

적외선 카메라를 이용한 초음속 충돌 동축제트의 벽면 온도 측정

곽종호[†] · V. R. Sanal Kumar^{*} · 김희동^{*}

An Experimental Study of the Wall Temperature of the Supersonic Impinging Coaxial Jet Using an FLIR

Jong-Ho Gwak, VR Sanal Kumar and Heuy-Dong Kim

Key Words : Compressible Flow(압축성 유동), Impinging Jet(충돌 제트), Mach Disk(마하 디스크), Plate Shock Wave(평판 충격파), Supersonic Coaxial Jet(초음속 동축 제트)

Abstract

The supersonic impinging jet has been extensively applied to rocket launching system, gas jet cutting control, gas turbine blade cooling, etc. In such applications, wall temperature of an object on which supersonic jet impinges is a very important factor to determine the performance and life of the device. However, wall temperature data of supersonic impinging jets are not enough to data. The present study describes an experimental work to measure the wall temperatures of a vertical flat plate on which supersonic, dual, coaxial jet impinges. An Infrared camera is employed to measure the wall temperature distribution on the impinging plate. The pressure ratio of the jet is varied to obtain the supersonic jets in the range of over-expanded to moderately under-expanded conditions at the exit of coaxial nozzle. The distance between the coaxial nozzle and the flat plate was also varied. The coaxial jet flows are visualized using a Shadow optical method. The results show that the wall temperature distribution of the impinging plate is strongly dependent on the jet pressure ratio and the distance between the nozzle and plate.

1. 서 론

최근 제트소음 경감, 추력 증강 등의 목적뿐만 아니라 금속재료를 절단하기 위하여 초음속 이중 동축 제트가 널리 활용되고 있다.

종래 초음속 이중 동축 제트유동에 관해서는, Kurian 등⁽¹⁾이 동축제트의 주제트와 보조제트의 압력비 변화에 따른 마하 디스크(Mach disk)와 충격파 구조를 조사하였으며, Narayanan 등⁽²⁾은 동축 제트 내부의 마하 디스크의 위치와 제트 중심축을 따르는 마하수 분포에 대한 2차 보조제트 유동의 영향을 상세하게 조사하였다. 또, 최근 김 등⁽³⁾은 수치계산법과 실험을 통하여, 초음속 동축제트에

서 발생하는 충격파 시스템과 초음속 길이 등에 미치는 1차 제트 및 2차 보조제트의 공급압력의 영향 및 노즐 형상의 영향에 대하여 체계적으로 연구한 바 있다.

그러나 이러한 연구들은 모두 제트가 대기 상태의 자유공간에 방출되는 자유제트에 관한 것이며, 금속모재의 절단이나 코팅 또는 가공 등에 사용되는 초음속 이중 동축 제트는 작업시 모재와 충돌하게 되므로, 종래 자유제트에 관한 연구결과만으로는 충돌제트 유동장을 이해하기가 곤란하다.

이러한 초음속 충돌제트는 1960년대부터 로켓의 발사대 설계, 다단계 로켓의 분리(multi-stage rocket separation)⁽⁴⁾, 추력제어(thrust control), 수직 이착륙(vertical take-off landing) 항공기 등의 비상체에 주로 응용되어 많은 연구가 수행되었으며, 현재에는 고체 표면의 에로존(erosion)⁽⁵⁾, 가스터빈, 강화유리의 제작공정, 금속 분말의 제조를 위한 가스 미립화, 레이저 가공에서 사용되는 어시스트 가스

[†] 안동대학교 기계공학과 대학원

E-mail : kimhd@andong.ac.kr

TEL : (054)820-5169 FAX : (054)823-5495

^{*} 안동대학교 기계공학부

(assist gas)⁽⁶⁾ 등의 산업분야에 적용 되어지고 있다. 이러한 충돌제트의 유동장은 자유제트의 유동장에 비해, 충돌판에서의 반사 충격파(reflected shock wave), 벽유동 및 재부착(reattachment) 등으로 인하여 한층 복잡한 유동장을 형성하게 된다. 이에 충돌제트 유동을 상세히 이해하기 위해 현재까지 다양한 연구가 수행되어 왔다.

