

## 論文

## 수직 축대칭 과소팽창 충돌 제트의 표면 열전달 특성 연구

유만선\*, 김병기\*\*, 조형희\*, 황기영\*\*\*, 배주찬\*\*\*

## A Study on the heat transfer characteristics of a normal axisymmetric under-expanded impinging jet on a surface

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

## ABSTRACT

An experimental investigation has been carried out to examine heat-transfer characteristics of an axisymmetric, under-expanded, sonic jet impinging on a flat plate and the local measurement of surface pressures and heat transfer coefficients on a plate have been achieved together with a visualization test of shock structure in a jet. Heat transfer coefficients on a plate have been found to be changed significantly depending on the under-expansion ratio as much as the nozzle-to-plate distance. These phenomena could be explained by the wall pressure measurement and the shock visualization.

## 초 록

축대칭 과소팽창 수직 충돌제트에 의한 표면 열전달 특성에 대하여 실험적 연구가 진행되었다. 초음속 유동장 내부의 충격파 구조 가시화와 함께 표면에서의 압력분포 및 열전달 계수가 측정되어졌다. 표면 열전달 계수는 노즐-충돌면간 거리와 과소 팽창비에 따라서 그 경향에 차이를 보였다. 이러한 현상은 벽압력 및 충격파 가시화에 대한 결과로부터 설명할 수 있었다.

**Key Words** : Under-expanded jet(과소팽창 제트), heat transfer coefficient(열전달 계수), shock structure(충격파 구조)

## 1. 서 론

고체 표면에 충돌하는 과소팽창 제트의 경우, 공학적 응용범위에 있어 여러 곳에서 발견되어진다. 그 중에는, 제트엔진 분사 충돌, 수직/단거리 이착륙기의 이착륙 그리고 고체 로켓 엔진의 추력 벡터 제어 장치 표면으로의 연소가스 충돌과

같은 것들이 있다. 동적 에너지는 열적 에너지로 변화하기 때문에 배출 화염과 같은 고온, 고속의 유동이 충돌할 때, 표면은 고온가스에 의한 열부하와 함께 공기역학적 열부하를 동시에 받게 된다. 많은 연구자들에 의해 수행된 포괄적인 연구를 통하여 몇몇 흥미롭고 복잡한 현상들은 이미 우리에게 밝혀졌으나 아직 만족스러운 수준은 아니다. 과소팽창 충돌 제트와 관련한 기존의 연구 대부분은 기본적인 유동 구조의 특성에 대하여 집중되어 졌으며, 이를 통해, 유동내부의 복잡한 충격파 구조와 충격파 경계층 간의 상호 작용 등이 슐리렌(Schlieren method)이나 shadowgraph method을 통한 가시화 결과 그리고 여타 이론적 예측치와의 비교를 통하여 연구되고 밝혀졌다

† 2004년 12월 17일 접수 ~ 2005년 6월 17일 심사완료

\* 정희원, 연세대학교 기계공학과

연락처자, E-mail : msyoo@yonsei.ac.kr

서울시 서대문구 신촌동 134번지

\*\* LG전선 (LG Cable LTd.)

\*\*\* 국방과학연구소

[1-5]. 또한, 대상 표면상의 압력 분포 측정은 정체점 근방에서 발생하는 'stagnation bubble'이라는 흥미로운 현상등을 보여주었다[1-4]. 1990년대 이래로 초음속 충돌제트의 유동장을 수치적으로 모사해보려는 여러 시도가 있어왔는데 유동 구조와 관련한 이러한 수많은 연구에도 불구하고, 과소팽창 충돌제트에 의한 표면 열전달과 관련한 연구는 현재까지 거의 전무한 상태이다.

본 연구의 목적은 평판 상에 충돌하는 과소팽창 충돌제트에 대한 기본적인 열전달 정보를 구하는 것이다. 이러한 이유로 축대칭 과소팽창 음속제트에 대한 열전달 특성의 실험적 연구가 수행되었다. 표면상에서의 국부적인 대류 열전달 계수 분포를 구하였으며, 부가적으로 국부 압력 분포와 shadowgraph method를 통한 유동장내부의 충격파 구조 가시화를 수행하여 열전달 결과 해석에 사용하였다. 실험 인자로서 다음의 두 가지가 고려되어졌다. 첫째로 대기 압력 대 노즐 출구 압력 비로 정의 되는 과소팽창 비가 있겠다. 이 경우, 작은 과소팽창비 1.5와 큰 과소팽창비 3.5의 두 경우에 대하여 실험이 수행되어졌다. 또 다른 인자로서 노즐-충돌면간 거리를 고려하였다. 기본적으로 노즐-충돌면간 거리는 첫 번째 충격파 셀 내에 위치한 작은 노즐-충돌면간 거리영역 내에서 정하여 졌으며 긴 노즐-충돌면간 거리에 대하여서도 실험이 수행되었다. 본 연구의 결과는 평판상에 충돌하는 과소팽창 제트에 의한 표면 열전달 특성의 알려지지 않은 특성들을 이해하는 데에 기초적인 정보를 제공할 수 있으며, 향후 수치적 모델을 검증하는데 있어서도 유용하게 사용될 수 있을 것이라 생각한다.

