

감독기능에 의한 제어기의 견실성 향상에 관한 연구

이 창 구^o 김 성 중

한국전자통신연구소 산업기술개발부
전북대학교 공과대학 제어계측공학과

A Study on the Improvement of Robustness of the Controller by the Supervision Functions

Chang-Goo Lee Sung-Joong Kim

Dept. of Industrial Technology Development, ETRI
Dept. of Control and Instrumentation Eng., Jeonbuk University

ABSTRACT

In this paper, we present a supervision and coordination level monitoring the adaptive controller and taking appropriate actions if malfunctions are detected. Supervision and coordination level are consist of start-up part and run-time part. The start-up part involves tasks for the configuration and the implementation of controllers, and the run-time part involves tasks for the supervision and coordination of the controllers in closed-loop operation. Also, we show how a supervision level and a coordination level can be designed and what basic elements should be included. Finally, we show the robustness of this scheme by experimental results for task model.

1. 서 론

적용제어기는 지난 20여년동안 제어공학을 연구하는 사람들의 주된 관심분야였다. 공정의 동특성이 대부분 완벽하게 알려지지 않고 시간에 따라 변화하기 때문에 적용제어기에 대한 관심이 증대되어 왔으며, 매우 다양한 연구결과들이 제시되었다.¹⁾ 그러나, 제시된 대부분의 기법들은 시스템의 차수, 지연시간, 계수의 초기치 및 한계치 등에 대한 임의의 가정에 기초한 것이며, 실제의 제어상황은 이와같은 가정과는 다른 경우가 많이 발생하여 적용제어기는 때때로 불안정한 제어성능을 나타내고 산업 현장에 급속히 보급되지 않고있다.²⁾⁻³⁾

이와같은 문제점을 해결하기 위하여 최근 건설한 적용제어기 개발에 관한 연구가 집중되고 있으며 초기 결과들이 발표되고 있다.⁴⁾ 적용제어기의 견실성을 향상시키기 위한 한가지 방법으로 기존의 적용제어층 위에 감독자층을 추가하여 적용제어기의 다양한 기능을 감시하고 필요한 조치를 취해 좋은 제어성능을 유지토록 한다. 이러한 방법의 첫번째 시도는 Bergmann, Isermann, Clarke와 Gawthrop 등에 의하여 연구되었다.⁵⁾⁻⁶⁾

본 논문에서는 감독자층의 구성방법과 어떠한 기능들이 감독자층에 포함되어야 하는가를 보여주고자 한다. 먼저 적용제어기의 기본 구조와 감독자층이 갖추어야 할 기능들을 제시하고 감독자층을 구현한다. 또한 실험을 통하여 구성된 감독자층의 동작을 보이고 그 우수성을 증명하였다.

2. 감독층을 갖는 적용제어기

감독층을 갖는 적용제어기는 그림 1과 같은 구조를 지니며, 제 1층은 일반적인 디지털 제어루우프이고 제 2층은 계수추정법과 제어기설계법으로 나뉘어 구성하였다. 제 3층은 감독층으로 계수추정과 제어기설계를 감독하는 기능을 수행하며, 제 4층은 계수추정의 on-off, 적절한 제어기 선정, 초기운전 모드 of 수행 등에 관한 기능을 탑재하였다.

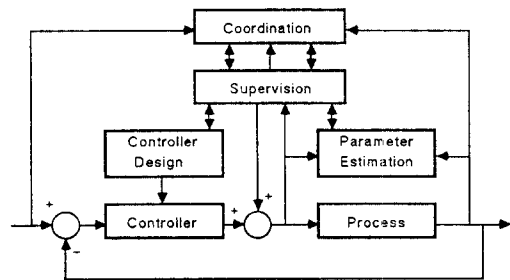


그림 1. 감독층을 갖는 적용제어기의 구조
Fig. 1. Structure of the adaptive controller with supervision level

1) 공정모델

공정은 선형과 비선형, 연속과 불연속 모델로 표현하며, 적용제어기를 설계하기 이전에 가장 적합한 공정모델의 선정을 위한 공정정보가 모아져야 한다. 일반적으로 산업공정은 1차, 1차지연, 2차, 2차지연 시스템으로 모델화할 수 있으며, 2차지연 시스템을 대표적으로 이용하였다.

