

〈논 문〉

홈이 파진 평판 사이 난류유동의 대와동모사(LES)

양 경 수* · 김 도 형**

(1996년 12월 16일 접수)

Large Eddy Simulation of Turbulent Flows in a Grooved Channel

Kyung-Soo Yang and Do-Hyeong Kim

Key Words : Groove(홈), Turbulence(난류), Large Eddy Simulation(대와동모사), Subgrid-Scale Modeling(아격자스케일모델)

Abstract

In this study, turbulent flows in a grooved channel are numerically investigated by Large Eddy Simulation(LES). Especially, a parametric study is carried out to study effects of length and depth of a groove on large-scale flow structures. For one test case, comparison of LES results with those of DNS reveals a good agreement even though the number of grid points of LES is only 6.5% of that of DNS. This confirms that LES is a suitable tool for a parametric study of turbulent flows. The subsequent parametric study using LES shows that the large-scale turbulent structures are significantly affected by the geometry of the groove. Especially, when the length of the groove is short such that the recirculation region occupies the entire groove, the turbulent flow in the groove becomes very weak in both mean and fluctuation quantities.

1. 서 론

수치모사(Numerical Simulation)를 이용한 유동의 연구는 이론이나 실험을 통한 연구와 더불어, 물리적 유동현상을 이해하기 위한 3가지 접근방법 중의 하나로 인정받고 있다. 특히 최근 들어 급속히 이룩된 컴퓨터 하드웨어와 수치해석 알고리즘의 발전은 이러한 수치모사의 위치를 더욱 확고히 해주고 있다. 주의 깊게 수행된 수치모사는 실험으로는 측정하기 어려운 유동구역에 대한 자세한 유동 정보를 제공할 수 있고, 또한 수학적 해석방법으로는 손쉽게 해를 구할 수 없는 비선형 방정식에 매우 효과적이다. 수치모사는 또한 입출구조건 및 유동파라미터의 완벽한 제어가 가능하므로 특정 유동

에 대한 결과를 손쉽게 재현할 수 있다. 이러한 이유로 유체기계나 수송기계에 관련된 유체공학적 신기술의 개발에 수치모사의 역할에 대한 기대가 점점 증하고 있다. 응용유동의 공학적 해석을 위해서는 그 응용유동의 대표적 특징을 갖춘 기본유동의 물리적 이해가 선행되어야 하고 따라서 이를 위한 도구(tool)로서 수치모사의 적용은 점차 큰 주목을 받고 있다.

본 연구에서는 홈이 파진(grooved) 평판 사이에서의 난류유동을 대와동모사(Large Eddy Simulation, LES)를 사용하여 전산해석적 연구를 수행하고자 한다. Grooved 평판이란 평행한 두 평면의 한쪽 면에 유동의 흐름방향으로 주기적으로 홈이 파여진 형상을 일컫는다(Fig. 1). 이러한 Grooved 평판 사이에서의 유동은 칩(chip)들이 정렬되어 부착된 평행한 두 인쇄회로기판(Printed Circuit Board, PCB) 사이에서 냉각유체로서의 공기의 유

*회원, 인하대학교 기계공학과

**인하대학교 대학원

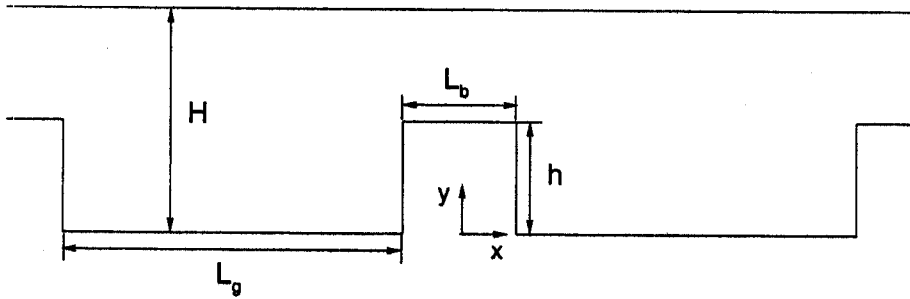


Fig. 1 Physical configuration.

동이나, 밀집된 건물주위에서의 대기의 유동, 송유관 부식의 주요한 원인으로 인식되고 있는 표면거칠기(surface roughness)의 난류강도에의 영향⁽¹⁾ 등 유체역학적인 측면에서의 물리적 이해가 요구되는 응용유동들의 기본적인 모델유동이라 할 수 있다. 수치해석적인 면에서 볼 때 흠이 파진 평판유동의 형상은 정상유동(steady flow)을 쉽게 얻기에 적합하고, 또한 흐름방향으로 주기조건을 적용함으로써 입출구 경계조건으로부터 파생될 수 있는 여러 가지 문제점을 피할 수 있다. 또한 흠이 파진 평판 사이의 유동은 벽전단층, 자유전단층, 재순환구역 등 복잡한 형상의 유동에서 흔히 발견되는 유동구조가 모두 포함되어 있어 좀더 복잡한 유동, 특히 앞서 언급된 응용유동과 같이 흐름방향으로 주기적인 요철형상을 갖는 응용유동을 이해하기 위한 building block으로서 매우 적절하다.

흠이 파진 평판 사이의 난류유동이 후향이나 전향계단유동(backward/forward facing step flow), 그리고 단일 장애물유동과 크게 다른 점은 이들 유동에서와 같은 재발달구역이 존재하지 않는다는 점이다. 즉 흠이 파진 정도에 따라 유동의 큰 유동구조(large-scale structure)가 크게 달라질 수 있고 이에 따른 강제 열전달이나 물질전달의 특성은 이런 유동구조의 유체역학적 이해 없이는 불가능하다. 현재까지 위에서 언급된 바와 같은 유사한 유동에 대해서는 실험적 연구가 비교적 활발히 수행되어 왔으나^(2,3) 실험이 갖는 한계 때문에 자세한 유동장 정보를 얻는데는 제약이 있으며 특히 본 연구에서 다루고자 하는 짧은 길이의 흠에 국한된 재순환구역에 대한 실험자료는 매우 빈약한 형편이다. Okamoto와 Nakaso⁽⁴⁾는 정사각단면의 막대들이 주유동방향으로 평판 위에 부착된 형상에 대해 freestream 난류를 유지시키기 위한 최적의 막대간

격을 실험적으로 연구하였다. Yamashita⁽⁵⁾ 등은 경계층유동에서 평면에 단일 흠이 있는 경우에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 하지만 이러한 형상들은 특수한 응용유동에 해당되며 기본유동으로 인식되는데는 무리가 따른다. 해외에서는 기본유동으로서 흠이 파진 평판 사이의 유동에 대해 그간 층류에서 난류로의 천이과정에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔으나^(6,7) 난류유동에 대한 연구는 아직 수행되지 못한 형편이다. 본 연구에서는 난류유동의 수치모사기법으로서 최근 주목을 받고 있는 LES를 이용하여 흠이 파진 평판 사이의 난류유동의 전산해석이 수행된다. 한편 가장 높은 해상도를 얻을 수 있는 직접 수치모사(Direct Numerical Simulation, DNS)는 현재의 컴퓨터 성능으로서는 과도한 계산시간이 소요되어 다양한 형상이나 유동파라미터의 변화에 대한 연구로는 아직은 부적절한 실정이다. 하지만 LES를 검증하기 위한 기초자료로서 DNS가 이용될 수 있으며, 본 연구에서는 한 case에 대해 DNS를 수행하여 LES의 정확도를 정량적으로 검증하였다. 이러한 검증을 마치면 LES는 다양한 유동장에 대해서 상세한 유동장 정보를 제공할 수 있다.

본 연구를 수행하기 위한 도구로서 사용될 LES는 1970년대 초, 대기의 큰 유동구조에 관심을 갖고 있는 기상학자들 사이에서 사용되기 시작하였다. LES는 흔히 사용되어 온 레이놀즈 평균기법과는 달리 작은 스케일 유동구조는 모형(subgrid-scale modeling, SGSM)을 사용하지만 큰 스케일 유동구조는 직접 계산하는, 즉 공간에서 국부적으로 평균치를 구하는 효과를 갖는 기법이다. LES의 이론적 정당성은 다음과 같은 두 가지 관찰에 근거를 두고 있다. 첫째는 대부분의 난류에너지는 큰 유동구조에 포함되어 있고, 둘째로는 작은 유동구

Table 1 Simulation cases.

	Algorithm	h/H	L_g/h	Re	Grid No.	$\Delta p/\Delta p_{case3}$	TI	FTT	X_g/h	X_b/h
Case 1	DNS	0.5	15	6830	$384 \times 168 \times 72$	—	130	9	5.00	—
Case 2	CDNS	0.5	15	7340	$204 \times 72 \times 36$	—	130	9	5.42	0.92
Case 3	LES	0.5	15	6720	$132 \times 48 \times 48$	1.0	38.3	2.4	4.84	0.98
Case 4	LES	0.5	7	6680	$132 \times 48 \times 48$	1.54	19.7	2.5	3.39	0.81
Case 5	LES	0.5	3	7460	$96 \times 64 \times 48$	1.48	19.8	3.1	—	0.12
Case 6	LES	0.25	7	6950	$96 \times 72 \times 48$	0.2	9.4	1.7	4.27	0.83
Case 7	LES	0.5	2	6800	$124 \times 56 \times 48$	0.31	28.7	3.6	—	0.05

조는 등방적이라는 점이다. 그러므로 LES는 레이놀즈 평균기법보다는 좀더 일반적이고 또한 형상에 덜 의존한다고 할 수 있다.

