

큰에디모사법을 이용한 소형 연소기의 난류 유동장 내 스칼라 혼합에 대한 수치해석

최 항 석,^{*1} 박 태 선,² K. SUZUKI³

NUMERICAL ANALYSIS ON THE MIXING OF A PASSIVE SCALAR IN THE TURBULENT FLOW OF A SMALL COMBUSTOR BY USING LARGE EDDY SIMULATION

H.S. Choi,^{*1} T.S. Park² and K. Suzuki³

The characteristics of turbulent flow and mixing in a small can type combustor are investigated by means of Large Eddy Simulation (LES). Attention is paid for a combustor having a baffle plate with oxidant injection and fuel injection holes and study is made for three cases of different baffle plate configurations. From the result, it is confirmed that mixing is promoted by interaction between the jets during their developing process and large vortical flows generated in the vicinity of the combustor wall or fuel jet front. This particular flow feature is effective to accelerate the slow mixing between fuel and oxidant suffering from low Reynolds number condition in such a small combustor. In particular, the vortical flow region ahead of fuel jet plays an important role for rapid mixing. Discussion is made for the time and space averaged turbulent flow and scalar quantities which show peculiar characteristics corresponding to different vortical flow structures for each baffle plate shapes.

Key Words : 난류유동(Turbulent Flow), 연소기(Combustor), 재순환(Recirculation), 큰에디모사법(LES), 혼합(Mixing)

1. 서 론

최근 마이크로 가스 터빈(Micro Gas Turbine)은 각 가정이나 작은 지역사회에서 자체적으로 에너지를 생성하기 위한 단위 에너지 발생 장치의 일환으로 주목을 받고 있으며, 이와 발맞추어 연료전지도 높은 효율과 환경 친화적인 이점으로 각광을 받고 있다. 예를 들어, 700℃ ~ 1000℃사이에서 운전되는 고체 산화물형 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell)는 적절한 사이클을 구성할 경우 50%이상의 높은 에너지 효율을 달성할 수 있다. 이러한 장점을 바탕으로 출력증대와 공해물질 저감 효과를 동시에 얻기 위하여 마이크로 가스 터빈과 연료전지

가 결합된 형태인 마이크로 가스터빈(MGT)-고체산화물형 연료전지(SOFC) 하이브리드(Hybrid) 시스템에 대한 많은 연구가 시도되고 있는 추세이다[1]. 본 연구는 이러한 하이브리드 시스템에 사용되는 마이크로 가스터빈용 소형 연소기에 초점을 두었다.

소형 연소기의 경우 레이놀즈(Reynolds)수가 작아, 연료와 산화제의 충분한 혼합을 이루기 위해서는 난류혼합을 증진시키는 방안이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 다수의 제트유동을 만드는 배플판을 사용하였다. 따라서 본 연구의 소형 연소기에는 Fig. 1에서 보는바와 같이 연소기 중심의 연료분사구와 그 연료 분사구를 둘러싸고 있는 다수의 산화제 분사구를 가지는 배플(baffle)판이 장착되어 있다.

이러한 연소기 입구에 장착된 배플판을 거쳐서 분사되는 다수의 제트유동들에 의해 연료와 산화제의 혼합이 이루어지고, 특히 연료전지로부터 배출되는 잔류 희박연료를 충분히 연소시키기 위하여 연료와 산화제의 혼합증대를 주요한 목적

접수일: 2005년 9월 25일, 심사완료일: 2006년 12월 12일.

1 정회원, 한국기계연구원, 청정환경기계연구센터

2 정회원, 경북대학교, 기계공학부

3 비회원, 시바우라공업대학, 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: hschoi@kimm.re.kr

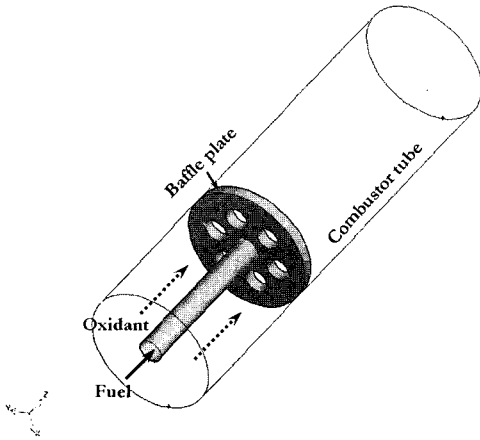


Fig. 1 Configuration of a small can combustor

으로 하고 있다. 일반적으로 연소기의 크기가 소형화되면 연소기의 체적에 대한 표면적의 비가 증가하기 때문에 연소기 벽면으로의 열손실이 증가하며, 연소기 특성길이가 소염길기와 비슷해지기 때문에 안정적인 연소반응을 유지하는데 어려움이 있다. 또한, 대형 연소기와 달리 유동의 레이놀즈수 감소로 인한 난류섭동의 감소를 초래하여 연료와 산화제의 혼합이 상대적으로 느려지므로 불완전 연소가 발생할 확률이 높다.