평판에 충돌하는 초음속 제트에 관한 연구로는 Iwamoto 등⁽⁷⁾이 평판에 충돌하는 부족 팽창(under expanded jet) 제트에 대한 수치해석과 실험을 수행하였으며, Prasad 등⁽⁸⁾은 double wedge deflector에 충돌하는 초음속 제트에 대한 실험을 수행하였다. 또 Masuda 등⁽⁹⁻¹⁰⁾은 음속 이중 동축 노즐을 사용하여, 2차 제트 유동의 압력에 따른 마하 디스크의 위치와 평판에서의 충돌 압력을 조사하였다. 한편 Fieret 등⁽¹¹⁾은 충돌제트에 관한 유사연구로서 레이저 절단작업에서 모재에 충돌하는 국부 전압이 모재의 최대 절단속도와 깊은 관계가 있음을 보고하였다. 초음속 충돌제트에서 발생하는 벽면온도는 장치의 수명을 결정하는 중요한 요소이다. 그러나 충돌 벽면온도에 관한 연구는 충분히 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 수직 평판에 충돌하는 초음속 이중 동축제트의 온도장을 조사하기 위한 실험을 수행하였다. 실험에서는 충돌판의 거리와, 주제트 및 보조제트의 압력 등을 변화시켜 충돌판에서 발생하는 온도분포를 상세하게 측정하였으며, 또 웨도우(shadow) 가시화법을 이용하여 충돌제트의 유동장을 정성적으로 관찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig.1은 본 연구에서 사용된 실험 장치를 나타낸다. 실험 장치는 압축기와 압축탱크, 1차 정체실 및 2차 정체실, 가시화 시스템과 온도 측정 시스템으로 구성되어 있다. 압축탱크는 약 1.5MPa까지 가압할 수 있으며, 체적은 15m³정도이다. 2 단 스크류 압축기(screw compressor)로부터 압축된 공기는 건조장치를 거쳐 압축탱크에 저장된다. 이후 압력 조절 밸브와 상류 1,2차 정체실을 거쳐 동축 노즐로 유입되어 대기로 방출되며, 전방의 평판에 충돌하여 이중 동축 충돌 유동장을 발생시킨다. 동축 제트의 2차 제트는 압축탱크와는 독립적으로 별도의 가압탱크로부터 공급되며, 2차 정체실을 거쳐 보조노즐로 유입하게 된다. 이러한 압축탱크는 실험에서 1차 주제트의 압력과 2차 보조제트의 압

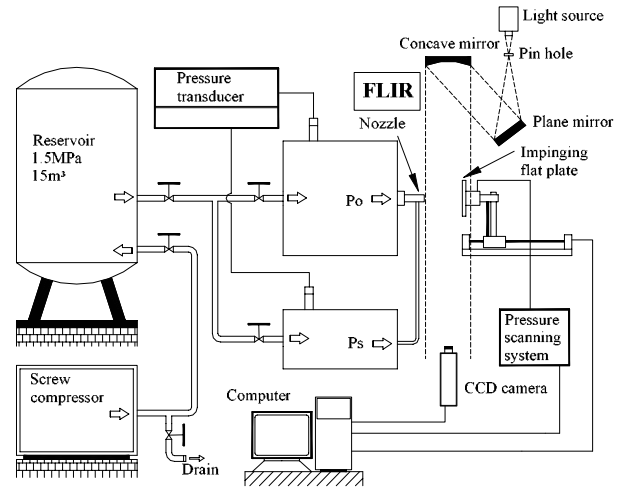


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

력을 각각 독립적으로 조절 가능하도록 하였다. 또한 본 실험에서는 2차 제트 유동의 공급라인에서 발생하는 유동의 초킹(choking)현상 및 압력 손실을 줄이기 위해서 보조제트의 유로를 노즐 출구 단면적보다 충분히 크게 설계하였다. 이중 동축 충돌 유동장을 가시화하기 위해 shadow 가시화법이 사용되었다. 광원으로는 할로겐 연속광이 사용되었으며, CCD 카메라(768x494 pixels)를 통하여 컴퓨터에 저장하였다. 노즐 반경 방향으로의 온도 측정을 위하여 사용된 FLIR(-40~500°C, 320x240 pixels)은 이미지를 포착해 PC-card에 저장하였으며, ThermoCAMTM Research 2002를 사용하여 이미지를 분석하였다. 또한 충돌판(140x140mm)은 3축 이송장치(이송 속도 17mm/s)의 전면부에 부착되었다.

