측풍에 대한 자동차 주위의 유동 해석

강동민[*1], 정영래[*2], 박원규[*3]

Numerical flow analysis of the automobile with crosswind effects

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

This paper describes the flow analysis of the automobile with crosswind effects of 15° , 30° and 45° of yaw angle. The governing equations of the 3-D unsteady 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 A- and C-pillar vortex and other flow phenomena around the ground vehicle are evidently shown.

1. 서론

최근 자동차가 알루미늄이나 복합재료의 사용이 증가됨에 따라 점차 경량화 되어 연료소모율을 감소시켜 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 있어왔으나, 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 박원규 등[3,4], Horinouchi 등[5], 그리고 Okumura 등[6]에 의해 3차원 자동차주위의 난류유동장이 계산되어졌다. 그리고 측풍영향을 고려한 자동차 주위의 유동장에 대한 연구는 Englar 등[7], Macklin 등[8], 그리고 Ahmadi 등[9]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. 후사경의 영향을 포함한 자동차 주위 유동을 정풍에 대해 계산한 후, 측풍의 편향각이 15° , 30° , 45° 로 변할 때 후사경의 영향이 포함된 자동차 주위의 유동현상에 대해 고찰하였다.

1),2) 부산대학교 대학원 기계공학과 (609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지 Tel:(051)510-3064)
3) 부산대학교 기계공학부 (609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지 Tel:(051)510-2457)

2. 지배방정식 및 수치해석 방법

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

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

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, 시간진행 반복행진법(Iterative time marching)[10]을 사용하였다. 이에대한 자세한 내용은 참고문헌[3]에서 기술되었다.

복잡한 3차원 자동차 형상에 대한 격자생성을 효율적으로 수행하기 위하여 chimera 격자기법을 사용하였는데 자세한 수치해석적 방법은 참고문헌[4]에서 기술되었다. 본 연구에서는 정풍에 대해서는 대칭조건을 적용하므로 하나의 후사경에 대해 chimera 격자기법을 적용할 수 있으나 측풍 계산을 위해서는 양쪽의 후사경에 대해 모두 chimera 격자기법을 적용해야 한다. 따라서 hole point 계산에 과도한 계산시간이 소요되는 것을 방지하기 위해 좌·우측 후사경에 대해 동일한 hole point를 적용하였다. 즉, 좌측의 후사경 주위에 계산된 hole point를 그대로 우측에 적용하여 hole point 검색시간을 반으로 줄였다.

3. 초기조건과 경계조건

본 연구에서는 초기조건으로는 자유유동조건을 사용하는데 레이놀즈 수는 자동차 길이에 대해서 1.68×10^6의 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 다중블럭으로 생성하였는데, 전방(30×111×67)과 후방(45×111×67), 자동차 상면(78×47×32), 자동차 하면(78×47×14), 자동차의 양 측면(78×33×67)으로 구성되는 총 6개를 주격자로 생성시켰으며, Fig.1(d)와 같이 chimera 격자 기법을 이용해서 후사경의 주위에 O-H격자(48×37×13)를 생성시켰다. 정풍의 경우에는 대칭조건에 의하여 자동차의 반(half)평면에 대해서만 지배방정식을 풀었고, 측풍의 계산에 있어서는 비대칭조건이므로 전체 격자에 대하여 지배방정식을 풀었다.

4. 결과 및 고찰

유동해석 코드의 검증을 위해서 후미경사각이 12.5° 와 30° 의 Ahmed body에 대해 계산하여 타연구자와 비교하였으며, chimera 격자기법의 타당성 검증을 위해서는 2차원 실린더 주위 유동을 계산하여 타연구자의 결과와 비교하였다. 타당성 검증에 대한 자세한 내용은 참고문헌[4]에 기술되었다.

지상운송체 주위의 유동해석코드와 chimera 격자기법 적용에 대한 검증이 끝난 후, 정풍과 측풍

에 대한 자동차 주위 유동해석을 수행하였다. 후사경에 대한 chimera 격자기법의 적용은 격자생성은 용이한 반면 hole point 검색과 유동정보의 보간에 많은 계산시간이 소요되므로 후사경을 제외한 자동차에 대한 유동계산과 후사경만을 고려한 유동계산을 충분히 수행한 후 각각의 계산결과를 이용하여 chimera 격자에서 유동을 계산하여 서로의 유동정보가 교환되도록 하였다.

