아보기 위하여 제4장에서 각 활용방향별로 외국의 관련 사례를 분석하여 제시하였다.

에머지 평가를 수행하기 위해서는 평가대상 시스템의 자연환경과 사회경제 현황에 대한 자료가 필요하다. 에머지 평가를 위해 우리나라 전체와 평가대상 갯벌을 이용하는 지역의 통계자료, 대상 갯벌의 자연환경 조사 보고서와 학술 논문, 인터넷 자료를 이용하였다.

---

4) 경제학 방법을 이용하여 두 차례 평가가 이루어졌지만(한국산업경제연구원, 1998 : 해양수산부, 2000), 에머지 개념을 이용한 평가는 수행되지 않은 지역임.

## 제 2 장 에머지 개념과 평가방법

에머지(Emergy) 개념은 미국의 시스템생태학자인 Howrar T. Odum이 1967년 제안하였으며, 이후 많은 연구들이 생태학의 입장에서 자연환경과 경제활동의 관계를 이해하고 정책 시사점을 제시하기 위하여 이용하였다(Odum, 1983, 1994, 1996). 에머지 개념은 한 가지 자원이 가지는 가치는 이를 만드는데 필요한 모든 에너지를 더한 값(직접 필요한 에너지와 간접으로 필요한 에너지를 모두 더한 양)에 비례한다는 가정에 기반을 두고 있다(Odum, 1996).

이 장에서는 자연환경이 경제에 기여하는 가치를 ‘생태학의 관점’에서 평가하고자 하는 개념의 하나인 에머지 개념을 소개하고, 이를 이용하여 자연환경의 가치를 평가하는 절차를 제시하고자 한다. 또한 자연과 인간의 공존을 위한 정책방향을 제시하는데 사용할 수 있는 여러 가지 에머지 지수(emergy indices)를 살펴보기로 한다. <표 2-1>에 이 연구에서 소개하고자 하는 에머지 개념과 평가방법을 이해하는데 필요한 기본 용어들을 정리하였다.<sup>5)</sup>

### 1. 에머지 개념

#### 1) 에머지 개념의 등장 배경

지금까지 우리나라에서 시행된 간척 사업 중 가장 규모가 큰 새만금 갯벌의 간척<sup>6)</sup>을 둘러싼 논쟁이 몇 년째 이어지고 있다. 최근 행정법원은 새만금 지역

---

5) 에머지 용어들에 대한 자세한 설명은 Odum(1983, 1994, 1996)을 참조.

6) 새만금간척사업은 모두 40,100ha의 갯벌을 매립하여 28,300ha의 토지와 11,800ha의 담수호를 조성하는 사업으로, 1991년에 공사를 시작하였음. 새만금간척사업의 목적은 농지확보, 수자원확보, 침수피해방지임.



주민 일부와 환경단체가 낸 새만금 간척사업의 취소를 요구하는 소송에서 본 판결이 나올 때까지 이 사업을 잠정 중단하라고 결정하였다.<sup>7)</sup>

〈표 2-1〉

## 에머지 용어의 정의(이창희 등, 2001)

|                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| 에너지<br>(energy)                       | 일을 할 수 있는 능력. 에너지는 열로 변환될 수 있는 모든 사물들의 성질이며, 열량의 단위로 나타낸다(BTU, 칼로리 또는 J).   |
| 에머지<br>(emergy)                       | 생산물이나 서비스를 생산하는 작업 과정에서 사용한 모든 에너지를 한 가지 형태의 에너지로 표현한 것으로, 단위는 emjoule이다. 태양 에머지(solar emergy)는 생산물이나 서비스의 에머지를 태양 에너지를 기준으로 나타낸 것이며, 단위는 solar emjoules(sej)이다. 예를 들어, 물고기의 태양 에머지는 물고기를 생산하기 위해 쓰인 모든 에너지를 태양 에너지로 환산한 Joule로 표현한다. |
| Empower                               | 단위시간당 에머지 흐름량(emjoules/yr, emjoules/day 등)  |
| 최대에머지원리<br>(Maximum emergy principle) | 생산과정을 강화하고 더 많은 자원을 끌어들이며 효과적인 시스템의 조직화를 통해 더 많은 제한요인을 극복함으로써 이용 가능한 에머지를 최대한 활용하는 시스템들이 우세하게 된다는 이론. 에머지를 최대화하는 형태의 시스템이 우리 사회의 부에 가장 많은 기여를 한다.   |
| Emvalue<br>(Em\$, Em)                 | 에머지 흐름의 결과로 경제에서 순환하는 화폐의 양. 에머지 흐름이나 저장의 Emdollar를 얻기 위해서는 이들의 에머지를 국가 경제의 국내총생산(GDP)에 대한 전체 에머지의 비율로 나누어준다.   |
| 에너지변환도<br>(Transformity)              | 한 과정에 사용한 모든 에머지를 이 과정을 통해 생산된 에너지로 나눈 값. 에너지변환도의 단위는 에머지/에너지의 형태로 나타난다. 한 가지 생산물에 대한 에너지 변환도값은 이 생산물을 만들기 위해 투입된 모든 에머지 흐름들을 더한 후 이 생산물의 에너지값으로 나누어 계산한다. 에너지 변환도는 서로 다른 형태의 에너지를 동일한 형태의 에머지로 환산하기 위하여 사용한다.                        |

1960년대부터 진행한 간척 사업으로 많은 갯벌이 사라졌으나, 정확한 손실 면적은 알 수 없다. 해양수산부(1998)가 1987년부터 1998년까지 10년 동안 약

7) 서울행정법원은 2003년 7월 15일 새만금지역 주민과 환경단체가 국무총리와 농림부 장관을 상대로 낸 새만금간척사업에 대한 정부조치계획과 사업시행인가처분 및 공유수면 매립면허처분 집행정지신청을 받아들여 본안소송 선고 때까지 공사를 중단하라고 결정하였음.

15%의 갯벌이 주로 토지를 얻기 위한 간척과 매립으로 사라졌다고 추정하였을 뿐이다.

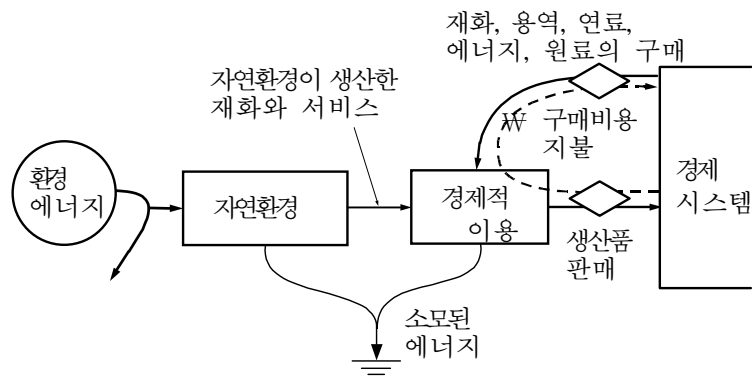
비록 1990년대부터 많은 연구들이 갯벌은 어류와 패류 생산이외에도 서식지, 오염정화, 심미·관광, 자연재해조절과 같은 여러 가지 역할을 하고 있다는 사실을 밝혀냈지만(해양수산부, 1998), 1990년대까지 이루어진 간척은 대부분 갯벌을 매립해야 하는 쓸모 없는 땅으로 여긴 결과였다. 즉, 매립으로 땅(농토, 공업용지, 도시용지)이 늘어남으로써 갯벌 생태계가 우리나라 경제에 기여하는 가치가 증가한다는 인식이 간척·매립 사업의 주된 논리적 근거였다. 지난 40년 동안 경제가 빠르게 성장하는 과정에서 짧은 기간에 얼마나 많은 경제적 이익을 만들어 낼 수 있는가 하는 점이 자연환경이 경제에 기여하는 가치를 평가하는 잣대 역할을 하였다. 이 과정에서 자연생태계의 개발이 오랜 기간에 걸쳐 주변 생태계에 미칠 영향은 전혀 고려하지 않았다.

〈그림 2-1〉은 자연환경과 경제의 관계를 아주 간단하게 나타낸 모델이다.<sup>8)</sup> 이 그림은 경제활동이 일어나는 공간(한 나라, 지역, 또는 지구 전체)이나 시간(현재의 산업사회나 옛날의 농경사회)의 크기에 관계없이 자연환경을 이용하는 인간의 경제활동을 나타내는데 사용할 수 있다. 자연환경은 과일, 나무, 물고기, 모래사장, 석탄, 석유, 광물, 기후조절과 같은 재화와 서비스를 생산하기 위하여 태양, 바람, 조석과 같은 '환경 에너지(environmental energies)'를 이용한다. 이러한 생산 과정은 지구에 인류가 나타나기 이전부터 많은 생물들이 지구에서 살아갈 수 있도록 하였다. 재화와 서비스의 종류에 따라 이를 만드는데 필요한 시간과 공간의 크기가 달라지는데, 화석연료인 석유와 석탄은 수 천 만년의 세월이 필요하고, 목재는 수십 년에서 수백 년, 과일이나 곡식은 일년에서 몇 년의 시간이 필요하다.<sup>9)</sup>

8) 그림에 쓰인 기호들의 의미에 대해서는 제2절 '에머지 평가법'을 참조.

9) 이러한 생산과정이 일어나는 시간과 공간의 크기는 우리가 이용하는 자원을 재생가능한 자원(renewable resources)과 재생불가능한 자원(nonrenewable resources)으로 나누는 기준이 됨. 재생불가능한 자원은 자연이 자원을 만드는 속도보다 경제활동으로 소모되는 속도가 빠른 자원이며, 재생가능한 자원은 그 반대인 자원임. 따라서 재생불가능한 자원과 재생가능한 자원은 자원에 대한 절대적 구분이 아니고, 만들어지는 속도와 소모되는 속도사이의 상대적 개념임. 즉, 지금 재생가능한 자원으로 구분되는 자원이라 하더라도 앞으로 경제활동에서 사용하는 속도가 더 빨라진다면 재생불가능한 자원이 됨.

〈그림 2-1〉

경제시스템의 자연환경 이용<sup>10)</sup>

사람들의 사회경제활동은 자연환경이 생산과정을 통해 만들어 낸 자원을 이용하여 이루어지고 있다. 자연환경의 재화와 서비스를 별도의 처리과정을 거치지 않고 직접 이용하는 경우(예를 들어 산나물, 신선한 공기)도 있지만, 인간의 노동력과 재화를 많이 투입해야 하는 경우(예를 들어 컴퓨터, 자동차)도 있다.

우리 경제는 재화, 용역, 에너지를 투입하여 자연환경이 만들어 낸 재화와 서비스를 가공함으로써 우리 생활에 필요한 여러 가지 재화와 용역을 생산한다. 일반적으로 이러한 재화와 용역은 시장에서 거래되는데, 이러한 거래를 매개하는 것은 시장경제의 가격이다. 즉, 가격은 사람들이 해당 재화와 용역에 대해 지불하고자(willingness-to-pay) 하는 금액이다. 〈그림 2-1〉은 이 과정에서 순환하는 돈의 흐름을 점선으로 나타내고 있다. 자연환경의 자원을 가공하여 판 사람은 시장경제의 수요와 공급원리에 따라 결정된 가격으로 자원을 팔아 새로운 생산을 위한 자금을 확보한다. 생산자는 이 돈으로 생산과정에 필요한 재화와 용역을 시장가격을 통해 구매하게 된다.

10) 실선은 에너지와 물질의 흐름을 나타내고, 점선은 화폐의 흐름을 나타냄. 그림에 사용한 기호의 의미에 대한 자세한 설명은 〈그림 2-7〉 참조.

그러나 경제가 자연 환경을 이용하는 간단한 모델인 <그림 2-1>에서 보듯이 시장을 통해 순환하는 돈은 경제활동에 참여하는 사람들의 용역에 대해서만 지불된다. 경제활동을 통해 거래되는 재화나 용역의 시장가격은 자연환경의 재화와 서비스를 가공하는데 투입한 사람들의 용역에 지불된 비용뿐만 아니라 원료의 가격까지 포함하고 있다고 주장할 수 있다. 예를 들어 우리가 컴퓨터를 사면서 지불한 돈은 컴퓨터를 조립하는데 들어간 기술자의 노동과 그래픽카드, 메인보드, 메모리, 하드디스크, CD롬, 랜카드, 자판, 전원공급장치와 같은 컴퓨터 부품들의 가격이 들어가 있다. 컴퓨터를 조립하기 위해 사들인 이러한 부품들의 가격에는 다시 이들을 만들어내기 위해 들어간 사람들의 용역과 부품(예를 들어, 중앙처리장치, 그래픽 칩, 메모리 칩, 트랜지스터, 전지)을 만들기 위해 필요한 재료의 가격을 포함하고 있다. 이러한 과정을 반복하여 거슬러 올라가면 마지막에는 자연환경이 환경에너지를 이용해 만들어 낸 원료와 이를 채취하는데 들어간 사람의 용역에 대해 지불한 비용만 남게 된다. 즉 컴퓨터를 만드는데 필요한 최초의 원료 가격은 이를 채취하는데 들어간 인간의 용역에 대한 비용만 포함하고 있다. 컴퓨터를 만드는 과정에 없어서는 안 되는 자연환경의 재화와 서비스는 자연환경이 무료로 제공한 것으로 간주한다.

따라서 자연자원의 획득과 처리에 들어간 인간의 용역에 대해서만 지불한 돈은 이들 자원이 우리 경제의 진정한 부(real wealth)에 기여하는 정도를 판단하는 척도가 될 수 없다(Odum, 1996). 자연환경의 가치를 평가하는 경제학 평가방법은 여전히 이러한 시장가격을 기본으로 하고 있다. Odum and Odum(2000)은 자연환경이 우리 사회에 기여하는 가치를 제대로 평가하지 못하면 생태계는 파괴되고 이로 인해 생태계로부터 우리가 얻는 이익은 줄어든다고 주장하였다.

이상에서 제기한 문제는 시장에서 거래되지 않는 재화와 서비스(예를 들어 서식지, 생물종다양성, 경관, 신선한 공기)에도 똑같이 적용된다. 자원 감소와 환경 훼손이 지역 자원을 벗어나 지구 차원으로 확대되면서 환경자원의 가치를 제대로 평가하고, 이를 토대로 지속가능한 발전을 달성하고자 하는 노력이 계속되고 있다. 일반적으로 비시장재가 우리 경제에 기여하는 바는 지불의사

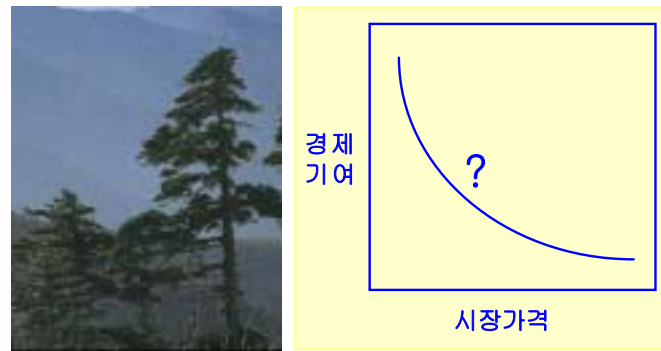
(willingness-to-pay)<sup>11)</sup>를 이용하여 평가한다. 그러나 이로 인해 시장경제의 가격으로 평가되는 시장재와 마찬가지로 비시장재의 가치평가에서도 인간중심의 가치 평가가 이루어지고 있다.

지불의사(willingness-to-pay)에 기반을 둔 시장 가격과, 자연 환경이 우리 사회의 진정한 부에 기여하는 정도는 반비례 관계에 있다고 할 수 있다 (Odum, 1996 : 그림 2-2). 시장경제의 수요-공급 원리에 따르면 환경 자원이 풍부할 때(공급이 수요보다 많을 때)는 시장에서 거래하는 자원의 가격이 내려간다. 따라서 우리 경제는 이 자원을 이용하여 여러 가지 재화를 생산할 수 있으며, 이를 통해 우리 사회의 부를 축적할 수 있다. 그러나 환경 자원의 양이 감소하면(수요가 공급보다 많을 경우) 돈으로 표시하는 가격은 올라가지만, 이 자원이 사회의 부를 축적하는데 실제로 기여하는 정도는 이용할 수 있는 자원의 절대량이 줄어들기 때문에 낮아진다.

예를 들어 오랫동안 자란 나무로부터 나온 목재는 재질과 강도가 우수하다. 그러나 요즘에는 우리나라 산에서 이러한 목재를 구하기가 쉽지 않기 때문에 비싼 가격에 팔린다. 이러한 목재는 공급이 부족하기 때문에 가격은 높지만, 공급량이 너무 적기 때문에 우리가 사용할 수 있는 다양한 물건들을 만들 수 없다. 즉, 높은 가격의 목재가 우리 사회에 기여하는 바는 그 가격에 비례하지 않는다. 그러나 옛날에는 좋은 목재를 지금보다 더 쉽게 얻을 수 있었기 때문에(즉, 공급이 풍부) 집, 다리, 가구와 같은 다양한 물품을 대량으로 만들 수 있어 많은 사람들이 이를 사용할 수 있었다. 즉, 목재의 단위가격은 낮았지만, 사회 전체의 부에 기여하는 바는 지금보다 더 컸다고 할 수 있다.

---

11) 수취의사(willingness-to-accept) 개념을 사용하기도 하는데, 이는 주어진 자연환경의 서비스를 이용하지 못하는 것에 대해 어느 정도의 보상을 원하는가 하는 것임. 일반적으로 수취의사금액이 지불의사금액보다 높게 나타나는 것으로 알려져 있음.

〈그림 2-2〉 에머지 관점에서 본 환경자원의 시장가격과 경제기여도의 관계<sup>12)</sup>

## 2) 에머지의 정의

미국의 시스템생태학자였던 Howard T. Odum은 지불의사에 바탕을 둔 자연환경의 가치 평가는 자연환경이 경제에 기여하는 바를 제대로 평가하지 못한다고 비판하였다. Odum은 이를 위한 대안으로 자연환경의 기여가치를 평가하는데 에너지를 공통 화폐(common currency)로 사용하고자 하였다. 에머지는 Farber et al.(2002)이 구분한 바와 같이 자연환경의 가치평가에 에너지를 이용하려는 시도(energy theory of value)로, Odum은 자연과 인간이 공존할 수 있는 대안을 제시하기 위한 가치평가법으로 에머지 개념을 제안하였다.

에머지는 자연환경의 서비스와 시장경제의 재화와 용역을 에너지 관점에서 평가하고자 하는 시도로, 궁극적으로 환경과 경제를 동일한 기준에서 평가하기 위한 개념이다(Odum and Odum, 2000). Odum and Odum(2000)은 지난 20년 동안 경제학자들이 외부요소(externality)를 내재화하려고(internalize) 시도한 반면, 에머지 개념은 경제와 환경의 기여 정도를 에너지를 이용하여 평가하고자 한다는 점에서 내부요소(internality)의 외재화(externalize)라고 하였다.

12) 이 그림에서 경제기여도와 환경자원의 시장가격 사이의 관계가 곡선으로 표시되어 있지만, 이 관계가 반드시 그런 형태로 나타난다는 것을 의미하지 않음. 시장가격과 경제기여도사이의 정확한 관계는 이에 관한 연구를 통해 밝혀야 함.

에머지는 “한 가지 서비스나 생산물을 만드는 과정에 직접 그리고 간접으로 이미 소모된 한 종류의 이용 가능한 에너지”로 정의되며(Odum, 1983 : 1994 : 1996), 단위는 emjoule을 사용한다. 여러 가지 환경 자원들을 에너지라는 공통 화폐로 표시함으로써 서로 다른 특성을 가진 자원들을 동일한 기준에서 비교할 수 있게 되는 것이다. 현재 에머지 평가법에서 서로 다른 자원들을 비교하기 위하여 기준<sup>13)</sup>으로 삼은 에너지는 태양 에너지이며, 에머지의 단위로는 solar emjoules(sej)을 사용한다.

에머지(Emergy)는 “Energy Memory”를 줄여서 표현한 용어로 간주할 수 있는데(Odum, 1996), 한 가지 자원이 가지고 있는 에너지 관점의 가치는 이 자원이 형성되기까지 열역학 제2법칙<sup>14)</sup>에 따라 소모되었던 모든 에너지들까지 포함해야 한다는 개념이다. 즉, 에머지는 주어진 자원에 현재 남아 있는 에너지뿐만 아니라 과거에 사용된 모든 에너지까지 모두 포함하려는 개념이다.<sup>15)</sup>

예를 들어 우리가 시장에서 구입하는 물고기 1kg의 에너지 관점의 가치는 물고기에 남아 있는 실제 에너지량<sup>16)</sup>뿐만 아니라, 1kg의 물고기가 성장하는 동안 더 이상 사용할 수 없는 에너지<sup>17)</sup>로 사라졌던 모든 에너지—태양, 바람, 비, 조석, 영양물질, 연료, 재화와 인간의 용역 등—까지 포함해야 한다는 것이다(그림 2-3). 열역학 제2법칙을 따라 사라진 에너지가 없었다면 1kg의 물고기가 성장하지 못했을 것이기 때문이다. 그러나 물고기의 에머지를 계산할 때 이중계산(double counting)을 하지 않도록 주의하여야 한다. <그림 2-3>

13) 1970년대에는 석탄을 기준 에너지로 사용하기도 하였음.

14) 에너지는 모든 에너지변환과정(energy transformation process)에서 해당 과정에 더 이상 유용한 일을 할 수 없는 형태로 바뀐다는 법칙. 즉, 에너지 효율이 100%인 에너지변환과정은 존재하지 않는다는 것을 의미하며, 이것은 에너지변환과정의 비가역성(irreversibility)을 나타냄. 에너지변환과정을 통해 주변 환경의 엔트로피(무질서도)가 증가한다는 점에서 엔트로피증가의 법칙이라고도 함.

15) 따라서 한 가지 자원의 에머지는 그 자원의 energy history를 나타낸다고 말하기도 함(Odum, 1996).

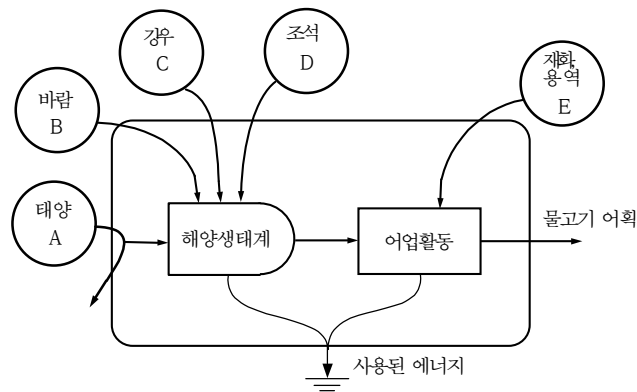
16) 이 에너지는 열량계(calorimeter)를 이용하여 측정할 수 있음.

17) 여기에서 사용할 수 없다고 하는 것은 물고기의 성장에 더 이상 사용할 수 없다는 것을 의미함. 물고기의 성장과정에서 열로 사라진 에너지는 다른 과정에 유용한 외부에너지로 기능할 수 있으며, 이 과정을 거치면서 다시 이용할 수 없는 에너지가 됨. 모든 에너지는 결국 더 이상 유용한 일을 할 수 없는 우주의 배경 에너지로 변하게 됨.

에서 바람과 강우는 태양에너지에 의해 발생하는 자연현상이기 때문에 이들을 모두 더하면 태양에너지를 이중 계산<sup>18)</sup>하게 된다.

〈그림 2-3〉

에머지와 에너지변환도 계산 다이어그램



$$\text{잡은 물고기의 에머지} = (A \text{ 또는 } B \text{ 또는 } C) + D + E$$

$$\text{물고기의 태양에너지변환도, } sej/J = \frac{\text{잡은 물고기의 태양에머지}}{\text{잡은 물고기에 있는 에너지}}$$

에머지 평가는 〈그림 2-1〉에 나타낸 두 가지 요소, 즉 인간의 용역과 자연 생태계가 무료로 제공하는 것까지 모두 포함하고자 하는 시도이다. 예를 들어 우리가 어업을 통해 얻는 물고기의 진정한 가치는 이들을 생산하는데 투입한 인간의 노동뿐만 아니라 태양, 바람, 비, 조석과 같이 자연이 한 일을 더한 것이다(그림 2-3). 그러나 에너지마다 일을 할 수 있는 능력이 다르기 때문에 에머지 분석에서는 서로 다른 에너지들을 더할 때 기준으로 삼은 한 가지 종류의 에너지로 먼저 환산한다.<sup>19)</sup>

Odum(1996)은 시장가치(market value)와 에머지 가치를 각각 receiver

18) 이중 계산에 대한 설명은 에머지평가법을 다루고 있는 제2절을 참조.

19) 이에 대한 자세한 내용은 다음 절에 나오는 에너지변환도(transformity)에 대한 설명을 참조.



value와 donor value로 구분하였다. 시장가치는 경제활동을 통해 생산된 재화와 용역의 가치를 소비자의 지불의사(willingness-to-pay)에 기초하여 평가하지만(즉, 가치결정이 생산물의 수요자에 의해 이루어짐 : 그림 2-4a), 에머지 개념이 제시하는 가치는 생산과정에 소요된 에너지량에 의해 결정된다(자연환경과 경제에서 투입하는, 즉 donor : 그림 2-4c).

Odum(1996)은 마르크스의 노동가치이론 또한 donor-value 개념으로 구분하고 있는데, 이 경우에는 경제활동을 통해 생산되는 산물의 가치가 이 과정에 투입된 노동의 양에 비례하는 것으로 제시된다(그림 2-4b). 즉 가치는 총 노동시간 또는 이에 상응하는 화폐단위로 측정된다. Odum(1996)은 마르크스의 노동가치와 에머지 가치가 생산과정에 투입되는 요소의 양에 의해 결정된다는 측면에서는 동일하지만, 노동가치는 여전히 인간중심의 가치이론이라고 비판하고 있다. 즉, 재화와 용역의 가치는 이를 생산하는 과정에 투입된 노동뿐만 아니라 자연환경의 기여까지 모두 포함하여야 한다는 것이다.

### 3) 에너지변환 계층구조와 에너지의 질

생태학자(특히 시스템생태학자)들은 생태계는 구조와 기능을 스스로 조직(self-organization)하는 능력을 가지고 있다고 말한다. 이렇게 스스로 조직하는 생태계의 능력은 화재로 파괴된 숲이 인간의 도움 없이도 몇 십 년에 걸쳐 다시 살아나는 경우나 유해화학물질 오염사고로 생물이 사라진 호수에 미생물에서 시작하여 물고기까지 비록 종류는 다르더라도 생물이 차츰 돌아오는 경우에서 쉽게 볼 수 있다. 지금 우리가 겪고 있는 지구온난화, 이에 따른 생태계와 서식생물종 변화는 산업혁명 이후 인간 활동으로 늘어난 대기 중 이산화탄소에 반응하여 자연이 스스로 그 구조와 기능을 다시 조직하는 과정으로 볼 수도 있다.

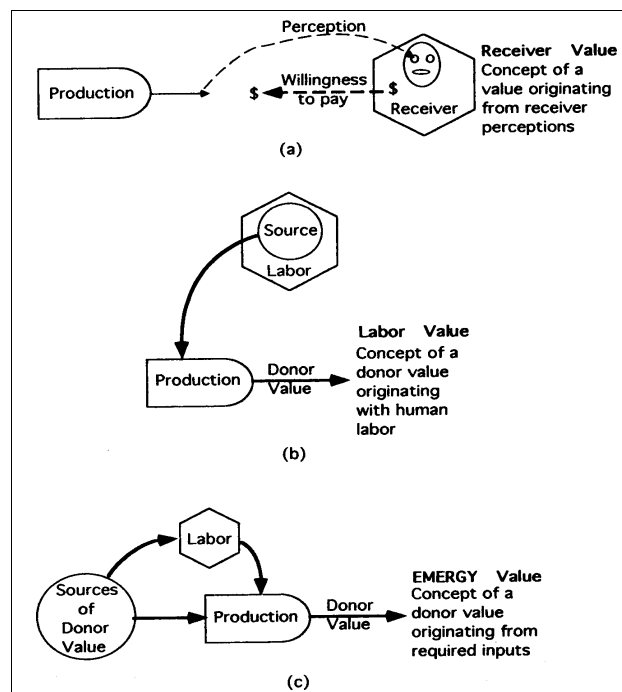
우리가 흔히 먹이사슬(food chain)<sup>20)</sup>이나 먹이망(food web)이라고 하는 생

20) 먹이사슬은 자연상태에서 서로 얽히고 설킨 복잡한 생물과 무생물의 관계로 이루어진 먹이망을 이해하고 연구하기 쉽도록 간단하게 만든 것으로, 자연상태에서는 이렇게 구성된 생태계가 거의 없음.

태계의 구조도 생태계가 수십 억 년의 진화를 통해 지구의 에너지와 물질을 가장 효율적으로 이용할 수 있도록 스스로 조직한 예라고 할 수 있다. 이런 먹이사슬이나 먹이망을 살펴보면, 한 종류의 에너지가 다른 종류의 에너지로 바뀌는 에너지변환과정(energy transformation process)<sup>21)</sup>의 연속이라고 할 수 있다.

〈그림 2-4〉

## 가치개념의 비교(Odum, 1996)



(a) 시장가치, (b) 마르크스 노동가치, (c) 에머지가치

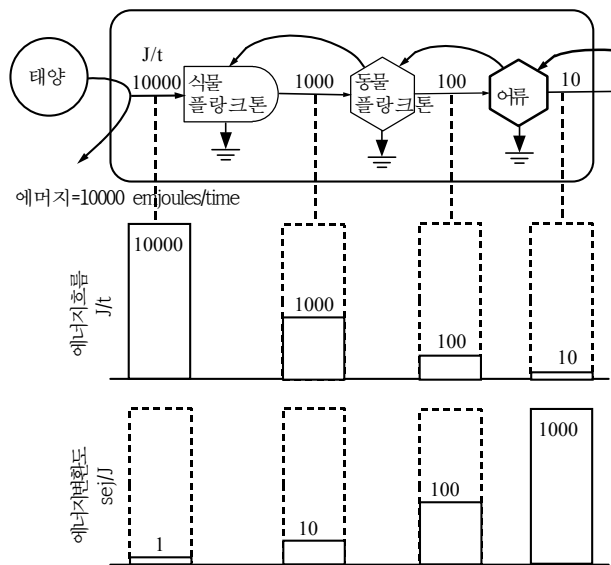
〈그림 2-5〉는 호수나 바다와 같은 수생생태계를 아주 간단하게 먹이사슬의

21) 태양에너지가 식물의 광합성으로 풀이나 나무 조직의 화학에너지로 바뀌고, 댐에서 떨어지는 물의 위치에너지가 수력발전소의 발전기에 의해 전기에너지로 바뀌는 것을 에너지변환과정의 예로 들 수 있음.

