

초음속풍동 실험에서 사용하는 압력측정 Probe에 대한 고찰 II

이재호* · 이영빈** · 최중근** · 최종호*** · 윤현걸*** · 김규홍**†

The Consideration in Terms of Pressure Probe Used in Experiments of Supersonic Wind Tunnel II

Jaeho Lee* · Yeongbin Lee** · Joongkeun Choi** · Jong-ho Choi*** · Hyun-gull Yoon*** · Kyu-Hong Kim**†

ABSTRACT

In this paper, the characteristic of pressures had been analyzed with a series of shapes that are pressure probes used in supersonic wind tunnel. When a performance of supersonic wind tunnel is evaluated, the Mach number is calculated by using the ratio of static pressure in test section wall to total pressure in settling chamber. Also the flow condition can be visualized by schlieren system. However a number of limitations exist to measure pressure of test section due to high speed and boundary layer effect. Therefore a specific pressure probe is needed for evaluating flow condition in test section at a various of positions. In the paper, experiments were conducted in terms of some pitot probes and the results were compared and analyzed.

초 록

초음속풍동에서 사용하는 압력 probe의 형상에 따른 압력특성에 대하여 분석하였다. 초음속풍동의 성능을 평가할 때 시험부의 벽면정압력과 전방안정실의 전압력을 측정하고 그 비로 마하수를 계산한다. 또한 쉐리렌 가시화를 통하여 유질의 상태를 확인한다. 그러나 매우 빠른 초음속 영역에서는 경계층의 영향을 무시할 수 없기 때문에 시험부의 압력을 측정하는데 한계가 있다. 따라서 시험부의 유질이 균일한지 확인을 위해 다양한 위치에서 압력을 측정하기 위한 probe가 필요하다. 본 논문에서 몇 가지 피토형상에 대해서 실험을 진행했고, 그 결과를 비교 분석했다.

Key Words: Supersonic Wind Tunnel(초음속풍동), Settling chamber(전방안정실), Test section(시험부), Mach number(마하수), Performance test(성능평가), Total pressure(전압력), Static pressure(정압력), Schlieren system(쉐리렌장치), Pressure probe(압력측정장치)

* 현대로템 추진연구팀

** 서울대학교 기계항공공학부

*** 국방과학연구소 1기술연구본부 5부

† 교신저자, E-mail: aerocfd1@snu.ac.kr

근대전에서 전투기나 미사일과 같이 속도가 매우 빠른 물체가 이동을 할 때 얻을 수 있는 데이터는 극히 한정되어 있다. 다시 말하면 초음속 영역에서는 대기중의 유동에 대한 정보를 얻기가 쉽지 않다. 따라서 가장 보편적으로 얻는 데이터가 압력이다. 하지만 압력 값은 그 데이터를 측정하는 장치의 위치나 형상에 따라서 다르다.

특히 초음속풍동의 성능평가에서 이용되는 시험부 벽면에서 측정되는 정압은 매우 중요한데도 불구하고 오차의 확률이 높다[1]. 그 이유는 벽면 정압의 경우 경계층의 영향으로 일정하게 측정하기가 힘들기 때문이다. 또한 마하수가 높은 고속유동이나 시험부의 표면이 조금이라도 손상되면 유동이 불안정해지기 때문에 위치를 매우 잘 선정해야 한다.

정확한 초음속풍동의 성능평가를 위해서는 벽면의 정압을 이용하기 보다는 전압과 정압을 측정할 수 있는 probe를 제작하여 실험한다. 또한 이 probe를 이용하여 시험부에서 유동의 수직면에 각 위치를 선정하여 압력의 균일함을 측정한다. 즉 경계층에 영향을 받지 않는 시험부 벽면 안쪽의 압력을 측정하여 풍동의 성능을 더욱 정확하게 확인할 수 있다. 또한 실험 형상을 위치시킬 수 있는 최적의 위치를 알아낼 수 있다.

