

< 논문 >

재순환 및 선회 유동에 대한 대와동모사(LES)의 성능검토

황 철 홍* · 이 창 언†

(2005년 12월 14일 접수, 2006년 3월 6일 심사완료)

Performance Evaluation of Large Eddy Simulation for Recirculating and Swirling Flows

Cheol-Hong Hwang and Chang-Eon Lee

Key Words : Large Eddy Simulation(대와동모사), Recirculating Flow(재순환 유동), Swirling Flow(선회 유동), Backward-Facing Step(후향 계단), Dump Combustor(덤프 연소기), Parallel Computation(병렬 계산)

Abstract

The objective of this study is to evaluate the efficiency and the prediction accuracy of developed large eddy simulation (LES) program for complex turbulent flows, such as recirculating and swirling flows. To save the computational cost, a Beowulf cluster system consisting 16 processors was constructed. The flows in backward-facing step and dump combustor were examined as representative recirculating and swirling flows. Firstly, a direct numerical simulation (DNS) for laminar backward-facing step flows was previously conducted to validate the overall performance of program. Then LES was carried out for turbulent backward-facing step flows. The results of laminar flow showed a qualitative and quantitative agreement between simulations and experiments. The simulations of the turbulent flow also showed reasonable results. Secondly, LES results for non-swirling and swirling flows in a dump combustor were compared with the results of Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) using standard κ - ϵ model. The results show that LES has a better performance in predicting the mean axial and azimuthal velocities, corner recirculation zone (CRZ) and center toroidal recirculation zone (CTRZ) than those of RANS. Finally, it was examined the capability of LES for the description of unsteady phenomena.

1. 서론

가스터빈, 램젯 엔진 및 대부분의 실용 연소기에는 연료와 공기의 혼합 증진, 열전달의 증가, 오염물질 발생저감 및 화염 안정성 등을 개선시키기 위하여 박리(separation)-재부착(reattachment)과 관련된 재순환 유동과 선회 유동을 포함하는 복잡한 난류 유동을 적용하고 있다. 이러한 유동장은 다

양한 스케일을 갖는 에디(eddy)들의 움직임에 의해서 매우 불규칙한 비정상 거동을 보인다. 특히 난류 혼합 및 와류의 전개와 같은 유체역학적 특성은 화학반응이 동반될 때 열 발생 및 음향파의 상호작용으로 복잡한 특성을 나타낸다. 따라서 열 발생이 존재하지 않는 비반응 난류 재순환 및 선회 유동에 대한 정확한 예측은 향후 실용 연소장에 대한 해석을 위해 반드시 선행되어야 한다.

최근에 전산자원 및 수치기법의 향상으로 실용 연소장 내의 난류 유동특성을 이해하기 위한 수치 해석이 많이 이루어지고 있다. 더불어 이러한 수치해석 결과를 직접 연소기 설계에 활용하려는 시도가 점차적으로 진행되고 있다. 난류 유동에 대

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : chelee@inha.ac.kr
TEL : (032)867-4522 FAX : (032)868-1716

* 회원, 인하대학교 산업과학기술연구소

한 수치 접근법은 모델링 없이 직접 수치 해를 구하는 DNS(direct numerical simulation), 평균화된 난류 유동에 대한 모델링을 통해 접근하는 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes), 그리고 이들 방법을 절충한 LES(large eddy simulation)로 크게 구분된다.

LES의 기본 개념은 대부분의 에너지를 포함하고 난류 수송의 역할을 담당하는 큰 에디는 모델 없이 직접 계산하고, 비교적 등방성(isotropic)의 성격을 갖는 작은 스케일의 에디는 아격자(subgrid) 모델로 처리하는 것이다. 따라서 LES는 모든 스케일의 유동 구조에 영향을 주는 RANS의 난류 모형보다는 형상과 경계조건에 덜 의존한다고 할 수 있다. 또한 시간 평균화된 물리량을 이용하여 난류 현상을 묘사하는 RANS와는 다르게 LES는 유동의 비정상 효과 뿐만 아니라 연소장에서의 화염 불안정성 등의 복잡한 현상들을 체계적으로 접근할 수 있는 매우 유용한 해석방법이다.⁽¹⁾

본 연구는 실용 연소장 해석을 위한 LES 프로그램 개발의 일환으로서, 우선적으로 반응이 고려되지 않는 재순환 및 선회 유동장에 대한 LES의 예측 성능을 검토하고자 한다. 이를 위해 두 가지 형상, 즉 후향 계단(backward-facing step)과 덤프(dump) 연소기 형상을 수치대상으로 하였다.

후향 계단은 박리-재부착 등과 관련된 재순환 유동이 발생하면서도, 매우 단순한 형상을 갖기 때문에 계산 프로그램의 성능 검토를 위한 표준 문제(benchmark problem)로서 많이 사용되고 있다. 후향 계단 유동의 대표적 실험 연구로서, Armaly 등⁽²⁾은 층류 유동을 포함하는 $70 < Re < 8,000$ 의 넓은 범위에서 유동의 박리 및 재부착점의 위치와 유속을 측정하였으며, 특정 Re 수 이상에서 3차원 구조의 재순환 유동이 발생됨을 확인하였다. 이외에도 Jovic 등⁽³⁾과 Pitz 등⁽⁴⁾은 각각 $Re=5,000$ 과 22,100에 해당되는 중간 및 높은 Re 수의 난류 영역에서 재순환 유동장 특성을 검토하였다.

