



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

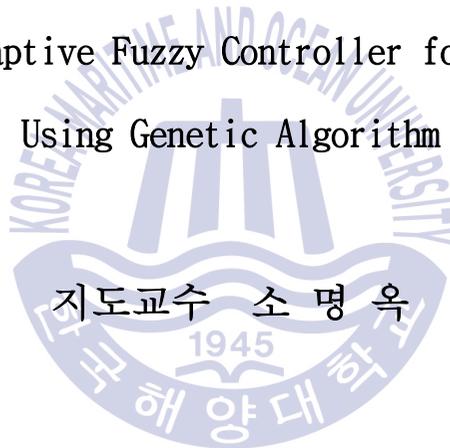
[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

유전알고리즘을 이용한 항만용 크레인의
적응 퍼지제어기 설계

Design of Adaptive Fuzzy Controller for Port Cranes

Using Genetic Algorithm



2019년 2월

한국해양대학교 대학원

메카트로닉스공학과

안 태 수

본 논문을 안태수의 공학박사 학위논문으로 인준함.

위원장 : 오 세 준

위 원 : 유 희 한

위 원 : 오 진 석

위 원 : 이 윤 형

위 원 : 소 명 옥



2018 년 12 월 24 일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경 및 동향	1
1.2 연구 내용 및 구성	3
제 2 장 항만용 크레인의 개요	5
2.1 항만 및 컨테이너 터미널	5
2.1.1 항만	5
2.1.2 컨테이너 터미널	7
2.2 항만용 크레인의 종류	10
2.2.1 STS 크레인	10
2.2.2 트랜스퍼 크레인	11
2.2.3 언로더	13
2.3 항만용 크레인의 주요장치	15
2.3.1 항만용 크레인의 동작장치	15
2.3.2 항만용 크레인의 기계장치	18
제 3 장 항만용 STS 크레인의 모델링	24
3.1 유전알고리즘	24
3.1.1 실수코딩	25
3.1.2 유전연산자	25
3.1.3 적합도 평가	26
3.2 퍼지이론	27
3.2.1 퍼지집합	27
3.2.2 퍼지추론	28

3.3 항만용 STS 크레인의 수학적 모델	31
3.3.1 트롤리부 비선형 모델	31
3.3.2 트롤리 구동부	37
3.3.3 선형화 및 상태공간 해석	39
3.4 항만용 STS 크레인의 퍼지모델	41
3.4.1 퍼지모델링	41
3.4.2 서브시스템	44
3.4.4 퍼지모델의 소속함수	45
제 4 장 항만용 STS 크레인의 제어시스템 설계	47
4.1 상태피드백제어기 설계	47
4.1.1 최적 상태피드백제어기	47
4.1.2 PI형 상태피드백제어기	48
4.2 적응 퍼지제어기 설계	51
제 5 장 시뮬레이션 및 검토	55
5.1 퍼지모델의 적합성 검토	55
5.2 PI형 상태피드백제어기의 성능 검토	70
5.2.1 유전알고리즘을 이용한 피드백 이득 탐색	70
5.2.2 PI형 상태피드백제어기 검토	76
5.3 적응 퍼지제어기의 성능 검토	87
5.3.1 기준입력 변화에 대한 검토	89
5.3.2 외란에 대한 검토	94
5.3.3 초기조건 변동에 대한 검토	103
5.3.4 질량 변화에 대한 검토	107
제 6 장 결 론	112
참고문헌	105

List of Tables

Table 3.1 Parameters of the STS crane	36
Table 3.2 Parameters of the STS crane actuator part	38
Table 3.3 Description of premise fuzzy sets	45
Table 5.1 Subsystems for fuzzy model	56
Table 5.2 Parameters of genetic algorithm operators	70



List of Figures

Fig. 2.1 Port position mapping of the whole country	6
Fig. 2.2 Layout of the container terminal	8
Fig. 2.3 Yard tractor(left) & straddle carrier(right) of the container terminal ·	9
Fig. 2.4 STS crane & container ship	11
Fig. 2.5 Transfer crane(left) & ATC(right)	12
Fig. 2.6 Hoist unit of the STS crane	16
Fig. 2.7 Trolley traversing unit of the STS crane	16
Fig. 2.8 Bogie of the STS crane(left) & RTTC(right)	17
Fig. 2.9 Boom hoist device of the STS crane	17
Fig. 2.10 Stowage pin of the port crane(rectangle type)	18
Fig. 2.11 Tie down of the port crane(1)	19
Fig. 2.12 Tie down of the port crane(2)	19
Fig. 2.13 Rail clamp of rail clamping type(left) & wheel brake type(right)	20
Fig. 2.14 Trolley of the port crane	21
Fig. 2.15 Head block of the port crane	21
Fig. 2.16 Spreader of the STS crane	22
Fig. 2.17 Boom latch of the STS crane	23
Fig. 3.1 Basic structure of fuzzy logic system	28
Fig. 3.2 Examples of membership function	30
Fig. 3.3 Coordinate system of the STS crane	32
Fig. 3.4 Actuator part for the STS crane	37
Fig. 3.5 Example of Takagi-Sugeno fuzzy model	42
Fig. 3.6 Trapezoidal membership function	46
Fig. 3.7 Triangle membership function	46
Fig. 4.1 PI-type state feedback control system for port crane linear system ..	50
Fig. 4.2 Optimization of state feedback gain using genetic algorithm	50
Fig. 4.3 Parallel distributed compensator	53
Fig. 4.4 Schematic diagram of the proposed GA-based fuzzy controller	54
Fig. 5.1 Membership functions for fuzzy model	57
Fig. 5.2 Change of parameters(l & m)	58
Fig. 5.3 Outputs of the nonlinear system and fuzzy model for the STS crane	60
Fig. 5.4 Errors of fuzzy model and linear model to nonlinear system	63

Fig. 5.5	Test input signal for validation of fuzzy model	64
Fig. 5.6	Outputs of the nonlinear system and fuzzy model for the STS crane	66
Fig. 5.7	Errors of fuzzy model and linear model to nonlinear system	69
Fig. 5.8	Evolutionary process of controller gain for subsystems	75
Fig. 5.9	Step responses of nonlinear system using sub-controller 1	78
Fig. 5.10	Step responses of nonlinear system using sub-controller 2	79
Fig. 5.11	Step responses of nonlinear system using sub-controller 3	80
Fig. 5.12	Step responses of nonlinear system using sub-controller 4	81
Fig. 5.13	Step responses of nonlinear system using sub-controller 5	82
Fig. 5.14	Step responses of nonlinear system using sub-controller 6	83
Fig. 5.15	Step responses of nonlinear system using sub-controller 7	84
Fig. 5.16	Step responses of nonlinear system using sub-controller 8	85
Fig. 5.17	Step responses of nonlinear system using sub-controller 9	86
Fig. 5.18	Change of parameters(ℓ & m)	88
Fig. 5.19	Step responses of the adaptive fuzzy controller(AFC) and SFCs	93
Fig. 5.20	Step responses of the adaptive fuzzy controller (change of disturbance: $+0.1$ [rad] at 1.5 [s] in transient state)	98
Fig. 5.21	Step responses of the adaptive fuzzy controller (change of disturbance: -0.2 [rad] at 7.0 [s] in steady-state)	102
Fig. 5.22	Step responses of the adaptive fuzzy controller when $x_p(0) = [0 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.5]^T$	106
Fig. 5.23	Change of parameters(ℓ & m)	107
Fig. 5.24	Step responses of the adaptive fuzzy controller (m : sinusoidal change)	111

유전알고리즘을 이용한 항만용 크레인의 적응 퍼지제어기 설계

안 태 수

메카트로닉스 공학과
한국해양대학교 대학원



다양하고 복잡한 장치로 구성되어 있는 항만용 STS 크레인은 컨테이너를 선박에 싣거나 내릴 때마다 호이스트 와이어로프의 길이와 취급하는 컨테이너의 질량이 변하며, 크레인 조종 중 파도와 돌풍 등의 외란도 상존한다. 따라서 기존의 선형제어기로는 크레인이 원하는 제어목적 달성이 어렵다. 본 논문은 이러한 파라미터의 변화와 외란이 존재하는 작업환경에서도 항만용 STS 크레인이 트롤리를 목표위치에 정밀하게 추종시킬 뿐만 아니라 컨테이너의 흔들림을 최소화시킬 수 있는 적응 퍼지제어기 설계 기법을 제안한다.

이를 위해, 먼저 항만용 STS 크레인의 하역시스템에 대한 수학적 비선형시스템을 라그랑지 운동방정식을 이용하여 유도하였으며, 이 비선형시스템을 호이스트 와이어로프의 길이와 컨테이너의 질량을 고려하여 9개의 서브시스템, 즉 선형시스템으로 다시 표현하였다. 또한, 이 서브시스템을 퍼지규칙으로 결합하여 비선형시스템과 동역학적 특성이 유사한 퍼지모델로 구현하였다. 다음으로 퍼지모델의 각 서브시스템에 대해 유전 알고리즘을 이용하여 PI형 상태피드백제어기(선형제어기)를 설계하였으며, 이들을 다시 퍼지규칙으로 결합하여 최종적으로 적응 퍼지제어기를 설계하였다.

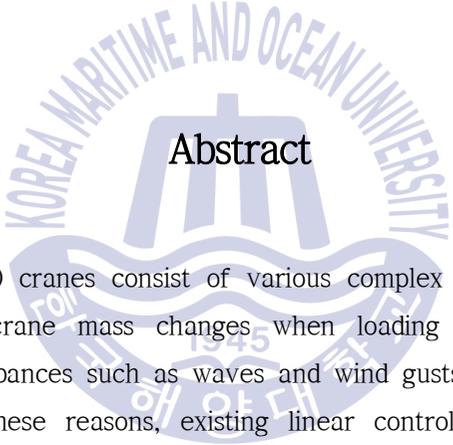
본 논문에서 제안한 퍼지모델의 적합성은 항만용 STS 크레인의 비선형시스템과 비교하여 그 유효성을 검증하였다. 또한, PI형 상태피드백제어기도 그 성능을 확인하였다. 마지막으로 제안한 적응 퍼지제어기를 STS 크레인의 비선형시스템에 적용하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하여 그 유효성을 검증하였다. 시뮬레이션은 파라미터가 변화하는 컨테이너 적화작업에서의 기준입력 변화, 외란 인가 및 초기조건 변동 등을 고려하였으며, 이와 같은 환경에서 적응 퍼지제어기는 PI형 상태피드백제어기보다 우수한 성능을 나타내었다.



Design of Adaptive Fuzzy controller for Port Cranes using Genetic Algorithm

Tae-Su Ahn

*Department of Mechatronics Engineering
Graduate school of
Korea Maritime and Ocean University*



Abstract

Port STS(ship-to-shore) cranes consist of various complex devices and a length of hoist wire rope. The crane mass changes when loading or unloading containers to/from ships, and disturbances such as waves and wind gusts are also present during crane operations. For these reasons, existing linear controllers cannot achieve the control objective desired by crane operators. This thesis proposes a design for an adaptive fuzzy controller that allows port STS cranes make a trolley follow a target position precisely, while minimizing the swing angle of the containers, even in work environments where changes in parameters and disturbances occur.

This thesis introduces a mathematical non-linear system using the Lagrange's equation of motion for the loading and unloading system of a port STS crane. This non-linear system was expressed as nine subsystems, which are also linear systems, and took into account the hoist wire rope length and the container mass. The subsystems were combined with fuzzy rules and implemented with a fuzzy model that had a similar dynamic characteristic to that of a non-linear system. A PI-type state feedback controller (a linear controller) was then designed using a genetic algorithm

for each of the subsystems in the fuzzy model. These controllers were then combined with the fuzzy rule again to design the final adaptive fuzzy controller.

Compatibility of the proposed fuzzy model is compared with the nonlinear system of the STS crane for port and its effectiveness was verified. Also, The PI type status feedback controller also confirmed its performance. Finally, the proposed adaptive fuzzy controller was applied to the nonlinear system of the port STS cranes, and the validity was verified through computer simulations. In the simulations, changes in reference inputs, applying disturbance, and variation in initial conditions during container loading work where parameters changed were taken into consideration. Under these conditions, the adaptive fuzzy controller performed better than the PI-type state feedback controller.



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 동향

항만은 해안선이 육상 쪽으로 굽어 들어간 만과 같이 천연적으로 이뤄진 지형을 이용하거나 방파제와 같은 인공적인 구조물을 설치하여 풍량의 크기를 억제함으로써 선박을 안전하게 정박시키기 위한 공간을 말한다. 항만에는 부두와 같은 접안시설, 화물을 선적하거나 양화할 수 있는 하역시설, 화물을 보관할 수 있는 저장시설 등이 갖춰져 있다. 항만은 그 자체가 고용과 수익을 발생시키는 산업이며, 동시에 항만활동을 지원하는 각종 서비스업과 무역, 금융업을 유치시키고 배후지의 산업화를 촉진하여 지역 발전과 경제의 원동력이 될 수 있다[1].

컨테이너 항만, 즉 컨테이너 터미널의 시설과 장비는 초대형 컨테이너선의 규모를 결정하는 요소라는 측면에서 중요한 사항이다. 초대형 컨테이너선에 대해 만족할 만한 서비스를 제공하기 위해서는 하역장비뿐만 아니라 대규모의 화물을 신속하게 처리할 수 있는 새로운 개념의 통합적 운영시스템[2]이 필요하게 된다. 즉, 컨테이너선의 대형화에 따라 크기나 형태가 다른 모든 선박에 적용할 수 있는 컨테이너 통합하역시스템의 개발을 필요로 한다. 대형 컨테이너선의 출현으로 컨테이너 터미널이 단위 시간에 취급해야 하는 컨테이너 양은 현저히 증가될 수밖에 없는 현실이다. 또한, 컨테이너 취급작업은 일반적으로 노동집약적이므로 급격한 컨테이너 처리량 증가는 컨테이너 터미널 운영비용 중 인건비의 급격한 상승을 초래할 것으로 전망된다. 이는 자동화 컨테이너 터미널 개발의 중요한 동기가 된다. 컨테이너 터미널의 자동화는 하역·운송장비의 자동화를 통하여 터미널의 하역생산성 향상, 안전사고 예방 및 노동력 부족을 해결할 수 있을 것이다. 초대형 컨테이너선의 출현은 많은 양의 컨테이너를 신속하게 처리할 수 있는 자동화된 대형 크레인 또는 선박의 양쪽에서 하역할 수 있는 양현 하역시설 등의 확보를 가속시키고 있다.

무인 완전자동화 컨테이너 터미널(fully automated container terminal)은 초대형 컨테이너선의 등장으로 개발되었으며, 모든 작업이 로봇과 지능화된 컴퓨터를 통하여 운영되기 때문에 일반적으로 사람이 운영하는 것보다 안전하고 효율적이다[3]. 이러한 터미널에서 안벽에 설치되어 선박과 부두 간에 컨테이너를 양·적화하는 STS(ship-to-shore) 크레인의 자동화[4]는 필수적이다.

STS 크레인의 주요동작에는 컨테이너를 올리고 내리는 호이스트 동작, 트롤리를 바다 쪽과 육지 쪽으로 이동시키는 트롤리 횡행 동작, 크레인 전체를 부두 좌·우로 이동시키는 주행 동작 및 붐을 들어 올리고 내리는 붐 호이스트 동작이 있다. 이 동작 중 컨테이너 하역작업에 가장 많이 사용되어지는 동작은 호이스트 동작과 트롤리 횡행 동작이다. 호이스트 동작으로 들어 올린 컨테이너는 트롤리가 횡행하면서 목표위치로 컨테이너를 이동시키게 되는데, 이때 트롤리의 속도변화와 호이스트 와이어로프의 길이 변화에 따라 흔들림이 발생한다. 컨테이너가 흔들리게 되면 목표위치에 빠르게 내려놓을 수 없을 뿐만 아니라 흔들리는 상태로 내려놓게 되면 화물에 손상이 발생된다. 따라서 STS 크레인의 하역효율 향상 및 자동조종[5]을 위해서는 컨테이너 화물의 흔들림 제어가 필수적이다.

STS 크레인의 흔들림 제어에 대한 연구에는 Boustany와 Novel[6]의 “동적 피드백의 선형화를 이용하는 적응제어”, Yamaguchi[7]와 Okawa 등[8]의 “흔들림 각도에 대응하는 피드백 제어 방법”, Yoon 등[9]의 “화물 흔들림 감쇠와 정지시의 위치오차를 줄이기 위한 퍼지제어기의 설계방법”, Kim 등[10]의 “동시최적화 설계기법을 이용한 항만용 크레인의 흔들림 제어계 설계”, Park 등[11]의 “컨테이너 크레인의 되먹임 선형화제어”, 카와이 히데키 등[12]의 “실용화를 고려한 Anti-Sway 시스템 구축” 등이 있다.

지금까지 대부분의 연구는 호이스트 와이어로프의 길이 l 과 컨테이너의 질량 m 이 일정하다고 가정한 후 진행하여 하역작업 중의 l 과 m 의 변화는 고려하지 못하였다. 실제 컨테이너 하역시스템에서는 매 작업 시 마다 양·적화되는 컨테이너의 질량이 컨테이너 내함에 따라 차이가 발생하며, 호이스트 와이어로프의 길이 또한 작업 중에 수시로 변하게 된다. 이것은 기존의 연구가 실제 컨테이너 하역작업과 차이가 있어 실제 작업에서는 정밀한 제어를 수행하기 어렵다는 것을 의미한다. 최근에는 유전알고리즘, 퍼지제어 및 인간의 사고능력과 적응능력을 모방하는 신경회로망 같은 지능형 제어기(intelligent controller)가 연구되고 있다. 또한, 기존의 제어기와 지능형 제어기를 여러 방법으로 결합한 강인한 제어기 개발에 많은 연구가 이루어지고 있다.

1.2 연구 내용과 구성

항만용 크레인 은 다양하고 복잡한 장치로 구성되어 있다. 또한, 호이스트 와이어로프 의 길이와 컨테이너의 질량이 매 작업 시 마다 변하고, 파도와 돌풍 등 크레인 조종환 경에서 발생하는 외란도 상존한다. 이러한 경우, 종래의 제어기법으로는 원하는 제어목 적을 달성하기가 어렵다.

따라서 본 논문에서는 이러한 항만용 STS 크레인의 트롤리를 목표위치에 정밀하게 추종시키고, 동시에 컨테이너의 흔들림을 최소화시키는 적응 퍼지제어기 설계기법을 제안한다. 이를 위해, 우선 항만용 STS 크레인의 비선형시스템을 라그랑지 운동방정식 을 이용하여 유도한다. 이 비선형시스템으로부터 호이스트 와이어로프의 길이와 컨테 이너의 질량에 따라 9개의 서브시스템을 구하고, 이 서브시스템을 퍼지규칙으로 결합 하여 항만용 STS 크레인의 비선형시스템과 동역학적 특성이 유사한 퍼지모델을 얻는 다.

다음으로 9개의 각 서브시스템에 대해 유전알고리즘을 이용하여 PI형 상태피드백제 어기의 이득을 탐색한 후, 이들을 다시 퍼지규칙으로 결합하여 최종적으로 적응 퍼지 제어기를 설계한다. 이때, 퍼지모델과 적응 퍼지제어기가 일관성을 유지하도록 소속함 수는 퍼지모델을 구현할 때 사용한 것과 동일한 것을 사용한다.

본 논문은 이와 같은 내용으로 모두 6장으로 구성되어 있으며, 각 장에서 수행한 연 구내용을 정리하면 다음과 같다.

제2장은 항만과 컨테이너 터미널에 대해 간략히 살펴보고, 본 논문의 제어대상이 되 는 항만용 크레인에 대해 설명한다. 대표적으로 STS 크레인, 트랜스퍼크레인, 언로더 등을 살펴보고, 항만용 크레인의 주요장치를 사진과 함께 설명한다.

제3장은 본 논문에서 제안하는 적응 퍼지제어기의 설계 배경이 되는 유전알고리즘과 퍼지이론에 대한 개념을 설명한다. 또한, 항만용 STS 크레인의 비선형시스템을 유도한 후, 특정 외부 변수의 변동 값에 따른 서브시스템(선형모델)을 구하여 상태공간을 해석 한다. 그리고 유도된 항만용 STS 크레인의 비선형시스템과 동역학적 특성이 유사한 퍼 지모델을 얻는 방법을 설명한다. 퍼지모델의 구현은 항만용 STS 크레인의 작업환경에 영향을 주는 외부 변수(파라미터)의 변화에 대응하기 위한 모델링 기법이며, 제4장의 적응 퍼지제어기 설계를 위해 선행되어야 하는 중요한 과정이다.

제4장에서는 항만용 STS 크레인의 외부 변수 l 과 m 의 변화 및 외란에 대해 강인한 성능을 보이는 적응 퍼지제어기를 설계한다. 제안하는 적응 퍼지제어기 설계는 먼저 제3장에서 설명한 퍼지모델을 외부 변수의 변동 값에 따라 표현된 9개의 서브시스템에 대해 유전 알고리즘을 이용하여 PI형 상태피드백제어기 이득을 탐색한 후, 이들을 “IF – THEN” 퍼지규칙으로 결합함으로써 이루어진다. 이때, 소속함수는 퍼지모델을 구현할 때 사용한 것과 동일한 것을 사용하여 퍼지모델과 적응 퍼지제어기가 일관성을 유지하도록 한다.

제5장에서는 먼저 항만용 STS 크레인의 퍼지모델의 유효성을 검증하고, 다음으로 9개의 각 서브시스템에 대해 유전알고리즘을 이용하여 설계한 PI형 상태 피드백제어기의 성능을 확인한다. 마지막으로 적응 퍼지제어기를 제3장에서 유도한 항만용 STS 크레인의 비선형시스템에 적용하고, 다양한 환경 하에서 시뮬레이션을 실시하여 강인함을 입증한다.

마지막으로 제6장에서는 본 논문에서 최종적으로 얻어진 결론을 요약하고 정리한다.



제 2 장 항만용 크레인의 개요

2.1 항만 및 컨테이너 터미널

2.1.1. 항만

항만이란 선박을 안전하게 정박시키기 위한 공간으로써 해안선이 육상 쪽으로 굽어들어간 만과 같이 천연적으로 이루어진 지형을 이용하거나 방파제와 같은 인공 구조물을 설치하여 풍랑의 크기를 억제하고 있으며, 평온한 수면과 적절한 수심을 가지고 있는 장소이다. 항만은 선박의 출입, 사람의 승선·하선, 화물의 하역·보관·처리 등을 위한 접안시설, 화물을 양·적화할 수 있는 하역시설, 화물을 보관할 수 있는 저장시설 등을 갖추고 있다. 즉, 선박이 안전하게 출입 또는 정박할 수 있는 장소로써 사람이나 화물 등의 해륙수송을 전환하는 기능을 가지고 있다.

항만은 내륙에서 생산된 물자를 모아서 해외로 운송하거나 해외로부터 유입되는 화물을 내륙으로 배송하는 교통의 거점이다. 우리나라와 같이 부존자원이 부족한 나라들은 원자재를 수입하여 상품으로 가공하고, 생산된 제품을 수출하는 경제구조를 갖고 있다. 항만은 이러한 과정에서 항만을 통과하는 화물을 신속, 저비용으로 처리함으로써 국가산업의 발전 및 수출 경쟁력을 높여 국민 경제에 기여[13]하게 된다.

현재 우리나라의 항만법에서는 항만을 무역항과 연안항으로 구분하고 있다. 무역항이란 국민경제와 공공의 이해에 밀접한 관계가 있고 주로 외항선이 입·출항하는 항만으로써 항만법에 따라 지정된 항만을 말하고, 연안항이란 주로 국내항 간을 운항하는 선박이 입·출항하는 항만으로써 항만법에 따라 지정된 항만을 말한다. Fig. 2.1은 전국의 항만을 무역항과 연안항으로 구분한 항만위치도를 나타내고 있다.



Fig. 2.1 Port position mapping of the whole country

2.1.2 컨테이너 터미널

컨테이너는 국제운송의 대표적인 화물형태로써 내륙의 화물 발생지로부터 내륙의 화물 수요지까지 육상운송과 해상운송이 혼합되는 일관운송체제의 핵심을 이루고 있다. 컨테이너 터미널은 이러한 과정에서 컨테이너의 보관, 하역 및 공 컨테이너의 유통 등이 이루어지는 기지로써의 역할을 하게 된다.

컨테이너 터미널은 선박에 적재되어 있는 컨테이너 화물을 부두로 이동시키거나 부두에 보관하고 있던 컨테이너 화물을 선박에 적재하는 등의 작업을 수행하는 장소이다. 대량의 컨테이너 화물을 신속하고 효율적으로 처리하기 위하여 터미널에 선박 작업시스템, 부두 이송시스템, 장치 및 보관시스템, 인수·인도 작업시스템, 게이트(gate) 작업시스템, 정보 및 관리시스템 등의 하위 시스템과 이들 하위 시스템들이 터미널 내에서 유기적으로 연결된 종합시스템 체계[14]를 갖추고 있다. 즉, 컨테이너 터미널은 컨테이너가 복수의 운송수단을 이용하여 세계 각지에서 집산되고 이동하는 거점 역할 및 컨테이너 이동을 파악하고 관리하는 기점 역할을 동시에 담당하고 있다. 이러한 컨테이너 터미널의 기능은 하역·이송기능과 보관기능으로 분류할 수 있으며, 컨테이너의 전 운송과정 중의 접속점으로써 터미널에 연결되는 복수의 운송수단 사이에 컨테이너 화물을 신속·정확·안전하게 하역 및 이송[15]할 수 있어야 한다.

컨테이너 터미널의 하역·이송기능이란 일반적으로 해상간선, 해상지선, 철도운송 및 도로운송 사이에서 컨테이너 화물을 안전하고 신속하게 하역·이송하는 기능을 말한다. 보관기능이란 컨테이너 화물을 한정된 하역시간에 대량으로 하역하는 해상운송과 비교적 긴 시간에 소량·단속적으로 반입·반출하는 도로운송과의 원활한 하역·이송을 위하여 컨테이너 화물을 일시 보관하는 기능을 말한다. 컨테이너 터미널에서 운영되고 있는 하역시스템[16]에는 온 새시 시스템(on chassis system), 트랜스퍼 크레인 시스템(transfer crane system) 및 스트래들 캐리어 시스템(straddle carrier system)이 있으며, 이외에도 터미널운영의 안전 및 생산성 향상을 위하여 무인 완전자동화(또는 반자동화) 터미널의 개발과 STS 크레인 등의 성능향상을 위한 기술개발이 지속적으로 추진[17]되고 있다. 트랜스퍼 크레인 시스템은 안벽과 컨테이너 야드(CY; Container Yard) 간에는 야드 트랙터(Y/T; Yard Tractor)와 야드 새시(Y/C; Yard Chassis)를 조합하여 컨테이너 화물을 운송하고 컨테이너 야드에서는 트랜스퍼 크레인(T/C)을 이용하여 적재·보관하는 하역시스템[18]으로 일반적으로 컨테이너 야드의 적치효율, 장비의 가동효율 및 토지 이용률이 높다.

컨테이너 터미널은 수입 컨테이너의 하역, 보관, 반출 및 수출 컨테이너의 반입, 보관, 선적을 하는 곳으로써 Fig. 2.2와 같이 안벽(quay), 에이프런(apron), 컨테이너 야드(CY; Container Yard), 마샬링 야드(marshalling yard), 컨테이너 화물 조작장(CFS), 게이트(gate) 등의 시설이 갖추어져 있다. 안벽은 선석이라고도 하며, 접안하는 선박을 안전하게 수용할 만큼 충분한 길이와 수심을 확보해야 한다. 최근에는 컨테이너 전용선박이 20,000 TEU급으로 대형화되어 안벽 규모도 길이가 400~500 [m]로 확대되었으며, 전면수심은 15~18 [m]가 일반화되고 있다. 에이프런은 부두의 안벽을 따라 일정한 폭을 가지고 나란히 뻗어있는 작업구역이며, STS 크레인이 이동할 수 있는 레일이 설치되어 있다. 에이프런의 폭은 하역시설과 터미널 운영방법에 따라 다르지만 일반적으로 60 [m] 내외이다. 터미널에는 선적될 컨테이너, 양화된 컨테이너, 수화인으로부터 회수된 빈 컨테이너 등 많은 컨테이너가 모이게 된다. 이러한 컨테이너를 적치하기 위한 공간을 컨테이너 야드[19]라 하며, 넓은 의미로는 마샬링 야드를 포함하기도 한다. 컨테이너 야드는 번지가 주어진 많은 구획으로 구분되어 있으며, 야드 하역장비를 사용하여 컨테이너를 3단~8단으로 쌓을 수 있게 되어 있다. 마샬링 야드는 컨테이너선 입항 전 선적될 컨테이너를 작업순서대로 쌓아 두거나 양화된 컨테이너를 컨테이너 야드로 이동시키기 전 임시로 보관하는 공간이며, 일반적으로 에이프런에 인접해 있다.



Fig. 2.2 Layout of the container terminal

CFS는 혼재화물을 처리하는 일종의 창고라 할 수 있다. 수출의 경우, 인수한 단위 포장상태의 LCL(Less than Container Load) 화물들을 목적지 또는 양화항 별로 분류한 후 컨테이너에 적입하여 Full Container로 만든다. 수입의 경우, 인수한 FCL(Full Container Load) 컨테이너에 적입되어 있는 화물을 적출하여 선별, 분류한 후 각 수화인에게 인도한다. CFS는 터미널 내부에 설치되기도 하지만 화주가 이용하기 쉽고 CY와 연결이 용이한 외부장소에 설치되기도 한다.

게이트는 컨테이너가 터미널에 반입·반출되는 출입문이며, 컴퓨터와 연계하여 수출입 컨테이너의 인수·인도, 컨테이너 번호·외관상태·봉인상태의 점검 및 반입·반출되는 컨테이너가 CY에 장치되어 있는 위치에 관한 정보 제공 등과 같은 업무를 담당한다.

컨테이너 터미널에는 컨테이너를 선박에서 부두로 양화하거나 부두에서 선박으로 적화하는 STS 크레인, 컨테이너 야드(CY)에 적치되어 있는 컨테이너를 이송장비에 상차하거나 이송장비에 실려 온 컨테이너를 CY에 적치하는 트랜스퍼 크레인(T/C) 및 부두의 에이프런(apron)과 CY 사이를 왕복하면서 컨테이너를 이송시켜주는 야드 트랙터(Y/T) 또는 스트래들 캐리어(S/C) 등의 하역장비가 배치되어 있다. Fig. 2.3의 왼쪽은 야드 트랙터, 오른쪽은 스트래들 캐리어를 나타내고 있다.



Fig. 2.3 Yard tractor(left) & straddle carrier(right) of the container terminal

2.2 항만용 크레인의 종류

2.2.1 STS 크레인

STS(ship-to-shore) 크레인은 컨테이너 크레인(container crane), 안벽 크레인(quayside crane), 갠트리 크레인(gantry crane) 등으로 불리는 컨테이너 전용 하역장비로써 컨테이너 터미널 에이프런의 레일 상에 설치되어 있다. 컨테이너 화물을 적재한 선박이 터미널에 접안하게 되면 컨테이너를 육상에서 선박으로 또는 선박에서 육상으로 안전하고 신속하게 하역하는 역할을 담당하고 있다. 기술의 발달로 대형화·고속화·자동화되고 있으며, 현재는 컨테이너 전용선의 대형화에 따라 23열의 컨테이너까지 처리할 수 있다. STS 크레인은 컨테이너 화물의 하역시간을 단축시켜 터미널의 생산성 향상 및 컨테이너 선박의 기항시간 단축으로 연관 산업의 경제적 이익을 향상시켜 주고 있다. 구조는 레일 위를 이동하는 몸체와 몸체에서 선박 쪽으로 뻗어 있는 접이식 붐(boom), 몸체에서 육상 쪽으로 뻗어 있는 거더(girder), 붐을 따라 이동하는 트롤리(trolley), 트롤리에 부착되어 있는 인양장치(hoist)와 조종실, 인양장치의 끝에 부착되어 컨테이너를 집어 올리는 스프레더(spreeder) 등[20]으로 구성된다. STS 크레인은 에이프런에 부설된 레일을 따라 이동이 가능하며 시간당 30~50개의 컨테이너를 양·적화할 수 있다. Fig. 2.4는 컨테이너 터미널에 접안한 컨테이너 선박과 STS 크레인을 나타내고 있다.

현재 세계 각국은 컨테이너 터미널의 운영효율 및 경쟁력 향상을 위하여 STS 크레인의 처리능력 향상과 관련한 기술개발[21-24]에 많은 투자와 노력을 기울이고 있다. 기존 STS 크레인의 한계를 극복하기 위하여 듀얼 호이스트 STS 크레인(dual hoist STS crane), 듀얼 트롤리 STS 크레인(dual trolley STS crane) 등을 개발 또는 사용 중에 있다. 듀얼 호이스트 STS 크레인은 크레인 1대에 트롤리와 조종실이 2개로써 기존의 붐 및 거더를 따라 움직이는 트롤리와 포탈 레그(portal leg) 중간에 플랫폼(platform)을 설치하여 별도의 트롤리를 설치하여 하역작업을 한다. 전자의 트롤리는 선박과 중간 플랫폼 간, 후자의 트롤리는 중간 플랫폼과 지상의 새시(chassis) 간에서 분담하여 컨테이너를 하역한다. 작업효율은 약 30% 정도 향상되나 크레인 조종자 2명이 투입되어야 한다. 듀얼 트롤리 STS 크레인은 붐과 거더에 2대의 트롤리를 설치하고 거더와 붐의 연결부인 중간에 플랫폼을 설치하여 2개의 트롤리가 각각 작업을 분담[25-26]함으로써 하역효율을 높인다. 작업방식은 듀얼 호이스트 STS 크레인과의 유사하다.



Fig. 2.4 STS crane & container ship

2.2.2 트랜스퍼 크레인

트랜스퍼 크레인(T/C; Transfer Crane)은 컨테이너 야드(CY)에 설치되어 있는 컨테이너 하역장비로써 야드 크레인(yard crane)이라고도 불린다. CY에 운반되어진 컨테이너 화물을 반입 또는 반출하는데 사용되며, 레일식인 RMTC(Rail Mounted Transfer Crane)와 타이어식인 RTTC(Rubber Tired Transfer Crane) 두 종류가 있다.

컨테이너 터미널 내에서 현재 운영하고 있는 컨테이너 운송시스템은 야드 트랙터 운송방식과 스트래들 캐리어 운송방식의 두 가지로 대별된다. 야드 트랙터 운송방식은 선박에서의 컨테이너 양·적화작업은 STS 크레인이 담당하고 CY에서의 컨테이너 반입·반출작업은 트랜스퍼 크레인이 담당하며, 이 두 장비 사이에서 야드 트랙터가 컨테이너 화물을 운송·연계하는 시스템이다. 컨테이너선에 선적되어 있는 컨테이너와 CY에 적치되는 컨테이너가 같은 방향으로 되어 있는 수평배열 컨테이너 터미널에 적용되는

운송방식으로 재래식 또는 반자동화 컨테이너 터미널에 적용된다. 주로 컨테이너 야드(CY) 사정이 좋지 않은 국가에서 CY의 면적효율을 높이기 위해 사용된다. 스트래들 캐리어 운송방식은 야드 트랙터의 역할을 스트래들 캐리어가 담당하는 운송방식을 말한다. 즉, STS 크레인이 컨테이너를 에이프런(apron)의 지면에 내려놓으면 스트래들 캐리어가 컨테이너를 직접 집어 올려 운송하는 시스템으로 단위시간 당 컨테이너 처리량은 많으나 터미널의 면적효율이 떨어지고 스트래들 캐리어의 자체중량을 지지하기 위하여 야드 전체를 견고하게 시공하기 때문에 건설비용이 많이 든다. 컨테이너선에 선적되어 있는 컨테이너와 CY에 적치되는 컨테이너가 수직 방향으로 되어 있는 수직배열 컨테이너 터미널에 적용되는 운송방식으로 일반적으로 자동화(또는 반자동화) 컨테이너 터미널에 적용된다. 특히, 자동화(또는 반자동화) 터미널에 사용되는 트랜스퍼 크레인을 무인 자동화 트랜스퍼 크레인(ATC; Automated Transfer Crane)이라 하며, ATC는 AGV(Automatic Guided Vehicle) 등에 실려 온 컨테이너를 무인으로 CY에 반입 또는 반출한다[27-28]. 이때, 컨테이너를 집을 때와 내려놓을 때에는 원격조종실(RCS; Remote control center)에서 RCS 운영요원이 원격으로 ATC를 조종[29]한다. Fig. 2.5의 왼쪽은 트랜스퍼 크레인을 오른쪽은 무인 자동화 트랜스퍼 크레인을 나타내고 있다.

트랜스퍼 크레인에는 호이스트 장치, 주행장치, 트롤리 횡행장치가 있으며, 주요 기계장치로는 스토이지 핀(stowage pin), 타이다운(tie down), 레일 클램프(rail clamp), 트롤리(trolley), 헤드 블록(head block), 스프레더(spreeder), 틸팅 디바이스(tilting device) 등의 기계장치가 설치되어 있다.



Fig. 2.5 Transfer crane(left) & ATC(right)

2.2.3 언로더

언로더(unloader)는 부두에 설치되어 선박으로부터 화물을 하역하는데 사용하는 장비로써 구조에 따라 상부가 회전하지 않는 갠트리형과 회전하는 선회형으로, 하역방식에 따라 그랩 버킷식(grab bucket type)과 연속식(continues type)으로 구분된다. 일반적으로 석탄, 양곡, 사료, 고철 등 화물을 벌크(bulk) 상태로 운송하는 전용선박과의 하역작업에 사용된다. 과거에는 대량화물 하역작업 시 그랩 버킷식·갠트리형 언로더를 사용하였으나 현재는 장비와 관련한 기술개발을 통하여 하역효율이 높고 분진발생도 적은 연속식·선회형 언로더[30]를 대부분 사용하고 있다.

언로더와 반대로 육상에서 선박에 벌크화물을 선적하는데 사용하는 장비를 쉑로더(ship loader)라 하며, 주로 연속식·선회형을 사용한다. 동해항, 목포항 등에 석회석 선적을 위한 쉑로더가 설치되어 있다. 쉑로더에는 호이스트장치, 주행장치, 붐 러핑장치, 선회장치, 붐 컨베이어, 평형추(balance weight), 레일 클램프(rail clamp), 스토이지 핀(stowage pin), 타이다운(tie down), 슈트(chute), 집진기 등의 장치가 장착되어 있다.

① 갠트리형 언로더

장비의 4군데 다리에 주행바퀴를 부착하여 부두의 에이프런 상에 설치된 레일 위를 주행하면서 하역작업을 할 수 있는 하역장비이다. 선박에 실려 온 석탄, 광석, 곡물 등의 벌크화물을 그랩 버킷을 사용하여 하역한다. 작업을 능률적으로 수행할 수 있는 대형 하역장비로써 화물의 종류에 따라 훅(hook), 마그네트(magnet) 등을 부착하여 대형 화물, 철강재, 고철 등의 하역작업도 가능하다. 갠트리식 언로더에는 호이스트장치, 주행장치, 트롤리 횡행장치, 붐 호이스트장치, 레일 클램프(rail clamp), 스토이지 핀(stowage pin), 타이다운(tie down), 이송컨베이어(feeder conveyor), 슈트(chute), 집진기 등의 장치가 장착되어 있다.

② 수평인입식 크레인(LLC)

수평인입식 크레인(LLC; Level Luffing Crane)은 부두의 에이프런 상에 설치된 레일 위를 주행하고 크레인 상부가 선회를 하며 작업을 하는 크레인으로 작업의 안전성과 하역능률이 높다. 붐의 끝단에 설치된 플라이 붐(fly boom)이 붐을 세우거나 눕힘에 따라 호이스트 와이어로프의 길이가 조절되면서 화물을 수평으로 움직이게 한다. 일반적으로 플라이 붐 끝단에 장치된 호이스트 와이어로프에 그랩 버킷을 매달아 선박에 실

려 온 석탄, 광석, 곡물 등의 벌크화물을 하역한다. 화물의 종류에 따라 그랩 버킷 대신 훅(hook), 오렌지 휠(orange wheel), 마그네트(magnet) 등을 부착하여 코일(coil), 파이프(pipe), 고철 등의 하역작업도 가능하다. 수평인입식 크레인(LLC)에는 호이스트장치, 주행장치, 수평인입장치, 선회장치, 레일 클램프(rail clamp), 스토이지 핀(stowage pin), 타이다운(tie down), 호퍼(hopper), 이송 컨베이어(feeder conveyor), 슈트(chute) 등의 장치가 장착되어 있다.

