

# 누적방지 무충돌 전환 제어기의 설계와 비선형 보일러 시스템 적용

## Design of the Anti-windup and Bumpless Transfer Controller with Application to Nonlinear Boiler Systems

이 영 삼, 이 명 의, 권 오 규

(Young-Sam Lee, Myung-Eui Lee, and Oh-Kyu Kwon)

**Abstract** : In this paper, we deal with the full range control problem of nonlinear boiler systems subject to complex actuator constraints. Firstly,  $H_\infty$  loop shaping design procedure[10] is used for the controller design. Secondly, modified high-gain feedback[11] for the loop shaping controller is adopted for the anti-windup function and the bumpless transfer technique between controllers is proposed for the full range control of nonlinear systems. Finally, the performance of the proposed controller is demonstrated through the simulation studies.

**Keywords** : anti-windup, bumpless transfer, high-gain feedback, full range control,  $H_\infty$  loop shaping controller

### I. 서론

에너지 절약과 발전시설의 안정적인 운전을 위해 발전용 보일러의 효율적인 제어가 반드시 필요하다. 이런 요구에 부응하여 국내외에서 보일러 제어에 관한 많은 연구가 있었다[1-8]. 보일러 시스템은 3입력 3출력의 다변수 시스템으로서 입력의 크기를 3개의 구동밸브를 통해 조절하게 된다. 보일러의 제어를 어렵게 만드는 주요 요소들 중 하나는 구동기의 역할을 하는 밸브가 동작영역 및 속도에 제약을 받는 것으로 인해 유발되는 구동기 비선형성을 들 수 있다. 구동기 비선형성을 가지는 시스템에 단순한 선형제어기만을 사용하게 되면 누적(windup) 현상으로 인한 성능악화가 일어나고 결과적으로 효과적인 제어를 수행할 수가 없게 된다[9]. 또한 보일러 시스템 자체에서 나타나는 비선형 동특성도 기존의 선형 제어기법을 적용하는 것을 어렵게 하고 있다.

비선형 시스템을 적절한 동작점에서 선형화시키고 이 선형화 모델을 근거로 선형제어기를 설계하여 적용할 수는 있다. 그러나 이러한 제어기는 특정 동작점 근방에서만 유효한 것이기 때문에 비선형 시스템의 동특성이 동작구간에 따라 크게 변화하는 경우에는 적용할 수 없다. 이 경우에는 동작점별로 시스템을 선형화하여 선형제어기를 설계한 다음, 동작구간이 바뀔 때마다 동작점에 대응하는 제어기로 교체해야 하는데, 이 교체과정에서 제어기의 출력 신호가 서로 다르기 때문에 충돌현상(bump)이 나타나서 과도상태의 성능이 악화된다. 이러한 누적문제와 충돌문제 때문에 보일러 시스템에 대한 기존의 제어기법들은 단순히 특정 동작점에서 선형화된 제어기를 이용하여 보일러의 전기적 출력을 한정된 범위에서만 제어하는데 그쳤

으며 전기의 사용량에 따라 전기적 출력의 크기를 전구간에 걸쳐 제어하는 적극적 제어 사례는 드물었다.

이 논문에서는 누적방지 무충돌전환 제어기를 설계하고 이를 보일러 시스템에 적용함으로써 지적되었던 두 가지 문제점을 해결하는 제어방식을 제시한다. 누적방지 제어기란 누적현상으로 인해 발생하는 성능악화현상을 개선하도록 설계된 제어기이고 무충돌전환이란 제어기 교체를 통해 비선형 시스템을 전구간 제어하고자 할 때 제어기 교체시 발생하는 충돌현상을 최소화하고 유연하게 제어기를 교체하는 기법을 뜻한다. 누적방지 무충돌전환 제어기의 설계방식은 크게 2단계로 구성되는 데, 첫 번째 단계는 먼저 선형제어기를 설계하는 것이고 두 번째 단계는 구동기 제약조건과 충돌을 고려하기 위한 여분의 보상을 첨가하는 것이다.

이 논문에서는  $H_\infty$  루프 형성 설계과정[10]에 따라 선형제어기를 설계하며, 구동기 제약 때문에 나타나는 누적현상과 제어기 교체시의 충돌현상을 개선하기 위하여 고이득 되먹임(high-gain feedback) 기법을 도입한다. 루프 형성 제어기의 구조적 특성을 고려하기 위해 Hyde가 제안한 방법[11]에 따라 고이득 되먹임 기법을  $H_\infty$  루프형성 제어기에 적합하게 수정 적용함으로써 누적방지 무충돌전환 제어기를 설계하고, 설계된 제어기를 비선형 시스템에 모의실험을 통해 적용함으로써 성능개선과 더불어 만족스러운 전구간 제어가 가능함을 예시한다.

