

物流시스템工學博士 學位論文

크레인 운전패턴에 따른 에너지 효율
분석에 관한 연구

A study on Energy Effect Analyze According to the Crane
Control Pattern



指導教授 金 煥 成

2010年 2月

韓國海洋大學校 大學院

物流시스템工學科

金 溟 圭

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 필요성 및 목적	1
1.2 연구의 동향	3
1.3 연구의 내용 및 방법	5
제 2 장 컨테이너 터미널의 하역장비 분석	8
2.1 하역장비의 구성 및 특징	8
2.2 하역장비의 발전현황	23
2.3 결론	34
제 3 장 크레인의 가속도 특성분석	36
3.1 크레인의 수학적 모델링	36
3.2 크레인의 상태공간 해석	39
3.3 시뮬레이션 및 고찰	42
3.4 결론	47

제 4 장 제어입력에 따른 크레인의 에너지 효율분석	49
4.1 서론	49
4.2 사다리꼴형 제어입력	50
4.3 노치형 제어입력	54
4.4 계단형 제어입력	56
4.5 시뮬레이션 및 고찰	58
4.6 결론	68
제 5 장 Eco-Driving에 의한 크레인의 에너지 효율분석	70
5.1 서론	70
5.2 최적제어법	73
5.3 Eco-Driving제어법	76
5.4 시뮬레이션 및 고찰	81
5.5 결론	102
제 6 장 결 론	103
참고문헌	106

List of Tables

표 2.1	항만하역장비의 구성	9
표 2.2	부산항 신항의 RMGC사양 비교	17
표 3.1	가속도 특성에 따른 에너지 소비패턴	45
표 4.1	크레인 횡행 운전에 대한 시뮬레이션 결과	60
표 4.2	크레인의 횡행운전에 따른 에너지 절감	62
표 4.3	크레인의 주행운전에 대한 시뮬레이션 결과	63
표 4.4	크레인의 주행운전에 따른 에너지 절감	64
표 4.5	크레인의 승강운전에 대한 시뮬레이션 결과	65
표 4.6	크레인의 승강운전에 따른 에너지 절감	67
표 4.7	크레인의 전체 운전에 대한 시뮬레이션 결과	68
표 5.1	트롤리의 속도변화에 따른 시뮬레이션 결과	82
표 5.2	최적제어법에 의한 에너지 소비패턴	90
표 5.3	고정형 제어입력 및 최적제어형에 따른 에너지 소비패턴	91
표 5.4	최적제어형 패턴에 따른 횡행과 승강운전시 비용절감	92
표 5.5	크레인 주행(승강포함)운전 시뮬레이션 결과	95
표 5.6	주행(승강포함) 운전에 따른 에너지 소비패턴	96
표 5.7	최적제어형에 의한 주행(승강포함)운전시의 에너지소비 절감	97
표 5.8	2점분할법에 의한 에너지 비용절감	99
표 5.9	3점분할법에 의한 에너지 비용절감	99
표 5.10	4점분할법에 의한 에너지 비용절감	100
표 5.11	유한극점 분할법에 의한 에너지 비용절감	100
표 5.12	최적제어법에 의한 에너지 비용절감	101

List of Figures

그림 2.1 컨테이너 터미널 하역단계별 장비구성	8
그림 2.2 컨테이너 크레인	11
그림 2.3 트랜스퍼 크레인	18
그림 2.4 야드 트랙터	20
그림 2.5 스트래들 캐리어	21
그림 2.6 셔틀 캐리어	22
그림 3.1 자동화 크레인의 모델링	37
그림 3.2 속도 및 트롤리의 위치에 따른 에너지 소비패턴	43
그림 3.3 트롤리의 위치에 따른 에너지 소비패턴	44
그림 3.4 가속도 특성에 따른 에너지 소비패턴	46
그림 3.5 가속도 특성에 따른 운전모드의 분류	47
그림 4.1 크레인의 이동궤적	51
그림 4.2 사다리꼴형 제어입력	54
그림 4.3 노치형 제어입력	55
그림 4.4 계단형 제어입력	57
그림 4.5 사다리꼴 제어입력에 대한 시뮬레이션 결과	59
그림 4.6 노치형 제어입력에 대한 시뮬레이션 결과	59
그림 4.7 계단형 제어입력에 대한 시뮬레이션 결과	60
그림 4.8 크레인의 횡행운전에 따른 에너지 소비패턴	61
그림 4.9 크레인의 주행운전에 따른 에너지 소비패턴	64
그림 4.10 크레인의 승강운전에 따른 에너지 소비패턴	66
그림 5.1 컨테이너 이동 제약조건	77

그림 5.2 2점분할법	79
그림 5.3 3점분할법	79
그림 5.4 4점분할법	80
그림 5.5 유한극점(EP) 분할법	80
그림 5.6 트롤리의 속도변화에 따른 시뮬레이션 결과	82
그림 5.7 트롤리의 속도변화에 따른 에너지 소비패턴	83
그림 5.8 2점분할법에 의한 시뮬레이션 결과	85
그림 5.9 3점분할법에 의한 시뮬레이션 결과	86
그림 5.10 4점분할법에 의한 시뮬레이션 결과	88
그림 5.11 유한극점(EP)분할법에 의한 시뮬레이션 결과	90
그림 5.12 최적제어법에 의한 에너지 소비패턴	91
그림 5.13 고정형 및 최적제어형 운전에 따른 에너지 소비패턴	92
그림 5.14 최적제어형의 에너지 절감	94
그림 5.15 최적제어형에 의한 크레인 주행운전의 에너지 소비패턴	95
그림 5.16 주행운전에 따른 에너지 소비패턴	96
그림 5.17 최적제어법에 의한 에너지 비용절감	101

A study on Energy Effect Analyze According to the Crane Control Pattern

Gyu-Myung KIM

Department of Logistics System Engineering,
Graduate School of Korea Maritime University



Abstract

Container terminals of each country are currently faced with many difficulties such as the increase in marine transportation cost triggered by bigger ship size and changes in distribution environment resulting from specialization, the worsening of the management finance from high oil price and the international environmental regulations according to United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCC). Accordingly, container terminals of each country are now in a desperately need for early response to overcome such difficulties and establish advanced harbor with international competitiveness. As a part

of such measure, most of container terminals including Busan Port have introduced and are operating automatic terminal as a part of their various efforts to increase the operational efficiency, and are seeking to improve their productivity through specialization upon establishing complete automation for the trucks within the terminal and partial automation for the trucks from outside by using Automatic Rail Mounted Crane at the yard.

Along with this, they are introducing new mechanisms to improve productivity or actively conducting research and development for port yard equipment to accelerate the process.

Therefore, this study focused on the energy efficiency analysis according to the changes in driving pattern of the automatic cranes being operated at container terminal as one of the plans to assure port competitiveness by establishing environmentally friendly container terminal and reducing energy cost from such perspective.

First of all, as the basic study to improve the energy efficiency of automatic crane, a mathematical modeling was conducted using Lagrange's equation of movement for transfer crane. In addition, it was confirmed that the acceleration value was eco-driving mode in the section of $1\sim 2.5[m/s^2]$ by conducting the characteristic analysis of the average energy consumption according to acceleration change while changing the value of acceleration in the section of $1\sim 5[m/s^2]$ based on the induced model.

Next, as the result of analyzing through simulation the efficiency of the energy consumed in three types of fixed driving patterns such as trapezoid type control input, notch type control input and stair type control input determined by the trace of movement of crane, the container

terminal that handles 1 million[TEU] annually showed that the eco-driving mode through which the minimum of over 850 million won of energy cost could be saved is possible simply by changing the driving pattern.

Along with this, an optimal control method was proposed as the eco-driving method for low-cost, high-energy efficiency driving of crane. In the proposed method, the optimal path is calculated for each section divided upon dividing the path of movement of crane through the same section. Also, it showed that the minimum of over 260 million won of energy cost could be saved through the two methods of the identical partition method that adopts the method of summing the each calculated value and the limited pole point partition method that calculated the optimal path by dividing the movement path curve through limited points.

Therefore, the eco-driving effect was verified through which the total of 1.11 billion won could be saved according to the cost reduction from fixed type driving pattern and optimal control type driving pattern.

It is expected that the eco-driver policy for high-efficiency could be introduced in the future when the energy reduction measure is established according to the waiting time of crane by examining the driving pattern that considers the waiting time and work schedule within the container terminal.

제 1 장 서 론

1.1 연구의 필요성 및 목적

최근 국내외의 컨테이너 터미널에서는 선박의 대형화에 따른 해상수송 물류비의 증가와 전문화 등에 따른 물류환경의 변화, 고유가로 인한 경영수지의 악화, 기후변화협약(UNFCC)에 따른 국제 환경규제 등 수많은 어려움에 직면해 있다. 이에 따라 각국의 컨테이너 터미널에서는 이러한 어려움을 극복하고 국제적 경쟁력을 확보한 선진 항만 구축을 위한 조기대응이 절실히 필요하게 되었다.

국내에서도 부산항을 비롯한 대부분의 컨테이너 터미널에서도 운영효율을 높이기 위한 다양한 노력을 경주하고 있는데 일부의 컨테이너 터미널에서는 자동화터미널을 도입하여 운용하고 있으며, 야드에서는 자동화 크레인(Automatic Rail Mounted Crane)를 이용하여 내부트럭에 대해서는 완전자동화를 외부트럭에 대해서는 부분 자동화를 구축하여 전문화를 통한 생산성 향상을 추구하고 있다. 이와 함께 생산성 향상을 위한 새로운 메커니즘을 도입하거나 고속화를 진행하기 위한 항만 야드장비에 대한 연구 개발도 활발하게 진행되고 있다.

또한 디젤장치의 사용에 따른 고유가로 인한 경영수지의 악화와 CO₂ 배출에 따른 기후변화협약(UNFCC)등의 국제 환경규제의 대응책이 산업계 전반에 걸쳐 절실히 필요하게 되었다. 이에 따라 국토해양부에서는 환경과 경제의 양자 시너지를 극대화하고 저탄소 및 녹색 산업화를 기반으로 경제 성장을 배가시키는 신성장 개념의 저탄소 녹색성장 정책을 수

립하여 시행하고 있으며 “녹색성장위원회”의 국가온실가스 중기 감축목표를 2020년 배출전망치의 30[%] 감축 설정에 따른 녹색성장 5개년 계획중에서 녹색물류 체계 구축에 관련된 내용으로는 “저탄소에너지 자립형 Green Port 구축”, “친환경 교통수단으로 Modal-Shift 추진”, “녹색성장형 Inter modalism 구축 및 투자효율화 달성”, “수·배송 녹색성장형 보관 등 물류공동화 인프라 구축”, “친환경 물류시설 및 장비의 개발과 활용“ 등의 전략을 수립하여 시행하고 있다.

이러한 시대변화 요구에 항만에서도 변화가 시도되고 있는데 종래의 항만은 에너지 효율측면을 고려하지 않고 오로지 생산성 증대만을 위한 작업시간 단축에만 초점을 맞추어 왔다. 그러나 최근에는 터미널 운영과 장비운전에 있어서 비용적인 관점에서 에너지 효율화에 대한 관심이 높아짐에 따라 일부의 항만에서는 자동화 터미널의 도입과 더불어 일부 차량에 이용되고 있는 Eco-driving 기법을 대형화물을 취급하는 항만에 적용하여 에너지 효율을 높이는 노력을 추구하고 있다.

이러한 노력의 일환으로 부산항에서는 2007년 종래의 디젤엔진형의 RTTC(Rubber Type Transfer Crane)을 전기절환형인 e-RTTC로 전환하여 연간 202톤의 질소산화물과 9톤의 디젤분진을 감소시키는 효과와 더불어 189억원의 비용절감과 50%의 엔진 고장율을 감소시키는 이익을 창출하였다[1]. 이 결과에 따라 2008년부터 자성대, 감만, 신선대 터미널로 확대 운영하고 있는 것으로 알려져 있다.

그 밖의 에너지 절감을 위한 에너지 Saving기술으로는 디젤엔진의 연소효율을 향상시키거나, 회생전력과¹⁾같이 역으로 발생된 에너지를 저장하여 재사용하거나, Capacitor를 이용하는 방식²⁾ 등이 있다.

1) 크레인에 스프레더 하강시 또는 브레이킹시 발생하는 역전류

2) 크레인의 정속운전 중 불필요한 에너지를 Capacitor에 저장해 두었다가 재사용하는 방식

또한 항만의 고 효율화를 위한 방안으로는 컨테이너 터미널에서 안벽과 야드간의 컨테이너 운반 작업에 있어 이송장비에 대해 작업조를 편성하지 않고 운행상황이나 컨테이너 크레인의 작업 상황에 따라 선별적으로 컨테이너 크레인 작업을 지원하는 방식의 야드 트럭 풀링제 운영, 터미널 하역장비에 있어 이송장비 다음으로 가장 작업 동선비율이 큰 트랜스퍼 크레인을 목표지점까지 최소가 되는 위치에 있는 트랜스퍼 크레인에 작업에 배정하여 크레인의 동선을 최소화하고 이동에 따른 연료비용을 절감하는 크레인 작업동선 최소화 운영, 일반 야드 트럭에 비해 적재용량이 2배로 할 수 있는 2단 적재차량의 도입, 컨테이너 터미널에서 처리되는 모든 컨테이너의 적하순서에 맞게 재 정렬하거나 사전에 장치순서를 결정하여 트랜스퍼 크레인의 작업횟수를 최소화하는 컨테이너 재조작 감소 방법 등이 있다.

이와 같이 고 효율화를 위한 컨테이너 터미널의 비용 절감 노력은 컨테이너 크레인을 포함한 대부분 야드 장비로 부터 출발한다. 따라서 야드 장비의 비용절감은 전체 항만의 비용절감에 절대적이라 할 수 있다. 그러나 이 분야의 기술적인 연구개발의 정도는 항만에서 차지하는 비중에 비해 미약한 실정이다.

1.2 연구의 동향

앞 절에서도 기술한 바와 같이 항만에서 활용하고 있는 많은 종류의 야드 장비 중 크레인은 컨테이너 터미널의 운영에 있어서 매우 중요한 야드 장비로 어떻게 운영 하는가에 따라 터미널의 생산성과 고 효율화를 결정하는 중요한 장비이다. 따라서 크레인의 생산성 향상을 위한 방법의

논의는 크레인의 운전 및 고장진단 부분, 그리고 컨테이너 터미널 비용 절감을 위한 운영부분으로 크게 구분되어 질 수 있다.

이러한 관점에서 첫 번째로 크레인은 작업 사이클 시간을 줄이기 위해 트롤리를 목표위치에 빠르게 이동시키면 목표위치 근처에서 화물의 흔들림이 비교적 크게 발생되는데, 이 흔들림을 제어하기 위한 기존의 흔들림 방지 시스템(Anti Sway System)은 트롤리를 빠르게 수회 전진 또는 후진시키면서 흔들림을 최소화 한다. 그러나 이러한 방법은 크레인을 운전하는 운전자에게 피로를 증가시키는 커다란 단점을 가지고 있다. 또한 크레인의 운전은 주로 운전자의 숙련도에 의존하고 있기 때문에 개인의 운전능력 및 피로도에 따라 안전사고와 화물손상 등의 문제를 일으키는 주요 원인이 되고 있다.

따라서 트롤리의 위치 및 흔들림 제어에서 중요한 점은 컨테이너 화물을 짧은 시간내에 오버슈트가 없도록 목표위치에 고속으로 이동시키면서 트롤리가 목표지점에 안정하게 도착시키는 것이 생산성 향상의 가장 중요한 관건이다.

이와 관련된 연구로는 홍금식 등(1997)은 컨테이너 크레인의 흔들림 제어를 위한 모델링 및 제어전략에 대하여 제안한 후 속도선도를 다섯 가지로 나누어 각각의 선도에 대한 이동시간 및 흔들림을 비교하였고, 이진우 등(1998)은 2차원 크레인모델에서 서보제어기를 이용하여 크레인의 흔들림을 제어하는 연구를 수행하였다. 또한 윤지섭(1995)은 로프 길이가 일정한 화물의 흔들림을 제어할 목적으로 화물의 진동각의 변화율을 측정하고 이것을 피이드백하여 단진자 운동에 감쇠효과를 부여하는 것을 제안하였고, 임창진 등(2005)는 극배치법을 사용하여 화물의 흔들림을 억제하는 연구를 수행하였고, 손정기(2004)는 LQ-제어 및 LQ-보

간제어를 이용한 화물의 흔들림을 억제하는 등 많은 수의 연구결과가 제시되고 있다[6~10].

그리고 크레인의 효율 향상과 고장진단을 위한 연구로 김환성 등(2001)은 부분별 또는 복합적 센서에 의한 고장 부위를 정확히 예측하는 진단법에 대해서 연구를 수행하는 등 많은 연구가 진행되어 왔다[10~11].

또한 에너지 절감을 위한 연구로는 손호성 등(2009)은 컨테이너 작업량에 따라 에너지소비가 증가하는 패턴을 분석하여 정상적 에너지 소비패턴과 비정상적인 에너지 소비패턴으로 분류하는 방법을 도출하였으며, 김우선 등(2007)은 고유가에 대비하여 컨테이너 비용절감을 통해 운영 효율성을 위한 방안을 연구하였고, 최상희 등(2007)은 컨테이너 항만기술개발 로드맵을 수립하는 연구를 진행하였다[2~5].

그러나 앞서서도 기술한 바와 같이 지금까지의 연구는 주로 화물의 흔들림을 제어하는데 초점이 맞추어져 있어 컨테이너 터미널의 비용절감을 위한 대부분은 크레인의 운영여부에 전적으로 의존함에도 불구하고 에너지 절감 등의 비용적 측면에서의 연구 개발은 미진하여 최근의 국제적 금융위기와 고유가로 인한 유류비 증가 등 고정비용의 상승으로 인한 운영적 효율에 대한 대비가 부족하여 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다.

1.3 연구의 내용 및 방법

본 연구에서는 온실가스 감축을 통한 친환경 컨테이너 터미널의 구축과 에너지비용 절감을 통한 항만의 경쟁력 확보를 위한 방안의 하나로 컨테이너 터미널에서 운영하고 있는 자동화 크레인에 대한 운전패턴에

따른 에너지 효율분석에 초점을 둔다.

이에 따라 자동화 크레인에 대한 에너지 효율을 향상시키기 위한 기초연구로서 자동화 크레인을 대상으로 미분방정식으로 표현되는 수학적 모델링을 도출하고 도출된 모델을 바탕으로 가속도를 변경하였을 때 가속도 변화에 따른 트롤리의 위치 및 속도 등에 따른 에너지 소비에 대한 특성 분석을 실시하여 가장 경제적인 운전모드를 도출한다.

그리고 이를 근거로 크레인의 운전 패턴별로 소요되는 에너지 소비량을 비교분석하여 에너지 소비가 적은 경제적인 운전패턴과 에너지 소비가 많은 비경제적 운전 패턴을 도출한다. 또한 에너지 소비에 따른 비용 절감을 위하여 최적의 제어법을 제안하고 효율 분석을 통하여 에너지 절감 방안에 따른 Eco-Driving 효과를 검증하고자 한다.

제1장 “서론”에서는 저비용 고효율의 컨테이너 터미널을 구축하기 위한 본 연구의 필요성과 목적, 연구의 동향, 주요내용 및 방법에 대해서 기술한다.



제2장 “컨테이너 터미널의 하역장비 분석”에서는 컨테이너 터미널에서 운용하고 있는 장비의 구성과 특징에 대해서 조사하고 이들 장비의 발전현황에 대해서 기술한다.

제3장 “크레인의 가속도 특성분석”에서는 저비용 에너지 고 효율화를 위한 크레인의 운전패턴을 개발하기 위하여 트랜스퍼 크레인을 대상으로 미분방정식으로 표현되는 수학적 모델링을 실시하고, 이를 바탕으로 가속도 특성에 따른 소비되는 에너지량을 분석한 후 가속도의 값에 따라 “Eco-Driving Mode”, “Normal-Driving Mode”, “Fast-Driving Mode”로 분류한다.

제4장 “제어입력에 따른 크레인의 에너지 효율분석”에서는 사다리꼴

형 제어입력, 노치형 제어입력, 계단형 제어입력 등 3가지의 고정형 운전패턴에 따른 각각의 제어입력에 대하여 에너지 소비량을 시뮬레이션을 통하여 산출하여 Eco-Driving이 가능함을 보이도록 한다.

제5장 “Eco-Driving에 의한 크레인의 에너지 효율분석”에서는 에너지 절감에 따른 고효율 크레인의 배경과 효과를 바탕으로 이동하고자 하는 경로에 대하여 동일한 구간으로 경로를 나누고, 이들 구간에 대해서 최적경로를 구한 후 각각의 경로 전체를 더하는 방법의 동일 분할법과 이동곡선을 유한극점(EP)으로 분할하여 최적경로를 구하는 유한극점(EP) 분할법 등 2가지의 형태의 Eco-Driving제어법을 제안하고, 제안한 방법에 의한 Eco-Driving효과를 시뮬레이션을 통해 검증 한다.

제6장 “결론”에서는 운전패턴 변경에 따른 에너지 비용절감에 대한 효과와 제안된 Eco-Driving제어법에 대하여 검증된 결과를 종합적으로 정리하고 연구의 한계점과 향후의 연구방향에 대하여 기술한다.



제 2 장 컨테이너 터미널의 하역장비 분석

2.1 하역장비의 구성 및 특징

항만의 하역단계는 Fig 2.1과 같이 안벽하역, 이송, 야드하역 등으로 크게 3개의 작업으로 이루어지게 된다[3].

안벽하역 단계에서는 주로 컨테이너 크레인(Container Crane)에 의해서 선박과 이송장비 사이에서 작업이 이루어지며, 이송단계에서는 안벽에서 야드까지 컨테이너를 이송시키는 야드 트랙터(Yard Tractor)등의 이송장비가 사용된다.

야드하역 단계에서는 일반적으로 이송장비 및 외부트럭에 대한 컨테이너 작업을 수행하는 RTGC(Rubber Tired Gantry Crane), 또는 RMGC(Rail Mounted Gantry Crane)의 야드 장비가 사용된다.

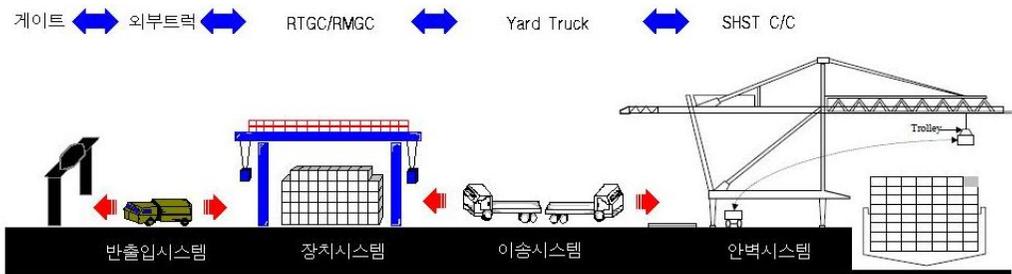


Fig 2.1 컨테이너 터미널의 하역단계별 장비구성

따라서 컨테이너 터미널에서 하역을 위한 장비의 구성은 안벽장비, 이송장비, 야드 장비 등 크게 3가지로 나누어지며 각 장비의 구조, 기능 및 형태에 따라 세부장비로 나누어져 운영되고 있다.

Table 2.1 항만하역 장비의 구성

구 분	구 성	비 고
안벽장비	C/C(SHST, DHST)	선박 및 이송장비와의 하역작업 수행
이송장비	YT, SC, AGV	안벽 및 야드장비간의 이송작업 수행
야드장비	RTGC, RMGC	이송 및 외부트럭 장비와의 하역작업 수행

부산항을 비롯한 국내의 컨테이너터미널의 하역장비의 구성은 1970년대 컨테이너 터미널을 개장할 당시의 설계된 장비의 구성이 현재에 이르기까지 그 형태의 큰 변화 없이 진행되어 왔으며, 각 터미널마다 거의 동일한 하역장비가 사용되고 있다. 또한 국내 컨테이너 터미널의 안벽시설은 모두 수평형 배치 구조로 설계되어 있으며 하역장비들은 대부분이 SHST C/C ↔ Y/T ↔ RTGC(또는 RMGC) 체제의 구성을 가지고 있다.

2.1.1 컨테이너 크레인

컨테이너 크레인은 부두 안벽의 주행 레일위에 설치되어 규격화(20피트, 40피트, 45피트)된 컨테이너 화물을 선박에서 육상으로 양화 또는 육상의 트레일러 새시로 부터 선박으로 적화하는 컨테이너 화물전용 상하역장비로서 컨테이너 터미널에서의 생산성에 큰 영향을 미친다.

컨테이너 화물을 제외한 특수화물 및 일반화물의 경우에는 스프레더 대신에 버킷(Bucket)이나, 혹은 훅(Hook)을 장착한 언로더(Unloader) 및 BTC(Bridge Type Crane) 등이 있다.

컨테이너 터미널에서 사용되고 있는 주요 하역장비로는 부두안벽에 설치되어 있는 갠트리 크레인(Gantry Crane)과 야드에 설치되어 있는 트랜스퍼 크레인(Transfer Crane)등이 있다.

이때 컨테이너 크레인은 선박이 부두에 접안하면 컨테이너 화물을 육상의 새시로 하역하거나 선박으로 선적함으로써 항만과 선박사이에서 화물운송의 가교 역할을 담당한다.

컨테이너 크레인은 형태와 크기별로 A형 구조(A Frame Type), 수정된 A형 구조(Modified A Frame Type), 2중 중첩식 붐 A형 구조(A Frame with Articulated Boom Type), 롱 백리치 구조(Long Back Reach Type), 롱 스패ن 구조(Long Span Type), 로우 프로파일 구조(Low Profile type)가 있으며, 크기별로는 피더형식(Feeder Type), 파나맥스 형식(Panamax Type), 포스트 파나맥스 형식(Post Panamax Type) 등으로 구분한다.

컨테이너 크레인의 동작은 크게 4가지로 구분되는데, 선박의 부두접안이 용이하도록 붐을 올리고 내리는 붐 호이스트 동작, 선박의 홀드를 따라 좌우로 크레인 전체가 이동하는 주행동작, 선박과 육상사이에서 전후로 트롤리가 이동하는 횡행동작, 스프레더 또는 컨테이너 화물을 내리고 올리는 호이스트 동작으로 나눈다.

컨테이너 터미널 안벽에서 컨테이너 화물전용으로 사용되는 컨테이너 크레인의 구조와 실제작업의 형태를 나타낸 것은 Fig 2.2와 같다.



Fig 2.2 컨테이너 크레인



컨테이너 크레인의 구조를 기술하면 다음과 같다. 먼저, 트롤리 장치 (Trolley Device)는 트롤리 거더(Girder)와 붐 위에 설치된 레일을 따라 해상 또는 육상쪽으로 움직이는 트롤리가 설치되어 있고 그 하단에는 운전자가 탑승할 수 있는 운전석이 마련되어 있어 트롤리와 함께 움직인다. 모터의 정회전과 역회전에 따라 와이어 드럼에 감겨있는 와이어로프에 의해 트롤리가 해상방향으로 또는 육상방향으로 이송되는 장치로서 구동부는 기계실 내에 장착되어 있으며 트롤리 하부에 와이어로프에 의해 연결된 스프레더가 컨테이너 화물을 매달아 아웃리치(Outreach), 스패ن(Span), 백리치(Backreach) 구간을 따라 움직이며, 이는 모터의 속도 제어로 운전된다.

