Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 22, No.8, pp. 31~37 August 2008 논문 22-8-5

# 장력측정에 의한 가설 송전선의 시스템 자동화

## (Automatic Control System for the Stringing Transmission Wire by the Measured Tension)

홍정표* · 홍순일**
(Jeng-Pyo Hong · Soon-Ill Hong)

## 요 약

현재, 송전선등 전력케이블의 가설작업은 딥 측정으로 크레인에 의해 수작업에 의해 행해지고 있지만 안전과 효율적인 작업을 위해 가설작업의 자동화 시스템이 필요하다. 이러한 필요에 대하여 본 논문의 목적은 송전선 케이블의 가설을 위한 자동화 시스템의 개발이다.

본 논문은 현수형 송전 케이블과 장력발생 교류 서보전동기의 모델을 나타내고 송전케이블의 딥을 일정히 유지하기 위한 장력을 계산하는 알고리즘을 나타내었다. 현수형 송전선 특성에 기초하여 로드셀을 이용한 장력측정에 의해 송전선 가설 시스템의 구성법이 제안되었다. 가설시스템은 장력 발생장치에 교류서보 전동기를 이용하고 케이블의 장력계측 장치는 하중변환기(load cell)를 사용한다.

## Abstract

As transmission line is installed by manual operation, it is necessary to scheme the automatic system for stringing transmission wire. For this necessity, the objective of this paper is developed automatic control system for a stringing of transmission wire.

In this paper, transmission wire with suspended pattern and ac servo motor for torque generating are modeled. On the basis of wire model, algorithms to determine the reference tension is presented, so as the dip of transmission wire is keep constancy.

The control scheme is proposed by the ac servo motor for torque generation and a load cell for a detected tension of transmission wire and implemented.

We experimentally show that the performance of the tension response is satisfactory. And also proposed scheme verified the utilities for tension control of transmission wire.

Key Words : The Dip Of Transmission Wire, Tension Control, Load Cell

* 주저자 : 동의과학대학 전기공학과
** 교신저자 : 부경대학교 전기공학과
Tel : 051-629-6311, Fax : 051-629-6305
E-mail : sihng@dit.pknu.ac.kr
접수일자 : 2008년 4월 2일
1차심사 : 2008년 4월 10일, 2차심사 : 2008년 5월 23일
심사완료 : 2008년 6월 16일

## 1. 서 론

최근 Mechanism과 Electronics에 의한 Mechartronics 공학의 발달로 산업현장에서 기계의 제어를 전자화함으로 기계성능의 고도화가 가능하게 되었

다. 메카트로닉스의 대표적인 응용은 로봇의 개발과 연구이다. 특히 산업체에서 인건비 절감과 생산품질의 향상, 품질의 균질성 등이 요구되고 있어 이러한 문제를 해결하기 위해 산업용 로봇이 매우 발전되고 있다. 이러한 배경 아래 산업용 로봇은 용접, 도장, 운송, 조립 등 여러 분야에 응용되어 자동화 추진의 중요한 역할을 하고 있다.

가선 케이블의 장력제어를 행할 때 장력을 단순히 일정히 유지시키는 것은 별 문제가 없지만 케이블의 형상을 일정히 유지시키도록 제어하는 경우 현수선에 관해서 검토가 필요하다. 여기서 "케이블의 형상을 일정하게 유지시킨다."라는 것은 가선 케이블의 최저점(Dip)의 높이가 일정히 유지된다는 것을 말한다.

가설되는 케이블은 현수선( Catenary) 형이고 케이블의 가설 길이, 지지점에서 수평방향을 이루는 각도 $\theta$등의 시변 파라미터를 포함하고 있기 때문에 강인성이 있는 제어가 필요하다.

현재 전력케이블의 설치는 가선이 소정의 딥(Dip)을 유지하도록 윈치를 운전하여 당기는 방법이다[1-2]. 이 경우 딥의 측정이 매우 중요하며 측정방법은 직접법과 간접법이 있으며 직접법은 등장법, 이장법, 수평 이동법, 각도법, 추출 각도법, 표적 관측법 등이 있다.

