

## 가선 트롤리선의 장력제어 시스템 구성

정승환\* · 홍순일† · 홍정표\*\*

(원고접수일 : 2008년 4월 3일, 원고수정일 : 2008년 7월 16일, 심사완료일 : 2008년 7월 16일)

### Scheme of Tension control for the Stringing Trolley Wire

Seoung-Hwan Jung\* · Soon-Il Hong† · Jeng-Pyo Hong\*\*

**Abstract** : Now, but task for stringing trolley wire is worked manually by a measurement of dip, we need to development the automatic control system for a safety and effective tasks

In this paper, in works of stringing trolley wire by a mobile of robot, a method is proposed tension control for the stringing trolley wire. On the basics of a wire model with hard nonlinear, ac servo motor model for torque generating and stringing wire tension, the tension control scheme is design and implemented with a detected wire tension by a load cell. We experimentally show that the performance of the tension response are satisfactory to regulator tension. The proposed system is simulated and experimented, results is verified the utilities.

**Key words** : Stringing trolley wire(트롤리선 가선), Working robot(작업로봇), Tension control(장력제어)

### 기호설명

$T_{W}$  : 와이어 장력,  $n_1$  : 치차비,  $R_2$  : 구동륜 반경,  $J_2$  : 합성 관성 모우먼트,  $l$  : 와이어의 길이,  $T_M$  : 장력발생 전동기의 토크,  $E$  : 영계수,  $S$  : 와이어 단면적,  $T_D$  : 구동륜의 동마찰력,  $C$  : 동마찰 정수,  $v_{wir}$  : 와이어 풀림속도,  $C_1$  : 토크 제어기 비례정수,  $h$  : 와이어의 단면의 한 변 길이,  $V_d$  : 로봇속도,  $x$  : 로봇 이동거리,  $\Delta l = x - l$  : 인장 케이블 길이 변화량.

### 1. 서 론

인간을 열악한 작업상황과 단순작업에서 해방하는 것으로서 자동기계 또는 그 기계를 제어하는 자동화 시스템이 개발되어 실용화되어 있다. 전력 케이블 가설공사에서 일정 장력을 유지하도록 제어하는 것도 인간을 열악한 작업환경에서 해방시키고 산업기계를 자동화 시키는 하나의 과제이다 본 연구를 하게 된 동기는 전차 트롤리선(이하 와이어선 이라함)의 가설 작업이나 와이어로프 등의 제조 작업에서 장력을 제어하여 작업을 자동화함으로써 작

\* 교신저자(부경대학교 전기제어공학부, E-mail: sihong@pknu.ac.kr, Tel: 051)629-6311)

\* 부경대학교 전기제어공학부 전기공학전공

\*\* 동의과학대학교

업능률의 증가, 품질향상, 열악한 작업환경에서의 해방 등이다<sup>(1)-(2)</sup>.

와이어선 가설공사에서 가장 중요한 것은 와이어 케이블에 흐르는 부하전류의 변화, 주위환경 변화 등에 견딜 수 있는 일정한 기계적 강도를 유지하여야 하고 이렇게 되기 위해서는 와이어 케이블의 장력제어가 필요하다.

전차 트롤리선 가설 작업, 지중 케이블 및 광케이블 가설작업은 산업 현장에서 필요한 작업이고 일반적으로 윈치 크레인에 의해 수동으로 운전자의 경험적 지식에 의해 행해지고 있다<sup>(3)-(4)</sup>. 이러한 작업에서 주된 목적은 롤에서 와이어 케이블이 풀리는 동안 장력이 일정히 유지되도록 제어하는 것이다. 와이어선의 장력제어는 크레인, 로봇 암 등에서 단일 작업으로 연구되고 있지만 이동하면서 와이어선 가설작업을 하는 경우 장력의 세기는 비선형이기 때문에 장력과 다른 일에 대한 혼합제어는 매우 어려울 뿐만 아니라 이에 대한 연구는 아직 행해지지 않고 있다<sup>(5)-(6)</sup>.

고속 전철에서 트롤리선의 가설이나 교체작업에서 와이어 케이블의 장력은 그 한계치를 넘지 않고 느슨하지 않도록 인장력을 조정할 필요가 있다. 현재에 전차 트롤리선의 가설작업은 수동으로 하고 있지만 이것을 자동 가설하는 작업로봇의 개발이 필요하다. 본 연구자들은 일정장력을 유지하면서 이동하는 케이블 가설 작업 로봇에서 이동 제어 시스템은 이미 발표한 것을<sup>(7)</sup> 이용하고 이번 논문은 장력제어 시스템의 개발이다.

