

# LES에 의한 사각형 Bluff Body 주위 유동장 수치해석(I)

## Numerical Analysis on Flow Field Around a Bluff Body by LES(I)

장동식 · 이연원 · 도덕희 · 배대석 · 김남식

D. S. Jang, Y. W. Lee, D. H. Doh, D. S. Bae and N. S. Kim

**Key Words** : Large Eddy Simulation(대와동 모사), Smagorinsky SGS Model(Smagorinsky SubGrid Scale 모델), PIV(Particle Image Velocimetry 입자영상유속계), Reynolds Averaging Navier-Stokes Equation(Reynolds 평균 NS 방정식)

**Abstract** : The turbulent flow with wake, reattachment and recirculation flow is very important from the viewpoint of engineering. But that is still difficult because of especially the unsteady problems which are related with the vehicle dynamics and the aerodynamics noise. This paper evaluate LES that can analyze about all fluid flow region including the laminar, transition and turbulent. So we compare the results of LES with those of PIV measurement and Reynolds averaging models. In conclusion, LES predicts flow behavior better than Reynolds averaging models.

### 1. 서론

난류는 일상생활에서 자연스럽게 볼 수 있는 유동의 현상이다. 그러나 난류에 대해 정확한 엄밀해를 구하는 것은 지금의 실정에서는 불가능하므로 컴퓨터를 이용해서 근사해를 구하는 방법이 지금까지 시도되어졌다. 그러나 난류유동은 공간뿐만 아니라, 시간적으로도 불규칙한 변동성분을 가지고 있으므로, 슈퍼컴퓨터를 가지고도 정확한 예측을 하기란 거의 불가능하다. 하지만 컴퓨터의 상당한 발전으로 점차 근사해를 구하는 수치모사법의 비중이 점차 늘어나고 있는 것은 사실이다. 그 중 난류의 지배방정식을 수치해석적인 방법으로 직접 계산하는 직접수치모사(Direct Numerical Simulation; DNS)가 가장 정확한 해를 주지만, 공학적으로 중요한 흐름인  $Re=10^5 \sim 10^6$  정도의 계산에서 약 2~640년 정도가 걸리기 때문에 아직까지는 널리 이용되고 있지 못하고 여러 난류모델의 검증, 저 레이놀즈수의 단순 유동장의 계산에서만 이용되고 있는 실정이다<sup>1)</sup>. 그러므로 아직까지 DNS의 이용은 무

리이다. 이에 대안 방편으로 부각한 대와동 모사(Large Eddy Simulation; LES)는 격자로 해상 할 수 있는 영역(Grid Scale; SG)은 DNS와 같이 직접계산하고 격자로 해상 할 수 없는 영역(SubGrid Scale)은 모델화하여 계산하는 방법으로, 기존의 Reynolds 시간평균모델(Reynolds Averaged Navier Stokes Equation: 이하 RANS)과 같이 전 영역을 평균을 취하는 방법과 DNS의 중간단계라 하겠다. 난류에너지의 대부분은 큰 영역 유동구조에 포함되어 있고, 작은 유동구조는 평균전단에 의해 유도되는 방향효과에 무관하므로, 좌표계가 회전하거나 반사되더라도 작은 와류에 관계된 모든 물리량들은 변하지 않는 등방적인 사실로부터 LES의 이론적인 정당성이 뒷받침된다<sup>2)</sup>. 따라서, LES는 모든 영역의 유동구조에 영향을 주는 RANS보다는 좀더 일반적이고, 형상에 덜 의존한다. 이와 같은 이유로 LES는 난류유동의 수치해석법으로 각광을 받고 있다. 최근에는 미국에서는 Ferziger<sup>3)</sup>, Germano<sup>4)</sup>, Moin<sup>5)</sup> 등이 LES에 대해서 연구를 하고 있으며, 일본에서는 小林敏雄<sup>6,7)</sup>, 谷口伸行<sup>8)</sup>, 村上周正<sup>9)</sup> 등이 활발히 연구를 하고 있는 실정이며, 우리나라에서는 양경수<sup>10)</sup> 등이 DNS와 LES에 대해서 연구를 하고 있는 실정이다. 공학적인 관점에서, 2방정식 난류모델은 난류유동의 공학적인 예측

접수일 : 2000년 7월 4일  
장동식 : 부경대학교 대학원  
이연원, 배대석, 김남식 : 부경대학교 기계공학부  
도덕희 : 한국해양대학교 기계·정보공학부

