

# 표면유동가시화를 통한 박리유동의 고찰

## On Flow Separation Delineated with Surface Flow Visualization

전중환<sup>1)</sup>

Chung-Hwan Chun

From surface flow visualization on a MIRA notchback reference model using oil flow technique, the topology of the singular points of the skin friction lines are delineated. Separation and reattachment lines at the front screen, at the A-pillar, at the C-pillar and on the rear side of the car including the trunk have been identified. It is worth to mention that two vortices emerging from the top of the trunk coil in the opposite direction as that vortices starting from the C-pillar edge. The positions of the singular points and the separation and reattachment lines and the foci of the vortices provide a sensitive database for validation of CFD-codes

### 1. 서론

일반적으로 유동장은 항상 3차원의 형상이며, 3차원 경계층이 벽으로부터 박리하면 매우 복잡한 3차원 비정상 유동장이 형성된다. 이런 박리유동은 벽 마찰 전단력과 벽 압력분포 및 국부 열전달 분포에 지대한 영향을 미치게 된다. 그러므로 비행체나 자동차, 기차 등 육상 운송체의 공력과 열전달 특성을 이해/예측하기 위하여 박리현상의 이해와 해석능력이 선행되어야 한다.

60년대 이후 전산유체역학의 놀라운 발전으로 오늘날 많은 유동문제에서 Navier-Stokes 방정식의 충분히 정확한 근사해를 수치해석적으로 구할 수 있게 됐으나, 3차원 유동박리 문제는 아직도 어려운 과제로 남아있다. 층류/난류의 천이문제와 난류 모델링 등 많은 문제가 이 박리유동의 해석을 더욱 힘들게 함은 자명하다. 벽 표면의 유동박리 현상을 이해하기 위해 사용하는 전통적 실험 방법은 벽 표면의 “마찰력선”(skin friction line, shear stress trajectory, 또는 limiting stream line으로 불림)의 가시화다. 즉 통상적으로 “Oil flow visualization”이라고 부르는 방법이다. 이 실험방법은 그 수행이 비교적 용이하며 벽 표면의 마찰력선의 Topology에서 그 특이점(singular point)의 형상, 즉 node, saddle point, spiral focus(node)를 분별하여 3차원 박리유동의 박리선(separation line), 부착선(Reattachment line), 및 와류 표출점(Focus of separated vortical flow)을 찾아내고, 박리유동의 구조를 이해할 수 있다. Oil flow 가시화 실험을 통해 얻어지는 3차원 물체 벽 표면의 마찰력선의 특이점 조합으로 구성되는 앞/뒤 정체점, 박리선, 부착선, 와류표출점 등 복잡한 3차원 박리유동의 구조는 외부유동장의 압력구배, 유선 형상과 곡률 등에 매우 민감하게 좌우된다. 그러므로 전산유체 수치해석 결과의 질을 판단하고, 사용코드의 적절성을 가름하기에는 마찰력선 형상과 그 특이점들의 위치의 상호비교를 사용함이 대단히 바람직하다. 잘 알려져 있는 바와 같이 자동차의 항력의 전산해석 결과가 사용코드에 따라 100%까지 서로 차이가 난다.[3] 이런 큰 차이는 자동차 뒤쪽의 3차원 박리유동의 수치해석 결과가 서로 많이 상이하기 때문이라고 추측된다.

본 고찰에서는 이미 많은 전산유체 해석과 실험에서 표준 형상으로 채택이 된 MIRA car의 표면마찰력선의 가시화를 통하여 3차원 유동박리의 Topology를 규명하고 그 결과를 향후 전산

1) 포항공과대학교 기계공학과 (790-784 경북 포항시 효자동 산 31, Tel:0562-279-2180)

