

# QFT 를 이용한 전기유압 하이브리드 부하 시뮬레이터의 능동 힘제어

## Active Force Control of Electro-Hydraulic Hybrid Load Simulator using Quantitative Feedback Theory

윤주현<sup>1</sup>, ✉안경관<sup>2</sup>, 딩광형<sup>1</sup>, 조우근<sup>1</sup>  
 Joo Hyeon Yoon<sup>1</sup>, ✉Kyoung Kwan Ahn<sup>2</sup>, Dinh Quang Truong<sup>1</sup> and Woo Geun Jo<sup>1</sup>

1 울산대학교 기계자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Univ. of Ulsan)

2 울산대학교 기계자동차공학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Univ. of Ulsan)

✉ Corresponding author: kkahn@ulsan.ac.kr, Tel: 052-259-2282

Manuscript received: 2007.12.3 / Revised: 2008.11.12 / Accepted: 2008.11.29

*Today, reduction of CO<sub>2</sub> exhaustion gas for global-warming prevention becomes important issues in all industrial fields. Hydraulic systems have been widely used in industrial applications due to high power density and so on. However hydraulic pump is always being operated by engine or electric motor in the conventional hydraulic system. Therefore most of the conventional hydraulic system is not efficient system. Recently, an electro-hydraulic hybrid system, which combines electric and hydraulic technology in a compact unit, can be adapted to a wide variety of force, speed and torque requirements. In the electro-hydraulic hybrid system, hydraulic pump is operated by electric motor only when hydraulic power is needed. Therefore the electro-hydraulic system can reduce the energy consumption drastically when compared to the conventional hydraulic systems.*

*This paper presents a new kind of hydraulic load simulator which is composed of electro-hydraulic hybrid system. Disturbances in the real working condition make the control performance decrease or go bad. QFT controller is designed to eliminate or reduce the disturbance and improve the control performance of the electro-hydraulic load simulator. Experimental results show that the proposed controller is verified to apply for electro-hydraulic hybrid system with varied external disturbances.*

Key Words: Quantitative Feedback Theory (양자화피드백제어), Hydraulic (유압), Load Simulator (부하시뮬레이터), Hybrid Actuator (하이브리드 액추에이터), Robust Control (강건 제어)

### 1. 서론

유압 시스템은 단위면적당 출력이 크고, 과부하 방지가 쉽게 되며, 힘 조절이 쉬워 큰 힘이 요구되는 증장비 등과 같은 산업 분야에서 중요한 역할을 하고 있다. 유압기술은 정확한 속력 제어,

제어용이성, 신뢰성 및 비용절감 등을 달성하기 위하여 빠르게 개발되고 있다. 또한, 환경적인 측면도 고려되어 소음, 에너지 소비, 폐유처리 역시 유압 시스템의 성능을 평가하는 중요한 변수로 작용하고 있다.

현재 사용되고 있는 대부분의 유압 시스템에서

는 각종 밸브나 펌프, 배관 등을 통해서 많은 유압 에너지가 열에너지로 변환되어 에너지손실이 되고 있다. 또한, 구성 요소가 복잡하며 규모가 크기 때문에 다루기가 어렵고, 설치공간이 작은 경우에는 적용하기 어렵다. 이러한 유압 시스템의 단점을 개선하고 친 환경적인 조건을 만족하기 위해 전기-유압 하이브리드 액추에이터가 제안되었다. 이는 항상 구동되는 엔진(전기모터)과 가변 유압펌프를 대신하여 전기모터와 고정용량형 유압펌프를 일체화하여 사용한다. 제어는 기존에 서보밸브나 비례제어밸브, 가변 유압펌프의 사판각 제어 대신, 전기모터의 회전수와 회전방향제어로 전기-유압 하이브리드 액추에이터의 작동을 제어하게 된다. 이에 따라 실험장치의 구성비용을 줄이고, 작동시에만 전기모터를 구동해서, 유압펌프를 구동하게 되므로 기존의 에너지 손실에 대해 상당한 에너지 절감효과를 얻을 수 있다. 최근에는 전기모터와 유압펌프를 일체화시킨 전기유압 유닛을 구성하여 에너지 효율을 개선하기 위한 연구, 개발이 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서 사용한 전기유압 하이브리드 액추에이터의 유압 회로를 Fig. 1 에 나타내고 있다. 이 전기유압 하이브리드 액추에이터는 Rahmfeld<sup>1</sup> 에 의해 기존의 유압장치보다 상당한 에너지 절감효과가 있음이 검증되었다. 그러나 유압시스템은 작업조건에 따른 작동유의 온도변화에 따라 온도가 상승하면 점성변화가 크며, 작동유의 압축성과 작업환경에 따른 외부부하조건이 변동함으로써, 고정도의 힘 제어가 어려웠다.<sup>2</sup> 이러한 유압시스템의 단점을 해결하기 위하여 여러 가지 힘 제어 방법들이 제안되어, 기존의 유압 장치에서 많은 실험이 수행되었다. 그러나 본 논문에서와 같이 전기모터의 회전속도제어를 통하여 힘 제어를 적용한 사례는 드물다. 한 사례로 Grabbel<sup>3</sup> 는 전기유압 시스템의 위치와 속도를 제어하기 위해 2 가지의 제어기법을 사용하였다. 그러나 낮은 감쇠비에서는 비선형문제를 해결했으나, 주위의 부하가 바뀌면 다시 불안정한 결과를 보였다.