2. 연구방법 및 이론

본 연구에서는 흡이 파진 평판 사이의 난류유동에서 여러 가지 다른 형상, 특히 흡의 길이와 깊이의 변화에 따른 유동구조의 변화를 파악하고 각 경우에 대한 자세한 수치적 정보를 제공한다. 여기서 윗평면과 돌출된 면 사이에서의 평균속도 (U_m)와 두 면 사이의 간격 ($H-h$)을 기준으로한 레이놀즈수 (Re)는 약 6900으로 고정되었다. 이는 각 경우에 유량이 일정함을 의미한다. 본 연구에서 계산된 각 Case들이 Table 1에 요약되어 있다.

본 연구에서는 흡의 길이가 변화하는 경우(Case 3, 4, 5, 7)와 흡의 깊이가 변화하는 경우(Case 4, 6)의 두 가지 변화를 관찰한다. 이들은 흡이 파진 평판 사이 유동을 특징지워주는(characterize) 두 가지 중요한 변수이다. 이들의 상대적인 크기에 따라 평행한 PCB사이의 냉각공기의 난류유동, 건물주위의 풍공학(wind engineering), 표면거칠기 등 다양한 응용유동의 모델로 간주될 수 있다.

2.1 수식전개

본 논문에서는 모든 변수들을 U_m 과 $H-h$ 를 각각 속도 및 길이 스케일로 하여 무차원화하였다. 이 연구에 사용된 컴퓨터프로그램은 유한체적법(finite-volume method)이 적용되었고, 비균일 엇갈린 직교좌표계(nonuniform Cartesian staggered grid)를 사용하였다. 검사체적내에서 평균을 구하는 효과를 갖는 상자필터(box filter)를 사용하여

여과된(filtered) 연속방정식과 운동량방정식을 사용하였다. 이에 관한 자세한 설명은 앞서 발표된 저자의 논문^(8,9)들을 참고하기 바란다.

2.2 수치해석법

시간에 따른 지배방정식의 해를 구하기 위해 fractional step method⁽¹⁰⁾를 사용하였다. 운동량방정식의 시간에 따르는 적분은 혼합적인 형태로서, 대류항은 3차의 정확도를 갖는 Runge-Kutta 법으로 explicit하게, 그리고 점성항은 Crank-Nicolson 법으로 implicit하게 계산하였다. Approximate factorization 방법을 적용하는 fractional step method의 첫번째 단계와 divergence free 조건으로부터 파생되는 Poisson 방정식의 solver는 완전히 벡터화되어 NEC SX-3에서 약 1.5GFLOPS의 속도를 달성하였다. 사용된 수치해석법의 자세한 설명은 앞서 발표된 저자의 논문^(8,9)들에 기술되었다.

2.3 Subgrid-scale model의 선택

적절한 SGS의 선택은 LES의 성공적 수행에 있어 매우 중요하다. 본 연구에서는 dynamic subgrid-scale model(DSGSM)을 사용하였다. 와점성모형(Eddy viscosity model)의 일종으로서 그 동안 LES에서 주로 사용된 Smagorinsky 모형과 비교한 DSGSM의 우수성은 여러 연구를 통해 입증되었다.^(9,11,12) Bardina의 혼합모형(mixed model)은 두단계의 필터를 사용한다는 면에서 DSGSM과 같이 정교하지만,⁽¹³⁾ DSGSM과는 달리 모델계수를 고정시켜야 한다는 결정적인 약점이 있다. 사용된 DSGSM의 자세한 설명은 앞서 발표된 저자의 논문⁽¹⁴⁾을 참고하기 바란다.

2.4 경계조건 및 유동파라미터의 선택

균질한(homogeneous) 방향인 횡방향 (z)과 형상이 주기적인 주유동방향 (x)으로는 주기조건이, 또한 모든 벽면에서는 no-slip 조건이 적용되었다. 컴퓨터코드는 계산영역내에 흠이 두 개까지 포함되도록 제작되었으나 실제로는 과도한 계산시간 때문에 대부분의 경우 하나의 흠만 포함하는 계산영역으로 LES를 수행하였다. 이는 Jimenez와 Moin⁽¹⁵⁾의 minimal channel 유동연구와 같은 접근방법이다. 즉 형상파라미터의 변화에 따른 기본유동의 정성적 변화메커니즘을 밝히고자함이 본 연구의 주목적이다.

본 연구에서 택한 레이놀즈수 6900은 비교적 낮은 수치이다. 낮은 레이놀즈수를 택한 이유는 모든 벽면에서 no-slip 조건의 적용이 가능케 하기 위해서이다. 높은 레이놀즈수에서는 벽면근처의 전단층을 정확히 해상하기 위해서는 과도한 격자점이 필요하고, 이를 대체하기 위한 벽면모형(wall-layer model)의 도입은 또다른 차원의 불확실성이 개입되는 것을 의미한다.

본 연구에서는 Case 7을 제외하고 돌출된 부분의 주유동방향의 길이 (L_b)는 $H/2$ 로, 계산영역의 횡방향의 길이는 $2H$ 로 고정하였고 흠의 길이 (L_g)는 L_b 보다 비교적 큰 경우를 고려하였다 (Table 1). 따라서 서론에서 언급된 바와 같은 다량의 칩이 부착된 평행한 두 PCB의 형상이나 관내 유로의 거칠기의 형상의 간략화된 모형에 해당된다. 이러한 형상에서의 유동은 $L_b > L_g$ 인 경우 (Case 7)와 비교할 때 상당히 다를 것으로 추측된다. 전자는 전유동장에 걸쳐 흠의 상류쪽면 모서리에서 생성된 자유전단층(free-shear layer)의 영향이 지배적이고, 반면 후자에서는 전유동장에 걸쳐 channel 유동의 양상이 지배적일 것으로 예상된다. (Table 1, Case 7)

본 연구에서 고려한 유동형상을 포함하는 정지된 두 면 사이의 유동은 두 가지 형태로 구분될 수 있다. 첫째는 유량이 고정되고 입구와 출구 사이의 압력차이 (Δp)가 시간에 따라 변동하는 경우이고, 둘째는 정반대로 Δp 가 고정되고 대신 유량이 변동하는 경우이다. 본 연구에서 고려한 형상과 같은 복잡한 형상에서의 유동의 전산해석은 유한차분법이 사용되는 한 엄밀하게(exactly) 유량을 고정시키는 것이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 후자

의 경우를 택하였고 각 Case에서의 레이놀즈수와, Δp 값의 상대적인 크기가 Table 1에 나타나있다. 모든 Case에 대해 레이놀즈수가 가급적 같게 되도록 Δp 값을 조절하였지만 정확히 같은 레이놀즈수를 얻는 것은 거의 불가능하였고 DNS를 기준으로 레이놀즈수에서 Case 5를 제외하고 약 3%이내의 차이를 보였다. (Table 1)

각 Case에서 사용된 격자점의 수도 Table 1에 나타내었다. LES의 경우 DNS에 비해 단지 약 6.5% 정도의 격자점만이 사용되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 DNS와의 비교

본 연구에서 사용된 해석도구인 LES의 정확도의 정량적 평가를 위해서 DNS와의 비교를 우선 실시하였다. 파라미터적 연구를 수행하기 위해서는 DNS보다 훨씬 적은 격자점을 사용하는 LES의 사용이 불가피하기 때문에 LES의 정확도에 대한 평가는 매우 중요하다. 평가기준자료로서 흠이 파진 평판유동의 DNS data를 얻기 위해 저자와 협력관계에 있는 독일 DLR(German Aerospace Research Establishment)과 함께 한 경우에 대한 DNS를 수행하였다(Case 1). DNS 결과는 별도의 논문으로 발표될 예정이다.⁽¹⁶⁾ 과도한 계산시간 및 방대한 data 저장장소가 요구되는 DNS를 한국에서 수행하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 독일 DLR은 현재 한국 SERI의 CRAY-YMP/C90보다 약 2배이상 빠른 성능을 가진 NEC SX-3를 보유하고 있다. Case 1에서 채택된 형상은 1992년에 저자가 수행한 DNS의 경우⁽¹⁴⁾와 비교해 볼 때 레이놀즈수는 약 2배로 높였고, 흠의 길이를 반으로 줄였으며 반면 사용된 격자점수는 4배이상 증가하였고, 평균유동장계산에 있어 통계적 오차를 줄이기 위해 130에 달하는 상당히 긴 무차원화된 Time Interval(TI, Table 1)동안 realization을 sample하였다. 이는 약 9번의 Flow-Through Time(FTT, Table 1)에 해당되는 시간이다. 이와 같은 Case 1을 수행하는데 약 800시간이상의 CPU 시간이 NEC SX-3에서 소요되었다. LES계산에서는 비교적 짧은 TI동안 평균작업을 수행하였는데 이는 과도한 계산시간을 피하기 위해서이다. 하지만 각 경우에 대해 적어도 평균속도나 난류섭동(turbulent fluctuation)등 DNS와 비교하고자 하는 양들에 관

