

3 축 유압 도로 시뮬레이터의 정량적 피드백 제어 시스템 설계

김진완[†] · 현동길* · 김영배**
(2007년 12월 4일 접수, 2008년 1월 16일 심사완료)

Design of Quantitative Feedback Control System for the Three Axes Hydraulic Road Simulator

Jin Wan Kim, Dong Ji Xuan and Young Bae Kim

Key Words : MIMO(다중입출력), QFT(정량적 피드백 이론), Hydraulic Road Simulator(유압 도로 시뮬레이터), Robust Control(강인 제어), Uncertain Plant(불확실한 플랜트)

Abstract

This paper presents design of the quantitative feedback control system of the three axes hydraulic road simulator with respect to the dummy wheel for uncertain multiple input-output(MIMO) feedback systems. This simulator has the uncertain parameters such as fluid compressibility, fluid leakage, electrical servo components and nonlinear mechanical connections. This works have reproduced the random input signal to implement the real road vibration's data in the lab. The replaced m^2 MISO equivalent control systems satisfied the design specifications of the original $m*m$ MIMO control system and developed the mathematical method using quantitative feedback theory based on schauder's fixed point theorem. This control system illustrates a tracking performance of the closed-loop controller with low order transfer function $G(s)$ and pre-filter $F(s)$ having the minimum bandwidth for parameters of uncertain plant. The efficacy of the designed controller is verified through the dynamic simulation with combined hydraulic model and Adams simulator model. The Matlab simulation results to connect with Adams simulator model show that the proposed control technique works well under uncertain hydraulic plant system. The designed control system has satisfied robust performance with stability bounds, tracking bounds and disturbance. The Hydraulic road simulator consists of the specimen, hydraulic pump, servo valve, hydraulic actuator and its control equipments

1. 서론

자동차의 도로 주행 중에 발생하는 피로는 차체, 현가 장치 및 각 부품들의 강성, 진동과 승차감에 직접적인 관련이 있다. 차량의 동특성과 내구성에 대한 신속한 연구를 위해 극한 도로조건을 실험실에서 다축 유압 도로 시뮬레이터로 재현하는 시험이 보편화 되고 있다. 이것은 시간과 비용을 절감

하고 다양한 조건의 제어입력과 반복 재현 실험이 우수한 효과를 얻을 수 있기 때문이다. 많은 장점을 갖고 있는 유압 도로 시뮬레이터 실험에서 중요한 것은 실제 도로 데이터를 얼마나 정확히 재현시키는가이다. 하드웨어적으로는, 각 축의 움직임이 다른 축에 거의 영향을 주지 않아야 하며 (decoupled motion) 극한 진동과 부하 하중에 견딜 수 있는 구조를 가져야 한다. 소프트웨어적으로는, 도로 데이터를 정확히 재현하는 강인 제어 알고리즘 설계가 필요하다.

1980년대부터 많이 사용되는 강인 제어 연구는 LQG/LTR 기법, H_2/H_∞ 기법, μ 기법 및 정량적 피드백 이론(Quantitative Feedback Theory)이다.

[†] 책임저자, 회원, 전남대학교 대학원 기계공학과
E-mail : pilot-kim@hanmail.net
TEL : (062)530-0209 FAX : (062)530-1689

* 전남대학교 대학원 기계공학과

** 전남대학교 기계시스템공학부

1972년, Horowitz는 플랜트 불확실성과 외부의 외란들을 강인하게 제어할 수 있는 QFT를 재 정립하였다.^(1,2) 1976년, Shaked는 불확실성 다변수 플랜트를 대각선 형태로 변형하는 이론을 정립하였다.⁽³⁾ 1982년, Horowitz는 다중입출력(MIMO) 제어 시스템을 고정점 이론(schauder fixed point theory)을 이용하여 다중입력단일출력(MISO) 선형 시 불변 시스템의 분리 설계로 QFT를 보완하였다.^(4,5) 1986년, Yaniv는 훨씬 간단하고 반복 설계를 줄일 수 있는 방법을 제시하였다.^(6,7) 1988년, D'Azzo, Houpis 와 1990년, Chait. Y.는 QFT 해석과 설계조건에 근접하는 제어기 설계를 정립하였다.^(8,9) 1993년, Borghesani는 Matlab Toolbox 제작 목적으로 종래의 QFT를 컴퓨터 프로그램으로 만들었다.⁽¹⁰⁻¹²⁾ 1998년, 박 명수는 루프 전달함수의 역 변환 없이 직접식 다변수 정량적 피드백 이론의 안정성 및 성능의 경계조건들을 계산하는 방법을 제안하였다.^(13,14) 정량적 피드백 이론에서 가장 중요하게 강조되는 것은 플랜트에 존재하는 불확실성과 외란에 대해 강인성을 보장할 수 있는 피드백 제어계의 주파수 영역에서 실제적인 설계 기법이다. 결국, QFT 기법은 초기에 MISO 제어 시스템으로 개발한 후로 MIMO 제어 시스템으로까지 가능하게 되었다.

유압 도로 시뮬레이터가 불확실한 플랜트를 가지게 되는 주요 요소는 차량의 비선형 현가장치, 유압 서보 밸브의 변위 변화와 부하 질량의 변화에 있다. 따라서, PID 제어기와 주파수 응답 함수(FRF) 가진 신호 재현 방법⁽¹⁵⁾은 실제 산업에 널리 사용되지만, 비선형 특성만큼 불 확실한 시스템 파라미터 변화에도 정확한 도로 데이터를 재현할 수 있는 정량적 피드백 제어계 설계가 필요하다. 이 제어계의 특징은 높은 이득과 큰 위상을 가지는 페루프 전달함수에서 넓은 대역폭을 가지는 저차수의 강인 제어기를 설계하고, 크기와 위상을 함께 고려한 니콜스 선도와 연계하여 그래프적이고 수치적인 방법을 사용하는 것이다. 이 과정에서 강인 안정 여유와 경계 조건들을 만족하는 공칭 플랜트와 제어기의 전달함수가 결정된다.

