



技術現況分析報告書

PID 파라메타의 자동동조 기술 현황

A Survey on the Autotuning of PID Parameter

韓國原子力研究所

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 PID 파라메타의 자동등조 기술 현황에 관한 기술현황분석 보고서로 제출합니다.

1996. 6. 14.

제출부서명 : 계측계통분야

참여연구원 :

주 저 자 : 연 구 원 이 윤 희

공 등 저 자 : 연 구 원 하 재 흥

연 구 원 신 해 곤

연 구 원 김 동 완

선임기술원 남 상 구

감 수 위 원 : 박 석 준

국 문 요 약

오늘날 과학의 발전과 더불어 스스로 판단하고 결정하는 자동 기계장치들이 여러 분야에서 등장하고 있다. 공정 제어 분야에서도 PID 제어기 조율을 자동적으로 수행하는 자동동조기에 대한 연구가 80년대 중반 이후부터 활발하게 진행되어 왔다.

본 보고서에서는 자동동조 알고리즘의 기본적인 기술들을 소개하고 있다. 제어기의 조율시에 일반적으로 사용되고 있는 과도응답 평가 방법을 소개하였으며, 공정 동특성을 평가하고 PID 파라메타를 조율하는 실험적인 방법들을 기술하였다. 또한, 이러한 연구 결과들을 응용하여 시중에 판매되고 있는 자동동조기에 대하여 소개하였다.

폭 넓은 사전실험을 거친 후에 수많은 산업현장에 도입된 자동동조기는 운전원의 과중한 부담을 줄여 주면서 많은 장점들이 보고되고 있다. 원자력 발전소에서도 보다 많은 자동화를 이룩하기 위해 자동동조기 적용을 신중히 검토해야 할 것이다.

영 문 요 약

A significant advance in science and technology during the last few decades has resulted in the evolution and use of automatic control equipment in various areas of industry. The automatic control equipment monitor various parameters associated with the process and make decisions accordingly. In the area of process control, extensive research has been carried out for PID parameter auto-tuning techniques since the middle of 1980's.

This paper covers two auto-tuning techniques namely system transient response performance and experimental method to analyze dynamic characteristics of process systems.

In this paper auto-tuning technology used in commercial models is analyzed in detail. It is reported by industry that by optimum application of the auto-tuning controller, the operator load is significantly reduced while the reliability of process control is greatly enhanced. It is recommended that the application of auto-tuning controller should be evaluated for automatic process control in nuclear plant.

목 차

제 출 문	-----	1
국문요약	-----	2
영문요약	-----	3
목 차	-----	4
표 목 차	-----	6
그림목차	-----	6
1장 서 론	-----	7
2장 제어기 조율 방식	-----	10
2.1절 1/4 감쇄비용답 방식	-----	10
2.2절 최소적분오차 방식	-----	11
3장 제어기의 자동동조	-----	13
3.1절 과도응답을 근거로 한 방법	-----	14
3.1.1 접선 방법	-----	14
3.1.2 두점 방법	-----	16
3.2절 주파수응답을 근거로 한 방법	-----	19
3.2.1 연속진동법	-----	20
3.2.2 릴레이 방법	-----	23

4장	자동동조 제어기 시제품	26
4.1절	FOXBORO EXACT™	26
4.1.1	제어기 설계 방식	26
4.1.2	사전 정보 및 초기동조	29
4.2절	SATT CONTROL INSTRUMENTS의 자동동조기	30
4.2.1	제어기 설계 방식	31
4.2.2	사전 정보	31
5장	결	33
	론	
		33
	참고문헌	35

표 목 차

표 1. 공정이득, 시정수 및 지연시간을 이용한 1/4 감쇄비 동조 공식	-	17
표 2. ITAE 기준에 의한 PID 파라메타의 동조 공식	-----	18
표 3. 한계이득과 한계주기에 의한 1/4 감쇄비 동조 공식	-----	22
표 4. 한계이득과 한계주기에 의한 변형된 1/4 감쇄비 동조 공식	---	22

그 림 목 차

그림 1. 1/4 감쇄비 응답	-----	10
그림 2. IAE의 도식적 해석	-----	12
그림 3. 자동동조 제어기의 블록 선도	-----	13
그림 4. 1차 시간지연 모델의 파라메타를 구하기 위한 공정반응곡선		15
그림 5. 계단응답 곡선에서의 두점 방법에 대한 도식적 이해	-----	16
그림 6. 계통의 Nyquist 곡선	-----	19
그림 7. 비례게환을 갖는 페루프 계통의 블록 다이어그램	-----	20
그림 8. 한계이득과 한계주기의 결정	-----	21
그림 9. 릴레이 방법에 따른 자동동조기의 블록 다이어그램	-----	23
그림 10. 릴레이를 가진 궤환회로의 제어신호와 출력	-----	24
그림 11. 계단 혹은 임펄스 입력에 의한 과도 오차 응답의 형태	-----	27
그림 12. EXACT™의 자동동조 알고리즘	-----	28

1장 서론

현대 제어이론의 눈부신 발전에도 불구하고 PID(Proportional Integral Derivative) 제어기는 공정과 모델계수의 불일치에 대한 강인성, 목표치의 추적, 외란효과 감쇄 등 제어계에 요구되는 제반 특성 면에서 우수한 기능을 보유하고 있기 때문에 산업현장에서 가장 널리 이용되고 있다. 그러나 PID 제어기가 갖는 중요한 문제점은 지연시간이 지배적인 공정일 경우, 운전중 공정환경이 변화할 경우, 운전원이 이득조정에 익숙하지 못할 경우 등에는 만족할 만한 제어성능을 얻을 수 없다.

산업공정에서 제어기 설치시 또는 플랜트의 특성변화가 일어났을 때, 제어기 기술자 또는 운전원이 주어진 공정의 동작조건 그리고 성능지수 (Performance Index)를 만족시키는 제어기의 적절한 이득 (Gain)값을 구해야만 한다. 이러한 작업을 일반적으로 동조 (Tuning)라고 하는데 동조에는 초기동조 (Initial Tuning 또는 Rough Tuning)와 정밀동조 (Fine Tuning)로 나누어 생각할 수 있다. 초기동조는 주어진 공정의 특성을 한번 파악하여 주어진 조건에 따라 대략적인 이득값을 정하는 것을 말하며, 정밀동조는 초기동조에 의해 구해진 이득값을 기본으로 하여 성능을 보다 개선하는 새로운 제어값을 구하는 작업을 말한다.

원자력 발전소 플랜트는 장기간의 운전에 의해 또는 원자로 출력을 달리 함에 따라 특성이 변경될 수 있다. 운전원은 성능개선을 위해 제어기의 이득을 재조정해야 하며 운전원은 운전을 통해서 얻은 데이터들을 이용하여 이득조정을 하게 된다. 그러나 이득조정시 데이터를 잘못 읽어 엉뚱한 이득값을 발생시킨다면 위험한 일이 일어날 수 있으며, 수동으로 동조작업을 행하기 때문에 기본적으로 많은 시간이 소요된다. 이와 같이 이득조정은 운전원

줄이고 보다 빨리 동조를 수행하여 성능을 쉽게 향상시킬 수 있도록 동조 작업을 개선할 필요가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 PID 파라메타를 자동으로 동조하는 자동 동조 알고리즘이 도입되었으며, 이에 대한 연구가 80년대 중반 이후부터 본격적으로 시작되었다⁽¹⁾.