주행장치(Gantry Crane)는 야드 위에 설치된 2개의 레일을 따라 크레인 전체가 선박의 선수와 선미 쪽으로 이동을 하며 이동거리는 케이블 릴의 케이블 길이에 따라 계류 위치에서 좌우로 수백[m]을 이동할 수 있다. 좌우측으로 크레인이 이동할 때 주위 작업원에게 크레인의 이동을 알리는 사이렌과 경광등이 작동되도록 장착되어 있으며, 또한 동일선상에 있는 다른 크레인과 충돌을 방지할 수 있는 센서가 부착되어 이동 중에 발생하는 위험요소를 운전자에게 알려주는 기능이 있다.

해상 및 육상쪽의 각 다리에는 8개의 차륜이 있으며 다리당 4~8대의 모터로써 차륜을 기동한다. 주행장치는 레일 클램프 또는 휠 클램프와 연동하고 있으며 양쪽의 레일 클램프에 설치되어 있는 폼림 확인용 센서에서 폼림을 감지하지 않으면 주행운전을 할 수 없도록 되어 있다. 케이블 릴 동작은 크레인의 주행속도에 따라 연동 동작되는데 케이블 릴은 토크에 의해 제어가 이루어진다.

호이스트장치(Hoist Device)는 모터의 정회전 또는 역회전에 의하여 와이어 드럼에 연결되어 있는 와이어로프를 풀고 감음으로써 스프레더를 포함한 화물을 권상 또는 권하시키는 장치로서 구동부는 기계실내에 설치되어 있다. 이 장치는 붐 하부에서 트레일러 새시 또는 본선의 홀드까지 이동하는 일을 담당하면서 붐팁에 로드 셀(Load Cell)이 설치되어 스프레더와 컨테이너 화물의 중량 및 편하중을 측정을 할 수 있도록 되어 있으며 권상 작업시 모터의 토크에 영향을 미친다.

호이스트장치는 운전실에서 조작할 수 있으며 MCS(Master Control Switch)를 밀면 권하 동작을 하고 당기면 권상동작이 된다. 권상 권하는 인크리멘탈 엔코더(Increment Encoder) 및 캠 리밋스위치(Cam Limit Switch)에 의해 속도에 비례하여 감속구간, 정지 실 빔(Sill Beam)의 충

돌, 트롤리 주차 등을 자동으로 제어되도록 구성되어 있다.

이외 장치의 구성으로는 운전을 하지 않을 때 바람 등에 밀리지 않도록 하는 앵커와 타이다운(Tie Down), 작업 중에 밀리지 않도록 하기 위한 레일 클램프 등의 안전장치가 있다. 그리고 크레인 상부에 바람의 속도와 방향을 측정할 수 있는 풍량 및 풍속계가 설치되어 바람의 최대 속도를 측정하여 통상 16~20[m/s]정도가 되면 작업을 정지 하도록 구성되어 있다.

또한 트롤리 동작이 원활하도록 와이어로프에 일정한 장력을 유지시키는 로프 텐서너(Rope Tensioner)가 있으며, 컨테이너 화물의 무게중심 그리고 파도 등에 의한 선박의 움직임(좌, 우, 전, 후)에 의해 컨테이너 화물이 기울어진 경우 화물을 올바르게 집거나 놓기 위해서 알맞은 각도로 스프레더를 기울이는 틸팅장치(Tilting Device)가 있으며, 붐을 크레인 상부 구조물에 고정시켜 붐 와이어로프에 긴장을 주지 않기 위한 붐 랫치(Boom latch), 그리고 작업시 선박의 마스트와 크레인 붐과의 충돌을 방지하는 붐 충돌방지 장치 등이 있다.

컨테이너 크레인은 컨테이너 화물을 전용으로 취급하기 위한 스프레더가 기본적으로 장착된 장비를 말하며 스프레더의 세부동작은 다음과 같다. 스프레더가 컨테이너 화물의 네모서리 부분과 정확한 착상여부를 감지하는 리밋스위치(Limit Switch)가 있으며 스프레더와 컨테이너 화물을 연결하기 위한 콘(Cone)이 설치되어 있고 콘을 끼워 90°로 회전하여 잠그고 푸는 트위스트 록(Twist lock)장치가 있다. 콘이 컨테이너 화물의 네 모서리에 잘 들어가도록 안내판 역할을 하는 플리퍼(Fliper)장치, 컨테이너 화물의 길이에 맞게 신축시키는 텔레스코픽(Telescopic)장치가 있다.

스프레더는 헤드블록(Head block)의 하단에 수동식 트위스트 록으로 연결되어 있으며, 스프레더의 동작은 유압장치에 의해 동작되고 메탈 커넥터(Metal Connector)와 셀프시일 커플링(Self seal coupling)이 연결되어 있다.

컨테이너 화물의 하역작업은 주로 트롤리와 호이스트의 혼합동작으로 이루어지는 선박의 홀드단위 작업이기 때문에 컨테이너 화물의 이송경로는 수평과 수직운동의 조합으로 이루어진다.

컨테이너 크레인의 하역작업은 선박이 부두안벽에 접안할 때 크레인의 붐과 충돌하지 않도록 붐 호이스트를 올린 후 접안을 하고 접안 후 크레인의 붐을 내리고 타이다운 및 앵커를 해체한 후 주행운전을 통하여 선박의 홀드단위로 정차한 후 작업을 개시한다.

적하는 육상의 트레일러 새시에서 해상의 선박으로 이송하는 작업을 말하고, 양하는 선박에서 육상의 트레일러 새시위에 올려 놓는 작업을 말한다. 따라서 트롤리와 호이스트 그리고 스프레더의 반복동작으로 작업을 한다고 볼 수 있다. 트롤리 이송은 가속, 등속, 감속 그리고 스프레더의 흔들림을 보정하는 4단계의 작업으로 이루어진다. 트롤리의 이송구간 변경과 목표지점의 높이에 의한 호이스트 와이어로프의 길이가 변하고 특히 목표지점 전방에서 컨테이너 화물을 내려놓기 위해 트롤리 모터의 속도를 감속하고 이때 와이어로프 길이가 심하게 변하기 때문에 와이어로프의 길이가 고정된 상태에서 제어를 설계하는 것은 컨테이너 크레인에서는 적용하기 어렵다.

가속과 감속구간에서 발생하는 흔들림은 실제작업에서 큰 의미가 없으며 화물의 흔들림은 목표지점 전방에서 감속을 실시하는 구간에서 가장 큰 흔들림이 발생한다고 볼 수 있다. 따라서 목표지점에서의 흔들림

을 어떻게 빠르게 제어하는가에 따라 하역작업의 생산성이 결정하는 요소가 된다. 스프레더의 흔들림 억제는 목표지점 전방에서 트롤리 모터의 감속으로 컨테이너 화물의 흔들림을 억제한 후 화물을 놓고자 하는 위치에 정확하게 위치시키는 구간으로 기존의 운전방법은 운전자의 숙련도에 주로 의존 한다. 또한 선박의 홀드에 안전하게 컨테이너 화물이 들어가기 위해서는 셀 가이드(Cell Guide)의 유격이 약 20[cm]이내에서 작업이 가능하므로 이를 맞추기 위해 운전자의 노력이 필요하다. 이는 하역 사이클 시간에 많은 영향을 미치며 또한 에너지 소비에도 상당한 영향을 미친다. 따라서 최상의 조건을 만족시키고 가능한 컨테이너 화물의 흔들림이 없고 에너지 소비가 최소화 되는 것이 최상의 조건이 될 수 있다.

최근 컨테이너의 최소 이송속도는 일반적으로 호이스트의 경우는 60~180[m/min], 트롤리는 180[m/min]이상, 갠트리는 45[m/min]으로 되어 있다. 컨테이너 크레인의 속도는 선박의 크기에 따라 그 속도를 달리 하고 그 속도는 더 증가할 것으로 판단되지만 속도의 한계는 배제할 수 없을 것으로 판단된다[6].

또한 컨테이너 크레인은 현수방식으로 운전되므로 빠른 시간내에 트롤리와 호이스트의 속도를 최고로 하면서 컨테이너 화물의 흔들림을 억제하는 것이 현실적 대안이며, 이는 에너지 소비 역시 최소화 할 수 있어 생산성 향상 및 경쟁력 재고에 많은 도움이 될 것이다.

컨테이너 크레인은 트롤리의 위치, 와이어로프의 흔들림 각도 등 다수의 상태에 비해 제어입력은 모터에 가해지는 전압뿐인 SIMO(Single Input Multiple Output)시스템으로 보유하고 있는 자유도의 수가 시스템에서 구사할 있는 제어입력의 수보다 많은 시스템이다.

2.1.2 트랜스퍼 크레인

트랜스퍼 크레인은 컨테이너 터미널의 야드에서 규격화된 컨테이너 화물을 트레일러의 새시에 상차 또는 하차는 역할을 담당 하는 야드 전용하역장비로써 레일식인 RMGC(Rail Mounted Gantry Crane)과 타이어식인 RTGC(Rail Tired Gantry Crane) 두 종류가 있다.

RMGC와 RTGC의 구조는 동일하나 RMGC는 RTGC의 타이어 바퀴 대신 철도용 휠(Wheel)을 사용하고, RMGC의 구동전력은 디젤엔진 대신 케이블 릴(Cable Reel)에 의해 공급되는 육상공급 전원으로 구동하고 RTGC는 자체 발전기를 탑재하여 이를 전원으로 사용한다.

그러나 디젤엔진의 헌팅(Hunting) 등으로 발전기에서 생산된 전력이 일정하지 못하여 자동전압조정장치(Automatic Voltage Regulator)를 탑재하고 있어 컨테이너 터미널의 특성상 염분이나 수분에 노출되어 있어 다른 크레인에 비해 상대적으로 고장 빈도가 잦다. 또한 최근에는 고유가로 인한 경제성 문제로 인해 디젤 엔진형을 전기식으로 교체하는 추세에 있다[1].

또한 RMGC는 레일위에 설치되어 있어 컨테이너 적재 블록을 자유로이 바꿀 수가 없기 때문에 주로 철송용 컨테이너를 취급하는 장비로만 사용되어 왔으나 RMGC는 다열 고단 적재가 가능하고, 정확한 주행과 정지로 무인 자동화가 용이하기 때문에 근래에는 많은 터미널에서 RTGC대신 RMGC를 설치하고 있다.

특히 최근의 고유가와 환경문제로 인하여 이런 경향이 더욱 강하게 나타나고 있으며, 2006년 상업운전을 시작한 부산 신항에서는 RTGC대신 RMGC를 설치하여 사용 중이며, 2007년 이후 개장한 신규 터미널도 대부분 RMGC를 야드 주장비로 사용하고 있다.

Table 2.2는 국내의 부산신항에 설치된 RMGC의 주요 사양으로 RTGC와 비교할 때 적재능력, 처리속도에서 유리할 뿐만 아니라 자동화가 많이 이루어지고 있다.

Table 2.2 부산항 신항의 RMGC사양 비교

구 분	부산신항 (Ph.1-1)	부산신항 (Ph.1-2)	부산신항 (Ph.2-1)
설치년도	2006년	2008년	2008년
인양용량	65[ton](Twin-20) 50[ton](single)	40[ton]	40 ton
적재능력	5단 9열	5단 9열	6단 10열
Wheel span	28.5[m]	28.4[m]	31.0[m]
Lifting height	18.0[m]	18.0[m]	21.0[m]
Hoist speed	26/83[m/min]	45/90[m/min]	30/80[m/min]
Trolley speed	120[m/min]	150[m/min]	120[m/min]
Gantry speed	150[m/min]	180[m/min]	150[m/min]
Automation	Semi-automated	Unmanned automation	Unmanned automation

자료출처 : 국내 컨테이너 항만기술개발 로드맵 수립연구, 2007-14,
한국해양수산개발원.

Fig 2.3은 컨테이너 터미널에서의 트랜스퍼 크레인으로, 다음과 같은 동작으로 이루어진다. 트랜스퍼 크레인 장치는 시스템 전체가 이동할 수 있으며 스티어링 메커니즘이 있는 휠이 90°씩 회전할 수 있도록 되어

있어 스팬방향과 스팬의 직각방향으로 각각 주행할 수 있다.

타이어 휠의 회전은 실 빔에 붙어 있는 유압장치에 의해 유압실린더가 구동되고, 이 유압실린더는 휠 요오크의 한쪽에 핀으로 고정되어 있고 다른 쪽에는 로드 연결되어 있어 휠 요오크는 동시에 회전하게 된다. 또한 90°와 0°에서 잠김이 가능한 로킹장치(Locking Equipment)가 설치되어 있다.



Fig 2.3 트랜스퍼 크레인

트롤리 장치는 트롤리 위에 설치되어 두 개의 피니언이 거더 위의 랙에 설치되어 있고 이 피니언은 모터가 구동하게 되면 기어를 통하여 트롤리를 횡행방향으로 동작시킨다. 횡행구간의 양쪽 끝에는 속도를 감

속시키기 위한 리밋스위치(Limit Switch)가 설치되어 있다. 트롤리가 지정된 위치에서 미끌어지지 않도록 거더 위에 설치되어 있는 트롤리 앵커링 장치(Anchoring Equipment)가 있다.

호이스트 장치는 모터의 구동력으로 기어를 통하여 와이어 드럼을 돌려 스프레더를 권상 또는 권하시킨다. 와이어 드럼의 감김 속도는 매달린 화물의 중량과 MCS(Master Control Switch)에 의해 일반적으로 최대 34[m/sec]까지의 범위에서 원활하게 속도조정을 할 수 있다.

캠 리밋스위치(Cam Limit Switch)는 와이어 드럼의 감김 수에 따라 상한과 하한 위치를 검출하도록 되어 있어 스프레더가 트롤리나 지면에 충돌하는 것을 방지해준다. 또한 스프레더의 권하 속도가 규정치를 초과하는 과속도가 되면 와이어 드럼의 회전을 정지시키게 된다.

그리고 스프레더 장치는 메인 프레임(Main Frame)과 텔레스코픽 빔(Telescopic Beam)으로 이루어져 텔레스코픽 빔은 가이드 슈의 안내에 따라 확장과 축소를 하게 된다. 이때 확장과 축소는 유압실린더 또는 유압 모터에 의해 이루어지는데, 최근에는 오일의 누설로 인한 해양 오염을 방지하기 위하여 전기를 이용한 방식도 사용된다. 확장된 텔레스코픽 빔은 스톱퍼(Stopper)의 작용에 의해 규정길이(40피트) 이상은 늘어나지 못하도록 되어 있다. 이외에 트윈스트 록의 잠김과 폼림, 플리퍼의 작동 등은 유압장치에 의해 이루어진다.

기타장치로 스쿠장치 등이 있고 컨테이너 크레인과 기능이 유사하다. 산업현장에서 많이 사용하고 있는 천정크레인 (Overhead Crane), 타워 크레인(Tower Crane) 등의 동작방법도 항만에서 사용되어지는 크레인 과 유사하다.

2.1.3 야드 트랙터

야드 트랙터(Yard Tractor)는 트레일러에 컨테이너를 싣고 안벽과 스테킹 야드 간에 컨테이너를 이동하는 대표적인 이송장비로서 각 트레일러는 20피트, 40피트 컨테이너의 수송에 적합하도록 설계되어 있으며 연결장치(Twist-lock fitting)를 장착하고 있다. 유인으로 작동되며 높은 작업유연성과 빠른 이송속도로 목적 블록의 베이까지 이동한다. 야드 트랙터로 장치장과 안벽간 운송을 위해서는 일반적으로 1대의 컨테이너 크레인 당 5~6대가 필요한 것으로 알려져 있으며 수평배치 구조의 컨테이너 터미널에서 사용된다.



Fig. 2.4 야드 트랙터

2.1.4 스트래들 캐리어

스트래들 캐리어는 컨테이너를 직접 인양 운반하여 적재하거나 반출하는데 사용하는 장비로서 자유로운 주행으로 컨테이너 운반의 기동성에

중점을 둔 장비로 1960년대 말 처음 개발되어 3단 또는 4단 적재가 가능하며, 다단적에서 하단의 컨테이너를 처리할 경우 그 작업이 열에 의한 종 방향에 한정되므로 RTGC보다 작업이 더 곤란하다. 따라서 트랜스퍼 크레인 보다는 초기 투자비용이 적게 들지만 야드 효율적 운영 측면에서는 많이 뒤떨어져 소규모 터미널 등 매우 한정된 항만에서만 사용되고 있다.



Fig. 2.5 스트래들 캐리어

그러나 예외적으로 미국 버지니아주 NIT South 터미널의 경우 스트래들 캐리어가 RTGC와 샷시(Chassi)에 의한 운영보다 더 생산성이 높다고 판단하고 2002년부터 2012년까지 279백만불을 투입하여 RTGC에 의한 작업을 줄이고 스트래들 캐리어에 의한 야드 운영을 계획하고 있으며 네덜란드, 독일 등 유럽 항만 선진국에서는 야드장비로서 스트래들 캐리어의 사용빈도가 매우 높은 편에 속한다.

2.1.5 셔틀캐리어

셔틀 캐리어는 기존의 야드 트럭이나 자동화 컨테이너 터미널의 AGV와 같은 이송장비를 대체할 수 있는 장비로서 컨테이너를 적재한 상태로 주행이 가능하며 스스로 컨테이너를 Loading 또는 Unloading하여 작업할 수 있는 야드 장비이다.



Fig 2.6 셔틀 캐리어

컨테이너 크레인이 컨테이너 화물을 내려놓으면 셔틀 캐리어가 이동하여 컨테이너를 적재하여 야드로 이동한다. 야드에서 컨테이너를 내려놓으면 야드 크레인이 컨테이너를 Loading하여 야드에 적재한다. 따라서 기존 이송장비와는 달리 본선작업이나 야드 작업시 하역 장비와의 연계가 불필요하므로 셔틀 캐리어의 작업 사이클을 줄일 수 있어 보다 많은 컨테이너를 이송할 수 있다.

셔틀 캐리어의 자유로운 이동성과 유동적인 작업능력으로 인하여 안벽 및 야드 하역장비의 생산성을 증가시킨다. 특히 셔틀 캐리어가 스스로 컨테이너를 적재하여 이송이 가능하므로 하역장비와 셔틀 캐리어와의 연계지점에서 버퍼존을 형성하여 하역장비의 사이클 타임을 줄임으로서 생산성을 크게 증가시킨다.

자동화 측면에서 DGPS(Differential Global Positioning System)을 사용하여 셔틀 캐리어의 자동화가 가능하다. 또한 경제적으로 셔틀캐리어 시스템의 운용으로 야드 크레인의 사이클 타임이 줄어들게 되므로 장비 투자비 및 인건비를 감소시킨다. 특히 생산성 측면에서 6대의 AGV에 2대의 셔틀 캐리어가 소요되며, 기존의 터미널에서 레이아웃의 변경이나 하역장비를 전환할 필요 없어 생산성의 증가가 이루어질 수 있다.



2.2 하역장비의 발전 현황

2.2.1 컨테이너 터미널의 슈퍼스트럭처(Superstructure)의 변화

슈퍼스트럭처는 컨테이너 터미널에서 서비스를 받거나 서비스를 수행하는 시설 또는 상부시설 구조물로서 선박, 안벽장비, 이송장비, 야드장비, 게이트 등이 이에 해당된다. 즉 토목적인 인프라스트럭처를 제외한 하역에 필요한 모든 장비를 의미한다.

컨테이너 터미널에서 취급되는 선박은 컨테이너 전용선으로서 교역규모의 증대에 따라 등장하는 초대형 컨테이너선의 크기도 급증하는 추세에 있다. 1957년 미국의 시랜드사가 미국내 연안수송에 소형 탱크선을 개조한 최초의 컨테이너선인 게이트웨이 시티(Gateway City)호를 운항한 이래 10년 뒤인 1968년에 1세대 700[TEU]급인 전용 컨테이너선이

등장하였으며 여러 단계의 컨테이너선 대형화를 거쳐 40여년이 지난 2007년에 초대형선 11,500[TEU]급인 엠마머스크(Emma Maersk)호가 등장하게 되었다. 또한 2007년 중반 독일의 피터돌레사가 삼성중공업에 12,600[TEU]급 선박 8척을 발주함으로써 초대형 컨테이너선의 시대가 급속히 진행되고 있다.

컨테이너선의 초대형화는 세계적으로 컨테이너 물동량의 증가, 대형선사의 통합화와 거대화, 운항연료비 증가, 운임의 하락화 등에 따라 규모의 경제를 추구하려는 선사 전략의 일환으로 나타나고 있으며, 이러한 추세로 보았을 때 선박의 초대형화 경쟁은 가속도를 더할 것으로 판단된다. 컨테이너 터미널에서 터미널의 생산성을 결정짓는 가장 중요한 하역 시설인 컨테이너 크레인은 기항하는 선박의 크기변화에 따라 변화되어 왔다.

이는 다양한 선박이 기항하는 항만의 첫 서비스 창구인 컨테이너 크레인은 선박의 크기에 상관없이 원활한 서비스가 가능해야 하며 또한 신속한 서비스를 제공할 수 있어야 하기 때문이다. 따라서 선박의 대형화에 따라 선폭이 증가되어 왔고 증가된 선폭에 대응하기 위해서는 컨테이너 크레인의 아웃리치가 이에 대응하여야 하며 아웃리치가 장대화됨에 따라 구조 및 안정성 측면에서 전반적인 크레인의 제작규모도 비례적으로 증가되어야 한다.

또한 선박의 초대형화에 따른 취급물량의 증가로 컨테이너 크레인 성능 또한 발전되어야만 선박에 대한 원활한 서비스가 가능하다. 그러므로 컨테이너 크레인의 변화는 컨테이너 크레인의 제작 및 운영측면에서는 아웃리치, 레이스팬의 장대화, 장치의 고성능화 및 자동화 쪽으로 변화하고 있다.

이송장비의 경우 장비크기의 변화보다는 기능적 변화를 많이 가져오게 되었다. 과거의 이송장비는 이송장비와 연계되는 안벽장비 야드장비와의 작업에서 야드 트랙터 및 AGV가 도착하여야만 컨테이너 작업이 이루어지는 수동적 기능을 가진 장비가 사용되었다. 따라서 타 장비와의 연계 작업시 이송장비가 도착하여야만 이송장비의 이송작업이 수행되기 때문에 타 장비의 작업완료까지 대기시간이 발생 할 수밖에 없어 이러한 이송장비의 수동적 기능이 터미널의 전반적 생산성을 저해시키는 주요원인으로 작용할 수 밖에 없었다.

따라서 이러한 단점을 보완하기 위해 스트래들 캐리어, 셔틀 캐리어와 같이 자가 하역 기능을 추가함으로써 이송장비의 도착여부에 상관없이 지속적으로 작업이 가능한 추세로 변화하는 기능적 변화가 진행되고 있다. 또한, 자동화터미널이 증가함에 따라 사람이 개입하지 않는 무인 이송차량을 개발하여 투입함으로써 인건비 절감을 위한 방향으로 변화하고 있다.

현재 컨테이너터미널의 야드 장비는 새시, SC, RTGC, RMGC, OHBC (Over Head Bridge Crane)등이 사용되고 있다. 컨테이너 항만의 초기에는 넓은 부지면적과 적은 물동량을 가진 항만의 특성상 1단적의 새시시스템을 사용하였으나 항만의 건설비용 증가, 부지활용성의 증가요구, 고생산성 항만의 필요성에 의해 고 단적이 가능하고 부지효율성을 증가시킬 수 있는 고효율의 야드 운영이 가능한 연구 개발도 활발히 이루어지고 있는 상황이다[3~5].

따라서 야드 장비는 과거 장비의 저단적화에서 고단적화, 광폭화, 자동화로 도입하는 추세에 비례하여 첨단 장비의 적용비율도 높아지고 있는 추세에 있다.

2.2.2 항만 하역장비의 변화요인

가. 선박의 대형화에 따른 변화

현재까지 항만하역장비 발전과 변화를 주도해온 핵심적인 요인은 선박의 대형화이다. 즉 항만하역장비들은 선박의 크기, 하역시의 적·양하량 및 컨테이너의 사이즈가 생산성의 중요한 지표이며 이와 관련하여 선박의 대형화가 가장 핵심적인 요인이다.

초기에는 길이 200[m]내외의 선박에서 최근에는 360[m]급의 초대형 선박까지 지속적으로 선박이 대형화되어 안벽장비의 경우 아웃리치가 길어짐에 따라 생산성을 유지하기 위해 트롤리 및 호이스트의 속도가 상승하였으며, 선박의 높이가 높아짐에 따라 크레인의 높이도 높아져 호이스트 케이블의 스웨이(흔들림)가 심해지고 이를 해결을 위한 안티 스웨이 기술이 적용되었다.



나. 항만 서비스 수준의 증가에 따른 변화

세계적으로 컨테이너 물동량이 급증하고 선사들의 통폐합이 가속화되면서 글로벌 선사들의 영향력이 점차적으로 증대되고 있다. 이는 글로벌 선사들의 기항여부에 따라서 해당국가 항만의 입지가 결정될 수 있다는 뜻이기도 하다.

과거 선박의 규모가 소규모일 때는 대륙별로 다수의 항만에 기항할 수 있었으나 선박이 대형화 될수록 기항 항만의 수는 점점 줄어들어 각 대륙별로 1~2개, 선사별로는 3~4개의 항만에 기항하게 되며 이외의 항만은 중심항만 경쟁에서 탈락되어 지역항으로의 전략을 가져올 수밖에 없는 상황에 이르게 되었다.

이러한 변화는 고객인 선사들의 요구를 어느 정도 충족시키느냐에 따른 것이며 이에 따라 항만 운영사 들은 자국 항만서비스 수준의 증가를 위해 경쟁적으로 항만시설에 투자를 하고 있다.

초대형 선박기항을 유치하기 위해 대규모 안벽장비 도입, 야드장비 및 항만시설의 개선, 자동화 터미널을 포함한 신개념 컨테이너 터미널의 개발 등 항만서비스의 증가를 통한 항만의 경쟁력 확보에 매진하고 있는 실정이다. 이는 결국 항만하역장비의 효율화와 자동화 및 대형화에 이르게 되는 주요 원인으로 작용하고 있는 상황에 있다.

다. 인건비 상승에 따른 변화

컨테이너 터미널 종사자의 인건비는 타 직종에 비해 매우 높은 편으로 앞으로도 인건비는 점점 더 상승하고 있는 추세에 있다. 유럽 선진항만의 경우 10여년전 부터 자동화터미널을 계획하여 개발한 주요 원인중의 하나는 항만인력의 인건비 절감이었다.

자동화터미널의 경우 기존 터미널에 비해 장비 운전인력이 1/3로 감소되어 연간 운영비에서 상당부분을 절감을 가져오고 있다. 따라서 향후 인건비의 상승이 자동화터미널의 건설로 이어질 가능성이 높기 때문에 자동화터미널을 위한 자동화된 첨단 항만하역장비의 개발가능성은 매우 크다고 할 수 있다.

라. 장비기술의 첨단화에 따른 변화

항만하역장비 관련 산업도 기계적 생산성 및 운영적 측면에서 고생산성, 자동화 방향으로 보다 첨단화되고 있는 추세에 있다. 이는 항만 장비 관련기업들은 항만 운영사 들이 요구하는 항만서비스 수준 증가 및

터미널 생산성 증가에 대응하여야만 항만장비관련 산업에서 생존할 수 있기 때문이다. 따라서 안벽장비의 대형화 및 고 생산성화, 이송장비 및 야드장비의 무인화 등 항만장비 관련기술의 첨단화에 연구 개발과 투자를 지속하고 있다.

