

# 핀 부착 U형 복사튜브 버너의 열전달 및 연소성능 실험

이현찬\* · 유현석\* · 이종성\*

## Heat Transfer and Combustion Characteristics and Performance of U type Radiation Tube Burner with fin

Hyun Chan Lee, Hyun Seok You and Joong Seong Lee

**Key Words:** U type(U형), Radiation tube burner(복사튜브버너), Combustion(연소), Thermal efficiency(열효율), Radiative efficiency(복사효율), fin(핀)

### Abstract

Present study deals with combustion characteristics and performance of U type radiation tube burner with fin which combustion capacity is 30,000kcal/hr and the maximum capacity of supply fuel is 3.0N m<sup>3</sup>/hr. Temperature difference of radiation tube is about 173°C at 25% capacity and this show relatively small temperature difference for convenient type. Thermal efficiency is satisfactory as 72~81%. Also, radiative efficiency of radiation tube is 52~73%. The efficiency of heat exchanger is 27~37%. Therefore, radiative efficiency is improved to 1~10% after installing fin.

### 1. 서론

U형 복사튜브 버너의 1차 실험으로 핀을 부착하지 않은 상태에서 열전달 및 연소성능 실험을 실시하여 보고한바 있다. 실험결과 튜브표면의 온도차는 150~170°C이며, 열효율은 75~80%로 양호하였다. 그리고 각 부하별 복사효율이 약 52~63%정도를 차지하였다. 또한, 연소용 공기의 공급온도를 높이기 위한 배기가스와 연소용공기의 열교환기의 온도효율은 30~40% 이었다. U형 복사튜브 버너의 2차 실험으로는 복사 열전달의 효율을 높이기 위해 튜브표면에 핀을 부착하여 열전달 및 연소성능 실험을 실시하였다.

핀을 부착하면 전체적인 표면적이 증가하기 때문에 복사열전달이 잘 될 것으로 예상하여, 튜브표면온도, 열효율, 복사효율 및 열교환기 효율 등을 측정하여 비교분석 하였다.

### 2. 실험장치 및 방법

1차 실험에서와 같은 실험장치 및 방법을 사용하여 실험을 실시하였다. Fig.1은 복사튜브 버너 실험의 실험장치도를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는바와 같이 공기는 60m<sup>3</sup>/hr용량의 송풍기를 통하여 공기에열기에 의해 배기가스와 열교환으로 예열되어 공급된다.

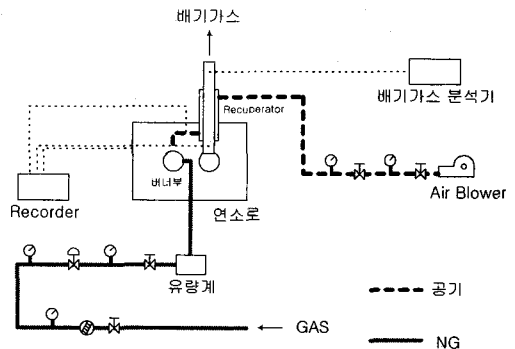


Fig.1 schematic diagram of radiation tube burner

\* 한국가스공사 연구개발원 가스이용기술센터

이러한 열교환에 의해 배기가스의 폐열을 회수하여 열효율을 높일 수 있다. 버너는 연소용량이 30,000kcal/hr이며, 공급연료의 최대용량은 3.0Nm<sup>3</sup>/hr이다.

1차 실험에서와 마찬가지로 표면온도 측정은 복사튜브 버너 표면에 열전대를 설치하여 레코더를 통하여 데이터를 수집하였고, 공기에열기전 배기가스온도와 공기에열기후의 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.

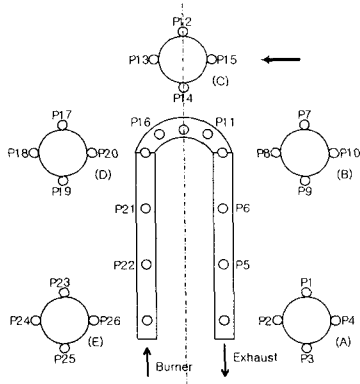


Fig.2 Measurement point of radiation tube temperature

Fig.2는 복사튜브의 온도측정 지점을 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 26points에서 온도를 측정하였다. 그리고 연소부분, 배기부분, 양직관부의 끝나는 부분, 곡관부 중앙지점에는 원주방향으로 튜브표면에 4개씩의 열전대를 설치하였다. 그 외의 부분은 튜브 위 부분의 표면 1군데만 열전대를 설치하였다.

