

<論 文>

천정크레인의 무진동/위치 제어기 개발에 관한 연구

윤지섭* · 강이석**

(1994년 6월 1일 접수)

A Study on the Anti-Swing and Position Controller for the Overhead Cranes

Ji Sup Yoon and E. Suck Kang

Key Words : Anti-Swing Controller(무진동제어기), Position Controller(위치제어기), Swing Angle Measuring Device(흔들림각도 측정장치)

Abstract

This paper addresses design procedure and testing results of a closed-loop motion control of the cranes. When the object is stopped at the desired position, swinging occurs, and such swinging deteriorates the safety and efficiency of the operation of the crane. Therefore, in this paper, the cascade anti-swing and trolley position feedback controller are designed. Anti-swing controller rapidly eliminates swinging of object and position feedback controller reduces the trolley position error. The performance of this controller is investigated through the computer simulation and experiment. From the results of a series of computer simulations and experiments it can be concluded that proposed controller effectively reduces swinging of the object and trolley position error, which shows this controller can be used as an effective tool for the precise control of overhead cranes.

————— 기 호 설 명 —————

T, U : 트롤리와 운반물의 운동에너지 및 위치에너지

q_i, Q_i : 일반 좌표계에서의 시스템변수 및 힘

M_T, M_L : 트롤리와 운반물의 질량(Kg)

F_T : 트롤리에 인가되는 힘(Kg)

g : 중력가속도(980 cm/sec²)

x, x_d : 트롤리의 출력 및 입력변위(cm)

v, v_r : 트롤리의 출력 및 입력속도(cm/sec)

L : 호이스트의 줄길이(cm)

θ, θ_r : 운반물의 흔들림각속도 및 각가속도(deg)

$\dot{\theta}, \ddot{\theta}$: 운반물의 흔들림각속도 및 각가속도(deg/sec, deg/sec²)

k_θ : 무진동제어기 이득(cm/sec/deg)

k_p : 위치제어기 이득(1/sec)

T_s : 샘플링시간(msec)

τ : 구동모터의 1차 사정수(1/sec)

1. 서 론

산업시설에서 중량의 물체를 이송시키고자 할 경우 일반적으로 크레인을 이용한다. 크레인은 트롤리(trolley)에 부착된 모터를 구동시킴으로써 체인이나 로프에 매달린 중량물을 목적위치까지 이송시키는데 모터의 초기가속 및 정지시 감속으로 인하여 운반물에는 필연적으로 흔들림이 발생하여 이송물의 낙하 위험성뿐만 아니라 주변물과의 충돌 위험성이 있으며 정지 후에는 다른 작업으로의 전환이 어려워 작업의 능률이 저하되며 작업자의 안전

*정회원, 한국원자력연구소 부설 원자력환경관리센터

**충남대학교, 기계설계공학과

성에도 영향을 미친다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 흔들림을 제거하는 여러가지 방법이 제안되고 있다.

이 방법에는 운반물의 주기를 이용하여 일정한 속도 경로(pattern)를 수립한 후에 이 경로에 추종하도록 크레인의 속도를 제어하는 개회로제어(open loop control)방식과 운반물의 흔들림각도를 피드백(feedback)하는 폐회로제어(closed loop control) 방식 등이 제안되고 있다. 개회로제어 방식의 대표적인 연구로는 SNL(sandia national laboratory)과 ORNL(oak ridge national laboratory)^(1,2)의 연구들을 들 수 있는데, 이 방식은 흔들림각도 측정기가 필요하지 않다는 장점이 있으나 로프의 길이가 변화됨에 따라 즉, 주기가 변화됨에 따라 속도경로계획을 그때의 상황에 맞도록 변화시켜 주어야 하는 번거로움이 있고 또한, 초기에 운반물의 흔들림이 발생하거나 이송도중 운반물이 다른 물체와 충돌할 경우 흔들림을 제거할 수 없는 단점이 있다.

이에 반하여 개회로제어방식은 운반물의 흔들림각도가 무진동 알고리즘에 피드백되기 때문에 이송작업 전과정에 걸쳐 어떤 흔들림도 제어할 수 있다. Ohnishi 등⁽³⁾은 크레인을 이송시킨 후 무진동제어기 감속경로계획 및 정지위치제어기를 순차적으로 적용하는 방식을 제안하여 만족할 만한 흔들림 및 위치오차 제거 특성을 얻었으며 Auernig,⁽⁴⁾는 흔들림감쇠와 운반물 이송시간의 단축을 위하여 최적 제어이론을 크레인에 적용한 바 있다.

또한, 이동철 외⁽⁵⁾는 임의의 외란에 대해서 짧은 시간내에 진자의 흔들림을 제거하며 목표치가 변화하더라도 오차가 없이 정확하게 목표치에 추종할 수 있는 디지털재설계법(digital redesign)을 제안하였으며 소규모 실험장치를 대상으로 이의 특성을 조사하였다.

윤지섭⁽⁶⁻¹⁰⁾은 소규모 및 실증 규모의 무진동 크레인을 개발하였으며, 개회로제어방식을 이용하여 이송도중의 운반물의 흔들림과 정지위치에서의 흔들림 및 이송오차를 제어할 수 있는 제어기를 개발하였고, 퍼지(fuzzy)방식을 이용한 무진동 알고리즘도 개발하였다.

위의 여러가지 방법은 먼저 이송하고자 하는 거리가 주어지야만 이송거리에 따른 속도경로계획을 수립할 수 있다. 그러나 작업자가 운반물을 이송도중 임의의 위치에 운반물을 하역할 경우에는 이송하고자 하는 거리는 주어지지 않게 되어 위의 방법

을 적용할 수 없다. 이 경우 원하는 위치에 트롤리를 정지시키면 정지시 발생된 흔들림 주기운동은 자연적으로 감쇠되기까지 상당한 시간이 소요되어서 다음 작업으로의 전환이 지체되고 작업효율이 저하되며 또한, 주변 작업물과의 충돌을 발생시킬 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 작업자가 거리에 제한을 받지 않고 주행중에 있는 트롤리를 임의의 지점에 정지시켰을 때 발생하는 운반물의 흔들림을 신속히 감쇠시키고 정지위치 오차도 최소로 줄일 수 있는 제어기를 개발하였다. 개발한 제어기의 성능을 전산모사를 통하여 해석하였고 또한 이를 실험결과와 비교하였다.

