

# 벤츠크리형 후연소기의 오염물질 저감에 관한 연구

이화신<sup>+</sup>·이용후<sup>++</sup>·이진석<sup>++</sup>·권오봉<sup>+++</sup>·이도형<sup>+++</sup>

## A Study on the Pollutant Reduction by Venturi Type After-burner

Hwa-Sin Lee<sup>+</sup>, Yong-Hoo Lee<sup>++</sup>, Jin-Seok Lee<sup>++</sup>, Oh-Boong Kwon<sup>+++</sup> and Do-Hyung Lee<sup>+++</sup>

**Abstract** : The purpose of this study is to develop venturi type after-burner in order to obtain pollutant reduction effect and find the best stable combustion condition. For this purpose, through a flow analysis, the shape of venturi type was made and flame holder locations were also decided by measuring chemical species at before and after the after-burner. Also, various chemical species concentration were measured at changing the induced air rates and the oxygen for oxygen enrichment for the solution the problems of much oxygen flow rate and the flame stability range. As results of this study, a flow distribution and the purification effect was excellent at venturi contraction 0.5 and flame holder location 12mm below the center of Venturi throat. On the purification characteristics, we found that pollutants reduction was effective when area ratio and oxygen are increased. But there are suitable quantities due to the flame shape change and combustion efficiency.

**Key words** : Venturi type after-burner(벤츠크리형 후연소기), Exhaust gas(배기가스), Flame holder(보염기), Oxygen enrichment(산소부화), Induced air(유인공기)

## 1. 서 론

난방, 산업, 수송, 발전 등 여러 분야에서의 연소 설비 증가로 인해 화석연료의 사용이 증가하고 있다. 이와 더불어 환경오염을 유발시키는 배출가스의 배출량도 더욱 증가하고 있으며 이에 따라 환경오염 문제에 대한 관심도 높아지고 있다. 국내외적으로 기후변화협약, 환경보호를 위한 선진국의 무역규제 강화,<sup>[1]</sup> 대기환경보전법의 개정, 지리정보시스템(GIS)의 구축, 굴뚝자동측정기(TMS)의 설치 등을 통하여 대기오염물질 저감의 노력들이 진행되고 있다.<sup>[2]</sup>

본 연구에서는 1차 주연소기에서 나온 배기가스를 연료와 산화제(순산소)를 이용하여 후연소를 시킴으로써 각종 오염물질의 저감, 배기후처리 시스템의 단순화 및 설치 운전비용의 절감을 도모하고자 하였다.

이를 위해, 연돌부근에 벤츠크리형 후연소기를 설치하였으며, 후연소기 내부에 화염의 안정화를 위해 중앙분공형 보염기를 설치하였다. 그리고 후연소기에서 보염기 위치변화에 따른 후연소기 전후의 배출가스 특성을 고찰하였다. 또한, 다량의 산소소모 및 화염의 안정화 범위에 대한 보완과 효율적 오염물질 저감을 위해 1차 배기덕트에 홀을 만들어 유인공기 효과를 도모함으로써, 유인공기 유입량 변화 및 산소부화용 산소공급량 변화에 따른 CO, HC 농도 및 그을음(Soot) 등의 오염물질 저감정도에 대해서도 살펴보았다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

+ 이화신(부경대학교 대학원 기계공학부), E-mail: sin0305@netian.com, Tel: 051)620-1415

++ 부경대학교 대학원 기계공학부

+++ 부경대학교 기계공학부

본 실험에 사용된 벤추리형 후연소기의 전체 계통도를 Fig.1에 나타내었다. 주연소기에 공급되는 공기는 송풍기(2.24 kW)에서 직경 52 mm의 공기유로를 통하여 공급되며, 압력맥동에 의한 유동변화를 최소화하기 위해 서지탱크를 거친 후, 공기유량계(MAGNECHELIC)를 지나 연소실 내부로 70 l/min의 공기를 공급하였다. 후연소기에 공급되는 산소부화용 산소는 순도 99.5%의 공업용산소를 사용하여 압력조정기와 산소유량계를 거쳐 필요한 유량을 조절하여 공급하였다. 연료는 상용프로판(C3H8)을 사용하였으며, 압력조정기와 연료유량계를 지나 주연소기와 후연소기에 각각 3 l/min, 2.13 l/min을 공급하였다.

