

## 난류발생기가 장착된 선회기를 이용한 연소기내의 혼합 및 연소 특성

류승협\* · 서정무\*\* · 박용국\*\* · 이근선\*\*\* · 문수연\*\* · 이충원\*\*

### The Characteristics of Mixing and Combustion in the Combustor with Turbulence Generator

S. H. Ryu\* · J. M. Seo\*\* · Y. K. Park\*\* · G. S. Lee\*\*\* · S. Y. Moon\*\* · C. W. Lee\*\*

#### ABSTRACT

A swirler with turbulence generator is designed and manufactured for generating many small-scale eddies in the combustor which contribute to enhancing mixing effect between fuel and air. The method results in not only the disadvantage of pressure loss but also the advantage of promoting combustion and reducing NOx. For the purpose of the study, four kinds of swirler: with different turbulence generator area (0%, 3%, 7%, and 12% of reducing flow area) are designed to confirm the effect of mixing according the variation in the area of the turbulence generator. The mixing of combustor in the radial direction is significantly improved and the distributions of flames and temperature are well distributed throughout the cross section of a combustor as area of swirl generator is increased.

#### 초 록

본 연구에서는 화염의 안정화를 위하여 사용되는 선회류 발생 장치의 베인에 작은 스케일의 난류를 발생시킬 수 있는 난류 발생기를 장착하여 연료와 흡입공기의 혼합을 촉진시키고, 연소와 온도의 균일도를 향상시키기 위한 실험적 검토를 행하였다. 실험에서는 내부 혼합용 이유체 분사노즐 사용하여 등유를 분사시킨 후 연료와 흡입공기의 혼합과 연소 현상을 관측하였다. 난류발생기는 베인 각도에 따른 베인과 베인 사이의 각 단면의 면적을 계산하여 그 유로단면의 면적에 대한 비율로서 난류발생기의 면적을 결정하여 선회기를 통과하는 유로 단면적의 각각 0%, 3%, 7%, 12%에 해당하는 면적의 난류 발생기를 제작하여 선회기 출구 베인의 끝단에 설치하였다. 실용 연소기의 구조를 어느 정도 단순화한 환형 연소기에서의 농도분포, 화염구조 및 온도분포를 조사하여 효과적인 연소기내의 연소제어에 사용하고자 한다.

\* 현대중공업 (Hyundai heavy Industries Co.,Ltd)

\*\* 경북대학교 기계공학부 (Kyungpook National University, Dept. of Mechanical Engineering)

\*\*\* 구미1대학 컴퓨터응용기계설계과 (Kumi College, Dept. of Mechanical Design)

## 1. 서론

액체 연료를 사용하는 연소기내의 연소현상은 분무연소로 연료의 미립화 및 주위 가스와의 혼합이라는 유체 역학적 현상, 유적의 가열, 증발과 같은 물리적 과정과 연료와 공기의 혼합에 뒤따른 착화·연소와 같은 화학반응 및 반응물질과 주위 가스와의 열 및 물질의 교환 등이 동시 혹은 순차적으로 진행되는 복잡한 연소 형태를 보인다. 따라서, 분무연소에서 효과적인 분무와 연소를 위해 노즐 자체의 성능과악은 물론, 선회기를 이용한 재순환 영역의 형성을 통한 화염의 안정성, 연소 성능 및 배기 특성과의 관계에 대한 연구가 꾸준히 진행되어져 왔다.

선회분류중의 연소에 관련된 연구로는 Beer(1)의 환상선회분류의 흐름에 관한 연구와 선회류를 사용한 연소기의 연구(2),(3)가 있으며, 多賀(4),(5),(6), Chigier(7)의 환상분류, 선회분류에 관한 연구가 있다. 분무연소에 관련된 연구로는 Hiroyasu(8)의 분무연소에 있어서 연료특성의 효과에 관한 연구와 Williams(9)의 액체 연료의 연소에 대한 연구 등이 있다.

최근 에너지 절약과 환경 친화적인 요구가 커짐에 따라 분무연소의 기구를 밝히고 NOx 등의 배기가스 저감과 Soot 생성억제를 위한 연소 시스템의 개발이 필요로 하고 있다. 기존의

연료와 공기의 혼합 방법으로는 연소장내에 국부적인 연료 농도가 불균일하게 되어 국소적 혼합 불균일 영역에서 배출되는 배기가스의 제어에 어려움을 가져오게 된다. 그러므로 연소장내의 균일한 혼합기 농도 분포를 이루어 연소장의 제어를 통한 연소 효율과 균일한 연소 온도분포를 구현함으로써 배기가스를 효과적으로 제어할 수 있다.

연료와 흡입되는 공기의 혼합은 큰 스케일의 난류 성분보다는 오히려 연소기내에서 국부적으로 혼합에 작용하는 작은 스케일의 난류 성분에 크게 지배를 받게 된다. 이러한 혼합 촉진을 위해 연료와 공기의 경계면에서의 운동에너지를 증가시키는 방법은 혼합의 촉진에 의한 연소의 효과적인 제어와 배기가스의 저감을 가져다 준다.

