

결합생산성 분석방법을 통한 항만시스템 취급능력 향상방안

2004. 12

양창호·최용석·최상희·최종희

□ 보고서 집필 내역

◆ 연구책임자

- 양 창 호 : 제1장, 제4장, 제5장

◆ 연 구 진

- 최 용 석 : 제2장, 제3장, 제4장
- 최 상 희 : 제3장
- 최 종 희 : 제2장

□ 산·학·연·정 연구자문위원

◆ 이 규 용(해양수산부 항만정책과 사무관)

◆ 장 성 용(서울산업대학교 교수)

머 리 말

항만의 편의성을 논할 때 선주와 화주에 대한 서비스 수준을 가장 대표적인 지표로 사용하게 된다. 선박이 항만에서 대기하지 않고 항만에 머무르는 시간이 단축될 수 있다면, 그리고 수출입화물이 항만에 신속히 반출입 될 수 있다면 서비스 수준이 높은 항만이 될 수 있다.

항만은 최근 컨테이너 선박의 대형화에 따라 선박의 재항시간을 단축시켜야 하는 상황에 처해 있다. 이를 위해 하역시스템의 자동화, 운영시스템의 고도화, 터미널 시설물의 재배치, 운영인력의 재교육 등을 통해 터미널 전체의 생산성을 높이려 노력하고 있다. 이러한 노력을 경제적으로 하기 위해서는 터미널의 어느 부분을 우선 보완하거나, 개선시켜야 생산성 향상에 크게 기여할 것인가를 파악해야 한다.

컨테이너터미널의 생산성은 일반적으로 안벽에서의 시간당 양적하 개수(Lifts)로 나타내고 있다. 터미널 운영사 입장에서는 컨테이너크레인(C/C)당 양적하 개수를, 그리고 선주의 입장에서는 선박당 시간당 양적하 개수를 생산성으로 사용하고 있다. 이 안벽 생산성은 각종 장비, 운영시스템, 인력, 터미널 부지, 장치규칙 및 무료장치기간 등 터미널 전체의 제반 요인에 의해 영향을 받게 된다.

그러나 안벽의 양적하 생산성은 작업결과로 나타난 생산성이므로 어떤 요인에 의해 생산성 향상이 제약을 받는지, 그리고 터미널의 어느 공정에 의해 생산성이 떨어지는지를 규명할 수가 없다. 즉 컨테이너터미널의 생산성을 분석하기 위한 다양한 평가지표들이 사용되고 있으나 이는 결과 분석을 위한 지표일 뿐, 생산성 애로공정의 원인규명을 통한 문제해결에는 기여하지 못하고 있다. 이 중에서도 안벽과 이송 그리고 야드에서의 취급능력 불균형 및 생산성 부조화가 터미널의 전체 취급능력 및 생산성 향상에 가장 큰 제약요인이 되고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 항만 하역시스템을 중심으로 생산성 향상의 애로요인을 파악할 수 있는 지표를 설정하고 모델링을 하였다. 최종적으로는 항만하역시스템의 새로운 결합생산성 지표를 개발하여 생산성 애로공정을 파악할 수 있도록 함으로써 컨테이너터미널의 항만하역시스템 취급능력을 극대화하고 생산성을 향상시킬 수 있도록 함을 목적으로 하였다.

이를 위해 우선 항만하역시스템을 구성하는 공정 및 장비들의 생산성을 분리하여 이를 다시 결합하는 결합생산성 개념을 제시하였다. 결합생산성 구성요소를 분석하고 요소들 간의 상호 인과관계 및 트레이드-오프 관계를 규명하여 각각 분리된 생산성을 결합시키는 결합생산성모형을 수립하였다. 이렇게 결합된 터미널 생산성은 내부에 하역시스템을 구성하는 각 공정별로 총 생산성에 미치는 영향이 포함되어 있기 때문에 공정별로 애로점의 정도를 비교할 수 있고 시급히 개선해야 할 부분을 파악할 수도 있다.

결합생산성모형을 이용하여 애로공정을 분석하고 하역시스템 취급능력 향상방안을 제시하기 위해 실제 컨테이너터미널을 대상으로 시뮬레이션 실험을 하고, 그 결과를 분석하였다. 부산의 감만부두 대한통운 터미널과 우암터미널을 대상으로 시뮬레이션 분석을 수행하였고 이 결과를 토대로 이들 터미널의 취급 능력 극대화 및 생산성 향상을 위한 방안과 정책건의를 제시하였다. 앞으로 결합생산성 평가지표가 부산항 컨테이너터미널의 리모델링시, 또는 신규 항만의 개발 계획 수립시, 그리고 부두 통합화방안 수립시 하역시스템 평가에 활용되기를 바란다.

본 연구보고서는 본원의 양창호 연구위원이 연구책임을 맡고, 최종희 부연구위원, 최상희·최용석 책임연구원이 공동으로 집필하였다. 좋은 지적과 조언을 주신 서울산업대의 장성용 교수, 해양수산부의 이규용 사무관, 그리고 본원의 정봉민 해운물류·항만연구센터장에게 심심한 감사를 드린다. 이 밖에 연구수행에 도움을 준 서재화씨에게도 감사드린다.

끝으로 본 보고서의 내용은 전적으로 필자들 각자의 연구의견이며, 한국해양수산개발원의 공식적인 견해가 아님을 밝혀 둔다.

2004년 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. 연구의 필요성 및 목적	1
2. 주요 연구내용 및 연구방법	2
제 2 장 국내 컨테이너터미널의 생산성 분석	4
1. 장비 보유율	4
2. 안벽 생산성	5
3. C/C 생산성	11
제 3 장 결합생산성 개념 수립 및 분석	15
1. 결합생산성 개념 수립	15
1) 기본전제 / 15	
2) 분석과정 / 16	
3) 결합생산성 개념수립 / 18	
2. 항만시스템의 생산성 구성요소 분석	19
1) 개요 / 19	
2) 결합생산성 구성요소 / 21	
3. 결합생산성 평가지표 선정	26
제 4 장 결합생산성 모형 설정 및 실증분석	31
1. 결합생산성 모형 설정	31
1) 작업시간의 분해에 의한 결합생산성 모형 수립 / 31	

2) 결합생산성 분석을 위한 시뮬레이션 구현 / 36	
3) 시뮬레이션 모델 개발 환경 / 42	
2. 시뮬레이션에 의한 실증분석	43
1) 개요 / 43	
2) 애로공정 조정 방법론 / 43	
3) 전제조건 / 45	
4) 실증분석 1 : 우암터미널 / 47	
5) 실증분석 2 : 감만부두 대한통운 / 57	
 제5장 결론 및 정책건의	67
1. 결론	67
2. 정책건의	68
1) 결합생산성 평가지표 활용방안 / 68	
2) 항만에 대한 결합생산성 적용방안 / 69	
 참고문헌	71
 부록 A : 감만부두에 대한 결합생산성 관련지표	73

표 목 차

<표 2-1> 부산항 컨테이너터미널 장비 보유율	5
<표 2-2> 안벽 생산성의 컨테이너터미널 조건별 유형분류	6
<표 2-3> 2003년 부산항 컨테이너터미널의 안벽길이 m당 처리물량(TEU) 비교	6
<표 2-4> 부산항 컨테이너터미널의 안벽크레인 생산성	11
<표 2-5> 부산항 컨테이너터미널의 하역시스템 구성과 C/C 생산성	13
<표 3-1> 분석모형 기본전제	16
<표 3-2> 컨테이너터미널의 생산성 영향인자와 생산성 평가지표	21
<표 3-3> 생산성 영향인자와 생산성 지표 I (선박/선석/안벽장비)	24
<표 3-4> 생산성 영향인자와 생산성 지표 II(야드장비/이송장비/야드)	25
<표 3-5> 생산성 영향인자와 생산성 지표 III(안벽/이송/야드장비)	26
<표 3-6> 생산성 영향인자와 생산성 지표(종합)	27
<표 3-7> 생산성 평가지표 선정기준	28
<표 3-8> 결합생산성 구성요소, 영향인자, 평가지표	30
<표 4-1> 선석 모형의 입출력 관계	37
<표 4-2> 장치장 모형의 입출력 관계	38
<표 4-3> TC의 상태	39
<표 4-4> C/C의 상태	39
<표 4-5> YT의 상태	40
<표 4-6> 애로공정 요소 및 발생지점에 따른 원인	45
<표 4-7> 장비의 성능 입력값	47
<표 4-8> 운영정책 입력값	48
<표 4-9> 시설물 입력값	48
<표 4-10> C/C 대수변화에 따른 실험결과값	49
<표 4-11> TC 대수변화에 따른 실험결과값	49
<표 4-12> YT 대수변화에 따른 실험결과값	50
<표 4-13> C/C 대수변화에 따른 평가값	51

<표 4-14> TC 대수변화에 따른 평가값	52
<표 4-15> YT 대수변화에 따른 평가값	53
<표 4-16> 실증분석 1의 애로공정 및 개선점	56
<표 4-17> 장비의 성능 입력값	57
<표 4-18> 운영정책 입력값	58
<표 4-19> 시설물 입력값	58
<표 4-20> C/C 평균대기시간비율($W_{\kappa(C/C)}$)	59
<표 4-21> TC 평균대기시간비율($W_{\kappa(TC)}$)	59
<표 4-22> YT의 C/C 평균대기시간비율($W_{\kappa(YT+C/C)}$)	60
<표 4-23> YT의 TC 평균대기시간비율($W_{\kappa(YT+TC)}$)	61
<표 4-24> 안벽대기값(A_w)	61
<표 4-25> 야드대기값(Y_w)	62
<표 4-26> 평가함수값(P)	63
<표 4-27> 상대적 낭비효과	63
<표 4-28> 실증분석 2의 애로공정 및 개선점	66

그림 목 차

<그림 1-1>	연구흐름도	3
<그림 2-1>	2003년 부산항 주요 터미널 선석점유율(월별)	7
<그림 2-2>	2003년 부산항 주요 터미널 C/C 가동률(월별)	8
<그림 2-3>	2003년 부산항 주요 터미널 TC 가동률(월별)	8
<그림 2-4>	2003년 부산항 주요 터미널 YT 가동률(월별)	9
<그림 2-5>	A 터미널(우암부두) 선석점유율 및 장비 가동률(2003년도 월별) ·	9
<그림 2-6>	B 터미널(신선대) 선석점유율 및 장비 가동률(2003년도 월별) ·	10
<그림 2-7>	C 터미널(감만부두) 선석점유율 및 장비 가동률(2003년도 월별)	10
<그림 2-8>	국내 컨테이너터미널의 C/C 생산성 변화추이	13
<그림 2-9>	컨테이너터미널별 장비 보유율과 C/C 생산성	14
<그림 3-1>	컨테이너터미널에서의 작업흐름	17
<그림 3-2>	컨테이너터미널의 대기네트워크	17
<그림 3-3>	결합생산성 분석을 위한 개념 모형	19
<그림 3-4>	컨테이너 흐름에 따른 결합생산도	22
<그림 3-5>	결합생산성 영역별 영향인자	29
<그림 4-1>	C/C 서버 모형	36
<그림 4-2>	TC 서버 모형	37
<그림 4-3>	TC와 C/C의 상태전이도	39
<그림 4-4>	YT 상태전이도	40
<그림 4-5>	선박 상태전이도	41
<그림 4-6>	외부차량 상태전이도	42
<그림 4-7>	C/C 대수변화에 따른 실험결과값	49
<그림 4-8>	TC 대수변화에 따른 실험결과값	50
<그림 4-9>	YT 대수변화에 따른 실험결과값	50
<그림 4-10>	C/C 대수변화에 따른 평가함수값의 민감도	51
<그림 4-11>	TC 대수변화에 따른 평가함수값의 민감도	52

<그림 4-12> YT 대수변화에 따른 평가함수값의 민감도	53
<그림 4-13> C/C 평균대기시간비율 실험결과값	59
<그림 4-14> TC 평균대기시간비율 실험결과값	60
<그림 4-15> YT의 C/C 평균대기시간비율 실험결과값	60
<그림 4-16> YT의 TC 평균대기시간비율 실험결과값	61
<그림 4-17> 안벽대기값 산출결과	62
<그림 4-18> 야드대기값 산출결과	62
<그림 4-19> 평가함수값	63
<그림 4-20> TC 대수변화에 따른 상대적 낭비효과	64
<그림 4-21> YT 대수변화에 따른 상대적 낭비효과	64
<그림 A-1> TC 대수 변화에 따른 YT 사이클타임	73
<그림 A-2> YT 대수 변화에 따른 YT 사이클타임	73
<그림 A-3> TC 대수 변화에 따른 YT의 C/C 앞 도착간격	74
<그림 A-4> YT 대수 변화에 따른 YT의 C/C 앞 도착간격	74
<그림 A-5> TC 대수 변화에 따른 YT의 안벽대기율	75
<그림 A-6> YT 대수 변화에 따른 YT의 안벽대기율	75
<그림 A-7> TC 대수 변화에 따른 YT의 야드대기율	76
<그림 A-8> YT 대수 변화에 따른 YT의 야드대기율	76

<요 약>

제1장 서론

1. 연구의 필요성 및 목적

- 국내 컨테이너터미널의 장비 보유대수가 외국의 경쟁항만에 비해서 상대적으로 낮은 수준임
 - 국내 안벽크레인 대비 야드크레인의 보유율이 평균 2.37대
 - 경쟁항만인 홍콩항이 평균 3.84대, 싱가포르항이 평균 3.25대
 - C/C는 선석당 2.76대, C/C당 YT 대수는 5.34대로 상대적으로 낮음
- 컨테이너터미널의 생산성을 분석하기 위한 다양한 평가지표들이 사용되고 있으나 이는 결과 분석을 위한 도구의 역할을 하며, 애로공정의 원인규명을 통한 문제해결에는 기여하지 못함
- 특히 항만하역시스템을 구성하는 장비들 간의 생산성에 상호 영향을 주며, 이러한 생산성에서의 트레이드-오프 관계를 규명하여 애로공정이 발생하는 장비의 생산성을 조정함으로써 취급능력을 향상시키는 결합 생산성 평가지표와 분석기술이 필요함
- 항만하역시스템의 결합생산성 지표의 개발과 분석으로 애로공정을 최소화하여 컨테이너터미널 항만하역시스템의 취급능력을 극대화하고 생산성을 향상시키기 위한 방안을 제시하고자 함

2. 주요 연구내용 및 연구방법

- 제2장 ‘국내 컨테이너터미널의 생산성 분석’
 - 장비 보유율
 - 안벽 생산성
 - C/C 생산성

- 제3장 ‘결합생산성 개념 수립 및 분석’
 - 결합생산성 개념분석
 - 항만시스템의 생산성 구성요소 분석
 - 결합생산성 평가지표 선정
- 제4장 ‘결합생산성 모형 설정 및 실증분석’
 - 결합생산성 모형 설정(장비의 작업시간 분해에 의한 모형 수립, 시뮬레이션 구현 및 이용 방법)
 - 시뮬레이션을 이용한 실증 분석(애로공정 조정 방법론, 실증분석 결과 분석)
- 제5장에서는 본 연구의 결론과 정책건의를 기술
 - 결합생산성 평가지표 활용방안
 - 항만에 대한 결합생산성 적용방안
- 연구방법은 국내 컨테이너터미널 생산성 현황 분석, 생산성 평가지표 문헌고찰, 항만시스템 취급능력 평가지표 선정 등의 자료조사 및 분석 단계와 결합생산성 개념 분석, 항만시스템의 생산성 구성요소 분석, 결합생산성 평가지표 선정 등의 개념 정립 단계를 거쳐 결합생산성 모형을 개발한 후 시뮬레이션 방법을 통하여 애로공정 파악을 위한 민감도 분석을 수행함으로써 결합생산성 적용방안 및 취급능력 향상방안을 수립함

제2장 국내 컨테이너터미널의 생산성 분석

- 본 연구에서는 컨테이너터미널 생산성과 관련하여 처리용량 측면의 장비 보유율과 처리능력 측면의 안벽 생산성 및 C/C 생산성 현황을 조사하였음

1. 장비 보유율

- 국내 컨테이너터미널의 안벽크레인(C/C : Container Crane) 대비 야드 크레인(TC : Transfer Crane)의 보유율이 평균 2.37대(부산항 2.52대)

로 경쟁항만인 홍콩항의 평균 3.84대와 싱가포르항의 평균 3.25대에 비해 상대적으로 낮은 수준임

- C/C 보유율 또한 부산항의 경우, 선석당 2.76대, C/C당 YT(Yard Tractor) 보유율도 5.34대로 보유수준이 낮으며, 야드 장치장 면적도 상대적으로 부족한 실정임

2. 안벽 생산성

- 2003년 부산항의 3개 컨테이너터미널 월별 선석점유율, C/C 가동률, TC 가동률, YT 가동률에 대한 실적 데이터를 분석하였음
- 선석점유율 측면에서 공용터미널과 전용터미널의 운영형태에 따른 선석점유율 차이점이 뚜렷하게 발생하고 있음. C/C 가동률 측면에서는 터미널의 운영형태와 선석 수의 차이에 따른 C/C 가동률의 차이점이 발생하고 있음을 알 수 있으며, 특히 B 터미널(신선대)의 경우 다른 2개 터미널(우암부두, 감만부두)보다 현저하게 낮은 TC 및 YT 가동률을 나타내고 있음. 그러나 B 터미널의 안벽 생산성이 다른 2개 터미널의 안벽 생산성과 큰 차이점은 없는 것으로 조사됨

3. C/C 생산성

- 국내에서 가장 일반적으로 적용하는 C/C의 생산성은 총 작업시간 생산성(또는 총 크레인 생산성)이나 순 작업시간 생산성(순 크레인 생산성)이며, 국내 컨테이너터미널의 총 작업시간 생산성은 해마다 일정한 성장률로 성장하는 선형적인 추세를 가지고 있음
- 1994년 이후 총 작업 생산성은 시간당 18~19개에서 22개 내외로 증가해 왔으며, 부산항 컨테이너터미널의 하역시스템 구성비율은 평균 1:5.3:2.5(C/C : YT : TC)임
- 컨테이너터미널별 장비 보유율과 C/C 생산성을 분석한 결과, 장비조합의 적정성은 C/C 생산성과 항상 일치하지는 않으며, 최적의 장비조합을 구성하기 위해서는 결합생산성에 의한 애로공정 분석이 필요함

제3장 결합생산성 개념 수립 및 분석

1. 결합생산성 개념 수립

- 결합생산성은 항만하역시스템이라는 시스템을 구성하는 장비들의 개별 생산성을 결합하여 새로운 생산성 지표로 변환해서 사용하기 위한 의미로 정의함
 - 장비 보유율이 비교를 위한 대안이 됨과 동시에 의사결정을 위한 변수 역할을 함
- 본 연구에서는 컨테이너터미널의 생산성에 가장 결정적 역할을 담당하는 안벽장비(C/C), 이송장비(YT), 야드장비(TC)가 결합되어 나타나는 생산성을 결합생산성 개념으로 정의
 - C/C, TC는 항만 생산성을 좌우하는 서버의 역할을 하며 이와 연계되는 YT는 클라이언트의 역할을 담당
 - 따라서 세 구성요소의 유기적이고 원활한 연계체계가 중요
- 결합생산성 개념은 C/C, TC, YT가 연계된 형태이면서, 장비 보유율과 같이 조별 할당되어 작업하는 것으로 가정
 - 양적하작업>Loading and Discharging)에서의 C/C의 선박 대 안벽작업(Ship To Shore Operation), C/C에 조별 할당받은 YT의 이송 사이클(Transfer Cycle)에 따라 이루어지는 이송작업(Transport Operation), TC에 의해서 이루어지는 적재(Storage)와 외부차량 서비스를 위한 반입/반출(Delivery/Receipt) 등으로 구성된 개념을 수립

2. 항만시스템의 생산성 구성요소 분석

- 일반적으로 컨테이너터미널에서의 결합생산성이라 함은 선석, 야드, 게이트, 하역장비, 노동력 등과 같이 항만에서의 모든 구성요소들이 결합되어 나타난 항만 생산성을 일컬음
 - 현재까지 항만 생산성을 선석당 처리능력, C/C의 시간당 처리능력 등을 기준으로 평가하고 있음
- 컨테이너 흐름에 따라 본선하역과 반출입하역 결합생산성으로 구분

- 안벽영역의 생산성 구성요소 : 선박, 선석, 안벽장비
- 야드영역의 생산성 구성요소 : 야드장비, 이송장비, 야드
- 하역장비영역의 생산성 구성요소 : 안벽, 이송, 야드장비

3. 결합생산성 평가지표 선정

- 기존 항만 생산성 지표는 실질적 항만 운영의 경험적 결과로서 C/C의 시간당 처리능력 등이 대부분의 생산성 변동요인을 포함하기는 하나 장비별 생산성 영향인자 중 어떤 요인이 어느 정도 통합 생산성에 영향을 미치고 있는지를 모르는 상황임
 - 기존 터미널에 대한 생산성 개선을 위한 방안수립이 비합리적
 - 신규 터미널 건설시에도 고생산성의 터미널 설계가 이루어지지 못함
- 결합생산성 평가지표는 안벽/이송/야드장비의 결합시 모든 운영요소를 고려하여 결합생산성에 부정적 영향을 미치는 대기시간값을 최소화하는 것이 목표
 - 결합생산성 평가지표는 각 장비들의 결합시 장비 간의 대기시간으로 설정
 - 안벽장비 대기시간, 안벽장비 앞 이송장비 대기시간, 야드장비 앞 이송장비 대기시간, 야드장비 대기시간으로 구성됨

제4장 결합생산성 모형 설정 및 실증분석

1. 결합생산성 모형 설정

- 하역시스템을 구성하는 장비들의 결합생산성을 모형화하기 위해서 각 장비의 작업시간을 분해함
 - C/C와 TC는 동일한 작업시간 모형을 적용

$$U_i = \frac{O_i + M_i + W_i}{T}, \text{ for all } i \quad (4-1)$$

$$I_i = 1 - U_i, \text{ for all } i \quad (4-2)$$

$$W_i = T - (O_i + M_i + I_i), \text{ for all } i \quad (4-3)$$

- YT는 크레인과 다른 작업시간 모형 적용

$$T = k\{M_i + W(C/C + TC)_i\} + I_i, \text{ for all } i \quad (4-4)$$

$$W(C/C + TC)_i = \frac{T - I_i}{k} - M_i, \text{ for all } i \quad (4-5)$$

- 장비작업시간 모형에서 구분된 장비별 시간인자에서 결합생산성 평가 함수를 산출함
- 생산성을 저해하는 요인이 대기시간이므로 생산성과 대기시간은 반비례의 관계가 성립함을 전제로 하며, 대기값을 산출하기 위한 방법으로 는 대기시간비율을 산출하는 방법이 사용 가능함

[평가모형 기호 정의]

$W_{r(C/C)}$: C/C의 YT 평균대기시간비율

$W_{r(TC)}$: TC의 YT 평균대기시간비율

$W_{r(YT+C/C)}$: YT의 C/C 앞 평균대기시간비율

$W_{r(YT+TC)}$: YT의 TC 앞 평균대기시간비율

A_w : C/C와 YT의 안벽에서의 평균대기값

Y_w : TC와 YT의 야드에서의 평균대기값

w_1 : 안벽대기 가중치($w_1 > w_2 + M$)

w_2 : 야드대기 가중치($w_2 > 0$)

P : 결합생산성 평가함수

[대기시간비율 산출 방식]

$$A_w = W_{r(C/C)} + W_{r(YT+C/C)} \quad (4-6)$$

$$Y_w = W_{r(TC)} + W_{r(YT+TC)} \quad (4-7)$$

$$P = w_1 * A_w + w_2 * Y_w \quad (4-8)$$

- 각 장비의 대수에 대한 시나리오는 $S(N_{CC}, N_{TC}, N_{YT})$ 로 정의하여 C/C, TC, YT 각 장비의 대수에 대한 장비조합을 시나리오로 설정하였음
- 평가모형은 평가함수 P에 대한 값을 비교하여 최소값을 구하는 문제로 간주하여 시나리오를 수립하였음
- 하역시스템을 구성하는 C/C, YT, TC의 작업상태를 정의한 후 작업상태

- 에 따라 작업을 위한 대기현상 및 상호작용을 객체지향접근법으로 모델링이 가능하도록 상태전이 모델링(state transition modeling)을 사용함
- 상태전이 모델링에서는 C/C, TC, YT, 선박, 외부차량을 모델링 대상으로 함
- 시뮬레이션 모형에서는 상태전이 모델링에서의 각 장비의 작업, 이동, 대기 등에 대한 시간통계량과 사이클타임 주기 및 회수에 대한 통계량을 구하여 분석이 가능하도록 함
- 컨테이너터미널의 하역시스템을 서버와 클라이언트에 대한 상호작용으로 분석하여 모델링하였으므로 객체지향 프로그래밍(object-oriented programming) 및 객체지향 시뮬레이션(object-oriented simulation)이 가능한 Visual C++를 개발환경으로 함

2. 시뮬레이션에 의한 실증분석

1) 개요

- 결합생산성 모형을 이용하여 애로공정을 분석하고 하역시스템 취급능력 향상방안을 제시하기 위해 실제 컨테이너터미널을 대상으로 시뮬레이션 실험을 하고, 그 결과를 분석함

2) 애로공정 조정 방법론 적용

- 애로공정 조정 방법론은 컨테이너터미널 하역시스템의 생산성 관련 개념의 차이를 이용하여 조정 방법을 정의함
- 처리용량에 대한 기준 정의
 - i) 설계용량 : 이론적 또는 수리적 모델로부터 유도된 용량
 - ii) 운영용량 : 유사항만에서 달성한 결과에 기초한 용량
 - iii) 물리적 한계 : 100% 선석점유율에서 측정되는 용량
- 애로공정의 적용에 가능한 방법
 - [조정방법 1] 기존 하역시스템 장비조합 시나리오 변경
 - 이 방법에 의해서 애로공정이 발생한 장비영역의 대기시간을 줄여나가면서 애로공정을 감소시킴

[조정방법 2] 안벽과 야드 대기값의 가중치 부여방법

이 방법은 하역시스템 장비조합 평가함수값 산출시 안벽과 야드의 대기값에 대한 가중치인 w_1 과 w_2 를 조정하는 방법이며, 안벽과 야드에서 대기에 의한 손실값을 달리 부여하는 것임

<요약 표-1>

애로공정 요소 및 발생지점에 따른 원인

애로공정 요소		발생 지점		안벽		야드	
				C/C	YT	YT	TC
C/C 대기	$W_{(C/C)}$	애로공정	장비부족				장비부족
TC 대기	$W_{(TC)}$	장비부족	장비부족				애로공정
YT 대기(안벽)	$W_{(YT+C/C)}$	장비부족	애로공정				
YT 대기(야드)	$W_{(YT+TC)}$					애로공정	장비부족

주 : 회색으로 표시된 부분이 애로공정 발생지점이며, 원인은 해당 장비부족으로 표시됨

3) 전제조건

- 실험 대상 : 우암터미널, 감만부두 대한통운
- C/C 대수를 결정하는 근거
 - 선사에서 재항시간에 대한 요구사항이 있을 경우
 - 선박의 작업 물량에 따라 판단
 - 선박의 크기에 따라 결정
- 면담결과를 바탕으로 C/C 4대를 할당하여 작업을 하는 부산항 감만부두 (주)대한통운의 한 선석을 대상으로 실험 및 분석함
- 컨테이너터미널별로 시설물배치, 장치기간, 운영시스템 효율성 등의 차이로 인해서 동일한 장비구성비가 적용되지 않음

4) 실증분석 1 : 우암터미널

(1) 실험설계

- 시뮬레이션 실험을 위해서 연간 물동량 자료, 장비 성능 자료, 운영정책 자료, 시설물 자료 등을 입력하며, 시뮬레이션 실험 결과는 C/C 대수변화, TC 대수변화, YT 대수변화에 대한 시나리오별로 정리함

(2) 실험 결과

- 시나리오별 실험결과값을 제시하여 평가모형값을 검증하기 위해 사용함
 - 장비통계량(C/C 활용도, TC 활용도, YT 선회시간)
 - 고객통계량(선석점유율, 접안시간, 외부차량 평균체재시간)

