

## 선형 시변시스템을 위한 신경망 기반의 새로운 이득계획 QFT 기법

### A New Gain Scheduled QFT Method Based on Neural Networks for Linear Time-Varying Systems

최재원, 임기홍  
(Jae Weon Choi and Ki Hong Im)

**Abstract** : The properties of linear time-varying(LTV) systems vary because of the time-varying property of plant parameters. The generalized controller design method for linear time-varying systems does not exist because the analytic solution of the dynamic equation has not been found yet. Hence, to design a controller for LTV systems, the robust control methods for uncertain LTI systems which are the approximation of LTV systems have been generally used instead. However, these methods are not sufficient to reflect the fast dynamics of the original time-varying systems such as missiles and supersonic aircraft. In general, both the performance and the robustness of the control system which is designed with these methods are not satisfactory. In addition, since a better model will give the more robustness to the controlled system, a gain scheduling technique based on LTI controller design methods has been used to solve this problem. Therefore, we propose a new gain scheduled QFT method for LTV systems based on neural networks in this paper. The gain scheduled QFT involves gain scheduling procedures which are the first trial for QFT and are well suited for consideration of the properties of the existing QFT method. The proposed method is illustrated by a numerical example.

**Keywords** : QFT, linear time-varying system, neural network, gain-scheduling, sufficient uncertainty bound

#### I. 서론

일반적으로 선형 시변시스템은 시간에 따른 시스템 파라미터의 변동으로 그 특성이 복잡할 뿐만 아니라 시스템에 대한 해석적인 해가 알려져 있지 않으므로 해석적인 제어기의 구성이 어렵다. 이런 문제를 해결하기 위해, 시변시스템을 불확실성을 포함한 시불변시스템으로 근사화하고 견실성을 보장하는 제어기법을 이용하는 방법과 시변시스템에 대해서 제어기의 이득값을 상황에 따라 적절한 값으로 변경하는 이득계획법(gain scheduling)[1][2]을 이용하는 방법이 시변시스템의 제어기 구성에 주로 적용되어 왔다. 그러나, 견실성을 보장하는 시불변 제어시스템 설계기법을 선형 시변시스템에 적용할 경우, 시변 특성이 약한 시스템에 대해서는 요구되는 제어성능을 구현할 수 있지만 시변 특성이 강한 미사일이나 초음속항공기 등의 시스템에 대해서는 제어성능의 한계 때문에 요구되는 성능을 만족시키기 어렵다.

시불변시스템에 적용할 수 있는 조직적인 제어시스템 설계기법으로는 QFT(Quantitative Feedback Theory)를 들 수 있다. QFT는 1960년대에 Isaac Horowitz에 의해서 그 개념이 제안되어[3] 1970년대 이후에 설계기법의 틀이 형성되었다[4]-[6]. QFT의 설계목적은 시불변시스템의 파라미터 불확실성이 유한한 한계를 가질 경우, 필요한 정도의 견실성을 가지도록 제어시스템을 설계하는 것이다. 그리고 입출력 외란제거 성능과 제어입력에 대한 제한조건도 설계과정에 포함할 수 있도록 일반화되어 있다. QFT 제어시스템의 설계는 설계조건들을 Nichols 선도의 주파수역

제한조건으로 반영하고 이 조건들을 모두 만족할 수 있도록 제어시스템을 loop shaping함으로써 이루어진다[7]-[9]. 그러나 QFT도 시불변시스템을 위한 제어시스템 설계기법이므로 강한 시변 특성의 시스템에 적용할 경우에는 성능의 한계를 보인다. 따라서, QFT 설계기법의 여러 이점을 시변시스템에도 적용할 수 있도록 하기 위해, 본 논문에서는 선형 시변시스템을 위한 제어시스템 설계기법으로 QFT 제어이득 값이 시변시스템의 상태에 따라서 적당한 값을 가지도록 변화할 수 있도록 할 수 있는 이득계획 QFT를 제안한다.

본 논문에서 제안하는 이득계획 QFT 기법은 기존의 이득계획 기법을 선형 시변시스템의 제어에 적용하는 과정에서, 각 이득계획 간격에 대해서 발생할 수 있는 작은 시변 오차를 그 이득계획 간격의 불확실성으로 반영하고 각 간격마다 이를 수용할 수 있도록 QFT의 이득계획을 수행한다. 이를 위하여 시변시스템의 파라미터 변화를 반영할 수 있는 유한한 개수의 불확실성을 포함한 시불변시스템을 선정하고 이에 대해서 QFT 이득을 구한다. 즉, 이득계획 기법에 사용되는 제어이득은 기존의 QFT 기법에 의해서 구해진다. 이와 같은 방법으로 선형 시변시스템의 시변 특성을 반영하면서 QFT의 견실성과 잘 정의된 설계기법을 수정없이 적용할 수 있는 제어시스템 설계기법을 구성할 수 있다. 이 방법은 대상 시스템이 공칭 시변시스템인 경우와 시불변 불확실성이나 외란 등이 포함된 일반적인 선형 시변시스템인 경우 모두 동일한 설계과정을 적용할 수 있다. 이득계획의 구성에 필요한 유한한 개수의 시불변시스템의 상태와 수는 이득계획 오차를 반영하는 충분한 불확실성 한계를 이용해서 결정할 수 있으며 계산된 파라미터와 이

독들을 사상(mapping)시키고 연속적인 이득계획 함수를 구현하기 위해서는 신경망[10]을 이용한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. I장 서론에 이어, II장에서는 시불변시스템을 위한 기존의 QFT 기법을 소개하며 단일입출력 시불변 플랜트를 예로 이용한다. III장에서는 본 논문에서 제안하는 시변시스템을 위한 새로운 이득계획 QFT 기법을 소개한다. 이득계획 QFT 기법은 II장에서 설명된 기존의 QFT 기법을 포함하므로 이에 대한 설명은 III장에서는 생략한다. 그리고 이득계획 QFT 기법을 단일입출력 시변 질량-스프링-댐퍼 모델의 제어시스템 설계에 적용하고 시물레이션 결과를 통해서 적용 타당성과 성능을 검증한다. 마지막으로, IV장에서 본 논문의 전체 내용과 결과를 요약한다.

II. 선형 시불변시스템을 위한 QFT 기법[3]-[5]

1. QFT 제어시스템의 구조와 공칭 플랜트의 선정

본 장에서는, 본 논문에서 제안하는 이득계획 QFT 기법의 배경지식으로 시불변시스템을 위한 기존의 QFT 기법을 소개한다. QFT 설계과정은 (1)과 같이 파라미터  $K$ 와  $a$ 가 불확실성을 가지는 시불변 단일입출력 플랜트에 QFT 기법을 적용하는 과정을 통하여 기술한다. 기본적인 QFT의 설계과정은 최소위상(minimum phase) 플랜트를 대상으로 하는데 (1)은 이 조건을 잘 만족함을 알 수 있다.

$$P(s) = \frac{Ka}{s(s+a)}, K \in [1, 10], a \in [1, 10] \quad (1)$$

QFT 제어시스템의 구조는 그림 1과 같으며, 제어시스템 설계는 다입력-다출력 플랜트인 경우, 필터(pre-filter) 전달함수 행렬  $F(s)$ 와 보상기 전달함수 행렬  $G(s)$ 에 대한 2자유도(2 DOF) 설계를 이용한다. 여기서, 그림 1의 플랜트  $P(s)$ 에는 파라미터 불확실성이 존재하므로, (1)의 경우에  $P(s)$ 는 불확실성 영역에 포함되는 모든 시불변 플랜트의 집합  $\mathbb{P}$ 로 (2)와 같이 표현하는 것이 가능하다.