③ 연속하역기기(CSU)

부두에 설치된 연속하역기기(CSU; Continuous Ship Unloader)는 선박에서 벌크화물을 양화하여 부두에 있는 벨트 컨베이어, 호퍼, 트럭 등으로 이송하는 장비이다. 버킷, 진공, 벨트, 체인, 스크루 등을 이용하여 연속적으로 석탄, 시멘트, 석회석 및 곡물 등의 벌크화물을 양화할 수 있다. 공해와 소음억제 효과가 뛰어나고 에너지 소모량이 적으며, 효율이 높고 중량이 작은 장점이 있다. 따라서 대량의 벌크화물을 하역할 때에는 대부분이 연속하역기기가 사용되며, 화물의 하역방식에 따라 버킷 엘리베이터식, 진공흡입식, 벨트-공기압식 등이 있다.

연속하역기기 중 가장 널리 사용되는 버킷 엘리베이터식(bucker elevator type)은 주로 석탄하역에 사용된다. 소형 버킷을 컨베이어에 연속적으로 장착하여 선박의 화물창 내에서 회전시켜 석탄 등을 위로 끌어 올린 후 내부 컨베이어를 이용하여 장비 하부에 연결된 부두 컨베이어에 실어주는 장비이다. 하역효율이 높고 동력소모가 적어 석탄을 사용하는 제철소와 유연탄을 사용하는 화력발전소에서 많이 사용하고 있다.

진공흡입식(vacuum intake type)은 진공펌프를 이용하여 비교적 비중이 낮은 곡물을 연속적으로 하역하는 방식이다. 소음과 분진 발생이 적고 화물 처리능력이 우수하나 동력이 많이 소요되고 흡입하는 과정에서 곡물이 벽면에 부딪히면서 영양요소의 손상 등이 발생하는 단점이 있다. 부두의 레일 위에 설치되어 그 위를 주행 또는 선회하면서 붐에 설치된 노즐을 통해 곡물을 흡입한 후, 붐에 연결된 통로를 통해 컨베이어벨트 위로 양화하여 사일로(silo) 빔까지 이송하는 시스템으로 되어 있다.

벨트-공기압식(belt-air pressure type)은 주로 곡물하역작업에 사용된다. 공기 벨트 컨베이어에 일정간격으로 받침을 만들고 양 배면에서 공기압을 가하여 곡물을 감싸 안으면서 위로 끌어 올린 후 내부 컨베이어를 이용하여 장비 하부에 연결된 부두 컨베이어에 실어주는 장비이다. 하역효율은 높으나 화물창 하부에 잔류 곡물이 많이 남는다.

2.3 항만용 크레인의 주요장치

2.3.1 항만용 크레인의 동작장치

STS 크레인의 주요 동작은 크게 호이스트 업/다운(hoist up/down, 권상/권하), 트롤리 전진/후진(trolley forward/backward, 횡행), 갠트리 우행/좌행(gantry right/left, travelling right/left, 주행), 붐 호이스트 업/다운(boom hoist up/down, 붐 권상/권하)의 네 가지로 나눌 수 있다. 호이스트 업/다운은 스프레더 또는 컨테이너가 위 아래로 움직이는 동작이며, 트롤리 전진/후진은 트롤리 프레임(또는 스프레더, 컨테이너, 조종실)이 바다 쪽 또는 육지 쪽으로 움직이는 동작이다. 또한, 갠트리 우행/좌행은 크레인 전체가 에이프런에 설치된 레일 위에서 좌우로 움직이는 동작이며, 붐 호이스트 업/다운은 붐이 수평 또는 수직으로 위치할 수 있도록 위·아래로 움직이는 동작으로써 붐 래치(boom latched) 상태와 붐 수평(boom horizontal) 상태가 있다. 여기에서 위·아래, 전진/후진, 좌행/우행은 항상 바다 쪽을 바라보고 있는 크레인 조종자를 기준으로 정한다. 호이스트, 트롤리 횡행, 주행 동작 등은 조종실의 조종 조작반(operator's consoles)에 설치된 조종 레버의 조작에 의해 실행된다. 붐 호이스트 조종은 붐 조종실 조작반의 푸시 버튼 스위치(PBS; Push Button Switch)에 의해 동작한다. 그 외에 주행 현장 조작반(gantry leg station) 또는 기계실 내에서 유지보수를 하기 위해 동작할 수 있다.

STS 크레인의 우측 작업조종 레버는 호이스트와 주행 겸용으로 좌우측으로 조작하면 주행이 되고 전후로 조작을 하면 호이스트 업·다운이 된다. 붐 호이스트 조종은 해측 타이 빔 위에 별도로 마련된 붐 조종실에서 실행한다. 호이스트와 주행 조종은 선취우선 방식으로 되어 있다. 즉, 선택스위치에 의해 호이스트나 주행을 먼저 선택하는 쪽만 조종이 가능하도록 되어있다. 또한, 트롤리와 붐 호이스트는 붐 조종실에 설치된 붐-트롤리 절환 스위치를 선택함으로써 동작이 가능하다. 모든 회로의 전원투입은 작업조종 레버가 중립위치(zero notch)에 있을 때만 가능하다. 호이스트 조종은 작업조종 레버의 최종 노치에서 부하를 검출하여 경부하인 경우에는 호이스트속도를 상승시킨다. 트롤리와 주행은 부하에 관계없이 작업조종 레버의 조작 각도에 대응한 속도로써 조종된다. 주행 및 트롤리는 작업조종 레버를 급속히 조작하여도 크레인은 천천히 가감속되도록 하고 있다. 작업조종 레버를 급속히 중립위치로 조작을 하면 전기 제동이 걸리며 일정한 속도로 감속된 후 기계적 브레이크가 작동한다.

① 호이스트장치

STS 크레인의 호이스트장치는 구동모터의 정·역회전과 감속기에 의해 발생된 동력을 이용하여 와이어로프로 컨테이너 화물을 권상·권하하는 장치이다. Fig. 2.6과 같이 구동부는 기계실에 설치되어 있으며, 조종자가 작업조종 레버를 작동하여 조종한다.



Fig. 2.6 Hoist unit of the STS crane

② 횡행장치

STS 크레인의 트롤리 횡행장치는 횡행모터의 정·역회전과 감속기에 의해 발생된 동력을 이용하여 횡행 와이어로프로 트롤리를 바다 쪽 또는 육지 쪽으로 이동시키는 장치이다. Fig. 2.7과 같이 구동부는 기계실에 설치되어 있으며, 조종자가 작업조종 레버를 작동하여 조종한다.



Fig. 2.7 Trolley traversing unit of the STS crane

③ 주행장치

STS 크레인의 주행장치는 보기(bogie) 장치라고도 하며, 주행모터의 정·역회전과 감속기에 의해 발생된 동력을 이용하여 주행 휠을 구동시켜 크레인을 에이프런에 설치된 레일 위에서 굴러가게 하는 장치이다. Fig. 2.8과 같이 구동부는 크레인 하부의 다리(leg)에 설치되어 있으며, 조종자가 작업조종 레버를 작동하여 조종한다.



Fig. 2.8 Bogie of the STS crane(left) & RTTC(right)

④ 붐 호이스트장치

STS 크레인의 붐 호이스트(hoist)장치는 구동모터의 정·역회전과 감속기에 의해 발생된 동력을 이용하여 와이어로프로 크레인의 붐을 높히거나 세워주는 장치이다. Fig. 2.9와 같이 구동부는 기계실에 설치되어 있으며, 일반적으로 조종자가 해측 타이 빔(tie beam) 위에 설치되어 있는 붐 조종실에서 조종한다. 붐 호이스트의 동작속도는 최고 5 [min/one way]이다.



Fig. 2.9 Boom hoist device of the STS crane

2.3.2 항만용 크레인의 기계장치

① 스토이지 핀

스토이지 핀(stowage pin)은 크레인이 계류 위치(stowage position)에 있을 때, 즉 작업을 하지 않고 계류되어 있을 때 크레인이 바람에 의해 밀리지 않도록 하기 위하여 설치된다. 수동으로 작동되고 작동레버의 상하운동에 의해 핀 컵(pin cup)에 핀을 삽입하여 크레인을 고정시키거나 반대로 핀 컵에서 핀을 뽑아 해제시킨다. 스토이지 핀에 부착된 리밋 스위치(LS)에 의해 고정 또는 해제상태를 전기적으로 파악할 수 있다. 스토이지 핀은 주행동작과 인터 록되어 있어 핀이 고정되어 있을 때에는 주행이 불가능하다. 따라서 크레인을 조종하기 전에 반드시 스토인 핀을 해제시켜야 한다. 스토이지 핀은 크레인의 상태가 작업 종료 또는 장시간 대기 중일 때 기상이변 등으로 인하여 크레인이 굴러서 이동하는 것을 방지하는 장치로써 일반적으로 크레인의 바다 쪽과 육지 쪽의 실빔 중앙에 1조(주행 레일의 좌우)씩 설치된다. 우리나라에 설치되는 항만용 크레인의 스토이지 핀 설계풍속 기준[31]은 크레인이 설치되는 지역에 따라 다르며, 풍속을 지면상에서 20미터 높이에서 측정했을 경우 다음과 같다. Fig. 2.10은 직사각형 타입의 스토이지 핀을 나타내고 있다.

- 서해안 : 초당 55미터 이상
- 동해안 : 초당 60미터 이상
- 남해안 : 초당 60미터 이상
- 목 포 : 초당 70미터 이상
- 울릉도 : 초당 75미터 이상



Fig. 2.10 Stowage pin of the port crane(rectangle type)

② 타이다운

타이다운(tie down)은 기상 악화 또는 태풍 등에 의한 풍압으로 크레인이 넘어지는 것을 방지하는 장치로써 전도방지장치라고도 부른다. Fig. 2.11과 Fig. 2.12와 같이 타이다운 장치와 크레인 계류장소 지면부의 타이다운 소켓으로 구성된다. 타이다운 소켓의 타이다운 러그는 지면부에 설치되어 있으며 타이다운 장치가 샤크로 체결된다. 타이다운은 일반적으로 크레인의 각 다리 부분에 바다 쪽에 2조, 육지 쪽에 1조를 설치하고 있으며, 턴버클(turnbuckle)로 지면의 기초금속과 연결되어 있다. 크레인을 계류장소로 이동시켜 크레인 다리 부분의 아이 플레이트(eye plate)와 주행로 지면에 매설된 기초금속에 턴버클을 서로 연결한 후 보기(bogie) 측면에 준비된 스패너(spanner)로 턴버클을 조여서 크레인을 고정시킬 수 있다. 타이다운은 타이로드와 지면의 기초금속과 연결되어 있는 볼트를 풀고 턴버클을 제거하면 해제되며, 타이다운은 해제해야만 크레인을 주행시킬 수 있다.



Fig. 2.11 Tie down of the port crane(1)



Fig. 2.12 Tie down of the port crane(2)

③ 레일 클램프

레일 클램프(rail clamp)는 작업도중 갑작스런 돌풍이나 돌발사태 때 크레인을 보호하는 유일한 장치로써 초속 35m의 강풍[32]에도 크레인이 바람에 밀리지 않도록 한다. 레일 클램프의 해제는 유압에 의해 이루어지며, 해제는 빨리 되는 것이 바람직하므로 보통 마스터 컨트롤러 스위치(MCS)의 동작과 동시에 이루어진다. 유압 실린더는 큰 유압이 작용하여 스프링을 압착하면서 해제된다. 레일 클램프의 제동은 마스터 컨트롤러 스위치의 중립 위치와 함께 약간의 시차를 두고 스프링의 힘으로 이루어진다. 제동은 유압으로도 가능하지만, 단전에 대비하기 위해 기계적으로 제동한다. 제동되는 과정은 유압 실린더의 압력이 소멸되어 반대로 작용하고 있던 스프링이 유압 실린더를 밀어내면서 제동[33]시킨다. 제동 시 시차를 두는 이유는 크레인의 관성력이 소멸되고 난 후 클램프를 제동시키기 위함이다. Fig. 2.13의 왼쪽은 레일 클램핑형, 오른쪽은 휠 브레이크형 레일 클램프를 나타내고 있다.



Fig. 2.13 Rail clamp of rail clamping type(left) & wheel brake type(right)

④ 트롤리

트롤리는 Fig. 2.14와 같이 크레인 거더 및 붐에 설치된 횡행 레일 위로 이동하면서 하부에 와이어로프로 연결된 스프레더를 이용하여 컨테이너를 바다 쪽 또는 육지 쪽으로 이동시킨다. 트롤리 횡행 양단에는 트롤리를 자동으로 감속·정지시키는 리밋 스위치(limit switch) 형식의 안전장치가 설치되어 있으며, 육지 측 하부에 조종실이 부착되어 있다.



Fig. 2.14 Trolley of the port crane

⑤ 헤드블록

헤드 블록(head block)은 스프레더를 부착하는 리프팅 빔(lifting beam)으로 Fig. 2.15와 같이 호이스트 와이어로프에 의해 트롤리 프레임의 연직하방에 매달려 있다. 헤드 블록 위에는 호이스트 와이어로프용 시브 4개가 부착되어 있으며, 스프레더에 전기를 공급하는 케이블 튜브 장치하고 있다. 헤드 블록 아래에는 스프레더 윗면의 소켓(socket)을 잡는 수동식 트위스트 록(twist lock) 4개가 설치되어 있다.

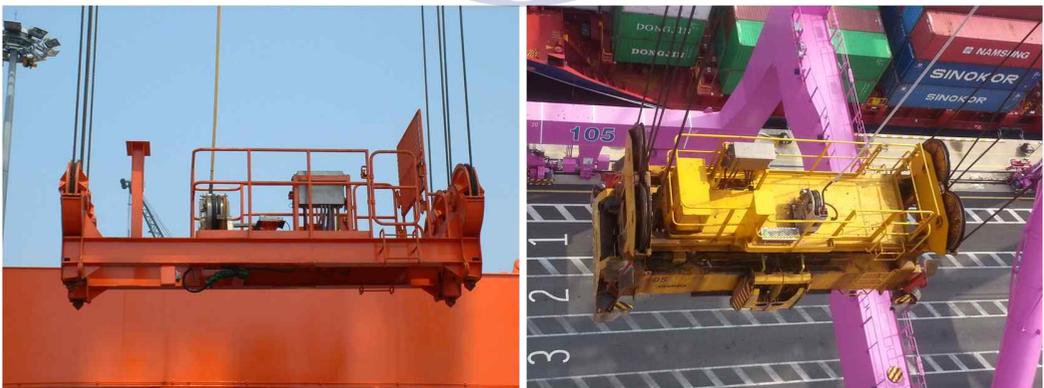


Fig. 2.15 Head block of the port crane

⑥ 스프레더

스프레더(spreader)는 컨테이너 화물을 집어서 들어 올리고 내리는 장치로써 플리퍼(flipper), 텔레스코픽(telescopic) 장치 및 트위스트 록 콘(twist lock corn) 장치 등이 설치되어 있다. 플리퍼는 스프레더를 컨테이너 위에 착상시킬 때 작업이 쉽도록 가이드 역할을 하며, 텔레스코픽 장치는 스프레더 너비를 20피트에서 40피트(또는 45피트)로 확장·축소시켜 주는 장치이다. 스프레더의 각 모서리에 설치되어 있는 트위스트 록 콘은 컨테이너의 코너 피팅 부분과 결합하여 잠금과 풀림을 반복하면서 컨테이너를 들어 올리거나 내려놓을 때 사용한다. STS 크레인의 하역효율 향상을 위해 현재 트윈 스프레더, 탠덤 스프레더 및 트리플 스프레더를 개발[34]하여 사용하고 있다. 트윈 스프레더는 40피트 컨테이너 1개 또는 20피트 컨테이너 2개를 동시에 취급할 수 있으며, 탠덤 스프레더는 40피트 컨테이너 2개 또는 20피트 컨테이너 4개를 동시에 취급할 수 있다. 트리플 스프레더는 40피트 컨테이너 3개를 동시에 취급할 수 있다. Fig. 2.16의 왼쪽은 트윈 스프레더, 오른쪽은 일반 스프레더를 나타내고 있다.



Fig. 2.16 Spreader of the STS crane

⑦ 틸팅 디바이스

틸팅 디바이스(tilting device)는 일명 TLS(Trim, List, Skew) 장치라고도 하며, 작업 중 기울어진 컨테이너에 스프레더를 맞추기 위한 장치이다. 트림(trim)은 선박이 선수미 방향으로, 리스트는 좌우현 방향으로 기울어진 것을 뜻하며, 스큐는 시계 또는 반시계 방향으로 회전되어 있는 것을 말한다.

⑧ 붐 래치장치

붐 래치(boom latch) 장치는 붐을 들어 올린 후 붐 와이어로프에 긴장을 주지 않고 보호하기 위해 붐을 걸어두는 장치로써 Fig. 2.17과 같이 아펙스 빔(apex beam 또는 cross tie beam) 위에 설치되어 있다. 붐 래치장치는 세워진 붐을 걸어두는 장치로써 아펙스 빔의 바다 쪽 좌·우에 2개가 설치되어 있다. 붐을 완전히 세워(수평상태로부터 약 80도) 래치시키면 와이어로프에 장력이 가해지지 않으므로 와이어로프와 붐 권상 드럼을 보호할 수 있다. 와이어로프에 의해 끌어 올려진 붐을 계속하여 와이어로프가 잡고 있으면, 와이어로프에는 항상 어느 정도의 장력이 계속하여 작용하고 붐 권상 드럼의 브레이크는 와이어로프가 받는 장력을 이겨야 붐이 하강하지 않으므로 계속하여 부하를 받게 된다. 즉, 아펙스 빔에 설치되어 있는 붐 래치 장치는 붐 상승 동작이 끝난 후 붐을 기계적으로 래치 혹은 걸어두기만 하는 장치로써 붐의 상승과 하강 도중에 관여되는 장치는 아니다. 붐을 올릴 때 붐 중간에 부착된 힌지가 붐 래치를 밀고 들어가 붐 래치에 걸리게 되고, 붐 하강시 붐 래치를 올린 다음 붐을 하강시킬 수 있다. 래치 혹은 들어 올리는 유압장치는 모터와 펌프가 같은 하우스징 내에 위치하여 모터가 구동되는 동안 원심 펌프가 작동되어 피스톤을 밀어올리고 모터가 구동되지 않으면 자동적으로 압력이 소멸되어 내장 스프링에 의해 피스톤이 하강하는 형식이다.



Fig. 2.17 Boom latch of the STS crane

제 3 장 항만용 STS 크레인의 모델링

항만용 크레인의 효율적인 운영을 위해서는 크레인별 작업환경에 적합한 제어기가 설계되어야 한다. 본 논문에서는 다양한 항만용 크레인 중에서 트롤리가 와이어로프에 의해 이동하고, 트롤리 하부에 매달린 컨테이너를 와이어로프를 이용하여 상·하 이동 시키면서 컨테이너 양·적화작업을 수행하는 STS(ship-to-shore) 크레인의 제어기를 설계하고자 한다. 이를 위해서는 우선 항만용 STS 크레인 하역시스템의 수학적 모델을 얻는 것이 필요하다. STS 크레인은 조종 중 호이스트 와이어로프의 길이가 필연적으로 변화하게 되고, 화물을 취급하는 때 사이클 마다 스프레더가 집어 올리는 컨테이너의 질량도 변화하는 특징을 가지고 있다. 이러한 외부 변수(external variable)로 인해 크레인의 비선형 수학적 모델을 유도하더라도 단일 선형시스템으로 표현하는 것이 매우 어렵다.

따라서 본 논문에서는 STS 크레인 하역시스템에 작용하는 외부 변수(파라미터)의 변화 범위를 가정하고, 파라미터(parameter)의 변화에 따른 대표적인 선형모델(서브시스템)을 구한다. 그리고 이를 이용하여 비선형시스템과 유사한 응답특성을 보이는 퍼지모델을 구현한다. 또한, 각 서브시스템에 대해 유전알고리즘으로 PI형 상태피드백제어기를 설계하고, 이를 퍼지모델에 사용한 소속함수로 퍼지결합하여 적용 퍼지제어기를 설계하고자 한다. 제3장에서는 이와 같은 과정을 진행하기 위해 필요한 유전알고리즘, 퍼지이론, 항만용 STS 크레인의 수학적 모델 유도 및 퍼지모델링에 대해 살펴보기로 한다.

3.1 유전알고리즘

유전알고리즘은 최적화문제를 해결하는 기법 중 하나로써 자연계에서 일어나는 자연선택과 유전적 메커니즘을 컴퓨터 알고리즘으로 모방한 것이다. 1975년에 처음으로 Holland 교수[35]에 의해 제안되었고, Goldberg[36]에 의해 많은 발전을 이루었다. 유전알고리즘은 인위적인 진화를 일으키기 위해 집단을 설정해야 하고, 이 집단 내부에서 재생산, 교배, 돌연변이와 같은 유전 연산자가 작동하게 된다.

이처럼 자연현상을 모사한 유전알고리즘은 「탐색공간이 다양한 형태로 주어지는 경우」, 「탐색공간에 대한 사전지식이 없는 경우」, 「매우 큰 탐색공간이 주어진 경우」에도 전역해로 수렴시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한, 확실적인 특성을 가지고 있어 보다 더 강인한 탐색이 가능하여 스케줄링 문제의 최적화[37-39], 함수의 최적화 [40-41], 동적시스템의 파라미터 추정 및 제어[42-44], 신경회로망의 학습[45-46], 신호처리[47-48] 등 많은 분야에 적용되고 있다.

3.1.1 실수코딩

유전알고리즘의 대표적인 코딩방법은 이진코딩(binary coding), 그레이코딩(gray coding), 실수코딩(real coding) 등이 있다. 코딩의 종류를 통해 유추할 수 있듯이 유전알고리즘은 해결하고자 하는 문제의 해를 직접 다루는 것이 아니라 염색체(chromosome) 형태로 변형하여 사용한다. 주로 적용하는 코딩방법은 이진코딩이다. 그러나 이진코딩은 탐색공간이 클 경우, 고정밀도의 해가 필요할 경우 및 제약조건이 존재할 경우에는 염색체의 길이가 커지게 되어 연산부담으로 탐색이 불가능해지는 단점 [49]을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 이진코딩 대신 실수코딩 유전알고리즘[50]을 사용한다. 염색체를 실수로 표시하게 되면 염색체의 실수 유전자(gene)를 문제의 해 벡터와 일대일로 대응시키면 된다.

3.1.2 유전연산자

유전알고리즘은 주어진 집단 안에서 진화가 진행되며, 세대를 거듭할수록 좋은 유전자를 보유하게 된다. x 세대에서 크기 n 을 갖는 집단 G 는 식 (3.1)과 같이 표현되고, 이 집단의 크기는 세대에 따라 변하지 않는 것으로 가정한다.

$$G(x) = \{s_1(x), s_2(x) \cdots s_i(x) \cdots s_n(x)\} \quad (3.1)$$

여기에서, $s_i \in R$ 는 i 번째 유전자(유전 인자)를 의미한다.

본 논문에서는 초기 집단 $G(0)$ 을 여러 가지 초기집단 선택방법 중 무작위법을 사용하여 난수발생기에서 발생한 실수로 구성한다. 이렇게 형성된 집단 내에서 모의진화를 일으키기 위해 자연의 진화원리를 모사한 재생산, 교배, 돌연변이와 같은 유전연산자(genetic operator)를 사용한다.

① 재생산

재생산(reproduction)은 자연의 적자생존을 모방한 유전연산자로 각 개체의 적합도에 따라 집단 내의 개체들을 선택하고, 새로운 집단을 형성하는 메커니즘이다. 이 과정을 통해 집단 내의 약한 개체들은 도태되고, 강한 개체는 선택되는 적자생존이 이루어져 세대가 진행될수록 좋은 유전자를 가진 집단으로 변하게 된다. 본 논문에서는 다양한 재생산 연산자들 가운데 구배와 유사한 재생산[51]을 사용한다.

② 교배

교배(crossover)는 자연계 생물의 성적결합을 모방한 연산자로 이를 통해 부모세대의 유전인자가 서로 교환된다. 다양한 형태의 교배 연산자[52-54]가 제안되었으며, 본 논문에서는 수정단순 교배[50]를 적용한다. 수정단순 교배는 선택된 교배점 이후의 유전자를 서로 교환하여 자손을 형성하는 단순 교배와 교배점의 유전자를 일차결합(linear combination)하여 자손을 생성하는 산술적 교배를 결합한 형태이다.

③ 돌연변이

돌연변이(mutation)는 모의진화가 진행되는 동안 집단이 점점 더 해에 근접한 탐색체로 구성되어 결국 유전자의 다양성 결핍으로 지역해(local solution) 또는 사점(dead corner)에 빠지게 될 수 있는 문제점을 보완하기 위한 전략이다. 다양한 돌연변이 연산자[54]가 있으나 본 논문에서는 동적 돌연변이(dynamic mutation)를 사용한다. 이 돌연변이 연산자는 세대 초기에 전 탐색공간을 균등한 확률로 탐색하고, 진화가 진행될수록 지역적인 탐색을 진행하는 특징을 가지고 있다.

3.1.3 적합도 평가

유전알고리즘이 진화를 거듭하게 되면 최적해로의 수렴 정도를 파악하고, 이를 개체의 적합도 평가(fitness evaluation)로 반영한다. 재생산, 교배 및 돌연변이 연산을 통해 새로운 집단이 형성되면 개체의 적합도는 목적함수에 의해 평가된다. 이 적합도 크기에 따라 다음 세대에서 재생산되는 비율이 결정된다. 이 과정에서 적합도가 큰 개체가 더 많이 선택되어야 하므로 적합도 함수는 최대화 문제로 표현되고, 음의 값을 가지면 안 된다. 만약 최소화 문제로 기술되는 경우에는 적절한 사상(mapping)을 통해 최대화 문제로 표현하는 것이 가능하다.

3.2 퍼지이론

퍼지(fuzzy)는 어렴풋하고 애매모호하다는 뜻이며, 자동제어에서는 “경계가 불명확한” 이라고 해석하는 것이 적절하다. 퍼지이론(fuzzy theory)은 애매모호한 인간의 언어를 컴퓨터 언어로 표현하고자 한 이론이다. 퍼지집합을 처음으로 발표한 Zadeh 교수는 컴퓨터가 ‘과연 나의 아내는 어느 정도 예쁜가?’ 와 같은 인간의 감정적이거나 추상적인 자연어를 0과 1만으로 표현하는데 한계가 있음을 깨닫는다. 따라서 인간의 자연스러운 표현을 컴퓨터가 이해할 수 있도록 표현하고자 했다. 즉 ‘예쁘다’ 와 예쁘지 않다 ‘를 1과 0으로 두고, [조금 예쁘다, 적당히 예쁘다, 많이 예쁘다]를 [0.2, 0.5, 0.8] 정도라고 표현한다. 여기에서 [0.2, 0.5, 0.8]을 소속정도(membership grade)라고 한다. 이와 같이 퍼지알고리즘은 애매모호한 상태를 수식화하여 시스템을 구축하는데 사용함으로써 기존 컴퓨터의 0과 1로 이루어진 이진 논리(binary logic)를 극복할 수 있다.

즉, 퍼지 알고리즘은 주어진 제어시스템에 대한 정밀한 수학적 해석을 기반으로 하는 기존의 방법들과는 달리, 전문가의 지식을 언어적으로 적절히 표현하여 시스템에 내재해 있는 애매함(fuzziness)의 불확실성을 극복하는 설계방법을 제시해 주었다. 이와 같은 장점으로 복잡한 패턴인식분야, 음성인식분야 및 비선형시스템의 식별과 제어 등 다양한 공학분야에 응용되고 있다.

3.2.1 퍼지집합

보통집합(crisp set)은 전체집합의 원소들이 전체집합에 소속되면 포함시켜 표시하고, 그렇지 않은 경우에는 포함시키지 않는다. 즉, 집합의 원소들은 소속정도가 1이 되면 포함되고, 소속정도가 0이 되면 포함되지 않는다.

그러나 실세계에서의 사실 또는 논리를 이와 같이 참 또는 거짓으로만 설명하는 것은 많은 제한을 가지고 있다. 예를 들어 어느 교실에서 키가 큰 학생을 선택하는 경우, 어떤 친구는 명확하게 키가 큰 그룹에 포함되거나 또는 제외되고, 어떤 친구는 어느 그룹에도 포함되지 못하는 곤란한 상황도 발생한다. 또한 다른 학생의 기준으로 보면 이미 키가 큰 그룹에 포함된 친구가 키가 작은 그룹으로 이동해야 하는 경우도 있을 수 있다. 이처럼 명확한 경계를 설정할 수 없는 경우에는 원소들과 이들 원소가 집합에 포함될 가능성을 함께 표시하고자 하는 것이 퍼지집합이다. 예를 들어, 원소 n 으로 이루어진 전체집합이 U 라면 퍼지집합 F 는 U 내에서 식 (3.2)와 같이 표현된다.

$$F = \{ (n, \mu_F(n)) \mid n \in U \}, \mu_F(n) : U \rightarrow [0, 1] \quad (3.2)$$

여기에서, $\mu_F(n)$ 은 퍼지집합 F에 대한 n의 소속함수로 원소 $n \in U$ 이 퍼지집합 F에 소속되는 정도를 의미하며, 0과 1사이의 값을 가진다. 퍼지집합을 규정하는 것은 전체 집합의 정의나 소속함수의 특성에 따라 다르며, 특히 소속함수는 아주 주관적으로 정의된다.

3.2.2 퍼지추론

퍼지로직시스템(fuzzy logic system)은 시스템 표현기법의 한 방법으로 퍼지추론 및 퍼지 “IF – THEN” 규칙을 기반으로 한다. 일반적으로 퍼지화부, 지식베이스부, 퍼지추론부 및 비퍼지화부로 이루어져 있으며, Fig. 3.1과 같이 구성된다.

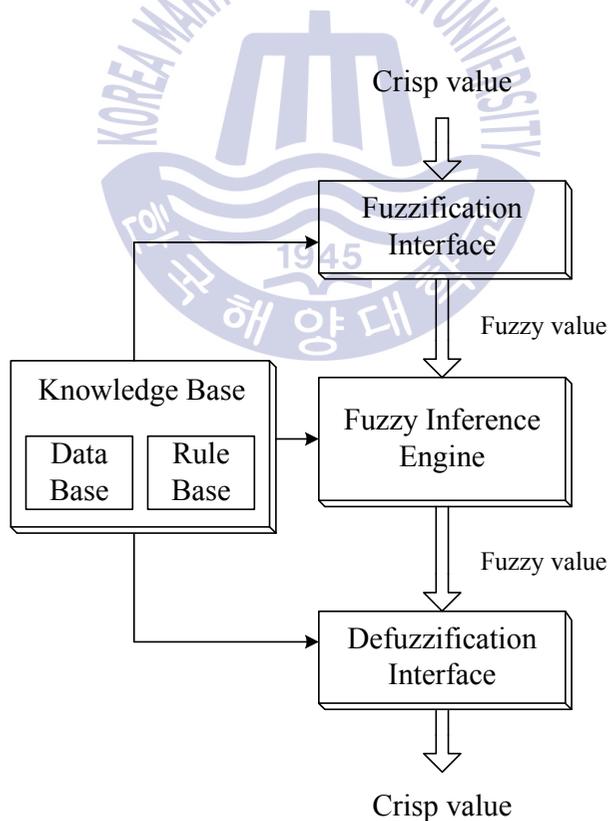


Fig. 3.1 Basic structure of fuzzy logic system

① 퍼지화부

퍼지화부(fuzzification interface)는 제어시스템에서 측정된 명확한(crisp) 입력 값들을 퍼지로지 시스템이 사용할 수 있도록 퍼지규칙을 사용하여 각각의 언어 값과 소속함수(membership function)로 바꾸는 과정이다.

② 지식베이스부

지식베이스부(knowledge base)는 데이터베이스(data base)와 규칙베이스(rule base)로 구성되어 있다. 데이터베이스는 전체집합의 이산화 및 정규화, 입·출력 공간의 분할방식, 퍼지규칙에 사용되는 소속함수의 형태 등에 대한 사항을 정의하고 있다. 여기에서 이산화는 연속적인 형태의 전체집합을 컴퓨터에 구현하기 위해 이산적인 양으로 변환하는 것이다. 정규화는 전체집합을 폐구간으로 변환하는 것으로 $[-1 \ 1]$ 의 구간으로 스케일을 변환하여 정규화하는 방법이 사용된다. 입·출력 공간의 퍼지분할은 입·출력 변수에 대한 퍼지변수가 결정된 이후, 그 변수의 개수에 따라 입·출력 공간을 몇 개의 영역으로 나누는 것을 말한다. 소속함수는 주로 삼각형, 사다리꼴, 가우스형 및 범종형 등이 사용되며, Fig. 3.2에 그 형태를 나타내었다.

규칙베이스는 퍼지 제어규칙에 대한 입·출력 변수의 선택과 언어적인 퍼지 제어규칙을 포함한다. 일반적으로 퍼지 제어규칙 문장은 식 (3.8)과 같이 “IF – THEN”의 집합에 의해 결정된다. 원소 n 으로 이루어진 전체집합이 U 이고, 원소 m 으로 이루어진 전체집합이 V 일 때, 퍼지 제어규칙의 퍼지조건문은 두 퍼지집합 F_1 과 F_2 간의 관계를 의미하므로 다음과 같이 퍼지관계로 표현되는 것을 의미한다.

$$\text{IF } u \text{ is } F_1 \text{ THEN } v \text{ is } F_2 \quad (3.3)$$

여기에서, u 와 v 는 언어적 변수이고, 두 집합 F_1 과 F_2 는 전체집합 U 와 V 내에서 정의되는 「short」, 「long」 등과 같은 퍼지집합이다. 두 집합 F_1 과 F_2 의 소속함수는 각각 $\mu_{F_1}(n)$, $\mu_{F_2}(m)$ 이다. 「 $u \text{ is } F_1$ 」을 전건부(전제), 「 $v \text{ is } F_2$ 」를 후건부(결론)라고 한다.

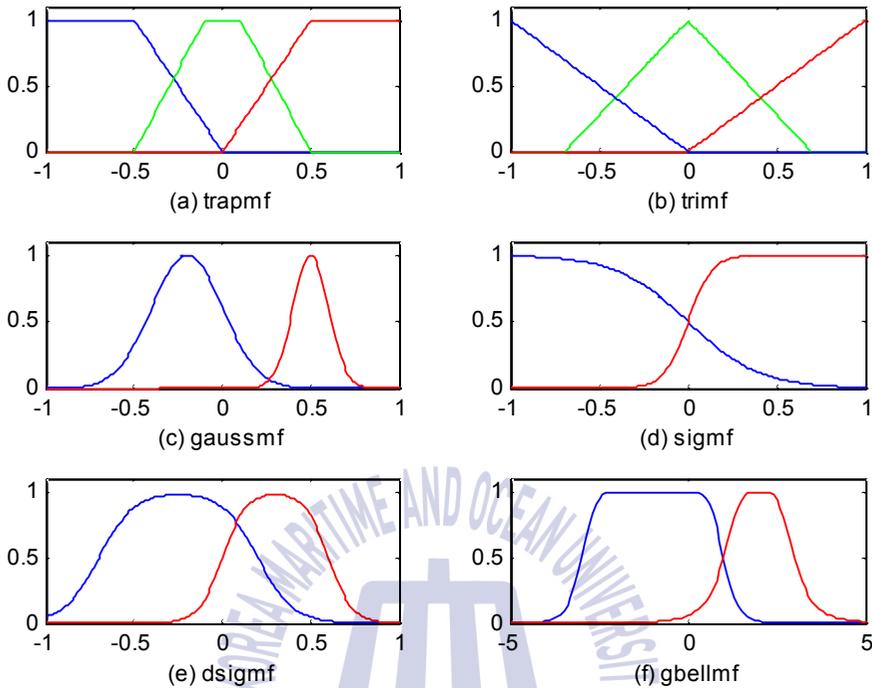


Fig. 3.2 Examples of membership function

③ 퍼지추론부

퍼지추론부(fuzzy inference engine)는 퍼지조건과 합성규칙의 추론을 사용하여 규칙 베이스에 있는 퍼지 제어규칙으로 퍼지입력에 대한 퍼지출력을 추론하는 부분이다.

④ 비퍼지화부

비퍼지화부(defuzzification interface)는 앞에서 설명한 추론엔진에서 추론한 출력을 실제 시스템에 적용하기 위해 명확한 값으로 변환하는 역할을 한다. 퍼지출력에 대한 비퍼지화 방법에는 여러 가지 방법이 있으며[55], 일반적으로 널리 사용되는 방법은 무게중심법(COG; Center of Gravity)이다. 무게중심법은 최종 퍼지집합의 면적중심에 해당하는 z 를 명확한 출력[56]으로 환산한다.

3.3 항만용 STS 크레인의 수학적 모델

항만용 크레인에는 컨테이너 터미널의 안벽에 설치되어 선박과 부두 사이에서 컨테이너 양·적화작업을 수행하는 STS 크레인, 컨테이너 터미널의 야드에 설치되어 컨테이너 야드(CY)와 이송장비 간의 컨테이너 적치·상차작업을 수행하는 트랜스퍼 크레인(TC) 및 일반적으로 전용부두의 안벽에 설치되어 석탄·고철·철재화물·곡물 등을 전용으로 하역하는 언로더(unloader)가 있다. 이러한 항만용 크레인은 복잡한 장치와 많은 구조물로 이루어져 있으며, 점점 대형화·고속화·자동화되어 가고 있다.

본 논문에서는 이러한 크레인 중 트롤리를 횡행 와이어로프로 전·후 이동시키고, 컨테이너를 트롤리 하부에서 호이스트 와이어로프로 매달아 상·하 이동시키면서 컨테이너 양·적화작업을 수행하는 STS 크레인의 수학적 모델을 라그랑지(Lagrange) 운동방정식을 이용하여 유도하도록 한다.

기계시스템을 해석하고 수학적 모델을 유도하는데 있어서 가장 잘 알려진 방식은 뉴턴(Newton)의 운동방정식을 이용하는 것이지만 라그랑지 운동방정식도 뉴턴의 운동방정식과 더불어 널리 알려진 방법 중의 하나이다. 라그랑지 운동방정식의 대표적인 장점은 적용하고자 하는 시스템에 대하여 그 운동을 가장 잘 표시할 수 있는 좌표계를 사용한다는 것이다. 하지만 이 경우, 해당 좌표계에서 좌표 값들을 정의하면 그 역학계의 각 부분에 해당하는 위치가 완전히 결정되어야 한다는 가정이 존재한다. 이 조건을 홀로노믹(holonomic) 조건이라고 하며, 이는 고려하는 역학계가 가지는 자유도 각각에 대하여 1개씩의 좌표가 설정되어야 한다는 것을 의미한다.

STS 크레인의 수학적 모델을 유도하기 위해 해당 시스템을 컨테이너를 상·하로 이동시키는 트롤리부와 트롤리를 전·후로 이동시키는 트롤리 구동부로 구분하기로 한다.

3.3.1 트롤리부 비선형 모델

Fig. 3.3은 본 논문에서 제어대상으로 고려하는 STS 크레인 하역시스템의 동역학적 절대 직교 좌표계를 단순화하여 정의한 것이다. 이 좌표로부터 컨테이너 하역작업 시의 트롤리부에 대한 동역학적 운동방정식을 유도하기로 한다.

