

가스엔진 열병합시스템의 온도제어변수 결정에관한 실험적연구

A Study on the Determination of Temperature Control Gains by Experiment for a Gas Engine Cogeneration System

장상준 유재석 방효선* 한정옥*
아주대학교 에너지학과
* 한국가스공사 연구개발원

요 약

200kW급 가스엔진 열병합시스템에서 엔진 냉각수는 엔진을 냉각시키는 기능 뿐만 아니라 배열회수용 열원으로 사용된다. 전력부하나 냉·난방 부하가 변할 때 엔진 냉각수의 온도가 민감하게 변하므로 이를 일정하게 제어하기 위하여 PID 제어기를 사용하고 있다. 본 연구는 이 제어기의 적정 이득값(gain)을 설정하기 위하여 공정 전달함수를 실험적방법을 이용하여 일차시간지연함수(First Order Plus Dead Time)로 근사한 후 여러 조율방법을 사용하여 이득값을 구하였다. 이 이득값과 전달함수를 가지고 공정모사기인 'MATLAB'을 사용하여 시스템에 적합한 적정이득값을 선정 하였으며 실증실험 결과 시스템의 온도동특성이 안정됨을 보였다.

1. 서 론

가스엔진 열병합시스템은 청정연료인 가스를 원료로 하여 발전을 함과 동시에 엔진냉각수와 배기가스에서 배열을 회수하여 냉방과 난방에 이용하는 고효율 에너지 공급 시스템이다. 원활한 시스템운전을 위해서는 부하변동에 관계없이 적절한 열평형(heat balance)조건을 유지시켜야 하며 특히 엔진냉각수 입구온도 조건을 일정범위내로 조절할 필요가 있다.

본 연구는 200 kW급 단위건물용 가스엔진 열병합시스템에서 배열회수 효율을 향상시키며 동시에 시스템의 온도 동특성을 안정화 시킬 수 있도록 냉각수 온도제어용 PID제어기의 이득값을 단순화한 모델과 실험적 방법으로 구하였다. 시스템의 모델은 일차시간지연(FOPDT)으로 근사 시켰으며 Process Reaction Curve 방법을 사용하여 FOPDT모델의 변수값을 구하였다. 이 모델을 가지고 여러가지 조율(Tuning)방법을 이용하여 PID제어기 이득값을 조율하였다. 여러 PID 조합을 구한 후 MATLAB 공정모사기를 이용하여 각 조율방법중 공정을 안정시키는 이득값들을 선별하여 실제 시스템에 적용하여 제어성능을 확인하였다.

제어성능은 다단계제어(cascade control)와 피드백제어(feedback control)에서 각각 난방부하와 전력부하를 변동시켰을때 엔진냉각수 입구온도가 설정치로 수렴하는 것을 관찰하였다. 실험결과 IMC방법으로 조율한 이득값이 좋은 제어성능을 보였으며 모사결과와도 일치하였다. 또한 본 시스템에서는 피드백제어만으로도 충분한 제어성능을 만족시킬 수 있음을 알수 있었으며 새롭게 구한 제어기

이득값이 안정된 시스템 온도 동특성을 보여주었고 유사한 시스템에 적용할수 있음을 확인하였다.

2. 가스엔진 열병합시스템 구성

그림 1 과 같이 시스템을 구성하였으며 엔진의 안정적인 운전과 열 회수효율을 높이기위해 엔진 냉각수 열 회수용 열교환기를 설치하여 엔진 냉각수 입구 온도를 일정한 온도 (80 °C)로 유지하도록 하였다. 엔진 냉각수 배열과 배기가스를 통해 버려지는 폐열을 판형열교환기와 핀달린판형 열교환기를 각각 직렬로 연결하여 냉방시에는 흡수식 냉동기의 열원으로 이용하고 기타시에는 난방및 급탕의 열원으로 사용함으로써 열의 이용을 극대화 하였다.

성능 실험을위해 냉·난방부하를 대체할수 있는 부하용 열교환기(load heat exchanger)를 설치하여 시스템의 부하별 성능실험 및 신뢰성 시험이 가능하게 하였다.

