

조정파라미터 공간에서의 제어계 동작점과 안정성에 관한 연구

최 순 만

STUDY ON THE OPERATING CONDITION AND STABILITY OF CONTROL SYSTEM IN THE SPACE OF ADJUSTING PARAMETERS

S. M. Choi

Key words : Stability, Parameter Space, PID Control

Abstract

The states of control loops in existing actual systems are changed according to time varying conditions of controlled process and other system components. Adjusting control parameters properly at site which is performed generally by Ziegler & Nichols method is important for safe and efficient operation, but the method may require much time to adjust and not easy to inexperienced engineers. This study is aimed to propose more handy method to adjust control parameters by plotting operating conditions on the space of adjusting parameters. One loop of model control system without perturbation condition has been adopted and its stability limit was plotted on the coordinates of Gain and Integral time which was acquired after analyzing Nyquist diagrams and time domain responses. The result showed that the sets of adjusting parameters according to critical stability and proper stability could be acquired reasonably through both responses and the curves on parameter space revealed available patterns for the purpose of easy maintenance of control characteristics.

1. 서 론

선박의 기관계통을 비롯한 자동화 시스템에는 많은 제어루프들이 관련되며 이것들의 제어특성은 구성요소의 상태변화에 따라서 여러모로 달라진다. 안정된 시스템의 운전을 위해서는 이러한 상

태변화에 대해 조절기의 제어파라미터 값을 적절히 조정할 필요가 있으며 현장의 운전자들은 이 경우 나름대로 경험에 의한 감각적인 방법으로 대응하게 된다. 제어파라미터의 조정에는 Ziegler & Nichols의 한계감도법을 비롯한 여러 형태의 방법이 있으나¹⁾⁻³⁾ 현장에 적용하는 데에는 조정에 요

* 한국해양수산연수원(원고접수일 : 2000년 2월)

하는 노력과 시간이 많이 들므로 실무자의 입장에서 보다 직감적이고 손쉬운 방법을 필요로 하게 된다. 일부 제어계통에서 적용되고 있는 오토튜닝 방식은 파라미터를 자동으로 조정해 준다는 점에서 효과적인 대안이 될 수 있지만^{4),5)} 아직 대부분의 선박 현장에서 적용이 일반적이지 못하다.

제어시스템의 설계와 조정에는 많은 파라미터가 관련되나 사용자가 접하고 관심을 갖게 되는 것은 가시적인 조정파라미터일 뿐이고 따라서 제어특성의 문제를 이러한 파라미터 값에 의해 나타내도록 하는 것은^{6),7)} 제어장치에 대한 보수관리의 측면에서 보다 실무적인 도움이 된다. 본 논문에서는 이와 관련하여 사용자가 다이얼 수치로 접하게 되는 조정파라미터 값을 토대로 조정파라미터 공간 상에서 현재의 상태를 동작점으로 확인한 후 이를 통하여 제어계의 안정도를 적정히 유지하는 방법의 문제를 다루기로 한다. 기존의 설치되어 있는 제어시스템에서 부족감쇠나 과감쇠의 방향으로 제어특성이 크게 벗어나서 재조정을 하게 되는 경우 스텝응답으로 나타나는 맥동감쇠 정도를 살펴 게 되는데 이 같은 시간영역에서의 응답을 확인하는 데에 적지 않은 시간이 소요되었다. 이것에 대해 계의 안정한계가 조정 파라미터 평면상에서 미리 확인되어 있는 경우에는 현재의 동작점을 기준으로 적정한 안정여유를 갖기 위한 조정방향이 어떠한 형태가 되어야 하는지를 직접적으로 판단하는 것이 가능해진다.

논문에서는 단일 입출력의 조절계에서 제어대상의 특성을 시불변의 조건으로 하여 안정한계에 해당하는 조정 파라미터의 집합을 구하였으며 이를 위하여 주파수와 시간영역에서 해당 조절계의 응답을 확인하였다. 또한 구해진 결과를 조정 파라미터 좌표 상에서 특성곡선으로 나타낸 후 적정한 안정여유를 갖기 위한 조정파라미터의 설정과 관리에 대한 유용성에 대하여 분석하였다.

