한국액체미립화학회지 제19권 제2호(2014)
http://dx.doi.org/10.15435/JILASSKR.2014.19.2.75

연소효율 개선을 위한 스월제트의 난류유동 특성에 관한 연구

고동국* · 윤석주†

A Study on the Turbulent Flow Characteristics of Swirl Jets for Improvement of Combustion Efficiency

Dong Guk Ko and Suck Ju Yoon

Key Words: Turbulence intensity(난류 강도), Kinetic energy(난류 운동에너지), Shear stress(전단응력), Flatness factor (편평도), Skewness factor(비대칭도)

Abstract

Swirl flow in the gun type burner has a decisive effect on the stabilization of the flame, improvement of the combustion efficiency, and also a reduction of NOx. This swirl flow is created by the spinner which is inside the airtube that guide the combustion air. Gun type burner has generally the inner devices composed nozzle adapter, spark gap ignitor, and spinner. These inner components change the air flow behavior passing through air tube. Meanwhile, turbulent characteristics of this air flow are important to understand the combustion phenomena in the gun type burner, because the mixture of fuel and air are depended on. However, nearly all of the studies have been analyzed the turbulent flow of simplified combustion formation without the inner devices. So, this study conducted the measurement using by hot-wire anemometer and analyzed turbulent flow characteristics of the swirl flow discharged from the air tube with inner devices. Turbulence characteristics come up in this study were turbulence intensity, kinetic energy and shear stress of the air flow with the change of the distance of axial direction from the exit of the air tube.

1. 서 론

액체연료의 분무연소에 연소효율을 높이기 위하여 유동 매개체에 선회를 가하게 되는데 연료 분류 주위에 유입되어지는 공기류에 강한 선회를 주면, 중심축상에 재순환 유동이 발생하고 고온의 연소가스가 역류함과 동시에 연료와 공기의 혼합도 촉진되기 때문에 넓은 연소 범위에 걸쳐서 안정된 고부하 연소를 얻을 수가 있다.

또한 연소과정에 있어서 연소 효율을 향상시키거나 공해 배출 물질 등의 생성을 억제하기 위해서는 화염의 안정화가 필요하다.

유동상태, 온도분포 및 혼합기의 분포 상태에 따라 이러한 화염의 안정화가 결정되므로 재순환 유동영역의 존재는 연소 유동장내의 연료와 산화제간의 접촉을 용이하게 하여 적절한 혼합기를 생성시킴과 동시에 재순환되는 고온의 연소 생성물로부터 열전달에 의해 화학반응에 필요한 지속적인 열이 공급된다. 이로 인해, 화염의 전파속도와 유동속도가 잘 일치되는 영역이 생성됨으로서 화염의 안정화를 얻을 수 있다.

특히 화석연료의 연소과정에 의해 생성되는 배기 배출물은 그을음과 질소산화물이 주성분인데 이때 생성되는 질소산화물은 대부분이 연소열이 주원인인 열적 산화물이다.

질소산화물의 생성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 화

Recieved: 02 May 2014, Recieved in revised form: 09 June 2014, Accepted: 10 June 2014)
*회원, 한국액체미립화학회
†윤석주, 정회원, 한국액체미립화학회
E-mail : mecysj@jbnu.ac.kr
TEL : (063)270-2324 FAX : (063)270-2315

염의 조건인데 화염은 버너에서 생성되므로 버너의 특성과 노(爐, furnace)에 관련된 조건은 대단히 중요하다.

버너 및 노에서의 화염조건을 결정하는 인자들로는 버너 스롯(throat)에서의 속도, 버너 출구의기하학적 구조, 연소용 공기의 분포, 연소용 공기의 난류특성 및 버너와의 상관관계 등이 있다.

저 질소산화물의 버너는 대분분 연료 및 공기의 혼합특성을 조절하여 질소산화물의 생성을 억제시킬 수 있도록 설계할 필요성이 있다.

즉 연료와 공기가 혼합이 빨리 이루어져 연소가 일찍 종결되도록 함으로써 고온상태에서도 연소가스의 잔류시간을 단축시킬 수 있기 때문에 질소산화물의 저감이 가능하다.