2. 제어계 해석

2.1 크레인의 수학적 모델링

Fig. 1에서 로프의 길이는 변하지 않고 체인의 중량은 운반물에 비해 상대적으로 매우 작다고 가정하여 Lagrange 식을 적용한다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = Q_i, \quad i=1, 2 \quad (1)$$

트롤리와 운반물의 운동에너지의 합(T)과 위치에너지(U)는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} M_T \dot{x}^2 + \frac{1}{2} M_L (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2) \quad (2)$$

$$U = M_L g y_i \quad (3)$$

식(2), (3)에 $x_1 = x - L \sin \theta$, $y_1 = L(1 - \cos \theta)$ 을 대

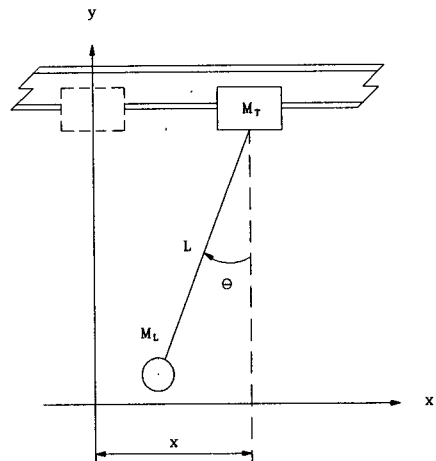


Fig. 1 Schematic diagram of crane

입하고 이의 결과를 Lagrange 운동방정식에 적용하면 다음과 같은 두 식을 얻는다.

첫째, $q_i = x$ 에 대해서

$$(M_T + M_L)\ddot{x} - M_L L \ddot{\theta} \cos \theta + M_L \dot{\theta}^2 \sin \theta = F_T \quad (4)$$

둘째, $q_i = \theta$ 에 대해서

$$M_L L^2 \ddot{\theta} - M_L L \dot{x} \cos \theta + M_L g L \sin \theta = 0 \quad (5)$$

여기서, 운반물의 흔들림각도가 작다(약 5° 이하)고 가정하면 $\sin \theta \cong \theta$, $\cos \theta \cong 1$ 로 가정할 수 있다. 또한 흔들림각속도 $\dot{\theta}$ 이 작다고 가정하면 비선형 요소 $\dot{\theta}^2$ 을 무시할 수 있다. 따라서 다음과 같은 선형 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$(M_T + M_L)\ddot{x} - M_L L \ddot{\theta} = F_T \quad (6)$$

$$L \ddot{\theta} + g \theta = \dot{x} \quad (7)$$

2.2 제어변수의 설정 및 흔들림제어기

식(6)과 식(7)에서 운반물의 흔들림(θ)을 제어하기 위해서는 식(6)의 트롤리의 구동힘(F_T) 혹은 식(7)의 트롤리의 변위, 속도, 혹은 가속도 중의 하나를 제어변수로 하는 제어계가 구성되어야 한다. 일반적으로 실용화된 모터의 구동시스템이 속도제어계로 구성되어 있음을 감안하면 식(7)로 표현되는 계에서는 속도를 제어변수로 설정함이 바람직하다. 식(6)과 식(7)을 각각 구동힘(F_T)와 이송속도(V)를 입력으로 하고 운반물의 흔들림(θ)를 출력으로 하는 전달함수로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{\Theta(s)}{F_T(s)} = \frac{1/M_T}{Ls^2 + \left(1 + \frac{M_L}{M_T}\right)g} \quad (8)$$

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{s}{Ls^2 + g} \quad (9)$$

식(8)의 토크제어계에서 흔들림운동에 충분한 감쇠효과를 주기 위해서는 다음과 같은 비례/미분 제어기가 요구된다.

$$F_T = k[(\theta_r - \theta) + \tau_d(\dot{\theta}_r - \dot{\theta})] \quad (10)$$

여기서, θ_r 은 흔들림각도의 설정치이다. 이에 반하여 식(9)의 속도제어계는 토크제어계에서 요구되는 비례/미분 제어기를 사용하지 않더라도 다음과 같은 단순한 비례제어기를 적용함으로써 감쇠효과를 줄 수 있으며 비례제어 이득(k_θ)을 적절히 선정하여 원하는 시스템의 감쇠효과를 얻을 수 있다.

$$v = k_\theta(\theta_r - \theta) \quad (11)$$

일반적으로 비례/미분 제어기보다는 비례제어기를 구현하기가 쉽고 상용화되어 있는 서보전동기의 가격도 토크제어계로 구성된 것보다는 속도제어계로 구성된 것이 저가이기 때문에 제어변수를 토크보다는 속도로 선택하는 것이 실제 무진동 크레인을 구현하는 데 유리함을 알 수 있다.

2.3 위치제어기

작업자가 임의의 위치에서 운반물을 정지시켰을 때 흔들리고 있는 운반물을 감쇠시키기 위하여 흔들림제어를 수행하면 흔들림을 제거시킬 수 있으나 이로 인하여 운반물은 원래의 정지된 위치에서 벗어나 다른 위치로 이송된다.⁽¹¹⁾ 따라서 흔들림 제어 후 위치제어를 수행하여야 하는데 위치제어시 운반물에 가해진 가속도로 인하여 다시 운반물이 흔들리게 된다. 따라서 이를 해결하는 방법은 흔들림, 위치, 흔들림, 위치... 제어 순으로 제어기를 순차적으로 적용하면 가능하나 이 경우 작업시간이 길어지며 작업의 안전성을 저하시킬 수 있다. 따라서 흔들림과 위치를 동시에 제어하는 것이 바람직하며 이를 위해서 운반물의 흔들림의 설정치(θ_r)를 위치오차의 함수로 설정한다. 이 경우 이송위치(x)와 흔들림 설정치(θ_r) 사이의 전달함수는 type 0(zero) 시스템이므로 단순한 비례제어기를 사용하더라도 위치오차를 제거할 수 있다. 따라서 위치제어기는 다음과 같은 비례제어기로 설정한다.

