

시간지연제어기법과 무지령 입력다듬기기법을 이용한 텔레스코픽 핸들러의 진동 제어

박준영* · 장평훈†

(2000년 12월 7일 접수, 2001년 4월 26일 심사완료)

Vibration Control of Telescopic Handler Using Time Delay Control and Commandless Input Shaping Technique

Joon-Young Park and Pyung-Hun Chang

Key Words : Telescopic Handler(텔레스코픽 핸들러), Vibration Control(진동 제어), Time Delay Control(시간지연제어기법), Input Shaping Technique(입력다듬기기법)

Abstract

A telescopic handler is a kind of construction machinery for loading, carrying and unloading various cargos. A residual vibration of the boom, however, is often caused in carrying cargos to high workplace, especially in small motion and unloading operations, even when an expert of this machine handles the boom. To solve this vibrational problem, we applied TDC and newly proposed Commandless IST to the telescopic handler, and confirmed their effectiveness through experiments. These promising results show that the proposed control schemes can improve productivity, safety and ride comfort of the telescopic handler.

1. 서론

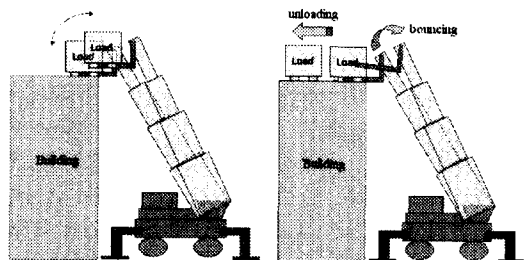
텔레스코픽 핸들러(telescopic handler : 핸들러)(Fig. 1)는 항만, 공항이나 공사 현장 등에서 각종 화물 및 건축용 자재를 이송 및 적재하기 위해 개발된 건설 중장비로서, 산업 현장에서의 필요성과 경제적인 면에서의 장점으로 인해 그 사용 비중이 앞으로 더욱 증가할 것으로 기대되어진다.

산업 현장에서 핸들러의 생산성을 높이기 위해서는 핸들러 자체가 가지는 높은 인양 능력뿐만 아니라, 붐(boom)을 진동 없이 빠르게 조종할 수 있는 능력이 조종자에게 요구되어진다. 하지만, 숙련된 조종자라 할지라도 높은 곳에 위치한 작업 현장에 부하를 운반하기 위하여, 특히 다음과 같은 작업을 수행하고자 할 경우에는 붐 끝단이 크게 흔들리는 잔류 진동이 유발되기 쉽다.

(1) 높이맞추기 작업(small motion operation) : 부



Fig. 1 Telescopic Handler



(a) Small motion operation (b) Unloading operation
Fig. 2 Operations that often cause a residual vibration

* 회원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과
† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
Email : phchang@mecha.kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3226 FAX : (042)869-5226

하를 언로딩(unloading)하기 위해 앞서 포크의 높이를 공사 현장의 높이에 맞추기 위하여 붐을 3~4 도 정도의 작은 각도만큼 들어올리거나 내리는 작업 (Fig. 2(a))

(2) 언로딩 작업(unloading operation) : 높은 곳에 위치한 공사현장에 벽돌과 같은 부하를 내려두는 작업 (Fig. 2(b))

이와 같은 작업에 대하여 붐을 진동 없이 조종하기 어려운 이유는 길게 뻗어 있는 붐으로 인하여 관성 모멘트가 크고, 유압 회로의 비선형성 등으로 인하여 조이스틱의 움직임에 대해 붐이 선형적으로 움직이지 않기 때문이다. 또한, 순간적인 하중의 감소로 인해 진동이 발생하는 언로딩의 경우에는 조종자가 진동 제어를 위해 필요한 언로딩 시점을 뒤늦게 인지하는 문제점을 안고 있다.

이러한 잔류 진동은 생산성의 저하, 작업자의 승차감의 저하, 작업 현장의 파손 및 안전사고의 발생을 가져올 수 있다. 따라서, 핸들러의 이러한 진동을 자동적으로 제어해줄 수 있는 제어 기법에 대한 연구가 절실히 요구되어진다. 그러나, 지금까지 굴삭기(Excavator),⁽¹⁾ 크레인(Crane)⁽²⁾ 등과 같은 건설 중장비의 진동 제어에 대한 연구는 많이 수행되어 온 반면, 핸들러에 대한 연구는 거의 수행되어 오지 않은 실정이다.

이와 같은 핸들러에 대한 연구는 제어공학의 관점에서 볼 때 상당히 해결하기 어려운 과제이다. 왜냐하면 핸들러 자체가 가지고 있는 유압 회로의 복잡성 및 비선형성, 그리고 전체 시스템이 갖는 상당한 양의 불확실성 등으로 인하여 정확한 모델링이 어렵고, 실령 모델링이 가능하더라도 모델식에 들어가는 각종 파라미터(parameter) 값들을 정확히 알기 어렵기 때문이다. 또한, 경제적인 면에서도 많은 계산량을 요구하는 그 모델식의 복잡함으로 인해 매우 빠른 처리속도를 가진 고가격, 고성능의 프로세서가 요구되어진다.

시간지연제어기법(Time Delay Control : TDC)과 입력다듬기기법(Input Shaping Technique : IST)은 그 기법의 특성상 상기한 제어상의 문제점을 잘 해결할 수 있을 것으로 기대되어진다. TDC⁽³⁾는 다른 비선형 기법에서 흔히 요구되는 비선형 동역학 모델의 실시간 계산을 필요로 하지 않기 때문에 매우 단순하고 효율적인 구조를 가지고 있고, 정확한 모델식을 모르더라도 대상 시스템의 차수와 관성행렬의 변화범위만을 알면 쉽게 적용이 가능하다. 또한, TDC는 외란과 매개변수의 변동에 대해서 탁월한 강인성을 가지며, 로봇 매니플레이터,⁽⁴⁾ 공압 시스템,⁽⁵⁾ 유압 굴삭기⁽⁶⁾ 등에 적용되어 좋은

