

# 현수형 架線케이블의 일정 장력유지 제어에 관한 연구

## A Study on the Tension Control for Catenary's cable

홍순일, 윤정환

S. I. Hong, J. H. Yoon

### 요 약

제어대상인 현수형 케이블의 수학적 모델을 구성하고 이것에 장력이 발생하는 교류서보 전동기의 수학적 모델을 구하였다. 제어방법은 제어대상의 동적 모델이 비선형 시변계이기 때문에 강인성이 있는 퍼지제어를 적용하고 차대가 움직이기 시작할 때 발생하는 오버슈트를 억제하기 위해서 피드포워드 제어를 도입하여 정장력 제어 시스템을 구성하였다. 시뮬레이션에 의해 그 유효성을 평가하였으며 양호한 결과를 얻었다.

### ABSTRACT

The cable installed will have catenary's type that is nonlinear and variable time system. Because it has a close relation to the catenary's type to determine command value of tension for the tension control of this cable, we need to study it.

The purpose of this study is automated the installation equipment for a catenary's cable.

This study shows control system that the tension of a catenary's cable is keep constant. The control method is adopted the fuzzy control that is robust because the model of a control object is nonlinear and variable time system and feed-forward control to suppress overshoot as a shift begins to move. On the basis of the dynamic modeling of a catenary's cable we compose the control system with adopting fuzzy and feed-forward control has recognized the effectiveness in simulation results.

### I. 서 론

최근, 메카트로닉스 공학의 발달로 산업현장에서 기계의 제어를 전자화함으로 기계성능의 고도화가 가능하게 되었다. 메카트로닉스적 기계 시스템은 기계적으로 구성하기 쉽고 제어와 정보처리 부분을 분리하고 그 기능을 분해하여 감지기, 정보처리부, 액추에이터 등으로 치환함으로써 제어성과 사양에 대한 유연성이 있다[1,2].

인간을 나쁜 작업상황 이나 단순 작업에서 해방시키는 것으로 생산 시스템의 자동화, 자동기계 또는 그 기계를 제어하는 자동제어 이론이 연구되어 실용화되고 있다. 종이의 제조, 플라스틱의 제조, 케이블의 가설, 로프의 가공 등에서 장력을 일정히 제어하는 것도 자동화의 한 부분이다[3].

인간에게 위험한 작업이나 출입이 불가능한 장소에서의 작업은 로봇이 작업을 행하고 인간이 위험에 노출되지 않기를 희망한다. 그러나 현실적으로 인간이 행하고 있는 모든 작업을 로봇이 행하도록 하는 것은 많은 문제점이 있기 때문에 한정된 장소에서만 작업로봇이 활약하고 있다.

인간을 대신하여 위험한 장소에서 작업하는 작업로봇은 작업하여할 작업대상이 복잡적이고 정성적인 제어량이 많아 이것들에 대한 제어는 종래의 PID제어와 퍼지제어를 혼합한 제어가 많이 연구되고 있다[4, 5].

현재 로프 제조 공정은 장력의 제어가 필요하지만 거의 수동으로 행하고 있는 실정이고 제품의 균질성과 생산성 향상을 위하여 제조 공정의 자동화가 필요하다. 또한 전차의 트롤리선 가설 공사는 케이블을 탑재한 차대가 주행하면서 릴에 감긴 케이블을 풀어주고 양단의 장력을 일정히 유지하도록 조절할 필요가 있다. 그러나 전기공사에서 시행하고 있는 송배전 선로의 전

력케이블 가선공사나 전차 트롤리선 가선공사는 수동으로 하고 있는 실정이고 이것의 자동화기계가 필요하다. 따라서 본 연구의 목적은 현수형 가선 케이블 가설장치의 자동화이다.

본 연구에서는 제어대상인 현수형 케이블의 수학적 모델을 구성하고 이것에 장력을 발생하는 교류서보 전동기의 수학적 모델을 구하였다. 제어 방법은 제어대상의 동적 모델이 비선형 시변계이기 때문에 강인성이 있는 퍼지제어를 적용하고 차대가 움직이기 시작할 때 발생하는 오버슈트를 억제하기 위해서 피드포워드제어를 채택한다.