$$\theta_r = \frac{k_p}{k_\theta}(x_d - x) \quad (12)$$

여기서, k_p 는 위치제어이득이고 x_d 는 원하는 이송 위치이며 본 연구에서는 항상 0(zero)의 값을 갖는다. 식(11)과 (12)로부터 무진동/위치 제어기는 식(13)과 같으며 전체 제어계의 블록선도를 나타내면 Fig. 2와 같다.

$$v = k_p(x_d - x) - k_\theta \theta \quad (13)$$

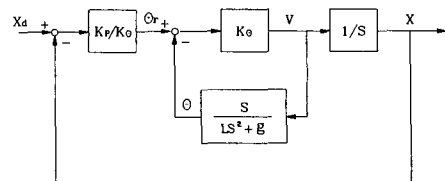


Fig. 2 Block diagram of anti-swing and position control system

또한 입력위치와 출력위치 사이의 전달함수는 식(14)와 같이 표시된다.

$$\frac{X(s)}{X_d(s)} = \frac{k_p(Ls^2 + g)}{Ls^3 + (k_\theta + k_pL)s^2 + gs + k_p g} \quad (14)$$

식(14)의 제어계에서 무진동제어 이득(k_θ)의 값을 식(9)와 (11)로 구성되는 무진동제어계의 감쇠율이 0.707이 되도록 선정하고 위치제어 이득(k_p)을 변화시키면서 root locus 선도를 그리면 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 전체 무진동/위치 제어계는 위치제어 이득(k_p)값에 관계없이 항상 안정성을 갖으며 k_p 를 적절히 선정함으로써 전체 제어계의 감쇠효과를 얻을 수 있다.

Fig. 2의 무진동/위치 제어계에는 트롤리를 구동하는 모터의 입력속도와 출력속도 사이의 동특성이 고려되어 있지 않다. 본 연구에 사용된 구동모터는 3차계로 표시되나 이의 동특성은(약 17 Hz at -3 dB) 운반물의 흔들림 주기운동(로프의 길이가 365 cm인 경우 약 0.26 Hz)의 동특성과 비교하여 상당히 빠르기 때문에 1차 시정수를 갖는 시스템으로 간략화 하였다.

$$\frac{V(s)}{V_r(s)} = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (15)$$

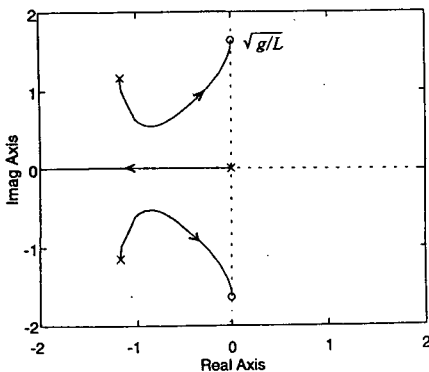


Fig. 3 Root loci of anti-swing and position control system with k_p variation($k_\theta = 12$ cm/sec/deg)

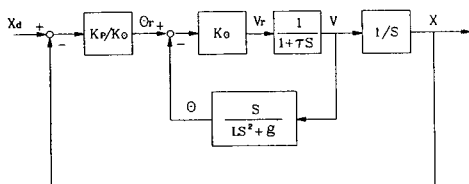


Fig. 4 Block diagram of anti-swing and position control system with motor dynamics

여기서, V_r 은 입력속도이다. 식(15)를 고려한 무진동/위치 제어계의 블록선도는 Fig. 4와 같으며 무진동/위치 제어기는 입력위치(x_d)가 0일 경우 다음과 같다.

$$v_r = -k_\theta \theta - k_p x \quad (16)$$

3. 실험장치

한국원자력연구소에서는 1축 방향, (3 m 행정) 취급중량 100 kg의 소규모 실험용 크레인을 대상으로 각종 무진동제어기를 적용 실험하였으며^(6,7,10) 실제 시설에의 무진동제어기의 적용 가능성을 조사하기 위하여 기존의 시설에 설치되어 있는 1톤 규모의 천정크레인(높이 4 m, 주행거리 8 m, 횡행거리 3 m)을 개조하여 Fig. 5와 같은 실험장치를 구성하였다.

3.1 구동장치

일반 크레인에 사용된 3쌍의 교류유도전동기와 감속기어를 각각 교류서보전동기 및 하모닉드라이버 혹은 유성기어로 교체하였으며 주행, 횡행 및 호이스트구동에 사용된 구동모터 및 기어의 Table 1과 같다.

3.2 각도 측정장치⁽¹²⁾

운반물의 흔들림을 측정하기 위하여 2개의 레이저센서를 이용하여 주행, 횡행방향으로의 흔들림을 동시에 측정할 수 있는 비접촉형 각도 측정장치를 고안하였다. 이 장치는 크게 기존의 로프, 두 개의 레이저센서, 레이저반사판(reflection plate)으로 구성되는데 고정된 로프의 상단으로부터 일정한 거리

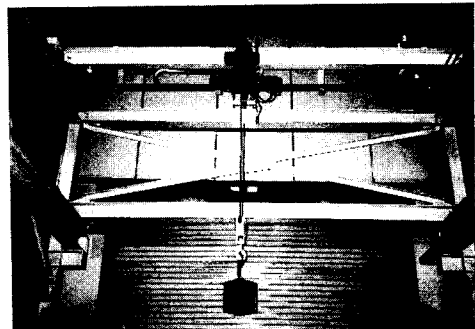


Fig. 5 Anti-swing crane installed at KAERI

Table 1 Characteristics of motor

Specification		Overhead crane		
Motor	Travel distance	Travel(8 m)	Trolley(3 m)	Hoist(4 m)
	Type	AC servo	AC servo	AC servo
	Rated power(W)	750	750	750
	Continuous stall torque(Kgf-cm)	25	25	25
	Maximum operating speed(rpm)	3000	3000	3000
	Reduction ratio	1 : 50	1 : 33.4	1 : 39.3
	Speed sensor (pulse/rev)	Encoder (2000)	Encoder (2000)	Encoder (2000)
	Encoder type	Line driver	Line driver	Line driver
	Brake	None	None	Yes
Driver	Controller type	FET PWM	FET PWM	FET PWM
	Input signal	Pulse	Pulse	Pulse
	Input voltage main/control	Single phase 220 V AC/ Single phase 220 V AC	Single phase 220 V AC/ Single phase 220 V AC	Three phase 220 V AC/ Single phase 220 V AC

에 레이저센서 두 개를 서로 직각방향으로 장착하고 센서주변에는 레이저반사판이 서로 직각방향으로 부착되어 있다.

