

# 스윙 유동을 이용한 오일 버너의 연소성능분석

최창우\* , 김영환\*\* , 정재현,\*\*\* 박권하\*\*\*

## Analysis on Combustion Characteristics of the Oil Burner using Swirl Flow

Changwoo Choi\*, Younghwan Kim\*\*, Jaehyun Jeong\*\*\*, Kweonha Park\*\*\*

**Abstract:** This paper addresses the analysis of the combustion characteristics in the oil burner using swirl flow. The reduction of exhaust emissions and high efficiency combustion techniques of the industrial burner have been studied to conserve environmental resources. We make swirl burner equal to dimension of wide burner and it is turn round of the combustion gas in construction. For a vigorous inner flow possessed 3m/s velocity in combustion gas of two burners .In calculation, we make use of a densely mesh to detailed analysis. In this study, the effect of swirl flow on the combustion of a commercial burner is analysed by experimental and also simulative manner. The results show the swirl burner has 40% better efficiency and less emissions of CO, HC, NOx and Smoke.

**Key words:** Oil burner(오일버너), Swirl flow(스윙유동), Flue gas(배기가스)

### 1. 서 론

최근 에너지 문제와 공해문제에 대한 환경규제 등으로 연소기의 효율 향상을 통한 에너지 절감과 환경 문제의 해결을 위한 청정연소 및 고효율, 저공해 연소기술의 개발에 관심이 고조됨에 따라 연소과정에 대한 중요성이 증가하고 있다. 그 중요성 때문에 고효율, 저공해 연소기술들에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있고, 이러한 연소기술들을 살펴보면 대류열전

달 향상을 위한 버너 연소기술, 축열연소, 고휘염 연소 등과 같은 연소시스템 기술이 있다.

연소기의 고효율을 유지하면서 질소산화물을 줄이는 것은 서로 상충되는 문제로 이를 해결하는 방안으로 연료의 분무특성 향상과 연료와 공기의 혼합 증대를 통한 연소영역의 확대와 동시에 국부적인 온도상승을 억제하는 기술이 연구되고 있다.

이러한 점에서 혼합 특성 증대 및 연소 특성 향상의 방안으로 선회류에 의한 연구를 진행하고 있다. <sup>1), 2)</sup> 선회류에 의한 재순환 영역의 생성은 분무의 성능을 향상시키고 기연가스 재

\* 책임저자(한국해양대 대학원 기계공학과) E-mail : [pany831@naver.com](mailto:pany831@naver.com) Tel : 051) 410-4953

\*\* 한국해양대 대학원 기계공학과

\*\*\* 한국해양대(기계정보공학부)

순환 과정을 생성시켜 이로 인해 화염의 형상과 안전성에 보다 긍정적인 영향을 미친다.<sup>1)</sup>  
<sup>3)</sup> 또한 연료와 공기 및 기연가스의 강한 선회력을 수반하므로, 연소시작 전 단계에서 양호한 예혼합이 이루어지므로 이론 당량비 부근에서도 완전 연소가 가능하여 질소산화물(NOx), 매연(Soot) 등의 배기가스를 동시에 감소시키는 것이 가능하게 된다.

흡입되는 연소공기에 강한 와 유동을 수반하게 하면 화염 면적이 폭방향으로 증가하여 국부적인 화염온도가 낮아지고, 연소가스의 재순환으로 산소 농도가 낮아져 NOx가 저감되는 효과가 있다.<sup>1)</sup>

Ottino<sup>4)</sup> 와 Cox등<sup>5)</sup>의 연구에 의하면 원통내부 유동의 경우 양호한 교반을 위해서 정상유동과 요동유동을 동시에 발생시켜야한다. 와 유동을 이용한 원통내의 유동은 원통의 크기, 테이블의 운동진폭, 요동각속도, 액체의 깊이 등에 따라 달라지게 되며, 버너의 화염의 형상, 안정성, 온도분포 및 배출 가스 특성은 구조와 연료 및 산화제의 유동 특성에 영향을 받게 된다.

Mathur<sup>6)</sup>, Maccallum<sup>7)</sup> 등은 3차원 구형피토타관을 사용하여 3차원 난류유동장을 측정하였으며, 강선회류는 연소실 중앙부에 재순환영역을 발생시킴을 확인하였다.