본 논문에서 다루고자 하는 플랜트인 3 축 유압 도로 시뮬레이터는 종, 횡 그리고 수직방향으로 3 개의 입력과 3 개의 출력을 갖는 3 자유도 3*3 페루프 다중입출력(MIMO) 피드백 제어 시스템이다. 이 시스템 구조는 Fig. 1 과 같이 블록다이어그램으로 표현하였다. $m*m$ MIMO 정량적 피드백 제어 시스템 설계는 m^2 MISO 동등한 시스템으로 분리 설계가 가능하다. 이러한 결과는 수학적인 분산

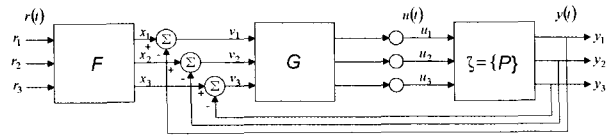


Fig. 1 MIMO feedback control structure

제어 개발이며 2 장에서 이론을 확립하였다. 3 장에서는 단축 유압 서보 시스템의 수학적 모델링을 확립하였고 4 장에서는 MISO 정량적 피드백 제어 시스템을 설계하였고. 5 장에서는 랜덤 신호 입력에 대한 시뮬레이션을 하여 그 결과를 그래프로 나타내었다. 마지막으로 6 장에서는 결론을 맺었다.

2. 3 x 3 MIMO 제어 시스템의 설계

2.1 MIMO 제어 시스템의 표현

Fig. 1 은 3 개의 입력과 3 개의 출력을 갖는 3*3 페루프 MIMO 피드백 제어 시스템 구조를 나타내며 Pre_filter F, 제어기 G, 불확실한 플랜트 P 로 구성된다. 파라미터 변화에 따른 불확실성 때문에 플랜트 P 는 불확실성 플랜트 집합 $\zeta = \{P\}$ 의 원소이다. Fig. 1 에서, F,G,P 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix}$$

m 개의 입력 $r_i(s)$ 에 m 개의 출력 $y_i(s)$ 의 관계인 m^2 개의 페루프 시스템 전달 함수 $t_{ij}(s)$ 의 원소로 된 T 행렬은 제어 감도(control ratio) 행렬이다. 시스템이 매우 작은 커플링(coupling)과 독립적으로 제어가 가능하여 m 개의 입력에 m 개의 출력이 된다면, 제어 행렬 G 는 대각행렬이 가능하다. 식 (1)에서와 같이 플랜트 P 의 역 행렬이 존재한다. 플랜트 P 의 역 행렬을 Q 행렬로 표현한다.

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 & 0 \\ 0 & g_{22} & 0 \\ 0 & 0 & g_{33} \end{bmatrix} \quad Q = P^{-1} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{bmatrix}$$

Fig. 1 에서 출력방정식 $y(t)$ 는 다음과 같다.

$$y = [I + PG]^{-1} PGFr$$

제어 감도(Control Ratio) T 는,

$$T = y/r = [I + PG]^{-1} PGF \tag{1}$$

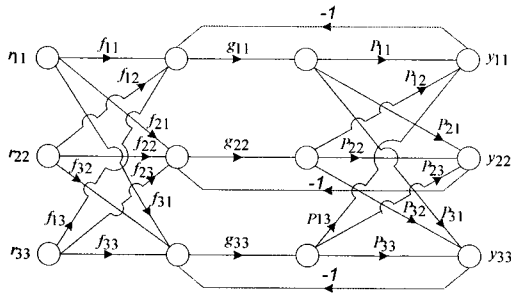


Fig. 2 Three-by-three(3*3) MIMO signal flow graph

Fig. 2 는 Fig. 1 의 신호 흐름을 상세하게 표현한 것이다.

2.2 $m \times m$ MIMO 제어 시스템을 동등한 m^2 개의 MISO 제어 시스템으로 분리한 효과 식 (1)을 전개 하면,

$$T = adj[I + PG]PGF / det[I + PG] \quad (2)$$

식 (2)에서 시스템 제어 전달함수 t_{ij} 를 설계하는 문제는 매우 복잡하고 어렵다. 그러므로, 단위 임펄스 함수에 기초로 하는 Schauder 고정점 이론(Fixed point theory)을 이용하여, 식 (4) ~ 식 (7)와 같이, MIMO 제어 시스템을 동등한 MISO 제어 시스템으로 용이하게 수학적으로 분리하여 정량적 피드백 제어 시스템을 설계할 수 있다. 이것은 제어기 설계에 있어서 용이한 설계가 가능하다. MISO 제어 시스템 집합으로 MIMO 제어 시스템 해석과 설계가 허용되는 알맞은 사상(mapping)을 찾고, 각 축간의 크로스 커플링 효과들에 관한 출력들이 최소화하여 기준 입력을 추종하는 각각의 폐루프 시스템을 만드는 것이 목적이다. 식 (1)의 $[I + PG]$ 를 양변에 곱하여 정리하면,

$$[I + PG]T = PGF, \quad [P^{-1} + G]T = GF \quad (3)$$

여기서, $P = nonsingular$, $P^{-1} = \begin{bmatrix} p_{11}^* & p_{12}^* & p_{13}^* \\ p_{21}^* & p_{22}^* & p_{23}^* \\ p_{31}^* & p_{32}^* & p_{33}^* \end{bmatrix}$

m^2 개의 효과적인 플랜트 전달함수는 식 (4)와 같이 Q 행렬로 결정한다.

$$Q = [q_{ij}] = \left[\frac{1}{p_{ij}^*} \right] = \left[\frac{det[P]}{Adj_{ij}[P]} \right] \quad (4)$$

P^{-1} 행렬은 식 (5)와 같이 분리 할 수 있다.

$$P^{-1} = [p_{ij}^*] = \left[\frac{1}{q_{ij}} \right] = \Lambda + B \quad (5)$$

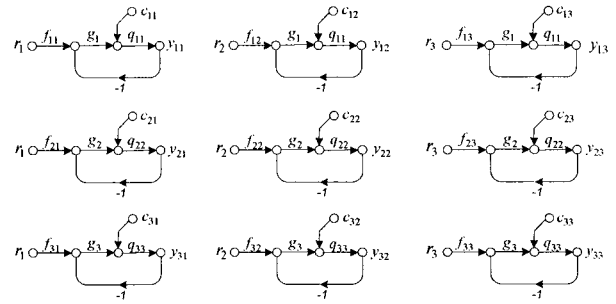


Fig. 3 Effective MISO Loops three-by-three(9 loops)

Λ : diagonal part, B : balance part of P^{-1} for($i \neq j$)
식 (5)를 식 (3)에 대입하면 식 (6)과 같이 된다.

$$[\Lambda + B + G]T = GF, \quad T = [\Lambda + G]^{-1}[GF - BT] \quad (6)$$

MIMO 피드백 제어 시스템 설계에 만족되는 개별적인 MISO 제어 시스템은 식 (7)과 같다.

