

# QFT(Quantitative Feedback Theory)를 이용한 불안정한 시스템의 안정화를 위한 강인 제어기 설계

## A Design of the Robust Controller for Stabilization of the Unstable System Using QFT(Quantitative Feedback Theory)

강민구, 변기식

Min-Goo Kang, Gi-Sig Byun

### 요약

본 논문은 시스템의 불확실성과 외란의 불확실성에도 불구하고 원하는 시스템 성능을 만족할 수 있는 강인한 제어기 설계에 대하여 서술한다. QFT(Quantitative Feedback Theory)에 근거한 강인한 제어기 설계과정은 시스템 파라미터 변동과 설계사양을 고려하여 결정되는 템플레이트, 한계조건 그리고 루프형성을 거친다. 설계된 제어기의 성능을 입증하기 위해 파라미터 변동에 매우 민감하고, 비선형성이 강하며 불안정한 특성을 지닌 독립진자시스템에 대하여 적용한다. 설계된 제어기에 대한 시뮬레이션과 실험결과들은 파라메타 변동과 외란에 강인한 제어성능을 보인다.

### Abstract

This paper propose a robust control method to achieve a desired system performance in spite of system uncertainty and disturbance uncertainty. The procedures of the robust controller based on QFT(Quantitative Feedback Theory) make template, bound and loop shaping which are considered by system parameter variations and performance specifications. To prove the efficiency, the designed controller is applied for an inverted pendulum which is so sensitive to the parameter variation and has a highly nonlinear and unstable characteristics. It is shown that the simulation and experimental results from the proposed controller are efficient in robustness of parameter variation and disturbance.

**Keywords:** QFT, Robust Control, Loop Shaping, Inverted Pendulum, Stabilization

### I. 서론

플랜트의 수학적 모델링의 불확실성에도 불구하고 실제 시스템의 안정성과 성능을 보장하는 강인한 제어기를 설계하고 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중 최근에 많이 사용되고 있는 것이  $H_\infty$  설계법,  $\mu$ -설계법 등이다. 그러나 이들 설계법들은 수학적 치밀성은 있으나 전달함수의 주파수 응답 크기만을 고려하여 설계하므로 인해 과도설계문제가 있다[1]. 이에 비해 I.M Horowitz에 의해 처음으로 시도되어진 고전제어 이론을 근거로 한 QFT(Quantitative Feedback Theory)는 니콜스 선도상에서 크기 및 위상까지를 고려하여 설계함으로써 주어진 사양에 근접하는 제어기를 설계할 수 있다 [2][3][4][5][6]. Horowitz와 Sidi는 단일루프 피드백에 대해서 연구하였고[2], 성능사양을 만족시키는 불확실한 NMP에 대한 제어기 연구를 하였으며[6], 그리고 QFT에

서 가장 중요한 루프형성(loop shaping)을 효과적으로 하기 위해서 Gera와 Horowitz에 의해서 연구되어[7] O.Yaniv[8]등에 의해서 루프형성을 하기 위한 프로그램이 개발되었다.

QFT는 피드백 양이 성능사양, 플랜트와 외란의 불확실한 양으로 일치되고 각각의 주파수에서 절충(Trade-off)되어진 설계는 안정성, 성능, 플랜트 및 외란의 불확실성, 제어기의 복잡성, 제어기 대역폭사이의 투명성을 보장한다. 그리고 모델이 간소화되고 수학적 표현이 간단하다는 장점을 가진다[4]. 이러한 점들 때문에 QFT는 로봇분야[9], 비선형성이 강한 항공분야[10]등 불확실성이 큰 곳에서 많이 적용되었고 플로피 디스크에 적용되어 실제 실용화되는 등 효과적인 결과를 많이 얻고 있다[11]. 따라서 본 논문에서는 로켓트나 로봇의 기본시스템, 그리고 우주 항공분야의 비행체 자세 제어시스템에 필수적인 비선형적이고 불안정성이 강한 시스템의 하나인 독립진자 시스템에 대해 MISO(Multi Input Single Output)

QFT 제어기법을 적용하여 시스템의 파라메타 변동과 모델링의 불확실성에 의한 영향 및 외란에 강한 제어기를 설계하고 구현함으로써 QFT의 유용성을 입증한다.

## II. QFT 제어 이론

### 2.1 QFT제어의 개요

피드백의 중요성은 플랜트의 불확실성과 외란이 존재 하더라도 바라는 성능을 만족시키는 것에 있다. 실제적인 설계와 피드백 비용(cost of feedback)은 성능허용오차의 범위와 불확실성의 범위에 관계된다. 다시 말해서 정량적(quantitative)이어야 한다는 것이다. 그러나 지금까지 피드백 이론은 이런 정량적인 부분을 무시한 채 피드백 이론을 다루고 있다. QFT는 바로 이런 부분에서 피드백 이론을 기반으로 하는 정량적인 되먹임 제어 이론이다[5].

QFT는 두 개의 목적을 기반으로 하는 주파수영역 해석 이론으로서 1) 피드백은 플랜트의 불확실성과 알려지지 않은 외란에 대해 바라는 응답을 얻는 것이고 2) 제어기의 대역폭을 작게 하는 것이다. 제어 대역폭을 줄이는 가장 큰 이유는 센서 잡음과 모델링 되어지지 않은 추가적인 동특성에 대한 견실성을 증가시키기 위해서이다. QFT는 정확한 플랜트의 불확실성, 외란 및 요구되어지는 사양을 위해 제어기를 결정하는 의미에서의 정량적인(quantitative)것이다. 다양한 조건을 절충시키는 안목과 주파수상에서 측정되어진 플랜트 응답에 적용할 수 있기 때문에 상태공간(State space) 형태나 그밖에 다른 형태의 모델이 필요 없다[12].

