

한국에너지공학회(1998년도)

추계 학술발표회 논문집p96-102

가스히터 후단 공급가스온도 안정제어에 관한 연구

윤영석, 한정옥, 이중성, 유현석

한국가스공사

A Study on the Gas Heater Control to Obtain Stable Downstream Gas Temperature

Y. S. Yoon, J. O. Han, J. S. Lee, H. S. Yoo

Korea Gas Corporation

요 약

천연가스 공급설비 중 하나인 가스히터의 온도제어 특성을 파악하고 온도제어 성능을 개선하기 위해 모의실험장치를 구성하여 가스히터에 적합한 시스템 인식 및 제어기 조율관계식을 결정하였다. 또한 모의실험결과를 가스히터에 적용하여 전달함수 및 제어값을 결정하였으며 운전결과 양호한 응답특성을 얻었다. 경제성 분석을 통해 비례운전 방법이 단속운전 방법보다 약 15%의 연료절감 효과가 있음을 확인하였다.

1. 서 론

국내에 도입되는 천연가스(natural gas, NG)는 인수기지로부터 고압(40~70kgf/cm²)으로 가압된 후 도시가스사나 각 산업체에 공급하기 위해 지역 공급 관리소에서 저압(8~25kgf/cm²)으로 감압되며 이 때 Joule-Thomson효과에 의해 온도가 1kgf/cm²당 0.56℃정도 하락하게 된다. 즉 60kgf/cm²에서 8kgf/cm²로 감압시 26℃의 온도가 하락하며 감압전 천연가스 온도가 20℃라 했을 때 -6℃가 되기 때문에 정압기 등 설비에 손상을 초래할 수 있다. 따라서 이와 같은 문제를 방지하기 위해 압력강하에 의한 하락온도를 감압 전에 보상하기 위해 가스히터를 사용한다. 가스히터는 노통연관식 보일러의 형태를 가지며 화염과 배가스가 통과하는 관에서 열매체액(bath water)으로, 열매체액에서 천연가스가 통과하는 관으로 열전달이 이루어진다. 이렇게 가열된 천연가스는 정압기를 통과하면서 압력과 온도가 떨어지고 출구온도를 0~5℃로 유지하게 되어있다. 이 온도를 제어하기 위해 가스히터는 PID제어기와 비례출력 버너를 갖추고 있으나 PID값이 적절히 설정되어있지 않을 경우 상한·하한의 event 신호에 의한 단속운전(on-off)이 되며 따라서 진동응답이 나타난다. 단속운전의 경우 가열하는 열매체액의 열관성(thermal inertia)이 크기 때문에 후단온도의 등락폭이 커지게 되며 이에 따

라 다음과 같은 문제점이 제기되고 있다.

- 배가스손실 및 퍼지손실(purge loss) 증가에 따른 열효율 감소
- 급격한 부하변동에 따른 과도진동 및 소음발생
- 부하변동에 따른 열응력(thermal stress) 증가
- 설비 내구성 감소
- 공급온도 변동에 따른 공급안정성 저하

이러한 on-off 제어로 인한 문제를 해결하고 안정적인 제어를 하기 위해 가스 히터와 상사성을 갖는 모의실험장치를 구성하여 PID 상수값의 특성을 파악하고 시스템 인식(system identification) 방법과 제어기 조율관계식을 조사하여 가스히터에 적절한 PID상수값을 결정하고자 한다.

2. 가스히터의 온도제어시스템

가스히터 제어시스템을 그림 1에 도시하였다. 열매체액 온도는 RTD(측온저항체)로 감지되어 TIC(온도제어기)에 입력되며 입력된 온도와 설정치를 비교하여 제어신호를 발생시킨다. 제어신호는 버너 제어기에 입력되어 모듈트럴 모터(modutral motor)를 구동시키고 링크시스템에 의해 공연비가 조절되며 버너가 기동된다. 버너의 화염과 배가스의 열이 열매체액(bath water)을 통해 천연가스로 전달되는 것이다.

