

〈論 文〉

무진동 크레인의 구현을 위한 여러가지 제어방식의 비교 연구

윤 지 섭*

(1994년 12월 10일 접수)

Comparison Study of Various Control Schemes for the Anti-Swing Crane

Ji Sup Yoon

Key Words : Anti-Swing Controller(무진동제어기), Position Controller(위치제어기), Acceleration Profile Plan(가속도경로계획), Velocity Profile Feedback Control(속도경로귀환제어), Fuzzy Control(퍼지제어), Swing Angle Measuring Device(흔들림각도 측정장치)

Abstract

Crane operation for transporting heavy loads inherently causes swinging motion at the loads due to crane's acceleration or deceleration. This motion not only lowers the handling safety but also slows down the handling process. To complement such a problem, Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI) has designed several anti-swing controllers using open loop and closed loop approaches. They are namely a pre-programmed feedback controller and a fuzzy controller. These controllers are implemented on a 1-ton crane system at KAERI and their control performances are compared. Test operations show that the new controllers are superior to that of conventional cranes in terms of robustness to the disturbances and adaptation capability to the change of rope length.

기 호 설 명

g : 중력가속도 (980 cm/sec²)
 K_d : 무진동 제어게인 (cm/sec/deg)
 L : 크레인의 줄길이 (cm)
 T_s : 샘플링시간 (msec)
 T_L : 운반물의 흔들림주기 (sec)
 $u(t)$: 단위 계단함수
 U_D : 퍼지제어기 출력변수 (cm/sec²)
 V_{max} : 이송대차의 최대이송속도 (cm/sec)
 x, x_d : 이송대차의 현재위치 및 원하는 최종이송 위치 (cm)
 Δx : 최종이송위치까지 남은 거리 (cm)
 \dot{x}, \dot{x}_d : 이송대차속도 및 원하는 이송속도 (cm/sec)

$\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$: 흔들림각도, 흔들림각속도, 및 흔들림각 가속도 (deg, deg/sec, deg/sec²)
 θ_E, θ_{DE} : 흔들림각도오차 및 흔들림각도오차의 변화율 (deg, deg/sec)
 w_n : 운반물의 흔들림 고유진동수 (rad/sec)
 ζ : 시스템의 감쇠비 (dimensionless)

1. 서 론

산업시설에서 중량의 물체를 이송시키고자 할 경우 일반적으로 크레인을 이용한다. 크레인은 이송대차(trolley)에 부착된 모터를 구동시킴으로써 체인이나 줄(rope)에 매달린 중량물을 목적위치까지 이송시키는 데 모터의 초기 가속 및 정지시 감속으

*정회원, 한국원자력연구소

로 인하여 운반물에는 필연적으로 흔들림이 발생하여 이송물의 낙하위험성뿐만 아니라 주변물과의 충돌위험성이 있으며 정지후에는 다른 작업으로의 전환이 어려워 작업의 능률이 저하되며 작업자의 안전성에도 영향을 미친다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 흔들림을 제거하는 여러 가지 방법이 제안되고 있다. 이 방법에는 운반물의 주기를 이용하여 일정한 가속도 경로(pattern)를 수립한 후에 이 경로에 추종하도록 크레인의 가속도를 제어하는 가속도경로 계획방식(acceleration profile planning method)과 운반물의 흔들림 각도를 귀환(feedback)하는 폐회로제어방식(closed loop control method) 등이 제안되고 있다.

Alzingers⁽¹⁾와 Carbon⁽²⁾에 의해서 제안된 가속도경로 계획방식을 SNL(sandia national laboratory)⁽³⁾에서 소규모 실험을 통하여 확인하고, 이 결과를 ORNL(oak ridge national laboratory)⁽⁴⁾에서 실증 시험한 바 있다. 이 방식은 흔들림각도 측정이 필요하지 않다는 장점이 있으나 로프의 길이가 변화됨에 따라, 즉 주기가 변화됨에 따라 가속도경로 계획을 그때의 상황에 맞도록 변화시켜 주어야 하는 번거로움이 있고 이송도중 줄길이가 변하면 흔들림이 제어되지 않는다. 또한, 초기에 운반물의 흔들림이 있거나 이송도중 운반물이 다른 물체와 충돌할 경우 흔들림을 제거할 수 없는 단점이 있다.

이에 반하여 폐회로제어방식은 운반물의 흔들림각도가 무진동 알고리즘에 귀환되기 때문에 이송작업 전 과정에 걸쳐 어떤 흔들림도 제어할 수 있다. Ohnishi⁽⁵⁾ 등은 크레인을 이송시킨 후 무진동 제어, 감속경로제어, 및 정지위치제어를 순차적으로 적용하는 방식을 제안하여 만족할 만한 흔들림 및 위치오차 제거 특성을 얻었으며 Auernig⁽⁶⁾는 흔들림 감쇠와 운반물 이송시간의 단축을 위하여 최적 제어이론을 크레인에 적용한 바 있다.

한국원자력연구소에서는 원자력발전소에서 타고 남은 사용후 핵연료와 각종 저준위 폐기물 드럼의 안전한 이송을 위하여 보다 효율적이고 외란에 대해서도 잘 적용할 수 있는 무진동 크레인의 개발에 노력하여 왔다. 그 결과 폐회로제어방식을 이용하여 이송도중의 운반물의 흔들림과 정지위치에서의 흔들림 및 이송위치오차를 제어할 수 있는 속도경로 폐회로제어방식 및 퍼지(fuzzy)방식을 이용한 무진동 알고리즘을 개발하였다. 본 논문에서는 위

의 여러가지 제어기의 설계방법을 제시하고 각 제어기의 성능을 전산모사를 통하여 해석하였으며, 또한 각 제어기를 1톤 규모의 크레인에 적용하여 전산모사 결과와 비교하여 그 성능을 확인하였다.

2. 무진동 크레인의 제어 알고리즘

2.1 수학적 모델링

Fig. 1에서 줄 혹은 체인의 무게는 운반물에 비하여 상대적으로 매우 작기 때문에 무시하고, 또한 운반물의 흔들림각도가 작고 운반물의 이송도중 체인의 길이가 변화되지 않는다고 가정하면 운반물과 크레인의 수학적 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁷⁾

$$(M_T + M_L) \ddot{x} + M_L L \ddot{\theta} = F_T \quad (1)$$

$$\ddot{\theta} + \omega_n^2 \theta = -\frac{\ddot{x}}{L} \quad (2)$$

여기서, M_T 는 트롤리의 질량, M_L 은 운반물의 질량, F_T 는 트롤리의 구동력, $\omega_n (= \sqrt{g/L})$ 은 운반물의 흔들림주기, θ 는 흔들림각도, \ddot{x} 은 이송대차의 가속도, L 은 체인의 길이, g 는 중력가속도를 나타낸다. 식 (2)에서 보는 바와 같이 천정크레인 시스템은 감쇠비가 0인 전형적인 2차계(second order system)임을 알 수 있다.

