

# 초음속 유동장내 2차분사 분사각도 변화에 따른 열전달 특성 변화

송지운\* · 이종주\*\* · 조형희\*\*\* · 배주찬\*\*\*\*

## Heat Transfer on Secondary Injection Surface in Supersonic Flow-field with Various Injection Angle

Jiwoon Song\* · Jong Ju Yi\*\* · Hyung Hee Cho\*\*\*† · Ju Chan Bae\*\*\*\*

### ABSTRACT

In this paper, heat transfer changes due to the shock/boundary layer interaction were investigated on surfaces where secondary jet are injected. With an infra-red thermography, surface temperature was measured and the measured data was used to obtain the convective heat transfer. Heat transfer is enhanced with increment of momentum ratio. And normal injection case has a higher heat transfer value than that of 15 degrees inclined injection case. Secondary injection momentum ratio and injection angle affect the surface heat transfer distribution.

### 초 록

초음속 유동장내에 분사된 2차제트 주변에서의 열전달 현상을 고찰 하였다. 초음속 유동장내에 분사 되는 2차유동의 Jet to freestream momentum ratio(운동량비)의 변화와, 2차유동 분사각도에 따른 2차 분사홀 주변의 열전달 특성을 파악하기 위하여 홀 주변의 표면온도 변화를 고속 적외선 카메라를 통하여 측정하였으며, 이를 이용하여 비정상 열유속 기법을 바탕으로 열유속을 계산하였다. 운동량비가 증가할 수록 열전달 현상이 강화 되었으며, 15° 기울어진 분사보다는 수직 분사의 경우에 더 강한 열전달 현상이 발생되었다. 이를 통해 분사비와 분사 각도가 표면 열전달 분포에 중요한 요인으로 작용함을 확인할 수 있었다.

Key Words: Supersonic(초음속), Heat Transfer(열전달), Secondary Injection(2차분사), Injection angle(분사각도), Momentum Ratio(운동량비)

### 1. 서 론

\* 연세대학교 기계공학과  
\*\* 국방과학연구소  
\*\*\* 연세대학교 기계공학과  
연락처자, E-mail: [hhcho@yonsei.ac.kr](mailto:hhcho@yonsei.ac.kr)  
\*\*\*\* 국방과학연구소

초음속 유동장 내에 2차분사가 이루어지는 분야는 다양하다. 추력방향제어(TVC : Thrust Vector Control)의 주요기술은 노즐목이나 디퓨

저부분에 2차유동을 분사시켜 주유동의 방향을 제어하는 것이다. 또한 스크립체트는 엔진 내부에서 초음속 유동장 내에 연료를 분사시켜 점화 후 추력을 얻는다. 마하 이상의 속도로 비행하는 각종 비행체의 경우, 비행체 외부 표면에 부착된 각종 돌출물에 의하여 항공공학적 가열이 일어난다고 알려져 있다. 초음속 유동장내에 분사되는 2차분사와 초음속 유동장내에 돌출된 돌출물은 초음속 유동장내에 장애물 역할을 하기에 2차분사홀과 돌출물 주변에서의 유동현상은 비슷하다고 할 수 있다. 초음속 유동장내에 돌출물 주변에서의 열전달 현상 및 유동장 연구는 많이 있었다. Aso[1]는 실린더 주변에 얇은 필름형태의 열유속 측정 게이지를 설치하여, 초음속 유동장내에 돌출된 실린더 주변에서의 열유속을 측정하였다. 이를 통하여 유동의 재부착 지점과 박리되는 지점에서 열전달이 증가함을 알아내었다. Yu[2]는 초음속 유동장 내에 돌출된 실린더 주변 표면온도를 적외선 카메라를 통하여 표면 대류열전달계수를 측정하였다. Everett[3]는 원형 2차분사홀 주변 표면의 압력장을 PSP(Pressure Sensitive Paint)를 통하여 측정 하였으며, 최대 압력분포는 2차분사홀의 양단에서 나타난다고 보고하였다. Gruber[4]는 원형 2차분사홀과 타원형 2차분사홀 주변 표면압력분포를 PSP를 통하여 압력을 측정하였다. 초음속 유동장에 돌출된 돌출부 주변의 압력장과 열전달 현상에 대한 연구[5]는 많이 있었으나, 초음속 유동장내에 분사되는 2차분사홀 주변에서의 열전달 현상에 관한 연구와 2차분사에 관련된 각 분사비와 같은 실험 인자 변경에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 초음속 유동장내에 분사되는 2차분사의 분사비 및 분사 각도의 변경에 따른 홀 주변 열전달 특성 변화에 대해 알아보고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

