

# 입력에 포화기를 가진 제어시스템의 성능 향상

## Performance Enhancement of Control Systems with Saturating Actuators

朴 鍾 久\* · 崔 悰 鎬\*\*  
(Jong-Koo Park · Chong-Ho Choi)

### 요 약

포화를 방지하면서 성능을 향상시키는 기존의 여러 방법중 가장 좋은 성능을 보이는 구조는 CAW (Conventional-Anti-reset-Windup) 구조이나 시스템을 설계시 체계적인 설계방법이 없으며 안정도에 문제가 있다. 또한 CAW 구조는 포화기의 출력을 측정할 수 없는 경우에는 사용하지 못한다. 따라서 본 논문에서는 CAW 구조를 포화기의 출력을 측정할 수 없는 경우에도 적용할 수 있는 구조로 개선하였다. 그리고 포화기를 지닌 시스템의 성능향상을 위한 체계적이고 효과적인 설계 방법을 제시하였으며 이러한 제어 시스템에 대한 안정도 분석도 하였다. 몇 개의 예를 통하여 제안된 방법의 유용성을 살펴 보았다.

**Abstract-** The Conventional-Anti-reset-Windup (CAW) structure gives pretty good performance among the conventional strategies that prevent systems from saturation, but there is no systematic way of designing the control systems. Also, it frequently destabilizes the systems. Moreover, the CAW structure cannot be applied when the output of the saturating actuator cannot be measured. Therefore the CAW structure is modified to accommodate this situation. An effective designing method is proposed to give better performance of the control system. The stability of the control system is also considered. The usefulness of the proposed method is shown by applying this method to a few examples.

### 1. 서 론

\*正 會 員 : 서울대 大學院 制御計測工學科 博士課程

\*\*正 會 員 : 서울대 工大 制御計測工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 1988年 12月 26日

1次修正 : 1989年 4月 17日

포화요소는 시스템의 특성에 여러가지 측면에서 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 그런데 실제 산업체에서 플랜트 제어시 널리 사용되는 제어기로는 비례적분제어기(PI controller)를 들 수 있는데 이

때 PI 제어기에 있는 적분요소 때문에 시스템에 포화요소가 포함되어 있는 경우 '적분작용(integral action)'에 의하여 'reset windup' 현상이 일어나게 된다. 그래서 실제적인 시스템에서는 설계 감각(engineering sense)에 의거하여 'reset windup' 현상을 방지해 주는 구조를 채택하여 사용하고 있는 데 이런 구조를 'ARW(Anti-Reset-windup)' 구조라 보통 일컫는다<sup>1)</sup>. 그러나 산업계에서 이런 시스템을 다룰 때에는 그 설계방법에 있어서 감각에 의존하고 또 여러 시행착오를 거치는 비 효율적인 방법이 사용되고 있으며 이런 구조를 사용하였을 때의 안정도 문제는 대부분 고려하지 못하는 실정이다. 따라서 포화요소가 있는 시스템에 대한 제어목표는 안정도를 보장하면서 성능 향상면에서 만족할 만한 결과를 요구 한다고 할 수 있다.

그래서 최근에는 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는 데 대표적인 것으로는 다음과 같다. Horowitz<sup>2)</sup>는 포화요소 전후에 되먹임 루우프(feedback loop)를 도입한 구조를 제안하였고, IMC(Internal-Model-Control) 구조<sup>3)</sup>를 포화시스템에 적용<sup>4)</sup>한 방법도 고려되고 있으며 krikelis등<sup>5)</sup>은 지능('intelligent') 적분기를 포화시스템에 적용하여 성능을 향상시키는 방안을 제시하였다. Chen 등<sup>6)</sup>은 행렬 norm과 Bellman-Gronwall의 정리를 이용하여 시간영역에서의 제어를 구성하는 논문을 발표하였으며 Hanus 등<sup>7)</sup>은 CAW(Conventional-Anti-reset-Windup) 구조를 제안하였다. 그런데 각 방법들은 나름대로 많은 문제점들을 안고 있는데 포화요소가 있는 시스템의 제어에 있어서 가장 만족할 만한 성능을 보이는 방법은 CAW 구조라 할 수 있다<sup>7~9)</sup>.

