

고장진단을 위한 PI제어기간 직결합 루프시스템의 응답특성에 대한 연구

최순만* · 두현욱*

(원고접수일 : 2007년 7월 6일, 심사완료일 : 2007년 7월 30일)

A Study on the Properties of Loop System Configured by Coupling 2 PI Controllers for Fault Diagnosis

Soon-Man Choi* · Hyun-Wook Doo*

Abstract : When 2 sets of PID controllers are coupled directly each other to configure a closed control loop on behalf of coupling a controller and a plant, the behaviors of this exclusive loop system are expected to be unique in inherent system responses. If its properties be disclosed and generalized well in advance, it is possible for us to use the results for the purpose of fault detection and performance monitoring between control stations from the stage of system design, particularly in such cases as cascade control systems. In this paper, general properties of the proposed system are analyzed firstly to check whether it is controllable and how its steady responses would be. To simplify calculation, the analysis has been performed based on the transfer equation derived from a modelled case which consists of 2 PI controllers and signal converters between them, including time delay element and first-lag element to consider the situation of signal transmission. The results acquired from simulation are suggested to show how it works actually.

Key words : Fault Diagnosis(고장진단), PID controllers(PID제어기), Cascade Control(카스케이드제어), Fault Detection(고장탐지)

I. 서 론

제어시스템의 요구성능이 높아짐에 따라 각종 형태의 결합제어가 산업현장에서 보편화되고 있고 또한 해당 시스템의 성능감시와 고장탐지방면에서도 다양한 개념이 도입되고 있다^{[1]-[3]}. 고장상황이 발견되어 고장부위를 구분 탐색하는 과정에는 시스템을 구성하는 각 부위별로 정상 및 고장여부를 단계

적으로 구별하기 위한 분석 알고리즘이 필요하며 고장부위의 범위를 좁혀감으로서 고장지점을 최종 탐색해 내는 고장분석의 기법에 있어서도 여러 형태의 연구들이 진행되어 왔다^{[4]-[7]}.

이와 관련하여 본 논문에서는 일반적인 PID제어기를 이용하여 구축되는 다단의 카스케이드제어 시스템에서 고장분석을 위한 제어기 직결의 루프특성을 살펴보기로 한다. 계통에 이상이 발생한 경우

* 교신저자(한국해양수산연수원), E-mail: mindmind@chol.com, Tel: 051)620-5769

* 한국해양수산연수원

제어대상과 조작기 및 검출기를 제외한 상태에서 제어기만을 직결한 단축된 제어루프의 응답결과를 통해 고장상황의 부위를 1차적으로 구분하게 된다 면 고장범위를 조기에 확인하는 것이 가능해진다. 즉, 제어기의 직렬 제어루프에서 예정된 응답특성을 미리 알고 있는 것이 전제된다면 진단시의 응답결과를 비교 분석함으로써 적어도 축소된 제어루프의 정상여부를 판단할 수 있다.

제안된 방법은 제어기간 페루프 구성이므로 제어 대상에 영향을 주지 않고 진단할 수 있을 뿐 아니라 제어기 자체의 특성과 이상여부는 물론 인터페이스 계통과 선로 계통의 고장 여부를 동시에 점검하는 것이 가능하다는 점에서 특히 제어 위치간의 거리가 먼 경우 경제적인 점검수단이 된다.

PID제어기만의 직렬합 특성을 기초로 하는 경우 계통의 모델링이 간단하고 제어파라미터를 가변 조정할 수 있어서 진단을 위한 시험신호의 인가 및 적절한 동특성의 부여가 비교적 쉽게 된다.

본 논문에서는 제어루프에 데이터 전송의 경로가 있을 것을 고려하여 시스템에 시간지연 요소를 포함하였으며 PID제어기를 PI제어로 사용하는 튜닝 조건에서 직렬 제어루프가 갖는 기초특성을 해석하였다. 이것에 의해 분석결과가 시스템의 고장진단에 유용할 수 있는지에 대해 고찰하고 또한 결과적으로 나타나는 시스템의 응답특성을 시뮬레이션을 통해 스텝응답으로 확인하도록 한다.