현재에 전차 트롤리선의 가설작업은 딥 측정에 의해 수동으로 하고 있지만 작업(task)의 안전과 효율을 위하여 자동 가설하는 장치의 개발이 필요하다. 트롤리선 가설작업은 장력/이동의 두 작업이 필요하다. 또한 트롤리선 자동가설 작업로봇은 가설 케이블의 동적모델이 비선형 시변계이기 때문에 이동/장력제어의 두 동작에 대하여 서로 간섭이 생긴다. 이러한 문제를 고려한 장력제어 시스템이 필요하다.

본 연구는 이동하면서 트롤리선을 가설하는 작업 로봇에서 가선 트롤리선에 대한 장력제어 방법이 제안되었다. 비선형 와이어 모델, AC 전동기를 이

용한 장력발생 시스템 및 와이어의 장력 방정식에 기초하여 장력제어 시스템이 로드셀에 의한 검출 장력을 피드백 하여 설계하고 실행하였다.

장력제어 시스템은 로드셀에 의해 실측한 장력의 피드백제어를 기본으로 하고 속응성과 정상특성을 개선하기 위하여 PID 보상을 행한다. 제어의 연산 결과는 토크 지령치로 실측토크와 비교되어 토크 제어기( $C_1$ )에 입력되고 지령토크에 추종하여 서보전동기의 토크를 제어한다.

제안한 장력 제어시스템은 구성이 간편하고 장력/이동의 두 작업에서 장력의 조절을 할 수 있음을 시뮬레이션에 의해 확인하였다. 장력응답은 실험에서 만족하게 장력을 조절하는 것을 나타낸다. 장력 제어 시스템은 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 결과가 유효함을 증명하였다. 실제 산업사회에 응용 분야는 전차 트롤리선의 가설과 교체 작업 및 광케이블의 가설 등에 적합하다.

## 2. 장력제어 시스템

작업로봇은 한 쪽 끝에 고정되어 있는 지점에서 전차 트롤리선을 로봇이 이동하면서 트롤리선의 장력을 일정하게 유지하도록 가설하는 것이다. Fig.1은 트롤리선 가설작업 로봇의 구조와 로봇위에 탑재되어 있는 장력제어 시스템의 원리를 나타낸다. 장력 검출은 Load cell을 이용하고 브리지에 인가전압이 걸려있고 여기에 장력이 가해지면 브리지에 외형이 생겨 내부의 저항치 변화가 전압의 변화로 출력된다. 이 출력전압이 측정장력에 비례한다.

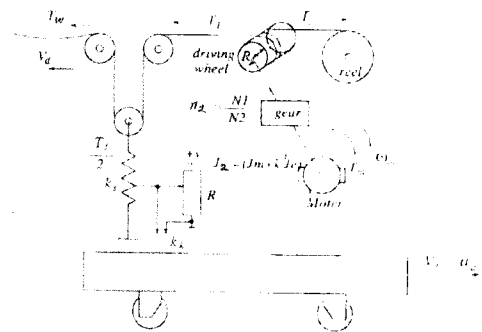


Fig. 1 The working robot and principle of tension control system

2.1 장력계

장력계는 와이어 시스템, 장력 발생 전동기, 구동륜 등으로 구성되고 이동로봇 위에 탑재되어 있다. 와이어의 장력은 고정 지지점 사이의 거리 보다 와이어의 길이  $l$  가 충분히 길 경우 제어해야 할 와이어의 장력은 와이어가 거의 수평으로 당길 정도로 강한 장력이기 때문에 와이어의 신축성이 중요한 문제로 된다. 와이어의 신축성은 포아손비 및 영률에 따르고 장력은 (1)이 된다.

$$T_{W} = \frac{\Delta l}{l} E(h + \Delta h)^2 \quad (1)$$

이때 신축에 의해  $h^2 \simeq S$ 이고 포아손 비에 의해  $\Delta h (= \sqrt{\Delta S})$ ,  $\Delta l$  가 변화하지만,  $\Delta h \ll h$  이므로  $\Delta h$ 은 무시 할 수 있다. 따라서 와이어 운동 방정식은 탄성한계 내에서 당길 때 발생하는 외형 응력은 후 법칙에서 (2)이다.

$$T_{W} = \frac{\Delta l}{l} \cdot ES = \frac{(x-l)}{l} \cdot ES \quad (2)$$

(2)에서  $ES=k$  는 와이어 정수이고 장력은 로봇이 주행한 거리와 드럼에서 풀린 와이어 길이의 차에 비례하고 와이어 길이에 따라 변화하는 것을 알 수 있다.