따라서 초소형 연소기를 개발하는 경우 연료와 산화제의 혼합 증진이 연소효율을 높이는 데 중요한 인자로 대두 된다 [2,3]. 기존의 연구결과[2,3]에서 볼 수 있듯이 배플형상의 변화에 의해서 소형연소기 내의 연료와 산화제의 혼합특성 구조가 변경될 수 있다. 본 연구에서는 배플판의 중요 형상인자인 연료/산화제 분사구 직경변화에 따른 수치해석을 수행하여 난류유동과 연료/산화제의 혼합에 관한 특성을 살펴보았다.

2. 계산 방법

2.1 지배방정식 및 SGS(Subgrid-Scale) 모델

LES(Large Eddy Simulation)계산을 위하여 공간 필터링(filtering)된 비압축성 연속방정식 및 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial t} + \hat{u}_j \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} = \nu \frac{\partial^2 \hat{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x_j} \quad (2)$$

여기서, \hat{u}_i , \hat{p} , 그리고 τ_{ij} 는 필터링 된 속도, 압력 그리고 SGS(Subgrid-Scale)응력 텐서이다. 식 (2)를 닫기(closing)위해서는 응력텐서 τ_{ij} 의 모델링이 필요하게 되고, 본 연구에서는 Lilly의 dynamic SGS모델[4]이 사용되었다. 따라서 응력텐서 τ_{ij} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{ij} - 1/3 \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_t \hat{S}_{ij} \quad (3)$$

여기서, $\hat{S}_{ij} = (\partial \hat{u}_i / \partial x_j + \partial \hat{u}_j / \partial x_i) / 2$ 이고 ν_t 는 dynamic SGS 모델에 의하여 구해지는 에디(eddy)점성계수이다. 또한, 연료와 산화제의 혼합에 관해 살펴보기 위해, 공간 필터링된 혼합분율(Mixture Fraction) Z 의 지배방정식이 사용되었고, 이는 다음과 같다. 여기서 Z 는 순수한 연료에 대해서는 1 그리고 순수한 산화제에 대해서는 0의 값을 가진다.

$$\frac{\partial \hat{Z}}{\partial t} + \frac{\partial (\hat{u}_j \hat{Z})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial \hat{Z}}{\partial x_j} \right) - s_j \quad (4)$$

여기서 \hat{Z} 는 공간 필터링된 혼합분율을 나타내고, D 는 혼합분율의 확산계수를 나타낸다. 본 연구에서 Schmidt수, Sc 는 $Sc = \nu / D = 0.7$ 로 일정하게 주어졌다. 또한, 식 (4)에서 SGS 스칼라(scalar) 유속은 $s_j = \frac{\nu_t}{Sc_t} \frac{\partial \hat{Z}}{\partial x_j}$ 로 모델링 되었고 난류 Schmidt수, Sc_t 는 0.7로 일정하게 주어졌다.

2.2 지배방정식의 차분화 및 계산조건

식 (1)-(4)를 시간에 대해 차분화하여 풀기위해서, 기본적으로 Fractional-Step법이 사용되었다. 차분화된 방정식의 시간적분은 Adams-Bashforth법에 의하여 수행되었고, 공간 차분의 경우 대류항에 관해서는 4차의 COMPACT법[5]이, 확산항과 나머지 잔류항들에 대해서는 2차의 중앙차분법이 사용되었다. Table 1은 세 가지 형상의 배플판에 관한 계산조건을 보여주며, Fig. 2는 연소기의 격자구성 및 계산영역을 나타낸다.

계산에 사용된 격자수는 예비해석을 통하여 혼합특성을 적절히 묘사할 수 있는 $51 \times 55 \times 109$ 로 선택하였다. 본 연구에서는 Table 1에서 보여 주는 바와 같이 연료와 산화제 분사구

Table 1 Computational condition

Case	D_o/D_f	V_o/V_f	Re_{tube}
A	1	2	3060
B	2	0.5	3060
C	0.5	8	3060

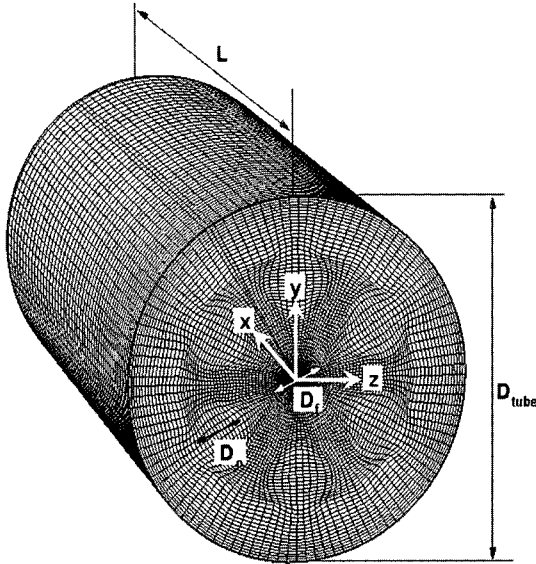


Fig. 2 Computational domain of a small combustor in case A

의 직경만을 변화시켜가며 계산을 수행하였다. Table 1에서 D_o/D_f 및 V_o/V_f 는 각각 산화제와 연료분사구의 직경 및 속도비를 나타내고, 하첨자 “o”와 “f”는 각각 산화제(oxidant)와 연료(fuel)를 의미한다. Re_{tube} 는 연소기의 직경(D_{tube})을 기준으로 한 레이놀즈수를 나타내며, 본 연소기에 대한 연소실험[2]을 기준으로 하이브리드 시스템의 운전조건을 충족시키는 범위 안에서 세 경우 모두 안정적으로 연소가 되는 경우의 값으로 선정되었다.

