

파넬법을 이용한 自動車의 外形設計

Design of Automobile Body Shape by Using Panel Method

李 東 鎬* · 姜 信 榮**
Dong-Ho Lee, Shin-Hyoung Kang

Abstract

Numerical calculation of the flow field past a passenger car was carried out by using a panel method with a small computer of 5Mbyte memory size.

The shape of car body was simplified and reconstructed by 2180 panels on which a constant strength sink(or source) was distributed. The separation of flow from the surface and the wake flow were not considered in the calculation because of the computer memory limitation. All of the results of calculation were presented by using a 3-dimensional computer graphics.

In spite of small memory size of computer, generally good agreements were obtained, except the separated region, from the comparison of pressure distribution between numerical analysis and wind tunnel experiment with 1/5 scaled model.

1. 서 론

70년대 이후 두 차체에 걸친 세계적인 오일쇼크는 한정된 석유에너지의 효율적 이용이란 면에서 고속화에 의해 계속 증가하는 자동차의 연료소모율을 줄이기 위한 활발한 연구를 진행하게 만들었다. 일반적으로 승용차에서는 속도가 80km/hr를 분기점으로 하여 공기저항에 의한 마력소모가 기타 주요 기계적 저항력 등에 의한 값보다 급격이 증가한다고 한다.⁽¹⁾ 자동차에 대한 공기 저항력은 60km/hr전후에서 속도증가에 따라 매우 급속히 증가하기 때문에 공기역학적인 특성에 대하여 오래전부터 풍동(wind tunnel)을 이용하여 꾸준히 연구되어 왔다.

그러나 최근들어 빠르게 발달하고 있는 전자공학 기술의 발달로 대형 고성능 컴퓨터를 가까이

접하는 것이 무척 용이하게 되었다. 이에 따라 이전까지는 막대한 계산비용을 사용할 수 있는 항공기 설계분야에서 특수 대형 컴퓨터를 이용하여 실시되어 왔던 수치해석법들이 점차 여러 관련 분야에 파급되어 응용되기 시작했다.

본 연구에서는 공기역학적인 항공기의 외형설계에 널리 쓰이고 있는 파넬법(panel method)을 자동차의 기본적인 공기역학적 외형설계에 적용코자 하며 이는 최근들어 구미 선진제국의 자동차회사들도 많은 관심을 갖고 보다 적극적으로 연구를 진행시키고 있는 과제이다.⁽²⁾ 그러나 이 파넬법은 비점성(invscid) 이상유동에 근거한 이론이므로 그 계산결과와 해석 및 이용에는 여러가지 제약이 따르게 된다. 즉 비점성유동이므로 공기의 점성(viscosity)으로 인한 경계층(boundary layer)발생을 예측할 수 없으며, 따라서 물체의

* 正會員, 서울대학교 航空工學科

** 正會員, 서울대학교 機械工學科

표면으로부터의 유동의 박리(separation) 현상을 예측할 수 없다. 이에 따라 일반적으로 유선형 물체(stream lined body)일 경우는 별도의 특별한 수정이 필요없이 이론 계산치와 실질 유동의 실험 측정치의 좋은 일치를 얻고 있으나 물체의 형상이 복잡해지고, 따라서 물체 표면의 압력구배(pressure gradient)가 복잡한 분포를 갖게 되면 유동의 박리가 나타날 수 있게 된다. 이 경우는 모델실험에서 측정된 위치 등을 이용하여 박리유동(예를 들면 wake)에 대한 파넬의 수학적 모델을 새로 만들어 사용하여야 한다.

본 연구에서는 이상의 여러가지 점들을 고려하여 일차적으로 박리가 없다고 가정하여 용출점(sink-source)만을 분포시킨 파넬법을 이용하여 3차원 승용차 모델에 적용 계산한 후, 1/5로 축소된 승용차 모델을 사용하여 실시된 풍동 실험 결과와 비교 검토함으로써 일반 범용 컴퓨터에서의 이 방법의 적용 가능성과, 풍동실험치와의 비교를 통해 박리가 없다고 가정한 수치해의 일치범위 등을 확인코자 한다.

