

G 방정식을 이용한 실린더 챔버 내부 둔각물체 주위의 난류 예 혼합 화염 해석

고상철† · 최창용* · 박남섭**

(원고접수일 : 2005년 1월 5일, 심사완료일 : 2005년 3월 2일)

Application of G-equation to large eddy simulation of turbulent premixed flame around a bluff body inside a cylindrical chamber

Sang-Cheol Ko† · Chang-Yong Choi* · Nam-Seob Park**

Abstract : In this investigation, turbulent premixed combustion and flame front propagation in a gas turbine combustion chamber is studied. Direct numerical simulation of turbulent reacting flows demands extremely high computational resources, especially in more complicated geometry. The alternative choice may be left for Large Eddy Simulation (LES) by which only large scales are solved directly. In combustion problems, capturing the large scales' behavior without solving the details of small scales is a difficult task. Using a transport equation for description of the flame front propagation and therefore avoiding the calculation of inner flame structure is the basic idea of this study. For this purpose, the so-called G-equation has been used by which any iso-level of the G variable provides the flame location. A comparison with the experiment indicates that the present method can predict a turbulent velocity field and also capture a instantaneous 3-dimensional flame structure.

Key words : LES(Large eddy simulation, 대 와동 모사), Premixed flame(예 혼합 화염), Flame holder(보염기), G-equation (G-방정식), Flame front propagation(화염 전파)

1. 서 론

최근의 환경문제 및 에너지자원의 제한으로 인하여 가급적 공해물질을 배출하지 않으면서 고효율을 실행할 수 있을 뿐 아니라 석유에너지를 대

체할 수 있는 에너지시스템의 개발이 적극적으로 요구되고 있다. 그 중에서도 가스 터빈은 이와 같은 목적에 부합하는 에너지기기로서 주목을 받고 있을 뿐만 아니라, 비교적 소형으로 큰 출력을 발휘할 수 있기 때문에 적극적으로 개발이 진행되

† 책임저자(전주대학교 기계공학과), E-mail : scko@jeonju.ac.kr, Tel : 063)220-2623

* 전주대학교 기계공학과

** 현대·기아 연구개발본부

고 있다.

예 혼합(premixed) 연소방식의 가스 터어빈은 확산 연소방식에 비해 화염온도를 낮춤으로써 NO_x 방출을 줄일 수 있기 때문에 환경 유해물질의 억제 측면에서 많은 주목을 받고 있다. 그러나 비교적 낮은 온도의 예 혼합 연소방식은 연소 반응과정 또는 난류 혼합과정에서 쉽게 소멸현상이 일어날 수 있기 때문에 보염기(flame holder)의 설치에 의해 화염의 안정화를 도모하고 있다.

예 혼합 연소방식에 대한 종래의 연구에 의하면, Amano 등⁽¹⁾은 k-ε 모델과 층류 화염면 모델을 사용하여 둔각물체 주위의 난류 예 혼합에 관한 수치모사를 행하여, 예 혼합 화염의 온도분포를 예측하였다. 또한, Inage 등^{(2) (3)}은 2차원 평행평판 내부에 3각 프리즘 형상의 보염기를 갖는 예 혼합 연소기에 관한 LES 수치해석을 수행하여, 보염기에 의해 안정화된 예 혼합 화염의 경우 보염기 주변에 강한 전단류로 인해 화염신장의 영향을 받기 쉽다는 사실을 확인하였다. 한편, Murota 등⁽⁴⁾도 평행평판 내부에 보염기가 설치되어 있는 연소기 형상을 대상으로 예 혼합 연소 화염의 연소진동에 관한 수치적 연구를 수행하였다. 그러나 이상과 같은 수치예측 결과들은 비교적 단순한 형상을 대상으로 한 것이 대부분으로, 공학적 응용성이 뛰어난 실제 연소기의 복잡한 형상을 대상으로 한 시간 의존에 따른 해석방법이 요구되게 되었다.