Fig. 2는 배플판 A에 대한 계산영역 및 격자구성을 보여주며, 그림에서 L은 유동방향에 대한 계산영역의 길이이다. 본 계산에서 case A의 연료분사구의 직경을 기준으로 한 무차원화된 계산영역과 연소기 직경의 크기는 각각 $L/D_f=12.5$, $D_{tube}/D_f=5.5$ 이다. 여기서 L/D_f 는 난류모델 계산 결과를 기초로 연소기내 난류혼합 현상을 충분히 보여줄 수 있는 최소 거리로 선정하였다.

Fig. 3은 난류모델과 LES의 시간평균된 계산결과를 비교한 그림으로 난류모델은 표준 k-ε 모델과 Park과 Sung[6]의 low-Reynolds-number k-ε- f_{μ} model을 사용하여 계산을 수행하였다. 또한 Fig. 3은 case A에 대한 $y=0$ 인 지점에서 (x,z) 평면의 유동방향 속도분포를 나타내며, 점선은 음의 속도분포를, 실선은 양의 속도분포를 나타내며 그림에서 $x/D_f = 0$, $z/D_f = 0$ 인 지점이 연료제트가 분사되는 연료분사구이다.

그림에서 보듯이 표준 k-ε 모델의 경우는 연료제트와 벽면 사이의 재순환영역(recirculation region)은 예측하나, 연료제트의 전방에서 나타나는 또 하나의 재순환영역은 예측하지 못

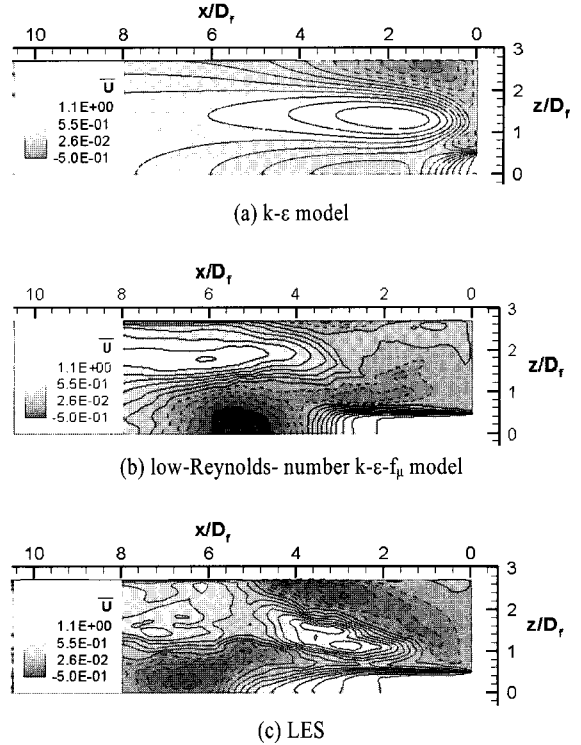


Fig. 3 Contours of streamwise velocity at (x,z) cross-section for case A

한다. 반면, k-ε- f_{μ} model과 LES를 이용할 경우 Fig. 3의 (b)와 (c)에서 보는바와 같이 두 지점의 재순환영역 발생을 예측하고 있다. 그렇지만 재순환 영역의 크기와 위치에서는 서로 다른 값을 보여주고 있다. 일반적으로 자유전단유동과 벽면난류 유동이 공존하는 본 연구와 같은 형상에 대해서 난류모델로 예측할 경우, 많은 문제점을 가지고 있다. 지금까지 난류모델은 위의 두 가지 유동형태에 대하여 서로 다른 형태로 개선되어 왔기 때문에 두 가지 서로 다른 특성을 나타내는 유동이 공존할 경우 해석에 대한 신뢰성을 가지기 어려운 점이 있다.

