

# 모형 가스터빈 연소기의 2차공기 주입에 따른 연소배출특성

김규성\* · 임경달\*\* · 이도형\*\*\*

부경대학교 대학원 기계공학과, 부산기능대학 연구원, 부경대학교 기계공학부

## Combustion Emission Characteristics on the Effect of Secondary Air Injection in Model Gas Turbine Combustor

KYU-SUNG KIM\*, GYUNG-DAL LIM\*\* AND DO-HYUNG LEE\*\*\*

\*Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

\*\*Pusan Polytechnic College, Pusan 616-101, Korea

\*\*\*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

**KEY WORDS:** Primary air 주류방향공기, Secondary air 2차공기, Combustion field 연소장, Model gas turbine combustor 모형가스터빈 연소기, Excess air ratio 공기과잉률, Flame structure 화염구조, Combustion emission characteristics 연소배출특성

**ABSTRACT:** The purpose of this study is to investigate the combustion emission characteristics by the effect of secondary air injection and variation of the excess air ratio in combustion field of model gas turbine combustor. For this purpose, mean temperature, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> and HC concentrations were measured by changing excess air ratio and secondary air injection. As a result of this study, mean temperature was decreased and CO, HC emission increased by increasing the excess air ratio of secondary air. Therefore, this results showed the secondary air injection effected strongly on the flame structure and combustion emission characteristics.

### 1. 서 론

현재 대기오염과 에너지 사용량의 제한으로 인한 환경문제를 해결하기 위한 현실적인 방안으로 『에너지 이용 효율의 향상 및 저공해 연소』가 실질적인 방안으로 대두되고 있다.

최근 국내외 동력기계분야에서 연소기는 고성능·저공해·연소제어의 고도화 등을 요구하는 에너지절약과 연소 배출물 저감을 실현할 수 있는 연소기술 개발이 중요한 연구과제로 되었다. 이에 따라 현재 실용 연소기기에 많이 사용되고 있는 확산연소방식은 화염을 크게 할 수 있으며, 조작범위가 넓고 역화 등의 위험도가 낮은 장점을 가지고 있다. 또한 선회류는 연소속도를 지배하는 난류강도 증대 및 체류시간을 제어하고, 화염구조, 화염의 안정성 및 공해물질의 생성을 제어하고 연료와 공기의 혼합을 촉진하는 것으로 알려져 있다.

Ikeda 등(1997)은 가스터빈 연소기에 대해 선회류를 동반한 연소기내의 재순환 영역의 거동을 포함한 유동상태, 연료와 공기의 혼합, 온도 및 농도분포를 조사하였다. Gupta 등(1979)은 유동장의 높은 전단응력영역과 과농영역이 일치되도록 연료와 유동의 방향을 조절함으로써 높은 연소부하율을 얻을 수 있고, 또 화염의 안정한계도 더 넓어지는 다중선회 연소기기의 원리를 발표하였다. 그러나 이런 종래의 많은 연구에도 불구하고, 선회 및 비선회 화염에 대한 안정범위와 같은 정보는 알려져 있으나 2차공기 주입에 따른 연소장의 화염구조 및 연소배출 특성 등에 대한 정보가 부족한 실정이다. 그러므로 에너지 절

약과 저공해성 등을 고려한 최적의 연소기 설계를 위해서는 2차공기 주입이 연소장에 미치는 연소배출특성에 대한 체계적인 연구가 무엇보다 필요한 실정이다. 따라서 본 연구는 선회류를 동반하는 모형 가스터빈 연소기에서 주류방향의 공기유량변화와 2차공기 주입에 따른 평균온도 및 각종 화학종농도 측정을 통한 연소상태를 분석함으로써 1차공기 과잉률변화와 2차공기 주입이 연소 배출에 미치는 영향을 고찰하였다.