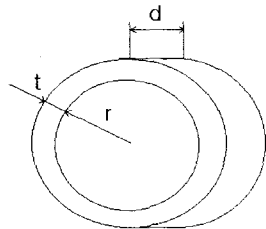


Fig.3 Fin installed in the radiation tube burner of U type

Table 1 Fin size installed in radiation tube burner

d(mm)	t(mm)	n(갯수)
5	1.5	30

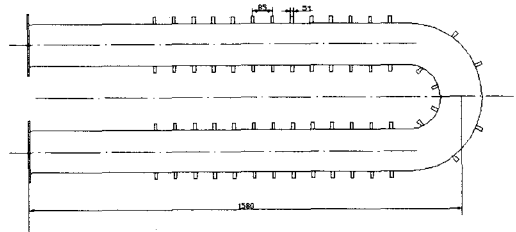


Fig.4 U type radiation tube with fin

이번 실험에서는 복사효율 증대를 위해 튜브표면에 핀을 설치하였다. Fig.3과 Fig.4는 핀 형상과 부착을 나타낸 그림이다. 1차 실험에서 복사효율이 약51~63% 정도이므로 복사효율을 70% 이상으로 향상시키기 위해 튜브표면에 핀을 설치하였다. 핀의 크기와 갯수를 계산한 결과 Table 1에서와 같은 크기의 핀을 구할 수 있었다. 특히 두께(d:5mm)의 경우, 용접이 가능한 최소용접 두께이며, 핀의 갯수는 30개로 하였다.

본 실험에 사용한 연료는 천연가스로 Table 2에 조성을 나타내었다.

Table 2 Composition of nature gas

CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
0.898	0.075	0.020	0.0036	0.0034

사용된 연료의 주성분은 메탄(CH<sub>4</sub>)이며, 부탄(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) 및 프로판(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)이 조금씩이 함유되어있다.

### 3. 실험결과 및 검토

#### 3.1 핀 설치 전.후 비교

핀 설치 효과를 측정하고자 핀 설치 전후의 같은 분위기 온도(377℃)를 올리기까지 핀 설치 전후 튜브표면 평균온도를 측정하였다.

Table 3 Temperature of surface in atmosphere temperature(377℃) with fin and without fin

	Ave. temp. of tube surface(℃)	Atmosphere(℃)
Without fin	579.7	377
With fin	557	377

Table 3에서 보는바와 같이 튜브 표면에 핀을 설치하였을 경우, 같은 분위기 온도 377℃를 얻는데 핀을 설치하지 않은 경우(579.7℃)와 비교하여 23℃정도 낮은 온도(557℃)에서 얻을 수 있었다. 이것은 핀을 통한 열전달 표면적의 증가로 적은 표면온도를 가지고 동일한 분위기온도를 얻을 수 있었다. 핀을 설치하지 않을 경우, 표면온도 557℃에서는 분위기온도 308.4℃를 얻을 수 있다. 그러므로 핀을 설치하였을 경우 설치하지 않았을 경우에 비해 68.6℃정도의 분위기온도 향상을 얻을 수 있다. 약 20%정도 분위기 온도가 향상되었다.

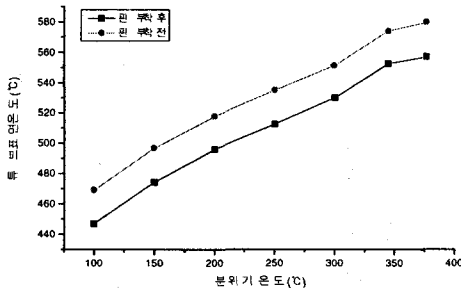


Fig.5 Temperature of tube surface along atmosphere temperature with fin and without fin

Fig.5은 핀 설치 전·후의 분위기온도에 따른 튜브표면온도 분포를 나타내고 있다.

