연소실 내 난류유동장 특성에 대한 아격자 모델을 사용한 LES 모사 및 관련인자 영향 평가

남승만 · 이계복[†]

충북대학교 기계공학부

(2012년 5월 17일 접수, 2012년 9월 14일 수정, 2012년 9월 14일 채택)

Large Eddy Simulation and Parametric Study of Turbulent Flow Characteristics in the Internal Combustion Chamber using SGS Model

Seung Man Nam · Kye Bock Lee[†]

School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

(Received 17 May 2012, Revised 14 September 2012, Accepted 14 September 2012)

요 약

큰 에디 모사(LES)는 복잡한 연소실 유동에서 RANS 모델과 비교해 난류 유동장에 대해 모델의 보편성과 더 정확한 결과를 제공하기 때문에 점차적으로 사용이 증대되고 있다. 내연 기관의 연소실 내 난류 유동장 해석을 큰 에디 모사를 사용하여 수행하였다. 이산화 방식, 초기 조건, 시간 간격과 SGS 모델과 같은 모델과 수치 인자에 따른 영향을 평가하였다. SGS 모델을 사용한 LES 모사는 실험치와 유사한 결과를 보여주었다.

주요어 : 큰 에디 모사, 난류, 아격자 모델, 연소실 유동

Abstract - Large eddy simulation (LES) is increasingly used as a tool for studying the dynamics of turbulence in combustion chamber flows due to the promise of wider generality and more accurate results compared to Reynolds averaged Navier-Stokes(RANS) models. This study presents the appropriate subgrid-scale(SGS) model in LES for predicting the turbulent flow field in the internal combustion engine. The study of the effects of model and numerical parameters such as discretization scheme, initial condition, time step and SGS model was performed. The results of LES using the SGS model were found to be in the good agreement with experimental data.

Key words : large eddy simulation(LES), turbulence, SGS model, combustion chamber flow

1. 서 론

최근 자동차 엔진 연소 기술은 석유고갈로 인한 자원문제와 배기가스로 인한 환경문제 때문에 고효율과 저배출성이 중요시되고 있다. 엔진 실린더 내부 유동은 3차원적이며, 비정상적인 난류 특성을 갖고 있어

매우 복잡하기 때문에 실험적 연구를 통해 유동 특성을 명확하게 규명하기가 쉽지 않다. 따라서 연료와 공기의 혼합, 연소 등에 영향을 미칠 수 있는 흡입 포트 형상이나 연소실 형상 설계는 그 목적에 따라 매우 단순화된 이론 해석 또는 오랜 시간에 걸쳐 많은 노력을 필요로 하는 실험적 경험에 의존해 오고 있다.⁽¹⁾

난류 연구에 있어서 직접 수치 모사는 향후 점점 중요한 위치를 차지하게 될 것으로 예상된다.

[†]To whom corresponding should be addressed.

School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

Tel : 043-261-3232 ; E-mail : kblee@chungbuk.ac.kr

DNS(Direct Numerical Simulation)와 LES는 비교적 최근에 개발된 난류 유동 해석 방법이다. DNS와 LES는 유체 유동의 지배방정식인 Navier-Stokes 방정식을 비정상, 3차원으로 해석해야 하기 때문에 종래의 수치모사와는 비교가 되지 않을 정도의 큰 CPU와 메모리를 요구하게 된다. 그러나 이 방법을 사용하는 경우, 난류의 시간과 공간에 따른 변화 및 유동구조를 제대로 파악할 수 있는 큰 장점을 갖게 된다.

최근 들어, DNS와 LES는 유동 해석에 그치지 않고 난류 제어 기법 개발, 유동 소음 해석, 열전달, 연소 등에도 활발하게 적용되고 있다. DNS와 LES의 응용 가능성은 향후 더욱 커지리라 생각된다.