또한 난류성분이 큰 영역과 작은 영역이 비정상적으로 혼합되는 특성을 예측할 수 없는 단점이 존재한다. 이러한 특징은 Fig. 4의 소형연소기내 한 단면에서 각각 다른 순간의 속도벡터장과 유동방향속도의 섭동(velocity fluctuation)에 대한 LES결과를 보면 확인할 수 있다. 그림에서 보듯이 LES해석의 경우 난류모델에 의해서 예측이 불가능한 고주파성분에 의해서 발생하는 조직적인 난류유동 구조의 예측이 가능하다. 난류스케일측면에서 고려할 때 참고문헌[7]에서 알 수 있듯이 선택된 공간필터크기 이상의 난류스케일에 대한 분해가 이론

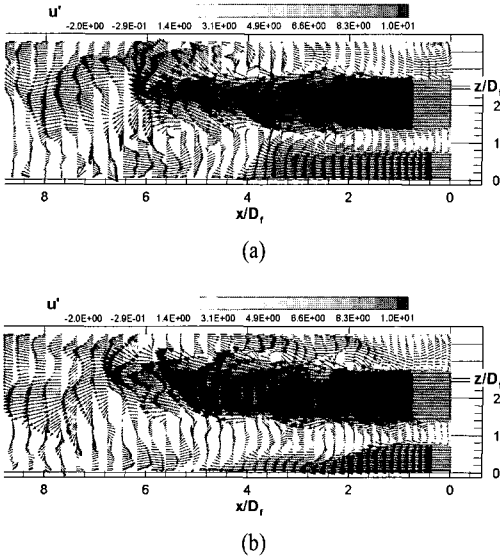


Fig. 4 Instantaneous velocity vector map and contour of streamwise velocity fluctuation

적으로 가능한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 계산 비용을 다소 요구하기는 하나, 난류모델보다 좀 더 정확한 난류유동장 및 난류혼합 특성을 파악하기 위하여 LES를 사용하여 수치해석을 수행하였다.

3. 계산 결과

본 연구에 대한 정량적인 실험데이터가 없기 때문에 본 해석에 앞서 LES 계산의 정확성을 검토하기 위하여 본 연구와 관련성이 높은 Djeridane 등[8]의 제트 유동장을 해석하였다. 레이놀즈수는 제트직경기준 21,000이고, 입구경계조건은 30×40×48 격자계의 입구유동 생성기로부터 주어졌다. 제트 유동의 발달과정은 60×90×48 격자계에서 40,000 시간증분 동안 관찰되었다.

Fig. 5에서 실험과 본 LES결과를 비교할 때, 평균속도의 발달을 잘 예측하고 있다. 따라서 본 LES 코드를 이용한 소형연소기 내의 난류유동장 해석은 적절한 정확성을 가질 것으로 예측된다.

Fig. 6은 case A에 대한 연소기 내 어느 순간의 유동장에서 발생하는 와류를 나타낸 그림이며, 이는 $-(1/\rho)(\partial^2 p/\partial x_i \partial x_j)$ 또는 $S_{ik}S_{kj} + \Omega_{ik}\Omega_{kj}$ 의 고유치(eigenvalue)들을 계산하고, 그 고유치를 중 두 번째로 큰 음의 λ_2 값을 가지는 영역을 형상화하여 와류를 표현하는 방식[9-11]을 사용하였다.

여기서 S_{ij} 와 Ω_{ij} 는 각각 유체의 변형률(strain rate)과 와도(vorticity)텐서이다. 그림에서 보듯이 산화제가 분사되는 배플

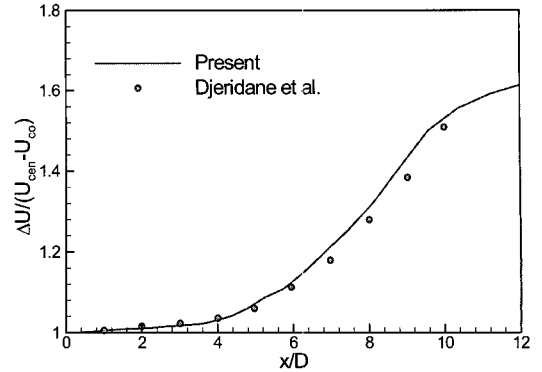


Fig. 5 The distribution of time averaged axial velocity along the streamwise direction

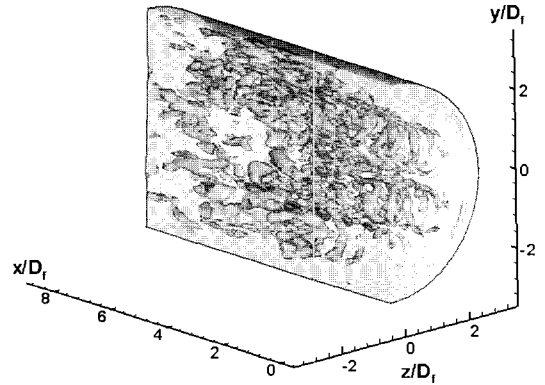


Fig. 6 Iso-surface of instantaneous negative λ_2 in case A

판 분사구 근처에 링(Ring)모양의 강한 와류(vortex)들이 생성됨을 알 수 있고, 이러한 와류가 유동의 후류로 갈수록 발달하고, 서로 간섭하여 복잡한 와유동 구조를 만들어냄을 알 수 있다. 이러한 와유동 구조는 유동장내에 난류생성을 촉진하여 층류일 때와는 다르게 산화제와 연료의 혼합을 증진시킬 수 있다. 이러한 난류의 생성은 아래 Fig. 7에서 확인할 수 있다. Fig. 7은 세 가지 배플판 형상에 대한 연소기 내 난류에너지의 생성율의 분포를 연소기 중앙의 (x,y)단면에서 보여주는 그림이며, 난류에너지의 생성율은 $P_k = -\overline{u_i u_j} (\partial \overline{U_i} / \partial x_j)$ 이다.