CAW는 실제 시스템에서 가장 많이 사용되고 있는 PI 제어를 보통 전제로 하고 있는데 PI 제어기와 다른 형태의 제어기에 이를 적용하더라도 다른 방법에 비하여 성능이 우수한데<sup>4)</sup> 이 방법의 문제점은 설계지침이 미비되어 있어 경우에 따라 만족스럽지 못한 응답을 보여주며 특히 안정도를 보장하지 못하는 단점이 있다. 또한 기존의 CAW 구조는 포화기를 거쳐서 나오는 출력을 측정할 수 있어야 하는데 실제 플랜트에서는 이를 측정할 수 없는 경우가 많다. 따라서 이러한 경우에도 사용할 수 있는 CAW 구조를 제안하여 이 구조에 대한 안정도 해석을 하며 제어 시스템의 성능 향상을 위한 체계적인 설계방법을 제시한다. 몇 개의 예를 통하여 본 논문이 제시한 설계 방법

이 우수하다는 것을 보였다.

## 2. CWA 구조의 변형 및 안정도 해석

일반적으로 ARW(Anti-Reset-Windup) 회로라 하면 Hanus<sup>1)</sup>가 제안하고 Glattfelder 등<sup>7)</sup>이 최초로 안정도 분석을 한 그림 1과 같은 '병렬'구조를 일컫는 것으로 인식되어 있다. 그림 1과 같은 구조는 또한 CAW 구조라고도 한다. 이러한 구조는 포화기  $f_1(\cdot)$ 을 통과한 출력을 측정할 수 있는 경우에는 사용가능하나 플랜트가  $f_1(\cdot)$ 과  $G_p(s)$ 로 구성되어 있어  $u$ 를 측정할 수 없는 경우에는 사용하기가 어렵다. 따라서  $u$ 를 측정하지 못하는 경우에 대해서도 사용할 수 있는 구조에 대하여 생각하자.

그림 1에서 점선부분을  $f_2(\cdot, \cdot)$ 라 하고 포화비선형(saturation nonlinearity)을  $f_1(\cdot)$ 이라 했을 때  $f_1(\cdot)$ ,  $f_2(\cdot, \cdot)$ 는 일반성을 해치지 않고 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u = f_1(e_2) = \begin{cases} 1, & e_2 > 1 \\ e_2, & |e_2| \leq 1 \\ -1, & e_2 < -1 \end{cases} \quad (1)$$

$$f_2(e_2, u) = \alpha(e_2 - u) \quad (2)$$

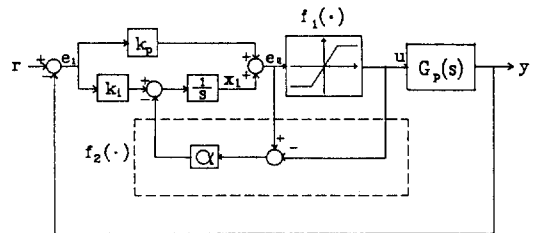


그림 1 일반적인 ARW(CAW) 구조  
Fig. 1 General ARW(CAW) structure.

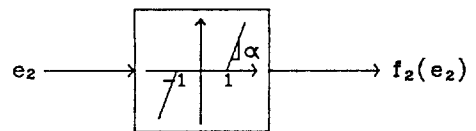


그림 2 기울기  $\alpha$ 인 dead-zone 비선형  
Fig. 2 Dead-zone nonlinearity with slope  $\alpha$ .

이 두 식을 결합하면 (2)는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$f_2(e_2) = \begin{cases} \alpha(e_2-1), & e_2 > 1 \\ 0, & |e_2| \leq 1 \\ \alpha(e_2+1), & e_2 < -1 \end{cases} \quad (3)$$

이를 그림으로 표시하면 그림2와 같은 dead-zone 형태의 비선형으로 표현할 수 있다.