끝으로 수치해의 출력력을 3차원 그래픽(graphic)을 통해 나타냄으로써 자동차의 기본 형상설계에서 공기역학적 특성을 고려한 형상결정은 물론, 미적인 면에서의 형상결정(styling)을 동시에 실시 가능토록 하였다.

그리고 일차연구 결과를 토대로 박리(separation)를 포함하는 실제 유동에 더욱 가까운 파넬법을 개발하는 기초를 마련코자 한다.

2. 파넬법 (Panel method)

2.1 이론전개⁽¹⁾

비점성유체의 정상유동을 지배하는 방정식은 잘 알려진 Laplace 방정식과 Bernoulli 방정식이다.

즉, 물체에서 멀리 떨어져 들어오는 유동의 속도를 \vec{V}_∞ 이라 하고, 속도 포텐셜 (Velocity Potential)을 ϕ 라 할때 이 두식은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\rho}{2} |\vec{V}|^2 + P = \text{constant} \quad (2.2)$$

이때 임의의 위치에서의 속도 \vec{V} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{V} = \vec{V}_\infty + \nabla \phi \quad (2.3)$$

여기서 ϕ 는 물체로 인한 유동장의 교란 속도 포텐셜 (disturbance velocity potential)로써 다음과 같은 경계조건들을 만족시켜야 한다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} \Big|_s = -\vec{n} \cdot \vec{V}_\infty \quad : \text{물체표면} \quad (2.4-a)$$

$$\phi \rightarrow 0 \quad : x^2 + y^2 + z^2 \rightarrow \infty \quad (2.4-b)$$

윗식에서 \vec{n} 는 물체표면에 수직방향의 단위 벡터이다.

이때 교란속도 포텐셜 ϕ 는 물체표면에 source와 doublet를 분포시켜 표시할 수가 있다.

$$\phi = - \iint_s \frac{\sigma}{r} ds - \iint \mu \vec{n} \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) ds \quad (2.5)$$

여기서, σ : source 강도

μ : doublet 강도

물체가 무양력물체 (nonlifting body)인 경우는 source분포만으로 (2.5)식을 나타낼 수 있다.

$$\phi = - \iint_s \frac{\sigma}{r} ds \quad (2.6)$$

위 식은 지배방정식 (2.1)식과 무한대에서의 경계조건식 (2.4-b)를 만족하므로 물체표면에서의 조건인 식 (2.4-a)을 만족시키도록 해야한다. 따라서 식 (2.6)을 물체표면에 수직방향의 미분을 취하면,

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} \Big|_s = -2\pi\sigma - \iint_s \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) \sigma ds \quad (2.7)$$

식 (2.4-a)와 식 (2.7)로부터

$$2\pi\sigma - \iint_s \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) \sigma ds = -\vec{n} \cdot \vec{V}_\infty \quad (2.8)$$

위식은 2nd Kind Fredholm integral eq.이다.

물체를 n개의 사각형 파넬로 나누고 각 파넬에서의 source 강도 σ 를 일정하게 분포시킬 때, 각 파넬중의 한 점(control point)에서 식 (2.8)을 만족시키는 각 파넬의 source 강도 σ 를 결정하는 것이 1st order 파넬법이다. 이를 좀 더 자세히 설명하면 각 j번 파넬의 source 강도 σ_j 에 의하여 나타내어지는 교란속도 \vec{V}_j 는

$$\vec{V}_i = - \sum_{j=1}^n \sigma_j \iint_s \nabla \left(\frac{1}{r_{ij}} \right) ds \quad (2.9)$$

이때 $-\iint_s \nabla \left(\frac{1}{r_{ij}} \right) ds$ 는 파넬간의 상대적인 위치 r_{ij} 만으로 결정되는 값이므로 이 값을 \vec{V}_{ij} 라 하면

$$\vec{V}_i = \sum_{j=1}^n \vec{V}_{ij} \sigma_j \quad (2.10)$$

경계조건 (2.4-a)에서

$$\vec{n}_i \cdot \vec{V}_i = -\vec{n}_i \cdot \vec{V}_{on}$$

$$\sum_{j=1}^n (\vec{n}_i \cdot \vec{V}_{ij}) \sigma_j = -\vec{n}_i \cdot \vec{V}_{on} \text{이다}$$