본 논문에서는 전기유압 하이브리드 액추에이터의 힘 제어를 위해 QFT 강건 제어기를 제안한다. QFT 기술은 로봇의 위치 제어, 항공기 작동장치, 산업 시스템 등 많은 공학문제를 해결하는데 응용되어 왔다. Niksefar<sup>4</sup> 는 기존의 유압시스템의 불안정한 요소를 강건 제어기를 적용하고, 비선형적인 문제들은 QFT 기술을 적용하여 해결했다.

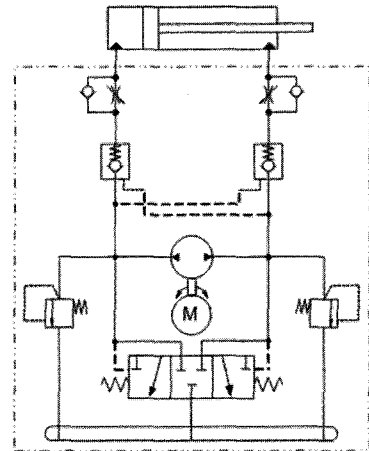


Fig. 1 Schematic diagram of electro-hydraulic hybrid system

그리고 Thompson<sup>5</sup> 은 가변 베인 펌프의 성능을 향상시키기 위해 QFT 를 적용해 강건 제어기를 최적화 하는데 성공하였다.

본 논문에서는 앞서 언급한 전기-유압 하이브리드 시스템을 응용하여 외부의 다양한 외란을 모사하는 부하시뮬레이터를 제안하고, 전기-유압 하이브리드 액추에이터에 QFT 를 적용해 강건 제어기의 성능을 평가하고자 한다.

## 2. 실험장치

### 2.1 전기유압 하이브리드 액추에이터의 원리 및 특징

전기유압 하이브리드 액추에이터는 전동기의 회전각 및 회전속도의 제어에 의하여 실린더의 힘 및 위치제어를 구현할 수 있으며, 이는 기존의 유압시스템이 작동기의 동작과는 상관없이 상시 구동되고 또한 펌프 토출유량이 압력손실요소인 제어밸브를 거쳐 작동기에 공급되는 시스템과 비교할 때, 상당한 에너지가 절감될 수 있다. 본 유압시스템의 제어는 기존의 방향절환밸브가 아닌 전기모터의 회전방향으로 제어가 되고, 유량은 전기모터의 회전 속도로 제어가 구현될 수 있다. 따라서 전기유압 액추에이터의 작동은 양방향 기어 펌프와 DC 모터가 체결되어 구동함으로써 액추에이터에 작동유를 공급하게 된다. 또한 액추에이터 내의 용적차이에 따른 작동유의 유량 보상은 펌프와 일체로 구성된 밸브를 통해 필요한 유량이 공급되거나 유압탱크로 귀환되도록 구성되어 있다.

### 2.2 전기유압 하이브리드 부하시물레이터

부하시물레이터는 제품이 출하되기 전에 시스템의 성능 및 내구성 등을 실험실내에서 평가하는 단계에서 필수적인 장치이다. 본 연구에서는 Fig. 2 와 같은 전기유압 하이브리드 부하시물레이터를 구성하여 시스템의 성능을 실험하고자 한다. 본 부하 시물레이터의 구체적인 사양은 Table 1 에 보여주고 있다. 전기유압 하이브리드 액추에이터를 이용한 부하시물레이터의 개념도를 Fig. 3 에 나타내고 있다. 본 시스템은 IBM 컴퓨터와 각 센서로부터의 계측량(실린더의 양 챔버의 압력, 실린더 변위 및 로드셀에서의 압축 및 인장력)을 A/D 보드를 통하여 컴퓨터에 받아들이고 있으며, 이를 바탕으로 모터제어를 위한 제어입력 값이 컴퓨터에서 연산되어 이를 D/A 보드를 통하여 출력한다.