덤프 연소기에서의 선회 유동장에 대한 실험 및 수치적 연구로서, Ahmed 등⁽⁵⁾은 선회수 0.0과 0.4의 두 조건에 대한 상세한 유동정보를 제공하였으며, Nejad 등⁽⁶⁾은 실험과 $\kappa\text{-}\epsilon$ 모델을 이용한 RANS 계산을 병행하여, RANS가 복잡한 선회 유동의 난류 구조를 묘사하기에는 부적절하다고 언급하였다. 또한 Lin 등⁽⁷⁾은 $\kappa\text{-}\epsilon$ 모델과 보다 정교한 난류 모델을 통하여 동축 선회 유동장의 정보를 비교적 잘 예측하였으나, 동시에 수행된 LES의 경우가 실험값을 보다 잘 예측함을 확인하였다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 LES의 비반응 난류 유동장에 대한 예측 성능을 검토하기 위하여,

후향 계단의 재순환 유동과 덤프 연소기의 선회 유동에 대한 LES 결과를 기존 실험 결과와 비교·검토하고자 한다. 또한 RANS의 대표적인 $\kappa\text{-}\epsilon$ 모델과의 비교를 통하여 평균 및 비정상 현상에 대한 RANS와 LES의 차이점을 확인하고자 한다. 이 결과들을 바탕으로 향후 실용 연소장의 화염 불안정성, 연소 소음 및 NOx, CO 등과 같은 오염물질의 생성특성에 관한 연구를 단계적으로 진행하고자 한다.

2. 지배방정식 및 수치해법

2.1 지배방정식

난류 유동은 다음과 같은 3차원 비정상압축성 Navier-Stokes 방정식에 의해 지배된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} &= -\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} \\ \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_i u_j + p \delta_{ij} - \tau_{ij}] \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x_i} [\rho H u_i + q_i - u_j \tau_{ji}] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 ρ 는 밀도, p 는 압력, E 는 단위 질량당 총 에너지, u_i 는 속도 벡터, q_i 는 열 유속 벡터, τ_{ij} 는 전단응력 텐서를 나타내고 H 는 단위 질량당 총 엔탈피를 의미한다. 이들 방정식의 각 항은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \\ q_i &= -k \frac{\partial T}{\partial x_i} \\ p &= \rho RT \\ E &= C_v T + \frac{1}{2} u_k^2 \\ H &= (E + p) / \rho \\ \mu &= \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + 110}{T + 110} \\ \kappa &= \frac{\mu C_p}{Pr} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 μ , κ , C_p 와 Pr 는 각각 Sutherland의 법칙에 의한 분자 점성 계수, 열전달 계수, 정압 비열 및 Prandtl 수를 의미한다. 본 계산에서의 유체는

공기를 대상으로 하였다.

위의 방정식들을 이용한 DNS는 난류 유동장에 대해 추가적인 모델 없이 유체현상을 거의 완벽하게 모사할 수 있는 가장 이상적인 수치모사 방법이다. 그러나 Re 수에 따른 격자수의 증가로 인하여 실용 유동장의 해석에는 현재의 계산성능으로 많은 어려움이 있다. 따라서 이를 해결하기 위한 대안인 LES의 지배방정식 유도가 요구된다.

LES에서 순간적인 유동변수는 GS(grid scale) 성분(\bar{f})과 SGS(subgrid scale) 성분(f'')으로 나뉘어진다. 이때 GS 성분은 Farve 여과($\bar{f} = \overline{\rho f} / \bar{\rho}$)에 의해 결정되며, 'over-bar' 첨자는 공간 여과(spatial filter)를 의미한다. 이에 대한 표현은 식 (3)과 같다.

$$\overline{f(x_i, t)} = \int f(x'_i, t) G_f(x_i, x'_i) dx'_i \quad (3)$$

여기서 G_f 는 확률 밀도함수(probability density function)의 의미를 갖는 여과함수(filter function)이며, 전 계산영역에 대해 적분된다. 본 연구에서는 격자의 평균효과를 갖는 box filter 함수가 사용되었다. 이와 같은 여과과정을 통해 압축성 LES 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} &= -\frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_i}{\partial x_i} \\ \frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_i}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j + \bar{p} \delta_{ij} - \bar{\tau}_{ij} + \tau_{ij}^{sgs}] \\ \frac{\partial \bar{\rho} \bar{E}}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x_i} [\bar{\rho} \bar{H} \bar{u}_i + \bar{q}_i - \bar{u}_j \bar{\tau}_{ij} + H_i^{sgs} + \sigma_{ij}^{sgs}] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 상첨자 'sgs'는 SGS 성분의 효과를 나타낸 항으로서 위 방정식들을 종결(closure)시키기 위하여 모델링 되어야 한다. 위의 각 SGS 항들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_{ij}^{sgs} &= \bar{\rho} [\widetilde{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j] \\ H_i^{sgs} &= \bar{\rho} [\widetilde{E u_i} - \bar{E} \bar{u}_i] + [\overline{p u_i} - \bar{p} \bar{u}_i] \\ \sigma_i^{sgs} &= [\overline{u_j \tau_{ij}} - \bar{u}_j \bar{\tau}_{ij}] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 τ_{ij}^{sgs} 는 SGS 응력텐서, H_i^{sgs} 는 SGS 열 유속(flux)이며 σ_i^{sgs} 는 SGS 점성 일을 의미한다.