Table 1 Model governing equations

RANS		LES	
$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$	(1)	$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$	(10)
$\frac{\partial u_i u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\}$	(2)	$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + (\nu + \nu_{SGS}) \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial u_i \partial x_j}$	(11)
$\frac{\partial k u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P_k - \rho \epsilon$	(3)	$\nu_{SGS} = (C_s \Delta)^2  \bar{S} $	(12)
$\frac{\partial \epsilon u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right\} + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \epsilon)$	(4)	$ \bar{S}  = (2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{1/2}$	(13)
$P_k = \nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$	(5)	$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$	(14)
$\nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon}$	(6)	$\Delta = (\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3)^{1/3}$	(15)
SKE의 경우 $C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92$	(7)	$C_s = 0.1$	(16)
RNG의 경우 $C_\mu = 0.085, \sigma_k = 0.72, \sigma_\epsilon = 0.72, C_{\epsilon 2} = 1.68$ $C_{\epsilon 1} = 1.42 - \eta(1 - \eta/\eta_0)/(1 + \beta\eta^3)$	(8)	$f = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{A^+}\right)$	(17)
$\beta = 0.012, \eta_0 = 4.38, \eta = Sk/\epsilon$	(9)	$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu}$ $\mu_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ $A^+ = 25$	(18)

에 매우 광범위하게 이용되어지고 있다. 특히 표준 k-ε 모델(이하 SKE)은 모델자체가 단순하고, 예측 성능이 우수하여 광범위하게 이용되어지고 있으며, 복잡한 3차원 형상 등의 유동해석에도 유용하게 쓰이고 있고, 수용할 만한 결과를 얻고 있다 하지만 국부적인 평형, 강한 압력구배, 유선의 곡률 효과, swirl, 와의 등방성 가정 등은 유동에서 발생하는 여러 가지 부가적인 값들을 SKE에서는 정확하게 예측하기가 어렵다. 그러므로 SKE의 예측성능을 향상시키기 위해 많은 수정된 k-ε 모델이 제안되어졌고, 그 중 난류에너지 소산을 지배방정식을 수정한 RNG k-ε 모델(이하 RNG)은 간단한 수정을 통해서 SKE보다 월등한 결과를 보여주고 있어 널리 사용되어지고 있다<sup>11)</sup>.

기존의 자동차 주위의 유동 연구에 대해서 살펴보면, 명현국 등<sup>12)</sup>은 ahmed body주위의 유동계산에서 난류모델의 평가를 하였는데, RNG가 SKE보다 개선된 예측성능을 나타낸다고 하였으며, 허남건 등<sup>13)</sup>도 실차의 형태에 대해서 RNG와 SKE에 대해서 비교하였으며, 역시 RNG가 SKE보다 개선된 예측성능을 나타낸다고 보고하였다. 이외에도 국내에서는 아직 RANS에 의한 계산만이 이루어지고 있으며, LES에 의한 계산은 전무후무한 상태이다.

본 연구에서는 움직이는 자동차 형태를 가장 단순화한 사각형의 Bluff body에 대해서 기존에 이미 널리 사용되고 있는 RANS중 SKE 및 RNG와 격자평균모델인 LES를 이용하여 계산된 결과를

PIV실험에 의한 결과와 비교 검토하였다.

## 2. 지배방정식과 수치해석

RANS와 LES에서의 지배방정식은 Table 1과 같으며, RANS의 모든 값은 앙상블 평균값이다.

RANS에서는 SIMPLE 알고리즘을 적용하여 압력수정에 관한 근사 이산화방정식을 압력과 속도의 상관관계를 고려한 연속방정식의 이산화방정식으로부터 구하여 운동방정식의 압력항을 처리하였으며, 대류항은 하이브리드 차분도식을 이용하여 차분하였으며, LES에서는 속도-압력 연결 알고리즘에는 SMAC법을 적용하였으며, 시간이산화에는 3차 Runge-Kutta법을 이용하였으며, ΔT=0.01로

Table 2 Boundary conditions

	RANS	LES
입구조건	$U = U_{in}, V = W = 0$ $k_{in} = Ti(U_{in})^2$ $\epsilon = \frac{C_\mu k^{1.5}}{0.002H}$	$U = U_{inst}, V = W = 0$
출구조건	Neumann condition $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = 0$	대류유출경계조건 $\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + U_{inst} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0$
고체벽면	대수벽법칙	Spalding법법칙
상부면	free-slip	free-slip
옆면	free-slip	cyclic condition

두었다. 공간이산화에는 중앙차분법을 이용하였다. RANS와 LES에서의 경계조건은 Table 2에서 보는 바와 같이 입구조건에서 RANS는  $U_{in}$ 의 일정한 속도를, LES에서는 인공적인 변동분을 부여하여 불규칙한 속도  $U_{inst}$ 를 적용하였으며, 출구조건에서는 RANS에서는 속도와 난류 운동에너지, 난류 운동에너지 소산율의 구배가 0인 Neumann 조건을 적용하였지만, LES에서는 난류의 불규칙한 성질에 인하여 RANS에서와 같은 Neumann 조건을 부여할 수 없다. 그러므로 입구 부에서의 속도  $U_{inst}$ 에 의한 근사적인 값을 대입하는 대류유출경계조건을 적용하여 계산하였으며, 차체와 바닥과 같은 고체면에 대한 경계조건은 RANS에서는 대수경계조건을, LES에서는 층류와 난류 그리고, 천이 영역 등의 전 영역에 대해서 적용이 가능한 Spalding 벽법칙을 적용하였으며, 상부면에 대해서는 자유 표면경계조건을 적용하였다. 그리고, 옆면에 대해서는 RANS에서는 자유 표면 경계조건을 적용하였으며, LES에서는 주기 경계조건을 적용하여 계산을 수행하였다<sup>14)</sup>.