2.1 시스템 주요 구성기기

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

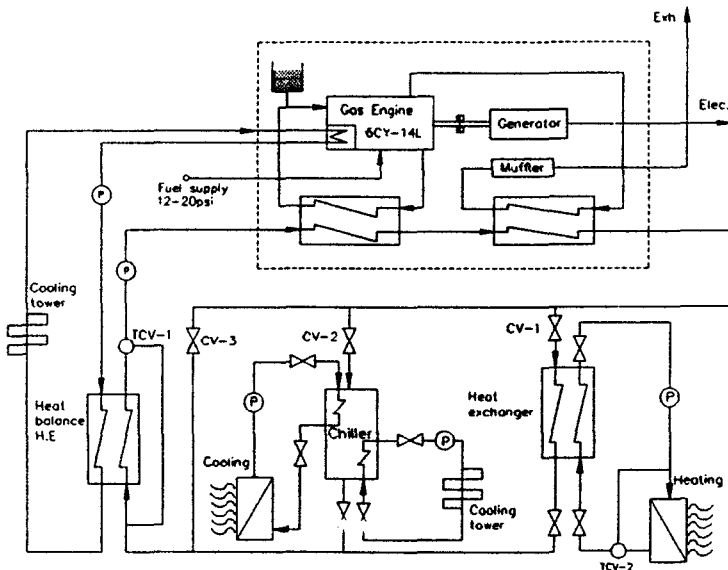


그림 1 가스엔진 열병합 시스템의 구성도

흡수식 냉동기는 회수된 폐열을 이용할수있는 저온수형으로 93 °C의 온수를 이용하도록 제작되었다. 주요기기의 사양을 표 1 에 정리하였다.

표 1 200kW급 가스엔진 열병합시스템의 구성기기 사양

구 분	사 양	구 분	사 양
<u>가스엔진</u>		<u>발전기</u>	
형 식	l형 6 cycle	정격출력	210 kW
회전수	1800 rpm	전압	380/220 V
압축비	10 : 1	주파수	60 Hz
<u>열교환기</u>	판 형 핀달린판형	<u>흡수식냉동기</u>	저온수식 78 RT

열교환기로는 물-물의 경우 단위면적당 유효열전달 면적이 크고 매체내의 격렬한 난류형성으로 열전달효과가 뛰어난 판형 열교환기를 적용하였고 배기가스-물 열교환기의 경우는 물보다 상대적으로 낮은 기체의 밀도를 고려하여 기체 접촉면적이 물보다 80배 큰 핀달린판형 열교환기를 채택하였다. 엔진의 heat balance용 냉각탑으로는 입·출구 온도차가 큰(max 17 °C) 직교류형 냉각탑(90RT)을 선정하였고, 흡수식 냉동기의 냉각수 냉각탑은 요구냉각용량의 1.8배인 150RT급 냉각탑을 선정하여 안정된 냉각수 입구온도를 유지하도록 하였다.

3. 열병합시스템 온도제어 계통구성

엔진 냉각수 입구온도제어를 위한 구성도는 그림 2 와 같다. 엔진 냉각수 입구온도를 일정(80°C)하게 제어하기 위하여 제어기 01에서의 출력값이 직접 3-way 밸브를 제어하지 않고 제어기02의 설정치값으로 연결되며 제어기02는 밸브의 위치를 조작하게 된다. 이러한 제어방식을 다단계제어(cascade)방식이라 한다.

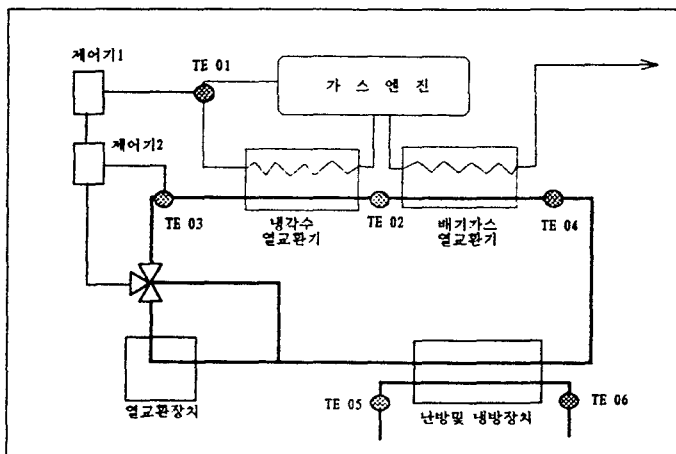


그림 2 열병합시스템 열제어 구성도

PID 제어기01 (SDC 200-5G-P46-AA07)은 축온저항체 (TE01)에서 온도를 입력 받아 제어기 02로 제어출력 4 ~ 20mA를 보낸다. 제어기02 (SDC 200-2GP-46-AA 07)는 제어기 01에서의 제어출력을 설정치(set point)로 하고 축온저항체 (TE02)에서 온도를 입력받아 제어출력으로 3-way밸브를 개폐한다. 제어기01은 프로세스량이 증가하면 제어출력이 작아지는 역동작이며 제어기02는 반대경우인 정동작으로 설정되어있다.