여기서 A_{ij} 를 다음과 같이 정의하면

$$A_{ij} = \vec{n}_i \cdot \vec{V}_{ij} \quad (2.11)$$

따라서 경계조건(2.4-a)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{j=1}^n A_{ij} \sigma_j = -\vec{n}_i \cdot \vec{V}_{on} \quad (2.12)$$

이때 A_{ij} 는 식(2.8)에 의하여 다음과 같은 성질을 갖는다.

$$i=j \text{일때 } A_{ij} = 2\pi$$

위의 (2.12)식은 n 개의 미지수 σ_j 를 갖는 선형대수 방정식이므로 잘 알려진 방법을 이용하여 쉽게 해를 구할 수 있다.

따라서 source분포에 의한 유도속도 (induced velocity)와 무한대 앞에서의 진입속도 \vec{V}_{on} 를 합한 속도(total velocity) \vec{V}_{ti} 는 다음과 같다.

$$\vec{V}_{ti} = \sum_{j=1}^n \vec{V}_{ij} \sigma_j + \vec{V}_{on} \quad (2.13)$$

압력계수 C_{pi} 는 식(2.13)에서 구한 속도와 식(2.2)의 Bernoulli 방정식으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{pi} = \frac{P_o - P_i}{1/2 \rho |\vec{V}_{on}|^2} = 1 - \frac{|\vec{V}_{ti}|^2}{|\vec{V}_{on}|^2} \quad (2.14)$$

2.2 수치계산용 컴퓨터 프로그램 개요

본 연구에서는 일반적으로 non-lifting potential flow 계산에 널리 사용되고 있는 Hess and Smith⁽⁴⁾의 프로그램을 기초로 하여 본 연구의 내

용에 맞고 소형컴퓨터 사용이 가능하도록 기본 프로그램을 수정 사용하였다. 한편 계산결과를 Calcomp Plotter를 이용하여 3차원 그래픽으로 나타낼 수 있도록 하여 임의 각도에서 본 대상 물체의 파넬형성 및 표면 압력분포 등을 쉽게 분석 가능토록 하였다.

본 연구에서 사용된 프로그램은 다음과 같은 6개의 주요 subprogram으로 구성되어 있다.

- (1) INPUT : 물체 형상을 단순화시켜 파넬구성 - 각 파넬의 기하학적 특성치 계산 - transformation matrix 계산 - control point 계산
- (2) VFORM : 식(2.10)속의 \vec{V}_{ij} 계산 (far, intermediate and near field)
- (3) AFORM : 식(2.11)에 의한 A_{ij} (normal influence matrix)
- (4) SIGMA : Gauss-Seidel Iterative Method 에 의한 source 강도 σ_j 계산
- (5) PRINT : 식(2.13)에 의한 속도 V_{ti} 와 식(2.14)에 의한 압력계수 C_{pi} 계산
- (6) DRAW : 이 프로그램은 주로 참고문헌(5)를 인용 작성되었다. - 물체의 좌표계를 관찰자에 수직인 스크린 좌표계로 변환 - normal vector criteria에 의한 보이지 않는 표면(hidden surface) 판별 - face priority method에 의한 선의 가시여부(visibility)를 판별한 후 선의 보이지 않는 부분(hidden portion) 계산

2.3 예비계산

본 연구의 목적에 맞게 수정, 설치된 컴퓨터 프로그램의 정확성을 확인하기 위하여 일차적으로 단순한 형상을 갖는 경우에 대하여 예비계산을 실시하였다.

계산에 사용된 컴퓨터는 NOVA Eclips MV-8000으로 주기억용량 5M byte를 갖고 있으며 보조기억장치로 자기디스크 및 테이프 등을 지니고 있다.

첫째 경우는, Fig. 1에 보인 바와 같이 반경 R의 구가 평판으로부터 0.5R 떨어져 평판에 평행

하게 유입하는 유동장내에 놓인 경우로 근접한 평판의 효과를 고려하기 위하여 평판을 대칭으로 한 Method of Images를 사용하였다. ϕ 및 θ 방향으로 각각 9° 씩 절단하여 구의 전체표면을 800개의 파넬로 구성한 후, 구의 피칭성을 이용하여 그 절반 판넬에 대하여 계산을 실시하였다. 수치계산 결과인 구 표면의 압력계수 분포를

Fig. 2에 나타내었는데 여기서 상반구표면($\phi > 0$) 보다 하반구표면($\phi < 0$)에서 압력이 상대적으로 감소하여 평판에 근접한 효과를 잘 보여주고 있다.