두개의 레이저센서의 길이방향(상·하)의 부착위치

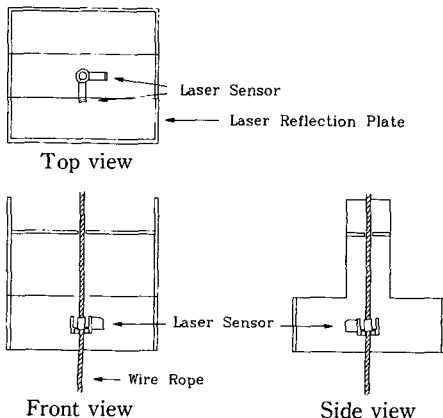


Fig. 6 Swing-angle measurement device using laser sensor

는 측정하고자 하는 운반물의 각도범위와 레이저센서의 거리측정범위에 의해서 삼각함수법으로 구한다. 본 장치에서는 측정하고자 하는 각도범위를 10°로 하였는데, 여기서 사용된 센서의 거리측정범위가 40 mm인 점을 고려하여 로프가 힌지되는 지점에서 205 mm 하단에 설치하였다. 각도 측정장치의 레이저센서는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 4각 반사판 중앙에 설치하였는데, 만약 Fig. 7에서 보는 바와 같이 반사판으로부터 거리 d 만큼 떨어진 A 지점에 설치된 레이저센서가 B 지점으로 이동하였다면 운반물의 흔들림각도는 다음과 같이 유도된다.

$$s \cos \theta + l \sin \theta = d \tag{17}$$

만약 흔들림(θ)이 충분히 작다고 가정하면 $\cos \theta = 1$, $\sin \theta = \theta$ 이므로 운반물의 흔들림각도(θ)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta = \frac{d-s}{l} \tag{18}$$

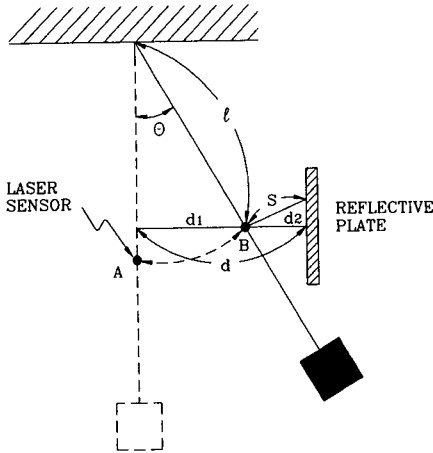


Fig. 7 Measurement principle of swing angle measurement device

3.3 제어장치

제어장치는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 각도 측정용 레이저센서(laser sensor), 회전수 측정을 위한 엔코더(encoder), 모터드라이버(driver) 및 트롤리와 주행대의 탈선방지를 위한 리밋 스위치 등과 이들을 제어용컴퓨터(PC 386)로 접속하는 MRC-4 다축 제어기, 아날로그/디지털변환기(A/D converter) 및 주파수/전압변환기(frequency to voltage converter)로 구성된다. 이들 제어장치는 원거리(실험장치로부터 약 20 m 거리)에 있는 제어반에 설치되어 무진동 크레인각 축을 동시에 통합적으로 제어한다.

다축 제어기는 일반적으로 로봇이나 수치제어기(NC machine) 등 자동화 기기에서 많이 사용되기 때문에 8축까지 제어할 수 있는 제어기들이 상용화되어 있으나 이들은 대부분 특정한 모터나 시스템에 사용되기 때문에 사용자가 설계한 장치의 특성에 맞는 제어를 수행하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 펄스발생기(FGC 210), 펄스카운터(7066) 및 디지털 I/O를 사용하여 4개의 외부 출력단과 16개의 리밋 스위치 입력단을 갖으며 동시에 4축을 제어할 수 있는 MRC-4 다축 제어기를 제작하여 사용하였다.

다축 제어기의 펄스발생기에서 각 축의 구동에 필요한 위치 및 속도를 펄스로 드라이버에 전송하면 드라이버에서 이를 다시 주파수/전압 변환시켜 모터에 전압을 인가함으로써 트롤리를 구동시킨다. 트롤리가 구동됨에 따라 발생된 운반물의 흔들림

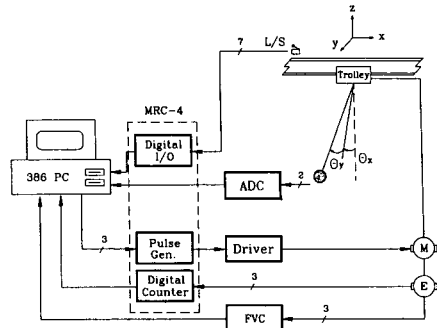


Fig. 8 Schematic diagram of control system

은 각도 측정장치에서 측정되어 아날로그/디지털 변환기를 통해 컴퓨터로 전송된다. 이송변위는 엔코더(encoder)에 의하여 측정되어 디지털카운터(digital counter)를 통해 컴퓨터로 전송되며, 또한 이송속도는 엔코더의 출력펄스를 주파수/전압 변환하여 구한다.

각 방향으로의 주행, 횡행 및 견인거리를 제한하기 위하여 5개의 리밋 스위치가 설치되어 있는데 이들은 다축 제어기의 디지털 입력채널을 통하여 컴퓨터로 전송되어 크레인의 안전운전을 감시한다.

4. 전산모사 및 실험방법

4.1 전산모사방법

식(7)의 크레인 시스템의 수학적 모델을 이용하고 식(16)의 무진동/위치 제어기에서 무진동제어기 이득(k_θ) 및 트롤리 위치제어기 이득(k_p)을 변화시키면서 다음과 같은 경우에 대하여 운반물의 흔들림, 이송속도 및 이송위치를 구하여 제어성능을 관찰하였다.

