

과소팽창비와 경사각에 따른 평판에서의 단열벽면온도분포

이장우* · 유만선* · 조형희** · 황기영*** · 배주찬***

Adiabatic wall temperature distribution on a plate as under-expanded ratio and impinging angle

Lee Jang Woo* · Yu Man Sun* · Cho Hyung Hee** · Hwang Ki Young*** · Bae Ju Chan***

ABSTRACT

Experiments are conducted to get basic information of under-expanded impinging jet in the near field. Experimental parameters are impinging angle and under-expanded ratio. As the under-expanded ratio increases, the maximum surface pressure decreases and the reducing effect of recovery factor increases. As the impinging angle decreases, the peak of surface pressure is displaced slightly from the geometric center of the plate to the upward region and the cooling region is expanded in the downward region, whereas it is contracted in the upward region.

초 록

평판에 충돌하는 과소팽창 충돌제트에 대한 기본적인 정보를 구하기 위해 근거리에서 경사 각도와 과소팽창 비의 변화에 따른 실험을 수행하였다. 과소 팽창비가 증가하면서 최대표면압력 값들은 작아지며, 회복계수의 감소효과는 커진다. 또한 경사각도 감소에 따라 표면 압력 정점의 위치는 상류로 이동하고, 저온영역의 범위는 상류에서 감소하는 반면 하류로 넓게 분포된다.

Key Words: Recovery Factor(회복계수), Inclined Plate(경사평판), Infrared Thermography(적외선온도측정), Under-expanded Ratio(과소팽창 비)

1. 서 론

고체표면에 과소 팽창된 제트가 충돌하는 예는 로켓 발사 시, 제트엔진 분사 충돌이나 수직/단거리 이착륙과 같은 경우들이 있다. 이는 충

돌 표면에 심각한 열적부하와 공기역학적 열부하를 동시에 준다. 과소팽창 충돌제트에 대한 초기연구로서 Lamont와 Hunt[1]는 제트내부 유동 구조 특성을 중심으로 유동내부의 복잡한 충격파구조와 상호 작용을 가시화와 압력측정을 통해 밝혔다. 또한, Kim과 Chang[2]은 초음속 충돌제트 유동장 내부의 압력과 밀도를 수치해석을 통해 모사해보려는 시도를 하였다. 제트의 온도 특성에 대해서 Eckert[3]는 전단층과 경계

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 연세대학교 기계공학부

*** 국방과학연구소

연락처, E-mail: leejw@yonsei.ac.kr

층에서 발생하는 energy separation 현상을 온도차에 의한 heat conduction과 속도 차에 의한 viscous shear work 사이의 불균형 그리고, 와류에 의한 효과로 제시하였다. Han 등[4]은 수치 해석을 통해 자유제트에서 Re에 따른 전단층에서의 energy separation은 와류에 의한 영향이 지배적임을 확인하였다. 표면 열전달과 관련하여 Goldstein 등[5,6]은 음속이하의 범위에서의 충돌제트에 대한 대류열전달계수와 단열벽면온도를 측정하였으며, Dytte와 Webb[7]는 열전대를 통한 측정의 한계를 극복하기 위해 2차원적인 온도측정이 가능한 적외선 카메라를 이용하여 근거리의 충돌 면에서 열전달 계수를 측정하였다. 그러나 과소팽창 충돌제트 특히, 경사진 평판에 충돌하는 경우의 온도 특성에 대한 해석이나 실험은 극히 부족한 실정이다.

본 연구의 목적은 평판에 충돌하는 과소팽창 충돌제트에 대한 기본적인 정보를 실험을 통해 구하는 것이다. 고속 제트의 경우 대류열전달 계수를 구할 때 필요한 국부적인 단열 벽 온도 분포가 구해졌으며, 부가적으로 표면압력 분포를 측정하여 결과 해석 시 사용하였다. 연구결과로는 경사진 평판에 충돌하는 과소팽창 된 충돌제트에 의한 표면 특성의 이해와 향후 수치모델을 검증하는 데에 있어서도 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

2. 본 론

2.1 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험 장치의 개략도를 나타내고 있다. 공기는 왕복동식 압축기에 의해서 최대 150kgf/cm²까지 압축되어진 뒤에 제습을 위하여 7단계의 공기 필터를 통과하고 3개의 고압탱크에 저장되어지게 된다. 고압탱크의 총 저장용량은 450 리터이다. 실험 시작 시, 압축된 공기는 저장 탱크로부터 배압을 조절할 수 있는 고압용 레귤레이터(Yamato sangyo, YR-5062)를 지나 유동의 안정성과 균일성 확보를 위하여 정체 챔버로 공급되어진다.