Fig.2는 측풍의 각도에 따른 자동차주위의 3차원 유선을 나타내고 있는데, 정풍의 경우 전면 유리창 중심에서 양측면으로 분리되는 유동과 측면의 아래에서 위로 흐르는 유동이 A-piller에서 만나서 와류를 형성하는 A-piller vortex가 되지만 측풍의 경우 바람부는쪽 A-piller vortex는 전면 유리창의 중심에서 우측으로 분리되는 유동이 측풍으로 인해 약해지면서 측풍각도가 증가함에 따라서 점점 약해짐을 볼 수 있고 바람 반대쪽 A-piller vortex는 반대로 점점 강해지는 것을 볼 수 있다. 그러나 C-piller에서는 후면유리창이 박리영역이므로 유리창의 하면에서 상면쪽으로 역류되는 유동과 측면에서 후면유리창으로 흘러드는 유동이 합해져서 C-piller vortex가 생성되는데 A-piller와는 반대로 측풍각이 증가할수록 바람쪽 와류는 강해지고 바람반대쪽 와류는 약해짐을 알 수 있다. 한편 바람 반대쪽으로는 측풍에 의해서 전체적으로 낮은 압력이 분포하는 영역이므로 바람반대쪽 측면 전체에 걸쳐서 강한 와류가 바람 반대쪽을 형성하고 있음을 볼 수 있고, 이 영향으로 자동차 후미에서 바람반대쪽이 바람쪽보다 압력이 높게 된다. Fig.3은 측풍의 각도에 따른 좌우의 후사경 주위의 3차원 유선을 나타낸 것이다. 정풍일 경우 후사경의 뒤에서 강한 쌍와류가 발생하지만 측풍에서는 바람방향에 존재하는 후사경의 경우 측풍의 각도가 커질수록 후사경 뒤에서의 와류가 점점 더 자동차 표면쪽으로 이동해 나가고, 바람 반대방향에 존재하는 후사경의 경우 바람 반대쪽에 형성된 와류의 영향으로 후사경 주위의 와류는 소멸해 가는 것을 볼 수 있다.

Fig.4는 측풍에 따른 자동차와 후사경의 표면마찰력선을 나타낸 그림이다. 자동차의 경우 편향각이 커질수록 전면중앙의 정체점이 바람부는쪽 측면으로 이동하고 후면중앙의 정체점은 바람반대쪽으로 이동해 가는 것을 볼 수 있다. 후사경의 경우, 바람부는쪽의 후사경은 편향각이 커질수록 바람부는쪽 측면에서 전면유리창으로 넘어가는 바람의 영향으로 정체점은 후사경의 하면으로 이동하지만, 바람반대쪽 후사경은 전면유리창을 타고 넘어오는 바람의 영향으로 정체점이 후사경의 상면으로 이동하는 것을 볼 수 있다.

Fig.5는 측풍에 따른 자동차와 후사경 표면의 등압력선도를 나타낸 그림으로 측풍의 각도가 커질수록 높은 압력은 바람부는쪽 모서리로 이동하고 낮은 압력은 바람반대쪽 모서리로 이동하며, 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.6은 유동방향으로의 표면압력계수의 변화를 나타내는 그림이다. 여기서 상면과 하면의 압력차는 양력을 의미하는데 상면과 하면사이의 면적이 양력의 대략적인 크기를 의미한다. Fig.7은 유동의 수직방향의 표면압력계수의 변화를 보여준다. 여기서 바람방향과 바람반대방향 사이의 면적은 압력에 의한 자동차의 측력을 나타낸다. A, B 단면에서는 바람방향에서 압력이 바람 반대방향에서의 압력보다 커서 바람부는쪽에서 바람반대방향으로의 측력을 가지고, C 단면에서는 방향에서의 압력차이가 미소하여 측력이 상쇄되는 효과를 얻는다. 그리고 D, E 단면에서는 바람반대방향에서의 압력이 바람부는쪽의 압력보다 크므로 바람반대쪽에서 바람부는쪽으로 측력을 얻게된다. 이러한 공기역학적 힘들이 자동차의 무게중심과 상호작용을 통하여 모멘트를 발생시켜서 측풍의 영향을 받는 자동차의 안정성에 영향을 미치게 된다.

5. 결론

본 연구에서는 3차원 비압축성 점성 유동의 N-S방정식을 사용하여 측풍에 대한 자동차 주위의 유동해석을 수행하였다. 후사경 주위의 유동해석을 효과적으로 수행하기 위해 chimera 격자기법을 사용하였다. 유동해석 코드 검증을 위하여 Ahmed body의 유동을 해석하였고, chimera 검증을 위하여 실린더 주위의 유동을 해석하였으며, 두가지 경우 모두에서 실험치 및 타 연구자의 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 이상의 검증된 코드를 이용하여 편향각이 15° , 30° , 45° 로 변화하는 측풍에 대한 자동차 주위의 유동해석 결과, 후사경 뒤쪽에서 발생하는 박리와 3차원 와류, A-/ C-pillar vortex 등의 변화를 확인할 수 있었다.

참고문헌

[1] Hucho, W. H., "Aerodynamics of Road Vehicles : from fluid mechanics of road vehicle engineering," Bufferworths, (1987).