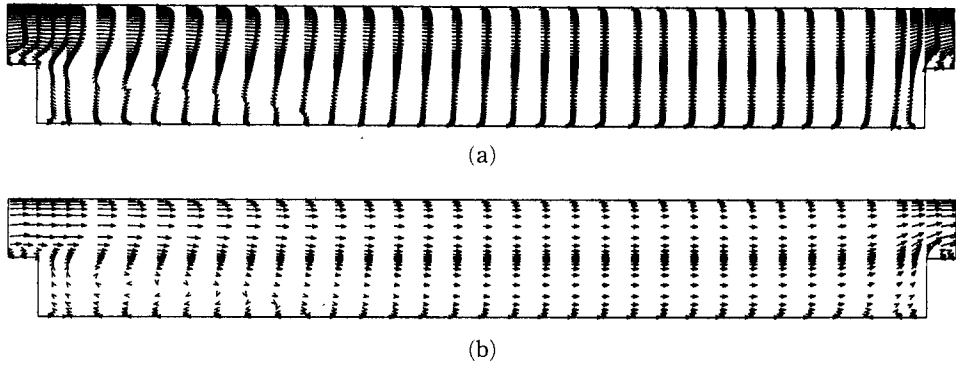


Fig. 2 Velocity vector plots: (a) DNS; (b) LES

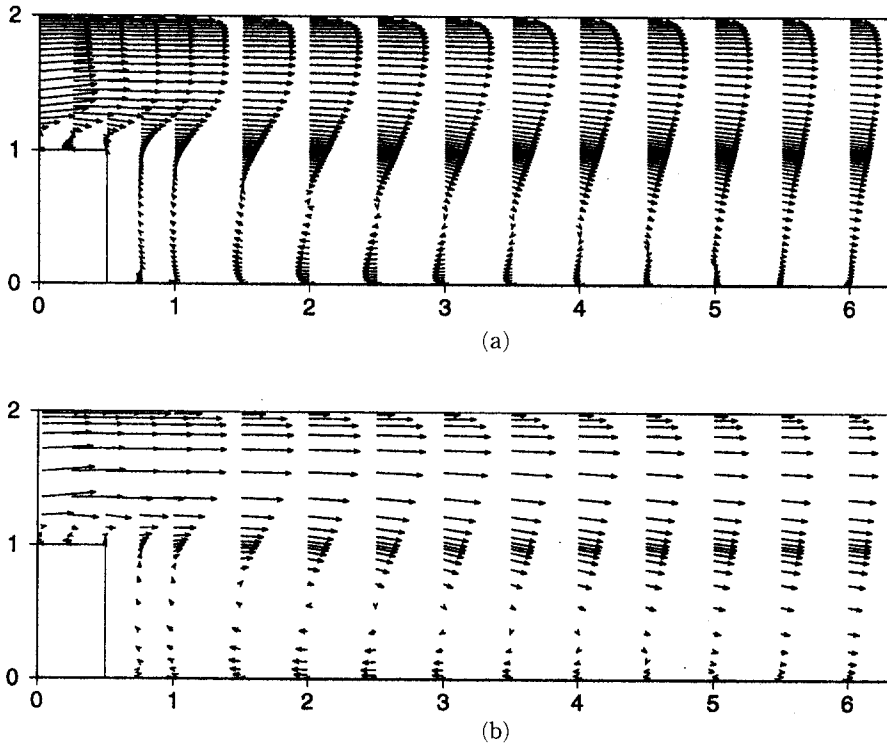


Fig. 3 Velocity vector plots near the backward face of the groove: (a) DNS; (b) LES

한 한 더 이상의 변화가 없음을 확인하였다. Case 2는 Case 1과 같은 조건에서 난류모델 없이 생긴 격자점 수를 사용한 수치모사이며 본 논문에서는 “coarse-grid DNS(CDNS)”라 칭한다. 이는 “fine-grid DNS(DNS)”의 수치적 오차를 평가하기 위하여 수행되었으며, 또한 LES와의 비교평가에도 이용된다.

Case 3은 Case 1과 같은 조건에서의 LES 결과이다. 단 레이놀즈수만 약 1.6%의 차이가 있다. 평균유동장에 대해 두 Case의 비교가 이루어지며 균질한 방향인 z 방향과 시간에 대해 평균이 계산되었다. Fig. 2는 전체유동장에서의 속도벡터그림의 비교이고, Fig. 3과 Fig. 4는 홈의 상류쪽 벽면과 하류쪽 벽면근처에서의 확대된 속도벡터그림이

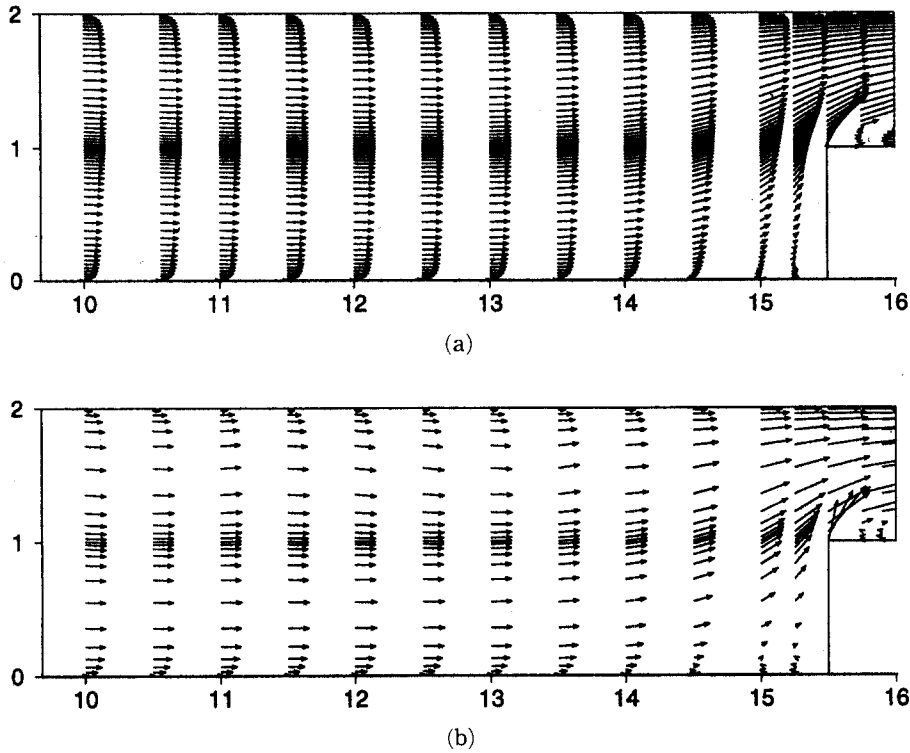


Fig. 4 Velocity vector plots near the forward face of the groove: (a) DNS; (b) LES

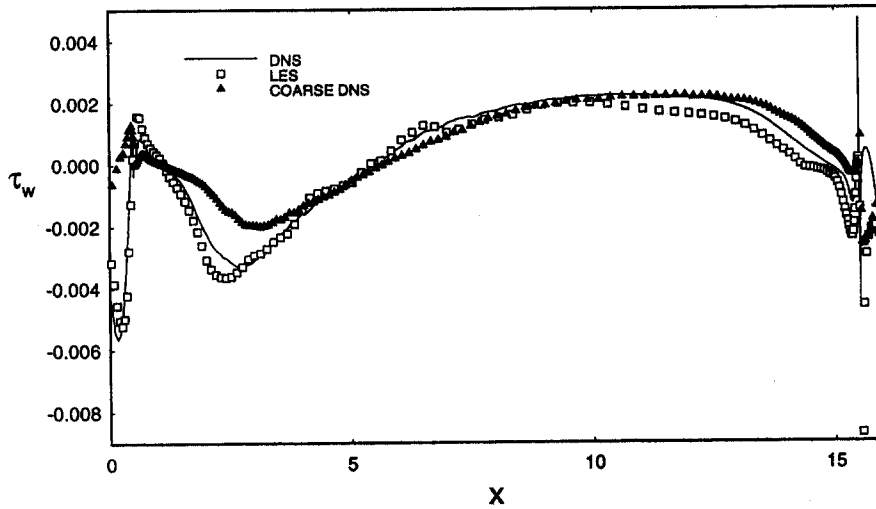


Fig. 5 Comparison of shear stress.