마. 항만부지이용의 고 효율화에 따른 변화

그동안 세계적으로 급격한 물동량 증가에 따라 항만개발과 건설에 막대한 투자를 지속해 오고 있다. 그 결과 항만을 건설할 수 있는 천혜지역은 점점 더 줄어들고 항만매립을 위한 매립재 또한, 감소하고 있는 실정에 있다. 또한 과거에 비해 증가되는 항만건설비용과 항만의 생산성 증가요구는 항만부지이용의 고 효율화를 유도하고 있다. 따라서 항만부지이용의 고 효율화 요구는 동일한 부지에 보다 더 높은 장치능력 및 고 생산성을 가진 하역장비들의 개발에 대한 주요 원인으로 작용하고 있다.

향후 항만부지 이용의 고 효율화 요구는 점점 더 거세질 것으로 예측되며 항만부지비용을 절감시킬 수 있는 새로운 하역시스템 및 하역장비의 개발도 예상할 수 있다.

2.2.3 항만하역장비의 변화추세

가. 안벽장비의 변화추세

항만하역장비의 경우에 가장 두드러진 변화는 선박하역작업을 하는 컨테이너 크레인의 자체성능개선이라 할 수 있다. 최초 크레인이 개발된 후 현재까지 그 구조와 기능면에서 가장 많은 변화가 있었던 부분이며 터미널 하역시스템의 생산성에 영향을 미치는 핵심요소이기도 하다.

안벽장비의 변화는 세부적으로 컨테이너 크레인의 아웃리치 길이 및

레일스팬 폭과 같은 구조적 변화, 그리고 컨테이너 크레인 기능의 변화로 나누어 볼 수 있다.

컨테이너 크레인 아웃리치의 경우 선박의 대형화에 따라 선박의 폭이 넓어지고 이를 원활하게 처리하기 위해서는 컨테이너 크레인의 아웃리치 길이가 선박의 폭보다 길어야만 처리가 가능하다. 따라서 컨테이너 크레인의 아웃리치도 길어져야 하기 때문에 선박규모의 변화에 따라 컨테이너 크레인의 아웃리치도 변화되어 왔다.

컨테이너 크레인의 레이스팬의 변화도 아웃리치의 증대 및 대형선의 등장으로 인한 레이스팬 내부 작업레인수의 확보 등으로 폭의 변화를 가져왔다. 과거 2천[TEU]급 선박이 대표 선형인 항만의 경우 컨테이너 크레인의 레일스팬은 16[m]였으며 레일스팬 내부의 이송장비 작업 레인수는 3~4레인을 필요로 하였다. 그러나 선박의 규모 증가에 따라 5천[TEU]급 선박이 대표선형으로 등장하면서 안벽에서 처리해야 할 물동량이 증가하고 안벽장비의 소요수량이 증가하게 되었다.

안벽장비의 소요수량 증가에 따라 이송장비 작업로가 6레인 이상이 필요하게 되어 과거 16[m]였던 레일스팬 폭은 30.5[m]로 증가하게 되었으며 오늘날 대부분의 컨테이너 항만은 30.5[m] 레일스팬 폭을 적용하고 있다.

최근 들어 안벽 생산성의 증가 및 항만의 자동화 등으로 인해 터미널의 생산성이 증가하게 되어 안벽에서 야드까지 보다 증가된 이송장비의 생산성을 요구하게 되었다. 따라서 고효율, 고생산성을 추구하는 대규모 항만의 경우 35[m]의 레일스팬을 채용하고 있는 추세에 있다.

예외적으로 특정한 목적을 위해 레일스팬을 확장하는 경우가 있는데 부산신항만의 경우 안벽에서의 듀얼 사이클을 운영하기 위해 레일스팬을

42.67[m]로 건설하여 작업레인을 9레인까지 확보하였다.

컨테이너 크레인의 기능적 측면에서는 과거 해상측 선박의 컨테이너와 육상측 이송장비의 컨테이너를 모두 담당하는 SHST(Single Hoist Single Trolley)방식이 많이 사용되었으나 안벽에서의 처리능력 요구증가와 항만 자동화의 발달로 인해 해상측 선박작업과 육상측 이송장비의 작업 사이클을 분리하여 생산성을 높이는 DHST(Dual Second Trolley)방식의 사용이 증가하고 있다. 또한 선박측 수직이송작업 → 트래버스 수평이동 → 이송 장비측 수직 이송작업 등 3단계의 작업 사이클 분리로 컨테이너 크레인의 생산성을 보다 증가시킬 수 있는 신개념의 크레인도 등장할 예정이다.

그리고 크레인의 장치개발을 통해 터미널에서의 작업효율을 높이기 위한 동일한 작업회수에 그 효율성을 높이기 위해 다량의 컨테이너를 동시에 취급할 수 있는 스프레더의 기능을 강화(속도개선, Multi-Load)하는 방향으로 기능이 개선되었다. 기존의 20피트 1개나 40피트 1개만 취급이 가능했던 스프레더 시스템을 20피트 컨테이너 2개를 동시에 작업이 가능한 트윈 리프트(Twin Lift)시스템, 40피트 2개 또는 20피트 4개의 동시취급이 가능한 텐덤 리프트(Tandem Lift)시스템으로 개선시켜 운영하고 있다. 결론적으로 과거 1세대부터 현재까지의 안벽장비의 변화를 간단하게 요약하면 아웃리치, 레일게이지 등의 대형화와 트롤리, 호이스트 등 장치의 고속화로 나타낼 수 있다.

나. 야드장비의 변화추세

컨테이너 항만의 초기에는 넓은 부지면적과 적은 물동량을 가진 항만의 특성상 1단적의 새시시스템을 사용하였으나 항만의 건설비용 증가,

부지활용성의 증가요구, 고생산성 항만의 필요성에 의해 고단적이 가능하고 부지효율성을 증가시킬 수 있는 RTGC, RMGC, OHBC 등 다양한 야드하역 장비가 등장하여 운영되고 있다.

더불어 고단적 적재 창고시스템, 웨어하우스 시스템 등 부지효율성을 극대화하면서 고효율의 야드 운영이 가능한 연구 개발도 활발히 이루어지고 있는 상황이다. 따라서 야드 장비는 과거 장비의 저단적화에서 고단적화, 광폭화, 자동화를 도입하는 추세에 있으며 첨단 장비의 적용비율도 높아지고 있는 추세에 있다.

향후 발전될 야드 장비는 항만의 성격에 따라 달라질 것으로 판단되나 중소형 항만은 RTGC 시스템, 대형항만은 보다 광폭화 된 RMGC시스템을 채용할 것으로 예상되며 현재의 시스템보다는 부지효율성이 높고, 고생산성이며 경제적으로 우수한 야드 장비가 개발될 것으로 판단된다.

대표적 야드 장비인 RTGC의 구조적 변화를 살펴보면 1960년대 처음으로 도입되었을 당시 바퀴 4개에 3단 3열 또는 4단 4열의 적재가 가능한 구조였다. 이후 바퀴 8개에 4단 6열을 적재할 수 있는 구조로 정착되어 현재까지 많은 컨테이너 야드에서 사용되고 있다.

최근에는 5단 6열 크레인도 많이 사용되고 있다. 또한 싱가포르항의 경우 6단 6열 그리고 7단 8열의 트랜스퍼 크레인까지 운용되고 있다.

그러나 이러한 고단적 및 다열 적재를 하기 위해서는 보다 효율적인 운영시스템이 필요하고 많은 재작업에 대한 우려뿐만 아니라 트랜스퍼 크레인의 구조상 크레인의 높이가 높을수록 장비 자체의 특성상 흔들림이 많아져 작업성이 떨어지기 때문에 현재 대부분의 터미널에서는 5단 6열을 사용하고 있다. 이에 대한 예로 1990년대 싱가포르항의 경우 6단 6열 또는 7단 8열 크레인을 발주하였으나 2006년에 두산중공업이 싱가포르

항에 납품한 120대의 RTGC 모두 5단 6열이었다. RTGC의 장치 및 기능상 변화추세를 살펴보면 우선 작업 속도 향상을 위해 호이스트의 속도와 트롤리 및 크레인 주행 속도가 많이 증가되고 있는 추세이다.

크레인의 자동화 및 운전 편의성 향상을 위해 AGSS(Automatic Gantry Steering System) 및 APIS(Automatic Position Indication System)등이 사용되고 있다.

AGSS는 RTGC가 야드에서 정해진 주행로를 벗어날시 대형사고로 이어질 가능성이 있기 때문에 자동으로 정해진 주행로만 운행하도록 하는 시스템이다. AGSS는 주로 다음과 같은 2가지 방식이 사용되고 있다.

먼저 주행로에 특수 페인트를 하고 이를 크레인에 설치된 CCTV로 인지, 해석하여 정해진 오차를 벗어나면 자동으로 수정 Steering하는 방식이며, 다른 방식은 일정 전자파에 반응하는 Transponder를 주행로에 일정 간격으로 박아 이를 크레인에 설치된 센서가 감지하는 방식이 있다.

APIS는 운전 자동화를 위한 장치로서 크레인 자체 및 트롤리, 스프레더의 위치를 파악하기 위한 장치이다.

일반적인 RTGC는 대부분 레그(Leg) 각 코너당 바퀴가 2개씩으로 4코너에서 총 8개의 바퀴로 구성되어 있다. 그러나 연약지반의 야드나 신규로 조성되는 터미널에서 야드 토목 비용을 줄이기 위해서 레그 각 코너당 바퀴를 4개씩 총 16개 바퀴를 장착한 크레인을 사용하고 있다.

초기에 컨테이너 터미널에 사용된 저단적의 스트래들 캐리어에서 점차적으로 장치공간의 효율을 향상시키기 위한 4단적 RTGC가 개발되었으며, 지속적인 항만의 물량증가 및 그에 따른 장치공간부족, 인건비 증가 등에 대응하기 위한 ATC, OHBC, RMGC 등이 개발되어 사용되고 있으며, 이러한 장비들의 특징을 결합한 HSS가 현재 국내 연구진에 의해

서 개발되었다.

다. 이송장비의 변화추세

이송장비의 경우 장비크기의 변화보다는 기능적 변화를 많이 가져오게 되었다. 항만에서 본선작업이나 야드 작업시 이송장비가 안벽장비, 야드 장비의 작업 상황에 영향을 받게 된다. 터미널의 물류는 안벽장비 ↔ 이송장비 ↔ 야드 장비로 컨테이너 연계작업이 순환하게 되어 있어 특정장비의 능력이 저하되면 다른 장비에 영향을 미치게 된다.

따라서 기존의 야드 트럭은 안벽 및 야드 장비의 다른 작업이 종료되면 서비스를 받게 된다. 그러나 안벽과 야드 장비의 서비스가 끝나지 않을 경우 이송장비가 대기하게 되며 결국 이송장비와 안벽 및 야드 장비를 연계하는 이송능력이 저하되므로 터미널의 전반적인 생산성이 감소하게 된다. 따라서 이송장비의 변화는 이러한 생산성을 저하시키는 요소를 제거하기 위한 발전이 이루어졌고 과거의 야드 트럭이 컨테이너를 인도받아 운반하는 수동적인 작업형태를 가지고 있었다면 이를 보완한 SHC(Shuttle Carrier), SC(Straddle Carrier)는 컨테이너를 스스로 자가 하역 할 수 있는 능동적인 작업형태를 가지고 있다.

또한 자동화 컨테이너 터미널의 경우 기존에 많은 인력이 소요되는 야드 트럭을 개선하고자 무인으로 운영되는 AGV(Automated Guided Vehicle), ASHC(Automated Shuttle Carrier)가 이용되고 있다.

초기의 컨테이너터미널에서 사용하였고 지금도 가장 많이 사용되고 있는 야드 트럭에서 이송과 장치기능이 결합된 스트래들 캐리어가 병렬로 사용되고 있으며, 인건비 증가에 따른 운영비용절감을 위한 AGV와 자동화 SHC가 현재 운영되거나 개발되어 사용될 예정에 있다.

현재 국내 연구진에 의해서 AGV와 SHC의 장점이 결합된 자가 하역 차량 ALV(Automated Lifting Vehicle)이 개발되었다.

2.3 결론

앞 절에서 기술한 바와 같이 크레인을 포함한 컨테이너 터미널을 구성하고 있는 모든 야드 장비는 수출입 화물의 선적과 하역에 있어서 필수 구성요소이다. 따라서 이들 장비는 컨테이너 터미널의 생산성을 결정짓는 가장 중요한 시설로서 고 효율화를 통하여 선사에 대한 고객 서비스가 신속하고 원활하게 이루어져야 한다.

이를 위하여 각 터미널에서는 선박의 대형화에 따른 취급물량의 증가에 장비의 크기변화와 더불어 기능의 변화도 꾸준히 진행되어 왔으며, 이에 따른 연구개발도 꾸준히 진행되어 왔다.

그러나 지금까지의 연구개발 방향은 주로 대형화에 따른 기능의 변화와 컨테이너 화물의 흔들림을 제어하여 빠른 시간 안에 하역을 완료하는 작업시간 단축에만 초점이 맞추어져 있었다. 그러나 현재는 고 효율화 및 고 생산성을 통한 대 고객 서비스의 강화, 비용절감을 통한 경쟁력을 확보하기 위한 연구개발이 시급한 과제로 대두 되었다.

컨테이너 터미널의 비용절감을 위한 방법으로 기술적 측면이나 운영적 측면에서 여러 가지 방법의 대안이 있겠으나 컨테이너 터미널의 운영에 있어서 대부분은 야드장비의 운영여부에 전적으로 의존한다고 하여도 과언이 아니므로 에너지 절감 등의 비용적 측면에서의 기술적 연구 개발이 보다 더 활발히 진행되어야 할 것으로 판단된다.

특히 최근에는 고유가로 인한 유류비의 증가에 따른 경영수지의 악화

등을 개선하기 위하여 저비용 고 효율화를 추구할 수 있는 방향의 연구 개발과 함께 추가시설의 설치나 보완 없이 생산성을 향상시킬 수 있는 장비의 운영관점에서 연구개발이 하나의 방안으로 요구되고 있다.



제 3 장 크레인의 가속도 특성 분석

3.1 크레인의 모델링

자동화 트랜스퍼 크레인(Automated Rail Mounted Crane)은 자동화 터미널 개발의 일환으로 컨테이너 터미널의 야드에 설치되어 야드에 운반되어진 컨테이너 화물을 적재 또는 반출하는 야드 장비로서 주로 레일형으로 제작되어 기존 터미널에 적용한 결과 20~30[%]의 하역생산성을 향상시키는 장비이다.

본 논문에서의 Eco-Driving을 고찰하기 위하여 가속도 특성 분석을 위한 트랜스퍼 크레인의 수학적 모델은 여러 문헌에서 소개 되었다[9~18].

크레인의 모델을 얻는 방법에서는 라그랑제 운동방정식과 뉴턴의 운동방정식을 이용하여 구할 수 있다. 이때 라그랑제 운동방정식은 기계시스템의 해석에 있어서 뉴턴(Newton)의 운동방정식과 더불어 잘 알려진 모델링 방법 중 하나로, 이 방식은 적용하고자 하는 문제에 대하여 그 운동을 가장 편리하게 표시할 수 있는 좌표계를 사용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 경우 그 좌표계에 구하는 좌표들의 값을 지정하면 그 역학계의 각 부분 위치가 완전히 결정되어야 한다는 가정이 따른다. 이것은 다루는 역학계가 가지고 있는 자유도 하나하나에 대하여 각각 1개씩의 좌표가 마련되어야 한다는 것을 의미한다.

트랜스퍼 크레인의 제어를 위한 시스템은 크게 트롤리, 트롤리의 구동 모터, 레일위에서 이동하는 컨테이너로 구분할 수 있으므로 여기서는 이

에 대한 수학적 모델을 구하도록 한다.

Fig 3.1은 본 연구의 제어대상인 자동화 크레인 시스템의 동역학적 좌표계를 단순화하여 정의한 것이다.

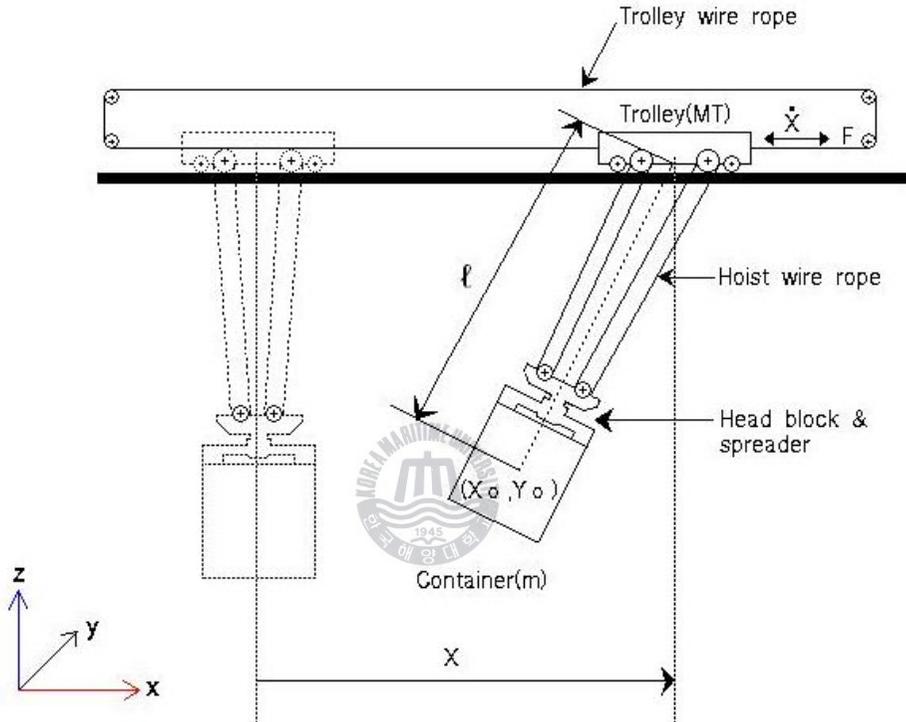


Fig 3.1 자동화 크레인의 모델링

이때 시스템에서 x 는 트롤리의 수평방향 위치[m], \dot{x} 는 트롤리의 수평방향 속도[m/s], \ddot{x} 는 트롤리의 수평방향 가속도[m/s²], M_T 는 트롤리의 질량[kg], M_l 은 로프의 질량[kg], M_C 는 크레인의 질량[kg], m 은 스프레더를 포함한 화물의 질량[kg], l 은 로프의 길이[m], \dot{l} 는 로프의 속도

[m/s], \ddot{i} 는 로프의 가속도[m/s²], θ 는 로프 흔들림의 각[deg], $\dot{\theta}$ 는 흔들림의 각속도[deg/s], $\ddot{\theta}$ 는 흔들림 각가속도[deg/s²], g 는 중력 가속도[m/s²], C_x 는 트롤리가 x 축 방향으로 이동할 때 발생하는 마찰계수, C_y 는 크레인이 y 축 방향으로 이동할 때 발생하는 마찰계수, K_y 는 크레인이 y 축 방향으로 이동할 때 발생하는 탄성계수이다.

운동방정식에는 트롤리의 수평방향운동, 컨테이너 화물의 수평방향, 운동, 컨테이너 화물의 수직방향 운동 및 컨테이너 화물 중심 주위에서 일어나는 회전운동이 있다. 따라서 크레인의 이동에 따른 운동을 라그랑제 운동방정식을 이용하여 나타내면 각각 다음과 같다. 이때 크레인의 수학적 모델을 유도하기 위해 다음과 같은 조건을 가정한다.

- (1) 화물은 집중질량이며, 로프의 흔들림 마찰은 무시한다.
- (2) 트롤리 및 크레인의 질량에 변속기 및 모터의 관성을 포함하며, C_x 에는 모터의 역기전력상수를 포함한다.

Fig 3.1에서 컨테이너 화물의 중심좌표 P점(x_0, y_0)은 식(3.1)과 같이 얻을 수 있다.

$$x_0 = x - l \sin \theta \quad (3.1a)$$

$$y_0 = l \cos \theta \quad (3.1b)$$

식(3.1)의 가정 하에 라그랑제 운동방정식을 이용하면 식(3.2)와 같은 비선형 크레인 모델을 얻을 수 있다.

$$(M_T + m)\ddot{x}(1 - \cos^2\theta - m^2\sin^2\theta) - m\cos\theta(2\dot{l}\dot{\theta} + g\sin\theta) \\ + m\sin\theta(F_l - C_l\dot{l} + ml\dot{\theta}^2 + mg\cos\theta) + C_x\dot{x} + 2m\cos\theta\dot{l}\dot{\theta} \\ - ml\sin\theta\dot{\theta}^2 = F_x \quad (3.2a)$$

$$ml^2\ddot{\theta} + ml\cos\theta\ddot{x} + 2ml\dot{l}\dot{\theta} + mgl\sin\theta = 0 \quad (3.2b)$$

$$(M_l + m)\ddot{l} + m\sin\theta\ddot{x} + C_l\dot{l} - ml\dot{\theta}^2 - mg\cos\theta = F_H \quad (3.2c)$$

$$M_C\ddot{y} + C_y\dot{y} + K_y y = F_y \quad (3.2d)$$

3.2 크레인의 상태공간 해석

위의 식(3.2)에서 크레인, 트롤리, 호이스트의 속도제어가 가능하다고 가정하면 다음의 식(3.3)으로 관계를 정의 할 수 있다.



$$\ddot{x} = u_x \quad (3.3a)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{\ddot{x}}{l} - \frac{g\theta}{l} \quad (3.3b)$$

$$\ddot{l} = -C_l\dot{l} + u_l \quad (3.3c)$$

$$\ddot{y} = -C_y\dot{y} + u_y \quad (3.3d)$$

위의 식(3.3)은 다음과 같이 식(3.4)으로 변환 할 수 있다.

$$\dot{x}_1 = \dot{x} = x_2 \quad (3.4a)$$

$$\dot{x}_2 = u_x \quad (3.4b)$$

$$\dot{x}_3 = \dot{\theta} = x_4 \quad (3.4c)$$

$$\dot{x}_4 = -au_x - bx_3 \quad (3.4d)$$

$$\dot{x}_5 = \dot{l} = x_6 \quad (3.4e)$$

$$\dot{x}_6 = -C_l x_5 + u_l \quad (3.4f)$$

$$\dot{x}_7 = \dot{y} = x_8 \quad (3.4g)$$

$$\dot{x}_8 = -C_y x_8 + u_y \quad (3.4h)$$

이때 K_y 는 공기에 의한 탄성으로서 무시하였으며, a 와 b 는 트롤리 이 동시에 발생하는 요소로서 상수로 가정하면 식(3.4)으로 부터 크레인의 상태방정식을 식(3.5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (3.5a)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} \quad (3.5b)$$



여기서 \mathbf{x} 는 상태벡터, \mathbf{u} 는 입력벡터, \mathbf{y} 는 출력벡터를 각각 나타내며 다음과 같다.

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8]^T$$

$$\mathbf{u} = [u_x \ u_l \ u_y]^T$$

$$\mathbf{y} = [x_1 \ x_3 \ x_5 \ x_7]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C_l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_y \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

위의 행렬식에서 y 축 방향으로 크레인이 이동할 때 발생하는 마찰계수 $C_y = 0.1$ 으로, 트롤리의 마찰계수 $C_l = 0.01$ 으로, 트롤리의 이동시에 발생하는 요소의 값 $a = 0.001$ 으로, $b = 1$ 를 각각 대입하면 동적방정식에 대한 시스템 행렬 A 와 입력행렬 B , 그리고 출력행렬 C 를 구하면 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.01 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.001 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$



3.3 시뮬레이션 및 고찰

다음의 Fig 3.2는 앞 절에서 도출한 자동화 크레인의 수학적 모델을 이용하여 특성분석을 위하여 가속도의 값을 1[m/s²]에서부터 5[m/s²]까지 단계적으로 증가시키면서 크레인을 운전하게 되면, 이에 따라 발생하는 출력값으로 가속도의 변화에 따른 속도의 변화와 이동하는 트롤리의 위치에 따라 소비되는 에너지의 패턴에 대한 시뮬레이션 결과이다.

여기서 시뮬레이션을 실행하기 위한 조건으로 크레인의 중량을

393[Ton]으로, 트롤리의 중량은 50[Ton]으로, 화물을 포함한 스프레더의 중량을 35[Ton]으로 하였으며, 단위 이동거리에 대한 에너지 소비량의 계산을 위하여 컨테이너 이동구간은 열의 중앙에서 외곽까지 20[m]를 가정하였다.

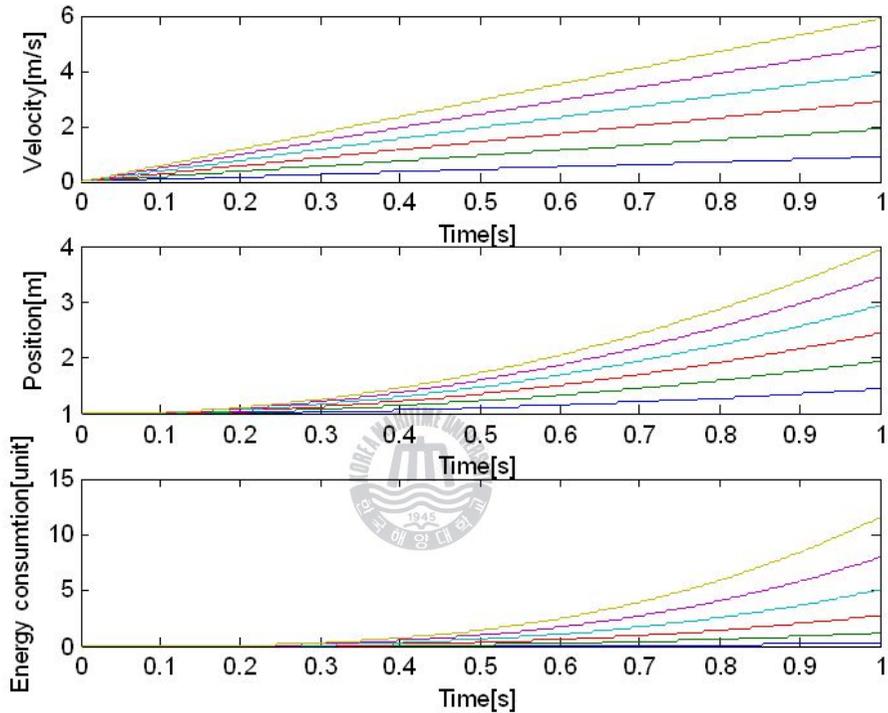


Fig. 3.2 속도 및 트롤리의 위치에 따른 에너지 소비패턴

그리고 Fig 3.3은 트롤리가 이동하는 위치의 변화에 따라 발생하는 에너지 소비패턴의 관계를 나타낸 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 트롤리가 출발하여 0.445[m]까지 이동했을 때 소비되는 에너지는 0.405[kWh]가 되었으며, 트롤리의 위치가 이동하여 0.940[m]일 때 소비되는 에너지는 1.789[kWh] 소비되는 것으로 나타났다.

이후 크레인의 운전을 계속하여 트롤리의 위치가 1.438[m] 지점에서 소비되는 에너지는 4.174[kWh]이며, 트롤리가 1.936[m]까지 이동하였을 때의 에너지 소비는 7.554[kWh], 그리고 트롤리의 이동거리가 2.434[m]일 때 에너지는 11.931[kWh]가 소비되는 것으로 나타나는 것으로 되었다.