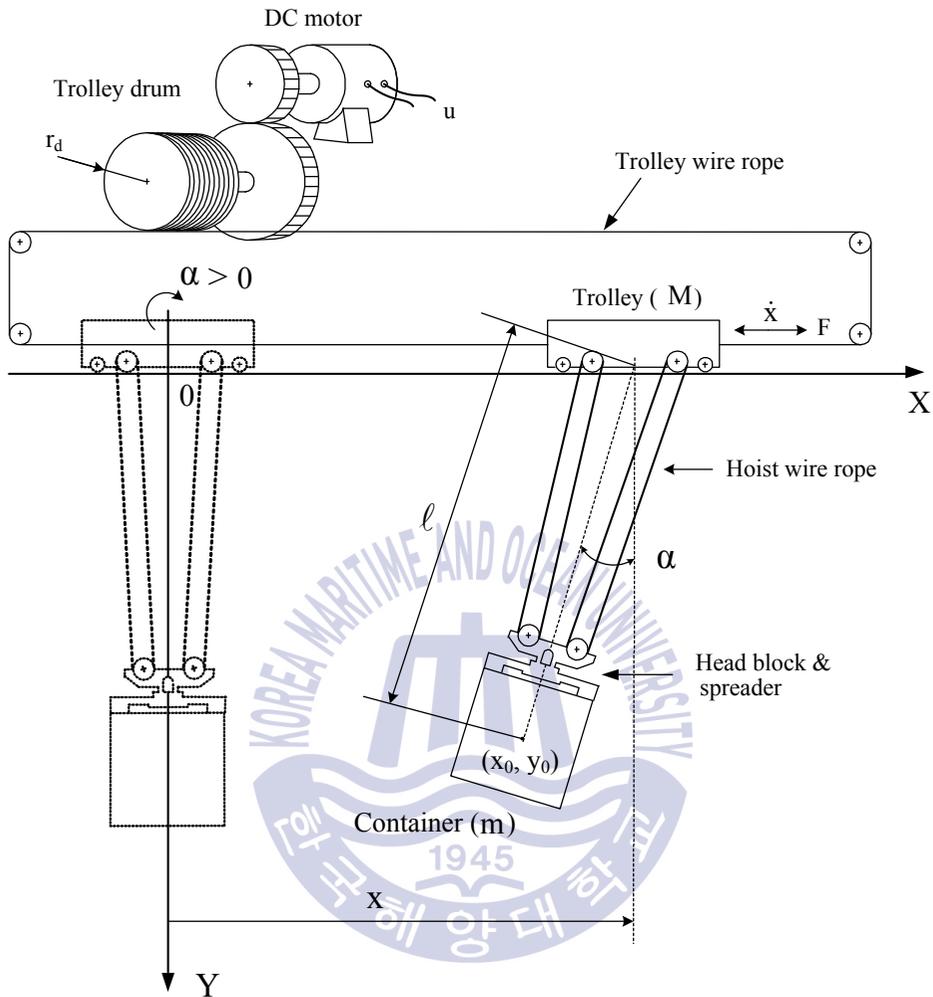


Fig. 3.3 Coordinate system of the STS crane

Fig. 3.3의 시스템에서 x 는 트롤리의 수평방향 위치(트롤리 위치), \dot{x} 는 트롤리의 수평방향 속도(트롤리 속도), α 는 컨테이너(또는 호이스트 와이어로프)의 수직에 대한 각도(컨테이너 흔들림 각도)로서 시계 방향이 양의 각이며, $\dot{\alpha}$ 는 컨테이너 흔들림 각도의 변화에 따른 각속도(컨테이너 흔들림 각속도), l 은 트롤리에서 컨테이너 중심까지의 거리, m 은 컨테이너의 질량, M 은 구동부를 포함한 트롤리의 질량, F 는 트롤리에 가해지는 힘, g 는 중력가속도를 나타낸다.

따라서 컨테이너의 중심좌표 (x_0, y_0) 는 식 (3.4)와 같다.

$$x_0 = x - \ell \sin \alpha, \quad y_0 = -\ell \cos \alpha \quad (3.4)$$

STS 크레인의 하역시스템에서 트롤리부에 대한 동역학적 에너지 E 는 운동에너지 E_k 와 위치에너지 E_p 의 합으로 나타낼 수 있다.

먼저, 트롤리부의 이동에 따른 총 운동에너지 E_k 를 트롤리의 이동에 따른 운동에너지(트롤리 운동에너지) E_{kt} 와 컨테이너의 이동에 따른 운동에너지(컨테이너 운동에너지) E_{kc} 로 구분하여 계산한 뒤 이를 합산하여 구한다. 여기에서 트롤리 운동에너지 E_{kt} 는 다시 트롤리의 수평이동에 의한 운동에너지(트롤리의 수평이동 운동에너지) E_{ktp} 와 트롤리 구동모터의 회전에 의한 운동에너지(트롤리 구동모터의 회전 운동에너지) E_{ktr} 로 나누어 생각할 수 있다. 트롤리 운동에너지 중 트롤리의 수평이동 운동에너지 E_{ktp} 는 식 (3.5)와 같고, 트롤리 구동모터의 회전 운동에너지 E_{ktr} 은 식 (3.6)과 같다.

$$E_{ktp} = \frac{1}{2} M_t \dot{x}^2 \quad (3.5)$$

$$E_{ktr} = \frac{1}{2} I_m \left(\frac{R_g}{r_d} \right)^2 \dot{x}^2 \quad (3.6)$$

여기에서, M_t 는 트롤리 구동부를 제외한 트롤리의 질량, I_m 은 구동모터의 회전관성 모멘트, r_d 는 구동모터의 피니언 반지름, R_g 는 감속기의 기어비이다. 따라서 트롤리 운동에너지는 식 (3.5)와 (3.6)의 합으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{kt} = E_{ktp} + E_{ktr} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} M_t \dot{x}^2 + \frac{1}{2} I_m \left(\frac{R_g}{r_d} \right)^2 \dot{x}^2 \\ &= \frac{1}{2} M \dot{x}^2 \end{aligned}$$

단, $M = M_t + I_m \left(\frac{R_g}{r_d} \right)^2$ 이며, 구동부를 포함한 트롤리의 질량이다.

컨테이너 운동에너지 E_{kc} 는 다시 컨테이너의 수평이동에 의한 운동에너지(컨테이너의 수평이동 운동에너지) E_{kcp} 와 컨테이너의 회전에 의한 운동에너지(컨테이너의 회전 운동에너지) E_{kcr} 로 나누어 생각할 수 있다.

컨테이너 운동에너지 중 컨테이너의 수평이동 운동에너지 E_{kcp} 는 식 (3.8)과 같다.

$$E_{kcp} = \frac{1}{2}m\left(\sqrt{\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2}\right)^2 \quad (3.8)$$

여기에서, $\dot{x}_0 = \dot{x} - l \dot{\alpha} \cos \alpha$ 이며, $\dot{y}_0 = l \dot{\alpha} \sin \alpha$ 이다.

또한, 컨테이너 운동에너지 중 컨테이너의 회전 운동에너지 E_{kcr} 은 식 (3.9)와 같다.

$$E_{kcr} = \frac{1}{2}I_c \dot{\alpha}^2 \quad (3.9)$$

여기에서 $I_c = \frac{1}{12}m\ell^2$ 는 컨테이너의 관성모멘트이다.

따라서 컨테이너 운동에너지 E_{kc} 는 식 (3.8)과 (3.9)의 합으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{kc} = E_{kcp} + E_{kcr} \quad (3.10)$$

$$= \frac{1}{2}m\left(\sqrt{\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2}\right)^2 + \frac{1}{2}I_c \dot{\alpha}^2$$

결국, STS 크레인 하역시스템의 총 운동에너지 E_k 는 식 (3.7)과 (3.10)의 합으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_k = E_{kt} + E_{kc} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2}M\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m\left(\sqrt{\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2}\right)^2 + \frac{1}{2}I_c \dot{\alpha}^2 \\ &= \frac{1}{2}(M+m)\dot{x}^2 - m\ell \dot{x}\dot{\alpha} \cos\alpha + \frac{1}{2}\dot{\alpha}^2 (I_c + m\ell^2) \end{aligned}$$

다음으로 STS 크레인의 하역시스템에서 트롤리부에 대한 총 위치에너지 E_p 는 시스템 또는 시스템 구성요소의 에너지 양으로 나타나며, 일반적으로 기준점에서의 수직변위에 의한 것과 스프링 같은 탄성체의 변위에 의한 것으로 구분할 수 있다. 그런데 트롤리는 기준점에서 수평방향으로만 운동하기 때문에 이 시스템의 위치에너지는 컨테이너 화물의 중력 위치에너지만을 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_p = -m g \ell \cos\alpha \quad (3.12)$$

종합하면, STS 크레인의 하역시스템에서 트롤리부에 대한 동역학적 에너지 E 는 운동에너지와 위치에너지의 합으로 표현되므로, 식 (3.11)과 (3.12)를 합하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = E_k + E_p \quad (3.13)$$

$$= \frac{1}{2}(M+m)\dot{x}^2 - m\ell \dot{x}\dot{\alpha} \cos\alpha + \frac{1}{2}\dot{\alpha}^2 (I_c + m\ell^2) - m g \ell \cos\alpha$$

이제 식 (3.13)을 x 와 α 에 대한 라그랑지안(Lagrangian)과 라그랑지 방정식으로 표현하여 \ddot{x} 와 $\ddot{\alpha}$ 에 대하여 정리하면, 다음과 같은 트롤리부의 동역학적 에너지에 대한 2계 비선형 연립 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{x} = \frac{-(I_c m_v + m \ell^2 m_v) \dot{x} - (m^2 \ell^3 + I_c m \ell) \dot{\alpha}^2 \sin \alpha}{(M + m) I_c + M m \ell^2 + m^2 \ell^2 - m^2 \ell^2 \cos^2 \alpha} \quad (3.14)$$

$$+ \frac{-m \ell c_v \dot{\alpha} \cos \alpha - m^2 \ell^2 g \cos \alpha \sin \alpha + (I_c + m \ell^2) F}{(M + m) I_c + M m \ell^2 + m^2 \ell^2 - m^2 \ell^2 \cos^2 \alpha}$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{-m \ell m_v \dot{x} \cos \alpha - m^2 \ell^2 \dot{\alpha}^2 \cos \alpha \sin \alpha}{(M + m) I_c + M m \ell^2 + m^2 \ell^2 - m^2 \ell^2 \cos^2 \alpha} \quad (3.15)$$

$$+ \frac{-(M + m) c_v \dot{\alpha} - (M + m) m g \ell \sin \alpha + F m \ell \cos \alpha}{(M + m) I_c + M m \ell^2 + m^2 \ell^2 - m^2 \ell^2 \cos^2 \alpha}$$

여기에서, F는 트롤리가 구동모터에 의해 움직이는 힘이며, m_v 는 구동모터의 점성제동계수, c_v 는 컨테이너의 점성제동계수이다. Table 3.1은 식 (3.19)와 (3.20)의 미분방정식에 나타난 STS 크레인 하역시스템의 각종 파라미터를 정리한 것이다.

Table 3.1 Parameters of the STS crane

Parameters	Unit	Descriptions
c_v	[N · m · s/rad]	Viscous damping coefficient of container
F	[N]	Driving force of trolley
g	[m/s ²]	Gravitational acceleration constant
I_c	[kg · m ²]	Inertial moment of container
ℓ	[m]	Length from trolley to center of container
M	[kg]	Mass of trolley with actuator motor
m	[kg]	Mass of container
m_v	[N · s/m]	Viscous damping coefficient of motor
x	[m]	Horizontal position of trolley
\dot{x}	[m/s]	Horizontal velocity of trolley
α	[rad]	Swing angle of container from vertical line
$\dot{\alpha}$	[rad/s]	Swing angular velocity of container

3.3.2 트롤리 구동부

Fig. 3.4는 트롤리 구동모터를 포함한 트롤리 구동부를 도식화한 것이다. 구동모터에 인가되는 전압은 직류를 사용하였다. 여기에서 트롤리에 작용하는 힘 F 와 구동모터에 인가되는 입력전압 u 와의 관계를 구한다.

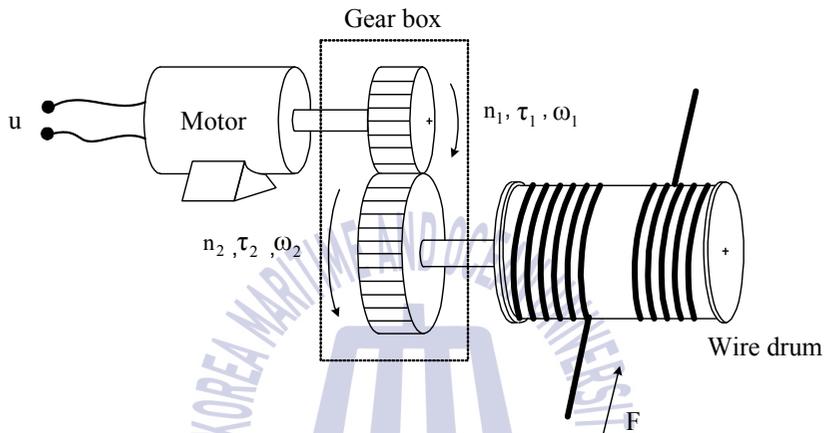


Fig. 3.4 Actuator part for the STS crane

트롤리 구동모터에 입력전압 u 를 가하면 회전력이 발생된다. 이 회전력은 감속기(기어박스)를 거쳐 트롤리에 힘 F 로 작용하게 된다. 여기에서 구동모터의 입력전압을 u , 전기자전류를 I_a , 전기자 저항을 R_a , 토크 상수를 C_t , 역기전력 상수를 C_{be} , 회전수를 n_1 , 회전력을 τ_1 , 회전각속도를 ω_1 으로 정의하고, 와이어 드럼의 회전수를 n_2 , 회전력을 τ_2 , 회전각속도를 ω_2 , 반지름을 r_d 로 정의한다. 이때, 감속기의 기어비를 r_g 라 하고 구동모터의 미소한 인덕턴스 값을 무시하면, 구동모터의 입력전압 u 와 구동모터의 회전력 τ_1 및 와이어드럼의 회전력 τ_2 의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_g = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{F r_d}{C_t I_a} \quad (3.16)$$

$$u = I_a R_a + C_{be} \omega_1 \quad (3.17)$$

여기에서, 트롤리 이동속도 $\dot{x} = r_d \omega_2$ 이므로 위 식들을 다시 정리하면, 다음과 같이 트롤리에 작용하는 힘 F와 구동모터에 인가되는 입력전압 u를 구할 수 있다.

$$F = \frac{\eta_g r_g \eta_m C_t}{R_a r_d} u - \frac{\eta_g r_g^2 \eta_m C_{be} C_t}{R_a r_d^2} \dot{x} \quad (3.18)$$

$$u = \frac{R_a r_d}{\eta_g r_g \eta_m C_t} F + \frac{r_g C_{be}}{r_d} \dot{x} \quad (3.19)$$

여기에서, η_g 는 기어박스의 효율, η_m 은 구동모터의 전기·기계적 효율을 나타내며, 손실은 없는 것으로 가정한다. Table 3.2는 트롤리 구동부의 각종 파라미터를 정리한 것이다.

Table 3.2 Parameters of the STS crane actuator part

Parameters	Unit	Descriptions
I_a	[A]	Armature current of motor
C_{be}	-	Back e.m.f. constant of motor
r_g	-	Gear ratio in gear box
C_t	[V/rad/s]	Torque constant of motor
n_1	-	Teeth number of motor pinion gear
n_2	-	Teeth number of driven gear
R_a	[Ω]	Armature resistance of motor
r_d	[m]	Radius of wire drum
u	[V]	Voltage applied to motor
τ_1	[N · m]	Torque of motor pinion
τ_2	[N · m]	Torque of wire drum
ω_1	[rad/s]	Angular velocity of motor pinion
ω_2	[rad/s]	Angular velocity of wire drum

3.3.3 선형화 및 상태공간 해석

앞 절에서는 트롤리의 수평방향 위치 x 와 호이스트 와이어로프의 수직방향에 대한 각도 α 값을 나타내는 2계 비선형 연립 미분방정식을 구하여 식 (3.14)와 (3.15)에 나타내었다. 이제 이 비선형 미분방정식을 선형화하기 위하여 α 의 변화가 미소하다고 가정하고, $\alpha \cong 0$ 부근에서 테일러(Taylor) 급수를 전개하면, 다음과 같은 선형 미분방정식을 구할 수 있다.

$$\ddot{x} = \frac{-(I_c + m \ell^2)m_v \dot{x} - m \ell c_v \dot{\alpha} + (I_c + m \ell^2)F - m^2 \ell^2 g \alpha}{(M + m)I_c + M m \ell^2} \quad (3.20)$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{-m \ell m_v \dot{x} - (M + m)c_v \dot{\alpha} - (M + m)m g \ell \alpha + m \ell F}{(M + m)I_c + M m \ell^2} \quad (3.21)$$

식 (3.20)과 (3.21)은 STS 크레인의 하역시스템 중 트롤리부만을 표현하므로 하역시스템 전체를 표현하기 위해서는 여기에 트롤리 구동부를 포함시켜야 한다. 식 (3.20)과 (3.21)에 식 (3.18)을 대입하여 정리하면, 다음과 같은 STS 크레인의 하역시스템 전체에 대한 선형 미분방정식을 찾을 수 있다.

$$\ddot{x} = \frac{-m^2 \ell^2 g}{(M + m)I_c + M m \ell^2} \alpha + \frac{-m \ell c_v}{(M + m)I_c + M m \ell^2} \dot{\alpha} \quad (3.22)$$

$$+ \frac{-\{(r_g^2 C_t C_{be} (I_c + m \ell^2) + m_v R_a r_d^2 (I_c + m \ell^2)\}}{R_a r_d^2 \{(M + m)I_c + M m \ell^2\}} \dot{x}$$

$$+ \frac{r_g C_t (I_c + m \ell^2)}{R_a r_d \{(M + m)I_c + M m \ell^2\}} u$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{-(M + m)m g \ell}{(M + m)I_c + M m \ell^2} \alpha + \frac{-(M + m)c_v}{(M + m)I_c + M m \ell^2} \dot{\alpha} \quad (3.23)$$

$$+ \frac{-\{m \ell (r_g^2 C_t C_{be} + m_v R_a r_d^2)\}}{R_a r_d^2 \{(M + m)I_c + M m \ell^2\}} \dot{x} + \frac{r_g C_t m \ell}{R_a r_d \{(M + m)I_c + M m \ell^2\}} u$$

식 (3.22)과 (3.23)에서 트롤리 위치 $x = x_1$, 트롤리 속도 $\dot{x} = x_2$, 컨테이너 흔들림 각도 $\alpha = x_3$, 컨테이너 흔들림 각속도 $\dot{\alpha} = x_4$ 로 상태변수를 정의하면, $\dot{x}_1 = \dot{x} = x_2$, $\dot{x}_2 = \ddot{x}$, $\dot{x}_3 = \dot{\alpha} = x_4$, $\dot{x}_4 = \ddot{\alpha}$ 이므로 이를 다음과 같이 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{P} \mathbf{x} + \mathbf{Q} u \quad (3.24a)$$

$$y = \mathbf{S} \mathbf{x}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ q_2 \\ 0 \\ q_4 \end{bmatrix} u \quad (3.24b)$$

여기에서, $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{bmatrix}$, $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0 \\ q_2 \\ 0 \\ q_4 \end{bmatrix}$, $\mathbf{S} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$ 이며, 행렬의 각 성분은 다음과 같다.

$$p_{22} = \frac{-\{(r_g^2 C_t C_{be} (I_c + m \ell^2) + m_v R_a r_d^2 (I_c + m \ell^2))\}}{R_a r_d^2 \{(M + m) I_c + M m \ell^2\}}$$

$$p_{23} = \frac{-m^2 \ell^2 g}{(M + m) I_c + M m \ell^2} \alpha$$

$$p_{24} = \frac{-m \ell c_v}{(M + m) I_c + M m \ell^2}$$

$$p_{43} = \frac{-(M + m) m g \ell}{(M + m) I_c + M m \ell^2}$$

$$q_2 = \frac{r_g C_t (I_c + m \ell^2)}{R_a r_d \{(M + m) I_c + M m \ell^2\}}$$

$$p_{42} = \frac{-\{m \ell (r_g^2 C_t C_{be} + m_v R_a r_d^2)\}}{R_a r_d^2 \{(M + m) I_c + M m \ell^2\}}$$

$$p_{44} = \frac{-(M + m) c_v}{(M + m) I_c + M m \ell^2}$$

$$q_4 = \frac{r_g C_t m \ell}{R_a r_d \{(M + m) I_c + M m \ell^2\}}$$

3.4 항만용 STS 크레인의 퍼지모델

3.2절과 3.3절의 방법을 통해 얻은 선형모델은 시스템의 파라미터가 고정된 경우에만 그 정확도가 유지된다. 그러나 STS 크레인의 하역시스템은 매 작업 사이클마다 컨테이너 질량과 호이스트 와이어로프의 길이가 변하므로 3.2절과 3.3절에서 유도한 단일 선형모델은 파라미터가 변하는 실제 작업환경에서는 STS 크레인 하역시스템과 동일한 동역학적 특성을 보이지 못한다.

따라서 여기에서는 시스템의 파라미터가 변화하는 환경에서도 STS 크레인의 비선형 하역시스템을 효과적으로 표현하는 것이 가능한 퍼지모델을 구현하는 문제를 다룬다. 이렇게 구현한 퍼지모델의 소속함수는 제4장에서 제안하는 적응 퍼지제어기 설계에 그대로 사용되기 때문에 본 논문에 있어서 퍼지모델의 구현은 제어기를 설계하기 이전 단계에 이루어져야 하는 중요한 과정이다.

3.4.1 퍼지모델링

“IF – THEN” 규칙을 사용하면 많은 실제적인 상황에서 퍼지시스템을 조합할 수 있는 언어적 묘사가 가능하다. 여기에서는 본 논문에서 다루고자 하는 퍼지모델링 기법에 대해 살펴본다.

본 논문에서는 Takagi-Sugeno 추론법[57]의 특별한 한 형태로 퍼지규칙의 후건부를 식 (3.25)와 같이 1차 항을 결합함으로써 시스템을 표현하는 방법을 사용한다. 이 방법은 알려진 퍼지규칙의 개수가 많지 않더라도 고차의 비선형 함수를 잘 묘사하는 장점을 가지고 있다[58-59].

$$\text{IF } x_1 \text{ is } F_1^i \text{ and } \dots x_j \text{ is } F_j^i \text{ and } \dots x_n \text{ is } F_n^i \quad (3.25)$$

$$\text{THEN } y^i = r_0^i + r_1^i x_1 + \dots + r_j^i x_j + \dots + r_n^i x_n, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, k$$

여기에서, $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n] \in \mathbf{R}^n$ 는 입력벡터, F_j^i 는 전건부의 퍼지집합, r_j^i 는 후건부의 상수 파라미터, k 는 퍼지규칙의 개수를 의미하며, 퍼지모델의 최종 출력 y^i 는 주어진 입력 \mathbf{x} 에 대해 가중평균으로 계산된다.

즉, 식 (3.25)의 물리적 의미는 입력벡터 x 가 퍼지규칙 전건부에 의해 결정된 퍼지 부공간으로 제한될 때, 퍼지모델의 출력은 후건부 함수로 형성된 각각의 출력을 가중 평균하여 계산된다는 것이다.

Fig. 3.5는 이 개념을 도식화하여 나타낸 것으로써 2개의 선형식을 퍼지규칙으로 조합하면, 비선형식으로 나타낼 수 있다는 것을 보여준다.

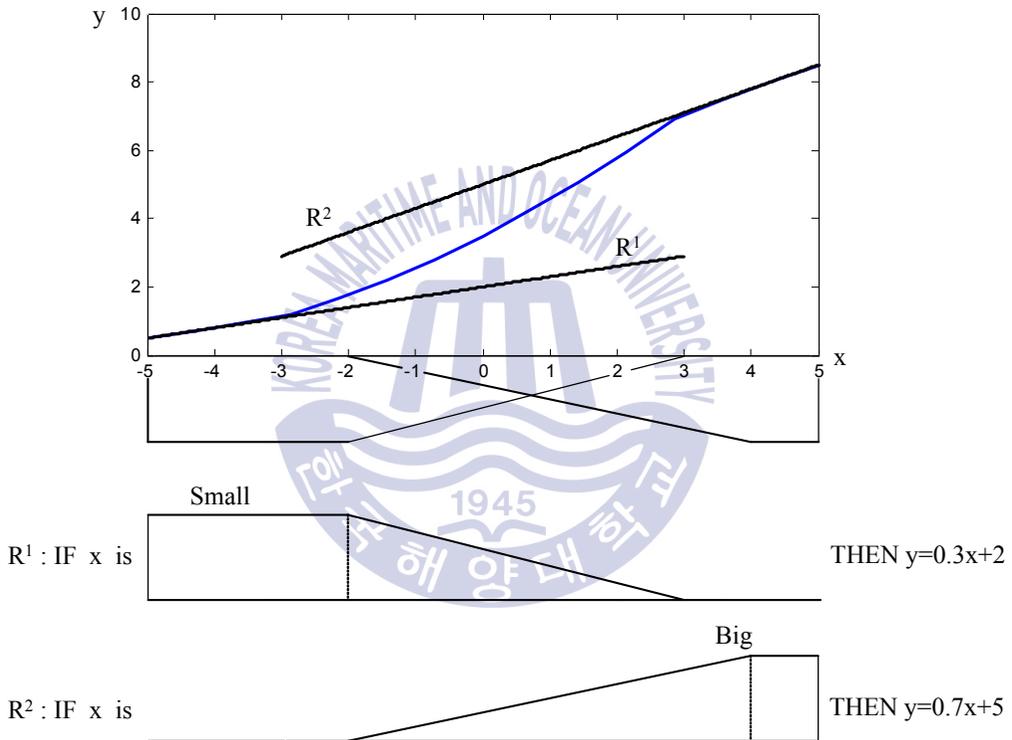


Fig. 3.5 Example of Takagi-Sugeno fuzzy model

식 (3.25)로 표현되는 퍼지모델은 후건부가 입력변수의 함수로 주어진다. 이를 동적 시스템의 관점으로 해석하면, 식 (3.26)과 같이 제어대상으로 주어진 비선형시스템을 대표적인 동작점에서 유도된 선형모델을 기용하여 퍼지규칙으로 기술하는 것이 가능하다는 것을 의미한다.

$$\text{IF } x_1 \text{ is } F_1^i \text{ and } \dots x_j \text{ is } F_j^i \text{ and } \dots x_n \text{ is } F_n^i \quad (3.26)$$

$$\text{THEN } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{P}^i \mathbf{x} + \mathbf{Q}^i \mathbf{u}, \text{ for } i = 1, 2, \dots, k$$

여기에서, 후건부에 $\mathbf{P}^i \mathbf{x} + \mathbf{Q}^i \mathbf{u}$ 로 표현된 선형모델은 서브시스템(subsystem)이라 부르며, 일반적으로 「IF u is F_1 THEN v is F_2 」인 비선형시스템의 각 동작점에서 선형화하여 얻어진다[58-59].

이처럼 퍼지규칙이 적용된 시스템에 입력으로 호이스트 와이어로프의 길이 l 과 컨테이너의 질량 m 이 주어지고, 입출력 쌍 (\mathbf{x}, \mathbf{u}) 가 결정되면 최종적인 퍼지 시스템의 출력은 다음과 같이 추론된다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \frac{\sum_{i=1}^k \rho^i \{ \mathbf{P}^i \mathbf{x} + \mathbf{Q}^i \mathbf{u} \}}{\sum_{i=1}^r \rho^i} \quad (3.27) \\ &= \sum_{i=1}^k \xi^i \{ \mathbf{P}^i \mathbf{x} + \mathbf{Q}^i \mathbf{u} \}, \text{ for } i = 1, 2, \dots, k \end{aligned}$$

여기에서, ρ^i 는 점호강도로서 식 (3.28)과 같으며, ξ^i 는 식 (3.29)와 같이 정의한다.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^r \rho^i > 0 \\ \rho^i \geq 0 \end{cases}, \text{ for } i = 1, 2, \dots, k \quad (3.28)$$

$$\xi^i = \frac{\rho^i}{\sum_{i=1}^r \rho^i} \quad (3.29)$$

3.4.2 서브시스템

퍼지모델의 전건부는 일반적으로 식 (3.24)와 같은 서브시스템의 상태변수 중의 하나로 구성된다. 이것은 3.3절에서 설명한 것과 같이 비선형시스템은 몇몇 동작점에서 얻어지는 선형모델(서브시스템)을 퍼지결합함으로써 표시할 수 있음을 의미한다. 실제 STS 크레인의 조종환경을 분석하면 외부 변수(external variable)에 해당하는 호이스트 와이어로프의 길이 ℓ 과 컨테이너의 질량 m 에 따라 서브시스템이 정의될 수 있다. 따라서 외부 변수 ℓ 과 m 의 변화를 고려하면 퍼지모델의 전건부 변수는 상태변수로 표현되는 기존의 퍼지모델과 다르게 ℓ 과 m 으로 표현할 수 있다.

본 논문에서는 실험장치의 제원을 고려하여 ℓ 의 가능한 변화폭은 0.4 [m]에서 1.2 [m]로 가정하고, 퍼지 소속함수는 0.4 [m], 0.8 [m], 1.2 [m]와 가까운 경우 각각 LS(Length Short), LC(Length Center), LL(Length Long)로 정의하여 입력공간을 퍼지분할한다. 또한, m 의 가능한 변화폭은 0.2 [kg]에서 0.6 [kg]로 가정하고, 퍼지 소속함수는 0.2 [kg], 0.4 [kg], 0.6 [kg]과 가까운 경우 각각 ML(Mass Light), MC(Mass Center), MH(Mass Heavy)로 퍼지분할한다. 그러면 STS 크레인의 퍼지모델은 식 (3.30)과 같이 9개의 규칙으로 표현하는 것이 가능하다. 여기에서, F_1^i 와 F_2^i 는 각각 Table 3.3과 같은 의미를 가지는 전건부의 퍼지집합이다.

$$\begin{aligned}
 R^1 : & \text{ IF } \ell \text{ is } F_1^1 \text{ and } m \text{ is } F_2^1 \text{ THEN } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{P}^1 \mathbf{x} + \mathbf{Q}^1 u \\
 R^2 : & \text{ IF } \ell \text{ is } F_1^2 \text{ and } m \text{ is } F_2^2 \text{ THEN } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{P}^2 \mathbf{x} + \mathbf{Q}^2 u \\
 R^3 : & \text{ IF } \ell \text{ is } F_1^3 \text{ and } m \text{ is } F_2^3 \text{ THEN } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{P}^3 \mathbf{x} + \mathbf{Q}^3 u \\
 R^4 : & \text{ IF } \ell \text{ is } F_1^4 \text{ and } m \text{ is } F_2^4 \text{ THEN } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{P}^4 \mathbf{x} + \mathbf{Q}^4 u \\
 R^5 : & \text{ IF } \ell \text{ is } F_1^5 \text{ and } m \text{ is } F_2^5 \text{ THEN } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{P}^5 \mathbf{x} + \mathbf{Q}^5 u \\
 R^6 : & \text{ IF } \ell \text{ is } F_1^6 \text{ and } m \text{ is } F_2^6 \text{ THEN } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{P}^6 \mathbf{x} + \mathbf{Q}^6 u \\
 R^7 : & \text{ IF } \ell \text{ is } F_1^7 \text{ and } m \text{ is } F_2^7 \text{ THEN } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{P}^7 \mathbf{x} + \mathbf{Q}^7 u \\
 R^8 : & \text{ IF } \ell \text{ is } F_1^8 \text{ and } m \text{ is } F_2^8 \text{ THEN } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{P}^8 \mathbf{x} + \mathbf{Q}^8 u \\
 R^9 : & \text{ IF } \ell \text{ is } F_1^9 \text{ and } m \text{ is } F_2^9 \text{ THEN } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{P}^9 \mathbf{x} + \mathbf{Q}^9 u
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

Table 3.3 Description of premise fuzzy sets

M_1^i	Description	M_2^i	Description
F_1^1	LS(Length Short)	F_2^1	ML(Mass Light)
F_1^2	LS(Length Short)	F_2^2	MC(Mass Center)
F_1^3	LS(Length Short)	F_2^3	MH(Mass Heavy)
F_1^4	LC(Length Center)	F_2^4	ML(Mass Light)
F_1^5	LC(Length Center)	F_2^5	MC(Mass Center)
F_1^6	LC(Length Center)	F_2^6	MH(Mass Heavy)
F_1^7	LL(Length Long)	F_2^7	ML(Mass Light)
F_1^8	LL(Length Long)	F_2^8	MC(Mass Center)
F_1^9	LL(Length Long)	F_2^9	MH(Mass Heavy)

3.4.3 퍼지모델의 소속함수

STS 크레인의 비선형 하역시스템이 식 (3.30)과 같은 퍼지모델로 표현되면, 적절한 소속함수를 정의하여 전건부 입력변수들의 공간을 퍼지분할함으로써 퍼지모델이 비선형 하역시스템의 동역학적 특성에 가까워지도록 한다[60-61].

본 논문에서는 Table 3.3과 같은 퍼지집합의 퍼지분할에 사용하는 소속함수로써 외부 변수 ℓ 과 m 모두에 대해 사다리꼴 형태와 삼각형 형태를 사용한다. 이때, 바깥쪽에 해당하는 외부(exterior) 퍼지집합에는 사다리꼴 형태의 소속함수를, 안쪽에 해당하는 내부(interior) 퍼지집합에는 삼각형 형태의 소속함수를 사용한다.

식 (3.31)은 사다리꼴 형태의 소속함수를 의미하며, Fig. 3.6은 이 소속함수를 나타낸 것이다.

$$\text{Trap_mf}(M_j^i) = \begin{cases} \frac{v_i^j - a_{ij}}{b_{ij} - a_{ij}} & , a_{ij} \leq v_i^j \leq b_{ij} \\ 1 & , b_{ij} \leq v_i^j \leq c_{ij} \\ \frac{d_{ij} - v_i^j}{d_{ij} - c_{ij}} & , c_{ij} \leq v_i^j \leq d_{ij} \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.31)$$

여기에서, {a, b, c, d}는 사다리꼴 소속함수의 각 꼭지점 위치를 나타낸다.

식 (3.32)는 삼각형 형태의 소속함수를 의미하며, Fig. 3.7은 이 소속함수를 나타낸 것이다.

$$\text{Tri_mf}(M_j^i) = \begin{cases} \frac{z_i^j - o_{ij}}{p_{ij} - o_{ij}} & , o_{ij} \leq z_i^j \leq p_{ij} \\ \frac{q_{ij} - z_i^j}{q_{ij} - p_{ij}} & , p_{ij} \leq z_i^j \leq q_{ij} \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.32)$$

여기에서, {o, p, q}는 삼각형 소속함수의 왼쪽, 중앙, 오른쪽 꼭지점 위치를 의미한다.

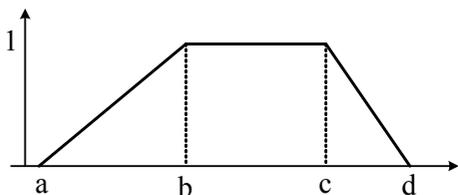


Fig. 3.6 Trapezoidal membership function

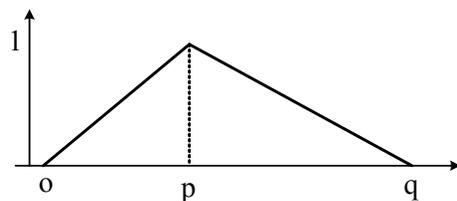


Fig. 3.7 Triangle membership function

제 4 장 항만용 STS 크레인의 제어기 설계

제어 알고리즘의 대부분은 시스템의 주요 동작점 부근에서 얻어진 선형모델에 근거하여 설계된다. 그러나 항만용 STS(ship-to-shore) 크레인은 앞에서 설명한 것과 같이 조종 중에 시스템의 파라미터가 변하므로 제3장에서 얻은 선형모델을 사용하여 설계한 제어기로는 원하는 제어 목적을 달성하기가 매우 곤란하다. 따라서 본 장에서는 STS 크레인이 조종에 따른 파라미터 변화에 효과적으로 대응할 수 있는 적응 퍼지제어기를 설계한다. 이 제어기는 제3장에서 설명한 퍼지모델의 각 서브시스템에 대해 PI형 상태피드백제어기, 즉 서브제어기(sub-controller)를 설계하고, 이를 퍼지모델에 사용한 소속함수를 이용하여 퍼지결합함으로써 얻어진다. 제어기는 STS 크레인의 제어특성, 즉 트롤리의 신속한 목표위치 도착, 목표위치 도착 시 도착지점 이탈금지 및 화물의 흔들림 신속제어, 시스템 구동 시 과도한 제어입력 금지, 돌발적 외란 발생 시 화물의 흔들림 신속제어 등을 고려하여 설계한다.

4.1 상태피드백제어기 설계

본 절에서는 4.2절에서 제안하고자 하는 적응 퍼지제어기 설계를 위해 퍼지모델의 전건부에 해당하는 서브시스템에 대한 상태피드백제어기의 설계방법에 대해 살펴본다. 상태피드백제어는 조정기(regulator) 문제와 추종제어(tracking control) 문제로 구분할 수 있으며, 여기에서는 먼저 일반적으로 폭넓게 적용되는 조정기 설계방법을 확인한 후 추종제어가 가능한 PI형 상태피드백제어기 설계문제로 확장하기로 한다.

4.1.1 최적 상태피드백제어기

퍼지모델의 후건부에는 식 (4.1)과 같은 서브시스템이 주어진다.

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{P}\mathbf{x} + \mathbf{Q}u \\ y &= \mathbf{S}\mathbf{x}\end{aligned}\tag{4.1}$$

여기에서, $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ 는 크레인 하역시스템의 상태벡터, $y(t) \in \mathbb{R}$ 는 트롤리의 위치로 정의되는 출력, $u(t) \in \mathbb{R}$ 는 구동모터에 인가되는 제어입력이다. 서브시스템의 행렬 P, Q, S 는 각각 $P \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$, $Q \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$, $S \in \mathbb{R}^{1 \times 4}$ 의 차원을 갖는다. 상태피드백제어기를 설계하기 위해서는 행렬쌍 (P, Q) 가 가제어(controllable)해야 하며, 이를 위하여 구성되는 가제어성 판별행렬은 제어가 가능한지 판별하는 행렬로써 다음과 같이 정의된다.

$$C_M = [Q \quad PQ \quad P^2Q \quad \dots \quad P^{n-1}Q] \quad (4.2)$$

이 행렬의 구성벡터가 모두 선형독립(linearly independent)이면, 다시 말해 $\text{rank}(C_M) = n$ 을 만족하면 제어가 가능하다고 판단하며, 상태피드백제어기를 설계할 수 있다. 본 절에서는 우선 최적 상태피드백제어기를 설계하는 방법을 살펴본다. 최적제어란 제어대상의 상태변수와 제어입력이 만들어 내는 제어결과를 평가하고, 가장 좋은 평가결과를 유지하면서 제어목적을 달성하는 방법이다. 따라서 성능지수를 최소화시키는 이득을 구하여 이를 제어입력으로 사용한다. 이를 위해 2차 형식의 평가함수를 정의하여 이를 최소화시키는 이득을 갖는 상태피드백 제어법칙을 다음과 같이 결정한다.

$$u = -Kx \quad (4.3)$$

여기에서, K 는 상태피드백 이득행렬이다.