형태로 표현한 모델이다. 태양에너지부터 물고기까지 이르는 과정에 3번의 에너지변환이 일어난다. 첫 번째 에너지변환은 태양을 비롯하여 바람, 비, 조석, 해류와 같은 환경에너지가 식물플랑크톤의 광합성으로 유기물로 바뀌는 과정에서 일어나고, 동물플랑크톤이 이러한 식물플랑크톤을 먹는 과정이 두 번째 에너지변환이다. 그리고 어류가 동물플랑크톤을 잡아먹고 성장하는 과정이 세 번째 에너지변환이다. 그림에는 나타나 있지 않지만 물에 사는 포유동물이나 어업활동을 통해 물고기를 잡는 인간의 활동을 포함하면 에너지변환과정이 추가되어 먹이사슬의 길이가 더 길어진다.

〈그림 2-5〉

수생생태계의 에너지변환 계층구조



앞에서 에머지 개념을 설명하면서 간단하게 언급하였듯이 모든 에너지변환 과정에는 반드시 에너지 손실이 일어난다. 즉, 에너지변환 효율이 100%인 과정은 없다. 따라서 〈그림 2-5〉에 나타난 바와 같이 태양에너지가 어류까지 이동하면서 각 에너지 변환과정에서 감소하여 아주 적은 양만 남게 된다. 즉, 먹

이사슬의 왼쪽에서 오른쪽으로 가면서 각 단계에 나타나는 에너지량은 감소하게 된다. 일반적으로 태양에너지가 식물의 광합성을 거치면서 1%만 식물체에 남고 나머지는 열에너지의 형태로 빠져나가는 것으로 알려져 있다.<sup>22)</sup> 또한 식물플랑크톤에서 동물플랑크톤, 동물플랑크톤에서 어류로 이어지는 에너지변환은 10% 전후로 여긴다. 따라서 일정한 양의 태양에너지가 들어오는 지구생태계에서 한없이 긴 먹이사슬이 존재할 수는 없다.

이렇게 단계를 지나면서 관심 대상의 양이나 숫자가 줄어드는 구조를 흔히 계층구조(hierarchy)라고 한다. 일반사에서 최고의사결정권자인 사장까지 이어지는 회사조직, 사병에서 장군까지 이어지는 군대조직 등이 모두 계층구조의 예이다. 회사조직이나 군대조직 모두 일반사원이나 사병의 숫자가 가장 많고, 직급(또는 계급)이 올라가면서 각 직급에 속하는 사람들의 수가 차츰 줄어든다. 따라서 <그림 2-5>에 제시한 에너지변환과정은 에너지변환 계층구조(energy transformation hierarchy)라 할 수 있다.

앞에서 에너지들은 일을 할 수 있는 능력이 다르기 때문에 서로 다른 에너지를 비교할 때는 기준이 되는 에너지로 바꾸어야 한다고 하였다. ‘에너지마다 일할 수 있는 능력이 다르다는 것’은 에머지 개념에서 아주 중요한 개념이다(Odum, 1996). 에너지변환 계층구조는 에너지사이에 나타나는 일할 수 있는 능력의 차이를 설명해준다. 예를 들어 태양에너지 1 칼로리와 인간의 에너지 1 칼로리를 비교해 보자. 지구의 생물이 살아가는데 가장 기본적인 에너지인 태양에너지는 지구표면의 가열, 식물의 광합성, 바람 생성, 해류이동과 같은 에너지변환 과정을 통해 지구의 다른 생물들이 이용할 수 있는 에너지와 물질로 바뀐다. 이에 비해 다른 생물이 만들어낸 에너지에 의존하는 인간의 에너지는 논리적 사고작용, 창의적 생각, 문자, 언어 등과 같은 일들을 수행한다. 단순히 에너지의 관점에서 보면 태양에너지 1칼로리와 인간에너지 1칼로리는 같은 양이지만, 에너지가 영향을 미치는 범위가 더 넓고 조절작용을 할 수 있다는

22) 따라서 태양전지의 효율을 높이기 위한 과정은 수십 억 년의 진화과정을 거쳐 확립된 광합성의 에너지 효율을 넘지 못할 것이라고 주장하는 생태학자들도 있음. 태양전지의 효율이 광합성 효율보다 높은 것으로 알려진 이유는 태양전지의 효율계산에 이 전지의 개발에 사용한 화석연료를 포함하지 않기 때문임.

점에서 인간의 에너지 1 칼로리는 태양에너지 1 칼로리보다 질이 더 높다고 할 수 있다.<sup>23)</sup> 많은 양의 태양에너지가 생태계의 먹이사슬을 따라 일어나는 에너지 변환과정을 거쳐 대부분의 에너지는 소모되고 아주 적은 양의 에너지만 인간에게 도달한다.

〈그림 2-5〉에 나타낸 수생생태계를 예로 들면 태양에너지, 식물 플랑크톤, 동물 플랑크톤, 어류의 순으로 에너지 질이 증가한다. 즉 에너지 질의 계층구조(energy quality hierarchy)가 형성된다. 이 계층구조를 따라 올라가면서 각 단계에 나타나는 실제 에너지량은 감소하지만 단위 에너지가 할 수 있는 일의 능력은 커진다. 질이 낮은 에너지는 질이 높은 에너지를 위한 기반이 되며, 질이 높은 에너지는 질이 낮은 에너지에 조절의 피드백(feedback)을 제공한다(Odum, 1996).

에머지 이론에서는 서로 다른 에너지 사이에 나타나는 일할 수 있는 능력의 차이를 에너지변환도(transformity)로 나타낸다. 에너지 변환도는 한 가지 자원이 만들어지는데 직접 투입된 에너지와 간접으로 투입된 기준이 되는 에너지량, 즉 에머지를 이 자원의 실제 에너지량으로 나눈 값으로(그림 2-3), 에너지 변환도가 클수록 자원의 질은 더 높다(Odum, 1996). 에너지 변환도의 단위<sup>24)</sup>는 emjoules/joule로 나타낸다. 앞에서 예로 든 수생생태계는 태양 에너지, 식물 플랑크톤, 동물 플랑크톤, 어류의 순으로 에너지 변환도가 증가한다. 태양에너지 변환도(Solar transformity)는 모든 자원의 질을 에머지 이론에서 현재 기준으로 사용하고 있는 태양에너지를 이용하여 나타낸 값으로, 단위는 solar emjoules per joule(sej/J)을 사용한다.

23) 계층구조의 예로 든 회사나 군대에서 지시나 명령은 계층구조의 위 단계에서 아래로 내려감. 또한 사단장의 명령은 수만 명의 군인에게 영향을 미치지만 소대장의 명령은 수십 명에 영향을 미친다는 점에서 사단장이라는 직책에 주어진 일의 질은 더 높다고 할 수 있음.

24) 에머지의 단위는 이를 계산하는데 사용하는 원 자료의 단위에 따라 emjoules/g, emjoules/\$와 같이 나타내기도 함.

〈표 2-2〉

태양에너지 변환도의 예

| 항 목      | 태양에너지 변환도<br>(sej/J) |
|----------|----------------------|
| 태양에너지    | 1                    |
| 바람에너지    | 1,496                |
| 조석에너지    | 16,842               |
| 화산의 열에너지 | 18,000               |
| 열대우림 목재  | 32,000               |
| 원유       | 54,000               |
| 천연가스     | 48,000               |
| 석탄       | 40,000               |
| 옥수수      | 83,000               |
| 전기에너지    | 200,000              |
| 목화       | 860,000              |
| 양식새우     | 13,000,000           |

자료 : Odum(1996)

앞에서 사용한 물고기의 예에서 이 물고기에 포함되어 있는 에너지가 1,000J 이고, 이 물고기가 성장하는 동안 직·간접으로 들어간 모든 에너지를 태양 에너지 기준으로 표현하여 1,000,000J이라고 가정한다면(그림 2-3에서  $A+B+C+D+E$ ), 1kg의 물고기에 있는 에머지는 1,000,000 solar emjoules (sej)이 되고, 태양 에너지 변환도는 1,000,000 sej/1,000J, 즉 1,000 sej/J가 된다. 따라서 한 가지 자원의 실제 에너지량과 에너지 변환도를 알고 있다면, 이 자원이 가지고 있는 에머지량을 계산할 수 있다.

#### 4) 최대에머지원리

앞에서도 언급하였듯이 모든 시스템은 다른 시스템과 경쟁에서 살아남기 위하여 스스로 구조와 기능을 조직함으로써 시스템의 효율을 높이하고자 한다. 생태학자들은 이러한 시스템의 자기조직화(self-organization)를 설명하기 위해

여러 가지 이론을 제시하였다(Odum, 1983, 1994 : Jorgensen, 1994). 이러한 이론의 하나로 Lotka(1922a, b)가 제시한 maximum power principle이 있다. 이 원리는 에너지자원을 놓고 서로 경쟁하는 시스템 중 power<sup>25)</sup>를 최대화하는 시스템이 이기게 된다고 주장한다. 그러나 Odum(1996)은 Lotka의 maximum power principle은 서로 다른 에너지는 에너지의 질이 다르다는 점을 반영하지 못한다고 비판하면서, Lotka의 원리에 에머지 개념을 접목하여 최대에머지원리(maximum empower principle)를 제안하였다. 최대에머지원리는 “(다른 시스템과) 경쟁에서 우세하게 되는 시스템은 최적의 효율로 자원 유입을 강화함으로써 empower를 최대화하는 디자인을 가지고 있는 시스템들”이라고 정의하였다(Odum, 1996).

최대에머지원리는 환경관리를 위한 정책결정과정에 사용할 수 있는 개념이다. 즉, 여러 가지 정책대안 중에서 에머지 흐름을 최대화하는 대안이 시스템의 전체적인 발전에 유리하다는 것이다. 최대에머지원리의 적용에 관한 내용은 뒤에서 자세하게 다룰 것이다.

## 5) 통합접근법으로서 에머지

에머지는 평가하고자 하는 시스템의 바깥에서 시스템의 경계를 가로질러 들어오는 에너지와 물질의 흐름을 평가하기 때문에 평가하고자 하는 시스템을 둘러싸고 있는 더 큰 시스템의 성질을 반영한다(Odum, 1996). 따라서 에머지 평가는 평가대상 시스템보다 시스템의 계층구조에서 한 단계 높은 시스템에 관해 알지 못하고는 완전하게 이루어질 수 없다. 이러한 이유로 에머지 평가법을 top-down systems approach라고 한다(Odum, 1983, 1994, 1996). 예를 들어 팔당호의 수질오염 문제를 다루면서 호수와 육지의 경계내부에만 초점을 맞출 경우 이해하고자 하는 수질오염 문제의 원인과 제대로 된 해결방법을 찾을 수 없다. 즉, 팔당호 오염문제는 이 호수를 둘러싸고 있는 유역(watershed)의 사회경제활동에 대해 파악하지 못한 상태에서는 해결할 수 없다. 최

---

25) 일을 하는 속도 또는 에너지흐름량.

근 제정된 4대강 특별법이 도입한 오염원총량관리제는 이러한 유역관리 개념을 적용한 제도라고 할 수 있다.

## 2. 에머지 평가법

이 절에서는 앞에서 살펴본 에머지 개념을 자연생태계의 가치평가에 이용하는 평가과정에 대해 살펴보기로 한다. Top-down systems approach인 에머지 평가 과정은 크게 세 단계로 나눌 수 있다. 에머지 평가법은 먼저 평가하고자 하는 시스템을 이루는 요소들이 무엇인지, 그리고 이러한 요소들은 어떻게 연결되어 있는 가를 파악하는 것에서 시작한다. 즉, 시스템의 구성요소들과 이들 사이에 일어나는 에너지와 물질 흐름을 파악하는 것이다. 에머지 평가법에서는 이러한 흐름을 에너지 시스템 언어(energy systems language)라는 모델링 언어를 이용하여 나타내며, 이를 에너지 시스템 다이어그램(energy system diagram)으로 부른다. 에머지 평가법의 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 완성한 에너지시스템 다이어그램을 이용하여 에머지 평가표를 만든다. 이를 위해 각 평가요소별로 에너지, 물질, 화폐의 흐름과 같이 각 요소와 흐름에 알맞은 자료를 찾아 에머지를 계산한다. 이렇게 완성된 에머지 평가표는 세 번째 단계에서 자연환경이 경제에 기여하는 바를 평가하기 위한 에머지 지수(emergy indices)의 계산에 이용한다.

### 1) 에너지시스템 다이어그램



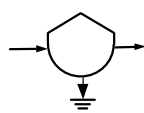
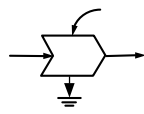
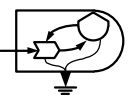
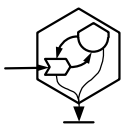
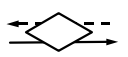
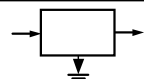
#### (1) 에너지시스템언어(Energy Systems Language)

평가대상 시스템의 구조와 기능을 나타내는 에너지시스템 다이어그램은 미국의 시스템 생태학자인 Howard T. Odum이 개발한 에너지 시스템 언어를 이용하여 만든다(Odum, 1983, 1994). 에너지시스템언어는 분석하고자 하는 시스템의 성분들과 이들 사이의 연결관계를 특별한 의미들이 부여된 기호들을 이용하여 시각적으로 나타내며, 이를 통해 전체 시스템의 유기적인 관계를 종합적으로 파악할 수 있도록 해준다. <그림 2-6>에 에너지 시스템 언어에서 사



용하는 기호의 일부를 제시하였다.<sup>26)</sup>

〈그림 2-6〉 에너지 시스템 언어에서 사용하는 기호<sup>27)</sup>(이창희 등, 2001)

|   |   |
|---|---|
|    | 에너지 흐름 : 순수한 에너지 흐름 또는 물질이 포함된 에너지 흐름 : 태양에너지의 흐름은 순수한 에너지 흐름이며, 생태계의 먹이사슬을 따라 일어나는 유기물 흐름은 에너지와 물질의 흐름이 결합된 형태임.   |
|    | 에너지원 : 외부로부터 시스템으로 유입되는 에너지 : 예를 들어, 산림생태계로 유입되는 태양, 바람, 강우 등을 들 수 있으며, 우리나라가 외국으로부터 수입하는 화석연료 등도 우리나라 전체 경제시스템에서는 에너지원으로 구분한다.   |
|    | 저장고 : 시스템내에 저장되는 에너지 또는 물질을 나타내는 기호 : 예를 들어 숲의 목재, 동물의 몸체, 토양, 우리 주변의 건축물 등을 저장고 기호로 표시할 수 있으며, 대기중의 산소나 질소 등과 같은 기체도 저장고 기호로 나타낼 수 있다.   |
|   | 상호작용 : 서로 다른 형태의 에너지 흐름 또는 물질 흐름이 상호작용하여 새로운 흐름을 만들어내는 과정을 나타내는 기호 : 예를 들어, 빛, 영양분, 이산화탄소가 반응하여 유기물이 생성되는 광합성 과정을 이 기호를 이용하여 나타낸다.  |
|  | 생산자 : 식물처럼 다양한 에너지를 이용하여 새로운 유기물을 만들어내는 것들을 위한 기호 : 생산자 기호는 상대적인 측면을 가지고 있다. 즉, 한 시스템의 소비자가 다른 관점에서 본다면 생산자가 될 수도 있다. 산업생산은 자연자원을 소비한다는 점에서는 소비자이지만, 우리 사회에 필요한 물품을 생산한다는 관점에서 보면 생산자 기호로 나타낼 수 있다. |
|  | 소비자 : 스스로 새로운 물질을 만들어내지 못하고, 다른 생물이나 과정을 통해 생산된 물질을 이용하는 성분을 나타내는 기호 : 예를 들어, 생태계의 동물들을 이 기호로 나타낼 수 있으며, 인간사회도 자연자원을 소비한다는 관점에서 이 기호로 나타낼 수 있다.   |
|  | 거래 : 재화나 용역의 판매를 나타내는 기호 : 실선은 농산물, 수산물, 공산품 등 에너지나 물질의 흐름을 나타내고, 점선은 이러한 물품의 판매의 반대급부로 지불되는 화폐의 흐름을 나타낸다. 에너지나 물질의 흐름과 화폐의 흐름은 항상 반대방향으로 일어난다.   |
|  | 상자 : 시스템의 경계를 나타내거나, 내부의 자세한 과정을 나타내고 싶지 않은 과정을 나타내는데 사용한다.   |

26) 에너지시스템언어에서 사용하는 다른 기호들에 대한 설명은 Odum(1983, 1994)을 참조.

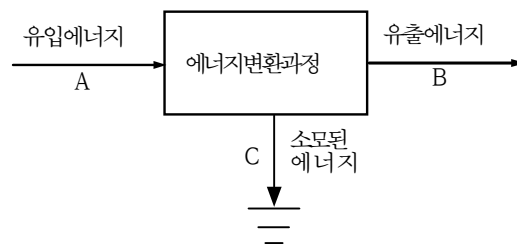
27) 에너지시스템언어의 기호에 대한 자세한 설명은 Odum(1983, 1994)을 참조.

에너지시스템언어를 이용한 시스템 표현은 각 기호들이 에너지 법칙들을 충실히 따르고 있기 때문에(그림 2-7) 시스템의 에너지 흐름과 동태(dynamics)를 동시에 나타낼 수 있다(Odum, 1996). 에너지 변환과정에서는 에너지가 새로 만들어지지도 않고 사라지지도 않는다는 원리를 열역학 제1법칙 또는 에너지 보존법칙이라고 한다. 따라서 <그림 2-7>에서 에너지변환과정에 들어오는 에너지량 A는, 에너지변환으로 만들어진 다른 형태의 에너지(B)와 변환과정에서 소모된 에너지(C)의 합과 같아야 한다( $A = B + C$ ). 에너지시스템 다이어그램은 에너지는 한 방향으로만 흐른다는 원리인 열역학 제2법칙을 전기공학에서 사용하는 접지기호를 이용하여 나타낸다(그림 2-7에서 C). 즉 접지기호는 C를 통해 빠져나간 에너지는 이 에너지변환과정에 다시 사용되지 않는다는 것을 나타낸다.<sup>28)</sup>

또한 에너지시스템언어는 기호들 사이의 수학적 관계를 이미 정의하고 있기 때문에 에너지시스템 다이어그램이 작성되면, 이로부터 쉽게 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 작성할 수 있어서 시스템 구조와 기능이 시간에 지남에 따라 어떻게 변화할 것인지(즉, 시스템의 동태) 예측하는데 사용할 수 있다.<sup>29)</sup>

<그림 2-7>

#### 에너지 시스템 언어와 에너지법칙



열역학 제1법칙 (에너지보존법칙) :  $A = B + C$

열역학 제2법칙 (엔트로피법칙) : C

28) 즉, 에너지는 엔트로피가 증가하는 방향으로만 흐름.

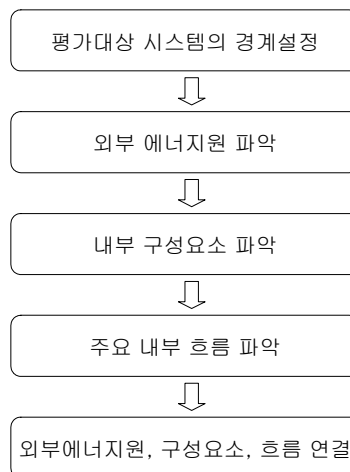
29) 에너지시스템언어를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 하는 과정은 부록을 참조.

## (2) 에너지시스템 다이어그램 작성

에너지시스템 다이어그램의 작성 과정은 크게 5단계로 이루어져 있는데(그림 2-8), 1단계에서는 평가대상 시스템의 경계를 정하여야 한다. 시스템 경계의 설정은 다루고자 하는 문제들이 무엇인지 명확하게 하는 과정이다. 시스템의 경계는 연구하고자 하는 대상과 연구의 목적에 따라 연구자들이 결정하게 된다. 국가전체, 호수와 같이 물리적 경계가 뚜렷하여 시스템의 경계를 쉽게 설정할 수 있는 경우도 있지만, 이러한 뚜렷한 경계가 없는 경우도 많이 있다. 연안해역을 대상으로 하는 평가의 경우와 같이 뚜렷한 물리적 경계가 없을 때에는 연구의 대상과 목적에 따라 연구자가 임의로 경계를 설정하면 된다.

〈그림 2-8〉

### 에너지 시스템 언어와 에너지법칙

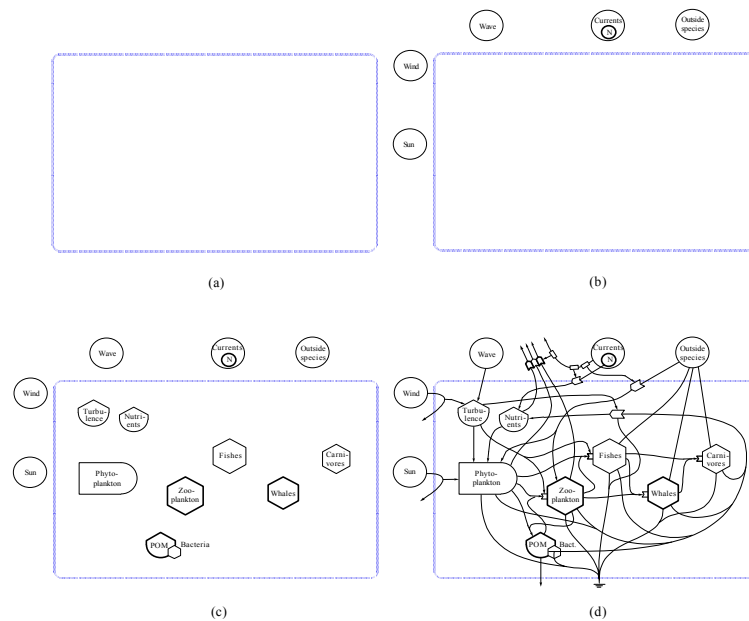


〈그림 2-9〉는 외양생태계(open ocean ecosystem)를 나타내는 에너지 시스템 다이어그램을 그리는 과정을 단계별로 보여주고 있다. 외양생태계는 시스템 경계가 뚜렷하지 않기 때문에 경계를 정하기가 어렵다. 이 경우 연구하고자 하는 해역의 일정 면적(예를 들어 10km<sup>2</sup>)과 수심(예를 들어 1,000m)을 지정함으로써 시스템의 경계를 설정할 수 있다. 시스템 경계를 설정하기 위한 면적과

수심은 연구하고자 하는 목적에 따라 연구자가 크기를 마음대로 결정하면 된다. <그림 2-9a>는 이렇게 결정한 시스템 경계를 사각형으로 나타내고 있다.

<그림 2-9>

**에너지 시스템 언어와 에너지법칙<sup>30)</sup>**



(a) 시스템 경계 설정, (b) 외부에너지원 파악,  
(c) 내부 구성요소 파악, (d) 구성요소간 연결관계 파악과 에너지시스템 기호 연결

평가대상 시스템의 경계가 설정되면, 2단계에서는 시스템의 경계 외부에서 대상 시스템에 영향을 미치는 모든 요소들을 파악한다. 여기에는 시스템에 유입하는 모든 에너지와 물질이 포함되는데, 태양, 강우, 바람, 조석, 해류와 같은 자연적인 요소와 연료, 전기, 상품, 용역, 정보처럼 외부에서 구입한 인위적 요소를 모두 포함한다. <그림 2-9b>에 보인 예는 태양, 바람, 파도, 해류와 여기에 포함되어 이동하는 영양염류, 시스템 경계 바깥에서 들어오는 다양

30) Kang(1998)을 이용하여 재구성

한 해양생물을 외부에너지원<sup>31)</sup>으로 표시하고 있다. 실제 외양생태계는 이보다 더 많은 외부 에너지원이 있을 수 있지만, 여기에서는 시스템 다이어그램의 작성과정을 설명하기 위하여 단순하게 나타내었다.

3단계는 평가대상 시스템의 내부에 있는 주요 구성요소를 파악하는 단계이며, 4단계에서는 이들 구성요소와 외부 에너지를 연결하는 주요 흐름(또는 과정)을 파악한다. <그림 2-9c>는 연구대상 시스템의 내부 구성요소를 파악하여, 경계를 나타내는 사각형 안에 배치한 모습을 보여주고 있다. 이 그림은 해수의 움직임, 영양염류, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 어류, 고래류, 육식해양동물, 유기물과 박테리아를 주요 내부 구성요소로 제시하고 있다. 앞에서 외부 에너지를 다이어그램 바깥에 배치할 때와 마찬가지로 시스템 내부의 구성요소 또한 에너지 변환도가 작은 것부터 왼쪽에서 오른쪽으로 배치한다.

마지막 단계에서는 에너지시스템언어의 규칙<sup>32)</sup>에 따라 외부 에너지원과 내부 구성요소를 적절한 위치에 배치하고 이들을 연결함으로써 에너지 시스템 다이어그램을 완성한다. 에너지시스템 다이어그램을 작성할 때는 기호사이의 연결관계가 에너지 법칙과 물질 보존의 법칙을 만족하는지 반드시 점검하여야 한다.

<그림 2-9d>는 에너지시스템 다이어그램을 그리는 네 번째 단계와 다섯 번째 단계를 보여주고 있다. 이 그림은 외부 에너지원과 내부 구성요소를 연결하는 관계를 파악한 후 이에 따라 이들을 연결한 모습이다. 외부 에너지원과 내부 구성요소 사이의 관계의 예로, 식물플랑크톤이 해수 움직임을 받아 태양에너지와 영양염류를 이용하여 유기물을 만드는 광합성 과정, 육식동물이 어류나 고래를 잡아먹는 과정을 들 수 있다. 이러한 연결관계들이 <그림 2-9d>에서 실선으로 나타나 있다.

<그림 2-9d>의 다이어그램에서 시스템의 경계를 나타내는 사각형의 맨 아

31) 여기에서 외부 에너지원은 반드시 순수한 에너지만을 의미하지 않음. 시스템 외부에서 연구대상 해역에 영향을 미치는 태양에너지와 같은 순수 에너지이외에도 영양염류, 유기물과 같은 물질, 플랑크톤, 어류, 고래와 같은 생물들까지 모두 외부 에너지원으로 표현하였음.

32) 에너지시스템언어의 규칙에 대한 자세한 내용은 Odum(1983, 1994) 참조.

래쪽에 있는 접지기호는 외양생태계에서 일어나는 에너지 변환과정이 열역학 제2법칙을 따르고 있음을 보여준다. 또한 이 그림에는 외부 에너지원과 구성 요소사이의 에너지흐름 자료가 표시되어 있지만, 이들 자료를 다이어그램에 포함할 경우 각 내부 구성요소로 유입하는 모든 에너지량을 더한 값과 여기에서 빠져나가는 에너지를 모두 더한 값이 같은지 반드시 확인하여야 한다.

에너지시스템 다이어그램을 처음 그릴 때는 시스템의 모든 에너지원, 구성 요소, 흐름관계를 다이어그램에 표시하지만, 나중에는 평가의 목적에 필요한 요소들만을 포함하도록 단순하게 만든다.

## 2) 에머지 평가표

에머지 평가의 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 완성한 에너지시스템 다이어그램을 이용하여 에머지 평가표를 만든다. 이 평가표는 평가대상 시스템의 주요 유입경로와 유출 경로, 내부의 주요 구성성분(저장된 양 또는 흐름)으로 나누어서 작성한다. 일반적으로 에머지 평가표는 다음과 같은 형태가 된다.

| 번호 | 항목  | 원자료                      | 태양에너지<br>변환도 | 태양에머지            | Emvalue            |
|----|-----|--------------------------|--------------|------------------|--------------------|
| 1  | xxx | J/yr, g/yr 또는<br>화폐단위/yr | xxx          | 원자료×태양에너지<br>변환도 | 태양에머지/에머지-<br>화폐비율 |

에머지 평가표의 각 행은 평가하고자 하는 흐름이나 저장된 양을 나타내는 데, 각 열에 대한 설명은 아래와 같다.

1. 각 항목의 자료출처와 에머지 계산과정을 나타내기 위한 주석 번호
2. 각 항목을 표현하는 명칭 : 시스템으로 유입하거나 시스템에서 외부로 빠져나가는 에너지 또는 물질 흐름 : 시스템 내부에 저장된 에너지나 물질의 양과 이들 사이의 흐름
3. 각 항목의 실제 측정자료(또는 측정자료를 이용하여 계산된 자료)로, 단

위는 단위시간당 에너지, 물질 또는 화폐의 양으로 나타낸다. 여기에서 시간의 단위는 평가하고자 하는 시간 규모에 따라 결정된다. 일반적으로 연간 에너지(J/yr), 물질(g/yr) 또는 화폐(\$/yr 또는 ₩/yr)의 양으로 나타낸다.

4. 각 항목의 태양에너지 변환도 : 평가과정에서 직접 계산하거나 기존의 연구를 통해 계산된 값을 이용할 수 있다.
5. 세 번째 열의 실제 자료와 네 번째 열의 태양에너지 변환도를 곱하여 얻은 태양에머지
6. 다섯 번째 열의 에머지값을 평가하고자 하는 시스템이 속해 있는 전체 시스템(예를 들어, 국가 전체)의 에머지-화폐비율(Emergy-Money ratio)로 나눈 값

연구대상 시스템이 사용하는 총 에머지량은 에머지 평가표에 나타난 각 항목의 에머지값을 더해 구할 수 있다. 또한 연구자의 필요에 따라 관련 에머지 항목끼리 더해 다음에 설명하는 여러 가지 에머지 지수의 계산에 사용한다. 그러나 이 과정에서 조심해야 할 것은 서로 다른 에머지를 더하는 과정에서 나타날 수 있는 이중 계산(double counting) 문제이다(Odum, 1996). 예를 들어 바람과 강우는 태양에너지가 지구 표면을 가열하여 나타나는 자연 현상이다. 따라서, 태양, 바람, 강우의 에머지를 모두 더하여 에머지 총량을 계산하면 태양에너지를 중복 계산하게 된다. 이 경우 에머지 개념은 에머지량이 가장 큰 에너지만 선택하도록 한다.

