

論文

적외선 카메라를 이용한 압축성 고속 충돌 제트에서의 단열 벽면 온도 특성 연구

김법석*, 신상우*, 유만선**, 조형희*, 이장우***, 배주찬***

Measurement of Adiabatic Wall Temperature in Compressible High Speed Impinging Jets using Infra-red Camera

Beom Seok Kim*, Sang Woo Shin*, Man-Sun Yu, Hyung-Hee Cho, **, Jang-Woo Lee*** and Ju-Chan Bae***

ABSTRACT

In this paper, we report experimental investigations on measurement of adiabatic wall temperature on a flat 2-D plate of high-speed impinging jet made by circular-shape nozzle at steady state condition using infra-red camera. Experiments have been conducted for the Reynolds number of 187,000 according to the change of nozzle-to-plate distance. Dimensionless number, recovery factor, has been used to represent the measured adiabatic wall temperature. And we compared the result obtained by using infra-red camera with that obtained by using thermocouple.

초 록

본 연구에서는 적외선(Infra-Red) 카메라를 이용하여 원형 노즐을 통한 고속 제트 분사 시 수직 충돌 벽면에서 나타나는 정상상태(steady state)의 단열 벽면 온도를 2차원적으로 측정하였다. 출구 노즐 직경으로 표현된, Reynolds 수 187,000에서 노즐-평판간 거리 변화의 영향을 살펴보았으며, 측정된 단열 벽 온도는 회복 계수로 무차원화 하였다. 한편 열전대를 이용하여 측정한 단열 벽면 온도를 적외선 카메라를 이용한 측정 결과와 비교하여 검증하였다.

Key Words : High-speed impinging jet(고속 충돌 제트), Adiabatic wall temperature(단열 벽면 온도), Infra-Red camera(적외선 카메라), Thermocouple(열전대)

1. 서 론

고체 평면에 대한 고속제트의 충돌 현상은 제트 엔진배기가스의 분출 및 로켓, 미사일, 위성 등의 발사, 종이 및 Textile 건조 등의 산업분야, 기계, 전자 장비의 냉각 등에 널리 적용되고 있다.

제트 분사 시 충돌면에서는 제트에 의하여 국

소적인 온도구배가 형성되며, 야기된 온도구배는 충돌 면에 심각한 변형 및 파괴를 가져올 수 있다. 그러므로 충돌 면에서 열전달 현상을 고려한 기기 설계가 요구되며, 이에 따라 열전달 현상을 관찰, 해석하기 위한 실험적 연구가 많이 진행되어 왔다.

Lamont와 Hunt[1]는 축대칭 과소팽창 초음속 제트가 고체 평판에 충돌 시 충격파 간섭이 중요하게 작용하는 영역에 대해 실험적인 연구를 수행하였고, Gummer와 Hunt[2]는 초음속 제트가 고체 평면에 충돌 시 표면에서의 압력분포와 고체 평면에 충돌 시 표면에서의 압력분포와 충

† 2007년 1월 3일 접수 ~ 2007년 7월 4일 심사완료

* 정희원, 연세대학교 기계공학과

연락처, E-mail : kimmbs@yonsei.ac.kr

** 정희원, 과학기술부

** 정희원, 국방과학연구소

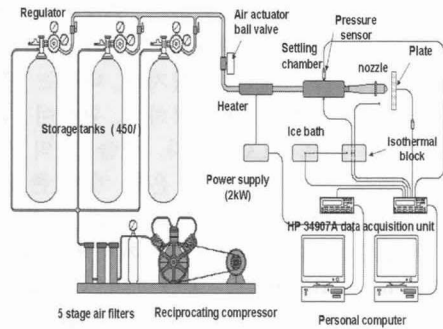


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus

격가시화를 측정하였다. 그리고 Goldstein 등[3]은 축대칭 아음속 제트가 고체 평면에 충돌 시 나타나는 온도분포 및 열전달 특성에 대해 연구하였다. 노즐 직경 대비 충돌판과의 거리(L/D)에 따른 회복 계수 분포를 측정하였고, 경계층 내에 형성되는 vortex ring이 야기하는 energy separation 현상[4]에 의해, L/D가 작은 경우 노즐 직경 대비 반경 방향 거리(R/D)≈2에서 냉각 효과에 의해 회복 계수(recovery factor)가 1보다 작아짐을 보였다.

