

# 전력케이블 가설용 작업로봇의 구성과 이동/장력 혼합제어에 관한 연구(1)

최동수<sup>\*</sup> · 이동훈

부경대학교 안전공학과

(2016. 9. 17. 접수 / 2016. 10. 17. 수정 / 2016. 10. 24. 채택)

## Scheme and Movement/Tension Control of Working Robot for the Installation of an Overhead Power Cable (1)

Dong Soo Choi<sup>\*</sup> · Dong Hoon Lee

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received September 17, 2016 / Revised October 17, 2016 / Accepted October 24, 2016)

**Abstract :** When a electric power cable is installed in the air for newly or exchanged working, it is necessary at all time to hold a constant tension for an overhead power cable. And also a pendent power cable is an extreme job to have work in a high sky. For this reason, the objective of this paper developments working robot for preventing disaster that tension of cable installed automatically power cable to hold a constant. So the working robot works at all the time two tasks for mobil and tension it come into a inference between two tasks, control is difficult. Control methode needs to suppress inference of two tasks. In this paper, for installation of overhead power cable, the scheme and control methode of working robot is presented. the robot work at a same time tow tasks that have hold a constant tension of the power cable and move a constant place while unfasten a winding cable at a drum on a chassis. Working robot consist of three parts with mobile system, tension system and control part. As it is applied the feedback/ feedforward control, methode of hybrid control is established to suppress that interference come into between two tasks. The simulation programs is made out using models of mobil and tension system, and a proposed controllers. In accordance with simulation, the model of each systems is discussed to make out proper. And also parameters of controllers is selected a suitable value and the driving performance of robot is evaluated.

**Key Words :** install of electric power cable, working robot for extreme job, hybrid control

### 1. 서론

전력 케이블의 가공 설치하는 사람의 취급이 어려운 고공에서 이루어지는 위험작업이고, 케이블이 일정한 DIP을 유지하도록 설계 및 시공 되어야 한다. 케이블 시공시 Cable pulling에 소요되는 힘과 케이블 자중에 의한 힘이 중첩되므로 장력은 케이블 지지점 근단에서 가장 크고, 또 양 지지점의 중간 즉 가장 원단에서 최소가 된다. 이와 같은 가공 전력케이블 시공시 장력이 과대 또는 과소 할 경우 단선 등 사고로 이어지므로 안전한 시공을 위하여 케이블의 기계적 허용 강도 범위 내로 시공하는 것이 필수적이다. 가공 전력케이블 시공시 일반적으로 윈치크레인 조작자의 경험에 기준한 삼각 측정법을 이용하여 Cable drum에서 전력케이블이 풀려져 나가는 동안 장력

을 일정하게 조절하여 유지하는 것이다. 가공 전력케이블 시공은 고공의 위험한 장소에서 이루어지며, 2015년도 산업재해 발생현황에서 추락사고는 14,126명으로 재해율 15.7%이고 전년도 대비 증가 추세이므로 로봇을 이용하여 이 위험을 대신 할 수 있고<sup>1,2)</sup>, 로봇작업에서 일정한 장력 유지를 위해 정밀한 제어를 필요로 한다. 로봇을 이용한 전력 케이블 가공설치에서 이동제어계 및 장력제어계의 동시 복합작업시 두 제어계 사이에 간섭이 발생하므로 복합작업시 상호 간섭의 억제에 대한 연구가 필요하다<sup>3)</sup>. 복수의 작동을 동시 수행 하도록 상호간 억제방식을 확립하는 것이<sup>5)</sup> 사람의 취급이 어렵고 위험한 장소에서의 작업을 대신 할 로봇이 가져야 할 필수조건이다. 이와 같은 이유에 따라 전력케이블 가공 설치에 필요한 작업로봇의 시스템 구성 및 복합제어에 대한 설계기법을

<sup>\*</sup> Corresponding Author : Dong Soo Choi, Tel : +82-51-629-6466, E-mail : gv100sq@pknu.ac.kr  
Department of Safety Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea

얻고자 한다. 본 논문은 전력케이블 가공선로 설치 시스템의 구성 및 로봇의 이동과 장력의 일정한 유지를 복합 수행하기 위한 혼합제어 방법을 제안 하였다. 가공 전선로 설치 시스템은 몸체, 이동계, 케이블과 장력계 및 제어 계로 구성하였다. 로봇의 이동중 케이블은 드럼에서 풀리고 장력을 일정하도록 유지하면서 이동제어와 장력제어 사이에 간섭이 발생하는 것을 제어하기 위해 가속도 피드포워드 제어를 적용 하였다. 제안한 가공 케이블 설치의 시뮬레이션을 통해 시스템의 모델링을 함으로써 두 동작 사이에 간섭의 억제가 이루어짐을 확인 하였다.

## 2. 연구내용

### 2.1 가공케이블 설치원리

공중 높이 케이블을 가설하는 것은 어렵고 힘든 작업일 뿐 아니라 추락 등 위험을 초래한다. 이 위험한 장소에서의 작업을 로봇이 인간을 대신하게 하는 생각에서 이 작업의 설치 개념도를 나타낸 것은 Fig.1 과 같다. 차대는 이동하며 케이블 드럼과 장력제어부는 탑재되어 케이블 토크를 제어한다. 케이블 설치 시작 지지점에 고정한 후 반대편 케이블 끝은 차대의 진행과 탑재된 장력제어부에서 전력케이블의 장력이 허용장력범위내로 유지되면서 설치된다. 전력케이블 자동설치 시스템은 로드 셀에서 장력을 측정하여 케이블의 장력이 일정하게 유지되도록 이동 중인 차대와 케이블의 풀림에 따른 장력크기를 혼합 제어한다.

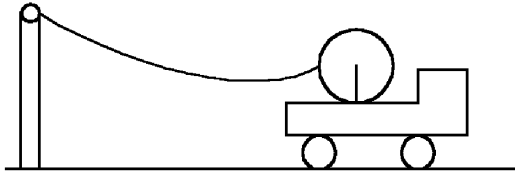


Fig. 1. The principle of stringing electric cable.

### 2.2 이동제어계

이동 제어계의 운동 방정식은 주행용 직류전동기 모델의 전압, 전류 방정식과 토크 방정식에서 구한다. 그리고 출력토크는 실제의 차륜에 전해지는 토크를 구한다. 또 전기적 시정수 개선을 위해 전류 피드백에 의해서 행한다. DC motor의 속도제어로 인한 차대 이동거리는 식 (1)이고 전달 함수는 식 (2), 이동계의 부하 토크는 식 (3), Motor 입력전압은 식 (4)이다.

$$x = R_1 \theta_L = R_1 \frac{\theta_M}{n_1} \quad (1)$$

$R_1$  : 구동륜 반경,  $n_1$  : 이동체 치차비,  
 $\theta_L$  : 회전각 변위,  $\theta_M$  : 전동기 회전각변위.

$$G_M(s) = \frac{\frac{A_m}{K_i} K_T}{J_1 L_a s^2 + J_1 (R_a + \frac{A_m}{K_i}) s + K_T K_E} \quad (2)$$

$A_m$  : 증폭비,  $R_a$  : 전기자 저항,  
 $L_a$  : 전자기 인덕턴스  
 $K_E$  : 유도기전력 정수  
 $K_T$  : 토크 정수  
 $J_1$  회전자 및 부하의 관성모멘트  
 $1/K_i$  : 전류 피드백 계수

$$T_L = T \times n + \frac{B M g / 2}{n_1} \quad (3)$$

$B$  : 구름 마찰계수,  $g$  : 중력가속도,  $M$  : 차대질량

$$v_a(s) = K_{mp} (1 + \frac{1}{T_{mi} \cdot s}) (v^*(s) - v_{enco}(s)) \quad (4)$$

$K_{mp}$  : 비례상수,  $T_{mi}$  : 적분 상수,  
 $v^*$  : 설정속도,  $v_{enco}$  : 검출속도.

