

# 적용 퍼지제어를 이용한 컨테이너 크레인의 고성능 제어

(High Performance Control of Container Crane using Adaptive-Fuzzy Control)

김도연 · 정병진 · 정동화\*

(Do-Yun Kim · Byung-Jin Jung · Dong-Hwa Jung)

## 요 약

본 논문은 컨테이너 크레인의 속도 및 위치의 고성능 제어를 위하여 적용 퍼지제어를 제안하였다. 컨테이너 크레인의 전동기는 에너지 및 환경문제에 대한 강인성을 갖는 가변속 드라이브인 SynRM으로 설정하였다. 종래의 PI 제어기는 파라미터 변동 및 외부환경에 의하여 트롤리의 정확한 위치, 속도와 sway 각을 제어하는데 어려움이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 적용 퍼지제어를 설계하여 크레인에 적용된 SynRM 드라이브의 성능을 분석하였다. 본 논문에서는 종래의 PI 제어와 적용 퍼지제어의 위치 및 속도 응답특성을 분석하고 비교함으로써, 논문의 타당성을 입증하였다.

## Abstract

This paper proposed an adaptive fuzzy controller for controlling speed and positions of a container crane. The motor used in container crane is installed as SynRM with variable-speed drive having the robustness on the problems of energy and environment. The conventional PI controller is not able to accurately track the position, speed and sway angle of trolley due to the factors of environment and the parameter variety. In the paper, we analyzed the performance of SynRM derive applied to the container crane by using an adaptive fuzzy control of SynRM in order to solve those problems. This paper analyzed the characteristics of position and speed response and compared the performance of PI controller with an adaptive Fuzzy controller, proving the validity.

Key Words : SynRM, AFLC, Fuzzy Control, Adaptive Control, Container Crane

## 1. 서 론

세계무역경제가 활성화됨에 따라 물동량은 매년 5~8[%] 수준으로 성장세가 지속되고 있으며 우리

나라의 경우도 2003년까지 13,186,000TEU(Twenty foot Equivalent Unit)로 물류량이 급속히 증가하였다. 이로 인해 컨테이너 크레인의 하역 부분에서 화물의 병목현상이 심하게 나타나 이 장비에 의해 항만의 가장 중요한 서비스 지표인 선박의 체항시간이 좌우되고 있다(해양수산부, 2004)[1]. 현재 부산항만과 광양항만은 동북아 컨테이너 거점항만으로서 지위를 선점하고자, 해양수산부에서는 2011년까지 이

\* 주저자 : 순천대학교 정보통신공학부 교수  
Tel : 061-750-3540, Fax : 061-752-1103

E-mail : hwa777@sunchon.ac.kr

접수일자 : 2008년 11월 27일  
1차심사 : 2008년 12월 1일, 2차심사 : 2008년 12월 22일  
심사완료 : 2009년 1월 5일

## 적용 퍼지제어를 이용한 컨테이너 크레인의 고성능 제어

두 항에 대규모 선석 건설을 추진하고 있다. 또한 국내외와 세계 각처에서 안벽크레인의 컨테이너터미널 생산성에 가장 큰 영향을 주는 장비로써 활발하게 논의되고 있다. 즉 중량의 물체를 이송 시 크레인을 이용하는데, 그 크레인은 트롤리(trolley)에 부착된 모터를 구동시킴으로써 체인이나 로프에 매달린 중량물을 목적위치까지 이송시킨다. 그러나 주위의 작업환경에 따라서 크레인을 이송하는 트롤리의 이동 속도, 운동하고자 하는 물체의 무게 및 이송거리 변화에 의하여 진자운동과 같은 흔들림과 그에 따른 위치오차도 함께 발생되므로, 이송물의 낙하 위험성 뿐만 아니라 주변물체와의 충돌, 선석 및 하역의 지연으로 작업의 능률 저하와 작업자의 안전성에도 영향을 미친다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 흔들림 제거가 반드시 필요하며 여러 가지 방법들이 제안되고 있다[2].

이러한 여러 문제점들을 해결하기 위하여 여러 가지 제어기법들이 적용되고 있지만 아직까지 실제 산업현장에서는 숙련자의 판단에 의존하고 있는 실정이다. 또한 진동 억제(Anti-swing)시스템 적용 시 모든 각도에 대하여 진동을 제어하다 보니 기존 DC 전동기는 제어 출력에 미처 추종하지 못하였다[3]. 따라서, 진동을 적절히 최소화시키면서 효율적으로 조정하고, 목표위치 도착 시에는 진동을 감소시킬 수 있는 크레인의 속도 제어 방법을 제안한다. 즉 적용 퍼지를 적용한 SynRM(Synchronous Reluctance Motor)으로 컨테이너 크레인을 보다 효율적으로 제어 할 수 있는 방법으로 구축하였다. 직류전동기는 브러시와 정류자를 사용하기 때문에 가격이 비싸고 규격이 커지며 브러시와 정류자의 마찰에 의한 마모 현상이 빈번하게 발생된다. 그리고 정기적인 검사와 수리로 인한 유지비가 많이 소요되며 마모된 기기를 자주 교체해야 하는 어려움이 있다. 따라서 직류전동기는 산업체에서 크게 호응을 받지 못하고 있으며 직류전동기를 모체로 하여 새로운 형태의 전동기의 개발에 변신을 시도하고 있다. 그에 따라 교류전동기는 구조적 특성상 튼튼한 구조로 되어 있으며 가격이 저렴하여 일반 산업계에 가장 많이 사용되어 왔다. 현재에도 산업설비 시스템에 주류를 이루고 있으나 효율이 더욱 우수한 전동기가 요구되고 있다.