$$Y(T_i) \equiv [\Lambda + G]^{-1}[GF - BT_i] \equiv T_i \quad (7)$$

Fig. 3 에서, 각 9 개의 폐루프 구조들은 식 (6,7)의 $Y(T)$ 의 요소들 중 각 한 요소에 대응된다. 이것들은 $m^2(3^2)$ MISO 폐루프 시스템의 변환 결과를 보여준다. 식 (7)을 식 (8)과 같은 형태로 다시 쓸 수 있다.

$$Y_{ij} = w_{ij} (v_{ij} + c_{ij}) = T_{ij} \quad (8)$$

where, $w_{ij} = \frac{q_{ii}}{1 + g_i q_{ii}}$, $v_{ij} = g_i f_{ij}$, $c_{ij} = -\sum_{k \neq i} \left[\frac{t_{kj}}{q_{ik}} \right]$, $k = 1, 2, \dots, m$

식 (8)에 의해 j^{th} 입력에 i^{th} 출력이 관계되는 제어 감도를 계산하면 식 (9)와 같이 되며, 일부만 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} t_{11} &= \frac{q_{11}}{1 + g_1 q_{11}} \left[g_1 f_{11} - \left[\frac{t_{21}}{q_{12}} + \frac{t_{31}}{q_{13}} \right] \right], & t_{22} &= \frac{q_{22}}{1 + g_2 q_{22}} \left[g_2 f_{22} - \left[\frac{t_{32}}{q_{23}} + \frac{t_{12}}{q_{21}} \right] \right] \\ t_{12} &= \frac{q_{11}}{1 + g_1 q_{11}} \left[g_1 f_{12} - \left[\frac{t_{22}}{q_{12}} + \frac{t_{32}}{q_{13}} \right] \right], & t_{33} &= \frac{q_{33}}{1 + g_3 q_{33}} \left[g_3 f_{33} - \left[\frac{t_{13}}{q_{31}} + \frac{t_{23}}{q_{32}} \right] \right] \\ t_{13} &= \frac{q_{11}}{1 + g_1 q_{11}} \left[g_1 f_{13} - \left[\frac{t_{23}}{q_{12}} + \frac{t_{33}}{q_{13}} \right] \right], & & (i, j, k = 1, 2, 3) \end{aligned} \quad (9)$$

Fig. 17 를 보면, 커플링 관계(cross coupling effect)는 거의 0 에 가까운 미소한 관계이기 때문에 우리는 Fig. 3 의 $9(m^2)$ 개의 루프들 중에서 대각화만 취할 수 있다. Fig. 4 는 Fig. 3 에서 대각화만 취한 것이다. 또한 c_{ij} 를 0 으로 근사화되었고 이것을 외란으로 간주한다.

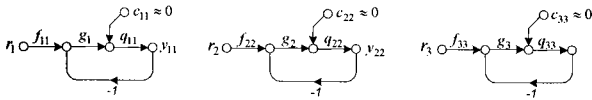


Fig. 4 MISO Loops with cross coupling rejection

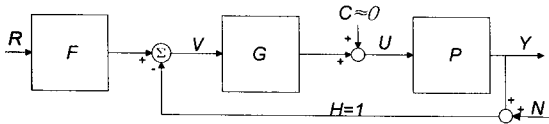


Fig. 5 MISO Loops minimizing cross coupling effect

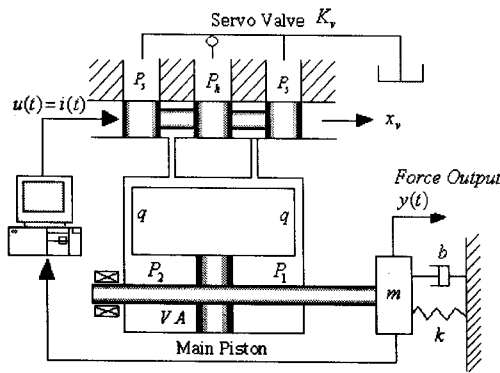


Fig. 6 The Hydraulic servo system

$c_{ij} \approx 0$ 으로 근사화된 Fig. 4 을 식 (10)으로 나타내었다.

$$t_{11} = \frac{f_{11}g_1q_{11}}{1+g_1q_{11}}, \quad t_{22} = \frac{f_{22}g_2q_{22}}{1+g_2q_{22}}, \quad t_{33} = \frac{f_{33}g_3q_{33}}{1+g_3q_{33}} \quad (10)$$

식 (10)과 같이 커플링 작용이 소거된 유압 도로 시스템의 피드백 제어 전체 시스템을 블록선도로 Fig. 5 와 같이 나타내었다.

Fig. 5 는 MISO 와 같은 구조를 갖게 되며, MIMO 시스템에서 동등하게 분리된 MISO 피드백 제어 시스템으로 정량적 피드백 제어 시스템 설계가 충분히 가능함을 보여준다. 또한, 이 시스템 구조는 기존의 MISO 시스템 구조와 같다. 입출력 관계의 궤환 제어 시스템을 식 (11)로 나타내었다.

$$T_R = Y(T_i) = \frac{FGP}{1+GP} = \frac{FL}{1+L} \quad (11)$$

3. 유압 서보 시스템의 수학적 모델링⁽¹⁶⁾

유압 서보 시스템은 전류를 입력 받아 서보 밸브를 개폐하여 유압펌프에서 가해진 작동유의 공급 압력으로 유압 작동기를 구동하여 시편에 힘(변위)을 가하거나 변위를 발생시킨다. 시편은 중, 소형차 1/4 에 해당한다. 유압 서보 시스템의

Table 1 Parameter value of dynamic plant equation

Parameter	Value	Unit	Description
A_{Lat}	0.003	m^2	Piston area of Lateral axis
A_{Lon}	6.2e-3	m^2	Piston area of Longitudinal axis
A_{Ver}	8.3e-3	m^2	Piston area of Vertical axis
V_{Lat}	4.8305e-4	m^3	Cylinder Volume of Lateral Axis
V_{Lon}	1.1e-3	m^3	Cylinder Volume of Longitudinal Axis
V_{Ver}	1.5e-3	m^3	Cylinder Volume of Vertical Axis
M	100 ~ 500	Kg	Load mass
B	200 ~ 540	Ns/m	Load Damping
K	10,000 ~ 20,000	N/m	Load spring stiffness
L	1.56e-8	m^3/sPa	Leakage coefficient
c	0.6 ~ 0.8		Flux coefficient
g	9.8	m/s^2	Gravity acceleration
P_h	21e6	Pa	Supply pressure
x_v	0.0001 ~ 0.0033	m	Displacement of Spool valve
w	0.008	m	Lat.longi port width
w	0.0302	m	Vertical port width
K_B	1.379e9	Pa	Bulk modulus
ρ	870	kg/m^3	Hydraulic density
K_v	0.165	m/A	Gain of spool valve(Lateral, Longi)
K_v	0.0825	m/A	Gain of spool valve (Vertical)
n_F	0.9937		Force conversion efficiency (Lat. Lon.)
n_F	0.9407		Force conversion efficiency (vertical)
r	8526	N/m^3	ρg

