

# MIRA Notchback Reference Car 표면유동가시화

전중환\* · 김용환\*\* · 조광륜\*\* · 노상길\*\*\* · 이응호\*\*\*  
(1999년 10월 23일 접수)

## Surface Flow Visualization of MIRA Notchback Reference Car

Chung-Hwan Chun, Yong-Hwan Kim, Kwang-Ryun Cho, Sang-Kil Roh and Eung-Ho Lee

**Key Words :** Flow Visualization(유동가시화), Flow Separation(유동박리), Wind Tunnel(풍동), MIRA Reference Car(MIRA 자동차)

### Abstract

A surface flow visualization of a MIRA notchback reference car was conducted using a 1/4 -scale model in the POSTECH wind tunnel. The flow separation and reattachment phenomenon around A-pillar, C-pillar, backlight, and trunk were discussed with the help of the distributions of singular points such as nodes, saddles, and spiral foci. The locations of the singular points on the trunk and the backlight from experimental results are compared with those of CFD results using the turbulence modeling of RNG k -ε and RSM.

### 1. 서 론

일반적으로 유동장은 3차원 형상이며, 경계층에서의 유동이 벽으로부터 박리하면 매우 복잡한 3차원 비정상 유동장이 형성된다. 이러한 박리유동은 벽 마찰전단력과 표면압력분포 및 국부 열전달 분포에 큰 영향을 미치게 되므로, 비행체, 자동차, 기차와 같은 운송체의 공력특성과 열전달 특성 등의 이해와 예측을 위하여 박리현상의 이해와 해석이 선행되어야 한다.

벽 표면에서의 유동박리 현상을 이해하기 위해 사용하는 전통적 실험 방법으로는 벽 표면 마찰력선의 가시화가 있다. 통상적으로 표면유동가시화라고 부르는 이 실험방법은 수행이 비교적 쉽고, 벽 표면 마찰력선으로부터 특이점들을 분별하여 3차원 박리유동의 박리선, 재부착선 및 와류표출점을 찾아내어 박리유동의 구조를 이해할 수 있게 해준다.<sup>(1,2)</sup> 표면유동가시화 실험을 통해 얻어지는 3차원 물체 벽 표면의 정체점, 박리선, 부

착선, 와류표출점 등 복잡한 3차원 박리유동 구조는 마찰력선의 특이점 조합으로 구성되며, 외부 유동장의 압력구배, 유선 형상과 곡률 등에 매우 민감하게 좌우된다. 그러므로, 전산유체 수치해석 결과의 질을 판단하고, 사용코드의 적절성을 가름하기 위해서는 마찰력선 형상과 특이점들의 위치들을 서로 비교하는 것이 매우 중요하다.

1960년대 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. 잘 알려져 있는 바와 같이 자동차 항력의 수치해석 결과는 사용코드에 따라 실험결과와 100%까지 서로 차이가 난다.<sup>(3,4)</sup> 이러한 차이는 3차원 경계층의 층류/난류 천이문제와 난류 모델링 등 많은 문제로 인하여 자동차 뒤쪽에서 발생하는 난류 박리유동의 수치해석 결과가 실험결과와 서로 많이 다르기 때문에 생기는 것으로 추측된다.

본 연구에서는 풍동 간의 공력계수 비교를 위한 모델로 사용되며,<sup>(5,6)</sup> 전산유체 해석코드 검증에 위한 모델로도 자주 사용되는<sup>(3,7-9)</sup> MIRA 자동차 모델의 표면유동가시화를 수행하여 3차원 유동박리의 형상을 규명하고 그 결과를 전산유체 해석코드 검증의 기준자료로 이용하고자 한다.

\* 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : plume@postech.ac.kr

TEL : (054) 279-2180 FAX : (054) 279-3199

\*\* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* (주) 대우자동차

2. 실험장치 및 방법

실험이 수행된 포항공대 아음속 풍동은 폐쇄순환식 풍동으로 최대 풍속이 75m/s이고, 난류강도가 0.2% 이하이며, 시험부의 크기가 1.8W x 1.5H x 4.3L (m)이다. 실험에 사용된 1/4축소 MIRA notchback reference model의 전체길이는 1041mm, 폭은 407mm, 높이는 356mm, 축간거리는 635mm이며, 전면투영면적은 0.116m<sup>2</sup>이다. 자동차 모델의 형상은 Fig. 1에서 볼 수 있으며, 제원은 참고문헌<sup>(9)</sup>에 상세히 기술되어 있다. 참고문헌<sup>(10)</sup>에서 자동차 모델의 전면투영면적과 풍동 시험부 단면적의 비인 차폐율(blockage ratio)이 5% 이하인 조건에서 실험하는 것을 추천하였다. 본 실험에 사용된 모델의 차폐율은 4.3%이므로 이의 영향은 무시할 수 있을 것으로 사료된다. 모델이 세워져 있는 풍동 시험부 바닥은 고정되어 있으므로 실제 주행시의 경계조건인 풍속과 동일하게 움직이는 지면을 본 실험에서는 실현하지 못하였다. 그러나, Hucho 등<sup>(11)</sup>의 실험이 보여주듯이 고정지면 풍동에서 획득한 자동차 중앙단면의 압력분포는 주행시험에서 획득한 압력분포와 잘 일치하므로, 고정지면 조건에서 획득한 자동차 상부의 표면유동은 움직이는 지면의 경우와 비교하여 크게 다르지 않을 것으로 판단된다.