현수선 조가방식은 지지대의 애자에 의해 전력케이블을 조가하여 현수형으로 가설되며 측정한 딥 D가 규정한 값을 유지하도록 윈치운전에 의한 가선 케이블을 설치하고 윈치 조작은 유압식, 전자식, 공기압식이 있다[3-4].

전력케이블을 설치하는 것은 수작업에 의해 행해지고 있어 작업의 효율화와 함께 최적의 장력제어가 필요하다. 본 연구의 목적은 전력케이블을 가설할 때 장력이 케이블의 한계치를 넘지 않는 것과 동시에 케이블이 너무 느슨하지 않도록 일정한 딥을 유지하도록 제어하는 방법이 필요하다. 케이블을 새롭게 가설은 장치는 케이블을 릴에 감아올릴 필요성은 거의 없기 때문에 케이블을 풀어주는 속도와 로드셀에 의해 장력을 검출하고 장력을 발생하는 하드웨어 구성방법의 연구가 필요하다[5-6].

전기공사에서 가공 케이블의 가설공사는 딥을 일정히 유지할 필요가 있고 케이블 가설 자동화 시스템은 드럼에서 케이블을 풀고 케이블 양단의 장력을 어느 일정치 이상으로 유지하도록 조절하는 것이 필요하다.

전차선 가설공사는 극한 환경 하에서 작업이며 이러한 작업을 효율적이고 경제적으로 행하기 위한 연구가 진행되고 있다[7]. 가설 케이블은 현수 형상이고 케이블의 형상을 결정하는 파라미터는 케이블이 릴에서 풀린 길이에 따라 변하는 시변 파라미터가 존재한다[8-9].

현재 송전선등 전력케이블의 가설작업은 수작업에 의해 행해지고 있기 때문에 가설작업의 자동화 시스템이 필요하다. 이러한 필요에 대하여 본 논문의 목적은 송전선 케이블의 가설을 위한 자동화 시스템의 개발이다.

본 논문은 현수형 송전 케이블과 장력발생 교류서보전동기의 모델을 나타내고 송전케이블의 딥을 일정히 유지하기 위한 장력을 계산하는 알고리즘을 나타내었다. 현수형 송전선 특성에 기초하여 로드셀을 이용한 장력측정에 의해 송전선 가설 시스템의 구성법이 제안되었다. 가설시스템은 장력 발생장치에 교류서보 전동기를 이용하고 케이블의 장력계측장치는 하중변환기(load cell)를 사용한다.

이 시스템은 A/D 컨버터를 통해서 마이크로프로세스에 데이터를 저장시켜 제어 알고리즘에 의해 계산한 결과를 D/A 컨버터를 통하여 조작신호를 발생시켜 토크 제어시스템에 피드백에 의해 장력제어를 실현한다.

## 2. 가선 케이블 시스템

### 2.1 케이블 시스템의 운동방정식

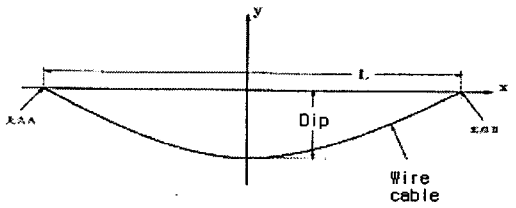


**그림 1. 현수선 케이블**
**Fig. 1. Suspended transmission wire**

일정한 질량을 갖고 길게 가설된 케이블의 양측에 힘을 가해 당기면 가설되는 케이블은 공기 중의 중력에 의해 그림 1과 같은 현수곡선(Catenary Curve)이 된다.

현수선의 일반 방정식은 (1)이다.

$$y = a\cosh(x/a + m) + n \tag{1}$$

여기서, a, m, n은 현수선의 형을 결정하는 각 파라미터이다. 그리고 최저치가 되는 각 좌표는 $x_{min} = -a\,m$, $y_{min} = a + n$이다. 그리고 현수선의 길이 $l$은 (2)이다.