### 3) 에머지 지수

두 번째 단계에서 완성한 에머지 분석표를 이용하여 연구대상 시스템의 특성을 평가하고 이를 다른 시스템과 비교할 수 있는 지수들을 계산할 수 있다. 이러한 지수들은 분석대상 시스템의 상태에 관한 정보를 제공하며, 경제성 평가, 환경영향, 대안선정과 같은 정책결정에 사용할 수 있다. 여기에서는 에머

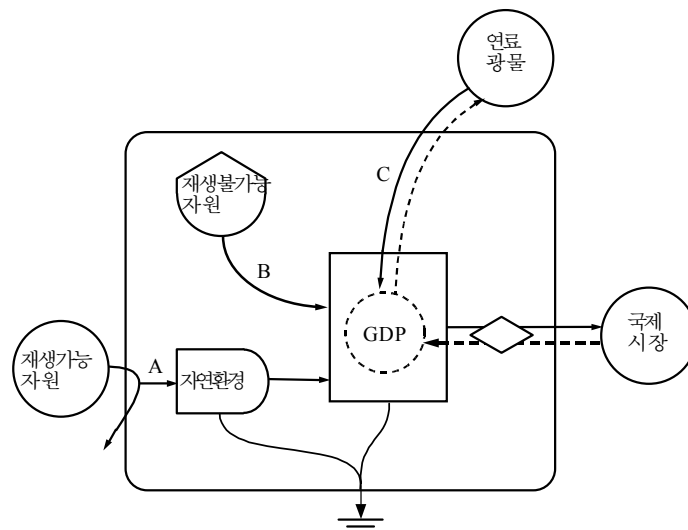
지평가에서 가장 많이 사용하는 에머지 지수들을 소개한다.

### (1) 에머지-화폐비율(Emergy-money ratio, EMR)

에머지-화폐비율(EMR)은 평가하고자 하는 경제시스템이 1년 동안 사용한 총에머지량을 그 해의 총생산(예를 들어, GDP)으로 나눈 값으로 정의된다(그림 2-10).

〈그림 2-10〉

에머지-화폐비율의 정의



$$\text{에머지-화폐비율} = \text{에머지} / \text{GDP} = (A + B + C) / \text{GDP}$$

에머지 개념은 에머지 흐름이 경제시스템의 화폐순환(예를 들어, GDP)의 원동력이라고 설명한다(Odum, 1996 : Brown and Ulgiati, 1999). 따라서 EMR은 경제의 화폐흐름을 에머지 흐름과 연결하는 역할을 한다. 1995년 전세계 경제의 EMR은 1.1 E12 sej/\$이었는데(Brown and Ulgiati, 1999), 이는 전 세계경제에서 1달러가 순환하는데 필요한 에머지량에 해당한다.

EMR은 평가대상 경제의 화폐구매력(buying power of money)을 나타내는



데(Odum, 1996), 그 비율이 감소한다면 동일한 양의 화폐로 구매할 수 있는 실질적인 부(real wealth)가 감소하는 것을 의미한다. Odum(1996)은 인플레이션을 에머지 관점에서 해석하여, 경제에서 사용하는 에머지량이 동일한 상태에서 유통되는 화폐량이 증가하는 경우(즉, 단위화폐당 구매가능한 에머지량을 나타내는 EMR이 감소)를 인플레이션이라고 하였다.

국가마다 연간 에머지 사용량과 화폐로 표시되는 연간 경제규모가 다르기 때문에 EMR은 국가마다 다르게 나타난다. 동일한 화폐단위(예를 들어, 달러)로 나타냈을 경우 저개발국가의 EMR은 일반적으로 선진국의 EMR보다 높은데, 이는 돈을 지불할 필요가 없는 자연 환경으로부터 유입하는 에머지가 경제에서 차지하는 부분이 크기 때문이다. 즉, 저개발국가의 단위화폐당 구매할 수 있는 실질적 부의 크기가 선진국보다 더 크다는 것을 의미한다. 예를 들어, Odum(1996)에 따르면 저개발국가인 리베리아와 에쿠아도르의 EMR은 각각 34.5 E12 sej/\$, 8.7 E12 sej/\$이었으며, 선진국인 미국, 일본, 독일의 EMR은 각각 3.2 E12 sej/\$, 1.5 E12 sej/\$, 2.5 E12 sej/\$을 보였다. 우리나라 경제의 1997년 EMR은 1.61 E12 sej/\$으로, 선진국 수준의 EMR을 나타내었다(Kang and Park, 2002).

## (2) Emvalue

Emvalue는 주어진 전체 경제시스템이나 경제과정이 사용하는 총 에머지량을 에머지-화폐비율로 나누어 구할 수 있다. 따라서 Emvalue는 각 국가의 화폐단위에 따라 Emdollar(Em\$), Emwon(Em₩)과 같이 나타낼 수 있다. Emvalue는 에머지로 표현한 환경자원의 기여가치를 전통적인 시장경제의 가치표현 수단인 화폐 단위로 바꾸어 경제학 방법으로 구한 결과와 비교할 수 있도록 해준다.

## (3) 일인당 에머지 사용량(Energy use per capita)

일반적인 경제통계에서 한 지역 또는 국가의 생활수준을 나타내는데 사용하는 지표는 일인당 국민총생산인데, 우리나라의 일인당 국민총생산은 2001년에 1,149만원(USD 8,900)이었다. 에머지 개념은 이를 일인당 에머지 사용량으로

나타내는데, 한 국가 또는 지역에서 일년 동안 사용한 총에머지량을 인구수로 나눈 값이다. 일인당 에머지 사용량이 높다는 것은 진정한 부의 측면에서 생활 수준이 높다는 것을 의미한다. Odum(1996)은 에머지가 자연환경이 우리 경제에 기여하는 모든 요소를 포괄하려고 한다는 점에서 일인당 국민총생산보다는 일인당 에머지사용량이 생활수준을 더 정확하게 나타낼 수 있다고 주장하였다.

Brown and Ulgiati(1999)의 자료를 바탕으로 1995년 전 세계인구의 일인당 에머지사용량을 계산한 결과 0.53 E16 sej/capita로 나타났다. 우리나라 국민의 일인당 에머지사용량은 1997년에 1.66 E16 sej/capita로 선진국 수준에 근접하였다(Kang and Park, 2002). 다른 나라의 국민 일인당 에머지사용량을 살펴보면<sup>33)</sup>, 미국 2.9 E16 sej/capita, 호주 5.9 E16 sej/capita, 중국 0.5 E16 sej/capita, 인디아 0.1 E16 sej/capita 등으로 나타났다(Odum, 1996).

#### (4) 에머지 산출비율(Emergy yield ratio, EYR)

에머지 산출비율(EYR)은 주어진 경제시스템이 생산한 최종 산물의 에머지(Y)를 시스템 외부로부터 구입하여 생산과정에 투입한 에머지량(F)으로 나누어 구한다(그림 2-9a). 이 비율은 관심의 대상이 되는 생산과정이 지역 경제에 일차 에너지원(primary energy source)을 공급하는데 경쟁력이 있는지 나타낸다(Odum, 1996). 경쟁력이 있는 전형적인 연료의 에머지 산출비율은 약 6으로 알려져 있다. 따라서, 이 비율보다 낮은 에머지 산출비율을 갖는 과정들은 일차 에너지원으로서 경제적이라고 할 수 없다.

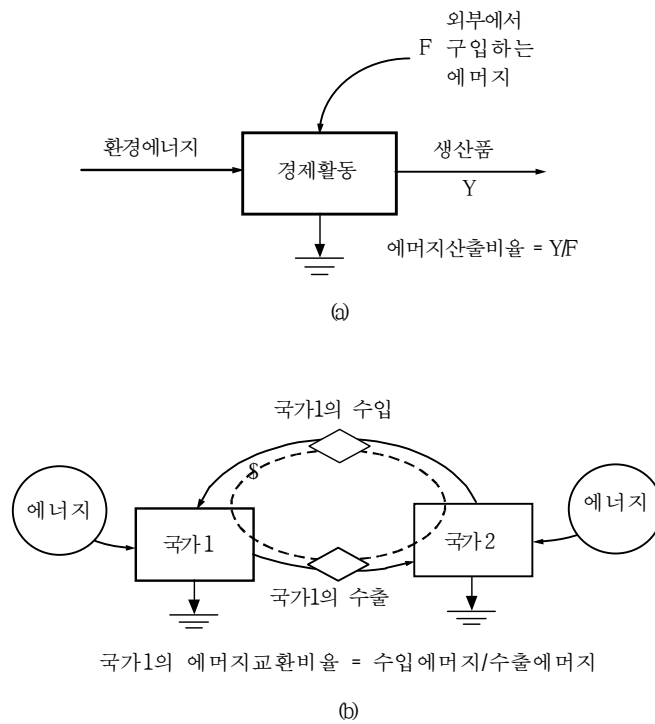
#### (5) 에머지 교환비율(Emergy exchange ratio, EER)

일반적인 경제통계에서 한 국가의 경상수지는 재화와 용역의 수출을 통해 벌어들인 화폐와 수입에 지출한 화폐사이의 차이를 말한다. 2001년 우리나라의 경상수지는 86억 1,690만 달러의 흑자를 기록하였으며, 상품의 교역만을 고려한 무역수지는 93억 4,130만 달러로 무역흑자를 보였다(통계청, 2002).

33) 여기에 제시한 다른 나라의 일인당 에머지사용량은 1980~1987년 사이의 자료로, 우리나라 1997년 자료와 직접 비교하기는 어려움.

〈그림 2-11〉

## 에머지산출비율과 에머지교환비율 계산방법



자연환경과 인간활동이 우리 경제의 진정한 부에 기여하는 바를 평가하고자 하는 에머지 개념에서는 이를 에머지교환비율을 통해 제시하고 있다. 즉, 국가 사이나 경제시스템사이의 교역수지를 에머지 관점에서 다룬다는 점에서 이를 에머지교역수지라고 할 수 있다.

에머지 교환비율(EER)은 재화와 용역의 교역을 통해 경제시스템으로 유입한 에머지를 수출을 통해 외부로 빠져나간 에머지로 나눈 값이다(그림 2-9b). 에머지 관점에서 재화와 용역의 교역을 통한 수지 문제를 바라볼 때, 수출을 통해 빠져나간 에머지보다 더 많은 양의 에머지를 수입으로 얻는 경제는 더 많은 부를 축적하며, 이를 이용하여 경제가 더 윤택하게 된다.

외환위기가 발생한 1997년 우리나라의 경상수지는 81억 6,670만 달러의 적

자를 나타냈으며, 경상수지 중 무역수지는 206억 2,400만 달러의 적자를 기록하였다(통계청, 2002). 화폐의 관점에서 보았을 때 우리나라는 1997년 대외고역수지(경상수지, 무역수지)에서 적자를 나타냈지만, 에머지의 관점에서는 수입을 통해 유입한 총 에머지량이 수출을 통해 외국으로 유출한 총 에머지량의 2.79배로 흑자를 보였다(Kang and Park, 2002).

#### (6) 인구수용력

에머지 평가는 현재의 자연환경과 경제활동이 유지할 수 있는 인구수용력(population carrying capacity)에 관한 정보를 제공한다. 인구수용력은 자연환경이 제공하는 재생가능한 에너지원(태양, 바람, 강우 등)에 기반을 둔 수용력과 선진국과 같은 경제발전 수준을 유지한다고 가정하였을 경우의 수용력 두 가지로 계산할 수 있다.

재생가능에머지 기반 인구수용력(renewable carrying capacity)은 주어진 경제시스템의 총 에머지 사용량 중에서 재생가능한 에너지원으로부터 유입하는 에머지의 양이 차지하는 비율과 현재의 인구수를 곱하여 얻을 수 있다. 우리나라의 경우 1997년에 재생가능에머지가 전체 에머지 사용량에서 차지하는 비율은 6%이었으며, 이를 1997년 우리나라 전체 인구수와 곱한 결과 재생가능에머지 기반 인구수용력은 258만명(전체 인구의 6%)에 불과하였다.

선진국과 유사한 경제수준을 가정할 경우의 인구수용력(developed carrying capacity)은 재생가능에머지 기반 인구수용력의 8배로 계산한다. 이는 선진국의 경우 평균적으로 외부에서 구입한 에머지와 내부 에머지 사이의 비율이 8 정도 되기 때문이다(Odum, 1996). 우리나라의 경우 선진국 수준의 경제발전을 가정할 경우 인구수용력이 1997년에 2,060만명으로, 전체 인구의 46%에 불과하였다(Kang and Park, 2002).

#### (7) 단위면적당 에머지 사용량(Emergy use per unit area)

단위면적당 에머지 사용량(또는 에머지 밀도)은 한 경제시스템에서 일정 기간(보통 1년) 사용한 총 에머지량을 시스템의 전체 면적으로 나눈 값인데, 평가대상 경제시스템의 공간적 집중정도를 나타낸다(Odum, 1996). 에머지 밀도

가 높은 지역일수록 경제활동의 강도가 높다는 것을 의미한다. 일반적으로 저개발 국가나 면적이 큰 국가일수록 단위면적당 에머지 사용량이 적게 나타난다.

우리나라의 경우 1997년에 단위면적당 에머지 사용량이  $7.67 \text{ E12 sej/m}^2/\text{yr}$ 로 아주 높았다(Kang and Park, 2002). 이는 Odum(1996)이 제시한 도시형 국가(urban nation)에 해당하는 값( $1\sim 10 \text{ E12 sej/m}^2/\text{yr}$ )으로, 좁은 국토에서 무역을 중심으로 한 고밀도 경제구조를 가지고 있는 우리나라의 상황을 나타내고 있다.

#### (8) 에머지 투자비율(Emergy investment ratio, EIR)

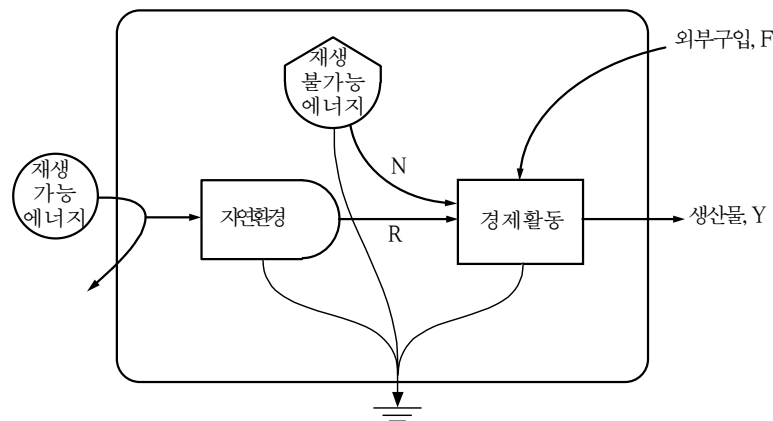
산업혁명 이전의 농경사회에서는 많은 경제활동이 해당 경제시스템의 에너지와 자원을 이용하는 자급자족 형태를 띠었지만, 현대 산업사회에서는 경제시스템 사이에 이루어지는 재화와 용역의 교역이 경제활동의 기본 요소가 되었다. 따라서 한 경제시스템의 경쟁력은 내부에서 공급가능한 재화와 용역과 외부로부터 구입하여야 하는 재화와 용역사이의 비율로 설명할 수 있다. 즉, 이 비율이 낮을수록 경쟁력이 크다고 할 수 있다.

에머지투자비율(EIR)은 외부에서 구입하는 에머지(F)와 지역 또는 국가 자체에서 이용가능한 에머지(태양 에너지, 바람, 강우 등 재생가능한 에머지(I)와 석탄, 광물자원처럼 재생불가능한 에머지(N)를 더한 값 : 즉,  $I + N$ ) 사이의 비율이다(그림 2-12). 기존에 연구된 국가들의 EIR은 미국의 7(Odum et al., 1987)에서부터 파푸아뉴기니의 0.045(Doherty et al., 1992)까지 나타나고 있다.

$$EIR = \frac{F}{(I + N)}$$

〈그림 2-12〉

에머지 지수 계산 개념도



$$\text{에머지산출비율(EYR)} = Y/F$$

$$\text{에머지투자비율(EIR)} = F/(R + N)$$

$$\text{환경부하비율(ELR)} = (N + F)/R$$

$$\text{에머지지속성지수(ESI)} = \text{EYR}/\text{ELR}$$

EIR은 주어진 경제활동이 외부 자원을 이용하는데 얼마나 경제적인가를 나타낸다. 즉, EIR이 클수록 단위 내부 에머지당 외부 에머지의 양이 증가한다. 따라서 주어진 경제활동이 경쟁력을 가지기 위해서는 대안들의 EIR과 유사하거나 적어야 한다. 또한 EIR은 개발의 강도를 간접적으로 나타내는데, EIR이 클수록 개발의 강도가 높다고 할 수 있다(Odum, 1996).

#### (9) 환경부하비율(Environmental loading ratio, ELR)

환경·경제시스템의 물적 토대로서 자연환경은 인간의 사회경제활동과 밀접하게 상호작용하며, 이러한 상호작용을 통해 환경과 인간은 서로에게 영향을 미친다. 현대 산업경제의 모든 생산과정은 태양, 바람, 조석과 같은 환경의 재생가능한 에머지, 화석연료나 광물과 같은 재생불가능한 에머지, 그리고 인간의 노동력이 결합되어 우리에게 유용한 재화를 생산해낸다. 그러나 자연환경은 이러한 경제활동과정에서 발생한 오염물질과 생태계 훼손으로 그 상태가

악화하고 있다.

환경부하비율(ELR)은 다양한 사회경제활동이 자연환경에 미치는 압력(스트레스)을 나타내기 위한 지수로, 외부에서 구입한 에머지와 시스템 내부에 저장되어 있는 재생불가능한 에머지의 합(N+F)을 자연환경이 제공하는 재생가능한 에머지(I)로 나눈 값으로 정의된다(그림 2-10).

$$ELR = \frac{(F+N)}{I}$$

ELR이 낮을수록 인간의 사회경제활동이 자연환경에 미치는 영향이 적고, ELR이 높을수록 주어진 사회경제활동이 환경에 미칠 잠재적 영향이 크다는 것을 의미한다. Brown and Ulgiati(1997)는 ELR의 크기를 3단계로 구분하여, ELR이 3보다 적으면 환경에 대한 영향이 적은 시스템이며, 10 보다 클 경우에는 환경에 대한 영향이 큰 시스템으로 평가하였다. ELR이 3~10의 범위일 경우에는 환경에 미치는 영향이 비교적 크지 않은 것으로 간주하였다.

우리나라의 1997년 ELR은 16.82(Kang and Park, 2002)로, Brown and Ulgiati(1997)의 기준에 따르면 경제활동이 환경에 미치는 영향이 아주 큰 나라에 속한다. 전 세계경제의 1995년 ELR은 2.17로 나타났다(Brown and Ulgiati, 1999)

ELR을 이용하여 주어진 개발사업이 환경에 미치는 영향을 기존의 시스템과 비교함으로써 개발사업이 착수되기 이전에 사업의 환경영향을 비교할 수 있다. 즉, 개발사업의 ELR이 기존 시스템의 ELR보다 크다면, 개발사업이 환경에 미치는 영향을 줄일 수 있는 공사방법을 선택하거나 이러한 대안이 가능하지 않을 경우 해당 사업의 취소를 고려해 볼 수 있다. 또한 원래의 개발사업에 대한 대안들에 대해서도 ELR을 비교함으로써 환경에 미치는 영향이 가장 적은 대안을 선택함으로써 환경자원의 지속가능한 이용을 위한 정책의 수립에 사용할 수도 있다.

### (10) 에머지 지속가능성지수(Energy sustainability index, ESI)

Brown and Ulgiati(1997)는 평가대상이 되는 시스템이 현재의 환경상태와 사회경제활동에서 얼마나 지속가능한 지 나타내기 위하여 에머지 지속가능성 지수(ESI)를 제안하였다. ESI는 주어진 시스템의 생산성을 나타내는 에머지 산출비율(EYR)을 사회경제활동이 환경에 미치는 영향을 의미하는 환경부하비율(ELR)로 나눈 값으로 정의된다(그림 2-10).

$$ESI = \frac{EYR}{ELR}$$

지속가능성지수가 작을수록 재생불가능한 에너지의 사용량이 많고, 외부에서 구입한 에너지와 물질에 대한 의존도가 높으며, 환경에 주는 스트레스가 높다(Brown and Ulgiati, 1997). Brown and Ulgiati는 7개 나라의 ESI 평가결과를 토대로, ESI가 1보다 작은 경우는 선진국형 소비경제(미국 0.48, 이탈리아 0.17, 대만 0.16)로, 10보다 큰 경우는 저개발 경제(파푸아뉴기니 15.64, 에콰도르 15.48)로 구분하였다. 또한 ESI가 1~10인 경우는 개발도상국형 경제(태국 3.14, 멕시코 1.66)를 나타내는 것으로 제시하였다.

1995년 전 세계경제의 ESI는 0.73(Brown and Ulgiati, 1999)으로 Brown and Ulgiati(1997)에 따르면 선진국형 소비경제에 해당하여 전 세계적으로 지속가능한 발전을 달성하기 위한 정책의 추진이 시급한 실정임을 보여주고 있다. 우리나라의 1997년 ESI는 0.07<sup>34)</sup>로 아주 낮게 나타나 세계 평균의 약 1/10에 불과하여 현 수준의 사회경제활동에서는 지속가능성이 극히 낮게 나타났다.

## 3. 에머지평가 선행연구

에머지 개념을 이용하여 자연 환경과 경제를 평가한 연구들은 자연 환경의 보존과 개발에 관한 새로운 관점들을 많이 제시하였다. Odum(1996)이 저술한

34) Kang and Park(2002)의 자료를 이용하여 계산하였음.



‘Environmental Accounting : Emergy and Environmental Decision Making’은 다양한 시스템을 평가한 연구결과를 이용하여 에머지 개념을 소개하고 있는 에머지 평가의 기초 교재라고 할 수 있다. Brown et al.(2001, 2003)은 최근에 이루어진 에머지 연구를 소개하고 있다. 이 연구에서는 선행 연구의 분석대상을 우리나라에서 수행한 에머지 연구에 한정하였다. 외국에서 수행한 에머지 연구는 에머지 개념을 해양환경과 자원관리에 어떻게 활용할 수 있는 지 설명하면서 일부 제시하기로 한다.

우리나라에서는 에머지 개념이 우리나라 전체에 대한 모델(Lee and Odum, 1994), 수산업 분석(손지호 등, 1996), 어장의 환경용량 산정(엄기혁 등, 1996), 댐 건설(강대석 등, 1999 : Kang and Park, 2002), 도시 분석(환경부, 1996a : 부산광역시, 1998 : 이창우, 1999 : 손지호, 1999 : Kang, 2001a), 갯벌 평가(이석모, 2001 : Kang, 2001b), 하구(이창희 등, 2001) 등에 적용되었다.

우리나라에서 에머지 개념을 이용한 최초의 연구인 Lee and Odum(1994)은 우리나라 전체의 자연환경과 경제를 평가하였다. 1991년 우리나라 경제를 대상으로 한 이 연구에 따르면 우리나라는 1년 동안 경제활동이 사용하는 에머지의 90%를 외국에 의존하였다. 화폐로 본 무역수지는 적자를 보였지만, 에머지로 본 무역수지는 약 3.4배의 흑자를 나타냈다. 이 연구는 경제활동이 우리나라의 환경에 많은 부담을 주고 있으며, 인구 또한 자연환경이 지탱할 수 있는 수용력을 훨씬 초과하고 있다는 것을 보여주었다. 특정 생태계나 도시 등에 대해 에머지 평가를 수행하면서 우리나라 전체의 경제를 같이 평가한 다른 연구들(강대석 등, 1999 : 손지호, 1999 : Kang, 2001a, 2001b : 이창희 등, 2001 : Kang and Park, 2002)도 비슷한 결과를 보여주었다.

환경부(1996a)가 1993년 자료를 이용하여 평가한 서울시의 인구수용력은 자연환경에만 의존할 경우 55만명, 선진국 수준의 경제개발을 가정할 경우 440만명으로 나타났다. 이는 Lee and Odum(1994)이 평가한 우리나라 전체와 마찬가지로 서울의 경우 이미 자연환경이 수용할 수 있는 인구를 많이 초과하고 있음을 보여준다. Kang(2001a)은 환경부(1996a) 연구가 가지고 있는 문제를 개선하여 서울의 자연환경과 경제에 대한 에머지 평가를 수행하였다. 이 연구에 따르면 서울은 연간 에머지 사용량의 97%를 우리나라의 다른 지역이나 외

국에서 수입하여, 우리나라 전체 경제보다 더 외부의존적이었다. 또한, 환경부(1996a)와 마찬가지로 서울의 자연환경이 지탱할 수 있는 인구는 1997년 서울 인구의 2.8%에 불과하였으며, 선진국 수준의 경제를 가정하여도 22%에 지나지 않았다. 이에 따라 Kang(2001a)은 서울의 지속가능성을 높이기 위해서는 인구와 경제 집중이 빨리 완화되어야 한다고 주장하였다. 대도시인 부산을 대상으로 한 연구인 부산광역시(1998), 손지호(1999)의 연구도 비슷한 결과를 나타내 우리나라 도시의 인구와 경제 집중과 이로 인해 환경에 미치는 압력이 아주 크다는 것을 보여주었다.

손지호 등(1996)은 우리나라 수산업 전체에 대해 에머지 평가를 수행하여 에머지 가치와 시장의 가격사이에는 전체 수산업은 7.02배, 일반해면어업은 10.69배, 천해양식업은 1.25배의 차이가 있음을 보였다. 즉, 수산물 생산금액으로 나타낸 수산업의 1992년 경제기여 가치는 바다가 우리 경제에 기여하는 가치를 아주 낮게 평가하고 있다는 것을 알 수 있다. 김남국 등(2001)은 에머지 개념을 이용하여 넙치양식의 지속성을 평가하였는데, 넙치양식의 에머지 지속성지수는 0.06에 불과하였다. 김남국 등은 화석연료에 의존하는 양식형태를 벗어나 자연환경을 충분히 이용하는 형태의 양식으로 전환할 것을 제안하였다. 에머지 개념을 이용하여 득량만의 환경용량을 산정한 엄기혁 등(1996)에 따르면 1994년 득량만의 수산물 생산량은 어류는 환경용량의 80%, 갑각류는 92%, 패류는 80%, 해조류는 84%에 해당하였다.

에머지 개념을 생태계 가치평가에 적용한 연구는 갯벌을 대상으로 한 이석모(2001)와 Kang(2001b)의 연구가 있으며, 하구와 석호를 대상으로 한 이창희 등(2001)의 연구가 있다. 이석모(2001)는 평가대상 갯벌이 우리나라 경제에 ha당 연간 약 980만원을 기여하고 있음을 보여주었으며, 다른 갯벌을 대상으로 연구한 Kang(2001b)에서는 갯벌의 기여가치가 ha당 연간 약 3,200만원으로 나타났다. 한편 하구와 석호 생태계의 경제기여 가치를 평가한 이창희 등(2001)의 연구에서 갯벌의 기여가치는 ha당 각각 연간 2,900만원과 150만원을 나타냈다.

대규모 개발사업에 대해 에머지 개념을 이용하여 편익/비용평가를 수행한 연구는 이석모(2001)와 Kang and Park(2002)의 연구가 있다. 이석모(2001)는

갯벌 간척사업을 간척으로 얻을 수 있는 편익을 에머지로 나타낸 값과 간척으로 잃어버리게 될 것들을 에머지로 나타낸 값 사이의 비율(즉, 에머지 편익/비용비)을 계산하였다. 이에 따르면 간척으로 인한 환경비용이 편익보다 커 연구 대상 갯벌의 간척은 에머지 측면에서 경제성이 없는 것으로 나타났다. 이 연구는 간척으로 인한 에머지 손실을 개발계획을 통해 회수하는데 약 17년이 걸릴 것으로 추정하였다. 또한 에머지산출비율은 갯벌을 그대로 보존할 경우 7.58, 갯벌을 간척하여 농지로 사용할 경우 3.81로 나타나 간척으로 생겨날 새로운 시스템이 경제에 기여하는 바가 더 적었다. 대규모 다목적댐의 건설에 대해 에머지 편익/비용평가를 수행한 Kang and Park(2002)의 연구에 따르면 댐 건설로 생겨나는 호수 바닥에 가라앉을 퇴적물<sup>35)</sup>을 고려하였을 경우 에머지 측면에서 편익이 비용보다 크게 나타났다. 그러나 Kang and Park(2002)은 댐 건설이 수자원을 확보하고 홍수를 조절하기 위한 유일한 대안은 아님을 지적하면서, 각 대안들에 대해 에머지 편익/비용평가를 수행하고 이를 비교하여 가장 적절한 대안을 선택할 것을 권고하였다.

지금까지 우리나라에서 수행된 대부분의 에머지 연구는 우리나라 경제가 자연환경에 큰 부담을 주고 있으며, 자연환경이 수용할 수 있는 인구수용력을 많이 초과해 지속가능성이 아주 낮음을 보여주었다. 따라서 대부분의 연구가 우리나라 경제의 지속가능성을 높이기 위한 정책을 추진할 것을 권고하였다.

생태학의 입장에서 자연환경의 가치를 평가하고 정책 시사점을 제시하기 위한 에머지 개념이 우리나라에 도입된 지 10여 년이 지났지만, 아직 연구가 많이 이루어지지 않았고, 대부분의 연구가 평가대상 시스템에 대한 자료부족으로 철저한 분석결과를 제시하지 못하였다. 일부 연구의 경우 자료의 부족으로 전체 에머지 연구의 일부만 제시하는데 그치고 있다. 또한 아직까지 에머지 개념을 이용한 연구결과가 정부의 정책결정과정에 채택된 적이 없다.

따라서 우리나라에서 에머지 개념이 자연과 인간의 공존을 위한 새로운 시각과 정책수단을 제공하기 위해서는 관련 연구자들의 정책지향적인 연구가 필요한 것으로 보인다.

---

35) Kang and Park(2002)의 연구는 호수 바닥에 가라앉을 퇴적물을 환경비용으로 간주하였는데, 이는 하천 상류에서 하구로 유입하는 퇴적물은 하구생태계의 생산성에 중요한 역할을 하지만 댐은 이러한 유입을 차단한다는 점에서 비용으로 처리하였음.