2.2 LES SGS 항의 모델링

SGS 항들의 모델링을 위해서는 SGS의 특성 길이 및 시간(속도) 스케일의 정보가 요구된다. 이를 위해 본 계산에서 길이 스케일은 격자의 평균 길이 즉, $\bar{\Delta} = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$ 로 하였으며, 시간 스케일은 SGS의 난류 운동에너지로부터 계산하였다. SGS 운동에너지($k^{sgs} = 0.5[\widetilde{u_k^2} - \bar{u}_k^2]$) 전달 방정식은 식 (6)과 같다.⁽⁸⁾

$$\frac{\partial \bar{\rho} k^{sgs}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i k^{sgs}) = P^{sgs} - D^{sgs} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \frac{v_i}{Pr_i} \frac{\partial k^{sgs}}{\partial x_i}) \quad (6)$$

여기서 Pr_i 는 난류 Prandtl 수로서 1로 가정하였으며, 이에 대한 오차는 향후 추가적으로 검토되어야 할 것이다. P^{sgs} 와 D^{sgs} 는 k^{sgs} 의 생성항과 소멸항을 의미한다. 생성항은 $P^{sgs} = -\tau_{ij}^{sgs} (\partial \bar{u}_i / \partial x_j)$ 으로 표현되며, 이때 SGS 응력 텐서는 다음과 같다.

$$\tau_{ij}^{sgs} = -2\bar{\rho} v_t (\bar{S}_{ij} - \frac{1}{3} \bar{S}_{kk} \delta_{ij}) + \frac{2}{3} \bar{\rho} k^{sgs} \delta_{ij} \quad (7)$$

여기서 $v_t = C_v (k^{sgs})^{1/2} \bar{\Delta}$ 는 eddy viscosity이며 $\bar{S}_{ij} = 0.5(\partial \bar{u}_i / \partial x_j + \partial \bar{u}_j / \partial x_i)$ 는 GS 스트레인율 텐서를 나타낸다. 소멸항은 $D^{sgs} = C_\epsilon \bar{\rho} (k^{sgs})^{3/2} / \bar{\Delta}$ 으로 모델되었다. C_v 와 C_ϵ 은 dynamic 모델⁽⁹⁾에 의해 공간과 시간에 따라 결정되었다. 마지막으로 SGS 열 유속(H_i^{sgs})과 SGS 점성 일(σ_i^{sgs})은 다음과 같이 모델되었다.

$$H_i^{sgs} = -\bar{\rho} \frac{v_t}{Pr_i} \frac{\partial \bar{H}}{\partial x_i} \quad (8)$$

$$\sigma_i^{sgs} = \bar{u}_j \tau_{ij}^{sgs} \quad (9)$$

2.3 수치해법

지배방정식의 차분을 위하여 공간에 대해 유한 체적법(finite volume method)을 이용한 2차 정확도의 차분법을 사용하였으며, 시간적분에 대해서는 전체적으로 2차 정확도의 MacCormack scheme⁽¹⁰⁾을 사용하였다. 또한 복잡한 형상을 수치모사하기 위하여 좌표변환을 통한 일반 곡선 좌표계(generalized curvilinear coordinate system)를 사용하였다.

양해법(explicit scheme)에 의한 수치 해의 정확도 및 안정성을 보장하기 위하여 시간 전진 간격(Δt)은 CFL(Courant-Friedrich-Levy) 수에 의해 제어되었으며, 이때 CFL 수는 0.5로 설정하였다.

3. 계산대상 및 조건

3.1 후향 계단의 재순환 유동

후향 계단에서의 유동은 Re 수와 같은 유동조건과 확대되는 스텝(step)과 입구와의 길이 비 등에 따라 재순환 형태, 박리 및 재부착점의 위치 등이 크게 변화되는 다양한 유동구조를 보여준다. 따라서 재순환 유동에 대한 본 프로그램의 검증을 위해서는 다양한 유동조건에 대한 체계적인 검토가 요구된다. 본 연구에서는 우선적으로 $Re=389$, 1,000에 해당되는 층류 유동⁽²⁾에 대한 DNS 계산을 수행하였다. 이는 LES 유동 아격자 모델이 적용되기 전에 격자, 이산화 등을 포함하는 수치 알고리즘의 정확도를 검토하기 위한 것이다. 그리고 중간 및 높은 Re 수에 해당되는 난류 유동에 대한 검토를 위해서 $Re=5,100$ ⁽³⁾ 및 22,100⁽⁴⁾에 해당되는 유동장을 대상으로 하였다.

계산영역 및 초기조건은 각 계산에 해당되는 실험결과를 바탕으로 부여되었으며, 보다 자세한 내용은 각 해당 조건의 참고문헌을 통해 확인될 수 있다. 출구조건은 Poinso 등⁽¹¹⁾이 제안한 NSCBC (Navier-Stokes characteristics boundary condition)을 부여하였다. 벽면에서의 유속과 스칼라(scalar)는 각각 no-slip과 Neumann 경계조건을 주었으며, 너비방향(z-dir.)으로는 주기(periodic) 조건을 주었다. 또한 입구에서 난류 초기조건은 평균유속 및 난류 강도를 이용한 가우스 분포의 난수(random number) 발생 함수를 통해 부여하였다. 각 계산에 사용된 격자수는 결과부분에 언급되었으며 격자 의존도 검사를 통해 최종 결정되었다.