장력발생 전동기는 교류서보 HA-FH23 (Mitsubishi)이고 입력을 전압[V]로 하고 출력을 토크[kgf]로 하여 측정된 주파수 특성에서 (3)과 같이 모델링된다.

$$G(s) = 0.4e^{-0.002s} \frac{1 + (1/350)s}{1 + (1/90)s} \quad (3)$$

토크 제어기는 지령전압에서 전동기 발생 토크를 제어하며 비례정수는  $7.16[kgf/V]$  이다.

장력계는 외란의 항이 식에 나타나 있지 않지만 차대의 이동외란이 존재한다. 장력계의 운동 방정식은 (4)이 된다.

$$J_2 \ddot{l} = - \left[ \frac{T_M}{R_2} + T_D \right] + T_W \quad (4)$$

장력 검출은 로드셀을 이용하고 이 로드셀은 급속의 변형에 의해 장력을 측정하고 있다. 그리고 측정장력은 등활차가 이동하면 와이어의 모양이 변하고 장력응답이 변하므로 측정 결과는 저역필터 (Low pass filter)를 통과도록 한다.

2.2 장력제어계 구성

트롤리션 장력제어 원리는 드럼의 앞단에 구동륜 (Driving Wheel)을 부착하고 이것을 교류 서보 전동기로 토크를 제어하여 장력제어를 실현한다. 케이블을 구동륜에 몇 회 감으면 케이블의 한쪽 끝단에 걸리는 큰 힘을 다른 끝단에서 작은 힘으로 인장 할 수 있다. 이것은 구동륜의 한 단에 걸린 큰 힘을 구동륜의 마찰력에 의해 계류할 수 있는 원리를 이용한다. 또한 장력제어 시스템은 한 쪽 끝에 고정된 트롤리션을 로봇이 이동하면서 일정 장력으로 가선한다.

Fig.1에서 차대의 진행속도에 의한 에너지와 장력발생 전동기에 의한 에너지는 에너지 보존법칙에 의해 아래의 관계가 성립한다. 단, 에너지의 손실은 무시한다.

$$T_W V_d = T_M \omega \quad (5)$$

또한 드럼에서 풀린 와이어 길이  $l$ 는 (6)이다.

$$l = \int_0^t v_{wire} dt = 2\pi R_2 \quad (6)$$

그리고 구동 토크를 증폭하기 위한 치차비  $n_2$ 는 (7)의 관계가 성립한다.

$$\frac{T_M}{T_W R_2} = n_2 \quad (7)$$

로드셀에서 측정되는 장력과 피드백 신호사이에 (8)가 성립한다.

$$T_W = k_k v_{fb} \quad (8)$$

여기서,  $k_k$  :로드셀 피드백 이득정수,  $v_{fb}$ 는 피드백 신호이다. 토크 발생 전동기와 부하의 운동방정식은 (9)이다.

$$T_M = J_2 \frac{d\omega_m}{dt} + n_2 R_2 T_W + n_2 R_2 k_k \omega_m(t) \quad (9)$$

장력제어 시스템의 구성은 장력제어기(PID), 와이어 운동방정식(2), 장력 발생용 교류 서보 전동기 모델 (3), 장력계 운동방정식 (4) 및 토크 제어기( $C_1$ )으로 구성된다. 장력 발생전동기의 발생토크와 구동륜( $R_2$ )에 의한 장력은 (7), (8) 및 (9)에 의해 구성되고 와이어 길이는 (6) 이다.

Fig. 2는 지금까지 유도한 식에 의해 구성한 장력제어 시스템의 블록선도이다.

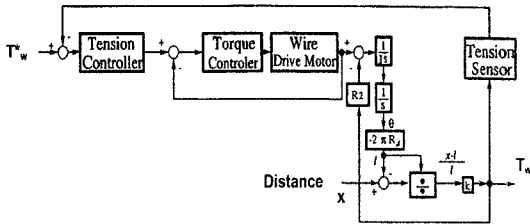


Fig. 2 Block diagram of the proposed tension control system

장력제어는 장력지령치와 실측한 장력의 오차에서 제어 출력을 구하는 피드백제어를 기본으로 하고 속응성과 정상특성을 개선하기 위하여 PID 보상을 행한다. 제어의 연산 결과는 토크 지령치로 실측토크와 비교되어 토크 제어기( $C_1$ )에 입력되고 서보 전동기는 지령토크에 추종하여 전동기를 제어한다.