수학적 모델은 유압서보밸브의 유량식, 유압 작동기의 연속방정식, 부하의 운동방정식으로 구성된다. 유압서보밸브의 입력전류 I 와 유압 작동기의 출력 Y 의 관계식은 식 (12)와 같이 표현된다. 유압서보시스템의 구성도는 Fig. 6 과 같으며 각축에 적용된 유압서보시스템의 파라미터 값은 Table 1 에 나타나 있다.

$$P(s) = \frac{Y(s)}{I(s)} = \frac{C_x K_v}{as^3 + bs^2 + cs + d} \quad (12)$$

Where,

$$a = \frac{VM}{K_B n_F A}, \quad b = \left[\frac{VB}{K_B n_F A} + (L + C_p) \frac{M}{n_F A} \right]$$

$$c = \left[A + \frac{VK}{K_B n_F A} + \frac{B}{n_F A} (L + C_p) \right], \quad d = \left[\frac{K}{n_F A} (L + C_p) \right]$$

Table 2 Varying range of parameter set of plant

Parameters	Range	Parameters	Range
a_{11}	1.175e-8 ~ 4.7e-8	b_{11}	5.233e-4 ~ 2.114e-3
c_{11}	4.257e-3 ~ 5.856e-3	d_{11}	0.05233 ~ 0.1057
a_{22}	2.626e-8 ~ 1.05e-7	b_{22}	2.533e-4 ~ 1.038e-3
c_{22}	6.811e-3 ~ 7.606e-3	d_{22}	0.02533 ~ 0.0518
a_{33}	5.573e-8 ~ 1.393e-8	b_{33}	8.073e-4 ~ 1.999e-4
c_{33}	9.391e-3 ~ 8.781e-3	d_{33}	0.02018 ~ 0.0199
e_{11}	0.3281	e_{22}	0.1989
e_{33}	0.1681		

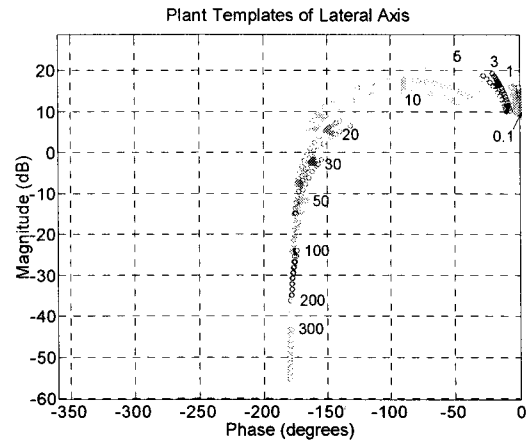
a, b, c, d 의 파라미터들은 유압의 압축성, 누설, 전기유압서보 메커니즘, 오리피스들의 비선형 요소를 포함한 불확실한 실린더 특성들을 나타낸다. 이러한 파라미터들은 특정한 상수값으로 표현할 수 없기 때문에 변화하는 파라미터의 하한치와 상한치를 결정해야만 한다.

4. 제어기 설계

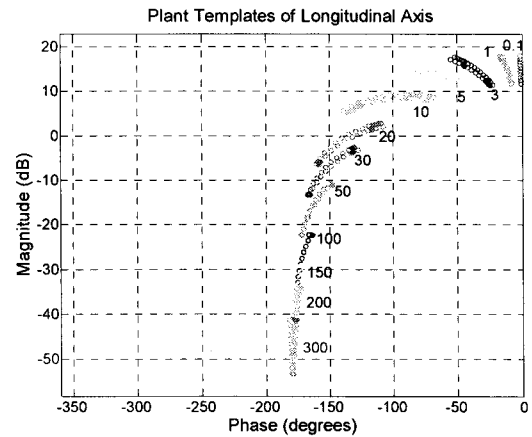
Horowitz(1963)에 의해 처음 제안된 QFT는 플랜트 $P(s)$ 에 존재하는 불확실성과 외란에 대해서 요구된 계통의 제어 성능을 보장하기 위한 주파수 영역에서의 강인 제어기 설계 이론이다. 요구되는 되먹임 양은 계통의 설계 사양으로 주어지는 강인 안정 여유, 추적 사양과 외란 제거 사양에 의해 조합된 경계 조건들과 플랜트의 파라미터에 포함된 불확실성 집합에 의해서 조정된다.^(5,11,13-16) 이 세가지 특성들은 진폭과 위상을 포함한 복소 평면에서 확실한 경계들을 가진다. 플랜트의 파라미터 변화에 따라 형성된 템플릿이 구성되어지는 불확실한 플랜트는 니콜스선도(Nichols chart)에서 루프형성(Loop shaping)을 통하여 페루프 전달함수의 주파수 응답의 크기가 설정된 허용 범위 내에 만족하는 설계가 되어져야 한다. QFT를 이용한 제어기의 설계 목적은 주어진 제어성능을 만족하는 제어기 $G(s)$ 와 입력 필터 $F(s)$ 를 설계하는 것이며, 설계 과정은 다음과 같다.

4.1 설계 사양

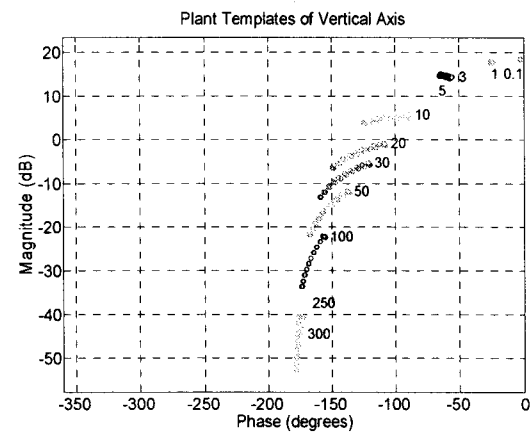
상승시간, 과도응답, 그리고 정착시간과 같은 특징적인 설계 사양들은 시간영역에서 주파수 영역으로 변환된다. 강인 안정 조건과 추적 경계 조건으로 주어지는 강인 안정성, 추적 사양과



(a) Lateral axis



(b) Longitudinal axis



(c) Vertical axis

Fig. 7 Plant Templates

외란 제거 사양을 포함한다.