MIRA 모델의 A-pillar, 트렁크, 본넷 주위에서 레이놀즈수를 변화에 따른 유동박리, 재부착, 그리고 표면유동방향을 관찰하기 위하여 풍속이 20, 40, 55, 65m/s일 때의 표면유동가시화를 수행하였다. 이때의 모델 전체길이 기준 레이놀즈수는 각각 1.3x10<sup>6</sup>, 2.6x10<sup>6</sup>, 3.6x10<sup>6</sup>, 4.2x10<sup>6</sup>이다.

자동차 표면의 유동박리나 재부착 영역을 관측하기 위하여 본 실험에서는 윤활유(엔진오일 SAE 5W-50)와 미세입자(이산화티타늄)를 섞어서 모델 표면에 칠한 뒤 유동에 노출시켜 윤활유와 섞여 있는 미세입자가 표면유동방향으로 움직여 생성되는 궤적을 가시화하는 방법을 이용하였다. 이산화티타늄과 윤활유의 혼합비는 유속이 클 때에는 1:1 정도이고, 유속이 작을 때에는 1:3 정도이며, 올레산(CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>7</sub>CH<sub>2</sub>CH(CH<sub>2</sub>)<sub>7</sub>COOH)을 혼합물에 소량 추가하여 입자와 윤활유의 혼합이 용이하도록 하였다. 혼합액을 유화용 붓으로 모델 표면에 임의로 격자점을 찍는 방법과 표면에 균일하게 칠하는 방법을 병행하여 유동가시화를 수행하여 사진으로 기록한 후, 제도용 트레이싱지를 현상된 사진 위에 놓고 입자궤적을 손으로 추적하여 표면마찰력선을 획득하였다.

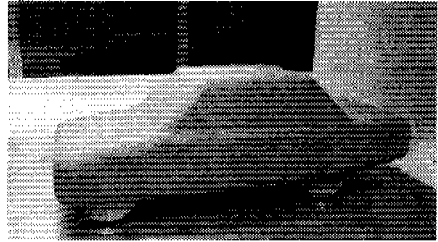


Fig. 1 Photo of 1/4-scale MIRA reference model

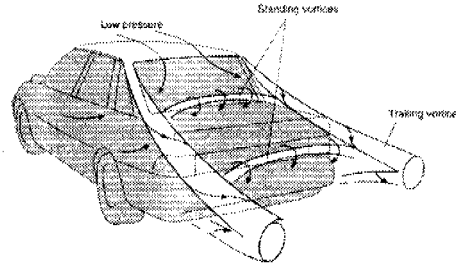


Fig. 2 Flow around a car (after Ref. 10)

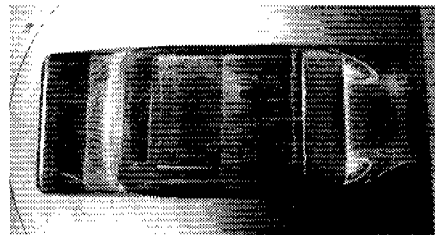


Fig. 3 Surface flow visualization (Re=4.2x10<sup>6</sup>)

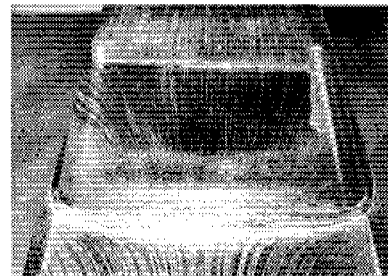


Fig. 4 Flow around a screen (Re=4.2x10<sup>6</sup>)

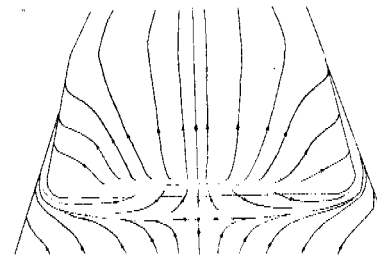


Fig. 5 Sketch of direction of skin friction on the screen (Re=4.2x10<sup>6</sup>)

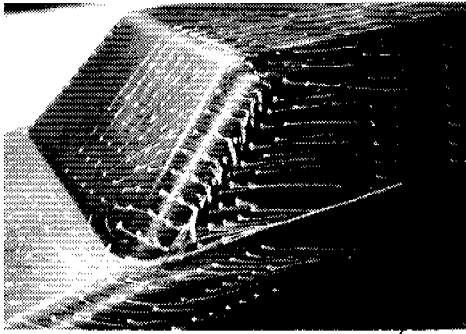


Fig. 6 Flow around A-pillar ( $Re=1.3 \times 10^6$ )

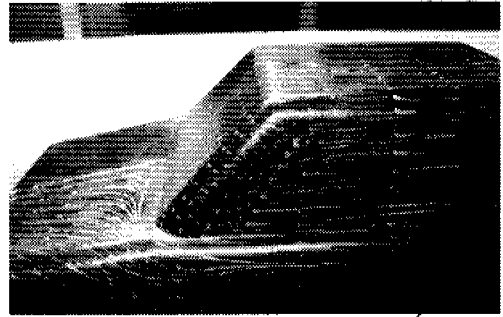


Fig. 10 Flow around A-pillar ( $Re=3.6 \times 10^6$ )