Table 1 Electro-hydraulic hybrid load simulator parameter

Components	Specification	Setting
AC servo motor (Test part)	YASKAWA ELECTRIC SGMGH-30PCA21	2.9kW, 2000rpm
Hydraulic Piston Pump (Test part)	PUMP Displacement	16cc/rev
AC servo motor (Disturbance Generation part)	OTIS-LG FMA-KN55-EB01	5.5kW, 2000rpm
Hydraulic Pump (Disturbance Generation part)	PUMP Displacement	15cc/rev
Cylinder (Test part)	HYE MYUNG 201H-FA63-150ST	Rod Dia.: 35mm
		Stroke : 150mm
		Cyl. Dia.: 63mm
Cylinder (Disturbance Generation part)	HYE MYUNG 210H-FY63BB105	Rod Dia.: 35mm
		Stroke : 105mm
		Cyl. Dia.:63mm

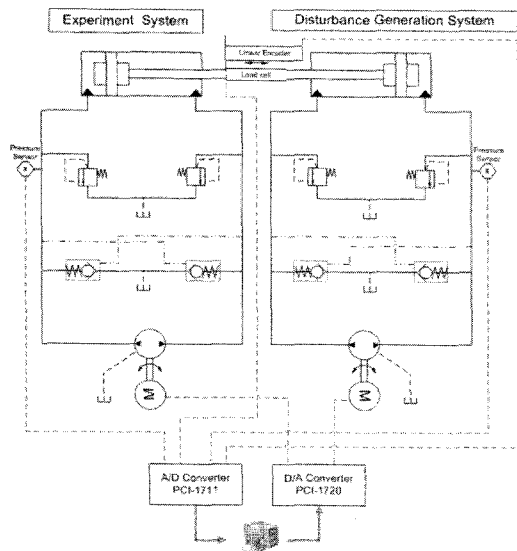


Fig. 2 Hydraulic circuit of electro-hybrid load simulator

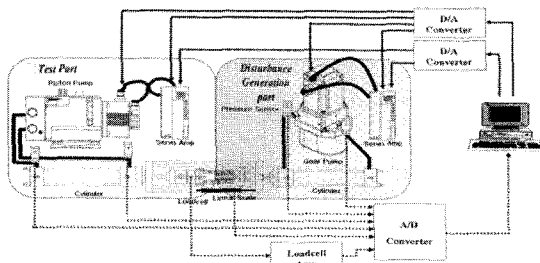


Fig. 3 Schematic diagram of electro-hybrid load simulator

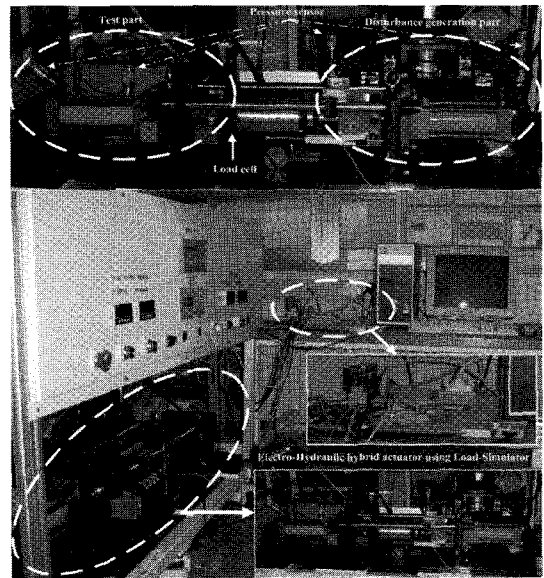


Fig. 4 Photograph of experimental of electro-hybrid actuator

### 3. QFT 제어기 설계

#### 3.1 QFT 제어기 설계 이론

Quantitative feedback theory (이하 QFT)는 구조화된 시스템의 비선형적인 특징과 외란에도 불구하고 강건한 시스템 제어성능을 얻기 위한 제어이론이다.<sup>6</sup> 이 제어이론은 1960년대 Horowitz<sup>7</sup>에 의해

처음 소개되었고, 그에 의해 발전되었다. QFT 는 주파수 영역에서의 설계를 기본으로 하며 연속적인 시간 피드백시스템의 강건 제어기 설계에 실용적인 방법을 제시한다.

Fig. 5 의  $P(s)$ ,  $G(s)$  및  $F(s)$ 는 불확실성을 포함하고 있는 플랜트, 중속 보상기 및 입력 필터의 전달함수를 각각 나타낸다. Fig. 5 에서 제어기  $G(s)$  는 플랜트  $P(s)$ 의 불확실성에 의한 출력  $y(t)$ 가 허용오차내에 존재하도록, 그리고 외란  $d_1$ 의 영향을 가능한 작게 유지하도록 설계되어야 한다. 또한 입력 필터  $F(s)$ 는 요구된 시간영역사양을 만족하도록 설계되어야 한다.<sup>7-9</sup>

**3.1.1 모델구성**

일반적인 피드백 제어계의 설계목표는 시간영역에서 주어진다. 주파수영역에서 수행되는 QFT 에 의한 설계를 위해서는 시간 영역에서 주어진 설계사양을 주파수영역의 경계조건으로 변환한 모델의 주파수 전달 함수를 합성할 필요가 있다.

QFT 강건 제어기 설계의 첫 단계로서 플랜트 전달함수에서 불안정한 집합을 찾아내는 것이다. 본 연구에서는 전기유압 액추에이터의 선형 시간등가 전달함수 집합 중에서 실험적인 주파수 응답으로부터 시스템의 주요 불안정한 영역을 찾는다.