(3) 결과 분석

- C/C 대수 증가시 분석 결과
 - C/C 평균대기시간비율($W_{\lambda(C/C)}$)과 TC 평균대기시간비율($W_{\lambda(TC)}$)이 동일하게 감소함
 - 안벽의 평균대기값(A_w)은 감소하나 야드의 평균대기값(Y_w)은 증가함
- TC 대수 증가시 분석 결과
 - C/C 평균대기시간비율($W_{\lambda(C/C)}$)과 TC 평균대기시간비율($W_{\lambda(TC)}$)이 동일하게 감소함
 - 안벽의 평균대기값(A_w)과 야드의 평균대기값(Y_w)이 동일하게 감소함
- YT 대수 증가시 분석 결과
 - C/C 평균대기시간비율($W_{\lambda(C/C)}$)과 TC 평균대기시간비율($W_{\lambda(TC)}$)이 동일하게 감소함
 - 안벽의 평균대기값(A_w)은 S(2,10,5)까지는 감소세를 보인 후 다시 증가하고, 야드의 평균대기값(Y_w)은 S(2,10,4)까지는 감소하다가 다시 증가함
- 시나리오 중에서 결함생산성 평가함수값을 고려할 때 낭비가 되는 대기 현상을 가장 최소화하는 시나리오는 P값이 최소인 S(2,14,4)임

- 기존 모델의 TC 대수 10대를 14대로 변경할 경우 결합생산성의 목적함수인 대기현상을 최소화함
- 또한 장비 보유에 따른 상대적 낭비효과가 최저 수준이 될 수 있으며, 이 때 C/C:YT:TC의 구성비율이 1:4:3.5임
- 시뮬레이션 실험에서 고려한 하역시스템의 장비 보유대수 중 TC의 보유대수를 늘리는 것이 장비 결합생산성 측면에서 가장 효과적임

(4) 애로공정 분석 및 개선방향

- 애로공정 분석 결과, 애로공정은 C/C 대기와 YT의 TC 앞 대기에서 발생하였음
- 애로공정 발생원인은 C/C 대기는 YT 및 TC 부족이며, YT의 TC 앞 대기는 TC 부족임
- 결합생산성의 목적함수인 대기에 대한 평가함수값을 최소화함
- 장비 보유에 따른 상대적 낭비효과가 최저 수준이 되어 애로공정이 제거될 수 있음

<요약 표-2>

실증분석 1의 애로공정 및 개선점

하역시스템		애로공정	개선점
장비명	보유수량		
C/C	4		
TC	10	C/C 대기 YT의 TC 앞 대기	현재의 10대에서 14대로 보유 수준을 높임
YT	16		

4) 실증분석 2 : 감만부두 대한통운

(1) 실험설계

- 시뮬레이션 실험을 위해서 연간 물동량 자료, 장비 성능 자료, 운영정책 자료, 시설물 자료 등을 입력하며, 시뮬레이션 실험 결과는 C/C 대수를 고정하고 TC 대수변화 및 YT 대수변화에 대한 시나리오별로 정리함

(2) 실험 결과

- 결합생산성 모형의 값을 분석하는 단계별로 얻은 결과는 다음과 같음

- C/C 평균대기시간비율($W_{r(C/C)}$)은 YT 대수가 늘어날수록 감소하고 TC 대수가 늘어갈수록 감소함
- TC 평균대기시간비율($W_{r(TC)}$)은 YT 대수가 늘어나면 감소하고 TC 대수가 늘어나면 증가함
- YT의 C/C 평균대기시간비율($W_{r(YT+C/C)}$)은 YT 5대 이상, TC 10대 이상일 때 급격히 증가함
- YT의 TC 평균대기시간비율($W_{r(YT+TC)}$)은 YT 대수와 TC 대수가 늘어날수록 감소함
- 안벽대기값(A_w)은 YT가 5대 이상이고 TC가 12대 이상이면 감소세가 안정화됨
- 야드대기값(Y_w)은 YT 4대 이상이면 TC가 10대 이상에서 감소세를 보임
- 결합생산성의 평가함수값은 TC가 10대 이상에서 비슷한 값을 보임
- 상대적 낭비효과는 TC 10대 이상에서 급격히 감소하며, YT는 5대 이상이 되면 감소세가 많이 발생함

(3) 결과 분석

- TC 대수 증가시 분석 결과
 - TC 대수가 증가함에 따라 C/C 평균대기시간비율($W_{r(C/C)}$)은 감소세를 보이고, TC 평균대기시간비율($W_{r(TC)}$)은 증가세를 보임
 - TC 대수가 증가함에 따라 안벽에서의 평균대기값(A_w)은 감소세를 보이고 야드에서의 평균대기값(Y_w)은 증가와 감소의 패턴이 동시에 발생함
- YT 대수 증가시 분석 결과
 - C/C 평균대기시간비율($W_{r(C/C)}$)이 감소하며, TC 평균대기시간비율($W_{r(TC)}$)도 감소함
 - 안벽에서의 평균대기값(A_w)은 TC 10대 이상부터는 동일한 추세로 감소세를 보인 후 안정화되어 가며, 야드에서의 평균대기값(Y_w)은 TC 6, 8대와 10대 이상이 뚜렷한 추세의 차이를 보여 10대 이상일 경우 증가하다가 완만히 감소함

- 시나리오 중에서 결합생산성 평가함수값을 고려할 때 낭비가 되는 대기 현상을 가장 최소화하는 시나리오는 P값이 최소인 S(4,12,6)임
 - 기존 모델의 TC 대수 10대를 12대로 변경할 경우 결합생산성의 목적함수인 대기현상을 최소화함
 - 또한 장비 보유에 따른 상대적 낭비효과가 최저 수준이 될 수 있으며, 이 때 C/C:YT:TC의 구성비율이 1:6:3임
 - 시뮬레이션 실험에서 고려한 하역시스템의 장비 보유대수 중 TC의 보유대수를 늘리는 것이 장비의 결합생산성 측면에서 가장 효과적임

(4) 애로공정 분석 및 개선방향

- 애로공정 분석 결과, 애로공정은 C/C 대기와 YT의 TC 앞 대기에서 발생하였음
 - 애로공정 발생원인은 C/C 대기는 YT 및 TC 부족이며, YT의 TC 앞 대기는 TC 부족임
 - 애로공정인 TC 부족으로 인한 C/C의 대기와 YT의 TC 앞 대기를 최저 수준으로 낮출 수 있어 결합생산성의 목적함수인 대기에 대한 평가함수값을 최소화함
 - 장비 보유에 따른 상대적 낭비효과가 최저 수준이 되어 애로공정이 제거될 수 있음

<요약 표-3>

실증분석 2의 애로공정 및 개선점

하역시스템		애로공정	개선점
장비명	보유수량		
C/C	4		
TC	10	C/C 대기	현재의 10대에서 12대로 보유수준을 높임
		YT의 TC 앞 대기	
YT	24		

제5장 결론 및 정책건의

1. 결론

- 컨테이너터미널의 생산성을 분석하기 위한 다양한 평가지표들이 사용되고 있으나 이는 결과 분석을 위한 도구의 역할을 하므로 애로공정의 원인규명을 통한 문제해결을 위해 결합생산성 개념이 필요함
- 특히 항만하역시스템을 구성하는 장비들 간의 생산성에 상호 영향을 주며, 이러한 생산성에서의 트레이드-오프 관계를 규명하여 애로공정이 발생하는 장비의 생산성을 조정함으로써 취급능력을 향상시키는 결합생산성 평가지표와 분석기술이 필요함
- 항만하역시스템의 결합생산성 지표의 개발과 분석으로 애로공정을 최소화하여 결합생산성을 최대화할 수 있는 컨테이너터미널의 항만하역시스템의 취급능력을 극대화하고 생산성을 향상시키기 위한 방안을 제시

2. 정책건의

- 결합생산성 평가지표 활용방안
 - 항만하역시스템의 애로공정 파악을 위한 판단근거 제공
 - 항만 개발계획 수립시 장비소요규모 결정을 위한 평가지표 제시
 - 장비 투자규모 산출시 경제적 우선순위 선정기준 제공
- 항만에 대한 결합생산성 적용방안
 - 기존 부산항 컨테이너터미널의 리모델링시
 - 신규 항만의 개발 계획 수립시
 - 컨테이너터미널 하역시스템 생산성 측정시
 - 부두 통합화방안 수립시 하역시스템 평가

제 1 장 서 론

1. 연구의 필요성 및 목적

컨테이너라는 기본단위로 표준화된 컨테이너터미널의 항만하역시스템은 선박에 대한 수출입 컨테이너를 처리하는 안벽시스템, 이를 적재하기 위해 이동시키는 이송시스템, 이송된 컨테이너를 보관하는 적재시스템, 내륙수송과 연계시키는 반출입시스템 등의 단위시스템들로 구성된 대규모시스템이다. 따라서 항만하역시스템의 생산성을 높이기 위해서는 안벽시스템, 이송시스템, 적재시스템, 반출입시스템 등의 단위시스템의 생산성을 높여야 하고, 항만의 생산성은 결국 각 단위시스템 중 가장 낮은 능력을 가진 단위시스템의 생산성에 의해 결정된다. 그러나 제한된 예산으로 복수의 단위시스템 생산성을 동시에 높이려 할 경우에는 통합시스템 전체 하에 각 단위시스템의 트레이드-오프 관계를 규명하여 조정하는 문제 해석적 측면의 항만하역시스템 개발 전략이 필요하다. 컨테이너터미널의 생산성은 안벽시스템, 이송시스템, 적재시스템 등에 사용되는 C/C(Container Crane), YT(Yard Tractor), TC(Transfer Crane) 등의 하역장비 생산성에 의해 직접적으로 영향을 받므로 이들 장비 각각을 어떠한 조합으로 보충을 하여야 하역시스템이 전체 터미널의 생산성을 효율적으로 향상시키는지에 대한 진단과 분석이 필요하다.

컨테이너터미널의 생산성을 분석하기 위해 안벽 길이당 또는 야적장 면적당, 안벽 크레인당 처리실적 등 실적자료에 근거한 다양한 평가지표들이 사용되고 있으나 이는 결과 분석을 위한 도구의 역할을 할 뿐, 애로공정의 원인규명을 통한 근본적인 문제해결에는 도움이 되지 못한다. 항만하역시스템을 구성하는 장비들은 상호간 생산성에 영향을 주게 되기 때문에 이러한 생산성에서의 트레이드-오프 관계를 규명하여 애로공정이 발생하는 장비의 조합을 조정함으로써 하역시스템의 취급능력을 향상시키기 위한 결합생산성(Combined Productivity) 평가지표와 분석기술이 요구된다.

특히 부산항과 광양항에서 현재 운영 중인 컨테이너터미널은 거의 동일한 항만하역시스템을 사용하므로 표준화된 항만하역시스템의 결합생산성 지표의 개발과

분석으로 컨테이너터미널의 생산성 향상을 위한 방안제시가 가능하다. 그러므로 국내의 C/C-YT-TC 연계운영체계를 대상으로 하여 각 장비의 특성을 반영한 생산성 평가지표에 대해서 상호연계에 의하여 발생하는 결합생산성 평가함수를 모형화하고, 실증분석을 위해서 시뮬레이션 모델을 이용하여 결합생산성을 분석하는 방안을 제시하고자 한다.

또한 실증분석을 통해서 C/C, YT, TC의 개별적인 장비 생산성의 결합으로 인하여 애로공정 및 시간지연을 최소화하면서 장비 결합생산성을 최대화할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

본 연구는 항만하역시스템의 결합생산성을 평가하기 위한 지표와 결합생산성 모형을 개발하여 항만시스템에서 발생하는 애로공정을 최소화함으로써 항만시스템의 취급능력을 최대화하는 방안을 수립하는 데 그 목적이 있다.

2. 주요 연구내용 및 연구방법

본 연구는 컨테이너터미널 생산성 평가지표 조사, 컨테이너터미널 생산성 평가지표의 선정, 결합생산성 평가모형 수립, 시뮬레이션을 통한 결합생산성 실증분석 등을 통하여 국내 컨테이너터미널의 하역시스템 취급능력 향상방안을 도출하는데 초점을 둔다.

제1장 서론에 이어 제2장 ‘국내 컨테이너터미널의 생산성 분석’에서는 국내 컨테이너터미널의 생산성 즉, 처리용량 측면의 장비 보유율과 처리능력 측면의 안벽생산성 및 C/C 생산성 현황을 살펴본 후, 컨테이너터미널 생산성과 관련된 평가지표들을 도출한다.

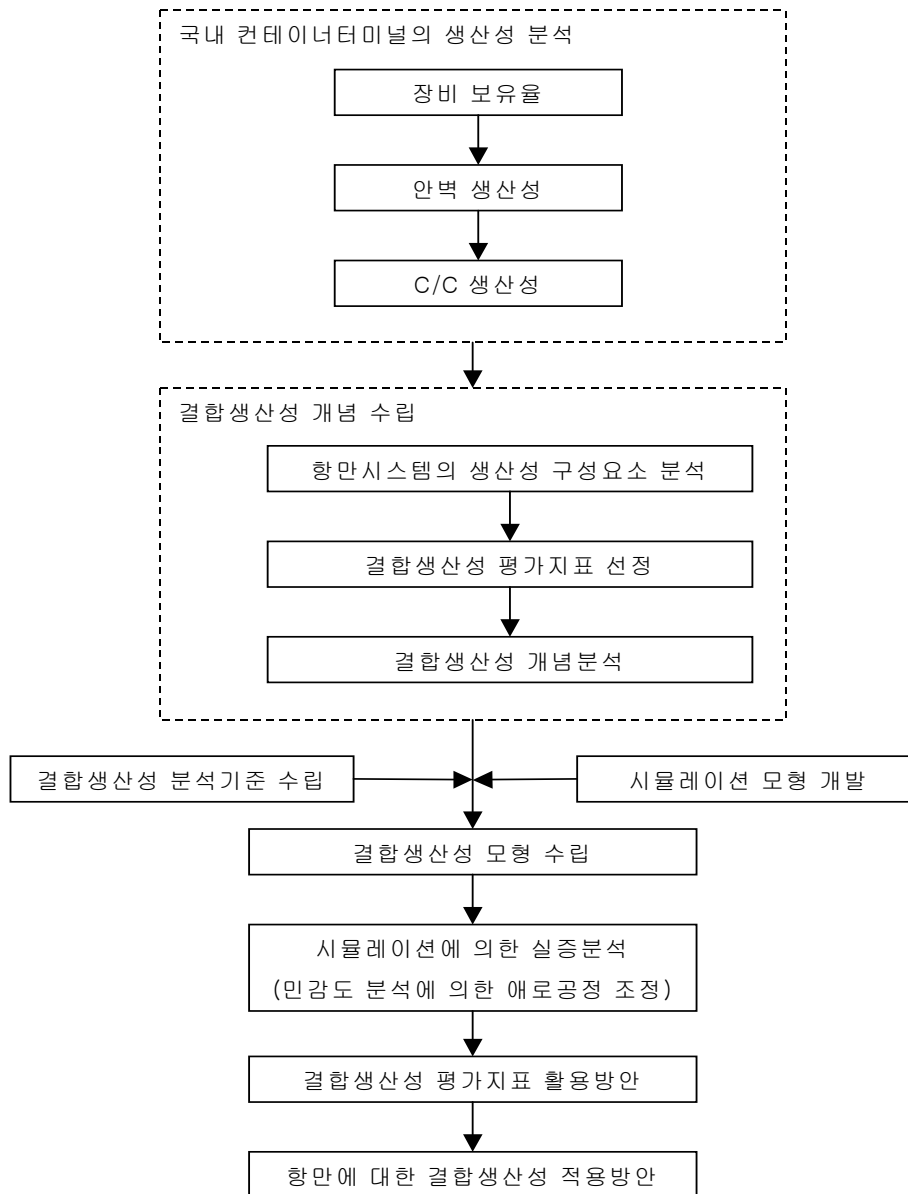
제3장 ‘결합생산성 개념 수립 및 분석’에서는 먼저 항만시스템의 생산성 영향인자를 안벽크레인, 이송차량, 야드크레인 측면으로 구분하여 분석하고, 이들 인자들의 결합으로 나타나는 현상을 결합생산성이라고 가정한 결합생산성 평가지표를 정의한다. 결합생산성 분석을 위한 모형화 과정을 제시한다.

제4장 ‘결합생산성 모형 설정 및 실증분석’에서는 3장에서 수립한 결합생산성 분석 모형을 시뮬레이션 방법을 이용하여 실증 분석한다. 즉 결합생산성 분석기준을 설정한 후 시뮬레이션 모형을 제시하고 결합생산성 분석을 효과적으로 활용하기 위한 애로공정 조정 방법론을 적용하기 위한 민감도 분석을 한다.

그리고 제5장에서는 결론과 함께 정책건의를 기술한다.

<그림 1-1>

연구흐름도



제 2 장 국내 컨테이너터미널의 생산성 분석

항만의 생산성은 시간당 컨테이너 처리개수로 표현되는 성능측면의 처리능력(Productivity)과 장치장 면적 및 장비 보유대수로 표현되는 시설규모적인 측면의 처리용량(Capacity)의 두 가지가 함께 사용되고 있다. 따라서 생산성과 관련하여 처리용량 측면의 장비 보유율과 처리능력 측면의 안벽 생산성 및 C/C 생산성 현황을 살펴본다.

1. 장비 보유율

국내의 부산항과 광양항의 컨테이너터미널은 생산성에 직접적인 영향을 미치는 장비 보유대수 측면에서 안벽크레인(C/C : Container Crane) 대비 야드크레인(TC : Transfer Crane)의 보유율이 평균 2.37대(부산항 2.52대)로 경쟁항만인 홍콩항의 평균 3.84대와 싱가포르항의 평균 3.25대에 비해 상대적으로 낮은 수준이며, C/C도 선석당 2.59대(부산항 2.89대), C/C당 YT(Yard Tractor) 대수도 5.54대(부산항 5.62)로 장비 여유율을 감안할 때 보유수준이 낮으며, 야드 장치면적도 상대적으로 부족한 실정이다.¹⁾

국내 부산항 컨테이너터미널의 C/C 보유대수를 분석해 보면, C/C당 담당 안벽 길이에서 신선대, 우암터미널, 감만터미널이 100m로 가장 많은 C/C가 투입되고 있으며, 감천항이 150m로 가장 적은 C/C가 투입되고 있다. 터미널의 규모에 따라 살펴보면 자성대, 신선대, 감만부두가 4개 선석을 운영하고 있으나 각각 113.4m, 100m, 100m 등으로 차이를 보이며, 2개 선석으로 운영하고 있는 우암터미널과 감천항은 각각 100m와 150m로 차이를 보이고 있다. 한편 광양항 1단계는 155.6m, 광양항 2단계가 191.7m로 광양항이 부산항보다 C/C당 안벽길이가 긴 것으로 나타

1) 부산항만공사의 자료에 의하면 홍콩항을 기준값 100으로 환산하면, 부산항의 생산성 지수는 77로 싱가포르 96, 가오슝 93보다 낮은 수준임. 동 공사는 그 원인을 크레인 보유대수 부족으로 판단하고 크레인 확충 등으로 생산성 향상대책을 추진 중이라고 밝히고 있음.

났다.

따라서 터미널 규모가 비슷한 경우에는 C/C당 담당하는 안벽길이가 큰 차이를 보이지 않으며, 부산항의 4개 이상의 선석을 보유한 대형 터미널들이 상대적으로 C/C 보유대수가 높은 것을 알 수 있다. TC 보유율은 C/C 대비 2.38 ~ 2.79의 값을 가지며, 실제 작업에서는 전체 보유대수 중 평균 20% 정도는 정비, 주차 등으로 투입하지 않고 있다. YT 보유율은 C/C 대비 4.00 이상의 값을 가지며, 평균적으로는 C/C 당 4대가 투입되어 조별 작업을 한다. 또한 C/C 작업이 없을 경우 구내이적(Remarshaling)을 하며, 구내이적에 투입되는 비율은 50% 정도이다. 또한 본선작업 및 구내이적작업에 투입되지 않는 YT는 유지보수작업 및 예방정비작업을 수행하거나 휴식시간을 가진다.

<표 2-1>

부산항 컨테이너터미널 장비 보유율

구 분	자 성 대 (1, 2단계)	신 선 대 (3단계)	감만부두 (4단계)	신감만부두	우암터미널	감천항	평균
접안능력	5만 톤급 4척 1만 톤급 1척	5만 톤급 4척	5만 톤급 4척	5만 톤급 2척 5천톤급 1척	2만 톤급 1척 5천톤급 2척	5만 톤급 2척	-
안벽길이	1,474m	1,200m	1,400m	826m	500m	600m	-
하역능력	120만 TEU	120만 TEU	120만 TEU	65만 TEU	35만 TEU	34만 TEU	-
C/C 보유대수(a)	13	12	14	7	5	4	9.17
선석 수(b)	4	4	4	3	2	2	3.17
C/C당 담당 안벽길이(m)	120.6	109.1	100.0	118.1	125.0	150.0	120.5
TC 보유대수(c)	31	31	39	16	13	10	23.33
TC당 작업면적(m ²)	12.7	21.0	9.1	10.2	15.6	10.5	13.18
YT 보유대수(d)	63	91	80	36	20	19	51.50
C/C 보유율(a/b)	3.25	3.0	3.5	2.33	2.5	2	2.76
TC 보유율(c/a)	2.38	2.58	2.79	2.29	2.60	2.50	2.52
YT 보유율(d/a)	4.85	7.58	5.71	5.14	4.00	4.75	5.34

자료 : 한국컨테이너부두공단/부산항만공사, 「2003년도 컨테이너화물 유통추이 및 분석」, 2004. 7.

2. 안벽 생산성

안벽 생산성은 먼저 「Drewry Shipping Consultants」에서 전세계 컨테이너터미널

에 대해 분석한 조건별 유형분류를 살펴본 후 부산항의 컨테이너터미널에 적용하여 보았다.

전세계 컨테이너터미널을 안벽길이 범위에 대해서 안벽 1m당 물량을 바탕으로 세 가지 유형으로 분류하여 일반화하였다. 분석결과 아시아의 항만들은 안벽길이 범위에 따라 유형 B로 분류되었다.

<표 2-2> 안벽 생산성의 컨테이너터미널 조건별 유형분류

유형 구분	컨테이너터미널 운영 조건	안벽길이 범위	안벽1m당 물량(TEU)	사례
유형 A	<ul style="list-style-type: none"> - Common-user terminal - 선박일정 준수와 선박 지연이 혼합된 형태 - 자유시장 경쟁(선석점유율이 정체점 이하) - 환적비율 33% 이하 	1,000m 이상	1,200	북유럽 항만
		500~1,000m	1,000	
		500m 이하	800	
유형 B	<ul style="list-style-type: none"> - Common-user terminal - 선박일정 준수와 선박지연이 혼합된 형태 - 요율 고정(선석점유율이 정체점 이상) - 환적비율 33% 이하 	1,000m 이상	1,500	아시아 항만
		500~1,000m	1,200	
		500m 이하	1,000	
유형 C	<ul style="list-style-type: none"> - 전용 터미널 - 뽁뽁한 선박 일정 - 정부는 정책적으로 선석점유율이 정체점 이하에서 유지되도록 하는 데 관여를 적게 함 - 환적비율 50% 이상 	1,000m 이상	1,700	오만 살랄라 (Salalah)항
		500~1,000m	1,600	
		500m 이하	1,300	

자료 : Eleanor Hadland, "Defining Capacity", *Drewry Shipping Consultants*, 2003. 9.

<표 2-3> 2003년 부산항 컨테이너터미널의 안벽길이 m당 처리물량(TEU) 비교

	연간물동량(TEU)	환적비율(%)	안벽길이(m)	안벽 m당 물량(TEU)	유형분류
자성대	1,618,000	44.90	1,447	1,118.18	-
신선대	1,790,232	44.52	1,200	1,491.86	-
우암부두	548,811	38.20	500	1,097.62	-
감만부두	2,561,951	40.48	1,400	1,829.97	B
감천부두	551,637	43.89	600	919.40	-
신감만부두	812,683	40.59	826	983.28	-

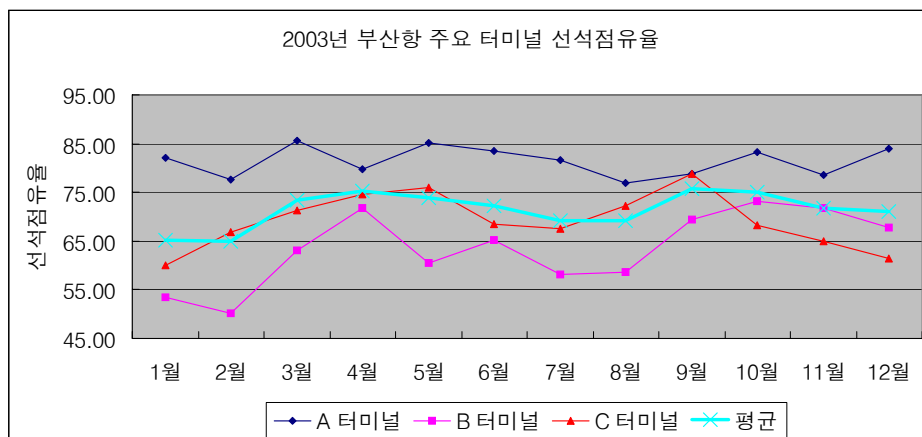
자료 : 한국컨테이너부두공단, 「2003년 부산항 월별 처리실적」. 2003.

또한 현재 항만개발이 진행 중인 부산신항만의 컨테이너터미널의 경우 선석당 (350m) 37.5만 TEU로 계획 중이므로 안벽 m당 1,071.43TEU로 자성대부두의 처리 능력을 가지는 셈이어서 현실적인 값과는 차이가 발생한다. 따라서 좀더 정확한 기준값의 적용이 요구된다. 실제 부산항의 6개 컨테이너터미널에 대해서 분석해보면, 환적비율이 모두 33% 이상이면서 50% 이하인 경우에 속하여 세 가지 일반적인 유형분류에 속하지 않으며, 아시아 항만의 사례에 적용되는 환적비율 33% 이하인 유형 B를 가정하더라도 감만부두만 이 유형에 속하며, 나머지 컨테이너터미널은 어느 유형에도 포함되지 않는다.

안벽 생산성과 직접 관련된 선석점유율 그리고 하역시스템과 관련된 C/C 가동률, TC 가동률, YT 가동률에 대한 실적 데이터를 분석하여 안벽 생산성과 상관관계가 있음을 보이고자 한다.

부산항 주요 컨테이너터미널의 2003년의 월별 선석점유율, C/C 가동률, TC 가동률, YT 가동률에 대한 실적 데이터를 분석한 결과는 다음과 같다. 먼저 선석점유율 측면에서 공용터미널과 전용터미널의 운영형태에 따른 선석점유율 차이점이 뚜렷하게 발생하고 있음을 알 수 있다.

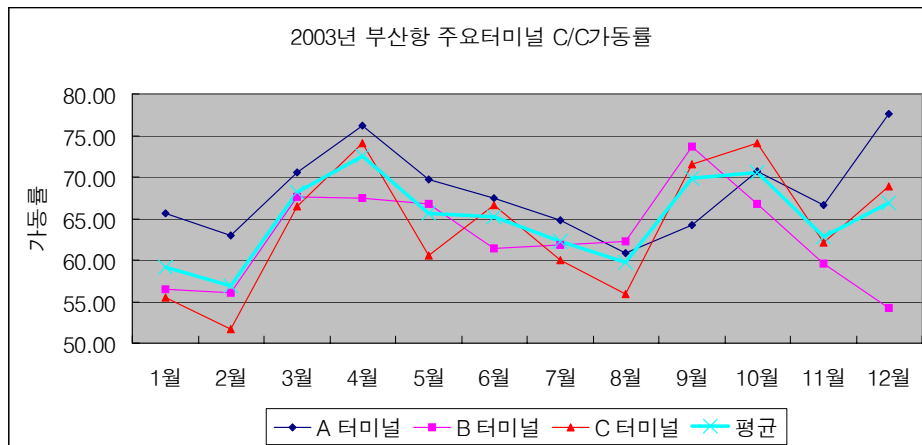
<그림 2-1> 2003년 부산항 주요 터미널 선석점유율(월별)



공용터미널 및 전용터미널의 운영형태와 단일선석에서 최고 4개 선석 운영에 따른 터미널별 C/C 가동률의 차이점이 발생하고 있음을 알 수 있다.

<그림 2-2>

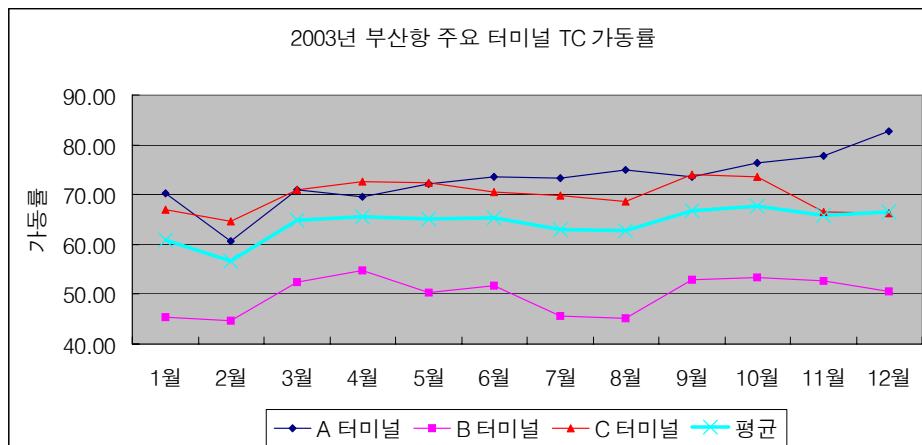
2003년 부산항 주요 터미널 C/C 가동률(월별)



B 터미널(신선대)의 경우 다른 2개 터미널보다 현저하게 낮은 TC 가동률을 나타내고 있다.