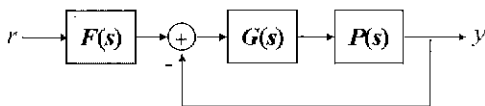


그림 1. QFT 제어시스템의 블록 다이어그램.

Fig. 1. Block diagram of the QFT control system.

$$\mathbb{P} = \left\{ P(s): P(s) = \frac{Ka}{s(s+a)}, K \in [1, 10], a \in [1, 10] \right\} \quad (2)$$

QFT는 설계과정에서 집합  $\mathbb{P}$ 에 속하는 플랜트 중에서 공칭 플랜트  $P_0$ 를 선정하고 이를 기준으로 설계한다. 플랜트 (1)의 경우, 공칭 플랜트는 (3)과 같이 선정할 수 있다. 이와같이, 공칭 플랜트를 선정하는 다른 기준은 없지만 한번 선정된 공칭 플랜트는 설계과정 중에 변경하지 않아야 한다.

$$P_0(s) = \frac{K_0 a_0}{s(s+a_0)}, K_0 \in [0, 1], a_0 \in [0, 1] \rightarrow P_0(s) \in \mathbb{P} \quad (3)$$

2. Nichols 선도 템플릿(NC template)

QFT는 플랜트 파라미터의 불확실성 한계가 주어질 때, 요구되는 안정도와 추종성능의 견실성을 보장할 수 있는 제어시스템을 주파수영역에서 설계하는 방법이다. 즉, (2)의 집합  $\mathbb{P}$ 에 포함되는 모든 플랜트에 대해서 요구되는 안정도와 성능을 보장하는 필터  $T(s)$ 와 보상기  $G(s)$ 를 설계하는 것이라 할 수 있다. QFT 설계과정에 적용하기 위해서 플랜트의 파라미터 불확실성을 나타내는 집합  $\mathbb{P}$ 를 고려대상이 되는 주파수에서의 Nichols 선도 템플릿으로 표현한다. (1)의 파라미터 불확실성에 의해서 플랜트의 크기와 위상이 변화하는 영역을 주파수  $w = 0.01, 0.1, 1, 10, 100$ 에서 NC 템플릿으로 표현하면 그림 2와 같이 도시할 수 있다.

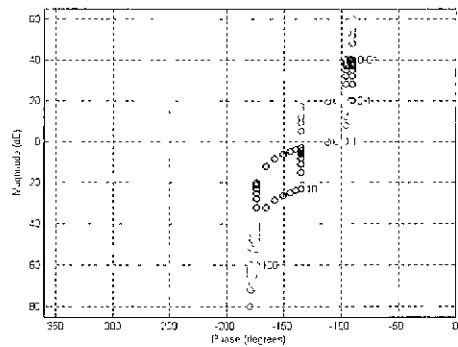


그림 2. 플랜트 파라미터 불확실성을 표현하는 NC 템플릿.

Fig. 2. The NC templates of plant parameter uncertainty.

그림 2에서 NC 템플릿은 (1)의 플랜트 파라미터  $a$ 와  $K$ 가 불확실성한계 내에서 임의의 값을 가질 경우, 나타날 수 있는 플랜트 크기와 위상의 영역을 Nichols 선도에 표시한다. 물리적 시스템의 불확실성을 표현하는 NC 템플릿은 고주파 영역으로 갈수록 그림 2와 같이 일정한 길이의 수직선으로 수렴하는 일반적인 특성을 보인다. (1)에서 템플릿의 형태가 수렴하는 주파수  $w_h$ 와 수렴한 템플릿의 수직길이  $V$ (dB)는 (4) 및 (5)와 같이 결정된다.

$$LmP(jw)_{\max} - LmP(jw)_{\min} \approx \text{Constant}, w > w_h \quad (4)$$

$$\lim_{w \rightarrow \infty} [LmP(jw)_{\max} - LmP(jw)_{\min}] = \frac{(Ka)_{\max}}{(Ka)_{\min}} = V \text{dB} = 40 \text{dB} \quad (5)$$

여기서,  $Lm(\cdot)$ 은 괄호내부 값의 로그값을 나타낸다.

이처럼, 특정 주파수 이상의 고주파영역에서는 플랜트 파라미터 불확실성에 의한 시스템 특성의 변화가 0에 가까기 때문에 제어시스템의 설계는  $w \leq w_h$ 의 주파수영역에 대한 고려만으로 충분함을 알 수 있다.

3.  $L_0(jw)$ 에 대한 안정도 한계와 추종성능 한계

QFT의 보상기 설계는 단일 입출력의 경우, 그림 1에서 필터를 제외한 공칭 개루프 전달함수인 (6)의  $L_0(jw)$ 를 대상으로 수행한다.

$$L_0(jw) = P_0(jw)G(jw) \quad (6)$$

그러나, 다입력-다출력인 경우의  $L_0(jw)$ 는 (6)과는 조금 다른 형태로 표현된다.

설계에 이용할 제한조건들을 구성하기 위해서  $L_0(jw)$ 에 대한 각 주파수에서의 한계(bound)들을 Nichols 선도상에 표시하게 되는데, 안정도 한계(stability bound)와 추종 성능 한계(tracking bounds)가 기본적으로 다루어진다. 안정도 한계는 (5)에서 계산한 크기  $V$ 와 허용 가능한 단위 스텝응답의 최대오버슈트 크기  $M_p$ 로부터 그림 3과 같이 구성한다. 이 때, 페루프 전달함수의 크기는 주파수  $w \leq w_h$ 에서 허용가능한 최대 오버슈트 값보다 작은 값을 가져야 하므로  $L_0(jw)$ 의 Nichols 선도 궤적은 안정도 한계의 내부를 지나지 않아야 한다.

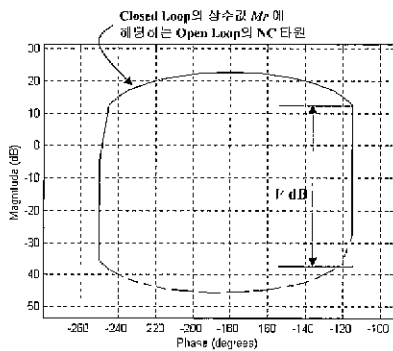


그림 3. 안정도 한계.  
Fig. 3. Stability bound(U-contour).

QFT 설계에서는 또한 추종성능에 대한 조건을 만족시키기 위해서 불확실성을 포함한  $L(jw)$ 가 동일한 입력에 대해 요구되는 구간이내로 한정되는 출력을 낼 수 있도록 견실한 성능을 가져야 한다. 단일 입출력 플랜트의 경우, 이를 만족하기 위해서  $w \leq w_h$ 의 모든 주파수에서 다음의 (7) 또는 (8)로 주어지는 조건들을 만족하여야 한다.

$$\Delta Lm T(jw) = \Delta Lm \left[ \frac{L(jw)}{L(jw) + 1} \right] < \delta(jw), \quad w \leq w_h \quad (7)$$

$$L(jw) > B(jw), \quad w \leq w_h \quad (8)$$

여기서,  $\Delta Lm(\cdot)$ 은 괄호내부 값의 로그값의 변화량이며  $B(jw)$ 는 주파수  $w$ 에서의 추종성능 한계이다.

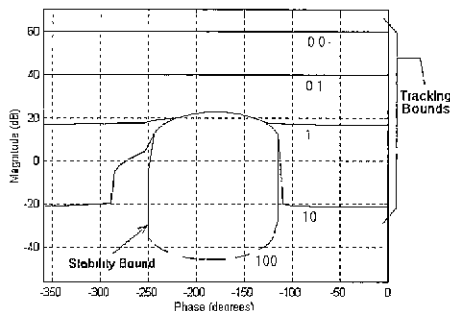


그림 4. 추종성능 한계.  
Fig. 4. Tracking bounds.