이번 실험은 초음속풍동의 성능평가와 원뿔형상과 유사한 압력측정 장치 실험의 연장선상에 있다[2]. 초음속영역에서의 압력을 측정하여 유질의 균일함을 확인하기 위해 세 가지 피토 형상의 압력측정 probe를 제작하여 마하수 3.0에서 실험을 진행했다. 우선 첫 번째로 관이 막힌 형상, 두 번째는 관이 뚫린 형상, 끝으로 관이 뚫려있지만 노즐목을 가진 형상이다. 그리고 그 결과를 바탕으로 결과를 비교하고 분석했고 가장 적절한 형상을 선정했다.

2. 본 론

2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 실험 장치인 서울대학교

초음속풍동은 1980년대 일본의 KANOMAX사에 의해 설계 제작 되었으며, 간헐적 불어내기식(Intermittent blowdown type) 풍동이다. Fig. 1은 실제 초음속풍동의 모습으로 전방안정실(Settling chamber), 시험부(Test section), 확산부(Diffuser), 쉘리렌 가시화장비(Schlieren system)를 보여주고 있다.

이 풍동의 큰 특징은 노즐교체식으로 마하수 2.0, 3.0, 3.8에서 실험이 가능하다. 최대 압축공기 용량은 $40.0\text{kg}/\text{cm}^2(11.0\text{m}^3)$ 으로 $30.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 을 압축하면 시험부 노즐에 따라 10~30초정도의 실험을 수행할 수 있다[2].



Fig. 1 The supersonic wind tunnel of Seoul National University

2.2 실험 관계식 및 변수

등엔트로피 유동이라 가정하여 전방안정실과 시험부의 압력을 측정하여 마하수를 구하는 관계식은 다음과 같다[3].

$$\frac{p_1}{p_t} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (\gamma=1.4) \quad (1)$$

또한 압력이 측정되는 벽면과 자유류에 대한 상호연관된 관계식은 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$\frac{\tilde{p}_\infty}{p_\infty} \equiv \frac{\tau_w}{p_\infty} \frac{\tilde{p}_\infty}{\tilde{p}_w} \frac{\tilde{p}_w}{\tau_w} \quad (2)$$

$$\frac{\tilde{p}_w}{\tau_{w,aw}} = f_1(M_\infty) = 2.2 + 4.1(1 - e^{-0.1M_\infty^2}) \quad (3)$$

위 (2), (3)식을 통하여 마하수에 따른 벽면의 압력의 변화를 계산할 수 있고, 마하수 2.5이상에서 압력의 변화나 noise등의 disturbance가 커지는 것을 확인할 수 있다[4]. 이를 통하여 본 시험에서 수행된 마하수 3.0에서의 압력 변화를 예측하여 볼 수 있다.

2.3 실험형상

실험에 사용된 압력측정 probe 형상은 세 가지이다. 첫 번째는 평행한 관에 뒤가 막힌 형상, 두 번째는 뒤가 뚫린 형상, 마지막으로 뒤가 뚫려있지만 probe 안쪽이 노즐 형상으로 되어있다. 막힌 관은 전압을 측정하여 fluctuation 정도를 보기 위함이고, 일자로 뚫린 관은 정압의 변화를 보기 위함이다. 마지막으로 노즐 형상은 정압을 측정하는 일자형상과 어떠한 차이가 있는지 확인하기 위하여 제작을 하여 실험을 수행했다.

아래 Table 1은 피토크의 스펙을 나타낸다. 첫 번째와 두 번째인 일자관의 압력 측정 위치는 5 곳이고, 유동의 불안정한 현상으로 실험을 할 수 없는 기준이 되는 blockage ratio의 경우 9.73%이다[5]. 피토크에서 내부의 탭 위치는 일자관 내에서 일정 간격으로 위치해 있다. 또한 세 번째의 노즐형태의 관은 노즐목과 디퓨저 쪽 두 곳에 탭이 위치해 있다. 이를 개략적으로 표현하면 다음 Fig. 2과 같이 나타낼 수 있다.