[2] Ahmed, S. R., "Wake Structure of Typical Automobile Shapes," Journal of Fluids Engineering, Vol. 103, (1981), pp 162-169.

[3] 정영래, 박원규, 박영준, 김종섭, 홍성훈, "3차원 미니밴 형상 주위의 비압축성 점성유동," 한국전산유체공학회지 제2권, 제1호, (1997), pp 46-53.

[4] 안민기, 박원규, "Chimera 격자기법을 이용한 자동차 주위의 유동장 해석," 한국전산유체공학회지 제3권 제2호, (1999), pp 39-51.

[5] Horinouchi, N., Kato, Y., Shinano, S., Kondoh, T., and Tagayashi, Y., "Numerical Investigation of Vehicle Aerodynamics with Overlaid Grid System," SAE Paper 950628, (1995).

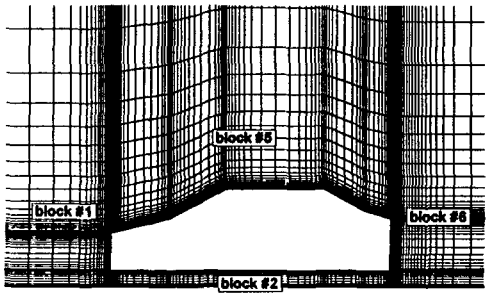
[6] Okumura, K. and Kuriyama, T., "Practical Aerodynamic Simulations(C_D, C_L, C_{YM}) Using a Turbulence Model and 3rd-Order Upwind Scheme," SAE Paper 950629, (1995).

[7] Englar, R. J. and Smith, M. J. and Niebur, C. S. and Gregory, S. D., "Development of Pneumatic Areodynamic Concepts for Control of Lift, Drag and Moments plus Lateral/Directional Stability of Automotive Vehicles," SAE Paper 960673 (1996).

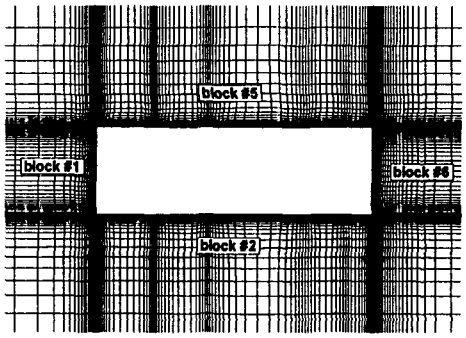
[8] Mackin, A. R. and Garry, K. P., "Comparing Static and Dynamic Testing Techniques for the Crosswind Sensitivity of Road Vehicles," SAE Paper 960674 (1996).

[9] Ahmadi, M. and Garry, K. P, "Preliminary Investigation of the Influence of a Ground-Plane Boundary Layer on the Areodynamic Characteristics of Road Vechicle Models Tested Over a Fixed Ground," SAE Paper 960675 (1996).

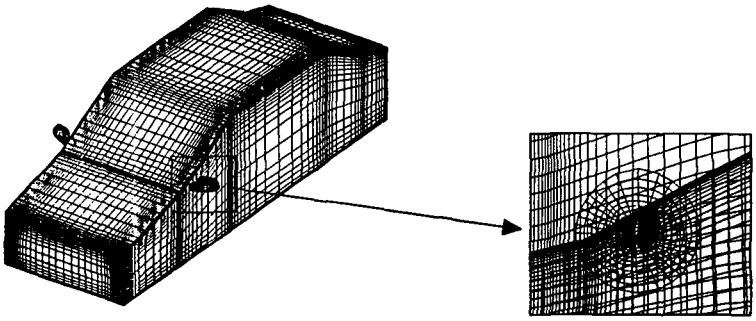
[10] Park, W. G., Jung, Y. R., and Ha, S. D., "Numerical Viscous Flow Analysis Around a High Speed Train with Crosswind Effects," AIAA Journal, Vol. 36, No. 3, (1998), pp. 477-479.