## 제 3 장 사례지역 에머지 평가

에머지 개념을 이용하여 자연환경의 경제기여 가치를 평가하기 위한 사례지역으로 1998년 7월 16일 공식적으로 추진이 중단된 영산강 4단계 간척사업의 대상이었던 갯벌을 선정하였다. 이 장에서는 제2장에서 설명한 에머지 평가법을 이용하여 영산강 4단계 사업지역 갯벌이 우리 경제에 기여하는 바를 평가하였다.

에머지 개념은 평가대상 시스템(여기에서는 영산강 4단계 사업지역 갯벌)의 가치는 이 시스템이 속해 있는 더 큰 시스템의 관점(우리나라 전체 또는 지역 차원)에서 파악하지 않으면 아무런 의미가 없다는 점을 강조하고 있다. 따라서 사례지역인 영산강 4단계 사업지역 갯벌이 기여하는 바를 평가하기 위해 우리나라 경제에 대해 에머지 평가를 먼저 실시하고, 이를 토대로 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 기여가치를 평가하였다.

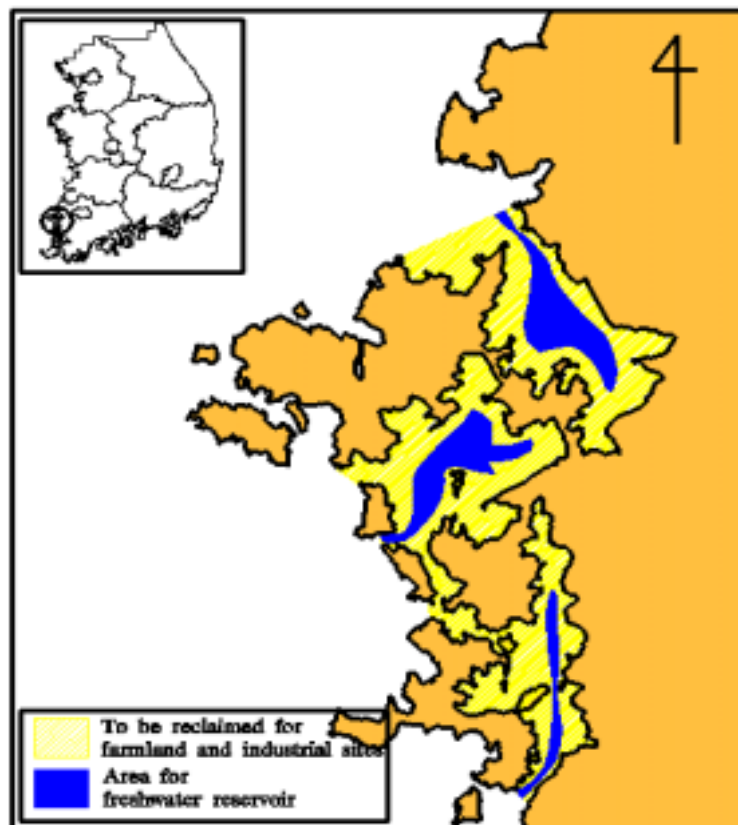
### 1. 사례지역 개요

#### 1) 영산강 4단계 간척사업

1972년부터 5단계로 나누어 시작된 영산강유역 종합개발사업의 영산강 4단계 간척사업은 총 사업비 1조 9,600억원을 들여 전남 목포, 무안, 함평, 영광, 신안 주변의 섬들을 방조제로 막아 농업용지, 산업용지, 담수호를 만들고자 하는 사업이었다(해양수산부, 2000 : 그림 3-1, 표 3-1). 이 사업의 목적은 i) 국토확장과 수자원 개발, ii) 농업·공업·생활용수 확보, iii) 간척지개발로 토지확보, iv) 해안도서지역의 영농기계화와 소득증대, 생활환경 개선, v) 해안선단축으로 육운 개선, vi) 중국교역의 전진기지 확보와 서남해안시대에 대

비한 임해종합개발 기반 구축으로 제시되었다(한국산업경제연구원, 1998). 영산강 4단계 간척사업은 41.4km의 방조제를 쌓아 간척지 21,690ha와 담수호 11,870ha를 더한 33,560ha의 매립면적을 확보하기 위한 사업으로, 모두 39,040ha(농지 16,450ha, 배후지 17,350ha, 산업용지 5,240ha)를 개발할 계획이었다.

〈그림 3-1〉 사례지역인 영산강 4단계 매립 계획 지역(해양수산부, 2000)



〈표 3-1〉

영산강 4단계 간척사업 개요

| 구 분     | 영산강4단계 지역<br>(함해지역 제외) | 함해지구      | 계          | 비 고     |
|---------|------------------------|-----------|------------|---------|
| 1. 면적   |                        |           |            |         |
| 매립면적    | 21,360ha               | 12,200ha  | 33,560ha   |         |
| - 간척지   | - 14,560ha             | - 7,130ha | - 21,690ha |         |
| - 담수호   | - 6,800ha              | - 5,070ha | - 11,870ha |         |
| 개발면적    | 28,360ha               | 10,680ha  | 39,040ha   |         |
| - 간척지   | - 10,960ha             | - 5,490ha | - 16,450ha |         |
| - 배후지   | - 13,800ha             | - 3,550ha | - 17,350ha |         |
| - 산업용지  | - 3,600ha              | - 1,640ha | - 5,240ha  |         |
| 2. 주요시설 |                        |           |            |         |
| 담수호     | 6,800ha                | 5,070ha   | 11,870ha   |         |
| 방조제     | 8조 20.1km              | 5조 21.9km | 13조 42km   |         |
| 배수갑문    | 4개소                    | 3개소       | 7개소        |         |
| 연락수로    | 23km                   | 4km       | 27km       |         |
| 양수장     | 17개소                   | 5개소       | 22개소       |         |
| 용수로     | 63조 384km              | 9조 124km  | 72조 508km  |         |
| 진입도로    | 11.9km                 | 6조 8.1km  | 6조 20km    |         |
| 제염펌프    | 2개소                    | 1개소       | 3개소        |         |
| 3. 사업효과 |                        |           |            |         |
| 국토확장    | 21,360ha               | 12,200ha  | 33,560ha   |         |
| 수자원확보   | 280백만톤                 | 290백만톤    | 570백만톤     |         |
| 해안선단축   | 95km                   | 65km      | 160km      |         |
| 육운개선    | 30km                   | -         | 30km       |         |
| 농경지조성   | 10,960ha               | 5,490ha   | 16,450ha   |         |
| 산업용지조성  | 3,600ha                | 1,640ha   | 5,240ha    |         |
| 4. 총사업비 | 11,180억원               | 6,828억원   | 18,008억원   | '97년 단가 |
| 5. 사업기간 |                        |           | 15개년       |         |

자료 : 농어촌진흥공사(1998), 「해양수산부(2000)에서 재인용」.

그러나 농림부는 1998년 7월 16일 갯벌을 보호하고 재정낭비를 줄이기 위해 영산강 4단계 간척사업을 취소한다고 발표하였다. 이는 시화호, 송도간척지와 같이 간척이 이루어진 곳에서 나타나는 담수호의 수질 악화, 간척의 경제성 문

제를 고려한 것이다. 정부는 영산강 4단계 간척사업을 철회하면서 앞으로 환경을 훼손하는 대규모 간척은 모두 중단하겠다고 선언했다.

한편, 해양수산부는 영산강 4단계 간척사업에 포함되었던 전라남도 무안군 현경면과 해제면의 갯벌 35.6km<sup>2</sup>를 습지보전법에 근거하여 2001년 12월 습지보호지역으로 지정하였다.

## 2) 영산강 4단계 사업지역 갯벌 생태계 현황

사례지역인 영산강 4단계 간척계획지역은 리아스식 해안으로 갯벌이 잘 형성되어 있는 지역이다. 여기에서는 한국산업경제연구원(1998)이 영산강 4단계 개발사업의 타당성을 평가하기 위한 연구에서 조사한 해양생태계 자료를 토대로 갯벌생태계 현황을 정리하였다.

조간대에는 모두 47종의 염생식물이 서식하며, 벼과와 국화과 염생식물이 11종으로 염생식물의 44%를 차지하였다. 이 지역의 갯벌에서 우점하는 염생식물은 갈대, 갯잔디, 강아지풀 등 12종이었다. 또한 염생식물 군락은 모두 11개의 군락으로 나뉘며, 이 가운데 칠면초군락과 갯잔디군락이 우점하였다. 염생식물군락의 생산량은 310~1680 gDW/m<sup>2</sup>로, 갯잔디군락의 생산량이 적고, 갈대군락의 생산량이 많았다.

식물플랑크톤, 저서규조류, 조간대 저서무척추동물, 조하대 저서무척추동물에 대한 한국산업경제연구원(1998)의 조사는 함평만에 국한되어 영산강 4단계 사업지역 갯벌생태계를 제대로 나타내기 힘든 것으로 판단된다. 이 조사에서 식물플랑크톤은 17종에 불과하였다.

저서조류는 76종이 나타났는데, 모두 규조류였다. 한국산업경제연구원(1998)은 엽록소-a의 양을 이용하여 저서규조류의 생산성을 추정하였는데, 연평균 478 gC/m<sup>2</sup>/yr의 생산성을 보였다. 그러나 이 결과는 생산성이 가장 낮은 겨울에 측정한 결과이기 때문에 함평만 저서규조류의 연간 생산량은 더 높을 것으로 보인다.

모두 69종이 나타난 조간대 저서무척추동물은 다모류와 연체동물이 출현중

의 68%를 차지하였다. 조간대 저서무척추동물의 밀도는 1,932개체/m<sup>2</sup>, 생물량은 99.47g/m<sup>2</sup>으로 조사되었으며, 연체동물의 밀도와 생물량이 가장 높았다. 가장 우점하는 조간대 저서무척추동물은 종뱀(Musculista senhousia)으로, 전체 출현 개체수의 70.1%에 해당하였다.

조하대 저서무척추동물은 168종이 나타났으며, 밀도는 1,168개체/m<sup>2</sup>를 보였다. 연체동물이 조하대 저서무척추동물 개체수의 58.6%, 생물량의 84.5%를 차지하여 가장 우점하는 분류군이었다. 전체 출현 개체수의 44.2%를 차지한 바지락이 가장 우점하는 종이었으며, 다모류인 Lumbrinesis longifolia가 두 번째로 우점하는 종이었다.

### 3) 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 수산업 현황

목포시의 어장은 방조제 안에 포함되어 있지 않지만, 방조제 부근에 있는 해역으로 방조제가 건설될 경우 어업 피해가 예상되었다. 목포시 어가인구는 1998년에 3,960명으로, 목포시 인구의 1.6%에 해당하였다. 목포시의 수산물 생산량은 52,182톤이었으며, 종류별로는 어류가 전체 생산량의 68.3%로 가장 많았다. 수산물 생산액은 122,352백만원이었다. 목포시의 허가어업 허가건수는 1,346건이며, 이 중 연안복합형태가 725건으로 가장 많았다. 신고어업은 505건이었으며, 면허어업은 20건, 면적은 692.5ha를 보였다(해양수산부, 2000).

무안군의 어가인구는 3,811명으로, 1998년 무안군 인구의 5.3%를 차지하였다. 영산강 4단계 간척사업 지역에 속하는 어가수는 전체 어가의 97%로 무안군의 대부분 어가가 사업지역에 포함되었다. 수산물 생산량은 14,586톤, 생산액은 40,352백만원으로, 해조류가 전체 생산량의 58.5%로 가장 많았다. 허가어업 건수는 1,013건으로 연안복합형태가 622건으로 가장 많았으며, 면허어업은 207건, 4,967ha를 보였다(해양수산부, 2000).

신안군의 어가인구는 18,929명으로 나타났다. 수산물 생산량은 34,105톤으로, 영산강 4단계 사업지역 수산물 생산량의 29%를 차지하였다. 신고어업은 영산강 4단계 개발지구 내부에 14건, 방조제 바깥에 32건이 있으며, 허가어업



은 638건이었다. 면허어업은 607건, 15,209ha에 이르며, 방조제의 건설로 영향을 받을 것으로 보이는 면허어업은 308건 8,173ha을 보였다(해양수산부, 2000).

어가인구가 1,031명인 함평군의 수산물 생산량은 2,24톤, 생산금액은 11,874백만원이며, 연체류가 전체 생산량의 50%를 차지하였다. 함평군의 어장은 모두 방조제 내부에 있는 것으로 나타났는데, 신고어업 7건, 허가어업 159건, 면허어업 37건(1,045.5ha)이 있는 것으로 조사되었다(해양수산부, 2000).

영광군의 어가인구는 2,847명이며, 수산물 생산량은 13,692톤, 생산액은 18,521백만원으로 나타났다. 해조류가 전체 생산량의 66.2%로 가장 많았다. 면허어업은 117건, 2,441ha으로, 4단계 간척사업 내의 면허어업은 46건, 982.45ha로, 전체 면허어업 면적의 40.2%를 차지하였다(해양수산부, 2000).

## 2. 사례지역 가치평가 선행연구

영산강 4단계 개발사업의 매립대상 갯벌의 가치를 경제학 방법을 이용하여 평가한 연구는 한국산업경제연구원(1998)과 해양수산부(2000)가 있다. 이 연구에서 사례지역으로 고른 갯벌의 가치를 처음 평가한 한국산업경제연구원(1998)은 편익-비용분석법을 이용하여 영산강 4단계 사업의 경제성을 평가하면서 갯벌의 기여가치를 계산하였다. 해양수산부(2000)는 영산강 4단계 사업이 취소되고 난 뒤 한국산업경제연구원 평가결과의 문제점을 지적하고, 영산강 4단계 개발사업의 경제성을 다시 평가하였다. 그러나 에머지 개념을 이용하여 이 지역의 갯벌 가치를 평가한 사례는 없다.

### 1) 한국산업경제연구원(1998)

한국산업경제연구원(1998)은 영산강 4단계 매립대상 갯벌의 기능을 수산물 생산, 해수정화, 심미 기능 세 가지로 나누어 갯벌의 가치를 평가하였다(표 3-2). 수산물생산 기능은 영산강 4단계 사업지역 갯벌에서 이루어지는 면허어

업(236.9만원/ha/yr), 허가어업(16.8만원/ha/yr), 신고어업(197.4만원/ha/yr), 마을어업(60만원/ha/yr)의 연간 순이익을 더하여 계산하였다. 갯벌의 수질정화가치는 영산강 4단계 간척사업으로 만들어 질 11,870ha의 담수호 수질을 개선하기 위해 필요한 인공습지의 설치비용으로 계산하였다. 이 연구에서는 모두 36개의 인공습지(면적 : 1,385ha, 부피 : 20,775,000m<sup>3</sup>)가 필요한 것으로 가정하였다. 한편, 한국산업경제연구원(1998)은 환경부(1996b)<sup>36)</sup>가 인용한 외국 사례를 이용하여 영산강 4단계 사업지역 갯벌이 가지고 있는 심미가치를 계산하였다.

〈표 3-2〉      **경제학 방법을 이용한 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 가치 평가**  
단위 : 백만원/ha/yr

| 구 분  | 한국산업경제연구원(1998) | 해양수산부(2000) |
|------|-----------------|-------------|
| 어업생산 | 5.11            | 5.53        |
| 수질정화 | 0.41(3.83)      | 1.03        |
| 심미가치 | 0.40            | -           |
| 보전가치 | -               | 0.81        |
| 합계   | 5.92(9.36)      | 7.41        |

주 : 1) 한국산업경제연구원의 연구결과에서 괄호 안은 Odum의 갯벌 정화능력 연구를 인용한 환경부(1996b)의 결과를 적용할 경우 갯벌 가치임.

2) 해양수산부는 평가결과를 평가기간(55년)의 총 현가로 제시하였음. 표에 나타난 연간기여가치는 부경대학교 표희동 교수가 제공하였음.

한국산업경제연구원의 평가 결과 영산강 4단계 사업지역 갯벌이 우리나라 경제에 기여하는 가치는 ha당 연간 592만원이었다. 환경부(1996)가 추정한 수질정화가치(383만원/ha/yr)<sup>37)</sup>를 적용할 경우 영산강 4단계 사업지역 갯벌의

36) 환경부(1996b)는 미국 루이지애나주 습지와 플로리다주 습지의 오락가치를 평균하여 우리나라 갯벌의 심미가치를 평가하였음.

37) 환경부(1996b)는 우리나라 갯벌의 정화가치를 추정하면서 미국 조지아대 Odum교수팀이 수행한 갯벌의 정화능력 연구 결과를 인용하였는데, 갯벌 1ha는 하루에 21.7kg의 유기물(생물학적 산소요구량(BOD) 기준)을 처리하는 것으로 조사되었음. 이에 따라 환경부는 같은 양의 유기물을 제거하는데 필요한 하수처리장의 처리비용을 갯벌의 정화가치로 하였음.

가치는 ha당 연간 936만원으로 늘어났다.

## 2) 해양수산부(2000)

해양수산부(2000)는 한국산업경제연구원의 평가 결과를 1) 비교대상이 분명하지 않고, 2) 단위면적당 가치평가 기준에 일관성이 없으며, 3) 갯벌의 정화가치를 평가하기 위해 대체비용법을 적용하면서 현실적이지 못하고 일관성이 없고, 4) 어업손실, 보상 범위, 순이익율을 낮게 평가하고 있고, 5) 대기정화가치와 수질정화가치를 지나치게 높게 평가하거나 잘못 평가하고 있으며, 6) 갯벌의 보존가치를 포함하지 않는 등 6가지 문제점을 지적한 후 영산강 4단계 사업지역의 갯벌 가치를 다시 평가하였다(표 3-2). 해양수산부(2000)도 한국산업경제연구원과 같이 영산강 4단계 사업지역의 갯벌 기능을 세 가지로 나누었다. 해양수산부(2000)는 수산물 생산가치를 평가하면서 간척사업이 방조제 안의 어업뿐만 아니라 방조제 밖의 어업에도 많은 피해를 준다는 점을 고려하였으며, 면허어업, 허가어업, 신고어업의 순이익을 이용하여 이 지역 갯벌의 가치를 계산하였다. 갯벌의 오염물질 정화가치는 환경부(1996)와 마찬가지로 Odum의 연구결과를 인용하여 같은 양의 유기물을 처리하는데 필요한 하수처리비용으로 계산하였다. 그러나 계산 결과가 지나치게 커 갯벌의 정화능력에 대한 더 많은 연구가 필요하다는 판단아래 하수처리비용의 10%를 갯벌의 정화가치로 사용하였다. 해양수산부(2000)는 갯벌의 심미가치를 외국 사례를 이용하여 평가한 한국산업경제연구원과 달리 조건부 가치측정법(contingent valuation)을 이용하여 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 보전가치를 추정하였다. 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 보전가치는 연간 1,757~6,071억원으로 계산되었다.

해양수산부(2000)가 평가한 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 연간 기여가치는 ha당 741만원으로 나타났다. 이 결과는 오염정화가치를 인공습지를 만드는 데 드는 비용으로 환산한 한국산업경제연구원 평가보다는 높았으나, Odum의 갯벌정화능력 자료를 이용한 평가보다는 낮았다.

### 3) 비교 검토

한국산업경제연구원과 해양수산부의 평가결과는 평가방법, 평가대상 갯벌면적, 평가기준이 달라 갯벌의 기여가치가 다르게 나타났다. 전체적으로 해양수산부(2000)의 연구가 한국산업경제연구원(1998)에 비해 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 연간 기여가치를 높게 평가하였다.

어업생산 가치는 해양수산부의 평가가 한국산업경제연구원의 평가보다 9% 높았다. 이러한 차이는 두 연구에서 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 가치를 평가하기 위해 이용한 보상대상 갯벌 면적, 보상비 산출기준, 보상기간, 단위면적당 수산물생산량, 생산단가, 순수이익률이 달랐기 때문이다. 해양수산부는 방조제의 건설로 해류와 조석패턴, 퇴적물 이동이 영향을 받는 방조제 바깥의 갯벌까지 포함하여 15,860ha의 갯벌을 평가하였다. 이는 한국산업경제연구원의 평가대상이었던 9,700ha보다 평가대상 갯벌 면적이 63.5%나 넓다. 또한 해양수산부는 면허어업, 마을어업, 신고어업, 허가어업의 일부, 염전보상은 무한대까지 경제적 기회비용이 발생할 수 있음을 가정하여 갯벌의 가치를 평가하였다.

해양수산부(2000)도 지적하고 있듯이 인공습지의 정화능력이 자연상태의 갯벌보다 15배 이상 크다는 한국산업경제연구원의 가정은 문제가 있다. 인공갯벌을 만들고 난 뒤 아무런 관리도 하지 않는다면 자연상태의 갯벌과 비슷한 정화능력을 가질 것이며, 관리를 하더라도 15배 이상의 정화능력은 얻기 어려운 것으로 판단된다. 해양수산부가 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 오염정화가치를 추정하기 위해 적용한 하수처리비용은 연간 ha당 1,026만원으로, 환경부(1996b)가 사용한 비용(384만원/ha/yr)보다 2.7배 높았다. 그 결과 오염정화기능의 가치가 면허어업의 가치보다 2배 크게 나타나 해양수산부는 추정된 수질정화가치의 10%만 고려하여 갯벌의 기여가치를 평가하였다. 그러나 해양수산부는 이에 대한 논리적 근거를 제시하지 못하였다. 따라서 해양수산부 연구는 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 오염정화기능을 낮게 평가했을 가능성이 있다. 해양수산부(2000)가 지적하고 있듯이, 우리나라 갯벌의 정화능력에 대한

연구가 이루어져야 수질정화가치에 대한 정확한 평가가 가능할 것이다. 또한 이 과정에서 갯벌이 유기물이나 영양염류와 같은 오염물질을 제거할(sink) 수도 있지만, 오히려 오염물질의 공급원(source)으로 작용할 수 있다는 점도 고려하여야 한다(Mitsch and Gosselink, 2000).

한국산업경제연구원은 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 심미가치를 평가하는데 미국 습지의 오락가치를 이용하였지만, 해양수산부는 조건부 가치측정법을 이용하여 갯벌의 보전가치를 평가하였다. 한국산업경제연구원의 연구 결과는 우리나라의 자연환경과 사회경제 조건이 다른 미국 습지의 오락가치를 이용하였다는 점에서 현실성이 떨어지는 것으로 판단된다. 그러나 해양수산부(2000)는 갯벌 보전가치의 크기에 대한 논란과 한국산업경제연구원이 보전가치를 포함하지 않았다는 점을 들어 갯벌의 보전가치가 평가 첫 해에만 발생하는 것으로 매수 보수적으로 가정하였다. 따라서 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 실제 보전가치는 해양수산부(2000)의 평가보다 클 것으로 판단된다.

에머지 개념을 소개하면서 지적인 바와 같이 경제학 방법을 이용하여 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 가치를 평가한 한국산업경제연구원(1998)과 해양수산부(2000)의 연구는 기본적으로 인간중심의 지불의사(시장가격이나 보전가치 지불의사)를 이용하고 있다. 경제학 방법을 이용한 이러한 연구들이 영산강 4단계 사업지역 갯벌뿐만 아니라 다른 생태계의 개발과 보전에 관한 훌륭한 정책방향을 제시하였지만, 생태계가 우리에게 제공하는 유용한 기능을 좀 더 고려할 수 있는 방법을 이용하여 보완할 필요가 있다.

다음 절에서는 에머지 개념을 이용하여 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 가치를 평가하고, 이를 경제학 방법을 이용한 연구결과와 비교함으로써 에머지 개념을 해양환경과 자원관리 정책에 어떻게 이용할 수 있는 지 살펴보기로 한다.

### 3. 사례지역 에너지평가

#### 1) 우리나라의 에너지 평가

##### (1) 에너지시스템 다이어그램

우리나라 경제의 에너지 시스템 다이어그램을 <그림 3-2>에 제시하였다. 앞에서 에너지시스템 다이어그램을 그리는 과정을 설명하였듯이 가장 먼저 해야 할 일은 평가대상 시스템의 경계를 정하는 일이다(그림 2-7). 우리나라 경제에 대한 에너지 평가의 경우 그 경계가 아주 뚜렷한데, 헌법이 정한 영토(영해와 영공 포함)의 경계를 이용하면 된다.

에너지 시스템 다이어그램을 그릴 때 두 번째 단계는 외부 에너지를 파악하는 일인데, <그림 3-2>에서 평가대상 시스템의 경계를 나타내는 사각형 바깥에 원으로 표시되어 있는 것들이 외부 에너지원에 속한다. 외부 에너지원은 앞에서 설명한 에너지 변환도의 크기 순(즉, 에너지질의 순서)으로 왼쪽에서 오른쪽으로 배치하였다. 우리나라 경제로 유입하는 외부 에너지원은 태양, 바람, 강우, 조석, 파도, 지질작용처럼 재생가능한 에너지와 다른 나라에서 구입한 연료, 광물, 재화와 용역, 정보와 같은 에너지를 포함한다. 이러한 외부 에너지원과 우리나라 내부에서 나오는 석탄, 광물과 같은 재생불가능한 에너지가 서로 작용하여 우리나라의 경제생산이 이루어진다.

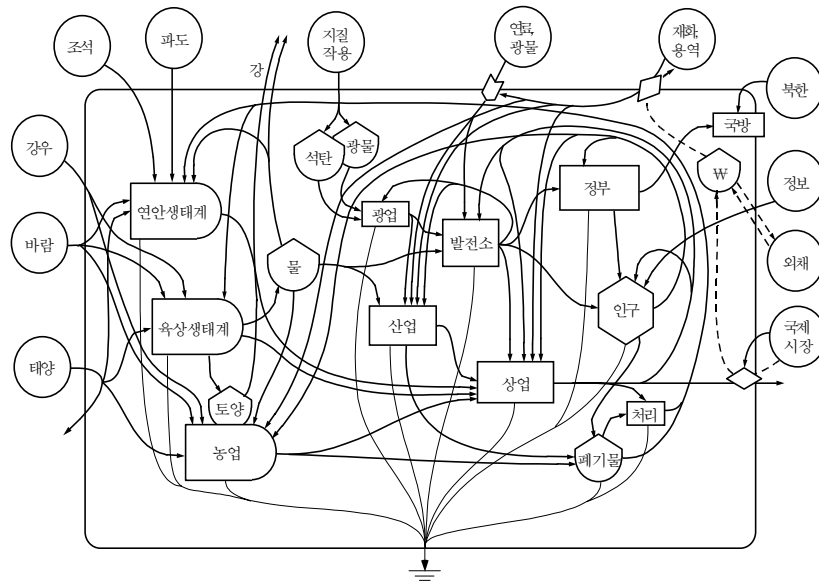
시스템 내부의 주요 생산은 크게 연안생태계, 산림, 농업과 같이 자연환경의 역할이 중요한 부분(그림 3-2에서 왼쪽에 있는 요소들)과 인간의 재화와 용역이 중요한 부분(그림 3-2에서 오른쪽에 있는 요소들)으로 나누어 제시하였다. <그림 2-3>의 오른쪽에 있는 생산과정은 자연생태계가 생산한 자원, 다른 나라에서 구입한 원료와 서비스를 이용하여 더 고급의 재화와 용역을 만들어내는 산업과 상업으로 이루어져 있다. 이러한 모든 생산 과정들은 사람들이 지원하고 유지한다.

남북분단은 지난 반세기 동안 우리나라 사회경제에 커다란 영향을 미치고 있기 때문에 우리나라의 에너지 시스템 다이어그램을 그릴 때 빼놓을 수 없는

외부 요소이다. <그림 3-2>는 북한을 외부 요소로 포함하였으며, 국방이라는 요소를 통해 남북의 군사적, 정치적 대치상황을 나타내었다.

<그림 3-2>

우리나라의 에너지시스템 다이어그램



## (2) 에머지평가표

<표 3-3>은 <그림 3-2>의 에너지시스템 다이어그램을 이용하여 만든 우리나라 경제의 에머지 평가표이다. <표 3-3>의 에머지 평가표에는 영산강 4단계 사업지역 갯벌에 대한 에머지평가 결과와 경제학 방법을 이용한 해양수산부(2000)와 한국산업경제연구원(1999)의 연구결과를 비교할 수 있도록 1999년 우리나라의 자연환경과 경제활동에 관한 자료를 에머지 평가에 이용하였다. <표 3-3>은 우리나라 경제의 에머지 흐름을 재생가능한 자원, 국내의 재생가능한 에너지생산, 국내의 재생불가능 자원, 수입, 수출의 5가지로 나누어 평가하고 있다. 이 중 외부에서 유입하는 에머지는 ‘재생가능한 자원’으로 나타낸 환경에너지와 ‘수입’에 포함된 재화와 용역이다. 여기에 ‘국내의 재생불가능한 자

원'이 더해져 우리나라 경제를 움직이는 세 가지 기본 자원이 된다.

태양에너지는 <표 3-3>에 제시한 7가지 재생가능한 에너지 중에서 에너지 단위로 보았을 때 가장 많은 에너지를 공급하였다. 그러나 각 에너지 자료와 태양에너지 변환도를 곱해 얻은 에머지로 보면 강우의 화학에너지가 가장 많은 에머지를 우리나라 경제에 제공하였다. 에너지 단위로 보면 우리나라로 유입하는 태양에너지량이 강우의 화학에너지량보다 442배 많았지만, 에머지 단위에서는 강우의 화학에너지의 기여 정도가 태양에너지의 41배로 나타났다. 이 자료는 서로 다른 에너지가 우리나라 경제에 기여하는 바를 에너지 질을 고려하지 않고 평가한 경우와 고려한 경우사이의 차이를 뚜렷하게 보여준다.

재생가능 에너지는 우리나라의 사회경제활동에 연간  $5.24E22$  sej의 에머지를 제공하였다. 이 값은 <표 3-3>에 나타난 7가지 재생가능 에머지를 더한 값보다 더 적은데, 이는 중복계산을 피하기 위하여 조석에너지와 강우의 화학에너지만 더했기 때문이다. 조석에너지를 뺀 다른 재생가능 에너지는 모두 태양에너지의 작용을 통해 밀접하게 연결되어 있기 때문에 이들을 단순히 더할 경우 중복계산을 피할 수 없다. 여기에서는 중복계산을 피하기 위하여 태양, 바람, 강우(위치, 화학), 파도, 지질작용 중에서 에머지 흐름이 가장 큰 강우의 화학에너지만 재생가능 에머지의 합을 구하는데 이용하였다. 조석에너지는 지구와 달, 지구와 태양사이의 인력에 의해 발생하는 에너지이기 때문에 <표 3-3>에 있는 다른 재생가능 에너지와 성격이 달라 중복계산에 해당하지 않는다.

