

## 다중 모델, 제어기, 스위칭을 이용한 비선형 플랜트의 IMC 제어기 설계

### IMC Design for Nonlinear Plants using multiple models, controllers, and switching

\*오원근\*, 구세완\*, 서병설\*

한양대학교 전자통신공학과 (Tel: 290-0364; Fax: 281-9912; E-mail: owg@apollo.hanyang.ac.kr)

**Abstracts** This paper discusses the general properties and the design procedures of Internal Model Control(IMC) scheme for nonlinear plants. Also we propose new nonlinear IMC(NIMC) design method using linear IMC. Although all IMC controllers can be thought simple 'inverse controller', its nonlinear realization is not easy. Propose NIMC is composed multiple linear models, IMC controllers, and switching scheme. The advantages of this method are we can use simple linear IMC design method and need not nonlinear modelings.

**Keywords** Internal Model Control, Nonlinear Control, Multiple Models/Controllers, Switching

#### 1. 서론

IMC 구조는 일반적인 되먹임 시스템의 구조와는 달리 페루프 내에 플랜트의 공칭 모델(nominal model)이 들어 있으며 이의 출력과 플랜트 출력의 차이를 되먹임 한다. 선형 플랜트에 대한 IMC 는 주파수 영역에서 설계하며 내부 안정성(internal stability), 강인성(robustness),  $H_\infty$ -노름 최소화 등이 반영되어 있는 설계법으로 그 절차가 잘 정립되어 있다.[1]

그러나 IMC 구조를 비선형 플랜트로 확장시키는 것은 구체적인 설계법의 확립이 어려워 몇 가지 결과만이 나와있다. Economou 와 Morari[2]는 비선형 IMC 구조의 성질과 제어기 설계 절차의 개요를 입출력 시스템 이론을 이용해서 일반적인 형태로 기술하고 수치 해석 방법을 이용하여 제어기를 구하였다. Henson 과 Seborg[3] feedback linearization을 IMC 구조에 적용한 방법을 제안하였다.

현재까지 연구된 비선형 IMC 는 이 2가지 정도이며 이들은 실용적인 방법론으로는 쉽게 적용하기 힘든 단점이 있다. 본 논문에서는 쉽게 설계할 수 있는 비선형 플랜트에 대한 새로운 IMC 제어기 설계 방법을 제안하였다. 이 방법의 동작 원리는 대략 다음과 같다. 비선형 플랜트가 주로 동작하는 몇 개의 동작점에서 선형 모델을 구하고 각각에 대해 선형 IMC 제어기를 설계한다. 그러면 이 모델/제어기 쌍은 해당 동작점에서만 유효한 것이 아니라 동작점 주변의 일정한 영역에서도 페루프가 잘 동작하게 한다. 이 페루프가 잘 동작하는 영역을 강인성 영역이라고 정의하며, 운전중에는 비선형 플랜트가 현재 어느 강인성 영역에 있는지를 판별하여 해당되는 모델/제어기로 스위칭을 하는 방식으로 동작한다.

$\|z\|_p$  : 신호  $x: R_+ \rightarrow R^n$  의  $p$  노름

$\gamma_p(P)$  : 연산자  $F$  의  $L_p$ -이득 또는  $L_p$ -노름

$$\gamma_p(P) := \sup_u \frac{\|(Pu)\|_p}{\|u\|_p}, \forall u \in L_p, \forall T \in R_+$$

#### 2. 비선형 플랜트에 대한 IMC 구조

비선형 플랜트에 대한 IMC 구조를 그림 1 에 나타내었다. 전체 페루프의 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z &= (p - \hat{p}_N) q_N e \\ r &= e + z \\ y &= p q_N e = \hat{p}_N f_N e \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서  $p, \hat{p}_N, \hat{q}_N, f_N: L_{pe} \rightarrow L_{pe}, r, e, u, y, \hat{y}, z \in L_{pe}$  이다.

비선형 IMC 제어기의 설계 목적은 출력  $y$  가 기준 입력  $r$  을 잘 추종하도록 하는 것이며 그 설계 과정은 크게 두 단계로 나누어진다. 첫 단계인 공칭 제어기 설계 과정에서는 모델링 오차가 없다는 가정 하에서 설계 목적을 만족하는 제어기를 구하고, 두 번째 단계인 강인성 필터 설계 과정에서는 이 공칭 제어기가 모델링 오차에도 강인하게 동작하도록 강인성 필터를 설계해서 공칭 제어기에 덧붙인다.