大田<sup>(10)</sup>는 메탄을 연료로 혼합촉진을 위하여 예혼합기에 흡입되는 공기를 와류 발생기를 이용하여 작은 스케일의 난류를 발생시키는 방법과 塩路<sup>(11)</sup> 등은 유로중의 삼각평판에 의한 와류발생으로 연료 주변의 공기와의 혼합을 촉진시킨 바 있으나 이는 가스상의 연료에 적용한 것이다. 현재 산업체에 많이 적용중인 액체 연료에 대한 연구는 미비하다.

본 연구에서는 화염의 안정화를 위하여 사용되는 선회류 발생 장치의 배인에 작은 스케일의 난류를 발생시킬 수 있는 난류 발생기를 장착하

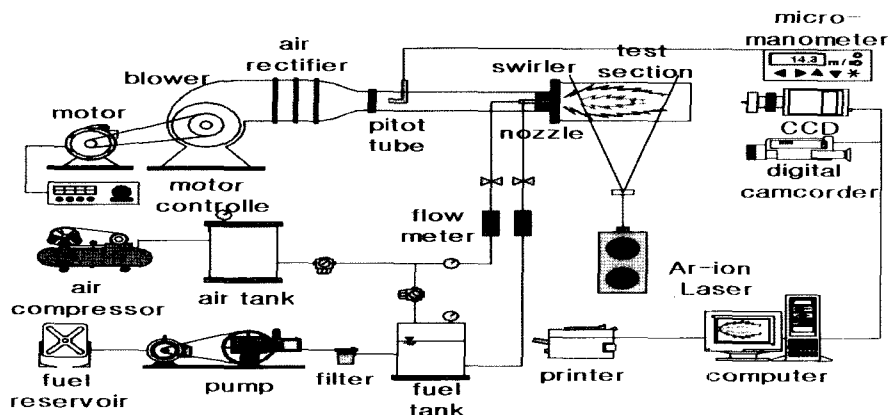


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

여 연료와 흡입공기의 혼합을 촉진시키고, 연소기내의 혼합기 농도 분포 균일도를 향상시키도록 실험적 검토를 행하였다. 실험에서는 실용 연소기의 구조를 어느 정도 단순화한 환형 연소기의 혼합기의 농도분포, 화염구조 및 온도분포를 조사하여 효과적인 연소기내의 연소 제어에 사용하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 크게 액체 및 기체 공급 장치부, 노즐부, 그리고 측정 및 해석 장치부로 구분된다.

### 2.1 연소용 공기 공급 장치

연소용 공기는 원심송풍기로 공급되며 허니콤(Honeycomb) 및 메시(Mesh)를 사용하여 난류의 강도를 약화시킨 후, 선회기에 의해 선회성분을 가지며 연소실로 유입된다. 송풍기를 구동시키는 모터의 출력은 5마력으로 동력은 출력의 안정을 기하기 위하여 3상 220V를 사용하였으며, 공기량은 송풍기를 구동하는 모터의 회전수를 가변 시킴으로써 조절된다. 그리고 송풍기로부터의 진동이 시험부에 전달되는 것을 방지하기 위하여 송풍기와 덕트(duct)사이에서 가변튜브를 사용하였다. 연소용 공기량은 선회기 전단에서 피토판과 최대 200mmH<sub>2</sub>O의 측정범위를 가진 마이크로 마노미터를 통하여 평균속도를 구한 후, 이 평균속도를 공기량으로 환산하여 구하였다. 또한 장착되는 선회기에 의한 동압의 변화에 따른 연소 공기량의 변화를 보정하기 위하여 선회기 전단 단면의 중심부에 피토판을 설치하여 연소 중에서도 그 중심속도에 의해 공기량의 변화를 체크할 수 있도록 하였다.

### 2.2 연료 분사 노즐

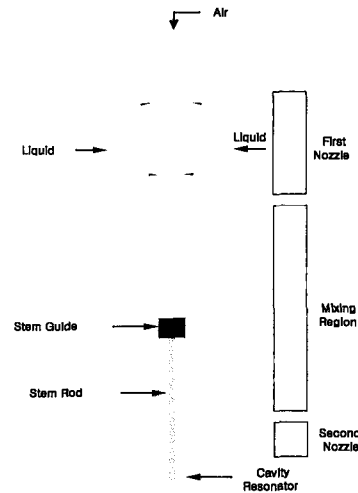


Fig. 2 A schematic of a nozzle

Fig. 2는 본 연구에 사용한 분사노즐을 나타낸다. 음향에너지를 이용하여 기체류에 의해 작동되는 공동 공진기를 가지는 내부 혼합형 이류체 분사 노즐을 설계 및 제작하여 사용하였다.

초음파를 이용한 노즐은 진동에너지를 이용한 미립화 방식이다. 초음파 진동을 하는 고체면에 액체를 공급하면 액면에 규칙적인 파장을 일으켜 파장의 머리부에서 미립화 하게 되는 것이다. 초음파 분무는 결국은 액체에 초음파 진동 에너지를 주는 것으로, 다른 미립화 방법에 비하여 비교적 입경이 균일하고, 분무량이나 입경의 제어가 용이하였다.

