

전열제어를 위한 충돌제트의 유동특성에 관한 연구

· 김 동 균*, 김 정 환**, 배 석 태***, 김 시 범****, 이 영 호*****

A Study about Flow Characteristics of Impinging Jet for Thermal Control

Dong-Kyun Kim, Jeong-Hwan Kim, Suk-Tae Bae, Si-Pom Kim, Young-Ho Lee

Abstract: A present study is the flow characteristics of impinging jet by PIV measurement and numerical analysis. The flow characteristics of impinging jet flow are affected greatly by nozzle inlet velocity. An circular sharp edged nozzle type(45°) was used to achieve uniform mean velocity at the nozzle inlet, and its diameter is 10mm(d). Therefore, the flow characteristics on the impinging jet can be changed largely by the control of main flow. In this parent study, we investigate the effects of inlet velocity, its variable is nozzle inlet Reynolds numbers(Re=1500, 3000, 4500, 6000 and 7500)

Key words: Impinging Jet(충돌제트), Potential core(포텐셜코어), PIV(입자영상유속계)

1. 서론

충돌제트(Impinging Jet)는 충돌면에서 국소적으로 높은 열·물질전달 효과를 얻을 수 있기 때문에 연소기 벽면 냉각, 종이 건조, 터빈 블레이드 냉각, 전자 장비 냉각 등 고온현을 효과적으로 냉각 할 수 있기 때문에 많이 응용될 수 있다. 또한 제트 충돌 냉각은 냉각 위치의 조절이 용이하다. 이는 하류에서 벽면 제트를 형성하여 추가적인 냉각효과를 가지기 때문이다. 그리고 전자장비내의 반도체와 같은 주위환경에 미세한 충격에 민감한 발열체는 충돌제트로 냉각하는 경우에 세심한 주의가 필요하다. 물론 고속의 충돌제트를 사용할 경우에는 발열체의 냉각효과의 열전달적인 측면에서는 유리하지만 발열체 표면에 열응력과 잔류응력이 존재할 수도 있어 그 수명과도 연관된다. 따라서 충돌제트를 이용한 전자장비의 냉각

에서 충돌제트의 위치와 제트의 속도가 중요한 요소 중의 하나이다.

충돌제트는 높은 열전달 효과로 인하여 그동안 많은 연구가 행하여져 왔다. Gardon 과 Akfirat⁽¹⁾은 국소열전달계수와 난류강도의 분포를 측정하여 국소 열전달계수 변화의 특징을 살펴보고, 난류강도가 열전달에 미치는 영향을 연구하여 열전달계수의 최대위치가 난류강도의 최대위치와 관계함을 보였다. Martin⁽²⁾은 충돌제트를 다양한 형상의 제트 즉 원형제트, 슬롯제트, 다중제트로 구분하여 이들의 열전달특성에 대하여 연구하였으며, Lytle 와 Webb⁽³⁾는 노즐과 충돌벽면사이의 거리가 아주 작고 제트출구 Reynolds수가 아주 큰 경우 유동의 가속에 의한 난류강도의 증가가 열전달 효과를 증가시킴을 보였다. 또한 Gau⁽⁴⁾는 제트의 난류특성을 증대하기 위한 연구를 하였다. 이상과 같은 기존의 연구들은 주로 제트의 형상에 대하여 연구하여 이를 열전달과 유동특성으로 연관하였다.

본 연구에서는 제트를 형성하는 노즐과 발열체 사이의 거리가 일정한 경우에 노즐의 출구속도변화에 따른 유동 해석에 대하여 고찰하였다. 유동장 해석에서 PIV(Particle Image Velocimetry)와

* 동아대학교 대학원 기계공학과
** 한국해양대학교 대학원 기계공학과
*** 동명대학 기계과
**** 동아대학교 기계공학과
***** 한국해양대학교 기계·정보공학부

전열제어를 위한 충돌제트의 유동특성에 관한 연구

수치해석을 이용하여 상호비교 검토하였다. 사전에 충돌제트에서 충돌제트의 출구속도에 따른 유동특성을 조사하여 주어진 조건에서 최적의 열전달 효과를 갖는 유동특성을 분석한 후, 최적의 조건에서 노즐과 발열체사이의 거리변화에 따른 연구를 수행하였다. PIV는 측정영역의 속도분포를 동시다점으로 측정할 수 있으며, 유동장의 교란을 주는 문제가 없으므로 본 연구와 같은 형상의 유동장에 적합한 측정기법이다.