Fig.2 에는 실험에 사용된 음속/초음속 동축 노즐의 상세 형상을 나타내었다. 그림에서 D_t 는 노즐 목직경, D_e 는 노즐 출구직경, α 는 외부환형

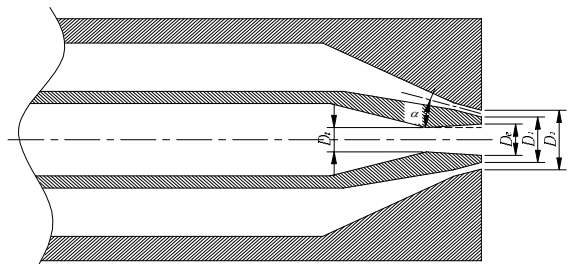


Fig.2 Details of coaxial nozzle

Table 1 Dimensions of coaxial nozzles

	M_d (mm)	D_t (mm)	D_e (mm)	D_1 (mm)	D_2 (mm)	α (deg)
N-1	2.0	5.0	6.5	9.5	12.5	0
N-2	1.0	5.0	5.0	8.0	11.0	0
N-3	1.0	5.0	5.0	8.0	11.0	20

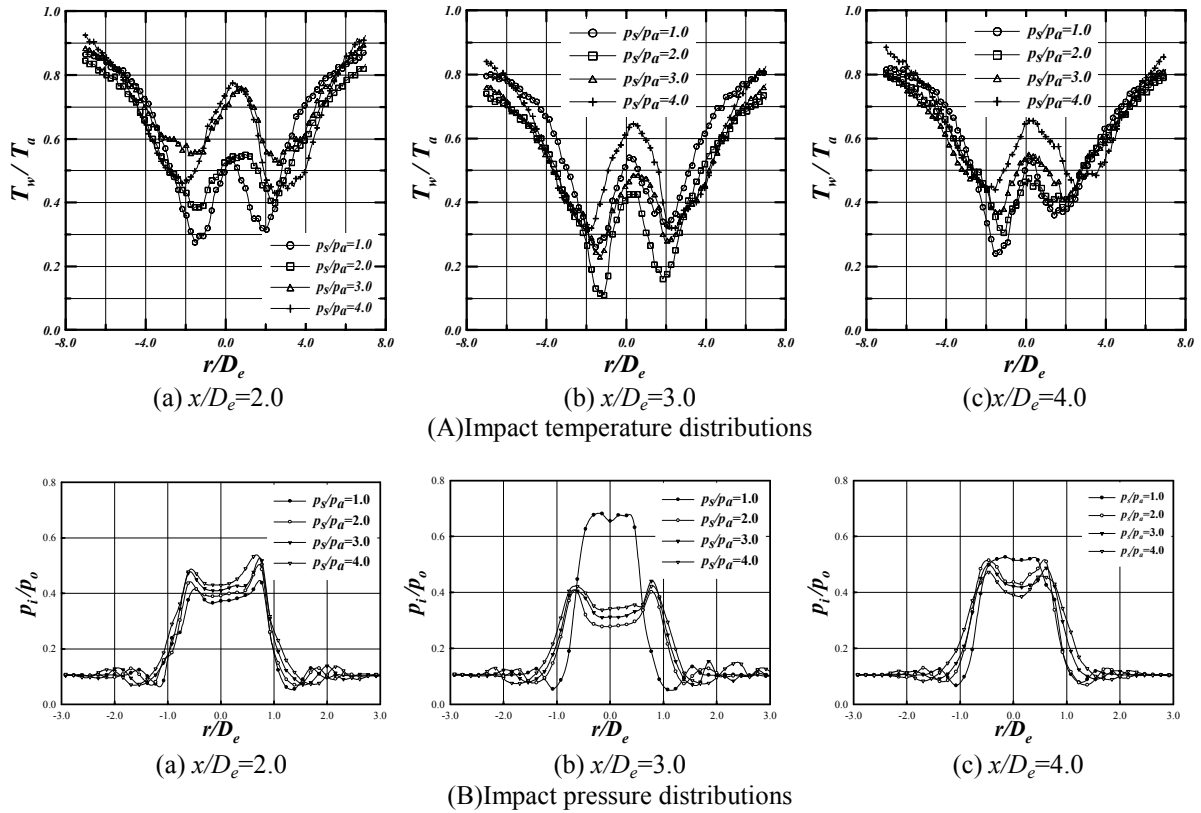


Fig.3 Impact temperature distributions and impact pressure distributions (N-1, $p_0/p_a=8.0$)