결과적으로 위치 변화에 따른 에너지 소비패턴은 관계는 이동거리와 에너지소비가 비례하여 증가 하나, 트롤리의 이동거리가 많을수록 에너지 소비는 상대적으로 많이 소비되는 비선형 시스템으로 분석 되었다.

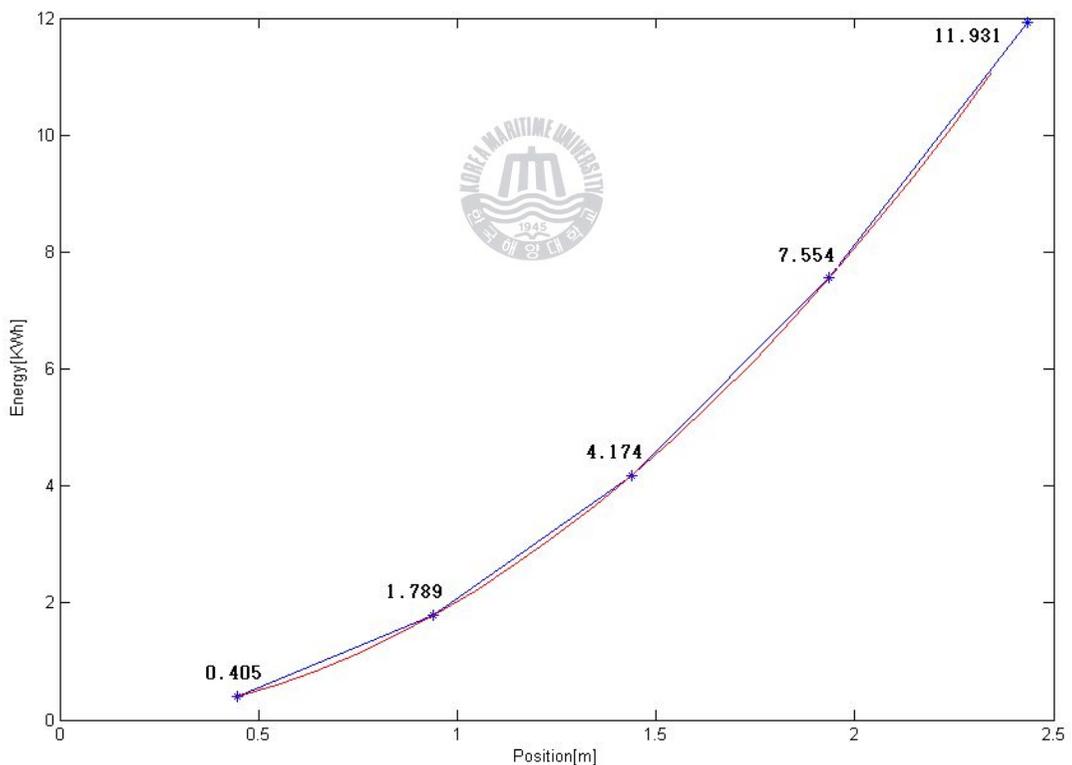


Fig. 3.3 트롤리의 위치에 따른 에너지 소비패턴

따라서 Fig 3.2와 같이 나타나는 시뮬레이션 결과로부터 가속도 값의 변화에 따른 각각의 출력값들에 대하여 분석된 결과는 Table 3.1으로 정리 하였다. 표에서 기술한 바와 같이 “Case 1”의 경우 가속도를 $1[m/s^2]$ 로 하였을 경우 이동거리는 $0.445[m]$ 이며 단위 거리당 평균 소비에너지는 0.909 으로 나타났다. 그리고 가속도 값이 $2[m/s^2]$ 로 주어진 “Case 2”의 경우에는 이동거리는 $0.940[m]$ 에서 단위 거리당 소비에너지는 1.904 이며, 가속도 값을 $3[m/s^2]$ 으로 주어진 “Case 3”의 경우에는 이동거리는 $1.438[m]$ 이며 단위 거리당 평균 소비에너지는 2.903 이며, 가속도 값을 $4[m/s^2]$ 로 주어진 “Case 4”의 경우에는 이동거리는 $1.936[m]$ 이고 단위 거리당 평균 소비에너지는 3.902 이다. 또한 가속도의 값이 $5[m/s^2]$ 인 “Case 5”의 경우에는 이동거리는 $2.434[m]$ 으로 단위 미터당 평균 소비에너지는 4.902 으로 나타났다.

Table 3.1. 가속도 특성에 따른 에너지 소비패턴

구 분	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
가속도 $[m/s^2]$	1	2	3	4	5
위치 $[m]$	0.445	0.940	1.438	1.936	2.434
소비에너지 $[kWh]$	0.405	1.789	4.174	7.554	11.931
단위 미터당 평균 소비에너지 $[Unit/m]$	0.909	1.904	2.903	3.902	4.902

따라서 Fig 3.4에서 보는바와 같이 트롤리의 이동거리에 대한 에너지 소비량은 가속도의 값이 클수록 이동거리는 상대적으로 많이 이동하였으

나 단위 거리당 에너지 소비는 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

즉 “Case 1과 2”의 경우 이동거리는 적게 이동하였으나 “Case 3, 4, 5”에 비해 상대적으로 에너지의 소비량은 적게 소비되는 것으로 나타났다.

또한 이들 값에 대하여 이동거리에 따른 각각의 상대적 에너지소비 관점에서는 “Case 1”과 “Case 2”가 “Case 3, 4, 5” 비해 상대적으로 가장 경제적인 운전을 할 수 있는 것으로 조사되어, 가속도 특성에 따른 운전 모드를 분류하게 되면 Fig 3.5와 같이 “Eco-Driving Mode”, “Normal-Driving Mode”, “Fast-Driving Mode”의 3가지 운전모드로 분류할 수 있다.

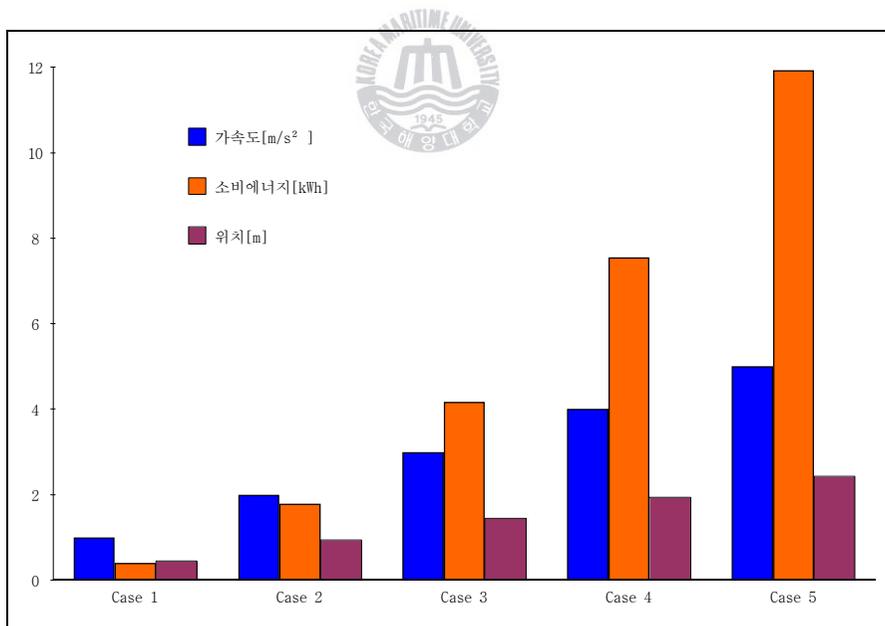


Fig 3.4 가속도 특성에 따른 에너지 소비패턴

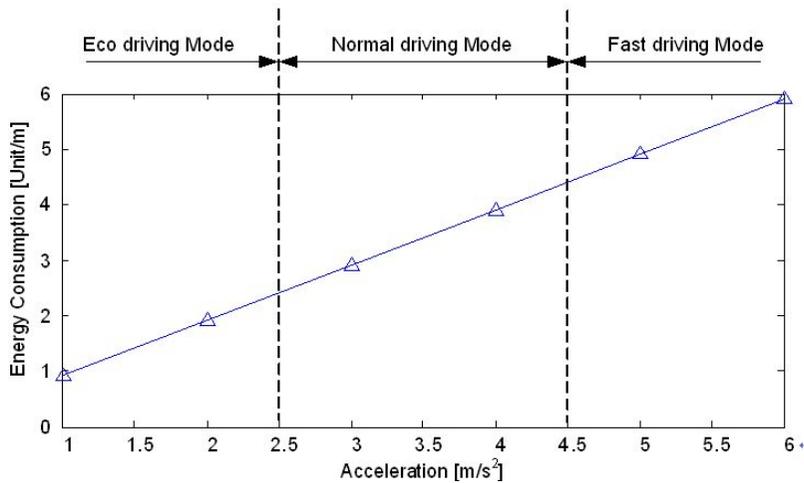


Fig. 3.5 가속도 특성에 따른 운전모드의 분류

3.4 결론

본 절에서는 트랜스퍼 크레인¹⁾에 대한 3차원 비선형모델 및 선형화를 통한 상태모델을 도출하여 크레인의 가속도 특성에 따른 트롤리의 이동 위치와 에너지 소비의 관점에서 시뮬레이션을 통하여 고찰한 결과 가속도 값이 $1 \sim 2.5 [m/s^2]$ 에서 “Eco-Driving Mode”, $2.5 \sim 4.5 [m/s^2]$ 에서 “Normal-Driving Mode”, $4.5 [m/s^2]$ 이상에서 “Fast-Driving Mode”임을 확인하였다. 그러나 가속도의 값이 작으면 에너지 소비는 상대적으로 적게 소모되는 것으로 분석 되었으나, 화물의 반입과 반출을 위한 크레인의 작업시간 단축 등의 생산성 향상의 측면에서는 반드시 가속도가 작은 값이 유리한 것이라고 단정하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다.

또한 위치 변화에 따른 에너지 소비패턴 관계에서도 이동거리와 에너지 소비가 비례적으로 증가 하나, 트롤리의 이동거리가 많을수록 에너지

소비는 상대적으로 많이 소비되는 비선형 시스템으로 분석되어 이들에 대한 보정의 필요성이 제기된다. 따라서 향후에는 이를 토대로 저비용 고효율과 작업시간 단축을 위한 새로운 크레인의 제어기 개발과 운전모드에 따른 에너지 소비절감 대책에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.



제 4 장 제어입력 패턴에 따른 크레인의 에너지 효율분석

4.1 서론

지금까지 각국의 컨테이너 터미널에서는 오로지 작업시간 단축을 통한 생산성 증대만을 추구하였으나, 현재의 컨테이너 터미널은 저탄소 녹색기반의 친환경 향만과 에너지 비용 절감을 통한 저비용 고 효율화를 요구 받고있다. 이에 따라 일부의 항만에서는 자동화 크레인을 이용한 자동화 터미널의 운영으로 인건비절감 등을 통한 생산성을 향상하고 있으며, 디젤 엔진형 RTTC를 전기식인 e-RTTC로 전환하여 고유가에 따른 경영수지의 개선, 고장율의 감소, 질소산화물 배출억제 등의 저비용 고 효율화, 친환경화를 추구하고 있다.

이때 컨테이너 터미널의 저비용 고 효율화를 추구하기 위한 방법의 대부분은 컨테이너 크레인을 포함한 야드장비를 어떻게 운영하는가에 따라 터미널의 생산성과 고 효율화를 결정하는 중요한 요소로 작용하게 된다. 그 중에서 크레인의 고 효율화를 위한 선행 연구로는 현재 항만에 설치되어 운영되고 있는 크레인은 모두 SHST(Single Hoist Single Trolley)형으로 이러한 형태는 크레인에 부착된 1개의 트롤리가 선박의 컨테이너를 양·적하하는 방식을 취하는 방식으로 최근에는 이러한 싱글 트롤리형 크레인의 취약점을 보완한 신개념의 크레인의 개발이 가속화되고 있다.

그 대표적인 것으로 중앙부분에 컨테이너 버퍼(Buffer)공간을 두고 2개의 트롤리가 전체 작업거리를 분담하는 형식을 취하는 듀얼트롤리

(Dual Trolley), 2개의 트롤리가 독립적으로 하역하는 작업방식을 취하는 더블트롤리(Double Trolley), 그리고 2개의 트롤리와 1개의 트레이서(Traverser)가 장착되어 2개 트롤리는 해상측과 육상측에서 수직 동작만으로 컨테이너를 선박 또는 차량에만 양·적하하는 슈퍼테이너형 크레인 등이 있다[36]. 그러나 이러한 방법들은 초기 투자비용이 많이 들고 기존에 설치되어 운영중인 크레인에 대해서는 사용이 어려운 단점을 가지고 있다.

따라서 본 절에서는 장비에 대한 개선비용이 추가로 소요되지 않고 크레인의 운전패턴 변경만으로 저비용 고 효율화를 얻을 수 있는 방법으로 크레인의 이동 궤적에 따라 정해지는 3가지의 운전패턴 즉, 사다리꼴형 제어입력, 노치형 제어입력, 계단형 제어입력 등 각각의 제어입력에 대하여 에너지 효율을 분석하고, 이때 도출되는 결과를 바탕으로 비용절감을 통한 Eco-Driving의 가능성과 소비되는 에너지의 절감으로 환경오염을 줄인 친환경 항만과 경쟁력을 확보한 선진항만 구축을 위한 가능성을 보이고자 한다.

4.2 사다리꼴 제어입력

컨테이너가 이동하는 궤적을 Fig 4.1과 같이 $x-y$ 평면상에 나타내면 컨테이너를 A지점에서 D지점까지 이동시키고자할 때 트롤리는 가속구간 → 정속구간 → 감속구간으로 나누어 최단시간 내에 목표위치에 도달하게 해야 한다. 이때 트롤리는 최대속도 도달시점과 최종목표지점 도착시 각각 컨테이너의 흔들임이 없도록 해야 하며 호이스트의 동작도 트롤리의 이동과는 무관하게 독립적으로 상승운동 → 일정높이 유지 → 하강운

동 등의 3단계 과정으로 이루어진다. 트롤리의 이동궤적에 대한 가속구간, 정속구간, 감속구간의 특성은 다음과 같이 3가지로 기술할 수 있다.

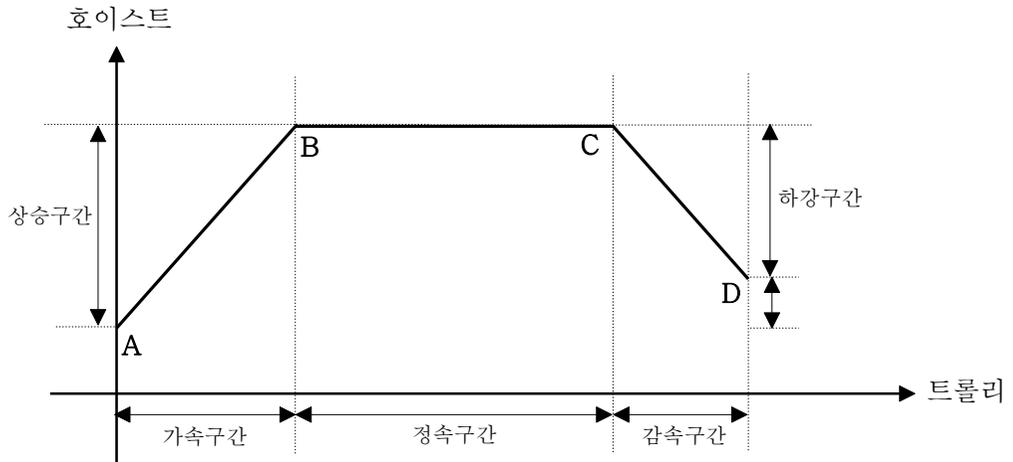


Fig 4.1. 크레인의 이동궤적



먼저 트롤리의 가속구간에 대한 특징은 트롤리의 전체 이동시간을 고려할 때 가장 짧은 시간에 최대속도에 이르게 하는 것이 가장 관건이다. 즉 최대속도 이송구간이 길면 길수록 전체 이송시간은 줄어들게 된다. 물론 가속이 끝난 시점에서 흔들림이 없어야 하므로 컨테이너의 진자운동을 고려하여 흔들림이 없도록 최대속도에 이르게 하는 것이 중요하다. 또한 진자운동의 주기는 로프의 길이에 따라 변하므로 가속구간 중 이를 보상 할 수 있는 제어방법이 강구되어야 한다.

두 번째로 트롤리의 최대정속구간은 트롤리의 운동에 있어서 트롤리의 모터가 낼 수 있는 최대속도로 이송하는 구간을 말하며 최대속도는 기계적인 요소에 의해 결정되어진다. 만약 최대 속도 구간에서 제어작용

을 하게 되면 이는 반복적인 최대속도 이상에서의 운전을 수행하게 되므로 이러한 경우에는 설계 안정상 최대속도의 설정치를 낮추는 방법을 고려해야 한다.

따라서 이는 시간적인 손실을 유발하게 되므로 최대정속구간에서는 정속을 유지하는 것을 1차 목표로 한다. 그리고 최대속도에서 제어입력을 가하게 되면 운전자에게 급격한 가속과 감속을 가하는 동시에 크레인의 전기, 기계요소에도 무리한 힘을 가할 수 있으므로 이러한 점도 고려되어야 한다. 그리고 트롤리의 수평이송 구간이 충분히 길지 않을 때는 최대속도에 이르지 못한 상태에서 감속해야 하는 경우도 발생할 수 있을 것이다.

마지막으로 감속구간은 가속구간의 역순으로 가속과 마찬가지로 감속을 마치는 시점에서 흔들림이 없도록 하는 것이 관건이다. 감속의 시작은 수동모드 및 반 자동모드에서는 운전자의 조작에 의해 시작되며, 자동모드에서는 최종위치의 남은 거리가 고려되어 자동으로 결정된다.

앞에서 기술한 이러한 이동궤적은 로프의 길이가 일정하다고 가정한 경우에 식(3.2)으로 부터 단순화된 진자시스템의 운동방정식은 식(4.1)과 같이 선형 시불변 시스템으로 구할 수 있다.

$$l\ddot{\theta}(t) + g\theta(t) = -\ddot{x}(t), \quad \theta(0) = 0, \quad \dot{\theta} = 0 \quad (4.1)$$

여기서 $\theta(t)$ 는 흔들림의 각도, l 은 로프의 길이이며 g 는 중력가속도이다. 그리고 트롤리의 가속도 $\ddot{x}(t)$ 는 제어입력이 되는데 이때 선택하는 상수 값에 따라 속도패턴의 형상이 사다리꼴형 제어패턴, 계단형 제어패턴 및 노치형 제어패턴 등으로 나타나게 된다[14~15].

따라서 사다리꼴형 제어입력 패턴은 Fig 4.2와 같이 나타내며, 컨테이너 진자운동의 한주기만에 가속 혹은 감속을 행하는 제어패턴으로서 등가감속구간에서의 제어입력 $\ddot{x}(t)$ 는 상수값이 된다. 즉 $\ddot{x}(t) = C$ (상수)인 경우를 고려하면 식(4.1)의 해는

$$\theta(t) = \frac{C}{g}(\cos \omega t - 1) \quad (4.2)$$

이 된다

여기서 $\omega = \sqrt{g/l}$ 이며, $\theta(t)$ 는 진폭이 C/g 이며, 주파수가 ω 인 단진동운동이다. 따라서 $t = T_{up} = \frac{2\pi}{\omega}$ 에서 완전히 1사이클이 끝나고 θ 가 0이 됨을 알 수 있다. 만약 $t = T_{up}$ 에서 가하는 제어입력을 $\ddot{x}(t) = 0$ 으로 전환하면 이때의 초기조건이 $\theta(T_{up}) = \dot{\theta}(T_{up}) = 0$ 가 되어 $\theta(t) = 0, t \geq T_{up}$ 으로 지속됨을 알 수 있다. 즉 제어입력은 $\ddot{x}(t) = \frac{\dot{x}_{\max}}{T_{up}}$ 이 됨을 알 수 있다. 또한 가속구간 중 트롤리의 이동거리는 다음과 같이 계산된다.

$$x_{travel} = \frac{1}{2} \dot{x}_{\max} T_{up} = \pi \dot{x}_{\max} \sqrt{l/g} \quad (4.3)$$

따라서 감속구간에서도 최종위치로부터 x_{travel} 만큼 떨어진 지점에서 감속작용에 들어가면 정확히 원하는 위치에 흔들림 없이 정지하게 된다.

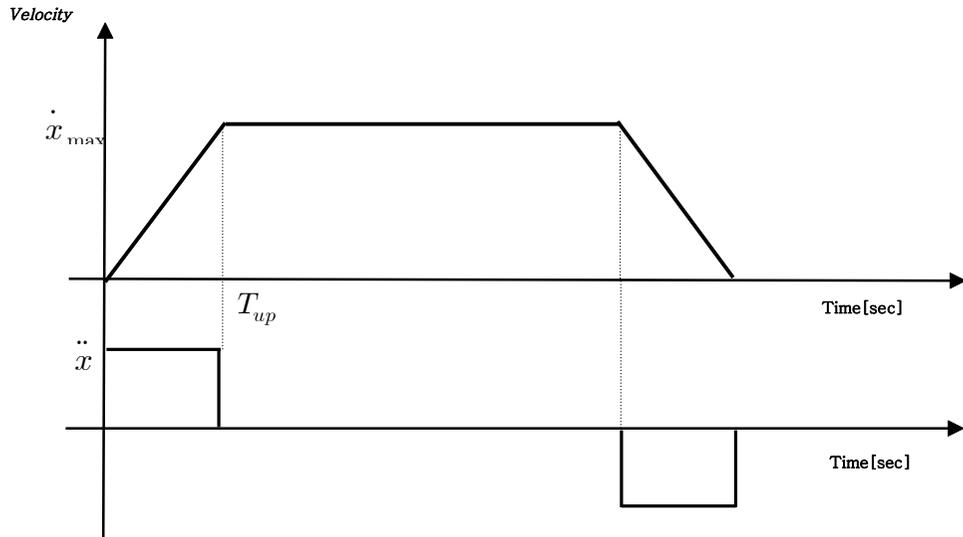


Fig 4.2 사다리꼴 제어입력

4.3 노치형 제어입력



노치형 제어입력은 Fig 4.3에서와 같이 등속구간의 전후에 가속구간과 감속구간을 설치하여 이 사이의 시간을 최단시간으로 제어하는 방법으로, 이 경우 등속구간의 직전에서 화물의 진동정지를 하면 등속구간 중에서는 하중의 진동이 없다. 또한 감속구간에서는 가속구간의 역 패턴으로 제어하는 방법으로, 앞 절에서도 설명한 바와 같이 속도선도란 트롤리의 주행패턴으로 가속, 최대정속, 그리고 감속의 패턴을 가지도록 하면서 가속이 끝난 후 최대정속의 시작시점에서 흔들림이 없고 또한 감속이 끝난 후에 원하는 목표지점에 정확히 도달하면서 흔들림이 없는 특징을 가지고 있다. 이때 계단형과 사다리꼴형의 제어입력은 미분방정식의 해로부터 그 패턴을 유도하였으나 노치형 제어입력은 시간 최적제어 개념으로 접근한다. 따라서 식(4.1)으로 부터 식(4.4)을 얻을 수 있다.

$$\ddot{x}(t) = u_a \quad (4.4a)$$

$$\ddot{\theta}(t) + \omega^2 \theta(t) = \frac{u_a}{l} \quad (4.4b)$$

여기서 $\omega^2 = \frac{g}{l}$ 이다. 이때 $V = \omega \dot{x}$ 라고 하면 식(4.4)은 아래의 식(4.5)와 같이 된다.

$$\dot{V} = \frac{u_a}{\omega} \quad (4.5a)$$

$$\ddot{\theta}(t) + \theta(t) = \frac{u_a}{g} \quad (4.5b)$$

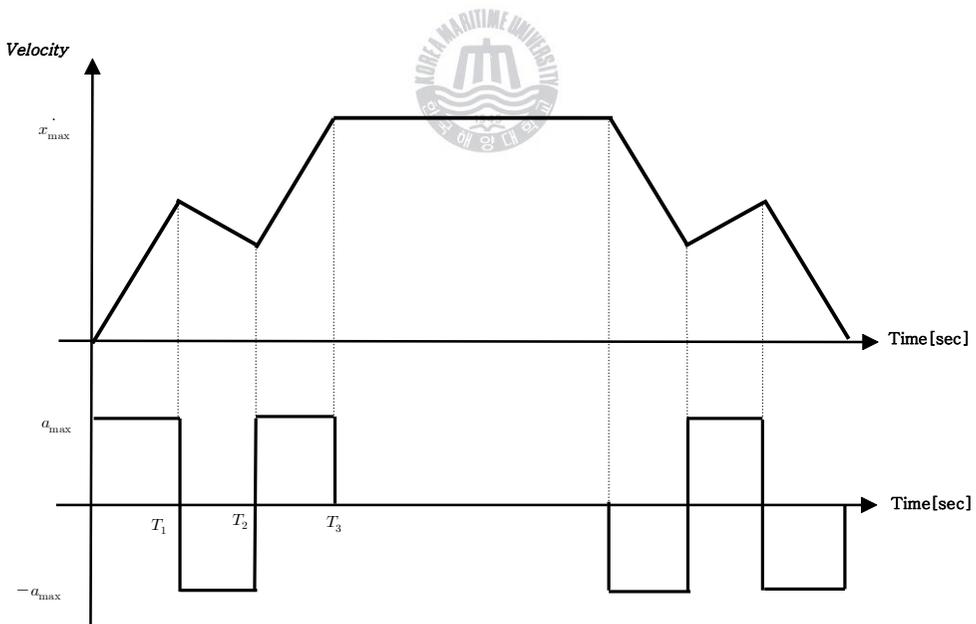


Fig. 4.3 노치형 제어입력

4.4 계단형 제어입력

계단형 제어입력 패턴은 Fig 4.4와 같이 크레인 주행모터의 속도증가를 계단 형상으로 할 때 제어 입력을 시간에 대해서 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 트롤리 모터가 낼 수 있는 보다 큰 가속력으로 시간 T_1 까지 가속하여 중간정속 V_1 에 도달하게 한 다음 제어입력을 제거하였다가 일정시간 기다린 후 단진자운동의 주기의 절반이 되는 지점에 이른 후 다시 같은 크기의 가속을 같은 시간만큼 가하면 최대속도에 도달한 후 잔류 흔들림을 최소화 할 수 있는 패턴형으로 가속구간의 제어입력은 다음과 같이 표시된다.

$$\ddot{x}(t) = a[u_s(t) - u_s(t - T_1) + u_s(t - T_2) - u_s(t - T_3)] \quad (4.6)$$

여기서 $a(t)$ 는 가속도의 크기이고 $u_s(t)$ 는 단위스텝함수이다. 제어입력이 식(4.3)과 같이 주어지면 선형시스템 식(4.1)의 해는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta(t) = & \frac{a}{g} [\cos \omega t - \cos \omega(t - T_1) + \cos \omega(t - T_2) - \cos \omega(t - T_3) \\ & - u_s(t) + u_s(t - T_1) - u_s(t)(t - T_3)] \end{aligned} \quad (4.7)$$

2차 가속구간의 크기를 1차 가속구간의 크기와 같게 잡는다면, 즉 $T_1 = T_3 - T_2$ 이면 시간 $t \geq T_3$ 에서

$$\theta(t) = -4 \frac{a}{g} \sin \omega \frac{T_1}{2} \cos \omega \frac{T_2}{2} \sin \omega \left(t - \frac{T_3}{2} \right), \quad t \geq T_3 \quad (4.8)$$

이 된다. 따라서 $t \geq T_3$ 에서 $\theta(t) = 0$ 이 되는 시간 t 가 존재함을 알 수 있다. 즉 $\omega(t - \frac{T_3}{2}) = 0, \pi, 2\pi, \dots$ 이 되는데 이중 $t \geq T_3$ 이면서 가장 작은 시간을 잡으면 $t = \frac{T_3}{2} + \frac{\pi}{\omega}$ 이 됨을 알 수 있다. 또한 식(4.7)으로부터 흔들림 각속도는

$$\dot{\theta}(t) = -\frac{a}{g} \omega (\sin \omega t - \sin \omega(t - T_1) + \sin \omega(t - T_2) - \sin \omega(t - T_3)) \quad (4.9)$$

식(4.9)가 된다.