## II. 본 론

### 2.1 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험 장치의 개략도이다. 공기는 왕복동식 압축기에 의해서 최대 150kgf/cm<sup>2</sup>까지 압축된 뒤에 제습을 위하여 7단계의 공기 필터를 통과하고 6개의 고압탱크에 저장된다. 고압탱크의 총 저장용량은 690 리터이다. 실험 시작시, 압축된 공기는 저장 탱크로부터 배압을 조절할 수 있는 고압용 압력조절기(Yamato sangyo, YR-5062)를 지나 유동의 안정성과 균일성 확보를 위하여 정체실로 공급된다. 제트가 분출되는 노즐은 정체실과 연결되어 있다. 이 후, 정체실에 감속되어 머물던 압축공기는 노즐을 통하여 가속되어 공기 중으로 분출된다.

또한, 공급되어지는 공기는 저장 탱크와 정체실 사이에 위치한 전기 히터를 통하여 가열되며 대기 중의 공기 유입에 의한 영향을 배제하기 위한 목적으로 팽창제트의 전온도를 대기 온도와 ±0.5K내로 유지하였다.

열전달 측정을 위한 시편은 가열 박막(stainless steel foil), 단열층 그리고 열전대로 이루어져 있다. Fig. 2는 테스트 판의 개략도를 보여주고 있다. 스테인리스 스틸 가열 포일은 두께가 25.4×10<sup>-3</sup>mm의 두께를 가지며, 양면테이프로 3mm의 두께에 해당하는 베이클라이트 판에 부착되어졌다. 베이클라이트는 단열성이 좋은( $k_{bakelite} = 1.4W/m-K$ ) 합성수지의 일종으로 페놀과 포름알데히드의 화합물로 알려져 있다. 가열면의 면적은 0.0354m<sup>2</sup>이다. 전기적인 파워가 공급될 때, 가열 포일상에는 등 열유속조건이 부여되어진다. 표면에 공급되는 전기적인 파워를 결정하기 위하여, 가열 포일에서의 전압 강하량이 실험중에 측