이러한 이유 때문에 최근 SynRM이 많은 관심을 받고 있으며 교류전동기를 대체하여 적용이 가능한 장점으로 인식되고 있다. 회전자 설계를 개선하여 유도 전동기보다 역률과 효율 면에서 우수하며 [4-5], 벡터 제어 기법에 의한 제어성능이 다른 고성능 교류전동기보다 양호하다는 것이 입증되었다[6]. SynRM 드라이브를 제어하기 위하여 아직도 산업현장에서는 일반적으로 PI 제어를 많이 사용하고 있다[7]. 이는 PI 제어기가 간단하게 구현할 수 있고 파라미터와 시스템의 응답설정 사이에 존재하는 관계가 명확하기 때문이다. 또한 PI 제어기는 다양한 최신 제어 알고리즘과 기법을 개발하는데 기초가 된다. PI 제어기의 고정된 이득은 어떤 동작조건에 환경에서는 양호하게 수행된다. 그러나 이 제어기는 일반적으로 비선형과 불확실한 모델에 의해 복잡하고 시변이며 비선형일 경우에는 문제점이 나타난다[8-9]. 특히 외란, 속도 및 부하 등의 파라미터가 변동할 경우 고성능 및 강인성 제어를 실현하기 어렵다. 산업 프로세서의 적용에는 부하 외란, 파라미터 변화 및 어떤 모델의 불확실성 등에 대하여 고성능과 강인성을 발휘할 수 있는 기법이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 더욱 더 고성능 및 강인성 제어를 하기 위하여 AFLC(Adaptive Fuzzy Logic Control) 제어를 설계한다. 적용 퍼지제어는 종래의 퍼지제어 및 적응제어의 문제점을 보완하여 종래의 퍼지제어기에 기존 모델을 추가하여 MRAC(Model Reference Adaptive Control) 형태의 퍼지제어를 구성한다. 적용 퍼지 제어기는 2개의 퍼지제어의 블록으로 동작한다. 기준모델을 이용한 적응 메커니즘은 퍼지제어의 지식 베이스를 수정 또는 퍼지제어의 출력에 적응신호를 추가한 모델과 같이 시스템을 동작하게 한다. 종래의 PI 제어기와 본 연구에서 제시한 적용 퍼지제어의 응답특성의 결과를 비교한다. 지령속도의 변화, 스텝 부하토크의 변화 및 관성의 변화 등의 응답특성의 결과는 본 연구에서 제시한 적용 퍼지제어기가 종래의 PI 제어기에 비해 매우 양호하게 나타났으며 그 결과들을 제시한다.

## 2. 본 론

### 2.1 크레인 모델링

크레인의 운동을 모델링 할 때는, 진동각도가  $\theta \ll 1$  ( $\sin \theta \cong \theta$ ,  $\cos \theta \cong 1$ )의 여건 하에서 동력학적 방정식을 구한다. 또한 무진동 제어의 측면에서 속도 계획을 만들기 위해서 다음과 같은 조건 / 가정하에서 크레인 시스템을 모델링한다.

1. 크레인의 이동 방향과 같은 방향의 진동만을 고려하는 평면운동만을 다룬다.
2. 크레인의 탄성 변형은 무시한다.
3. 마찰력과 같은 소모적인 효과나 손실은 무시한다.
4. 물체의 질량이 없는 로프에 매달린 질점으로 간주한다.
5. 물체의 진동으로 인하여 생기는 로프의 길이 변화는 무시한다.

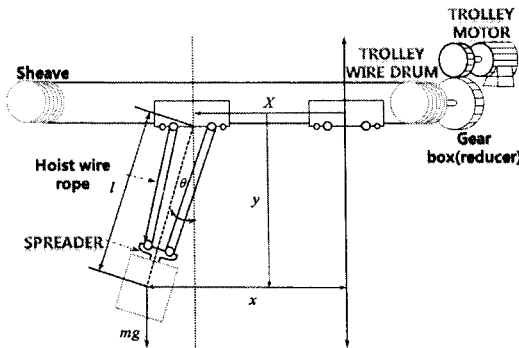


그림 1. 크레인의 모델  
Fig. 1. Model of crane

컨테이너 크레인의 대략적인 형태를 그림 1과 같이 구성할 수 있다. 이를 바탕으로 크레인의 운동을 Lagrange의 운동 방정식을 이용하여 모델링하면 다음과 같다[10]. 운동 에너지  $W$ 와 위치 에너지  $P$ 의 차이로 정의한 Lagrangian  $L$ , 즉,

$$L = W - P \quad (1)$$

식 (1)에 대하여 식 (2)의 운동방정식이 성립한다.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \quad (2)$$

컨테이너 크레인의 경우  $W$ 와  $P$ 는

$$W = \frac{1}{2} m \cdot \left( \dot{x}^2 + \dot{y}^2 \right) \quad (3)$$

$$P = -mgl \cdot \cos \theta \quad (4)$$

각각 식 (3)과 (4)가 되며, 여기서  $x, y, \dot{x}, \dot{y}$ 은 다음과 같다.