### 2. 실험장치 및 방법

#### 2.1 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 모형 가스터빈 연소기의 실험장치의 구성을 Fig. 1에 나타내었다. 주류공기(Primary air)는 송풍기(3HP)에서 공급되며 압력맥동을 최소화하기 위해 서지탱크를 거친 후, 증류유량계(SOKKEN, LFE-100B)에 의해 검증된 오리피스 수두를 조절밸브로 조절하여 필요 유량을 공급한다. 연료는 상용 LPG로서 압력용기에서 공급되며, 압력조정기와 가스유량계(DC-2, SINAGAWA)를 거쳐 연소기에 공급한다. 2차공기(Secondary air) 주입은 주류방향 유량주입과 같은 방법으로 별도의 송풍기(3HP)에서 서지탱크와 오리피스를 거쳐 조절밸브로 조절하여 필요유량을 연소기에 공급한다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 연소기의 상세도이다. 전체 연소기 길이는 450mm이며, 연소기는 직경 154mm 케이싱과 직경 102mm 라이너로 구분된다. 케이싱은 전체길이에서 150mm 간격으로 3개의 영역으로 나누었으며 각각의 영역의 중간에 직

경 20mm의 공기 주입구를 180° 간격으로 2개씩 배열하여, 2차공기(Secondary air)가 주입되도록 제작하였다. 주류방향공기(Primary air)는 내경 52mm의 내측원관으로 유입되고 주류방향 45°의 선회각을 가지는 선회익을 설치하여 공기에 선회를 주어 연료와 공기의 혼합이 촉진되도록 하였다. 연료는 노즐내경 7mm(외경 17mm)의 분공직경 1.0mm인 분공 8개를 통하여 연소기내에서 분사각 45°로 분사되도록 하였다.

본 연구에서는 2차공기 주입이 연소장에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 공기과잉률 변화에 따른 평균온도와 각종 화학종 농도(CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, 및 HC)를 측정하였다. 평균온도 측정에는 R-type, 세션 직경 0.5mm, Pt/Pt-Rh 13%의 수냉식 열전대를 사용하였으며, 복사나 열전도에 의한 열손실은 고려하지 않았다. 그리고 각종 화학종 농도 측정은 비분산 적외선 분석(NDIR)방식을 이용한 가스농도분석기(I/M 2000, SHIN SUNG)를 사용하여 측정하였다. 가스 샘플링프로브는 흡입직경 1mm에서 2mm로 돌연 확대시켜 반응이 동결되는 것으로 보고 사용하였다(장인갑,1998). 샘플링된 연소가스는 3중 수냉 프로브를 통과하면서 수증기가 응축되어 분리된 다음 가스분석기로 보내져서 분석된다.

본 실험에서는 우선 3개영역의 2차 공기 주입구 중에서 축방향으로 75mm 위치에 있는 2차 공기만을 주입하여 실험을 실시하였다.

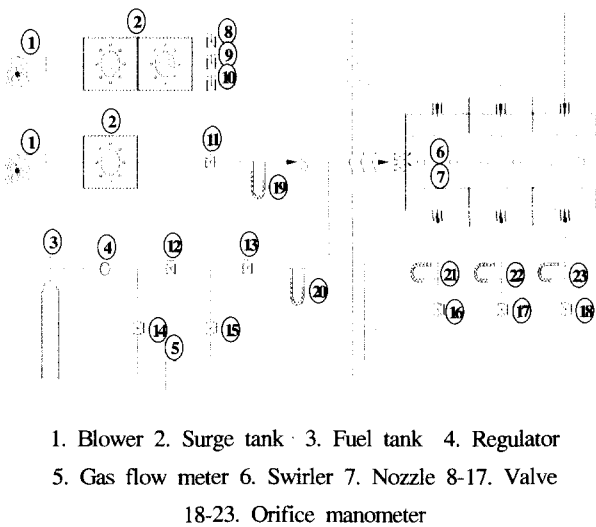


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

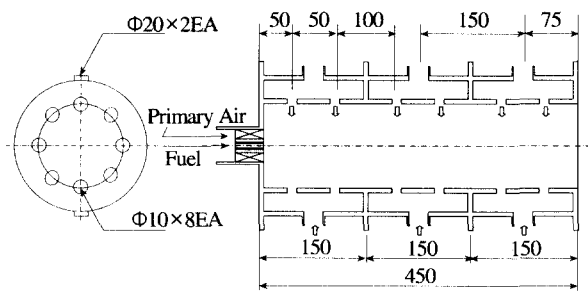


Fig. 2 Detail of model gas turbine combustor

2.2 실험조건

본 연구의 실험조건은 연료는 0.7kg/cm<sup>2</sup>의 일정 압력하에서 연료유량 0.25 l/sec로 일정하게 하고 주류방향의 공기를 22.94 l/sec, 29.62 l/sec 및 36.98 l/sec로 변화시키면서 형성되는 공기과잉률 변화에 따른 연소배출물(실험조건 A1, B1, C1)과 2차공기 1.56 l/sec로 일정하게 주입하였을 때 배출되는 연소배출물(실험조건 A2, B2, C2)을 측정하였다. 위와 같은 실험조건을 아래의 Table 1과 같이 정리하였다. 참고로, 본 연구에서는 연소기 중심을 원점으로 하여 반경방향을 R, 축방향을 Z로 정의하여 실험을 수행하였다.

