

고속 자유/벽 제트 영역에서의 총온도 특성 고찰

정현갑* · 이장우*** · 유만선* · 조형희** · 황기영*** · 배주찬***

Total temperature investigation in free & wall jet regions

Hyungab Jung* · Jangwoo Lee*** · Mansun Yu* · Hyunghee Cho**
· Kiyong Hwang*** · Ju chan Bae***

ABSTRACT

Total temperature distribution in high speed free & wall jet regions was investigated using the total temperature probe. For the free jet, the distance of probe from the nozzle exit is changed in the range of 1, 2, 4 and 6 times of nozzle exit diameter. Energy separation phenomenon was observed on shear layer between jet and ambient. In wall jet region, impinging plate was fixed at $Z/D=2$ and total temperature distribution has been measured for various radial distance ($R/D=1.25\sim 2.0$). Energy separation phenomenon was found at wall jet boundary and near wall, and was compared with measured adiabatic wall temperature value.

초 록

고속의 자유 제트 및 표면 충돌시 나타나는 벽제트 내에서의 총온도 분포가 측정되어졌다. 자유제트에서는 노즐 출구로부터 측정거리를 달리하며 ($Z/D=1,2,4,6$) 외기를 포함하여 총온도 분포가 측정되었으며, 제트와 외기 간 전단층에서의 에너지 분리현상을 확인하였다. 벽제트 영역에서는 충돌거리가 짧은 경우에 대하여 반경위치를 달리하며 ($R/D=1.25, 1.5, 1.75, 2.0$) 총온도 분포를 측정하여 벽제트 경계 및 벽근방에서의 에너지 분리현상을 확인하였으며, 단열벽면온도 분포와 이를 비교·검토하여 설명하였다.

Key Words: Wall jet(벽 제트), Total temperature measurement(총온도 측정), Energy Separation(에너지분리)

1. 서 론

고속의 충돌제트는 로켓의 발사시스템, 항공모함의 함재기 이륙시에 제트후방의 열차폐벽 그리고 군함에서 유도무기의 발사대등에서 볼 수 있는데, 이러한 충돌제트는 고속이면서 고온으로 충돌면과 주변에 열적이 부하를 준다. 이런 열부하를 해결하기 위해서 충돌판에서의 열전달 해

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 연세대학교 기계공학부

*** 국방과학연구소

연락처, E-mail: ghostmk44@yonsei.ac.kr

2. 본 론

석이 필요하며, 이 때 고소제트의 특성상 벽 근처의 가스 회복 온도를 대변하는 단열벽면온도를 측정하는 것이 중요하다. 이에 대하여 과거부터 많은 연구가 이루어졌는데 총돌판에서의 단열벽면온도 분포 특성은 여러 인자에 따라 국부적으로 다른 특성을 보인다. 단열벽면온도 역시 열전달 특성에 따라 국부적으로 다른 분포를 보이는데, 이런 현상을 설명한 연구중에서 Eckert[1]는 총돌제트에서의 국부적인 단열벽면온도의 분포를 에너지 분리현상(energy separation phenomenon)로 설명하였다. 에너지 분리현상이란 외부에 의한 어떤 가열이나 냉각 없이 유동 내에서 총 에너지가 재분배된다는 개념이다. 그래서 유동의 어느 부분은 높은 에너지를 가지고 다른 부분은 유동의 총에너지보다 낮은 에너지를 가지게 된다. Eckert[1]는 이런 현상을 제트와 외기간의 경계에서 두 유동의 온도차에 의한 열전도와 속도차에 의한 점성일간의 불균형과 유동의 속도차 의해 발생한 와류가 이동하면서 생기는 압력섭동으로 설명하고 있다. 그리고 Goldstein[2]은 총돌제트에 의한 단열벽면온도의 분포가 Re수가 아닌 노즐과 평판 간의 거리에 영향 받음을 제시하면서 노즐평판간 거리가 가까울 때 반경방향으로의 낮은 단열벽면온도분포는 에너지 분리현상에 의한 것이라 제시하였다. 에너지 분리현상은 자유제트에서 더 많은 연구가 있었는데 Seo[3]등은 $Re=80,000 \sim 160,000$ 인 자유제트에서 노즐과의 거리와 반경방향으로의 에너지 분리 크기를 실험적으로 측정하여 전반적으로 Re에 따른 에너지 분리 경향의 변화는 크지 않음을 제시하였다. Han 등[4]은 수치 해석을 통해 노즐과의 거리와 $Re=100 \sim 1000$ 의 자유제트 전단층에서의 에너지 분리 발생위치와 크기를 계산하였으며, 와류에 의한 영향이 지배적임을 제시하였다. 본 연구는 자유제트에서 에너지 분리현상을 확인하고 총돌제트의 벽제트 영역에서의 총온도를 측정함으로써 에너지 분리현상을 통해 단열벽면온도특성을 이해하고자 한다.

