

〈論 文〉

# 기저면이 경사진 Ogive실린더의 공력특성에 관한 실험적 연구

맹주성\* · 양시영\*\* · 김형준\*\*\* · 오세진\*\*\*\*

(1993년 12월 20일 접수)

## Experimental Study for the Aerodynamic Characteristics of Slanted-Base Ogive Cylinder

Joo-Sung Maeng, Si-Young Yang, Hyung-Joon Kim and Sei-Jin Oh

**Key Words :** Slanted-Base Ogive Cylinder(기저면이 경사진 Ogive 실린더), Wind-Tunnel Testing(풍동실험), Balance(천칭), 5-Hole Pitot Tube(5공 피토투브), Longitudinal Vortex(주 유동방향 와동)

### Abstract

Drag, lift, and pitching moment measurements have been made on a range of slanted-base ogive cylinders, using the KANOMAX wind tunnel and balance system. Test Reynolds numbers(based on model maximum diameter) varied from  $0.54 \times 10^5$  to  $1.56 \times 10^5$ . Crossflow velocity measurement was conducted by 5-hole pitot tube at  $Re_D = 1.46 \times 10^5$ . For two base angle( $\theta = 30$  and  $45$  deg.), aerodynamic forces and moment were measured with increasing angle of attack( $0 \sim 30$  deg.). Two types of wake flow were observed, a quasisymmetric turbulent closure or a longitudinal vortex flow. Aerodynamic characteristics differ dramatically between the two wake types. It was found that the drag, lift and pitching moment coefficients increased with increasing angle of attack.

#### 기 호 설 명

#### 그리스문자

- $C_{pp}$  : 받음각 계수 (pitch angle coefficient)
- $C_{py}$  : 요우잉각 계수 (yaw angle coefficient)
- $C_{pt}$  : 전압력계수 (total pressure coefficient)
- $C_{ps}$  : 정압력계수 (static pressure coefficient)
- $D$  : 모델의 최대직경
- $H$  : 풍동 시험부의 면간거리
- $L$  : 모델의 길이
- $P_1 \sim P_5$  : 5공 피토투브의 각 압력공 압력
- $Re_D$  : 모델의 최대직경에 근거한 레이놀즈수
- $U_\infty$  : 자유유동속도
- $V_x, V_y, V_z$  : X, Y, Z 방향 속도성분

- $\alpha$  : 유동 받음각 (pitching angle)
- $\beta$  : 유동 요우잉각 (yawing angle)
- $\theta$  : 모델의 기저면 경사각도 (base angle)
- $\rho$  : 공기밀도 ( $1.226 \text{ kg/m}^3$ )

### 1. 서 론

최근 들어 에너지 절감 및 소음, 공해 등을 줄이려는 차원에서 고성능 저항력의 운송수단을 개발하려는 연구가 많은 기술선진국에서 시도되고 있다. 이러한 연구는 기존의 교통수단을 개선 및 보완하는 방법과 자기부상열차, 전기자동차 혹은 태양열 자동차 등과 같은 새로운 교통수단을 개발하려는데

\*정회원, 한양대학교 기계공학과

\*\*정회원, 한양대학교 생산공학연구소

\*\*\*정회원, 기아자동차 중앙연구소

\*\*\*\*정회원, 국방과학연구소

있다. 실제로 교통수단의 외형설계시 신중하게 고려해야 할 것중의 하나가 주행중 공기와의 접촉으로 인한 공력특성을 파악하는 것이며, 이는 추진동력 절감, 중행중의 안정성, 승객의 승차감 향상 및 주위환경에 미치는 영향 등과 밀접한 관계가 있다. 특히 공기저항이 차체에 미치는 영향은 자동차의 경우 시속 130 km에서 공기저항이 차지하는 비율은 총 주행저항의 65%, 시속 180 km에서는 75% 정도가 되어 공기 저항 감소가 매우 중요하다는 것을 알 수 있다. 모든 교통수단들의 운행중 차체에 미치는 공기역학적 힘은 차체의 선두부 및 단면형상 뿐만 아니라 후미부의 형상에도 크게 지배된다. 따라서 본 연구에서는 후미부의 형상에 따른 공력특성 및 후류구조를 고찰하기 위하여 Britcher<sup>(1)</sup> 등이 실험한 바 있는 모델과 유사한 기저면이 경사진 Ogive 실린더를 실험모델로 채택하였다. 이러한 기하학적 형상은 제작이 용이하고 후미부 기저면의 경사각도에 따른 후류구조 및 공력특성 변화를 쉽게 얻을 수 있을 뿐만 아니라 실제로 자동차 혹은 항공기 동체설계시 응용할 수 있다. 일반적으로 후류의 형태는 기저면의 경사각도 및 유동조건에 따라 Fig. 1에서 보는 바와 같이 준대칭 난류후류(turbulent wake closure) 형태와 한쌍의 주 유동방향 외동이 발생하는 후류(longitudinal vortex wake) 형태로 나타내어 진다. 이와 같이 서로 다른 후류구조는 기저면의 압력변화를 초래하여 압력항력이 각각 다르게 되며 주위환경에 미치는 영향도 또한 다르게 된다. Britcher 등<sup>(1)</sup>은 기저면이 경사진 Ogive 실린더에 대해 기저면의 경사각도 및 유동조건을 변화시키면서 실험하였으며, 이러한 파라미터들이 공력특성에 커다란 영향을 미친다는 사실을 알았다. 특히 경사각도가 약 45° 근처에서 기저면의 압력이 급격히 작아지고 항력 및 양력은 급격히 증가하는 것을 확인하였으며, 그 원인은 앞에서 언급한 바와 같이 후류의 유동구조때문으로 예측하였으나 이에 대한 실험은 수행하지 않았다. 그리고 Yate<sup>(2)</sup>와 Hartwich<sup>(3)</sup> 등은 Tangent Ogive 실린더에서 받음각이 변하는 경우에 대한 수치계산을 수행하여 crossflow separation 및 표면마찰의 변화를 연구하였다. Ahmed<sup>(4,5)</sup>와 Bearman<sup>(6)</sup>은 후미부의 형태가 서로 다른 자동차 모델에 대하여 공력학적 힘 및 유동장을 측정하여 후미부 기저면에 작용하는 압력은 주 유동방향 외동의 세기 및 위치와 밀접한 관계가 있다는 사실을 알았다. 그리고