### 2.3 장력제어계

제어대상인 케이블 모델은 Fig. 2이다.

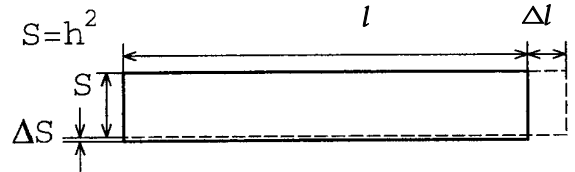


Fig. 2. Model of stringing electric cable.

신축에 따라 변형된 케이블 모델에서 장력은 포아손비 및 영률에 따라 아래 식 (5) 및 식 (6)과 같이 된다.

$$F = T_w / h^2 \quad (5)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{E} = \frac{1}{E} \cdot \frac{T_w}{h + \Delta h^2} \quad (6)$$

$F$  : 단위 면적당의 힘  $T_w$  : 케이블 장력  
 $h$  : 케이블의 단면 정방형의 한 변의 길이

$E$  : 포아손비에 의한 영률  $\Delta h$  : 힘에 의한  $h$ 의 변화량  
 $l$  : 케이블의 길이  $\Delta l$  : 케이블길이의 변화량

이상에서 장력은 다음 식 (7)이 된다.

$$T_W = \frac{\Delta l}{l} E(h + \Delta h)^2 \quad (7)$$

이때 포아손비에 의해  $\Delta h (= \sqrt{\Delta S})$ ,  $\Delta l$ 가 변화하지만,  $\Delta h \ll h$ 이므로  $\Delta h$ 는 무시 할 수 있다. 따라서 장력  $T_W$ 는 다음 식 (8) 및 식 (9)로 모델링 된다.

$$T_W = \frac{\Delta l}{l} E h^2 = ES \frac{\Delta l}{l} \quad (8)$$

$$T_W = \frac{(x-l)}{l} ES \quad (9)$$

$E$  : 영률,  $S$  : 와이어 단면적,  $l$  : 고정점에서 와이어 길이,  $ES = 1.4 \times 10^3 [kgf]$ .

장력은 주행거리와 풀린 케이블 길이 차이는 식 (10)이다.

$$T_W = ES \frac{\int_0^t (v_{ro} - v_{wi}) dt}{\int_0^t v_{wi} dt} \quad (10)$$

$v_{ro}$  : 이동체 속도,  $v_{wi}$  : 와이어 풀림속도

장력발생 AC Motor의 모델링은 식 (11)이다.

$$G(s) = 0.4e^{-0.002s} \frac{1 + (1/350)s}{1 + (1/90)s} \quad (11)$$

로드셀을 이용하여 장력을 측정하고 차대 이동 외란을 케이블 장력의 항에 포함한 운동 방정식은 식 (12)이다.

$$J_2 \ddot{l} = - \left[ \frac{T_M}{R_2} + T_D \right] + T_W \quad (12)$$

- $n_2$  : 장력 전달 치차비
- $J_2$  : 장력발생 부분의 관성 모멘트
- $T_M$  : 장력발생 전동기의 토크
- $R_2$  : 장력 발생 토크의 반경
- $T_D$  : 와이어 드럼 동 마찰력

## 2.4 장력제어계와 이동제어계의 간섭

케이블은 설치 중 자중과 이동거리의 변화로 간섭 (interference)의 문제가 발생한다. 로봇 주행속도에 장력이 직접관계하여 케이블 길이와 시간에 따라 변화하는 계로 영향을 준다. 따라서 이동/장력의 혼합 제어를 하는 경우 이동계와 장력계 각각 독립동작에서 나타나지 않는 다른 계의 동작에 영향을 미치는 계로 되어 이동계와 장력계의 혼합 시스템에서 상호 간섭을 억제하기 위해서 서로의 영향을 외란으로 해석하고 이것을 보상한다. 보상 방법은 이동 가속도에 대응한 장력지령을 피드포워드 제어한다.