4.1.2 PI형 상태피드백제어기

식 (4.3)으로 주어지는 제어법칙은 1형 시스템(type 1 system)인 제어대상의 조정기 문제와 추종제어 문제에 모두 적용할 수 있다. 한편, 3.3절에서 유도한 STS 크레인의 선형모델은 1형 시스템이므로 식 (4.3)의 제어법칙을 적용하면 조정기 문제뿐만 아니라 추종제어도 가능하다. 그러나 계단상의 외란이나 잡음이 존재하는 환경을 고려하여 출력이 정상상태오차 없이 기준입력에 잘 추종할 수 있도록 적분기를 추가하여 입력과 출력의 오차를 적분하는 PI형 상태피드백제어기를 적용한다[62-64]. 적분기를 추가하기 위해 식 (4.4)와 같이 새로운 오차변수 z 를 정의한다.

$$z = \int (y - y_r) dt \quad (4.4a)$$

$$\dot{z} = y - y_r \quad (4.4b)$$

식 (4.4)의 적분기를 식 (4.1)의 서브시스템에 결합하여 확장시스템을 유도한다. 이 확장시스템의 동역학은 식 (4.5)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P} & \mathbf{0} \\ \mathbf{S} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ 0 \end{bmatrix} u - \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{bmatrix} y_r \quad (4.5)$$

식 (4.5)의 각 요소에 $\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \dot{\mathbf{x}}_c$, $\begin{bmatrix} \mathbf{P} & \mathbf{0} \\ \mathbf{S} & 0 \end{bmatrix} = \mathbf{P}_c$, $\begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{x}_c$, $\begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{Q}_c$, $\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_c$ 를 대입하여 정리하면 다음과 같이 간단히 표시된다.

$$\dot{\mathbf{x}}_c = \mathbf{P}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{Q}_c u - \mathbf{T}_c y_r \quad (4.6)$$

확장시스템에 근거하여 2차 형식의 평가함수를 정의하고 이를 최소화시키면서 확장시스템을 점근적으로 안정하게 만드는 상태피드백 제어입력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u = -\mathbf{K} \mathbf{x}_c \quad (4.7)$$

$$= -\mathbf{K}_1 \mathbf{x} + k_2 \int (y_r - y) dt$$

여기에서, $\mathbf{K} = [\mathbf{K}_1 \quad k_2]$ 는 상태피드백 이득행렬이다.

식 (4.7)에서 확인할 수 있듯이 상태피드백 제어입력은 비례와 적분 기능을 동시에 가지고 있으며, 이를 PI형 상태피드백제어기라 한다. PI형 상태피드백제어기를 적용한 제어시스템은 Fig. 4.1과 같으며, 적분기가 앞쪽 경로에 포함되어 있는 것을 확인할 수 있다. PI형 상태피드백 제어시스템은 새로운 오차변수 z 가 추가됨으로써 전체 시스템의 차수가 증가하는 단점은 있지만 기준입력과 출력 사이를 비교함으로써 출력을 기준입력에 잘 도달하게 하고, 이는 정상상태오차를 감소시키는 역할을 하게 된다.

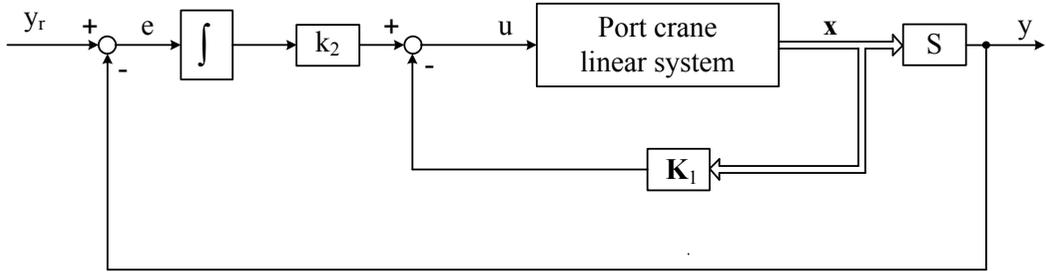


Fig. 4.1 PI-type state feedback control system for port crane linear system

본 논문에서는 식 (4.7)의 상태피드백 이득행렬 $K = [K_1 \quad k_2]$ 를 결정하기 위해서 Riccati 방정식의 해행렬을 구하는 대신 Fig. 4.2와 같이 유전알고리즘을 이용하여 이득을 탐색하는 방법을 사용한다. 제3장에서 설명한 것과 같이 유전알고리즘에는 진화를 진행하면서 집단 내부의 우열을 판단하기 위한 목적함수가 있어야 한다. 이때, 사용하는 목적함수는 2차 형식이 사용되며, 이를 통해 앞에서 설명한 기존의 상태피드백 제어기법과 일관성을 유지할 수 있다. 목적함수를 계산하기 위한 최종 적분시간은 사용자가 시스템의 특성 및 연산시간을 고려하여 적절하게 선택해야 한다. 유전알고리즘의 목적함수에서 하중행렬과 하중계수는 상태벡터와 제어입력의 상대적 중요성에 근거하여 원하는 제어응답을 나타내도록 선정[65]한다.

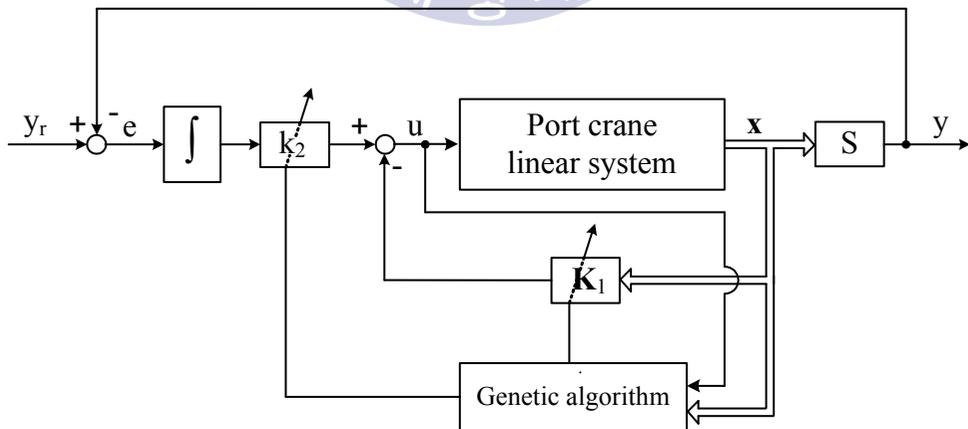


Fig. 4.2 Optimization of state feedback gain using genetic algorithm

4.2 적응 퍼지제어기 설계

제3장에서 STS 크레인의 퍼지모델은 호이스트 와이어로프의 길이 ℓ 과 컨테이너의 질량 m 에 따라 다음과 같이 주어졌다.

$$\text{IF } \ell \text{ is } F_1^i \text{ and } m \text{ is } F_2^i \quad (4.8)$$

$$\text{THEN } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{P}^i \mathbf{x} + \mathbf{Q}^i u, \text{ for } i = 1, 2, \dots, 9$$

이를 PI형 상태피드백 제어형태로 가져가기 위하여 식 (4.4)에서 정의한 오차변수 z 를 사용하면, 다음과 같은 확장 퍼지모델을 얻을 수 있다.

$$\text{IF } \ell \text{ is } F_1^i \text{ and } m \text{ is } F_2^i \quad (4.9)$$

$$\text{THEN } \dot{\mathbf{x}}_c = \mathbf{P}_c^i \mathbf{x}_c + \mathbf{Q}_c^i u - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_r, \text{ for } i = 1, 2, \dots, 9$$

단, $\mathbf{x}_c = [\mathbf{x}^T \ z]^T \in \mathbb{R}^{5 \times 1}$, $\mathbf{P}_c^i = \begin{bmatrix} \mathbf{P}^i & 0 \\ \mathbf{S} & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{Q}_c^i = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^i \\ 0 \end{bmatrix}$ 이다.

원래의 각 서브시스템이 제어가 가능하고, $\text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^i & \mathbf{P}^i \\ 0 & \mathbf{S} \end{bmatrix} = n+1$ 의 관계가 만족되면 확장 퍼지시스템도 제어가 가능하므로 확장 퍼지시스템의 추론 결과는 식 (4.10)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_c &= \frac{\sum_{i=1}^9 \rho^i \left(\mathbf{P}_c^i \mathbf{x}_c + \mathbf{Q}_c^i u - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_r \right)}{\sum_{i=1}^9 \rho^i} \\ &= \left(\sum_{i=1}^9 \xi^i \mathbf{P}_c^i \right) \mathbf{x}_c + \left(\sum_{i=1}^9 \xi^i \mathbf{Q}_c^i \right) u - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_r \end{aligned} \quad (4.10)$$

확장 퍼지시스템에 식 (4.7)로 주어지는 제어규칙을 적용하면, 확장 퍼지시스템의 다음과 같이 표현되는 i 번째 제어입력을 통해 시스템을 점점 더 안정하게 만드는 것이 가능하다.

$$\begin{aligned} \text{IF } \ell \text{ is } F_1^i \text{ and } m \text{ is } F_2^i \\ \text{THEN } u^i &= -\mathbf{K}^i \mathbf{x}_c \\ &= -\mathbf{K}_1^i \mathbf{x} + k_2^i \int (y_r - y) dt, \text{ for } i = 1, 2, \dots, 9 \end{aligned} \quad (4.11)$$

여기에서, $\mathbf{K}^i = [\mathbf{K}_1^i \quad k_2^i]$ 는 i 번째 규칙에 해당하는 상태피드백제어기의 이득행렬로써 극배치법, 최적제어기법 등으로 계산이 가능[66]하다. 하지만 본 논문에서는 3.1절에서 설명한 유전알고리즘으로 이득행렬을 탐색하여 얻는 방법을 사용한다. 따라서 퍼지제어기의 출력은 식 (4.12)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} u &= \frac{\sum_{i=1}^9 \rho^i u^i}{\sum_{i=1}^9 \rho^i} = \sum_{i=1}^9 \xi^i u^i = \sum_{i=1}^9 \xi^i (-\mathbf{K}^i \mathbf{x}_c) \\ &= \sum_{i=1}^9 \xi^i \left(-\mathbf{K}_1^i \mathbf{x} + k_2^i \int (y_r - y) dt \right), \text{ for } i = 1, 2, \dots, 9 \end{aligned} \quad (4.12)$$

식 (4.11)로 표현되는 제어방법은 병렬분산보상기(parallel distributed compensator)의 확장개념으로 볼 수 있다. 이 기법은 Tanaka 등[67]이 처음으로 제안하였으며, 후건부의 상태피드백제어기를 퍼지모델에 사용한 소속함수를 이용하여 퍼지결합하는 방식이다.

본 논문에서도 병렬분산보상기의 개념을 확장 퍼지시스템에 적용하기로 하며, 이를 확장형 병렬분산보상기(extended parallel distributed compensator)로 제시하고자 한다. 이를 도식적으로 나타낸 것이 Fig. 4.3이다. 다만, 제3장에서 확인할 수 있듯이 STS 크레인의 비선형 모델이 유도되었기 때문에 실제 퍼지제어기는 퍼지모델이 아닌 비선형 모델에 적용하기로 한다.

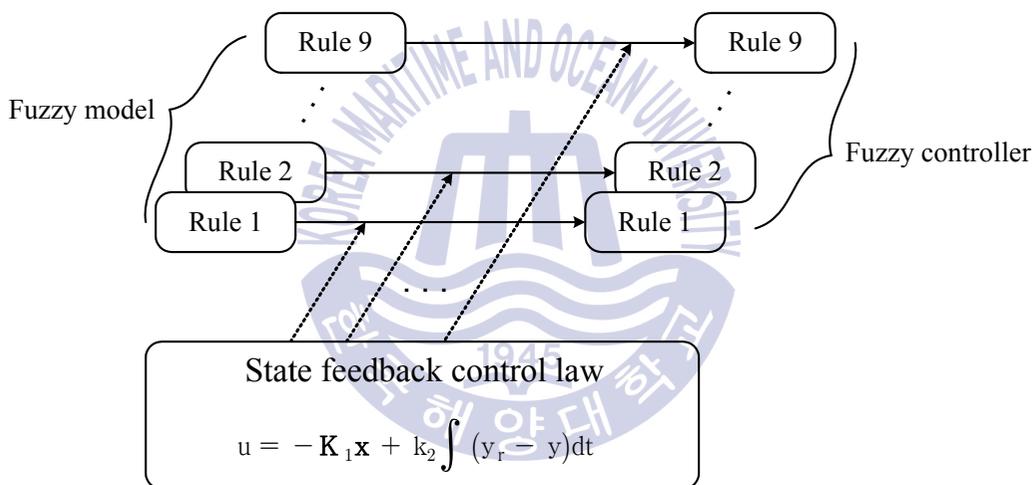
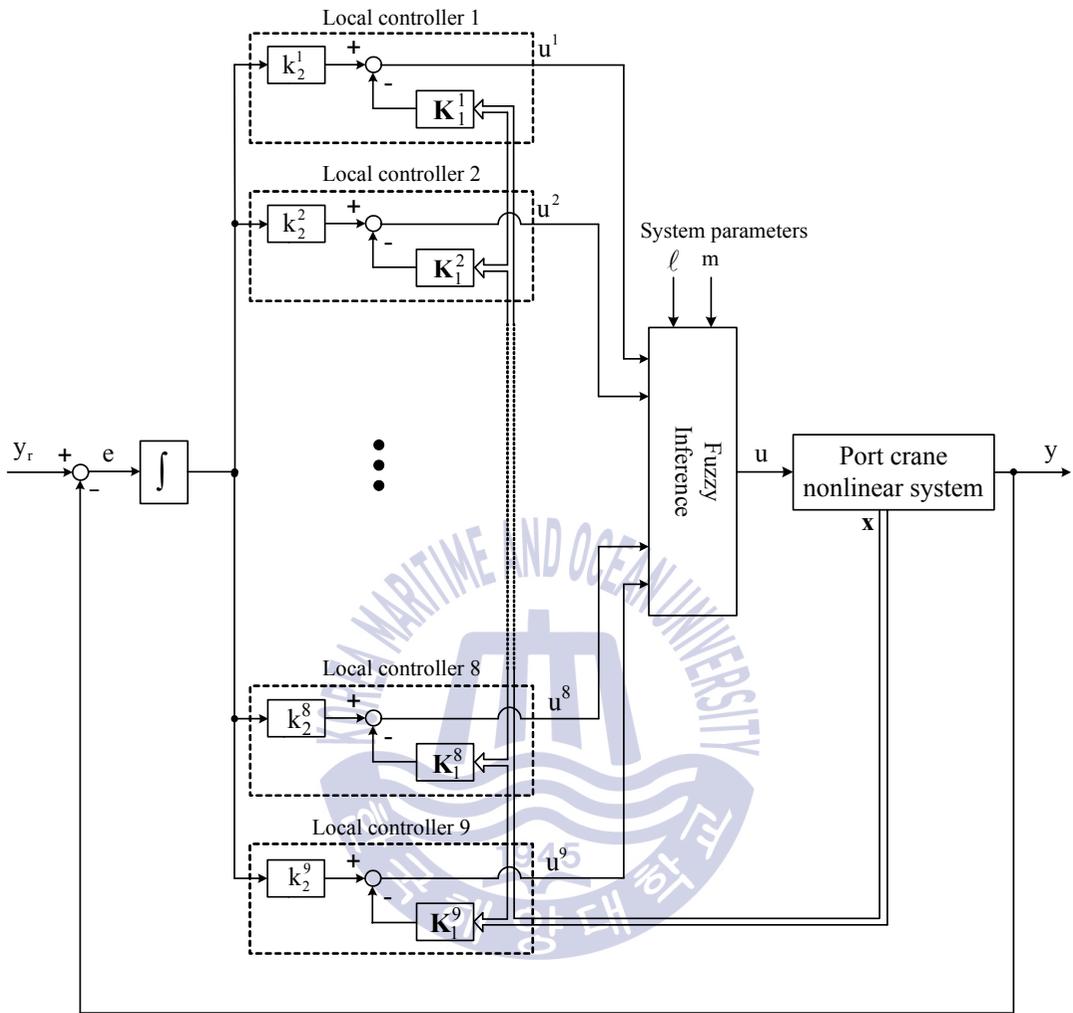


Fig. 4.3 Parallel distributed compensator

이때, 병렬분산보상기의 개념을 그대로 유지하기 위해 제3장의 퍼지모델에 사용한 소속함수를 퍼지제어기에도 동일하게 사용[68-73]한다. 이렇게 함으로써 퍼지모델과 퍼지제어기 사이에 일관성을 유지할 수 있다.

확장형 병렬분산보상기를 적용한 적응 퍼지제어기를 STS 크레인의 하역시스템에 결합한 제어시스템은 Fig .4.4와 같다. 제안된 제어기는 퍼지모델의 각 서브시스템에 적합하게 설계된 서브제어기를 퍼지모델에 사용된 소속함수를 이용하여 퍼지결합함으로써 만들어 진다.



vector \Rightarrow
 scalar \rightarrow

Fig. 4.4 Schematic diagram of the proposed GA-based Adaptive fuzzy controller

제 5 장 시뮬레이션 및 검토

제2장에서는 본 논문에서 제어대상으로 고려하는 항만용 크레인에 대한 개요를 살펴 보았다. 제3장에서는 제어기 설계에 사용되는 유전알고리즘과 퍼지이론을 설명하였으며, 제어기 설계를 위한 선행단계로 라그랑지 방정식을 이용하여 항만용 STS 크레인의 비선형 및 선형 수학적 모델을 유도하였다. 또한, 외부 변수(파라미터)인 호이스트 와이어로프의 길이와 컨테이너의 질량을 변화시킨 9개의 서브시스템(선형모델)을 얻고, 이를 퍼지규칙으로 결합하는 퍼지모델링 기법을 제안하였다. 제4장에서는 제3장에서 얻은 9개의 서브시스템에 대해 오차변수를 도입한 PI형 상태피드백제어기를 이론적으로 유도하였고, 유전알고리즘을 이용하여 제어이득을 탐색하는 기법을 설명하였다. 또한, 확장형 병렬분산보상기를 적용한 적응 퍼지제어기를 설계하였다.

따라서 제5장에서는 제안된 STS 크레인의 퍼지모델, 유전알고리즘에 기초한 PI형 상태피드백제어기 및 적응 퍼지제어기 설계기법을 제3장에서 유도한 항만용 STS 크레인의 비선형시스템에 적용하여 그 유효성을 검증한다.

5.1 퍼지모델의 적합성 검토

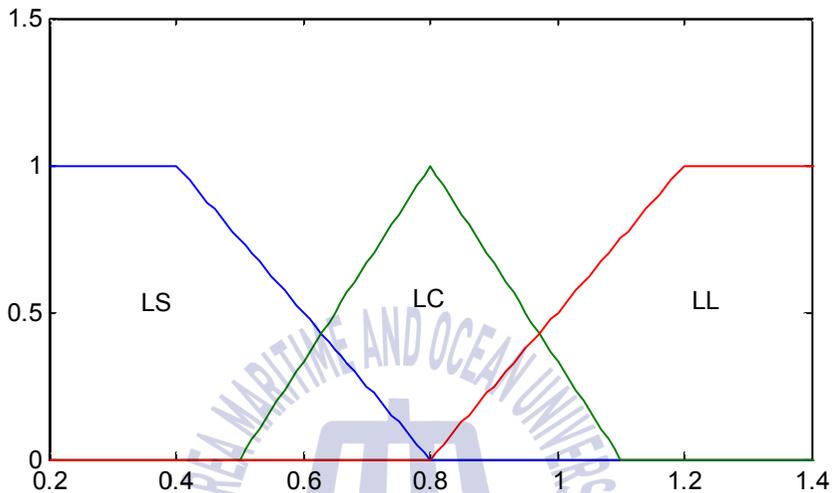
본 절에서는 제3장에서 설명한 STS 크레인의 퍼지모델을 검증하도록 한다. 이를 위해 우선 외부 변수로 고려한 호이스트 와이어로프의 길이 ℓ 과 컨테이너의 질량 m 의 변화에 따른 서브시스템(선형모델)을 도출한다. 제3장에서 이미 ℓ 의 가능한 변화폭은 0.4[m] ~ 1.2[m]로, m 의 가능한 변화폭은 0.2[kg] ~ 0.6[kg]으로 가정하였다.

이때, ℓ 이 0.4[m], 0.8[m], 1.2[m]와 가까운 경우에는 각각 LS(Length Short), LC(Length Center), LL(Length Long)의 소속함수로, m 이 0.2[kg], 0.4[kg], 0.6[kg]과 가까운 경우에는 각각 ML(Mass Light), MC(Mass Center), MH(Mass Heavy)의 소속함수로 정의하여 입력공간을 퍼지분할 하였으므로, 이 대표적인 값을 고려하면 9개의 서브시스템을 Table 5.1과 같이 구할 수 있다.

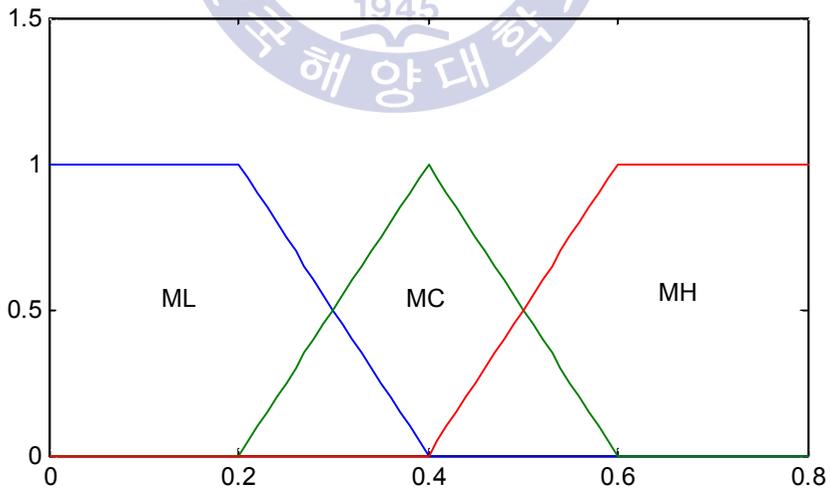
Table 5.1 Subsystems for fuzzy model

Subsystem matrix		system parameter change
$P^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1.953 & -19.815 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -22.057 & -37.153 & -0.2 \end{bmatrix}$	$Q^1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.288 \\ 0 \\ 4.291 \end{bmatrix}$	$\ell = 0.4$ [m] $m = 0.2$ [kg]
$P^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -3.664 & -18.582 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -25.265 & -34.841 & -0.12 \end{bmatrix}$	$Q^2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.146 \\ 0 \\ 4.024 \end{bmatrix}$	$\ell = 0.4$ [m] $m = 0.4$ [kg]
$P^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -5.174 & -17.492 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -28.095 & -32.798 & 0 \end{bmatrix}$	$Q^3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.02 \\ 0 \\ 3.788 \end{bmatrix}$	$\ell = 0.4$ [m] $m = 0.6$ [kg]
$P^4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1.953 & -19.815 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -11.028 & -18.576 & 0 \end{bmatrix}$	$Q^4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.288 \\ 0 \\ 2.145 \end{bmatrix}$	$\ell = 0.8$ [m] $m = 0.2$ [kg]
$P^5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -3.664 & -18.582 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -12.632 & -17.42 & 0 \end{bmatrix}$	$Q^5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.146 \\ 0 \\ 2.012 \end{bmatrix}$	$\ell = 0.8$ [m] $m = 0.4$ [kg]
$P^6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -5.174 & -17.492 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -14.047 & -16.399 & 0 \end{bmatrix}$	$Q^6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.02 \\ 0 \\ 1.894 \end{bmatrix}$	$\ell = 0.8$ [m], $m = 0.6$ [kg]
$P^7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1.953 & -19.815 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -7.352 & -12.384 & 0 \end{bmatrix}$	$Q^7 = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.288 \\ 0 \\ 1.43 \end{bmatrix}$	$\ell = 1.2$ [m] $m = 0.2$ [kg]
$P^8 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -3.664 & -18.581 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -8.422 & -11.614 & 0 \end{bmatrix}$	$Q^8 = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.146 \\ 0 \\ 1.341 \end{bmatrix}$	$\ell = 1.2$ [m] $m = 0.4$ [kg]
$P^9 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -5.174 & -17.492 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -9.365 & -10.932 & 0 \end{bmatrix}$	$Q^9 = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.02 \\ 0 \\ 1.262 \end{bmatrix}$	$\ell = 1.2$ [m] $m = 0.6$ [kg]

퍼지모델의 소속함수는 제3장에서 설명한 것과 같이 STS 크레인 비선형시스템의 동역학적 특성에 접근할 수 있도록 Fig. 5.1과 같은 사다리꼴 형태와 삼각형 형태를 조합하여 사용한다.



a) Premise variables: hoisting wire rope



(b) Premise variables: container mass

Fig. 5.1 Membership functions for fuzzy model

이제 Table 5.1에 나타난 9개의 서브시스템과 Fig. 5.1의 소속함수로 구현되는 퍼지모델이 STS 크레인 비선형시스템의 동역학적 특성을 얼마나 잘 나타내는지 확인해보도록 한다. 이를 위해, 시스템에 제어가 결합되지 않은 상태에서 계단상의 입력을 인가하였으며, 호이스트 와이어로프의 길이 l 와 컨테이너의 질량 m 이 Fig. 5.2와 같이 앞에서 가정한 변화폭 내에서 사인과 형태로 변화하는 상황을 고려한다.

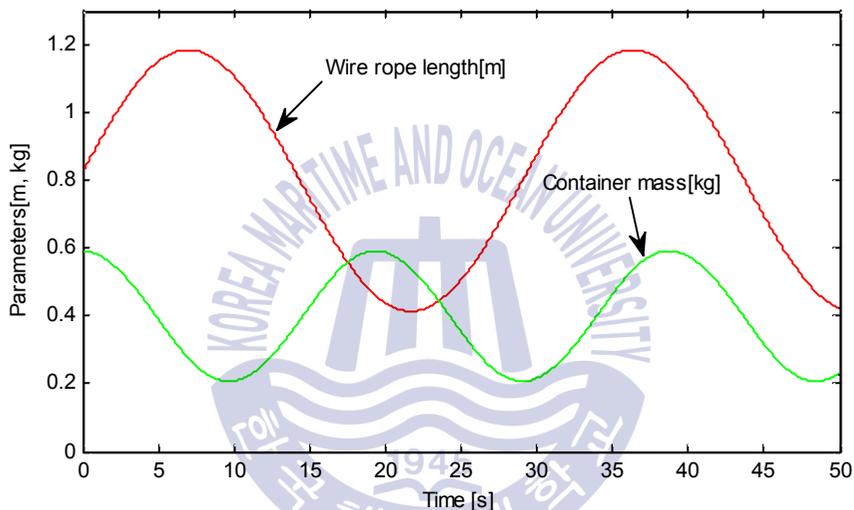
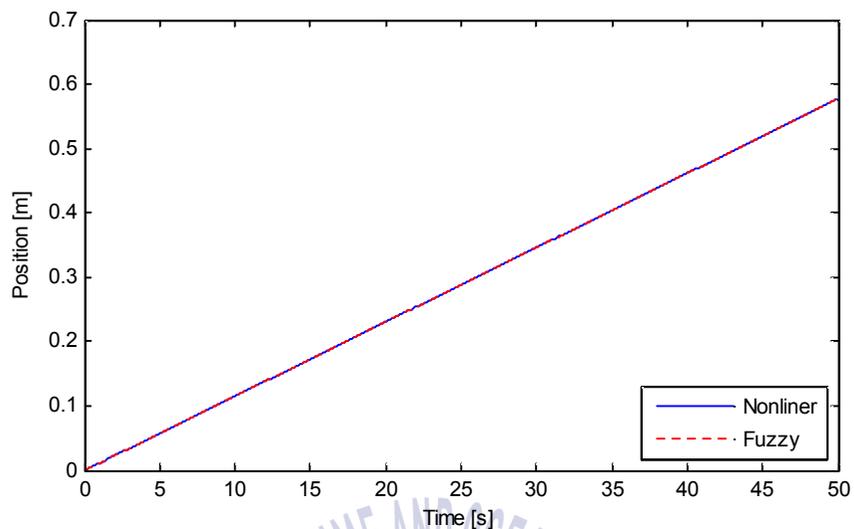


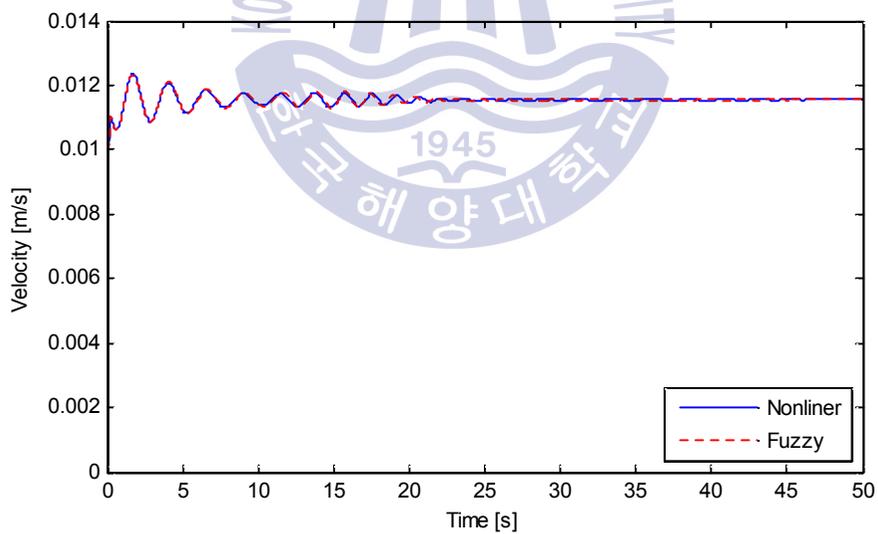
Fig. 5.2 Change of parameters(l & m)

Fig. 5.3은 계단입력의 인가에 따른 STS 크레인의 비선형시스템의 출력과 퍼지모델의 출력을 상태변수별로 나타낸 것이다. Fig. 5.3의 (a)는 트롤리 위치, (b)는 트롤리 속도, (c)는 컨테이너 흔들림 각도, (d)는 컨테이너 흔들림 각속도의 변화를 나타낸다. 계단입력을 인가하였기 때문에 트롤리 위치는 Fig. 5.3(a)와 같이 시간에 따라 지속적으로 증가하고 있으며, 컨테이너 흔들림 각도는 Fig. 5.3(c)와 같이 초기에 크게 흔들리고 이후 점점 감소하고 있다.

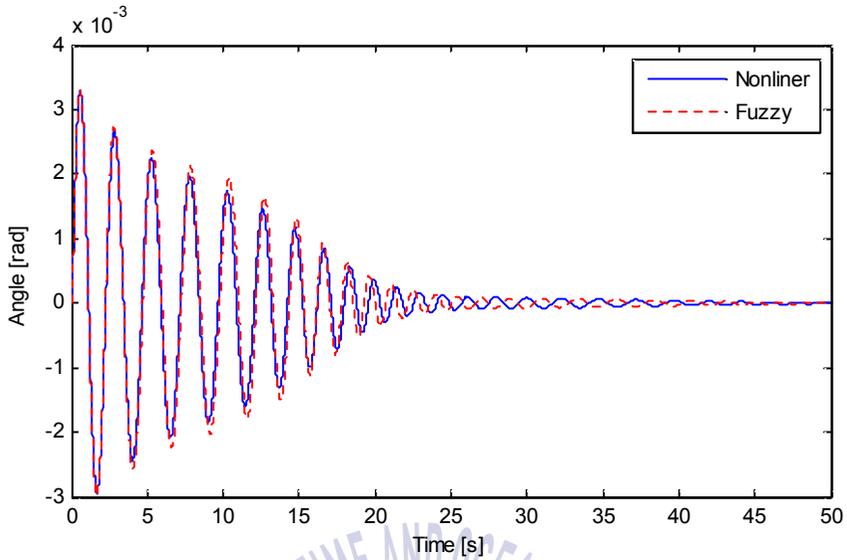
결론적으로 시스템에 제어가 결합되지 않은 상태에서 계단입력을 인가한 경우, 퍼지모델의 출력은 시스템의 외부 변수인 l 과 m 이 변화하는 상황에서 STS 크레인 비선형시스템의 동역학적 특성에 근사하게 접근한다는 것을 알 수 있다.



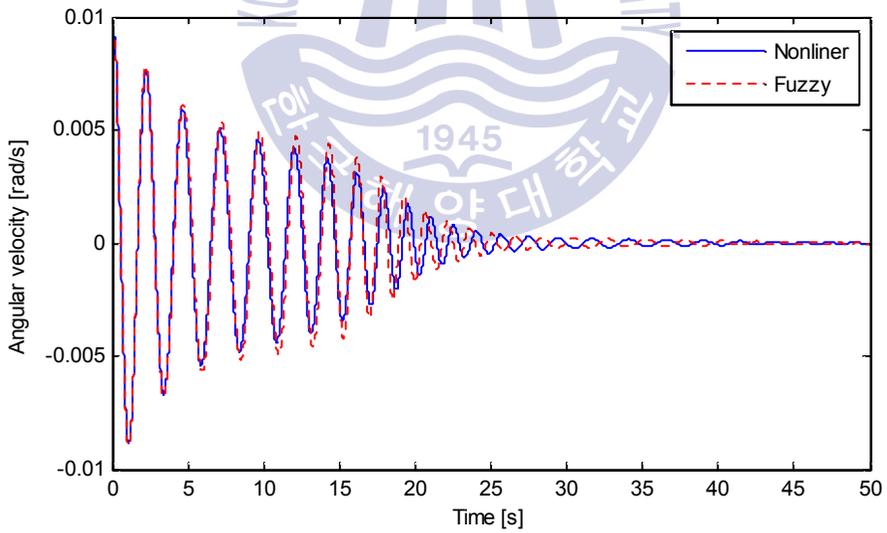
(a) Trolley position



(b) Trolley velocity



(c) Swing angle



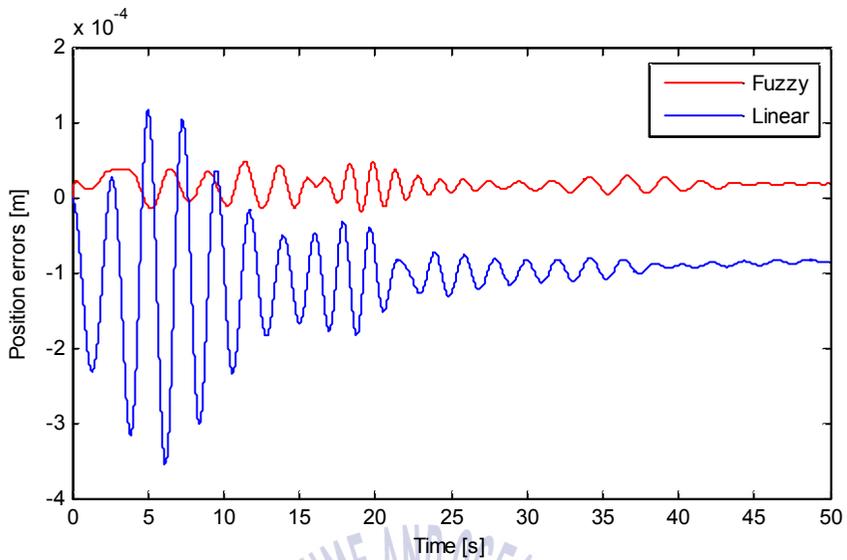
(d) Swing angular velocity

Fig. 5.3 Outputs of the nonlinear system and fuzzy model for the STS crane

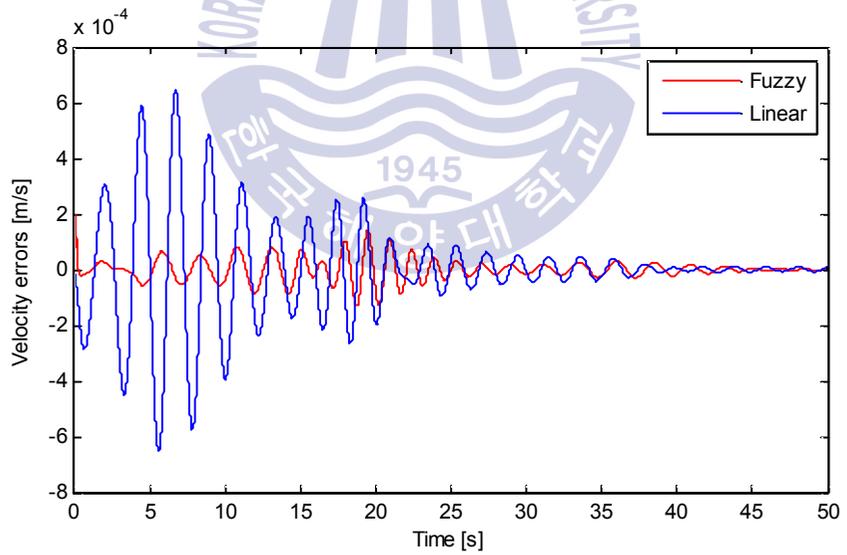
Fig. 5.4는 계단입력이 인가된 경우에 있어서 STS 크레인 비선형시스템의 출력과 퍼지모델의 출력, 비선형시스템의 출력과 선형모델(서브시스템)의 출력 사이의 오차를 비교하여 상태변수별로 나타낸 것이다. Fig. 5.4의 (a)는 트롤리 위치 오차, (b)는 트롤리 속도 오차, (c)는 컨테이너 흔들림 각도 오차, (d)는 컨테이너 흔들림 각속도 오차를 나타낸다. 비교 목적으로 선택한 서브시스템은 호이스트 와이어로프의 길이 및 컨테이너의 질량이 모두 변화폭의 가운데 값($\ell = 0.8$, $m = 0.4$)을 갖는 5번째 서브시스템이다.

Fig. 5.4 (a)에서 퍼지모델과 STS 크레인 비선형 시스템 사이의 트롤리 위치 오차는 미소하게 나타나고 있다. 한편, 다섯 번째 서브시스템은 STS 크레인 비선형시스템의 트롤리 위치 오차가 최대 $+1.2 \times 10^{-4}$ [m] ~ -2.4×10^{-4} [m] 정도 발생하고 있다. Fig. 5.4 (b)의 트롤리 속도 오차 역시 5번째 서브시스템 보다 퍼지모델이 더 작은 오차를 보이고 있다. Fig. 5.4 (c)의 컨테이너 흔들림 각도 오차에서도 확인할 수 있듯이 퍼지모델이 5번째 서브시스템 보다 STS 크레인 비선형시스템의 출력을 더 잘 모사하고 있다. 한편, 서브시스템은 컨테이너 흔들림 각도 오차가 최대 $\pm 3.8 \times 10^{-3}$ [rad] 정도 발생하고 있다. Fig. 5.4 (d)의 컨테이너 흔들림 각속도 오차도 퍼지모델이 서브시스템보다 더 작은 것을 확인할 수 있다.

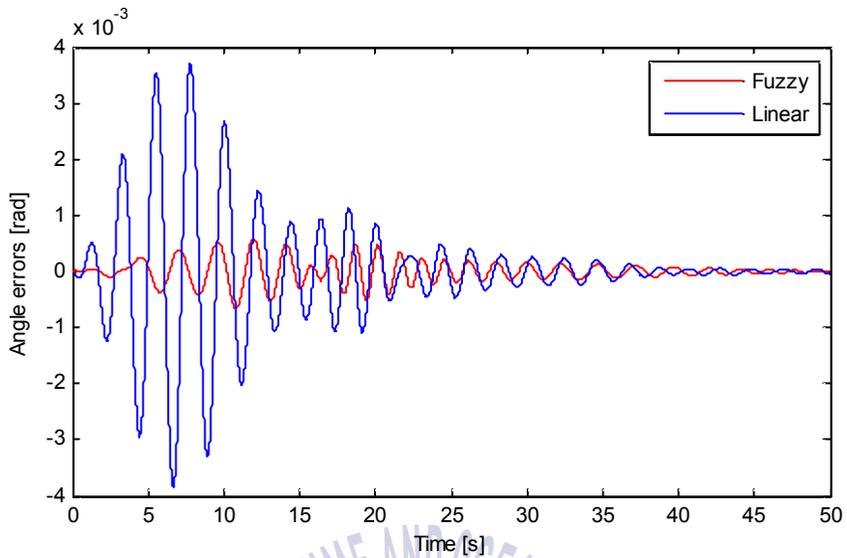
이는 결론적으로 하나의 서브시스템으로는 외부변수인 호이스트 와이어로프의 길이 ℓ 과 컨테이너의 질량 m 이 변하는 환경에서는 STS 크레인 비선형시스템의 출력과 일치하지 못한 다는 것을 의미한다. 반면 퍼지모델은 외부변수가 변화하는 경우에도 비선형 시스템의 출력을 잘 모사할 수 있어 비선형 시스템의 모델링이 어려운 경우 퍼지모델이 비선형 시스템을 대신할 수 있는 모델링 기법이라 할 수 있다.