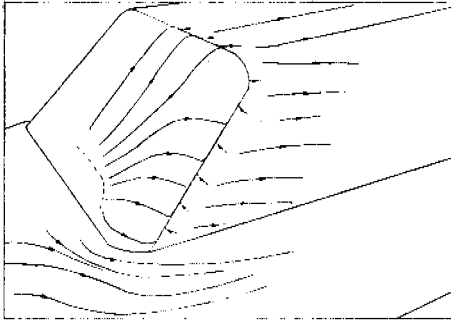


Fig. 7 Sketch of direction of skin friction around A-pillar ( $Re=1.3 \times 10^6$ )

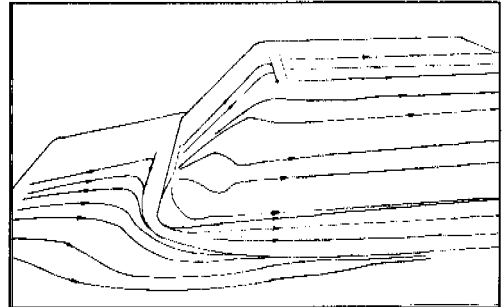


Fig. 11 Sketch of direction of skin friction around A-pillar ( $Re=3.6 \times 10^6$ )

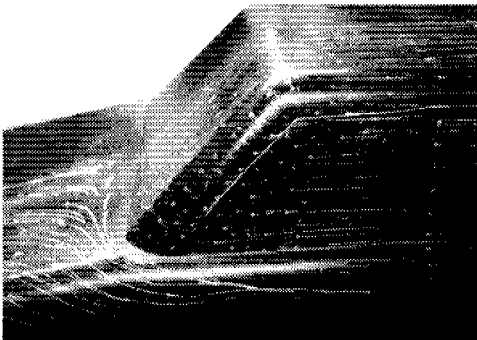


Fig. 8 Flow around A-pillar ( $Re=2.6 \times 10^6$ )

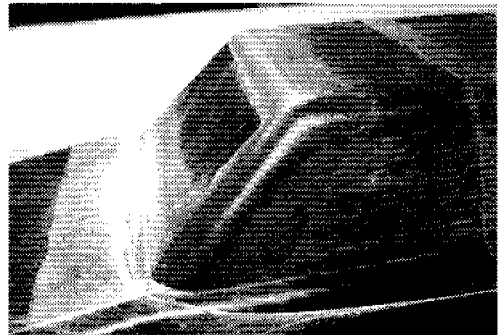


Fig. 12 Flow around A-pillar ( $Re=4.2 \times 10^6$ )

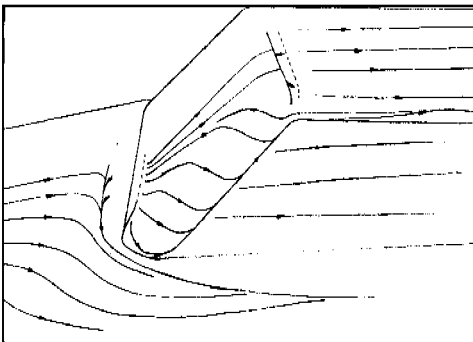


Fig. 9 Sketch of direction of skin friction around A-pillar ( $Re=2.6 \times 10^6$ )

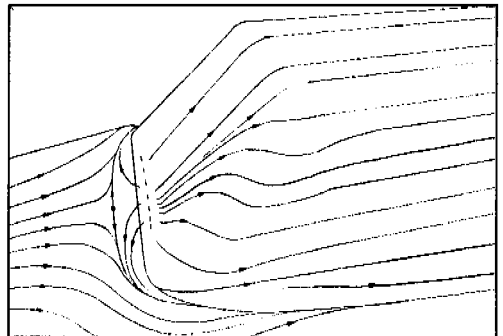


Fig. 13 Sketch of direction of skin friction around A-pillar ( $Re=4.2 \times 10^6$ )

### 3. 결과 및 분석

자동차와 같이 뾰족한 형상의 물체 후미나 곡률반경이 작은 A-pillar와 C-pillar에서는 대부분의 경우 3차원 박리유동이 발생된다. 자동차의 후미에서는 박리유동에 의해 Fig. 2에서 보는 바와 같이 꼬리와류(trailing vortex)가 생성된다.