그림 2에서 기울기  $\alpha$ 를 따로 떼어내어 기울기 1인 dead-zone 비선형 형태로 고친 다음 그림 1에 대입하면 그림 3과 같은 형태의 ARW 구조로 변형할 수 있다. 따라서 그림 3과 같은 구조는  $u$ 를 측정할 수 없는 경우에도 사용 가능한 ARW 기능을 갖는다. 또한 이같은 구조는 ARW 구조의 두 부류인 '병렬' 구조<sup>1,7~9)</sup>와 '직렬' 구조<sup>5)</sup>를 포함하는 일반적인 구조라 할 수 있다.

비선형 시스템의 안정도 판별은 Lur'e의 절대안정문제<sup>10,11)</sup>로 변형하여 여러가지 안정판별법을 적용한다.

그림 3을 보면 비선형 요소가  $f_1(\cdot)$ ,  $f_2(\cdot)$  두개가 있지만 이 그림을 잘 변형하면  $f_1(\cdot)$ 과  $f_2(\cdot)$ 를 하나의 비선형으로 묶을 수가 있다.

먼저 그림 3에서 포화비선형  $f_1(\cdot)$ 은 그림 4와 같이 dead-zone 비선형으로 표현할 수 있다<sup>9)</sup>.

그림 4를 그림 3의 구조에 대체하여 두개의 dead-zone 비선형을 하나로 합친 다음 Lur'e의 절대안정문제<sup>10,11)</sup> 형태로 변형하면 그림 5와 같다.

이 그림에서 점선부분에 해당하는 부분  $G_a(s)$ 는 dead-zone ARW 회로의 선형부분(linear part)에 해당하는데  $G_a(s)$ 와  $\phi(\cdot)$ 은 각각 다음과 같이 표현된다.

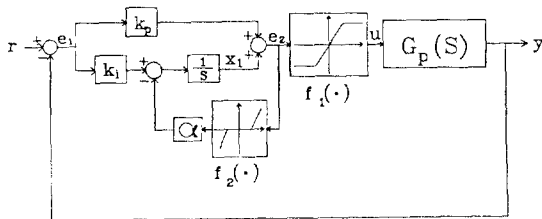


그림 3 변형된 CAW 구조—Dead-zone ARW structure

Fig. 3 A modified CAW structure—Dead-zone ARW structure

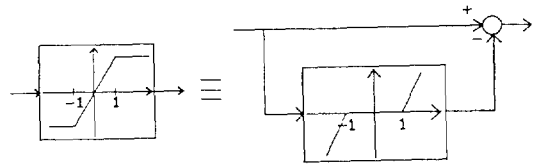


그림 4 포화비선형의 동등한 구조

Fig. 4 Equivalent representations of saturation nonlinearity

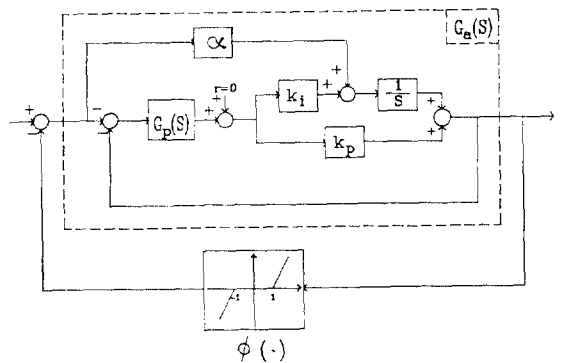


그림 5 절대안정문제 형태로 변형된 Dead-zone ARW 구조

Fig. 5 Dead-zone ARW structure which is modified to the form of absolute stability problem

$$G_a(s) = \frac{\alpha/s - (k_p + k_i/s) G_p(s)}{1 + (k_p + k_i/s) G_p(s)} \quad (4)$$

$$\phi(\cdot) \in \text{sector}[0, 1] \quad (5)$$

(4), (5)와 그림 5에서 안정도 해석은 Circle Criterion<sup>10,11)</sup>에 적용하여 안정도를 판별할 수 있다. 이때  $G_a(j\omega)$ 의 Nyquist plot은

$$\{s : \text{Re } s \geq -1\} \quad (6)$$

상에 놓여 있으면 그림 3의 구조는 광역적으로 (globally) 안정하다. (6)에서 등호가 들어간 것은 (5)가 다음을 만족하기 때문이다.