Lee등은 고부하 연소기의 유동장 특성에 관한 연구에서 연소실 팽창각에 따른 유동 특성과 선회도의 증가에 따른 재순환 영역의 축방향의 속도가 증가하는 것을 관찰하였다.<sup>8)</sup> 이러한 연구들은 국부적인 현상의 분석에 국한되고 있으며, 산업용 버너에 대한 유동에서부터 연소후의 배기까지의 종합적인 연구는 부족한 상태이다.

본 연구에서는 산업용 버너에 대한 선회유동의 거동을 계산에 의하여 분석하였고, 2차 공기에 의해서 1차 연소실내에 강선회류를 형성할 수 있는 보염기를 제작하고, 실험을 통해 화염 형상, 화염 안정성, 온도 특성 및 배출가스 발생 특성을 비교 실험하고, 그 결과를 종합 고찰하였다.

## 2. 선회유동에 대한 계산적 고찰

### 2.1 계산조건 및 방법

선회유동에 대한 계산적 고찰은 회전 요동하는 원통내의 유체유동에 관한 것으로서, 흡입 초기부터 흡입공기에 강한 와 유동을 형성시키는 스윙 유동을 이용한 버너와 비교 실험 대상인 현재 상용화 되어 있는 일반버너의 원통내에서의 각각의 내부 유동을 비교하기 위하여 상용코드인 Fluent 코드를 이용하여 수행하였다.

원통내의 유동은 원통의 크기, 테이블의 운동진폭, 요동각속도 등에 따라서 달라지며 이러한 특성들에 따라 달라지는 유동을 이해하고 정상적으로 그 효과를 파악하고 스윙 유동을 이용한 버너와 비교 실험 대상인 일반버너의 원통내에서의 유동을 비교하기 위하여 스윙 버너는 흡입공기에 강한 와 유동을 형성할 수 있도록 보염기와 노의 형상을 실제 형상대로 설계하고, 일반버너 역시 실제 형상 그대로 설계하였으며 격자생성은 입구에서의 빠른 유동을 상세히 분석하기 위하여 조밀 격자를 사용하였으며 스윙버너와 일반버너를 동일한 격자로 구성하였다.

난류 모델은 벽 압축성 난류유동의 해석에 3차원 Reynolds averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식과 연속방정식을 지배방정식으로 하였다.

계산조건으로는 TASCflow에서 제공하는  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하였고, 조밀한 격자를 사용할 경우에 발생하는 벽면함수(wall function)의 모순을 피하기 위해 격자수를 줄여 계산하는 수정된 함수를 사용하였다.<sup>9)</sup>

노즐은 Solid로 가정하고 연소실 내부에서 충분한 유동을 나타낼 수 있도록 하기 위하여 보염기를 통과하는 흡입공기에는 3m/s의 일정한 속도를 주어 계산을 수행하였고, 내부의 유동과 속도 벡터의 분포를 고찰하였다.

**Table. 1 Condition of simulation**

Items	Condition	
Area (Dig*Length)	400 * 1350(mm)	
Calculation Number of grids	50000개	
Tool of grid generation	CATIA 5.7 ICEM CFD	
Solver	FLUENT 6.0	
Turbulence model	$k-\epsilon$	
Governing Eqs	Reynolds average Navier-Stokes Eq	
Boundary values	Inlet velocity	3m/s
	Outlet pressure	1atm

## 2.2 결과 및 고찰

Fig. 1과 Fig. 2는 스윙 버너와 일반 버너의 보염기의 정면 형상으로서 스윙 버너는 흡기가 연소실 내부로 유입될 때 흡기에 와 유동을 일으킬 수 있도록 되어 있고 흡기의 속도벡터는 고정 날개깃 부분에서 가장 크게 나타난다. 일반 버너는 일부의 흡기는 연소실 외벽으로 향하고 대부분의 흡기는 노즐 중심축방향으로 확산되는 구조로 되어있고, 노즐 중심축 상에서 흡기의 속도벡터가 가장 크게 나타난다.