MIRA 모델의 표면 전체를 유동가시화한 결과인 Fig. 3에 자동차 앞유리 전방의 유동박리선과 후미 트렁크 위 회전유동의 와류표출점이 잘 나타나 있다. 앞유리 전방 대칭선 위에는 안장점(saddle point)이 존재하며, Fig. 4와 Fig. 5의 박리선에 모여드는 마찰력선 형상에서 안장점의 좌우로 박리선이 나가고 있음을 확인할 수 있다. 앞유리 위에서는 발산하는 마찰력선에 의해 재부착선이 나타나고 있다. 이 박리선과 재부착선 사이에 3차원 박리기포(separation bubble)가 존재하는 것으로 판단된다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 A-pillar 주변의 유동은 낮은 레이놀즈수인  $Re=1.3 \times 10^6$ 에서 박리가 됐다가 열창문에서 다시 부착된다. 이런 박리현상은 레이놀즈수가  $2.6 \times 10^6$ 으로 증가하여도 나타나는 것을 Fig. 8과 Fig. 9에서 알 수 있다. 그러나,  $Re=3.6 \times 10^6$ 이 되면 Fig. 10과 Fig. 11에 나타난 것처럼 박리와 재부착이 비정상적으로 불안정해지며,  $Re=4.2 \times 10^6$ 이 되면 박리현상이 완전히 사라지고 A-pillar 주변 유동은 완전히 부착되는 것을 Fig. 12와 Fig. 13에서 확인할 수 있다. 낮은 레이놀즈수에서는 A-pillar의 작은 곡률반경 때문에 층류 경계층에서 역압력구배가 발생하여 유동이 박리되나, 레이놀즈수가 커짐에 따라 3차원 경계층의 측류 불안정성(cross flow instability)에 의해 난류천이가 먼저 발생하여 박리가 사라지는 것으로 추측된다.

C-pillar의 예리한 모퉁이에서는 모퉁이를 따라 마찰력선들이 모여드는 박리선이 Fig. 14와 Fig. 15에서 분명히 보인다. 이 박리선은 차 후미의 뒷유리 위의 표면유동과 서로 맞물려 있으며, C-pillar의 작은 곡률반경으로 인하여 레이놀즈수에 상관없이 항상 같은 위치에 고정되어 있다.

$Re=2.6 \times 10^6$ ,  $3.6 \times 10^6$ ,  $4.2 \times 10^6$ 일 때의 트렁크 위의 마찰력선의 형상과 특이점들을 Fig. 16(a)~18(b)가 보여주고 있다. 이 그림들에서 차 후미의 3차원 박리유동에 의해 결정되는 트렁크 위의 표면유동 구조는 레이놀즈수의 변화에 거의 무관한 것으로 확인된다. 이것은 완전히 박리된 차 후미의 유동이 레이놀즈수 변화에 거의 상관없이 구성됨을 뜻한다. 이렇게 레이놀즈수에 무관한 마찰력선의

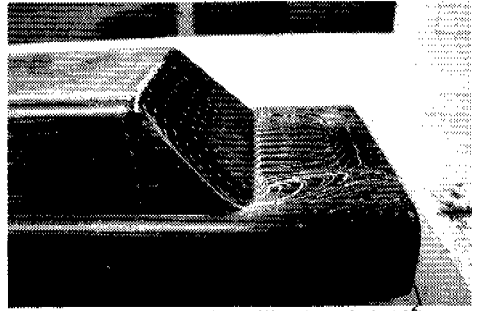


Fig. 14 Flow around C-pillar ( $Re=3.6 \times 10^6$ )

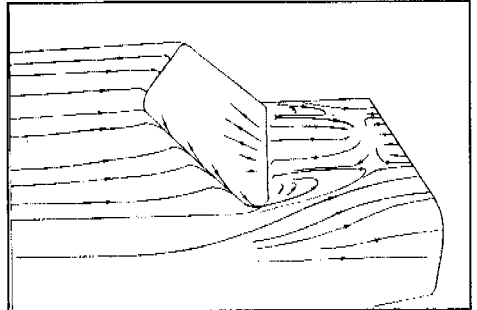


Fig. 15 Sketch of direction of skin friction around C-pillar ( $Re=3.6 \times 10^6$ )

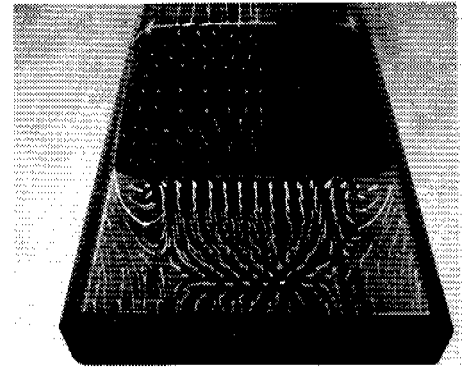


Fig. 16(a) Flow around a trunk ( $Re=2.6 \times 10^6$ )

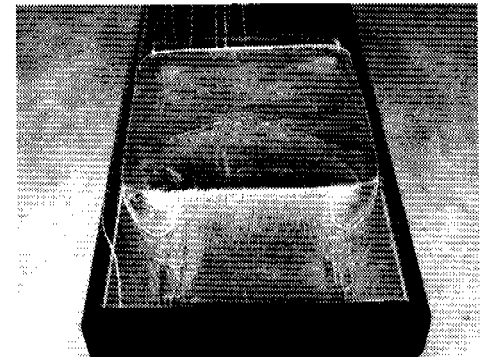


Fig. 16(b) Flow around the trunk ( $Re=2.6 \times 10^6$ )