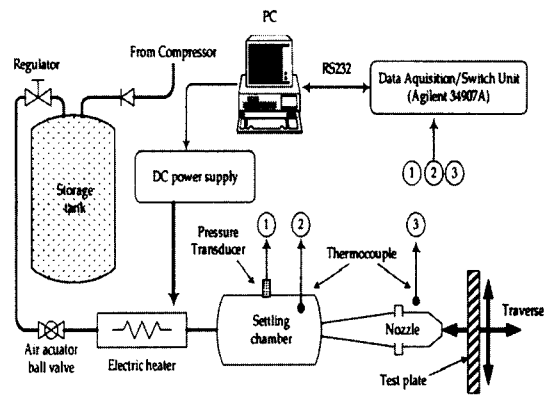


Fig. 1. 실험장치의 개략도

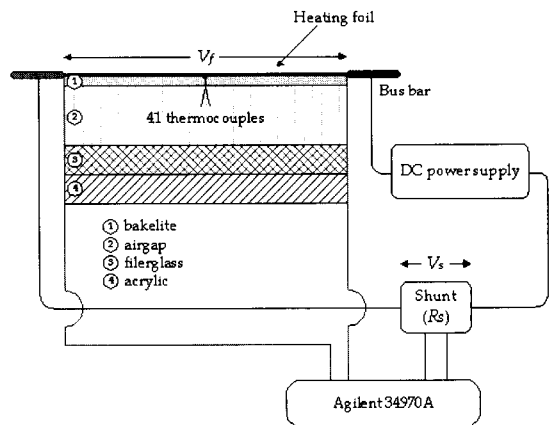


Fig. 2. 열전달 실험용 테스트판 개략도

정되어진다. 판의 배면은 공기층, 유리섬유와 아크릴로 단열되어졌다. 판의 정면에는 총 41개의 T 타입(copper-constantan) 열전대가 설치되었으며, 온도의 큰 변화가 예상되는 중심으로부터 반경 30mm내에서는 2.5mm 간격으로 그 외의 영역에서는 5mm간격으로 배치하였다. 중심 근방에 2개의 압력탭을 가진 또 다른 판이 표면 압력 측정을 위하여 사용되었다. 홀의 크기는 직경 0.8mm이며 두 압력탭은 20mm간격으로 떨어져 있다. 압력은 각 압력탭과 연결된 압력 센서(Druck pressure transducer, PMP4070)에 의해 측정되어졌다. 높은 공간 분해능을 얻기 위해서 압력탭을 1mm간격으로 측방향으로 이송시키며 압력을 측정하였으며, 각 위치에서 3번씩 압력을 대표하는 전압신호를 받아들여 평균하여 저장하였다.

테스트 판은 스텝모터(Oriental Motors, PK596NA)에 의해 구동되는 2축 선형 이송 시스템(Samik LMS, SAR1110T-200/400)에 고정되었다. 노즐 측 방향으로의 이송길이는 400mm이며, 축에 수직방향으로는 200mm이다. 각 방향으로의 이송 정밀도는 0.02mm이기 때문에 실험중에 노즐 평판 거리와 압력탭의 반경방향 위치에 대한 정확한 조정이 가능하게 되었다.

열전대와 압력센서로부터의 출력신호들은 데이터 신호 획득 장치(Agilent 34970A data acquisition/switch units)를 통해 획득되어져 개인용 컴퓨터에 저장되어졌다. 제트의 유동장내에서의 충격파 구조를 가시화하기 위하여 shadowgraph method이 사용되어졌다. 30W의 연속 광원과 두 개의 직경 100mm 볼록렌즈를 이용한 전형적인 shadowgraph 장비가 적용되었다. 이러한 shadowgraph 시스템의 개략도가 Fig. 3에 나타나 있다. 평행광이 광원으로부터 볼록렌즈를 지나 형성되어지며, 이것이 노즐 출구 근방에서의 유동장을 통과하게 된다. 유동장의 광학 이미지는 디지털 카메라(Nikon, Coolpix 900)을 사용하여 촬영되어졌으며 셔터 속도는 1/500초이다.

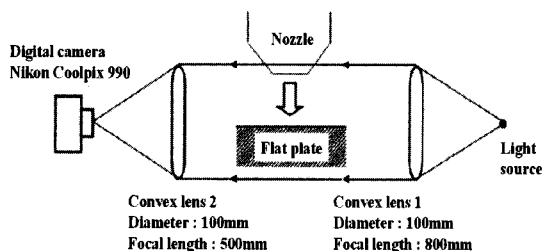


Fig. 3. Shadowgraph method 장치 개략도

충돌면에서의 국부 열전달 계수를 측정하기 위한 실험은 크게 두 단계로 구분되어진다. 우선, 가열 포일에 전기가 가해지지 않는 즉, 벽면의 열유속이 없는 단열조건에서의 표면 온도분포가 측정되어진다. 이것은 표면에서의 단열 벽온도 분포  $T_{aw}$ 를 제공한다.

두 번째로, 열유속이 없는 경우와 같은 실험 조건에서, 가열 포일에 일정한 전류를 가해주면서 표면 온도분포를 측정한다. 두 경우 모두 열유동장이 정상상태에 이르면 30초간 측정된 결과를 평균화해서 결과를 도출하였다. 대부분의 경우, 정상상태는 발사 뒤 약 4분 뒤에 이르렀다. 국부 열유속,  $q_q$ 는 가열 포일내에서 생성된 평균 전기 파워와 같다. 이러한 열유속은 테스트 판 배면으로의 열전도 및 가열 포일상에서의 복사효과 등에 의해서  $q_q$ 만큼 수정이 필요하다.

$$q = q_q - q_r \quad (1)$$

$$q_q = \frac{IV_f}{A_f} = \frac{V_s V_f}{R_s A_f} \quad (2)$$

이 때,  $I$ 는 가열판을 통과하는 전기의 전류값이고  $V_f$ ,  $V_s$ ,  $A_f$ 는 가열 포일과 셉트를 통과하는 전기의 전압강하량 그리고 가열면의 면적을 각각 나타낸다.