$$0 \leq \frac{\phi(x)}{x} < 1 \text{ for all } x \neq 0 \quad (7)$$

### 3. CAW의 성능 향상을 위한 방법의 제시

CAW(또는 dead-zone ARW) 구조의 성능 향상을 고려하는 이유는 그림 1에서 CAW의 알려져 있는 설계지침<sup>7-9)</sup>인

$$\alpha \gg 1 \tag{8}$$

이 많은 경우 성능을 만족할 만큼 향상 시키지 못한다는 것에 연유한다.

본 논문에서는 그림 1에서  $k_p, k_i$ 가 결정된 상태에서 CAW의 이득  $\alpha$ 를 하나의 설계변수로 취급하여 성능에 만족할만한 응답을 주는 좋은  $\alpha$ 를 선택하는 방법을 고려하였으며 안정도 해석은 2절의 내용을 적용하여 살펴보겠다.

본 논문에서 제안하려는 성능 향상법은 PI 제어기를 가진 1차 플랜트의 위상평면(phase-plane)<sup>11)</sup> 해석방법에서 출발하였다.

일반적인 일차시스템에 대하여 살펴보기 위하여 플랜트의 계수와 PI 제어기의 계수는 모두 변수로 두자. 즉 일차플랜트  $G_p(s)$ 는 일반성을 깨뜨리지 않고 다음과 같은 형태를 갖는다고 할 수 있다.

$$G_p(s) = \frac{b}{s+a}, \quad a > 0, \quad b > 0 \tag{9}$$

그림 3에서 적분기의 출력을 상태(state)  $x_1$ , 플랜트의 출력을 상태(state)  $x_2$ 라 하고  $f_1(\cdot), f_2(\cdot)$ 는 (1), (2)와 같이 주어 있을 때 시스템 전체의 상태방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -k_i x_2 - \alpha f_2(x_1 - k_p x_2) \\ \dot{x}_2 = -a x_2 + b f_1(x_1 - k_p x_2) \end{cases} \tag{10}$$

윗 식은  $x_1 - k_p x_2$ 에 따라 각각 그 특성이 달라진다.

(a)  $|x_1 - k_p x_2| \leq 1$ 인 경우

(1), (2)를 (10)에 대입한 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -k_i x_2 \\ \dot{x}_2 = b x_1 - (a + b k_p) x_2 \end{cases}$$

이때 평형점<sup>11)</sup>은

$$(x_1, x_2)^T = (0, 0)^T \tag{11}$$

와 같이 주어진다.

(b)  $x_1 - k_p x_2 > 1$ 인 경우

(1), (2), (10)으로부터 시스템의 상태방정식은

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\alpha x_1 - (k_i - \alpha k_p) x_2 + \alpha \\ \dot{x}_2 = -a x_2 + b \end{cases}$$

이고 이때 평형점은 다음과 같다.

$$(x_1, x_2)^T = \{ [1 + k_p(b/a)] - k_i(b/a)(1/\alpha), b/a \}^T$$

(c)  $x_1 - k_p x_2 < -1$ 인 경우

(12)

이 경우는 (b)와 완전한 대칭이다.

이 시스템의 스위칭 평면<sup>11)</sup>은 다음과 같다.

$$x_2 = 1/k_p(x_1 \pm 1) \tag{13}$$

(13)과 평형점 (11), (12)를  $\alpha$ 값에 따른 궤적으로 그린 형태를 위상평면에 나타내면 그림 6과 같다.

그림 6에서 ①은 선형영역에서 동작할 때의 평형점이고 불변이다. 포화치를 넘어섰을 경우의 평형점은  $\alpha$ 값에 따라 점선부분의 궤적을 갖는다.

