# 표면온도 차이에 의한 표면마찰력 측정 오차에 대한 연구

# A Study on the Errors in Skin Friction Measurements due to Surface Temperature Mismatch

백 승 욱*
Baek, Seung-Woock

**ABSTRACT**

An experimental study was performed to investigate the effect of surface temperature mismatch on measurements of skin friction using a plug-type skin friction gage mounted on the side wall of a supersonic wind tunnel. The freestream Mach number was 2.4 and Reynolds number per meter was $5.25 \times 10^7$ with total pressure of 50 psi and total temperature of 275K. Temperature mismatch between the gage surface and surrounding wall surface was generated by hot water injection using the active temperature control system. Results of the tests showed that the temperature mismatch made sizable effects on the measurements of skin friction.

## 1. 서 론

표면마찰력 측정은 공기역학적 항력 계산과 직접적인 관계를 갖고 있으며, 항공기 엔진의 압축기 날개(blades)나 터빈(turbine) 등의 효율 계산[1], 스크램제트(scramjet) 유동장 해석, 그리고 난류 모델에 대한 수치적 해석 결과의 비교 자료로 활용되는 등 여러 가지 유동장 해석의 근간이 된다. 그러나 다양한 상황에서 정확한 해를 제공할 수 있는 수치해석적 방법이 아직 개발되지 않은 상태이며, 실험을 통한 표면마찰력의 측정에도 많은 어려움이 존재하고 있다. 이에 따라 표면마찰력을 정확하게 측정하기 위한 여러 가지 기술들이 개발되고 있다.

Schetz[2]는 표면마찰력 측정 방법을 직접 측정 방법과 간접 측정 방법으로 구분하여 정리하였다. 직접 측정 방법은 측정값 자체를 직접 사용할 수 있다는 장점을 가진 반면에, hot film이나 preston tube 등에 의한 간접 측정 방법은 결과값에 대해 해석적 관계식을 이용한 계산이 추가로 요구된다. 따라서 간접 측정 방법은 가정에 의하여 초래되는 불확실성을 포함하므로 직접 측정 방법이 더 우수한 결과를 제공하게 된다. 직접 측정을 위한 표면마찰력 게이지는 원점유지력이 있는 게이지와 원점유지력이 없는 게이지로 구분되는데, 두 경우 모두 부유체의 크기를 결정하기 위하여 오차발생, 외력에 대한 민감도, 내부 구조의 단순성 등을 고려하여야 한다.

원점유지장치가 없는 게이지는 높은 엔탈피의 유동조건을 갖는 연구에 사용되었는데 DeTurris와 Schetz[3], Chadick[4]은 냉각장치를 갖춘 직접 측정 게이지를 이용하였다. 그리고 최근에는 스크램제트의 연소실과 같은 유동조건의 실험을 위해 극히 짧은 실험시간이

* 공군사관학교 항공공학과 교수

요구되는 설비에서도 부유체를 이용한 직접 측정 게이지가 사용되고 있으며, 이는 극초음속의 영역까지 확장되고 있다. Bowersox 등[5]에 의하면 실험실에서의 스크램제트 엔진 실험은 $\mu$sec 수준의 매우 짧은 시간 내에 이루어지기 때문에 많은 어려움이 따르며, 무엇보다도 표면마찰력을 측정하는 것이 가장 큰 문제이고, 연구자료가 매우 적은 표면마찰력의 직접 측정 방법에 의한 연구가 필요하다고 하였다.

표면마찰력 게이지의 표면온도와 주위의 벽면온도와의 차이가 표면마찰력에 미치는 영향은 Westkaemper[6]에 의해 처음으로 연구되었는데, 플러그형의 게이지를 사용할 때 주위 벽면과의 온도차이에 의하여 열전달 측정에 많은 영향이 있음을 확인하였을 뿐 표면마찰력 측정에 미치는 영향에 대해서는 마하수 5.0, 표면온도 차이 34K상태에서 2% 이내로 매우 작다고 하였다. 한편, Voisinet[7]는 마하수 2.9와 4.9에서 실험하였는데 표면온도 차이에 의한 영향이 높은 마하수에서 상대적으로 크며, 동일 마하수에서는 레이놀즈수가 작을수록 영향이 증가함을 보였을 뿐이다.