### 2.3 연료 공급 장치

연료 필터를 거친 등유(kerosene, C<sub>10</sub>H<sub>20</sub>)는 전자식 연료펌프로 연료탱크에 보충하도록 한 후, 연료탱크에서 압축기로 0.3MPa까지 가압하여 압력조절기와 니들밸브를 조절하여 용기 내의 압력을 일정하게 유지시킨다. 가압된 연료는 액체 유량계를 지나 노즐의 양단을 통해 투입되어 혼합실을 지나 공동 공진기에 충돌한 후 연소실 내로 분사된다. 정량적인 공급을 위하여 부유식

액체 유량계를 사용하였으며, 유량계의 정도를 비교 검토하기 위하여 직접 메스실린더와 초시계를 이용하여 보정한 후 사용하였다.

#### 2.4 난류발생기를 장착한 선회류 발생장치

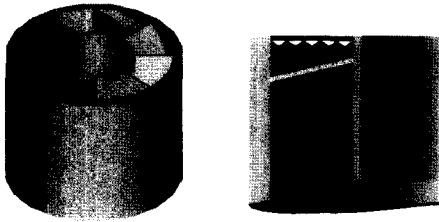


Fig. 3 A vane type swirler with turbulence generators

Fig. 3은 본 실험에 사용한 단순 베인 타입의 고정식 구조의 선회류 발생장치의 각 베인에 난류발생기를 장착한 모습이다. 선회류 발생장치의 외경은 시험부 전단에 공급되는 유로 면적과 동일하게 78mm이고, 내경은 42.5mm이며 베인은 8개로 플랫폼형이다. 선회기의 베인각은 40°로 고정하였다. 난류 발생기는 톱니 형상으로 제작하였으며 톱니의 개수는 각각의 베인마다 5개씩 점용접을 통하여 연소기 입구로 들어가는 선회기 베인의 출구 끝단에 장착하였다. 베인 각도에 따른 베인과 베인 사이의 각 단면의 면적을 계산하여 그 유로단면의 면적에 대한 비율로서 난류발생기의 면적을 결정하여 선회기를 통과하는 유로 단면적의 각각 0%(A type), 3%(B type), 7%(C type), 12%(D type)에 해당하는 면적의 난류 발생기를 제작하여 선회기 출구 베인의 끝단에 설치하였다.

Vane angle	Ratio of the area of T.G. (T.G. area/total flow area)	Swirl number
40°	0%, 3%, 7%, 12%	0.67

Table. 1 Specifications of swirler with

turbulence generator

$$S = \frac{2}{3} \left( \frac{1-z^3}{1-z^2} \right) \tan \theta \quad (1)$$

여기서  $z$  : hub ratio ( $D_1/D_2$ )

$\theta$  : vane angle

$D_1$  : inner diameter

$D_2$  : outer diameter

Table. 1은 본 실험을 위해 사용된 난류발생기를 장착한 선회류 발생 장치의 사양을 나타낸 것이며 이때, 선회강도를 나타내는 선회수(swirl number)는 Mathur, M. L. 와 Maccallum, N. R. L<sup>(12)</sup>이 제안한 식 (1)을 참조하여 구하였다. 본 실험에 사용된 선회류 발생장치의 선회강도는 0.67로써 항공기 등에서 사용되는 고속용 가스 터빈보다는 산업용 버너에서 일반적으로 사용되는 선회강도에 초점을 맞추었다.

#### 2.5 연소실

시험부는 내경이 265mm, 길이는 450mm 원통형으로 단순 환형 연소기 형태이다. 연소기 재질은 비연소장에서의 농도 분포 측정시에는 투명한 아크릴로, 연소장에서의 연소현상 파악을 위해서는 스테인리스로 측정 목적에 따라 달리 사용하였다.

#### 2.6 비연소장의 액적의 단면분포 측정

0.3MPa로 가압된 후, 유량 조절 밸브 및 액체 유량계를 거쳐 노즐의 양단으로 유입된 후 대기중에 분사된다. 실험에 사용된 공기는 압축기에 의해 0.3MPa까지 가압된 서지 탱크에서 기체 유량계를 통해 노즐의 상부로 유입된 후 대기 중으로 분사된다. 분사에 필요한 액체와 공기의 배압은 압축기로부터의 압력 조절기와 각각의 용기에 설치된 압력계로 조절하였다. 분사된 분무 액적들을 받기 위하여 노즐 선단으로부터 100cm 지점에 분무 받이를 설치하였으며, 분출된 분무류가 측정부에 유입되는 것을 방지

하기 위해 송풍기를 사용하여 분출된 분무류를 흡입하도록 하였다.