추종성능 한계를 그림 3의 안정도 한계와 함께 표현하면 그림 4와 같이 각 주파수에서의 한계들로 표현된다. 즉, QFT 설계에 이용되는  $L(jw)$ 는 (8)의 조건을 만족해야 하므로, 그림 4에서 표시된 각 주파수에서 한계들 위에 위치해야 한다.

4. Loop shaping에 의한 보상기  $G(jw)$ 와 필터  $F(s)$ 의 설계

이제, Nichols 선도의 한계로 그림 4와 같이 표현되는 설계조건을 만족시키는 보상기 전달함수  $G(s)$ 를 설계할 수 있다. 설계과정은 공칭루프인  $L_0(jw)$ 에 대한 loop shaping으로 이루어진다. loop shaping은 shaping된  $L_0(jw)$ 가 proper 하고 주어진 한계들을 만족시킬 수 있는 방법이면 모두 가능하다. (1)의 플랜트에 loop shaping을 적용한 결과는 그림 5와 같다. 그림 5는 그림 4의 한계들을 포함하고 있으며 loop shaping 되기 이전의  $L_0(jw)$ 를 회색, loop shaping 완료된  $L_0(jw)$ 를 검은색의 실선으로 표시하고 있다. Loop shaping되기 이전의  $L_0(jw)$ 는 그림 2와 같은 NC 템플릿에서 공칭시스템에 대한 부분만을 표현한 것으로 안정도 조건과 성능 조건을 만족하지 못하지만, loop shaping된  $L_0(jw)$ 는 모든 조건을 잘 만족함을 그림에서 확인할 수 있다

두 번째 설계 대상인 필터  $F(s)$ 는 다음의 (9)와 같은 페루프 전달함수  $T(jw)$ 에 대한 조건과 (10)을 이용해서 설계할 수 있다

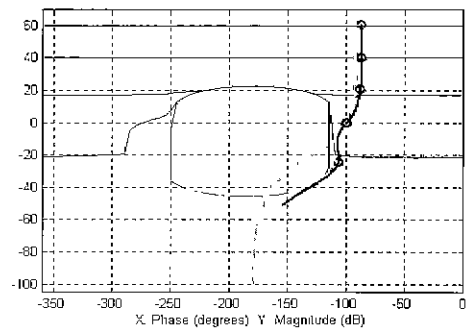


그림 5.  $L_0(jw)$ 의 loop shaping.  
Fig. 5. Loop shaping of  $L_0(jw)$ .

$$T_L \leq \left\{ T(jw) = \frac{L(jw)}{1+L(jw)} F(jw) \right\} \leq T_U \quad (9)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} [F(s)] = 1 \quad (10)$$

여기서,  $T_L$ 과  $T_U$ 는 스텝응답에 대한 설계사양으로 주어진 페루프 전달함수의 하한과 상한을 각각 나타낸다.

5. 다입력-다출력 플랜트에 대한 QFT 설계

QFT를 이용한 다입력-다출력 플랜트의 제어시스템 설계에서는, 일반적으로 필터 전달함수행렬  $F(s)$ 를 대각행렬로 선정하고 페루프 전달함수행렬  $T(s)$ 에 대해서 내부적으로 연성화(coupling)된 입출력간의 관계를 모두 불연성화(decoupling)하는 방법을 이용하여 왔다. 즉, 연성화된

관계는 모두 외란으로 간주하고 0에 가까운 값이 되도록 보상기 전달함수행렬  $G(s)$ 를 구성함으로써 실질적으로는 여러개의 단일입출력 제어시스템이 중첩된 형태로 구성하게 된다. 이 밖에, 다입력-다출력 시스템을 전체적으로 고려할 수 있는 QFT설계도 여러 가지로 연구 및 보고되고 있다.

**III. 선형 시변시스템을 위한 이득계획 QFT 기법**

본 장에서는 본 논문에서 제안하는 선형 시변시스템을 위한 이득계획 QFT 기법의 원리와 적용과정을 기술한다. 기존의 시불변시스템에 대한 QFT 기법은 설계과정의 변경없이 이득계획 QFT를 구성하는 과정의 일부로 포함되지만 II장에서 설명되었으므로 여기서는 생략하기로 한다.

**1. 공칭 선형 시변시스템**

제어대상인 공칭 선형 시변시스템은 (11)과 같이 표현된다. 이 때, 시스템의 시변 파라미터 값들과 이들을 시간에 대해서 미분한 값들은 (12)와 같이 유한 구간 내에서 값을 가지는 시간함수로 가정한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ y(t) &= C(t)x(t) + D(t)u(t) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (a_{ij})_{\min} \leq a_{ij}(t) \leq (a_{ij})_{\max}, (\dot{a}_{ij})_{\min} \leq \dot{a}_{ij}(t) \leq (\dot{a}_{ij})_{\max} \\ (b_{ij})_{\min} \leq b_{ij}(t) \leq (b_{ij})_{\max}, (\dot{b}_{ij})_{\min} \leq \dot{b}_{ij}(t) \leq (\dot{b}_{ij})_{\max} \\ (c_{ij})_{\min} \leq c_{ij}(t) \leq (c_{ij})_{\max}, (\dot{c}_{ij})_{\min} \leq \dot{c}_{ij}(t) \leq (\dot{c}_{ij})_{\max} \\ (d_{ij})_{\min} \leq d_{ij}(t) \leq (d_{ij})_{\max}, (\dot{d}_{ij})_{\min} \leq \dot{d}_{ij}(t) \leq (\dot{d}_{ij})_{\max} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,  $a_{ij}(t), b_{ij}(t), \dots$  등은 각각 행렬  $A(t), B(t), \dots$  등의  $i$ 행  $j$ 열 요소를 나타낸다.

일반적으로 시스템의 파라미터 값들은 시스템이 허용되는 작동범위 내에 존재하는 경우에 (12)와 같은 구간내에서 값을 가지므로 (12)와 같은 가정은 일반성을 잃지 않는다.

**2 이득계획 최대오차와 불확실성 한계의 결정**

(11)로 주어진 시스템에 이득계획 시간간격  $\Delta t$ 를 적용하면 행렬  $A(t)$ 는 (13)과 같이 변환된다.

$$A(t) \rightarrow A_k = A(k \times \Delta t) \quad (k=0, 1, 2, \dots) \quad (13)$$

나머지  $B(t), C(t), D(t)$ 도 (13)과 같은 방법으로 변환될 수 있다. 예를 들어, 일반적인 시간함수  $a(t)$ 에 그림 6과 같이 0.5초 간격으로 이득계획을 적용하면  $a(t) \rightarrow a_k$

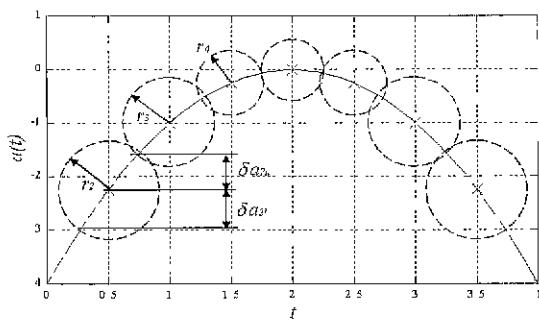


그림 6. 함수의 이득계획 오차.  
Fig. 6. Gain-scheduling errors of a function.

$= a(k \times 0.5) \quad (k=0, 1, 2, \dots)$ 로 되며, 각  $a_k$ 의 값들은 그림 6에서 'x'로 표시된 값들에 해당한다.