#### 3.1 공칭 제어기 설계

이 단계에서는 모델과 플랜트가 완전히 동일하다 가정하고 다음과 같이 추종 오차를 최소화하는 제어기  $\hat{q}_N$  을 설계한다.

$$\min_{\hat{q}_N} \|r - y\|_p \quad (2)$$

모델링 오차가 없을때  $y = \hat{p}_N \hat{q}_N r, f_N = 1$  이므로 (2)는

$$\min_{\hat{q}_N} \|(1 - \hat{p}_N \hat{q}_N)r\|_p \quad (3)$$

이 된다. 이 문제의 해는 다음과 같이  $\hat{q}_N$  를  $\hat{p}_N$  의 우측 역 연산자로 즉, 모델의 역으로 선택하는 것이다.

$$\hat{q}_N = \hat{p}_N^{-1} \quad (4)$$

그러면 전체 페루프는 다음과 같은 성질을 갖게 된다.[2]

1. 역 모델  $\hat{p}_N^{-1}$  와 플랜트  $p$  가  $L_p$ -안정하면 전체 페루프

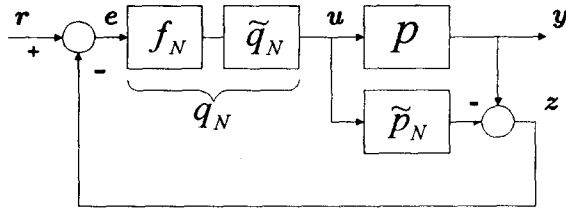


그림 1. 비선형 플랜트에 대한 IMC 구조

는  $L_p$ -안정하다.

2. 제어기는  $y=r$  이 되는 완전 제어(perfect control)를 한다.
3. 점근적으로 상수 값에 접근하는 입력을 인가했을 때 정상 상태 오차는 0 이다.

따라서 모델링이 완벽하게 이루어지고 그 모델의 안정한 우측 역연산자가 존재한다면 전체 시스템의 안정성과 성능이 100% 달성될 수 있다. 그러나 이렇게 완전 제어를 하는 제어기는 일반적으로 아주 큰 이득을 갖기 때문에 감도(sensitivity)가 매우 크다. 그래서 현실적으로는 언제나 모델링 오차가 존재하기 때문에 이 역 모델 제어기는 바로 구현될 수는 없으며 제어기의 이득을 줄여서 모델링 오차에 대한 강인성을 늘려야 한다.

### 3.2 필터 설계

여기에서는 공칭 제어기에 덧붙여 강인성을 증가시키는 강인성 필터  $f_N$  에 대해 논한다. 모델 오차가 존재할 때 IMC 구조의 안정 조건은 다음과 같다.

(정리 1)  $p$  와  $q_N$  이 유한한  $L_p$ -이득을 갖고 다음 부등식을 만족하면 IMC 제어 구조의 전체 페루프는  $L_p$ -안정하다.

$$\gamma_p(p - \hat{p}_N) \gamma_p(q_N) < 1 \quad (5)$$

(증명) 페루프가  $L_p$  안정하기 위해서는  $r \in L_p$  일 때  $z, u, y, \hat{y} \in L_p$  이어야 한다.

$$\begin{aligned} \|z\|_p &= \|(p - \hat{p}_N)u\|_p = \|(p - \hat{p}_N)q_N(r - z)\|_p \\ &\leq \gamma_p(p - \hat{p}_N) \gamma(q_N) \|r\|_p + \gamma_p(p - \hat{p}_N) \gamma(q_N) \|z\|_p \end{aligned}$$

$$\|z\|_p \leq (1 - \gamma_p(p - \hat{p}_N) \gamma(q_N))^{-1} \gamma_p(p - \hat{p}_N) \gamma(q_N) \|r\|_p$$

에서  $\gamma_p(p - \hat{p}_N) \gamma_p(q_N) < 1$  이면  $z \in L_p$  이 성립한다. 또한

$$\|u\|_p \leq \gamma(q_N) \|r\|_p + \gamma(q_N) \|z\|_p$$

$$\|y\|_p \leq \gamma_p(p) \|u\|_p$$

$$\|\hat{y}\|_p \leq \gamma_p(\hat{p}_N) \|u\|_p$$

이므로  $u, y, \hat{y} \in L_p$  이다. 그러므로  $\gamma_p(p - \hat{p}_N) \gamma_p(q_N) < 1$  이면 페루프는  $L_p$ -안정하다. ■