2. 장치의 기본구성

Fig. 1은 1단으로 이루어진 카스케이드제어계의

한 예로서 선택 스위치는 평상시 RM(Running Mode)으로 운전되다가 고장분석의 경우에는 스위치 전환에 의해 CM(Check Mode)으로 돌려지게 된다. 이것으로 마스터제어기와 슬레이브제어기는 고장진단의 목적으로 직결되고 축소된 제어루프가 형성된다. R, C는 전체 계통의 설정신호 및 제어량을 나타내고 D는 제어대상에 대한 외란신호이다. 센서(1)과 센서(2)는 각각 마스터 및 슬레이브 제어기를 위한 피드백 신호를 보내며 CM으로 전환되는 경우 일시 차단되고 있다.

동일한 종류의 PID제어기들로 제어루프를 구성하는 경우 이들간의 결합은 비교적 단순해지겠으나 제어기와 신호의 형태가 서로 다를 때에는 중간에 신호의 변환과정이 별도로 필요하다. 따라서 모델링을 위한 계통의 블록구성은 다양한 방식으로 조합될 수 있으며 이들을 근사적으로 일반화하는 것이 가능하다.

Fig. 2는 마스터제어기가 디지털 PID제어기이고 슬레이브제어기가 공기압식 PID제어기인 카스케이드제어계에서 제어기간 직렬의 구성예를 나타내며 각각의 상하 제어기를 제어기1 및 제어기2로 구분하기로 한다. 제어기간 직렬제어루프의 구성을 위해 제어기2의 출력은 조작기 및 제어대상으로 연결되는 대신 제어기1로 피드백되고 있는 상태이다. 여기에서 R_1 은 입력신호, Y는 출력신호이며 제어기2의 설정신호 R_2 는 외란신호를 인가하기 위한 용도로 표시되었다. 단, Fig. 2에서 제어기1의 비례 동작은 정방향인 것에 대해 제어기2인 공기압식 PID제어기의 비례대는 역방향 동작으로의 선택이 필요하다.

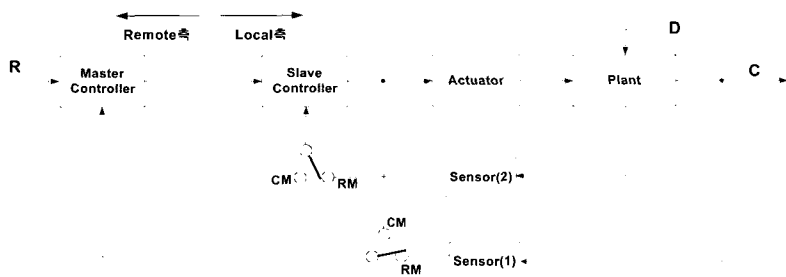


Fig. 1 Example of cascade control system

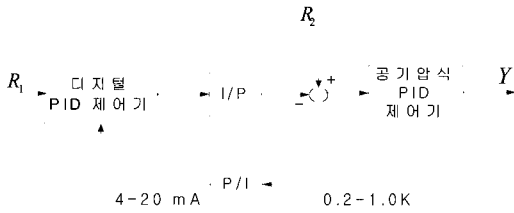


Fig. 2 Configuration of a proposed system

I/P 및 P/I는 각각 전류-공기압 및 공기압-전류 신호의 변환기를 나타낸다.

3. 시스템 특성

3.1 시스템모델링

양 제어기와 연결선로의 특성을 포함하여 Fig. 2의 PI제어기 직결에 의한 제어루프를 Fig. 3과 같이 모델링하였다. 해석의 간략화를 위해 PI제어만으로 동작하도록 각 PID제어기의 미분시간은 미리 최소로 튜닝하여 D동작이 무시될 수 있는 조건으로 한다.