Table 1 Experimental conditions

Condition	Fuel (l/sec)	Primary air (l/sec)	Excess air ratio(α) of primary air
		Secondary air (l/sec)	Excess air ratio(α) of primary and secondary air
A	A1	22.94	α=3.85
	A2	1.56	α=4.11
B	B1	29.62	α=4.98
	B2	1.56	α=5.23
C	C1	36.98	α=6.25
	C2	1.56	α=6.46

3. 실험결과 및 고찰

3.1 평균온도 및 산소농도

Fig. 3은 Table 1에 나타낸 실험조건의 주류방향의 공기과잉률 변화 즉, 실험조건 A1, B1, C1의 변화에 따른 평균온도분포를 등온선으로 나타낸 것이다. 대체적으로 공기과잉률이 높을수록 화염의 길이는 짧아지고 반경방향으로 커지며 고온영역이 넓어지는 것으로 나타났다. 또한, 출구온도분포는 연소실 내부에서는 고온이고, 벽면부에서는 저온이 형성되는데 이는 선회에 의한 영향으로 중심부의 온도는 높게 나타나지만, 벽면부에서는 현재의 선회강도가 충분하지 않아 연소실 출구에서 연소가스와 공기의 혼합이 원활하지 못하여 저온이 형성되는 것으로 생각된다.

Fig. 4는 주류방향의 공기과잉률 변화에 따른 실험조건 A1, B1, C1에 2차공기 1.56 l/sec를 주입하였을 경우의 평균온도분포를 등온선으로 나타낸 것이다. 2차공기 주입으로 인해 B2는 화염온도는 낮아지지만 화염길이가 더욱 짧아지며 반경방향으로 고온영역이 더욱 넓어지며 화염이 안정되는 것으로 나타났다. 그러나 C2에서는 2차공기 주입이 과다 공기과잉률로 작용하여 화염이 불안정하게 형성되는 것으로 나타났다. B2, C2에서는 2차공기 주입 위치인 축방향 75mm 전후로 화염길이가 형성되는 것으로 나타났다. 이것으로 보아 2차공기 주입이 화염형상에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

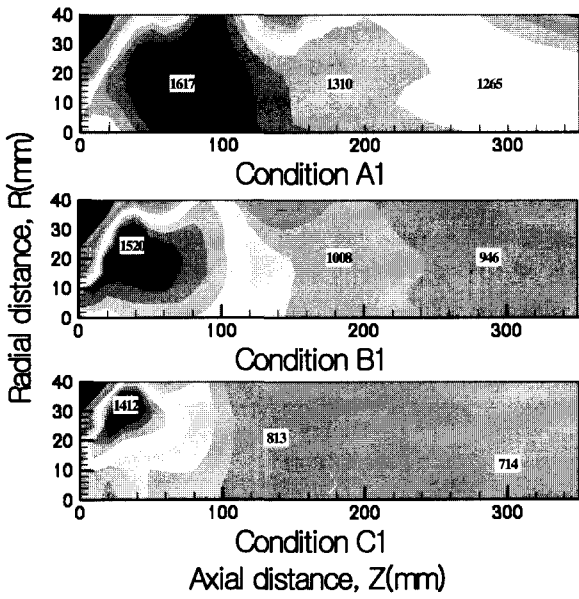


Fig. 3 Isothermal lines of changing excess air ratio for primary air injection

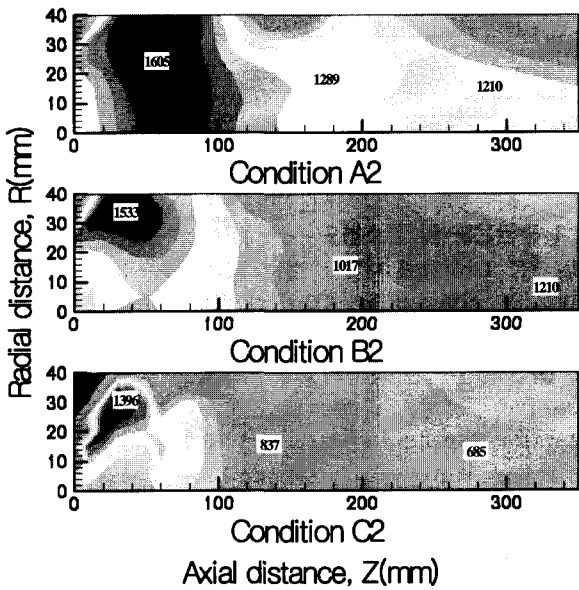


Fig. 4 Isothermal lines of changing excess air ratio for primary and secondary air injection