둘째 경우는, Fig. 3에 보인 바와 같이 2 : 1.5 : 1의 반경비를 갖는 축대칭 타원물체가 평판으로부터 0.5R 떨어져 평판에 평행한 유동장내에

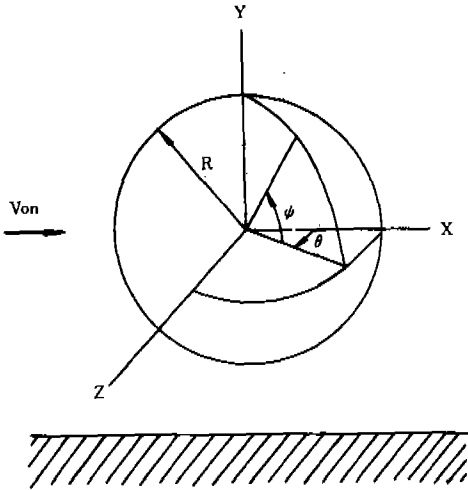


Fig. 1 Sphere located in Uniform Flow near a Flat Plate

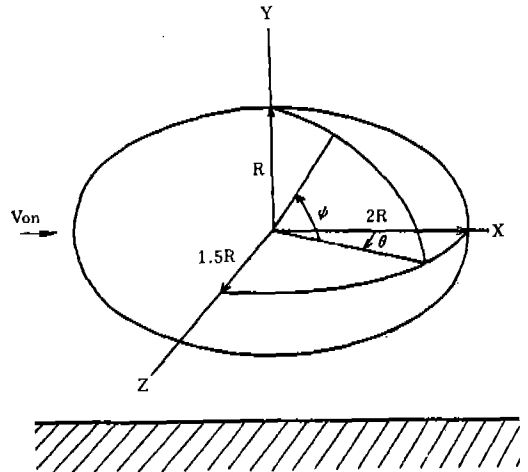


Fig. 3 Ellipsoid located in Uniform Flow near a Flat Plate

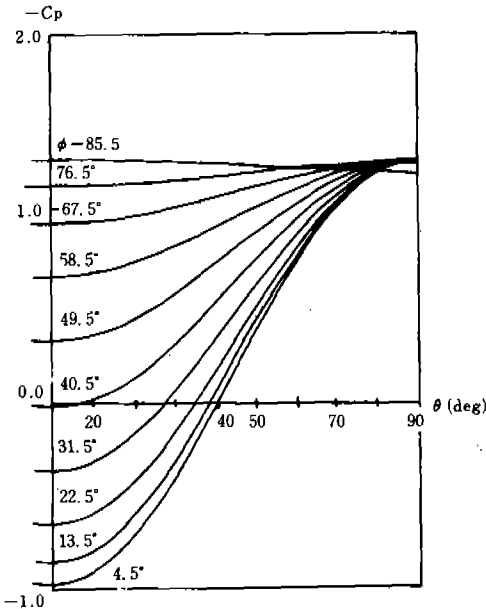


Fig. 2(a) Distribution of Pressure Coefficient on the Upper Hemisphere Surface

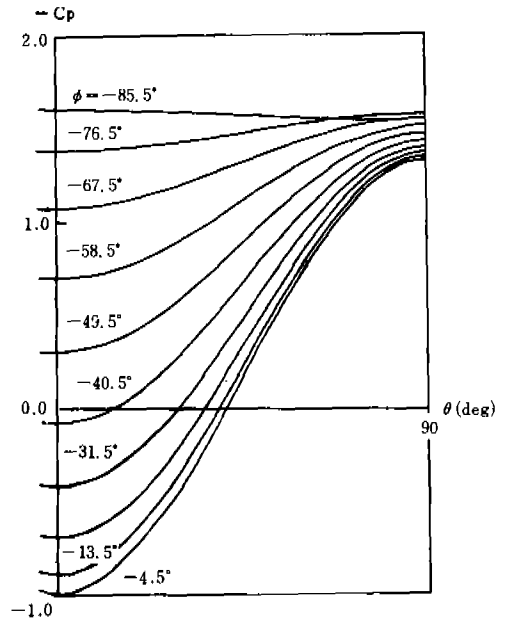


Fig. 2(b) Distribution of Pressure Coefficient on the Lower Hemisphere Surface

놓인 경우로, θ 및 ϕ 방향으로 각각 18° 씩, 전체 표면을 200개의 패널로 잘라 계산하였다. 이 경우도 Fig. 4에 나타낸 C_p 분포에서 물체와 평판사이에서 유체의 가속으로 인한 압력강하 현상을