### 3. PIV에 의한 계측

#### 3.1 PIV의 원리

유동장의 국소 속도는 어느 한 점을 통과하는 추적입자가 미소시간간격동안 이동한 직선거리 및 방향을 알면 쉽게 구해진다. 즉, 주어진 측정시간 동안 움직인 유동입자(particle)들의 변위정보를 CCD(charge coupled device)카메라와 같은 화상입력장치를 이용하여 2차원 화상데이터로 저장한 후 디지털 화상처리기법을 이용하여 입자변위를 계측

하는 것이다. 이때 사용되는 추적입자의 비중은 유체의 비중과 동일한 것을 사용하여야 한다. PIV는 원래 유동화상의 조사구간내 산란입자의 강도분포에 대한 Fourier변환이나 직접적인 상관계수 계산으로부터 조사구간의 평균속도를 구하는 방법이다. PIV는 입자밀도가 매우 큰 경우에 보통 적용되며 조사구간내의 평균속도를 추출함으로써 제한된 공간분해능을 지닌다.

#### 3.2 실험방법 및 계측방법

실험을 위한 장치는 아래의 Fig. 1과 같이 유동장을 만들기 위한 수조(980×300×250)와 유동장을 촬영하기 위한 카메라, 계산을 위한 컴퓨터, 조명을 위한 레이저, AOM 조절기, 이미지 보드로 구성되어 있으며, 알루미늄으로 된 직육면체의 Bluff Body를 수조 속의 지면에 핀으로 고정시켰으며, 이때의 핀에 의한 영향은 무시하였다. 유동장의 변화는 카메라를 이용하여 각 속도별로 3분간 촬영, 녹화하였으며, 녹화되어진 유동장은 컴퓨터로 0.0035초로 50장의 사진을 받아서 상호상관 PIV 처리를 하였다. 상호상관 PIV를 거친 속도벡터는 상관영역의 크기나 탐색영역의 크기에 따라서 에러벡터를 측정하여 에러벡터처리법을 도입하고, 면적보간으로 에러를 수정하여 평균속도 분포를 구하였다.

### 4. 결과 및 고찰

먼저 LES와 RANS를 비교하기 위해서 PIV실험을 사각형의 Bluff Body 모형에 먼저 수행하였으며, 그 결과를 가지고 LES와 RANS의 결과를 비교하였다. Fig. 2에서는 모형의 해석영역을 보여주

