

측풍의 편향각 변화에 따른 자동차 주위의 유동해석

강동민^{*1}, 정영래^{*2}, 박원규^{*3}, 하성도^{*4}

Numerical analysis of flow field around an automobile with variation of yaw angles

D. M. Kang, Y. R. Jung, W. G. Park, S. D. Ha

This paper describes the flow field analysis of an automobile with crosswind effects of 15°, 30°, 45° and 60° of yaw angles. The governing equations of the 3-D incompressible Navier-Stokes equations are solved by the iterative time marching scheme. The Chimera grid technique has been applied to efficiently simulate the flow around the side-view mirror. The computed surface pressure coefficients have been compared with experimental results and a good agreement has been achieved. The A- and C-pillar vortex and other flow phenomena around the ground vehicle are evidently shown. The variation of aerodynamic coefficients of drag, lift, side force and moments with respect to yaw angle is systematically studied.

Key Words : 자동차 주위유동 (Flow around an automobile), 측풍 효과(Crosswind effects), 비압축성 난류유동(Incompressible turbulence flow), 시간 진행 반복 기법(Iterative time marching scheme), Chimera 격자기법 (Chimera grid technique), 공기역학적 계수 (Aerodynamic coefficients)

1. 서론

최근의 자동차는 알루미늄이나 복합재료의 사용이 증가됨에 따라 점차 경량화 되어 연료소모율이 감소되어 왔으나 상대적으로 측풍 및 돌풍에 취약하게 되어 고속주행시 측풍 및 돌풍에 대한 안정성의 문제가 제기되어 왔으며, 이에 자동차 주위의 정확한 유동장 해석을 통하여 자동차 성능향상을 모색하기 위한 연구의 필요성이

꾸준히 증가되어 오고 있다. 그러나 현재 정풍의 경우 다양한 연구를 통하여 많은 진척이 있어 왔으나, 측풍 및 돌풍에 대한 연구는 상대적으로 취약한 실정이다.

본 연구와 관련하여 선행된 자동차 주위의 일반적인 유동해석에 대한 연구들은 실험적 방법[1,2]에 주로 의존해 왔으나, 최근 수치기법의 개발과 컴퓨터의 급속한 발달로 인해 수치적 해석의 영역이 점차 확대되어져 가고 있다. 정풍의 경우 Taniguti 등[3], 정영래 등[4], 안민기 등[5], Horinouchi 등[6], Okumura 등[7]에 의해 3차원 자동차주위의 난류유동장이 계산되어졌다. 그리고 측풍영향

^{*1, *2} 학생회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

^{*3} 정회원, 부산대학교 기계공학과

^{*4} 한국기계연구원 신교통기술연구부

을 고려한 자동차 주위의 유동장에 대한 연구는 Englar 등(8), Macklin 등(9), Ahmadi 등(10)에 의해 수행되었다.

본 연구에서는 주행 안정성 및 저항감소를 위하여 측풍을 고려한 자동차 주위의 유동을 해석하였으며, 3차원 자동차에 대한 효율적인 격자생성을 위해서 영역분할 기법의 하나인 Chimera 격자기법을 사용하였다. 측풍에 따른 유동코드의 검증에 의해 측풍각 0° , 15° , 30° , 45° 의 경우에 대해 후사경이 없는 자동차 주위 압력계수를 계산하여 실험결과(11)와 비교하였다. 또한 측풍에 대한 후사경의 영향을 고찰하기 위해 각 측풍각도에 대해 유동을 계산하였다.

2. 지배방정식 및 수치해석 방법

3차원 비정상 상태 비압축성 점성 유동의 지배 방정식은 Navier-Stokes 방정식으로서, 이를 무차원화한 후 일반화된 곡선좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \hat{q}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\hat{E} - \hat{E}_v) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\hat{F} - \hat{F}_v) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\hat{G} - \hat{G}_v) = 0 \quad (1)$$

여기서 \hat{q} 는 유동벡터이며 \hat{E} , \hat{F} , \hat{G} 는 대류항을 의미하며, \hat{E}_v , \hat{F}_v , \hat{G}_v 는 점성항을 의미한다. 식(1)의 해를 구하기 위해, 반복시간진행법(Iterative time marching)(4,12)을 사용하였으며 자동차등과 같은 지상운송체의 유동해석 검증에 대해 참고문헌(5)에서 Ahmed 형상에 대해 계산하여 실험 및 타 연구자의 계산결과와 비교하였으며, 본 방법에 의한 계산결과가 다른 실험 및 계산결과와 매우 잘 일치하는 결과를 이미 얻은바있어 본 연구에서는 코드 검증에 위한 부분은 생략하기로 한다.