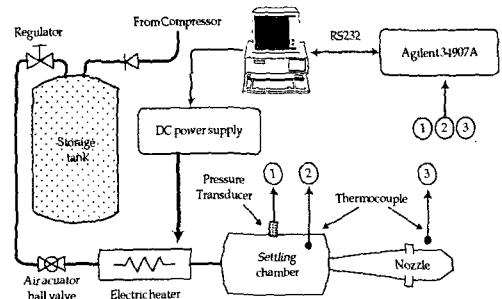


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

제트가 분출되어지는 노즐은 정체 챔버와 연결되어져 있다. 이 후, 정체 챔버에 저속화되어 머물던 압축공기는 노즐을 통하여 가속되어지며 공기 증으로 분출되게 된다. 사용된 노즐은 출구에서의 설계마하수가 1.0인 음속노즐이며, 곡면으로 이루어진 축소노즐(contoured convergent nozzle)로 출구직경은 10.0mm이다. 또한, 공급되어지는 공기는 저장 탱크와 정체 챔버 사이에 위치한 전기 히터를 통하여 가열되어지며 대기 중의 공기 유입에 의한 영향을 되도록 배제하기 위한 목적으로 팽창제트의 총 온도를 대기 온도와 $\pm 0.5K$ 내로 유지시켰다.

충돌면과 제트축이 수직이 아닌 경우는 평판 근방에서의 유동장은 3차원적인 특성을 보이며, 충돌면에서의 압력 및 온도 분포는 2차원적인 분포를 나타낸다. 따라서 1차원적이 센서 분포로는 한계가 있으며, 열전대와 같은 국소점의 온도 측정센서를 이용해서 광범위한 표면 영역 온도를 자세히 측정하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 2차원적인 이미지 온도측정방식인 적외선 카메라를 이용하였다. 적외선 카메라의 장점은 유동장에 영향을 최소화한 상태로 표면 온도를 측정할 수 있다는 점과 광범위한 영역에 대하여 동시적인 측정이 가능하다는 점 등이 있다.

Fig. 2는 적외선 카메라를 이용한 표면 온도 측정 실험을 위하여 고안된 테스트부의 개략도를 보여주고 있다. 충돌제트에 영향을 주지 않으면서, 충돌면의 온도를 측정하기 위해서 충돌면의 반대쪽에 적외선 카메라를 배치한 뒤 배면

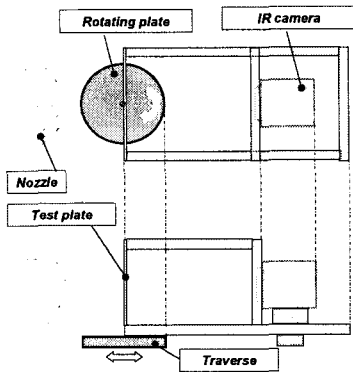


Fig. 2 Experimental equipment with IR camera

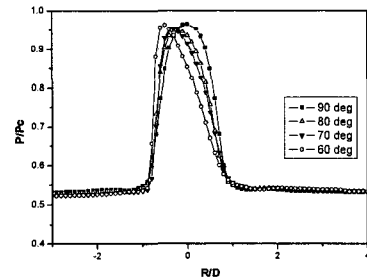
의 온도를 촬영하였다. 충돌판은 제트충돌 시 고압에 의한 변형과 함께 충돌면과 배면간의 온도차를 최소화하기 위한 적정두께인 0.7mm의 stainless steel판을 사용하였으며, 가로세로 크기는 315mm×300mm로 하였다. 사용된 충돌판의 배면에서의 자연대류와 반경방향으로의 열확산을 고려한 해석 결과로부터 오차가 최대 0.12%내인 것을 확인하였다. 충돌제트에 의한 stainless steel 충돌판의 변형은 측정결과, 충돌면 중심에서 최대 0.5mm 함입되었고, 이는 변형 각으로 생각하면 0.22도이므로 평판으로의 가정이 가능하다고 생각한다. 그림에 보이는 바와 같이, 충돌 반대면과 적외선 카메라는 상자형태로 외부와 차단하였으며, 이는 외부 공기의 유입 및 외부로부터 방사되는 적외선 입사에 의한 영향들을 최소화하기 위한 것이다. 충돌 반대면과 상자의 내부 면들은 적외선 반사에 의한 영향을 최소화하기 위하여 검은색 페인트로 도포하였다.