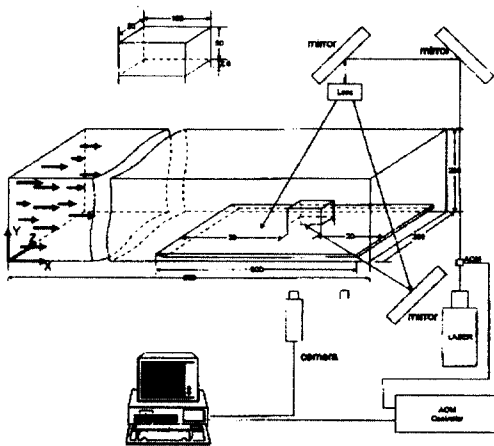


Fig. 1 Schematic arrangement of PIV system

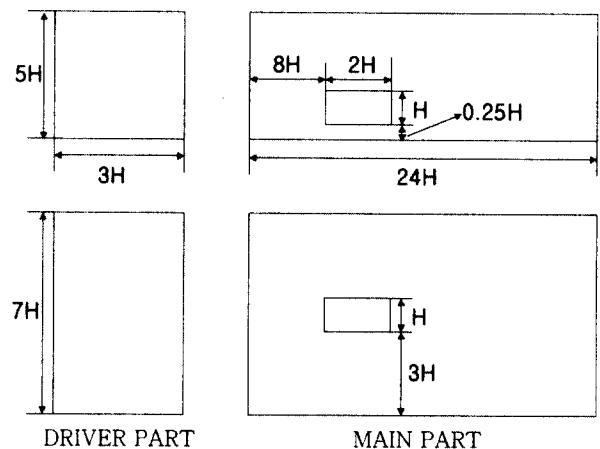


Fig. 2 Computational Domain

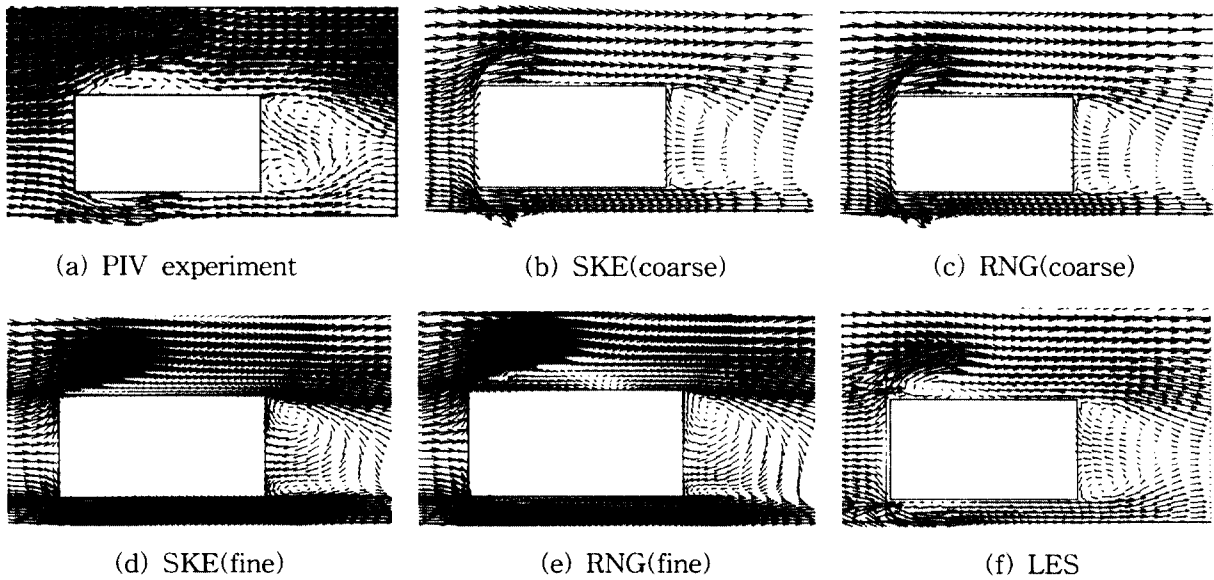


Fig. 3 Distribution of mean velocity vectors

고 있으며, LES에서는 충분한 벽난류장을 얻기 위해서 본계산영역 앞부분에 구동부를 두어서 충분히 발달한 유동장을 만든 후 본 계산부의 입구조건으로 삼았다. RANS에서는 구동부가 빠지며 본계산부분에서만 계산이 이루어진다. 구동부의 계산영역은  $3H \times 5H \times 7H$ 이며, 격자수는 49,920( $20 \times 48 \times 52$ )개이며, Main부의 계산영역은  $20H \times 5H \times 7H$ , 격자수는 189,696( $76 \times 48 \times 52$ )개이며, 레이놀즈 수는 45,000으로 설정하였다. Fig. 3은 모형의 중앙단면에서의 시간 평균 속도장을 보여주고 있으며, (a)의 PIV실험에 의한 결과에서는 물체상부에서 박리가 일어나는 것과 재부착을 확인 할 수가 있다. 그러나 RANS에서 성긴격자를 사용한 (b)와 (c)에서는 박리에 의한 역류를 재현하지 못하고 있기 때문에 재부착 등을 제대로 재현하지 못하고 있으며, 조밀격자를 사용한(d)와 (e)에서는 박리에 의한 역류를 재현하지만 (a)와는 달리 크기가 작게 재현되었다. (f)의 LES에서는 박리에 의한 역류의 크기가 (a)와 가장 유사하게 재현하고 있음을 볼 수 있다. 이는 모든 스케일에 영향을 주는 RANS에서는 격자에 의한 의존성이 크기 때문이라고 생각되며, 이에 반해 작은 스케일만 모델링하는 LES에서는 격자의 의존성이 RANS보다는 작기 때문이라고 생각된다.

Fig. 4는 모형상부의 전면에서 0.5H지점에서의 평균속도  $u$ 의 분포를 보여주고 있다. PIV와 다른 case들을 비교해보면 RANS의 성긴격자에서는 Fig. 3에서와 같이 박리에 의한 재순환영역이 발달하지 못하였기 때문에 벽면에서 바로 양의 방향으

로  $u$ 가 분포하는 것을 볼 수 있으며, 조밀격자의 경우 SKE는 1, 2번째 격자에서는 음의 값을 가지지만 이후 급격하게 양의 방향으로  $u$ 가 변하기 때문에 성긴격자와 같이 선형적인 분포를 보여 주고 있다. 그리고, RNG는 역류를 SKE보다 좀더 크게 재현하므로 SKE보다 향상된 분포를 보여 주고 있다. LES는 역류영역을 크게 재현하였으며, PIV실험과 가장 유사한 분포를 가진다. 하지만 첫 번째 격자에서는 RNG-fine의 분포보다 적은 값을 가지는데, 이는  $y$ 방향의 격자크기가 조밀격자보다 크기 때문이며, 이는 조밀격자와 같이 벽면에 격자를 집중 시켜 격자의 영향에 대해 계산할 필요가 있음을 의미한다.

