

U형 복사튜브 버너 연소특성 및 성능실험

이현찬, 유현석, 이중성
한국가스공사 연구개발원

Combustion Characteristics and Performance of U type Radiation Tube Burner

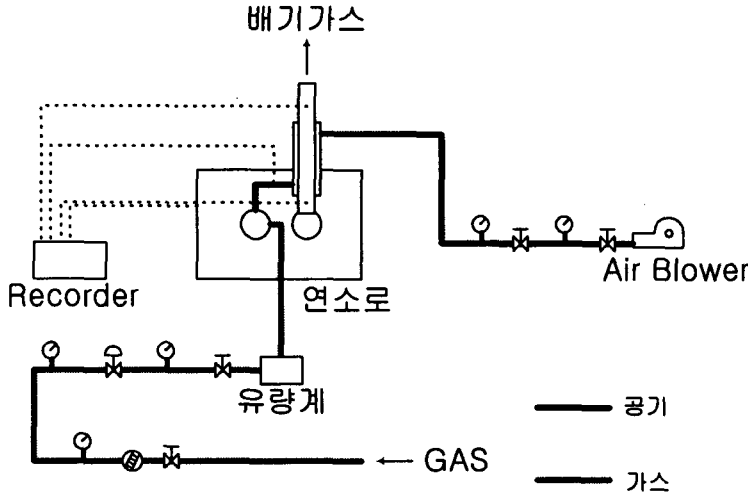
Hyun Chan Lee, Hyun Seok You, Joong Seong Lee
Korea Gas Corporation R&D Center

1. 서론

국내에서 적용되고 있는 공업로의 약 40%에 달하는 설비가 간접가열에 의존하고 있는 열처리로이다. 과거에는 제철압연용 가열로 내에서 버너를 사용하여 연료를 직접 연소시켜 화염의 휘염복사, 가스복사 및 노체의 복사 그리고 대류 열전달에 의하여 피가열물을 가열시켜 왔다. 그러나 이러한 연소방식은 버너에서 분출된 연료와 연소용 공기를 노 내의 공간에서 연소시키기 때문에 산화작용이 일어나 스케일이 발생하고 또한 노 길이나 노 폭이 대형화됨에 따라 노내온도가 불균일화 되었다. 따라서 정밀도가 요구되는 고품질의 제품을 열처리하기 위해서는 간접가열방식을 적용하는데 간접가열에 따른 문제점들을 개선한 간접가열방식이 현장에서 요구되어왔다. 그 결과로 최근 간접가열방식의 대표적 형태인 복사튜브 버너는 제철, 철강산업에서의 금속 열처리로 외에도 도금, 스텐레스 소둔로, 칩탄로, 소성로, 난방, 플라스틱 성형, 정제공장의 가열장치, 보일러, 식품 및 제지 등의 여러 가지 산업체에서 사용되고 있다.

복사튜브를 이용한 가열방식은 튜브 내에서 연료를 연소시킬 때 발생하는 열이 튜브를 통하여 복사됨으로서 피가열물을 가열하는 방식으로써 분위기제어가 필요한 열처리로 등에 널리 사용되고 있다. 이러한 복사튜브 가열방식에서 제한된 연소장의 연소특성, 곡관부를 포함한 온도특성 및 성능 등을 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