2) 계수추정

공정의 동특성을 추정하기 위하여 본 연구에서는 릴레이 동조실험과 함께 견실성이 증명되어 널리 이용되고 있는 반복 최소자승법을 도입하였으며, 산업공정이 대부분 느리게 변화하는 시스템을 고려하여 망각인수(forgetting factor) λ 가 가변되는 기법을 채택하였다.

3) 제어기 설계

추정된 공정모델에 따라 각각 다른 제어기와 설계기법을 이용하였다. 본 연구에서는 다양한 공정에서 좋은 제어성능을 발휘하는 일반 예측제어기 (Generalized Predictive Control)와 PID (Proportional Integral Derivative)제어기를 이용하였으며, 극점배치나 수치적인 최적화와 같은 설계기법들을 포함한다.

4) 감독과 조정(supervision and coordination)

감독층과 조정층은 다음과 같은 기능을 내장하여 감독층에서 전체 제어시스템의 불안정 또는 각 단계의 제어기설계 과정을 감시하고 조정층에서 적절한 조치를 취하여 좋은 제어성능을 유지하도록 한다.

㉔ 감독층의 기능

- 계수추정의 감시기능
- 공정모델의 불일치 판단기능
- 제어기설계의 감시기능
- 전체 제어시스템의 안정도 감시기능
- 경보 및 응급복구 기능

㉕ 조정층의 기능

- Start-up 과정의 수행
- 계수추정의 수행과 중단 결정
- 최적의 제어기 설계기법 선정
- 최적의 동조계수 결정과 변경
- 제어기 선정,수행과 중단

3. 감독층과 조정층의 구현

감독층과 조정층을 설계하는 데에는 여러가지 방법이 가능하며, 이들 층은 계수추정과 제어기설계를 감독할 수 있는 요소들을 포함하여야 한다. 이러한 기능은 대부분 제어신호, 성능지수, 특별한 Matrix 등의 분석에 의하여 구성되며, 실험 또는 경험적 지식에 의한 제한값을 요구한다. 따라서 이러한 접근법은 한정적이 되어 다양한 공정에 적용할 수 없다. 본 논문에서는 이러한 단점을 개선하고자 공정유형에 의존하지 않고 범용적으로 적용할 수 있는 기능을 제안하고 구현하고자 한다.

감독층과 조정층의 주된 목적은 적응제어기의 성공적인 초기제어를 보장하는 일이다. 이론적인 전제조건들이 일치하지 아니할때 발생하는 제어불능 상태를 감지하고 임의의 조치를 취하기 위해 감독층과 조정층을 초기제어와 온라인제어에 관한 기능으로 나누어 설계하였다. 초기제어모드일 때는 적응제어기의 구성과 설계를 위한 다음과 같은 기능을 감독 및 조정층에서 수행하여야 한다.

- 릴레이제어에 의한 적응제어 설계변수 추정
- 사용할 공정모델의 선정

- 선정된 공정모델의 평가

- Backup 제어기로 이용할 제어알고리즘의 선정과 설계

온라인제어모드일 때는 감독 및 조정층에서 다음과 같은 기능을 수행한다.

- 입출력신호 분석
- 공정모델 불일치의 감지
- 불일치의 원인 감지
- 페루우프 제어의 안정도 감시
- 온라인으로 작동할 적응제어기의 설계
- 제어성능이 저하될때 switching

이러한 기능과 역할들은 현장운전자의 경험과 제어전문가의 지식으로 구현된 지식기반시스템에 의하여 운영되는 것이 효율적이다.

3.1. 초기제어 부분

초기제어 기간에는 공정의 입출력신호가 한정영역안에서 변화하도록 하고, 적응제어기 설계에 필요한 사전정보의 제공과 backup제어기 설계기능을 수행하여 제어기의 견실성 향상은 물론 우수한 제어성능을 유지하도록 한다. 이들은 그림 2와 같은 scheduler에 의하여 수행한다.