### 3.2 복사튜브의 표면온도 분포

최저 표면온도는 배기끝 아래부분(Fig.2의 P3 지점)으로 모든 부하에서 동일하게 최저 표면온도를 나타내고 있다. 그리고 최고 표면온도는 버너측 위부분(Fig.2의 P23 지점)에서 최고표면온도가 나타나고 있다.

Table 4은 각 부하별 평균온도, 평균온도와 최고, 최저 온도차를 나타내고 있다. 부하가 높을수록 가열범위가 길어져 균일하게 가열되기 때문에 온도차가 작아짐을 알 수 있다.

Table 4 The difference of Temperature along load

	1/4	2/4	3/4	4/4
Average(℃)	275.9	387.5	475.8	540.6
Max-Ave.(℃)	101.35	113	106.45	71.4
Min-Ave.(℃)	56.15	60.25	66.55	57.6

Fig.6에서 보는바와 같이 각 point별 온도차가 크지 않음을 알 수 있는데 이것은 튜브표면 온도 분포가 고르다는 것을 알 수 있다. 평균온도에 비교하여 최고 70~110℃, 최저 56~67℃정도의 온도차를 나타내고 있다. 이것은 복사튜브의 온도차가 적을수록 휨이나 국부팽창 등을 방지할 수 있어 내구성을 증대할 수 있다.

또한, Fig.6에서 보는 바와 같이 P23~P26 지점(Fig.2)인 연소부에서 최고 표면온도를 나타내며 배기부분으로 갈수록 표면온도가 낮아지고, 다시 곡관부에서 온도가 상승함을 알 수 있다. 이는 곡관부 저항으로 인한 배가스 속도의 감소로 정체되므로 가열시간이 증가하여 온도가 상승함을 알 수 있다. 그리고 곡관부를 지나서 배기부까지 온도가 떨어짐을 알 수 있다.

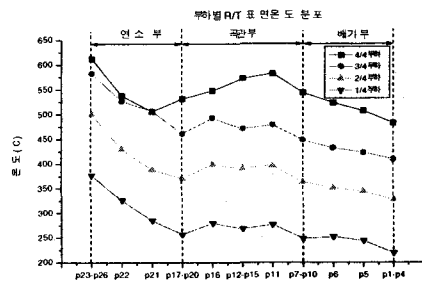


Fig.6 Surface temperature of radiation tube along load

따라서 곡관부 시작지점부터 표면온도가 증가하다 다시 온도가 감소하기 시작하는 것을 알 수 있다.

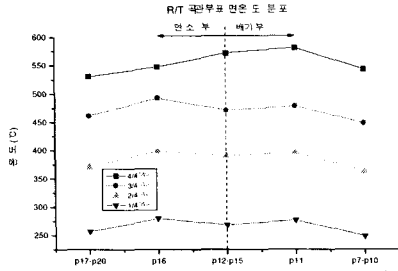


Fig.7 Surface temperature in the curvature part of radiation tube

Fig.7은 각 부하별 복사튜브의 곡관부 표면온도 분포를 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 P7,11은 배기부이며, P16,17은 연소부이다. 곡관부에서 온도차의 최대치는 약20~40℃ 정도이다.

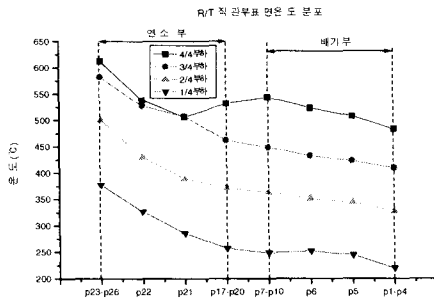


Fig.8 Surface temperature of straight part of radiation tube

Fig.8은 각 부하별 복사튜브의 직관부 표면온도 분포를 나타낸 그림이다. 직관부 P1,5,6은 배기부분의 온도분포이고, 직관부 P21,22,23은 연소부분의 온도분포이다. 배기부분 직관부의 최대 온도차는 약 10~40℃ 정도이고, 연소부분 직관부의 최대 온도차는 약 30~60℃ 정도였다.

