

論文

과소팽창된 충돌제트에 의한 단열벽면 온도 측정

유만선*, 이장우*, 김병기**, 조형희*, 황기영***, 배주찬***

Measurement of Adiabatic Wall Temperature on an Impinging Surface by Under-expanded Jet

Man-Sun Yu*, Jang-Woo Lee*, Byung-Gi Kim**, Hyung-Hee Cho*,
Ki-Young Hwang*** and Ju-Chan Bae***

ABSTRACT

An experimental investigation for impingement of under-expanded, axisymmetric jets on a flat plate has been conducted, and the surface pressure, the adiabatic wall temperature distributions on the plate have been measured in detail. For the explanation on the wall temperature distributions, the total temperature distributions along a free jet have also been measured with total temperature probes. In this study, the under-expansion ratio and the nozzle-to-plate distance have been considered as experimental parameters. Depending on nozzle-to-plate distances, different distributions of adiabatic wall temperature are shown by the energy separation at a jet edge and a impinged surface. Also, the recovery factor on a stagnation point decreases significantly due to the isolation of fluid particles in a central region.

초 록

평판 표면에 충돌하는 축대칭, 과소팽창 제트에 대한 실험적 연구가 수행되어졌으며, 벽압력 및 단열 벽온도 분포가 자세히 측정되어졌다. 벽온도 분포 결과에 대한 설명을 위하여 자유제트 내에서의 전온도 값을 전온도 탐침을 사용하여 측정하였다. 본 연구에서 실험 변수로는 과소팽창비와 노즐-평판간 거리가 고려되었다. 노즐-평판 간 거리에 따라 제트 경계 및 충돌면에서의 에너지 박리에 의해 서로 다른 형태의 단열 벽온도 분포가 나타났으며, 과소팽창비가 큰 경우, 중심영역에서의 저온 유체 입자의 고립효과로 정체점의 회복계수가 크게 낮아지는 현상 또한 관찰되었다.

Key Words : Under-expanded jet(과소팽창 제트), Recovery factor(회복계수), Energy separation(에너지 분리)

1. 서 론

과소팽창 제트의 고체벽면 충돌 현상은 로켓

이나 미사일의 발사, V/STOL(Vertical/Short Take Off and Landing) 항공기의 이착륙, 제트 엔진 배기가스의 분출, 로켓모터의 추력방향 제어 시스템(Thrust Vector Control system, TVC) 등과 같은 다양한 상황에서 관찰되어지고 있다. 또한, 과소팽창 제트는 아음속의 충돌제트와 달리 barrel shock, plate shock, reflected shock 등의 여러 충격파들이 서로 간섭하고, 제트 경계 및 plate shock 후방의 음속선 근방의 shear

† 2004년 12월 13일 접수 ~ 2005년 2월 11일 심사완료

* 정회원, 연세대학교 기계공학과

연락처, E-mail : msyoo@yonsei.ac.kr

** 정회원, LG전선

*** 정회원, 국방과학연구소

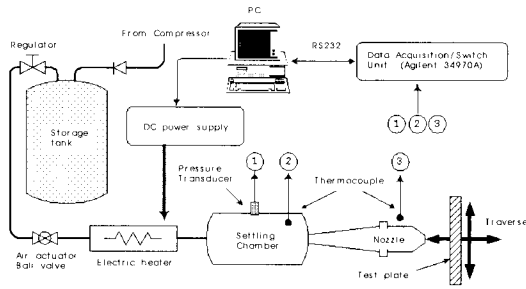


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus

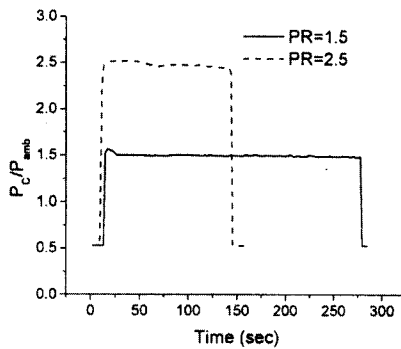


Fig. 2. Under-expansion ratio during a test

layer 및 충돌면 중심부에 나타나는 stagnation bubble과 같은 유동의 불안정성이 존재하는 매우 복잡한 유동으로서 기초현상 연구의 대상으로도 의미가 있다.