다. 속도벡터의 길이는 각 Case 별로 스케일 되었다. LES결과를 DNS와 비교해볼때 큰 유동구조가 매우 잘 일치됨을 알 수 있다. 특히 박리 및 재부

착유동의 주요 파라미터로 인식되는 박리면으로부터의 재부착지점까지의 거리 (X_g)가 단지 약 3.2%의 오차를 보여주고 있고, 돌출면위에서의 박

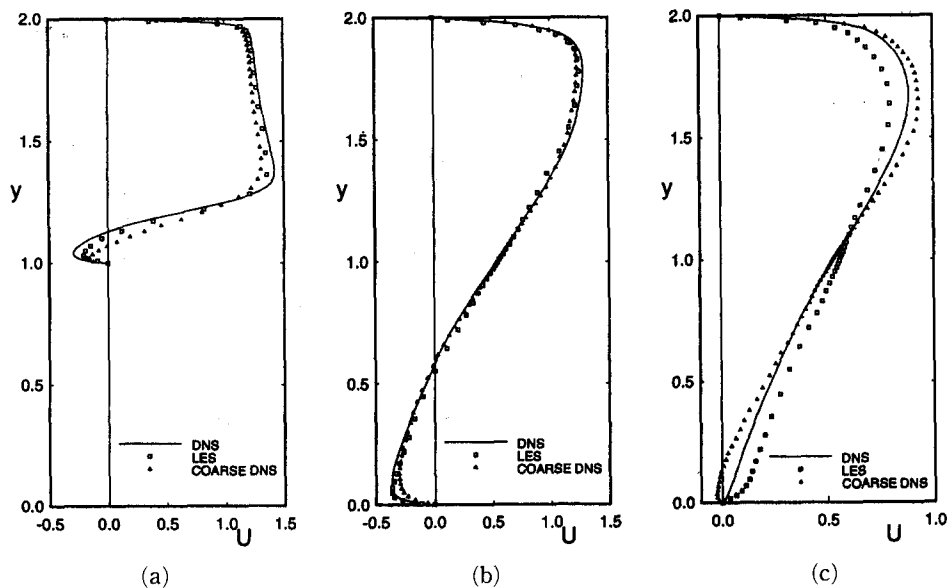


Fig. 6 Streamwise mean velocity: (a) $x=0.0$; (b) $x=2.5$; (c) $x=5.5$

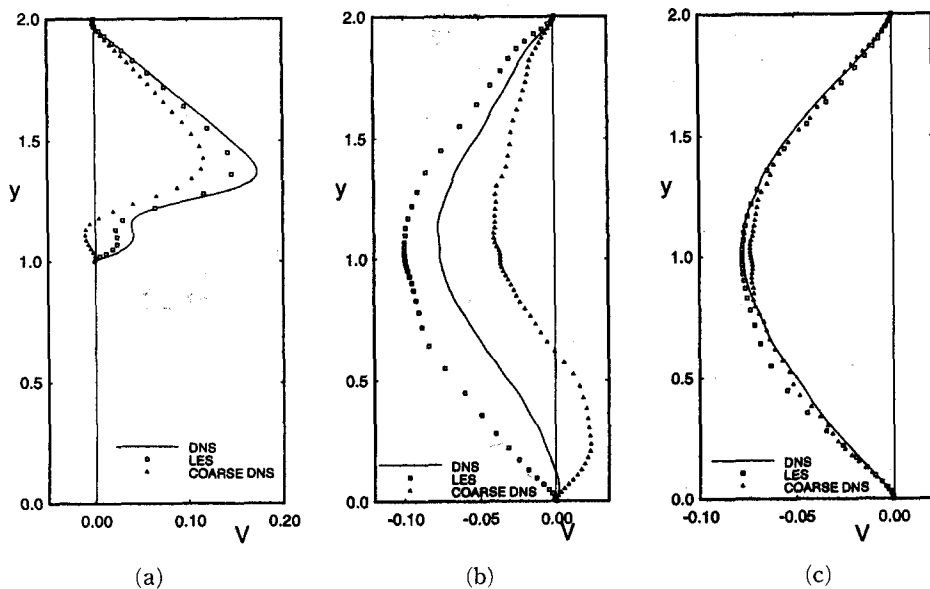


Fig. 7 Normal mean velocity: (a) $x=0.0$; (b) $x=2.5$; (c) $x=5.5$

리된 유동구조도 흡의 하류쪽면인 박리면으로부터 재부착지점까지의 거리 (X_b)에서 약 2%의 오차를 보여주는 등 매우 흡사함을 알 수 있다. 또한 흡의 모서리부근에서의 이차적인(secondary) 에디들도 비교적 정확히 해상되었다.

Fig. 5는 흡의 아랫면에서의 평균유동장에서의 전

단응력(shear stress) 분포의 비교를 나타낸다. 흡은 $x=0.5$ 와 $x=15.5$ 사이에 위치한다. 정성적으로나 정량적으로 DNS와 LES결과는 잘 일치한다. 특히 LES는 CDNS와 비교해 볼 때 더 적은 격자점을 사용하였음에도 불구하고 우수한 성능을 보여주고 있으며, 이는 SGS의 중요성을 나타낸다.

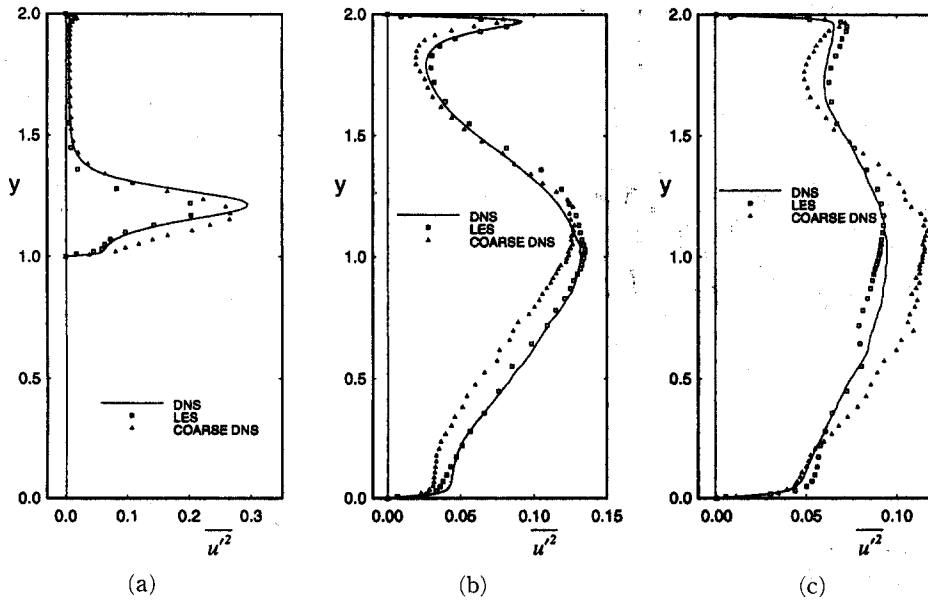


Fig. 8 Streamwise turbulent fluctuation: (a) $x=0.0$; (b) $x=2.5$; (c) $x=5.5$

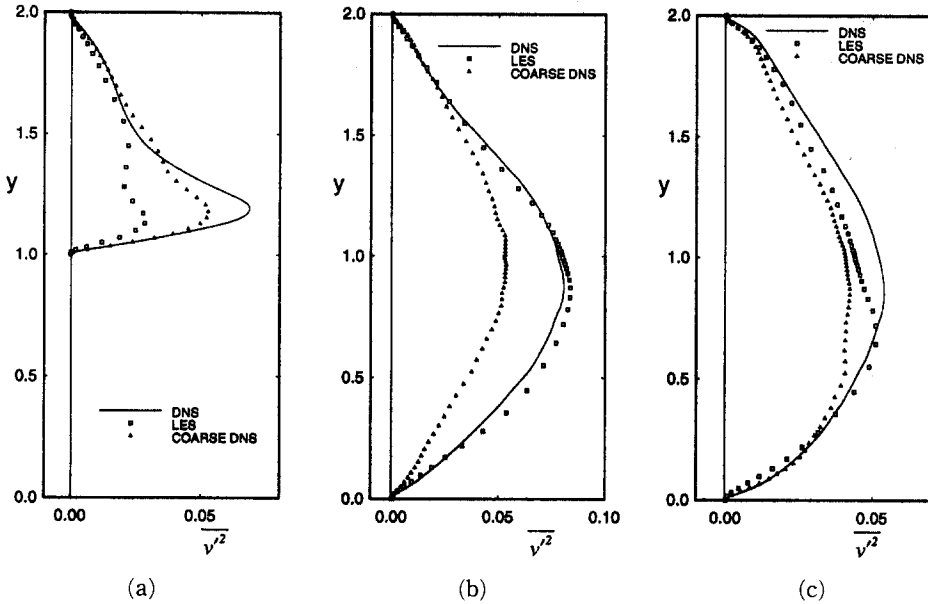


Fig. 9 Normal turbulent fluctuation: (a) $x=0.0$; (b) $x=2.5$; (c) $x=5.5$

Fig. 6과 7은 돌출면 중앙($x=0.0$), 흡의 상류쪽 면으로부터 $2h$ 떨어진 재순환구역내($x=2.5$), 그리고 재부착점부근($x=5.5$)에서의 주유동방향과 수직방향 평균속도분포의 비교를 나타낸다. 모든 지점에서 LES가 CDNS보다 정성적으로나 정량적

으로 보다 우수한 결과를 보여준다. 특히 LES는 벽면전단층 및 자유전단층등 난류의 생성과 관련되는 주요부분에서 속도분포를 비교적 정확히 해상하고 있다.