2. 조정파라미터에 의한 안정한계

시불변의 고정된 파라미터를 갖는 제어대상 $G(s)$ 와 이에 대한 제어기 $K(s)$ 로 구성되는 단일 입출력의 직렬피드백 계통을 가정한다. 제어기의 가

변 조정파라미터가 p_1, p_2 2 개이고 폐회로 전달함수를 $F(s)$, 입출력 시간함수를 r, c 라 할 때 이들 관계는 식(2.1)과 같아진다.

$$c(t) = \int_0^t f(\tau, p_1, p_2) r(t-\tau) d\tau$$

$$\text{단, } f(t, p_1, p_2) = L^{-1}[F(s)] \quad (2.1)$$

제어기의 전달함수 $K(s)$ 를 p_1, p_2 에 의한 3항 클래스 제어기 형태로 표현하면 $K(s)$ 는 식(2.2)로 되고 여기에서 $K_0(s), K_1(s), K_2(s)$ 는 고정된 전달함수를 나타낸다.

p_1, p_2 는 PI 제어기의 경우 각각 비례동작 및 적분동작의 크기를 정하는 조정 파라미터이고 또한 계인을 고정한 조건에서는 PID제어기의 경우를 포함한다.

$$K(s) = K_0(s) + K_1(s)p_1 + K_2(s)p_2, \quad p_1, p_2 \in R \quad (2.2)$$

계의 제어특성은 루프전달함수 $KG(s)$ 에 의해 정해지고 이것의 미소변화분 $\Delta KG(s)$ 은 제어대상의 특성이 일정하면 편미분 선형화를 통한 식(2.3)과 같이 p_1, p_2 두 파라미터의 변화에 의해서만 영향을 받는다.

$$\Delta KG(s) = G(s) \left[\frac{\partial K(s)}{\partial p_1} \Delta p_1 + \frac{\partial K(s)}{\partial p_2} \Delta p_2 \right]$$

$$= G(s) [K_1(s) \Delta p_1 + K_2(s) \Delta p_2] \quad (2.3)$$

폐루프계가 안정한계로 되기 위한 주파수응답의 조건식은 식(2.2)로부터 식(2.4)가 된다.

$$1 + G(j\omega) [K_0(j\omega) + K_1(j\omega)p_1 + K_2(j\omega)p_2] = 0, \quad \omega \in R \quad (2.4)$$

식(2.4)에서 $G(s), K_0(s), K_1(s), K_2(s)$ 가 허수축 상에 극을 갖는 경우의 집합을 A 라고 하면 안정한계가 되기 위한 파라미터 집합 P_c 는 식(2.5)로 나타낼 수 있다.

$$P_c = \{p = (p_1, p_2) \mid 1 + K(j\omega)G(j\omega) = 0, \omega \in A\} \quad (2.5)$$

식(2.5)를 풀기 위하여 G, K 를 복소수 형태로 나타내면 식(2.6)과 식(2.7)과 같으며 여기에서 우변의 a, b, c_{1i}, c_{2i} 는 ω 의 함수이다.

$$G(j\omega) = a(\omega) + b(\omega)j \quad a, b \in R \quad (2.6)$$

$$K_i(j\omega) = c_{1i}(\omega) + c_{2i}(\omega)j$$

$$c_{1i}, c_{2i} \in R, \quad i = 0, 1, 2 \quad (2.7)$$

식(2.6)과 식(2.7)로부터 식(2.4)는 식(2.8)과 같아진다.

$$H\Theta p = -H\eta - e \quad (2.8)$$

여기에서

$$p = (p_1 \ p_2)^T, \quad \eta = (c_{10} \ c_{20})^T, \quad e = (1 \ 0)^T \quad (2.9)$$

$$H = \begin{pmatrix} a & -b \\ b & a \end{pmatrix}, \quad \Theta = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

이다. 식(2.8)의 H는 $\det H = a^2 + b^2 = |G(j\omega)|^2$ 이므로 정칙이고 PI제어의 경우 $p_1 = K_p, p_2 = K_p/T_i$ 라고 하면 이 때의 행렬 θ 는 식(2.11)이 된다.

$$\Theta = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\omega} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