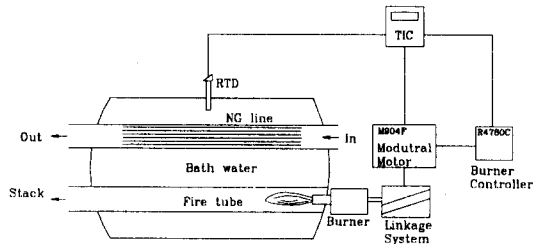


그림 1 공급관리소 가스히터의 제어시스템 구성도

3. 제어 특성

3-1. 시스템 인식(system identification)

전달함수(transfer function)는 동적시스템의 입력과 출력변수 사이의 관계를 라플라스 변환에 의해 대수적으로 표현한 것으로 초기조건이나 입력함수의 형태와는 상관없이 독립적으로 정의된다.

입력의 계단변화에 대해 나타나는 출력의 응답을 시간축에 대한 그래프로 나타낸 것을 공정반응곡선(process reaction curve)이라 하며 이 곡선으로부터 1차 시간지연 모델의 전달함수를 구하는 방법으로 여러 가지 방법이 있으나 여기서는 Sundaresan과 Krishnaswamy가 제시한 방법을 사용하였다.[1] 이 방법으로 공정응답이 최종값의 35.3%, 85.3%에 이르는 두 시점 t_1 과 t_2 를 찾아 다음의 식을

이용하여 지연시간과 시상수를 결정할 수 있다.

$$\theta = 1.3t_1 - 0.29t_2$$

$$\tau = 0.67(t_2 - t_1)$$

$$K = \Delta T / \text{계단입력크기}$$

3-2. 제어방식

가스히터에 사용한 제어기(SDC200)는 PID제어방식으로 P(proportional, 비례상수), I(integral, 적분상수), D(derivative, 미분상수)를 입력함으로써 제어특성을 변화시킬 수 있다. PID값은 전달함수에서 구한 변수(이득값, 지연시간, 시상수)를 제어기조율관계식에 대입함으로써 구할 수 있으며 여러 가지 관계식이 있으나 본 연구에서는 모의실험을 통해 Cohen-Coon과 ITAE 관계식[1]이 가스히터 시스템에 적절함을 알 수 있었다.

4. 실험결과

4-1. 모의실험

가스히터 및 제어기의 제어특성을 파악하기 위해 가스히터와 상사성을 갖는 모의실험 장치를 제작하여 전달함수 및 PID제어값 결정 실험을 수행하였다. 모의실험 장치의 가열부는 전기히터, 열매체액은 물, 열교환 대상은 천연가스 대신에 물을 사용하였다. 출력을 30%에서 40%로 변화시켰을 때 구한 전달함수와 제어값 및 그에 따른 응답곡선은 다음과 같다.

▶ 출력 30 → 40% 계단변화 시 온도변화 43℃ → 68℃ ($\Delta T = 25^\circ\text{C}$)

지연시간 $\theta = 47.4\text{sec}$, 시상수 $\tau = 1656.9\text{sec}$, 공정이득 $K = 2.55$

Method	Controller	Mode	value
Cohen-Coon	PI	P	8.1
		I	149
	PID	P	5.4
		I	115
		D	17
ITAE	PI	P	9.2
		I	219
	PID	P	6.5
		I	143
		D	18

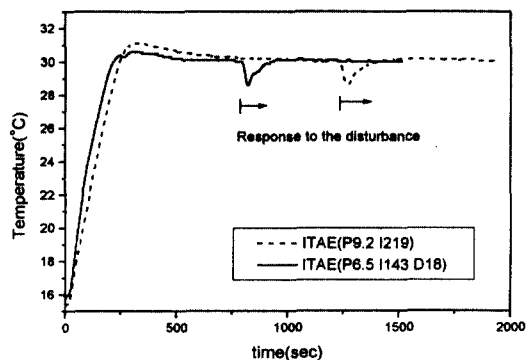


그림 2 ITAE에 의한 응답곡선

그림 2는 설정값 30℃일 때 ITAE 제어값에 따른 응답곡선으로 1℃ 이내의 오버슈트가 나타나며 외란에도 빠르고 안정된 응답을 보인다.