3.2 덤프 연소기의 선회 유동

선회 유동에 대한 LES 성능 검토는 Ahmed 등⁽⁵⁾의 실험조건을 대상으로 수행되었다. 실험은 선회수(swirl number, SN) 0.0과 0.4에 대하여 수행되었으며, 이때 선회수의 정의는 다음과 같다.

$$SN = \frac{\int_{R_i}^{R_h} \bar{U} \bar{W} r^2 dr}{\left(R_i \int_{R_i}^{R_h} \bar{U}^2 r dr \right)} \quad (10)$$

여기서 R_i 와 R_h 는 각각 입구 파이프와 선회 발생기 허브(hub)의 반경을 의미한다. 또한 \bar{u} 와 \bar{w} 는 각각 축방향 및 원주방향의 평균유속을 나타낸다.

덤프 연소기의 형상은 Fig. 1과 같으며, 연소기 입구에서 확장된 스텝 높이(H)는 25.4mm이다. 선회 발생기 이전의 최대 유속은 19.2m/s이며, 입구 관 반경을 기준으로 Re 수는 1.25×10^5 이다. 실험

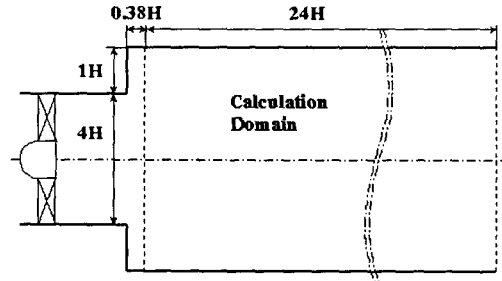


Fig. 1 Schematic of dump combustor and calculation domain

에서는 스텝을 기준으로 하류방향의 0.38H에서부터 유속이 측정되었기 때문에, 초기조건을 부재로 인하여 계산영역은 $x=0.38H \sim 24.38H$ 로 설정하였다. 사용된 격자 수는 $N_x \times N_r \times N_\theta = 125 \times 65 \times 60$ 이며, 축방향 및 반경방향에 대해 각각 입구 및 전단층 영역과 벽면근처에 밀집되었다. 이때 격자 크기의 신장율은 최대 5% 이내로 하였다. 경계조건으로서 입구조건은 $x=0.38H$ 의 실험값인 평균유속 및 난류강도를 부여하였으며, 벽면 및 출구조건은 후향 계단의 유동과 동일한 방법을 통해 부여하였다.

본 LES 계산과 비교 검토될 RANS의 계산은 상용 프로그램인 STAR-CD⁽¹²⁾를 이용하였으며, 난류 모델은 표준 $\kappa-\epsilon$ 모델을 적용하였다. 사용된 격자수는 격자 의존도 검사를 통해 $N_x \times N_r \times N_\theta = 80 \times 65 \times 40$ 으로 결정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 병렬계산의 성능 검토

LES에서는 난류 통계치를 얻기 위하여 충분한 샘플 유동장을 수집하여야 하며 장시간의 계산시간이 요구된다. 이를 해결하기 위하여 MPI(message passing interface)를 이용한 분산 메모리 병렬기법을 수행하였다. 병렬효율의 성능 평가는 크게 속도 향상률(speed-up ratio, S_p)과 병렬화 효율지수 (efficiency ratio, E_p)에 의해 이루어 지는데 이들에 의한 정의는 각각 식 (11) 및 (12)와 같다.

$$S_p = T_1 / T_p \quad (11)$$

$$E_p (\%) = (S_p / P) \times 100 \quad (12)$$

여기서 T_1 은 1개의 프로세서(processor, P)로 계산하는데 걸리는 시간을 의미하며, T_p 는 P개의 프로세서를 사용했을 때 계산에 걸리는 시간을 의미

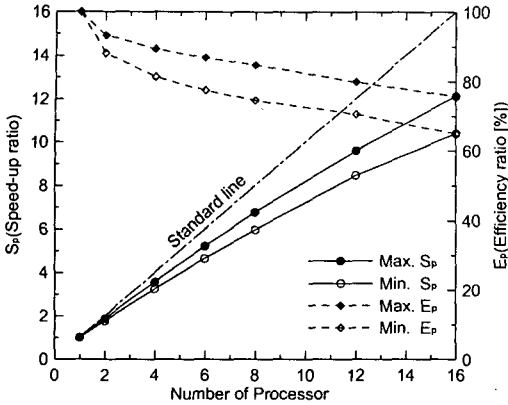


Fig. 2 Speed-up ratios and efficiency ratios for parallel computation

한다.

본 연구에는 총 16개의 프로세서가 사용되었으며, 이들의 병렬 수행결과는 Fig. 2와 같다. 각 프로세서에 동일한 격자가 할당되더라도 인접한 프로세서간의 통신량의 차이에 따라 병렬성능은 큰 영향을 받게 된다. 따라서 최대 및 최소의 S_p 와 E_p 를 그림에 도시하였다. 프로세서의 증가에 따라 S_p 는 비선형적으로 증가하며, 16개의 프로세서가 사용될 때 영역 분할방법에 따라 최대 12.13, 최소 10.39로서 상당한 차이를 보이고 있다. 프로세서의 증가는 통신의 오버헤드 및 지연 등의 다양한 원인에 의해 필연적인 효율 감소를 발생시킨다. 이러한 경향을 E_p 로 확인해 보면, 최대 75%에서 최소 65%의 결과를 나타낸다. 위 결과를 바탕으로 본 연구를 위해 구축된 병렬 컴퓨터는 비교적 좋은 성능을 보이며, 영역분할 방식에 따라 약 10%의 병렬효율 차이가 발생됨을 확인하였다.