이때, 두 번째 이득계획 구간  $0.25 \leq t \leq 0.75$  에서 'x'로 표시된 기준값  $a_2$ 를 중심으로 연속함수  $a(t)$ 가 가질 수 있는 아래와 위의 최대 오차크기가 양의 값을 가지는  $\delta a_{2l}, \delta a_{2u}$ 로 결정된다. 그리고 기준값을 중심으로 이득계획 시간구간내의 모든 값을 포함할 수 있는 원을 그림 6과 같이 결정할 수 있다. 원의 반경  $r_k$ 는 그림 7과 같이 그 구간내의 최대기울기를 이용해서 정해진다.

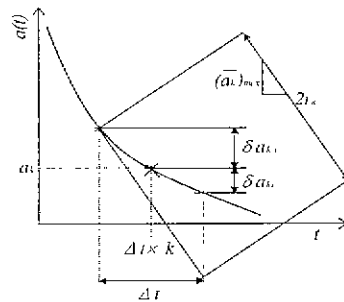


그림 7 최대 기울기를 이용한 원의 반경 결정  
Fig. 7. Setting the radius of circle using the maximum gradient.

그림 7에서 최대오차의 값은 (14)와 같이 정해지고, 최대 오차와 반경과의 관계는 (15)와 같다.

$$(\delta a_k)_{\max} = \max[\delta a_{ku}, \delta a_{kl}] \quad (14)$$

$$r_k > (\delta a_k)_{\max} \quad (15)$$

모든 시간에서 고려한 전구간 최대오차와 전구간 최대 반경과의 관계도 이와 동등하므로 (16)과 같이 표현가능하고, 전구간 최대오차와 전구간 최대반경은 각각 (17)과 (18)로 표현된다.

$$r_{\max} > (\delta a)_{\max} \quad (16)$$

$$(\delta a)_{\max} = \frac{\Delta t}{2} \times \max[|(\bar{a})_{\max}|, |(\bar{a})_{\min}|] \quad (17)$$

$$r_{\max} = \frac{\Delta t}{2} [1 + \{\max[|(\bar{a})_{\max}|, |(\bar{a})_{\min}|]\}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

여기서,  $(\bar{a})_{\max}, (\bar{a})_{\min}$ 은 (12)와 같이 주어지는  $a(t)$ 의 기울기의 상한, 하한이다.

행렬의 모든 시간함수 요소들은 그림 7과 (15)를 이용해서 각 시간에서의 최대오차와 이를 포함할 수 있는 원의 반경을 결정할 수 있으며, 이득계획의 시간간격  $\Delta t$ 의 값이 커질수록 연속시간에 대한 오차 한계도 커지고 이를 포함하는 원의 반경도 커짐을 알 수 있다.

연속시간 시스템에 이득계획 간격을 적용하면서 발생하는 전구간 최대오차 값인  $(\delta a)_{\max}$ 는 모든 이득계획 구간내에서 발생할 수 있는 공칭값에 대한 최대오차의 값을 나타낸다. 본 논문에서는 이러한 각 이득계획 구간내에서 발

생하는 공칭값에 대한 최대오차를 그 구간내의 공칭 파라미터에 대한 불확실성으로 보고 각각의 구간내에서 이를 견실하게 수용할 수 있는 QFT 제어를 QFT의 이득계획을 통해서 구현한다. 이때 앞에서 언급된 실제로 발생할 수 있는 최대오차의 한계인  $(\delta a)_{max}$ 는 이득계획을 구성하는 공칭 시불변시스템을 선택하는 과정에 이용되며, QFT의 설계사양인 파라미터의 불확실성 한계로는 이 최대오차의 값보다 항상 큰 값을 유지하는 최대 원의 반경인  $r_{max}$ 를 이용한다. 그리고 이득계획의 구간은 대부분 작은 값이므로 이를 반영하는 불확실성 한계의 값도 작은값을 유지할 수 있다. 따라서, 작은 값의 불확실성 한계를 QFT 설계과정에 이용하게 되므로 제어시스템 설계가 용이하게 된다.

3. 유한한 개수의 공칭 시불변 플랜트 선정

본 논문에서 소개할 이득계획법은 (12)에서 주어진 시스템의 시변 파라미터 값이 속하는 유한한 구간내에서 (17)을 이용하여 필요한 개수의 등분포된 공칭 시불변시스템을 선택한 뒤, (18)을 반영하여 각각의 시스템에 대한 QFT 제어시스템을 설계하고 이득값을 계산한다. 이렇게 선택된 시스템의 파라미터와 계산된 이득값들을 각각 입력 및 출력 패턴(pattern)으로 두고, 신경망의 학습을 통해 사상시킨다. 실제 제어시에는 학습된 신경망에서 출력되는 이득값들로 QFT 제어시스템을 구성하게 된다. 이 방법은 복잡한 시스템에서도 동일한 방법으로 적용할 수 있다는 장점과 함께, 조밀한 이득의 사상을 위해서는 많은 설계가 필요하다는 단점도 있다. 이런 문제는 QFT 자동 loop shaping 방법[8][9]을 바탕으로, 선택된 시불변시스템들에 대한 설계과정을 프로그램으로 구성하면 쉽게 해결할 수 있다.

(11)의 시스템에 (13)과 같이 이득계획 간격을 적용하고 주파수역 변환을 통해서 각 이득계획 시간  $t = k \times \Delta t$ 에서의 시스템을 시불변 플랜트(plant) 전달함수로 구성하면 (19)와 같다.

$$P_k(s) = C_k [sI - A_k]^{-1} B_k + D_k \quad (19)$$

전달함수 (19)를 일반화된 형태로 구성하면,  $n$ 차 단일입 출력 플랜트의 경우 (20)과 같은 형태를 가진다.

$$P_k(s) = \frac{(b_m)_k s^m + (b_{m-1})_k s^{m-1} + \dots + (b_0)_k}{s^n + (a_{n-1})_k s^{n-1} + \dots + (a_0)_k} \quad (m \leq n) \quad (20)$$

(19)의 계산과정에 의해서 (20)의 전달함수 파라미터  $(a_0)_k, \dots, (a_{n-1})_k, (b_0)_k, \dots, (b_m)_k$ 들은 이득계획 간격을 적용한 시간역 파라미터인  $A_k, B_k, C_k, D_k$  행렬의 요소들을 조합함으로써 계산된다 이와 같은 관계에 의해서 주파수역 파라미터들의 불확실성 한계도 시간역 파라미터와 이들의 불확실성 한계들을 조합함으로써 계산할 수 있다.

모든 이산시간  $k=0, 1, 2, \dots$ 에서 결정되는 시불변시스템을 대상으로 미리 제어를 설계할 수는 없으므로, 본 논문에서는 시스템 파라미터들이 포함되는 (12)와 같은 구간 내에서 등분포된 유한한 개수의 파라미터 값들을 선택하고 이 파라미터 값들의 조합으로 가능한 모든 파라미터

조합을 대신한다. 그리고 파라미터 조합들을 신경망의 학습을 통해서 연속적으로 사상함으로써 가능한 모든 파라미터 값들의 조합에 대해서 이용할 수 있도록 다시 복원하는 방법을 이용한다.

등분포된 파라미터 값을 선택하는 방법은 일반적인 경우와 특별한 경우로 나누어서 고려할 수 있다 일반적인 경우는 시변 파라미터가 임의 형상의 시간함수로 구성된 경우이고 특별한 경우는 시변 파라미터중 일부 또는 전체가 주기함수로 구성된 경우이다.

3.1 일반적인 시변 파라미터인 경우

예를 들어, 시스템에 포함된 시변 파라미터가  $a(t), b(t)$  두 개이고 (12)의 조건을 만족하는 임의 형상의 시간함수 일 경우, 등분포된 파라미터 값과 그 조합을 통한 유한한 개수의 시불변시스템을 선택하는 방법은 그림 8과 같다.

