

무진동 크레인을 이용한 흔들림 제어에 관한 연구

박 병 석    윤 지 섭    이 재 설

한국 원자력 연구소    원격장치 기술실

A study on the swing control using anti-swing crane

Byung-Suk Park    Ji-Sup Yoon    Jae-Sol Lee

Remote Technology Department

Korea Atomic Energy Research Institute

ABSTRACT

An anti-swing controller for an overhead crane in the stop position is designed. The developed anti-swing controller improves on the poor damping characteristics of overhead crane by feeding back the crane acceleration as a function of swing angular speed. The experimental results show that this crane using the proposed controller yields small stop position error and rapid damping response characteristics.

트롤리 임의의 지점에서 세우고자 할 때는 사용할 수 없게 된다. 따라서, 푸쉬버튼(push button) 스위치를 사용하여 천정 크레인 작업을 하는 경우 임의의 지점에 트롤리를 세웠을 때 발생하는 흔들림을 신속히 감쇠시키고 또한 이때 발생하는 정지오차도 최소로 줄일 수 있는 제어를 제시하였다.

2. 수학적 모델링(modelling)

그림 1에서 보는 바와 같이 트롤리의 주행은 한축 방

1. 서론

산업시설에서 크레인(천정 크레인, 컨테이너 크레인 등)을 사용하여 중량의 물체를 이송시키고자 할 경우 대두되는 가장 큰 문제는 트롤리를 목적위치에 정지시켰을 때 체인(chain) 혹은 로우프(rop)에 매달린 이송물이 계속 흔들리고 있기 때문에 다음 동작을 하는데 어려움이 발생하는 점이다. 따라서, 흔들림(swing)이 발생하지 않도록 하기위해 적절한 목표 속도패턴을 산출하고 이 속도패턴에 강제적으로 트롤리 속도를 추종시키는 프로그램 제어방식<sup>1)</sup>과 이송물의 진동각도, 크레인의 속도와 가속도를 피드백 시킨 피드백 제어방식<sup>2)</sup>이 제안되고 있다. 그러나 이와 같은 방식은 정확한 목표지점을 초기에 주어 야 하기 때문에 작업자가 주행중에 있는 트

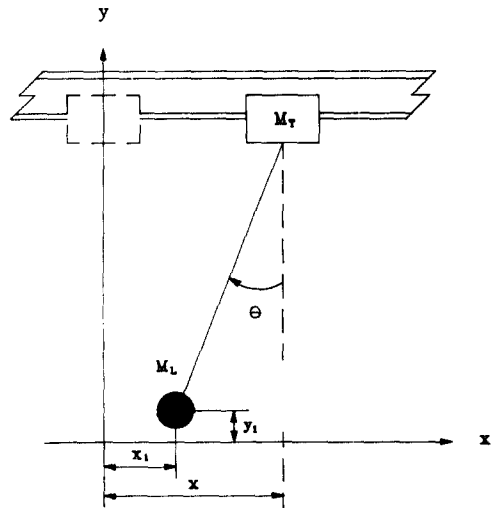


그림 1 천정 크레인의 개략도

Fig. 1 Schematic diagram of overhead crane

항으로만 이루어진다. 여기서 체인의 중량은 운반물에 비해 상대적으로 매우 작기 때문에 무시하고, 또한 이송도중 운반물의 흔들림 각도가 작고, 줄의 길이 변화가 없다고 가정하면 식 (1)과 같은 운반물과 크레인의 선형 운동방정식이 얻어진다.

$$L\ddot{\theta} + g\theta = \dot{x} \quad (1)$$

여기서 L은 체인의 길이, g는 중력 가속도,  $\theta$ 는 운반물의 흔들림 각도,  $\dot{x}$ 는 트롤리의 가속도이다.

식 (1)에서 보는 바와 같이 천정 크레인의 각운동은 트롤리의 가속도를 입력으로 하고 흔들림 각도를 출력으로 하는 비감쇠 2차계임을 알 수 있다.