Fig. 5는 주류방향 공기과잉률 변화 즉, 실험조건 A1, B1, C1의 변화에 따른 연소기 후류 대표단면 Z=160mm, 180mm, 200mm에서의 반경방향 산소농도와 평균온도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 개략적으로 알 수 있듯이 Z=120mm 단면 이후에서는 연소반응이 완료되었다고 해도 좋으므로, 여기서는 모든 단면에서 전체적으로 공기과잉률이 높을수록 평균온도분포가 낮아졌다.

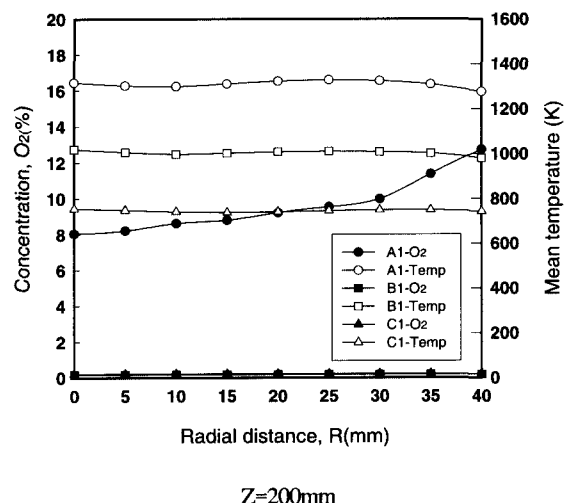
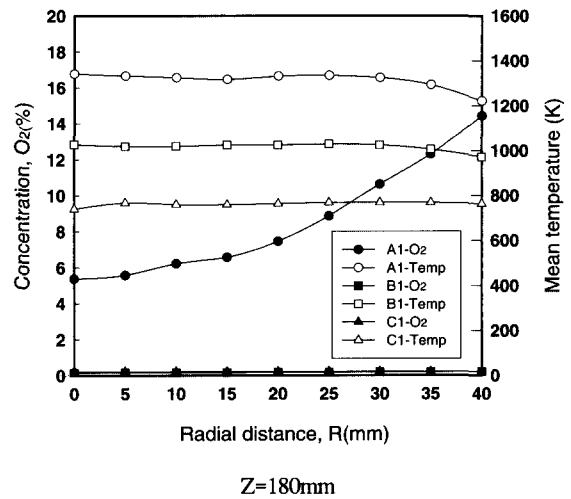
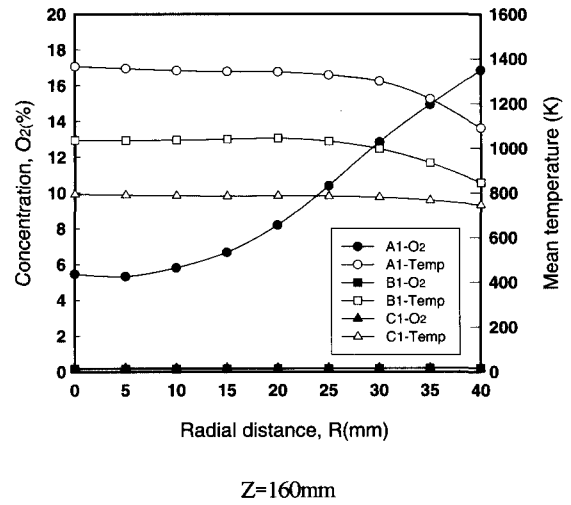


Fig. 5 Distributions of O<sub>2</sub> and mean temperature for A1, B1, C1

Fig. 6은 주류방향의 공기과잉률 변화에 따른 실험조건 A1, B1, C1에 2차공기 1.56 l/sec를 주입하였을 경우의 산소농도와 평균온도 분포를 나타낸 것이다. 연소반응이 완전 종결된 후류

단면인 Z=200mm 단면 이후를 살펴보면 온도분포는 Fig. 5와 거의 유사하지만 A2의 경우 평균온도 분포는 낮고, 산소농도는 상대적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 2차공기 영향으로 인하여 연소반응에 참여하지 않는 과잉공기가 많은 것으로 생각된다.

