

<論 文>

# 觀測器를 利用한 位置制御 油壓 서보 시스템의 過渡應答 特性 改善(Ⅱ)

— 애널로그 觀測器를 利用한 實驗結果 —

李 教 一\* · 趙 勝 鎬\*\*

(1987年 12月 29日 接受)

## Improvement of Transient Response Characteristics of a Position Control Hydraulic Servosystem Using Observer (II)

— Experimental Results Using Analog Observer —

K. I. Lee and S. H. Cho

**Key Words :** Second Order Linear Observer(二次 線型 觀測器) Fourth Order Linear Observer(四次 線型 觀測器) Proportional Control(比例制御) State Feedback Control(狀態變數 피이드백 制御)

### Abstract

The oscillatory hydraulic servosystem and the stable hydraulic servosystem under proportional control were feedback-controlled respectively using the estimated states of the observer. The observer was constructed in the analog computer and then it was interfaced with the real hydraulic servosystem to excute the experiment. As a result of experiment, the system that had been stable under proportional control responded more rapidly than before and the system that had shown oscillatory phenomenon under proportional control became stable with the same maximum acceleration and velocity that it had started under proportional control.

### 1. 序 論

油壓 서보 시스템의 位置制御에는 主로 比例制御器가 利用된다. 그러나 內在된 댐핑이 작은 것이 油壓 서보 시스템의 主要한 特徵이므로, 比例制御器로써 安定된 應答을 얻을 수 없는 境遇가 發生한다. 이러한 境遇에 狀態變數 피이드백 制御에 依하여 댐핑을 增加시킴으로써 動特性的 改善을 가져올 수 있다.

Bell<sup>(1)</sup>과 Drazil<sup>(2)</sup>은 線型 油壓 서보 시스템의 動特性 補償方法으로서 油壓실린더의 變位, 速度, 加

速度, 그리고, 負荷壓力的 피이드백 效果에 對하여 研究하였다. 이러한 狀態變數들을 모두 直接 測定하여 피이드백시키려면 經濟的인 費用, 計測器의 設置 等の 어려움이 수반된다. 따라서 本 研究에서 는 이러한 狀態變數들을 觀測器를 使用하여 推定하고, 推定된 狀態變數들을 油壓 서보 시스템의 피이드백 制御에 利用한다. 이 때의 피이드백 利得(gain)은 第一報<sup>(3)</sup>에서 求한 最適 狀態變數 피이드백 利得 값을 使用한다. 本 論文에서의 觀測器는 第一報에서 誘導한 全次數 觀測器(full order observer)이다. 애널로그 컴퓨터를 使用하여 四次 線型 觀測器와 二次 線型 觀測器를 各各 構成한 後, 애널로그 컴퓨터를 實際의 油壓 서보 시스템에 連結하여 實驗을 遂行한다.

\* 正會員, 서울大學校 工科大学 機械設計學科  
\*\* 正會員, 弘益大學校 工科大学 機械工學科

2. 觀測器-制御器 및 實驗裝置의 構成

2.1 觀測器-制御器의 構成

本 研究에서는 第一報<sup>(3)</sup>에서 誘導된 油壓 서보 시스템의 狀態方程式을 利用하여 觀測器-制御器를 構成하였으며, 그 애널로그 回路가 Fig. 1과 Fig. 2 에 나타나 있다. 여기에서  $l_1, l_2, l_3, l_4$ 는 觀測器의 利得을 나타내고,  $K_{p1}, K_{p2}, K_{p3}, K_{p4}$ 는 狀態變數 피이드백 利得을 나타낸다. 또한  $a_{11}, a_{21}, a_{22}, a_{24}, a_{42}, b_{11}, b_{12}$ 는 狀態方程式에서  $A, B$  行列의 要素(element) 들을 나타낸다<sup>(3)</sup>.

實驗하는 데 使用된 觀測器의 利得 및 狀態變數 피이드백 利得은 다음과 같다.