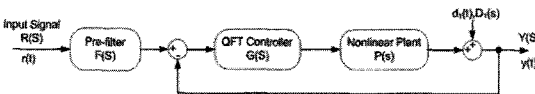


Fig. 5 Structure of QFT control algorithm

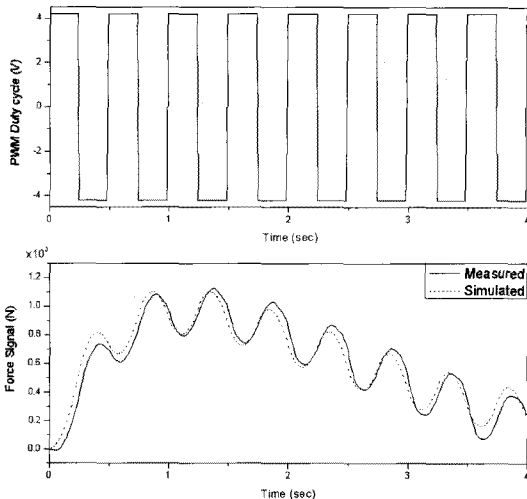


Fig. 6 Identification of the system model using PRBS

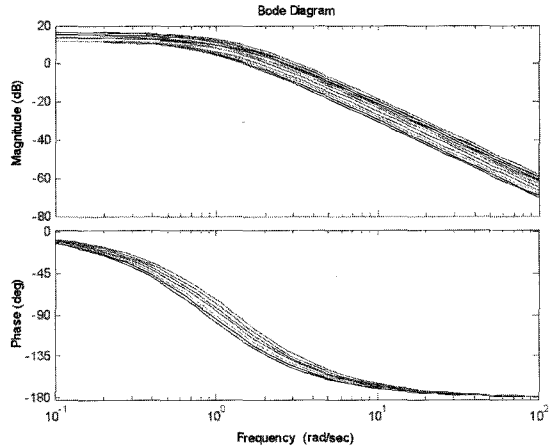


Fig. 7 Frequency responses of electro-hydraulic hybrid actuator

유사랜덤이진신호 (Pseudo Random Binary Signal, PRBS)<sup>10</sup> 를 입력하여 다수의 실험을 실시한다. PRBS 는 다수의 주파수 성분을 포함한 신호로 시스템 추정시에 자주 활용된다. 이 과정에서 외란으로서 진폭 0.2~0.8V, 주파수(Frequency) 2rad/sec 인 정현파를 부가하고, 노이즈 신호로서 0.0005~0.001V 를 인가한다. 각 실험에서는 PRBS 입력에 대하여 PWM 제어 신호를 발생시킨다. 샘플링 시간은 0.01s 로 하고 시스템의 전달함수는 그 극이 2 개의 실근이 존재하도록 시스템 모델을 다음과 같이 설정한다.<sup>10</sup>

$$P(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_1}{(1+T_{p1}s)(1+T_{p2}s)} \quad (1)$$

여기서,  $U(s)$ 는 하이브리드 액추에이터에 공급되는 PWM 신호에 대한 라플라스 변환을,  $Y(s)$ 는 하이브리드 액추에이터의 실린더 끝단에서 발생한 힘에 대한 라플라스 변환을 각각 의미하고 각 파라메터에 대한 범위는 다음과 같다.

$$K_1 \in [3.79, 6.81]; T_{p1} \in [0.75, 1.16]; T_{p2} \in [0.75, 1.16];$$

Fig. 6 은 PRBS 신호를 이용하여 시스템을 동정한 결과와 실험결과를 비교한 그래프이다. 상기 파라메터의 범위에 대하여 시스템의 주파수 응답의 영역을 나타낸 그래프를 Fig. 7 에 나타내고 있다. 위의 결과를 바탕으로 공칭 플랜트는 다음과 같이 선정하였다.

$$P_n(s) = \frac{5.3}{(1+0.85s)(1+0.85s)} \quad (2)$$

**3.1.2 QFT 제어기 합성**

이 절에서는 불확실성을 가진 전달함수에 의해 표현되는 전기유압 하이브리드 액추에이터를 위한 강건 제어기의 합성에 대하여 소개한다.

QFT 제어기의 추종성능을 만족시키기 위해 시간영역에서 시스템의 성능사양을 바탕으로 규범 모델을 설정해야 한다. 이 시스템에서 제어 성능을 만족하기 위한 제어기의 사양은 다음과 같다.