### II. 비선형 보일러 모델

이 논문에서 다루는 보일러-터빈 모델은 Åström[12]이 제안한 160MW급 산업용 보일러 모델로서 3입력, 3출력의 비선형 다변수 시스템이다. 보일러-터빈의 동작은 다음과 같다. 먼저 급수밸브를 통해 물이 드럼(drum)으로 유입된다. 유입된 드럼수(drum water)는 드럼에 가해지는 열에 의하여 끓는 온도까지 데워지게 된다. 끓는 온도에까지 도달한 물은 증기로 변하여 위로 상승하게 되고, 다시 드럼으로 나와 물과 분리되어 터빈으로 가게 된다. 터빈으로

접수일자 : 1999. 3. 29., 수정완료 : 2000. 1. 10.

이영삼 : 서울대학교 전기공학부

이명의 : 한국기술교육대학교 정보통신공학과

권오규 : 인하대학교 전자·전기·컴퓨터공학부

\* 본 논문은 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관(관리번호 97-006)으로 수행되었습니다.

보내진 증기에 의해 터빈이 회전하여 전기가 발생하게 된다. 이 때 드럼으로 유입되는 드럼수는 급수밸브에 의해, 보일러에 공급되는 연료의 양은 연료밸브에 의해, 그리고 터빈으로 보내지는 증기의 양은 증기조절밸브에 의해 조절된다. 보일러의 비선형 동특성은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -0.0018u_2x_1^{9/8} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \\ \dot{x}_2 &= [(0.73u_2 - 0.16)x_1^{9/8} - x_2]/10 \\ \dot{x}_3 &= [141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1]/85\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}a_{cs} &= \frac{(1 - 0.001538x_3)(0.8x_1 - 25.6)}{x_3(1.0394 - 0.0012304x_1)} \\ q_e &= (0.85u_2 - 0.147)x_1 + 45.59u_1 \\ &\quad - 2.514u_3 - 2.096\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}y_1 &= x_1 \\ y_2 &= x_2 \\ y_3 &= 0.05(0.13073x_3 + 100a_{cs} \\ &\quad + q_e/9 - 67.975)\end{aligned}\quad (3)$$

여기서 상태변수  $x_1, x_2, x_3$ 는 드럼의 증기압력[ $\text{kg}/\text{cm}^3$ ], 전기적출력[MW], 그리고 드럼내의 유체밀도[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]를 나타내며, 입력변수  $u_1, u_2, u_3$ 는 모두 정규화된 값으로서 각각 연료밸브의 위치, 증기 조절밸브의 위치, 그리고 급수밸브의 위치를 나타낸다.  $y_1, y_2, y_3$ 는 시스템의 출력변수로서  $y_3$ 는 드럼수위[m]를 나타낸다. 입력의 양을 조절하는 밸브는 물리적 특성상 다음과 같은 변화율 및 크기의 제약 조건을 가진다.

$$\begin{aligned}|\dot{u}_1| &\leq 0.007/\text{sec}, -2/\text{sec} \leq \dot{u}_2 \leq 0.02/ \\ |\dot{u}_3| &\leq 0.05/\text{sec}, 0 \leq u_1, u_2, u_3 \leq 1\end{aligned}\quad (4)$$

보일러시스템의 주 제어목적은 전기적 출력을 효과적으로 제어하는 것이다. 따라서 전기적 출력은 사용자가 요구하는 전기적 출력의 요구치를 추종오차 없이 빠른 시간 내에 따라가야 한다. 반면 첫 번째와 세 번째 출력인 드럼의 증기압력과 드럼내의 수위는 전기적 출력의 제어를 가장 효율적으로 유지할 수 있는 한도 내에서 변화하며 한정된 구간에서 머무르도록 하는 것을 목적으로 한다.

### III. 누적방지 무충돌 전환제어기

#### 1. $H_\infty$ 루프형성 제어기

이 논문에서는 보일러시스템을 제어하기 위하여 그림 1과 같이 전단필터를 이용한 2-자유도 구조의  $H_\infty$  루프형성 제어기를 설계한다. 루프형성 제어기는 McFarlane등 [10]에 의해 제시된 제어기 설계기법으로, 표준형  $H_\infty$  제어기법과는 달리  $\gamma$ -반복계산( $\gamma$ -iteration)이 필요없고 제어기 계수들이 명확한 공식으로 주어지는 장점이 있는 조적적인 제어기 설계기법이다. 여기서  $W_1$ 과  $W_2$ 는 설계명세를 만족시키도록 선정되는 형성함수이고,  $G$ 와  $K_s$ 는 각각 플랜트와 제어기를 나타낸다. 2자유도 구조의  $H_\infty$  루프형성 제어기는 단위되먹임 구조로 구현되는 루프형성 제어기와는 달리 초과현상이 거의 나타나지 않는 장점을 가지고 있다. 2-자유도 구조의 루프형성 제어기에서는 기준

