

〈技術論文〉

모형 가스터빈 연소기의 연소 및 배출물 특성

최병륜* · 김태한**

(1993년 8월 12일 접수)

Combustion and Emission Characteristics of Model Gas Turbine Combustor

Byeong Ryun Choi and Tae Han Kim

Key Words : Swirl Intensity(선회강도), Combustion(연소), Emission(배출), Primary Zone(1차 연소영역), Secondary Zone(2차 연소영역)

Abstract

The basic experiments for designing the effective gas turbine combustor were performed. There are several factors that define the characteristics of gas turbine combustor. Among them, experiment was focused on swirl effects by three types of swirler with different swirl numbers(0, 0.38, and 0.62). Particularly, an interest was concentrated on primary zone where the flame characteristics of total combustor was dominated strongly and secondary zone where the remaining unburned gas was reacted again or cooling effect was done according to degree of swirl intensity. For this study, following measurements have been carried out, that is, time mean and fluctuating temperature, exhaust gas composition including NO concentration, and ion current. From this study, it was found that swirl intensity affects largely not only flame style but also emission formation, furthermore that it is important to select proper swirl intensity.

1. 서 론

항공분야에서 연소기가 차지하는 중요성과 수송기관 등에 가스터빈 연소기의 이용도가 점점 증가하는 추세를 감안할 때, 이에 대한 연소기 특성을 정확히 규명하는 것이 절실히 요구되고 있다. 실제로 작동범위도 넓고, 용도도 기종 및 형식에 따라 다양하기 때문에 전반적인 가스터빈 연소기의 연소 및 배출특성을 획일적으로 논의하는 것은 곤란하나, 유해물질의 생성기구를 이해하고 설계인자 및 운전조건에 따라 어떻게 영향을 미치는 가는 중요하다 하겠다. 실용연소기에서 연소기내부의 온도나 가스 농도측정이 용이하지 않기 때문에 연소기출구

를 대상으로 한 것이 많다. 그러나, 유해물질의 생성기구나 저감대책을 논의한다든지 이론모델에 의한 해석을 하기 위해서는 연소기출구의 배기조성뿐만 아니라 연소기내부의 온도, 농도분포를 상세히 조사할 필요가 있다. 이에 대한 연구는 연소기내의 공기량배분이 배기가스에 미치는 영향을 상세히 조사한 堀⁽¹⁾의 연구가 있으나, 최근 큰 문제로 대두되고 있는 NO_x의 측정이 포함되어 있지 않다. Starkman 등⁽²⁾은 전공연비가 변화하는 경우에 연소기내의 온도 및 각종 농도분포를 상세히 보고하고 있고, Mellor⁽³⁾는 여러 형태의 가스터빈 연소기에 대한 배출특성과 1차 연소영역에서의 당량비의 영향에 대해 보고하고 있다. 실용연소기의 대부분은 유동에 선회를 주어 연료와 혼합시키면서 연소하는 선회화염의 형태를 갖기 때문에 이에 대한 많은 연구^(4,5,6)가 수행되어 왔다. 高城⁽⁷⁾은 선회가 있

*정회원, 부산대학교 기계공학과

**정회원, 부산대학교 기계공학과 대학원

는 동축확산화염을 대상으로 LDV를 사용한 유동현상(유속, 난류강도)뿐만 아니라 온도, 가스농도 등을 측정하여 선회화염의 구조를 밝히고 있다. 쯔月 등¹⁸⁾은 가스터빈 연소기를 대상으로 입구온도, 선회강도 및 1차 연소영역의 공연비의 영향 등을 고려하여 연소기내 온도와 각종 농도분포를 측정하고 그에 따른 이론해석을 통하여, 오염의 주요인자인 CO와 NO_x의 저감대책을 논의하고 있다.

본 연구는 "Can-Type" 모형 가스터빈 연소기를 제작하여 1차 연소공기의 선회강도 영향에 따른 온도, 이온전류 및 가스농도분포와 NO_x의 생성상태를 조사하고, 이들의 상호관계를 고찰함으로써 최근, 수요가 급증할 것으로 예상되는 가스터빈의 효율과 부하를 높이고 소형화 및 저 NO_x화의 요구를 만족시킬 수 있는 고성능·저공해 연소기 개발을 위한 기본자료를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 연소기 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 연소기 라이너(liner)는 직경 80 mm, 길이 345 mm로 제작하였고, 공기구멍列의 위치(연료노즐 끝단으로부터의 거리) X_h , 공기구멍의 직경 D_h , 一列의 공기구멍의 개수 N_h 를 Table 1에 나타내었다. 1차 연소영역으로 유입되는 공기는 축방향으로 0°, 30° 및 45° 선회기(swirler)를 통하여 공급된다. 각각의 선회강도는 Lilley¹⁴⁾가 제안한 식을 이용하여 0.0, 0.38, 0.62로 규정하였다. 연료노즐은 직경 1.0 mm로 원주방향으로 4개 뚫어서 연소기내에서 분사각(θ) 90°로 분사되도록 제작하였고, 예상되는 연료분사속도는 약 55 m/sec이다. 연료는 상용 프로판가스(C₃H₈)를 사용하였다.

Fig. 2는 본 연구의 실험장치의 개략도이다. 먼저 1차 연소용 공기는 송풍기에서 압축된 공기가 압력매동을 줄이기 위한 서지탱크2를 지나 밸브, 8에 의해 공기량이 조절되어 공급되고, 2차 및 3차 연소영역 공기는 역시 밸브13, 14를 거쳐서 공급된다. 또한, 연료는 연료탱크3에서 압력조정기4와 가스유량계5를 지나 연료노즐7을 거쳐서 연소기 내부로 공급되는데, 밸브12에 의해 조절되도록 되어있다.