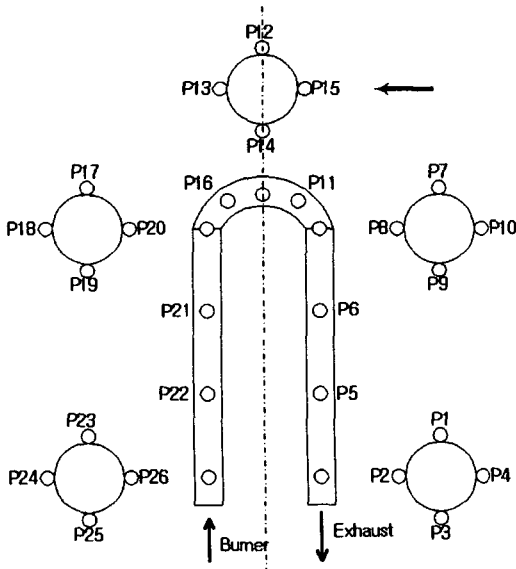


[그림 1] 실험장치도

[그림 1]은 복사튜브 버너 실험의 실험장치도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 공기는 60m³/hr용량의 Air Blower를 통하여 공급되고, 공기는 공기예열기에 의해 배기가스와 열교환에 의해 예열되어 공급된다. 이러한 열교환에 의해 배기가스의 폐열을 회수

할 수 있다. 버너는 연소용량이 30,000kcal/hr이며, 공급연료의 최대용량은 3.0Nm³/hr이다.

표면온도 측정은 복사튜브 버너 표면에 열전대를 설치하여 레코더를 통하여 데이터를 수집하였고, 공기예열기전 배기가스온도와 공기예열기후의 공기온도를 측정하였다. 그리고 배기가스분석기를 통해 배기가스 성분을 측정하였다. 실험은 각 부하(1/4(25%), 2/4(50%), 3/4(75%), 4/4(100%))에 따라 실시하였다.



[그림 2]은 복사튜브의 온도측정 지점을 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 26 points에서 온도를 받아 보았다. 그리고 연소부분, 배기부분, 양직관부의 끝나는 부분, 곡관부 중앙지점에는 원주방향으로 튜브표면에 4개씩의 열전대를 설치하였다. 그 외의 부분은 튜브 위부분의 표면 1군데만 열전대를 설치하였다.

[그림 2] 복사튜브의 온도 측정지점

3. 실험결과 및 검토

1) 연소가스 조성

본 실험에 사용한 연료는 천연가스로 <표 1>에 그 조성은 다음과 같다.

<표 1> 천연가스 조성

| | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₃ H ₈ | n-C ₄ H ₁₀ | i-C ₄ H ₁₀ | n-C ₅ H ₁₂ | i-C ₅ H ₁₂ |
|-----|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 조 성 | 0.898 | 0.075 | 0.020 | 0.0036 | 0.0034 | 0 | 0 |

사용된 연료의 주성분은 메탄(CH₄)이며, 부탄(C₂H₆) 및 프로판(C₃H₈)이 조금씩이 함유되어있다. 천연가스가 연소된 후 배기가스로는 CO₂, CO, H₂O, O₂, N₂, NO, NO₂가 발생하나, 성분조성비에서 CO, NO, NO₂는 양이 매우 작기 때문에 나타 내지 않았다.

<표 2>은 각 부하별 배기가스 측정치이고, <표 4>은 각 부하에 따른 배기가스 성분별 mol 분율을 나타낸다.

<표 2> 부하별 배기가스

| | 1/4 | 2/4 | 3/4 | 4/4 |
|-----------------------|------|-----|-----|-----|
| O ₂ (%) | 12.9 | 9.7 | 6.7 | 5.3 |
| CO(ppm) | 164 | 65 | 40 | 54 |
| CO ₂ (%) | 4.0 | 5.6 | 7.1 | 7.8 |
| NO(ppm) | 16 | 52 | 80 | 91 |
| NO ₂ (ppm) | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 배기가스온도(°C) | 221 | 298 | 367 | 422 |