2.2 가속도경로 계획방식

2.2.1 원리

이 방식의 원리는 다음과 같다. 이송초기에 이송

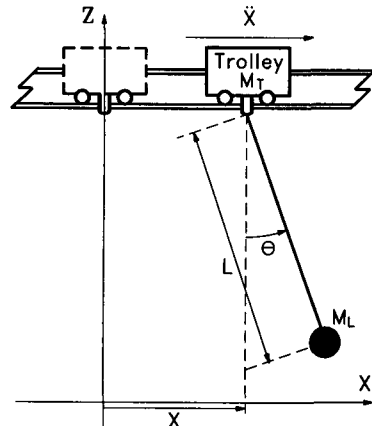


Fig. 1 Schematic diagram of crane

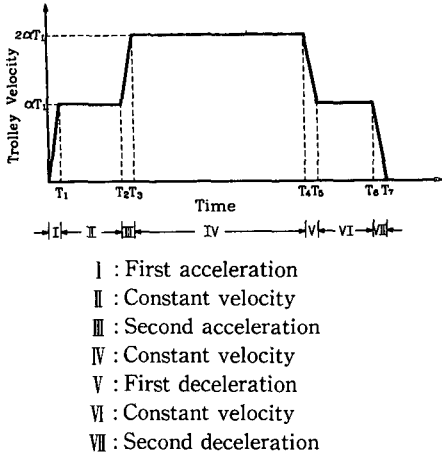


Fig. 2 Velocity profile of open loop controller

대차를 일정시간 가속(1차 가속)시키면 운반물은 이송대차의 이송방향의 뒤방향으로 흔들리다가 다시 앞방향으로 흔들려서 계속 흔들림운동을 한다. 만약 이송시작후 정확히 1/2 주기가 경과한 시점에 1차 가속과 같은 크기와 적용시간을 가지는 2차 가속을 이송대차에 가하면 2차 가속이 끝난 시점부터 운반물의 흔들림은 제거된다. 이와 같은 개념은 수학적으로도 증명된 바 있으며⁽⁸⁾ 이 개념을 이용하여 흔들림을 제거할 수 있는 이송대차의 가속도경로를 구할 수 있고 이를 적분한 속도경로는 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 이 그림에서 각 속도별 전환시간은 다음과 같이 주어진다.⁽⁸⁾

$$\begin{aligned}
 T_1 &: T_L/4 \text{보다 작은 양의 값} \\
 T_2 &= \frac{\pi}{\omega_n} = \frac{T_L}{2} & T_3 &= T_1 + T_2 \\
 T_4 &= \frac{x_d}{2aT_1} & T_5 &= T_4 + T_1 \\
 T_6 &= T_4 + \frac{T_L}{2} & T_7 &= T_6 + T_1
 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, a 는 이송대차의 초기가속도 크기, T_L 은 운반물의 흔들림주기이며 x_d 는 원하는 이송거리이다.

2.2.2 응답특성

가속도경로 계획방식의 응답특성을 전산모사를 수행하여 구한 후, 시간에 대한 이송속도, 흔들림 각도 및 이송거리 응답을 Fig. 3에 나타내었다. 또한 외부 환경변화에 대한 영향을 조사하기 위하여 외란이 존재할 경우와 이송도중 줄길이가 변화할

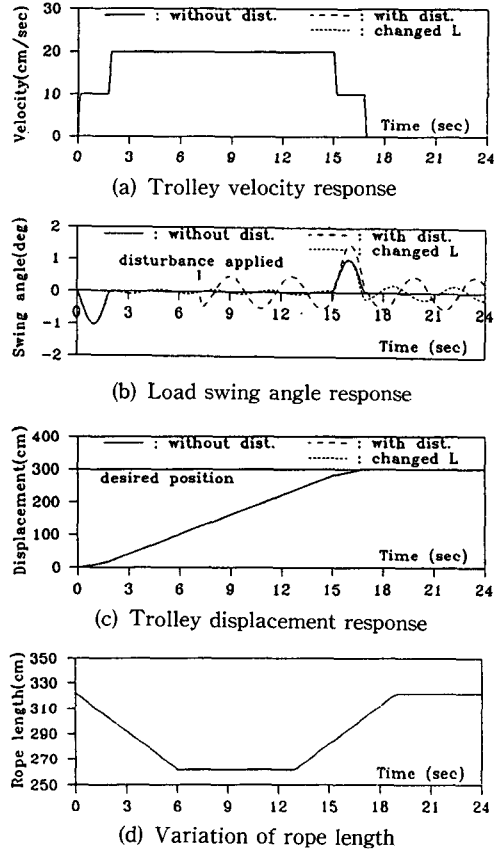


Fig. 3 Response characteristics of open loop controller with disturbance and with changed rope length

경우의 응답특성도 같이 도시하였다. 전산모사조건은 실험에 사용될 조건과 같이 $L=322 \text{ cm}$ ($T_L=3.602 \text{ sec}$), $a=66.678 \text{ cm/sec}^2$, $x_d=300 \text{ cm}$, 및 $T_1=0.150 \text{ sec}$ 로 설정하였다. 외란은 이송후 2주기가 경과한 시점에 흔들림각도($\theta(t)$)의 임펄스함수로 주었으며, 줄길이는 Fig. 3(d)에서 보는 바와 같이 이송시작후 6초간 10 cm/sec의 속도로 상승시키고 이후 일정하게 유지시키다가 최종이송거리로부터 40 cm전 지점에 도달한 시점부터 6초간 10 cm/sec의 속도로 하강시켰다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 외부 환경이 변화하지 않은 경우, 이송초기에 1차 가속($0 \leq t < T_1$)에 의하여 발생된 흔들림은 2차 가속($T_2 = T_L/2 \leq t < T_3$)으로 제거됨을 알 수 있다. 정지시에도 가속시와 같은 개념을 사용하여 1차 감속과 2차 감속의 단계를 거쳐 정지후에도 흔들림을 제거할 수 있다.

이와 같은 가속도경로 계획방식은 기존의 크레인에서 발생하는 흔들림을 쉽게 제거할 수 있고 기존 크레인의 하드웨어를 개조하지 않더라도 (2단 속도변경이 가능한 크레인 이상일 경우) 그대로 적용될 수 있는 장점이 있으나 다음과 같은 단점 때문에 그 적용에 제한을 받는다.

(1) 이 방식은 개회로(open loop) 제어방식으로 외부 환경변화에 대한 보상(compensation) 수단이 없기때문에 운반물이 주변 물체와 충돌하거나 바람 등에 의하여 이송도중 운반물이 흔들릴 경우 또는 이송전에 운반물이 흔들리고 있는 경우에는 흔들림을 제거할 수 없다.