입력  $r$ 이 전단필터를 거쳐 되먹임 루프에 입력되며, 상수 전단필터의 이득은 다음과 같이 구해진다.

$$K_s(0)W_2(0) = \lim_{s \rightarrow 0} K_s(s)W_2(s) \quad (5)$$

제어기 설계에 관한 전반적 절차는 [10]의 방법을 따른다.

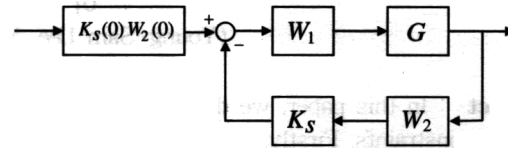


그림 1. 2자유도  $H_\infty$  루프형성 제어기.

Fig. 1. 2-DOF  $H_\infty$  loop shaping controller.

#### 2. 고이득 되먹임을 이용한 누적방지법

전기적 시스템을 제외한 대부분의 제어대상 시스템들은 제어신호로부터 플랜트의 입력을 발생시켜주기 위해 구동기를 시스템 내부에 포함하고 있다. 이러한 구동기는 물리적 특성상 대부분이 어떠한 형태로든 제약 조건을 가지게 되는데, 가장 보편적인 구동기 제약조건은 (6)과 (7)로 표현되는 크기 및 변화율 제약 조건이다.

$$u_i^r = \begin{cases} u_{i\max} & u_i > u_{i\max} \\ u_i & u_{i\min} \leq u_i \leq u_{i\max} \\ u_{i\min} & u_i < u_{i\min} \end{cases} \quad (6)$$

$$u_i = \begin{cases} v_{i\max} & \dot{u}_i > v_{i\max} \\ \dot{u}_i & v_{i\min} \leq \dot{u}_i \leq v_{i\max} \\ v_{i\min} & \dot{u}_i < v_{i\min} \end{cases} \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

여기서,  $u_i$ 는 제어기의 출력 벡터  $u$ 의  $i$ 번째 성분을  $u_i^r$ 은 실제 구동기의 출력 벡터  $u^r$ 의  $i$ 번째 성분을 나타낸다. 그림 2는 구동기에 제약조건이 있는 시스템을 나타내고 있다.

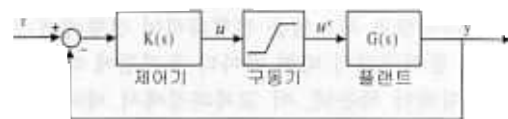


그림 2. 구동기 제약조건을 갖는 시스템.

Fig. 2. System with actuator constraints.

그림 2와 같이 구동기에 변화율, 또는 크기 제약조건이 있으면, 제어기가 빠르게 변화하거나 과도한 크기의 출력을 발생할 경우 구동기가 이러한 변화를 미처 따라가지 못하게 되어,  $u \neq u^r$ 인 현상이 발생하게 된다. 이렇게 되면 제어기가 시스템을 효과적으로 구동하지 못하여 결과적으로 출력과 기준입력의 오차가 커져서 시스템의 성능이 악화된다. 그런데 제어기는 기준입력과 출력사이의 오차정보

만을 이용하여 제어신호를 발생하므로  $u \neq u^*$ 로 인해 생기는 성능의 악화(오차증가) 현상을 개선하기 위하여 더 과도한 제어기 출력을 발생하게 된다. 하지만 이 값 역시 구동기가 가진 제약조건을 넘게되므로 성능의 악화 현상은 더욱 가중된다. 이러한 과정이 반복됨으로써 성능악화현상이 계속하여 누적되는 현상을 제어기의 누적(windup)현상이라고 하며, 누적현상을 개선하기 위한 기법을 누적방지(anti-windup) 기법이라고 한다. 누적현상의 근본적인 원인은 제어기가 구동기 포화(또는 변화를 제약조건)로 인해 발생하는 성능악화 현상을 전혀 알지 못하고 단순히 출력정보만을 이용하여 제어기 내부상태를 갱신하기 때문이다. 누적방지 기법의 기본 개념은 구동기 포화가 발생하였을 경우 단순히 출력정보뿐 아니라 구동기 포화에 대한 정보도 제어기의 내부상태 갱신에 반영함으로써 제어기로 하여금 포화현상이 발생한 것을 알게 하고 누적현상을 줄일 수 있는 제어입력을 계산하여 빨리 포화구간을 벗어나도록 하는 것이다. 이 논문에서는 그림 3과 같이 고이득 되먹임 기법을 이용하여 선형 제어기에 누적방지 기능을 첨가한다.