이들의 연구는 연구목적에 적합한 표면마찰력 게이지를 갖추지 못한 상태에서 이루어진 것으로서, 표면온도 차이에 의한 영향을 제대로 규명하지 못하였다. 그러나, 최근에 부유체의 표면온도를 임의로 조절할 수 있는 표면마찰력 게이지가 개발되었다[8]. 참고문헌 9에 의하면, 이 게이지를 사용한 연구 결과 표면온도 차이가 표면마찰력과 열전달 측정에 상당한 영향을 미치므로 플러그형 표면마찰력 게이지를 사용할 때에는 표면온도 차이에 의한 영향을 반드시 고려해야 한다는 사실이 규명되었다. 그러나 이 참고문헌 9는 표면온도 차이가 18.7K인 한 가지 경우만 제시하였으므로 보다 세밀한 자료가 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 참고문헌 8에서 개발된 표면마찰력 게이지를 공군사관학교 초음속 풍동에 적합한 형상으로 설계하여 제작하고, 표면온도를 임의로 조절할 수 있는 가열장치도 새로이 설계·제작하여 표면온도 차이가 표면마찰력 측정에 미치는 영향을 보다 세밀하게 규명하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

본 실험은 공군사관학교의 초음속풍동에서 수행되었으며, 초음속풍동 측정부 벽면부근의 유동장 측정 실험을 먼저 실시하였다. 유동장 측정을 위한 장치는 그림 1에 보여진 바와 같이 Total pressure probe, Pressure transducer, Microswitch, Function generator, Signal amplifier, Digital multimeter, A/D board 및 Labview를 탑재한 PC로 구성하였다.

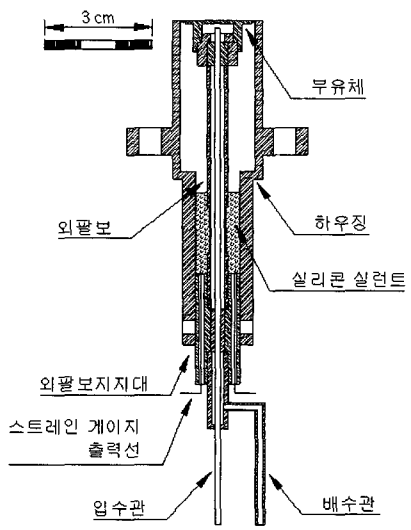
〔그림 1〕 측정부 벽면 부근의 유동장 측정실험

유동장 측정실험의 Rake에서 얻어진 전압($Pt_2$)과 정압(Pc)은 프로브의 앞에 형성된 충격파의 뒤에서 측정된 값으로서 다음과 같은 실험식(10)에 의하여 마하수로 환산되었다.

$$M = 1 / [\,-0.052976 + 4.684\,X - 18.6786\,X^2 + 50.7006\,X^3 - 54.1577\,X^4] \quad (1)$$

이 식에서 $X = P_c / P_{T_2}$이며, 이 식은 마하수 1.5부터 4.4까지 적용할 수 있다.

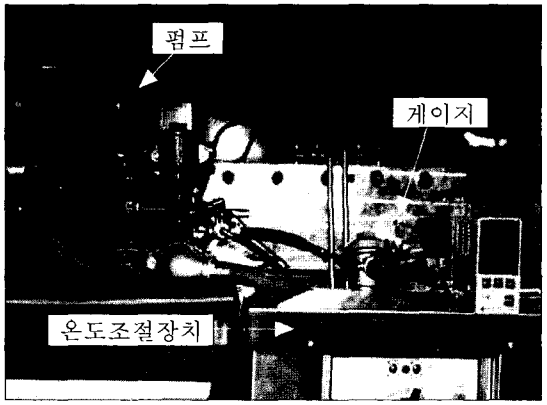
그림 2는 표면마찰력 게이지의 단면도로서 참고문헌 8의 표면마찰력과 열전달 동시 측정 게이지에서 열전달 센서를 제외시키고 공군사관학교 초음속풍동에 적합한 형상으로 설계·제작한 것이다.