4 실험방법 및 결과

제어기의 적정PID 이득값을 결정하기 위하여 다음과 같은 방법으로 수행한다.

- ① 시스템의 공정을 표현하는 전달함수를 구한다.
- ② 시스템전달함수를 이용하여 제어기의 변수값을 계산한다.
- ③ 시스템을 각각의 PID 조합으로 제어하면서 최적 이득값을 찾는다.

4.1 시스템 인식(Identification)

공정의 모델을 일차시간지연으로 근사하기 위한 공정모델인식 (identification) 방법은 공정을 제어하지 않는 상태에서 입력의 계단변화로부터 얻어지는 응답을 근거로 하는 Process Reaction Curve (PRC) 방법을 사용하였다.

피드백제어의 구성에서 제어기02는 엔진냉각수입구온도 (TE01)를 입력값으로 하고 설정치(set point) 80℃에 의한 제어출력으로 3-way 밸브의 개폐위치 신호를 보내게 된다. 공정에 계단입력을 주기위하여 제어기02에서 제어출력을 일정하게 하여 3-way 밸브를 고정시킨후 공정이 안정된후에 제어출력을 변화시켜주었다. 그림 4는 3-way 밸브로의 제어출력이 각각 20%→40% , 38%→48% 으로 계단변화 할때 공정의 온도변화곡선이다. 제어출력을 변화시킨후 약 10초후에 엔진냉각수입구 온도가 변하기 시작하였으며 응답곡선은 전형적인 일차시간지연 (FOPDT) 함수의 응답곡선을 보여주고 있다.

그림 4(a)는 난방용 온수를 생산하면서 전력부하는 34 kW이며 그림 4(b)는 난방부하가 없는 조건에서 전력부하는 173kW 이다. 그림 4(a)그림에서 온도가 그림 4(b)보다 낮은이유는 전력부하가 적고 난방부하를 사용하기때문이다. 이곡선을 토대로 PRC방법을 이용하여 FOPDT 전달함수를 표 2와 같이 구하였다.

표 2 계단입력에 의한 피드백시스템의 FOPDT 전달함수

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

4.2 조율(tuning)

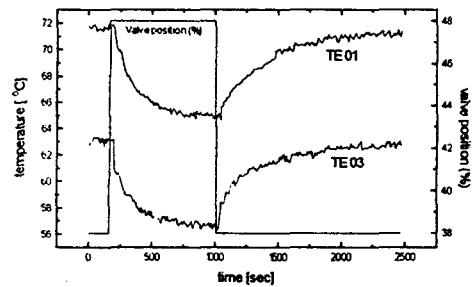
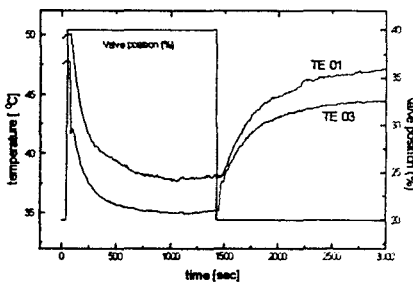
조율의 방법은 크게 구분하면 공정의 한계주파수에서의 정보를 이용하는 방법과 전달함수 형태의 공정정보를 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 본

연구에서는 적분오차법중의 하나인 시간가중 절대 적분오차(integral of the time-weighted absolute error, ITAE) 방법과 Internal Model Control(IMC) 방법 그리고 Ziegler-Nichols 방법을 이용하여 각각의 전달함수에 대하여 제어기 이득값을 표 3에 구하였다.

표 3 제어기 조율방법에 의한 이득값의 결정

밸브제어출력	조율방법	Kc	τ_i	τ_d
40% → 20%	Z-N	54.6	40	10
	IMC	37.3	420	7.7
	ITAE	52.7	52.4	7.7
38% → 48%	Z-N	25.6	20	5
	IMC	17.6	150	4.8
	ITAE	25.1	0	3.8
48% → 38%	Z-N	25.6	40	10
	IMC	9.1	155	9.4
	ITAE	13.0	0	7.7

다음으로 'MATLAB' 공정모사기를 사용하여 각 전달함수마다 구하여진 이득값 중 단위입력에 대한 공정응답이 빨리 안정되는 이득값을 구하였다. 그림 5에서와 같이 전달함수가 $0.6e^{-20s}/(135s+1)$ 일때 IMC방법으로 조율한 이득값이 다른 이득값보다 빠른 안정을 보임을 알 수 있다.