마지막으로 국부 열전달 계수는 다음의 단순한 방정식으로 정의되어지며, Nusselt 수로 무차원화하여 표현한다.

$$h = \frac{q}{T_w - T_{aw}} \quad (3)$$

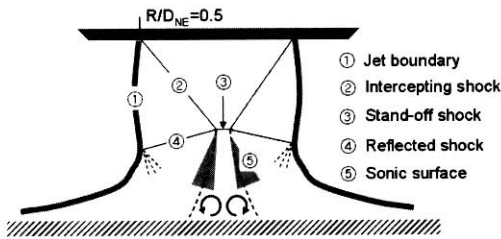
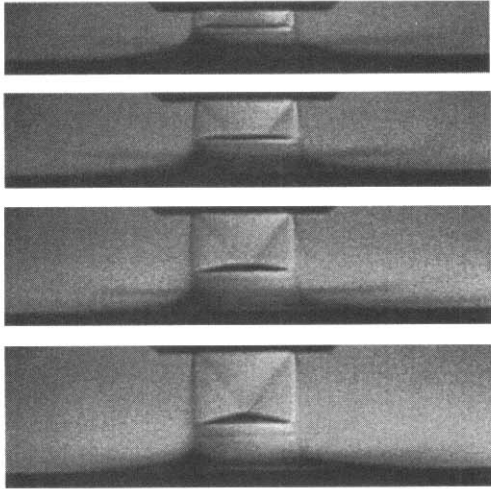
$$Nu = \frac{h D_{NE}}{k_a} \quad (4)$$

실험 변수로서 과소팽창 비와 노즐 평판간 거리가 선택되어졌다. 과소팽창비는 대기압과 노즐 출구 압의 비 즉,  $P_e/P_a$ 로 정의되어진다. 실험중에  $P_e/P_a$ 는 1.5와 3.5로 고려되었다. 노즐 평판 거리는 노즐 출구 직경의 배수로 표현할 때,  $0.5D_{NE}$ 에서  $20D_{NE}$ 까지 변화되었다.

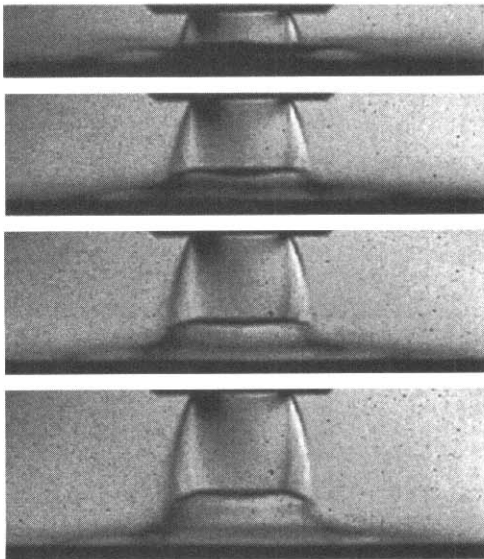
## 2.2 실험 결과 및 고찰

### 2.2.1 충격파 가시화

과소팽창비 1.5 및 3.5에 대한 shadowgraph 결과가 Fig. 4에 나타나 있다. Fig. 4(a)의 마지막에는 편의를 위하여 작은 노즐 평판 거리에서 나타나는 충격제트 유동장의 형태 및 각 명칭들을 나타내었다. Fig. 4(a)에서 볼 수 있는 바와 같이, 작은 노즐 평판 거리( $Z_f/D_{NE}=0.5, 0.75$ )에서는