2.1 실험장치 및 방법

Figure 1은 본 연구에 사용된 실험 장치의 개략도이다. 왕복동식 고압압축기 실내공기를 흡입하여 150 kgf/cm^2 (최대 200 kgf/cm^2)까지 압축한다. 고압으로 압축된 공기에 함유된 수분은 단열팽창 시 응결하므로 이를 방지하기 위하여 7단의 공기필터를 거쳐서 이슬점 -50°C 이하 수준까지 제습하여 고압저장용기에 저장한다. 3개의 고압저장용기의 총 용량은 1800L , 사용압력은 200 kgf/cm^2 (파괴압력 700 kgf/cm^2)이다. 필터 직전에 위치한 버퍼압력이 150 kgf/cm^2 까지 가압되면 압축기 전원이 자동으로 차단되도록 설계되었으나, 안전을 위하여 각각의 고압용기에는 작동압력 155 kgf/cm^2 인 안전밸브(relief valve)를 설치하였다. 고압용기에 저장된 압축공기는 압력조절기를 통과하면서 실험에 요구되는 압력으로 감압 조정된다. 조정밸브는 스테인레스 스틸로 제작되었으며 중앙부에 T타입 열전대와 압력센서를 설치하여 실험중의 온도와 압력을 측정하였다. 히터와 집합관 사이에는 내부유로 및 단면적의 변화가 없는 공압자동식 볼밸브를 설치하여 순간적인 유동제어가 가능하도록 하였다. 볼밸브를 순간적으로 개방하면 압축공기가 조정 챔버에 충전된 후 노즐을 통하여 가속되어 고속유동을 발생시킨다. 본 연구에서는 사용한 노즐은 아음속에서 음속까지 가능하며 폭면으로 이루어진 축소노즐(contoured convergent nozzle)로 출구의 직경은 10.0 mm 이고, 면적 수축비(area contraction ratio)가 25:1이다. 노즐벽면을

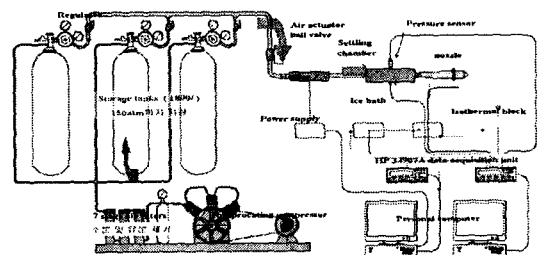


Fig. 1 Schematic of Experimental Apparatus.