그 중 한가지 방법은 입출력 정보를 이용하여 모델계수를 식별하고 이에 근거하여 PID 파라메타를 계산하는 방식으로 적응제어기법에 기초한 것이다⁽²⁾. 그러나 이 방법은 많은 사전정보가 요구되기 때문에 실질적인 현장 적용에 어려움이 있으며, 현재에는 다음의 두 가지 방법이 주로 사용되고 있다. 그 하나는 패턴인식에 근거한 기법이며,⁽³⁾⁽⁴⁾ 다른 한 종류는 Astrom등이 제안한 릴레이케한 기법이다⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾. 전자는 PID 제어를 공정에 연결한 상태에서 계단응답을 관찰하여 응답패턴에 따라 제어기 이득을 조정하는 숙련된 운전원의 이득동조 방법을 알고리즘화 한 것으로 Bristol로부터 시작되었다. 그러나 이러한 방식은 초기이득 결정이 타당한 경우에만 사용될 수 있으며, 이득동조 과정에서 부족제동의 경우에만 고려되었다는 단점을 내포하고 있다. 후자는 릴레이 제한루우프의 응답이 일정한 임계주파수로 진동을 한다는 사실에 착안하여 릴레이케한을 실행하여 임계값을 얻고 이 결과를 Ziegler-Nichols 동조법에 대입하여 PID 파라메타를 결정하는 방식이다. 이 방법은 릴레이 진폭의 크기 외에 아무런 사전정보도 요구하지 않으며 현실성이 우수하다는 좋은 장점을 갖고 있어 초기동조에 적합하나 운전 중에 외란이나 환경변화에 의한 공정계수의 변화는 릴레이 입력의 재도입에 의한 재동조를 요구하기 때문에 온라인 동조에는 적합하지 않으며 고도의 제어기능을 보장하지 못한다. 이 문제를 해결하는 한 방법은 매 순간 제어오차를 측정하여 그 크기와 형태를 분석하고 이를 교정할 수 있는 적절한 신호를 발생하는 것이다. 현재 국내에서도 이러한 기능을 Fuzzy 논리를 이용하여 실현하

고자 하는 연구가 진행되고 있다⁽⁹⁾.

본 보고서에서는 최근에 활발히 이루어지고 있는 자동동조기에 관한 연구 내용을 분석하여, 자동동조기를 구현하는 기본적인 기술들을 소개하고자 한다. 본 보고서는 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 제어기 조율시 일반적으로 널리 활용되고 있는 과도응답 평가 방법을 소개하였으며, 3장에서는 공정 동특성을 평가하고 PID 파라메타를 획득하는 방법들을 활용하여 자동동조기를 구현할 수 있음을 보여주고 있으며, 4장에서는 2장과 3장에서 소개한 내용들을 응용하여 시중에 판매되고 있는 자동동조기에 대하여 소개하고 있다.

2장 제어기 조율 방식

어떤 공정을 제어할 때에, 운전원이 원하는 과도응답이 나타나도록 PID 파라메타 값을 결정할 수 있다. 그러나, 최적의 과도응답을 주는 PID 파라메타 값을 얻기 위해서는 정확한 공정모델에 의한 복잡한 해석과정을 거치거나 시행착오법에 의해서 상당히 오랜 시간을 소요하여 PID 파라메타를 조율해야만 한다. 따라서 범용성이 인정된 다음과 같은 과도응답 특성을 얻을 수 있도록 제어기를 조율하고 있다.

2.1절 1/4 감쇄비응답 방식

일반적으로 제어기 조율을 위해서는 Cohen과 Coon이 개발한 1/4 감쇄비 응답(Quarter-Decay Ratio Response) 조율 방식을 많이 사용한다⁽¹⁰⁾. 그림 1에서 알 수 있듯이 응답파형은 1/4의 감쇄비를 가지면서 약간 진동한다.

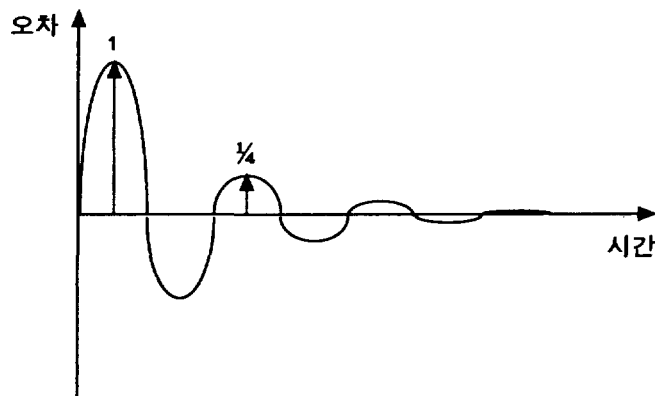


그림 1. 1/4 감쇄비응답

그러나 이 방법은 대부분의 제어계에 적절한 응답을 제공하지만 다음과 같은 몇 가지 단점을 갖고 있다⁽¹¹⁾⁽¹²⁾.

1. 1/4 감쇄비 응답을 낚는 비레이득, 적분시간 및 미분시간의 조합이 무한하다.
2. 운전원들은 1/4 감쇄비 응답을 대개 너무 진동이 심하다고 생각한다.
3. 이 방법은 페루프 응답의 첫 두 정점만을 고려한 것이다.

2.2절 최소적분오차 방식

1/4 감쇄비 조율 방식을 대체할 수 있는 다른 방법은 페루프 응답 전체를 반영하는 제어기 설계 관계식을 사용하는 것이다. 이에 따라 사용되는 성능 지표는 아래와 같다.

가. 오차의 절대값의 적분

(Integral of the Absolute Value of the Error : IAE)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

여기서, 오차신호 $e(t)$ 는 설정값과 측정값 사이의 차이이다.

그림 2는 IAE의 도식적 해석을 보여준다.

나. 오차제곱의 적분 (Integral of the Squared Error : ISE)

$$ISE = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt$$

다. 시간 가중 절대오차의 적분

(Integral of the Time-weighted Absolute Error : ITAE)

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt$$

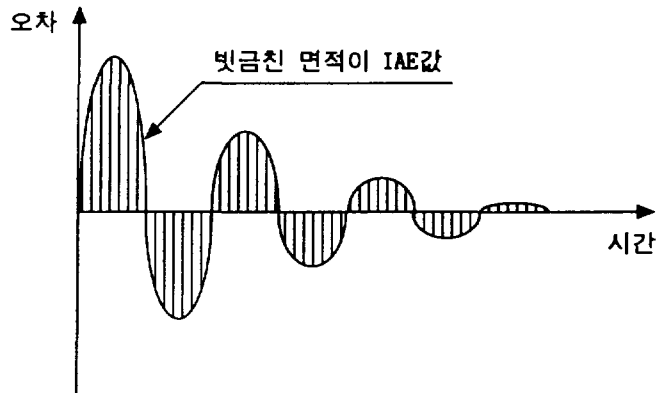


그림 2. IAE의 도식적 해석

PID 제어기의 설계관계식은 부하 혹은 설정값 변화에 대하여 적분오차 기준을 최소화하도록 개발된다. ISE 기준은 오차를 제곱한 값을 최소화하기 때문에, IAE 혹은 ITAE 기준과 비교할 때 큰 오차는 용납하지 않는 반면, 작은 오차에 대해서는 관대한 응답을 주는 제어기 파라메타를 제시할 것이다. 한편, ITAE 기준은 시간을 가중값으로 갖고 있으므로, 초기에 나타나는 오차에 대해서는 관대한 반면, 시간이 지나면서도 줄어들지 않는 오차는 용납하지 않는 성격을 갖는다. 일반적으로는 ITAE가 가장 보수적인 제어기 파라메타를 주며, 이 이유 때문에 가장 선호된다⁽¹²⁾.

3장 제어기의 자동동조

자동동조란 운전원의 지시에 따라서 시험신호를 생성하여 공정 동특성을 획득하고 제어기의 PID 파라메타를 계산하는 일련의 과정을 자동적으로 수행하는 것을 말한다. 페루프 혹은 개루프 상태에서 설정값이나 외란을 변화시키면 공정은 출력값을 발생한다. 이때 공정 입력과 출력값을 측정하여 공정 동특성을 평가한다. 얻어진 공정 동특성을 근거로 하여 공정 모델을 근사화하고 제어기의 새로운 PID 파라메타를 계산한 후, 기존의 PID 파라메타 값을 대체한다.

그림 3은 자동동조 기능을 가진 PID 제어기의 블록 선도를 보여준다.