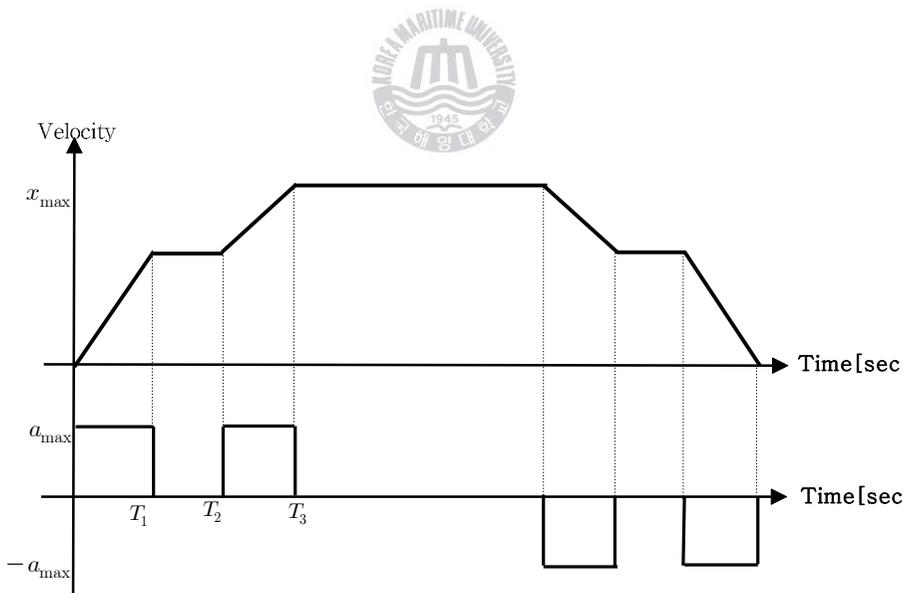


Fig 4.4 계단형 제어입력

4.5 시뮬레이션 및 고찰

본 연구에서는 앞 절에서 기술한 제어입력패턴에 따라 정확히 제어하는 것이 목적이 아니므로 조이스틱을 통하여 속도제어가 가능한 형태로써 조이스틱의 각도는 속도와 비례한다고 가정한다. 이때 조이스틱 입력은 4.1절의 제어입력 패턴을 기준으로 한다. 또한 구동기를 DC모터로 가정하면 1차계로 표현이 가능하며 입력신호와 토크의 비례관계를 가정할 수 있다. 시뮬레이션을 실행하기 위한 조건으로 트롤리의 최대속도를 2[m/sec]로 하였으며, 크레인의 중량은 393[Ton]으로, 트롤리의 중량은 50[Ton]으로, 화물을 포함한 스프레더의 중량을 35[Ton]으로 하였다. 그리고 단위 이동거리에 대한 에너지 소비량의 계산을 위하여 컨테이너 이동구간은 열의 중앙에서 외곽까지 20[m]를 가정하였으며 한 사이클의 시간을 5초간 설정하여 시뮬레이션을 실시한 결과 다음과 같다.

먼저 사다리꼴형 제어입력에 대한 시뮬레이션 제어결과는 Fig 4.5와 같이 나타났다. 분석결과 이동시간은 25[sec]일 때 이동거리는 5.7430[m]이며, 에너지소비량은 2.43[Wh]이며, 단위 이동 거리당 에너지 소비량은 3.8957[Wh/m]로 나타났다.

두 번째로 노치형 제어입력 패턴에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig 4.6과 같이 나타났다. 이동시간이 25[sec]일 때 이동거리는 4.5196[m]이며, 에너지 소비량은 13.8[Wh]이며, 단위 이동 거리당 에너지소비량은 3.0627[Wh/m]으로 나타났다.

마지막으로 계단형 제어입력 패턴에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig 4.7과 같이 나타났다. 이동시간이 25[sec]일 때 이동거리는 3.4232[m]이며, 이때 에너지소비량은 8.0[Wh]이며, 단위 이동 거리당 에너지 소비량은 2.3343[Wh/m]로 나타났다.

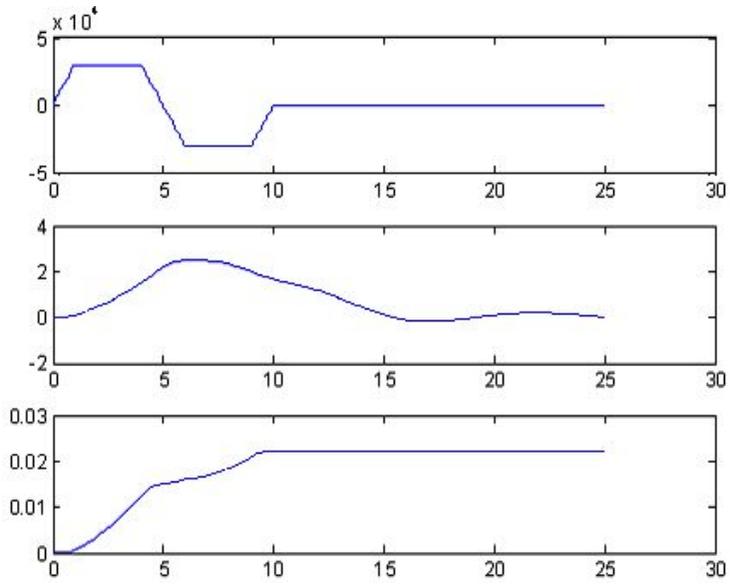


Fig 4.5 사다리꼴 제어입력에 대한 시뮬레이션 결과

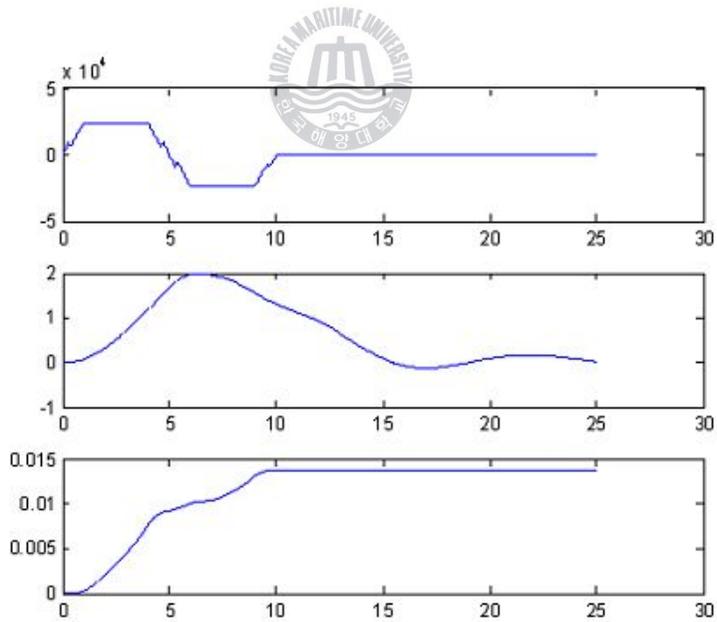


Fig 4.6 노치형 제어입력에 대한 시뮬레이션 결과

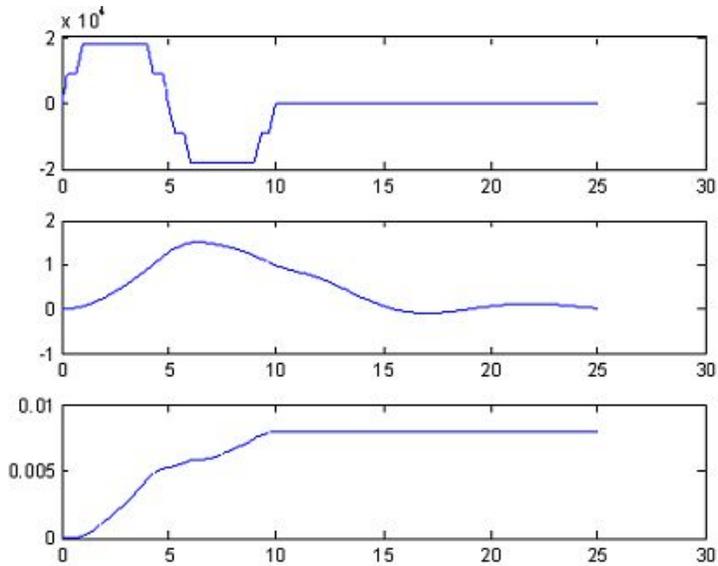


Fig 4.7 계단형 제어입력에 대한 시뮬레이션 결과

따라서 앞에서 기술한 사다리꼴형 제어입력 패턴, 노치형 제어입력 패턴, 계단형 제어입력 패턴 등 각각의 패턴에 대하여 크레인의 횡행운전에 대한 시뮬레이션 결과를 표로 정리하면 Table 4.1과 같다.

Table 4.1 크레인 횡행 운전에 대한 시뮬레이션 결과

구 분	사다리꼴	노치형	계단형
이동거리[m]	5.743	4.5196	3.4232
에너지 소비량[Wh]	2.43	13.8	8.0
단위 이동 거리당 에너지소비량[Wh/m]	3.8957	3.0627	2.3343

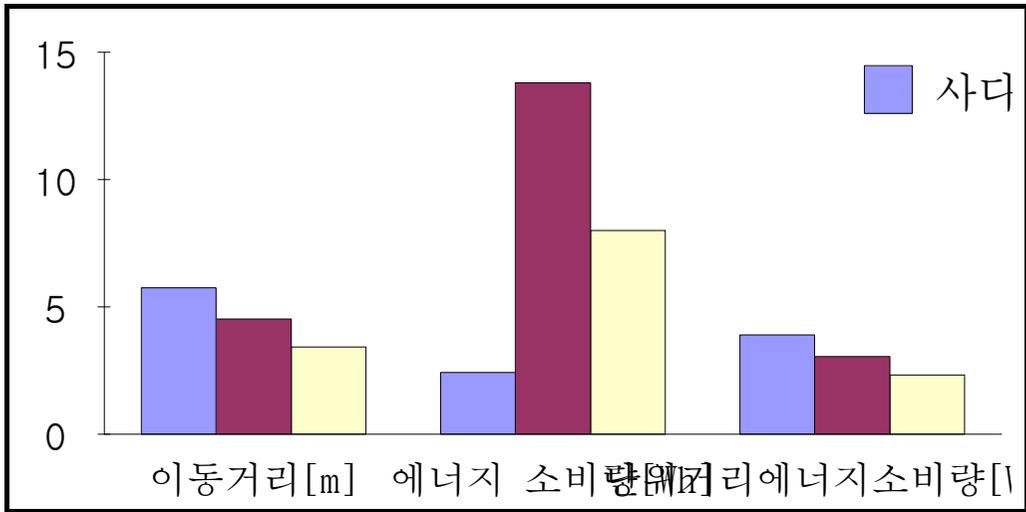


Fig 4.8 크레인의 횡행운전에 따른 에너지 소비패턴

위의 Fig 4.8은 크레인의 횡행운전에 따른 에너지 소비패턴을 나타낸 그림으로 각각의 패턴에 따른 세부적인 내용을 설명하면 다음과 같다.

이동거리는 사다리꼴형이 5.743[m]으로 가장 많이 이동하였고, 다음으로 노치형이 5.5196[m]이며, 계단형은 3.4232[m]로 가장 적게 이동하여 사다리꼴형 → 노치형 → 계단형의 순으로 나타났다.

그러나 소비되는 에너지는 노치형이 13.8[Wh] 가장 많은 에너지 소비패턴을 보였고, 다음으로 계단형이 8.0[Wh], 사다리꼴형이 2.43[Wh]를 소비하는 것으로 나타나 노치형이 가장 많은 에너지 소비패턴을 보였고 사다리꼴형이 에너지 소비가 가장 적은 것으로 분석되었다.

그리고 단위 이동 거리당 에너지 소비는 계단형이 2.3343[Wh/m]로 가장 적게 소비된 반면 사다리꼴형이 3.8957[Wh/m]로 에너지 소비가 가장 많은 제어패턴으로 분류 되었다.

이를 근거로 전체 에너지 소비 절감량을 도출하기 위하여 단위 거리 당 에너지 소비가 가장 많은 사다리꼴형과 에너지 소비가 가장 적은 계단형을 비교하면 단위 거리당 에너지 소비량의 차이는 1.5614[Wh/m]의 차이가 나는 것을 알 수 있다.

이때 총 에너지 소비 절감량을 구하기 위하여 컨테이너의 중량은 Full 20피트 컨테이너로 75[%]의 야드작업 조건으로, 연간 100만[TEU]를 처리한다고 가정하고, 화물의 처리는 반입과 반출이 각각 2회가 이루어 지므로 크레인은 총 4회로 운전할 때 야드의 길이를 20[m]로 가정하여 계산하면 Table 4.2과 같이 정리할 수 있다.

Table 4.2 크레인의 횡행운전에 따른 에너지 절감

구 분	에너지절감 [kWh]	비용절감액[천원]	t CO ₂ 절감	CO ₂ 절감 대체[천원]	총 절감액 [천원]
내 용	93,684	5,902	39.722	1,397	7,299

즉 크레인의 횡행운전에서는 사다리꼴형보다 계단형으로 운전 하였을 때, 93.684[kWh]의 에너지소비 절감효과가 있음을 알 수 있다. 이를 원 단위로 환산하면 산업용전기의 경우 300[kWh]이상 사용시 [kWh]당 63 원의 사용 요금이 부과되므로 연간 5,902[천원]의 절감할 수 있으며, 여기에 에너지절감으로 39,722[Ton]의 CO₂(0.424[kg/kWh])의 발생을 억제할 수 있으므로, 이에 따른 절감비용 1,397[천원]을 절감(20유로/t CO₂, 1,758원/유로)를 할 수 있어 총7,299[천원]의 비용절감을 할 수 있는 것으로 분석되었다.

다음으로 앞에서 기술한 사다리꼴형 제어입력 패턴, 노치형 제어입력 패턴, 계단형 제어입력 패턴 등 각각의 패턴에 대하여 크레인의 주행운전에 대한 시뮬레이션 결과를 정리하면 Table 4.3과 같다.

Table 4.3 크레인의 주행운전에 대한 시뮬레이션 결과

구 분	사다리꼴형	노치형	계단형
이송거리[m]	8.3028	6.5225	4.9712
에너지소비량[Wh]	739.1	455.5	264.6
단위 거리당 에너지 소비량[Wh/m]	89.0126	69.8380	53.2178

다음의 Fig 4.9은 크레인의 주행운전에 따른 에너지 소비패턴을 나타낸 그림으로 각각의 패턴에 따른 세부적인 내용을 기술하면 다음과 같다. 이동거리는 사다리꼴형이 8.3028[m]으로 가장 많이 이동하였고, 다음으로 노치형이 6.5225[m]이며, 계단형은 4.9712[m]로 가장 적게 이동하여 사다리꼴형 → 노치형 → 계단형의 순으로 나타났다. 그러나 소비되는 에너지는 사다리꼴형이 739.1[Wh]으로 가장 많은 에너지 소비 패턴을 보였다. 다음으로 노치형이 455.5[Wh], 계단형이 264.6[Wh]를 소비하는 것으로 나타나 사다리꼴형이 가장 많은 에너지 소비 패턴을 보였으며, 계단형이 에너지 소비가 가장 적은 것으로 분석되었다.

그리고 단위 이동 거리당 에너지 소비는 계단형이 53.2178[Wh/m]로 가장 적게 소비된 반면, 사다리꼴형이 89.0126[Wh/m]로 에너지 소비가 가장 많은 제어패턴으로 분류 되었다.

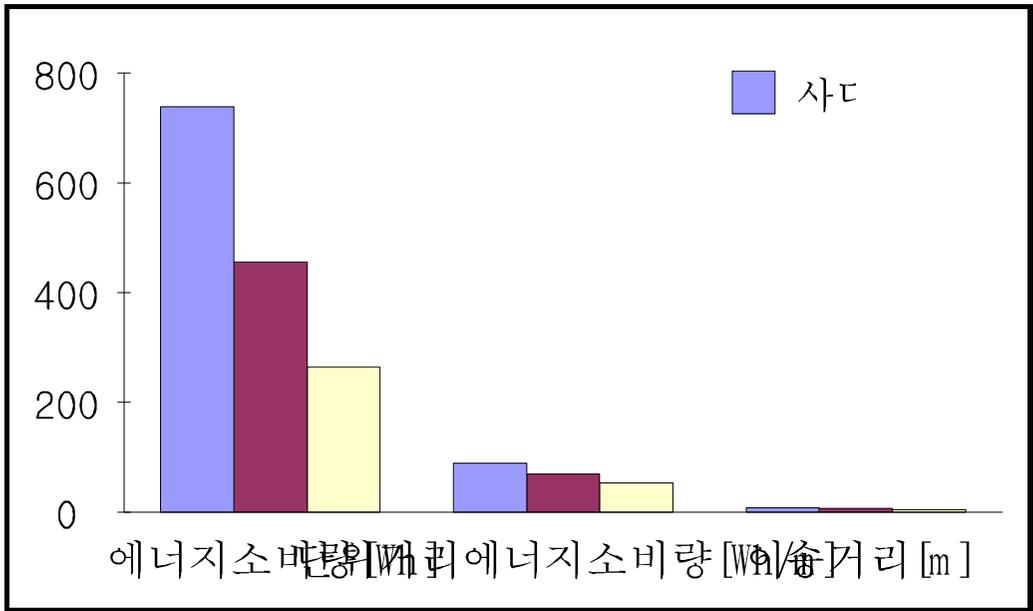


Fig 4.9 크레인의 주행운전에 따른 에너지 소비패턴

이를 근거로 전체 에너지 소비 절감량을 도출하기 위하여 단위 거리 당 에너지 소비가 가장 많은 사다리꼴형과 에너지 소비가 가장 적은 계단형을 비교하면 단위 거리당 에너지 소비량의 차이는 35.7948[Wh/m]의 차이가 나는 것을 알 수 있다. 따라서 횡행 운전시의 작업조건으로 가정하여 계산하면 Table 4.4와 같이 정리할 수 있다.

Table 4.4 크레인의 주행운전에 따른 에너지 절감

구분	에너지절감 [kWh]	비용절감액[천원]	t CO2 절감	CO2절감 대체[천원]	총 절감액 [천원]
내용	10,738,440	676,552	4,553.1	160,087	836,609

즉 크레인의 주행운전을 함에 있어 사다리꼴 형보다 계단형으로 운전 하였을 총10,738,440[kWh]의 에너지소비 절감효과가 있음을 알 수 있다. 이를 원단위로 환산하면 산업용전기의 경우 300[kWh]이상 사용시 [kWh]당 63원의 사용 요금이 부과되므로 연간 676,552[천원]의 절감할 수 있으며, 여기에 에너지절감으로 4,553.1[Ton]의 CO2을 절감 (0.424[kg/kWh]) 할 수 있으므로 이에 따른 절감비용 160,087[천원]을 절감(20유로/t CO2, 1,758원/유로)을 할 수 있어 총836,609[천원]의 비용절감을 할 수 있는 것으로 분석되었다.

마지막으로 앞에서 기술한 사다리꼴형 제어입력 패턴, 노치형 제어입력 패턴, 계단형 제어입력 패턴 등 각각의 패턴에 대하여 크레인의 승강 운전에 대한 시뮬레이션 결과를 정리하면 Table 4.5과 같다.

Table 4.5 크레인의 승강 운전에 대한 시뮬레이션 결과

구 분	사다리꼴형	노치형	계단형
이송거리[m]	1.1642	0.9127	0.6950
에너지소비량[Wh]	98.5	79.6	62.4
단위 거리당 에너지 소비량[Wh/m]	84.5913	87.2080	89.7785

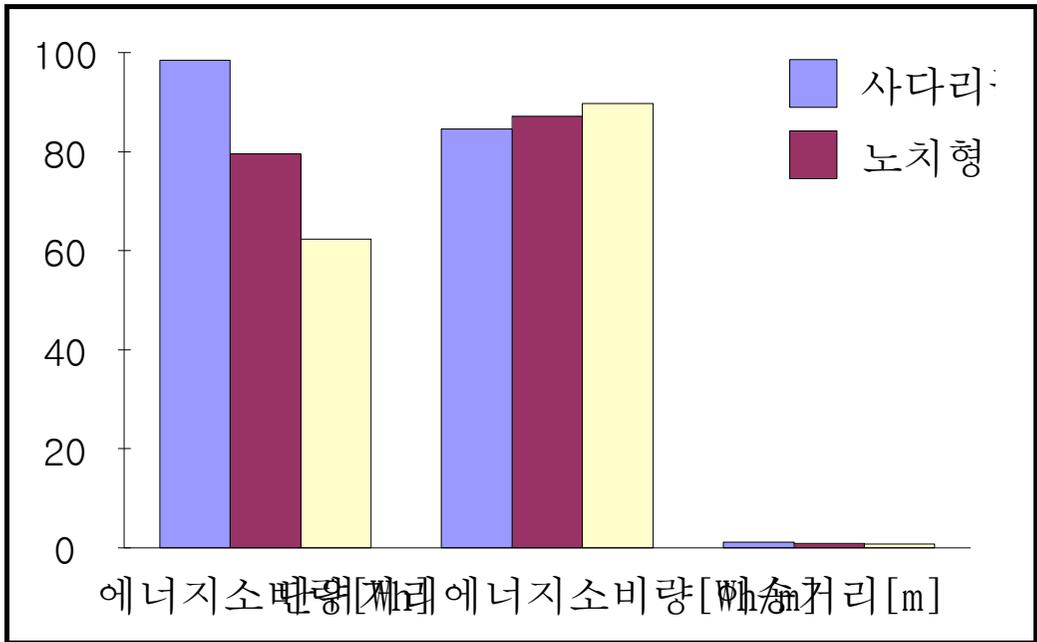


Fig 4. 10 크레인의 승강운전에 따른 에너지 소비패턴



위의 Fig 4.10은 크레인의 승강운전에 따른 에너지 소비의 형태를 도표로 나타낸 그림으로, 각각의 패턴에 따른 세부적인 내용을 기술하면 다음과 같다. 이동거리는 사다리꼴형이 1.1642[m]으로 가장 많이 이동하였고, 다음으로 노치형이 0.9127[m]이며, 계단형은 0.6950[m]로 가장 적게 이동하여 사다리꼴형→노치형→계단형의 순으로 나타났다.

소비되는 에너지 역시 사다리꼴형이 98.5[Wh] 가장 많은 에너지 소비형태를 보였다. 다음으로 노치형이 79.6[Wh], 계단형이 62.4[Wh]를 소비하는 것으로 나타나 사다리꼴형이 가장 많은 에너지 소비 형태를 보였고 계단형이 에너지 소비가 가장 적은 것으로 분석되었다. 그러나 단위 이동 거리당 에너지 소비는 사다리꼴형이 84.5913[Wh/m]로 가장 적게 소비된 반면 계단형이 89.7785[Wh/m]로 에너지 소비가 가장 많은

제어패턴으로 분류 되었다.

이를 근거로 전체 에너지 소비 절감량을 도출하기 위하여 단위 거리 당 에너지 소비가 가장 많은 계단형과 에너지 소비가 가장 적은 사다리꼴형을 비교하면 단위 거리당 에너지 소비량의 차이는 5.1872[Wh/m]의 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이때 작업조건은 주행 운전때와 마찬가지로 컨테이너의 중량은 Full 20피트 컨테이너로 75[%]의 야드작업 조건으로, 연간 100만[TEU]를 처리한다고 가정하고, 야드의 길이는 12[m]로 가정하여 계산하면 Table 4.6과 같이 정리할 수 있다.

Table 4.6 크레인의 승강운전에 따른 에너지 절감

구 분	에너지절감 [kWh]	비용절감 액[천원]	t CO2 절감	CO2절감 대체[천원]	총 절감액 [천원]
내 용	186,739	11,765	79.18	2,784	14,546

즉 크레인의 승강운전을 함에 있어 계단형보다 사다리꼴형으로 운전하였을 총186,739[kWh]의 에너지소비 절감효과가 있음을 알 수 있다. 이를 원단위로 환산하면 산업용전기의 경우 300[kWh]이상 사용시 [kWh]당 63원의 사용 요금이 부과되므로 연간 11,765[천원]의 절감할 수 있으며, 여기에 에너지절감으로 79.18[Ton]의 CO2절감(0.424[kg/kWh])를 할 수 있으므로 이에 따른 절감비용 2,784[천원]을 절감(20 유로/t CO2, 1,758원/유로)를 할 수 있어 총14,546[천원]의 비용절감을 할 수 있는 것으로 분석되었다.

따라서 앞에서 기술한 횡행운전, 주행운전, 승강운전 등 크레인의 3가지 동작모드에 대한 에너지 소비에 대한 시뮬레이션 결과를 종합적으로

정리하면 Table 4.7와 같이 기술할 수 있다.

표 4.7 크레인의 전체운전에 대한 시뮬레이션 결과

구 분	횡 행	주 행	승 강	소 계
에너지절감 [kWh]	93,684	10,738,440	186,739	11,018,863
비용절감액 [천원]	5,902	676,552	11,765	694,219
t CO ₂ 절감	39.72	4,553.1	79.18	4,672
CO ₂ 대체금액 [천원]	1,397	160,087	2,784	164,268
총 절감액 [천원]	7,299	836,609	14,546	858,454



4.6 결 론

본 절에서는 컨테이너 터미널에서 사용되는 크레인을 대상으로 각각의 제어입력 패턴에 따른 에너지 효율을 비교 분석하였다.

크레인의 운전동작은 횡행운, 주행운전, 승강운전 등으로 구분하는데 이때 횡행운전에서는 사다리꼴형 제어패턴이 가장 에너지 소비가 적은 우수한 운전패턴으로, 주행운전에서는 계단형 제어패턴이 가장 우수한 패턴이며, 승강운전에서도 계단형 제어패턴이 에너지 소비측면에서 가장 우수한 것으로 분석되었다.

그리고 이를 바탕으로 각 제어패턴별로 가장 에너지 소비가 적은 제어패턴과 가장 에너지 소비가 많은 제어패턴의 차이를 비교하여 에너지

절감 금액을 산출하면, 연간 100만[TEU]을 처리하는 컨테이너 터미널에서 크레인의 운전패턴별 형태를 본 논문에서 기술한 에너지 소비가 적은 운전패턴으로 채택하여 운전하게 되면 694,189[천원]의 에너지 비용 절감과 동시에 4,672[Ton]의 CO₂배출 감소에 따른 환경오염을 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

또한 CO₂배출감소에 따른 164,268[천원]의 비용적 이익으로 총 858,454[천원]의 경제적 이익을 창출할 수 있는 Eco-Driving의 가능성과 에너지소비 절감 효과로 환경오염을 줄여 친환경 항만 구축이 가능함을 보였다 따라서 향후에는 이를 토대로 항만 내에서의 대기시간 및 작업 스케줄을 고려한 운전패턴 검토할 필요가 있으며 더 나아가 에너지 효율화를 위한 Eco-Driver제도를 도입하는 것도 하나의 방안이라 할 수 있다.