<그림 2-3>

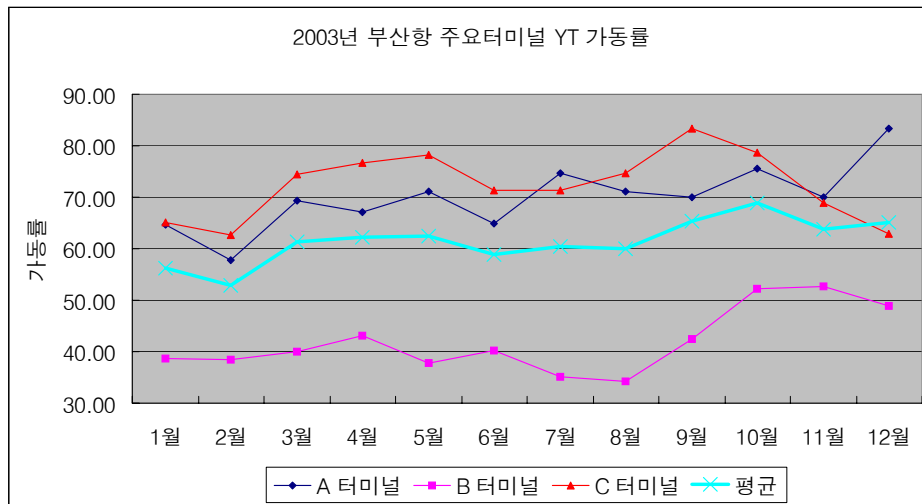
2003년 부산항 주요 터미널 TC 가동률(월별)



B 터미널(신선대)의 경우 다른 2개 터미널보다 현저하게 낮은 YT 가동률을 나타내고 있다.

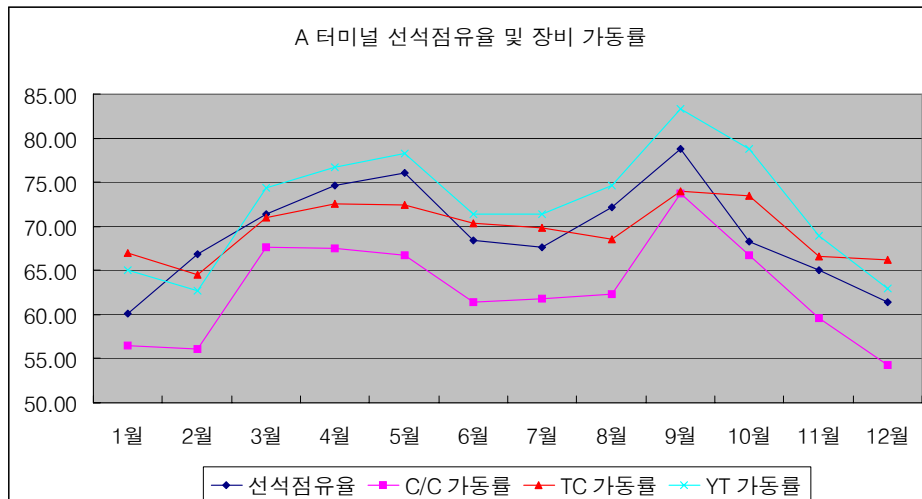
<그림 2-4>

2003년 부산항 주요 터미널 YT 가동률(월별)

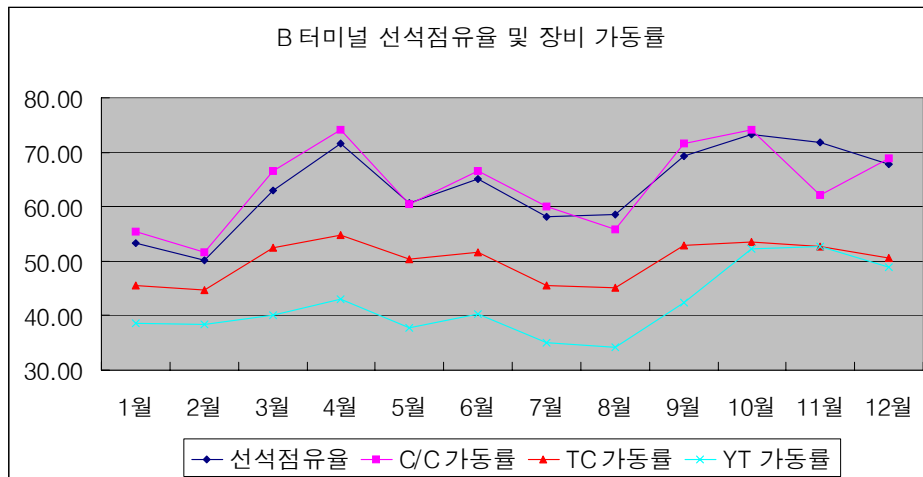


<그림 2-5>

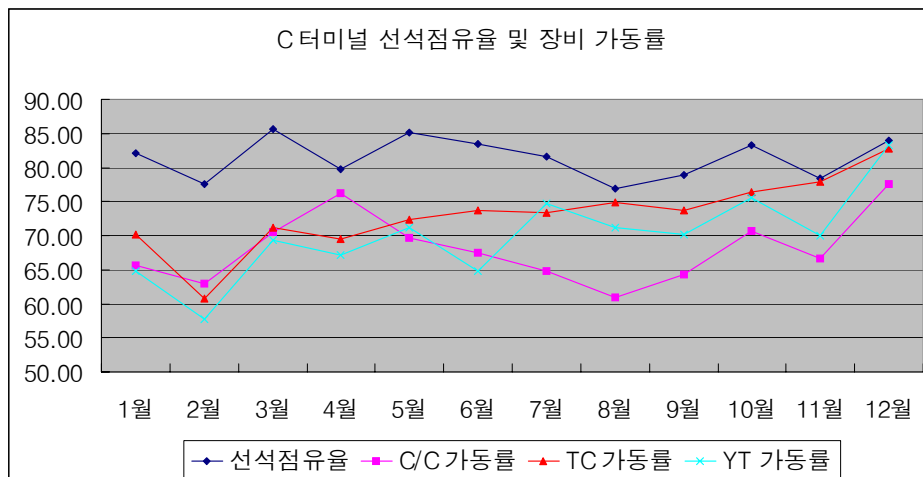
A 터미널(우암부두) 선석점유율 및 장비 가동률(2003년도 월별)



<그림 2-6> B 터미널(신선대) 선석점유율 및 장비 가동률(2003년도 월별)



<그림 2-7> C 터미널(감만부두) 선석점유율 및 장비 가동률(2003년도 월별)



공용터미널 및 전용터미널의 운영형태 차이와 단일선석 및 4개 선석 운영에 따른 터미널별 장비 가동률의 차이점이 발생할 수 있음을 감안하여도 C 터미널(감만부두)의 경우 다른 2개 터미널보다 현저하게 낮은 TC 가동률 및 YT 가동률을 나타내고 있다. 그러나 단순히 C 터미널(감만부두)이 다른 2개 터미널보다 현저하게 낮은 TC 가동률 및 YT 가동률을 나타내고 있다고 해서 C 터미널(감만부두)의

안벽 생산성이 다른 2개 터미널의 안벽 생산성과 큰 차이점을 나타내고 있지는 않은 실정이다.

3. C/C 생산성

국내에서 가장 일반적으로 적용하는 C/C의 생산성은 총 작업시간 생산성²⁾(또는 총 크레인 생산성)이나 순 작업시간 생산성³⁾(순 크레인 생산성)으로 표현하며, 국내 컨테이너터미널의 총 작업시간 생산성은 <그림 2-8>과 같이 해마다 일정한 성장률로 성장하는 선형적인 추세를 가지고 있다. 1994년 이후 총 작업 생산성은 시간당 18~19개에서 22개 내외로 증가해 왔다.⁴⁾

<표 2-4> 부산항 컨테이너터미널의 안벽크레인 생산성

년도	구분	순 작업시간	총 작업시간	순 작업시간 생산성(개/시간)	총 작업시간 생산성(개/시간)
1994	자성대	44,397	53,831	22.5	18.6
	신선대	27,401	34,451	27.4	21.8
	계	71,798	88,282	24.4	19.8
1995	자성대	50,866	59,485	20.7	17.1
	신선대	30,521	38,075	27.5	22.1
	계	81,837	97,560	22.5	18.8
1996	자성대	50,327	58,917	23.1	19.7
	신선대	32,622	40,738	26.1	20.8
	계	82,949	99,655	24.2	20.2
1997	자성대	52,120	63,967	24.3	19.8
	신선대	36,963	46,843	25.9	20.4
	우암부두	13,646	14,359	17.5	16.6
	계	102,729	125,169	24.9	20.0

2) 총 크레인 작업시간당 처리한 컨테이너처리개수를 의미(컨테이너 수량 / 총 크레인 작업시간), 작업 시작시간 전후의 대기시간 및 조기 작업 종료 등을 포함함.

3) 순 크레인 작업시간당 처리한 컨테이너처리개수를 의미(컨테이너 수량 / 순 크레인 작업시간), 총 컨테이너 수량에 관한 간접적인 작업시간 즉 라이싱, 콘(cone)탈착, 해치의 개·폐, 장비고장 등 기타 작업 중단 사유 등에 대해 소요된 시간을 알 수 있음.

4) 양창호 외, 「차세대 컨테이너터미널 운영시스템의 기술개발 방향과 전략수립에 관한 연구」, 한국해양수산개발원, 2003.

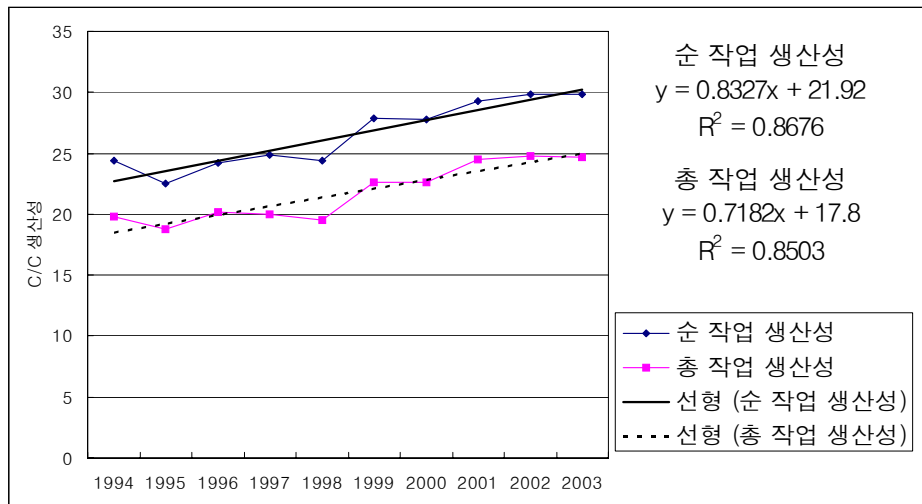
부산항 컨테이너터미널의 안벽크레인 생산성(계속)

년도	구분	순작업시간	총작업시간	순작업시간 생산성(개/시간)	총작업시간 생산성(개/시간)
1998	자성대	34,251	40,001	26.2	22.4
	신선대	39,208	30,814	26.8	21.1
	우암부두	9,791	13,152	21.7	16.1
	감만부두	25,020	30,015	23.4	19.3
	감천부두	10,178	13,356	24.1	18.5
	계	110,054	135,732	24.4	19.5
1999	자성대	24,124	29,345	26.6	21.9
	신선대	30,382	37,286	26.7	21.8
	우암부두	31,972	39,255	29.8	24.3
	감만부두	9,312	12,189	26.9	20.6
	감천부두	10,713	14,193	27.5	21.4
	계	21,301	26,454	27.5	22.0
2000	자성대	33,836	41,325	25.4	20.8
	신선대	35,225	43,423	24.1	19.9
	우암부두	9,312	12,189	26.9	20.6
	감만부두	41,357	50,407	30.6	25.2
	감천부두	9,586	12,797	28.2	21.4
	계	25,863	32,028	27.0	21.6
2001	자성대	34,254	39,693	26.3	22.7
	신선대	32,686	39,629	27.0	22.4
	우암부두	11,408	14,891	27.5	21.1
	감만부두	41,552	48,640	30.9	26.4
	감천부두	9,677	12,108	30.1	24.3
	계	25,915	30,992	28.4	23.4
2002	자성대	44,845	55,075	24.0	19.6
	신선대	31,430	49,408	25.2	21.1
	우암부두	13,664	18,428	26.0	19.3
	감만부두	43,050	45,041	28.9	25.1
	감천부두	11,959	14,519	27.8	22.9
	신감만부두	12,425	16,083	28.2	21.8
	계	26,229	33,092	26.7	21.6
2003	자성대	42,721	52,345	25.9	21.1
	신선대	43,413	52,744	27.3	22.5
	우암부두	14,880	19,625	25.6	19.4
	감만부두	14,711	16,821	28.2	24.6
	감천부두	15,455	12,745	26.6	21.9
	신감만부두	17,664	23,048	32.0	25.4
	계	24,807	29,555	27.6	22.5

자료 : 한국컨테이너부두공단, 「컨테이너화물 유통추이 및 분석」, 각 연도

<그림 2-8>

국내 컨테이너터미널의 C/C 생산성 변화추이



자료 : 한국컨테이너부두공단, 「컨테이너화물 유통추이 및 분석」, 각 연도.

부산항 컨테이너터미널의 하역시스템 구성과 C/C 생산성 간의 관계는 <표 2-5>에서와 같이 파악되었다. 부산항 컨테이너터미널 전체의 C/C:YT:TC의 비율은 1:5.3:2.5이었으며, C/C당 YT수는 신선대가 7.6대로 가장 높았고, 하역시스템 구성은 1:7.6:2.6이다. 또한 C/C당 TC수는 감만부두가 2.8대로 가장 높았으며, 하역시스템 구성은 1:5.7:2.8이다.

<표 2-5>

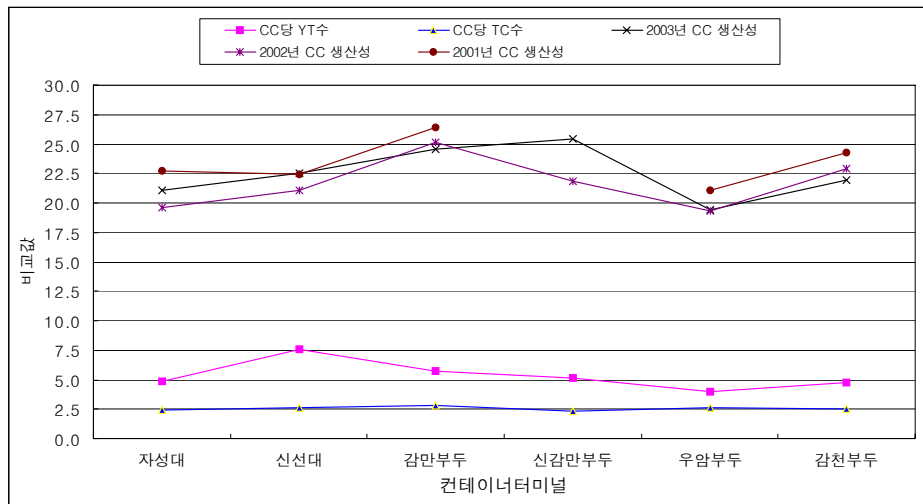
부산항 컨테이너터미널의 하역시스템 구성과 C/C 생산성

구분	하역시스템 구성(C/C:YT:TC)			C/C 생산성		
	C/C 1대	C/C당 YT수	C/C당 TC수	2001년	2002년	2003년
자성대	1	4.8	2.4	22.7	19.6	21.1
신선대	1	7.6*	2.6	22.4	21.1	22.5
우암부두	1	4.0	2.6	21.1	19.3	19.4
감만부두	1	5.7	2.8*	26.4*	25.1*	24.6
감천부두	1	4.8	2.5	24.3	22.9	21.9
신감만부두	1	5.1	2.3	-	21.8	25.4*
평균	1	5.3	2.5	23.4	21.6	22.5

주 : * C/C당 YT수는 신선대, C/C당 TC수는 감만부두가 가장 많으며, C/C 생산성은 2001년, 2002년은 감만부두가 2003년은 신감만부두가 가장 높음.

<그림 2-9>

컨테이너터미널별 장비 보유율과 C/C 생산성



<그림 2-9>에서와 같이 감만부두를 제외한 자성대, 감만부두, 신감만부두의 장비 보유율은 거의 비슷함에도 불구하고 C/C 생산성의 차이를 보이고 있으며, 우암부두와 감천부두에서도 비슷한 현상을 보인다.

장비조합의 적정성은 C/C 생산성과 항상 일치하지는 않으며, 최적의 장비조합을 구성하기 위해서는 결합생산성에 의한 애로공정 분석이 필요하다.

제 3 장 결합생산성 개념 수립 및 분석

1. 결합생산성 개념 수립

1) 기본전제

2장에서 살펴 본 장비 보유율, 안벽 생산성, C/C 생산성 등이 컨테이너터미널의 현황을 분석하기 위한 평가지표로 사용되고 있으나 이로써 생산성 향상을 위한 방안을 제시하거나 하역시스템의 개선을 위한 방안을 제시하기에는 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 컨테이너터미널의 하역시스템인 안벽장비(C/C), 이송장비(YT), 야드장비(TC)가 결합되어 나타나는 생산성을 결합생산성(Combined Productivity) 개념으로 정의하였다.

일반적으로 경제학적인 의미에서 결합생산(Joint Production)은 하나의 생산과정에서 두 가지 이상의 물건이 생산되는 것을 의미하지만 본 과제에서 정의한 결합생산성은 항만하역시스템을 구성하는 장비들의 개별 생산성을 결합하여 새로운 생산성 지표로 변환하여 사용하기 위한 의미로 쓰여졌다. 또한 생산공정을 통합하여 전체적으로 관리하는 개념인 통합생산(Integrated Manufacturing)이라는 생산공학적인 용어와도 구별된다. 그러므로 결합생산성은 개별 장비의 생산성지표를 하나의 지표로 표현하기 위해서 결합한 것을 의미한다.

따라서 결합생산성 개념 하에서 항만하역시스템은 안벽의 양적하작업과 외부 차량에 의한 반출입작업이 조화를 이루는 시스템으로 가정하였다. 따라서 앞서 분석한 장비 보유율이 비교를 위한 대안이 됨과 동시에 의사결정을 위한 변수의 역할을 한다.

일반적으로 야드장비는 실제 작업에서 전체 보유대수 중 평균 20% 정도는 정비, 주차 등으로 인해 투입하지 않고 있으며, 이송장비는 평균적으로 안벽장비 1대 당 4대정도가 투입이 되어 조별 작업을 한다.

만약 안벽장비의 작업이 없을 경우 구내이적을 담당하며 그 비율이 50%에 이르게 된다. 이러한 정규 하역작업 외에 하역장비의 사용비율이 존재하나 본 연구에

서는 이러한 사용비율까지 감안하여 장비할당 비율을 적용한다.

<표 3-1>

분석모형 기본전제

구분	세부내용
결합생산성	• 안벽장비-이송장비-야드장비의 3부분이 반드시 연계될 때 나타나는 생산성을 산출
본선과 반출입시스템	• 본선과 반출입 작업은 조화를 이룸
비교대안	• 안벽장비-이송장비-야드장비의 장비할당대수(장비 보유율)

2) 분석과정

<그림 3-1>은 일반적으로 컨테이너가 안벽에서부터 야드장치를 거쳐 게이트로 나가기까지를 나타낸 컨테이너 흐름도이며 각 영역별로 세부적인 과정을 나타낸 것이다.

이와 같이 항만에서의 작업흐름은 컨테이너를 매개로 장비 간의 상호작용이 연속적인 흐름을 가짐에도 불구하고 기존의 항만시스템 분석시에 적용하는 방법은 각 하역장비인 C/C, YT, TC의 생산성을 동시에 분석하여 최적화하는 방식이 아니라 단계적 또는 부분적으로 생산성을 분석하였다.

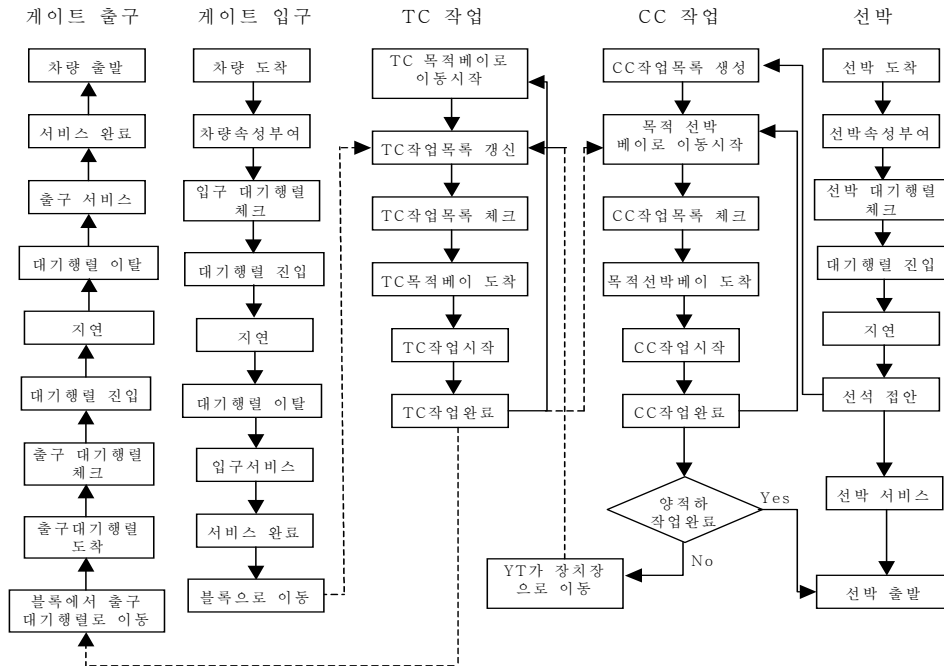
과거 1~2년 전만 해도 항만설계시 단계적인 생산성 분석을 통해 항만설계가 이루어져 왔다.

그러나 최근 항만설계시 장비소요규모의 결정에 있어 장비들 간의 생산성 상호작용을 판단하기 어려우므로 시뮬레이션 방식을 사용하여 항만설계를 수행하고 있으며, 향후에도 시뮬레이션을 통해 터미널의 생산성을 극대화시킬 수 있도록 설계하는 것이 필요하다.⁵⁾ 또한 시뮬레이션 방법을 통해서 실증 분석하는 것이 방법론의 타당성을 입증하기 위한 수단으로 사용될 수 있으며, 항만 기본설계의 재검토 단계에서도 검증의 수단이 될 수 있다.

5) 양창호·최용석, “컨테이너터미널 계획 시뮬레이션 모델링 개발방향 연구”, 「해양정책연구」, Vol.17, No.4, 2002.

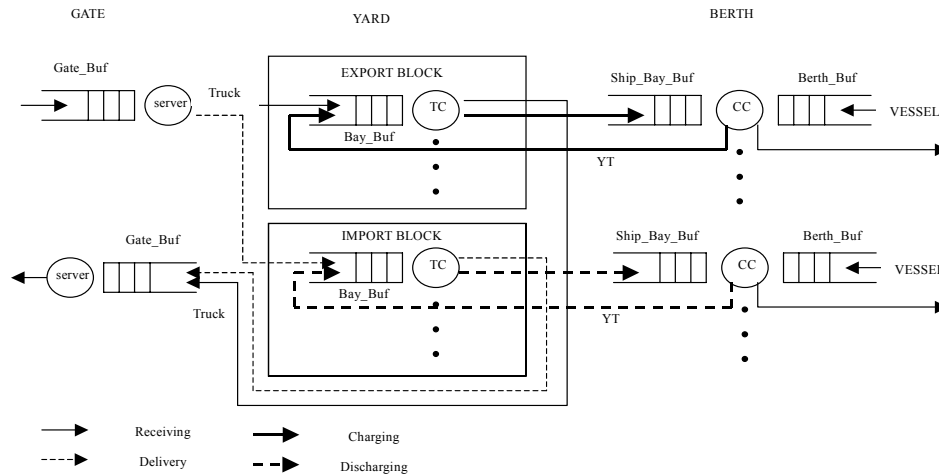
<그림 3-1>

컨테이너터미널에서의 작업흐름



<그림 3-2>

컨테이너터미널의 대기네트워크



자료 : Yong-Seok Choi, "Simulation Study for Performance Measures of Resources in a Port Container Terminal", *International Journal of Navigation and Port Research*, Vol.28, No.7, 2004.

<그림 3-2>의 컨테이너터미널의 대기네트워크는 안벽영역, 야드영역, 게이트영역별로 구분하여 대기모형을 도시한 것이다. 여기서 항만하역시스템은 수출입화물을 수송하는 선박과 외부차량이 C/C 및 TC에 의해 서비스 받는 개방형 대기네트워크(Open Queueing Network)와 내부 이송차량인 YT와 C/C 및 TC의 연계작업을 통해 서비스 받는 폐쇄형 대기네트워크(Closed Queueing Network)가 서로 연결되어 동적특성과 상호의존성을 가지는 복합형 대기네트워크(Mixed Queueing Network)로 정의할 수 있다. 따라서 해석적인 접근방법으로 항만하역시스템의 단위시스템간의 트레이드-오프 관계를 규명하여 항만하역시스템 설계에 반영하기는 어려우므로 시뮬레이션 방법을 통해 통합 항만하역시스템의 단위시스템 간의 트레이드-오프 관계를 규명하고 고생산성을 달성하도록 설계하는 기술개발이 필요하다.

3) 결합생산성 개념수립

결합생산성 분석을 위한 개념은 C/C, TC, YT가 연계된 형태이면서, 장비 보유율과 같이 조별 할당되어 작업하는 것으로 가정하여 <그림 3-3>과 같이 양적하작업(Loading and Discharging)에서 C/C의 선박 대 안벽작업(Ship To Shore Operation), C/C에 조별 할당받은 YT의 이송 사이클(Transfer Cycle)에 따라 이루어지는 이송작업(Transport Operation), TC에 의해서 이루어지는 적재(Storage)와 외부차량 서비스를 위한 반입/반출(Delivery/Receipt) 등으로 구성된 개념을 수립할 수 있다.

<그림 3-3>에서 C/C 1대당 n 은 YT의 할당비율, m 은 야드장비인 TC의 할당비율을 나타낸 것이다.

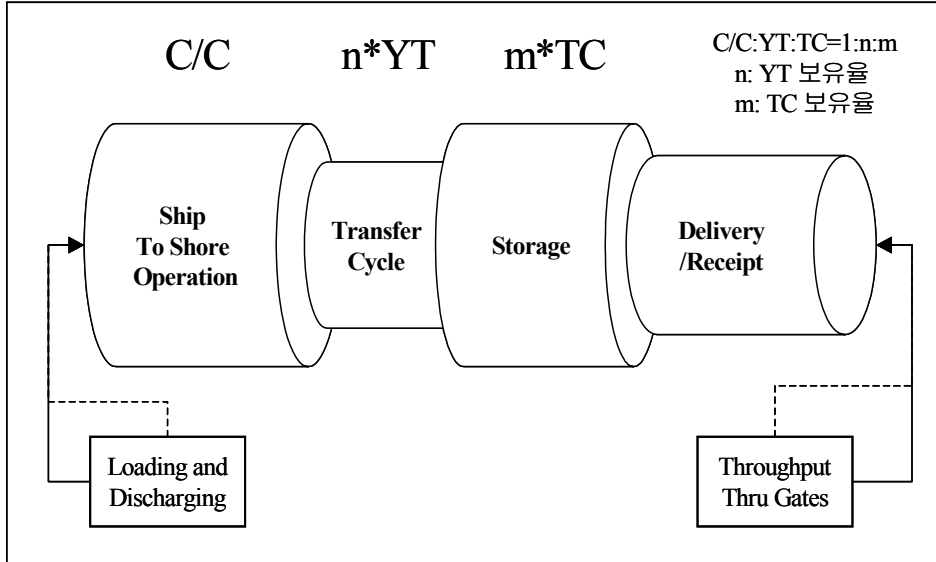
장비 간의 결합생산성에 대한 가정을 바탕으로 한 연구로 야드 트랙터수를 최소화하기 위해 C/C의 양적하 YT 대기시간과 YT의 대기시간을 합산하여 총 대기시간을 최소화하는 방법을 적용한 사례⁶⁾가 있으며, 이 경우 안벽작업 대기네트워크 상에서 서버인 C/C의 대기시간과 클라이언트인 YT의 대기시간을 동시에 고려하여 대기시간의 합을 최소로 하는 YT 대수를 구하는 것이다. 그러나 YT 대수는 정수(Integer)를 가지므로 계산결과를 만족시키는 반올림된 YT 대수는 실제 적용되는 YT 대수를 의미한다. 따라서 TC의 작업을 반영할 경우에 또 다른 계산결과

6) 최용석 · 김우선 · 하태영, “컨테이너터미널의 야드 트랙터 소요대수 추정”, 「한국항해항만학회지」, Vol.28, No.6, 2004.