난류 유동장 해석을 위한 수치해석 방법은 크게 레이놀즈 평균된 Navier-Stokes 방정식을 이용한 해석 방법과 직접 수치 모사 그리고 큰 에디 모사 방법으로 나눌 수 있다. 난류 유동장 해석을 위한 수치해석 방법으로 잘 알려진 레이놀즈 평균된 Navier-Stokes 방정식을 이용한 난류 유동 해석은 박리점이 시간에 따라 움직이는 유동, 곡률 효과가 심한 유동, 천이 경계층유동 등과 같은 유동장을 제대로 예측하지 못하고 있으며, 또한 이 방법을 통하여 계산된 속도와 압력, 레이놀즈 응력 등은 시간과 공간에 따라 변화하는 유동 구조나 현상을 파악하는 데 충분한 자료가 되지 못한다. 그런 이유로, 최근에는 직접 수치 모사 또는 큰 에디 모사 방법에 대한 관심이 증대하고 있는 실정이다.

난류모델들은 난류에 의한 변동량들을 시간 평균하여 얻고 있음에 비해 LES에서는 시간평균을 이용하지 않기 때문에 비정상 유동에서의 응용이 가능하다. LES는 지배방정식을 필터링하여, 유동장을 격자로 해석할 수 있는 성분과 그 이하의 작은 성분으로 분리하여 전자는 직접 계산하고 후자는 모델화하여 해석하는 방법이다. 큰 스케일은 에너지 스펙트럼의 비등방성 부분을 대표하며 대부분의 에너지를 포함하고 있다. 반면 작은 스케일은 등방성을 가지는 것으로 알려져 있다. 따라서 SGS항이 모델화되어지더라도 아격자 스케일에 포함되어 있는 에너지가 적다면 그 결과는 상당히 정확하다고 볼 수 있다.

LES는 대부분의 난류 에너지를 운반하는 큰 스케일(Large-scale)에 대해서는 직접 해석하고, 에너지가 소산하는 작은 스케일(Small-scale)에 관해서는 모델화하여 유동장을 해석하는 방법으로, 연소과정의 비정상인 난류거동을 효과적으로 예측할 수 있다. 일반

적으로 Smagorinsky 모델을 널리 사용되고 있으며, 근래에 Dynamic SGS 모델이 제안되어 저 레이놀즈 수 영역에 대한 합리적인 예측결과를 얻고 있다. 그러나 복잡한 형상의 연소실 내부 유동에 관한 정확한 해석을 행하기에 아직도 많은 불확실성을 갖고 있다고 생각된다. LES(Large Eddy Simulation) 기법은 SGS 모델을 필요로 하며, 현재 가장 널리 쓰이는 모델은 동적 Smagorinsky 모델⁽²⁾⁻⁽⁴⁾ (Dynamic Smagorinsky Model: DSM)이다.

본 연구에서는 연소실 내 난류 혼합 유동을 네 가지 SGS모델을 사용하여 예측한 결과를 실험결과⁽⁵⁾와 비교하여 각 모델의 특성과 장단점을 평가하였고, 실린더 내의 축방향 평균속도와 난류속도 등, 유동특성을 해석하였다.

2. 수치 해석 방법

2-1 수치해석과 지배방정식

3차원 형상의 실린더 내부유동 난류특성을 상용 CFD 코드인 FLUENT 6.3.26⁽⁶⁾을 사용하여 수치적으로 해석하였다. 입구 경계조건은 입구에서 모든 종속 변수들의 값들의 알고 있다는 Dirichlet 형태를 사용한다. 벽면에서 속도 경계조건은 점착조건으로 주어진다. 점착조건이 적용되는 벽면에서는 $u = w_{wall}$ 로 표현할 수 있는데 이것은 z방향(Axial direction)으로 w_{wall} 의 속도로 움직이는 것을 의미한다.

격자생성은 수치해석 시 많은 시간과 노력이 요구되는 부분으로 격자생성이 부적절하게 되었을 경우에는 수치 확산 등을 발생시킴으로써 해의 부정확성을 유발시키고 어떤 경우에는 수치해를 구하지 못하는 경우도 발생시키기 때문에 많은 주의를 요하게 된다. 유동장의 격자생성은 Gambit 2.4.6 비구조격자계를 사용하였다. 비압축성 유동에 관한 공간 필터 조작을 수행한 LES 지배방정식은 다음과 같이 나타낸다.