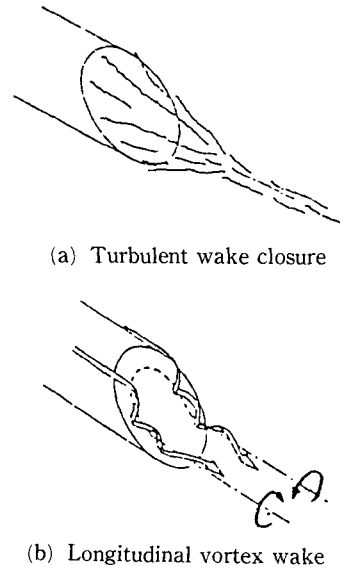


Fig. 1 Wake flow pattern

Taniguchi 등<sup>(7)</sup>은 기저면이 시작되는 부위에 플랩을 부착하였을 때의 유동특성을 연구하였으며, Djodiharjo<sup>(8)</sup>는 차체의 형상변화에 따른 압력 및 항력, 양력변화를 panel method에 의해 고찰하였다. 결국 이와 같은 연구들은 차체의 형상 특히 후미부 기저면의 형상에 따른 후류구조와 이러한 후류가 기저면에 미치는 영향을 연구한 것이며, 이는 결국 항력을 줄이기 위한 것이다. 따라서 본 연구에서는 기저면의 경사각도에 따른 후류의 유동구조 및 공력특성을 자세히 해석하기 위하여 입구속도 및 받음각(angle of attack)이 변하는 경우에 대해서 실험하였다. 이때 입구속도는 약 18~53 m/sec 까지로 하였으며, 모델의 최대직경에 근접한 레이놀즈수는 약  $0.54 \times 10^5 \sim 1.56 \times 10^5$ 까지이다. 힘 및 모멘트를 측정하기 위해 6분력의 풍동 밸런스를 사용하였으며, 3차원 속도성분은 5공 피토투브를 사용하여 측정하였다. 그리고 본 실험을 수행하기 전에 구에 대한 항력실험을 통하여 기존의 값과 비교하므로써 본 연구의 실험방법에 대한 타당성을 검증하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험모델

본 연구에서 사용된 모델은 Fig. 2에 나타나 있으며, 선두부는 원뿔형상이고 후미부의 형상은 기

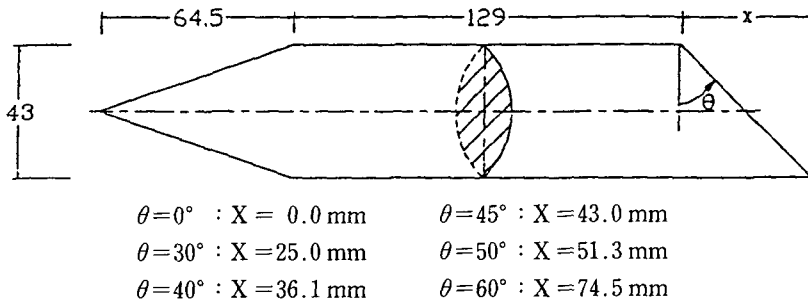


Fig. 2 Slanted-base Ogive cylinder

저면이 0°, 30°, 40°, 45°, 50°, 60°로 경사진 Ogive 실린더이다. 모델의 선두부 원뿔각도와 중심부 직경(D)은 약 37°, 43mm이며, 모델의 무게를 최소화하기 위해 선두부 및 후미부의 재질은 알루미늄으로 하고, 중앙부는 일반 탄소강관으로 제작하였다. 이와 같은 모델은 항공기의 동체 및 자동차의 후미부 형상(square back, fast back)과 매우 유사한 형상이므로 기초모델로 응용할 수 있다. 모델의 지지방법은 모델 중앙에 나사를 내고, 직경 10mm 정도의 지지봉을 접속하여 밸런스와 연결하였다. 후미부는 기저면의 경사각도에 따라 공력계수의 변화가 45°를 경계로 심하기 때문에 40°와 50° 사이에 45°를 추가하여 공력계수 변화를 더욱 자세히 관찰할 수 있도록 하였다.

2.2 실험장치

2.2.1 풍동

본 연구에서 사용된 풍동(wind tunnel)은 KA-

NOMAX사에서 제작된 아음속 폐쇄형 풍동장치이며, 축류팬이 장착된 출력 22 kw의 변속 전동기로 구동된다. 최대풍속은 약 60 m/sec이며, 이때 난류강도는 약 1.0% 미만이다. 그리고 시험부의 단면형상은 정8각형이며, 면간거리는 450 mm이고 길이는 1000 mm이다. 실험모델을 풍동의 시험부내에 지지하기 위하여 직경 10 mm의 지지봉을 사용하여 지지하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 풍동의 개략도 및 측정장치의 구성도를 나타낸다.

2.2.2 밸런스

실험모델에 작용하는 공력학적 힘 및 모멘트를 측정하기 위해 KANOMAX사가 제작한 피라미드식 6분력 밸런스(balance, S2503-1)를 이용하였다. 밸런스에서 측정가능한 하중의범위는 항력, 양력, 측력의 경우 모두 0~50 kgf까지이고, 모멘트는 0~20 kgf·m까지이다. 요우잉각을 0.1° 간격으로 0~360°까지, 그리고 받음각은 모델 지지대에 의해서 ±45°범위내에서 조절할 수 있다. 밸런스로부터