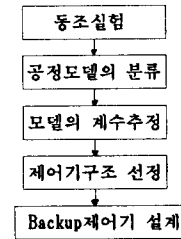


그림 2. 초기제어 과정의 흐름도
Fig. 2. Flow chart of the start-up procedure

1) 동조실험

릴레이제어에 의하여 인위적으로 공정의 출력이 발진하도록 하고, Nyquist선도상의 -180^0 과 -90^0 에서의 임계이득(ultimate gain, k_c)과 임계주기(ultimate period, t_c)를 구한다. 또한, 릴레이신호가 반전된후 출력이 최고점에 도달하는 시간(τ)를 측정하여 적응제어기 설계를 위한 사전정보로 이용한다.

- o 샘플링주기 : $h = t_c/10\pi \sim 3t_c/10\pi$
- o 지연시간 : $L = \tau$

2) 공정모델의 분류

릴레이 동조실험에서 취득한 정보를 이용하여 다음과 같은 규칙에 의거 공정을 1차($K/(1+sT)$), 1차지연($K \cdot e^{-ds}/(1+sT)$), 2차($K/(1+a_1s+a_2s^2)$) 시스템으로 분류하고, 고차시스템은 1차지연시스템에 포함한다.

㉔ If $\tau < 0.8t_c/4$
Then 1차시스템이다.

㉕ If $\tau > 0.8t_c/4$
Then 1차지연 시스템이다.

- ㉑ If $(|G(j\omega_{.90})| = |G(j\omega_{.180})|)$ and $(\omega_{.180} = 2\omega_{.90})$
Then 1차지연 시스템이다.
- ㉒ If $\omega_{.180} = 2\omega_{.90}$
Then 1차지연 시스템이다.
- ㉓ If 모델 fitting값이 세점에서 근접된 값
Then 1차지연 시스템이다.
- ㉔ Else 2차시스템이다.

3) 모델계수의 추정

앞서 분류된 공정의 계수를 추정하는 방법은 분류된 모델의 차수와 규칙에 따라 각각 다르며 그 내용은 다음과 같다.

㉑ 만약 공정이 1차시스템으로 분류되었다면 식(1)과 (2)를 이용하여 플랜트계수 T와 K를 구한다.

$$\arg G(j\omega_c) = -\pi/2 - 2\pi\tau/t_c \quad (1)$$

단, ω_c 는 임계주파수

$$|G(j\omega_c)| = 1/k_c = \pi a/4d \quad (2)$$

㉒ 공정모델이 1차지연시스템으로 분류되었을 경우 어떠한 규칙에 의하여 선정되었느냐에 따라 모델계수를 결정하는 방법도 다르다. 규칙㉑에 의하여 1차지연 시스템으로 선정되었다면 -90° 점에서 정보, 규칙㉑,㉒에 의하여 선정되었으면 -180° 점에서의 정보, 규칙㉑에 의하여 선정되었으면 각점에서의 평균값으로 구한다.

㉓ 모델이 2차시스템으로 분류되었으면 계수는 -180° 점에서의 정보를 이용하여 구한다. 이들 각 정보는 릴레이 동조실험에 의한 임계값을 식(3),(4)에 대입하여 취득한다.

$$K = G(0) \\ |G(j\omega_{-180})| = K/\sqrt{1+(\omega_{-180}T)^2} \\ \arg G(j\omega_{-180}) = -\arctan(\omega_{-180}T - \omega_{-180}L) \quad (3)$$

$$K = G(0) \\ |G(j\omega_{-90})| = K/\sqrt{1+(\omega_{-90}T)^2} \\ \arg G(j\omega_{-90}) = -\arctan(\omega_{-90}T - \omega_{-90}L) \quad (4)$$