Fig. 2는 실험에 사용된 주연소부와 후연소부의 형상과 크기 및 측정위치이다. 연소기의 전체길이는 1540 mm이며, 655 mm의 주연소부와 885 mm의 후연소부로 이루어져 있다. 주연소부는 길이 220 mm인 주연소기와 길이 435 mm인 배기덕트로 구성되어 있다. 그리고 배기덕트 상부에 직경 13 mm의 유인공기 흡입구를 뚫어 압력차에 의해 대기의 공기가 연소기 내로 유입되도록 하였으며, 유인공기 흡입구는 각각 0, 2, 4, 8, 16개씩 뚫어 그 유인공기량에 따른 영향을 알아보았다. 후연소부의 연료와 산화제는 노즐내경 9 mm, 직경 1 mm 분공 8개를 가진 분사각 45°의 T자형 노즐을 이용하여 예혼합-분사하도록 설계하였다. 그리고 보염기는 벤추리관 측면의 중앙부분과 상단으로 12 mm지점, 하단으로 12 mm지점에서 설치하였다.

한편, 후연소에 의한 각종 화학종 농도의 저감정도

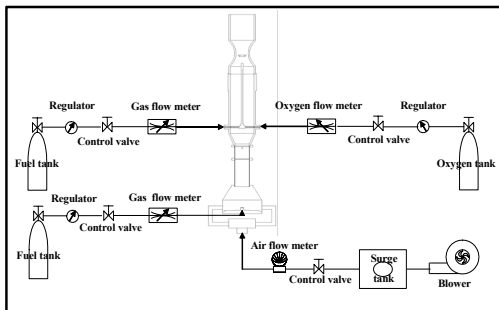


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

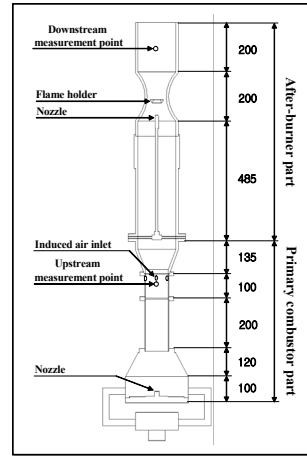


Fig. 2 Detail of primary combustor and after-burner

를 알아보기 위하여 주연소기의 끝단으로부터 240 mm 지점(이하, 상류부라고 한다.)과 벤추리관 측면의 중심으로부터 200 mm 지점(이하, 하류부라고 한다.)에서 중심에서부터 반경방향으로 5 mm 등간격으로 측정하였다.

## 2.1 실험장치

Table 1은 보염기 위치에 따른 영향을 알아보기 위한 조건이다. 주연소부의 연료와 공기유량을 공기비  $\alpha=0.97$ 로 일정하게 공급하고, 후연소부의 연료와 산소공급유량을 각각 2.13 l/min과 22 l/min로 일정하게 공급하여, 보염기를 벤추리관의 상단, 중앙, 하단에 설치하여 CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub>, Soot 농도 및 온도를 측정하였다. 또한, Table 2는 유인공기와 산소부화용 산소유량의 영향을 알아본 조건으로서 보염기를 하단에 고정시키고, 면적비를 0, 0.07, 0.13, 0.27, 0.55로 변화시키면서 산소부화용 산소공급량을 22, 20, 16, 12, 8 l/min으로 변화시켜 각종 화학종 농도를 측정하였다.