Fig. 8과 9는 Fig. 6과 7에서 나타낸 지점과 같은

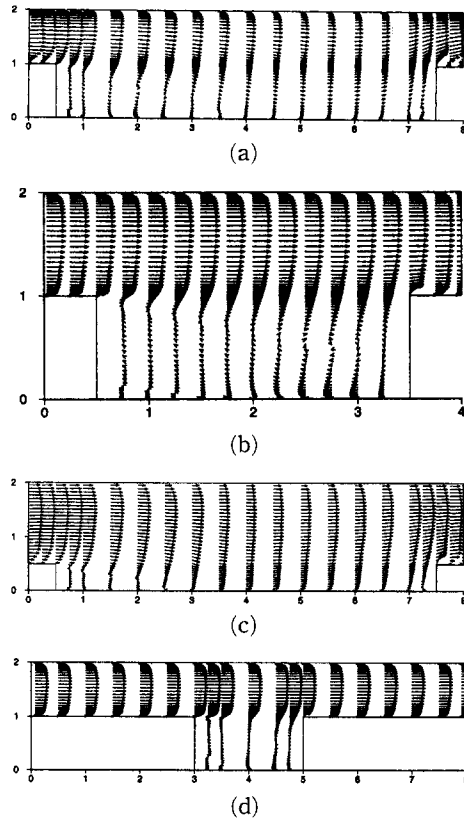


Fig. 10 Velocity vector plot for the averaged flow fields: (a) Case 4; (b) Case 5; (c) Case 6; (d) Case 7

지점들에서의 x 와 y 방향의 평균된 난류섭동을 각각 보여준다. LES결과가 DNS와 비교하여 일부구간에서만 약간의 차이를 나타낼 뿐 대부분의 영역에서는 비교적 일치된 결과를 보여준다. 이러한 second order의 양들은 주유동방향의 평균속도와 비교하여 절대값에서 매우 작고 또한 DNS와 LES의 레이놀즈수에서 약 1.6%의 차이가 있음을 감안할 때 일부구간에서의 차이는 수용할 만한 것으로 판단된다.

위의 결과를 종합해보면, LES가 DNS에서의 격자점수의 단지 6.5%만을 사용함에도 평균속도 및 2차 통계치에서 비교적 양호한 계산결과를 보여줌으로, 흐름의 형상변화에 따른 큰 유동구조의 변화를 관찰하고자 하는 본 연구의 목적에 현실적으로 부합되는 연구도구라고 사료된다.

3.2 흐름이 파진 평판 사이 난류유동의 파라미터적 연구

이 절에서는 흐름 형상의 변화에 따른 큰 유동구조의 변화의 파라미터적 연구결과가 소개된다. 특히 흐름의 길이 (L_g)와 깊이 (h)의 변화에 따른 큰 유동구조의 변화를 관찰한다. 이를 위해 다섯 가지 경우의 LES가 수행되었고 각 Case의 형상 및 유동파라미터들과 realization sampling에 소요된 TI와 FTT가 Table 1에 열거되었다. Case 3, 4, 5, 7은 L_g 가 변화하는 경우이고, Case 4, 6은 h 가 변화하는 경우에 해당된다.

3.2.1 평균유동장

Fig. 10(a), (b), (c), (d)는 각각 Case 4, 5, 6, 7에 대한 평균유동장의 속도벡터를 나타낸다. Case 3에 대한 평균유동장의 속도벡터그림은 Fig. 2, 3, 4에서 이미 나타내었다. Case 3, 4, 6에서는 날카로운 모서리에서의 유동의 박리에 의해 흔히 발견되는 재순환구역이 돌출물 윗면과 흐름의 상류부분에서 존재함을 알 수 있다. 각 재순환구역의 재부착길이가 Table 1에 표시되어있다.

흐름의 길이가 짧아짐에 따라 각 재부착길어도 역시 짧아지며, Case 5와 7의 경우에는 흐름의 밑면에서 재부착이 일어나지 않고 재순환구역이 전체 흐름에 걸쳐 포함되어 있고 또한 돌출물 위에서는 유동의 박리가 일어나지 않는 등 상당히 다른 양상을 보여준다. Fig. 10 (b)와 (d)를 보면 흐름내부의 대부분의 구역에서 유동속도의 크기가 매우 작고 따라서 이 부분에 존재하는 재순환구역의 세기는 매우 약함을 알 수 있다. 이는 흐름의 간격이 짧아짐에 따라 전체적인 유동이 마치 간격이 $H-h$ 인 두 평행한 평판 사이의 유동으로 접근하는 듯한 경향을 보여주고 있다. 이러한 과정에서 흐름내부구역에서는 평균유동이 매우 빈약해짐을 알 수 있다.

Case 6은 Case 4의 경우에서 흐름의 깊이가 반으로 줄어든 경우로서 각 재순환구역의 절대적인 크기만 줄어들었을 뿐 각 구역의 크기의 흐름깊이에 대한 비율은 Case 4의 값들과 큰 차이가 없음을 알 수 있다(Table 1). 이는 Case 6에서와 같은 정도의 흐름의 길이에서는 흐름깊이의 다소간의 변화에는 전체적인 유동구조가 정성적으로는 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 또한 X_g 와 X_b 에서의 차이는 Case 6의 경우 흐름의 하류쪽면에서의 박리점인 모서리가 Case 4의 경우보다 평균속도가 작은 구역

에 위치함을 유의하면 설명되어질 수 있다.

흠의 깊이는 일정하게 유지하면서 흠의 길이가 변화하는 경우인 Case 7과 Case 4에 있어서는 흠의 길이는 일정하게 유지하면서 흠의 깊이가 변화하는 경우인 Case 6과 Case 4의 경우와는 다른 결과를 보인다. Case 7은 Case 5에서와 같이 흠내부에서는 유동의 재부착은 일어나지 않고, 재순환구역이 흠안에 갖히는 유동의 형태를 보여준다. 그리고 전체적인 유동 형태는 간격이 $H-h$ 인 평판 사이의 유동과 유사한 형태를 보이고 있다. 즉 Case 7과 Case 5를 비교해보면 유동장이 상당히 비슷한 양상을 보여주고 있으며, 따라서 흠의 길이가 유동의 재부착없이 재순환구역이 포함될 정도로 짧으면 흠과 흠사이의 간격에 큰 영향을 받지 않고 유동은 간격이 $H-h$ 인 평판 사이의 유동과 유사해짐을 알 수 있다.

Fig. 11 (a), (b), (c), (d)는 각각 Case 4, 5, 6, 7의 돌출면의 윗면과 흠의 밑면에서의 평균유동장의 전단응력분포를 나타낸다. 전단응력의 부호에 따라 재부착점의 위치를 정확히 알 수 있다. 또한 각 경우에 흠의 상류쪽면과 하류쪽면의 아래모서리 부근에 작은 크기의 2차적 유동구조가 존재함을 보여준다. Case 5와 Case 7의 경우 흠의 상류쪽면에서 흠의 중앙부분까지는 전단응력이 매우 미약함을 알 수 있다. 또한 이 두 가지 Case들에서는 돌출물위에서의 전단응력이 거의 일정함을 보여주고 있는데, 이는 흠의 길이가 짧을 경우 흠 이외의 영역에서는 평판 사이의 유동과 비슷하다는 앞서의 논의와도 일치함을 보여준다.

Fig. 12 (a), (b), (c), (d)는 각각 Case 3, 4, 5, 7에 대한 전체평균 난류섭동($\sqrt{u'^2 + v'^2 + w'^2}$)의 분포도를 보여준다. Case 3, 4, 7의 경우에는 등고선간의 간격이 0.03이고 Case 5의 경우에는 간격이 0.06이다. 실선은 점선보다 더 큰 값을 나타낸다. 즉 실선으로 표시된 부분에서 전체 난류섭동의 크기가 매우 큼을 나타낸다. 네 경우 모두 흠의 하류쪽 돌출물 모서리 부근과 흠 중앙 윗부분의 자유전단층에서 강한 난류가 존재함을 알 수 있다. 특히, 자유전단층에서의 난류가 흠 내부로의 물질 전달에 중요한 역할을 할 수 있다. Case 5와 7의 경우에는 Case 3과 4의 경우와는 달리 돌출물 윗면에 박리에 의한 재순환구역이 존재하지 않으므로 Case 5와 7에서의 자유전단층은 흠안에 고립된 주재순환유동에 의한 것으로 따라서, 난류가 강한 부