Lytle과 Webb[5]은 저속 제트에서 제트 분사 노즐과 충돌판사이의 거리가 작을 경우에 (L/D<1) 보이는 다양한 열전달 특성에 관한 연구를 수행하였다. Pamadi와 Belov[6]는 저속 충돌 제트의 열전달 특성 중 'Inner peak'의 존재에 대해 이론적으로 규명하였다. 그리고 Kim 등[7-9]은 축대칭 과소팽창 초음속 충돌제트의 회복 계수와 표면 압력의 분포에 대한 연구를 수행하고, 충돌 면에서의 반경방향의 회복 계수 분포를 측정하였다.

하지만 이런 연구들은 대부분 충돌 판에서의 온도 측정을 위해 열전대를 사용하였고, 1차원적인 해석에 그쳤다. 실제로는 고속 충돌 제트의 영향으로 평면상에서 2차원적인 열전달 현상이 발생한다는 점에서 기존 연구의 한계점을 지적할 수 있다. 기존 연구들에서 온도 측정에 사용한 열전대는 비교적 정확한 온도 측정이 가능하다는 장점을 갖지만, 점 단위 측정에 이용되기 때문에 공간적인 온도 분포측정을 위해서는 많은 수의 열전대를 이용해야 한다는 단점이 있다. 반면 최근에 많은 분야에서 사용되는 적외선 카메라는 매우 쉽게 2차원적 온도 분포를 측정할 수 있다는 장점을 갖는다.

이에 본 연구에서는 고속 충돌 제트에 의한 단열 벽면에서의 2차원적인 온도분포 특성을 알

아보기 위해 적외선 카메라를 사용하였다. 적외선 카메라를 이용할 때 발생할 수 있는 측정 오차를 최소화하도록 장치를 구성하여 충돌판에서의 온도 분포 특성을 연구하였다. 또한 신뢰성 검증을 위하여 열전대를 이용한 실험도 병행하여 두 결과를 비교하였다.

II. 본 론

2.1 실험장치 구성

2.1.1 초음속 유동 발생장치

실험장치의 전체 모식도를 Figure 1에 제시하였다. 3단 피스톤 왕복동식 고압압축기(reciprocation high pressure compressor, MST-300)를 통해 압축된 공기는 습기와 불순물 제거를 위한 흡착식 여과기를 거친 후, 총 저장용량 450리터의 압축용기에 저장된다. 제트 분사 압력비를 조절하기 위하여 배압 조절을 위한 고압용 레귤레이터(TESCOM)를 이용하였다. 레귤레이터를 통해 감압된 공기는 3/8" 스테인리스 스틸관을 통해 노즐이 부착된 정체실(settling chamber)로 공급된다. 정체실은 스테인리스 스틸로 제작되었으며, 용량 약 5.8l에 길이와 직경은 각각 330mm와 150mm이다. 제트 분사 시 주위 공기와의 온도 차에 의한 영향을 배제시키기 위하여 제트 온도 조절을 위한 히터와 온도 측정을 위한 T-type 열전대를 정체실 내부에 설치하였다. 히터는 내경 60mm의 고압관 내부에 최대 6kw의 코일히터이며, 변압기를 이용하여 발열량을 조절할 수 있도록 하였다. 또한 정체 압력 측정을 위해 정체실 내부에 압력 측정기(Pureron, PC-302A-VR)를 설치하였다. 사용한 노즐은 곡면으로 이루어진 축소노즐(contoured convergent nozzle)로써 출구 직경은 10.0mm, 면적 수축비(area contraction ratio)는 25:1이다. Figure 1에 나타난 'plate' 부분에는 뒤에 설명할 열전대 단열 벽면 온도 측정 장치와 적외선 카메라 단열 벽면 온도 측정 장치를 각각 배치하여 실험을 수행할 수 있도록 하였다.