벤추리관의 형상적 특징으로 인해 측정위치의 직경이 다르므로 본 실험에서는 상류와 하류의 비교를 위해 상류 반경방향거리( $r$ )와 하류 반경방향거리( $R$ )를 무차원하여 도시하였다( $r/R$ ). 그리고 면적비( $A_2/A_1$ )는 배기덕트 상단부 100 mm 벽면에 직경 13 mm인 유인공기 흡입구가 무한개 뚫렸다고 가정했을 때의 면

**Table 1 Experimental conditions (for flame holder location)**

Condition	Oxygen flow rate (ℓ/min)	Flame holder locations	After-burner fuel rate (ℓ/min)	Primary combustor's excess air ratio (α)
A <sub>1U</sub>	22	+12 mm	2.13	0.97
A <sub>1o</sub>		Center		
A <sub>1D</sub>		-12 mm		

**Table 2 Experimental conditions (for oxygen flow rate and area ratio)**

Condition	Area ratio	Oxygen flow rate (ℓ/min)	After-burner fuel rate (ℓ/min)	Primary combustor's excess air ratio (α)
A	A1	22	2.13	0.97
	A2	20		
B	B1	22		
	B2	20		
	B3	16		
C	C1	22		
	C2	20		
	C3	16		
	C4	12		
	C5	8		
D	D1	22		
	D2	20		
	D3	16		
	D4	12		
	D5	8		
E	E1	22		
	E2	20		
	E3	16		
	E4	12		
	E5	8		

적(A<sub>1</sub>)에 대한 실제 뚫린 흡입구의 총면적(A<sub>2</sub>)의 비를 의미한다.

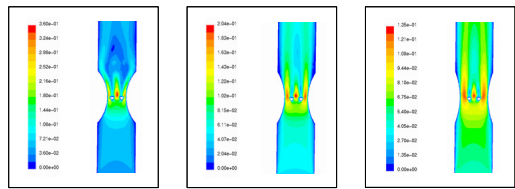
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 Venturi 형상 및 보염기 위치 결정

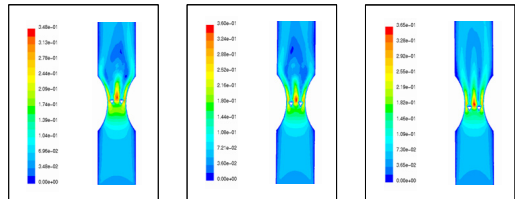
후연소 기술에 있어서 후처리 장치는 연돌을 통해 배출되는 배기가스의 유량 및 오염도에 적합한 형상을 가지는 것이 중요하다. 본 연구에서는 유체의 유동을 원활히 하기 위한 장치로써 벤츨리관 타입을 사용하였으며, 유동분포를 좋게 하면서 안정적인 화염을 확보하기 위해 벤츨리의 형상 및 보염기의 설치위치 등에 대한 수치해석을 진행하였다. Fig. 3의 (a),

(b), (c)는 각각 0.05 m/sec의 배기가스가 들어간다고 가정하였을 때, 벤츨리관의 목(throat)을 수축비 0.5(d=80 mm), 0.652(d=100 mm), 0.75(d=120 mm)로 하여 수치해석한 등속도분포의 결과이다. 수축비 0.5(80 mm), Fig. 3의 (a)인 경우가 보염기 이후에서 유속분포가 가장 일정하게 좋았으며, 이러한 이유로 본 연구에서는 수축비 0.5의 벤츨리관을 이용하여 실험하였다.

Fig. 4의 (a), (b), (c)는 각각 0.05 m/sec의 배기가스가 들어간다고 가정하였을 때, 수축비 0.5(80 mm)인 벤츨리관의 Throat 정중앙위치(y=0 mm), 정중앙보다 12 mm 위쪽(y=+12 mm), 정중앙보다 12 mm 아래쪽(y=-12 mm)에 보염기를 설치하였을 때의 수치해석 등속도분포의 결과이다. Fig. 4의(a), (b), (c)를 각각 비교해 보면, 보염기 이후에서 유동(등속도분포)이 가장 좋게 나타난 것은 보염기를 중앙보다 12 mm 낮은 위치에 설치한 경우 (c)임을 알 수 있다.