4-2. 현장적용 실험

모의실험 결과를 두 곳(A, B)의 공급관리소에 적용하였으며 각 결과는 다음과 같다.

▶ 공급관리소 A

계단변화에 대한 응답을 그림 3에 나타냈으며 전달함수는 다음과 같다.

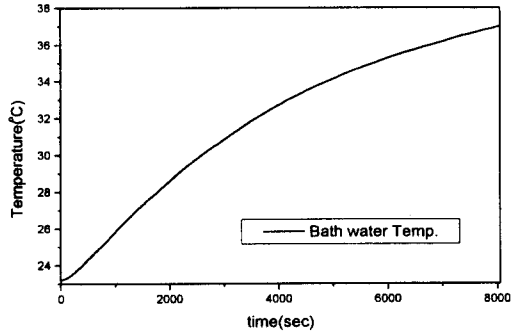


그림 3 계단입력(0 → 10%)

※ 출력 0 → 50% 계단변화 시 온도변화 23.2 → 37°C ($\Delta T = 13.8^\circ\text{C}$)

- 지연시간 $\theta = 694.2\text{sec}$, 시상수 $\tau = 2633.8\text{sec}$, 공정이득 $K = 0.276$

위의 전달함수로부터 얻은 제어기조울값을 아래 표에 나타냈으며 이 제어값 ($P=8, I=1500$)을 입력한 후 실험한 결과를 그림 4에 도시하였다. 미분값이 크면 진동응답이 나타날 뿐만 아니라 시스템의 잦은 동작을 유발하므로 제외시켰다. 실험당시 버너용량에 비해 부하가 작았기 때문에 응답이 상향곡선을 그리지만 오차는 크지 않으며 후단온도는 0°C 로 거의 일정하게 제어되고 있다.

Method	Controller	Mode	value
Cohen -Coon	PI	P	7.9
		I	1497
	PID	P	5.2
		I	1542
		D	240
ITAE	PI	P	8.7
		I	1578
	PID	P	5.7
		I	1169
		D	266

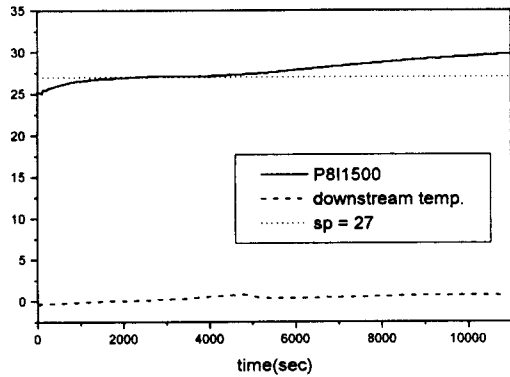


그림 4 PI조울값 현장적용 실험결과(공급관리소 A)

▶ 공급관리소 B

전달함수를 구하기 위해 0 → 10%의 계단입력 실험을 수행하였으며 그림 5에 도시하였다. 응답 결과는 정상상태에 이르지 않고 계속 상승하며 자체조절 (self-regulating)이 아님을 알 수 있다.

이 경우 적용 가능한 공정반응곡선법의 Ziegler-Nichols 조울관계식을 이용하

여 PID 상수값을 결정하였다. 데이터로부터 지연시간과 기울기를 구하면 다음과 같다.

$$\theta = 83\text{sec}, \quad S = 0.00935$$

이 값을 조율관계식에 대입하여 구한 제어값을 표에 나타내었다.

