大韓機械學會論文集 第15卷 第1號, pp. 323~327, 1991.

〈論 文〉

초음속충돌제트의 열전달에 관한 실험적 연구

이 찬*·정 명 균**

(1990년 10월 24일 접수)

Experimental Study on the Heat Transfer of Supersonic Impinging Jet

Chan Lee and Myung Kyoon Chung

Key Words: Impinging Jet(충돌제트), Multiple Shock(다중충격파), Quasi One-Dimensional Heat Conduction Model(준1차원 열전도 모형) Stagnation Region(정체점 지역), Wall Jet Region(벽면제트 지역)

Abstract

An experiment was conducted to determine the local heat transfer from a supersonic hot jet impinging at 45° to a plate surface. A semi-analytic method was used to determine the Nusselt number from experimental data. The results indicates that the location of the peak heat transfer is displaced from the geometric center of the axisymmetric jet and that the radial variation of the local heat transfer is steeper than that in the subsonic impinging jet. In the stagnation region, the heat transfer from the supersonic impinging jet is about 10 times larger than that from the subsonic one, while the heat transer away from the stagnation region is of the same magnitude as that of the in compressible turbulent radial wall jet.

기 호 설 명

d : 평판두께
D : 제트출구직경
h : 국소 열전달계수
k_g : 고온기체의 열전도 계수
k_s : 평판의 열전도계수
L : 제트출구로부터 평판까지의 거리
M : 제트 마하수
Nu : 누셀트 수(hD/k_g)
ΔNu : 누셀트 수의 불확실성
P_j : 제트출구압력
P_∞ : 대기압력
PR : 과소팽창비($=P_j/P_\infty$)
Pr : 프란틀 수
Re : 레이놀즈 수
t : 측정시간
Δt : 측정시간의 불확실성
T_j : 제트출구온도
T_0 : 제트정체점온도
T_∞ : 대기온도
ΔT : 측정온도의 불확실성
x, y, z : 평판의 직각좌표
Δz : 열전대위치의 불확실성
α : 평판의 열확산계수
θ : 제트각도

*정회원, 한국과학기술원 항공공학과
**정회원, 한국과학기술원 기계공학과

1. 서 론

고체표면에 대한 충돌제트의 문제는 다단로켓분리, V/STOL 항공기엔진의 배기, 가스터어빈 블

레이드의 냉각 그리고 로켓발사대 등의 공학적 응용에 있어서 매우 중요하다. 이러한 문제에 관한 연구는 주로 아음속 충돌제트에 대해 많이 이루어졌다. Martin[1]은 아음속충돌제트의 열전달연구들을 검토하였다. Foss[2]는 레이놀즈수가 48,000인 경사충돌제트의 유동장을 측정하였다. 또한 Goldstein등은, 일련의 실험적 연구[3~5]를 통하여, 충돌제트의 각도와 간격이 열전달에 미치는 영향을 규명하고 그에 따른 실험적 상관관계를 제시했다. Sparrow와 Novell[6]은 경사충돌제트의 열전달을 나프탈렌 승화기법을 이용하여 측정하였다. 그리고 Metzger와 Kostad[7]는 배열된 충돌제트의 열전달에 관하여 연구하였다.

아음속 충돌제트의 경우와는 달리, 초음속 충돌제트의 연구는 매우 드문 형편이며, 그 이유는 경계층과 충격파간의 복잡한 상호작용과 고체표면의 고온, 고압을 재는데 어려움이 있기 때문이다. Donaldson등[8,9]은 마하수가 거의 1에 가까운 자유제트와 충돌제트의 난류구조와 열전달에 관해 실험적연구를 수행하였다. 그들의 연구결과에 따르면, 열전달은 정체점으로 부터의 거리에 반비례함을 볼 수 있다. Lamont와 Hunt[10]는 과소팽창된 축대칭제트가 평판에 수직 또는 경사되게 충돌할 때 표면의 압력을 측정하였다. 그들의 결과는 정체점 부근에서 다중충격파가 형성됨을 보여준다.