(1) 二次 線型 觀測器

觀測器의 固有值( $\lambda$ ) = -12.0

$$l = (l_1 \ l_2) = (20.5 \ 72.8)$$

制御入力の 加重值( $R$ ) = 1.0

$$K_f = (K_{p1} \ K_{p2}) = (3.16 \ 6.67)$$

(2) 四次 線型 觀測器

觀測器의 固有值( $\lambda$ ) = -8.0

$$l = (l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4) = (945.0 \ -2230.0 \ 8.48 \ 141.0)$$

(case 1) 制御入力の 加重值( $R$ ) = 1.0

$$K_f = (K_{p1} \ K_{p2} \ K_{p3} \ K_{p4}) = (0.15 \ 0.021 \ 1.0 \ 0.66)$$

(case 2) 制御入力の 加重值( $R$ ) = 0.1

$$K_f = (0.46 \ 0.0642 \ 3.16 \ 2.0)$$

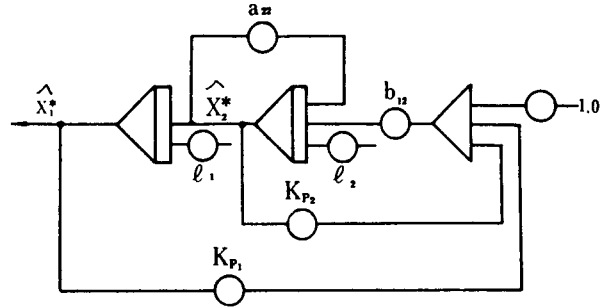


Fig. 2 Analog circuit of the second order linear observer-controller

2.2 實驗裝置의 構成

本 實驗을 遂行하기 위한 裝置들의 블록다이어그램이 Fig. 3에 나타나 있다. 그리고 油壓 파워 유닛을 비롯하여 電氣-油壓 서보 밸브, 油壓실린더를 包含한 全體 시스템의 油壓回路圖가 Fig. 4에 나타나 있다. 油壓을 發生시키기 위하여 壓力 補償型 액셀 피스톤 油壓펌프가 使用되었다.

이 油壓펌프의 最大 吐出壓力은 140bar이고, 每分當 吐出流量은 回轉數 1800rpm에서 80l이다. Precharge pressure가 70bar인 蓄壓器(accumulator)가 油壓펌프 動力의 節約, 油壓 펌프 맥동의 흡수 등을 目的으로 使用되었다.

本 研究에서는 油壓 펌프의 供給壓力을 50bar, 油溫을 45℃로 유지한 狀態에서 實驗을 進行하였다.