## 2.5 피드포워드 제어

이동과 장력제어를 동시에 하이브리드로 동작시키고 속도를 피드포워드 하여 간섭억제 제어를 할 때, 이동 지령후 차대 반응시까지 응답 지연 등을 보상한 피드포워드 할 량은 식 (13)이다.

$$V_F(t) = K_F \cdot a(t) + K_S \cdot u(t - t_{start} - t_{delay}) \quad (13)$$

- $K_F$  : 가속도 피드포워드 계수,  $a(t)$  : 차대 가속도,
- $K_S$  : 스텝계수,  $u(t)$  : 전동기 출력토크,  $t$  : 시간
- $t_{start}$  : 이동 시작 시간,
- $t_{delay}$  : 차대의 지령치에 대한 지연 시간.

## 3. 시스템 모델링

### 3.1 시스템 구성

혼합제어시스템으로 구성된 가공전선로 설치 시스템 블록선도는 Fig. 3이다. 이동제어계는 식 (1) ~ 식 (4)에 의해 구성하고 PI 제어한다. 식 (9), 토크제어기  $C_1$ , 식 (11)로 장력제어계는 구성된다. 장력 측정과 차대의 이동을 포함한 운동방정식 식 (9), 식 (12)에 의해

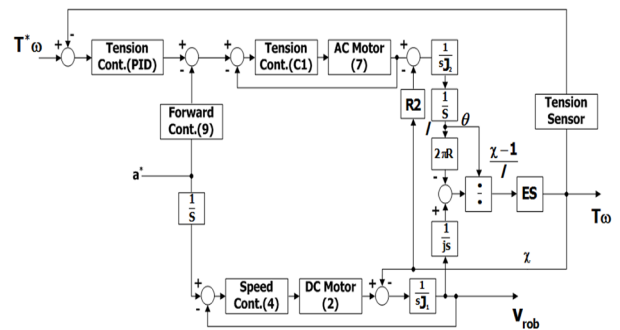


Fig. 3. Proposed mobile/tension control system.

구성하고 비간섭 제어는 식 (13)로 구성한다. 측정된 장력을 지령값에 비교한 오차에서 제어출력을 구하고 PID 보상으로 속응성과 정상특성을 개선한다.

### 3.2 시뮬레이션 방법

시뮬레이션은 작업 모델로봇의 이동계와 장력계에 관한 운동방정식을 라플라스 변환에 의한 전달함수로 변환하여 이동계와 장력계의 블록선도로 작성했다. 블록선도에 나타난 작업 모델로봇을 시뮬레이션하기 위해 우선 각 블록을 라플라스 역변환에 의해 시간영역으로 나타내고 미분방정식은 오일러 법을 이용하여 실제 프로그램은 C++에 의해 작성하고 블록마다 목적파일을 모아서 이후, 추가 작성에도 유연하게 대응할 수 있도록 했다. 또 데이터의 표시에도 유연하게 대응할 수 있도록 한다. 이상의 프로그램을 사용해서 이동작업 모델로 로봇의 시뮬레이션을 했다. 앞에서 제안한 제어방법에 의해 실제 제어를 설계하기 위해서는 제어 대상의 모델이 필요하다. 또 이 모델과 제어기 모델을 사용하여 로봇의 움직임을 정확히 시뮬레이션하면 제어기 파라미터의 결정이나 평가가 행하여 질 수 있다. 특히 로봇이 설계자가 의도하지 않는 움직임을 하

Table 1. The parameters for mobile system

$A_{mp}$	15	$K_T$	$0.0647 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$
$R_1$	0.078	$R_a$	$1.3 \Omega$
$B$	0.001	$L_a$	$1.7 \text{ mH}$
$n_1$	1/20	$K_E$	$0.0649\text{V}/(\text{rad}/\text{s})$
$M$	100 Kg	$J_1$	$0.00079 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$
$K_{mp}$	4.0	$T_{mi}$	0.3