이 정리는 제어기 설계시에 성능과 강인성 사이의 trade off 관계를 나타내고 있다. (5)에서 페루프 안정을 위해서는 모델링 오차가 크면 제어기의 이득을 줄여야 하고(그러면 추종 성능이 나빠진다) 반대로 모델링 오차가 작은 경우에는 큰 제어기의 이득이 허용될 수 있다는 것을 알 수 있다.(추종 성능이 좋아진다).

그러나 (4)와 같이 완전 제어를 하는 제어기는 보통 무한대의 이득을 갖기 때문에 아주 작은 모델링 오차에도 (5)의 안정 조건은 만족될 수 없다. 그래서 공칭 제어기의 이득을 줄여 모델 오차에 대한 강인성을 높이기 위해서 필터를  $\hat{q}_N$  에 덧붙인다. 필터의 조건은 (5)에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\gamma_p(p - \hat{p}_N) \gamma_p(\hat{q}_N f_N) < 1 \quad \text{또는} \quad \gamma_p(p - \hat{p}) \gamma(\hat{q}) \gamma(f) < 1 \quad (6)$$

그리고 필터에는 운전자가 강인성과 성능 사이의 trade off 를 어느 정도 조절할 수 있도록 이득을 변화할 수 있는 패러미터가 들어 있어야 한다.

### 3.3 설계 절차와 문제점

이상의 설계 절차를 요약하면 다음과 같다.

(절차 1) 비선형 플랜트의 공칭 모델을 구한다.

(절차 2) (4)와 같이 공칭 제어기를 모델의 우측 역연산자로 선택한다.

(절차 3) (6)을 만족하도록 필터를 덧붙인다.

이 절차는 IMC 구조에 대한 제어기를 설계하는 기본적인 원칙이며 선형, 비선형을 막론하고 IMC 설계법은 모두 위의 절차를 따르고 있다. 그러나 이를 이용해서 구체적으로 제어기를 구현하려 할 때에는 다음과 같은 어려움이 있다.

(D1) 비선형 연산자의 역 모델  $\hat{p}_N$  을 구하는 방법.

(D2) 강인성 필터  $f_N$  의 골과 패러미터 선정 방법.

(D3) 강인성 조건 (5) 에서 비선형 연산자의 이득 계산 방법.

기존의 비선형 IMC 방법은 이 같은 점들을 서로 다른 방법으로 해결하려 한 것이라 볼 수 있다. Economou 와 Morari[2]는 역 모델은 수치 해석법인 Newton 방법을 이용하였고 필터는 선형으로 그 패러미터는 발견적인(heuristic) 방법으로 설정하였다. 이 방법은 수치 해석을 이용하기 때문에 해석적인 형태의 설계 절차를 유도할 수 없으며 필터 설계가 조직적이지 않은 단점이 있다. Henson 과 Seborg[3]의 방법은 feedback linearization (FL) 을 IMC 구조에 적용한 것으로 역 모델과 필터의 설계에 Lie 미분이 사용되었다. 이 방법은 해석적이며 일반성이 있는 방법이지만 FL 이 갖는 단점을 그대로 갖고 있다. 한편 선형 IMC의 경우에는 (D1)~(D3)는 선형성을 이용해서 간단하게 해결되기 때문에 현재 그 설계법이 잘 정립되어 있다.[1] 다음절에는 이 같은 사실들을 고려해서 비교적 쉽게 설계할 수 있는 여러 개의 선형 IMC를 이용한 비선형 IMC 방법을 제안하였다.