유체 해석코드의 검증 기준 자료로 제공하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험이 수행된 포항공대 아음속 풍동은 폐쇄순환식 풍동으로 시험부의 크기가 1.8W x 1.5H x 4.3L (m)이므로 1/4 축소 자동차 모델 시험에 적합하며, 최대 풍속이 75m/s이고 난류강도는 0.2% 이하이다. 실험에 사용된 자동차 모델(Fig.2)은 대우자동차(주)에서 제공한 1/4-scale MIRA Notchback Reference Model이다. 이 모델은 단순한 형태를 가지면서 실제 자동차 형상과 비슷하고, 많은 다른 풍동에서도 이 모델을 이용한 실험을 수행하여 많은 실험데이터를 가지고 있는 모델이므로 자동차의 공기역학 특성을 규명하는데 적당한 모델이다. 1/4-scale MIRA Notchback model의 전체길이( $l_0$ )는 1041mm이고, 폭인 407mm이고, 높이(H)는 356mm이며, 축간거리( $l_w$ )는 635mm이며, 전면투영면적(A)은 0.116mm<sup>2</sup>이다. 이 모델의 전면투영면적과 풍동 시험부 단면적의 비인 blockage ratio는 4.3%이다. 표면 유동 가시화는 주로 자동차에서 생기는 유동박리나 재부착 영역을 관측하거나 표면근처에서의 유동방향을 관찰할 수 있는 방법이다. 본 실험에서는 사용된 유동가시화 방법은 윤활유와 미세입자를 섞어서 모델 표면에 칠한 뒤 유동에 노출시키면 윤활유와 섞여있던 미세입자가 유동방향으로 움직이는 원리를 이용한 오일표면유동가시화(oil surface flow visualization) 방법이다.

레이놀즈수를 변화시키면서 자동차의 A-pillar, 트렁크, 본넷 주위에서의 유동박리, 재부착, 그리고 표면유동방향을 관찰하기 위하여 풍속이 20, 40, 55, 65m/s일 때의 표면유동가시화를 수행하였다. 이때의 자동차모델의 길이 기준 레이놀즈수는 각각  $1.3 \times 10^6$ ,  $2.6 \times 10^6$ ,  $3.6 \times 10^6$ ,  $4.2 \times 10^6$ 이다.

## 3. 결과 고찰

자동차와 같이 뾰족한 형상의 물체 주변의 유동은 일반적으로 물론 완전한 3차원 유동이며 후미 쪽에서는 대부분의 경우에 3차원 박리유동이 발생된다. 자동차의 경우 곡률반경이 작은 모퉁이들에서는 많은 경우에 유동박리가 유발되는데, A-pillar와 C-pillar 주변이 그러하다. 후미에서는 Fig.1에서 보는바와 같이 longitudinal vortex가 말려나가 저항을 증가하게 한다. Fig.2는 풍동 시험부에 설치된 MIRA reference model을 보여준다. Fig.3은 차의 전체를 위에서 본 것으로 차 앞유리 전방의 유동박리선과 후미 트렁크 위 vortex의 spiral focus가 잘 보이고 있다. 앞창 전방 대칭선 위에 특이점, saddle point가 존재하며 이점의 좌우로 박리선이 나가고 있음이 박리선에 converging하는 마찰력선 형상에서 잘 확인된다.(Fig.4와 Fig.5) 창문 앞 위에는 재부착선이 diverging하는 마찰력선에 의해 나타나고 있다. 이 박리선과 재부착선 사이에 3차원 박리 bubble이 존재하는 것으로 판단된다.(Fig.5)

A-pillar 주변의 유동은 Fig.6과 7에서 보듯이 낮은 속도  $U=20\text{m/s}$ 에서 분명히 박리가 됐다 가 옆창문쪽에서 다시 부착된다. 이런 박리는 자유유속이  $U=40\text{m/s}$ 로 증가하여도 나타난다. 그러나 유속이 55m/s이라면(Fig.10과 Fig.11) 박리와 재부착이 비정상적으로 불안정해지고 유속이 65m/s이 되면(Fig.12와 Fig.13) 박리현상이 완전히 사라지고 A-pillar 주변 유동은 완전히 부착되게 된다. 이런 현상의 이해는 앞으로의 과제로 남아 있다. 전산유체의 수치해석이 이에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다. 물론 이런 곡률반경이 작은 모퉁이의 박리와 재부착을 적절히 묘사하기 위해서 이 모퉁이 주변에서의 grid의 밀도가 충분히 높아야 할 것이다.

C-pillar의 예리한 모퉁이에서는 모퉁이를 따라 마찰력선이 converging하는 박리선이 분명히 보인다.(Fig.14와 15) 박리선은 물론 차 후미의 뒷유리창 위의 표면유동과 서로 맞물려 있다. 이 C-pillar의 박리선은 속도의 크기에 상관없이 곡률반경이 매우 적어 예리한 모퉁이이므로 항상 같은 위치에 고정되어 있다.