## II. 장력제어 시스템의 구성

장력 유지제어 시스템은 작업로봇이고 차대를 이동하는 이동시스템, 장력을 일정히 유지하는 장력제어 시스템, 각 장치를 전기적으로 접속하여 각각의 상태에 대한 정보를 판단하는 제어부 등으로 구성한다.

### 2.1 현수형 케이블의 운동방정식

일정한 질량을 가지고 가선 되는 케이블에 힘을 가해 당기면 공기중의 중력에 의해 현수곡선(Catenary curve)의 형상이고 식(1)과 같다.

$$y = a \cosh(x/a + m) + n \quad (1)$$

여기서,  $a > 0$ ,  $m < 0$  이고  $a$ ,  $m$ ,  $n$ 은 현수선의 형을 결정하는 각 파라미터이다. 그리고 각 좌표의 최저점은  $x_{\min} = -am$ ,  $y_{\min} = a + n$ 이다.

현수선의 길이  $l$  은

$$l = \int_{-x}^x \sqrt{1 + \sinh^2(x/a + m)} \, dx \quad (2)$$

이 된다.

케이블 모양이 Y축에 대칭 할 때 식(1)은 식(3)이 되고 그림 1과 같다..

$$y = \cosh(x/a) + n \quad (3)$$

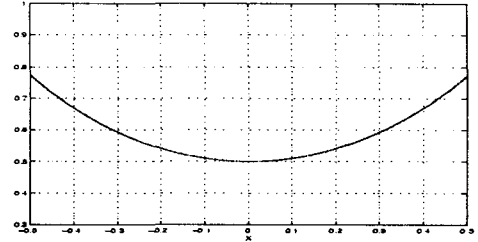


그림 1. 현수선의 모형(Y축에 대칭일 때)

Fig.1 Catenary's shape (m=0)

이때의 현수형 케이블의 장력은 식(4)이 된다[3].

$$T = a \rho g \sqrt{1 + \sinh^2(x/a)} \quad (4)$$

여기서,  $\rho$ 는 케이블의 선밀도,  $g$ 는 중력가속도이다.

이 경우 케이블의 길이  $l$  는 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$l = 2 a \sinh(x/a) \quad (5)$$

### 2.2 정장력 유지제어 시스템의 원리 및 모델링

그림 2는 장력제어 시스템의 원리를 나타낸다.

차대는 케이블과 기계장치를 운반하는 몸체 부분이고 릴에 감긴 케이블은 구동륜을 통해 풀린다. 중앙의 동활차 아래에 로드셀이 붙어 있어 케이블의 장력이 변하면 로드셀의 가변 저항 암이 스프링과 연계되어 가변저항의 값이 변하고 양단에서 검출한 전압의 변화량을 피드백 신호로 한다.

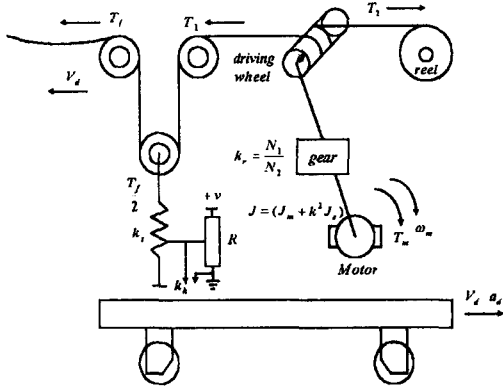


그림 2 장력 유지 제어 시스템의 원리도  
Fig. 2 Principle diagram of tension control system

여기서,  $T_c(t)$  : 케이블의 장력 [N],  $v_d(t)$  : 차대의 운행속도 [m/sec],  $J_m + k^2 J_e$  : 전동기 축에 환산한 관성 모우먼트 [ $kgm^2$ ],  $T_m(t)$  : 전동기의 출력 토크 [Nm],  $\omega_m(t)$  : 전동기 회전각속도 [1/sec],  $k_r = N_1 / N_2$  : 치차비,  $k_s$  : 스프링계수 [N/m],  $k_k(t)$  : 피드백신호 [V]