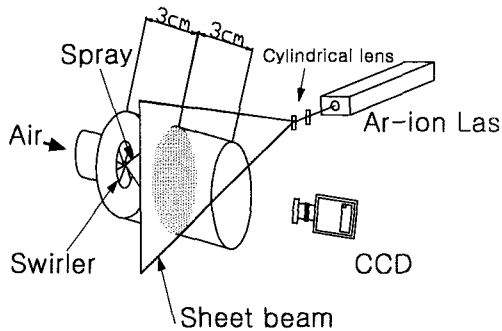


Fig. 4 Schematic diagram of the measurements of distribution of spray

Fig. 4는 비연소장에서 난류발생기를 장착한 선회기에 의한 액적의 단면 분포의 영향을 측정하기 위한 장치도이다. 본 실험에서는 액적의 단면 분포의 측정을 위하여 발광체에 의한 Mie-scattering 이미지들을 이용하여 연소장내의 단면에서의 액적 분포 사진을 획득하여 gray level값들을 판독하는 방법으로 분포를 판단하였다. Ar-ion 레이저로부터 조사되는 빛은 두개의 실린더형 렌즈를 통과하면서 sheet beam을 형성하여 분무 단면을 평면으로 비추게 된다. 이때 분무를 위한 수용액에 형광 물체인 이오신(Eosin-Y)을 첨가하여 sheet beam에 접촉하게 되는 액적들이 빛을 발하게 하였다. 이렇게 액적이 발광하는 단면 사진을 조리개 8, 노출시간 0.032초로 CCD(Charge Coupled Device)카메라를 이용하여 각 조건에서 5장의 사진을 획득한 후 개발된 프로그램을 이용하여 사진당 32만개의 화소로 나누어 각 지점에서의 gray level 값을 읽어들이고 그 5장의 사진의 값을 평균하여 각 지점에서의 휘도의 값을 측정

하였다. 이때 gray level이 높은 곳은 액적이 밀집되어 밝은 빛을 띄게 됨을 의미하며 낮은 곳은 반대로 액적의 분포가 적은 곳을 의미한다. 단면의 측정은 선회기의 출구로부터 각각 3cm, 6cm 두 곳에 sheet beam을 조사하여 측정하였으며, 이 때 사용된 조건은 공기량을 3.27Kg/min로 고정시켰으며, 이오신을 첨가한 수용액 200ml/min을 미립화 시키기 위한 미립화용 공기는 80 l/min으로 하였다. 이 때 분무 조건은 미립화 공기와 연료 모두 0.3MPa의 압력으로 노즐에 주입된다. 연소실은 레이저 beam의 조사를 위하여 아크릴을 사용하였다.

#### 2.7 연소장의 화염 거동 현상의 측정

연소시의 화염의 관찰은 카메라의 조리개 2.8, 4, 5.6, 노출시간 1/60, 1/30으로 하여 KODAK(ASA 100) 필름을 이용하였으며, 디지털 카메라를 이용하여 연속 촬영을 수행한 후 이미지 보드를 이용하여 화상을 캡처하는 방법을 통해 획득하였다. 촬영 시 대상물과의 거리는 약 1.2m이다.

#### 2.8 연소기내의 온도분포 측정

연소실내의 온도 측정에는 와이어 직경 0.5mm, 비이드 직경 1.0mm인 Pt/Pt-Rh 13%의 R-type 열전대를 사용하였다. 연소기내의 온도 분포 측정을 위하여 선회기 출구 6cm와 연소기 출구에서 반경방향으로 1.3cm간격으로 이송한 후, 5~6초 동안 지연시킨 후 초당 10개씩 200개의 데이터를 얻어 A/D 변환기를 이용하여 검출된 기전력을 온도로 환산하였다. 입력된 데이터는 그 값들을 평균하여 데이터 처리부에 기록하였다. 이 경우 복사와 열전도에 의한 열전대 열손실은 고려하지 않았으며, 측정프로브의 연소실 내 투입으로 인한 화염형상의 변화가 거의 없는 것을 확인하였다.

3. 실험 결과

3.1 유동패턴

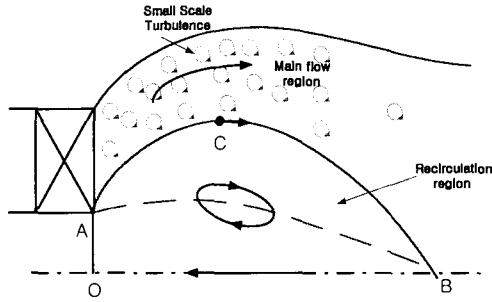


Fig. 5 Flow pattern of swirler with turbulence generator

Fig. 5는 난류발생기를 장착한 선회기에 의해 예상되는 일반적인 유동패턴을 도시한 그림이다. 유동이 축대칭이라 가정되기 때문에 단지 절반의 유동 패턴만이 고려된다. 재순환 영역은 곡선 OACB의 내부에 포함되며, 점 B는 일반적인 선회기 유동의 정체점이라 불린다. OACB 외부의 유동이 주 흐름이며, 실선으로 표현된 곡선 AB를 따라서 재순환 영역을 생성하게 된다. 일반적으로 선회기는 이렇게 생성된 재순환 영역을 이용하여 보염의 목적으로 사용되지만, 선회기에 의해 생성되는 난류는 연료와 공기의 혼합 촉진을 이루기에는 비교적 큰 스케일이어서 연료의 혼합에는 크게 작용하지 않는다. 실제로 연료와 흡입되는 공기의 혼합은 연소기내에서 국부적으로 생성되어 작용하는 작은 스케일의 난류 성분에 크게 지배를 받는다. 선회기의 베인에 장착된 톱니 모양의 난류 생성기는 연소실 내부에 작은 스케일의 난류를 발생시키게 되며, 이러한 난류 성분이 연료 주위의 공기의 유동을 활발하게 하여 연료와 공기의 혼합을 촉진시키게 되며, 연소실 내부의 전반에 걸쳐서 균일한 농도 분포를 이루는 데 효과를 주게 된다.