(a)  $P_e/P_a = 1.5$   
 $(Z_P/D_{NE}=0.5, 0.75, 1.0 \text{ and } 1.2)$



(b)  $P_e/P_a = 3.5$   
 $(Z_P/D_{NE}=0.5, 1.0, 1.25 \text{ and } 1.5)$

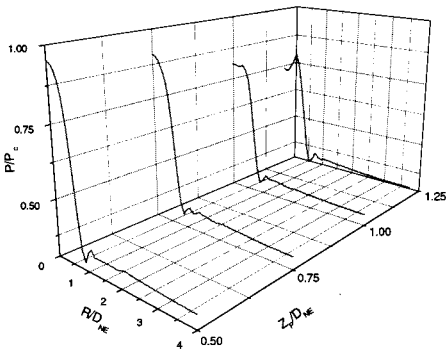
Fig. 4. 제트내부 충격파 가시화

stand-off shock wave가 제트 단면의 많은 부분에 걸쳐 폭방향에 거의 평행하게 나타난다. 충돌면이 노즐출구로부터 점차 멀어지면( $Z_P/D_{NE}=1.0, 1.2$ ), 제트의 중심부에는 stand-off shock wave가 여전히 제트 축에 수직으로 남아 있으나, 바깥부분은 경사진 intercepting shock wave가 크게 나타난다. 따라서, 이 경우( $Z_P/D_{NE}=1.0, 1.2$ )에 stand-off shock wave 하류의 유동장은 수직 충격파(stand-off shock wave)를 통과한 내부 유동과 경사 충격파(intercepting shock wave)를 통과한 바깥 유동의 두 영역으로 나누어진다. 수직 충격파를 지난 가스로 이루어진 내부 유동영역은 1보다 작은 마하수를 지나는 반면, 바깥 유동영역은 여전히 1보다 큰 마하수를 지니게 된다. 이로 인하여, 두 영역의 경계면에서는 음속면(sonic surface)이 존재하게 되며, 이 면을 따라 혼합영역(mixing region)이 발달하게 된다. 또한, 음속면 주위의 고압 전단층과 경계층간의 상호작용이 유동 박리를 일으켜 결과적으로 환형형태의 최대 압력 분포 및 중심부에서의 stagnation bubble을 발생시킬 수 있는 것으로 알려져 있다[3].

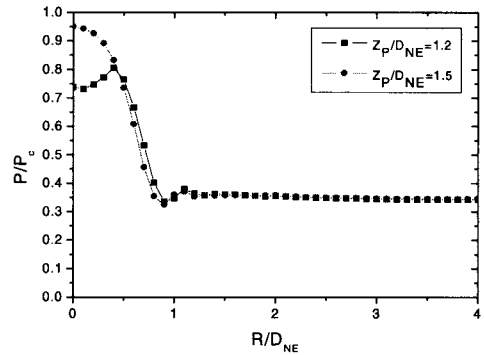
과소팽창비가 큰 경우(Fig. 4(b))도 앞서 설명한 경우와 유사한 유동장 구조를 보인다. 그러나, 유사한 노즐-평판 거리 영역에서도 낮은 과소팽창비의 경우에 비하여 stand-off shock wave의 크기가 매우 큰 것을 알 수 있으며, 이로부터 중심 영역에 저압 상태의 stagnation bubble이 크게 존재하는 것을 예측할 수 있다.

### 2.2.2 표면압력 측정

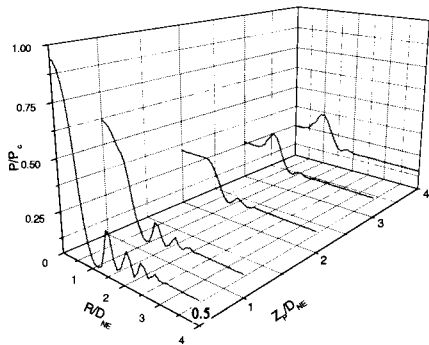
노즐-충돌면간 거리가 커짐에 따라 노즐 출구로부터 가까운 위치에서는 중심점 표면 압력이 감소하다가 하류방향으로 평판이 계속 이동함에 따라 압력의 증감을 반복한다[6]. 편의를 위해서 중심 표면 압력이 노즐출구에서 멀어짐에 따라 감소만을 하는 근접구간의 길이를 초기 팽창 길이( $Z_{ie}$ )로 정의한다. 김병기[7]에 따르면, 초기 팽창 길이( $Z_{ie}$ )는 과소팽창비( $P_e/P_a$ )에 비례하며, 팽창비 1.5일 때, 약  $1.25D_{NE}$ , 3.5일 때, 약  $4.0D_{NE}$ 의 값을 갖는 것으로 밝혀졌다. Fig. 5는 서로 다른 과소 팽창비에서 초기 팽창 길이내의 범위에서 노즐-충돌면간 길이에 따른 표면 압력분포이다.  $P_e/P_a$ 가 1.5인 경우(Fig. 5(a)), 충돌판이  $0.5D_{NE}$ 만큼 떨어져 있을 때, 표면압력 분포는 중심에서 최대값을 지니며, 정체점으로부터 반경방향 거리가 증가함에 따라 유동가속에 의하여 압력은 감소하고 있다. 반경방향으로  $0.9D_{NE}$ 까지 표면압력의 급격한 감소는 충돌면 전방의 수직충격파(stand-off shock wave)와 제트 경계간의 상