그림 1에서  $P(s)$ 는 불확실성을 포함하고 있는 플랜트의 전달함수이고,  $C(s)$ 는 제어기의 전달함수이며,  $R(s)$ 는 입력,  $F(s)$ 는 전위 필터(Input Filter)의 전달함수를 나타낸다. 제어기  $C(s)$ 는 플랜트  $P(s)$ 의 불확실성에 의한 출력  $Y(s)$ 의 진폭이 허용 오차 내에 존재하도록, 그리고 외란  $V(s)$ 와  $D(s)$ 의 영향을 가능한 작게 유지하도록 설계되어야 한다. 또한 전위필터  $F(s)$ 는 요구된 시간 영역 사양을 만족하도록 설계되어야 한다.

### 2.2 QFT 제어기의 설계 순서[13]

#### 1. 설계 사양.

Robust Performance, Robust Stability, 출력 외란제거(Out disturbance rejection), 입력 외란제거(Input disturbance rejection)등의 설계사양을 정한다. 특히 시간 응답의 사양이 주어졌을 때에는 QFT가 주파수 영역 설계이므로 시간응답 사양을 주파수 응답으로 바꾸어야 하는데 여기에는 어떤 특별한 법칙은 없지만 풍부한 경험자에 의해 제시되어진 방법이 있다[14].

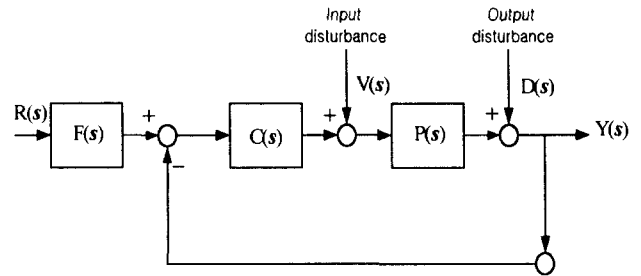


그림 1 피드백 시스템  
Fig.1 Feedback system

#### 2. N개의 LTI 플랜트 모델 선정

#### 3. 템플레이트(Template)

주어진 각 주파수에서의 불확실한 플랜트의 주파수 응답 집합인 템플레이트(Template)를 니콜스 선도에 나타낸다.

$$Y(s) = R(s)T(s) = R(s)F(s) \frac{L(s)}{1+L(s)} \quad (1)$$

$$L(s) = C(s)P(s) \quad (2)$$

$F(s)$ 와  $C(s)$ 는 불확실성이 없기 때문에 식(1)과 식(2)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \ln |T(j\omega)| = \Delta \ln \left| \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \quad (3)$$

$$\Delta \ln |L(j\omega)| = \Delta \ln |P(j\omega)| \quad (4)$$

임의의 주파수  $\omega_1$ 에서  $\ln P(j\omega_1)$ 는 복소 평면에서의 영역으로 이를  $\omega_1$ 에서의 템플레이트라고 한다. 다른 주파수에 대한 템플레이트를 계산하고 니콜스선도에 그린다. 식(3)과 식(4)는 루프전달함수  $L(j\omega)$ 가  $P(j\omega)$ 와 같은 템플레이트를 가진다. 식(5)와 식(6)은  $L(j\omega)$ 가 제어기  $\ln |C(j\omega)|$ ,  $Arg(C(j\omega))$ 만큼  $P(j\omega)$ 을 이동시킴으로써 얻어짐을 나타낸다.

$$\ln |L(j\omega)| = \ln |C(j\omega)| + \ln |P(j\omega)| \quad (5)$$

$$Arg(L(j\omega)) = Arg(C(j\omega)) + Arg(P(j\omega)) \quad (6)$$

그리고 니콜스 선도상에서 플랜트의 템플레이트는 이동될 수 있으나 회전할 수는 없다.

#### 4. 공칭 플랜트(Nominal Plant) $P_0(s)$ 선정

불확실한 영역  $P(s)$ 에서 하나의 플랜트를 선정하고 이것을 공칭플랜트  $P_0(s)$ 로서 하고 템플레이트 상에 표시한다.  $P_0(s)$ 의 선택은 임의적이고 설계 상에 영향을 주지 않는다[8].

5. 한계조건 계산(Bound)

QFT를 실제 설계에 이용하기 위해서는 플랜트의 파라미터 불확실성에 대해 모든 주파수  $\omega$ 에서 루프 전달함수  $L(j\omega)$ 가 통과하지 않는 영역, 다시 말해서 안정 조건과 설계 사양을 만족시키는 경계 조건을 니콜스 선도에 표시한다. 이런 조건들은 루프 형성에 의한 공칭 루프 전달함수  $L_0(s)$ 의 결정을 제한하는 조건이 된다. 그리고 안정조건과 설계사양을 만족시키는 한계조건에 의해서 합성된 경계 중 우세한 조건 즉, 큰 대수 크기를 갖거나 경계의 외각 부분을 연결하는 것에 의해 주어진다.