이와 관련된 연구 결과를 살펴보면 대부분 충돌 표면의 압력 분포 측정이나 광학법을 이용한 유동장내 충격파 구조 가시화와 같은 실험에 의한 방법이 주를 이루었으며[1-5], 충돌면으로의 열전달에 대한 연구는 대다수가 음속 이하의 범위로 한정되어져 있다[6]. 과소팽창 제트에 대한 열전달 특성 연구로는 Gardon과 Cobonpue[7]에 의한 충돌면 정체점에서의 노즐 평판간 거리에 따른 주기적인 열전달을 변화측정과, Messersmith등[8,9]에 의해 측정된 TSP(Thermal Sensitive Paint)를 이용한 충돌면 단열 벽온도 및 열유속 분포가 있다. 그러나, 이러한 결과들의 경우, 충돌면에서의 열전달 특성이 급변하는 중심 근방 영역에서의 정밀도가 낮고, 해당 영역에서 나타나는 현상에 대한 설명이 충분치 못하다. 중심영역에서 나타나는 단열 벽온도 분포의 특이성에 대한 의미있는 설명은 1990년대 Fox와 Kurosaka 등[10,11]에 의해 제시된 energy separation 개념이 가장 타당하게 여겨지고 있는

며, 그들은 제트 경계 및 충돌면에서 발생하는 와류 거동 및 제트내의 충격파와 와류간의 상호 거동 기재를 실험적, 수학적, 수치적으로 밝혀내어 이러한 현상을 설명하고 있다.

본 연구에서는 고체 표면에 충돌하는 과소팽창 제트에 대한 기초정보의 획득을 목표로 확대칭, 수직 과소팽창 충돌제트에 대한 실험을 수행하여 보았다. 실험 중에는 충돌제트에 의한 단열 벽온도 분포를 측정하였으며, 벽온도 분포의 설명을 뒷받침하기 위하여 자유제트 상에서의 전 온도 및 압력 분포 측정, 충격파 구조의 가시화 등도 수행하였다. 각각의 측정은 서로 다른 과소팽창비 및 노즐 평판간 거리를 실험 변수로 삼아 이루어 졌으며, 그 결과들을 서로 비교하였다.

II. 본 론

2.1 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 사용된 노즐은 곡면으로 이루어진 축소부 노즐(contoured sonic nozzle)이며, 출구(노즐목) 직경은 10.0mm이다. Figure 1은 실험장치의 개략도이다. 공기는 수분과 불순물을 제거하기 위하여 흡착식 필터를 거쳐서 총용량 690리터의 압축용기에 약 150기압으로 저장되고, 압력 조절기를 통해 감압하여 노즐이 부착된 정체실(settling chamber)로 공급된다. 정체실의 압력은 실험인자인 과소팽창비에 따라 압력 조절기의 조정을 통하여 다르게 하였으며, 과소팽창비 1.5의 경우 약 2.9 bar, 2.5의 경우, 약 4.8 bar의 압력을 유지시켰다. Figure 2는 과소팽창비 1.5에 있어 실험시간 동안의 과소팽창비 변화를 보여주고 있다. Figure 2에 나타난 바와 같이 시험 초기 정체실 가압에 의한 수초간의 압력 섭동을 제외하고는 비교적 일정한 값을 유지하는 것을 볼 수 있다. 정상 상태의 실험은 과소팽창비에 따라 약 2분에서 4분 사이로 진행되었으며, 이는 충돌면에서의 높은 열전달 특성으로 인하여 표면온도의 정상상태까지 충분한 시간이 되었다. 배출가스의 온도가 실험 시간에 따라 변화하는 것을 방지하기 위하여 압축용기로부터 공급되는 공기는 전기히터로 가열되어 공기의 온도가 주위의 온도와 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 이내의 차이를 갖도록 실시간으로 조절하였다. 단열 벽온도 측정을 위한 충돌판은 배면이 공기충(Honey-comb), 유리섬유와 아크릴로 단열된 베이클라이트판에 T-type 열전대를 일렬로 설치하였으며, 측정밀도를 높이기 위하여 충돌시 정체점으로 예상되는 기준점으로부터 반경방향으로 $\pm 30\text{mm}$ 까지는 2.5mm 간격으