(a) 0.5(d=80 mm) (b) 0.625(d=100 mm) (c) 0.75(d=120 mm)  
Fig. 3 Contours of velocity by venturi contraction ratio(0.5, 0.625, 0.75) change at venturi throat



(a) y=+12 (b) y=0 (c) y=-12  
Fig. 4 Contours of velocity by flame holder location(y=+12, 0, -12) change at venturi throat d=80 mm

#### 3.2 보염기의 위치에 따른 영향

Fig. 5는 후연소기에서 산소공급량 22 ℓ/min의 조건에서 보염기 위치변화를 하였을 때 즉, 실험조건

A1U, A1O, A1D의 CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub>, Mean Soot 농도 및 온도를 나타낸 것이다. Fig. 5의 (a)에서는 상류영역에 비해 하류영역에서 CO농도가 상당히 감소하였음을 알 수 있으며, 농도는 A1U>A1O>A1D 순으로 나타났다. 그리고 보염기가 상단에 위치한 경우, 벽면 부근에서 많이 나타남을 알 수 있으며 이는 벽면 근방을 통하여 후연소 되지 못한 CO가 빠져나가기 때문으로 생각된다. Fig. 5의 (b)에서는 상류에 비하여 하류는 모두 증가하였으며, 하류측에서는 모두 벽면 근방에서 급속히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 앞의 CO농도의 경향과 반대임을 알 수 있다. Fig. 5의 (c)에서는 상류에 비해 하류에서 대부분 높은 O<sub>2</sub> 농도를 나타내고 있으며, 벽면부근에서 급격히 상승

하고 있음을 알 수 있다. 이는 앞의 CO와 같이 벽면근방을 통해 연소반응에 참여하지 못한 O<sub>2</sub>농도가 빠져나가기 때문으로 생각된다. Fig. 5의 (d)에서는 상류영역과 비교하여 하류영역에서 HC저감효과가 확연함을 알 수 있으며, 보염기의 위치변화와 관계없이 모두 뛰어난 효과를 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 5의 (e)에서는 후연소를 하였으나 하류에서의 온도상승은 상류에 비해 그다지 크지 않거나 오히려 낮음을 알 수 있다. 이는 후연소에 의해 화염이 안정화되는 보염기 부근에서는 물론 온도가 높지만, 배기가스 전체의 온도는 그다지 높지 않다는 것을 의미한다. 따라서 본 실험에서 후연소기에 공급되는 연료유량은 오염물질을 제거하기위한 후연소용으로 공급하는데 적합한 것으로 생각된다. Fig. 5의 (f)에서는 상류에 비하여 오히려 하류의 모든 조건에서 약간 증가함을 알 수 있으며, 이는 산소공급으로 인한 화염영역에서의 온도상승 때문에 생성된 것으로 생각된다. 그리고 하류영역에서 NO<sub>x</sub>발생량은 A1D>A1O>A1U 순으로 많이 나타났다. Fig. 5의 (g)에서는 Soot 농도가 상류에 비해 하류의 모든 조건에서 확연히 줄어들었음을 알 수 있으며, 보염기 위치변화에 따른 농도의 차는 크게 없으나 중앙이 하단보다 약간 낮음을 알 수 있다.