그리고 애널로그 컴퓨터를 油壓 서보 시스템에

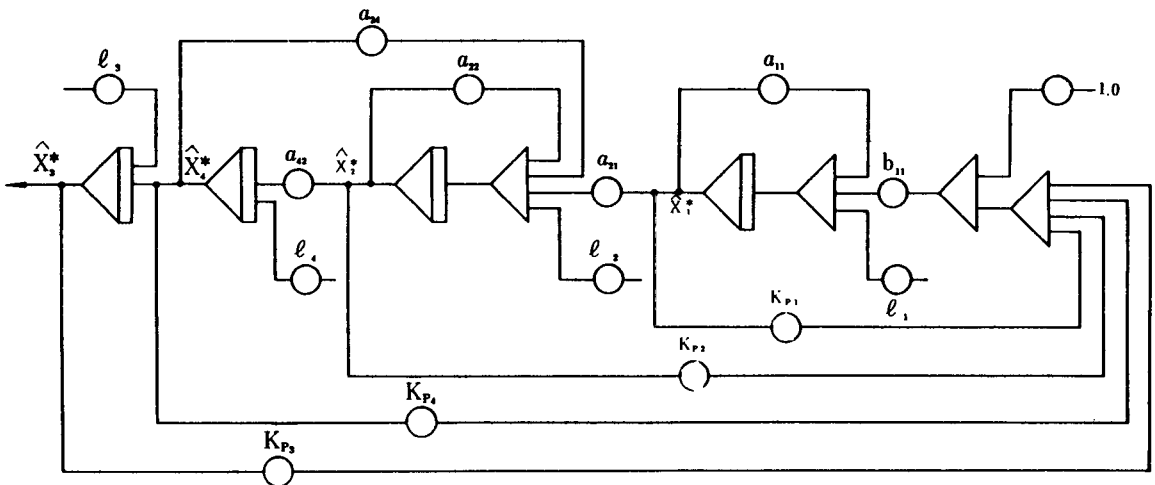


Fig. 1 Analog circuit of the fourth order linear observer-controller

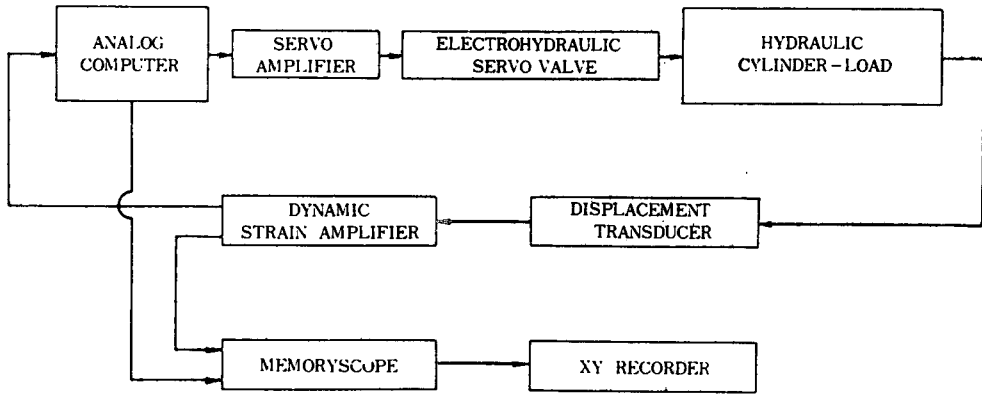


Fig. 3 Block diagram representation of the experimental procedure

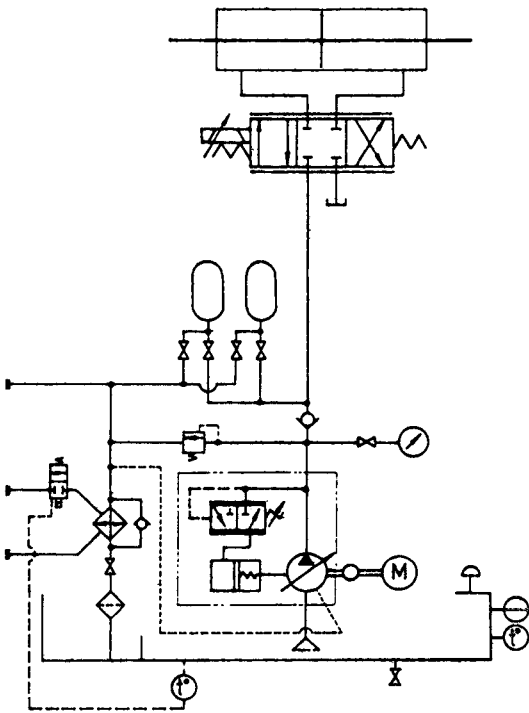


Fig. 4 Hydraulic circuit including the hydraulic power unit and the electrohydraulic servo valve controlled-hydraulic cylinder

連結하여 觀測器 및 制御器로써 使用하였다.

油壓 실린더의 變位를 測定하기 위하여 인덕티브형 (inductive type)의 變位變換器를 使用하였으며, 인덕티브형이지만 스트레인 증폭기에 連結하여 使用할 수 있도록 設計가 되어 있다. 變位變換器의 환산표 (calibration sheet)에 있는 較正係數를 參考하여 1cm當 스트레인을 求한 다음, 基準變位를 設

定하여, 1cm을 基準 變位로 나눈 後, 10倍하여 1cm에 該當하는 電壓을 求한다. 10倍하는 까닭은, 애널로그 컴퓨터에서는 10V電壓을 正規化(normalization)된 값 1.0으로 받아들이기 때문이다. 스트레인 증폭기에서는 1cm에 該當하는 스트레인을 1cm에 該當하는 電壓으로 換算한다.

觀測器를 構成하기 위하여, 實際의 出力이 必要하므로 스트레인 증폭기에서 電壓으로 換算된 油壓 실린더 變位를 애널로그 컴퓨터의 入力포트에 連結한다.

애널로그 컴퓨터를 使用하여 觀測器를 構成하므로, 觀測器에서 推定된 狀態變數를 利用하여 피드백 制御하는 過程이 애널로그 그 컴퓨터에 依해 遂行된다. 플랜트(=油壓 서보 시스템)에 들어가는 最適 制御入力(optimal control input)을 애널로그 컴퓨터에서 計算한 後, 出力포트를 통하여 서보 增幅器에 가한다.

使用된 서보 增幅器는 DC서보 콘트롤러이며, 電壓을 電流(最大值=40mA)로 變換하는 機能을 갖고 있다. 그리고 서보 밸브 코일의 인덕턴스와 저항에 對한 影響을 받지 않도록 電流 피드백 方式을 利用하여 設計되었다.