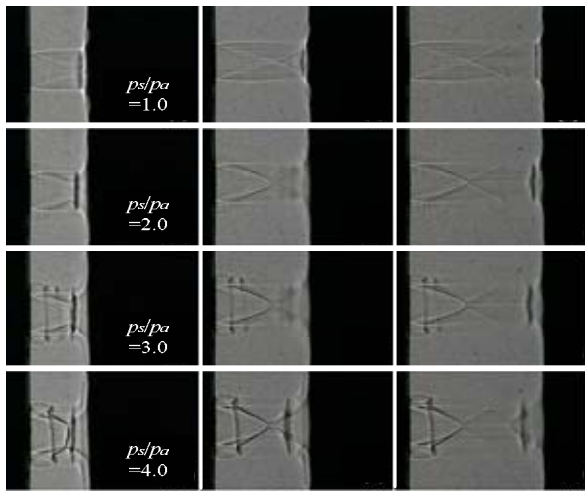
노즐의 분사각을 나타내며, 상세한 제원을 Table 1에 나타내었다. 동축 노즐의 내부 노즐로는 음속 또는 초음속 노즐이 사용되었으며, 외부 환형 노즐은 노즐목과 출구 면적비가 동일한 음속 노즐이다. Table 1에 나타내었듯이, 3개의 동축 노즐이 실험에 사용되었으며, N-1의 내부 노즐은 설계 마하수 $M_d = 2.0$ 인 초음속 노즐이며, 노즐목의 직경은 5mm이다. N-2, N-3 노즐은 $M_d = 1.0$ 인 음속 노즐이 내부 노즐로 사용되었으며, 노즐 목직경은 초음속 노즐과 동일하다. 한편 N-3에는 외부 환형 제트의 분사각이 동축 제트에 미치는 영향을 조사하기 위해 외부 환형 노즐에 20°의 분사각을 주었다.

2.2 실험 조건과 측정 방법

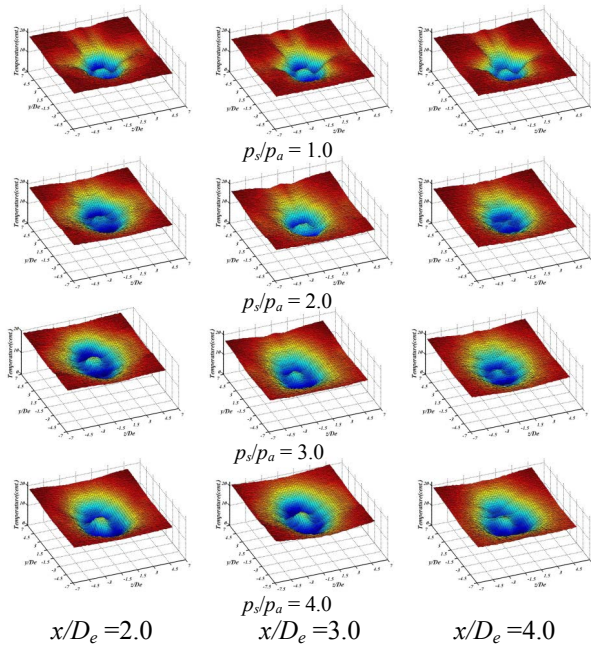
본 실험은 내부 노즐의 압력비(p_0/p_a)와 외부 환형 노즐의 압력비(p_s/p_a)를 각각 6.0 ~ 10.0과 1.0 ~ 4.0으로 변화시켜 압력 변화에 따른 벽면온도를 측정하였다. 또한 거리변화에 따른 온도변화를 측정하기 위해서 노즐출구와 평판사이의 거리(x)를 내부노즐 출구 직경(D_e)으로 무차원 한 값 x/D_e 를 2.0 ~ 4.0으로 각각 변화시켰다. 주제트와 보조제트의 압력비는 1, 2차 정체실에 설치된 압력 센서 (Kulite, XT-190)를 사용하여 조절하였으며, 노즐 출구면과 충돌판과의 거리는 3축 이송장치를 이용하여 변화시켰다.

3. 결과 및 고찰

Fig.3에는 p_0/p_a 는 8.0이고 p_s/p_a 를 1.0, 2.0, 3.0, 4.0까지 변화시켰을 때 N-1노즐에 대하여 단일 및 동축제트가 수직 평판에 충돌할 때 반경방향으로의 온도분포와 압력분포를 나타내었다. 또한 $x/D_e = 2.0, 3.0, 4.0$ 는 그림에서 각각 (a), (b), (c)를 나타낸다. 횡축은 수직 반경거리 r 를 내부노즐 출구직경 D_e 로 무차원하여 나타내었으며, (A)의 종축은 벽면온도 T_w 를 주위온도 T_a 로 무차원하였고, (B)의 종축은 충돌전압 p_i 를 상류 정체압 p_0 로 무차원하여 나타내었다. $p_s/p_a = 1.0$ 인 경우는 대기압과 같은 단일제트이며, $p_s/p_a = 2.0, 3.0, 4.0$ 인 경우는 주제트 주위에 환형의 보조제트가 방출되는 동축제트이다. $r/D_e = 0$ 을 기준으로 정확한 측대칭을 나타내지 않는 것은 노즐 중심축과 충돌판의 중심이 정확하게 일치하지 않기 때문이다. 그림(A)에서 충돌제트의 최소 벽면온도는 평판 중심부에 발생하지 않으며, $r/D_e \approx 1.2$ 부근에서 환형으로 나타난다. 이러한 환형의 벽면온도는 평판 중심으로 갈수록 온도가 증가한다. 이는 노즐 충격파와 plate shock의 간섭이 원인이다. p_s/p_a 가 증가하는 경우, 벽면온도가 증가하며, x/D_e 가 증가하는 경우 평판 중심에서의 피크 벽면온도가 감소하다가 증가한다.