‘국내의 재생가능한 생산’은 수력발전, 농업, 축산업, 어업, 연료목재생산, 임업과 같이 자연환경의 재생가능한 에너지에 주로 의존하는 형태의 생산과정을 의미한다. 이 중 농업, 축산업, 어업이 에머지 측면에서 주요 재생가능한 생산으로 나타났다. 재생불가능한 자원 중에서는 광물 생산, 특히 산업광물 생산이 대부분의 에머지를 공급하였다.



〈표 3-3〉

## 한국의 199년 에머지 흐름

| 번호             | 항 목       | 원자료                   |    | 태양에너지<br>변환도<br>(sej/단위) | 태양에너지<br>(sej/yr)     | Emdollar<br>1999 Em\$ |
|----------------|-----------|-----------------------|----|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 재생가능 자원        |           |                       |    |                          |                       |                       |
| 1              | 태양        | $1.17 \times 10^{21}$ | J  | 1                        | $1.17 \times 10^{21}$ | $7.04 \times 10^8$    |
| 2              | 바람        | $1.97 \times 10^{17}$ | J  | 1,496                    | $2.95 \times 10^{20}$ | $1.78 \times 10^8$    |
| 3              | 강우, 위치에너지 | $2.41 \times 10^{17}$ | J  | 10,488                   | $2.52 \times 10^{21}$ | $1.52 \times 10^9$    |
| 4              | 조석        | $2.54 \times 10^{17}$ | J  | 16,842                   | $4.28 \times 10^{21}$ | $2.58 \times 10^9$    |
| 5              | 강우, 화학에너지 | $2.65 \times 10^{18}$ | J  | 18,199                   | $4.82 \times 10^{22}$ | $2.90 \times 10^{10}$ |
| 6              | 파도        | $2.03 \times 10^{17}$ | J  | 30,550                   | $6.20 \times 10^{21}$ | $3.73 \times 10^9$    |
| 7              | 지질작용      | $9.94 \times 10^{16}$ | J  | 34,377                   | $3.42 \times 10^{21}$ | $2.06 \times 10^9$    |
| 국내의 재생가능 에너지생산 |           |                       |    |                          |                       |                       |
| 8              | 수력        | $2.18 \times 10^{16}$ | J  | 159,000                  | $3.47 \times 10^{21}$ | $2.09 \times 10^9$    |
| 9              | 농업생산      | $2.57 \times 10^{17}$ | J  | 200,000                  | $5.15 \times 10^{22}$ | $3.10 \times 10^{10}$ |
| 10             | 축산업생산     | $1.97 \times 10^{16}$ | J  | 2,000,000                | $3.94 \times 10^{22}$ | $2.37 \times 10^{10}$ |
| 11             | 어업생산      | $7.10 \times 10^{15}$ | J  | 2,000,000                | $1.42 \times 10^{22}$ | $8.55 \times 10^9$    |
| 12             | 연료목재생산    | $2.28 \times 10^{15}$ | J  | 34,900                   | $7.94 \times 10^{19}$ | $4.79 \times 10^7$    |
| 13             | 임업생산      | $6.27 \times 10^{16}$ | J  | 34,900                   | $2.19 \times 10^{21}$ | $1.32 \times 10^9$    |
| 국내의 재생불가능 자원   |           |                       |    |                          |                       |                       |
| 14             | 석탄        | $1.22 \times 10^{17}$ | J  | 40,000                   | $4.87 \times 10^{21}$ | $2.93 \times 10^9$    |
| 15             | 금속광물      | $4.15 \times 10^{11}$ | g  | $8.55 \times 10^8$       | $3.55 \times 10^{20}$ | $2.14 \times 10^8$    |
| 16             | 산업광물      | $8.46 \times 10^{13}$ | g  | $1.00 \times 10^9$       | $8.46 \times 10^{22}$ | $5.10 \times 10^{10}$ |
| 17             | 토양        | $1.90 \times 10^{16}$ | J  | 74,000                   | $1.40 \times 10^{21}$ | $8.45 \times 10^8$    |
| 수 입            |           |                       |    |                          |                       |                       |
| 18             | 석탄        | $1.51 \times 10^{18}$ | J  | 40,000                   | $6.06 \times 10^{22}$ | $3.65 \times 10^{10}$ |
| 19             | 원유        | $5.49 \times 10^{18}$ | J  | 53,000                   | $2.91 \times 10^{23}$ | $1.75 \times 10^{11}$ |
| 20             | 석유제품      | $1.20 \times 10^{18}$ | J  | 66,000                   | $7.95 \times 10^{22}$ | $4.79 \times 10^{10}$ |
| 21             | 금속광물      | $3.86 \times 10^{13}$ | g  | $1.00 \times 10^9$       | $3.86 \times 10^{22}$ | $2.32 \times 10^{10}$ |
| 22             | 산업광물      | $3.20 \times 10^{14}$ | g  | $1.00 \times 10^9$       | $3.20 \times 10^{23}$ | $1.93 \times 10^{11}$ |
| 23             | 천연가스      | $6.90 \times 10^{17}$ | J  | 48,000                   | $3.31 \times 10^{22}$ | $1.99 \times 10^{10}$ |
| 24             | 재화와 용역    | $9.37 \times 10^{10}$ | \$ | $1.24 \times 10^{12}$    | $1.16 \times 10^{23}$ | $7.00 \times 10^{10}$ |
| 수 출            |           |                       |    |                          |                       |                       |
| 25             | 재화와 용역    | $1.44 \times 10^{11}$ | \$ | $2.67 \times 10^{12}$    | $3.83 \times 10^{23}$ | $2.31 \times 10^{11}$ |

주 : 1) 태양에너지변환도 자료는 기존의 에머지 평가결과(Odum, 1996)를 이용하였음.

2) 자세한 계산과정은 〈부록 2〉를 참조.

다른 나라에서 들어오는 에머지는 대부분 연료와 원료물질로 구성되어 있는데, 산업광물의 에머지 흐름이 가장 컸다. 산업광물은 <표 3-3>에 제시한 외부 에머지원과 내부 에머지원 중에서 에머지 기여도가 가장 큰 항목이다. 원유, 재화와 용역도 에머지 기여도가 높은 항목이었다.

<표 3-3>에서 계산한 우리나라 경제의 에머지 흐름을 <그림 3-3>에 요약하여 제시하였다. <그림 3-3a>는 우리나라로 들어오는 에머지 흐름을 외국에서 수입한 연료와 광물(F), 재화와 용역(P2I), 재생가능한 에너지원(R), 우리나라에서 생산한 재생불가능한 에너지원(N)의 4가지로 요약한 그림이다. <그림 3-3b>는 <그림 3-3a>의 다이어그램을 좀 더 단순하게 만든 형태로, 외부에서 유입하는 에머지를 우리나라 내부에서 공급된 에머지 흐름(R과 N), 다른 나라에서 구입한 에머지 흐름(F와 P2I), 수출(P1E) 세 가지로 요약하였다. <그림 3-3>의 자료를 <표 3-4>에 정리하였다.

주요 에머지 흐름에 대한 평가 결과는 우리나라 경제활동의 일반적 특징을 파악하는데 도움을 준다. 우리나라에서 1999년 일 년 동안 사용한 에머지 대부분은 수입을 통해 들어온 것이었는데, 이는 우리나라 경제체제가 무역중심임을 의미한다.

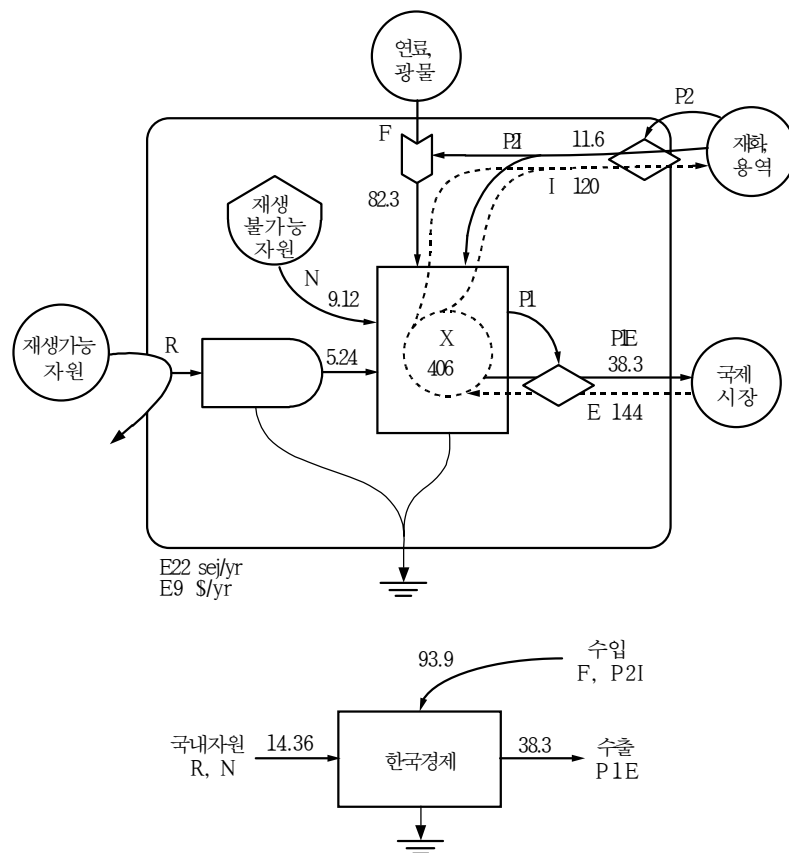
### (3) 에머지지수

<표 3-4>의 자료를 이용하여 우리나라 경제의 에머지 지수를 <표 3-5>에 제시하였다. 우리나라의 에머지-화폐비율은  $2.67 \times 10^{12}$  sej/\$로 세계 평균  $1.10 \times 10^{12}$  sej/\$(Brown and Ulgiati, 1999)보다 높았으며, 선진국의 에머지-화폐비율에 근접하였다.

우리나라 경제가 1999년에 사용한 총 에머지량은  $2.67 \times 10^{12}$  sej/yr이다. 이 중 우리나라 내부의 에머지원(그림 3-3a에서 R과 N)이 공급한 양은 13%에 불과하며, 대부분의 에머지(총에머지 사용량의 87%)가 다른 나라에서 들어왔다. 총에머지 사용량에서 내부의 에머지원이 공급한 비율은 에머지 관점에서 한 나라 경제의 자급자족 정도를 나타낸다. 총 에머지 사용량의 13%만 내부에서 공급된 우리나라 경제는 외부 의존적 경제라고 할 수 있다. 이를 다른 나라와 비교해 보면, 일본과 대만 경제는 연간 에머지 사용량의 31%와 24%를 국내에

서 조달하였으며, 미국은 연간 총 에머지 사용량의 77%, 중국은 98%를 자체 조달하였다(Odum, 1996). 일반적으로 나라의 크기가 클수록 에머지 자급자족률이 높아진다.

〈그림 3-3〉 한국경제에 대한 에머지 평가의 요약 다이어그램<sup>38)</sup>



38) 에머지 흐름의 단위는  $10E22$  sej/yr이며, 화폐 흐름의 단위는  $10E12$  ₩/yr임. 그림에 표시한 영문자는 <표 3-4>에서 제시한 것과 동일함.

〈표 3-4〉

한국의 1999년 에머지 흐름 요약

| 항목  |                         | 에머지 흐름                |
|-----|-------------------------|-----------------------|
| R   | 재생가능에너지원, sej/yr        | $5.24 \times 10^{22}$ |
| N   | 국내의 재생불가능한 에너지원, sej/yr | $9.12 \times 10^{22}$ |
| F   | 수입한 광물과 연료, sej/yr      | $8.23 \times 10^{23}$ |
| P2I | 수입한 재화와 용역, sej/yr      | $1.16 \times 10^{23}$ |
| I   | 수입금액, \$/yr             | $1.20 \times 10^{11}$ |
| E   | 수출금액, \$/yr             | $1.44 \times 10^{11}$ |
| P1E | 수출한 재화와 용역, sej/yr      | $3.83 \times 10^{23}$ |
| X   | 국내총생산, \$/yr            | $4.06 \times 10^{11}$ |
| P2  | 수입품의 에머지-화폐 비율, sej/\$  | $1.24 \times 10^{12}$ |
| P1  | 우리나라의 에머지-화폐 비율, sej/\$ | $2.67 \times 10^{12}$ |

우리나라의 1999년 에머지교환비율은 2.45로, 재화와 용역의 수출로 우리나라에서 빠져나간 에머지량보다 수입을 통해 우리나라로 들어온 에머지량이 더 많아 에머지 교역수지가 흑자를 기록하였다. 이는 화폐로 나타낸 우리나라의 1999년 무역수지 흑자(1.2배)보다 더 높은 값이었다. Brown and McClanahan (1996)은 수입 에머지가 수출 에머지보다 큰 나라를 소비자 국가, 이와 반대인 나라를 생산자 국가로 구분하였는데, 이 구분에 따르면 우리나라는 소비자 국가에 해당한다.

우리나라 경제의 단위면적당 연간 에머지 사용량은  $1.09 \times 10^{13}$  sej/m<sup>2</sup>/yr로 아주 높아 Odum(1996)의 구분에 따르면 도시형 국가에 속하였다. 단위면적당 에머지 사용량은 일반적으로 저개발국가와 면적이 넓은 나라에서 적게 나타난다. 높은 단위면적당 에머지 사용량은 국토는 좁고 인구밀도가 높은 상태에서 많은 양의 에머지를 교역을 통한 수입에 의존하는 우리나라의 상황을 반영하는 것으로 보인다.

일인당 연간 에머지 사용량은 지역이나 국가의 생활수준을 나타내는데, 우리나라 국민 한 사람이 1999년에 사용한 에머지량은  $2.32 \times 10^{16}$  sej/person/yr

이었다. 이는 1995년 세계 평균<sup>39)</sup>인  $0.53 \times 10^{16}$  sej/person/yr보다 4배 정도 높았으며, 선진국 수준에 근접하였다.

〈표 3-5〉 한국의 1999년 에머지 지수

| 항목   |              | 값                     |
|--|--------------|-----------------------|
| 재생가능 에머지 흐름  | R            | $5.24 \times 10^{22}$ |
| 국내의 재생불가능한 에머지 흐름                                    | N            | $9.12 \times 10^{22}$ |
| 수입한 에머지 흐름   | F+P2I        | $9.39 \times 10^{23}$ |
| 총 에머지 흐름   | R+N+F+P2I    | $1.08 \times 10^{24}$ |
| 총 에머지 사용   | U=N+R+F+P2I  | $1.08 \times 10^{24}$ |
| 수출한 에머지 흐름   | P1E          | $3.87 \times 10^{23}$ |
| 총 에머지 사용량 중 국내의 에머지원 비율                              | (N+R)/U      | 0.13                  |
| 수입 - 수출  | (F+P2I)-P1E  | $5.52 \times 10^{23}$ |
| 수입/수출 에머지 비율   | (F+P2I)/P1E  | 2.45                  |
| 총 에머지 사용량 중 재생가능 에머지 비율                              | R/U          | 0.05                  |
| 총 에머지 사용량 중 수입된 에머지 비율                               | (F+P2I)/U    | 0.87                  |
| 단위면적당 에머지 사용( $9.94 \times 10^{10}$ m <sup>2</sup> ) | U/(면적)       | $1.09 \times 10^{13}$ |
| 일인당 에머지 사용(4,660만명)                                  | U/(인구수)      | $2.31 \times 10^{16}$ |
| 재생가능 에머지에 기초한 인구수용력                                  | (R/U)*(인구수)  | $2.27 \times 10^{16}$ |
| 선진국수준 발전 가정 인구수용력                                    | 8(R/U)*(인구수) | $1.81 \times 10^{17}$ |
| 에머지-화폐 비율(sej/\$)                                    | P1=U/GNP     | $2.67 \times 10^{12}$ |
| 환경부하비율(ELR)  | (N+F+P2I)/R  | 19.65                 |
| 에머지산출비율(EYR)   | U/(F+P2I)    | 1.15                  |
| 지속가능성지수(SI)  | EYR/ELR      | 0.06                  |

우리나라의 자연환경이 공급하는 재생가능한 에너지(R)가 수용할 수 있는 인구는 약 226만명으로, 1999년 현재 우리나라 인구(4,690만)의 4.8%에 불과하였다. 우리나라 경제가 선진국 수준으로 발전한다고 가정할 경우 인구수용

39) Brown and Ulgiati(1999)의 자료를 이용하여 계산한 값임.

력은 1,810만명으로 전체 인구의 38.8%에 해당하였다. 따라서 우리나라의 현재 인구는 자연 환경이 부양할 수 있는 수준을 훨씬 초과하였다는 것을 알 수 있다.

인간의 사회경제활동이 자연환경에 미치는 영향을 나타내는 환경부하비율은 19.65로, 우리나라 경제가 환경에 주는 부하가 아주 높다는 것을 알 수 있다. 에머지 지속가능성지수(ESI)는 0.06에 불과하여 현재 우리나라의 사회경제활동이 지속가능하지 않음을 알 수 있다.

## 2) 사례지역 갯벌 에머지평가

### (1) 에너지시스템 다이어그램

〈그림 3-4〉는 영산강 4단계 사업지역 갯벌생태계의 에너지시스템 다이어그램이다. 다이어그램의 경계는 영산강 4단계 간척사업의 대상이었던 갯벌과 주변 해역 33,560ha로 설정하였다(그림 3-1). 〈그림 3-4〉는 외부 에너지원으로 태양, 바람, 조석, 강우, 조류(birds), 재화와 용역을 나타내었다. 갯벌생태계의 내부 구성요소는 식물플랑크톤, 저서규조류, 패류, 어류와 같은 생물성분이 외에도 유기물과 물을 포함하고 있다. 갯벌에서 이루어지는 어업활동을 통해 수산물이 시장에 공급된다.

시스템 내부의 주요 일차 생산자인 식물 플랑크톤, 저서 규조류, 습지식물이 생산한 유기물은 조개류와 같은 부유물 식자(suspension feeder)가 섭취하는 경로와 유기쇄설물(detritus)을 거쳐 먹이 사슬의 상위 단계로 이동하는 경로인 두 가지로 나누어 표현하였다. 플랑크톤과 어류가 조석을 따라 갯벌 생태계로 들어오거나 빠져나가는 것은 양쪽 끝에 화살표가 없는 선이나 반대 방향인 두 경로를 동시에 사용하여 나타내었다. 조류의 이동 또한 같은 방식으로 표현하였다.

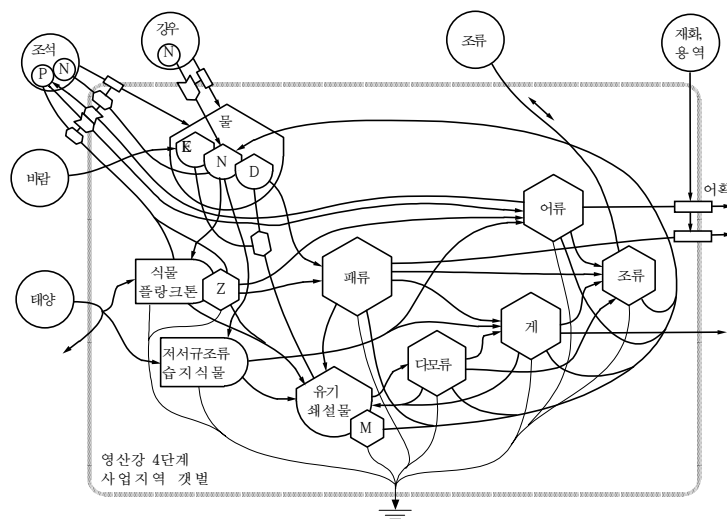
### (2) 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 Emvalue

영산강 4단계 사업지역 갯벌의 자연환경에 대한 에머지 평가결과는 〈표

3-6>에 제시하였다. 이 연구에서는 자연상태의 갯벌이 순수하게 우리나라 경제에 기여하는 부분만을 평가하기 위하여 <그림 3-4>에 제시한 다이어그램의 오른쪽에 배치한, 갯벌과 주변해역을 대상으로 한 사회경제활동은 포함하지 않았다. 1999년에 이 지역 갯벌로 유입한 자연환경 에머지 총량은 연간  $5.80 \times 10^{20}$  sej/yr로, 이 중 강우에 의한 에머지 유입이 72.7%( $4.22 \times 10^{20}$  sej/yr)로 가장 많은 양을 차지하였다. 조석에너지에 의한 에머지 유입량은  $4.22 \times 10^{20}$  sej/yr로, 전체 유입량의 27.3%를 차지하였다.

영산강 4단계 사업지역 갯벌로 유입하는 에머지 총량을 계산하는 과정에서 중복 계산을 피하기 위하여, 태양, 바람, 강우 중 에머지 유입량이 가장 큰 강우 에머지만 포함하였다. 즉 영산강 4단계 사업지역 갯벌로 유입한 총 에머지량은 강우와 조석의 에머지를 더한 값으로 계산하였다.

<그림 3-4> 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 에너지시스템 다이어그램



(KE = 운동에너지 : N = 영양염류 : M = 미생물 : D = 유기쇄설물 :  
P = 시스템 외부의 플랑크톤 개체군 : Z = 동물플랑크톤)

영산강 4단계 사업지역 갯벌의 emvalue는 <표 3-6>에 제시한 각 유입에너지의 에머지량을 <표 3-5>에서 계산한 에머지-화폐 비율인  $2.67 \times 10^{12}$  sej/\$로 나누어 계산하였다. 이 결과에 따르면, 영산강 4단계 간척사업의 대상이었던 33,600ha의 갯벌이 우리 경제에 기여하는 바는 연간 2억 1,700만 Em\$(2,490억 Em₩)로 나타났다. 이를 단위면적(ha)으로 환산하면 약 6,475 Em\$(742만 Em₩)에 해당한다. 에머지 측면에서 가장 큰 에머지 기여율을 보인 경우는 연간 1억 5,800만 Em\$(1,810억 Em₩)의 가치를 보였다.

&lt;표 3-6&gt;

영산강 4단계 사업지역 갯벌의 에머지 평가

| 항 목       | 에너지                     | 에너지<br>변환도<br>(sej/J) | 에머지<br>(sej)          | Emdollar<br>(Em\$) |
|-----------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| 태양        | $1.15 \times 10^{18}$ J | 1                     | $1.15 \times 10^{18}$ | $4.30 \times 10^5$ |
| 바람        | $2.49 \times 10^{15}$ J | 1,496                 | $3.73 \times 10^{18}$ | $1.40 \times 10^6$ |
| 조석        | $9.40 \times 10^{15}$ J | 16,842                | $1.58 \times 10^{20}$ | $5.93 \times 10^7$ |
| 강우, 화학에너지 | $2.32 \times 10^{16}$ J | 18,199                | $4.22 \times 10^{20}$ | $1.58 \times 10^8$ |
| 합 계       |                         |                       | $5.80 \times 10^{20}$ | $2.17 \times 10^8$ |

주 : 1) 에너지변환도는 Odum(1996)의 자료를 이용하였음.

2) 자세한 계산과정은 <부록 2> 참조

### (3) 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 기능별 에머지 가치

앞에서 수행한 에머지 평가결과는 영산강 4단계 사업지역 갯벌로 유입하는 자연환경의 에머지를 이용하여 계산하였기 때문에 갯벌생태계 내부의 기능에 대해 평가한 한국산업경제연구원(1998)과 해양수산부(2000)의 연구결과와 직접 비교하기는 힘들다. 따라서 두 연구에서 영산강 4단계 갯벌의 연간 기여가치를 평가하기 위하여 사용한 갯벌의 기능에 대해 에머지 평가를 수행하였다(표 3-7).

영산강 4단계 사업지역 갯벌의 수산물생산가치를 계산하기 위해 사용한 수산물생산량과 수산물 생산비용은 한국산업경제연구원(1998)의 자료를 직접 이



용하거나 이를 이용하여 추정하였다. 수산물생산의 에머지 가치는 수산물생산량으로 구한 에머지 가치에서 수산물의 생산에 투입된 에머지 비용<sup>40)</sup>을 제외하여 구하였다. 오염정화가치는 새만금하구 갯벌에서 갯벌미생물에 의한 유기물 정화능력을 측정한 김종구 등(2001)의 연구결과를 이용하였다.

〈표 3-7〉 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 기능별 에머지 가치 평가

| 항 목   | 에너지                     | 에너지<br>변환도<br>(sej/J) | 에머지<br>(sej)          | Emdollar<br>(Em\$) |
|-------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| 수산물생산 |                         |                       | $1.61 \times 10^{16}$ | 6,045              |
| 생산량   | $1.23 \times 10^{10}$ J | $2.00 \times 10^6$    | $2.46 \times 10^{16}$ | 9,240              |
| 생산비용  |                         |                       | $8.53 \times 10^{15}$ | 3,195              |
| 수질정화  | $7.63 \times 10^{10}$ J | $1.10 \times 10^4$    | $8.39 \times 10^{14}$ | 315                |
| 보전가치  | ?                       | ?                     | ?                     | ?                  |
| 합 계   |                         |                       | $2.65 \times 10^{16}$ | 6,360              |

주 : 1) 에너지변환도는 Odum(1996)의 자료를 이용하였음.

2) 수산물생산

수산물 생산량 = 3.68 MT/ha/yr (한국산업경제연구원, 1998)

에너지(J) = (생산량)\*(1 E6 g/MT)\*(4 kcal/g)\*(4186 J/kcal)\*(0.20)  
=  $1.23 \times 10^{10}$  J/ha/yr

수산물 생산비용 = 366만원/ha/yr (한국산업경제연구원, 1998)  
=  $8.53 \times 10^{15}$  sej/ha/yr

수산물생산가치 = 수산물생산량 - 수산물 생산비용

3) 수질정화

유기물제거량 = 3,376 kg/ha/yr (김종구 등, 2001)

에너지 = (OM removal)\*(1,000g/kg)\*(5.4 kcal/g)\*(4,186 J/kcal)  
=  $7.63 \times 10^{10}$  J/ha/yr

40) 수산물 생산비용은 한국산업경제연구원(1998)이 정리한 자료를 이용하여 추정하였음. 수산물 생산에 드는 비용은 수산물 생산금액에서 순이익을 뺀 값으로 가정하고 각 어업형태별로 ha당 비용으로 환산하였음. 이 비용을 에머지/화폐 비율로 나눈 값이 수산물생산의 에머지 비용임.

에머지를 이용하여 계산한 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 수산물생산가치는 ha당 연간 6,045 Em\$(또는 692만 EmW)로 나타났다. 이 결과는 같은 자료를 사용한 한국산업경제연구원의 511만원/ha/yr(표 3-2)이나, 해양수산부(2000)의 575만원/ha/yr보다 높은 값이었다. 비록 수산물 생산비용에 대한 더 정확한 자료를 바탕으로 이 연구의 에머지가치 계산을 보완할 필요가 있지만, 자연환경의 재화와 서비스를 포함하는 에머지 평가가 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 수산물 생산가치를 더 높게 평가하였다.

김종구 등(2001)이 새만금 갯벌에 대해 조사한 자료를 이용하여 계산한 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 오염정화가치는 ha당 연간 36만원으로 나타났다. 그러나, 이 값은 김종구 등(2001)이 생물활동이 활발한 여름(8월)에 측정한 자료를 단순히 생물활동이 낮은 겨울까지 확대하여 계산한 결과이기 때문에, 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 오염정화가치를 과대 평가한 것으로 보인다. 또한 앞에서도 언급하였듯이 갯벌생태계에 의한 유기물 분해는 영양염류를 방출하기 때문에 완전한 오염정화라고 할 수 없다. 따라서 갯벌의 오염정화가치를 산정할 때는 각 갯벌에 대해 일년 평균 유기물 제거율과 영양염류의 방출에 대한 자료를 확보해야 한다.

한국산업경제연구원과 해양수산부가 사용한 Odum의 자료(21.7 kg/day)를 이용할 경우 수질정화가치는 78만원/ha/yr으로 나타났다. 이는 해양수산부(2000)의 103만원/ha/yr이나 한국산업경제연구원(1998)의 383만원에 훨씬 낮은 값이다. 그러나 이러한 차이는 에머지 평가법과 경제학 평가방법 사이의 근본적인 차이를 반영하는 것으로 볼 수 있다. 즉, 해양수산부(2000)와 한국산업경제연구원(1998)이 계산한 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 오염정화가치는 동일한 양의 유기물을 제거하는데 필요한 하수처리비용에 해당한다. 이렇게 계산된 오염정화가치는 에너지변환도가 아주 높은 인간의 서비스를 포함하고 있기 때문에, 에너지변환 계층구조의 낮은 단계에 속하는 미생물의 유기물 분해 과정에 대해 직접 평가한 에머지 결과와 큰 차이가 있을 수 밖에 없다.

갯벌의 기능별 에머지 가치 계산은 중복계산(double counting) 문제를 내포하고 있다. 즉, 수산물생산과 오염정화 기능은 영산강 4단계 사업지역 갯벌 생태계의 네트워크를 통해 밀접하게 연결되어 있기 때문에 외부에서 들어오는

에머지가 이 두 과정에 모두 유입한다. 그러므로 이들 기능별 에머지 가치를 계산한 후 더하는 것은 중복계산을 유발한다. 따라서 각 기능별로 에머지 가치와 경제학 방법을 이용하여 평가한 가치를 비교하는 것은 의미 있는 일이지만, 합계를 비교하는 것은 에머지 방법론상 문제가 있는 것으로 판단된다.

그럼에도 불구하고 비교를 위해 에머지를 이용하여 계산한 영산강 4단계 사업지역 갯벌의 수산물생산가치와 오염정화가치를 더하면, ha당 연간 728만원<sup>41)</sup>이 되어 한국산업경제연구원(1998)의 결과 중 Odum의 정화능력자료를 이용한 경우를 제외하고는 심미가치나 보전가치까지 합한 한국산업경제연구원이나 해양수산부의 결과보다 높았다.