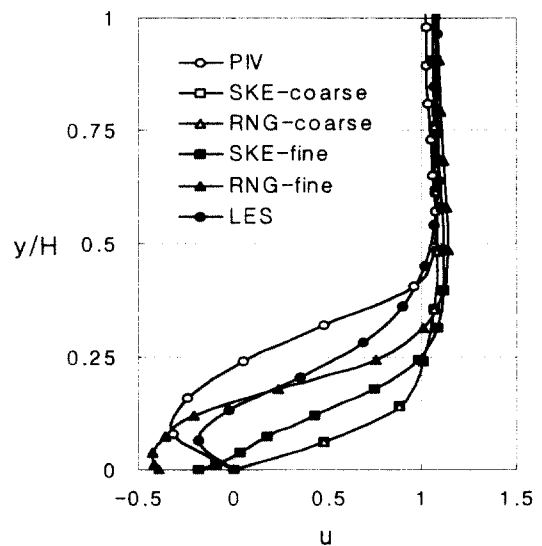


Fig. 4 Profiles of mean velocity  $u$  at the center plane ( $x=0.5H$ )

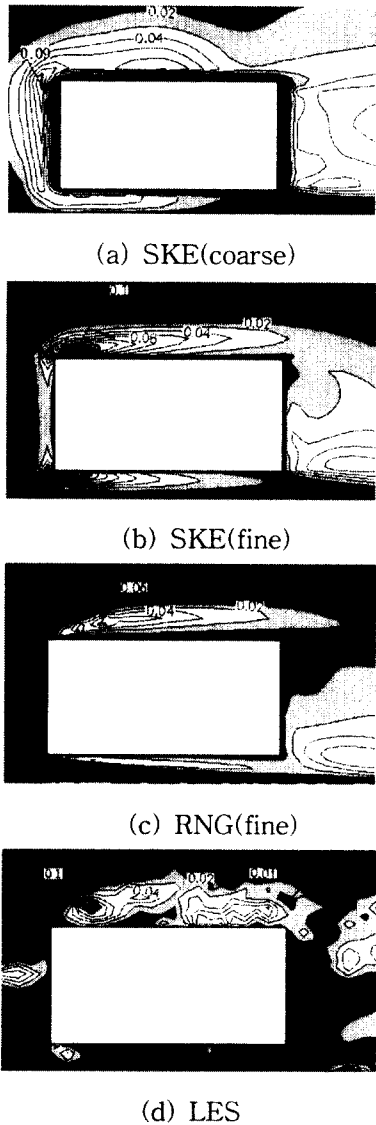


Fig. 5 Distribution of  $k$

Fig. 5는 중앙단면에서의 난류운동에너지  $k$ 의 분포를 보여주고 있는데, (a)는 상부의 모서리부에서 가장 높은 값을 보여 주고 있으며, RNG-coarse는 (a)와 거의 유사한 분포를 보여 주었다. 그리고 (b)에서는 박리가 일어나는 모서리부와 역류가 일어나는 상부 전면에서 (c)는 전반적으로 (a)와 (b)에 비해  $k$ 의 값이 적은 분포를 보여 주고 있으며, 모서리부 보다 역류가 일어나는 부분에서 가장 높은 수치를 보여 주었다. 그리고 LES인 (d)는 역류가 일어나는 부분에서 가장 높은 값을 보여주고 있으며, 또한 재부착이 일어나는 부분에서 상대적으로 높은 값을 나타내고 있다. 이는 난류에너지의 생성항  $P_k$ 와 관련있는데, Fig. 6에서 중앙 단면에서의  $P_k$ 의 분포를 보여 주고 있다. (a)에서는 Fig. 5 (a)와 같이 모형의 모서리 전면부에서 가장 높은 값