실험조건을 Table 2에 나타내었다. 연료를 35.4 KPa의 일정 압력하에서 동일유량($Q_{fuel}=0.17 \times 10^{-3}$ m³/sec)으로 연소기내에 분사하고, 3영역의 공급

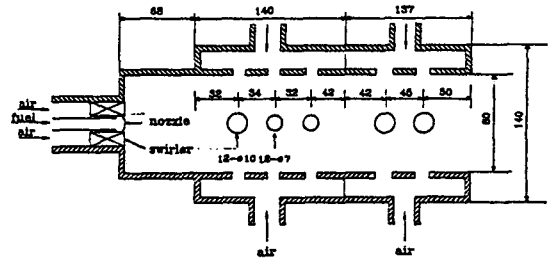


Fig. 1 Gas turbine combustor (unit=mm)

Table 1 Details of linear air hole

No	Location (X_h , mm)	Diameter (D_h , mm)	Number (N_h)
1	100	10	12
2	134	7	12
3	166	7	12
4	250	10	12
5	295	10	12

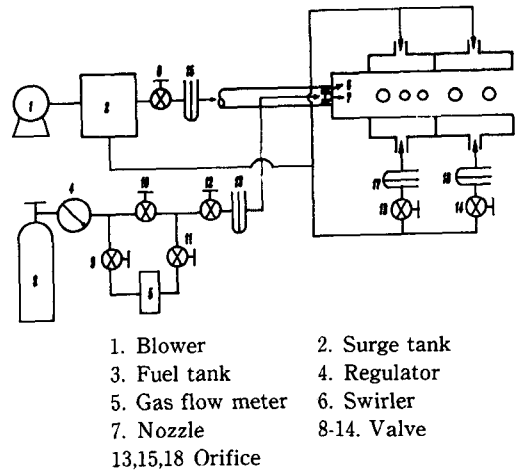


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

공기량은 일정하게 한 상태에서 연소와 배출특성에 지배적인 영향을 미치는 선회강도 변화에 따른 연소장내의 제랑들을 조사하였다. 평균 온도의 측정에는 직경 0.1 mm, 재질 Pt/Pt-Ph 13%의 "R-Type" 수냉식열전대를 사용하여 검출된 기전력은

Table 2 Experimental conditions(unit : 10^{-3} m³/sec)

Swirler intensity	Q_{nozel} (Nozzel)	Q_{pri} (Primary zone)	Q_{secon} (Secondary zone)	Q_{dilu} (Dilution zone)
0.0	0.17	4.7	4.1	4.8
0.38	0.17	4.7	4.1	4.8
0.62	0.17	4.7	4.1	4.8

데이터 레코드에 수록한 후 오실로스코프에 연결하여 파형의 평균값을 취하였고, 복사와 열전도에 의한 열손실은 고려하지 않았다. 변동온도는 직경 25 μ m, 재질 Pt/Pt-Rh 13% 열전대로 세선과 같은 재질의 직경 0.5 mm의 지주에 각각 연결하여 측정하였다. 열전대의 열기전력은 우선, 직류증폭기로 증폭되고 보상기에서 열관성을 보상함에 의해 주파수특성을 개선하여 데이터 레코드에 기록된다. 이 파형을 A/D변환기로 디지털신호로 바꾸어 필요한 파형에 대한 분석을 행하였다. 실험데이터의 표시는 연료노즐 끝단의 중심을 원점으로 하여 반경방향 r축, 축방향을 x축으로 설정하여 표기하였다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 온도분포

온도분포는 선회강도에 따라 많은 차가 나타나고 있다. Fig. 3의 선회가 없는 경우(S=0.0), 연소기

상류부 $x=100$ mm, $r=5\sim 20$ mm지점에서는 반경방향의 온도구배가 크게 나타나 연소반응이 활발하게 진행되고 있음을 알 수 있고, $x=200$ mm이후의 하류영역에서는 1500 K 전후의 온도분포가 나타나고 있다. Fig. 4의 선회강도가 0.38인 경우, Fig. 3의 경우보다 온도분포가 높게 나타나고, $x=50$ mm 단면, $r=25\sim 35$ mm에서 온도구배가 크게 나타나고 있다. 이는 선회효과로 인하여 연소기 중앙부보다는 벽부근에서 연료와 공기의 혼합이 원활히 이루어졌음을 알 수 있다. $x=100$ mm이후부터 온도장이 비교적 발달하고, $x=200$ mm이후에서는 유입공기의 영향으로 연소기 벽부근에서 온도가 낮아지는 경향을 보인다. 한편, 선회강도가 0.62인 Fig. 5의 경우, $x=50$ mm단면을 제외하고는 Fig. 4와 유사한 온도분포를 나타내나, $x=50$ mm단면에서 중앙부에서 200~500 K의 온도차가 나는 것은 선회강도차에 의해 연소반응대가 상류로 이동하였음을 알 수 있다. 이러한 현상은 각 선회강도에 대한 대표지점의 변동 온도분포(Fig. 7~9)

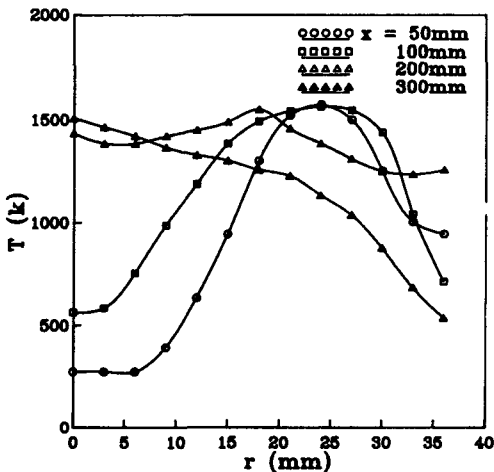


Fig. 3 Profiles of time mean temperature relative to radial direction (S=0.0)

