

과소팽창제트의 평판충돌에 의한 표면 열전달 특성

유만선* · 김병기** · 조형희* · 황기영*** · 배주찬***

Heat transfer on a plain surface by the under-expanded impinging jet

Yu, Man Sun* · Kim, Byung Ki** · Cho, Hyung Hee* · Hwang, Ki Young*** · Bae, Ju Chan***

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 at small nozzle-to-plate distances. the pressure ratio and the nozzle-to-plate distance have been considered as experimental parameters.

초 록

평판 표면에 충돌하는 축대칭, 과소팽창 제트에 대한 실험적 연구가 수행되어졌는데, 노즐 평판간 거리가 작은 경우에 있어서 평판상의 표면압력, 단열벽온도가 상세하게 측정되어졌다. 압력비와 노즐 평판간 거리가 실험 변수로 고려되었다.

1. 서 론

초음속 제트의 고체벽면 충돌 현상은 로켓이나 미사일의 발사, V/STOL(Vertical/Short Take Off and Landing) 항공기의 이착륙, 제트엔진 배기가스의 분출, 로켓모터의 추력방향 제어 시스템(Thrust Vector Control system, TVC) 등과 같은 다양한 상황에서 관찰되고, 또한 열차폐재의 테스트에도 이용되어지고 있다. 초음속 충돌 제트는 아음속의 충돌 제트와는 달리, barrel

shock, plate shock, reflected shock등의 여러 충격파들이 서로 간섭하고, shear layer 및 stagnation bubble과 같은 유동의 불안정성이 존재하는 매우 복잡한 유동이다.

이와 관련된 연구 결과를 살펴보면 대부분이 충돌면의 표면 압력 분포의 측정이나 광학법을 이용한 유동장내 충격파 구조의 가시화와 같은 실험에 의한 방법이 주를 이루었으며[1-5], 충돌면으로의 열전달에 대한 연구는 대다수가 음속 이하의 범위로 한정되어 있다.[6,7] 과소팽창

* 연세대학교 기계공학과

** LG 전선 (LG cable)

*** 국방과학연구소(Agency for Defence Development)

제트에 대한 열전달 특성 연구로는 Gardon과 Cobonpue[8]에 의한 충돌면 정체점에서의 노즐 평판간 거리에 따른 주기적인 열전달을 변화 측정과, Fox와 Kurosaka[9]에 의한 초음속 제트내의 와류여기에 의한 냉각 기제(vortex-induced cooling mechanism) 연구가 있다.

본 연구에서는 고체표면에 충돌하는 과소팽창 제트에 관한 기초정보의 획득을 목표로 축대칭, 과소팽창 제트에 대한 실험을 수행하여 보았다. 실험을 통하여 제트의 충격과 구조 가시화, 평판상의 표면압력분포 및 단열 벽면 온도분포를 측정하였으며, 대기압에 대한 노즐 출구의 압력비, 노즐 평판간 거리등을 실험 변수로 삼아 이에 따른 측정결과들을 서로 비교하였다.

2. 본 론

2.1 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 사용된 노즐은 출구에서의 설계 마하수가 1.0 인 음속노즐(sonic nozzle)이며, 곡면으로 이루어진 축소노즐(contoured convergent nozzle)로 출구직경은 10.0 mm이다. Figure 1은 실험장치의 개략도이다. 공기는 수분과 불순물을 제거하기 위해 흡착식 필터를 거쳐서 총용량 690L의 압축용기에 저장시키고, 레귤레이터를 통해 감압하여 노즐이 부착된 정체실(settling chamber)로 공급한다. 배출가스의 온도가 실험 시간에 따라 변화하는 것을 방지하기 위하여 압