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

현수선이 그림 1에 나타낸 것과 같이 Y축에 대칭일 때 (1)에서 방정식은 (3)이고 딥은 (4)이다.

$$y = a\cosh\left(\frac{x}{a}\right) - D_{ip} \tag{3}$$

$$D_{ip} = a[\cosh\left(\frac{L}{2a}\right) - \cosh(0)] \tag{4}$$

여기서 $L$: 지지점 사이의 거리, $a$ ; 현수선 모양에 따른 임의 상수. $D_{ip}$; 최저치, 딥이다. 길이는 (2)에서 (5)이다.

$$l = 2a \cdot \sinh\left(\frac{x}{2a}\right) \tag{5}$$

케이블이 Y축에 대칭일 때 식 (3)을 이용하여 양단에 걸리는 장력 $T_f$ 는 (6)이다.

$$T_f = a(t)\rho g\sqrt{1 + \sinh^2\left(\frac{x}{a}\right)} \tag{6}$$

여기서, $\rho$ : 케이블의 선밀도, $g$ : 중력가속도, $x$ :경간 수평거리( $L$). 또한 현수선 모양을 결정하는 상수 $a(t)$는 케이블이 가설 될 때 시간에 따라 변한다.

## 2.2 장력발생 AC 서보전동기

장력발생 교류 서보전동기는 Mitsubishi MR-H20AN3이고 입력을 전압[V]로 하고 출력을 토크[ *kgf*]로 하여 측정한 주파수 및 이득 특성에 기초하여 (7)와 같이 모델링된다.

$$G(s) = K_m e^{-0.002s}\frac{1 + (1/350)s}{1 + (1/90)s} \tag{7}$$

장력은 발생토크에 비례하며 토크 제어기는 기존 제품 MELSERVO-H이고 발생 토크는 지령전압에 직접 비례한다.

그림 2는 케이블의 딥(Dip : 늘어진 위치)이 일정하게 유지되도록 장력을 제어하기 위한 지령치(6)를 계산하는 알고리즘이다. 이 알고리즘을 이용하여 케이블이 처진 딥 위치를 목표치에 유지하기 위한 장력지령치의 구성을 제안한다.

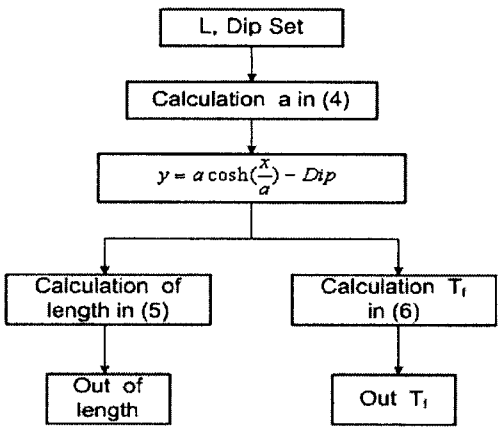


**그림 2. 장력 지령치 결정 알고리즘**
**Fig. 2. Algorithm for decision of reference tension**

그림 3은 케이블 길이와 장력의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 반경 $R = 2.5[mm]$( $\rho = 0.17[kg/m]$)의 동선, 지지점 사이의 폭 2[m]( $x = 1.0$)일 때, 케이블이 처지는 량(딥: Dip)과 장력의 관계는 식 (3)과 양단 토크의 관계에서 뉴톤법으로 수식 계산하였다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 어느 한 일정 장력에 대해서 케이블은 2개의 교점이 있다. 이것은 케이블이 가설되어 있을 때에 현수형이 되어 나타나는 성질 때문이다.

여기서 케이블의 장력은 케이블의 양단에 걸리는 장력을 의미한다. 계산 결과 그래프에서 케이블의

양단에 걸리는 장력이 가장 큰 것을 알 수 있다. 따라서 장력제어 시스템을 구축하기 위해서 장력 검출은 이 점에서 한다.

