

적외선 측정 기법을 이용한 초음속 유동내 열전달 측정

유만선* · 이종주* · 송지운** · 조형희***

Heat Transfer Measurement in a Supersonic Flowfield by an Infra-red Thermography

Man Sun Yu* · Jongju Yi* · Jiwoon Song** · Hyung Hee Cho***

ABSTRACT

Infra-red thermography was conducted to understand a heat transfer characteristic on a surface protruded to a supersonic flowfield. Surface temperature distribution was obtained under the constant heat flux condition with a infra-red camera and the convective heat transfer coefficient distribution was calculated. Finally, two dimensional distribution of heat transfer coefficient on a surface around a cylinder body was derived.

초 록

초음속 유동내 노출된 표면에서의 열전달 특성 파악을 위하여 적외선 측정 방법이 적용되었다. 등 열유속 조건을 만족하는 표면 온도를 적외선 카메라로 촬영하여 이로부터 대류 열전달 계수를 계산하였으며, 실린더가 설치된 표면 근방에서 증가된 열전달 계수 분포를 도출해 낼 수 있었다.

Key Words: Supersonic flow(초음속 유동), Infra-red thermography(적외선 촬영기법), Convective heat transfer(대류 열전달 계수)

1. 서 론

최근 항공 우주 기술의 발달로 인해 비행체의 고속화가 진행되고 있으며, 램제트/스크램제트 엔진과 같은 초음속/극초음속용의 엔진형태도 꾸준히 개발되어지고 있다.

고속, 특히 초음속 유동에 노출된 표면은 근방

의 높은 대류 효과와 충격파/경계층 상호작용 등에 의한 국소 영역에서의 유동편차로 인하여 높은 열전달 및 열전달의 높은 국소편차를 지니는 단점을 갖는다.

이러한 초음속 유동내의 열전달 현상에 대한 실험적 연구의 대부분은 초음속 유동의 가시화와 함께 표면으로의 열유속 측정이 중심이 되어 이루어졌다. 자주 사용되었던 열유속 측정법으로는 모델 표면 냉각을 위해 흐르는 냉각유체의 온도변화로부터 표면 열유속을 간접적으로 측정하는 방식[1]과 표면에 소형 센서를 장착하여 열

* 연세대학교 대학원

** 연세대학교 기계공학부

*** 연세대학교 기계공학부

연락처, E-mail: msyoo@yonsei.ac.kr

유속을 직접 측정하는 방식[2]이 있었다. 그리고, 최근 들어 TLC(Thermochromic Liquid Crystal)를 이용한 표면 열유속 측정법[3] 또한 연속적으로 광범위한 관심영역을 측정대상화 할 수 있는 장점으로 인하여 자주 사용되고 있다.

본 연구에서는 열전달 측정의 또 다른 방법으로서 적외선 촬영 기법(Infra-red Thermography)을 이용하여 초음속 유동내 돌출된 실린더 주위에서의 열전달 계수를 얻는 실험을 수행하였다. 초음속 불어내리기식 풍동내에 얇은 포일 히터가 장착된 테스트부를 장착하여 실험하였으며, 적외선 카메라를 이용하여 등열유속조건하에서의 온도분포를 측정하여 이를 대류열전달 계수로 변환하였다. 이와 같은 열전달 측정법은 비접촉식으로 넓은 대상 영역의 측정이 가능하다는 장점을 지닌다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 초음속 불어내리기식 풍동 설비의 개략도가 Fig. 1에 나타나 있다. 실험에 사용되는 공기는 실험 전 왕복동식 압축기, 버퍼 탱크, 7단 필터를 거쳐 습기와 유분이 제거된 상태로 약 1.8m³의 용적을 갖는 탱크에 최고 압력 150기압으로 저장된다. 실험 시에는 공압식 밸브가 개방되어 압축된 공기는 압력 조절기를 거쳐 감압되며, 정체 챔버와 초음속 노즐을 거쳐 테스트 챔버에 자유제트 형태로 분출된다. 실험 모델을 통과한 공기는 후방에 위치한 디퓨저를 통과, 압력회복을 한 뒤 소음기를 거쳐 대기중으로 분사된다.

Figure 2는 테스트 모델의 형상 및 치수를 보여주고 있다. 철로 제작된 모델 선단은 초음속 유동에 의한 압력저항을 줄일 수 있도록 가능한 날카롭게 가공하였으며, 10°의 쉐기각을 주어 발생하는 충격파의 강도를 약하게 하였다. 돌출부로 사용된 실린더는 직경 5mm, 높이 20mm로서 평판 모델 선단으로부터 65mm의 위치를 중심으로 고정하였다. 실린더 주위의 사각 영역은 히