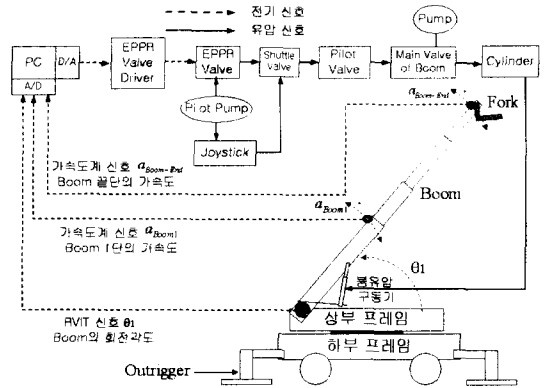


Fig. 3 Overall Structure of Control System

제어 성능을 보여 주었다. IST^(7,8)는 시스템의 임펄스 응답에 기초한 피드포워드(feedforward) 진동 제어 기법으로, 시스템의 모델을 요구하지 않으며 단지 진동의 정보만을 요구한다. 이와 같은 특징으로 미루어 볼 때, 이 두 제어기법은 정확한 모델식과 파라미터를 구하기 어려운 비선형 시스템인 핸들러의 제어에 적합할 것으로 고려된다. 그러므로, 본 연구에서는 TDC와 IST의 개념에 기초하여 새로이 제안한 무지령 입력다듬기기법(Commandless Input Shaping Technique : Commandless IST)을 각각 핸들러의 높이맞추기 작업과 언로딩 작업에 적용하여 붐 끝단에서 발생하는 잔류 진동의 양을 감소시키고자 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 다음 장에서는 먼저 전체적인 제어 시스템의 구성에 대해 설명하고, 실험을 통해 핸들러의 특성을 분석한다. 그리고, 본 연구에서 적용할 제어 방법의 개요를 설명한다. 3 장에서는 TDC 설계를 위해 필요한 핸들러의 모델을 구한다. 4 장에서는 높이맞추기 작업의 진동 제어를 위하여 TDC를 적용하고, 그 실험 결과를 보인다. 5 장에서는 언로딩 작업의 진동 제어를 위하여 IST의 개념에 기초한 새로운 진동 제어 기법을 제안하고, 실험 결과를 통해 그 효용성을 보이고 있다. 끝으로 6 장에서는 결론을 내린다.

2. 제어의 개요

2.1 전체적인 제어 시스템의 구성

핸들러의 진동 제어를 위한 전체적인 시스템의 구성은 Fig. 3과 같다. 실험에 사용되어진 핸들러는 최대 인양 높이 20m, 최대 인양 능력 4톤의 사양을 가진다. 그림에서 볼 수 있듯이 핸들러는 크게 4단으로 구성된 붐, 포크, 유압 구동기들, 상

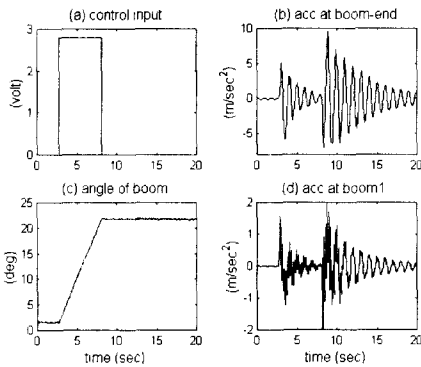


Fig. 4 Experimental results for analysis of main cause of residual vibration

•하부 프레임 그리고 이 프레임들을 지면에 고정시키는 아웃트리거(outtrigger)로 구성되어있다. 세 개의 유압 구동기는 각각 붐의 상하 움직임, 붐의 신장·신축 움직임(tele motion), 포크의 상하 움직임을 담당한다. 그리고, 상부 프레임은 선회 모터(swing motor)에 의해 선회축(swing axis)에 대하여 좌우로 회전하는 움직임이 가능하다.

사용한 센서로는 붐의 회전각 θ 의 측정을 위하여 회전 가변 인덕턴스 변환기(Rotary Variable Inductance Transducer)를 장착하였고, 붐 끝단과 붐 1 단의 진동을 측정하기 위하여 그림과 같은 위치에 각각 가속도계를 장착하였다.

2.2 핸들러의 특성

Fig. 4는 부하 없이 붐을 최대 신장한 상태에서 (a)와 같은 입력을 주었을 때 붐 끝단, 유압 실린더와 붐 1 단에서 발생하는 진동을 측정한 실험 결과이다. 본 절에서는 이 실험 결과의 분석을 통해 붐 끝단의 진동 특성, 유압의 압축성이 진동에 미치는 영향의 정도와 붐의 유연성(flexibility)의 정도를 살펴보고자 한다.

먼저 Fig. 4(b)의 결과를 살펴보면, 붐 끝단에 크게 나타나는 잔류 진동을 관찰할 수 있다. 이 붐 끝단의 진동을 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform : FFT)을 사용하여 그 주파수 성분을 분석해 보면, 핸들러는 약 1Hz의 고유 진동수(natural frequency)를 가진다는 것을 알 수 있다.

다음으로 유압 실린더에 일반적으로 존재하는 유압의 압축성이 이 진동에 주는 영향을 고려하여 보자. 만약 유압의 압축성의 영향에 의해 붐 실린더의 피스톤에 진동이 발생했다면, 이 진동은 붐의 회전각 θ 에도 그대로 반영되어야 할 것이다. 하지만, Fig. 4(c)에서 볼 수 있듯이 회전각 θ 에는 진동이 거의 관찰되지 않는다. 따라서, 이 결과로

부터 유압의 압축성은 붐의 잔류 진동에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

한편, Fig. 4(b)와 (d)의 결과로부터 붐의 유연성의 정도를 알 수 있다. 만약 붐이 매우 유연(flexible)하다면, 붐 끝단의 진동은 붐 1 단의 진동과 다른 주파수 혹은 다른 위상차를 보여야 할 것이다. 하지만, 실험 결과 이 두 진동의 주파수와 위상차가 서로 거의 같다는 점은 붐의 유연성이 무시할 만하다는 것을 보여준다. 이와 같은 결과는 붐 자체를 강성(stiffness)이 매우 높은 재질로 제작한 것에 주로 기인한 것으로 보여진다.

2.3 Control Strategy

본 연구의 대상 작업인 높이맞추기 작업과 언로딩 작업은 그 작업의 특성이 서로 다르기 때문에, 적용할 제어 기법도 다를 수 밖에 없다. 본 절에서는 본 연구에서 각 작업에 적용하고자 하는 제어 기법에 대하여 간략하게 소개하기로 한다.

