

## 가스엔진 열병합시스템의 온도제어에 관한 실험적 연구

장상준·유재석\*·방효선\*\*·한정옥\*\*

대우중공업(주) 가스선사업부, \*아주대학교 기계공학과, \*\*한국가스공사 연구개발원

### An Experimental Study on the Temperature Control for a Gas Engine Cogeneration System

Chang Sang Chun, Yoo Jai Suk\*, Pang Hyo Sun\*\* and Han Jeong Ok\*\*

*Daewoo Heavy Ind. Ltd. Gas Ship Business Department*

*\*Ajou University, Division of Mechanical & Industrial Engineering*

*\*\*Gas R&D Center, Gas Utilization Department*

#### 요 약

본 연구는 소형 가스엔진 열병합시스템에서 엔진 냉각수를 포함한 시스템의 온도 동특성을 안정하게 제어하기 위해 적절한 PID제어기의 조율방법을 구하는데 있다. 제어기의 이득값(gain)을 결정하기 위하여 공정 전달함수를 일차시간지연 함수(First Order Plus Dead Time)로 근사시킨 후 여러 조율방법을 사용하여 제어기 이득값을 구하였다. 이 이득값과 전달함수를 가지고 공정모사기인 "MATLAB"을 사용하여 시스템에 적합한 조율방법과 이득값을 선정하였으며 실증실험결과 부하 변동에 대해 시스템의 온도동특성이 안정됨을 확인하였다.

**Abstract**—This study was carried out find out the appropriate tuning method of PID controller for a package type gas engine cogeneration system in terms of stabilizing the engine coolant temperature and system heat balance. In order to acquire the proper parameters of the controller, a system transfer function was set as a first order plus dead time model and thereafter model parameters were determined by using several tuning methods. And, with determined values of parameters and the system transfer functions, optimal tuning method was selected by simulating the process using MATLAB. From the experimental results, it was found that obtained PID gains made the system stable in various operating conditions.

#### 1. 서 론

가스엔진 열병합시스템은 청정연료인 가스를 원료로 하여 발전을 함과 동시에 엔진냉각수와 배기가스에서 방출하는 배열을 회수하여 냉방과 난방에 이용하는 고효율 에너지 공급 시스템이다. 원활한 시스템 운전을 위해서는 부하변동에 관계없이 적절한 열평형(heat balance)조건을 유지시켜야 하며 특히 시스템의 안정적인 운전을 위해 엔진냉각수 입구온도 조건을 일정범위이내로 조절할 필요가 있다. 온도를 제어하기 위하여 세계 이하의 조율 이득값을 가지고 있고 그 구조가 간단하며 넓은 범위의 공정에 대하여 안정한 성능을 보이고 있는 PID 제어기를 사용하였다.

본 연구에서는 200 kW급 단위건물용 가스엔진 열병합시스템에서 배열회수 효율을 향상시키며 동시에 시스템의 온도 동특성을 안정화 시킬 수 있도록 온도제어용 PID제어기의 이득값을 실험적 방법으로 구하였다. 먼저 시스템을 각각 다단계제어(cascade control)와 피드백제어(feedback control)로 구성하여 일차시간지연(First Order Plus Dead Time, FOPDT)모델로 근사화 한후 계단응답 분석(Process Reaction Curve, PRC)방법을 사용하여 모델 변수를 결정하고 여러가지 조율(tuning)방법을 이용하여 PID제어기의 이득값을 결정하는 방법을 사용하였다. 각 조율방법에 대해 MATLAB 공정모사기를 이용하여 조율특성을 조사하였고 공정을 안정시키는 이득값들을 선별하여 실제 시스템에 적용하여 제어성능을 확

인하였다.

## 2. 가스엔진 열병합시스템 구성

Fig. 1과 같이 열병합시스템을 구성하였으며 시스템의 안정적인 운전을 위해 엔진 냉각수 입구온도를 일정한 온도(80°C)로 유지하도록 하였다. 엔진 냉각수 배열과 배기가스를 통해 버려지는 폐열을 열교환기를 설치하여 난방시에는 흡수식 냉동기의 열원으로 이용하고 기타시에는 난방 및 급탕의 열원으로 사용함으로써 열의 이용을 극대화 하였다. 성능 실험을 위해 냉·난방부하를 대체할수 있는 부하용 열교환기(load heat exchanger)를 설치하여 시스템의 부하별 성능실험 및 신뢰성 실험이 가능하게 하였다.