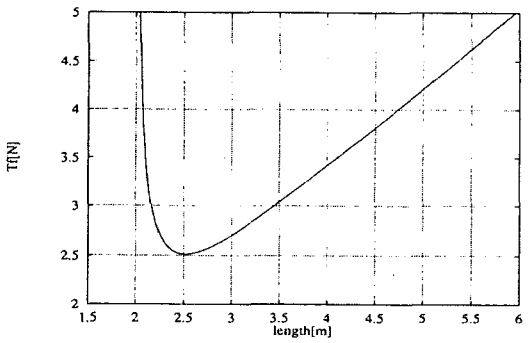


**그림 3. 케이블의 길이와 장력의 관계도**
**Fig. 3. The relation for tension and length of transmission wire**

## 3. 장력제어 시스템

앞에서 검토한 현수선 가선케이블의 특성에 기초하여 제안하는 장력제어 시스템은 드럼의 앞단에 구동륜(Driving Wheel)을 부착하고 이것을 장력발생 교류 서보전동기의 토크를 제어하여 케이블의 장력을 제어한다.

그림 4는 케이블 자동가설 장치를 나타내며 AC 서보 전동기와 제어기, 홀 감속기, 장력 센서( Load cell)가 붙어있는 활차 및 와이어 케이블 안내 활차로 구성되어 있다. 드럼(Reel)에 감긴 케이블은 구동륜(Driving wheel)을 통해 풀린다. AC 서보 전동기는 토크발생 용이고 발생 토크는 30:1의 감속기를 통하여 구동 휠에 전달된다.

그림에서 각부의 변수 및 정수는 다음과 같다.

$T_f(t)$ : 케이블의 장력 [$kgf$], $J_{se}$ : 전동기 측에 환산한 합성 관성 모우먼트 [$kgm^2$]

$T_m(t)$ : 전동기의 출력토크 [$Nm$], $\omega_m(t)$ : 전동기 회전각속도 [1/ sec]

$n_2 = N_1/N_2$ : 치차비, $k_s$ : 로드셀 스프링계수 [$N/m$], $k_f$:마찰력 정수 [$Nsec$]

$v_{fb}(t)$ : 피드백신호 [$V$], $k_k$ ; 피드백 정수, $V_d$ : 케이블 풀리는 속도

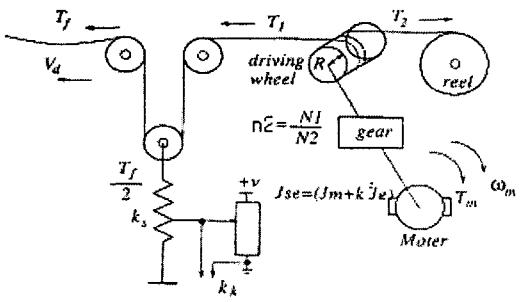


**그림 4. 장력제어 시스템의 원리**
**Fig. 4. The principle of tension control system for transmission wire**

발생 토크 증폭을 위한 전동기와 구동륜 사이 치차비 $n_2$는 (8)의 관계가 성립한다.

$$\frac{T_m}{T_f R} = n_2 \tag{8}$$

또한 드럼에서 풀린 와이어 길이 $l$는 (9)이다.

$$l = \int_0^t V_d dt = 2\pi R \tag{9}$$

여기서 $V_d$: 와이어 케이블 풀림속도, $R$ : 구동륜 반경이다. 로드셀에서 측정되는 장력과 피드백 신호 사이에 (10)가 성립한다.

$$T_f = \frac{k_s}{k_k} v_{fb} \tag{10}$$

전동기 출력토크와 부하의 운동방정식은 (11)이다.

$$T_m(t) = J_{se}\frac{d}{dt}\omega_m(t) + n_2 R T_f(t) + n_2 R k_k \omega_m(t) \tag{11}$$

여기서, $J_{se} = J_m + n_2 J_L$, $k_k$ ; 피드백 정수. 장력제어는 장력지령치와 실측한 장력의 피드백을 기본으로 구성하고 속응성과 정상특성을 개선하기 위하여 장력발생 전동기 회전속도( $\omega_m$)를 피드백 보상한다.

그림 5는 모델링 한 케이블 운동 방정식 (6) 서보 전동기 전달함수(7) 및 부하 (8), (10) (11)을 이용하여 구성한 장력제어 시스템의 블록선도를 나타낸다.