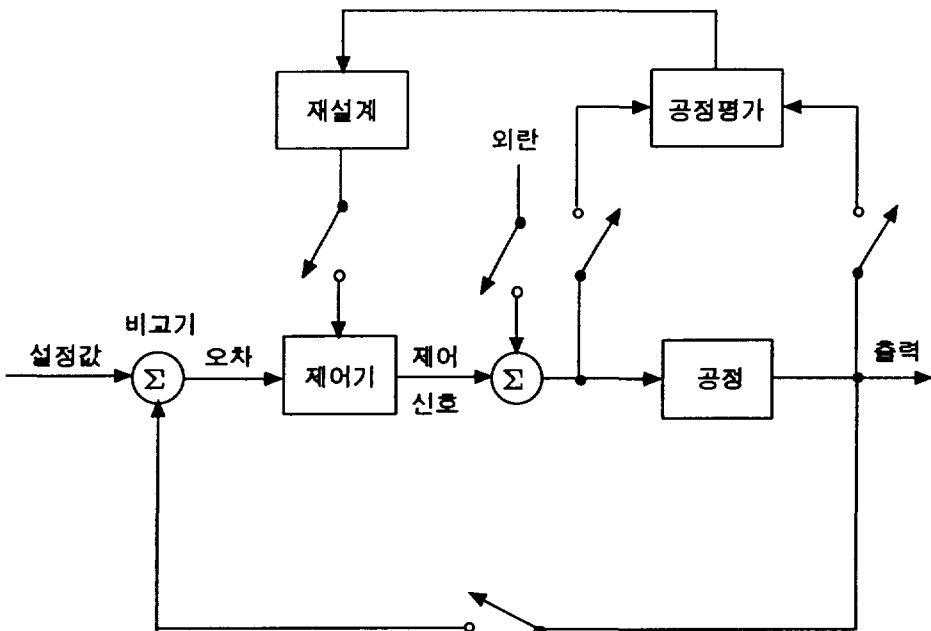


그림 3. 자동동조 제어기의 블록 선도

3.1절 과도응답을 근거로 한 방법

계단 혹은 펄스 입력을 인가하여 개루프 혹은 폐루프 과도응답 해석을 바탕으로 자동동조를 수행할 수 있다. 이 방법은 사전 지식이 거의 필요 없기 때문에 보다 세련된 동조기에서 초기동조 (Initial Tuning 또는 Rough Tuning)을 위해서 자주 사용한다. 과도응답 방법의 결점은 외란에 민감하다는 것이나, 단지 초기동조에서 사용하므로 별로 중요하지 않다.

계단응답으로부터 얻을 수 있는 파라메타에는 공정이득 (Process Gain), 시정수 (Time Constant) 그리고 지연시간 (Dead Time)이 있으며 제어기 파라메타를 계산하는 대부분의 방법들은 이들 세 가지 파라메타를 이용한다. 그것은 이들 세 가지 파라메타를 이용하여 대부분의 공정을 식(3-1)과 같은 1차 시간지연 모델로 근사화할 수 있기 때문이다.

$$G(s) = \frac{K_p e^{-t_d s}}{T_s s + 1} \quad (3-1)$$

3.1.1 접선 방법

계단응답이 시간에 따라 감소하지 않는 경우에는 다음과 같은 방법을 사용할 수 있다. 공정이득, 시정수 그리고 지연시간을 결정하는 방법으로 Ziegler와 Nichols는 그림 4와 같은 접선 (Tangent) 방법을 제안하였다⁽¹³⁾. 그림 4에 보인 것과 같은 공정의 계단응답을 식(3-1)의 1차 시간지연 모델에 맞추는 과정은 다음과 같다⁽¹⁴⁾.

1. 공정이득을 출력의 정상상태값의 변화량과 입력신호의 계단변화량의 비

로 계산한다.

- 계단응답곡선의 변곡점에서 접선을 구하고 이 접선이 시간 축과 만나는 값을 지연시간으로 취한다.
- 접선이 최종정상상태값과 만나는 시간이 $t = t_d + \tau$ 이며, 이 값으로부터 시정수 τ 를 결정한다.

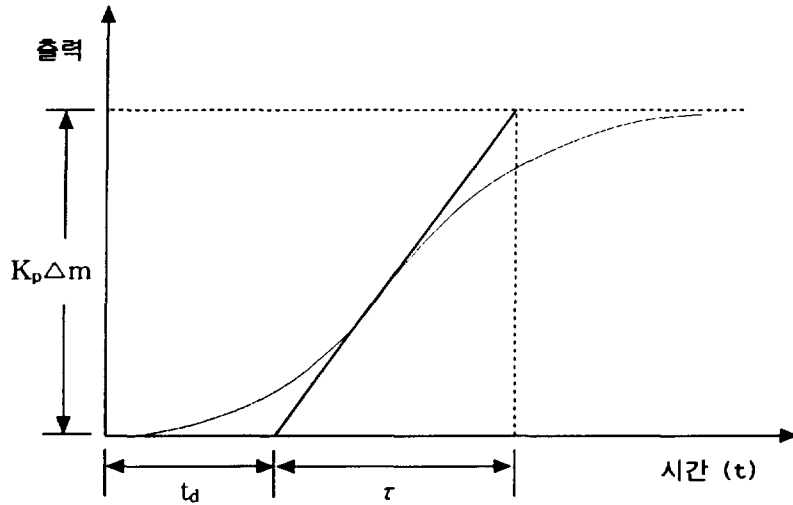


그림 4. 1차 시간지연 모델의 파라메타를 구하기 위한 공정반응곡선

그러나, 그림 4와 같이 변곡점에서 접선을 긋는 방법은 시정수를 계산하는데 너무 긴 소요시간이 소요될 수 있다. 또한 마이크로컴퓨터를 사용하는 자동 동조의 경우에는 문제가 되지 않지만, 측정값에 잡음이 있거나 기록기의 용지에 한 눈금의 범위가 너무 큰 경우 상당한 오차를 동반할 수 있다는 단점도 갖고 있다. 이러한 문제점을 피하기 위해서 접선을 필요로 하지 않는 전혀 새로운 방법이 제시되었다.

3.12 두점 방법

시정수 τ 와 지연시간 t_d 를 그림 5와 같은 두점 방법 (Two-point Method)에 의해 구할 수 있다⁽¹²⁾. 어떤 공정의 입력이 계단변화할 때, 출력의 변화가 최종값의 28.3% 및 63.2%에 도달하는 두개의 시간을 이용하여 시정수 τ 와 지연시간 t_d 를 아래와 같이 표현한다.

$$\tau = 1.5(t_2 - t_1) \quad (3-2)$$

$$t_d = t_2 - \tau \quad (3-3)$$

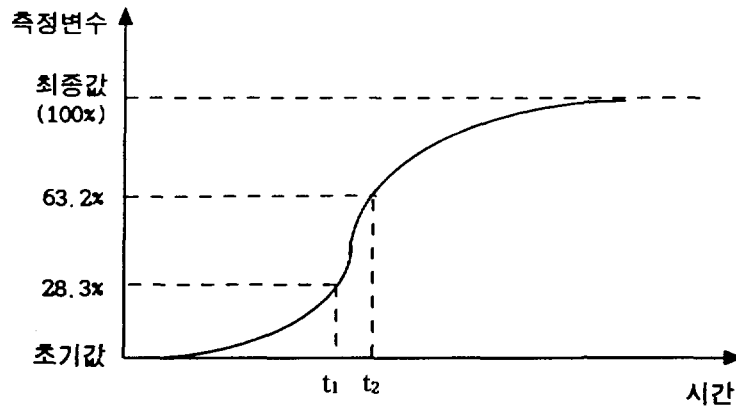


그림 5. 계단응답 곡선에서의 두점 방법에 대한 도식적 이해

위의 두점 방법과 비슷하게 Sundaresan과 Krishnaswamy는 공정응답이 최종값의 35.3%, 85.3%에 이르는 두 시점 t_1 , t_2 를 찾아 다음의 식을 이용하여 시정수 τ 와 지연시간 t_d 를 찾는 방법을 제안하였다⁽¹⁵⁾.

$$\tau = 0.67(t_1 - t_2) \quad (3-4)$$

$$t_d = 1.3t_1 - 0.29t_2 \quad (3-5)$$

이렇게 계산된 시정수와 지연시간은 최소자승법의 관점에서 출력측정값과 모델출력의 차이를 근사적으로 최소화하는 값이다⁽¹⁵⁾.