(2) 1차·2차 가속의 적용시간을 정하기 위하여 정확한 운반물의 흔들림주기를 알아야 하는데 만약 이송도중 줄길이가 변화할 경우에는 흔들림 주기도 변화되어 적용이 곤란하다.

(3) 이 방식은 위치 혹은 속도 피드백을 하지 않으므로 실제 이송대차가 원하는 속도대로 구동되지 않으면 정지후에 위치오차가 발생하며 또한 운반물이 흔들릴 수 있다.

이와 같은 단점은 Fig. 3에 외란이 존재할 경우와 줄길이가 변화할 경우의 응답특성에서 볼 수 있다. 즉, 외란이 존재할 경우 외란에 의해서 발생된 운반물의 흔들림은 그대로 존재하게 된다. 또한, 이송도중 줄길이가 변화할 경우, 운반물의 흔들림 주기가 변화하여 정확한 시점에 2차 가속을 가할 수 없게 되어 정속이송 구간에서 흔들림이 존재하며, 정지시에도 1차 감속과 2차 감속의 적용시간차가 정확히 반주기가 될 수 없으므로 운반물의 흔들림이 증폭된다.

2.3 속도경로 폐회로제어방식^(8,9)

외부 환경변화에 적응할 수 있는 제어기를 설계하기 위하여 가속도경로 계획방식의 정속이송 구간에 무진동제어기를 도입하였다.

2.3.1 무진동제어기

식 (2)에서 보는 바와 같이 이송대차가 가속 혹은 감속되면 운반물은 항상 흔들리게 된다. 따라서 흔들림을 제거하기 위하여 흔들림각도의 변화율($\dot{\theta}$)을 측정 귀환하여 이송대차의 가속도 입력(\ddot{x})을 다음과 같이 변화시켜 준다.

$$\ddot{x} = K_a \dot{\theta} \text{ and } K_a = 2L\zeta\omega_n \quad (4)$$

여기서, K_a 는 무진동 제어게인이며 ζ 는 원하는 감쇠비이다. 식 (4)를 식 (2)에 대입하면 제어된 크레인 시스템은 다음과 같이 감쇠된 2차 계로 나타난다.

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

식 (5)에서 무진동 제어게인 (K_a)을 적절히 선택함으로써 운반물의 흔들림운동에 충분한 감쇠효과를 줄 수 있다. 식 (4)의 무진동제어기를 디지털 컴퓨터에서 수행하기 위하여 작은 샘플링시간(T_s)에 대하여 디지털 제어기로 전환하면 다음과 같다.

$$\dot{x}(k) = K_a \{\theta(k) - \theta(k-1)\} + \dot{x}(k-1) \quad (6)$$

2.3.2 이송속도 경로계획

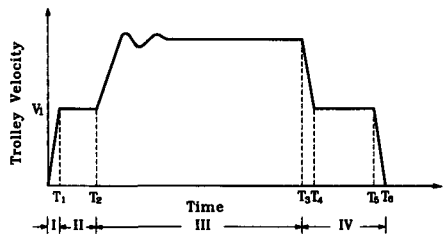
이송속도의 경로는 크레인의 무리한 구동을 방지하기 위하여 사다리꼴 파형을 선택하였으며, Fig. 4에서 보는 바와 같이 초기 가속구간, 정속구간, 무진동제어구간, 및 프로그램 감속구간으로 나뉜다. 각 구간의 이송속도경로계획 및 제어기의 전환 방법은 다음과 같다.

(1) 초기 가속구간($0 \leq t < T_1$)

이송대차의 속도가 설정속도 (V_1)가 될 때까지 가속시킨다. 설정속도 (V_1)의 값을 결정하는 방법은 다음에 설명한다.

(2) 정속구간($T_1 \leq t < T_2$)

초기 가속도에 의하여 운반물의 흔들림각도가 최대가 될 때까지($t = T_2$) 이송대차를 V_1 의 속도로 정속 운전시킨다. 여기서, 운반물의 흔들림이 최대가 되는 시점(T_2)은 식 (2)의 미분방정식의 해를 구한 다음 식 $\dot{\theta}(t) = 0$ 을 만족하는 해를 얻어 구할 수 있으며 다음과 같이 표시된다.⁽⁸⁾



- I : Initial acceleration
- II : Constant velocity
- III : Anti-swing control
- IV : Programmed deceleration

Fig. 4 Velocity profile of preprogrammed controller

$$T_2 = 1/4 T_L + 1/2 T_1 \quad (7)$$

또한 이송속도 (V_1)는 다음과 같은 사항을 고려하여 결정한다. V_1 은 초기가속의 적용시간에 비례하므로 운반물의 최대 흔들림각도에 직접적인 영향을 준다. 또한 $t = T_2$ 시점 이후에 운반물은 이송대차의 진행방향과 같은 방향으로 흔들리려 하므로 무진동제어기는 이를 제거하려 이송대차를 다시 가속시킨다. 그 결과 무진동제어구간에서의 평균이송속도는 $V_1 + K_d \theta_{max}$ 에 근사한다.⁽⁸⁾ 무진동 제어게인 (K_d)은 일정한 값을 가지며 최대흔들림각도 (θ_{max})는 V_1 에 비례하므로 V_1 이 크면 클수록 이송대차의 평균이송속도는 커지게 되어 전체 이송시간이 단축된다. 그러나, 너무 큰 V_1 을 적용할 경우에는 T_2 시점 이후에 무진동제어기에 의해서 계산된 이송대차의 이송속도가 실제 구동 가능한 최대속도보다 커지게 됨에 따라 무진동제어기의 성능이 저하될 수 있다. 따라서, 운반물의 최대 흔들림각도, 전체 이송시간 및 무진동제어기의 속도 포화(saturation) 등을 고려하여 V_1 을 이송대차의 구동 가능한 최대속도의 1/2에서 2/3 값 사이로 설정하였다. 즉,

$$\dot{x} = \frac{V_1}{T_1} t \quad 0 \leq t < T_1 \quad (8)$$

$$\dot{x} = V_1 \quad T_1 \leq t < T_2 \quad (9)$$

where $\frac{1}{2} V_{max} \leq V_1 \leq \frac{2}{3} V_{max}$

(3) 무진동 제어구간 ($T_2 \leq t < T_3$)

식 (6)의 무진동제어기를 시점 T_2 부터 시점 T_3 까지 적용한다.