- (1) 제어하지 않은 일반 크레인의 흔들림특성 ($k_\theta = k_p = 0$)
- (2) 제어기의 적용 시점에 따른 제어특성 ($k_p = 0, t = 0$ 혹은 $\theta = 0^\circ$ 부터 제어시작)
- (3) 제어이득 변화에 따른 제어특성 ($k_\theta \neq 0, k_p \neq 0$)

각 경우에 대하여 초기 흔들림은 2° 로 설정하였으며 전산모사(computer simulation)에 사용한 시스템 상수값은 Table 2에서 보는 바와 같다. 식(7)과 식(16)의 해는 4차 런지쿠타방법(4th order runge kutta method)을 사용하여 구하였고, 이때 계산주기는 0.0001 sec로 선정하였다. 시스템의 안

Table 2 Parameters for computer simulation

Parameters	Value	Unit
Sampling time(T_s)	0.15	sec
Gravitational acceleration(g)	980	cm/sec ²
Rope length(L)	365.646	cm
Time constant(τ)	0.02	sec ⁻¹
Maximum velocity(V_{max})	30	cm/sec
Maximum acceleration	300	cm/sec ²

전을 고려하여 이송속도 및 가속도는 Table 2에서 보는 바와 같이 최고치 한계를 주었으며, 계산 프로그램은 무진동/위치 제어기 알고리즘이 작동하여 흔들림과 이송위치 오차가 0(zero)으로 수렴하면 모든 수행은 완료된다.

4.2 실험방법

전산모사 결과를 실험에 의하여 검증하기 위하여 전산모사조건($\theta=2^\circ$, $T_s=0.15$ sec, $L=365.646$ cm)과 같이 실험조건을 설정하여 위의 각 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 초기 조건($\theta=2^\circ$)을 맞추어 주기 위해서는 운반물을 손으로 흔들여 주어야 하는데, 이 경우에는 정확히 2° 를 맞추기가 어렵고 또한, 수학적 모델에서 고려하지 않은 트롤리의 고리(hook)를 힌지(hinge)점으로 하는 2차 모드의 조화(harmonic) 진동이 발생하여 전산 모사에 사용된 것과 같은 실험조건을 정확히 맞추어 줄 수 없다. 따라서, 트롤리를 일정하게 가속, 정속 및 감속시키면 트롤리가 정지 후에 운반물이 일정하게 흔들리는 현상을 이용하여 초기 조건을 맞추어 주었다. 이와 같은 방법으로 운반물을 2° 정도 가진 시킨 상태에서 식(16)의 제어기 이득을 변화시키면서 흔들림각도, 트롤리속도 및 위치오차 출력을 측정하였다.

5. 전산모사 및 실험결과

5.1 제어하지 않은 일반 크레인의 흔들림특성

식(16)의 제어기에서 무진동제어기 이득과 위치 제어기 이득을 0으로 설정하고 운반물을 2° 흔들여 놓고 전산모사 및 실험을 수행하였다. 그 결과 Fig. 9에서 보는 바와 같이 운반물의 흔들림은 전

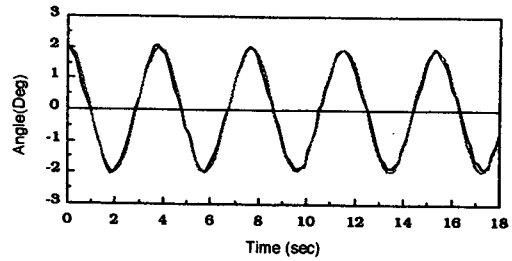


Fig. 9 Response characteristics of uncontrolled crane($\zeta=0$, $k_p=0$)

혀 감쇠되지 않고 계속하여 주기운동을 한다. 또한 전산모사결과와 실험결과와 잘 일치하고 있는 데 실험결과로부터 구한 흔들림 주기(3.85 sec)는 이론식으로부터 구한 주기($2\pi\sqrt{g/L}=3.838$ sec)와 거의 일치된다. 이로부터 전산모사에서 사용된 로프길이는 실험에서 측정된 로프길리와 잘 일치됨을 알 수 있다.

5.2 제어기의 적용시점에 따른 제어특성

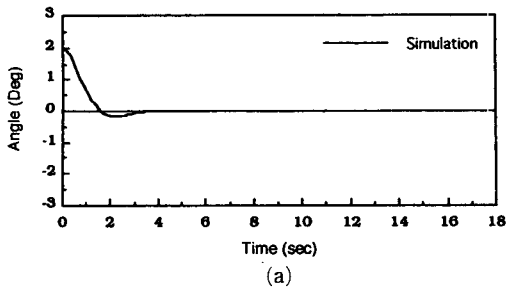
식(16)에서 무진동제어기만을 적용할 경우의 특성을 조사하기 위하여 위치제어기 이득(k_p)을 0(zero)으로 놓고 전산모사를 수행한 결과, Fig. 10과 같은 응답특성을 얻었다. Fig. 10(a)에서 보는 바와 같이 흔들림각도는 약 5초 이내에 신속하게 감쇠되는 특성을 나타내나, Fig. 10(c)에서 보는 바와 같이 트롤리가 초기 위치에서 일정방향으로 점차 치우쳐서 이송오차가 점점 증가되는 데 그 이유는 다음과 같다. 식(16)의 제어기를 일정한 샘플링(T_s)에 대하여 이산화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 v_r(k) - v_r(k-1) &= -k_o[\theta(k) - \theta(k-1)] \\
 &\quad - k_p[x(k) - x(k-1)] \\
 k &= 1, 2, \dots, n \quad (19)
 \end{aligned}$$

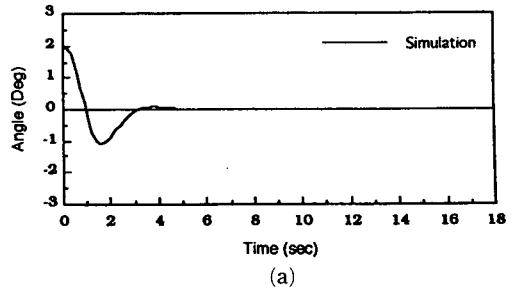
식(19)에서 위치제어기 이득을 0(zero)으로 놓고 각 샘플링 시간에서 입력속도를 구하여 이를 모두 합하면 흔들림제어가 종료된 시점에서의 입력 속도($v_r(n)$)은 다음과 같다.