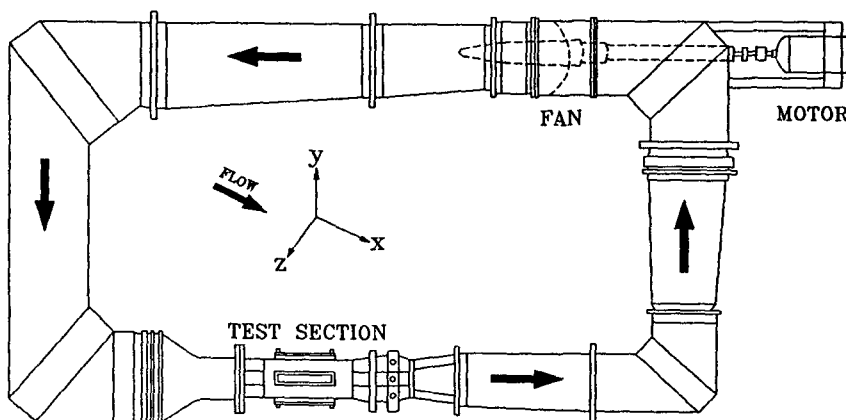


Fig. 3 Schematic of susonic wind tunnel

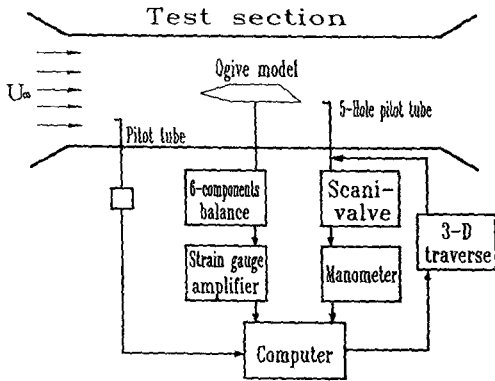


Fig. 4 Setup of measuring equipments

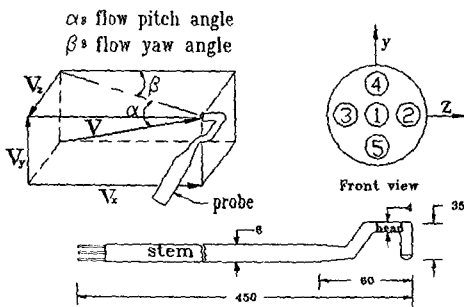


Fig. 5 Schematic of 5-hole pitot tube & coordinate system for experimental study

출력된 미소한 신호를 증폭하는 strain gauge amplifier는 6채널로써, full scale에서 0.02%의 오차를 갖는다. 밸런스내에 부착된 load cell에 힘이 작용하면 전기적 신호는 strain gauge amplifier에서 증폭된 후 자동자료처리 시스템에 의해 컴퓨터에 저장된다. 저장된 데이터는 PC/AT를 이용하여 통계처리 하므로써 항력, 양력 및 피칭모멘트 등을 구할 수 있다.

2.2.3 5공 피토투브

후류의 속도 측정을 위해 사용된 5공 피토투브는 United Sensor사 제품으로 Fig. 5는 5공 피토투브의 개략도와 좌표계를 정의한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 프로브는 전방 정체점에서 한개의 압력공과 흐름방향으로 45° 떨어진 위치에 둘레방향으로 90°간격의 압력공 4개로 구성된다. 프로브의 대롱(stem)은 충분히 길어서 지지장치에 의해 발생하는 간섭이 없도록 제작되어 있다.

대롱(stem)은 대략 390 mm이고 직경은 약 8 mm

정도로 재질은 스테인레스강이다. 그리고 head부는 유동장내의 측정위치에서 프로브에 의한 유동의 간섭을 최소화하기 위하여 직경이 약 4 mm로 되어 있다. 내부에는 5개의 압력공과 연결되어 있는 직경이 매우 작은 소형원관 5개로 구성되고, 이것들은 연질 비닐튜브를 이용하여 scanivalve에 연결된다.

2.2.4 3차원 프로브 자동이송장치

5공 피토투브의 정밀한 이송을 위해 사용된 3차원 자동이송장치는 삼덕과학사가 제작한 것으로 x, y, z축 방향으로 좌표를 1/100 mm까지 제어할 수 있다. 최대 이송거리는 약 600 mm 정도이다. 이송속도는 컴퓨터로 조절되어지며, 측정위치는 x, y, z의 절대좌표를 입력하여 원하는 위치까지 정확히 이송된다.

2.2.5 압력측정 및 자유유동 온도측정장치

전압력과 정압력의 차압인 동압을 측정하여 자유유동의 속도를 측정하는 1공 피토투브 및 5공 피토투브에서 얻어진 압력의 측정을 위하여 영국 Furness사가 제작한, 측정범위가 0~1000 mmH<sub>2</sub>O인 Micromanometer FC-060를 사용하였다. 5공 피토투브로부터 나온 5개의 압력은 10채널 scanivalve를 이용하여 순차적으로 측정할 수 있도록 하였다. 온도는 유체특성을 변화시키는 변수이므로 실험시 되도록 일정한 온도 조건하에서 실험을 수행하기 위하여 유동장의 온도측정이 필요하다. 유동장의 유체온도 측정은 KANOMAX anemomaster model 6141로 하였으며, 이때 온도(-20°C ~ 70°C) 및 유속(0~50 m/sec) 측정이 가능하다

2.2.6 자동자료 처리장치

자동자료 처리장치의 구성 및 자료의 처리과정은 다음과 같다. 풍동 밸런스 및 Micromanometer로부터 감지된 전압신호는 다중 채널 스위치와 연결되어 있어 원하는 데이터를 선택할 수 있다. 여기서 선택된 신호는 PC/AT 내에 내장된 PC-lap card에 의해 정수형 데이터로 기록되며, 컴퓨터의 프로그램에 의해 자동으로 통계처리되도록 하였다. 그리고 원하는 데이터의 양 및 sampling rate은 컴퓨터에 의해 조절할 수 있으며, 본 실험에서는 초당 약 7000개의 데이터를 추출하여 시간 평균한 후 물리량들을 계산하였다.