(4) 프로그램 감속구간 ($T_3 \leq t < T_6$)

무진동제어에 의하여 흔들림이 제거된 운반물을 다시 흔들리지 않게 정확한 위치에 정지시키기 위하여 이송속도를 감속시키는 구간으로 앞에서 기술한 가속도경로 계획방식의 2단 감속방법을 그대로 적용한다. 따라서, 각 속도의 전환시점 T_4 , T_5 및 T_6 는 다음과 같이 결정한다.

$$T_4 = T_3 + T_1, \quad T_5 = T_3 + \frac{T_L}{2}, \quad T_6 = T_5 + T_1 \quad (10)$$

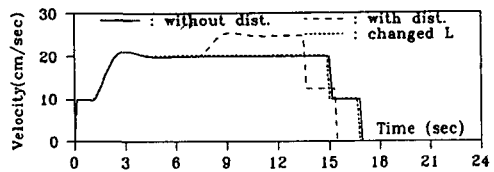
또한 무진동제어구간에서 프로그램감속구간으로 전환시점 T_3 는 이송대차가 주어진 거리 ($x_d - \Delta x$)에 도달하는 시점으로 정한다. 즉,

$$x(t) = x_d - \Delta x \\ = x_d - \frac{1}{2} (T_1 + \frac{1}{2} T_L) V_3 \quad (11)$$

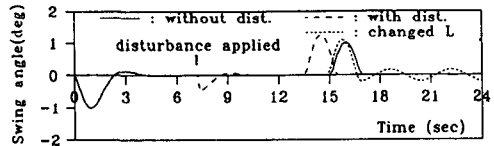
여기서, Δx 는 시점 T_3 에서 최종이송위치까지 남은 거리이며 V_3 는 이 시점에서의 이송대차의 실제 속도이다.

2.3.3 응답특성

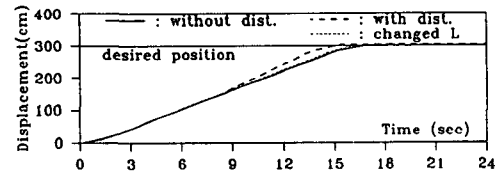
전산모사결과, 속도경로 폐회로제어방식의 응답특성은 Fig. 5에서 보는 바와 같다. 또한, 외란이 존재할 때와 이송도중 줄길이가 변화할 때의 응답특성도 같이 도시하였다. 전산모사에 사용된 조건은 가속도경로 계획방식에 사용된 조건과 같으며, $T_1 \leq t < T_2$ 시점의 일정속도 V_1 은 무진동제어구간에서의 평균속도가 가속도경로 계획방식의 평균속도와 유사하도록 10 cm/sec ($1/3 V_{max}$)로 설정하였다. 또한, 무진동 제어게인 (K_d)은 전산 모사와 실험을 반복수행하여 흔들림제거 특성과 계의 안정도를 동시에 가장 잘 만족시키는 10 cm/sec/deg로 설정하였다.⁽⁸⁾



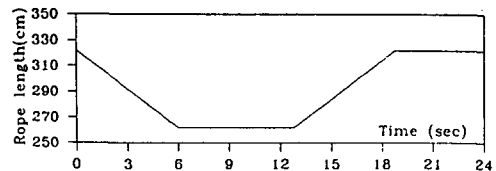
(a) Trolley velocity response



(b) Load swing angle response



(c) Trolley displacement response



(d) Variation of rope length

Fig. 5 Response characteristics of preprogrammed controller with disturbance and with changed rope length

Fig. 5에서 보는 바와 같이 외부 환경이 변화하지 않을 때 T_2 시점에서 무진동제어기가 적용되면 약 3/4 흔들림 주기만에 흔들림은 완전히 제거된다. Fig. 5(a)에서 외란이 작용할 경우(이송대차의 진행방향과 반대방향으로 운반물이 흔들린 경우) 무진동제어기는 흔들림을 제어하기 위하여 이송대차의 이송속도를 가속시켜 Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이 외란에 의해서 발생된 흔들림을 효과적으로 제거한다. 줄길이가 변화한 경우에도 무진동 제어기는 가속도경로 계획방식에 비하여 흔들림을 효과적으로 제거함을 알 수 있다. 그러나, 무진동제어기는 고정된 제어게인(K_d)을 가지기 때문에 이와 같은 줄길이변화에 대하여 효율적으로 적용하지 못할 수 있다. 즉, 시스템의 감쇠비 ($\xi = K_d / 2\sqrt{Lg}$)는 줄길이가 길어짐에 따라 감소하여 운반물의 흔들림을 충분히 감쇠시킬 수 없게 된다. 또한 속도경로 폐회로제어방식은 마지막 감속 구간에서 가속도경로 계획방식에 사용된 2단 감속방식을 적용하기 때문에 이 구간에서 외란이 작용하거나 줄길이가 변화하게 되면 운반물의 흔들림을 제거할 수 없는 단점을 여전히 가지고 있다. 결론적으로 속도경로 폐회로제어방식은 가속도경로 제어방식에 비하여 외란 및 줄길이 변화에 대한 시스템의 영향을 없애 줄 수 있으나 다음과 같은 경우에 적용하기 곤란하다.

- (1) 외란이 감속구간에 작용된 경우와 줄길이가 감속구간에서 변하는 경우
- (2) 줄길이의 변화가 심할 경우

2.4 퍼지제어기(fuzzy controller)

앞에서 기술한 두 제어기를 실제 산업현장에 적용하는 데는 다음과 같은 두 가지의 문제점이 있다. 첫째, 위의 두 제어기는 감속구간에서 외란이 발생하지 않거나 줄길이가 변화되지 않는다면 운반물을 정확한 목표지점에 흔들림없이 정지시킬 수 있으나, 이 구간에서 무진동제어를 수행하지 않기 때문에 외란이 발생하거나 줄길이가 변하면 운반물을 목표지점에 정확하게 정지시키더라도 운반물의 흔들림은 제어할 수 없다. 이를 해결하기 위하여 감속구간에서도 무진동제어기를 적용하여야 하는데 이 경우 이송대차의 속도 및 위치가 무진동 제어기에 의하여 전적으로 결정되기 때문에 최종이송 위치 오차가 발생한다. 따라서 무진동제어기와 함께 위치제어기를 동시에 적용하여야 하는데 이 경

우 제어기의 구조가 비교적 복잡해져⁽⁷⁾ 무진동 크레인을 실제로 구현할 때 시스템이 불안정해지는 요인으로 작용될 수 있다.