고 효율, 저 공해의 연소기를 개발하기 위해서는 난류 예 혼합 연소의 해석과 고정도의 난류 연소모델이 필요하다. 난류해석의 수법으로는 RANS, LES, DNS 등이 있으나, 화염의 비화, 소멸, 화염진동 등 공학적으로 중요한 연소거동은 비정상성 성질이 강하기 때문에 레이놀즈 평균형 난류모델인 RANS 모델은 적합하지 않다. 또한, 연소기 형상의 복잡성과 계산기 처리능력 등을 고려할 때 실용적인 수치 시뮬레이션 방안으로서 DNS 수법을 적용할 수 없게 된다. 따라서 LES에 의한 해석방법이 최적이라 판단된다.

본 연구에서는 LES에 의한 복잡 난류 연소장에 대한 유효성을 보다 상세하게 검토하기 위한 목적으로 계산코드를 구축하였으며, 적용된 난류

화염 모델로는 Flamelet 모델에 기초한 화염면 수송을 나타내는 G-방정식⁽⁵⁾ 모델을 채용하여 난류 연소해석을 수행하였다. 지배방정식은 물리 반변 속도성분(physical contravariant velocity component)을 기초로 한 일반좌표계(generalized coordinate)에 의해 정식화하였다. 난류 예 혼합 연소를 해석하기 위한 해석모델 및 수치해석 방법의 정당성에 대한 실용적 검증은 실험결과와의 비교를 통하여 평가하였으며⁽⁶⁾, 연소기 내부의 화염 전파와 난류 변동성분과의 상호작용에 대한 수치적 검증을 수행하였다.

2. 지배 방정식

공간필터 조작을 행한 일반좌표계 비압축성 유동장에 대한 LES 지배방정식은 다음과 같이 표현된다⁽⁶⁾.

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta^j} \left[\frac{J}{\sqrt{g_{jj}}} \overline{u^{(j)}} \right] = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{u^{(i)}}}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta^j} \left[\frac{J}{\sqrt{g_{jj}}} \left(\overline{u^{(i)}} \overline{u^{(j)}} - \tau^{(ij)} \right) \right. \\ \left. + \overline{u^{(i)}} \overline{u^{(m)}} \left(\frac{i}{mj} \right) \right] \\ = -g^{ij} \sqrt{g_{ij}} \frac{\partial \overline{p}}{\partial \eta^j} + \tau^{(im)} \left(\frac{i}{mj} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서 $\overline{u^{(i)}}$ 는 grid-scale의 물리 반변 속도성분이다. $\left(\frac{i}{mj} \right)$ 는 Christoffel symbol의 물리성분, J는 Jacobian, g_{ij} 는 계량텐서(metric tensor)의 수학성분, $g^{(ij)}$ 와 $g^{(ij)}$ 는 각각 계량텐서의 물리성분과 역성분을 나타낸다.

속도, 좌표계 및 시간은 각각 입구부의 평균 벌크속도 U_b , 반경 R , 시간 스케일 R/U_b 로 무차원화 하였다. 여기에서 응력텐서 $\tau_{(ij)}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau^{(ij)} = (\nu + \nu_{sgs}) S^{(ij)} \quad (3)$$

$$S^{(ij)} = g^{(im)} \nabla_{(m)} u^{(j)} + g^{(jm)} \nabla_{(m)} u^{(i)} \quad (4)$$

$$\nu_{sgs} = (C_s \Delta)^2 (S^{(ij)} S^{(ij)} / 2)^{1/2} \quad (5)$$

본 연구에서 Smagorinsky 모델⁽⁷⁾ 계수 C_s 는 0.1을 사용하였으며, 길이 스케일 Δ 는 격자크기와 Van Driest⁽⁸⁾형의 감쇠함수를 이용하여 계산함으로써 벽면 부근의 점근거동을 구하고 있다.