4.2 플랜트 템플레이트(Plant template)

3 축 유압 도로 시뮬레이터는 Fig. 15에 나타난 것처럼 하나의 부하 질량(실제 차량 1/4 크기의

현가장치 부분에 3 개의 유압 서보 작동기가 직교하게 커플링이 된 구조이다. 서보 밸브의 스톱 변위와 부하 질량의 변화에 따라 a, b, c, d 파라미터가 변동하는 불확실한 플랜트 집합이며, 이는 식 (13)과 같다.

$$\mathbf{p} = \left\{ P_{ij}(s) = \frac{e_{ij}}{a_{ij}s^3 + b_{ij}s^2 + c_{ij}s + d_{ij}} \right\} (ij=1,2,3) \quad (13)$$

Fig. 4, Fig. 17 의 결과와 같이 각 3 축간의 커플링 효과가 미비하므로 대각성분만 고려한 a, b, c, d 의 불확실한 파라미터 변동 범위는 Table 2 와 같다.

유압 로드 시뮬레이터의 최대 작동 주파수는 약 300rad/sec 이므로 이산 주파수는 다음과 같이 선정한다.

$$\omega = [0.1, 1, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200, 300] \text{ (rad/sec)}$$

선정된 각각의 주파수에서 불확실한 플랜트의 주파수 응답인 플랜트 템플릿들은 Fig. 7 과 같이 니콜스 선도위에 나타내었다. 수평축은 위상각, 수직축은 크기(dB)이다. 250rad/sec 에서 플랜트는 미소한 위상 변화를 보임으로써 선정된 주파수대역은 적절함을 알 수 있다.

4.3 경계 조건(Boundary condition)

i) 강인 안정성(Robust Stability Bounds)

$$\left| \frac{PG}{1+PG}(j\omega) \right| \leq M_p, \omega \geq 0, P \in \mathbf{P} \quad (14)$$

P : Uncertain plant, G : feedback controller, M_p : Peak response

M_p 는 1.3 으로 설정하였고 크기는 2.3dB 이다.

ii) 추적 사양(Tracking Specification Bounds)

$$T_U(j\omega) \leq \left| \frac{FPG}{1+PG}(j\omega) \right| \leq T_L(j\omega) \quad (15)$$

T_U : upper bound, T_L : lower bound, F : pre-filter

상한 경계 조건은 $M_p = 1.3$ (Overshoot = 30%), $t_s = 0.9\text{sec}$, $tr = 0.12\text{sec}$, 하한 경계 조건은 $t_s = 1.5\text{sec}$, $tr = 0.8\text{sec}$ 으로 하여, Fig. 8 에 나타낸 것과 같이, 시간 영역으로 설계하였다. 각 경계들의 대응되는 부분은 식 (16), (17) 처럼 주파수 영역으로 변환할 수 있다.

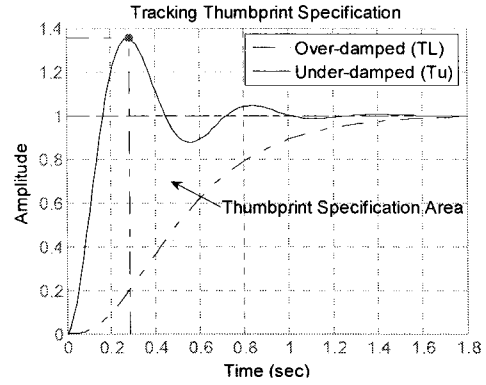


Fig. 8 The tracking thumbprint specification

$$T_U(j\omega) = \frac{0.7030(j\omega+198)}{(j\omega)^2 + 8.42(j\omega) + 139.2} \quad (16)$$

$$T_L(j\omega) = \frac{20910}{(j\omega+4.21)(j\omega+4.21)(j\omega+11.8)(j\omega+100)} \quad (17)$$

iii) 외란 제거 사양(Disturbance Rejection Bounds)

$$T_D = \frac{Y}{D} = \left| \frac{P}{1+PG}(j\omega) \right| \leq w_d \quad (18)$$

w_d : weight of disturbance rejection, 0.01

플랜트 템플레이트에 의해서 합성되는 경계조건을 계산할 필요가 있다. 이 경계 조건들에 의해서 결정할 공칭 루프 전달함수의 주파수 응답인 루프 형성을 위한 최종 경계 조건이 니콜스 선도에 의해서 주어진다.

4.4 루프형성(Loop shaping)

요구되는 경계 조건들을 니콜스 선도에 나타내고, 불확실한 템플릿은 언급한 경계들 위에 조건에 맞는 루프전달함수를 결정할 수 있다. 이러한 절차를 루프형성이라고 한다. 최적의 설계를 위해 강인 안정성의 여유를 나타내는 U-레직에 근접하고, 합성된 최종 경계 조건들을 만족하는 공칭루프 전달함수 $L_0(s)$ 가 결정된다. 루프 형성 기법은 시행 착오에 의해서 제어기와 입력 필터 설계를 한다. 설계 방법으로는 먼저 개인을 조절하고, 영점 그리고 극점을 첨가하는 순서로 한다. 이 때, 공칭 루프전달함수가 안정도 한계를 침범하지 않도록 한다. 극점은 고주파에서 roll-off 특성을 주어 강인성을 향상시킨다.