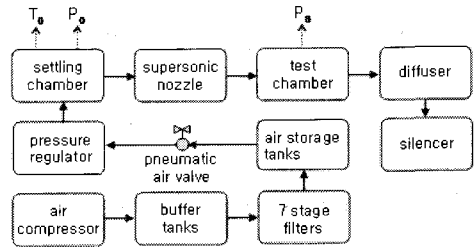


Fig. 1 Experimental set-up

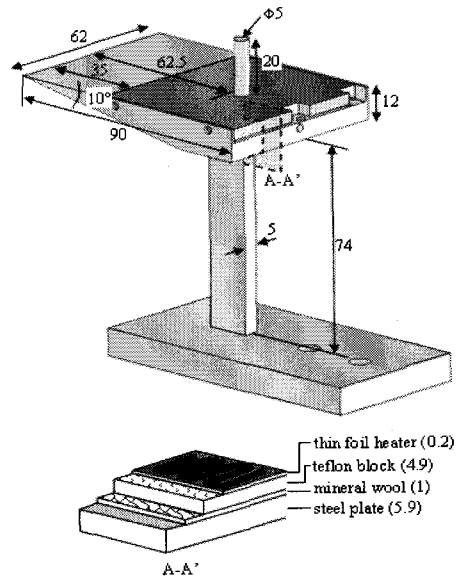


Fig. 2 Test model

터 발열량의 대상면 반대 방향으로의 손실을 막기 위하여 테플론 및 공기를 포함한 미네랄 울 등으로 단열하였다. Figure 3은 모델이 설치된 테스트부의 형상을 나타낸다. 모델의 선단은 초음속 노즐의 중심선과 일치되어 노즐 출구로부터 약 1mm의 간격을 두도록 고정하였다. 사용된 적외선 카메라는 테스트부 상측면에 설치, 아래쪽을 바라보도록 고정하였으며, 적외선 카메라에 노출되는 테스트부 및 노즐, 디퓨저의 표면은 무광 흑색 페인트로 스프레이하여, 적외선 반사에 의한 영향을 최소화하였다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 초음속 풍동의 가동 중, 테스트

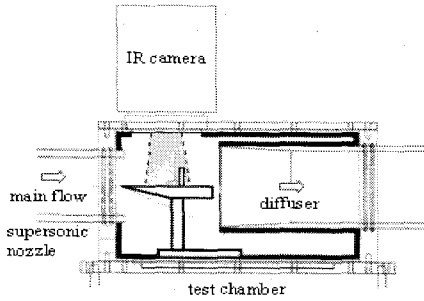


Fig. 3 Illustration of test chamber

모델 표면의 등열유속 조건하에서 표면 온도 분포를 측정하였다. 공압식 밸브가 개방된 후, 테스트 모델 표면에 설치된 thin foil heater에 전류가 공급되었으며, 공급된 전류량은 히터를 포함한 전기회로 내에 설치한 shunt에서의 전압강하량으로부터 계산되어졌다. 히터 발생열은 아래와 같은 식을 통해서 계산되어졌다.

$$q = \frac{I^2 R}{A} \quad (1)$$

이 때, q , I , R 그리고 A 는 각각 히터 발생열, 히터에 공급된 전류, 히터 저항, 그리고 히터의 표면 면적을 의미한다.

본 연구에서 실험 시간은 약 8-10초 정도인데, 유동은 밸브 개방 직후, 정상상태에 도달하는 데에 반하여 모델 내부에서의 열전도는 정상상태에 이르지 못하는 문제를 지닌다. 이는 표면 열유속 계산에 수정조건으로 고려되어야 하며, 이를 위해 히터 발열량을 변수로 하는 비정상 열전도 해석을 통해 표면 열유속과의 차이를 얻어내었다.(Fig. 4) 그림에 보이는 바와 같이 단위 면적당 히터 발열량이 $2 \times 10^4 \text{W/m}^2$ 에서 $3 \times 10^4 \text{W/m}^2$ 사이인 경우, 표면 열유속과의 차이가 가장 작게 나타났다. 히터 열유속이 이보다 작은 경우, 상온상태에 있던 단열재가 실험시 또 다른 열원으로 작용하여 보다 높은 표면 열유속을 발생시키고, 반대로 히터 열유속이 큰 경우, 단열재 측으로의 열손실 발생에 의해 표면으로의 열발산이 작게 이루어지기 때문에 큰 에러값을 지니는 것으로 생각된다. 해석을 통하여 계산된 에러값은 식(1)에서 계산된 히터 발열량을 보정하여 표면 열유속(q_s)를 얻기 위해 사용되었다.

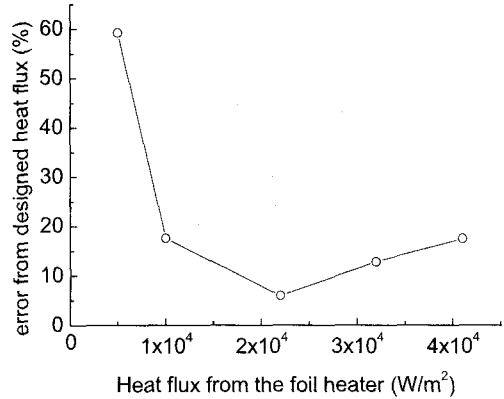


Fig. 4 Heat flux error

등열유속 조건 하에서 적외선 카메라를 이용해 측정된 표면온도(T_w)는 아래와 같이 널리 알려진 식에 대입되어 표면 대류 열전달 계수(h)를 구하는데에 사용되었다.