실험인자는 노즐 출구와 평판간의 거리(Z/D)를 1로 고정하고, 대기 압력 대 노즐 출구 압력 비로 정의 되어지는 과소팽창 비(P_e/P_a) 1.0에서 2.5까지 그리고 노즐중심축에 대한 평판의 경사각(θ)은 수직인 90도에서 60도까지 감소시켰다. 측정된 단열 벽 온도는 식(1)을 통하여 회복 계수의 형태로 표현되었다. 표면압력 측정결과는 챔버 압력에 대한 비(P/P_c)로 나타내었다.

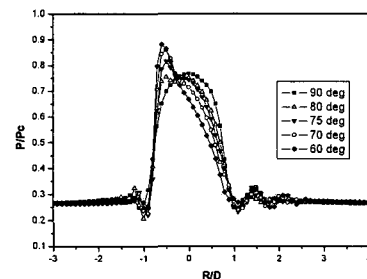
$$r = \frac{(T_{aw} - T_s)}{T_d} = 1 + \frac{(T_{aw} - T_0)}{\frac{u_j^2}{2c_p}} \quad (1)$$

2.2 실험 결과 및 고찰

Fig. 3은 Z/D=1, PR=1.0과 PR=2.0에서 중심을 기준으로 상류에서 하류방향으로의 경사각도에 따른 표면 압력분포를 나타낸다. PR=1.0에서의 표면 압력은 경사각도 90°일 때 중심에서 0.963Pc이며, 축 대칭 분포로 반경방향으로 감소하여 대기압에 가까워지고 있다. 또한, 경사각도가 감소하면서 최대 압력 값은 거의 변화가 없는 상태로 상류방향으로 이동하게 된다. 반면, PR=2.0의 경우는 90°에서 최대 표면압력 0.767Pc는 중심에서 나타나며, 마찬가지로 경사각도가 감소하면서 최대 압력 값의 위치는 상류로 이동하지만, 그 크기는 증가하여 60°에서의 최대 0.881Pc까지 상승한다. 이를 Lamont 와 Hunt[1]는 경사충돌제트의 경우, upper tail shock영역으로의 정체유선 움직임에 의해 이 영역에 최대압력이 나타나게 되는 것으로 설명



(a) PR=1.0



(b) PR=2.0

Fig. 3 Variation of surface pressure with decreasing impinging angles

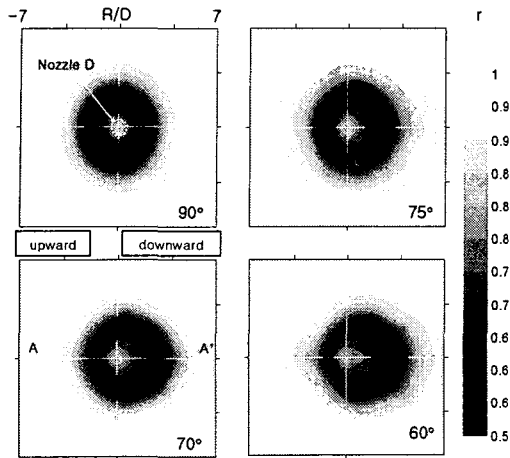


Fig. 4 Distributions of recovery factor with decreasing impinging angles

하고 있다. 상류부분($R/D \approx -0.2$)의 굴곡은 upper triple point에서의 slip line의 영향으로 알려져 있다. 또한, 대기압으로의 급격한 압력 하강은 tail shock과 jet edge사이에 형성되는 expansion fan 때문이다. 제트 경계에서 발생된 파동의 제트 경계 및 충돌 면에서의 반복적인 충돌 반사에 의해 형성되는 압력의 주기적인 진동의 폭은 반경 거리가 증가함에 따라 감소하고 있으며, 점차적으로 대기압에 가까워지고 있다.