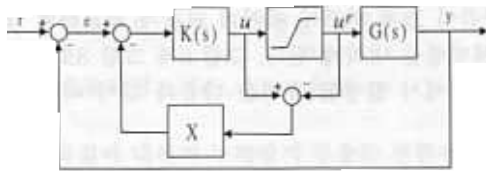


그림 3. 누적방지를 위한 고이득 되먹임 구조.

Fig. 3.. High-gain feedback for the anti-windup.

구동기 제약조건을 고려하지 않고 설계된 단순한 선형 제어기를  $K(s)$ 라고 하였을 때, 고이득 되먹임 기법을 통해 누적방지 기능이 첨가된 제어기의 출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = K(s)[e - X(u - u^*)] \\ = [I + K(s)X]^{-1}K(s)(e + Xu^*) \quad (8)$$

(8)에서 알 수 있듯이 고이득 되먹임을 통해 구현된 누적방지 제어기는 추종오차  $e$ 뿐 아니라 제어기 출력과 실제 구동기 출력과의 차  $u - u^*$ 에 의해 제어기의 상태갱신이 이루어지므로 구동기 제약조건으로 인해  $u \neq u^*$ 인 상태가 발생하였을 경우 이에 대한 정보를 이득행렬  $X$ 를 거쳐 제어기에 되먹임으로써 누적현상을 개선할 수 있다. 이득행렬  $X$ 는 일종의 조정계수로서 만약  $\|X\| \gg 1$  이라면  $\|K(s)X\| \gg 1$ 이 성립하고

$$u \approx [K(s)X]^{-1}K(s)(e + Xu^*) \approx u^* \quad (9)$$

이 성립하게 된다. 즉 어떠한 경우에도 항상  $u \approx u^*$ 을 만족하므로 누적현상이 개선될 수 있다.

그림 3에서 구동기 포화특성을  $N$ 이라 놓으면 폐로전달 함수는 다음과 같다.

$$H_f = \frac{KNG}{1 + KNG + KX(1 - N)}$$

(9)에서 알 수 있듯이  $\|KX\| \gg 1$ 이면  $u \approx u^*$ , 즉  $N \approx 1$ 이 되어  $H_f \approx \frac{KG}{1 + KG}$ 가 되어  $X$ 는 폐로시스템의 안정성에는 거의 영향이 없다. 그런데  $H_\infty$  루프형성 제어기에 누적방지 기법을 적용하려면 그 구조가 그림 3의 단위 되먹임 구조와는 다르기 때문에 적절한 변형이 필요하다. 그림 1의  $H_\infty$  루프형성 제어기에서 실제 제어입력을 생성하는 부분은 형성함수  $W_1$ 이므로 이 논문에서는 [11]에서 제안된 방법에 따라 고이득 되먹임 구조를 그림 4와 같이  $W_1$ 에 대하여 적용한다.

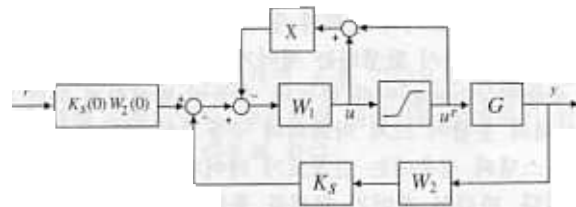


그림 4. 2자유도  $H_\infty$  루프형성 제어기에서의 고이득 되먹임 구조.

Fig. 4. High-gain feedback for 2-DOF  $H_\infty$  loop shaping controller.

#### 1. 고이득 되먹임에 의한 무충돌전환 기법(bumpless transfer technique)

대부분의 물리적인 시스템들은 비선형 동특성을 가지고 있기 때문에 이를 제어하기 위해서는 동작점을 선정하고 선형화하여 선형 제어기를 얻는 것이 보통이다. 이렇게 설계된 선형 제어기는 그 동작점 부근에서는 효과적인 제어를 수행할 수 있겠지만 동작점에서 크게 벗어난 영역에서는 성능이 현저하게 악화된다. 동작 영역이 달라질 경우 시스템의 동특성이 선형 시스템과는 달리 크게 변화하기 때문이다. 따라서 비선형 시스템을 전구간에 걸쳐 효과적으로 운전하기 위해서는 비선형 시스템의 운전구간을 적절히 분할하여 여러 개의 동작점을 선정하고 이에 대한 선형 제어기를 설계한 다음, 동작구간이 변화함에 따라 그에 맞는 제어기를 교체 운전하게 되면 효과적인 제어를 이룰 수 있다.