## 4. 다중 모델, 제어기 비선형 IMC

### 4.1 구조와 동작 개요

다중 모델/제어기 비선형 IMC의 구조를 그림 2 에 나타내었다. 그림에서  $F$  는 비선형 플랜트이며,

$\hat{P}_M = \{ \hat{p}_1, \hat{p}_2, \dots, \hat{p}_N \}$  는 여러 동작점에서 얻은 선형 모델의 집합이고,  $Q_M = \{ q_1, q_2, \dots, q_N \}$  는  $\hat{P}_M$  의 원소 각각에 대해서 설계한 선형 IMC 제어기들의 집합, 그리고  $\Omega = \{ 1, 2, \dots, N \}$  는  $\hat{P}_M, Q_M$  원소의 인덱스의 집합이다. 전체 페루프의 입출력 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z &= (P - \hat{p}_\xi) q_\xi e \\ r &= e + z \\ y &= P q_\xi e \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서  $\xi = \{ \xi_0, \xi_1, \xi_2, \dots \}$  는 인덱스의 변화를 나타내는 수열을 의미한다. 각 모델/제어기 쌍들간에는 운전 중에  $(\hat{p}_{\xi_0}, q_{\xi_0}) \rightarrow (\hat{p}_{\xi_1}, q_{\xi_1}) \rightarrow (\hat{p}_{\xi_2}, q_{\xi_2}) \rightarrow \dots$  와 같이 스위칭이 일어난다. 스위칭의 기준은 현재 시간에서 플랜트와 가장 "가까운" 모델을 선택하는 것이며 이 가까움의 정도는 평가 함수에 의해 온라인으로 측정된다.

### 4.2 다중 모델, 제어기 비선형 IMC 설계

다음과 같은 비선형 플랜트를 고려하자.

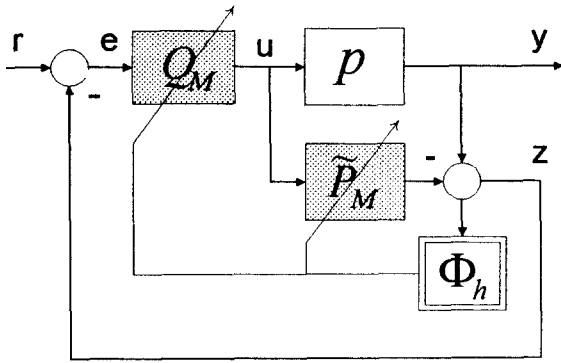


그림 2. 다중 모델, 제어기 IMC 구조

$$P: \begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), \theta(t)) \\ y(t) = h(x(t), u(t), \theta(t)) \end{cases} \quad (8)$$

이 비선형 플랜트의 동작은  $\omega = (x, u, y, \theta)$  라는 하나의 벡터로 정의될 수 있으며 전체 동작 영역  $R(P)$  는 이 벡터의 집합이라 정의한다. 또한  $F$  가 입력이나 출력에 대해서 상수 동작점을 갖는다고 가정하면 동작점의 집합은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E = \{(x^0, u^0, y^0) \in R(P) \mid f(x^0, u^0) = 0, y^0 = h(x^0, u^0)\} \quad (9)$$

$\tilde{p}_i = M(E_i)$  를  $E$  의 원소중  $i$  번째 동작점  $E_i$  에서 선형화한 모델이라 하고 이들 모델 각각에 대해서 일반적인 선형 IMC 제어기  $q_i$  를 구한다.

설계 사양인 주파수 영역에서의 불확실성 정보  $|\bar{\Delta}(\omega)|$  는 다음과 같이 동일한  $L_2$ -이득을 갖는 선형 불확실성을 고려하여 간접적인 방법으로 비선형 섭동의 주파수 영역에서의 크기를 구한다.  $P_i$  를 동작점  $i$  근처에서 비선형 플랜트  $F$  의 실제 동역학이라하고, 선형 모델  $\tilde{p}_i$  와는 다음과 같은 관계를 갖는다고 가정한다.

$$P_i = (1 + \Delta p) \tilde{p}_i \quad (10)$$

$\Delta p$  는  $|\Delta p u(t)| \leq \rho |u(t)|$  인 conic sector 조건을 만족한다고 하면 이 비선형 섭동  $\Delta p$  와 동일한  $L_2$ -이득을 갖는 곱셈형 선형 오차  $\Delta_m$  은  $\gamma_2(\Delta_m) = \sup_{\omega} |\Delta_m(j\omega)|$  을 만족하므로 (15)의 비선형 섭동  $\Delta p$  와 동일한 2 노음 이득을 갖는 곱셈형 선형 오차  $\Delta_m$  은 다음 조건을 만족한다.

$$\sup_{\omega} |\Delta_m(j\omega)| = \rho = \gamma_2(\Delta p) \quad (11)$$

이 식은 주파수 영역에서의 오차의 최대값을 비선형 불확실성의 시간 영역에서의 이득과 같게 놓으면 둘은 동일한  $L_2$ -이득 즉, 동일한 에너지를 갖게 된다는 것을 의미한다. 그러나 이 정리는 선형 오차의 최대값만을 알려줄 뿐 구체적인 형상에 대한 정보는 없기 때문에 설계시에는 최대값만을 맞춰 주고 정확한 형상은 선형 불확실성의 경우와 비슷하게 설정한다.