이와 같은 시스템에서 제시한  $\alpha$ 를 결정하는 고려된 방법은 선형영역에서 동작할 때의 평형점과 포화치를 넘어섰을 경우의 평형점을  $\alpha$ 의 함수로서 표현한 다음 이들 사이의 거리를 가장 가깝게 해 주는  $\alpha$ 를 CAW 구조의 이득값으로 제시하였다.

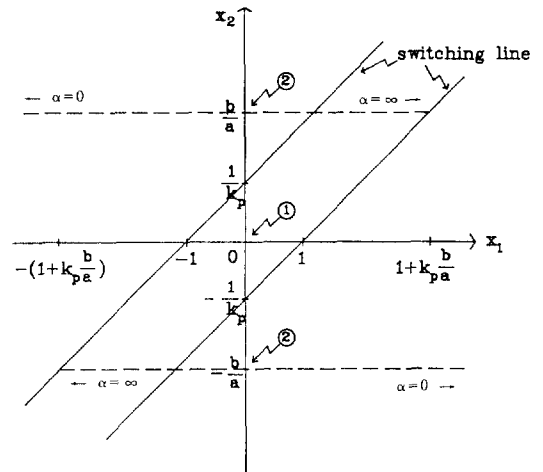


그림 6 위상평면상에서의  $\alpha$ 값에 따른 평형점변이  
Fig. 6 Equilibrium points in the phase-plane for different values of  $\alpha$

즉 그림 6에서 평형점 사이가 가장 가까운 경우는 적당한  $\alpha$ 에 의하여 평형점이 ②에 위치해 있을 경우이다. 이때의  $\alpha$ 값은 (12)로부터  $\alpha = k, b / (a + k, b)$ 이다.

여기서 평형점들이 모두 일치하는 경우는 완전한 선형시스템에 해당하는 데 포화비선형이 존재함으로서 평형점들은 일치하지 않게 된다. 그러므로 이득  $\alpha$ 를 조정하여 평형점들을 근접시킨다는 의미는 주어진 시스템을 비선형이 존재하는 범위 내에서 가능한 최대 선형화시킨다는 것을 뜻한다.

이 개념을 일반화시켜 임의 차수의 플랜트에 적용할 수 있는 성능향상 기법 즉 그림 1에서 이득  $\alpha$ 의 선정방법은 아래와 같다.

**제안 1**

시스템의 상태를

$$x := (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \tag{14}$$

선형영역에서 동작할 때의 평형점<sup>11)</sup>을

$$x_{el} := (x_{1el}, x_{2el}, \dots, x_{nel})^T, \tag{15}$$

스위칭평면<sup>11)</sup>을 넘어섰을 경우의 각각의 평형점을

$$x_{es}^i := (x_{1es}^i, x_{2es}^i, \dots, x_{nes}^i)^T, \tag{16}$$

$i = 1, \dots, m,$

여기서  $m$ 은 스위칭 평면을 넘어섰을 경우의 평형점의 갯수이다.

이때 CAW의 이득  $\alpha$ 의 선정은 다음과 같이 한다.

$$\min_{\alpha} \sum_{i=1}^m |x_{el} - x_{es}^i|_2 \tag{17}$$

△△△

포화기를 가진 경우 보통  $m=2$ 이다.

제안한  $\alpha$ 의 선정방법과 2절의 안정도 판별문제를 결합하여 서론에서 제기한 ARW 구조에 대한 제어목표 즉 안정도를 보장하면서 성능을 향상시킬 수 있는 설계과정은 다음과 같다.

**제안된 ARW 설계 과정**

- 1) 그림 3과 같은 형태를 비선형  $f_1(\cdot), f_2(\cdot)$ 를 포함하는 상태방정식으로 표현한다.
- 2) 선형영역에서 동작할 때 위상평면에서의 평

형점을 구한다.

3) 포화상한 이나 하한을 넘는 경우의 위상평면에서의 평형점을 이득  $\alpha$ 의 함수로 표현한다.

4) (17)을 사용하여  $\alpha$ 값을 계산한다.

5) 위의  $\alpha$ 값과  $G_p(s), k_p, k_i$  값을 (4)에 대입하여 안정도를 판별한다. 안정도를 보장하면 설계를 끝내며 이때의  $\alpha$ 값을 ARW 구조의 이득값으로 선택한다.