장력 발생 전동기의 토크는 구동륜을 통해서 큰 구동 토크를 얻고 저속 운전하는 경우 제어를 쉽게 하기 위해서 치차를 통해서 장력을 제어한다. 케이블의 장력제어는 교류 전동기의 토크로 제어하고 장력을 측정하여 측정값에 따라 전동기의 토크를 조정한다.

장력제어용 서보 전동기는 HA-FH23(0.2 KW, T=0.64Nm)이고 드라이브는 MELSERVO-H이다. 전동기는 입력을 전압지령( $V^*$ )으로 하고 출력을 토크 kgf로 하여 입력과 출력의 관계를 측정하여 주파수 특성그래프를 작성하였다. 이 특성 그래프는 그림 3과 같고 그림에서 다음과 같이 모델링된다.

$$G(s) = 0.4e^{-0.002s} \frac{1 + \frac{1}{350}s}{1 + \frac{1}{90}s} \quad (6)$$

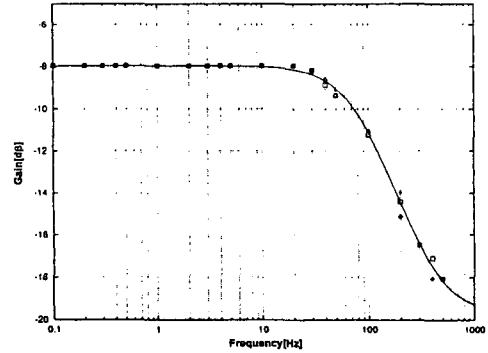


그림 3 서보 전동기의 주파수 특성  
Fig. 3 Frequency characteristics of servo motor

### 2.3 퍼지제어의 적용

정장력 제어시스템의 제어대상은 현수형 케이블 양단의 장력이고 차대의 주행에 따라 형상이 변한다. 따라서 현수형 케이블은 시변, 비선형이기 때문에 강인성을 갖는 퍼지제어를 적용한다. 장력의 조절을 행하는 퍼지제어는 설계하기가 쉬운 상태평가 제어방법을 채택하고 입력은 케이블의 장력과 목표값의 편차  $e$ 와 미분량  $de$ 이고 출력은 조작량  $v$ 이다.

추론 방법은 대수곱-가산-중심법을 사용하고 후건부는 퍼지 싱글톤형 추론법[2, 3]으로 하여 연산시간을 짧게한다. 비퍼지화한 상태량  $e_0, de_0$ 가 입력되면 전건부 적합도  $\omega_i$  는

$$\omega_i = \mu_{A_i}(e_0) \cdot \mu_{B_i}(de_0) \quad (7)$$

이다. 단,  $\mu_{A_i}(e_0), \mu_{B_i}(de_0)$  는  $A_i, B_i$ 의  $e_0, de_0$  에서 소속함수의 급수(Grade)이고  $\cdot$  은 곱셈계산이다. 따라서, 각 퍼지제어 규칙  $v_1, v_2 \dots v_n$ 에서 얻어지는 추론결과  $h_i$ 는

$$h_i = \omega_i \cdot v_i \quad (8)$$

가 되고, 최종적인 결론  $v_c$ 는 각 퍼지규칙  $v_1, v_2 \dots v_n$ 을 적합도  $\omega_1, \omega_2, \dots \omega_n$  로 하중 평균하여 식(9)과 같이 계산된다.

$$v_c = \frac{\omega_1 v_1 + \omega_2 v_2 + \dots + \omega_n v_n}{\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n} \quad (9)$$

$$= \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n}$$

$$T_m / T_f R = k_r \quad (11)$$

로드셀에서 측정되는 장력과 피드백 신호사이에 다음의 식이 성립한다.