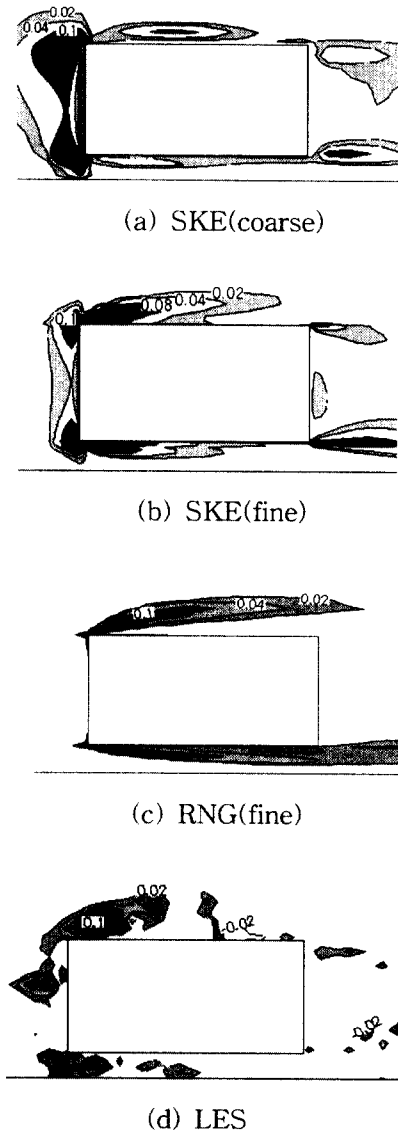


Fig. 6 Distribution of  $P_k$  at center section

을 보여 주고 있으며, (b)는 모서리부 뿐만 아니라 역류가 발생하는 부분에서도 높게 나타났으며, (c)는 (b)와는 달리 역류가 발생하는 부분에서 높게 나타났으며, (d)는 전면부에 약간 높게 분포하지만, 전반적으로 박리에 의한 역류가 발생하는 부분인 모서리의 후부에서 가장 높은 분포를 보여 주고 있으며, 또한 재부착이 일어나는 지점과 아래측 재순환영역에서는 음의 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 이는  $P_k$ 가 식 (19)와 (20)에 의해서 계산되어 지기 때문인데, RANS는 와점성가정에 의해 식 (19)와 같이 가정되어서  $P_k$ 를 계산하기 때문에 항상 양의 값을 가지지만, LES는 식 (20)과 같이 생성항의 원래형태대로 계산하기 때문에 국부적으로 음의 값을 가진다. 특히 재부착지점과 후류의 재순환영역에서 음의 값을 가지는 데 이는 와점성 모

델을 기초로한 RANS와의 차이를 보여준다. 하지만 RANS만을 비교해 보면 격자를 충분히 고려한다면 수정모델이 RNG가 SKE보다는 훨씬 LES에 비슷한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 하지만 국부적으로 음의 값을 가지지 않기 때문에 Fig. 3에서와 같이 박리에 의한 역류를 재현하나 PIV 실험치와는 다른 양상을 보여준다.

RANS

$$P_k \approx \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (19)$$

LES

$$P_k = -u_i u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (20)$$

Fig. 7은 Fig. 4와 같은 지점에서의 레이놀즈 응력  $u'v'$ 의 분포를 보여 주고 있는데, Fig. 4와 비슷한 분포를 보여 주고 있음을 알 수 있으며, 역류에 의한 와류가 발생하는 지점에서 가장 작은 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 특히 SKE의 경우에는 벽면 근처(0.25y/H이하)에서는 격자에 관계없이 거의 비슷한 분포를 보여 주고 있지만, RNG의 경우에는 성긴격자가 첫 번째 격자에서 비슷한 분포

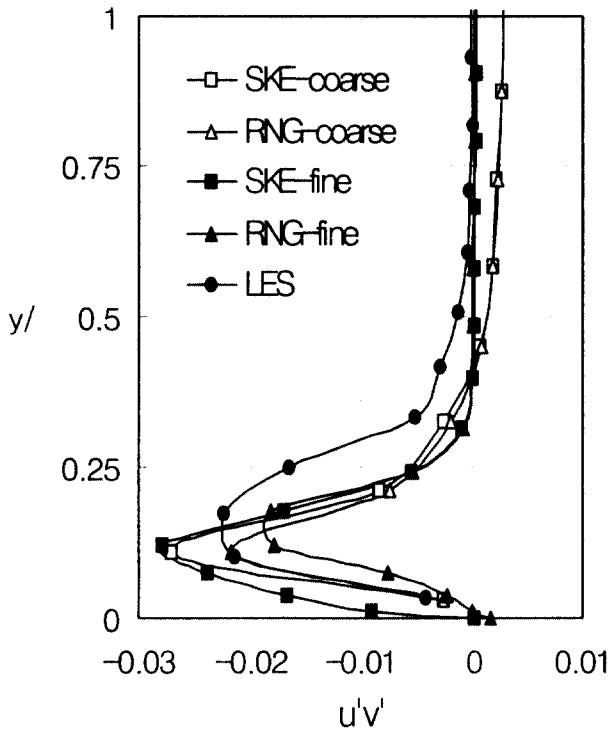


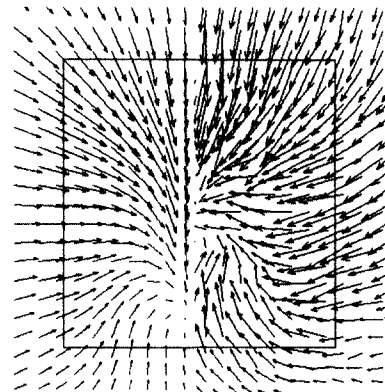
Fig. 7 Profile of  $u'v'$  at the center plane ( $x=0.5H$ )