$$v_r(n) = -k_o[\theta(n) - \theta(0)] + v_r(0) \quad (20)$$

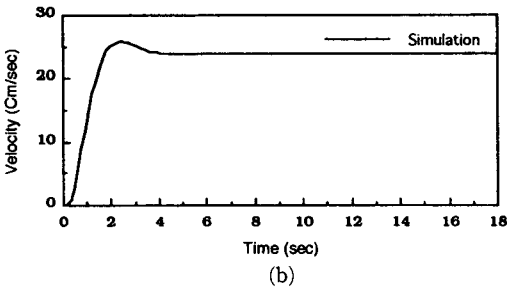
여기서, 흔들림각도와 입력속도의 초기값이 모두 0(zero)이라면 최종 입력속도($v_r(n)$)은 $-k_o\theta(n)$ 이 되므로 흔들림이 완전히 제거될 경우($\theta(n)=0$), 이송속도도 0(zero)으로 수렴한다. 그러나 흔들림의 초기값이 0(zero)이 아니기 때문에($\theta(0)=2^\circ$) 정지하고



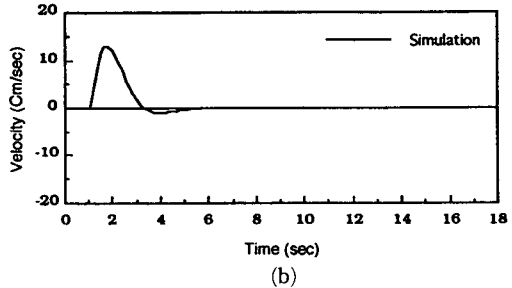
(a)



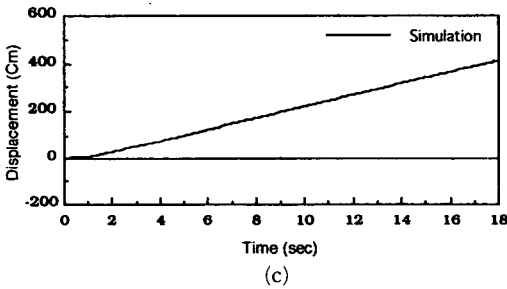
(a)



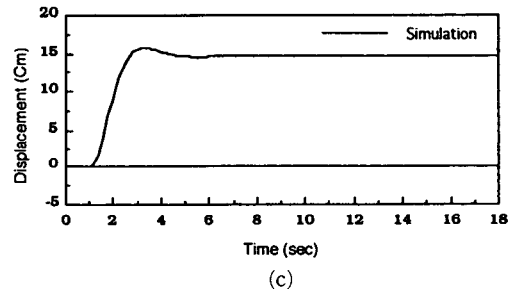
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 10 Response characteristics of anti-swing controller applied from $t=0$

Fig. 11 Response characteristics of anti-swing controller applied from $\theta=0$

있던($v_r(0)=0$) 트롤리는 한쪽 방향으로 $k_\theta\theta(0)$ 의 속도로 이동된다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 초기부터 식(16)의 제어를 적용하지 않고 운반물이 최대 높이($\theta=2^\circ$)에서 최소 높이로 내려오는 순간($\theta=0^\circ$) 혹은 시작시점부터 1/4 흔들림 주기(0.95 sec)만큼 경과한 시점에 제어를 수행하면 잔류속도를 감소시킬 수 있다. 이와 같은 방법으로 전산모사를 수행한 경우, Fig. 11(b)에서 보는 바와 같이 잔류속도가 0(zero)으로 되고 Fig. 11(c)와 같이 이송오차는 일정한 값을 갖는다.

5.3 무진동제어기 이득을 변화한 경우

최적의 무진동제어 이득값을 구하기 위하여 무진동/위치 제어를 적용시키며 무진동제어 이득을 변화시킨 경우에 전산모사 결과를 얻었다. Fig. 12

는 위치제어기 이득을 0.7 sec^{-1} 로 고정하고, 무진동제어기 이득(k_θ)을 5, 12, 20 cm/sec/deg(각각의 감쇠율은 0.325, 0.660, 1.040에 해당)로 변화시키면서 전산모사를 수행한 결과를 나타낸다. 또한, 전산모사에 사용한 이득값과 같은 값을 적용한 실험결과와 비교하였다.

Fig. 12(d)는 무진동제어기 이득(k_θ)이 12 cm/sec/deg(감쇠율 0.660)인 경우의 흔들림각도의 응답 특성을 나타내는데 흔들림각도가 완전히 감쇠되는데 소요되는 시간은 약 8초 정도로 위치제어기를 적용하지 않았을 때(Fig. 11(a)) 흔들림각도와 비교하여 약 3초 정도 지연되며 진폭도 약간 커짐을 알 수 있다. 이는 위치제어기를 적용함에 따라 흔들림과 위치를 동시에 제어하기 때문에 흔들림제어 특성이 다소 나빠지기 때문이다. 그러나 Fig. 12(f)에서 보는 바와 같이 무진동제어기와 함께 위치제