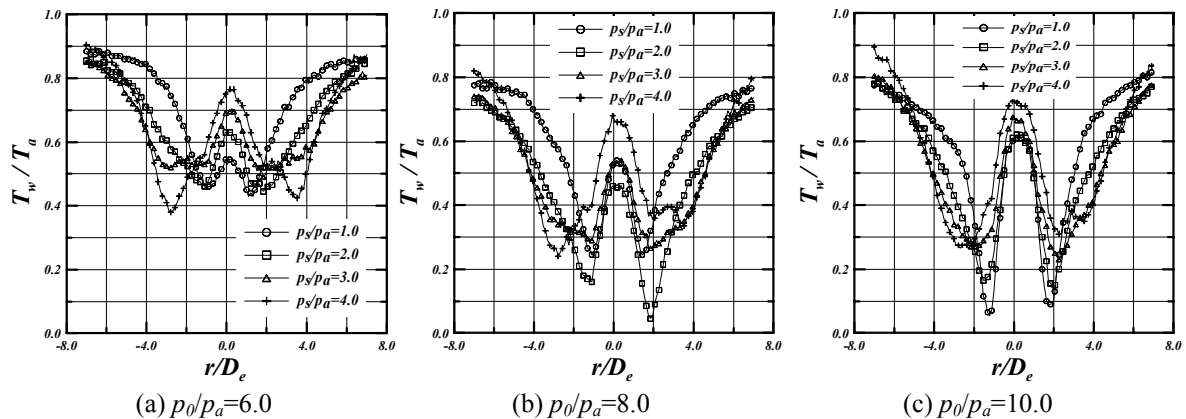


$x/D_e = 2.0$ $x/D_e = 3.0$ $x/D_e = 4.0$
 (a) Shadowgraphs



$x/D_e = 2.0$ $x/D_e = 3.0$ $x/D_e = 4.0$
 (b) Temperature distributions

Fig.4 Shadowgraphs and temperature distributions of supersonic impinging coaxial jets (N-1, $p_0/p_a = 8.0$)



(a) $p_0/p_a = 6.0$ (b) $p_0/p_a = 8.0$ (c) $p_0/p_a = 10.0$

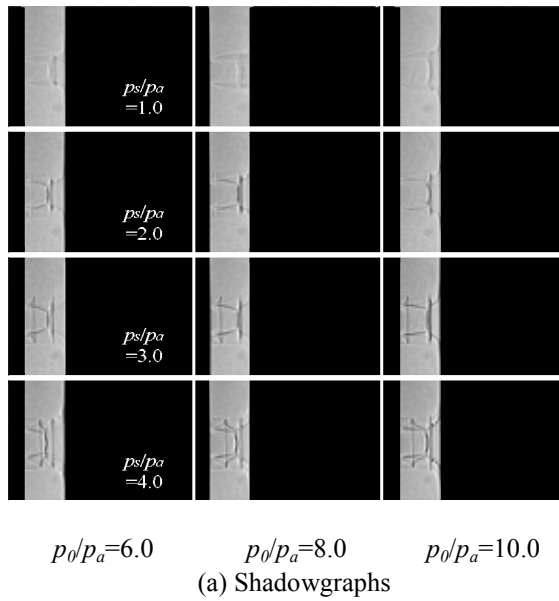
Fig.5 Impact temperature distributions on flat plate (N-2, $x/D_e = 2.0$)

또한 그림(B)에서 충돌압력 p_{imax} 도 평판 중심부에 작용하지 않으며, 환형의 최대 압력부 내부는 거의 일정한 압력분포를 나타낸다. (b)에서 단일제트의 중심부에서의 충돌압력이 상대적으로 크게 나타났다. 이것은 plate shock이 압축 영역내에 위치하면서 상대적으로 높은 충돌압력을 나타내기 때문이다. p_s/p_a 증가에 따라 충돌압력은 증가하는 경향을 나타냈다.