표1은 장력제어제에 사용한 시스템 파라미터를 나타낸다. 파라미터는 실제로 측정된 것과 이동용 전동기의 오버슛이 없는 조건에서 속응성과 정상특성이 좋은 것을 사용했다.

Table 1 The parameters for tension system

$\rho$	0.17kg/m	$n_2$	30:1
$g$	9.8[m/s]	$R_2$	0.075
$E \cdot S = k$	$1.4 \times 10^3$ [kgf]	$C_1$	7.16 [kgf/V]
$J_2$	$3.5 \times 10^{-3}$ kgm <sup>2</sup>	$k_k$	200 [A/m]
$T_M$	6.5kgf · cm	Power	0.2kW

### 3. 시뮬레이션 결과

#### 3.1 장력응답특성

장력 시스템은 개루프 특성시험 결과 지령전압과 검출장력의 직류 이득은 5.0[kgf/V], 시정수는 약 0.21[sec], 부동작 시간 15[ms] 이다. 이 값에 기초하여 장력의 PID 직렬보상기의 파라미터는 오버슛이 발생하지 않도록 하여  $K_p=0.25$ ,  $T_i=0.1$ ,  $T_D=0.03$ 이고 PI제어의 경우  $K_p=0.25$ ,  $T_I=0.3$  이다. 그리고 목표장력은  $T_W^*=6$ kgf이고 와이어 풀린 길이  $l=1.2$ m,  $l=0.4$ m로 한다.

장력응답 그래프는 장력지령치(실선), 서보 전동기 토크제어장치의 출력전압(간 일점 세선), 실제 장력(중간 크기 일점세선) 저역필터를 통과한 후의 검출 장력(작은 일점세선)이다. 와이어의 길이 응답 그래프는 위에서부터 와이어 풀린 길이(실선), 와이어의 고정점에서 위치(일점쇄선)를 나타낸다.

Fig. 3은 제어 시작이 케이블의 길이  $l=1.2$ m에서 계산한 장력응답이고 제어전압이 상승하는 것은 일정 지령장력을 유지하기 위함이다. Fig. 4는 그때 케이블 길이에 대한 응답을 나타낸다. Fig. 5는 제어 시작이 케이블이  $l=0.4$ m에서 계산한 장력응답이고 Fig. 6은 그 때 케이블 길이의 응답을 나타낸다. 이 경우  $l=1.2$ m일 때 응답 보다 오버슛이 크고 진동적이다. 이 이유는 제어 파라미터를  $l=1.2$ m을 기준으로 설정하였기 때문이다.

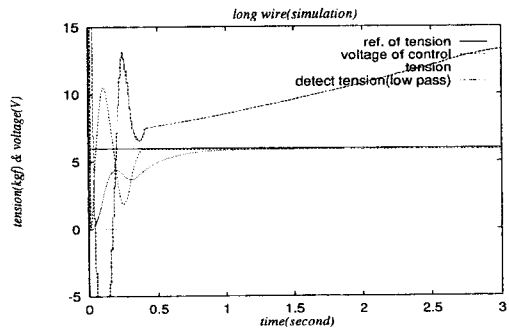


Fig. 3 Simulated step response of tension,  $l=1.2$ m (simulation)

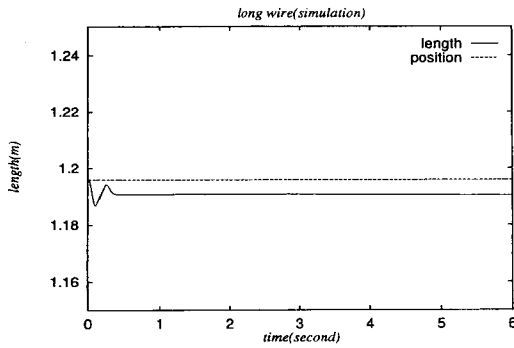


Fig. 4 Simulated step response of length,  $l = 1.2m$  (simulation)

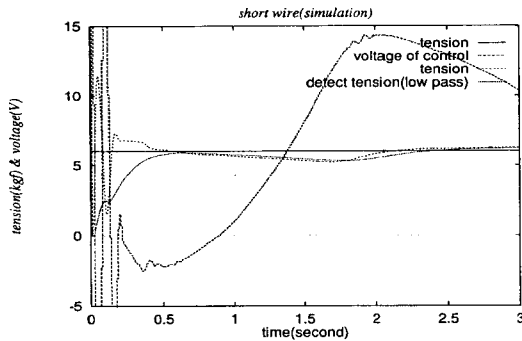


Fig. 5 Simulated step response of tension,  $l = 0.4m$  (simulation)