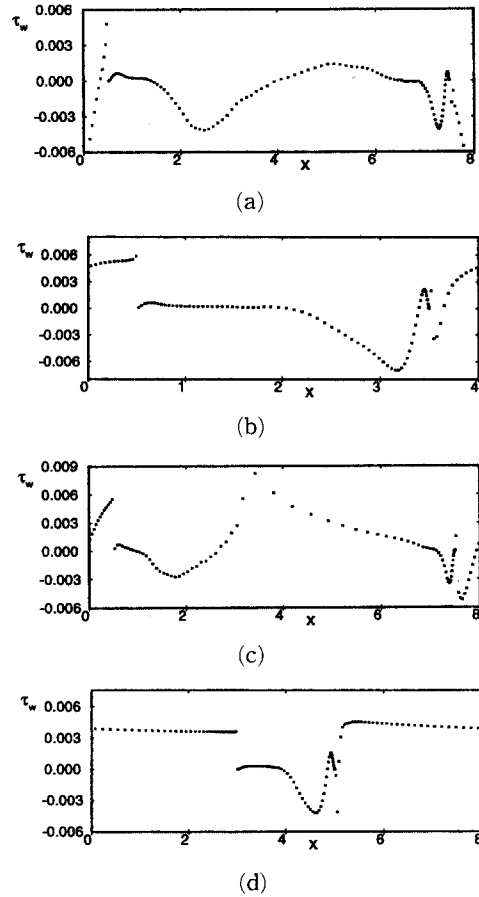


Fig. 11 Distribution of shear stress: (a) Case 4; (b) Case 5; (c) Case 6; (d) Case 7

분은 흠 하류쪽에 치우쳐 나타난다. 한편, Case 3과 4에서는 돌출물 모서리에서의 박리에 의해 형성된 자유전단층에서 강한 난류가 존재함으로 이는 흠 상류쪽에 치우쳐 나타난다. Case 5와 7의 경우, 흠의 내부에서 난류섭동이 매우 약함을 알 수 있고, 또한 평균유동도 매우 빈약하다는 앞서의 관찰로부터 이 부분에서는 효과적인 강제 열전달이나 물질전달을 기대할 수 없음을 알 수 있다.

Table 1의 7번째 칸($\Delta p / \Delta p_{Case 3}$)은 각 경우의 유동장의 입구와 출구사이에서의 평균압력차이를 Case 3을 기준으로 무차원화한 결과이다. 단 각 경우 모두 Case 3과 같은 주유동방향의 계산영역 길이 ($L_b + L_g$)로 환산된 압력차이를 사용하였다. 흠의 길이가 짧아질수록 같은 유량(혹은 레이놀즈 수)을 유지하기 위해서는 압력차이가 커지다가

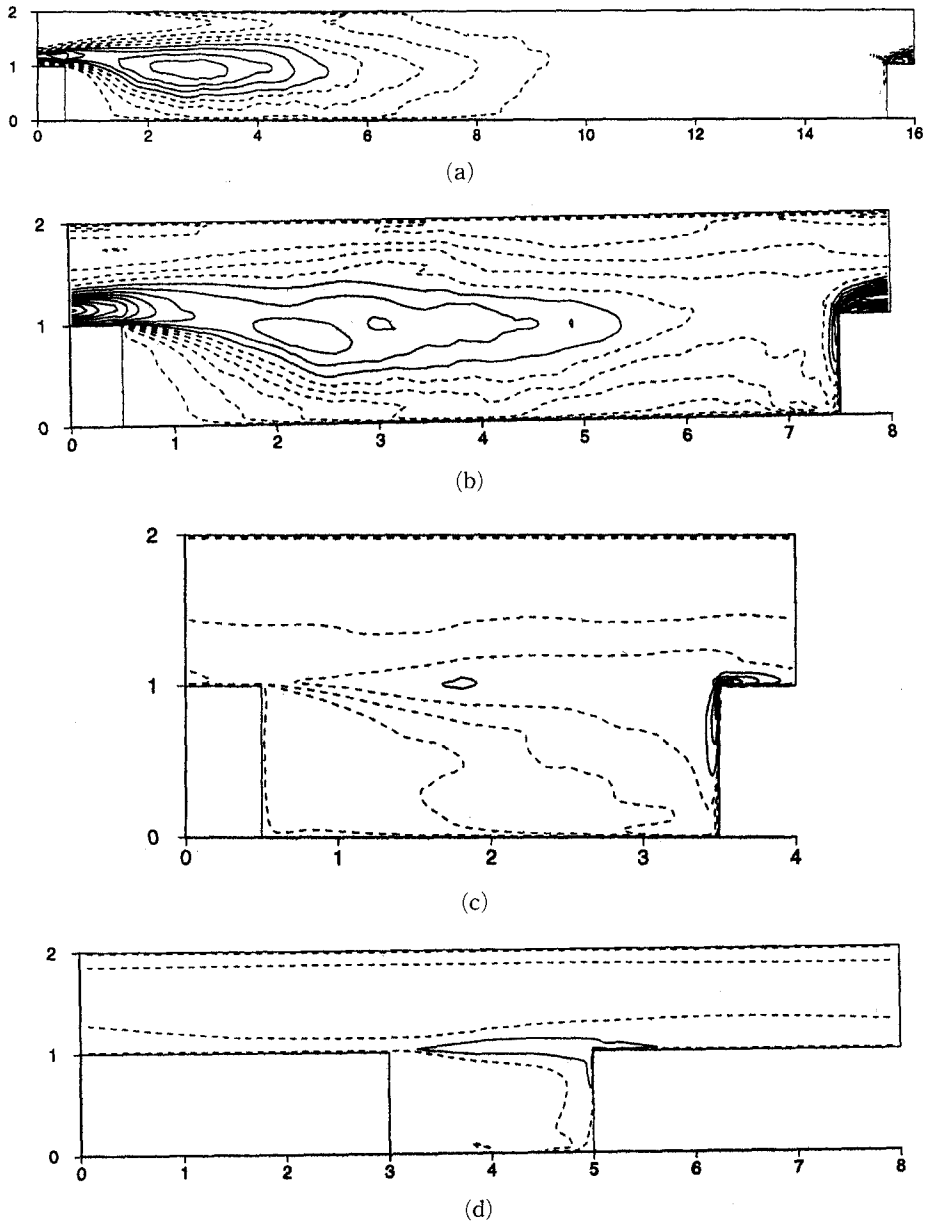


Fig. 12 Contours of total turbulent fluctuation: (a) Case 3; (b) Case 4; (c) Case 5; (d) Case 7

(Case 4), 다시 감소되는(Case 5) 경향을 보여준다. Case 3과 4의 경우에는 홈내에 재순환구역과 재부착지점이 명확히 존재하고 있으나 Case 5의 경우에는 재순환구역이 재부착지점이 없이 홈내에 고립된 형태이고 그 세기 또한 매우 약하다는 앞서의 관찰을 상기해 볼 때 Case 5에서의 압력차이의 감소가 홈의 길이감소에 의한 큰 유동구조의 변화

와 무관하지 않음을 알 수 있다. 즉 Case 5의 경우에는 주유동이 홈의 존재를 크게 의식하지 못하고 마치 평판 사이의 간격이 줄어든 평판 사이유동의 거동에 가까워짐으로써 Case 4의 경우보다 작은 압력차이로도 비슷한 유량(혹은 레이놀즈 수)를 유지하는 것이 가능한 것으로 사료된다. 이와 같은 판단은 Case 4과 6의 비교로 뒷받침된다.

Case 6은 Case 4보다 주유동이 두 평행한 평판 사이 유동에 더 가깝고 따라서 유동장의 입구와 출구 사이에서의 압력차이가 Case 3에 비해 현저히 작음을 알 수 있다(Table 1). Case 5와 6을 비교해보면 Case 5의 주유동의 거동은 Case 6의 주유동의 거동보다 평판 사이 간격이 더 작은 평판 사이 유동에 접근하므로 같은 유량을 유지하기 위해서는 Case 6보다는 큰 압력차이가 필요하다.

Case 5와 7에서는 평판 사이 유동에 좀더 가까운 Case 7의 압력차이가 더 작으며, Case 6과 7에서는 평판 사이 간격이 더 큰 것으로 인식되는 Case 6의 압력차가 더 작다. 위에서 언급된 각 경우에 대한 입구와 출구 사이 압력차이의 값에 관한 관찰은 흡의 길이 변화에 따른 큰 유동구조의 변화에 관한 관찰과 잘 일치한다.