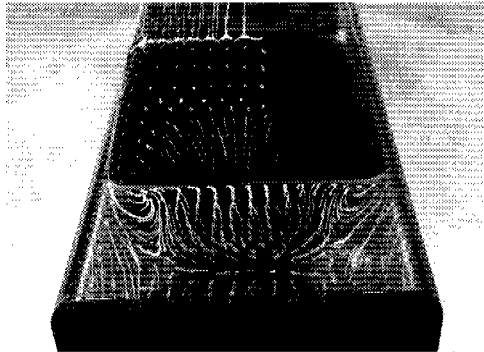


Fig. 17(a) Flow around the trunk ( $Re=3.6 \times 10^6$ )

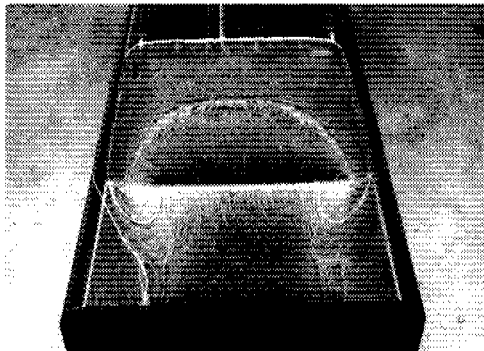


Fig. 17(b) Flow around the trunk ( $Re=3.6 \times 10^6$ )

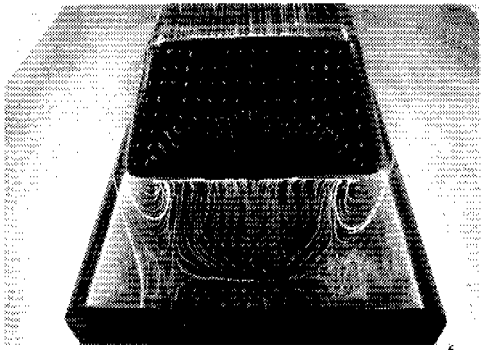


Fig. 18(a) Flow around the trunk ( $Re=4.2 \times 10^6$ )

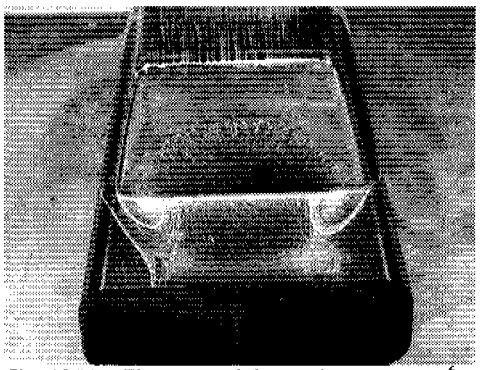


Fig. 18(b) Flow around the trunk ( $Re=4.2 \times 10^6$ )

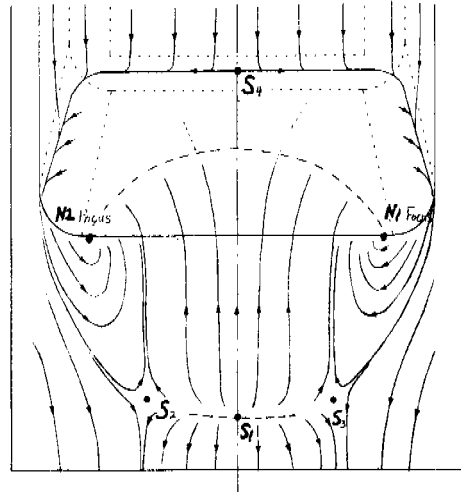


Fig. 19 Sketch of direction of skin friction on the trunk ( $Re=2.6 \times 10^6 \sim 4.2 \times 10^6$ )

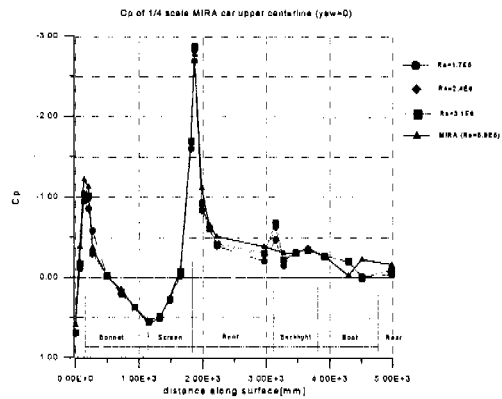


Fig. 20 Pressure distributions along the upper centerline of MIRA reference model

형상은 Fig. 19에서 보는 바와 같다. 대칭축 위에 첫 번째의 특이점  $S_1$ 은 안장점으로 이 점의 좌우로 재부착선이 나가고 있으며 이 재부착선의 양 끝에는 또 다른 안장점  $S_2$ 와  $S_3$ 가 있다.  $S_2$ 와  $S_3$ 는 와류표출점  $N_2$ ,  $N_1$ 와 더불어 각각 반대방향으로 말아올리는 와류를 형성한다. Fig. 19에서 뒷유리의 마찰력선이 부채살모양으로 올라가다가 더 이상 전진하지 않으므로 박리선이 형성되는 것으로 보인다. 그러나, 이에 접근하는 마찰력선도 박리선에 모여들지 않으므로 이 선은 박리선이 아니다. 단지 유동이 기름막에 가하는 힘이 약하기

때문에 기름막이 지구중력을 극복하고 위로 올라가지 못하여 이 선에 머물러 있는 것으로 추측된다. 이 선이 마찰력선이 아니라면 마지막 특이점은 안장점  $S_4$ 가 되며,  $S_4$ 의 양쪽으로 박리선이 나가고 있다.