Ziegler와 Nichols는 공정이득 K_p , 시정수 τ 및 지연시간 t_d 를 이용하여, 1/4 감쇄비응답을 얻을 수 있도록 표 1과 같이 PID 제어기의 파라메타 값을 결정하는 공식을 제안하였다⁽¹³⁾.

표 1. 공정이득, 시정수 및 지연시간을 이용한 1/4 감쇄비 동조 공식

제어기	비레이득	적분시간	미분시간
P	$K_C = \frac{\tau}{K_p t_d}$	-	-
PI	$K_C = \frac{0.9\tau}{K_p t_d}$	$T_I = 3.33t_d$	-
PID	$K_C = \frac{1.5\tau}{K_p t_d}$	$T_I = 2.5t_d$	$T_D = 0.4t_d$

Lopez는 2.2절의 최소적분오차 방식에 따른 표 2와 같은 동조 공식을 제안하였다⁽¹⁶⁾. 표 2에서 P_U 는 지연시간과 시정수의 비로써 표현되는 제어불능(Uncontrollability) 파라메타이며 아래 식(3-6)과 같이 표현된다.

$$P_U = \frac{t_d}{\tau} \quad (3-6)$$

- 계단응답을 이용하여 PID 자동조기기를 구현하는 방법을 요약하면 아래와 같다. 계단의 크기와 지속시간을 사전에 설정하여야 한다. 이를 따라 나타는 응답이 관음 크기 이상으로 나타나다를 적절한 크기를 가져야 하나, 안정의 비선형성이 나타날 정도로 커서는 안된다. 안정이 안정할 때 계단입력응답을 증가하고 그 응답특성을 측정한다.
1. 먼저 계기를 수동운작성태로 하여 출력의 크기가 $K_p \Delta m$ 만큼 변화하도록 계단입력 Δm 을 증가한다.
 2. 계단입력을 인가한 순간부터 제어변수의 변화를 기록하여 고정반응곡선 응답을 얻는다.
 3. 고정반응곡선으로부터 안정이득 K_p , 시정수 τ 그리고 지연시간 t_d 를 변곡점 방법이나 두점 방법을 이용하여 계산한다.
 4. 표 1이나 표 2의 동작공식을 이용하여 제어기의 동작 파라메타를 계산하고 PID 파라메타를 개선한다.

제어기	비례이득, K_c	적분시간, T_i	미분시간, T_D
P	$\frac{K_p}{1.490} P^U_{-1.084}$	-	-
PI	$\frac{K_p}{0.859} P^U_{-0.977}$	$\frac{0.674}{\tau} P^U_{0.680}$	-
PID	$\frac{K_p}{1.357} P^U_{-0.947}$	$\frac{0.842}{\tau} P^U_{0.738}$	$0.381 \tau P^U_{0.995}$

표 2. ITAE 기준에 의한 PID 파라메타의 동작 공식

3.2절 주파수응답을 근거로 한 방법

어떤 선형시스템이 안정할 경우에, 입력이 사인파이면 출력도 어떤 과도 상태를 지난 후 사인파의 형태를 갖게 된다. 이 출력은 입력과 같은 주파수를 가지며 단지 진폭과 위상이 차이가 날 뿐이다. 이것은 입출력간의 관계를 이들의 진폭비 a 와 위상차 φ 로 나타낼 수 있다는 의미이다.

$G(i\omega) = a(\omega)e^{i\varphi(\omega)}$ 와 같은 복소함수로 표현하면 모든 주파수에 걸쳐서 진폭비와 위상차 즉, $a(\omega)$ 와 $\varphi(\omega)$ 를 쉽게 도식화할 수 있다. 여기에서, $G(i\omega)$ 를 계통의 주파수 응답함수라고 한다. $a(\omega) = |G(i\omega)|$ 는 진폭함수이고, $\varphi(\omega) = \arg(G(i\omega))$ 는 위상함수이다. 주파수 응답함수는 주파수가 $0 \sim \infty$ 사이에서 변함에 따라 그림 6과 같은 주파수 곡선을 그리게 되고 이를 Nyquist 곡선이라 한다.

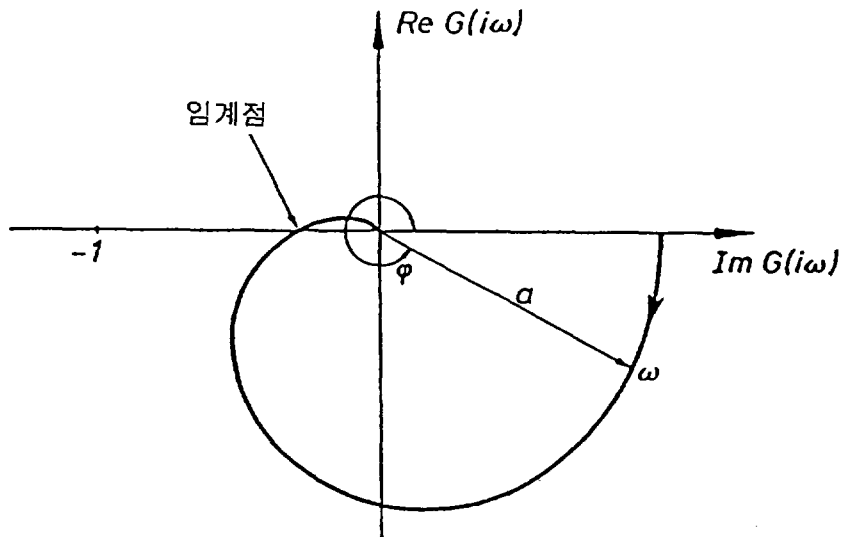


그림 6. 계통의 Nyquist 곡선

여러 가지 주파수들의 사인파를 계통에 인가하면 계통의 모델을 얻어낼 수 있다. 사실상 Nyquist 곡선의 일부만 알아도 계통모델을 얻을 수 있다. 특히 그림 6의 임계점에 해당하는 주파수 즉, 임계주파수 (Crossover Frequency, ω_c)를 얻으면 동조가 가능해진다. 이를 구하기 위한 방법으로는 3.2.1항의 연속진동법이나 3.2.2항의 릴레이 방법과 같은 것이 있다.

3.2.1 연속진동법

Ziegler-Nichols의 연속진동법 (Continuous Cycling)은 그림 7과 같은 비례회환회로에서 비례제어기의 이득을 충분히 크게 해 주면 대부분의 공정이 발진하게 된다는데 착안을 두고 있다⁽¹³⁾.

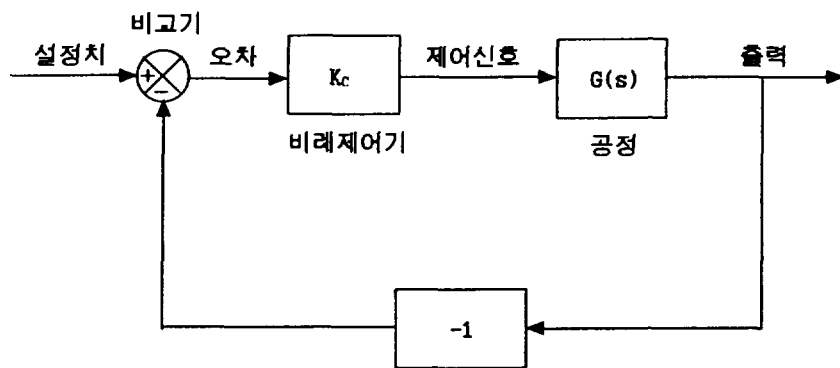


그림 7. 비례회환을 갖는 폐루프 계통의 블록 다이어그램

비례이득이 작을 때는 발진후 안정하게 되고, 비례이득이 지나치게 커지면 발진진폭이 점점 커져서 문제가 된다. 그러나 그림 8과 같이 발진진폭이

일정한 크기로 유지되는 비례이득이 존재할 것이며, 이를 한계이득 (Ultimate (Controller) Gain), K_{cu} 라고 부른다. 이때 루프의 전체이득은 발진을 유지하기 위해서 식(3-7)과 같이 1이 될 것이다.

$$K_{cu}G(i\omega_c) = 1 \quad (3-7)$$

$$G(i\omega_c) = \frac{1}{K_{cu}} \quad (3-8)$$

그림 8은 한계이득, K_{cu} 에 의해서 생성된 발진 모양과 한계주기 (Ultimate Period), T_u 를 보여준다.