### 3. 제어기 개발

식 (1)과 같은 동력학 계는 트롤리의 가속과 감속에 의해서 필연적으로 흔들림이 발생한다. 따라서, 이러한 흔들림 각도( $\theta$ )를 제어하기 위해서 식 (2) 처럼 제어 대상의 상태변수인 흔들림 각속도( $\dot{\theta}$ )를 피드백 시켜 트롤리의 가속도( $\dot{x}$ )를 조정하는 제어기를 선정하였다.

$$\dot{x} = -K_1 \dot{\theta} \quad (2)$$

여기서  $K_1$ 은 피드백 계인이며 식 (2)와 같은 제어기를 식 (1)에 대입하면

$$\ddot{\theta} + (K_1/L)\dot{\theta} + (g/L)\theta = 0 \quad (3)$$

과 같다. 여기서,  $K_1$ 을 적절히 선택하여 희망하는 감쇠계수( $\zeta$ )를 얻으면 진동각도( $\theta$ )를 0에 수렴시킬 수 있다. 따라서,  $K_1=2L\zeta\omega_n$ ,  $\omega_n^2=g/L$  이라 하면 식 (2), 식 (3)은 식 (4), 식 (5)와 같이 되며 이를 블록선도로 나타내면 그림 2와 같다.

$$\dot{x} = -2L\zeta\omega_n\dot{\theta} \quad (4)$$

$$\ddot{\theta} + 2\zeta\omega_n\dot{\theta} + \omega_n^2\theta = 0 \quad (5)$$

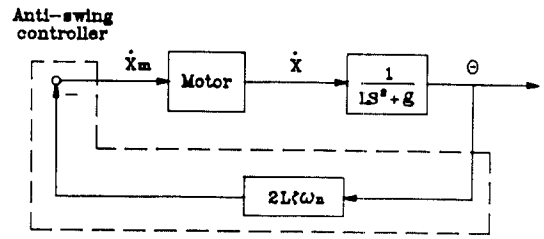


그림 2 무진동 제어기를 갖는 천정 크레인의 블록선도

Fig. 2 Block diagram of overhead crane with anti-swing controller

여기서 고유 각속도  $\omega_n$ 은  $2.45 \text{ rad/sec} (\sqrt{g/L}=\sqrt{980/163})$ 이며 고유진동수  $f_n$ 은  $0.39 \text{ Hz} (\omega_n/2\pi)$ 이다.

식 (5)에서 보는 바와 같이 식 (4)의 제어기에 충분한 감쇠계수( $\zeta$ )를 부가하여 식 (1)에 적용시키면 천정 크레인은 흔들림 각도( $\theta$ )에 대해서 감쇠가 있는 계가 됨을 알 수 있다. 따라서, 식 (4)는 감쇠가 없는 2차 계에 감쇠를 부여하는 무진동 제어기(anti-swing controller)가 된다.

식 (4)는 아날로그 제어기 이므로 다음과 같은 과정을 거쳐 디지털 제어기로 전환시킬 수 있다. 식 (4)의 제어기에서  $2L\zeta\omega_n$ 을 무진동 제어기의 게인( $K_d$ )이라 하면 식 (4)는 식 (6)과 같이 된다.

$$\dot{x} = -K_d \dot{\theta} \quad (6)$$

위의 식 (6)을 샘플링 시간( $T_s$ )에서 근사시키면

$$\frac{\dot{x}(t) - \dot{x}(t-T_s)}{T_s} = -K_d \frac{\theta(t) - \theta(t-T_s)}{T_s} \quad (7)$$

과 같이 되며, 여기서 시간 t는  $kT_s (k=0,1,\dots,n)$  이다. 이때, 식 (7)은 다음과 같은 디지털 제어기가 된다.

$$\dot{x}(k) = -K_d\{\theta(k) - \theta(k-1)\} + \dot{x}(k-1) \quad (8)$$

여기서 트롤리의 선속도( $\dot{x}$ )는 모터의 회전속도(N)에 의해서 발생하기 때문에 모터의 특성이 고려되어야 한다. 따라서, 트롤리를 구동시키는 AC 서보모터의 응답특성을 얻기위해 주파수응답 분석기(frequency response analyser)를 사용하였으며 이의 주파수응답 데이터(응답