Table 2. The parameters for tension system

	$g$	$9.8 \text{ m}/\text{s}$	PID controller	$K_p$	3.0
Cable	diameter	2.5		$T_i$	1.0
	$\rho$	0.17		$T_D$	2.0
	$K_F$	0.5	$J_2$	$2.21 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$	
Motor spec'	A	1/350	$R_2$	0.075	
	B	1/90	$T_w$	1.0	
	prop' factor	$7.16[\text{kgf}/\text{v}]$	$n_2$	1/30	

는 위험한 경우는 시뮬레이션에 의한 사전 검토가 중요하다. Fig. 4는 작성한 로봇 시스템의 시뮬레이션 블록선도를 나타낸다. 본 모델은 차대의 타이어 탄성을 고려하지 않았기 때문에 차체가 가속도에 의한 요동현상은 관측할 수 없다. 따라서 차체의 요동영향은 여기서는 고찰하지 않는다. 그리고 차체의 요동이 장력계에 미치는 영향은 생략하고 여러 가지 운전조건에서 시뮬레이션과 그 실험을 비교해서 유용성을 검토한다. Table 1은 시뮬레이션에 사용한 로봇 이동계 정수이고 Table 2는 장력계 정수이다.

### 4. 결과 및 고찰

시뮬레이션 그래프의 사다리꼴 파형에서 실선은 목표속도(ref. of velocity), 점선은 속도(velocity)이고 가운

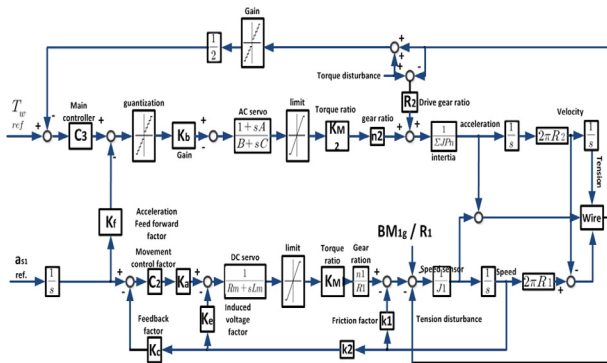
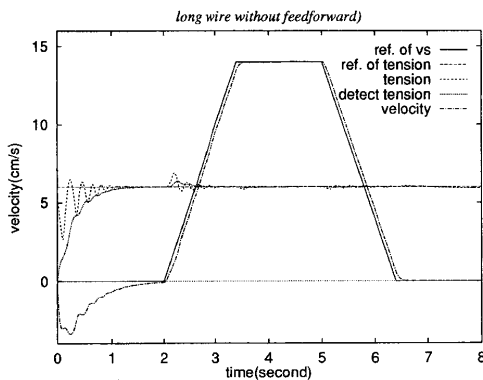
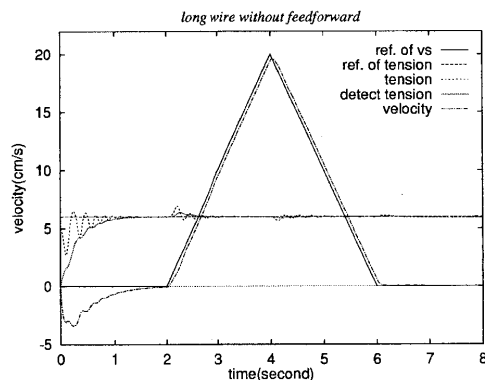


Fig. 4. Simulation block diagram of working robot.