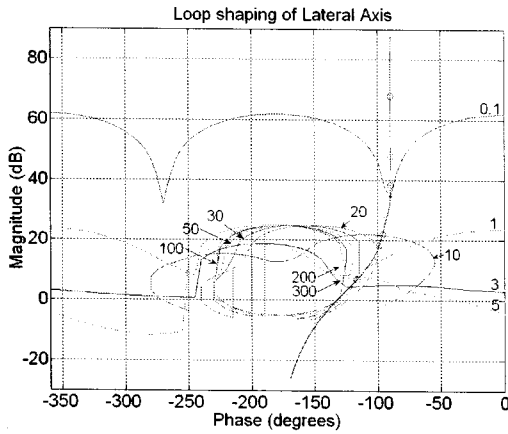


Fig. 9 Controller design of lateral axis

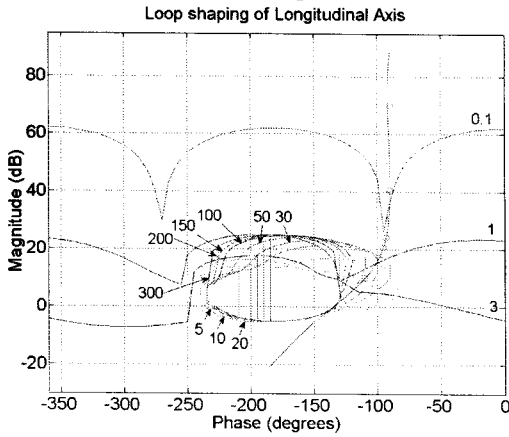


Fig. 10 Controller design of longitudinal axis

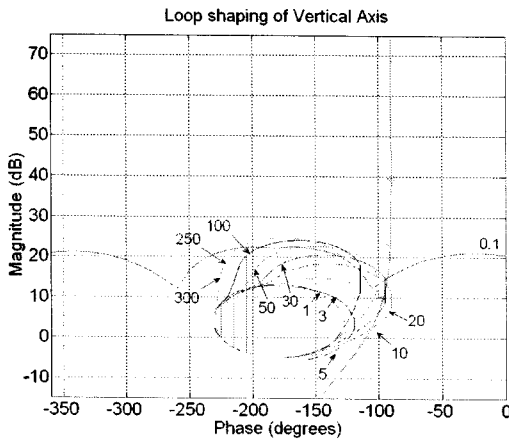


Fig. 11 Controller design of vertical axis

4.5 제어기 설계

Fig. 9 ~ Fig. 11 는 4.4 절의 루프형성법에 따라서 모든 경계조건들을 만족하는 최종 루프형성 결과를 나타내었다. 루프형성은 U-궤적의 인터셉트이며, 모든 주파수 범위에서 경계 조건들을 만족하여야 한다. 이때, 제어기 분모 (극점)의 차수는 플랜트 분모의 차수 보다 작아야 하며 제어기 분자의 차수

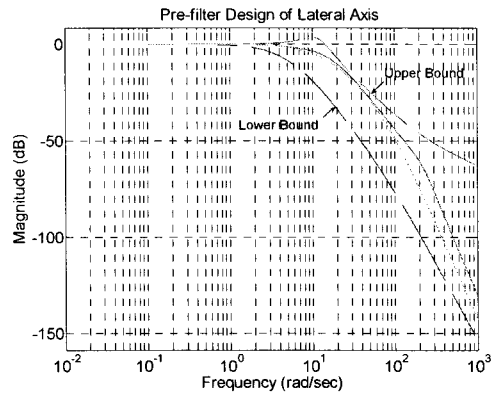


Fig. 12 Pre-filter design of lateral axis

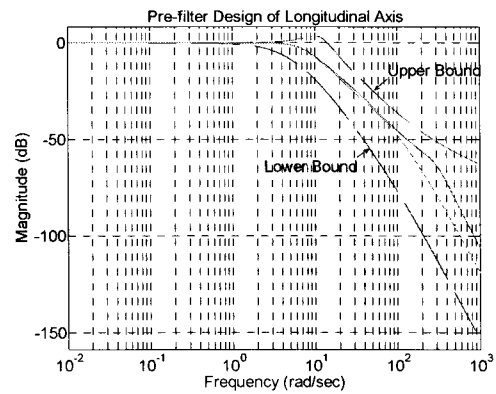


Fig. 13 Pre-filter design of longitudinal axis

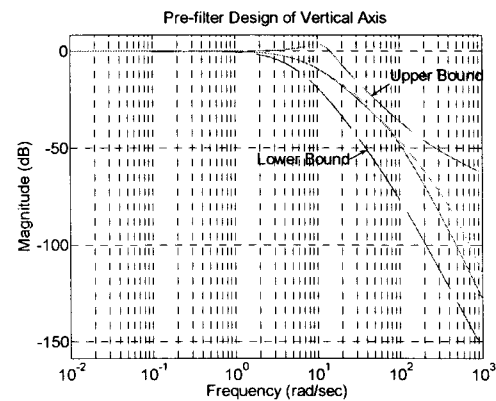


Fig. 14 Pre-filter design of vertical axis

는 분모보다 작아야 한다.

$$G(s) = \frac{40(s/100 + (2 \times 0.58)s/10 + 1)}{s(s/400 + 1)} \tag{19}$$

$$G(s) = \frac{40(s/4.4 + 1)(s/22 + 1)}{s(s/300 + 1)} \tag{20}$$

$$G(s) = \frac{35(s/2.35 + 1)(s/40 + 1)}{s(s/850 + 1)} \tag{21}$$

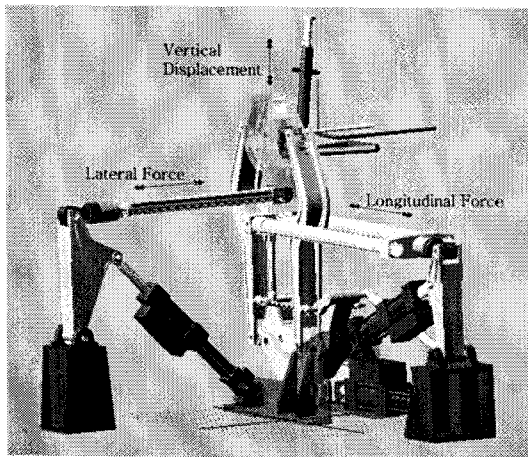


Fig. 15 Adams model of the hydraulic road simulator

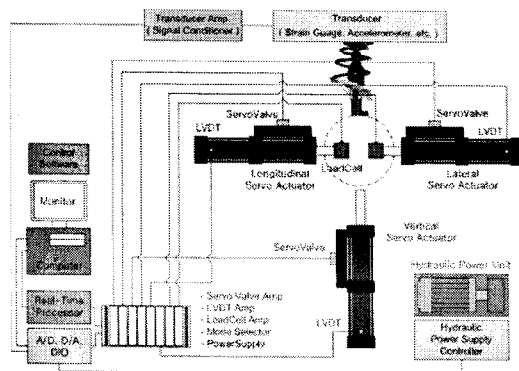
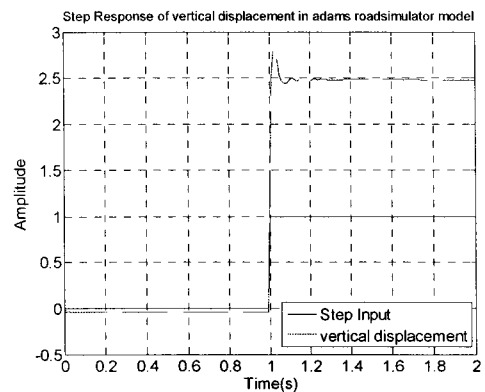