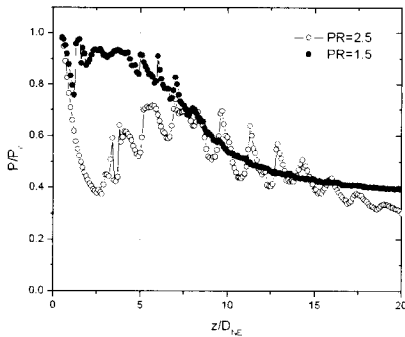
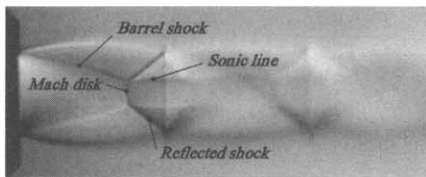


Fig. 3. Pitot pressure survey along the jet center-line



(a) PR=1.5



(b) PR=2.5

Fig. 4. Shadowgraph pictures for shock structure

로 $\pm 30\text{mm}$ 부터 $\pm 70\text{mm}$ 까지는 5mm 간격으로 설치하였다. 자유제트 내에서의 전온도 측정의 경우, 고속효과에 의해 열전대 탐침의 회복계수가 1이 되지 않는 것을 막기 위하여 덮개(shield)가 있는 K-type 열전대를 자동 이송장치에 장착하여 이송시켜가며 측정하였다. 압력 측정의 경우, 내경 약 0.4mm의 STS관을 시작으로 직경을 점차 키워가며 최종적으로 압력센서(Druck pressure transducer, PMP4070)에 연결시킨 뒤, 이를 자동 이송장치에 연결시켜 제트의 중심선을 따라 후방으로 이동시키며 압력을 측정하였다. 압력센서와 열전대로부터의 출력전압은 3개의 16채널 멀티플렉서 모듈이 장착된 Agilent 34970A 데이터 획득 장치를 이용하여 스캔하여 획득하고 PC에 저장하였다. 이 밖에 노즐과 충돌면 사이에 존재하는 제트내 충격과 구조를 가시화하기 위해서 음영법(Shadowgraph method)을 사용하였다.

실험은 대기압에 대한 노즐 출구의 압력비로 정의되는 과소팽창비를 각각 1.5, 2.5로 바꾸어 보았고, 노즐출구 직경으로 무차원화한 노즐-충돌면간 거리를 0.5에서 20까지 변화시켜가며 수행되었다.

2.2 결과 및 토의

2.2.1 자유제트의 가시화 및 압력, 전온도

Figure 3는 과소팽창비 1.5, 2.5인 경우에 대하여 노즐 출구 위치로부터 후방으로 제트 중심선을 따라 이동하면서 피토압을 측정한 결과이며 Fig. 4은 각 경우에 대하여 충격파 구조를 가시화한 결과이다. Figure 3에서 가로축은 노즐 출구 직경(D_{NE})으로 무차원화한 노즐-피토관 거리를 나타내며, 세로축은 챔버압력(P_0)로 무차원화한 피토 압력을 나타내고 있다. 노즐출구로부터 가까운 구간에서 피토관 측정압은 거리에 따라 감소하고 있는데, 이는 노즐 출구로부터 팽창 가속되어 초음속화된 공기가 피토관 전방에 충격파를 형성, 압력 손실을 일으킨 뒤 측정되어지기 때문이며, 노즐 출구로부터 떨어진 위치일수록 팽창 가속 효과도 커짐에 따라 총압 손실 또한 커지기 때문이다. 또한, 팽창비가 큰 경우, 노즐 출구에서의 팽창 가속 효과가 팽창비가 낮은 경우에 비하여 크게 나타나기 때문에 피토관 전방에서의 총압 손실량 또한 크게 나타나고 이로 인하여 Fig. 3에 나타난 바와 같이 팽창비 2.5인 경우가 팽창비 1.5인 경우에 비하여 피토관 측정압이 같은 위치에서도 더욱 많이 떨어지게 된다.

그러나, 피토관이 자유제트에서 자연적으로 생성되는 마하디스크의 위치를 지난 경우($z/D_{NE} \sim 1.24$: PR=1.5, $z/D_{NE} \sim 2.48$: PR=2.5), 마하디스크 후방에 아음속 영역의 존재로 인하여 총압손실은 더 이상 발생하지 않고, 오히려 마하디스크 외부에 존재하여 배럴충격파 및 반사충격파 등과 같은 경사충격파를 통과한 가스의 중심으로의 모멘텀 확산에 의하여 총압이 상승되는 결과를 보인다. 또한, Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 과소팽창비가 낮은 경우에는 이러한 총압상승이 급격하게 발생하고 있으나 팽창비가 높은 경우에 이러한 총압회복은 상대적으로 천천히 나타나고 있다. 이는 Fig. 4에 보이는 바와 같이 팽창비가 큰 경우에 있어 마하디스크의 크기 즉, 중심영역에서의 아음속 영역이 상대적으로 크게 나타나기 때문에 외부가스의 확산도 천천히 이루어지기 때문으로 볼 수 있다. 이러한 압력 회복 후에도 후방으로 감에 따라 피토관 측정압은 증감을 반복하며 점차 대기압으로 떨어지고 있는데, 이는