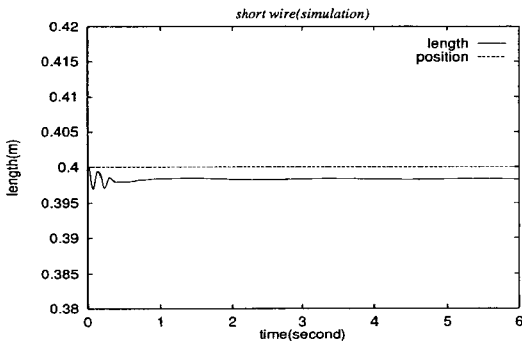


Fig. 6 Simulated step response of length,  $l = 0.4m$  (simulation)

이 결과에서 목표장력은 6 kgf이고 여기서 실장력은 오버슈트가 있지만 지역필터를 통한 후는 목표치에 수렴하고 있는 것을 알 수 있다. 이 결과장력의 시뮬레이션 응답특성은 초기에는 오버슈트와 진동이 발생하였지만 정상 상태에는 목적으로 한 일정 장력제어를 실행할 수 있는 것을 알 수 있다.

이상 장력제어 시스템은 그 동작특성을 시뮬레이션 검토한 결과 시스템의 구성이 적합함을 알 수 있다.

3.2 실험결과

시뮬레이션에 의해 각 제어계의 파라미터를 결정했기 때문에 그 값을 이용해서 실제 시스템을 구성하여 실험을 행한다. 실험은 제어를 시작할 때 와이어가 느슨 하지 않도록 미리 토크를 걸어 놓은 상태에서 더 큰 토크 지령전압을 스텝으로 걸게 된다.

실험은 장력지령을 단계적으로 나누어서 조금씩 증가시켜 대차의 위치가 이동하지 않는 것처럼 장력과 위치를 동시에 제어하여 그 때 장력응답을 나타낸 것이다. 이렇게 하였기 때문에 속도는 계속 영을 유지한다. 이 경우 파라미터는 시뮬레이션에 사용한 것과 같고 그래프는 각각 차레로 지령장력, 측정장력을 나타낸다. Fig. 7은 PI 제어이고 Fig. 8 및 Fig. 9는 PID 제어이다. Fig. 9은 차대의 위치를 고정하지 않고 이동 속도가 가해지고 있을 때 설정 장력은 2kgf→4kgf 계단 입력한 장력응답을 나타낸다. 이때는 차대의 이동 외란이 장력시스템에 영향을 미쳐 장력응답이 목표치 추종하지 않고 있다.

이상의 실험에서 대차의 위치가 고정된 상태에서 장력응답은 목표장력에 추종하여 양호하고 시뮬레이션의 응답과 같은 특성을 얻었다. 그러나 Fig. 10과 같이 대차가 이동할 때는 목표장력을 추종하지 못하는 응답을 나타내고 있으며 이것은 속도 피드포워드 도입 등 외란 억제방법이 필요한 것을 알 수 있다.