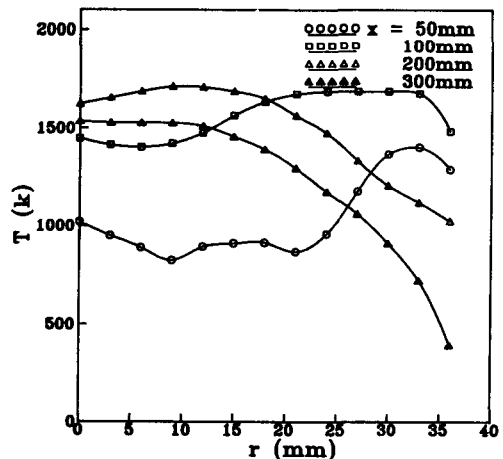


Fig. 4 Profiles of time mean temperature relative to radial direction (S=0.38)

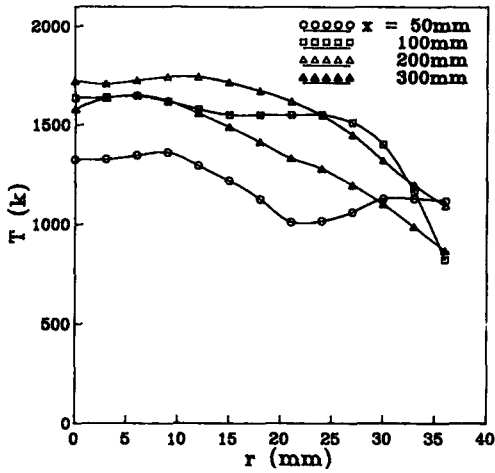


Fig. 5 Profiles of time mean temperature relative to radial direction ($S=0.62$)

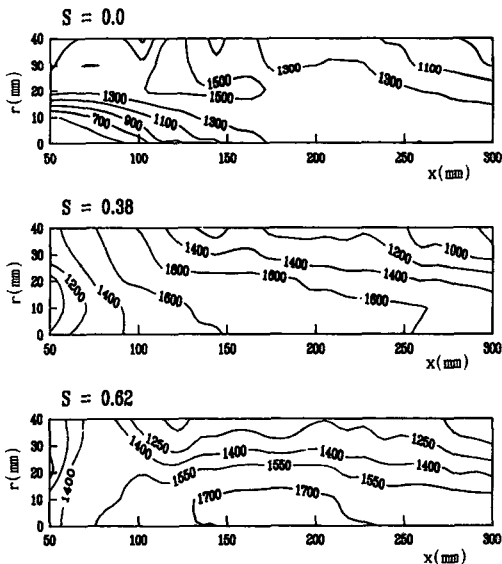


Fig. 6 Contour of mean temperature

파형과 연소반응강도의 지표가 되는 이온전류분포 (Fig. 14~16)에서 자세히 관찰할 수 있다. 따라서, 선회강도가 커짐에 따라 연소반응대가 상류로 이동하고, 온도분포에도 많은 차이가 남을 알 수 있다.

Fig. 6은 각 선회강도에서의 등온선분포를 나타낸 것이다. 선회가 없는 경우에는 온도분포가 축방향 $x=150$ mm, $r=15$ mm 지점까지 낮고, 라이너 홀에서의 공기유입으로 잔존 미연가스가 재차 반응

하는 $x=100\sim 160$ mm, $r=15\sim 30$ mm 지점에서 가장 높은 온도분포대를 형성하고 있다. 선회가 있을 경우 그리고, 선회강도가 클수록 연소기 상류부의 온도분포가 높은 것은 Fig. 4, 5의 온도분포에서 나타난 선회의 효과로 연료와 공기의 혼합효과에 기인한다. 선회강도가 0.38인 경우, 연소기상류에서부터 1400 K 전후의 온도대가 형성되어 하류로 감에 따라 점점 온도장이 발달하고, 유입공기의 영향을 받는 2, 3차 연소영역의 벽쪽에서부터 온도가 점점 떨어지고 있다. 선회강도가 0.62인 경우, 좀더 상류에서 높은 온도대가 형성되어 강한 선회의 영향을 받는 연소기 중앙부에서 높은 온도분포대를 형성하고 있다. 따라서, 1차 연소영역이 가스터빈 연소기의 연소특성을 좌우한다고 볼 때, 선회강도가 커짐에 따라 1차 연소영역이 짧아지고, $x=60$ mm 상류역부터 서서히 온도장이 발달하고 있음을 알 수 있다. 또한, 강선회인 $S=0.62$ 에서는 Fig. 5의 온도분포에서 나타난 연소기 상류영역에서 거의 반응이 완료되어 고온의 온도분포가 연소기 중앙부에 집중되는 반면, 약선회인 $S=0.38$ 에서는 1차 연소영역에서 완전반응하지 못한 미연가스가 2차 연소영역에서 유입되는 공기와 재연소반응이 일어나고, 그 이후부터는 유입공기에 의한 냉각작용이 일어나는 균형잡힌 온도분포를 갖는 가스터빈 연소기의 특징을 갖고 있다. 연소기출구에 터빈익 (turbine blade)이 위치해 있음을 고려한다면, 연소기 출구온도를 비교적 일정하게 유지하고, 그 재질에 견딜 수 있도록 1차 연소영역의 공연비와 2, 3차 연소 영역에서의 공급공기량을 적절히 조절할 필요가 있다.