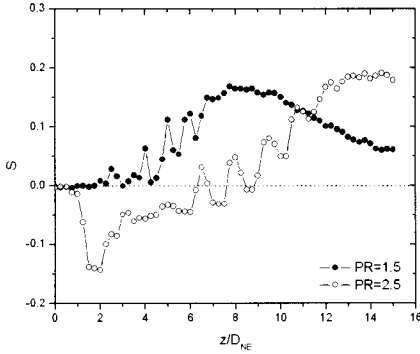


Fig. 5. Energy separation factor along the jet centerline

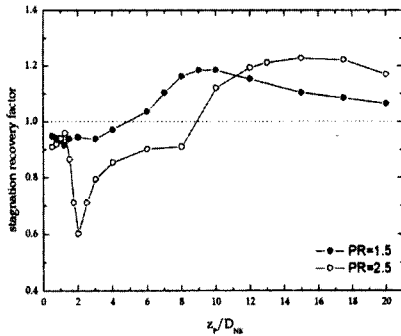


Fig. 6. Recovery factor on stagnation point of the impinging plate

앞서 설명했던 총압 손실 및 회복이 과소팽창 자유제트내의 충격과 구조를 따라 반복되고, 전체적으로 외기의 유입에 의하여 후방으로 갈수록 그 평균값은 떨어지기 때문이다.

Figure 5는 자유제트 중심선을 따라 z/D_{NE} 를 0부터 15까지 이동시켜가며 측정된 전온도값을 나타내며 Seo등[12]으로부터 제시된 아래와 같은 식을 이용, energy separation factor 값으로 계산하여 나타내었다.

$$S = \frac{T_t - T_d^e}{T_d^e} \quad (1)$$

이 때, T_t , T_d^e 는 각각 노즐 출구에서의 가스 전온도 및 동적 온도를 나타낸다.

전온도 탐침의 경우, 덮개 전방에서 유동을 충분히 감속하여 정체되도록 설계하였으므로 S가 양이나 음의 값을 갖는다는 것은 해당 위치에서 실제로 높거나 낮은 에너지 값을 지닌 유체입자들이 탐침내로 들어오고 있다는 것을 의미한다. 팽창비가 낮은 경우, 작은 노즐-탐침간 거리에서

S는 0의 값을 유지하다가 점차 상승하여 z/D_{NE} 약 8의 위치에서 최대값을 가진 뒤에 단조 감소하고 있다. 이러한 현상은 팽창비가 큰 경우에도 나타나는데 z/D_{NE} 약 2부터 14정도까지 전체적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 과거 Fox 등[10]의 연구 결과로부터 알려진 바와 같이 제트 경계에서 에너지 박리(energy separation)현상에 의하여 전온도가 높아진 유체입자가 점차 제트 중심으로 확산되면서 나타나는 현상으로 이해할 수 있다. 이와는 별도로 팽창비가 큰 경우 z/D_{NE} 가 0과 2사이인 경우에 S값은 급격히 감소하고 있는데 이는 와류에 의해 진동하는 배럴 충격파 면에서 에너지 박리에 의해 전온도가 낮아진 유체입자들이 제트 중심에 영향을 주기 때문으로 알려져 있다[11]. 또한, 팽창비에 관계없이 나타난 국부적인 S값의 진동현상은 자유제트의 반복적인 충격파 구조와 상관이 있다고 판단된다.

2.2.2 충돌면에서의 단일 벽온도

충돌면에서의 단일 벽온도 분포는 다음과 같은 회복계수로 환산되어 표현되었다.

$$r = \frac{T_{aw} - T_s^e}{T_d^e} = 1 + \frac{T_{aw} - T_t^e}{T_d^e} \quad (2)$$

이 때, T_{aw} , T_s^e 는 각각 단일벽온도 및 노즐 출구에서의 정온도를 의미한다.