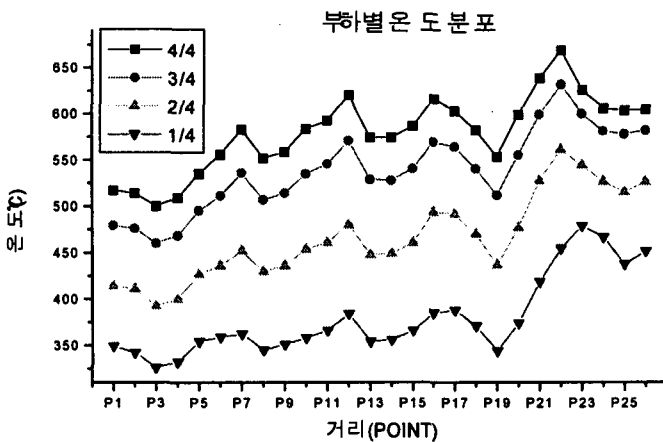
부하증대에 따라 과잉공기량이 줄어들었고, NO량이 증대되었다. 이는 복사튜브 버너 자체가 가열되어 고온분위기 내에서 연소되기 때문으로 생각된다.

<표 4> 부하별 배기가스 성분별 조성 비율(mol 비)

| | 1/4 | 2/4 | 3/4 | 4/4 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|
| CO ₂ | 0.043 | 0.058 | 0.071 | 0.077 |
| H ₂ O | 0.081 | 0.109 | 0.134 | 0.146 |
| N ₂ | 0.758 | 0.747 | 0.737 | 0.732 |
| O ₂ | 0.119 | 0.086 | 0.058 | 0.045 |
| Total | 1 | 1 | 1 | 1 |

2) 복사튜브의 표면온도 분포

최저 표면온도는 배기끝 아래부분(P3 지점)으로 모든 부하에서 동일하게 최저 표면온도를 나타내고 있다. 그리고 최고 표면온도는 P22 지점이나 1/4부하인 경우는 화염길이가 짧기 때문에 P23지점에서 최고표면온도가 나타나고 있다. 공기에 열기전 배기가스 온도는 각 부하별 346, 468, 547, 637℃ 이며, 공기에 열기후의 공기온도는 각 부하별 93, 111, 132, 144℃ 였다.



[그림 3]에서 보는 바와 같이 각 point별 온도편차가 크지 않음을 알 수 있는데 이것은 튜브표면 온도분포가 고르다는 것을 알 수 있다. 평균온도에 비교하여 최고 90~100℃, 최저 50~80℃ 정도의 편차를 나타내고 있다.

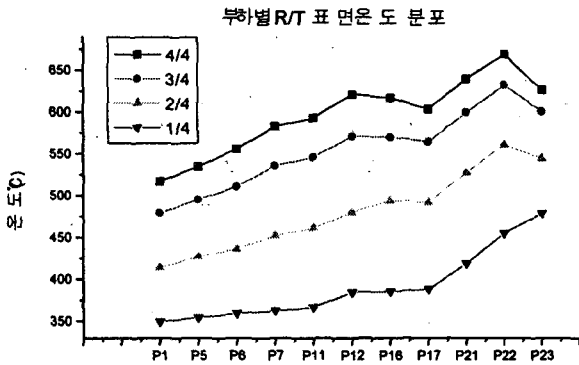
[그림 3] 부하별 복사튜브 표면의 거리별 온도분포

<표 6>은 각 부하별 평균온도, 평균온도와 최고, 최저 온도편차를 나타내고 있다. 부하가 높을수록 가열범위가 길어져 균일하게 가열하기 때문에 온도편차가 작아짐을 알 수 있다.

<표 6> 부하별 평균온도와 최고, 최저 온도편차

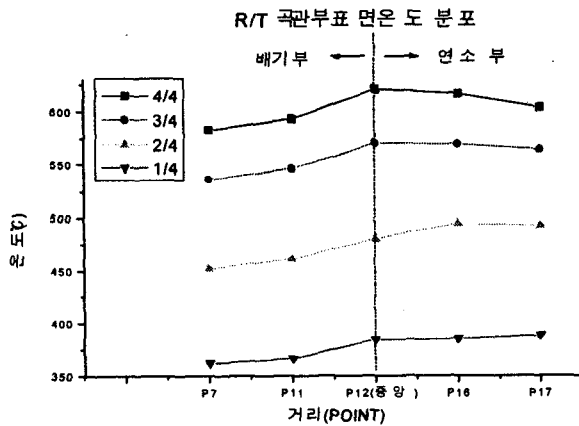
| | 1/4 | 2/4 | 3/4 | 4/4 |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| 평균온도(℃) | 379.8 | 466.4 | 539.2 | 579.7 |
| 최고-평균(℃) | 99.2 | 95.6 | 93.8 | 90.3 |
| 최저-평균(℃) | 53.8 | 74.4 | 79.2 | 79.7 |