$$T_f = k_s v_{fb} / k_k \quad (12)$$

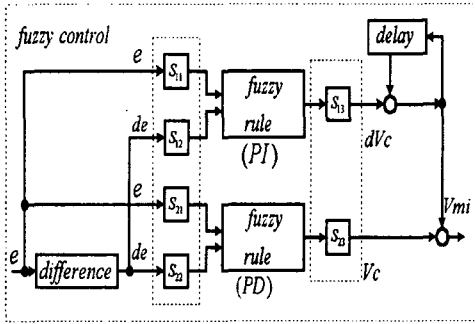


그림 4 퍼지제어 추론부의 구조

Fig. 4 Structure of fuzzy inference

그림 4는 퍼지제어 제어기의 구조를 나타내고 입출력 관계가  $e, de \rightarrow v$  로 되는 퍼지 PD제어와  $e, de \rightarrow dv$ 로 되는 퍼지 PI제어를 조합하여 구성한다. 이 방법의 특징은 PD 제어에 상응하여 응답시간이 짧고, PI제어에 대응하여 정상편차가 없는 동특성이 얻어진다.

2.4 피드포워드제어의 도입

시스템은 차대가 움직이기 시작할 때 장력의 응답에 큰 오버슈트와 진동이 발생하기 때문에 이 현상을 억제하기 위하여 피드포워드를 도입한 장력제어 방법을 제안한다.

차대의 진행속도  $v_d$ 는 장력  $T_f$ , 전동기의 출력 토크  $T_m$  및 전동기의 회전속도  $\omega$  사이에 에너지 보존법칙에 의해 아래의 관계가 성립한다.

$$T_f v_d = T_m \omega \quad (10)$$

또 치차비  $k_r$ 와 구동륜의 반경  $R$ 는 아래 관계가 성립한다.

여기서,  $k_s$ 는 스프링 정수,  $k_k$ 는 피드백 정수,  $v_{fb}$ 는 피드백 신호이다. 전동기와 부하의 운동방정식은 다음과 같다.

그림 5는 위에서 유도한 현수형 케이블의 제어 원리에 기초하여 구성한 시스템의 블록선도이다. 여기서,  $\Delta x$ 는 차대의 진행거리,  $a(t)$ 는 현수선의 모양을 결정하는 파라미터로 케이블이 풀릴 때 시간에 따라 변한다. 또한  $k_v, k_a$ 는 각각 차대의 속도 파라미터와 가속도 파라미터이고  $V_d, a_d$ 는 차대의 속도와 가속도이다.

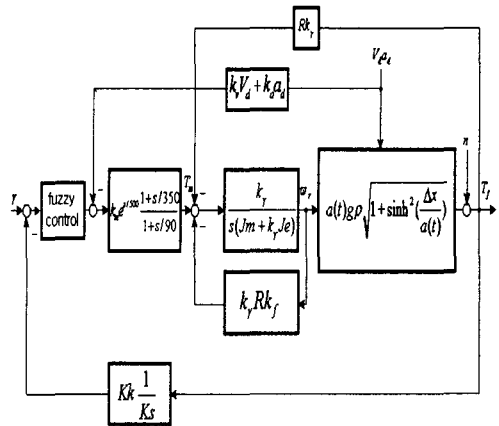


그림 5 제안한 장력제어 시스템 모델  
Fig. 5 Proposed tension control system

전동기 축으로 부하를 환산한 경우 전동기 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_m(t) = (J_m + k_r J_L) \frac{d}{dt} \omega_m(t) + k_r R T_f(t) + k_r R k_f \omega_m(t) \quad (13)$$

장력제어 원리는 차대가 움직이기 시작할 때 미리 차대의 속도와 가속도를 이용하여 어느 정도의 케이블을 당길 것인가를 예측을 하고, 그 값과 퍼지제어의 추론값의 차를 전동기의 토크 입력신호로서 전동기에 가하여 장력의 조절을 행한다.