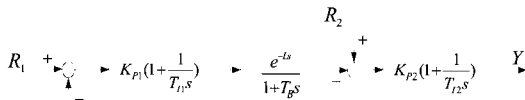


Fig. 3 Modelling of the proposed system

K_{P1} , T_I 과 K_{P2} , T_2 은 제어기1과 제어기2의 비례계수, 적분시간을 나타내고 T_B 는 에어버퍼의 시정수이다. K_{P1} 와 K_{P2} 는 $K_{P1}K_{P2} < 0$ 의 관계이고 L 과 T_B 는 연결선로에서의 시간지연 및 시정수이다. Fig. 3에서 R_1, Y 와 R_2, Y 간의 페루프전달함수 $F_1(s)$, $F_2(s)$ 는 (1), (2)와 같다.

$$F_1(s) = \frac{K_P(s^2 + \frac{T_P}{T_I}s + \frac{1}{T_I})e^{-Ls}}{T_B s^3 + s^2 + K_P(s^2 + \frac{T_P}{T_I}s + \frac{1}{T_I})e^{-Ls}} \quad (1)$$

$$F_2(s) = \frac{\frac{K_{P2}}{T_2} s (T_2 s + 1) (T_B s + 1)}{T_B s^3 + s^2 + K_P(s^2 + \frac{T_P}{T_I}s + \frac{1}{T_I})e^{-Ls}} \quad (2)$$

단, $K_P = |K_{P1}K_{P2}|$, $T_I = T_{I1}T_{I2}$, $T_P = T_{P1} + T_{P2}$ 이다.

3.2 가제어성

(1)에 대응하는 상태방정식을 제어표준형으로 나타내면

$$\dot{x}(t) = A_0 x(t) + A_1 x(t-L) + B r_1(t) \quad (3)$$

$$y(t) = C_1 x(t) + C_2 x(t-L) + D r_1(t) \quad (4)$$

$$A_0 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_B} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_P}{T_I T_B} & -\frac{K_P T_P}{T_I T_B} & -\frac{K_P}{T_B} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$B = (0 \quad 0 \quad \frac{1}{T_I T_B})^T \quad (7)$$

이다. 여기에서

$$\text{rank} [sI - A_0 - A_1 e^{-Ls} \quad B] = 3 \quad (8)$$

이므로 Fig. 3의 시스템은 가제어이다.

3.3 정상특성

Fig. 3의 R_1 에 스텝신호로 입력크기 r_1 을 인가하는 경우 (9)에 의해 동일한 값으로 정상상태에서 수렴하게 되고 또한 (10)으로부터 R_2 에 주어지는 외란크기 r_2 는 소멸되어 정상값은 제로가 됨을 알 수 있다.

$$Y = \lim_{s \rightarrow 0} s F_1(s) \frac{r_1}{s} = r_1 \quad (9)$$

$$Y = \lim_{s \rightarrow 0} s F_2(s) \frac{r_2}{s} = 0 \quad (10)$$

3.4 교환특성

전달함수 (2)는 Fig. 3의 양 PI제어기의 물리적 위치를 교환하는 경우에도 동일한 결과가 된다. 따라서 양 제어기는 직결조건에서 서로에 대해 대칭적인 응답특성을 갖는다.

4. 시뮬레이션 분석결과

4.1 스텝응답

Fig. 3 계통이 나타내는 특성을 스텝응답을 통해 확인한다. 관련된 파라미터의 개수가 다수여서 각 경우의 결과를 모두 나타내기가 곤란하므로 시스템의 고장상태를 점검하는 목적에서 적절한 감쇠에 의해 입력값을 추종하는 특성을 보이는지의 여부를 확인하는 것에 주된 관심을 두도록 한다. 먼저 제어기1의 게인조정으로 적절한 응답이 얻어질 수 있는지를 확인하기 위해 $K_{P2}=2$, $T_{I1}=10s$, $T_{I2}=10s$, $T_B=0s$, $L=0.1s$ 로 일정하게 유지한 조건에서 K_{P1} 의 조정만으로 감쇠도에 변화를 주었다. K_{P1} 의 변화에 대한 동특성 결과를 시뮬레이션으로 확인하면 Fig. 4와 같으며 시간축상 5초의 시점에서 0%에서 50%로 주어진 스텝입력신호에 대해 얻어진 응답결과를 곡선 (A), (B), (C)로 나타내고 있다. 각각의 파라미터 설정은 Table 1과 같다.