본 실험적연구는 로켓노즐로 부터 분출되는 고온의 초음속제트가 45°로 경사진 평판으로 분사되는 경우의 열전달을 측정하였다. 고온의 제트가 충돌하는 평판표면의 고온과 열유속을 측정하는 것이 거의 불가능하므로, 국소적열전달은 국소적 준 1차원 열전도모형을 평판표면 아래에서 측정한 온도자료에 적용하여 구하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험을 위해 고온의 초음속 제트를 고체추진 로켓에 연결된 로켓노즐로 부터 공급하였다. 로켓연소실의 압력은 10.7MPa 이고, 정체온도는 3000 K이다. 또한 노즐은 100mm직경의 원형단면 출구를 가진다. 제트출구와 평판간의 거리는 노즐직경의 5배이고, 제트축과 평판간의 각도는 45°로 유지하였다. 노즐은 과소팽창비가 2.60인 상태로 작동하였다. 자세한 실험조건은 Table 1에 표시되어 있다.

Table 1 Experimental conditions

Thermodynamic properties	
Jet exit mach No. (M_j)	2.7
Jet Reynolds No. (Re)	8.47×10^5
Jet exit temperature (T_j)	1555K
Ambient temperature (T_∞)	286K
Jet exit pressure (P_j)	0.263MPa
Ambient pressure (P_∞)	0.101MPa
Geometric parameters	
Inclination angle (θ)	45°
Nozzle-to-plate spacing (L/D)	5

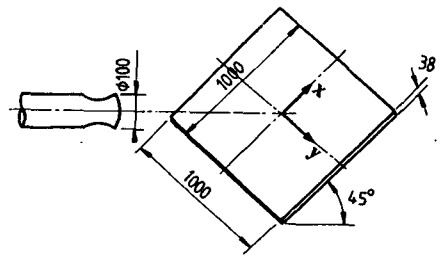

Fig. 1 Schematic diagram of a supersonic impinging jet onto an inclined plate surface

실험에 사용한 평판은 높이 1000mm, 폭 1000 mm 그리고 두께가 38mm인 직각평판이다. 이러한 평판의 재질은 알루미늄을 사용했고, 평판의 뒷면은 단열처리하였다. 평판에는 x, y방향으로 100 mm의 균일한 간격을 갖게 열전대를 설치하였다. 이때 x, y좌표는 Fig. 1에 나타나 있다. 제트 중심면의 x축을 따라 5개의 열전대를 설치하였고, 그 깊이는 평판표면으로부터 20mm되는 지점에 설치했다. 열전대 설치를 위한 구멍은 평판뒷면으로부터 뚫어 가공하였다. x축의 왼쪽면에는 5mm깊이에 10개의 열전대를 설치하였고, 오른쪽면에는 35mm깊이에 10개의 열전대를 설치하였다. 본 연구에서는 K형 열전대를 사용했고, 0.01초 시간간격으로 각 열전대 위치에서의 평판내부온도의 시간적 변화를 측정하였다.

3. 실험자료의 분석

앞서 측정한 온도자료를 가지고, 평판표면의 열전달은 국소적 준1차원 열전도모형을 사용하여 결

정하였다. 본 연구에서 제안된 국소적 준1차원 열전도모형은 시험평판이 고온의 충돌제트에 의해 가열될때, 평판깊이방향(z방향)으로의 열전도가 다른 횡방향(x, y방향)의 열전도에 비해 매우 크다는 가정에 근거한다.

그러므로 고온제트에 의한 평판의 가열은 다음과 같은 수학적 모형으로 표시할 수있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\alpha\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \qquad 0\le z\le d,\ t\ge 0 \qquad (1)$$

또한 초기조건과 경계조건은

$$T=T_\infty \qquad \text{at } t=0 \qquad (2)$$

그리고

$$-k_s\frac{\partial T}{\partial z}=h(T_0-T) \qquad \text{at } z=0 \qquad (3)$$

$$-k_s\frac{\partial T}{\partial z}=0 \qquad \text{at } z=d \qquad (4)$$

식 (1), (2), (3) 그리고 (4)에 대한 해는 다음과 같다[11]

$$\frac{T-T_\infty}{T_0-T_\infty}=1-\sum_{n=1}^{\infty}A_n\cos\left[\mu_n\left(1-\frac{z}{d}\right)\right]\times\exp\left(-\mu_n^2\frac{t\alpha}{d^2}\right) \qquad (5)$$

여기서 $A_n=\dfrac{2\sin\mu_n}{\sin\mu_n\cos\mu_n+\mu_n}$

그리고 eigenvalue μ_n은 아래와 같은 특성방정식으로부터 얻어진다.

$$\tan\mu_n=\frac{Nu}{\mu_n}\left(\frac{dk_g}{Dk_s}\right) \qquad (6)$$

시험평판의 내부온도에 관한 시간적변화가 실험적으로 구해지면, 식 (5)와 (6)을 이용하여 각 지점에서의 누셀트 수를 구할 수 있다. 초음속 고온충돌제트의 실험이 약 3.2초간 행해지는 동안, 알루미늄평판의 표면이 로켓 발사 후 약 1초 후에 용해되었다. 그러므로 본 연구에서는 표면이 용해되기 이전의 측정자료들만을 누셀트 수를 산출하는데 사용하였다.