- 정착시간  $\leq 1.5[s]$
- 최대 침투치  $\leq 5[\%]$

상기 시간응답을 만족하도록 다음과 같은 페루프 전달함수를 정의할 수 있다.

$$|T_l(j\omega_i)| \leq |T(j\omega_i)| \leq |T_u(j\omega_i)| \quad (3)$$

여기서,

$$T(s) = \frac{F(s)G(s)P(s)}{1+G(s)P(s)} \quad (4)$$

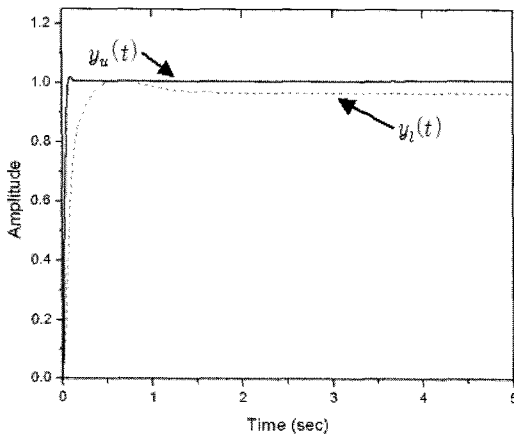


Fig. 8 Desired performance of system

Fig. 8 에서 보여주는 응답  $y_u(t)$ 와  $y_l(t)$ 는 각각 상하부의 경계를 나타내며, 만족스러운 설계를 위해서 시스템의 응답이 이 경계 내에 존재해야 한다.

$T_u(s)$ 와  $T_l(s)$ 의 설계시, 정상상태 응답특성과 목표 궤적 추적성능의 하한치와 상한치를 만족하도록 Matlab 의 Control System Toolbox 에 있는 SISO Design Tool 을 이용하였다. 이 Tool 은 개루프시스템의 근궤적, 보드선도 및 니콜라스 선도를 도식적으로 나타냄으로써 SISO 보상기를 설계하도록 도와준다. 실제 허용 가능한 전달함수는 상기 Tool 을 이용하여 시행착오적으로  $T_u(s)$ 와  $T_l(s)$ 를 다음에 주어진 식과 같이 결정하게 되었다

$$T_u(s) = \frac{0.0673s^2 + 3833s + 41.31}{s^3 + 99.5s^2 + 3810s + 38.45}$$

$$T_l(s) = \frac{540.4s^2 + 5563s + 12290}{s^4 + 51.7s^3 + 1171s^2 + 6538s + 12700} \quad (5)$$

Fig. 9 는 이들에 대한 주파수 응답이다. 이러한 요구조건에 더하여 페루프 시스템에 대한 안정도 여유는 이득여유(Gain Margin; GM)과 위상여유(Phase Margin; PM)에 관한 조건으로 명시된다. 일반적으로 GM 은 6dB (본 제어기에서는 3dB), 그리고 PM 은 45[°]이상으로 설정된다.

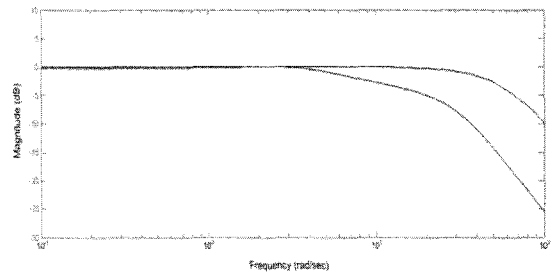


Fig. 9 Frequency response of upper and lower closed-loop transfer function

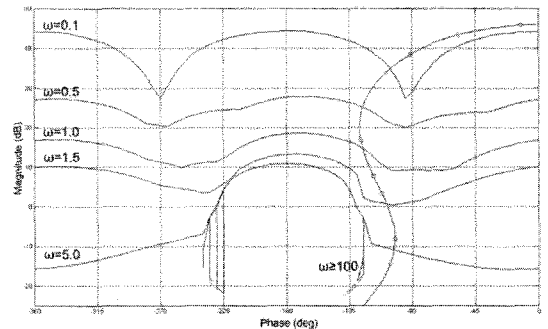


Fig. 10 QFT bounds and shaping of  $L_0(j\omega)$  on the Nichols chart

QFT 제어기 설계에 있어서의 설계요구조건은 Fig. 10의 Nichols chart에서 M-circle 경계로 표현될 수 있다. 즉, 이득영역내로 루프 게인선도가 침범하지 않으면, GM 과 PM 은 보장되며, 이 관계는 아래와 같이 된다.

$$\left| \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq M = 1.4, \omega \geq 0 \quad (6)$$

여기서  $L(s)=P(s)G(s)$ 이다.

시스템 출력에서 외란 제거를 위해서는 민감도 저감 문제가 해결되어야 한다. 여기서 외란 증폭의 첨두치를 제한하기 위해 일정한 상한치가 다음과 같이 고려된다.

$$\left| \frac{1}{1+L(j\omega)} \right|_{\max} \leq M_D(\omega) = 1.2 \forall \omega \in [0, \omega] \quad (7)$$

이렇게 결정된 플랜트 불확실성에 대해 QFT 제어기 결정은 플랜트가 어느 정도의 모델 불확실성을 갖는 것에 따라 달라진다. 따라서 QFT 제어기 설계에 앞서 제어 대상인 플랜트의 불확실성을 정량화하여 표현할 필요가 있다. 불확실성 정도를 각 주파수 별로 Nichols chart 에 기록한 것을 템플릿(Template)이라고 부르며, 이 템플릿은 Fig. 9 를 만족시키기 위해서는 특정 주파수에 대한 추종 경계위로 템플릿이 위치되어야 한다. 이렇게 결정된 템플릿에 대해 표현상의 편의를 위해 공칭 플랜트를 선정하게 되는데 이는 사각형꼴 템플릿에서 우측 하단 점으로 결정되는 조건에 대해 설정된다.