Fig. 20은 레이놀즈수가  $1.7 \times 10^6$ ,  $2.4 \times 10^6$ ,  $3.1 \times 10^6$ ,  $8.8 \times 10^6$ 일 때 MIRA 자동차 모델의 중앙 단면 위쪽의 본넷, 앞유리, 지붕, 뒷유리, 트렁크 그리고 뒷범퍼 표면에서의 압력계수분포를 나타낸 것이다. 그래프에서  $Re=1.7 \times 10^6$ ,  $2.4 \times 10^6$ ,  $3.1 \times 10^6$ 은 각각 유속이 25, 35, 45m/s일 때 1/4축소 MIRA 자동차 모델의 표면압력분포를 포함공대 풍동에서 측정한 결과이며,  $Re=8.8 \times 10^6$ 은 유속이 32.62m/s일 때 MIRA 실차 모델의 표면압력분포를 MIRA 풍동에서 측정한 결과이다.<sup>(6)</sup> MIRA 실차크기 모델 풍동시험의 표면압력 측정위치, 경계층 두께, 모델설치 위치, 차폐율, 풍동의 크기 등 상세한 실험조건은 참고문헌<sup>(7)</sup>에 기술되어 있으므로 여기서는 생략한다.

Fig. 20에서 본넷과 앞유리에서의 압력계수분포결과는 일치하였으나 지붕에서의 압력계수분포는 레이놀즈수 변화에 따라 차이가 났다. 이러한 차이는 앞유리와 지붕의 연결부에서 발생하는 박리기포에 의한 것으로 생각된다. 표면유동가시화 결과인 Fig. 6 ~ Fig. 11을 보면  $Re=3.6 \times 10^6$ 보다 작을 경우에는 앞유리와 지붕의 연결부에서 유동박리가 발생하는 것을 알 수 있으며, 이 유동박리는  $Re=4.2 \times 10^6$ 에서는 발생하지 않는다는 것을 Fig. 12와 Fig. 13에서 확인할 수 있다.

Fig. 20에 나타난 트렁크에서의 압력계수분포를 보면 포함공대 풍동에서 수행한 1/4 축소모델 실험결과( $Re=1.7 \times 10^6$ ,  $2.4 \times 10^6$ ,  $3.1 \times 10^6$ )의 압력계수들은 서로 일치하였으나 MIRA 실차 풍동실험 결과( $Re=8.8 \times 10^6$ )와는 다른 경향을 보였다. 1/4 축소 모델의 실험결과는 가로축이 4500mm인 곳에서 재부착이 이루어지는 것을 Fig. 20의 압력계수분포와 Fig. 14 ~ Fig. 19의 유동가시화 결과에서 확인할 수 있다. MIRA 풍동실험 결과인  $Re=8.8 \times 10^6$ 에서의 압력계수로부터 가로축이 4300mm인 곳에서 재부착이 이루어져 레이놀즈수가 증가하면 재부착이 빨리 되는 것으로 추정되지만 표면유동가시화 결과가 없어 확인할 수 없다.

풍동시험으로 얻은 MIRA 자동차 모델의 항력계수와 표면의 압력계수들은 전산유체 해석코드의 검증용을 위한 자료로 많이 사용되어 왔으나,<sup>(3,7,8,9)</sup> 항력계수와 표면압력계수들은 유동장에 대한 정보를 많이 포함하지 않으므로 전산유체 해석 결과를 검증하기에는 미흡하다. 정확한 검

증을 위해서는 전산 해석 결과로 얻은 유동장을 풍동시험으로 얻은 유동장과 비교하는 것이 바람직하나 풍동시험으로 전체 유동장을 획득하는 것은 많은 시간과 비용이 소모되므로, 비교적 시간이 적게 소모되고 많은 유동정보를 포함하는 표면유동가시화로 획득한 마찰력선의 형상을 전산 해석 결과의 검증자료로 이용하는 것이 바람직하다.

표면마찰력선의 형상을 비교함으로써 전산유체 해석결과를 평가하기 위한 예를 들기 위하여, 저자들에 의해 이미 수행되었으나 아직 발표되지 않은 MIRA 자동차 모델의 전산유체 해석결과로 얻은 트렁크 윗면의 마찰력선의 형상을 본 연구에서 획득한 마찰력선의 형상과 비교하였다.