4.2 후향 계단의 유동 검토

LES 아격자 모델의 적용 이전에 수치 알고리즘의 검토가 요구되며, 이를 위해 Armaly 등의 실험 조건을 대상으로 $Re=389$ 와 1,000에 대한 층류 영역의 DNS를 수행하였다. x - y - z 방향에 대한 계산영역은 $31H \times (S+H) \times 1H$ 로 하였다. 여기서 S 는 스텝의 높이(4.9mm)이며 H 는 스텝 상류의 입구 높이(5.2mm)를 의미한다. 이때 사용된 격자수는 각 방향에 대해 $120 \times 64 \times 10$ 로서, 계산시간을 고려하여 너비방향의 거리 및 격자를 최소화 하였다. Fig. 3(a)는 $Re=389$ 의 조건에서 대표적인 주 유동방향에 대한 무차원 된 평균 유속분포를 도시한 것이다. 실험결과와의 비교를 통해 DNS 결과는 층류 재순환 유동을 매우 잘 예측함을 확인할 수 있다.

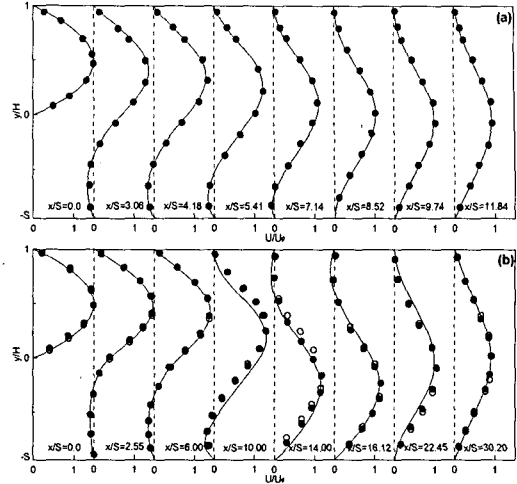


Fig. 3 Streamwise mean velocity profiles for (a) $Re=389$ (solid circle: Exp. by Armaly et al., line: DNS result) and (b) $Re=1,000$ (solid circle: Guerrero et al., circle: Chiang et al., line: DNS result)

또한 예측된 재부착점은 8.25S로서 실험결과(8.02 S)와 거의 일치한다.

위의 $Re=389$ 의 결과와는 다르게, Armaly 등은 실험을 통해 Re 수가 약 400 이상인 층류 유동장은 3D 구조의 유동이 발생된다고 언급하였다. 또한 상판(upper plate)에서 재순환 유동이 발생되며, 이 위치의 예측은 재부착점과 더불어 계산의 정확도를 검토하는데 중요한 기준이 된다. 그러나 본 계산은 비록 3D로 이루어졌으나, 2D 형상에 가깝게 너비방향의 길이나 격자 수를 제한하였기 때문에, 3D 유동구조를 확인하는데 다소 문제가 있다. 이러한 결과는 후향 계단의 너비 길이에 따른 층류 유동구조의 변화를 검토한 Chiang 등⁽¹³⁾의 연구에서도 확인할 수 있다. 그러므로 본 계산결과와 검증의 위하여 기존의 2D DNS 결과와 비교하는 것은 타당할 것으로 판단된다. Fig. 3(b)는 $Re=1,000$ 에서 주 유동방향에 대한 평균유속의 단면분포를 나타낸 것으로서, Guerrero 등⁽¹⁴⁾과 Chiang 등의 DNS 결과와 비교하였다. 그림에서와 같이 평균 유속분포는 기존 계산결과와 매우 잘 일치하고 있다. 즉 음의 유속의 분포를 통해 스텝 이후의 재순환 유동 및 상판의 재순환 유동을 잘 예측함을 알 수 있다. 위 결과를 바탕으로 수치 알고리즘을 포함한 본 프로그램의 전반적인 예측 정확도를 확인할 수 있었다.

난류 재순환 유동에 대한 LES의 예측 성능을 검토하기 위하여, Fig. 4~5는 $Re=5,100$ 과 22,100에 해당되는 Jovic 등⁽³⁾과 Pitz 등⁽⁴⁾의 실험결과와 LES

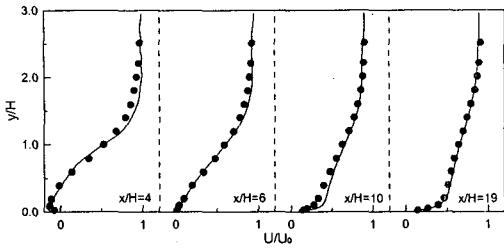


Fig. 4 Streamwise mean velocity profiles for $Re=5,100$ (solid circle: Exp. by Jovic et al., line: LES result)

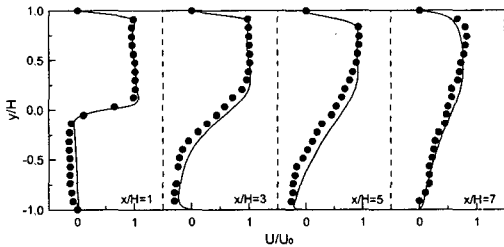


Fig. 5 Streamwise mean velocity profiles for $Re=22,100$ (solid circle: Exp. by Pitz et al., line: LES result)