2-2 LES의 지배방정식

비압축성 유동에 관한 공간 필터 조작을 수행한 LES 지배방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\tau_{ij} + 2\nu \overline{S_{ij}}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{T}}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

위 식에서 $\bar{}$ 는 공간에 대한 평균을 의미하며, 하첨자 i, j 는 공간에 대한 텐서표기, ν 는 동점성계수, α 는 열확산계수, τ_{ij} 는 SGS 응력텐서이고 q_j 는 열 플럭스이다. LES 모형에서는 유동 내의 속도장을 정의하기 위하여 다음과 같이 속도성분을 분류하여 해석한다.

$$u_i \equiv \bar{u}_i + u_i' \quad (4)$$

식 (4)에서 $\bar{u}_i$ 는 공간에 대하여 충분히 여과되어 격자 크기로 계산이 가능한 속도성분을 의미하며, u_i' 는 격자의 크기보다 작은 범위에 존재하는 속도성분을 의미한다. $\bar{u}_i$ 는 보편적으로 가우시안 필터 (Gaussian filter)를 이용하여 공간에 대하여 여과된다.

여기서, $\bar{S}_{ij}$ 는 변형속도 텐서의 격자 스케일 성분이며

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

를 나타낸다.

위 식을 이용하면 격자 스케일 이하의 와(eddy)를 풀지 않아도 되는 대신에 그 효과를 나타내는

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (6)$$

가 주어질 필요가 있다.

일반적으로,

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= \overline{(u_i + u_i')(u_j + u_j')} - \bar{u}_i \bar{u}_j \\ &= \overline{u_j u_j} - \bar{u}_j \bar{u}_j + \overline{(u_i' u_j + u_i u_j')} + \overline{u_i' u_j'} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $()'$ 은 필터된 값에 대한 변동량을 정의한다. 위 식의 우변 첫 번째와 두 번째 항은 Leonard 응력항(L_{ij}), 세 번째 항은 Cross 응력항(C_{ij}), 그리고 마지막 항은 SGS Reynolds 응력 항(R_{ij})을 각각 나타낸다. Leonard⁽⁷⁾응력 L_{ij} 은 격자 스케일 속도에 필터를 걸어 구할 수 있지만, C_{ij} 와 R_{ij} 는 모델이 필요하다.

본 연구에서는 LES에 사용되는 Smagorinsky⁽⁸⁾(이하 Smag이라 한다), Dynamic Smagorinsky (이하 Dy-Smag이라 한다), Wall-adapting Local Eddy-viscosity 모델⁽¹¹⁾(이하 WALE이라 한다)과 Dynamic Kinetic Energy SGS모델⁽¹²⁾(이하 DKESM이라 한다)을 사용하여, 복잡한 형상을 갖는 실린더 내부의 난류 유동장에 대하여 각 난류모델의 특성과 장단점을 평가하였다.

2-2-1 Smagorinsky 모델

LES 해법에서 널리 채택되고 있는 SGS 난류모델로서 Smagorinsky⁽⁸⁾모델을 들 수 있다.

이 모델에서는 SGS 난류모델의 와점성계수 ν_t 만을 택하여 난류에 의한 운동량 수송을 평가한다. SGS 모델에서는 SGS 응력 τ_{ij} 를 다음과 같이 모델화한다.

$$\tau_{ij} = 2\nu_t \bar{S}_{ij} \quad (8)$$

여기서, ν_t 는 SGS 응력의 와점성 계수이고, $\bar{S}_{ij}$ 는 격자스케일 성분의 변형텐서이며 Smagorinsky의 모델은 아래의 식과 같이 단순한 형태로 표현되는 와점성계수를 제안하였다.

$$\nu_t = L_s^2 \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} = L_s^2 |\bar{\Omega}| \quad (9)$$

여기서, $\bar{\Omega}$ 는 와도를 나타내며, 길이 스케일 L_s 는 Takakura et al⁽⁹⁾에 의해 다음 식으로 산출한다.

$$L_s = C_s \min(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \quad (10)$$

여기서, C_s 는 Smagorinsky계수로서 평판 난류 유동에 적합한 0.1을 사용한다. $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 는 각각 x, y, z 방향의 격자간격이다.