本 實驗에서 使用한 서보 밸브의 모델명은 Moog 76-104이며, 코일의 結線 方式을 並例로 하여, 서보 밸브에 흐를 수 있는 最大 電流를 40mA로 하였다. 作動體로서는 피스톤兩端의 面積이 同一한 複動型 油壓 실린더를 使用하였으며, 피스톤의 單面積은 13.0cm<sup>2</sup>, 그리고 行程(stroke)은 10cm이다.

油壓 실린더의 變位를 測定할 때 行程의 中心을 基準點으로 設定하였다.

### 3. 實驗結果 및 檢討

#### 3.1 變位 피드백에 의한 應答

質量負荷가 49.0kg일 때 制御器의 利得(K)에 變位를 주어가며 比例制御한 實驗結果가 Fig. 5에 나타나 있다. 制御器의 利得(K)이 20.0인 境遇, 定常狀態에서의 limit cycle周波數는 約 16.7Hz이다.

本 研究에서는 比例制御하였을 때 安定한 시스템 ( $K=1.0$ )과 振動 現象을 보이는 시스템 ( $K=20$ )을 制御對象으로 設定한 後, 觀測器의 狀態變數를 利用하여 이들을 피드백 制御하였을 때 應答 特性이 改善될 수 있는지를 調査하고자 한다.

#### 3.2 二次 線型 觀測器의 狀態變數

##### 피드백에 의한 應答

실린더의 變位만을 피드백하여 單純 比例制御한 境遇에 對하여, 二次 線型 觀測器를 使用하여 狀態變數 피드백하는 境遇의 效果가 Fig. 6에 나타나 있다.

制御器의 利得  $K=1.0$ 일 때, 比例制御한 境遇보다 狀態變數 피드백 制御한 境遇가, 그 應答特性이 빨라지고, 動的特性이 매우 向上되는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에서의 比例制御는 實驗 結果이다. 여기에서 最適 狀態變數 피드백 利得은 制御入力  $u$ 에 對한 加重值  $R$ 을 1.0으로 놓고 求한 값이다.

單純히 比例制御하였을 때 振動現象을 나타내는 시스템을 制御對象으로 設定한 後, 이를 二次 線型 觀測器의 狀態變數를 利用하여 피드백 制御한 結

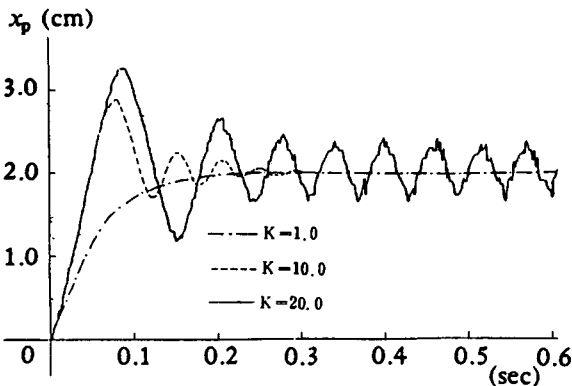


Fig. 5 Outputs to a step input with position feedback,  $K_f = (0.0 \ 0.0 \ 1.0 \ 0.0)$ ,  $M = 49\text{kg}$

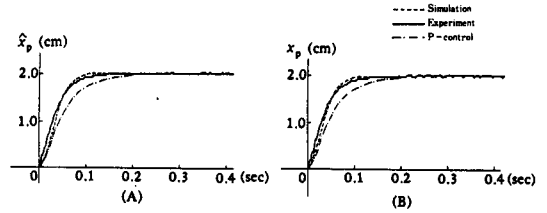


Fig. 6 Comparison of state feedback control using the second order linear observer and proportional control, (A) output of observer (B) output of plant ( $M=49\text{kg}$ ,  $K=1.0$ ,  $F_c^* = 0.005$ ,  $\lambda = -12.0$ ,  $K_f = [3.16 \ 6.67]$ )

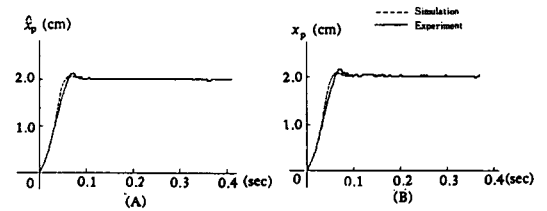


Fig. 7 Comparison of simulation and experiment (A) output of observer (B) output of plant ( $M=49\text{kg}$ ,  $K=20$ ,  $\lambda = -12.0$ ,  $F_c^* = 0.005$ ,  $K_f = [3.16 \ 6.67]$ )

果가 Fig. 7에 나타나 있다. 이때 最適 피드백 利得은 制御入力  $u$ 에 對한 加重值  $R$ 을 1.0으로 놓고 求하였다.