(1) 높이맞추기 작업 : 제어에 의해 이 작업을 수행할 경우, 높이맞추기 작업에 해당하는 주어진 입력 궤적을 잘 추종해야 하는 동시에 입력 궤적이 끝나는 시점에서 발생하는 잔류 진동을 또한 잘 억제해주어야 한다. 그러므로, 이와 같은 목적을 위해서는 입력 궤적을 잘 추종하기 위한 제어 기법과 입력 궤적이 끝나는 시점에서 잔류 진동을 억제할 진동 제어 기법의 사용이 고려될 수 있다. 하지만, 이와 같이 한 작업을 수행하기 위하여 두 가지 제어 기법을 사용하는 것은 제어기의 구현의 복잡성 및 게인 튜닝(Tuning)면을 고려해볼 때 그다지 바람직한 방법은 아니라고 할 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 애당초 핸들러의 고유 진동수를 자극하지 않도록 붐을 구동한다는 데 착안하였다. 상술하면, 먼저 입력 궤적 자체를 핸들러의 고유 진동수를 자극하지 않도록 설계한 다음, 이 입력 궤적을 붐이 잘 추종하도록 제환(feedback) 제어를 하였다. 이 때, 제어기로는 비선형 시스템의 제어에서 그 탁월한 성능이 입증된 TDC를 사용하였다.

(2) 언로딩 작업 : 언로딩 작업에서의 진동은 포크 단에 놓여있던 부하가 갑자기 제거됨으로 인해 붐이 크게 튀어 올라 진동하는 양상을 보인다. 높이맞추기 작업의 경우와는 달리, 이 경우에는 진동 제어를 위해 붐의 유압 구동기를 사용할 수 있다. 본 연구에서는 언로딩에 의해 발생하는 진동을 제거하기 위하여 IST의 개념에 기초하여 Commandless IST를 새로이 제안하였다. Commandless IST의 개념을 간략하게 소개하면, 붐의 유압 구동기를 사용하여 언로딩 시 발생하는 진동과 역상을

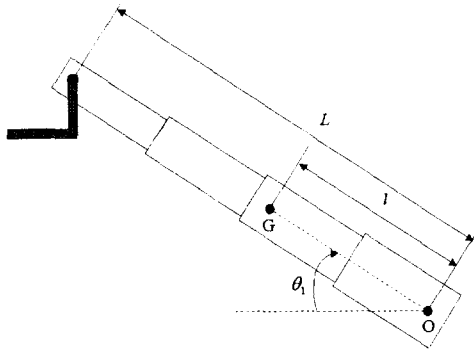


Fig. 5 Manipulator of telescopic handler

가지는 진동을 발생시키도록 제어함으로써 결과적으로 원래의 진동을 상쇄시키는 기법이다.

3. 핸들러의 모델링

본 장에서는 높이맞추기 작업에 적용할 제어 기법인 TDC의 설계를 위하여 핸들러의 모델을 구하고자 한다. 이를 위하여 먼저 핸들러를 강체(Manipulator)와 유압 회로의 두 부분으로 나누어 각각 모델링한다. 그리고, 이렇게 구해진 이 두 모델을 결합하여 전체적인 시스템의 모델을 구한다.

3.1 강체의 모델링

본 연구의 대상이 되는 높이맞추기 작업의 경우에는 텔레(tele motion), 포크, 선회 동작은 하지 않고, 붐 길이가 일정한 상태에서 붐 동작만을 행한다. 따라서, 모델링에 있어서 텔레, 포크, 스윙 부분은 고려하지 않았고, 붐의 길이 L 은 일정하다고 가정한다. 또한, 2.2 절의 분석으로부터 붐의 유연성은 무시될 수 있으므로, 붐을 강체로 가정하였다. Fig. 5는 이와 같은 가정 하에서 모델링될 강체 부분을 나타낸 것이다.

전술한 가정 하에서 강체의 모델은 1 축만을 가지는 매우 간단한 시스템으로 표현되어지므로, 뉴턴-오일러 동적 공식화(Newton-Euler dynamic formulation)에 의해 다음과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$\tau = (ml^2 + I)\ddot{\theta}_1 + mgl \cos \theta_1 \quad (1)$$

여기서, m 은 질량, I 는 무게 중심의 관성모멘트, θ_1 은 회전각, l 은 회전축에서 무게 중심까지의 거리, g 는 중력 가속도이다.

3.2 유압회로의 모델링

다음으로 유압 구동기에 대하여 모델링을 한다. 높이맞추기 작업에서는 붐의 유압 구동기만 동작

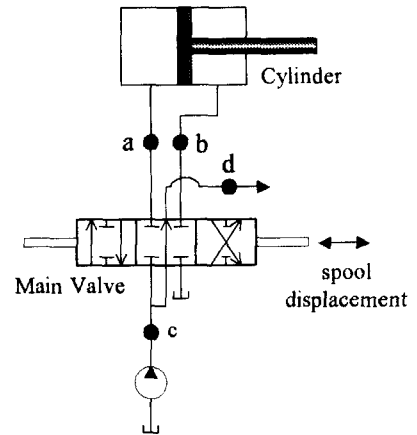


Fig. 6 Detailed structure of hydraulic circuit for boom

하므로, 붐의 유압회로만을 모델링하였다. 그리고, 2.2 절의 결과로부터 유압의 압축성을 무시할 수 있다고 가정한다. 붐의 유압회로는 Fig. 6과 같다.

Fig. 6의 접합점(Junction) a, b, c에 대해 유체의 연속 방정식(continuity equation of flow)을 적용하면, 각각 다음과 같은 식이 구해진다.

$$\begin{aligned} ZQ_{ap} - (1-Z)Q_{an} &= A_a U & \text{at Junction a} \\ ZQ_{bp} - (1-Z)Q_{bn} &= A_b U & \text{at Junction b} \end{aligned} \quad (2)$$

$$ZQ_{ap} + (1-Z)Q_{bn} + Q_{dv} = Q_s \quad \text{at Junction c}$$

여기서 A_a 와 A_b 는 피스톤의 양단의 면적, U 는 피스톤의 속도, Q_s 는 펌프로부터의 유량, Q_{ap} 와 Q_{bn} 은 실린더로 흘러 들어가는 유량, Q_{an} 와 Q_{bp} 는 탱크로 들어가는 유량, Q_{dv} 는 접합점 d로 바이패스(bypass)되는 유량이다. 그리고, Z 의 의미는 다음과 같다: 스톨(spool)이 양의 방향에 위치해 있으면 $Z=1$ 이고, 음의 방향에 위치해 있으면 $Z=0$ 이다. 그리고, 각각의 유량(flow)들은 다음과 같이 결정되어진다.

$$\begin{aligned} Q_{ap} &= c_q A_{ap}(u) \sqrt{P_c - P_a}, & Q_{an} &= c_q A_{an}(u) \sqrt{P_a - P_t} \\ Q_{bp} &= c_q A_{bp}(u) \sqrt{P_b - P_t}, & Q_{bn} &= c_q A_{bn}(u) \sqrt{P_c - P_b} \\ Q_{dv} &= c_q A_{dv}(u) \sqrt{P_c - P_d} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 P_a, P_b, P_c, P_d 는 각각 접합점 a, b, c, d에서의 압력을 나타내고, P_t 는 탱크의 압력을 뜻한다. 그리고, c_q 는 유량 계수, u 는 스톨의 변위이고, A_i 는 각각의 Q_i 가 흐르는 밸브의 면적이다.