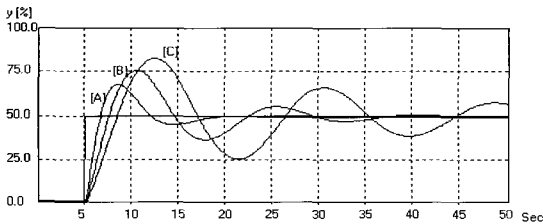


Fig. 4 The results of step responses

Table 1 Parameters at each step response

	R_1 [%]	R_2 [%]	K_{P1}	T_{I1} [s]	K_{P2}	T_{I2} [s]	L [s]	T_B [s]
A	50	0	10	10	2	10	0.1	0
B	50	0	5	10	2	10	0.1	0
C	50	0	3	10	2	10	0.1	0

$K_{P1}=10$ 일 때인 곡선(A)의 응답도가 가장 양호하게 나타난다. K_{P1} 과 K_{P2} 의 곱인 K_P 가 작아짐에 따라 부족감쇠로 되어 보다 맥동적이 되며 동시에 오버슈트와 감쇠맥동의 주기가 커지고 있다.

곡선(A),(B),(C)는 모두 정상응답이 스텝입력값에 수렴하고 있음을 나타내는 한편 제어기 한 곳에서 주어지는 게인조정으로도 다양한 감쇠특성이 얻어진다는 것을 알 수 있다. 또한 시간지연에 따른 계통의 응답을 확인하기 위해 동일한 조건에서 L값에 변화를 주었다. Fig. 5와 Fig. 6 각각은 시간지연이 0.5s 및 1.0s로 주어졌을 때의 응답결과이다.

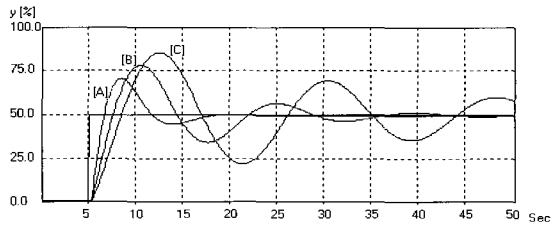


Fig. 5 Step responses at L=0.5s

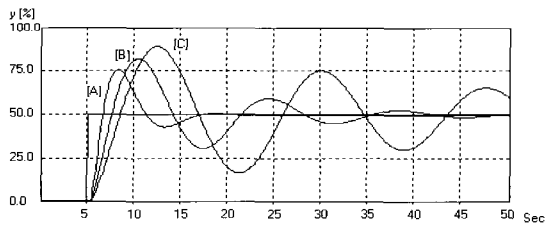


Fig. 6 Step responses at L=1.0s

Fig. 5와 Fig. 6에 의한 결과로부터 시간지연의 크기가 증가함에 따라 제어기 직결 시스템의 특성은 감쇠도가 조금 감소함을 보이고 있으며 전체적인 응답 형태에 큰 변화를 가져오지는 않는다는 것을 알 수 있다.

또한 K_{P1} 과 K_{P2} 및 T_{I1} 과 T_{I2} 를 서로 교환하는 경우에도 입력 R_1 에 대한 응답특성은 동일하게 나타나며 이것으로 제어기1의 제어파라미터와 제어기2의 제어파라미터간에 교환특성이 확인된다. Fig. 7은 R_2 에 의해 주어진 외란신호(곡선 D)의 변화에 대해 나타나는 응답(곡선 E)을 보인 것이

다. 시간축 15초 시점에서 10%이던 외란이 20%로 증가하였을 때의 결과로서 외란의 영향은 시간이 지남에 따라 소멸되고 있다.

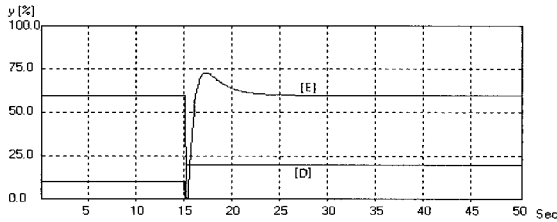


Fig. 7 Response to a disturbance change
($K_{P1}=5$, $T_{I1}=10s$, $K_{P2}=10$, $T_{I2}=10$, $L=0.1s$, $T_B=0s$)

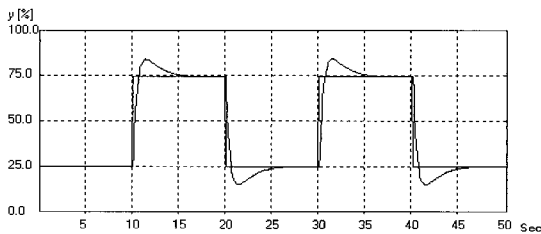


Fig. 8 Response to a test signal of pulse trace
($R_2=0[\%]$, $K_{P1}=30$, $T_{I1}=10s$, $K_{P2}=2$, $T_{I2}=10$, $L=0.1s$, $T_B=0s$)

Fig. 8은 설정신호를 펄스열의 형태로 인가한 경우 직결계통이 나타내는 출력단에서의 응답결과이다.