행렬 θ 는 계인을 고정한 PID제어에서는 정칙이 아니므로 조정파라미터의 자유도가 생기지 않으나 D동작을 미분시정수 ϵ 에 의한 불완전미분 형태로 나타내면 식(2.2)의 $K_2(s)$ 는 식(2.12)와 같이 되므로 $K_0(s)$ 를 상수 K_p 로 하고 $p_1 = K_p/T_i, p_2 = K_p T_d$ 로 하면 θ 는 식(2.13)이 되어 정칙으로 취급하는 것이 가능해진다⁶⁾.

$$K_2(s) = \frac{s}{(1 + \epsilon s)} \quad (2.12)$$

$$\Theta = \begin{pmatrix} 0 & \frac{\epsilon \omega^2}{1 + \epsilon^2 \omega} \\ -\frac{1}{\omega} & \frac{\omega}{1 + \epsilon^2 \omega^2} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

식(2.8)로부터 행렬 θ 가 정칙이면 이를 만족하는 p의 집합 P_c 는 식(2.14)에 의해 구해진다.

$$p = \Theta^{-1}(-\eta - H^{-1}e) \quad (2.14)$$

주어진 조절계가 안정한계에 놓이기 위한 조정파라미터의 조합은 식(2.14)에 의해 구해지고 이 식은 각주파수를 독립변수로 하여 얻어지는 조정파라미터 조합이 연속적으로 조정 파라미터 좌표상에 그려질 수 있음을 나타낸다. 식(2.14)의 해를 만족시키는 때의 ω 집합을 W_c 라고 하고 나이퀴스

트선도에서 나타나는 위상교차주파수의 집합을 W_0 라고 하면 $W_c \in W_0$ 의 관계가 된다. 안정한계에 놓이는 파라미터 좌표를 구하는 실제적인 방법에는 다음의 것들이 있다. 즉, 제어대상의 파라미터가 모두 규명되는 경우 식(2.14)의 관계를 직접적으로 이용하여 각주파수 변화에 따라 나타나는 파라미터 궤적을 구하는 방법과 함께 나이퀴스트선도에 의한 주파수응답으로부터 식(2.5)의 관계를 만족하는 조합 경우를 간접적으로 구하는 방법, 그리고 시간영역에서 한계감도법에 의해 안정한계 파라미터 조합을 구하는 방법 등의 3가지를 예로 들 수 있다. 본 논문에서는 실무적 활용가능성을 검토하는 것에 비중을 두어 제어대상에 대한 수학적 모델링이 모호하거나 설치되어 사용 중인 장치의 파라미터값을 구분하여 구하는 것이 어려운 경우에도 실험적인 방법으로 해석을 일반화할 수 있다는 점에서 나이퀴스트선도에 의한 방법을 선택하였으며 또한 현장에서 적용할 수 있는 한계감도법의 방법을 병행하여 파라미터 조합을 구하기로 한다.

3. 모델제어계의 안정도 해석

3.1 모델제어계의 구성

일반적인 단일루프의 제어계로서 가열기 출구 온도를 일정하게 유지하는 온도제어계를 모델로 하여 이것의 구성을 나타내면 Fig.3.1과 같다.

제어대상인 가열기의 열원은 일정 압력의 스팀 공급으로 이루어지고 조절기는 공기압 변위평형식 PI 조절기, 조작기는 공기압식 다이아프램식 콘트롤밸브, 온도검출기는 봉입가스에 의한 압력식

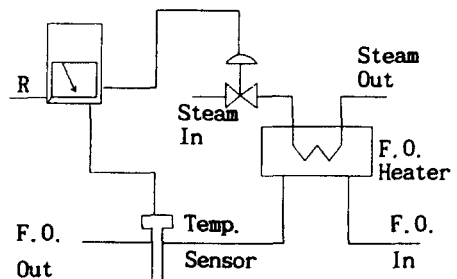


Fig.3.1 Fuel Oil Temperature Control System

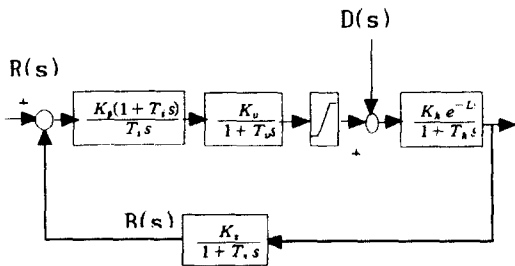
센서이다. 제어대상은 시간지연과 1차지연의 적으로 나타내고 조작기는 밸브개도와 유량간의 관계가 등비를 특성이므로 가정한다. 조작부의 포화특성과 함께 나타내면 제어계의 블록다이어그램은 Fig3.2가 된다.