이러한 연소효율을 높이기 위해 스피너(spinner)에 의한 스월을 형성시켜 화염을 안정화시킬 수 있으며, 또한 화염층을 얇게 형성시켜 질소산화물의 생성을 줄이기도 하며 버너에서의 재순환과 단계적 연소가 이루어지도록 할 수 있다.

송풍기에서 나온 공기는 스피너를 통과하면서 스월성분을 갖고, 선회공기를 압력손실없이 연소실에 유입시켜주는 역할을 하는 에어튜브를 지나 연소실로 유입된다.

스피너에 의한 스월이 존재할 경우 유동의 형태가 변화하여 화염의 모양과 형상에 직접적인 영향을 미치며, 결국 화염의 형상변화는 공기의 유동상태에 의존하게 된다.

그러나 실제 버너에 사용되고 있는 원심형 송풍기 자체 유동은 균일하지 않으며, 또한 송풍기 출구에 전극봉과 전극봉 어댑터 그리고 노즐이 부착되어 있어 실제 공기유동은 아주 복잡하게 된다. 특히 난류 유동장에 있어 스월은 유동을 더욱 복잡하게 하고 에너지 전달 및 열 수송 등을 더욱 용이하게 한다. 이러한 스월의 존재는 유동장의 변화, 축방향과 반경방향 압력구배를 만들고 강한 스월의 경우 축방향 역압력 구배가 상당히 커 축을 따라 유동을 거꾸로 흐르게 하여 내부 재순환 영역을 만든다고 하였다[1-3].

Hoffman 등[4]은 버너의 소화한계는 스월강도, 체적유량, 버너크기 및 연료성분 등의 물리적 특성들에 따라 달라지며, 이를 통하여 화염의 안정성 등을 예측할 수 있다는 것을 알아내었다.

Li, Z 등[5]은 Centrally Fuel Rich(CFR)버너의 출구에서의 난류강도를 hot-film센서, CCD카메라 및 유동가시화 장치 등을 이용하여 스월수(swirl number)에 따라 분석하였으며, 또한 Örlü Ramis Alfredsson 등[6]은 X-wire 및 cold-wire probe를 이용하여 스월제트에서의 혼합된 난류유동 특성을 분석하였다.

그러나 기존 연구들은 실제 스월제트의 내부에 부착된 부속물을 제외하고 단순화시킨 모델에 대한 난류유동 특성을 분석한 것들이 대부분이며, 이러한 결과들을 연소장치의 설계 및 성능 분석에 직접 적용하기에는 한계가 있다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 소형 보일러에 일반적으로 사용되는 건타입 버너의 연소효율 개선을 위한 유동특성에 관한 기초자료를 획득하기 위하여 송풍기 출구에 전극봉과 전극봉 어댑터, 그리고 연료분사 노즐이 부착되어 있는 에어튜브(air tube)에서 스피너의 스핀각도가 30°인 경우 난류유동 특성을 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Figure 1은 전체적인 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 유동을 발생시키는 송풍기를 통과한 공기는 스피너와 에어튜브를 거쳐 대기중에 분사된다.

계측부에는 송풍기에서 나온 유동을 측정하기 위한 열선유속계가 있으며, 센서를 3차원으로 이송시켜 유동의 속도를 측정하기 위한 가변 이송장치가 있다.

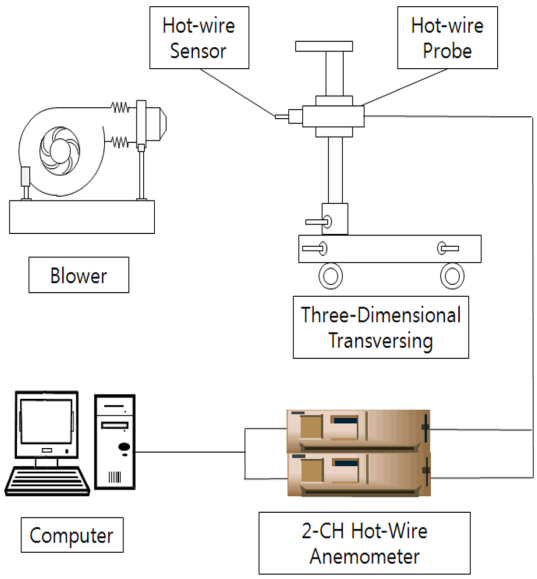


Fig. 1 Schematic of experimental device

이때 측정된 데이터는 열선유속계(Kanomax사 DATA6000) 본체에서 온도를 전압으로 바꿔주고 다시 컴퓨터로 이동시켜 순간속도 값들에 대한 난류유동 특성을 확인할 수 있도록 구성하였다.