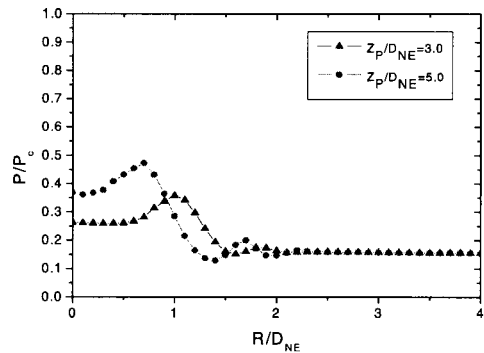
(a)  $P_e/P_a = 1.5$



(a)  $P_e/P_a = 1.5$



(b)  $P_e/P_a = 3.5$



(b)  $P_e/P_a = 3.5$

Fig. 5. 표면 압력 분포

Fig. 6. 초기 팽창길이 이후의 압력회복

호작용으로부터 발생된 팽창판 때문이다. 반경 약  $1.0D_{NE}$  근방에서의 약한 재압축뒤에 압력은 대기압( $P_a/P_0=0.35$ )으로 다가간다. 충돌면이 보다 하류인  $1.0D_{NE}$ 으로 이동하게 되면, 중심 영역에서의 압력값은 감소하며, 이는 증가하는 상류 마하수로 인해 stand-off shock wave 통과시 총압의 감소가 크기 때문이다. 충돌면이 좀더 하류로 이동하게 되면, 최대 벽압력값은 중심으로부터 떨어져 나타난다. 즉, 충돌면이 하류방향으로  $1.2D_{NE}$ 의 위치에 있을 때, 표면압력은 반경방향  $0.4D_{NE}$ 에서 최대값을 보인다. 이와 같은 환형모양의 벽압력 최대값 분포는 stand-off shock wave를 통과한 가스가 심한 압력손실로 인하여 바깥으로 빠져나오지 못하고 중심부에서 재순환되기 때문에 나타나는 현상으로 알려져 있다.

보다 높은 과소 팽창비(Fig. 5(b))의 경우, 낮은 과소팽창비의 결과와 비교해 보면 중심영역에서 보다 큰 재순환 영역(stagnation bubble)이 관찰되며( $Z_p/D_{NE}=3,4$ ), 이는 Fig. 4(b)에 나타난 가시

화 결과를 통해서도 추측할 수 있다. 또한, 벽제트 영역에서의 주기적인 진동현상도 명확하게 관찰되는데 압력의 주기적인 진동의 폭은 반경 거리가 증가함에 따라 감소하고 있으며, 점차적으로 대기압에 가까워지고 있다. 이러한 벽제트 내의 반복적인 압축 팽창 영역은 제트 경계에서 발생된 팽창파의 제트 경계 및 충돌면에서의 반복적인 충돌 반사에 의해 형성된 것이다[4]. Fig. 6은 각 팽창비에 대하여 초기 팽창 길이 전후에서의 반경 압력분포를 도시해 본 것이다. 팽창비가 낮은 경우 충돌면의 초기 팽창 길이 통과 시, 중심부에서의 압력회복은 매우 급격하게 나타나고 있는데 이는 중심 영역에서의 stand-off shock wave의 크기가 초기 팽창 길이 이후에 급격하게 감소하고 이로 인해 중심에 근접한 고압유체가 제트 중심부로 쉽게 확산되기 때문이다. 반면, 높은 과소 팽창비에서는 초기 팽창 길이 이후에도 충격파 구조의 변화가 크지 않으며, 이로 인해 stand-off shock wave 후방에 나타나는 중심영역

에서의 큰 아음속 영역이 유지되어 내부로의 고압 가스 확산효과가 작게 나타나 환형의 최대 벽압력 분포가 초기 팽창 길이 이후에도 유지되는 것이다.

### 2.2.3 대류 열전달 계수 분포

서로 다른 과소팽창비에 대해서 충돌표면에서의 Nusselt 수 분포가 Figs. 7, 8에서 보여지고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 노즐 평판간 거리에 따라서 매우 복잡한 경향을 보이는 것을 알 수 있는데, 특히 과소팽창 비가 증가함에 따라서 작은 노즐 평판간 거리범위에서 상대적으로 더욱 변화가 큰 것을 알 수 있다.