$$h = \frac{q_s}{T_w - T_{aw}} \left[1 - \left(\frac{\xi}{x_s} \right)^{9/10} \right]^{-1/9} \quad (2)$$

$$T_{aw} = T_0 \frac{1 + \text{Pr}^{1/3} \frac{\gamma - 1}{2} M^2}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2}$$

이 때, T_{aw} 은 가스 단열 벽면 온도를 의미하며, T_0 , Pr , γ , 그리고, M 은 각각 가스 총온도, Prandtl수, 비열비, 그리고, 상류 마하수를 의미한다. 가스 총온도의 경우, 챔버에서 측정된 온도($T_{chamber}$)를 그대로 사용하였다. 또한, 가열면이 평판 모델 선단에서 시작하지 않기 때문에 비가열 시작 길이가 존재하게 되며, Kays 등[4]에 의해 제시된 수정항을 식(2)의 오른쪽 항과 같이 곱해주었다. 이 때, ξ 와 x_s 는 각각 비가열 시작 길이 및 선단으로부터의 거리를 의미한다.

3. 결과 및 토의

Figure 5는 적외선 카메라를 이용하여 측정된 모델 표면의 온도분포를 3차원으로 도시한 것이다. 유동 상류($250 < x < 300$)의 비가열영역은 낮은 온도대를 유지하는 반면, 가열영역은 국부적인

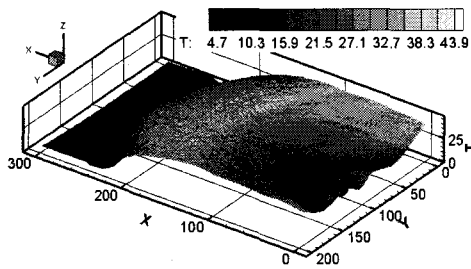


Fig. 5 Measured surface temperature

열전달 특성에 맞게 서로 다른 고온 분포를 그리는 것을 확인할 수 있다.

측정된 온도분포로부터 식(2)를 적용하여 열전달 계수 분포를 계산하였으며, 그 결과는 Fig. 6에 나타나 있다. 이 때, 실린더 위치에서의 결과 값은 등열유속 조건을 만족하지 않기 때문에 어떤 의미도 지니고 있지 않다. 그림에서 실린더 직경의 2~3배 전방에서부터 활형으로 열전달 증가영역이 형성됨을 확인할 수 있으며, 측정된 결과에 대한 설명은 저자의 다른 논문[5]에 서술되어 있다.

4. 결 론

초음속 유동에 노출된 표면에서의 열전달 특성 파악을 위하여 비접촉식으로 광범위한 표면 영역의 열전달 측정이 가능한 적외선 측정 기법을 적용해 보았으며, 이로부터 히터가 설치된 돌출부 주위에서의 이차원적 열전달 계수 분포를 계산해 낼 수 있었다. 향후, 짧은 실험시간에 의한 모델내부의 비정상 열전도 문제, 히터내 폭방향으로의 열확산 문제 등이 적절히 고려된다면 적외선 측정법은 앞으로도 유용한 열전달 측정방법으로서 꾸준히 사용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Back, L. H., Cuffel, R. F., and Massier, P. F., "Laminarization of a Turbulent

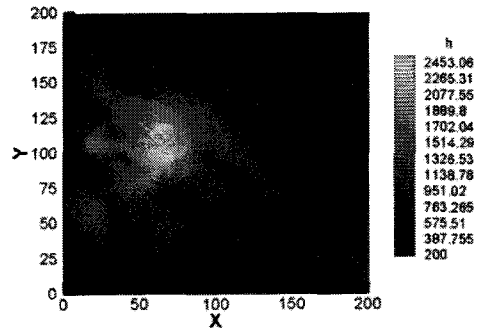


Fig. 6 Convective heat transfer coefficient

Boundary Layer in Nozzle Flow-Boundary Layer and Heat Transfer Measurements With Wall Cooling," *Journal of Heat Transfer*, Vol.92, No.3, Aug., 1970, pp.333-344.

2. Edney, B. E., "Effects of Shock Impingement on the Heat Transfer around Blunt Bodies," *AIAA Journal*, Vol.6, No.1, Jan., 1968, pp.15-21.

3. Roberts, G. T., Schuricht, P. H., and Mudford, N. R., "Heating Enhancement Caused by a Transverse Control Jet in Hypersonic Flow," *Shock Waves*, Vol.8, 1998, pp.105-112.

4. Kays, W. M., and Crawford, M. E., "Convective Heat and Mass Transfer - 2nd Ed.," McGraw-Hill Book Company, 1980, Chap.12, pp.204-235.

5. Yu, M. S., Yi, J. J., Cho, H. H., Hwang, G. Y., and Bae, J. C., "A Study of the Heat Transfer around a Cylindrical Body Protruded into a Supersonic Flowfield," *Proceeding of 2006 Asia Joint Conference on Propulsion and Power*, Beijing, China, 20-23, Apr., 2006.