### 2-1. 시스템 주요 구성기기

시스템의 주요 구성기기로는 가스엔진, 발전기 및 흡수식 냉동기와 제어반으로 구성되어 있다. 최대 발전출력은 210 kW이며 발전기를 구동하기 위한 원동기로는 천연가스엔진으로 304BHP(226 kW)이다. 발전기와 엔진은 모두 상용 형식으로 정기점검(overhaul) 기간을 제외하면 연중 연속운전이 가능하다.

흡수식 냉동기는 회수된 폐열을 이용할 수 있는 저온수형으로 93°C의 온수를 이용하도록 제작되었다. 주요 기기의 사양을 Table 1에 정리하였다. 열교환기로는 물-물의 경우 단위면적당 유효열전달 면적이 크고 매체내의 격렬한 난류형성으로 열전달 효과가 뛰어난 판형 열교환기를 적용하였고 배기가스-물 열교환기의 경우는 물보다 상대적으로 낮은 기체의 밀도를 고려하여 기체 접촉면적이 물보다 80배 큰 핀달린관형 열교환기를 채택하였다.

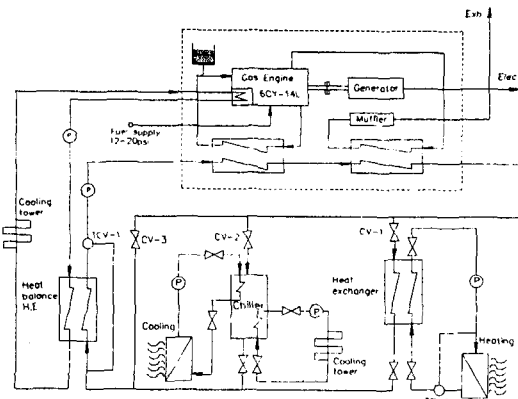


Fig. 1. Schematic diagram of a gas engine cogeneration system.

엔진의 heat balance용 냉각탑으로는 입·출구 온도차가 큰(max 17°C) 직교류형 냉각탑(90RT)을 선정하였고, 흡수식 냉동기의 냉각수 냉각탑은 냉각용량의 1.8배인 150RT급 냉각탑을 선정하여 안정된 냉각수 입구온도를 유지하도록 하였다.

### 2-2. 열병합시스템 온도제어 계통구성

엔진 냉각수 입구온도 제어를 위한 구성도는 Fig. 2와 같다. 엔진냉각수 입구온도(TE01)를 일정(~80°C)하게 제어하기 위하여 제어기1에서의 출력값이 직접 3-way 밸브를 제어하지 않고 제어기2의 설정치값으로 연결되며 제어기2가 3-way밸브의 위치를 조작하게 된다. 이러한 제어방식을 다단제어라 한다. 제어기1은 TE01에서 온도를 입력 받아 제어기 2로 제어출력 4~20 mA를 보낸다. 제어기2는 제어기1에서의 제어출력과 TE03에서 온도를 입력받아 설정치와 비교하여 PID제어출력을 3-way밸브로 내보낸다.

한편, 단순 피드백제어는 제어기2가 엔진냉각수 입구온도(TE01)를 입력값으로하여 3-way밸브를 개폐한다. 본연구에서는 단순 피드백 방법에대한 제어변수를 결정

Table 1. Specifications of 200 kW gas engine cogeneration system.

Items	Specs.	Items	Specs.
<u>Gas Engine</u>		<u>Generator</u>	
Type	I type-6cylinder	Rated Power	210 kW
Speed	1800 rpm	Voltage	380/220 V
Compression Ratio	10 : 1	Frequency	60 Hz
	natural gas		
	Plate type (water : water)	<u>Absorption</u>	Low temp type
<u>Heat Exchanger</u>	Shell & tube (gas : water)	<u>Chiller</u>	78 RT

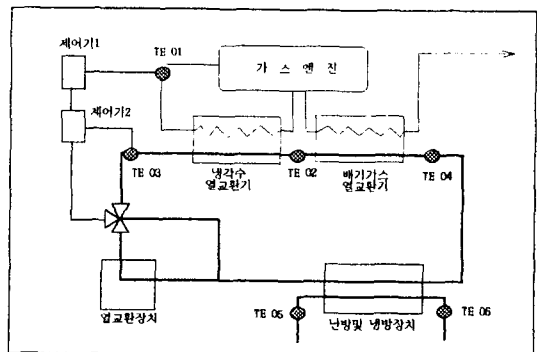


Fig. 2. Diagram for temperature control in cogeneration system.