진폭비, 응답위상차)를 그림 3과 같이 보데 선도(bode plot)로 나타내었다. 여기서 응답진폭비는 입력주파수가 약 10 Hz 에서 -3db 정도 감소함을 알 수 있어 모터의 고유진동수는 약 10 Hz가 됨을 알았다. 한편, 천정 크레

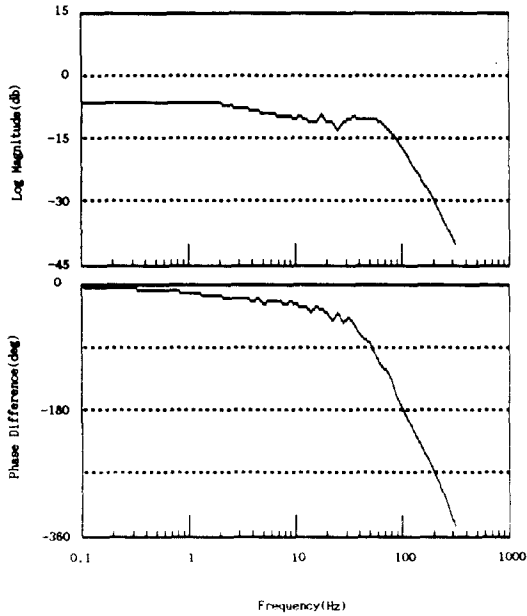


그림 3 트롤리에 부착된 모터의 주파수 응답

Fig. 3 Frequency response of motor attached to trolley

인의 체인 고유진동수는 식 (5)에서 약 0.39 Hz를 나타내었기 때문에 모터의 특성은 무시하였다.

트롤리의 선속도( $\dot{x}$ )와 모터의 회전속도(N) 사이에는 식 (9)와 같은 관계가 있다.

$$\dot{x} = \frac{\pi DNG}{60} \quad (9)$$

여기서 모터의 최고 회전속도(N)는 4000 rpm 이며 D는 트롤리 바퀴의 지름(8cm), G는 하모닉 드라이브의 감속비(1/50)이다. 따라서, 트롤리의 최고속도( $\dot{x}_{max}$ )는 약 30 cm/sec 이다.

한편, 레졸버의 속도신호는  $\pm 2$  V/1000 rpm 이므로 트롤리의 속도에 대해 모터에 가하는 속도입력(volt,  $V_i$ )을 구하면 다음과 같다.

$$V_i(\text{volt}) = 0.215 \dot{x}(\text{cm/sec}) \quad (10)$$

#### 4. 실험장치의 제작

기존의 천정 크레인은 크게 AC 모터, 감속기어, 체인 혹은 로우프 및 푸쉬버튼 스위치로 구성되어 있다. 따라서, 본 연구에서는 천정 크레인을 제작하기 위하여 기존 천정 크레인의 AC 모터부를 AC 서보모터로, 감속기어를