트렁크 위의 마찰력선의 Topology와 그의 특이점들을 Fig.16a - 18b가 유속 40, 55, 65m/s에

서 보여주고 있다. 이 차 후미의 3차원 박리유동에 의해 결정되는 트렁크 위의 표면유동 구조는 속도의 변화에 거의 무관한 것으로 확인된다. 이것은 완전히 박리된 차 후미의 유동이 유속변화에 거의 상관없이 구성됨을 뜻한다. 이렇게 유속에 무관한 마찰력선의 Topology는 Fig.19에서 보는 바와 같다. 우선 대칭축 위에 첫 번째의 특이점  $S_1$ 은 saddle point로 이 점의 좌우로 재부착선이 나가고 있으며 이 재부착선의 양끝은 saddle point  $S_2$ 와  $S_3$ 이 된다. 이  $S_2$ 와  $S_3$ 은  $N_2$ 와  $N_1$  Focus와 더불어 각각 반대방향으로 말아올리는 vortex를 형성한다. 이 vortex의 회전방향이 Fig.1의 vortex 방향과 반대됨이 주목된다. 사진들에서는 뒷유리창의 마찰력선이 부채살 모양으로 올라가다가 더 이상 전진하지 않고 끝나는 것으로 보이나 그러려면 그 끝나는 선이 박리선이 되어야 하고 그에 접근하는 마찰력선도 이 박리선에 converging해야 하는데 그렇지 않다.(Fig.18a) 추측컨대 이 선은 박리선이 아니고 단지 마찰력이 약하여 기름막을 지구중력을 극복하고 위로 밀어올리지 못해 어느점에서 머물러 있어 이 선이 보이는 것으로 생각된다. 그렇다면 마지막 특이점은  $S_4$ 의 saddle point로  $S_4$ 의 양쪽으로 박리선이 나가고 있다.

Fig.20a와 Fig.20b는 각각 RNG  $k-\epsilon$ 과 RSM의 난류모델을 사용한 수치해석 결과이다.[4] Fig.20a에서 특이점의 수는 saddle point 4개와 2개의 N. Focus는 Fig.19에서와 같으나  $S_2$ 와  $S_3$ 의 위치가  $S_1$ 에 매우 접근해 있어 실험결과와는 완전히 다른 Topology를 보이고 있다. Fig.20b에서는  $S_2$ 와  $S_3$ 가 완전히 실종되어 실험결과와는 많은 차이가 있다.

전산수치해석의 결과가 실험결과와 큰 차이가 나므로 압력분포도 많은 차이를 보이게 될 것이므로 수치해석의 저항값도 실험값과는 큰 차이를 나타낼 것으로 예상된다.

표면유동가시화 실험은 박리선과 부착선 그리고 와류생성 표출점의 위치와 마찰력선의 Topology를 잘 보여주어 박리유동을 이해하는데 기여하며 나아가서는 전산수치해석 결과 검증의 민감한 자료로 활용될 수 있다.

## 후기

상기 실험은 대우자동차(주)와의 공동연구의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사한다.

## 참고문헌

- [1] Lighthill, M. J., "Attachment and Separation in Three-Dimensional Flow", in *Laminar Boundary Layers*, edited by L. Rosenhead, Oxford Univ. Press, 1963
- [2] Peake, D.J. and Tobak, M., "Three-Dimensional Interactions and Vortical Flows with Emphasis on High Speeds", AGARDograph No.252, 1980
- [3] N. Hur, I.K. Ahn, S. R. Kim, K. H. Lee, & S. C. Lee, "A Study on Vehicle Aerodynamics by using CFD : Simulation of 3-D Flow Fields around a MIRA Reference Vehicle Model", AF9411-24, 1995
- [4] 이응호, Unpublished results, private communication, 대우자동차(주), 1998
- [5] Hucho, "Aerodynamics of Road Vehicles", Butterworths, 1986, p.108

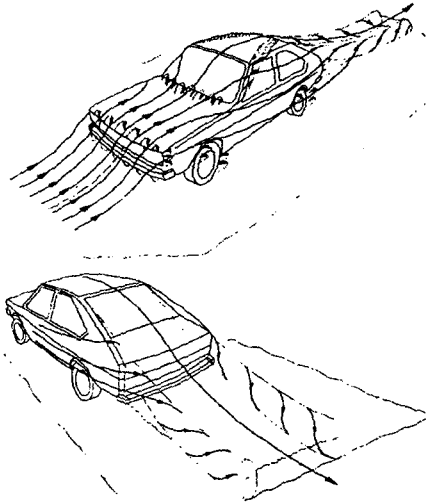


Fig. 1 Flow around a car (after Ref. 5)