3.2 압력 손실

Mathur<sup>(12)</sup>는 8개의 베인을 가지고 내경이 31.8mm, 외경이 98mm이며, 길이가 100mm인 단순 베인 타입 고정익 구조의 선회기를 대상으로 하여 선회각에 따른 다양한 압력 변화를 실험적으로 조사한 바 있다. 본 실험에 사용하는 난류 발생기를 장착한 선회기의 경우 난류 발생기가 유동을 방해하게 되므로 Mathur가 제안한 위의 손실 이외에도 난류 발생기에 따라 추가적인 압력손실이 발생하게 된다. 본 실험에서는 선회기에 각각 다른 난류 발생기를 장착함에 따르는 압력변화를 고려하기 위해 40 의 선회각을 가진 선회기를 이용하여 압력 손실을 측정해 보았다. 이때 공기의 유속은 최고 마하 0.06이하로 비압축성 유체로 볼 수 있으며, 제작상의 문제에 따른 형상의 차이에 의한 압력손실은 작다고 가정한다. 난류 발생기에 의한 압력 손실은 식 (2)으로 나타낸다.

$$\Delta P_{f_2} = k_3 \frac{\rho_a v^2}{2} \quad (2)$$

여기서,

$\Delta P_{f_2}$  : 스웰러에 장착된 난류발생기에 의한 압력손실

$k_3$  : 유동면적의 감소에 따른 압력손실 계수

$\rho_a$  : 공기의 밀도

$v$  : 축방향 속도

Axial velocity (m/s)	3%	7%	12%
10	-	0.021	0.088
15	0.018	0.04	0.116
20	0.021	0.05	0.121

Table. 2 Pressure loss coefficient  $k_3$  caused by turbulence generator

Table. 2는 공기의 유량 변화에 따르는 각각

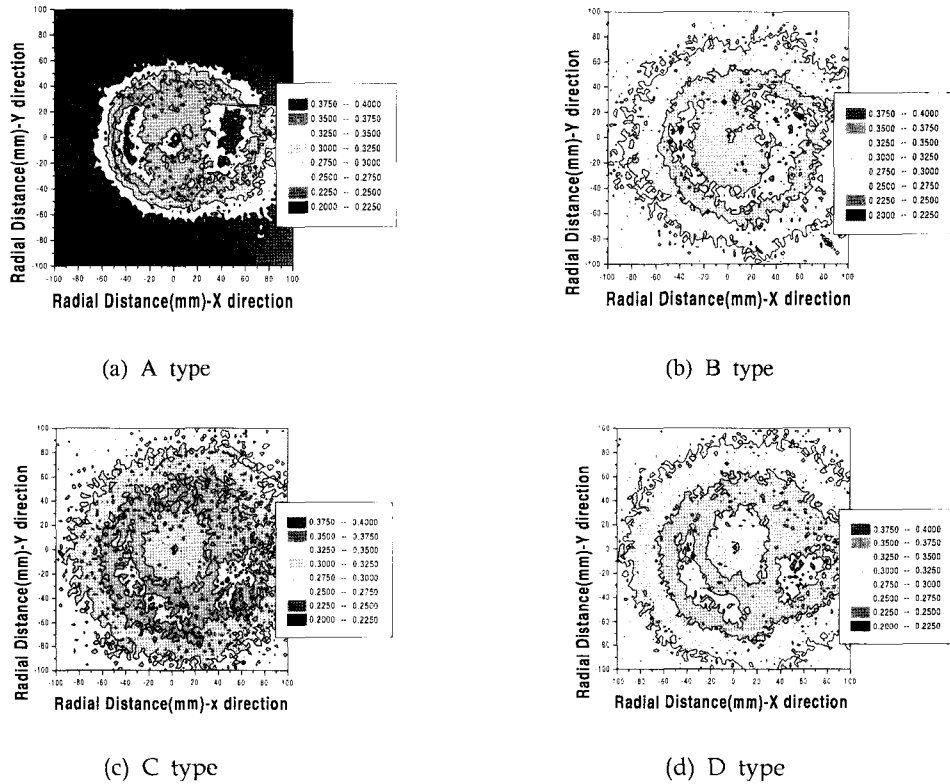


Fig. 6 Distributions of droplet at 3cm away from the exit of swirler

의 난류 발생기에 의한 압력 손실 계수  $k_3$  값을 나타낸 것이다. 이때 압력 손실은 선회기 전단에 설치된 피토포관과 마이크로 마노메타를 이용하여 중심속도를 측정하여 그 차압으로 계산하였다.

축방향 속도를 10m/s~20m/s로 변화시키면서 난류발생기에 의한 압력 손실을 살펴보았을 때 측정 범위에서 나타난 값은 난류 발생기를 장착하지 않은 경우에서 나타나는 선회기 자체의 압력손실에 비하여 그다지 크지 않다. 따라서, 난류 발생기에 의한 압력 손실을 작은 압력 손실 값으로 보상하여 주어 각각의 난류 발생기에 대해 연소장의 조건을 동일하게 하여 실험을 행하였다.