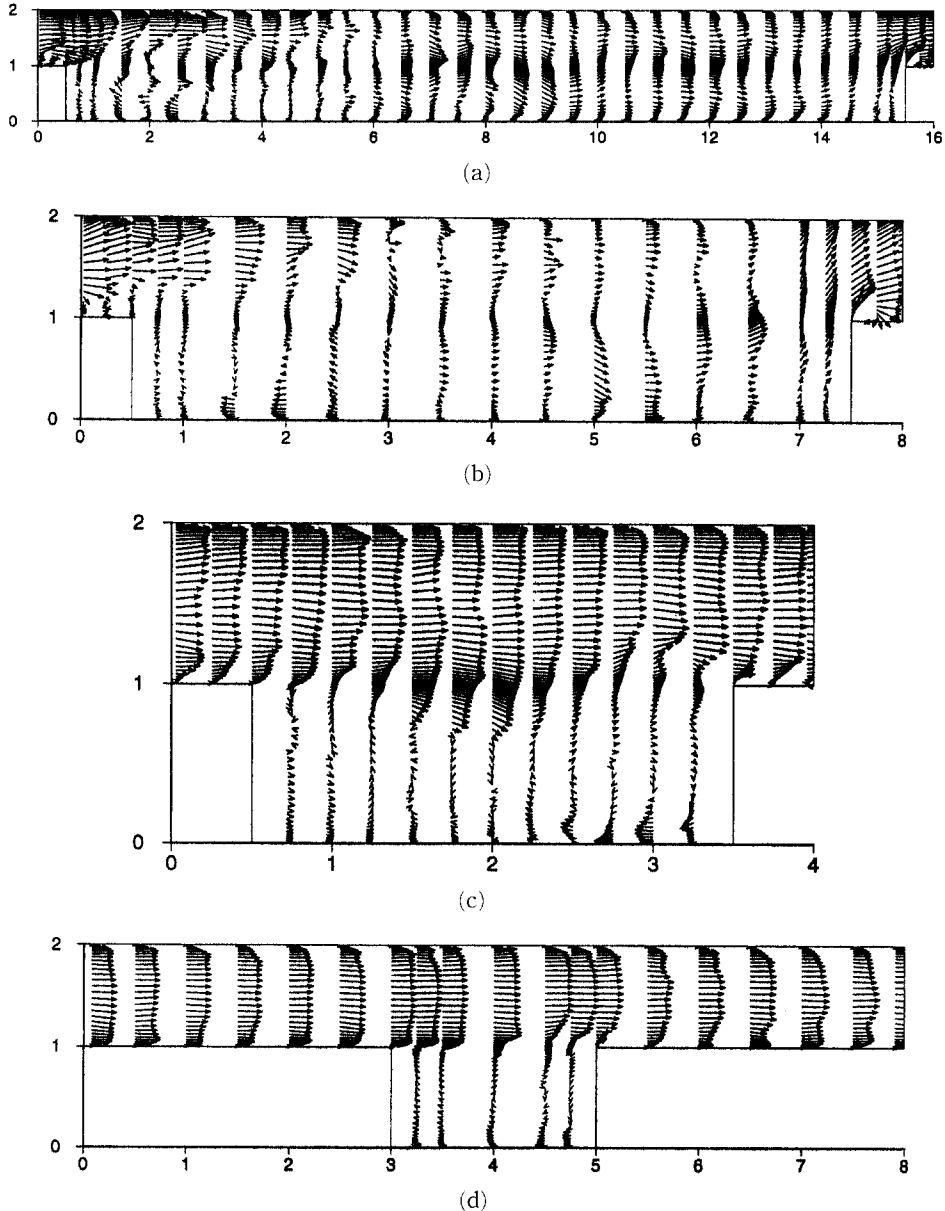


Fig. 13 Instantaneous velocity vector plot: (a) Case 3; (b) Case 4; (c) Case 5; (d) Case 7

3.2.2 평균유동장

Fig. 13 (a), (b), (c), (d)는 각각 Case 3, 4, 5, 7에 대해 한 순간과 한 xy 평면에서의 대표적인 순간유동장의 벡터그림이다. 속도벡터의 크기는 각 Case 별로 스케일되었다. Case 3의 경우에는 홈내부에서 상류쪽면 윗모서리로부터의 자유전단층의 생성, vortex shedding, 유동의 재순환, 재부착 등 후향계단유동과 전향계단유동에서 존재하는 대표적인 유동구조들을 볼 수 있다. 한편 Case 5와 7의 경우에는 평균유동장의 벡터그림(Fig. 10 (b)와 (d))과 상당히 유사하다. 특히 홈내부의 재순환구역은 순간유동장에서도 매우 속도가 작으며, 이는 평균유동장을 근거로 한 홈내부에서의 유동이 매우 미약하다는 앞서의 관찰을 뒷받침한다.

Fig. 14 (a), (b), (c), (d), (e)는 각각 Case 3, 4, 5, 6, 7의 홈상류쪽면(왼쪽그림)과 하류쪽면

(오른쪽그림)에서의 압력의 분포도이고 분포도의 무차원화된 간격은 0.02이다. 횡축은 횡방향의 좌표이다. 홈의 상류쪽면 윗모서리에서 유동의 박리가 일어나므로 상류쪽면은 재순환구역내에 있게 되고 그 면위에서의 압력구배는 매우 미미함을 보여 준다. 반면 하류쪽면 위에서는 압력구배가 매우 크며, 특히 입구와 출구사이에서의 평균압력차이가 가장 큰 Case 4에서 하류쪽면 위에서의 압력구배도 가장 큰 것을 알 수 있다. 한편 홈의 길이가 짧았던 Case 5와 7의 경우에는 다른 Case들에 비해 하류쪽면 위에서 윗쪽 모서리부근을 제외하고는 비교적 압력구배가 크지 않고, 또한 상류쪽면 위에서도 다른 Case들에 비해 압력구배가 매우 낮음을 알 수 있다. 이러한 사실은 Case 5와 7의 경우 홈내부에서의 유동이 매우 미약함을 알려주는 또하나의 증거이다. Case 6에서는 등압선의 분포가 y 방

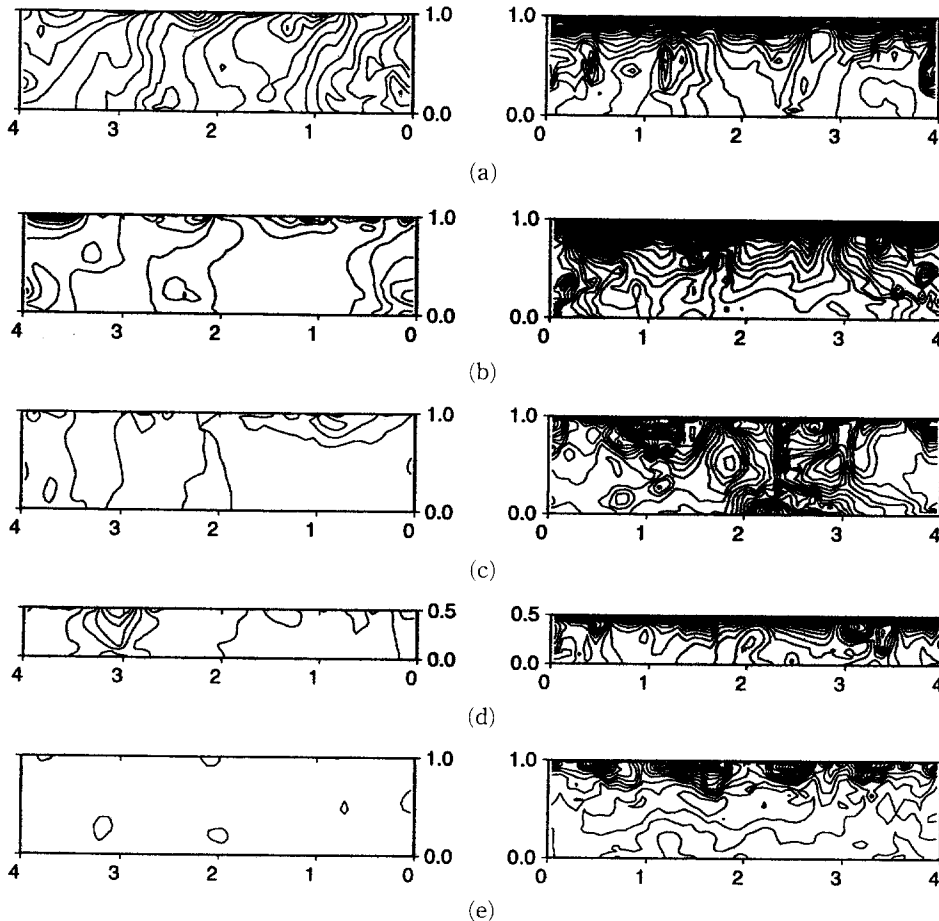


Fig. 14 Contour of pressure: (a) Case 3; (b) Case 4; (c) Case 5; (d) Case 6; (e) Case 7

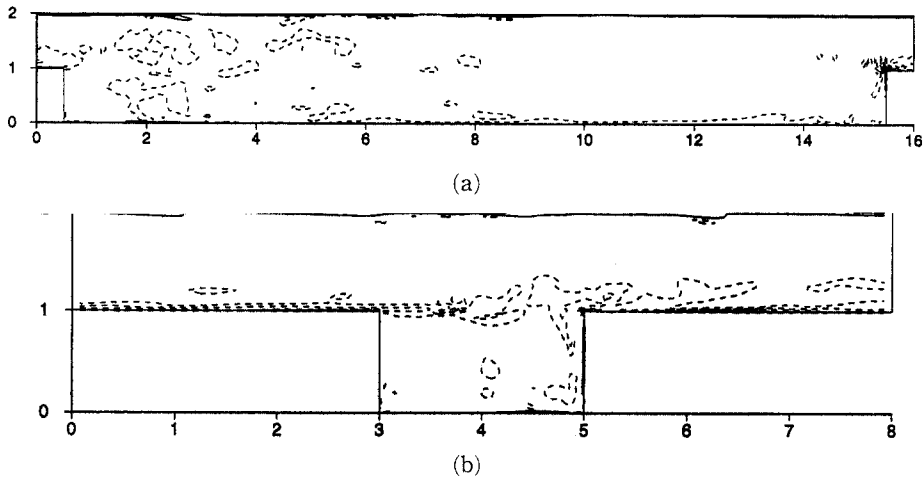


Fig. 15 Contour of ω_z : (a) Case 3; (b) Case 7

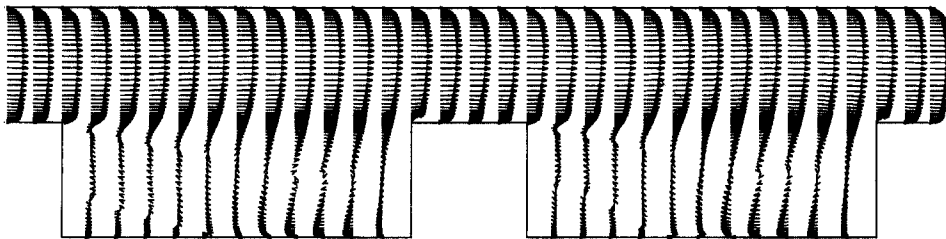


Fig. 16 Averaged flow field in a domain with two grooves. the flow domain of Case 5 was repeated in the streamwise direction. $Re=10,400$

향으로 길이스케일이 반으로 줄어든 것을 제외하고는 Case 4의 분포도와 매우 흡사하다. 이는 평균 유동장에서 Case 4와 6의 유동구조가 매우 비슷하다는 앞서의 관찰과 일치된다.