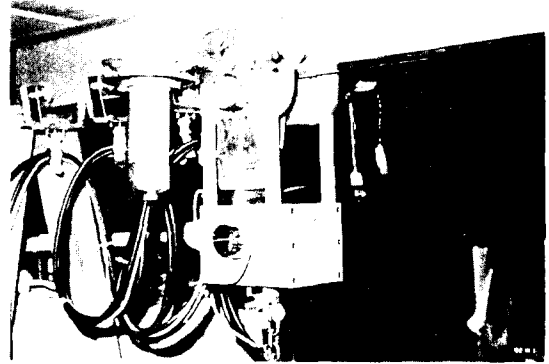


그림 4 트롤리와 흔들림 각도 측정장치

Fig. 4 Trolley and swing angle measuring device

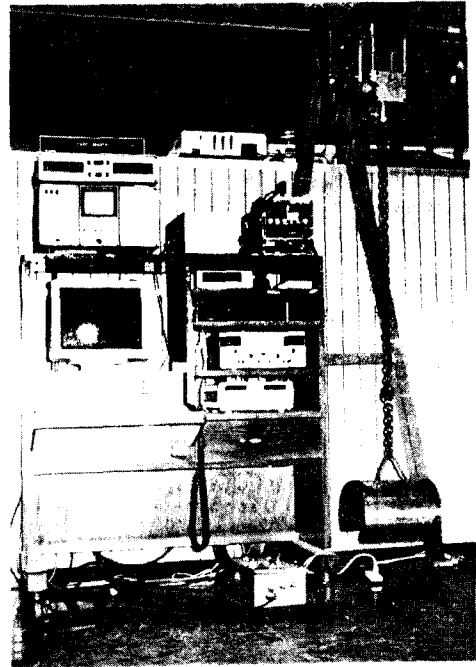


그림 5 무진동 천정 크레인의 실험장치

Fig. 5 Experimental set-up for anti-swing overhead crane

하모닉 드라이브(harmonic drive)로, 푸쉬버튼 스위치를 컴퓨터로 대체하였으며 개발한 제어기를 적용하기 위하여 흔들림 각도를 측정하는 장치를 만들어 그림 4에서 보는 바와 같이 트롤리 하단에 부착하였다. 이의 측정 원리를 보면 다음과 같다. 트롤리의 주행중에 체인에 매달려 있는 운반물에 흔들림이 발생하면 회전형 전위차계(rotary potentiometer)에서 흔들림 양에 따라 전위가 발생하는데 이를 변환하여 각도를 얻는다. 그림 5는 무진동 천정 크레인의 전체 구성도를 보여주고 있는데 높이 2.5m의 지지대 위에 길이 4m의 아이빔(I-beam)을 레일로 설치하고 그위에 개조된 트롤리가 주행할 수 있도록 제작하였다. 이의 제원은 표 1에서 보는 바와 같다.

표 1 무진동 천정 크레인의 사양  
Table 1 Overhead Crane Specifications

Height	250 cm
Width	400 cm
Reduced Gear & Ratio	Harmonic Drive, 1/50
Trolley Wheel	Dia. 8 cm
Trolley Max. Speed	30 cm/sec
Chain Length	163 cm
Angle Detection	Rotary Potentiometer
AC Servo Motor	TOEI VLBSR-A00540
Computer	IBM PC-AT
Experimental Weight	16, 32, 60 Kg

### 5. 실험장치와 컴퓨터의 접속

그림 6은 무진동 천정 크레인의 실험장치와 컴퓨터의 접속(interface) 관계를 보여주고 있다. 여기에서 보는 바와 같이 실험장치와 컴퓨터를 접속하기 위해서는 레졸버에서 출력되는 속도신호와 진동각도 측정장치에서 출력되는 각도신호가 아날로그 정보 이므로 이를 디지털 정보로 변환하는 장치(A/D converter)가 필요하며 또한 컴퓨터에서 속도지령 신호인 디지털 정보를 아날로그 쪽으로 변환하는 장치(D/A converter)와 현재 이송위치를

읽어 들일 수 있는 디지털 입출력 장치(DIO)가 필요하다. 따라서, 이와 같은 조건을 만족하고 있는 레빈마스터(Labin Master, Nano Tec.)를 사용하여 컴퓨터와 접속하였다. 한편, 레졸버로부터 나오는 속도 출력신호 속에는 잡음이 포함되어 있기 때문에 약 100 Hz의 차단 주파수를 갖는 2차 저주파 통과필터(2nd order low pass filter; LPF)를 설계하여 잡음을 제거하였다. 또한, 컴퓨터 CPU로는 IBM PC/AT의 Intel 80286을 사용하였으며 디지털 알고리즘에서의 샘플링 주기( $T_s$ )는 체인의 진동주기( $T_L$ )와 트롤리에 부착되어 있는 모터의 고유진동수(약 10 Hz 정도)를 고려하여 150 msec로 결정하였다.