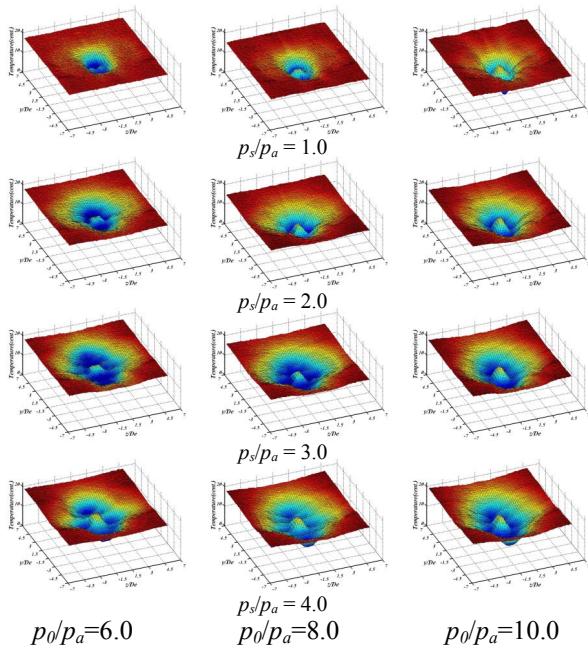
Fig.4는 Fig.3과 동일한 유동조건인 경우, shadow image와 평판에서의 온도분포를 나타낸다. p_s/p_a 가 증가함에 따라 plate shock은 충돌판 상류로 이동하게 된다. 이것은 p_s/p_a 의 증가에 의해 노즐출구에 형성되는 직경이 큰 마하 디스크와 강한 바렐 충격파(barrel shock wave)에 의한 유동 마하수의 감소가 원인이다.

Fig.5는 x/D_e 는 2.0이고 p_s/p_a 를 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 까지 변화시켰을 때, N-2 노즐에 대하여 단일 및 동축제트가 수직 평판에 충돌할 때 반경방향으로의 온도분포를 나타낸다. 또한 또한 $p_0/p_a = 6.0, 8.0, 10.0$ 는 그림에서 각각 (a), (b), (c)를 나타낸다. p_s/p_a 가 증가할수록 평판 중심에서의 피크 벽면온도가 증가한다. 이러한 경향은 N-1 노즐과 비슷한 경향을 나타낸다. 단일제트의 경우, p_0/p_a 가 증가할수록 중심부에서의 온도 변화폭이 커지는 것을 볼 수 있다. 하지만 단일제트에 비해 동축제트가 중심부에서 온도 변화폭이 작다는 것을 알 수 있다.

Fig.6은 Fig.5와 동일한 유동조건인 경우, shadow image와 평판에서의 온도분포를 나타낸다. p_s/p_a 의 증가는 노즐 출구에서의 제트 팽창을 증가시켜 마하 디스크의 직경을 증가시키며, 노즐 출구 하류로 이동하게 된다. 하지만 단일제트에 비해 동축제트의 보조제트는 마하 디스크의 직경을 감소시키는 것을 볼 수 있다. 충돌판 상류에 돔(dome)형태의 충격파가 형성됨을 알 수 있고, 노즐 출구에서의 충격파와 충돌판에서의 반사 충격파의 상호