Fig. 3과 Fig. 4는 스윙 버너와 일반 버너의 입구에서의 속도벡터를 나타낸다. 스윙 버너는 흡입초기부터 강한 와 유동을 나타내며 축방향의 진행과 함께 유동 분포가 넓어짐을 보여준다. 속도벡터는 고정 날개깃 부분에서 연소실 내벽으로 향하는 곳에서 4.25m/s 정도로 가장 크게 나타난다. 일반 버너는 대부분의 흡기가 중심축방향으로 향하고 일부는 연소실 내벽으로 확산되고 있다는 것을 알 수 있다. 속도벡터는 노즐 중심축 상에서 3.02m/s 정도로 가장 높게 나타난다.

Fig. 5와 Fig. 6은 스윙 버너와 일반 버너를 정면에서 봤을 때의 속도벡터를 나타낸 것이다. 스윙 버너는 흡입 초기부터 흡입 공기의

강한 와 유동으로 연소실 내부에서 공기의 활발한 유동을 일으키고 화염이 벽면을 따라 선회하는 구조를 보이고 있다. 이는 중심축의 속도벡터가 2.13m/s로 벽면을 향하는 흡기의 속도벡터 4.25m/s보다 훨씬 낮아 중심축상의 화염은 거의 분포되지 않고 벽면을 따라 회전하며 분포하게 된다. 일반 버너는 벽면을 향하는 미세한 양의 흡기의 속도벡터가 2.42m/s로 축방향의 속도벡터와 비슷하지만 대부분의 흡기가 중심축상에 분포되어 있어 화염이 축방향으로 분포된다.

Fig.3 ~ Fig.6에서 알 수 있듯이 스윙 버너의 속도벡터는 4.25m/s로 일반 버너보다 폭방향의 속도가 훨씬크고 중심축에서의 속도벡터는 2.13m/s정도로 일반 버너보다 훨씬 낮아 중심축상에 분포되는 화염보다 폭방향으로 향하려고 하는 강한 흡기의 속도에 의해서 화염은 벽면을 따라 회전하며 분포된다.

보일러 내부 중심 단면 유동의 분포와 변화를 상세히 분석하기 위하여 축방향 단면속도 분포를 Fig. 7와 Fig. 8에 나타낸다. 스윙 버너에서는 중심축에 강한 역방향 속도를 나타내며 그 외곽으로 순방향의 높은 유동 속도를 보여준다. 이는 와 유동으로 외부로 분산되며 이동된 유동의 영향으로 중심축 방향으로의 강한 와유동이 있음을 알 수 있다. 일반버너는 중심축에서 가장 높은 속도를 나타내며 축에서 멀어지면서 점점 낮은 속도분포를 나타내다가 보일러 벽면 근처에서 역방향의 속도분포를 보이며 와 유동의 발생을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 전체 유동으로 스윙 버너는 유동 흡입초기부터 와 유동이 발생하여 2 겹 3겹의 선회 유동 형태를 보여주었고, 일반 버너는 직진성의 유동과 노 끝에서 선회하여 유동 흡입구까지 순환하는 단순 유동을 보여준다.