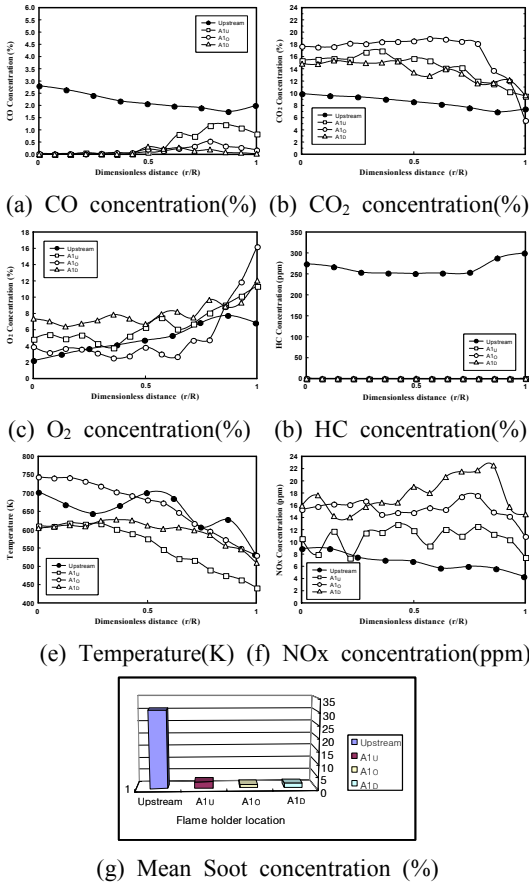
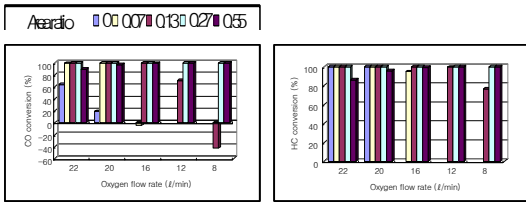


Fig. 5 Each concentrations and temperature distribution for radial direction by flame holder location change (O<sub>2</sub>=22 l/min)

### 3.3 산소부화 및 유인공기에 의한 영향

#### 3.3.1 유인공기 변화에 따른 영향

Fig. 6은 후연소기에서 산소유량 22 l/min, 20 l/min, 16 l/min, 12 l/min, 8 l/min의 각 조건에서 면적비 0, 0.07, 0.13, 0.27, 0.55으로 변화시켰을 때, 후연소에 의한 CO 및 HC의 저감정도를 백분율로 나타낸 것이다. 면적비 0.55의 22 l/min과 20 l/min을 제외하고는 전반적으로 면적비가 증가할수록 CO 및 HC는 저감되었다. 각각의 유량에 대한 유인공기 변화, 즉 면적비 변화의 특징을 살펴보면, 산소유량 22 l/min과 20 l/min의 경우, 면적비 0과 0.55가 다소 낮은 저감율을 보이고 있다. 전자는 산소공급이 동일할 때, 유인되는 공기 혹은 산소의 양이 부족하여 불완전연소에 의한 CO가 생성되었고, 후자는 큰 면적비의 영향으로 유인공기의 유입이 많아져서 산소과잉공급에 의한 화염형태가 바뀌고, 결국 보염기에 의한 후연소가 원활하지 못했기 때문으



(a) CO reduction(%) (b) HC reduction(%)

Fig. 6 CO, HC mean conversion efficiency distribution for each oxygen flow rate(22, 20, 16, 12, 8 l/min) change by area ratio change

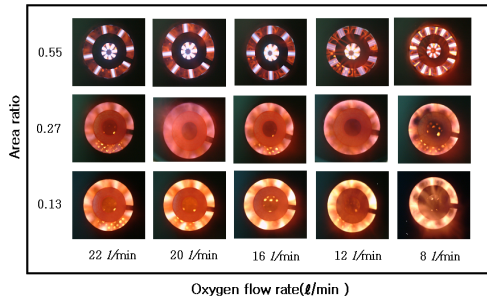


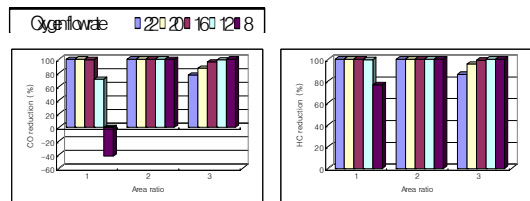
Fig. 7 Direct photography of flame by oxygen flow rate change at downstream (area ratio=0.13, 0.27, 0.55)