잘 보여 주고 있으며, 3차원 그래픽으로 그려진 물체의 패널형성 및 패널 중심선에서의 벽면 속도 벡터도 문제점없이 잘 그려지고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 5).

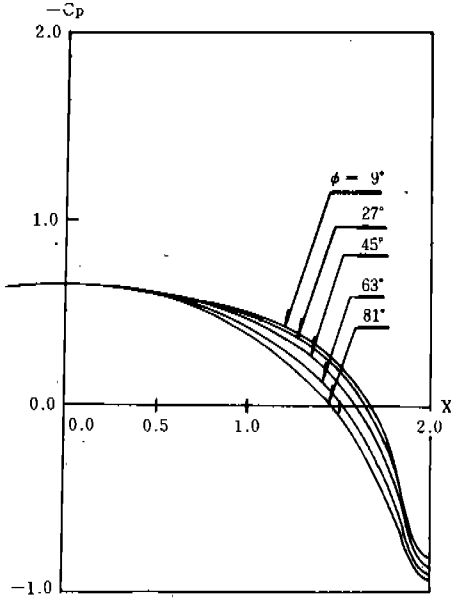


Fig. 4(a) Distribution of Pressure Coefficient ($\phi > 0$)

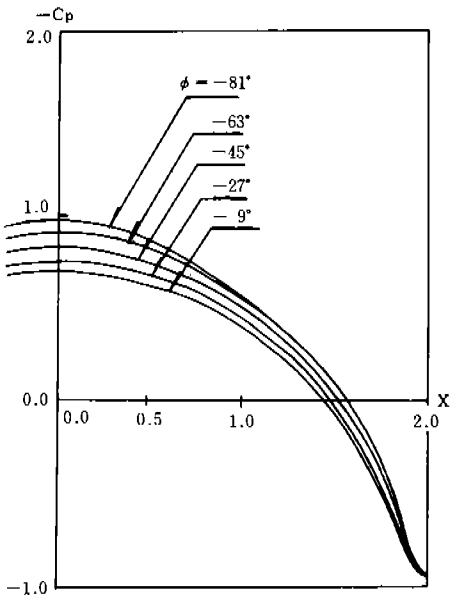


Fig. 4(b) Distribution of Pressure Coefficient ($\phi < 0$)

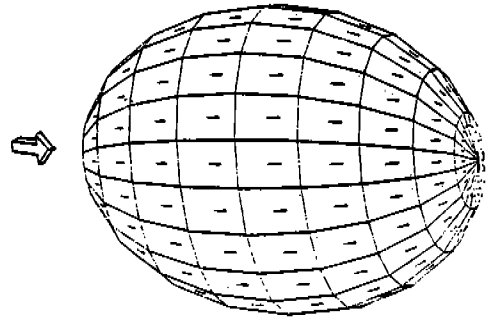


Fig. 5 Velocity Vector on the Surface of Ellipsoid

3. 풍동실험

3.1 풍동시설 및 자동차모형

본 연구에서 실험을 실시한 풍동은 서울대학교 항공공학과에 설치되어 있는 미국 Aerolab Co. 회사의 폐회로 순환식 아음속풍동으로 실험측정부 형상은 직사각형으로 폭 135cm, 높이 95cm, 길이 250cm이며 최대 풍속은 약 70m/scc이다.