또한, [그림 4]에서 보는 바와 같이 부하가 낮을수록 화염길이가 짧아져 최고표면온도가 P23지점에서 나타남을 알 수 있고, 반대로 부하가 높을수록 화염길이가 길어지기 때문에 P22지점에서 최고온도가 나타난다. 그리고 곡관부 시작지점부터는 곡면부의 저항으로 인해 연소가스의 속도가 감소하는 반면 온도는 높게 나타났다.



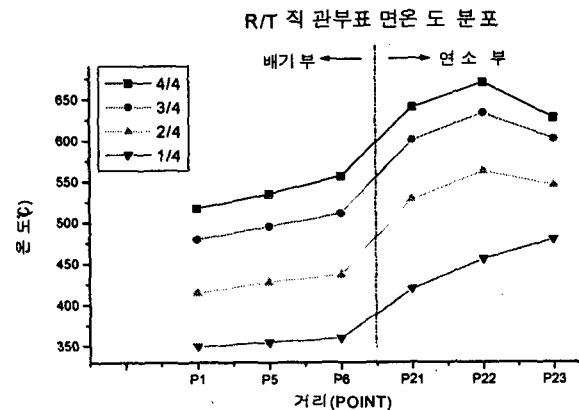
[그림 4] 부하별 복사튜브 표면온도 분포

따라서 곡관부 시작지점부터 표면온도가 증가하며, 곡관부 중앙지점에서 곡관부 최고온도를 나타낸 후 다시 온도가 감소하기 시작하는 것을 볼 수 있다.



[그림 5] 복사튜브 곡관부 표면온도 분포

[그림 5]은 각 부하별 복사튜브의 곡관부 표면온도 분포를 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 P7,11은 배기부 분이며, P16,17은 연소부분이다. 곡관부에서의 온도는 곡관부 중앙에서의 온도가 제일 높게 나타났고, 최고·저 약 20~40℃정도의 온도차이가 나타남을 알 수 있다.



[그림 6] 복사튜브 직관부 표면온도 분포

[그림 6]은 각 부하별 복사튜브의 직관부 표면온도 분포를 나타낸 그림이다. 직관부 P1,5,6은 배기부분의 온도분포이고, 직관부 P21,22,23은 연소부분의 온도분포이다. 배기부분 직관부는 최고·저 온도차가 약 10~40℃정도이고, 연소부분 직관부는 최고·저 온도차가 약 30~60℃정도였다.

3) 열효율 계산

<표 7> 부하별 복사튜브 버너 열효율

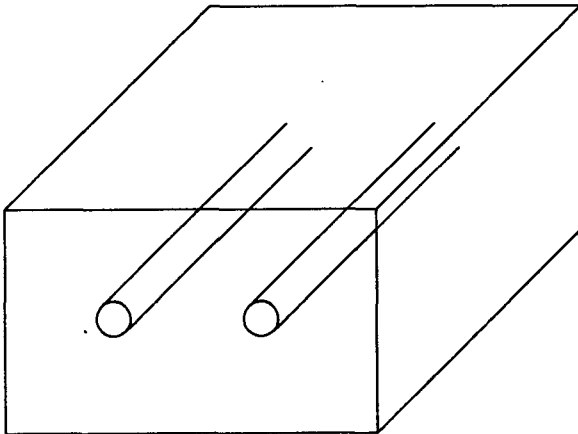
| 부 하 별 | 1/4 | 2/4 | 3/4 | 4/4 |
|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| 배가스손실열(kcal/Nm ³) | 1697.01 | 1764.37 | 1820.71 | 1966.38 |
| 입열(kcal/Nm ³) | 9500 | 9500 | 9500 | 9500 |
| 기타손실(%) | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 열효율(%) | 78.14 | 77.43 | 76.83 | 75.30 |