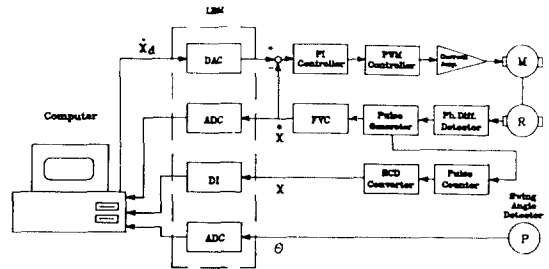


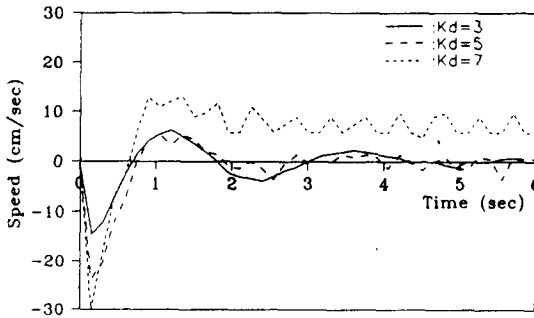
그림 6 천정 크레인과의 컴퓨터 접속

Fig. 6 Interface between overhead crane and computer

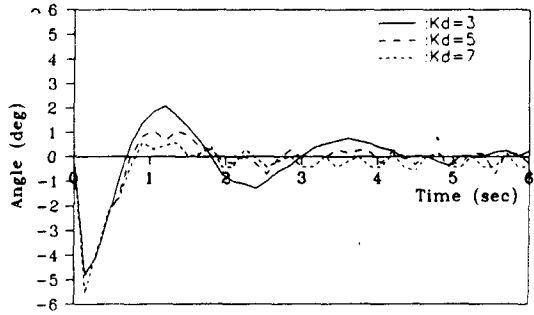
### 6. 실험 및 결과고찰

#### 1) 무진동 제어기 실험

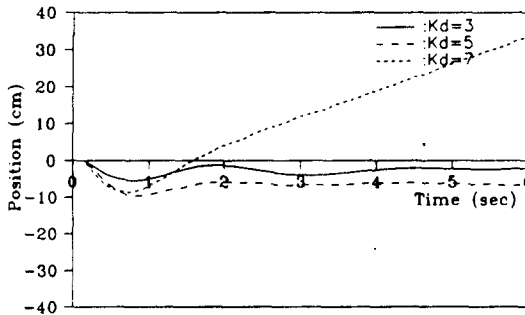
다음 실험은 운반물을 어느 정도 가진(약 5도)시킨 상태에서 식 (8)을 사용하여 무진동 제어기 게인( $K_d$ )을 각각 3, 5, 7 cm/sec/deg로 변화시켜 가며 제어했을 때의 트롤리 속도, 흔들림 각도 및 위치변화를 나타낸 것이다. 여기서  $K_d$ 의 값을 감쇠계수( $\zeta$ )로 바꾸면 0.215, 0.359, 0.502가 된다. 그림 7에서 보는 바와 같이  $K_d$  값이 커지면 흔들림 각도는 신속하게 0에 수렴하나 트롤리의 위치변화는 점점 커짐을 알 수 있다. 또한  $K_d$ 가 7인 경우를 보면 모터의 속도에 포화가 발생하는데 이는 모터속도의 제한( $\pm 30$  cm/sec)에 기인한다. 한편, 정상상태에 잔류속도가 남는데 이의 이유는 다음과 같다.



(a) 트롤리의 속도응답  
(a) Trolley speed response



(b) 운반물의 흔들림 각도응답  
(b) Load swing angle response



(c) 트롤리의 위치응답  
(c) Trolley position response

그림 7 무진동 제어기의 응답특성

Fig. 7 Response characteristics of anti-swing controller

첫째, 속도입력에 포화가 발생하지 않는다면 정상상태에서의 속도는

$$\dot{x}(k) = -K_d(\theta(k) - \theta(0)) + \dot{x}(0) \quad (11)$$

이 된다. 여기서,  $\theta(0)=\dot{x}(0)=0$  임을 고려하면  $\dot{x}(k) = -K_d\theta(k)$ 가 된다. 따라서,  $\theta(k)$ 가 0에 수렴할 경우

$\dot{x}(k)$ 도 0에 수렴한다.