(a) Side view



(b) Top view



(c) The surface grid (d) Chimera grid around a side-view mirror

Fig.1 Grid system of the automobile

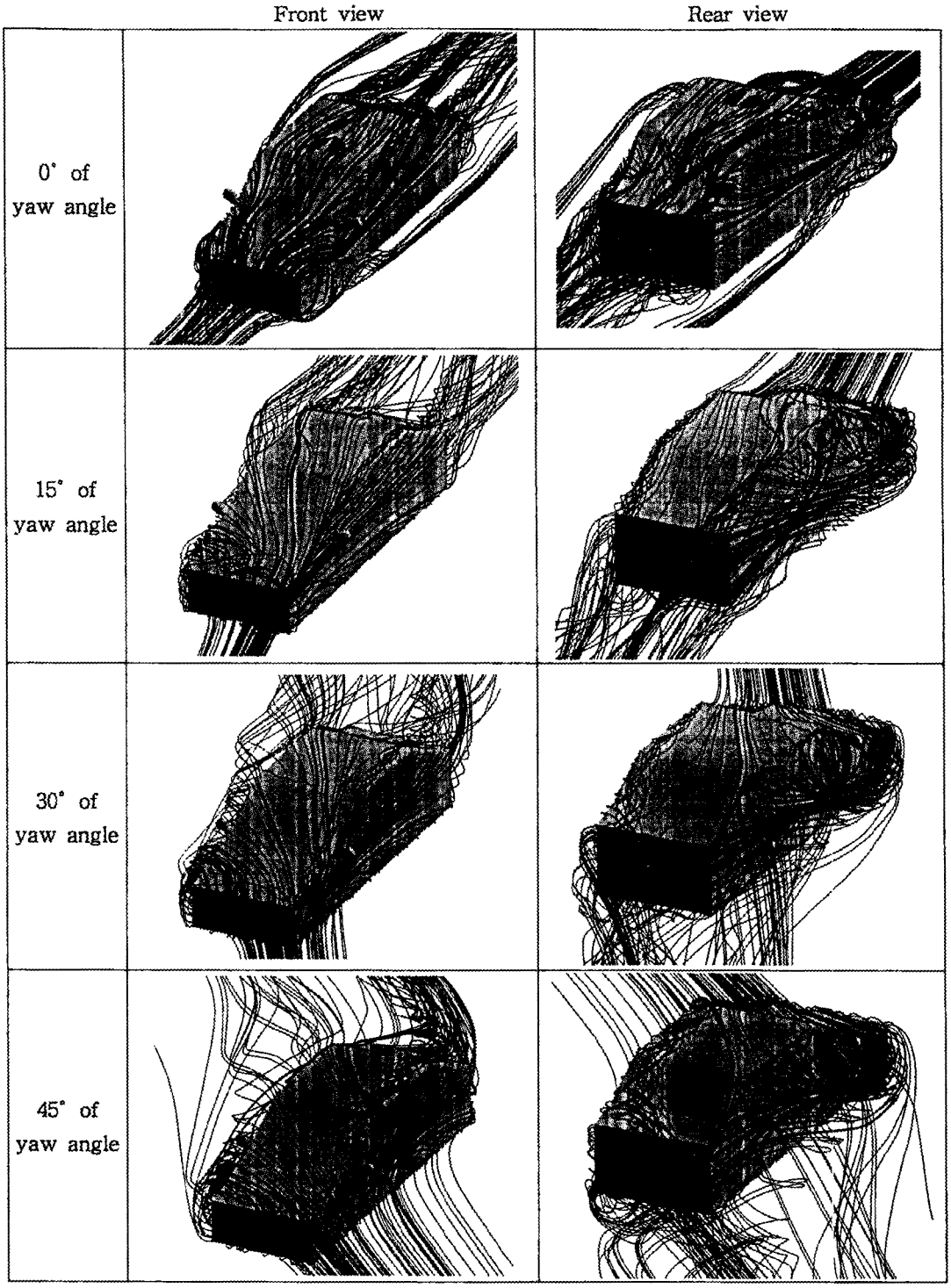