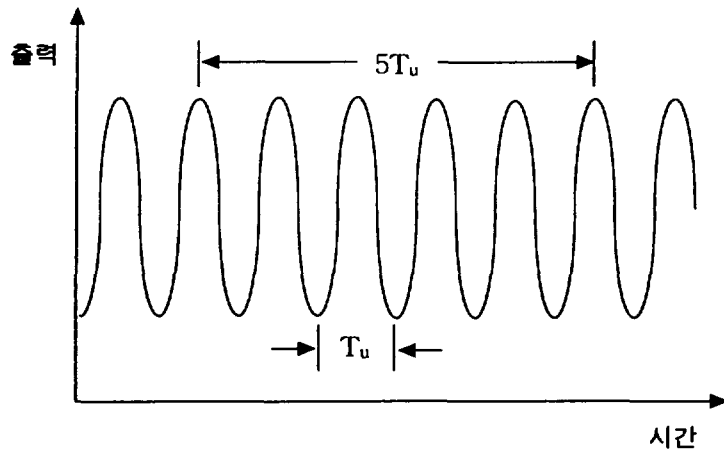


그림 8. 한계이득과 한계주기의 결정

이 방법은 공정 그 자체 이외의 다른 실험장비가 필요 없다는 장점이 있으나, 발진크기를 일정하게 유지하도록 실험을 수행하기가 어렵고 실제 산업계에서 불안정 근처까지 공정을 가져가야 하므로 위험한 방법이다. 자동동조를 위해 부적합하다 하겠다.

표 3은 한계이득과 한계주기에 의해서 1/4감쇄비 응답을 주는 PID 파라메타를 결정하는 공식으로서 Ziegler와 Nichols가 제안한 방법이다⁽¹³⁾.

표 3. 한계이득과 한계주기에 의한 1/4 감쇄비 동조 공식

제어기	비례 이득	적분 시간	미분 시간
P	$K_C = 0.5K_{cu}$	-	-
PI	$K_C = 0.45K_{cu}$	$T_I = \frac{T_u}{1.2}$	-
PID	$K_C = 0.6K_{cu}$	$T_I = \frac{T_u}{2}$	$T_D = \frac{T_u}{8}$

어떤 제어루프에 대해서는 2.1절에 나타낸바와 같이 1/4 감쇄비가 나타나는 진동정도와 설정값 변화시 나타나는 큰 오버슈트가 바람직하지 않은 것으로 평가된다. 따라서, 표 4의 변형된 Ziegler-Nichols 설정과 같은 더 보수적인 설정이 자주 선호된다⁽¹⁷⁾.

표 4. 한계이득과 한계주기에 의한 변형된 1/4 감쇄비 동조 공식

	비례 이득	적분 시간	미분 시간
Original	$K_C = 0.6K_{cu}$	$T_I = \frac{T_u}{2}$	$T_D = \frac{T_u}{8}$
Some Overshoot	$K_C = 0.33K_{cu}$	$T_I = \frac{T_u}{2}$	$T_D = \frac{T_u}{3}$
No Overshoot	$K_C = 0.2K_{cu}$	$T_I = \frac{T_u}{2}$	$T_D = \frac{T_u}{3}$

3.2.2 릴레이 방법

전통적인 주파수 응답 방법에서는 공정의 전달함수를 사인과 입력에 대한 정상응답 (Steady-state response)을 측정하여 결정한다. 이 방법의 어려움은 입력신호의 주파수를 결정해야 한다는 것이다. 입력신호의 적절한 주파수를 자동적으로 발생하는 방법은 일정한 진폭을 갖고 주기적인 발진이 있도록 릴레이 형태의 비선형 변환을 도입하는 것이다. 이상적인 릴레이라면, 그 방법이 공정의 입력신호가 될 때, 공정의 주기가 페루프 계통의 임계주파수 (Crossover Frequency)에 가까워진다.

그림 9는 릴레이 방법에 따른 자동동조기의 블록 다이어그램을 보여준다.

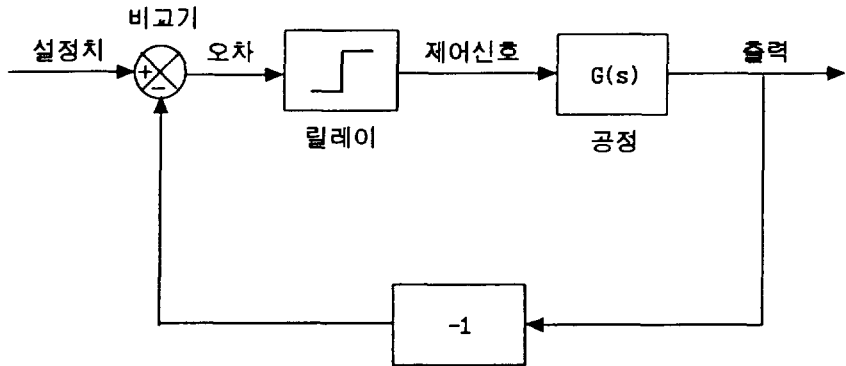


그림 9. 릴레이 방법에 따른 자동동조기의 블록 다이어그램

그림 9와 같이 릴레이를 연결하고 제어신호로 구형파를 발생하면 공정출력은 그림 10과 같이 발진한다. 공정의 입출력 위상차는 180° 이며, 발진크기는 릴레이 진폭에 비례한다.

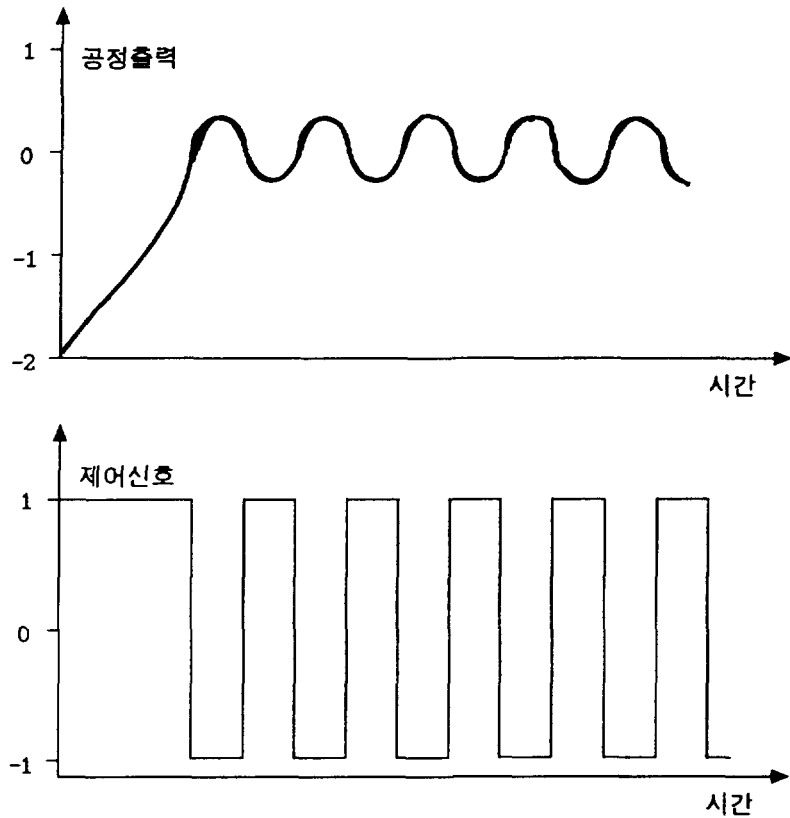


그림 10. 릴레이를 가진 케환회로의 제어신호와 출력

정상발진이 이루어질 때 발진 주기와 진폭을 결정한다. 이것으로부터 한계주기와 한계이득을 얻을 수 있다. 그리고 이 값으로부터 PID 제어기의 파라메타를 표 3이나 표4의 동조 공식을 사용하여 결정할 수 있다. 이 자동동조 방법은 사전에 값을 주어야 할 하나의 파라메타가 있다. 즉 릴레이 신호의 초기 크기이다. 릴레이 신호 진폭에 대한 공정의 발진 진폭을 측정하여 케환 루프의 출력이 발진동안 합당한 범위 내에 있는지를 알 수 있다. 또한 릴레이에 히스테리시스를 도입하는 것이 유용하다. 이것은 측정 잡음의 영향을 줄이고 발진 주기를 증가시킨다. 히스테리시스라는 부가적인 파라메타가 있으나 측정 잡음 크기에 따라 자동적으로 설정할 수 있다. 임계주파수