2.1 스피너

Figure 2는 본 실험에 사용된 스피너의 형상을 나타낸 것으로서, 송풍기에서 나온 공기는 스피너를 통과하면서 스월이 발생된다.

스피너의 형상은 스월의 정도와 직접적인 관련성이 있으며, 본 연구에서는 실제 적외선 오일 히터에서 사용되고 있는 스피너의 스핀각도가 30°인 경우 송풍기에서 토출되는 공기의 난류유동 특성을 분석하였다.

2.2 에어튜브

Figure 3은 에어튜브의 기본 모델을 나타낸 것으로서, 스피너를 통해 발생된 선회공기를 압력 손실없이 연소실에 유입시켜 주는 유로 역할을 수행한다.

에어튜브의 설계는 입구직경(D_1=50 mm)과 출구직경

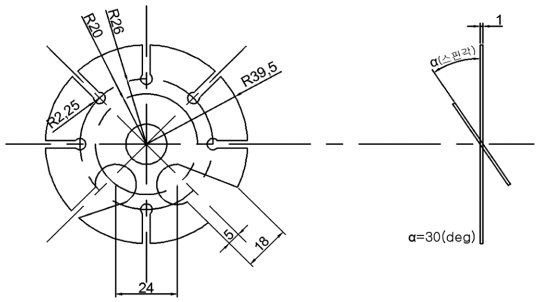


Fig. 2 Schematic of spinner

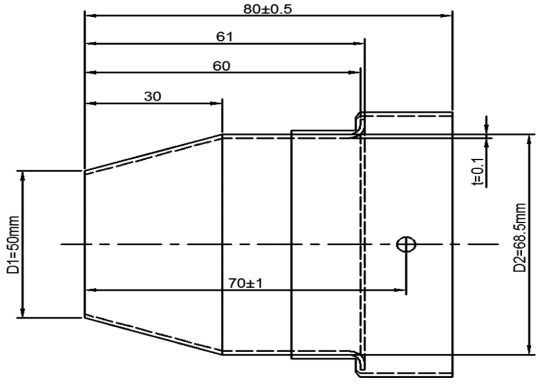


Fig. 3 Schematic of airtube

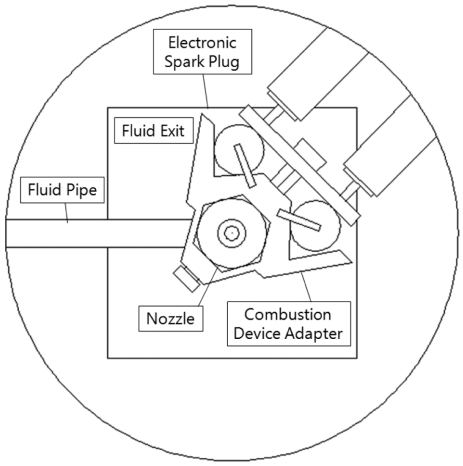


Fig. 4 Schematic of combustion device

(D_2=68.5 mm)의 비를 고려하여 본 연구에 사용된 건타입 버너의 에어튜브 형상인 0.73을 기준으로 제작하였으며, 유동방향 거리에 따른 공기의 흐름을 파악하였다.

2.3 연소장치

Figure 4는 본 연구에 사용된 건타입 버너의 연소장치의 개략도이다.

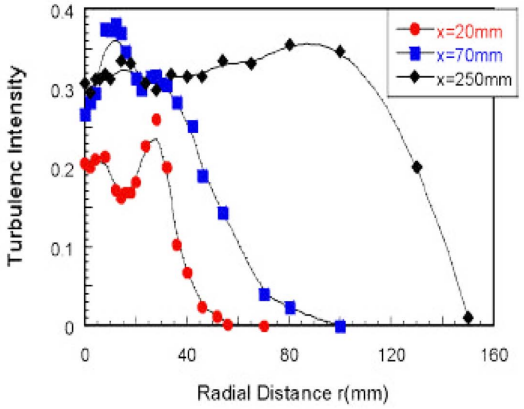
그림과 같이 연소장치는 송풍기 출구에 부착되어있는 분사노즐과 전극봉, 전극봉 어뎁터, 에어튜브와 스피너 지지대로 구성되어 있다.