압축기에서 압축된 공기는 필터를 통과하여 유분과 수분이 제거된다. 그 후  $1.8m^3$ 의 용적을

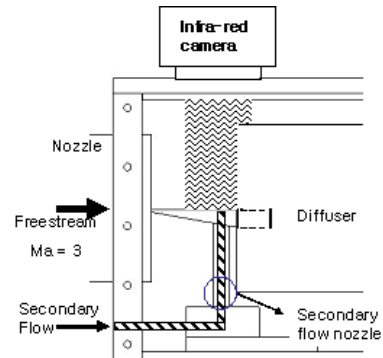


Fig. 1 Schematic View of Test Chamber

가진 공기탱크에 약 150기압으로 압축되어 저장된다. 실험이 시작되면 압축된 공기는 압력 레귤레이터를 통과하면서 약 6.8기압으로 감압이 된다. 감압된 공기의 불균일성을 줄여주기 위하여 주유동 정체 챔버내에 5단 스크린을 설치하였다. 주유동 정체챔버를 통과한 유동은 마하3으로 설계된 원형노즐을 통과하며 가속된다. 마하 3으로 가속된 유동은 테스트 챔버내에 설치된 테스트 모델 주위를 통과한 후 디퓨저를 거쳐 대기중으로 방출된다. 2차분사를 위하여 2차분사용 압축탱크를 설치하였으며, 2차분사용 압축탱크에서 나온 2차유동은 압력 레귤레이터를 통과하며 운동량비에 맞는 상류압으로 감압이 된다. 감압된 2차유동은 2차분사 정체챔버를 거쳐 테스트모델 내부에 설치된 노즐을 통과하면서 마하1로 가속된다. 마하1의 2차분사유동은 테스트 모델 내 유로를 따라 테스트 표면에 설치된 홀을 통과하여 테스트챔버내의 초음속 유동장에 분사된다.[6] 테스트챔버 내부의 개략도는 Fig.1에 도시 하였다. Figure 2는 테스트 모델의 개략도이다. 테스트 모델의 분사 각도는  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  이며, 분사비는  $J=1.0, 1.5$  이다. 시간에 따른 온도 이력을 통해 열전달을 및 대류열전달계수를 계산하기 위하여 테스트 표면의 수직방향에 고속 적외선 카메라(FLIR A40M)를 설치하였다. 주유동의 속도는 마하 3이며, 레이놀즈 수는  $5.0 \times 10^7/m$ 이다. 주유동 정체챔버내 압력은 약 6.3기압, 주유동 정체챔버내 온도는 263K이다. 열전달 특성은 비정상 열유속 기법을 이용하였다. 고속 적외선 카메라를

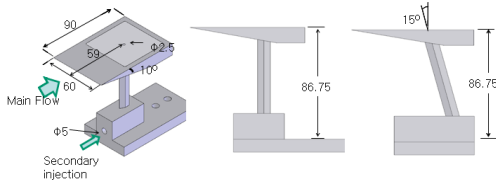


Fig. 2 Test Model

이용하여 시간에 따른 테스트 표면의 온도 이력을 측정하고 이를 통하여 표면 열유속을 계산한다. 짧은 시간 동안 측정된 온도 이력을 이용한 표면 열유속 계산은 기본 열유속 지배 미분 방정식을 통해 유도되며 최종적으로는 아래의 형태로 나타낼 수 있으며, 본 연구에 적용된 열전달 계산은 다음의 식을 이용하였다.

$$q_s = \sqrt{\frac{\rho c k}{\pi}} \left[ \frac{\theta(\tau)}{\sqrt{t}} + \frac{1}{2} \int_0^t \frac{\theta(t) - \theta(\tau)}{(t-\tau)^{3/2}} d\tau \right] \quad (1)$$

### 3. 결과 및 토의

Figure 3은 2차유동을 수직으로 분사하였을 때, 홀 주변의 열전달 현상 결과이다. 운동량비는 1.5와 1.0이다. 전체적으로 말발굽 형태의 대류열전달 촉진 지역이 나타났다. 2차분사홀의 양쪽에서 가장 높은 대류열전달 계수 분포를 보인다. 또한 2차분사홀 하류에서는 대류열전달 계수가 급격히 낮아지는 현상을 볼 수 있었다. 전체적으로 대칭적 구조를 이루고 있다. 운동량비가 1.0일 때 열전달 현상 결과 역시 운동량비 1.5와 마찬가지로 말발굽 모양의 대류열전달 촉진 지역이 나타났다. 그러나 운동량비의 감소 영향으로 대류열전달 촉진 지역에 운동량비 1.5인 경우보다 작게 나왔다. 이는 운동량비 감소에 따라 2차분사유동과 주유동의 교란 정도가 약화되어 생긴 결과라 사료된다. 최대 열전달이 일어난 곳은 2차분사 홀의 양단으로 운동량비 1.5인 경우와 동일한 곳으로 파악된다. 2차분사홀 하류에는 다른 지역보다 상대적으로 낮은 대류열전달이 일어난 것으로 파악된다. Figure 3 하단은