Fig. 7~9의 변동온도 파형들은 평균 온도분포에서 관찰한 각 선회강도에서 변동치(t')가 큰 1차 연소영역과 선회강도에 따라 재연소 혹은 냉각작용이 일어나는 2차 연소영역중의 대표위치에서의 파형들이다. 전반적으로 선회강도가 커짐에 따라 에디 스케일이 작아짐을 알 수 있다. Fig. 7은 선회가 없는 경우의 변동온도의 파형을 나타내고 있다. $x=100$ mm, $r=6$ mm 지점에서는 저온의 공기영역에서 간헐적으로 연료가 밀려 들어와 반응을 일으키고, $r=18$ mm 에서는 라이너 홀에서의 공기유입으로 비교적 활발한 반응이 일어나고 있다. $x=200$ mm 단면의 $r=6, 18$ mm 에서도 변동치가 높아 1차 연소영역에서 반응하지 못한 미연가스의 재연소 반응보다는 냉각공기와의 혼합에 의한 것으로

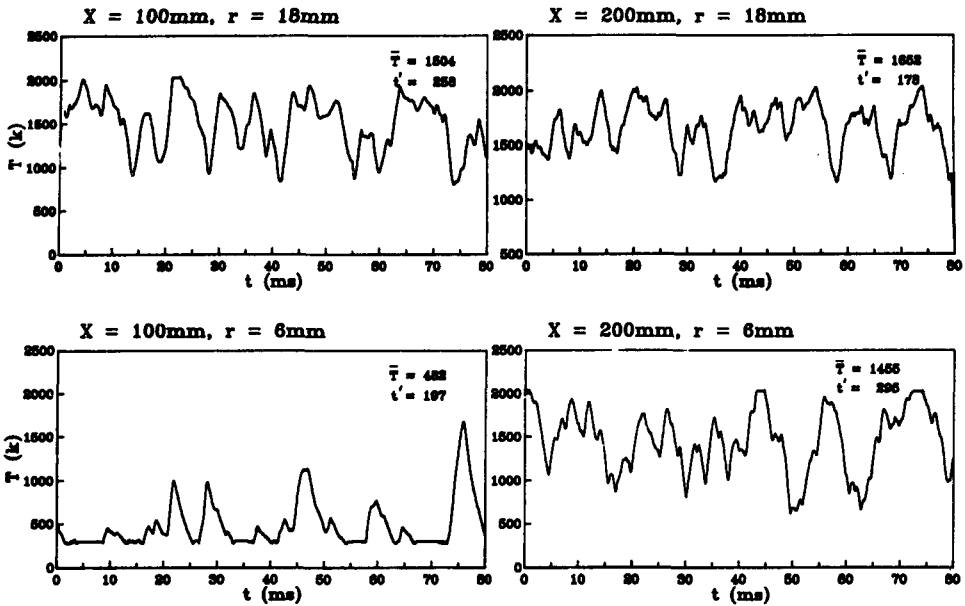


Fig. 7 Waves of fluctuating temperature ($S=0.0$)

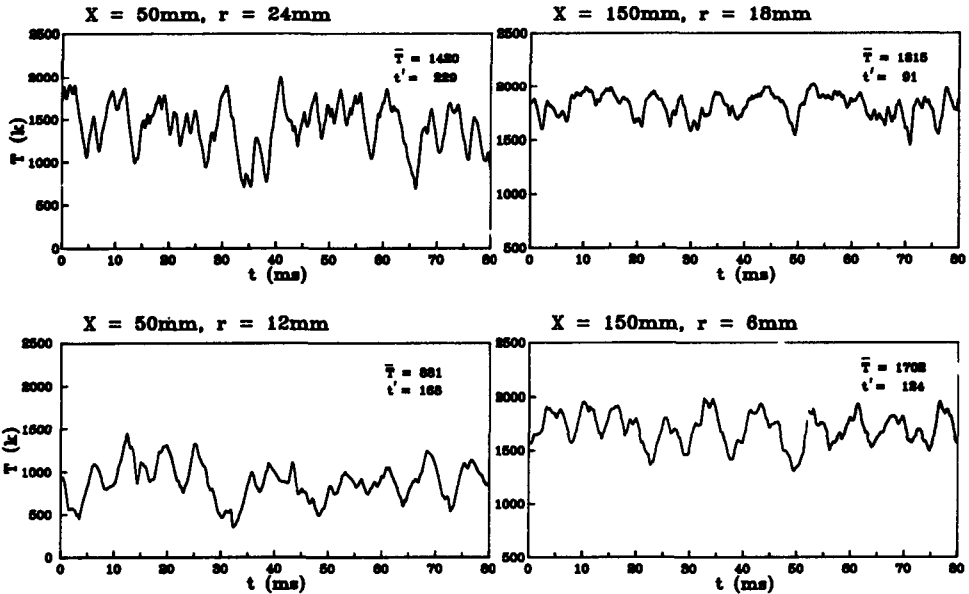


Fig. 8 Waves of fluctuating temperature ($S=0.38$)

여겨진다. Fig. 8의 선회강도가 0.38의 경우에는 $x=50$ mm 단면의 연소기 중앙부보다는 벽부근에서 변동치가 커, Fig. 3의 평균 온도분포에서 나타난 $r=20$ mm 이후의 급격한 온도구배의 경향과 일치하고 있다. $x=150$ mm 단면에서는 $r=6$ mm보다 18 mm에서 온도분포가 높은 반면, 변동치가 낮아

열적으로 발달해 있음을 알 수 있다. Fig. 9의 0.62인 경우, 2차 연소영역에서 비교적 고온의 온도장이 크게 발달해 있다. $x=150$ mm, $r=18$ mm의 파형을 보면 고온영역중에서 간헐적인 공기유입으로 순간적으로 온도가 떨어지는 하방피크의 현상이 나타나는 데, 하류역인 $x=200$ mm 단면에서도