$$\Delta = \left[1 - \exp\left(-\frac{y^+}{25}\right) \right] (\Delta\eta^1 \Delta\eta^2 \Delta\eta^3)^{1/3} \quad (6)$$

Klimov-Williams criterion⁽⁹⁾에 의하면, 화염면 두께가 Kolmogorov 스케일 보다 작고 화학반응의 시간 스케일이 유동의 스케일 보다 충분히 작은 경우에, 화염은 층류 화염구조를 유지하면서 화염면이 난류의 영향으로 주름상으로 변하게 된다. 이러한 주름상의 예 혼합 화염은 미연 혼합기체와 기연가스를 구분하는 무한히 얇은 면으로 취급될 수 있으며, 화염 전파속도 S_L 은 화염면에 수직인 방향으로 이송되어 연소상태를 나타내는 스칼라 G ($G=0$:미연소 혼합기체, $G=1$:기연소 가스)는 다음 식으로 나타낼 수 있다⁽⁵⁾.

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial u_j G}{\partial x_j} = S_L |\nabla G| \quad (7)$$

LES 에 있어서, 필터 조작을 수행한 GS (Grid scale) 성분은 다음 식으로 나타낸다.

$$\frac{\partial \bar{G}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{G}}{\partial x_j} = S_L |\nabla \bar{G}| - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \bar{G} - \overline{u_j G}) \quad (8)$$

우변 제 2항을 선형화산을 가정하여 모델화하면,

$$(\bar{u}_j \bar{G} - \overline{u_j G}) = \frac{\nu_{SGS}}{\sigma_G} \frac{\partial \bar{G}}{\partial x_j} \quad (9)$$

위 식에서 계수 σ_G 는 0.25로 계산하였다.

식 (8)에서는 SGS(Sub-grid scale) 성분의 화염변동에 대해 무시하고 있기 때문에 화염면은 실제보다 덜 주름질 것이라 예상되어 전체의 화염면도 실제보다 작게 된다. 따라서 다음의 식을 이용하여 수정한다.

$$S_L |\nabla \bar{G}| = S_{GS} |\nabla \bar{G}| \quad (10)$$

GS(Grid scale) 성분의 화염 전파속도 S_{GS} 는 층류 화염 전파속도 S_L 보다 크기 때문에 Yagot

의 모델⁽¹⁰⁾을 이용한다.

$$\frac{S_{GS}}{S_L} = \exp \left[(u'/S_L)^2 / (S_{GS}/S_L)^2 \right] \quad (11)$$

여기서, 난류 강도 스케일 u' 은 SGS 운동에너지와의 관련으로부터 구할 수 있다.

3. 수치 해석 방법

계산영역은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 가스터어빈 연소기를 단순화 한 모델을 이용하였다. 입구부와 급 확대부를 갖는 연소실내에 보염기가 설치되어 있어 예 혼합기체가 입구부로부터 분출되어 보염기에 충돌, 연소하고 하류로 흘러나가는 구조로, 난류 레이놀즈수는 입구의 평균유속(U_m)을 대표속도, 보염기의 폭(D)를 대표길이로 하여 $Re=50,000$ 에서 계산을 수행하였다.

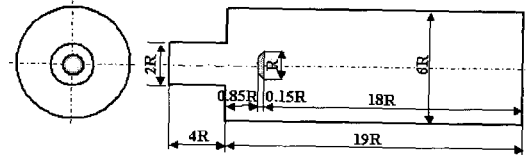


Fig. 1 Schematic diagram of the computational domain.

원통좌표계 격자를 이용하여 수치계산을 수행하였으며 시간이산화에 대해서는 2차 정도의 Adams-Bashforth 법, 공간이산화에 대해서는 점성항에 2차 중심차분법, 대류항에 QUICK법을 사용하여 계산을 수행하였다. 압력장 해법에는 압력, 속도의 동시 완화법인 HSMAC(Highly Simplified Maker and Cell)법을 사용하였다. 또한, 벽면 경계조건으로는 일반화된 벽면칙을 사용하였으며, 유출 경계조건으로는 대류 유출 경계조건을 부가하였다.