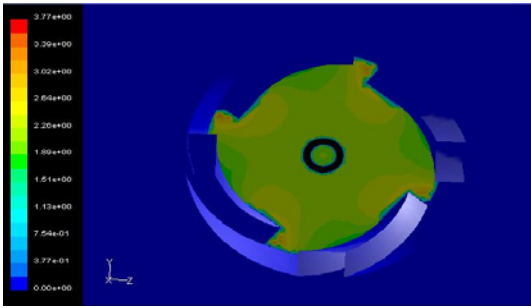


FIG. 1 A front section of Swirl burner

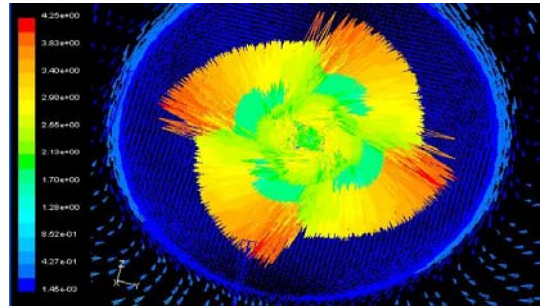


FIG. 5 An entrance section of Swirl burner

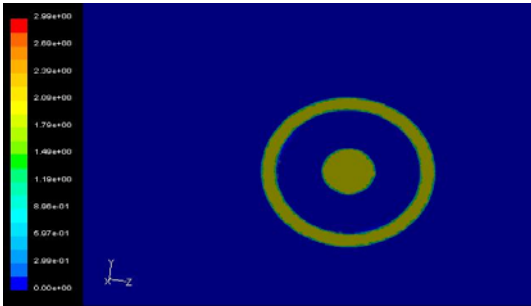


FIG. 2 A front section of Wide burner

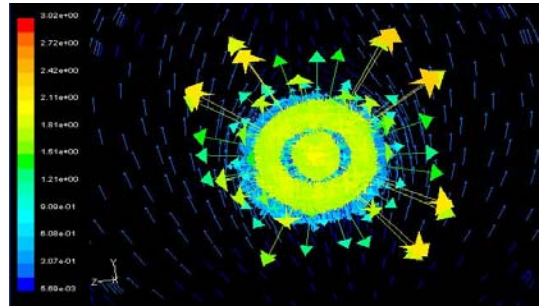


FIG. 6 An entrance section of Wide burner

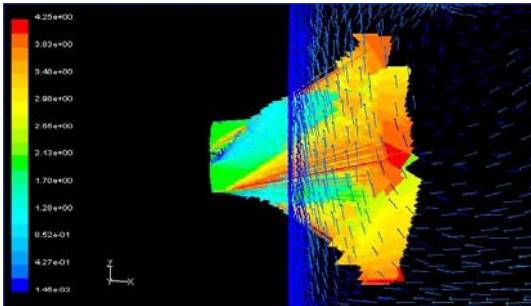


FIG. 3 Inlet velocity vector of Swirl burner

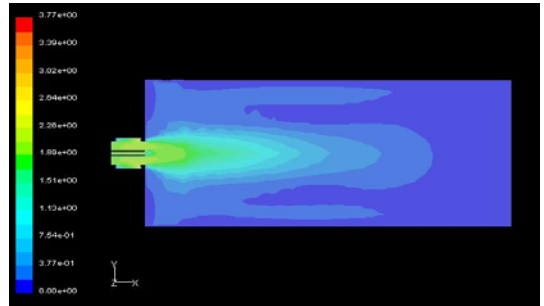


FIG. 7 Sectional flow of Swirl burner

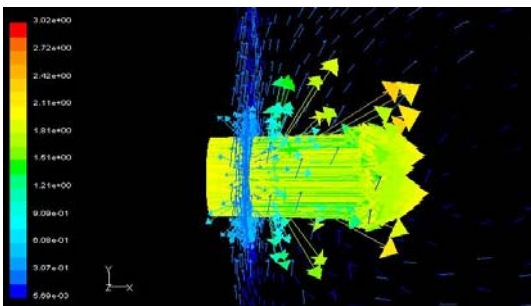


FIG. 4 Inlet velocity vector of wide burner

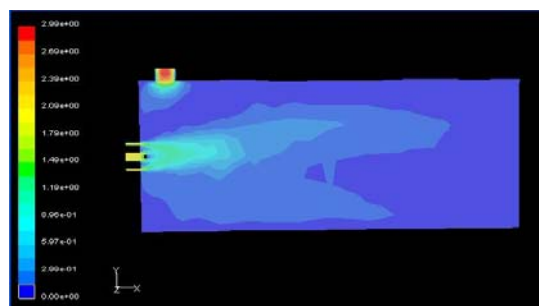


FIG. 8 Sectional flow of Wide burner

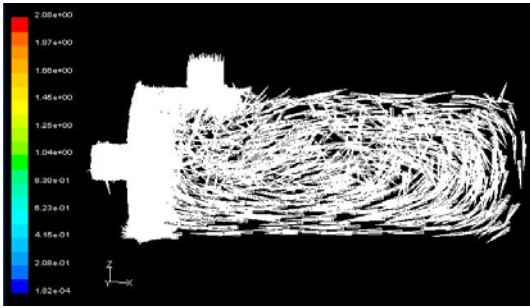


FIG. 9 Interior flow of Swirl burner

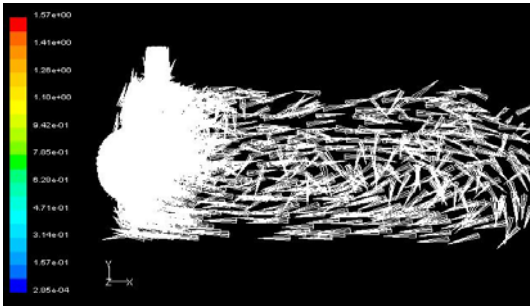


FIG. 10 Interior flow of Wide burner

### 3. 실험분석

#### 3.1 실험장치의 구성

전체적인 실험장치의 개략도는 Fig. 11과 같으며 버너에 사용된 노즐의 형상과 보염기를 통한 공기의 유입 경로는 FIG. 12와 같다. 본 실험 장치는 GUN타입 버너와, 연소실, 온도 및 연료소모량 측정시스템 및 배기가스 측정 장치로 구성된다.

연료는 보일러유를 사용하였고, 버너는 직경 0.15mm (7.89l/h)의 노즐을 사용한 건타입 버너이며 보일러는 2-패스 드라이백 형식의 로통 연관보일러이다. 동일한 조건하에서 연소 성능을 분석하기 위하여 현재 상용화되고 있는 일반 버너와 그 버너에 연소공기를 회전시킬수 있는 보염기를 제작 하여 장착한 스윙 버너를 같은 조건하에서의 실험을 통하여 연소성능을 분석하였다. 버너의 모든 형상의 치수와 펌프 용량은 동일하고 흡입공기의 유입경로인 보염