### Ⅲ. 시뮬레이션에 의한 정장력제어의 평가

#### 3.1 시뮬레이션 방법

퍼지추론에서 전건부의 소속함수는 삼각형 방법으로 하고 각각 NB, NS, ZO, PS, PB의 5 부분으로 나눈다. 후건부 소속함수는 막대형으로 하고 각각 NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB의 7부분으로 나눈다. 퍼지제어 규칙은 입력의  $e$ 와  $de$ 에 따라 25개의 제어규칙이 설정된다.

초기값은 케이블의 폭은 1[m], 덩 길이는 0.01[m]으로 하였고 양단에 걸린 장력은 20.8[N]이다. 또 장력의 목표값을 40[N]으로 하고 샘플링 시간은 10[ms]로 한다.

표 1은 시뮬레이션에 사용한 각 정수를 나타낸다.

표 1. 시뮬레이션에 사용한 정수

Table 1. Used parameters for simulation

$J_m$	$3.5 \times 10^5 [\text{kgm}^2]$	$J_e$	$J_m/10 [\text{kgm}^2]$
$R$	0.02[m]	$k_r$	0.1
Dip	0.01[m]	$k_s$	200[N/m]
$k_f$	200[A/m]	$k_k$	200[Nsec]
폭	1[m]	굵기	$\varnothing 2.5 [\text{mm}]$

차대가 움직이면서 케이블을 풀어 갈 때, 케이블의 일단은 원점에서 멀어지고 Y축에 대칭하지 않기 때문에 좌표 변환을 행하여 양단에 걸리는 장력이 같아지도록 한다. 식(5)에 케이블의 길이와 차대의 수평 이동거리를 대입하고 Euler법으로 현수선의 형을 결정하는 파라미터  $a(t_n)$ 을 구하여 식(4)에 대입하면 장력을 구할 수 있다.

시뮬레이션에서 전동기의 지연시간과 토크의 포화 등을 고려하여 샘플링 시간은 0.01[sec]로 하였기 때문에 시스템의 시뮬레이션 계산시간은 샘플링 시간의 1/100으로 하여 0.1[msec]이다.

#### 3.2 정장력제어의 평가

##### [1] 퍼지제어 시뮬레이션

그림 6은 속도형과 위치형 퍼지제어를 조합하여 차대가 정지한 상태에서 시뮬레이션을 행한 결과를 나타낸다. 여기서 스캘링 팩터  $s_{11} = 0.01$ ,  $s_{12} = 0.0001$ ,  $s_{13} = 3.0$  이고  $s_{21} = 0.01$ ,  $s_{22} = 0.0001$ ,  $s_{23} = 4000.0$ 으로 설정하였으며 이것은 시행착오로 얻은 결과이다. 이 실험의 경우 입상 시간은 0.3초이고 오버슈트는 발생하지 않고 정상오차도 없는 결과가 얻어졌다.

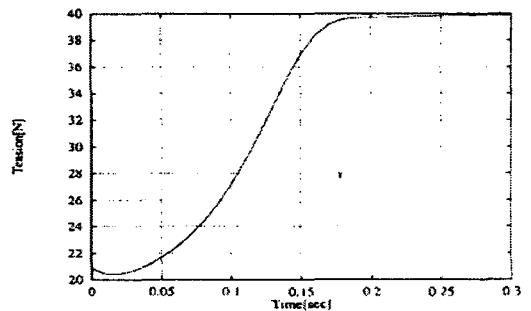


그림 6 퍼지제어의 장력응답

Fig. 6 Response of tension by fuzzy control

##### [2] 피드포워드에 대한 실험

그림 7은 차대가 0.3초에서 0.4초 사이에  $0.1\text{m/sec}^2$ 의 가속도로 움직이기 시작할 때 차

대의 속도와 가속도를 피드포워드 제어한 경우의 장력 응답을 나타낸 것이다. 차대의 가속도신호와 속도신호를 피드포워드 제어신호로 한 경우 입력은  $f_f = k_a a_d + k_v v_d$  이다.