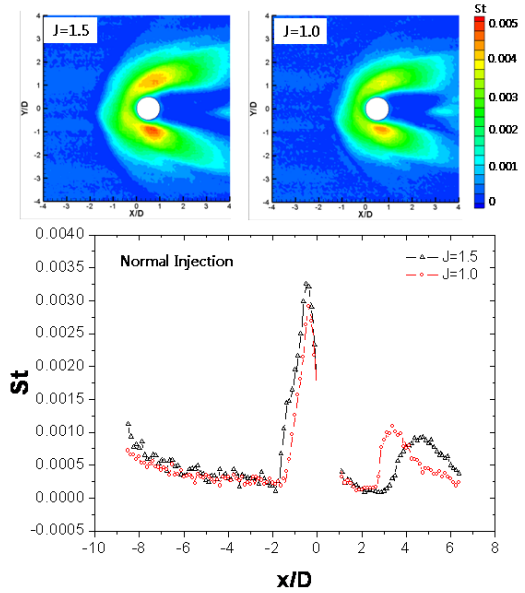


Fig. 3 Heat Transfer in the Normal Injection

$y/D = 0.0$ 인 위치에서 수직분사일 때 각 운동량별 주유동방향으로의 Stanton number 분포도표이다. 테스트모델 선단에서 발달하는 경계층의 영향으로 Stanton number는 줄어드는 경향을 보이고 있다. 그러나 유막 가시화를 통해 알아낸 1차박리선 이후 열전달 현상은 강화되기 시작하였다. 이는 1차박리 이후 나타나는 경계층 내부의 난류성분이 강화되어 대류열전달현상이 강화되는 것으로 파악된다. 특히, 최대 대류열전달 현상이 나타나는 곳은 2차박리선 이후이다. 유동의 재부착에 의해 2차박리선과 2차분사홀 상류 사이에서 높은 대류 열전달 현상이 존재한다고 할 수 있다. 가장 높은 대류 열전달 현상은 운동량비에 따라 조금 상이한 점이 있으나, 2차분사 홀 근방인  $x/D \sim 0 \sim 1$  사이에 높은 대류열전달 현상이 있는 것으로 파악되었다. 이 부분은 말발굽와류의 재부착이 있을 것이라 추측되는 지점이다. 따라서, 말발굽 와류의 재부착에 의해 2차분사홀 양단에서 높은 대류열전달 현상이 생긴 것임을 추측할 수 있다.

Figure 4는 2차유동을  $15^\circ$  기울여 분사하였을 때, 홀 주변의 열전달 현상 결과이다. 전체적

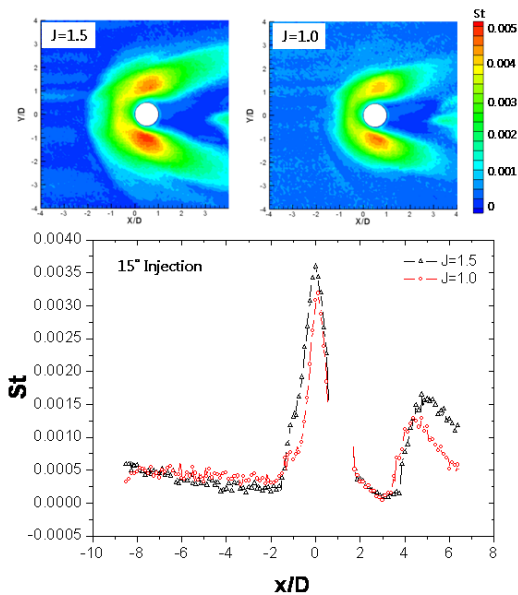


Fig. 4 Heat Transfer in the Inclined(15°) Injection

으로 말발굽 형상의 대류열전달 촉진 지역이 나타났다. 2차분사홀 하류에서 다른 지역보다 상대적으로 낮은 대류열전달 현상이 있는 것으로 파악되었다. 가장 높은 열전달현상이 있는 곳은 2차분사홀의 양단으로 나왔다. 운동량비가 1.0이고, 15° 기울여 분사한 경우는 분사비가 1.5인 경우와 비교하였을 때, 대류열전달 촉진 지역이 작게 나타났다. 이는 2차분사유동이 주유동에 분사될 때, 운동량비 1.5인 경우보다 교란하는 정도가 낮아서 생긴 결과로 사료된다. 전체적으로 말발굽형상의 대류열전달 촉진 지역이 나타났으며, 2차분사홀 하류에는 다른 지역보다 상대적으로 낮은 대류열전달 현상이 관찰되었다. Figure 4 하단은 15° 분사일 때 각 운동량별 주유동방향으로의 Stanton number 분포 도표이다. 테스트모델 선단에서 발달하는 경계층의 영향으로 Stanton number는 줄어드는 경향은 수직분사 실험과 동일하게 나왔다. 그 후, 유막 가시화를 통해 알아낸 1차박리선 이후 열전달 현상은 강화되기 시작하였다. 대류열전달 현상 강화는 1차박리 이후 나타나는 경계층 내부의 난류성분이 증가하여 나타난 것이다. 최대 대류열전달 현상이 나타나는 곳은 2차박리선 이후이며, 이는 수