가 나올 가능성이 있으나 대기시간 합을 최소화하는 방식 이외의 다른 평가함수를 이용하는 것도 가능하다.

<그림 3-3>

결합생산성 분석을 위한 개념 모형



2. 항만시스템의 생산성 구성요소 분석

1) 개요

일반적으로 컨테이너터미널을 운영하는 데 있어 터미널 생산성에 영향을 미치는 요소는 매우 다양하다. 터미널의 생산성과 관련하여 현재까지 다양한 논문들이 발표되었는데 대표적으로 Thomas J. Dowd & Thomas M. Leschin(1991)는 컨테이너터미널에서의 일반적인 생산성 척도와 영향인자를 제시하였다. 그 후 컨테이너터미널에 영향을 미치는 다양한 생산성 영향인자와 척도들이 발표되었으나 대부분이 Thomas J. Dowd & Thomas M. Leschin의 생산성 영향인자 모델의 범주를 벗어나지 못하였다.

Thomas J. Dowd & Thomas M. Leschin에 의해 발표된 생산성 모델을 살펴보면

컨테이너터미널에서 생산성에 영향을 미치는 요소들이 선석, 컨테이너 야드, 게이트, 하역장비, 노동력 등 크게 5가지로 나누어진다. 이들의 5가지 요소는 상호간에 밀접한 연관성을 가지고 있어, 어느 한 가지만의 능력향상만으로 전체 터미널의 생산성에 대한 급격한 증가를 기대하기는 매우 어렵다. 따라서 각 요소별 능력향상과 더불어 요소 간의 적절한 배분을 통해 전체적인 터미널의 생산성 증가를 꾀하는 것이 가장 합리적이라 판단된다.

본 연구에서는 <표 3-2>에 언급된 생산성 영향 요인들을 표준모델로 하여 국내에 적합한 항만 생산성 영향인자와 개념을 이끌어 내고자 한다.

그러나 <표 3-2>에 언급된 5가지 터미널 생산성 구성요소 중 모든 요소를 고려하기에는 본 기본과제의 연구기간과 범위를 벗어나기 때문에 본 연구에서는 5가지 요소 중 터미널의 생산성에 가장 결정적으로 영향을 미치는 안벽, 야드, 하역장비 등 3가지 생산성 구성요소가 서로 연계되어 작업이 이루어질 때 항만 생산성에 미치는 영향을 분석하여 이러한 영향요소를 모형화하였다.

게이트의 경우 장치장을 중심으로 본선하역의 컨테이너 흐름과는 별도로 반출입하역의 흐름이기 때문에 별도의 결합생산성에 대한 차후과제로 분석이 될 것이다.

기존의 안벽에서 게이트까지가 시설적 측면의 생산성 구성요소라면 노동력의 경우 운영적 요소로서 항만 생산성에 영향을 미치는 요소이나 작업 및 안전규칙, 기술적 능력, 훈련적 요소 등 항만 종사 인력 개개인의 주관적 요소가 많이 작용을 하기 때문에 이를 계량화하여 분석하기란 매우 어렵다. 따라서 향후 항만의 운영적 측면에서 항만 인력의 운영능력과 생산성의 관계를 별도로 분석하여 방안을 제시함이 타당할 것으로 판단된다.

따라서 <표 3-2>에 제시된 안벽, 야드, 하역장비 등 3가지 구성요소의 연계시 제시되는 모형화된 함수를 시뮬레이션을 통하여 심도 있는 실증분석을 수행함으로써 나타난 결과를 통해 각 영역별 개별 장비의 결합 운영시 발생하는 터미널의 생산성을 극대화하고자 한다.

본 절에서는 이러한 결합생산성 분석을 위한 구성요소를 제시하고 평가지표를 선정, 결합생산성 분석 모형의 수립을 목적으로 하고 있다.

<표 3-2>

컨테이너터미널의 생산성 영향인자와 생산성 평가지표

터미널 구성 요소		생산성 영향 인자	운영에 영향을 미치는 특성	생산성 척도	생산성 평가 지표
시설적 요소	안벽	• 선박 스케줄 • 안벽 길이 • 안벽크레인의 수	• 선석이용의 길이	• 컨테이너선 회전율/년/선석	• 순 작업시간 이용률
	야드	• 면적, 형태, 레이아웃 • 야드 운영방법 • TEU/Box 비율 • 장치기간	• 저장되는 컨테이너 범위 (새시 포함)	• TEU/년/총 면적 • TUE 적재량/순 면적	• 야드 물동량 • 야드 저장능력
	게이트	• 운영시간 • 라인수 • 자동화 정도 • 데이터 이용률	• 중량, 검사, 서류체크 등의 신속처리를 위한 길이	• 컨테이너/hr/레인 • 장비이동/hr/레인 • 트럭의 턴어라운드 시간	• 순 물동량 • 총 물동량
	하역 장비	• 장비사양/특성 • 선박특성 • 고장률, 가동률, 이용률 • 운전자 숙련도/훈련	• 운영상 지체	• 개/조(총시간당) • 개/조 또는 개/hr	• 순 생산성 • 총 생산성
운영적 요소	노동력	• 작업조의 규모 • 작업 및 안전규칙 • 작업자 기술/훈련/열의 • 선박특성	• 일반적 운영 속도	• 개/m · hr	• 총 노동생산성

자료 : Thomas J. Dowd & Thomas M. Leschin, *Productivity Measurement and Factors Affecting Container Terminal Productivity*, 1989.

2) 결합생산성 구성요소

일반적으로 하역작업과 관련되어 생산성에 영향을 미치는 영역은 선박, 선석, 장비, 야드, 게이트 등이며, 이러한 영역 간의 연계가 이루어질 때 비로소 두 가지 이상의 요소가 결합되어 서로 간에 영향을 미치는 결합생산성이 발생하게 된다.

이를 도식화하면 <그림 3-4>와 같고 다음과 같이 설명될 수 있다.

선박, 안벽, 장비(안벽, 이송, 야드), 야드, 게이트 등의 항만하역 구성요소에서 선박의 적재능력, C/C의 기계적 생산성, 야드장비의 기계적 생산성, 게이트 레인의 처리능력 등 독립적인 요소로서의 독립생산성은 존재한다.

위와 같은 요소들이 다른 구성요소들과 연계시 독립적 생산능력을 감소시킬 수

있는 영향적 요인이 없다면 각각의 요소는 장비의 기계적 생산성이 실질적 운영생산성이 되는 것과 같이 자체적으로 최대한의 생산성을 가질 수 있는 조건이 된다.

그러나 실질적으로 항만 운영시 각각의 요소들과 연계된 타 요소들이 여러 가지 제약조건에 의해 상호간 많은 영향을 끼치고 있기 때문에 각 요소마다 최대한 생산성을 낼 수 있는 완벽한 상태는 존재하지 않는다.

예를 들어 아래 <그림 3-4>에서 안벽장비는 그 자체의 생산성, 즉 기계적 생산성은 시간당 45개(일반적인 싱글트롤리타입의 C/C) 내외의 처리가 가능하나 이는 주변 다른 연계요소의 간섭이 없을 경우이며 안벽장비와 연계된 안벽의 조건이나 운영상황, 이송장비의 운영형태, 안벽장비 자체의 가동률 등과 같은 타 운영적 요인에 따라 안벽장비의 실질적 생산성은 크게 떨어지게 됨에 따라, 실제 운영시 최종적으로 시간당 22~25개 내외를 처리하게 되며 우리는 이를 총작업시간당 생산성이라 말한다.

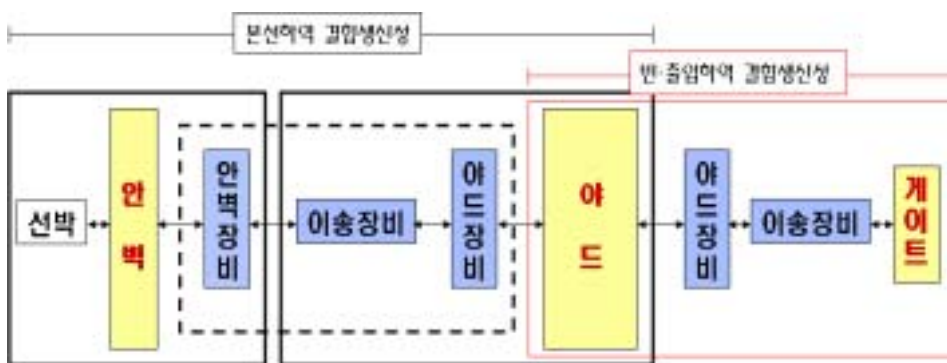
이와 같이 각각 2가지 이상의 요소가 결합되었을 때의 생산성은 다양한 터미널 운영조건에 따라 달라지며 이러한 요인들이 고려된 항만의 생산성을 결합생산성이라 한다.

<그림 3-4>와 같이 컨테이너터미널에서 결합생산성은 크게 야드를 중심으로 본 선하역 결합생산성과 반출입하역 결합생산성으로 나누어진다.

이는 컨테이너 본선하역이나 반출입하역시 하나의 흐름을 가지고 지속적으로 요소 간의 연계가 가능한 상황으로 구분한 것이며 야드에서는 컨테이너가 장기간 장치되는 장소이기 때문에 컨테이너 흐름에 있어 지속적인 연계가 종료 또는 시작되는 곳이다.

<그림 3-4>

컨테이너 흐름에 따른 결합생산도



본선하역에 있어서 결합생산을 유발시키는 요소는 선박, 안벽, 안벽장비, 이송장비, 야드 등이며 반출입하역에서의 결합생산을 유발시키는 요소는 야드, 야드장비, 이송장비, 게이트이다.

본 연구에서는 1절의 1)에 언급하였듯이 항만에서의 결합생산성 중 우선적으로 본선하역에 대한 결합생산성을 연구해 보기로 한다.

본선하역의 결합생산성은 크게 3가지의 영역으로 나누어 볼 수 있다.

1차적으로 이들의 인자가 부분적으로 결합이 되어 부분적 결합생산성이 나타나게 되는데 크게 안벽영역(선박-선석-안벽장비-이송장비)의 부분적 결합생산성, 이송영역(안벽장비-이송장비-야드장비)의 부분적 결합생산성, 야드영역(야드장비-이송장비-야드)의 부분적 결합생산성으로 구분될 수 있다.

최종적으로는 이러한 부분적 결합생산성이 연계가 되어 선박-선석-안벽장비-이송장비-야드장비-야드까지의 최종 결합생산성이 발생하게 되는 결과를 낳게 된다.

(1) 안벽영역의 생산성 구성요소 및 관련인자

런던에서 Developments in Container Handling Technology에 관해 열린 회의에서 Tomas Ward에 의해 제안된 본선하역과정에서의 생산성 척도와 인자들은 <표 3-3>과 같으며 부분적 결합생산성에 영향을 미치는 인자와 평가지표를 나타낸 것이다.

아래 <표 3-3>은 선박, 선석, 안벽장비 간의 독립생산성 및 결합생산성에 영향을 미치는 인자들과 평가지표를 나타낸 것이다.

평가지표는 총 컨테이너, 순 컨테이너, 사이클, 선박시간, 작업시간, 비작업시간, 크레인시간 등 크게 7가지로 나누어지는데 총 컨테이너는 선박 내에서 발생하는 컨테이너의 생산성 영향인자를 언급하는 것이며 순 컨테이너는 선박의 범위를 벗어나 순수 안벽장비와 이송장비 간의 작업량을 나타내는 것이다.

사이클은 선박 내에서 안벽장비 작업과 관련된 모든 요소들을 나타낸 것이며 선박시간은 선박이 안벽 접안시 발생가능한 모든 요소들을 세분화한 것이다.

작업시간은 터미널 내에 종사하는 인력에 의해 발생하는 모든 시간을 나타낸 것이며 비 작업시간은 선박이 접안하여 작업하기 이전까지 대기하고 있는, 선박 자체가 소요하는 시간이다.

크레인시간은 안벽장비가 안벽에서 처리할 수 있는 생산성을 가장 잘 나타내는 요소로서 생산성은 작업시간당 생산성과 선박당 할당 크레인의 수로서 나타난다. 이러한 모든 요소들이 선박에 대한 항만의 서비스 수준이나 생산성과 관련된 부분으로서 각각의 요소들이 결합되어 항만의 생산성을 결정하게 된다.

<표 3-3>

생산성 영향인자와 생산성 지표 I (선박/선석/안벽장비)

평가지표	정의	포함되는 인자	배제되는 인자
총 컨테이너	• 터미널 안벽과 선박 사이에 이동된 모든 크기의 컨테이너	• 선내이적과 재작업 • 적컨 및 공컨 • 크레인 사이클당 하역컨	• 기타 사이클 -해치커버,래싱,연결 -갠트리 이동
순 컨테이너	• 안벽크레인을 사용하여 야드와 선박 사이에 이동된 모든 크기의 컨테이너	• 적컨 및 공컨 • 크레인 사이클당 하역컨	• 안벽에 적재된 이적과 재작업 • 선박크레인에 의한 컨테이너 작업 • 해양에서 컨테이너 교환 • 기타 사이클
사이클	• 컨테이너를 이동하거나 다른 화물과 관련된 크레인의 작업	• Multi-Lift 1사이클 • 해치커버 1사이클 • 갠트리 이동 1사이클 • 비컨테이너 작업 1사이클 • 재작업 1사이클	• 수리와 관련된 시험작동 사이클
선박시간	• 해양에서 항만까지 선박의 도착, 항만에서 해양까지 출발 사이의 시간	• 운항 시간 • 갑문과 항내에서의 시간 • 선석대기 시간 • 선박서비스 시간 • 작업시간	• 선사에 의한 비정기적 시간
작업시간	• 터미널 하역장비를 지원하는 사람, 크레인에 종사하는 사람들에 의해 서비스되는 선박 시간, 시간의 합계	• 모든 화물 운영시간 • Midstream 운영시간 • 고장, 비컨테이너 하역시간 • 선박서비스 시간	• 관제시간 • 선박의 기어에 의해 단독 서비스 되는 시간
비 작업시간	• 선박 기항시간 (Call Time)과 작업시간과의 차이	• 관제시간 • 선석 대기 시간 • 작업시작까지 대기시간	• 사전에 규정된 작업시간
안벽장비 작업시간	• 작업시간당 생산성, 크레인의 수	• 작업시간	• 비 작업시간

자료 : Tomas Ward, *Developments in Container Handling Technology*, 1989.

(Documentation from Practical Port Productivity Measurement Workshop)

(2) 야드영역의 생산성 구성요소 및 관련인자

아래 <표 3-4>는 야드장비, 이송장비, 야드 간의 독립생산성 및 결합생산성에 영향을 미치는 인자들과 평가지표를 나타낸 것이다.

아래 표의 총 컨테이너, 순 컨테이너, 장비 작업시간 등은 야드의 상황과 야드장비, 컨테이너 등 모든 인자가 연계되어 작업이 이루어질 때의 상황을 지표로 나타

낸 것이다

야드영역에서의 생산성 지표는 총 컨테이너, 순 컨테이너, 장비작업시간이며 총 컨테이너는 야드 내부에서 일어나는 모든 컨테이너의 이동개수를 나타낸 것이고, 순 컨테이너는 야드내부의 컨테이너 이동을 벗어나 야드장비와 타 이송장비 간의 컨테이너 이송시 발생하는 컨테이너 이동개수를 나타낸 것이다.

장비작업시간은 야드 내부 작업시, 야드장비와 이송장비 간의 연계시 발생하는 야드장비의 모든 작업시간을 나타낸 것이다.

여기에서 총 컨테이너에 대한 지표는 장비 작업시간당 총 처리 컨테이너로서 야드장비의 생산성을 결정하는 데 사용된다. 이 평가시스템은 야드크레인, 야드트럭이나 기타 야드장비 등 모든 컨테이너 야드 하역장비에 적용될 수 있으며 물리적인 장비의 능력을 나타내는 수치이다.

두 번째 순 컨테이너에 대한 지표는 순 컨테이너 대비 총 컨테이너의 비율로 나타나며 야드 적재분포의 효율성을 나타낸다.

총 컨테이너와 순 컨테이너의 차이가 커지면 커질수록 가장 이상적인 비율인 1.0을 벗어나게 되며 비효율적인 야드의 생산성이 발생한다는 것을 나타내고 있다.

<표 3-4> 생산성 영향인자와 생산성 지표 II (야드장비/이송장비/야드)

평가지표	정의	포함되는 인자	배제되는 인자
총 컨테이너	<ul style="list-style-type: none"> 컨테이너 야드 내부에서 이동되는 모든 형태의 컨테이너 	<ul style="list-style-type: none"> 리핸들링 작업 적컨과 공컨 컨테이너당 2번 작업 40' 1개당 20' 2번 이동과 동일 	<ul style="list-style-type: none"> 비 컨테이너 운영 <ul style="list-style-type: none"> - 갠트리 이동 - 유지보수 운영
순 컨테이너	<ul style="list-style-type: none"> 컨테이너 야드 내부와 외부로 이동되는 모든 컨테이너 	<ul style="list-style-type: none"> 적컨과 공컨 컨테이너당 2번 작업 ODCY와 야드 간 이동 본선하역, 게이트, 레일 40' 1개당 20' 2번 이동과 동일 	<ul style="list-style-type: none"> 리핸들링 작업 야드 내부의 존 사이 이동
야드장비 작업시간	<ul style="list-style-type: none"> 컨테이너 조작에서 장비 이용시간이나 시간의 합계. 크레인, 트럭, 기타 야드장비의 시간 	<ul style="list-style-type: none"> 컨테이너 작업시간 컨테이너 작업에 대응하는 이동시간 다음 작업을 위해 대기하는 시간 	<ul style="list-style-type: none"> 장비 고장시간 휴식시간

자료 : Tomas Ward, *Developments in Container Handling Technology*, 1989.

(Documentation from Practical Port Productivity Measurement Workshop)

(3) 하역장비영역의 생산성 구성요소 및 관련인자

아래 <표 3-5>는 안벽장비, 야드장비, 이송장비 간의 독립생산성 및 결합생산성에 영향을 미치는 인자들과 평가지표를 나타낸 것이다.

장비영역의 생산성 지표로는 총 컨테이너, 순 컨테이너, 대기시간으로 나누어지는데 총 컨테이너의 의미는 각 장비별 모든 고장시간과 가동률, 식사, 휴식, 교대시간 등을 고려한 총 장비작업시간당 처리량을 나타내는 것이며, 순 컨테이너는 각 장비별 식사, 휴식, 교대, 대기시간(작업전후)을 제외한 컨테이너 처리량을 말한다.

각 장비들이 연계가 될 때 선박, 안벽의 작업상태, 야드의 작업상태, 장비의 작업상태에 따라 장비 간 대기시간이 발생하게 되는데, 이러한 대기시간의 종류는 <표 3-5>와 같이 나타난다.

아래 표의 작업 대기시간 등은 장비의 가동률과 각 장비 간의 할당, 장비의 사이클타임 등 모든 인자가 연계되어 작업이 이루어질 때의 상황을 지표로서 나타낸 것이다.

<표 3-5> 생산성 영향인자와 생산성 지표 III(안벽/이송/야드장비)

평가지표	정의	포함되는 인자
총 컨테이너	• 안벽장비, 야드장비, 이송장비의 작업시 모든 요소를 고려한 총 작업시간당 생산성	• 장비 가동률 • 장비 고장률 • 식사, 휴식, 교대, 대기시간(작업전후) • 장비의 사이클타임
순 컨테이너	• 안벽장비, 야드장비, 이송장비의 작업시 일부 요소를 고려한 순 작업시간당 생산성	• 장비 가동률 • 장비 고장률 • 장비의 사이클타임
작업 대기시간	• 장비와 장비 간의 연계작업시 컨테이너 처리를 위해 장비가 일시적으로 대기하는 시간	• 안벽장비 대기시간 • 안벽장비 앞 이송장비 대기시간 • 야드장비 대기시간 • 야드장비 앞 이송장비 대기시간

3. 결합생산성 평가지표 선정

본 절에서는 실질적으로 현재까지 나타난 모든 독립생산성 및 결합생산성 인자와 지표들 중 국내 항만시스템의 운영시 생산성에 가장 많은 영향을 미치는 인자들을 분석하여 본 연구범위에 적합한 최종적 결합생산성 평가지표를 선정하고자 한다.

2절에서는 현재까지 발표된 독립/결합생산성 인자와 자체적으로 분석된 독립/

결합생산성 인자를 모두 제시하였다.

이를 종합하면 다음 <표 3-6>과 같이 정리될 수 있다.

<표 3-6> 생산성 영향인자와 생산성 지표(종합)

영역	평가지표	포함되는 인자	비고
안벽	총 컨테이너	• 선내이적과 재작업 권수 • 적컨 및 공컨수 • 크레인 사이클당 하역권수	
	순 컨테이너	• 적컨 및 공컨수 • 크레인 사이클당 하역권수	
	사이클	• Multi-Lift 1사이클 • 해치커버 1사이클 • 갠트리 이동 1사이클 • 비컨테이너 작업 1사이클 • 재작업 1사이클	
	선박시간	• 운항시간 • 갑문과 항내에서의 시간 • 선석 대기시간 • 선박 서비스시간 • 작업시간	
	안벽장비 작업시간	• 모든 화물 운영시간 • Midstream 운영시간 • 고장, 비컨테이너 하역시간 • 선박 서비스시간	
	비작업시간	• 관제시간 • 선석 대기시간 • 작업시작까지 대기시간	
야드	총 컨테이너	• 리핸들링 작업권수 • 적컨과 공컨수 • 컨테이너당 2번 작업개수	
	순 컨테이너	• 적컨과 공컨수 • 컨테이너당 2번 작업개수 • ODCY와 야드 간 이동 • 본선하역, 게이트, 레일 권수	
	야드장비 작업시간	• 컨테이너 작업시간 • 컨테이너 작업에 대응하는 이동시간 • 다음 작업을 위해 대기하는 시간	
안벽↔야드	총 컨테이너	• 장비 가동률 • 장비 고장률 • 식사, 휴식, 교대, 대기시간(작업전후) • 장비의 사이클타임	
	순 컨테이너	• 장비 가동률 • 장비 고장률 • 장비의 사이클타임	
	작업 대기시간	• 안벽장비 대기시간 • 안벽장비 앞 이송장비 대기시간 • 야드장비 대기시간 • 야드장비 앞 이송장비 대기시간	

본 연구에서는 컨테이너터미널에서 결합생산성의 평가지표를 경제적 측면과 구조적 측면으로 나누어 선정기준을 정하였다.

우선 안벽에 대한 평가지표의 경우 안벽길이를 증가시켜 선석 대기시간을 줄이거나 안벽크레인의 투입대수를 증가시켜 선박서비스 수준을 높이는 방법이 있을 수 있다. 그러나 안벽의 길이를 증가시키는 것은 경제적 측면에서 매우 불리하며 안벽크레인의 대수를 증가시키는 것 또한 경제적인 측면뿐만이 아니라 다른 이송장비 및 야드장비의 수량 등 항만하역시스템의 구조적 측면과도 관련이 있기 때문에 단순히 선박서비스 수준의 증가를 위한 안벽장비의 수요를 파악하기 힘들다. 따라서 구조적인 측면도 안벽만을 고려하기 때문에 터미널 전체의 생산성을 파악하기가 힘든 지표이다.

야드에 대한 평가지표의 경우 야드의 면적, 레이아웃 등을 변경하여 야드 내부의 생산성을 증가시킬 수는 있으나 경제성 및 구조변경을 위한 시간적 요소, 변경기간 동안의 기존 항만 운영의 중단 등 여러 가지로 경제적인 측면에서 불리하며 구조적인 측면도 야드만을 고려하기 때문에 터미널 전체의 생산성을 파악하기가 힘든 지표이다.

<표 3-7>

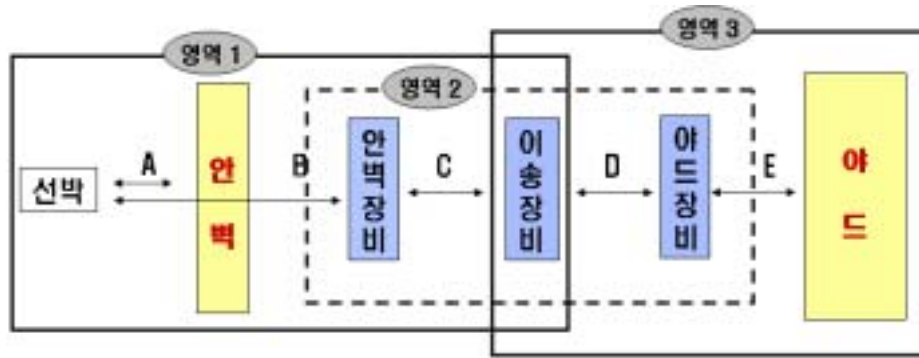
생산성 평가지표 선정기준

선정기준	선정기준
경제적 측면	• 기존 항만에 대한 추가적 시설의 투자로서 개선의 효과가 탁월한 평가지표
구조적 측면	• 항만의 하역구조 파악이 가능한 평가지표

이에 반해 안벽과 야드 사이에서 존재하는 안벽장비, 야드장비, 이송장비는 안벽 및 야드의 모든 상황을 반영하기 때문에 해당 컨테이너터미널의 취약구조를 쉽게 파악할 수 있으며 각각의 장비 소요규모를 적절하게 조정함으로써 소규모의 투자로 효과적인 항만의 능력을 증가시킬 수 있는 평가지표이다.

<표 3-7>에서 나타난 독립생산성 및 결합생산성 영향인자들을 분석해 본 결과 각 구성요소별로 가장 핵심적인 서버역할을 하는 요소인 안벽장비, 야드장비의 영향인자에 가장 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 결합생산성 평가지표로서 안벽과 야드 사이에서 고려될



	A	B	C	D	E
결합 생산성 영향 인자		C/C 사이클타임		RTGC 사이클타임	
			YT 주행시간		
		C/C 작업시간		RTGC 작업시간	
			YT 선회시간		
		C/C 할당대수	Y/T 할당대수		RTGC 할당대수
	선박스케줄				면적, 레이아웃
	안벽길이				야드운영, 장치기간

이를 정리하면 다음 <표 3-8>과 같이 나타나며 결합생산성 영향인자는 선박에서부터 야드에 컨테이너가 장치되기까지 각 구성요소들의 독립적 영향인자들이 모여 결합될 때의 그 결과로서 결합생산성의 정도를 나타내는 평가지표를 선정할 수 있다.

<표 3-8>에서 나타났듯이 본 연구에서는 결합생산성 영향인자로서 안벽의 선박스케줄, 안벽길이, 야드의 레이아웃 등 물리적인 인자들과 각 영역별 할당 장비대수, 각 장비들의 작업 사이클타임, 장치기간 등의 인자들을 설정하였다.

각 결합생산성 영향인자들에 따라 산출 가능한 평가지표는 차후 시뮬레이션 모형에서 결합생산성 영향인자들을 고려함으로써 결과값으로 나타나게 되며 세부

사항은 각 구성요소 간의 결합적 작업수행시 안벽장비의 대기시간, 안벽장비 앞 이송장비 대기시간, 야드장비 앞 이송장비 대기시간, 그리고 야드장비 대기시간으로 나타나게 된다.

<표 3-6>에서는 장비들의 대기시간이 안벽과 야드 사이의 영향인자로서 이는 일반적인 항만운영시 통계값이나 결과값으로서 표기되었으나 실제로 컨테이너터미널 운영시 각 장비들의 대기시간이 나타나지는 않는다.

본 연구에서는 이러한 대기시간의 값을 산출하기 위해 시뮬레이션을 수행할 예정이며 향후 기존 항만의 경험적 영향인자를 본 연구 시뮬레이션에 반영한다면 <표 3-8>과 같은 각 대기시간들이 계량적 평가지표로서 나타나게 될 것이다.