Fig3.2로부터 입력R(s)와 출력C(s)간의 전달함수는 식(3.1)과 같다.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_p K_v K_h (1+T_i s) (1+T_s) e^{-Ls}}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + l(s) e^{-Ls}} \quad (3.1)$$

단, $a_4 = T_i T_v T_h T_s$
 $a_3 = T_v T_h + T_v T_s + T_h T_s$
 $a_2 = (T_v + T_h + T_s) T_i$
 $a_1 = T_i$
 $l(s) = K_p K_v K_h K_s (1+T_i s)$

모델 시스템의 PI조절기는 공기압식 표준형으로서 비례대의 조정 다이알 범위는 5-500%이다. 따라서 K_p 값은 0.2에서 20까지를 가변 범위로 하고 T_i 의 조정범위도 적분시간 다이알의 조정범위인 0.05-30 [min]를 그대로 적용하기로 한다. 조정파라미터를 제외한 모델제어계 관련의 각 계수에 대해서는 모델 대상 시스템의 작동을 통해서 대략적인 값을 얻을 수 있으며 T_v, T_h, L, T_s 각



- K_p : 조절기 게인 [%/ %]
- T_i : 조절기 적분시간 [min]
- K_v : 조작밸브 게인 [%/ %]
- T_v : 조작밸브 시정수 [min]
- K_h : 제어대상의 정상이득 [%/ %]
- T_h : 제어대상의 시정수 [min]
- L : 제어대상의 지연시간 [min]
- K_s : 센서 게인 [%/ %]
- T_s : 센서의 시정수 [min]

Fig.3.2 Block Diagram of System

각을 1/50 [min], 1.0 [min], 1/5 [min], 1/12 [min]으로 하고 1차지연의 정상이득은 $K_v = K_h = K_s = 1$ 로 정한다.

3.2 주파수영역에 의한 안정한계

Fig3.2의 제어계통을 선형계로 다루기 위해 조작기 동작점이 비례영역 내에 있다고 가정하면 전향전달함수 G(s)와 후향전달함수 H(s)에 의한 개루프 전달함수는 식(3.2)가 된다.

$$G(s)H(s) = \frac{K_p(1+T_i s)K_v K_h K_s e^{-Ls}}{T_i s(1+T_v s)(1+T_h s)(1+T_s s)} \quad (3.2)$$

식(3.2)에 정해진 계수를 적용하고 조정파라미터인 K_p, T_i 변수만의 함수로 주파수궤적을 나타내면 식(3.3)이 된다.

$$G(j\omega)H(j\omega) = \frac{K_p(1+T_i j\omega) e^{-\frac{L}{5}j\omega}}{T_i j\omega(1 + \frac{1}{50}j\omega)(1+j\omega)(1 + \frac{1}{12}j\omega)} \quad (3.3)$$

식(3.5)에서 T_i 를 주어진 범위에서 최대가 되는 30min에서부터 K_p 값을 단계적으로 변화시켜 나이퀴스트 선도를 구하면 Fig3.3과 같으며 안정한계에서의 K_p 값을 K_{po} 라고 하면 $K_{po} = 7.5$ 로 나타난다. Fig3.4에서 Fig3.8은 T_i 의 값을 달리 하여 같은 방식으로 여러 K_p 값의 조건에서 얻어진 벡터궤적을 나타낸 것이다.