둘째, 크레인 시스템을 모델링할 때 고려하지 못한 2차 모드의 진동(크레인 후크를 힌지점으로 하는 운반물의 흔들림), 크레인 바퀴와 레일 사이의 진동으로 인한 운반물의 떨림, 크레인 줄길이가 방향을 축으로 회전하는 운반물의 회전운동, 및 여러 가지 가정으로 인하여 크레인 시스템의 동특성에 따라 설계한 위의 두 제어기의 성능이 전산모사 결과대로 항상 보장될 수 없다. 이에 반하여 산업 현장에서 숙련된 크레인 작업자는 크레인 시스템의 동특성을 고려하지 않고도 크레인을 효율적으로 제어하는 방법을 경험을 통하여 알고 있다. 즉, 크레인 작업자는 이송대차를 구동시키고 동시에 일정 높이로 운반물을 끌어 올려 이송도중 주변의 물체와 운반물의 충돌을 방지하며, 이송도중 이송대차의 가감속시점 또는 이송대차의 속도를 적절히 조절하여 이송도중 운반물의 흔들림을 방지하며 그리고, 운반물이 정지위치에 도달하기 전에 운반물을 내려줌으로써 작업시간도 단축하고 있다. 또한, 옥외 크레인작업에서와 같이 예기치 못한 바람의 영향을 받아 운반물이 흔들릴 경우에도 작업자의 경험에 따라 이송대차의 속도를 조절하여 어느 정도 외란의 영향을 줄일 수 있다. 따라서, 크레인 시스템의 동특성에 의존하는 진술한 제어 방법 대신에 시스템의 동특성을 정확히 모르더라도 줄길이가 변화 및 외란 등에 관계없이 전 구간에 대하여 운반물의 흔들림 및 위치를 제어할 수 있는 제어기의 도입이 요구된다. 이를 위하여 산업현장의 숙련된 작업자와의 면담을 통하여 구한 여러가지 경험을 토대로 퍼지제어방법을 설계하였다.

2.4.1 입력/출력 변수의 정의

속도경로 폐회로제어방식과 유사하게 초기 가속, 무진동제어, 및 정지위치 제어구간에 대하여 서로 다른 퍼지 법칙을 설계하였다.

(1) 초기 가속 구간

이 구간에서는 설정한 속도(\dot{x}_{s1})에 이송대차를 신속하게 도달시키기 위하여 설정속도와 현재 속도의 차인 속도오차(V_{E1})를 입력변수로 선정하였다. 즉,

$$V_{E1} = K_v(\dot{x}_{s1} - x) \quad (12)$$

위치제어구간에서는,

R_i : if (X_E is A_i and V_{E2} is B_i and θ_E is C_i) then (U_D is D_i)

와 같이 정리된다. 여기서, A_i, B_i, C_i 및 D_i 는 i 번째 제어규칙에서 입출력부 대역의 전체 집합 ($U \times V \times W \times X$)에서 정의된 각 입출력변수 ($V_{E1}, \theta_E, \theta_{DE}, X_E, V_{E2}, U_D$)들의 퍼지값을 나타내는 퍼지 변수이다. 예를 들어 “If θ_E is ZO and θ_{DE} is PB then U_D is PB”의 규칙은 흔들림각도가 0이고, 흔들림각도의 변화율이 “+” 방향으로 크다면, 이송대차를 구동하는 모터의 가속도를 “+” 방향으로 크게하라 라는 것으로 이 규칙의 물리적 의미는 다음과 같다. 흔들림각도가 0이고 운반물이 이송대차의 진행방향으로 빠르게 흔들리고 있다면 이송대차를 최고 가속시켜라. 위와 같은 구조를 가지는 퍼지제어규칙을 설정하기 위하여, 본 연구에서는 크레인작업에서 발생할 수 있는 모든 조건을 고려하여 이를 토대로 경험적인 퍼지규칙을 각 구간별로 설계하였고 전산모사와 실험을 통하여 세부 내용을 보완하였다. Table 2는 무진동제어구간에서의 흔들림각도오차 (θ_E) 및 흔들림각도의 오차 변화율 (θ_{DE})에 대한 제어출력(U_D)을 나타낸다. 또한 위치제어구간에서는 입력변수가 3 개이므로 이들의 조합이 많아지고 이에 따라 퍼지규칙도 무진동제어구간에 비하여 훨씬 많아지게 된다. 대략 95개의 퍼지규칙이 설계되었으며 이 중 $V_{E2}=PM$ 일 경우에 θ_E 와 X_E 의 변화에 대한 퍼지규칙을 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 “If V_{E2} is PM and X_E is PM and θ_E is NM then U_D is NM”이라는 제어규칙의 의미는 다음과 같다. “만약 이송대차가 최종 위치에 어느 정도 떨어진 거리에서 ($X_E=PM$) 최종 위치에 접근하는 방향으로 보통 속도로 ($V_{E2}=PM$) 진행하고 있고 운반물이 이송대차의 진행방향과 반대방향에($\theta_E=NM$) 있다면, 이송대차를 적당히 감속시켜 ($U_D=NM$) 이송대차의 속도와 흔들림을 동시에 감소시킬 수 있다.”

2.4.4 퍼지추론과 비퍼지화

입력변수의 값이 결정되고 이에 따른 퍼지규칙이 결정되면 퍼지추론(fuzzy inferencing)에 의하여 제어출력(U_D)이 결정된다. 여러 가지 퍼지추론방법 중에서 본 연구에서는 제어규칙의 수가 많은 점을 감안하여 연산추론과정이 다른 방법에 비하여

Table 2 Fuzzy control rule for anti-swing control

		θ_{DE}						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
θ_E	NB			NB	PB	PB		
	NM		NB	NM	PM	PM	PB	
	NS	NB	NM	NS	PS	ZO	PS	PM
	ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZO	NS	PM	PB	PB
	PM		NB	NM	NM	PM	PB	
	PB			NB	NB	PB		

Table 3 Fuzzy control rule for stop-position control (for $V_{E2}=PM$)

		θ_E						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
X_E	NB							
	NM	NB	NM	NS	NS			
	NS	NB	NM	NS	NS			
	ZO	NB	NM	NS	NS			
	PS	NB	NM	NS	NS			
	PM	NB	NM	NS	NS			
	PB							

비교적 간단한 sub-min⁽¹¹⁾방식을 채택하였다. Sub-min방식에 의해서 결정된 복수 개의 퍼지제어규칙에서 각 입력변수의 조합에 대한 퍼지제어 출력(U_D)과 이에 따른 소속도(membership grade, μ)가 결정되면 퍼지제어 출력값을 비퍼지화(defuzzification) 과정을 통하여 명확한(crisp) 수치로 변환시켜 주어야 하는 데 이 방법에는 최대값을 취하는 방법, 최대평균법, 및 무게중심법 등 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 가장 보편적으로 사용되는 무게중심법을 채택하였다. 퍼지규칙설계와 퍼지추론과정에 대한 보다 상세한 설명은 참고문헌(10)에 주어져 있다.

