

기본연구 2001-01

컨테이너터미널 신석처리능력 추정방안에 관한 연구

2001. 12

양창호, 김창곤, 배종욱

머 리 말

1998년 세계5위 컨테이너 항만이던 부산항이 2000년에는 대만의 카오슝항을 제치고 세계 3위의 컨테이너항만으로 성장하였다. 그러나 부산항은 1만톤급 이상의 컨테이너부두가 16선석으로 싱가포르항의 41선석, 고베항 37선석, 카오슝항 27선석, 홍콩항의 22선석에 비해 적을 뿐 아니라 상해항의 18선석에 비해서도 적은 규모이다. 이는 부산항의 경우 2000년도 처리물동량 754만TEU중 31%에 달하는 235만TEU를 일반부두에서 처리하였기 때문이다.

앞으로 우리나라의 컨테이너 물동량 증가세를 감안하면 현재 78%인 컨테이너터미널 시설 확보율은 현재의 투자수준이 계속될 경우 2011년에는 59%로 하락하여 시설부족이 더욱 심각해질 것으로 예상되어 항만에 대한 투자증대가 요망되는 상황에 처해있다.

선석처리능력은 컨테이너터미널 항만계획 규모를 결정짓는 중요한 정책 변수로 그 정확성 여부에 따라 항만개발 계획 규모에 큰 영향을 미치게 된다. 지금까지 선석처리능력을 산출할 때 사용하는 적정선석점유율은 UNCTAD에서 제시한 선박대기시간 비율표에 의거해 결정하였다. 즉 선박이 안벽에서 서비스받는 시간에 대해 대기하는 시간의 비율이 10%이 내일 때를 기준으로 하여 선석수가 1개인 터미널의 경우 선석점유율 30% 이내로 결정된다. 그러나 최근 부산항의 실적치에 의하면 1선석 터미널의 선석점유율이 90%에 달하는 경우에도 선박대기가 발생하지 않고 있어 UNCTAD의 선석점유율 산출 방식이 현실에 맞지 않음을 알 수 있으며, 나아가 이를 기초로 한 적정 선석처리능력의 적합성을 검증할 필요가 생겼다.

본 연구는 UNCTAD에서 20여 년 전에 작성하여 제시한 항만개발 계획용 선박대기시간 비율(W/S ratio)에 의해 산출되는 적정 선석점유율의

기본 가정과 전제조건이 현재의 상황에서 적용 가능한지를 실증분석으로 통해 검증하였다.

또한 우리나라 항만개발 기본계획에서 사용될 수 있는 안벽능력 산정을 위한 적정선석점유율을 산출할 수 있도록 시뮬레이션모델을 통해 새로운 선박대기시간 비율표를 제시하였으며, 이를 통해 적정한 항만 개발 규모를 결정하는데 활용 될 수 있도록 하고자 한다.

본 연구보고서는 본원의 양창호 연구위원이 연구책임을 맡고, 김창곤 책임연구원, 배종욱 책임연구원과 공동으로 집필하였다. 좋은 지적과 조언을 주신 서울산업대의 장성용 교수, 해양수산부의 박정천 과장, 합동석 서기관, 현대상선의 양원부장, 그리고 본원의 김학소 기획조정실장에게 심심한 감사를 드린다. 이밖에 연구수행에 도움을 준 서재화씨에게도 감사드린다.

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

2001년 12월

韓國海洋水産開發院
院 長 李 廷 旭

□ 보고서 집필 내역

◆ 연구책임자

-양창호 : 제1장, 제2장, 제3장, 제6장, 제7장

◆ 연 구 진

- 김창곤 : 제2장, 제5장

- 배종욱 : 제4장, 제5장, 제6장

목 차

〈요 약〉	1
제1장 서 론	12
1. 연구의 배경	12
2. 연구의 목적	13
3. 주요 연구내용 및 연구방법	14
제2장 적정 서비스 수준에 대한 이론적 검토	15
1. 서비스 수준과 선석점유율	16
1) 터미널 이용자와 운영자의 이해상충 / 16	
2) 해운비용과 항만비용의 비교 / 19	
2. 서비스수준과 선석점유율의 관계	25
3. 서비스 수준에 관한 기존 적용사례 분석	28
1) UNCTAD / 28	
2) JWD(Jordan Woodman Dobson) / 29	
3) KPC(Korea Port Consultants) / 29	
4. 적정선박대기시간비율 분석	31
제3장 선석처리능력 분석 방법 고찰	33

1. 기존의 선석처리능력 분석 방법	33
1) 크레인수 / 34	
2) 연간 작업가능 시간 / 34	
3) 크레인 작업 시간율 / 35	
4) 크레인 작업효율 / 37	
5) 단위환산 계수 / 39	
6) Overstow 계수 / 39	
7) 기존 연구보고서의 안벽처리능력 결정 요소 비교 / 39	
2. 적정 선석점유율 산출 방식 분석	42
3. 국내터미널 건설계획시 선석점유율 적용사례	49

제4장 선석점유율 산출방법의 문제점 ————— 52

1. 선박대기시간 분석	52
1) 주요컨테이너터미널 처리실적 / 52	
2) 적정 선석점유율, 선박대기시간 비교 / 53	
2. UNCTAD 대기행렬모형의 기본 가정	53
3 UNCTAD 모형작성 당시와 현재의 여건변화	57
1) 선박의 대형화와 하역시스템, 통신시스템의 발전 / 57	
2) 문제점 종합 / 60	

제5장 국내 컨테이너터미널에 대한 실증분석 ————— 61

1. 선박도착간격분포 추정	63
1) 신선대부두 / 63	
2) 자성대부두 / 65	
3) 한진감만터미널 / 66	
4) 대한통운감만터미널 / 68	
5) 우암부두 / 69	
2. 선박작업시간분포 추정	71
1) 신선대부두 / 71	
2) 자성대부두 / 72	
3) 한진감만터미널 / 74	
4) 대한통운감만터미널 / 75	
5) 우암부두 / 77	
3. 분석종합	78
 제6장 선석처리능력 산정 방법 대안 제시	61
1. 시뮬레이션 방식을 통한 선석처리능력 제안	81
1) 공용터미널 / 82	
2) 전용터미널 / 83	
2. 컨테이너터미널 시뮬레이션모델의 필요성 및 효과	85
3. 컨테이너터미널 시뮬레이션 모델 사례	88
1) ESPOCA / 89	
2) POSIM / 91	

4. 시뮬레이션모델 기본전제 및 분석과정	93
1) 선박규모별 선형 구성 / 97	
2) 선박입항시점 / 100	
3) 선박접안시간 / 102	
5. 시뮬레이션 분석결과	105
6. 선석처리능력 분석	108

제7장 결론 및 정책건의	112
---------------------	-----

1. 결론	112
2. 정책건의	115

참고문헌	118
------------	-----

표 목 차

<표 2-1> 이해당사자의 요구조건	18
<표 2-2> 운영사별 운영목표	19
<표 2-3> KPC 적용 선형별 목표 생산성	30
<표 2-4> 화물별 선박 대기시간비율 실적	31
<표 3-1> 컨테이너 전용 부두의 C/C 설치대수	34
<표 3-2> 자성대와 신선대 크레인의 순작업시간비율	37
<표 3-3> 기존보고서의 안벽처리능력 결정 요소	40
<표 3-4> 수정된 컨테이너터미널 능력	41
<표 3-5> 대기행렬모형의 특성요소	43
<표 3-6> 대기행렬모형과 컨테이너 전용부두의 비교	44
<표 3-7> 기존보고서의 선석점유율 결정요소	51
<표 4-1> 주요컨테이너터미널 처리실적	53
<표 4-2> 선박대기시간 비교분석	54
<표 4-3> 컨테이너선의 세대별 발전현황	59
<표 5-1> 컨테이너 전용부두 현황	61
<표 5-2> 신선대부두 선박도착간격 분포 추정결과	64
<표 5-3> 자성대부두 선박도착간격 분포 추정결과	65
<표 5-4> 한진감만터미널 선박도착간격 분포 추정결과	67
<표 5-5> 대한통운감만터미널 선박도착간격 분포 추정결과	68
<표 5-6> 우암부두 선박도착간격 분포 추정결과	70
<표 5-7> 신선대부두 선박접안시간 분포 추정결과	71
<표 5-8> 자성대부두 선박접안시간 분포 추정결과	73
<표 5-9> 한진감만터미널 선박접안시간 분포 추정결과	74

<표 5-10>대한통운감만터미널 선박접안시간 분포 추정결과	76
<표 5-11>우암부두 선박접안시간 분포 추정결과	77
<표 5-12>도착간격 및 작업시간 분포 추정 결과	79
<표 5-13>부산항 감만부두 운영 터미널별 처리실적	80
<표 6-1> ESPOCA의 주요 입력자료	90
<표 6-2> ESPOCA의 주요 출력자료	90
<표 6-3> POSIM의 주요 입력자료	92
<표 6-4> POSIM의 주요 출력자료	92
<표 6-5> 부산항 컨테이너 전용부두 톤수별 선박 접안현황	98
<표 6-6> 컨테이너 전용부두 접안선박의 톤수별 구성비(예상치)	99
<표 6-7> 총작업시간당 처리능력	102
<표 6-8> 선형별 총작업시간 분포	104
<표 6-9> 선석수별 대기시간비율표	106
<표 6-10>적정 안벽처리능력 산정 (1선석 기준)	109
<표 6-11>적정 안벽처리능력 산정 (2선석 기준)	109
<표 6-12>적정 안벽처리능력 산정 (3선석 기준)	110
<표 6-13>적정 안벽처리능력 산정 (4선석 기준)	110

그림목차

<그림 2-1> 물동량 증가에 따른 항만비용의 변동	21
<그림 2-2> 물동량 증가시 선박의 재항시간에 따른 비용의 변동	22
<그림 2-3> 물동량 증가시 총비용의 변동	23
<그림 3-1> 랜덤 프로세스들의 관계	46
<그림 5-1> 신선대부두 1998~2000년도 선박도착간격 분포	64
<그림 5-2> 자성대부두 선박도착간격 분포	66
<그림 5-3> 한진감만터미널 선박도착간격 분포	67
<그림 5-4> 대한통운감만터미널 선박도착간격 분포	69
<그림 5-5> 우암부두 선박도착간격 분포	70
<그림 5-6> 신선대부두 선박접안시간 분포	72
<그림 5-7> 자성대부두 선박접안시간 분포	73
<그림 5-8> 한진감만터미널 선박접안시간 분포	75
<그림 5-9> 대한통운감만터미널 선박접안시간 분포	76
<그림 5-10> 우암부두 선박접안시간 분포	78
<그림 6-1> k-열량분포의 밀도함수	84
<그림 6-2> ESPOCA 개략적 자료 흐름도	89
<그림 6-3> POSIM의 개략적 자료 흐름도	91
<그림 6-4> 선박 도착사건의 시퀀스 다이어그램	94
<그림 6-5> 선박 이안사건의 시퀀스 다이어그램	95
<그림 6-6> 시뮬레이션모델 분석과정	96
<그림 6-7> 예정입항시각에 대비 실제입항시각의 변동	101
<그림 6-8> 선석점유율과 대기시간비율의 관계	108

<요 약>

제 1 장 서론

1. 연구의 배경 및 목적

- 2011년 우리나라 컨테이너 화물 물동량은 2,967만 TEU로 증가될 것으로 예상되며, 이를 처리하기 위해서는 2011년까지 컨테이너 부두 98선석을 건설해야 함.
- 부산신항만과 광양항 컨테이너부두의 경우 2011년까지 약 1,800만 TEU의 화물을 처리하기 위해 컨테이너부두 선석처리능력을 약 30만TEU로 할 경우 약 60여개 선석을 건설해야하며, 그 건설비는 13조 3천억에 달함.
- 그러나 선석처리능력 기준이 바뀔 경우 건설 선석의 수와 소요예산이 변경 될 수 있어 선석처리능력은 향후 항만 건설규모를 결정 짓는 중요한 정책결정 변수임.
- 더욱이 우리나라 항만개발계획에 사용되는 컨테이너터미널 선석처리능력은 24만TEU, 30만TEU 등으로 통일적인 기준이 없이 적용되는 문제점이 있어 이에 대한 체계적인 분석의 필요성이 있음.

2. 연구의 목적

- 우리나라 항만개발 계획규모를 산정할 때 사용하던 선석처리능력

은 UNCTAD에서 제시한 선석점유율 산정방식에 기초해왔음.

- 본 연구는 UNCTAD에서 20여년전에 작성하여 제시한 항만개발 계획용 선박대기시간비율표에 의해 산출되는 적정 선석점유율의 기본가정과 전제조건이 현재의 상황에서 타당한지를 검증함.
- 또한 우리나라 항만개발 기본계획에서 사용될 수 있는 안벽능력 산정을 위한 적정 선석점유율을 산출할 수 있도록 새로운 방법에 의한 선박대기시간비율표를 제시함을 연구목적으로 함.

3. 주요 연구내용 및 연구방법

- 본 연구는 우선 우리나라 항만개발 계획에서 수행되었던 기존의 안벽능력분석 방법들을 고찰해 본 후, UNCTAD에서 제시한 분석적 방법에 의한 적정선석점유율 산출과정을 분석함.
- 다음으로 부산항의 컨테이너터미널 처리실적과 UNCTAD의 선박 대기시간비율표에 의한 선박대기시간과의 차이를 분석하고, UNCTAD의 대기행렬모형에서 가정하는 기본 전제조건들이 현재의 컨테이너터미널 환경에 비추어 볼 때 적용될 수 있는가를 부산항의 최근 실적을 갖고 실증분석을 수행. 이론적 확률분포에 적합한지의 적합도 검증 방법으로 Kolmogrov-Smirnov 검증을 사용하였으며, 시스템모델링(System Modeling)사의 “Input Analyzer”를 분석도구로 사용하였음.
- 부산항 입항 및 하역서비스 실적을 기초로 하여 실제와 비슷한 상황으로 작성한 시뮬레이션모델을 통해 현시점에 적용가능한 정형화된 선박대기시간비율표를 제시. 시뮬레이션모델은 모델의 분석과 설계를 위해 UML(Unified Modeling Language)방식을 채택하였고

UML로 설계된 모델을 객체지향 프로그래밍언어인 C++을 통해 구현, 개발하였음.

- o 마지막으로 시뮬레이션 모델로 작성한 새로운 선박대기시간 비율표와 서비스 수준인 대기시간비율의 조합에 의해 적정 선석처리능력을 추정.

제 2장 적정 서비스수준에 대한 이론적 검토

1. 서비스수준과 선석점유율

- o 터미널 이용자인 선사는 선박대기 없이 원하는 시점에 적정한 시간 동안의 서비스를 받기를 원하고, 터미널 운영자는 선석점유율을 높혀 최소한의 투자로 터미널 활용을 최대화하려는 상충된 이해 관계.
- o 이론적으로 항만투자비 및 변동비용과 선박의 재항시간비용의 합인 총비용을 최소화시킬 수 있는 경제적 최적이 되도록 항만투자를 해야 함. 즉 유희시설에 따른 비용과 선박의 대기시간 비용 합계가 최저가 되도록 결정해야 할 것임.
- o 그러나 항만설비의 확장 및 현대화는 단기적으로 항만이용자에게 이익이 될 뿐만아니라, 장기적으로 항만이용을 촉진하고 지역산업을 육성하기 위해서는 경제적 최적 이상의 투자를 하는 것이 바람직
- o 결국 선석점유율은 수용 가능한 선박의 평균대기시간에 의해 결정되며, 선박의 대기시간은 경제적 관점, 그리고 컨테이너터미널의 항만경쟁력 차원에서 검토되어야 함.

2. 적정선박대기시간비율 분석

- 선박 대기시간비율표 작성과 함께 서비스 수준인 서비스시간(S)에 대한 선박 대기시간(W)의 비율(W/S ratio)을 얼마로 할 것인가 하는 점이 적정선석점유율을 결정하는 또 하나의 요인임.
- UNCTAD에서는 30%이내를 권장하고 있을 뿐이며, 실적치로는 4%대 이내에 머물고 있음. 선박대기시간비율 10%는 부정기선의 대기시간비율 수준으로 정기선 서비스에서는 이보다 낮게 결정되어야 할 것임.
- 선박대기시간비율을 얼마까지 허용할 것인가 하는 것은 운항선사의 의견도 중요하지만 항만간 경쟁 상황에 의해 결정되어야 할 것으로 판단. 경쟁항만을 싱가포르, 홍콩항으로 할 경우 1.5% 대, 그리고 일본의 항만을 경쟁 항만으로 할 경우 3-3.5%를 적용해야 할 것임.

제 3장 선석처리능력 분석방법 고찰

1. 기존의 선석처리능력 분석방법

- 향후 추정 물동량을 처리하기 위해 건설해야 할 터미널 규모를 산정하기 위해서 선석처리능력을 분석함.
- 선석처리능력은 안벽장비인 컨테이너 크레인의 실질 작업시간과 시간당 실질 처리능력에 의해 결정됨. 크레인의 실질 작업시간은 연간 총 작업가능시간에서 선석점유율, 선박접안시간비율, 크레인 총 작업시간비율 등을 고려하여 산출되며, 크레인 처리능력은 크레인 수, 크레인 생산성 등에 의해 결정됨.

- 이러한 분석적 방법에 의해 5만톤급 부두는 연간 24만TEU, 2만톤 부두는 연간 10.7만TEU를 적정처리능력으로 하여 개발계획을 수립하여 왔으나 해양수산부에서는 2001년 항만의 서비스개선을 위한 사용 하역장비대수의 증가를 인정하고 「수정항만개발계획」에서는 5만톤 부두의 연간능력을 30만TEU로 수정하였음.

2. UNCTAD의 선석점유율 산출방식분석

- 안벽능력을 산정할 때 대부분의 값은 실측치, 또는 경험치를 사용하게 되나, 선석점유율은 UNCTAD의 선석점유율과 선석수에 의한 선박대기시간율표(Waiting Time Factor Table)에 의해 구함.
- 일반적으로 항만의 선석점유율을 산정하는 단순 대기모형에서는 선박도착시간과 서비스시간이 후속사건의 발생은 선행사건의 발생에 영향을 받지 않는다는 포아송 프로세스를 따르는 것을 가정하고 이는 곧 지수분포(M)의 기억상실증 속성을 의미함.
- 대기이론의 M/M/n 대기행렬 모형에서 선박대기시간비율(W/S ratio)은 지수분포의 특성상 평균서비스시간(μ)에 대한 평균도착률(λ)의 상대적인 비율, 즉 선석점유율(ρ)과 선석수(n)만으로 구할 수 있음. 즉 항만의 목표 서비스 수준에 대응하는 대기시간비율과 항만의 건설 예정 선석수가 정해지면 적정 선석점유율을 구할 수 있음

제4장 UNCTAD 선석점유율 산출방법의 문제점

1. 컨테이너터미널 처리실적 대비 선박대기시간 분석

- 터미널별 처리물동량이 가장 많았던 자성대와 선석대부두의 1997년 실적, 그리고 감만의 한진 및 현대 터미널의 2000년 실적을 갖고 당시의 선석점유율로 선박대기시간을 UNCTAD 방식에 의해 산출하고 이를 실제 선박대기비율과 비교
- UNCTAD 모형결과와 달리 높은 선석점유율에서도 선박대기 미미 즉 선석점유율이 91.3%이었던 자성대터미널의 경우 UNCTAD의 대기시간 비율표에 의하면 당시 입항한 1,870척의 평균 대기시간이 12시간이 넘어야하나 당시 자성대의 대기척수는 284척에 불과하고 이중 12시간 이상 체선 척수는 162척에 불과함.

2. UNCTAD 대기행렬모형의 기본가정

- 안벽능력 산정시 가장 중요한 부두에서의 선박도착간 시간분포형태에 대해 벌크화물을 취급하는 일반부두의 경우 지수분포, 전용부두의 경우 얼랑-2(Erlang-2)분포를 따르는 것을 가정.
- 얼랑분포(E_k)는 k 개의 지수분포로 구성될 수 있는 분포로 지수분포의 특성을 갖는 식으로 유도할 수 있음. 이는 지수분포만이 유일하게 대기시간비율(W/S)를 선석수(n)과 선석점유율(ρ)로 표시할 수 있기 때문임. 만약 지수분포(M)와 얼랑분포가 아닐 경우에는 수식에 의해 선박대기시간비율을 선석점유율로 도출할 수가 없음.

3. UNCTAD 모형작성 당시와 현재의 여건변화

- o UNCTAD에서 1969년에서 1972년에 걸쳐 선박대기시간비율표를 작성하기 위해 조사했던 대상선박은 평균 1,833톤에서 3,718톤 규모의 선형이었음.
- o 1960년대 중반까지도 정기선의 해운서비스는 전문화, 세분화되지 못했으며, 유럽국가들이 아시아, 아프리카등에 있는 그들 식민지간과의 항로가 주 운송항로이었고 이때의 무역형태는 완제품을 수출하고 식민국가에서 원재료를 수입하는 형태이었음.
- o UNCTAD에서 조사한 항만 Mombasa, Dar es Salaam, Khorramshahr 는 각각 케냐, 탄자니아, 이란의 항만이며, 하역 작업시간이 평균 3.4일에서 7.5일씩 소요된 것을 보면, 조사 당시 노동집약적 하역방식에 의한 것이었음을 알 수 있음.
- o 따라서 UNCTAD에서 조사한 재래 정기화물선이 운항하던 환경과 현재의 제 7세대 컨테이너전용 선박이 운항하는 터미널의 환경은 크게 다를 수밖에 없음.
- o 현재의 컨테이너 전용터미널의 경우 선박도착 스케줄이 매우 엄격하게 유지, 관리되고 있으며, 선박의 도착 및 하역서비스는 앞선 선박, 또는 다음 도착예정선박과 긴밀하게 연계되어 계획되고 있어, UNCTAD의 모형에서 가정하고있는 컨테이너선의 도착과 서비스 분포가 무작위적이라 하는 가정에 따른다고 보기 어려움.

제 5장 국내컨테이너터미널에 대한 실증분석

- 선박 도착간격 분포와 접안시간 분포를 자성대, 신선대, 감만(한진, 대한통운) 그리고 우암부두 등 부산항의 5개 터미널을 대상으로 분석.
- 각 터미널별 선박도착간격 분포 및 접안시간 분포에 대한 실증분석 결과, 국내 컨테이너 전용부두의 입항선박에 대한 도착간격시간의 분포는 UNCTAD에서 제시한 E2분포를 따른다고 볼 수 없음.
- 일부 터미널의 특정 연도의 자료를 분석하면 컨테이너 전용부두에 대해 포아송 프로세스를 적용할 수 있지만 대부분의 경우 적용이 곤란하다고 판단됨. 특히 선박도착간격분포는 포아송 프로세스를 적용하기 힘든 다양한 형태의 분포로 추정되었지만 통계적으로 유의한 경우는 없음.

제 6장 선석처리능력 산정방법 대안제시

1. 시뮬레이션 방식을 통한 안벽처리능력 제안

- 실증분석결과 선박도착분포가 일랑분포나 지수분포로 추정되지 않았기 때문에 컨테이너 전용터미널의 경우에 UNCTAD가 제시한 선박대기시간비율표로 선석점유율을 계산하는 것은 불가능하다는 것을 의미.
- 따라서 선박도착 및 서비스시간 분포에 대해 포아송 프로세스를 가정, 대기행렬이론을 적용하는 기존 안벽능력분석 방법 외에 운행 선박의 엄격한 운항 스케줄 준수 등의 항만 환경 변화를 반영

해 줄 수 있는 실적 분석 위주의 대안 연구가 필요.

- 본 과제에서는 선박의 도착시점에 대해서는 일반 확률분포를 사용하지 않고 안벽의 작업부하를 어느 정도 균등화시켜주는 사전계획의 효과를 반영하면서 대기시스템을 묘사할 수 있는 시뮬레이션을 통한 적정안벽처리능력 산정방법을 제안하고자 함.

2. 시뮬레이션모델 기본전제 및 분석과정

- 단계 1 : 계획 터미널에 입항하는 대상선박들에 대한 선형을 구성.
- 단계 2 : 연간 총처리물량에 따른 선박별 계획입항시점과 이에 변동을 고려한 실제 입항시점을 설정.
- 단계 3 : 비어있는 선석이 존재하면 입항 선박은 접안하지만 빈 선석이 없는 경우에는 대기하였다가 선입선출 원칙에 따라 다음 빈 선석에 접안.
- 단계 4 : 선석에 접안하는 선박의 이안시점은 선형별 접안시간 분포에 따라 결정.
- 단계 5 : 접안시간이 지나면 시스템에서 소멸되며 대기시간, 접안시간에 대한 통계량을 계산하고 대기 중인 선박이 존재하는지 여부를 확인.

3. 시뮬레이션 분석결과

- 일반적으로 포아송 프로세스를 따르는 대기행렬모형에서는 선석점유율과 선석수가 주어지면 대기시간비율이 제시되나, 본 시뮬레이션 모형에서는 연간 총처리물량을 변화시켜 선박의 입출항 과정을 시뮬레이션하여 출력 통계량으로서 선석점유율과 대기시간비율을 산출하였음.

- 본 시뮬레이션 모형에서 제시한 대기시간비율표의 값은 선박의 도착시간과 접안시간이 포아송 프로세스를 따르는 확률변수에 의해 정의된다고 가정하고 대기행렬이론에서 구한 결과값은 동일한 대기시간비율에 대한 선석 점유율보다 높음.
- 이는 $E_k/E_m/n$ 시스템에서는 k 와 m 이 증가할수록 즉, 입항간격시간과 접안시간의 분포에서 분산이 적어질수록 동일 선석점유율일지라도 구해지는 대기시간비율이 낮아지는 특성과 유사함.

4. 선박 대기시간비율(W/S ratio)에 따른 적정 선석능력 분석

- 선석처리능력은 운영선석수를 몇 개로 할 것인가, 그리고 선박대기시간비율을 얼마로 할 것인가에 따라 달라지게 됨. 본 연구에서는 선석처리능력을 운영선석수 1~4개까지, 그리고 선박대기시간비율을 1.0%에서 5.0%까지 증가시켜 표로 작성 제시함.

제 7장 결론 및 정책건의

- 우리나라의 컨테이너 물동량 증가세를 감안하면 현재 78%인 컨테이너터미널 시설확보율은 현재의 투자수준이 계속 될 경우 2011년에는 59%로 시설부족이 더욱 심각해 질 것으로 예상, 항만에 대한 투자 증대가 요망되는 상황임.
- 본 과제는 향후 「항만개발기본계획」 수립시 적용 할 수 있는 이론적으로 적용가능하고 현실적인 적정 선석처리능력을 산출하는 방법에 대해 연구하였음.

- o 컨테이너터미널의 적정 선석처리능력은 정부가 향후 발생할 것으로 예측하는 컨테이너화물 물동량에 대비 해 건설하는 컨테이너터미널 선석규모를 결정짓는 중요한 정책 변수이므로 다음과 같은 정책을 제안함.
- 1) 선박대기시간비율 산정 : 이는 컨테이너터미널에서 선박이 양적하를 위해 서비스받는 시간(S)에 대한 선석에 접안하지 못하고 대기하는 대기시간(W)의 비율(W/S ratio)을 책정하는 것으로 선박에 대한 터미널의 서비스 수준을 결정짓는 정책적 요소임. 본 연구에서는 인근 경쟁항만의 선박대기시간비율 실적치를 조사해서 이를 항만과 동일하거나 혹은 더 낮은 비율로 정해져야 할 것임을 제시하였음.
 - 2) 선박대기시간비율표 재작성 : 선박대기시간비율표는 선박대기시간비율이 정해질 경우 적정선석점유율을 산출할 수 있는 표로 UNCTAD에서는 통계적 특성을 갖고 수식으로 풀어서 이 표를 작성했으나, 본 연구에서는 부산항의 최근 입항선박 분포, 하역시간분포 등 각종 실적에 기초하여 작성한 시뮬레이션 모델에 의해 동 선박대기시간비율표를 재작성하였음. 따라서 적정 선석처리능력을 산정할 필요가 있을 때마다 UNCTAD의 모형에 의해 산출된 선박대기시간비율표를 사용하는 대신에 최근의 실적에 기초한 선박대기시간비율표를 재작성해서 사용해야함을 제시하였음.
 - 3) 항만개발 기본계획 수립시 반영 : 5년마다 수립되는 「항만개발기본계획」에서 향후 물동량에 대한 추정을 시행하고 이를 기초로 앞으로의 항만개발 규모를 정하게 되는데, 이때 선박대기시간의 산정과 시뮬레이션에 의한 선박대기시간비율표도 함께 재작성해서 적정한 항만개발 규모를 추정해야 할 것임.