### 4.3 스위칭 함수

각 동작점에서 선형 모델을 이용해서 설계한 제어기는 정확하게 동작점에서만 제어 목적을 달성하는 것이 아니라 동작점 주위의 일정한 영역에서도 유효하게 동작한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 즉, 모델과 제어기의 쌍  $(\tilde{p}_i, q_i)$  는 동작점  $E_i$  근방에 강인성 영역을 형성하게 되며 (그림 3), 비선형 플랜트가 이 영역 내에서 동작할 경우에  $(\tilde{p}_i, q_i)$  는 전체 페루프 시스템을 잘 동작하도록 한다. 이 사실은 강인 제어기 설계의 기본 원리라고 할

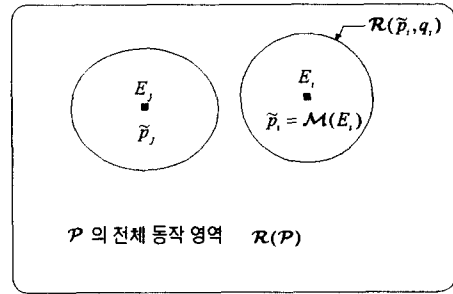


그림 3. 동작점과 강인성 영역

수 있다. 만약  $P$  가 항상 어느 한 동작점 근방에서만 동작한다면 하나의 선형 제어기를 가지고도 비선형 플랜트의 제어가 가능할 것이나 넓은 동작 영역을 갖는 경우에는 여러 개의 제어기를 설치해 놓고 비선형 플랜트의 동작 상황에 따라 제어기를 바꿔 줘야 한다. 즉,  $F$  가 현재 어느 동작 영역에 있는지를 검출해서 해당되는 모델, 제어기의 쌍으로 스위칭을 해준다. 그러기 위해서는 우선 강인성 영역  $R$  을 명확하게 정의할 필요가 있다. 강인성 영역을 다음과 같이 정의한다.

$$R(\tilde{p}_i, q_i) = \{\omega \in R(P) \mid (\tilde{p}_i, q_i) \text{를 사용했을 때 페루프가 잘 동작할 영역}\}$$

이는 가장 정확한 정의지만 너무 추상적이기 때문에 실제 측정의 기준으로 사용하는데는 도움을 주지 못하므로 근사적으로 다음과 같이 모델과 플랜트와의 거리를 이용한 정의를 이용한다.

$$R(\tilde{p}_i, q_i) = \{\omega \in R(P) \mid \text{dist}(P, \tilde{p}_i) \leq \epsilon\}$$

(5)를 이용하면 이 식은 다음과 같다.

$$R_i := R_{IMC}(\tilde{p}_i, q_i) = \{\omega \in R(P) \mid \gamma_p(P - \tilde{p}_i) < \gamma_p^{-1}(q_i)\} \quad (12)$$

강인성 영역의 합은 다음과 같이 비선형 플랜트의 전체 동작 영역을 덮는다고 가정한다.

$$R(P) = \bigcup_{i=1}^N R_{IMC}(\tilde{p}_i, q_i) \quad (13)$$

스위칭 함수는 플랜트가 현재 어느 강인성 영역  $R_i$  에 있는지를 판별해서 해당되는 모델/제어기의 쌍  $(\tilde{p}_i, q_i)$  로 스위칭을 하는 역할을 한다. 현재 동작 영역의 판별은 각 모델에 대해서 직접 (12)를 계산하면 구할 수 있지만, 비선형 연산자의  $L_p$ -이득은 계산 과정이 간단하지 않을 뿐만 아니라 실시간, 온라인 계산이 불가능하기 때문에 취할 수 있는 방법이 아니다. 판별 절차는 직접  $L_2$ -이득을 구할 필요 없이 간단하게 온라인 실시간으로 적용될 수 있어야 하며, 이러한 요구 조건을 만족하는 판별 절차를 다음과 같이 구하였다. 먼저 비선형 플랜트가 동작점  $E_i$  근방에서만 동작할 때 플랜트와 각 모델들 간의 관계를 구해 보면 다음과 같다.