## 2.3 실험방법

### 2.3.1 공력 측정방법

풍동내의 실험모델에 작용하는 공기역학적 힘 및 모멘트를 측정하는 장치가 밸런스이다. 모델 형상이 복잡하여 유동특성을 예측하기 어려운 모델의 수치해석은 격자생성의 어려움 때문에 공력특성을 해석하는것이 난해하며, 또한 표면의 압력분포 측정만으로 공력특성을 해석하는 것은 불충분하다. 이런 경우 풍동과 밸런스를 이용하여 해석하는 것이 보편적이며, 본 연구에서는 6분력 밸런스를 이용하여 모델에 작용하는 항력, 양력 및 피칭모멘트를 측정하였다. 모델은 풍동의 시험부 중앙에 위치하도록 받음각을  $\pm 45^\circ$ 까지 조절 가능한 지름 약 10 mm가량의 지지대로 고정시켰다. 각각의 모델 (base angle :  $0^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ )에 대하여, 유속을 약 18 m/sec~53 m/sec로 변화시켜 가면서 밸런스로부터 출력된 모델에 작용하는 공력의 전기적 신호를 strain gauge amplifier에서 증폭한 후 다중 채널 스위치에 순차적으로 항력, 양력 및 피칭모멘트 신호를 선택하였다. 선택된 신호는 자동자료 처리장치를 통해 컴퓨터에 입력된다. 입력된 데이터는 컴퓨터에 의해 통계처리 되므로써 항력, 양력 그리고 피칭모멘트와 각각의 계수들 및 레이놀즈수를 구할 수 있다. 자유 유동속도는 피토투브를 이용하여 측정하였으며, 유동장의 유체온도는 약  $23^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 로 측정되었다. 받음각 변화에 따른 공력측정 또한 같은 방법으로 기저면의 경사각도가  $30^\circ$  및  $45^\circ$ 인 두 모델에 대하여, 각각  $Re_D = 92000$  (약 31 m/sec), 14600 (약 50 m/sec)에서 받음각을  $0^\circ \sim 30^\circ$ 까지  $5^\circ$ 간격으로 증가시키면서 항력, 양력 및 피칭모멘트를 측정하였다. 여기서 지지대에 의해 모델에 작용하는 간섭공력을 무시할 수 없으므로 이러한 간섭을 보상하기 위하여 모델에 지지대를 연결하여 공력을 측정한 후 동일한 조건에서 지지대만의 공력을 상쇄시킴으로써 순수한 모델의 공력을 측정하였다.

풍동 시험부에 모델이 장착되면 지시동압과 실제 동압간에 차이가 생기게 된다. 이런 차이를 고려하기 위하여 봉쇄보정(blockage correction) 방법을 사용하게 된다. 그러나 본 연구에서는 시험부 단면의 면적거리가 모델 직경의 10배 이상이 되므로, 폐쇄비( $D/H$ )가 0.1이하로 매우 낮기 때문에 봉쇄

효과(blockage effect)는 무시할 정도로 작게 된다. 그러므로 봉쇄효과를 고려하지 않았으며, 이에 대한 검증은 예비실험인 구(지름=100 mm)의 항력 실험으로부터 확인할 수 있었다.

### 2.3.2 후류속도 측정방법

후류에서의 속도장을 측정하기 위하여 5공 피토투브를 사용하였다. 5공 피토투브는 적절한 측정기법을 채택하면 전압력, 정압력 및 흐름각 등을 쉽게 측정할 수 있는 장점이 있다. (Fig. 5 참조) 5공 피토투브에 의한 유동특성 측정방법은 크게 두가지<sup>(9)</sup>가 있으며, 그 첫째는 기준면과 프로브의 축이 일정한 각을 유지하도록 장치한 후 프로브를 측정하고자 하는 유동장에 두고, 흐름 받음각 측정시에는 상하의 압력공의 압력이 동일하게 될 때까지, 흐름 요우잉각을 측정하기 위해서는 좌우 압력공의 압력이 동일하게 될 때까지, 기준면을 회전시켜서 그때의 회전각을 흐름각으로 측정하는 Nulling method가 있다. 그리고 두번째는 Non-nulling method로서 속도분포가 일정한 유동장에서 정해진 받음각과 요우잉각을 조합하여, 프로브의 5개 압력공의 압력을 측정하고 보정곡선을 구한다. 그리고 측정하고자 하는 유동장에 프로브를 위치시킨 다음 각 압력공에서 얻어진 압력을 측정하여, 보정곡선으로부터 3차원 속도를 구하는 방법이다. 본 실험에서는 후자인 Non-nulling method를 사용하였다. 유동장의 공기온도는 마찬가지로  $23^\circ\text{C}$  정도이며, 자유유동 속도가 약 31 m/sec ( $Re_D = 92000$ )인 유동장내에 삽입된 5공 피토투브에서 감지되는 각각의 압력은 scanivalve를 거쳐 순차적으로 압력계로 이어지며, 압력계로부터 나온 압력신호는 공력실험에서와 마찬가지로 자동자료처리 시스템으로 받아들여져 PC/AT에서 통계처리하여 데이터 파일로 저장된다. 그 다음 보정곡선으로부터 유동특성을 구하는 작업은 FORTRAN언어로 프로그래밍하여 이미 자동 자료처리 시스템으로부터 얻어진 프로브의 압력 데이터를 프로그램에 입력하면 손쉽게 흐름각, 전압력, 정압력 및 3차원 속도성분을 구할 수 있으며, 역류영역도 예측할 수 있도록 하였다.

다음은 5공 피토투브의 보정곡선 작성과 작성된 보정곡선을 이용하여 유동특성을 계산하는 과정을 자세히 서술하였다. 5공 피토투브의 보정 실험을 통해 보정곡선을 직접 구함으로써 본 실험에서 이용한 5공 피토투브의 특성에 더욱 잘 부합되도록

하였다. 보정실험을 위하여 사용된 풍동은 공력측정 실험에서 사용한 풍동과 동일한 KANOMAX사의 아음속 폐쇄형 풍동(Fig. 3)이며, 풍속은 약 5.5 m/sec로 일정한 상태에서 수행하였다. 5공 피토투브의 미세한 각도변환을 위하여 10 mm두께의 아크릴판으로 각도변환 기구를 제작하여, 프로브의 받음각 및 요우잉각을 10° 간격으로 정확히 변환할 수 있도록 하였다. 풍동의 시험부내에서 프로브 받음각과 요우잉각을 각각 10° 간격으로 -40°~+40° 까지 변화해 가면서, 각 압력공의 압력을 측정하고 측정된 각 압력공의 압력으로부터 무차원 압력계수는 아래와 같이 계산된다.

$$C_{p,pitch} = (P_5 - P_4) / A$$

$$C_{p,yaw} = (P_2 - P_3) / A$$

$$C_{p,total} = (P_1 - P_t) / A$$

$$C_{p,static} = (P_1 - P_s) / A - 1$$

$$A = P_1 - (P_2 + P_3 + P_4 + P_5) / 4$$

여기서,

- $C_{p,pitch}, C_{p,yaw}$  : 압력 피칭계수와 압력 요우잉계수
- $C_{p,total}, C_{p,static}$  : 전압력계수와 정압력계수
- $P_t, P_s$  : 전압력과 정압력
- $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$  : 각 압력공의 압력

전압력과 정압력은 반드시 독립된 피토투브로부터 결정되어야 한다. 각각의 프로브 받음각과 요우잉각에 대하여 얻은  $C_{p,pitch}, C_{p,yaw}, C_{p,total}, C_{p,static}$  를 가지고 보정곡선을 작성한다. 작성된 보정곡선은 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8에 나타나 있다.