2.1.2 열전대 단열 벽면 온도 측정 장치

열전대를 이용한 온도 측정 장치의 구조는 다음과 같다[9]. 충돌판은 200mm × 200mm × 10mm의 베이클라이트(k=0.19W/mK)로 제작되었으며 충돌면 뒷면에는 열전도도가 각각 0.046W/mK과 0.028W/mK, 두께가 10mm와 20mm인 유리섬유와 스티로폼을 이용하여 단열

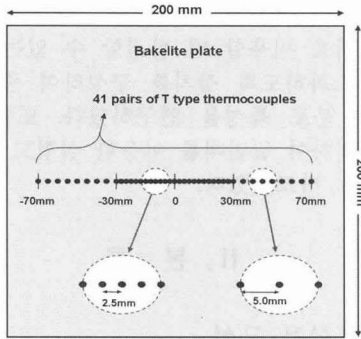


Fig. 2(a). Front view of thermocouple test plate

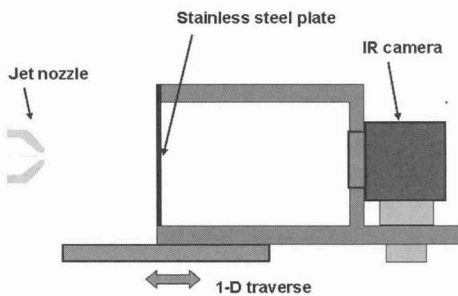


Fig. 2(b). Side view of IR-camera test section

시켰다. 충돌면에는 T-type 열전대(Omega) 41개를 일직선상에 설치하였다. 사용한 열전대는 bare-type으로써 베이클라이트에 뚫은 홀을 통해 충돌면 표면에 노출되도록 하였다. 충돌 판의 반경방향으로, 심한 온도 구배가 예상되는 충돌면 중심부터 반경 30mm 지점까지는 2.5mm간격으로, 그 바깥의 반경 70mm 지점까지는 5mm간격으로 열전대를 설치하였다. 설명한 단일 벽면 온도 측정 장치의 정면도를 Figure 2(a)에 나타내었다. 한편 축간거리 조절이 가능한 직선이송장치를 이용하여 노즐출구와 충돌면간의 거리를 정밀하게 조정할 수 있도록 하였다. 열전대의 출력 전압은 데이터획득장치(Agilent 34970A) 3대를 이용하여 스캔한 후, 개인용 컴퓨터를 통해 얻어내었다.

2.1.3 적외선 카메라 단일 벽면 온도 측정 장치

Figure 2(b)는 적외선 카메라를 이용하여 온도 측정을 하기 위한 테스트부의 모식도이다. 분사 제트에 영향을 주지 않도록 하기 위하여 충돌판의 반대쪽에 적외선 카메라를 설치한 뒤 충돌판의 배면 온도를 측정하였다. 외부 공기의 유입 및 외부로부터 방사되는 적외선의 입사에 의한

영향 등을 최소화하기 위하여 충돌판의 배면과 적외선 카메라는 상자형태로 외부와 차단시켰다. 그리고 충돌판의 배면과 상자의 내부는 적외선 반사에 의한 영향을 최소화하기 위하여 검은색 페인트(흑무광)로 도포하였다. 충돌 판의 두께가 두꺼울 경우 전면과 배면의 온도 차가 존재할 수 있으므로, 제트에 의한 변형을 견딜 수 있으면서 최대한 얇은 스테인리스 스틸 재질의 판(300mm × 315mm × 0.7mm)을 충돌면으로 사용하였다. 사용한 적외선 카메라는 JENOPTIK사의 Varioscan 3011-ST 모델로써 8~12 μ m의 장파장대역의 적외선을 감지한다. 픽셀 수는 300 × 200개이며, 30 $^{\circ}$ C의 흑체에 대한 온도 resolution은 0.03K이다.

2.2 적외선 카메라 온도 측정 장치의 검증

충돌면에 수직으로 분사되는 제트를 이용한 실험이기 때문에 충돌면의 전면부에 적외선 카메라를 설치하기가 어렵다. 그렇기 때문에 제트의 충돌에 의해 형성되는 온도 구배를 충돌판의 전면에서 직접적으로 측정할 수 없다는 문제가 발생한다. 그래서 본 실험에서는 충돌판의 후방에 적외선 카메라를 위치시켜 충돌판 배면의 온도를 측정하였다.