2.4.5 응답특성

속도경로 폐회로제어방식에서 사용한 것과 같은

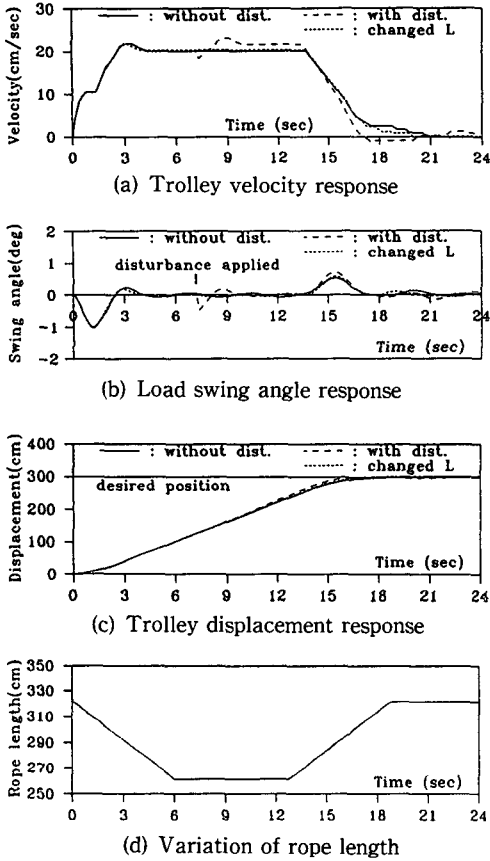


Fig. 6 Response characteristics of fuzzy controller with disturbance and with changed rope length

조건을 이용하여 퍼지제어기의 응답특성을 전산모사를 통하여 구한 결과 Fig. 6과 같은 응답특성을 얻었다. 전산모사조건에 사용된 크기변환 상수 (scaling factor)는 $K_x=0.5$, $K_v=0.5$, $K_\theta=6.5$, $K_{\theta d}=22$ 로 설정하였고 제어출력의 크기변환상수 (K_w)는 여러 가지 값에 대하여 전산모사를 반복 수행하여 가장 적절한 결과를 나타내는 값을 선정 하였으며, 초기 가속, 무진동제어 및 위치제어의 각 구간별로 5.0, 2.0 과 2.5로 설정하였다. 외부 환경이 변화하지 않을 경우, 퍼지제어 응답은 속도 경로 폐회로제어방식에 비하여 약간의 흔들림이 존재함을 알 수 있는 데 이는 이 구간에서 퍼지규칙이 완전히 조정되지 않음을 나타낸다. 외란이 존재할 경우에 퍼지제어기는 속도경로 폐회로제어방식에서와 마찬가지로 외란에 의하여 발생된 흔들림을 신속히 제거하며 또한 정지위치제어구간에서 줄길

이의 변화에 대한 영향이 속도경로 폐회로제어방식에 비하여 작음을 알 수 있다. 이는 이 구간에서 위치제어효과와 함께 무진동제어효과가 나타나기 때문이다. 이와 같이 퍼지제어기는 외부 환경변화에도 적응할 수 있는 강인한 특성을 나타낸다.

3. 크레인 실험장치

3.1 크레인 및 흔들림각도 측정장치

전 장에서 설계한 3가지 제어기의 산업현장에서의 적용 가능성을 조사하기 위하여 기존의 시설에 설치되어 있는 1톤 규모의 천정크레인 (높이 4 m, 주행거리 8 m, 횡행거리 3 m)을 개조하여 실험장치를 구성하였다.

구동장치로는 일반 크레인에 사용된 3쌍의 교류 유도전동기와 감속기어를 각각 교류서보전동기 및 하모닉 드라이버 혹은 유성기어로 교체하였다. 또한, 운반물의 흔들림을 측정하기 위하여 Fig. 7에서 보는 바와 같이 2개의 레이저센서를 이용하여 주행, 횡행방향으로의 흔들림을 동시에 측정할 수 있는 비접촉형 흔들림각도 측정장치를 고안하였다. 이 장치는 크게 기존의 로프, 2개의 레이저센서, 레이저 반사판(reflection plate)으로 구성되는데 고정된 로프의 상단으로부터 일정한 거리에 레이저센서 2개를 서로 직각방향으로 장착하고 센서주변에는 레이저 반사판이 서로 직각방향으로 부착되어 있다.

운반물이 흔들리면 x, y 각 방향으로 로프와 반사판 사이의 거리가 변화하고 이 거리에 비례하는 레이저센서 출력전압이 발생한다. 따라서, 이 출력

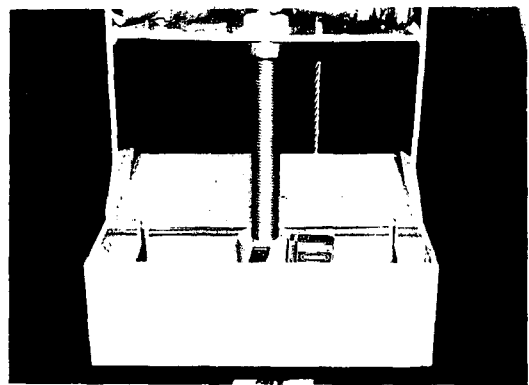


Fig. 7 Swing-angle measuring device using laser sensor

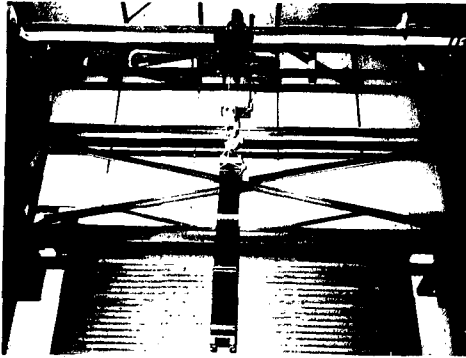


Fig. 8 Anti-swing crane installed at KAERI

전압을 삼각함수법으로 환산하면 각 방향으로의 흔들림각도를 측정할 수 있다.⁽⁷⁾ Fig. 8은 무진동 크레인의 전체 장면을 나타내며 운반물로는 가압 경수로 핵연료집합체 (pressurized water reactor fuel assembly)가 사용되었는데 실험에 사용된 핵연료 집합체는 핵연료가 들어 있지 않고 실제 핵연료 집합체와 같은 구조와 단면 (21.4 cm x 21.4 cm)을 가지며 길이는 실제 집합체의 약 반 (187.2 cm)으로 제작하였다.

3.2 제어장치

제어장치는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 각도 측정용 레이저센서 (laser sensor), 회전수 측정을 위한 엔코더 (encoder), 모터드라이버 및 이송대차와 주행대의 탈선방지를 위한 리미트스위치 등과 이들을 제어용 컴퓨터 (PC 386)로 접속하는 MRC-4 (multi-axis robot controller-4) 다축제어기, 아날로그/디지털 변환기 (A/D converter) 및 주파수/전압 변환기 (frequency to voltage converter)로 구성된다. 이들 제어장치는 원거리 (실험장치로부터 약 20 m 거리)에 있는 제어반에 설치되어 무진동 크레인 각 축을 동시에 통합적으로 제어한다.