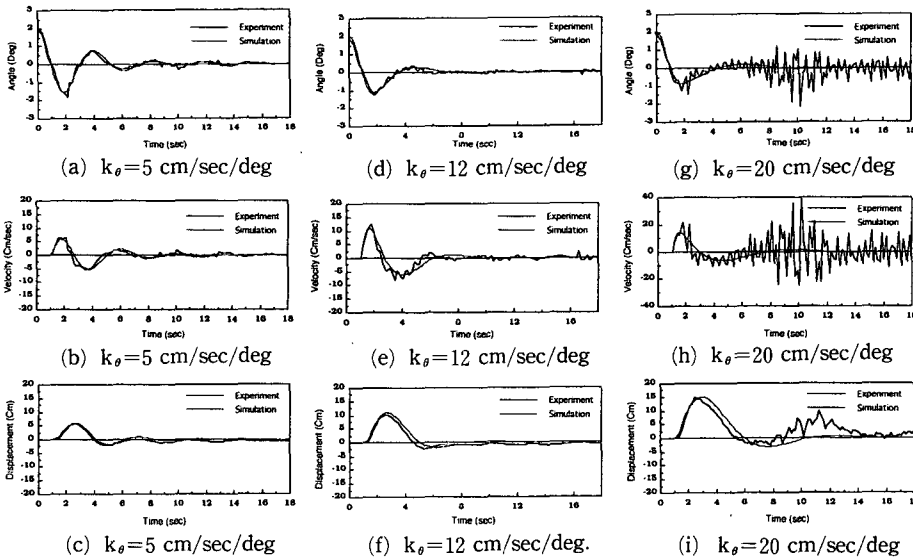


Fig. 12 Variation of response characteristics of antiswing and position controller with various anti-swing controller gains(k_{θ}), $k_p=0.7 \text{ sec}^{-1}$

어기를 적용함으로써 위치오차가 0으로 수렴함을 알 수 있다. Fig. 12(e)에서의 이송속도는 Fig. 11(b)와 비교해 볼 때 음의 방향의 진폭이 커지는데 이는 위치제어기를 적용함에 따라 양의 방향으로 이송된 거리만큼 음의 방향으로도 운반물을 이송시켜 위치오차를 제거하기 때문이다.

실험결과는 비교적 전산모사 결과와 잘 일치하고 있으나 흔들림각도에 약간의 진동이 발생한다. 이는 트롤리를 구동할 때 트롤리바퀴와 레일 사이에 발생하는 진동이 각도 측정기에 측정되어 무진동제어기 이득만큼 증폭되며 또한, 운반물을 지지하는 트롤리의 고리를 힌지(hinge)점으로 하는 2차 모드 of 조화(harmonic) 진동이 운반물에 발생함으로써 크레인 시스템에 비선형성을 유발시켜 제어계의 불안정 요인으로 작용하기 때문이다. 이와 같은 현상은 무진동제어기 이득값이 증가됨(Fig. 12(g))에 따라 더욱 심화되며 결국 최적 제어이득을 결정하는데 제한요소로 작용하며 2차계 시스템으로 간략화된 크레인 시스템이 실제의 경우에는 3차계 이상의 시스템의 특성을 갖음을 나타낸다.

Fig. 12(a)는 무진동제어기 이득(k_{θ})이 5 cm/sec/deg(감쇠율 0.325)인 경우의 흔들림각도의 응답 특성을 나타내는데 Fig. 12(d)의 경우와 비교하여 진폭이 크고 수렴시간이 길어짐을 알 수 있다. 이

는 시스템의 감쇠율이 상대적으로 작게 적용되기 때문이다. 이에 반하여 무진동제어 이득(k_{θ})을 20 cm/sec/deg로 할 경우에는 Fig. 12(g)에서 보는 바와 같이 흔들림각도의 진폭이 줄어든다. 각도가 완전히 감쇠되는 시간은 오히려 증가하게 된다. 이는 제어계의 감쇠율이 1보다 커져서 시스템이 과감쇠(overdamped)되기 때문이다. 일반적인 시스템에서는 감쇠율이 0.707($k_{\theta}=14.73 \text{ cm/sec/deg}$)일 때 최적의 흔들림감쇠특성을 갖으나 흔들림 및 위치를 동시에 제어할 경우에는 0.66일 때 감쇠특성이 가장 좋은 것으로 나타났다. 또한 Fig. 12(i)에서 보는 바와 같이 무진동제어기 이득값을 증가시키면 흔들림제어를 함에 따라 발생한 이송오차가 증가되며, 이에 따라 이송오차가 0(zero)으로 수렴하는 시간도 길어진다. 이는 무진동과 위치제어기를 동시에 적용시켰기 때문에 무진동제어기 이득값이 증가됨에 따라 상대적으로 위치제어 효과가 작아지기 때문이다.

실험결과는 비교적 전산모사와 잘 일치하고 있으나 Fig. 12(g, h, i)에서 보는 바와 같이 전산모사 결과와는 달리 무진동제어기 이득값이 크면 트롤리속도의 변화가 상당히 커지는데, 이는 전술하였듯이 트롤리 자체의 진동과 크레인 시스템의 비선형성으로 유발된 조화진동이 시스템을 불안정하게 만들기

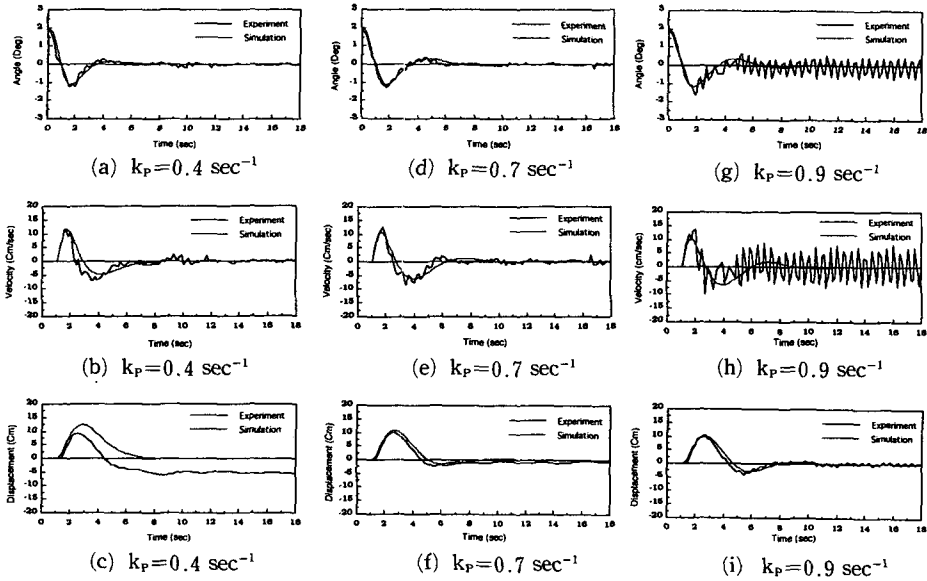


Fig. 13 Variation of response characteristics of antiswing and position controller with various position controller gains(k_p), $k_s=12$ cm/sec/deg

때문이다. 이상과 같은 전산모사 및 실험결과로부터 무진동제어기 이득(k_s)이 12 cm/sec/deg일 때가 가장 최적의 응답특성을 나타냄을 알 수 있다.