한편 본 연구에서 사용한 자동차 모형은 중형 승용차(국내H 회사)의 기본형으로써 1/5척도로 축소 제작되었으며 모형의 주요 제원은 아래와 같다.

- 전장 : 883.2mm
- 전고 : 272.4mm
- 전폭 : 343.2mm
- 축거 : 515.8mm

최대 단면적(진행 방향에 수직방향) : 728cm²
 이때 풍동 측정부 단면적에 대하여 모델의 최대 단면적은 약 5.7%의 흐름 차단율을 갖고 있어 실제 자동차의 주행시 유동과 동일하다고 볼 수 있다.⁽⁶⁾

3.2 측정기기 및 실험

자동차 모델에 작용하는 공기역학적 힘들을 측정하기 위하여 여러 형태의 바란스(balance)중에

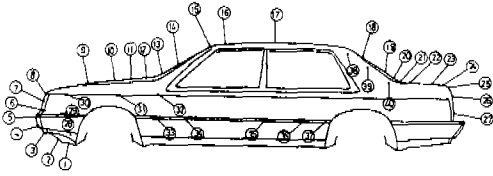


Fig. 6 Locations of Pressure Measuring Holes

서 흐름 차단율이 낮은 platform sting balance를 사용하여 자동차의 4개 바퀴와 연결, 부착시켰으며 지면 효과를 재현시키기 위하여 정지 평판법을 사용하였다. 정지평판과 모델과의 간격은 평판에 발생하는 경계층(boundary-layer)의 변위두께(displacement thickness)를 고려하여 결정하였다.

모델표면의 압력분포를 측정하기 위하여 40개의 표면 압력측정용 구멍을 Fig. 6과 같이 설치하였다. 이 구멍들은 직경 0.8mm의 드릴로 벽면에 수직되게 구멍을 뚫은 후 외경 0.8mm의 스텐레스 튜브를 외부로 돌출하지 않도록 삽입하여 고정된 후 비닐튜브로 연결, 모델하부로 끌어 내어 최대 48개의 연결단자를 갖는 J-48형 Scanivalve에 연결하였다. Scanivalve 내에는 차압1Psi의 측정범위를 갖는 압력변환기(pressure transducer)를 설치하였으며 출력은 디지털 전압계로 측정하였다.

4. 수치계산 결과와 실험 측정치의 비교 및 분석

예비계산에서 얻어진 경험을 토대로 모델자동차의 외형에 직접 파넬을 그려 형성한 후 이들 파넬의 위치(x, y, z)를 3차원 위치 측정기로 측정하여 컴퓨터에 입력시켰다.

전체 자동차의 형상은 총 2180개의 파넬로 구성되었으며 이 모습을 3차원 그래픽으로 나타낸 것이 Fig. 7이다.

이 과정에서 실제 자동차의 바퀴부분을 생략하고 단순화하여 평면으로 연결하였는데 이러한 단순화는 기본적인 외형설계에서 자주 사용되는 방법이다.²⁾

본 계산에서도 주기억용량 5Mbyte를 갖고 있

는 NOVA MV-8000 컴퓨터를 사용하였는데 계산과정에서 일어나는 기억용량 부족을 해결하기 위하여 계산 중간결과를 보조기억장치에 임시로 기억시켰다가 사용하는 계산방법을 택하였다. 이때 마그네틱디스크로 약 50k block (512byte/block)이 필요하였다. 계산시간은 C. P. U 시간이약 1시간정도 이었으며 파넬 수가 배로 증가함에 따라 C. P. U. 시간은 약 4배, 보조기억용 디스크도 약 4배 이상 요구되었다.