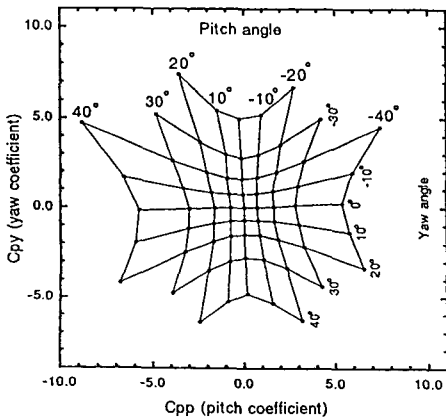


Fig. 6 Yaw coefficient vs pitch coefficient

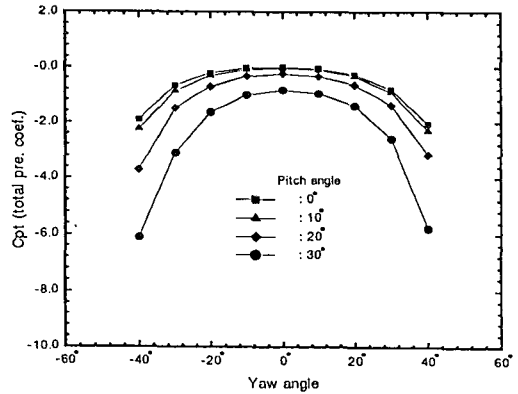
다음은 위의 프로브 보정실험을 통해 얻은 보정곡선을 이용하여 실험하고자 하는 유동장의 유동특성을 구하는 과정이다. 유동특성을 알고자 하는 영역에 대하여 5공 피토투브를 위치시키고 5개의 압력공으로부터 얻은 압력 데이터를 가지고 무차원 압력계수  $C_{p,pitch}, C_{p,yaw}$ 를 계산한다. 계산된 무차원 압력계수  $C_{p,pitch}, C_{p,yaw}$ 는 구해 놓은 보정곡선(Fig. 6)으로부터 프로브의 받음각과 요우잉각을 결정하고, 유동 받음각과 요우잉각으로 변환한다.

여기서 결정된 프로브의 받음각과 요우잉각을 이용해서 Fig. 7, Fig. 8로부터 전압력 계수와 정압력 계수를 구하고, 다음 식에 대입하여 전압력과 정압력을 구한다.

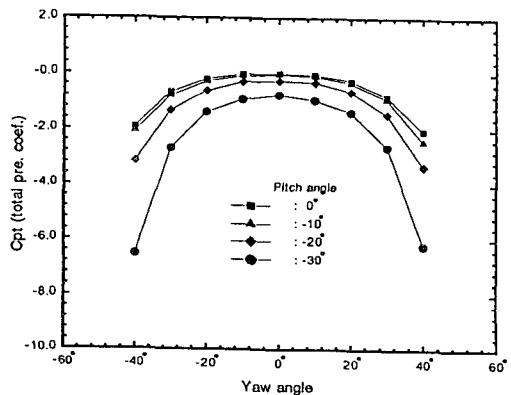
$$P_t = P_1 - AC_{p,total}$$

$$P_s = P_1 - A(1 + C_{p,static})$$

비압축성 베르누이방정식으로부터 전 속도벡터의 크기가 결정된다.

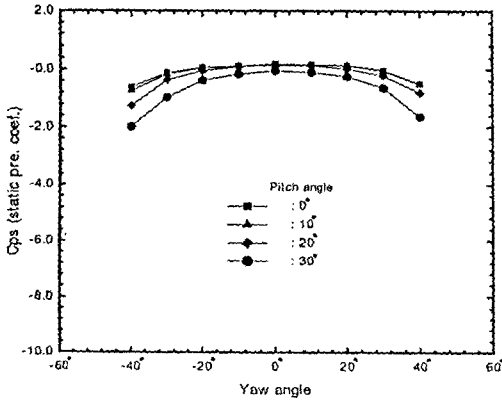


(a) Positive pitch angle

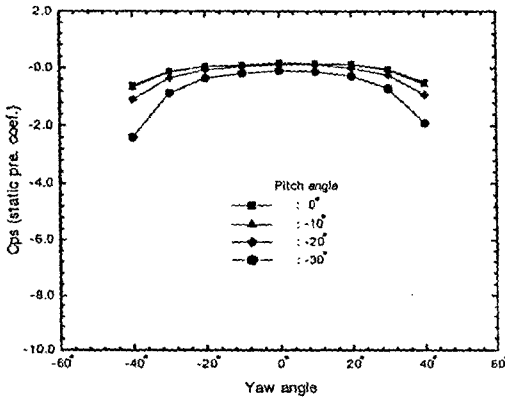


(b) Negative pitch angle

Fig. 7 Total pressure coefficient vs yaw angle



(a) Positive pitch angle



(b) Negative pitch angle

Fig. 8 Static pressure coefficient vs yaw angle

$$|V| = \sqrt{2(P_t - P_s) / \rho}$$

결국 3차원 속도성분은 다음의 식으로부터 구해진다.

$$\begin{aligned} V_x &= |V| \cos \alpha \cos \beta \\ V_y &= |V| \cos \alpha \sin \beta \\ V_z &= -|V| \sin \alpha \end{aligned}$$

여기서  $\alpha$ : 유동 받음각

$\beta$ : 유동 요우잉각

위의 보정곡선으로부터 유동특성을 구하는 과정은 내삽과 외삽 부프로그램을 이용해서 프로그램에 의하여 수행된다. 프로브를 이송시키기 위하여 3차원 자동이송장치를 사용하였다. 측정단면(Y-Z평면)의 X축 방향 위치는 모델의 끝단으로부터 43 mm( $X/D=1$ ) 떨어져 있으며, 모델이 좌우대칭이므로 반단면만을 5 mm간격으로 Y축 방향은 0~130 mm까지, Z축 방향은 0~65 mm까지, 총 378