2-2-2 Dynamic Smagorinsky 모델

전술한 Smagorinsky⁽⁸⁾모형은 C_s 를 일정한 값으로 고정시키게 된다. 이와 같은 해석은 전 유동계에 걸쳐 난류의 강도가 동일하다는 가정에 기초한다. Germano 등⁽²⁾은 Smagorinsky 계수 C_s 의 변화를 공간에 따라 예측할 수 있도록 제안된 Dynamic SGS 모델에서는, 계산격자에 따라 가정된 격자 필터에 대해 그보다 큰 크기의 테스트 필터를 도입해서 SGS 모델 정수를 평가한다. 격자 크기보다 큰 고주파수의 변동을 제거하고 격자 스케일보다 훨씬 큰 격자로 보다 작은 주파수

까지 필터된 부드러운 분포를 이용해 C_s 를 구한다.

격자 필터와 테스트 필터에 의해 격자 스케일을

$$\bar{u} = \overline{G(u)}, \quad \tilde{u} = \widetilde{G(u)} \quad (11)$$

로 정의하면 이들에 대한 각각의 SGS 응력은

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j} \quad (12)$$

$$T_{ij} = \widetilde{\overline{u_i u_j}} - \widetilde{\overline{u_i}} \widetilde{\overline{u_j}} \quad (13)$$

로 주어진다. 여기서 각 SGS 응력은 미지량이지만, 다음과 같은 양은

$$L_{ij} = T_{ij} - \tilde{\tau}_{ij} = \widetilde{\overline{u_i u_j}} - \widetilde{\overline{u_i}} \widetilde{\overline{u_j}} \quad (14)$$

격자 스케일 양만으로 주어지는 계산 가능한 값이다. SGS 응력 τ_{ij} , T_{ij} 에 대해서 Smagorinsky의 모델을 적용하면

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2 \overline{C} \overline{\Delta}^2 |\overline{S}| \overline{S}_{ij} \quad (15)$$

$$T_{ij} - \frac{1}{3} T_{kk} \delta_{ij} = -2 \widetilde{\overline{C}} \widetilde{\overline{\Delta}}^2 |\widetilde{\overline{S}}| \widetilde{\overline{S}}_{ij} \quad (16)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 $\overline{\Delta}$, $\widetilde{\overline{\Delta}}$ 는 격자 필터 및 테스트 필터의 폭 또는 $\overline{C}$, $\widetilde{\overline{C}}$ 는 각각의 필터에 대한 모델 상수이다.

식(15),(16)을 식(14)에 대입해서 다음 식을 얻는다.

$$L_{ij}^* = -2(\overline{C} \overline{\Delta}^2) M_{ij} \quad (17)$$

$$L_{ij}^* = L_{ij} - \frac{1}{3} L_{kk} \delta_{ij} \quad (18)$$

$$M_{ij} = \alpha^2 |\widetilde{\overline{S}}| \widetilde{\overline{S}}_{ij} - |\overline{S}| \overline{S}_{ij} \quad (19)$$

$$\alpha^2 = (\widetilde{\overline{C}} / \overline{C}) (\widetilde{\overline{\Delta}} / \overline{\Delta})^2 \quad (20)$$

종래 S 의 동적 Smagorinsky 상수를 C_s 로 표현하면

$$\alpha = \frac{(\widetilde{\overline{C}} \widetilde{\overline{\Delta}})^2}{(\overline{C} \overline{\Delta})^2}, \quad C_s^2 = C \quad (21)$$

이 되며, 계수 α 는 형식적으로는 다른 필터 폭으로 정의되는 Smagorinsky 모델에서의 길이 스케일의 비

이다.

식(21)은 일반적으로는 스칼라 값 $(\overline{C} \overline{\Delta}^2)$ 에 대해 해를 갖지 않지만, Lilly⁽¹⁰⁾의 제안에 따르면 최소자승(least-square) 근사에 의해

$$(\overline{C} \overline{\Delta}^2) = - \frac{\langle L_{ij}^* M_{ij} \rangle}{\langle 2 M_{ij} M_{ij} \rangle} \quad (22)$$

로서 계산된다. 여기서, $\langle \rangle$ 는 앙상블 평균조작을 표시하고, 균질한 영역(평판 난류에서는 벽면에 평행한 면상)의 평균이 이용된다.