그러나 이 연구에서는 한국산업경제연구원(1998)의 심미가치나 해양수산부(2000)의 보전가치에 해당하는 에머지 가치를 평가하지 못했다. 이는 아직 에머지 개념에서 생태계의 보전가치나 심미가치를 평가하기 위한 기법이 정립되어 있지 않기 때문이다. 그러나 갯벌의 심미가치나 보전가치는 갯벌생태계의 구조와 기능이 크게 훼손되지 않고 온전히 유지될 때 가능한 가치이다. 또한 이러한 구조와 기능의 유지는 영산강 4단계 사업지역 갯벌로 들어오는 모든 에너지와 갯벌 구성원이 유기적인 상호작용을 할 때에만 가능하다는 점에서 갯벌의 보전가치나 심미가치는 갯벌로 유입하는 에머지를 모두 더한 값으로 볼 수도 있다. 경제학 방법을 이용한 연구와 마찬가지로 에머지를 이용한 연구에서도 갯벌의 심미가치나 보전가치는 0보다 클 것이기 때문에 영산강 4단계 갯벌의 수산물생산가치, 오염정화가치, 보전가치(또는 심미가치)를 더한 에머지 가치는 경제학 방법에 의한 평가결과보다 갯벌 가치보다 높게 나타날 것으로 판단된다.

---

41) Odum의 자료를 이용할 경우 오염정화가치가 ha당 연간 78만원이 되며, 따라서 수산물생산가치와 정화가치를 더한 값은 770만원/ha/yr가 됨.

## 제 4 장 에머지 개념의 해양 자원 · 환경관리 작용 방향

지금까지 제2장에서 에머지 개념과 평가방법을 소개하고, 제3장에서 사례지역으로 영산강 4단계 간척사업지역 갯벌을 선정하여 이 갯벌이 우리나라 경제에 기여하는 에머지가치를 평가하였다. 앞에서도 지적하였듯이 에머지 평가법과 경제학 방법은 자원의 가치를 평가하는데 서로 다른 방향에서 접근하기 때문에 두 방법의 통합은 힘들 것으로 보인다. 그러나 에머지 평가방법을 기존의 경제학 방법과 병행하여 사용할 경우 경제학과 생태학의 관점에서 해양 자원과 환경을 관리하기 위한 서로 다른 정책 시사점을 얻을 수 있으며, 이를 우리나라 해양 환경과 자원의 지속가능성을 높이기 위한 정책 개발과 이행에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 에머지 평가법은 시스템 접근방법이기 때문에 이 연구의 결과는 육상환경과 자원의 관리에도 그대로 적용할 수 있다.

이 장에서는 앞에서 소개한 에머지 개념과 평가법을 연안자원과 환경을 관리하는데 어떻게 활용될 수 있을지 사례를 들어 설명하고자 한다. 에머지 개념을 해양자원·환경관리에 활용할 수 있는 분야는 크게 생태계 가치평가, 편익/비용평가, 환경수용력평가, 대안평가의 4가지로 구분할 수 있다.

### 1. 생태계 가치평가

에머지 개념을 이용한 환경자원의 가치평가는 제3장에서 사례지역으로 선택한 영산강 4단계 사업지역 갯벌을 대상으로 제시하였다. 이러한 생태계의 기여가치평가는 대상 생태계의 이용과 보전에 관한 정책을 수립하는데 활용할 수 있을 것이다. 즉, 에머지 가치가 높은 생태계는 보전을 중심으로 관리하도록 하고, 에머지 가치가 낮은 생태계는 생태계의 구조와 기능을 지나치게 훼손하지 않는 범위에서 다양한 이용행위를 허용하도록 한다. 에머지 선행연구에

대한 분석에서도 살펴보았듯이 아직까지 에머지 개념을 이용하여 생태계 가치를 평가한 사례는 그리 많지 않다.

여기에서는 에머지 개념을 이용하여 가치평가를 수행하고 정책방향을 제시한 외국 사례로, 홍콩의 Mai Po 홍수림을 평가한 Qin et al.(2000)의 연구와 공유수면 무단점용에 관한 재판과정에서 공유수면의 가치를 평가하여 제시한 사례(Odum, 1998)를 소개하고자 한다.

### 1) Mai Po 홍수림 사례

Qin et al.(2000)은 홍콩의 보전지역인 Mai Po 홍수림이 지역사회에 기여하는 생태적·경제적 편익과 교육기능을 에머지를 이용하여 평가하였다. Mai Po 보전지역은 홍콩의 서부에 있으며, 총면적은 3.8km<sup>2</sup>(수역 2.5km<sup>2</sup>, 홍수림 1.3 km<sup>2</sup>)이고 평균 깊이는 3m이다. 이 보전지역에는 자연서식지와 인공서식지를 포함하여 여러 가지 종류의 서식지가 있는데, 인공서식지는 새우양식을 위한 사각형의 호수로 평균 면적은 0.1km<sup>2</sup>이다. 또한 홍수림 보전지역은 철새들이 먹이 섭취, 서식, 성장, 산란, 중간기착지로 이용하고 있어 기초적인 먹이사슬 관계가 형성되어 있는 것으로 판단된다.

홍수림 보전지역이 기여하는 생태적·경제적 편익의 평가에는 재생가능에너지, 재생불가능 에너지, 총 일차생산(GPP), 관리비용과 관광수입, 어업생산량 자료가 사용되었다. 이들 자료를 이용하여 계산한 에머지 지수는 <표 4-1>과 같다. 홍수림보전지역의 에머지 투자비율(EIR), 환경부하비율(ELR), 에머지 산출비율(EYR)은 각각 0.48, 1.03, 3.10으로 나타났다(Qin et al., 2000). 이 지수에 따르면 Mai Po 홍수림 보전지역의 에머지 산출비율은 6보다 낮아 일차 에너지원으로는 경제적이다 할 수 있고, 환경부하비율은 3보다 현저히 낮아 환경에 대한 영향이 매우 적은 시스템이라 할 수 있다. Qin et al.(2000)은 이를 미국의 대표적인 습지인 플로리다 에버글레이즈(Everglades) 국립공원의 에머지 지수와 비교하였는데, 개발 밀도는 에버글레이즈에 비해 낮았지만, 환경부하비율과 경제기여도는 높았다.

이러한 연구결과를 토대로 Qin et al.(2000)은 홍콩의 사회경제 여건과 장기변화 전망을 종합하여 검토한 결과, Mai Po 홍수림 보전지역에 대한 개발 압력과 환경부하를 낮은 수준에서 유지하기는 어려울 것으로 판단되므로, 법제도를 개정하여 Mai Po의 육지부 개발을 제한하고 환경부하를 줄이는 방향으로 정책을 시행하는 것이 필요하다고 제안하였다.

〈표 4-1〉

Mai Po 홍수림 보전지역 애머지 지수

| 구분 | 지 수       |                | 애머지 흐름                                   |
|----|-----------|----------------|--|
| 1  | 재생가능애머지   | R              | $12.98 \times 10^{17}$ sej/yr            |
| 2  | 재생불가능 애머지 | N              | $4.91 \times 10^{17}$ sej/yr             |
| 3  | 투자에머지     | F              | $8.50 \times 10^{17}$ sej/yr             |
| 4  | 총 애머지     | $I=R+N+F$      | $26.39 \times 10^{17}$ sej/yr            |
| 5  | 총 환경애머지   | $E=R+N$        | $17.89 \times 10^{17}$ sej/yr            |
| 6  | 애머지투자비율   | $IR=F/E$       | 0.48                                     |
| 7  | 환경부하비율    | $ELR=(F+N)/R$  | 1.03                                     |
| 8  | 애머지산출비율   | $YR=(R+N+F)/F$ | 3.10                                     |
| 9  | 애머지밀도     | 애머지/면적         | $6.94 \times 10^{11}$ sej/m <sup>2</sup> |
| 10 | 애머지/화폐비율  | 애머지/GDP(1988)  | $1.02 \times 10^{12}$ sej/US\$           |

자료 : Qin et al.(2000).

## 2) 미국 플로리다 공유수면 무단 점용 재판 사례

우리나라 공유수면관리법은 공유수면을 점용하거나 사용할 경우 이에 대한 비용을 국가에 지불하도록 규정하고 있는데, 연안환경이 훼손되고 환경수용력이 감소함에 따라 연안자원이용의 공간적, 내용적 범위가 줄어들고 있다. 이에 따라 공유수면의 가치는 과거에 비해 높아질 것으로 판단되며, 공유수면 중 보호가치가 높은 자연자원과 생태계가 훼손될 경우 이에 대해서는 일반 공유수면에 대해 부과하는 수준의 점·사용료가 아닌 환경·생태계 가치를 충분히

고려한 높은 수준의 점·사용료를 부과할 필요가 있다.

플로리다 주정부는 84ha의 홍수림을 불법으로 훼손한 사람을 상대로 소송을 제기하였는데, 이 사람에 대해 부과할 점·사용료를 산정하기 위한 방법의 하나로 에머지 평가법을 활용하였다. 홍수림 훼손에 대해 어류와 홍수림 목재에 대한 시장가치만을 기준으로 부과금을 산정할 경우 부과금은 수천 달러에 불과하였지만, 에머지를 이용하였을 때는 부과금이 250만달러로 늘어났다(Odum, 1998 : 표 4-2). 이 소송은 결국 홍수림을 무단 점용한 사람이 법정 밖에서 주정부와 벌금액수에 합의함으로써 일단락되었지만, 에머지 개념이 생태계의 훼손과 관련하여 법정 증언에 이용된 첫 사례였다. 이 사례는 상당히 느슨한 관리체계를 갖고 있는 우리나라의 공유수면 관리제도가 해양환경과 자원을 보다 효과적으로 보전하면서 최대의 부가가치를 생산할 수 있는 체계적인 관리체제로 변화할 필요가 있음을 시사한다.

〈표 4-2〉

플로리다주 홍수림의 연간 이용 에머지

| 구 분      | 에너지<br>(J/yr) | 태양에너지<br>변환도<br>(sej/J) | 이용가치 (1,000 Em\$) |                       |
|----------|---------------|-------------------------|-------------------|-----------------------|
|          |               |                         | 환경기여              | 환경기여 +<br>경제분야 에너지 유입 |
| 1. 조류 교환 | 3.0E12        | 2.9E4                   | 55                | 440                   |
| 2. 담수 유입 | 5.5E12        | 4.9E4                   | 207               | 1,652                 |
| 3. 강우 이용 | 4.2E12        | 1.8E4                   | 558               | 464                   |
| 총 계      |               |                         | 320               | 2,556                 |

자료 : Odum(1998)에서 정리.

## 2. 에머지 편익/비용평가

현재 우리가 누리고 있는 생활 수준을 유지하기 위해서는 자연 환경의 개발을 피할 수 없다. 그러나 지금까지 개발에 따른 편익-비용 평가는 주로 경제적인 측면에만 치우쳐 개발이 가져오게 될 환경의 변화를 충분히 고려하지 않

았으며, 이러한 변화가 비용-편익 평가에 포함되었더라도 정성적인 측면만을 다루었다. 에머지 평가는 시장경제의 가격 시스템에서 돈으로 쉽게 환산할 수 없는 자연 환경과 자원들을 에너지 관점에서 분석함으로써 개발에 따른 이익과 손실을 평가하는데 정량적인 도구를 제공한다.

개발사업의 편익/비용평가는 사업의 추진여부를 결정하는 주요 수단으로 사용되었다. 일반적으로 개발을 통해 얻는 편익이 환경비용보다 크면(즉, 편익/비용비가 1보다 크면) 개발사업의 추진은 정당화되었다. 지금까지 우리나라에서 이루어진 개발사업에 대한 편익/비용분석은 전통적인 경제학 방법을 이용하였다. 그러나 같은 개발사업에 대해서 연구자마다 편익/비용분석 결과가 달라 혼란을 초래하는 경우가 많았다. 특히 대규모 개발사업의 경우 개발찬성론자와 환경보호론자의 연구결과는 차이가 컸는데, 대표적 예로 계획이 취소된 동강댐, 법원의 판결로 사업이 잠정 중단된 새만금 사업을 들 수 있다.

에머지 개념을 이용한 편익/비용 평가는 경제학 방법을 이용한 편익/비용 평가와 마찬가지로 개발사업을 통해 얻게 될 편익과 개발로 인해 사라질 생태계서비스와 건설·유지 비용을 계산하고, 이를 비교함으로써 이루어진다. 다만 편익과 비용을 화폐가 아니라 에머지 단위로 나타낸다는 점이 다를 뿐이다. 지금까지 국내외에서 에머지 개념을 이용하여 개발사업의 편익/비용 평가를 수행한 예는 많지 않으며, 대부분 댐 건설 계획에 대한 연구였다(Brown, 1982 : Brown and McClanahan, 1996 : Kang and Park, 2002). 최근 시화호 주변 공간이용계획에 포함된 조력발전소 건설계획과 논란이 되고 있는 경인운하 건설사업은 에머지 개념을 이용한 편익/비용 평가의 훌륭한 대상으로 판단된다.

에머지 편익/비용평가는 개발사업의 비용효과성을 평가할 뿐만 아니라 추진된 정책의 이행을 평가하는데도 사용할 수 있다. 정책 이행평가는 정책추진에 들어가는 비용과 이러한 정책의 시행으로 얻게 될 편익을 비교하여 편익이 비용을 초과하게 되면, 이는 정책이 올바른 방향과 수단을 통해 이행되었음을 나타낸다.

여기에서는 미국 미시시피강 삼각주 수로 분화 사업의 에머지 편익/비용분석을 이용하여 에머지 개념을 어떻게 편익/비용평가에 활용할 수 있는지 소개하였다.



## 1) 사업 배경과 개요

미국 미시시피강의 물길을 돌리는 하천사업의 편익-비용 평가에 에머지 개념을 활용한 이 사례는 환경복원을 목적으로 하는 수로분화(diversions of river water) 사업이 생태적·경제적 관점에서 어느 정도 편익이 있는 지 평가하는데 아주 유용한 수단임을 보여준다.

미시시피강 삼각주는 지난 7,000년 동안 진행된 범람과 퇴적작용으로 형성된 지역이다. 그러나 최근 200년 동안 제방 축조 사업, 항로 건설 사업, 방조제 건설 사업과 같은 사회경제활동으로 하구지역의 환경과 생태계가 훼손되고 (Day et al., 1997)<sup>42)</sup>, 하구역의 육지부 면적이 급속도로 줄어들었다(Reed, 1995).<sup>43)</sup> 이러한 문제를 해결하기 위해 추진한 사업이 수로분화사업이었다. 모두 1,270만 달러를 투자한 이 사업은 연안지역의 환경 질을 개선하고, 영양염류를 공급함으로써 하구생태계의 생산력을 높이고, 하구역 육지부의 토지손실을 줄일 수 있다는 점에서 환경복원사업이라 할 수 있다.

이 지역의 일차생산력과 수산업 생산량은 매우 높은 상관관계를 가지고 있는 것으로 알려져 있어(Nixon, 1988) 영양염류를 공급하여 일차생산력을 높이는 것은 이 지역의 수산업 생산량 증가에 기여할 것으로 판단된다. 특히 이 지역의 수산업과 습지관련 사회경제활동이 지역경제에 기여하는 정도가 각각 10억 달러에 달하고 있다는 사실(Day et al., 1997)은 이 수로분화사업이 경제적·생태적으로 아주 중요한 사업임을 나타낸다.

미시시피강 삼각주 수로분화사업의 주요 내용을 요약하면 <표 4-3>과 같다.

42) 미시시피강 삼각주에 있는 Barataria 하구역과 Terrebonne지역의 총일차순생산은 지난 30년 동안 26%나 감소한 것으로 나타났다(Day et al., 1997).

43) 미시시피강 삼각주에 있는 Barataria 하구역의 육지부 면적은 매년 평균 25km<sup>2</sup>씩 줄어들고 있는 것으로 나타났다.

〈표 4-3〉

미시시피강 삼각주 수로분화사업

| 지역                                       | 사업면적<br>(km <sup>2</sup> ) | 토지확보<br>(km <sup>2</sup> /년) | 토지손실<br>(km <sup>2</sup> /년) | 하천유량<br>유입율<br>(%) | 총비용<br>(백만\$) | Emergy/\$ 비율<br>(1×10 <sup>12</sup> sej/\$) |
|--|----------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|---------------|---|
| Caernarvon<br>(Brenton Sound<br>Estuary) | 127                        | 1.29                         | 1.03                         | 1.6                | 23            | 2.00  |
| Davis pond<br>(Barataria Estuary)        | 1,158                      | —                            | —                            | 2.1                | 104           | 1.55  |

자료 : Martin(2002).

주 : 토지 확보는 수로분화사업을 통해 나타난 효과이며, 토지 손실은 이 사업이 시행되지 않을 때 지속되는 토지 손실을 의미함.

## 2) 애머지순산출량(NEY)을 활용한 편익-비용 분석 결과

수로분화사업의 편익-비용을 제대로 분석하기 위해서는 i) 영양염류 유입에 따른 일차생산력 상승(하구역과 외해)과 하구생태계 안정 효과, ii) 일차생산력 상승에 따른 수산물 생산량 증가효과, iii) 외해와 상호작용 증가로 인한 환경개선효과, iv) 퇴적작용에 따른 토지손실방지 효과, v) 사업시행으로 인한 재생가능에너지 증가효과와 같이 크게 4개 분야를 통합하여 편익과 비용을 분석해야 한다. 이 중 수산물 생산효과와 습지관련 사회경제활동 효과, 토지손실방지 효과는 화폐가치로 평가할 수 있다. 그러나 일차생산력 상승과 하구생태계 안정효과, 환경개선효과, 토지손실방지에 따른 생태계 부작용에 대해서는 현재의 경제학적 편익-비용 분석방법을 이용하여 추정하기에는 한계가 있다.

이에 따라 Martin(2002)은 수로분화사업에 들어간 비용과 이 사업으로 나타난 편익을 애머지를 이용하여 계산하였다. 애머지 편익-비용 분석을 위한 구성요소는 ▷ 재생가능에너지의 애머지, ▷ 수로분화사업에 들어간 애머지, ▷ 외부로 유출하는 애머지로 이루어졌다. 〈표 4-4〉는 미시시피 삼각주 수로분화사업의 애머지 평가결과를 나타낸다.

〈표 4-4〉

## 미시시피강 삼각주 수로분화사업 에머지 평가결과

단위 : 1018sej

| 구 분                   | Caernarvon |              | Davis Pond |              |
|-----------------------|------------|--------------|------------|--------------|
|                       | 사업을 할 경우   | 사업을 하지 않을 경우 | 사업을 할 경우   | 사업을 하지 않은 경우 |
| 재생가능에너지               | 341,012.04 | 2429.11      | 471,017.37 | 27,287.77    |
| 외부에머지 유입<br>(Imports) | 48.22      | 0.00         | 170.87     | 0.00         |
| 에머지 유출<br>(Exports)   | 15,055.84  | 13,456.0     | 138,830.00 | 136,870.00   |

자료 : Martin(2002)의 자료를 요약.

- 주 : 1) 재생가능에너지는 태양, 비(화학에너지), 하천 위치에너지, 바람에너지, 조류, 파도, 하천수 유입(외해, 하구역), 하천기인 퇴적물을 포함하고 있음. 이 중 사업을 하고 난 뒤에도 에머지 변화가 없는 항목은 화학에너지와 바람에너지이며, 사업이 이루어지지 않을 경우 에머지 손실이 나타나는 항목은 하천기인 퇴적물임.
- 2) 외부에머지 유입은 토지수용, 도로와 철도 위치 변경, 건설, 철강, 콘크리트, 하천 운영과 유지로 구성되어 있음.
- 3) 에머지 유출은 하구생산력 증가에 기여하는 대상시스템의 순일차생산과 수산물업 생산량이며, 이 중 가장 큰 편익은 수산업 생산량임.
- 4) 에머지평가 기간은 50년임.

최종 산물의 에머지를 외부에서 유입한 에머지로 나눈 에머지산출량을 실제 편익-비용 분석에 이용하기 위해서는 에머지순산출량으로 대체하는 것이 바람직하다. 하천수로분화사업에 대한 에머지순산출량을 기준으로 Martin(2002)이 계산한 에머지순산출비율(net emergy yield ratios)은 Caernarvon과 Davis Pond가 각각 33.2, 9.36으로 나타나 이 사업은 비용효과성이 아주 높은 것으로 나타났다. 유입에머지와 산출에머지만을 이용한 편익-비용 분석외에도, 수로분화사업으로 인해 증가하는 재생가능에너지의 에머지도 상당하여 이를 편익-비용 분석에 포함할 경우 Caernarvon지역의 편익/비용비율은 7,054.8로 높아진다.

따라서 미시시피 삼각주 수로분화사업에서 에머지를 활용한 편익-비용 분석 사례는 i) 시장에서 거래되는 화폐가치에 근거한 편익-비용 분석에서 제외되

는 재생가능에너지, 하구역과 외해의 일차생산력, 수산업 생산량의 증가효과를 보다 정량적으로 평가할 수 있었고, ii) 이를 토대로 환경복원사업과 같이 천연자원과 공간을 대상으로 한 사업의 실효성을 검증하는데 에머지가 유용한 도구가 될 수 있음을 보여주었다.

### 3. 환경수용력평가

개체군생태학에서 유래한 환경수용력이라는 용어는 ‘주어진 환경이 유지할 수 있는 어느 한 종의 개체군의 최대 개체수 또는 생물량’으로 정의된다. 그러나 환경수용력은 연구대상에 따라 다양하게 정의되고 있다.<sup>44)</sup> 임효혁 등(2003)은 해양환경수용력을 해양환경자원과 해양오염 두 가지로 나누어 해양환경자원의 생산성 측면에서는 “해양의 환경수용력을 주어진 해양환경 내에서 유지될 수 있는 최대 개체군수 또는 생물량”, 해양오염 측면에서는 “해역의 이용을 저해하지 않고 육상활동, 대기, 해양활동 등 오염원으로부터 유입될 수 있는 오염물질의 최대 유입부하량”으로 정의하였다. 임효혁 등(2003)은 연안구역관리체제에서 해양환경수용력을 이용한 의사결정과정의 중요성을 강조하면서 해양환경수용력 산정을 위한 모델을 개발할 필요가 있음을 주장하였다.

우리나라 에머지 선행연구에 대한 소개와 사례지역의 평가에서 나타났듯이 에머지 개념은 환경수용력을 평가할 수 있는 수단을 제공한다. 이들 연구에서는 국가 전체 또는 도시의 자연환경이 수용할 수 있는 인구수용력을 산정하였다. 그러나 에머지 개념은 사회경제활동을 지탱하기 위한 공간환경수용력의 계산에도 이용할 수 있다. 여기에서는 멕시코와 파푸아뉴기니 관광개발에 대해 에머지 개념을 이용하여 공간환경수용력을 평가한 사례를 소개한다. 이러한 사례는 우리나라 연안공간의 개발과 관련된 환경수용력의 평가에 직접 활용할 수 있다.

44) 인구에 대해 다룰 때는 환경수용력은 지구의 자연환경이 지탱할 수 있는 최대 인구가 되고, 관광지의 경우에는 생태계에 영향을 미치지 않고 이용할 수 있는 최대 관광객수로 정의됨.

## 1) 배경과 개요

연안지역 개발사업이 그 지역의 환경수용력 범위 안에서 이루어지도록 하기 위한 지침을 정량화된 수치로 제시하는 것은 ‘지속가능한 발전(sustainable development)’을 지역 단위에서 실행할 수 있는 정책기반이 될 수 있다. 이러한 환경수용력을 더 넓은 범위의 지역이나 국가, 여러 나라가 공유하고 있는 지역해에 적용할 경우 다양한 차원에서 지속가능한 발전을 실현하는데 유용한 정책도구로 활용할 수 있다.

Brown and Ulgiati(2001)는 멕시코와 파푸아뉴기니 연안에 있는 리조트를 대상으로 지역 개발과 관련한 투자가 이루어질 경우 이러한 개발 압력을 견딜 수 있는 수용력(carrying capacity)을 에머지를 이용하여 산정하였다. 이 연구자들이 제안한 수용력은 재생가능에너지의 에머지 수용력과 환경부하의 유지·증가 억제 개념이 통합된 형태이다. 에머지를 이용한 수용력 평가는 시설과 규모에서 큰 차이가 있는 두 개의 리조트를 대상으로 이루어졌다(표 4-5).

〈표 4-5〉

멕시코와 파푸아뉴기니 리조트 시설 비교

| 구분         | 객실수와<br>연 수용인원     | 위치             | 건축소재        | 에너지                       |
|------------|--------------------|----------------|-------------|---------------------------|
| 멕시코 리조트    | 침실 160개<br>37,584명 | 연안             | 콘크리트,<br>철골 | 전기구입                      |
| 파푸아뉴기니 리조트 | 침실 12개<br>5,232명   | 섬<br>(Britain) | 목재, 짚       | 발전기 가동을 위한 연료구입<br>코코넛 조각 |

자료 : Brown and Ulgiati(2001)에서 정리

## 2) 에머지 수용력 평가 결과

Brown and Ulgiati(2001)는 에머지 수용력의 단위를 지속가능성을 유지하기 위한 면적(land area required to support an economic activity, "su-

pport area")으로 설정하였는데, 총 애머지 유입량을 지역의 단위면적당 평균 재생가능 애머지로 나누었다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$SA_{(r)} = (F+N)/Empd_{(r)}$$

$SA_{(r)}$  : 재생가능 지원면적( $m^2$ )

$Empd_{(r)}$  : 연간 단위면적당 애머지 사용량( $sej\ m^{-2}\ yr^{-1}$ )

$F$  : 외부에서 구입한 애머지( $sej\ yr^{-1}$ )

$N$  : 재생불가능 애머지( $sej\ yr^{-1}$ )

이를 애머지 환경부하비율(ELR)과 결합하면, 제안된 개발사업이 그 지역의 지속가능성을 해치지 않기 위해 필요한 자연상태의 면적을 구하는 식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$SA_{(ELR)} = R^*/Empd_{(r)}$$

$SA_{(ELR)}$  : 개발사업으로 인한 환경부하를 줄이기 위한 면적

$R^*$  : 개발사업의 환경부하를 줄이는데 필요한 재생가능애머지의 양

이러한 관계식을 이용하여 도출한 두 리조트의 애머지 지수는 <표 4-6>과 같다.

리조트 운영으로 발생하는 환경부하를 줄이기 위한 면적은 멕시코와 파푸아 뉴기니 리조트에서 각각  $35km^2$ ,  $34km^2$ 로 나타났는데, 이는 리조트 토지면적에 비해 각각 1,800배, 835배나 넓다. 환경부하를 줄이는데 필요한 절대면적이 두 리조트에서 비슷하게 나타난 것은 고밀도로 개발된 멕시코에 비해 파푸아 뉴기니의 개발압력이 낮기 때문이다. 따라서 현재의 환경, 경제, 문화 상태를 유지하기 위해 필요한 면적은 개발밀도가 낮은 지역에서 상대적으로 넓게 나타날 수 있다. Brown and Ulgiati(2001)도 새로운 개발사업에 대한 ‘환경부하를 줄이는데 필요한 면적’은 저개발 지역에서 높게 나타나는 반면, 개발지역에서는 비교적 낮게 나타나는 것으로 해석하였다.

〈표 4-6〉

멕시코와 파푸아뉴기니 리조트 에머지 지수

| 에머지 지수                                       | 멕시코     | 파푸아뉴기니  |
|--|---------|---------|
| 1. 총 에머지 사용량                                 | 8.2E+18 | 9.8E+17 |
| 재생가능에머지                                      | 1.1E+17 | 6.0E+16 |
| 재생불가능에머지                                     | 3.6E+16 | 4.4E+14 |
| 외부유입 에머지                                     | 8.1E+18 | 9.2E+17 |
| 2. 재생가능에머지 비율                                | 1.30%   | 6.1%    |
| 3. 단위면적당에머지사용량(E11 sej/m <sup>2</sup> /yr)   | 2,702.7 | 121.2   |
| 4. 일인당 에머지(E15 sej/m <sup>2</sup> /yr)       | 79.6    | 68.2    |
| 5. 환경부하비율                                    | 76.0    | 15.3    |
| 6. 단위면적당 재생가능에머지(E11 sej/m <sup>2</sup> /yr) | 35.1    | 7.4     |
| 7. 환경부하를 줄이는데 필요한 면적(km <sup>2</sup> )       | 35      | 34      |
| 8. 재생가능성을 유지하기 위한 면적(km <sup>2</sup> )       | 150     | 39      |

자료 : Brown and Ulgiati(2001)에서 정리

주 : 재생가능성을 유지하기 위한 면적은 ‘지속가능발전을 위한 면적’ 과 ‘재생불가능에머지와 유입에머지를 재생가능에너지로 대체하는데 필요한 면적’ 의 합임.

또한 연구대상 리조트가 연안에 있기 때문에 전체 지역의 재생가능에너지는 연안해역으로부터 공급받는 특징이 있다. 따라서 개발사업으로 발생하는 환경부하를 줄이기 위한 구역은 연안해역과 연안육역을 포함하게 되는데, 이에 대해 Brown and Ulgiati는 그 지역의 총면적(육역과 대륙붕)에서 대륙붕이 차지하는 면적의 비율을 이용하여 해역면적을 산정하였다. 즉 파푸아뉴기니의 경우 환경부하를 줄이는데 필요한 면적은 총 34km<sup>2</sup>인데, 이 면적 중 육지부에 해당하는 면적을 25.84km<sup>2</sup>, 연안해역면적을 8.16km<sup>2</sup>로 할당하였다.<sup>45)</sup>

45) Brown and Ulgiati(2001)는 해역과 육역의 면적을 할당할 때 지역 전체의 면적비율을 단순비교하여 이용하였는데, 보다 체계적으로 해역과 육역 면적을 할당하기 위해서는 육역과 해역의 에머지 특성을 분석해야 함.

### 3) 에머지 수용력 적용 방안

연안지역에서 개발사업으로 발생하는 환경부하를 줄이는데 필요한 면적을 산정하고 구역을 지정하는 방식은 <그림 4-1>과 같이 크게 3가지로 나타낼 수 있다(Brown and Ulgiati, 2001). 이 중 (a)는 각 시설물별로 구역을 할당하는 방식이고, (b)는 총 시설물에 대해 면적을 할당하는 방식이다. (c)는 보호가치가 높은 지역을 보전하는데 유용한 방식으로, 개발사업으로부터 보호구역을 안전하게 유지할 수 있는 장점이 있다.