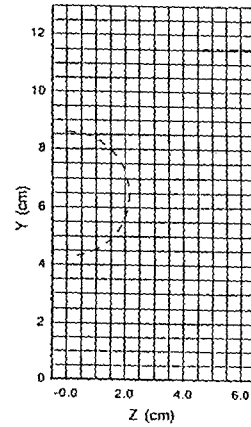


Fig. 9 Velocity measuring points & geometry

points를 측정하였다. 측정단면 상의 모델중심은  $Y=65$  mm,  $Z=0$  mm에 위치하며, Fig. 9에 측정점 및 모델의 위치를 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 10은 본 실험에서 실험방법의 타당성을 검증하기 위하여 구에서 레이놀즈수의 변화에 따른 항력계수를 측정하여 기존의 실험값<sup>(10)</sup>과 비교한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 본 실험에서 측정한 값이 기존의 값과 잘 일치하고 있어 본 실험 방법이 타당하다고 판단되어진다.

Fig. 11은 각기 다른 기저면의 경사각도에서 레이놀즈수의 변화에 따른 항력계수의 변화를 나타낸 그림이다. 모든 모델에서 레이놀즈수의 증가에 따라 항력계수가 점차 감소하고 있어, 구에서와 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉 레이놀즈수의 증가에 따라 난류 경계층이 형성되어 후미부 기저면에서의 압력회복이 증가하여 상대적으로 항력이 점차 감소하기 때문이다. 그리고 여기서 특이한 것은 기저면의 경사각도에 따라 항력계수가 커다란 차이를 보이고 있는데, 이는 Fig. 12에 잘 나타나 있다. 즉, 동일한 레이놀즈수에서 기저면의 경사각도( $\theta$ )가 0°, 30°인 모델에서는 항력계수가 거의 일정하지만  $\theta=40^\circ$ 에서 약간 증가하고,  $\theta=45^\circ$ 에서 급격한 상승을 나타내고 있는데, 이는 Fig. 13에 나타난 바와 같이 0°~30°에서는 후류의 유동형태가 준대칭 난류후류 특성을 나타내나, 40° 이후에서는 한쌍의 주 유동방향 와동이 발생하여 기저면에 작용하는 압력이 달라지기 때문이다.

와 같은 주 유동방향 와동은 후미부의 압력회복을 저해하므로 후미부 기저면에서의 압력감소로 압력항력의 증가를 초래하고, 이로 인하여 갑작스런 항력의 증가가 발생하게 된다. Fig. 12의 경우 Britch 등<sup>(1)</sup>의 결과와 비교할 때 항력계수가 상대적으로 작게 나타나고 있는데, 이는 본 실험에서 사용한 모델의 직경에 대한 길이의 비  $L/D$ 가 3으로 Britch 등<sup>(1)</sup>이 사용한 모델( $L/D=7$ )보다 작기 때문에 표면마찰에 의한 항력이 상대적으로 작아지기 때문이다.

Fig. 13은 각각의 모델들의 후연으로부터 모델직경의 1배가 되는 위치의 단면에서 속도벡터를 나타낸 그림으로서 기저면의 경사각도( $\theta$ )가  $45^\circ$ 에서 주 유동방향 와동이 가장 크게 나타나고 있다. 따라서 항력도 이에 상응하여 크게 증가하며,<sup>(5,6)</sup> 기저면의 경사각도가 계속 커짐에 따라 다시 와동의 강도가 작아지면서 소멸하게 되고 항력도 서서히 감소하게 된다. 그리고 와동중심은 경사각도가 커

질수록 위쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다. Fig. 14는  $Re_D=1.46 \times 10^5$ 인 경우, 받음각의 변화에 따른 항력의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 받음각이 증가할수록 항력이 증가하고 있는데, 이는 선두부에서 압력으로 인한 항력이 증가하고 후류에서 유동방향 와동의 세기가 더욱 커져 압력항력이 증가하기 때문이다. 그리고 특히 기저면의 경사각도가  $30^\circ$ 인 모델이 받음각이  $25^\circ$ 에서 항력계수가 급격히 증가하고 있는데, 이는 모델의 받음각이  $25^\circ$ 인 경우 후류유동구조가 준 대칭의 난류후류에서 한쌍의 주 유동방향 와동으로 변화되었기 때문이다.

Fig. 15는 각각의 기저면의 경사각도에서 레이놀즈 수의 변화에 따른 양력계수의 변화를 나타낸 그림으로 항력에서와는 반대로 레이놀즈 수가 증가함에 따라 양력계수가 증가하고 있음을 알 수 있다. 여기서 경사각도가  $30^\circ, 40^\circ$ 인 모델에서는 거의 변화가 작지만  $45^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ 인 모델에서는 레이놀즈 수에 따라 증가되는 기울기가 더 크게 나타나고 있다. 이는 레이놀즈 수의 증가에 따라 와동구조에 영향을 주어 기저면에 작용하는 압력이 변하기 때문이다. 이와 같은 사실은 Britcher<sup>(1)</sup>에 의해 후류구조는 기저면의 경사각도 뿐만 아니라 상류에서의 경계층 발달정도에 의존한다고 이미 밝혀진 바 있다. Fig. 16에서 보는 바와 같이 양력 또한 항력에서와 마찬가지로 후류 유동구조의 변화에 따라  $\theta = 40^\circ \sim 45^\circ$ 사이에서 급격히 상승하고 있다. 이 또한 앞에서 언급한 바와 마찬가지로 후류에서의 강한 주 유동방향 와동의 발생으로 기저면에 작용하는 압력분포가 달라져 윗면과 밑면에 작용하는 압력차가 급속히 증가하기 때문이다. Fig. 17은  $Re_D$