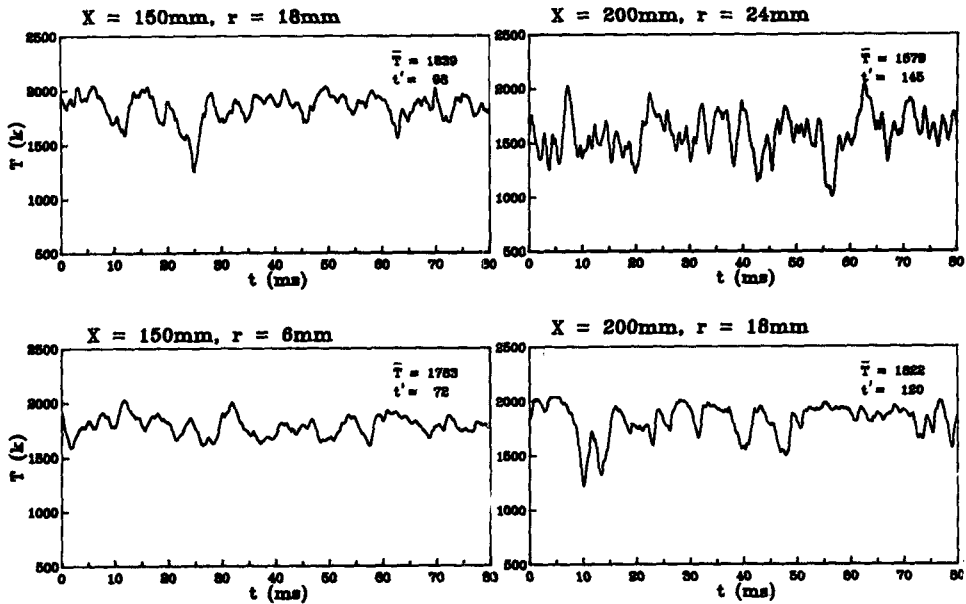


Fig. 9 Waves of fluctuating temperature ($S=0.62$)

이와 유사한 현상이 나타나고 있다. 또한, $x=200$ mm, $r=24$ mm에서는 공기유입으로 인한 냉각작용이 크게 나타나 변동치가 높게 나타나고 있다. 따라서, 선화가 없는 경우, 2차 연소영역에 걸쳐 연소반응이 일어나고, 약선화인 $S=0.38$ 에서는 2차 연소영역에서 부분적인 반응과 냉각작용이 동시에 일어나는 반면, 강선화인 $S=0.62$ 에서는 대부분 연소반응이 1차 연소영역에서 거의 완료되고 2차 연소영역부터 냉각작용이 일어나는 것을 알 수

있다.

3.2 농도 및 당량비분포

각종 농도의 측정에 있어서 CO , CO_2 , O_2 농도는 가스분석기 (Model Rx-777), NO 농도는 NO_x 분석기 (Model NA510-2)를 사용하여 측정하였고, 국소 당량비는 Starkman 등⁽²⁾이 제안한 화학평형식을 사용하여 구했다.

Fig. 10~12는 평균 및 변동온도에서 판별된 1차

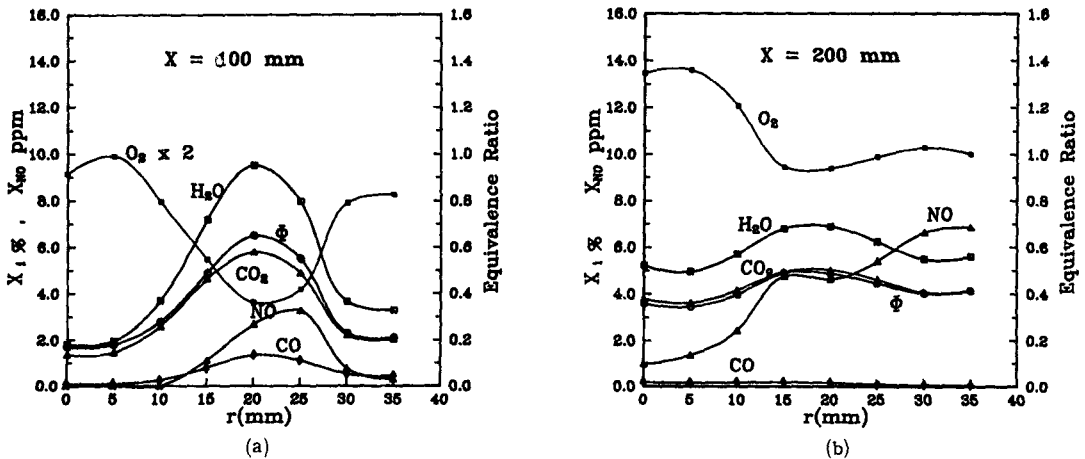


Fig. 10 Gas composition & equivalence ratio of typical section ($S=0.0$)