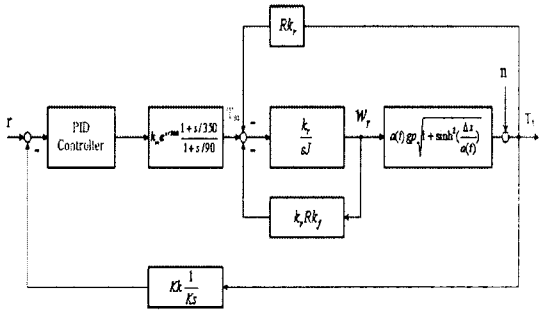


**그림 5. 제안한 전력 케이블의 장력제어 시스템**
Fig. 5. The proposed tension control for wire cable system

## 4. 시뮬레이션과 실험

### 4.1 시뮬레이션

시뮬레이션은 Matalab Tool에 의해서 행한다. 실제의 프로그램은 C++에 의해 작성하고 블록마다 목적파일 모아서 이후, 추가 작성에도 유연하게 대응할 수 있도록 했다. 표1은 시뮬레이션에 사용한 시스템의 파라미터를 나타낸다.

**표 1. 장력제어 파라미터**
Table 1. Parameters of tension system.

| | | | |
|---|---|---|---|
| $\rho$ | 0.17 $kg/m$ | $J_{se}$ | $3.5\times10^{-5}[kgm^2]$ |
| $g$ | 9.8[$m/s$] | $n_2$ | 0.1 |
| wire | Ø2.5[$mm$] | $k_s$ | 200[N/m] |
| $k_k$ | 200[A/m] | $K_m$ | 5.0[$kgf/V$] |
| $k_f$ | 200[Nsec] | $R$ | 0.075 |

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 PID 직렬보상기의 파라미터는 오버슛이 발생하지 않도록 하여 $K_P=0.25$, $T_i=0.1$, $T_D=0.03$이고 PI제어의 경우 $K_p=0.25$, $KT_I=0.3$이다. 그리고 목표장력은 $T^*_W=6kgf$이고 와이어 풀린 길이 $l=1.2m$, $l=0.4m$로 한다. 표 2는 장력 발생 AC 전동기 정수이다.

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

그림 6 는 제어 시작이 케이블의 길이 $l = 1.2m$에서 계산한 장력응답이고 그림 7은 그 때 케이블 길이의 응답을 나타낸다. 그림 8은 제어 시작이 케이블이 짧은 $l=0.4m$에서 계산한 장력응답이고 그림 9는 그 때 케이블 길이의 응답을 나타낸다. 이 경우 $l=1.2m$일 때 응답 보다 오버슛이 크고 진동적이다. 이 이유는 제어 파라미터를 $l = 1.2m$을 기준