로 사료된다[Fig. 7]. 따라서 산소공급량 22 l/min, 20 l/min의 조건에서는 면적비 0.13 전후의 조건이 적당하다. 한편, 산소공급량 16 l/min의 경우, 면적비 0에서는 산소공급량 부족으로 인해 후연소를 위한 화염이 형성되지 못하여 측정이 불가능하였고(소염화현상), 0.07에서는 CO가 정화되지 못하고 다소 증가하는 경향을 보였다. 이는 산소유량 16 l/min의 0.07 조건에서 다른 면적비에 비해 유인공기가 적어서 산소공급량의 부족에 따른 불완전연소로 CO 농도가 증가된 것으로 판단된다. 그리고 12 l/min과 8 l/min에서도 이와 비슷한 이유 때문에 면적비 0과 0.07에서는 화염이 형성되지 못했고, 0.13에서는 오염물질 저감이 높지 않았다. 따라서 산소유량 16 ~ 8 l/min의 조건에서는 면적비 0.27을 이용하면 90% 이상의 정화 효과를 얻을 수 있다.

### 3.3.2 산소부화용 산소유량 변화에 따른 영향 앞에서 언급한 바와 같이 동일한 산소량 공급에 대

한 면적비는 0.27이내에서 충분한 오염물질저감효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 면적비 0과 0.07에서 소염화현상에 따른 각종 화학종 농도의 측정이 불가능하였다. 따라서 본 절에서는 면적비를 0.13, 0.27, 0.55로 고정하고 산소유량을 변화시켰을 때의 오염물질저감효과를 고찰하기로 한다.

Fig. 8에서는 후연소기에서 면적비 0.13, 0.27, 0.55의 각 조건에서 산소유량을 22 l/min, 20 l/min, 16 l/min, 12 l/min, 8 l/min으로 공급하였을 때, 상류영역에 대한 하류영역에서 CO, HC의 저감정도를 백분율로 나타낸 것이다. 면적비 0.13 조건에서 CO의 정화율을 살펴보면, 산소공급량 12 l/min의 경우 산소공급량 부족으로 인한 불완전 연소로 인해 다른 조건에 비해 다소 낮은 면을 보이며, 8 l/min에서는 후연소에 의한 효과를 전혀 보지 못하고 CO농도가 상류영역보다 하류영역에서 더 증가하였으며, HC의 경우 다소 낮은 정화율을 보였다. 따라서 면적비 0.13에서 산소공급량 16 l/min으로도 오염물질이 확연히 저감됨을 알 수 있다. 면적비 0.27에서 CO, HC 농도변화를 보면 산소유량 변화와 상관없이 모두 정화된 것을 알 수 있다. 따라서 면적비 0.27에서는 모든 조건에서 오염물질을 충분히 저감시킬 수 있었으며, 산소공급량 8 l/min만을 공급하여도 오염물질이 90%이상 저감됨을 알 수 있다. 면적비 0.55의 경우 산소공급량이 증가할수록 정화율이 감소한다. 이는 산소공급량의 증가로 인하여 화염형태가 변화하여 정화효과가 떨어지는 것으로 사료된다[Fig. 7]. 따라서 면적비 0.55조건에서 산소공급량이 16 l/min이하가 적당하다.

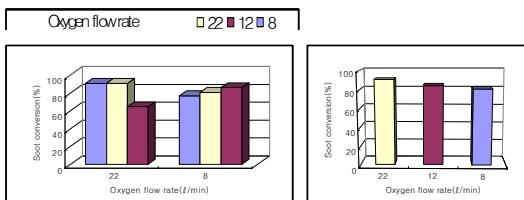


(a) CO reduction(%) (b) HC reduction(%)

Fig. 8 CO, HC mean conversion efficiency for each area ratio(0.13, 0.27, 0.55) change and oxygen flow rate change