4) Backup제어기의 구조선정과 설계

선택된 모델에 따라 여러가지 다른 설계법에 의하여 최종 제어기를 설계한다. PID 제어기는 1차 릴레이실험에 의한 정보 (즉, 임계이득, 임계주기)를 이용하여 Astrom과 Hagglund에 의하여 제시된 위상이득과 여유법으로 설계한다. 그러나 이러한 설계는 단지 기본적인 제어기를 형성하는데 사용하며, 만약 최종모델이 1차지연시스템이고 $L > 1.5T$ 이면, 제어기는 불연속 극배치기법으로 제어기를 설계한다. 이 때에 샘플링주기는 $L/4$, 두 극점은 0.2로 정한다. 만약 최종모델이 2차시스템이면 다음과 같은 특성방정식을 갖는 PID제어기가 설계된다.

$$(s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2)(s + \omega_0) = 0 \quad (5)$$

단, 본 논문에서는 ξ 는 0.707, ω_0 는 PID제어기의 비례제어항 K_p 값에 따라 결정되도록 하였다.

3.2 온라인제어 부분

1) 제어시스템의 안정도 판별

식(6)과 같은 저대역통과 필터를 이용하여 제어시스템의 안정여부를 판별한다.

$$\hat{e}(k) = \sum_{i=1}^{N-N_0} |e(k-i)| / (N-N_0) \quad (6)$$

식(6)은 발진과 비발진 신호를 균일하게 다루고 잡음의 효과를 감소시키는 역할을 한다. 여기에서 N_0 는 N 보다 작은 정수값으로 N 개의 샘플값중 최대, 최소값들의 제거수를 나타낸다. 필터된 값 $\hat{e}(k)$ 은 두 threshold값 w_1 , w_2 와 비교하여 제어시스템이 안정한가 또는 불안정한가를 판별하는데 이용한다.

2) 적응제어기 설계

적응제어기는 식(7)로 표현된 비용함수를 최소로 하는 GPC제어기를 이용하며, 이 제어기는 설계변수만 적절히 선정되면 좋은 성능을 발휘한다.

$$J = \sum_{j=1}^{N_p} (w(t+j) - y(t+j))^2 + \sum_{j=1}^{N_u} u(t+j)^2 \quad (7)$$

본 논문에서는 GPC제어기의 설계변수 N_p 와 N_u 는 default로 10, 1로 정하였으며, 다만 N_p 는 항상 L/h 보다 크도록 정한다. λ 는 GPC설계에 있어서 가장 민감한 설계변수이며, 여러 실험결과 지연시간이 없는 1차시스템에는 0으로 하였을 때 좋은 특성을 나타내나 이외의 모든 다른 플랜트에는 불안정한 제어결과를 보여주었다. 이외 보편적인 선정을 위하여 본 논문에서는 릴레이동조실험에 의한 임계값과의 관계를 실험하여 $\lambda = t_c/k_c$ 로 하였을 때 보편적으로 좋은 제어결과를 얻었다. 이를 좀더 세분화하여 규칙화하면 다음과 같다.

$$\lambda = t_c/k_c \\ \text{If } \lambda < k_c \\ \text{Then } \lambda = 0.8 * t_c/k_c \\ \text{Else } \lambda = 1.2 * t_c/k_c$$

4. 실험 및 결과

4.1. 1차지연 시스템에 대한 동작

시뮬레이션 대상 플랜트로 $G(s) = e^{-5s}/(1+10s)$ 를 선정하였다. 1차 릴레이 동조실험의 응답곡선을 분석한 결과 $\tau > 0.07 * t_c$ 이므로 플랜트는 고차 시스템이나 2차 시스템으로 분류되고, 다시 적분기를 삽입한 2차 릴레이 동조실험을 수행하여 다음과 같은 정보를 취득한다. 취득된 정보는 본 논문에서 제시된 규칙에 의하여 정확한 모델을 구분하고 backup 제어기 설계에 이용된다.