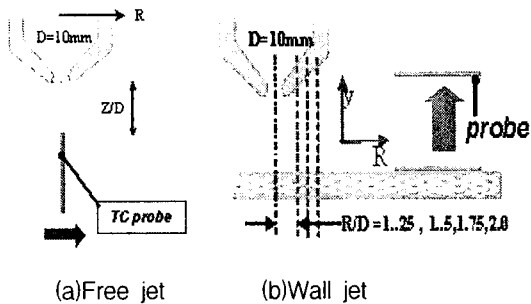


Fig. 2 Total temperature measurement at Free & Wall jet

통한 열손실을 방지하기 위하여 노즐은 단열 재료인 아크릴(acrylic)로 제작하였다. 또한, 공급되어지는 공기는 저장 탱크와 정체 챔버 사이에 위치한 전기 히터를 통하여 가열되어지며 대기 중의 공기 유입에 의한 영향을 되도록 배제하기 위한 목적으로 제트의 총온도를 대기 온도와 $\pm 0.3K$ 내로 유지시켰다. 히터는 내경 60 mm의 고압관 내부에 최대 6 kW의 코일히터가 내장되어 있으며, 가변전원을 이용하여 발열량을 조절할 수 있도록 하였다.

본 연구에 필요한 총온도를 측정하는 방법을 Fig. 2에 개략적으로 나타내었다. 자유제트의 경우 노즐출구로부터 일정거리에 총온도 탐침을 두어 반경방향으로 탐침을 이동시켜가며 측정하였고, 노즐로부터의 거리변화에 따른 총온도 분포의 변화를 확인하였다. 벽제트영역에서는 특정 반경거리($R/D=1.25, 1.5, 1.75, 2.0$)에서 탐침을 높이방향(y)으로 이동시켜가며 측정하였다. 이때 총돌판의 위치는 Shin[5]등에 의해 제시된 충돌 제트에 의한 단열벽온도 분포를 참조하여 측정값의 국부적인 차이가 크게 나는 $Z/D=2.0$ 으로 고정하였다. 총돌판은 아크릴 평판을 사용하였으며 노즐과 평판은 수직이다. 총온도 측정 탐침은 참고문헌[6,7]을 참고하여 공기유출홀의 면적을 입구면적의 66%정도가 되도록 하여 제작하였으며, 입구의 직경은 0.2 mm로 하였다. 제작된 탐침은 이송정밀도 0.02 mm의 선형이송장치에 고정되어 사용되었으며, 자유제트내에서의 실험결과 회복계수가 약 0.97로 나타났다. 측정된 총온도 분포는 에너지 분리계수로 무차원화하여

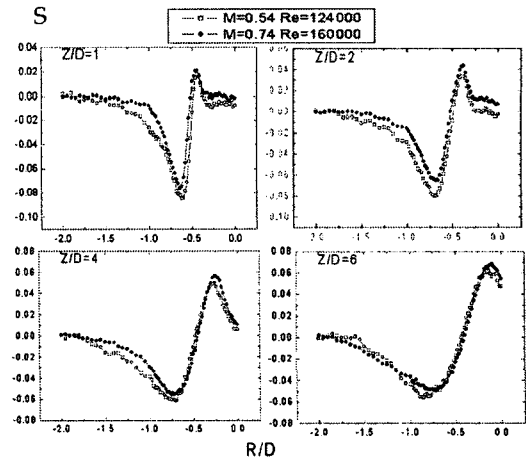


Fig. 3 Effect of Re on the distribution of energy separation factor of free jet

표현하였으며, 에너지 분리계수는 다음과 같이 정의된다.

$$S = \frac{T - T_j}{T_d} = \frac{T - T_j}{\frac{u_j^2}{2c_p}}, \quad T_j = T_{amb} = T_t$$

이 때 T는 탐침에 의해 측정된 온도이며, T_j 는 주유동 혹은 대기온도, T_d 은 유동속도에 따른 동적온도이다. 따라서 양의 S는 가열된 총온도를 음의 S는 냉각된 제트 총온도를 각각 의미한다.