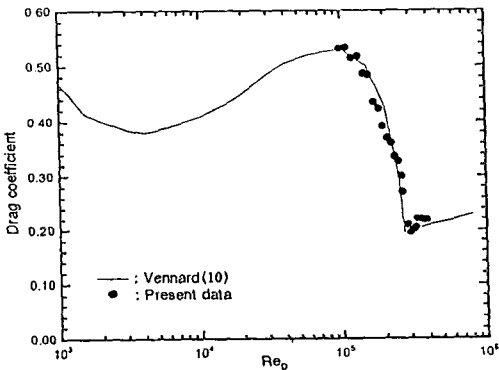


Fig. 10 Drag coefficient for sphere as a function of the Reynolds number

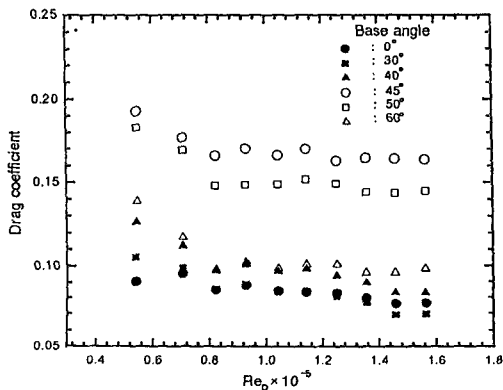


Fig. 11 Drag coefficient vs Reynolds number

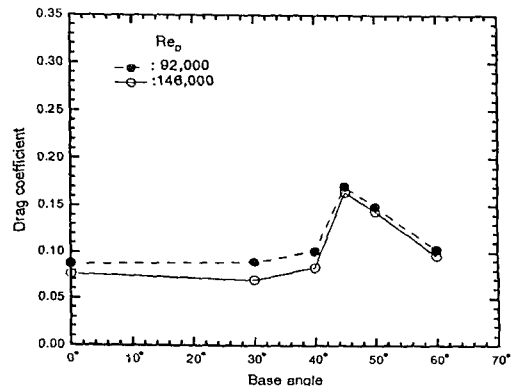
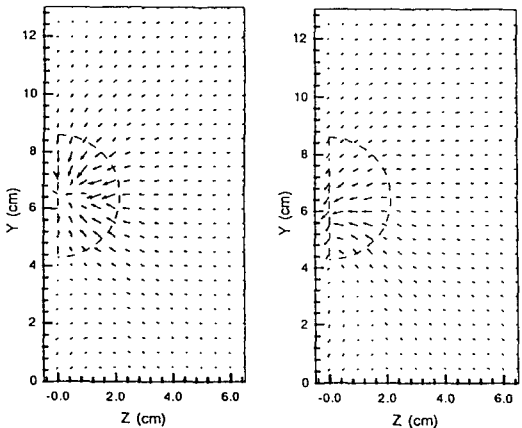


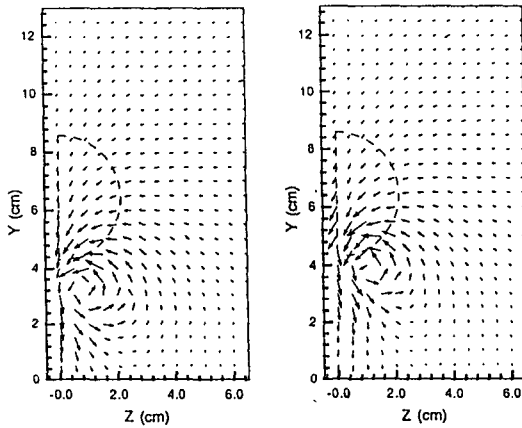
Fig. 12 Drag coefficient vs base slant angle





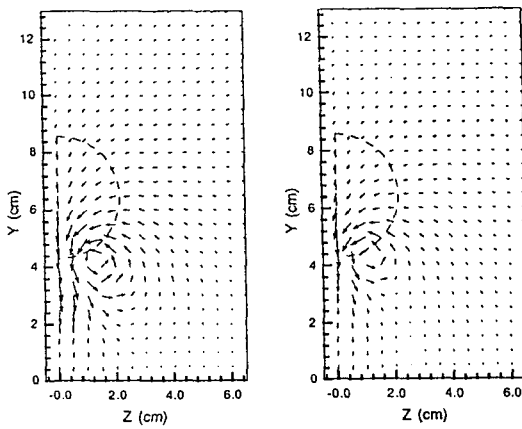
(a)  $\theta = 0^\circ$

(b)  $\theta = 30^\circ$



(c)  $\theta = 40^\circ$

(d)  $\theta = 45^\circ$



(e)  $\theta = 50^\circ$

(f)  $\theta = 60^\circ$

Fig. 13 Crossflow velocity distributions

=  $1.46 \times 10^5$ 인 경우 반응각의 변화에 따른 양력변화를 나타낸 것으로 거의 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. Fig. 18은 기저면의 경사각도에

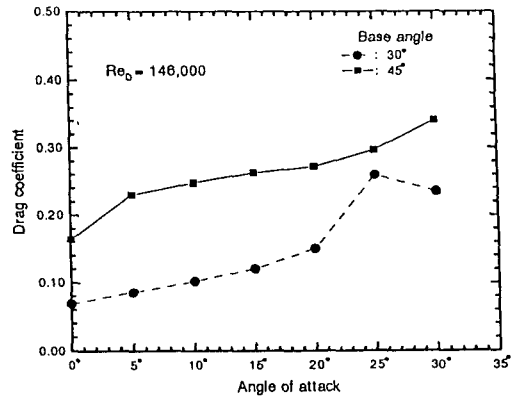


Fig. 14 Drag coefficient vs angle of attack

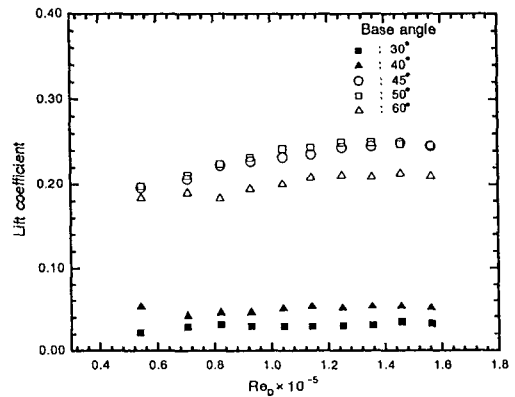


Fig. 15 Lift coefficient vs Reynolds number

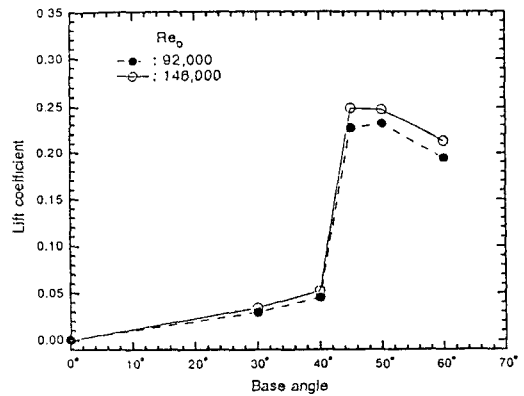


Fig. 16 Lift coefficient vs base slant angle

다른 피칭모멘트의 변화를 나타낸 것으로 항력 및 양력에서와 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 여기서, 피칭모멘트의 계수가 Britch 등<sup>(1)</sup>의