안정도를 보장하지 못하면 다음 단계로 간다.

6)  $\alpha$ 를 변수로 놓아  $G_p(s), k_p, k_i$  값을 (4)에 대입하여 안정도를 보장하는  $\alpha$ 의 범위를 구한다.

7) 위에서 구한  $\alpha$ 의 범위를 제약조건으로 (12)를 최소화 하는  $\alpha$ 값을 결정한다.

제안된 ARW 설계법의 타당성을 살펴보기 위하여 PI 제어를 사용한 2차 플랜트에 적용하여  $\alpha$ 를 (8)과 같은 일반적인 설계지침으로 설계된 경우와 계단 입력에 대한 출력을 비교해 보자.

**예제 1**

그림 1에서 다음과 같은 시스템을 고려하자.

$$G_p(s) = \frac{8}{s^2 + 4s + 4}$$

$k_p = 3$   
 $k_i = 2$

입력  $r=0$ 이라 했을 경우(실제시 입력값에는 상관없음) 선형영역에서의 평형점은  $(0,0,0)^T$ 이고 포화상하한을 넘었을 경우의 평형점은 각각  $(7-4/\alpha, 2, 0)^T, (4/\alpha-7, -2, 0)^T$ 이다. 이때 (17)로부터

$$|x_{el} - x_{es}^1|_2 + |x_{el} - x_{es}^2|_2 = 2[(7-4/\alpha)^2 + 2^2]^{1/2}$$

이고 제안된 설계 과정을 따라 이득  $\alpha$ 를 계산해 보면  $\alpha$ 는

$$\alpha = 4/7 \cong 0.5714$$

이다.

이 경우에 (4)는

$$G_a(s) = \frac{\alpha s^2 + 4(\alpha-6)s + 4(\alpha-4)}{s^3 + 4s^2 + 28s + 16}$$

이다. 이 식에  $\alpha=0.0, 0.5714, 4.0, 10.0$ 을 대입하여 그린 Nyquist plot을 그림 7에 나타내었다. 이 그림을 보면 모든  $\alpha$ 에 대하여 Circle Criterion 으로부터 안정도를 보장받는다. 또한 일반적인 설계방법인 (8)에 대응되는 값을  $\alpha=10.0$ 으로 간주하여  $\alpha$ 에 따른 시간영역에서의 응답을 그림 8에 나타내었다. 이 그림을 보면 본 논문에서 제시한 방

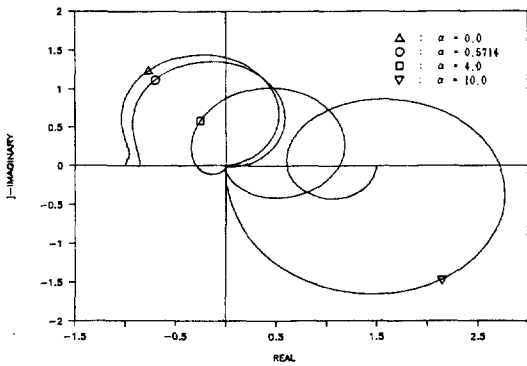


그림 7 2차 포화플랜트의  $\alpha$ 값에 따른 Nyquist plot

Fig. 7 Nyquist plots of (14) with different values of  $\alpha$

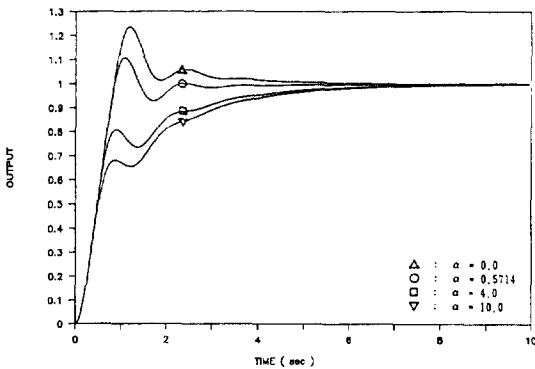


그림 8 2차 포화플랜트의 단계단입력에 대한 출력  
Fig. 8 Unit step input responses of the system in example 1 with different values of  $\alpha$

법대로 설계된  $\alpha$ 값이 가장 좋은 출력응답을 보임을 확인할 수 있다.