제1장 서론

1. 연구의 배경

1999년 기준으로 우리나라 컨테이너 물동량은 767만TEU 이나 컨테이너항만 시설능력은 548만TEU로 시설확보율이 70.5%에 불과한 상태이다.

2011년 이후에는 우리나라 컨테이너 물동량이 2,967만TEU로 증가될 것으로 예측되며, 이때 컨테이너항만의 시설을 100%까지 확보하기 위해서는 향후 10년간 약 2,420만TEU를 처리 할 수 있는 컨테이너항만을 건설해야 한다. 이를 위해 2001년부터 2011년까지 11년동안 매년 부산 신선타대규모(5만톤급 4선석)의 거의 2배에 해당되는 컨테이너부두의 7선석씩 확보되어야 함을 의미하며, 실제로 정부의 2001년 수정항만계획에서도 2011년까지 컨테이너부두의 시설확보율이 100%까지 되기 위해서는 컨테이너부두 98선석을 추가로 건설해야 한다고 하고 있다.

98선석중 부산항만과 광양항 컨테이너부두 시설규모 약 1,800만TEU를 확보하기 위해 컨테이너부두 선석처리능력을 약 30만TEU로할 경우 약 60여개의 선석을 건설해야 하고 그 건설비만 13조 3천억원에 달한다. 그러나 만약 선석당 처리규모 기준이 바뀔 경우 건설해야 할 컨테이너부두 선석 수와 건설비도 변경될 수 있다.

또한 컨테이너터미널 선석당 적정처리능력도 과거 24만TEU에서 최근 수정항만개발 계획에서는 30만TEU로 바뀌었고 또한 민자사업으로 개발 중인 터미널의 경우도 터미널마다 다른 적정처리능력을 적용하고 있어, 컨테이너터미널 계획용 안벽처리능력에 대한 통일된 기준을 제시할 필요가 생겼다.

국내 항만개발에서 컨테이너 전용부두의 적정 처리능력을 산정하는 방식은 UNCTAD가 1973년에 발간한 「Berth Throughput」과 1985년에 출간한 「Port Development」에서 제시한 내용을 근간으로 하였다.

UNCTAD에서 제시한 선박대기시간비율표로 선석점유율과 선석수에 의해 서비스시간에 대한 선박대기 시간비율(W/S ratio)을 편리하게 구할수 있다. 이에 따라 정책적으로 항만의 서비스 수준인 W/S ratio를 결정할 경우 계획대상 안벽의 적정 선석점유율을 쉽게 구할 수 있고, 이 선석점유율로 안벽능력을 산정하였다. 즉, 적정 선석점유율에 연간 작업가능시간을 곱하면 안벽에서 수행되는 총 작업시간이 산출되고 여기에 작업시간당 처리량을 곱하면 연간 안벽처리능력이 계산된다.

그러나 최근 들어 부산의 감만터미널이 연간 처리능력실적이 선석당 50만TEU를 상회하고 선석점유율도 60%를 넘는 경우가 발생하였으며, 수년전에 자성대터미널의 경우 선석점유율이 90%가 넘는 경우도 발생되었다. 이와 같은 선석점유율을 UNCTAD의 대기행렬모형에 따른 선박대기 시간비율표에 의하면 감만터미널의 경우 적당평균 대기시간이 18시간까지 발생 될 것으로 추정되나, 실제로는 대기척수가 거의 없었던 것으로 나타나 UNCTAD방식에 의한 안벽능력 산정방법에 대한 의문이 제기되고 있다.

특히 5년마다 갱신되는 항만개발 기본계획이 항만개발규모에 대한 기본계획인 만큼, 5년마다 바뀐 하역생산성, 입항선박등의 최근자료에 기준 한 새로운 안벽처리능력 기준도 함께 산출, 갱신되어야 할 것으로 생각되며, 이에 대한 대안도 제시할 필요성이 생겼다.

2. 연구의 목적

이상의 연구 배경과 필요성에 의해 수행하게 될 본 과제연구의 목적은 다음과 같다.

첫째 UNCTAD에서 제시한 선박대기시간비율표(Waiting Time Factor Table)에 의해 산출되는 적정선석점유율의 기본가정과 전제조건을 분석하

여 우리의 항만개발 계획용으로 사용할 수 있는가의 적합성을 우선 검토한다.

둘째 만약 UNCTAD의 선박대기시간비율표를 활용하기가 부적합하다면 항만개발 기본계획용으로 사용할 수 있는 산출용 새로운 방법에 의한 선박대기시간비율표의 제시를 연구의 목적으로 한다.

3. 주요 연구내용 및 연구방법

2장에서는 선박대기시간비율표에서 제시하는 적정서비스 수준에 대한 이론적 검토를 통해 선석점유율과의 관계를 분석한다. 이는 터미널의 이용자인 선사의 입장과 터미널운영자의 입장 차이의 관계를 나타내는 것으로 선사는 선박대기시간을 줄여주길 원하고, 터미널운영자는 선석점유율을 높이려 할 것인데 그 관계를 설명한다. 그리고 주요 외국항만의 서비스시간에 대한 선박대기시간비율을 분석하여 선박대기시간 비율의 결정기준을 제시한다.

3장에서는 그동안 우리나라 항만개발 계획에서 수행되었던 선석처리능력분석 방법을 고찰해 본다. UNCTAD에서 제시한 분석적 방법에 의한 적정선석점유율 산출과정을 분석한다. 또한 이 선석점유율을 갖고 선석처리능력을 산출하기 위해 적용하는 각종 변수들에 대해 분석한다. 그리고 UNCTAD에서 제시한 선박대기시간비율표 작성과정을 수식모형전개 과정으로 살펴본다.

4장에서는 첫째, 부산컨테이너터미널 처리실적과 비교하여 볼 때 UNCTAD의 선박대기시간비율표에 의해 산출되는 선박대기시간의 차이를 분석하고, 둘째 UNCTAD의 대기행렬모형에서 가정하는 기본전제조건들이 현재의 컨테이너터미널 환경에 비추어볼 때 적용될 수 있는가 하는 여부를 분석한다.

5장에서는 4장에서 분석한 UNCTAD 선박대기시간비율표의 기본가정

의적합성여부를 부산컨테이너터미널들의 실적자료를 갖고 실증분석을 한다. 이론적 확률분포에 적합한지의 적합도 검증 방법으로 Kolmogrov-Smirnov 검증을 사용하였으며, 시스템모델링(Sytem Modeling)사의 “Input Analyzer”를 분석도구로 사용한다.

6장에서는 특수한 경우에만 사용이 가능한 UNCTAD 선박대기시간비율표를 현재의 부산항 입항 및 하역서비스 실적을 기초로 하여 실제와 비슷한 상황의 기초로 하여 작성한 시뮬레이션모델을 통해 현시점에 맞는 선박대기시간비율표를 제시한다. 모델의 분석과 설계를 위해 UML(Unified Modeling Lauguage)방식을 채택하였고 UML로 설계된 모델을 객체지향 프로그래밍언어인 C++을 통해 구현, 개발한다.

제2장 적정 서비스 수준에 대한 이론적 검토

1. 서비스 수준과 선택점유율

1) 터미널 이용자와 운영자의 이해상충

컨테이너터미널은 국가간 수출입 화물 및 환적 화물의 중요 물류기지이다. 따라서 각국은 수출입 화물이 이용자의 요구에 따라 적기에 양하 및 적하될 수 있는 충분한 능력의 시설을 갖추고 있어야 하며, 또한 선사의 사정에 따라 일시적으로 자국 터미널을 이용하게 되는 환적화물의 유치를 위해 투자를 계속하고 있다.

따라서 컨테이너터미널을 이용하는 주체와 서비스를 제공하는 주체 사이에는 서로 상충된 이해 관계가 존재한다. 즉, 터미널 이용자는 원하는 시점에 적정한 시간 동안의 서비스를 받기를 원하고, 터미널 운영자는 최소한의 투자로 터미널 활용은 최대화하려 한다.

터미널 이용자와 직접적으로 관련되어 터미널 운영자가 제공하는 서비스는 안벽에서의 양적하 작업, 장치장에서의 장치작업 및 게이트에서의 반출입 작업이 있다. 그러나 컨테이너터미널은 입항하는 선박이 각 선사의 항로별 운항계획을 준수하도록 서비스를 제공하는 것을 우선적으로 검토한다. 따라서 본 연구에서는 선박과 관련된 안벽에서의 양적하 작업을 주요 서비스로 간주한다. 터미널 운영자와 선사의 상충된 이해 관계를 살펴봄으로써 양자간 적정 수준의 서비스 수준을 검토할 수 있다.

먼저 선사는 자사 소유의 선박에 대해서 항로별로 장단기 운항계획을 수립한다. 따라서 선박은 장단기 운항계획에 따른 배선계획에 따라 특정 터미널에 계획된 시각에 입항하여 양적하 작업이 완료된 후, 예정된 시각에 출항하기를 바란다. 물론 항로 사정에 따라 배선계획에 따른 예정된

시각에 특정 터미널에 입항하는 것이 현실적으로 불가능한 경우도 있으나, 선박은 최대한 배선계획에 따른 예정시각에 특정 터미널에 입항하려는 강한 의지를 갖고 있다. 터미널에 도착한 선박은 선석 부족 등 터미널 사정에 의하여 묘박지에서 대기하는 경우가 발생하지 않고, 즉시 서비스 받기를 원한다. 또한 안벽에 접안한 이후로는 높은 생산성으로 양적하 작업을 완료하여 예정된 시각에 출항하기를 바란다. 만약 특정 터미널에서의 출항시각이 예정된 시각보다 지연되면, 다음 기항지에서의 입항시각이 예정된 시각보다 지연되거나 아니면 예정입항시간을 맞추기 위해 연료소비가 많이드는 가속운항을 할 수 밖에 없다. 또한 선박에 입장에서는 배선계획에 따른 입항예정시각 보다 늦게 입항한 경우에도 예정된 시각에 출항하기를 바란다. 이는 곧 안벽에서의 생산성 향상으로 양적하 시간이 단축되기를 바란다.

터미널 운영사는 최소한의 안벽길이 및 컨테이너 크레인을 설치하여 이와 같은 선사의 요구 조건을 충족시키려 한 것이다. 그러나 터미널 운영사가 기항하는 모든 선사의 선박에 대해서 적정 수준의 서비스를 제공하지 못하면 선사는 경쟁관계에 있는 인근 터미널로 기항지를 바꾸기 때문에 적정 수준의 서비스를 제공할 수 있는 시설을 갖추어야 한다.

또한 터미널 운영자는 기항하는 모든 선사가 장기적으로 수립된 운항 계획에 따라 선박이 입항하기를 바란다. 각 선사로부터 보다 정확한 정보가 입수됨으로서 터미널 운영사는 주어진 시설 규모로 최적의 선석 배정 계획, 선박별 컨테이너 크레인 할당 계획을 수립할 수 있다. 터미널에 대한 이해 당사자들의 요구조건을 다음 표에 정리하였다.

<표 2-1>

이해당사자의 요구조건

구 분	일차적인 요구조건	이차적인 요구조건	비 고
터미널 이용자가 운영자에게	출항 예정시각 준수	대기시간 감소 양적하 작업시간 감소	터미널 시설 투자 증가 선박 운항계획 수립
터미널 운영자가 이용자에게	입항 예정시각 준수	화물량 등 화물정보	터미널 시설 투자 감소 터미널 운영계획 수립

즉, 선사는 장단기 선박 운항계획에 근거하여 선박을 운항하고 터미널 운영자는 이와 같은 선사별 항로별 운항계획을 근거로 하여 터미널 운영계획을 수립하면 최소한의 터미널 투자로 선사가 요구하는 조건을 충족할 수 있다. 그러나 항로의 기상상태, 출항지에서의 사정 등에 의하여 운항계획에 의한 입항 예정시간과 실제 입항시각과는 차이가 발생한다. 따라서 터미널 운영자는 이와 같은 사실을 감안하여 어느 정도의 여유를 고려한 적정 수준의 터미널 시설 및 하역장비를 보유 할 필요가 있다.

일반적으로 정부, 항만단국(Port Authority), 선사, 화주로 구분할 수 있으며 각각의 입장에서 터미널 운영 목표는 다음과 같이 정리될 수 있다.

<표 4-2>

운영사별 운영목표

구분	운영목표
정부	<ul style="list-style-type: none"> ○ 사회경제적 부가가치의 극대화 ○ 해상운송 비용의 최소화 ○ 선박 재항시간의 최적화 ○ 항만의 재정적 자립도 향상 ○ 효율적인 물류인프라 구축
Port Authority	<ul style="list-style-type: none"> ○ 항만처리 물량의 극대화 ○ 자본이익률의 극대화 ○ 선박 재항시간의 최적화 ○ 화주에 대한 최고의 서비스 수준 유지
선사	<ul style="list-style-type: none"> ○ 선박 재항시간의 최적화 ○ 항만비용의 최소화 ○ 화주에 대한 최고의 서비스 수준 유지
화주	<ul style="list-style-type: none"> ○ 해상운송 비용의 최소화 ○ 수송화물 지연의 최소화 ○ 수송화물의 안전도 우선

자료 : Willy Winkelms, *Advanced Port Economics*, Institute of Transport, 2000.

2) 해운비용과 항만비용의 비교

선박이 정시에 항만에 도착하고, 양적하시간동안만 재항한다면, 선박의 대기시간을 없애는 동시에 안벽의 활용을 극대화할 수 있는 안벽능력을 결정하기가 쉬울 것이다. 불행히도 이러한 이상적인 상황은 존재하지 않는다. 선박은 항만에 불규칙적으로 도착하며, 재항시간은 화물의 양, 종류, 적재방식, 처리율 등에 따라 매우 다양하다.

선박도착율과 선박작업시간을 고려할 때 100%의 안벽사용비율은 선박

의 대기시간을 희생해야만 가능하다. 마찬가지로 선박의 대기시간을 제거하려면 평균 안벽사용비율이 극도로 낮아질 수밖에 없다. 따라서 선박의 대기시간과 안벽사용비율을 서로 조화시켜 나가야한다.

즉, 선사들은 선박의 재항시간을 단축시키기 위하여 충분한 처리시설 능력을 갖춘 항만을 선호한다. 그러나 이는 항만운영자에게는 곧 시설이 충분히 이용되지 않을 수 있다는 것을 의미한다. 반면에 항만운영자의 경우 컨테이너터미널의 개발 및 운영에 있어서 매몰비용(sunk cost)의 비중이 변동비용의 비중보다 훨씬 높기 때문에 가능한 한 시설의 활용도를 극대화 하고자 할 것이다. 선사의 입장에서 볼 때 이는 결코 바람직하지 못한 체선현상을 야기할 수 있다. 결국 컨테이너터미널에서의 적정처리량은 여러 가지 입지적인 요소, 운영방침 및 경쟁적 환경에 따라 다르게 된다. 터미널은 선사를 위시한 이용자들간의 상호작용(interaction)에 의존하므로 터미널의 생산성 향상을 위해서는 모든 관련자의 이해관계를 충분히 반영해야 하는 것이다. 이론적으로 컨테이너터미널의 능력은 항만 및 선사의 이러한 두 가지 상충되는 요인을 잘 조화시켜 유희시설에 따르는 비용과 선박의 재항시간 비용의 합계가 최저가 되도록 결정되어야 한다.¹⁾ 실제로 오늘날과 같은 경쟁적인 환경에서 항만은 선박이 도착하자마자 서비스가 제공될 수 있도록 선석의 여유를 보장해야 한다. 이에 따라 컨테이너화가 항만에서 하역효율을 많이 향상시켰지만, 또한 많은 경우 터미널시설의 유희화를 초래하기도 하였다.

항만비용(BC : Berthing Cost)은 두 부분으로 구성된다.

- ① 처리량과 독립적으로 발생하는 고정비용 : 안벽, 창고, 크레인 등의 자본비용
- ② 처리량에 의존하여 발생하는 가변비용 : 인건비, 연료비, 유지비 등

1) UNCTAD, *Port Development*, 1985

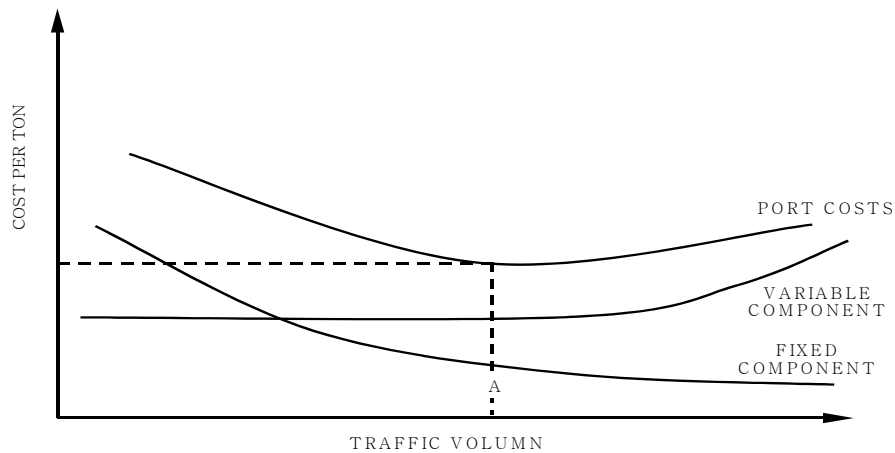
위와 같은 항만 비용은 결국 선석 수에 따른 비용으로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$BC = b \times ac_b$$

여기서 b : 선석 수, ac_b : 선석 당 건설비용

<그림 2-1>에서 나타나 있듯이 안벽의 처리물량이 증가함에 따라 톤당 고정비용은 감소한다. 반면 톤당 변동비용은 안정을 보이다가 처리량이 과도해지는 순간부터 증가하기 시작한다. 톤당 고정비용의 감소율이 톤당 가변비용의 증가율과 같아지는 A점에서 항만비용이 최소화된다.

<그림 2-11> 물동량 증가에 따른 항만비용의 변동



자료 : UNCTAD, *Port Development*, 1985

선박의 재항시간에 따른 비용(PC: Port Cost) 역시 두 부분으로 구성된다.

- ① 선박이 안벽에서 보내는 시간
- ② 선박이 접안을 위해 대기하는 시간

따라서 선박 재항시간 비용은 다음과 같이 대기시간과 실제 서비스 시간의 합으로 표현할 수 있다.

$$PC = (W + S) \times ac_v$$

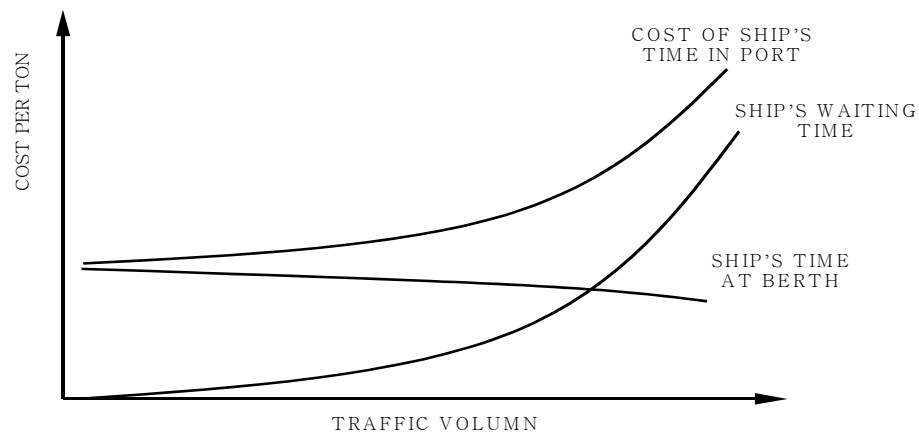
여기서 W : 대기시간, S : 서비스 시간, ac_v : 평균 선박 비용

또한 대기시간은 다음과 같이 생산성, 선석 수 및 평균 선박 수의 함수로 표현된다.

$$W = h(r, b, \bar{v})$$

위 식은 의 관계에 있으며 이를 그래프로 나타내면 다음과 같다.

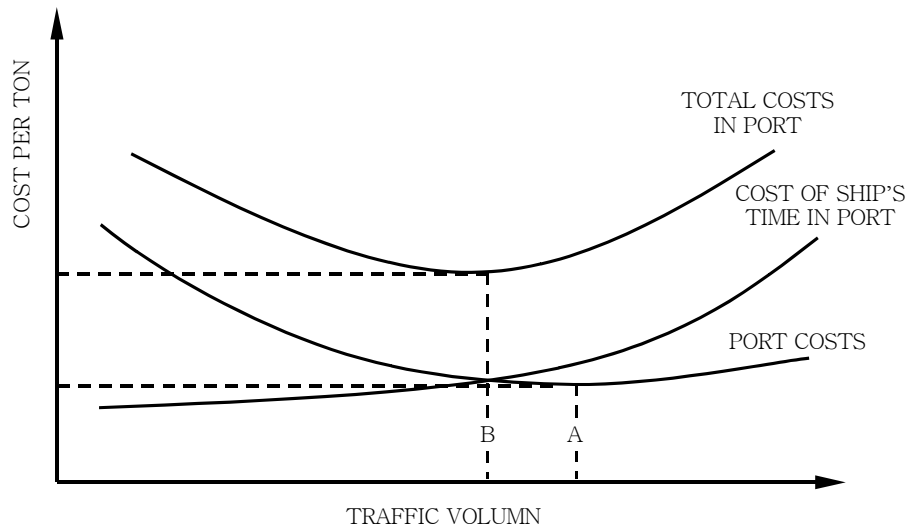
<그림 2-2> 물동량 증가시 선박의 재항시간에 따른 비용의 변동



자료 : <그림2-1>과 동일

<그림 2-2>에서 보면 물동량이 증가함에 따라 선박이 대기시간이 증가하고 있다. 높은 안벽사용률을 유지하려면 선박의 대기시간이 늘어날 수밖에 없다.

<그림 2-3> 물동량 증가시 총비용의 변동



자료 : <그림2-1>과 동일

<그림 2-3>에서 볼 수 있듯이 항만에서의 선박비용은 실제 항만비용(BC)과 선박이 항만에서 보내는 시간비용(PC)의 합으로 표현된 총 비용(TC)을 의미한다. 항만에서의 톤당 총비용은 B점에서 최소화된다. 즉, 항만비용을 최소화하는 것만으로 충분치 않으며, 체선할증료 등을 고려하여 선주에게 최상의 서비스를 제공해야 한다.

총비용을 최소화는 선박의 자본비용, 안벽사용료 등 다양한 비용요소들에 의존한다. 따라서 재래정기선 (break-bulk cargo ship)의 경우 컨테이너선, 탱커, LNG선 등 특수선에 비해 선가가 낮기 때문에 안벽사용을 높이는 것이 바람직하다. <그림 2-1>, <그림 2-2> 그리고 <그림 2-3>에 나타난 곡선의 모양이나 최소점은 대상 선박에 따라 달라진다.

항만투자를 하면 선박의 재항시간을 단축할 수 있다는 경제적 이점이

있다. 경제적 최적(Economic optimum)을 충족시키는 투자결정을 내리기 위해서는 다음 2가지 측면을 고려해야 한다.

첫째, 항만설비의 확장 및 현대화는 단기적으로는 항만이용자에게 이익이 되지만, 장기적으로는 항만과 국가에게 이익이 된다. 항만이용을 촉진하고 지역산업을 육성하기 위해서는 경제적 최적 이상의 투자를 하는 것이 바람직하다. 다만, 물동량이 다른 항만 또는 다른 운송수단으로 전환되는 경우 등 항만의 성장이 제한된 경우에는 예외적으로 경제적 최적 이하의 투자를 해야한다.

둘째, 선박의 평균 대기시간을 고려해야 한다. UNCTAD의 의하면 비용/수익분석의 결과 선박의 대기시간에 따른 비용과 여분의 능력을 제공하는데 따른 비용을 고려하여 최적을 고려해야 한다. 그러나 최적의 상황에서도 서비스시간에 비해 과도한 대기시간을 유발할 수 있다. 따라서 선박 대기시간과 선박투자에 관해서 UNCTAD에서는 다음의 의견을 제시하고 있다.

- ① 선박의 대기시간을 완전히 없애는 것은 경제적 최적에 어긋난다.
- ② 대다수의 선박이 도착 즉시 접안하는 것이 이상적이다. 그러나 이러한 상황이라고 해서 앞으로의 투자가 미뤄져서는 안된다.
- ③ 선박은 몇몇 선박의 과도한 대기시간을 이유로 항만의 혼잡에 대해 항의할 수 없다. 평균대기시간을 근거로 혼잡 여부를 판단해야 한다.

2. 서비스수준과 선석점유율의 관계

선석점유율은 총 시간에 대한 선석점유시간비율로 전반적인 선석이용률을 나타낸다. UNCTAD에서는 선석점유율과 관련하여 다음의 3가지 지표로 분류, 정의하고 있으며, 일반적으로는 총 선석 시간에 대한 선석에서의 총선박정박시간 비율을 선석점유율로 사용하고 있다.

- (1) 순 작업 시간 점유율 = 선석 작업시간 / 정상적인 선석 작업시간
- (2) 순 선석점유율 = 선석 작업시간 / 총 선석시간
- (3) 총 선석점유율 = 총 선박 정박시간 / 총 선석시간

이와 같은 선석점유율은 대기시스템에서 서버의 이용률을 표현하는 평가지표로서, 시스템의 대기시간, 고객 대기율 등 전반적인 현황을 예상할 수 있다. 터미널 운영자의 입장에서는 높은 점유율로 터미널의 이용률을 높이려 하나, 적정 이상의 점유율은 터미널 이용자가 대기할 확률을 증가시킴으로써 결국은 터미널 운영자가 기항을 기피하게 되는 요인이 된다. 따라서 터미널 이용자는 터미널 운영자가 낮은 점유율을 유지할 경우 터미널 도착 즉시 양·적하 서비스를 받을 것으로 예상한다²⁾. 즉, 선석점유율이 높은 터미널은 터미널 이용자가 도착 즉시 기다리지 않고 서비스를 받을 가능성이 감소하고, 반대로 선석점유율이 낮은 터미널은 터미널 도착 즉시 서비스를 받을 가능성이 증가한다. 따라서 터미널 운영자는 적정 수준의 선석점유율을 유지하는 것이 중요하다.

2) 안벽에서 선석의 수심 등 선석간 조건이 서로 다른 경우에는 선석 구분의 의미가 있지만, 각 선석의 조건이 모두 같다면 원칙적으로는 선석 구분은 의미가 없으며, 실제 운영상에서는 두 대 이상의 소형 선박이 동시에 한 선석을 점유하는 경우도 있게 됨. 그러나 대기이론에서는 원칙적으로 임의의 순간에 하나의 서버에는 하나의 고객만이 점유할 수 있다고 가정하고 있기 때문에, 대기 이론에서 정의한 선석점유율과 실제 운영상의 선석점유율과는 차이가 있을 수 있음.

선석점유율 외에 서비스 수준을 예측할 수 있는 평가지표로는 단위안벽길이당 연간산출량, 선박 재항시간, 선박 생산성, 선박 대기시간비율, 선박대기척수비율, 안벽점유길이시간비율, 기준하역시간(Norm time) 초과비율 등이 있다.

(1) 단위안벽길이당 연간산출량

이는 안벽단위길이당 처리되는 연간 양·적하 물동량으로서 터미널 운영자의 입장에서 투입 자원에 대비 연간 처리능력을 평가할 수 있는 주요 관심 사항이다.

$$\text{단위 안벽 길이당 연간 산출량} = \text{연간 총 물동량} / \text{안벽 총길이}$$

(2) 선박 재항시간

선박 재항시간은 항만에 도착한 선박이 접안대기 및 안벽에서의 양·적하 시간을 포함하여 항만에 체제한 총 시간을 말한다.

$$\text{선박 재항시간} = \text{접안대기시간} + \text{양·적하 작업 시간}$$

(3) 선박 생산성

선박 생산성(ship productivity)은 단위 시간당 양·적하 생산성으로서 고객의 입장에서는 높은 생산성을 요구하여 양·적하 작업이 빨리 끝나기를 바란다.

$$\text{선박 생산성} = \text{선박별 작업량} / \text{선박별 양·적하 작업 시간}$$

(4) 선박대기시간비율

선박대기시간비율³⁾은 항만에 도착한 선박이 서비스를 받기 위해 대기

하는 시간을 서비스 시간에 대한 비율로 표현한 것으로, 서비스 시간에 대한 상대적 대기시간 비율을 나타낸다.

$$\text{선박대기시간비율(W/S ratio)} = \text{평균 대기시간(W)} / \text{평균 양·적하작업시간(S)}$$

(5) 선박대기척수 비율

선박대기척수 비율은 총 도착 선박 수에 대해서 선박 도착 순간 유틸 선석이 없어 대기하는 선박 수의 비율을 나타낸다.

$$\text{선박대기척수 비율} = \text{대기선박 수} / \text{총 도착 선박수}$$

(6) 안벽 점유길이 시간 비율

최대 안벽 점유 길이 시간 비율은 주어진 안벽 점유 길이에 대해서 총 시스템 시간 동안 최대로 안벽을 점유하고 있는 시간 비율을 말한다.

$$\text{안벽 점유 길이 시간 비율} = \text{안벽 점유 길이 시간} / \text{총 시간}$$

(7) 기준하역시간Norm-time 초과비율

기준하역시간은 선박별 양·적하량을 목표 선박 생산성으로 나눈 것으로써 정상적인 상태에서의 선박별 양·적하 시간 기준을 말한다.

$$\text{기준하역시간 초과비율} = \text{선박별 양·적하량} / \text{선박별 생산성 기준}$$

3) 선박대기시간비율을 Waiting time factor 로도 인용되고 있으며, 국내의 항만 개발 규모를 산정할 때 많은 보고서에서 적용되고 있음.