Fig. 7에서 보여주듯이 큰 값의 P_k 가 각각 연료 또는 산화제 유동 주위의 와류가 생성되는 국부적인 영역에 집중적으로 분포하고 있고, 유동의 후류로 갈수록 이러한 큰 값의 P_k 영역들이 서로 간섭하면서 넓게 퍼져나가는 현상을 나타낸다. 따라서 Fig. 6과 7로부터 멀티제트의 유동에 의해 생성되는 와류가 연료와 산화제의 난류혼합에 기여함을 예측할 수 있다. 하지만, 본 연구에 사용된 연소기의 경우 산화제와 연료

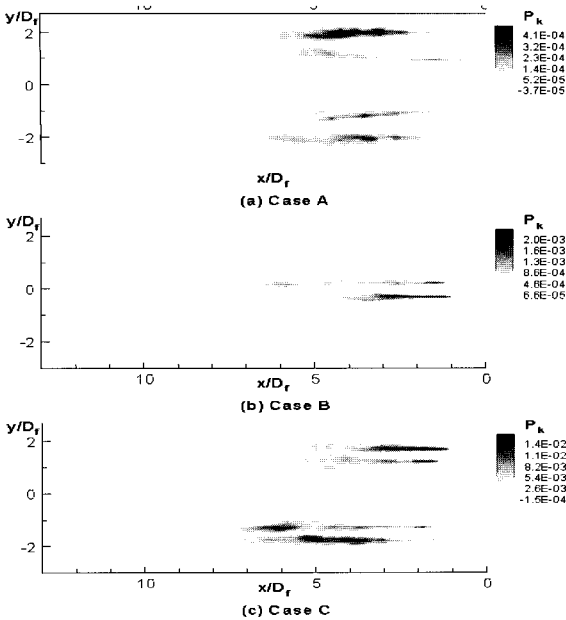


Fig. 7 Contours of production rate of turbulent kinetic energy

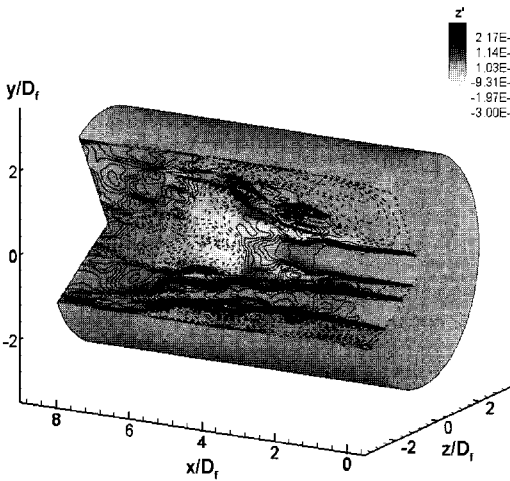


Fig. 8 Contours of instantaneous streamwise velocity and fluctuation of mixture fraction in case A

의 혼합은 작은 스케일의 와류 구조에 의한 혼합 외에 큰 스케일의 재순환 영역(recirculation region)이 존재하며 이는 다음의 결과들로부터 확인할 수 있다.

Fig. 8은 유동방향 순간 속도와 혼합분율의 섭동 분포를 나타내는 그림으로, 혼합분율의 섭동(fluctuation of mixture fraction)은 $z' \equiv Z - \bar{Z}$ 로 정의되며, Z 는 순간 혼합분율 이고, \bar{Z} 는 시간평균 혼합분율 이다. 그림에서 유동방향의 순간속도

분포는 검은선으로 나타내었고 점선은 음의 값, 실선은 양의 값을 의미한다. 그림에서 보듯이 특히 연료제트 전방에 혼합분율의 섭동이 크게 발생하고 있는데 이는 유동변형률이 크게 증가하는 지역과 밀접한 관계가 있다. 또한 배플의 형상과 연료/산화제 제트의 운동량 차이로 발생하는 재순환 유동에 의한 난류에너지 생성과 커다란 관계가 있을 것으로 생각된다.

위의 같이 소형연소기 내에서 유동혼합은 난류섭동과 평균 유동의 특성에 의해서 효율성이 결정될 수 있다. 그렇지만 연소기 전체에 대한 혼합정도는 평균유동에 의한 혼합이 더욱 중요한 요인으로 생각되기 때문에 본 연구에서는 평균유동 특히 재순환 유동을 변화시킬 수 있는 요인으로 연료/산화제 직경변화를 고려하였다. 이러한 재순환 영역의 영향을 알아보기 위해 시간평균 혼합유동장에 대해 아래와 같이 살펴보았다.