둘째, 속도입력에 포화가 발생하는 경우, 만약 1 번째 샘플링에서 포화가 발생하고 2 번째 샘플링 부터 k 번째 샘플링 까지 포화가 발생하지 않는다면

$$\dot{x}(k) = -K_d(\theta(k) - \theta(1)) + \dot{x}_{\max} \quad (12)$$

과 같이 되어 정상상태에서  $\theta(k)$ 가 0 이더라도  $\dot{x}(k)$ 는  $\theta(1)$ 와  $\dot{x}_{\max}$  때문에 0이 되지 않는다. 여기서  $\dot{x}_{\max}$ 는 모터 속도의 포화값( $\pm 30$  cm/sec)이다. 또한, 정상상태에서 물결모양의 속도변화가 발생하는데 이의 원인은 흔들림 각도가 0에 수렴한다 하더라도 작은 각도변화가 발생하면 큰 제어기 계인에 의해서 속도변화가 커지기 때문이다. 이와 같이 제어기 계인이 너무 크면 위치 변화가 커지고 입력속도에 쉽게 포화가 발생하여 잔류속도가 남게되며 작은 각도변화에도 큰 속도변화만 일어난다. 따라서, 본 연구에서는 제어기 계인( $K_d$ )이 3 cm/sec/deg 일때 최적의 제어특성을 나타내는 것으로 간주하였다.

## 2) 정지위치 흔들림 제어

무진동 제어기 계인( $K_d$ )을 3 cm/sec/deg로 고정시킨 상태에서 트롤리를 최고속도의 2/3(20 cm/sec)의 속도로 주행시키다가 임의의 지점에 정지시켰을 때 천정크레인 제어특성을 조사하였다. 그림 8은 구동되는 트롤리를 임의의 지점(130 cm)에 정지시켰을 때 흔들림 각도(약 7도)가 이송중의 각도(약 3.5도) 보다 커지는 경우를 제어한 속도, 흔들림 각도 및 위치변화를 보여주고 있다. 여기서 보는 바와 같이 트롤리를 정지시킨 후 대략 4초 이내에 진동각도 및 트롤리 속도는 0에 수렴함을 알 수 있으며 이때 정지된 지점으로 부터 위치오차는 +5 cm 정도를 나타내었다. 그림 9는 구동되는 트롤리를 임의의 지점(155 cm)에 정지시켰을 때 흔들림 각도가 이송중의 각도 보다 매우 작게(약 0.5도) 되는 경우를 제어했을 때의 특성을 나타내고 있다. 이때는 제어하지 않은 경우와 거의 일치했다. 그림 10은 구동되는 트롤리를 임의의 지점(165 cm)에 정지시켰을 때 흔들림 각도가 이송중의 각도와 거의 일치하는 경우를 제어했을 때의 특성이다.

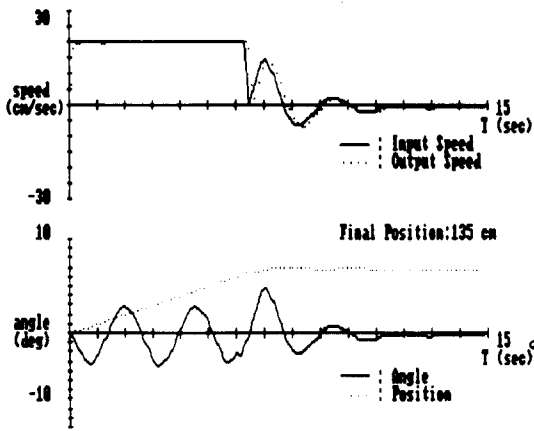


그림 8 무진동 제어를 갖는 천정 크레인의 응답특성 ( $x_d=130$  cm)