Fig. 2 1/4-scale MIRA reference model

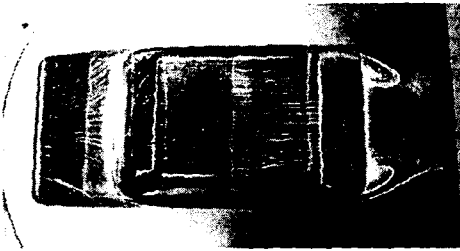


Fig. 3 Surface flow visualization (U=65m/s)

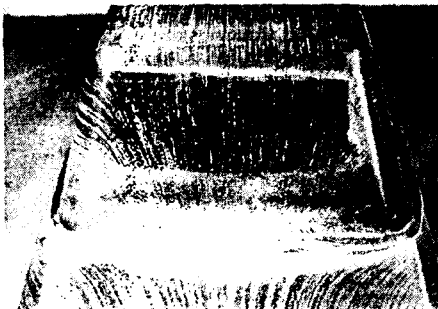


Fig. 4 Flow around the screen (u=65m/s)

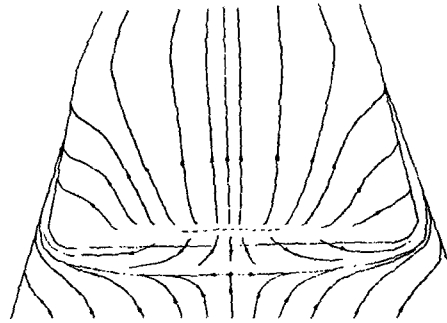


Fig. 5 Direction of skin friction on the screen

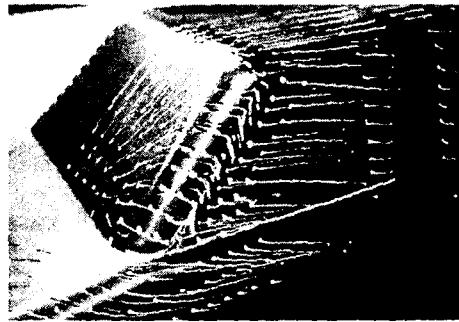


Fig. 6 Flow around A-pillar (U=20m/s)

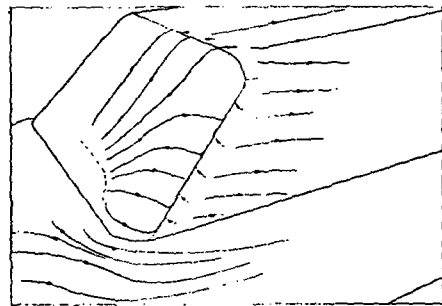


Fig. 7 Direction of skin friction around A-pillar (U=20m/s)

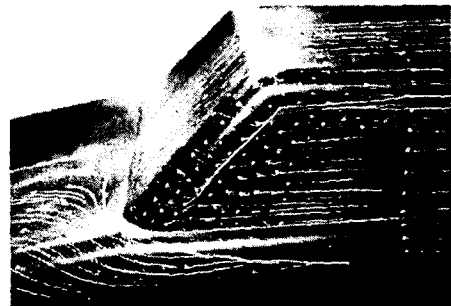


Fig. 8 Flow around A-pillar (U=40m/s)

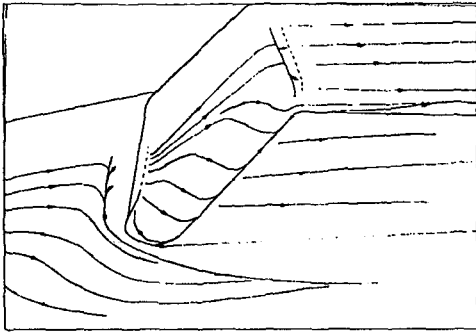


Fig. 9 Direction of skin friction around A-pillar ( $U=40\text{m/s}$ )