가 자동적으로 결정되면 시간 단위에 대해서는 알 필요가 없다.

이 방법에서는 공정의 시정수를 얻을 수는 없지만, 적절한 주파수를 갖는 발진이 자동적으로 발생한다. 그러므로 이 방법은 동조기로서 적합할 뿐만 아니라 계통의 시정수를 알아야 하는 다른 동조 방법에서 초기동조 단계로 사용할 수 있다. 또한 이 동조 방법은 Nyquist 곡선상의 몇 개 점을 찾기 위해서 응용할 수도 있다. 이것은 릴레이의 크기와 히스테리시스를 달리하여 몇 번의 실험을 수행하여 얻을 수 있다. 어떤 특성을 갖는 필터가 또한 루프에 도입되어 Nyquist 곡선상의 다른 점을 찾을 수 있다. 만약 두 점이 알려진다면 이에 근거하여 Dominant Pole 설계 방법이나 M_p -Circle 설계 방법을 활용할 수도 있다⁽⁵⁾.

4장 자동동조 제어기 시제품

4.1절 FOXBORO EXACT™

EXACT (EXpert Adaptive Controller Tuning) 자동동조기는 외란이 계단 혹은 짧은 펄스이며 공정이 안정 응답을 주는 제어기를 가진 페루프라는 가정 하에, 패턴인식을 이용하여 설정값 변화 혹은 외란 발생에 따른 페루프 계통의 과도응답을 평가한 후, Ziegler-Nichols⁽¹³⁾ 혹은 Shinskey⁽¹⁸⁾의 동조방법과 비슷한 방식을 근거로 하여 PID 파라메타를 자동으로 계산한다.

4.1.1 제어기 설계 방식

이 제품은 충분히 큰 오차를 갖는 과도상태를 발생시켜서 공정의 동적 특성을 결정한다. 제어기 파라메타가 적절하다면 그림 11과 같은 과도 오차 응답이 나타난다. 패턴인식을 통하여 그림 12와 같은 감지회로 (Heuristic logic)가 외란의 발생 여부를 감지하고 침투값 E_1 , E_2 , E_3 및 주기 T_p 를 감시한다. EXACT 패턴인식 방법은 공정의 수학적인 모델을 필요로 하지 않는다⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾. 다만, 제어기 설계는 감쇄비 (Damping Ratio) 그리고 오버슈트 (Overshoot)를 결정하는 것으로 충분하다.

감쇄비는 아래 식(4-1)과 같이 정의한다.

$$d = \frac{E_3 - E_2}{E_1 - E_2} \quad (4-1)$$

오버슈트는 아래 식(4-2)와 같이 정의한다.

$$z = \frac{E_2}{E_1} \quad (4-2)$$

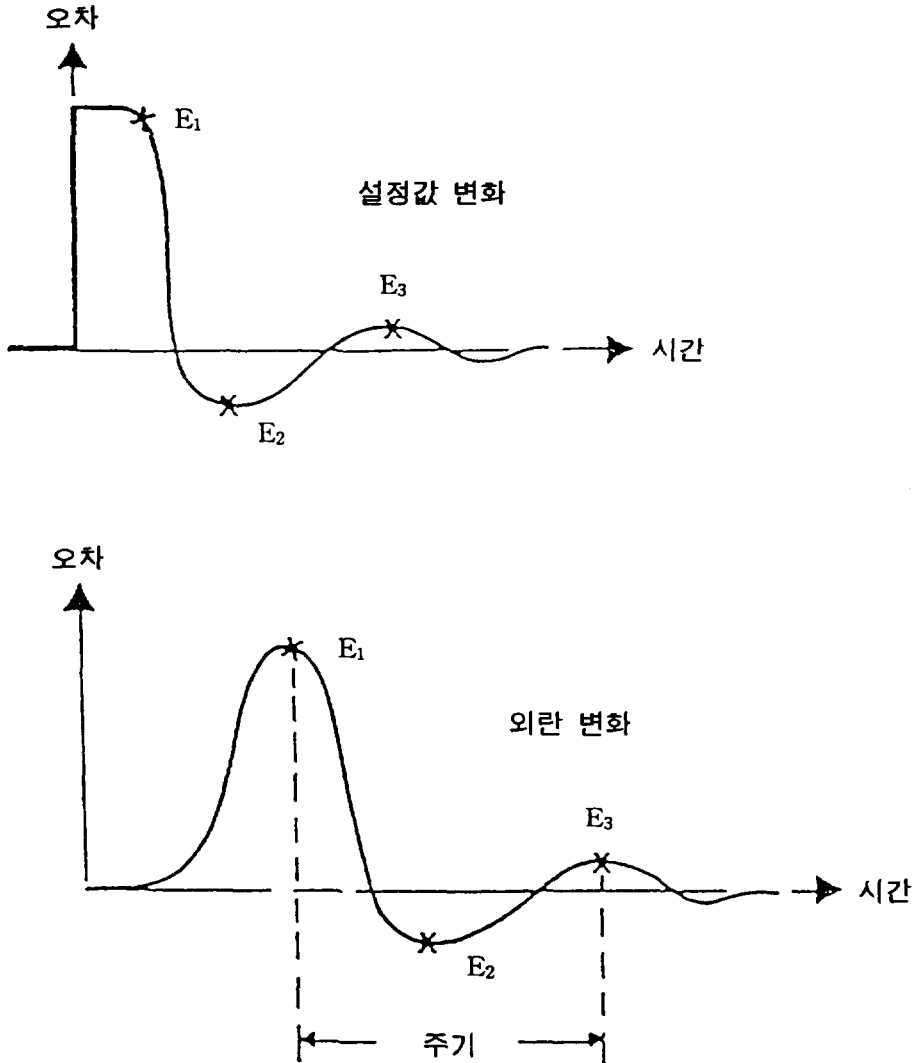
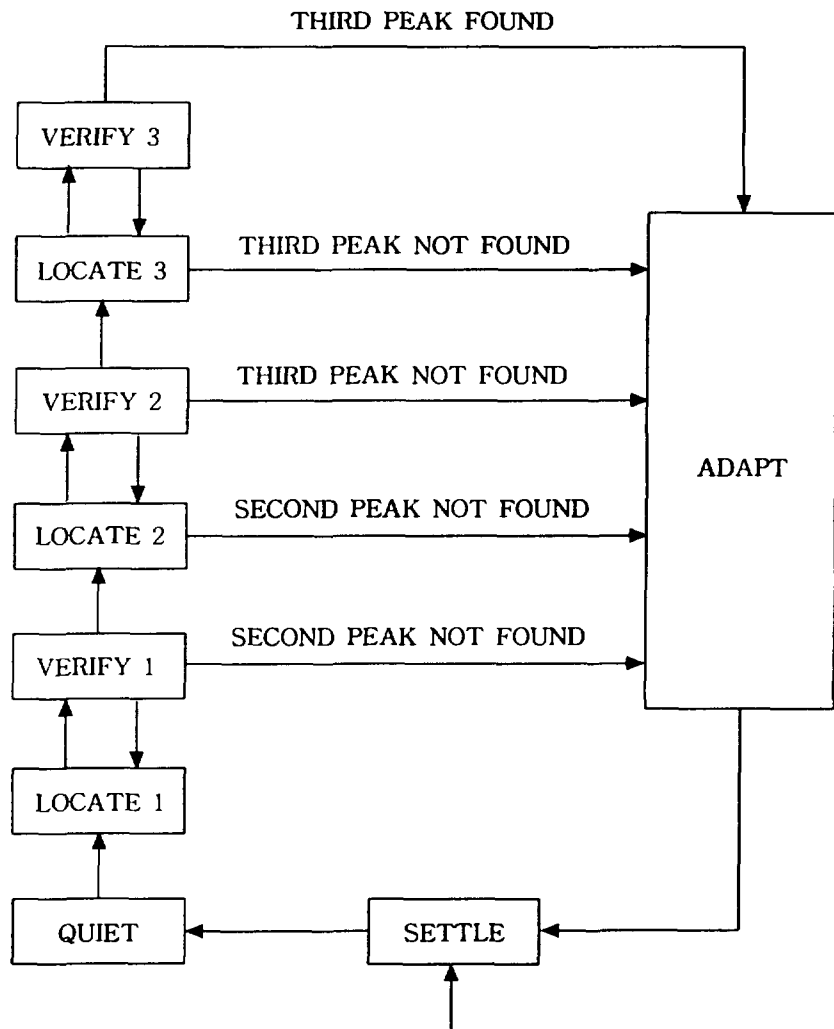