한편 실험에 앞서 해석적, 이론적 방법을 사용하여 적외선 카메라 온도 측정기법을 검증하였다. 우선, 충돌판 전면과 배면의 온도가 얼마나 차이를 보일지에 대해 해석하였다. 배면에서 발생하는 자연대류와 충돌판의 측면방향으로의 열확산을 동시에 고려하여 수치 해석을 수행하였다. 상용 수치 해석 코드인 Fluent를 이용한 해석 결과, 충돌판의 전면과 배면의 온도 차가 최대 0.12% 이내임을 확인하였다. 또한 충돌판 배면에서의 Biot 수를 계산하여 금속 도체에서 표면의 대류에 의한 두께방향으로의 열손실의 정도를 알아보았다[10]. 무차원 수인 Biot 수는 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$Bi = \frac{i \text{ internal conduction resistance}}{e \text{ external convection resistance}} \\ \cong \frac{L_s / k_s A}{1 / \bar{h}_s A} = \frac{\bar{h}_s L_s}{k_s} \quad (1)$$

여기서 L_s 는 충돌판의 특성 길이, k_s 는 충돌판의 열전도도, A 는 충돌판 배면의 표면적, \bar{h}_s 는 충돌판 배면에서의 평균 열전달 계수를 나타낸다. 배면에서의 자연대류만 고려한 계산 결과, Biot 수는 최대 0.0012 값을 가짐을 확인하였다.

이러한 해석 결과를 통하여 충돌판 전면과 배면의 온도는 큰 차이 없이 균일하다고 볼 수 있다.

그리고 제트 분사 시 발생할 수 있는 충돌면의 변형에 대해서도 검증하였다. 충돌 제트에 의한 스테인리스 스틸 충돌판의 변형을 미리 측정 한 결과, 중심부에서 최대 0.5mm 함입되었고, 이는 변형 각으로 환산 시 0.22°이다. 이러한 결과를 통해 실험 시 충돌판의 변형은 무시할 수 있다고 본다.

2.3 실험 조건

압축 공기를 노즐을 이용하여 분사함에 있어서 등엔트로피(isentropic) 상태에서 마하 수와 압력 비 간의 관계는 다음의 수식과 같이 나타난다.

$$P_0 = P_e \left(1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} M_D^2 \right)^{\gamma/(\gamma - 1)} \quad (2)$$

여기서 P_0 는 전압(total pressure), P_e 는 노즐 출구 압력, γ 는 공기의 비열비(=1.4), M_D 는 출구 마하 수를 나타낸다. 수식 (2)를 통해 알 수 있듯이, 제트의 마하 수는 정체실 내부의 전압을 제어함으로써 맞춰줄 수 있다. 본 실험에서 맞춰준 정체실 내부 전압은 145431Pa이다. 이러한 방법으로 $Re=187,000$ ($M_D=0.74$)으로 맞추어 실험을 수행하였다. 한편, 노즐을 통해 분사되는 제트의 온도가 주변의 공기 온도와 차이가 크게 되면 외부의 공기가 제트로 유입, 교란을 일으키는 현상이 발생한다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 정체실 내부에 설치된 코일히터를 통해 제트의 전 온도를 상온(25°C)으로 가열시킨 후 제트를 분사하였다.

열전대와 적외선 카메라를 이용한 각각의 충돌판 장치를 이용하여, 레이놀즈 수 187,000의 유동 조건에서 노즐 직경 대비 노즐과 단열 벽면까지의 거리(L/D)가 각각 2, 4, 5, 7, 10, 15인 경우의 정상상태(steady state) 단열 벽면 온도를 측정하였다. 그리고 측정된 단열 벽면 온도를 이용하여 무차원 수인 회복계수(recovery factor, r)로 나타내었다. 회복계수의 정의는 다음과 같다.

$$r = \frac{(T_{aw} - T_s)}{T_d} = 1 + \frac{(T_{aw} - T_0)}{\frac{u_j^2}{2C_p}} \quad (3)$$

여기서 T_{aw} 는 단열 벽면 온도, T_s 는 정온도(static temperature), T_d 는 동온도(dynamic temperature), T_0 는 정체실 내의 전온도, u_j 는 노즐 출구 속도, C_p 는 정압비열을 나타낸다.

2.4 실험 결과 및 토의

$Re=187,000$ 인 조건에서 노즐 직경 대비 노즐-충돌면간 거리 (L/D) 가 2, 4, 5, 7, 10, 15인 경우 적외선 카메라를 통해서 얻은 충돌판에서 $7 \times 7 \text{cm}^2$ 영역에서의 2차원적인 온도 구배 측정 결과를 Figure 3에 제시하였다. 각각의 2차원적인 측정 결과에서 A-A' 방향과 B-B' 단면 방향으로의 온도 구배를 하부와 우측에 각각 제시하였다.