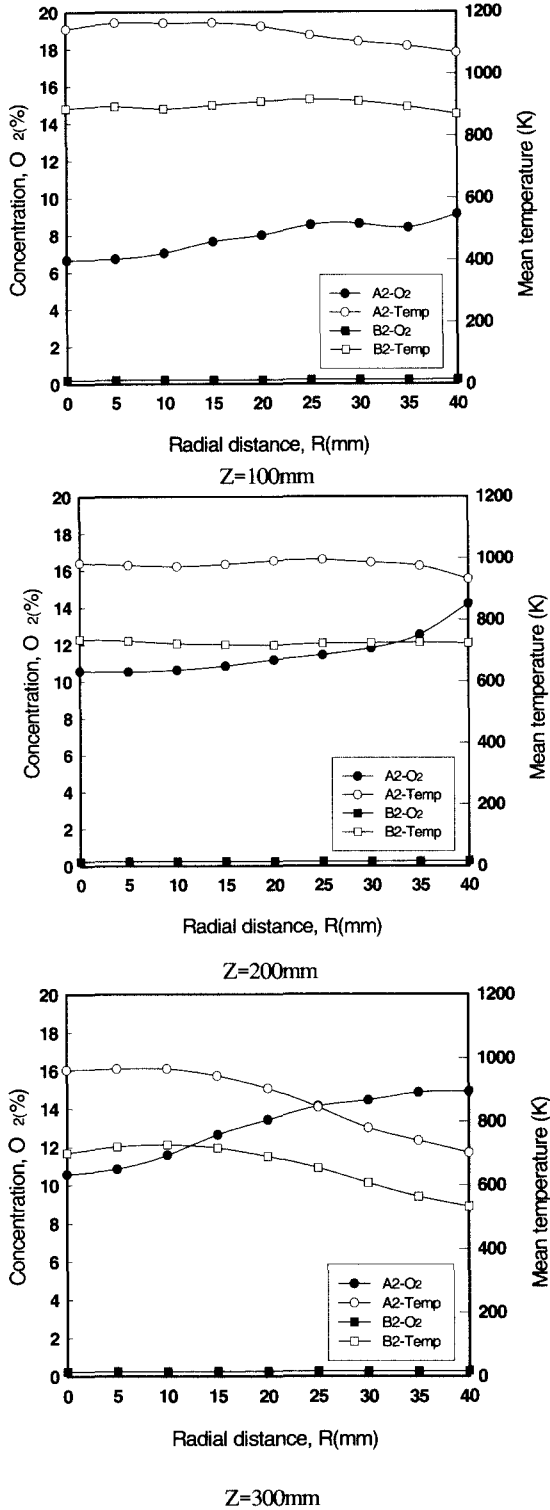


Fig. 6 Distributions of O<sub>2</sub> and mean temperature for A2, B2, C2

3.2 CO 및 CO<sub>2</sub> 분포

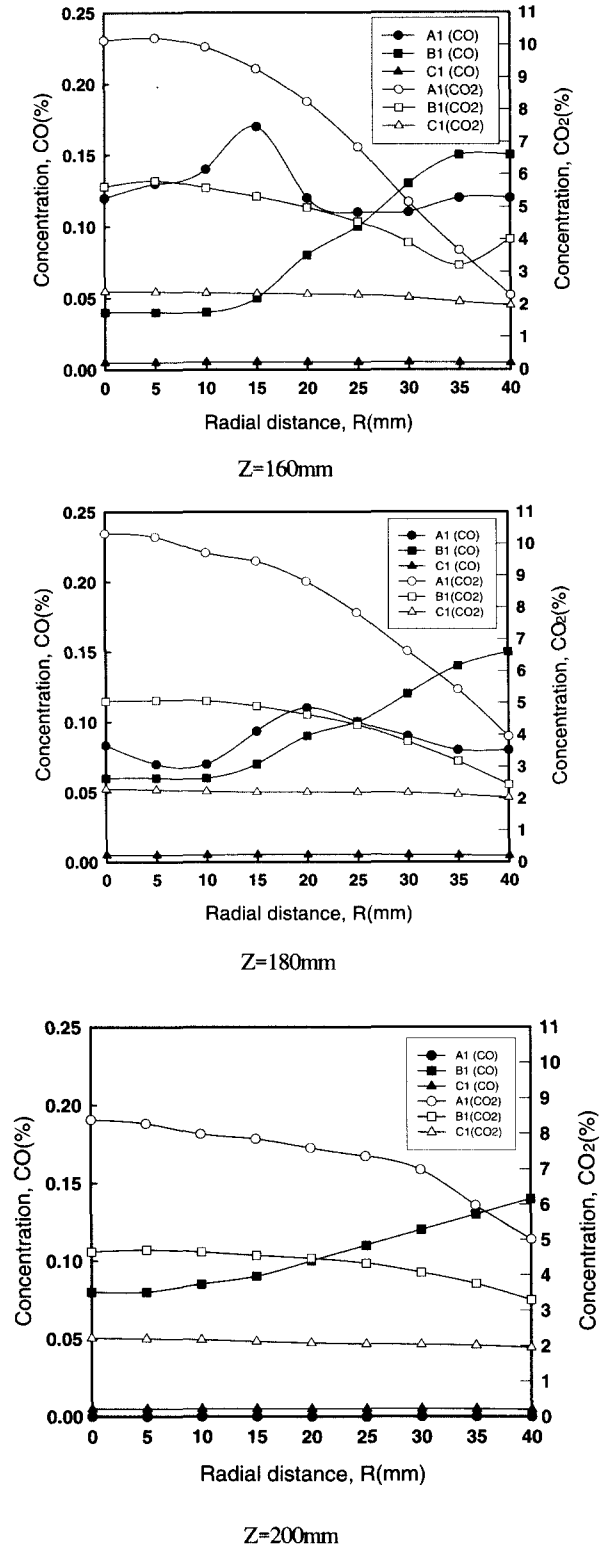


Fig. 7 Distributions of CO and CO<sub>2</sub> concentration for A1, B1, C1

Fig. 7 은 주류방향의 공기과잉를 변화 즉, 실험조건 A1, B1 C1의 변화에 따른 CO 및 CO<sub>2</sub>분포를 나타낸 것이다. 전체적으

로 공기과잉률이 증가할수록 CO배출은 감소하고 CO<sub>2</sub>배출은 Z=160mm 단면이후 거의 일정하게 배출되는 것으로 나타났다. 이것은 Fig. 5의 산소, 평균온도 그래프와 잘 대응함을 알 수 있다. 실험조건 A1은 임의의 반경방향 5~10mm 부근에서 CO<sub>2</sub> 농도가 최대치이고 산소농도 및 온도분포가 대체로 높은 것으로 보아 선회에 의해 연소가스와 공기와의 원활한 혼합으로 활발한 연소를 하는 영역으로 나타났다. 또한 임의의 반경방향 30mm 전후부터 CO가 증가하는 것은 현재의 선회강도가 충분하지 않아 연소가스와 공기의 불충분한 혼합에 의한 영향으로 생각된다. 실험조건 B1 역시 A1과 거의 유사한 경향을 나타내고 있으며, 대체적으로 임의반경방향 30mm 이후에 CO배출증대가 A1보다 큰 것으로 나타났는데 이것은 연소실 내부의 유동이 불균일하게 형성된 것에 의한 것으로 생각된다. C1는 Z=160mm 단면 이후 CO배출이 임의의 반경방향으로 균일하며 거의 배출이 없는 것으로 보아 이것으로 연소반응이 완전히 종결된 영역임을 알 수 있다. 따라서 연소효율을 상승시키기 위해서 CO 배출을 저감할 수 있는 적정한 주류방향의 공기과잉률 결정은 아주 중요한 인자인 것을 알 수 있다.