Fig. 4는 과소팽창 비 2.0에서 경사각도에 따라 적외선 카메라로부터 얻은 온도 값을 회복계수로 무차원화하여 나타낸 그림이다. 측정영역은 중심으로부터 노즐 직경의 ± 7 배 거리이며, 선이 교차하는 지점이 중심위치를 나타낸다. 경사충돌 시, 각 그림의 우측이 벽 제트의 하류, 좌측이 상류를 나타낸다. 90° 수직인 경우, 회복계수 분포는 확대칭이며, 경사각도가 감소함에 따라 상류의 저온영역은 감소하면서 하류로 치우쳐서 분포하며, 중심부에 높은 회복계수가 더 넓게 분포됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 중심을 기준으로 그림에서의 수평방향(AA')으로의 회복계수를 나타내었다. 수직평판의 경우 W형태의 회복계수 분포는 첫째, Fox 등[8]에 의해 제시된 'vortex-induced total temperature separation' 개념과 둘째, 온도차에 의한 heat conduction과 속도 차에 의한

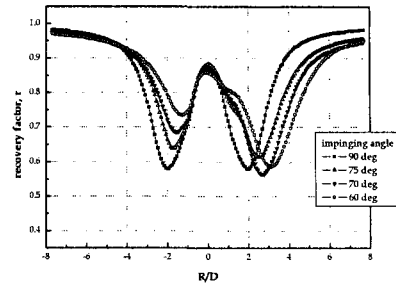


Fig. 5 Variation of recovery factor with decreasing impinging angles

viscous shear work 사이의 불균형으로 설명한다. 전자의 경우, 노즐-벽면간 거리가 가까운 경우 충돌표면상에 나타나는 환형의 낮은 회복계수는 충돌면에서의 이차와류형성으로 벽면근방에서 이를 통과하는 유체입자들의 단열팽창 효과에 의한 것으로 알려져 있다. 후자의 경우는 평판을 흐르는 $Pr < 1$ 인 공기의 경우, 상대적으로 속도가 큰 바깥쪽 저온유체로의 열전도보다 점성에 의해 안쪽으로 들어오는 에너지가 더 작기 때문에 경계층 안에서 작은 에너지(총온도)를 갖게 되어 낮은 회복계수가 나타나는 것으로 설명한다. Eckert[3]에 의하면 energy separation은 대류속도와 와류 회전속도에 비례하며, 와류가 커짐에 따라 증가하고, 하류로 움직임에 따라 점성력과 난류가 증가하면서 감소하게 된다. 따라서 경사진 평판의 경우에 유속이 큰 하류가 상류보다 회복계수가 낮게 되고, 상류에서 경사각의 감소에 따른 회복계수의 증가 역시 설명이 가능하다. 중심에서 멀어지면서 회복계수가 1에 근접하는 것은 점성력과 난류 증가에 따른 냉각 효과 감소로 설명할 수 있다. 하지만, 하류에서 경향을 벗어나는 결과의 설명을 위해서는 와류의 회전속도나 크기에 대한 정확한 정보가 필요하다. 또한, 경사평판의 경우 경사각이 감소하면서, 하류의 저온영역이 넓어짐을 알 수 있는데, 이는 최대압력이 상승하면서 상류로 이동해감에 따라 하류부분의 팽창가속구간 증가하고 이로 인해 냉각 폭이 증가하기 때문으로 생각된다.

Fig. 6은 경사각 60° 에서 과소팽창 비에 따른 회복계수 분포를 나타낸 그림이다. 전반적으로

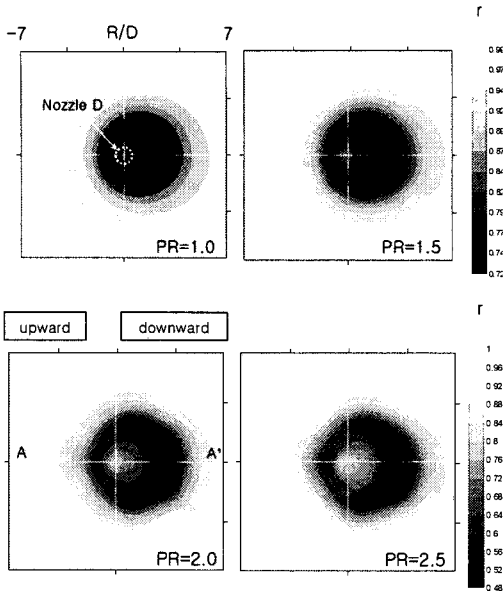


Fig. 6 Distributions of recovery factor with under-expanded ratio

하류의 저온영역은 상류보다 더 넓게 분포하며, 과소팽창비가 증가하면서 전체적인 냉각효과도 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 수평방향(AA')으로의 회복계수이다. 모든 과소팽창 비에서 하류의 저온영역이 상류보다 크게 나타나며, 과소팽창 비 증가에 따라 전체적인 저온영역의 폭과 크기는 증가함을 확인할 수 있다. 이는 경사진 평판의 경우 하류에서의 유속이 상대적으로 상류보다 크고, 이에 따라 energy separation 역시 증가하기 때문이다. 또한, 과소팽창 비 증가 역시 유속의 증가를 의미하므로 energy separation을 증가시킨다.