Figure 4는 앞선 실험과 동일한 실험 조건에서, 충돌판 중앙부를 지나는 선상(Figure 3에서 B-B'방향)에 대하여 적외선 카메라 측정 장치로 얻은 결과와 열전대 실험 장치를 통해 얻은 결과를 비교한 것이다. 열전대와 적외선 카메라를 이용한 두 실험의 결과 그래프가 큰 차이 없이 일치하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 두 실험 결과를 통해서 L/D가 작은 경우, 충돌면에서의 에너지 박리 현상(Energy separation)에 의해 R/D=2 근처에서 온도가 떨어지는 현상을 살펴볼 수 있다. L/D가 점차 커지면서 이러한 에너지 박리 현상은 감소된다. 그리고 제트 주변 외기의 유입이 점차 증가하면서 중앙부의 회복계수가 상승하게 된다. L/D=10 이후부터는 제트의 영향이 감소됨에 따라 국소적인 변화 폭이 전체적으로 줄어드는 것을 볼 수 있다[4].

한편, Table 1에는 각각의 L/D에 대해서 열전대와 적외선 카메라를 이용해 측정된 회복 계수 간의 평균오차를 수치적으로 제시하였다. 여기서 평균 오차는 각각의 L/D에서 열전대를 통해 얻어진 결과 값과 적외선 카메라를 통해 얻어진 동일 위치상의 결과 값 차이를 평균한 값이다. 여기서 최대 평균 오차는 L/D=2에서 0.816%임을 확인하였다. Fig. 4와 Table 1에 제시한 결과를 통해 열전대 측정값과 적외선 카메라를 이용한 측정값이 큰 오차 없이 매우 잘 일치한다는 것을 알 수 있다. 이러한 두 장치를 이용한 측정 결과 비교를 통해, 기존에 주로 사용되던 열전대 측정 장치와 비교해서 적외선 카메라를 이용한 측정의 신뢰성을 확인할 수 있다.

얻어진 결과를 통해, 기존의 열전대를 통해서 살펴보기 어려운 2차원적인 온도 분포를 적외선 카메라를 이용하여 쉽게 살펴볼 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 얻어진 2차원적 결과를 통해 원하는 라인 상의 1차원적인 온도분포 결과도 동시에 얻을 수 있다. 이러한 장점을 토대로 하여, 차후 다른 Re 수의 조건에서의 단열 벽면 온도 측정을 비롯한 곡면 또는 분사 제트에 대해 경사진 면 등 2차원적인 온도분포 특성이 중요한

Table 1. Average error obtained from the experiment by IR-camera and thermocouple

L/D	평균 오차(%)	L/D	평균 오차(%)
2	0.816	4	0.381
5	0.552	7	0.352
10	0.389	15	0.236

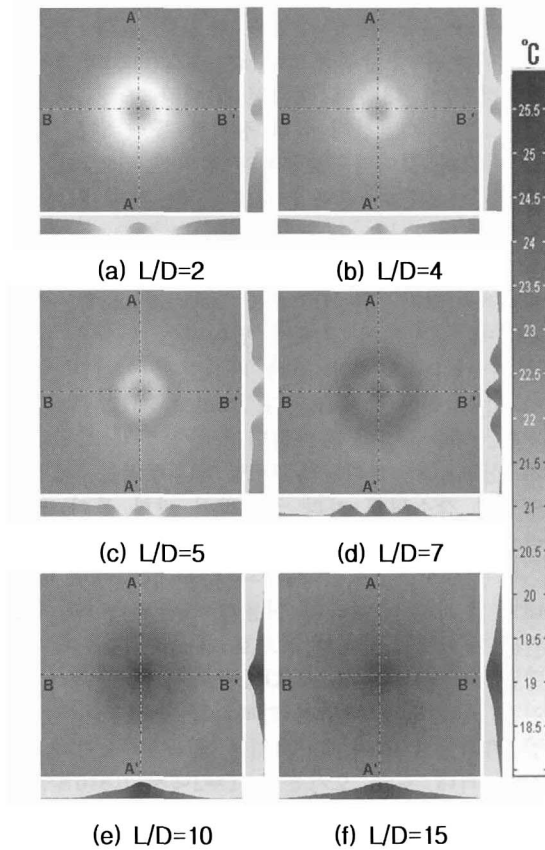


Fig. 3. Temperature distribution obtained by IR-camera for various L/D at $Re=187,000$

실험에서의 연구에 적외선 카메라를 이용할 수 있을 것이다.