를 통해 출력되는 온도신호는 온도컨트롤러에 입력되고 입력된 신호에 따라서 온도컨트롤러가 발열체에 항상 균일한 전류가 공급되도록 회로를 구성하였다

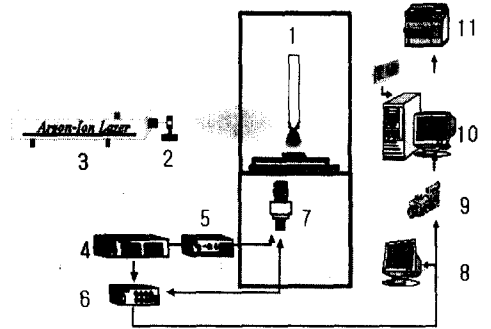
2. PIV 및 수치해석방법

2.2 PIV

가. PIV실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 채택한 실험장치의 구성도이다. 주제트유동은 송풍기를 사용하여 공기를 공급하였으며 속도제어는 송풍기에 연결된 인버터(inverter)를 사용하였다. 노즐의 입구속도가 가변적으로 조정 가능하다. 또한 송풍기의 작동시 발생하는 진동을 억제하기 위하여 고무재질의 배관을 사용하였다. 본 연구에서는 노즐의 출구Re를 1500, 3000, 4500, 6000, 7500로 설정하였다. 노즐의 입구유속의 측정은 열선유속계(Kanomax Climomaster 6511)를 이용하여 측정하여 초기조건으로 하였다. 유동장내의 유체 입자 선별문제는 광원과 함께 PIV계측정도에 큰 영향을 미친다. 본 실험에서의 입자는 올리브유를 이용한 라스킨 노즐(laskin nozzle)을 이용하였다. 라스킨 노즐에서 발생한 미세입자를 송풍기로 흡입시켜 노즐로 직접 분사하였다. 외부로의 영향을 최소화 하기 위하여 실험장치전체를 특수 제작한 수조속에 설치하여 외부로부터의 영향을 최소화 하였다. 제트를 분사하는 노즐은 균일한 속도분포를 가질 수 있도록 만들었는데 이를 위하여 정류기(rectifier)를 설치하였으며, 균일 출구 속도분포를 가질 수 있도록 하였고, 부가적으로 조명장치는 5W 출력의 아르곤-이온레이저를 사용하였다. 그리고 영상은 Hi-8mm 캠코더를 사용하여 기록하였으며, 펄스발생기(Kanomax사, 10 μ s)를 이용한 영상강화CCD 카메라(Image Intensifier CCD Camera, Hamamatsu사, C4273)를 사용하였다. 계측영역의 최대크기는 가로 및 세로가 각각 140mm \times 62mm이다.

Fig. 3은 실험에 사용된 충돌면에서 온도제어를 위한 측정장치의 단면도이다. 알루미늄으로 제작된 열판에 열전대(T-type)를 설치하였다. 열전대



1.Nozzle 2.Cylindrical lens 3.Argon-Ion laser
4.Pulse generator 5.Image intensifier controller
6.CCD controller 7.Image intensifier CCD camera
8.Monitor 9.Hi-8mm camera 10.Host computer & image grabber 11.Printer