방법을 택하였다.

### 3. 시스템 인식과 제어기 조율

#### 3-1. 시스템 모델인식

열병합 시스템은 가스엔진 열교환기, 펌프 및 밸브 등 복잡한 요소기기로 구성되어 있으며 이들 각각의 요소기기를 공정해석 프로그램을 이용하여 개별적으로 모델화 시킬 수 있겠으나 단순화된 모델의 증첩으로 실제 공정을 표현할 전달함수를 찾는 것이 쉽지 않다. 여기서는 모든 기기를 포함하는 전체 시스템을 단순화시켜 1차시간지연모델(FOPDT)로 근사시켰으며 모델인식을 위해 실험을 통한 인식방법을 적용하였다.

이와 같은 실험은 공정에 시험용 입력신호를 가하고 그 응답을 분석하는 방법으로 수행되어지는데 Process Reaction Curve(PRC) 방법과 P-controller 방법 등이 있다. 여기서는 공정을 제어하지 않는 상태에서 입력의 계단변화로부터 얻어지는 응답을 근거로 하는 PRC 방법을 적용하여 FOPDT 모델의 변수값을 구하였다. FOPDT 모델은 다음과 같으며 정상상태 이득(steady state gain: K), 지연시간(time delay: d), 시상수(time constant:  $\tau$ ) 세개의 변수를 가진다.

$$Y(s) = \frac{Ke^{-ds}}{\tau s + 1} U(s)$$

피드백제어 구성에서 제어기2는 엔진냉각수 입구 온도(TE01)를 입력값으로 하고 설정치(80°C)에 의한 제어출력으로 3-way 밸브의 개폐위치 신호를 보내게 된다. 밸브의 개폐신호가 100%일때는 밸브가 완전히 열린 상태에 있으며 이때 순환수는 모두 열교환기로 흘러 열량을 외부로 버리게 된다. 따라서 피드백제어시 FOPDT 전달함수를 구하기 위하여 먼저 제어기2의 동작을 수동으로 전환하여 밸브의 위치를 일정하게 고정 시킨다. 시스템이 정상상태에 도달하여 각 부분의 온도가 일정하게 유지되면 이 상태에서 밸브제어 신호를 계단입력으로 변화를 주고 엔진냉각수 입구온도(TE01)의 응답을 기록한다. 이 응답곡선을 가지고 PRC 방법을 이용하여 전달함수를 구한다. 이때 계단입력의 신호크기와 부하 조건에 따라서 전달함수의 변수값이 변하게 되므로 본 실험에서는 실험조건을 실제 운전조건과 유사한 조건으로 맞추었다. 즉, 실제 운전 조건에서는 부하변동이 크지않기 때문에 밸브변화가 0%에서 100%로 갑작스런 변화는 발생하지 않으며 완만한 점을 고려하여 10~20% 정도의 밸브 출력 변화에 대해 응답특성을 조사하였다.

시스템 운전시 전력부하가 100%일때 열량을 회수한 순환수의 온도가 최대가 되며 3-way 밸브가 약 40%정도

열리게된다. 한편 전력부하가 25%이하일때는 3-way 밸브가 0%로 닫히게 되며 난방부하가 없고 전력부하가 100%일때를 최대조건으로 하고 전력부하가 25%일때는 최소 조건으로하여 실험하였다. 온도측정장치의 샘플링 시간이 10초인 점을 감안하여 밸브의 위치변화가 10초 안에 이루어지는 범위안에서 밸브의 개폐신호를 20%→40%, 38%→48%로 변화시켜 주었다.

Fig. 3은 제어기2에서 3-way 밸브로의 제어출력이 각각 20%→40%, 38%→48%로 계단변화할때 엔진냉각수 입구온도(TE01)와 순환수온도(TE03)의 온도응답곡선이다. 밸브의 위치를 변화시킨후 약 10초후에 엔진냉각수 입구 온도가 변하기 시작하였으며 응답곡선은 전형적인 일차시간지연(FOPDT) 함수의 응답곡선을 보여주고 있다.