제 5 장 Eco-Driving에 의한 크레인의 에너지 효율분석

5.1 서 론

세계 각국의 컨테이너 터미널은 지속적인 컨테이너 물동량의 증가와 컨테이너선의 초대형화 등의 변화 추세에 대한 차세대 항만의 대응방안과 세계기후변화협약에 따른 온실가스 감축을 통한 친환경항만 구축을 위한 대책이 절실히 요구되고 있다.

따라서 세계적 선진항만인 네델란드, 독일, 싱가포르, 중국 등은 항만여건의 급격한 변화에 대응하기 위하여 친환경화를 통한 첨단화 및 자동화 그리고 높은 생산성을 추구하는 항만기술개발을 지속적으로 수행하고 있다. 또한 초대형선이 기항하기 위해서는 기존의 항만하역시스템보다 한층 더 발전된 저비용 고효율을 통한 첨단 지능형 항만하역장비 및 관련 시스템 개발이 필수적인 것으로 인식되고 있으며 국내에서도 이러한 상황에 맞추어 국가기술개발 과제로서 개발을 추진하고 있는 상황이다,

그리고 새로운 일자리의 확충과 환경문제에 대비하기 위한 녹색성장 정책에 따른 지속가능한 항만시설에 대한 정책적 대안이 마련되고 있다.

이제까지의 항만관련 기술개발이 대부분의 분야에서 선진국의 첨단기술을 받아 들였다면 향후 국내기술개발의 방향은 독자적인 기술로 세계적인 항만관련 첨단기술을 선도해 나가야 할 때이다. 또한 세계적인 중추항만이 되기 위해서는 무엇보다도 고효율 고생산성을 가진 첨단 항만이 되어야만 주 고객인 선사들의 요구에 부응할 수 있고 기업의 가치창출을 위한 역할을 수행할 수 있을 것이다.

고효율 고생산성 항만을 개발하기 위해서는 항만의 효율화 측면에서 원활하게 물동량을 처리할 수 있는 고효율 야드적재 시스템의 개발과 더불어 고성능 하역시스템의 개발이 필수적이라 할 수 있다.

이러한 관점에서 2002년도 DSC(Drewry Shipping Consultants) 자료에 의하면 세계 100만[TEU]급 이상을 처리하는 컨테이너 터미널 중 RTGC(Rubber Tyred Gantry Crane)시스템이 51.4[%]로 가장 높게 나타나고 있고, SC(Shuttle carrier)시스템이 24.8[%], RMGC(Rail Mounted Gantry Crane)시스템이 9.4[%], OHBC(Over Head Bridge Crane)시스템이 1.1[%]로 나타나고 있다.³⁾ 한편, Cargo Systems에서 발표된 세계 장비제작회사의 발주현황을 보면 1999년에 RTGC 95[%], RMGC 5[%]에서 2000년 RTGC 84.9[%], RMGC 15.1[%], 2002년 RTGC 81.2[%], RMGC 18.8[%]로 매년 RMGC의 발주가 늘어나고 있는 상태이다.⁴⁾ 최근에는 자동화 터미널을 개장하면서 ARMC(Automatd Rail Mounted Crane)의 활용이 높아지는 추세에 있다.

RMGC시스템은 항만의 대형화에 대응하기 적합하고, 고용량, 고효율의 야드 하역 및 적재시스템, 터미널의 자동화 용이함을 갖추고 있어 차세대 야드하역 시스템으로 자리잡아가고 있다. 국내 대부분의 컨테이너 터미널 하역시스템은 C/C ↔ YT ↔ RTGC로 연계되는 하역시스템을 채택하여 운영하고 있으며 대부분의 국내 터미널의 하역시스템은 세계 무역환경의 변화와 주변여건 및 대상선박에 관계없이 모두 RTGC시스템으로 운영되어왔으나, 현재 국내의 부산항과 광양항에서 운영되거나 계획 중인 총 15개 터미널 중 RTGC시스템이 9개, RMGC시스템이 6개로서 RMGC시스템의 채택이 점차 늘어나고 있으며 향후 국내에 건설되는 대

3) Drewry Shipping Consultants, Global Container Terminal, 2002.10

4) Cargo Systems, 각호 2000-2003

형터미널의 경우 RMGC시스템을 채용한 반자동화 및 자동화 터미널을 개발할 예정이며 일부의 터미널에서는 운영 중에 있다.

세계적으로 항만하역시스템은 향후 컨테이너와 일반 벌크화물에 있어 대량화물취급, 고속화, 자동화 및 기계화를 요구하고 있어 전통적인 하역시스템에서 보다 새로운 개념의 하역시스템의 개발과 그 기능이 요구되고 있다. 따라서 세계의 선진항만들은 항만의 초대형화, 통합화, 자동화, 기계화를 위한 연구개발에 대한 노력에 최선을 다하고 있는 것과 동시에 여러 측면에서 효율적이고 미래지향적인 터미널시스템을 개발하고 있다. 또한 이러한 하역시스템 변화 추세에서 미래의 컨테이너 터미널은 안벽에서부터 야드 적재 그리고 배후운송 시스템까지 원활한 컨테이너 흐름과 높은 생산성을 가지는 신개념의 하역시스템을 요구하고 있다고 할 수 있다. 따라서 컨테이너 터미널의 에너지비용은 운영과 장치 및 신기술 측면에서 대안을 강구하여 절감할 수 있다.

에너지비용은 운영측면에서는 야드트럭 폴링 운영제, 야드 크레인 작업동선 최소화, 2단 적재 차량도입 및 컨테이너 재조작 감소 등의 방안으로 절감이 가능하며, 장치의 관점에서는 외부전원공급방식(e-RTG)과 본 논문에서 제안하는 크레인의 운전 패턴에 따른 에너지절약 기술사용 등의 방법이 있으며, 신기술로서는 바이오에너지, 수소연료전지 및 하이브리드엔진 등을 이용하여 에너지를 절약 할 수 있다.

지금까지의 선행 연구에서는 운영효율화 분야에서는 초기투입비용이 가장 많이 소요되는 야드 트럭 2단 적재방법이 가장 불리한 것으로 나타났다으며, 일부 운영시스템의 개선을 통한 비용절감 효과가 가장 높은 야드 크레인 재조작 최소화를 통한 절감대안이 가장 우선순위가 높다.

기 개발된 장치 적용분야에서는 투입비용 측면, 비용절감 효과성, 기

술의 적용성에서 모두 우수한 플라이휠 배터리가 가장 우선순위가 앞서며, 가변출력엔진, Super Capacitor, E-RTGC 순으로 나타난다[4].

컨테이너터미널의 에너지비용을 절감하기 위한 대안적용 절차는 전체 컨테이너 터미널 혹은 컨테이너터미널의 특정하역 체계를 대상으로 할 경우 다르게 진행된다.

따라서 본 논문에서는 트랜스퍼 크레인을 대상으로 기존의 운영중인 운전방법을 최적제어법에 의한 Eco-Driving제어법을 제안한 후 제안된 방법으로 운전 하였을 때의 에너지 절감 효과를 제시하고자 한다.

5.2 최적 제어법

최적제어는 선형의 2차 형식으로 주어지는 시스템에서 미리 정한 평가 기준을 최소로 할 수 있는 제어를 말한다. 즉 시스템의 상태방정식을 구속조건으로 하고 주어진 2차형식의 평가함수를 최소화하는 최적제어 이론에 기반을 둔 상태 피드백 제어기법으로 LQ(Linear Quadratic)이라고도 한다[23~24].

최적제어는 식(5.1)과 같이 표현되는 일반적인 시스템에 대하여 식(5.2)와 같이 주어지는 평가함수를 최소화 하여, 식(5.3)와 같은 최적제어 입력 u 를 결정하는 제어방식이다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{5.1a}$$

$$y = Cx \tag{5.1b}$$

여기서 x 는 n 차원의 상태벡터, u 는 m 차원의 제어입력벡터, y 는 제어기

의 출력벡터, A 는 적당한 크기의 상태행렬, B 는 입력행렬, C 는 출력행렬이다.

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (5.2)$$

$$u = -F x \quad (5.3a)$$

$$= -R^{-1} B^T P x \quad (5.3b)$$

또한 식(5.3)에서 F 는 피드백 이득행렬이고, P 는 식(5.4)의 리카치 방정식에서 얻어지는 행렬이다.

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (5.4)$$

최적제어기법의 사용상의 장점은 특별한 경우를 제외하고는 설계된 시스템이 안정하다는 것이고 플랜트의 정확한 모델링과 적절한 파라미터 선정이 이루어진다면 설계된 구간에서는 제어성능이 우수하다는 것이다. 이는 선형시스템에서 2차 평가함수를 최소화하면서 시스템을 안정화하는데 기초를 두기 때문이다.

식(5.2)에서 평가함수의 첫 번째 항은 상태변수 x 의 제곱형태이고 두 번째 항은 제어입력의 제곱형태이므로 평가함수를 최소화 한다는 것은 상태변수 x 값을 줄이는 것이고, 두 번째 항인 제어입력 u 값 즉, 소비되는 에너지를 가능한 한 줄인다는 의미가 된다.

여기에서 상태변수 항과 제어입력 항은 서로 상충관계가 있다. 즉 상태변수 값을 빨리 작게 하려면 큰 제어 입력값이 필요하고 반대로 제어

입력 값이 줄이면 상태변수 값은 작게 할 수 없다는 것이다. 따라서 하중행렬 Q 와 R 을 적절히 선택하여 두 항사이의 상대적인 중요성을 결정해 바람직한 제어응답이 되도록 하는 것이 무엇보다도 중요하다.

고전제어의 제어시스템 설계방법은 제어기를 설계하고 이에 대한 안정성을 검토하였으나 현대제어에서는 이와 달리 제어대상의 안정성을 시뮬레이션 한 결과를 가지고 안전한 영역에 속하도록 제어기를 설계하는 방법이 사용된다. 즉 이러한 방법은 제어기를 설계할 때에 계단입력에 대한 동특성에 기준을 둔다든지 아니면 폐회로의 극점을 어떤 위치로 옮긴다든지 하는 등의 전통적인 제어개념이 아닌 임의의 평가함수를 선정하고 이것을 최소화되게 제어입력을 구하는 것이다.

최적제어는 현대제어이론의 다변수 시스템을 다루기 용이하도록 상태방정식과 출력방정식을 사용한다. 최적제어법칙은 상태방정식을 구속조건으로 하고 식(5.2)와 같은 2차형식의 평가함수를 최소로 하면서 피드백 시스템을 점근적으로 안정하게 하도록 식(5.3)과 같이 제어입력 u 을 가하는 것이다.

식(5.2)의 평가함수에서 Q 는 양의 반한정 대칭행렬($Q \geq 0$)인 상태가중행렬(State Weighting Matrix)이고, R 은 양의 한정 대칭행렬인 제어가중행렬($R > 0$)이다. Q 와 R 은 상태벡터와 제어입력의 상대적인 중요성에 근거를 두고 설계자가 선정하는 값으로서 이들의 값에 따라 폐루프의 극점위치와 고유벡터가 결정된다.

그리고 최적제어기를 설계하기 전에 해당시스템을 제어할 수 있는지 그리고 상태를 관측할 수 있는지를 먼저 판단하는 것이 중요하다. 구속조건이 없는 제어벡터에 의해 임의의 초기상태 $x(t_0)$ 에서 다른 임의의 상태로 유한시간 내에 이동시킬 수 있다면 가제어성(Controllability)라고

하고 초기상태 $x(t_0)$ 에 대해 유한시간 동안 출력을 관측함으로써 이 초기상태를 결정할 수 있으면 가관측성(Observability)이라고 한다.

상태의 모든 변화가 출력벡터의 모든 요소에 영향을 준다면 시스템은 완전 가관측이고 가관측성의 개념은 가능한 짧은 시간 내에 측정 가능한 상태에서부터 측정 불가능한 상태변수를 재구성하는 문제를 해결하는데 유용하게 사용된다.

실제로 가제어성과 가관측성의 조건이 제어시스템 설계문제에 완전해의 존재여부를 결정한다. 제어대상이 가제어성이고 가관측성이면 평가함수를 최소로 하는 제어시스템은 점근 안정한 성질을 가진다. 가제어성과 가관측성을 판단하는 것은 행렬 A, B, C 를 이용하여 다음식의 행렬 급수(Rank)를 조사함으로써 이루어진다. 상태행렬 A 가 6×6 인 시스템이라고 가정한다면 가제어성은 상태행렬 A 와 제어입력 B 로 구성되는 식(5.5)의 가제어성 행렬 S 의 급수가 6이면 시스템 $[A, B]$ 는 제어가능하고 6보다 적으면 제어불가능하며 가관측성은 상태행렬 A 와 출력행렬 C 로 구성되는 식(5.6)의 가관측성 행렬 N 의 급수가 6이면 시스템 $[A, C]$ 는 관측가능하고 6보다 적으면 관측불가능하다고 판단된다.

$$S = [B : AB : A^2B : A^3B : A^4B : A^5B] \quad (5.5)$$

$$N = [C : CA : CA^2 : CA^3 : CA^4 : CA^5]^T \quad (5.6)$$

5.3 Eco-driving 제어법

크레인의 선형 시불변 동적시스템은 다음의 식(5.7)과 같이 나타내어진다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (5.7a)$$

$$y = Cx \quad (5.7b)$$

이때, Eco-Driving을 위한 평가함수를 식(5.8)과 같이 가정할 수 있다.

$$J = \int_{t_0}^{t_1} f(x(t), u(t), g(x)) dt \quad (5.8a)$$

또는

$$J = \int_{x_0(t_0)}^{x_1(t_1)} f(x(t), u(t), g(x)) dx \quad (5.8b)$$

여기서 $g(x)$ 는 컨테이너 야드의 컨테이너 적재함수로서, 스프레더 이동 시의 제약조건을 나타낸다. 본 논문에서의 Eco-Driving 제어법은 위의 식(5.8)의 평가함수 J 를 최소로 하는 제어입력 $u(t)$ 를 구하는 것이다.

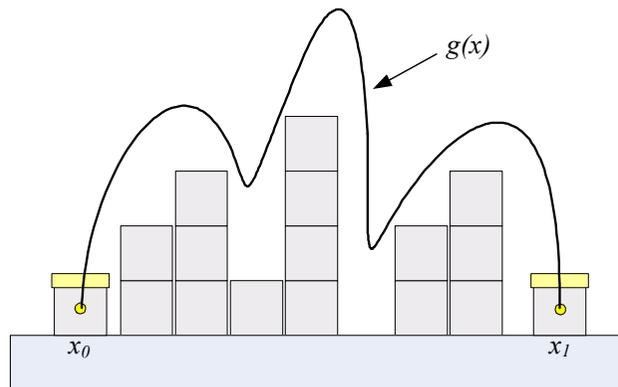


Fig 5.1 컨테이너 이동 제약조건

따라서 본 논문에서는 저비용 고효율 위한 크레인의 Eco-Driving 제어를 위하여 다음과 같이 3단계의 절차를 이용한다.

step1 : 컨테이너 이동거리를 각 구역별로 나눈다.

step2 : 각 구역에서의 크레인 제어입력 $u(t)$ 를 최적 제어법에 의해 구한다.

step3 : 평가함수 J 가 최소가 되는 제어입력 $u(t)$ 를 선택한다.

이때 "Step 1"에서 주어진 이동경로에 대하여 동일 구간으로 경로를 나눈 후, "Step 2"에서 이들 각 구간에서의 최적경로를 구하여 전체를 더하는 방법을 취하는 동일 분할법과, 컨테이너 야드의 컨테이너 적재함수 $g(x)$ 곡선을 유한극점(EP)으로 분할하여 최적경로를 구하는 유한극점(EP)분할방법의 2가지 방법을 제안한다.

5.1.1 동일 분할법

첫 번째 방법으로 제안한 주어진 이동경로에 대하여 동일 구간으로 경로를 나눈 후 이들 각 구간에서의 최적경로를 구하여 전체를 더하는 방법을 취하는 동일 분할법에 의한 최적경로를 구하기 위해서 평가함수 J 는 식(5.9)과 같이 구해진다.

$$J_{\min} = \min \{ J_{\min}^1, J_{\min}^2, \dots, J_{\min}^n \} \quad (5.9)$$

이때 크레인의 이동경로에 대하여 동일 구간으로 경로를 나누는 방법으로, Fig 5.2는 나누고자 하는 구역을 2개의 구역으로 분할하는 2점 분할법이며, Fig 5.3는 경로에 대한 구역을 3개의 구역으로 분할하는 3점 분할법이며, Fig 5.4는 나누고자 하는 경로에 대한 구역을 4개의 구역으로 분할하는 4점 분할법을 나타낸 것이다.

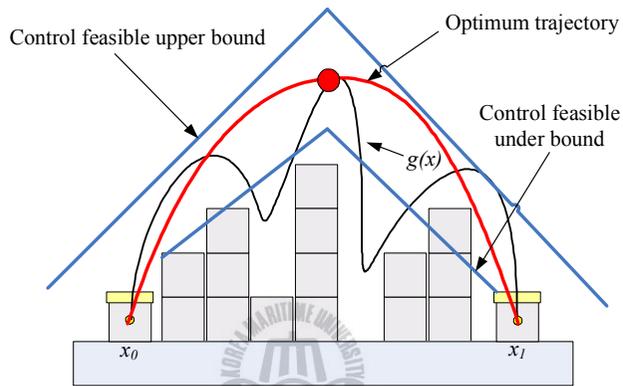


Fig 5.2 2점분할법

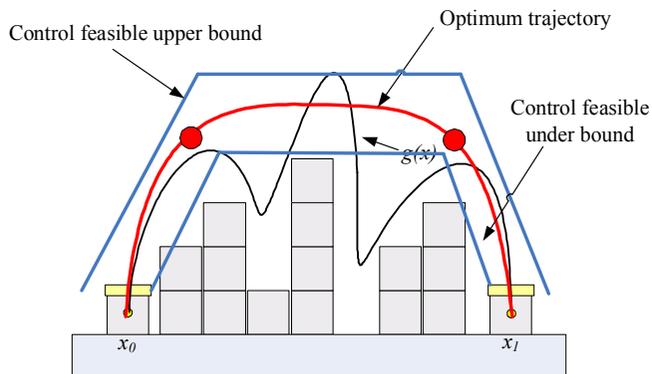


Fig 5.3 3점분할법

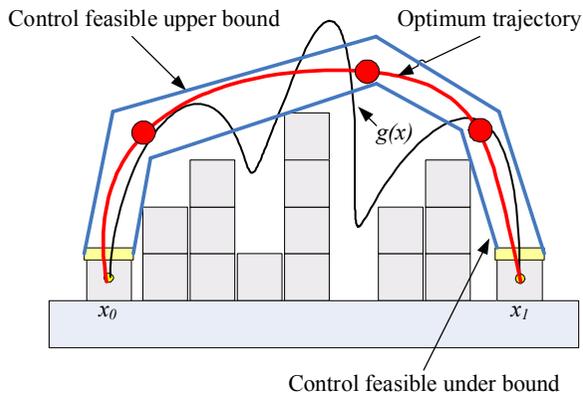


Fig 5.4 4점 분할법

5.2.2 유한극점 분할법

유한극점 분할법은 Fig 5.5에서 보는 바와 같이 $g(x)$ 곡선의 유한점 (EP)으로 분할하여 최적경로를 구하는 유한극점분할법이다.

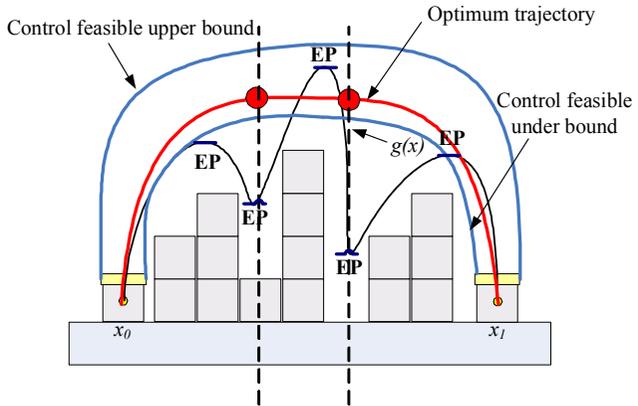
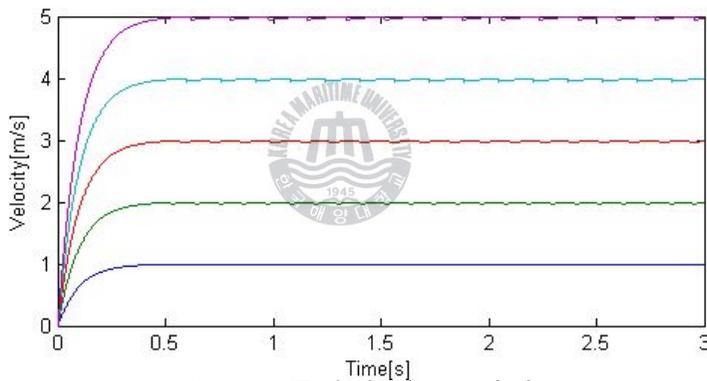


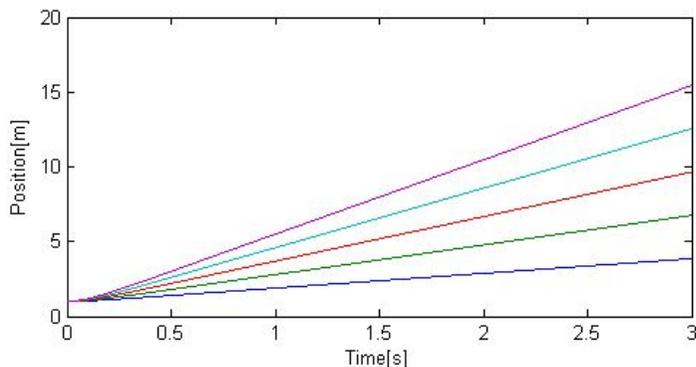
Fig 5.5 유한극점(EP) 분할법

5.4 시뮬레이션 및 고찰

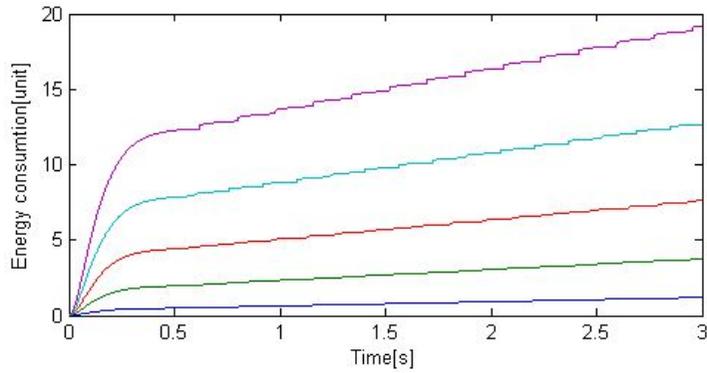
시뮬레이션의 조건은 4장에서 기술한 사다리꼴형 제어입력을 포함한 3가지의 고정형 운전패턴에서의 에너지 소비량과 5장에서 제안하는 Eco-Driving제어법에 따른 운전패턴에서의 에너지 소비량을 비교 분석하기 위하여 고정형 제어패턴에서의 시뮬레이션 조건과 동일하며, 컨테이너의 열은 외곽에서 외곽까지 길이를 14[m], 호이스트의 이동 높이는 4[m]로 가정하였다. 따라서 트롤리의 속도변화에 따른 위치와 에너지 소비패턴에 대한 시뮬레이션을 행한 결과는 Fig 5.6과 같이 나타났다.



(a) 트롤리의 속도 변화



(b) 트롤리의 위치 변화



(c) 에너지 소비 패턴

Fig 5.6 트롤리의 속도변화에 따른 시뮬레이션 결과

그리고 Fig 5.6으로부터 분석된 속도 변화에 따른 에너지 소비량, 위치 및 단위 거리당 평균에너지 소비량 등에 대한 세부적인 분석 값은 Table 5.1과 같다.



Table 5.1 트롤리의 속도변화에 따른 시뮬레이션 결과

Velocity[m/s]	1	2	3	4	5
Energy consumption [unit/m]	1.206	3.771	7.6227	12.678	19.204
Position[m]	3.8625	6.7538.	9.6450	12.5371	15.4288
Power[unit/m]	0.4212	0.6554	0.8812	1.0989	1.3309

이때 중요관점인 에너지 소비는 Table 5.1에서 보는 바와 같이 크레인 운전 시작하게 되면 트롤리는 가속구간이므로 에너지소비가 급격

한 증가 추세를 보이다가, 트롤리가 가속을 완료한 후 정속구간에서는 크레인은 속도는 일정하게 유지한다. 그러나 속도는 일정하게 유지되나 에너지의 소비는 조금씩 증가하는 것을 알 수 있다.

또한 트롤리의 이동속도가 저속일 때는 에너지 소비의 증가폭이 작지만 고속일 때는 속도에 비해 상대적으로 많은 에너지 소비가 되는 것으로 나타났다.

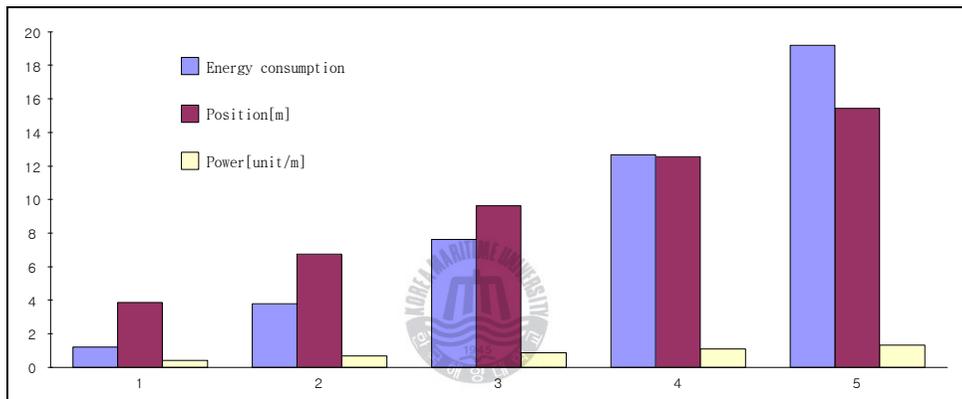
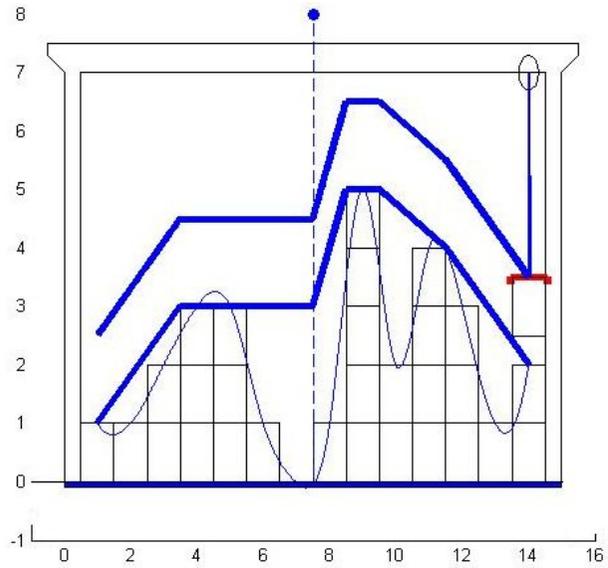


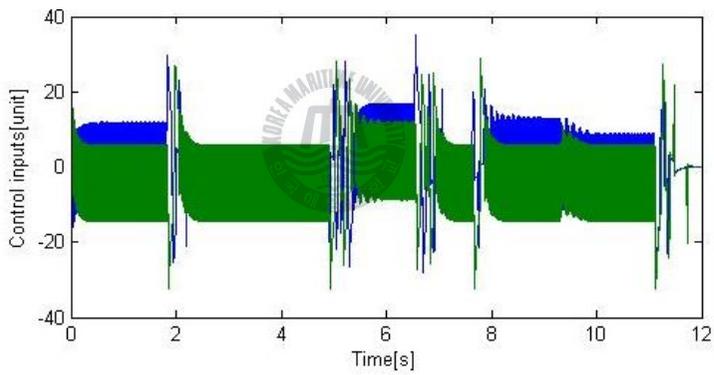
Fig 5.7. 트롤리의 속도변화에 따른 에너지 소비패턴

이를 토대로 본 연구에서 제안한 2점분할법, 3점분할법, 4점분할법, 유한극점(EP)분할법 등의 4가지의 Eco-Driving 제어법에 의한 효과를 검증하기 위하여 시뮬레이션을 실행하였다.