Controller	P	I	D
PI	8.6	276	—
PID	6.5	166	42

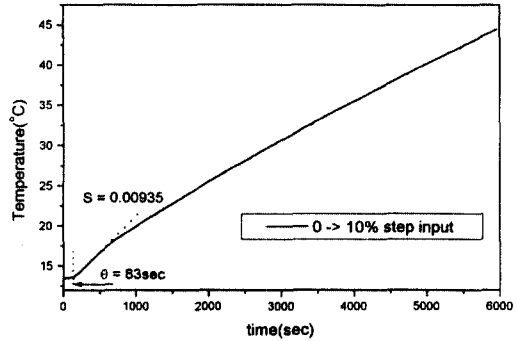


그림 5 계단입력(0 → 10%)

위의 PI 제어값(P=8, I=300)을 입력한 뒤 실험한 결과를 그림 6에 도시하였다. 오버슈트가 1.2°C이며 시간이 경과함에 따라 천연가스 유량이 약 6000 Nm³/h정도 변동함에도 불구하고 편차 1°C 이내로 양호한 응답특성을 보이고 있다.

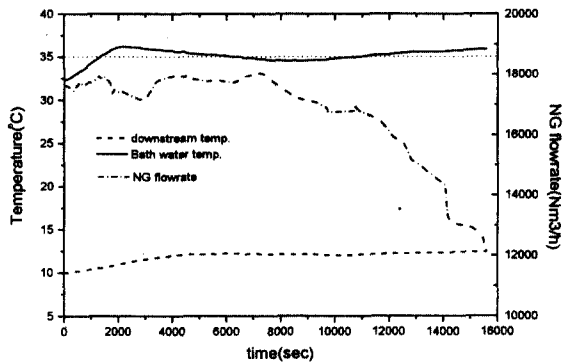


그림 6 PI조율값 가스히터 적용 제어응답특성

4. 경제성 분석

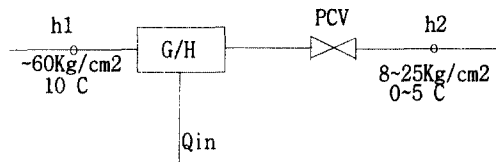


그림 7 가스히터 경제성 분석을 위한 개략도

가스히터의 연료경제성을 평가하기 위한 기본 모델을 그림 7과 같이 설정하였다. 가스히터 전단의 공급가스엔탈피(h1)와 감압된 PCV(pressure control valve) 후단의 엔탈피(h2)의 차이가 총에너지 변화량이며 이를 가스히터에서 공급(Qin) 해주므로 히터의 효율을 평가할 수 있다. PCV 전후단에서는 등엔탈피 조건을 만족하므로 히터에서 공급된 에너지는 PCV 후단의 엔탈피 증가를 가져온다.

$$Q_{in} = 1/\eta * m * (h_1 - h_2)$$

Q_{in} = 버너투입열량(kcal)

η = 효율

m = 질량유량(kg)

h_1 = 히터전단 엔탈피(kcal/kg)

h_2 = PCV 후단 엔탈피(kcal/kg)

가스히터 후단에서의 천연가스 엔탈피는 가스히터의 운전방법에 의해 영향을 받게되며 가스히터 전후단의 엔탈피 변화는 천연가스조성 및 온도, 압력 조건으로부터 구해질 수 있다.

한편 가스히터에서 공급하는 에너지는 PCV에서의 온도강하를 보상해주는 데 필요한 유효에너지와 여분의 무효에너지로 구분할 수 있다. 즉, 유효에너지는 도시가스사 및 발전소에 공급해야할 공급기준에 만족하기 위해 필요한 최소한의 에너지이고 그 이상의 에너지는 무효에너지로 볼 수 있으며 절감가능한 에너지이다. 이와 같은 분석을 공급관리소 A에 적용하여 얻은 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1 다양한 운전모드에서 무효에너지 및 절감가능량 비교