계산격자는 각각 반경방향 55, 원주방향 90, 주 흐름방향 102의 총 504,900개를 취하였으며, 보염기 주위에는 격자 폭을 0.01D 이하로 세밀하게 배열하여 계산을 수행하였다. 시간증분은 무차원 시간으로 $\Delta t=0.002$ 로 하였다. 초기조건으로서,

무차원 시간 $T=80.0$ 까지의 비 연소장에 대한 발달 난류 유동장의 해석결과를 이용하여 보염기의 배면에 기연소 가스를 나타내는 $G=1$ 을 부가하고, 그 밖의 영역은 $G=0$ 의 미연소 가스로 취급하여 계산을 수행하였다.

4. 결과 및 검토

공학적인 응용에 있어서의 유동장에 대한 문제는 복잡한 형상을 갖는 경우가 대부분이다. 이와 같이 복잡한 형상을 갖는 유동장을 해석하는데 있어서 고려하여야 할 사항은 난류모델에 관한 문제와 계산격자를 어떻게 설정하여 해석을 수행하는가의 문제로 대별된다. 특히, 난류 화염의 거동은 난류 혼합과정과 밀접한 관련이 있기 때문에, 가스 터빈 연소기 내부의 연소장을 해석하기 위해서는 복잡 형상을 갖는 난류 유동장에 대한 엄밀한 해석이 선행되어야 한다. 저자 등은 이미 복잡 난류 유동장을 대상으로 수치해석 코드를 구축하여 비교적 저 레이놀즈 수($Re=5,000$)의 난류 혼합과정에 대한 체계적인 연구를 수행하였다^[6].

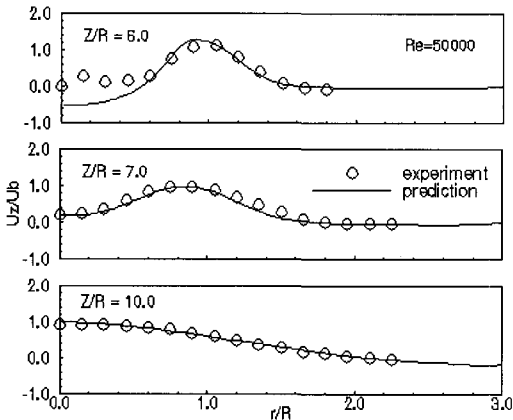


Fig. 2 Comparison of the predicted mean axial velocity with the experimental data.

본 연구에서는, 실제의 연소기내 유동장을 대상으로 한 고 레이놀즈 수 ($Re=50,000$)에 관한 해석을 수행하였다. Fig. 2와 3에 각각 축 방향의 평균 속도분포와 난류 강도분포를 실험결과^[11]와

의 비교를 통해 나타내었다. Fig. 2에서 보는 바와 같이, 예측된 평균속도는 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있으나, 재순환 영역에서 약간의 불일치가 보임을 알 수 있다. 이와 같은 예측치와 실험결과와의 차이는 Fig. 3의 $Z/R=6.0$ 에서의 재순환 영역($r/R<1.0$)의 난류강도 분포에는 더욱 확대되어 나타남을 알 수 있다. 이는 LDV(Laser Doppler Velocimetry)에 의한 실험결과와 확률 밀도분포(PDF)가 이 영역에서 2개의 피크치를 갖고 있다는데 기인하는 것으로 판단된다. 위의 영역을 제외한 영역에서 난류 강도분포 및 평균 속도분포는 전반적으로 실험결과와 잘 일치하는 결과가 얻어졌다.