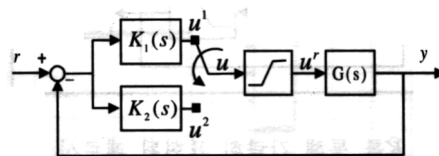


그림 5. 제어기교체를 통한 비선형시스템의 제어.

Fig. 5. Nonlinear system control via controller switching.

그림 5은 제어기 교체를 통해 비선형 시스템을 제어하는 방식의 개략도를 나타내고 있다.  $K_1(s)$ 를 동작제어기,  $K_2(s)$ 를 교체 제어기라고 가정하자. 그리고  $K_1(s)$ 와  $K_2(s)$ 는 해당 동작구간에서 각각 만족스러운 성능을 갖도록 설계되었다고 가정하자.  $K_1(s)$ 에 의해 시스템을 운전하는 중 동작구간이 크게 변화하여 제어기 교체가 필요하게 되면  $K_2(s)$ 가 교체 투입되어 제어가 수행됨으로써 전 구간에 걸친 제어를 이룰 수가 있을 것이다. 하지만 제어기가 교체되는 순간 동작중이던 제어기의 출력  $u^1(=u^r)$ 과 투입되어 들어간 제어기의 출력  $u^2$ 가 일치하지 않는 현상이 발생한다. 더욱이 구동기 제약조건이 있는 시스템의 경우 제어기의 출력이 구동기 제약조건을 넘게 되면  $u^1 \neq u^r$ ,  $u^2 \neq u^r$ 인 경우가 발생한다. 즉 어떠한 제어기의 출력도 실제구동기의 출력과 일치하지 않는 것이다. 이처럼 제어기 교체시 발생하는 제어기 출력간의 불일치 현상을 충돌현상(bump)이라 하는데, 충돌이 발생하게 되면 과도상태의 응답이 크게 악화되며 구동기의 제약조건이 강한 시스템의 경우에는 안정도가 깨어지는 경우도 발생할 수 있다. 따라서 제어기 교체를 통해서 제어를 수행하는 경우에는 충돌에 대한 고려를 해 주어야 하는데, 이처럼 충돌을 최소화하기 위한 기법을 무충돌전환 기법이라고 부른다. 이 절에서는 고이득 되먹임을 이용한 누적방지의 개념을 제어기 교체시에 그대로 연장 적용함으로써 무충돌전환이 가능함을 보일 것이다.

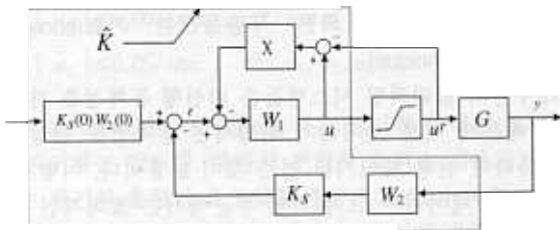


그림 6. 최종 제어기  $\hat{K}$ .

Fig. 6. Final controller  $\hat{K}$ .

그림 6은 고이득 되먹임을 이용한 누적방지  $H_\infty$  루프형성 제어기를 나타낸다. 여기서 점선으로 표시된 부분을 최종제어기  $\hat{K}$ 로 정의하면, 전체적인 폐로시스템은 그림 7과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

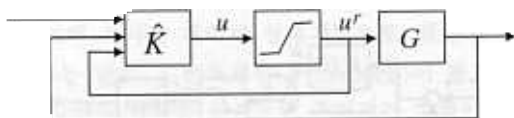


그림 7.  $\hat{K}$ 를 통해 간략히 표현된 폐로시스템

Fig. 7. Closed-loop system simplified by  $\hat{K}$ .

최종 제어기  $\hat{K}$ 를 이용한 무충돌전환 제어기의 구현방식을 그림 8과 같이 나타낼 수가 있게 된다. 그림 8에서

$\hat{K}_1, \hat{K}_2, \dots, \hat{K}_i$ 는 해당 동작구간의 동작점에 대해 설계된 선형제어기에 누적방지 기능을 첨가한 최종 제어기들을 나타낸다.

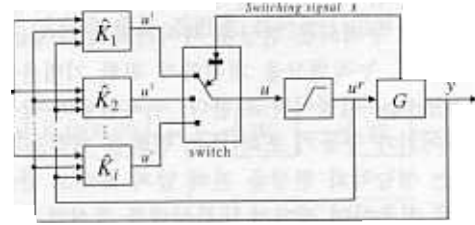


그림 8. 무충돌전환 제어방식의 구현도.