회색으로 채워진 영역은 (12)와 같은 조건을 만족하면서 두 파라미터의 조합으로 형성할 수 있는 공간이다. 이와 같이, 시변 파라미터의 값이 포함되는 구간을 전구간 최대오차  $(\delta a)_{max}, (\delta b)_{max}$ 의 2배인 값으로 나누어서 계산에 이용할 유한한 개수의 파라미터 조합  $(a, b)$ 들을 선택한다. 이 파라미터 조합들로 구성되는 시불변시스템은 그림 8에서 '●'로 표시되며 이렇게 선택된 파라미터의 조합으로 구성되는 시스템의 개수는 (21)과 같이 결정된다.

$$N = \prod_{p=1}^q \left[ \text{int} \left( \frac{(a_p)_{max} - (a_p)_{min}}{2(\delta a_p)_{max}} \right) + 1 \right] \quad (21)$$

여기서,  $\text{int}(\cdot)$ 는 괄호내부 값의 정수부를 나타내며,  $q$ 는 시스템에 포함된 시변 파라미터의 전체 개수를 나타낸다

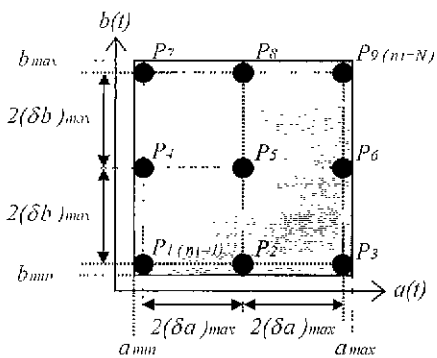


그림 8. 일반적인 파라미터인 경우.  
Fig. 8. In case of general parameters.

그림 8과 같이 파라미터 값들을 선택하는 이유는 시간에 따라 결정되는 파라미터의 값은 여러 시간에서 동일한 값이 생길 수 있지만, 그 값들이 소속되는 이득계획 구간에서 결정되는 이들의 최대 기울기 값은 서로 다를 수 있기 때문이다. 즉, 같은 파라미터 값을 가지는 여러 시간에서의 최대오차 한계가 일정하지 않기 때문에, 이 최대오차들을 각각 다르게 반영하지 않고 모든 이득계획 구간들에 대해서 동일하게 전구간 최대오차를 반영하도록 일반화한다. 이런 방법으로 이득계획 간격과 관련된 최대오차를 반영할 수

있고, 최소한의 파라미터 개수로 그 파라미터의 값이 소속 되는 전체 구간을 대신할 수 있다. 이때, 파라미터를 조합하여 구성된 시불변시스템의 개수  $N$ 도 최소가 된다.

일반적인 형상의 시간함수에 대해서 위와 같은 방법으로 시불변시스템을 표본으로 추출해서 이득계획함수를 구성하면 (12)에서 주어진 함수와 그 미분값의 상한, 하한을 동일한 값으로 가지는 모든 시스템에 대해서는 동일한 이득계획 QFT 제어기를 적용할 수 있다. 즉, 시변 파라미터의 정확한 함수 표현을 알 수 없어도 파라미터의 상한과 하한 그리고 파라미터 변화율의 상한과 하한을 알 수 있으면 본 절에서 기술한 선택방법을 이용해서 시변시스템에 대한 이득계획 QFT 제어시스템을 설계할 수 있게 된다.

3.2 주기함수로 주어지는 시변 파라미터인 경우

3.1절의 경우처럼 시스템에 포함된 시변 파라미터가  $a(t)$ ,  $b(t)$  두 개이고 이들이 (12)의 조건을 만족하는 주기함수로 주어질 때, 등분포된 파라미터 값과 그 조합을 통한 유한한 개수의 시불변시스템을 선택하는 방법은 그림 9와 같다. 회색으로 채워진 영역은 (12)의 조건을 만족하면서 두 파라미터  $a(t)$ ,  $b(t)$ 의 조합으로 형성할 수 있는 공간을 나타낸다. 그리고 격자(grid)는 이 공간을  $2(\delta a)_{\max}$  와  $2(\delta b)_{\max}$ 로 나누고 있다. 그림 9는  $a(t) = \sin t$ ,  $b(t) = [\sin(3t) + \cos t]/2$ 로 주어진 경우를 도시한 것이다. 이런 경우, 공칭 시불변시스템의 선택은 그림과 같이 16개로 나누어진 공간에서 모든 시간에 대한 시변 파라미터의 궤적이 지나가는 공간만을 선택하고, 다시 이 공간을 대표하는 파라미터 조합을 선택함으로써 가능하다.

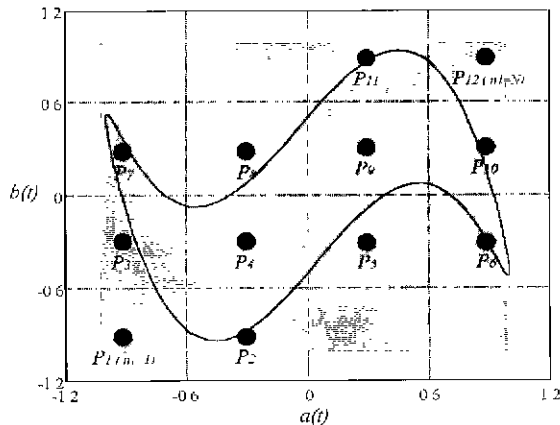


그림 9. 주기함수 파라미터인 경우.  
Fig. 9. In case of periodic parameters.

이를 일반화하면, 시변 파라미터의 개수가  $q$ 개이고 주기함수인 경우에는 (12)의 조건을 만족하는  $q$ 개의 시변 파라미터가  $q$ 차원의 공간을 형성한다. 그러나, 모든 시간에서의 파라미터 조합이 폐곡선이나 곡선 등의 일정한 궤적만을 반복해서 나타내게 되므로 파라미터의 선정을 위해서 (12)를 만족하는  $q$ 차원의 모든 공간을 고려하지 않아도 되며 선택된 시불변시스템의 개수도 줄일 수 있다. 그림 9와 같은 경우는 총 16개의 격자공간 중에서 4개를 줄일 수 있음을 보여준다.

3.1절과 달리 이 경우는 선택해야 할 시스템의 개수를 미리 알 수는 없고, 일반적으로 이런 형태의 파라미터로 구성되는 경우는 드물기 때문에 3.1절과 같은 시변 파라미터에 대한 고려가 주로 이용된다. 3.1절의 일반적인 경우는 이 절의 특수한 경우도 포함하는 형태라 할 수 있다.

4. 선택된 시스템의 QFT 이득 구성

다음 단계로, 3절에서 선택한  $N$ 개의 시스템에 대해서 각각의 QFT 제어기와 필터를 구성해야 한다. 이 때, QFT 설계과정의 NC 템플릿 구성을 위해서 각각의 파라미터에 대한 불확실성 구간이 필요하다. 이 불확실성 구간을 지정하는 방법은 공칭 시변시스템인 경우와 시불변 불확실성을 포함한 일반적인 시변시스템인 경우로 나누어서 고려할 수 있다.

4.1 공칭 시변시스템인 경우

(11)과 같은 시변시스템에 이득계획 간격을 적용하는 과정에서 선택된 공칭 시불변시스템의 파라미터 값들이  $a_m$  ( $m=1, \dots, N$ )이고, 이에 대한 연속시간에서의 파라미터가  $a(t)$ 라고 하면  $a_m$ 의 불확실성인  $\Delta a_m$ 의 한계는 전구간의 최대오차를 포함하는 원의 반경 (18)을 이용해서 다음의 (22)와 같이 표현된다.

$$-r_{\max} \leq \Delta a_m \leq r_{\max} \quad (m=1, \dots, N) \quad (22)$$

이와 같이 실제의 최대오차 (17)보다 항상 큰 값인 충분한 불확실성 한계를 QFT 이득구성의 조건으로 이용하는 이유는, 5절에서 설명될 신경망 상상을 이용한 연속 이득계획함수의 구성시에 발생할 수 있는 이득상상 오차를 고려해 주기 위해서이다. 또한, 짧은 시간구간이지만 오차가 가지는 시변 특성도 이를 통해서 반영해 줄 수 있다.