다축제어기는 일반적으로 로봇이나 수치제어기 (NC machine) 등 자동화 기기에서 많이 사용되기 때문에 8축까지 제어할 수 있는 제어기들의 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 리미트스위치 입력단을 가지며 동시에 4축을 제어할 수 있는 MRC-4 다축제어기를 제작하여 사

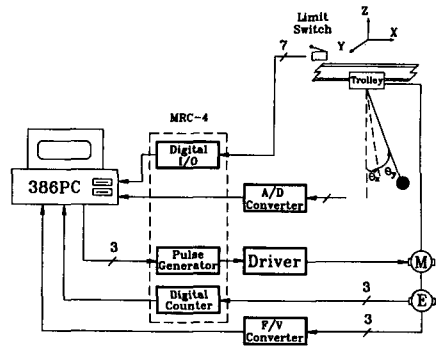


Fig. 9 Schematic diagram of control system

용하였다. 다축제어기의 펄스발생기에서 각 축의 구동에 필요한 속도를 펄스로 드라이버에 전송하면 드라이버에서 이를 다시 주파수/전압변환시켜 모터에 전압을 인가함으로써 이송대차를 구동시킨다.

이송대차가 구동됨에 따라 발생된 운반물의 흔들림은 각도측정장치에서 측정되어 아날로그/디지털 변환기를 통해 컴퓨터로 전송된다. 이송변위는 인코더 (encoder)에 의하여 측정되어 디지털카운터 (digital counter)를 통해 컴퓨터로 전송되며, 또한 이송속도는 인코더의 출력펄스를 주파수/전압변환하여 구한다.

컴퓨터는 전장에서 기술한 각 제어방식에서 설정한 지령속도의 경로 (가속도경로 계획방식의 경우 식(3), 속도경로 폐회로방식의 경우 Fig. 4의 I, II 구간 및 IV구간)를 계산하며, 또한 측정된 흔들림 각도, 이송속도 및 변위를 이용하여 각 제어기 (속도경로 폐회로방식의 경우 III 구간과 식(6), 퍼지 제어기의 경우 식(12)~(18) 및 각 퍼지 규칙)대로 지령속도의 값을 계산한다. 특히 퍼지제어기의 경우에는 계산된 지령값이 가속도의 값을 나타내므로 이를 각 샘플링구간에서 적분하여 지령속도의 값으로 변환하였다. 컴퓨터는 이와 같이 계산된 지령속도를 MRC-4 다축제어기의 펄스발생기로 전송한다.

각 방향으로의 주행, 횡행 및 견인거리를 제한하기 위하여 5개의 리미트스위치가 설치되어 있는데 이들은 다축제어기의 디지털 입력채널을 통하여 컴퓨터로 전송되어 크레인의 안전운전을 감시한다.

4. 실험 및 결과

전산모사조건과 같은 조건에 대하여 위 3가지 제

어기에 대한 응답특성을 외부 환경이 변화하지 않는 경우와 외란이 존재할 경우에 대하여 실험을 수행하여 구하였다. 외부 환경이 변화하지 않는 경우 각 제어기의 응답특성은 Fig. 10, Fig. 11 및 Fig. 12에 나타내었으며 이를 전산모사결과와 비교하기 위하여 각 경우의 전산모사 결과도 같이 나타내었다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 가속도경로 계획 방식의 실험결과 속도와 위치응답곡선은 전산모사 결과의 그것과 일치함을 알 수 있으나 흔들림각도 응답에 주기 1.133 sec, 진폭 0.216°의 작은 진동이 있음을 볼 수 있다. 이는 식 (2)의 크레인 시스템이 1차 모드의 진동 외에 다른 모드가 있음을 보여주며 운반물로 길이가 긴 핵연료집합체를 사용하였기 때문인 것으로 해석되었다.

Fig. 11의 속도경로 폐회로방식에서 실험결과와 전산모사결과는 대략 일치하나 감속구간이 시작되는 시점이 서로 다름을 알 수 있다. 이는 실험의 경우 무진동제어가 시작되는 시점(약 0.975초)에서 전술한 2차 모드의 진동으로 식(6)의 제어기에서 계산된 이송대차의 입력속도가 전산모사에서의 입력속도보다 작기 때문에 평균이송속도가 전산모사 결과에 비하여 작아지고 따라서 이송 시간이 증가되기 때문이다. Fig. 11(b)에서 보는 바와 같이 흔들림 응답곡선에는 $0.975 \leq t \leq 15.90$ sec 사이의 무

진동제어구간에서 Fig. 10에서 보는 것과 같은 운반물의 작은 진동이 없음을 알 수 있는데 이는 무진동제어기가 흔들림 각도측정장치에 의해서 측정된 흔들림 (1차 모드, 2차 모드)중 로프가 길이 방