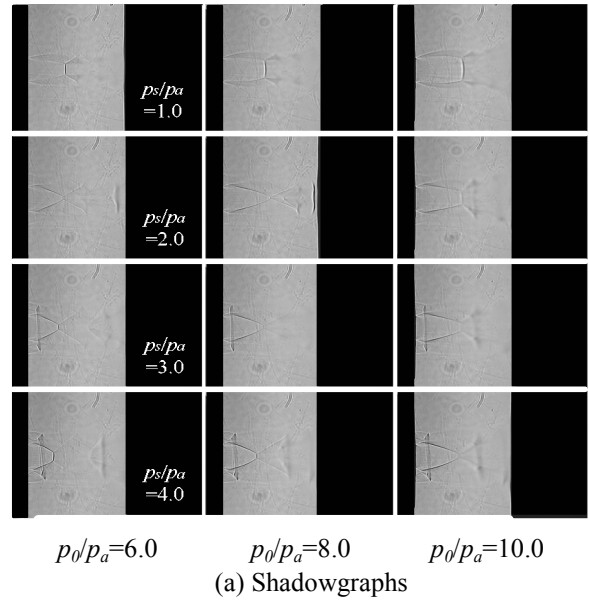


(a) Shadowgraphs

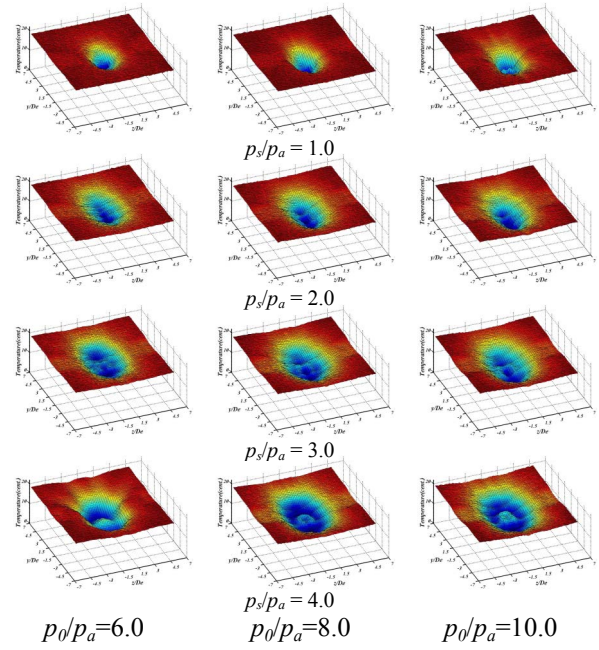


(b) Temperature distributions

Fig.6 Shadowgraphs and temperature distributions (N-2, $x/D_e=2.0$)

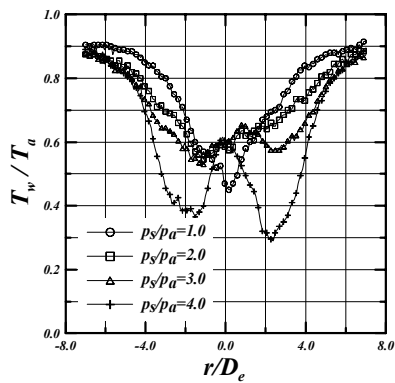


(a) Shadowgraphs

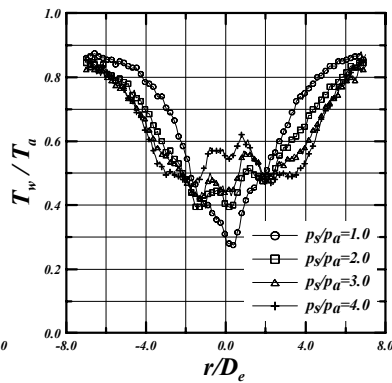


(b) Temperature distributions

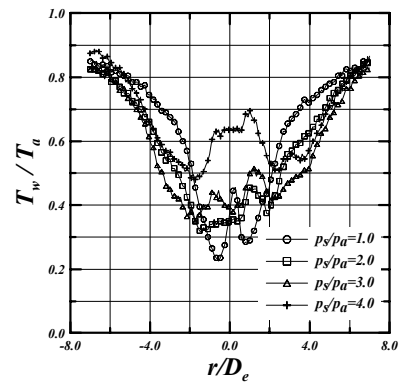
Fig.8 Shadowgraphs and temperature distributions (N-3, $x/D_e=3.0$)



(a) $p_0/p_a = 6.0$



(b) $p_0/p_a = 8.0$



(c) $p_0/p_a = 10.0$

Fig.7 Impact temperature distributions on flat plate (N-3, $x/D_e=3.0$)

간섭에 의해 매우 복잡한 충격파 구조가 형성됨을 볼 수 있다.

Fig.7 에는 x/D_e 는 3.0이고 p_s/p_a 를 1.0, 2.0, 3.0, 4.0까지 변화시켰을 때, N-3 노즐에 대하여 단일 및 동축제트가 수직 평판에 충돌할 때 반경방향으로의 온도분포를 나타내었다. 또한 $p_o/p_a = 6.0, 8.0, 10.0$ 는 그림에서 각각 (a), (b), (c)를 나타낸다. 단일제트의 경우, p_o/p_a 가 증가할수록 최소 벽면온도가 감소한다는 것을 볼 수 있다. 반면 동축제트의 경우, $p_o/p_a = 8.0$ 일 때 $p_o/p_a = 6.0$ 보다 온도 변화폭이 감소하였으나 $p_o/p_a = 10.0$ 으로 증가한 경우에는 오히려 온도 변화폭이 증가했다. 이러한 경향은 외부 환형 노즐의 분사각이 없는 N-2와 매우 다르며, 보조제트의 분사각은 주제트의 유동 특성에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig.8은 Fig.7과 동일한 유동조건인 경우, shadow image와 평판에서의 온도분포를 나타낸다. 단일제트인 경우, p_o/p_a 의 증가는 마하 디스크의 직경을 증가시킨다. 반면 동축제트의 경우, $p_o/p_a = 8.0$ 은 $p_o/p_a = 6.0$ 보다 마하 디스크의 직경이 감소하였으나 $p_o/p_a = 10.0$ 으로 증가한 경우에는 오히려 직경이 증가했다. 또한 p_s/p_a 가 증가할수록 마하 디스크는 감소하였으나, $p_s/p_a = 4.0$ 이 되면 외부 환형 노즐 경계부 부근에서 발생한 충격파가 발생함에 따라 마하 디스크의 직경을 오히려 증가시켰다. 그러므로 p_s/p_a 의 증가는 마하 디스크의 직경을 감소시키지만 p_o/p_a 에 따라 임계값이 존재한다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 평판에 충돌하는 초음속 이중 동축제트의 유동장을 조사하기 위하여, 주제트와 보조제트의 압력비와 평판의 위치 등을 변화시켜 실험을 수행하였다. 실험에서는 적외선 카메라를 이용하여 충돌면의 온도를 측정하였을 때, 고감도 압력센서를 이용하여 벽면 압력을 측정하였다. 본 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 초음속 노즐인 경우, 충돌제트의 최소 벽면 온도는 평판 중심부에 발생하지 않으며 $r/D_e \approx 1.2$ 부근에서 환형으로 나타난다. 이러한 환형의 벽면 온도는 평판 중심으로 갈수록 증가한다.