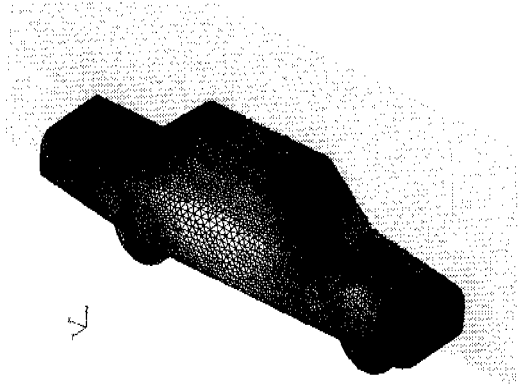


Fig.21(a) Meshes on the surface of MIRA reference model and a symmetry plane

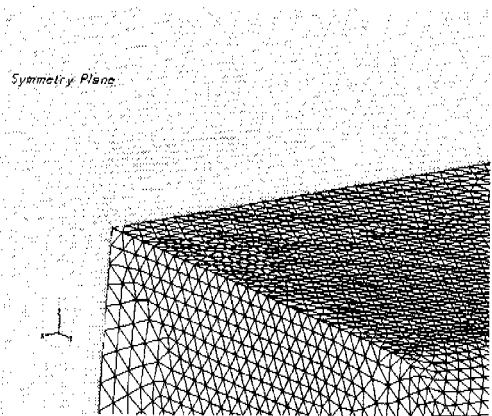


Fig.21(b) Magnified view around a rear-end

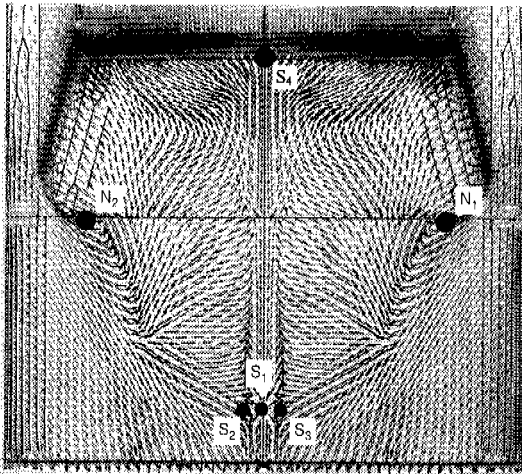


Fig. 22(a) Direction of skin friction on the trunk (RNG k- $\epsilon$ ,  $Re=8.8 \times 10^6$ )

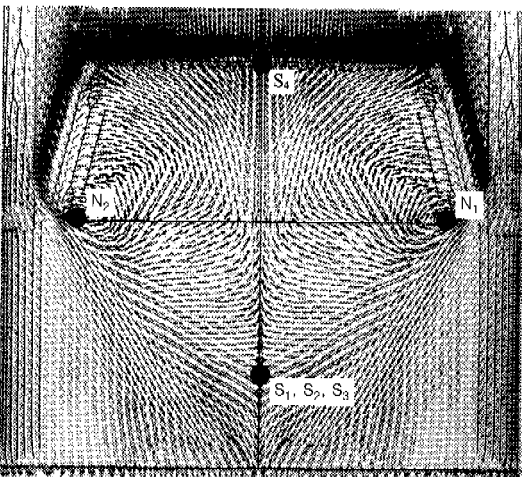


Fig. 22(b) Direction of skin friction on the trunk (RSM,  $Re=8.8 \times 10^6$ )

전산유체 해석에서는 유한체적법을 사용하는 상용 전산유체 해석 프로그램인 FLUENT를 이용하였다. 사용된 격자는 차체면 주위에는 프리즘 격자, 그 외의 공간에서는 사면체 격자를 사용하였으며, 사면체 격자수는 345,000개, 프리즘 격자수는 194,000개로 총 539,000개의 격자가 사용되었다. Fig. 21(a)와 Fig. 21(b)에서 해석모델 표면의 격자형태를 볼 수 있다. 계산영역의 설정에서 폭과 높이는 MIRA 풍동의 시험부 단면적(8m x 6m)과 같도록 하였고, 유동입구 위치는 앞범퍼에서 상류방향으로 4L(차량길이 L은 4.165m), 유동출구 위치는 뒷범퍼에서 하류방향으로 11L을 사용하였다. 입구 경계의 유동속도는 32.62m/s, 난류강도는 0.1%이며, 모델표면과 풍동벽면은 점착조건을 부

여하고, 풍동시험과 같은 고정된 지면조건을 적용하여, MIRA 풍동에서의 실차크기 시험과 동일한 조건<sup>(7)</sup>을 수치해석에서 사용하였다. 출구에서는 압력구배가 없는 경계조건을 부여하였고, 횡풍이 없는 경우를 해석하였으므로 주유동방향에 대해 대칭 경계조건을 적용하여 전체 유동장의 반을 계산하였다. 난류모델은 RNG k- $\epsilon$ 과 RSM (Reynolds Stress Model)을 이용하였으며, 정상상태 비압축성 3차원 유동장에 대해 계산하였다.

본 연구의 표면유동가시화로 획득한 MIRA 모델 트렁크 표면의 마찰력선 형상을 비교하기 위한 예로 이용된 전산유체 해석에서의 레이놀즈수는  $8.8 \times 10^6$ 으로 표면유동가시화 실험이 수행된 레이놀즈수 영역인  $2.6 \times 10^6 \sim 4.2 \times 10^6$ 에서 크게 멀지 않으며, Fig. 16(a) ~ Fig. 18(b)에 나타난 것과 같이 레이놀즈수가  $2.6 \times 10^6 \sim 4.2 \times 10^6$ 에서는 후류영역에 속하는 자동차 트렁크 표면에서는 표면유동가시화 형상이 큰 차이가 없으므로 레이놀즈수  $8.8 \times 10^6$ 에서도 크게 다르지 않을 것이라고 사료된다.