제어기 위상은  $\phi = [0, -5^\circ, \dots, -360^\circ]$ 을 정하고  $\phi \in \Phi$  중에 한 개의 위상을 정한다. 그리고 식(7)식에 의해서

$$20 \log \max \left| \frac{PC(j\omega)}{1+PC(j\omega)} \right| - 20 \log \min \left| \frac{PC(j\omega)}{1+PC(j\omega)} \right| = 20 \log \frac{\beta(\omega)}{\alpha(\omega)} \quad (7)$$

(단  $\alpha, \beta$ 는 니콜스선도상의 성능사양 응답곡선)

템플레이트의 페루프 불확실성이 사양과 만나는 점까지 템플레이트를 변화없이 수평으로 위상  $\phi^\circ$ 만큼, 수직으로  $kdB$  (개루프 이득)만큼 이동한다. 그리고 나서 니콜스 선도에 템플레이트의 공칭 플랜트  $P_0(s)$ 를 표시한다. 이 점의 중요성은 만약  $C(j\omega) = \phi^\circ, |C(j\omega)| > kdB$ (개루프)라면 주파수  $\omega$ 에서의 페루프 불확실성은 만족되어진다. 즉, 식(8)과 같다.

$$20 \log \max \left| \frac{PC(j\omega)}{1+PC(j\omega)} \right| - 20 \log \min \left| \frac{PC(j\omega)}{1+PC(j\omega)} \right| \leq 20 \log \frac{\beta(\omega)}{\alpha(\omega)} \quad (8)$$

이런 과정을  $\phi \in \Phi$ 안에 있는 모든 위상에 대해서 반복하고 모든 공칭 플랜트를 연결한다. 이 곡선이  $\omega$ 에서  $P_0C(j\omega)$ 상의 경계가 된다. 이런 과정을 모든 주파수에 대해서 실행한다.

6. 루프형성(Loop Shaping)

공칭 루프전달함수  $L_0(s)$ 는 식(9)로서 정의되어진다. 여기서 중요한 것은 공칭 플랜트  $P_0(s)$ 은 한계조건 형성 때와 같아야 한다는 것이다.  $L(s)$ 는 가능한 한 한계조건 위어나 그 근처에 있도록 하여야 한다.

$$L_0(s) = P_0(s)C(s) \quad (9)$$

$$C(s) = \frac{L_0(s)}{P_0(s)} \quad (10)$$

만약에 설계사양이 피드백 시스템의 추종사양으로 주어질 때는 전위필터  $F(s)$ 를 설계하여 페루프 시스템의 주

파수 특성을 만족하도록 한다. 그림 2는 QFT 설계 순서도를 나타낸다.

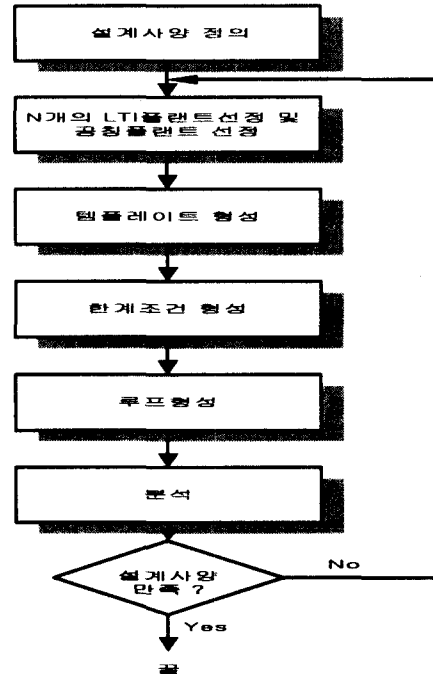


그림 2. QFT 설계 순서도  
Fig. 2. QFT design Flowchart

III. 독립진자 시스템의 수학적 모델링

본 연구에 적용한 독립진자 시스템은 그림 3과 같으며 표 1의 파라메타 값을 이용해서 모델링 하였다.

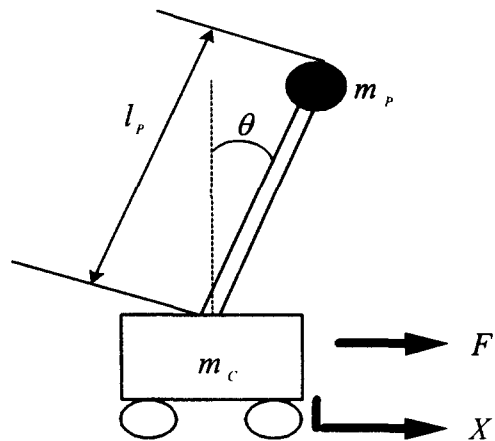


그림 3. 독립진자의 간단한 모델  
Fig. 3. Simplified model of Inverted pendulum

$$(m_p + m_c) \ddot{x} - m_p \dot{\theta}^2 l_p \sin(\theta) + m_p \ddot{\theta} l_p \cos(\theta) = F \quad (11)$$

$$m_p l_p \cos(\theta) \ddot{x} - m_p l_p \sin(\theta) \dot{\theta} \dot{x} + m_p \theta l_p^2 - m_p g l_p \sin(\theta) = 0 \quad (12)$$