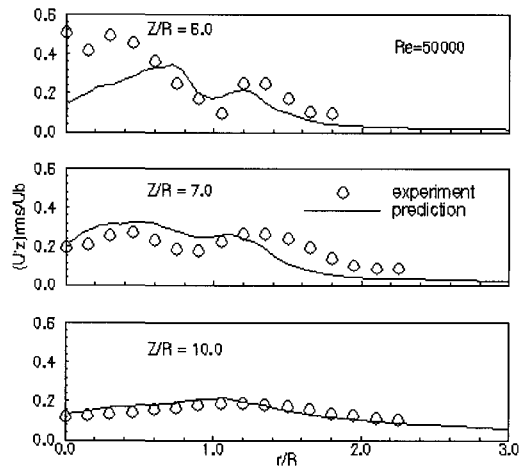


Fig. 3 Comparison of the predicted axial turbulent intensity with the experimental data.

순간적인 축 방향 속도의 등치선 분포를 Fig.4에 나타내었다. 등치선은 -0.92 와 1.49 사이에서 0.08 의 간격으로 표시하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 속도분포는 보염기의 영향으로 배면에 재순환 영역이 생성된다. $Z/R=7.0$ 부근에서 재순환 영역은 끝나고 난류혼합이 촉진됨을 알 수 있다. 또한, $Z/R=6.0$ 과 $7.0, 10.0$ 에서의 단면 분포에서 알 수 있는 바와 같이 보염기 배면에 링 형태의 고속영역이 존재하며, 그 안쪽에 비교적 강한 역류영역인 재순환 영역과 바깥쪽에 약한 역류영역이 나타난다. 링 형태의 고속영역과 이들 2

개의 역류영역사이의 전단층에서 난류혼합이 이루어지며, 따라서 링 형태의 고속영역은 이들 2개의 전단층에서 주름상의 변형을 하게 된다. $Z/R=7.0$ 에서는 재순환 영역이 끝나게 되며, 하류영역에서 난류혼합에 의한 변형이 더욱 촉진되고 전단층에서 주름상의 변형을 통해 생성된 주류방향의 볼텍스를 성장시키게 되며, 이에 따라 유동의 불안정성은 증가하게 된다.

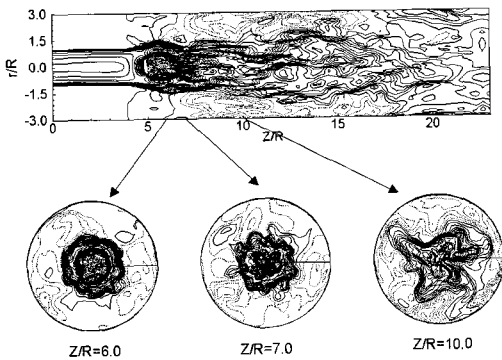


Fig. 4 Contour plots of the instantaneous axial velocity.

Fig. 5에 볼텍스 강도의 등가면 연속 분포를 나타내어 보임기 배면의 재순환 영역 내부에서의 큰 척도 볼텍스의 시간에 따른 rolling-up과 방출에 관해 설명하고 있다. 연속 그림에서 나타난 바와 같이 링 형태의 볼텍스는 보임기를 지나 흐름방향으로 방출되며 roll-up하고 있으며, 화살표로 표시한 방향으로 회전하고 있다. 그러나, 보임기 배후의 역류영역인 재순환 영역 내부의 볼텍스 덩어리는 링 형태의 볼텍스와는 반대방향으로 회전을 하며 또한 진행방향도 반대이기 때문에, 이들 두 볼텍스 사이의 상호작용으로 인해 링 형태의 볼텍스가 붕괴하게 되며, 재순환 영역 내부의 볼텍스 덩어리는 압축력을 받게 된다. 한편, 재순환 영역이 팽창을 하게 되면 재순환 영역 내부의 볼텍스 덩어리는 압축시와는 반대방향으로 회전하며 주류 방향으로 밀려나게 되어 생성된 주류방향의 볼텍스를 하류로 방출하게 된다. 그림 내부에 작은 원으로 표시한 부분은 전단층의 경계면에서 시간에 따른 볼텍스의 변형을 나타낸다. 따라서 보임기