복잡한 3차원 자동차 형상에 대한 격자생성을 효율적으로 수행하기 위하여 Chimera 격자기법을 사용하였는데, 이 방법 역시 참고문헌(5)에서 충분한 검증이 되었으므로 구체적인 기술은 생략하기로 한다. 후사경의 Chimera

격자기법에서 hole point 계산에 과도한 계산시간이 소요되는 것을 방지하기 위해 좌·우측 후사경에 대해 동일한 hole point를 적용하여 hole point 검색시간을 반으로 줄였다.

3. 초기조건과 경계조건

초기조건으로는 자유유동조건을 사용하는데 레이놀즈 수는 자동차 길이에 대해서 1.68×10^6 의 값을 가진다. 원거리 유입경계조건으로 역시 자유유동조건을 사용하였으며, 유출경계조건은 속도의 외삽과 $p = p_\infty$ 로부터 구하였다. 자동차 표면과 지면에서는 점착조건(no slip)과 표면의 법선 압력구배가 영(zero)이라는 조건을 이용하였다.

본 연구에서는 계산을 위한 격자계를 Fig.1(a)와 (b)에서 보듯이 전방($30 \times 111 \times 67$)과 후방($45 \times 111 \times 67$), 자동차 상면($78 \times 47 \times 32$), 자동차 하면($78 \times 47 \times 14$), 자동차의 양 측면($78 \times 33 \times 67$)으로 구성되는 총 6개의 다중블록격자로 생성시켰으며, Fig.1(d)와 같이 Chimera 격자 기법을 이용해서 후사경의 주위에 O-H격자($48 \times 37 \times 13$)를 생성시켰으며 총 격자점은 1.1×10^6 이다. Fig.1 (e)에서는 사용된 모델의 형상을 나타낸다. 정풍의 경우에는 대칭조건에 의하여 자동차의 반(half)평면에 대해서만 지배방정식을 풀었고, 측풍의 계산에 있어서는 비대칭조건이므로 전체 격자에 대하여 지배방정식을 풀었다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 참고문헌(4,5)에서 이미 검증된 유동해석코드와 Chimera 격자기법을 이용하여 정풍과 측풍에 대한 자동차 주위 유동해석을 수행하였으며, 계산을 위하여 Origin 2000 (4×195 MHZ MPIS R10000 PROCESSOR, R10010 FPUS)을 사용하였다.

Fig.2는 측풍의 편향각 변화에 따른 자동차 주위의 3차원 유선을 나타내고 있는데, 정풍의 경우 전면 유리창 중심에서 양측면으로 분리되

는 유동과 측면의 아래에서 위로 흐르는 유동이 A-pillar에서 만나서 A-pillar vortex가 생성되지만, 측풍의 경우 바람부는쪽 A-pillar vortex의 세기는 측풍속도성분의 상쇄효과에 의해 그 세기가 약하되는데 이것은 측풍각도가 증가할수록 심해진다. 반면에 바람반대쪽 A-pillar vortex의 세기는 측풍속도성분에 의한 A-pillar 부근의 추가적인 유동박리로 인해 그 세기가 증가하게 된다. 특히 편향각 45° 이상에서는 자동차의 바람반대쪽 측면의 전체길이에서 매우 광범위한 유동박리에 의한 와류가 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 C-pillar에서는 후면유리창의 하면에서 상면쪽으로 역류되는 유동과 측면에서 후면유리창으로 흘러들어가는 유동이 합쳐져서 C-pillar vortex가 생성되는데 A-pillar vortex와는 반대로 측풍각이 증가할수록 바람부는쪽 와류는 강해지고 바람반대쪽 와류는 약해짐을 알 수 있다. 그러나 측풍이 30° 이상에서는 바람반대쪽의 전체 측면이 유동박리 영역이 되어 더이상 C-pillar vortex가 의미가 없어짐을 알 수 있다.

Fig.3은 측풍에 따른 자동차와 후사경의 표면마찰력선을 나타낸 그림이다. 여기서 두 종류의 특이점이 나타나는데, saddle point는 유동의 집중과 분산이 이루어지는 점으로서 이 점을 중심으로 박리선과 재부착선이 형성되고, focus point는 와류 표출점으로서 이 점을 중심으로 vortex가 형성된다. 정풍의 경우 중앙단면에 4개의 saddle point(S_1, S_2, S_3, S_4)가 형성되는 것을 알 수 있다. 먼저 S_1 의 좌우로 재부착선이 형성되고, S_2 의 좌우로 박리선이 형성되는 것을 알 수 있다. 그리고 S_3 와 S_4 는 N_1 과 N_2 focus와 더불어 vortex를 형성한다. 그러나, 편향각이 커질수록 자동차 상면의 특이점(S_3, S_4, N_1, N_2)은 자동차 상면의 바람반대쪽 측면으로, 자동차 후미의 특이점(S_1, S_2)들은 바람부는쪽 측면으로 이동하여 자동차의 바람반대쪽 측면과 자동차 후미의 바람부는쪽 측면에서 복잡한 와류를 형성함을 알 수 있다.