Fig. 8. Implementation of the bumpless transfer control.

그림 8에서 제어기의 교체는 다음과 같이 이루어지게 된다. 먼저 시스템의 출력변수나 상태변수 중에서 중요한 변수를 교체신호  $s$ 로 선정한다. 스위치는 교체신호  $s$ 의 값을 감시하고 제어기 교체 여부를 결정하는 역할을 하는데 동작구간이 크게 변화하여 제어기 교체가 필요하면 그에 대한 교체명령을 내리게 된다. 그림 6과 그림 8로부터, 각각의 제어기에서 발생된 출력을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u^i = W_1^i(s) [K_s^i(0)W_2^i(0)r - K_s^i(s)W_2^i(s)y - X(u^i - u^r)] + \hat{K}_i(s) \begin{bmatrix} r \\ y \\ u^r \end{bmatrix} \quad (10)$$

위첨자와 아래첨자  $i$ 는  $i$ 번째 제어기에 대한 것을 나타낸다. 여기서

$$K_s^i(0)W_2^i(0)r - K_s^i(s)W_2^i(s)y = e \quad (11)$$

로 정의하면, (10)은 다음과 같이 바꿔 쓸 수 있다.

$$u^i = W_1^i(s) [e_i - X(u^i - u^r)] \quad (12)$$

여기서  $i$ 번째 제어기가 교체되면서 발생하는 충돌  $u^i - u^r$ 를 벡터  $\hat{e}_i$ 로 정의하면,

$$\begin{aligned} -u^r &= W_1^i(s) [e_i - X(u^i - u^r)] - u^r \\ \hat{e}_i &= W_1^i(s) [e_i - X\hat{e}_i] - u^r \end{aligned} \quad (13)$$

따라서 제어기 교체시의 충돌은

$$\hat{e}_i = [I + W_1^i(s)X]^{-1} W_1^i(s)e_i - u^r \quad (14)$$

로 나타낼 수가 있게 된다. 만약  $\|X\| \gg 1$  이라면  $\|W_1^i(s)X\| \gg 1$ 이고  $\hat{e}_i \approx 0$ 가 성립하게 된다. 결국  $u^i \approx u^r$ 이 성립하므로 제어기 교체시 무충돌전환이 가능하게 된다. 이와 같이 고이득 되먹임 기법을 사용하면 동일

구조를 통해 누적방지 및 무충돌전환이 가능하게 된다.

#### IV. 제어기 설계절차 및 모의실험

이 절에서는 III절에서 제시한 누적방지 및 무충돌전환 기법에 따라 비선형 보일러 시스템에 대한 제어기를 설계하고, 이 제어기의 성능을 검증하기 위한 모의실험을 수행한다.

##### 1. 제어기 설계절차

III절에서 요약된 누적방지 및 무충돌전환 기법을 이용하여 비선형시스템을 구간 제어하기 위한 제어기 설계 절차를 아래와 같이 정리할 수 있다.

1) 중요 출력변수, 또는 상태변수중 하나를 제어기 교체 신호로 선정한다.

$$\text{교체신호} : s(t) = y_i(t) \text{ 또는 } x_i(t)$$

2) 비선형시스템의 동작구간을 제어기 교체신호  $s$ 를 기준으로 적절히 분할한다.

$$\text{동작구간} \quad \{R_1, R_2, \dots\}$$

3) 각 동작구간의 대표 동작점을 선정한다.

$$\text{대표동작점} \quad \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n\}$$

4) 각 동작점에 대하여 누적방지 무충돌 전환제어기  $\hat{K}_i$ 를 설계한다.

5) 동작제어기  $\hat{K}$ 를 다음과 같이 교체한다.

$$\hat{K} = \hat{K}_i \text{ whenever } s(t) \in R_i$$

표 1. 동작구간의 분할과 동작제어기.

Table 1. Operating range and operating controller.

동작구간	기준동작점	동작제어기
$R_1: 20 \leq y_2 \leq 60$	$\phi_1$	$\hat{K}_1$
$R_2: 60 \leq y_2 \leq 120$	$\phi_2$	$\hat{K}_2$
$R_3: 120 \leq y_2 \leq 160$	$\phi_3$	$\hat{K}_3$

표 2. 기준 동작점.

Table 2. Basis operating point.

	$\phi_1$	$\phi_2$	$\phi_3$
$w_1^0$	0.2517	0.4508	0.6489
$w_2^0$	0.4702	0.7138	0.9026
$w_3^0$	0.2785	0.5699	0.8541
$y_1^0$	120	135	150
$y_2^0$	40	90	140
$y_3^0$	0.5	0.5	0.5

보일러시스템의 경우 가장 중요한 출력이  $y_2$ (전기적 출력)이기 때문에 제어기 교체신호로  $y_2$ 를 사용한다.