### 3.3 비연소시의 액적의 단면분포

Fig. 6은 선회기의 출구로부터 3cm되는 지점에 laser sheet을 조사한 후 그 단면에서의 액적의 단면분포를 CCD 카메라를 이용하여 각각 5컷의 사진을 촬영한 후 gray level을 이용하여 액적의 분포도 나타낸 그림이다. 그림에서의 좌표 x,y는 laser sheet가 조사된 연소기의 단면의 반경 방향으로의 거리를 나타낸다.

Fig. 6(a)와 같이 난류 발생기를 장착하지 않았을 때의 경우에는 단면의 액적 분포가 선회기 주변에 급격하게 밀집되어 있는 현상을 보이지만, 난류 발생기를 장착한 경우에는 Fig.6(b)와 (c)에서 보는 것처럼 확산이 촉진되어 점차 연소실 전반으로 퍼져 나가는 것을 볼 수 있다. 난류 발생기의 단면적이 가장 큰 Fig.6(d)에서는 액적이 국부적으로 밀집되는 것이 없어지고 연소실 전반에 걸쳐 액적 분포는 균일

한 성향을 보이며 연소실의 끝단까지 분무군이 도달하게 된다. 특히 gray level의 최대값은 Fig. 6(a)의 최대값에 비해 난류 발생기를 장착하지 않은 경우에 있어서 나타나는 최대값에 비해 40%정도 떨어지게 된다.

Fig. 7은 laser sheet의 단면을 선회기로부터 3cm의 위치시켜서 반경방향으로 4개의 각기 다른 선회기의 액적 분포를 그래프에 같이 도시한 그림이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 난류 발생기의 면적이 커질수록 단면에 위치한 액적들이 균일하게 분포되어 연소기 전반으로 확산되어 간다.

Fig. 8은 laser sheet의 단면을 선회기로부터 6cm의 위치로 옮겨서 분무가 더 진행된 상태에서의 단면의 액적 분포를 나타낸 그래프로써, 선회기의 끝단으로부터 연소실의 가장자리까지의 액적의 분포를 반경방향으로 나타내었다. Fig. 7과 마찬가지로 난류 발생기를 장착하지 않았을 경우에는 선회기의 끝단에서의 gray

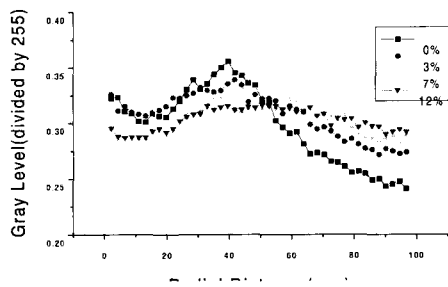


Fig. 7 Distributions of the section at 3cm away from the exit of swirler

level 값이 높아 이곳에서의 액적의 국부적인 밀집이 큰 것으로 보이며, 이것은 연소실의 반경 방향으로 진행할수록 급격히 떨어지게 된다.

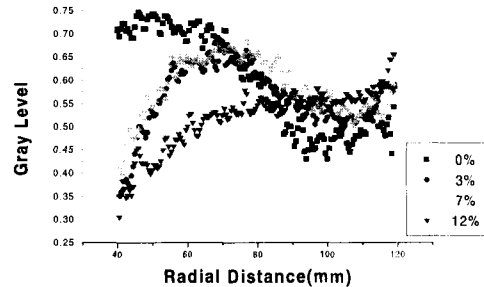


Fig. 8 Distributions of the section at 6cm away from the exit of swirler

난류 발생기를 장착한 경우에는 반경 방향으로의 확산이 촉진되어 선회기 근처로 밀집되어 있던 액적들이 연소기 전반으로 퍼져 나가는 것을 볼 수 있다. 특히 단면적이 12%인 난류 발생기를 장착한 경우에 있어서는 그 확산이 연소실의 끝단까지 고르게 확산되어 연소실 전반에 걸쳐 균일한 분포를 얻을 수 있다.

이러한 비연소시의 연료의 분포 경향으로부터 난류 발생기를 장착한 경우에서 연소실 전반에 걸친 균일한 농도 분포의 획득이 가능하다는 것을 파악할 수 있으며, 이러한 균일한 농도 분포는 연소시의 화염 거동에 영향을 끼칠 것이라는 것을 알 수 있다.

### 3.4 난류발생기를 장착한 선회기의 영향

선회기에 장착된 난류 발생기의 혼합촉진 효과를 고려하기 위하여 본 실험에서는 공동 공진기를 가지는 내부 혼합형 이유제 분사 노즐을 이용하고 실험조건은 청색염과 적색염이 같이 존재하는 이론 공기비보다 공기량이 약간 많은 조건인 당량비 0.8을 기준으로 하였다. 각기 다른 난류 발생기를 장착한 선회기의 경우에 의한 동압에서의 손실은 연소장내의 조건을 상이하게 하여 난류 발생기에 의한 효과만을 파악하기에는 어려움이 있다. 따라서 난류 발생기에 의한 압력손실을 보상하여 연소실로 들어오는 공기의 속도를 일정하게 해주어 연소장에서의 다른 조건을 동일하게 하였다. 본 실험에서는 공기량을



3.27kg/min, 당량비 0.8, 미립화용 공기량 100 l/min로 선회기의 변화 외에는 모든 조건을 동일하게 하여 난류발생기의 효과를 파악하였다.