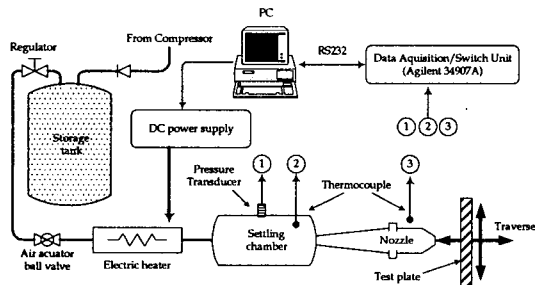


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

축용기로부터 공급되는 공기는 전기히터로 가열하여 가스의 온도가 주위의 공기온도와 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내의 차이를 갖도록 실시간으로 조절하였다. 열전달 측정을 위한 충돌판은 배면이 공기층, 유리섬유와 아크릴로 단열된 베이클라이트판에 T-type 열전대를 설치하였으며, 전면에 stainless steel foil을 코팅하여 전류를 가해줌으로서 실험 중에 필요한 등열유속 조건을 유지시켰다. 표면압력측정에는 아크릴판에 20.0 mm간격의 직경 0.8 mm pressure tap을 두 개 만들어 압력 센서(Druck pressure transducer, PMP4070)에 연결한 뒤, 실험시에 자동 이송장치로 측정점의 위치를 이동해가며 분포를 측정하였다. 열전대와 압력 트랜듀서로부터의 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(shadow graph method)을 사용하였다. 실험은 대기압에 대한 노즐 출구의 압력비로 정의되는 과소팽창비를 1.5에서 3.5까지 노즐 출구 직경으로 무차원한 노즐-충돌면간 거리를 0.5에서 20까지 변화시켜가며 수행되었다.

2.2 결과 및 토의

2.2.1 표면 압력 분포

Figure 2는 노즐-충돌면 거리에 따른 정체점에

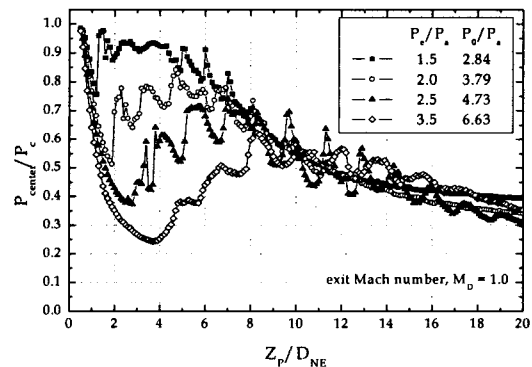


Fig. 2 The central surface pressure distribution

서의 표면압력 변화를 나타내고 있다. 가까운 거리에서 표면압력은 감소하다가 일정 거리이상에서 압력 증가와 감소가 반복되는 현상이 관찰되었다. 이때 과소팽창비 1.5와 2.0과 같은 약한 과소팽창 충돌제트의 경우, 첫 압력 증가현상이 급격하게 발생하고 있고, 팽창비 3.5와 같은 강한 과소팽창 충돌제트의 경우는 부드러운 압력 증가가 발생하고 있다. 이러한 현상은 다음과 같이 설명될 수 있다. 충돌면이 하류방향으로 이동함에 따라 전방에 존재하는 stand-off shock도 함께 하류방향으로 이동한다. 따라서, 이 충격파를 통과하는 가스의 총압력 손실비 또한 증가하는 충격파의 강도에 의해서 커지게 되어 표면 중심부의 압력이 거리에 따라 점차 감소하게 된다. 충돌면이 더욱 하류방향으로 이동하여 stand-off shock이 자유제트의 충격파 구조 형성이 가능한 특정 거리를 지나게 되면, 경사충격파인 barrel shock을 지나 상대적으로 높은 총압을 지닌 가스가 충돌면 중심의 압력을 결정함으로써 짧은 거리 이동에 큰 압력 회복을 일으키게 된다. 그러나, 강한 과소팽창 충돌제트의 경우, Mach disk의 존재로 인한 중심부 아음속 영역의 크기로 인하여 이러한 외부의 고압 가스가 중심부로 쉽게 진입하지 못하기 때문에 상당한 거리를 두고 압력회복이 천천히 이루어지게 된다. Figure 3은 과소팽창비 1.5와 2.5의

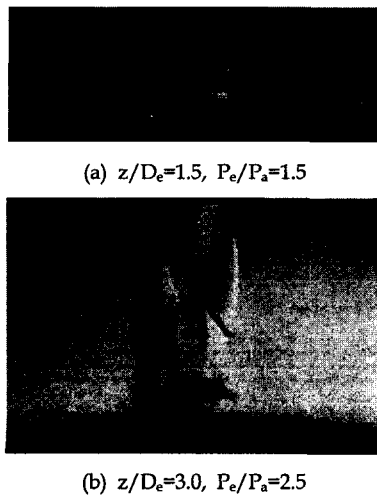


Fig. 3 Shadow graphs of impinging jets

경우에 해당하는 충격파 가시화 결과로서 앞서 언급했던 충격파 구조의 차이를 확인해 볼 수 있다.