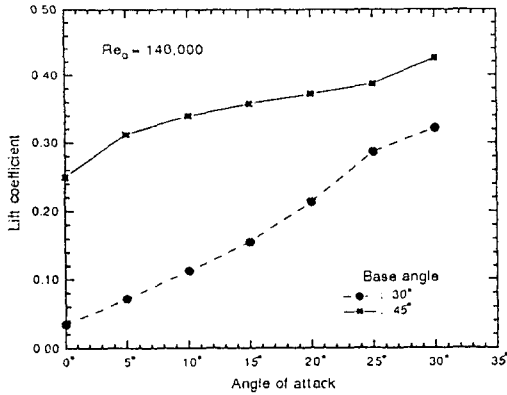


Fig. 17 Lift coefficient vs angle of attack

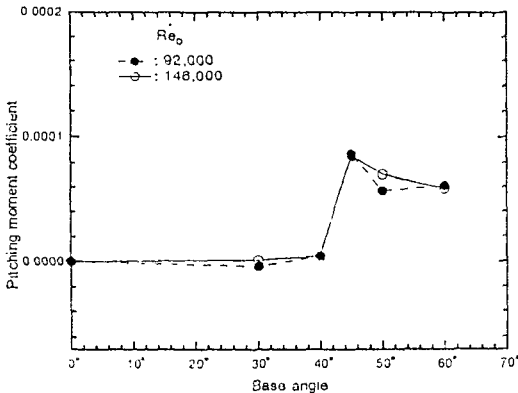


Fig. 18 Pitching moment coefficient vs base slant angle

실험결과와 비교해 작게 나타나고 있는데, 이는 피칭모멘트 계수의 정의에서 사용된 특성길이  $L$ 의 차원이 서로 다르기 때문이다.

#### 4. 결 론

기저면의 경사각도에 따른 후류구조 및 공력학적 특성을 해석하기 위하여 기저면 경사각도가 각기 다른 Ogive 실린더에 작용하는 항력, 양력 및 피칭 모멘트를 측정하였다. 이와 같은 실험을 수행한 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 5공 피토투브를 이용하여 비교적 정확한 속도성분을 측정할 수 있었다.
- (2) 각각의 모델에서 레이놀즈 수의 변화에 따른 항력계수의 변화는 구에서와 유사한 경향을 나타낸다는 것을 알 수 있었다.

(3) 기저부의 경사각도에 따라 공력의 변화가 있으며, 특히  $\theta=45^\circ$ 를 기준으로 급격히 항력, 양력 및 피칭모멘트가 증가함을 알 수 있었다.

(4)  $\theta=40^\circ$ 보다 작은 경우 후류구조는 단순한 준 대칭 난류후류를 형성하나  $\theta=40^\circ$ 이상의 경우에는 한쌍의 주 유동방향 와동이 발생하며,  $\theta=45^\circ$ 에서 그 와동의 세기가 가장 크게 나타나고, 와동 중심은 기저면의 경사각도가 증가함에 따라 뒷면으로 이동한다는 것을 알 수 있었다.

(5) 받음각의 증가에 따라 항력 및 양력계수가 거의 선형적으로 증가한다는 사실을 알 수 있었다.

(6) 결국 기저면의 경사각도 및 상류에서의 경계층 발달정도가 후류의 유동구조에 영향을 주며, 이러한 후류의 변화는 항력 및 양력 그리고 피칭 모멘트에 상당한 영향을 미친다는 사실을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

- (1) Colin P. Britcher and Charles W. Alcorn, 1991, "Interference-Free Measurements of the Subsonic Aerodynamics of Slanted-Base Ogive Cylinders," *AIAA J.*, Vol. 29, No. 4, pp. 520~525.
- (2) Leslie A. Yates and Gary T. Chapman, 1988, "Numerical Investigation of Crossflow Separation on a Three-Calibe Tangent Ogive Cylinder," *AIAA J.*, Vol. 26, No. 10, pp. 1223~1230.
- (3) Peter-M. Hartwich and R. M. Hall, 1990, "Navier-Stokes Solutions for Vortical Flows over a Tangent-Ogive Cylinder," *AIAA J.*, Vol. 28, No. 7, pp. 1171~1179.
- (4) Ahmed, S. R., 1981, "Wake Structure of Typical Automobile Shapes," *ASME-Journal of Fluids Engineering*, Vol. 103, pp. 162~169.
- (5) Ahmed, S. R., 1983, "Influence of Base Slant on the Wake Structure and Drag of Road Vehicles," *ASME-Journal of Fluids Engineering*, Vol. 105, pp. 429~434.
- (6) Bearman, P. W., "Some Observation on Road Vehicle Wakes," *SAE Paper*, 840301.
- (7) Nobuyuki Taniguchi and Toshio Kobayashi, "Numerical Simulation for the Flow around a Car-like Bluff Body," *SAE Paper*, 912575., pp. 1053~1060.

- (8) Harijono Djodihardjo, "Computational Study of the Influence of Several Parameters on the Aerodynamic Performance of Automotive Vehicle," *SAE Paper*, 912520, pp. 575~580.
- (9) 성봉주, 장병희, 1988, "최소자승법을 이용한 5-Hole Yawhead Probe의 간략한 보정법," 한국항공우주학회지, 제16권, 제2호, pp. 20~28.
- (10) John K. Vennard and Robert L. Street, 1982, *Elementry Fluid Mechanics*, Sixth Edition.