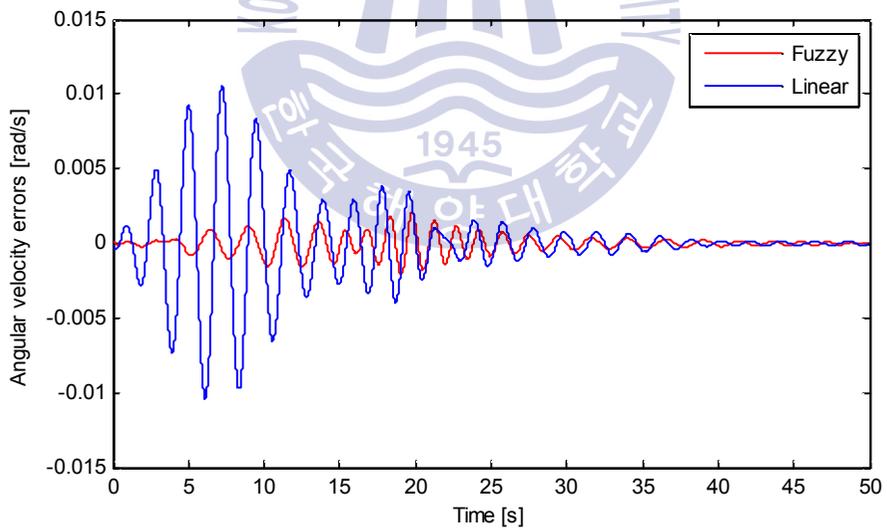
(a) Errors of trolley position



(b) Errors of trolley velocity



(c) Errors of swing angle



(d) Errors of swing angular velocity

Fig. 5.4 Errors of fuzzy model and linear model to nonlinear system

다음으로 Fig. 5.5와 같은 임의의 사인파조합 입력이 인가된 경우를 살펴보기로 한다. 최대입력전압은 ± 1.5 [V]를 초과하지 않는 범위로 설정하였다. Fig. 5.2와 같이 호이스트 와이어로프의 길이 l 과 컨테이너의 질량 m 은 앞에서 가정한 변화폭 내에서 사인파 형태로 변화하는 상황을 고려한다.

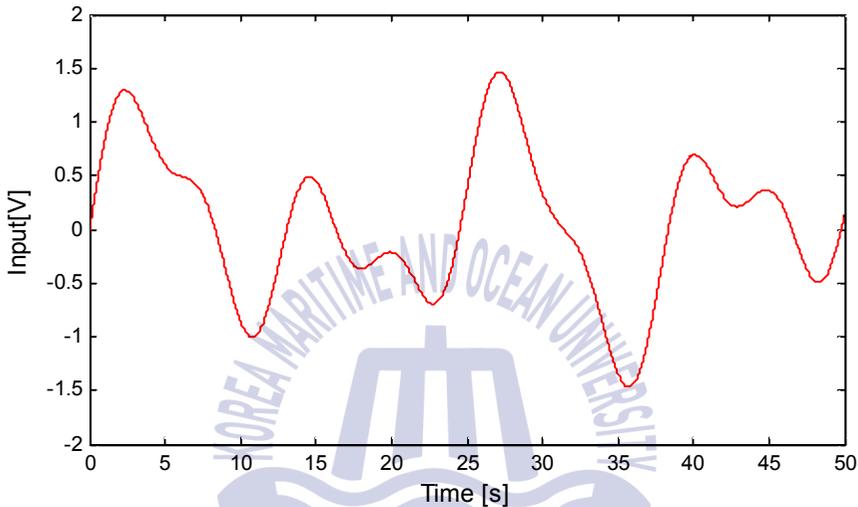
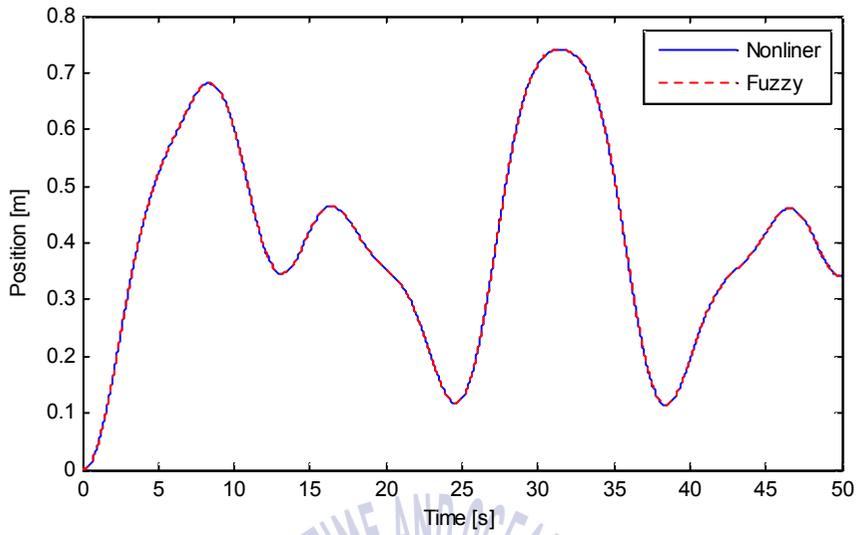


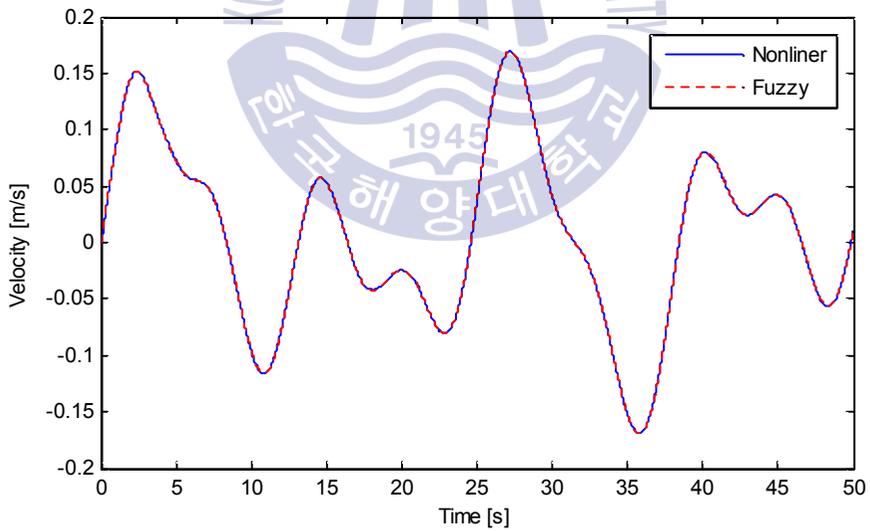
Fig. 5.5 Test input signal for validation of fuzzy model

Fig. 5.6은 임의입력의 인가에 따른 STS 크레인의 비선형시스템의 출력과 퍼지모델의 출력을 상태변수별로 나타낸 것이다. 임의입력을 인가 시 초기에 트롤리가 전·후진을 반복하고 있으며, 이로 인해 컨테이너의 흔들림이 좀 더 많이 발생하고 있다는 것을 보여주고 있다. 그럼에도 불구하고 퍼지모델의 출력은 STS 크레인 비선형시스템의 출력에 잘 근접하고 있으며, 특히 초기에 발생한 컨테이너의 급격한 흔들림에도 작은 오차범위 내에서 비선형시스템에 잘 접근하고 있다.

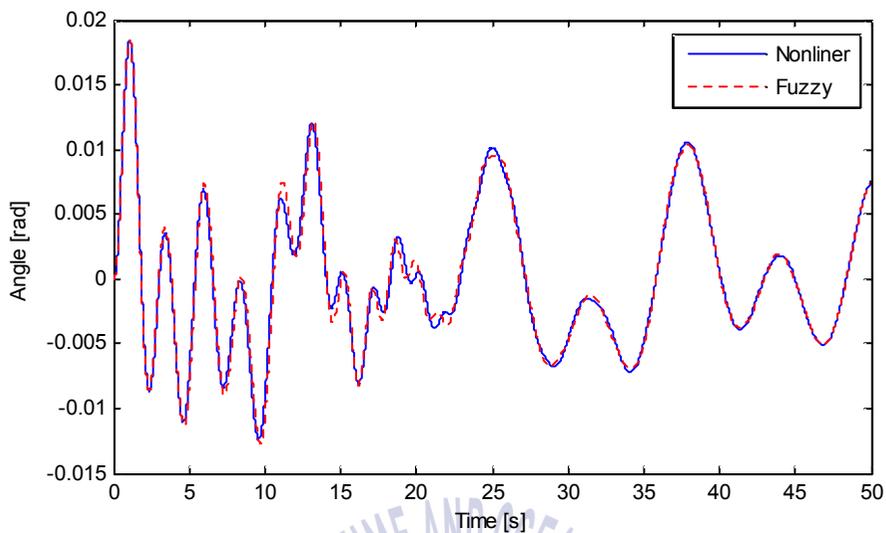
결론적으로 외부 변수인 l 과 m 이 변화하는 상태에서 시스템에 임의입력을 인가한 경우, 퍼지모델의 출력은 초기에 트롤리가 전·후진을 반복하고 컨테이너가 많이 흔들림에도 불구하고 작은 오차 범위 내에서 STS 크레인 비선형시스템의 출력에 잘 접근하고 있음을 알 수 있다.



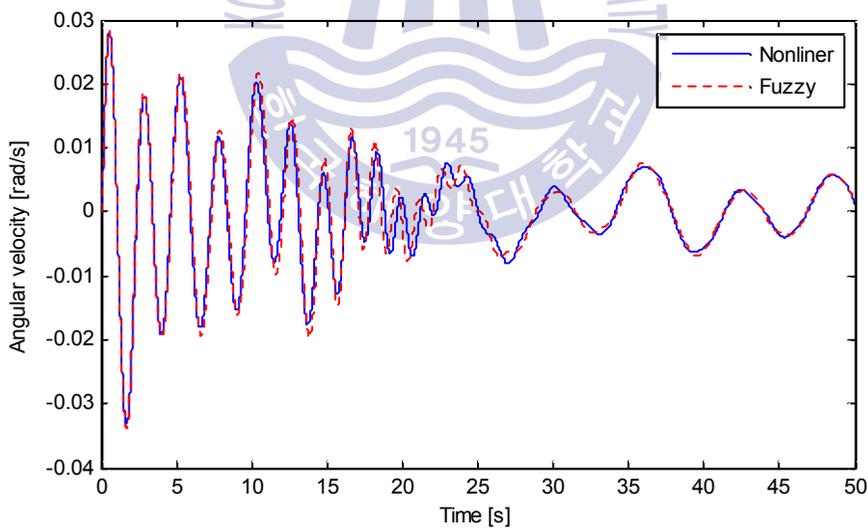
(a) Trolley position



(b) Trolley velocity



(c) Swing angle



(d) Swing angular velocity

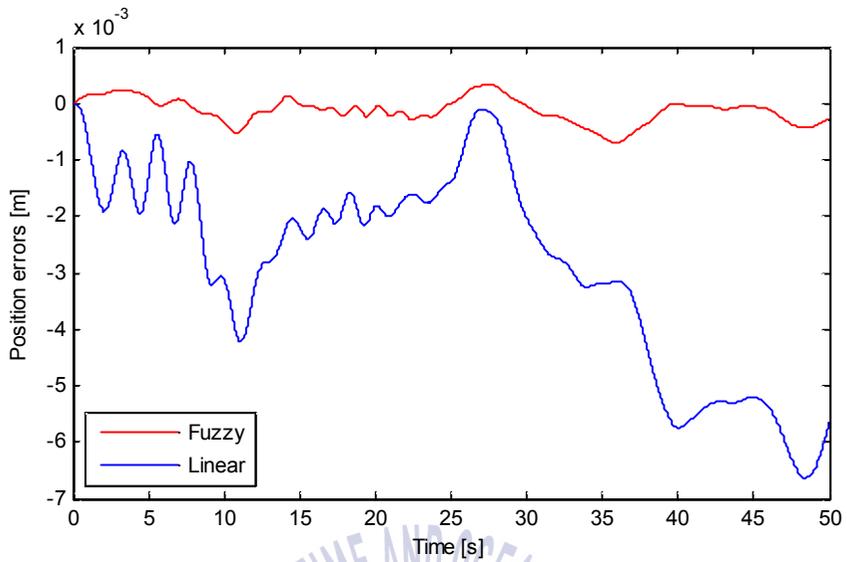
Fig. 5.6 Outputs of the nonlinear system and fuzzy model for the STS crane

Fig. 5.7은 임의입력이 인가된 경우에 있어서 STS 크레인 비선형시스템의 출력과 퍼지모델의 출력 사이의 오차, 비선형시스템의 출력과 선형모델(서브시스템)의 출력 사이의 오차를 비교하여 상태변수별로 나타낸 것이다. Fig. 5.7의 (a)는 트롤리 위치 오차, (b)는 트롤리 속도 오차, (c)는 컨테이너 흔들림 각도 오차, (d)는 컨테이너 흔들림 각속도 오차를 나타낸다. 비교 목적으로 선택한 5번째 서브시스템이다.

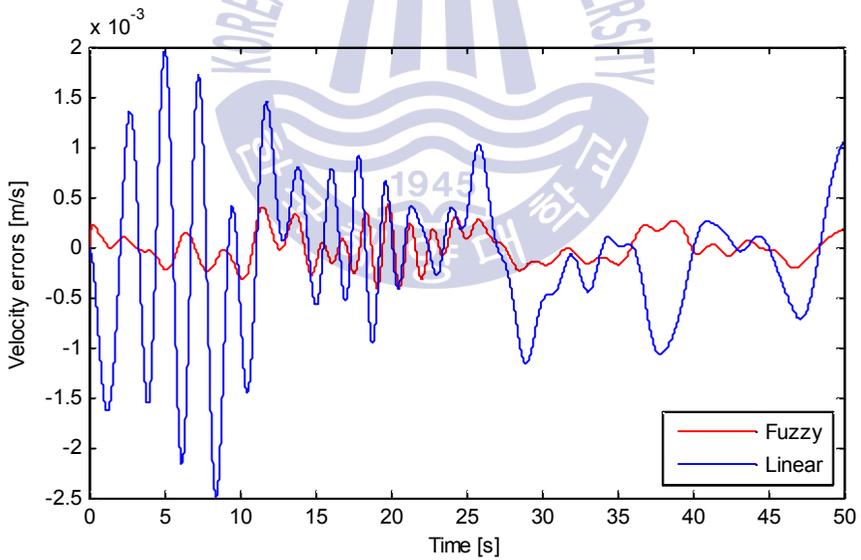
Fig. 5.7 (a)에서 퍼지모델의 출력은 STS 크레인 비선형시스템의 출력과의 오차가 미소하지만 5번째 서브시스템의 오차는 최대 -6.5×10^{-4} [m] 정도 발생하고 있다. 5.7 (b)의 트롤리 속도 오차 역시 퍼지모델이 5번째 서브시스템 보다 더 작은 오차를 보이고 있다. Fig. 5.7 (c)에서 퍼지모델의 출력은 STS 크레인 비선형시스템의 출력과의 오차가 미소하지만 5번째 서브시스템의 오차는 최대 $\pm 12.4 \times 10^{-3}$ [rad] 정도 발생하고 있다. Fig. 5.7 (d)의 컨테이너 흔들림 각속도 오차도 퍼지모델이 서브시스템보다 더 작은 것을 확인할 수 있다.

이는 앞의 계단상의 입력을 인가한 경우와 마찬가지로 하나의 서브시스템은 외부변수가 변하는 환경에서는 STS 크레인 비선형시스템의 출력과 일치하지 못한 다는 것을 확인할 수 있다. 반면 퍼지모델은 외부변수가 변화하는 경우에도 비선형 시스템의 출력을 잘 모사하는 결과를 나타내었다.

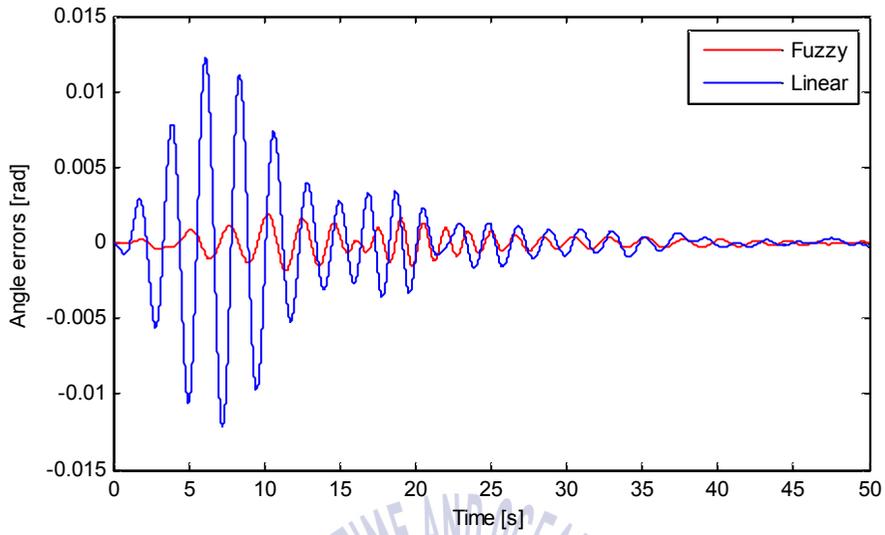
지금까지의 시뮬레이션을 통해 퍼지모델은 항만용 STS 크레인 비선형시스템의 외부변수(파라미터)인 호이스트 와이어로프의 길이 l 과 컨테이너의 질량 m 의 크기가 변해도 이 시스템의 동역학적 특성을 효과적으로 표현하는 것이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.



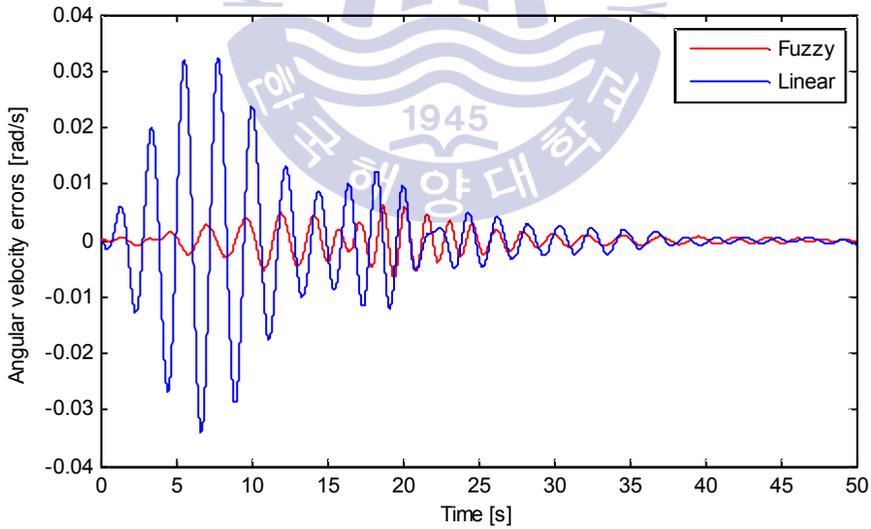
(a) Errors of trolley position



(b) Errors of trolley velocity



(c) Errors of swing angle



(d) Errors of swing angular velocity

Fig. 5.7 Errors of fuzzy model and linear model to nonlinear system

5.2 PI형 상태피드백제어기의 성능 검토

본 절에서는 적응 퍼지제어기를 구현하기에 앞서 4.1절에서 설명한 9개의 서브시스템에 대한 상태피드백제어기 이득행렬 $\mathbf{K} = [\mathbf{K}_1 \quad \mathbf{K}_2]$ 를 유전알고리즘으로 탐색하는 과정을 살펴본다.

5.2.1 유전알고리즘을 이용한 피드백 이득 탐색

유전알고리즘의 목적함수에서 하중행렬 \mathbf{W}_c , 하중계수 R_c 는 상태벡터와 제어입력의 상대적 중요성에 근거하여 원하는 제어응답을 나타내도록 선정하는데, 9개의 서브시스템에 대한 하중행렬과 하중계수는 다음과 같이 설정하였다.

$$\mathbf{W}_c = \text{diag}(55, 45, 10, 8, 6), \quad R_c = 2.5 \quad \text{for subsystem } 1 \sim 9 \quad (5.1)$$

유전알고리즘의 유전 연산자는 구배와 유사한 재생산, 수정단순교배, 동적돌연변이를 사용하였다. 또한, 탐색압(selection pressure)을 높이기 위하여 스케일링 윈도우법, 한 세대의 최적 개체 소멸을 방지하여 가장 강한 개체가 다음 세대로 전달되는 것을 보장하기 위해 엘리트전략을 사용하였다. 이와 함께 각 유전 연산자에 사용된 매개변수들을 Table 5.2에 정리하여 나타내었다.

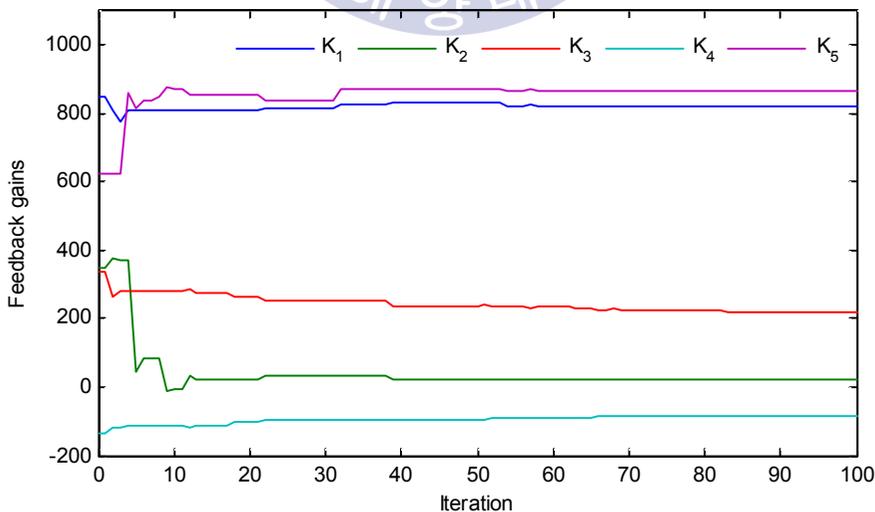
Table 5.2 Parameters of genetic algorithm operators

Operators		value
Selection	Gradient-like selection	-
	Selection efficient	1.8
Crossover	Arithmetical crossover	-
	Probability of crossover	0.9
Mutation	dynamic(non-uniform) mutation	5
	Probability of mutation	0.05
	Parameter determining the degree of non-uniformity.	5
Linear scaling window	scaling factor	1.7
Elitism	elitism strategy	-

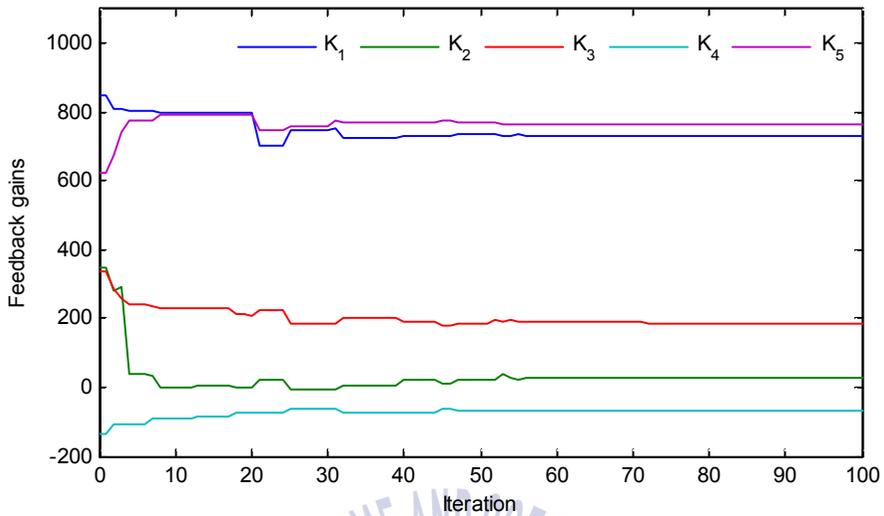
이때, 유전알고리즘은 독립된 씨드(seed)로 프로그램을 3번 실행하여 구한 평균값을 사용하였으며, 최종적으로 탐색된 9개의 서브시스템에 대한 상태피드백제어기 이득행렬 $\mathbf{K} = [\mathbf{K}_1 \quad \mathbf{k}_2]$ 는 식 (5.2)와 같다. 여기에서, $\mathbf{K}^i = [\mathbf{K}_1^i \quad \mathbf{k}_2^i]$ 는 i 번째 서브시스템의 이득행렬을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{K}^1 &= [822.9540 & 21.9570 & 221.9530 & -83.0760 & 864.6390] \\
 \mathbf{K}^2 &= [732.5770 & 28.6710 & 187.5290 & -65.4900 & 763.1070] \\
 \mathbf{K}^3 &= [807.5780 & 37.8070 & 214.1220 & -75.7960 & 837.0520] \\
 \mathbf{K}^4 &= [781.1820 & 11.2200 & 168.3720 & -113.1960 & 814.9850] \\
 \mathbf{K}^5 &= [774.5400 & 11.3860 & 173.5370 & -114.5340 & 807.0990] \\
 \mathbf{K}^6 &= [740.8070 & 6.8560 & 175.0340 & -113.3090 & 771.2790] \\
 \mathbf{K}^7 &= [778.9920 & -4.3510 & 158.0080 & -152.9300 & 814.9200] \\
 \mathbf{K}^8 &= [764.8290 & -7.7350 & 161.2160 & -152.0740 & 798.8970] \\
 \mathbf{K}^9 &= [745.3720 & -13.0600 & 165.2280 & -153.9510 & 777.4710]
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

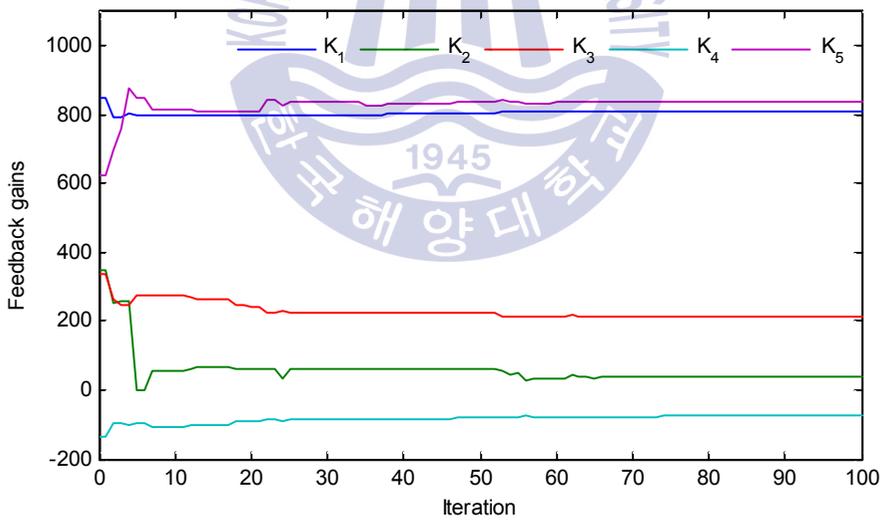
Fig. 5.8은 9개의 서브시스템에서 상태피드백제어기 이득행렬의 탐색과정을 나타낸 것이다.



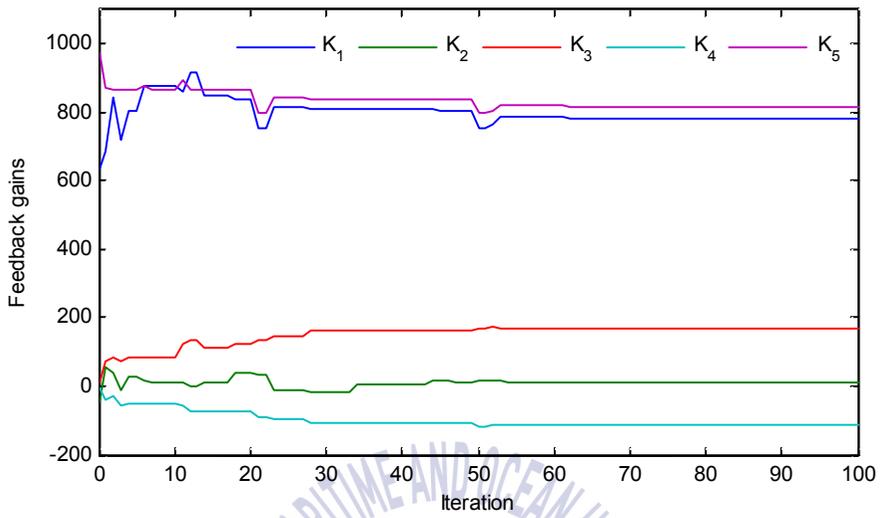
(a) Evolutionary process for subsystem 1



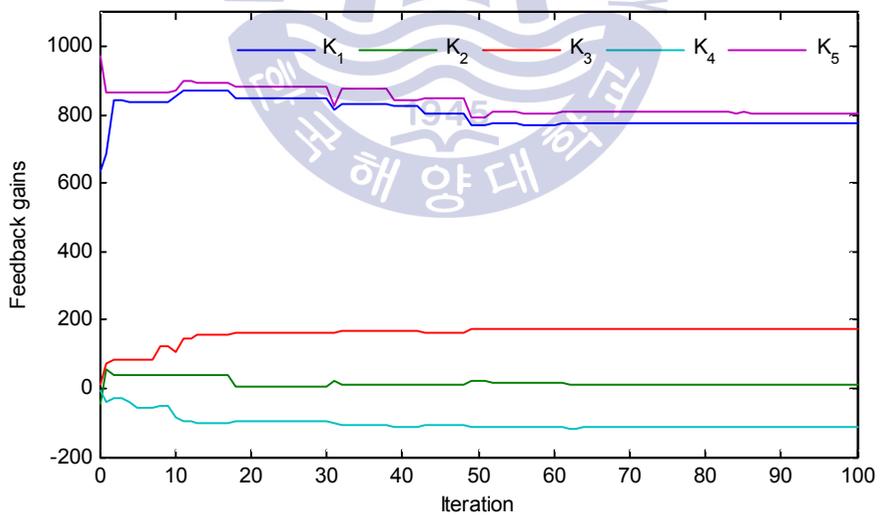
(b) Evolutionary process for subsystem 2



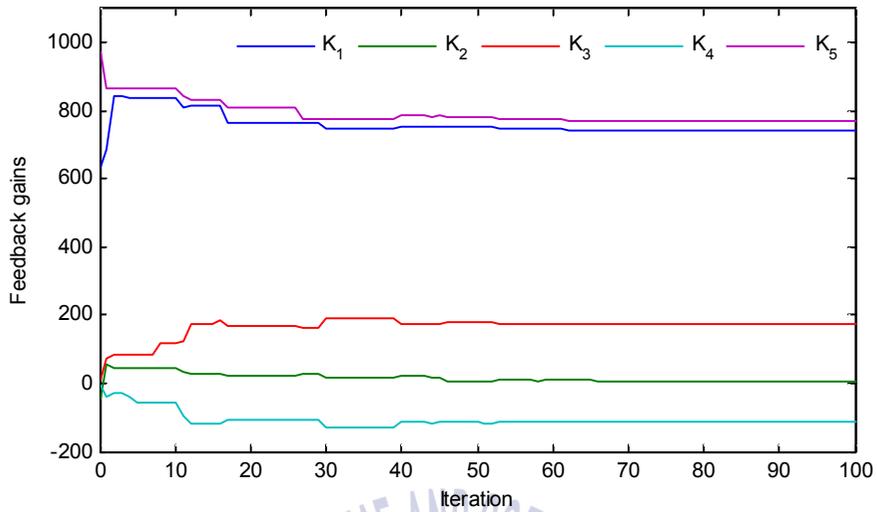
(c) Evolutionary process for subsystem 3



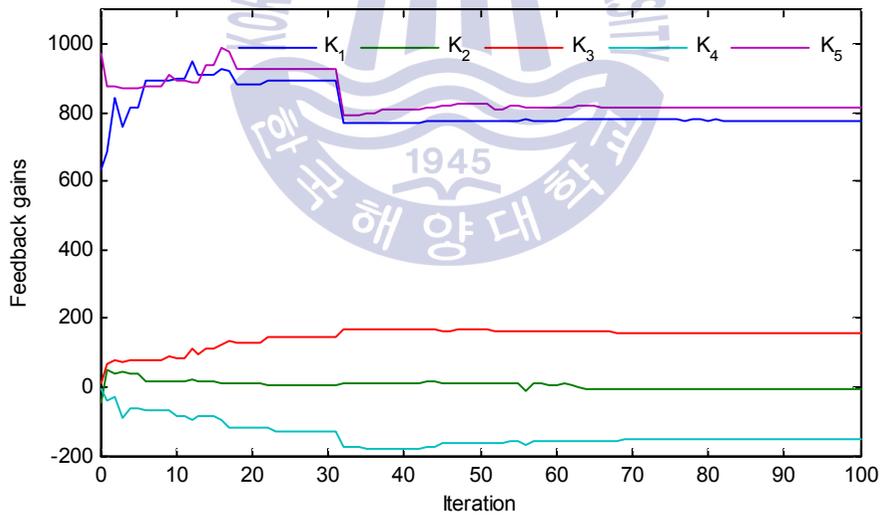
(d) Evolutionary process for subsystem 4



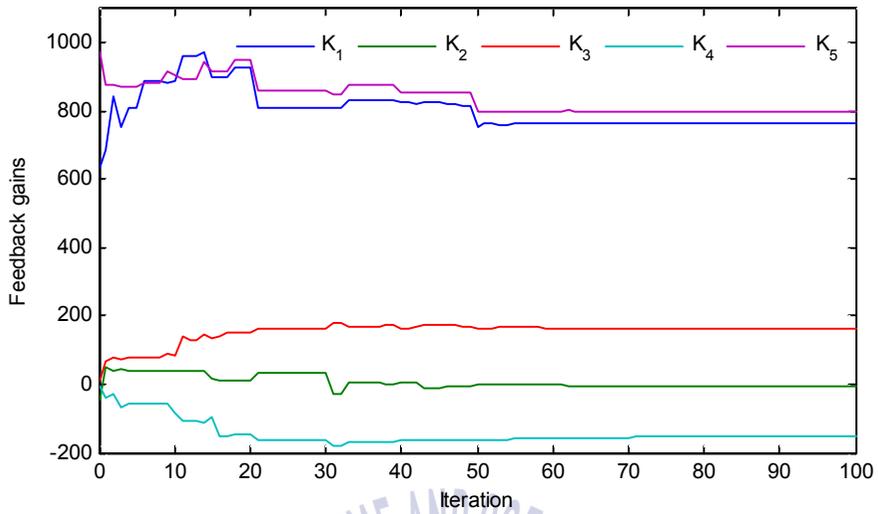
(e) Evolutionary process for subsystem 5



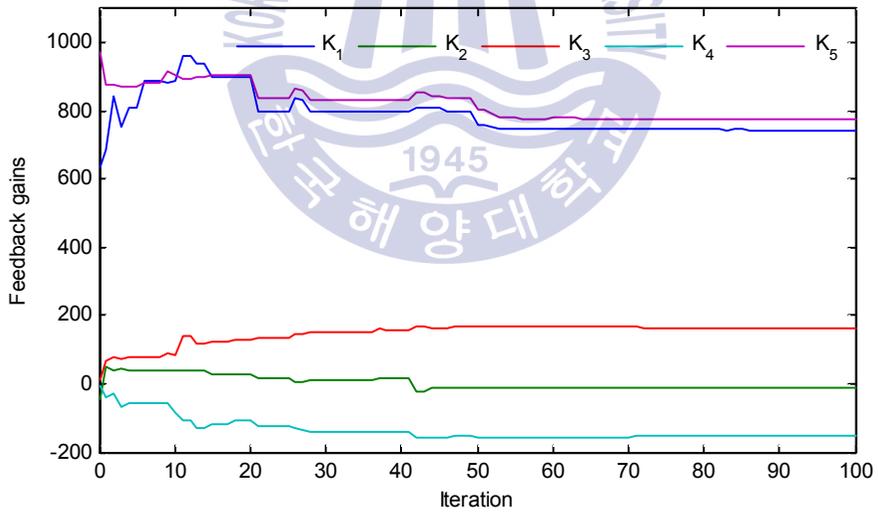
(f) Evolutionary process for subsystem 6



(g) Evolutionary process for subsystem 7



(h) Evolutionary process for subsystem 8



(i) Evolutionary process for subsystem 9

Fig. 5.8 Evolutionary process of controller gain for subsystems

5.2.2 PI형 상태피드백제어기 검토

앞의 절에서는 9개의 서브시스템(선형시스템)에 대해 각각 유전알고리즘을 이용하여 PI형 상태피드백제어기 이득을 탐색하였다. 이제 유전알고리즘으로 탐색된 각각의 제어기에 대해 시뮬레이션을 실시하여 그 성능을 확인하기로 한다. 비선형시스템을 유도할 수 없는 경우에는 3.4절에서 설명한 퍼지모델을 제어대상으로 고려할 수 있으나 본 논문에서 다루는 STS 크레인은 3.3절에서 비선형시스템을 유도하였기 때문에 이를 제어대상으로 하여 시뮬레이션을 실시한다. Fig. 5.9 ~ Fig. 5.17까지의 좌측 상단 그림은 트롤리 위치, 우측 상단 그림은 트롤리 속도, 좌측 중간 그림은 컨테이너 흔들림 각도, 우측 중간 그림은 컨테이너 흔들림 각속도, 좌측 하단 그림은 입력전압, 우측 하단 그림은 트롤리에 가해지는 힘의 변화를 나타낸다.

Fig. 5.9 ~ Fig. 5.17까지의 좌측 상단 그림에서 확인할 수 있듯이 와이어로프의 길이가 0.4 [m]로 짧은 서브시스템 1~3에서는 트롤리의 목표위치 최초 도착시간이 각각 2.8 [s], 3.5 [s], 3.5 [s]로 나타났으며, 오버슈트나 언더슈트는 발생하지 않았다. 와이어로프의 길이가 0.8 [m]로 중간인 서브시스템 4~6에서는 트롤리의 목표위치 최초 도착시간이 모두 약 2.2 [s]로 나타났으며, 목표위치 완전 추종시간은 각각 4.8 [s], 4.8 [s], 5.0 [s]로 나타났다. 오버슈트는 발생하지 않았으며, 언더슈트는 약 2%(0.02 m) 발생하였다. 와이어로프의 길이가 1.2 [m]로 가장 긴 서브시스템 7~9에서는 트롤리의 목표위치 최초 도착시간이 모두 약 2.2 [s]로 나타났으며, 목표위치 완전 추종시간은 각각 7.9 [s], 8.2 [s], 8.2 [s]로 나타났다. 오버슈트와 언더슈트는 각각 약 1%(0.01 m), 약 2%(0.02 m) 발생하였다. 서브시스템 1~3에서 오버슈트나 언더슈트가 발생하지 않은 이유는 호이스트 와이어로프의 길이가 짧은($\ell = 0.4$ [m]) 동작점에서 설계되었기 때문이며, 트롤리의 목표위치 완전 추종시간이 긴 서브시스템 7~9는 호이스트 와이어로프의 길이가 긴($\ell = 1.2$ [m]) 동작점에서 설계되었기 때문이다.

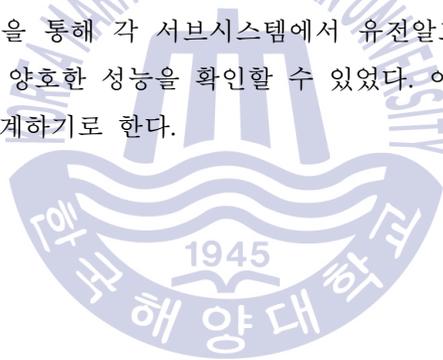
Fig. 5.9 ~ Fig. 5.17까지의 우측 상단 그림에서 확인할 수 있듯이 서브시스템 1~3에서는 목표위치 완전 추종까지의 트롤리 이동속도 변화량이 0.0 ~ +0.7 [m/s]로 나타났으며, 후진 동작은 나타나지 않았다. 트롤리 이동속도는 약 3.2 [s] 후에 0이 되었다. 서브시스템 4~6에서는 목표위치 완전 추종까지의 트롤리 이동속도 변화량이 -0.07 ~ +0.78 [m/s]로 나타났으며, 약 7.0 [s] 후에 트롤리 이동속도가 0이 되었다. 서브시스템 7~9에서는 목표위치 완전 추종까지의 트롤리 이동속도 변화량이 -0.12 ~ +0.80 [m/s]로 나타났으며, 약 10 [s] 후에 트롤리 이동속도가 0이 되었다.