이 밖에 시뮬레이션을 통하여 여러 예제에 대하여 살펴본 결과 대부분의 경우 본 논문에서 제시된 방법대로 설계된  $\alpha$ 값이 가장 좋은 성능을 보여 주나 어떤 경우에는  $\alpha$ 를 무한대로 설계되었을 경우에 성능이 약간 좋은데 이런 경우는 시스템의 선형영역에서의 동작 특성이 좋지 않기 때문에 평형점들을 가깝게 해주는  $\alpha$ 값을 선택한다는 것이 의미가 없기 때문이다. 그러나 이런 경우에도 본 논문에서 제시한 방법대로 설계된 경우와 비교했을 때 그 성능차이는 아주 근소하다. 따라서 (제

안 1)은 타당한 설계방법이라고 생각된다.

위에서 제안된 설계방법대로 구성된 시스템은 일반적인 설계법으로 설계된 시스템이 안정도를 보장하지 못하는 경우에도 안정도를 보장하는 경우가 있다.

**예제 2**

그림 3에서 플랜트와 제어기는 다음과 같이 주어져 있다.

$$G_p(s) = \frac{s^2 - s + 2}{s^2 + 8s + 1}$$

$$k_p = 1$$

$$k_i = 1$$

이와 같은 시스템에서  $\alpha$ 값을 변화시키면서 Circle Criterion의 관점에서 안정도를 보장하는  $\alpha$ 의 범위를 구하면 아래와 같다.

$$0.3715 \leq \alpha \leq 9.998 \tag{18}$$

이때 이득  $\alpha$ 를 예제 1에서와 같이 제안한 방법대로 설계해 보면

$$\alpha = 2/3 \approx 0.6667 \tag{19}$$

를 얻는다.

(19)를 보면 (18)의 안정도보장범위내에 속해 있음을 알 수 있다. 그러나 일반적인 설계방법(예를 들어  $\alpha \geq 10$ )으로 설계한다면 안정도를 보장받을 수 없다.

불안정한 플랜트에 포화요소가 존재하는 경우 시스템은 국부안정도(local stability)만을 보장한다. 그런데 본 논문에서 제안한 안정도해석 방법으로 시스템을 분석할 경우 그림 3과 같은 구조에서 불안정한 플랜트에 대하여 그 안정도를 보장하는  $e_2$ 의 범위를 구할 수 있다.

그림 5에서 광역안정도를 보장받으려면  $G_a(j\omega)$ 의 Nyquist plot이 (6)을 만족하여야 한다. 그런데 만약  $G_a(j\omega)$ 의 Nyquist plot이

$$\{s: \text{Re } s > k, k < -1\}$$

상에 놓여 있다면 Circle Criterion으로부터 비선형  $\phi(\cdot)$ 는

$$\phi \in \text{sector}\{0, -1/k\}$$

를 만족해야 된다는 것을 의미한다. 이를 나타내면 그림 9와 같다. 따라서 그림 9에서  $e_2$ 가 안정도를 보장하는 상한값(단, 충분조건임)인데 다음과 같이 계산된다.