(2) 초음속 노즐인 경우, p_s/p_a 가 증가하는 경우 벽면 온도가 증가하며, x/D_e 가 증가하는 경우 평판 중심에서의 피크 벽면 온도가 감소하다가 증가한다. 또 p_s/p_a 가 증가함에 따라 plate shock은 충돌판 상류로 이동하게 된다.

(3) 음속 노즐인 경우, 단일제트에 비해 동축제

트의 중심부에서 온도 변화폭이 작다.

(4) 음속 노즐이며 분사각이 있는 경우, p_s/p_a 의 증가는 마하 디스크의 직경을 감소시키지만 p_o/p_a 에 따라 임계값이 존재한다는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 2004년도 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Kurian, J., Rao, T. V. R. and Kumar, R. R., 1995, "Mach Disk and Shock Structure in Coflowing Dual Axisymmetric Jets," *Shock Waves*, Vol. I, pp. 349~354.
- (2) Narayanan, A. K. and Damodaran, K. A., 1993, "Mach Disk of Dual Coaxial Axisymmetric Jets," *AIAA*, Vol. 31, No.7, pp. 1343~1345.
- (3) Kim, J. B., Lee, J. H. and Kim, H. D., 2002, "Experimental Study of Supersonic, Dual, Coaxial Jets Impinging on a Flat Plate" *KSME*, pp. 1550~1555.
- (4) Gummer, J. H. and Hunt, B. L., 1974, "The Impingement of Non-Uniform, Axisymmetric, Supersonic Jets on a Perpendicular Flat Plate," *Israel Journal of Technology*, Vol. 12, pp. 221~235.
- (5) Ashratov, E. A., 1966, "Calculations of Axisymmetric Jet Leaving a Nozzle at Jet Pressure Lower than Pressure in Medium," *Fluid dynamics*, Vol. 1, No. 1, pp. 113.
- (6) Masuda, W., Bai, Z., Nakamura, T. and Matsuno, K., 1991, "Visual Observation and Numerical Simulation of and Underexpanded Annular Impinging Jet," *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, (in Japanese), Vol. 57, No. 543 B, pp. 3738.
- (7) Nakamura, T. and Iwamoto, J., 1996, "Experimental Study on Oscillation of Underexpanded Impinging Jet and Behavior of Plate Shock Wave," *JSME*, Vol. 62, No. 604 B, pp. 4148~4153.
- (8) Prasad, J. K., Mehta, R. C. and Sreekanth, A. K., 1994, "Impingement of Supersonic Jets on an Axisymmetric Deflector," *AIAA*, Vol. 32, No. 7, pp. 1535~1538.
- (9) Masuda, W. and Nakamura, T., 1993, "Effects of Nozzle Contour on the Aerodynamic Characteristics of Underexpanded Annular Impinging Jets," *JSME*, Series B, Vol. 36, No. 2, pp. 238~244.
- (10) Masuda, W. and Moriyama, E., 1994, "Aerodynamic Characteristics of Underexpanded Coaxial Impinging Jets," *JSME*, Series B, Vol. 37, No. 4, pp. 769~775.
- (11) Fieret, J., Terry, M. J. and Ward, B. A., 1987, "Overview of Flow Dynamics in Gas-Assisted Laser Cutting" *High Power Laser*, Vol. 801, pp. 243~250.