기의 형상만을 다르게 하여 실험을 하였다.

냉각수의 온도측정은 보일러 내부의 냉각수 온도를 바이메탈식 온도계를 사용하여 측정하였고, 화염의 온도는 IRtec P2000 모델을 이용하여 화염에 시편을 고정 시킨후 그 시편의 온도를 측정하였다. 배기가스 측정은 K-TYPE Thermocouple을 이용하였고, 연료소모량은 유량게이지 높이에 따른 체적으로 계산하였다.

스모크의 측정은 Diesel Smoke Meter GSM-101과 산업기술 시험원에서 제공하는 매연 포집용 여과지를 사용하였고, 배기가스측정은 CGA-4300A와 Testo350모델을 사용하여 HC, NOx, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, λ 값을 측정하였다. 연소 화염의 가시화는 버너를 개방된 공간에서 연소 시킨 후, 2m 거리에서 촬영하였다.

#### 3.2 실험방법

유동에 따른 화염의 특성을 분석하기 위해서 화염의 순간 형상을 점화초기와 정상 화염 상태에서 고속 카메라를 사용하여 촬영 하였고, 버너에 따른 보일러 성능을 측정하기 위하여 스윙 버너와 일반 버너의 공기 흡입 댐퍼의 열림량에 따라 석유 연소기기의 시험방법 통칙 KSB 8021의 규정에 맞추어 버너가 정상적으로 연소할 때의 스모크 스케일을 측정하였다.

동일한 조건에서의 비교를 위하여 일반버너가 가장 적은 스모크 스케일을 나타내는 스모크 스케일 1.5상태에서 두 가지 버너의 성능을 비교하기 위해서 공기 흡입 댐퍼를 25% 열었을 때를 기준으로 실험을 하여 화염 형상, 화염 안전성, 연료 소비량, 온도 특성 및 배출가스 발생 특성을 비교 실험하였다.

연료 소비량은 (7.89 l/h)인 노즐, 유량 게이지와 초시계를 사용하여 버너가 정상적으로 연소할 때의 노통수의 온도 상승에 따라 측정하였다. 노통수의 온도 상승률 측정은 버너가 점화되는 순간부터 노통수의 온도가 80°C가 될 때까지의 시간을 측정하였으며, 배기가스 측정은 배기가스 측정기를 사용하여 HC, NOx, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, 및 공기 과잉률을 측정하였다.