$$x = X + l \cdot \sin \theta, \quad y = l \cdot \cos \theta$$

$$\dot{x} = \dot{X} + l \cdot \cos \theta \cdot \dot{\theta}, \quad \dot{y} = -l \cdot \sin \theta \cdot \dot{\theta}$$

이 값을 식 (3)과 식 (4)에 대입한 후,

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = m \cdot (l^2 \dot{\theta} + l \dot{X} \cdot \cos \theta) \quad (5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = -ml \dot{X} \dot{\theta} \sin \theta - mgl \cdot \sin \theta \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 구하여 식 (2)에 다시 대입하면 식 (7)과 같다.

$$ml^2 \ddot{\theta} + ml \ddot{X} \cdot \cos \theta + mgl \cdot \sin \theta = 0 \quad (7)$$

$a = \ddot{X}$ 으로 표기한 후 식 (7)을 정리하면 식 (8)과 같다.

$$\ddot{\theta} = -\frac{g}{l} \cdot \left( \sin \theta + \frac{a}{g} \cdot \cos \theta \right) \quad (8)$$

다시 ( $\sin \theta \cong \theta$ ,  $\cos \theta \cong 1$ )로 각각 근사화 시켜 선형화시키면 식 (9)와 같이 정리된다.

적용 퍼지제어를 이용한 컨테이너 크레인의 고성능 제어

$$\ddot{\theta} = -\frac{g}{l} \cdot \left( \theta + \frac{a}{g} \right) \quad (9)$$

식 (9)로부터 크레인의 진동은 크레인의 가속도에 의해서 영향을 받고 있음을 알 수 있고, 크레인의 속도를 제어함으로써 진동을 작게 유지하면서 목표 위치까지 이동시킬 수 있는 이론적 근거를 얻을 수 있다.

여기서 사용된 변수는 다음과 같다.

- $\theta$  : 진동각도
- $\dot{\theta}$  : 진동각속도
- $\ddot{\theta}$  : 진동각가속도
- $X$  : 트롤리의수평위치
- $\dot{X}$  : 트롤리의수평속도
- $a$  : 트롤리의수평가속도
- $x$  : 운반물의수평위치
- $\dot{x}$  : 운반물의수평속도
- $y$  : 운반물의수직위치
- $\dot{y}$  : 운반물의수직속도
- $l$  : 로프의길이
- $m$  : 운반물의질량
- $g$  : 중력가속도

## 2.2 SynRM 모델링

SynRM의 이상적인 등가회로는 그림 2와 같다. 이 등가회로에 의한 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_r L_q i_q \quad (10)$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_r L_d i_d \quad (11)$$

SynRM의 토크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3P}{2} (L_d - L_q) i_d i_q \quad (12)$$

식 (11)을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3P}{2} L_d (1 - L_q / L_d) i_d i_q \quad (13)$$

식 (13)에서  $T_e$ 는  $L_d / L_q$ 항에 비례한다. 여기서 돌극비  $\xi = L_d / L_q$ 는 토크의 크기를 결정하는 중요한 요소이다. 식 (12)에서  $P$ 는 전동기의 극수이다. 토크 식을 그림 2의 벡터도로부터 전류벡터의 크기  $i_s$ 와 전류 위상각  $\theta_i$ 로 표시하면 식 (13)과 같다.

$$T_e = \frac{3P}{2} (L_d - L_q) i_s^2 \frac{\sin(2\theta_i)}{2} \quad (14)$$

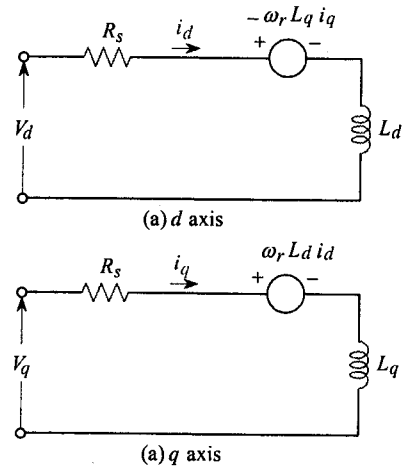


그림 2. SynRM의 등가회로 및 벡터도  
Fig. 2. Equivalent circuit and Current vector diagram of SynRM

## 2.3. AFLC 제어기 설계

적용 퍼지제어기는 그림 3에 나타낸 특정 수학적 기준모델의 출력으로서 제어 시스템의 예측성능을 파악할 수 있다.