〔그림 2〕 표면마찰력 게이지 단면도

이 게이지는 부유체(floating element), 외팔보(cantilever beam), 외팔보 지지대 및 표면온도 조절장치로 구성되어 있다. 부유체는 초음속풍동의 벽면과 일치되도록 외팔보의 끝단에 장착되어 있다. 부유체 표면은 초음속 흐름에 의한 국부 마찰력을 받으며 이 마찰력은 외팔보의 축방향 변위를 발생시킨다. 이 변위는 외팔보에 부착된 스트레인 게이지(strain gage)에 의해 전기적 신호로 전환되어 국부 표면마찰력을 나타내게 된다. 표면온도 조절장치는 외팔보의 내부에 설치되어 있으며, 스테인레스 스틸 관을 통하여 가열 또는 냉각된 물을 부유체의 내부 표면에 분사함으로써 부유체의 온도를 조절할 수 있다. 부유체가 부착된 외팔보는 게이지 하우징(gage housing) 안에 설치되며, 게이지 하우징은 초음속풍동의 벽면에 직접 설치된다. 외팔보의 위쪽에는 부유체를 금속 에폭시로 접착하였으며, 아래쪽에는 공기흐름 방향과 직각인 면에 스트레인 게이지를 부착하였다. 표면온도 조절장치의 물 분사를 위하여 직경 1 mm의 스테인레스 스틸 관을 사용하였다. 스테인레스 스틸 관은 부유체 내부 표면의 중심점에 가열 또는 냉각된 물을 분사할 수 있도록 중심점으로부터 1 mm의 거리에 끝단을 위치시켰다.

표면마찰력 측정은 먼저 자료처리(data acquisition) 장치를 가동한 상태에서 초음속풍동을 작동시켜 초음속풍동의 작동시간 전체에 대하여 출력신호를 획득함으로써 전체적인 표면마찰력 변화 및 측정 전후의 기준 출력상태를 Labview에서 실시간에 관찰할 수 있도록 하였다.




〔그림 3〕 표면마찰력 측정 실험

측정부 벽면과 부유체 표면과의 온도차이 설정은 온도 조절장치에 의해 이루어졌다. 측정부 벽면온도는 표면마찰력 게이지의 윗부분과 아랫부분에 설치한 열전대(thermocouple)로 측정하였으며, 표면마찰력 게이지의 표면온도는 부유체의 표면에 열전대를 임

시로 부착하고 온도 조절장치의 설정온도 및 측정온도를 조절함으로써 원하는 표면온도를 확인하였다. 실험에서 측정된 표면마찰력은 부유체의 전체 면적에 작용한 국부 마찰력이므로 표면마찰력계수($C_f$)를 다음과 같이 산출하였다.

$$q = \frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2 = \frac{1}{2}\gamma P_\infty M_\infty^2 \quad (2)$$

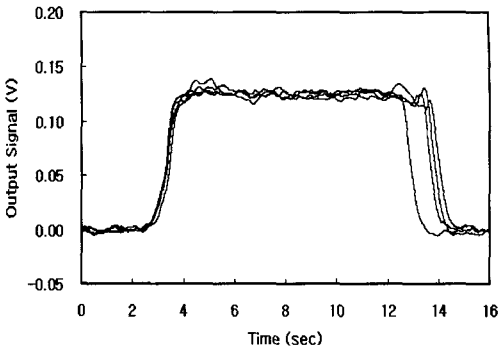
$$C_f = \frac{\tau_w}{q} = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\gamma P_\infty M_\infty^2} \quad (3)$$

## 3. 실험결과

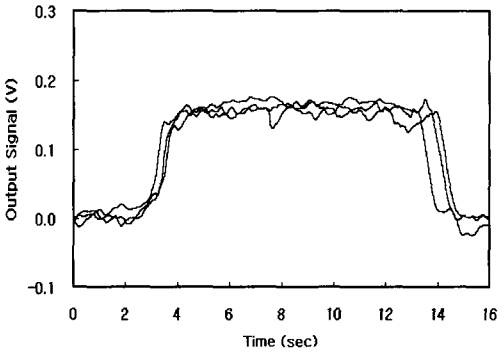
본 연구에서 수행된 표면마찰력 측정은 자유류의 마하수 2.4, 단위 미터당 레이놀즈수 $5.25 \times 10^7$인 초음속 유동장에서 부유체와 초음속풍동 벽면의 온도차이가 없는 상태 즉 가열장치를 작동하지 않은 상태에서 7회를 실시하였고, 가열장치 작동상태에서는 표면온도 차이를 10K 간격으로 40K 까지 각각 3회씩 실시하였다. 이 표면온도 차이는 초음속풍동 작동 직전에 측정한 게이지 부유체의 표면온도와 주위 벽면 표면온도와의 차이를 말한다.