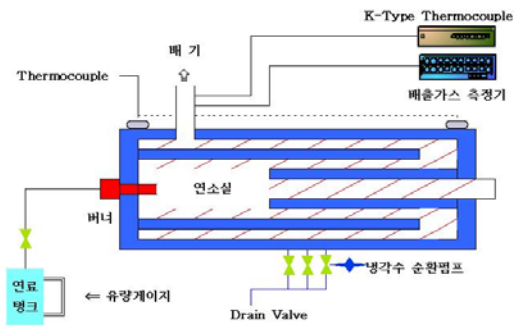
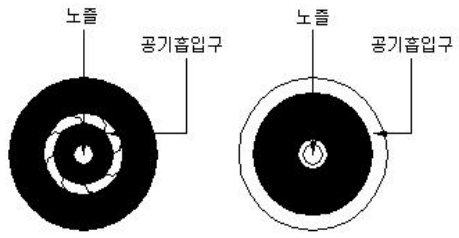


FIG. 11 Experimental setup



<Swirl Burner> <Wide spread Burner>  
FIG. 12 Comparison of nozzle geometries

### 3.3 실험결과 및 분석

#### 3.3.1 화염 형상 및 온도분포 특성

Fig. 13과 Fig. 14는 스윙 버너와 일반 버너의 점화직후의 화염을 나타낸다. 스윙 버너는 Fig. 13에서 알 수 있듯이 점화전부터 흡입공기가 강한 와 유동을 보이고 있고 점화 직후 화염이 공기의 유동에 의해서 강하게 회전함을 볼 수 있다. 반면 일반 버너의 경우 해석결과에서 알 수 있듯이 중심축에서 가장 높은 속도를 보이고 유동이 직진성을 나타내고 있어 화염이 직선적으로 점화됨을 볼 수 있다.

Fig. 15와 Fig. 16은 화염의 크기를 보여주고 있다. 스윙 버너의 화염은 와 유동으로 벽면을 따라 회전하며 화염의 크기가 일반 버너에 비해 길이는 짧지만 높이가 높고 폭이 넓어 연소실 내부 벽면에서 더 빠르게 열을 전달할 수 있을 것 이라고 사료된다.

Fig. 17과 Fig. 18은 화염의 온도 분포를 나타내고 있다. 스윙 버너의 온도 분포는 중심축과 입구에서의 온도가 낮고 화염 끝부분의 온도가 높다. 이것은 흡입공기의 와 유동으로 인하여 화염이 벽면에 가깝게 분포되어 있고 중심축 상에서는 거의 존재하지 않는 상태로 분포되어 있기 때문이다. 반면 일반 버너의 경우 화염의 끝과 폭방향의 온도보다 중심축의 온도가 높다는 것을 알 수 있다.

화염의 크기와 온도 분포 스윙 버너는 일반 버너에 비해 중심축의 온도는 낮고 화염의 끝부분의 온도가 높아 와 유동으로 인해 화염의 폭이 넓게 분포되어 연소실 내부에서 열이 더 빠르게 전달되어 냉각수를 효율적으로 가열할 수 있다.