Fig. 15 (a), (b)는 각각 Case 3과 7의 한 xy 평면에서의 횡방향와류(spanwise vorticity, ω_z)의 분포도이다. 실선은 양의 값, 점선은 음의 값을 가지며 각 등고선사이의 무차원화된 간격은 12이다. Case 3에서는 홈의 하류쪽면 윗모서리에서 최대값을 가지며 하류로 갈수록 소멸되는 경향을 보이나 Case 7에서는 ω_z 가 유동장에 계속 유지되는 경향을 보여주며, 홈내부에서의 분포는 최대 난류섭동구역과 일치되는 결과를 보여준다.

일이 정상주기의 두배인 subharmonic 형태의 큰 유동구조가 존재한다면 본 연구의 계산영역으로는 감지될 수 없다. Subharmonic 형태의 유동구조의 존재가능성을 확인하기위하여 이러한 구조가 존재할 가능성이 가장 큰 형상의 경우(Case 5)에 대해서 계산영역내에 두 개의 홈이 포함된 경우의 LES를 수행하였다. Fig. 16은 1 FTT동안 평균된 유동장을 보여준다. 두 개의 홈에서의 유동구조는 매우 유사하다. 따라서 본 연구에서 고려하는 형상과 레이놀즈수에서는 subharmonic 형태의 유동구조의 존재가능성은 없고, 따라서 fundamental 형태의 유동구조에 주안점을 둔 본 연구가 타당함을 알 수 있다.

3.2.3 Fundamental 형태의 유동구조

위에 언급된 모든 계산결과들은 계산영역내에 하나의 홈만이 존재하는 경우이다. 따라서 길이스케

4. 요약

본 연구에서는 LES기법을 이용하여 홈이 파진

평판 사이 난류유동의 전산해석을 수행하였다. 특히 흡의 길이와 깊이의 변화에 따른 큰 유동구조의 변화를 관찰하기 위한 파라미터적 연구를 수행하였다. 벽면전단층을 현실적으로 수용 가능한 격자점의 수를 사용하여 no-slip조건으로 해상할 수 있도록 비교적 낮은 레이놀즈 수를 선택하였다. 우선 LES의 정량적 성능평가를 위한 기준자료로서 한 case에 대하여 고해상도의 DNS가 수행되었다. 같은 case에 대해 LES를 수행하여 각방향의 평균속도와 각 방향의 난류섭동등의 2차 통계치를 DNS자료와 비교해본 결과, LES가 DNS의 격자점수의 단지 6.5%만을 사용함에도 불구하고 정성적 및 정량적으로 만족한 결과를 얻을 수 있었고 따라서 LES가 파라미터적 연구에 적절한 도구임을 확인하였다.

본 연구의 두번째 단계로 이루어진 흡의 길이와 깊이의 변화에 따른 파라미터적 연구를 통해 다음과 같은 사실들을 확인하였다. 흡의 길이가 길 때에는 후향계단유동이나 전향계단유동에서 흔히 관찰되는 자유전단층, 재순환구역, 재부착 및 재발달, 2차적 유동구조등이 존재한다. 흡의 길이가 짧아지면 재순환구역이 전체 흡을 차지하여 재부착이나 재발달은 일어나지 않으며 흡내에 고립된 재순환의 세기는 상당히 약하여 주유동이 마치 평판 사이 간격이 줄어든 새로운 두 평행한 평판 사이 유동으로 옮겨가는 듯한 경향을 보여준다. 그 결과 유동장의 입구와 출구사이의 압력차이가 줄어들고 또한 난류가 왕성한 부분이 자유전단층에서 유동장의 중앙부분으로 이동하는 현상이 나타난다. 흡 전체를 차지하는 미약한 재순환 때문에 이 구역에서 강제열전달 및 물질전달이 왕성하지 못할 것임을 짐작할 수 있다. 한편 흡의 깊이가 변화하는 경우에는 유동구조는 정성적으로 큰 변화가 없었으며 단지 길이스케일이 흡의 깊이에 따라 비례적으로 변하는 경향을 보여주었다. 위에서 언급된 모든 관찰결과들은 평균유동장 및 순간유동장에 의해 일관성 있게 확인되었다.

본 연구의 연구결과를 칩들이 정렬되어 부착된 평행한 두 인쇄회로기판 사이에서 냉각유체로서의 공기의 유동이나, 밀집된 건물주위에서의 대기의 유동, 송유관 부식의 주요한 원인으로 인식되고 있는 표면거칠기등 요철이 있는 유동형상을 갖는 응용유동의 유체역학적인 측면에서의 물리적 이해를 위한 기본적인 모델로서 기초적 자료로서의 활용이

기대된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 핵심전문 연구비(951-1006-032-1)지원으로 수행되었으며 지원에 감사를 드린다. 본 연구의 계산은 시스템공학연구소(SERI)의 Cray C90를 사용하여 수행되었다.

참고문헌

- (1) Sendstad, O., 1994, Personal Communication.
- (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) Dimaczek, G., Kessler, R., Martinuzzi, R. and Tropea, C., 1989, "The Flow Over Two-Dimensional, Surface-Mounted Obstacles at High Reynolds Numbers," *the 7th Symposium on Turbulent Shear Flows*, Stanford University, 21~23.
- (4) Okamoto, S. and Nakaso, K., 1991, "Turbulent Shear Flow Over Rows Of Two-Dimensional Square Ribs on Ground Plane," *the 8th Symposium on Turbulent Shear Flows*, Technical University of Munich, 9~11.
- (5) Yamashita, S., Nakamura, I., Kushida, T. and Yamada, H., 1991, "An Experimental Study on the Separation of a Turbulent Boundary Layer from a Sharp Edge," *the 8th Symposium on Turbulent Shear Flows*, Technical University of Munich, 9~11.
- (6) Amon, C. H., 1993, "Spectral Element-Fourier Method for Transitional Flows in Complex Geometries," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 1, pp. 42~48.
- (7) Ghaddar, N. K., Magen, M., Mikic, B. B. and Patera, A. T., 1986, "Numerical Investigation of Incompressible Flow in Grooved-Channels; Part 2: Resonance and Oscillatory Heat Transfer Enhancement," *J. Fluid Mech.*, Vol. 168, p. 541.
- (8) 양경수, 1994, "높은 레이놀즈수에서의 난류 장애물유동의 Large-Eddy Simulation," 대한기

- 계학회논문집, 제18권, 제7호, pp. 1866~1872.
- (9) 양경수, 1995, "난류유동의 Large-Eddy Simulation기법의 알고리즘 향상에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제19권, 제7호, pp. 1691~1701.
- (10) Kim, J. and Moin, P., 1985, "Application of a Fractional Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations," *Journal of Computational Physics*, Vol. 59, pp. 308~323.
- (11) Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W., 1991, "A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model," *Phys. Fluids A*, Vol. 3, pp. 1760~1765.
- (12) Lilly, D. K., 1992, "A Proposed Modification of the Germano Subgrid-Scale Closure Method," *Phys. Fluids A*, Vol. 4, No. 3, pp. 633~635.
- (13) Bardina, J., Ferziger, J. H. and Reynolds, W. C., 1980, "Improved Subgrid Scale Models for Large Eddy Simulation," *AIAA paper* No. 80~1357.
- (14) Yang, K. -S. and Ferziger, J. H., 1993, "Large-Eddy Simulation of Turbulent Obstacle Flow Using a Dynamic Subgrid-Scale Model," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 8, pp. 1406~1413.
- (15) Jimenez J. and Moin, P., 1990, "The Minimal Flow Unit in Near-Wall Turbulence," *J. Fluid Mech.*, Vol 225, p. 213.
- (16) Kessler, R. and Yang, K. -S., 1996, "Direct Numerical Simulation of Turbulent Obstacle Flow," *KSME Journal*, submitted.