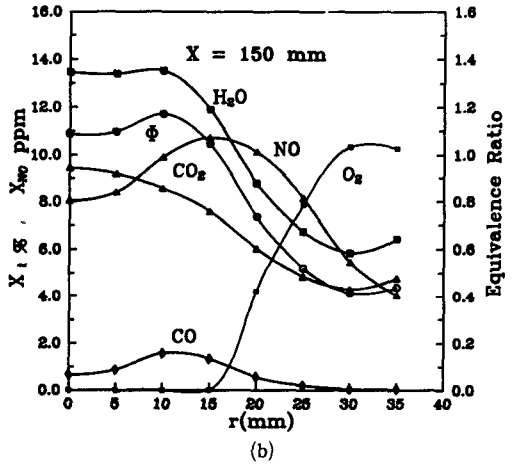
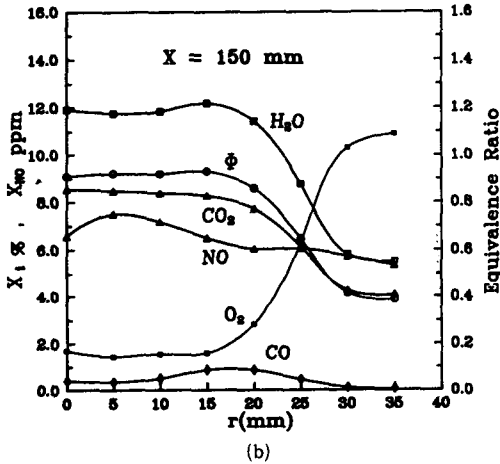
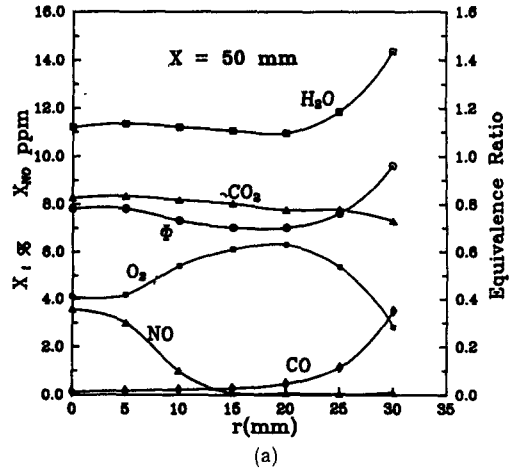
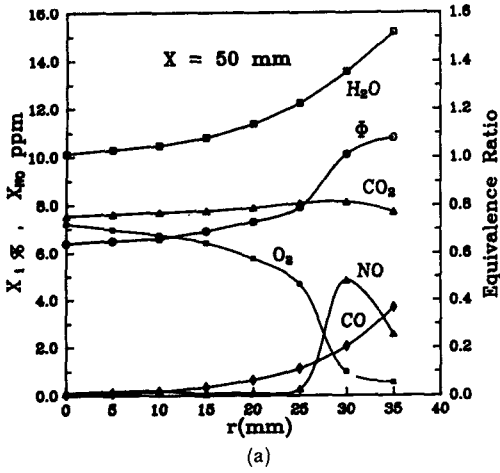


Fig. 11 Gas composition & equivalence ratio of typical section ($S=0.38$)

Fig. 12 Gas composition & equivalence ratio of typical section ($S=0.62$)

또는 2차 연소영역중 대표지점이라 여겨지는 곳을 대상으로, 선회에 따른 각종 농도분포 및 국소당량비 분포를 나타낸 것이다. Fig. 10의 선회가 없는 경우, $x=100$ mm 단면에서 CO 와 NO 농도는 O_2 를 제외한 다른 농도분포와 비례적으로 증가 또는 감소하나, $x=200$ mm 단면의 경우 CO 는 거의 나타나지 않고 있어, Fig. 7의 변동온도파형에서 나타난 재연소보다는 유입공기와 혼합과정에 기인한다고 여겨진다. H_2O , CO_2 농도 및 당량비분포도 비교적 낮게 나타난다. 특히, NO 농도는 $r=20$ mm까지는 H_2O , CO_2 농도와 비례관계에 있으나, 그 이후지점부터는 오히려 증가하는 경향을 나타낸다. 선회강도가 0.38인 Fig. 11(a)의 경우, CO 와 NO 농도는 O_2 농도 구배가 큰 $r=25$ mm 이후 증가하고 있다. 한편, 당량비분포는 벽부근에서 약 1.1의

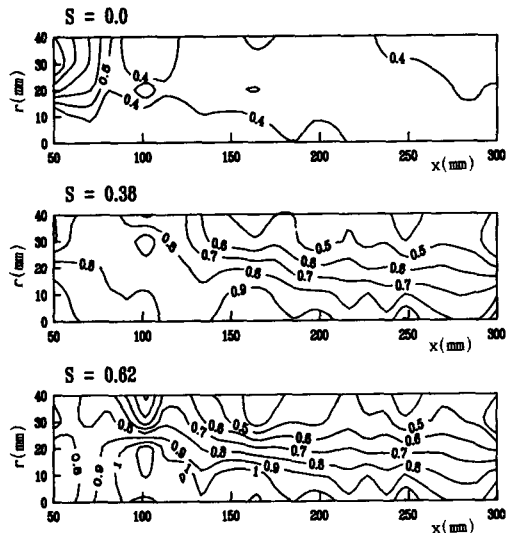


Fig. 13 Contour of equivalence ratio

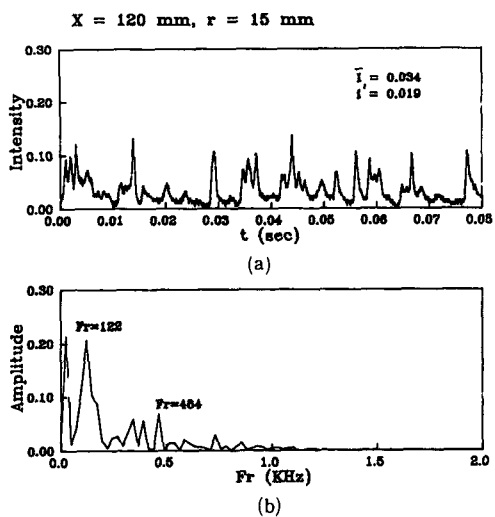


Fig. 14-1 Wave & spectral characteristics of ion current (S=0.0)