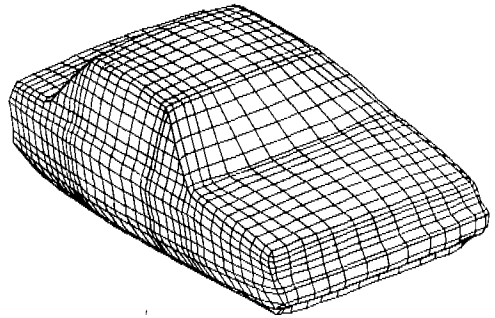


Fig. 7 Panelized Model of the Passenger Car

Fig. 8은 3차원 그래픽으로 처리된 각 파넬에서의 표면속도 벡터로써 차 전단부의 정체선(stagnation line)위치, 유동방향 및 속도의 크기 등을 잘 보여주고 있다. 그러나 실험에서는 이 값이 측정되지 않았는데, 이는 장기간의 측정시간과 측정장치를 필요로 하기 때문이다. 반면 수치계산에서는 한번의 계산으로 모든 점에서의 속도 벡터가 나오므로 많은 시간과 노력을 절약할

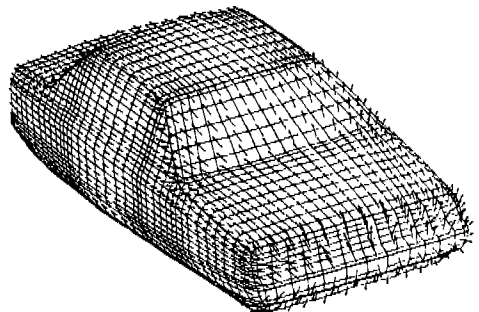


Fig. 8 3-dimensional Velocity Vector Visualization

수 있는 장점이 있다.

실험치와 계산치의 비교는 주로 표면압력분포를 통하여 이루어졌다. Fig. 9-a는 자동차 길이 방향의 대칭단면 표면압력의 계산결과를 나타내고 있으며, Fig. 9-b는 이 결과를 실험측정치와 비교하여 보여주고 있다.

수치계산은 앞에서 설명했듯이 비점성 유동 이론에 근거하였으므로 표면에서의 유동의 박리 현상 등을 예측할 수 없으며 이에 따라 후류(wake)가 발생하는 차체의 후면유리창 이후 뒷부분에서 실험측정치와 점차 다른 값을 갖게 됨을 유의해야 한다.

Fig. 6에 나타낸 압력측정구멍번호를 참조하여 볼때 압력구멍 (3)번부터 (17)번까지는 (엔진실 전

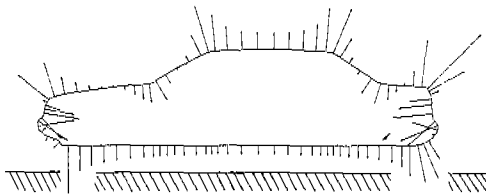
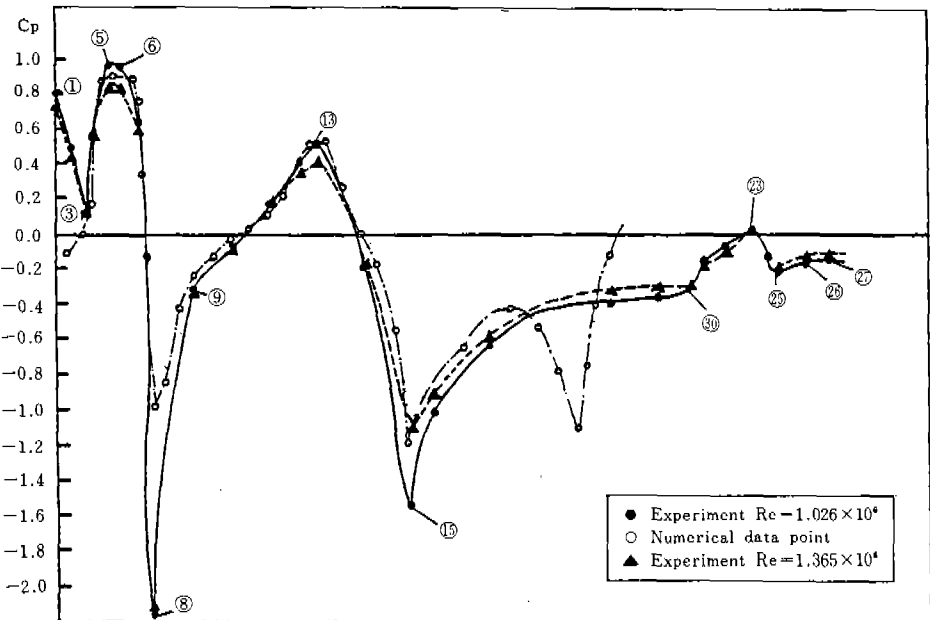