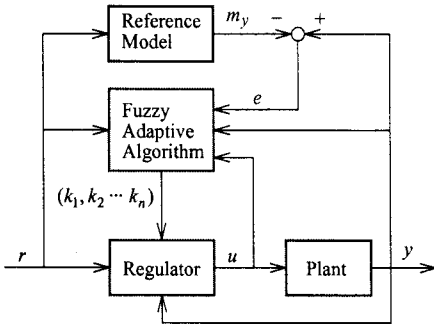


그림 3. 적응 퍼지제어기의 블록도  
Fig. 3. Block diagram of adaptive fuzzy controller

입력  $r$ 은 지령속도이며 플랜트는 PWM 인버터와 SynRM이다. 그리고 플랜트의 출력  $y$ 는  $\omega_r(k)$ 이며 기준모델의 출력은  $m_y$ 는  $\omega_m(k)$ 이다. MRAC 시스템의 적응과정은 2개의 퍼지제어기로 동작한다. 하나의 퍼지제어기는 그림 4에 있는 종래의 퍼지 속도제어기가 사용되며 퍼지적응 알고리즘에 의해 출력은  $\Delta i_{qs1}^*(k)$ 이고, 다른 하나의 퍼지제어기는 기준모델을 사용하며 플랜트의 출력  $y$ 는 기준모델의 출력  $m_y$ 와 비교한 오차  $e$ 는 퍼지적응 메커니즘을 수행하는데 사용된다. 기준모델은 안정화 시간 및 오버슈트와 같은 설계기준을 만족하는 요구성능을 충족시키기 위하여 사용하며 1차 지연 시스템을 사용한다. 동일한 지령입력인  $r$ 이 종래의 퍼지제어기와 기준모델에 공급된다. 기준모델의 출력은 지령신호에 요구되는 응답인  $y_m$ 이다. 이 출력은 적응신호를 발생하는 시스템의 실질적인 응답  $y$ 와 비교하여 오차를 감소하는 방향으로 퍼지 적응 메커니즘에 의해 동작된다.

그림 4는 적응 퍼지제어기의 구성도를 용이하게 이해하기 위하여 나타낸다. DFC(Direct Fuzzy Controller)에 의한 출력은  $\Delta i_{qs1}^*$ 이며 적분의 오차를 보상하기 위하여 기준모델을 사용한 AFC(Adaptive Fuzzy Controller)를 병렬로 사용한다. AFC의 출력은  $\Delta i_{qs2}^*$ 이며 이는  $\Delta i_{qs1}^*$ 와 합하여  $\Delta i_{qs}^*$ 를 얻는다.

그림 5는 AFC의 기법을 나타내며 기준모델의 출력인  $\omega_m^*$ 와 실제속도  $\omega_r$ 를 비교하여 오차분과 오차

의 변화분을 입력으로 퍼지동작을 수행하며 출력은  $\Delta i_{qs2}^*$ 이다.

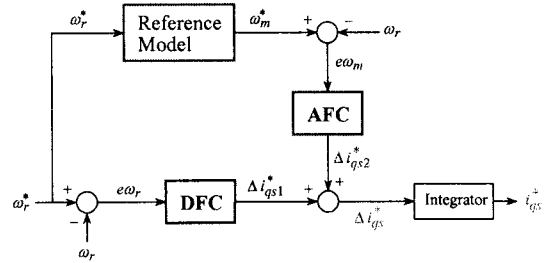


그림 4. 적응 퍼지제어 기법  
Fig. 4. Adaptive fuzzy control scheme

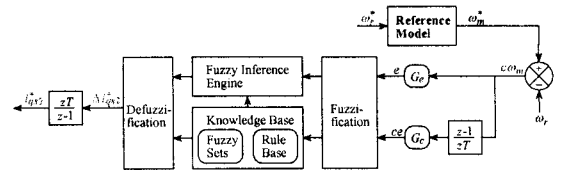


그림 5. AFC 방식  
Fig. 5. AFC scheme

적응 메커니즘에 의한 출력은  $\Delta i_{qs2}^*(k)$ 를 발생시킨다.  $\Delta i_{qs1}^*(k)$ 과  $\Delta i_{qs2}^*(k)$ 를 합하여  $\Delta i_{qs}^*(k)$ 를 구하고 이를 적분기를 통해  $i_{qs}^*(k)$ 를 발생시켜 플랜트에 인가한다.

퍼지 적응 메커니즘의 입력은 기준모델의 출력과 실제속도의 오차( $e\omega_m(k)$ )와 오차의 변화분( $ce\omega_m(k)$ )을 사용한다. 오차와 오차의 변화분은 다음과 같다.

$$e\omega_m(k) = \omega_m^*(k) - \omega_r(k) \tag{15}$$

$$ce\omega_m(k) = e\omega_m(k) - e\omega_m(k-1) \tag{16}$$

위의 두 입력은 적응 퍼지의 룰 베이스에 의해 지령  $q$ 축 전류에 보상되는  $\Delta i_{qs2}^*(k)$ 가 발생되고  $\Delta i_{qs1}^*(k)$ 에 추가된다. 그러므로 퍼지제어기의 지령  $q$ 축 전류는 다음과 같다.