Fig. 8의 결과를 통해 점검을 위해 인가되는 펄스열의 시험 입력신호에 대한 피드백신호의 추종특성이 잘 확인되고 있으며 이를 통해 직결된 양 제어기와 신호선로의 연결상태와 제어기들의 동작이 정상적임을 판단할 수 있다.

V. 결 론

PID제어기에 의한 결합제어계에서 제어기들을 직결하는 방식으로 제어루프를 구성하는 경우 나타나는 일반적인 기초특성을 PI제어로의 직결조건에서 해석하였다. 연결선로에서 나타날 수 있는 1차 지연 및 시간지연 특성을 포함하여 제시된 계통의 가제어성을 확인한 후 모델링을 통해 입력신호에 대한 추종특성을 알 수 있었다.

또한 시뮬레이션으로 계통의 응답을 시간영역에서 확인하였다. 응답곡선에서 마스터측 제어기의 게인조정에 의한 감쇠도의 변화를 비교하였으며 시간지연의 증가시 나타나는 영향을 조사하였다. 이 결과 계의 출력은 제어 파라미터값을 적정히 부여함에 따라 다양한 안정도로 입력신호에 수렴함을 알 수 있었다. 또한 펄스열의 입력에 대해 나타나는 피드백신호를 확인하였으며 주어진 입력신호에 이러한 피드백신호가 추종하는지의 여부 및 추종특성을 통해 계통 및 신호선로의 이상여부를 진단할 수 있었다. 따라서 계통에 대한 모의점검 목적으로 직결 계통의 특성이 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] M. Sampath, R. Senguptaq, S. Lafortune, K. Sinnamohideen and T.C. Demosthemis, "Fault Diagnosis using Discrete-Event Models", IEEE Trans. On Control Systems Technology, Vol.4, No.2, pp. 105-124, 1996.
- [2] Gabor Karsai, Gautam Biswas, Tal Pasternak and Sriram Narasimhan, "Fault-Adaptive Control: A CBS Application", IEEE International Conference on ECBS, pp. 205, 2001
- [3] M. Sampath, S. Lafortune and D. Teneketzis, "Active Diagnosis of Discrete-Event Systems", IEEE Trans. On Automatic Control, Vol.43, No.7, pp. 908-929, 1998.
- [4] Sriram Narasimhan, Feng Zhao, Gautam Biswas and Elmer Hung, "Fault isolation in hybrid systems combining model based diagnosis and signal processing", In Proc. 4th IFAC Symp. SafeProcess, pp. 1074-1079, 2000.
- [5] H. E. Rauch, "Intelligent fault diagnosis and control reconfiguration",

- IEEE Control Systems Magazine, Vol.14, No.3, pp. 6-12, 1994.
- [6] R. J. Patton, J. Chen and S. B. Nielsen, "Model-Based Methods for Fault Diagnosis", Trans. of Institute of Measurement and Control, Vol.17, NO.2, pp. 73-76, 1995.
- [7] M. Blanke, R. Izadi-Zamanabadi and T. F. Lootsma, "Fault monitoring and re-configurable control for a ship propulsion plant", Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Vol.12, No.8, pp. 671-688, 1998.
- [8] M. Sampath, R. Sengupta, S. Lafortune, K. Sinnamohideen, and D. Teneketzis, "Failure diagnosis using discrete-event models", IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol.4, No.2, pp. 105-124, 1980.

저 자 소 개



최순만(崔淳萬)

1955년 3월 30일생. 1977년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1990년 동 대학원 석사, 1995년 동 대학원 박사, 현재 한국해양수산연수원 교수



두현욱(杜鉉旭)

1974년 3월생, 1997년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 2005년 세계해사대학 졸업(석사), 현재 한국해양수산연수원 전임강사 관심분야 : 해양환경 및 주기 관 제어분야