

# 가스히터 운전제어 최적화에 의한 시스템 효율향상에 관한 연구

유현석, 이현찬, 이용원  
한국가스공사 연구개발원 이용기기연구센터

## Improvement of Gas Heater Efficiency by Optimization of Operating Control

Hyun-Seok You, Hyun-Chan Lee, Yong-Won Lee  
Gas Utilization Div., R&D Center, Korea Gas Corporation

### 1. 서론

LNG 인수기지에서부터 고압(40~70 kgf/cm<sup>2</sup>)으로 공급된 천연가스를 공급기지에서 저압(8~25 kgf/cm<sup>2</sup>)으로 감압할 때 Joule-Thomson 효과에 의해 온도가 1 kgf/cm<sup>2</sup> 당 0.56℃ 정도 하락하게 된다. 즉 60kgf/cm<sup>2</sup>에서 8kgf/cm<sup>2</sup>로 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 위해서 압력강하에 의한 하락온도를 감압 전에 가스히터로 보상해 주게 된다.

가스히터는 노통연관식 보일러 형태를 가지며 화염과 배가스가 통과하는 관에서 열매체액(bath water)으로, 열매체액에서 천연가스가 통과하는 관으로 열전달이 이루어 진다. 이렇게 가열된 천연가스는 정압기를 통과하면서 압력과 온도가 떨어지고 공급온도를 0~5 ℃로 유지하게 되어 있다. 이 온도를 제어하기 위해 가스히터는 PID제어기와 비례출력 버너를 갖추고 있으나 PID값이 적절히 설정되어 있지 않기 때문에 event 신호를 이용한 단속운전(on-off)이 되고 있으며 따라서 진동응답이 나타난다.

단속운전의 경우 가열하는 열매체액의 열관성(thermal inertia)이 크기 때문에 가스히터 후단온도의 등락폭이 커지게 되며 고부하 운전 및 퍼지(purge)에 의한 열효율이 감소하게 되며 부하변동에 따른 열응력(thermal stress)이 증가하고 설비 내구성이 감소될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 최적의 연속운전을 위한 PID 제어값을 도출하고자 한다.

### 2. 실험장치 및 방법

#### 2.1 실험장치

가스히터의 성능을 좌우하는 중요한 요인 중 하나가 버너 성능이다. 가스히터

에서 요구되는 최대최소 부하비(turn down ratio 이하 TDR)는 공급기지마다 차이는 있지만 최대 20:1로 나타나고 있으므로 버너로 연속운전제어를 하기 위해서는 버너 TDR도 20:1이 요구된다. TDR 범위내에서 공연비 특성을 파악하기 위해 가스분석기(WOHLER Analysing Computer A 97)를 사용하였다.

본 연구에서는 20:1의 TDR을 위해 상용 로형버너를 적용하였다. 버너사양은 표와 같다. 가스버너 점화과정은 안전을 위해 송풍기 개도 100%에서 pre-purge를 한 후, 30%에서 점화를 하였다. 소화과정은 가스차단 후 post-purge를 한 후 운전이 정지된다. 이 때 pre-purge 및 post-purge는 시간조절이 가능하도록 하였다.

표 1. 가스히터에 적용된 가스버너 사양

항목	내용
Maker	Eclipse
Capacity	250,000 kcal/hr
TDR	25:1
Igniton	Spark ignition
Gas/air ratio control	Gas/air ration regulator
Flame detector	U.V

진공식 가스히터의 온도제어는 RTD에 의해서 측정된 온도값을 디지털지시조절계에서 받아 가스버너의 송풍기 개도를 조절하는 모듈트럴 모터에 출력신호를 보내 히터온도를 제어하는 방식이다.

표 2. 디지털 지시조절계 사양

항목	내용
제조사	Honeywell GH1000
출력형식	릴레이 출력 M/M(모듈트럴 모터) 구동용 위치비례 PID
제어동작	전력출력 DC4~20 mA
부가기능	이벤트(알람), 원격SP설정
입력종류	측온저항체 : -199.9~400 °C, 분해능 0.1 °C

시간에 따른 진공식 가스히터의 각 부위별 온도 경향을 보기 위해 데이터 로거(Yokogawa)와 노트북 컴퓨터로 데이터 취득장치를 사용하였다.

## 2.2 실험방법

1차시간지연모델에 대해 잘 알려진 제어기 설계식은 다음과 같다.

▶ Cohen-Coon 설계식 : 1/4 감쇠비를 가지므로 진동이 있는 폐루프응답에서는 PI값이 커져야 한다.