본 논문에서 이용할 이득계획법은 고정된 전달함수 형태의 QFT 보상기와 필터에 대해서 파라미터 값을 변경하는 방법으로 구성하므로 제어기와 필터의 형태(단일 입출력의 경우 (20)의  $m, n$ 에 해당)는 동일한 것으로 가정한다. 선택된 시불변시스템의 수가 많더라도 고정된 차수의 제어기 설계는 유전자 알고리즘 등을 이용한 자동 loop shaping[11][12]을 구현하면 프로그램에 의해서 많은 수의 설계를 자동으로 수행할 수 있으므로 큰 문제는 되지 않는다. 선택된 이들 각각의 시스템에 대한 QFT 보상기와 필터의 이득 설계과정은 II장에서 기술된 시불변시스템을 위한 QFT 설계과정과 동일하므로 여기서는 생략한다.

4.2 불확실성을 포함한 일반적인 선형 시변시스템

(11)의 공칭 시변시스템에 시불변 파라미터 불확실성이 포함된 일반적인 시스템을 고려하면 (23)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A(t) + \Delta A)x(t) + (B(t) + \Delta B)u(t) \\ y(t) &= (C(t) + \Delta C)x(t) + (D(t) + \Delta D)u(t) \end{aligned} \quad (23)$$

(23)은 (12)의 공칭 시변 파라미터에 대한 조건을 동일하게 포함하며 시불변 파라미터 불확실성에 대한 구간을 (24)와 같이 설정할 수 있다고 가정한다.

$$\begin{aligned} (\Delta a_{ij})_{\min} &\leq \Delta a_{ij} \leq (\Delta a_{ij})_{\max} \\ (\Delta b_{ij})_{\min} &\leq \Delta b_{ij} \leq (\Delta b_{ij})_{\max} \\ (\Delta c_{ij})_{\min} &\leq \Delta c_{ij} \leq (\Delta c_{ij})_{\max} \\ (\Delta d_{ij})_{\min} &\leq \Delta d_{ij} \leq (\Delta d_{ij})_{\max} \end{aligned} \quad (24)$$

여기서,  $\Delta a_{ij}, \Delta b_{ij}, \dots$  등은 각각 행렬  $\Delta A, \Delta B, \dots$  등의  $i$  행  $j$  열의 요소이다.

예를 들어, (23)의 시스템에 (13)과 같이 이득계획 간격을 적용하는 과정에서 시변 파라미터  $a(i)$ 에 대한 공칭 시불변시스템의 파라미터 값들을  $a_m (m=1, \dots, N)$ 로 선택하는 경우를 고려하기로 한다. 여기서, 시변 파라미터  $a(t)$ 는 시불변 불확실성  $(\Delta a)_{\min} \leq \Delta a \leq (\Delta a)_{\max}$ 를 포함한다. 이때  $a_m$ 의 불확실성인  $\Delta a_m$ 의 한계는 (22)를 통해서 주어지는 충분한 불확실성과 (24)의 시불변 불확실성을 동시에 고려하여 (25)와 같이 결정된다.

$$-r_{\max} + (\Delta a)_{\min} \leq \Delta a_m \leq r_{\max} + (\Delta a)_{\max} \quad (25)$$

$(m=1, \dots, N)$

위와 같이 시불변 불확실성을 포함한 일반적인 경우의 설계과정도 불확실성 한계를 결정하는 식만 공칭 시불변시스템의 경우와 차이를 보이며 나머지 과정은 모두 동일하다. 즉, 두 경우의 차이점은 그림 2와 같이 QFT 템플릿 구성을 위한 불확실성 한계를 결정할 때 (22)대신 (25)를 이용해야 한다는 것이다.

5. 신경망 학습에 의한 연속 이득계획함수의 구성

본 논문에서 구성한 유한한 개수의 시불변시스템과 QFT 이득은 각 이득계획구간의 오차를 수용할 수 있도록 설계되어 있으므로 이들간의 switching 기법에 만으로도 의도한 성능은 얻을 수 있다. 그러나 설계상에서 설정한 공칭값 이외의 시스템 파라미터에 대해서도 연속적으로 그 값에 더욱 적당한 이득계획 성능을 얻기 위해서 신경망의 학습을 통해서 연속적인 하나의 이득계획함수를 구현하도록 한다. 이득계획을 담당할 신경망을 구성하고 오프라인 학습을 시키는 과정은 시스템 파라미터의 값에 따라 그 시스템에 필요한 제어기와 필터를 자동으로 구성하도록 신경망을 학습시키는 과정이다. 이 과정은 신경망의 출력결과에 따라서 어느정도의 시행착오가 소요된다.

플랜트 파라미터의 개수가  $m$ 개이고 설계된 제어시스템의 파라미터 개수가  $n$ 개인 경우, 이득계획함수를 구성하기 위한 신경망의 구조는 그림 10과 같이 크게 (a)와 (b)의 형태로 나누어 볼 수 있다.

(a)는 플랜트 파라미터와 제어시스템의 파라미터의 관계

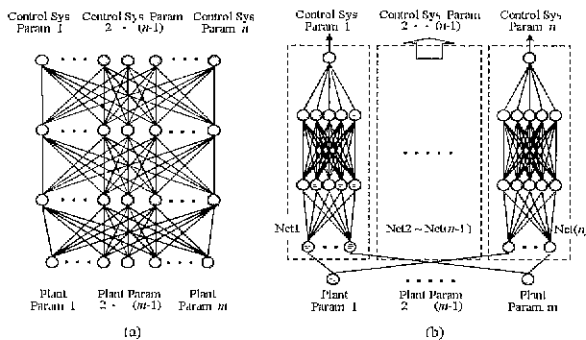


그림 10. 파라미터 사상을 위한 신경망의 구조.

Fig. 10. Neural network structures for parameter mapping.

를 하나의 신경망에 사상하는 형태이다. 이 경우는 구조가 복잡하지 않고 전체 뉴런(neuron)의 수가 적으므로 구성하기가 간편하다는 장점이 있다. 그러나, 뉴런의 수에 비해서 상대적으로 연결(synaptic connection)의 수가 많고, 입력보다 출력의 개수가 많은 경우에 학습이 용이하지 않다는 단점도 있다. 반면, (b)는 모든 플랜트 파라미터와 하나의 제어시스템 파라미터의 관계를 신경망에 사상하고 각각의 제어시스템 파라미터에 대해서 이와 같은 신경망을 구성해서 병렬로 배열한 형태이다. 이 경우는 그림처럼 전체 신경망의 구조가 복잡하고 뉴런의 수가 많다는 단점이 있지만, 뉴런의 수에 비해서 연결의 수는 아주 적으며 신경망 각각은 하나의 출력에 대한 사상만을 담당하므로 학습이 용이하고 입력층 파라미터간의 관계도 불연성화(decoupling)할 수 있으므로 학습결과도 전반적으로 만족스럽게 된다. 본 논문에서는 그림 10의 (b)와 같은 신경망 구조를 이용했으며, 학습 알고리즘은 일반적인 오류-역전파(error-back propagation) 알고리즘을 이용하였다[10]. 학습에 이용될 입력패턴은 그림 8, 그림 9와 같은 방법으로 선택된 시스템 파라미터 값의 조합이며, 입력패턴에 이용된 파라미터 값들로 구성된 시스템에 대해서 QFT 제어기와 필터를 설계하고 이들의 파라미터를 출력패턴으로 이용한다.