조건	후단온도 (°C)	운전모드	버너 연료량 (Nm3)	총 에너지 (Mcal)	무효 에너지 (Mcal)	종합 효율 (%)	절감 가능량 (%)	비 고
1	0	비례제어	288.0	2844	26	94	0.9	
2	2	비례제어	339.0	3426	530	96	15	
3	3	비례제어	367.0	3181	867	83	22	
4	0~5	단속운전	170.0	1620	554	91	31	저부하
5	0~5	단속운전	181.0	1857	612	98	32	
6	0~2	단속운전	469.0	4168	287	85	6	고부하
7	0~3.5	단속운전	348.0	3569	477	98	13	
8	0~4	단속운전	277.0	2895	373	99	13	
9	0~4	단속운전	268.0	2811	537	99	19	

결과에서 조건 1~3의 경우는 비례제어에 의해 운전된 경우로서 운전모드가 일정한 후단온도 특성을 보이고 있으며 조건 4, 5의 경우는 단속운전 모드의 경우로서 최소, 최대 온도차가 큰 편이다. 조건 1의 경우가 가장 효율적으로 운전된 경우로서 무효에너지가 거의 없으며 가스히터의 열매체액 온도를 부하에 맞추어 낮게 설정하여 운전된 경우이다. 조건 2와 3의 경우는 smoke tube내에서의 응축수 문제를 고려하여 열매체액 온도를 높게 운전한 경우로서 후단온도는 일정하게 유지되는 특성을 보이고 있으나 절대 온도가 기준온도인 0°C보다 높기

때문에 무효에너지가 15~20%정도 높음을 알 수 있다.

한편, 비례운전모드가 아닌 단속운전의 경우 조건 4, 5와 같이 단속 횟수가 많은 저부하 조건에서의 무효에너지가 비례제어의 경우보다 큰 30%정도를 보이고 있다. 이것은 단속운전이 연속운전보다 효율이 낮다는 것을 입증해 주는 결과이다. 조건 6은 단속운전의 경우이지만 고부하 조건이기 때문에 단속 횟수가 많지 않으며 거의 연속운전의 형태에 가깝다. 따라서 이 경우 무효에너지는 6%정도로 작게 나타나고 있다. 이상의 결과로부터 계절별 부하특성을 고려할 때 PID제어에 의한 비례운전의 경우 단속운전에 비해 약 15%정도의 효율 향상이 기대된다.

5. 결 론

가스히터에 관한 온도제어특성 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모의실험을 통해 PID 특성을 파악하였으며 계단입력에 대한 응답곡선으로부터 가스히터에 적정한 시스템 인식방법을 결정하였으며 결정된 전달함수의 시상수(τ), 지연시간(θ), 제어이득(K)을 Cohen-Coon과 ITAE제어기조울관계식에 대입하여 적정 PID 제어값을 결정하였다.
- 2) 두 곳의 공급관리소에서 계단입력 응답곡선으로부터 구한 제어기 조울값을 입력하여 실험한 결과 양호한 제어특성을 얻었으며, 이 중 가스히터에 적절한 상수값은 $P=8$, $I=300$ 이며 조건에 따라 응답시간과 오버슈트를 고려하여 수정이 필요하다.
- 3) 연속운전의 경우 단속운전조건에 비해 에너지 절감효과는 연료소비량 기준으로 약 15%정도 기대된다.
- 4) 가스히터의 기동, 정지시에 발생하는 과도진동 및 소음은 비례제어방법에 의해 저부하로 운전함으로써 발생소음을 저감시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 박선원, 양대륙, 이광순, 이지태 공역: "공정 동특성 및 제어", 선중당 (1995)
2. 김경수: "디지털지시조절계(SDC200) 매뉴얼", LG하니웰 (1996)
3. 한정옥, 조양수, 장상준: "200kW급 가스엔진 열병합 시스템 운전연구", 한국가스공사 (1995)
4. T.E. Marlin: "Process Control", McGraw Hill (1995)
5. D. R. Coughanowr: "Process Systems Analysis and Control", McGraw Hill (1991)