(정리 2) 비선형 플랜트에 대한 IMC 구조에서  $\omega \in R_i$  이면 각 모델들 사이에는 다음 식이 성립한다.

$$\gamma_2(P - \tilde{p}_i) \leq \gamma_2(P - \tilde{p}_j), \quad i, j \in \Omega \quad (14)$$

(증명)  $\omega \in R_i$  일 때  $P = P_i = (1 + \Delta p) \tilde{p}_i$  이므로  $\Delta p$  를 동일한  $L_2$ -이득을 갖는 선형 섭동  $\Delta_m$  으로 바꾸면

$$\gamma_2(P_i - \tilde{p}_i) = \gamma_2(\tilde{p}_i \Delta p) = \sup_{\omega} |\tilde{p}_i(j\omega) \Delta_m(j\omega)|$$

$$\begin{aligned} \gamma_2(P_i - \tilde{p}_j) &= \gamma_2(\tilde{p}_i - \tilde{p}_j + \tilde{p}_j \Delta p) \\ &= \sup_{\omega} |\tilde{p}_i(j\omega) - \tilde{p}_j(j\omega) + \tilde{p}_j(j\omega) \Delta_m(j\omega)| \end{aligned}$$

에서 우변을 벡터로 나타내고 크기를 비교하면

$r_2(P_i - \hat{p}_i) \leq r_2(P_i - \tilde{p}_i)$  이다. ■

즉, 플랜트와 가장 가까운 모델은 차이의  $L_2$ -이득이 가장 작다는 것을 알 수 있기 때문에 절대적인 이득값을 계산하지 않고 상대적인 크기만을 비교해서 동작 영역을 판별할 수 있다. 그러나 (14)는 플랜트가 초기 시간부터 현재까지 계속 한 영역에만 머물러 있을 때 성립하는 식이다. 플랜트의 동작 영역이 시간에 따라 바뀌는 경우에 동작 영역을 판별하기 위해서는 현재 시간에서 이득을 계산할 필요가 있다. 그리고 연산자의 이득은  $z_i = y_i - \hat{y}_i$  를 이용하면 간접적으로 측정이 가능하기 때문에 다음과 같이 변형된  $L_2$ -노름 형태의 평가 함수를 통해 시간  $t$ 에서 모델과 플랜트의 거리를 측정한다.

$$J_i(t) = \alpha \int_0^t e^{-\lambda(t-\tau)} z_i^2(\tau) d\tau + \beta z_i^2(t) \quad (15)$$

여기에서  $\alpha, \beta, \lambda \geq 0$  이며 각각 현재 오차와 과거 오차간의 가중치, 그리고 과거 오차의 중요도가 감소하는 비율을 나타낸다. 이 값이 가장 작은 모델의 첨자를  $m$  이라 하면  $\tilde{p}_m$  은 시간  $t$ 에서 플랜트와 가장 가까운 모델이며 플랜트는 현재 영역  $R_m$ 에서 동작한다고 판별한다.

스위칭은 원칙적으로 평가 함수의 값이 가장 작은 모델, 제어기로 일어난다. 그러나 바로 스위칭을 하는 것은 조그마한 잡음에도 채터링(chattering)이 일어날 수 있으며 이로 인해 페루프가 불안정하게 될 수 있으므로 히스테리시스 스위칭 알고리즘 [4]을 이용한다.  $\Phi_h(t)$  는 시간  $t$ 에서 스위칭 되야 할 모델과 제어기의 첨자를 출력하는 함수로 다음과 같이 정의된다.

$$\Phi_h(t) = \begin{cases} i, & \text{if } J_i(t) \leq J_j(t) + h \\ j, & \text{if } J_i(t) > \min_{j, i \neq j} J_j(t) + h \end{cases} \quad (16)$$

여기에서  $h$  는 히스테리시스 상수이다.