를 보여주고 있고, 전체적으로는 조밀격자가 LES와 비슷한 경향을 보이고 있다. 이는  $P_k$ 에서와 마찬가지로 RANS의 경우 레이놀즈 응력  $u'v'$ 는 식 (21)과 같이 평균속도의 변형률과 와점성계수에 비례한다고 가정되기 때문이다.

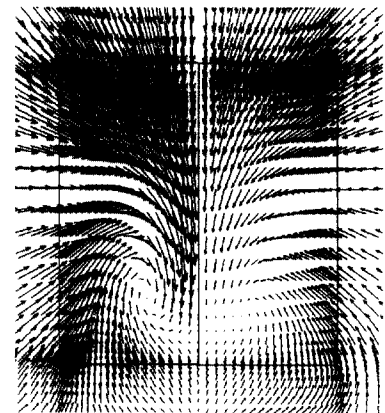
$$-u'v' = \nu_t \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (21)$$

여기서,  $\nu_t$ 는 와점성계수로서 식(6)에서와 같이  $k$ 와  $\epsilon$ 에 의해서 계산되어지는데 SKE 보다는 RNG가  $\epsilon$ 의 수송방정식을 식 (8), (9)와 같이 좀더 섬세하게 계산하기 때문에 SKE 보다 LES에 가까운 경향을 보이고 있다.

Fig. 8은 모형 후부에서 1H 떨어진 위치에서의 후류를 보여 주고 있는데 (a)와 (d)의 경우에는 윗면에서 발생된 주류에 의해 중심보다 아래쪽에



(a) SKE (coarse)



(c) SKE (fine) (d) RNG (fine)

Fig. 8 Trailing vortices behind the Bluff body (1H from the rear face)

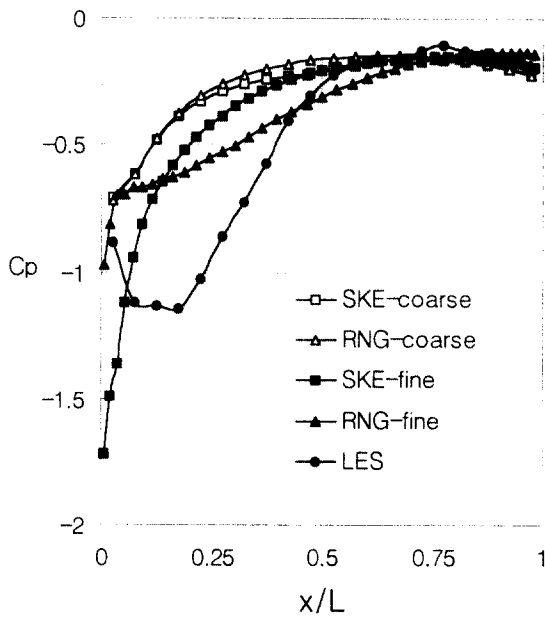


Fig. 9 Profile of  $C_p$  at the upper center plane

서 합쳐지는 것을 볼 수 있지만 LES인 (b)의 경우에는 거의 중앙부에서 유동이 합쳐지는 것을 볼 수 있다. 그리고 (c)에서는 볼텍스가 남아 있는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 3과 관련지어 볼 수 있는데 Fig. 3(f) LES에서처럼 모형상부에서의 유동과 하부에서의 유동이 후류에서는 거의 중앙부에서 만나는 것을 볼 수 있는데, 이는 모형후부에서의 위쪽에서 발생하는 재순환영역뿐만 아니라 아래에서 발생하는 재순환영역이 거의 비슷한 크기로 발생함을 볼 수 있다. 이는 Fig. 3(a)의 PIV와도 거의 유사한 분포를 가진다. 하지만 RANS인 Fig. 3의 (b), (c), (d), (e)는 상부에서의 유동과 하부에서의 유동이 후류에서는 모형 중앙보다 아래에서 만나는 것을 볼 수 있는데, 이는 아래에서 발생하는 재순환영역의 크기가 위쪽에서 발생하는 재순환영역에 비해 상대적으로 작게 재현되기 때문이며, 이것에 의해 Fig. 8과 같은 후와동(trailing vortex)이 형성되는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 상부중앙단면에서의 압력계수  $C_p$ 의 분포를 보여주고 있으며, PIV실험에 의한 결과를 얻지 못하여서 정확한 결론을 내릴 수는 없지만 성긴격자에서는 거의 비슷한 분포를 보여주고 있으며, 조밀격자에서도 SKE의 경우에는 앞부분에서 약간의 차이가 있지만 성긴격자와 거의 비슷한 분포를 보여주고 있고, RNG에서는 앞부분에서 약간 급격하게 상승하지만 이후 압력이 회복되어서 거의 비슷한 분포를 보여 주고 있다. 그리고, LES는 앞부분의 약간 뒤쪽에서  $C_p$ 값이 가장 낮게 분포되