그림 4는 가열장치를 작동하지 않은 상태에서, 그림 5는 표면온도 차이가 40K일 때의 표면마찰력 게이지의 출력 신호로 초음속풍동 전체 작동시간에 걸친 측정 결과이다. 전체 측정구간 중 실제로 자유류 마하수가 안정되게 유지된 상태에서의 측정구간은 초음속 풍동의 정체부 압력조절 밸브를 열었을 때 초기에 발생하는 수직충격파에 의한 불안정한 부분과 밸브를 닫을 때의 부분을 제외한 약 7초의 구간으로 이 구간 중 6초에서 10초까지 4초간의 출력신호를 측정 데이터로 사용하였다.

출력신호를 게이지 보정(calibration) 결과식에 대입하여 표면마찰력을 계산한 후 표면마찰력 게이지의



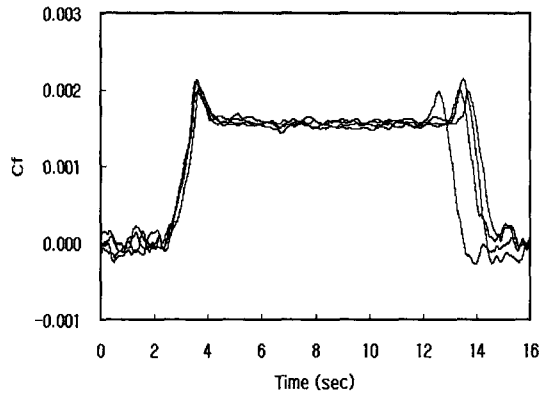

〔그림 4〕 표면마찰력 게이지의 출력신호(가열장치 OFF)



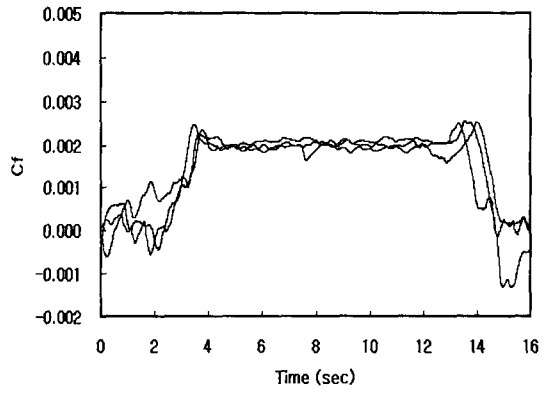

〔그림 5〕 표면마찰력 게이지의 출력신호
(표면온도 차이 40K)

표면면적을 고려하여 표면전단응력을 계산하였고, 식(3)에 의하여 그림 6과 그림 7의 표면마찰력 계수를 구하였다.

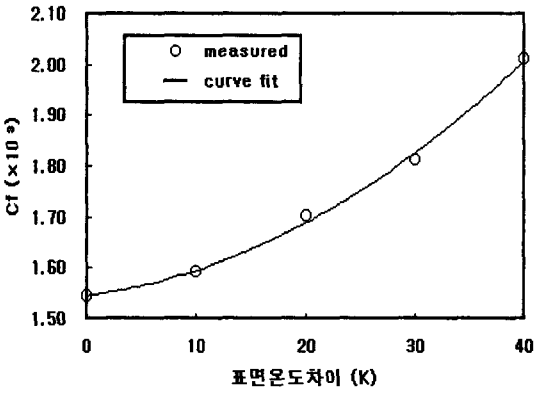
가열장치를 사용하여 인위적인 표면온도 차이를 만들어 준 상태에서의 출력 신호는 초음속풍동 작동 전의 초기 출력값과 측정후 안정된 상태에서의 출력값이 거의 일치됨을 관찰할 수 있었고, 유효작동시간 중에도 대체로 일정한 수준의 출력신호가 관찰되었다. 이는 풍동의 작동에 따른 초음속 유동의 매우 낮은 온도가 표면마찰력 게이지의 출력에 영향을 주지 않았음을 의미하며, 유효 작동구간에서는 온도 조절장치에 의한 부유체의 온도조절 효과가 충분하였음을 나타내는 것이다.