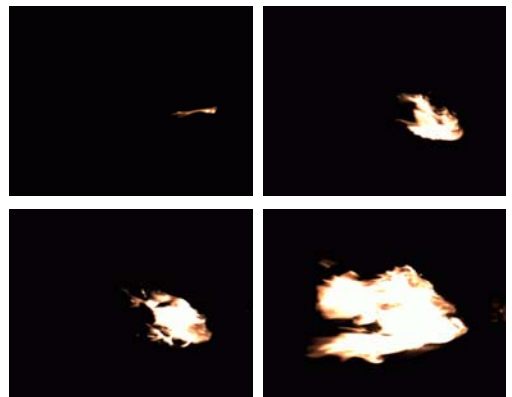


FIG. 13 Ignition flame shape Swirl burner



FIG. 14 Ignition flame shape wide burner

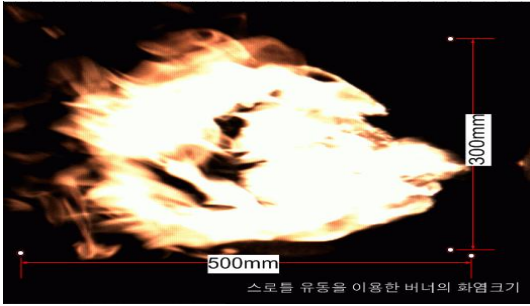


FIG. 15 Dimensions of Swirl burner flame

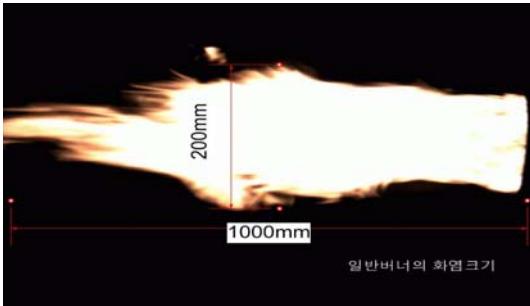


FIG. 16 Dimensions of wide burner flame

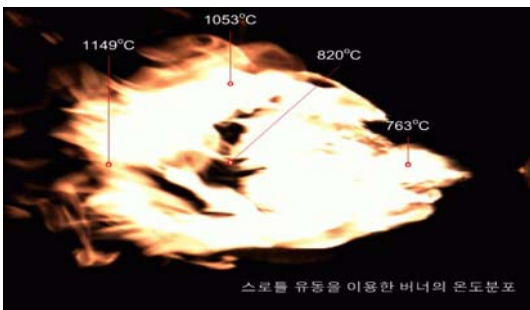


FIG. 17 Temperature distribution of Swirl burner

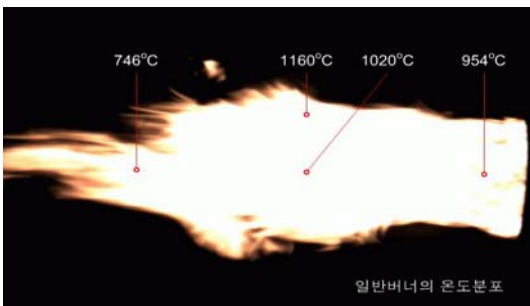


FIG. 18 Temperature distribution of Wide burner

Table. 2 Test results

구분		Swirl burner	Wide burner
연료소비량 ( $l/h$ )		7.89	
배기가스 온도		238°C	305°C
노통수온도 상승시험 (30°C-80°C)	노통크기	400 * 1350	
	내경*길이(mm)	400 * 1350	
	노통수 용량( $l$ )	100	
	온도상승시간(s)	444	712
소요 연료량 ( $l$ )		0.97	1.56
배기가스 성분측정 (3회 평균)	HC(ppm)	0	44
	NOx(ppm)	0	14
	O <sub>2</sub> (%)	11.41	16.80
	CO <sub>2</sub> (%)	7.0	2.6
	CO(%)	0	0.3
	공기과잉률	2	2
Smoke (%)		1.5	1.5

### 3.3.2 효율 및 배기가스 특성

Fig. 19는 공기 흡입 댐퍼의 각도에 따른 스모크 스케일을 나타낸 것이고, 스월버너와 일반 버너는 모두 댐퍼를 완전히 닫았을 때가 가장 높고 댐퍼의 열림률이 25%일때 가장 적은 스모크 스케일을 보이며 열림률이 클수록 스모크 스케일 역시 높아지는 것을 알 수 있다.