DC 전동기가 Cart에 탑재해 있으므로  $x$ 를 고려한 동역학 방정식은 식(13)과 같다.(단,  $V$ 는 전동기의 입력전압)

$$\frac{K_m K_g}{Rr} V - \frac{K_m^2 K_g^2}{Rr^2} \dot{x} = F \quad (13)$$

식(13)을 식(11)에 대입해서 풀면

$$\ddot{x} = \frac{(-K_g^2 K_m^2 \dot{x} + m_c l r^2 R \dot{\theta}^2 \sin \theta + K_g K_m r V - m_c g r^2 R \sin \theta \cos \theta)}{(m_p + m_c - m_c \cos^2 \theta) r^2 R} \quad (14)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{(K_g^2 K_m^2 \dot{x} \cos \theta - m_c l r^2 R \dot{\theta}^2 \sin \theta \cos \theta - K_g K_m r V \cos \theta + (m_p + m_c) g r^2 R \sin \theta)}{(m_p + m_c - m_c \cos^2 \theta) r^2 R l_p} \quad (15)$$

$\theta$ 가 매우 작다고 가정하면  $\sin \theta \approx \theta$ ,  $\cos \theta \approx 1$ 로 하여 Laplace 변환하여 다시 정리를 하면 식(16)과 식(17)을 유도할 수 있다.

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{Es^2 - (CE - BF)s}{s^4 - Cs^3 - Ds^2(DC - FA)s} \quad (16)$$

$$\frac{X(s)}{V(s)} = \frac{Hs^2 + (GK - HD)}{s^4 - Is^3 - Js^2 + (JI - LG)s} \quad (17)$$

단,

$$A = \frac{-m_p g}{m_c}, \quad B = \frac{K_m * K_g}{m_c Rr}$$

$$C = \frac{-K_m^2 K_g^2}{m_c Rr^2}, \quad D = \frac{m_p + m_c g}{m_c l_p}$$

$$E = \frac{-K_m K_g}{m_c l_p Rr}, \quad F = \frac{K_m^2 K_g^2}{m_c l_p Rr^2}$$

$$G = \frac{-m_p g}{m_c}, \quad H = \frac{K_m K_g}{m_c Rr}$$

$$I = -\frac{K_m^2 K_g^2}{m_c Rr^2}, \quad J = \frac{m_p + m_c g}{m_c l_p}$$

$$K = -\frac{K_m K_g}{m_c l_p Rr}, \quad L = \frac{K_m^2 K_g^2}{m_c l_p Rr^2}$$

로 둔다.

이들 식 중, 식(16)은 진자의 각도에 대한 전달함수이고 식(17)은 Cart 위치에 대한 전달함수이다. 그림 4는 도립진자 시스템의 블록선도를 나타낸다.

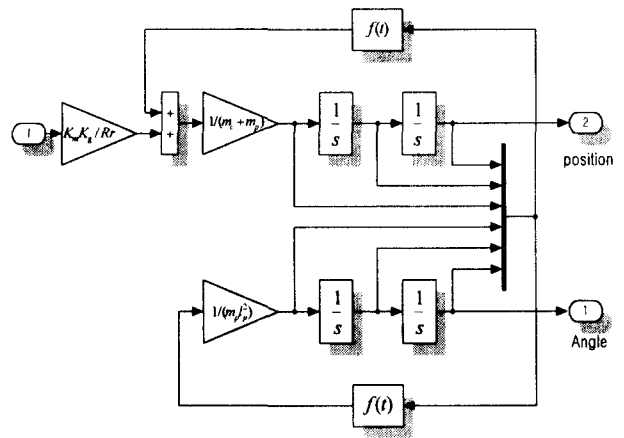


그림 4. 도립진자의 블록선도  
Fig. 4. Block diagram of Inverted pendulum

표 1. 도립진자의 파라메타 값  
Table 1. Parameter value of Inverted pendulum

파라메타 (Parameter)	기호 (Symbol)	수치 범위 (Value Range)	단위 (Units)
Length of pendulum	$l_p$	[0.305 0.7]	m
Mass of pendulum	$m_p$	[0.15 0.3]	kg
Cart of pendulum	$m_c$	[0.35 0.45]	kg
Amateur resistor	$R$	[2.6 3]	$\Omega$
Gear box rate	$K_g$	3.7	
Motor torque constant	$K_m$	[0.00767 0.009]	Nm/A
Radius of wheel	$r$	0.0254/4	m
Gravity	$g$	9.81	m/s <sup>2</sup>

QFT 제어기 설계는 식(16)의 진자의 각도에 대해서만 안정성과 외란을 고려하여 제어기를 설계한다. QFT를 이용한 제어기설계 절차는 니콜스 선도상에서 여러 개의 주파수를 결정하고 선택한 주파수에서 플랜트의 변동범위를 나타내는 템플레이트를 표현하게 되며 설계 조건에 대한 경계 조건을 만족하는 공칭 루프전달함수  $L_0(s)$ 를 구함으로써 제어기를 얻게 된다. 주파수 설정은 파라미터 변동범위를 잘 나타내고 있는 저주파 부근에서 파라미터 변동범위가 다른 주파수에 비해 상대적으로 큰 저주파대역을 고려했고 고주파 대역은 템플레이트의 변화가 거의 일정한 주파수를 고주파대역으로 해서  $\omega = [0.1, 4, 10, 25, 50, 100]$  같은 주파수 대역을 선정했다. 설계조건은 다음과 같다.

$$\left| \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} \right| \leq 1.2 \quad (18)$$

#### IV. QFT 제어기 설계

$$\left| \frac{Y(s)}{D(s)} \right| = \left| \frac{1}{1+C(s)P(s)} \right| < 0.02 \left| \frac{s^3+64s^2+748s+2400}{s^2+14.4s+169} \right| \quad (19)$$

식(18)은 안정조건이고 식(19)는 출력 외란제거 조건이다. 그림 5에서는 33개의 LTI 플랜트를 가지고 각각의 주파수에서 템플레이트를 니콜스 선도상에 나타냈다.