컴퓨터 시뮬레이션 結果와 實驗 結果가 거의 一致하고 있으며, 制御器의 利得  $K=20$ 인 狀態에서 單純 比例制御 하였을 때의 最大 加速度와 最大 速度를 유지하면서 定常狀態로 빨리 收斂하는 優秀한 應答特性을 나타낸다.

#### 3.3 四次 線型 觀測器의 狀態變數 피드백에 의한 應答

四次 線型 觀測器의 狀態變數를 利用하여 피드백 制御한 境遇와 單純히 比例制御한 境遇의 應答特性이 Fig. 8에 나타나 있다.

Fig. 8에서의 比例制御는 實驗結果이다. 그리고 이때 制御 入力  $u$ 에 對한 加重值  $R$ 은 1.0이다.

比例制御하였을 때 安定한 應答를 나타내는 油壓 서보 시스템을 狀態變數 피드백 制御하면, 比例 制御한 境遇보다 정착시간(settling time)이 增加하며 性能이 低下하는 것을 알 수 있다. 이는 制御 入力  $u$ 에 對한 加重值  $R$ 의 影響이며, 이 값의 影響은 3.4節에서 檢討할 예정이다.

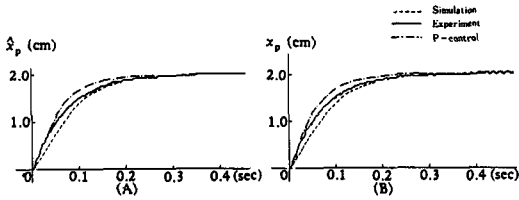


Fig. 8 Comparison of state feedback control using the fourth order linear observer and proportional control, (A) output of observer (B) output of plant, ( $M=49\text{kg}$ ,  $K=1.0$ ,  $F_c^*=0.005$ ,  $\lambda=-8.0$ ),  $K_f=[0.15 \ 0.021 \ 1.0 \ 0.66]$

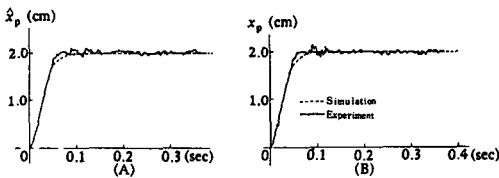


Fig. 9 Comparison of simulation and experiment, (A) output of observer (B) output of plant, ( $M=49\text{kg}$ ,  $K=20$ ,  $\lambda=-8.0$ ,  $F_c^*=0.005$ )  $K_f=[0.15 \ 0.021 \ 1.0 \ 0.66]$

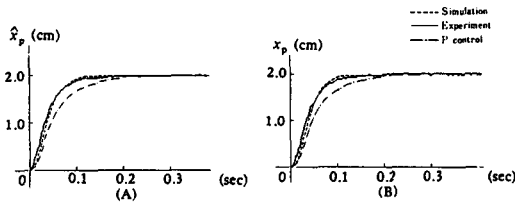


Fig. 10 Comparison between state feedback control using the fourth order linear observer and proportional control (A) output of observer (B) output of plant ( $M=49\text{kg}$ ,  $K=1.0$ ,  $\lambda=-8.0$ ,  $F_c^*=0.005$ ),  $K_f=[0.46 \ 0.0642 \ 3.16 \ 2.0]$

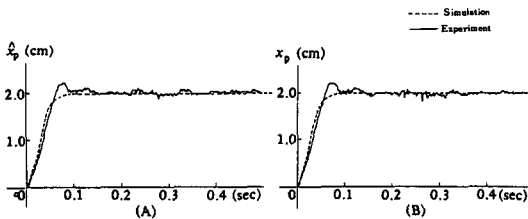


Fig. 11 Comparison between simulation and experiment (A) Output of observer (B) output of plant ( $M=49\text{kg}$ ,  $K=20$ ,  $\lambda=-8.0$ ,  $F_c^*=0.005$ ),  $K_f=[0.46 \ 0.0642 \ 3.16 \ 2.0]$

單純히 比例制御하였을 때 振動現象을 나타내는 油壓 서보 시스템을 觀測器에 依하여 피이드백 制御한 境遇, 그 應答特性이 Fig. 9에 나타나 있다. 이때 最適 狀態變數 피이드백 利得은 制御入力  $u$  에 對한 加重值  $R$ 을 1.0으로 놓고 求하였다.