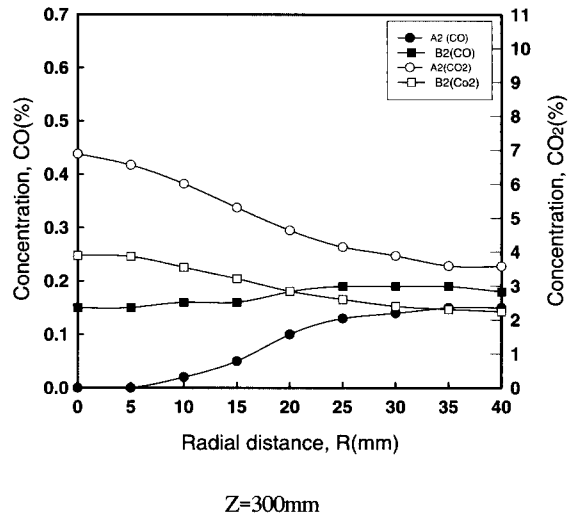


Fig. 8 Distributions of CO and CO<sub>2</sub> concentration for A2, B2, C3

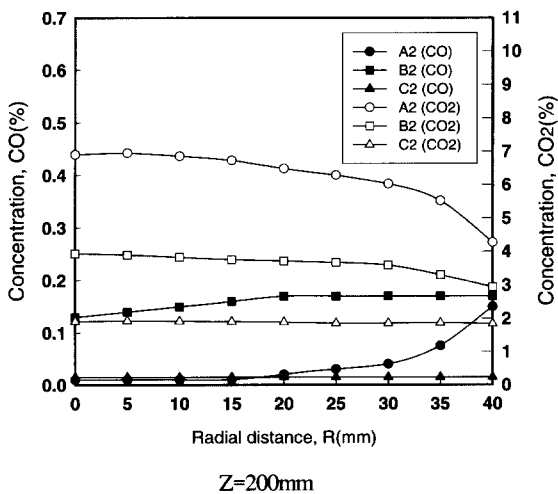
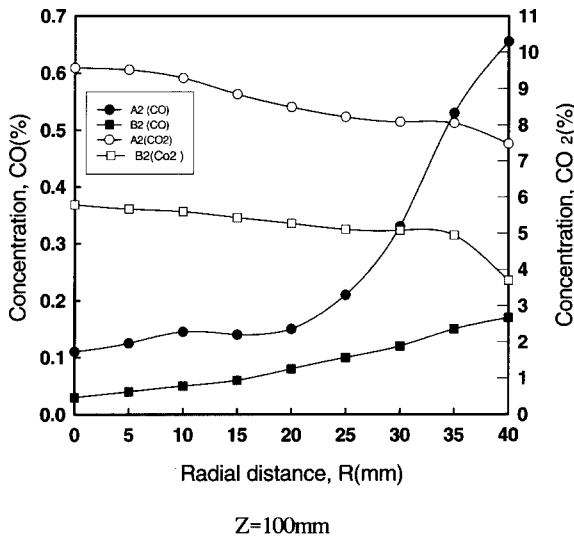
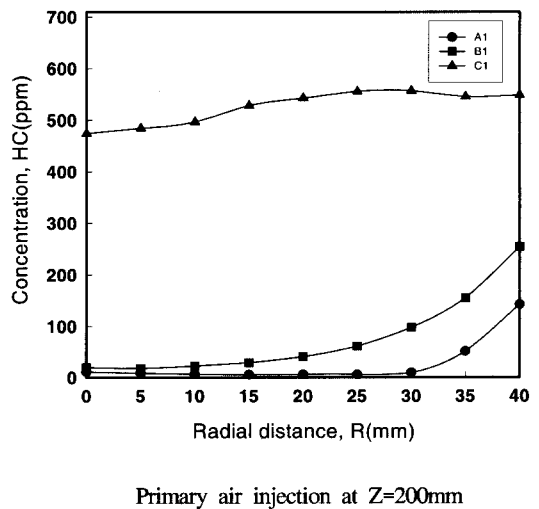
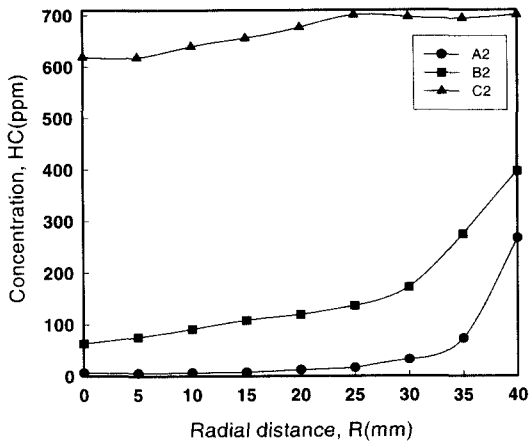


Fig. 8은 주류방향의 공기과잉률 변화에 따른 실험조건 A1, B1, C1에 2차공기 1.56 l/sec를 주입하였을 경우의 CO 및 CO<sub>2</sub>를 나타낸 것이다. 전체적으로 2차공기 영향으로 CO<sub>2</sub>배출은 감소하는 것으로 나타났지만 급격한 감소는 확인할 수 없었다. 그러나 CO배출은 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 실험조건 A2의 Z=100mm 단면에서 임의의 반경방향 25mm 이후에 CO가 급격히 증가하는 것으로 나타났는데 이것은 2차공기 주입으로 인한 냉각작용의 영향에 따른 것으로 생각된다.