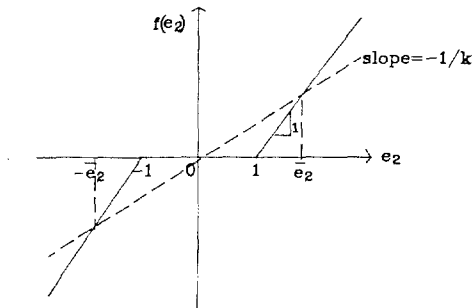


그림 9 제한된 sector 범위  
Fig. 9 Restricted sector bound

$$\bar{e}_2 = \frac{k}{k+1}, \quad k < -1$$

이는 본 논문의 안정도 해석방법이 Glattfelder 등<sup>7)</sup>이 제시했던 방법보다 수월하고 효과적이라는 것을 의미한다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 CAW의 단점을 제거하거나 보완할 수 있는 체계적인 설계방법을 모색하였다. 첫째 포화기를 거쳐서 나오는 출력을 측정할 수 없는 경우라도 사용할 수 있도록 CAW 구조를 변형하여 dead-zone 비선형을 사용한 새로운 제어 구조를 제안하였다. 본 논문에서는 이러한 구조를 dead-zone ARW 회로라 명칭하였으며 이러한 구조를 그림 5와 같이 절대안정문제 형태로 변형시켜 Circle Criterion으로 안정도를 분석하였다. 그리고 기존의 설계방법은 CAW 구조의 이득  $\alpha$ 를 충분히 크게하여 시스템이 'reset windup' 현상이 일어나지 않도록 하는 방법이었으나 본 논문에서는  $\alpha$ 를 설계변수로 하여  $\alpha$ 를 적절히 설계함으로써 성능과 안정도에서 만족할만 특성을 보이는 방법을 제시하였다. 제안된 방법은 선형영역에서 동작할 때의 평형점과 포화치를 넘어섰을 경우의 평형점을  $\alpha$ 의 함수로서 표현한 다음 이들 사이의 거리를 가장 가깝게 해주는  $\alpha$ 를 CAW 구조의 이득값으로 제시하였다. 이를 기초로 하여 본 논문에서는 성능향상법과 안정도해석법을 결합하여 CAW 구조를 합리적으로 설계할 수 있는 설계절차를 제시하였다. 본 논문에서 제안한 방법으로 선택된  $\alpha$ 가 지금까지의 설계방법에 비하여 상당히 나은 응

답특성을 주는 것을 예를 통하여 살펴보았다. 또한 기존의 설계방법으로 설계된 시스템보다는 본 논문에서 제안한 방법으로 설계된 시스템이 안정도를 보다 용이하게 보장받을 수가 있는 것으로 생각된다.

#### 참 고 문 헌

- 1) R. Hanus, M. Kinnaert and J.L. Henrotte, "Conditioning Technique, a General Antiwindup and Bumpless Transfer Method," *Automatica*, vol. 23, no. 6, pp. 729-739, 1987.
- 2) I. Horowitz, "A synthesis theory for a class of saturating systems," *INT. J. Contr.*, vol. 38, no. 1, pp. 169-187, 1983.
- 3) C.E. Garcia and M. Morari, "Internal Model Control: I. A Unifying Review and Some New Results," *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, vol. 21, no 2, pp. 308-323, 1982.
- 4) J.C. Doyle, R.S. Smith and D.F. Enns, "Control Plants with Input Saturation Nonlinearities," *Automat. Contr. Confer.*, pp. 1034-1039, 1987.
- 5) N.G. Krikelis and S.K. Barkas, "Design of tracking systems subject to actuator saturation and integrator wind-up," *INT. J. Control*, vol. 39, no. 4, pp. 667-682, 1984.
- 6) B.S. Chen and S.S. Wang, "The Stability of Feedback Control with Nonlinear Saturating Actuator: Time Domain Approach," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 33, no. 5, pp. 483-487, 1988.
- 7) A.H. Glattfelder and W. Schaufelberger, "Stability Analysis of Single Loop control Systems with Saturation and Antireset-Windup circuits," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-28, no. 12, pp. 1074-1081, 1983.
- 8) A.H. Glattfelder and W. Schaufelberger, "Start-up performance of different proportional-integral-anti-wind-up regulators," *INT. J. Control*, vol. 44, no.2, pp. 493-505, 1986.
- 9) A.H. Glattfelder and W. Schaufelberger, "Stability of Discrete Override and Cascade-Limiter Single-Loop Control Systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 33, no. 6, pp. 532-540, 1988.
- 10) K.S. Narendra and J.H. Taylor, *Frequency*

Domain Criteria for Absolute Stability, Academic Press: New York and London, 1973.

11) M. Vidyasagar, Nonlinear Systems Analysis,

Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1978.

---