Figure 4는 과소팽창비 1.5, 3.5에 대한 반경방향의 표면압력분포를 각각 나타내고 있다. 중심으로부터 반경의 위치는 R/D_e 로서 노즐 출구 직경으로 무차원되어 표현되었다. 대체로 압력 값은 중심부에서 높은 값을 나타내고, 반경방향으로 가스가 가속됨에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한, 약한 과소팽창비의 경우 z/D_e 가 1.2, 강한 과소팽창비의 경우 3.0이후에 벽압력의 최대값이 중심에서 벗어난 위치에 존재하고 있는 것이 관찰되었다. 이와 같은 중심부의 압력분포는 'stagnation bubble'이라 불리는 재순환 유동이 중심부에 존재하기 때문으로 알려져 있다.[1-3] 강한 과소팽창 충돌제트의 경우, 벽제트구간에서 압력이 주기적으로 증감하고 있는데, 이는 제트 경계로부터 발생한 파동이 벽제트의 상부 경계와 충돌면등에 반복적으로 반사

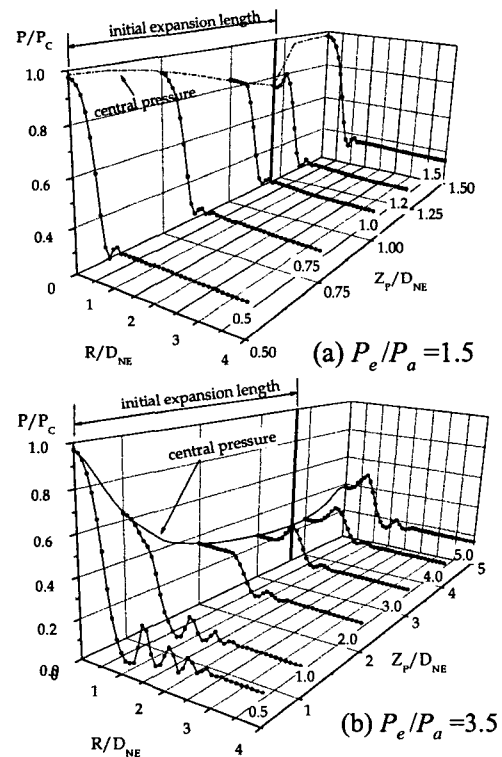


Fig. 4 Radial distributions of the surface pressure

되면서 생기는 현상으로 생각된다.

2.2.2 회복 계수 분포

측정된 단열 벽온도는 다음과 같은 회복계수로 환산되어 표현되었다.

$$r = \frac{(T_{aw} - T_s)}{T_d} = 1 + \frac{(T_{aw} - T_0)}{T_d} \quad (1)$$

Figure 5는 과소팽창비 1.5의 경우에 노즐-평판 거리에 따른 회복계수의 반경방향 분포를 보여주고 있다. 가까운 거리에서 정체점의 회복계수는 1에 근접한 값을 나타내고 있으며, 'W' 모양의 형태를 띠며, $R/D_{NE} = \pm 2.0$ 근방에서 최소값을 가지고 있다. 이러한 낮은 회복계수의 영역은 Fox등[7]에 의해 제시된 'vortex-induced total temperature separation' 개념으로 설명되어질 수 있다. 노즐-벽면간 거리가 가까운 경우, 노즐출구에서 형성되어 제트를 따라 하류로 이동하는 일차와류로 인하여 충돌면에는 이차와류가 형성되며, 이러한 벽면근방에서의 주기적인 와류 이

동은 유체입자들의 순간적인 단열팽창 효과를 가져와 평균적으로 낮은 총온도 영역을 형성한다는 것이다. 노즐-평판간 거리가 큰 경우, 이차와류는 사라지고 단지 일차와류만이 존재하게 됨으로서 이러한 냉각효과 또한 사라지게 된다.