적용 퍼지제어를 이용한 컨테이너 크레인의 고성능 제어

$$i_{qs}^*(k) = i_{qs}^*(k-1) + [\Delta i_{qs1}^*(k) + \Delta i_{qs2}^*(k)] \quad (17)$$

$e\omega_m$ ,  $ce\omega_m$  및  $\Delta i_{qs2}^*(k)$ 의 전체집합은 각각 (-180, 180) [rad/s], (-6, 6) [rad/s] 및 (-1, 1) [A]로 설정한다. SynRM의 속도는 무진동 제어의 입장에서 만들어지는데, 이를 위해 가속 및 감속 구간에 짧은 정속 구간을 둔다. 하지만 외란이나 시스템의 비선형성에 기인한 진동 현상이 발생되어, 진동을 적절히 보장하지 않을 경우, 도착 후에도 진동이 존재하게 된다. 이런 현상을 방지하기 위한 방법으로 진동이 일어나지 말아야 하는 구간(정속, 도착 후)에서 진동을 보정하여 주는 방법을 사용하여야 한다. 이러한 목적으로 퍼지 논리 제어를 사용한 각도 궤환 제어방식을 쓴다. 그림 6은 퍼지 논리 제어를 나타내는 것으로서, 크레인 시스템으로부터 진동각도  $\theta$ , 진동 각속도  $\dot{\theta}$ 을 감지하여 전문가의 제어 계획에 바탕을 둔 제어를 통해 진동을 제거한다[3].

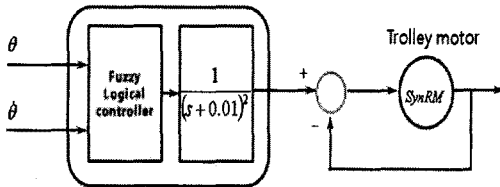


그림 6. 퍼지 논리 제어기  
Fig. 6. Fuzzy logical controller

퍼지론은 전문가의 경험이나 제어 공학자의 지식을 기초로 하여 진동을 없애기 위해 만들어진 If-Then 형태로 된 룰이다. 숙련된 운전자들을 인터뷰하여, 이를 기초로 퍼지론을 만들었다. 모든 각도가 아닌 Zero근처에 있는 각도에 한하여 스윙을 억제함으로써 더욱더 효과적인 결과를 얻을 수 있다. 표 1은 각도( $\theta$ )와 각 속도( $\dot{\theta}$ )를 이용하여, 본 논문에 사용된 퍼지제어기의 룰 베이스를 만들었다[11]. 즉 “각도가 NB이고 각속도가 ZE이면, 트롤리의 가속도를 NB로 하고, 각도가 PB이고 각속도가 ZE이면, 트롤리의 가속도를 PB로 한다.”는 것이다.

표 1. 퍼지론 베이스  
Table 1. Fuzzy rule base

$\theta \backslash \dot{\theta}$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

### 3. 시스템 성능 및 결과

그림 7은 본 논문에서 제시한 AFLC 제어기를 이용한 컨테이너 크레인의 속도제어를 위한 전체 시스템 블록도를 나타내고 있다.

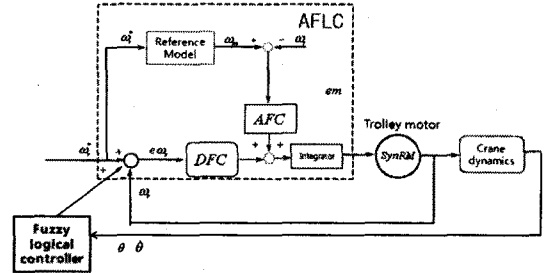


그림 7. AFLC 제어기를 이용한 시스템 블록도  
Fig. 7. System Block diagram of AFLC Controller

속도패턴 발생기로부터 출력된 지령속도  $\omega_r^*$ 는 SynRM에서 발생하는 실제속도  $\omega$ 와 비교하여 트롤리 모터의 속도를 제어한다. 또한 퍼지 논리 제어를 통해서 얻어낸 위치 값은 SynRM에서 획득된 위치 값과 비교하여 제어된다.

그림 8은 무 부하 상태에서 0.2[sec]에 스텝 지령속도를 1,800[rpm]으로 운전하였을 경우 PI, AFLC 제어기의 응답특성을 나타내고 그림 9는 0.2[sec]에 스텝 지령속도를 1,800[rpm]으로 운전 중 부하토크를 10[N·m] 인가하였을 때 응답특성을 나타낸다.

그림 10는 그림 8과 9의 과도상태 부분을 확대 해

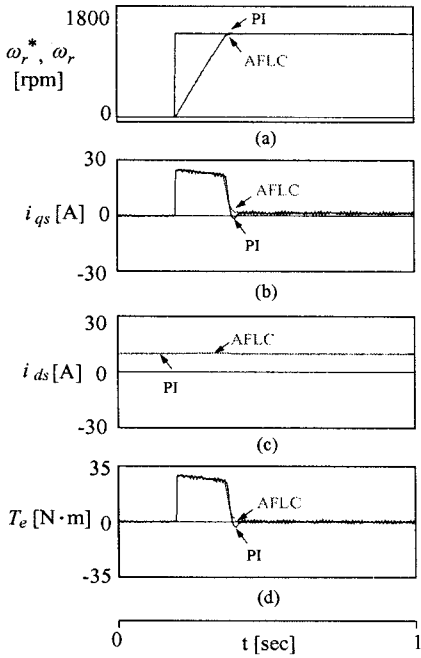


그림 8. 지령속도 변화에 대한 응답특성(No Load)  
Fig. 8. Response characteristics with command speed change(No Load)