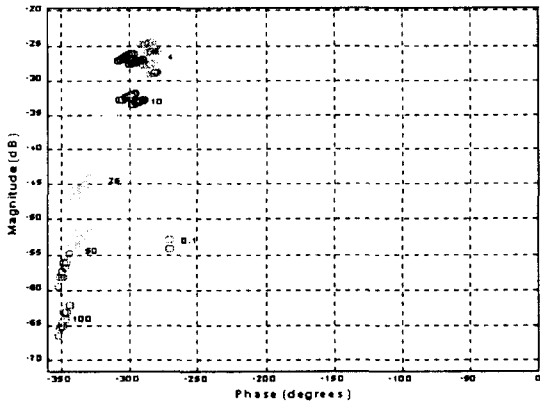


그림 5. 템플레이트  
Fig. 5. Template

그리고 공칭 플랜트  $P_0(s)$ 는 33개의 LTI 플랜트 중에서 임의적으로 선정해도 설계 상에는 아무런 영향을 주지 않으므로 식(20)으로 선정했다[8]. 하지만 설계과정에서 공칭 플랜트가 바뀌어서는 안된다.

$$P_0 = \frac{-6.0805s^2 - 1.4211 \cdot 10^{-14}s}{s^4 + 19.022s^3 - 20.020s^2 - 266.58s} \quad (20)$$