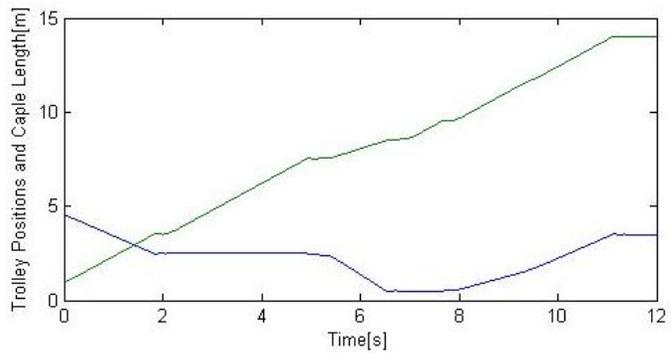
먼저 동일 구간법에 의한 방법 중 2점 분할법에 의한 시뮬레이션의 결과는 Fig 5.8과 같이 나타났으며, 이때 소비되는 전체 에너지 189.2[Wh]가 소비되는 것으로 분석 되었다.



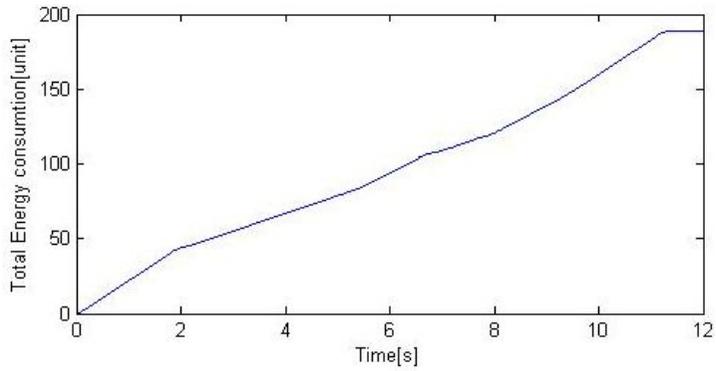
(a) 분할구간



(b) 제어입력



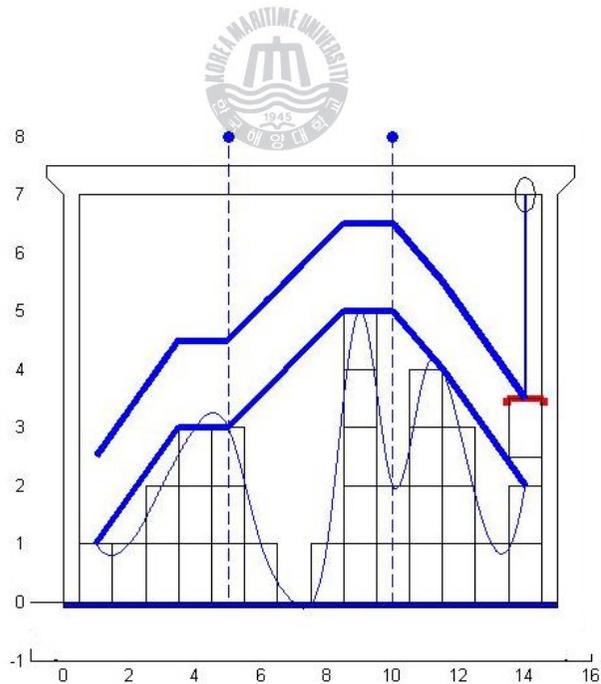
(c) 트롤리의 위치에 따른 Cable의 길이



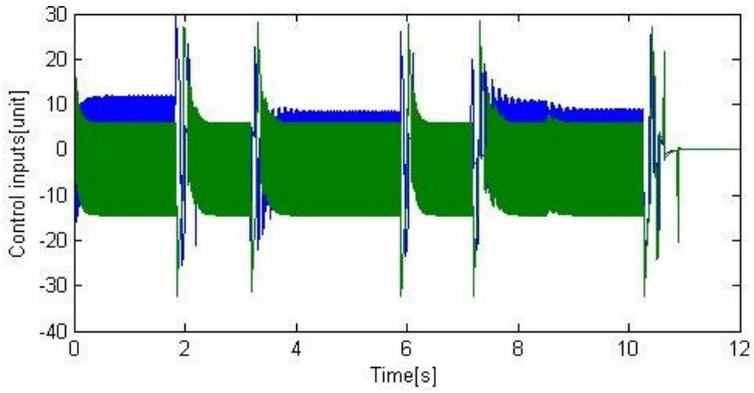
(d) 에너지 소비패턴

Fig 5.8 2점분할법에 의한 시뮬레이션 결과

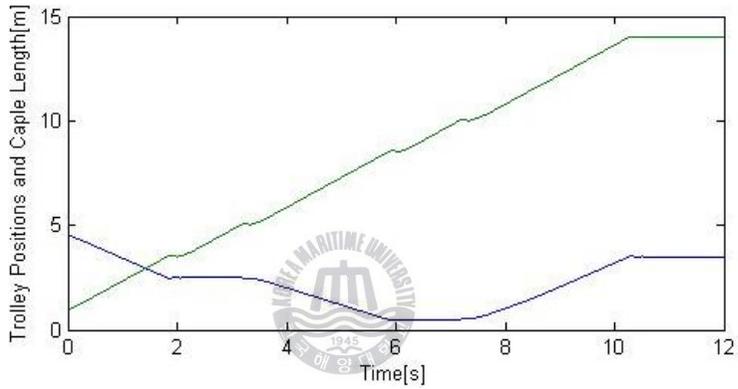
두 번째로 3점분할법에 의한 시뮬레이션 결과는 Fig 5.9과 같이 나타났으며, 이때 소비되는 전체 에너지는 191.5[Wh]으로 분석되었다.



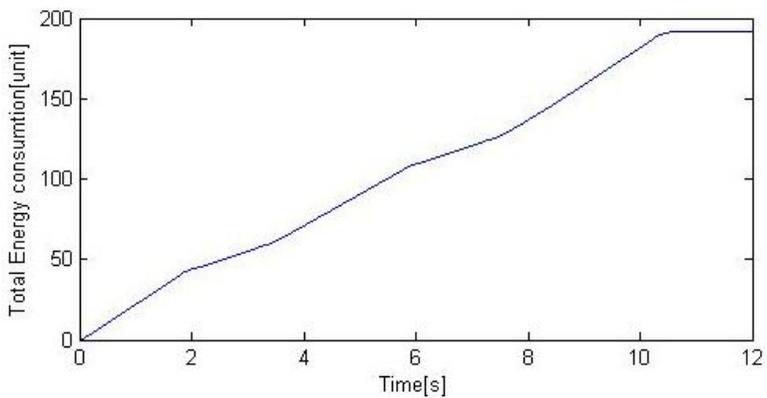
(a) 분할 구간



(b) 제어입력



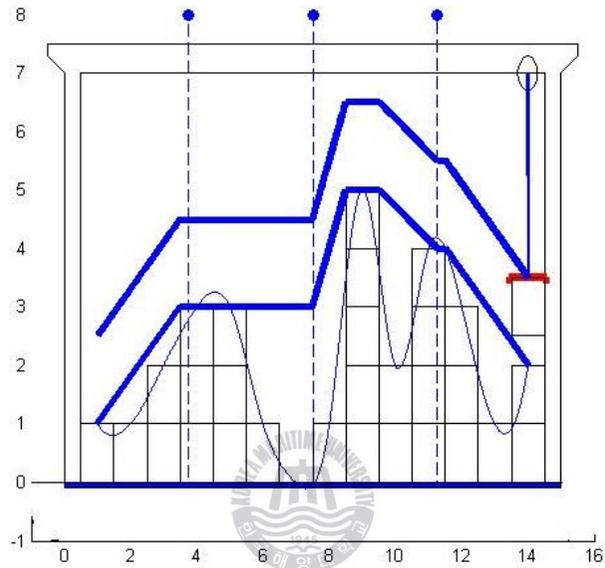
(c) 트롤리의 위치에 따른 Cable의 길이



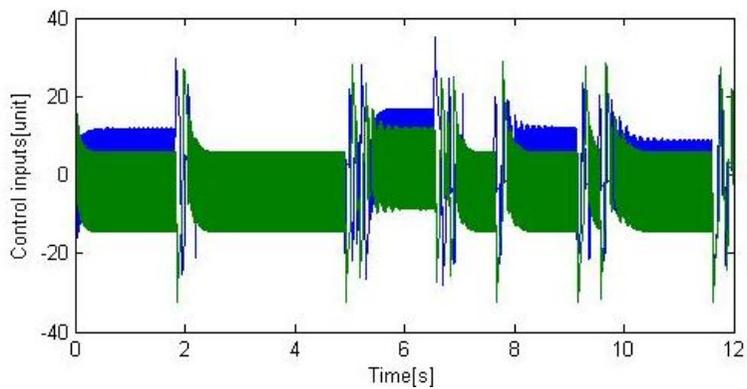
(d) 에너지 소비패턴

Fig 5.9 3점 분할법에 의한 시뮬레이션 결과

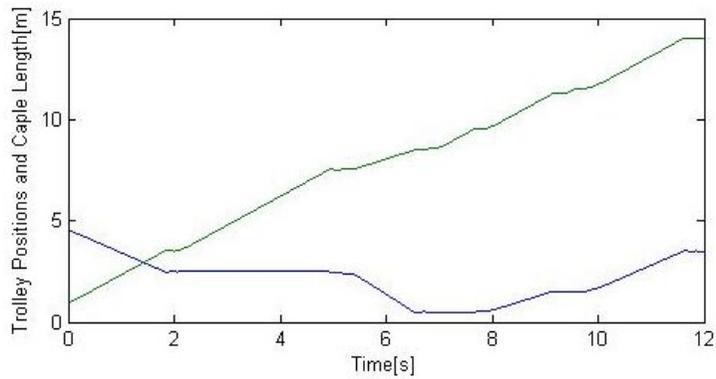
세 번째로 4점분할법에 의한 시뮬레이션 결과는 Fig 5.10과 같이 나타났다. 이때 소비되는 전체 에너지는 194.5[Wh]가 소비되는 것으로 분석되었다.



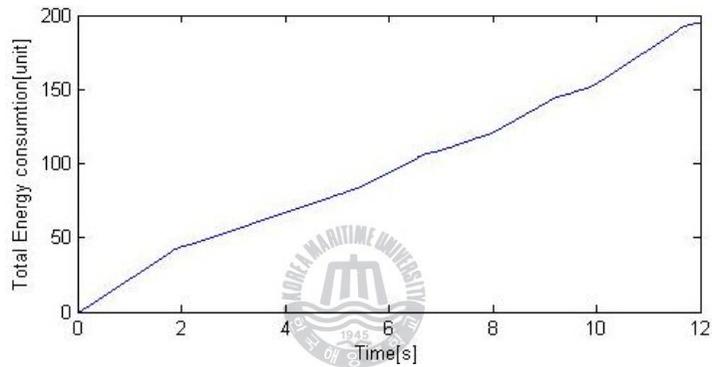
(a) 분할구간



(b) 제어입력



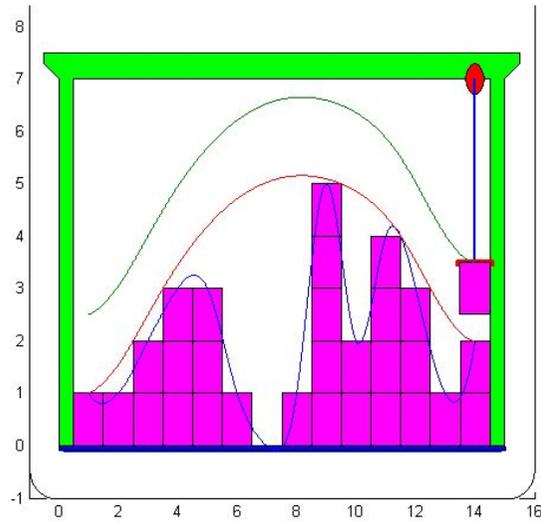
(c) 트롤리의 위치에 따른 Cable의 길이



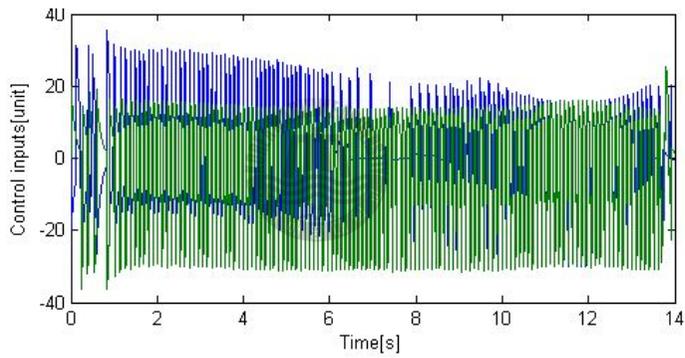
(d) 에너지 소비패턴

Fig 5.10 4점분할법에 의한 시뮬레이션 결과

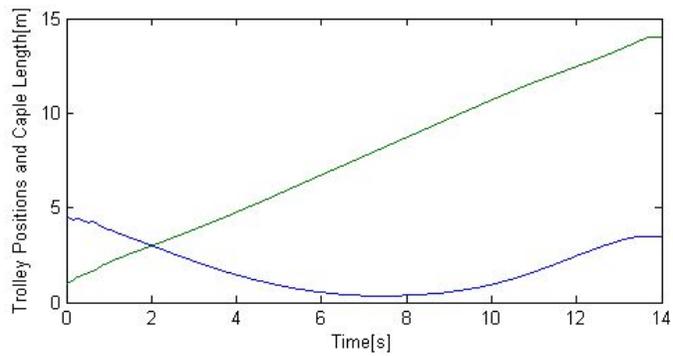
마지막으로 유한극점(EP)분할법에 의한 시뮬레이션 결과는 Fig 5.11 과 같이 나타났다. 이때 소비되는 에너지는 266.2[Wh]가 소비되는 것으로 분석되었다.



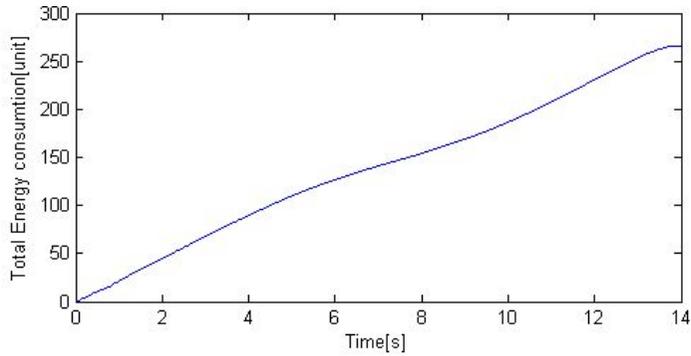
(a) 분할구간



(b) 제어입력



(c) 트롤리의 위치와 Cable의 길이



(d) 에너지 소비패턴

Fig 5.11 유한극점(EP)분할법에 의한 시뮬레이션 결과

따라서 앞에서 기술한 4가지의 각 제어법에 의한 시뮬레이션 결과 값을 정리하면 Table 5.2와 같다.

Table 5.2 최적제어형에 의한 에너지 소비패턴

구 분	2점분할법	3점분할법	4점분할법	EP분할법
횡행 운전시 소비된 에너지[Wh]	145.889	147.649	149.512	203.024
승강 운전시 소비된 에너지[Wh]	43.311	43.851	44.888	63.176
계[Wh]	189.2	191.5	194.4	266.2

Fig 5.12는 제안된 3가지 분할법에 따라 시뮬레이션 결과를 나타낸 그림으로 유한극점(EP)분할법이 가장 많은 266.2[Wh]의 에너지가 소비되었고, 2점 분할법이 189.2[Wh]로 가장 적은 에너지 소비 패턴을 보여 2점 분할법이 가장 에너지 소비가 적은 방법으로 분석 되었다.

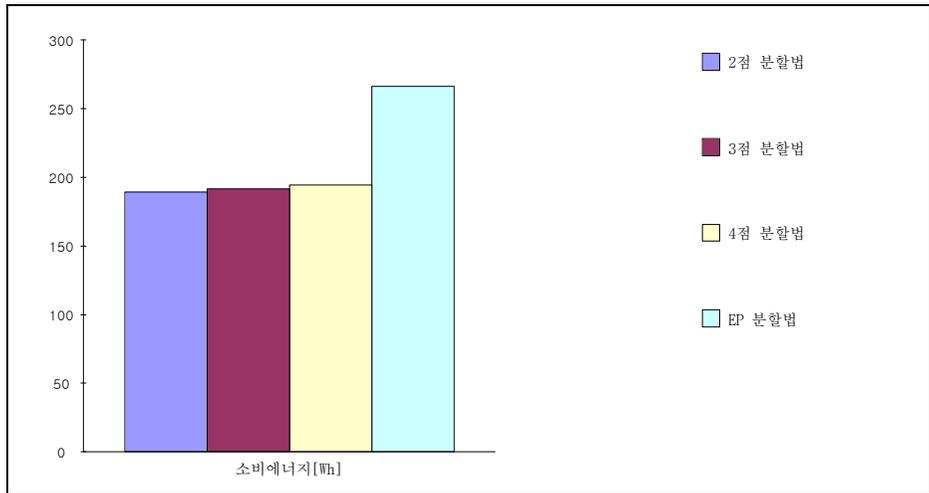


Fig 5. 12 최적제어형에 의한 에너지 소비패턴

따라서 앞에서 기술한 분석값을 바탕으로 3가지 고정형 제어패턴과 본 절에서 제안한 최적 제어형 운전패턴에 따른 에너지 소비량을 정리하면 표 5.3과 같다.



Table 5.3 고정형 제어입력 및 최적제어형에 따른 에너지 소비패턴

구 분	사다리꼴형	노치형	계단형	2점 분할법	3점 분할법	4점 분할법	EP 분할법
호이스트의 소비 에너지 [Wh]	338.365	348.832	359.114	145.889	147.649	149.512	203.024
트롤리의 소비 에너지 [Wh]	54.5398	42.8778	32.6802	43.311	43.851	44.888	63.176
계[Wh]	392.905	391.709	391.794	189.2	191.5	194.4	266.2

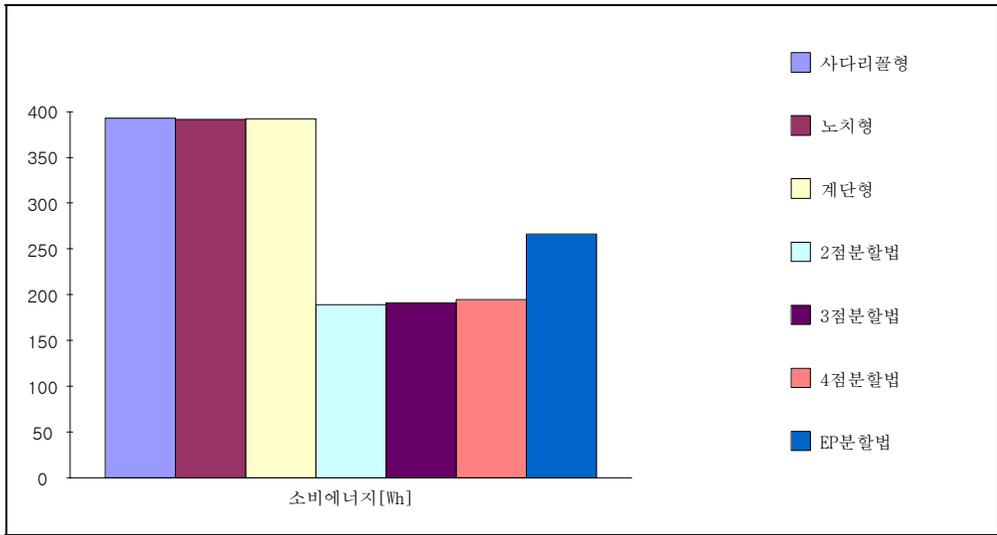


Fig 5.13 고정형 및 최적제어형 운전에 따른 에너지 소비패턴

따라서 에너지 소비량은 Table 5.3에서 보는 바와 같이 고정패턴 중 사다리꼴형이 392.905[Wh]로 에너지소비가 가장 많은 패턴이므로, 사다리꼴형을 기준으로 제안한 4가지 운전 패턴 각각에 대하여 소비량에 대한 절감량을 정리하면 Table 5.4과 같다.

Table 5.4 최적제어형 패턴에 따른 횡행과 승강 운전시 비용절감

구 분	2점분할법	3점분할법	4점분할법	EP분할법
에너지절감 [kWh]	305,558	302,108	297,758	190,058
비용절감액 [천원]	19,250	19,033	18,759	11,974
t CO ₂ 절감	129.56	128.09	126.54	80.58
CO ₂ 대체금액 [천원]	4,555	4,504	4,439	2,833
총 절감액 [천원]	23,805	23,537	23,198	14,807

먼저 고정형의 사다리꼴형과 2점분할법으로 운전하였을 경우 소비되는 에너지를 비교하면 총 305,558[kWh]의 에너지 절감을 할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 이를 원단위로 환산하면 산업용전기의 경우 300[kWh]이상 사용시 [kWh]당 63원의 사용 요금이 부과되므로 연간 19,250[천원]의 절감할 수 있는 것으로 나타났으며, 여기에 에너지절감에 따른 129.56 [Ton]의 CO₂절감(0.424[kg/kWh])를 할 수 있으므로 이에 대한 비용 4,555[천원]의 절감(20유로/t CO₂, 1,758원/유로)를 할 수 있는 것으로 분석되어 총 23,805[천원]의 비용절감을 할 수 있는 것으로 분석되었다.

다음으로 고정형의 사다리꼴형과 제어패턴과 3점분할법을 채택하였을 경우를 비교하면 약 302,108[kWh] 정도의 에너지 절감에 따라 연간 19,033[천원]의 비용 절감을 할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 에너지절감에 따른 128.09[Ton]의 CO₂절감(0.424[kg/kWh])으로 이에 대한 대체비용 4,504[천원]의 추가 절감 효과로 총 23,537[천원]의 비용절감을 할 수 있는 것으로 분석되었다.

세 번째로 고정형의 사다리꼴형과 4점분할법을 채택하였을 경우를 비교하면 약 297,758[kWh]의 에너지 절감에 연간 18,759[천원]의 비용 절감을 할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 에너지절감에 따른 126.54 [Ton]의 CO₂절감(0.424[kg/kWh])으로 이에 대한 대체비용 4,439[천원]의 추가 절감 효과로 총 23,198[천원]의 비용절감을 할 수 있는 것으로 분석되었다.

마지막으로 고정형의 사다리꼴형과 유한극점(EP)분할법을 채택하였을 경우를 비교하면 약 190,058[kWh]의 에너지 절감에 따라 연간 11,974 [천원]의 비용 절감을 할 수 있는 것으로 분석되었다.

또한 에너지절감에 따른 80.58[Ton]의 CO₂절감(0.424[kg/kWh])으로 이에 대한 대체비용 2,833[천원]의 추가 절감 효과로 총 14,807[천원]의 비용절감을 할 수 있는 것으로 분석되었으며, 이를 도표로 나타내면 Fig 5.14와 같이 나타낼 수 있다.

따라서 그림에서 보는바와 같이 고정형의 사다리꼴형과 최적제어형의 2점 분할법을 비교하면 2점 분할법이 가장 에너지 소비를 절감할 수 있는 최적 제어법으로 분석되었다.

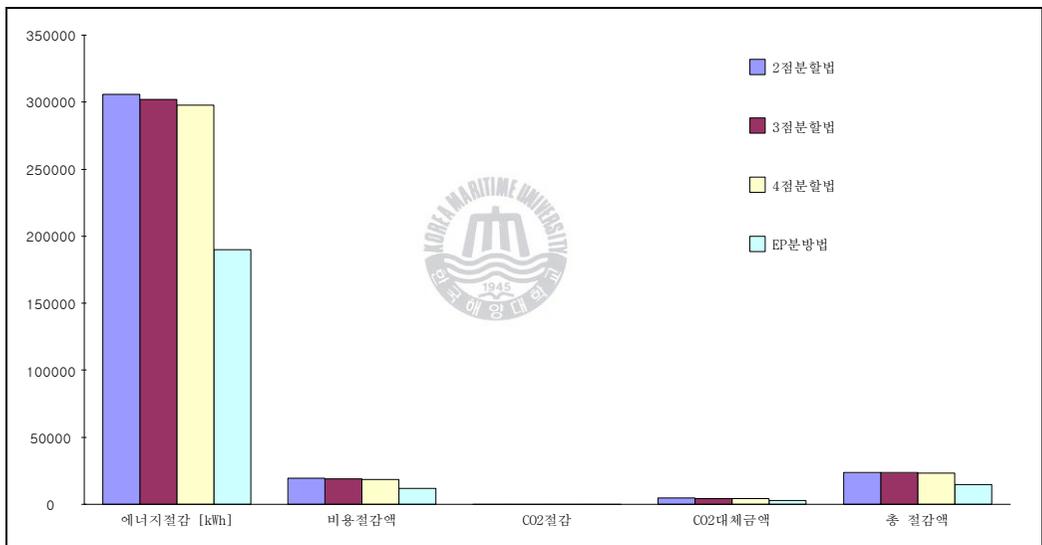


Fig 5.14 최적제어형의 에너지 절감

다음으로 크레인을 횡행운전 시뮬레이션과 동일한 조건에서 야드의 길이를 100[m]로 가정하여 주행운전에 대한 에너지 소비량을 시뮬레이션하고 그 결과를 정리하면 Table 5.5와 같다.

따라서 Table 5.5에서 보는 바와 같이 최적제어법에 의한 유한극점 분할법은 5,136.8[Wh]로 에너지 소비가 가장 많았고, 3점 분할법이 4,879.5[Wh]으로 다른 분할법에 비해 미세한 차이지만 가장 에너지 소비가 적은 우수한 패턴으로 분석되었다.