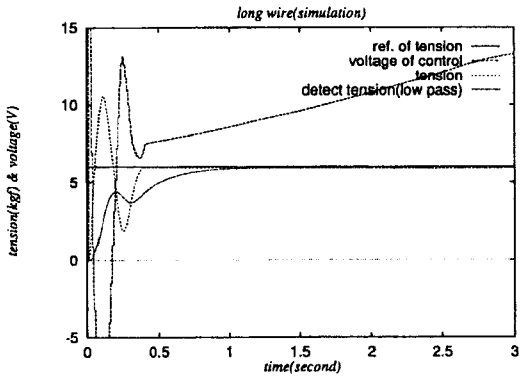


**그림 6. 시뮬레이션 한 장력의 스텝응답( $l = 1.2\ m$ )**
Fig. 6. Simulated step responses of tension ( $l = 1.2\ m$ )

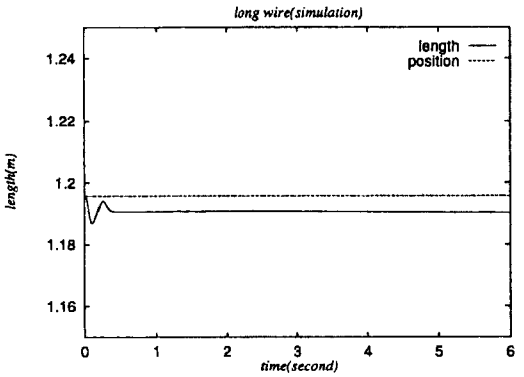


**그림 7. 시뮬레이션 한 와이어 길이 스텝응답**
Fig. 7. Simulated step responses of length

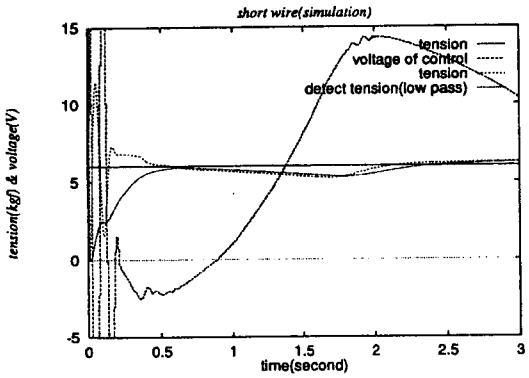


그림 8. 시뮬레이션 한 장력의 스텝응답 ( $l=0.4m$)
Fig. 8. Simulated step responses of tension ( $l=0.4m$)

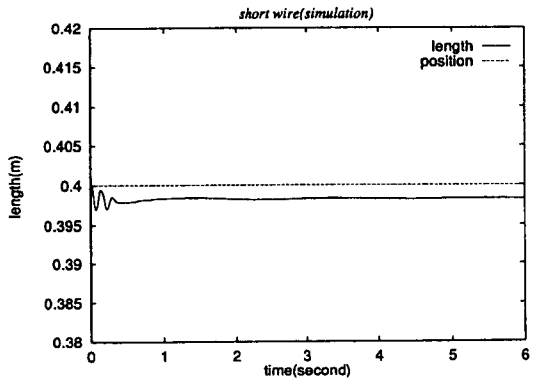


그림 9. 시뮬레이션 한 와이어 길이 스텝응답
Fig. 9. Simulated step responses of length

으로 설정하였기 때문이다.

여기서 목표장력은 6 *kgf*이고 실 장력은 오버슛이 있지만 저역필터를 통한 후는 목표치에 수렴하고 있는 것을 알 수 있다. 이 결과 장력의 시뮬레이션 응답특성은 초기에는 오버슛과 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.

## 4.2 실험결과

그림 10은 장력의 계단응답 실험장치 이고 PC 에서 DAC를 통해 AC 서보제어기에 토크지령을 입력하고 장력검출기 출력을 증폭하여 디지털 오실로 스코프에 모니터링 한다. 와이어가 너선 하지 않도록 미리 토크를 걸어 놓은 상태에서 더 큰 토크지령전압을 걸게 된다. 시뮬레이션에 의해 각 제어계의 파라미터를 결정했기 때문에 그 값을 이용해서 실제 시스템을 구성하여 실험을 행한다.

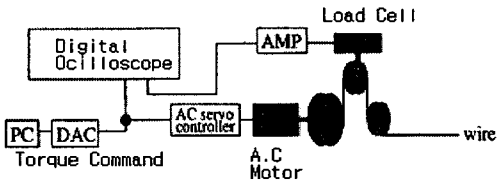


그림 10. 스텝응답 실험장치
Fig. 10. The experimental equipment for step responses

그림 11 위치를 고정하고 장력을 미리 2[*kgf*] 걸어 둔 상태에서 목표 장력을 6[*kgf*]로 인가하여 PI 제어 한 경우 장력의 실험응답을 나타낸 것이다. 그림 12는 같은 조건에서 PID 제어한 장력의 실험응답을 나타낸다. 그래프는 각각 차례로 측정장력(실선), 토크제어장치의 출력전압(긴 일점 세선) 지령장력(작은 일점세선)을 각각 나타낸다. 두 실험에서 장력응답에 진동이 발생하는 것은 목표설정치가 변경되는 순간 외란이 적용되었기 때문이고 PID 제어가 진동이 적고 양호하다. 이상의 실험에서 장력응답은

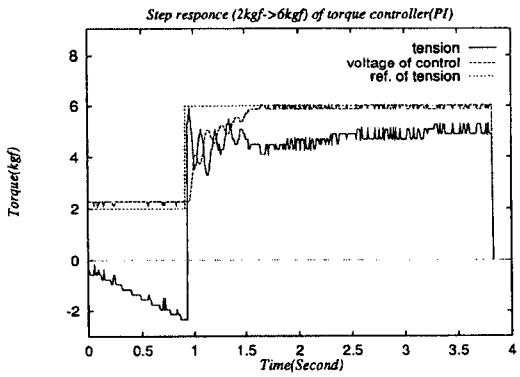


그림 11. PI제어에 의한 스텝 장력응답
Fig. 11. The step tension responses of PI control

목표장력에 추종하여 양호하고 시뮬레이션의 응답과 같은 특성을 얻었다.