나이퀴스트선도의 결과에서 K_{po} 는 T_i 가 30min일 때 7.5의 값으로 최대가 되고 K_{po} 의 최소값은 T_i

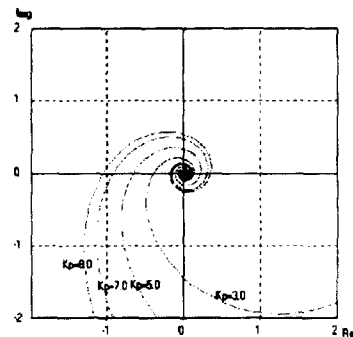


Fig.3.3 Nyquist Plots at various K_p 's with $T_i = 30$ min

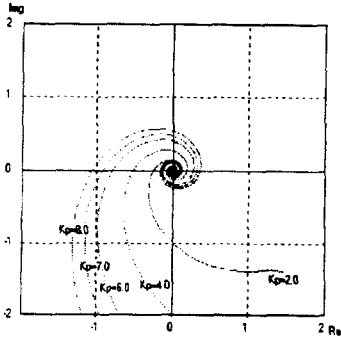


Fig.3.4 Nyquist Plots at various \$K_p\$'s with \$T_i=10\$ min

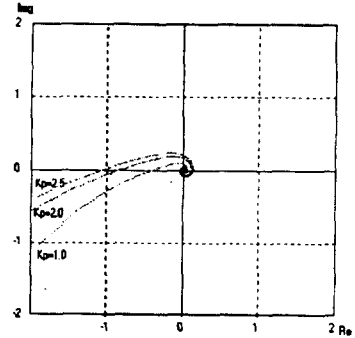


Fig.3.7 Nyquist Plots at various \$K_p\$'s with \$T_i=0.2\$ min

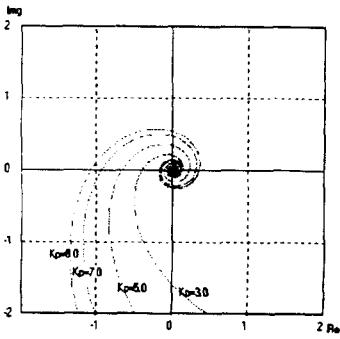


Fig.3.5 Nyquist Plots at various \$K_p\$'s with \$T_i=5.0\$ min

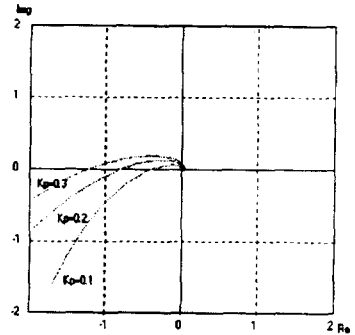


Fig.3.8 Nyquist Plots at various \$K_p\$'s with \$T_i=0.05\$ min

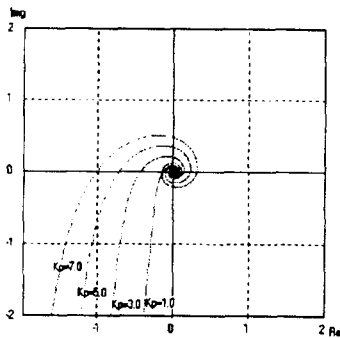


Fig.3.6 Nyquist Plots at various \$K_p\$'s with \$T_i=1.0\$ min

가 최소일 때로 0.25이다. 또한 적절한 게인여유 gm을 6dB로 정하고 이 때의 게인을 \$K_{pr}\$, 이것과 \$K_{po}\$와의 비를 적정게인비 \$k_g\$로 정하면 식(3.4)의 관계가 된다.

$$K_{pr} = k_g K_{po} \quad (3.4)$$

3.3 시간영역에서의 안정한계

조작부가 포화되지 않는 동작점 부근에서 작동하는 것으로 가정하고 주파수응답에서의 동일한 \$T_i\$값과 \$K_p\$값의 설정 상태에서 스텝응답을 구하면 Fig.3.9부터 Fig.3.14까지의 결과가 얻어진다.

또한 Ziegler & Nichols의 한계감도법에 따라 파라미터를 설정하기 위해 적분시간 최대인 상태에서 게인만을 증가시켜 안정한계 상태에 이르게 하면 한계감도와 맥동주기는 각각 7.0과 1.2min로 확인된다. 여기에 Ziegler & Nichols가 제시하고 있는 PI제어에서의 한계감도에 대한 일정 비율 0.45와 맥동주기에 대한 일정비율 0.83을 곱하면 적정한 감도와 적분시간 값은 각각 \$K_p=3.15\$와