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

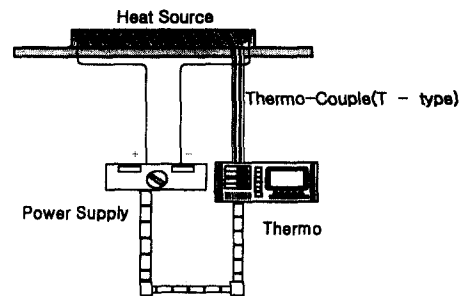


Fig. 2 Diagram of Heat source control system

본 연구에서 열전대(T-type)를 사용하여 열전도를 측정하는 데 사용하였다. 열전대는 열전도율이 높은 열전대(T-type)를 사용하여 열전도를 측정하는 데 사용하였다. 열전대는 열전도율이 높은 열전대(T-type)를 사용하여 열전도를 측정하는 데 사용하였다.

보드는 영상저장장치로부터 공급된 유동장의 아날로그 신호를 디지털 영상정보로 바꾸어 주는 역할을 하며 각종 전처리 조작성은 PIV처리 상용코드인 CACTUS 2000을 사용하였다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾

Fig. 3는 본 연구에서 제트를 생성하기 위해 사용한 노즐의 단면도이다. 노즐의 종류는 circular sharp-edged type 이다.

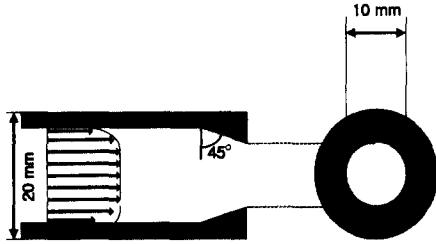


Fig. 3 Cross-section of nozzle

2.2 수치해석

가. 해석모델

수치해석에는 열·유체상용코드인 FLUENT를 사용하였다. FLUENT는 오랜 기간 동안 널리 사용되어 그 정확성이 충분히 검증되어 있으며 해석대상모델링의 편리함과 수치해석시 가장 중요한 격자생성의 용이성 때문에 선택하였다. 층돌제트의 전열특성과 유동특성을 살펴보기 위해 채택한 모델은 Fig. 4와 같다. 여기서 X는 제트유동방향과 직교를 이루는 좌표이며 Y는 제트유동방향의 좌표이다. 실험과의 비교를 위해서 모든 모델링은 실제 scale 과 동일한 조건에서 수치해석을 수행하였다.

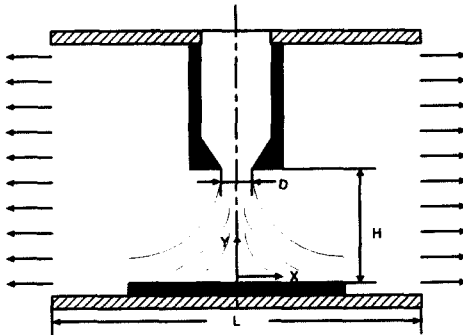


Fig. 4 Schematic diagram of numerical analysis

나. 지배방정식

지배방정식은 2차원, 비압축성, 정상상태의 난류 유동으로 가정하였다. 지배방정식은 다음과 같다. 연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + [(\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}] \quad (2)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} [(\nu + \nu_t) \frac{\partial u}{\partial y}] + S_u + g\beta(T - T_{in})$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + [(\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}] \quad (3)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} [(\nu + \nu_t) \frac{\partial v}{\partial y}] + S_v + g\beta(T - T_{in})$$

에너지방정식

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \left(\frac{u_t}{\partial t} + \frac{\mu}{Pr} \right) \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right\} \quad (4)$$

여기서 u, v 는 직각좌표계 (x,y)방향으로의 유동 속도, p는 압력, ρ는 밀도, ν는 동점성계수이다. 그리고 ν_t 는 난류유동에 따른 생성항이다. ν_t 는 x, y 의 함수로서 다음과 같은 식으로 구한다.

$$\nu_t = C_\mu C_D k^2 / \epsilon \quad (5)$$

여기서 k 와 ε는 각각 난류운동에너지와 난류운동에너지 소산율로서 아래와 같은 식에 의해 결정된다.

$$u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] \quad (6)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + (P_k - \epsilon)$$

$$u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] \quad (7)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + (C_{1\epsilon} P_k - C_{2\epsilon} \epsilon)$$

윗식에서 사용된 상수들은

σ_k = 1.0, σ_ε = 1.3, C_μ = 0.5478, C_D = 0.1643, C_{1ε} = 1.44, C_{2ε} = 1.92 이다.