3 서비스 수준에 관한 기존 적용사례 분석

터미널 이용자와 터미널 운영자 사이의 상충된 이해관계를 충족하기 위하여, 터미널 이용자에게 적정 서비스 수준을 제공하기 위한 시설 규모가 유지되어야 한다. 터미널 능력의 적정성은 터미널 운영자가 제공하고자 하는 서비스 수준을 어느 정도로 할 것인가에 따라 달라진다. 예를 들어 터미널이 터미널 이용자를 만족시키면서 양적하작업을 처리하기 위한 시설 규모를 결정하는 것이 중요하다. 따라서 어떤 서비스 평가지표에 의하여 어느 정도의 서비스 수준을 제공할 것인가가 중요하다.

1) UNCTAD

터미널의 평가지표와 관련하여, UNCTAD는 1985년에 발행된 「Port Development」에서 서비스 평가지표⁴⁾의 하나로 선박대기시간비율(W/S ratio : waiting time in unit of service time)을 제시하고 있다. 이는 양하할 화물이 적은 선박이 양하할 화물이 많은 선박만큼 오래 대기 할 수는 없기 때문이라는 원칙에서 서비스 수준으로 제시한 것이다. 선박대기시간비율은 항만에 도착한 선박이 서비스를 받기 위해 대기하는 시간을 서비스 시간에 대한 비율로 표현한 것으로서, 기대 서비스시간에 대한 상대적 대기시간 비율을 나타낸다.

$$\text{선박대기시간비율(W/S ratio)} = \frac{\text{입항선박의 평균대기시간}}{\text{평균 접안시간}}^5)$$

4) UNCTAD, *Berth throughput (Symmetric methods for improving general cargo operations)*, 1973, p.25 와 UNCTAD, *Port Development*, 1985, p.30 에서 상세히 언급되어있음.

5) 작업시간은 선박의 양·적하 작업시간외에 접안 선석이 있어 다른 선박의 접안을 불가하게 하는 모든 시간 요소를 포함.

위와 같은 대기시간비율을 서비스 평가지표로 사용할 때는 30% 대기시간이 작업시간의 10~50%를 넘어서는 않된다는 원칙아래 경제적 기준에서 볼 때 이 비용은 30%를 넘지 않는 것이 바람직하다고 UNCTAD는 제시하고 있다. 국내에서는 항만개발계획을 수립할 때 선박대기시간비를 10%를 서비스 수준으로 하여 터미널의 적정 능력을 산정해왔다.

2) JWD(Jordan Woodman Dobson)

1999년도에 부산 신항만을 설계한 JWD사⁶⁾는 선박대기척수비율을 적용하여 터미널 규모를 산정하였다. JWD사는 터미널의 적정 능력을 산정하기 위하여 시뮬레이션을 이용하였는데, 선박대기척수비율로서 터미널 능력의 적정성 여부를 판단하였다.

1999년도 부산 신항만을 설계한 미국의 JWD사는 시뮬레이션을 수행하여 터미널의 적정 능력을 산정하였다. 시뮬레이션상에서 적정 능력의 판단 기준은 터미널에 대한 최대수요가 발생했을 때 1%이내의 대기는 허용한다는 조건에서 터미널 능력을 산정하였다. 따라서 임의의 순간에 도착한 선박이 안벽에 접안하지 못하고 대기할 수 있는 확률은 1% 이내이다.

$$\text{선박대기척수비율} = \text{대기 선박 수} / \text{총 도착 선박 수}$$

3) KPC(Korea Port Consultants)

1999년도에 부산 신항만의 자동화 컨테이너터미널을 설계한 KPC사는 기준하역시간(Norm-time) 초과비율을 서비스 평가지표로 제시하여 터미널의 규모를 산정하였다. KPC는 JWD와 마찬가지로 시뮬레이션을 이용하여

6) JWD에서는 야드의 하역장비로 RMG를 채택하는 반자동화 하역시스템을 제시하였음.

터미널의 적정능력을 분석하였는데 시뮬레이션의 주요 통계량으로서 기준하역시간 초과비율을 제시하였다. 기준하역시간 초과비율은 선박별 양·적하 작업량에 따른 적정 작업시간 기준을 설정하여, 이 기준을 만족하지 않는 선박 수의 비율을 의미한다. 터미널의 적정 처리능력은 기준하역시간이 일정 값 이내에서만 허용되면서 처리되는 터미널 능력로 산정한다. 이때 기준하역시간은 선박별 작업량에 따라 할당된 컨테이너크레인(C/C) 대수 및 컨테이너크레인 생산성에 의하여 결정된다.

<표 2-3>

KPC 적용 선형별 목표 생산성

선 형	양·적하 작업량(lifts)			목표 생산성(B) (lifts/hr/ship)	Norm-time(A/B) (hr)
	하 한	상 한	평균(A)		
Mainline A	2,000	3,000	2,500	110	22.7
Mainline B, C, D	500	2,000	1,250	85	14.7
Feeders	250	600	425	40	10.6
Coastal	70	160	115	20	5.8

주: Norm-time은 LPC/목표 생산성

자료: KPC, Pusan New Port Terminal Planning Study, PNC, 1998

즉 Mainline A 선형의 경우 시간당 110 lifts를 목표 생산성으로 하여 기준하역시간을 정하였다. 만약 양·적하 작업량이 2,500 lifts이라면 그 선박의 기준하역시간은 22.7시간이 된다. 위와 같은 선형별 기준하역시간 기준을 제시하여 시뮬레이션의 결과 기준하역시간을 초과하는 선박의 수가 총 선박 수의 5% 이내가 되는 범위에서 터미널 규모를 선정하였다.

4. 적정선박대기시간비율 분석

선박대기시간비율표 작성과 함께 서비스 수준인 선박대기시간비율을 얼마로 할 것인가 하는 점이 적정선석점유율을 결정하는 또 하나의 요인이다. 서비스시간에 대한 선박대기시간비율을 얼마까지 허용할 것인가 하는 것은 운항선사의 의견도 중요하지만 항만간 경쟁 상황에 의해 결정되어야 할 것으로 판단된다. 1999년 기준 현대상선이 기항하는 항만인 싱가포르, 홍콩, 오사카, 도쿄, 롱비치, 부산항에서의 평균대기시간(W)/평균서비스시간(S)비율은 최소 0.7%에서 최대 4.3%까지 나타났다. 즉, 부산의 경우가 4.3%, 싱가포르 1.6%, 홍콩 1.5%, 오사카 3%, 도쿄 3.5%, 롱비치 0.7%로 나타났다.

<표 2-6>

화물별 선박 대기시간비율 실적

화 물	국 내	국 외	비 고
컨테이너	부산 4.3%	싱가폴 1.6% 홍콩 1.5% 오사카 3.0% 도쿄 3.5% 롱비치 0.7%	현대상선 내부자료
석탄	삼천포 9.6% 보령 11.1% 태안 12.0% 하동 10.1%	-	범양상선 내부자료
고철	포항 10~15% 인천 50%	LA항 12.5% 시애틀항 11.1% CAMDEN항 6%	상동
양곡	31%	일본 33%(공용부두) 일본 17%(자가부두)	상동
원목	18%	일본가와사키항 8% 중국칭다오 15% 뉴질랜드 4%	상동

해양수산부, 「항만장비 현대화 기본계획」, 1999.6

그동안 항만개발 계획에서 사용했던 W/S ratio 10% 기준은 그 근거가 모호하다. 즉, UNCTAD에서는 30%이내를 권장하고 있을 뿐이며, 이상에서 보듯이 실적치로는 4%대 이내에 머물고 있다. 정기선 서비스와 달리 부정기선 서비스는 선박의 입항이 정해진 스케줄에 의해 이루어지지 않는 특성이 있어 물량이 많을 경우 선박대기가 정기선에 비해 많이 발생된다. 석탄의 경우 범양상선의 자료에 따르면 삼천포, 보령, 태안, 하동항에서의 평균대기시간/평균서비스시간은 9.6%~12%로 조사되었다.

따라서 그 동안 컨테이너터미널 개발계획에서 사용되었던 W/S ratio 10%는 거의 부정기선의 수준으로 정기선 서비스에서는 이보다 낮게 결정되어야 한다. 선박 대기시간비율을 얼마로 두는 것인가 하는 것은 인근 경쟁항만과의 경쟁차원에서 결정해야될 서비스 수준을 결정하는 것으로 선박 대기시간비율표가 갱신될 때마다 적정 선박 대기시간비율도 최근 자료에 의해 조사해서 결정되어야 할 것이다.

예를 들어, 최근 현대상선의 자료에 따르면 우리와 경쟁관계에 있는 오사카항이나 도쿄항의 선박대기시간비율은 3%~3.5%이나 싱가포르항이나 홍콩항의 경우는 1.5%대이므로 어느 항만을 경쟁항만으로 보는가에 따라 선박대기시간비율이 달라질 수 있다.

제3장 선석처리능력 분석 방법 고찰

1. 기존의 선석처리능력 분석 방법

컨테이너터미널의 처리능력은 안벽처리능력과 장치장 처리능력을 함께 검토하여 원활한 시스템운영 측면에서 작은 값의 제약에 의해 처리능력이 결정된다. 여기서는 정부가 향후 발생할 예상 물동량에 상응하는 터미널건설을 위해 건설규모를 산출하기 위한 선석처리능력을 검토하며, 이는 안벽처리능력을 의미하는 것으로 한다.

분석적 방법에 의한 선석처리능력은 항만건설 운영의 경험에서 선석능력을 결정하는 요인을 논리적으로 작성하고 그 요인의 경험치 값을 갖고 능력을 산정하는 방식이다. 이방식은 크게 컨테이너 크레인의 처리능력 및 대수에 의해 능력을 산정하는 방식과 선박접안시간당, 평균목표 생산성에 의해 산정하는 방식으로 나누어 질 수 있다.

우리나라에서 그동안 컨테이너부두개발 계획에 사용되었던 방식은 대부분 컨테이너 크레인의 처리능력을 기준으로 선석처리능력을 산정하는 것이었다. 이는 향후 발생 될 것으로 추정되는 물동량을 처리하기 위해 건설해야 할 터미널 규모를 산정하기 위한 목적이었기 때문이다. 즉, 특정 터미널을 운영하는 운영자 입장에서 또는 우리나라 항만에 입항하는 선박에 대한 하역서비스의 최저기준을 감안해서 터미널개발 규모를 정하지 않았기 때문이다.

전자의 방식에 의하면 안벽장비인 컨테이너 크레인의 실질 작업시간과 시간당 실질 처리능력에 의해 안벽능력이 결정된다. 크레인의 실질 작업시간은 연간 총 작업가능시간에서 선석점유율, 선박접안율, 크레인 총 작업시간비용 등을 고려하여 산출된다.⁷⁾ 크레인 처리능력은 크레인 수, 크레인 생산성 등에 의해 결정된다.

7) 한국해양수산개발원, 「전국항만 적정하역능력산정」, 1998.7 참조하여 구성

1) 크레인수

안벽능력 산출에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 컨테이너크레인(C/C)의 설치대수라 할 수 있다. 야드에서의 처리능력만 뒷받침된다면 이론적으로는 컨테이너 크레인 설치대수만큼 안벽능력이 증가 될 수 있다.⁷⁾ 특히 컨테이너선의 대형화와 선박당 하역생산성 향상이라는 추세에 따라 선석당 설치하는 컨테이너크레인 대수는 점차 늘어나고 있다. 광양항 1단계 개발 단계까지는 선석당 2기의 컨테이너크레인 설치하는 것으로 해왔으나 감만 터미널부터는 3대씩 설치하는 것으로 하였고, 실제 자성대와 신선대의 경우는 선석당 3대 이상의 컨테이너크레인이 설치되어있다.

<표 3-1> 컨테이너 전용 부두의 C/C 설치대수

구 분	자성대	신선대	감만	광양항 (1단계)
부두길이(m)	1,447	1,200	1,400	1,400
C/C 대수	11	11	12	8

자료 : 한국컨테이너부두공단, 「2000년도 컨테이너 화물 유통 측이 및 분석」, 2001.4

2) 연간 작업가능 시간

연간 작업가능시간은 선석점유율 산정의 기본시간이 되는 365일을 기준으로 하고 있다. 기존 보고서에 연간작업일수 항목을 살펴보면 자성대 보고서와 PRC 보고서는 365일로 설정하였고 항만적정능력산정 보고서는 330일, 광양1단계 개발보고서에서는 345일, 부산신항만 보고서는 300일로 적용하였는데. 이는 총 작업가능일의 개념과 기상조건, 유일, 장비고장 등

8) 물론 크레인 간섭계수 등을 고려해야함.

과 같은 요소를 배제한 순수 작업일의 개념으로 나누어 산정한 것으로 판단된다.

현재 자성대나 신선대의 경우 명절 2일만 작업을 중단하고 있으며 기상 장애로 인한 선박 및 컨테이너크레인의 운전원 또는 작업반장의 판단에 의해 작업중지를 결정하고 있으며, 광양항1단계 개발보고서에는 폭풍 10.3일, 안개 3.9일, 강우 5.9일(10mm)이상 등 총 20.1일을 작업불가능 일수로 보고 있다.

일일작업가능시간은 총 작업시간의 개념을 적용하여 24시간을 적용하고 있는데 하루 근무가능한 24시간을 기준으로 한 총작업시간의 개념과 실제 자성대와 신선대의 작업시간 중 3조 2교대의 형태로 교대시간 2시간과 식사시간 2시간을 제외한 20시간을 기준으로 한 순작업시간의 개념으로 나누어 질 수 있다.

자성대보고서, PRC보고서에서는 작업가능한 총 근무시간인 24시간을 적용하였고 항만적정능력산정보고서 및 가덕신항만보고서에서는 순작업시간의 개념인 20시간을 기준으로 적용하고 있다.

3) 크레인 작업 시간율

크레인 작업시간율은 선석점유율에 선박이동계수, 및 크레인 가동율을 곱하여 산출하게 되는데 선석당 적정 처리량을 산출하기 위해서는 먼저 항만서비스 중에서 가장 중요한 요인인 선박대기시간을 결정짓는 선석점유율을 산정하는 것이다. 대기시간 대 서비스비율이 결정되었을 경우, UNCTAD가 권장하는 표준선석점유율은 $E_2/E_2/n$ 대기행렬을 통해 산출될 수 있다.

이러한 방식에 의한 선석점유율은 선석 수에 따라 달라지게 되는데 국내에서는 대기시간 대 서비스 시간비율을 약 10%, 선석점유율을 선석수에 따라 46%~60%를 적용하였다.

또한 크레인이 실제로 작업하는 대상시간은 선석이 점유된 시간이 아니

라 선박이 접안되어야 작업이 가능하므로 선박접안시간을 기준으로 한다. 따라서 선석점유율에서 선박의 이접안시간을 제외하여야 하며 이를 선박 이동계수라고 한다. 보통 20시간의 평균점유시간에 2시간의 이접안시간이 소요되는 것으로 추정하여 선박이동계수를 0.9로 사용하고 있다.⁸⁾ 이론상 서비스 개념은 선석점유시간을 기준으로 하는데 비해 대부분의 작성통계 결과는 선박의 이접안시간이 제외된 선박접안율이라 할 수 있다.

크레인 가동율은 크레인의 작업시간을 말하는데 선박이 접안후 컨테이너의 양하작업을 시작해서부터 마지막 컨테이너의 적하작업을 마칠때까지의 총 작업시간에서 고장, 식사등 작업중단시간을 제외한 실질작업시간을 의미한다.

따라서 크레인 작업시간의 선박작업시간(20시간기준)에 대한 비율인 크레인작업계수는 약 0.95를 사용한다.

또한 식사, 크레인 고장, 벌크화물의 하역, 트랜스퍼크레인 고장, 라싱등 본선사유로 인한 작업중지 등 여러 가지 요인에 의한 작업중단시간을 제외한 실질작업시간을 총 작업시간대비 약 80%정도로 추정되고 있다.

<표 3-2> 자성대와 신선대 크레인의 순작업시간비율

연 도	전 체	BCTOC	PECT
1996	0.832	0.854	0.801
1997	0.804	0.815	0.789
1998	0.930	0.856	0.786
1999	0.808	0.822	0.815
2000	0.871	0.819	0.811
평균	0.849	0.833	0.800

자료 : <표3-1>과 동일

8) 임진수 외, 「컨테이너시설하역능력 산정기준 및 적정처리능력에 관한 연구」, 1997

4) 크레인 작업효율

크레인 작업효율은 크레인설계능력이 작업손실로 정계수와 간섭계수를 곱하여 계산될 수 있다. 컨테이너크레인의 설계능력은 이상적인 상태에서 트롤리의 이동거리를 속도로 나누어서 구한 최대작업능력을 의미한다. 이상적인 상태란 크레인을 이동하지 않고 선박의 같은 부분에서 컨테이너를 하역하고, 하역된 컨테이너는 지체없이 장치장으로 이동하여 크레인의 작업에는 아무런 대기시간이 안 생기는 상태를 의미한다.

최근 설치된 크레인의 시간당 처리개수는 감만부두와 광양항1단계 부두에 설치되어 있는 18열 6단의 초고속 크레인을 기준으로 합해서 45VAN이 적용할 수 있다. 크레인의 실질(순)작업시간 중에도 많은 작업손실이 발생하는 데 몇 가지 대표적인 요인은 다음과 같다.

- 컨테이너의 선박내 선창간 이동
- 장치장 부족 및 장치장 하역장비의 능력부족으로 인한 대기
- 컨테이너 크레인 하역지원시스템이 원활하지 않음으로 인한 대기
- 해치카바의 하역
- 크레인 작업 전후의 준비시간
- 휴식시간 전후의 작업손실
- 옆 크레인과의 작업간섭
- 바람, 안개 등 악천후에 따른 작업속도 둔화
- 크레인 운전기사의 작업미숙에 따른 지연
- 기타 고장 등으로 인한 지연

이러한 요인들 가운데는 순작업시간에서 제외되는 작업중단시간도 포함되어 있으나(고장, 식사 등), 대부분은 작업중단시간에 체크되지 않기 때문에 이러한 요인에 따른 작업효율의 저하를 크레인작업손실조정계수로 조정하고 있다.

현재의 컨테이너크레인의 작업능력은 실제 PECT의 크레인 작업시간당 처리실적(20.4VAN)과 크레인의 설계능력(45VAN)을 비교할 때 약 45% 정도이다. 이 가운데서 고장, 식사 등 작업중단시간 등은 이미 조정이 되었으므로 크레인 작업손실에 따른 조정계수는 0.75를 적용하고 있다. 실제 현재의 작업능률을 기준으로 할 경우 작업손실에 따른 조정계수는 0.65정도이지만, 향후 충분한 장치장의 확보, 정보화 및 전산화의 진전에 따른 장치장 배정계획의 정확화 등에 따라 작업능률이 개선될 것으로 보고 0.75를 적용하기도 한다.

간접계수 혹은 작업유희계수로 표현되기도 하는데 선박당 1기의 컨테이너크레인을 투입하였을 경우의 생산성을 1로 보았을 때 컨테이너크레인의 숫자가 늘면서 컨테이너크레인 1기당 작업효율 떨어지는 정도를 나타낸다. PECT의 실례를 보면 컨테이너크레인 2기 투입시 작업효율은 0.9, 3기투입시 0.83으로 추정되었다.⁹⁾

5) 단위환산 계수

VAN의 TEU 환산계수는 40푸터 컨테이너의 증가와 함께 점차 증가하고 있으며, 현재는 보통 1.5를 적용하고 있다. 그러나 소형 피더 선석인 2만DWT급 선석의 경우에는, 인천항과 부산항 우암터미널의 실적치를 근거로 1.36을 적용해왔다.

6) Overstow 계수

Overstow비율은 컨테이너의 하역작업시 해당 터미널에 하역할 컨테이너가 작업하는 컨테이너의 비율을 의미한다. 즉, 터미널에 하역할 컨테이너의 위에 적재되어 있는 컨테이너에 대한 작업으로서 터미널 통계에서는 선내이적이라는 항목으로 처리되고 있다.

9) 한국해양수산개발원, 「전국항만 적정하역능력산정」, 1998. 7

이러한 선내이적 컨테이너는 터미널의 처리실적에 포함되지는 않지만 컨테이너 크레인의 입장에서 보면 작업을 한 것으로 컨테이너 터미널 능력산정의 방법은 컨테이너 크레인의 작업횟수를 기준으로 한 것임로 이를 감안해 주어야 한다. 우리나라의 경우 전체작업량이 3%정도가 해당되므로 Overstow계수는 0.97정도라할 수 있다.

7) 기존 연구보고서의 안벽처리능력 결정 요소 비교

이상의 방식에서 도입한 적용계수들의 의미를 정리하여 컨테이너 전용 부두의 연간 적정안벽능력의 산정방식을 정리하면 다음과 같다.

<표 3-3>

기존보고서의 안벽처리능력 결정 요소

구 분	자성대 보고서	PRC 보고서	적정능력 1차		광양항 1단계		가덕 신항만
적용터미널	BCTOC	PECT	BCTOC	PECT	광양항 1단계		가덕 신항만
컨테이너 크레인(기)	8	6	9	6	2 (1선석)	2 (1선석)	
연간작업일수(일)	365	265	330	330	245	245	300
일일작업시간 (시간)	24	24	20	20	24	24	20
선석점유율 (개/시간)	(0.48)	0.6	(0.6)	(0.6)	0.26	0.46	0.55
크레인처리 개수(개/시간)	22	30	22	27	44	44	45
크레인 가동률		0.79	0.93	0.93	0.78	0.78	0.74
크레인작업효율					0.72	0.72	0.72
크레인 고장시간계수	0.9						
간섭계수		0.9			0.9	0.9	0.9
Overstow계수	0.853						
선박이동계수	0.88	0.9					
TEU/BOX비율	1.57	1.57	1.58	1.58	1.60	1.60	1.70
크레인1기당 처리능력(TEU)	98,116	158,412	128,014	152,040			121,055
안벽능력(TEU)	784,931	950,472	1,114,961	912,241	153,206	271,058	

자료 : 한국해양수산개발원, 「전국 항만 적정하역능력 산정」, 1998.7

주 : 1) PRC보고서는 1991년 이후 능력 추정

2) 가덕신항만개발보고서의 적용수치들은 2005년 기준

연간 적정 안벽능력 = 연간작업일×일일작업시간×선박 접안율(선석점유율
의 의미로 사용)×장비대수×장비능력×작업계수×선박이동계수×선내이적계

수×환산계수×실작업시간율×작업손실계수

위와 같은 계산식에 근거하여 5만톤급 부두는 연간 24만TEU, 2만톤 부두는 연간 10.7만TEU를 적정능력으로 하여 개발계획을 수립하여 왔다. 그러나 해양수산부는 항만의 서비스개선을 위해 “수정항만개발계획”에서 장비대수와 간섭계수를 조정하였고, 5만톤 부두의 연간능력을 30만TEU로 수정하였다.

<표 3-4>

수정된 컨테이너터미널 능력

구 분	장비수	연간 작업 일수	일일 작업 시간	선박 접안율	장비 능력	간섭 계수	선박 이동 계수	선재 이적 계수	환산 계수	실작업 시간율	작업 손실 계수	연간 처리능력
5만톤 부두	2	365	24	0.46	45	0.9	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	46,9
(조정)	3	상동	상동	상동	상동	0.81	상동	상동	상동	상동	상동	324,512 (320,000)
2만톤 부두	2	365	24	0.26	35	0.9	0.9	0.97	1.36	0.8	0.75	106,817 (107,000)

자료 : 해양수산부, 「수정 항만개발계획」, 2001. 1

2. 적정 선석점유율 산출 방식 분석

안벽능력을 산정할 때 대부분의 요인들의 값은 실측치, 또는 경험치를 사용

하게 되나, 선석점유율은 UNCTAD의 선석점유율과 선석수에 의한 선박대기 시간비율표(Waiting Time Factor Table)에 의해 구하는 것으로 되어있다.

이는 터미널의 안벽 서비스상황이 대기행렬 시스템으로 표현된 것이며, 그 안에 통계적 가정들이 포함되어 있다. 따라서 여기서는 UNCTAD에서 제시한 대기행렬시스템의 내용과, 그 가정이 무엇인가를 분석한다.

컨테이너터미널의 안벽은 시간에 따라 상태가 변화하는 추계적(Stochastic) 성질을 띠는 대기행렬시스템으로 표현될 수 있다. 대기행렬시스템이란 고객들이 도착하여 기다렸다가 서비스를 받고 떠나는 시스템으로 대기현상에는 반드시 기다리는 주체가 있어야 하고 기다림의 목적을 달성시켜 주는 행위가 있어야 한다. 대기이론에서는 일반적으로 기다리는 주체를 고객이라고 하고 기다림의 목적을 달성시켜주는 행위를 서비스라고 한다. 그리고 서비스를 제공하는 측을 서버(server)라고 한다. 따라서 대기행렬시스템에서의 개체는 고객과 서버로 고객들과 서버는 서로 연관관계를 유지하며 대기행렬시스템을 구성한다.

다음 표에서는 하나의 대기행렬시스템을 다른 대기행렬시스템과 구분 짓는 특성요소를 정리하였다. 어떤 대기행렬시스템을 묘사하기 위해서는 이러한 특성요소들을 명시해야 한다.

<표 3-5> 대기행렬모형의 특성요소

대기행렬 모형	설 명
고객의 형태	시스템에 도착하는 고객이 받아야 하는 서비스의 종류가 고객의 부류에 따라 달라지느냐에 따라 단수계층(single class)과 복수계층(multi-class)으로 분류.
모집단의 형태	고객이 될 수 있는 가능성을 가진 잠재고객집단은 시스템에서 서비스를 받는 고객의 수가 한정적인지 혹은 무한한지에 따라 유한모집단과 무한모집단으로 구분.
도착과정	도착하는 고객들의 패턴이 대기상황이나 서버의 활동상황에 관계되는지 혹은 시간구간에 따라 일정한지에 따라 구분.
서비스과정	일반적으로는 특정 고객이 필요로 하는 서버의 수는 한 명이고, 고객에 대한 서비스시간은 독립이며 동일한 분포는 따른다고 본다. 그렇지만 복수 서버를 필요로 하거나 서비스율이 상태종속인 경우가 있고 피드백과정을 따를 수도 있음.
서버수	시스템 내에 존재하는 서버의 수에 따라 단수서버, 복수서버, 무한서버의 경우로 구분된다. 별도의 기술이 없으며 대부분 동일한 능력을 갖는 동일서버를 의미함.
서비스규칙	한 서비스가 끝났을 때 또는 서비스가 진행되고 있는 도중에 다음 서비스 받을 고객을 결정하는 방법을 의미한다. 서비스가 중간에 중단되는 경우와 다시 서비스를 재개될 때 서비스시간의 적용방법에 따라 추출-계속형, 추출-동일반복형, 추출-비동일반복형이 고려됨.
고객 성향	중도포기(reneging), 보킹(balking), 자킹(jockeying) 등이 발생할 수 있음
대기행렬 구조	대부분의 경우 서버의 수에 관계없이 고객들이 한 줄로 서서 기다리는 단수행렬시스템을 다루지만 자킹을 고려한 복수행렬시스템을 다룰 수도 있음.

자료: 이호우, 「대기행렬 이론 -확률과정론적 분석-」, 시그마프레스, 1999

다음 표에서는 앞서 언급한 대기행렬시스템의 특성요소들에 대해 적정 선석점 유율을 산출하기 위해 대기이론을 적용할 경우 컨테이너 전용부두에서 대해서

어떤 가정을 두고 문제영역을 정의하는 지에 관해 설명하였다.