Fig. 9(a) Surface Pressure Coefficient along Center Line



Surface Pressure Coefficient Along Center Line

Fig. 9(b) Comparison of Surface Pressure Coefficient along Center Line

면-엔진실 상부-전면 유리창-차체 상부-후면 유리창 직전)포텐셜유동에 근거한 파넬법 결과와 점성효과가 있는 실제유동의 풍동실험 결과와 전반적으로 만족할만한 일치율을 보여주고 있다. 한편 압력구멍 (8)번과 (15)번에서 계산치가 측정치보다 작은것은 곡률이 급속히 변하는 코너부분에 파넬을 충분히 분포시키지 못한 탓으로 생각된다.

즉, 항력방향으로 최대의 압력이 작용하게 되어 자동차의 공기저항력을 줄이는데 중요한 부분인 엔진실 전반부의 복잡한 압력분포 예측, 그리고 엔진실 상부 및 전면 유리창의 경사각도 등을 결정하는 데도 유용한 정보를 줄 수 있음을 알 수 있다.

풍동실험에서의 모델형상을 바꾸는데 비하여, 손쉽게 모델형상을 바꿀 수 있는 점을 또한 유의해야 하겠다.

5. 결 론

본 연구에서는 자동차의 공기역학적 기본 외형 설계에 있어 소형컴퓨터를 이용한 기존 파넬법

의 적용 가능성을 알아보기 위하여, 일차적으로 박리가 없는 유동으로 가정하고 용출점(sink-source)만을 분포시켜 수치계산한 결과와, 1/5축소된 승용자동차 모델에 대한 풍동실험 결과를 비교, 분석하였다.

주 기억용량 5Mbyte를 갖고 있는 소형컴퓨터를 사용할 때 최대 2180개의 패널로 구성할 수 있었으며, 이러한 패널구성에 의한 계산결과는 박리가 일어나는 차체 후면 부분을 제외하고 전반적으로 양호한 일치를 보여주고 있어 풍동실험과 병행해서 사용할 경우 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한 CAD의 한 기법인 패널법을 사용할 때 외형을 3차원 그래픽화하여 여러 결과를 표시함으로써 미적인 형상결정과 공학적인 형상결정 과정에 용이하게 정보를 주고 받아 최종 형상결정 단계가 신속히 진행될 수 있음을 유의해야 할 것이다.

끝으로 일차적인 본 연구에 계속하여 차체 후면부의 유동박리현상 및 후류(wake) 등을 고려하기 위한 와류(vortex) 패널 도입에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 1983년도 첨단과학기술분야 연구비로 수행되었음을 밝히는 바이며, 본 연구비를 지원해 주신 재단 및 관계 제위에게 깊은 감사를 드립니다. 끝으로 수치계산

에 많은 수고를 해준 이승수군의 노고에 감사한다.

참 고 문 헌

1. Kent B. Kelly and Harry J. Holcombe, "Aerodynamics for Body Engineers," SAE/PT-78/16, pp. 1-10.
2. Jay C. Lowndes, "Auto Industry Uses Aerospace Formulas," Aviation Week & Space Technology, Sept. 5, 1983, pp. 53-55.
3. Werner Kraus, "Panel Methods in Aerodynamics," in Numerical Methods in Fluid Dynamics, edited by H. J. Wirz and J. J. Smollderren, Mc Graw-Hill, 1978, pp. 237-297.
4. J. L. Hess and A. M. O. Smith, "Calculation of Non-lifting Potential Flow about Arbitrary Three-Dimensional Bodies," Douglas Aircraft Co., E. S. 40622, 1962.
5. I. E. Sutherland, R. F. Sproull and R. A. Schumacker, "A Characterization of Ten Hidden-Surface Algorithms," Computing Surveys, Vol. 6, No. 1, March 1974.
6. Alan Pope and John J. Harper, Low-Speed Wind Tunnel Testing, John Wiley & Sons, Inc., 1966, pp. 326.
7. J. P. Howell, "Force and Wake Characteristics of Simple Bluff Bodies in Ground Proximity," Ph. D Thesis, The City University, 1977.