식(3), (6), (7)에 따라 전기유압 하이브리드 액추에이터의 루프 게인에 구속 조건이 주어진다. Fig. 10 에서 추종 경계 영역은 주파수  $\omega$ (rad/sec) [0.1, 0.5, 1, 1.5, 5, 100]에서의 템플릿을 나타낸다. 여기서 루프게인의 점들은 공칭 플랜트의 Nichols plot 를 의미한다. 이는 전기유압 하이브리드 액추에이터가 최소 유량 게인, 최소 고유진동수를 갖는다는 조건으로 설정되었다.

위와 같은 불확실성을 갖는 개루프 플랜트가 미리 정의된 제어기 성능 및 안정도 여유에 관한 설계조건을 만족시키기 위해서는 QFT 제어기가 위에서 정의된 공칭 플랜트의 Nichols chart 가 특정 주파수에서 추종 경계선 상단에 위치하도록 설계되어야 한다. 식 (8)와 같은 제어기를 선정하면 특

정 주파수에 대해 공칭 플랜트의 Nichols chart 를 모두 추종 경계선 상단부에 위치시킬 수 있다.

$$G(s) = \frac{5.406 \times 10^6 s + 1.38 \times 10^7}{s^2 + 2143s + 7.557 \times 10^5} \quad (8)$$

위에서 설계된  $G(s)$ 는 불확실성을 갖는 개루프 플랜트에 대해 페루프 응답특성은 단지  $T(s)$ 의 변화가 식(3)의 구속과 같거나 작을 때만을 보장한다. 그러므로 이때의 응답특성은 Fig. 11 과 같이 나타난다. 따라서 모든 추적 응답이 주파수 영역을 만족시킬 수 있도록 QFT 전처리 필터가 요구된다. 본 실험의 전처리 필터는 식(9)와 같다.

$$F(s) = \frac{0.06696s + 39.9}{s + 39.9} \quad (9)$$

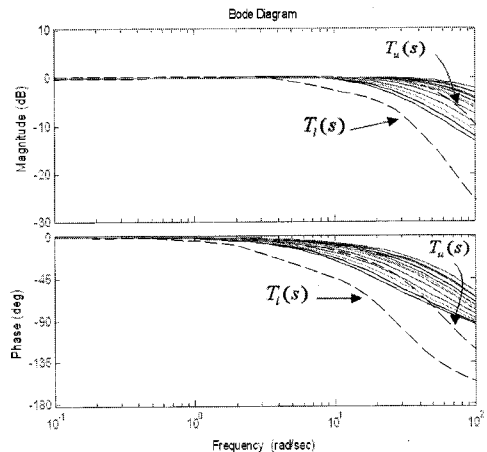


Fig. 11 Closed-loop frequency response without pre-filter

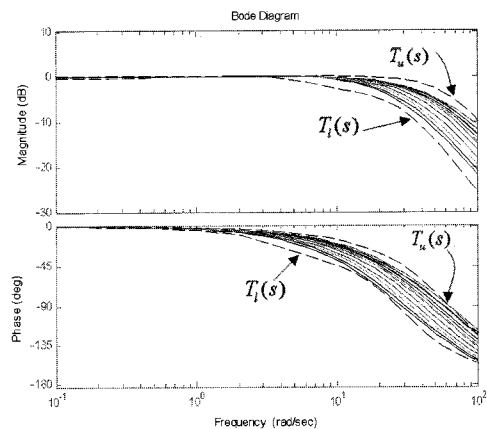


Fig. 12 Closed-loop frequency response with pre-filter

Fig. 11 과 Fig. 12 는 전처리 필터가 있는 경우와 없는 경우에 대한 페루프 주파수 응답을 나타낸다. 이것은 전처리필터가 있는 경우 모든 주파수 영역에서 추종성능을 만족하는 것을 나타내고 있다.

### 3.2 실험결과

본 실험은 설계된 QFT 제어기의 성능을 평가하기 위하여 외란으로 진폭 0.2V~0.8V 주파수 2 rad/sec 인 정현파를 인가하였다. 그리고 센서의 노이즈로 0.0005V~0.001V 를 인가하여 실험을 수행하였다. 또한 QFT 제어기의 성능을 비교할 수 있도록 PID 제어기와 비교 실험하였다. PID 계인의 경우 다수의 실험으로 가장 우수한 제어성능을 나타내는  $K_P=0.59$ ;  $K_I=0.027$ ;  $K_D=0.295$  를 적용했다.