4. 결과 및 검토

Fig. 2는 본 실험에서 측정된 열전대온도의 시간적 변화를 보여주고 있다. Fig. 2의 온도 변화자료와 3장의 분석방법을 이용하여 열전달 계수를 구하였다.

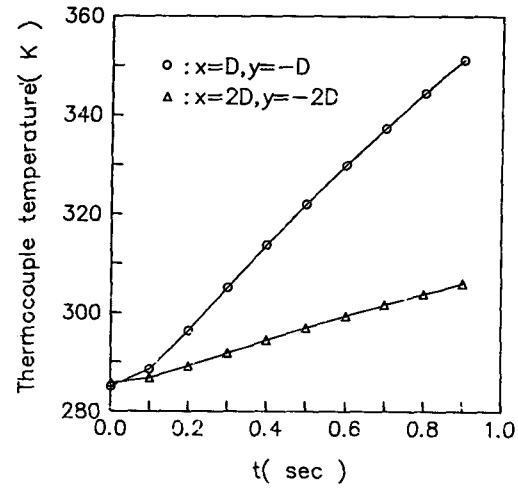

Fig. 2 Time variations of thermocouple temperatures at z=5mm

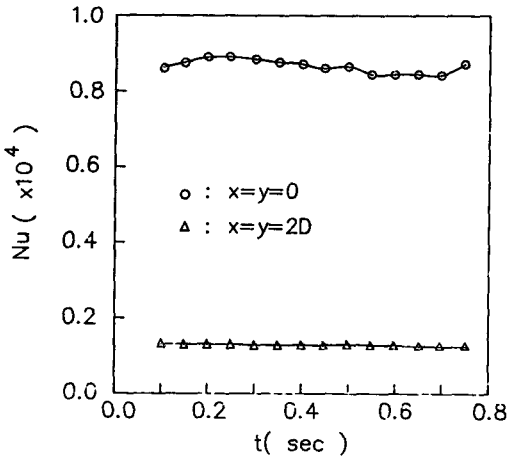

Fig. 3 Variations of local Nusselt numbers with time

국소적 준1차원 열전도모형을 사용하여 열전달계수를 결정하기 이전에, 그 방법의 타당성을 검토하였다. 측정되어진 평판의 온도분포를 이용하여, 횡방향의 근사적 온도구배(dT/dy 또는 dT/dx)는 깊이 방향의 온도구배(dT/dz)에 비해 5%미만임이 밝혀졌다. Fig. 3는 본 방법에 의해 구해진 국소적 누셀트 수의 시간적 변화를 보여준다. 누셀트 수의 시간에 따른 변화폭이 6%미만의 작은값을 보이므로, 누셀트 수는 시간변화에 무관한 정상상태의 값임을 알 수 있다.

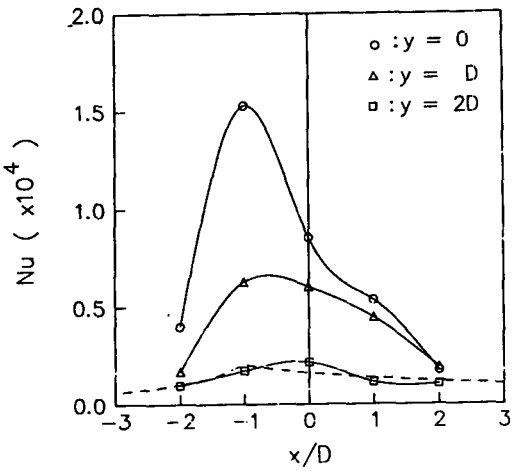

Fig. 4 Distributions of local Nusselt numbers at different y positions. Dotted line represents the data of Goldstein[3] for subsonic jet at $y=0$