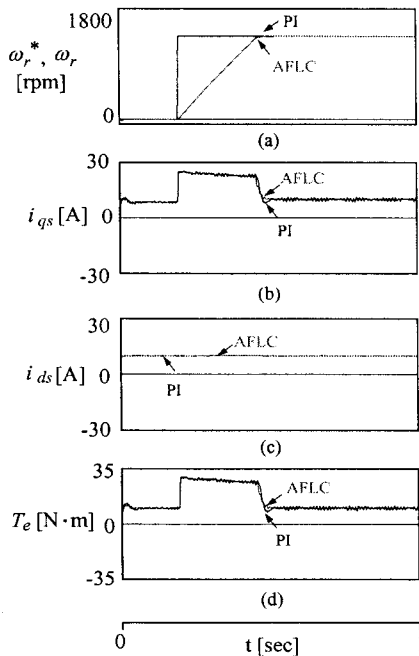


그림 9. 지령속도 변화에 대한 응답특성(Load = 10(N · m))  
Fig. 9. Response characteristics with command speed change(Load = 10(N · m))

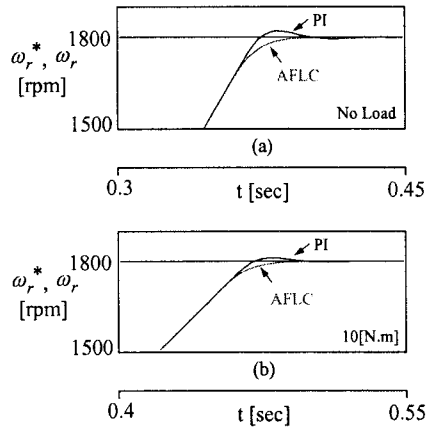


그림 10. 지령속도 변화에 대한 응답특성  
Fig. 10. Response characteristics with command speed change

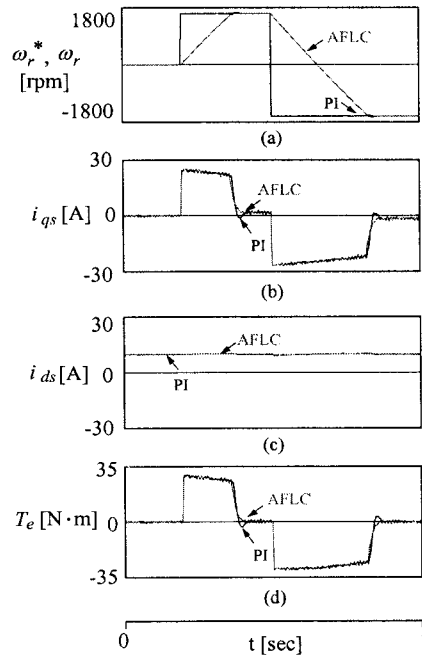


그림 11. 정·역 운전에 대한 응답특성(No Load)  
Fig. 11. Response characteristics with forward and reverse operating(No Load)

석한 그림이다. 그림 10 (a)은 그림 8의 과도상태 부분, 그림 10 (b)는 그림 9의 과도상태 부분을 나타낸다. 무 부하 및 부하토크인가에 대하여 AFLC 제어기는 PI 제어기에 비하여 오버슈트가 작고, 상승시간이 짧으며 안정화 시간도 작게 나타난다. 따라서

적용 퍼지제어를 이용한 컨테이너 크레인의 고성능 제어

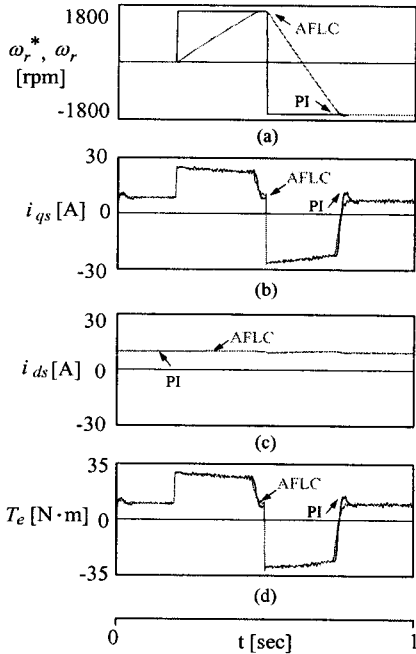


그림 12. 정·역 운전에 대한 응답특성[Load=10(N·m)]  
 Fig. 12. Response characteristics with forward and reverse operating[Load=10(N·m)]

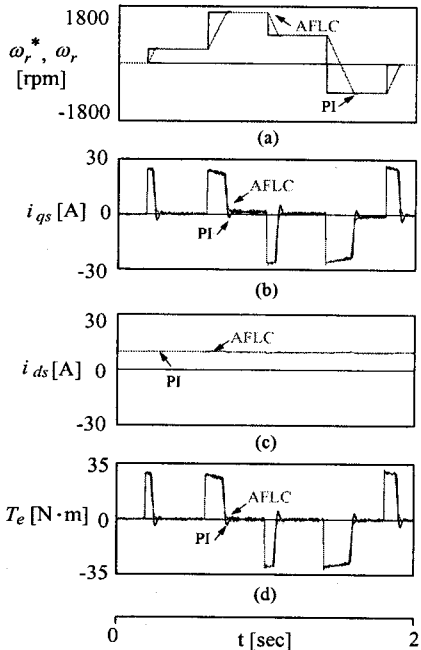


그림 13. 스텝지령속도 변화에 대한 응답특성  
 Fig. 13. Response characteristics with step command speed change

AFLC 제어가 종래의 PI 제어기 보다 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다.