송풍기에서 나온 공기는 연소장치를 통과하면서 주위 부착물들과의 상호 교란을 통해 균일한 유동이 아닌 복잡하고 다양한 형태의 유동특성을 나타낼 것이라 사료된다.

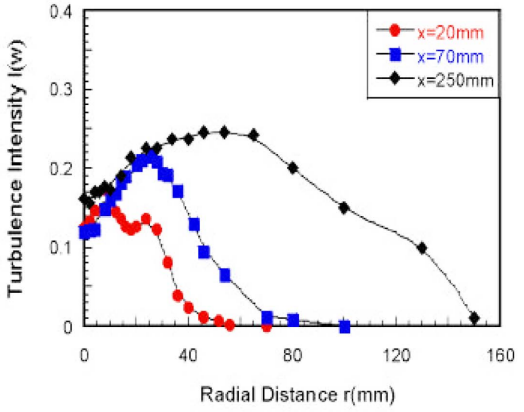
3. 결과 및 분석

본 실험에 사용된 연소장치내의 유동은 3차원적으로 불규칙한 난류유동 특성을 가지며, 이때 발생되는 소용돌이 운동은 공기의 대류와 확산에 의한 혼합유동과 전단력 등에 의해 야기된다.

Figure 5는 유동축 단면에서의 반경방향에 따른 축방향과 반경방향의 난류강도(turbulent intensity)를 나타낸 것이다. 난류강도는 특성속도 또는 평균속도에 대한 특성 난류 에디(eddy) 속도의 비를 나타내며, 유동의 난류정도를 파악하는데 중요한 인자로 사용된다.



(a) Axial turbulence intensity



(b) Tangential turbulence intensity

Fig. 5 Distribution of the turbulence intensity on the radial direction of spinner

송풍기로부터 토출된 공기의 전체적인 난류강도는 축방향 거리가 증가할수록 반경방향으로 넓게 퍼지고, 확대됨을 알 수 있다.

축방향 난류강도는 x=20 mm인 경우 r=15 mm에서 낮은 경향을 보이는데, 이는 스피너 형상과 연소장치에 의한 역압력구배에 따른 영향을 받아 유동변화가 적게 나타나는 것으로 사료된다.

또한 접선방향 난류강도는 스피너에 의한 스월이 형성되어 넓게 분포하였으며, x=20 mm인 지점에서의 난류강도는 스피너와 연소장치의 영향으로 (a)그림과 유사한 경향을 나타내었다.

Figure 6은 유동축 단면에서의 반경방향 거리에 따른 난류 운동에너지를 나타낸 것이다.

자유 원형분사유동에 대해 원통좌표계를 적용하면 단위 질량당 난류 운동에너지는 $Ke=(u'^2+v'^2+w'^2)/2$으로 정의되지만, v'^2과 w'^2이 거의 크기가 동일하므로 $Ke=(u'^2+2v'^2)/2$으로 표현할 수 있다.

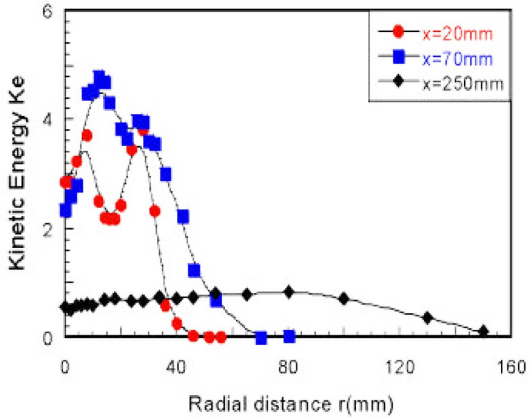


Fig. 6 Distribution of the turbulence kinetic energy on the radial direction of spinner

그러나 Ligrani, PM 등[7]은 2방향의 파동속도성분을 측정하여 단위질량당 난류 운동에너지를 $Ke=3(u'^2+v'^2)/4$으로 계산하는 방법을 제시하여 본 연구에서는 이 식을 사용하였다.

x=250 mm인 경우 스월의 영향으로 유동의 운동에너지가 반경방향의 전 영역에 걸쳐서 상당히 낮고, 넓게 분포함을 알 수 있었다.