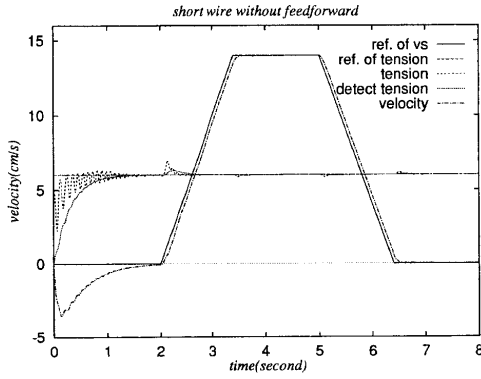


(a) Simulation for a trapezoid velocity command

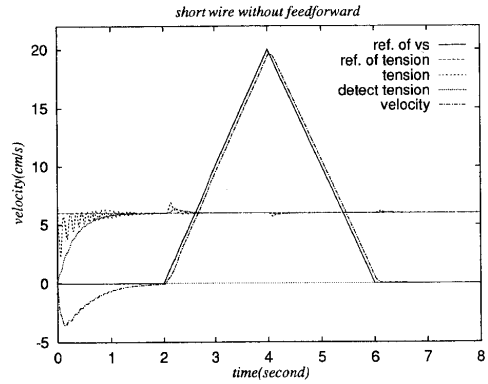


(b) Simulation for a tripod velocity command

Fig. 5. System responses without feed forward in  $l = 1.2[m]$ .

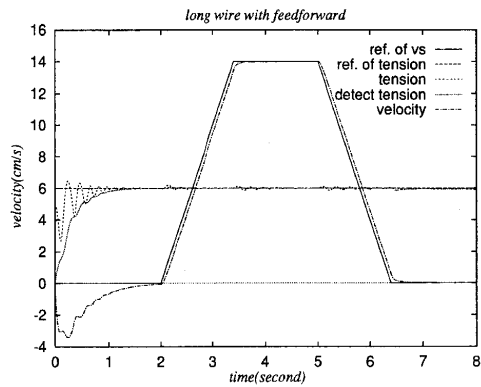


(a) Simulation for a trapezoid velocity command

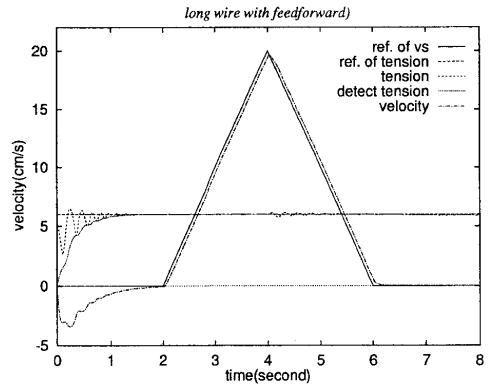


(b) Simulation for a tripod velocity command

Fig. 6. System responses without feed forward in  $l=0.4[m]$ .

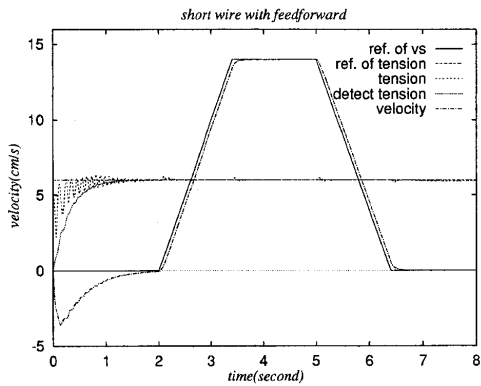


(a) Simulation for a trapezoid velocity command

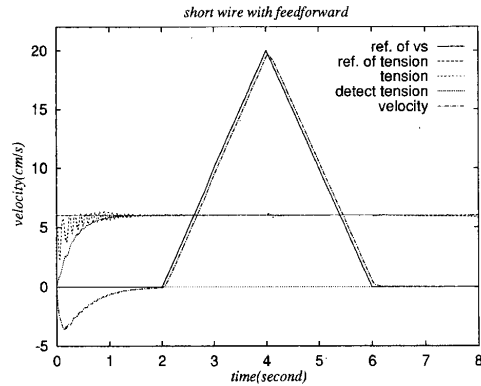


(b) Simulation for a tripod velocity command

Fig. 7. system responses with feed forward in  $l=1.2[m]$ .



(a) Simulation for a trapezoid velocity command



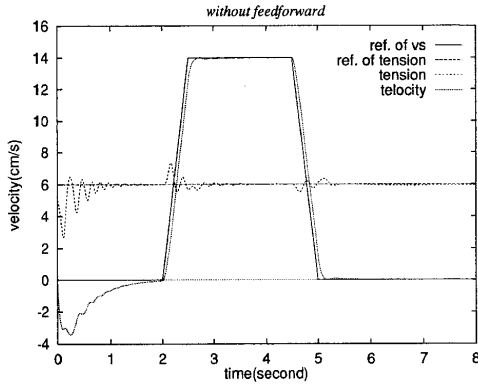
(b) Simulation for a tripod velocity command

Fig. 8. system responses with feed forward in  $l=0.4[m]$ .