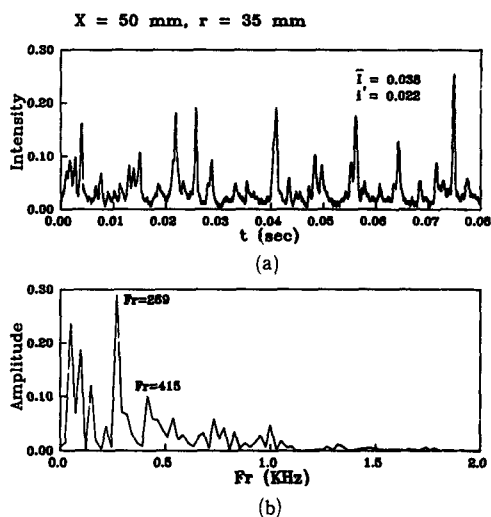


Fig. 15-1 Wave & spectral characteristics of ion current (S=0.38)

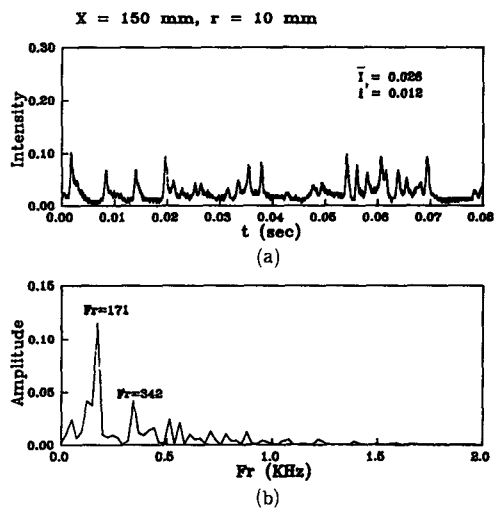


Fig. 14-2 Wave & spectral characteristics of ion current (S=0.0)

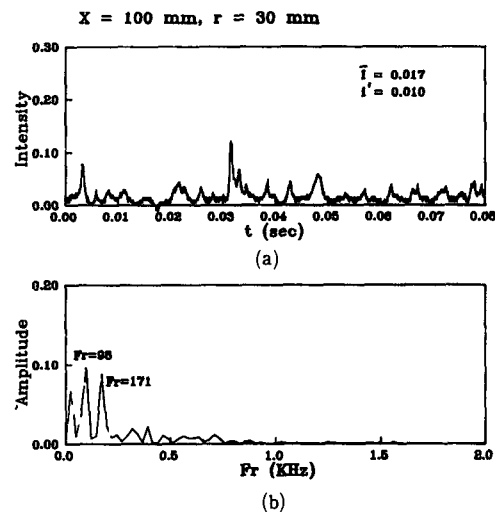


Fig. 15-2 Wave & spectral characteristics of ion current (S=0.38)

높은 값을 나타낸다. Fig. 11(b)의 경우, CO농도의 분포가 낮은 반면, NO농도의 분포는 O₂농도에 상관없이 비교적 균일한 분포를 하고 있다. 다른 농도분포와 당량비도 연소기 중앙부, 반경 $r=20 \text{ mm}$ 까지 비교적 균일한 분포를 하고 있다. Fig. 12(a)에서는 CO농도가 증가함에 따라 CO₂농도도 증가하나, NO농도는 오히려 감소하고 있다. 이는 앞선 Fig. 11, 12(a)의 경향과 대조를 이루는 것으로 선회강도에 의해 변화하는 혼합상태나 국소온도

및 O₂농도 분포의 차이에 따라 NO의 생성과정에 약간의 차가 생김을 알 수 있다. 1차 연소영역은 연료와 공기의 혼합이 활발한 곳으로 상류부에서의 NO를 논의하는 것은 차후로 미루어야 할 것 같다. Fig. 12(b)의 경우는 Fig. 11(b)와 유사한 경향을 보이며 온도장이 발달하고, 중앙부의 당량비가 높아 NO농도 값이 가장 높게 나타나고 있다. 따라서, Fig. 10(a), Fig. 11(b), Fig. 12(b)에서 CO₂, H₂O 및 NO 농도는 당량비와 비례관계를 갖고

O₂농도와는 역비례의 관계를 갖고 있다. 한편, Fig. 10(a), Fig. 12(a)에서의 CO농도는 반응이 활발한 1차 연소영역에서 높게 나타나나, NO농도는 온도가 높은 2차 연소영역에서 많이 나타나는 경향을 보여 온도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있고, 온도와 당량비에 의해 결정되는 서-멀(thermal) NO가 주종을 차지한다고 추측된다.

Fig. 13은 선회에 따른 등당량비분포를 나타내고 있다. 당량비분포를 Fig. 10~12에서 고찰한 것과 같이 전반적으로 CO₂농도 분포와 밀접한 관계를

갖고, O₂분포와는 역비례관계를 하고 있음을 알 수 있었다. 선회가 없는 경우, $x=80$ mm 단면 이전의 연소기 상류부를 제외하고 0.4정도의 낮은 분포를 하고, 선회가 클수록 전반적으로 높은 분포를 나타낸다. 선회강도 0.62에서 온도분포가 1700 K 이상인 연소기 중앙부에서 당량비 0.9~1.1의 높은 분포를 나타내고 있다.

3.3 이온전류분포

이온전류치는 연소기내의 연소가 활발한 곳에서 높게 나타나므로 연소반응강도의 지표가 된다. Fig. 14~16은 1차 또는 2차 연소영역의 대표위치에서의 이온전류치와 그에 대한 주파수 분석파형을 나타내고 있다. Fig. 14의 선회가 없는 경우, 전반적으로 이온전류강도가 약하고, $x=150$ mm 위치까지 국부적인 연소반응이 일어나고 있다. Fig. 15의 선회강도가 0.38에서는 상류부인 $x=50$ mm의 1차 연소영역에서 가장 강도가 높고, $x=100$ mm에서는 라이너 홀에서의 공기유입으로 미약한 반응이 일어나고 있음을 알 수 있다. Fig. 16의 선회강도가 0.62인 강선회에서는 $x=30\sim 50$ mm에서 반응이 매우 활발함을 알 수 있다. 주파수분석에서 나타난 탁월주파수는 연소반응이 활발한 1차 연소영역에서 $S=0.0$ 에서는 171, $S=0.38$ 에서는 269, $S=0.62$ 에서는 293과 513 Hz의 비교적 저주파수를 갖고, 선회가 클수록 에디 스케일이 작아짐을 알 수 있다.