Fig. 3(a)는 전력부하가 34 kW이며 난방용 온수를 생산하고있고 Fig. 3(b)는 난방부하가 없는 조건에서 전력부하는 173 kW이다. Fig. 3(a)에서 온도가 Fig. 3(b)보다 낮은 이유는 전력부하가 적고 난방부하를 사용하여서 엔진냉각수 온도가 낮기 때문이다. 이곡선을 토대로 PRC 방법을 이용하여 FOPDT 전달함수를 Table 2와 같이 구하였다. 이와 같이 시스템의 전달함수가 운전조건에 따라 다른 이유는 열병합시스템을 1차 시스템으로

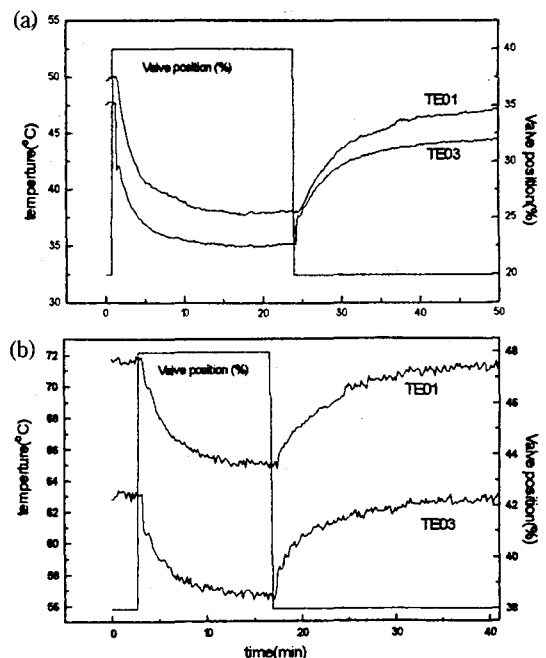


Fig. 3. Temperature response on the introduction of step input to precesses.

(a) step input: 40%→20%, (b) step input: 48%→38%.

**Table 2. FOPDT transfer function of feedback system due to step inputs.**

Value position	20%→40%	40%→20%	38%→48%	48%→38%
FOPDT transfer function	$\frac{0.6e^{-20s}}{135s+1}$	$\frac{0.45e^{-20s}}{410s+1}$	$\frac{0.68e^{-10s}}{145s+1}$	$\frac{0.68e^{-20s}}{145s+1}$

**Table 3. The amount of gains determined by controller tuning methods on feedback control.**

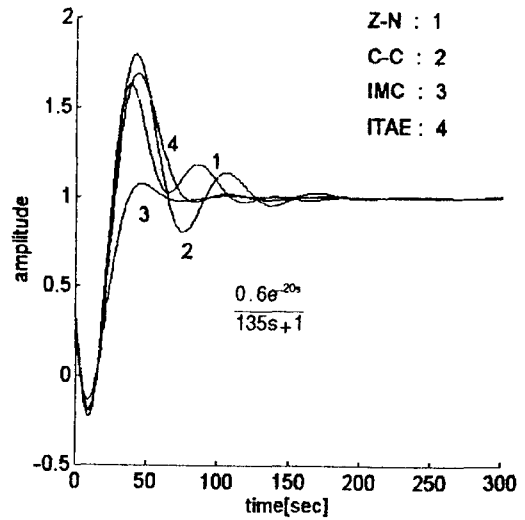
Transfer Function	Tuning Methods	Kc	ti	td
$0.45e^{-20s}/(410s+1)$	Z-N	54.6	40	10
	IMC	37.3	420	7.7
	ITAE	52.7	52.4	7.7
$0.68e^{-10s}/(145s+1)$	Z-N	25.6	20	5
	IMC	17.6	150	4.8
	ITAE	25.1	0	3.8
$0.68e^{-20s}/(145s+1)$	Z-N	25.6	40	10
	IMC	9.1	155	9.4
	ITAE	13.0	0	7.7

단순화시켰기 때문으로 분석된다. 실제 운전조건의 경우 피드백시스템에서 밸브 위치변화는 크지 않을 것으로 예측되며 따라서 밸브 위치변화가 작은 경우의 전달함수를 선택하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

**3-2. 제어기 이득값 조절**

FOPDT모델을 이용하여 PID제어기의 이득값인 비례이득(Proportional gain: Kc), 적분시간(Integral time: ti), 미분시간(Derivative time: td)을 구하는 것을 조절(tuning)이라 한다. 본 실험에서는 제어기의 적절한 PID 이득값을 조절하기 위하여 먼저 시스템의 공정을 표현하는 시스템 전달함수를 구하고 각각의 조절방법을 통하여 각 전달함수에 대한 이득값을 계산하였다. 그 후에 열병합 시스템을 각각의 PID 이득값으로 제어하면서 공정을 빨리 안정되게 하는 이득값을 찾았다.