Fig.4는 측풍에 따른 자동차와 후사경 표면의 등압력선도를 나타낸 그림으로 측풍의 각도가 커질수록 높은 압력은 바람부는쪽 모서리로 이동하고 낮은 압력은 바람반대쪽 모서리로 이

동하며, 최소압력의 크기도 정풍에 비하여 작아진다. 특히 45° 의 편향각에서 바람부는쪽 모서리를 따라서 형성되는 저압의 띠는 측면을 타고 오르던 유동이 모서리부분에서 와류를 형성하며 떨어져 나가기 때문이다. 또한 측풍은 후사경의 표면압력에도 영향을 끼쳐서 좌우의 후사경이 전혀 다른 형태의 등압력선을 보여주고 있다. 이러한 사실은 3차원 유선을 나타낸 Fig.2를 통해서도 확인된다. 이러한 등압력선의 변화는 자동차의 표면압력계수(C_p)의 변화를 가져온다. Fig.5는 후사경이 없는 경우의 실험결과[11]와 본 연구결과의 자동차 상면에서의 표면압력계수를 비교한 것으로 각 편향각에 대한 표면압력계수가 실험과 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 복잡한 유동박리에 의한 와류가 형성되는 자동차의 전두부나 편향각 45° 의 바람부는쪽 측면에서는 실험결과와 다소 차이를 보이는데, 이것은 본 연구에서 사용된 Baldwin-Lomax 난류모델이 광범위한 유동박리 및 복잡한 와류를 정확히 계산하지 못하는데 그 원인이 있다고 생각된다. 공기역학적 힘들은 자동차의 무게중심과의 상호작용으로 모멘트를 발생시켜서 측풍의 영향을 받는 자동차의 안정성에 영향을 미치게 된다. Fig.6에서는 측풍의 각도에 따른 공기역학적 계수들을 후사경이 있을 때와 없을 때를 비교하여 나타내었다. 여기서, 기준면적 A 는 가장 큰 수직 단면적이고, 기준길이 l 은 자동차 전체길이이다. 전체적으로 후사경이 있을 때가 후사경이 없을 때보다 공기역학적 계수가 큰 값을 가짐을 알 수 있지만, 그 차이가 크지 않으므로 후사경이 자동차의 유동에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있다. Fig.6(a)에서 보면 항력과 양력의 경우 측풍의 각도에 따른 변화가 크지 않지만 측력은 측풍의 각도가 커질수록 점점 더 큰 값을 가지게 되므로, 자동차의 주행시 측면에서의 돌풍이나 대형트럭의 추월로 인한 갑작스런 측풍조건이 형성될 때 측력으로 인해 자동차의 안정성에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 또한, Fig.6(b)에서 보듯이 편향각이 증가할 때 yawing moment는 30° 부근에서 최대값을 가지고 rolling moment는 그 변화가 크지 않음을 알 수 있다. Fig.7은 후사경이 자동차

에 미치는 영향을 좀 더 자세히 알아보기 위하여 큰 변화를 보이는 항력, 측력, 그리고 yawing moment를 후사경이 있을 경우와 없을 경우를 비교한 것이다. 항력과 측력의 경우 후사경의 영향이 크지 않지만, yawing moment의 경우에는 편향각이 커질수록 후사경의 영향을 더 많이 받음을 알 수 있었다. 이상의 결과들로 미루어 측풍의 영향을 받는 자동차에 가장 큰 영향을 미치는 공기역학적 계수는 측력과 yawing moment임을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 3차원 비압축성 점성 유동의 Navier-Stokes 방정식을 사용하여 측풍에 대한 자동차 주위의 유동해석을 수행하였다. 후사경 주위의 유동해석을 효과적으로 수행하기 위해 Chimera 격자기법을 사용하였다. 후사경이 없는 자동차에 대해서 측풍 각도가 0° , 15° , 30° , 45° 인 경우 실험결과와 비교해 본 결과 실험과 잘 일치함을 알 수 있었으며, 측풍 각도의 변화에 따라 후사경 뒤쪽에서 발생하는 박리와 3차원 와류, A-/ C-pillar vortex 등의 변화를 확인할 수 있었다. 그리고 측풍의 편향각이 증가할수록 측력은 점점 더 증가하고 yawing moment는 30° 부근에서 최대값을 가짐을 확인할 수 있었다.