四次 線型 觀測器를 使用하여 性能向上을 시도한 境遇, 二次 觀測器의 境遇와 마찬가지로 시스템의 最大加速度와 最大速度를 유지하면서 定常狀態에 빨리 收斂하는 優秀한 特性을 나타낸다. 다만 定常狀態에서 雜音(noise)現象이 觀察되었으며, 이는 시스템 次數의 增加에 따른 使用要素의 增加가 影響을 주는 것으로 생각된다.

### 3.4 制御入力の 加重值에 의한 影響

制御入力  $u$ 의 加重值  $R$ 을 1.0에서 0.1로 變경한 狀態에서 求한 最適 狀態變數 피이드백 利得을 制御器의 利得  $K$ 가 1.0인 狀態에서, 四次 線型 觀測器의 狀態變數에 適用하여 實際의 油壓 서보 시스템을 피이드백 制御한 境遇와 單純히 比例制御한 境遇의 應答 特性이 Fig. 10에 나타나 있다. Fig. 10에서의 比例制御는 實驗結果이다. 觀測器를 使用한 境遇가 比例制御한 境遇보다 應答速度가 빠르다.

Fig. 10의 境遇가 Fig. 8의 境遇에 比하여 應答이 빨라진 이유는 性能지수(performance index)에서 加重值(weighting factor)  $R$ 을 1.0에서 0.1로 變化시킴으로써 制御入力에 對한 制限을 完화된 結果이다.

制御器의 利得  $K$ 가 20.0인 狀態에서 單純히 比例制御하였을 때 振動現象을 나타내는 시스템을 制御對象으로 設定한 後, 이를 四次 線型 觀測器의 狀態變數를 利用하여 피이드백 制御하였을 때의 應答이 Fig. 11에 나타나 있다. 이 때 制御入力  $u$ 에 對한 加重值  $R$ 은 0.1이다. 實驗을 한 境遇에는 出力에 雜音(noise)이 많고 오우버슈트 現象이 나타나며 Fig. 9에 比하여 오히려 性能이 低下됨을 알 수 있다. 卽 制御入力の 加重值는 制御器의 利得에 따라 결정된다.

## 4. 結 論

(1) 實驗結果, 四次 線型 觀測器와 二次 線型 觀測器의 狀態變數를 利用하여, 比例制御하였을 때 振動現象을 나타내는 油壓 서보 시스템을 피이드백

制御하였을 때, 出發할 때의 最大加速度와 最大速度가 그대로 유지되며 急速히 定常狀態에 收斂하는 優秀한 應答을 얻을 수 있었으며, 比例制御하였을 때 감쇠特性이 좋은 安定한 應答을 나타내는 油壓 서보 시스템을 피이드백 制御하였을 때에도 加速度와 加速特性이 優秀하고 정착시간이 減少한 安定된 應答을 얻을 수 있었다. 이 때에는 制御入力の 加重值에 對한 配慮가 있어야 한다.

(2) 二次 線型 觀測器를 利用하여 實驗한 結果와 四次 線型 觀測器를 利用하여 實驗한 結果를 比較하면 前者의 境遇가 後者の 境遇에 比하여 雜音(noise)에 덜 敏感하므로 前者의 境遇가 有利하다.

### 參 考 文 獻

- (1) R. Bell and A. de Pennington, 1969, "Active Compensation of Lightly Damped Electrohydraulic Cylinder Drives Using Derivative Signals", Proc. Instn, Mech. Engrs., Vol. 184, Pt. 1, No. 4.
- (2) M. Drazdil, 1972, "Die Verwendung der Druckrückführung zur Dämpfung elektrohydraulischer Servoantriebe", Industrie-Anzeiger, Nr. 35.
- (3) 李教一, 趙勝鎬, 1987, "觀測器를 利用한 位置制御 油壓 서보 시스템의 過渡應答 特性 改善(I)—컴퓨터 시뮬레이션—", 大韓機械學會論文集, 第11卷 第5號, pp. 781~788.
- (4) H. Kwakernaak and R. Sivan, 1972, "Linear Optimal Control Systems", John Wiley & Sons, Inc.