조절의 방법은 크게 구분하면 공정의 한계주파수에서 정보를 이용하는 방법과 전달함수 형태의 공정정보를 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 여기서는 Ziegler-Nichols(Z-N)<sup>3)</sup>, 시간가중 절대적분오차(Integral of the Time-weighted Absolute Error, ITAE)<sup>2)</sup>, Internal Model Control(IMC)<sup>2)</sup> 방법을 이용하여 피드백제어시 Table 2의 전달함수에 대한 제어기 이득값을 Table 3에 구하였다.



**Fig. 4. Simulated results obtained by MATLAB.**

다음으로 Table 3에서 구한 이득값을 사용하여 열병합 시스템을 운전하기전에 “MATLAB” 공정모사기를 사용하여 적절한 이득값들을 찾았다. 먼저 각 공정 전달함수마다 구하여진 이득값을 사용하여 피드백제어로 공정을 모사하고 제어기의 설정치를 변경하였을때 공정의 응답특성을 구하였다. Fig. 4는 전달함수가  $0.6e^{-20s}/(135s+1)$ 일 때 공정응답곡선이며 IMC방법으로 조절한 이득값이 다른 방법으로 구한 이득값보다 빠르고 안정된 응답을 보임을 알 수 있다.

**4. 시스템의 온도 동특성 실험결과**

Fig. 5는 각 조절방법으로 구한 이득값을 실제 시스템에 적용하여 운전한 경우 엔진냉각수 입구온도(TE01)의 응답곡선 이다. Fig. 5(a)는 Z-N 조절방법으로 구한 이득값(Kc=25.6, ti=40, td=10)을 적용한 경우로서 전력부하가 153 kW이고 난방부하가 없는 경우이다. 온도응답을 보면 설정치 80°C를 중심으로 75~85°C 사이에서 주기적으로 변동하고 있다. Fig. 5(b)는 ITAE 방법으로 결정한 이득값으로 (25.1, 0, 3.8)로 Fig. 5(a)의 경우와 비교할 때 적분과 미분이득값이 작아진 상태이다. 이 경우에도 계속 진동하는 온도응답을 보이고 있으며 전체적으로 낮은 온도를 유지하고 있다.

Fig. 5(c)와 5(d)는 IMC 방법으로 구한 PID이득값을 적용한 결과로 Fig. 5(c)는 Fig. 5(a)와 같은 전력부하조건에서 제어기2의 이득값을 (9.1, 155, 9.4)로 바꾼 경우이다. 온도가 80°C로 안정된 상태에서 11분후에 전력부하를 153 kW→183 kW로 증가시켰으며 28분후에 183

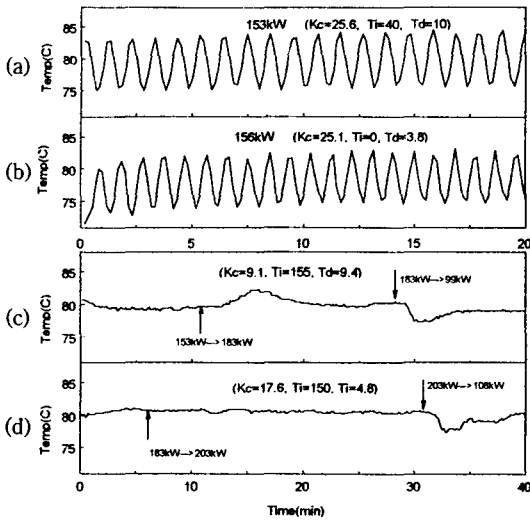


Fig. 5. Process temperature(TE01) in terms of the amount of gains from various transfer function (a): Z-N, (b): ITAE, (c) and (d): IMC method.