Fig.2 3-D streamlines around the automobile

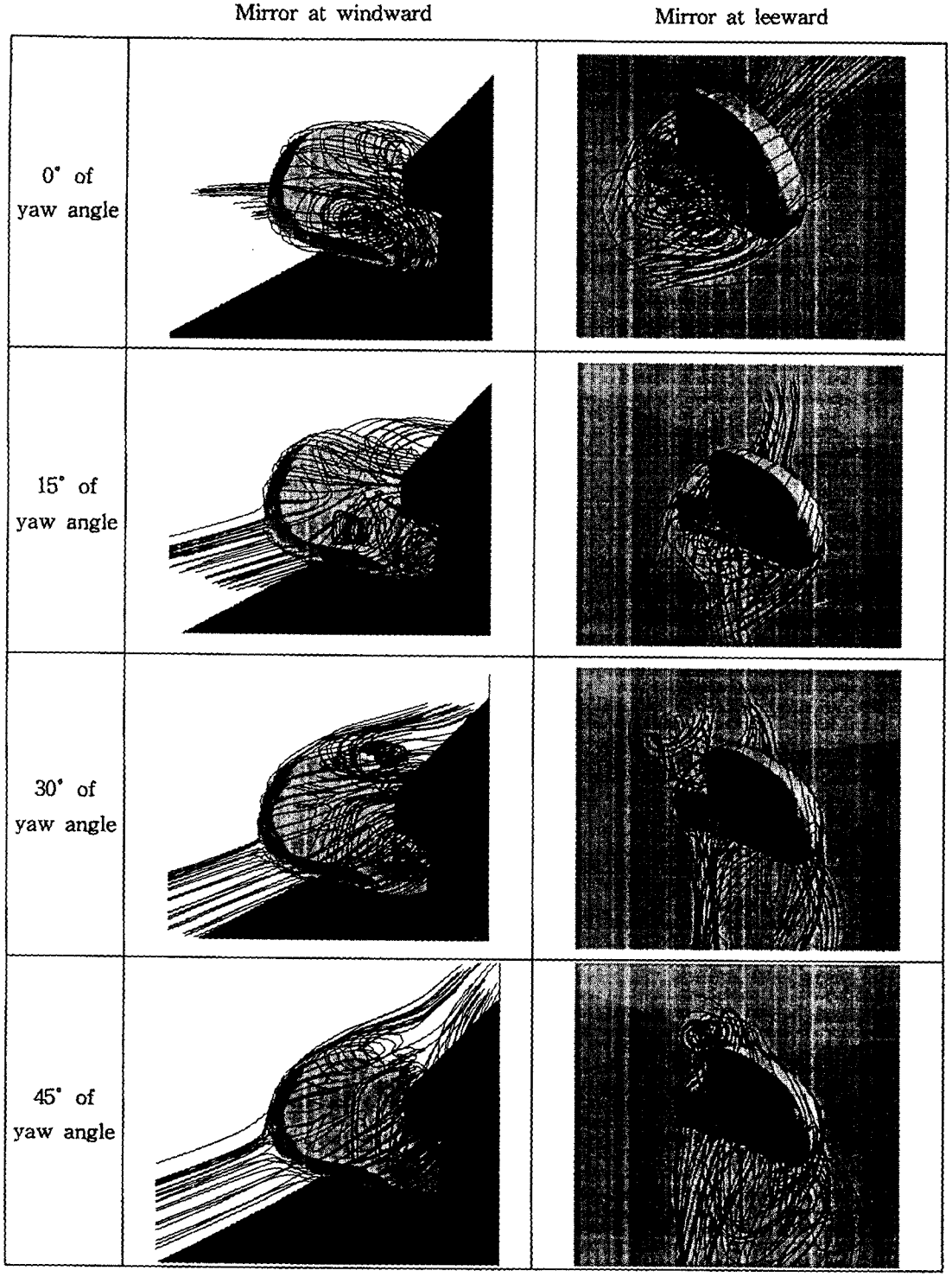


Fig.3 3-D streamlines around the side-view mirror