이 경우 시행착오 법에 의해  $k_v = 85.0$ ,  $k_a = 0.8$ 로 설정한다. 그림 7에서 알 수 있는 것은 속도와 가속도를 조합하여 피드포워드 제어를 행하면 응답은 진동은 발생하지 않고 오버슈트가 없는 좋은 결과를 얻을 수 있는 것을 알 수 있다.

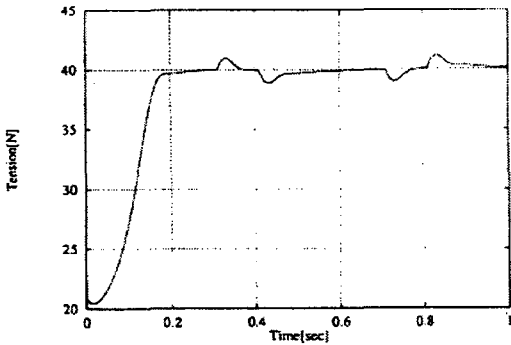


그림 7 피드포워드에 의한 장력응답  
Fig. 7 Response of tension by feed-forward with  $k_v v_d$  and  $k_a a_d$

[3] 속도변화에 대한 실험

그림 8은 차대가 0.3[sec]~0.4[sec] 사이에 0.1[m/sec<sup>2</sup>]의 가속도로 움직이기 시작하여 0.4[sec]~0.7[sec]에서는 0.01[m/sec] 등속도로 움직이고 있을 때 장력응답 곡선이다. 이 그림에서 차대가 진행하고 있어도 장력의 조절은 유효하다는 것을 알 수 있다.

[4] 외란에 대한 실험

그림 9과 10은 장력제어 시스템에 바람과 차대의 진동 혹은 케이블의 진동에 의해 장력에 외란  $n$ 이 들어올 경우의 시뮬레이션을 나타낸다. 여기서 그림 9과 그림 10은 차대가 0.7초에서 1.3초의 사이에 10[N]과 20[N]의 외란이 입력된다고 가정한 경우의 실험 결과이다. 이 경우 작은 오버슈트가 발생하였지만 시스템은 외란에 대해서 강인성을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

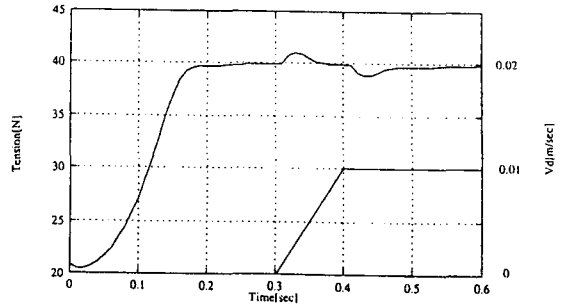


그림 8 장력응답 (차대 가속도 0.1[m/sec<sup>2</sup>])

Fig. 8 Response of tension at  $a_d = 0.1 [m/s^2]$

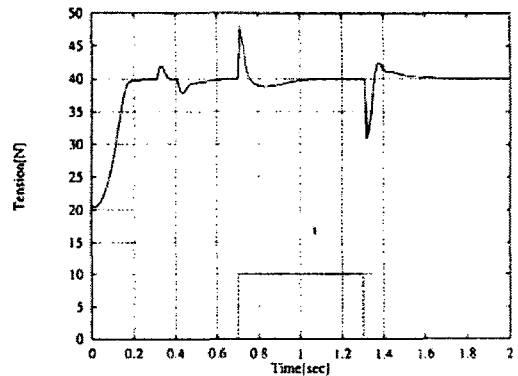


그림 9 10[N] 외란에서 장력응답

Fig. 9 Response of tension with  $n = 10 [N]$

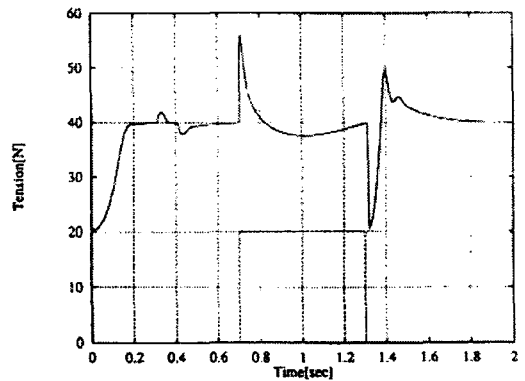


그림 10 20[N] 외란에서 장력응답

Fig. 10 Response of tension  
with  $n = 20$  [N]