식 (3)을 식 (2)에 대입한 후 결과 방정식들을 테일러 급수(Taylor series)로 전개하면, 다음과 같은 선형화된 관계식이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} K_{pa_a} & 0 & K_{pc_a} \\ 0 & K_{pb_b} & K_{pc_b} \\ K_{pa_c} & K_{pb_c} & K_{pc_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_a \\ P_b \\ P_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_a U - K_{u_a} u - Q_{rm_a} \\ A_b U - K_{u_b} u - Q_{rm_b} \\ Q_s - K_{u_c} u - K_{pd_c} P_d - Q_{rm_c} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서,

$$\begin{aligned} K_{pa_a} &= \frac{\partial}{\partial P_a} (ZQ_{ap} - (1-Z)Q_m)_{o,p}, & K_{pc_a} &= \frac{\partial}{\partial P_c} (ZQ_{ap})_{o,p}, \\ K_{pb_b} &= \frac{\partial}{\partial P_b} (ZQ_{bp} - (1-Z)Q_m)_{o,p}, & K_{pc_b} &= -\frac{\partial}{\partial P_c} ((1-Z)Q_m)_{o,p}, \\ K_{pa_c} &= \frac{\partial}{\partial P_a} (ZQ_{ap})_{o,p}, & K_{pb_c} &= \frac{\partial}{\partial P_b} ((1-Z)Q_m)_{o,p}, \\ K_{pc_c} &= \frac{\partial}{\partial P_c} (ZQ_{ap} + (1-Z)Q_m + Q_{bn})_{o,p}, & K_{pd_c} &= \frac{\partial}{\partial P_d} (ZQ_{bn})_{o,p}, \\ K_{u_a} &= \frac{\partial}{\partial u} (ZQ_{ap} - (1-Z)Q_m)_{o,p}, & K_{u_b} &= \frac{\partial}{\partial u} (ZQ_{bp} - (1-Z)Q_m)_{o,p}, \\ K_{u_c} &= \frac{\partial}{\partial u} (ZQ_{ap} + (1-Z)Q_m + Q_{bn})_{o,p}, \end{aligned}$$

이고, o.p.는 작업조건(operating conditions)에서의 압력과 스펙의 변위를 뜻한다. 그리고, Q_{rm_a} , Q_{rm_b} 와 Q_{rm_c} 는 테일러 급수의 고차 항들이다.

그리고, 피스톤에 가해지는 힘 F 는 다음과 같이 표현되어진다.

$$F = A_a P_a - A_b P_b \quad (5)$$

그러므로, 식 (4)로부터 P_a , P_b 를 구한 후 식 (5)에 대입하면, 최종적으로 봄 유압 회로의 모델식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F = K_u u + K_U U + Q_{etc} = K_u u + K_U T_r \dot{\theta}_1 + Q_{etc} \quad (6)$$

여기서 K_u 와 K_U 는 u 와 U 의 계수이고, Q_{etc} 는 u 또는 U 를 포함하지 않는 모든 항을 가리킨다. 그리고, T_r 은 피스톤의 속력과 각속도 사이의 변환식으로, 즉 $U/\dot{\theta}_1$ 또는 τ/F 을 나타낸다.

3.3 전체 시스템의 모델링

이제 강체의 모델과 유압회로의 모델을 결합하여 전체 시스템의 모델을 구한다. 강체의 동역학 식인 식 (1)에서 토크 τ 를 힘 F 로 변환하면,

$$F = M_f \ddot{\theta}_1 + H_f \quad (7)$$

여기서 $M_f = T_r^{-1} (m l^2 + I)$, $H_f = T_r^{-1} m g l \cos \theta_1$

식 (6)을 식 (7)에 대입하여 정리하면, 최종적으로 다음과 같은 핸들러의 전체 모델이 구해진다.

$$u = M_x \ddot{\theta}_1 + H_x \quad (8)$$

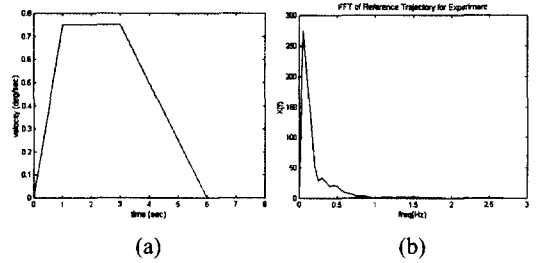


Fig. 7 (a) Trapezoid trajectory used for TDC experiment (b) Its FFT result

여기서 $M_x = K_u^{-1} M_f$, $H_x = K_u^{-1} (H_f - K_U T_r \dot{\theta}_1 - Q_{etc})$.

지금까지의 모델링 과정은 식 (8)의 비선형 항 M_x , H_x 가 굉장히 복잡한 항들로 구성되어 있음을 보여준다. 그리고, 실제적으로 이 항들을 이루는 많은 파라미터들의 정확한 값을 모두 알기가 어려운 실정이다. 이러한 점을 고려하였을 때, TDC가 이 비선형 시스템의 제어에 적합한 제어 기법으로 고려되어진다.

4. 시간지연제어기법을 이용한

높이맞추기 작업의 진동 제어

4.1 기준 궤적의 설계

2.3 절에서 설명한 바와 같이 본 연구에서는 높이맞추기 작업에서 진동을 유발하지 않기 위하여 시스템의 고유진동수를 거의 자극시키지 않는 궤적을 기준 궤적으로 사용한다. 궤적을 설계하는 방법에는 사다리꼴(trapezoid)궤적, 사인(sinusoidal) 궤적, 다항식(polynomial) 궤적 등의 여러 가지 방법이 있으나, 본 연구에서는 계산과 적용이 비교적 쉬운 사다리꼴 형태의 속도 궤적을 사용하였다.