과소팽창비가 2.0인 경우를 본 논문에 제시하지는 않았으나 그 경향은 팽창비 1.5인 Fig. 5의 경우와 거의 유사하게 나타났다. 그러나 강한 과소팽창 충돌제트에 해당하는 팽창비 2.5의 결과는 Fig. 6에서 보듯이 다소 차이를 보이고 있다. 이 경우, $Z_p/D_e = 1.75$ 에서 정체점 근방 영역에 추가적으로 계곡형태의 낮은 회복계수 영역이 나타나며, $Z_p/D_e = 2.0$ 에서 합쳐짐으로서 정체점에 매우 낮은 회복계수 영역을 발생시킨다. 이것은 Fox등[9]에 의해 제시된 'shock-induced cooling'의 영향으로 생각되는데, 충돌면 전방에 존재하는 충격파 구조가 일차와류의 영향으로 주기적인 진동형태를 띠면서 중심부로 이동하는 유체입자의 총온도를 낮추어 주어 정체점의 평

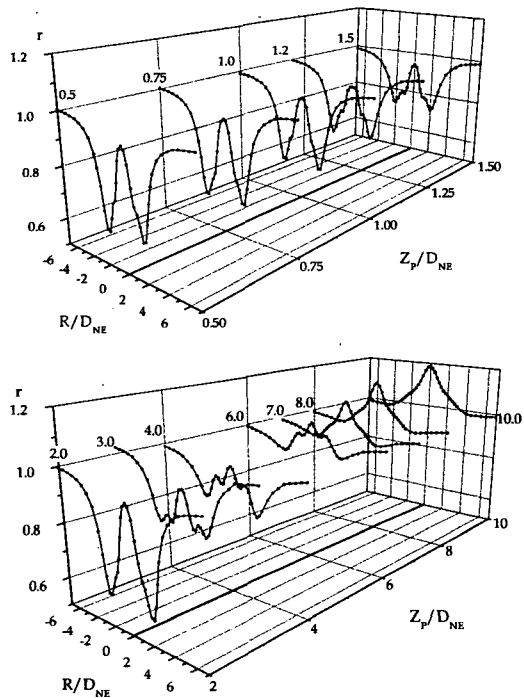


Fig. 5 Radial distributions of the recovery factor for the case of $P_0/P_a=1.5$

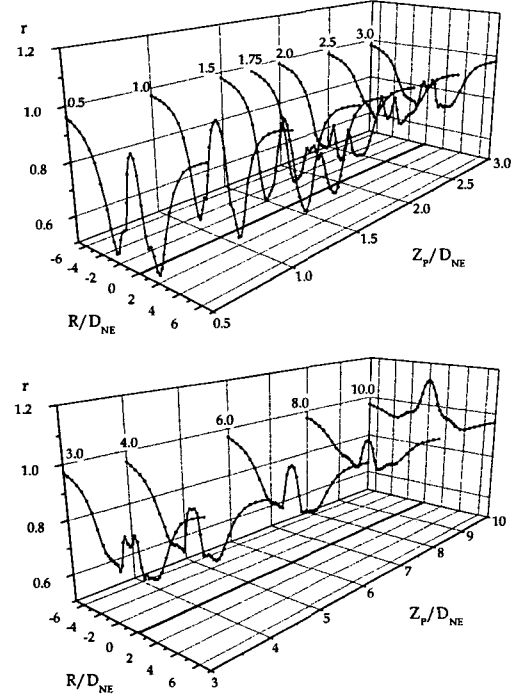


Fig. 6 Radial distributions of the recovery factor for the case of $P_0/P_a=2.5$

균적인 총온도값을 낮추는 것으로 알려져 있다.

3. 결론

축대칭 과소팽창 충돌제트에 열전달 특성을 살펴보기 위하여 실험적인 연구가 수행되었으며, 충돌면상에서의 회복계수 및 압력분포가 측정되었다. 연구결과, 충돌면 전방에 존재하는 충격파 구조는 노즐-평면간 거리에 크게 의존하는 것으로 나타났으며, 이에 따라 압력 및 온도값들 또한 거리에 따라 특성을 달리하며 서로 다른 분포를 갖는 것을 확인할 수 있었다.

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. Gubanov, 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. 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
8. 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
9. M. D. Fox and M. Kurosaka, 1996, "Supersonic cooling by shock-vortex interaction," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 308, pp. 363-379