배면의 재순환 영역은 시간에 따라 전후로 진동하며 링 형태의 볼텍스를 붕괴시켜 주류방향 볼텍스를 생성하여 하류로 방출하는 역할을 수행함으로써 난류혼합을 촉진하고 또한 화염면의 blow-out을 방지하는 화염 부착기구로서의 역할을 수행함을 알 수 있다.

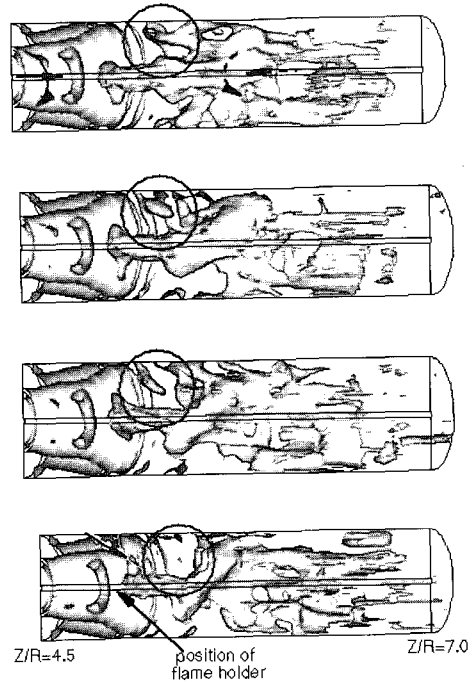


Fig. 5 Sequential frames of the vortical structure inside region of the recirculating zone behind the flame holder. $\Delta t=1.0t^*$.

한편, 완전 발달된 난류 유동해석 결과를 초기 조건으로 이용하여 난류 연소장에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 난류 연소장에 대한 해석은 초기 연소기내의 전 영역에 미연소 가스($G=0$)를 채우고 입구부를 통해 미연소 가스가 공급되는 경계조건을 설정하였으며, 보임기 배면의 일부영역에 기연소 가스($G=1$)를 부가함으로써 연소기내 난류 유동장과 동시에 난류 화염면($G=0.5$)을 나타내는 스칼라 량 G 값의 거동을 계산하였다.

Fig. 6에 시간에 따른 난류 화염면의 전파를 나타내었다. 보임기 배면의 기연소 가스 영역이 시간에 따라 하류로 발달하여 연소기 내부 벽면과

출구영역에 도달함을 알 수 있다. 화염면($G=0.5$)은 보염기 후방의 박리영역을 따라 전파한 후, 전단층의 확산을 따라 반경방향으로 확대되는 형태를 나타낸다. 화염은 난류 전단층을 따라 비교적 안정된 형태를 유지하며 하류에서는 연소기내의 전 영역이 기연소 가스로 채워짐을 알 수 있다.

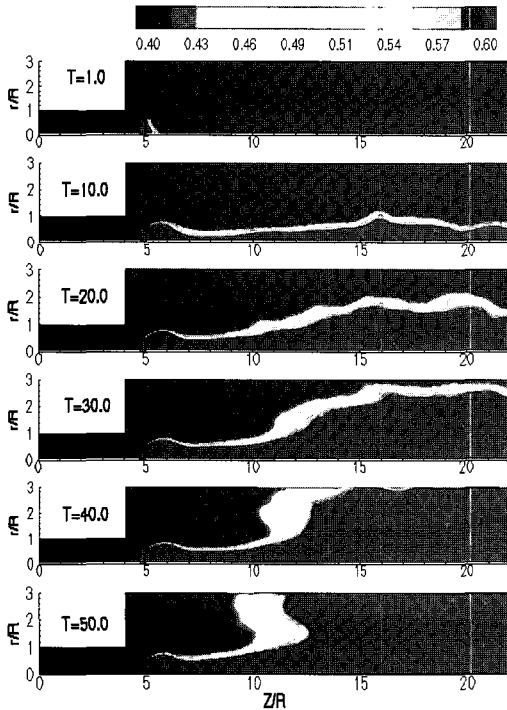


Fig. 6 Sequential series of the flame front propagation of the level scalar G.