결과를 각각 비교한 것이다. Fig. 4는 $Re=5,100$ 의 조건에서 평균유속에 대한 LES 결과와 실험결과를 비교한 것으로서, x - y - z 방향에 대한 계산영역은 $30H \times 6H \times 4H$ ($H=8.0\text{mm}$)이며, 격자는 $180 \times 57 \times 32$ 개가 사용되었다. Table 1에 제시된 바와 같이 재부착점의 위치는 실험 및 Le 등⁽¹⁵⁾의 DNS 결과보다 다소 과대 예측하고 있으나, 단면 유속분포의 비교를 통해 유동장의 평균정보를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 또한 본 논문에 제시하지는 않았지만, Friedrich 등⁽¹⁶⁾의 실험과 Le 등의 DNS 연구에서 확인된 바와 같이 스텝 근처에서 주 재순환 유동과 반대방향의 2차 재순환 유동이 발생됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 높은 Re 수의 난류조건에서 LES의 성능 검토를 위하여, $Re=22,100$ 에 대한 결과로서, x - y - z 방향에 대한 계산영역은 $17.1H \times 2H \times 3H$ ($H=25.4\text{mm}$)이며, 격자는 $187 \times 80 \times 32$ 개가 사용되었다. Re 수가 증가함에 따라 $Re=5,100$ 의 경우보다 실험과의 오차는 비교적 증가하였으나, 난류 재순환 유동에 대한 평균정보를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 또한 재부착점 위치의 예측에 대하여, Table 1에 제시된 바와 같이 LES 결과는 $6.9H$ 로서 실험결과($7.0H$) 및 Weller 등⁽¹⁷⁾의 LES 결과($7.1H$)와 매우 유사한 값을 보여주고 있다. 위 결과로부터 난류 재순환 유동에 대한 본 LES의 예측 성능은 비교적 우수함을 확인할 수 있으며,

Table 1 The locations of reattachment point for the $Re=5,100$ and $22,100$

| | $Re=5,100$ | $Re=22,100$ |
|---------------------|------------|-------------|
| Experiment result | 6.00H | 7.0H |
| Another num. result | 6.28H | 7.1H |
| Present LES result | 6.60H | 6.9H |



Fig. 6 Instantaneous iso-contour of streamwise velocity (6m/s) using (a) LES and (b) unsteady RANS for $Re=22,100$

확인된 실험결과와의 오차는 초기 유속 및 난류조건에 대한 정확성 및 아격자 모델의 성능 등에 의해 발생된 것으로 추측된다. 이들에 대한 정확한 규명은 추가적으로 진행 중에 있다.

Fig. 6은 LES의 중요한 특징인 비정상 현상에 대한 모사 성능을 검토하기 위하여, $Re=22,100$ 의 유동에 대한 LES와 unsteady RANS의 순간적인 유속 iso-contour(6m/s) 결과를 도시한 것이다. RANS의 경우에, 3D 및 비정상 조건이 고려되더라도, 유속은 공간적으로 균일한 분포를 보이고 있다. 반면에 LES는 공간적으로 불규칙한 3D 특성을 잘 보여주고 있다. 즉 평균화된 기법으로부터 발전된 RANS는 본질적으로 비정상 난류 유동을 모사하기에는 많은 한계가 있음을 확인할 수 있다. 이는 향후 실용 연소장에서 비정상 효과가 중요시 되는 화염 불안정성의 해석을 위한 LES의 필요성을 단적으로 보여주고 있는 결과라고 할 수 있다.

4.3 덤프 선회 연소기의 유동 검토

덤프 연소기에서 비선회 및 선회에 의한 유동특성을 검토하기 위하여 Fig. 7은 축방향의 유속분포 및 벡터를 도시한 것이다. 실선은 축방향 유속이 0인 부분을 나타낸 것으로, 코너 부분의 CRZ (corner recirculation zone)과 중심에서 발생하는 도넛형상의 CTRZ (central toroidal recirculation zone)을 의미한다. 비선회 유동장(SN=0)에서 급격한 확대에 의한 박리 유동으로 CRZ가 형성됨을 볼 수 있다. 이때 재부착점의 발생위치는 Ahmed 등⁽⁵⁾과 Pennucci⁽¹⁸⁾의 실험결과($x=8.0H$)와 정확히 일치한다.

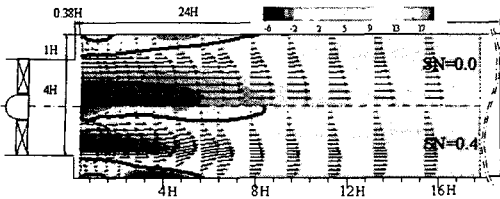


Fig. 7 Steady axial velocity contours with swirl number

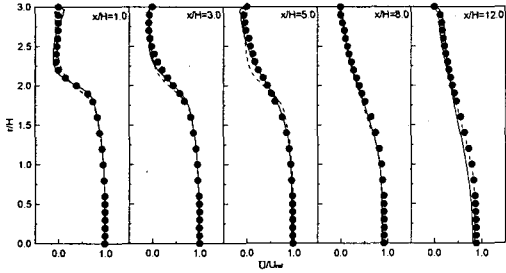


Fig. 8 Axial velocity profiles for SN=0.0 (symbol: exp., solid-line: LES, dot-line: RANS)

또한 코너 근처에서 CRZ와는 반대방향으로 2차 재순환 유동이 발생되는데, 이러한 현상은 앞에서 언급되었던 후향 계단의 난류 유동에서 확인된 바 있다. 반면에 선회 유동장에서는 코너 근처의 CRZ와 2차 재순환 영역뿐만 아니라, 중심부에서 CTRZ가 생성됨을 알 수 있다. 예측된 CTRZ의 크기는 축방향 및 반경방향의 최대 길이로 비교해 볼 때 $x=8.5H$, $r=0.6H$ 로서, 실험결과($x=7.9H$, $r=0.6H$)와 매우 유사함을 알 수 있다. 코너 근처의 재부착점 위치는 $x=5.8H$ 로서 비선회에 비해 상당히 작은 값을 갖으며, 실험결과($x=4.0H$)와 비교할 때 다소 크게 예측하고 있으나, 선회 유동의 특성을 비교적 잘 묘사하고 있음을 확인할 수 있다.