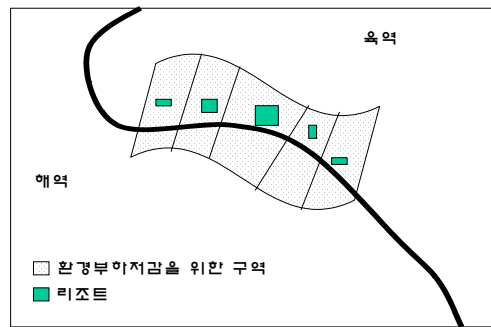
## 4. 대안평가

에머지 개념은 제안된 개발계획이나 관리계획에 대한 대안들을 동일한 과정을 통해 평가·비교함으로써 기존의 시스템, 제안된 계획, 이 계획에 대한 대안들 중에서 환경친화적이고 지속가능한 성장을 보장하는 대안을 선택할 수 있도록 해준다. 에머지 개념은 생태계 복원 대안의 결정에도 사용될 수 있다.

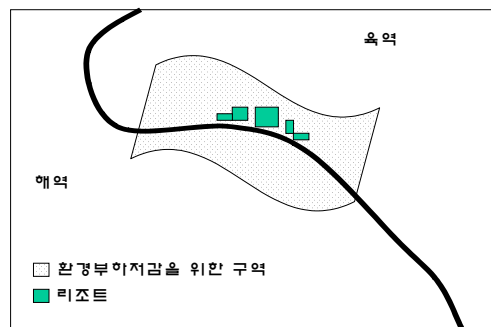
<그림 4-2>는 에머지 평가가 제안된 계획이 원래의 시스템이나 다른 대안들과 어떻게 비교될 수 있는지 보여준다. 에머지 이론은 적정 효율로 자원의 유입량을 강화함으로써 에머지의 흐름을 최대화하는 시스템이 다른 시스템과 경쟁에서 이기게 될 것(maximum empower principle)이라고 주장한다(Odum, 1996). 그러나 에머지의 최대화가 환경에 지나치게 부하를 주는 것이라면 이 시스템은 장기적인 관점에서 보았을 때 지속가능한 시스템이 아니며 결국 다른 시스템이 이를 대체할 것이다. <그림 4-2>의 대안들 중에서 좀 더 많은 에머지를 산출(E+F)하고 환경에 대한 부하가 작은 대안이 가장 훌륭한 개발대안 또는 정책대안이 될 것이다.



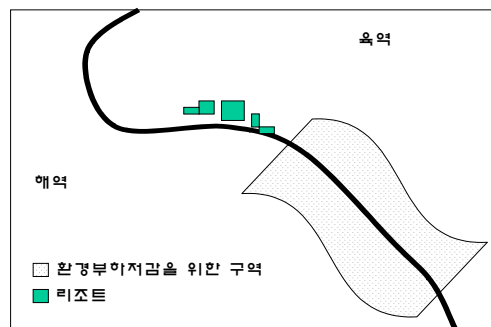
〈그림 4-1〉 연안지역에서 환경부하를 줄이는데 필요한 구역지정 방식<sup>46)</sup>



(a)



(b)

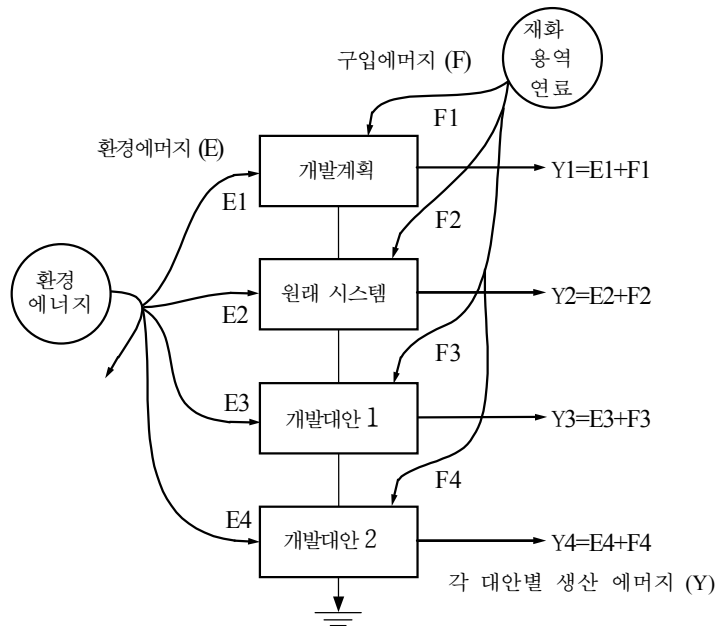


(c)

46) Brown and Ulgiati(2001)를 참조하여 재구성.

〈그림 4-2〉

에머지 개념을 이용한 대안 평가



여기에서는 세 가지 폐수처리 대안을 에머지를 이용하여 비교·평가한 스웨덴의 사례를 소개하고(Geber and BjÖrklund, 2002), 에머지 개념이 어떻게 개발대안 또는 정책대안의 선정에 이용될 수 있는지 제시한다.

### 1) 배경과 개요

사회경제활동 과정에서 발생하는 부산물인 오폐수의 처리는 최근의 환경관리에서 중요한 사업이다. 또한 어떠한 방식으로 오폐수를 처리해야 하는지도 매우 중요한데, 오폐수 처리방식은 그 사회의 경제적, 사회적, 생태적 특징과 여건을 고려하여 결정된다. 최근 들어 기존의 전통적인 폐수처리방식 외에 대안적 폐수처리방식의 도입 필요성에 관한 연구가 진행되었고, 부분적으로 이를 적용하려는 시도가 있었다. Geber and BjÖrklund(2002)는 이러한 다양한

폐수처리체계에서 사용한 자원량을 평가하고 비교할 수 있는 수단이 기존의 학문분야에서 미비한 점에 주목하고, 이를 적절하게 평가·비교하기 위해 에머지 개념을 도입하였다.

이들이 연구대상으로 삼은 폐수처리방식은 i) 전통적인 방식의 폐수처리방식(wastewater treatment plant, WWTP), ii) 전통적 폐수처리방식과 인공습지를 이용한 통합처리방식(treatment plant+constructed wetlands, TP+CW), iii) 자연습지를 이용한 처리방식(natural wetlands, NW)의 3가지이다(표 4-7).

〈표 4-7〉 평가대상 폐수처리방식 기본 사항

| 구 분                              | 전통적 처리방식<br>WWTP | 전통처리+ 인공습지<br>TP+CW | 자연습지 이용<br>NW |
|----------------------------------|------------------|---------------------|---------------|
| BOD 제거<br>%/yr<br>kg/yr          | 96<br>144,860    | 95<br>134,898       | 95<br>12,633  |
| 인 제거<br>%/yr<br>kg/yr            | 95<br>7,060      | 99<br>7,558         | 95<br>220-550 |
| 질소 제거<br>%/yr<br>kg/yr           | 50<br>24,150     | 50<br>23,792        | 60<br>2,165   |
| 하수유입량<br>(103m <sup>3</sup> /yr) | 2,100            | 2,330               | 156           |
| 하수처리인구(명)                        | 9,714            | 9,947               | 759           |
| 회전율(일)                           | 0.5              | 9                   | 180           |
| 토지면적(m <sup>2</sup> /yr)         | 8,700            | 220,000             | 220,000       |

자료 : Geber and Björklund(2002)에서 정리.

이 중 WWTP와 TP+CW에 대한 에머지평가는 현재 스웨덴에서 가동 중에 있기 때문에 정량적 자료를 직접 이용하였고, NW는 인공습지의 자료를 이용하여 에머지 평가를 수행하였다.

## 2) 애머지 평가 결과

애머지 평가를 위한 시간 범위는 건물에 대해서는 50년을, 습지와 처리시설에 대해서는 20년을 적용하였다. 세 가지 폐수처리방식에 대한 애머지 평가에서 총 사용애머지는 세 가지 처리방식 모두 비슷한 결과를 보여주었으나, 애머지 투자비율은 WWTP가 3,056으로 가장 높았고, TP+CW와 NW는 각각 141, 9로 나타났다(표 4-8).

〈표 4-8〉

폐수처리방식의 자원 이용 애머지 분석 결과

단위 : 1012 sej

| 구 분                    | 전통적 처리방식<br>WWTP | 전통처리<br>+인공습지<br>TP+CW | 자연습지 이용<br>NW |
|------------------------|------------------|------------------------|---------------|
| 일인당 총 이용 애머지           | 154              | 181                    | 170           |
| 질소제거 이용 애머지(kg-1)      | 62               | 76                     | 60            |
| 인제거 이용 애머지(kg-1)       | 212              | 238                    | 235           |
| BOD제거 이용 애머지(kg-1)     | 10               | 13                     | 10            |
| m <sup>2</sup> 당 이용애머지 | 162.80           | 8.2                    | 0.6           |
| 일인당 재생가능애머지            | 0.05             | 1.27                   | 16.43         |
| 질소제거 재생가능애머지(kg-1)     | 0.05             | 0.53                   | 5.76          |
| 인제거 재생가능애머지(kg-1)      | 0.07             | 1.67                   | 22.67         |
| BOD제거 재생가능애머지(kg-1)    | 0.00             | 0.09                   | 0.99          |
| 일인당 외부구입애머지            | 154              | 180                    | 154           |
| 질소제거 외부구입애머지(kg-1)     | 62               | 75                     | 54            |
| 인제거 외부구입애머지(kg-1)      | 212              | 236                    | 212           |
| BOD제거 외부구입애머지(kg-1)    | 10               | 13                     | 9             |

자료 : Geber and Björklund(2002)에서 정리.

따라서 에머지 투자비율만을 고려할 때 세 가지 폐수처리방식 중 자연습지를 이용한 폐수처리방식이 경쟁력이 가장 높은 것으로 평가할 수 있다. 자연습지는 폐수처리에서 높은 경쟁력을 가지고 있다. 그러나 단위면적당 이용 에머지가 가장 낮다는 점에서 한계가 있기 때문에 Geber and BjÖrklund(2002)는 자연습지를 이용한 처리방식은 인구가 적게 분포하고 있는 지역에 아주 유용하다고 평가하였다.

## 제 5 장 정책제언과 향후 연구방향

이 연구는 생태학의 입장에서 자연환경이 우리 경제에 기여하는 진정한 가치를 평가하기 위해 제안된 에머지 개념과 평가방법을 소개하였다. 또한 사례지역을 대상으로 실제 에머지 평가를 수행하여 에머지 평가법의 적용 과정을 살펴보았다. 시장경제의 가격을 핵심으로 하는 수요자의 지불의사에 토대를 두고 있는 기존의 경제학 방법(receiver-based)과 달리 에머지는 하나의 자원을 만들기 위해 자연환경에서 유입한 에너지를 기준으로 자연환경이 우리 경제에 기여하는 가치를 평가하는 방법(donor-based)이다.

에머지 개념을 소개하면서 제시한 〈그림 2-1〉은 현대의 산업사회에서 흔히 볼 수 있는 자연과 경제사이의 일방적인 이용 관계를 보여준다. 이 그림에는 경제시스템에서 자연환경으로 직접 연결되는 경로가 없다는 것을 주목할 필요가 있다. 물론 사회경제활동에서 발생하는 폐기물과 오염물질이 자연환경에 유입하여 생태계에 부정적인 변화를 초래하고 있다. 그러나 여기에서 말하고자 하는 경로는 자연환경의 다양성과 생산성을 유지하고자 하는 경제 주체의 능동적인 행동을 말한다. 자연과 경제를 이어주는 이러한 능동적인 연결 고리가 없다는 것이 현재 우리가 겪고 있는 다양한 환경과 자원 문제의 근원이라고 할 수 있다(Odum, 1996).

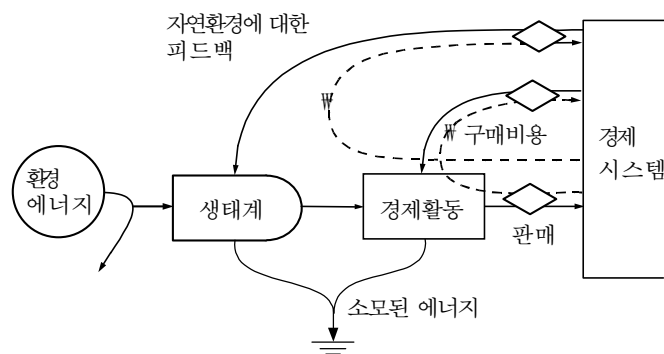
자연과 인간의 공존을 위한 디자인으로서 〈그림 5-1〉에 제시한 모델은 자연생태계가 우리에게 주는 유용한 일을 강화하기 위한 경제시스템의 피드백을 포함하고 있다. 산업혁명 이후 일어난 급속한 경제성장 과정에서 대부분의 나라는 이러한 피드백에 관심을 기울이지 않았다. 그러나 자원이 고갈되고 환경이 훼손되어 우리 삶의 기반이 약화되고 있는 지금 이러한 공존 체계의 확립은 시급한 일이다. 1992년 리우회의와 2002년 지속가능발전 세계정상회의는 자연과 인간의 공존 체계를 확립하기 위한 국제사회의 노력을 상징적으로 보

여주고 있다. 이러한 흐름에 따라 국제사회와 선진국은 기존의 전통적인 환경·자원관리에 관한 의사결정방식을 바꾸는데 많은 투자를 하고 있다.

지금까지 연안환경과 자원 관리와 이용에 관한 정책결정에 사용한 경제학 방법과는 다른 관점에서 자연환경의 가치를 평가하고 정책방향을 설정하기 위한 분석 틀을 제공하는 에머지 개념이 의사결정과정에 사용된다면, 적절한 정책의 선택과 이의 이행 실효성을 높이는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 이 장에서는 에머지 개념을 해양 자원과 환경관리에 활용하기 위해 필요한 정책제언과 이 개념의 정책지향성을 높이기 위해 앞으로 필요한 연구방향을 제시하였다.

〈그림 5-1〉

자연과 인간의 공존을 위한 자연환경의 이용 형태

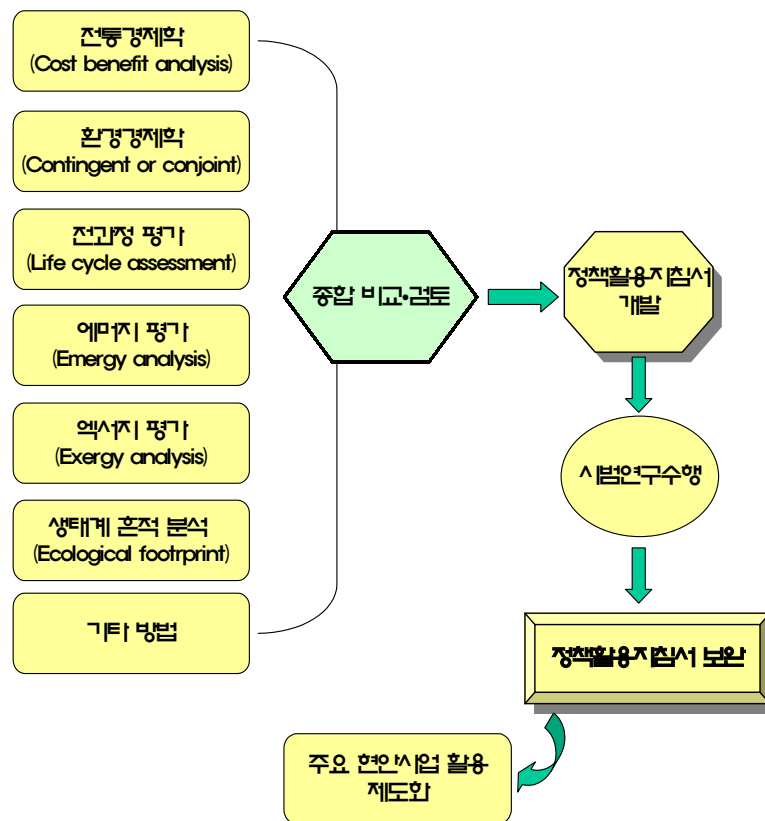


## 1. 정책제언

이 연구는 지금까지 일반적으로 사용된 경제학 방법 이외에도 해양 환경과 자원을 관리하기 위한 정책 결정에 사용할 수 있는 자원평가 개념과 평가방법이 있다는 것을 보여주었다. 이미 소개한 바와 같이 에머지 개념은 해양 환경과 자원 관련 분야뿐만 아니라 육상 환경, 경제 정책, 도시 관리, 역사와 같이 아주 다양한 분야에 적용되어 자연과 인간의 관계를 바라보는 새로운 시각을 제공하였다. 따라서 에머지 개념을 포함한 다양한 평가방법을 해양 환경과 자

원 관리에 도입할 수 있는 제도적 장치가 마련될 필요가 있다. 환경과 자원 관리와 이용에 관한 정책을 결정할 때 지금까지 해온 것처럼 경제학 방법만을 사용할 것이 아니라 에머지 개념과 같이 똑같은 사안에 대해 다른 시각을 제공할 수 있는 몇 가지 방법을 동시에 사용하면 합리적인 의사결정을 할 수 있을 것이다. 이를 위해서는 우선 해양 환경과 자원 관리에 활용할 수 있는 평가 방법들을 종합적으로 비교·검토하여 서로 보완적으로 사용할 수 있는 평가 방법들을 선택할 필요가 있다(그림 5-2).

〈그림 5-2〉 합리적 의사결정을 위한 정책평가 방법 개발 모식도





해양 환경·자원 관리와 개발 정책을 수립할 때 이렇게 선택한 평가방법들을 어떻게 이용하여야 하는지를 교육하기 위한 정책활용 지침서를 개발해야 한다. 해양 환경과 자원에 큰 영향을 미치게 될 관리정책이나 개발정책을 결정할 때는 반드시 이 지침서를 따르도록 제도화할 필요가 있다. 이러한 과정을 거쳐 서로 다른 시각에서 이루어진 분석 결과를 종합하여 의사결정이 이루어지면 시화호, 동강댐, 새만금과 같은 대규모 개발계획을 둘러싼 논쟁으로 발생하는 막대한 사회적 비용의 낭비를 막을 수 있을 것이다.

이러한 점에서 에머지 개념과 평가방법의 정책효용성을 검증하기 위한 시범 연구사업을 진행할 필요가 있다. 에머지 개념을 이용한 연구가 활발한 일부 나라의 경우 아주 다양한 분야의 에머지 평가를 통해 환경관리 의사결정을 위한 대안제시에 집중하고 있다. 그러나 선행연구 분석에서도 제시하였듯이 우리나라의 에머지 연구는 아직 초기 단계를 벗어나지 못하여 에머지 가치평가와 개발계획에 대한 에머지 편익/비용평가와 같이 일부 분야에 한정되어 있다. 따라서 다양한 관리대안이나 개발 대안의 비교평가, 최적의 관리대안 제시, 정책이행의 성과 평가와 같은 정책결정과 이행에 직접 활용할 수 있는 시범 연구를 통해 에머지 개념과 평가방법의 적용성을 높일 필요가 있다.

## 2. 앞으로 연구방향

재화나 용역을 만드는 과정에 투입한 에너지(donor-based)를 이용하여 자연환경의 기여 가치를 평가하는 에머지 평가법과 수요자 중심(receiver-based)의 경제학 방법은 기본적으로 자연환경의 가치평가에 접근하는 방향이 다르기 때문에 두 방법의 통합은 어려울 것으로 보인다. 그러나 사람들이 쉽게 이해할 수 있는 화폐를 이용하여 오랫동안 정책결정에 활용되어 온 경제학 방법의 장점을 에머지 평가법에 도입하여 정책활용성을 높일 필요가 있다.

에너지사이의 일을 할 수 있는 능력의 차이를 나타내는 에너지 변환도는 에머지 개념에서 가장 중요한 요소에 속한다. 그러나 지금까지 국내의 에머지 연구에서 사용된 에너지변환도는 극히 일부를 제외하고는 사회경제여건이 다른

외국의 에머지 연구에서 제시한 것들이다. 물론 태양에너지, 조석, 바람과 같이 사회경제여건과 관계없이 사용할 수 있는 에너지 변환도들도 있다. 그러나 우리나라 환경에 적응한 생태계나 사회경제활동과 밀접한 관련이 있는 항목들의 경우 에머지 평가의 정확성을 높이기 위해서는 국내의 시스템에 대한 에머지 연구를 통해 독자적으로 계산하여 사용할 필요가 있다. 따라서 앞으로 우리나라 환경과 사회경제 특성을 반영하는 에너지 변환도를 계산하기 위한 연구를 진행할 필요가 있다.

이 연구의 사례지역 에머지 평가에서도 지적하였듯이 아직까지 에머지 평가법에서 자연환경의 심미가치나 보전가치에 관한 합의된 평가 틀이 마련되어 있지 않다. 심미가치나 보전가치는 생태계의 모든 구조와 기능이 제대로 작동하여야 유지될 수 있는 가치이기 때문에 평가대상 생태계로 유입하는 모든 에머지를 심미가치나 보전가치로 사용해야 할 지도 모른다. 이런 점에서 생태계의 심미가치나 보전가치의 평가를 위한 새로운 과정이 필요하지 않을 수도 있다. 그러나 그것이 개념적 정리이든 새로운 평가과정의 도입이건, 이러한 가치에 대한 평가 틀을 정리하여야 경제학 방법의 평가와 충분한 비교를 통해 정책결정에 활용할 수 있을 것이다.

또한 제4장에서 제시한 정책활용 유형별로 에머지 평가지침서를 개발하기 위한 연구를 다학제간(multidisciplinary) 연구 방식으로 진행하여야 한다. 이를 통해 평가를 수행하는 연구자에 따른 에머지 평가의 차이를 최소화할 수 있을 것이다. 그러나 이러한 지침서를 개발하기 위해서는 유형별로 우리나라의 시스템을 대상으로 에머지 평가가 먼저 이루어져야 한다.

마지막으로, 에머지 개념과 에너지시스템언어를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 평가대상 시스템의 시간에 따른 변화를 예측하기 위한 연구가 이루어져야 한다. 지금까지 이루어진 대부분의 국내외 에머지 연구는 어느 한 시점의 정적인 평가였다. 그러나 관리정책의 시행이나 개발계획의 집행이 가져올 장기적인 영향을 평가하고 이를 통해 정책이나 계획의 변경 또는 취소를 결정하기 위해서는 이러한 영향을 예측할 수 있는 수단이 필요하다.

## 참 고 문 헌

- 강대석, 박석순, 1999. 에머지(Emergy) 개념을 이용한 다목적댐 건설의 생태경제학적인 평가방법에 관한 연구. 환경영향평가, 8 : 45-51.
- 국립수산진흥원, 1993, '93년 연근해어업자원의 동향, 수산자원조사보고 제 14호, 93~107.
- 권순국, 1999. 논의 환경적 역할과 가치 (I). 15pp.
- 기상청, 1999. 기상연보. 247pp.
- 김종구, 유선재, 2001. 새만금지역 하구갯벌의 유기물 분해능력 평가. 한국환경과학회지, 10 : 315~321.
- 부산광역시. 1998. 부산광역시 환경보전종합계획. 709 pp.
- 산업자원부, 에너지경제연구원, 2000. 에너지통계연보.
- 손지호, 1999. 에머지 분석법에 의한 도시의 지속적인 발전가능성 평가. 부경대학교 환경공학과 박사학위 논문. 141pp.
- , 신성교, 조은일, 이석모, 1996. 한국수산업의 EMERGY 분석. 한국수산학회지, 29 : 689-700.
- 엄기혁, 손지호, 조은일, 이석모, 박청길, 1996. EMERGY 분석법에 의한 득량만의 환경용량 산정. 한국수산학회지, 29 : 629-636.
- 이석모, 2001. 새만금 간척종합개발사업에 대한 환경회계. 한국해양환경공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집. 2001.5.24~25, 여수대학교, 여수. pp.1~14.
- 이창우, 1999. 서울시 환경용량 평가에 관한 연구. 서울시정개발연구원. 144pp.
- 이창희, 강대석, 남정호, 이병국, 유혜진, 2001. 하구·석호 육해전이수역 통합환경관리방안 연구. 349pp.
- 임효혁·강대석·남정호, 2003. 연안유역관리를 위한 해양환경수용력 평가

- 모델의 활용 개선방안. 해양정책연구, 제18권 1호. pp. 33-69.
- 통계청, 1998. 한국통계연감. 720pp.
- \_\_\_\_\_, 2002. 한국통계연감.
- \_\_\_\_\_, 2000. 한국통계연감. 777pp.
- 한국산업경제연구원, 1998. 영산강 IV단계 개발사업 타당성조사.
- 해양수산부, 2000. 해양자원의 경제적 가치추정과 해양환경보전방안 연구. 278pp.
- \_\_\_\_\_, 1998. 우리나라의 갯벌. 28pp.
- 환경부, 1996a. 생태도시 조성 기본계획수립을 위한 용역사업
- \_\_\_\_\_, 1996b. 갯벌보전과 이용의 경제성 평가. 113pp.
- Brown, M.T. and R.A. Herendeen, 1996. Embodied energy analysis and EMERGY analysis : a comparative view. Ecological Economics, 19 : 219-235.
- Brown, M.T. and S. Ulgiati, 1997. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability : monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. Ecological Engineering, 9 : 51-69.
- \_\_\_\_\_, 1999. Emergy evaluation of the biosphere and natural capital. Ambio, 28 : 486-493.
- \_\_\_\_\_, 2001. Emergy measures of carrying capacity to evaluate economic investments. Population and Environment, Vol.22(5) : 471-501
- Brown, M.T. and T.R. McClanahan, 1996. Emergy analysis perspectives of Thailand and Mekong River dam proposals. Ecological Modelling, 91 : 105-130
- Brown, M.T., Brandt-Williams, S., Tilley, D.R., Ulgiati, S. (Eds.), 2000. Emergy Synthesis : Theory and Applications of the Emergy Methodology, University of Florida, Center for Environmental Policy, Gainesville, p. 328.

- Brown, M.T., Odum, H.T., Tilley, D.R., Ulgiati, S. (Eds.), 2003. *Emergy Synthesis II*, University of Florida, Center for Environmental Policy, Gainesville.
- Day, J.W., Marin, J.F., Cardoch, L., and P.H. Templet, 1997. System functioning as a basis for sustainable management of deltaic ecosystems. *Coastal Management*, Vol. 25 : 115–153.
- Doherty, S.J., M.T. Brown, H.T. Odum, and R.C. Murphy, 1992. *Emergy analysis and policy perspectives for Papua New Guinea*. Report to the Cousteau Society, Center for Wetlands and Water Resources, University of Florida, Gainesville.
- Farber, S.C., R. Costanza, and M.A. Wilson, 2002. Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services. *Ecological Economics*, 41 : 375–392.
- Geber, U., and J. Björklund, 2002. The relationship between ecosystem services and purchased input Swedish wastewater treatment systems – a case study. *Ecological Engineering*, Vol.19 : 97–117.
- Gore, A., 1992. *Earth in the Balance*. Plume Book, New York. 407pp.
- Jorgensen, S.E., 1994. Review and comparison of goal functions in system ecology. *Vie Milieu*, 44 : 11–20.
- Kang, D. and S.S. Park, 2002. Emergy evaluation perspectives of a multipurpose dam proposal in Korea. *Journal of Environmental Engineering*, 66 : 293–306.
- Kang, D., 1998. *Pulsing and self-organization*. PhD Dissertation, Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Gainesville, Florida.
- \_\_\_\_\_, 2001a. Emergy evaluation perspectives on the natural environment and economy of Seoul. *Bulletin of the Korean Environmental Sciences Society*, 10 : 1–10.

- \_\_\_\_\_. 2001b. Emergy evaluation of the Kangwha tidal flat. J. Korean Soc. Oceanogr., 36 : 51-58.
- Lee, S.M. and H.T. Odum, 1994. Emergy analysis overview of Korea. J. of the Korean Environmental Sciences Society, 3 : 165-175.
- Martin, J.F., 2002. Emergy valuation of diversions of river water to marshes in the Mississippi River Delta. Ecological Engineering, 18 : 265-286.
- Mitsch, W.J. and J.G. Gosselink, 2000. Wetlands. third edition. Wiley, New York. 920pp.
- Nixon, S.W., 1988. Physical energy inputs and the comparative ecology of lake and marine ecosystems. Limnology and Oceanography. Vol.33 : 1005-1025.
- Odum, H.T. and E.P. Odum, 2000. The energetic basis for valuation of ecosystem services. Ecosystems, 3 : 21-23.
- Odum, H.T., 1983. Systems Ecology. Wiley, New York. 644pp.
- \_\_\_\_\_. 1992. Foreword. pp. i~iii in Proceedings of the 36th Annual Meeting of the International Society for the Systems Sciences, Denver, Colorado, July 12~17.
- \_\_\_\_\_. 1994. Ecological and General Systems. University Press of Colorado, Niwot. 644pp.
- \_\_\_\_\_. 1996. Environmental Accounting. Emergy and Environmental Decision Making. John Wiley & Sons, New York. 370pp.
- \_\_\_\_\_. 1998. Emergy evaluation. In the proceedings of International Energy Analysis Workshop at Porto Venere, Italy, May 26, 1998.
- \_\_\_\_\_. and D.A. Hornbeck, 1996. EMERGY evaluation of Florida salt marsh and its contribution to economic health. In : C.L. Coultas and Y.-P. Hsieh (eds.), Ecology and mana-

gement of tidal marshes : a model from the Gulf of Mexico.  
St. Lucie Press, Delray Beach, FL. pp.209–230

Qin, P., Wong, Y.S., and N.F.Y. Tam, 2000. Emergy evaluation of  
Mai Po mangrove marshes. Ecological Engineering. Vol. 16 :  
271–280

Reed, D.J., 1995. Status and trends of hydrologic modification, re-  
duction of sediment availability, and habitat loss/modification  
in the Barataria–Terrebonne Estuarine System. BTNEP No.  
20. Barataria–Terrebonne National Estuary Program, Thi-  
bodaus, L.A. Martin, J.F., 2002. Emergy valuation of diver-  
sions of river water to marshes in the mississippi River Delta,  
Vol.18 : 265–286.