사다리꼴 궤적을 FFT 하였을 때 얻어지는 주파수 성분의 크기는 속도의 최대값과 가·감속구간의 기울기를 어떻게 정하느냐에 따라 결정되며, 특히 가·감속구간의 기울기가 완만해질수록 고주파 영역의 크기가 줄어드는 경향이 있다. 이와 같은 점을 고려하면서 다음과 같은 조건을 만족하도록 튜닝을 통해 설계 파라미터인 속도의 최대값과 가·감속구간의 기울기를 결정하였다.

(1) 주어진 최종 시간에 원하는 각도에 도달해야 한다.

(2) 설계된 궤적을 FFT 하였을 때 핸들러의 고유진동수에 해당하는 주파수 성분의 크기가 작아야 한다.

Fig. 7(a)는 4.3 절의 TDC 실험에 사용되어진 속

도의 기준 궤적으로, 위의 (1), (2)항에 기초하여 설계하였다. 초기에 봄이 빨리 최고 속도에 도달할 수 있도록 가속구간의 기울기는 큰 값으로 결정하였고, FFT 하였을 때 고유 진동수 성분을 자극하지 않도록 감속구간의 기울기는 상대적으로 작은 값으로 튜닝하였다. Fig. 7(b)의 FFT 결과로부터 이 궤적은 약 1Hz의 핸들러 고유 진동수에 해당되는 성분이 매우 작아 고유 진동수를 거의 자극시키지 않는 궤적임을 알 수 있다. 그러므로, 봄 끝단 이 이 궤적을 잘 추종하도록 제어된다면, 진동은 거의 유발되지 않을 것이다.

4.2 TDC의 설계⁽³⁾

본 절에서는 핸들러에 대하여 TDC를 설계하도록 한다. 3장에서 구한 핸들러의 모델식을 다시 기술하여 보면, 다음의 식 (9)와 같다.

$$M_x \ddot{\theta}_1 + H_x = u \tag{9}$$

여기서 $M_x = K_u^{-1} M_f$, $H_x = K_u^{-1} (H_f - K_D T_r \dot{\theta}_1 - Q_{ec})$ 이다. 식 (9)에서 TDC를 설계하기 위해 비선형항들을 분리하면, 식 (10)과 같이 나타내질 수 있다.

$$\bar{M} \ddot{\theta}_1 + H = u \tag{10}$$

여기서 \bar{M} 는 M_x 의 알려진 범위를 나타내는 상수 행렬이고, $H = (M_x - \bar{M}) \ddot{\theta}_1 + H_x$ 이다.

계산토크제어(Computed torque control approach)에 의하여 제어 입력을 계산하여 보면, 다음과 같이 구해진다.

$$u = \bar{M} (\ddot{\theta}_d + K_p \dot{e} + K_r e) + H \tag{11}$$

여기서, $e = \theta_d - \theta_1$ 이며, K_p , K_D 는 각각 비례(Proportional), 미분 이득(Derivative gain)이다. 식 (11)을 식 (10)에 대입하면, 폐루프 시스템은 다음과 같은 오차 동역학을 가지게 된다.

$$\ddot{e} + K_D \dot{e} + K_p e = 0 \tag{12}$$

이와 같은 제어 알고리즘의 적용은 불확실성 H 의 계산을 필요로 한다. TDC는 이를 위하여 다음과 같은 시간지연 추정방법을 사용하고 있다. 만약 시간 지연 L 이 충분히 작은 값이고 시스템이 불연속적으로 변하지 않는다면, $H(t)$ 는 $H(t-L)$ 로 근사화되어질 수 있다. 따라서, 식 (10)을 이용하여 H 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$H(t) \cong H(t-L) = u(t-L) - \bar{M} \ddot{\theta}_1(t-L) \tag{13}$$

TDC는 상기한 추정 방법에 의해 복잡한 비선

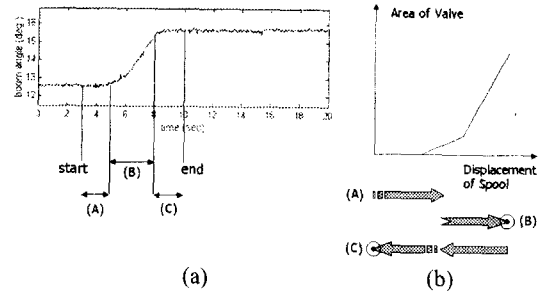


Fig. 8 (a) Rotational angle of boom and division according to way of expert's operation (b) Motion of joystick by expert in consideration for characteristics of spool curve

형항들을 포함한 불확실성 $H(t)$ 를 추정하므로 정확한 모델식이나 파라미터 값을 필요로 하지 않는다. 식 (13)을 식 (11)에 대입하면, 핸들러에 대한 TDC의 제어 입력이 최종적으로 다음과 같이 구해진다.

$$u(t) = u(t-L) + \bar{M} (\ddot{\theta}_d - \ddot{\theta}_1(t-L) + K_p \dot{e} + K_r e) \tag{14}$$

4.3 실험 결과

TDC 결과와의 비교를 위해서는, 우선 숙련자가 작업을 행하는 방식에 대해 이해를 할 필요가 있다. Fig. 8은 이를 위해 실제로 숙련자가 실험한 결과를 분석한 것으로, 숙련자가 높이맞추기 작업을 행하였을 때 봄의 회전각과 조이스틱의 움직임을 묘사한 것이다. 숙련자의 조종 방식은 이 그림에 표현된 것처럼 크게 (A), (B), (C)의 세 구간으로 나누어질 수 있다. 비숙련자와는 달리, 숙련자의 경우에는 실제 봄을 움직이는 구간 (B)의 전후로 유압 구동기의 스톱 곡선에 존재하는 데드밴드(deadband)를 고려하여 조이스틱을 조심스럽게 조종하는 구간 (A), (C)가 존재한다.