과소팽창비 1.5인 경우, 노즐 출구 직후방의 Nusselt 수는 정체점에서 높은 극값을 가지고, 또한 반경방향으로 약  $\pm 2D_{NE}$ 의 위치에서 또 다른 극대값을 보인다. 같은 위치에서의 벽압력분포(Fig. 4(a))로부터 환형 극값이 나타나는 지점에서의 특징적인 압력분포는 관찰되어지고 있지 않다. 기존 연구자들에 의해 밝혀진 바에 따르면, 이러한 환형 극값영역의 존재는 벽제트 영역에서

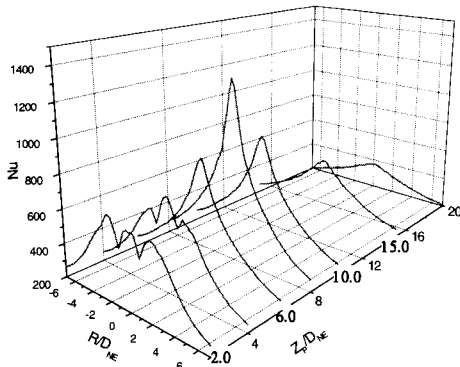
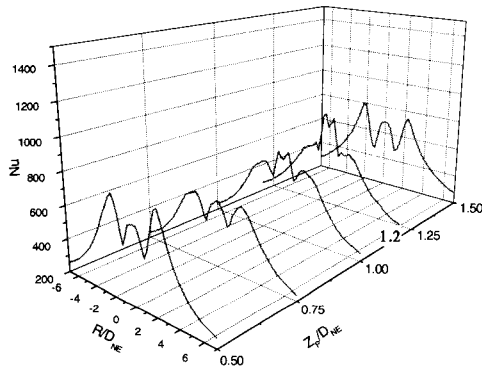


Fig. 7. Nusselt 수 분포 ( $P_e/P_a=1.5$ )

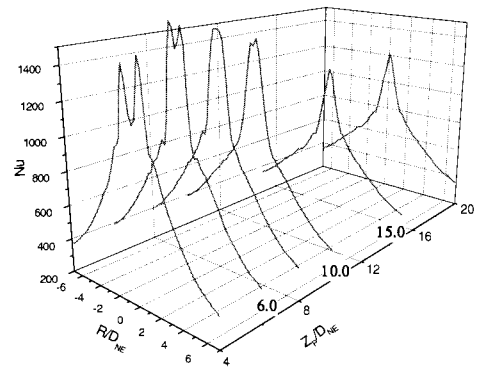
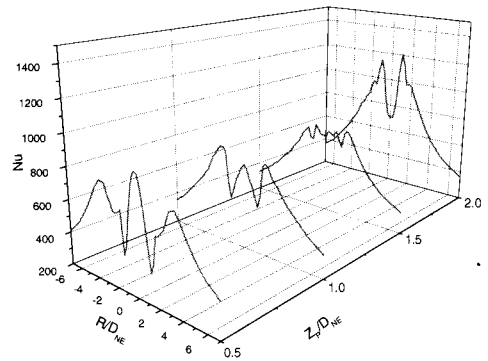


Fig. 8. Nusselt 수 분포 ( $P_e/P_a=3.5$ )

의 경계층의 천이나 제트 경계에서 발달된 와류의 흐름 등으로 인해 증가된 난류효과와 무관하지 않은 것 같다[5,8,9].

노즐-충돌면간 거리가 증가함에 따라, 정체영역에서의 Nusselt 수는 증가하게 되며, 특히 노즐-충돌면간 거리가 초기 팽창길이와 가까워지는  $1.0D_{NE}$ ,  $1.2D_{NE}$ 의 경우, 반경 방향으로 약  $\pm 0.5D_{NE}$ 의 거리에 또 다른 환형 극값이 발생하는 것을 알 수 있다. 이 내부 환형 극값은 이후  $1.5D_{NE}$ 의 노즐 평판간 거리등에서는 관찰되어지지 않는다. 벽 압력분포 측정 결과와 비교해 본 결과, 이러한 내부 환형 극대값이 존재하는 노즐-충돌면간 거리는 stagnation bubble이 존재하는 거리와 거의 일치하는 것을 확인하였다. Stagnation bubble이 존재하는 충돌면 위치에서는 중심 재순환 영역과 고압, 고속의 바깥영역 사이에 음속면을 기준으로 강한 전단층이 발생하게 되며 전단층에서의 상대적으로 높은 난류강도로 인하여 벽면에 높은 열전달 계수를 나타내는 것이다. 반면, 이때의 중심영역은 저속의 가스가 재순환하고 있기 때문에 직전의 충돌면 위치와 유사한 정도의 낮은 열전달 특성을 지니게 된다. 충돌면이 좀 더

하류방향으로 이동하게 되면, 제트 경계의 전단층으로부터 중심으로 유동의 난류성분이 확산, 전파되어 가장 바깥쪽의 환형 극값영역은 점차 내부로 이동하다 사라지게 된다. 노즐 평판간 거리가  $10D_{NE}$ 를 넘게 되면, Nusselt 수의 반경방향 분포는 단순한 종형을 띠게 되며 정체점에서 최대값을 가지고 반경방향으로 단조 감소하는 경향을 보인다.