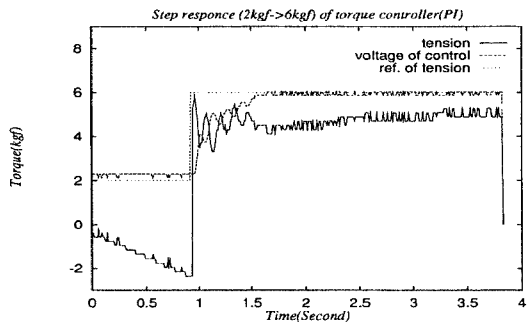


Fig. 7 Experimental step response of tension, with PI Control

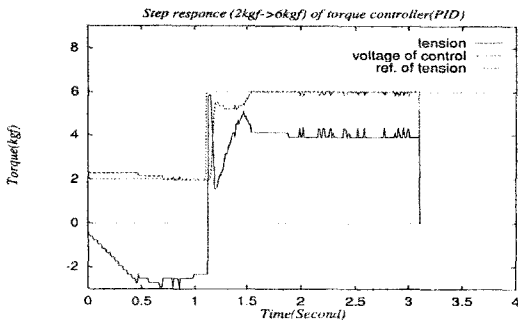


Fig. 8 Experimental step response of tension, with PID Control

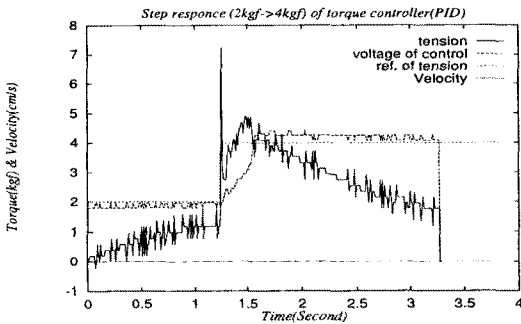


Fig. 9 Experimental step response of tension, at a mobile of robots

#### 4. 결 론

본 논문은 전차 트롤리 선 (와이어 케이블) 가설 작업에서 와이어 케이블의 일정 장력유지 제어시스템이 제안 되었다. 일정 장력을 유지하고 이동하는 작업로봇에서 장력/ 이동의 복합작업은 시스템의 운동 방정식이 매우 복잡하지만 장력제어 시스템은 구성이 간편하도록 제어방식을 나타내고 모델이 도출되었다.

제안된 장력제어 시스템은 케이블, 장력발생 교류 서보 전동기, 와이어 케이블 모델과 그 운동 방정식을 이용하여 간략하게 나타내었고 이동/ 장력 혼합제어의 구성에 편리하다. 구성한 장력제어시스템은 시뮬레이션과 실험을 통해 그 유용성이 입증되었다.

차후 연구는 이동/장력 혼합제어에서 두 동작이 상호 미치는 영향을 억제 되는 혼합 제어시스템의

구성이 필요하다.

#### 참고문헌

- [1] Mehrzad Namvar and Farhad Aghili, Member, IEEE "Adaptive Force-Motion Control of Coordinated Robots Interacting With Geometrically Unknown Environments," IEEE Transactions on Robotics, Vol. 21, No. 4, pp 678-694, August 2005.
- [2] 村上慶一, "30年も 電車線", JR East R&D Symposium, pp. 176-186, 1998
- [3] Randolph Cabell, Dan Palumbo, and Jeffrey Viperman "A Principal Component Feedforward Algorithm for Active Noise Control: Flight Test Results," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 9, No. 1, pp. 76-83, January 2001.
- [4] Hakan Koc, Dominique Knittel, Michel de Mathelin, and Gabriel Abba, "Modeling and Robust Control of Winding Systems for Elastic Webs," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 10, No.2, pp. 197-208, March 2002.
- [5] Di Xiao, Bijoy K. Ghosh, Ning Xi, and T. J. Tarn, "Sensor-Based Hybrid Position/Force Control of a Robot Manipulator in an Uncalibrated Environment," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 8, No. 4, pp. 635-645, July 2000.
- [6] Luigi Villani, Ciro Natale, Bruno Siciliano and Carlos Canudas de Wit, "An Experimental Study of Adaptive Force/Position Control Algorithms for an Industrial Robot," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 8,

No. 5, pp. 777-786, September 2000.

- [7] 김실근, 홍순일, 홍정표, "전동차 트로이선 가설 작업로봇의 이동제어", 한국마린엔지니어링학회지, Vol. 30. No. 8, pp 118-124, 2006.

## 저 자 소 개



### 정승환(鄭承環)

2008년 현재 부경대학교 전기제어공학부 조교, 2004년 부경대학교 전기공학과 졸, 2007년 부경대학교 전기공학과 석사 과정 수료, 2009년 부경대학교 전기공학과 박사 예정, 관심분야: 신재생 에너지 개발, 교류전동기 제어, 교류 전동기회생제어.



### 홍순일(洪淳一)

2008 현재 부경대학교 전기제어공학부 교수, 1981 부산대학 공학석사(전력전자), 1986 한국해양대학 공학박사 (제어공학) 1999 일본전기 통신대학 연구교수, 2000 대한전기학회 부산지부 회장. 관심분야: 퍼지 시스템설계, 서보시스템설계, 전동기 벡터제어.



### 홍정표(洪正杓)

2008년 현 동의과학대학 전임강사, 1998년 부경대학교 전기공학과 졸, 2001 부산대학교 대학원 공학석사, 2008년 부경대학교 기계설계학과 공학박사. 관심분야: 퍼지 시스템설계, 전동기 벡터제어, 리덕턴스 전동기 제어 설계.