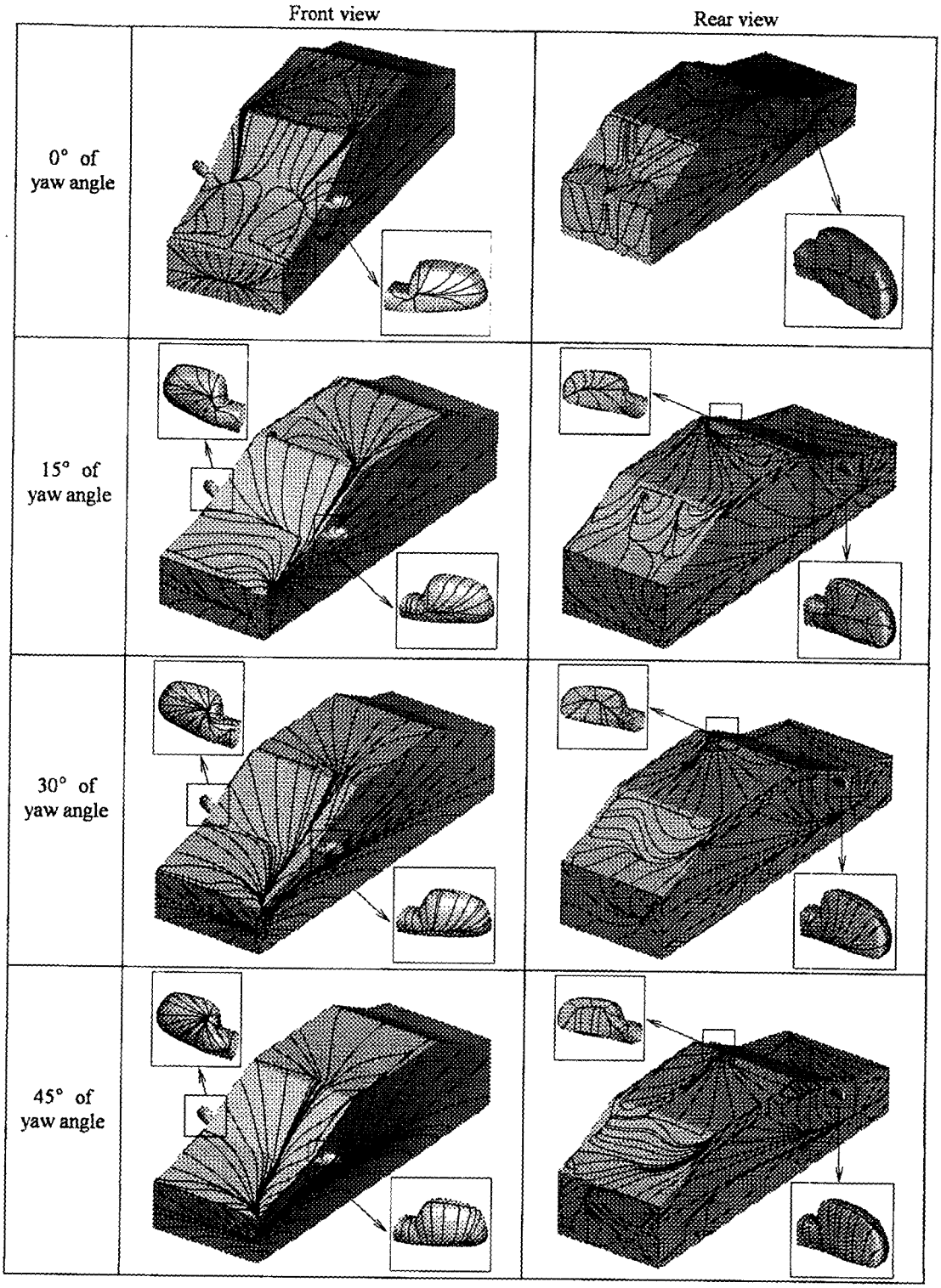


Fig.4 Limiting streamlines on the automobile and the side-view mirror

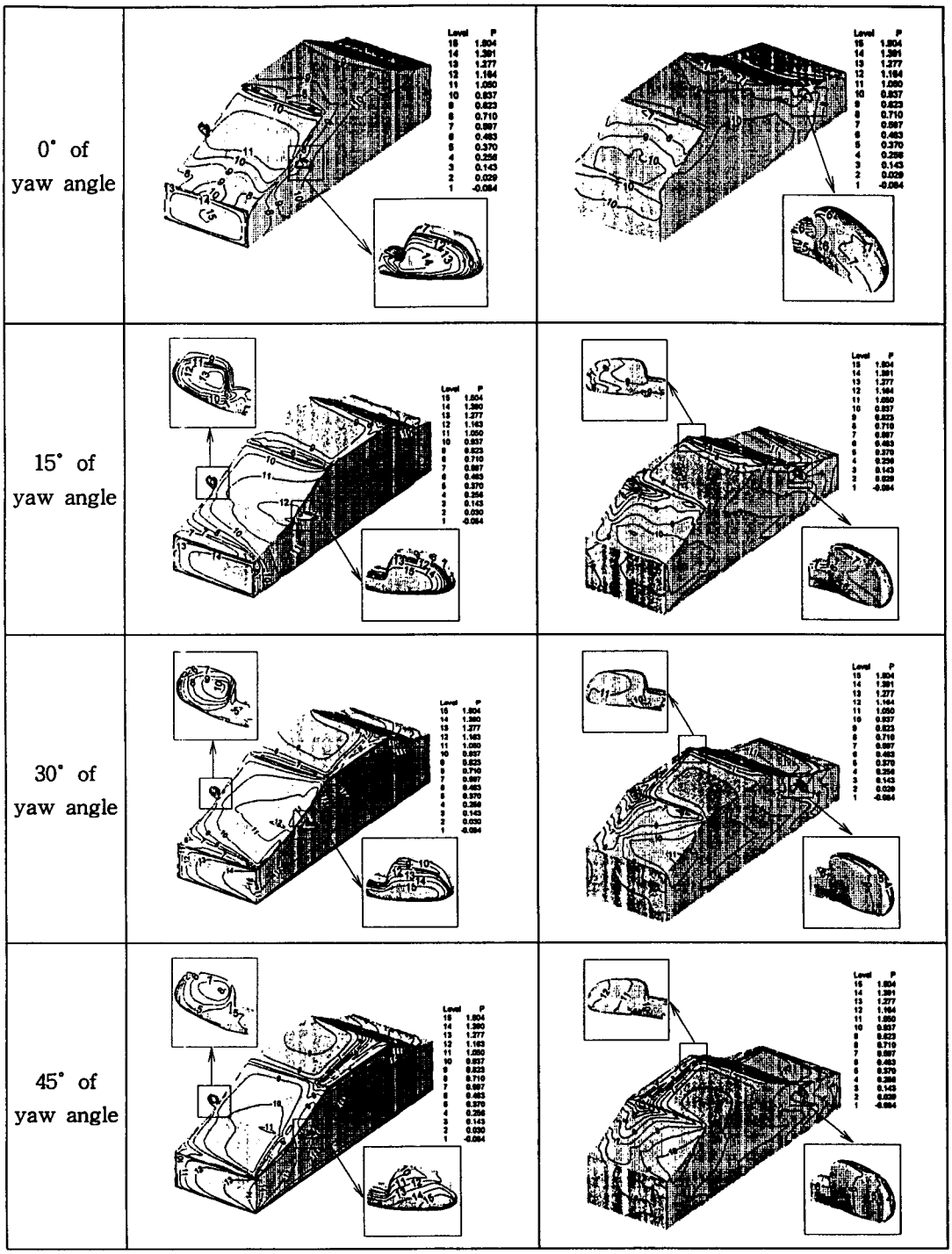


Fig.5 Pressure contour distribution