Fig. 13 은 외란 입력 전압에 대해 부하 실린더에 작용하는 압력을 나타내는 그래프이다. 외란 입력 전압은 0.2V~0.8V(부하실린더 헤드 측 압력 25bar~148bar, 로드 측 24bar~105bar)로 시스템의 안전을 위해 150bar 가 작용하는 0.8V 를 인가하여 실험을 실시하였다.

Fig. 14 는 PID 와 QFT 제어기를 적용한 계단 응답(step response)을 나타낸다. Table 2 와 3 은 PID 와 QFT 제어기의 시간응답특성을 각각 나타내고 있다. PID 제어기의 경우는 외란이 45bar~112bar 의 경우는  $T_s$  가 같았으나, 100bar 이상에서 정상상태 오차가 커졌다. 그리고 실험 중에 외란이 작은 영역과 큰 영역(Max 25bar and 145bar)에서  $T_s$  가 전기유압 하이브리드 부하시플레이터의 성능에 미치지

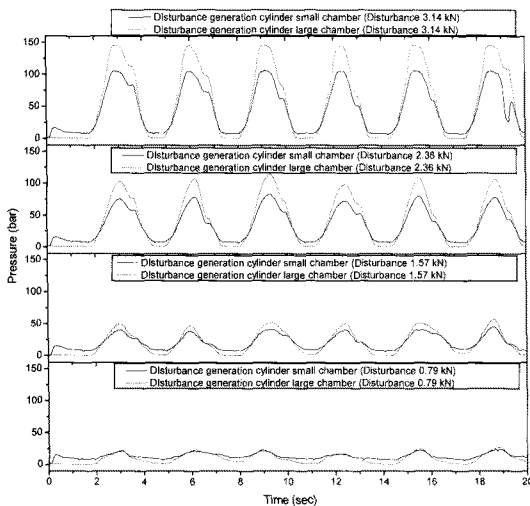


Fig. 13 Comparison of pressure to the each disturbance

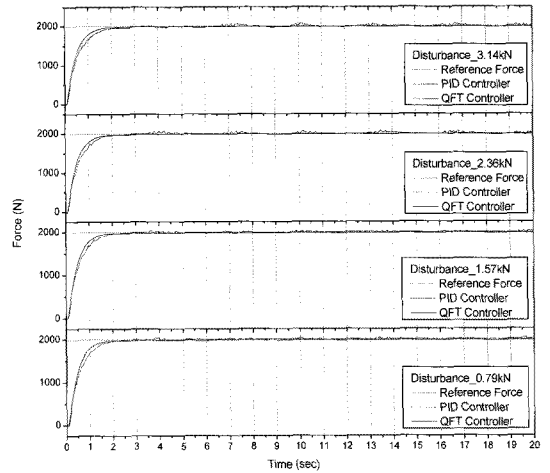


Fig. 14 Comparison of the force control between QFT and PID with different Disturbances

못하였다. QFT 제어기의 경우는 외란이 25bar~145bar 의 영역에서 외란이 커질수록  $T_r$ ,  $T_s$  의 시간이 빨라졌고, 정상상태 오차의 경우는 1%~1.45%로 전기유압 하이브리드 부하시플레이터의 제어 성능에 모두 만족하는 결과를 얻었다. Fig. 15 는 외란에 따른 계단과 기준 힘에 대하여 PID 와 QFT 의 응답을 각각 나타낸다. 전체적인 경향은 각각의 외란영역

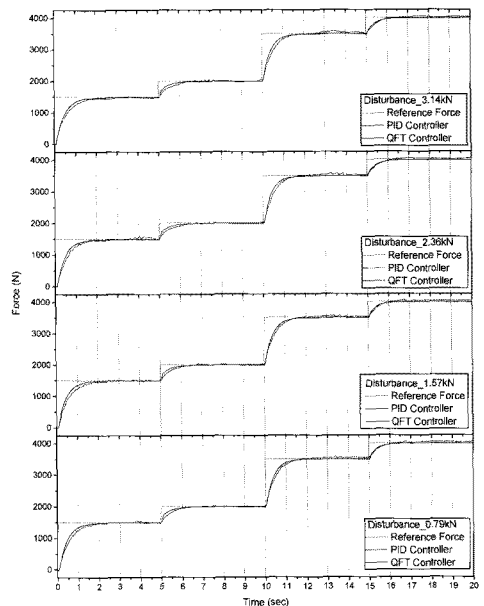


Fig. 15 Comparison of the QFTs with the PIDs of different Disturbances to ladder responses

Table 2 Experiment result of PID controller to the step response (Reference force : 2000N)

Disturbance (kN)	Td (delay time:sec)	Tr (rise time:sec)	Ts (settling time:sec)	Steady state error (%)
0.79	0.79	1.277	1.52	2.3
1.57	0.418	1.17	1.49	2.2
2.36	0.437	1.207	1.49	4.1
3.14	0.428	1.261	1.615	3.5

Table 3 Experiment result of QFT controller to the step response (Reference force : 2000N)