Nyquist선도상의 3점에서 취득된 정보

	0점	-90°점	-180°점
추정주파수	0	0.123	0.251
추정이득	1.02	0.508	0.420
추정위상	0	-2.186	-2.826

모델계수에 대한 Nyquist선상에서의 추정값

	0점	-90°점	-180°점
K	1.002	1.221	1.031
T	11.231	14.805	14.112
L	5	9	6

최종적으로 선정된 모델은 규칙④에 의하여 1차지연 시스템으로 분류되었다. 추정된 모델의 계수는 1차 릴레이 동조실험에 의한 정보를 이용하여 정하였으며 $G(s) = 1.031 \cdot e^{-6s} / (1 + 14.1s)$ 이다. 최종적으로 설계된 backup 제어기는 선정된 규칙에 따라 고이득 PI 제어기로 설계되었으며, $K_p=1.03$, $T_i=20.11$ 이다. 그림 3은 이와같이 설계된 제어기에 의한 응답곡선으로 견실한 특성을 보였다.

4.2. 2차 시스템에 대한 동작

시물레이션 대상 플랜트로 $G(s) = 1 / (1 + 10s)^2$ 를 선정하였다. 1차 릴레이 동조실험의 응답곡선을 분석한 결과 $\tau > 0.07 \cdot t_c$ 이므로 플랜트는 고차 시스템이나 2차 시스템으로 분류되고 다시 적분기를 삽입한 2차 릴레이 동조실험을 수행하여 다음과 같은 정보를 취득한다.

Nyquist선도상의 3점에서 취득된 정보

	0점	-90°점	-180°점
추정주파수	0	0.094	0.179
추정이득	1.09	5.240	0.219
추정위상	0	-2.662	-2.288

모델계수에 대한 Nyquist선상에서의 추정값

	0점	-90°점	-180°점
K	1.092	0.882	0.962
T	10.132	14.902	26.902
L	5	18	5

최종적으로 선정된 모델은 규칙④에 의하여 2차 시스템으로 분류되었다. 추정된 모델의 계수는 1차 릴레이 동조실험에 의한 정보와 안정상태에서의 정보를 이용하여 정하였으며 $G(s) = 0.987 / (1 + 12.5s)^2$ 이다. 최종적으로 설계된 backup 제어기는 선정된 규칙에 따라 극배치 PID 제어기로 설계되었으며, $K_p=3.06$, $T_i=17.50$, $T_d=1.78$ 이다. 그림 4는 이와같이 설계된 제어기에 의한 응답곡선으로 견실한 특성을 보였다.

4.3. 감속제어기의 운영

본 절에서는 앞서 제시된 릴레이 동조실험, 모델의 분류와 backup 제어기 설계기능, 경험지식기반 적응제어기의 기능, 불안정상태 감시기능과 제어모드 전환기능 등을 포함한 전체 제어시스템의 운전을 시물레이션하고자 한다. 이를 위하여 플랜트 모델로는 산업공정을 대표할 수 있는 2차지연 시스템인 $G(s) = e^{-5s} / (1 + 5s)(1 + 7.5s)$ 로 선정하였으며, 제어환경으로는 5%의 잡음을 인가하였다. 그림 5는 잡음이 없는 상황에서 제어기를 인가한 경우의 응답곡선으로써 운전초기에는 플랜트의 동특성 분류와 backup 제어기 설계모드가 동작되고 이후 적응제어모드가 동작된다. 운전중 불안정 감시자가 계속 동작되나 이 예제에서는 불

안정 상태가 감지되지 않았다.

그림 6은 비최소위상 시스템에 구현된 제어기가 동작하였을 경우의 응답곡선으로써 자동 동조기능의 완벽한 동작과 backup 제어기 설계가 이루어 졌고, 사전정보를 이용한 적응제어기능도 견실한 결과를 보여주었다. 감속기능을 시험하기 위하여 인위적으로 초기극면에서 응답크기의 20%에 해당하는 잡음을 인가하여 불안정한 상태로 접어들게 하면 감속중에서 이를 감지하여 backup 제어기인 PID 제어기로 제어동작모드를 전환하여 견실한 제어성능을 유지하도록 하였다.