III. 결 론

본 연구에서는 적외선 카메라를 이용하여 고속 제트($Re=187,000$)가 수직 단열 벽면에 충돌 시 나타나는 정상 상태 온도 분포를 $L/D=2, 4, 5, 7, 10, 15$ 에서 각각 측정하고 회복계수로 무차원화 하였다. 기존의 연구들은 충돌 제트 실험에 있어서 열전대를 이용하여 온도 측정을 수행하였다.

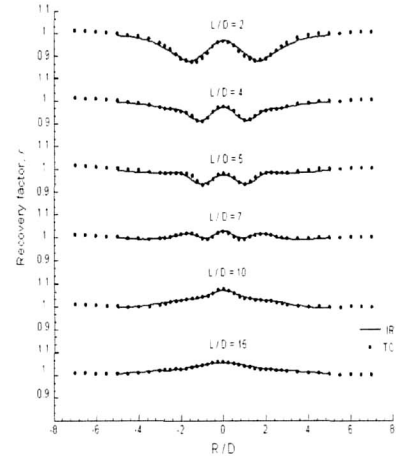


Fig. 4. Recovery factor obtained by IR-camera and thermocouple test plate for various L/D at $Re=187,000$

이번 연구에서는 열전대를 이용한 실험과 함께 적외선 카메라를 이용한 온도 측정을 수행하였고, 그 신뢰성을 평가하였다. 적외선 카메라를 이용하여 충돌판에서의 2차원적 온도 분포 결과를 제시하였고, 두 실험을 통해 얻은 회복 계수를 비교하여 최대 평균 오차 0.861%임을 확인하였다.

이번 연구를 통해 충돌제트 실험 시 적외선 카메라가 매우 유용하게 사용될 수 있음을 보여주었다. 기존의 실험 장비들과 비교하여 신뢰성의 손상 없이, 보다 쉽게 2차원적인 온도 분포 특성을 제시하였다. 이를 토대로 하여 차후 적외선 카메라를 이용하여 Re 수 변화에 따른 단열 벽면 온도 측정을 비롯한 경사면 또는 곡면 등의 다양한 형상의 충돌판에 대한 제트 분사 실험을 수행할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1) P. J. Lamont and B. L. Hunt, "The Impingement of Underexpanded, Axisymmetric Jets on Perpendicular and Inclined Flat Plates", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 100, 1980, pp. 471~511.
- 2) J. H. Gummer and B. L. Hunt, "The Impingement of a Uniform Axisymmetric, Supersonic Jet on a Perpendicular Flat Plate", *The Aeronautical Quarterly*, Vol. 22, 1971, pp. 403~420.
- 3) R. J. Goldstein, A. I. Behbahani and K. Kieger Heppelmann, "Streamwise Distribution

of the Recovery Factor and the Local Heat transfer coefficient to an Impinging Circular Air Jet", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 29, No. 8, 1986, pp. 1227~1235.

4) M. D. Fox, M. Kurosaka, L. Hedges and K. Hirano, "The Influence of Vortical Structures on the Thermal Fields of Jets", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 255, 1993, pp.447~472.

5) D. Lytle and B. W. Webb, "Air Jet Impingement Heat Transfer at Low Nozzle-plate Spacings", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 12, 1994, pp.1687~1697.

6) B. N. Pamadi and I. A. Belov, "A Note on the Heat Transfer Characteristics of Circular Impinging Jet", *International Journal of Heat and*

Mass Transfer, Vol. 23, No. 6, 1980, pp.783~787.

7) B. G. Kim, M. S. Yu and H. H. Cho, "Distribution of Recovery Temperature on a Flat Plate by Underexpanded Supersonic Impinging Jet", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 16, No. 3, 2002, pp. 425~431.

8) B. G. Kim, M. S. Yu and H. H. Cho, "Recovery Temperature Measurement of Underexpanded Sonic Jets Impinging on a Flat Plate", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 17, No. 3, 2003, pp.313~319.

9) 유만선, 김병기, 조형희, 황기영, 배주찬, "수직 축대칭 과소팽창 충돌 제트의 표면 열전달 특성 연구", *한국항공우주학회지*, 제33권 제8호, 2005, pp.84~91.

10) A. G. Mills, *Basic Heat & Mass Transfer*, 2nd Ed., Prentice Hall, New Jersey, 1999, pp. 29~34.