6. 후기

본 연구과제는 한국학술진흥재단의 대학부설 연구소 중점 연구과제(총괄 과제명 : 자동차 부품의 설계 및 제작을 위한 CAE기법의 개발에 관한 연구)로의 세부연구과제(세부 과제명 : 자동차 주위 유동해석 및 공력소음해석을 위한 CAE기법 개발의 일부연구)로 이루어졌으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Hucho, W. H., "Aerodynamics of Road Vehicles : from fluid mechanics of road vehicle engineering," Butterworths, (1987).
- [2] Ahmed, S. R., "Wake Structure of Typical Automobile Shapes," Journal of Fluids Engineering, Vol.103, (1981), pp. 162-169.
- [3] Taniguti, N., Kobayashi, T., Mizuo, M., "Numerical Simulation of the Flow around Vehicle Model with the Complex Shape", 동경대학 생산연구, 제42권, 제1호, (1990), pp. 10-15.
- [4] 정영래, 박원규, 박영준, 김종섭, 홍성훈, "3차원 미니밴 형상 주위의 비압축성 점성유동," 한국전산유체공학회지, 제2권, 제1호, (1997), pp. 46-53.
- [5] 안만기, 박원규, "Chimera 격자기법을 이용한 자동차 주위의 유동장 해석," 한국전산유체공학회지, 제3권, 제2호, (1999), pp. 39-51.
- [6] Horinouchi, N., Kato, Y., Shinano, S., Kondoh, T., and Tagayashi, Y., "Numerical Investigation of Vehicle Aerodynamics with Overlaid Grid System," SAE Paper 950628, (1995).
- [7] Okumura, K. and Kuriyama, T., "Practical Aerodynamic Simulations (C_D , C_L , C_{YM}) Using a Turbulence Model and 3rd-Order Upwind Scheme," SAE Paper 950629, (1995).
- [8] Englar, R. J., Smith, M. J., Niebur, C. S., and Gregory, S. D., "Development of Pneumatic Aerodynamic Concepts for Control of Lift, Drag and Moments plus Lateral/Directional Stability of Automotive Vehicles," SAE Paper 960673, (1996).
- [9] Mackin, A. R. and Garry, K. P., "Comparing Static and Dynamic Testing Techniques for the Crosswind Sensitivity of Road Vehicles," SAE Paper 960674, (1996).
- [10] Ahmadi, M. and Garry, K. P., "Pre-

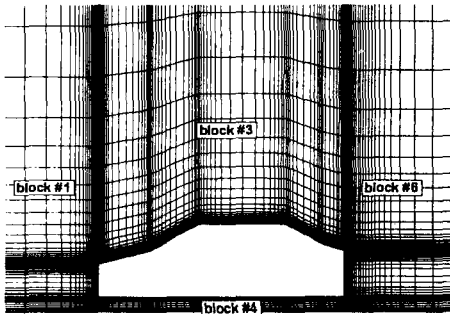
[1] Hucho, W. H., "Aerodynamics of Road Vehicles : from fluid mechanics of road

liminary Investigation of the Influence of a Ground-Plane Boundary Layer on the Aerodynamic Characteristics of Road Vehicle Models Tested Over a Fixed Ground." SAE Paper 960675, (1996).

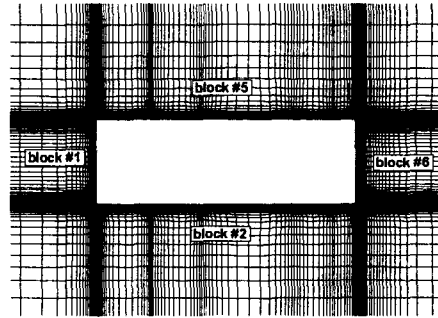
[11] 김경천, 지호성, 부산대학교 실험결과 내 부교환, (1999).

[12] Park, W. G., Jung, Y. R., and Ha, S. D., "Numerical Viscous Flow Analysis Around a High Speed Train with Crosswind Effects," AIAA Journal, Vol.36, No.3, (1998), pp. 477-479.

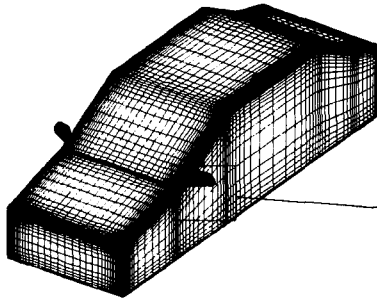
[13] 전중환, "표면유동가시화를 통한 박리유동의 고찰," 한국전산유체공학회 1998년도 추계학술대회 논문집, (1998), pp. 1-6.