실험을 위한 높이맞추기 작업의 조건은 봄을 최대 신장한 상태에서 400kg의 부하를 60도 부근에서 3도의 각도를 들어올리거나 내리는 작업으로 정하였다. 그리고, 실험에 사용되어진 TDC의 속도 궤적은 Fig. 7(a)와 같다. 위치 기준 궤적과 가속도 기준 궤적은 이 속도 궤적을 각각 적분, 미분한 값을 사용하였다. 앞서 4.1 절을 통해 설명한 것처럼, 이 궤적은 핸들러의 고유 진동수를 자극하는 성분이 매우 작은 궤적이다. 그리고, 센서의 노이즈 영향을 줄이기 위하여 저주파통과 필터(Low-pass filter)를 사용하였고, 더 좋은 제어 성능을 얻기 위해 TDC와 함께 데드밴드를 보상해주는 피드포워드 기법⁽⁶⁾을 사용하였다.

Fig. 9는 데드밴드를 고려한 조정에 숙련되지

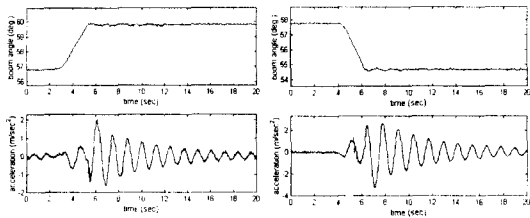


Fig. 9 Experimental result of small motion operation executed by a novice

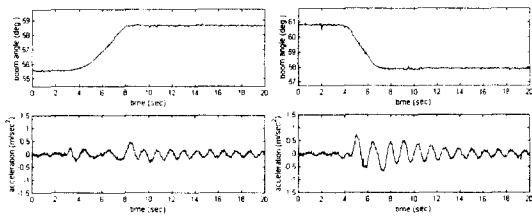


Fig. 10 Experimental result of small motion operation executed by an expert

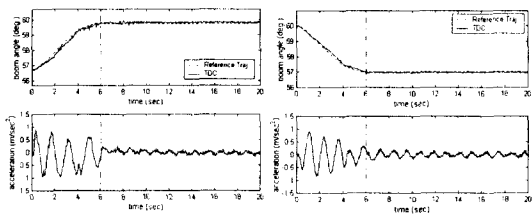
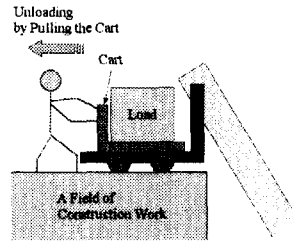
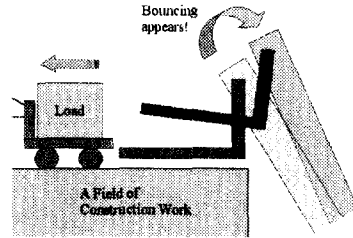


Fig. 11 Experimental result of small motion operation executed by TDC

못한 작업자가 작업했을 때의 결과로서, 큰 진동이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 이와 같은 진동은 숙련된 작업자도 실수를 할 경우에 발생할 수 있다. Fig. 10은 숙련된 작업자가 작업했을 때의 결과로, 이 경우 육안으로 관찰하면 진동이 거의 나타나지 않는다. 이와 같은 성능을 얻기 위해서 숙련자에게 필요한 최소 작업 시간은 Boom-up의 경우 8 초, Boom-down의 경우 7 초 정도로서, (A), (C) 구간에 각각 2 초, (B) 구간에 3~4 초 정도 소요되었다. Fig. 11은 TDC에 의한 실험 결과로, 설계된 기준 궤적을 잘 추종함으로써 진동이 거의 발생하지 않는 응답을 보이며 숙련자보다 더 좋은 응답을 얻을 수 있었다. 또한, 이와 같은 성능을 얻기 위한 TDC의 최소 작업 시간은 Boom-up, Boom-down 모두 6 초로서, 이는 생산성 측면에서 보더라도 숙련자의 응답보다 더 좋은 결과임을 알 수 있다. 여기서, Fig. 10과 Fig. 11을 살펴보면, 잔류 진동이 발생하기 이전에 붐이 실제로 이동하는 구간에서 발생하는 가속도는 TDC의 경우가 숙련된 작업자의 경우에 비해 더 큰 것을 관찰할 수



(a) Before Unloading



(b) After Unloading

Fig. 12 Unloading Operation

있다. 이는 TDC의 경우 Deadband 보상기법을 통해 Deadband를 보상하여주므로 숙련자와는 달리 정지상태로 있던 붐을 곧바로 구동할 수 있기 때문에 나타나는 결과로서, 실제 실험 수행 시에 이 정도 크기의 붐 이동 구간의 가속도는 높이맞추기 작업을 수행하는 데 있어서 별다른 영향을 주지 않았다.

5. 무지령 입력다듬기기법을 이용한 언로딩 작업의 진동 제어

5.1 무지령 입력다듬기기법(Commandless IST)

이 절에서는 IST^(7,8)의 개념을 토대로 하여 언로딩 작업 시 발생하는 진동을 억제할 수 있는 새로운 기법을 제안한다.

먼저 본 연구의 목표의 하나인 언로딩 작업에 의한 진동을 고려하여 보자. Fig. 12는 공사현장에서 작업자에 의해 이루어지는 언로딩 작업을 나타낸 것이다. 이 언로딩 작업을 살펴보면, 작업자에 의해 부하가 실린 짐차(Cart)가 당겨지면서 포크에 걸리는 하중이 순간적으로 줄어들게 된다. 이와 같은 하중의 순간적 감소는 마치 일종의 임펄스와 같은 효과를 붐에 주게 되어 진동이 발생하게 된다. Fig. 13은 붐을 최대 신장한 채 60도의 각도에서 1.5 ton의 부하를 3초의 순간에 언로딩했을 때 붐 끝단 가속도의 실제 실험 결과이다. 이 실험 결과를 보더라도 언로딩에 의한 진동은 일종의 임펄스 응답과 비슷한 응답을 보임을 확인할 수 있다.