서브시스템 1~3에서 트롤리가 목표위치 추종 중 후진 동작이 나타나지 않은 이유는 다른 시스템에 비해 목표위치까지 천천히 이동했기 때문이며, 트롤리가 목표위치에 완전히 추종하여 정지할 때까지의 시간이 가장 오래 걸린 서브시스템 7~9는 호이스트 와이어로프의 길이가 긴($l = 1.2$ [m]) 동작점에서 설계되었기 때문이다.

Fig. 5.9 ~ Fig. 5.17까지의 좌측 중간 그림에서 확인할 수 있듯이 모든 서브시스템에서 최대 흔들림 각도는 ± 0.2 [rad]이었으며, 약 3.0~10 [s] 후 흔들림이 완전히 제어되었다. 서브시스템 1~3에서는 약 3.0 [s] 후에 흔들림이 제어되었으며, 서브시스템 4~6에서는 약 5.0 [s] 후, 서브시스템 7~9에서는 약 10 [s] 후에 흔들림이 완전히 제어되었다.

결론적으로 9개의 각 서브시스템에서 유전알고리즘으로 설계한 PI형 상태피드백제어기는 정상편차 없이 트롤리를 목표위치에 잘 추종시키고 있으며, 트롤리가 목표위치에 도착 시 컨테이너의 흔들림을 잘 제어하고 있다.

지금까지의 시뮬레이션을 통해 각 서브시스템에서 유전알고리즘을 이용하여 설계한 PI형 상태피드백제어기의 양호한 성능을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 다음 절에서는 적응 퍼지제어기를 설계하기로 한다.



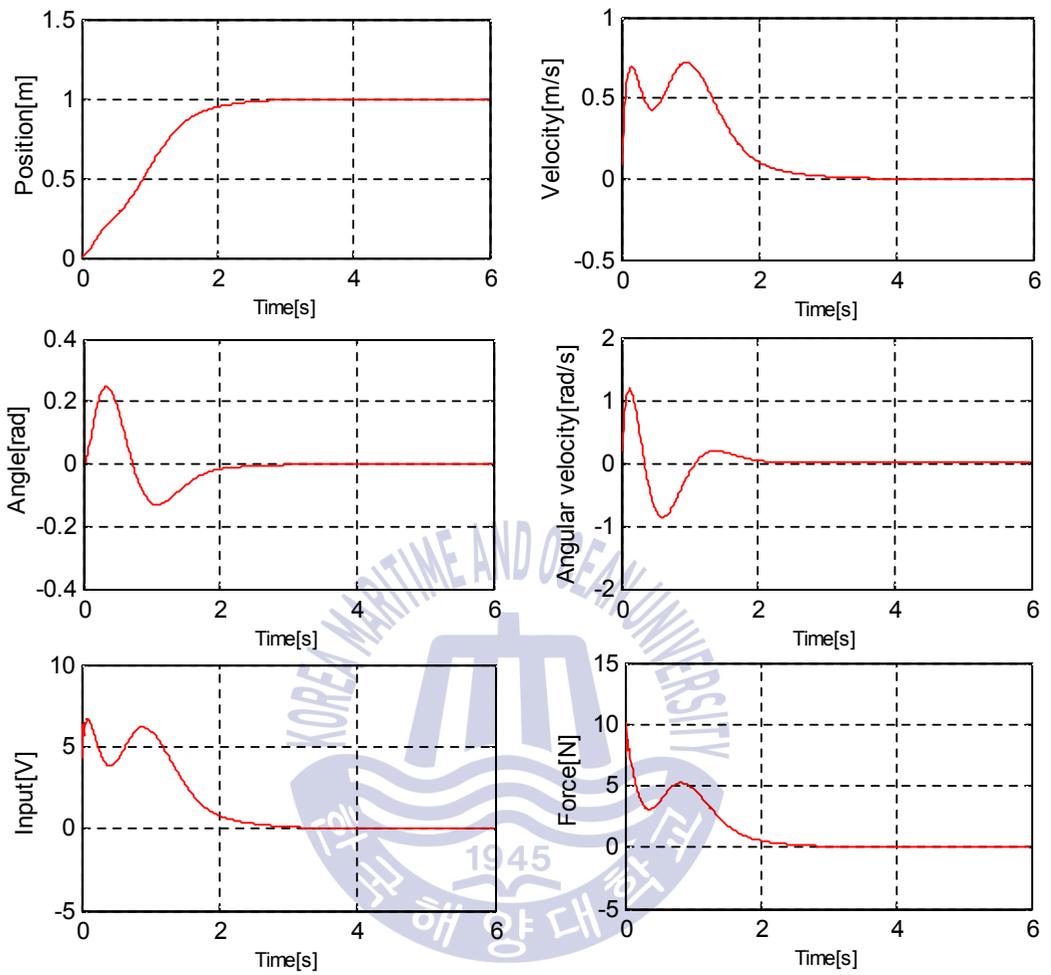


Fig. 5.9 Step responses of nonlinear system using sub-controller 1

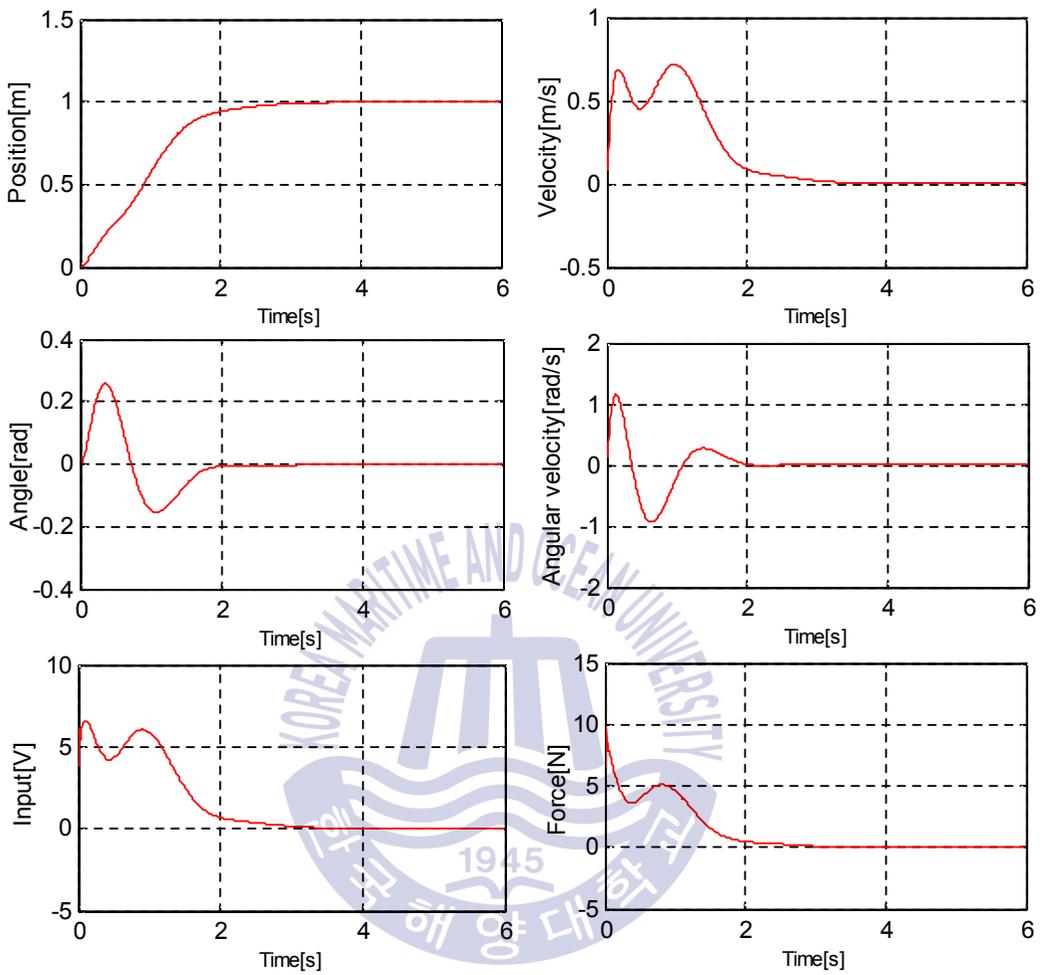


Fig. 5.10 Step responses of nonlinear system using sub-controller 2

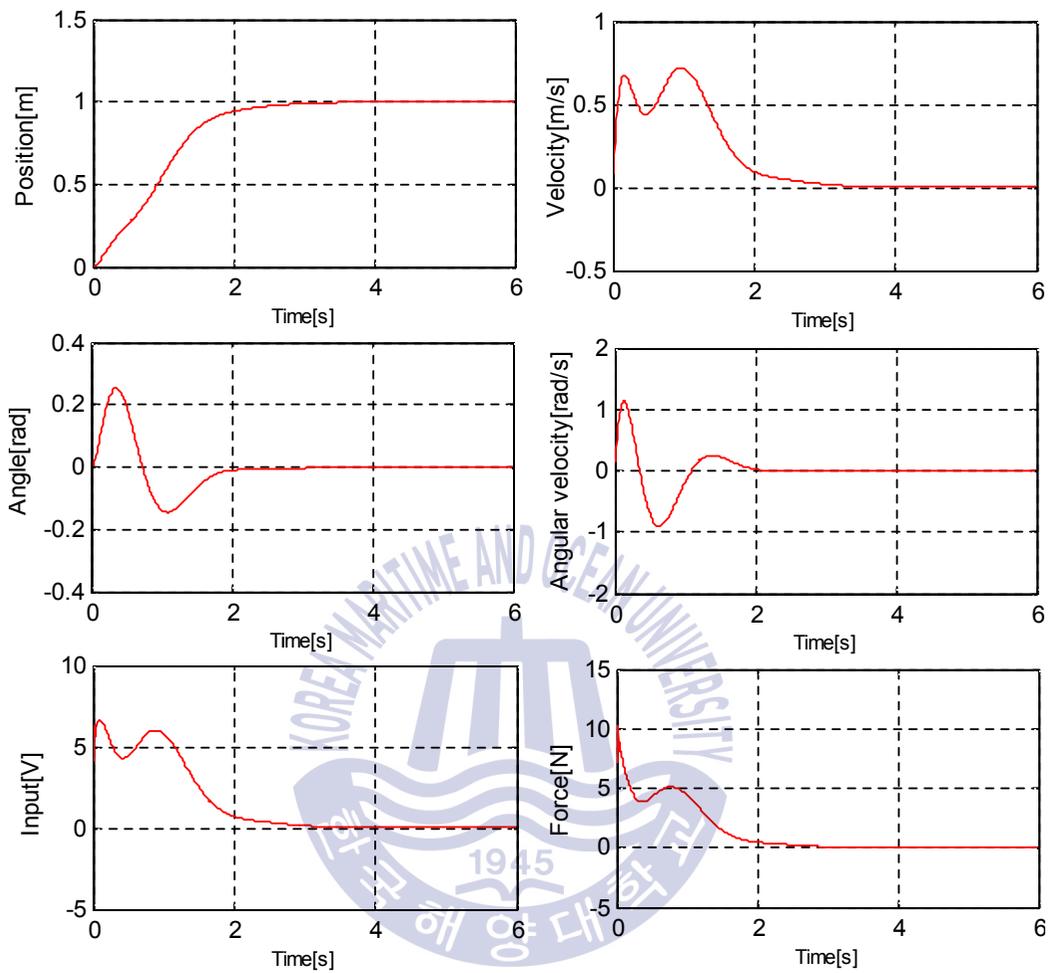


Fig. 5.11 Step responses of nonlinear system using sub-controller 3

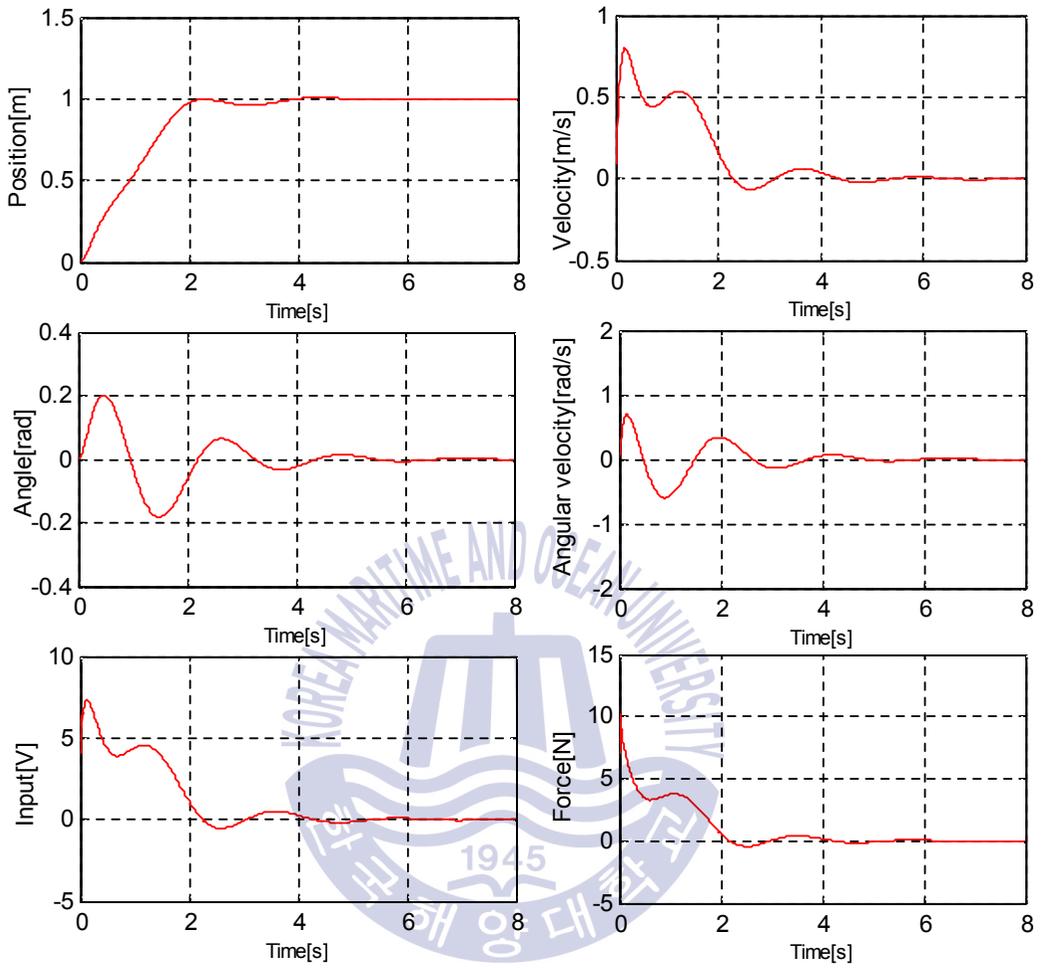


Fig. 5.12 Step responses of nonlinear system using sub-controller 4

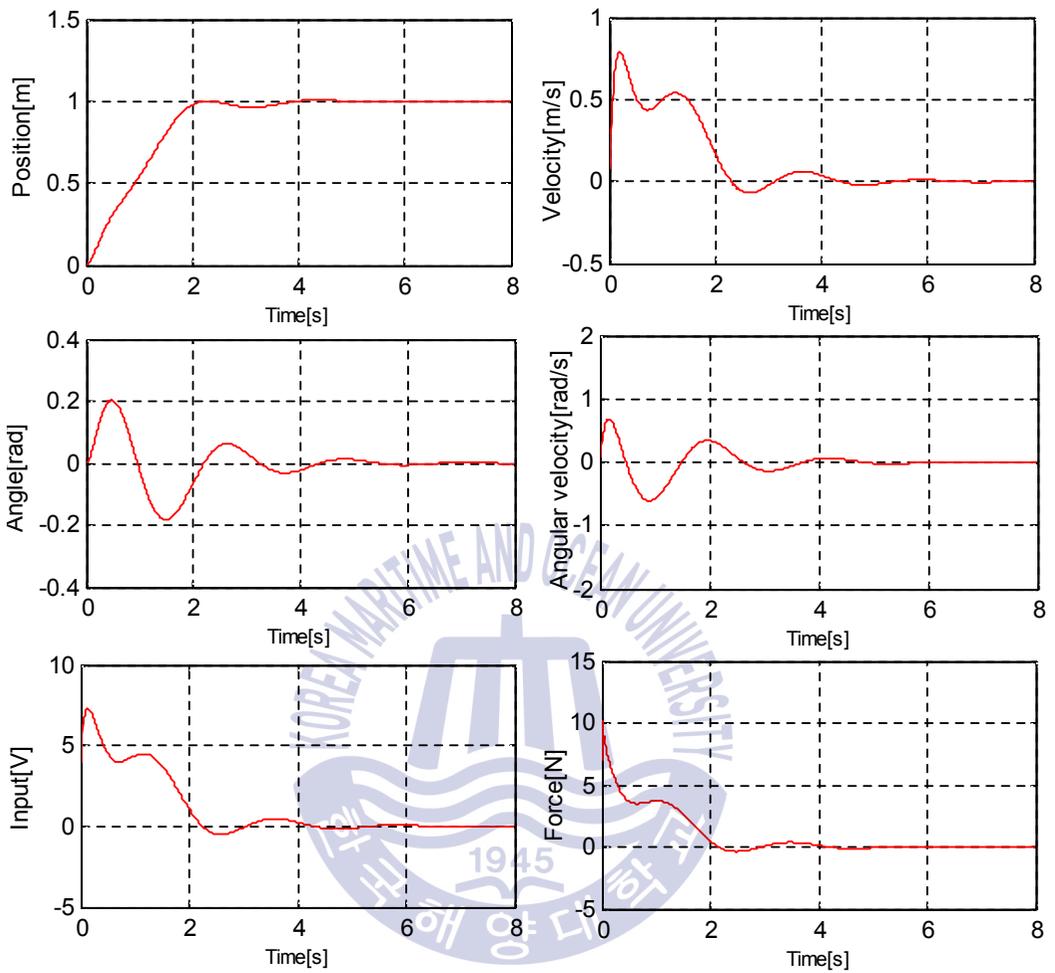


Fig. 5.13 Step responses of nonlinear system using sub-controller 5

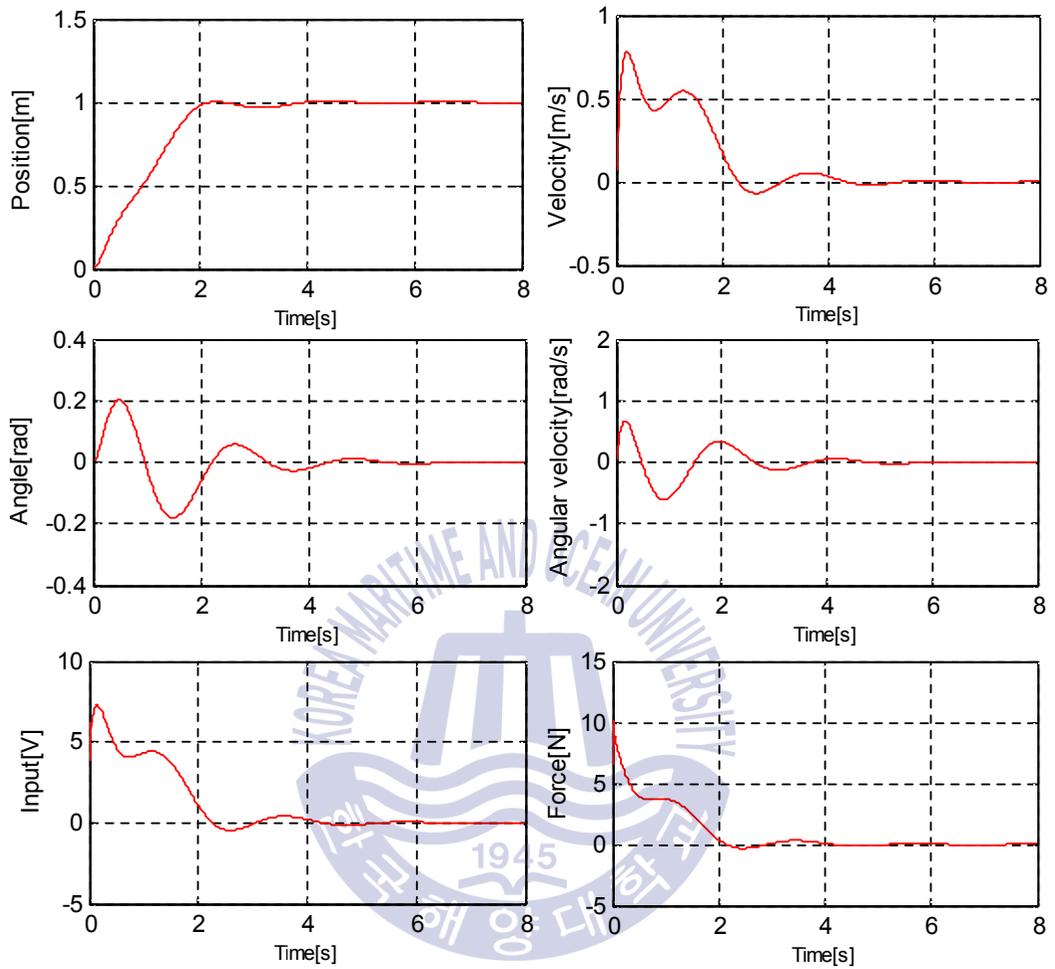


Fig. 5.14 Step responses of nonlinear system using sub-controller 6

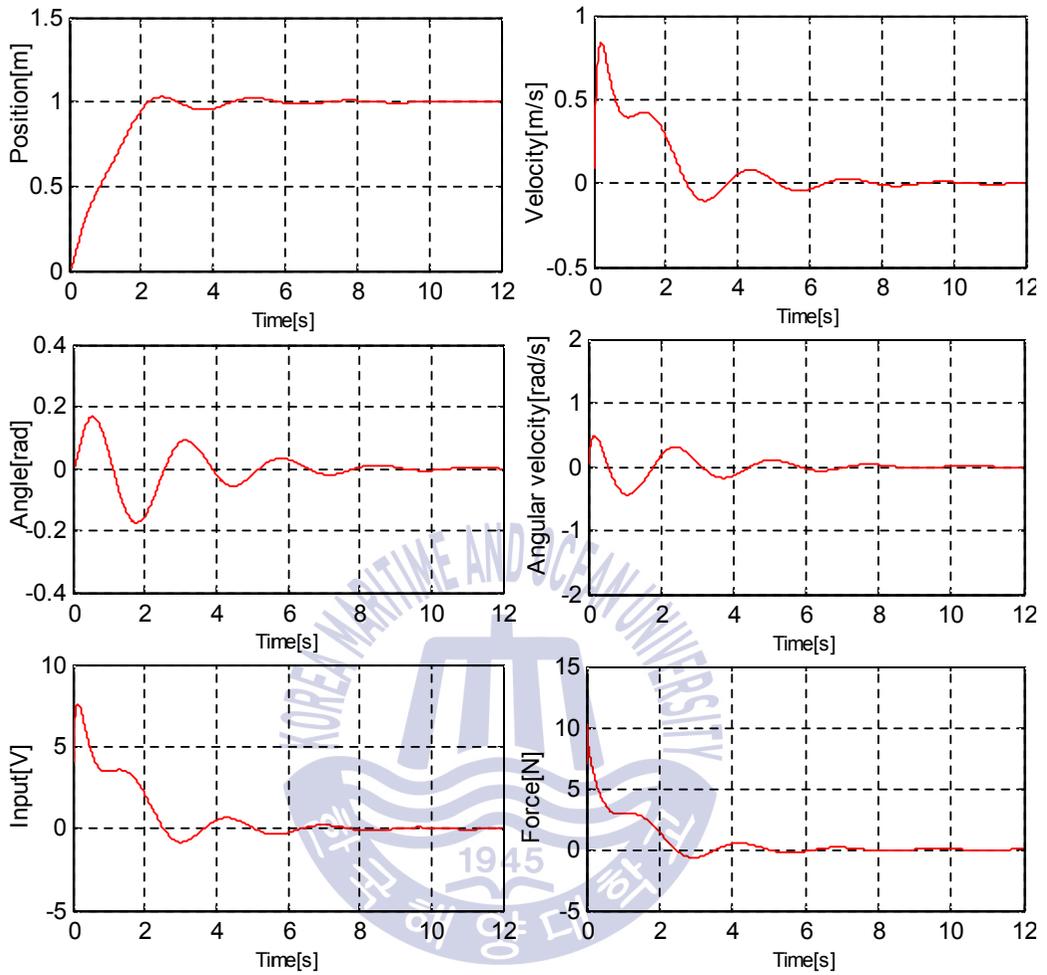


Fig. 5.15 Step responses of nonlinear system using sub-controller 7

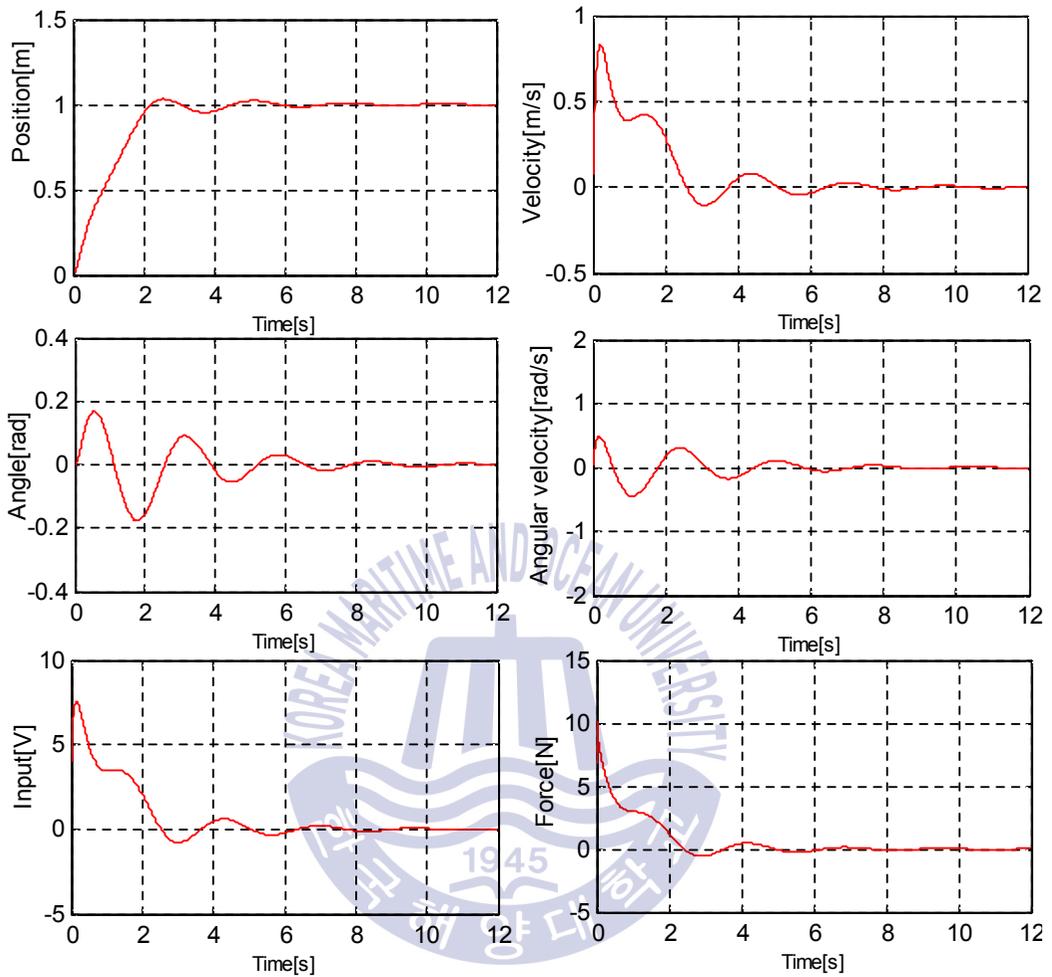


Fig. 5.16 Step responses of nonlinear system using sub-controller 8

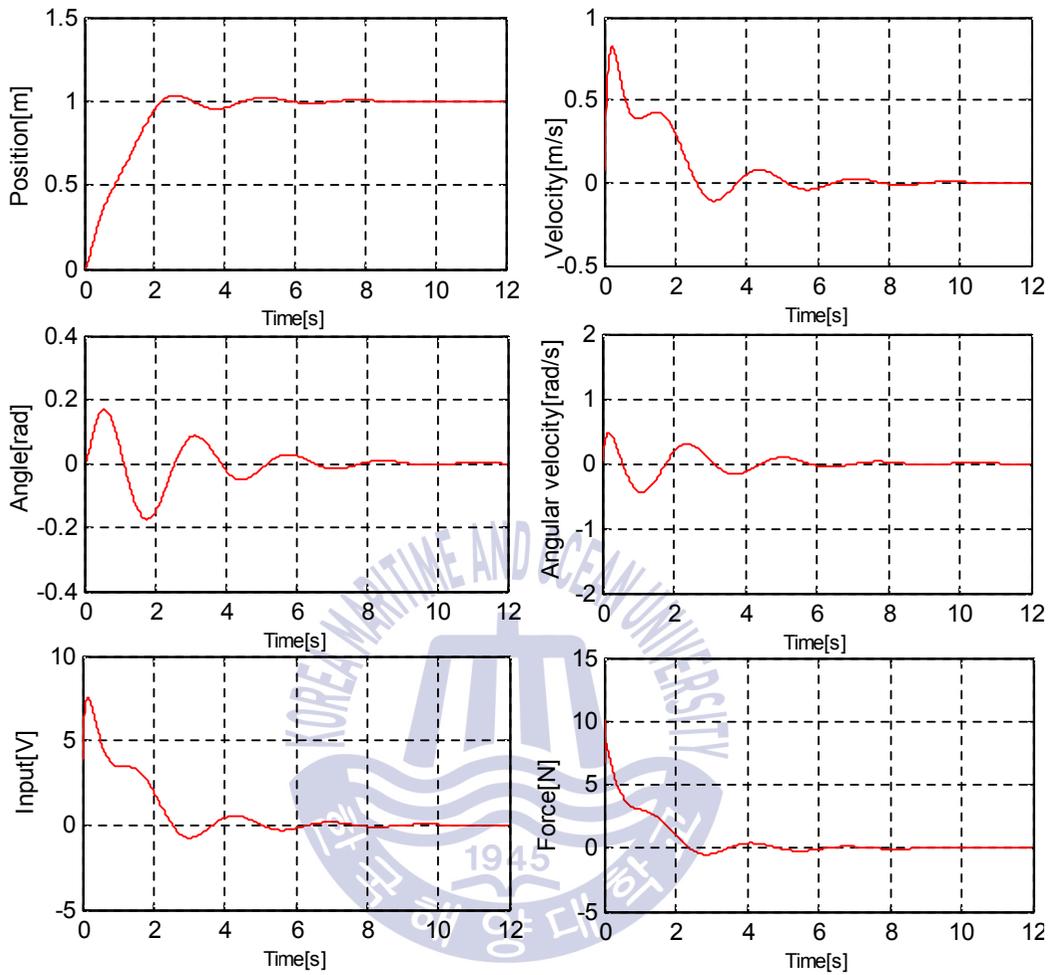


Fig. 5.17 Step responses of nonlinear system using sub-controller 9

5.3 적응 퍼지제어기의 성능 검토

항만용 STS 크레인은 작업과정에서 외부 변수(파라미터)인 ℓ 과 m 의 크기가 변화하기 때문에 ℓ 을 LS, LC, LL 중의 하나로, m 을 ML, MC, MH 중의 하나로 고정하여 유도한 서브시스템을 이용하여 설계한 제어기를 사용하면 정밀한 제어를 수행하기 어렵다. 따라서 4.2절에서는 STS 크레인의 파라미터 변화에 대해 잘 적용할 수 있는 적응 퍼지 제어기를 제안하였다. 여기에서는 제안한 적응 퍼지제어기의 유효성을 확인한다.

적응 퍼지제어기는 5.2절에서 설명한 것과 같이 원래의 시스템, 즉 항만용 STS 크레인 비선형시스템이 제어대상이므로 식 (4.11)의 \mathbf{x} , y 대신 비선형시스템의 출력을 피드백해야 한다. 비선형시스템의 출력을 \mathbf{x}_p , y_p 로 정의하면 식 (4.11)은 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\text{IF } \ell \text{ is } F_1^i \text{ and } m \text{ is } F_2^i \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} \text{THEN } u^i &= -\mathbf{K}_1^i \mathbf{x}_p \\ &= -\mathbf{K}_1^i \mathbf{x} + k_2^i \int (y_r - y_p) dt, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 9 \end{aligned}$$

여기에서, $\mathbf{K}^i (1 \leq i \leq 9)$ 는 식 (5.2)와 같다.

그러면 전체 9개 규칙의 추론을 통해 얻어지는 퍼지제어기의 출력 u 는 식 (5.4)와 같다. 퍼지제어기 구현 시 소속함수는 퍼지모델에 사용된 Fig. 5.1의 소속함수를 사용한다.

$$u = \sum_{i=1}^9 \xi^i u^i = \sum_{i=1}^9 \xi^i \left(-\mathbf{K}_1^i \mathbf{x} + k_2^i \int (y_r - y_p) dt \right) \quad (5.4)$$

이제 이렇게 설계된 적응 퍼지제어기의 유효성을 검증하기 위해 이에 대한 시뮬레이션을 실시한다. 시뮬레이션은 STS 크레인의 컨테이너 선박적화 작업상황을 고려하여 Fig. 5.18과 같이 호이스트 와이어로프의 길이 ℓ 은 작업이 시작되면 일정시간 동안 짧아진 후 동일한 길이를 유지하게 하고, 컨테이너의 질량 m 은 적화작업 도중에 변하지 않으므로 가정한 범위 내의 중간 값인 0.4 [kg]으로 고정한다. 적응 퍼지제어시스템의 제어성능을 검토하기 위해 다양한 시뮬레이션을 실시하였으며, 샘플링 시간은 1 [ms]로 하였다.

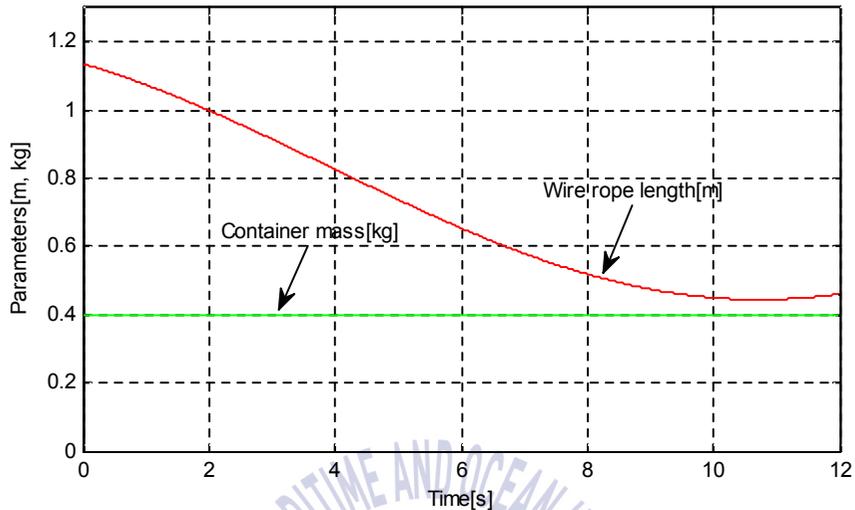


Fig. 5.18 Change of parameters(l & m)

Fig. 5.19는 STS 크레인이 특별한 외란이나 파라미터의 변화가 없는 정상적인 작업상황에서 기준입력 변화에 대한 적응 퍼지제어시스템의 제어성능을 검토하기 위해 트롤리의 이동거리에 대해 계단상의 기준입력을 인가한 경우이다. 비교 목적으로 첫 번째 서브시스템과 여섯 번째 서브시스템으로 설계된 선형제어기도 동시에 나타낸다.

Fig. 5.20은 트롤리가 목표위치를 추종 중인 초기 1.5 [s]에서 한 샘플링 시간인 1 [ms] 동안 +0.1 [rad]의 외란을 인가한 경우이며, Fig. 5.21은 목표위치에 트롤리가 정상상태오차 없이 도달한 이후인 7 [s]에서 한 샘플링 시간인 1 [ms] 동안 -0.2 [rad]의 외란을 인가한 경우이다.

Fig. 5.22는 STS 크레인의 초기 컨테이너 흔들림 각도가 0.1 [rad], 트롤리 속도가 0.2 [m/s], 컨테이너 흔들림 각속도가 0.1 [rad/s]인 상태로 움직이고 있는 경우이며, 마지막으로 Fig. 5.24는 작업 중 컨테이너의 질량도 동시에 변화하는 경우이다.

5.3.1 기준입력 변화에 대한 검토

정상작업 상황에서 STS 크레인 제어시스템의 목표위치 추정 및 흔들림 제어성능을 검토하기 위하여 시스템에 계단상의 기준입력을 인가시켰다. 이때, 외부 변수인 ℓ 과 m 의 변화는 Fig. 5.18과 같다. Fig. 5.19의 (a)는 트롤리 위치, (b)는 트롤리 속도, (c)는 컨테이너 흔들림 각도, (d)는 컨테이너 흔들림 각속도, (e)는 제어 입력전압, (f)는 트롤리에 가해지는 힘의 변화를 나타낸다. 비교 목적으로 식 (5.2)에 나타난 첫 번째 서브시스템($\ell = 0.4$ [m], $m = 0.2$ [kg])과 여섯 번째 서브시스템($\ell = 0.8$ [m], $m = 0.6$ [kg])에서 유전알고리즘으로 설계되어 K^1 과 K^6 의 상태피드백 이득행렬을 갖는 선형제어기도 동시에 나타낸다. K^1 의 이득을 갖는 제어기를 SFC 1(State Feedback Controller), K^6 의 이득을 갖는 제어기를 SFC 6으로 나타내기로 한다.

Fig. 5.19 (a)에서 트롤리의 목표위치 최초 도착시간은 SFC와 적응 퍼지제어기 모두 약 2.2 [s]로 나타났으며, 목표위치 완전 추종시간은 FSC 6과 적응 퍼지제어기가 약 6.0 [s], SFC 1이 약 7.0 [s]로 나타났다. 목표위치 도착까지의 최대 오버슈트는 SFC와 적응 퍼지제어기 모두 약 1%(0.01 m)정도 발생했다. SFC 1이 트롤리를 목표위치에 추종시킬 때 시간이 오래 걸린 이유는 호이스트 와이어로프의 길이가 짧은($\ell = 0.4$ [m]) 동작점에서 설계된 제어기를 Fig. 5.18과 같이 호이스트 와이어로프의 길이가 변하는 선박 적화작업에 적용했기 때문으로 사료된다.

Fig. 5.19 (b)에서 목표위치 완전 추종까지의 트롤리 이동속도 변화량은 SFC와 적응 퍼지제어기 모두 약 $-0.11 \sim +0.78$ [m/s]로 나타났다. 초기 트롤리 이동속도는 적응 퍼지제어기가 약 $+0.78$ [m/s]로 가장 빨랐으며, SFC 1이 약 $+0.75$ [m/s]로 가장 느리게 나타났다. 적응 퍼지제어기는 약 6.6 [s], FSC 6은 약 7.3 [s], SFC 1은 약 8.0 [s] 후에 트롤리 이동속도가 0이 되었다. 적응 퍼지제어기는 초기에 강한 힘으로 빠르게 이동하여 트롤리를 목표위치에 가장 빠르게 추종시키고 있다.