2.2 실험결과 및 고찰

2.2.1 자유제트(Free jet)

Figure 3은 고속의 Re수에서 자유제트 내에서의 총온도를 반경방향으로 측정하여 노즐과의 거리에 따라 총온도 분포를 에너지 분리계수로 나타낸 표이다. Fox[8]등이 제시한 바와 같이 노즐 출구 경계로부터의 와류에 의한 에너지 분리로 전단층을 경계로 제트 안쪽의 높은 총온도와 바깥쪽의 낮은 총온도가 형성됨을 확인할 수 있다. 근거리에서는 제트 경계면 근처에서만 에너지 분리현상이 확인이 되고 노즐과의 거리가 멀어짐에 따라 점점 중심으로 그 영향이 확대되는 경향을 확인할 수 있다. 그리고 Re수를 바꿔서 실험한 결과 같은 위치에서의 에너지 분리현상은 Seo[3]등이 제시한 것과 같이 Re수에 영향이 적음을 확인할 수 있다.

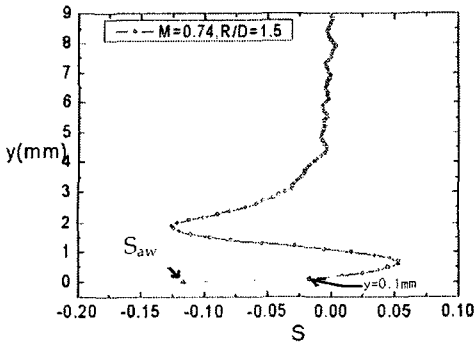


Fig. 4 Relation between energy separation and T_{aw}

2.2.2 벽제트(wall jet)

벽제트 영역에서도 자유제트와 유사한 방법으로 높이방향으로 탐침을 0.1 mm씩 이송하면서 총온도를 측정, 벽제트에서의 에너지 분리계수로 무차원화 하였다. Fig. 4는 무차원화 된 벽제트에서의 에너지 분리계수분포와 에너지 분리계수로 표현된 단열벽면온도를 함께 나타낸 것이다. 이것은 전반적인 벽제트의 온도분포에 대해서 설명해 주고 있다. 제시된 에너지 분리계수분포로부터 벽제트의 높이는 대략 총돌면에서부터 4~5 mm인 것으로 판단되며, 높이방향으로 1, 2 mm근방에서 각각 양, 음의 S가 관찰되어 에너지 분리 현상이 일어남을 보여주고 있다. 또한, 높이 1mm미만의 영역에서 벽근처에 가까울수록 온도는 급격히 떨어지며, 이로부터 표면에서의 값은 단열벽면온도로 수렴되리라 예상할 수 있다. 높이 1 ~ 5mm의 영역은 벽제트와 대기간

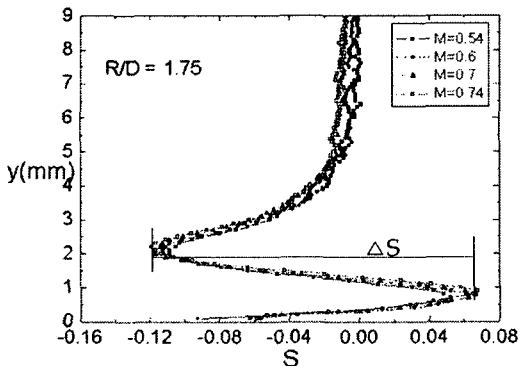


Fig. 5 Energy separation factor distribution with M# at $R/D=1.75$, $Z/D=2$

Table 1. Real Temperature difference by Energy separation ($R/D=1.75$)

M#	T(°C)min	max	ΔT
0.54	20.851	23.641	2.790
0.6	20.322	24.051	3.729
0.7	19.298	24.595	5.297
0.74	18.803	24.843	6.039

의 전단층에서의 에너지 분리효과로 생각되며, 1 mm이하의 영역에서는 경계층근방에서 나타나는 에너지 분리효과로 생각된다. Fox[8] 등에 의해 제기된 와류현상의 기재로부터 벽제트에서는 일차와류가 영향을 미치는 공간적 범위가 이차와류보다 크고, 이차와류는 벽근방의 작은 영역에만 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

Figure 5는 서로 다른 노즐 출구 마하수에 대하여 일정한 반경위치($R/D=1.75$)에서의 에너지 분리계수분포를 함께 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 서로 다른 마하수에서도 에너지 분리계수에 분포는 변화가 없음을 확인할 수 있으며, 이것은 자유제트에서의 에너지 분리계수분포 경향에 대하여 Soel[3]이 제시한 바와 같다. 에너지 분리크기(ΔS)는 평균적으로 약 0.17로 계산되었다.