Fig. 16 Block diagram of the hydraulic road simulator

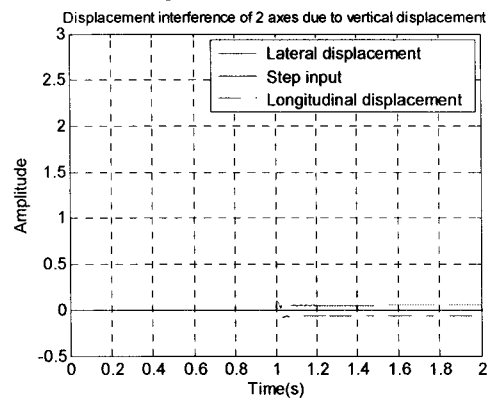
루프 형성의 결과로 얻어진 공칭 루프 전달함수는 Fig. 9-11로부터 각각의 $L_i(s) = G(s)P_i(s)$ 이다. $P_i(s)$ 는 공칭 플랜트(Nominal plant)이다. 공칭 플랜트 $P_i(s)$ 는 Table 2에서 변화하는 파라미터 중에서 어느 것이든 선택이 가능하다. 로드 시뮬레이터의 최종 힘 제어기 $G(s)$ 설계는 2 차 전달함수로 식 (19-21)과 같이 저 차수 전달함수를 설계 하였다. 이것은, 설계자의 노력(trial and error)이 필요로 하는 힘은 과정 이다

4.6 입력 필터(Pre-filter) 설계

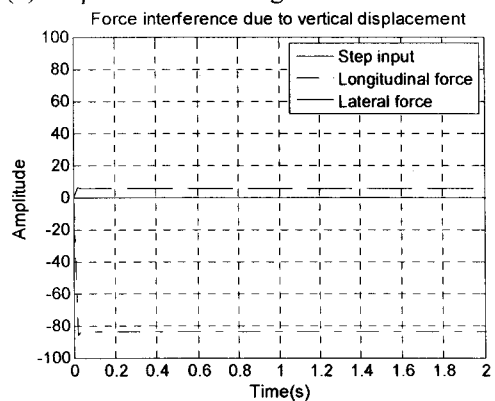
추적 사양 조건이 크게 요구될 때에는 조건에 맞는 주파수 대역을 통과 시키기는 입력 필터를 설계한다. Fig. 12-14와 같이 입력 필터는 실린더의 작동하는 범위를 고려하여 루프형성법에 따라서 설계하였다. 제어기 설계하는 방법과 비슷하다. 입력 필터 $F(s)$ 설계는 식 (22-24)와 같이 설계하였다.



(a) Displacement of vertical axis



(b) Displacements of longitudinal and lateral axis



(c) Force of longitudinal and lateral axis

Fig. 17 Simulation relating to cross coupling effect

$$F(s) = \frac{1}{(s/10 + 1)(s/20 + 1)(s/30 + 1)} \quad (22)$$

$$F(s) = \frac{s + 1}{(s + 1)(s^2/49 + 1.414s/7 + 1)} \quad (23)$$

$$F(s) = \frac{1}{(s/5 + 1)(s/13 + 1)(s/120 + 1)} \quad (24)$$

H_2/H_∞ 기법, μ 기법과 같은 다른 강인 제어기는 일반적으로 고차 전달 함수의 제어기로 설계되기 때문에 정량적 피드백 제어 시스템의 설계 특징은

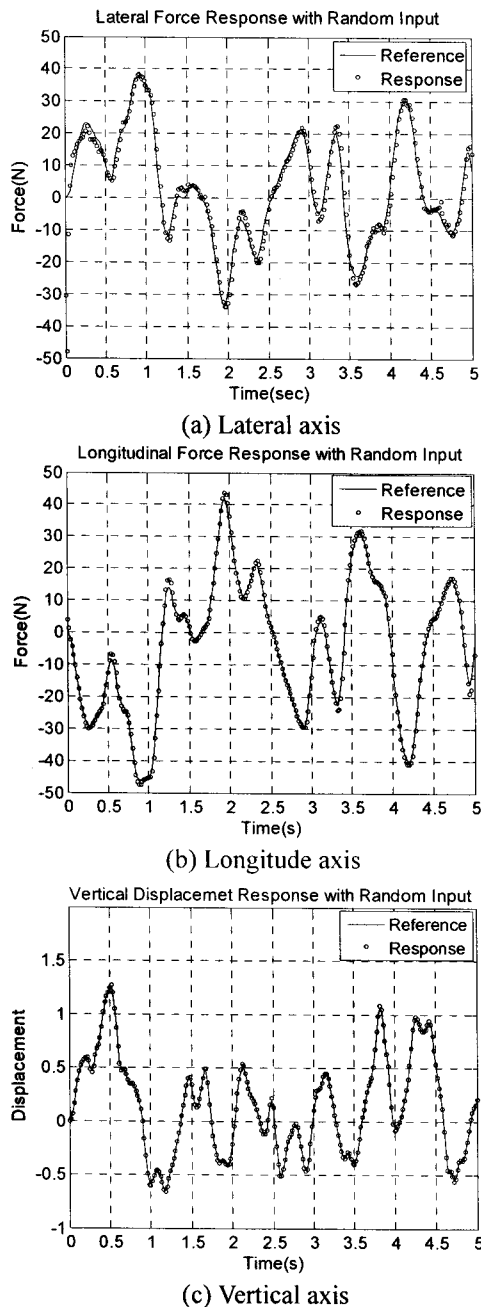


Fig. 18 Simulation Results

불확실한 모델을 Fig. 9~Fig. 14 와 같이 추종 성능을 만족하는 저 차수 전달함수의 제어기와 입력 필터 설계에 있다. 불확실한 파라미터들로 구성된 3 축 유압 도로 시뮬레이터에 정량적 피드백 제어 시스템 설계는 처음 이루어졌다.

5. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 나타난 3 축 유압 도로 시뮬레이터는 Fig. 15 와 같고 부하장치는 1/4 실차 크기에 해

당하고, 그의 구성도는 Fig. 16 과 같다. 이 시뮬레이터는 실제 차량과 동일하게 종, 횡축 방향은 힘을 제어하고 수직축 방향은 변위 제어를 한다. 횡축 방향 작동기는 30kN, 종축 방향 작동기는 50kN 과 수직축 방향 작동기는 100kN 까지의 부하 힘을 낼 수 있다. 서보 밸브는 126Lpm(63Lpm*2)과 800Lpm (Vertical Axis)까지 작동이 된다. 최대 공급 압력과 유량은 210MPa, 327Lpm 이다.

5.1 3 축 유압 도로 시뮬레이터의 커플링 결과
3 축 유압 도로 시뮬레이터의 각 축 방향간의 연성 작용(Coupling effect) 관계를 알아보기 위해 Matlab simulink 와 아담스 모델과 연동하여 시뮬레이션을 했다. 수직 축 움직임에 종, 횡 방향 축들이 가장 많은 영향이 있으므로, 수직 축에 스텝 입력을 가하고 나머지 축의 입력은 '0'으로 했다.

Fig. 17 의 그래프들과 같이, 연성 작용의 결과는 거의 간섭이 없는 것으로 판단되어진다. 횡축의 힘(c)이 다소 크지만 가해지는 힘의 입력보다는 매우 작으므로 무시할 수 있다. 그러므로 MIMO 구조의 시스템을 MISO 구조의 시스템으로 분리가 가능하다. 이때, 축간의 연성작용을 외란 입력으로 한다.

5.2 3 축 유압 도로 시뮬레이터의 시뮬레이션 결과

Fig. 9 와 같이 MISO 폐루프 구조에서 설계한 정량적 피드백 제어 시스템을 종, 횡, 수직 축 방향에 각각 3 개의 제어기와 입력 필터를 사용하고 아담스 모델(유압 성분이 포함된 복합 플랜트)이 복합된 플랜트와 연동하는 Matlab simulink 를 구성하여 5 초간 시뮬레이션을 하였다.

도로 데이터로는 랜덤 입력을 사용하였다. 종, 횡 축 방향은 힘 제어를 하며, 수직 축 방향은 변위 제어를 하였다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 18 에 나타내었다.

결과적으로, 아담스 모델과 연동함에 있어서 설계된 제어기가 각 축간의 미소한 커플링 작용과 실시간으로 플랜트가 변화함에도 불구하고 강인하다고 결정할 수 있었다.

6. 결론

유체의 압축성, 유체의 누설, 전자적인 서보 밸브의 구성 요소 그리고 다축의 기계적인 연결의 비선형성과 같은 불확실한 파라미터들을 가진 3 축 유압 도로 시뮬레이터의 폐루프 정량적 피드백 제어

시스템을 설계하였다. 설계된 제어기는 실시간 제어 방법에서 효율적인 저 차수 전달함수이다.

본 제어 시스템 설계에 있어서, $m \times m(3 \times 3)$ MIMO 제어 시스템을 동등한 $m^2(3^2)$ 개의 MISO 제어 시스템으로 분리하여 정량적 피드백 제어 시스템 설계가 가능함을 보여주었다. 또한, MISO 제어 시스템으로 분리 되어 설계된 제어 시스템은 본래의 MIMO 시스템 성능을 만족하였다.

그러므로, MIMO 시스템 구조를 MISO 시스템 구조로 분리하는 방법과 설계한 제어 시스템은 안정성, 추종성, 외란에 대해 만족한 성능을 가졌다고 판단된다.

참고문헌

- (1) Chait, Y. and Hollot, C.V., 1990, "A Comparison Between H_∞ Methods and QFT for a Single-loop Plant with Both Parametric Uncertainty and Performance Specifications," *Recent Development in Quantitative Feedback Theory, ASME WAM Config.*, O.D.I. Nwokah, ed., pp. 33~40.
- (2) Horowitz, I.M., 1963, "Synthesis of Feedback Systems," Academic Press, New York.
- (3) Horowitz, I.M. and Sidi, M., 1972, "Synthesis of Feedback Systems with Large Plant Ignorance for Prescribed Time-Domain Tolerance," *Int.J. Control*, 16(2), pp. 287~309.
- (4) Shaked, U., Horowitz, I.M. and Glode, S., 1976, "Synthesis of Multivariable Basically Non-interacting Systems with Significant Plant Uncertainty," *Automatica*, Vol. 12, pp. 61~71.
- (5) Horowitz, I.M., 1982, "Improved Design Technique for Uncertain Multi Input Multi Output Feedback Systems," *Int.J. Control*, Vol. 36, No. 6, pp. 977~988.
- (6) Horowitz, I.M., Loecher, C.Y., 1981, "Design of a 3*3 Multivariable Feedback System with Large Plant Uncertainty," *Int.J. Control*, 33:4, pp. 677~699.
- (7) Yaniv, O. and Horowitz, I.M., 1986, "A Quantitative Design Method for MIMO Linear Feedback Systems Having Uncertain Plants," *Int.J. Control*, 43, pp. 402~421.
- (8) Yaniv, O., 1999, "Quantitative Feedback Design of Linear and Nonlinear Control Systems," Kluwer Academic Publishers.
- (9) D'Azzo, J.J. and Houpis, C.H., 1988, "Linear Control System Analysis," McGraw-Hill Inc.
- (10) Horowitz, I.M., 1992, "Quantitative Feedback Theory(QFT)," QFT Publication, 4470 Grinnell Ave., Boulder, Colorado, 80303.
- (11) Borghesani, C., 1993, "Computer Aided Design of Robust Control Systems Using the Quantitative Feedback Theory," M.S. Thesis, Mechanical Engineering Department, University of Massachusetts, Amherst, MA.
- (12) Chait, Y. and Yaniv, O., 1993-2003, "Quantitative Feedback Theory Toolbox User's Guide," Terasoft Inc..
- (13) Park, M.S., 1994, "A New Approach to Multivariable Quantitative Feedback Theory," Ph.D. Thesis, Uni. of Massachusetts, Amherst, MA.
- (14) Park, M.S. and Lee, J.W., 1998, "Direct Multivariable Quantitative Feedback Theory," *Trans. of the KSME (A)* Vol. 22, No. 3, pp. 562~568.
- (15) Ziegler, J.G., Nichols, N.B., 1942, "Optimum Settings for Automatic Controllers," *ASME Trans.* 64, pp. 759-68.
- (16) Kim, J.W., Xuan, D.J., Kim, Y.B., 2007, "Design of Force Control System for a Hydraulic Road Simulator Using Quantitative Feedback Theory," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 31, No. 11, pp. 1069~1076.