<표 3-8> **결합생산성 구성요소, 영향인자, 평가지표**

구성요소		특성	영향인자	평가지표
결 합 생 산 성	• 안벽		<ul style="list-style-type: none"> 선박스케줄 안벽길이 할당된 안벽크레인의 수 	
	• 안벽장비	서버	<ul style="list-style-type: none"> 안벽장비 사이클타임 안벽장비 할당대수 	• 안벽장비 대기시간
	• 이송장비	클라이언트	<ul style="list-style-type: none"> 이송장비 할당대수 이송장비 주행시간 	<ul style="list-style-type: none"> 이송장비 선회시간 안벽장비 앞 이송장비 대기시간 야드장비 앞 이송장비 대기시간
	• 야드장비	서버	<ul style="list-style-type: none"> 야드장비 사이클타임 야드장비 할당대수 	• 야드장비 대기시간
	• 야드		<ul style="list-style-type: none"> 레이아웃 야드운영방법 장치기간 	

제 4 장 결합생산성 모형 설정 및 실증분석

1. 결합생산성 모형 설정

3장에서 수립한 결합생산성 개념을 결합생산성 분석을 위한 모형으로 설정하기 위해서는 C/C, YT, TC로 구성된 하역시스템이 나타내는 생산성을 기준으로 작업에 실제로 사용되는 시간의 분해가 필요하며, 작업시간의 분해를 통해서 생산성을 저해하는 대기시간 인자를 도출하고 각 장비별 대기시간 구조를 파악하여 대기시간을 최소화하기 위한 결합생산성 평가함수를 도출하고자 한다.

결합생산성에 대한 기본적인 가정은 장비의 대기시간이 영에 근접해 감에 따라 하역시스템 또는 각 장비의 생산성이 최적화됨을 의미하며, 대기현상이 시스템의 생산성을 저하시키는 요인이라고 간주한다.

1) 작업시간의 분해에 의한 결합생산성 모형 수립

하역시스템을 구성하는 장비들의 결합생산성을 모형화하기 위해서 각 장비의 작업시간에서 작업을 위해 사용된 시간을 분해하여야 한다. 즉 생산성을 저해하는 시간을 찾아내어 모형화하는 단계가 선행되어야 한다. 또한 모형을 분석하기 위해서는 분해한 시간인자는 시뮬레이션 모델을 이용한 실험을 통해서 얻어지는 통계량으로 정의하여야 한다. 모형에서 구할 수 있는 시간인자를 구분하면 결합생산성을 구성하는 장비작업시간 모형과 결합생산성에 의해 영향을 받는 시설물통계량으로 구분할 수 있다.

(1) 장비작업시간 모형의 기호 정의

장비작업시간 모형의 경우는 컨테이너터미널에서 이루어지는 작업인 양하, 적하, 반입, 반출 등의 전체작업에 걸쳐서 사용된 각 장비의 작업, 대기, 유휴, 이동 등의 장비 작업상황과 밀접한 관계가 있으므로 장비의 세부적인 시간인자들을 작업시간 모형의 인자로 선정하여야 한다. 특히 TC와 C/C의 작업시간을 모형화하기 위해서 장비에 대해서 시간 속성을 다음과 같이 정의하며 실증분석을 위한 시뮬레

이선 실험에 사용하기 위해서는 누적 시간 속성값들을 계산하여 추정할 수 있도록 하여야 한다. 각 장비별 특성을 고려하여 다음과 같이 기호를 정의한다.

T : 전체 시뮬레이션 시간(전체 작업시간의 의미도 가짐)

i : 개별 장비 번호

U_i : i 장비의 활용도(Utilization)

O_i : i 장비의 누적 작업시간

(Loading time + Unloading time)

M_i : i 장비의 누적 이동시간(Moving time)

W_i : i 장비의 누적 대기시간(Waiting time)

I_i : i 장비의 누적 유휴시간(Idle time)

k : YT의 평균선회횟수

(2) C/C와 TC의 작업시간 모형

TC와 C/C의 경우 작업시간을 분해하면, 시간인자는 상차/하차(loading/unloading) 작업시간과 다음 작업장소로의 이동시간(moving time), 작업이 할당되어 차량의 도착을 기다리는 시간(waiting time), 작업이 할당되지 않은 순수 유휴시간(idle time) 등으로 구성되며, 장비의 활용도와 장비의 유휴시간은 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$U_i = \frac{O_i + M_i + W_i}{T}, \text{ for all } i \dots\dots\dots (4-1)$$

$$I_i = 1 - U_i, \text{ for all } i \dots\dots\dots (4-2)$$

C/C와 TC의 장비 활용도와 유휴시간을 표현한 식(4-1), 식(4-2)와 더불어 대기시간은 다음의 식(4-3)과 같이 전체시간에서 작업시간, 이동시간, 유휴시간 등을 뺀 시간으로 표현된다. 또한 C/C와 TC는 크레인의 특성상 식(4-3)과 같이 동일한 대기시간 모형을 가지게 된다.

$$W_i = T - (O_i + M_i + I_i), \text{ for all } i \dots\dots\dots (4-3)$$

(3) YT의 작업시간 모형

YT의 작업시간은 YT의 운영 속성에 따라 작업을 위해 이동하는 데 소요되는 이동시간과 대기에 소요되는 대기시간(TC waiting time+C/C waiting time), 그리고 작업이 없는 순수 유희시간으로 나누어 전체 시뮬레이션시간에 대한 시간을 구할 수 있다. 따라서 다음 식(4-4)와 같이 표현할 수 있다.

$$T = k\{M_i + W(C/C + TC)_i\} + I_i, \text{ for all } i \dots\dots\dots (4-4)$$

YT가 안벽의 C/C 작업 후 야드로 이동하여 TC작업을 마친 후 다시 안벽의 C/C 작업장소까지 오는 데 걸리는 시간을 선회시간이라고 할 경우 k는 전체작업시간 동안의 평균선회횟수를 의미한다. 따라서 YT의 C/C 앞 대기시간, TC 앞 대기시간, 이동시간의 합이 총 작업시간이며, YT의 대기시간은 YT의 C/C 앞 대기시간과 TC 앞 대기시간의 합으로 정의하였다. 따라서 $W(C/C + TC)_i$ 는 전체시간에서 이동 시간을 뺀 시간으로 다음 식(4-5)와 같이 표현할 수 있다.

$$W(C/C + TC)_i = \frac{T - I_i}{k} - M_i, \text{ for all } i \dots\dots\dots (4-5)$$

(4) 기타 작업시간 모형

선박과 외부트럭은 서비스를 받기 위해 도착한 후 서비스를 받고 터미널을 떠나는 경우이므로 컨테이너터미널이라는 시스템 내에 머무는 시간이 곧 서비스시간이며, 서비스의 질은 선박의 경우 선석 접안에서 대기, 외부트럭의 경우 게이트 입구와 TC 앞에서의 대기 등이 영향을 미친다. 그러나 외부트럭의 경우 게이트 입구를 통과하여 야드에서 반출입 작업을 완료한 후 게이트 출구에 도착할 때까지의 시스템 체재시간을 작업시간으로 고려할 수 있으나, 이 작업시간은 외부트럭에 대한 시스템의 서비스 수준을 나타내는 것으로 TC의 작업에 영향을 미치는 시간 인자로 파악될 수 있다.

따라서 선박과 외부트럭의 작업시간 모형은 컨테이너터미널 내부의 생산성에 의해 영향을 받는 것으로 간주할 수 있다.

(5) 시설물통계량

하역시스템의 결합생산성에 의해서 결과값으로 주어지는 시설물 통계량은 선석통계량, 장치장통계량, 게이트통계량으로 구분되며, 선석통계량은 선석에서 선박의 점유시간을 의미하는 선석점유율, 선석별 컨테이너 평균처리시간, 선석별 선박의 접안시간, 선석별 처리 컨테이너수로 계산되는 선석처리능력 등이 사용된다.

장치장의 경우는 수입블록과 수출블록별로 평균장치수량이 장치장에 대한 컨테이너 재고량으로 표현되며, 게이트의 경우 입출구 개수에 대한 평균대기시간 및 차선별 평균대기차량 대수 등을 통계량으로 산출할 수 있으나 외부차량에 의해 영향을 받는 게이트의 통계량은 결합생산성에서 제외하기로 한다.

(6) 결합생산성 평가함수

장비작업시간 모형에서 구분된 장비별 시간인자들은 시뮬레이션 실험으로 구할 수 있는 결과 통계량으로 구성하여 각 장비별 통계량을 산출한 후 이를 평가할 수 있도록 평가함수를 정의하여야 한다. 하역시스템 장비조합에 의한 결합생산성 평가함수의 목적값은 각 장비작업에서 발생하는 안벽에서의 대기값과 야드에서의 대기값의 합을 최소화하는 것을 의미한다. 이를 산정하기 위한 방법을 다음과 같이 정의하였다.

먼저 생산성을 저해하는 요인이 대기시간이므로 생산성과 대기시간은 반비례의 관계가 성립함을 전제로 한다. 그리고 대기값을 산출하기 위한 방법으로는 장비의 대기시간을 산출하는 방법, 대기시간비율을 산출하는 방법, 두 가지를 혼합하는 방법 등을 사용할 수 있다.

여기서 대기시간비율은 총 작업시간에서 대기시간이 차지하는 비율이므로 대기시간비율이 0라면 생산성은 기계적 생산성에 육박하는 최대생산성을 의미하므로 대기시간비율이 10%라면 생산성은 최대생산성에서 10%가 감소한 90%의 생산성을 발휘하는 것을 의미한다.

하역시스템의 대기값 산출을 위한 결합생산성 평가함수의 기호는 다음과 같이 정의한다.

$W_{\pi(C/C)}$: C/C의 YT 평균대기시간비율

$W_{\pi(TC)}$: TC의 YT 평균대기시간비율

$W_{\kappa(YT+C/C)}$: YT의 C/C 앞 평균대기시간비율

$W_{\kappa(YT+TC)}$: YT의 TC 앞 평균대기시간비율

A_w : C/C와 YT의 안벽에서의 평균대기값

Y_w : TC와 YT의 야드에서의 평균대기값

w_1 : 안벽대기 가중치($w_1 > w_2 + M$)

w_2 : 야드대기 가중치($w_2 > 0$)

P : 결합생산성 평가함수

w_1 과 w_2 는 모형의 기존 전체사항으로 안벽대기와 야드대기가 컨테이너터미널의 생산성에 미치는 영향에 대한 가중치값으로서, 적용되는 상황에 따라 다른 값을 부여할 수 있으며, w_1 에서는 big M을 부가하여 w_2 보다는 항상 큰 가중치를 가지는 것으로 가정한다.

정의된 기호를 이용하여 평가함수를 모형화하면 다음과 같다.

[대기시간비율 산출방식]

$$A_w = W_{\kappa(C/C)} + W_{\kappa(YT+C/C)} \dots\dots\dots (4-6)$$

$$Y_w = W_{\kappa(TC)} + W_{\kappa(YT+TC)} \dots\dots\dots (4-7)$$

$$P = w_1 * A_w + w_2 * Y_w \dots\dots\dots (4-8)$$

식 (4-6)에서 A_w 는 안벽에서 작업을 하는 C/C와 안벽과 야드 간을 이동하는 YT에 대해서 안벽에서 각각의 평균대기시간비율인 $W_{\kappa(C/C)}$ 와 $W_{\kappa(YT+C/C)}$ 의 합으로 양적하를 위한 본선작업시 안벽에서의 평균대기값으로 설정한다.

식 (4-7)의 Y_w 는 야드에서 작업을 하는 TC와 안벽과 야드 간을 이동하는 YT에 대해서 야드에서의 각각의 평균대기시간비율인 $W_{\kappa(TC)}$ 와 $W_{\kappa(YT+TC)}$ 의 합으로 설정한다. 여기서, $W_{\kappa(TC)}$ 는 TC의 대기시간 중 외부차량에 대한 대기를 제외한 YT에 대한 평균대기시간비율을 의미한다.

결국 결합생산성은 식 (4-8)의 평가함수 P를 최소화하는 값을 구하는 문제로 간주하여 시나리오를 수립하였으며, 각 장비의 대수에 대한 시나리오는 $S(N_{C/C}, N_{TC},$

N_{YT})로 정의하여 C/C, TC, YT 각 장비의 대수에 대한 장비조합으로 시나리오를 설정하였으며, $N_{C/C}$ 는 선석당 C/C할당대수, N_{TC} 는 TC할당대수, N_{YT} 는 C/C당 YT할당대수를 의미한다.

그리고 실험 시나리오는 $S(N_{C/C}, N_{TC}, N_{YT})$ 로 표현하지만 개별 장비별 상대비교를 위한 장비 보유수준은 $E(R_{C/C}, R_{TC}, R_{YT})$ 로 정의하며, $R_{C/C}$ 는 C/C 1대 기준이며, R_{TC} 와 R_{YT} 는 YT와 TC 대수를 전체 C/C 대수로 나눈 비율이다.

결국 평가함수는 시나리오에서 정의한 하역시스템 장비대수 조합에 의해서 $P(N_{C/C}, N_{TC}, N_{YT})$ 로 구별되지만 $P(R_{C/C}, R_{TC}, R_{YT})$ 로도 표현이 가능하다.

2) 결합생산성 분석을 위한 시뮬레이션 구현

하역시스템을 구성하는 안벽크레인, 이송장비, 야드크레인의 작업상태를 정의한 후 작업상태에 따라 작업을 위한 대기현상 및 상호작용을 객체지향접근법으로 모델링하여 각 객체의 개별적인 사이클 타임을 가지면서 서로 맞물려 돌아가는 서버중심의 모형을 구성하며, C/C와 TC에 대한 서버 모델이 전체 모델의 단위 모델 역할을 한다.

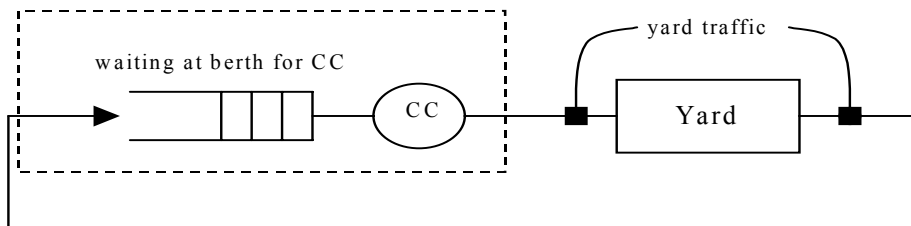
시뮬레이션 모형에서는 각 장비의 작업, 이동, 대기 등에 대한 시간통계량과 사이클타임 주기 및 횟수에 대한 통계량을 구하여 분석이 가능하도록 한다.

(1) C/C를 서버로 한 모델

C/C를 서버로 한 모델은 선석에서의 본선작업에 서버 역할을 하는 C/C 위주의 모델이며, C/C가 선박과 YT에 대한 서비스를 하는 형태이고, 대기행렬 구조는 다음 그림과 같다.

<그림 4-1>

C/C 서버 모형



또한 C/C 서버 모형에서는 C/C의 작업묘사를 위한 대기행렬에 YT의 장치장 간 이동을 묘사하는 장치장이동(yard traffic)을 포함하고 있다.

이 모형의 대기행렬은 YT의 C/C 앞에서의 대기라인과 C/C 작업을 고려한 C/C 활용도, YT의 장치장 간 이동을 반영한 선회시간을 산출할 수 있는 구조를 갖기 위해서 다음과 같이 정의된다.

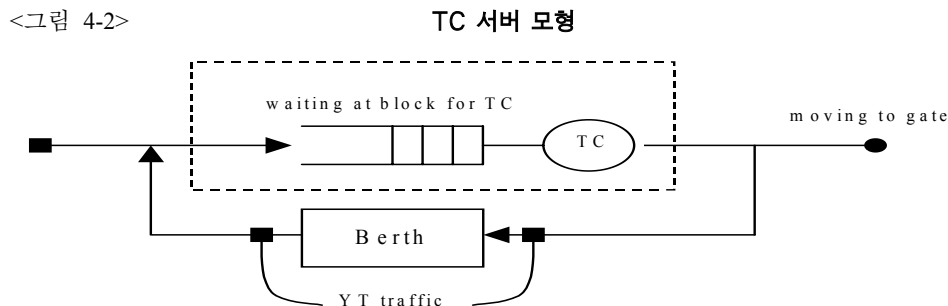
<표 4-1> 선석 모형의 입출력 관계

입력 요소	대기라인	출력 요소
선석과 장치장 간의 거리	C/C 앞 대기라인	YT의 C/C 대기시간
C/C의 작업시간	C/C의 속성에 반영	C/C 활용도
YT운행 시간	YT 도착지점의 대기라인	YT의 선회시간

<표 4-1>과 같은 입출력 관계를 바탕으로 선석 모형에 대한 시뮬레이션 모형을 이용하여 선석처리능력을 추정하거나 안벽능력을 분석한 연구사례들이 있다.⁷⁾⁸⁾

(2) TC를 서버로 한 모델

TC를 서버로 한 모델은 장치장에서의 야드작업에서 서버 역할을 하는 TC위주의 모델로서, 안벽의 양적하 작업물량과 게이트의 반출입 작업물량을 동시에 처리해야 하므로 YT와 외부차량의 두가지 유형의 고객이 도착하는 특성이 있으며, YT는 서비스시간에 제약이 있는 고객이므로, 대기행렬 구조는 다음 그림과 같다.



7) 김창곤 · 윤동한 · 최종희 · 배종욱 · 양창호, 「시뮬레이션 모델을 이용한 컨테이너터미널 안벽능력 분석」, 한국해양수산개발원, 2000. 12.

8) 양창호 · 양창호 · 김창곤 · 배종욱, 「컨테이너터미널 선석처리능력 추정방안에 관한 연구」, 한국해양수산개발원, 2001. 11.

또한 TC 서버 모형에서는 TC의 작업묘사를 위한 대기행렬에 YT의 장치장 간 이동을 묘사하는 장치장이동을 포함하고 있다.

이 모형의 대기행렬은 YT의 C/C 앞에서의 대기라인과 C/C 작업을 고려한 C/C 활용도, YT의 장치장 간 이동을 반영한 선회시간을 산출할 수 있는 구조를 갖기 위해서 다음과 같이 정의된다.

<표 4-2>

장치장 모형의 입출력 관계

입력 요소	대기라인	출력 요소
게이트와 장치장 간의 거리	TC 앞 대기라인	외부차량의 대기시간
선석과 장치장 간의 거리	TC 앞 대기라인	YT의 TC 대기시간
TC의 작업시간	TC 속성에 반영	TC 활용도
차량의 운행 경로 및 시간 수출입 블록의 Layout	차량 도착지점에 대기라인	대기시간을 차량에 반영 외부차량의 장치장 체제시간
TC대기라인 우선순위	TC 앞 대기라인 우선순위결정(YT>외부차량)	

(3) 상태전이 모델링

사건의 발생에 의한 객체의 상태 변화를 종합하여 사건과 상태의 변화를 하나의 다이어그램으로 나타낸 것이 상태전이 다이어그램이다. 상태전이 다이어그램은 객체의 행위, 또는 한 시스템 내에서 사건에 의한 객체의 생성에서 소멸까지의 과정을 살펴볼 수 있으며, 여기서는 C/C, TC, YT 등의 장비가 작업을 위해 대기하는 시간을 산출하기 위해서 작업, 이동, 대기 등 상세한 수준에서의 상태와 그 상태에 머무는 시간까지 산출할 수 있도록 상태전이 모델링을 사용하였다.

① TC

TC의 상태변화는 <표 4-3>과 같이 작업상태는 상차(load)와 하차(unload)로 구분하였고 그 외에 이동, 대기, 유휴 상태를 정의하였다. 이러한 상태 변화의 조건과 상태 변화과정을 모델링하기 위해 <그림 4-3>과 같이 TC를 중심으로 한 객체의 상태 변화를 나타내는 상태전이 다이어그램을 작성하였다.

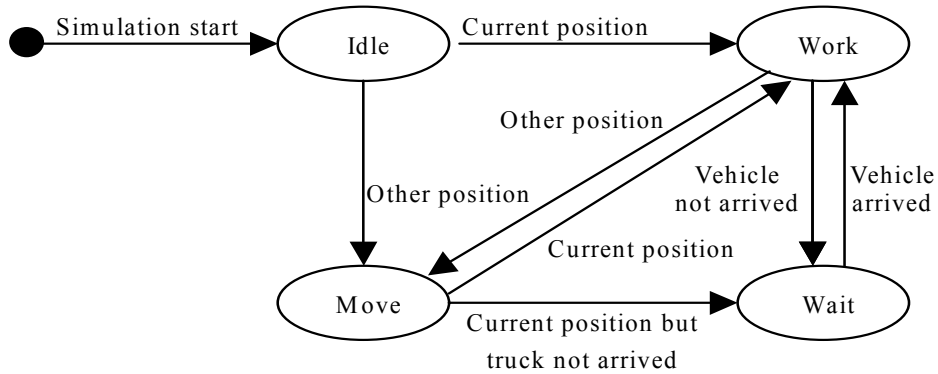
<표 4-3>

TC의 상태

상태		설명
IDLE		작업이 없어서 대기하고 있는 상태
MOVE		목적지로 이동하고 있는 상태
WAIT		외부차량 또는 YT가 도착하지 않아서 대기하고 있는 상태
WORK	LOAD	신고 온 컨테이너를 장치장에 장치하는 작업
	UNLOAD	차량에 컨테이너를 실어주는 작업

<그림 4-3>

TC와 C/C의 상태전이도



<그림 4-3>에서 TC가 작업지시를 받으면 ‘MOVE’ 상태로 변한다. 그리고 TC가 목적지에 도착했을 때 YT 또는 외부차량이 목적지에 도착해 있지 않으면 ‘WAIT’ 상태로, YT 또는 외부차량이 도착해 있으면 ‘WORK’ 상태로 변한다. 그리고 작업이 끝난 후 다른 작업이 없으면 ‘IDLE’ 상태가 된다.

② C/C

<표 4-4>는 C/C의 상태를 정의한 것으로 TC와 유사한 작업형태를 가지므로 동일한 5가지 상태로 구분하였다.

<표 4-4>

C/C의 상태

상태		설명
IDLE		작업이 없어서 대기하고 있는 상태
MOVE		작업이 있는 곳으로 이동하고 있는 상태
WAIT		YT가 도착하지 않아서 대기하고 있는 상태
WORK	LOAD	적하작업
	UNLOAD	양하작업

C/C의 상태전이도는 <그림 4-3>과 같이 C/C에 대한 상태전이 과정을 나타낸다. 선박이 도착하면 할당된 C/C의 작업 순서 리스트가 작성되고 작업이 시작되는데 C/C의 초기위치에 작업이 있으면 ‘WORK’ 상태로 다른 위치에 작업이 있으면 C/C는 ‘MOVE’ 상태로 변한다. 그리고 YT가 작업위치에 도착해 있으면 ‘WORK’ 상태로, YT가 아직 도착하지 않았으면 ‘WAIT’ 상태로 변한다. 이와 같은 과정을 거치면서 양하작업과 적하작업이 모두 끝나면, C/C는 다음 선박이 도착할 때까지 ‘IDLE’ 상태를 계속 유지한다.

③ YT

<표 4-5>는 YT의 상태를 정의한 것으로 이동시에는 컨테이너를 실은 상태와 차량만 운행하는 경우로 구분하였고 차량의 대기는 TC 앞에서의 대기과 C/C 앞에서의 대기로 구분하였다.

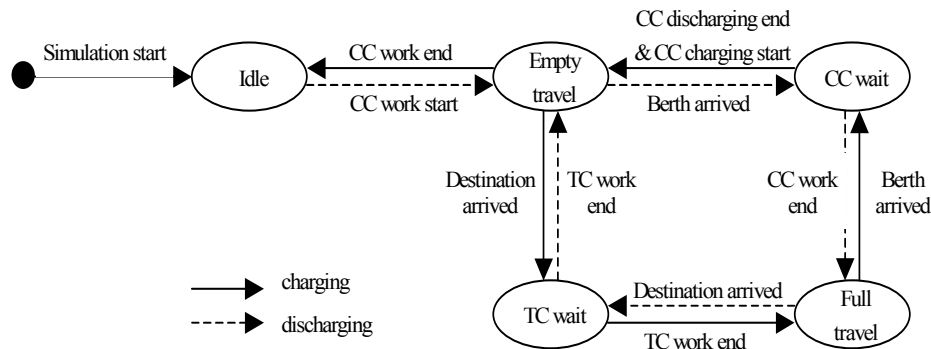
<표 4-5>

YT의 상태

상태		설 명
IDLE		할당된 C/C에 작업이 없어서 대기하고 있는 상태
MOVE	LOADED	컨테이너를 싣고 이동하고 있는 상태
	EMPTY	빈 상태로 다음 작업을 위해 이동하고 있는 상태
WAIT	TC_WAIT	TC의 서비스를 받기 위해 대기하고 있는 상태
	C/C_WAIT	C/C의 서비스를 받기 위해 대기하고 있는 상태

<그림 4-4>

YT 상태전이도



<그림 4-4>에서 YT가 할당되어 있는 C/C가 작업을 시작하면 YT는 'IDLE' 상태에서 선석의 작업위치로 이동하기 위해 'EMPTY' 상태로 변한다. 그리고 작업위치에 도착하면 C/C의 서비스를 받기 위해 'C/C_WAIT' 상태가 된다. C/C가 양하작업을 위해 YT에 컨테이너를 실어주면 YT는 'LOADED' 상태로 목적블록으로 이동을 시작한다. 그리고 목적블록에 도착하면 TC의 서비스를 받기위해 'TC_WAIT' 상태로 대기한다. TC의 작업이 끝나면 다시 'EMPTY' 상태로 선석의 작업위치로 이동한다.

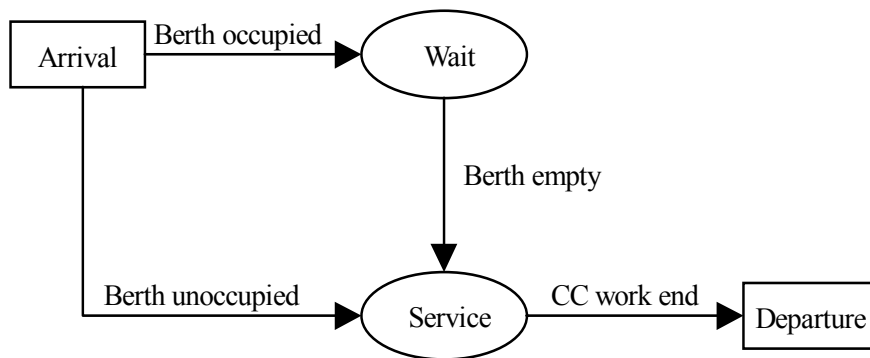
C/C의 양하작업이 모두 끝나고 적하작업이 시작되면 YT는 'EMPTY' 상태로 목적블록으로 이동한다. 그리고 TC가 작업을 하는 동안 'TC_WAIT' 상태를 유지한다. TC작업이 끝나면 'LOADED' 상태로 선석의 작업위치로 이동을 한다. C/C가 작업을 하는 동안 'C/C_WAIT' 상태를 유지한다.

C/C의 양하/적하 작업이 모두 끝나면 YT는 'IDLE' 상태를 유지한다.

④ 선박

<그림 4-5>

선박 상태전이도

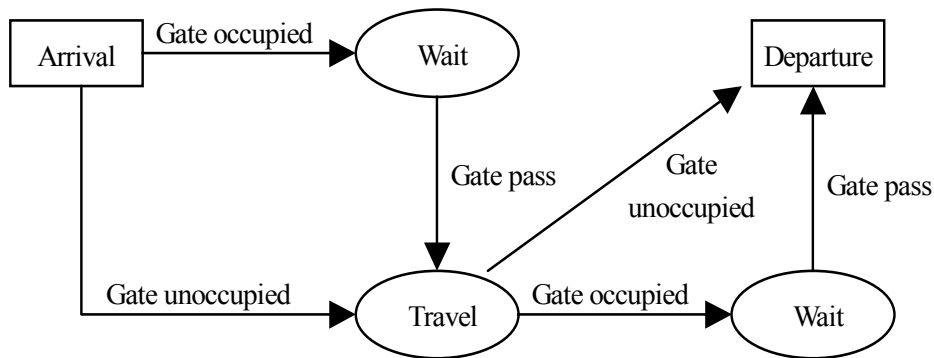


<그림 4-5>는 선박을 중심으로 한 상태전이 다이어그램이다. 선박 도착예정 시간이 되면 선박을 생성시킨다. 그리고 선석이 점유되어 있으면 선박은 'WAIT' 상태가 된다. 선석이 비어 있으면 접안을 하게 된다. 접안을 하게 되면 C/C의 작업이 시작되고 양하/적하 작업이 모두 끝나게 되면 선박은 출발을 한다. 그리고 소멸된다.