(a)
그림 4 공정에 계단입력을 주었을때 온도응답곡선
(a) 계단입력 20%→40% 주었을때 온도응답
(b) 계단입력 38%→48% 주었을때 온도응답

4.3 시스템 실험결과

그림 6은 각 조율방법으로 구한 이득값을 실제 시스템에 적용하였을때 엔진냉각수 입구온도(TE01) 응답곡선 이다. 그림 6 (a)는 전력부하가 153kW이고 난방부하가 없을때 제어기이득값 (K_c, τ_i, τ_d)이 각각 (25.6, 40, 10)인 경우로서 온도응답을 보면 설정치 80℃를 중심으로 75℃~85℃ 사이에서 진동하고 있다. 그림6 (b)는 그림 6 (a)와 같은 전력부하조건에서 제어기02의 이득값을 (9.1, 155, 9.4)로 바꾼 경우이다. 이득값을 바꾼후 약 500초후에 설정치인 80℃로 안정이 되었다. 온도가 안정이 된 후 2000초와 2800초에서 전력부하를 153kW → 183kW, 183kW → 99.3kW로 각각 변화 시켜 주었다. 전력부하변동후 약 300초동안 온도가 진동 하다가 다시 설정치 80℃로 수렴함을 볼 수 있다.

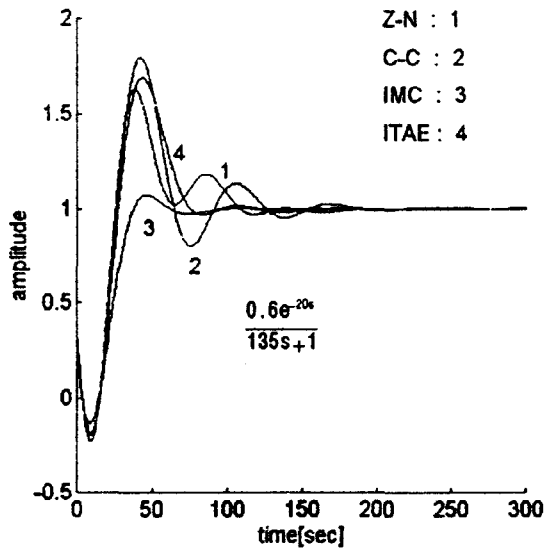


그림 5 MATLAB을 이용한 모사결과

그림 6 (c)는 이득값을 (17.6, 150, 4.8)로 바꾼후 전력부하를 183kW로 변화를 주었다. 이 이득값은 IMC 방법으로 조율한 값으로서 가장 안정되고 빨리 설정치로 수렴하는 것을 볼 수 있으며 2500초에 전력부하를 108kW로 변화시켜주어도 약간의 온도변화후 다시 설정치로 수렴하는 것을 관찰 할 수 있다. 그림 6 (d)는 이득값을 (25.1, 0, 3.8)로 바꾼후 온도응답이다. 이 이득값으로는 계속 진동하는 온도응답을 얻었다. 그림 6 (e)는 이득값이 (13, 0, 7.7)인 경우이다. 온도는 일정하게 수렴을 하나 설정치 80℃보다 약 5℃정도 낮은 75℃로 수렴이 되었으며 800초에 부하를 156kW에서 204kW로 변화시켜준 후 온도가 약간 상승함을 알 수 있다.

위의 온도특성을 종합하여 볼 때 MATLAB 모사에서와 마찬가지로 IMC 방법으로 구한 이득값이 가장 안정된 응답곡선을 보임을 관찰 하였다. 그림 7은 IMC 방법으로 구한 이득값(9.1, 155, 9.4)을 사용하여 난방부하를 변동시켰을 때 응답곡선이다. 전력부하는 초기에는 197kW 이며 4440초에서 전력부하를 132kW로 변

동시켜 주었다. 난방부하의 변동 즉 온수의 온도(TE05, TE06)의 변화에도 엔진 냉각수 입구온도(TE01)는 설정치 80℃로 잘 수렴하여 온도제어가 잘 되는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 200kW급 가스엔진 열병합시스템의 배열회수효율을 향상시키며 시스템의 온도 동특성을 안정하게 제어 하기위하여 공정제어변수를 MATLAB 공정모사기와 실험을 통하여 구하였다. PID 제어를 사용하여 피드백제어를 구성하였고 시스템의 모델은 일차시간지연(FOPDT)모델로 근사 시켰다. FOPDT전달함수의 변수값은 Process Reaction Curve(PCR)방법을 사용하여 실험적으로 구하였다. 제어기 조율은 Integral of Time weighted Absolute Error (ITAE), Internal Model Control (IMC), 그리고 Ziegler-Nichols 방법을 이용하였으며 MATLAB 공정모사기를 이용하여 각 조율방법을 모사하여 최적 이득값을 결정하였다. 이값을 제어기에 설정하여 각각 난방부하와 전력부하를 변동시켰을때 엔진냉각수입구온도(TE01)가 설정치로 수렴하는 것을 관찰 할 수 있었다.