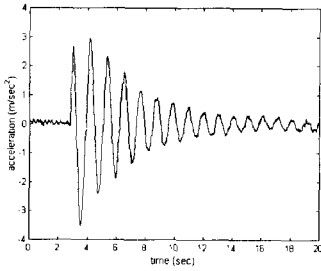


Fig. 13 Residual vibration at the end of the boom by unloading-only operation

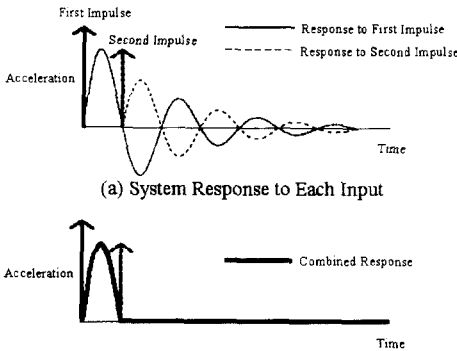


Fig. 14 Concept of IST

주지하다시피, IST는 Fig. 14와 같이 연속된 임펄스(Impulse)가 시스템에 가해졌을 때 각각의 임펄스 응답이 서로 중첩되어 잔류진동이 서로 상쇄되는 현상을 이용하는 제어 기법이다. 이 기법은 명령 입력에 의해 가진되는 잔류 진동의 제거에 사용되어지며, 실제 적용 시에는 설계된 임펄스열(Impulse sequence)을 주어진 명령 입력과 컨벌루션(convolution) 적분하여 시스템의 기준 입력으로 준다. 하지만, 전술한 언로딩 작업에 의해 발생하는 진동은 명령 입력에 의해 가진되는 진동이 아니라, 일종의 외란에 의해 가진되는 진동이기 때문에 IST가 적용될 수 없다.

따라서, 본 연구에서는 언로딩과 같은 유형의 외란에 의한 진동을 제거하기 위하여 IST와 같이 임펄스 응답에 기초한 새로운 진동 제어 기법 Commandless IST를 다음과 같이 제안하고자 한다. Fig. 15는 Commandless IST의 개념을 그림으로 나타낸 것이다. 첫 번째 임펄스(실선 화살표)에 의해 가는 실선과 같은 진동이 발생되었다고 하자. 이때 첫 번째 임펄스가 가해지는 순간을 포착하여 그림과 같이 같은 크기의 두 번째 임펄스(점선 화살표)를 역방향으로 가하면, 이 임펄스에 의해서 점선과 같은 진동이 발생할 것이다. 두 임펄스에 대한 시스템의 전체 응답은 이 두 응답을 중첩한

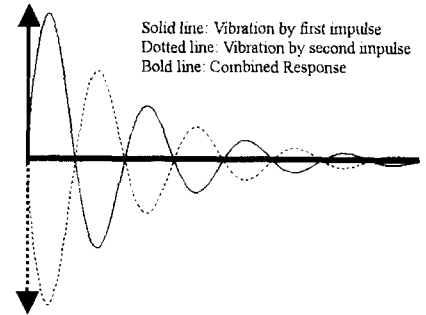


Fig. 15 Concept of Commandless IST

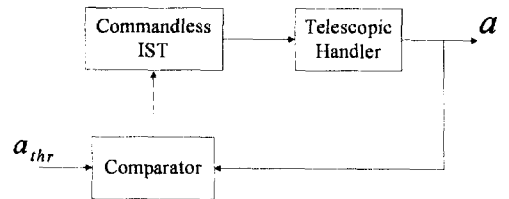


Fig. 16 Block diagram of Commandless IST

것과 같으므로, 결과적으로 굵은 실선과 같은 응답을 얻게 되어 첫 번째의 임펄스에 의해 유발된 진동은 상쇄되게 된다. 그러므로, Commandless IST의 제어 법칙은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t < T \\ -A\delta(t-T) & t \geq T \end{cases} \quad (15)$$

여기서, T 는 첫 번째 임펄스가 가해지는 순간이고, A 는 두 번째 임펄스의 크기로 첫 번째 임펄스의 크기와 같은 값을 주어야 한다. 이와 같은 Commandless IST의 개념을 블록선도로 나타내면 Fig. 16과 같다. 이 그림에서 콤퍼레이터(Comparator)는 첫 번째 임펄스가 가해지는 순간 T 를 포착하여 제어기에 알려주기 위한 것으로, 실제 구현 시에는 측정된 진동의 크기 a 가 일정 한계값(Threshold) a_{thr} 을 넘어서는 순간을 첫 번째 임펄스가 가해지는 순간으로 판단한다.

5.2 실험 결과

이제 Commandless IST를 핸들러에 실제로 적용해보기로 한다. 언로딩 순간을 포착하기 위한 센서로는 붐 끝단에 장착된 가속도계를 사용하였고, 가속도계 신호의 크기가 0.03 Volt 이상이 되는 순간을 언로딩 순간으로 설정하였다.

앞서 기재한 바와 같이, Fig. 13은 붐을 최대 신장한 채 60도의 각도에서 1.5톤의 부하를 언로딩 하였을 때 발생하는 진동(붐 끝단의 가속도)을 출력한 것이다. 이 진동에 대하여 Commandless IST를 적용하여 본다. 실제 적용 시 임펄스는 실제

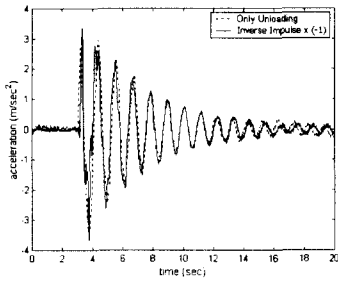


Fig. 17 Comparison between vibration by unloading-only operation and inverse one by designed impulse

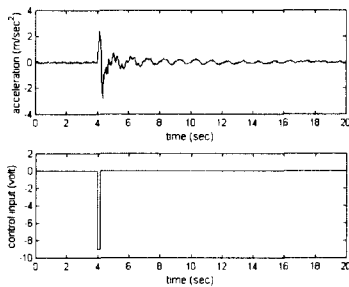


Fig. 18 Experimental result of Commandless IST under given experimental condition

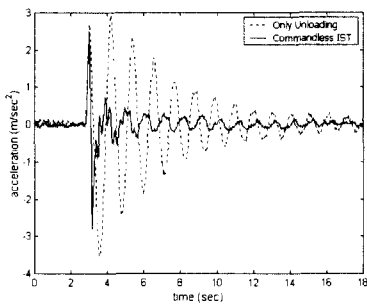


Fig. 19 Comparison of result of unloading-only operation with that of Commandless IST

로 구현되기 어려우므로, 임펄스 대신 펄스를 사용하였다. 펄스의 크기는 주 밸브의 스톱을 최대 로 열어주는 제어 입력의 최대값으로 정하였고, 펄스의 폭은 Fig. 13의 진동과 같은 크기의 역진동이 발생하도록 튜닝을 통해 결정하였다. Fig. 17은 이와 같이 결정한 제어 입력을 최대 신장, 붐 회전각 60도, 무부하 조건의 핸들러에 가했을 때 발생하는 역진동으로, 언로딩에 의한 진동과 함께 출력한 것이다. 여기서, 두 진동의 크기를 서로 비교하기 쉽게 하기 위해 역진동의 경우에는 (-1) 값을 곱한 역상을 출력하였다. 이 그림에서 관찰할 수 있듯이 두 진동은 거의 같은 크기를 가지며, 이 결과는 Commandless IST가 실제로 잘 적용될

수 있음을 보여준다.