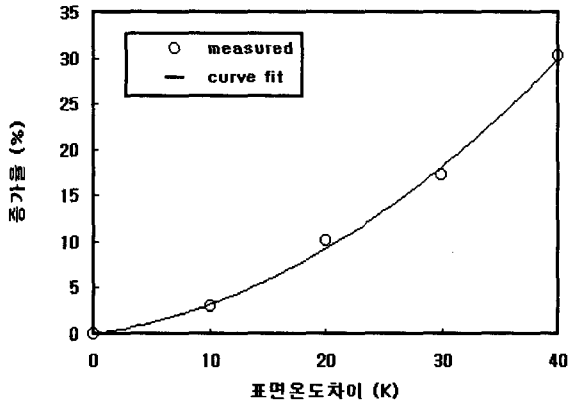

〔그림 6〕 표면마찰력 계수(가열장치 OFF)




〔그림 7〕 표면마찰력 계수(표면온도차이 40K)




〔그림 8〕 표면온도 차이에 따른 표면마찰력 변화




〔그림 9〕 표면온도 차이에 따른 표면마찰력 증가율

그림 8은 표면온도 차이가 0K에서 40K까지 10K의 간격으로 표면온도 차이에 따른 표면마찰력 계수를 나타낸 것이고, 그림 9는 표면온도 차이에 따른 마찰력 계수의 증가율을 나타낸 것이다. 온도차이 10K에서는 4%, 온도차이 20K에서는 12%, 온도차이 30K에서는 17%, 그리고 온도차이가 40K일 때는 32%의 증가를 보이고 있다. 온도차이가 작은 경우에는 표면마찰력의 변화도 매우 작으나 온도차이가 커짐에 따라 표면마찰력의 변화도 점차적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구는 표면온도 차이가 표면마찰력 측정에 미치는 영향을 규명하기 위한 것으로서 공군사관학교 초음속풍동에서 실험을 수행하였다. 유동조건은 자유류 마하수 2.4, 단위 미터당 레이놀즈수 $5.25\times10^7$, 전압 50psi, 전온도 275K이었으며, 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서 사용한 플러그형의 원점지지력이 없는 외팔보형 표면마찰력 게이지는 부유체의 온도를 임의로 조절할 수 있도록 설계되었으

며, 각 실험에서 안정된 출력값을 나타냄으로써 이 게이지는 초음속 유동에서의 표면 마찰력을 측정하는데 적합한 게이지로 확인되었다.

(2) 부유체의 표면과 측정부 벽면과의 표면온도 차이에 의한 표면마찰력 변화를 기존의 결과보다 다양한 온도차의 범위에서 확인하였다.

(3) 표면온도 차이가 40K일 때 32%의 표면마찰력 증가를 보였으며, 온도차이가 증가함에 따라 표면마찰력은 현저하게 증가하였다. 따라서, 부유체를 이용한 표면마찰력 게이지를 사용할 때에는 표면온도 차이에 의한 영향을 반드시 고려해야 한다는 사실을 명확하게 확인하였다.

## 참 고 문 헌


1. Bachman, R. C., Chamber J. T., and Giedt, W. H., "Investigation of Surface Heat Flux Measurement with Calorimeters", ISA Transactions, Vol. 4, No. 2, 1965, pp.143~151.
2. Schetz, J. A., Instrumentation for Fluid Dynamics, 1993.
3. DeTurris, D., Schetz, J. A., "Direct Measurement of Skin Friction in a Scramjet Combustor", AIAA paper 90-2342.
4. Chadwick, K. M., "An Actively Cooled Floating Element Skin Friction Balance for Direct Measurement in High Enthalpy Supersonic Flows", Ph.D. Dissertation, VPI&SU, 1992.
5. Bowersox, R. D. W., Schetz, J. A., Chadwick, K. M., and Deiwert, S., "Technique for Direct Measurement of Skin Friction in High Enthalpy Impulsive Scramjet Flowfields", AIAA Journal, Vol. 33, No. 7, 1995, pp.1286~1291.
6. Westkaemper, J. C., "On the Error in Plug Type Calorimeters Caused by Surface Temperature Mismatch", Journal of Aerospace Science, Vol. 28, 1961, pp.907~908.
7. Voisinet, R. L. P., "Temperature Step Effects on Direct Measurement of Skin Friction Drag", AIAA Paper 78-0779.
8. 백승욱, "표면마찰력과 열전달 동시 측정 게이지 개발", 한국항공우주학회지 제25권, 제6호, 1997, pp.45~49.
9. 백승욱, "표면온도 차이가 표면마찰력과 열전달 측정에 미치는 영향", 한국항공우주학회지, 제26권, 제6호, 1998, pp.59~63.
10. Bowersox, R. D. W., "Compressible Turbulence in a High Speed High Reynolds Number Mixing Layer", Ph.D. Dissertation, VPI&SU, 1992.