그림 11. 계단 혹은 임펄스 입력에 의한 과도 오차 응답의 형태



With Exact Configured and Implemented

그림 12. EXACT™ 의 자동동조 알고리즘

4.1.2 사전 정보 및 초기동조

동조 과정은 제어기 파라메타인 공정이득 K_p , 미분시간 T_i , 그리고 적분 시간 T_D 에 대한 사전 정보를 필요로 한다. 또한 그림 12의 감지회로가 두 번째 침투값을 기다리는 최대 허용 시간을 결정하여야 한다. 감지회로가 외란과 잡음을 구별할 수 있도록 잡음 크기를 측정하여야 한다. 감쇄비, 오버슈트, 제어기 파라메타의 변위를 선택하여야 한다.

제어기 파라메타를 초기화하기 위해서 초기동조 모드가 있다. 이 모드는 공정이 안정상태에 있을 때에만 유효하며, 다음과 같이 구동한다.

1. 운전원이 제어기를 수동 모드로 설정한다.
2. 운전원이 초기동조 모드를 구동하면 EXACT는 계단 입력신호를 발생한다. 이때 계단 크기는 공정 출력값의 변화량이 최소한 2.5%가 되도록 충분히 커야 한다.
3. EXACT는 3.1절과 비슷한 방법을 사용하여 지연시간과 시정수를 계단 응답으로부터 결정한다.
4. 표 1의 PID 파라메타 결정 공식과 마찬가지로 지연시간을 이용하여 적분 시간과 미분시간을 결정하며, 또한 이외에도 최대 대기시간 (Max. Wait Time)을 결정한다.
5. 제어기의 비례이득을 지연시간과 시정수로부터 결정한다.
6. 마지막으로 안정 상태에서 잡음 크기를 측정하여 결정한다.

4.2절 SATT CONTROL INSTRUMENTS의 자동동조기

Satt Control Instruments의 자동동조기는 3.2.2항의 릴레이 발진 방법을 이용하여 Nyquist 곡선상의 한 점을 평가하며, PID 파라메타를 결정하기 위하여 변형된 Ziegler-Nichols의 동조 공식을 사용하고 있다.

초기 릴레이 신호는 대부분의 공정제어에 응용하기에 적합한 값으로 미리 설정되어 있다. 그러나 이 값은 첫 번째 반주기 후에 자동으로 조정되어 발진 크기를 적절히 조절하게 될 것이므로 확정값이라고는 볼 수 없다. 히스테리시스 폭은 공정 잡음 크기를 근거로 하여 자동 설정된다. 릴레이 진폭은, 사전에 설정한 발진 진폭을 얻을 수 있도록 자동적으로 조절된다. 잡음 크기가 낮을수록 요구되는 측정 신호 크기도 작아지는데, 발진이 잡음 크기 이상으로 최소를 유지하도록 릴레이 진폭을 조절한다. 릴레이의 진폭과 주기 결정은 첨두값과 임계주파수에 달려 있다.

운전원에 의해서 수동으로 혹은 사전에 동조된 제어기에 의해서 자동으로 공정이 원하는 동작점에 안정된 후, 운전원이 동조 버튼을 누르면 자동동조기는 아래와 같이 동작한다.

1. 자동동조를 수행하는 동안에 PID 제어기를 일시적으로 차단한다.
2. 잡음 크기를 자동으로 측정하고, 히스테리시스를 갖는 릴레이를 공정에 도입한다. 이때, 릴레이의 히스테리시스를 잡음 크기에 따라서 자동으로 결정한다.
3. 히스테리시스를 갖는 릴레이는 공정을 발진시킨다. 발진 도중에 릴레이 진폭을 조절하여 원하는 발진 진폭을 얻어낸다. 일정한 진폭과 주기를 갖는 발진이 얻어질 때 릴레이 실험을 차단한다.

4. Nyquist 곡선상의 발진 주파수에 해당하는 점의 위치를 발진 진폭과 릴레이 특성으로부터 계산한다.
5. PID 파라메타를 결정하고 PID 제어를 구동한다.

4.2.1 제어기 설계 방식

Satt Control Instruments의 자동동조기는 제어기 설계를 변형된 Ziegler-Nichols 과정에 바탕을 두고 있다. 미분 동작이 필요한지를 결정하는데 매우 효과적인 시험 방법을 제공하고 있다. 실제로 미분 동작은 꽤 자주 사용되고 성능을 향상시키지만, 수위 제어와 같이 미분 시간을 사용하지 않는 예외도 있다. 또한, 이 자동동조기는 이득 조정 기능을 갖고 있다. 운전 조건을 특성 짓는 변수와 이에 상응하는 제어기 파라메타를 저장한 표를 제공한다. 이득 조정표를 이용하여 PID 파라메타 구성들 간의 이득 조정을 실행할 수 있으며, 이를 위해서 제어기 파라메타들 간의 자동 전환 설비를 제공한다.

4.2.2 사전 정보

다음은 운전원이 조정할 수 있는 선택 사양으로 사전에 설정해 주어야 하는 정보들이다.

1. 운전원의 제어기 설계 목표가 Satt Control Instruments 자동동조기에 미리 설정된 설계와 다를 수도 있다. 미리 설정된 방식을 따를 수도 있지

만, 이 자동동조기는 보다 빠른 응답이나 보다 느린 응답에 대한 선택을 주고 있으므로 운전원은 설계 목표를 사전에 설정해야 한다.

2. 동조로부터 얻어진 일부 정보, 즉 잡음크기, 초기 릴레이 크기, 발진 주기 등이 저장되어 다음 동조 시에 정확도를 개선하기 위해 사용된다. 만약 큰 변화가 제어 루프에서 발생한다면 운전원은 그때까지의 동조 정보들을 리셋할 수 있다.
3. 일부 민감한 루프에서는 릴레이 실험의 초기 입력 주기가 너무 클 수도 있다. 운전원은 초기 입력 크기를 결정할 수 있다.

5장 결 론

본 보고서에서는 PID 파라메타 조율시에 운전원에게 주어지는 과중한 부담을 줄이고 보다 신속한 동조를 수행하여 제어기 성능을 용이하게 향상시킬 수 있는 자동동조기에 대한 기술 현황을 조사하였다. 제어기의 조율시에 일반적으로 사용되고 있는 과도응답 평가 방법을 소개하였으며, 공정 동특성을 평가하고 PID 파라메타를 조율하는 실험적인 방법들을 기술하였다. 또한, 이러한 연구 결과들을 응용하여 시중에 판매되고 있는 자동동조기에 대하여 소개하였다.