- ▶ IAE(integral of the absolute value of the error) : 오차 최소화
  - ▶ ISE(integral of the squared error) : 성능 우수
  - ▶ ITAE(integral of the time-weighted absolute error) : 강인한 제어파라미터를 제시하므로 오차에 관대하여 가장 선호
- 상기 방법들은 계단응답실험을 통해 얻어진 K,  $\tau$ ,  $\theta$ 로부터 적정 PID 값을 구할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 가스히터 제어계에서는 Cohen-Coon 설계식과 ITAE 방법이 적절함을 확인하였으므로 공정반응곡선을 통해 적정 PID 값을 선정하여 적용하였다.

입출열법으로 연속제어(PID 제어)와 단속제어(On Off 제어)에 의한 가스히터의 열효율 비교를 위해 일정시간 동안 운전한 후의 적산 냉각수 유량과 가스 유량 및 냉각수 입.출구 온도를 측정하여 열효율을 비교하였다. 초기 시동시는 비정상태이기 때문에 효율 적산결과에서 제외시키고자 정상상태 도달 후(시동 후 1 시간) 데이터를 취득하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 연소기 성능

가스버너를 가스히터에 장착한 후 성능테스트를 실시하였다. 그림 1은 버너부하에 따른 연료발열량과 공연비의 경향을 나타낸 것이다. 가스연료량은 부하에 비선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으며 이는 버너 부하조절을 위해 공기용 버터플라이 밸브를 사용한 영향인 것이다. 부하에 따른 공연비 경향은 부하열량 경향과 상사성이 없는 것으로 나타났다. 따라서 가스버너 공연비제어에 공압비례 제어방식이 적용되었으므로 송풍기의 출력 풍압의 경향을 조사하여 가스제어밸브의 제어특성 등과 같은 2차적 요인을 확인해야 할 것이다.

버너에서 공급되는 발열량과 공연비 경향에 의해 최종적으로 가스히터에 가해지는 출력특성은 연소실내의 온도로 파악할 수 있다. 그림 2에 그 경향이 나타나 있다. 여기서 로내 온도는 연소실과 열교환기 사이의 온도가 되겠다. 전체적인 경향은 가스공급열량과 상사성을 가지고 있으나 버너부하 80%이상부터 온도가 저하되는 경향을 나타내고 있다. 이는 난류확산화염의 유동특성(난류강도)과 연소실의 구조(연소가스 재순환 영역)에 의해 복합적으로 나타나는 현상으로 파악된다. 즉 화염의 난류강도가 커져 연소실에 재순환 영역이 형성되고 이로 인해 화염의 길이가 짧아지면서 폭이 증가하는 형태가 예측된다. 따라서 로 출구에서의 온도는 80% 이상부터 떨어져도 버너 출력은 가스공급열량 경향과 동일할 것이며 부하에 따른 히터 출구에서의 배가스 온도분포를 통해 확인 할 수 있을 것이다.

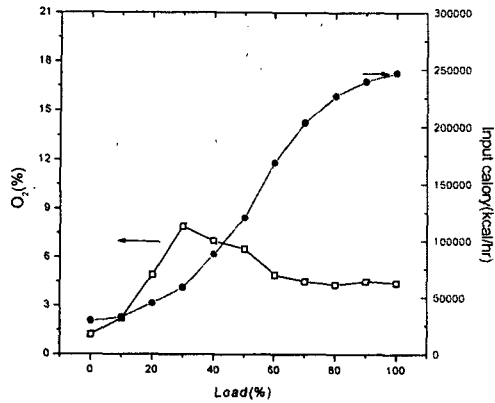


그림 1 버너부하에 따른 버너 가스유량 및 공연비 특성

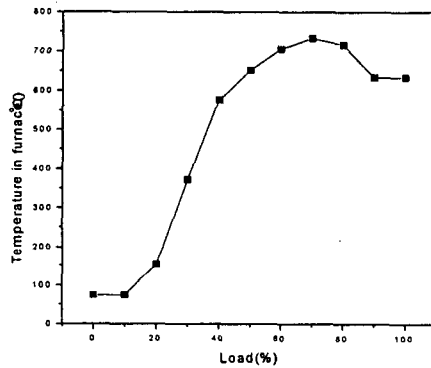


그림 2. 버너부하에 따른 연소실 출구에서의 온도경향

### 3.2 제어특성

부하특성선과 비례제어특성선을 통해 가스히터의 비례제어 몹셋과 적정 운전 범위를 예측할 수 있다. 그림 3의 데이터 점 곡선은 부하특성선으로 버너출력이 20, 40, 60, 80 % 일 때 평형이 되는 냉각수 출구온도를 나타낸 것이다. 직선으로 표시된 것은 비례제어특성선이다. P 값은 측정범위 중 비례대폭 비율(%)을 의미하는 것으로 실험에 사용된 디지털지시조절계의 온도측정 범위가 600 °C이므로 P값이 1이면 6 °C범위에서 비례제어(proportional control)가 이루어진다. 즉 설정 온도가 40 °C이면 37와 43 °C 구간에서 비례제어가 이루어진다. 따라서 비례제어만 할 경우 부하특성 곡선과 제어특성 곡선이 교차하는 지점의 온도로 설정값이 정해질 경우에만 몹셋없이 정확한 온도제어가 이루어지고 설정값이 이 교차온도 보다 높거나 낮을 경우 설정값과 몹셋이 발생되어 계속 유지될 것이다. 이러한

옅셋 제거를 위해 적분제어(integral control)가 필요한 것이다.