5.4 위치제어기 이득을 변화한 경우

Fig. 13은 무진동제어기 이득을 12 cm/sec/deg로 고정하고 위치제어기 이득을 0.4, 0.7 및 0.9 sec⁻¹로 변화시키면서 구한 전산모사와 실험결과를 나타낸다. 전산모사 결과는 Fig. 13(a, b, c)에서 보는 바와 같이 위치제어기 이득이 0.4 sec⁻¹일 때 흔들림, 속도 및 위치오차는 약 8초 이내에 0(zero)으로 수렴한다. 또한 Fig. 13(e, f)와 Fig. 13(h, i)에서 보는 바와 같이 위치제어기 이득이 증가됨에 따라 속도와 위치의 최대 진폭은 약간 줄어드나 위치오차를 0(zero)으로 수렴시키는 시간은 길어지며 흔들림각도, 속도 및 위치오차 응답이 점차 진동한다. 이는 위치제어기 이득값 증가에 따라 흔들림제어 효과가 상대적으로 작아지고 시스템의 불안정해지기 때문이다.

실험결과를 전산모사와 비교할 때 흔들림각도는 전산모사와 유사하게 나타나지만, 위치오차 응답의 경우 전산모사 결과는 0(zero)으로 수렴하나 실험 결과는 위치제어 이득값이 작을 경우 0으로 수렴하지 않음을 볼 수 있다.(Fig. 13(c)의 경우, 약 -5

cm) 이는 수학적으로 구한 제어계가 식(14)에서 보는 바와 같이 type 0(zero)계이므로 정상상태에서의 오차가 없어야 되는 것과는 대조적이며 실제 제어계가 type 0(zero)계가 아님을 나타낸다. 또한 위치제어기 이득값이 증가하면(Fig. 13(g, h)) 위치오차는 0(zero)으로 수렴하나 흔들림각도가 심하게 진동하는데 이는 Fig. 12(g, h)의 무진동제어기 이득값이 클 경우와 마찬가지로 트롤리 자체의 진동과 운반물의 2차 조화진동의 영향이 이득값이 증가함과 동시에 커지기 때문이다. 이로 인하여 로프에 흔들림이 계속해서 발생하게 된다. 따라서 가장 최적의 위치제어기 이득을 0.7 sec⁻¹로 선정하였으며 이 경우 흔들림각도가 정상상태에 도달하는 시간은 위치제어기 이득이 0.4 sec⁻¹일 때보다 약 1초 정도 지연되지만 위치오차는 0.4 sec⁻¹일 때 보다 약 7배나 줄어들었다.

6. 결 론

본 연구의 목적은 작업자가 거리에 제한을 받지 않고 주행 중에 있는 트롤리를 임의의 지점에 정지했을 때 발생하는 운반물의 흔들림을 신속히 감쇠시키고 정지위치 오차도 최소로 줄일 수 있는 제어기를 개발하는 것이다. 크레인 시스템의 수학적 모

델과 무진동/위치 제어기를 이용하여 전산모사와 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 무진동 및 위치제어기를 동시에 적용하면 흔들림과 위치오차를 약 8초 이내에 제거할 수 있다.

(2) 무진동제어기 이득이 증가하면 운반물의 흔들림은 더욱 감소되나 크레인 로프의 미소 흔들림이 동시에 증폭됨에 따라 시스템이 불안정해진다.

(3) 위치제어기 이득이 증가하면 위치오차의 최대값이 감소되나 응답이 진동하여 계가 불안정해지며 오차를 완전히 제거하는데 소요되는 시간이 증가한다.

(4) 실험결과와 전산모사 결과는 비교적 잘 일치하나, 수학적 모델에서 고려되지 않은 운반물의 2차 조화진동의 영향으로 실험에서는 큰 이득값에 대하여 불안정해지는 특성을 나타낸다.

참고문헌

(1) Noakes, M. W., et al., 1990, "An Application of Oscillation Damped Motion for Suspended Payloads to the Advanced Integrated Maintenance System," '90 ANS, Vol. 1, pp. 63~68.
 (2) Jones, J. F., et al., 1987, "Swing Damped Movement of Suspended Objects," SAND-87-2189.
 (3) Ohnishi, E., et al., 1984, "Automatic Control of an Overhead Crane," '84 IFAC, No. 63-3, pp.

XIV-37~XIV-42.

(4) Auernig, J. W. and Troger, H., 1987, "Time Optimal Control of Overhead Crane with Hoisting of the Load," *Automatica*, Vol. 23, No. 4, pp. 437~447.
 (5) 이동철, 신민생, 하주식, 김상용, 1992, "디지털 재설계법에 의한 크레인 계의 제어," 대한기계학회논문집, 제16권, 제1호, pp. 41~52.
 (6) 윤지섭, 박병석, 이재설, 1989, "무진동 크레인의 제어 알고리즘 설계," '89 KACC, Vol. 1, pp. 260~265.
 (7) 박병석, 윤지섭, 이재설, 1990, "무진동 크레인을 이용한 흔들림제어에 관한 연구," '90 KACC, Vol. 1, pp. 292~297.
 (8) 박병석, 윤지섭, 이재설, 1992, "핵연료 이송을 위한 무진동 크레인의 적용 가능성에 관한 연구," '92 춘계 한국원자력학회, pp. 395~404.
 (9) 윤지섭 외, 1992, 사용후 핵연료 취급 기술 개발, 한국원자력연구소, KAERI-NEMAC/RR-60/92.
 (10) 윤지섭 외, 1991, "저장 공정장치 개발," KAERI-NEMAC/RR-33/91.
 (11) 한국원자력연구소 특허, 1994, "크레인의 진동방지를 위한 속도제어 방법," 출원번호 6026.
 (12) 한국원자력연구소 특허, 1993, "무진동 조업용 진동각 측정장치," 출원번호 17481.