### 3.3.3 Soot 정화 특성

Fig. 9의 (a)는 산소공급량 22 l/min, 8 l/min에서 면적비 0.13, 0.27, 0.55의 변화에 따른 상류 영역에 대한 하류영역에서 Soot의 저감정도를 백분율로 나타낸 것이다. 산소공급량 22 l/min의 경우, 면적비 0.13, 0.27에서 90%정도의 Soot 정화율을 보였으며, 면적비 0.55에서는 65%의 정화율을 나타내고 있다. 면적비 0.55에서 오히려 정화율이 낮은 것은 전술한 바와 같이 보염기 주변의 화염이 골고루 분포되지 않았기 때문으로 사료된다. 8 l/min의 경우, 면적비가 증가할수록 정화효과가 좋아짐을 알 수 있다. Fig. 9의 (b)는 면적비를 0.27로 고정하고 산소공급량을 22 l/min, 12 l/min, 8 l/min으로 변화시켰을 때, 산소공급량이 증가할수록 Soot의 정화율이 증가한다. 한편 앞의 Fig. 9의 (a)에서 보여진 바와 같이 면적비 0.27이 다른 조건에 비해 상대적 Soot 농도의 저감효과가 좋음을 알 수 있다.



(a) Oxygen flow rate (22, 8 l/min) (b) Area ratio 0.27  
Fig. 9 Soot mean conversion efficiency distribution for each oxygen change and area ratio change

## 4. 결 론

벤츠크리형 후연소기의 개발에 따른 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 벤츠크리관의 형상 및 보염기의 위치 결정을 위한 유동해석 결과, 수축비 0.5에서 가장 좋은 유동현상을 얻을 수 있었고, 벤츠크리관의 중앙보다 약간 아래에 보염기를 설치하였을 때 보염기 위쪽의 유동 분포가 가장 좋았다.
2. 보염기를 벤츠크리관 중앙 및 12 mm 상·하단에 설치하여 오염물질의 농도저감을 고찰한 결과, 벤츠크리관 중앙보다 약간 하단에 설치한 경우가 우수하였다.
3. 주연소기의 배기덕트에 유인공기를 공급한 결

과, 소염화범위를 알 수 있었고, 면적비가 증가할수록 오염물질저감의 효과가 우수하였다. 한편, 면적비를 너무 크거나 작으면 공기과잉공급하에서 화염형태의 변화 및 산소공급 부족에 의한 불완전 연소가 원인이 되어 오히려 오염물질이 증가하였다.

4. 본 실험조건에서 산소소모량의 저감을 위해 산소공급량을 저감시켰을 경우, 면적비 0.27일 때가 모든 조건의 범위에서 저감되었으며 소량의 산소유량을 첨가하여도 오염물질 저감효과가 우수하였다.

5. 따라서 본 실험을 통하여 다량의 산소소모 및 화염의 안정화 범위에 대한 보완과 효율적 오염물질 저감을 고려하면 면적비 0.27과 0.55의 산소공급량 8 l/min이 가장 적합하였다.

## 후 기

본 논문은 한국과학재단 지정 부경대학교 환경 첨단에너지기계연구센터의 지원(과제번호 : R12-2003-001-03006-0)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 홍지형 허정숙, 이덕길, 석광설, 이대균, 엄윤성, “새로운 대기오염물질 배출원 분류체계에 관한 제언”, 한국대기환경학회지, Vol. 18, No. 3, pp. 231-245, 2002.
- [2] 한화진, 윤정임, “21세기 대기보전정책 전략수립에 관한 연구”, 한국환경정책평가연구원, 1998.
- [3] 김세권, “저과잉, 배기재순환 및 다단 연소의 복합형 저 NOx 연소 시스템 개발”, 한국생산기술연구원 보고서, 2000.
- [4] Dong-Shin Shin, “Low NOx Combustor in a Industrial Gas Turbine”, 대한기계학회지, Vol. 34, NO 12, pp.929-939, 1994.
- [5] 노동순, “최근의 저 NOx 연소기술의 동향”, ETIS분석지, 제 8권, 1999.
- [6] 김석준, “저 NOx 연소기술”, 한국청정기술학회지, Vol 2, No 1, pp.22-31, 1996.