그림 11은 무 부하 상태에서 0.2[sec]에 스텝 지령속도를 1,800[rpm]으로 운전 중, 0.5[sec]에서 스텝 지령속도를 -1,800[rpm]으로 정·역 운전을 하였을 때 응답특성을 나타낸다. AFLC 제어가 PI 제어에 비하여 상승시간이 빠르고 정상상태에 빠르게 도달하는 것을 알 수 있다.

그림 12는 부하토크를 10[N·m]인가 한 상태에서 0.2[sec]에 스텝 지령속도를 1,800[rpm]으로 운전 중에 0.5[sec]에서 스텝 지령속도를 -1,800[rpm]으로 운전 하였을 경우의 정·역 운전에 대한 응답특성이다.

그림 13은 지령속도를 500[rpm] → 1,800[rpm] → 1,000[rpm] → -1,000[rpm] → 0[rpm]으로 스텝 변화에 대한 응답특성을 나타낸다. AFLC 제어가 PI 제어에 비하여 상승시간이 빠르고 정상상태에 빠르게 도달하는 것을 알 수 있다.

그림 14는 저속영역에 대한 응답특성으로서 무 부하 상태에서 0.2[sec]에 200[rpm]으로 운전 중,

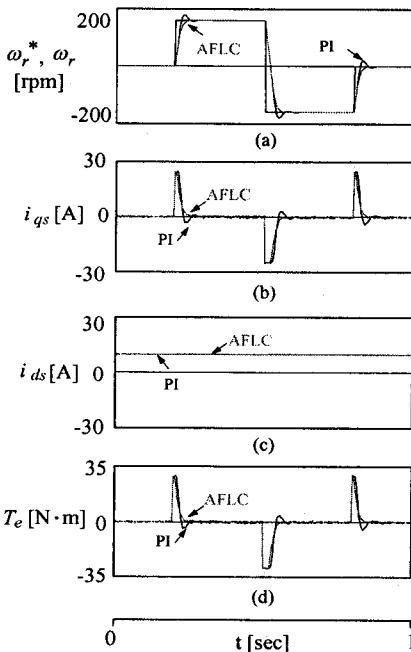


그림 14. 저속영역에 대한 응답특성(No Load)  
 Fig. 14. Response characteristics with low speed region(No Load)



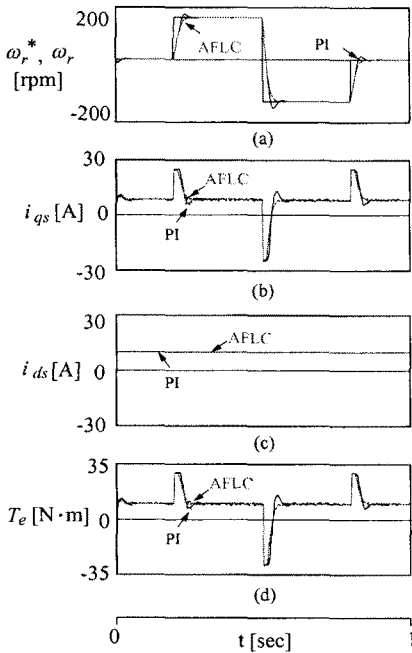


그림 15. 저속영역에 대한 응답특성(Load = 10(N · m))  
 Fig. 15. Response characteristics with low speed region(Load = 10(N · m))

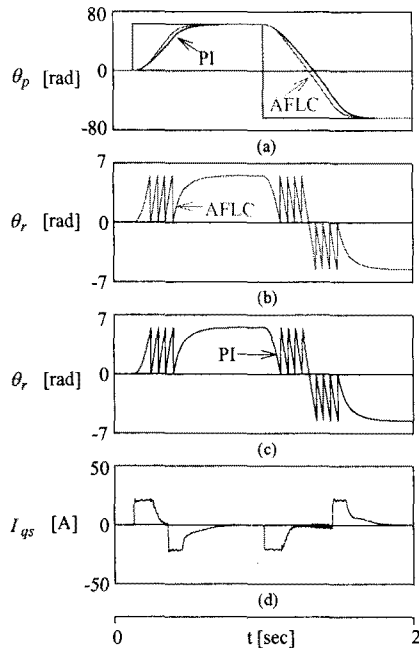


그림 16. 지령 위치에 대한 응답특성(No Load)  
 Fig. 16. Response characteristics with command position (No Load)

0.5[sec]에서 -200[rpm]으로 운전하였을 때 응답특성을 나타낸다.

그림 15는 부하토크를 10[N · m] 인가한 상태에서 0.2[sec]에 200[rpm]으로 운전 중에 0.5[sec]에서 -200[rpm]으로 운전하였을 때 응답특성을 나타낸다.

그림 16는 지령위치에 대한 특성으로서 무 부하 상태에서 0.2[sec]에 지령 위치를 60[rad]으로 운전 중 1초에 -60[rad]으로 운전하였을 때 응답특성을 나타낸다.

그림 17는 부하토크를 10[N · m] 인가한 상태에서 0.2[sec]에 지령 위치를 60[rad]으로 운전 중 1초에 -60[rad]으로 운전하였을 때 응답특성을 나타낸다.