Fig. 9는 0.67의 선회강도를 가진 선회기의 유동면적의 각기 0%, 3%, 7%, 12%에 해당하는 면적을 가진 난류 발생기를 장착한 경우의 화염 사진이다. 난류 발생기가 없는 0%의 선회기의 경우 Fig. 9(a)에서는 선회기 주변에서의 화염이 관찰되지 않아 선회기가 뚜렷이 관찰된다. Fig. 9(b), (c) 및 (d)에는 난류 발생기의 면적이 점차로 커짐에 따라 붉은 화염이 점차로 푸른 화염으로 변하여 균일한 형태의 화염이 됨을 볼 수 있다. 특히 Fig. 9(d)의 전반적으로 난류 발생기의 영향으로 연소실내에 혼합을 촉진시키게 됨에 따라 연소효율을 높임은 물론 낮은 온도의 화염인 청색화염의 균일한 형태의 화염으로 NOx의 저감도 유도될 것으로 사료된다.

Fig. 10은 화염사진을 바탕으로 연소현상을 분석한 결과이다. 난류발생기를 장착하지 않은 Fig. 10(a)의 경우에는 선회기 주변의 중심부에서는 화염이 관찰되지 않아 이 부분이 밝게

나타난다. 그러나 그 주위로 등고선의 간격이 매우 조밀하게 변하게 되며 그 주위로 연료가 농후한 지역이 환형으로 존재하게 된다. 이는 연소실내에 급격한 온도 변화를 가져오게 되는 곳으로 연료의 혼합이 잘 이루어지지 않아 완전 연소를 이룰 수 없게 된다. Fig. 10(b)의 경우에는 선회기 주변으로 혼합이 국부적으로 이루어져 균일한 형태를 보이나 연소기 벽으로는 Fig. 10(a)와 마찬가지로 급격한 변화를 이루게 된다. Fig. 10(c)와 Fig. 10(d)의 경우에는 발생한 난류의 영향으로 연소기 전반에 걸쳐 균일한 분포를 이루게 되며 연소기 전반에 걸쳐 급격한 변화를 보이는 곳이 적어지게 되고 (d)에서는 화염의 휘도가 거의 균일해지게 된다.

### 3.5 연소기내의 온도분포 및 연소효율

Fig. 11 (a)는 연소기내의 온도 분포를 당량비 0.6일 때 선회기 출구 6cm에서 반경방향으로 4개의 각기 다른 선회기에 대해서 도시한 그림이다. 난류 발생기가 없는 선회기의 경우에는 난류발생기를 장착한 경우보다 온도 구배가 큰

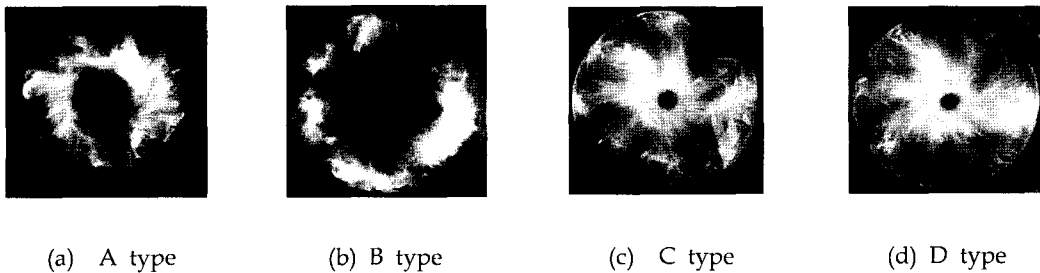


Fig. 9 Photographs of flame for the variation of turbulence generator area  
( $S=0.67$ ,  $Q_a=3.27\text{kg/min}$ )

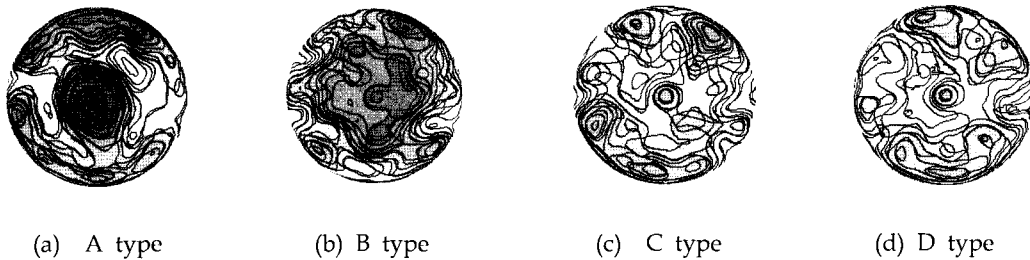


Fig. 10 Contour of flame for the variation of turbulence generator area  
( $S=0.67$ ,  $Q_a=3.27\text{kg/min}$ )