Table 1은 탐침에 의해 측정된 총온도분포의 최대값과 최소값을 나타낸 것이다. Table에서도 볼 수 있듯이 마하수에 따라서 최소, 최대온도가 달라지며 그 차이 또한 커짐을 확인할 수 있다.

Figure 6은 반경위치에 따른 에너지 분리의 크기(ΔS)를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 $R/D=$

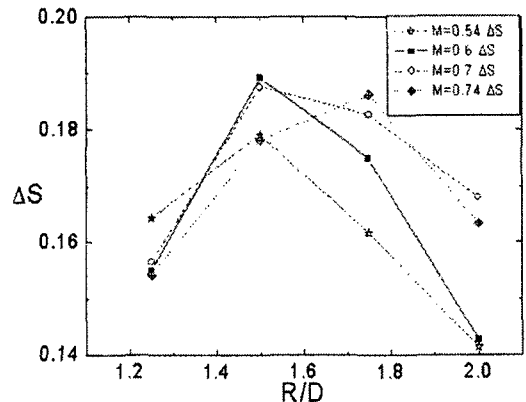


Fig. 6 Energy Separation factor difference along the R/D with M#

1.25, 1.5, 1.75, 2.0의 네 위치에서 값을 얻었다. R/D= 1.25, 2.0에서 에너지 분리의 크기가 낮은 값을 보이며 R/D= 1.5, 1.75에서 높은 값을 보인다. 즉, R/D=1.5~1.75에서 에너지 분리의 크기가 가장 커질 것으로 예상되며, 이로부터 Shin[5]등에 의해 제시된 같은 반경위치에서의 낮은 단열벽면온도분포를 설명할 수 있다.

3. 결 론

고속 자유제트 및 벽제트에서의 총온도 분포를 측정하였다. 자유제트에 아음속 마하수는 에너지 분리현상에 대해 영향을 거의 미치지 않고 있음을 확인하였다. 벽제트에서는 제트-대기 경계 및 벽 근방에서의 에너지 분리현상을 확인하였고 동일위치에서 S분포는 아음속 마하수에 영향을 받지 않음과 R/D=1.5 ~1.75사이에 에너지 분리현상이 커짐을 확인하였다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. Eckert, E. R. G., "Cross Transport of Energy in Fluid Streams," Thermo and Fluid Dynamics, Vol. 21 (1987), No. 2-3, pp. 73-81.
2. 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 Mass Transfer, Vol. 29, No. 8 (1986), pp. 1227-1235.

3. W. S. Seol, R. J. Goldstein., "Energy Separation in a Jet Flow," Journal of Fluids Engineering, Vol. 119 (1997), pp. 74-82.

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. Sangwoo Shin, Bumseok Kim, Jangwoo Lee, Mansun Yu, Hyunghee Cho, "Measurement of the adiabatic wall temperature in compressible high speed impinging jets", proceedings of the 3rd national congress on fluids engineering, jeju, korea, 2004.

6. H. Dean Baker, E. A. Ryder, N. H. Backer., "Temperature Measurement in Engineering," OMEGA ENGINEERING, INC., 1975.

7. Cindy W. Albertson and Willard A. Bauserman, Jr., "Total Temperature probes for High-Temperature Hypersonic Boundary-layer Measurements", NASA Technical memorandum 4407, NASA Langley Research center hampton, VA 23681-0001, 1993.

8. 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.