Table 5.5 크레인 주행(승강포함)운전 시뮬레이션 결과

구 분	2점분할법	3점분할법	4점분할법	EP분할법
에너지소비량[Wh]	4,895.2	4,854.1	4,879.5	5,136.8

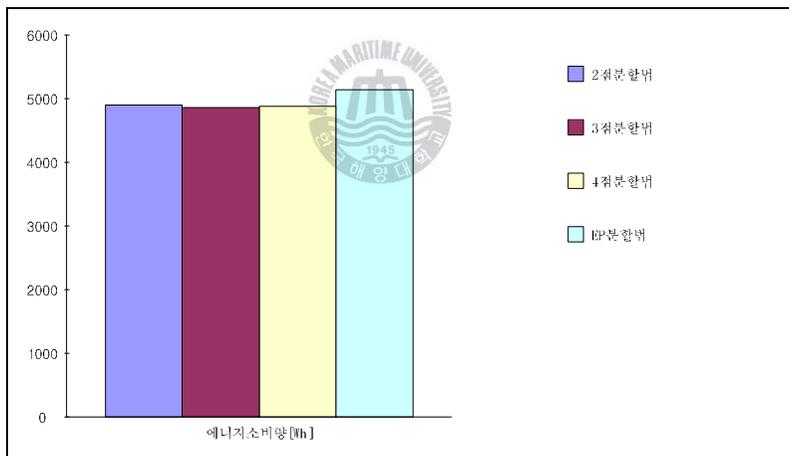


Fig 5.15 최적제어형에 의한 크레인 주행운전의 에너지 소비 패턴

Table 5.5에서 분석된 값을 바탕으로 앞 절에서 기술한 3가지 고정형 제어패턴과 본 절에서 제안한 최적제어형 운전패턴에 따른 에너지 소비량을 정리하면 Table 5.6와 같다.

Table 5.6 주행(승강포함)운전에 따른 에너지 소비패턴

구 분	사다리 꼴형	노치형	계단형	2점분 할법	3점분 할법	4점분 할법	EP분할 법
에너지소비량 [Wh]	8,901.3	6,983.8	5,321.8	4,895.2	4,854.1	4,879.5	5,136.8

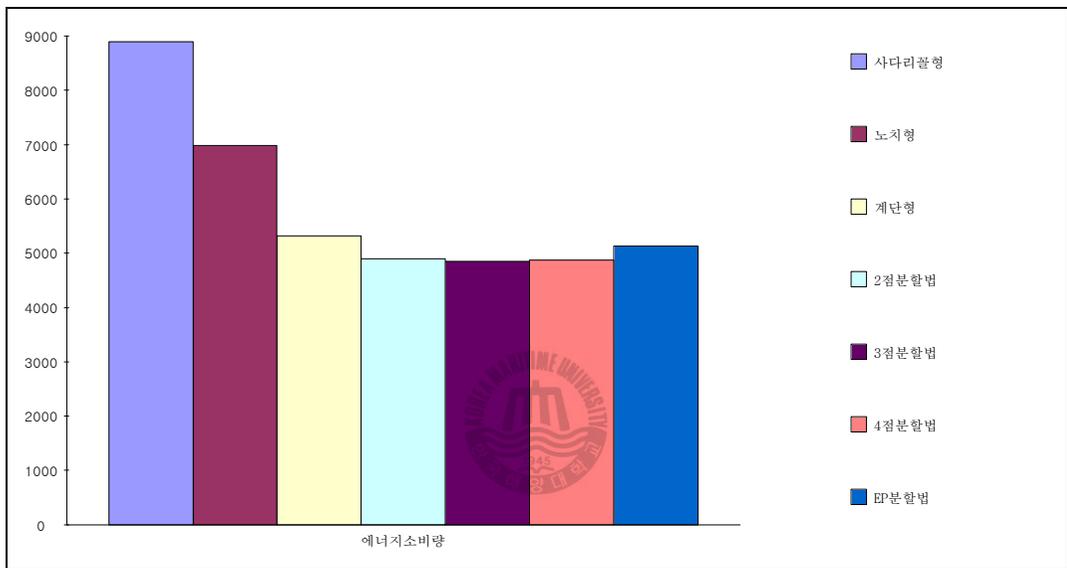


Fig 5.16 주행운전에 따른 에너지 소비 패턴

이에 따라 크레인의 주행운전에 있어 고정형 제어패턴 중 가장 에너지 소비가 많은 사다리꼴형과 에너지 소비가 가장 적은 본 논문에서 제안한 3점분할법으로 운전하였을 경우와 에너지 소비를 비교하면 Table 5.7와 같이 정리할 수 있다.

Table 5.7 최적제어형에 의한 주행(승강포함)운전시의 에너지소비 절감

구 분	2점분할법	3점분할법	4점분할법	EP분할법
에너지절감[kWh]	3,004,545	3,035,370	3,016,320	2,823,345
비용절감[천원]	189,286	191,228	190,028	177,871
CO2절감[kg당]	1,273.93	1,287.00	1,278.92	1,197.10
CO2절감액[천원]	44,791	45,251	44,967	42,090
총절감액[천원]	234,078	236,479	234,995	219,961

먼저 고정형 제어패턴중에서 가장 에너지 소비가 많은 사다리꼴형과 최적제어형의 2점분할법으로 크레인을 운전하였을 때 에너지 절감으로는 총 3,004,545[kWh]의 에너지 절감을 할 수 있는 것으로 나타났다.

따라서 이를 원단위로 환산하면 산업용전기의 경우 300[kWh]이상 사용시 [kWh]당 63원의 사용 요금이 부과되므로 연간 189,286[천원]의 절감할 수 있는 것으로 나타났으며, 여기에 에너지절감에 따른 1,273.93 [Ton]의 CO2절감(0.424[kg/kWh])를 할 수 있으므로 이에 대한 비용 44,791[천원]의 절감(20유로/t CO2, 1,758원/유로)를 할 수 있는 것으로 분석되어 총 234,078[천원]의 비용절감을 할 수 있는 것으로 분석되었다.

다음으로 사다리꼴형 제어패턴과 3점분할법을 채택하였을 경우를 비교하면 약 3,035,370[kWh] 정도의 에너지 절감에 따라 연간 191,228 [천원]의 비용 절감을 할 수 있는 것으로 분석되었다. 그리고 에너지절감에 따른 1,287.00[Ton]의 CO2절감(0.424[kg/kWh])으로 이에 대한

대체비용 4,504[천원]의 추가 절감 효과로 총 45,251[천원]의 비용절감을 할 수 있는 것으로 분석되었다.

세 번째로 사다리꼴형 제어패턴과 4점분할법으로 운전하였을 경우를 비교하면 약 3,016,320[kWh]의 에너지 절감에 연간 190,028[천원]의 비용 절감을 할 수 있는 것으로 분석되었다.

또한 에너지절감에 따른 1,278.92[Ton]의 CO₂절감(0.424[kg/ kWh])으로 이에 대한 대체비용 44,967[천원]의 추가 절감 효과로 총 234,995[천원]의 비용절감을 할 수 있는 것으로 분석되었다.

마지막으로 사다리꼴형 제어패턴과 유한극점(EP)분할법을 채택하였을 경우를 비교하면 약 2,823,345[kWh]의 에너지 절감에 따라 연간 177,871[천원]의 비용 절감을 할 수 있는 것으로 분석되었으며,

또한 에너지절감에 따른 1,197.10[Ton]의 CO₂절감(0.424[kg/kWh])으로 이에 대한 대체비용 42,090[천원]의 추가 절감 효과로 총 219,961[천원]의 비용절감을 할 수 있는 것으로 분석되었다.

따라서 크레인의 횡행운전, 승강운전, 주행운전 등 크레인 전체 운전 에 대한 에너지 소비량에 대한 비용절감효과에 대해서 기술하면 Table 5.8와 같다.

그리고 이를 근거로 각 제어패턴에 따른 비용절감에 대한 내용은 다음과 같이 기술할 수 있다. 먼저 2점분할법에 의한 비용절감효과는 Table 5.9에서 보는 바와 같이 총 257,883[천원]의 절감효과가 있는 것으로 분석되었다.

Table 5.8 2점분할법에 의한 에너지 비용절감

구 분	횡행(승강포함)	주행(승강포함)	계
에너지절감[kwh]	305,558	3,004,545	3,310,103
비용절감[천원]	19,250	189,286	208,536
t CO ₂ 절감	129.56	1,273.93	1,403
CO ₂ 대체금액[천원]	4,555	44,791	49,346
총 절감액[천원]	23,805	234,078	257,883

다음으로 3점분할법에 의한 비용절감효과는 Table 5.9에서 보는 바와 같이 총 260,016[천원]의 절감효과가 있는 것으로 분석되었다.

Table 5.9 3점분할법에 의한 에너지 비용절감

구 분	횡행(승강포함)	주행(승강포함)	계
에너지절감[kwh]	302,108	3,035,370	3,337,478
비용절감[천원]	19,033	191,228	210,261
t CO ₂ 절감	128.09	1,287.00	1,415
CO ₂ 대체금액[천원]	4,504	45,251	49,755
총 절감액[천원]	23,537	236,479	260,016

세 번째로 4점분할법에 의한 비용절감효과는 Table 5.10에서 보는 바와 같이 총 258,193[천원]의 절감효과가 있는 것으로 분석되었다

Table 5.10 4점분할법에 의한 에너지 비용절감

구 분	횡행(승강포함)	주행(승강포함)	계
에너지절감[kwh]	297,758	3,016,320	3,314,078
비용절감[천원]	18,759	190,028	208,787
t CO2 절감	126.54	1,278.92	1,405
CO2대체금액[천원]	4,439	44,967	49,406
총절감액[천원]	23,198	234,995	258,193

마지막으로 유한극점(EP)분할법에 의한 비용절감효과는 Table 5.11에서 보는 바와 같이 총258,193[천원]의 절감효과가 있는 것으로 분석되었다



Table 5.11 유한(EP)극점 분할법에 의한 에너지 비용절감

구 분	횡행(승강포함)	주행(승강포함)	계
에너지절감[kwh]	190,058	2,823,345	3,013,403
비용절감[천원]	11,974	177,871	189,845
t CO2 절감	80.58	1,197.10	1,278
CO2대체금액[천원]	2,833	42,090	44,923
총 절감액[천원]	14,807	219,961	234,768

따라서 이를 종합적으로 정리하면 Table 5.12와 같다. 따라서 최적제어형의 경우 3점분할법이 가장 에너지 절감을 많이 할 수 있는 경제적인 운전모드로 분석되었다.

Table 5.12 최적제어형에 의한 에너지 절감비용

구 분	2점분할법	3점분할법	4점분할법	EP분할법
에너지절감[kwh]	3,310,103	3,337,478	3,314,078	3,013,403
비용절감[천원]	208,536	210,261	208,787	189,845
t CO ₂ 절감	1,403	1,415	1,405	1,278
CO ₂ 대체금액[천원]	49,346	49,755	49,406	44,923
총절감액[천원]	257,883	260,016	258,193	234,768

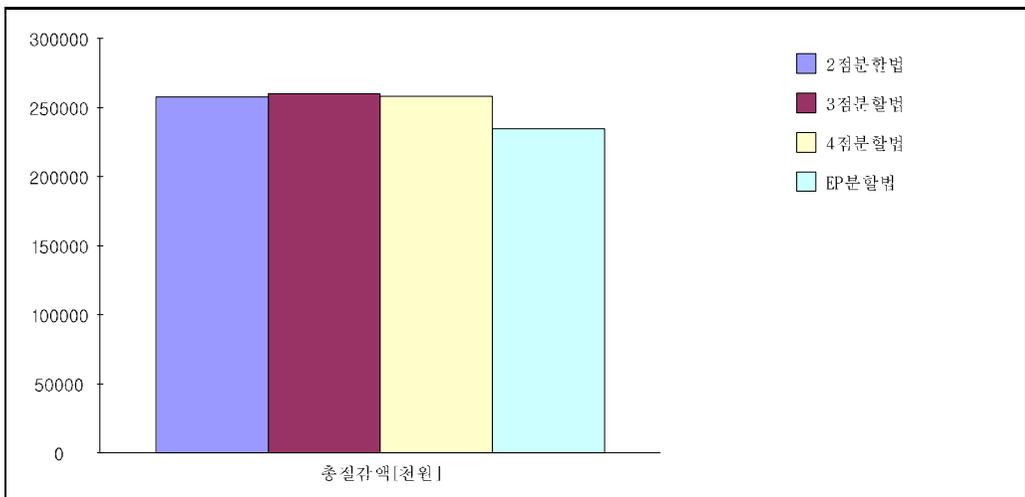


Fig 5.17 최적제어법에 의한 에너지 비용절감

5.4 결론

앞 절에서도 기술한 바와 같이 연간 100만[TEU]을 처리 컨테이너 터미널의 야드에서 운영중인 트랜스퍼 크레인을 운전함에 있어 저비용 고효율을 위한 Eco-Driving방법으로 2점분할법, 3점분할법, 4점분할법, 유한극점(EP)분할법을 제안하여 시뮬레이션을 실행한 결과 3점분할법이 가장 에너지 소비가 적은 Eco-Driving Mode임을 확인하였다.

또한 이를 근거로 고정형으로 운전되고 있는 제어패턴 중 가장 에너지 소비가 많은 사다리꼴형과 본 연구에서 제안한 Eco-Driving제어방법 중 가장 에너지 소비가 적은 3점분할법으로 운전하였을 경우에 대하여 에너지효율을 시뮬레이션을 통하여 비교 분석한 결과 본 논문에서 제안한 3점 분할법으로 야드 작업시 최대 3,337,478[kWh]의 에너지 절감으로 210,261[천원]의 에너지 비용절감을 할 수 있는 것으로 분석되었으며, 또한 이에 따른 1,415[Ton]의 CO₂ 배출감소로 인한 대체 비용 49,755[천원]의 절감하는 이익을 창출하여 총 260,016[천원]의 비용절감을 할 수 있는 것으로 분석되어 Eco-Driving이 가능함을 보였다. 더불어 에너지소비 절감으로 통하여 환경오염을 줄인 친환경 항만 구축이 가능함을 보였다

제 6 장 결 론

본 논문에서는 국내외의 컨테이너 터미널에서 직면해 있는 선박의 대형화에 따른 해상수송 물류비의 증가와 전문화 등에 따른 물류환경의 변화, 고유가로 인한 경영수지의 악화, 기후변화협약(UNFCCC)에 따른 국제환경규제 등 수 많은 어려움으로부터 경쟁력을 확보한 선진 항만의 구축과 생산성 향상을 목적으로 저비용 고 효율화를 위한 자동화 크레인의 운전패턴에 따른 에너지 효율분석에 초점을 두고 실시하였다.

먼저 자동화 크레인에 대한 에너지 효율을 향상하기 위한 기초연구로서 자동화 크레인을 대상으로 수학적으로 모델링하고 유도된 모델을 바탕으로 가속도를 변경하면서 가속도 값의 변화에 따른 에너지 소비에 대하여 특성 분석을 실시한 결과 가속도가 $1\sim 2.5[m/s^2]$ 에서 “Eco-Driving Mode”, $2.5\sim 4.5[m/s^2]$ 에서 “Normal-Driving Mode”, $4.5[m/s^2]$ 이상에서 “Fast-Driving Mode”임을 확인하였다.

이를 바탕으로 크레인의 고정형 운전패턴인 사다리꼴형, 노치형, 계단형 등의 제어입력 변경에 따른 크레인 운전패턴에 대한 에너지효율에 대하여 시뮬레이션 통해 분석한 결과 크레인의 횡행 동작시에는 사다리꼴형 제어입력 패턴이 가장 에너지소비가 적은 우수한 패턴으로 분석되어, 93,684[kWh]의 에너지 절감에 따른 5,902[천원]의 비용절감과 39.72 [Ton]의 CO₂의 절감으로 인한 대체금액 1,397[천원]을 절감할 수 있는 것으로 분석되어 횡행 운전시에 만 총 7,299[천원]의 절감효과가 나타나는 것으로 확인하였다.

다음으로 크레인의 주행 동작시에는 계단형 제어입력 패턴이 에너지 소비차원에서 가장 우수한 패턴으로 분석되어 10,738,440[kWh]의 에너지 절감에 따른 676,552[천원]의 비용절감과 4,553[Ton]의 CO₂의 절감으로 160,087[천원]의 대체금액을 절감하여 총 836,609[천원]의 절감효과가 나타나는 것으로 확인하였다.

그리고 크레인의 승강운전에서는 사다리꼴 제어입력 패턴이 가장 에너지소비가 작은 패턴으로 186,739[kWh]의 에너지 절감에 따른 11,765[천원]의 비용절감과 79.18[Ton]의 CO₂의 절감으로 대체금액 2,784[천원]을 절감효과로 총 14,548[천원]의 절감효과가 나타나는 것으로 나타났다.

따라서 터미널의 화물은 반입과 반출을 4회에 걸쳐 반복하므로 크레인이 횡행운전, 주행운전, 승강운전 등의 3가지 운전모드로 연간 100만 [TEU] 처리 컨테이너 터미널에서는 운전패턴의 변경만으로도 최소 858,456[천원] 이상의 에너지를 절감효과가 있는 것으로 분석되었다.

그리고 이를 토대로 본 연구에서는 에너지 고효율 크레인 운전을 위한 Eco-Driving 제어방법으로 주어진 이동경로에 동일 구간으로 경로를 나누어서 각 구간에서의 최적경로를 구하여 전체를 더하는 방법의 동일 분할 방법과 이동 경로 곡선의 유한극점으로 분할하여 최적경로를 구하는 이동경로 유한극점(EP)분할법을 제시한 최적제어형 운전 패턴인 경우 최대 3,337,478[kWh]의 에너지 절감으로 210,261[천원]의 에너지 비용절감과 이에 따른 1,415[Ton]의 CO₂절감액 49,755[천원]의 절감으로 총 260,016[천원]의 비용절감을 할 수 있는 것으로 분석되어 이들 제어법이 환경오염의 예방과 Eco-Driving의 효과를 검증하였다.

따라서 향후에는 컨테이너 터미널내에서의 대기시간 및 작업 스케줄

을 고려한 운전패턴을 함께 검토하여 크레인의 대기시간에 따른 에너지 절감대책을 수립 한다면 고 효율화를 위한 Eco-Driver제도를 도입할 수 있을 것으로 기대한다.

본 논문의 한계점으로 컨테이너 터미널에서 운용되고 있는 자동화 크레인을 대상으로 실시간 발생하는 운전 값을 취득하여 본 논문에서 제안한 Eco-Driving제어법과 비교분석하여 실제 운전값과 본 논문에서 제안한 제어법과의 오차에 대하여 원인을 분석한 후 보정을 통한 정확한 에너지 절감비용을 산출하여야 했다. 그러나 실제의 운전 값을 취득하기에는 현실적인 어려움으로 비교분석에 대한 한계점이 있었다. 따라서 향후에는 이 부분에 대한 연구가 진행된다면 보다 명확한 에너지 소비에 대한 대책도 함께 강구 할 수 있을 것으로 판단된다.



참 고 문 헌

- [1] 부산일보, “부산항의 야드 크레인 연료 유류서 전기식으로 앞다퉀 전환”, 2007.
- [2] 손호성, 최용석, “컨테이너 터미널의 에너지 소비패턴분석”한국항해항만학회 추계학술대회논문집, pp. 7-8, 2009.
- [3] 김우선, 최상희, 하태영, "컨테이너터미널 에너지비용 절감방안 연구", 한국해양수산개발원, 수시연구 2007-03, 2007.
- [4] 김우선, “컨테이너 하역장비의 에너지 세이빙 기술 적용효과분석”, 한국해양수산개발원, 수시연구, 2007.
- [5] 최상희, 김기섭, 김우선, 하태영, "국내 컨테이너 항만기술개발 로드맵 수립연구", 한국해양수산개발원, 기본연구 2007-14, 2007.
- [6] 이진우, "크레인의 흔들림 방지를 위한 강인한 제어계 설계법에 관한 연구", 부경대학교 박사학위 논문, 1998.
- [7] 홍금식, 손성철, 이만형, "컨테이너 크레인의 흔들림제어", 제어자동화 시스템공학회 논문지, vol 3, no 1, pp.23-31, 1997.
- [8] 임창진, 최창호, 문상호, “항만 컨테이너의 모델링과 흔들림 억제 제어방법”, 대한전기학회 추계학술대회 논문집, 2005.
- [9] 손정기, “ 컨테이너 크레인의 하역생산성 향상을 위한 강인한 제어 기 설계”, 부경대학교 박사학위 논문, 2004.
- [10] 김환성, 김명규, 유삼상, "갠트리 크레인의 입력보상형 분산제어", 제어자동화 시스템공학지회. 2001.

- [11] 김환성, 김명규, 유삼상, "관측기법을 이용한 갠트리크레인의 고장 진단", 한국박용기관학회지. 2001.
- [12] 홍금식, 손성철, "크레인 진자운동의 시간최적제어에 대한 단계적 접근", 대학기계학회 추계학술대회, pp. 453-457, 1996.
- [13] 김환성, 박홍수, 김상봉, "컨테이너 크레인 시스템의 하물중량 추정에 관한 연구", 한국항만학회 추계학술대회, pp.175-180, 1998.
- [14] 홍금식, 손성철, 이만형, "컨테이너 크레인의 흔들림 제어(Part I): 모델링, 제어전력, 기준선도를 통한 오차 피이드백 제어", 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 3 권 제 1 호, 1997.
- [15] 홍금식, 손성철, 이만형, "컨테이너 크레인의 흔들림 제어(Part II): 트롤리의 주행속도 조절을 통한 진자운동의 제어", 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 3 권 제 2 호, 1997.
- [16] 이진우, 김충환, 김상봉, "타워형 크레인의 자동화를 위한 이론적 고찰 및 디지털제어에 관한 연구", 한국자동제어 학술회의 논문집, Vol. 1, pp. 993-998, 1992
- [17] 이진우, 김상봉, "최단시간 제어법을 이용한 크레인의 흔들림 방지제어", 한국산업안전학회지, Vol. 12, NO. 3, pp. 23-29, 1997.
- [18] 이진우, 김환성, 여태경, 김상봉, " H_{∞} 이론을 이용한 크레인의 Anti-Sway 제어", 대한기계학회 추계학술회의 논문집, pp. 680-685, 1997.
- [19] A. Graham, and D. N. Burghes, "Introduction to Control Theory Including Optimal Control", pp. 197-261, 1982
- [20] G. A. Manson, "Time Optimal Control Methodes Arising from the Study of Overhead Cranes", Ph. D, Thesis. Univ. of

Strathclyde, Glasgow, U. K, 1997.

- [21] 신민생, 이진우, 김상봉, “컨테이너 크레인의 흔들림 방지제어”, 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 102-109, 1994.
- [22] 주현우, “최적 PID제어기를 이용한 크레인의 흔들림 제어에 관한 연구”, 동명정보대학교 석사학위 논문, 2003.
- [23] 최연욱, “현대제어공학”, 지코사이언스, 2008.
- [24] 김상봉, 하주식, “메카니컬 시스템제어”, 한미출판사, pp.192~205, 1992.
- [25] J. Shirai, H. Hirasawa, and K. Fujiwara et al, "Development of Electronic Sway Control System for Container Crane", Trans. JSME, Vol. 59, NO. 561 pp. 1443~1447, 1993.
- [26] H. Kwakernaak and R. Sivan, "Linear Optimal Control Systems", Wiley Interscience, 1972.
- [27] T. Hagiwara, Y. Ohtani and M. Araki, "A Design Method of LQI Servo Systems with Two Degree of Freedom", Trans. ISCIE, Vol. 4, No. 12, pp. 501~510, 1991.
- [28] R. E. Kalman, "Contribution to the Theory of Optimal Control", Bol. Soc. Matem, Mexico, pp. 102~119, 1960.
- [29] 김상봉, 오세준, 정용길, 김환성, “서보계 설계에 대한 쌍선형 변환법의 응용 및 카트의 위치제어”, 대한전기학회논문집, Vol. 39, No. 1, pp. 290~298, 1991.
- [30] 정경채, 홍진철, 배진호, 이달해, 이석규, 이해영, “천정크레인의 진동 저감을 위한 퍼지제어기 및 제어기개발용 시뮬레이터 설계에 관한 연구”, 제어·자동·시스템공학 논문지, Vol. 2, No. 2 pp. 96

~101, 1996.

- [31] 김상봉, 이충환, "Development of Real Time Control Program Package for Digital Control", 한국자동제어 학술강연논문, pp. 317~31, 1991.
- [32] 김우선, "전기식 RTG(Rubber Tyred Gantry)의 적용성 분석연구", 해양수산, 한국해양수산개발원, 2008.
- [33] 장운재, 금중수, "친환경 항만을 위한 항만개발 우선순위 평가 및 보상전략 분석", 해양환경안전학회 2007추계학술발표대회논문집, 2007.
- [34] 정봉민, 장형탁, "환경 친화적 항만개발 및 운영방안", 기본연구보고서, 한국해양수산개발원, 2003.
- [35] 최용석, 김우선, 하태영, "컨테이너터미널의 리모델링 방안연구", 기본 연구보고서, 한국해양수산개발원, 2005.
- [34] 최용석, 하태영, 김우선, "컨테이너터미널의 분리게이트 설계적용 분석", 한국항해항만학회 2005추계학술대회 논문집, 2005.
- [35] 김우선, "친환경 항만운영기술 적용 및 실행방안 연구", 한국해양수산개발원, 정책연구, 2008-09, 2008.
- [36] 최용석, 양창호, 최상희, 원승환, "고효율컨테이너 크레인의 개념 모델 및 적용효과분석", 한국해양수산개발원, 정책연구, 2007.
- [37] 최상희, 김우선, 하태영, 이주호, "국내 컨테이너터미널 리스크 관리방안", 한국해양수산개발원, 정책연구, 2008.
- [38] 양창호, 김영훈, 최상희, 배종욱, 이정은, "A Study on the System Design and Operations of Automated Container Terminal", 한국해양수산개발원, 정책연구, 2000.

- [39] www.portbusan.go.kr (부산지방해양항만청 홈페이지)
- [40] www.busanpa.com (부산항만공사 홈페이지)
- [41] www.kopla.or.kr (항만물류협회 홈페이지)
- [42] www.busanilbo.com (부산일보 홈페이지)
- [43] www.monthlymaritimekorea.com (한국해양 홈페이지)
- [44] www.spidc.go.kr (국토해양부 홈페이지)



感謝의 글

논문이 있기까지 부족한 저에게 학문의 길을 열어주시고 변함없는 관심과 격려로 용기를 주시면서 이끌어 주신 김환성 지도교수님께 머리 숙여 깊이 감사드립니다. 또한 강의와 연구로 바쁘신 가운데서도 논문의 심사를 맡아 부족함을 채워주신 곽규석 교수님, 신재영 교수님, 한국항공우주연구원 손정기 교수님, 한국선급엔지니어링(주) 김영호 박사님께 감사드립니다. 그리고 항상 바쁜 일정속에서도 수고를 아끼지 않으며 함께 해준 자동화실험실의 조민지양, 임창원군, 짬뽕황선박사를 비롯한 실험실 동료들 모두에게 감사드립니다. 그리고 항상 자신의 일처럼 함께 고민해주시고 기뻐해주신 전자기술학과 손홍두 교수님과 황윤학교학처장님, 전기시스템제어과 이은행 교수님, 배천수 교수님께도 감사드립니다.

자식의 행복이 곧 당신의 삶이라고 여기시며 날아주시고 길러주신 부모님, 그리고 장인, 장모님께 감사를 드리며 불효의 죄 용서를 빕니다. 그리고 형님을 비롯한 동생들 내외, 그리고 누님과 매형, 그리고 처남을 비롯한 처가 식구들 모두에게 감사드립니다. 그리고 저를 아는 모든분들께 감사드립니다.

끝으로 그동안 항상 웃음을 잃지 않고 부족한 남편임에도 사랑과 믿음으로 이해에 인색하지 않았던 사랑하는 내자와 딸 가연이, 수정이와 함께 완성의 기쁨과 영원히 행복을 같이하고 싶습니다.

2009年 12月

金 溟 圭 올림