Disturbance (kN)	Td (delay time:sec)	Tr (rise time:sec)	Ts (settling time:sec)	Steady state error (%)
0.79	0.378	1.024	1.328	1
1.57	0.379	1.022	1.312	1.05
2.36	0.379	1.018	1.312	1.4
3.14	0.387	1.017	1.305	1.45

에서 기준힘이 커질수록 지연시간, 상승시간, 정착 시간 및 정상상태 오차가 작아지는 경향을 나타내었고, 응답 시간은 지연시간이 0.292~0.441sec, 상승시간이 0.972~1.363sec, 정착시간이 1.137~1.692sec, 정상상태오차가 1.2~6.13%의 영역에서 PID 제어기 성능을 얻을 수 있었다. 이는 정착시간 및 정상상태오차가 제어기 설계목표에 만족하지 못하는 결과이다. 계단과 기준 힘에 대하여 전체적인 경향은 각각의 외란 영역에서 기준 힘 신호가 커질수록 지연시간, 상승시간, 정착시간 및 정상상태 오차가 작아지는 경향을 나타내었고, 응답 영역은 지연시간이 0.139~0.361[s], 상승시간이 0.876~1.055[s], 정착시간이 1.04~1.404[s], 정상상태오차가 0.52~2.8%의 영역에서 QFT 제어기 성능을 얻을 수 있었다. 이는 제어기 설계목표를 만족하는 결과이다.

**4. 결론**

현재 유압 시스템의 대부분을 차지하는 밸브 제어방식은 각종 밸브나 펌프, 유압 호스 등을 통해서 많은 유체 유동에너지가 열에너지로 소비되고 있다. 또한 구성요소가 복잡하고 설치공간이 작은 경우에 적용하기 어렵다. 이러한 유압 시스템의 단점을 개선하기 위해 본 연구에서는 전기-유압 하이브리드 시스템을 제안했다. 이 시스템은 항상

구동하는 엔진(전기모터)과 가변 유압 펌프를 대신해서 전기모터와 고정형 유압 펌프를 일체화해서 사용한다. 기존의 서보밸브, 비례제어밸브, 유압 펌프의 경사판 제어 대신, 전기모터의 회전수와 회전방향으로 실린더를 구동하게 되고, 실린더를 구동할 때만 필요한 작동 유체를 공급하므로 에너지 효율을 높일 수 있다. 이렇듯 유압 시스템에서의 에너지 절감의 가능성을 보이는 전기-유압 하이브리드 액추에이터의 성능을 평가하기 위한 부하시플레이터를 구성했다. 부하시플레이터는 제품의 출시 전 여러 컨트롤러의 성능을 시험해보고, 시스템 성능을 확인하기 위해 필요한 장비이다. 전기-유압 하이브리드 액추에이터를 이용한 부하시플레이터에 외란에 대한 강인 설계를 위해 QFT 제어를 적용하였다. 실험결과로부터 QFT 제어기는 다양한 외부부하 조건에서 전기-유압 하이브리드 시스템의 성능 조건을 충분히 만족함을 실험을 통하여 검증하였다. 또한 PID 제어기와 성능 비교에서 우수한 결과를 볼 수 있었다.

**후 기**

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과임. (PS-06-1-042)

**참고문헌**

1. Rahmfeld, R. and Ivantysynova, M., "Displacement Controlled Linear Actuator with Differential Cylinder-A Way to Save Primary Energy in Mobile Machines," Proc. of the 5th Int. Conf. on Fluid Power Transmission and Control, pp. 316-322, 2001.
2. Yao, B., Bu, F., Reedy, J. and Chiu, G., "Adaptive Robust Motion Control of Single-Rod Hydraulic Actuators: Theory and Experiments," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, pp. 79-91, 2000.
3. Grabbel, J., "On the control of joint integrated servo actuators for mobile handling and robotic applications," Proc. of the 1st FPNI- PhD Symp., pp. 449-465, 2000.
4. Niksefat, N. and Sepehri, N., "Robust force controller design for a hydraulic actuator based on experimental input-output data," Proc. of the American Control Conf., pp. 3718-3722, 1999.



5. Thompson, D. F. and Kremer, G. G., "Quantitative feedback design for a variable displacement hydraulic vane pump," Proc. of the American Control Conf., pp. 1061-1065, 1997.
6. D'Azzo, J. and Houpis, C. H., "Linear Control System Analysis and Design," McGraw-Hill, 1998.
7. Horowitz, I. M., "Survey of Quantitative Feedback Theory (QFT)," International Journal of Control, Vol. 53, No. 2, pp. 255-291, 1991.
8. Ahn, K. K. and Chau, N. H. T., "Design of a robust force controller for the new mini motion package using quantitative feedback theory," Mechatronics, Vol. 17, No. 10, pp. 542-550, 2007.
9. Wu, S. F., Grimble, M. and Breslin, S. G., "Introduction to Quantitative Feedback Theory for Lateral Robust Flight Control Systems Design," Control Engineering Practice, Vol. 6, No. 7, pp. 805-828, 1998.