$y_2$ 을 기준으로 보일러의 동작구간을 표 1과 같이 분할하였으며, 각 구간에서의 기준 동작점  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$ 는 표 2에 주어진다. 또한 구간 변경에 따른 제어기의 교체방식은 표 1을 따른다. 예를 들어  $y_2$ 가 구간  $R_2$ 에 속하는 동안에는  $\hat{K}_2$ 가 동작제어기가 된다.

##### 2. 모의실험

이 절에서는 단순한 선형  $H_\infty$  루프형성 제어기와 누적방지 무충돌 전환  $H_\infty$  루프형성 제어기를 각각 비선형 보일러 모델에 모의실험을 통해 적용함으로써 그 성능을 알아본다. 첫 번째 실험에서는 누적방지 기능을 알아보고 두 번째 실험에서는 무충돌전환에 대한 모의실험을 수행한다.

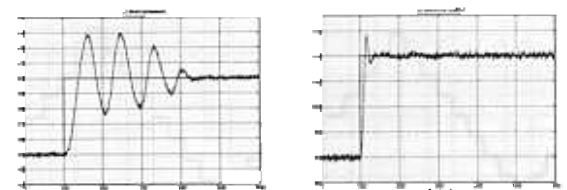
##### 2.1 누적방지 모의실험

모의실험은 표 2의 동작점  $\phi_2$ 를 기준으로 설계된 제어기에 대해 수행되었다. 루프형성 제어기를 설계하기 위해 사용된 형성함수는 다음과 같다.

$$W_1(s) = 0.0025 \times \text{diag} \left( \frac{(s+0.8)}{s(s+0.1)}, \frac{(s+0.8)}{s(s+0.1)}, \frac{10(s+0.8)}{s(s+0.1)} \right)$$

$$W_2(s) = I_{3 \times 3}, \quad K \text{는 단위행렬}$$

$H_\infty$  최적화과정을 거쳐 얻어진  $\gamma$  값은 3.7074이다. 모의실험은 출력측 잡음을 가정하고 수행되었다. 그림 9는 선형제어기만을 적용하였을 때의 응답을 보여준다. 이 경우에는 누적현상으로 인해 성능이 크게 악화되는데, 이에 비해 누적방지 제어기를 적용한 경우에는 그림 11에서와 같이 성능이 크게 향상된 것을 볼 수 있다.

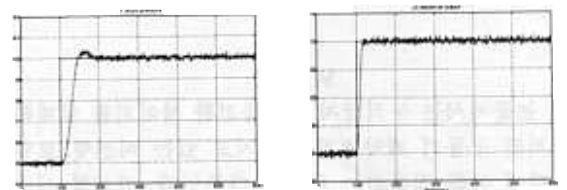


(a) 드림압력

(b) 전기적 출력

그림 9. 선형제어기만을 적용한 경우의 응답.

Fig. 9. Output response (linear controller).



(a) 드림압력

(b) 전기적 출력

그림 10. 누적방지 제어기를 적용한 경우의 응답.

Fig. 10. Output response (antiwindup controller).

## 2.2 무충돌전환 모의실험

무충돌 전환제어를 위해 제어기 설계시 선정된 형성함수는 다음과 같다. 이러한 형성함수는 구동기의 출력을 줄이면서 전실성을 좀 더 주기 위해 선정되었다.

$$W_1(s) = 0.0025 \times \text{diag} \left\{ \frac{(s+0.8)}{s(s+0.1)}, \frac{1}{s}, \frac{(s+1.5)}{s(s+0.8)} \right\}$$

$$W_2(s) = I_{3 \times 3}, \text{ 단위행렬}$$

그림 11은 충돌을 고려하지 않고 제어기를 교체한 경우의 응답을 나타내며, 그림 12는 고이득 되먹임을 이용하여 충돌을 고려한 제어기 교체방식의 적용했을 때의 응답을 나타낸다. 충돌을 고려하지 않은 경우에는 제어기 교체시 초과현상 및 진동현상이 크게 나타나서 과도응답 특성이 크게 악화되지만 이 논문에서 제시한 무충돌전환 기법을 적용한 경우에는 유연하게 제어기 교체가 이루어지고 특히 전구간에 걸친 효과적인 제어를 수행함을 볼 수 있다.