Fig. 18은 실제로 언로딩을 하는 경우에 대해 전술한 방법에 의해 설계한 Commandless IST를 적용한 결과이다. 그리고, Fig. 19는 이 두 경우의 결과를 비교하기 위하여 함께 출력한 것이다. Commandless IST의 응답에서 초기에 가속도가 크게 튀는 부분은 언로딩에 의해 위로 튀어 오르면 붐이 역으로 가해진 임펄스에 의해 급격하게 정지하기 때문에 나타나는 것으로, 제어 성능을 비교하기 위한 잔류 진동은 이 부분을 제하고서 비교해야 한다. 그림의 가속도 크기의 비교에서 알 수 있듯이 제어를 한 경우가 제어를 하지 않은 경우에 비해 77% 정도의 진동 감소 효과를 보인다. 하지만, 진동이 완전히 제거되지 못하고 약간의 작은 진동이 여전히 남아있는데, 이는 실제 언로딩 순간과 한계값을 사용하여 제어기가 감지한 언로딩 순간 사이에 존재하는 약간의 시간차에 주로 기인하는 것으로 보여진다.

6. 결론

핸들러의 높이맞추기 작업과 언로딩 작업은 그 작업 자체의 특성과 붐의 큰 관성, 유압 회로의 비선형성 등의 시스템의 특성으로 인해 숙련된 조종자라 할지라도 잔류 진동을 유발하기가 쉬운 작업이다.

본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 TDC와 새로이 제안한 Commandless IST를 핸들러에 적용하였다. 높이맞추기 작업의 경우 핸들러의 고유 진동수를 자극하지 않는 제어를 설계한 후, 비선형 시스템 제어에 적합한 TDC로 이 제어를 잘 추종하게 함으로써 붐의 진동을 원천적으로 발생하지 않도록 하는 방법을 제안하였다. 실험을 통해 높이맞추기 작업에 대해 이 기법을 적용한 결과, 숙련된 작업자보다 좀 더 좋은 제어 성능을 얻을 수 있었다.

언로딩의 진동은 그 특성상 외란에 의한 임펄스 응답으로 생각되어질 수 있다. 이와 같은 진동의 특성을 고려하여 본 연구에서는 IST의 개념에 기초한 새로운 진동 제어 기법인 Commandless IST를 제안하였고, 실험을 통해 그 효용성을 검토하였다. 실험 결과 Commandless IST로 제어하였을 때 제어를 하지 않은 경우에 비해 진동이 77% 정도 감소하는 결과를 보여 이 기법이 언로딩에 잘 적용될 수 있음을 보였다.

지금까지 본 논문에서는 핸들러의 일정한 작업 조건에 대하여 TDC와 Commandless IST를 적용하여 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 하지만, 상기한

제어기법이 실제 작업 현장에서 핸들러에 적용되기 위해서는 보다 다양한 작업 조건 (다양한 부하의 하중, 붐의 길이 및 회전각) 하에서 이들 제어기법을 사용할 수 있어야 한다. 이와 같은 목적을 위해서 이들 제어기법과 함께 사용될 수 있는 기법 중의 하나가 바로 게인 맵(Gain Map) 기법이다. 즉, 센서들로부터 읽은 정보들을 통해 먼저 현재의 작업 조건을 파악한 후, 이 조건에 해당하는 게인을 게인 맵으로부터 읽어 들여 제어기에 적용하는 것이다. 이 기법을 통해 상기한 제어기법은 다양한 작업 조건에 대하여 적용될 수 있다. 하지만, 이를 위해서는 제어기가 현재의 작업 조건을 인지할 수 있도록 부가적인 센서들이 장착되어야 하며, 각각의 작업 조건에 대하여 실험을 통해 게인 맵을 작성해주는 작업이 부가적으로 수행되어야 한다.

이상과 같이 상기한 제어기법이 핸들러에 적용된다면, 제어기가 붐의 진동을 자동적으로 제어해 주기 때문에 숙련되지 못한 작업자도 쉽게 핸들러를 사용할 수 있을 것이다. 또한 숙련자라 할 지라도 실수하는 경우에 발생하는 진동을 제어해줌으로써 핸들러의 생산성, 안전성 및 승차감을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대되어진다.

참고문헌

- (1) Honma, K., Nakajima, K., Izumi, E., Aoyagi, Y. and Watanabe, H., 1994, "Improvement of Damping Characteristics of Hydrostatically Driven Hydraulic Excavator," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (Part C)*, Vol. 60, No. 580, pp. 4175~4182.
- (2) Singhose, W. E., Porter, L. J. and Seering, W. P., 1997, "Input Shaped Control of a Planar Gantry Crane with Hoisting," *Proceedings of the American Control Conference*, Vol. 1, pp. 97~100.
- (3) Youcef-Toumi, K. and Ito, O., 1990, "A time delay controller design for systems with unknown dynamics," *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, Vol. 112, pp. 133~142.
- (4) 장평훈, 박병석, 박주이, 1994, "시간지연제어기법을 이용한 로봇의 혼합(위치/힘) 제어에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제 18 권, 제 10 호, pp. 2554~2566.
- (5) Chang, P. H. and Park, S. H., 1998, "The Development of Anti-windup Scheme and Stick-Slip Compensator for Time Delay Control," *Proceedings of the American Control Conference*, Vol. 6, pp. 3629~3633.
- (6) Lee, S. J., Chang, P. H. and Kwon, Y. M., 1999, "An Experimental Study on Cartesian Tracking Control of Automated Excavator System using TDC-Based Robust Control Design," *Proceedings of the American Control Conference*, Vol. 5, pp. 3180~3185.
- (7) Singer, N. and Seering, W., 1990, "Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration," *ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, Vol. 112, No. 1, pp. 76~82.
- (8) 박주이, 장평훈, 1994, "입력 다듬기기법을 이용한 유연관절을 갖는 로봇의 잔류진동 제거," 대한기계학회논문집, 제 18 권, 제 11 호, pp. 3066~3074.