입력과 출력패턴이 구성되면 신경망을 구성하고 두 종류의 파라미터 관계를 학습시킨다. 이런 과정을 통하여 앞에서 선택한 유한한 개수의 시불변시스템 뿐만 아니라 시스템 파라미터가 가질 수 있는 모든 가능한 값을 조합한 시불변시스템에 적용 가능한 QFT 제어기와 필터의 이득계획 함수가 연속적으로 구성될 수 있다.

이와 같이 모든 시간에서의 플랜트 파라미터 조합에 대해서 이용할 수 있도록 구성된 연속적인 이득계획함수는 (13)에서 설정한 이득계획 시간간격  $\Delta t$ 보다 작은 값의 시간간격에 대해서 모두 적용 가능하다. 각 이득계획 단계마다 이득의 결정을 위해서 신경망이 계산하는데 소요되는 시간  $\Delta t_{NN}$ 도 동시에 고려하면 실제로 이용 가능한 이득계획 시간간격  $\Delta t_s$ 는 (26)을 만족하는 값으로 선택할 수 있다.

$$\Delta t_{NN} \leq \Delta t_s \leq \Delta t \quad (26)$$

시변 특성이 아주 강한 시스템에 대해서 이득계획 QFT를 실제로 적용할 경우에는 구현 가능한 최소의 이득계획 간격을 (13)에 반영하더라도 충분한 불확실성 한계 (22), (25)는 작은 값이 아닐 수 있으므로 (13)의 이득계획 간격에 의해서 제어시스템의 성능이 대부분 좌우된다. 따라서, 이런 경우에는 설계시의 이득계획 시간간격으로 가능한 최소 이득계획 시간간격을 이용하는 것이 바람직하므로  $\Delta t_{NN} \approx \Delta t_s \approx \Delta t$  이 된다. 그러나 시스템의 시변 동역학이 매우 빠른 경우가 아니라면 설계시의 이득계획 시간간격이 크더라도 충분한 불확실성 한계의 크기는 대부분 작은 값이므로, 시변 제어성능이 이득계획 간격에 의존하는 정도가 줄어든다. 따라서, 이런 경우는 설계시에는 최소가 아닌 적절한 값의 이득계획 간격으로 설계함으로써 선택할 시불변시스템의 개수와 설계에 필요한 계산량을 줄일 수 있으며, 실제 적용시에는  $\Delta t_s = \Delta t_{NN}$ 을 이용함으로써 동일

한 제어시스템으로 성능의 향상을 얻을 수 있다.

이득계획 QFT의 모든 설계과정을 통해서 구성된 제어기, 필터와 이득계획을 수행하는 신경망을 포함한 전체 시스템을 도시하면 그림 11과 같이 나타낼 수 있다. 여기서,  $P_k(s)$ ,  $G_k(s)$ ,  $F_k(s)$ 는 각각 이득계획의 시간간격이 반영된 플랜트, QFT 제어기, 필터의 전달함수를 나타낸다.

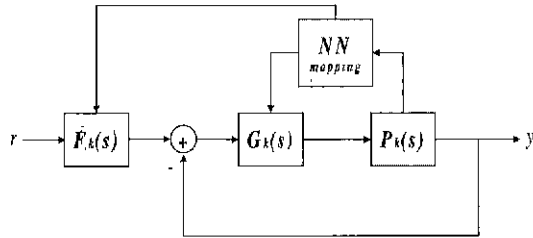


그림 11. 전체 제어시스템의 블록선도.  
Fig. 11. Block diagram of the whole control system.

6. 예제 및 시뮬레이션

지금까지 기술한 설계과정을 그림 12와 같은 시변 질량-스프링-댐퍼 시스템의 제어시스템 설계에 적용한다. 운동방정식은 (27)과 같으며 파라미터들은 (28)과 같이 주어진다 고 가정한다.

$$\ddot{x}(t) = -\frac{k(t)}{m(t)}x(t) - \frac{c(t) + \dot{m}(t)}{m(t)}\dot{x}(t) + \frac{1}{m(t)}u(t) \quad (27)$$

$$\ddot{x}(t) = -4x(t) - a(t)x(t) + a(t)k(t)u(t) \quad (28)$$

$$a(t) = 5 \sin t + 8 \quad (3 \leq a(t) \leq 13)$$

$$k(t) = 5 \cos t + 8 \quad (3 \leq k(t) \leq 13)$$

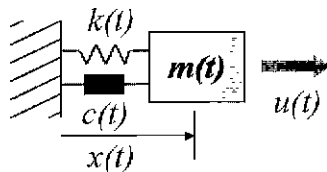


그림 12. 단일 입출력 시변시스템 예제.  
Fig. 12. An example of SISO time-varying system.

준 시스템에 0.4초 간격으로 이득계획을 적용하면 전구간 최대오차와 충분한 불확실성 한계는 (17), (18)을 이용해서 (29)와 같이 결정된다.

$$(r_a)_{\max} \approx (\delta a)_{\max} = 1, \quad -1 \leq \Delta a \leq 1 \quad (29)$$

$$(r_k)_{\max} \approx (\delta k)_{\max} = 1, \quad -1 \leq \Delta k \leq 1$$

그리고, 일반적인 시변 파라미터인 경우에 선택할 수 있는 최대 시스템의 개수를 (21)을 이용해서 계산하면 (30)과 같다.

$$\left[ \text{int}\left(\frac{10}{2}\right) + 1 \right] \times \left[ \text{int}\left(\frac{10}{2}\right) + 1 \right] = 36 \quad (30)$$

여기서, 시변 파라미터인  $a(t)$ ,  $k(t)$ 가 주기함수이므로 그림 9와 같은 방법으로  $a = \{3, 5, 7, 9, 11, 13\}$ ,  $k = \{3, 5, 7,$

9, 11, 13}이 조합된 36개의 시불변 공칭 시스템중에서  $a(t)$ ,  $k(t)$ 가 형성하는 궤적과 관련된 시스템을 선택하면  $N=20$ 개가 된다.

이 각각의 시스템에 대하여 주파수역 변환을 수행하면 (31)과 같다.

$$P_m(s) = \frac{(k_m + \Delta k)(a_m + \Delta a)}{s^2 + (a_m + \Delta a)s + 4} \quad (ni=1, 2, \dots, 20) \quad (31)$$

구성된 시불변시스템 각각에 대해서 (29)에서 계산한 충분한 불확실성 한계를 적용하고 QFT 제어기와 필터를 각각 (32), (33)과 같은 형태로 구성한다.

$$F_m(s) = \frac{b_{F2}s^2 + b_{F1}s + b_{F0}}{s^3 + a_{F2}s^2 + a_{F1}s + a_{F0}} \quad (32)$$

$$G_m(s) = \frac{b_{G1}s + b_{G0}}{s^2 + a_{G1}s + a_{G0}} \quad (33)$$

선택된 시스템들에 대해서 그림 13과 같이 파라미터 사상을 위한 신경망을 구성하고 학습을 시킨다. 그림 14는 첫 번째 제어시스템 파라미터  $b_{F2}$ 와 두 플랜트 파라미터  $a(t)$ ,  $k(t)$ 와의 관계를 신경망으로 사상한 결과이다. 같은 방법으로 모든 파라미터들에 대한 사상이 완료되면 그림 11과 같은 전체 제어시스템이 구성된다.