는데, 이는 박리에 의한 역류로 재순환영역의 압력이 강해지기 때문이다. 이후 압력이 회복되어서 다른 경우와 비슷한 분포를 보여 주고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 계산에서는 자동차 형상을 단순화한 사각형 Bluff Body 주위의 유동장의 수치계산에 있어서 가까운 미래에 공학적으로 활발히 적용되어질 것으로 예상되는 LES를 적용하여 계산을 하였으며, PIV실험에 의한 결과를 가지고 기존의 RANS의 계산과 상호 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 평균유동장의 분포를 비교한 결과 LES가 RANS보다 PIV실험에 의한 결과에 정성적으로나 정량적으로 더 잘 일치한다.
- 2) RANS는 난류에너지 생성항  $P_k$ 가 항상 양의 값으로 계산되지만, LES에서는 음의 값으로 계산되어 질수 있어 물리적인 현상을 보다더 잘 반영할 수 있으리라 판단된다.
- 3) RANS의 경우에는 격자의 의존성이 상대적으로 크게 영향을 미치므로 격자의 의존성을 먼저 점검해야 한다. 그리고, SKE보다는 수정모델인 RNG가 복잡한 난류유동장을 더 잘 예측한다.
- 4) LES는 격자의 수가 적음에도 불구하고 RANS의 결과보다는 더 정확한 계산결과를 얻었지만, 앞에서 언급한 바와 같이 차후 격자 의존성과 다양한 LES의 모델에 의한 검증이 필요하다.

## 후 기

본 연구는 1997년도 부경대학교 중점 연구소 지원사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드리며, 또한 프로그램 작성에 도움을 주신 동경대학 생산기술연구소 小林敏雄, 谷口伸行교수에게 감사드립니다.

## 6. 참고문헌

1. 정명균, "난류유동의 계산 모형", 대한기계학회지, 제34권 9호, pp. 688~696, 1994
2. 김신, 정범진, "난류 입문", 대영사, pp. 78~79, 1997
3. M. D. Su, R. Friedrich, "Investigation of fully developed turbulent flow in a Straight duct with large eddy simulation", J. Fluid

- Engineering. ASME, Vol. 116, pp. 677~684, 1994
4. M. Germano, U. Piomelli, P. Moin, W. H. Cabot, "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model", Phs, Fluids A 3(7), pp. 1760~1765, 1991
  5. P. Moin, J. Kim, "Numerical investigation of turbulent channel flow", J. Fluid Mech, Vol. 118, pp. 341~377, 1982
  6. 小林敏雄, "亂流の数値シミュレーション -數值亂流風洞への夢-", 日本機械學會誌, 第88卷 799号, pp. 644~647, 1985
  7. 小林敏雄, 鬼頭辛三, 森西洋平, "自動車まわりの流れの数値シミュレーション - LESとk- $\epsilon$ モデルによる解の比較-", 生産研究 41卷 1号, pp. 60~63, 1989
  8. 谷口伸行, "境界適合格子を用いた亂流LESにおけるダイナミックSGGモデルの定式化と數値檢証", 平成8年度 科學研究費補助金(基盤研究(C)(2)) 研究成果報告書, 1996
  9. 森西洋平, 小林敏雄, "LESによる人工的壁面境界條件の構成およびその評價", 生産研究 42卷 1号, pp. 47~50, 1991
  10. 양경수, "난류유동의 대와동모사(LES)", 대한기계학회지 제34권 9호, pp. 698~704, 1994
  11. J. H. Ferziger, M. Peric, "Computational Methods for Fluid Dynamics", Springer, pp. 257~267, 1996
  12. 명현국, 박희경, 진은주, "Ahmed body 주위의 3차원 난류유동 해석 -유한차분도식의 평가-", 대한기계학회논문집(B), 제20권 제11호, pp. 3589~3597, 1996
  13. 허남건, 최원국 "A Study on Vehicle Aerodynamics by using CFD: Simultion of 3-D Flow Fields around Bodies of a Vehicle Shape by using the RNG k- $\epsilon$  Model for Turbulence", 저저항운송체 연구보고서, AFFRC, pp. 81~118, 1994
  14. 朴南燮, "LESによるチャンネル内立方体章害物周辺の亂流解析に關する研究", 東京大學校大學院修士論文, 1995