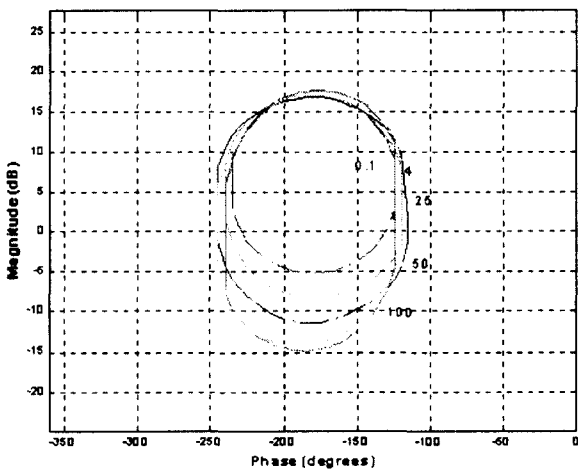


그림 6. 로버스트 안정영역  
Fig. 6. Robust Stable region

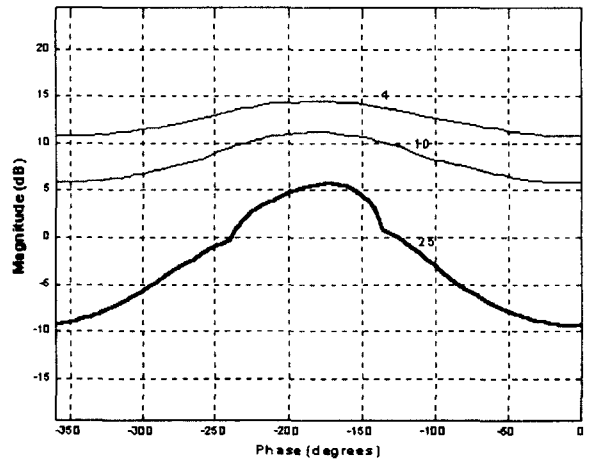


그림 7. 출력외란제거한계  
Fig. 7. Output disturbance rejection bound

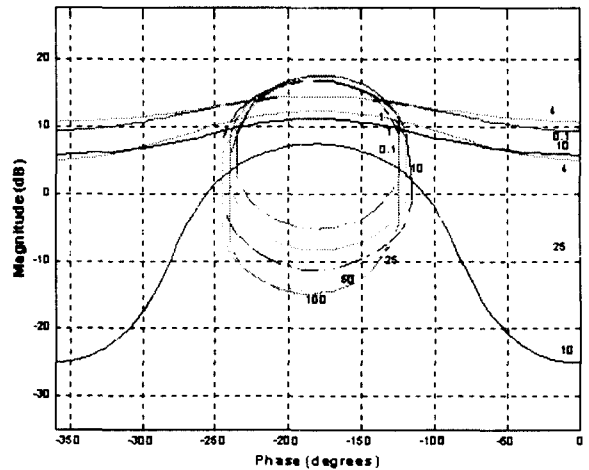


그림 8. 모든 한계  
Fig. 8. All bound

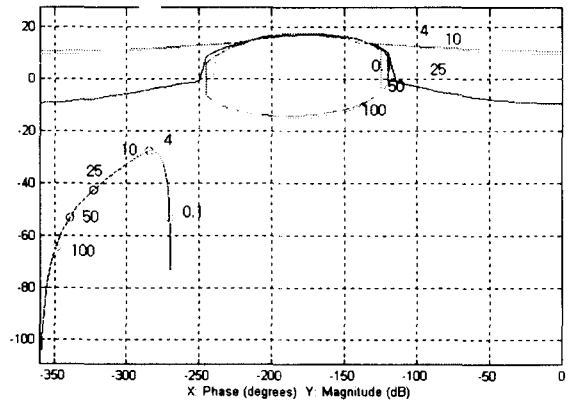


그림 9. 공칭 플랜트와 한계조건  
Fig. 9. Nominal plant and bound

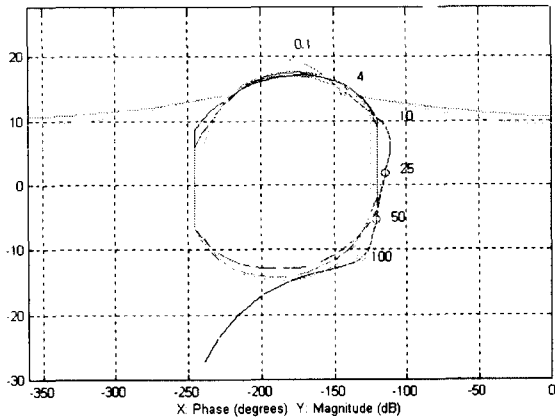


그림 10. 루프형성  
Fig. 10. Loop shaping

그림 6은 식(18)의 안정영역에 대한 경계를 나타내고 그림 7은 식(19)의 출력 외란제거 한계를 나타낸다. 그림 8은 이들을 혼합한 한계조건을 나타냈는데 이 중에서 상세한 조건만을 경계로 하여 나타낸 그림을 그림 9에 나타냈으며 공칭 플랜트  $P_0(s)$ 도 같이 나타냈다. 그리고 공칭 플랜트를 한계조건 위에 존재하거나 근처에 존재하도록 루프형성(Loop shaping)을 한 것을 그림 10에 나타냈다. 이와 같은 루프형성 결과 설계된 제어기는 식(21)과 같다.

$$C(s) = \frac{-104020s^5 - 5.7838 \cdot 10^7 s^4 - 5.2479 \cdot 10^9 s^3 - 1.5305 \cdot 10^{11} s^2 - 1.3268 \cdot 10^{12} s - 4.0531 \cdot 10^{12}}{s^6 + 605.85s^5 + 118330s^4 + 1.9856 \cdot 10^7 s^3 + 8.8887 \cdot 10^8 s^2 + 9.8173 \cdot 10^9 s} \quad (21)$$

설계된 제어기에 의한 폐루프 시스템의 설계사양을 만족하는지를 확인하기 위해 분석한 결과를 그림 11과 그림 12에 각각 나타냈다. 그림 11은 식(18)에 대한 결과이고 그림 12는 식(19)에 대한 결과이다. 설계된 제어기가 설계사양을 잘 만족하고 있음을 알 수 있다.

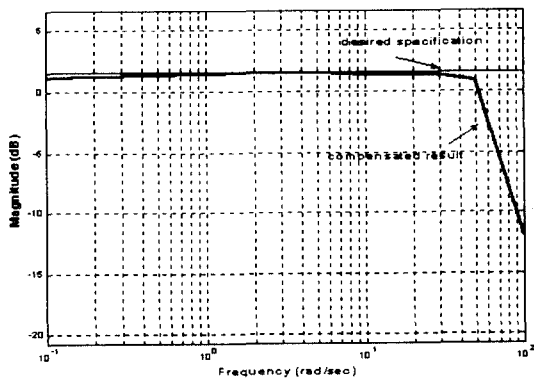


그림 11. 안정도 결과  
Fig. 11. Stability result

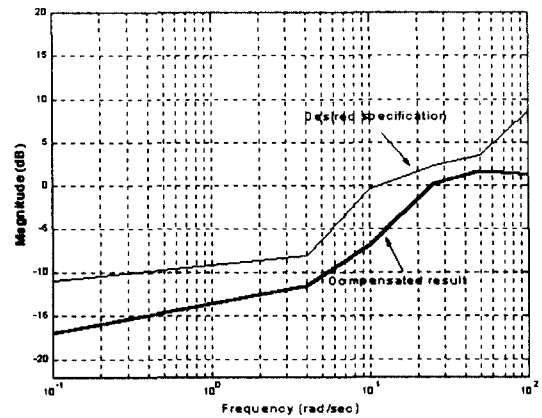


그림 12. 출력 외란제거 결과  
Fig. 12. Output disturbance rejection result

### V. 시뮬레이션

Matlab을 이용하여 식(16)에서 표 1과 같이 도입진자 시스템의 파라메타 변동 및 외란을 고려한 33개의 LTI 플랜트 전달함수에 대하여 앞서 구한 QFT 제어기를 시스템에 적용하여 시뮬레이션 하였다.

그림 13은 QFT제어기를 이용한 33개 LTI 플랜트의 페루프 임펄스 응답이다. 공칭 플랜트에 대해 QFT 제어기를 적용해 보면 진자의 각도는 1[sec]에서 안정화되는 것을 확인할 수 있었다. 그림 13에서 보는 바와 같이 파라메타 변동이 있음에도 불구하고 진자의 각도는 진폭의 변화가 거의 없이 안정화되고 시간도 1[sec] 근처가 됨을 알 수 있다.