### 3.3 열효율 계산

복사튜브버너의 연소특성 및 열효율을 측정하기 위해 배기가스 분석기로 배기가스를 측정하였는데, 배기가스로는 CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>가 발생하나, 성분조성비에서 CO, NO, NO<sub>2</sub>

는 양이 매우 작기 때문에 나타내지 않았다. Table 5은 각 부하별 배기가스 측정치이고, Table 6은 각 부하에 따른 배기가스 성분별 mol 분율을 나타낸다.

Table 5 Exhaust gas along load

	1/4	2/4	3/4	4/4
O <sub>2</sub> (%)	12.28	9.04	7.18	4.39
CO(ppm)	271	3	1	11
CO <sub>2</sub> (%)	4.71	6.43	7.38	9.0
NO(ppm)	20.9	65.5	85.2	92.1
Exhaust gas temperature(°C)	192.6	304.2	393.4	494.0

부하증대에 따라 과잉공기량이 줄어들었고, NO량이 증대되었다. 이는 복사튜브버너 자체가 열되어 고온분위기 내에서 연소되기 때문이다.

Table 6 Ratio of exhaust gas components along load (mol 비)

	1/4	2/4	3/4	4/4
CO <sub>2</sub>	0.046	0.061	0.068	0.08
H <sub>2</sub> O	0.086	0.115	0.13	0.153
N <sub>2</sub>	0.756	0.744	0.74	0.73
O <sub>2</sub>	0.112	0.08	0.062	0.037
Total	1	1	1	1

부하별 열효율 계산은 열손실법을 사용하였다. 열손실법 계산식은 다음과 같다.

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

Table 7 Efficiency of radiation tube burner along load

Load	1/4	2/4	3/4	4/4
Loss by exhaust gas(kcal/Nm <sup>3</sup> )	1461.64	1798.63	2091.53	2281.74
Input(kcal/Nm <sup>3</sup> )	9500	9500	9500	9500
Other loss(%)	4	4	4	4
Efficiency(%)	80.61	77.07	73.98	71.98

복사튜브버너의 열손실로는 열손실의 대부분을

차지하는 배기가스손실과 기타손실이 있는데, 기타손실은 4%로 하였다. Table 7에 계산하여 나타낸 것처럼 72~81%의 열효율을 얻었고, 부하가 증가함에 따라 배기가스로 손실되는 열량이 많아 지므로 열효율이 떨어짐을 알 수 있다. 핀을 붙이지 않은 경우와 비교하여 거의 비슷한 결과를 얻었다.

### 3.4 복사튜브 복사효율 계산

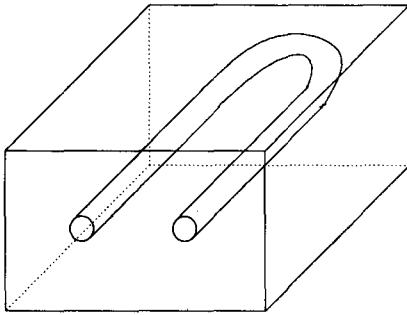


Fig.9 Radiation tube burner installed in combustion chamber

Fig.9는 노내에 설치된 복사튜브버너를 나타낸 그림이다. 열을 방출하는 복사튜브 표면과 방출된 열을 흡수하는 노벽의 두 표면으로 구성됨을 알 수 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  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수로서  $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ 이다.

U형 복사튜브버너의 이번 실험은 튜브표면에 핀을 부착하여 표면적을 넓힘으로 복사효율을 증가시키려고 하였다. Table 8은 복사효율을 계산한 결과 값이다.

Table 8 Radiative efficiency of radiation tube burner

Load	1/4	2/4	3/4	4/4
T1(K)	434.15	502.15	566.15	612.15
T2(K)	549.05	660.65	748.95	813.75
Radiation(W)	4581.1	10504.3	17538.5	24670.8
Radiative efficiency(%)	52.0	61.5	66.1	72.8

T1 : 연소로 벽면 온도, T2 : 복사튜브 표면 온도, A(복사튜브 표면적) :  $1.46\text{m}^2$

표에서 보는바와 같이 52~73% 정도의 복사효율을 얻을 수 있었다.