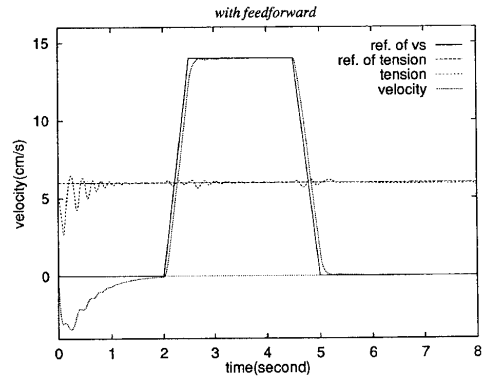
데 눈금 6에서 황으로 그린 실선은 목표장력(ref. of tension)이고 진동하면서 수렴하는 점선은 장력(det ect tension)이다. 이하 모든 그래프에서 동일하다. Fig. 5는 주행 시작할 때 케이블 길이  $l=1.2m$ , 목표장력  $T^*=6Kgf$ , 가속도  $5cm/s^2$  및 주행속도  $6m/s$  상태에서 피드포워드 제어하지 않은 사다리꼴 속도 입력에

대한 시뮬레이션 결과(a)와 삼각형 속도입력에 대한 시뮬레이션결과(b)의 응답이다.

Fig. 6은 주행 시작할 때 케이블 길이  $l=0.4m$ , 목표장력  $T^*=6Kgf$ , 가속도  $5cm/s^2$  및 주행 속도  $6m/s$  상태에서 피드포워드 제어하지 않은 사다리꼴 속도 입력에 대한 시뮬레이션 결과(a)와 삼각형 속도 입력에



(a) Simulation for a trapezoid velocity command, without feed forward



(b) Simulation for a trapezoid velocity command, with feed forward

Fig. 9. Effects of feed forward in  $l=1.2[m]$ ,  $a=10[m/s^2]$ .

대한 시뮬레이션결과(b)의 응답이다. Fig. 5, Fig. 6에서 케이블의 길이  $l=1.2m$ ,  $l=0.4m$  모두 속도곡선과 장력곡선이 만나는 점에서 장력응답에 오버슈트가 생기는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 피드 포워드 혼합제어 한 경우 주행 시작할때 케이블 길이  $l=1.2m$ , 사다리꼴 속도 입력에 대한 시뮬레이션 결과(a)와 삼각형 속도 입력에 대한 시뮬레이션 결과(b)의 응답이다. Fig. 8은 피드 포워드 혼합제어 한 경우 케이블 길이  $l=0.4m$ , 사다리꼴 속도 입력에 대한 시뮬레이션 결과(a)와 삼각형 속도 입력에 대한 시뮬레이션 결과(b)의 응답이다. 이 결과 장력 응답은 피드 포워드를 하지 않은 것 보다 차대 이동 시작점에서 오버 슈트 소멸 되는 것을 볼 수 있다. Fig 5, 6, 7, 8의 시뮬레이션 그래프에서 피드포워드의 효과가 입증되고 있는 것을 나타낸다.

Fig. 9는 가속도의 크기에 따른 피드포워드의 효과를 구체화하기 위하여 주행속도  $10m/s$  상태에서 피드포워드 제어하지 않은 사다리꼴 속도 입력에 대한 시뮬레이션 결과(a)와 피드포워드를 한 상태에서의 시뮬레이션 결과(b)를 나타낸다. 가속구간과 등속구간, 감속구간의 구분으로 사다리꼴 속도입력으로 시뮬레이션을 한 결과로 Fig. 9(a)의 시뮬레이션 응답은 장력이 속도곡선과 만나는 점에서 오버슈트가 발생하고 있지만, 피드포워드 한 Fig 9(b)의 응답곡선은 장력이 속도 곡선과 만나는 점에서 오버슈트가 감소하고 있는 것을 볼 수 있다.