⑤ 외부차량

<그림 4-6>

외부차량 상태전이도



<그림 4-6>은 외부차량을 중심으로 한 상태전이 다이어그램이다. 반입/반출차량의 발생정보에 의해 차량이 발생된다. 그리고 게이트가 비어 있으면 게이트를 통과하여 목적블록으로 이동한다. 목적블록에 도착하면 TC의 서비스를 받기 위해 'TC_WAIT' 상태가 된다. TC의 작업이 끝나면 게이트로 이동하고 게이트의 서비스를 받은 후 소멸된다.

3) 시뮬레이션 모델 개발 환경

컨테이너터미널에서의 장비와 선박 및 차량의 컨테이너 이송/하역작업을 서버와 클라이언트에 대한 상호작용으로 분석하여 모델링하였으므로 객체지향 프로그래밍(object-oriented programming) 및 객체지향 시뮬레이션(object-oriented simulation)이 가능한 Visual C++를 개발환경으로 하였다.

컨테이너터미널에서 일어나는 모든 장비의 작업과 선박 및 차량의 도착과 출발을 묘사하기 위해서 컨테이너터미널 전체를 시뮬레이션 모델의 대상으로 하였다.

2. 시뮬레이션에 의한 실증분석

1) 개요

1절에서 설정한 결합생산성 모형을 이용하여 애로공정을 분석하고 하역시스템 취급능력 향상방안을 제시하기 위해 실제 컨테이너터미널을 대상으로 시뮬레이션에 의한 실증분석을 하고자 한다. 대상은 우암터미널 2선석과 감만부두 대한통운 1선석 등 2개 터미널이며, 실적 자료를 바탕으로 현실성 있는 분석을 위해 시뮬레이션 모델에 입력·반영하였다.

실험결과로 얻은 출력결과값으로 결합생산성 모형의 설정에서 정의한 내용과 실증분석결과를 이용하여 애로공정을 조정할 수 있음을 보이고자 한다. 이를 위해서 먼저 애로공정 조정 방법론을 수립하고 시뮬레이션 실험을 위한 전제조건을 정의한 후 실증분석을 통하여 결합생산성 모형을 이용한 애로공정 조정을 보이고자 한다.

2) 애로공정 조정 방법론

컨테이너터미널에서 하역시스템의 생산성과 관련하여 자주 사용되는 개념에는 생산성(productivity), 처리용량(capacity), 성능(performance) 등이 있다. 이 개념들은 의미에 차이가 있으나 경우에 따라 동일한 의미로 사용되기도 하며, 이 개념들은 항만물동량(throughput) 또는 선석별 물동량과 대비해서 사용하고 있다.

여기서 포괄적인 의미의 항만 생산성은 시간당 컨테이너 처리개수로 표현되는 처리능력을 주로 사용하며, 장치장 면적 및 장비 보유대수로 표현되는 시설규모적인 측면의 처리용량도 사용되고, 처리능력과 처리용량을 항만별로 비교할 때 절대적인 수치비교를 위해서 성능을 사용하기도 한다.

먼저 처리용량에 대해서 다음의 세 가지 기준이 정의되고 있다.

- 설계용량 : 이론적 또는 수리적 모델로부터 유도된 용량
- 운영용량 : 유사항만에서 달성한 결과에 기초한 용량
- 물리적 한계 : 100% 선석점유율에서 측정되는 용량

위의 용량을 C/C를 예로 들어 설명하자면, 설계용량은 C/C의 생산성을 설계에 맞춘 것으로 총 작업시간당 생산성에 의해 작성된다. 운영용량은 C/C의 실제 작업

에서의 생산성으로 설계시의 총 작업시간당 생산성보다는 높고 순 작업시간당 생산성보다는 낮은 값을 의미하며, 물리적 한계는 C/C의 기계적 생산성인 사이클타임 그 자체를 의미하므로 생산성은 설계용량과 운영용량 사이에서 결정된다고 할 수 있다.

따라서 물리적 한계인 기계적 생산성에 도달할 수는 없지만 설계용량과 운영용량 사이에서 결정되는 운영용량은 단일 장비에 의해 결정되기보다는 하역시스템을 구성하는 장비 간의 부조화에 의해서 발생할 가능성이 높으므로 설계용량과 운영용량 간의 오차를 줄여서 생산성이 평준화 수준에 도달하기 위해서는 하역시스템을 구성하는 각 장비의 사이클타임 조절이 필요하며, 부수적으로는 장비의 사양이 변경되거나 장비기사의 작업능력이 향상되어도 가능하다.

장비의 대수 조절을 통한 애로공정의 조절은 하역시스템을 구성하는 서버인 C/C와 TC 그리고 클라이언트인 YT의 대수를 조정하여 대기라인의 구조변경을 통한 애로공정 조절이 가능하다. 특히 이 경우에는 안벽대기와 야드대기 간의 상대적인 가중치를 부여하거나 각 시나리오의 상대적인 절감효과를 파악하여 분석할 수 있다.

애로공정의 조절에 적용 가능한 방법은 다음과 같다.

[조정방법 1] 기존 하역시스템 장비조합 시나리오 변경

이 방법에 의해서 애로공정이 발생한 장비영역의 대기시간을 줄여나가면서 애로공정을 감소시킨다.

[조정방법 2] 안벽과 야드 대기값의 가중치 부여방법

이 방법은 하역시스템 장비조합 평가함수값 산출시 안벽과 야드의 대기값에 대한 가중치인 w_1 과 w_2 를 조정하는 방법이며, 안벽과 야드에서 대기에 의한 손실값을 달리 부여하는 것이다.

위의 2가지 방법을 반영하여 민감도 분석에서는 기존 하역시스템 장비조합 시나리오 변경에 대기값의 가중치를 고려하는데 본 연구에서는 가중치 w_1 과 w_2 에 동일한 값을 부여하는 경우를 분석하고자 한다.

또한 애로공정 분석을 위한 공정의 정의는 결합생산성 평가함수 수립시 정의한 하역시스템의 대기값 산출 요소와 동일하게 4가지 유형의 애로공정 요소가 있으며, 발생 지점은 안벽에서 C/C와 YT, 야드에서 YT와 TC이며, 애로공정의 지점과

원인을 표시하면 다음과 같다.

<표 4-6> 애로공정 요소 및 발생지점에 따른 원인

발생지점 애로공정 요소		안벽		야드	
		C/C	YT	YT	TC
C/C 대기	$W_{\neg(C/C)}$	애로공정	장비부족		장비부족
TC 대기	$W_{\neg(TC)}$	장비부족	장비부족		애로공정
YT 대기(안벽)	$W_{\neg(YT+C/C)}$	장비부족	애로공정		
YT 대기(야드)	$W_{\neg(YT+TC)}$			애로공정	장비부족

주 : 회색으로 표시된 부분이 애로공정 발생지점이며, 원인은 해당 장비부족으로 표시됨.

위의 <표 4-6>과 같이 애로공정의 발생지점에 따라 해당 장비부족이 발생하며, C/C 대기과 TC 대기의 경우는 자체 장비의 부족과 이송장비의 부족에 의한 것이고, YT의 대기는 자체 장비의 부족으로 인한 것이다. 따라서 애로공정의 조정은 부족한 장비를 적정 수준의 장비대수로 보유수준을 높여 애로공정을 조정함으로써 대기시간을 낮추는 것이 결합생산성에 의한 방법론이다.

3) 전제조건

시뮬레이션 실험에 의한 실증분석을 하기 위한 전제조건은 두 가지이며, 첫째는 실험대상 선정에 대한 전제조건이고 둘째는 대상에 대한 규모이다.

먼저, 실험대상은 우암터미널과 감만부두 대한통운으로 선정하였다. 우암터미널은 부산항의 중소형터미널이며, 감만부두 대한통운은 부산항에서 컨테이너처리 실적이 가장 많은 터미널이다. 우암터미널의 경우는 2개 선석을 보유한 터미널이므로 2개 선석을 대상으로 하지만 감만부두 대한통운의 경우는 1개 선석으로 운영되므로 이를 대상으로 한다.

둘째, 대상에 대한 규모의 결정은 전문가 면담결과를 바탕으로 하였다. 컨테이너터미널의 운영 및 계획부서의 전문가들에 대한 면담결과를 바탕으로 감만부두 대한통운과 같이 한 선석에 C/C 4대를 보유한 대형 컨테이너선용 컨테이너터미널을 시뮬레이션 실험대상으로 선정하였으며, C/C 4대를 전제로 하여 실증분석을 하였다.

C/C 4대를 적용한 실증분석을 위한 면담결과를 요약하면 다음과 같다.

컨테이너터미널에서 자원의 사용 중 가장 중요한 의사결정은 컨테이너선 입항 시 C/C를 몇 대 할당할 것인지를 결정하는 것이며, C/C 대수에 따라 YT대수 및 TC대수가 결정되는 그룹(Gang)단위의 작업을 하게 된다. 특히 안벽에서 C/C 1대가 더 추가될 경우에는 작업인원수는 40명이나 추가되는 만큼 중요한 의사결정으로 간주한다. 이러한 C/C의 대수를 결정하는 근거는 다음의 세 가지로 구분할 수 있다.

- 선사에서 재항시간에 대한 요구사항이 있을 경우 이를 만족시키기 위해 적합한 C/C의 대수를 할당한다.

선사에서 요구하는 경우는 직접적으로 안벽크레인 대수를 지정하여 할당을 요청하기보다는 물량에 따라 재항시간을 만족시키기 위한 최소 할당대수를 선석계획자(플래너)가 결정한다.

- 선박의 작업 물량이 어느 일정 범위가 되면 경험적으로 C/C 대수를 판단하게 되며, C/C의 시간당 생산성이 판단을 위한 주요 근거가 된다.

선박의 작업조건 중 작업 물량의 적재(stowage) 분배상황에 따라 C/C 할당대수가 달라질 수도 있다.

- 선박의 크기에 따라 물리적으로 할당 가능한 범위가 결정된다.

5천 TEU급 선박의 경우 보통 작업 물량이 1,500VAN 이상이므로 C/C 4대를 할당하게 된다. 부산항의 경우 C/C의 총 작업시간당 생산성이 25개를 밑돌아 4대를 할당할 경우 95lifts/h 정도의 생산성을 가지기 때문에 선박에 대한 서비스를 맞추기 위해서 100lifts/h를 목표로 하여 작업을 한다.

선박당 물량이 2천 VAN을 초과할 경우는 5천 TEU급 이상의 선박이며, 이 경우는 C/C 4대를 할당하여야 재항시간 24시간을 만족시킬 수 있다. 부산항 컨테이너터미널의 경험적 수치에서도 선박당 4대의 C/C를 할당할 경우 100lifts/h를 달성하는 정도의 수준이다.

그러므로 선석계획자의 판단 근거는 선박의 크기와 작업물량이고 작업상황에 따라 경험적으로 C/C 대수를 할당하게 되며, 선박의 작업조건(선박의 크기, 물량, 적재의 분배 상황)에 따라 변동요인이 발생한다고 할 수 있다.

따라서 이러한 면담결과를 이용하기 위해 C/C 4대를 고정으로 사용하는 감만부두 대한통운을 실험대상으로 하였다.

그리고 두 개의 컨테이너터미널을 실증분석 대상으로 한 이유는 컨테이너터미널별로는 동일한 장비구성비가 존재할 수 없기 때문이며(<표 2-1> 참조), 그 이유

는 시설물배치(layout), 장치기간, 운영시스템의 효율성 등 여러 가지 운영변수의 차이로 인해서 컨테이너터미널별로 운영상에서의 차이가 있기 때문이다.

4) 실증분석 1 : 우암터미널

(1) 실험설계

시뮬레이션 실험을 위해서 물동량 자료, 장비성능 및 수량, 터미널 운영을 위한 정책, 시설물의 사양 등의 다양한 입력자료들이 필요하다.

시뮬레이션 실험을 위한 대상 컨테이너터미널은 특정한 대상의 자료를 사용하지 않고 방법론의 타당성과 분석을 위하여 임의의 모형을 가정하였다.

컨테이너 물동량 자료는 연간 컨테이너 처리물량으로 가정하였다.

- 수출 컨테이너 물동량 : 179,595TEU
- 수입 컨테이너 물동량 : 98,252TEU
- 환적 컨테이너 물동량 : 수입(53,394TEU),
수출(33,656TEU)

- TEU/VAN 비율 : 1.4

이상의 컨테이너 물동량 자료에 함께 컨테이너터미널에서 사용되는 장비에 대해서는 <표 4-7>과 같이 장비의 성능 입력값을 고려하였다. 그리고 컨테이너터미널의 운영에 대한 기본값은 <표 4-8>과 같이 설정하고, 시설물을 구성하기 위한 기본 입력 자료는 <표 4-9>와 같이 설정하였다.

<표 4-7>

장비의 성능 입력값

속성 \ 장비구분	C/C	TC	YT	외부차량
기본 장비대수	4	10	16	-
작업시간(초)	N(112.8, 31.2)	N(87, 19.3)	-	-
이동속도(km/h)	3	8	20	20

장비에 주어지는 이동속도는 실제 정규 주행속도와 장비의 사양을 반영하여 결정한 값이며, 작업시간⁹⁾은 정규분포를 가정하였다.

9) 윤원영 외, “컨테이너터미널에서 컨테이너 크레인의 하역능력 추정에 관한 시뮬레이션 연구”, 「IE Interface」, 2001.

<표 4-8>

운영정책 입력값

운영 정책 항목	입력값
반입허용 시작시간	4일
반입허용 마감시간	10시간 전
무료장치기간	4일
선석당 C/C수	2대
C/C당 YT수	4대
선박도착시간 간격	지수분포(10시간)
선박의 선석 접안시간	50분
선박의 선석 이안시간	50분

운영정책 입력값에서 수출 컨테이너의 반입허용기간은 4일 전부터 10시간 전으로 하였으며, 무료장치기간은 평균 4일을 적용하였다. 선박도착시간 간격은 선박의 등간격 도착에서 매도착마다 지수분포 10시간의 편차를 가지도록 하였다.

<표 4-9>

시설물 입력값

게이트 사양		장치장 사양		안벽 사양	
입구수	3	수출 블록수	7	선석수	2
출구수	2	수입 블록수	5		
서비스시간 (초)	UN(20,30)	블록 베이수	25	안벽길이 (m)	500
		블록 열수	6		
		블록 단적수	4		

실험에서 가정한 시설물 중 게이트는 입구 3개, 출구 2개이며, 서비스시간은 일양분포를 가정하였다. 장치장에서 블록은 4단 6열을 가지며, 선석수는 2개를 고려하였다.

(2) 실험결과

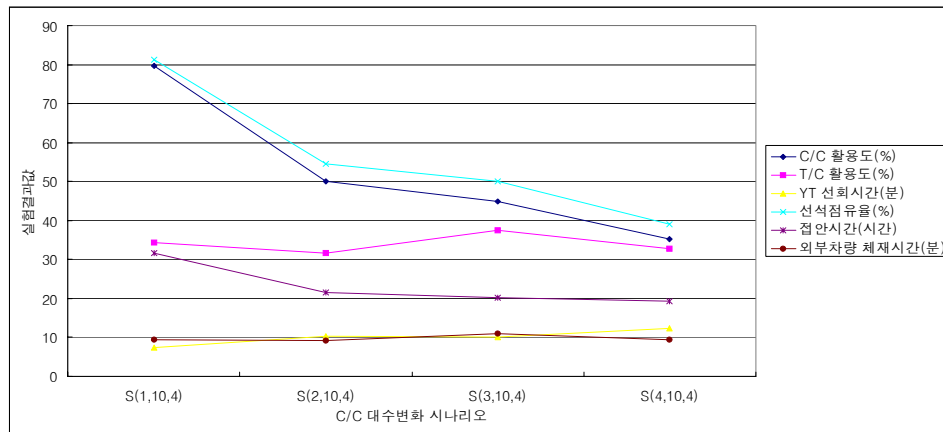
시뮬레이션 실험결과는 하역시스템의 결합생산성과 관련된 C/C 활용도, TC 활용도, YT 선회시간을 장비통계량으로 구하였으며, 시스템에서 고객인 선박과 외부차량에 대한 고객통계량으로 선석점유율, 접안시간, 외부차량 체재시간을 구하였다.

각 장비 대수변화에 대한 시나리오별 실험결과값을 정리하면 다음과 같다.

<표 4-10> C/C 대수변화에 따른 실험결과값

		S(1,10,4)	S(2,10,4)	S(3,10,4)	S(4,10,4)
장비 통계량	C/C 활용도(%)	79.77	50.00	44.88	35.32
	TC 활용도(%)	34.36	31.60	37.57	32.79
	YT 선회시간(분)	7.31	10.28	10.15	12.38
고객 통계량	선석점유율(%)	81.22	54.60	50.08	38.96
	접안시간(시간)	31.54	21.60	20.10	19.33
	외부차량 체제시간(분)	9.35	9.30	10.90	9.37

<그림 4-7> C/C 대수변화에 따른 실험결과값

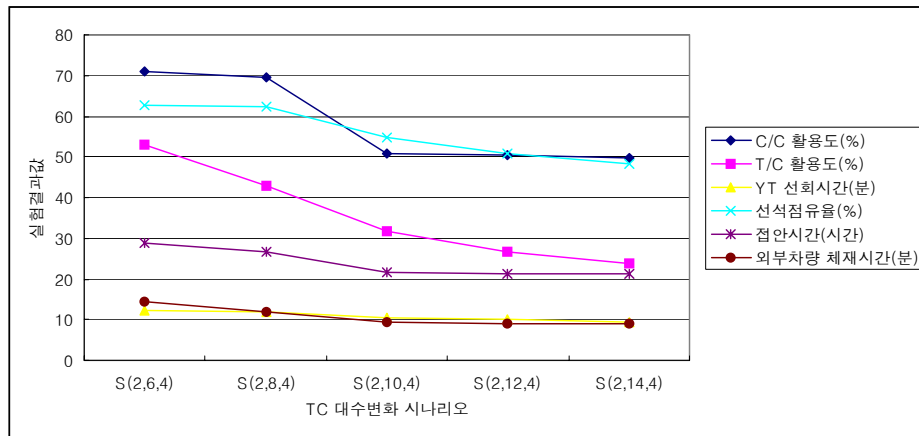


<표 4-11> TC 대수변화에 따른 실험결과값

		S(2,6,4)	S(2,8,4)	S(2,10,4)	S(2,12,4)	S(2,14,4)
장비 통계량	C/C 활용도(%)	71.08	69.60	50.00	50.39	49.72
	TC 활용도(%)	52.98	42.75	31.60	26.57	23.79
	YT 선회시간(분)	12.25	11.91	10.28	10.01	9.34
고객 통계량	선석점유율(%)	62.79	62.43	54.60	50.71	48.21
	접안시간(시간)	18.91	26.54	21.60	21.40	21.12
	외부차량 평균체제시간(분)	14.30	11.80	9.30	9.06	8.98

<그림 4-8>

TC 대수변화에 따른 실험결과값



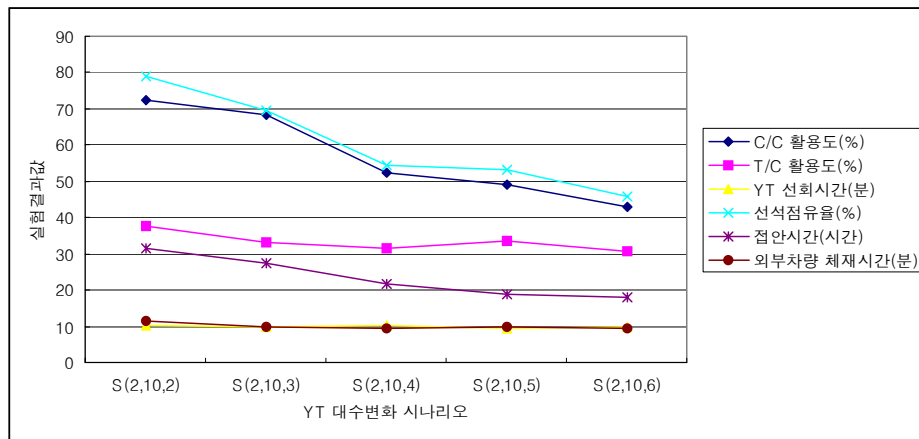
<표 4-12>

YT 대수변화에 따른 실험결과값

		S(2,10,2)	S(2,10,3)	S(2,10,4)	S(2,10,5)	S(2,10,6)
장비 통계량	C/C 활용도(%)	72.21	68.16	50.00	49.12	43.08
	TC 활용도(%)	37.46	33.28	31.60	33.72	30.82
	YT 선회시간(분)	10.34	9.92	10.28	9.39	9.68
고객 통계량	선석점유율(%)	78.94	69.40	54.60	53.12	45.77
	접안시간(시간)	31.70	27.40	21.60	18.92	17.84
	외부차량 평균체제시간(분)	11.51	9.72	9.30	9.92	9.23

<그림 4-9>

YT 대수변화에 따른 실험결과값



실증분석을 위해서 초기 실험조건을 S(2, 10, 4)로 설정한 후 이 시나리오의 하역시스템 장비조합에서 애로공정을 파악하고 조정하기 위한 민감도 분석을 수행하였다.

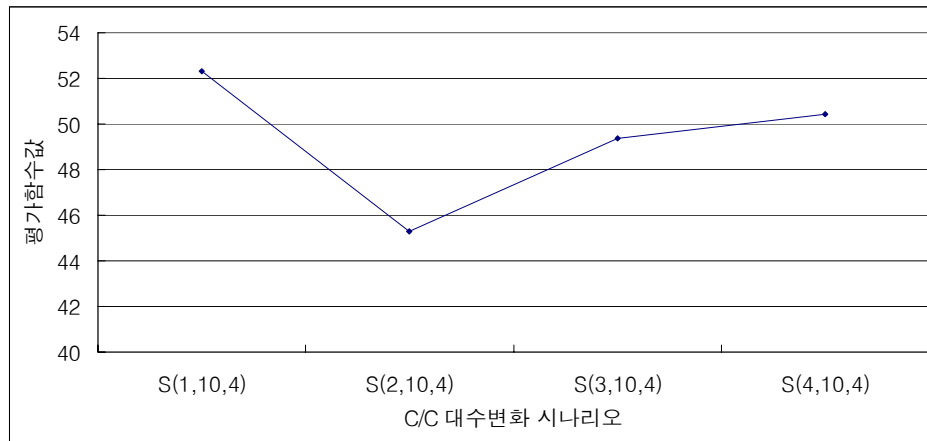
C/C 대수변화, TC 대수변화, YT 대수변화에 대해서 각각에 대한 결합생산성 모형의 항목별 평가값은 다음과 같다.

<표 4-13> C/C 대수변화에 따른 평가값

	S(1,10,4)	S(2,10,4)*	S(3,10,4)	S(4,10,4)
$W_{r(C/C)}$	19.88	20.30	18.12	17.24
$W_{r(TC)}$	15.47	13.30	14.28	12.98
$W_{r(YT+C/C)}$	13.61	6.10	5.69	4.01
$W_{r(YT+TC)}$	3.36	5.59	11.27	16.20
A_w	33.49	26.40	23.81	21.25
Y_w	18.83	18.89	25.55	29.18
$w_1^* A_w$	33.49	26.40	23.81	21.25
$w_2^* Y_w$	18.83	18.89	25.55	29.18
P	52.32	45.29	49.36	50.43
상대적 낭비효과	+7.08	0	+4.07	+5.14

주 : C/C 대수가 선석당 2대일 때 평가함수가 최소값을 가짐.

<그림 4-10> C/C 대수변화에 따른 평가함수값의 민감도



<표 4-14>

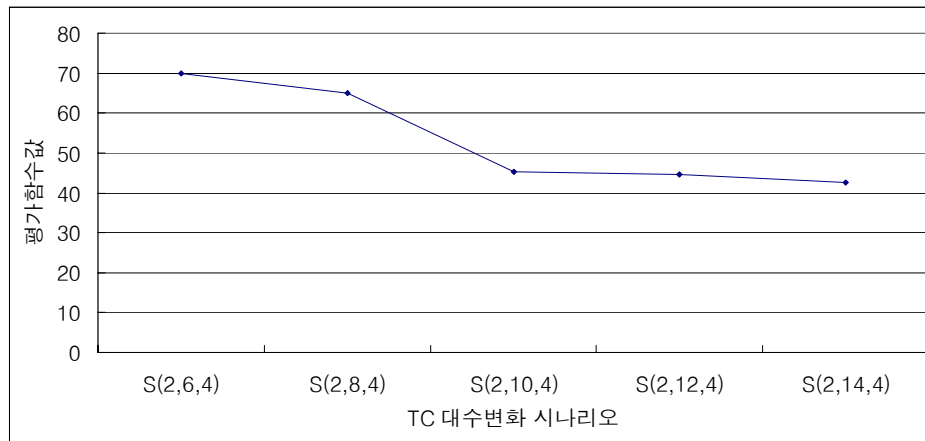
TC 대수변화에 따른 평가값

	S(2,6,4)	S(2,8,4)	S(2,10,4)	S(2,12,4)	S(2,14,4)*
$W_{r(C/C)}$	28.40	28.79	20.30	20.80	19.10
$W_{r(TC)}$	15.30	15.18	13.30	12.30	11.40
$W_{r(YT+C/C)}$	22.35	16.83	5.59	5.52	5.78
$W_{r(YT+TC)}$	3.90	4.22	6.10	5.89	6.30
A_w	32.30	33.01	26.43	26.67	25.40
Y_w	37.68	32.01	18.89	17.85	17.18
$w_1^* A_w$	32.30	33.01	26.40	26.67	25.40
$w_2^* Y_w$	37.68	32.01	18.89	17.85	17.18
P	69.98	65.01	45.29	44.52	42.58
상대적 낭비효과	+27.39	+22.43	+2.71	+1.94	0.00

주 : TC 대수가 14대일 때 평가함수가 최소값을 가짐.

<그림 4-11>

TC 대수변화에 따른 평가함수값의 민감도



<표 4-15>

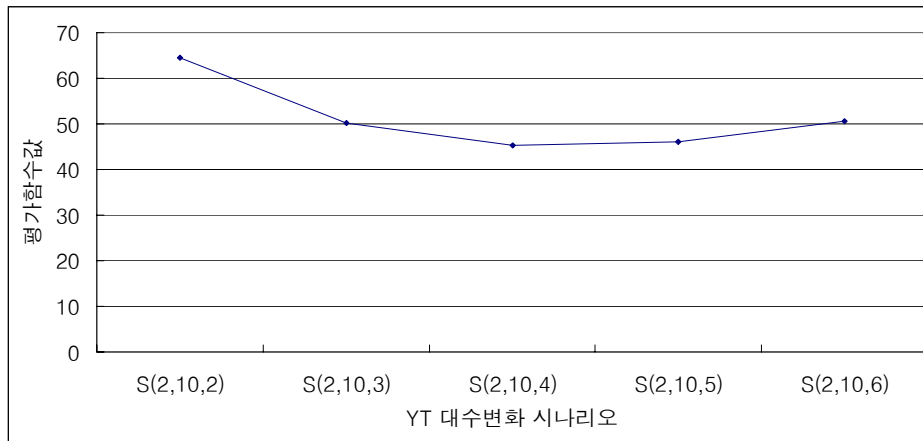
YT 대수변화에 따른 평가값

	S(2,10,2)	S(2,10,3)	S(2,10,4)*	S(2,10,5)	S(2,10,6)
$W_{r(C/C)}$	35.10	26.91	20.30	14.18	10.10
$W_{r(TC)}$	18.40	14.51	13.30	12.66	12.55
$W_{r(YT+C/C)}$	4.87	4.78	5.59	9.25	11.86
$W_{r(YT+TC)}$	6.19	3.90	6.10	10.02	16.03
A_w	41.29	30.81	26.40	24.20	26.13
Y_w	23.27	19.29	18.89	21.91	24.41
$w_1^* A_w$	41.29	30.81	26.40	24.20	26.13
$w_2^* Y_w$	23.27	19.29	18.89	21.91	24.41
P	64.56	50.10	45.29	46.11	50.54
상대적 낭비효과	+19.27	4.81	0.00	+0.82	+5.25

주 : YT 대수가 C/C당 4대일 때 평가함수가 최소값을 가짐.

<그림 4-12>

YT 대수변화에 따른 평가함수값의 민감도



(3) 결과 분석

실험에서 결과값은 $S(N_{CC}, N_{TC}, N_{YT})$ 에 대해서 C/C 대수변화, TC 대수변화, YT 대수변화에 대해서 각각 분석하였으며, 하역시스템의 대기값을 산출하기 위한 방법은 대기시간비율 산출방식을 사용하였다.