Table 1. The specification of pressure probe

Pressure tap	관내 압력측정 탭은 I II는5개, III는 2개
Blockage ratio	9.73%

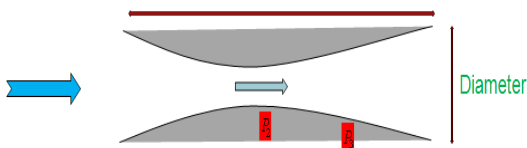


Fig. 2 The schematic of flow trend in pressure probe of nozzle shape

3. 결과 및 고찰

3.1 결과

마하수 3.0에서 시험부 벽면의 위치별 압력의 변화는 Table 2와 같다. 벽면에서의 압력 측정은 기준 압력을 기준으로 5개의 압력측정 탭을 가진 평판을 +형태와 ×형태로 위치시킨 후 시험했다[1]. 위치별로 차이는 있지만 +형태로 평판이 시험부에 장착이 되었을 때 ch2-1에서 오차가 1.571%로 가장 크다. 또한 ×형태도 앞쪽이 되는 ch2-2와 ch3-2가 변화율이 가장 높다.

Table 2. The pressure rates according to wall positions

위치	변화율(%)	위치	변화율(%)
Test section(기준압력)	0	Test section(기준압력)	0
center(ch0-1)	0.203	center(ch0-2)	0.017
upper(ch1-1)	0.439	upper(ch1-2)	0.295
front(ch2-1)	1.571	front(ch2-2)	0.628
lower(ch3-1)	0.485	lower(ch3-2)	0.719
rear(ch4-1)	0.861	rear(ch4-2)	0.174

전방안정실과 벽면이 아닌 시험부 중심부에서 원뿔형상을 이용하여 전압력을 측정하면 Fig. 3과 Fig. 4 같은 결과가 나온다. 이는 풍동이 가진 고유의 변화율로 전방안정실의 변화에 따른 시험부의 압력 변화를 확인할 수 있다.

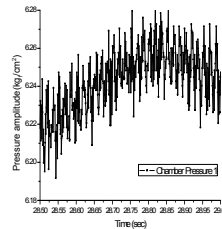


Fig. 3 The milli-scale pressure of chamber

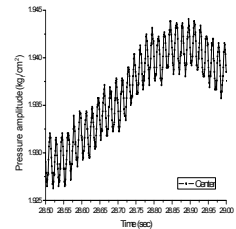


Fig. 4 The milli-scale pressure of T/S

결론으로 세 가지 피토크의 압력을 측정된 결과는 Fig. 5와 같다. 전압을 측정하는 막힌형태의 관이 변화율이 가장 크다.

다음으로 정압을 측정하는 일자관, 노즐형상의 피토크관 순서로 압력 변화율의 크기가 생긴다. 이로써 노즐형태의 피토크관이 압력측정에 더 적합한 것으로 판단된다.

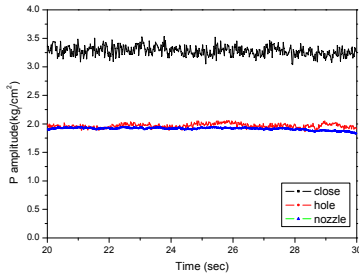


Fig. 5 The results of different models along time

3.2 고찰

실험의 결과 벽면의 압력은 압력탭을 장착한 평판의 앞쪽에서 변화가 큰 것으로 확인된다. 이것은 평판과 노즐벽면의 미세한 간격으로 인한 경계층 현상, circulation 등의 유동 불안정 현상 때문인 것으로 판단된다. 또한 벽면이 아닌 풍동 자체에서도 전방안정실에서 평균압력이 0.4% 변할 때 시험부에서 평균압력은 0.16% 변화가 생긴다. 이는 센서의 측정시간 지연이나 Hz 특성이 있더라도 마하수 2.5 이상의 고속유동에서 무시할 수 없는 변화다.