따라서 제어특성 실험에서는 냉각수 유량을 10 Nm<sup>3</sup>/hr 이하, 설정온도는 평형점 부근인 38 °C와 그 이외의 조건(48 °C)으로 일련의 실험을 수행했다.

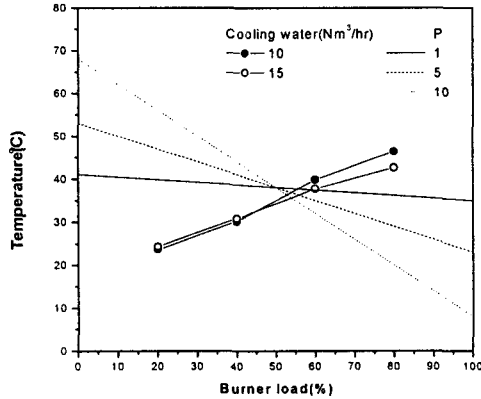


그림 3. 부하 및 제어 특성선

진공수제어에 의한 온도추종성 특성이 그림 4에 나타나 있다. 진공수 제어는 부하의 변동에 따라 냉각수 출구온도에 편차를 유발시킨다. 그 편차정도는 설정값 온도에 따라 다르겠지만 설정값 대비 5%이하인 것으로 나타났다. 그러나 정밀한 가스히터 후단온도제어를 고려한다면 주목할 결과이다. 초기 운전부하에서 정상상태에 도달한 후 부하를 5 Nm<sup>3</sup>/hr로 줄였을 때 설정대상인 진공수 온도는 설정값으로 복원이 되었으나 냉각수 출구 온도는 +옅셋을 나타냈고 열적 정상상태에 도달한 후 부하를 15 Nm<sup>3</sup>/hr로 늘렸을 때는 냉각수 출구 온도는 -옅셋을 나타냈다. 이는 진공수로부터 냉각수로의 열전달 함수가 1차원적이지 못하다는 사실을 나타낸 결과이다.

시간에 따른 로 출구온도경향은 디지털시조절계의 출력에 대응하여 나타난 결과이다. 냉각수량에 따라 비례하여 온도가 조절되는 것을 알 수 있다. 유량이 5 Nm<sup>3</sup>/hr일때 480°C, 10 Nm<sup>3</sup>/hr일때 650°C, 15 Nm<sup>3</sup>/hr일때 720°C로 부하에 따라 비례적으로 증가하고 있으며 이는 그림 2와 동일한 결과이다.

냉각수 입구온도는 부하가 증가할수록 약간씩 증가하고 있다. 이는 heat sink 인 냉각장치의 특성에 기인하는 것으로서 냉각탑의 팬회전수와 냉각탑 순환수 유량이 일정하기 때문에 나타나는 현상이다. 즉 가스히터에서 발생하는 열유속은 변화하는데 반해 냉각장치의 열유속은 일정하여 그 차이만큼 냉각수 입구온도가 증가하는 것이다.