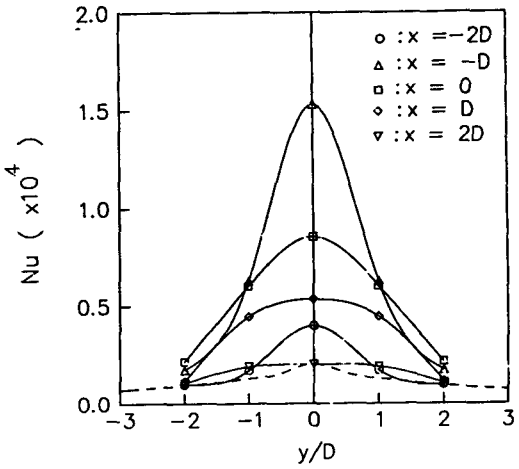

Fig. 5 Distributions of local Nusselt numbers at different x positions. Dotted line represents the data of Goldstein[3] for subsonic jet at $x=-D$

일반적으로 국소적 누셀트 수는 L/D, x/D, y/D, Pr 그리고 Re의 함수이다. 그러나 본 연구에서는 Re, Pr와 L/D가 고정되어 있으므로, 누셀트 수는 오로지 위치의 함수이다.

$$Nu=f(x/D,\ y/D)$$

우선 제트중심면의 x축을 따른 누셀트 수의 분포를 고려하면, Fig. 4에서 보여지듯이, 제트중심축으로부터 이동된 지점의 누셀트 수가 가장 크다. 이러한 결과는 평판표면에 평행한 자유제트의 횡분류성분(cross flow component)에 기인한다. 또한 최고열전달 지점으로 부터 아래방향으로의 국소적 누셀트 수의 변화가 윗방향에 비해 훨씬 급격하게 감소하는 경향을 보여준다. 이러한 현상은 정체점 부근에서 충격파에 의해 유발되는 박리현상에 의한 것이다[10]. 윗방향에서의 변곡점의 존재는 충격파와 평판간의 상호작용에 의해 야기되는 작은 압력턱(pressure hump)을 나타내어주며, y방향에 따른 최고열전달지점의 윗방향으로의 이동은 초생달형상의 정체영역이 존재함을 보여준다[10]. 본 실험결과와 Goldstein에 의한 아음속 실험결과[3]를 비교하면, x축을 따른 누셀트 수의 변화양상이 서로 유사함을 알 수 있다. 그러나 초음속 제트에 의한 최고열전달 계수는 아음속의 최고치에 비해 약 10배 정도된다.

Fig. 5는 y방향을 따른 열전달분포를 보여준다. 열전달분포가 x축에 대해 대칭적임을 알 수 있다. 또한 y방향으로 거리가 증가할수록, 누셀트 수는 감소하며, 그 거리가 증가함에 따라 초음속 충돌제트의 누셀트 수와 아음속의 경우가 같아짐을 볼수 있다. 이와 유사한 결과가 Donaldson등[9]과 Lamont 그리고 Hunt[10]에 의해 관찰되었다. 그들의 관측에 의하면, 정체지역으로 부터 멀리 떨어진 곳의 충돌제트는 난류벽면제트와 유사한 모습을 보인다.

Fig. 6는 평판표면에서의 열전달분포에 관한 곡선들을 보여주고 있다. 표면에 대해 제트가 경사지게 충돌하므로, 일정한 누셀트 수에 대한 곡선들이 준 타원형의 형태를 갖는다. 이러한 경향은 아음속

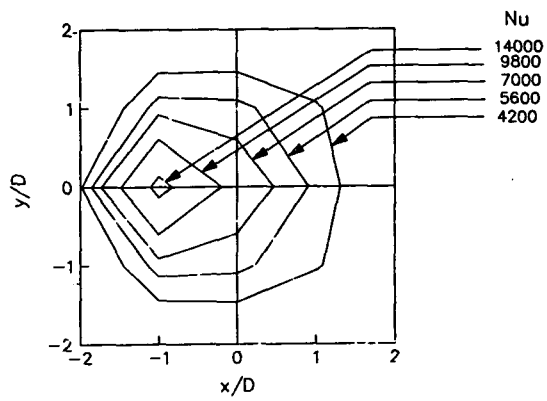

Fig. 6 Contours of constant Nusselt numbers

Table 2 Uncertainties of the Nusselt numbers

Location	Nu	ΔNu	Percent uncertainty
$x=y=0$	8650	1250	14.40%
$x=y=D$	4460	435	9.75%
$x=y=2D$	1330	124	9.34%

충돌제트의 실험[3,6]에서도 발견되어 진다.