테스트 필터는 가우시안 필터(Gaussian filter)나 체적 필터가 가정된다. 어느 쪽도 필터폭 $\widetilde{\Delta}$ 에 의한 Taylor 전개로 평가하면

$$\tilde{u} = \tilde{u} + \frac{\widetilde{\Delta}^2}{24} \frac{\delta^2 \tilde{u}}{\delta x^2} + O(\widetilde{\Delta}^4) \quad (23)$$

로 근사된다. 따라서 테스트 필터의 차분식은 식(23)을 만족시키도록 정식화된다.

예를 들면, 등간격 격자에서는

$$\tilde{u}_i = \tilde{u}_i + \frac{\gamma^2}{24} (\overline{u_{i+1}} - 2\overline{u_i} + \overline{u_{i-1}}) \quad (24)$$

$\gamma = \widetilde{\Delta} / h$ (h : 격자간격)이다. 또 가우시안 필터(Gaussian filter)의 정의로부터, $\tilde{u} = \widetilde{G(u)}$ 에 대해 $\widetilde{\overline{\Delta}^2} = \widetilde{\Delta}^2 + \overline{\Delta}^2$ 로 산정할 수 있다.

2-2-3 Wall-adapting local eddy viscosity 모델

WALE 모델은 Nicoud와 Ducros⁽¹¹⁾가 제안한 것으로 와점성은 다음과 같다.

$$\mu_t = \rho \Delta_s^2 \frac{(S_{ij} S_{ij})^{3/2}}{(\overline{S_{ij} S_{ij}})^{5/2} + (S_{ij} S_{ij})^{5/4}} \quad (25)$$

$$\Delta_s = C_w V^{1/3} \quad (26)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} (\overline{g_{ij}^2} + \overline{g_{ji}^2}) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \overline{g_{kk}^2} \quad (27)$$

$$\overline{g_{ij}} = \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \quad (28)$$

모델계수로는 $C_w = 0.325$ 이다.

Fig. 1. Configuration of axisymmetric piston - cylinder assembly

2-2-4 Kinetic energy SGS 모델

Kim과 Menon⁽¹²⁾이 제안한 것으로 SGS 운동 에너지는 다음 아래와 같다.

$$k_{sgs} = \frac{1}{2} (\overline{u_k^2} - (\overline{u_k})^2) \quad (29)$$

SGS 응력은 다음과 같다.

$$\tau_{ij} - \frac{2}{3} k_{sgs} \delta_{ij} = -2 C_k k_{sgs}^{1/2} \Delta_f \overline{S_{ij}} \quad (30)$$

Sub-grid k 모델은 난류운동에너지, k 에 관한 지배방정식을 이용하여 형성한 모델로서 본 연구에서는 Kim 등⁽¹²⁾이 제시한 모델을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{k_{sgs}}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j k_{sgs}}}{\partial x_j} \\ = -\tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - C_\epsilon \frac{k_{sgs}^{3/2}}{\Delta_f} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k_{sgs}}{\partial x_j} \right) \end{aligned} \quad (31)$$

이며 소산항과 난류 점성항은 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon = C_\epsilon \frac{k_{sgs}^{3/2}}{\Delta_f} \quad (32)$$

$$\mu_t = C_k \Delta_f k_{sgs}^{1/2} \quad (33)$$

여기서, $C_k = 0.05$, $C_\epsilon = 1$ 그리고 $\Delta = V^{1/3}$ 이며 V 는 격자의 부피이다.

2-3 모델 엔진

2-4 격자계

전산유체 해석 시 계산결과와 정확도와 가장 밀접

Fig. 2. Computational mesh of a model engine

한 관계가 있는 것 중 하나가 바로 격자(Grid)이다. 그러므로 Fig.2에서와 같이 유동이 복잡하게 형성되는 곳의 유동을 좀 더 정확하게 파악하기 위하여 실린더 내를 몇 개의 영역으로 나누어 격자간격을 설정하였다.