그림 15와 그림 16은 각각 스템과 정현파 기준입력에 대해서 설계된 이득계획 QFT를 적용한 시뮬레이션 결과이며 고정된 값의 이득을 가지는 기존의 QFT를 적용한 결과

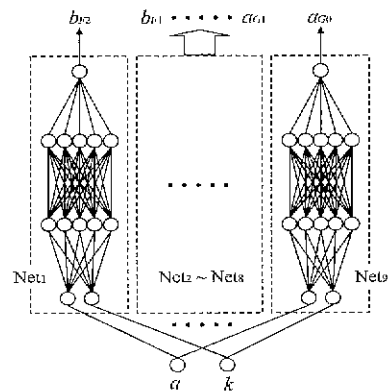


그림 13. 신경망의 구조.  
Fig. 13. Structure of neural network.

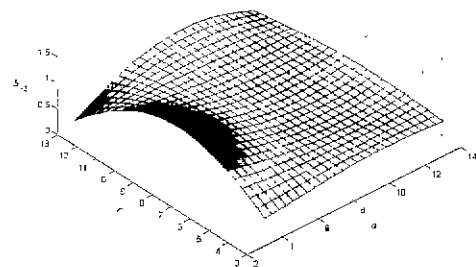


그림 14. 파라미터  $b_{F2}$ 의 사상 결과.  
Fig. 14. The result of mapping the parameter  $b_{F2}$ .



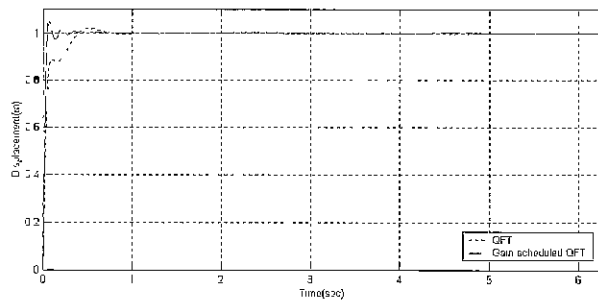


그림 15. 스텝 응답.

Fig. 15. Step input response.

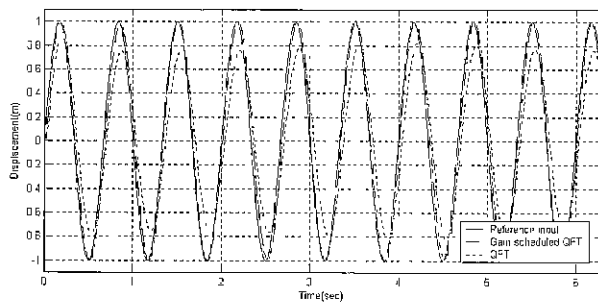


그림 16. 정현파 응답.

Fig. 16. Sinusoidal input response.

도 함께 포함한다. 그림 15에서 확인할 수 있듯이 시변 특성이 거의 없는 기준입력에 대해서는 기존의 QFT도 시스템의 시변 특성으로 인한 응답초기의 바람직하지 않은 특성을 제외하고는 이득계획 QFT와 비슷하게 양호한 응답을 보여줄 수 있다. 그러나 그림 16과 같이 시변 특성이 강해진 정현파 입력에 대해서는 기존의 QFT는 입력의 크기를 응답에 반영하지 못하고 응답의 위상도 입력에 비해서 지연되는 특성을 보여준다. 반면, 이득계획 QFT는 응답의 크기나 위상에서 기준입력을 잘 추종함을 확인할 수 있다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 시불변 불확실성을 포함한 일반적인 시변시스템에 적용 가능한 제어기 설계기법으로 이득계획을 이용한 QFT 제어기법을 제안하고, 예제를 통해서 그 설계 절차와 적용의 타당성을 검증하였다. 본 논문에서 제안한 이득계획 QFT 기법은 이득계획 수행시, 이득계획을 적용하면서 발생하는 오차를 기존의 QFT 기법에 적용가능한 불확실성 한계로 계산할 수 있는 방법과, 이와 관련하여 신경망을 이용한 이득계획을 구성할 때 필요한 조건들을 계산하는 방법도 제시하였다. 또한 모든 QFT 설계과정은 주어진 파라미터 불확실성에 대해서 안정화할 수 있는 제어기를 구성하므로 본 논문에서 구성한 이득계획 QFT는 신경망이 원하는 성능으로 구성될 경우, 시변시스템에 대해 정지시간(frozen-time)의 관점에서 안정성을 보장하는 제

어시스템을 구성한다

본 논문에서 제안한 이득계획 QFT 기법은 시뮬레이션 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 시변특성이 강한 플랜트와 기준입력에 대해서 양호한 특성을 보이므로, 비행기, 미사일 등 시변특성이 강하고, 기준입력에 대한 추종성능이 중요한 시스템에 적용할 제어기 구성에 기여할 것으로 판단된다. 또한, 모델링 오차가 고려되는 일반적인 시변시스템에 대해서도 양호한 성능을 보여줄 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] D. J. Leith and W. E. Leithead, "Appropriate realization of MIMO gain-scheduled controllers," *International Journal of Control*, vol. 70, no. 1, pp. 13-50, 1998.
- [2] D. J. Leith and W. E. Leithead, "Gain-scheduled and nonlinear systems: dynamic analysis by velocity-based linearization families," *International Journal of Control*, vol. 70, no. 2, pp. 289-317, 1998.
- [3] I. Horowitz, *Synthesis of feedback systems*, Academic Press, 1963.
- [4] I. Horowitz, "Survey of quantitative feedback theory," *International Journal of Control*, vol. 53, no. 2, pp. 255-291, 1991.
- [5] C. H. Houpis, R. R. Sating, S. Rasmussen, and S. Sheldon, "Quantitative feedback theory technique and applications," *International Journal of Control*, vol. 59, no. 1, pp. 39-70, 1994.
- [6] C. F. Lin, *Advanced control systems design*, Prentice Hall, 1994.
- [7] C. Borghesani, O. Yaniv, and Y. Chait, *Quantitative feedback theory toolbox user's guide*, The Mathworks, inc., 1994.
- [8] I. Horowitz, *Quantitative feedback theory(QFT)*, QFT Publications, 1992.
- [9] G. D. Halikias and G. F. Bryant, "Optimal loop-shaping for systems with large parameter uncertainty via linear programming," *International Journal of Control*, vol. 62, no. 1, pp. 557-568, 1995.
- [10] H. Demuth and M. Beale, *Neural network toolbox user's guide*, The Mathworks, inc., 1997.
- [11] J. Gu, J. Shen, and L. Chen, "The QFT control design via genetic algorithms and application," *Proceedings of the 14th World Congress of IFAC*, pp. 103-108, 1999.
- [12] W. H. Chen, D. J. Ballance, W. Feng, and Y. Li, "Genetic algorithm enabled computer-automated design of QFT control systems," *Proc. of the 1999 IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design*, pp. 492-497, 1999.



**최재원**

1987년 서울대학교 제어계측공학 졸업. 1989년 서울대학교 제어계측공학 석사. 1995년 서울대학교 제어계측공학 박사. 1995년 2월~3월 일본 NASDA/TKSC 방문 연구원. 1995년 9월~1996년 2월 미국 USC PostDoc. 1998년 1월~2월, 1999년 12월~2000년 1월 미국 LSU 방문 교수. IFAC Technical Committee on Aerospace 및 Technical Committee on Linear Systems 위원. IEEE Control Systems Society Conference Editorial Board, Associate Editor 1996년~현재 부산대학교 기계공학부 전임강사, 조교수. 2000년 5월 한국과학기술단체 총연합회 수여 제 10회 과학기술우수논문상 수상. 관심분야는 네트워크 차량의 항법 및 유도제어와 ITS에의 응용, 초소형 비행체의 항법 및 유도제어, 고장진단기반 제어기 재구성.



**임기홍**

1999년 부산대 기계공학부 졸업. 1999년~현재 부산대 기계공학부 석사과정. 관심분야는 선형 시변시스템, 지능 제어기법, 고장진단 기반의 제어기 재구성.