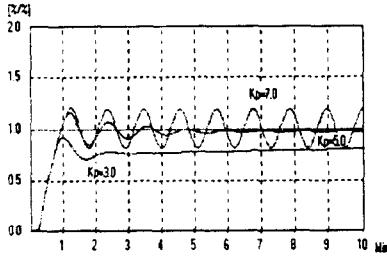


Fig.3.9 Step Response at various K_p 's with $T_i = 30.0$ min

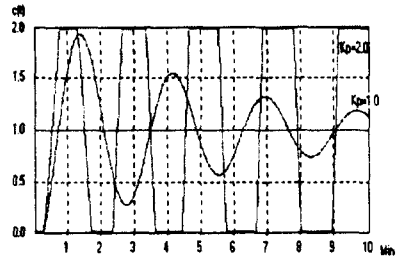


Fig.3.13 Step Response at various K_p 's with $T_i = 0.2$ min

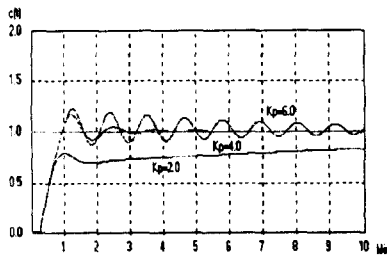


Fig.3.10 Step Response at various K_p 's with $T_i = 10.0$ min

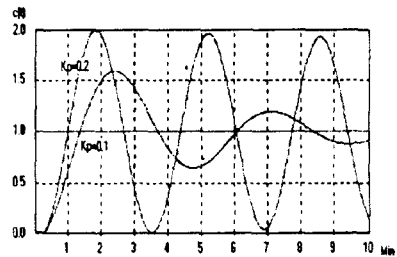


Fig.3.14 Step Response at various K_p 's with $T_i = 0.05$ min

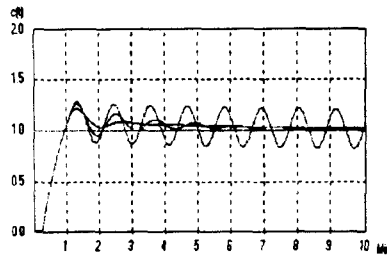


Fig.3.11 Step Response at various K_p 's with $T_i = 5.0$ min

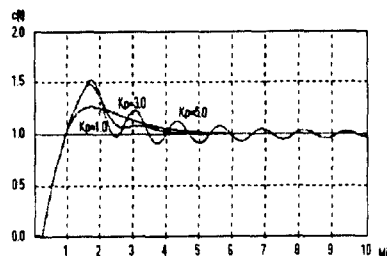


Fig.3.12 Step Response at various K_p 's with $T_i = 1.0$ min

$T_i = 1.2$ min인 것으로 나타나며 이 조합의 파라미터 값에서 스텝응답은 대략 1/4맥동감쇠의 형태가 되는 것이 확인된다.

4. 결과와 분석

나이퀴스트 선도에서 나타난 주파수응답의 궤적은 위상여유를 별도로 확인할 필요가 없는 비교적 단순한 곡선의 형태로서 안정한계의 문제는 게인여유 gm 만을 기준으로 나타낼 수 있다. 정해진 적분시간에 대해 게인여유 gm 이 0가 되는 안정한계점과 $gm = 6$ dB이 되는 K_{p0} 와 K_{pr} 의 파라미터의 결과는 Table 1과 같이 정리된다. 여기에서 적정게인비 k_g 를 함께 나타내면 k_g 는 대략 0.47 근방의 일정한 수치로 나타나며 이 값은 또한 한계감도법에서 PI제어의 경우 제시하고 있는 한계감도에 대한 적정비율의 크기와 비교할 때 주어진 조정범위 전체에서 근사한 값으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig.4.1은 Table 1의 결과를 조정 파라미터 좌표에서 나타낸 것이고 Fig.4.2는 양축을 대수값으로

Table 1. Gain and Reset Time values at Stability Limit and Optimum Case

Ti[<i>min</i>]	0.05	0.2	1.0	5.0	10.0	30.0
K _{po}	0.25	2.3	6.8	7.5	7.5	7.5
K _{pr}	0.12	1.0	3.0	3.5	3.5	3.5
k _g	0.480	0.435	0.441	0.467	0.467	0.467