Fig. 8은 최소 회복계수가 나타나는 지점을 과소팽창 비와 경사각도에 따라 나타낸 그래프이다. 과소팽창비가 증가하면서 상·하류 모두에서 최소 회복계수 형성위치가 점차 중심에서 멀어지는 것을 알 수 있다. 이는 과소팽창 비가 커지면서 팽창가속구간이 벽제트 하류로 더 넓어지고, 이에 따라 최대 대류속도가 형성되는 위치 또한 하류로 이동되어 나타나는 현상으로 생각된다. 동일한 과소팽창 비에서는 경사각도가 감소함에 따라 최소 회복계수 위치는 하류

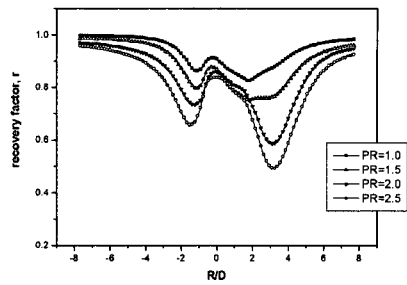


Fig. 7 Variation of recovery factor with under-expanded ratio

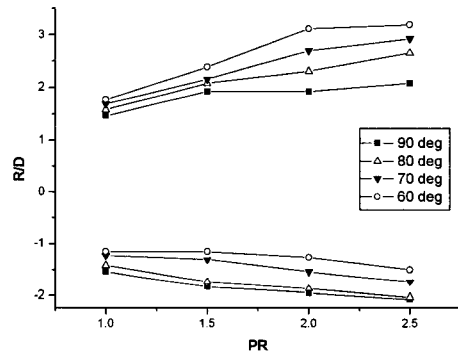


Fig. 8 Location of minimum recovery factor as functions of under-expanded ratio and impinging angle

방향으로 이동하는데, 이는 충돌면이 경사짐에 따라 최대 대류속도의 위치가 상류에서는 중심 방향으로, 하류에서는 중심반대 방향으로 이동하기 때문이다.

3. 결 론

충돌제트에 대한 기본적인 정보를 구하기 위해 경사진 평판에서 과소팽창 비와 경사각도에 따른 단열 벽 온도 분포와 표면 압력을 측정하였다. 과소 팽창비가 증가하면서 최대표면압력 값들은 작아지고, 회복계수의 감소효과는 커지며, 상/하류에서 모두 최소 회복계수 형성위치가 점차 중심에서 멀어진다. 또한 경사각도 감소에 따라 표면 압력 정점의 위치는 상류로 이동하고, 저온영역의 범위는 상류에서 감소하는 반면 하류로 넓게 분포된다. 동일한 과소팽창

비에서 최소 회복계수 형성위치는 상류에서는 경사각도가 감소함에 따라 중심에서 가까운 지점에서, 하류에서는 먼 지점에 형성된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업과 국방과학연구소 지원의 결과이며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Lamont, P. J., and Hunt, B. L., "The Impingement of Underexpanded, Axisymmetric Jets on Perpendicular and Inclined Flat Plates," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 100, Pt. 3 (1980), pp. 471-511.
2. Kim, K. H., and Chang, K. S., "Three-Dimensional Structure of a Supersonic Jet Impinging on an Inclined Plate," *Journal of Spacecraft and Rockets* Vol. 31, No. 5 (1994), pp. 778-782.
3. Eckert, E. R. G., "Cross Transport of Energy in Fluid Streams," *Thermo and Fluid Dynamics*, Vol. 21 (1987), No. 2-3, pp. 73-81.
4. B. Han, R. J. Goldstein, H. G. Choi., "Energy separation in shear layers," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 45 (2002), pp. 47-55.
5. Goldstein, R. J., Behbahani, A.L., and Heppelmann, K.K., "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.
6. Goldstein, R. J., "Heat Transfer From a Flat Surface to an Oblique Impinging Jet," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 110 (1998), pp. 84-90.
7. Lytle, D., Webb, B. W., "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.
8. Fox, M. D., Kuroska, M., Hedges, L. and Hirano. K., "The Influence of Vortical Structures on the Thermal Fields of Jets," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 255 (1993), pp. 447-472.