## 부록 1 : 에너지시스템언어를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션

에너지시스템언어를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션은 크게 시스템 다이어그램을 그리는 과정과 시뮬레이션 과정으로 나눌 수 있다(부록 그림 1). 시스템 다이어그램은 에너지시스템언어를 이용하여 본문에서 소개한 과정을 따라 그린다. 처음에는 연구하고자 하는 시스템에 영향을 미치는 외부요소, 시스템의 내부요소와 흐름을 아주 자세하게 그린다. 두 번째 단계에서는 시뮬레이션 대상과 목적에 맞게 시스템 다이어그램을 간단하게 만든다. 모델의 구조가 지나치게 복잡하면 시뮬레이션을 위한 컴퓨터 프로그램의 작성뿐만 아니라 이 프로그램의 실행에도 오랜 시간이 걸리기 때문에, 연구목적에 적절하게 모델의 구조를 단순하게 할 필요가 있다.

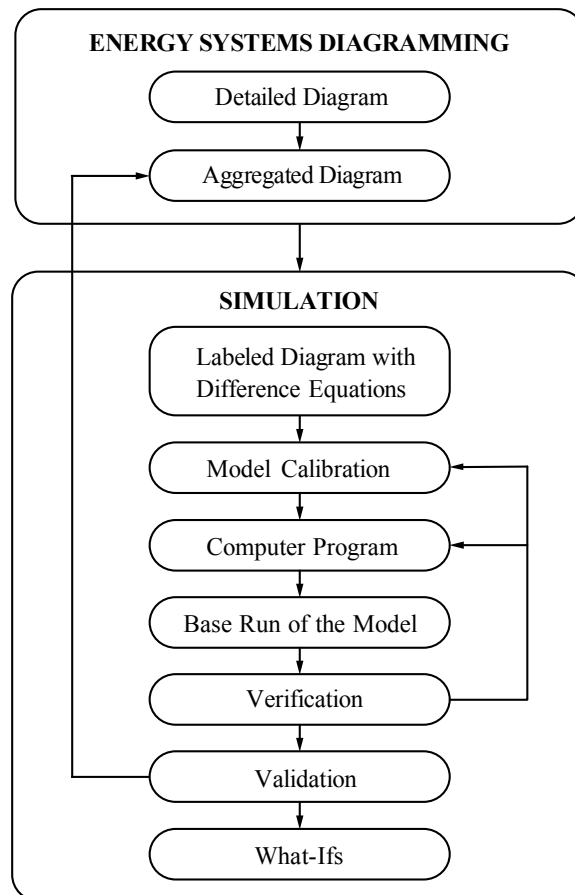
시뮬레이션 과정의 첫 단계에서는 앞에서 완성한 시스템 다이어그램을 이용하기 위한 수식을 쓴다. 본문에서도 언급하였지만, 에너지시스템언어에서 사용하는 기호들은 시스템의 구성요소들을 구분하여 표시할 뿐만 아니라 각 기호 사이의 수학적 관계가 미리 규정되어 있기 때문에 쉽게 시뮬레이션을 위한 수식을 쓸 수 있다. Odum(1983, 1994)은 기호사이의 수학적 관계와 수식을 쓰는 방법을 자세하게 소개하고 있다. <부록 그림 2>는 완성된 시스템다이어그램을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 수식을 작성한 예를 보여주고 있다. 이 모델은 자연생태계에서 일어나는 생산과 소비를 가장 단순하게 표현한 모델이다.

시뮬레이션을 수행하기 위해서는 대상시스템의 각 구성요소의 양과 이들 사이의 흐름관계를 나타내는 모델계수가 필요하다. 이러한 계수들을 찾는 과정을 에너지시스템언어에서는 모델 보정(calibration)이라고 한다. 계수들을 찾기 위한 보정과정은 앞에서 작성한 수식을 이용한다. <부록 그림 1>은 모델보정을 위한 자료를 모델의 구성요소와 이들 사이의 흐름경로에 표시한 것이다. 모델보정을 위한 자료는 연구하고자 하는 시스템의 구성요소와 흐름에 대한 장기간의 자료를 토대로 계산한 평균값을 사용하면 된다. 이러한 자료가 없는 경우에는 일정 시점의 자료를 이용할 수도 있다. <부록 표 1>은 <부록 그림 2>

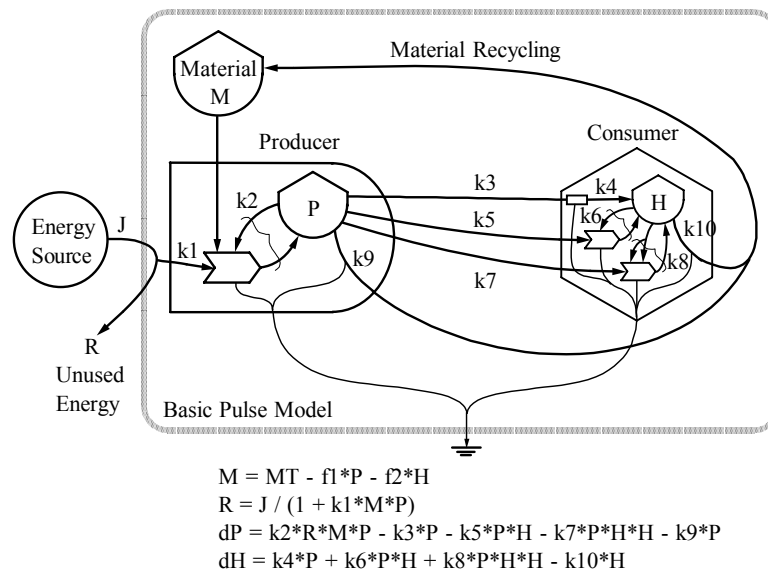


의 자료를 이용하여 엑셀 프로그램(excel program)에서 모델 시뮬레이션을 위한 계수를 계산하는 과정을 보여주고 있다.

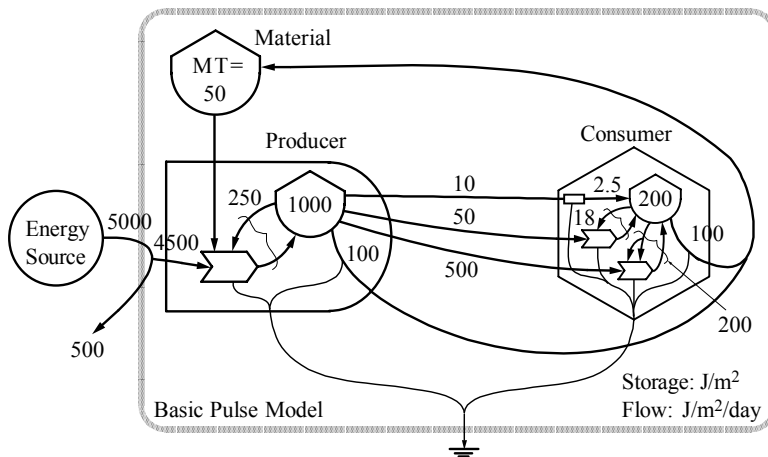
〈부록 그림 1-1〉 에너지시스템 언어를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 절차(Kang, 1998)



〈부록 그림 1-2〉 에너지시스템언어를 이용하여 만든 모델과 수식(Kang, 1998)



〈부록 그림 1-3〉 모델 보정에 사용하는 자료(Kang, 1998)



〈부록 표 1-1〉 에너지시스템언어로 만든 모델의 보정 과정(Kang, 1998)

| Items                               | Symbols               | Values | Units                 | Coefficients               |           |
|-------------------------------------|-----------------------|--------|-----------------------|----------------------------|-----------|
| Sources                             |                       |        |                       |                            |           |
| Sunlight                            | J                     | 5000   | J/m <sup>2</sup> /day |                            |           |
| Unused energy                       | R                     | 500    | J/m <sup>2</sup> /day |                            |           |
| Storages                            |                       |        |                       |                            |           |
| Producer                            | P                     | 1000   | J/m <sup>2</sup>      |                            |           |
| Consumer                            | H                     | 200    | J/m <sup>2</sup>      |                            |           |
| Material available                  | M                     | 20     | g/m <sup>2</sup>      | $M = MT - f1 * P - f2 * H$ |           |
| Total material (MT)                 | MT                    | 50     | g/m <sup>2</sup>      |                            |           |
| Material fraction                   |                       |        |                       |                            |           |
| Producer                            | f1                    | 0.02   | g/J                   |                            |           |
| Consumer                            | f2                    | 0.05   | g/J                   |                            |           |
| Flows                               |                       |        |                       |                            |           |
| Energy used                         | $J1 = k1 * R * M * P$ | 4500   | J/m <sup>2</sup> /day | k1 =                       | 0.00045   |
| Primary production                  | $J2 = k2 * R * M * P$ | 250    | J/m <sup>2</sup> /day | k2 =                       | 0.000025  |
| Linear consumption                  | $J3 = k3 * P$         | 10     | J/m <sup>2</sup> /day | k3 =                       | 0.01      |
|                                     | $J4 = k4 * P$         | 2.5    | J/m <sup>2</sup> /day | k4 =                       | 0.0025    |
| Autocatalytic consumption           | $J5 = k5 * P * H$     | 50     | J/m <sup>2</sup> /day | k5 =                       | 0.00025   |
|                                     | $J6 = k6 * P * H$     | 18     | J/m <sup>2</sup> /day | k6 =                       | 0.00009   |
| Quadratic autocatalytic consumption | $J7 = k7 * P * H * H$ | 500    | J/m <sup>2</sup> /day | k7 =                       | 0.0000125 |
|                                     | $J8 = k8 * P * H * H$ | 200    | J/m <sup>2</sup> /day | k8 =                       | 0.000005  |
| Producer respiration                | $J9 = k9 * P$         | 100    | J/m <sup>2</sup> /day | k9 =                       | 0.1       |
| Consumer respiration                | $J10 = k10 * H$       | 100    | J/m <sup>2</sup> /day | k10 =                      | 0.5       |

시뮬레이션 과정의 다음 단계는 〈부록 그림1〉에서 작성한 수식과 〈부록 표 1〉에서 계산한 계수를 이용하여 컴퓨터 프로그램을 쓰는 일이다. 시뮬레이션에 사용할 컴퓨터 프로그램에는 특별한 제한이 없으며, 연구자가 다루기 편한 프로그램을 사용하면 된다. 〈부록 표 2〉는 베이직(Basic) 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 위한 프로그램 코드를 작성한 예를 보여주고 있다. 프로그램 코

드의 구성은 크게 컴퓨터 화면에 시뮬레이션 결과를 표시하기 위한 화면 설정, 구성요소의 초기값, 시뮬레이션에서 컴퓨터 화면을 벗어나는 결과를 제어하기 위한 부분, 모델 계수, 수식, 모델결과를 화면에 나타내는 부분으로 구성되어 있다.

다음 단계는 작성된 컴퓨터 코드를 실제로 컴퓨터에서 실행하는 과정이다. 이 과정을 통해 컴퓨터 코드 자체의 오류가 없는 지 점검하게 되는데, 이를 오류검증(verification)이라고 한다. <부록 그림 4>는 오류검증을 수행한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 컴퓨터 코드 자체의 오류가 발견되지 않으면, 모델 계수를 계산하기 위하여 사용한 자료이외에 새로운 자료세트를 이용하여 모델이 실제 세계를 근사하게 시뮬레이션하는 지 점검하게 된다. 이 과정을 모델검증(validation)이라고 한다. 검증과정에서 모델의 결과가 실제 현상과 잘 일치하지 않으면, 연구대상 시스템의 모델 구조에 문제가 있음을 나타낸다. 따라서 이 경우 에너지시스템 다이어그램 작성 단계로 되돌아가 핵심 구성요소와 흐름들이 모두 포함되어 있는 지 확인할 필요가 있다.

모델검증을 통과한 모델은 연구대상 시스템이 외부 요소나 내부과정의 변화에 어떻게 반응하는지 예측하는 시나리오 분석단계에 사용할 수 있다. 이 단계에서는 연구대상 시스템에서 일반적으로 나타나는 변화를 예측한다. 예를 들어 이산화탄소와 지구온난화 과정을 시뮬레이션하기 위한 모델이라면 이산화탄소의 농도가 현재의 수준에 비해 몇 배 증가함에 따라 지구 기온이 어떻게 변화하는 지 예측할 수 있다. 이러한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 대상 시스템을 관리하기 위한 정책 방향을 결정할 수 있게 된다.

또한 이러한 시뮬레이션 프로그램은 시행하고자 하는 관리수단의 적합성을 판단하기 위한 도구로 사용할 수도 있다. 예를 들어 갯벌생태계를 관리하기 위한 관리수단이 채택되면, 이러한 수단의 이행을 통해 갯벌생태계에 어떤 변화가 나타날 것인지 예측함으로써 관리수단의 실효성을 판단할 수 있다.

〈부록 표 1-2〉

〈부록 그림 1-2〉의 모델 시뮬레이션을 위한  
베이직 프로그램 코드(Kang, 1998)

```

' Basic Pulse Model
' File Name : Pulse.bas

' Plotting Frames
10 SCREEN 12
11 LINE (20, 10)-(270, 175), 15, B
12 LINE (20, 65)-(270, 65), 15
13 LINE (20, 120)-(270, 120), 15
15 LINE (20, 190)-(270, 310), 15, B
16 LINE (20, 250)-(270, 250), 15

17 LINE (300, 10)-(550, 170), 15, B
18 LINE (300, 50)-(550, 50), 15
19 LINE (300, 90)-(550, 90), 15, B
20 LINE (300, 130)-(550, 130), 15
21 LINE (300, 190)-(550, 310), 15, B
22 LINE (300, 250)-(550, 250), 15

' Sources and Initial Values
30 MT = 50
31 J = 5000 : TrJ = 1
32 P = 10 : EP = 10 : TrP = EP/P
33 H = .1 : EH = 10 : TrH = EH/H

' Iteration Time Step during Simulation
40 dt = .01

' Scaling Factors for Plotting
50 P0 = 70 : EP0 = 3000 : TrP0 = 1.5
51 H0 = 20 : EH0 = 3000 : TrH0 = 25
52 M0 = 1
53 t0 = 1.46

' Material Fraction of Storages
70 f1 = .02
71 f2 = .05

```

## 〈부록 그림 1-2〉의 모델 시뮬레이션을 위한 베이직 프로그램 코드(Kang, 1998)(계속)

```

' Pathway Coefficients
101 k1 = .00045
102 k2 = .000025
103 k3 = .01
104 k4 = .0025
105 k5 = .00025
106 k6 = .00009
107 k7 = .0000125
108 k8 = .000005
109 k9 = .1
110 k10= .5

' Simulation Loop
200 M = MT - f1 * P - f2 * H
201 IF M < 0 THEN M = 0
202 R = J / (1 + k1*M*P)
211 J1 = k1 * R * M * P
212 J2 = k2 * R * M * P
213 J3 = k3 * P
214 J4 = k4 * P
215 J5 = k5 * P * H
216 J6 = k6 * P * H
217 J7 = k7 * P * H * H
218 J8 = k8 * P * H * H
219 J9 = k9 * P
220 J10= k10* H

300 dP = J2 - J3 - J5 - J7 - J9
301 IF (dP/P)>.05 THEN dEP = TrJ*J1-TrP*J3-TrP*J5-TrP*J7
302 IF (dP/P)<=.05 and (dP/P)>=0 THEN dEP = 0
303 IF (dP/P)<0 THEN dEP = TrP*dP

310 dH = J4 + J6 + J8 - J10
311 IF (dH/H)>.05 THEN dEH = TrP*J3+TrP*J5+TrP*J7
312 IF (dH/H)<=.05 and (dH/H)>=0 THEN dEH = 0
313 IF (dH/H)<0 THEN dEH = TrH*dH

```

〈부록 그림 1-2〉의 모델 시뮬레이션을 위한 베이직 프로그램 코드(Kang, 1998)(계속)

```

400 P = P + dP * dt
401 IF P < .01 THEN P = .01
402 EP = EP + dEP * dt

410 H = H + dH * dt
411 IF H < .001 THEN H = .001
412 EH = EH + dEH * dt

500 TrP = EP/P
501 TrH = EH/H
550 Total_P = Total_P + P
551 Total_H = Total_H + H
560 Total_Power = Total_Power + J1
561 Total_EP = Total_EP + EP
562 Total_EH = Total_EH + EH
563 Trans_P = Trans_P + TrP
564 Trans_H = Trans_H + TrH
570 I = I + 1

' Plotting Simulation Result
600 PSET (T / t0 + 20, 65 - P / P0), 15
601 PSET (T / t0 + 20, 120 - H / H0), 15
602 PSET (T / t0 + 20, 175 - M / M0), 15
603 PSET (T / t0 + 20, 250 - J2 / 6), 15
604 PSET (T / t0 + 20, 310 - J1*60/J), 15
605 PSET (T / t0 + 300, 250 - P/J2/.2), 15
606 PSET (T / t0 + 300, 310 - H/(J4+J6+J8)/.2), 15

610 PSET (T / t0 + 300, 50 - EP/EP0), 15
611 PSET (T / t0 + 300, 90 - EH/EH0), 15
612 PSET (T / t0 + 300, 130 - TrP/TrP0), 15
613 PSET (T / t0 + 300, 170 - TrH/TrH0), 15

700 T = T + dt

' Repeat the Simulation Loop
800 IF T / t0 < 250 GOTO 200

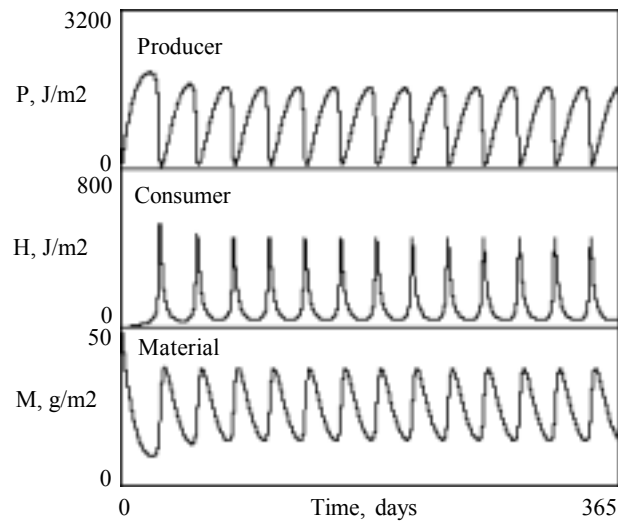
```

〈부록 그림 1-2〉의 모델 시뮬레이션을 위한 베이직 프로그램 코드(Kang, 1998)(계속)

```
LOCATE 23
PRINT "Total Power Input = ", Total_Power*dt, "J/m2"
PRINT "Average storage of P = ", Total_P/I, "J/m2"
PRINT "Average storage of H = ", Total_H/I, "J/m2"
PRINT "Average EMERGY storage of P = ", Total_EP/I, "sej/m2"
PRINT "Average EMERGY storage of H = ", Total_EH/I, "sej/m2"
PRINT "Average transformity of P = ", Trans_P/I, "sej/J"
PRINT "Average transformity of H = ", Trans_H/I, "sej/J"
```

〈부록 그림 1-4〉

〈부록 표 1-2〉의 프로그램 실행 결과





## 부록 2 : <표 3-3>의 계산과정

### RENEWABLE RESOURCES :

#### 1. Sunlight

Land area =  $9.94\text{E}+10\text{m}^2$  (통계청, 2002)

Continental shelf area =  $2.68\text{E}+11\text{m}^2$  (국립수산진흥원, 1993)

Insolation =  $4.54\text{E}+09 \text{ J/m}^2/\text{yr}$  (기상청(1999) 자료의 평균)

Albedo = 0.3(% given as decimal)

Energy (J) = (Area)\*(Insolation)\*(1-albedo) =  $1.17\text{E}+21\text{J}/\text{yr}$

#### 2. Wind

Area =  $9.94\text{E}+10\text{m}^2$

Avg. wind speed =  $2.19\text{m/s}$  (기상청(1999) 자료의 평균)

Geostrophic wind = (Avg. wind speed)\*(10/6) =  $3.65 \text{ m/s}$

Energy (J) =  $(1.3 \text{ kg/m}^3) * (1.0 \text{ E}-3) * (\text{Geostrophic wind})^3$   
 $* (3.14 \text{ E}7 \text{ s/yr}) * (\text{Area}) = 1.97\text{E}+17\text{J}/\text{yr}$

#### 3. Rain, geopotential

Area =  $9.94\text{E}+10\text{m}^2$

Rainfall =  $1.713\text{m}/\text{yr}$

Average elevation =  $262\text{m}$

Runoff rate = 0.55(% given as decimal)

Energy (J) = (Area)\*(Rainfall)\*(Runoff rate)\*( $1000 \text{ kg/m}^3$ )  
 $* (\text{Avg. elevation}) * (9.8 \text{ m/s}^2) = 2.41\text{E}+17\text{J}/\text{yr}$

#### 4. Rain, chemical

Rain =  $1.713\text{m}/\text{yr}$  (기상청, 1999)

Evapotranspiration = 0.45(% given as decimal)

Energy (land) (J) = (Land area)\*(Rain)\*(Evapotrans)  
 $\times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (4.94 \text{ E}3 \text{ J/kg}) = 3.79\text{E}+17\text{J/yr}$

Energy (shelf) (J) = (Shelf area)\*(Rain)\*(1000 kg/m<sup>3</sup>)  
 $\times (4.94 \text{ E}3 \text{ J/kg}) = 2.27\text{E}+18\text{J/yr}$

Total energy (J) = 2.65E+18J/yr

#### 5. Tide

Total energy (J) = 2.54E+17J/yr (Lee and Odum, 1994)

#### 6. Waves

Total energy (J) = 2.03E+17J/yr (Lee and Odum, 1994)

#### 7. Earth cycle

Land area = 9.94E+10m<sup>2</sup> (Lee and Odum, 1994)

Energy (J) = (Land area)\*(1 E6 J/m<sup>2</sup>/yr) = 9.94343E+16J/yr

### INDIGENOUS RENEWABLE ENERGY :

#### 8. Hydroelectricity

Production = 6067GWh/yr (통계청, 2000)

Energy (J) = (Hydroelect. production)\*(3.6 E12 J/GWh)  
 $= 2.18\text{E}+16\text{J/yr}$

#### 9. Agricultural Production

Production = 1.76E+07MT (통계청, 2000)

Energy(J) = (Production)\*(1 E6 g/MT)\*(3.5 kcal/g)\*(4186 J/kcal)  
 $= 2.57\text{E}+17\text{J/yr}$

## 10. Livestock Production

Production = 1.18E+06MT (통계청, 2000)

$$\begin{aligned}\text{Energy(J)} &= (\text{Production}) * (1 \text{ E6 g/MT}) * (4 \text{ kcal/g}) * (4186 \text{ J/kcal}) \\ &= 1.97\text{E}+16\text{J/yr}\end{aligned}$$

## 11. Fisheries Production

Production = 2.12E+06MT (통계청, 2000)

$$\begin{aligned}\text{Energy(J)} &= (\text{Production}) * (1 \text{ E6 g/MT}) * (4 \text{ kcal/g}) \\ &\quad * (4186 \text{ J/kcal}) * (0.20) = 7.10\text{E}+15\text{J/yr}\end{aligned}$$

## 12. Fuelwood Production

Production = 1.51E+05MT (통계청, 2000)

$$\begin{aligned}\text{Energy(J)} &= (\text{Production}) * (1 \text{ E6 g/MT}) * (3.6 \text{ kcal/g}) * (4186 \text{ J/kcal}) \\ &= 2.28\text{E}+15\text{J/yr}\end{aligned}$$

## 13. Forest Extraction

Harvest = 4.16E+06MT (통계청, 2000)

$$\begin{aligned}\text{Energy(J)} &= (\text{Harvest}) * (1 \text{ E6 g/MT}) * (3.6 \text{ kcal/g}) * (4186 \text{ J/kcal}) \\ &= 6.27\text{E}+16\text{J/yr}\end{aligned}$$

**NONRENEWABLE SOURCE USE FROM WITHIN SYSTEM :**

## 14. Coal production

Production = 4.20E+06MT (통계청, 2000)

$$\text{Energy(J)} = (\text{Production}) * (2.9 \text{ E10 J/MT}) = 1.22\text{E}+17\text{J/yr}$$

## 15. Metallic Minerals

Production = 4.15E+05MT/yr (MCIE and KEEI, 2000)

$$= 4.15\text{E}+11\text{g/yr}$$

## 16. Industrial Minerals

$$\begin{aligned}\text{Production} &= 8.46\text{E}+07\text{MT/yr (MCIE and KEEI, 2000)} \\ &= 8.46\text{E}+13\text{g/yr}\end{aligned}$$

## 17. Top Soil

$$\begin{aligned}\text{Area of dry paddies} &= 8.17\text{E}+05\text{ha (통계청, 2000)} \\ \text{Erosion rate} &= 14.8\text{MT/ha/yr (권순국, 1999)} \\ \text{Soil loss} &= (\text{Area}) * (\text{Erosion rate}) * (1\text{ E6 g/MT}) = 1.21\text{E}+13\text{g/yr} \\ \text{Area of forest} &= 6.52\text{E}+06\text{ha (통계청, 2000)} \\ \text{Erosion rate} &= 0.9\text{MT/ha/yr (임업연구원 내부자료)} \\ \text{Soil loss} &= (\text{Area}) * (\text{Erosion rate}) * (1\text{ E6 g/MT}) = 5.87\text{E}+12\text{g/yr} \\ \text{Total top soil loss} &= 1.80\text{E}+13\text{g/yr} \\ \text{Energy (J)} &= (\text{Total soil loss}) * (0.07\text{ gOM/g sed}) \\ &\quad * (3.6\text{ kcal/g}) * (4186\text{ J/kcal}) = 1.90\text{E}+16\text{J/yr}\end{aligned}$$

**IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES :**

## 18. Coal

$$\begin{aligned}\text{Imports} &= 5.22\text{E}+07\text{MT/yr (통계청, 2000)} \\ \text{Energy(J)} &= (\text{Imports}) * (2.9\text{ E10 J/MT}) = 1.51\text{E}+18\text{J/yr}\end{aligned}$$

## 19. Oil, crude

$$\begin{aligned}\text{Imports} &= 8.74\text{E}+08\text{BBL/yr (통계청, 2000)} \\ \text{Energy(J)} &= (\text{Imports}) * (6.28\text{ E9 J/BBL}) = 5.49\text{E}+18\text{J/yr}\end{aligned}$$

## 20. Petroleum Products

$$\begin{aligned}\text{Imports} &= 1.92\text{E}+08\text{BBL (통계청, 2000)} \\ \text{Energy(J)} &= (\text{Imports}) * (6.28\text{ E9 J/BBL}) = 1.20\text{E}+18\text{J/yr}\end{aligned}$$

## 21. Metallic Minerals

$$\text{Imports} = 3.86\text{E}+07\text{MT/yr (MCIE and KEEI, 2000)} = 3.86\text{E}+13\text{g/yr}$$

## 22. Industrial Minerals

$$\begin{aligned}\text{Imports} &= 3.20\text{E}+08\text{MT/yr (MCIE and KEEI, 2000)} \\ &= 3.20\text{E}+14\text{g/yr}\end{aligned}$$

## 23. Natural gas(LNG)

$$\begin{aligned}\text{Imports} &= 1.30\text{E}+07\text{MT (통계청, 2000)} \\ \text{Energy(J)} &= (\text{Imports}) * (1.27 \text{ E7 kcal/MT}) * (4186 \text{ J/kcal}) \\ &= 6.90\text{E}+17\text{J/yr}\end{aligned}$$

## 24. Goods &amp; Services = 1.20E+11\$/yr1) (통계청, 2000)

$$\text{Coal} = 1.91\text{E}+09\text{\$/yr2) (통계청, 2000)}$$

$$\text{Oil, crude} = 1.84\text{E}+10\text{\$/yr3) (통계청, 2000)}$$

$$\text{Petroleum products} = 3.65\text{E}+09\text{\$/yr4) (통계청, 2000)}$$

$$\text{Natural gas} = 2.07\text{E}+09\text{\$/yr5) (통계청, 2000)}$$

$$\text{Dollar paid for imports minus fuels}$$

$$= 9.37\text{E}+10\text{\$/yr1)-2)-3)-4)-5)}$$

**EXPORTS :**

$$25. \text{ Goods \& Services} = 1.44\text{E}+11\$ \text{ (통계청, 2000)}$$

### 부록 3 : <표 3-6>의 계산과정

#### 1. Sunlight

Area = 3.36E+08m<sup>2</sup> (통계청, 1998)

Insolation = 4.88E+09 J/m<sup>2</sup>/yr (기상청, 1999)

Albedo = 0.3(% given as decimal)

Energy (J) = (Area)\*(Insolation)\*(1-albedo) = 1.15E+18J/yr

#### 2. Wind

Area = 3.36E+08m<sup>2</sup>

Avg. wind speed = 3.4m/s

Geostrophic wind = (Avg. wind speed)\*(10/6) = 5.67 m/s

Energy (J) = (1.3 kg/m<sup>3</sup>)\*(1.0 E-3)\*(Geostrophic wind)<sup>3</sup>  
\*(3.14 E7 s/yr)\*(Area) = 2.49E+15J/yr

#### 3. Tide

Average tide = 2.81m

Total energy (J) = (Area)\*(0.5)\*(706/yr)\*(Average tide)<sup>2</sup>  
\*(1.025 E3 kg/m<sup>3</sup>)\*(9.8m/s<sup>2</sup>) = 9.40E+15J/yr

#### 4. Rain, chemical

Rain = 1.563m/yr (기상청, 1999)

Energy (J) = (Area)\*(Rain)\*(1000 kg/m<sup>3</sup>)\*(4.94 E3 J/kg)  
= 2.32E+16J/yr

---

**에머지 개념을 이용한 해양환경자원의 가치평가와 정책활용 방안**

---

2002年 12月 26日 印刷  
2002年 12月 31日 發行

|            |                    |                 |   |
|------------|--------------------|-----------------|---|
| 編輯兼<br>發行人 | 李                  | 廷               | 旭 |
| 發行處        | 韓 國 海 洋 水 產 開 發 院  |                 |   |
|            | 서울특별시 송파구 신천동 11-6 |                 |   |
| 전 화        | 2105-2700          | FAX : 2105-2800 |   |
| 등 록        | 1984년 8월 6일        | 제16-80호         |   |

---

組版・印刷/해항사 393-0836      정가 15,000원

판매 및 보급 : 정부간행물판매센터  
Tel : 394-0337, 734-6818