Figure 6는 충돌면상에 정체점에서의 회복계수 값을 노즐-평판간 거리에 따라 도시한 것이다. 대체적인 경향은 자유제트의 전온도 분포 경향과 유사하게 나타나고 있으나, 노즐-평판간 거리가 가까운 거리에서 평판내 환형방향으로의 열전도에 의한 에너지 손실 영향으로 자유제트와는 달리 정체점에서 완전회복($S=0/r=1$)이 이루어지지 않고 약간 낮은 값을 지니는 것을 알 수 있다. 또한, 자유제트 온도측정에서 나타나던 국부적인 전온도 진동현상은 관찰되어지지 않고 있는데 이는 충돌면의 존재로 인하여 충돌면 전방에서 형성되는 충격파 구조가 중심영역에서의 유동섭임을 증가시켜 작은 거리 변화에서의 국부적인 전온도 진동특성을 약화시키기 때문으로 생각된다.

두 팽창비에 대하여 특정 노즐-평판간 거리에서 반경방향으로의 회복계수 분포가 Fig. 7에 도시되어져 있다. Figure 7에서 가로축은 유동 정체점인 0을 기준으로 정체점으로부터의 상대 위치를, 세로축들은 회복 계수를 나타내고 있다. 팽창비가 낮은 경우, $0.5 \leq z_p/D_{NE} \leq 4.0$ 와 같이 노즐-평판간 거리가 작을 때 충돌면상의 회복계수 분포는 'W'형태를 그리고 있다. 이와 같은 분포

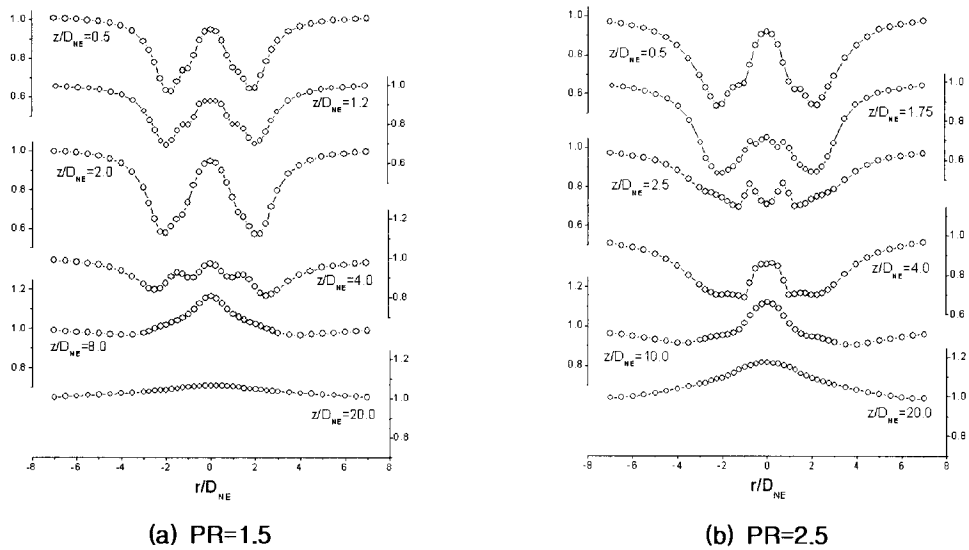


Fig. 7. Radial distribution of recovery factor on the impinging plate

는 자유제트의 경계에서 발생된 주와류(Primary vortex)가 충돌면 근방에 접근함에 따라 벽근방의 가스에 이차와류(Secondary vortex)를 발생시켜 나타나는 현상으로 알려져 있다[10]. 그러나, 노즐-평판간 거리가 멀어지게 되면($z/D_{NE}=8.0, 20.0$), 주와류에 의한 이차와류의 여기현상은 사라지게 되고, 자유제트의 주와류에 의해 에너지 박리(Energy separation)되어 높은 전온도를 지닌 유체입자가 충돌면 중심영역에 영향을 줌으로써 Fig. 7과 같은 'A'형태의 회복계수 분포를 보인다. 또한, 작은 노즐-평판간 거리인 경우, r/D_{NE} 이 약 ± 1 인 영역에서는 비록 노즐로부터 위치마다의 크기 차이가 있기는 하나 회복계수 형태가 부분적으로 주름져(wiggled) 나타나고 있다. 이것은 앞서 Fox등[11]에 의하여 제시된 제트내의 충격파-와류 상호작용에 의한 에너지 박리로 설명할 수 있다고 생각된다. 즉, 배럴 충격파 면에서 에너지 박리되어 저온화된 유체 입자들이 해당 영역에 충돌, 표면 온도에 영향을 주는 것으로 해석할 수 있을 것이다. 팽창비가 큰 경우(Fig. 7(b)), 대체적인 경향은 작은 팽창비의 경우와 유사하게 나타나고 있으나, z/D_{NE} 가 1.75, 2.5 그리고 4.0과 같은 위치에서는 정체점을 포함한 중심영역에서의 회복계수가 크게 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 배럴 충격파 면에서 에너지 박리된 저온 유체 입자들이 중심부로 전파된 뒤, 과소팽창비가 큰 경우에 충돌면 중심영역에 발생하는 'stagnation bubble'에 의해 고립되어 나타나는 것으로 생각된다. 노즐-평판간 거리가 커짐