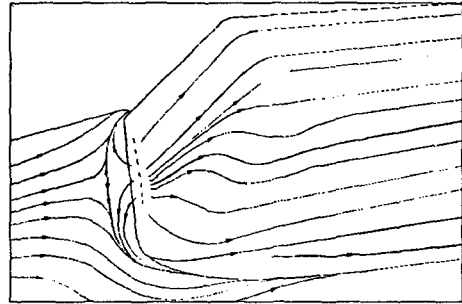


Fig. 13 Direction of skin friction around A-pillar ( $U=65\text{m/s}$ )

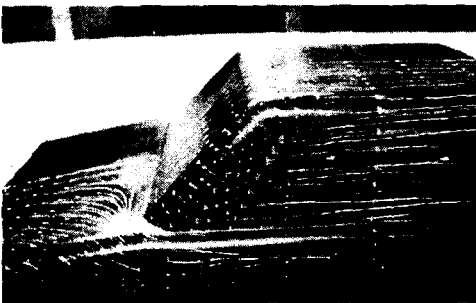


Fig. 10 Flow around A-pillar ( $U=55\text{m/s}$ )

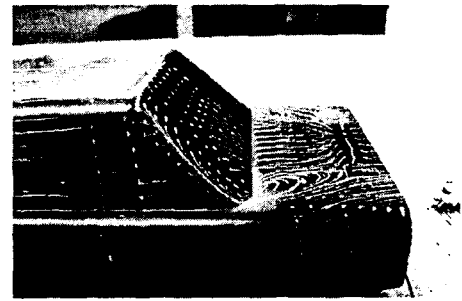


Fig. 14 Flow around C-pillar ( $U=55\text{m/s}$ )

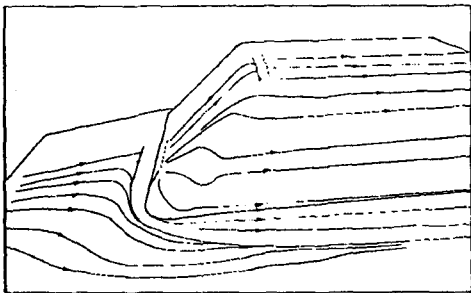


Fig. 11 Direction of skin friction around A-pillar ( $U=55\text{m/s}$ )

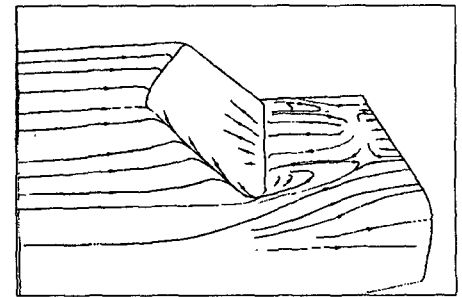


Fig. 15 Direction of skin friction around C-pillar ( $U=55\text{m/s}$ )

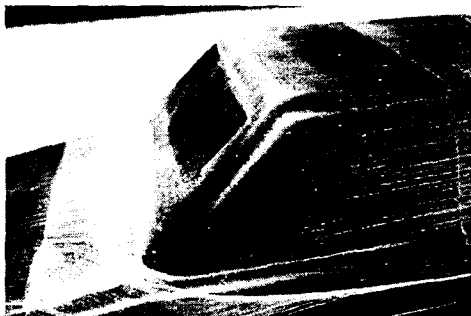


Fig. 12 Flow around A-pillar ( $U=65\text{m/s}$ )

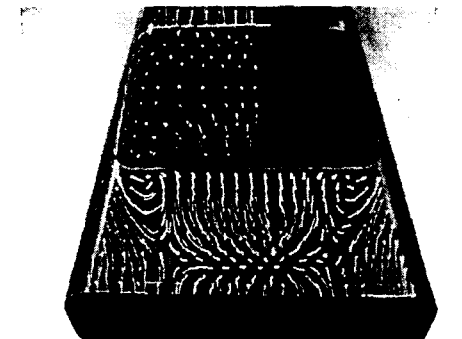


Fig. 16a Flow around the trunk ( $U=40\text{m/s}$ )

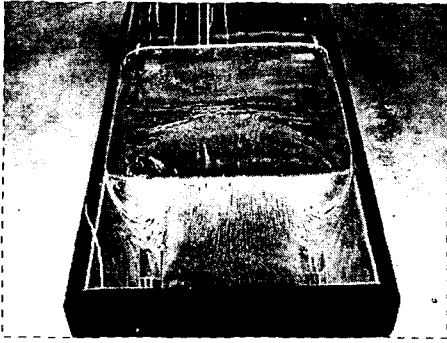


Fig. 16b Flow around the trunk ( $U=40\text{m/s}$ )