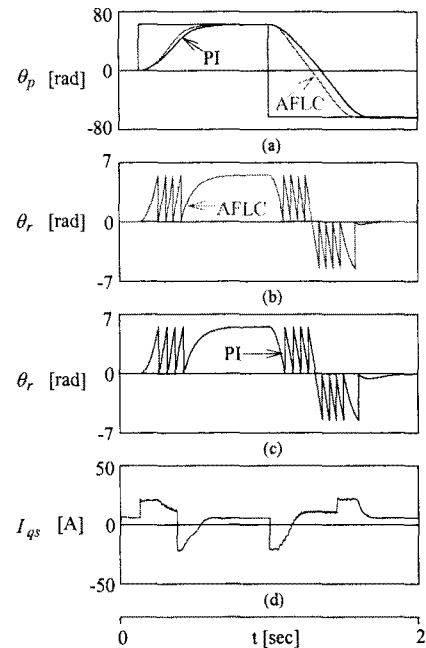


그림 17. 지령 위치에 대한 응답특성(Load = 5(N · m))  
 Fig. 17. Respond characteristics with command position(Load = 5(N · m))

#### 4. 결 론

본 논문에서는 컨테이너 크레인을 구동하는 SynRM의 고성능 제어를 위하여 AFLC 제어를 제시하였다.

SynRM 드라이브의 속도 및 부하변화와 고속영역

## 적응 퍼지제어를 이용한 컨테이너 크레인의 고성능 제어

및 저속영역에 대하여 AFLC제어와 PI 제어기의 응답특성을 비교 분석하였다. 종래의 컨테이너 크레인을 구동하는 전동기를 제어하기 위하여 PI 제어기를 통해 제어하였으나, 본 논문에서는 퍼지제어와 적응제어를 혼합한 AFLC 제어기를 이용하여 컨테이너 크레인을 구동하는 SynRM을 제어하였다.

AFLC제어는 종래의 PI 제어기에 비하여 오버슈트 및 상승시간이 작게 나타났으며, 빠르게 안정화되는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제시한 AFLC제어의 타당성을 입증할 수 있었다.

본 지식재산권은 정통부 및 정보통신연구진흥원의 지원을 받아 수행된 연구결과임.  
(08-기반-13, 정보통신연구기반조성사업)

### References

- [1] 정현수, 이숙재, 홍금식, "차세대 컨테이너 크레인에 대한 고찰," 한국해양학학회지 제29권 제3호, pp. 291-298, 2005.
- [2] 윤지섭, 강이석, "천정크레인의 무진동/위치 제어기 개발에 관한 연구," 대한기계학회 논문지, vol. 19, No. 6, pp. 1391-1401, 1995.
- [3] 변증남, "퍼지 논리 제어," 홍릉 과학 출판사, pp. 232-257, 1995.
- [4] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Rotor design optimization of synchronous reluctance machine," IEEE Trans. Energy conversion, vol. 9, no. 2, pp. 359-365, 1994.
- [5] A. Staton, T. J. E. Miller and S. E. Wood, "Optimization of the synchronous reluctance motor geometry," in Conf. Rec. Electrical machines and Drives, London, UK, pp. 156-160, 1991.
- [6] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Field oriented control of synchronous reluctance machine," in Conf. Rec. IEEE Power Electron Specialists Conf., pp 425-431, 1993.
- [7] Z. Ibrahim and E. Levi, "Comparative analysis of fuzzy logic and PI speed control in high performance AC drives using experimental approach," Proc. of IEEE IAS'2000, Rome, Italy, CD-ROM paper 46-3, 2000.

- [8] J. C. Lee and D. H. Chung, "MRAC fuzzy control for high performance of induction motor drive," The Trans. of KIEE, vol. 7, no. 3, pp. 215-223, 2002.
- [9] H. C. Lee, J. C. Lee and D. H. Chung, "Design of fuzzy controller induction drive considering parameter change," The Trans. of KIEE, vol. 51P, no. 3, pp. 111-119, 2002.
- [10] 변증남, "천정 크레인 무진동 제어 알고리즘 개발", 프로젝트 최종 보고서, 한국과학기술원, 1992. 5.
- [11] 정동화, "전동기 인공 지능 제어", 도서출판딴딴, pp. 95-99, 2006.

### ◆ 저자소개 ◆

#### 김도연 (金道演)

1981년 4월 16일생. 2007년 순천대학교 공대 전기제어 공학과 졸업. 2007년 8월~동 대학원 전기공학과 석사 과정.

Tel : (061)750-3543

Fax : (061)752-9841

E-mail : doyon72321@nate.com

#### 정병진 (鄭炳珍)

1981년 10월 7일생. 2007년 순천대학교 공대 전기제어 공학과 졸업. 2007년 8월~동 대학원 전기공학과 석사 과정.

Tel : (061)750-3543

Fax : (061)752-9841

E-mail : aureadyb@naver.com

#### 정동화 (鄭東和)

1955년 8월 15일생. 1979년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 현대중전기(주) 기술연구소 책임연구원. 1989년~현재 순천대학교 정보통신공학부 교수.

Tel : (061)750-3543,

Fax : (061)752-9841

E-mail : hwa777@sunchon.ac.kr

WebPage: <http://cafe.daum.net/dhpelab>