<표 3-6> 대기행렬모형과 컨테이너 전용부두의 비교

대기행렬 모형	모형에서의 대상	비고
고객의 형태	입항선박과 선석	터미널의 선석에서나 동일한 조건으로 접안 및 하역작업을 수행하는 것으로 가정함.
모집단의 형태	입항예정선박	무한모집단으로부터 입항선박이 계속 발생하는 것으로 가정함.
도착과정	대상 선박군의 범위	선박의 도착은 대기 선박의 상황이나 선석의 현 상태와는 무관하게 발생하며 항상 동일한 선박도착 분포를 따름.
서비스과정	접안 및 하역작업	선박의 서비스시간은 독립이며 동일한 분포를 따르고 한 선석만을 사용. 서비스를 마친 선박은 시스템을 빠져나감.
서버수	선석수	제한된 수의 선석으로 터미널의 안벽은 구성됨.
서비스규칙	하역작업	선박에 대한 서비스가 시작되면 중간에 멈추거나 중지되는 경우는 없다. 우선순위는 FCFS(First Come First Service)를 따름.
고객성향	입항선박 및 선석배정	접안하지 못한 선박은 서비스를 받을 때까지 무한한 단일 대기열에서 대기함
대기행렬 구조	안벽 서비스	단일 대기위치를 가지는 단수행렬시스템임.

주: 서비스시간은 입항 선박이 터미널의 시설을 이용하는 총소요시간으로 하역작업 시간+이접안시간을 의미.

일반적으로 대기행렬시스템은 크게 분석적인 방법(analytic method)이나 시뮬레이션(simulation)에 의하여 다루어진다. 지금까지 국내 항만개발에서는 컨테이너터미널의 안벽을 포아송 프로세스를 따르는 대기행렬모형으로 가정하여 분석적 방법을 적용해 왔다. 이 경우에는 일정 서비스수준을 충족하는

선석점유율과 안벽 하역장비의 생산성을 이용하여 처리능력을 구한다.

대기행렬 모형의 분석적 방법은 어떤 시스템의 미래 행태를 예측하기 위하여 그 시스템의 현재 행태를 분석하는 마코브 분석(Markov analysis)을 의미한다. 이때 분석의 대상이 되는 시스템은 마코브 과정(Markov process)을 따른다고 전제된다. 마코브 과정은 확률적 과정(stochastic or probabilistic process)으로 확률이 적용되는 그러한 불확실한 환경에서 어떤 상황이 발생하는 과정을 말한다. 이러한 상황은 여러 기간 동안 계속되며 또한 성격상 동태적이다. 시스템의 다음 상태가 현재 상태에 의존하고 있다면 이 확률적 과정은 바로 마코브 과정이라 한다. 이 경우 현재 상태가 알려져 있으면 다음 상태가 발생할 조건확률(conditional probability)은 현재 이전의 상태와 무관하다는 것을 의미한다. 어떤 상태에서 다른 상태로 바뀌는 가능성을 측정하는 변화확률(transition probability)이 시간이 경과하더라도 일정한 경우에는 마코브 과정을 마코브 체인(Markov chain)이라고 한다.

마코브 체인 분석에 있어서는 다음과 같은 전제를 필요로 한다.

첫째, 시스템은 유한한 수의 상태를 가진다.

둘째, 다음시점의 시스템의 상태는 바로 현시점의 상태와 변화확률에 의존한다.

셋째, 그 변화확률은 시간이 경과하더라도 일정하다.

넷째, 시스템에서의 변화는 각 시기에 한 번만 발생한다.

다섯째, 각 시기는 길이에 있어 일정하다.

이러한 전제하에서 마코브 분석은 시스템에 관한 역사적 정보에 입각하여 첫째, 그 시스템이 일정 시점에 특정 상태에 있을 확률, 둘째, 그 시스템이 각 상태에 있을 장기적 확률(long-run or steady state probability) 등을 예측하게 된다¹⁰⁾.

대기행렬모형은 모집단의 크기, 도착분포, 서비스규칙, 서비스경로, 서비스

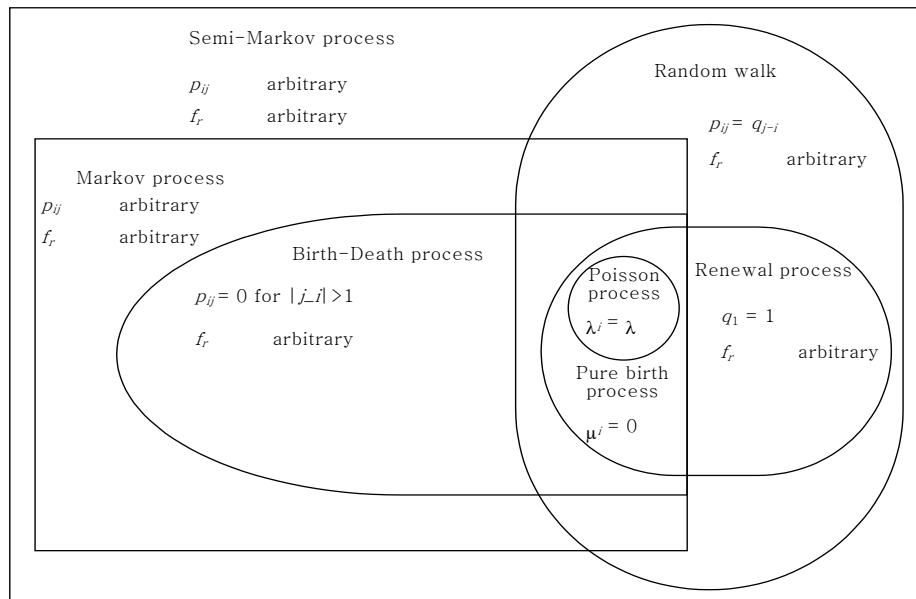
10) 강금식, 「경영과학」, 무역경영사, 1985

단계, 서비스분포 그리고 시스템의 상태에 대한 가정에 따라 수많은 모형으로 구분될 수 있다. 시스템의 상태란 시스템이 현재 과도상태(transient state)에 있느냐 그렇지 않으면 안정상태(steady state)에 도달했느냐를 말한다. 시스템이 과도상태에 있을 때는 시간의 경과에 따라 시스템의 행태가 변화하지만 일단 안정상태에 이르면 시간의 경과에 관계없이 시스템의 행태가 안정하게 된다.

일반적으로 항만의 선석점유율을 산정하는 단순 대기모형에서는 선박도착 시간과 서비스시간이 후속사건의 발생은 선행사건의 발생에 영향을 받지 않는다는 포아송 프로세스를 따르는 것을 가정하고 이는 곧 지수분포(M)의 기억상실증 성질을 의미한다. 대기모형에서 다루는 랜덤 프로세스들과의 관계를 정리하면 다음과 같다.

<그림 3-1>

랜덤 프로세스들의 관계



자료: Leonard Kleinrock, *Queueing Systems Volume I; Theory*, John Wiley

& Sons, Inc., pp. 25, 1975¹¹⁾

먼저 대기이론을 이용하여 정책적으로 제시한 서비스 수준을 만족시킬 수 있는 적정 선석점유율의 산출 과정을 알아보고 다음 이를 안벽능력 산정에 활용한 대표적인 연구들을 살펴보고자 한다.

이때 이 연구들은 공통적으로 서비스 평가지표로 선박의 대기시간비율을 사용하고 있다. 이는 평균 서비스시간에 대한 평균 대기시간의 상대적인 비율로서 대기이론의 M/M/n 모형에서 선박대기시간비율(w/s ratio)은 평균 서비스시간(μ)에 대한 평균도착률(λ)의 상대적인 비율, 즉 선석점유율(ρ)과 선석수(n)만으로 구할 수 있게 된다.

터미널의 안벽이 M/M/n을 따른다고 가정할 때 터미널 내에 선박이 x 대 존재할 확률은 다음과 같다.

$$P_n = \frac{\lambda^n}{n! \mu^n} P_0, \text{ if } 1 \leq n \leq c-1$$

$$= \frac{\lambda^n}{c^{n-c} c! \mu^n} P_0, \text{ if } n \geq c$$

여기서 P_0 은 다음과 같다.

$$P_0 = \left[\sum_{k=0}^{c-1} \frac{(\lambda/\mu)^k}{k!} + \frac{(\lambda/\mu)^c}{c!(1-\lambda/\mu)} \right]^{-1}$$

그리고 선석의 수가 c 일 때의 평균 대기 시간 W_q 은 다음과 같다.

11) 이에 관련된 내용은 본 연구의 범위를 벗어나므로 상세한 설명은 생략하고자 함.

$$\begin{aligned}
W_q &= \frac{1}{n\mu(1-\lambda/n\mu)} \sum_{k=c}^{\infty} P_k \\
&= \frac{1}{n\mu(1-\lambda/n\mu)} \frac{\lambda\mu}{n!(1-\lambda/n\mu)} P_0, \quad \rho = \lambda/\mu \\
&= \frac{1}{n\mu} \frac{\rho^n}{n!} \frac{1}{(1-\rho/n)^2} P_0
\end{aligned}$$

여기서,

c : 선석수

$s = \frac{1}{\mu}$: 평균 서비스시간

$\frac{s}{n(1-\rho/n)}$: 서비스를 제공받는 것이 지연될 확율을 지닌 선박의 평균 대기시간

$\sum_{k=c}^{\infty} P_k$: 선박 도착 순간 유티 선석이 없어 접안 대기가 발생할 확률

따라서 대기시간 비율 W_q/S 는 다음과 같다

$$W_q/S = \frac{1}{n} \frac{\rho}{n!} \frac{1}{(1-\rho/n)^2} P_0$$

윗 식을 보면 W_q/S 비율은 선박 도착분포와 서비스 시간의 각각의 절대 값 크기와는 무관하고 단지 비율에만 관계됨을 알 수 있다. 따라서 대기 시간 비율은 선석 수와 점유율에 의하여 결정된다.

$E_k/E_k/n$ 의 경우에도 근사식 또는 수치해석방법을 적용하여 구한 대기시간

비율표를 참조하여 선석수와 대기시간비율에 대응하는 적정 선석점유율을 구할 수 있다.

이상의 과정을 종합할 때 항만의 목표 서비스 수준에 대응하는 대기시간비율과 항만의 건설 예정 선석수가 정해지면 적정 선석점유율은 간단히 구해짐을 알 수 있다. 그리고 안벽에서 단위기간동안의 적정처리능력은 적정 선석점유율에 연간작업가능시간을 적용하면 안벽에서 수행되는 총작업시간을 구할 수가 있다. UNCTAD의 적정 안벽 처리능력은 안벽에서의 총작업시간에 작업시간당 처리량을 곱하여 산출된 것이다.

3. 국내터미널 건설계획시 선석점유율 적용사례

선석점유시간이란 선박이 · 접안하기 위하여 작업준비, 계선작업에 소요되는 시간까지 포함하는 개념으로 정의되며, 선박 접안시간은 선박이 실제로 부두에 접안해 있는 시간만을 산출한 것이며 선박 접안시간에 이 · 접안시간을 더하면 선석점유시간이된다. 이러한 시간상의 통계는 물동량, 장치장 현황 등 주변여건에 따라 매년 다르게 산출되는데 실제로 각 터미널의 통계상에 나오는 값은 선박 접안시간으로 보아야 할 것이다.

자성대 보고서에는 선박접안율을 1987년 당시 선석대기시간을 1시간으로 가정하고 대기행렬이론을 근거로 구하였는데 선박은 포아송 도착패턴에 따르고 서비스 시간은 지수분포에 따르는 대기행렬인 M/M/n 의 대기행렬의 가정하에 선박접안율을 구하였다. 평균 접안시간은 당시 BOTOC의 통계에 의해 14시간으로 보고 1시간의 평균대기시간을 가정하면 선박대기시간비율(대기시간의 서비스 시간에대한 비율)은 0.07이되고 BCTOC의 선석이 4개이므로 M/M/n 대기행렬의 선박대기시간비율표 (Waiting Time Factor Table)¹²⁾에 의하여 선석점유율은 0.48로 추정하였다.

PRC보고서에서는 선석점유율을 0.6으로 가정하였는데 일반적인 경우 컨테이너 터미널의 선박의 시각간격 분포 및 선석점유시간의 분포를 알량

12) UNCTAD, *Berth throughput : Systematic Methods for Improving General Cargo Operations*, 1973.

2(Erlang-2) 분포로 가정하였을 경우¹³⁾ 3선석 컨테이너 터미널의 선석점유율이 0.6에서의 선박대기시간비율은 0.11로 10%대에 접근하였기 때문이다.

PRC보고서에서는 평균 선석접안시간을 12시간으로, 이접안 시간을 1.25시간으로 가정하였으므로 선박이 선석을 점유하는 시간, 즉 대기행렬이론에서의 평균서비스시간(선석점유시간)은 13.25시간이 되므로 평균 선석대기시간은 1.46시간이 되는 셈이다.

「항만적정능력산정 및 개발기본계획구성」에서의 선석점유율은 UNCTAD에서 권고한 적정접안율 50~70%를 따르고 있다. 또한 대기행렬이론에 의하여 선석수가 많을수록 동일한 접안율하에서 대기시간이 감소한다고 보았다.

이러한 특성을 감안하여 항만적정능력 산출시 선석수가 1인 부두의 경우 선박접안율을 50%, 선석수가 2인 경우 접안율을 55%, 선석수가 3이상의 부두에는 60%를 적용하였다.

광양1단계 개발 보고서에서는 컨테이너선의 대기로 인한 입항기피현상을 방지하는 측면에서 선박대기시간비율을 타 보고서보다는 비교적 낮은 0.1로 가정하였다. 따라서 입항분포에 따른 선석점유율을 예정된 입항분포(Erlang-2 분포)로 가정하여 1선석 1터미널의 경우 0.26, 2선석 1터미널의 경우 0.46을 적용하였다.

부산신항만 개발보고서에서는 선석점유시간을 1986년 BCTOC의 통계와 같은 13.5시간, 대기시간을 1.5시간으로 적용하였다. 이에 따라 선박대기시간비율은 $1.5/13.5=0.11$ 로 산출되었고 입항분포에 따른 선석점유율은 예정된 입항분포(Erlang-2 분포)시 0.6, 무작위 입항분포(지수분포)시 0.5로 산출되었는데 두 분포의 평균인 0.55를 선석점유율로 설정하였다.

13) UNCTAD, *Port Development*, 1985, p.200.

<표 3-7>

기존보고서의 선석점유율 결정요소

구분	자성대 보고서2)	PRC 보고서3)	적정능력1차4)		광양항1단계5)		가덕신항만6)	
적용터미널	BCTOC	PECT	BCTOC	PECT	광양항1단계		가덕신항만	
선석수	4	3	4				3선석기준	
평균선박 접안시간(시간)	14	12	14.62					
평균선박 접안시간(시간)		13.25					13.5	
평균선박 점유시간(시간)	1	1.46					1.5	
이접안준비 시간(시간)	2	1.25	2	2	2	2		
Waiting-Time Factor	0.07	0.11			0.1 (가정)	0.1 (가정)	0.11	
Queue Model	M/M/4	Erlang-2	Erlang-2		Erlang-2		Erlang-2	지수분포
선박접안율 (선석점유율)	0.48	(0.6:가정)	0.6	0.6	0.26	0.26	0.6	0.5

주 : 1) 개정보고서의 경우 보고서상에는 선석점유시간이라고 표현하였으나 실제로는 이용한 BCTOC의 통계가 이·접안 시간을 제외한 선박접안시간만을 명시하였으므로 엄밀한 의미로는 선박접안시간이 정확함.

2) 현존 컨테이너 터미널 및 운영체계의 최대 활용(자성대보고서), 1987

3) 부산항3단계 컨테이너부두 : 컨테이너터미널운영연구(PRC보고서), 1988. 4.

4) 항만적정능력 산정 및 개발 기본계획 구상(1차), 1992. 6

5) 광양항 1단계(2차) 개발사업 실시설계 용역, 1993. 5.

6) 가덕신항만 개발 기본계획 용역보고서, 1996. 12.

제4장 선석점유율 산출방법의 문제점

1. 선박대기시간 분석

1) 주요컨테이너터미널 처리실적

2만톤급피더선석을 포함해 5선석인 자성대부두의 2000년 처리실적은 132만 TEU 이며 54% 선석점유율을 보였다. 그러나 1997년에는 181만TEU 처리하였고, 당시 선석점유율은 91%에 달했었다. 또한 4선석의 선석대부두도 2000년에 128만TEU를 처리해 51%의 선석점유율을 나타냈다. 그러나 1997년에는 145만TEU를 처리하여 60.5%의 선석점유율을 기록하였다.

또한 1선석씩 운영되는 감만터미널의 경우 현대터미널이 2000년에 49만 TEU를 처리하고 한진터미널이 57만TEU를 처리하여 각각 49%와 66%의 선석점유율을 보였다.

<표 4-1> 주요컨테이너터미널 처리실적

구분	처리물동량 (천TEU)	선석점유율 (%)	선박접안율 (%)
자성대			
1997	1,808	91.3	-
2000	1,323	53.9	-
신선대			
1997	1,452	60.5	-
2000	1,282	51.2	-
감만 현대			
1999	461	47.1	43.9
2000	489	48.8	45.4
감만 한진			
1999	425	51.8	44.8
2000	566	65.8	56.4

자료 : 한국컨테이너부두공단, 「2000년 컨테이너화물 유통추이 및 분석」, 2001. 4
 자체조사자료

2) 적정 선석점유율, 선박대기시간 비교

터미널별 처리물동량이 가장 많았던 자성대와 선석대부두의 1997년 실적, 그리고 감만 한진 및 현대 터미널의 2000년 실적을 갖고 당시의 선석점유율로 선박대기시간을 UNCTAD 방식에 의해 산출하고 이를 실제 선박대기 비율과 비교한다.

자성대의 경우 선석점유율이 91.3%에 달했기 때문에 평균대기시간 비율이 UNCTAD의 대기시간 비율표에 의하면 0.718에 이르고 당시 척당평균 서비스 시간이 17시간임을 감안하면 당시 입항한 1,870척의 평균 대기시간이 12

시간이 넘는다. 그러나 자성대의 1997년 대기척수는 284척에 불과하고 이중 12시간 이상 체선 척수는 162척에 불과한 것으로 나타났다.

또한 2000년의 감만 현대와 한진터미널의 경우도 UNCTAD의 선박대기시간비율표에 의한 이론적 대기시간은 척당 평균 각각 4.8시간, 17.9시간씩 대기가 발생해야 하는데, 실제 이 두 터미널에서의 대기척수는 없었던 것으로 보고되었다.

<표 4-2> 선박대기시간 비교분석

	선척 수	처리 물동량 (천TEU)	선척 점유율 (%)	평균 대기시간율	평균척당 서비스시간	평균척당 대기시간 (UNCTAD방식)	실제대기 척수비율 (%)
자성대 (‘97)	5	1,808	91.3	0.718	17	12.2시간	15.2%
신선대 (‘97)	4	1,452	60.5	0.06	18	1.1시간	2.7%
감만현대 (2000)	1	489	48.8	0.368	13	4.8시간	0%
감만한진 (2000)	1	566	65.8	0.812	22	17.9시간	0%

자료 : <표 4-1>과 동일

이와 같이 UNCTAD에서 제시한 선박대기시간 산출결과와 차이가 크게 발생하는 원인은 터미널 운영사들이 선박대기가 발생될 상황을 미리 예측하고 이를 해소하기 위한 스케줄 조정, 장비 및 인원의 추가 투입, 선석계획수정 등을 통해 적절한 대응을 취하기 때문인 것으로 추정할 수 있다.

즉, UNCTAD의 대기행렬모형에 의한 대기시간 비율표가 가정하고 있는 무작위로선박이 입항하고 무작위로 선박에 대한 서비스 시간이 결정된다는 기본가정이 엄격한 스케줄이 요구되는 현재의 컨테이너 전용부두 운영방식에 적용되지 않기 때문일 수 있다.

MIT대의 Frankel 교수도 선석점유율 또는 안벽이용율은 수용가능한 선박의 평균대기시간에 의해 결정되며, 선박의 대기시간은 경제적 관점, 그리고

터미널의 경쟁 차원에서 검토되어야 한다고 하고 있다.¹⁵⁾

여기서 선박은 무작위로 포함한다고 가정하고, 따라서 포아송 분포에 의해 모델화 됨을 지적하고, 또한 선박에 대한 양적하 시간 역시 무작위로 가정하고 있다.

그리고 허용가능한 선박의 대기시간은 선박의 서비스 시간 대비 경험적으로 10~50% 수준이라고 하고 있다. 이에 따라 선석점유율에 의해 안벽능력을 검토하는 방식에서 선석점유율은 선석의 수별로 선박의 평균 서비스시간 (T_B)에 대한 선박평균 대기시간(T_W)의 비율에 따라 결정될 수 있다.

이러한 가정은 선박도착간 분포와, 서비스 시간 분포가 포아송 분포에 따른다는 것을 가정하고 있지만, 컨테이너 선이나 Ro-Ro선과 같이 전용 선석을 사용하고, 엄격한 스케줄에 따라 운항되는 선박에 대해서는 이런 가정을 적용하기가 곤란함을 지적하고 있다.¹⁶⁾

여기서는 우선 선박도착분포와 서비스 시간분포를 포아송 분포로 가정하고 안벽능력을 대기행렬 시스템으로 묘사해 분석한 분석적 방법의 가정과 분석 방법을 살펴본다.

2. UNCTAD 대기행렬모형의 기본 가정

국내 항만개발에서 컨테이너 전용부두의 적정 처리능력을 산정하는 방식은 UNCTAD 가 1973년에 발간한 「Berth Throughput」과 1985년에 발간한 「Port Development」에 제시한 내용을 근간으로 하였다. 그렇지만 해운여건이 급변한 최근의 상황과 비교하여 UNCTAD가 제시하는 방식이 가지는 전제조건에 포함된 가정과 조사 당시 주변 상황은 현 항만이 지니는 특성을 제대로 반영하지 못하는 것으로 판단된다.

따라서 최근의 흐름과 비교하여 UNCTAD의 연구당시의 상황들을 먼저 정리해 보면 다음과 같다.

15) E. G. Frankel, *Port Planning and Development*, 1987.

16) Ibid., pp. 171~172

- (1) 컨테이너선의 발전 추세를 살펴볼 때 현재로 보면 소형선인 1,833~3,718톤급의 재래정기선에 대한 자료가 조사·분석되었다.
- (2) 부정기선의 입항 비율이 높은 초기 정기선부두가 위주로 되어 하역 시스템이나 선박 운항계획의 측면에서 볼 때 엄격한 운항계획과 높은 하역 생산성을 요구받는 컨테이너 전용부두의 특성이 고려되지 못했다.
- (3) 컨테이너터미널의 운영형태 및 방식에 대해 상세한 분류가 선행되지 않아 선박도착시간이나 서비스시간 분포에 있어 개별 특성에 대한 분석이 없다.

또한 모형 작성시의 전제조건은 안벽능력 산정시 가장 중요한 부두에서의 선박도착간 시간분포형태에 대해 일반적인 벌크화물을 취급하는 일반부두의 경우 지수분포, 전용부두의 경우 열량-2분포를 따르는 것으로 제시하고 있다.¹⁷⁾

여기서 선박도착간 분포와 서비스 시간분포를 Erlang(E_2)분포에 따르는 것으로 제시하였는데 물론 당시의 터미널 상황에서 E_2 분포로 통계적 유의성을 가졌기 때문일 것이다. 그러나 열량분포로 제시한 이면에는 선박대기시간 비율(W/S ratio)를 선석점유율(ρ)과 선석수(n)으로 표시할 수 있는 식을 유도 할수 있기 때문이었을 것이다.

즉 열량분포(E_2)는 k 개의 지수분포로 구성될 수 있는 분포로 마치 지수분포의 특성을 갖는 식으로 유도할 수 있는데, 지수분포만이 유일하게 대기시간비율(W/S)를 선석수(n)과 선석점유율(ρ)로 표시할 수 있기 때문이다. 만약 지수분포(M)과 열량분포가 아닐 경우에는 선박대기시간비율을 선석점유율로 도출할 수가 없기 때문이다.

지수분포와 열량분포는 분포의 특성으로 보면 무작위(random) 분포에 속한다. 따라서 본 분석에는 우선 선박도착간 분포와 서비스시간분포의 기본가정

17) UNCTAD, *Port Development*, 1985, p.220.

이 무작위성인데 이에 대한 타당성을 검토해 본다. 또한 UNCTAD의 모형에서는 열량분포를 가정하였기 때문에 선박대기 시간비율표를 선석수와 선석 점유율로 간단히 표시 할 수 있었는데, 현실적으로는 random성을 갖는 분포라도 열량 분포가 아닐 경우가 많은데 따른 문제점을 검토한다.

3 UNCTAD 모형작성 당시와 현재의 여건변화

1) 선박의 대형화와 하역시스템, 통신시스템의 발전

UNCTAD에서 1969년에서 1972년에 걸쳐 선박대기시간비율표를 작성하기 위해 조사했던 대상선박은 평균 1,833톤에서 3,718톤 규모의 선형이었다. 1960년대 이전까지도 정기선의 해운서비스는 전문화, 세분화되지 못했으며, 완제품, 반제품, 승객을 모두 운송하는 형태이었다. 즉 유럽국가들이 아시아, 아프리카, 남미등에 있는 그들 식민지간과의 항로가 주 운송항로이었고 이때의 무역형태는 완제품을 수출하고 식민국가에서 원재료를 수입하는 형태를 보였다.¹⁸⁾ 즉 당시의 선박은 정기 해운과 부정기선 해운이 모두 가능한 형태였다. 실제로 UNCTAD에서 조사한 항만¹⁹⁾ Mombasa, Dar es Salaam, Khorramshahr 는 각각 케냐, 탄자니아, 이란의 항만이었다. 당시 이들 항만의 작업방식은 노동집약적인 방법에서 일부 자본집약적 및 기계화로 전환되는 시기였다.

그러나 UNCTAD의 조사 자료에서 보면 1,800톤~3,700톤 규모의 형태로 보면 매우 소형선박인데 불구하고 하역 작업시간이 평균 3.4일에서 7.5일씩 소요된 것을 보면, 조사 당시까지도 노동집약적 하역방식에 의한 것이었음을 알 수 있다.

비능률적인 하역작업을 개선하기 위해 컨테이너화로 화물의 단위화, 그리고 이를 처리하는 각종 장비, 하역시스템의 기계화, 그리고 전용선박과 전용터

18) Martin Stopford, *Maritime Economics*, 1997, pp.338-343

19) UNCTAD, *Port Development*, 1985, p21

미널의 구축이 진행되었다. 1958년에 캘리포니아와 하와이간 해상운송에 있어 컨테이너선의 처음으로 도입되었으며, 1966년 Sea-Land에 의해 북대서양에 컨테이너선이 취항된 것이 해상컨테이너 서비스의 시초였다.

이와같이 1960년대 후반에 도입된 700 - 1,500TEU 선박을 제1세대 컨테이너선이라 부르고 있으며, 현재는 7,000TEU 급의 제 7세대 선박이 취항하고 있으며, 10,000TEU가 넘는 제 8세대 선박의 출현을 앞두고 있는 상황이다.

따라서 UNCTAD에서 조사한 컨테이너전용선박이 아닌 재래 정기화물선 화물 정기선이 운항하던 환경과 현재의 제 7세대 컨테이너전용 선박이 운항하는 터미널의 환경은 크게 다를 수밖에 없다.

최근 컨테이너터미널의 여건 변화에 따라 능력산정을 수행함에 있어 영향을 미치는 주요 요인을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 입항선박에 있어 정요정시 서비스가 적용되는 정기선의 비중이 확대되면서 선박 운항계획이 보다 엄격해졌다.
- (2) 대상 컨테이너선의 대형화가 지속적으로 추진되면서 하역시스템의 효과를 높이기 위해 항만의 기능이 허브 및 피더항으로 구분 운영되고 있다.
- (3) 항만 하역작업 생산성이 향상되고 장비배정 전략을 포함하는 하역시스템의 유연성이 높아져 서비스시간의 패턴이 변화되고 있다.
- (4) 정보·통신의 발달에 따라 선박 운행계획에 대응하는 효율적 운영시스템의 도입되어 선박의 입출항 시점에 대한 조정이 가능해졌다.