Fig. 5.19 (c)에서 최대 흔들림 각도는 FSC 6과 적응 퍼지제어기가 약 ± 0.18 [rad], SFC 1이 약 $-0.21 \sim +0.19$ [rad]으로 나타났다. 트롤리가 목표위치에 추종할 때까지의 평균 흔들림은 적응 퍼지제어기가 가장 작았으며, SFC 1이 가장 컸다. 흔들림이 멈춘 시간은 적응 퍼지제어기가 약 6.6 [s], FSC 6이 약 7.3 [s], SFC 1이 약 8.0 [s]로 나타났다. SFC 1의 평균 흔들림이 큰 이유는 호이스트 와이어로프의 길이가 짧은($\ell = 0.4$ [m]) 동작점에서 설계된 제어기를 Fig. 5.18과 같이 호이스트 와이어로프의 길

이가 변하는 선박 적화작업에 적용했기 때문에 사료된다.

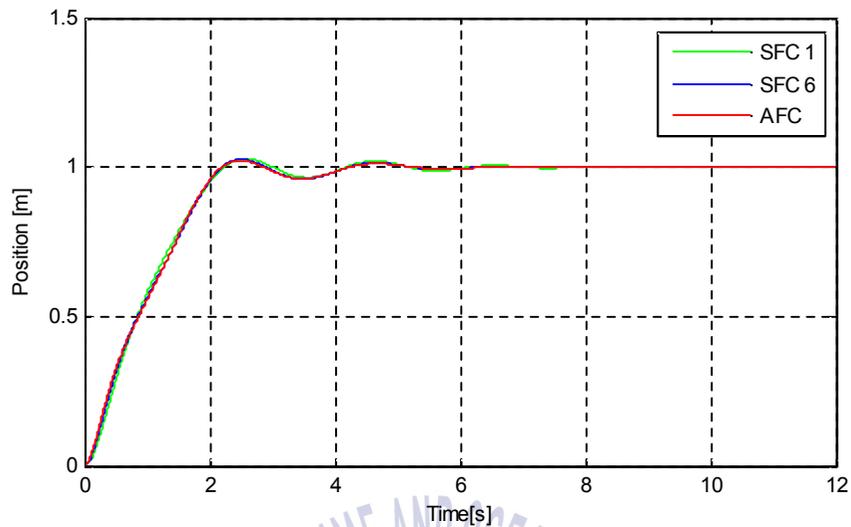
Fig. 5.19 (d)에서 트롤리가 목표위치에 추종할 때까지의 최대 각속도는 약 $-0.5 \sim +0.5$ [rad/s]로 나타났으며, 평균 각속도는 적응 퍼지제어기가 가장 느렸고 SFC 1이 가장 빨랐다.

Fig. 5.19 (e)에서 모든 제어기의 입력전압 변화는 약 $-1 \sim +7$ [V]로 나타났다. 적응 퍼지제어기는 약 6.5 [s], FSC 6은 약 7.2 [s], SFC 1은 약 7.8 [s] 후에 제어 입력전압이 0이 되었다.

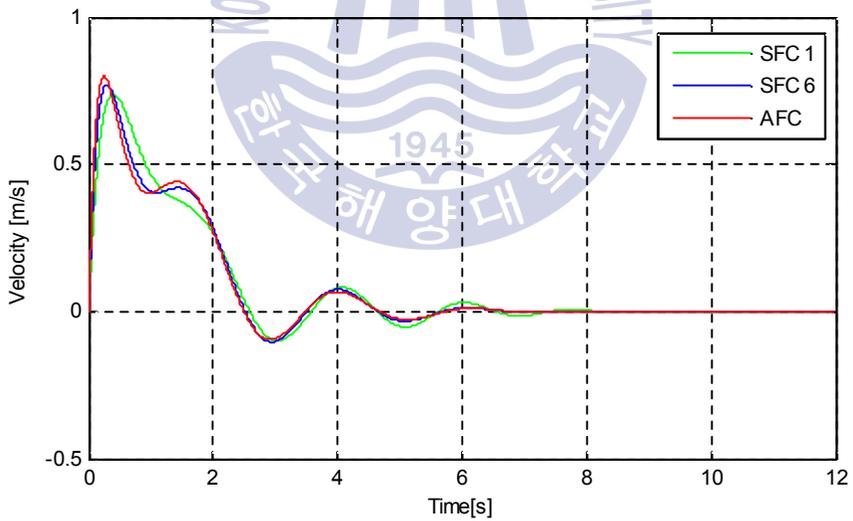
Fig. 5.19 (f)에서 초기에 트롤리에 가해지는 힘은 적응 퍼지제어기가 약 7.4 [N], FSC 6가 약 6.5 [N], SFC 1이 5.9 [N]으로 나타났다. 적응 퍼지제어기는 초기에 강한 힘으로 트롤리를 이동시켜 목표위치에 가장 빠르게 추종시키고 있다.

다만, SFC 6가 적응 퍼지제어기와 유사한 결과를 보이는 이유는 SFC 6는 호이스트 와이어로프의 중간 길이에서 설계된 제어기이기 때문이다. 그러나 호이스트 와이어로프의 길이가 짧은 상태 혹은 긴 상태로 운전되거나 길이의 변화 주기가 빠른 상황에서는 제어기의 성능은 보장할 수 없게 된다.

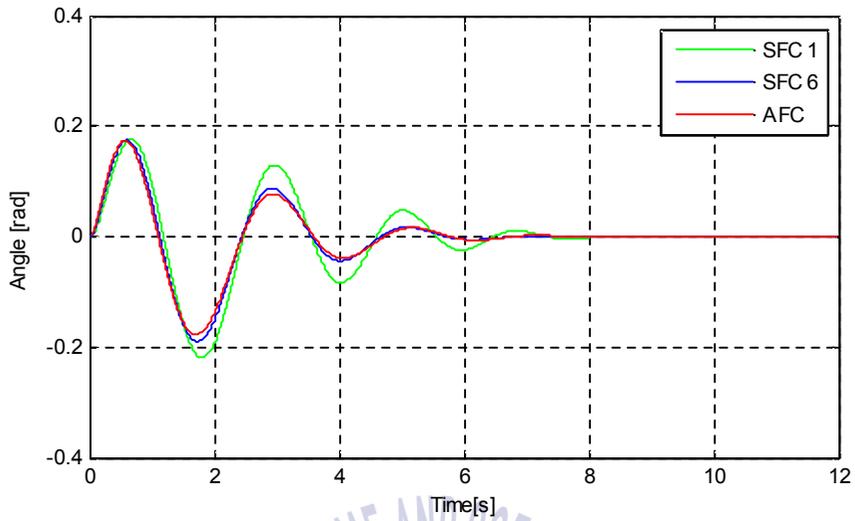
결론적으로 제안한 적응 퍼지제어기는 Fig. 5.18과 같이 외부 변수 l 이 가정한 범위 내에서 변화하는 작업상황에서도 정상상태오차 없이 트롤리를 목표위치에 잘 추종시키고 있으며, 동시에 목표위치에서 매달린 컨테이너의 흔들림을 잘 제어하고 있다.



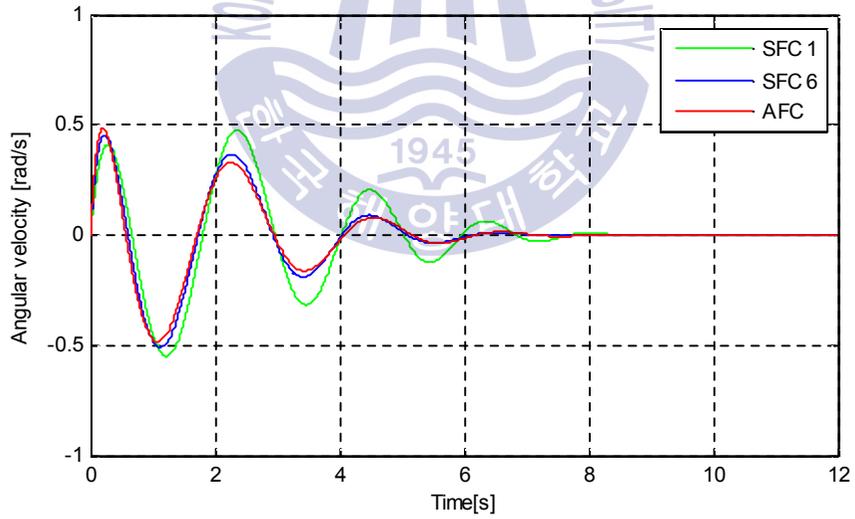
(a) Trolley position



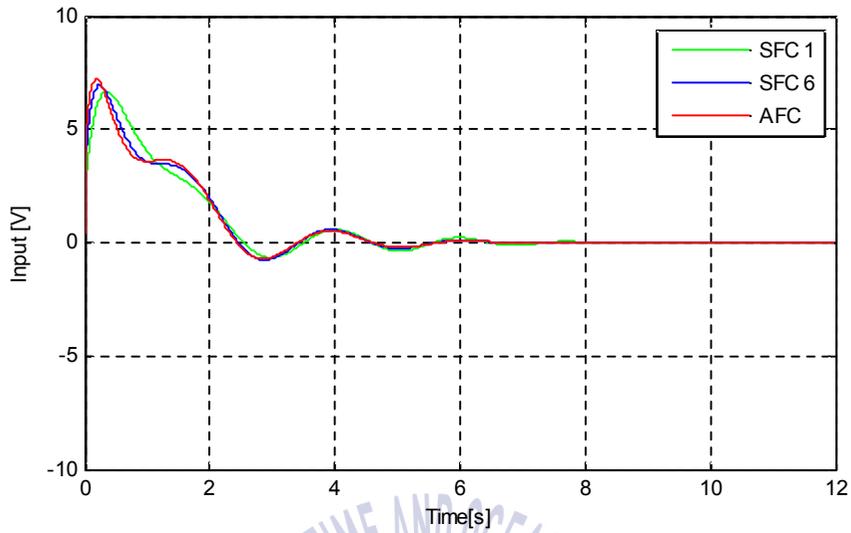
(b) Trolley velocity



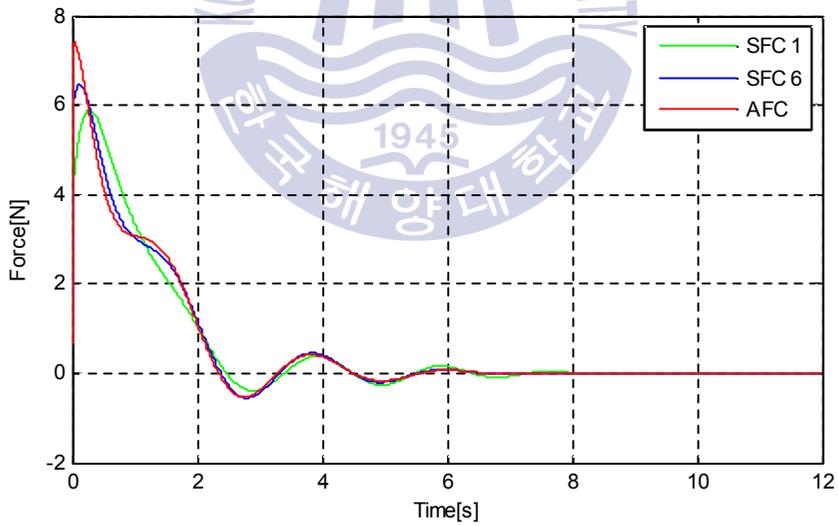
(c) Swing angle



(d) Swing angular velocity



(e) Control input



(f) Trolley input force

Fig. 5.19 Step responses of the adaptive fuzzy controller(AFC) and SFCs

5.3.2 외란에 대한 검토

항만에 설치된 STS 크레인은 강풍, 폭우, 해무, 폭설 등의 다양한 날씨 환경하에서 하역작업을 진행하고 있다. 이 중에서 강풍 또는 돌풍과 같은 외란이 크레인 하역시스템 내에 작용하더라도 정상적인 작업이 진행될 수 있도록 크레인은 제어성능을 갖추고 있어야 한다. Fig. 5.20과 Fig. 5.21에서는 작업 초기 또는 중간에 펄스 형태로 인가되는 외란에 대한 적응 퍼지제어기의 강인성을 확인한 것이다. 이와 같은 외란은 실제 작업 환경에서 돌풍이나 돌발사태와 같은 갑작스러운 외부 작업환경의 변화로 인하여 컨테이너가 급격하게 흔들리는 상황을 고려한 것이다.

Fig. 5.20은 트롤리가 목표위치를 추종 중인 초기 1.5 [s]에서 한 샘플링 시간인 1 [ms] 동안 +0.1 [rad]의 외란을 인가한 경우이다. 이때, 외부 변수인 l 과 m 의 변화는 Fig. 5.18과 같다. Fig. 5.20의 (a)는 트롤리 위치, (b)는 트롤리 속도, (c)는 컨테이너 흔들림 각도, (d)는 컨테이너 흔들림 각속도, (e)는 제어 입력전압, (f)는 트롤리에 가해지는 힘의 변화를 나타낸다.

Fig. 5.20 (a)에서 트롤리의 목표위치 최초 도착시간은 약 2.2 [s], 목표위치 완전 추종시간은 약 5.3 [s]로 나타났다. 초기 1.5 [s]에서 인가한 +0.1 [rad]의 외란으로 인한 특별한 변화는 없었다. 목표위치 도착까지의 최대 오버슈트는 1%(0.01 m) 미만으로 나타났다.

Fig. 5.20 (b)에서 목표위치 추종까지의 트롤리 이동속도는 약 $-0.1 \sim +0.8$ [m/s]로 나타났으며, 작업 시작 후 약 2.2 [s] 동안은 빠르게 움직이고 있음을 알 수 있다. 초기 1.5 [s]에서 인가한 +0.1 [rad]의 외란으로 인하여 순간적으로 약 0.05 [m/s] 만큼 감속되었으며 트롤리 이동속도는 약 6.8 [s] 후에 0이 되었다. 적응 퍼지제어기는 초기에 강한 힘으로 빠르게 이동하여 트롤리를 목표위치에 빠르게 추종시키고 있다.

Fig. 5.20 (c)에서 최대 흔들림 각도는 약 $-0.16 \sim +0.18$ [rad] 이었으며, 초기 1.5 [s]에서 인가한 +0.1 [rad]의 외란으로 인하여 순간적으로 +0.1 [rad] 만큼의 흔들림이 생긴 것을 확인할 수 있다. 흔들림이 멈춘 시간은 약 6.8 [s]로 나타났다.

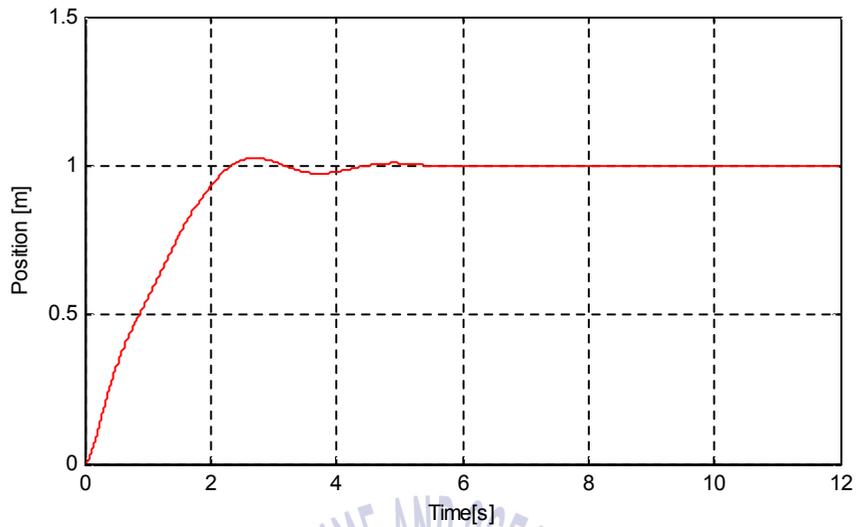
Fig. 5.20 (d)에서 트롤리가 목표위치에 추종할 때까지의 최대 각속도는 약 $-0.5 \sim +0.5$ [rad/s]로 나타났으며, 초기 1.5 [s]에서 인가한 +0.1 [rad]의 외란으로 인하여 증가하고 있던 각속도가 순간적으로 감소한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5.20 (e)에서 제어기의 입력전압 변화량은 약 $-0.5 \sim +7$ [V]로 나타났으며, 약 6.5 [s] 후에 제어 입력전압이 0이 되었다.

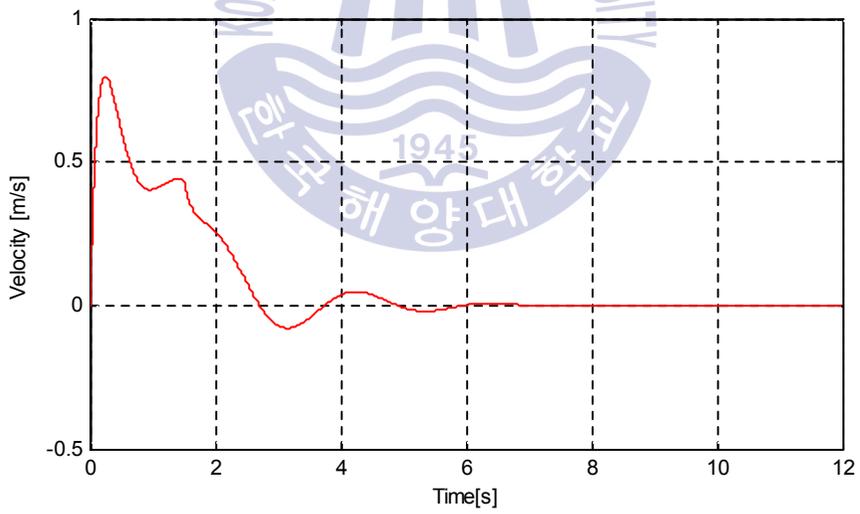
Fig. 5.20 (f)에서 초기에 트롤리에 가해진 힘은 약 7.4 [N]으로 나타났다. 적응 퍼지 제어기는 초기에 강한 힘으로 트롤리를 이동시켜 목표위치에 가장 빠르게 추종시키고 있음을 알 수 있다.

결론적으로 제안한 적응 퍼지제어기는 Fig. 5.18과 같이 외부 변수 ℓ 이 변화하고, 동시에 초기 1.5 [s]에서 $+0.1$ [rad]의 외란을 인가한 작업상황에서도 트롤리를 목표위치에 잘 추종시킬 뿐만 아니라 목표위치 도착 시 매달린 컨테이너의 흔들림을 잘 제어하고 있다.

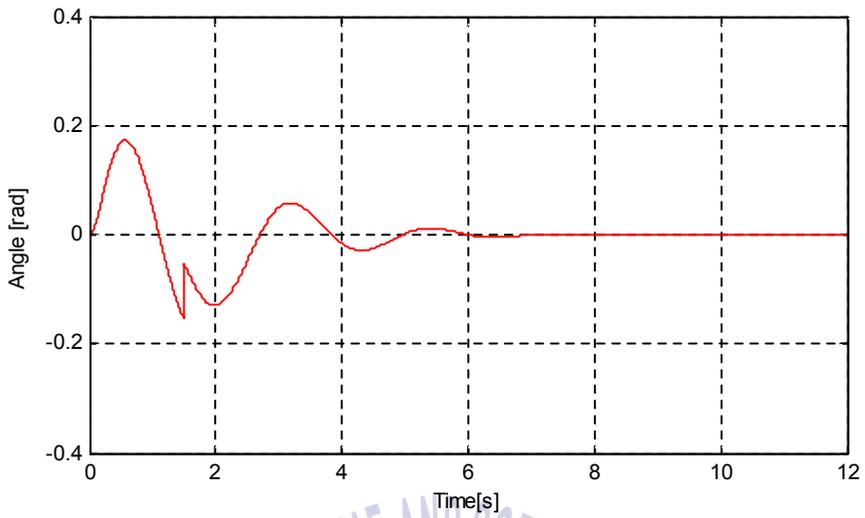




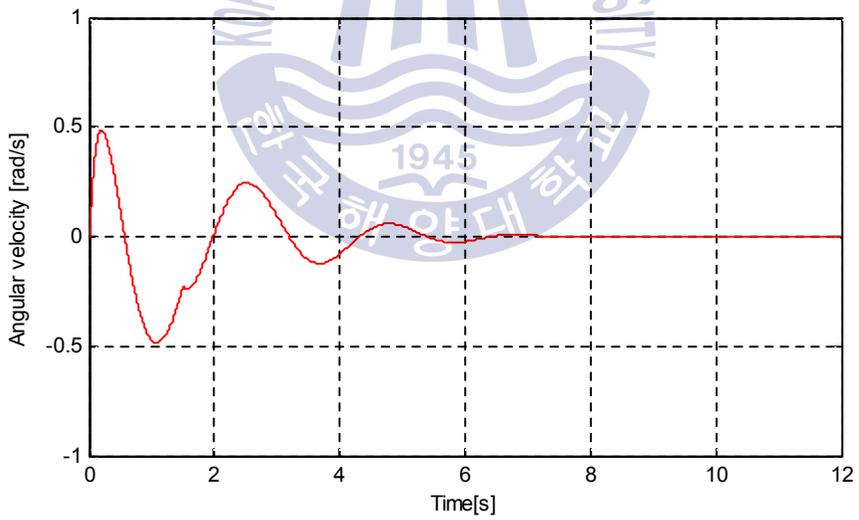
(a) Trolley position



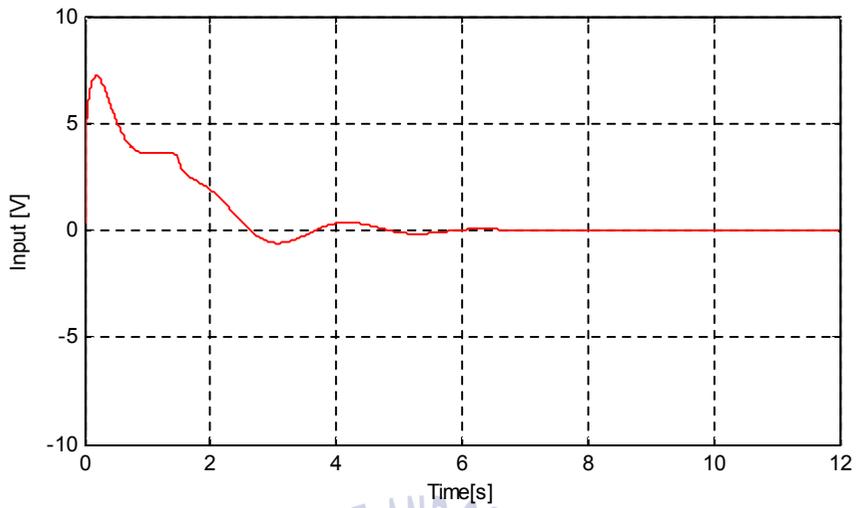
(b) Trolley velocity



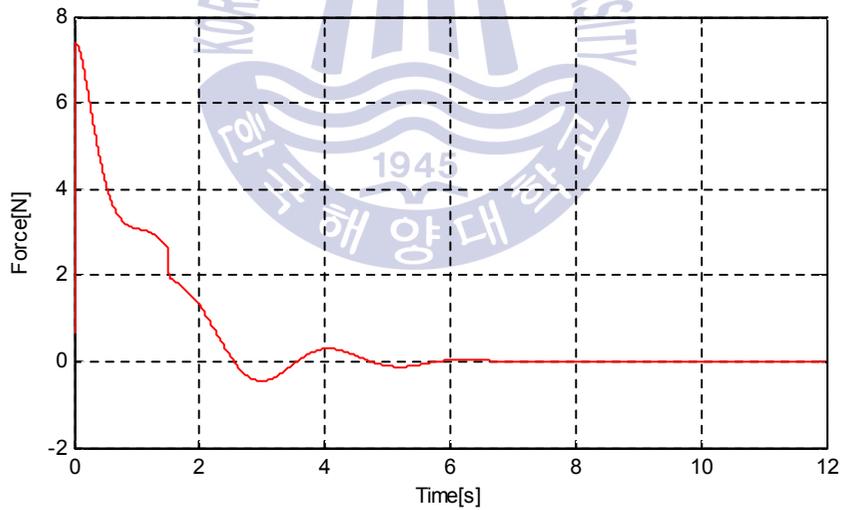
(c) Swing angle



(d) Swing angular velocity



(e) Control input



(f) Trolley input force

Fig. 5.20 Step responses of the adaptive fuzzy controller
(change of disturbance: $+0.1$ [rad] at 1.5 [s] in transient state)

Fig. 5.21은 트롤리가 목표위치에 정상상태오차 없이 도달한 이후인 7.0 [s]에서 한 샘플링 시간인 1 [ms] 동안 -0.2 [rad]의 외란을 인가한 경우이다. 이때, 외부 변수인 l 과 m 의 변화는 Fig. 5.18과 같다. Fig. 5.21의 (a)는 트롤리 위치, (b)는 트롤리 속도, (c)는 컨테이너 흔들림 각도, (d)는 컨테이너 흔들림 각속도, (e)는 제어 입력전압, (f)는 트롤리에 가해지는 힘의 변화를 나타낸다.

Fig. 5.21 (a)에서 트롤리가 목표위치에 도달한 이후인 7.0 [s]에서 -0.2 [rad]의 외란 인가 후 트롤리의 목표위치로 다시 복귀하는 시간은 약 2.2 [s]로 나타났으며, 이때 목표위치에서 최대로 벗어나는 거리는 약 8% (0.08 m)이다.

Fig. 5.21 (b)에서 트롤리의 이동방향으로 외란이 인가되었기 때문에 트롤리 이동속도가 순간적으로 $+0.2$ [m/s] 만큼 증속하였으며, 약 3.0 [s]가 지난 후 속도는 0이 되었다.

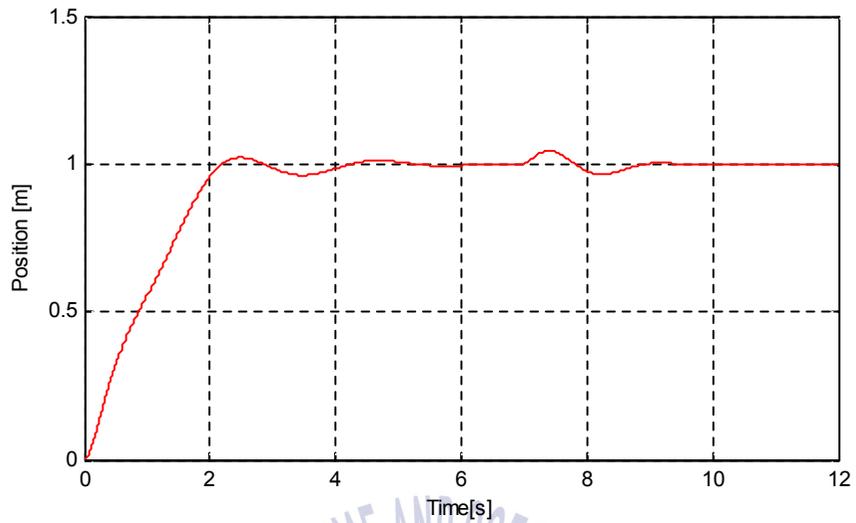
Fig. 5.21 (c)에서 인가한 -0.2 [rad]의 외란으로 인하여 흔들림이 순간적으로 -0.2 [rad] 만큼 발생했으며, 흔들림 범위는 $-0.2 \sim +0.12$ [rad]로 나타났다.

Fig. 5.21 (d)에서 인가된 외란으로 인하여 각속도가 순간적으로 $+0.7$ [rad/s]로 증속되었으며, 각속도 변화량은 $-0.3 \sim +0.7$ [rad/s]로 나타났다.

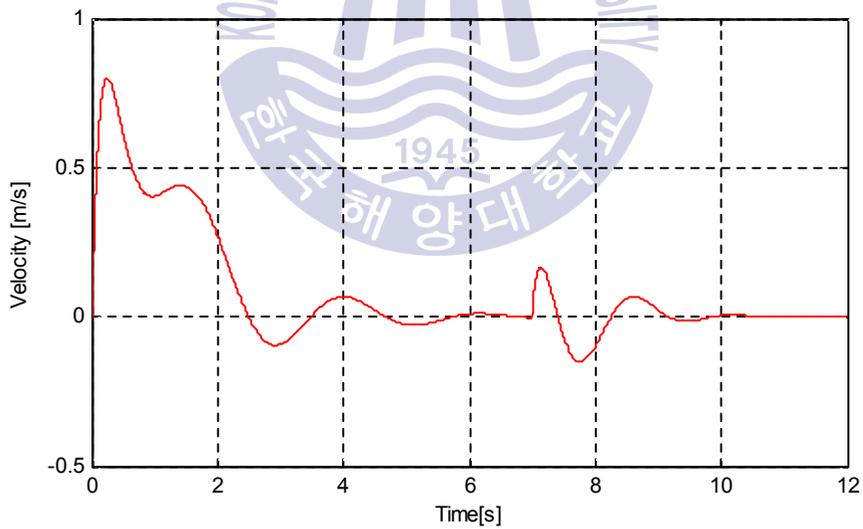
Fig. 5.21 (e)에서 인가한 외란으로 인하여 순간적으로 4.7 [V]의 제어입력이 발생했으며, 약 2.0 [s] 후 제어 입력전압은 안정화되었다.

Fig. 5.21 (f)에서 외란으로 인하여 순간적으로 7.9 [N]의 힘이 트롤리에 가해졌으며, 약 2.0 [s] 후에 안정화되었다.

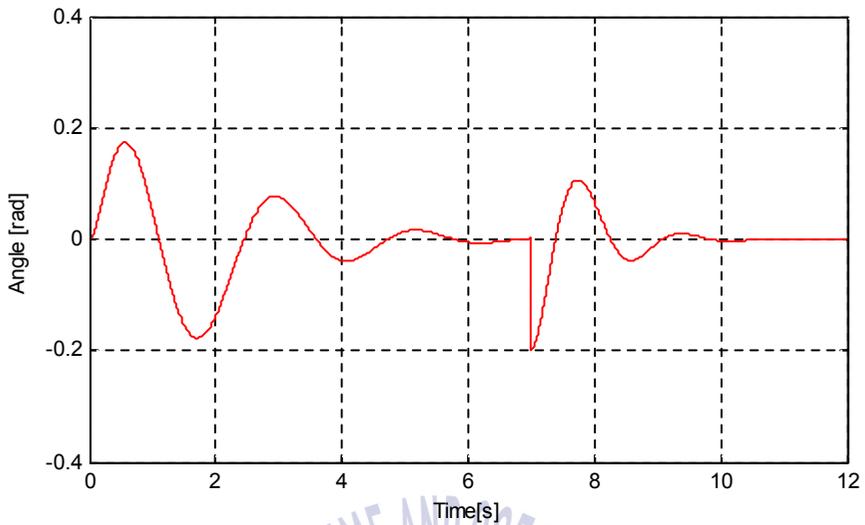
결론적으로 제안한 적응 퍼지제어기는 트롤리가 목표위치에 도달한 이후인 7.0 [s]에서 -0.2 [rad]의 외란을 인가한 경우에도 트롤리의 추가적인 목표위치 추종 및 목표위치 도착 시 매달린 컨테이너의 흔들림에 대해 양호한 응답 성능을 보이고 있다.



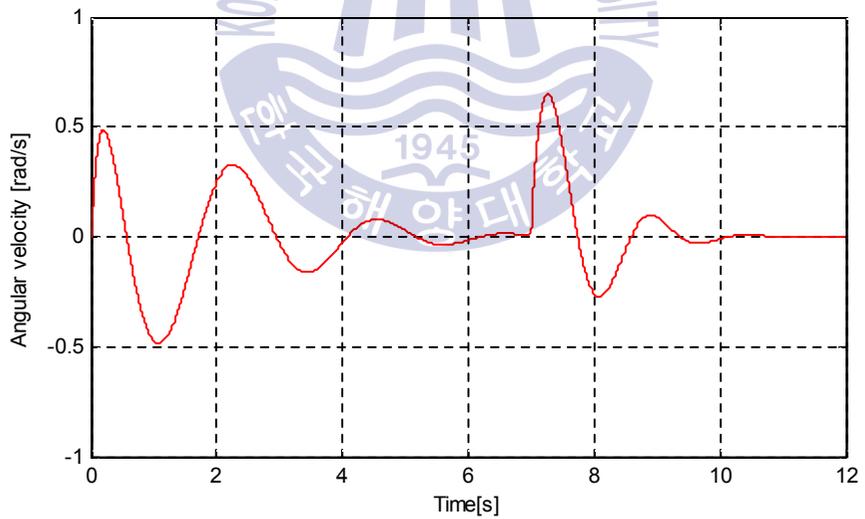
(a) Trolley position



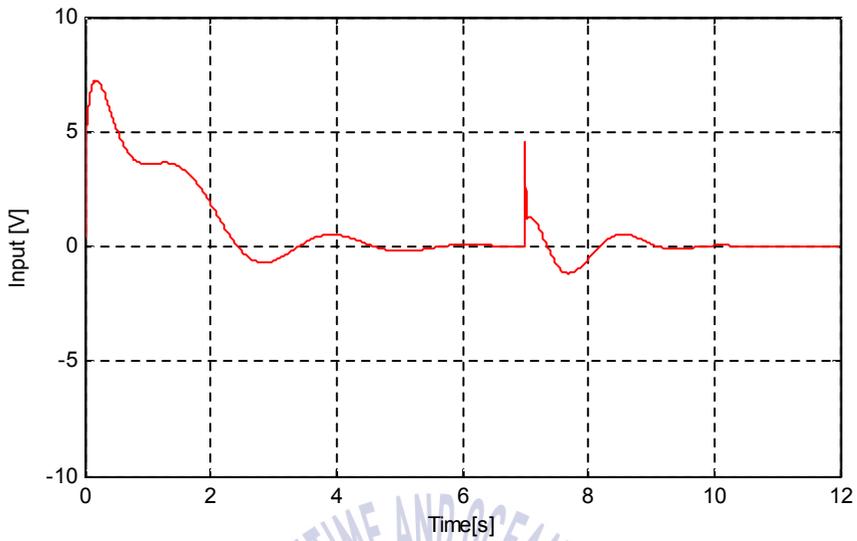
(b) Trolley velocity



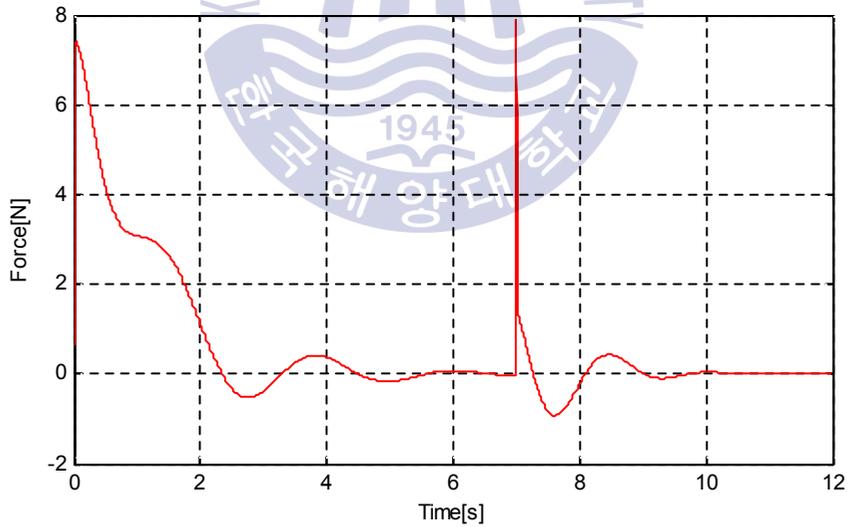
(c) Swing angle



(d) Swing angular velocity



(e) Control input



(f) Trolley input force

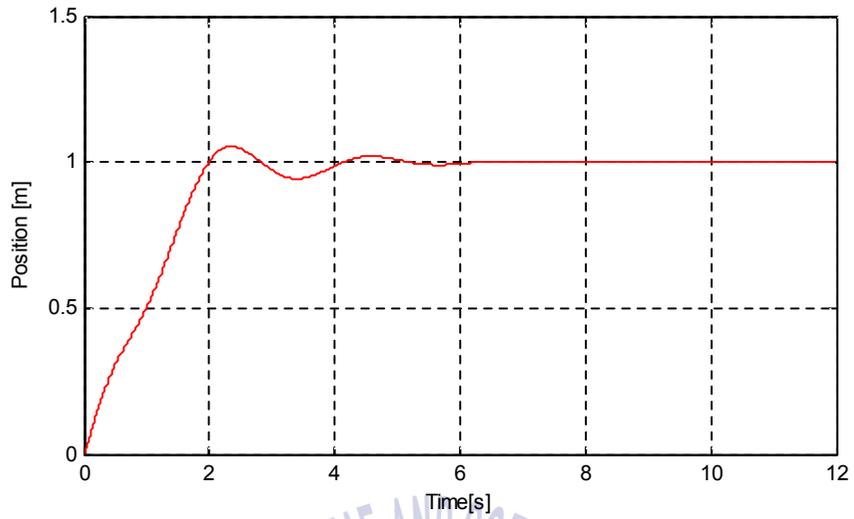
Fig. 5.21 Step responses of the adaptive fuzzy controller
 (change of disturbance: -0.2 [rad] at 7.0 [s] in steady-state)

5.3.3 초기조건 변동에 대한 검토

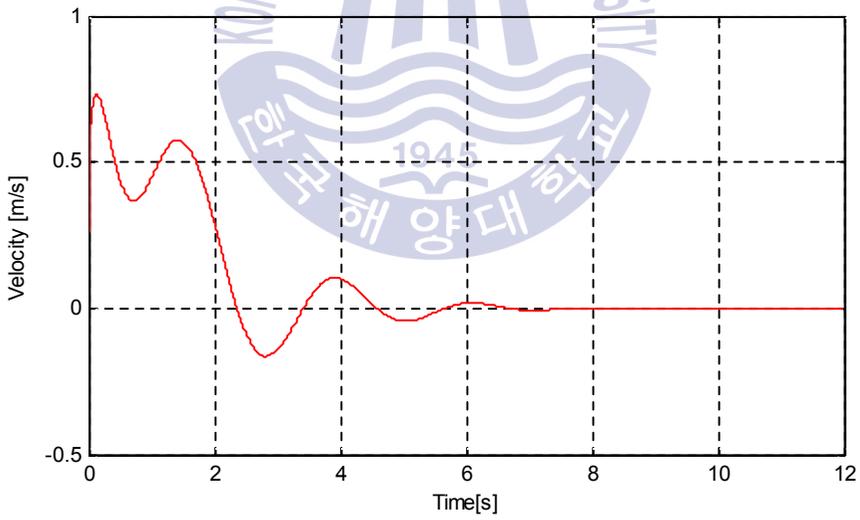
STS 크레인의 하역시스템에서 상태변수의 초기조건이 0이 아닌 상황에 대한 적응 퍼지제어기의 강인성을 확인하고자 한다. Fig. 5.22는 초기의 컨테이너 흔들림 각도가 0.1 [rad], 트롤리 속도가 0.2 [m/s], 컨테이너 흔들림 각속도가 0.5 [rad/s]인 상태로 움직이고 있는 경우($x_p(0) = [0 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.5]^T$)이며, 이와 같은 초기의 움직임은 실제 작업환경에서 돌발사태와 같은 특별한 상황에서 발생하는 경우로써 적응 퍼지제어기의 강인한 제어성능을 확인하기 위하여 실시한다. 이때, 외부 변수인 l 과 m 의 변화는 Fig. 5.18과 같다. Fig. 5.20의 (a)는 트롤리 위치, (b)는 트롤리 속도, (c)는 컨테이너 흔들림 각도, (d)는 컨테이너 흔들림 각속도, (e)는 제어 입력전압, (f)는 트롤리에 가해지는 힘의 변화를 나타낸다.