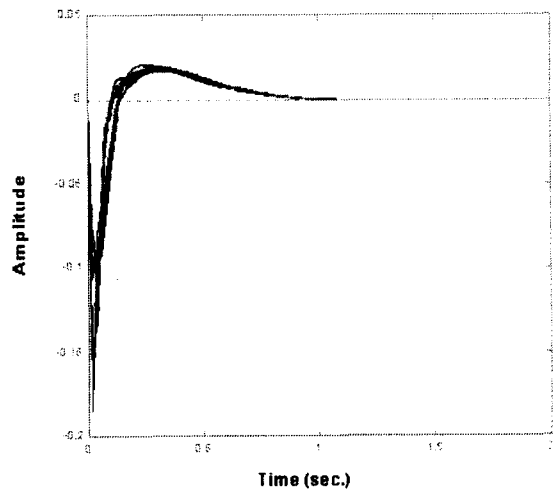
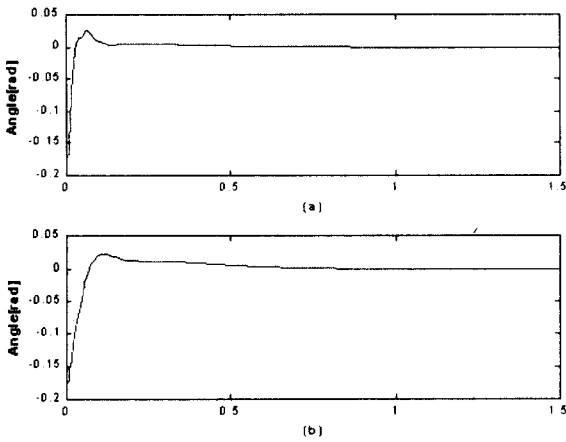


그림 13. QFT 제어기를 이용한 페루프 임펄스 응답  
Fig. 13. Impulse response of closed loop using QFT controller



(a) 진자의 길이 : 0.301[m]  
 (b) 진자의 길이 : 0.7 [m]

그림 14 초기 각도 : 5° 일 경우  
 Fig.14. Initial angle : 5° case

그림 14는 진자의 초기 각도를 5°로 하고 진자의 길이를 각각 0.301[m]과 0.7[m]로 파라메타를 변동시켰을 경우에 대해서 시뮬레이션 한 결과이다. 그림 14(a),(b)에서 보는 바와 같이 파라메타 변동에 대해서 거의 변화 없이 1[sec]이내에 안정화되는 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션을 통해본 바와 같이 제안된 제어기가 강인하다는 것을 보여주고 있다.

### VI. 실험

시뮬레이션의 타당성을 입증하기 위해서 그림 15와 같은 독립진자 시스템을 이용해서 실험을 하였다. 진자의 각도와 Cart의 위치는 포텐쇼메타를 이용했고 I/O 보드를

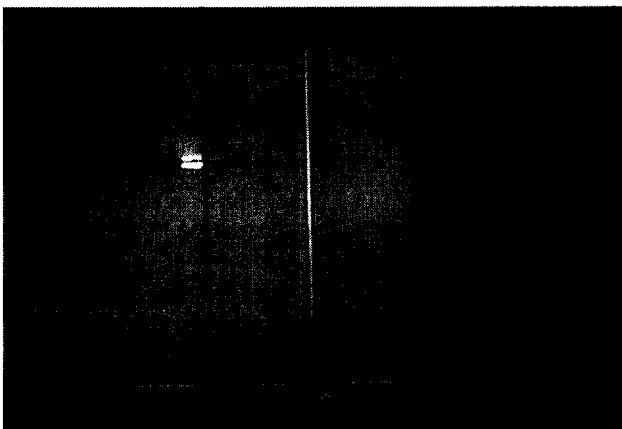
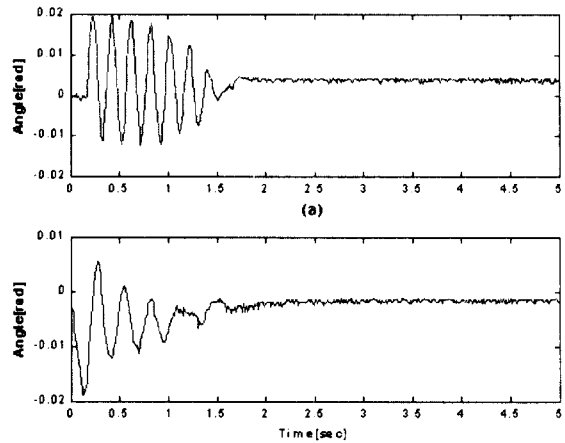


그림 15 독립진자의 실험장치  
 Fig. 15. The experiment equipment of Inverted pendulum

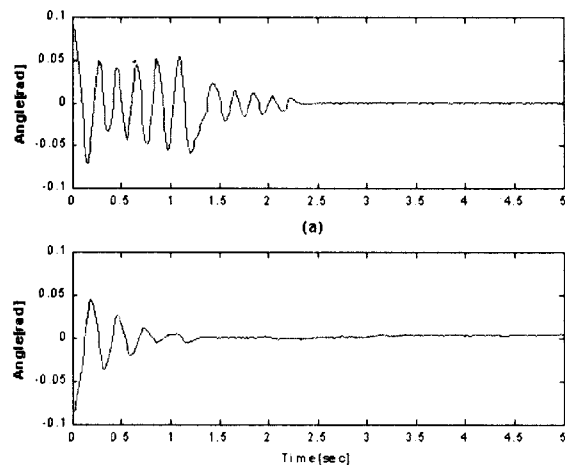
를 통해서 A/D변환하여 PC를 통해 QFT 제어이론으로

설계되어진 제어기를 거쳐 제어 입력신호가 계산되어진다. 이 값은 D/A 컨버터를 통해서 -12~+12V의 아날로그 전압으로 증폭되어 DC 전동기의 조작량으로 공급된다. 이 때 샘플링 시간은 0.005[sec]로 하였다. 그리고 진자의 길이를 0.301[m]과 0.7[m]의 파라메타 변동에 대해 독립진자 시스템에 외란이 가해졌을 경우와 초기 각도 5°에 대해서 실험을 수행하였다.