Fig. 22(a)와 Fig. 22(b)는 각각 RNG k- $\epsilon$ 과 RSM의 난류모델을 이용한 수치해석 결과로 얻은 MIRA 자동차 모델 트렁크 표면의 마찰력선과 특이점들을 나타낸 것이다. RNG k- $\epsilon$  난류모델을 이용한 해석 결과인 Fig. 22(a)에서 특이점의 수는 안장점 4개( $S_1, S_2, S_3, S_4$ )와 와류표출점 2개( $N_1, N_2$ )이다. 이는 표면유동가시화로 획득한 Fig. 19의 특이점 수와 같으나  $S_2$ 와  $S_3$ 의 위치가  $S_1$ 에 매우 접근해 있어 표면유동가시화 결과와는 다른 형상을 보이고 있다. RSM 난류모델을 이용한 해석 결과인 Fig. 22(b)에서는 마찰력선의 형상이  $S_2$ 와  $S_3$ 가  $S_1$ 과 합쳐진 형상으로 나타나 있어 실험결과와는 크게 차이가 있다는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 위의 두 수치해석 결과에서 표면마찰력선 형상이 실험결과와 크게 차이가 나므로 유동장도 큰 차이를 보일 것이라고 쉽게 추측할 수 있으며, 실험에서와 같은 형상의 마찰력선을 생성하는 유동장이 형성되도록 수치해석 방법을 개선하는 것이 바람직하다.

#### 4. 결론

MIRA 자동차 모델의 표면 유동가시화를 수행하여 다음과 같은 결론은 얻을 수 있었다.

(1) MIRA 자동차 모델에서 낮은 레이놀즈수에서 발생하는 A-pillar의 유동박리와 재부착은  $Re=4.2 \times 10^6$  이상에서는 발생하지 않았으며, 앞유리와 지붕의 연결부에서 발생하는 유동박리와 재부착도  $Re=4.2 \times 10^6$  이상에서 발생하지 않았다.

(2) C-pillar와 뒷유리 상단에서 유동박리선이 형성되었으며 C-pillar와 연결되는 트렁크 양끝에서는 한쌍의 와류표출점이 생성되었다. 트렁크 뒤쪽에서는 재부착선이 형성되었으며 재부착선 양끝에는 한쌍의 안장점이 형성되었다. 레이놀즈수가  $1.3 \times 10^6 \sim 4.2 \times 10^6$  범위 내에서는 이러한 특이점들의 위치는 변하지 않았다.

(3) 표면유동가시화에서 얻은 박리선, 부착선, 그리고 와류표출점들과 같은 특이점들과 표면마찰력선은 박리유동을 이해하는데 기여할 뿐만 아니라, 기존의 항력계수나 압력계수들의 비교에 의한 방법보다 더 정확한 전산유체 해석결과 검증자료로 활용될 수 있다.

## 후 기

본 연구는 (주)대우자동차와 포항공대 첨단유체공학연구센터의 도움으로 수행되었으며, 이에 감사한다.

## 참고문헌

- (1) Lighthill, M. J., 1963, "Attachment and Separation in Three-Dimensional Flow," in *Laminar Boundary Layers*, edited by L. Rosenhead, Oxford Univ. Press.
- (2) Peakc, D.J. and Tobak, M., 1980, "Three-Dimensional Interactions and Vortical Flows with

- Emphasis on High Speeds," AGARDograph No. 252.
- (3) Hur, N., Ahn, I.K., Kim, S.R., Lee, K.H., and Lee, S.C., 1995, "A Study on Vehicle Aerodynamics by using CFD : Simulation of 3-D Flow Fields around a MIRA Reference Vehicle Model," AF9411-24.
- (4) 명현국, 진은주, 박희경, 1997, "Ahmed Body 주위의 3차원 난류유동 해석 -난류모델의 평가," 대한기계학회논문집(B), 제21권, 제7호, pp. 873~881.
- (5) SAE, "Surface Vehicle Information Report: Aerodynamic Testing of Road Vehicles", SAE J2071.
- (6) 신중환, 김용환, 1997, "축소모델을 이용한 자동차의 공기역학적 특성에 관한 연구 I," (주)대우자동차 연구보고서, p. 46.
- (7) Carr, G.W., 1992, "Validation of CFD Codes for Predicting Aerodynamic Performance," *Automotive Engineer*, Oct./Nov., pp. 46~49.
- (8) 명현국, 진은주, 1997, "MIRA Vehicle Model 주위의 3차원 난류유동에 관한 수치해석," 대한기계학회 1997년 추계학술대회논문집 B, pp. 210~215.
- (9) Gaylard, A.P., Baxendale, A.J., Howell, J.E., 1998, "The Use of CFD to Predict the Aerodynamic Characteristics of Simple Automotive Shapes," SAE980036.
- (10) Barnard, R.H., 1996, "Road Vehicle Aerodynamic Design," Longman, p. 29, pp. 241~243.
- (11) Hucho, W.-H., Janssen, L.J., and Schwarz, G., 1975, "The Wind Tunnel's Ground Plane Boundary Layer - Its Interference with the Flow Underneath Cars," SAE Paper 700066, Detroit.