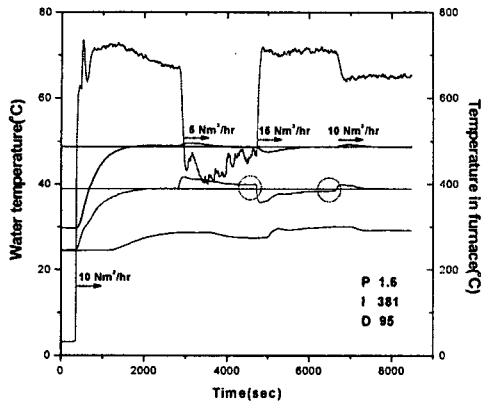


그림 4. 부하변동에 따른 진공수 온도 제어 특성

냉각수제어에 의한 온도추종성 특성결과가 그림 5에 나타나 있다. 진공수 제어와는 달리 부하변동에 따른 냉각수 출구 온도의 변동은 나타나지 않았으며 이는 제어대상 값이 냉각수 출구온도이였으므로 당연한 결과이다. 따라서 균일한 후단온도 제어를 위해서는 가스출구온도를 제어대상으로 설정하는 것이 바람직 하겠다. 그러나 현재 가스히터 설비는 후단온도 제어를 위한 온도계가 PCV 후단에 설치되어 있으므로 후단온도 제어시 설비에 미치는 영향을 검토할 필요가 있다. 진공수제어 때보다 P값이 작아 초기시동특성은 빠르게 응답하는 경향을 보여줬으나 이로 인해 약간의 옅셋이 나타났고 I값도 감소하였으므로 옅셋제거 응답이 느리게 나타났다. 냉각수 입구온도와 로 출구온도의 시간에 따른 경향은 진공수 제어와 동일한 경향을 나타냈다.

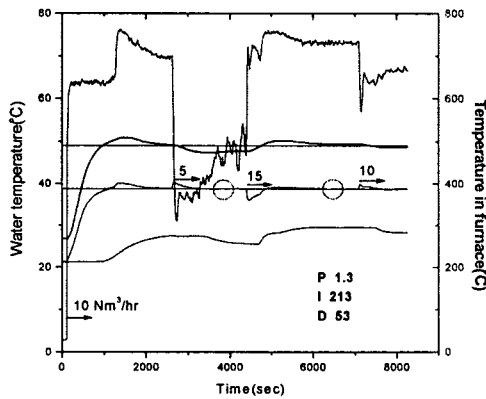


그림 5. 부하변동에 따른 냉각수 온도 제어 특성

제어방식에 따른 열효율 결과가 표에 나타나 있다. 결론적으로 냉각수량이 5

Nm<sup>3</sup>/hr 일때 효율은 연속제어방식이 단속제어에 비해 약 20% 향상되는 것으로 나타났다. 이는 단속운전이 버너 정지 가동 반복에 의한 전.후 퍼지 손실열량과 가동시 빠른 설정온도 회복을 위해 버너출력이 100%로 운전됨에 따른 배가스 열 손실의 증대로 나타난 결과이다.

제어온도 편차도 연소제어 방식의 경우 온도편차가 0.1℃이하로 나타난 반면 단속제어시는 4.5℃로 나타났다. 단속제어의 온도편차는 전.후 버너 퍼지시간 및 디지털시조절계의 이벤트 히스테리시스 설정값에 따라 변동적이다. 단속제어시 이벤트 온도를 48℃로 설정하였으나 0.8℃ 옅이 발생한 이유는 운전시 버너출력이 100%로 나오므로 48℃에서 버너가 정지되더라도 열관성에 의해 수초간 냉각수 출구온도가 상승하게 된 것이다.

연속제어를 위해서는 가스히터에 걸리는 부하 TDR과 버너 TDR이 일치해야 가능하다. 그러나 현재 공급소내 가스히터 설비현황은 가스히터 부하 TDR에 비해 버너 TDR이 작으며 그 범위도 가스히터의 높은 부하쪽으로 맞추어져 있어 하절기와 같이 가스히터에 걸리는 부하가 작은 시기에는 단속운전이 불가피한 실정이다. 따라서 이를 해결하기 위해서는 가스버너의 TDR을 개선할 필요가 있으며 이는 상용 버너교체로 가능하겠다. 물론 버너교체시 TDR외에도 화염의 형상과 현재 가스히터의 연소실 구조와 로내 압 등을 고려하여야 할 것이다.

표 제어방식에 따른 가스히터 열효율 비교

항목	연소제어	단속제어
열효율(%)	87.0	66.6
냉각수량(Nm <sup>3</sup> /hr)	5	5
버너 출력(%)	40~45	100(버너 가동시)
냉각수 제어온도(℃)	48	44.3~48.8
제어방식	PID	이벤트(히스테리시스:0.1℃)

### 3. 결론

1) 연속제어가 단속제어에 비해 20% 정도의 효율 상승을 유발하므로 현재 단속제어로 운전되고 있는 공급소내 가스히터의 제어방식을 연속제어로 전환할 필요가 있으나 이를 위해서는 가스버너의 TDR 개선이 선행되어야 한다.

2) 진공수 온도제어는 후단온도의 편차를 유발하므로 후단온도 제어방식으로 전환할 필요가 있으나 현재 가스히터의 설치여건이 후단온도를 제어하기 위한 최적조건이 아니므로 이에 대한 검토가 요구된다.

## 참고문헌

1. Donald R. Coughanowr., *Process Systems Analysis and Control*, 2<sup>nd</sup> ed., McGraw-Hill, (1991)
2. F. G. Shinskey, *Process Control Systems*, 4th ed., McGraw-Hill, (1996)
3. 박선원의 3인 공역, 공정 동특성 및 제어, 선중당, (1995)