(a) 진자의 길이 : 0.301[m] 경우  
 (b) 진자의 길이 : 0.7 [m] 경우

그림 16. 외란 응답 실험 결과  
 Fig. 16. The experiment results of Disturbance response



(a) 초기 진자의 각도 : 5°, 진자의 길이: 0.301[m]  
 (b) 초기 진자의 각도 : 5°, 진자의 길이: 0.7 [m]

그림 17. 초기각도 실험결과  
 Fig.17. The experiment results of Initial angle

그림 16은 파라메타 변동에 대한 외란응답을 나타내고

그림 17은 초기각도(5°)가 주어졌을 경우 파라메타 변동에 따른 응답을 나타낸다. 시뮬레이션 상에서는 안정화되는 시간이 약 1[sec] 이내였지만 실험결과에서는 진자의 길이가 0.7[m] 경우에는 시뮬레이션과 상당히 일치하지만 진자의 길이 0.301[m]일 경우에는 안정화되는 응답 시간이 1[sec]정도 느렸다. 이것은 레일상의 마찰 및 전동기의 역기전력, 기어의 백러쉬, 미약한 외란등에 의한 영향 때문이다.

### Ⅶ. 결론

본 연구에서는 QFT제어기 설계방법을 통해 불안정한 도립진자 시스템의 파라메타 변동과 외란의 영향에 강인한 제어기를 설계하였다. 파라메타를 변화시키면서 시뮬레이션을 수행한 결과 파라메타 변동에도 불구하고 성능사양을 잘 만족하는 것을 확인할 수 있었고 시뮬레이션의 타당성을 입증하기 위해서 실제 시스템에 설계된 제어기를 적용하여 실험하였다. 그 결과 QFT 제어기의 유용성과 강인성을 확인할 수 있었다. 그러나 QFT는 설계자에 따라 제어기가 크게 다를 수 있고 루프 형성(Loop Shaping)에 있어서는 설계자의 많은 경험이 필요하다. 이는 앞으로 계속 연구되어야 할 과제라고 하겠다.

접수일자 : 2001. 5. 16      수정완료 : 2001. 7. 10

### 참고문헌

[1] Y. Chait and C. V. Hollot, "A Comparison Between  $H_\infty$  and QFT for a single-loop plant with both parametric uncertainty and performance specifications" Recent Development in Quantitative feedback theory, ASME WAM conf. pp33-40. 1990

[2] I. M Horowitz, *Quantitative Feedback Design Theory*, QFT Publication, vol. 1, 1992.

[3] I. M. Horowitz, "Synthesis of feedback systems with large plant ignorance for prescribed time-domain tolerances" Int. J. of Control, vol.16, no.2, pp287~309, 1972.

[4] I. Horowitz, "Survey of Quantitative Feedback Theory" International Journal of Control, vol.53, no.2, pp255~291, 1991.

[5] I. Horowitz, "Quantitative feedback theory" IEE PROC. vol.129, no.6, 1982.

[6] I. Horowitz, "Optimum synthesis of non-minimum phase feedback systems with plant uncertainty" Int. J. Control. vol. 27, no. 3, 361~386, 1978.

[7] A.Gera, I. Horowitz, "Optimization of the loop transfer function", Int. J. Control, vol. 31, no. 2,

389-398, 1980.

[8] O. Yaniv, Y.Chait. C.Borghesani, *Quantitative feedback Theory toolbox*, Mathwork, 1994.

[9] J. Y. Chang, Y. M. Chen, T. T. Tsai, "Robot control design by Quantitative feedback theory" ICAR., Fifth International Conference, vol.1, 437-442, 1991

[10] R. Reynolds, M.Pachter, C. H. Houppis, "Full Evlope Flight Control System Design using QFT", Proceeding of America Control Conference, 1994.

[11] M. S. Park, Y. Chait, M. Steinbuch, "Inversion free Design Algorithms for Multivariable Quantitative Feedback theory : An Application to Robust Control of a CD-ROM", Automatica, vol.33, no.5, pp915-920, 1997.

[12] O. Yaniv, *Quantitative Feedback Design of Linear and Nonlinear control systems*, Kluwer Academic Publishers, 1999.

[13] William, S. Levine, *The Control Handbook*, IE EE Press, vol.1, 1996.

[14] J. J. D'Azz0 and C. H. Houppis, *Linear Control system Analysis*, McGraw-Hill Pub, 1988.

[15] 김대현, 정규홍, 이석재, 이교일, "  $H_\infty$  최적제어 이론을 이용한 도립진자의 견실한 보상기 설계에 관한 연구" KACC, 1991.



강민구(Min Goo Kang)

准會員

2000년 부경대학교 제어계측공학과

2000년~현재 부경대학교

제어계측공학과 석사과정

관심분야 : 강인 제어, 디지털 제어,

Motion Control



변기식(Gi Sig Byun)

正會員

1981년 중앙대학교 전기공학과

1983년 중앙대학교 전기공학과

(공학석사)

1990년 미국 Wichita State

University Electrical Eng.

(공학박사)

1990~현재 부경대학교 제어계측공학과 부교수

관심분야 : 디지털 제어, 비선형 제어, 신호처리