본 연구에서는 Dynamic Mesh를 이용하여 엔진의 수치해석을 수행하였다. Dynamic Mesh 모델의 형태 변화는 각 영역 경계의 운동시간에 따라 바뀐다. 움직이는 경계(피스톤)를 갖는 영역에서 계산이 이루어져야 하므로, 피스톤의 움직임에 따라 수축, 팽창하는 좌표계를 취하였으며, 엔진의 피스톤 상하 운동은 Spring Based Smoothing Method와 Layering Method, Remeshing Method를 적용하여 구현하였다.

3차원 모터링 엔진 모델에서 사용된 격자(Grid)는 상사점에서 235,392개, 하사점에서 804,244개를 사용하였다.

3. 해석결과 및 검토

본 연구에서는 모델기관의 흡입과정을 비압축성, 비정상 유동으로 크랭크각도의 간격을 0.05° , 0.1° 로 계산하였으며, 기관의 회전수 200rpm, 유체는 공기로 이상기체로, 유체의 점성계수와 비열은 일정하다고 가정하였다. 지배방정식으로 Navier - Stokes 방정식을 채택하고 비구조 격자계(unstructured mesh)를 구성하였다. 경계조건으로 벽에서 점착 경계조건을 부여하고 피스톤 평균속도는 $V=0.4\text{m/s}$ 의 일정한 속도로 레이놀즈수는 입구속도와 실린더 직경으로 계산되며 압력조건은 1atm, 온도는 300K이며 이때 실린더의 직경은 75mm이고 레이놀즈수 2000이다.

3-1 LES SGS 모델

Fig.3~Fig.10은 축방향 평균속도와 난류속도를 나타낸다. 모든 속도는 피스톤 평균속도 $V_p=0.4\text{m/s}$ 로

Table 1. Condition of computed cases used for the SGS model

	Model	Time step	Pressure-Velocity Coupling	Initial /B.C	Discretization
case 1	Dy-Smag	CA 0.1	SIMPLE	Velocity	BCD
case 2	Dy-Smag	CA 0.1	SIMPLE	Velocity	Power-Law
case 3	Dy-Smag	CA 0.1	SIMPLE	Pressure	Power-Law

Fig. 3. Radial profile of mean axial velocity at 36°

무차원 하였다. Morse 등⁽⁵⁾의 실험에서 측정된 축방향 평균속도 및 난류속도와 비교하기 위해 해석할 모든 경우에 대해 실험결과와 같은 위치인 실린더 헤드로부터 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70mm 떨어진 단면에서의 해석결과를 나타내었다.

3-2 축방향 평균속도 및 난류속도에 대한 이산화방법과 초기조건의 영향

Fig.3 및 Fig.4는 각각 크랭크 각 36° 및 144°에서의 축방향 평균속도이다. 크랭크 각 36°에서는 밸브로 유입되는 상당히 높은 속도의 유동에 의하여 중심 축에서 떨어진 위치에서 최대치를 보이고 있으며, 특히 경계 중앙차분(Bounded Central Differencing 이하 BCD이라 한다)을 사용한 경우에는 실험치와 많은 차이를 나타내고 있다. 크랭크 각 144°에서는 거의 비슷한 경향을 나타낸다. 따라서 초기 속도경계조건과 벽속도식을 사용함이 실험치와 전반적으로 가장 근접한 경향을 보이고 있다.

Fig.5 및 Fig.6은 각각 크랭크 각 36° 및 144°에서의 축방향 난류속도이다. 여기서 난류속도는 피스톤 평균속도로 무차원 하였다. 크랭크 각 36°에서 BCD를 사용한 경우, 난류속도는 실린더 헤드로부터

Fig. 4. Radial profile of mean axial velocity at 144° **Fig. 5.** Radial profile of turbulent axial velocity at 36° **Fig. 6.** Radial profile of turbulent axial velocity at 144°

10mm에서는 실험치와 차이를 보이며 벽속도식을 사용한 경우가 실험치와 가장 유사한 분포를 보여준다. 초기 압력경계조건을 사용한 경우는 난류속도 예측에서 가장 나쁜 결과를 나타내었다. 크랭크 각 36°와 144°에서의 축방향 평균속도와 난류속도를 종합적으로 볼 때 초기 속도경계조건과 벽속도식을 사용하는 것이 실험치와 전반적으로 가장 근접한 경향을 보이고 있다.