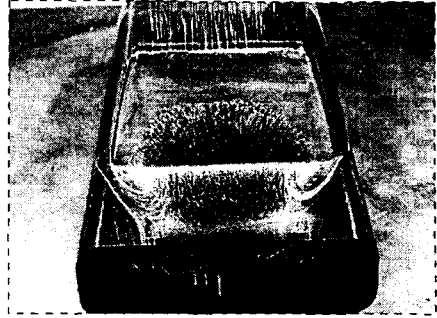


Fig. 18b Flow around the trunk ( $U=65\text{m/s}$ )

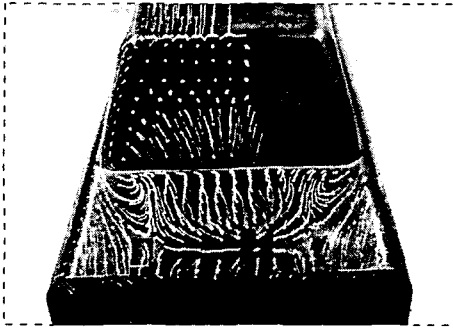


Fig. 17a Flow around the trunk ( $U=55\text{m/s}$ )

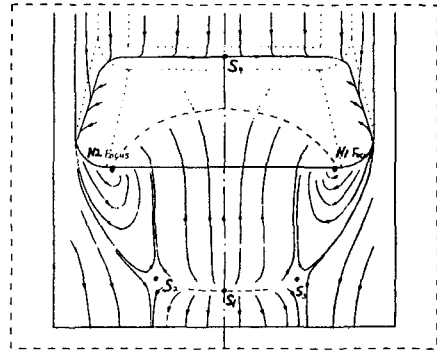


Fig. 19 Direction of skin friction on the trunk

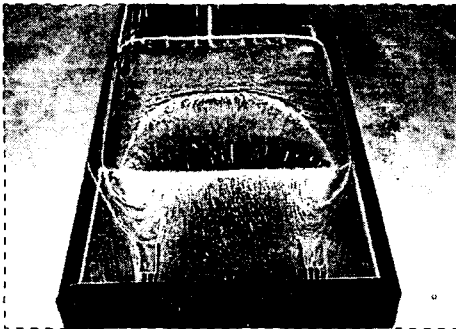


Fig. 17b Flow around the trunk ( $U=55\text{m/s}$ )

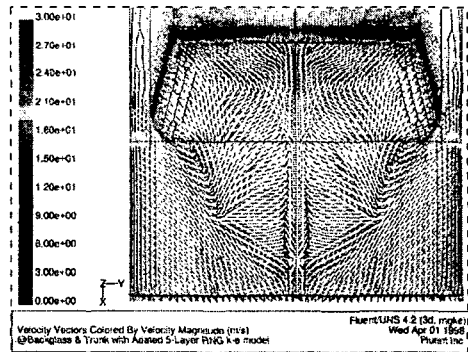


Fig. 20a Direction of flow on the trunk(CFD)

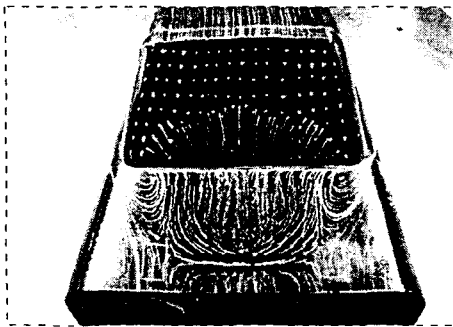


Fig. 18a Flow around the trunk ( $U=65\text{m/s}$ )

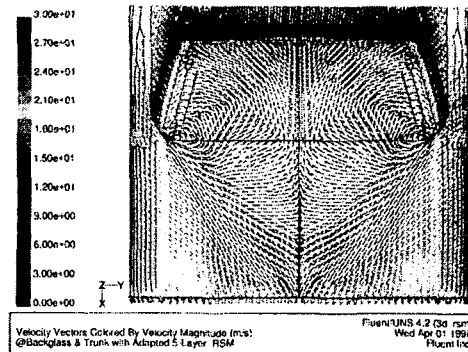


Fig. 20b Direction of flow on the trunk(CFD)