평균 유동장에 대한 LES 예측 성능을 보다 자세히 검토하기 위하여 Fig. 8~9는 대표 축방향 길이에 대한 유속 성분을 실험결과 및 RANS 결과와 비교한 것이다. Fig. 8은 비선회 유동장의 축방향 평균 유속을 도시한 것이다. 단면의 유속 분포는 앞에서 언급되었던 후향 계단의 난류 유동과 매우 유사한 분포를 보이고 있으며, LES 및 RANS의 결과 모두 이 경향을 비교적 정확하게 묘사하고 있다. LES와 RANS의 결과를 보다 구체적으로 비교하면, 중심근처에서는 두 계산 모두 실험결과를 잘 예측하고 있다. 그러나 RANS의 경우, 높은 속도 구배가 존재하는 $r=2.0H$ 근처에서 실험결과와 다소 차이를 보이는 반면, LES에서는 매우 정확한 예측이 이루어지고 있다. 즉 비선회 유동장의 경우에, LES와 RANS 모두 실험결과를 비교적 잘 묘사하고 있으나, LES가 RANS에 비해 보다 좋

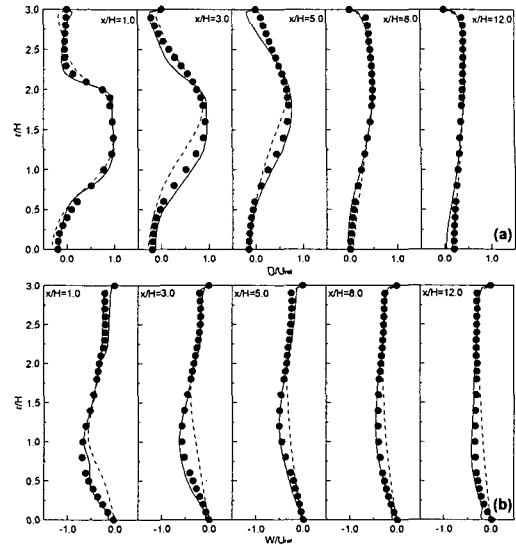


Fig. 9 Axial (a) and azimuthal (b) velocity profiles for SN=0.4 (symbol: exp., solid-line: LES, dot-line: RANS)

은 예측 결과를 보임을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 선회수가 0.4인 유동장에 대한 축방향 (a) 및 원주방향(b)의 평균 유속을 도시한 것이다. Fig. 9(a)에서, 축방향 길이 $x=1.0H\sim 5.0H$ 의 범위에 해당되는 상류에서 CRZ의 과대 예측을 제외하고 LES 결과는 실험결과를 비교적 잘 예측하고 있다. 그러나 RANS의 경우는 최대 유속의 위치 및 분포에서 실험결과와 상당한 차이를 보이고 있다. 또한 중심근처의 유속이 0인 반경, 즉 CTRZ의 폭의 크기가 상당히 과대 예측됨을 알 수 있다. 유동분포가 비교적 균일해지는 $x=8.0H$ 이상의 하류에서는 LES와 RANS 모두 비교적 양호한 예측 결과를 보이고 있다. Fig. 9(b)의 원주방향에 대해, LES결과는 실험결과를 매우 잘 예측하고 있다. 그러나 RANS의 경우, 선회유속의 최대치뿐만 아니라 공간분포에 대해 실험결과와 상당한 오차를 보이고 있다. 실용 연소장에서의 선회효과는 화염의 형상을 크게 변화시킬 뿐만 아니라 연료/공기의 혼합 및 화염의 신장율(stretching rate)에 영향을 준다고 알려져 있다. 따라서 LES를 이용한 선회효과의 정확한 예측은 실용 연소장 해석측면에서 매우 유용할 것으로 기대된다.

Fig. 10은 덤프 연소기에서 LES의 비정상 현상의 예측 성능을 검토하기 위하여 비선회 유동조건에서 시간에 따른 원주방향의 와도 분포와 축방향 유속이 음의 값을 갖는 영역(blue contour)을 도시한 것이다. 그림에서 연소기 입구의 급격한 확장으로 인하여 와동이 전단층 영역에서 생성되기 시

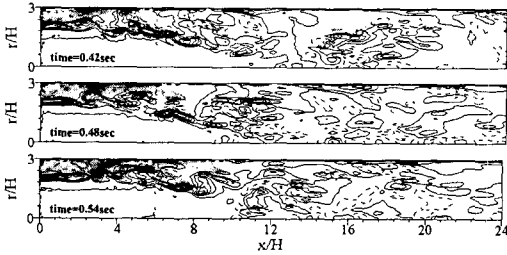


Fig. 10 Snapshot of velocity contour of corner recirculation region and azimuthal vorticity for SN=0.0