Fig. 9-11은 각각의 배플판에 대한 시간 평균 혼합분율 \bar{Z} 의 분포 및 유동방향 속도 \bar{U} 의 분포를 나타낸다. 그림에서 혼합분율은 색깔의 변화로 표시되었고, 속도는 선으로 나타내어 혼합분율과 속도장을 같이 비교할 수 있게 나타내었다. 여기서 점선의 경우 음의 속도분포를 나타내며 실선의 경우 양의 속도 분포를 나타낸다. 이러한 유동방향 속도의 분포를 통하여 연소기내에서 생성되는 유동의 재순환 영역을 파악할 수 있다.

Fig. 9에서 보듯이 배플판 근처에서는 제트와 제트사이 또는 제트와 연소기 벽면 사이에서 재순환영역이 생성됨을 알 수가 있고, 이러한 유동의 재순환이 국부적인 난류혼합의 증가를 가져옴을 알 수 있다. 특히, 주목해야 할 곳은 연료제트의 전방 부근에서 생성되는 커다란 재순환 영역이며, 이 재순환 영역이 연료제트 유동을 벽면근처에서 발생하는 또 다른 재순환 영역으로 분산시켜 연료의 급격한 난류확산을 촉진시킴을 알 수 있다. 이러한 재순환 영역들의 영향으로 연료제트의 난류 혼합이 크게 증대됨을 알 수 있다. Case B의 경우는 연료 제트의 앞 부근에 재순환 영역이 생성되지 않음을 알 수 있고, 따라서 혼합이 미미하여 연소기의 출구까지 상당한 양의 연료가 존재함을 알 수 있다.

특히, case C의 경우 세 가지 경우 중 가장 큰 재순환 영역이 연료 제트의 전방에 존재하며, 이러한 재순환 영역이 연료제트의 상류로 더 근접해 있음을 알 수 있다. 연료제트 전방에 발생하는 가장 큰 재순환 영역의 영향으로 인하여 case C의 경우가 세 경우 중 가장 짧은 혼합거리를 보여준다. 이러한 재순환 영역의 영향을 정량적으로 파악하기 위하여 혼합도(Mixedness Parameter) f 와 COV(Coefficient of Variation)를 구해 Fig. 12와 13에 나타내었다. 본 연구에서는 참고문헌 [12,13]에서 정의된 아래의 혼합도 식을 사용하였으며 혼합도

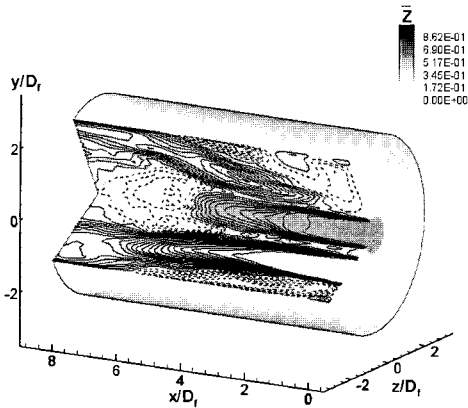


Fig. 9 Contours of streamwise velocity and mixture fraction in case A

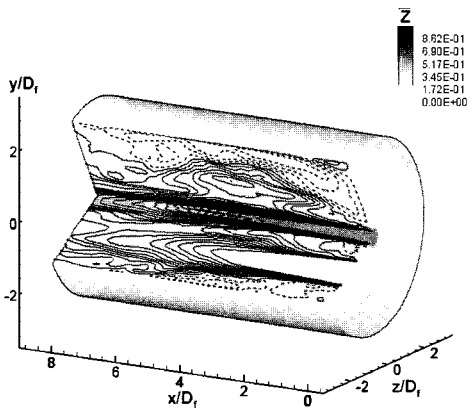


Fig. 10 Contours of streamwise velocity and mixture fraction in case B

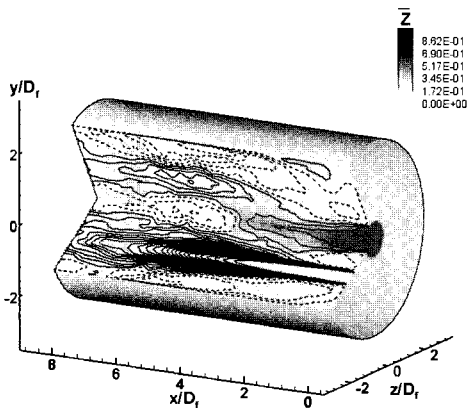


Fig. 11 Contours of streamwise velocity and mixture fraction in case C

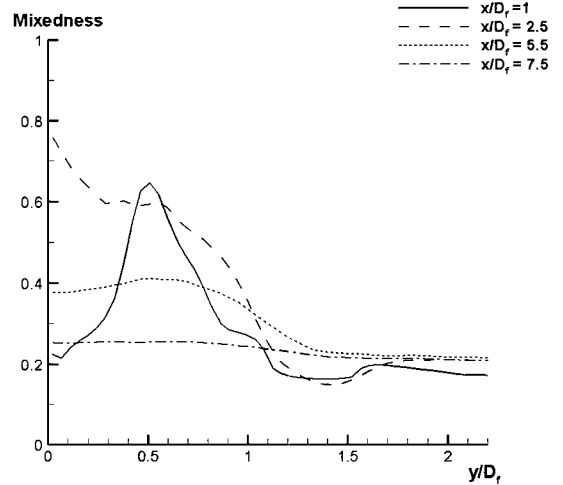


Fig. 12 Radial distributions of mixedness parameter at four different streamwise positions in case C