Fig. 8 Response characteristics of overhead crane with anti-swing controller ( $x_d=130$  cm)

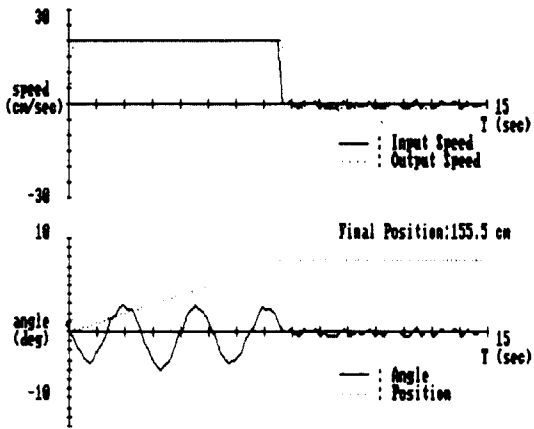


그림 9 무진동 제어를 갖는 천정 크레인의 응답특성 ( $x_d=155$  cm)

Fig. 9 Response characteristics of overhead crane with anti-swing controller ( $x_d=155$  cm)

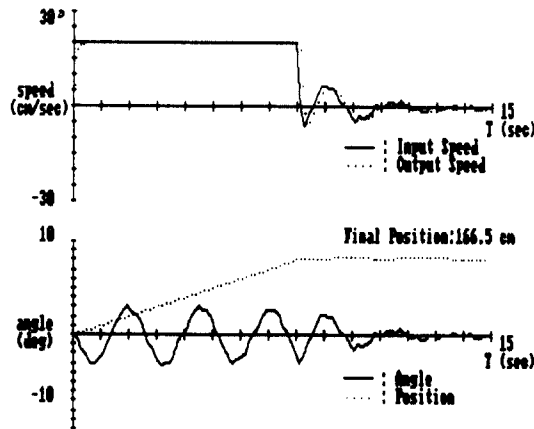


그림 10 무진동 제어를 갖는 천정 크레인의 응답특성 ( $x_d=165$  cm)

Fig. 10 Response characteristics of overhead crane with anti-swing controller ( $x_d=165$  cm)

여기에서도 보듯이 대략 4초 이내에 트롤리 속도와 흔들림 각도가 0에 수렴함을 보여주고 있으며 이때 위치변화는 +1.5 cm 었다. 이상에서 보는 바와 같이 어떤 상황에서도 대략 4초 이내에 트롤리 속도와 흔들림 각도가 0에 수렴함을 알 수 있었으며 위치변화도 불과 +5 cm 이내로 나타났다.

## 7. 결 론

산업시설에서 천정 크레인을 사용하여 운반물을 한지점에서 다른 한지점으로 이송시키는 경우 정지시에 발생하는 운반물의 흔들림으로 인하여 다음 작업을 하는데 어려움이 따르는 물론 작업시간의 지연이 발생된다. 따라서, 본 연구에서는 무진동 제어를 개발하여 이를 해결하고자 하였다. 실험 결과, 어떤 지점에 트롤리를 정지시켜도 운반물에 발생하는 흔들림을 빠른 시간내에 0에 수렴시킬 수 있었으며 이때 발생하는 정지오차도 아주 작은 값으로 나타났다.

## 참고문헌

- [1] Knut Aanerud, "Shorter Unloading Times for Grab Handling Potal Cranes," ABB Review, No.2-88, 1988.
- [2] E. Ohnishi, et al., "Automatic Control of an Overhead Crane," '84 IFAC, No. 66.3, pp.XIV-37 - XIV-42, 1984.
- [3] 윤 지섭, 박 병석, 이재설, "무진동 크레인의 제어 알고리즘 설계", '89 KACC, Vol.1, pp.260 - 265, 1989.
- [4] KAERI/RR-868/89, "사용후 핵연료 저장공정 장치개발", 과기처, pp.3-40, 1990.
- [5] 박 병석, "천정 크레인의 무진동 제어에 관한 연구", 전남 대학교, 1990.