본 실험에서 튜브에 핀을 붙인 목적이 복사효율을 높이고자 하였기에 핀 설치 전후의 복사효율을 비교하였다. Table 9에 핀 설치전후의 복사효율을 비교하였다. 핀 설치전의 복사효율은 기 발표된 내용을 참고하였다. 부하조건은 서로 같으나 실험운전 방식이 달라 표면 온도차가 많이 났다.

Table 9 Radiative efficiency with fin and without fin

Load	1/4	2/4	3/4	4/4
Without fin(%)	51.8	58.8	62.2	63.3
With fin(%)	52.0	61.5	66.1	72.8

핀을 설치후 설치전보다 1~10% 정도 복사효율이 향상되었음을 알 수 있었다. 그러나 핀 부착후 부하별 복사효율이 70% 이상 될 것으로 예상하였으나 기대한 만큼의 효과를 얻지 못하였다. 핀 설치전의 같은 부하증대방식으로 운전하여 데이터의 비교가 추후 필요할 것 같다.

### 3.5 열교환기 효율 계산

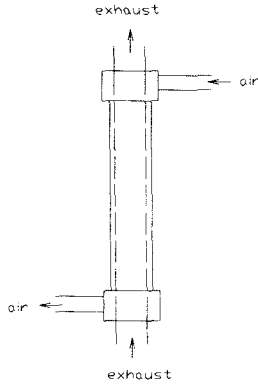


Fig.10 Heat exchanger of radiation tube burner

배기가스의 고온을 이용하기 위하여 배기가스부에 열교환기를 설치하여 고온의 배기가스와 연소용 공기를 열교환하여, 폐열을 회수하므로 버너의 효율을 향상시키는 효과를 얻으려 하였다. 열교환기의 온도 효율 계산식은 아래와 같다.

$$\text{온도효율} = \varepsilon = \frac{\text{실제이동열량}}{\text{가능한최대이동열량}}$$

$$\varepsilon = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{h1} - T_{c2}}$$

- $T_{h1}$  : 열교환기전 배기가스온도
- $T_{h2}$  : 열교환기후 배기가스온도
- $T_{c2}$  : 열교환기전 공기온도
- $\varepsilon$  : 열교환기의 온도효율

Table 10 Efficiency of heat exchanger of radiation tube burner

	1/4	2/4	3/4	4/4
$T_{h1}(K)$	281	436	541	659
$T_{h2}(K)$	192.6	304.2	393.4	494
$T_{c2}(K)$	43	48	60	52
$\varepsilon$	0.371	0.34	0.307	0.272
Efficiency of heat exchanger(%)	37.1	34.0	30.7	27.2

열교환기의 효율을 계산한 결과 27~37% 정도의 효율을 얻었다. 이는 열교환기를 통하여 배기가스로 버려지는 열량을 회수하여 연소용 공기 온도를 높여주는 역할을 한다.

### 4. 결론 및 향후계획

핀 설치 후 U형 복사튜브버너의 표면온도분포는 최고, 최저 온도차가 130~173℃ 정도로 비교적 온도차가 적음을 알 수 있다. 그리고 열효율도 72~81% 정도로 양호하였다. 또한, 복사튜브버너의 복사효율은 52~73% 이었다. 핀을 설치하지 않은 경우에 비교하여 1~10% 정도 효율이 향상되었음을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- (1) 이현찬, 이증성, 유현석, 2000.11, "U형 복사튜브 버너 연소특성 및 성능실험", 대한기계학회 추계학술대회, pp. 710~714
- (2) 에너지관리공단, 2000.3, "고효율 축열식 R/T 가스버너 실증검증 및 확대보급방안 연구"
- (3) J.P. Holman, "Heat Transfer", pp. 288~389, 419~463
- (4) 設樂正雄, "燃焼の理論と計算法"
- (5) 省I初等-セクター, "熱計算入門"
- (6) 한국가스공사 연구개발원, 1997.12, "가스히터 운전성능 향상을 위한 연구결과 현장적용 연구", pp. 61~64
- (7) "오사카 가스 Technical Report"
- (8) 권순석, "보일러 및 증기터빈"
- (9) 한국가스석유기기협회, "가스버너 설계 과정", pp. 151~165