## 5. 결론 및 향후과제

### 5.1 결론

가공전력 케이블을 새로이 가설하거나 교체하는 작업을 할 때 가설되는 케이블은 항상 일정한 장력을 유

지 할 필요가 있다. 또한 가공 전력 케이블 가설작업은 높은 공중에서 이루어지므로 위험이 따르는 작업이다. 이러한 이유에서 본 연구의 목적은 인간을 대신하여 일정장력을 유지하고 전력 케이블을 자동가설 하는 고소작업시 추락재해 예방용 작업로봇의 개발이다. 작업로봇에 의한 가설작업은 이동과 일정 장력유지의 두 가지 작업을 동시에 행해야 하기 때문에 각각의 동작에 의한 영향이 서로 간섭이 생기고 제어가 복잡하게 된다. 따라서 두 작업에서 서로의 간섭을 억제하는 제어 방식이 요구된다. 본 연구는 이동계의 모델, 장력계의 모델 및 케이블 모델을 제어대상으로 이동/장력의 혼합제어 시스템의 구성과 그 제어방식을 제안 하였다. 작업 로봇은 케이블을 실은 차대가 이동하는 일을 하면서 케이블을 드럼에서 풀고 일정장력을 유지하는 두 작업을 동시에 행한다. 작업로봇은 이동계, 장력계 및 제어부의 3부분으로 구성되고 피드백/ 피드포워드를 적용하여 두 작업 사이에 생기는 간섭을 억제하는 혼합제어 방법이 확립 되었다. 이동계와 장력계의 모델링과 제안한 제어기들을 이용하여 시뮬레이션 프로그램이 작성되었다. 시뮬레이션을 통해서 각 시스템(계)들이 올바르게 작성되었는지 검토 되었다. 또한 제어기의 적절한 파라미터를 선정하였고 로봇 주행 성능이 평가 되었다. 피드포워드제어에 의한 이동/장력 혼합제어의 시뮬레이션 평가에 의해 협조제어의 효과를 검토하여 최적의 피드포워드 제어기 파라미터를 결정 하였다.

### 5.2 향후과제

본 연구(1)는 시뮬레이션에 의해 피드포워드를 도입한 혼합제어로 이동계와 장력계의 간섭 억제를 위한 1차연구이다. 본 연구에 이어 연구(2)에서는 실험실에서 재현 할 수 있는 소규모 작업 안전로봇 시스템 시험

모델을 제작 하여 시뮬레이션과 같은 조건으로 실험하여 시뮬레이션 결과와 비교하고 그 유용성을 검토하여 최적의 피드포워드 제어기 파라미터를 결정하여 인간의 고소작업시 위험을 대신 할 방재로봇을 개발할 것이다.

### References

- 1) H. Koc, D. Knittel, M. de Mathelin and G. Abba, "Modeling and Robust Control of Winding Systems for Elastic Webs," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 10, No.2, pp. 197-208, 2002.
- 2) L. Villani, C. Natale, B. Siciliano and Carlos C. 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, 2002.
- 3) M. Namvar and F. Aghili, Member, "Adaptive Force- Motion Control of Coordinated Robots Interacting With Geometrically Unknown Environments," IEEE Transactions on Robotics, Vol. 21. No. 4, pp 678-694, 2005.
- 4) S. -H. Jung, S. -I. Hong, and J. -P. Hong, "Scheme of Tension Control for the Stringing Trolley Wire", Journal of The Korean Society of Marine Engineering, Vol. 32, No. 6, pp. 948-954, 2008.
- 5) J. -P. Hong, Y. -S. Kim, S. -G. Lee, and S. -I. Hong, "Tension/Movement Control of Working Robot and Dynamic Model of the Stringing Wire Cable", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 36, No. 1, pp. 118-125, 2012.
- 6) Ministry of Employment and Labor, "Industrial disaster of 2015", www.kosha.or.kr