<표 4-16>

컨테이너선의 세대별 발전현황

구 분		I 세대	II세대	III세대	IV세대	V 세대	VI세대	VII세대	VIII세대
발전방향			대형/ 고속화	에너지 절약화	거대화		초거대화		
명 칭		피더형	핸디형	준파 나막스	파나막스	포스트 파나막스	슈퍼포스트파나막스		울트라 막스
시 기		60년대 후반	70년대	70년대 말	80년대 후반	90년대 전반	90년대 후반	90년대 말	21세기 초
선형(TEU)		700~ 1,500	1,800~ 2,300	2,000~ 2,500	2,500~ 4,400	4,300~ 5,400	6,000~ 6,670	7,000~ 8,700	10,000~ 13,000
대 표 선 박	건조선사	NYK	MOL	Safmarine	Hapag-Lloy d	APL	Maersk	Maersk	-
	건조연도	1968년	1973년	1979년	1991년	1988년	1996년	1997년	(2005년)
	선명	Hakonemar u (箱根丸)	뉴저지호	S.A Waterpark	Levenkuse n E	P. Truman	Regina M.	Souverin M.	-
선 박 제 원	적재 능력(TEU)	752	1,887	2,464	4,626	4,340	6,418	6,600	(13,000)
	선장-Lpp (m)	187.0	263.3	247.4	281.6	260.8	302.3	331.5	(365.0)
	선장-Loa (m)	200.0	280.0	258.5	294.0	275.2	318.2	247.0	(380.0)
	선폭(m)	26.0	32.2	32.2	32.25	39.4	42.8	42.8	(55.0)
	선창깊이 (m)	15.5	19.6	24.1	21.4	23.6	24.1	24.1	(30.0)
	최대흘수 (m)	10.5	11.5	13.2	13.5	12.5	14.0	14.5	(15.0)
	톤(GT)	16,240	37,799	52,615	53,800	50,206	81,488	91,560	(150,000)
적 재 규 모	선창내(단)	6	7~9	8	8	8	9	9	(10)
	갑판(단)	2	2~3	3	5	4	6	6	(7)
	선창횡적 수(개)	7	9	10	11	12	14	14	(18)
	갑판 횡적수(개)	9	12	13	13	16	17	17	(22)
추 진	주기관 (마력)	27,800	69,600	34,840	49,640	59,960	74,640	74,555	(140,000)
	항해속도 (노트)	22.6	26.0	19.5	24.5	24.2	25.0	26.4	-
	추진축수 (개)	1	1	1	1	1	1	1	(2)

자료 : 해외해사정보(일)

2) 문제점 종합

UNCTAD에서 작성한 선박대기 시간비율표는 단지 선석점유율과 선석수에 의해 서비스 시간에 대한 선박대기시간비율(W/S ratio)을 구할 수 있도록 한 편리성 때문에 서비스 수준이라 할 수 있는 W/S ratio를 정책적으로 결정할 경우 쉽게 선석점유율을 구할 수 있고, 이는 곧 계획 대상 안벽능력을 바로 조회할 수 있는 큰 장점을 갖고 있다. 이에 따라 우리나라도 이 표에 근거하여 항만기본계획의 규모를 정하는데 활용해 왔다.

그러나 이 표를 앞으로도 계속 항만개발 계획에 안벽능력의 산출표로 활용하는데 몇가지 문제점이 있다. 우선 동 선박대기 시간비율표 작성의 통계적 기본가정이 선박도착간 시간분포와 안벽에서의 선박에 대한 양적하 서비스 시간분포가 무작위(random)라는 분포의 특성을 갖고 있는데 비해, 실제 현재의 컨테이너 전용터미널의 경우는 선박도착의 스케줄이 매우 엄격하게 유지·관리되고 있으며, 선박의 도착 및 하역서비스는 앞선 선박, 또는 다음 도착예정선박과 긴밀하게 연계되어 계획되고 있다. 따라서 현재의 컨테이너 선의 도착과 서비스 분포는 무작위성의 기본가정인 IID(independently, and identically distributed)에 따르지 않을 것으로 판단된다.

두 번째는 부산항의 실적치를 갖고 분석한 결과 UNCTAD의 선박대기 시간비율표에 의하면 실적 선석점유율로 척당평균 대기시간을 산출해 보면 대기시간이 평균 12시간-18시간씩 나타나지만 실제대기비율은 이보다 매우 낮게 나타나고 있어 실적치와의 차이를 보이고 있다.

세 번째는 UNCTAD의 모형이 선박도착분포와 서비스시간분포를 무작위로 가정하고 또한 열량분포에 따르는 것을 가정하였기 때문에 무작위 분포인 경우라도 열량분포, 즉 정수 k 개의 지수분포로 구성되는 분포가 아닐 경우 동선박 대기시간 비율표를 사용할 수 없는 문제점이 있다.

제5장 국내 컨테이너터미널에 대한 실증분석

항만개발계획에 있어 대기시스템 이론의 적용을 위한 기초 자료를 구하기 위해 국내 컨테이너 전용부두의 실적자료를 중심으로 선박도착간격 분포와 접안시간 분포를 분석하였다. 현재 국내 컨테이너 전용부두는 부산항에 5곳, 광양항에 1곳이 운영중이다. 전용부두들의 총부두길이는 6,547m로 2000년도의 총처리물량은 568만TEU이었다.

<표 5-17>

컨테이너 전용부두 현황

구 분	자성대	신선대	감만부두	광양항 (1단계)	우암부두	감천부두
운영개시	'78.9 (피더 : '96.9)	'91.6 (1선석 : '97.9)	'98.4	'98.7	'96.9	'97.11
부두길이	1,447m	1,200m	1,400m	1,400m	500m	600m
전면수심	-12.5m	-14m~-15m	-15m	-15m	-11m	-13m
하역능력	100만TEU	128만TEU	120만TEU	96만TEU	30만TEU	37만TEU
접안능력	5만톤급 4척 1만톤급 1척	5만톤급 1척	5만톤급 4척	5만톤급 4척	2만톤급 1척 5천톤급 2척	5만톤급 2척
부지면적 (CY면적)	647천m2 (394천m2)	1,039천m2 (672천m2)	731천m2 (336천m2)	840천m2 (500천m2)	184천m2 (120천m2)	148천m2 (105천m2)

자료: 한국컨테이너부두공단, 「2000년도 컨테이너화물 유통추이 및 분석」, 2001. 4.

분석의 전제조건은 전용부두의 경우 수출입 및 환적화물의 공급이 시설의 잠재능력에 대비하여 적절하고 수요증가 등의 변화에 따라 처리실적 및 서비스 수준의 변화가 발생된다는 점이다. 또한 각 터미널별로 하역작업의 여

건 및 입항 대상선박의 성격에 차이가 있어 선박 도착간격 분포와 접안시간 분포의 특성이 다르다고 가정하고 각 터미널별로 분포를 추정하였다.

분석에는 5곳의 터미널이 대상이 되어 자성대, 신선대, 감만(한진, 대한통운) 그리고 우암부두가 포함되었다. 분석결과의 오차범위를 줄이기 위해 '98년부터 2000년까지의 3개년도 위주로 자료가 수집되었지만 운영사의 사정에 따라 약간의 차이를 두었다. 예를 들면 자성대부두의 경우 '99년 운영사의 변경에 따라 과거 실적의 수집이 곤란하여 2000년1월~2001년10월의 선박 입출항 자료로서 분석되었다.

본 실증분석에서는 통계적 기법을 사용하여 조사된 선박도착간격시간, 접안시간에 관한 자료가 어떤 이론적 확률분포(theoretical distribution)에 대해 적합한가를 검증하였다. 본 연구에서는 분석의 신뢰도를 높이기 위해 검증된 분석도구로서 Systems Modeling사의 Input Analyzer를 사용하였다. Input Analyzer는 입력 자료에 대한 점 통계량(point statics) 및 히스토그램 분석 결과를 제공하고 이를 기초로 관찰 자료가 이론적 분포에 대해 어느 만큼 적당한 것인지를 밝히는 적합도 검증(goodness of fit test)을 실시한다.

일반적으로 적합도 검증방법으로는 χ^2 -검증(chi-square test) 또는 Kolmogorov-Smirnov 검정이 사용되는데 본 연구에서는 Kolmogorov-Smirnov 검정 결과를 자료들의 이론적 확률분포에 대한 적합 여부에 대한 판단 기준으로 삼았다. 일반적으로 표본의 크기에 따라 검증방법의 선택이 달라지는데 본 실증분석 중 일부 터미널에서는 제한된 표본이 수집되었기에 때문이다. 즉, χ^2 -검증에서는 표본들의 크기가 적으면 주위의 구간을 합해야 하는 경우가 발생하는데, 이 경우 중요한 성질들을 잃어버릴 수가 있다.

Kolmogorov-Smirnov 검정은 1939년 Smirnov에 의하여 제안되었고, Kolmogorov에 의하여 더욱 연구되었다. 여기서는 검정에서의 확률분포는 연속이고 평균과 분산은 알고 있는 것을 가정으로 한다. 주요점에 대한 Smirnov표가 1948년 완성되었는데, χ^2 -검정과 마찬가지로 Kolmogorov-Smirnov 검정은 관측된 자료들의 분포와 어떤 이론 이론적 분포와의 일치에 관한 것을 검정하는데 사용된다. 이 검증은 이론적 확률분포

로부터 얻은 누적확률분포와 입력자료로부터 얻은 누적확률분포를 비교함으로써 검정이 시작된다. 그런 후 각 구간에서 이론치와 관측치의 절대값 차이가 가장 큰 값을 찾고, 다음에 Kolmogorov-Smirnov 주요점표에서 구한 값과 비교하여 결론을 내리게 된다²⁰⁾.

1. 선박도착간격분포 추정

1) 신선대부두

1998년~2000년도에 신선대부두에 입항한 2,956항차에 대한 선박도착간격 분포를 추정한 결과 평균 534분마다 선박이 도착하는 것으로 나타났다. 선박도착간격에 대한 분포추정결과 베타분포의 자승 오차가 0.001716로 가장 적게 나타났지만 Kolmogorov - Smirnov 검정 결과 유의수준 5%(p-value < 0.01)에서 기각되었다.

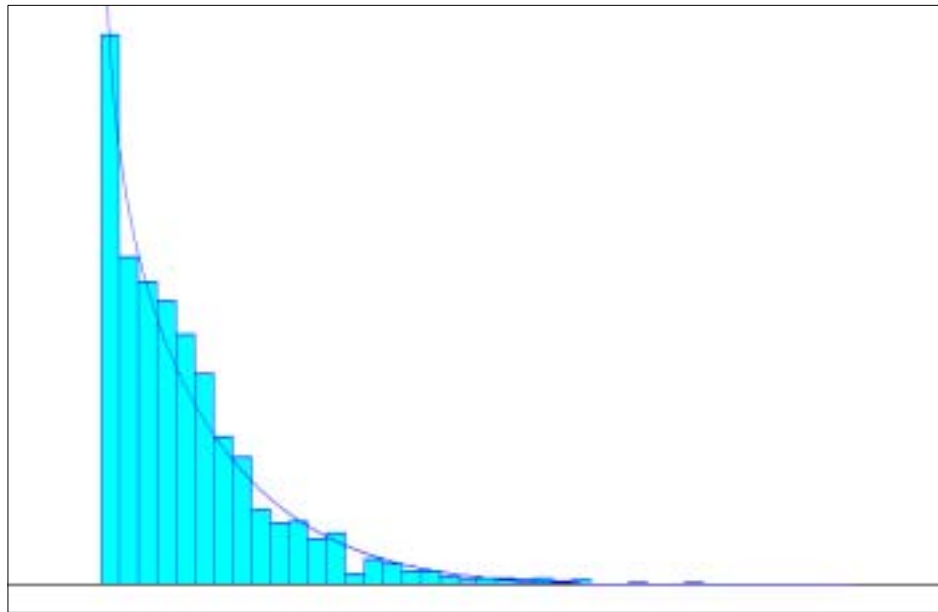
<표 5-18> 신선대부두 선박도착간격 분포 추정결과

구 분	분석치	비 고
평균	534	
최소값	0.01	
최대값	4.62e+3	
분포	베타분포	$\alpha = 0.802$ $\beta = 6.13$, scale factor = 4.62e+3
자승오차	0.001716	
검정 통계량	0.0414	Kolmogorov-Smirnov 검정
p-value	< 0.01	Kolmogorov-Smirnov 검정
관측수	2,956	

20) 김강현 · 백두권, 「시뮬레이션」, 한국방송대학교출판부, 1998, p.185.

<그림 5-15>

신선대부두 1998~2000년도 선박도착간격 분포



2) 자성대부두

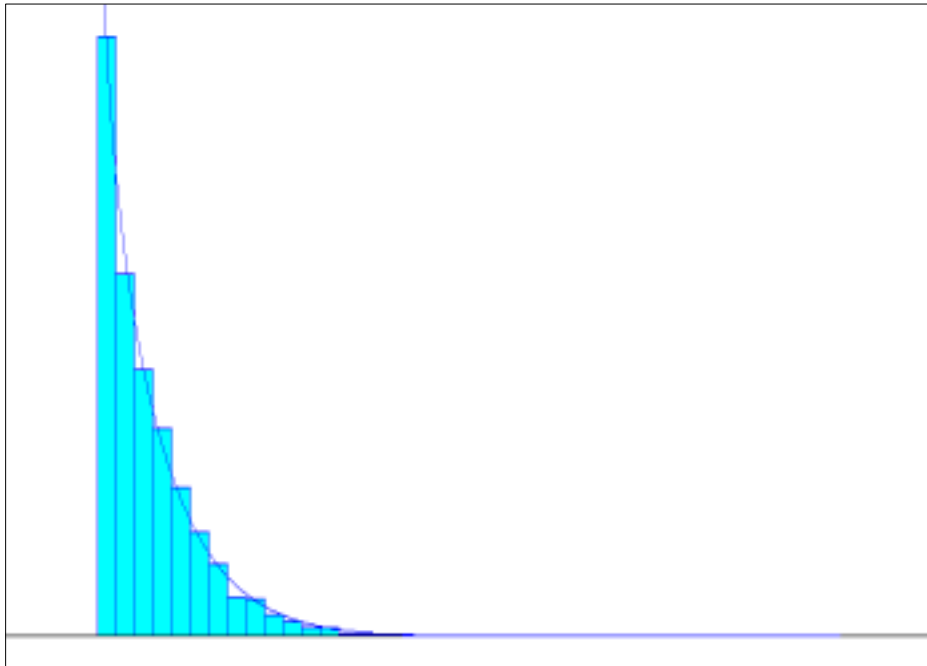
2000년~2001년(10월)도에 자성대부두에 입항한 3,004항차에 대한 선박도착 간격 분포를 추정한 결과 평균 321분마다 선박이 도착하는 것으로 나타났다. 선박도착간격에 대한 분포추정결과 베타분포의 자승 오차가 0.000497로 가장 적게 나타났지만 Kolmogorov - Smirnov 검정 결과 유의수준 5%(p-value < 0.01)에서 기각되었다.

<표 5-19> 자성대부두 선박도착간격 분포 추정결과

구 분	분석치	비 고
평균	321	
최소값	0	
최대값	4.66e+3	
분포	베타분포	$\alpha = 0.844, \beta=11.4, \text{scale factor}=4.66\text{e}+3$
자승오차	0.000497	
검정 통계량	0.0304	Kolmogorov-Smirnov 검정
p-value	< 0.01	Kolmogorov-Smirnov 검정
관측수	3004	

<그림 5-16>

자성대부두 선박도착간격 분포



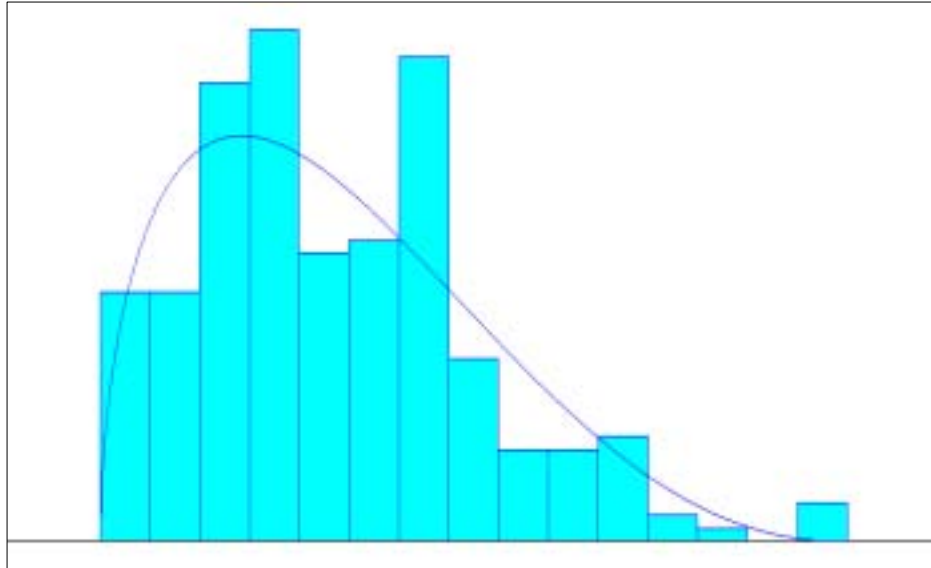
3) 한진감만터미널

2000년도에 한진감만터미널에 입항한 236항차에 대한 선박도착간격 분포를 추정한 결과 평균 2,230분마다 선박이 도착하는 것으로 나타났다. 선박도착간격에 대한 Kolmogorov - Simrnov 검정 결과 유의수준 10%(p-value > 0.15)에서 모수가 각각 1.53, 3.29인 베타분포를 따르는 것으로 나타났다. 이때의 자승 오차는 0.009635로 나타났다.

<표 5-20> 한진감만터미널 선박도착간격 분포 추정결과

구 분	분석치	비 고
평균	2.23e+3	
최소값	409	
최대값	6.13e+3	
분포	베타분포	$\alpha = 1.53, \beta=3.29, \text{scale factor}=5.72e+3$
자승오차	0.009635	
검정 통계량	0.0721	Kolmogorov-Smirnov 검정
p-value	> 0.15	Kolmogorov-Smirnov 검정
관측수	236	

<그림 5-17> 한진감만터미널 선박도착간격 분포



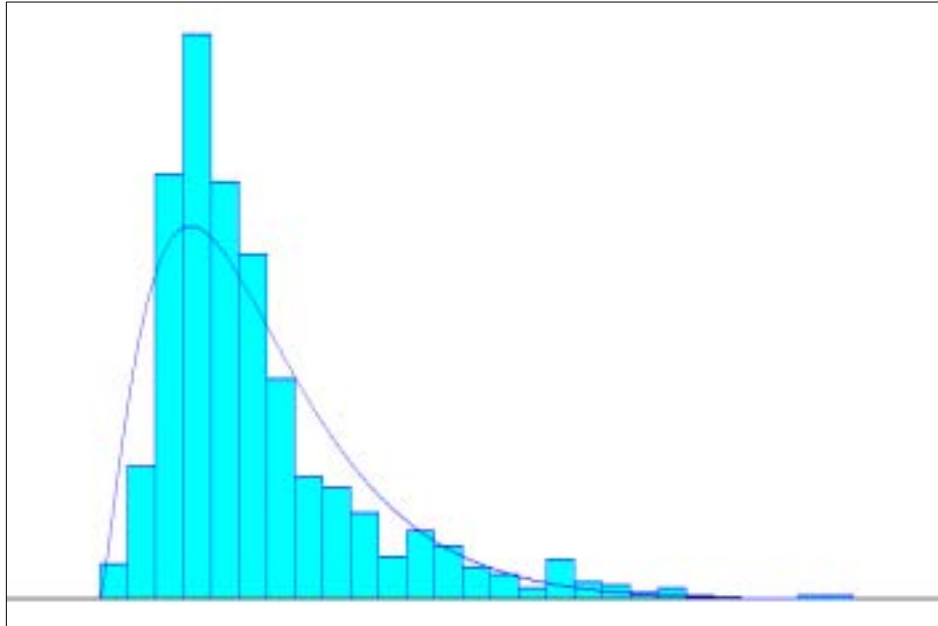
4) 대한통운감만터미널

1999년~2000년도에 대한통운감만터미널에 입항한 777항차에 대한 선박도착 간격 분포를 추정한 결과 평균 1,350분마다 선박이 도착하는 것으로 나타났다. 선박도착간격에 대한 분포추정결과 감마분포의 자승 오차가 0.010954로 가장 적게 나타났지만 Kolmogorov - Smirnov 검정 결과 유의수준 5%(p-value < 0.01)에서 기각되었다.

<표 5-21> 대한통운감만터미널 선박도착간격 분포 추정결과

구 분	분석치	비 고
평균	1.35e+3	
최소값	60	
최대값	6.42e+3	
분포	감마분포	$\alpha = 2.33, \beta=578$
자승오차	0.010954	
검정 통계량	0.0817	Kolmogorov-Smirnov 검정
p-value	< 0.01	Kolmogorov-Smirnov 검정
관측수	777	

<그림 5-18> 대한통운감만터미널 선박도착간격 분포



5) 우암부두

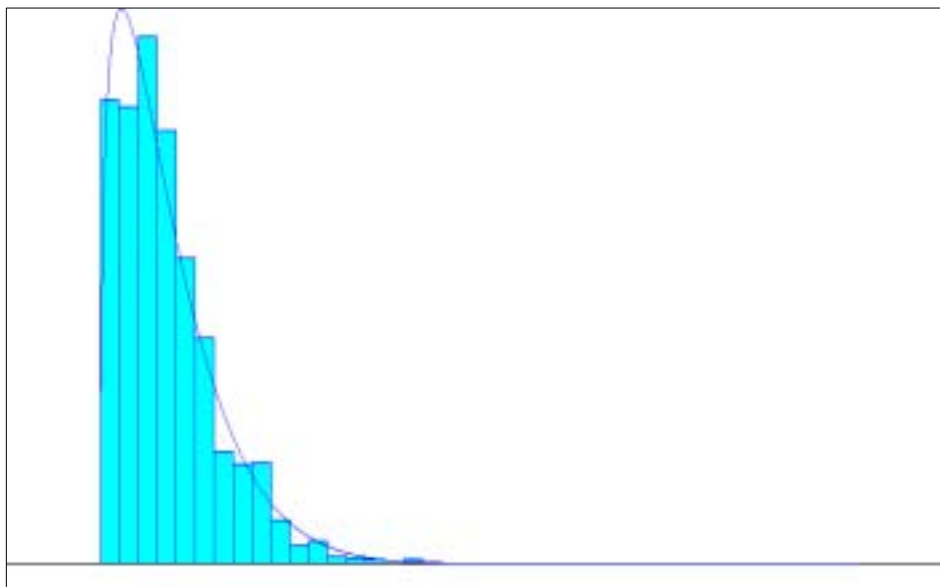
1998년~2000년도에 우암부두에 입항한 2,273항차에 대한 선박도착간격 분포를 추정한 결과 평균 925분마다 선박이 도착하는 것으로 나타났다. 선박도착간격에 대한 분포추정결과 베타분포의 자승 오차가 0.002299로 가장 적게 나타났다지만 Kolmogorov - Smirnov 검정 결과 유의수준 5%(p-value < 0.01)에서 기각되었다.

<표 5-22> 우암부두 선박도착간격 분포 추정결과

구 분	분석치	비 고
평균	925	
최소값	10	
최대값	1.05e+4	
분포	베타분포	$\alpha = 1.37, \beta=14.2, \text{scale factor}=1.05e+4$
자승오차	0.002299	
검정 통계량	0.0361	Kolmogorov-Smirnov 검정
p-value	< 0.01	Kolmogorov-Smirnov 검정
관측수	2273	

<그림 5-19>

우암부두 선박도착간격 분포



2. 선박작업시간분포 추정

1) 신선대부두

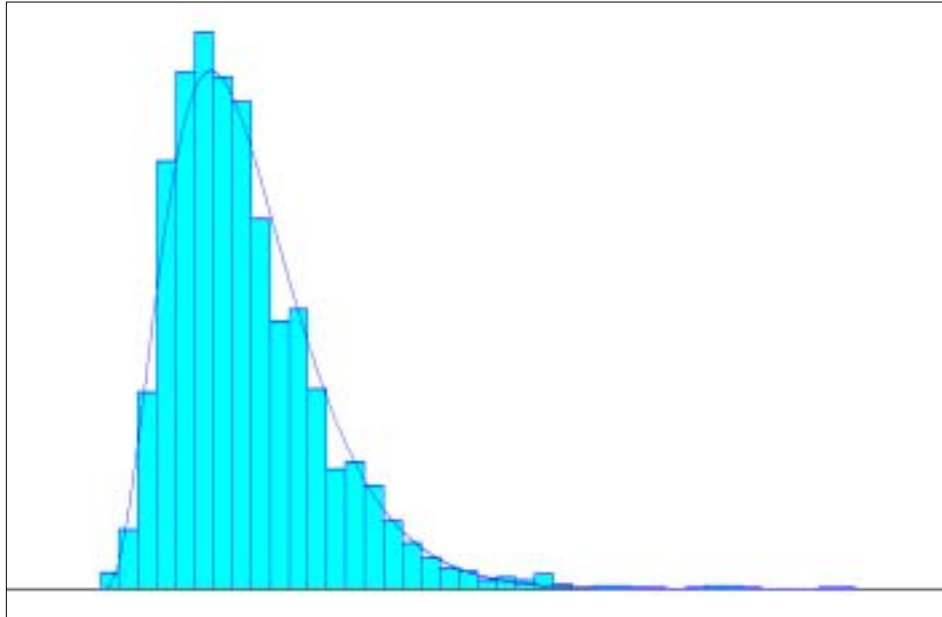
1998년~2000년도에 신선대부두에 입항한 2,956항차에 대한 선박접안시간 분포를 추정한 결과 평균 1,000분으로 나타났다. 선박접안시간에 대한 분포추정결과 일랑분포의 자승 오차가 0.000937로 가장 적게 나타났지만 Kolmogorov-Smirnov 검정 결과 유의수준 5% ($p\text{-value} < 0.01$)에서 기각되었다.

<표 5-23> 신선대부두 선박접안시간 분포 추정결과

구 분	분석치	비 고
평균	1e+3	
최소값	140	
최대값	4.58e+3	
분포	일랑분포	$\alpha = 216, \beta = 4$
자승오차	0.000937	
검정 통계량	0.0318	Kolmogorov-Smirnov 검정
p-value	< 0.01	Kolmogorov-Smirnov 검정
관측수	2,956	

<그림 5-20>

신선대부두 선박접안시간 분포



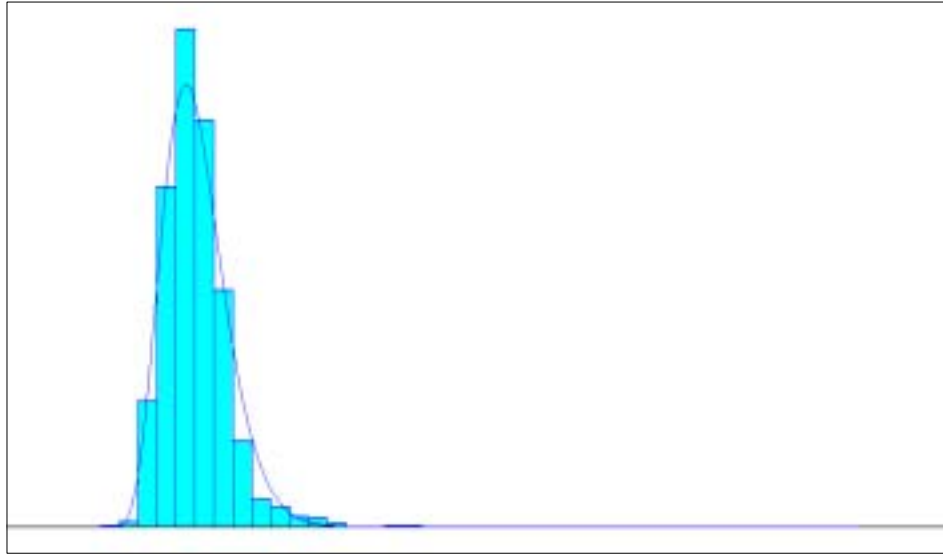
2) 자성대부두

2000년~2001년(10월)도에 자성대부두에 입항한 3,005항차에 대한 선박작업 시간 분포를 추정한 결과 평균 937분으로 나타났다. 선박접안시간에 대한 분포추정결과 일랑분포의 자승 오차가 0.002722로 가장 적게 나타났지만 Kolmogorov-Smirnov 검정 결과 유의수준 5% ($p\text{-value} < 0.01$)에서 기각되었다.