실험를 통해서 모사결과와 실험결과가 동일하게 IMC조율 방법이 안정된 제어성능을 보임을 알 수 있었다. 결론적으로 새로운 제어변수를 사용한 결과 각각의 부하변동시 전체 시스템의 온도 동특성을 안정적으로 제어하였다.

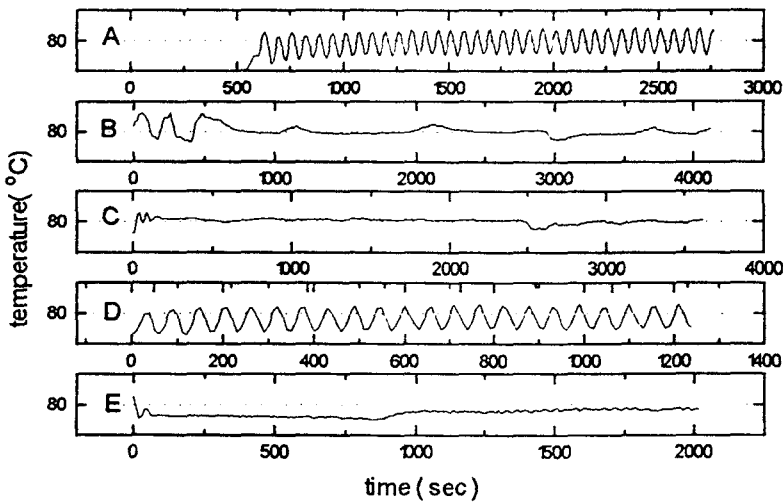


그림 6 각 전달함수의 이득값에 대한 공정의 온도(TE 01) 응답곡선

제어기 02의 PID 이득값

A: (25.6, 40, 10) B: (9.1, 155, 9.4) C: (17.6, 150, 4.8)

D: (25.1, 0.0, 3.8) E: (13, 0.0, 7.7)

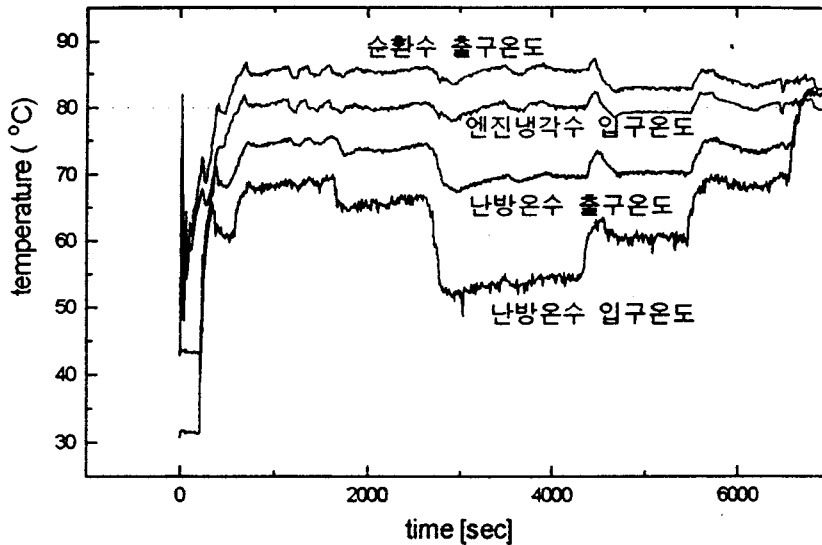


그림 7 난방부하 변동시 시스템 온도 응답곡선
 제어기02의 PID이득값 (9.1, 155, 9.4)
 전력부하 변동 4440초: 197 kW → 132 kW

참 고 문 헌

1. Carlos A. Smith, "Principles and Practices of Automatic Process control", John Wiley & Son, 1985
2. Su Whan Sung, "On-Line Process Identification and Autotuning Using P-Controller", Proceedings of the Asian Control Conference Tokyo, July 27-30, 1994, pp 411~414
3. 이광순, 공정제어, 서강대학교, 1993
4. 한국가스공사 연구개발원, 천연가스이용 Package Type 열병합발전 시스템 개발, 1993.
5. 양대륙, 'PID 제어기의 Autotuning' 화학공업과 기술, 제 12권 제 6호, 1994, pp 493~500