직분사 실험의 강화이유와 동일하다. 2차분사홀 근방인,  $X/D=0\sim 1$  사이에 높은 대류열전달 현상이 있는 것으로 파악되었다. 이 부분은 말발굽와류의 재부착이 있을 것이라 추측되는 지점이다. 따라서, 말발굽 와류의 재부착에 의해 2차분사홀 양단에서 높은 대류열전달 현상이 발생함을 추측할 수 있다.

Figure 3, 4의 결과를 통해, 수직분사와 15° 분사의 경우 공통적으로 나타난 현상은 말발굽 형태의 대류열전달 촉진지역의 존재와, 운동량비가 증가에 따른 대류열전달 촉진지역의 확대이다. 이러한 경향은 2차유동이 주유동장내에 분사될 때 운동량비가 증가할수록 주유동의 교란 정도가 증가하여 2차분사홀 근방에서 발생하는 말발굽와류의 강도를 증가시킨 것으로 파악된다. 말발굽와류는 2차분사홀 상류에서 박리되어 재부착을 하는데, 재부착 지점에서 충돌제트와 같은 효과를 내어 2차분사홀 양쪽에서 가장 높은 대류열전달 현상이 나타났다. 운동량비가 1.5일 때, 2차분사 유체의 분사각도에 따른 Stanton number 비교를 통해 같은 운동량비라 하여도 분사각도에 따라 대류열전달 촉진정도가 다를 수 있다. 이는 15° 분사가 수직분사보다 주유동을 교란시키는 강도가 더 강하기 때문으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 초음속 유동장내에 2차분사가 수직 또는 15° 기울어진 형태로 분사 될 경우 2차분사 홀 주변에서의 열전달 특성을 연구한 것이다. 주유동과 2차분사의 운동량비를 각 1.0, 1.5으로 하였으며, 수직분사와 15° 분사에 대해 실험을 수행하였다. 주유동은 마하 3이며, 2차유동은 마하 1로 분사되었다.

적외선 카메라를 통하여 2차분사가 이루어지는 표면의 온도변화를 시간에 따라 기록하였고 표면에서의 열유속을 파악한 후 대류열전달계수를 도출한 실험을 통해 열전달 특성을 파악하였다. 테스트모델의 선단에서 발달한 경계층으로 인해 대류열전달 계수가 감소되는 경향이 있으

나, 1차 박리선 이후 대류열전달 계수는 증가하였다. 최대 대류 열전달 계수가 존재하는 곳은 2차분사홀의 양단 부분이다. 이는 말발굽 와류가 2차분사홀의 양단에 충돌하여 생긴 결과로 사료된다. 운동량비가 증가할수록 대류열전달 촉진지역은 증가하는 형태를 가지고 있었으며, 수직분사와 15° 분사는 비슷한 형태의 대류열전달 촉진지역을 보였다. 그러나 같은 운동량비에서 15° 분사가 수직분사한 경우보다 더 높은 대류열전달 지역을 보이고 있었다.

#### 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사드립니다. (계약번호 UD080018CD)

#### 참 고 문 헌

1. Aso, S., Hayashi, M., and TAN, A., "Aerodynamic heating phenomena in three dimensional shock wave/turbulent boundary layer interactions induced by sweptback blunt fins," AIAA-1990-381
2. Yu, M.S., Yi, J.J., Cho, H.H., Hwang, G.Y. and Bea, J.C., "A Study of the heat transfer around a cylindrical body protruded into a supersonic flow-field," AJCPP2006-22143, 2006
3. Everett, D.E., Morris, M.J., "Wall pressure measurements for a sonic jet injected transversely into a supersonic crossflow," Journal of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 6, November-December, pp. 861-868, 1998
4. Gruber, M.R., and Goss, L.P., "Surface pressure measurements in supersonic transverse injection flowfields," Journal of Propulsion and Power, Vol. 15, No. 5, September-October, pp633-640, 1999
5. Stollery, J.L., "Glancing shock-boundary layer interactions," AGARD-R-764, 1990
6. 이종주, 유만선, 송지운, 조형희, "초음속유동장 내에 돌출된 실린더와 2차분사 홀 주변에서의 열전달 현상 연구," 한국추진공학회 2007년도 제28회 춘계학술대회논문집, 2007년, pp.276-280