4. 결 론

가스터빈 연소기의 고성능·저공해 연소기 설계를 위한 기초연구로서 소형의 모형 가스터빈 연소기를 제작하여, 선회강도의 따른 연소 및 배출특성을 1,2차 연소영역에 초점을 두고 현상론적으로 조사, 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 선회강도가 클수록 온도분포가 높게 나타나고, 연소특성을 좌우하는 1차 연소영역의 길이가 짧아져 연소반응이 연소기 상류부에서 활발하게 진행되어 화염길이도 짧아진다.

(2) 선회가 과다하면 환류영역의 길이가 감소하고 보염상태가 악화되어 오히려 연소상태에 역영향을 미치는 것을 감안할 때, 연소기에 적절한 선회강도가 존재한다고 볼 수 있다. 세 가지 선회조건에서 여러 실험데이터(온도, 가스농도 및 이온전류치)를 비교해 볼때 본 연소기의 선회강도 0.38인

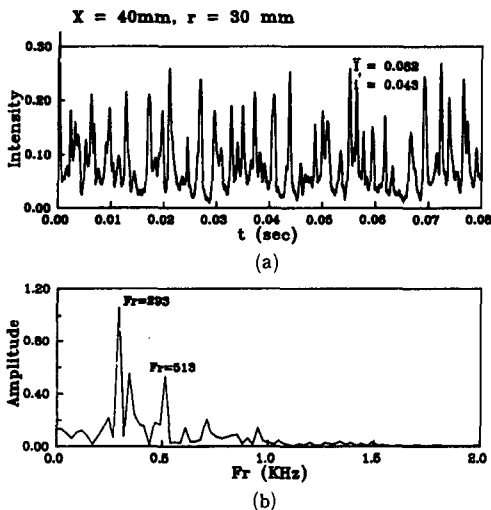


Fig. 16-1 Wave & spectral characteristics of ion current ($S=0.62$)

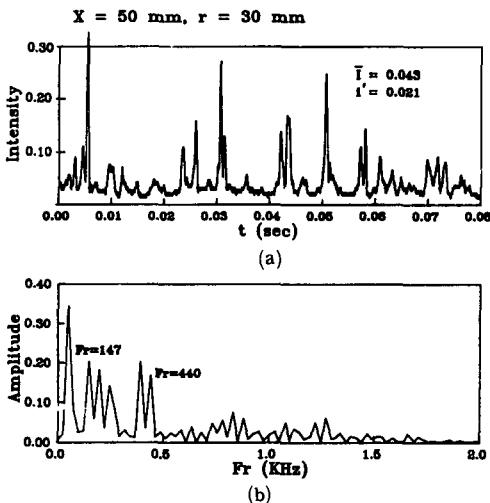


Fig. 16-2 Wave & spectral characteristics of ion current ($S=0.62$)

경우가 선회강도 0.62보다 적절하다고 생각된다.

(3) 탄화수소의 열분해에 의해 생기는 CO는 연소반응이 활발한 1차 연소영역에서 많이 발생하고 2차 연소영역부터는 산화가 진행되기 때문에 농도가 저하한다. 한편, NO는 온도분포가 높은 2차 연소영역에서 많이 나타나고 그 이후는 연소반응이 일어나지 않는 관제로 유입공기와의 희석으로 농도가 저하된다. 따라서, NO는 온도와 당량비에 비례하여 나타나는 서-멀 NO형의 생성기구가 지배적인 것으로 보인다.

(4) 선회강도는 CO, NO농도의 배출량에 직접 영향을 주고, 선회강도에 의해 변화하는 혼합상태나 국소 온도 및 O₂농도분포의 차이에 따라 NO의 생성과정에 약간의 차가 생긴다.

후 기

이 논문은 199년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 지원 학술연구조성비에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- (1) 堀 守雄, 1971, "高負荷燃焼器空氣量配分に關する實驗," JSME Paper 37卷, 295號, pp. 566.
- (2) Starkman, E. S. et al., 1971, "The Role of Chemistry in Gas Turbine Emissions," ASME Tran., Ser. A, pp. 333~344.
- (3) Mellor, A. M., 1976, "Gas Turbine Engine Pollution," Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 1, pp. 111~133.
- (4) Lilley, D. G., 1977, "Swirl Flows in Combustion," AIAA Journal, Vol. 15, No. 8, pp. 1063~1078.
- (5) Khalil, E. E., Spalding, D. B. and Whitelaw, J. H., 1977, "The Calculation of Local Flow Properties in Two-Dimension Furnances," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 13, pp. 775~791.
- (6) Larue, J. C. et al., 1984, "Momentum and Heat Flux in a Swirl-Stabilized Combustor," 20th Symp. (Int.) on Comb., pp. 277~285.
- (7) 高城敏美 et al., "旋回火炎の構造に關する研究," 日本機械學會論文(B編), 49卷, 441號(昭58-5), pp. 1078~1086.
- (8) 香月正司 et al., "ガスタービン燃焼器の排氣組成," 日本機械學會論文(B編), 42卷, 355號(昭51-3), pp. 935~942.
- (9) 堀 守雄, 1971, "高負荷燃焼器空氣量配分に關する實驗," JSME Paper 37卷, 295號, pp. 566.

(1) 堀 守雄, 1971, "高負荷燃焼器空氣量配分に關