작하여 하류로 전달되는 과정을 잘 묘사하고 있다. 또한 벽면 근처에서 CRZ의 형상이 시간에 따라 크게 변화되고 있음을 보여주고 있다. CRZ 및 CTRZ는 고온 생성물의 재순환을 통해 화염의 안정성을 개선시키는 역할을 한다. 따라서 이들의 순간적인 거동은 화염의 안정성 및 연소장 내의 압력변동과 밀접한 관계를 갖게 되며, 향후 실용 연소장의 화염 불안정성 및 연소 소음의 예측에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

비반응 난류 유동장에 대한 LES의 예측 성능을 검토하기 위하여 후향 계단의 재순환 및 덤프 연소기의 선회 유동에 대한 계산을 수행하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) LES 수행 시 막대한 계산시간을 줄이기 위하여 분산 메모리 형태의 16개 프로세서를 갖는 병렬 클러스터를 구축하였으며, 최대 12.13배의 속도 향상율과 75%의 병렬효율을 얻을 수 있었다.
- (2) 후향 계단의 층류 유동에 대한 DNS 수행 결과, 기존의 실험 및 수치결과를 매우 잘 예측하였으며, 이를 통해 본 프로그램의 전반적인 예측 정확도를 확인할 수 있었다. 또한 중간 및 높은 Re 수에 해당되는 난류 영역의 LES 결과는 평균 재순환 유동특성을 비교적 잘 예측함을 확인하였다.
- (3) 덤프 연소기의 LES 수행 결과, 비선회 유동의 경우에 LES 및 RANS 모두 평균 유동장을 거의 정확하게 예측하였으나, 선회 유동의 경우에 LES는 RANS에 비해 평균유속, CRZ 및 CTRZ의 특징을 보다 정확하게 예측하였다.
- (4) 후향 계단과 덤프 연소기에서 LES의 비정상 현상의 모사 성능을 검토하였으며, 이는 향후 실용 연소장에서 화염 불안정성 및 연소 소음 등의 해석에 매우 유용할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: R05-2003-000-10905-0). 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Poinso, T. and Veynante, D., 2001, *Theoretical Numerical Combustion*, Edwards.
- (2) Armaly, B. F., Durst, F., Pereira, J. C. F. and Schonung, B., 1983, "Experimental and Theoretical Investigation of Backward-Facing Step Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 127, pp. 473~496.
- (3) Jovic, S. and Driver, D. M., 1994, "Backward-Facing Step Measurement at Low Reynolds Number, $Re_b=5000$," *NASA Tech. Mem.* 108807.
- (4) Pitz, R. W. and Daily, J. W., 1983, "Combustion in a Turbulent Mixing Layer Formed at a Rearward-Facing Step," *AIAA Journal*, Vol. 21, No. 11, pp. 1565~1570.
- (5) Ahmed, S. A. and Nejad, A. S., 1992, "Velocity Measurements in a Research Combustor Part I: Isothermal Swirling Flow," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 5, pp. 162~174.
- (6) Nejad, A. S., Vanka, S. P., Favaloro, S. C., Samimy, M. and Langefeld, C., 1989, "Application of Laser Velocity for Characterization of Confined Swirling Flow," *Transactions of the ASME*, Vol. 11, pp. 36~45.
- (7) Lin, C. A., 1998, "Modeling a Confined Swirling Coaxial Jet," *Center for Turbulence Research, Annular Research Briefs*, pp. 211~219.
- (8) Menon, S., Yeung, P. K. and Kim, W. W., 1996, "Effect of Subgrid Models on the Computed Interscale Energy Transfer in Isotropic Turbulence," *Computers and Fluids*, Vol. 25, No. 2, pp. 165~180.
- (9) Kim, W. W. and Menon, S., 1995, "A New Dynamic One-Equation Subgrid-Scale Model for Large-Eddy Simulation," *AIAA-95-0356*.
- (10) MacCormack, 1969, "The Effects of Viscosity in Hyper-Velocity Impact Cratering," *AIAA Paper 69-354*.
- (11) Poinso, T. J. and Lele, S. K., 1992, "Boundary Conditions for Direct Simulations of Compressible Viscous Flows," *J. Computational Physics*, Vol. 101, pp. 104~129.
- (12) <http://www.cd-adapco.com/>
- (13) Chiang, T. P. and Sheu, T. W., 1999, "A Numerical Revisit of Backward-Facing Step Flow Problem," *Phys. Fluids*, Vol. 11, No. 4, pp. 862~874.
- (14) Guerrero, J. S. P. and Cotta, R. M., 1996, "Benchmark Integral Transform Results for Flow over a Backward-Facing Step," *Comput. Fluids*, Vol. 25, pp. 527~540.
- (15) Le, H., Moin, P. and Kim, J., 1997, "Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow over a Backward-Facing Step," *J. Fluid Mech.*, Vol. 330, pp. 349~374.
- (16) Friedrich, R. and Arnal, N., 1990, "Analysing

- Turbulent Backward-Facing Step Flow with the Lowpass-Filtered Navier-Stokes Equations," *J. Wind Enging Indust. Aerodyn.*, Vol. 35, pp. 101~128.
- (17) Weller, H. G., Tabor, G., Gosman, A. D. and Furebby, C., 1998, "Application of Flame-Wrinkling LES Combustion Model to a Turbulent Mixing Layer," *Proceeding of the Combustion Institute*, Vol. 27, pp. 899~907.
- (18) Pennucci, N. A., 1974, "Parametric Evaluation of Total Pressure and Recirculation Zone in a Sudden Expansion Combustor," *Thesis, Air Force Inst. Technology*.