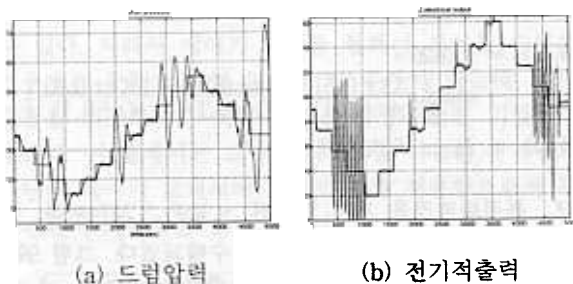


그림 11. 충돌을 고려하지 않은 경우의 응답.

Fig. 11. Output response (bumpy transfer control).

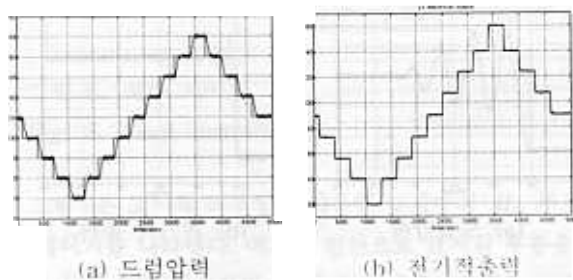


그림 12. 충돌을 고려한 경우의 응답.

Fig. 12. Output response (bumpless transfer control).

## V. 결론

이 논문에서는 누적방지 무충돌전환 제어기를 설계하고 복합적인 구동기 제약조건을 가지고 있는 비선형 보일러 시스템을 이를 적용하는 문제를 다루었다. 비선형 시스템을 전구간 제어하기 위하여 3개의 동작점을 선정하였고, 해당 동작점에 대하여  $H_\infty$  루프형성 제어기를 설계하였다.  $H_\infty$  루프형성 제어기에 누적방지 및 무충돌 전환의 기능을 첨가하기 위하여 고이득 되먹임 기법이 변형되어 적

용되었으며, 모의 실험을 통해 이 제어기가 향상된 성능을 나타내며, 또한 만족스런 전구간 제어를 수행함을 예시하였다.

## 참고문헌

- [1] K. J. Choi, "Design of robust TDF  $H_\infty$  controller for the system with input noise and disturbance," MSc Thesis, Inha Univ., 1996.
- [2] J. H. Hwang, "Robust  $H_\infty$  controller based on LMI with application to nonlinear boiler system," MSc Thesis, Inha Univ., 1998.
- [3] W. H. Kwon, S. W. Kim, P. G. Park, and E. K. Kim, "Design of a boiler-turbine control system using a modified LQG/LTR method," *KIEE Trans.*, vol. 39, no. 2, pp. 199-209, 1990.
- [4] Y. I. Lee, "Design of a gain scheduling receding horizon predictive controller for boiler turbine systems", *Proc. of International Workshop on Predictive and Receding Horizon Control*, pp. 97-104, 1995.
- [5] W. K. Son and O. K. Kwon, "Multivariable constrained model-based predictive control with application to boiler systems", *Journal of ICASE*, vol. 3, no. 6, pp. 582-587, 1997.
- [6] P. Gordon and B. Joseph, "Nonlinear control oriented boiler modelling-A benchmark problem for controller design", *IEEE Trans. on Contr Syst Tech.* vol. 4, no. 1, pp. 57-64, 1996.
- [7] R. Dimeo and K. Y. Lee, "Boiler-turbine control system design using a genetic algorithm", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 10, no. 4, pp. 752-759, 1995.
- [8] J. A. Rossiter, B. Kouvartakakis, and R. M. Dunnett, "Application of generalized predictive control to a boiler-turbine unit for electricity generation", *IEE Proc.-D*, vol. 138, no. 1, pp. 59-67, 1991.
- [9] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, "Feedback control of dynamic systems," Addison-Wesley Publishing Co., 1996.
- [10] D. McFarlane and K. Glover, "A loop shaping design procedure using  $H_\infty$  synthesis", *IEEE Trans on Automat Contr.*, vol. AC-37, no. 6, pp. 759-769, 1992.
- [11] R. A. Hyde, "The application of robust control to vstol aircraft," PhD. Thesis, Univ. of Cambridge, 1991.
- [12] K. J. Åström and R. B. Bell, Dynamic Models for Boiler Turbine-Alternator Units, Report TFRT-3192, Lund Institute of Technology, Sweden, 1987.



**이 영 삼**

1997년 인하대학교 전기공학과 졸업.  
동대학원 석사(1999), 1999년 3월~현재  
서울대학교 전기공학부 박사과정.  
관심분야는 예측제어, 건설제어, 비선  
형제어, 실시간 제어, 압연제어 등.

**권 오 규**

제어·자동화·시스템공학 논문지 제3권, 제6호, 참조.

**이 명 의**

제어·자동화·시스템공학 논문지 제4권, 제1호, 참조.