그리고 안벽과 야드의 대기구조에 대한 가중치를 동일하게 부여하기 위해 $w_1 = 1$, $w_2 = 1$ 로 가정하여 분석하였다.

시물레이션에 의한 결합생산성의 실증분석을 위해서 미리 설정한 시나리오 $S(N_{CC}, N_{TC}, N_{YT})$ 에 대한 민감도 분석결과를 살펴보면 다음과 같다.

① C/C 대수변화에 대한 분석

C/C 대수변화에 대한 분석결과는 다음과 같다.

- C/C 대수가 증가함에 따라 C/C 평균대기시간비율($W_{\kappa(C/C)}$)은 감소세를 보이고, TC 평균대기시간비율($W_{\kappa(TC)}$)도 감소세를 보였다.
- C/C 대수가 증가함에 따라 안벽에서의 평균대기값(A_w)은 감소하고 야드에서의 평균대기값(Y_w)은 증가하였다.
- 애로공정 측면에서는 S(4,10,4)와 같이 C/C를 4대로 증가키시더라도 $W_{\kappa(C/C)}$, $W_{\kappa(TC)}$, $W_{\kappa(YT+C/C)}$ 는 낮아지지만 $W_{\kappa(YT+TC)}$ 가 상대적으로 높아져 TC 부족이 발생하여 C/C 4대로의 증가는 TC 부족이라는 애로공정을 야기하는 시나리오이다.
- 또한, S(3,10,4)는 A_w 와 Y_w 간의 차이가 작아 안벽과 야드의 대기를 균등화시키는 효과가 있지만 평가함수 P 가 S(2,10,4)보다 높아 결합생산성측면에서 최소값을 가지지 않는다.
- 따라서 애로공정을 조정하면서 평가함수를 최소화하는 시나리오는 S(2,10,4)이며 결합생산성의 평가함수값은 45.29로 최소값을 가진다.

② TC 대수변화에 대한 분석

TC 대수변화에 대한 분석결과는 다음과 같다.

- TC 대수가 증가함에 따라 C/C 평균대기시간비율($W_{\kappa(C/C)}$)은 감소세를 보이고, TC 평균대기시간비율($W_{\kappa(TC)}$)도 감소세를 보였다.
- TC 대수가 증가함에 따라 안벽에서의 평균대기값(A_w)은 감소세를 보이고 야드에서의 평균대기값(Y_w)도 감소하였다.
- 애로공정 측면에서는 TC 8대 이하 보유는 $W_{\kappa(C/C)}$ 와 $W_{\kappa(YT+C/C)}$ 를 포함한 안벽 대기를 증가시키며, 전체적인 장비부족 현상을 야기시킨다. 그러나 TC

14대 이상 보유로 전체적으로 낮은 대기값을 가지고 A_w 와 Y_w 간의 차이가 가장 작아 안벽과 야드 대기값의 균등화를 달성할 수 있다.

- 따라서 결합생산성 측면에서 결합생산성 평가함수값의 감소세가 안정화되어 가며, 낭비효과가 가장 최소화되는 시나리오는 S(2,14,4)이고, 평가함수값이 42.58로 최소값을 가진다.

③ YT 대수변화에 대한 분석

YT 대수변화에 대한 분석결과는 다음과 같다.

- YT 대수가 증가함에 따라 C/C 평균대기시간비율($W_{\pi(C/C)}$)은 감소하며, TC 평균대기시간비율($W_{\pi(TC)}$)도 감소하였다.
- YT 대수가 증가함에 따라 안벽에서의 평균대기값(A_w)은 S(2,10,5)까지는 감소세를 보인 후 다시 증가하였고, 야드에서의 평균대기값(Y_w)은 S(2,10,4)까지는 감소하다가 다시 증가하였다.
- 결합생산성의 평가함수값은 감소세가 S(2,10,4)에서 최소값을 가지다가 다시 증가세를 가진다.
- 애로공정 측면에서는 S(2,10,6)과 같이 YT를 6대로 증가시키면 A_w 와 Y_w 의 차이가 가장 작아서 대기시간비율이 균등화되는 시나리오이지만 A_w 를 비슷한 수준으로 유지하면서 평가함수값을 최소화시키는 시나리오는 S(2,10,4)이다.
- 따라서 애로공정을 조정하지 않아도 평가함수값을 최소화하는 시나리오가 S(2,20,4)이며, 결합생산성의 평가함수값은 45.29로 최소값을 가진다.

(4) 애로공정 분석 및 개선방향

시뮬레이션에 의한 결합생산성의 실증분석을 위해서 미리 설정한 시나리오 S($N_{C/C}$, N_{TC} , N_{YT})에 대한 민감도 분석결과를 살펴보면, C/C 대수변화시에는 C/C 대수가 기준값 이상으로 증가함에 따라 야드에서의 대기가 증가하므로 S(2,10,4)에서 섣석당 C/C 2대가 C/C 측면에서 가장 좋은 대안이며, TC 대수변화시에는 TC 대수가 증가함에 따라 야드에서 대기가 지속적으로 감소되므로 S(2,14,4)에서 TC 14대가 가장 좋은 대안이었다. YT 대수변화시에는 YT 대수가 4대를 기점으로 안벽 대기와 야드 대기가 동시에 증가하므로 S(2,10,4)에서 YT 4대가 절감효과가 가

장 좋은 대안이 될 수 있다.

그러나 시나리오 중에서 결합생산성 평가함수값을 고려할 때 낭비가 되는 대기 현상을 가장 최소화하는 대안은 P값이 최소인 S(2,14,4)이다. 여기서 P값을 최소화하는 대안을 선택한다는 의미는 대안별 상대적 낭비효과가 가장 작은 대안들을 우선적으로 고려함으로써 가장 효율적인 대안을 선택하게 해 준다.

<표 4-16>

실증분석 1의 애로공정 및 개선점

하역시스템		애로공정	개선점
장비명	보유수량		
C/C	4		
TC	10	C/C 대기	현재의 10대에서 14대로 보유수준을 높임
		YT의 TC 앞 대기	
YT	16		

따라서 <표 4-16>과 같이 애로공정은 C/C 대기과 YT의 TC 앞 대기로 나타났으며, 기존에 보유하고 있는 TC 대수 10대를 14대로 변경할 경우 애로공정인 TC 장비부족을 해결하여 결합생산성의 목적함수인 대기현상을 최소화할 수 있다. 이 때 C/C:YT:TC의 구성비율은 1:4:3.5이다.

또한 TC 대수 10대를 14대로 변경하는 애로공정 조정을 통해서 대기시간비율을 줄이는 효과가 발생하며, 평가함수(P)의 감소는 하역장비들의 사이클타임 중 대기 시간이 차지하는 비율을 줄여 생산성에 반영되는 작업시간비율이 차지하는 비중을 높이는 것을 의미한다.

시뮬레이션 실험결과를 예를 들어 대기시간 감소와 생산성 향상을 설명하면, C/C 생산성의 경우 TC 10대를 14대로 조정하면 C/C 평균대기시간비율이 1.2% 감소하고 이를 총 작업시간당 생산성으로 환산하면, C/C 생산성이 약 1.5% 향상되어 시간당 20.40개 처리에서 20.71개 처리로 높아질 수 있음을 의미한다. 결과적으로 C/C 생산성은 1.5% 향상에 그치지만 애로공정 조정을 통해 계산된 평가함수에 대한 상대적 낭비효과 2.71은 하역시스템 대기시간값을 5.98% 감소시키며, 항만시스템 취급능력을 그 만큼 향상시킬 수 있음을 의미한다.

5) 실증분석 2 : 감만부두 대한통운

(1) 실험 설계

시뮬레이션 실험을 위해 필요한 물동량 자료, 장비성능 및 수량, 터미널 운영을 위한 정책, 시설물 사양 등의 다양한 입력자료들을 수집하여 시뮬레이션 프로그램에 적합하도록 가공을 하여 사용하였다.

컨테이너 물동량 자료는 연간 컨테이너 처리물량으로 가정하였다.

- 수출 컨테이너 물동량 : 268,594TEU
- 수입 컨테이너 물동량 : 259,862TEU
- 환적 컨테이너 물동량 : 217,212TEU
- TEU/VAN 비율 : 1.5

이상의 컨테이너 자료에 대해서 예비실험을 수행하여 초기장비 수량을 예측하였으며, 컨테이너터미널에서 사용되는 장비에 대해서는 <표 4-17>과 같이 장비성능을 고려하였다. 그리고 컨테이너터미널의 운영에 대한 기본값은 <표 4-18>과 같이 설정하고, 시설물을 구성하기 위한 기본 입력 자료는 <표 4-19>와 같이 설정하였다.

<표 4-17>

장비의 성능 입력값

속성 \ 장비구분	C/C	TC	YT	외부차량
기본 장비대수	4	10	24	-
작업시간(초)	N(112.8, 31.2)	N(87, 19.3)	-	-
이동속도(km/h)	3	8	20	20

장비에 주어지는 이동속도는 실제 정규 주행속도와 장비의 사양을 반영하여 결정한 값이며, 작업시간¹⁰⁾은 정규분포를 가정하였다.

10) 윤원영 외, “컨테이너터미널에서 컨테이너 크레인의 하역능력 추정에 관한 시뮬레이션 연구”, 「IE Interface」, 2001.

<표 4-18>

운영정책 입력값

운영 정책 항목	입력값
반입허용 시작시간	24시간 운영
반입허용 마감시간	24시간 운영
무료장치기간	수입(3일), 수출(4일), 환적(7일)
선석당 C/C수	4대
C/C당 YT수	6대
선박도착시간 간격	평균 2시간
선박의 선석 접안시간	40분
선박의 선석 이안시간	20분

운영정책 입력값에서 무료장치기간은 수입 3일, 수출 4일, 환적 7일을 평균장치기간으로 적용하였다. 선박도착시간 간격은 선박의 등간격 도착을 가정할 때 평균 2시간의 편차를 가지도록 하였다.

<표 4-19>

시설물 입력값

게이트 사양		장치장 사양		안벽 사양	
입구 수	3	수출 블록수	13	선석수	1
출구 수	2	수입 블록수	9		
서비스시간 (초)	UN(20,30)	블록 베이수	20	안벽길이 (m)	350
		블록 열수	6		
		블록 단적수	5		

실험에서 가정한 시설물 중 게이트는 입구 3개, 출구 2개이며, 서비스시간은 일양분포를 가정하였다. 장치장에서 블록은 5단 6열을 가지며, 선석수는 1개를 고려하였다.

(2) 실험결과

시뮬레이션 실험결과는 하역시스템의 결합생산성 평가모형에 대한 값들을 구하여 단계별로 정리하였으며, 시스템 내에서 고객인 YT에 대한 고객통계량으로 YT 사이클타임, C/C 앞 도착간격 등의 결합생산성 관련지표는 부록 A에 수록하였다.

TC와 YT의 장비 대수변화에 대한 시나리오별 실험결과값을 정리하면 다음과 같다.

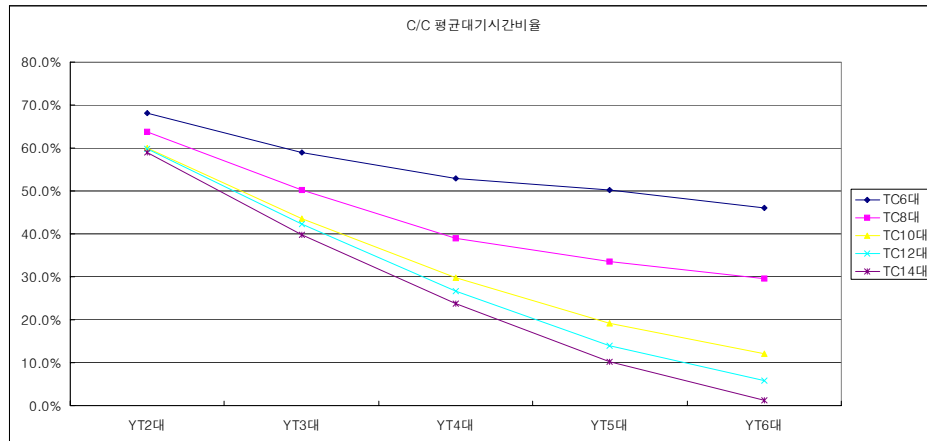
<표 4-20>

C/C 평균대기시간비율($W_{\pi(C/C)}$)

TC 대수 YT 대수	6	8	10	12	14
2	68.14	63.78	60.07	59.81	59.02
3	58.86	50.24	43.53	42.31	39.83
4	52.95	38.90	29.72	26.71	23.80
5	50.26	33.50	19.25	13.99	10.31
6	46.00	29.57	12.10	5.76	1.31

<그림 4-13>

C/C 평균대기시간비율 실험결과값



$W_{\pi(C/C)}$ 는 YT 대수가 늘어날수록 감소하고 TC 대수가 늘어갈수록 감소한다.

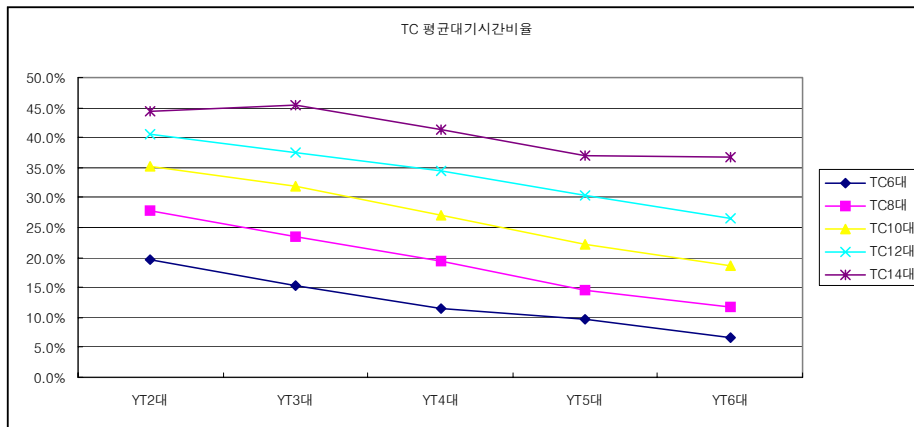
<표 4-21>

TC 평균대기시간비율($W_{\pi(TC)}$)

TC 대수 YT 대수	6	8	10	12	14
2	19.67	27.85	35.31	40.59	44.28
3	15.24	23.38	31.99	37.59	45.41
4	11.57	19.31	26.91	34.54	41.32
5	9.73	14.53	22.15	30.39	37.06
6	6.76	11.65	18.53	26.44	36.70

<그림 4-14>

TC 평균대기시간비율 실험결과값



$W_{\pi(TC)}$ 는 YT 대수가 늘어나면 감소하고 TC 대수가 늘어나면 증가한다.

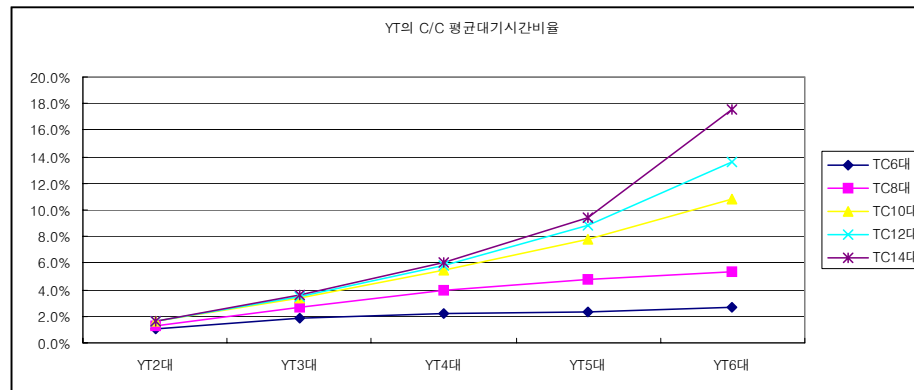
<표 4-22>

YT의 C/C 평균대기시간비율 ($W_{\pi(YT+C/C)}$)

TC 대수 \ YT 대수	6	8	10	12	14
2	1.05	1.30	1.61	1.62	1.60
3	1.81	2.62	3.41	3.51	3.59
4	2.26	3.97	5.45	5.81	6.00
5	2.37	4.73	7.79	8.81	9.50
6	2.63	5.38	10.78	13.61	17.51

<그림 4-15>

YT의 C/C 평균대기시간비율 실험결과값



$W_{\pi(YT+C/C)}$ 는 YT 5대 이상, TC 10대 이상일 때 급격히 증가한다.

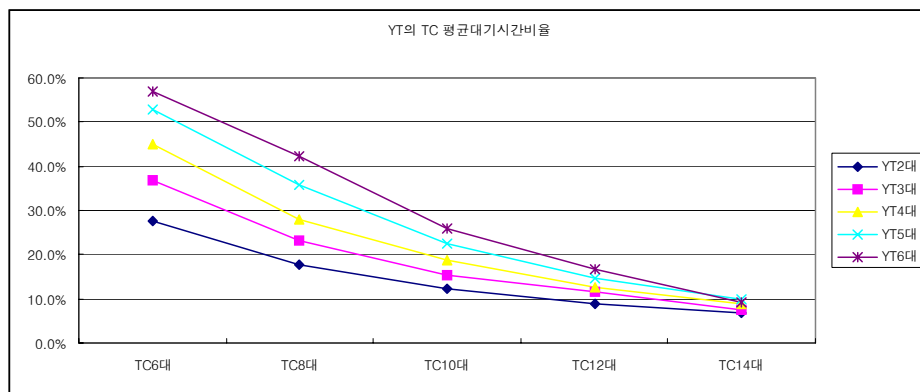
<표 4-23>

YT의 TC 평균대기시간비율($W_{\pi(YT+TC)}$)

TC 대수 \ YT 대수	6	8	10	12	14
2	27.47	17.88	12.24	8.74	6.85
3	36.68	23.34	15.39	11.49	7.37
4	44.94	28.04	18.73	12.74	8.79
5	52.97	35.91	22.51	14.66	10.04
6	56.98	42.21	25.95	16.61	9.19

<그림 4-16>

YT의 TC 평균대기시간비율 실험결과값



$W_{\pi(YT+TC)}$ 는 YT 대수와 TC 대수가 늘어날수록 감소한다.

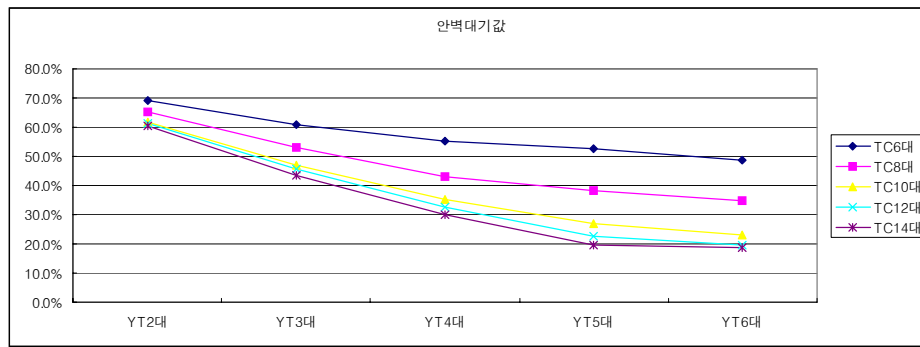
<표 4-24>

안벽대기값(A_w)

TC 대수 \ YT 대수	6	8	10	12	14
2	69.19	65.08	61.69	61.43	60.61
3	60.68	52.86	46.94	45.82	43.42
4	55.21	42.87	35.17	32.53	29.80
5	52.63	38.23	27.05	22.81	19.76
6	48.64	34.95	22.88	19.38	18.83

<그림 4-17>

안벽대기값 산출결과



A_w 는 YT가 5대 이상이고 TC가 12대 이상이면 감소세가 안정화된다.

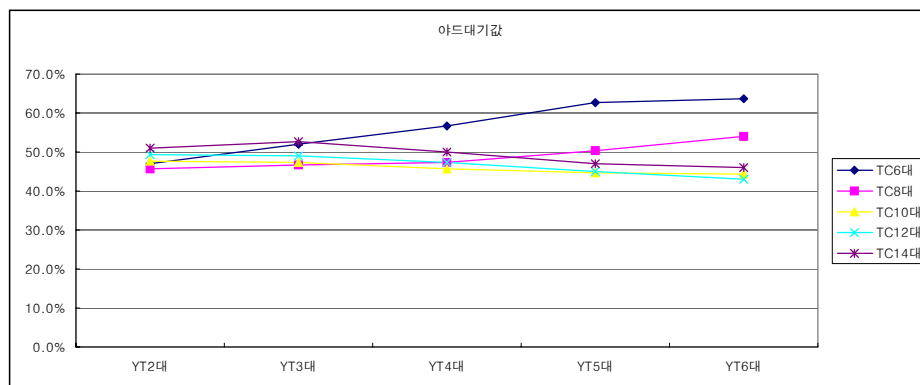
<표 4-25>

야드대기값(Y_w)

TC 대수 \ YT 대수	6	8	10	12	14
2	47.14	45.73	47.55	49.33	51.13
3	51.93	46.72	47.39	49.09	52.79
4	56.51	47.35	45.64	47.29	50.11
5	62.70	50.44	44.65	45.05	47.10
6	63.73	53.87	44.48	43.05	45.90

<그림 4-18>

야드대기값 산출결과



Y_w 는 YT 4대 이상이면 TC가 10대 이상에서 감소세를 보인다.

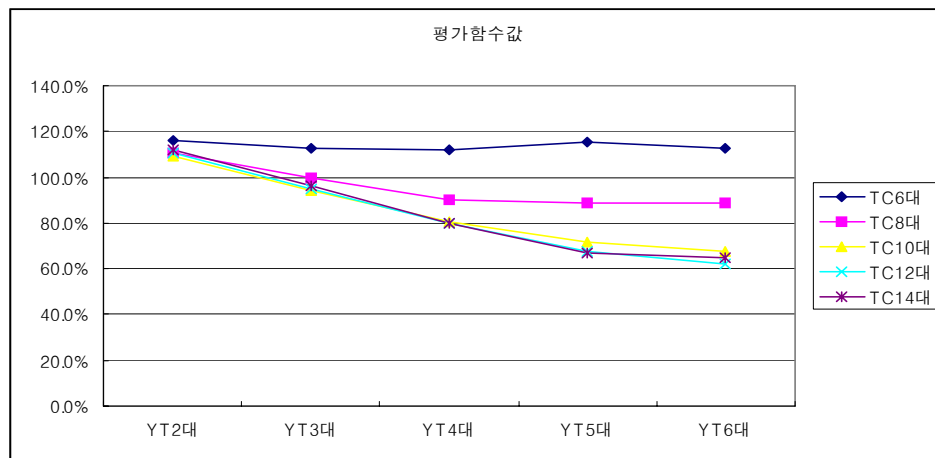
<표 4-26>

평가함수값(P)

TC 대수 YT 대수	6	8	10	12	14
2	116.33	110.82	109.24	110.76	111.75
3	112.61	99.59	94.32	94.91	96.21
4	111.72	90.22	80.81	79.82	79.92
5	115.33	88.67	71.70	67.85	66.87
6	112.37	88.82	67.36	62.43	64.73

<그림 4-19>

평가함수값



P 는 TC 10대 이상에서 비슷한 값을 보인다.

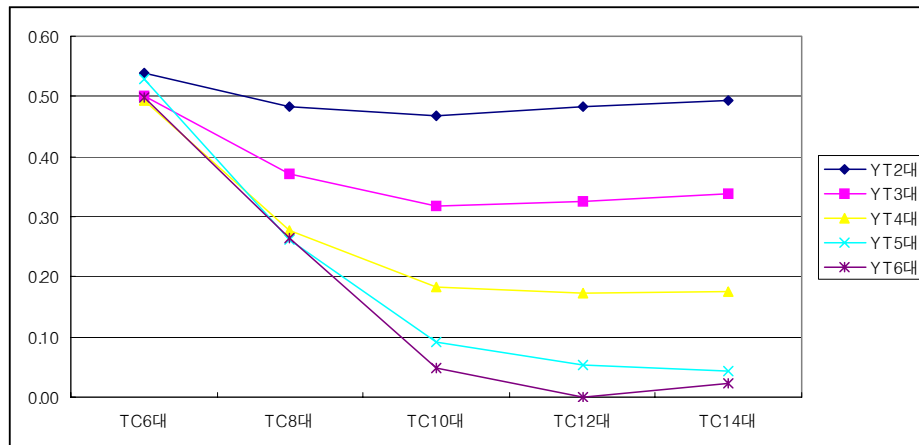
<표 4-27>

상대적 낭비효과

TC 대수 YT 대수	6	8	10	12	14
2	+54.90	+48.39	+46.81	+48.33	+49.32
3	+50.18	+37.16	+31.89	+32.48	+33.78
4	+49.29	+27.79	+18.38	+17.39	+17.48
5	+52.90	+26.24	+9.27	+5.42	+4.44
6	+49.94	+26.38	+4.93	0.00	+2.30

<그림 4-20>

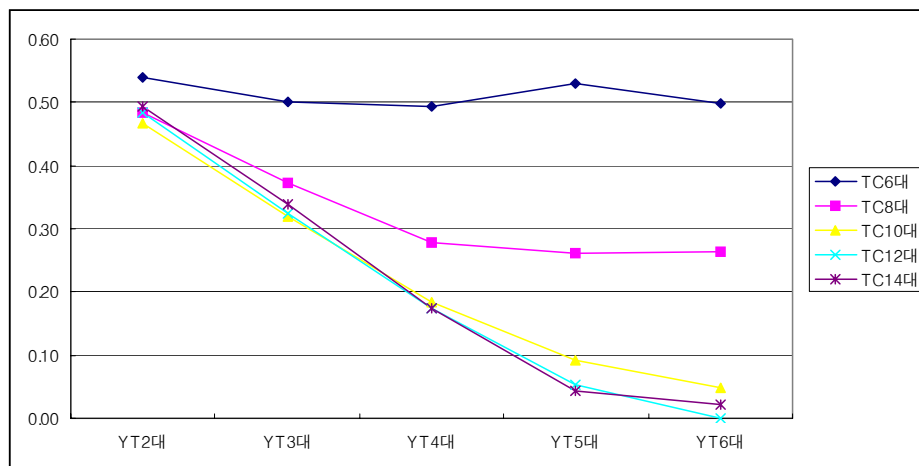
TC 대수변화에 따른 상대적 낭비효과



TC 10대 이상에서 상대적 감소효과가 급격히 감소하며, YT는 5대 이상이 되면 감소세가 많이 발생한다.

<그림 4-21>

YT 대수변화에 따른 상대적 낭비효과



(3) 결과 분석

실증분석을 위해서 초기 실험조건을 C/C 대수 4대로 고정하고 후 TC 대수를 {6, 8, 10, 12, 14}로 설정하고, YT 대수를 {2, 3, 4, 5, 6}로 설정한 후 이 시나리오의 하역시

시스템 장비조합에서 애로공정을 파악하고 조정하기 위한 민감도 분석을 수행하였다.

실험에서 결과값은 $S(N_{CC}, N_{TC}, N_{YT})$ 에 대해서 N_{CC} 는 4로 고정시키고, TC대수변화, YT 대수변화에 대해서 각각 분석하였으며, 하역시스템의 대기값을 산출하기 위한 방법은 대기시간비율 산출방식을 사용하였다.

그리고 안벽과 야드의 대기구조에 대한 가중치를 동일하게 부여하기 위해 $w_1=1$, $w_2=1$ 로 가정하여 분석하였다.

시뮬레이션에 의한 결합생산성의 실증분석을 위해서 미리 설정한 시나리오 $S(N_{CC}, N_{TC}, N_{YT})$ 에 대한 민감도 분석결과를 살펴보면 다음과 같다.

① TC 대수변화에 대한 분석

TC 대수변화에 대한 분석결과는 다음과 같다.

- TC 대수가 증가함에 따라 C/C 평균대기시간비율($W_{r(C/C)}$)은 감소세를 보이고, TC 평균대기시간비율($W_{r(TC)}$)은 증가세를 보였다.
- TC 대수가 증가함에 따라 안벽에서의 평균대기값(A_w)은 감소세를 보이고 야드에서의 평균대기값(Y_w)은 증가와 감소의 패턴이 동시에 발생하였다.
- 결합생산성의 평가함수값은 TC 10대 이상에서 비슷한 추세로 감소세가 점차 안정화되어 가며, $S(4,12,6)$ 에서 62.43으로 최소값을 가진다.

② YT 대수변화에 대한 분석

YT 대수변화에 대한 분석결과는 다음과 같다.