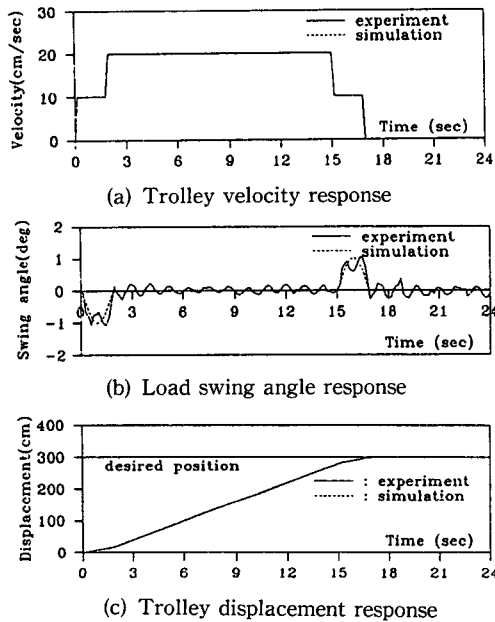


Fig. 10 Experimental result of open loop controller with simulation result

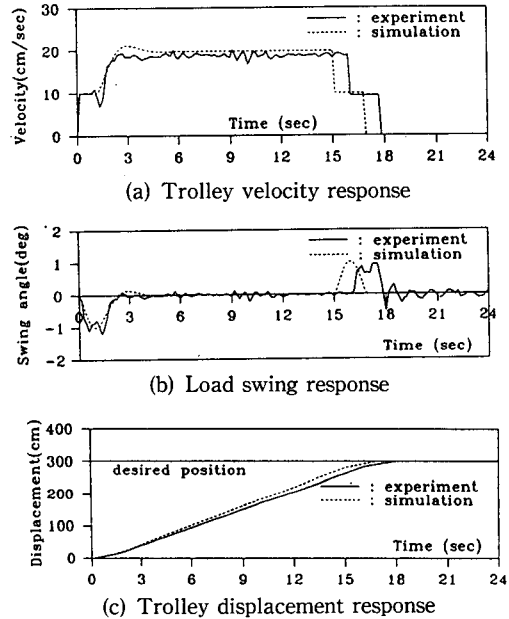


Fig. 11 Experimental result of preprogrammed controller with simulation result

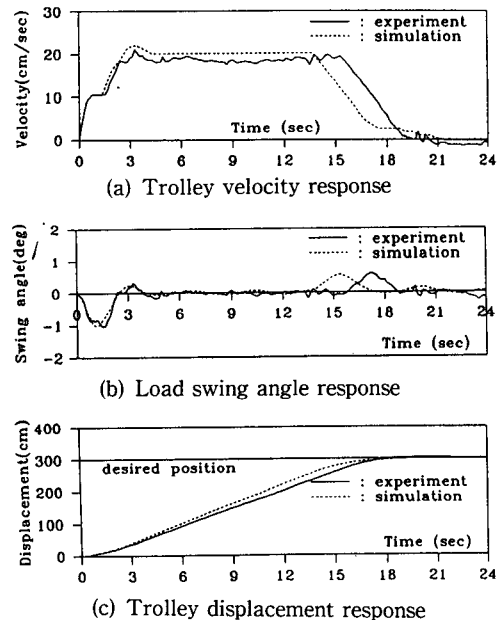


Fig. 12 Experimental result of fuzzy controller with simulation result

항의 축을 중심으로 회전함에 따라 발생하는 흔들림 (Fig. 11(b)의 흔들림각도 응답에 나타나는 고주파수의 흔들림)을 제외하고 모든 흔들림을 제거함을 나타낸다. 그러나, 2차 모드로 해석된 진동은 무진동제어구간 외에서는 여전히 존재함을 알 수 있다.

Fig. 12의 퍼지제어기의 경우, 속도경로 폐회로 방식과 마찬가지로 이송대차의 평균이속속도가 작아짐으로 이송 시간이 전산모사 결과에 비하여 길어지거나 전체적인 경향은 실험과 전산모사결과가 거의 유사하다. 실험에 의한 흔들림 응답 곡선에는 무진동제어구간은 물론 위치제어구간에서도 2차 모드에 의한 진동이 없음을 알 수 있다. 이는 위치제어구간에서도 위치제어기와 함께 무진동제어기가 작용하기 때문이다. 이와 같이 폐회로 제어기는 2차 모드에 의한 잔진동을 제거하는 우수한 특성을 나타내며 특히 외란이 존재할 때 그 특성이 더욱 우수하다.

Fig. 13은 외란이 존재할 경우, 각 제어기의 흔들림 응답특성을 나타낸다. 실험에서는 전산모사 조건에서 사용된 것과 같은 운반물에 impulse 형태의 충격을 주기가 불가능하기 때문에 대략 $t=2T_L$ 시점에 핵연료집합체를 손으로 잡았다가 놓음으로써 외란을 재현하였다. 그 결과 그림에서 보는 바와 같이 가속도경로 계획방식 (Fig. 13(a))에서는

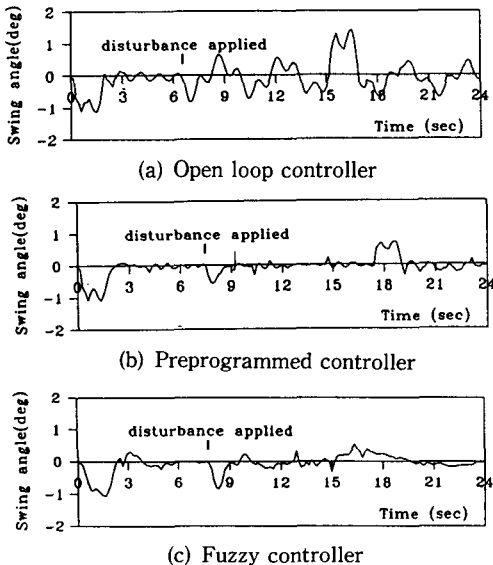


Fig. 13 Effect of disturbances on the swing angle responses of various controllers

가해진 외란이 없어지지 않고 계속 남아 있으나 속도경로 폐회로방식 (Fig. 13(b))과 퍼지제어기 (Fig. 13(c))의 경우에는 전산모사결과와 마찬가지로 외란에 의한 흔들림이 신속히 제거됨을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 가속도경로 계획방식의 문제점을 제시하였고 이와 같은 문제점을 해결할 수 있는 속도경로 폐회로방식과 퍼지제어기를 제안하였다. 크레인 시스템의 수학적 모델과 각 제어기를 이용하여 전산모사와 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 가속도경로 계획방식은 제어하지 않은 크레인에 비하여 훨씬 우수한 성능을 나타내나 외부 환경변화에 적응하지 못한다.

(2) 속도경로 폐회로방식은 무진동제어구간에서는 외부 환경변화에 강인한 특성을 나타내나 감속구간에서는 개회로제어기를 사용하기 때문에 가속도경로 계획방식과 같은 특성을 나타낸다.

(3) 퍼지제어기는 무진동제어구간과 위치제어구간에 대해서 외부 환경변화에 강인한 특성을 나타낸다.

(4) 가속도경로 계획방식은 크레인 시스템의 구조를 바꾸지 않더라도 간단히 적용할 수 있는 반면, 속도경로 폐회로방식과 퍼지제어방식은 이송대차의 위치, 속도 및 운반물의 흔들림을 실시간으로 측정하여야 하기 때문에 별도의 센서를 크레인에 부착시켜야 한다.

참고문헌

- (1) Alzinger, E. and Brozovic, V., 1983, "Brown Boveri Automation and Control System for Grab Cranes," *Brown Boveri Review*, Vol. 70, No. 9-10, pp. 351~356.
- (2) Carbon, L., 1976, "Automation of Grab Cranes," *Simens Review*, Vol. XLIII, No. 2, pp. 80~85.
- (3) Werner, J., et al, 1989, *Swing-free Movement of Simple Suspended Objects Employing Parameter Estimation*, SAND 89-2511, Sandia Natn'l Lab., Sandia AI.
- (4) Knokes, M. W., et al, 1993, "Implementation of

- Damped-Oscillation Crane Control for Existing AC Induction Motor Driven Cranes," Proc. of ANS fifth Top. Meeting on Robotics and Remote Systems, American Nuclear Society, Knoxville, TN, pp.479~485.
- (5) Ohnishi, E., et al, 1984, "Automatic Control of an Overhead Crane," '84 IFAC, No. 66.3, pp. XIV-37~XIV-42.
- (6) 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.
- (7) 윤지섭 외, 1995, "천정 크레인의 무진동/위치 제어기 개발에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제19권, 제6호, pp. 2237~2245.
- (8) 윤지섭 외, 1994, "Controller Design for the Anti-Swing Crane," 한국자동제어학술회의, Vol. 1, pp. 229~235.
- (9) 윤지섭 외, 1994, "무진동 크레인 구현을 위한 속도 경로 설계 연구," 한국정밀공학회지, 제11권, 제5호, pp. 143~152.
- (10) Yoon, J. S., et al, 1994, "Fuzzy Anti-Swing Crane," ANS '94 Winter Meeting, Washington D. C.
- (11) Mamdani, E. H., 1974, "Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant," *IEEE Proc. Control & Science*, Vol. 121, No. 12, pp. 1585~1588.