## 5. 모의실험

다음과 같은  $n$  개의 서로 간섭이 없는 탱크의 유량 제어에 제안된 방법을 적용하였다.  $A=0.5, c=1, n=3$  인 경우에 대해 모의실험 하였다. 동작점  $E_i$  는 임의로 선택한 상수 입력  $u^o = 3, 5, 7, \sqrt{70}, 9, 10, \sqrt{110}$  으로 구성하고 각 동작점에서 (17)을

$$\begin{aligned} \dot{h}_1(t) &= \frac{-c}{A} h_1^{1/2}(t) + \frac{1}{A} u(t) \\ \dot{h}_j(t) &= \frac{-c}{A} h_j^{1/2}(t) + \frac{c}{A} h_{j-1}^{1/2}(t), \quad j=1, \dots, n \\ y(t) &= h_n(t) \end{aligned} \quad (17)$$

선형화해서  $\tilde{p}_i$  를 구한 다음 각각에 대해 선형 IMC 제어기 설계법을 써서  $q_i$  를 얻는다. ( $i=1, \dots, 7$ ) 모의 실험 결과를 그림 4에 나타내었다. 입력의 변화량이 크기 때문에 하나의 제어기를 사용해서는 출력이 발산해 버리지만 [5], 제안된 방법은 입력을 잘 추종하는 것을 보이고 있다.

## 6. 결론

기존의 비선형 IMC 방법에 비해 간편하게 설계할 수 있는 다수의 선형 모델과 선형 IMC 제어기 그리고 스위칭을 이용한 비선형 IMC 설계법을 제안하였다. 제안된 방법은 각 동작점에서 얻은 선형 모델에 대해 선형 IMC 설계법을 적용해서 모델/제어기

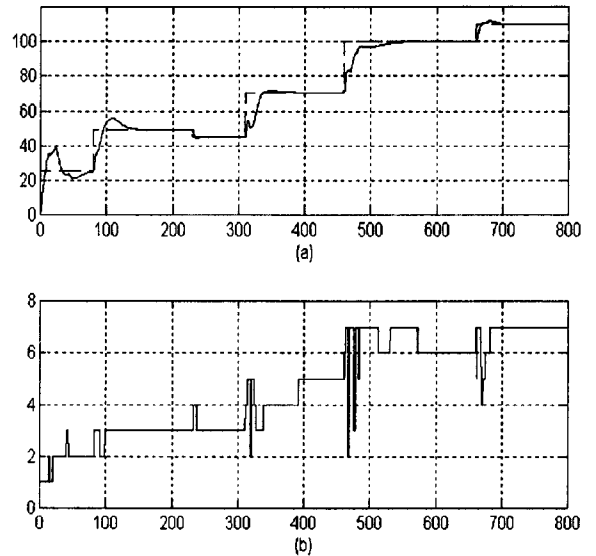


그림 4. (a) 계단 입력에 대한 출력  
(b) 스위칭에 따른 모델, 제어기의 첨자 변화

쌍을 구한 다음 플랜트의 동작 영역에 해당되는 쌍으로 스위칭을 해준다. 이를 위해 강인성 영역을 정의하였으며 플랜트가 현재 어느 강인성 영역에 속해 있는지를 판별하는 방법을 제시하였다. 실제 스위칭 동작은 채터링 방지를 위해서 히스테리시스 알고리즘을 이용해서 수행하였다. 이 방법이 큰 set point의 변화를 잘 추종하는 것을 모의 실험을 통해 보였다.

## 참고문헌

- [1] M. Morari and E. Zafiriou, *Robust Process Control*, Prentice Hall, 1989
- [2] C.G.Economou and M.Morari, "Internal Model Control. 5. Extension to Nonlinear Systems," *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 25, pp. 403-411, 1988
- [3] M.A.Henson and D.E.Seborg, "An Internal Model Control Strategy for Nonlinear Systems," *AICHE Journal*, Vol. 37, No. 7, July, 1991
- [4] A.S.Morse, D.Q.Mayne, and G.C.Goodwin, "Application of Hysteresis Switching in Parameter Adaptive Control," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol.37, no.9, September, 1992
- [5] W.J.Rugh, "Design of Nonlinear PID Contrillers," *AICHE Journal*, Vol. 33, No. 10, October, 1987
- [6] K.S.Narendra, J.Balakrishnan, and M.K.Ciliz, "Adaptation and Learning Using Multiple Models, Switching, and Tuning," *IEEE Control Systems*, June, 1995
- [7] R.A.Hilhorst, J.V.Amerongen, P.Löhnberg, and H.J.A.F.Tulleken, "A Supervisor for Control of Mode-switch Process," *Automatica*, Vol.30, No.8, 1994