- YT 대수가 증가함에 따라 C/C 평균대기시간비율($W_{r(C/C)}$)은 감소하며, TC 평균대기시간비율($W_{r(TC)}$)도 감소하였다.
- YT 대수가 증가함에 따라 안벽에서의 평균대기값(A_w)은 TC 10대 이상부터는 동일한 추세로 감소세를 보인 후 안정화되어 가며, 야드에서의 평균대기값(Y_w)은 TC 6, 8대와 10대 이상이 뚜렷한 추세의 차이를 보여 10대 이상일 경우 증가하다가 완만히 감소하였다.
- 결합생산성의 평가함수값은 감소세가 YT 5대 이상에서는 비슷한 큰 감소세를 보이지 않고 $S(4,12,6)$ 에서 62.43으로 최소값을 가진다.

(4) 애로공정 분석 및 개선방향

시뮬레이션에 의한 결합생산성의 실증분석을 위해서 C/C 대수를 고정한 상태에

서 설정한 시나리오에 대한 민감도 분석결과를 살펴보면, TC 대수변화시에는 안벽에서의 평균대기값은 감소세를 보이고 야드에서의 평균대기값은 증가와 감소의 패턴이 동시에 발생하였지만 TC 10대 이상에서 감소세가 안정화되어 가며, 12대에서 최소값을 가진다. YT 대수변화시에는 YT 대수가 증가함에 따라 평가함수는 감소세를 보이며, 5대 이상에서 안정세이며, 6대에서 최소값을 가진다.

시나리오 중에서 결합생산성 평가함수값을 고려할 때 낭비가 되는 대기현상을 가장 최소화하는 대안은 P값이 최소인 S(4,12,6)이며, 이에 따라 분석된 애로공정 및 개선점은 다음과 같다.

<표 4-28>

실증분석 2의 애로공정 및 개선점

하역시스템		애로공정	개선점
장비명	보유수량		
C/C	4		
TC	10	C/C 대기 YT의 TC 앞 대기	현재의 10대에서 12대로 보유 수준을 높임
YT	24		

따라서 <표 4-28>에서와 같이 애로공정은 C/C의 대기와 YT의 TC 앞 대기로 나타났다며, 기존에 보유하고 있는 TC 대수 10대를 12대로 변경할 경우 애로공정인 TC 장비부족을 해결하여 결합생산성의 목적함수인 대기현상을 최소화할 수 있다. 이 때 C/C:YT:TC의 구성비율은 1:6:3이다.

또한 TC 대수 10대를 12대로 변경하는 애로공정 조정을 통해서 대기시간비율을 줄이는 효과가 발생하며, 평가함수(P)의 감소는 하역장비들의 사이클타임 중 대기시간이 차지하는 비율을 줄여 생산성에 반영되는 작업시간비율이 차지하는 비중을 높이는 것을 의미한다.

시뮬레이션 실험결과를 예를 들어 대기시간 감소와 생산성 향상을 설명하면, C/C 생산성의 경우 TC 대수 10대를 12대로 조정하면 C/C 평균대기시간비율이 6.34% 감소하고 이를 총작업시간당 생산성으로 환산하면, C/C 생산성이 약 6.74% 향상되어 시간당 24.78개 처리에서 26.57개 처리로 높아질 수 있음을 의미한다.

따라서 애로공정 조정을 통해 계산된 평가함수에 대한 상대적 낭비효과 4.93은 하역시스템 대기시간값을 7.32% 감소시키며, 항만시스템 취급능력을 그 만큼 향상시킬 수 있음을 의미한다.

제 5 장 결론 및 정책건의

1. 결론

항만시스템의 취급능력을 향상시키는 것은 항만시스템을 효율적으로 활용하여 최대한 생산성을 향상시키면서 낭비적인 요소를 제거하여 최적의 항만시스템을 달성하고, 이를 통하여 항만 이용자에게 최상의 서비스를 제공함으로써 항만의 국제경쟁력을 제고하는 데 의의가 있다.

전세계적으로 주요 국가와 항만 간의 물류경쟁이 본격화되면서 대대적인 시설 확충과 운영시스템의 고도화에 적극적으로 투자하고 있으나 현재의 항만시스템의 취급능력을 제대로 파악하여 내제된 애로공정을 제거함으로써 최적운영이 가능하도록 하는 방법론이 필요하며, 이를 전제로 한 시설확충과 운영시스템 고도화가 더욱 고생산성을 달성할 수 있다.

실제로 국내 항만의 생산성 현황을 장비 보유율, 안벽 생산성, C/C 생산성 측면에서 살펴보면, 안벽 생산성과 C/C 생산성은 실적치에서 얻은 결과자료인 반면, 장비 보유율은 컨테이너터미널의 생산성을 잘 설명할 수 있으며, 컨테이너터미널 간의 비교에도 중요한 평가지표이다. 또한 안벽 생산성과 C/C 생산성의 중요한 입력조건이 장비 보유율이며, 장비 보유율에 따라 생산성에 많은 차이를 보이고 있다. 따라서 장비 보유율 측면에서 각 장비의 조합에 따라 생산성에 영향을 미치는 현상을 반영하는 것이 필요하다.

항만 컨테이너터미널에 대한 생산성 평가지표를 기존에 사용하고 있는 실적치에서 얻는 생산성 평가지표로부터 개념분석을 통하여 시뮬레이션을 이용해 구하는 생산성 평가지표로 분류하여 고찰하였으며, 생산성 평가지표 중 장비 간의 연계에서 발생하는 결합생산성을 분석하고 최적화하기 위한 장비조합을 구하는 방안으로 개념을 수립하였다.

이를 반영하기 위해 C/C, YT, TC로 구성된 하역시스템의 장비에 의한 결합생산성 모형을 수립하였다. 결합생산성 분석을 위한 모형은 C/C, YT, TC의 대기시간과 관련된 대기값을 이용하여 결합생산성 평가함수를 설정하였다. 설정된 평가함수

는 C/C, YT, TC 장비조합에 대한 시나리오에 따라 시뮬레이션 실험을 통하여 산출이 가능하다. 각 장비의 대수변화에 따른 결합생산성을 분석하여 장비대수 변화에 대한 평가를 통해서 애로공정인 대기현상을 가장 최소화하는 장비대안을 산출하였다.

실증분석으로 예시한 우암터미널의 예에서는 하역시스템 구성조합(C/C:YT:TC)이 1:4:2.5에서 1:4:3.5로 변경하는 것이 결합생산성 측면에서 가장 효과적인 것으로 나타났으며, 감만부두 대한통운의 예에서는 하역시스템 구성조합이 1:6:2.5에서 1:6:3으로 변경하는 것이 결합생산성 측면에서 가장 효과적인 것으로 나타났다. 실증분석 결과 공통점은 TC의 보유수준이 낮아서 야드에서 YT의 TC 앞 작업대기가 상대적으로 많이 발생하는 점이 애로공정인 것으로 파악되었으며, 이는 컨테이너터미널 전체의 생산성을 저해하고 있는 것으로 분석되어 이 애로공정을 제거하여 결합생산성을 향상시키기 위해서는 야드에서 TC의 대수를 제안된 장비수준만큼 보충하여야 한다는 것을 알 수 있었다.

항만에서 컨테이너터미널이 표준화된 하역시스템을 사용하지만 항만의 특성에 따라 다양한 양상을 보이므로 일반화하여 분석하기가 어렵다. 그러나 생산성에 영향을 미치는 다양한 인자를 잘 반영하도록 시뮬레이션에 의한 결합생산성 모형을 이용하고 이를 분석하여 상호 인과관계를 명확히 분석하였다. 앞으로 실제 항만들에 직접 적용하여 하역시스템의 결합생산성을 분석하고 생산성 향상을 위한 구체적인 방안이 수립되도록 적용해 나가야 할 것이다.

2. 정책건의

1) 결합생산성 평가지표 활용방안

(1) 항만하역시스템의 애로공정 파악을 위한 판단근거 제공

기존 컨테이너터미널의 항만하역시스템을 구성하는 C/C, TC, YT의 연계운영체제에서 애로공정이 되는 하역시스템 구성요소를 파악하여 문제점을 도출하기 위한 판단근거를 제공할 수 있다.

먼저 애로공정의 영역 파악이 가능하여 안벽인지 야드인지를 구별할 수 있으며, 그 영역을 찾은 후 그 영역 내에서 어느 장비가 애로공정으로 작용하여 생산성에

저해되는지를 판단할 수 있다.

예를 들면, 제4장의 시뮬레이션을 통한 민감도분석에서 야드의 TC 앞에서의 대기값이 많아 TC 대수 부족으로 인한 TC 앞에서의 대기가 애로공정인 것으로 나타났으며, 이러한 애로공정을 파악할 수 있는 각 장비의 대기시간비율 등이 애로공정 파악을 위한 판단근거가 될 수 있다.

즉 현재의 운영시점을 기준으로 컨테이너터미널의 애로공정을 판단하기 위한 근거를 제공한다.

(2) 항만 개발계획 수립시 장비소요규모 결정을 위한 평가지표 제시

항만 개발계획 수립시 하역시스템 구성 장비의 소요규모를 결정하고자 할 때 제4장에서 정의한 장비별 대기시간, 대기시간비율, 그리고 안벽과 야드의 대기값 등을 평가지표로 사용하여 하역시스템의 결합생산성을 최대화할 수 있도록 평가함수값을 제공한다.

즉 결합생산성 분석에서 장비소요규모별 시나리오에 대한 평가함수값과 상대적 낭비효과를 평가지표로 활용할 경우 최적의 장비소요규모를 결정할 수 있다.

따라서 컨테이너터미널의 개발계획시점에서 하역시스템 구성을 위한 최적의 장비소요규모 결정을 위한 평가지표를 제공한다.

(3) 장비 투자규모 산출시 경제적 우선순위 선정기준 제공

하역시스템 구성 장비에 대한 시나리오별 결합생산성을 민감도 분석하여 각 장비투입에 따른 하역시스템의 대기값의 효과를 산출할 수 있다. 이를 이용하여 장비 투자규모를 산출할 때 각 장비별로 가장 경제적인 투입대수를 산출할 수 있으므로 우선순위를 선정하기 위한 기준을 제공할 수 있다.

경제적인 장비 투자를 위한 우선순위를 결정할 수 있어 투자대비 효율성이 높은 순서대로 장비를 도입할 수 있도록 하여 장비도입에 대한 중장기계획을 수립할 수 있다.

2) 항만에 대한 결합생산성 적용방안

결합생산성 분석방법론은 국내의 부산항 및 광양항 컨테이너터미널의 전반적인 사례적용을 통해 최적의 항만시스템 구성이 가능하게 하는 기준 제시의 역할을

한다.

따라서 기존에 운영 중인 항만뿐만 아니라 새로 개발될 항만에도 적용 가능한 일반적 적용방안이므로 다음과 같은 사업에 적용이 가능하다.

i) 기존 부산항 컨테이너터미널의 리모델링시

- 현재 하역시스템에서 취급능력을 향상시키기 위한 장비의 보유수준 결정
- 향후 하역시스템 변경시 생산성 향상과 관련된 평가시
- 운영로직의 변경(YT pooling, 차량의 실시간배차 등)으로 인한 생산성 향상 효과 측정시 평가기준

ii) 신규 항만의 개발 계획 수립시

iii) 컨테이너터미널 하역시스템 생산성 측정시

iv) 부두 통합화방안 수립시 하역시스템 평가

- 광양항 1-1단계 및 감만부두 선석통합화의 추진시 통합화에 따른 하역시스템 최적 장비조합구성 또는 적정 장비 보유수준 결정시 결합생산성 평가지표를 적용하여 합리적인 방안을 제시

참 고 문 헌

<국내문헌>

- 김창곤 · 윤동한 · 최종희 · 배종욱 · 양창호, 「시뮬레이션 모델을 이용한 컨테이너 터미널 안벽능력 분석」, 한국해양수산개발원, 2000. 12.
- 부산신항만주식회사, 「북컨테이너터미널 운영설비 실시계획 보고서」, 1999. 6.
- 양창호 · 김창곤 · 배종욱, 「컨테이너터미널 선석처리능력 추정방안에 관한 연구」, 한국해양수산개발원, 2001. 11.
- 양창호 · 최용석, “컨테이너터미널 계획 시뮬레이션 모델링 개발방향 연구”, 「해양정책연구」, Vol.17, No.4, 2002.
- 양창호 · 최종희 · 최용석 · 하태영, 「차세대 컨테이너터미널 운영시스템의 기술 개발 방향과 전략수립에 관한 연구」, 한국해양수산개발원, 2003. 12.
- 윤원영 · 최용석 · 송진영 · 양창호, “컨테이너터미널에서 컨테이너 크레인의 하역 능력 추정에 관한 시뮬레이션 연구”, 「IE Interface」, Vol.14, No.1, 2001. 3.
- 최용석 · 김우선 · 하태영, “컨테이너터미널의 야드 트랙터 소요대수 추정”, 「한국항해항만학회지」, Vol.28, No.6, 2004.
- 한국컨테이너부두공단, 「컨테이너화물 유통추이 및 분석」, 각 연도.
- _____, 「2003년 부산항 월별 처리실적」, 2003.
- 한국컨테이너부두공단/부산항만공사, 「2003년 컨테이너화물 유통추이 및 분석」, 2004. 7.
- 한국해양수산개발원, 「광양 신항만 개발 기본계획에 관한 연구」, 1990. 8.
- _____, 「항만 장비 현대화 기본계획 수립」, 1999.
- 한국해운기술원, 「항만운영 효율화 연구 II」, 1988.
- 해운항만청, 「능력산정 내부자료」, 1986.
- _____, 「부산항 광역 개발 기본계획 보고서(제3권 개발계획편)」, 1989. 7.
- BCTOC, 「부산항 3단계 개발 컨테이너부두 변경 설계 및 배후도로 실시설계 용역 보고서」, 1988. 12.

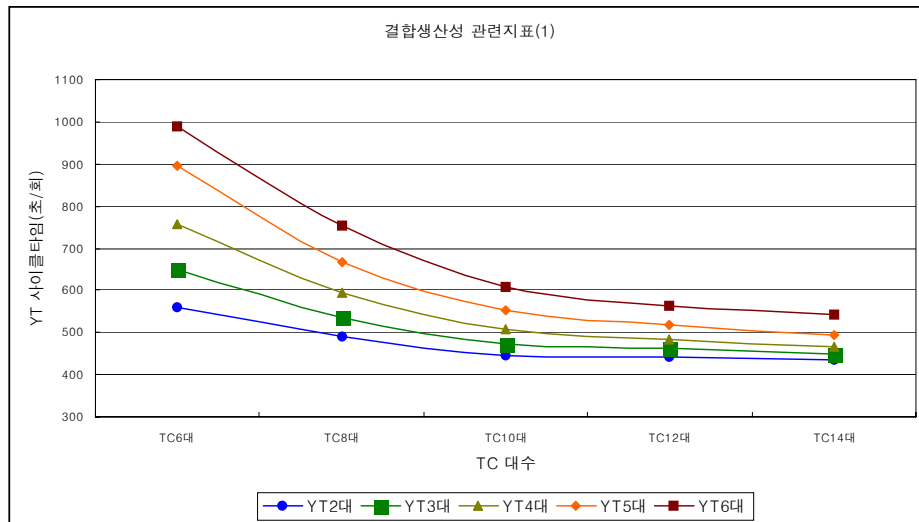
<외국문헌>

- Choi, Yong-Seok, “Simulation Study for Performance Measures of Resources in

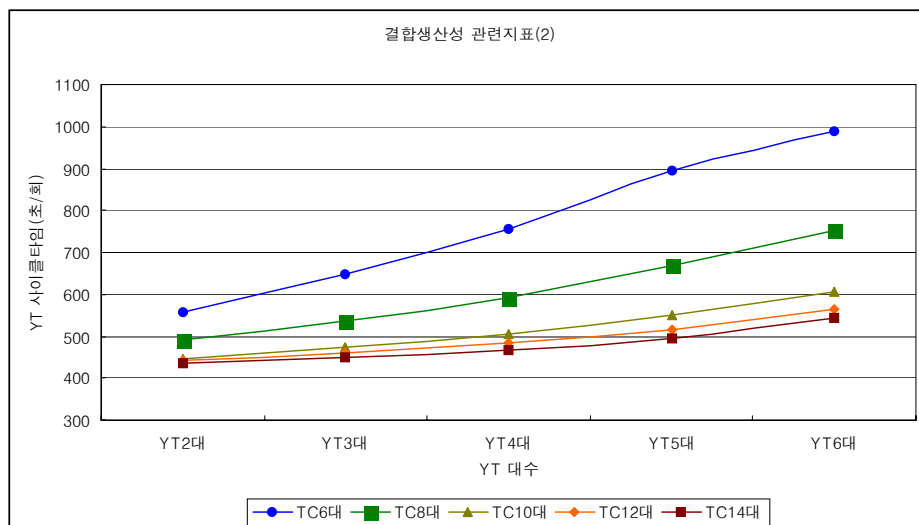
- a Port Container Terminal”, *International Journal of Navigation and Port Research*, Vol.28, No.7, 2004.
- D. Gross & Harris C., *Fundamentals of Queueing Theory*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 1985.
- ESCAP, *ESPOCA MANUAL*, 1990. 11,
- Hanland, Eleanor, *Measuring Productivity*, Drewry Shipping Consultants, 2003. 9.
- JWD, 「부산신항만 기본설계」, 1998.
- Korea Port Consults, 「부산신항만 기본설계」, 1998.
- Robinson, Dolly Measurements of Port Productivity and Container Terminal Design, *Cargo Systems*, 1999.
- UNCTAD, *Berth Throughput*, 1973.
- UNITED NATIONS, *Port Development*, 1985.
- Ward, Tomas, *Developments in Container Handling Technology*, Documentation from Practical Port Productivity Measurement Workshop. 1989.
- Watanabe Itsuro, “Container Terminal Planning - A Theoretical Approach”, *World Cargo News*, 2001.
- Wowd, Thomas J. & Thomas M. Leschin, “Productivity Measurement and Factors Affecting Container Terminal Productivity”, *Ports & Harbors*, 1991.

부록 A : 감만부두에 대한 결합생산성 관련지표

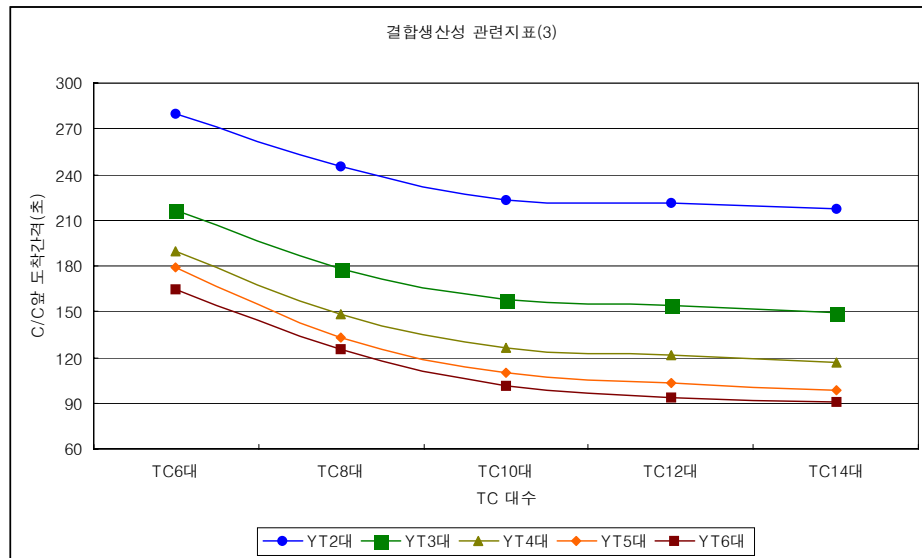
<그림 A-1> TC 대수 변화에 따른 YT 사이클타임



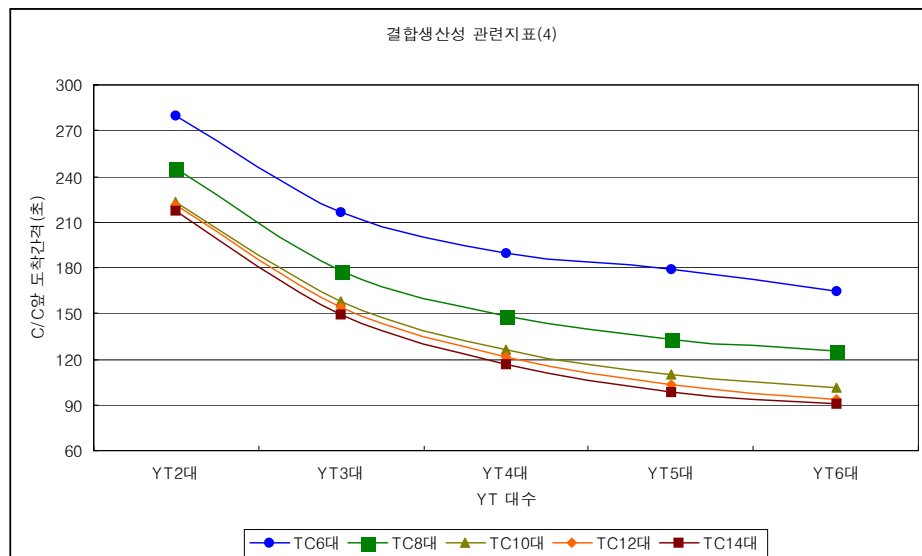
<그림 A-2> YT 대수 변화에 따른 YT 사이클타임



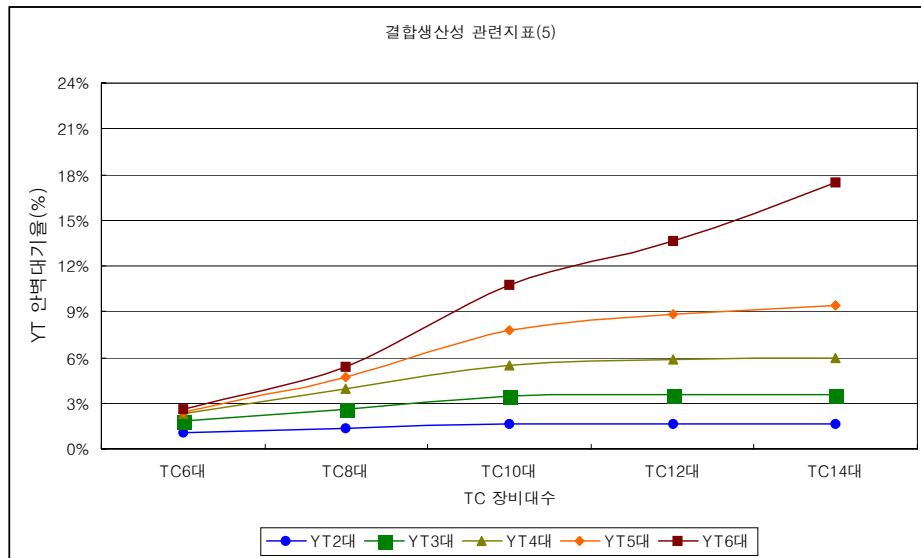
<그림 A-3> TC 대수 변화에 따른 YT의 C/C 앞 도착간격



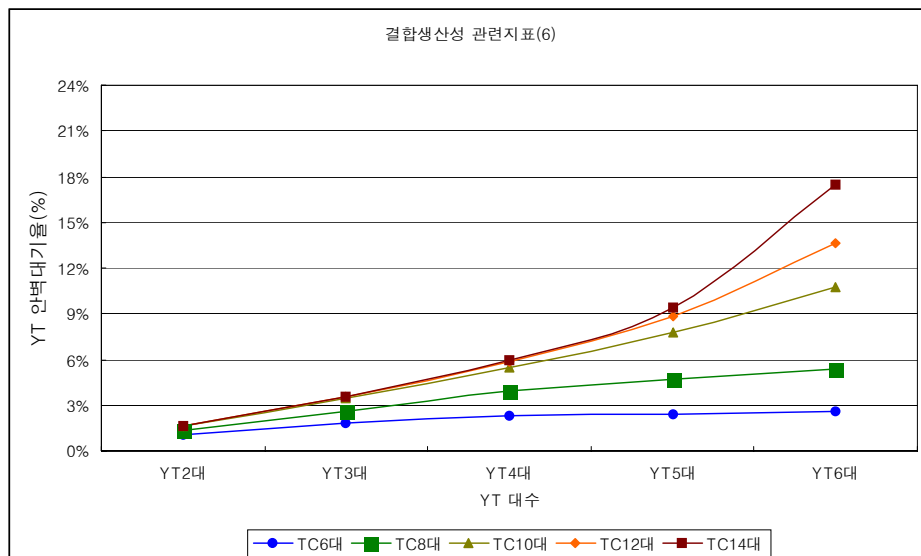
<그림 A-4> YT 대수 변화에 따른 YT의 C/C 앞 도착간격



<그림 A-5> TC 대수 변화에 따른 YT의 안벽대기율

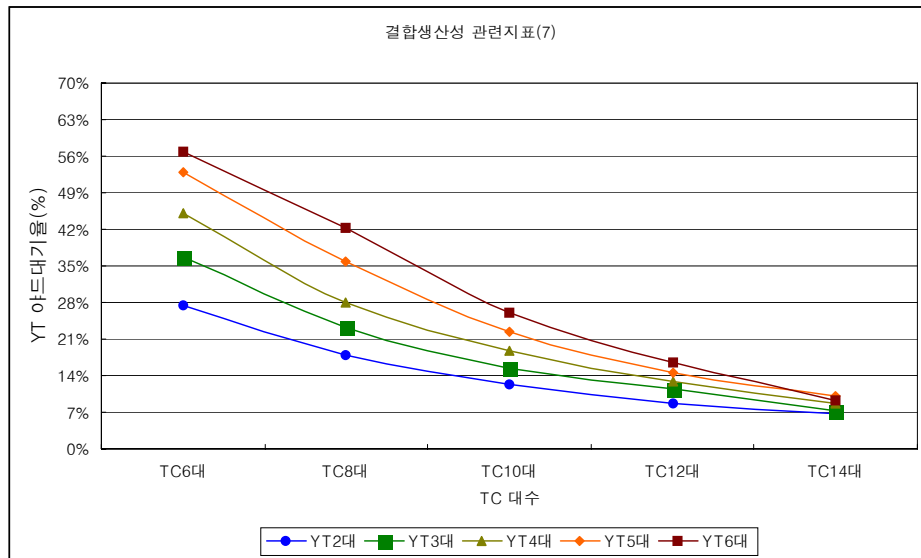


<그림 A-6> YT 대수 변화에 따른 YT의 안벽대기율



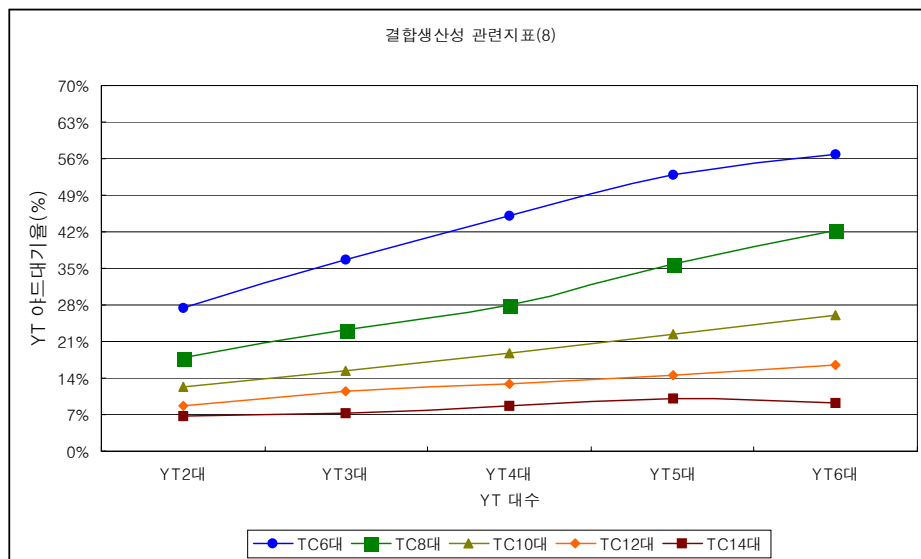
<그림 A-7>

TC 대수 변화에 따른 YT의 야드대기율



<그림 A-8>

YT 대수 변화에 따른 YT의 야드대기율



결합생산성 분석방법을 통한 항만시스템 취급능력 향상방안

2004年 12月 27日 印刷

2004年 12月 31日 發行

編輯兼

發行人

發行處

전 화

등 록

李 廷 旭

韓 國 海 洋 水 產 開 發 院
서울특별시 서초구 방배3동 1027-4
수암빌딩

2105-2700 FAX : 2105-2800

1984년 8월 6일 제16-80호

組版·印刷/서울기획문화사 2272-1533 정가 15,000원

판매 및 보급 : 정부간행물판매센터

Tel : 394-0337, 734-6818