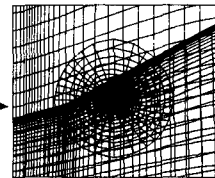
(a) Side view



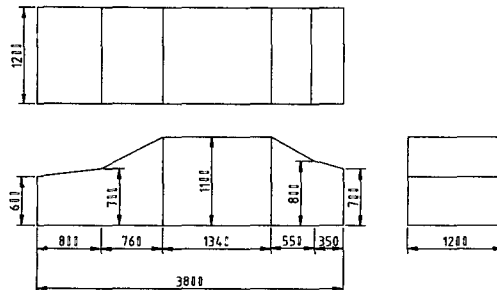
(b) Top view



(c) The surface grid



(d) Chimera grid around a side-view mirror



(e) Dimensions of automobile

Fig.1 Grid system and dimensions of the automobile

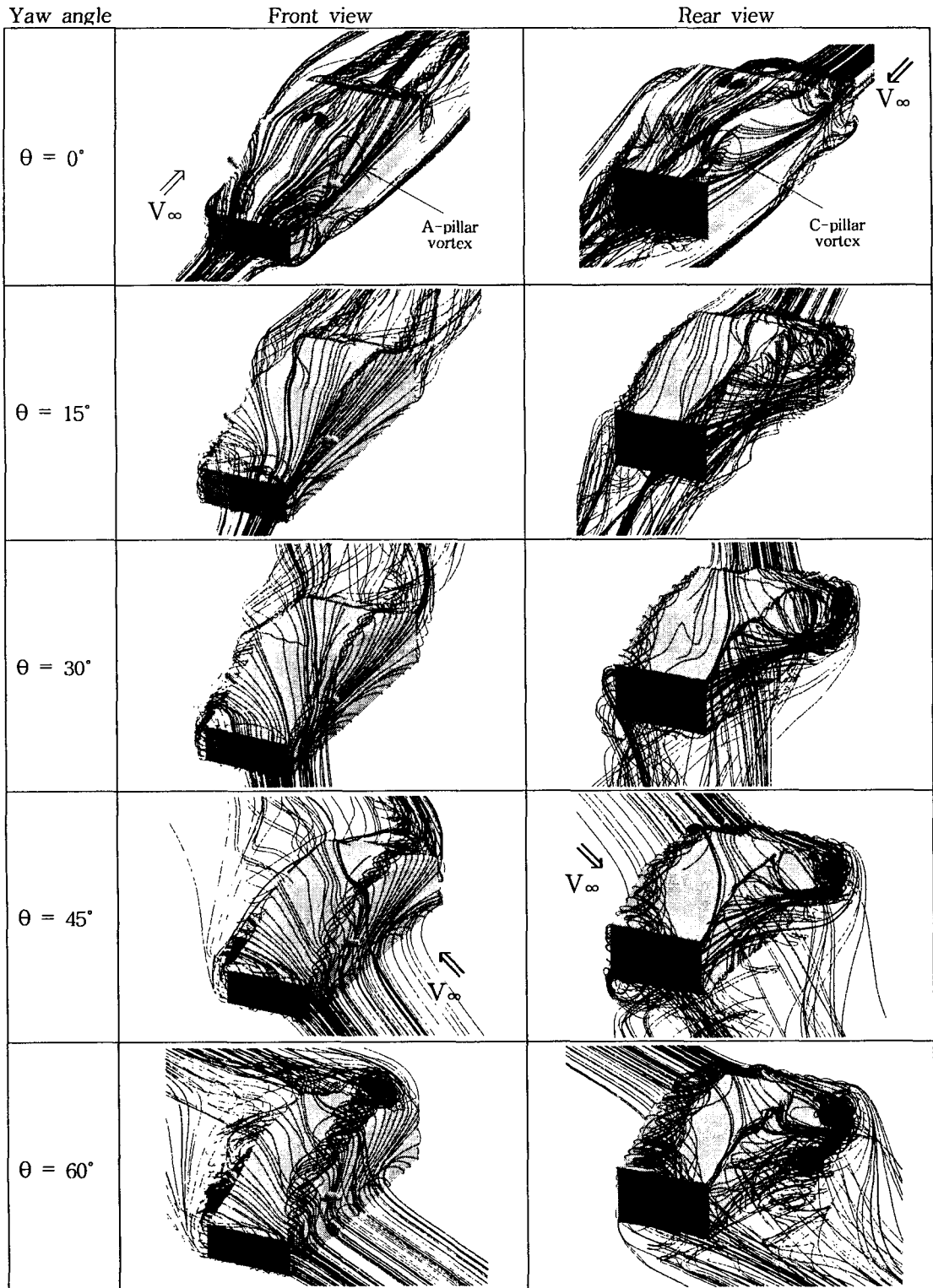


Fig.2 3-D streamlines around the automobile

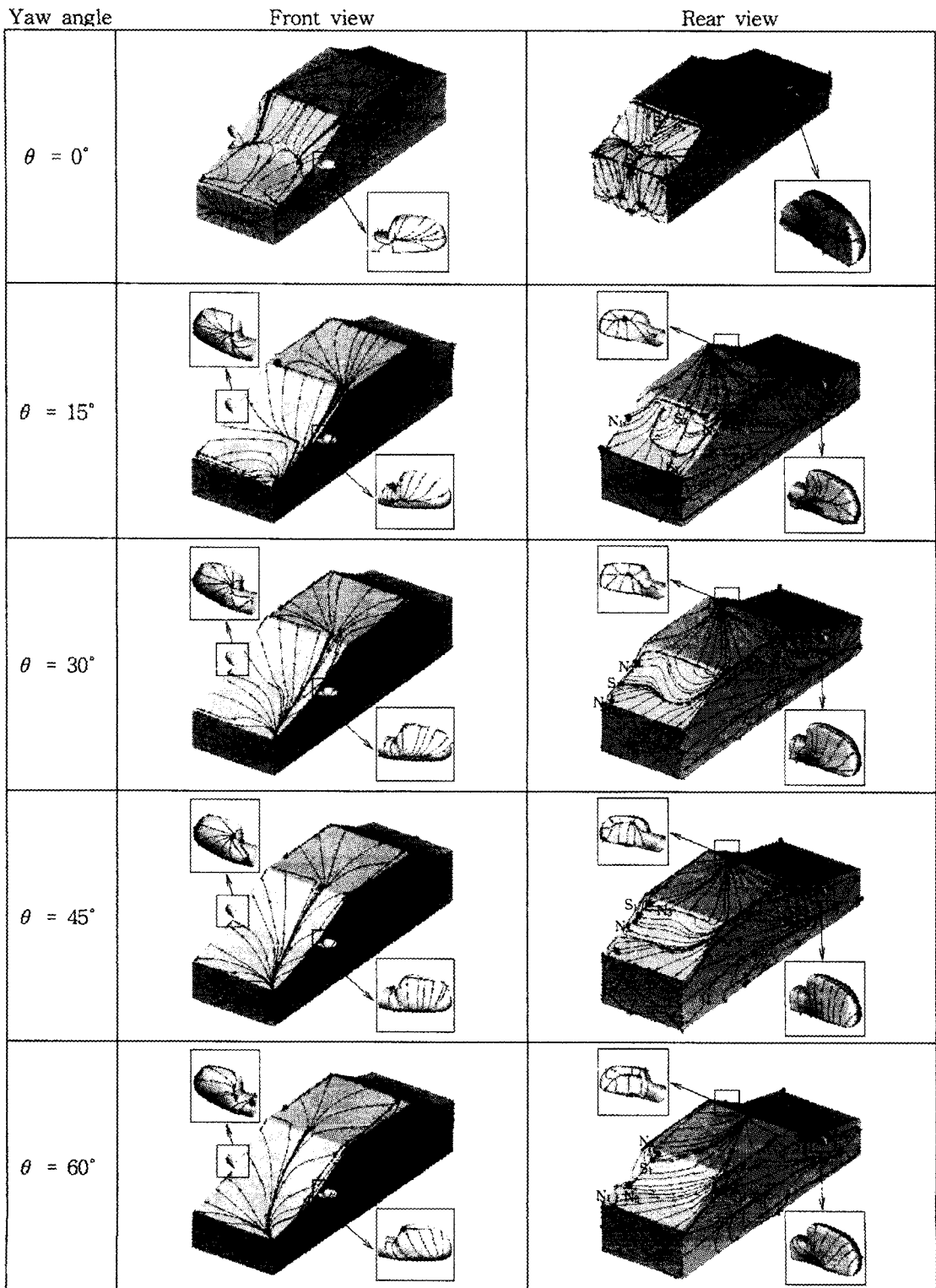


Fig.3 Limiting streamlines on the automobile and the side-view mirror

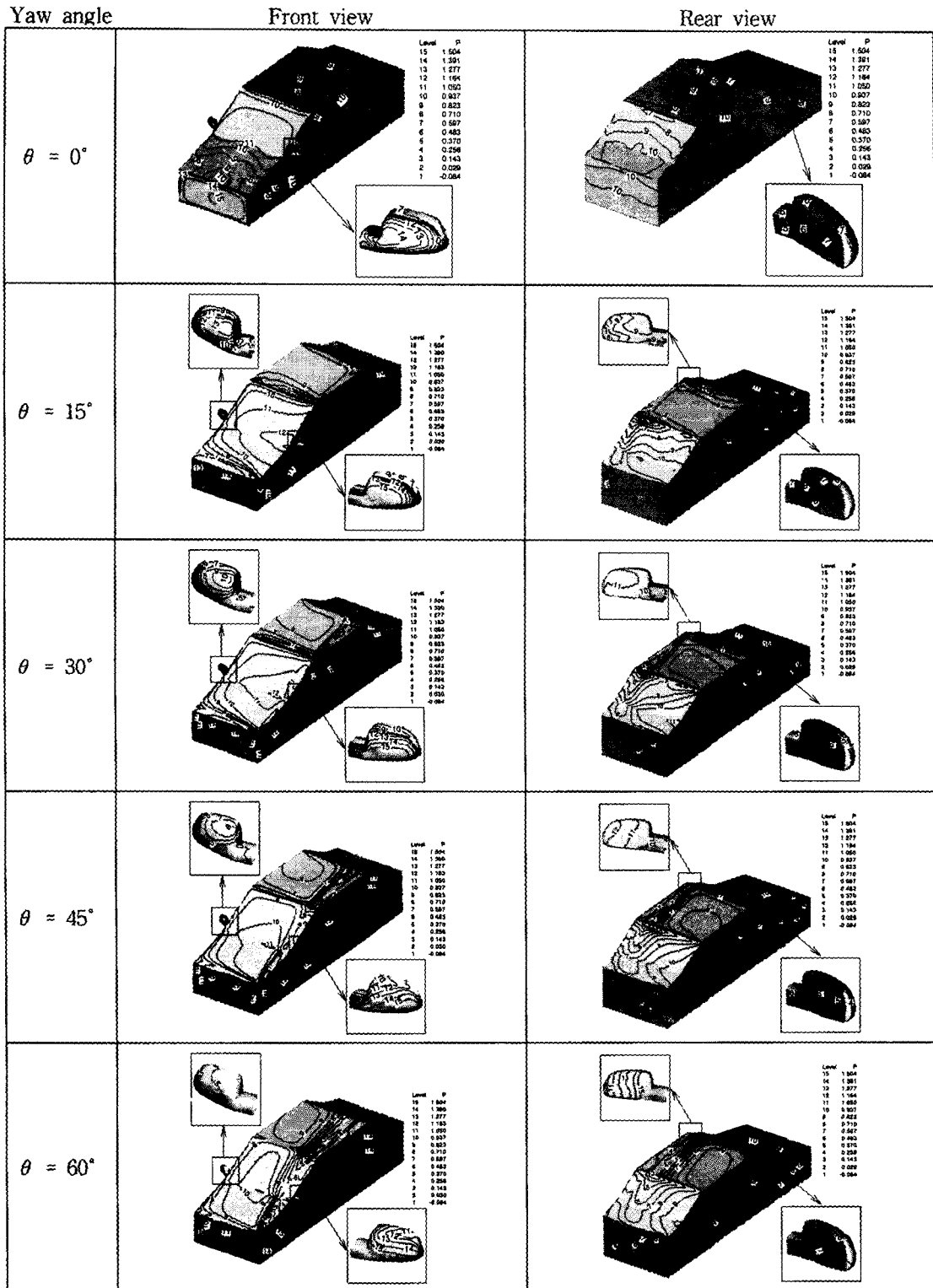