와 COV에 관한 식은 아래와 같다.

$$f = \frac{4}{A} \int_A Z(1-Z)dA \tag{5}$$

$$COV = \frac{1}{Z_{cs}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - Z_{cs})^2}{(n-1)}} \tag{6}$$

식 (5)에서 A는 적분이 취하여지는 계산영역상의 면적을 나타내며, Z는 순간 혼합분율을 나타낸다. 여기서 f는 0에서 1까지 변하며 f가 0일때는 산화제와 연료가 완전히 분리된 상태를 나타내며, 1인 경우는 두 가지 유체가 완전히 섞인 상태를 나타낸다. 또한, 식 (6)에서 Z_{cs} 는 유동방향 단면에서의 단면평균값을 나타내며, n은 단면에서 샘플링수를 의미하며 COV는 그 값이 작아질수록 혼합이 증가됨을 의미한다. 본 연구에서는 유동 후류로 갈수록 전체적인 혼합도의 변화를 살펴보기 위하여 식 (6)의 COV를 유동방향의 각 단면들에 대해서 계산하였다.

Fig. 12는 case C에 관한 유동방향(x)의 네 지점에서의 반경방향(y) 혼합도 분포를 보여준다. Fig. 11과 비교하여 살펴보면, $x/D_f=1$ 지점에서는 $y/D_f=0.5$ 부근 즉, 연료제트와 산화제 제트 사이에서 혼합이 촉진됨을 알 수 있으나 $x/D_f=2.5$ 지점에서는 Fig. 11에서 보여준 연료제트 전방에서 발생하는 재순환 영역의 영향으로 인하여 연료제트의 중앙 부근에서 높은 값의 혼합도를 보여준다. 이는 $x/D_f=1$ 지점의 혼합도보다도 훨씬 큰 값을 가지며 앞에서 설명한 연료제트의 전방에

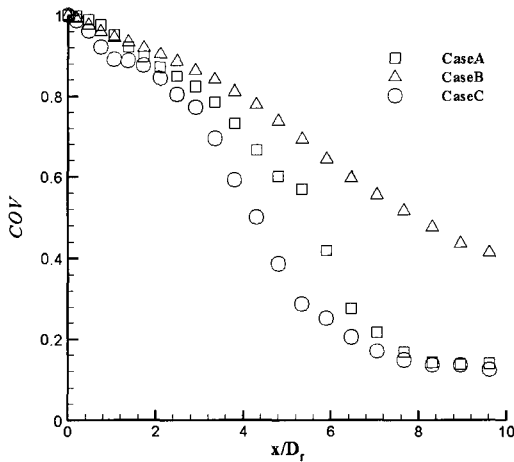


Fig. 13 Streamwise distributions of COV for the three cases

생성되는 재순환 영역이 혼합에 미치는 중요성을 보여준다. $x/D_j=5.5$ 이후 유동의 후류로 갈수록 연료와 산화제의 혼합이 상당히 진행되어 혼합도는 떨어지게 된다.

Fig. 13은 세가지 배플판의 경우에 대해 유동방향으로 유동방향에 수직인 각 단면에서의 COV 분포를 보여주는 그림으로, 비교를 위해 각각의 경우 COV의 최대값으로 나누어주었다. 그림에서 알 수 있듯이 case C의 경우가 가장 먼저 COV의 값이 떨어지며, 이는 Fig. 12에서 나타난 결과로 설명되어 질 수 있다. Case A의 경우는 연료제트 전방에서 재순환영역이 생성되는 지점이 case C의 경우보다 상대적으로 멀어서 COV가 case C의 경우보다 늦게 작아지지만 유동 후류로 갈수록 거의 비슷한 수준을 나타낸다. 이는 앞에서 언급했던 연료제트 전방에 생성되는 재순환영역이 산화제와 연료의 급속한 혼합에 미치는 중요성을 말해 준다. 또한, case B의 경우는 이러한 재순환 영역의 생성이 없어 셋 중 가장 늦게 COV가 떨어지며 유동의 후류에서도 다른 두 경우보다 높은 COV값을 가진다. 이는 case B의 경우가 셋 중 가장 혼합이 느리게 일어남을 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 배플판이 사용된 초소형 연소기 내부의 난류 혼합유동에 관한 특성을 파악하였으며, 특히 배플판의 형상 중 연료제트 분사구와 산화제제트 분사구의 직경비를 조절하여 직경비가 유동혼합에 미치는 영향을 파악하였다. LES를 이용한 전산해석 결과, 다수의 제트분사구를 가지는 배플판이 사용된 소형 연소기내의 난류유동 및 혼합은 거대 와유

동으로부터 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

배플판의 제트 분사구로부터 생성되는 링모양의 와류는 연소기의 후류로 갈수록 상호간 간섭으로 더욱 복잡한 난류 유동을 생성하고 따라서 이러한 와류가 존재하는 영역부근에서 높은 난류 운동에너지의 생성율(Production Rate of Turbulent Kinetic Energy)을 나타낸다. 이러한 와류의 생성 및 간섭이 소형 연소기내의 난류혼합을 촉진시키나, 또 다른 중요한 거대 와유동 즉 재순환 영역이 존재한다.