그러나 x=20 mm인 경우 r=18 mm인 지점에서의 난류 운동에너지는 최소값을 나타내었으며, 이는 연소장치에 의해 유동에 의한 운동에너지는 감소하는 반면 역압력구배에 의한 압력에너지가 상승되기 때문이라고 사료되며, r=40 mm 근처까지는 불규칙한 유동특성을 보이고 있음을 알 수 있었다.

x=250 mm인 경우 전 영역에 걸쳐서 낮은 난류 운동에너지를 갖는다는 것을 알 수 있으나, x=20 mm와 x=70 mm에서는 유동에 대한 스월의 영향으로 송풍기를 통해 토출된 유동의 운동에너지가 먼 하류영역까지 전달되지 않고 유동축 중심근처에 존재하게 됨을 알 수 있었다.

Fig. 7은 유동축 단면에서의 반경방향 거리에 따른 파동 속도성분의 레이놀즈 전단응력을 나타낸 것이다.

여기서 레이놀즈 전단응력이란 유체입자의 난동성분으로 야기되는 힘에 의한 응력으로서, r=50 mm까지는

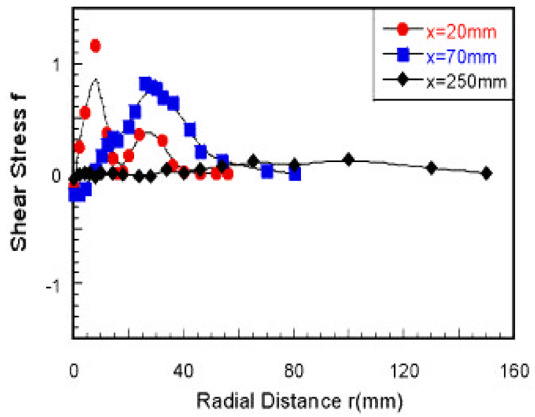


Fig. 7 Distributions of the shear stress on the radial direction of spinner

스피너에 의한 혼합유동의 운동량이 증가하여 상당히 복잡한 유동형태를 보이며 높은 난류 운동에너지를 가지는 것을 알 수 있었다.

또한 x=20 mm인 경우 혼합유동에 의한 복잡하고 다양한 양상을 보이는 전단응력의 분포의 경향은 심하게 변화하는 난류 운동에너지의 경향과 매우 유사하다는 것을 알 수 있었다.

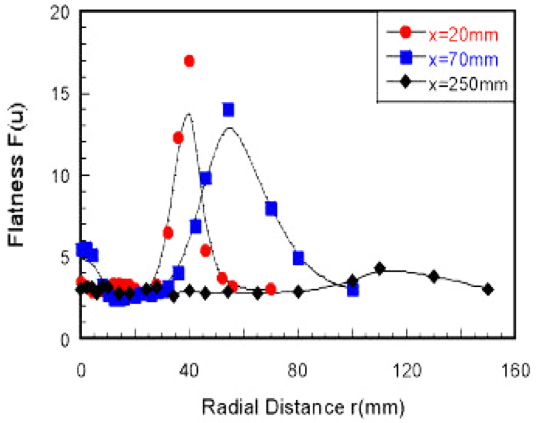
특히, x=70 mm인 곳에서는 반경방향으로 유동이 진행될수록 레이놀즈 전단응력이 증가하다가 r=30 mm 근처에서 난동성분이 최고의 값을 가진 후 점차 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

Figure 8은 유동축 단면에서의 반경방향 거리에 따른 축방향과 반경방향 성분의 편평도(Flatness factor)를 나타낸 것이다. 편평도는 균일유동에 대한 난류유동 성분의 비율을 의미하며, 통계학적으로 중요한 특성치로서 편평도를 이용하여 난류강도의 간헐도(Intermittency factor; 전체 유동상태에 대한 난류상태의 시간비율)를 분석할 수 있다.