Fig.4 Pressure contour distribution on the automobile and side-view mirror

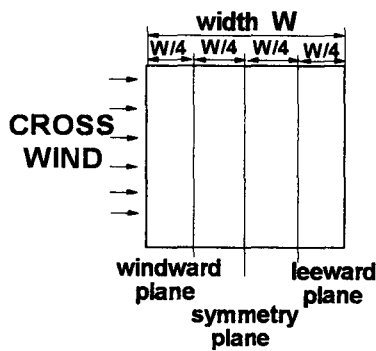
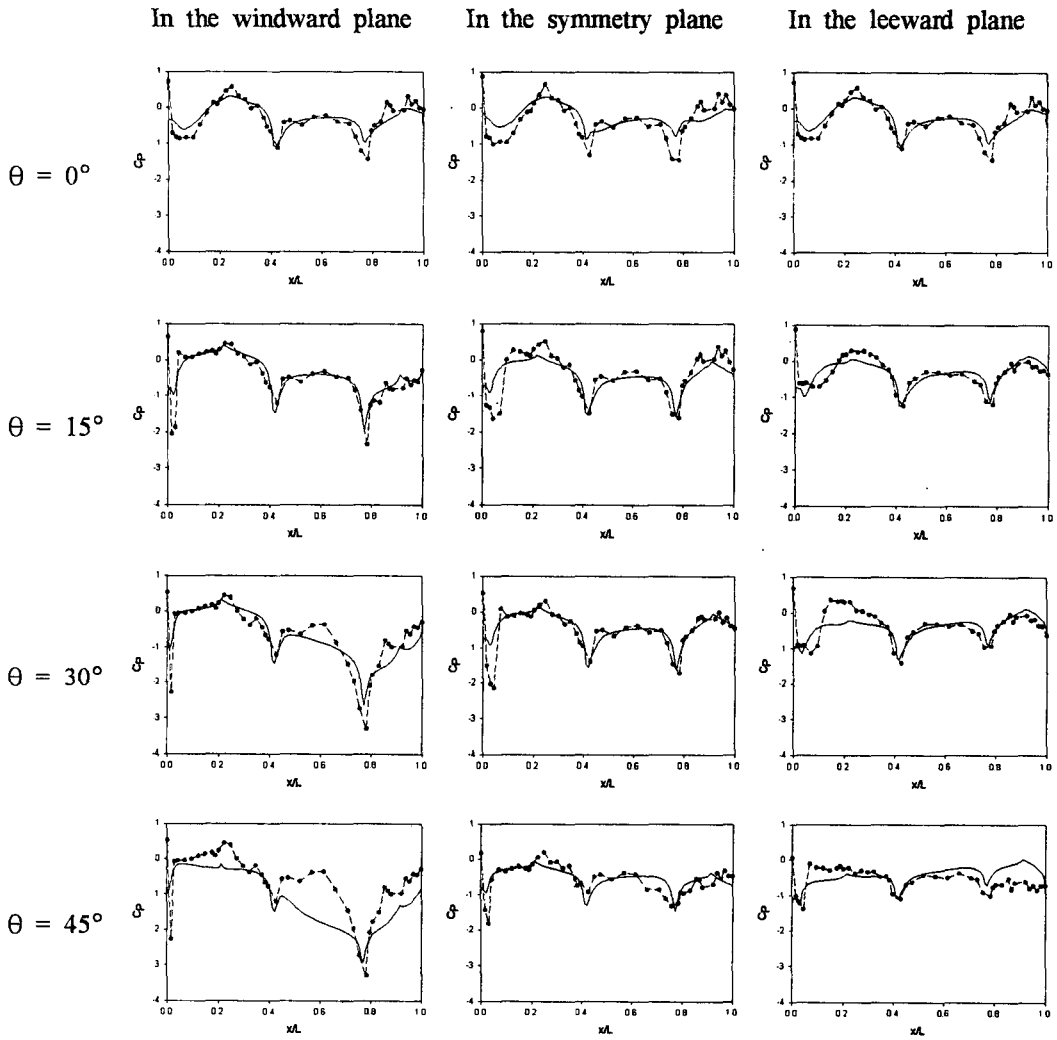
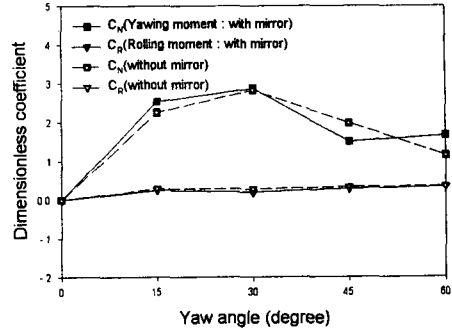
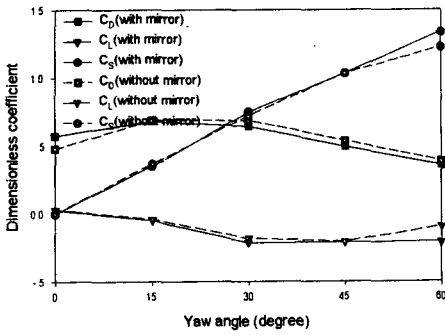