<표 5-24> 자성대부두 선박접안시간 분포 추정결과

구 분	분석치	비 고
평균	937	
최소값	0	
최대값	1.01e+4	
분포	E_9 분포	k=9, $\alpha = 148$
자승오차	0.002722	
검정 통계량	0.0424	Kolmogorov-Smirnov 검정
p-value	< 0.01	Kolmogorov-Smirnov 검정
관측수	3,005	

<그림 5-21> 자성대부두 선박접안시간 분포



3) 한진감만터미널

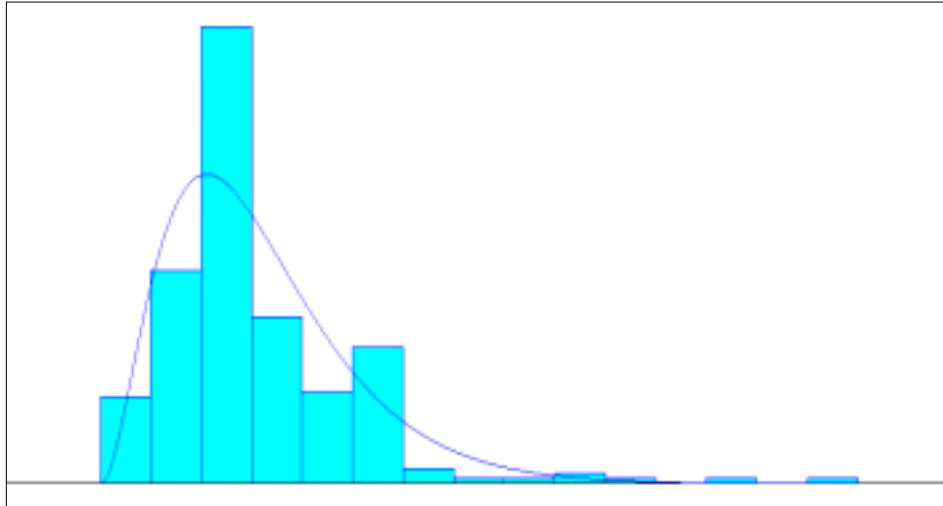
2000년도에 한진감만터미널에 입항한 237항차에 대한 선박작업시간 분포를 추정한 결과 평균 1,650분으로 나타났다. 선박접안시간에 대한 Kolmogorov-Simrnov 검정 결과 유의수준 5%(p-value = 0.0292)에서 모수가 각각 3,과 487인 E_3 분포를 따르는 것으로 나타났다. 이때의 자승 오차는 0.027491로 나타났다.

<표 5-25> 한진감만터미널 선박접안시간 분포 추정결과

구 분	분석치	비 고
평균	1.65e+3	
최소값	184	
최대값	7.14e+3	
분포	E_3 분포	k=3, α = 487
자승오차	0.027491	
검정 통계량	0.094	Kolmogorov-Smirnov 검정
p-value	0.0292	Kolmogorov-Smirnov 검정
관측수	237	

<그림 5-22>

한진감만터미널 선박접안시간 분포



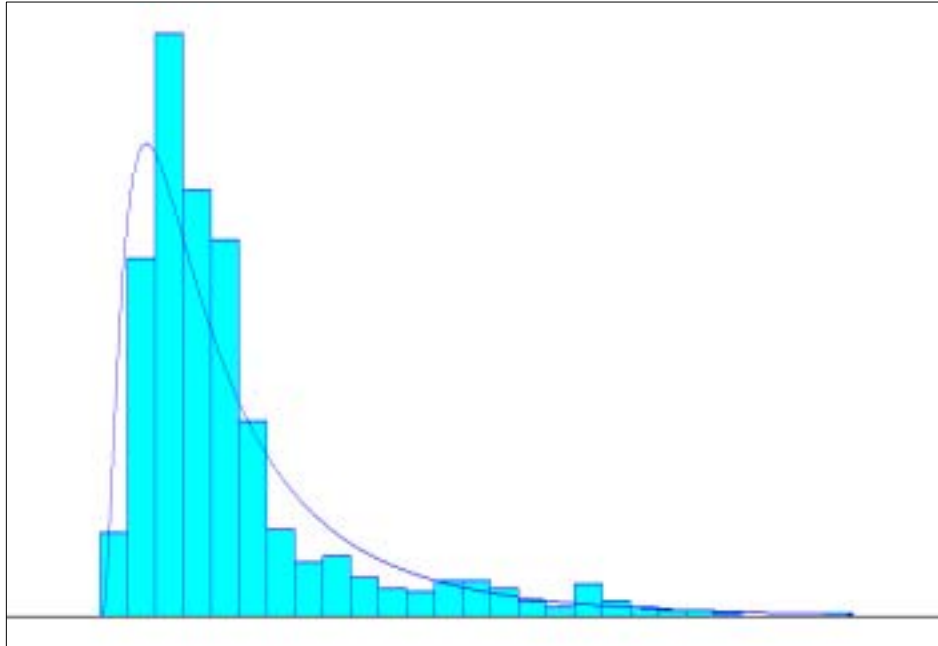
4) 대한통운감만터미널

1999년~2000년도에 대한통운감만터미널에 입항한 777항차에 대한 선박작업 시간 분포를 추정한 결과 평균 1,120분으로 나타났다. 선박접안시간에 대한 분포추정결과 대수정규분포의 자승 오차가 0.012638로 가장 적게 나타났지만 Kolmogorov-Smirnov 검정 결과 유의수준 5% ($p\text{-value} < 0.01$)에서 기각되었다.

<표 5-26> 대한통운감만터미널 선박접안시간 분포 추정결과

구 분	분석치	비 고
평균	1.12e+3	
최소값	60	
최대값	6.08e+3	
분포	대수정규분포	$\alpha=1.17e+3$ $\beta=1.26e+3$
자승오차	0.012638	
검정 통계량	0.0987	Kolmogorov-Smirnov 검정
p-value	< 0.01	Kolmogorov-Smirnov 검정
관측수	777	

<그림 5-23> 대한통운감만터미널 선박접안시간 분포



5) 우암부두

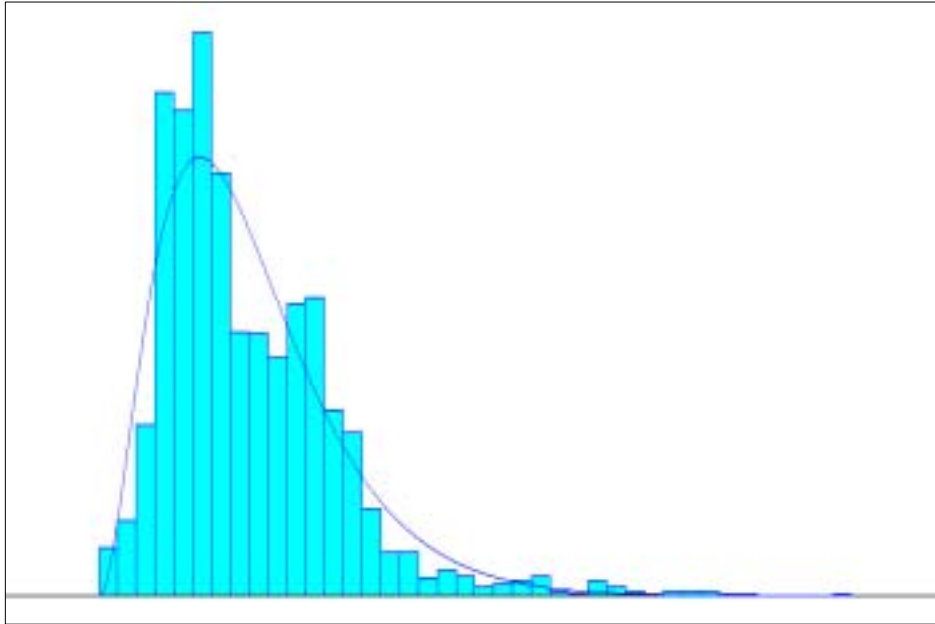
1998년~2000년도에 우암부두에 입항한 1,674항차에 대한 선박접안시간 분포를 추정한 결과 평균 1,000분으로 나타났다. 선박접안시간에 대한 분포추정결과 일량분포의 자승 오차가 0.004949로 가장 적게 나타났지만 Kolmogorov-Smirnov 검정 결과 유의수준 5% ($p\text{-value} < 0.01$)에서 기각되었다.

<표 5-27> 우암부두 선박접안시간 분포 추정결과

구 분	분석치	비 고
평균	1e+3	
최소값	120	
최대값	4.52e+003	
분포	일량분포	k=3, $\alpha=295$
자승오차	0.004949	
검정 통계량	0.0545	Kolmogorov-Smirnov 검정
p-value	< 0.01	Kolmogorov-Smirnov 검정
관측수	1674	

<그림 5-24>

우암부두 선박접안시간 분포



3. 분석종합

이상의 분석결과를 각 터미널별 선박도착간격 분포 및 접안시간 분포로 요약하면 다음 표와 같다. 각 터미널에 대해서는 연도별 자료를 통합하여 별도로 분포를 추정하였다.

<표 5-28> 도착간격 및 작업시간 분포 추정 결과

구 분	도착간격분포	접안시간 분포	대기시스템
신선대부두	-	-	없음
자성대부두	-	-	없음
대한통운감만터미널	-	-	없음
한진감만터미널	-	E_3	없음
우암부두	-	-	없음

종합하면 국내 컨테이너 전용부두의 입항선박에 대한 도착간격시간의 분포를 추정할 때 UNCTAD에서 제시한 E_2 분포를 따른다고 볼 수 없다. 일부 터미널의 특정 연도의 자료를 분석하면 컨테이너 전용부두에 대해 포아송 프로세스를 적용할 수 있지만 대부분의 경우 적용이 곤란하다고 판단된다. 특히 선박도착간격분포는 포아송 프로세스를 적용하기 힘든 다양한 형태의 분포로 추정되었지만 통계적으로 유의한 경우도 발견하기 힘들었다.

이러한 분석결과는 선박도착분포의 경우에 입항선박의 접안방식에 있어 가정되어온 선입선출 원칙과 입항시점의 독립성을 전제로 추정해온 기존의 방식에 문제가 있음을 의미한다. 즉, $E_2/E_2/n$ 모형 등을 통해 적정 선석점유율을 산정할 경우 실적치와는 많은 차이가 발생하는 원인으로 볼 수 있다. 예를 들어 전용부두의 운영으로 화물 집화 및 효율적 터미널 운영이 보장되는 감만부두의 선석점유율을 이론치와 비교해 보고자 한다.

<표 5-29> 부산항 감만부두 운영 터미널별 처리실적

구 분		1998	1999	2000
총처리량 (만TEU)	세방	7.9	26.3	43.9
	한진	28.7	42.4	56.5
	현대	29.8	46.1	49.8
	대한통운	25.7	34.7	47.3
	평균	23.0	37.4	49.4
선석점유율 (%)	세방	43.0	38.0	66.0
	한진	40.2	51.8	65.8
	현대	48.8	47.1	48.8
	대한통운	59.6	46.3	62.5
	평균	47.9	45.8	60.8

자료: KMI 조사자료, 운영사 내부자료

주: 선석점유율 = (선석점유시간) / (연간작업일수 × 24시간 × 선석수)

주: 연간작업일수 : 363일

주: 일부수치에서 지방청 PORT-MIS의 자료와 운영사의 내부자료에 일부 차이가 있음.

2000년도 실적치를 보면 감만부두에서 입항선박의 대기비율은 0.0% 즉, 선박 대기시간비율이 0.0%로 기존의 서비스 수준인 10%에 비해 월등히 낮다. 그러나 이때의 선석 점유율이 적정 서비스수준을 만족하는 선석 점유율이라고 가정하더라도 지금까지 적정 선석점유율로 채택해 온 46%에 비해 매우 높은 수치를 보이고 있다. 더욱이 감만부두의 각 터미널이 한 선석으로 운영되는 점을 감안한다면 E₂/E₂/1 대기시스템에서 제시되는 적정 선석 점유율은 26%로 두배 이상 차이가 있다.

제6장 선석처리능력 산정 방법 대안 제시

1. 시뮬레이션 방식을 통한 선석처리능력 제안

지금까지의 항만개발에 관한 연구들에서는 선박도착간격시간에 대해 포아송 프로세스를 따르는 확률변수로 정의하여 컨테이너터미널의 최적 자원 소요 규모를 분석해 왔다²⁰⁾²¹⁾. 그렇지만 컨테이너터미널의 선박도착은 기본적으로 터미널에 기항하는 각 선사의 항로별 운항계획에 의하여 터미널에 입항한다. 또한 터미널은 각 터미널에 기항하는 각 선사의 항로별 운항계획에 근거한 입항예정 시각을 고려하여 터미널 운영전략을 수립한다. 따라서 특정 터미널에 기항하는 모든 선박은 장단기 운항계획에 의한 입항예정 시각에 입항하려는 강한 의지를 가지고 있다. 즉 터미널의 입장에서 선박은 무작위로 터미널에 도착하지 않고 이미 정해진 예정시각을 전후로 하여 도착한다. 특히 정기항로를 기항하는 컨테이너선, 정기 여객선 등은 비교적 운항계획을 준수하여 터미널에 도착하기 때문에 결코 무작위로 도착한다고 할 수 없다²²⁾. 그러나 운항계획에 의하여 특정 터미널에 기항하는 모든 선박이 운항계획을 준수하여 정확히 예정된 시각에 터미널에 도착하는 것은 항로 및 출항지 사정에 의하여 현실적으로 불가능하다. 즉 운항계획과 실제 도착시각 사이에는 어느 정도의 차이가 발생한다. 선박도착은 다음의 요인들에 의하여 지금까지

20) P. Schonfeld and O. Sharafeldien, "Optimal Berth and Crane Combinations in Container Ports", *J. Waterway Port Coast. Ocean Engineering Div.* 111. November 1985, pp.1060-1072

21) R.C. Wanhill, "Futher Analysis of Optimum Size Seaport", *Journal of the Waterways Harbours Coastal Engineering Division* 100, November 1974, pp.377-383

22) Ernst G., Frankel, *Port Planning and Development*, 1987, p.172

어느 정도의 랜덤성을 인정해 왔다.

- (1) 장기 선박 스케줄은 선사가 터미널 운영자의 입장을 고려하여 제시하는 것이 아니라 각자의 요구사항을 의존하므로 선박의 계획 입항시점은 독립적이다.
- (2) 입항예정선박의 예정출항시각은 선사의 요구사항으로 이용선사의 편의를 최대한 수용할 수 있도록 선박의 입항시점은 합의된다.
- (3) 선박의 실제 입항시점은 일기나 운행상황에 따라 계획 입항시점에 대비해서 변동을 가진다.
- (4) 선박의 하역작업시간은 선박의 종류나 하역작업량에 밀접한 관련을 맺는데 이때 선박의 종류는 입항예정시점과 마찬가지로 운행선사의 요구사항에 따라 일정하지 않을 뿐 아니라 각 선박의 하역작업량은 수시로 변화하는 값이다. 따라서 선박의 집안시간은 상호 독립적인 변수로 간주할 수 있다.

본 연구에서는 선박도착분포와 집안시간 분포가 부두의 운영방안에 따라 서로 다른 특성을 가질 수 있는지 그래서 차별화될 수 있는지를 먼저 살펴보고자 한다. 즉 여러 선사가 이용하는 공용 터미널과 특정 선사가 배타적으로 이용하는 터미널의 경우에는 선박도착특성에 어떤 차이가 있는지 그리고 터미널이 운영하는 선석 수, 터미널에 기항하는 선사 수 및 항로 수 등의 차이에 의해서도 선박도착 특성은 달라질 수 있는지 이다. 세 선석 이상을 운영하는 자성대부두와 신선대부두 그리고 단일 선석을 운영하는 한진감만, 대한통운 터미널을 구분하여 선박도착 특성 및 작업시간 분포의 특성을 분석해 보았다.

1) 공용터미널

공용 터미널은 3선석 또는 그 이상의 선석을 가진 터미널에 각 선사의 항로를 기항하는 다양한 선박이 도착하는 터미널이다. 따라서 공용 터미널에 기항하는 모든 선사는 적어도 항로별로는 운항계획에 근거하여 터미널에 도착

하려는 의지를 갖고 있다. 그러나 앞에서 지적한 것처럼 특정 항로의 운항계획과 실제 도착시각과는 여러 요인에 의하여 차이가 발생한다. 따라서 공용터미널의 입장에서, 선박도착간격은 이러한 각 항로별 선박 도착예정시각과 실제 도착시각과 차이가 중복되어 결국 모든 선박이 계획없이 무작위로 도착하는 것처럼 인식될 수 있다. 2000년도에 자성대부두에 입항한 선박들의 도착분포를 추정한 결과 유의수준 5%에서 지수분포를 따르는 것으로 분석되었다. 또한 양적하 작업량에 따른 서비스 시간 분포는 유의 수준 5%에서 E_5 분포를 따르는 것으로 판명되었다. 그러나 이와 같은 경우가 특정한 시기에만 나타나며 다른 연도나 또는 수개년을 통합한 경우에는 이러한 지수분포로 추정되지 않기 때문에 기존에 UNCTAD 또는 국내 보고서에서 적용해왔던 방법에 의하여 안벽능력을 계산할 수 있는 터미널이라고 일반화 시킬 수 없다.

2) 전용터미널

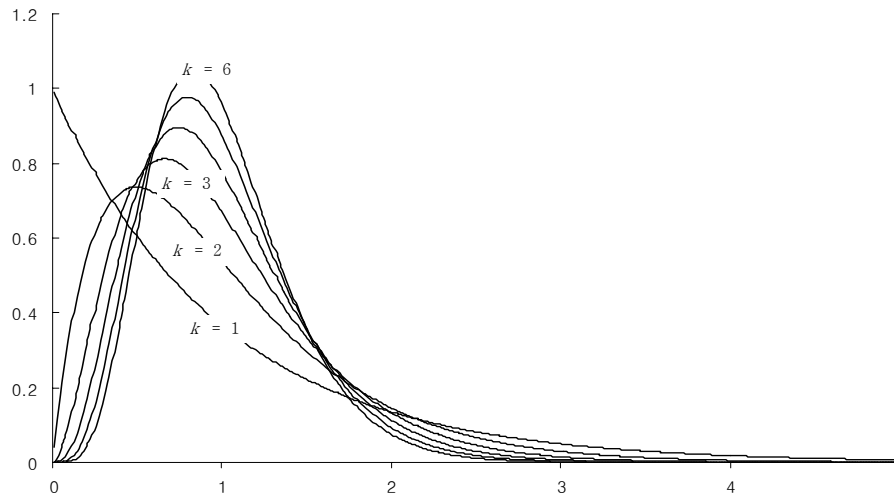
공용터미널에 비해 전용 터미널은 기항하는 선사 수가 제한적이며 선박의 항로 수에 있어도 공용 터미널에 비해 적다. 또한 운항하는 선박도 공용터미널보다는 정기선에 의한 정요정시 서비스가 엄격하게 유지된다. 즉 전용 터미널을 운영하는 터미널은 각 선사와의 (1)사전통보 (2)사전조정 (3)주기적 반복의 특성이 공용터미널에 비해 강하므로 포아송 프로세스의 특성을 바로 적용하기 곤란할 것으로 보인다.

1998년부터 2000년까지 신선대부두에 입항한 선박의 도착분포를 추정한 결과 1998년의 경우에는 유의수준 10%에서 베타 분포, 2000년에는 유의수준 10%에서 감마분포로 추정되었다. 그러나 1999년도의 경우에는 어떤 이론 분포로도 추정되지 않았다. 또한 감만 한진 터미널의 경우에는 유의수준 10%에서 E_3 분포로 추정되었다. 이와 같이 두 터미널에서 선박도착분포로 추정된 감마분포, 베타분포 및 E_3 분포의 분산은 자성대부두의 선박도착분포로 추정된 지수분포에 비해서 분산이 상대적으로 적은 특성을 가지고 있다. 그러나 이러한 결과에 근거하여 이를 일반적인 사실로 규명할 수 있는 통계적 근

거를 찾지는 못하였다. 여기서 k 에 따른 E_k 분포의 특징은 다음 그림과 같다. 즉 k 가 증가함에 따라 평균이 우측으로 이동함을 알 수 있다.

평균에 대한 분산의 비율을 나타내는 일랑분포의 변동계수는 $\frac{\sqrt{V(X)}}{E(X)}$
 $= \frac{\sqrt{k/\lambda}}{k/\lambda} = \frac{1}{\sqrt{k}}$ 이다. 지수분포의 변동계수는 1이지만 일랑분포에서는 k 가 증가할수록 변동계수는 감소함을 알 수 있다. 다음 그림에 일랑분포가 동일 평균값을 가졌을 때 차수를 변화시키면서 분포의 밀도함수를 나타내었다. 이때 일랑분포의 차수가 증가할수록 평균값 근처의 확률변수가 발생할 확률이 증가하는 것을 알 수 있다.

<그림 6-1> **k-일랑분포의 밀도함수**



한편 이러한 선박 도착간격분포에 대해서 작업시간 분포는 신선대부두는 E_3 분포(1998년 실적은 E_2 분포), 자성대부두는 E_5 로 추정되었으며, 한진감만터미널의 경우에는 어떤 이론적 분포에 대해서도 유의하지 않았다. 양적하 작업

시간 분포는 선박도착분포와 달리 선박별 작업량에 따라 달라지는 무작위분포로 가정하는데 있어 이를 부정할 수 있는 아무런 통계적 이유가 없다.

이는 공용터미널로 자성대부두를 제외한 기타 터미널의 경우에는 기존의 방법에서와 같은 방법으로 선박대기시간 비율을 기준으로 한 선석점유율을 계산하는 것은 불가능하다는 것을 의미한다.

따라서 선박도착 및 서비스시간 분포에 대해 포아송 프로세스를 가정, 대기행렬이론을 적용하는 기존 안벽능력분석 방법 외에 운행 선박의 엄격한 운항 스케줄 준수 등의 항만 환경 변화를 반영해 줄 수 있는 실적 분석 위주의 대안 보완 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 이는 항만의 처리능력을 예측함에 있어 기존 연구방법이 반영하지 못하는 새로운 영향요소를 포함하여 보다 현실적인 비교기준을 제시하는데 활용될 수 있을 것이다.

따라서 본 과제에서는 선박의 도착시점에 대해서는 일반 확률분포를 사용하지 않고 안벽의 작업부하를 어느 정도 균등화시켜주는 사전계획의 효과를 반영하면서 대기시스템을 묘사할 수 있는 시뮬레이션 방식을 통한 적정 안벽처리능력 산정을 제안하고자 한다.

2. 컨테이너터미널 시뮬레이션모델의 필요성 및 효과

시뮬레이션은 관찰하고자 하는 실제 시스템의 특성을 가장 흡사하게 구현시키는 기술이라 할 수 있다. 실제 시스템의 특성을 나타내는 시뮬레이션모델을 만들게 되면 그 모델을 이용하여 실제 시스템의 행위(Behavior)를 실험하여 각종 평가, 예측결과를 구하고 이를 통해 적합한 대안 및 계획수립에 활용할 수 있다.

컴퓨터 시뮬레이션은 실제 시스템의 특성을 흡사하게 나타내는 S/W를 구현하는 기술이라 할 수 있으며 실제 시스템의 행위 및 평가, 예측, 그리고 대안도출과 계획수립에 활용을 더욱 편리하게 할 수 있다.

항만, 특히 컨테이너터미널 건설시 활용되는 시뮬레이션 모델은 해상터미널의 모형을 만드는 기술이라 할 수 있다. 해상터미널 시뮬레이션 모델을 통해 실제 시스템에 대한 추론(Inference)을 유출하고자 하는 것으로 다음과 같은

장점을 갖을 수 있다.

첫째, 실제 해상터미널의 구축 이전에 시뮬레이션을 이용하여 터미널의 개발 규모를 평가할 수 있다. 둘째, 새로운 장비 및 하역시스템에 대한 평가실험을 시뮬레이션을 이용하여 터미널의 성능을 평가할 수 있다. 셋째, 실시 설계 이전 단계에서 적정 장비 소요대수, 평면배치계획, 실시 소요규모 등을 도출할 수 있다. 이와 같이 해상터미널 시뮬레이션 모델은 개발규모 산정, 설계, 운영방식, 성능(생산성) 평가 등에 이용될 수 있다.

다만 시뮬레이션이 실제 해상터미널의 모델을 만드는 기술이라하여 경험적인 모델(Heuristic Model)의 설계에 의존하기보다는 실제 시스템에서 적합한 모델을 추론하는데 더욱 역점을 두어 설계하는 노력이 필요하다.

컨테이너터미널 건설시 기본계획인 기본설계를 수행할 경우 건설대상 터미널에 대해 시뮬레이션 모델을 이용하여 설계하는 주된 이유는 해상터미널과 관련된 발생사건(Events)들의 무작위성(Randomness)의 특성을 갖고 있을 뿐만 아니라, 해상터미널의 설계, 장비 생산성, 운영 규칙 및 자원간의 복잡성(Complexity), 그리고 해상터미널을 둘러싸고 있는 외적 환경요인이 수시로 크게 변화하기 때문에 이를 수용하여 분석 할 수 있어야 하기 때문이다.

우선 터미널에 도착하는 선박의 경우, 선형크기, 도착패턴 등, 그리고 외부트럭의 경우 트럭도착 패턴이 상업적 요구나 인간 행동의 가변성에 의해 거의 무작위성의 특징을 갖고 있다. 일반적으로 무작위성은 이론적(Theoretical)인 것과 실제적(Practical)인 것으로 나뉘어 지는데, 이론적 무작위성은 통계적 분포와 같은 수학적 분석의 대상이 될 수 있다. 실제 발생하는 무작위성은 컴퓨터 시뮬레이션으로 검토해야 한다.

두 번째는 컨테이너터미널 분석의 복잡성이다. 터미널의 복잡성은 물리적인 측면과 논리적 측면으로 나누어 볼 수 있는데 물리적 측면에서는 예를 들어 터미널 레이아웃, 터미널내 통행 행동(Traffic Behavior), 그리고 장비생산성의 도출에 있어 다양한 대안으로부터 적정 대안도출은 많은 상호 관계성을 검토해야 하는 복잡성을 지니고 있다.

또한 논리적 측면에서는 예를 들어 적치방법(Storage Rules), 장비 할당, 각종 우선 순위 결정, 다양한 제약요인 수용 등을 위한 모델을 개발해야 한다.

이와 함께 해상터미널 건설시 세계무역환경, 해운물류환경변화에 대응할 수 있기 위해 다양한 실험을 통해 그 적정 설계대안을 도출할 수 있어야 하기 때문에, 처리물동량, 각종 스케줄의 변동, 터미널의 레이아웃, 장비 및 운영 시스템 등의 변화를 고려하여 여러 가지 대안으로 검토해야 한다.

컨테이너터미널 시뮬레이션 모델은 스프레드시트 모델, 이산형 이벤트 모델 (Discrete Event Model), 그리고 선형모델(Linear Model)로 나누어 볼 수 있다.

스프레드시트 모델은 빠르고 간단하게 구축할 수 있는 장점이 있을 뿐 아니라, 그래프 구현 및 D/B 조作的 용이, 그리고 다양한 시나리오별 분석 및 민감도 분석이 용이한 장점이 있다. 터미널 모델에서는 소요 슬롯수(GS) 계산, 피크 계수 적용, 물동량 분석, 각종 그래프 생성 등에 매우 편리하게 활용할 수 있다.

반면에 스프레드시트 모형에서는 무작위성(Randomness) 구현의 한계, 인과 관계가 복잡한 모형구현의 한계, 그리고 상관관계 및 관계식 구현의 한계 등이 단점이다.

이에 비해 이산형 이벤트 모델은 시간에 따른 시스템 상태의 동적인 묘사가 가능한 것으로 시스템의 상태가 특정시점(특정 이벤트 발생시)에서만 바뀌는 것으로 무작위성의 특성 변수처리가 가능하며, 시간에 따른 동작분석에 이상 적일 뿐만 아니라, 터미널 운영 애니메이션(Animation)구현에 적합하고, 대안 비교분석에 적합한 모델이다.

컨테이너터미널 개발 계획시 시뮬레이션모델을 활용해야 하는 이유는 비용 측면에서 검토되어야 할 것이다. 시뮬레이션을 통해 안벽 및 야드 규모의 산정, 그리고 여기에서 처리하는 물동량에 대한 적절한 평면배치와 동선체제, 하역시스템, 소요장비대수를 제시하게 되는데 안벽 및 야드규모 안벽시스템의 조합에 의한 소요장비대수면에서 생산성 향상이나 투자비 감소를 가져와 시뮬레이션 비용보다 효과가 크다면 계획시 시뮬레이션을 하는 편이 유리할 것이다.

또한 일단 건설된 터미널의 재배치나 장비 종류나 수의 조정에는 막대한 투자가 소요되며, 시간도 오래 걸리나(Terminal time is expensive), 컴퓨터

터 시뮬레이션으로 수행하게 되면 실제 발생할 시행착오를 용이하고 큰 비용 없이 줄일 수 있다(Computer time is cheap).

여기서는 안벽처리능력을 산정하기 위한 대안으로 시뮬레이션 모델의 사례를 예시한 후, 모델구성의 전제조건, 그리고 C^{++} 로 작성한 모델을 갖고 분석한 결과를 제시한다. 즉 UNCTAD의 선박대기시간비율표를 선박도착간 분포와 서비스시간분포를 열량분포가 될 경우에만 사용 가능했던 제약적 상황에서 벗어나, 현재의 부산항 입항 및 하역서비스 실적을 기초로 실제와 비슷한 상황을 시뮬레이션으로 분석하여 선박대기시간비율표를 작성하여 본다.