on the automobile and side-view mirror

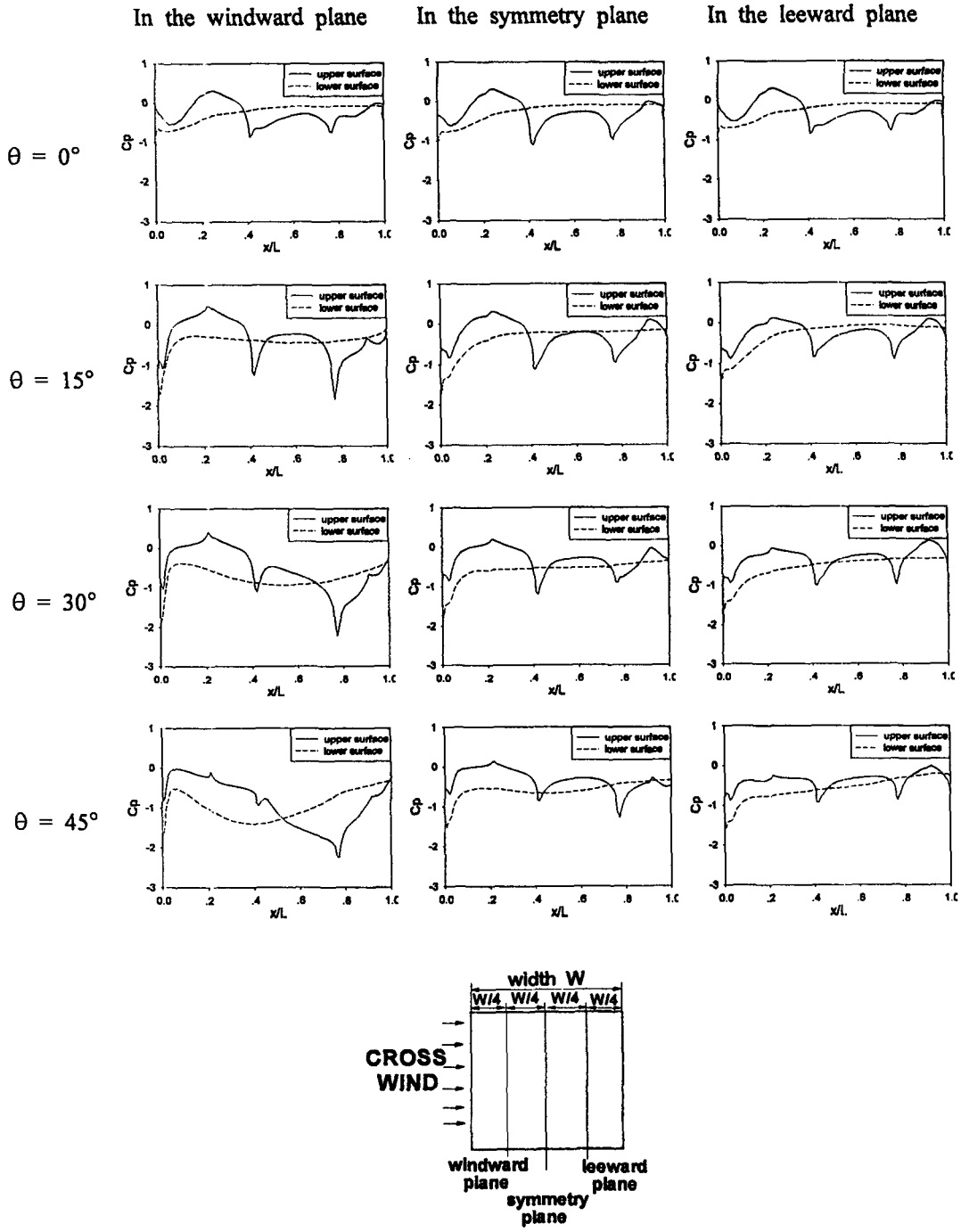
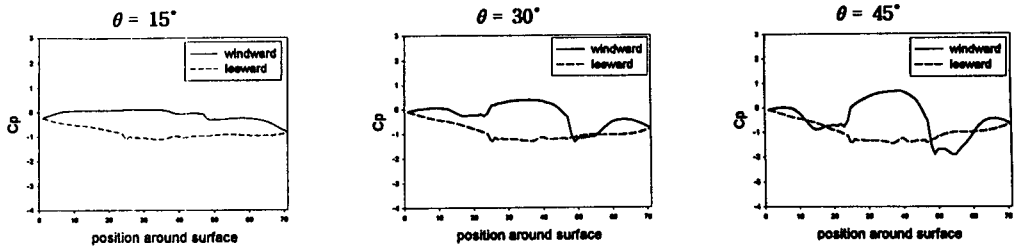
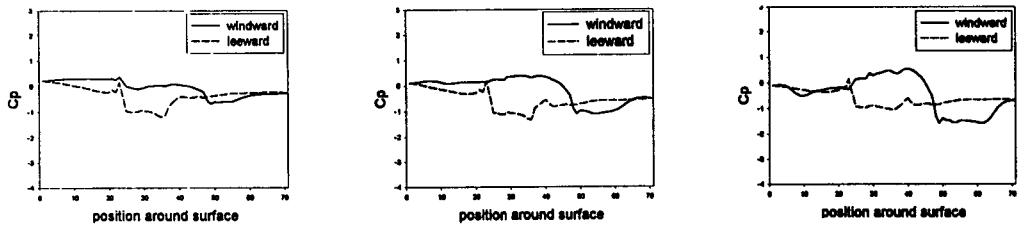