순간적인 G 값의 분포를 Fig. 7에 나타내었으며, 축방향을 따라 보염기 후방 4위치에서의 스칼라 량 G 의 단면분포를 Fig. 8에 나타내었다. 기연소 가스 영역이 보염기 후방에서 난류혼합 영역인 전단층을 따라 전 영역으로 전파되어 감을 알 수 있으며, 하류영역은 대부분이 기연소 가스 영역으로 채워져 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 8의 각 단면분포를 보면 순간적으로 챔버 벽면 부근에 다소의 미연소 가스 영역이 나타남을 알 수 있으며, 이로 인해 연소기의 전체적인 연소 효율이 저하하는 원인이 될 수 있다고 판단된다. 특히 보염기는 그 배면에 재순환 영역을 형성함으로써

화염의 blow-out을 방지하는 보염 기구로서의 역할을 수행하고, 또한 전단층을 형성함으로써 화염 안정화를 도모하는 기능을 수행함을 알 수 있다.

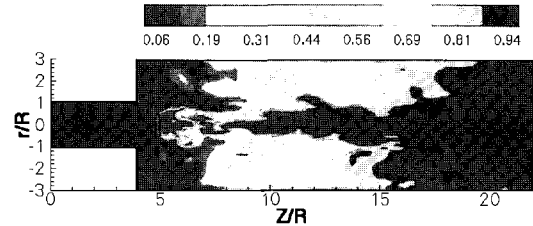


Fig. 7 Instantaneous distribution of the level scalar G.

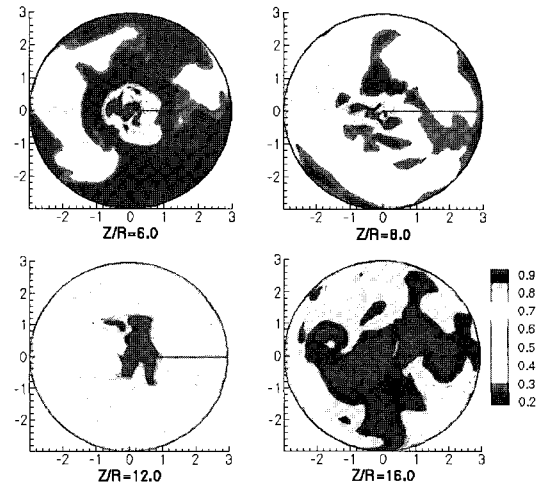


Fig. 8 Cross-sectional view of instantaneous distribution of the level scalar G.

5. 결 론

본 연구에서는 LES 수법과 G -방정식 모델을 이용하여 난류 연소장에 대한 수치해석을 수행하였다. 난류 연소장에 대한 신뢰성 있는 해석을 수행하기 위해서는 난류 혼합과정에 대한 상세한 검증이 필요로 하기 때문에 본 연구에서는 복잡형상을 갖는 난류 혼합과정에 대한 상세한 검증을 수행하기 위해 LES를 채택하였으며, 그 예측결과는 LDV에 의한 실험결과와의 비교를 통해 검증하였다.

난류 유동장에 대한 검증 결과, 평균속도 분포,

속도 피크치의 위치, 난류강도 분포 등의 난류 통계량의 검증을 기초로 복잡형상을 갖는 연소실내의 순간적인 난류 혼합과정을 보염기 배면의 재순환 영역 내부에서의 큰 척도 볼텍스의 시간에 따른 rolling-up과 방출을 통해 상세히 검증하였다. 특히 보염기 주변의 시간에 따른 볼텍스 링의 붕괴와 축 방향 볼텍스를 여기하는 나선형 구조의 생성에 대해 상세히 검토하였다.