3-3 축방향 평균속도 및 난류속도에 대한 SGS 모델, 시간간격, 알고리즘의 영향

Fig. 7과 Fig. 8는 이산화방법은 맥승도식, 초기 속도 경계조건을 사용한 경우에 대해 SGS 모델, 시간 간격, 알고리즘을 달리하여 크랭크 각 36° 및 144° 에서의 축방향 평균속도를 나타내었다.

Case 5와 6을 비교하면 pressure-velocity coupling 방법에 의한 영향은 크지 않는 것을 알 수 있다. 또한 나머지 경우를 종합하면 SGS 모델, 시간 간격에 의한 영향은 연소실 내의 난류 유동특성 예측 결과에서 큰 차이를 보이지 않았다.

Fig. 9 및 Fig. 10은 각각 크랭크 각 36° 및 144° 에서의 축방향 난류속도이다. 크랭크 각 36° 의 경우를 보면, 흡입포트(port)에서 높은 난류에너지의 유입과 속도구배에 의한 난류에너지의 생성으로 인하여, 중심축에서 23mm 정도 위치에서 최대치를 나타내고 있지만, 실린더 헤드로부터 20mm에서는 실험치와

다소 차이를 보이고 있다. 특히 흡입과정 중반인 크랭크 각 144° 의 경우 전체적으로 실린더 내의 실린더 헤드로부터 40mm 영역에 있어 다소 떨어지는 예측 결과를 나타내고 있다. 최대치는 하사점으로 감에 따라 평탄한 분포를 하고 있음을 알 수 있으며, 모든 경우에서 실험결과와 유사한 경향을 보여주고 있다.

Table 2. Condition of numerical analysis used for the SGS model

	Model	Time step	Pressure - Velocity Coupling	Initial /B.C	Discretization
case 4	Smag	CA 0.1	PISO	Velocity	Power-Law
case 5	Dy-Smag	CA 0.1	SIMPLE	Velocity	Power-Law
case 6	Dy-Smag	CA 0.05	PISO	Velocity	Power-Law
case 7	DKESM	CA 0.05	PISO	Velocity	Power-Law
case 8	WALE	CA 0.05	PISO	Velocity	Power-Law

Fig. 7. Fig. 8. Radial profile of mean axial velocity at 36°

Fig. 9. Radial profile of turbulent axial velocity at 36°

Fig. 8. Radial profile of mean axial velocity at 144°

Fig. 10. Radial profile of turbulent axial velocity at 144°

Fig. 11. Streamlines of prediction of the LES model(left) at 36° CA compared with Morse et al.(right)

Fig. 12. Streamlines of prediction of the LES model(left) at 90°CA compared with Morse et al.(right)

Fig. 13. Streamlines of prediction of the LES model (left) at 144°CA compared with Morse et al.(right)

3-4 Dynamic Smagorinsky SGS 모델로 해석한 연소실 내 난류유동장

Fig. 11와 Fig. 12 및 Fig. 13는 각각 크랭크 각 36°와 90° 및 144°에서의 Dynamic Smagorinsky SGS 모델로 해석한 연소실 내 유선(Streamline)이다. 그림에서처럼 회전을 갖는 2개의 링 형태의 와(eddy)가 생성되며, 입구에서의 강한 전단층의 영향을 받는 중심부 쪽의 와(eddy) 링이 보다 높은 강도를 갖게 된다. 이들 2개의 와(eddy) 링은 크랭크 각 144°에서는 또 다른 큰 와(eddy) 링이 형성되며, 실험결과와 비교해서 와(eddy)의 크기는 약간 다르지만 잘 일치함을 보여주고 작은 와(eddy)까지 잘 표현하고 있다. $k-\epsilon$ model을 사용한 경우에는 우측에 형성되는 한 개의 링만 모사되었다⁽¹³⁾.