마지막으로 세 가지 피토크관에서 측정된 압력의 경우 노즐형태의 모델에서 압력의 변화율이 가장 작다. 전압을 측정하는 막힌 관의 경우 충격파이후 관의 안쪽에서 유동이 앞뒤로 이동하는 현상으로 균일한 압력을 측정하기가 힘들다. 이 현상이 심한 경우 피토크관의 공진현상을 유발할 수도 있다[7].

또한 일자로 뚫린 관의 경우 충격파를 지나면서 불안정한 상태로 지나가기 때문에 변화가 생길 수밖에 없다. 하지만 노즐형태의 관은 형상 특성상 충격파를 지난 유동이 노즐 목으로 모여서 유입되므로 일자 관보다 안정된 흐름이 유지된다. 따라서 가장 안정된 압력을 측정할 수 있다.

4. 결 론

마하수가 3.0인 풍동에서 시험부의 압력은 위치에 따라서 다양한 변화를 보인다. 고전적 시험 평가에서 쓰이는 벽면에서 압력변화는 경계층과 기타 유동의 불안정한 현상 때문이다. 특히 본 시험에서는 압력이 측정되는 전면부에서 변화가 가장 큰 것을 확인했다.

따라서 충격과가 아닌 경계층 등의 부차적인 효과에 의한 압력 변화율을 줄이기 위해서 벽면이 아닌 위치에 압력 probe를 장착하여 압력을 측정한다. 이번 연구에서는 시험부 중심에 원뿔형상의 probe를 장착하여 실험을 진행했다.

그 결과 경계층이나 유동의 불안정 현상이 없더라도 압력의 변화량이 발생하는 것을 확인했다. 이는 전방안정실의 압력변화에 따른 시험부의 압력변화로 풍동 고유의 특성을 나타낸다. 따라서 마하수 2.5이상의 초음속풍동실험에서는 전방부 압력변화에 따른 시험부 압력의 변화를 측정하여 서로 보정해야 한다.

끝으로 초음속 영역에서 압력을 적합하게 측정할 수 있는 probe선정을 위해 세 가지 형상을 선정하여 실험을 수행한 결과 피토크관 내부가 노즐 형태로 제작된 관에서 압력이 가장 일정하게 측정되는 것을 확인했다. 이에 따른 향후 특성은 더욱 실험을 통해서 보완되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 이영빈*, 이재호, 이준우, 김규홍, 최중호, 윤현걸, “서울대 초음속 풍동의 마하수 2.0과 3.8에서의 성능 평가 및 검증”, 군사기술학회 종합학술대회 논문집, 2010
2. 이재호*, 최중호, 윤현걸, 김규홍 “초음속풍동 실험에서 원뿔형상의 표면에서 측정되는 압력에 대한 고찰 I”, 제36회 추진공학회 춘계 학술대회, 2011, pp.19-27
3. 노오현, “압축성 유체 유동”, 박영사, pp. 1-210, 359-373, 411-461, 2004.

4. P.C. stainback* and R.A. Rainey "Correlation of Freestream Pressure Disturbances in Supersonic Wind Thnnels", NASA Langley Research Center, Hampton, Va.
5. Alan Pope, Kenneth L. Goin, "High-speed Wind Tunnel Testing", John Wiley & Sons, Inc., New York/London/sydney, pp. 1-165, 349-401, 1965.
6. William Gracey, "Measurement of Aircraft Speed and Altitude", Wiley-Interscience Publication, pp.1-108, 1980.
7. Matthew McGlivray, Peter A. Jacobs, richard G. Morgan, Rowan J. Gollan and Carolyn M. Jacobs, "Helmholtz Resonance of Pitot Pressure Measurements in Impulsive Hypersonic Test Facilities", AIAA Journal, Vol. 47, No. 10, 2009, pp. 2430-2439.