한편, 난류 유동해석 결과를 기초로 난류 연소장에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 화염면 ($G=0.5$)은 보염기 후방의 박리영역을 따라 전파한 후 전단층의 확산을 따라 반경방향으로 확대되어 비교적 안정된 형태를 유지하며, 하류에서는 연소기내의 전 영역이 기연소 가스로 채워짐을 알 수 있다. 특히 보염기는 화염의 blow-out을 방지하는 보염 기구로서의 역할 및 화염 안정화를 도모하는 기능을 수행함을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] Amano, K., Inage, S., Yamakata, M. and Taniguchi, M., "Numerical simulation of turbulent pre-mixed flame around a bluff body using the $k-\epsilon$ and flamelet models", 9th Symp. on Turbulent Shear Flows, Kyoto, Japan, 1993.
- [2] 稻毛眞一, P. Vincent, 小林成嘉, "新たな燃焼モデルを用いた保炎器廻りの豫混合燃焼の評価", 日本機械學會 論文集 B, 63卷 612号, 1997, pp.2876-2883.
- [3] 稻毛眞一, 小林成嘉, "パイロット火炎および保炎器により安定化された亂流豫混合火炎の数値シミュレーション", 日本機械學會 論文集 B, 63卷 615号, 1997, pp.3758-3763.
- [4] Murota, T. and Ohtsuka, M., "Large eddy simulation of combustion oscillation in premixed combustor", Int. Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, Indianapolis, Indiana, 1999.
- [5] Kerstein, A. R., Ashurst, W. T. and Williams, F. A., "Field equation for interface propagation in an unsteady homogeneous flow field", Physical Review A37, 1988, pp.2728-2731
- [6] 고상철, 최창용, "급 확대부를 갖는 실린더 챔버 내부의 둔각물체 주위 유동에 관한 대 와동 모사", 한국박용기관학회 논문집, 제28권 1호, 2004, pp.98-108.
- [7] Smagorinsky, J., "General calculation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment", Monthly Weather Review, Vol.91, 1963, pp.99-164.
- [8] Van Driest, E. R., "On turbulent flow near a wall", J. of the Aeronautical Sciences, Vol.23, 1956, pp.1007-1011.
- [9] Williams, F. A., "Combustion theory (2nd ed.)", Addison-Wesley, 1985.
- [10] Yakhot, V., "Propagation velocity of premixed turbulent flames", Combustion Sci. Tech. 60, 1988, pp.191-214.
- [11] Kobayashi, T. et. al., "Modeling for flow simulation of combustion chambers", Rep. No. 8H-170-1, NEDO(in Japanese), Japan, 1999.

저 자 소 개



고상철 (高相喆)

1963년 10월 10일생. 1985년 부산대학교 기계설계학과 졸업, 1999년 일본 동경대학 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1993-1995년 동경대학 생산기술연구소, 1999-2000년 동경대학 국제 산학 연구센터, 2000년 03-08월 한국과학기술원 기계공학과, 2000-2002 삼성전자 디지털미디어(연), 2002년 전주대학교 기계공학과 교수.

**최창용 (崔昌龍)**

1961년 8월 13일생. 1983년 성균관대학교 기계공학과 졸업, 1991년 미국 플로리다대학 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1991-1996년 한국원자력연구소, 1996년-현재 전주대학교 기계공학과 교수.

**박남섭 (朴南燮)**

1965년 5월 24일생. 1989년 한양대학교 기계공학과 졸업, 1995년 일본 동경대학 대학원 기계공학과(석사), 2000년 일본 동경대학 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1989-1992 (일본)나라기계제작소, 2001-현재 현대자동차 연구개발본부 선임연구원.