이러한 재순환 영역은 연료제트 유동과 산화제 제트유동사이에서 발생하고, 또한 산화제제트 유동과 연소기의 벽면 사이에서도 생성된다. $D_o/D_j=0.5$ 와 1의 경우에는 $D_o/D_j=2$ 의 경우에는 볼 수 없었던 연료제트 유동의 전방에 또 다른 재순환 영역이 발생하게 되고, 이 재순환 영역이 연료제트 유동을 벽면근처에서 생성되는 재순환 영역으로 분산시켜 연료의 급격한 혼합을 촉진시킨다. 이는 혼합도(Mixedness Parameter) 및 COV를 통해서 정량적으로 파악될 수 있으며, case C의 경우 $x/D_j=2.5$ 부근에서 급격한 혼합도 f의 증가를 볼 수 있으며, 이는 앞서 말한 연료제트의 전방에 발생하는 재순환 영역의 영향임을 알 수 있다. 따라서 case A와 case C 경우의 배플판이 장착된 연소기를 사용할 경우, case B의 경우보다 훨씬 짧은 유동방향의 혼합거리를 얻을 수 있고, case C의 경우가 세 경우 중 연료와 산화제의 혼합이 가장 빨리 이루어짐을 알 수 있다. 그러므로 연료제트 전방에 재순환영역이 발생하는 caseA와 caseC의 배플판을 사용하였을 경우, 소형 연소기내의 상대적으로 작은 Re수에 의한 혼합저하 문제를 해결할 수 있다.

참고문헌

- [1] Suzuki, K., Teshima, K. and Kim, J-H, 2000, Keynote Paper: "Solid Oxide Fuel Cell and Micro Gas Turbine Hybrid Cycle for a Distributed Energy Generation System," *Proc. 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference*, Vol.3, pp.1-8.
- [2] Choi, H. S., and Nakabe, K., Suzuki, K. and Katsumoto, Y., 2001, "An Experimental Investigation of Mixing and Combustion Characteristics on the Can-Type Micro Combustor with a Multi-Jet Baffle Plate," *Proceedings, IUTAM Symposium on Turbulent Mixing and Combustion*, U. Grigul et al., ed., Hemisphere Publishing Corp., Washington, D.C., Vol.2, pp.136-137.
- [3] Woodfield, Peter L., Nakabe, K. and Suzuki, K., 2003, "Numerical Study for Enhancement of Laminar Flow Mixing Using Multiple Confined Jets in a Micro-Can Combustor,"

- Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.46, pp.2655-2663.
- [4] Lilly, D. K., 1992, "A Proposed Modification of the Germano Subgrid-Scale Closure Model," *Phys. Fluids*, Vol.4, pp.633-635.
- [5] Lele, S. K., 1992. "Compact Finite Difference Schemes with Spectral-Like Resolution," *J. Comput. Phys.*, Vol.103, pp. 16-42.
- [6] Park, T. S. and Sung, H. J., 1997, "A new low-Reynolds-number $k-\epsilon-f_w$ model for predictions involving multiple surfaces," *Fluid Dynamic Research*, Vol.20, pp. 97-113.
- [7] Bernard, Peters S. and Wallace, James M., 2002, "Turbulent Flow," *John Wiley & Sons Inc.*
- [8] Djeridane T., Amielh M., Anselmet F. and Fulachier L., 1996, "Velocity Turbulence Properties in the Near-Field Region of Axisymmetric Variable Density Jets," *Phys. Fluids*, Vol.8(6), pp.1614-1630.
- [9] Choi, H. S. and Suzuki, K., 2005, "Large Eddy Simulation of Turbulent Flow and Heat Transfer in a Channel with One Wavy Wall," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol.206, pp. 681-694.
- [10] Jeong, J. and Hussain, F., 1995, "On the Identification of a Vortex," *J. Fluid Mech.*, Vol.285, pp.69-94.
- [11] Jeong, J., Hussain, F., Schoppa, W. and Kim, J., 1997, "Coherent Structures near the Wall in a Turbulent Channel Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol.332, pp.184-214.
- [12] Cetegen, Baki M. and Mohamad, Nazri, 1993, "Experiments on Liquid Mixing and Reaction in a Vortex," *J. Fluid Mech.*, Vol.249, pp.391-414.
- [13] Verzicco, R. and Orlandi, P., 1995, "Mixedness in the Formation of a Vortex Ring," *Phys. Fluids*, Vol.7, pp 1513-1515.