Fig. 5.22 (a)에서 초기조건이 0이 아닌 상황에서 트롤리의 목표위치 최초 도착시간은 약 2.0 [s], 목표위치 완전 추종시간은 약 6.2 [s]로 나타났다. 이때, 최대 오버슈트는 약 6% (0.06 m), 최대 언더슈트는 약 7% (0.07 m) 발생하였다. Fig. 5.22 (b)에서 트롤리의 이동속도 변화폭은 $-0.18 \sim +0.72$ [m/s]로 나타났으며, 트롤리 이동속도는 약 7.2 [s] 후에 0이 되었다. 적응 퍼지제어기의 트롤리 이동속도가 이렇게 빠르게 나타난 이유는 트롤리 속도의 초기조건이 0.2 [m/s]이었기 때문으로 사료된다. Fig. 5.22 (c)에서 컨테이너의 흔들림 각도 변화 폭은 $-0.26 \sim +0.32$ [rad]로 나타났으며, 컨테이너의 흔들림은 약 7.0 [s] 후 안정화되었다. Fig. 5.22 (d)에서 트롤리가 목표위치에 추종할 때까지의 각속도 변화량은 $-0.75 \sim +0.75$ [rad/s]로 나타났으며, 약 7.8 [s] 후에 흔들림 각속도는 0이 되었다. Fig. 5.22 (e)에서 초기조건이 0이 아닌 상황에서 제어 입력전압은 작업시작과 동시에 제한값인 10 [V]까지 상승했으며, 이후 트롤리가 목표위치에 추종할 때까지의 입력전압 변화는 $-1 \sim +7$ [V]로 나타났다. 제어 입력전압은 약 6.5 [s] 후에 0이 되었다. Fig. 5.22 (f)에서 초기조건이 0이 아닌 상황에서 트롤리에 가해진 힘은 작업시작과 동시에 제한값인 8.0 [N]까지 상승했으며, 이후 트롤리가 목표위치에 추종할 때까지의 입력전압 변화는 $-0.8 \sim +6.8$ [N]으로 나타났다.

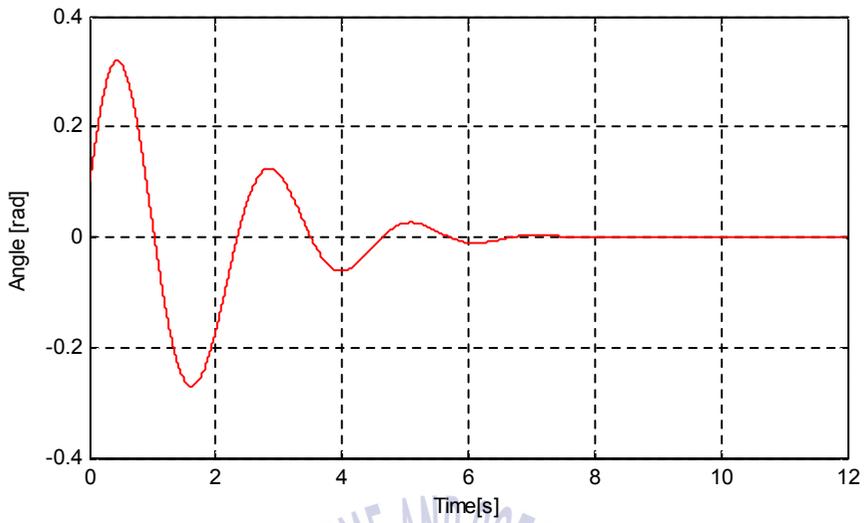
결론적으로 제안한 적응 퍼지제어기는 트롤리 속도 및 컨테이너 흔들림 각도의 초기조건이 0이 아닌 경우에도 작업초기에 강한 힘으로 트롤리를 이동시켜 목표위치에 빠르게 추종시키고 있으며, 동시에 목표위치에서 매달린 컨테이너의 흔들림을 잘 제어하고 있다.



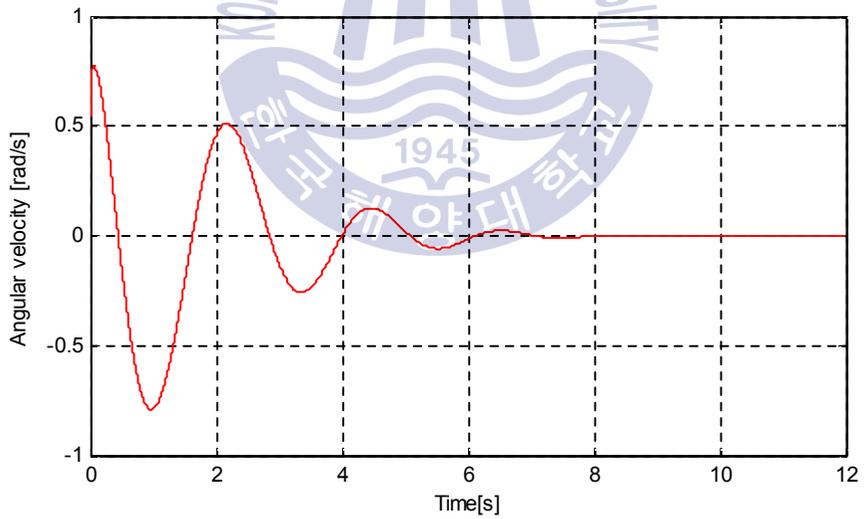
(a) Trolley position



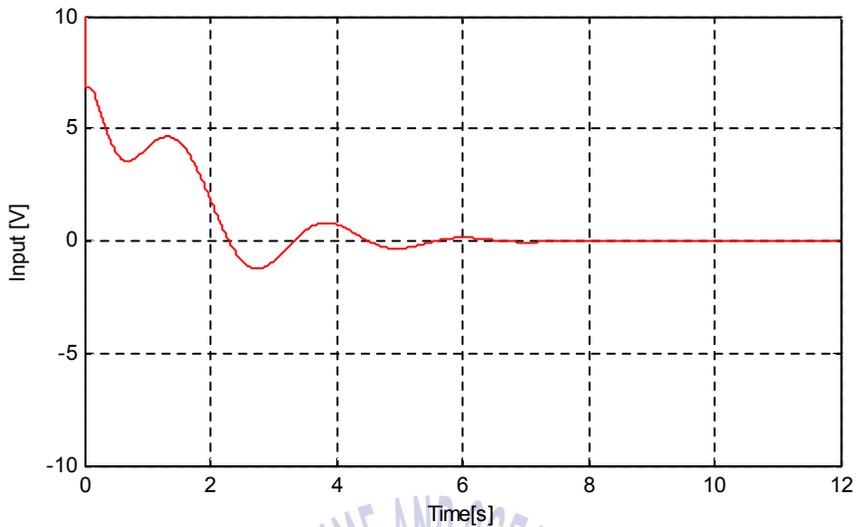
(b) Trolley velocity



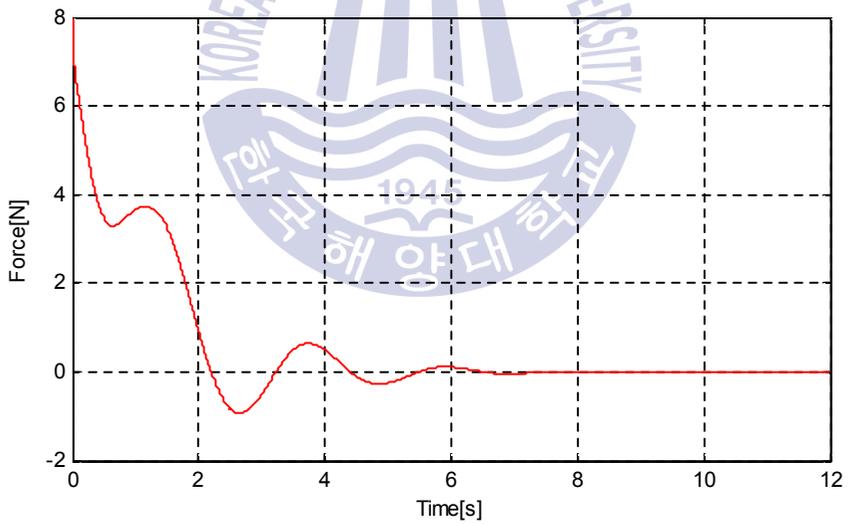
(c) Swing angle



(d) Swing angular velocity



(e) Control input



(f) Trolley input force

Fig. 5.22 Step responses of the adaptive fuzzy controller
when $x_p(0) = [0 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.5]^T$

5.3.4 질량 변화에 대한 검토

STS 크레인의 하역시스템에서 작업 중 컨테이너의 질량도 동시에 변화하는 경우
 대한 적응 퍼지제어기의 강인성을 확인하고자 한다.

Fig. 5.24는 컨테이너 적화작업 중 와이어로프의 길이 ℓ 과 컨테이너의 질량 m 이 동
 시에 변화하는 상황을 가정한 경우이다. 이는 실제 조종환경에서 자주 발생하는 상황
 은 아니지만 작업 중 컨테이너 내품이 흘러내리는 등 가혹한 형태의 작업환경에서 적
 응 퍼지제어기의 강인한 제어성능을 확인하기 위하여 실시한다. 이때, 외부 변수인 ℓ 과
 m 의 변화는 Fig. 5.23과 같다. Fig. 5.24의 (a)는 트롤리 위치, (b)는 트롤리 속도, (c)는
 컨테이너 흔들림 각도, (d)는 컨테이너 흔들림 각속도, (e)는 제어 입력전압, (f)는 트롤
 리에 가해지는 힘의 변화를 나타낸다.

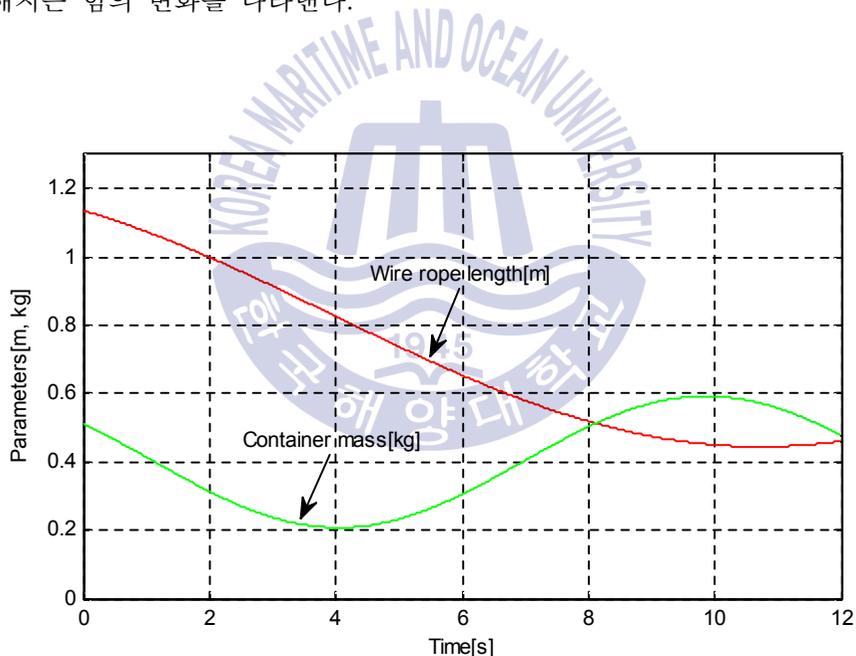


Fig. 5.23 Change of parameters(ℓ & m)

Fig. 5.24 (a)에서 작업 중 질량이 변화하는 상황에서의 트롤리 목표위치 최초 도착시간은 약 2.2 [s], 목표위치 완전 추종시간은 약 6.8 [s]로 나타났다. 이때, 최대 오버슈트는 약 2%(0.02 m), 최대 언더슈트는 약 4%(0.04 m)로 미소하게 발생하였다.

Fig. 5.24 (b)에서 트롤리 이동속도 변화량은 $-0.1 \sim +0.78$ [m/s]로 나타났으며, 트롤리 이동속도는 약 7.2 [s] 후에 0이 되었다. 적응 퍼지제어기는 작업 초기 0.2 [s] 이내에 강한 힘으로 빠르게 이동하여 트롤리를 목표위치에 빠르게 추종시키고 있다.

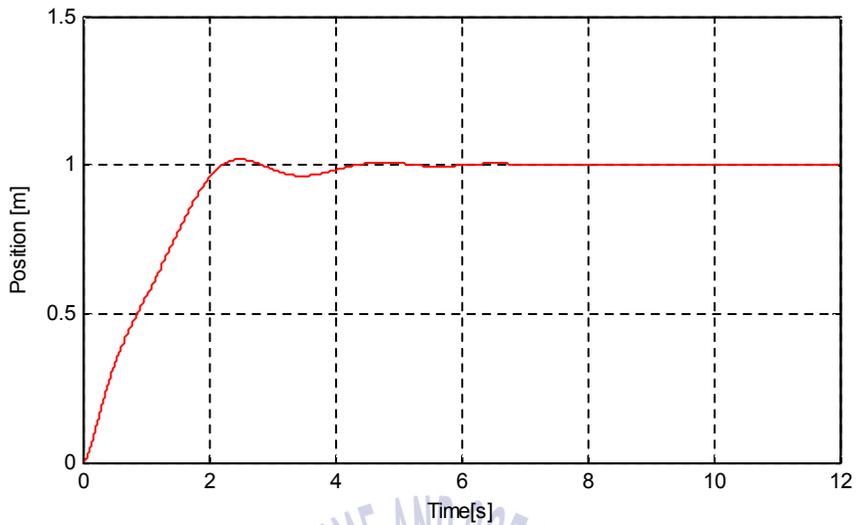
Fig. 5.24 (c)에서 흔들림 각도는 ± 0.18 [rad]으로 나타났으며, 컨테이너의 흔들림은 약 7.0 [s] 후 안정화되었다.

Fig. 5.24 (d)에서 각속도는 ± 0.5 [rad/s]로 나타났으며, 약 7.8 [s] 후에 흔들림 각속도는 0이 되었다.

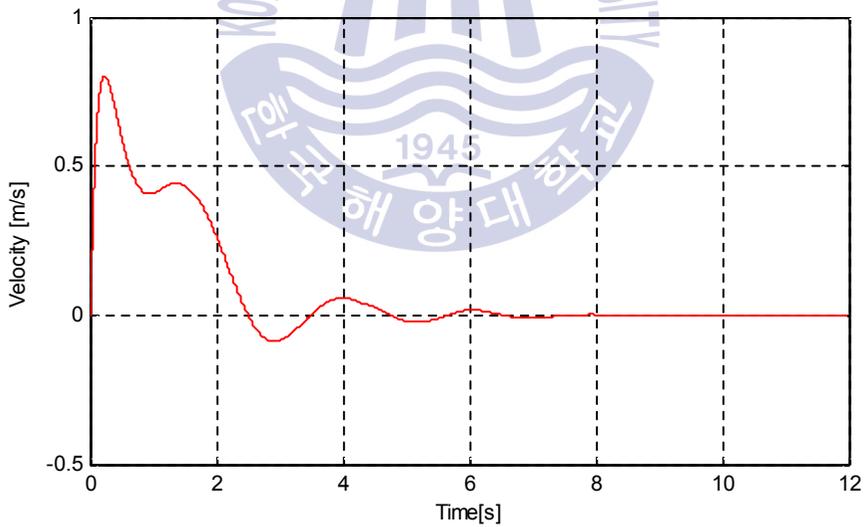
Fig. 5.24 (e)에서 제어 입력전압은 작업 초기 0.2 [s] 이내에 약 7 [V]까지 상승했으며, 이후 트롤리가 목표위치에 추종할 때까지의 입력전압 변화는 $-1 \sim +7$ [V]로 나타났다. 제어 입력전압은 약 7.2 [s] 후에 0이 되었다.

Fig. 5.24 (f)에서 트롤리에 가해진 힘은 작업시작과 동시에 제한값인 8.0 [N]까지 급상승했으며, 이후 2.4 [s] 동안에 0 [N]까지 급강하한 후 안정화되었다.

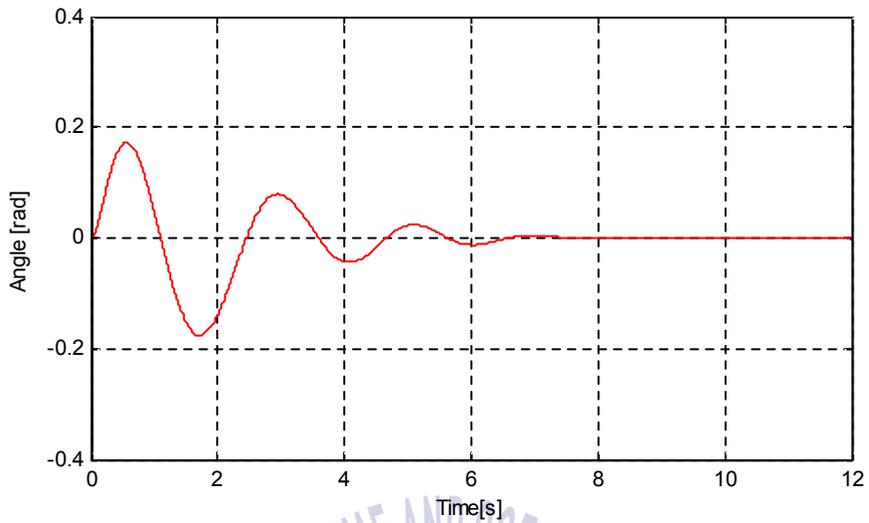
결론적으로 제안한 적응 퍼지제어기는 작업 중 질량이 변화하는 상황에서도 작업초기에 강한 힘으로 트롤리를 이동시켜 목표위치에 빠르게 추종시키고 있으며, 동시에 매달린 컨테이너의 흔들림을 잘 제어하고 있음을 확인할 수 있다.



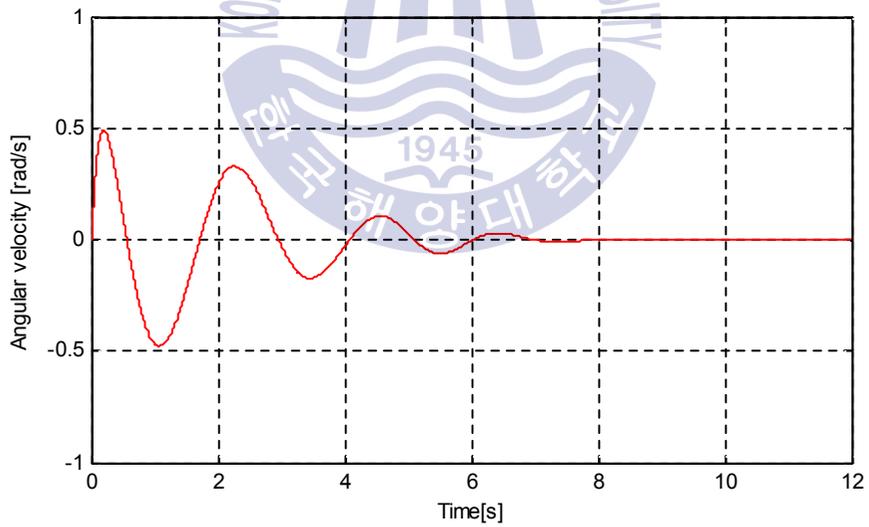
(a) Trolley position



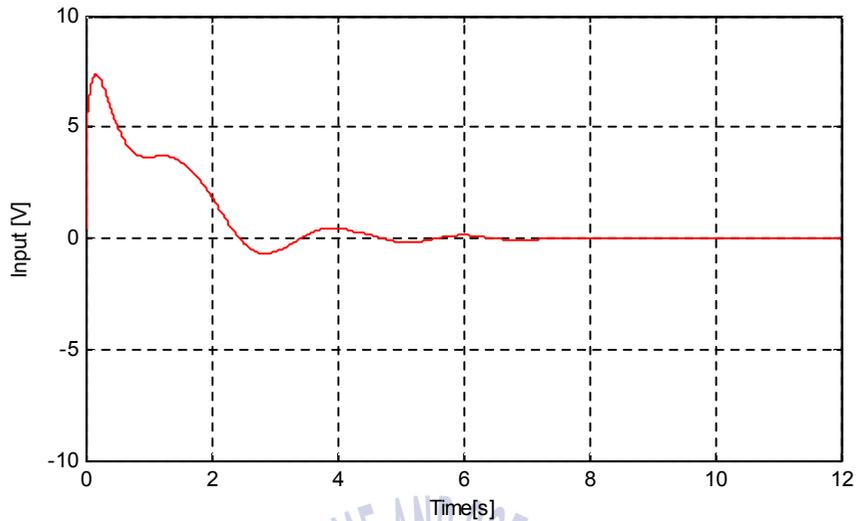
(b) Trolley velocity



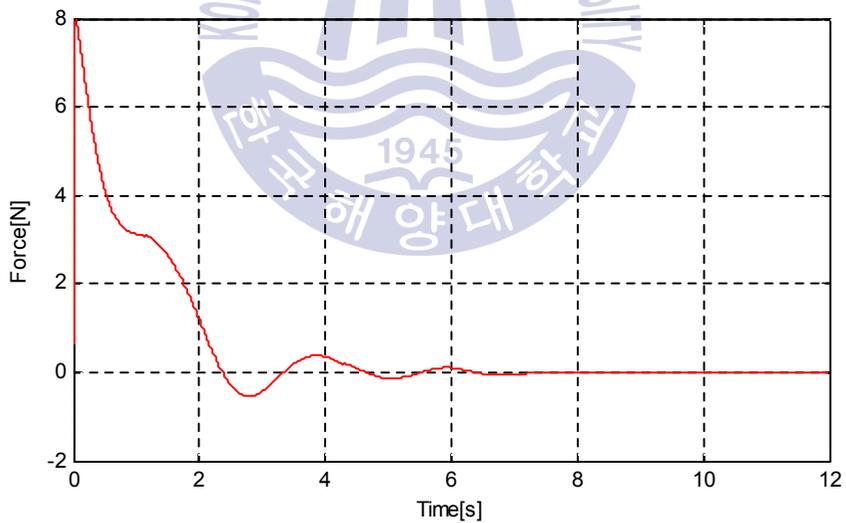
(c) Swing angle



(d) Swing angular velocity



(e) Control input



(f) Trolley input force

Fig. 5.24 Step responses of the adaptive fuzzy controller
(m : sinusoidal change)

제 6 장 결 론

항만에서 STS 크레인의 하역시스템은 일반적으로 비선형시스템으로 표현되며, 컨테이너 화물을 양·적화하는 동안 호이스트 와이어로프의 길이 및 컨테이너의 질량이 가변된다. 이에 따라 매 작업마다 하역시스템의 파라미터는 필연적으로 변화하게 되며, 동시에 외부의 외란도 존재하는 시스템이다. 이와 같은 시스템은 종래의 고전적인 제어기법으로는 빠른 시간 안에 트롤리를 목표하는 위치에 정밀하게 추종시킴과 동시에 컨테이너의 흔들림이 최소가 되도록 제어하는 것은 어려운 문제이다.

따라서 본 논문에서는 외부 변수(파라미터)로 호이스트 와이어로프의 길이와 컨테이너의 질량을 고려한 STS 크레인 하역시스템의 수학적 모델링을 통해 얻어진 비선형시스템에 대해 9개의 서브시스템으로 선형모델을 유도하였다. 이 서브시스템을 퍼지결합을 통해 비선형시스템과 유사한 동역학적 특성을 나타내는 퍼지모델로 구현하였다.

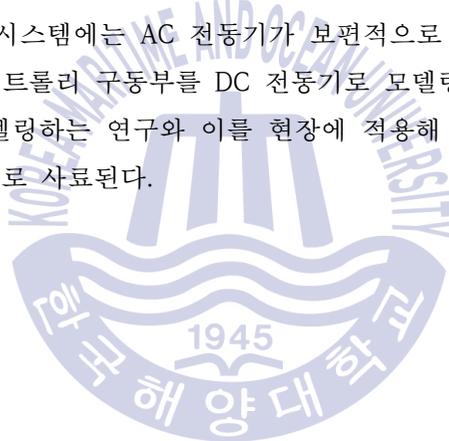
최종적으로 퍼지모델링 기법을 이용하여 트롤리가 빠르고 정밀하게 목표위치에 추종할 뿐만 아니라 컨테이너의 흔들림도 최소화시키는 적응 퍼지제어기를 설계하였으며, 시뮬레이션을 통해 그 성능을 확인하였다.

구체적으로 퍼지모델은 STS 크레인의 비선형시스템을 외부 변수인 호이스트 와이어로프의 길이와 컨테이너의 질량 변화에 따라 9개의 선형 서브시스템으로 분할한 후, 삼각형과 사다리꼴 형태의 소속함수를 이용하여 퍼지결합함으로써 퍼지모델을 구현하였다. 이 퍼지모델은 비선형시스템을 얻을 수 없는 환경에서 비선형시스템을 대신할 수 있게 된다. 또한, 유전알고리즘을 이용하여 각 서브시스템에 대해 PI형 상태피드백 제어기 이득을 구한 후, 이들을 퍼지모델 구현에 사용한 동일한 소속함수로 퍼지결합하여 적응 퍼지제어기를 설계하였다.

제안된 기법들은 STS 크레인의 비선형시스템에 적용하여 시뮬레이션을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 라그랑지 방정식을 이용하여 STS 크레인의 비선형시스템을 유도할 수 있었다.
- 호이스트 와이어로프 길이와 컨테이너의 질량이 변화하는 STS 크레인의 작업환경에서도 퍼지모델은 STS 크레인의 비선형시스템을 효과적으로 표현하고 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.
- 시뮬레이션 결과 제안한 적응 퍼지제어기는 항만용 STS 크레인이 외부 변수(파라미터)의 변화 및 외란이 발생하는 작업환경에서도 트롤리의 목표위치 추종 및 컨테이너의 흔들림 제어에 양호한 응답특성을 나타내었다.

이상의 결론으로 본 논문에서 제안한 퍼지모델링 방법 및 적응 퍼지제어기 설계기법은 다양한 비선형시스템의 제어에도 응용하여 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 현재 STS 크레인의 하역시스템에는 AC 전동기가 보편적으로 사용되고 있으나 실험 모형장치의 한계로 인하여 트롤리 구동부를 DC 전동기로 모델링 한 부분이다. 트롤리 구동부를 AC 전동기로 모델링하는 연구와 이를 현장에 적용해 보는 것은 향후의 연구과제로 수행되어야 할 것으로 사료된다.



참 고 문 헌

- [1] 김근섭, 2018, “항만산업 전망과 대응”, 한국항만협회, 항만 통권143호, pp.39-44.
- [2] 이연경, 정동훈, 최상희, 2014, “극초대형선 처리를 위한 신개념 컨테이너터미널”, 해운물류연구 제30권 제3호, pp.671-696.
- [3] 차상현, 노창균, 2018, “컨테이너터미널에서 야드 이송장비 자동화 적용방안에 관한 연구”, 한국항해항만학회지 제42권 제3호, pp.217-226.
- [4] 한국해사문제연구소, 2017, “한국, 완전무인자동화 항만 세계흐름 따라가야“, 해양한국 통권 제526호, pp.93-93.
- [5] 전영환, 2015, “항만자동화 추진현황과 과제”, 한국항만협회, 항만 통권133호, pp.7-14.
- [6] F. Boustany and B. Andra-Novel, 1992, “Adaptive Control of Non-completely Controlled Mechanical Systems Using Dynamic Feedback Linearization and Estimation Design”, Int. J. Adaptive Control and Signal Processing, Vol. 6, pp. 589-610.
- [7] O. Yamaguchi, 1994, “Anti-swing Control of Overhead Crane”, 材料またProcess, Vol. 7, pp. 347.
- [8] T. Okawa, O. Yamaguchi and H. Sekine, 1995, “Computer Control of Overhead Crane”, NKK 기보, No. 149, pp. 40-45.
- [9] 윤지섭, 1995, “무진동 크레인의 구현을 위한 여러 가지 제어방식의 비교 연구”, 대한기계학회논문집, 제19권 9호, pp. 2399-2411.
- [10] 김영복, 문덕홍, 양주호, 채규훈, 2005, “동시최적화 설계기법을 이용한 항만용 크레인의 흔들림 제어계 설계”, 한국해양공학회지 제19권 제3호, pp.66-73.
- [11] 박한, 좌동경, 홍금식, 2005, “컨테이너 크레인의 되먹임 선형화제어”, 한국해양공학회지 제19권 제3호, pp.58-64..
- [12] 카와이 히데키, 김영복, 최용운, 2008, “실용화를 고려한 Anti-Sway 시스템 구축”, 한국해양공학회지 제22권 제4호, pp.90-96.
- [13] 강범구, 2017, “항만 물류 IT 산업의 변화와 미래”, 한국항만협회, 항만 통권139호, pp.24-29.

- [14] 김선구, 2014, “컨테이너터미널 물류시스템의 평가와 개선에 관한 연구”, 순천대학교 박사학위논문.
- [15] Ivan Kristianto Singgih, Kap Hwan Kim, 2016, “컨테이너 터미널에서의 유연한 적하작업 순서 결정법”, 한국SCM학회지 제16권 제2호, pp.93-104.
- [16] 서정훈, 이상혁, 김갑환, 2018, “레일기반 컨테이너 이송시스템의 교착에 관한 시뮬레이션 연구”, 한국항해항만학회지 제42권 제1호, pp.47-56.
- [17] 조성우, 최상희, 원승환, 2017, “저탄소 자동화 컨테이너 터미널 긴급상황 및 대처방안에 관한 연구”, 전자무역연구 제15권 제2호 pp.93-115.
- [18] 신창훈, 박종원, 권민균, 신재영, 2017, “컨테이너 터미널의 RTGC작업 분산지표 적용연구”, 한국항해항만학회지 제41권 제4호, pp.229-234.
- [19] 박영규, 2016, “컨테이너 터미널에서 이웃 베이를 활용한 컨테이너 재정돈 계획”, 한국항해항만학회지 제40권 제3호, pp.113-120.
- [20] 나웅수, 유주영, 남기찬, 2009, “컨테이너크레인(C/C)의 효율적인 예방보전에 관한 연구”, 한국항해항만학회지 제33권 제5호, pp.339-344.
- [21] 김영한, 장상목, 2005, “L1-최적제어를 이용한 컨테이너 크레인의 운전”, 한국항해항만학회지 제29권 제4호, pp.409-413.
- [22] 김영복, 문덕홍, 양주호, 채규훈, 2005, “동시최적화 설계기법을 이용한 항만용 크레인의 흔들림 제어계 설계”, 한국해양공학회지 제19권 제3호, pp.66-73.
- [23] 김도연, 정병진, 정동화, 2009, “적용 퍼지제어를 이용한 컨테이너 크레인의 고성능 제어”, 조명·전기설비학회논문지 제23권 제2호, pp.115-124.
- [24] 백운보, 2015, “미지의 부하와 흔들림 각속도를 갖는 컨테이너 크레인의 2차 슬라이딩 모드 제어”, 제어·로봇·시스템학회논문지 제21권 제2호, pp.145-149.
- [25] 최용석, 원승환, 2009, “듀얼 트롤리형 컨테이너 크레인의 버퍼공간 분석을 위한 시뮬레이션 연구”, 한국항해항만학회지 제33권 제5호, pp.331-337.
- [26] 정창윤, 신재영, 2009, “컨테이너 터미널의 효율적인 선적 작업을 위한 Dual Cycle 계획”, 한국항해항만학회지 제33권 제8호, pp.555-562.
- [27] 전태원, 2004, “항만 자동화를 위한 야드 크레인의 절대위치 측정 기법”, 전력전자학회논문지 제9권 제2호, pp.163-170.
- [28] 홍동희, 2010, “항만 야드 자동화크레인(ATC)에서 효율적인 컨테이너번호 인식시스템 개발”, 한국컴퓨터정보학회논문지 제15권 제9호, pp.57-65.

- [29] 손동섭, 2002, “신경회로망 예측제어에 의한 Transfer Crane의 ATCS 개발에 관한 연구”, 한국항해항만학회지 제26권 제5호, pp.537-542.
- [30] 최상희, 2017, “항만하역장비의 진화”, 한국항만협회, 항만 통권139호, pp.9-17.
- [31] 김태형, 이성욱, 2006, “풍하중 설계 기준에 따른 컨테이너 크레인의 구조 안정성 평가”, 경남정보대학, 논문집 제34집, pp.69-78.
- [32] 이정명, 한동섭, 이성욱, 심재준, 한근조, 2006, “설계풍속 상향조정에 따른 레일클램프의 췌기각에 대한 연구”, 한국정밀공학회지 제23권 제12호, pp.103-110.
- [33] 한동섭, 한근조, 2009, “컨테이너 크레인용 레일클램프의 U형 췌기 형상설계”, 한국동력기계공학회지 제13권 제6호, pp.117-122.
- [34] 최상희, 2009, “탠덤(Tandem) 컨테이너크레인의 도입에 따른 터미널 적용 방안 분석”, 한국해양수산개발원, 해양물류연구 제3권.
- [35] J. Matyas, 1965, “Random Optimization”, Automation and Remote Control, Vol.26, pp. 246-253.
- [36] D. E. Goldberg, 1989, “Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning”, Addison-Wesley.
- [37] D. Abramson and J. Abela, 1992, “A Parallel Genetic Algorithm for Solving the School Timetabling Problem”, The 15th Australian Computer Science Conf., Hobart.
- [38] E. burke, D. Elliman and R. Weare, 1994, “A Genetic Algorithm Based University Timetabling System”, Proc. 2nd East-West Int. Conf. on Computer Technologies in Education, pp. 35-40.
- [39] 박현재, 박진현, 최영규, 2017, “유전알고리즘을 이용한 이동로봇의 시간 및 에너지 최적제어”, 한국정보통신학회논문지 제21권 제4호, pp.688-697.
- [40] J. D. Schaffer et al., 1989, “A Study of Control Parameters Affecting Online Performance of Genetic Algorithms for Function Optimization”, Proc. 3rd Int. Conf. on Genetic Algorithms and Their Applications, pp. 51-60.
- [41] 최영규, 박진현, 2016, “신경회로망과 유전알고리즘에 기초한 이동로봇의 제어 이득 최적화”, 한국정보통신학회논문지 제20권 제4호, pp.698-706.
- [42] R. Das and D. E. Goldberg, 1988, “Discrete-time Parameter Estimation with Genetic Algorithms”, Proc. 19th Annual Pittsburgh Conf. on Modeling and Simulation, pp.2391-2395.

- [43] 신명호, 김민정, 이윤형, 소명옥, 진강규, 2006, “PPGA 기반의 시스템 파라미터 추정과 PID 제어기 동조”, 제어·자동화·시스템공학 논문지, Vol. 12, No.7, pp. 644-649.
- [44] 이윤형, 소명옥, 2014, “DC 모터의 GA 기반 파라미터 추정”, 한국마린엔지니어링학회지 제38권 제6호, pp.716-722.
- [45] P. Arena, R. Caponette, L. Fortuna and M. G. Xibilia, 1992, “Genetic Algorithm to Select Optimal Neural Network Topology”, Proc. 35th Midwest Symposium on Circuit and Systems, Washington.
- [46] P. Arena, R. Caponette, L. Fortuna and M. G. Xibilia, 1993, “MLP Optimal Selection Via Genetic Algorithms”, Proc. Int. Conf. Neural Networks and Genetic Algorithms.
- [47] D. J. Montana, 1989, “Automated Parameter Tuning for Interpretation of Synthetic Images”, Handbook of Genetic Algorithms, VNR Computer Library.
- [48] 소명옥, 이윤형, 진강규, 정병건, 오세준, 2014, “GA기반의 슬라이딩 모드 제어를 이용한 Pehlivan 카오스 시스템의 동기화”, 한국마린엔지니어링학회지 제38권 제4호, pp.424-429.
- [49] 지홍일, 서창진, 2015, “유전 알고리즘의 연산처리를 통한 개선된 경로 탐색 기법”, 전기학회논문지 제64권 제4호, pp.315-320.
- [50] 진강규, 주상래, 2000, “실수코딩 유전알고리즘에 관한 연구”, 제어·자동화·시스템공학 논문지, Vol. 6, No. 4, pp. 268-275.
- [51] D. T. Pham and G. Jin, 1996, “A Hybrid Genetic Algorithm”, Proc. 3rd World Conf. on Expert Systems, Seoul, Korea, Vol. 2, pp. 748-757.
- [52] N. J. Radcliffe, 1991, “Equivalence Class Analysis of Genetic Algorithms”, Complex Systems, Vol. 5, No. 2, pp. 183-205.
- [53] A. Wright, 1991, “Genetic Algorithms for Real Parameter Optimization”, Foundations of Genetic Algorithms 1, G. J. E. Rawlin(Ed.), Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, CA.
- [54] Z. 1996, “Michalewicz, Genetic Algorithms+Data Structure=Evolution Programs”, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [55] L. Zheng, 1992, “A Practical Guide to Tune of Proportional and Integral(PI) like Fuzzy Controllers”, IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp. 633-640

- [56] 유현호, 최병재, 2016, “새로운 비퍼지화 기법에 의한 퍼지논리제어기 설계”, 한국지능시스템학회 논문집 제26권 제1호 (2016년 춘계), pp.27-27.
- [57] T. Tagaki and M. Sugeno, 1985, “Fuzzy Identification of Systems and Its Application to Modeling and Control”, IEEE Trans. on SMC, Vol. SMC-15, No. 1, pp. 116-132.
- [58] K. Tanaka, T. Ikeda, H. O. Wang, 1997, “Controlling Chaos via Model-based Fuzzy Control System Design”, Proceedings of the 36th Conference on Decision & Control, pp.1448-1493.
- [59] C. Tseng, B. Chen, H. Uang, 2001, “Fuzzy Tracking Control Design for Nonlinear Dynamic Systems via T-S Fuzzy Model”, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 9, No. 3, pp.381-392.
- [60] M. Sugeno, K. Tanaka, 1991, “Successive Identification of Fuzzy Model and its application to prediction of a Complex System”, Fuzzy Sets and System, Vol. 42, pp. 315-334.
- [61] 이원창, 강근택, 2017, “비선형 시스템의 계단 입력 응답과 GA를 이용한 퍼지 모델링과 퍼지 제어기 설계”, 한국지능시스템학회논문지 제27권 제1호, pp.50-58.
- [62] 강근택, 오갑석, 2014, “TSK 퍼지 시스템을 이용한 퍼지 PID 제어기 설계”, 한국지능시스템학회논문지 제24권 제1호, pp.102-109.
- [63] 이주연, 소건백, 이운형, 소명옥, 진강규, 2015, “GA 기반의 비선형 PID 제어기 설계 및 CSTR 프로세스에 응용”, 한국마린엔지니어링학회지 제39권 제6호, pp.633-641.
- [64] Gun-Baek So, Gang-Gyoo Jin, 2018, “Fuzzy-based nonlinear PID controller and its application to CSTR”, (The)Korean journal of chemical engineering vol.35 no.4, pp.819-825.
- [65] 김한솔, 주영훈, 박진배, 2018, “T-S 퍼지 시스템의 퍼지 적분 슬라이딩 모드 추적 제어기 설계, 제어·로봇·시스템학회논문지 제24권 제6호, p.561-566.
- [66] Guoqing Zhang, Xianku Zhang, 2016, “Concise Adaptive Fuzzy Control of Nonlinearly Parameterized and Periodically Time-varying Systems via Small Gain Theory”, International journal of control, automation and systems vol.14 no.4, pp.893-905.

- [67] H.Wang, K. Tanaka, and M. Griffin, 1995, “Parallel Distributed Compensation of Nonlinear Systems by Takagi and Sugeno’s Fuzzy Moel” , in Proc. FUZZy-IEEE, Japan, pp.531-538.
- [68] 이윤형, 윤학진, 진강규, 소명옥, 2014, “비선형 시스템을 위한 퍼지 기반 적응 제어기” , 한국마린엔지니어링학회지 제38권 제6호, pp.710-715.
- [69] Muhammad Waqas Khan, 2015, “Adaptive fuzzy multivariable controller design based on genetic algorithm for an air handling unit” , Pergamon Press, Energy vol. 81, p.477-488.
- [70] Jin Yang, Hang Su, Zhijun Li, Di Ao, Rong Song, 2016, “Adaptive Control with a Fuzzy Tuner for Cable-based Rehabilitation Robot” , International journal of control, automation and systems vol.14 no.3, pp.865-875.
- [71] 윤용호, 2017, “Fuzzy 제어를 이용한 7상 BLDC 전동기 속도제어 구동시스템” , 전기학회논문지 제66권 제11호, pp.1663-1668.
- [72] Reza Karami Mohammadi, Fariba Haghhighipour, 2017, “Implementation of Uniform Deformation Theory in semi-active control of structures using fuzzy controller” , Smart structures and systems Vol.19 no.4, pp.351-360.
- [73] Boukhalfa Abdelouaheb, Khaber Farid, Essounbouli Najib, 2018, “Synergetic Adaptive Fuzzy Control for a Class of Nonlinear Discrete-time Systems” , International journal of control, automation and systems vol.16 no.4, p.1981-1988.