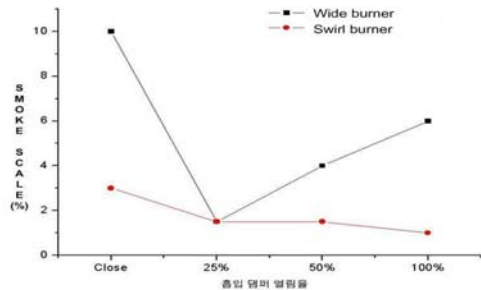


FIG. 19 Comparison of Smoke scale

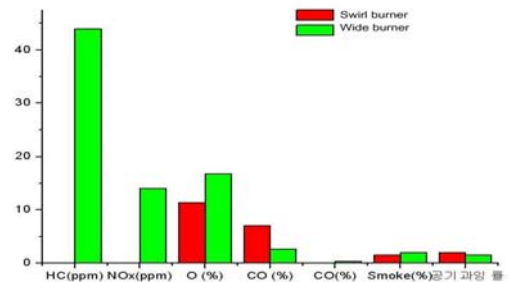


FIG. 20 Comparison of exhaust fumes

효율 측면에서는 스윙 버너는 직진성의 화염을 가지는 일반버너에 비해 와 유동으로 인해 화염이 폭과 높이 방향으로 넓게 퍼지고, 중심축에 비해 화염의 끝에서 온도가 높게 분포되어 있어 연소실 내부에 활발하게 열을 전달하고, 배기가스의 온도가 낮아서 냉각수의 온도 상승을 촉진시켜 40%이상 큰 연료 저감의 효과를 나타낸다.

배기가스에 대한 규제가 심화되고 있고, 특히 그중에서도 규제가 심화되고 있는 NOx(질소산화물)의 경우 스윙 버너가 일반 버너에 비해 상대적으로 낮은 수치를 나타내고 있고 스모크 스케일 역시 일반 버너에 비해 많이 낮기 때문에 공해문제에 있어서도 적합한 버너라 할 수 있다.

FIG. 19, 20에서 스모크 스케일과 배기가스의 수치를 비교할 수 있다.

#### 4. 결론

와 유동을 이용한 버너의 내부 유동과 화염 거동 및 버너 성능을 계산과 실험에 의하여 분석한 본 연구를 종합하면 다음과 같다. 와 유동을 이용한 버너의 공기 유동은 공기흡기 직후부터 강한 와 유동을 동반하고 삼중의 연속된 와 유동을 나타내며, 화염의 거동도 이러한 유동의 형태에 따라 회전하며 넓게 확산된다.

스윙 버너의 화염 온도는 중심축 상에서 높은 온도를 나타내고 있는 일반 버너에 비해서 중심축에는 온도가 낮고 와 유동으로 화염이 넓게 분포되는 화염 끝에서의 온도가 높다.

배기적인 측면에서 볼 때 스윙 버너는 NOx의 경우 0%에 가까운 수치를 나타내고 있고, 스모크 스케일 역시 매우 낮다.

화염의 거동과 효율측면에서 높은 온도의 화염이 연소실 벽면에 더 가깝게 분포되어 열전달 속도를 증가시키고, 넓은 화염대 형성에 의한 연소영역의 확대와 유동의 활성화로 연소효율을 향상시킴으로써 40%정도의 높은 열효율 향상을 나타낸다.

#### 5.참고문헌

- [1] Hoffmann, S., Lenze B. and Eickhoff, H., 1998, "Results of Experiments and Models for Predicting Stability Limits of Turbulent Swirling Flames," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Transactions of the ASME, Vol. 120, NO. 2, pp. 311~316.
- [2] A. K. Gupta, D. G. Lilley and N. Syred, "Swirl Flows", Abacus Press, 1984.
- [3] H. Y. Wang, V. G. Mcdonnell and G. S. Samuelsen, "The Two-Phase Flow Downstream of a Production Engine Combustor Swirl Cup", 24th Symposium on Combustion, 1992, pp. 1457~1464
- [4] Ottino, J. M., 1989, The Kinematics of Mixing : Stretching, Chaos, and Transport, Camb. Univ. Press
- [5] Cox, S. M., Drazin, P. G., Ryrie, S. C. and Slater, K., 1990, "Chaotic Advection of Irrotational Flows and of Waves in Fluids," J. Fluid Mech., Vol. 214, pp. 517~534.
- [6] Mathur, M.L. and Maccallum, N.R.L., 1976, "Swirling Air Tests Issuing from Vane Swirlers," J. of the Institute of Fuel, Vol. 41, pp. 238~240
- [7] Chaturvedi, M.C., 1963, "Flow Characteristics of Axisymmetric Expansion," Proceedings, J. of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 89, No. HY3, pp. 61~92
- [8] 이상남, 윤형기, 류정인, 1996, "Flow Field Characteristics of a High Load Combustor," 1996 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(B), pp. 58~63
- [9] 심창열, 홍순삼, 강신형, "상용코드를 이용한 원심펌프 임펠러 유동평가" 유체기계 연구개발 발표회 논문집, 2000. pp285~292