에 따라, 충격파 진동에 의한 에너지 박리 현상은 사라지게 되며 회복계수는 팽창비가 작은 경우와 동일한 형태로 'A'형태의 분포를 그리며 점차 1의 값에 다가가게 된다.

III. 결 론

과소팽창 충돌제트에 의해 나타나는 표면부에서의 단일 벽온도 분포를 측정하였으며, 결과의 해석을 위하여 자유제트에 대한 압력 및 온도 측정 그리고 충격파 구조에 대한 가시화도 수행하였다. 실험 결과, 제트 경계에서의 주와류 및 충돌면상에서 발생하는 이차와류 그리고 주와류와 제트내 충격파 간의 상호작용에 의한 에너지 박리 효과를 관찰할 수 있었으며, 팽창비가 큰 경우, 중심영역에서 저온 유체 입자의 고립효과로 인하여 정체점의 회복계수가 크게 낮아지는 현상 또한 관찰하였다. 이러한 결과는 향후 추가적인 실험을 통해 정량화되어 고속 충돌 제트에 의한 가열/냉각 시스템 설계에 중요한 자료로 사용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 과학 기술부(National Research Laboratory Program) 및 국방과학연구소(ADD 기초연구과제)로부터의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) G. T. Kalghatgi and B. L. Hunt, "The Occurrence of Stagnation Bubbles in Supersonic Impingement Flows", *The Aeronautical Quarterly*, Vol. 27, No. 3, 1976, pp. 169-185.
- 2) I. P. Ginzburg, B. G. Semiletchenko, V. S. Terpigorev and V. N. Uskov,, "Some Singularities of Supersonic Underexpanded Jet Interaction with a Plane Obstacle", *Journal of Engineering Physics*, Vol. 19, 1973, pp. 1081-1084.
- 3) O. I. Gubanova, V. V. Lucev and L. N. Plastina, "Central Breakaway Zone with Interaction between a Supersonic Underexpanded Jet and a Barrier", *Fluid Dynamics*, Vol. 6, 1973, pp. 298-301.
- 4) J. C. Carling and B. L. Hunt, "The Near Wall Jet of a Normally Impinging, Uniform, Axisymmetric, Supersonic Jet", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 66, Part 1, 1974, pp. 159-176.
- 5) 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, Part 3, 1980, pp. 471-511.
- 6) C. D. Donaldson, R. S. Snedeker and D. P. Margolis, "A Study of Free Jet Impingement Part 2. Free Jet Turbulent Structure and Impingement Heat Transfer", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 45, Part 3, 1971, pp. 477-512.
- 7) R. Gardon and J. Cobonpue, 1962, "Heat Transfer between a Flat Plate and Jets of Air Impinging on It", *International Developments in Heat Transfer*, pp. 454-460.
- 8) N. Messersmith and S. Murthy, "Gas Dynamics and Heat Transfer from Impinging Underexpanded Jets", *AIAA/DGLR 5th International Aerospace Planes and Hypersonics Technologies Conference*, AIAA-93-5018, 1993.
- 9) J. G. Love, M. T. Sturman, N. L. Messer-smith, C. M. Ehresman and S. N. B. Murthy, "Experimental Investigations of the Heat Transfer Characteristics of Impinging Jets", *32nd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA-94-0262, 1994.
- 10) 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.
- 11) M. D. Fox, M. Kurosaka, "Supersonic Cooling by Shock-vortex Interaction", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 308, 1996, pp. 363-379.
- 12) W. S. Seol and R. J. Goldstein, "Energy Separation in a Jet Flow", *Transactions of the ASME*, vol. 119, 1997, pp. 74-82.