것을 볼 수 있다. 이는 연료와 공기와의 혼합이 미흡하여 국부적인 곳에서의 당량비가 높아지며 이는 국부적으로 온도가 높아져 NOx 발생량이 난류발생기를 장착한 경우보다 많음을 예측할 수 있다. 가장 혼합이 잘 되는 12% 경우에는 모든 조건에 대해서 전체적으로 연소기 내의 온도 구배가 일정함을 알 수 있으며, 7%보다 연소기 벽면 부근에서 온도가 낮은 이유는 난류발생기에 의한 혼합 개선에 의해 국부적인 온도가 낮아지게 되어 벽면부근의 냉각효과에 의해 12%가 7%보다 연소기 벽면에서 온도가 낮은 것으로 사료된다. 따라서, 같은 연료량을 연소하더라도 연소기내에서 난류발생기에 의한 혼합의 개선에 의해 난류 발생기를 장착하지 않은 경우보다 연료를 더 효율적으로 연소할 수 있으며, NOx 생성요인이 적음을 알 수 있다.

Fig. 11 (b)는 위에서와 같은 위치에서 당량비를 0.8일 경우의 반경 방향에 대한 온도 분포도이다. 당량비 0.6일때와 같이 난류생성기의 면적이 커질수록 연소기내의 온도분포가 균일해짐을 알 수가 있다

Fig. 12 (a), (b)는 각각 당량비 0.6, 0.8에서의 연소기 출구에서의 온도 분포도이다. 난류발생기의 면적이 커질수록 출구에서의 온도분포도 더욱 더 균일해짐을 알 수 있다. 연소기내에서 불균일한 출구온도 분포는 부분적으로 열점이 발생하고, 화염이 연소실내 체류하는 시간이 길어짐으로서 연소실내의 온도가 상승하여 배출가스의 NOx 농도에 영향을 미치게 된다. 따라서 난류발생기의 장착에 따라 출구에서의 온도균일성과 NOx생성이 작게 될 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기존의 연소기에 쉽게 적용할 수 있으며, 흡입되는 공기와 연료의 혼합을 촉진하는 난류 생성기를 장착한 선회기를 제안하였다. 이러한 난류 생성기의 면적을 연소용 공기의 유로 단면적의 각각 0%, 3%, 7%, 12%로 하여 변화를 살펴본 결과 다음과 같은 결론을

얻었다.

1. 비연소 실험에서 분사된 연료와 연소용 공기의 혼합을 조사한 결과, 기존의 선회기에 비해 난류발생기가 장착된 경우에, 그리고, 난류발생기의 면적이 증가함에 따라 연소기의 반경방향으로 혼합기의 농도분포의 균일도는 크게 향상되었다.
2. 난류 발생기를 장착함에 따라 적색화염의 불완전 연소를 완전 연소화 하여 청색화염을 획득할 수 있으며, 연소기 전반에 걸친 균일한 화염의 획득이 가능하였다.
3. 난류발생기의 면적이 넓어질수록 연료와 공기와의 혼합의 촉진에 의해 연소기내의 온도는 균일하게 되어 국부적인 연료 과잉으로 인한 높은 연소온도에 의해 발생하는 thermal NOx 생성요인을 저감시킬 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. Beer, J. M. and Chiger, N. A., "Velocity and Static-pressure Distributions in Swirler Air Jet Issuing from Annular and Divergent Nozzle.", Trans. ASMe, ser-D, 86-4, 1964, pp. 788-796.
2. Syred, N. and Beer, J., "Velocity and Swirling Flows.", Combustion and Flame, 1974, pp143~204.
3. Beer, J, M., "On the Stability and Combustion Intensity of Pressure-jet Oil Flames.", Combustion, 37, 1965, pp. 41~49.
4. 赤川活爾, 多賀正夫, "環狀噴流に関する研究(第1報) 基本的噴流特性の実験結果とその近似的計算", 機論31-221, 昭和40-1, pp. 105~112.

5. 多賀正夫, 赤川活爾, 園部芳弘, 山地勝弘,  
“環状噴流に関する研究(第2報)旋回羽根付および円錐状ノズルの合の実験”, 機論36-283, 昭和45-3, pp. 385-396,
6. 多賀正夫, 赤川活爾, 園部芳弘, 山地勝弘,  
“環状噴流に関する研究(第3報)主流線および速度分布の理論的考察”, 機論36-283, 昭和45-3, pp. 397~406,
7. Chiger, N, A and Chervinsky, A.,  
“Experimental Investigation of Swirling Vortex Motions in Jets.”, Trans. ASME, Ser-E, 34, 1976, pp. 443~451,
8. H. Hiroyasu, "Effect of Fuel Properties on Spray Combustion.", Sekiyu Gakkaishi, vol.33, No.6, 1990, pp. 337~346,
9. F. A. Williams, "Combustion Theory"- 2nd edition, 1966, pp. 446~482
10. 大田黒俊夫, “Vortex Generatorを用いた予混合器の混合促進”, 第27回 ガスタービン定期講演会 講演論文集, 1999. 5
11. 塩路昌雄, “流路の三角平板による渦流発生と混合促進”, 日本機械学会文集(B編) 67巻 653号, 2000, pp.288~293
12. Mathur. L. M and Maccallum, N. R. L,  
“Swirling Air Jets Issuing from Vane Swirlers PART1: Free jets.” J. Inst. Fuel., 1967, 39, 214