Fig. 9는 반응이 종결된 후류 대표단면인 Z=200mm에서의 주류방향과 2차공기 주입시의 HC 배출농도를 각각 나타낸 것이다. 주류방향의 공기과잉률이 증가할수록 HC배출은 증가하는 것으로 나타나, 과도한 주류방향의 공기과잉률 증가는 진동연소범위의 확대와 불완전 연소배출물 증가를 초래하기 때문에 주의가 필요하다. 그리고 2차공기주입시 HC배출이 증가하는 것으로 나타났는데 이것은 2차공기주입이 Z=200mm단면 전후에서는 공기 주입에 의해 유동장이 불안정하여 연소반응을 저해하는 것으로 생각된다.



Primary air injection at Z=200mm



Primary and secondary air injection at Z=200mm

Fig. 9 Distributions of HC concentration for A1, B1, C1 and A2, B2, C3 at Z=200mm

#### 4. 결 론

2차공기 주입에 의한 모형가스터빈 연소기에 형성된 실험조건 연소배출특성에 관하여 분석한 결과 다음과 같은 결론들을 얻었다.

- (1) 전체적으로 공기과잉률이 증가할수록 평균온도는 낮고, 과잉공기로 인한 냉각효과로 연소실내의 2차공기 주입에 의한 출구 온도분포는 낮게 나타났다.
- (2) 본 실험조건에서는 공기과잉률이 증가할수록 CO배출은 감소하였지만 2차공기 주입시 CO 배출은 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 비록 많은 공기가 공급되더라도 연소실 내부의 유동이 적절하게 형성되지 않으면 불완전 연소생성물이 많이 배출될 수 있음을 알 수 있다.
- (3) 반응이 종결된 후류단면에서는 주류방향의 공기과잉률이 증가할수록 HC배출이 증가하고 2차공기 주입시에도 HC 배출이 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 본 실험조건에서 과도한 주류방향의 공기과잉률 증가가 화염을 불안정하게 형성시켜 불완전 연소생성물의 증가를 초래하였고, 2차공기 주입시 화염길이는 짧게 되었지만, 연소실 내부의 유동장을 흐트러 약간

의 불완전연소가 초래되었음을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

강인구 등(1999). “중양분공형 보염기 후류에 안정된 난류확산 화염의 구조에 관한연구(II)”, 한국동력기계공학회 논문집, 제3권 제3호, pp 29~35.

이우섭 등(1998). “중양분공형 보염기 후류에 안정된 난류확산 화염에서의 NOx 생성”, 한국동력기계공학회 추계학술대회 논문집, pp 30~34.

이도형, 최병륜(1992). “연소공학” 공역, 제2판 동명사.

이도형 등(1996). “후연소기에 형성된 난류확산화염에서의 NOx 생성에 관한 연구”, 한국해양공학회지 제13권 제3(II)호, pp. 22~28.

장인갑 (1998). “난류확산화염에서 라디칼 자발광의 특성과 화염구조에 관한 연구”, 박사학위논문, 부산대학교.

Ikeda., Y. S. Hosokawa and T. Nakajima(1991). “Flow Structure in a Can-type Model Gas Turbine Combustor” (1st Report, Flow Field in a Primary Zone), JSME(B), Vol. 57, No. 535 pp 1167.

Ikeda., Y. S. Hosokawa and T. Nakajima(1991), “Flow Structure in a Can-type Model Gas Turbine Combustor” (2nd Report, Detailed Flow Structure and Turbulence Properties) JSME(B), Vol. 57, No. 535 pp 1175~1182.

Gupta, A. K., J. M. Beer and J. Swithenbank(1979) “Concentric Multi Annular Swirl Bunner: Stability Limits and Emission Characteristics”, 16th. Symp. (Int.) on Combustion, pp 79.

Katsumi, Y. Y. Nakayama and M. Wakatsuki(1991). “Study on the Cylindrical Combustor Flow with Swirling Flow” (1st Report, Characteristics of Flow Partam for Swirl Number) JSME(B), Vol. 51, No. 468 pp 2759~2766.

2000년 5월 31일 원고 접수

2000년 7월 13일 수정본 채택