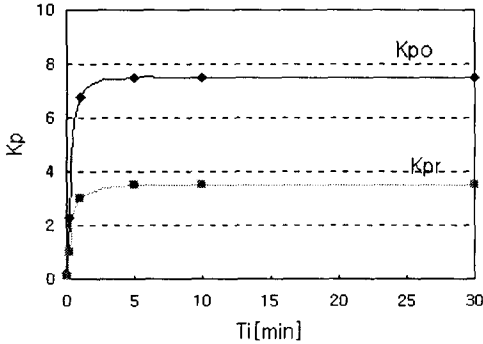


Fig.4.1 Stability Limits by K_{po} and K_{pr}

취하여 나타낸 그래프이다. 적분시간의 변화는 감도가 작은 영역에서 부분적으로 안정특성에 영향을 미치고 있으나 대부분의 조정범위에서 안정특성은 감도의 조정의 의해 주로 지배되고 있다. 여기에서 곡선 K_{po}와 K_{pr}은 계인비 k_g만큼의 비율로 차이를 나타내는 닳음 형태의 패턴을 보인다. 단일 루프의 공기압식 제어계에서 나타난 안정한계 곡선 패턴은 제어계의 형태에 따라 서로 다른 일정한 형태가 되고 또한 제어대상의 특성이 변하는 경우 적절한 변동폭을 갖는 유사한 패턴의 형태가 될 것이 유추된다. 실시스템의 경우 현장에서는 조정 다이알의 순차적 조정에 의해 안정한계에 해당하는 조정파라미터의 몇몇 조합을 간단히 구할 수 있으므로 이 같은 패턴의 확인은 용이해진다. Fig3.1-Fig3.8 과 Fig3.9-Fig3.14의 결과는 동일 파라미터 조합에 대해 안정특성이 서로 일의적으로 잘 대응하고 있다는 것을 나타낸다. 특히 Fig4.1의 결과는 T_i가 5분 이상에서 적분시간은 안정한계 특성에 거의 영향을 미치지 않는 대신 계인의 값에 의해 안정한계가 지배된다는 것을 보이고 있으며 이러한 관계를 식으로 나타내기 위해 한계감도 K_{po}를 적분시간에 의한 함수로 표현하면 대략 식(4.1)의 지수함수 형태가 된다.

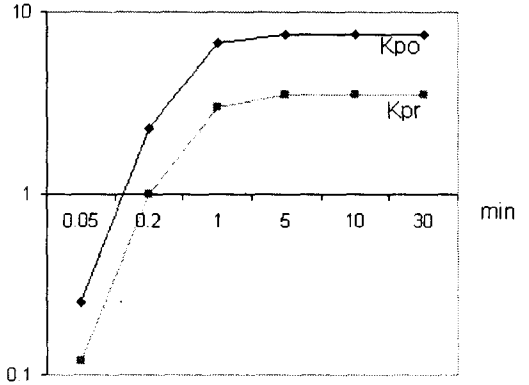


Fig.4.2 Stability Limits by K_{po} and K_{pr}

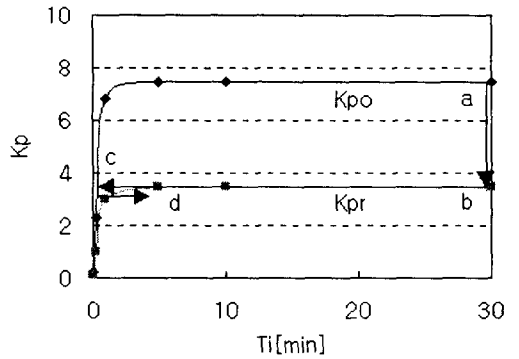


Fig.4.3 Adjusting points by Ziegler&Nichols method on parameter space

$$K_{po} = \max(K_{po}) [1 - \exp(-\frac{T_i}{c})] \quad (4.1)$$

식(4.1)에서의 파라미터 c는 어느 조절계를 대상으로 할 때 조정파라미터와 관계가 없이 제어계의 구성형태에 따라 정해지는 조절계의 고유한 특성값의 의미를 갖는 것으로 보아진다. 현장에서 적용되고 있는 한계감도법에 의한 조정의 과정을 파라미터좌표 상에서 나타내면 Fig4.3에서 a, b, c, d 점이 되며 여기에서 a점은 적분시간을 최대한 상태에서 계인 K_p를 증가시켜 안정한계점에 이르도록 한 지점이다. 이 상태에서 K_p의 조정의 의해 적절한 안정여유를 갖도록 감도를 줄이면 동작점은 아래 방향으로 이동되며 이렇게 하여 곡선 K_{pr}과 만나게 되는 지점이 b가 된다. 점 b의 위치는 안정한계를 나타내는 한계감도의 값에다 적정감도비 k_g값을 바로 곱하여 직접적으로 정해줄 수 있