Fig.5 Upper surface pressure distribution along the streamwise direction

(-●- Exp. [11], — Calculation)



(a) aerodynamic forces

(b) aerodynamic moments

Fig.6 Aerodynamic coefficients as a function of yaw angle

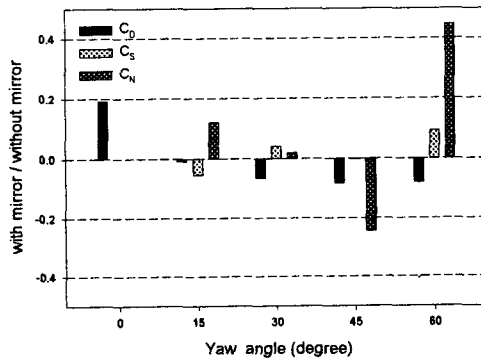
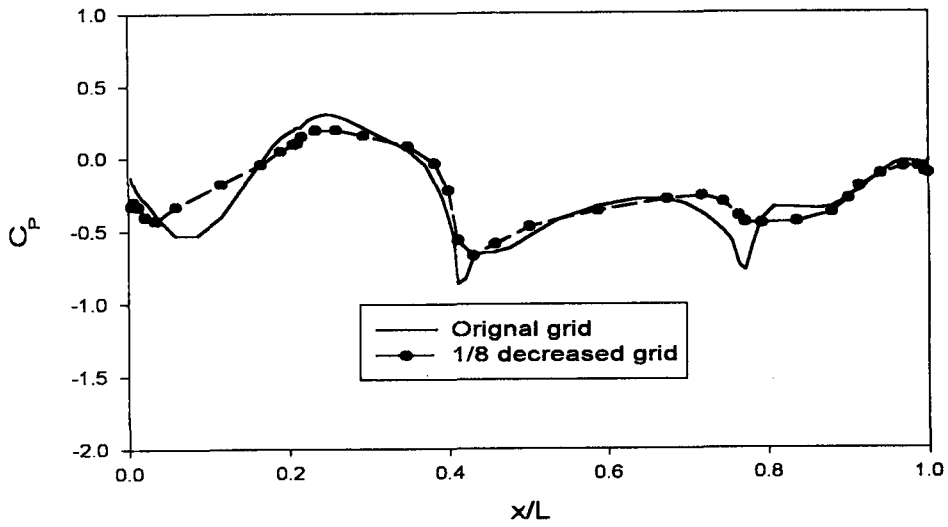


Fig.7 The effects of side-view mirror



[참고그림 1] grid dependency