본 연구에서 구해진 열전달결과에 대한 신뢰도를 평가하였다. 본 연구에서는 누셀트 수를 열전대측정온도, 측정시간 그리고 열전대위치를 가지고 결정하였으므로, 누셀트 수의 실험에 따른 불확실성은 앞서 언급한 3가지 측정자료들의 불확실성들에 기인하며, 다음과 같이 표현된다[12].

$$\Delta Nu=\left[\left(\frac{\partial Nu}{\partial t}\Delta t\right)^2+\left(\frac{\partial Nu}{\partial z}\Delta z\right)^2+\left(\frac{\partial Nu}{\partial T}\Delta T\right)^2\right]^{1/2} \quad (7)$$

이때 열전달응답시간에 따른 불확실성 Δt는 약 0.03초 미만이고, 열전대위치에 대한 불확실성 Δz는 가공상의 오차로서, $\Delta z=\pm 0.5$mm이다. 또한 사용된 K형 열전대의 온도측정에 대한 불확실성 $\Delta T=\pm 0.7K$이다. 그러므로 누셀트 수에 대한 불확실성은 Δt, Δz, ΔT와 식(5), (6)을 통하여 얻을 수 있다. 본 연구의 불확실성에 대한 결과는 Table 2에 요약되어 있다.

5. 결 론

국소적 준1차원 열전도모형을 사용하여, 45°로 경사진 평판에 충돌하는 고온 제트의 열전달분포를 구하였다. 축대칭 제트의 기하학적 중심으로부터 아랫방향으로 떨어진 지점의 열전달이 가장 크며, 그 열전달량은 아음속충돌제트의 약 10배 이상 증가하였다. 그러나 정체지역에서 멀리 떨어진 곳의 열전달특성은 난류벽면제트의 열전달특성과 매우 유사하였다. 불확실성 해석을 통하여, 본 연구에 의해 구해진 누셀트 수가 15% 오차 범위내에서 신뢰할 수 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

(1) Martin, H., 1977, "Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces", Advances in Heat Transfer, Academic Press, New York, Vol. 13, pp. 1~60.

(2) Foss, J.F., 1979, "Measurement in a Large-Angle Oblique Jet Impingement Flow", AIAA J., Vol. 17, pp. 801~802.

(3) Goldstein, R.J. and Franchett, M.E., 1988, "Heat Transfer From a Flat Plate to an Oblique Impinging Jet", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 110, pp. 84~90.

(4) Goldstein, R.J., Behbahani, A., 1982, "Impingement of a Circular Jet with and without Cross Flow", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 25, pp. 1377~1382.

(5) Goldstein, R.J., Behbahani, A. and Heppelmann, K. K., 1986, "Streamwise Distribution of the Recovery Factor and the Local Heat Transfer Coefficient to an Impinging Circular Air Jet", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 29, pp. 1227~1235.

(6) Sparrow, E.M. and Lovell, B.J., 1980, "Heat Transfer Characteristics of an Obliquely Impinging Circular Jet", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 102, pp. 202~209.

(7) Metzger, D.E. and Korstad, R.J., 1972, "Effect of Cross Flow on Impingement Heat Transfer", ASME J. of Eng. for Power, Vol. 94, pp. 35~42.

(8) Donaldson, C.D. and Snedecker, R.S., 1971, "A Study of Free Jet Impingement. Part 1. Mean Properties of Free and Impinging Jets", J. Fluid Mech., Vol. 45, pp. 281~319.

(9) Donaldson, C.D., Snedeker, R.S. and Maryolis, D. P., 1971, "A Study of Free Jet Impingement. Part. 2 Free Jet Turbulent Structure and Impingement Heat Transfer", J. Fluid Mech., Vol. 45, pp. 477~512.

(10) Lamont, D.J. and Hunt, B.L., 1980, "The Impingement of Underexpanded, Axisymmetric Jets on Perpendicular and Inclined Flat Plates", J. Fluid Mech., Vol. 100, pp. 471~511.

(11) Luikov, A.V., 1969, Analytical Heat Diffusion Theory, Academic Press, New York, pp. 238~239.

(12) Holmann, J.P., 1966, Experimental Methods for Engineers, McGraw-Hill, New York, pp. 37~42.