다. 점 b로부터 c까지는 적분시간만을 서서히 감소시켜 안정한계에 이르도록 하는 과정이고 이것에 의해 동작점은 왼쪽으로 이동하게 되며 곡선 K_{po} 와 만나는 안정한계점이 c가 된다. 여기에서 다시 적절한 안정여유를 주기 위하여 적분시간을 증가시키면 점 c는 오른쪽으로 이동하게 되고 곡선 K_{pr} 과 만나는 점 d가 한계감도법에 의한 최종 조정점을 가르치게 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 이미 설치되어 있는 제어계의 안정성 관리문제와 관련하여 조정파라미터 값을 토대로 현재의 동작점과 안정성 특성을 나타내는 방법에 대해서 모색하였다. 이를 위해 공기압식의 단일 입출력 제어계를 대상으로 주파수영역에서의 나이퀴스트 선도와 시간영역에서의 스텝응답을 구하였으며 여기에서 얻어진 한정한계에서의 파라미터 조합을 조정파라미터 영역에 나타냄으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 주어진 제어계의 개인-적분시간 좌표상에서 안정한계 특성은 일정한 형태의 패턴곡선으로 나타나며 공기압식의 단일 루프제어계인 모델제어계의 경우 이 곡선은 개인을 적분시간의 함수로 나타낼 때 지수함수의 일정 형태로 된다.
2. 모델제어계의 개인-적분시간 좌표 상에서 안정성 특성은 감도의 조정에 주로 지배적인 영향을 받으며 적분시간의 조정에 대해서는 감도가 작은 영역에서만 부분적으로 영향을 미쳤다. 또한 안정한계와 적절한 안정여유를 갖는 개인과의 비 k_g 는 주어진 조정범위 전체에서 대략 0.4-0.5의 값으로 얻어졌다.
3. 안정한계와 적정 안정여유를 나타내는 조정파라미터 조합의 집합은 나이퀴스트선도와 시간영역의 스텝응답 모두에서 일치된 특성으로 확인되었으며 현장의 실제 시스템의 경우 이들 집합은 조정 다이얼의 조작에 의해 간단히 얻어질 수 있다.
4. 일반적으로 적용되는 한계감도법에 의한 파라미터 조정방법을 조정파라미터 영역에서

나타내는 경우 그 조정과정은 곡선 K_{po} 와 곡선 K_{pr} 사이에서 나타나는 일정한 형태의 동작점 궤적으로 표현된다.

참고문헌

- 1) J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers", Trans. ASME, 64-8, 759~768, 1942
- 2) Ryuichi Kuwata, "An Improved Ultimate Sensitivity Method and PID ; I-PD Control Characteristics", SICE Tans.(Japanese), Vol 23, No.3, p232~239, 1987
- 3) Hidefumi Taguchi, Masateru Doi and Mitsuhiro Araki, "Optimal Parameters of Two-Degrees of Freedom PID Control Systems", SICE Trans. (Jananese), Vol23, No.9, p889~895, 1987
- 4) P. J.Gawthrop, "Self-Tuning PID Controllers- Algorithms and Implementation", IEEE Trans. Automatic Control, AC-31-3, p201~209, 1986
- 5) T. Yamamoto, S. Omatu and H.Ishihara, "A Construction of Self-Tuning PID Control Algorithm and Its Applications", Proceedings of SICE '89, ES15-1, p1143~1146, 1989
- 6) Masami Saeki and Daii Hirayama, "Parameter Space Design Method of PID Controller for Robust Sensitivity Minimization Problem", SICE Trans.(Japanese), Vol 32, No.12, p1612~1619, 1996
- 7) Yyou Kondo, Shinji Hara and Takuji Kaneko, "Parameter Space Design for H_∞ Control", SICE Trans.(Japanese), Vol 27, No.6, p714~716, 1990

저 자 소 개



최순만(崔準萬)

1955년 3월생, 1977년 한국해양대학교 기공공학과 졸업, 1990년 동대학원졸업(석사), 1995년 동대학원졸업(박사), 1987년-현재 한국해양수산연수원 교수, 당학회 회원