부하별 열효율 계산은 열손실법을 사용하였다. 열손실법 계산식은 다음과 같다.

$$\text{열효율} = 100 - \left(\frac{\text{배가스손실} + \text{기타손실}}{\text{버너공급열량}} \right) \times 100$$

복사튜브버너의 열손실로는 열손실의 대부분을 차지하는 배기가스손실과 기타손실(복사손실, 전열손실) 4%로 하였다.⁽⁴⁾ <표 7>에 계산하여 나타낸 것처럼 75~80%의 열효율을 얻었고, 부하가 증가함에 따라 배기가스로 손실되는 열량이 많아지므로 열효율이 떨어짐을 알 수 있다.

4) 복사튜브 복사효율 계산



[그림 7] 노내에 설치된 복사튜브 버너

[그림 8]에서 보는바와 같이 노내에 복사튜브버너가 설치되어있다. 열을 방출하는 복사튜브 표면과 방출된 열을 흡수하는 노벽의 두 표면으로 구성됨을 알수 있다. 이 두 표면사이에서는 복사 열전달이 주된 열교환 수단이 된다. 복사튜브에서 방출되는 열이 모두 노벽으로 흡수된다고 가정하고 복사튜브 및 노벽이 모두 흑체라고 가정하면 두 표면사이에서의 복사 열전달식은 다음과 같다.

$$q = \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

위 식을 이용하여 복사튜브버너의 복사효율을 계산하였다.

여기서 σ 는 Stefan-Boltzmann 상수로서 $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ 이다.

<표 8> 복사튜브버너의 복사효율

| 부 하 | 1/4 | 2/4 | 3/4 | 4/4 |
|---------|--------|---------|---------|---------|
| T1(K) | 572.15 | 606.15 | 638.15 | 650.15 |
| T2(K) | 652.95 | 739.55 | 812.35 | 852.85 |
| 복사열(W) | 4567.8 | 10049.6 | 16509.0 | 21451.6 |
| 복사효율(%) | 51.8 | 58.8 | 62.2 | 63.3 |

T1 : 연소로 벽면 온도, T2 : 복사튜브 표면 온도, A(복사튜브 표면적) : 1.08m²

부하의 증대에 따라 표면온도가 높아 복사효율이 높게 나타났고, 입열(9500kcal/Nm³)에 대한 각 부하별 복사효율이 약 52~63%정도 차지하였다.

4. 결론 및 향후계획

본 실험에는 연소용량이 30,000kcal/hr이며, 공급연료의 최대용량이 3.0Nm³/hr 인 복사튜브 버너를 사용하여 실험을 하였다. 먼저 복사튜브 표면의 온도분포는 최고, 최저 온도차가 150~170℃ 정도로 비교적 온도편차가 적음을 알 수 있다. 그리고 열효율도 75~80%정도로 양호하였다. 또한, 복사튜브버너의 복사효율은 52~63%였다. 향후 복사효율을 70%이상으로 높이기 위해 핀을 부착하여 복사튜브의 단면적을 높이는 방안으로 실험을 수행할 예정이다.

참고문헌

- (1) 고효율 축열식 R/T 가스버너 실증검증 및 확대보급방안 연구, 에너지관리공단, 2000.3
- (2) Heat Transfer, J.P. Holman, pp 288~389
- (3) 燃焼の理論と計算法, 設樂正雄
- (4) 가스히터 운전성능 향상을 위한 연구결과 현장적용 연구, 한국가스공사 연구개발원, 1997.12, pp 61~64