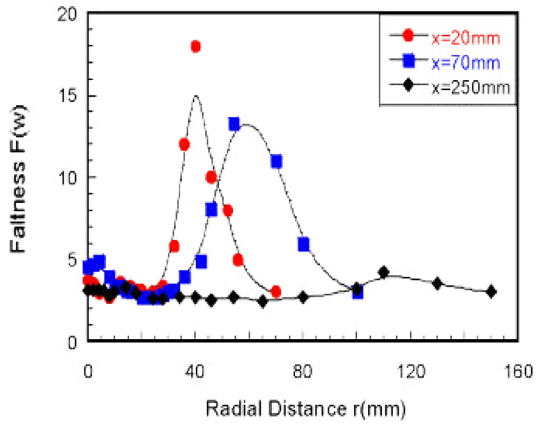
일반적으로 편평도를 비교·분석하기 위해 가우시안 확률 밀도분포를 사용하는데 가우시안 정규분포에서의 편평도는 3의 값을 갖는다. 편평도가 크다는 것은 파동성분을 가진 유동의 속도분포가 균일하지 못하고 한쪽으로 많이 치우쳐 있다는 것을 의미한다.

축방향의 편평도는 x=20 mm와 x=70 mm인 경우 r=40~60 mm사이에서 상당히 크게 나타나고 있는데, 이는 송풍기로부터 토출된 공기가 바깥으로 치우치는 정도가 상당히 높다는 것을 의미한다.

그러나 x=250 mm인 경우 유동축 방향으로 진행됨에



(a) Axial flatness factor



(b) Tangential flatness factor

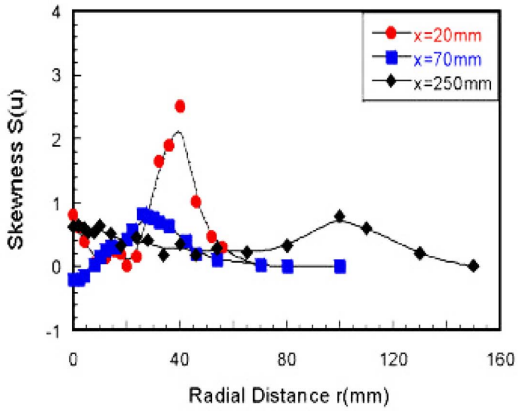
Fig. 8 Distributions of the flatness factor on the radial direction of spinner

따라 난류성 유동이 감소하여 편평도가 작아짐을 알 수 있었다.

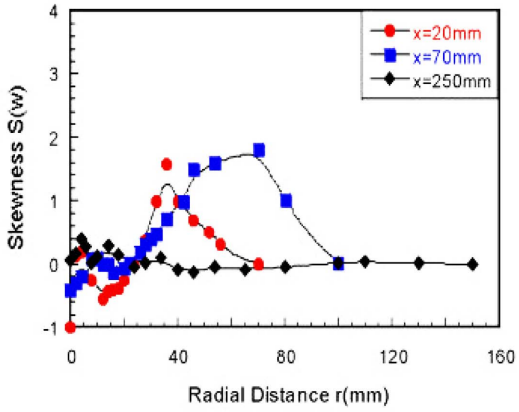
즉, x=250 mm영역에서 축방향 편평도는 반경방향의 전 영역에서 거의 균일하고 낮은 분포를 보이고 있는데, 이는 스월에 의한 불균일한 유동의 영향이 먼 하류영역까지 전달되지 않음을 의미한다.

반경방향의 편평도는 축방향 편평도와 거의 유사한 경향을 나타내고 있으며, x=20 mm와 x=70 mm인 경우 유동축의 중심에서 각각 r=40 mm와 r=60 mm근처까지 진행될수록 유동이 바깥쪽으로 치우치는 정도가 매우 심하게 나타났다.

그러나 x=250 mm영역에서는 축방향 편평도와 유사하게 전 영역에 대하여 거의 변화가 없으며, 이것은 스월유동의 영향이 유동의 하류영역 근처에서는 매우 약



(a) Axial skewness factor



(b) Tangential skewness factor

Fig. 9 Distributions of the skewness factor on the radial direction of spinner

하게 작용하고 있다는 것을 의미한다.