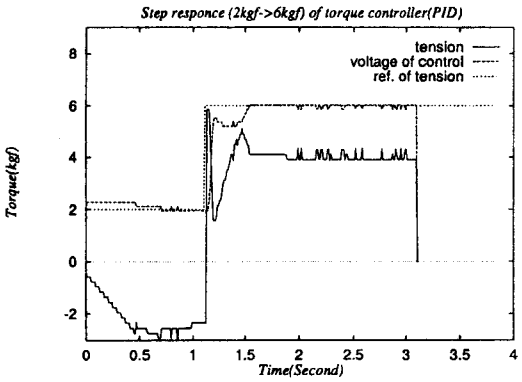


**그림 12. PID제어에 의한 스텝 장력응답**
**Fig. 12. The step tension responses of PID control**

## 5. 결 론

본 논문은 송전선 전력케이블의 가설작업은 딥 측정으로 크레인에 의해 수작업으로 행해지고 있지만 안전과 효율적인 작업을 위해 하중변환기(load cell)를 이용한 현수형 송전선 가설작업의 자동화 시스템을 제안하였다.

현수형 케이블의 장력특성에 기초하여 로드셀을 이용한 가설 시스템의 모델이 설계 제작하여 실험한 결과 아래의 결과를 얻었다.

1) 현수형 케이블의 장력에 대하여 모델링 하고 Dip을 조정하기 위한 지령토크 결정 알고리즘을 도출하였다.
2) 토크 발생 서보 전동기와 장력검출 요소를 모델링 하였다.
3) 시뮬레이션의 결과에 기초해 구성한 현수형 케이블의 자동가설 시스템은 시뮬레이션과 실험을 통하여 유효성을 확인하였다.
4) 장력의 PID제어는 입상 시간이 짧고 정상오차가 없는 양호한 응답이 얻어지는 것을 시뮬레이션과 실험에 의해 확인하였다.

## References


[1] 한국전력공사 "송변전분야 표준시공절차 송전가선공사편 (III)", 한국전력공사편, pp. 273-311, 1994.1.
[2] 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.
[3] 김실근, 홍순일, 홍정표, " 전동차 트로이선 가설 작업 로봇의 이동제어", 한국마린엔지니어링 학회지, Vol. 30. No. 8, pp 118-124, 2006.
[4] 村上慶一, "30年も 電車線", JR East R&D Symposium, pp. 176-186, 1998.
[5] Randolph Cabell, Dan Palumbo, and Jeffrey Vipperman "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.
[6] 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.
[7] 홍순일, 최재용. "현수형 전차선 케이블의 자동가설 시스템에 관한 연구" 2002년도 대한전기학회 하계학술 대회, Vol. 전력설비 시공분야 전문 SESSION 논문집, pp. 1- 3, 2002.
[8] 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.
[9] 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.


## ◇ 저자소개 ◇


**홍정표** (洪正杓)
1972년 9월 7일생. 부경대학교 기계공학부 졸업(박사). 1998년 부경대학교 전기공학과 졸업. 2001년 부산대학교 대학원 졸업(석사). 현재 동의과학대학 전임강사.
관심분야 : 퍼지 시스템설계, 전동기 벡터제어, 리럭턴스 전동기 제어 설계. 신재생에너지 변환기 설계

**홍순일** (洪淳一)
1945년 2월 23일생. 1981년 부산대학 전력전자 졸업(석사). 1986년 한국해양대학 제어공학 졸업(박사). 1999년 일본전기 통신대학 연구교수. 2000년 대한전기학회 부산지부 회장. 2001년 한국조명전기설비학회 부산경남지부 회장. 현재 부경대학교 전기제어 계측공학부 교수.
관심분야 : 퍼지 시스템설계, 서보시스템 설계, 전동기 벡터제어