#### IV. 결 론

본 논문은 케이블의 장력특성에 기초하여 장력제어시스템을 구성했다. 시뮬레이션 평가 결과 아래와 같은 결과를 얻었다.

1) 퍼지제어는 위치형과 속도형의 조합에 의해 입상 시간이 짧고 정상오차가 없는 제어 방법임이 확인되었고 시뮬레이션에 의해 그 유연성과 유효성을 나타내었다.

2) 차대가 움직이기 시작하는 때에 생겨난 오버슈트에 대해서 시스템에 피드포워드 제어를 도입하여 빨리 장력조절을 행하는 것이 가능하고 시스템이 이 오버슈트를 억제할 수 있는 것을 검증하였다.

3) 제어시스템은 장력 외란에 대해서 강인성과 안정성이 있는 것을 시뮬레이션에 의해 확인하였다.

접수일자 : 2000. 9. 3. 수정완료 : 2000. 10. 16

본 연구는 '99년도 공동기술 개발 지역 컨소시엄 사업으로 중소기업청 부산·울산지부 및 동양제강(주)의 지원을 받아 수행한 것임.

#### 참고문헌

[1] 竹内芳美, " 메카트로닉스의 基礎技術 応用," 機械の研究 제40권 제8호 pp. 941. ~ 947, 1987.

[2] 坂木 鐵 : " ウェブの 張力制御系の 解析 と 制御," TIEE Japan, Vol.117\_D, No.3 pp. 27 4~281, 1997.

[3] 村上慶一, " 30年もつ 電車線 " JR East R & D Symposium pp.176~186, 1993.

[4] M.H. Raibert and J.J.Craig, " Hybrid position / force control of manipulators," Transaction of the ASEM, Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, vol.102, pp.126 ~133, 1981.

[5] Toshio Fukuta, Takanori, Takanori Shibata, Hasatosi Tokita, " Neuromorphic

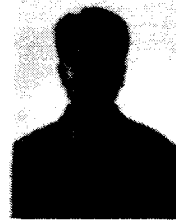
Control : Adaptation and Learning, " IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol.39, no. 6, pp. 497~503, 1992.

[6] 竹内俱佳, 泳井豊, " 自律型ロボットの ファジィ 移動 誘導 制御," 日本ファジィ 學會誌, vol.2, no.1, pp.85~94, 1990.

[7] Norbert A. Ebler, Gerd Michaelis, and Noel D'Sa, " Tension Control : Dancer Rolls or Load Cells, " IEEE Transaction Industry Application Vol.29, No.4, pp.101~107, 1993.

[8] 水本 雅晴, ファジィ制御に 代する 改善法 (VI) " 第 8回 ファジィシステムシンポジウム 講演論文集, pp.26~28, 1992.

[9] 홍순일, 노창주, " 서보제어용 퍼지추론 TOOL의 개발", 한국박용 기관학회 논문지, Vol. , No. pp.313~316, 1993.



윤정환(J. H. Yoon)

準會員

1999년 부경대학교 전기 공학과졸업.

2000년 동 대학원 전기 공학과 석사과정



홍순일(S. I. Hong)

正會員

1969년 부산대학교 전기과 졸.

1981년 부산대학교 대학원 공학석사

1996년 한국 해양대학교 공학박사

1993-1996년 대한 전기 학회 편집이사

1997년-1999년 한국조명전기설비 학회 부산경남지회장.

2000년-현재 대한전기학회 부산지회 부회장.

2000년-현재 신호처리·시스템 학회감사.

2000년-현재 부경대학교 전기·제어계측 공학부 교수