3. 컨테이너터미널 시뮬레이션 모델 사례

선석점유율과 시뮬레이션에 의한 항만의 능력산정방식으로 대표적인 것으로는 UN의 ESCAP(Economic and Social Commission for Asia and Pacific)에서 RMSS(Regional Maritime Strategy Study) 모델의 일부로서 2개의 항만 능력산정모델을 개발하였다.

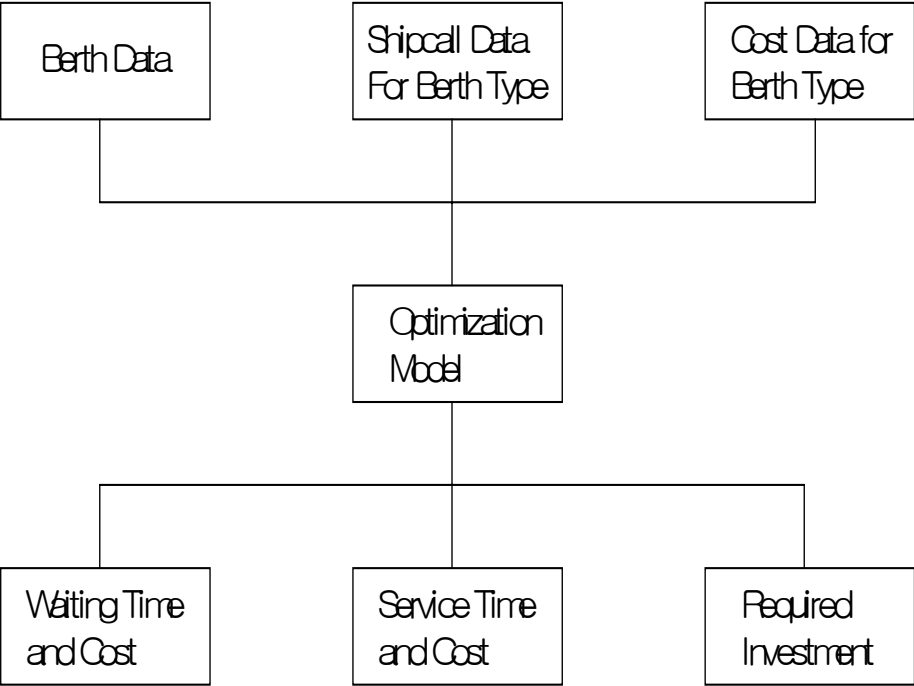
이들 모델은 대기행렬이론을 이용한 ESPOCA와 시뮬레이션을 이용한 POSIM으로 일본의 국제 임해개발연구센터에 의해서 개발된 모델이다. RMSS 모델은 무역부분, 항만배정부분, 해운부분, 항만능력산정부분 등 4개 부분으로 구성된다.

1) ESPOCA

ESPOCA는 대기행렬이론을 바탕으로 최적 소요선석수를 계산하는 확정적 모델이다.

<그림 6-26>

ESPOCA 개략적 자료 흐름도



<표 6-30>

ESPOCA의 주요 입력자료

구 분	항 목
선석자료	선석의 종류, 선석의 길이, 선석수, 선석 전면수심, 연간작업일수, 비용수준, 평균이용선박시간당비용, 평균시간당 하역비용
이용선박자료	선박의 종류, 연간 이용 선박수, 선박의 크기, 평균이용선박길이, 평균 이용 선박 횡수, 평균이용선박시간당비용, 평균 시간당하역 비용
비용자료	부두공사비용, 건축공사비용, 하역장비비용, 운영비용

<표 6-31>

ESPOCA의 주요 출력자료

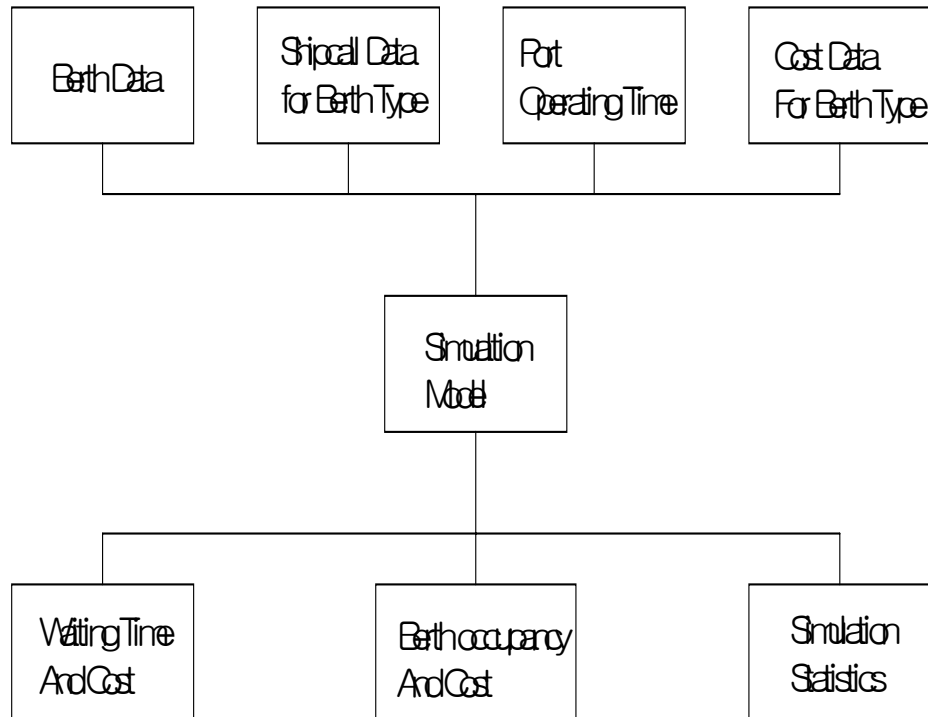
구 분	항 목
선박관련자료	도착 선박수, 연간물동량, 선박당 평균 선석이용시간, 평균 도착 시간간격
부두별 통계	평균부두내의 선박수, 평균 선석대기 선박수, 평균 선석점유시간, 선박당 평균 선석대기시간, 전체 선석 대기시간
선석관계자료	선석점유율
비용관계자료	연간대기비용, 선석의 추가로 인한 선석 대기비용 감소분, 선석 추가시 연간비용
출력도표	투자비용과 선석대기비용 비교, 투자비용과 선석 대기비용비교, 선석 추가시 연간비용

2) POSIM

POSIM은 주어진 물동량 예측 및 부두조건하에서 부두운영의 상태를 점검하는 확률적 모델이다.

<그림 6-27>

POSIM의 개략적 자료 흐름도



<표 6-3> POSIM의 주요 입력자료

구 분	항 목
항만자료	항만의 하루중 개장 및 폐장시간, 운영시간
선석자료	선석종류, 선석길이, 선석전면수심, 선석 개장시간, 선석 폐장시간, 선석의 연간고장(자본)비용, 하역장비수, 하역장비생산성, 하역장비의 고정 및 운영비용
이용선박자료	선박종류, 평균 이용선박 횡수, 평균 기간당 하역비용, 평균 시간당선석대기비용, 각 선박별 우선권, 선석이용시간

<표 6-33> POSIM의 주요 출력자료

구 분	항 목
선박관련자료	선박종류별 도착선박수, 각 단계별 대기선박수, 총대기시간, 선박당 평균 대기시간, 대기선박들의 선박당 평균대기 시간, 선석이용시간, 부두별 이용선박수
선석관련자료	총선석 이용시간, 선석점유율, 크레인 사용율
비용관련자료	선박대기비용, 선박 접안시 운영비용, 선박비용, 크레인 운영비용, 크레인고정비용, 선석 고정비용

이들 모델은 다양한 분석과 비교에 적절하지만 항만개발 초기단계의 대략적인 적정 처리능력 산정에 앞서 세부적인 입력사항들에 대한 고려 변수가 많

은 단점이 있다.

4. 시뮬레이션모델 기본전제 및 분석과정

본 연구에서는 컨테이너 터미널 안벽 시뮬레이션 모델의 분석과 설계를 위해 UML(Unified Modeling Language) 방식을 채택하였다. 즉, 체계적인 설계 관리 및 구현의 편리성을 위해 소프트웨어 중심의 모델링 도구인 UML를 사용하여 설계 내용들을 가시화, 명세화, 구축, 문서화하였다.

UML은 1997년에 소개된 이래로 전체 소프트웨어 업계에서 빠르게 채택되어 왔으며, 소프트웨어 중심의 시스템을 명세화하고, 구축하며, 문서화하는데 사용하는 표준 그래픽 언어로서 인정을 받고 있다. UML은 소프트웨어를 제작하고, 배치하며, 유지 보수하는 일을 하는 사람이라면 누구에게나 시스템의 청사진을 표현할 수 있는 표준 기법을 제공한다.

UML에서 사용하는 주요 다이어그램에서 항만 시스템의 구성요소들의 관계로 구성된 교류와 그들간에 전달되는 메시지를 명시화하는데 사용되는 것은 교류도(interaction diagram)로 메시지의 시간 순서를 강조하는 시퀀스 다이어그램(sequence diagram)이 대표적으로 사용된다.

시퀀스 다이어그램은 시간 진행에 따른 메시지 순서를 강조하는 동적 뷰를 다루는 도해로서 교류에 참가하는 객체들을 도해 위쪽 부분 가로축에 배치한다. 교류를 주도하는 객체를 왼쪽에 배치하는 게 보통이고, 부속되는 객체 순으로 점차 오른쪽에 배치한다. 이 객체들이 주고받는 메시지들은 세로축에 따라 배치시켜 위에서 아래로 시간흐름에 맞춘다. 시퀀스 다이어그램에는 객체 생명선이 있는데 이는 수직 점선으로 나타내고 특정 시간 기간 동안 객체가 살아 있거나 역할을 수행함을 의미한다.

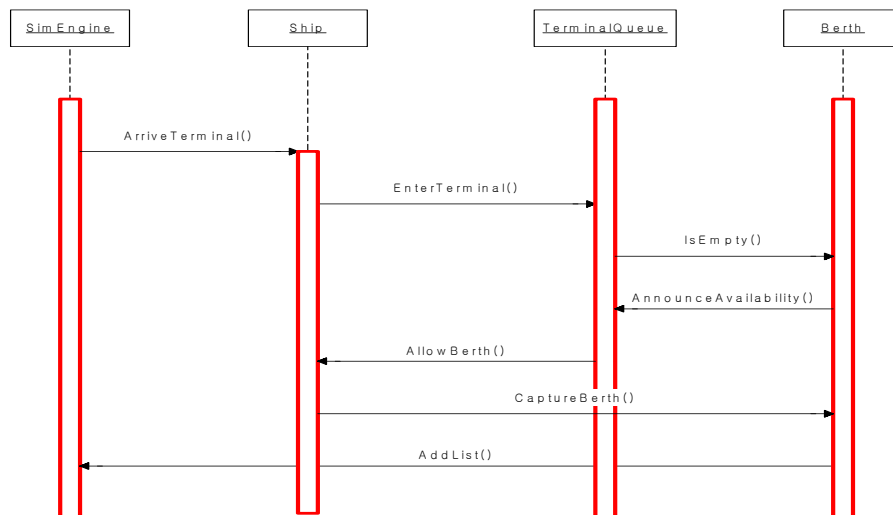
아래의 첫 번째 시퀀스 다이어그램은 안벽에 선박이 도착하여 접안 또는 대기하는 과정을 묘사하고 있다. 도착시점에 선박 객체는 생성되어 가상의 TerminalQueue에 등록된 다음 그 시점의 선석 상태에 따라 빈 선석이 발생할 때까지 대기하든지 아니면 즉시 접안하게 된다. 접안작업이 시작하면서 이안사건을 발생시켜 이벤트 리스트에 등록한다.

두 번째 시퀀스 다이어그램은 하역작업이 종료된 선박이 안벽에서 이안하면

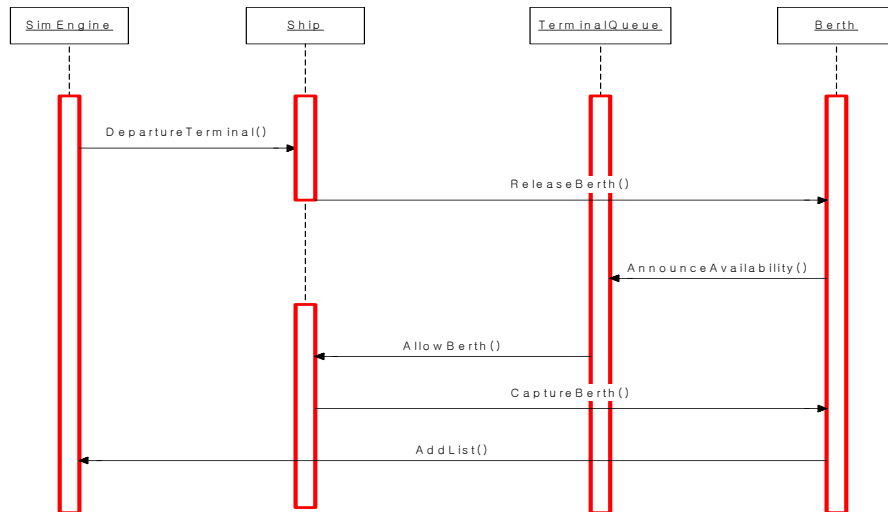
서 대기 선박의 접안을 유도하는 과정을 보여준다. 만일 TerminalQueue에 빈 선석을 대기 중인 선박이 있으면 대기선박은 앞서 언급한 선박 도착사건과 유사한 과정을 거치게 된다.

그리고 UML로 설계된 시뮬레이션 모델은 객체지향 프로그래밍 언어인 C++을 통해 구현, 개발되었다.

<그림 6-28> 선박 도착사건의 시퀀스 다이어그램



<그림 6-29> 선박 이안사건의 시퀀스 다이어그램



본 연구에서는 시뮬레이션 모델을 이용한 적정안벽능력 산정을 위해 몇 가지 기본전제를 설정하였다.

- (1) 선박의 평균 접안시간은 선박의 작업물량에 따라 비례적으로 증감하지만 선후행 선박과의 입항간격시간에는 독립적이다.
- (2) 일반적으로 정기선의 경우 정요정시 서비스의 원칙에 따라 주기성을 지니지만 본 연구에서는 이러한 특성을 배제한다.
- (3) 두 개이상의 선석으로 터미널이 운영될 경우 장비의 운영 효율을 높임으로써 대기 등을 조정할 수 있지만 이는 고려하지 않았다. 또한 선박의 입항에 앞서 반입이 발생하여 대부분의 경우 특정 선석이 배정되지만 본 모델에서는 선석할당에 있어 선입선출(FCFS)의 원칙을 채택하였다.

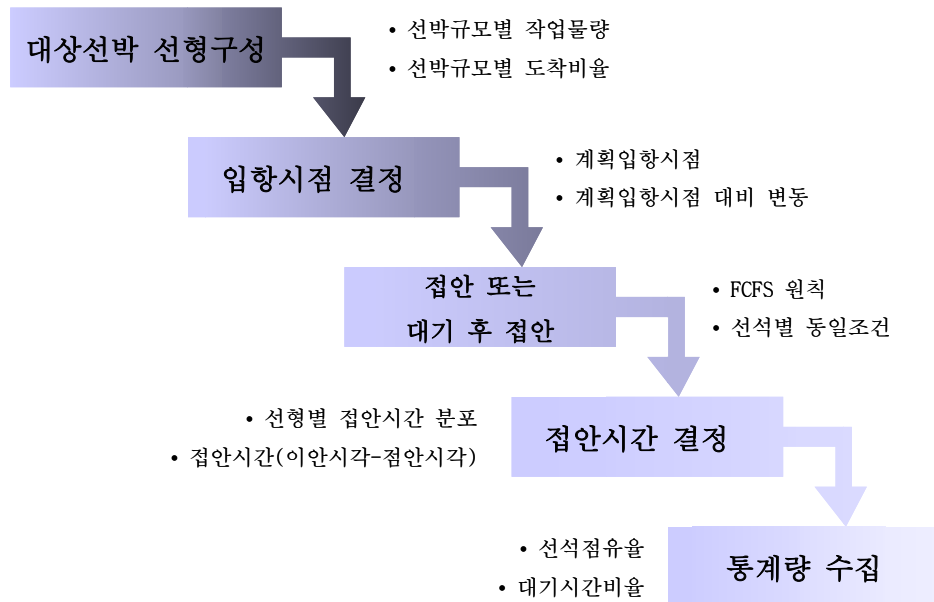
본 모델의 개략적인 흐름은 안벽에서 수행되는 선박의 접안과정을 묘사하고 주요한 정보를 생성, 관리하는 것으로 시뮬레이션의 주요 과정을 정리하면

다음과 같다. 이에 대한 자세한 내용은 별도로 다루었다.

- (단계 1) 계획 터미널에 입항하는 대상선박들에 대한 선형을 구성한다.
- (단계 2) 연간 총처리물량에 따른 선박별 계획입항시점과 이에 변동을 고려한 실제 입항시점을 설정한다.
- (단계 3) 빈 선석이 있으면 입항 선박은 접안하지만 그렇지 않은 경우에는 대기하였다가 선입선출 원칙에 따라 다음의 빈 선석에 접안한다.
- (단계 4) 선석에 접안하는 선박의 이안시점은 선형별 접안시간 분포에 따라 결정된다.
- (단계 5) 접안시간이 지나면 시스템에서 소멸되며 대기시간, 접안시간에 대한 통계량을 계산하고 대기 중인 선박이 존재하는지 여부를 확인한다.

<그림 6-6>

시뮬레이션모델 분석과정



1) 선박규모별 선형 구성

일반적으로 접안 선박의 작업량과 작업량별 구성비는 안벽에서 동일한 처리물량을 소화한다고 가정할 때 터미널에 입항하는 선박척수와 직접적으로 관련된다. 따라서 항만 시스템의 추계적 성질을 반영하기 위해 선박의 입항시점과 접안시간에 변동성을 부여할 경우 입항척수는 선박의 대기비율에 많은 영향을 미친다.

현재 선박의 대형화추세에 따라 지속적으로 대형선박의 입항 비중이 증가하고 있는데 이는 터미널 개발의 주요 고려사항으로 안벽능력산정에서는 적절히 이를 반영해 주어야 한다. 따라서 선박규모별 선형 구성비에 대한 추정치는 최근 국내 동향에 기초하여 설정되어야 한다.

국내 주요 컨테이너 전용부두는 부산항과 광양항에 개발, 운영되고 있지만 광양항의 경우 부산항과 비교하여 선형 구성을 위한 분석자료로 활용되기는 자료의 안정화 측면에서 아직 미흡한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 추정을 위한 분석자료로 부산항의 실적치에 대해 단순 이동평균법을 적용, 최근 2년치에 대한 평균값을 사용하였다.

선박의 톤수별 부두 입항 비율을 조사한 아래 표를 살펴보면 부산항 컨테이너 전용부두에 접안한 컨테이너선은 1999년 3,640척에 대비 20%가 증가한 4,368척이며, 5만톤급 이상의 대형선박은 645척으로 33.5% 증가하는 등 선박의 대형화추세가 지속됨을 알 수 있다. 분석자료에서 피더 전용부두를 운영하는 자성대부두와 5만톤급 대형선박의 접안이 불가능한 우암부두의 자료는 제외시키고 전용부두의 컨테이너선 구성비를 추정하였다.

<표 6-34> 부산항 컨테이너 전용부두 톤수별 선박 접안현황

단위 : 척, %

구 분	1999년						2000년						합계
	자성대	신선대	우암부두	감만부두	감천부두	소계	자성대	신선대	우암부두	감만부두	감천부두	소계	
합계	935	899	593	849	364	3,640	1,156	869	556	1,427	360	4,368	8,008
1만톤 미만 (비중)	92 (9.8)	2 (0.2)	334 (56.3)	27 (3.2)	27 (3.2)	456 (12.5)	138 (11.9)	4 (0.5)	328 (59.0)	66 (4.6)	7 (1.9)	543 (12.4)	999 (12.5)
1~2만톤 (비중)	319 (34.1)	113 (12.6)	240 (40.5)	104 (12.2)	104 (12.2)	870 (23.9)	499 (43.2)	158 (18.2)	210 (37.8)	223 (15.6)	124 (34.5)	1,214 (27.8)	2084 (26.0)
2~3만톤 (비중)	165 (17.7)	224 (24.9)	19 (3.2)	47 (5.5)	47 (5.5)	455 (12.5)	153 (13.2)	178 (20.5)	18 (3.2)	90 (6.3)	4 (1.1)	443 (10.1)	898 (11.2)
3~5만톤 (비중)	354 (37.7)	344 (38.3)	-	409 (48.2)	409 (48.2)	1,376 (37.8)	349 (30.2)	306 (35.2)	-	648 (45.4)	220 (61.1)	1,523 (34.9)	2899 (36.2)
5~6만톤 (비중)	5 (0.5)	184 (20.5)	-	133 (15.7)	133 (15.7)	322 (8.9)	13 (1.1)	160 (18.4)	-	231 (16.2)	5 (1.4)	409 (9.4)	731 (9.1)
6만톤 이상 (비중)	-	32 (3.5)	-	129 (15.2)	129 (15.2)	161 (4.4)	4 (0.4)	63 (7.2)	-	169 (11.9)	-	236 (5.4)	397 (5.0)

자료: 한국컨테이너부두공단, 「2000년도 컨테이너화물 유통추이 및 분석」, 2001. 4

<표 35-6> 컨테이너 전용부두 접안선박의 톤수별 구성비(예상치)

구 분	선박규모	평균작업물량	구 성 비(%)
1만톤 미만	700TEU	280개	2.2
1~2만톤	1,050TEU	410개	17.1
2~3만톤	1,750TEU	660개	11.4
3~5만톤	2,800TEU	1,030개	46.1
5~6만톤	3,850TEU	1,400개	15.0
6만톤 이상	5,250TEU	1,890개	8.2

선박 규모와 선박의 작업물량은 밀접한 관련을 가지는데 초대형 선박이 출현할 경우에는 해운 전략의 변경으로 인해 지금과 비교하여 선박당 작업물량이 보다 증가할 것으로 예상되므로 실적위주의 분석이 중요한 의미를 지닌다. 그러나 현재의 국내 항만 실태를 반영하고자 하는 본 연구의 목적상 선박규모와 작업물량의 관계는 1999년도 신선대부두의 실적을 분석한 「A Study on the System Design and Operations of the Automated Container Terminal」의 결과를 따랐다²³⁾.

23) 양창호 외 「A Study on the System Design and Operations of the Automated Container Terminal」, 한국해양수산개발원, 2000. 12., p34.

$y = 0.3525x + 40.56$ (y : 선박당 작업물량, x : 선박규모)

2) 선박입항시점

컨테이너 전용부두에 접안하는 선박은 대부분 운영사와의 의견 조정을 통해 접안 가능한 시점에 근거하여 입항시점이 정해진 정기선이다. 이는 기존의 대기모형이론에서 가정한 입항도착간격시간은 서로 독립적이라는 가정이 정기선 위주의 운영을 실시 중인 현 전용부두의 특성에 위배됨을 의미한다. 따라서 부두 운영사는 선박의 입항시점을 조정할 경우에 자원의 효율적 활용 측면에서 부두의 처리능력을 증가시킬 수 있다.

그러나 입항시점이 준수되는 정기선의 경우에도 선박 운행상의 여건이나 기상변화에 따라 계획된 입항시점에 대비하여 어느 정도 변동된 시점에 입항하게 된다. 터미널의 안벽의 작업부하를 평준화시키는 측면에서 선박의 계획 입항시점을 정하는 방식은 다음의 두 가지 방안을 고려해 볼 수 있다.

- (1) 첫 번째 방안은 선석의 작업부하를 균등하게 유지하기 위해 선박간의 입항간격시간을 동일하게 설정하는 것으로 입항예정 선박수에 맞추어 등간격으로 계획도착시점을 설정한 다음 계획시점에 대해 변동폭을 적용하여 입항시점을 결정한다.
- (2) 두 번째 방안은 선박의 작업물량에 따라 입항간격시간을 변동적으로 적용하는 경우로 선박 작업물량에 비례하여 선행 도착선박과의 여유 간격시간을 정해 계획입항시점을 설정하고 계획시점에 대해 변동폭을 적용하여 입항시점을 결정한다.

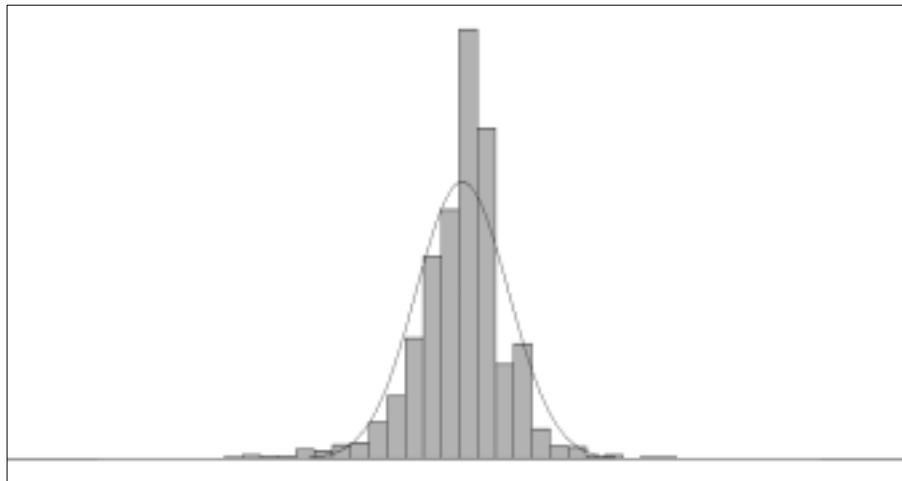
일반적으로 선박의 입항시점은 계획단계에서부터 선박의 작업량 등이 고려되어 다른 선박의 작업에 방해가 되지 않도록 적절한 여유간격을 배정하므로 본 연구에서는 계획입항시점의 설정에 대해 두 번째 방안을 적용하였다.

그렇지만 실제 선박의 입항시점과 계획입항시점은 다양한 요인에 의해서 항상 일치하지는 않는다. 이는 선박이 입항할 시점에 접안 선석이 비어있지 않아 묘박지에서 불가피하게 대기하는 상황을 초래하는 주요한 원인이다. 항만 사용자의 경우 서비스 지표의 하나로 선석 점유율을 고려하는 이유는 선석

점유율이 낮을 경우, 즉 선박입항간에 여유간격시간이 많을수록 선박의 대기가 적게 발생한다고 예측하기 때문이다. 따라서 터미널의 입항선박 척수가 증가하거나 선박의 접안시간이 늘어날수록 계획시점과 실제 입항시점의 차이에 따라 대기발생비율은 증가하게 된다.

터미널에 입항하는 선박의 항로와 이용 선사에 따라 계획 및 실제 입항시간간의 변동폭은 다양한 형태로 조사된다. 본 연구에서는 부산항 신선대부두의 사례를 분석하여 앞서 설정한 계획입항시점에 대해 변동폭을 부여 시뮬레이션 상의 입항사건을 발생시켰다. 다음 그림은 '98년에서 2000년도까지 신선대부두에 입항한 2,957척의 선박들에 대해서 예정입항시각과 실제입항시각의 차이를 분석하여 구한 정규분포로 평균과 분산은 각각 9.5분과 16.1분이었다.

<그림 6-7> 예정입항시각에 대비 실제입항시각의 변동



주: 분포 추정결과 정규분포가 가장 작은 자승오차를 보였으나 유의수준10%에서 기각되었음.