Fig. 9는 유동축 단면에서의 반경방향 거리에 따른 축방향과 반경방향 성분의 비대칭도(Skew-ness factor)를 나타낸 것이다.

비대칭도는 편평도와 함께 난류유동의 중요한 통계학적 특성치로서 중심축을 기준으로 어느 한쪽으로 치우친 정도를 나타내며, 난류의 파동성분이 어느 방향으로 강하게 발생하고 있는가를 판단하는 척도이다.

가우시안 이론식을 기초로 한 가우시안 확률밀도 분포는 곡선이 중심축에 대해 완전한 축대칭을 이루므로 비대칭도는 0의 값을 갖는다.

그러나 난류의 파동성분이 어느 한쪽으로 치우쳐 발생하게 되면 확률밀도 분포가 중심축에 대해 비대칭현상을 나타내어 비대칭도는 그 정도에 따라 임의의 값을 갖게 된다.

스피너와 연소장치가 없는 경우 비대칭도는 0의 값 근처에서 유동분포를 형성하겠지만, 본 연구에서와 같이 스피너가 존재하여 스월이 형성될 경우 그 영향으로 축방향과 반경방향의 비대칭도 는 모두 0이 아닌 다양한 값들을 가지게 됨을 알 수 있었다.

특히 x=70 mm이고 r=65 mm인 경우 반경방향의 비대칭도는 약 2의 값을 가짐으로서 매우 심한 난류유동이 나타나고 있음을 알 수 있었다. 그러나 송풍기에서 토출된 공기는 x=250 mm근처에서 축방향과 반경방향 모두 비대칭도가 0에 근접고 있으며, 이는 유동이 하류영역으로 발달됨에 따라 파동성분에 의한 난류유동이 약해지고 유동이 축대칭 분포를 형성하게 되어 스월의 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있었다.

4. 결 론

보일러에 사용되는 건타입 버너의 원심형 송풍기를 사용하여 송풍기 내부에 부착된 연소장치를 고려한 유동특성을 규명하고, 공기와 연료의 연소효율을 개선하기 위해 스피너의 스핀 각도가 30°일 경우의 난류유동 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 스피너의 스핀각도가 존재할 경우 스월이 발생되어 송풍기로부터 토출된 공기의 난류유동은 반경방향으로 크게 발달됨을 알 수 있었다.

(2) 스월의 영향은 유동의 하류영역에 거의 전달되지 않으며 이로 인하여 난류유동은 x=250 mm근처에서 매우 작게 형성됨을 알 수 있었다.

(3) 스월제트에 부착된 연소장치는 유동흐름에 상당한 영향을 미치며, 불균일하고 복잡한 유동을 발생시키는 것으로 나타났다.

(4) 송풍기로부터 토출된 공기의 난류유동은 스피너와 연소장치가 부착될 경우 축과 반경방향으로 각각 x=70 mm, r=100 mm근처까지 영향을 받는 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 한국연구재단 기본연구지원사업 유형1 (1301001081)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) A. K. Gupta, D. G. Lilly and N. Syred, “Swirl Flows”, 1984.
(2) J. M. Beer and N. A, Chigier., “Combustion Aerodynamics”, 1974.
(3) D. G. Lilly, “Swirl flow in combustion; a review”, AIAA, Vol. 15, 1977, pp. 1063~1078.
(4) S. Hoffmann, B. Lenze and H. Eickhorr., “Results of Experiments and Models for Predicting Stability Limits of Turbulent Swirling Flames”, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 120, 1998, pp. 311~316.
(5) Z. Li, J. Jing, G. Liu and Z. Chen, “Fractal and turbulence characteristics of aerodynamic fields of swirl burners”, Chemical engineering science, Vol. 65, No. 3, 2010, pp. 1253~1260.
(6) Örlü Ramis Alfredsson and P. Henrik, “An Experimental Study of the Near-Field Mixing Characteristics of a Swirling Jet”, Flow, turbulence and combustion, Vol. 80, No. 3, 2008, pp. 323~350.
(7) P. M. Ligrani and P. Bradshaw, “Subminiature hot-wire sensors: development and use”, Journal of physics. E: Scientific instruments, Vol. 20, No. 3, 1987, pp. 323~332.