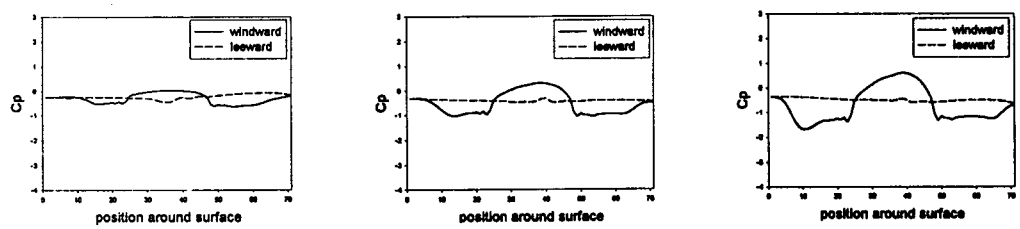
Fig.6 Surface pressure distrbution in the several plane at each yaw angle



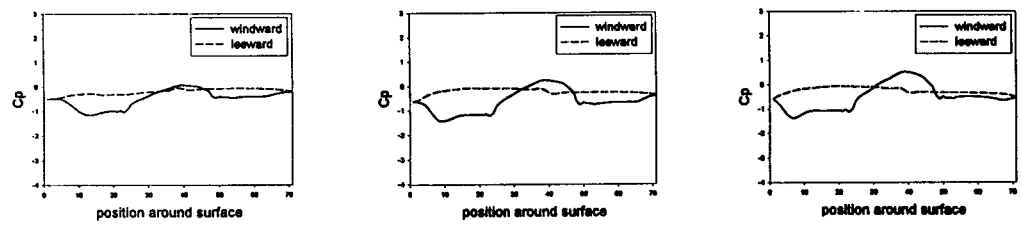
(a) At A-cross sectional plane



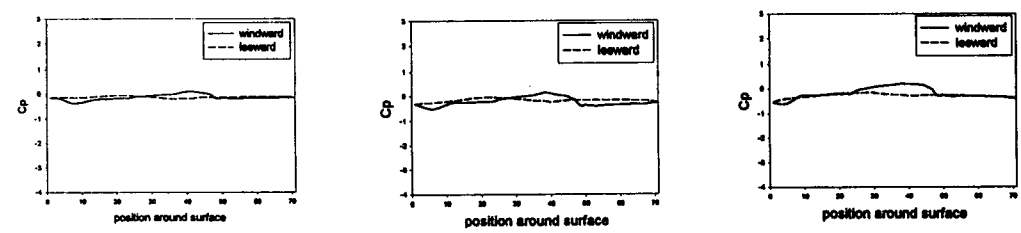
(b) At B-cross sectional plane



(c) At C-cross sectional plane



(d) At D-cross sectional plane



(e) At E-cross sectional plane

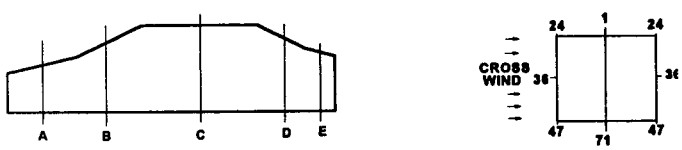


Fig.7 Cross-sectional surface pressure distribution in the several cross-sectional planes at each yaw angle