과소팽창비가 3.5로 증가한 경우도(Fig. 8), 절대값에의 차이는 있으나 대체적인 분포 형태는 과소팽창비 1.5와 유사하게 나타난다. 그러나, 높은 팽창비에서는 충돌면 전방의 stand-off shock wave를 통과하는 가스의 총압력 손실도 상대적으로 높기 때문에 Fig. 8의 충돌면 위치( $z_p/D_{NE}$ )가 2.0, 4.0 등인 경우에서 보이는 바와 같이 중심영역에서의 열전달 계수값이 다른 영역에 비하여 매우 낮게 나타나고 있다. 이와 반대로 stand-off shock wave 후방의 음속면을 기준으로 한 전단층에서 난류강도는 전단층 양쪽의 높은 속도차로 인하여 커지게 되고 내부 환형 극값의 크기가 경계층 천이나 제트 경계의 와류발달 등에 의한 외부 환형 극값의 크기에 비하여 높게 나타나고 있다. 팽창비가 높은 경우, 앞절의 벽압력 분포에서 설명한 바와 같이 충돌면의 위치가 초기 팽창 길이를 지났음에도 중심의 아음속 재순환 영역(stagnation bubble)은 초기 팽창 길이로부터 상당한 거리까지 유지되며, 이로 인해 Fig. 8에서는  $z_p/D_{NE}$  약 6.0까지 내부 환형 극값을 지니며, 난류 확산으로 인해 열전달 계수값이 점차 증가하고 있는 것이 관찰된다.

### III. 결 론

축대칭 과소팽창 평판 충돌제트에 열전달 특성을 살펴보기 위하여 실험적인 연구가 수행되었다. 과소팽창비와 노즐-충돌면간 거리에 따라서 Nusselt 수 분포는 다른 특징을 보여주었다. 작은 노즐 평판간 거리에서 나타나는 환형 극값은 벽제트 영역에서의 와류거동에 따른 경계층 천이에 의한 난류효과와 관련이 있다. 음속면을 따라 발달된 전단층이 정체점 근방의 영역에 영향을 줄 경우, 기존 벽제트 내의 환형 영역 내부에 또 다른 환형 극값 영역이 나타난다. 노즐 평판간 거리가 증가함에 따라, 제트 중심부로의 난류 확산으로 인하여 중심영역에서의 열전달 계수는 증가한다. 과소팽창비가 1.5에서 3.5로 증가함에 따라서 열전달 계수값은 약 2배 가까이 크게 증가

하였으며, 초기 팽창거리 후방 상당 거리까지 내부 환형 극값영역이 유지됨을 관찰하였다.

### 후 기

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

### 참고문헌

- 1) O. I. Gubanova, V. G. Lucev and L. N. Plastina, "Central breakaway zone with interaction between a supersonic underexpanded jet and a barrier", Fluid Dynamics, Vol. 6, pp. 298-301.
- 2) G. T. Kalghatgi and B. L. Hunt, "The occurrence of stagnation bubbles in supersonic impingement flows", The Aeronautical Quarterly, Vol. 27, No. 3, pp. 169-185.
- 3) I. P. Ginzburg, B. G. Semiletchenko, V. S. Terpigorev, V. N. Uskov, "Some singularities of supersonic underexpanded jet interaction with a plane obstacle", Journal of Engineering Physics, Vol. 19, pp. 1081-1084.
- 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, pp. 159-176.
- 5) R. Gardon and, J. C. Akfirat, "The role of turbulence in determining the heat transfer characteristics of impinging jets", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 8, pp. 1261-1272.
- 6) B. G. Kim, M. S. Yu and H. H. Cho, "Recovery temperature measurement of under-expanded sonic jets impinging on a flat plate", Journal of Thermophysics and Heat transfer, Vol. 17, No. 3, pp. 313-319.
- 7) B. G. Kim, "Heat Transfer Measurement of Under-expanded Jet Impingement Flow on a Flat Plate", Dissertation submitted to the Department of Mechanical Engineering in Yonsei University, pp. 33-36, June, 2002.
- 8) R. Gardon and J. Cobonpue, "Heat transfer between a flat plate and jets of air

impinging on it", International Developments in Heat Transfer, pp. 454-460.

9) R. J. Goldstein, A. L. Behbahani and K. K. 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, pp. 1227-1235.