PID 파라메타 조율시에 자동동조기를 활용한다면 다음과 같은 효과를 기대할 수 있을 것이다.

- 운전을 단순화함으로써 운전원의 부담을 줄일 수 있다.
- 공정 특성변화에 신속히 대처할 수 있다.
- 지연시간이 많은 공정일수록 동조 시간을 크게 줄여 준다.
- 미분 동작이 성능을 개선시키는 이점이 있음에도 불구하고 동조 문제점 때문에 수동으로 동조되는 계통에서는 미분동작을 배제하곤 한다. 그러나, 자동동조기는 PID 파라메타를 보다 정확히 동조함으로써 공정 경제성을 향상시킨다.
- 지연시간 보상을 갖는 복잡한 회로일수록 이점이 크다.
- PID 제어를 실현하는 방법을 다양화할 수 있다.
- 보다 세련된 제어를 손쉽게 구현할 수 있다.

폭 넓은 사전실험을 거치면서 80년대 중반 이후부터 본격적으로 도입된

PID 자동동조기는 수많은 산업현장에서 널리 활용되어 왔다. PID 자동동조기는 숙련된 계측제어 기술자가 없는 공장이나, 계측제어 기술자가 근무하지 않는 야간 운전시에 매우 유용했던 것으로 보고되고 있다. 특별히 제어기 파라메타에 대하여 이전 지식이 없는 새로운 공장의 시운전 (Commissioning)에 유용한 것으로 입증되고 있다. 즉, 자동동조기를 사용하여 시운전 시간을 크게 단축할 수 있었던 것이다.

오늘날 과학의 발전에 힘입어 스스로 판단하고 결정하는 자동 기계장치들이 여러 분야에서 등장하고 있다. 원자력 발전소에서도 보다 많은 자동화를 이룩해야 할 것이며, 위와 같은 장점들을 고려하여 자동동조기 적용을 신중히 검토해야 할 것이다. 차세대 원자력 발전소와 같이 DCS (Distributed Control System)이 적용될 경우에는 온라인으로 매개 변수의 값을 변경시킴으로써 비교적 간단하게 조정할 수 있기 때문에 자동동조 알고리즘이 개발될 경우, 동조 작업이 쉽게 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. K.J. Astrom, "Toward Intelligent Control: Keynote Speech the 1988 ACC," IEEE Control System Magazine, pp.60-64, April 1989.
2. G.A. Dumont, C. Zervos and P.R. Belanger, "Automatic Tuning of Industrial PID Controllers," ACC, Vol.1, pp.1573-1578, 1985.
3. E.H. Bristol, et al, "Adaptive Process Control by Pattern Recognition," Instrument and Control Systems, pp.101-105, March 1970.
4. E.H. Bristol, et al, "Pattern Recognition: an Alternative Parameter Identification in Adaptive Control," Automatica, Vol.1, pp.197-202, March 1977.
5. T. Hagglund and K.J. Astrom, "Automatic Tuning of PID Controllers Based on Dominant Pole Design," Proc. IFAC Conference on Adaptive Control of Chemical Process, Frankfurt, W. Germany, pp.205-210, 1985.
6. K.J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins," Automatica, Vol.20, No.5, pp.645-651, 1984.

7. Y. Nishikawa, N. Sannomiya, T. Otha and M. Dkudara, "A method for Auto-tuning of PID Control Parameters," *Automatica*, Vol.20, No.3, pp.321-332,1984.
8. K.J. Astrom, et all, "Expert Control," *Automatica*, Vol.22, No.3, pp.277-286, 1986.
9. 이창구, 김성중, "Fuzzy논리를 이용한 온라인 자기동조 PID 제어기 개발," *전기학회논문지*, Vol.43, No.11, pp.1938-1945, 1994.
10. G.H. Cohen and G.A. Coon, "Theoretical Considerations of Retarded Control", *Trans. ASME* 75, 827 (1953).
11. Dale E. Seborg, Thomas F. Edgar, Duncan A. Mellichamp, "Process Dynamics and Control", John Wiley & Sons, 1989.
12. Armando B. Corripio, "Tuning of Industrial Control Systems", Instrument Society of America, 1990.
13. J.G. Ziegler and N.B. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers", *Transactions ASME*, Nov. 1942.
14. T.F. Edgar and D.M. Himmelbau, "Optimization of Chemical Processes, McGraw-Hill, New York, 1988.

15. K.R. Sundaresan and P.R. Krishnaswamy, Estimation of time delay, time constant parameters in time, frequency, and Laplace domains, *Can.J. Chem. Eng.*, 56, 257 (1977).
16. A.M. Lopez, P.W. Murrill and C.L. Smith, "Controller Tuning Relationships Based on Integral Performance Criteria", *Instrumentation Technology*, V.14, Nov. 1967.
17. R.H. Perry and C.H. Chilton, "Chemical Engineers' Handbook", 5th Edition, McGraw-Hill, New York, 1973.
18. F.G. Shinskey, *Process Control Systems*, McGraw-Hill, NY, NY, 2nd Edition, 1979.
19. C.E. Rohrs, L. Valavani, M. Athans and G. Stein, "Robustness of Adaptive Control Algorithms in the Presence of Unmodeled Dynamics", MIT Industrial Liaison Program, Publication No. 01-016, 1983.
20. M. Fjeld and R.G. Wilhelm, " Self-Tuning Regulators - The Software Way", *Control Engineering*, October 1981.
21. D.W. Clarke, "The Application of Self-Tuning Control", *Trans Inst MC Vol.5. No.2*, April - June 1983.

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관	보고서번호	표준보고서번호	INIS주제코드	
KAERI/AR-442/96					
제목/부제 PID 파라메타의 자동동조 기술 현황					
연구책임자 및 부서명		한 재 복(계측계통분야)			
연구자 및 부서명		이 윤희, 하 재홍, 신 해곤, 김 동완, 남 상구			
발행지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행일	1996. 06
페이지	37	도표	유(0) 무()	크기	4x6 배판
참고사항					
비밀여부	공개(0)	비공개()	보고서종류	연구보고서	
연구위탁기관		계약번호			
초록(300자 내외)					
<p>공정 제어 분야에서 PID 제어기 조율을 자동적으로 수행하는 자동동조기에 대한 연구가 80년대 중반 이후부터 활발하게 진행되어 왔다. 본 보고서에서는 자동동조 알고리즘의 기본적인 기술들을 소개하고 있다. 제어기의 조율시에 일반적으로 사용되고 있는 과도응답 평가 방법을 소개하였으며, 공정 동특성을 평가하고 PID 파라메타를 조율하는 실험적인 방법들을 기술하였다. 또한, 이러한 연구 결과들을 응용한, 시중에 판매되고 있는 자동동조기에 대하여 소개하였다.</p>					
주제명 키워드 자동동조, PID					

BIBLIOGRAPH INFORMATION					
Performing ORG. Report No.		Sponsoring ORG. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject No.
KAERI/AR-442/96					
Title/Subtitle A Survey on the Autotuning of PID Parameter					
Project Manager and Dept.		Jae Bok Han (Instrumentation Systems)			
Researcher and Dept.		Yoon-Hee Lee, Jae-Hong Ha, Hae-Gon Shin, Dong-Wan Kim, Sang-Koo Nam			
Pub. Place	Taejeon	Pub. ORG.	KAERI	Pub. date	1996. 06
Page	37	Fig. & Tab.	Yes(0) No()	Size	4x6
Note					
Classified	Open(0), Outside(), ___Class			Report Type	Research Report
Sponsoring ORG.		Contract No.			
Abstract (about 300 word)					
<p>In the area of process control, extensive research has been carried out for PID parameter auto-tuning techniques since the middle of 1980's. This paper covers two auto-tuning techniques namely system transient response performance and experimental method to analyze dynamic characteristics of process systems. In this paper auto-tuning technology used in commercial models is analyzed in detail.</p>					
Subject Keyword Autotuning, PID					