5. 결론

본 논문에서는 현장엔지니어에게 익숙해 있는 PID제어기에 운전자와 제어전문가의 경험지식을 이용하여 감속층을 형성하고 전체 제어시스템의 견실성을 향상시킴으로써 산업현장에서 널리 이용되도록 하였다. 즉, 제시된 방법은 구조가 간단하고 현장에서 널리 이용되고 있는 PID제어기에 현장운전자의 경험이 병합되므로써 감속과 조정층이 운전자의 역할을 대신하여 안전장치 기능은 물론 최적의 제어기설계기능 등을 보유하여 산업현장에서 널리 이용할 수 있는 전형적인 모델이 되리라 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) Astrom, K. J., "Theory and Application of Adaptive Control - A Survey", Automatica, Vol. 19, No. 5, pp.471-487, Sept. 1983.
- 2) T. F. Edgar, "Current Problems in Process Control", IEEE Control Systems Magazine, April 1987.
- 3) Wittenmark, B. and Astrom, K. J., "Practical Issues in the Implementation of Self-tuning Control", Automatica, Vol. 20, No. 5, pp. 595-605, 1984.
- 4) R. Ortega and Y. Tang, "Robustness of Adaptive Controllers - a Survey", Automatica, Vol. 25, No. 5, pp.651-677, 1989.
- 5) Isermann, R. and Lachmann, K. H., "Parameter-Adaptive Control with Configuration Aids and Supervision Function", Automatica, Vol. 21, pp. 625-638, 1985.
- 6) Gawthrop, P., "Robust Stability of a Continuous Time Self-tuning Controller", Int. J. Adaptive Control Signal Processing, Vol. 31, No. 1, pp. 31-48, 1987.

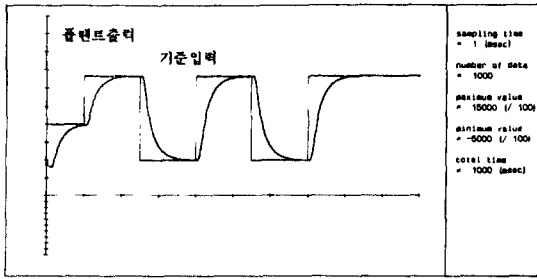


그림 3. Backup제어기에 의한 1차지연 시스템의 응답곡선
 Fig. 3. Response curve of the 1st order long delay model by backup controller

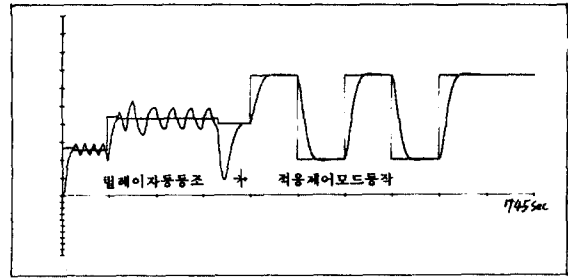


그림 5. 감독제어기에 의한 2차지연 시스템의 응답곡선
 Fig. 5. Response curve of the 2nd order delay model by supervisor controller

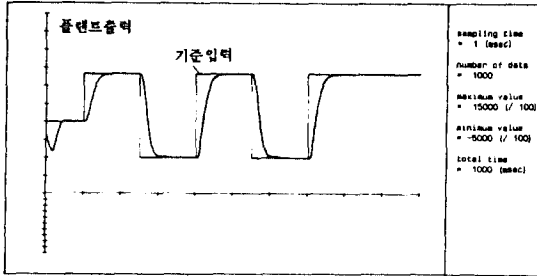


그림 4. Backup제어기에 의한 2차 시스템의 응답곡선
 Fig. 4. Response curve of the 2nd order model by backup controller

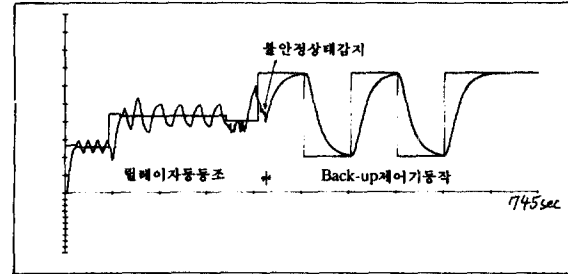


그림 6. 감독제어기에 의한 비최소위상 시스템의 응답곡선
 (20%크기의 잡음 포함)
 Fig. 6. Response curve of the non-minimum phase model by supervisor controller (including noise with 20% magnitude)