3) 선박접안시간

시뮬레이션 모델에서 선박접안시간은 현재 점유한 선석에 대해 다른 선박의

접안이 불가능한 상태로 지속되는 시간을 의미하는데 이는 터미널에서 선박의 접안에서부터 이안까지에 소요된 시간으로 정의된다. 대기행렬모형에서는 모든 입항선박의 접안시간에 대해 동일한 분포를 적용하였지만 본 시뮬레이션 모델에서는 입항선박의 선형에 따라 다른 접안시간 분포를 적용하였다. 선박규모별 선형 구성에서 척당 평균 작업량은 990개로 TEU당 Box비율을 1.5로 가정할 때 1,484TEU로 2000년 신선대부두의 척당 평균하역량 1,475TEU²⁴⁾와 유사하였다. 또한 신선대부두의 총작업시간당 생산성은 시간당 75.6TEU로 「수정 항만개발계획」에 적용된 연간 적정처리능력의 적용 계수 중에서 아래 표와 같이 총작업시간당 작업량에 관련된 계수만을 산정하여 구한 시간당 80.5TEU에 근접하였다²⁵⁾

<표 6-36> 총작업시간당 처리능력

구 분	장비 대수	장비 능력	작업 계수	간섭 계수	선박이동 계수	선내이적 계수	환산 계수	실작업 시간율	작업손실 계수	총작업시간당 처리능력 (TEU/시)
5만톤부두	3	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	80.5
2만톤부두	2	35	0.95	0.9	0.9	0.97	1.36	0.8	0.75	46.1

자료 : 해양수산부, 「수정항만개발계획」, 2001. 1

따라서 본 연구에서는 입항선박 규모와 총작업시간당 생산성에서 유사성을 찾을 수 있는 신선대부두의 자료를 분석하여 시뮬레이션 모델의 각 선형별 접안시간에 대한 입력자료로 적용하였다. 분석결과에 따르면 1만톤 미만 선박에 대한 접안시간분포의 경우에는 정규분포가 가장 적은 자승오차를 보였고 나머지 선형의 경우에는 차수가 3 또는 4인 일량분포로 추정되었다. 그렇

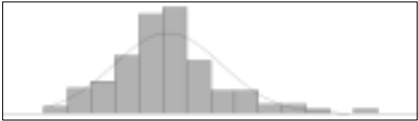
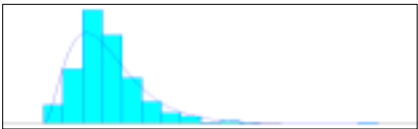
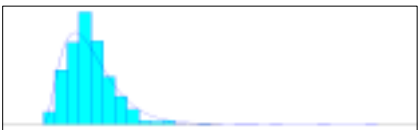
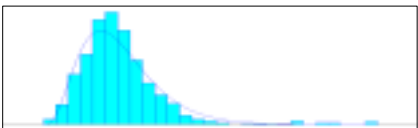
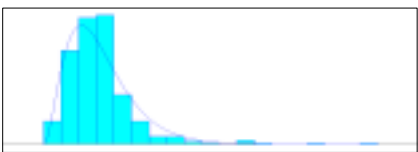
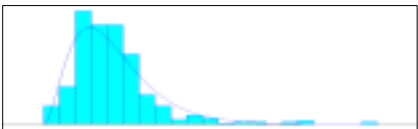
24) 한국컨테이너부두공단, 「2000년도 컨테이너화물 유통추이 및 분석」 2001. 4, p.45

25) '98년~2000년 신선대부두 내부운영자료를 분석한 결과 총작업시간당 생산성은 50.64개로 TEU당 Box비율은 1.5로 가정할 경우 75.6TEU로 집계된다.

지만 추정된 분포들은 유의수준 10%에서 기각되어 통계적으로는 적합하다고는 말할 수 없지만 본 연구에서는 이를 각 선형별 접안시간분포로 사용하였다. 시뮬레이션 모델 내에서는 선박이 선석에 접안하는 시점에 선박의 선형에 따른 접안시간 분포를 가지고 이안사건의 시점을 설정하였다.

<표 6-8>

선형별 총작업시간 분포

구 분	추정분포	작업시간분포(분)
1만톤 미만		NORM(445, 132)
1~2만톤		330 + ERLA(93.7, 3)
2~3만톤		385 + ERLA(130, 3)
3~5만톤		495 + ERLA(131, 4)
5~6만톤		690 + ERLA(186, 3)
6만톤 이상		925 + ERLA(252, 3)

위 그림에서는 신선대부두의 실적자료를 분석하여 얻은 각 선형별 접안시간의 히스토그램과 시뮬레이션 모델에서 반영할 접안시간분포를 정리하였다. 선형별로 접안시간분포를 사용하게 되면 모든 선박에 대해 동일한 접안시간분포를 적용하는 것에 비해 대기가 발생할 가능성은 적어진다. 왜냐하면 선박의 입항시점을 정할 때 시뮬레이션에서는 선박의 작업규모에 따라 선후행 선박과의 여유간격을 설정하였기 때문에 작업규모에 따라 적절한 분산 내에서 접안시간이 소요되면 선행 선박의 이안 전에 미리 도착하거나 작업이 지연되어 후속 도착하는 선박의 접안을 방해할 확률이 줄어들게 된다.

5. 시뮬레이션 분석결과

시뮬레이션 실험에서는 다양한 지표를 통해 시스템의 상태 및 수준을 평가할 수 있다. 그러나 본 절에서는 기존 적정안벽능력 산정의 연구와 비교하기 위해 선박의 대기시간비율만을 제시하고자 한다.

일반적으로 포아송 프로세스를 따르는 대기행렬모형에서는 선석점유율과 선석수가 주어지면 대기시간비율을 제시하였다. 그렇지만 본 시뮬레이션에서는 연간 총처리물량을 변화시켜 선박의 입출항 과정을 시뮬레이션하여 출력 통계량으로서 선석점유율과 대기시간비율을 산출하게 된다. 아래 표는 선석수를 증가시키면서 시뮬레이션의 수행결과로 구해진 통계량 중 대기시간비율만을 정리한 것이다.

각 시뮬레이션에는 6년의 수행기간을 설정하여 선박을 발생시키되 1년의 위명업 기간을 제외한 5년 동안에 대해서만 선석점유율과 대기시간비율에 관한 결과값을 수집하였다. 그리고 시뮬레이션 결과의 신뢰를 높이기 위해 각 실험은 10회의 반복수행을 실시한 다음 통계량을 정리하였다.

다음은 선석수별 선박대기시간비율과 선석점유율의 관계를 표로 정리한 선박대기시간비율표이다.

<표 6-38> 선석수별 대기시간비율표

선석점유율	선 석 수			
	1	2	3	4
0.10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.30	0.0010	0.0000	0.0000	0.0000
0.35	0.0026	0.0000	0.0000	0.0000
0.40	0.0050	0.0006	0.0000	0.0000
0.45	0.0085	0.0016	0.0010	0.0010
0.50	0.0147	0.0040	0.0040	0.0030
0.55	0.0207	0.0090	0.0080	0.0070
0.60	0.0329	0.0180	0.0160	0.0140
0.65	0.0444	0.0303	0.0280	0.0241
0.70	0.0630	0.0499	0.0460	0.0422
0.75	0.0928	0.0808	0.0747	0.0736
0.80	0.1450	0.1271	0.1227	0.1224

본 시뮬레이션에서 제시한 대기시간비율표의 값은 선박의 도착시간과 접안 시간이 포아송 프로세스를 따르는 확률변수에 의해 정의된다고 가정하고 대기행렬이론에서 구한 결과값과 비교해 볼 때 동일한 대기시간비율에 대해 선석 점유율이 매우 높다는 점을 알 수 있다. 예를 들면 선석점유율이 40% 일 경우 $E_2/E_2/1$ 시스템에서 선박대기시간비율은 24%가 되지만 본 시뮬레이션에서는 1% 미만으로 추정되어 거의 대기가 발생하지 않는 것으로 나타났다. $E_k/E_m/n$ 시스템에서는 k 와 m 이 증가할수록 즉, 입항간격시간과 접안시

간의 분포에서 분산이 적어질수록 동일 선석점유율일지라도 구해지는 대기 시간비율은 낮아지는 특징이 있다.

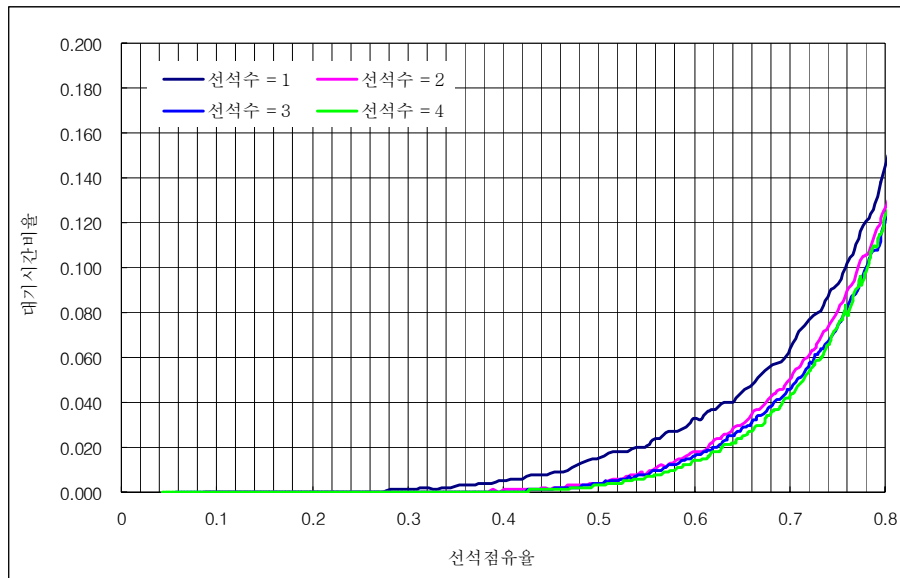
따라서 기존 대기모형의 대기시간비율에 비해 본 연구에서 제시하는 대기시간비율이 낮은 까닭은 정기선 위주의 서비스를 제공하는 컨테이너 터미널의 경우 선박 입항시점이 상당히 계획적으로 이루어지고 선박의 접안 시간의 경우에도 선형에 따라 일정한 범위 내에서 소요된다고 가정하였기 때문으로 판단된다.

또 하나의 중요한 특징은 아래의 그림에서처럼 선석수가 증가하더라도 규모의 경제에 따른 효과가 적은 것으로 시뮬레이션의 결과는 제시하였다. 이는 선박의 입항시점에서 랜덤성이 어느 정도 배제되어 계획적으로 이루어질수록 선석당 부과되는 접안척수가 평준화되기 때문인 것으로 추정된다. 실제 기존의 항만의 경우에도 한 선석으로 운영되는 터미널과 여러 선석으로 구성, 운영되는 터미널의 하역 처리량에서도 UNCTAD의 $E_2/E_2/n$ 시스템처럼 큰 차이를 보이지 않는다²⁶⁾.

<그림 6-8>

선석점유율과 대기시간비율의 관계

26) 대기시간비율 10%를 적용할 때 선석수가 1인 경우의 적정 선석점유율은 26%, 선석수가 2인 경우는 46%로 선석점유율에 있어 76%의 향상 효과가 있는 것으로 제시.



6. 선석처리능력 분석

본 장의 시뮬레이션 분석에 의해 도출된 선박대기시간비율표는 운영선석수 별로, 그리고 선박대기시간비율(W/S ratio)에 의해 구할 수 있다. 예를 들어 1선석운영시 선박대기비율 1%인 경우 선석점유율은 46.7%로 구해진다. 이 선석점유율로 선석처리능력을 산정 할 수 있는데 예로 들은 선석점유율 46.7%인 경우 연간 선석처리능력은 약 33만TEU로 산출 될 수 있다.

따라서 선석처리능력은 운영선석수를 몇 개로 할 것인가, 그리고 선박대기시간비율을 얼마로 할 것인가에 따라 달라지게 된다. 본 연구에서는 선석처리능력을 운영선석수 1~4까지, 그리고 선박대기시간비율을 1.0%에서 5.0%까지 0.5%씩 증가시켜 표로 작성 제시한다.

<표 6-39>

적정 안벽처리능력 산정 (1선석 기준)

대기 시간 비율	연간 작업 일수	일일 작업 시간	선석 점유율	장비 능력	작업 계수	간섭 계수	선박 이동 계수	선내 이적 계수	환산 계수	실작 업시 간율	작업 손실 계수	선석당 처리능력 (만TEU)
1.0%	365	24	0.467	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	32.9
1.5%	365	24	0.498	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	35.1
2.0%	365	24	0.540	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	38.1
2.5%	365	24	0.567	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	40.0
3.0%	365	24	0.594	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	41.9
3.5%	365	24	0.610	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	43.0
4.0%	365	24	0.631	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	44.5
4.5%	365	24	0.652	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	46.0
5.0%	365	24	0.665	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	46.9

<표 6-40>

적정 안벽처리능력 산정 (2선석 기준)

대기 시간 비율	연간 작업 일수	일일 작업 시간	선석 점유율	장비 능력	작업 계수	간섭 계수	선박 이동 계수	선내 이적 계수	환산 계수	실작 업시 간율	작업 손실 계수	선석당 처리능력 (만TEU)
1.0%	365	24	0.553	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	39.0
1.5%	365	24	0.586	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	41.4
2.0%	365	24	0.613	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	43.3
2.5%	365	24	0.630	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	44.5
3.0%	365	24	0.648	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	45.7
3.5%	365	24	0.660	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	46.6
4.0%	365	24	0.675	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	47.6
4.5%	365	24	0.688	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	48.5
5.0%	365	24	0.700	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	49.4

<표 6-41>

적정 안벽처리능력 산정 (3선석 기준)

대기 시간 비율	연간 작업 일수	일일 작업 시간	선석 점유율	장비 능력	작업 계수	간섭 계수	선박 이동 계수	선내 이적 계수	환산 계수	실작업 시간율	작업 손실 계수	선석당 처리능력 (만TEU)
1.0%	365	24	0.560	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	39.5
1.5%	365	24	0.594	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	41.9
2.0%	365	24	0.621	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	43.8
2.5%	365	24	0.638	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	45.0
3.0%	365	24	0.657	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	46.3
3.5%	365	24	0.673	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	47.5
4.0%	365	24	0.685	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	48.3
4.5%	365	24	0.697	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	49.2
5.0%	365	24	0.706	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	49.8

<표 6-42>

적정 안벽처리능력 산정 (4선석 기준)

대기 시간 비율	연간 작업 일수	일일 작업 시간	선석 점유율	장비 능력	작업 계수	간섭 계수	선박 이동 계수	선내 이적 계수	환산 계수	실작업 시간율	작업 손실 계수	선석당 처리능력 (만TEU)
1.0%	365	24	0.578	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	40.8
1.5%	365	24	0.610	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	43.0
2.0%	365	24	0.629	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	44.4
2.5%	365	24	0.652	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	46.0
3.0%	365	24	0.667	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	47.1
3.5%	365	24	0.680	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	48.0
4.0%	365	24	0.693	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	48.9
4.5%	365	24	0.705	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	49.7
5.0%	365	24	0.714	45	0.95	0.81	0.9	0.97	1.48	0.8	0.75	50.4

제7장 결론 및 정책건의

1. 결론

본 연구는 UNCTAD에서 20여년전에 작성하여 제시한 항만개발 계획용 선박대기시간비율표(W/S ratio)에 의해 산출되는 적정 선석점유율의 기본가정과 전제조건이 현재의 상황에서 적용 가능한지를 실증분석을 통해 검증하였다.

또한 우리나라 항만개발 기본계획에서 사용될 수 있는 안벽능력 산정을 위한 적정 선석점유율을 산출할 수 있도록 시뮬레이션모델을 통해 새로운 선박대기시간비율표를 제시함을 연구목적으로 하였다.

이와 같은 연구는 실제 부산항의 처리실적이 선석당 40-50만TEU를 처리하면서도 선박대기가 거의 발생되지 않고 있으나, 이와 같은 처리규모하에서는 항만개발계획에서 사용되어온 UNCTAD의 선박대기시간비율표에 의하면 선박대기가 심각할 정도로 나타나야 했다. 또한 선석당 적정처리 물동량 규모에 있어서도 24만TEU, 30만TEU, 45만TEU등 통일적인 기준이 없어 이에 대한 체계적인 분석의 필요성이 있었다.

이와 같은 연구배경과 목적에 따라 수행한 주요 연구결과는 다음과 같다.

UNCTAD의 대기행렬모형에서는 안벽능력 산정시 가장 중요한 부두에서의 선박도착간 시간분포형태에 대해 벌크화물을 취급하는 일반부두의 경우 지수분포, 전용부두의 경우 얼랑-2(Erlang-2)분포를 따르는 것을 가정하고 있다. 이 얼랑분포(E_k)는 k 개의 지수분포로 구성될 수 있는 분포로 지수분포의 특성을 갖는 식으로 유도할 수 있는데, 지수분포만이 유일하게 대기시간비율(W/S)를 선석수(n)과 선석점유율(ρ)로 표시할 수 있기 때문이다. 만약 지수분포(M)와 얼랑분포가 아닐 경우에는 수식에 의해 선박대기시간비율을 선석점유율로 도출할 수가 없다.

또한 UNCTAD에서 1969년에서 1972년에 걸쳐 선박대기시간비율표를 작성

하기 위해 조사했던 대상선박은 평균 1,833톤에서 3,718톤 규모의 선형이었다. 그리고 1960년대 중반까지도 정기선의 해운서비스는 전문화, 세분화되지 못했으며, 완제품, 반제품, 승객을 모두 운송하는 형태로, 유럽국가들이 아시아, 아프리카, 남미등에 있는 그들 식민지간과의 항로가 주 운송항로이었고 이때의 무역형태는 완제품을 수출하고 식민국가에서 원재료를 수입하는 형태이었다. UNCTAD에서 조사한 항만 Mombasa, Dar es Salaam, Khorramshahr 도 각각 케냐, 탄자니아, 이란의 항만이며, 하역 작업시간이 평균 3.4일에서 7.5일씩 소요된 것을 보면, 조사 당시까지도 노동집약적 하역 방식에 의한 것이었음을 알 수 있다.

따라서 UNCTAD에서 조사한 재래정기선이 운항하던 환경과 현재의 제 7세대 컨테이너전용 선박이 운항하는 터미널의 환경은 크게 다를 수밖에 없다. UNCTAD의 선박대기시간비율표의 통계적 기본가정이 선박도착간 시간분포와 안벽에서의 선박에 대한 양적하 서비스시간분포가 무작위(random)라는 점이나, 현재의 컨테이너 전용터미널의 경우 선박도착의 스케줄이 매우 엄격하게 유지, 관리되고 있으며, 선박의 도착 및 하역서비스는 앞선 선박, 또는 다음 도착예정선박과 긴밀하게 연계되어 계획되고 있어, 컨테이너선의 도착과 서비스 분포는 무작위성의 기본가정인 IID (independently and identically distributed)에 따른다고 보기 어렵다.

이를 실증적으로 검증하기 위해 선박 도착간격 분포와 접안시간 분포를 자성대, 신선대, 감만(한진, 대한통운) 그리고 우암부두 등 부산의 5개 터미널을 대상으로 분석하였다.

각 터미널별 선박도착간격 분포 및 접안시간 분포에 대한 실증분석 결과를 요약하면 국내 컨테이너 전용부두의 입항선박에 대한 도착간격시간의 분포는 UNCTAD에서 제시한 E2분포를 따른다고 볼 수 없었다.

일부 터미널의 특정 연도의 자료를 분석하면 컨테이너 전용부두에 대해 포아송 프로세스를 적용할 수 있지만 대부분의 경우 적용이 곤란하다고 판단되었고, 특히 선박도착간격분포는 포아송 프로세스를 적용하기 힘든 다양한 형태의 분포로 추정되었지만 통계적으로 유의한 경우는 없었다.

이같은 실증분석에서 나타나듯이 선박도착분포가 열량분포나 지수분포로 추

정되지 않았기 때문에 컨테이너 전용터미널의 경우에 UNCTAD 가 제시한 선박대기시간비율표로 선석점유율을 계산하는 것은 불가능하다는 것을 의미한다.

따라서 선박도착 및 서비스시간 분포에 대해 포아송 프로세스를 가정, 대기행렬이론을 적용하는 기존 안벽능력분석 방법 외에 운행 선박의 엄격한 운항 스케줄 준수 등의 항만 환경 변화를 반영해 줄 수 있는 실적 분석 위주의 대안 연구가 필요.

본 과제에서는 선박의 도착시점에 대해서는 일반 확률분포를 사용하지 않고 안벽의 작업부하를 어느 정도 균등화시켜주는 사전계획의 효과를 반영하면서 대기시스템을 묘사할 수 있는 시뮬레이션을 통한 적정안벽처리능력 산정 방법을 제안하였다.

즉 일반적으로 포아송 프로세스를 따르는 대기행렬모형에서는 선석점유율과 선석수가 주어지면 대기시간비율이 제시되나, 본 시뮬레이션 모형에서는 연간 총처리물량을 변화시켜 선박의 입출항 과정을 시뮬레이션하여 출력 통계량으로서 선석점유율과 대기시간비율을 산출하였다. 이 결과 선석수를 증가시키면서 시뮬레이션의 수행결과로 구해진 통계량 중 대기시간비율만을 정리한 시뮬레이션 방법에 의한 정형화된 선박대기시간비율표를 작성 제시하였다.

본 시뮬레이션 모형에서 제시한 대기시간비율표의 값은 선박의 도착시간과 접안시간이 포아송 프로세스를 따르는 확률변수에 의해 정의된다고 가정하고 대기행렬이론에서 구한 결과값과 비교해 볼 때 동일한 대기시간비율에 대해 선석 점유율이 높다. 이는 $E_k/E_m/n$ 시스템에서는 k 와 m 이 증가할수록 즉, 입항간격시간과 접안시간의 분포에서 분산이 적어질수록 동일 선석점유율일지라도 구해지는 대기시간비율은 낮아지기 때문이다.

선박대기시간비율표 작성과 함께 서비스 수준인 선박 대기시간비율을 얼마로 할 것인가 하는 점이 적정선석점유율을 결정하는 또 하나의 요인이다.

서비스시간에 대한 선박 대기시간비율을 얼마까지 허용할 것인가 하는 것은 운항선사의 의견도 중요하지만 항만간 경쟁 상황에 의해 결정되어야 할 것이다. 1999년 기준 현대상선이 기항하는 항만인 부산항은 4.3%, 싱가포르

1.6%, 홍콩항 1.5%, 오사카항 3%, 도쿄항 3.5%, 롱비치항 0.7%로 조사되었다.

그동안 항만개발 계획에서 사용했던 W/S ratio 10% 기준은 그 근거가 모호하다. 즉, UNCTAD에서는 30%이내를 권장하고 있을 뿐이며, 실적치로는 4%대 이내에 머물고 있다. W/S ratio 10%는 부정기선의 대기시간비율 수준으로 정기선 서비스에서는 이보다 낮게 결정되어야 할 것이다.

선석처리능력은 운영선석수를 몇 개로 할 것인가, 그리고 선박대기시간비율을 얼마로 할 것인가에 따라 달라지게 된다. 본 연구에서는 선석처리능력을 운영선석수 1~4까지, 그리고 선박대기시간비율을 1.0%에서 5.0%까지 0.5%씩 증가시켜 표로 작성 제시하였다.

2. 정책건의

1998년 세계5위의 컨테이너 항만이던 부산항이 2000년에는 대만의 카오슝항을 제치고 세계 3위의 컨테이너항만으로 성장하였다. 그러나 부산항은 1만톤급 이상의 컨테이너부두가 16선석으로 싱가포르항의 41선석, 고베항 37선석, 카오슝항 27선석, 홍콩항의 22선석에 비해 적을 뿐 아니라 상해항의 18선석에 비해서도 적은 규모이다. 이는 부산항의 경우 2000년도 처리물동량 754만 TEU중 31%에 달하는 235만TEU를 일반부두에서 처리하였기 때문이다.

앞으로 우리나라의 컨테이너 물동량 증가세를 감안하면 현재 78%인 컨테이너터미널 시설확보율은 현재의 투자수준이 계속 될 경우 2011년에는 59%로 시설부족이 더욱 심각해 질 것으로 예상되어, 항만에 대한 투자 증대가 요망되는 상황에 처해있다.

본 과제는 향후 「항만개발기본계획」 수립시 적용 할 수 있는 이론적으로 적용가능하고 현실적인 적정 선석처리능력을 산출하는 방법에 대해 연구하였다.

선석처리능력 산정의 기준이 되는 적정선석점유율은 서비스 수준평가지표인 선박대기시간비율의 값으로 선박대기시간비율표(Waiting Time Factor Table)도 산출할 수 있다. 컨테이너터미널의 적정 선석처리능력은 정부가 항

후 발생될 것으로 예측하는 컨테이너화물 물동량에 대비해 건설하는 컨테이너터미널 선석규모를 결정짓는 중요한 정책 변수이므로 다음과 같은 정책을 제안한다.

- 1) 선박대기시간비율 산정 : 이는 컨테이너터미널에서 선박이 양적하를 위해 서비스받는 시간(S)에 대한 선석에 접안하지 못하고 대기하는 대기시간(W)의 비율(W/S ratio)을 책정하는 것으로 선박에 대한 터미널의 서비스 수준을 결정짓는 정책적 요소이다. 본 연구에서는 인근 경쟁항만의 선박대기시간비율 실적치를 조사해서 이들 항만과 동일하거나 혹은 더 낮은 비율로 정해져야 할 것임을 제시하였다
- 2) 선박대기시간비율표 재작성 : 선박대기시간비율표는 선박대기시간비율이 정해질 경우 적정선석점유율을 산출할 수 있는 표로 UNCTAD에서는 통계적 특성을 갖고 수식으로 풀어서 이 표를 작성했으나, 본 연구에서는 부산항의 최근 입항선박 분포, 하역시간분포 등 각종 실적에 기초하여 작성한 시뮬레이션 모델에 의해 동 선박대기시간비율표를 재작성하였다. 따라서 적정 선석처리능력을 산정할 필요가 있을 때마다 UNCTAD의 모형에 의해 산출된 선박대기시간비율표를 사용하는 대신에 최근의 실적에 기초한 선박대기시간비율표를 재작성해서 사용해야함을 제시하였다.
- 3) 항만 기본계획수립시 반영 : 5년마다 수립되는 「항만개발기본계획」에서 향후 물동량에 대한 추정을 시행하고 이를 기초로 앞으로의 항만개발 규모를 정하게 되는데, 이때 선박대기시간비율의 산정과 시뮬레이션에 의한 선박대기시간비율표도 함께 재작성해서 적정한 항만개발 규모를 추정시 반영해야 할 것을 제시한다.

참 고 문 헌

- 강금식, 「경영과학」, 무역경영사, 1985
- 김창곤, 컨테이너터미널의 서비스 수준 평가지표에 대한 고찰”, 「해양 정책연구」, 제15권, 제1호, 2000.
- 김창곤 외 4인, 「시뮬레이션 모델을 이용한 컨테이너터미널 안벽능력 분석」, 한국해양수산개발원, 2000
- 양창호 외 4인, 「A Study on the System Design and Operations of the Automated Container Terminal」, 한국해양수산개발원, 2000
- 이호우, 「대기행렬 이론」, 시그마프레스, 1999
- 임진수, 박병인, 「컨테이너터미널 능력산정에 관한 연구」, 해운산업연구원, 1991
- 임진수, 이종훈, 최상희, 「컨테이너터미널 하역능력 산정기준 및 적정 처리능력에 관한 연구」, 한국해양수산개발원, 1997.
- 장성용, 박진우, “시뮬레이션 기법을 이용한 컨테이너터미널의 운영시스템 결정”, 「산업공학회지」, 제1권, 제1호, 1988.
- 한국해양수산개발원, 「항만장비 현대화 기본계획 수립」, 해양수산부, 1999
- 한국해양수산개발원, 「전국 항만 적정하역능력 산정」, 해양수산부, 1998.
- 한국컨테이너부두공단, 「컨테이너화물 유통추이 및 분석」, 한국컨테이너부두공단, 2000.
- 한국컨테이너부두공단, 「컨테이너화물 유통추이 및 분석」, 한국컨테이너부두공단, 2001.
- 해양수산부, 「수정 항만개발계획」, 해양수산부, 2001
- 허문열, 송문섭, 「수리통계학」, 박영사, 1997.

- Frankel, E. G., *Port Planning and Development*, John Wiley, 1987.
- Gambadella, L. M., Rizzoli, A. E., and Zaffalon, M., "Simulation and Planning of Intermodal Container Terminal", *Simulation*, Vol. 71, No. 2, 1998.
- Hillier, F. S., and Yu, O. S., *Queuing Tables and Graphs*, North Holland, 1981.
- Jansson, J. O. and Shneerson D., *Port Economics*, The MIT Press, 1982
- Jordan Woodman Dobson, *Pusan New Port Container Terminal*, Pusan New Port, 1998
- Kleinrock, L., *Queueing Systems Volume I; Theory*, John Wiley & Sons, Inc., 1975
- Page, E., *Queueing Theory in OR*, Butterworths, 1972.
- Rath, E., *Container Systems*, John Wiley, 1973.
- Schonfeld, P. and Sharafeldien, O., "Optimal Berth and Crane Combinations in Container Ports", *J. Waterway Port Coast. Ocean Engng Div.*, 111, 1985, pp. 1060~1072.
- Taha, H. A, *Operations Research*, Macmillan, 1987.
- Thiers, G. F. and Janssens, G. K., "A Port Simulation Model as a Permanent Decision Instrument", *Simulation*, Vol. 71, 1998.
- UNCTAD, *Berth Throughput*, United Nations, 1973
- UNCTAD, *Port Development*, United Nations, 1985
- Wanhill, R. C., "Futher Analysis of Optimum Size Seaport", *Journal of the Waterways Harbours Coastal Engineering Division*, 100, 1974.
- Willy Winkelmaus, *Advanced Port Economics*, Institute of Transport, 2000