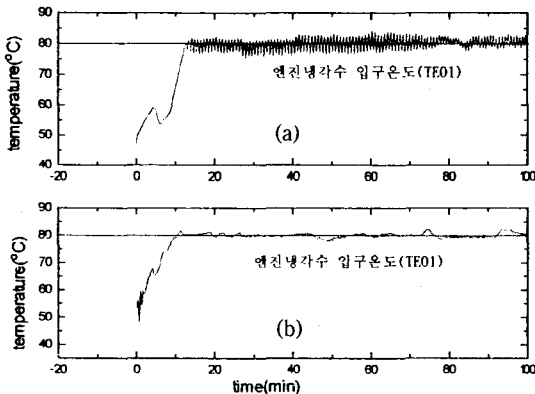


Fig. 6. Temperature responses of system in the variation of heating loads (a) in the case of original gasins, (b) new estimated gains of PID (17.6, 150, 5.0) variation of electric load at 74 minute: 197 kW→132 kW.

kW→99.3 kW로 변화시켰다. 이 경우 전력부하 변동에 따라 시간지연을 가지고 온도변동이 보이고 있으며 부하변동효과가 뚜렷이 보이고 있다. 전력부하가 증가할 경우는 단위 시간당 발생되는 열에너지가 증가하게되므로 Fig. 2에서 볼 때 3-way밸브를 적절히 조절하여 열교환 장치로 부하를 흡수하여야 한다.

Fig. 5(d)는 이득값이 (17.6, 150, 4.8)인 경우로서 Fig. 4에서 보인 바와 같이 공정모사 결과 가장 안정된 특성을 보인경우로 초기전력부하 조건이 183 kW이다. 다른 경우와 비교할 때 가장 안정되고 빨리 설정치로 수렴하

는 것을 볼 수 있으며 6분에 전력부하를 약10%(183→203 kW) 변화시켜도 안정된 온도특성을 보이고 있으며 31분후 부하를 약50% 감소(203→108 kW)시켰을 경우에도 약간의 온도변화후 다시 설정치로 수렴하는 것을 관찰할 수 있다. 이상의 온도특성을 종합하여 볼 때 MATLAB 모사에서의 마찬가지로 IMC 방법으로 구한 이득값이 가장 안정된 응답특성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 시스템의 온도특성을 개선하기전과 후의 결과를 비교한 것으로 74분후에 전력부하를 197 kW에서 132 kW로 낮춘경우이다. Fig. 6(a)는 개선하기전으로서 온도제어가 잘 이루어지지 않아 온도가 주기적으로 변동하는 특성을 보이고 있다. Fig. 6(b)는 IMC방법으로 구한 이득값(17.6, 150, 5)을 사용한 경우로서 부하 변동에도 안정적인 온도변화를 보이고 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 200 kW급 가스엔진 열병합시스템의 배열회수효율을 향상시키며 시스템의 온도 동특성을 안정하게 제어하기 위하여 시스템을 일차 시간지연모델로 설정하고 전달함수의 변수값은 Process Reaction Curve(PRC)방법을 사용하여 실험적으로 구하였다. PID제어변수를 결정하기 위해 ITAE, IMC 그리고 Ziegler-Nichols방법을 적용하였으며 MATLAB 공정모사를 이용한 모사 결과 IMC 방법이 가장 안정된 특성을 보였다.

새로운 이득값을 제어기에 설정하여 실험적으로 확인한 결과 부하 변동에 대해서 IMC 조절방법이 안정된 제어특성을 보였으며 PID 이득값이  $K_c=17.6$ ,  $t_i=150$ ,  $t_d=4.8$ 의 경우가 가장 우수한 제어성능을 보였다.

결론적으로 본 연구에서는 각 요소기기가 복잡하게 구성된 열병합 시스템을 일차 시간지연모델로 설정하고 실험적으로 제어변수를 결정하는 방법을 제시하였으며 실험을 통하여 제어성능을 확인하였다. 이와 같은 제어변수 결정방법은 각 요소별 특성파악이 어려운 유사한 시스템에 적용할 수 있을 것으로 본다.

## 참고문헌

1. 이광순: 공정제어, 서강대학교, (1993).
2. 양대륙: "PID 제어기의 Autotuning" 화학공업과 기술, 12(6), 493-500 (1994).
3. 한국가스공사 연구개발원, 천연가스이용 Package Type 열병합발전 시스템 개발, (1993).
4. Su Whan Sung: "On-Line Process Identification and

- Autotuning Using P-Controller", Proceedings of the Asian Control Conference Tokyo, July 27-30, pp. 411-414 (1994).
5. Carlos A. Smith: "Principles and Practices of Automatic Process control", John Wiley & Son, (1985).
  6. Jietae Lee: Comparison of Two Identification Methods for PID Controller Tuning, AIChE j., **39**(4), 695-697 (1993).
  7. Jietae Lee: On-Line PID Controller Tuning from a Single, Closed-Loop Test, AIChE J., **35**(2), 329-331 (1989).
  8. Carlos A.S.: Principles and Practices of Automatic Process Control, John Wiley & Son, (1985).