4. 결 론

본 연구에서는 복잡한 형상을 갖는 연소실 내 난류유동장을 LES를 사용하여 해석하였다. 평균속도 분포, 최대 속도의 위치, 난류강도 등의 해석결과는 실험결과와 유사한 경향을 보여준다. 기존 SGS 난류모델에 대한 특성 평가를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) LES 난류모델을 이용한 경우가 박리(separation)현상, 재순환(recirculation)현상 등의 난류현상들이 복합적으로 작용하는 복잡한 난류장의 해석에 유용하다는 사실을 확인하였으며, 입구 경계조건은 속도조건을, 이산화 도식은 멱승도식(power-law scheme)을 사용한 경우가 실험치와 근접한 결과를 보이고 있다.
- 2) 멱승도식(power-law scheme)과 입구 조건으로 속도를 사용한 경우 SGS모델, 시간간격, 알고리즘은 난류 유동장 해석에서 큰 차이를 나타내지 않았다.
- 3) 연소실 내에는 회전을 갖는 2개의 링 형태의 와(eddy)가 생성되며, 재순환 영역의 강한 전단층의 영향을 받는 중심부 쪽의 와(eddy) 링이 보다 높은 강도를 갖게 된다. 이들 2개의 와(eddy) 링은 하사점(Bottom Dead Center: BDC)으로 갈수록 또 다른 큰 와(eddy) 링이 형성되고 와(eddy) 링의 강도에 따라 유동형태가 변하고 난류혼합이 촉진되고 있음을 확인하였고 실험결과와 거의 유사한 것을 알 수 있다.

4) LES 난류모델을 이용하여 축방향 속도성분의 계산 결과 유체는 밸브를 통해 연소실로 채트와 같이 분출되며, 유로면적이 최소가 되는 흡입밸브의 밸브목(throat)에서 최대속도를 갖고 실린더 내의 흡입유동은 중심축에서 23mm 정도 벽 쪽으로 이동한 위치에서 최대치를 보이며 실험결과와 거의 일치되는 것을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2011년도 충북대학교 학술연구지원 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Stoll, H., Durst, F., Peric, M., Pereira, J. C. F. and Scheuerer, G., "Study of Laminar, Unsteady Piston-Cylinder Flows", ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 115, pp.687-693, 1993.
2. Germano, M., Piomelli, U., Min. P. and Cabot, W. H., "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model", Physics of Fluids, A, Vol. 3, pp.1760-1765, 1991.
3. Zang, Y., Street, RL and Koseff, JR, "A Dynamic Mixed Sugrid-Scale Model and Its Application to Turbulent Recirculating Flows," Physics of Fluids, A, Vol. 5 No 12,, pp.3186-3195, 1993.
4. Moin, P., Squires, K., Cabot, W. and Lee, S., "A dynamic subgrid-scale model for compressible turbulence and scalar transport," Physics of Fluids A, Vol. 3, No. 5, pp. 2746-2757. 1991.
5. Morse, A. P., Whitelaw, J. H. & Yianneskis, M. "Turbulent flow measurement by Laser Doppler Anemometry in a motored reciprocating engine." Report FS/78/24. Imperial College Dept. Mech Eng, 1978.
6. FLUENT, Fluent 6.3 User's Guide, 2007.
7. Leonard, A., "Energy cascade in large-eddy simulation of turbulent fluid flow", Adv. Geophys., Vol 18, A, pp 237-248, 1974.
8. Smagorinsky, J., "General calculation experiments with the primitive equations. The basic experiment". Monthly Weather Review. Vol.91. pp.99-164. 1963.
9. Takakura, Y., Ogawa, S. and Ishiguro, T., "Turbulence Models for Transsonic Viscous Flow," AIAA paper, No 89-1952, 1989.
10. Lilly, D. K., "A Proposed Modification of the Germano Subgrid-Scale Closure Method", Physics of Fluids A, Vol. 4, No. 3, pp. 633-635. 1992.
11. Nicoud, F. and Ducros, F., "Subgrid-scale modelling based on the square of the velocity gradient tensor", Flow, Turbulence and Combustion, 62: pp 183-200, 1999.
12. Kim, W and Menon, S., "A new dynamic one-equation subgrid-scale model for large eddy simulation", In 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, 1995.
13. Ibrahim, Y, Refined turbulence models for simulation of IC-engine cylinder flows, Ph. D thesis, West Virginia University, WV, 2000.