한편, 운동량방정식 (2),(3)의 우변에 존재하는 생성항 S_u, S_v 와 k, ε 방정식 (6),(7)의 우변에 나타나는 P_k는 각각 다음과 같이 구한다.

$$S_u = \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial v}{\partial x} \right] - \frac{2}{3} k \quad (8)$$

$$S_v = \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right] - \frac{2}{3} k \quad (9)$$

$$P_k = \nu_t \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\} \right] \quad (10)$$

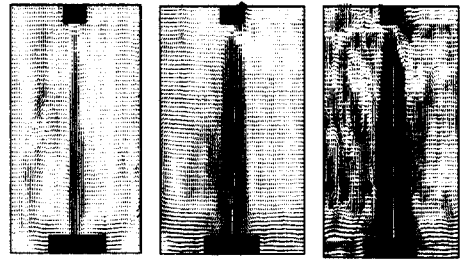
즉, 본 연구에서는 난류모델로서 표준 k-ε 모델을 사용하였다. 식(11)은 정의한 Re 이다.

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (11)$$

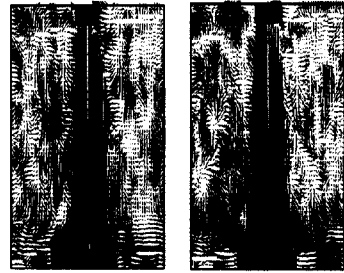
여기서 ν :공기의 열전도계수, v :노즐의 출구속도
 D: 노즐의 출구직경

3. 결과 및 고찰

충돌제트의 속도에 따른 유동특성을 살펴보기 위해서 PIV와 수치해석을 이용하여 비교 검토하였다. 이 때 노즐과 충돌판사이의 거리(H)는 노즐의 출구직경(D)을 기준으로 하여 거리비(H/D)가 6인 경우로 설정하였다. Fig. 5~Fig. 6은 PIV를 이용하여 구한 속도벡터와 운동에너지를 도식화 한 것이다. Re=1500인 경우를 살펴보면, 노즐의 형상에 관계없이 노즐에서 분출되는 제트가 발열체에 원활히 충돌되지 못하고 있다. 이는 노즐에서 분출되는 제트의 에너지크기가 충돌판까지 도달하는데 다소 부족한 원인이라고 생각된다. Re=3000으로 증가하는 경우에는 주제트유동 주위에 발생한 와류들이 주제트유동으로부터 멀어지는 경향을 보이고 있다. 이는 Re가 증가함에 따라 노즐에서 분출되는 유량의 증가로 인하여 주제트 유동의 폭이 넓어지기 때문이라고 생각된다. 하지만 와류가 제트주위에 존재하므로 주제트 유동이 와류의 영향을 받고 있는 범위내에 있음을 알 수 있다. Re=4500 이상부터는 주제트 유동으로부터 분리되는 경향을 보이고 있다. 따라서 Re가 증가할수록 노즐에서 분출되는 주제트유동의 주위에 발생한 와류들이 주제트유동의 증가에 비례하여 자유제트영역에서 다소 멀어지는 경향을 보이고 있다. 제트의 양쪽에 발생한 와류는 제트가 발열체에 충돌하는 것을 방해하는 역할을 한다고 판단된다. 따라서 주제트유동 주위에 발생한 와류가 제트의 영향을 주는 범위에서 벗어나는 Re=6000인 경우에 노즐에서 발생한 제트가 그 크기를 유지하면서 발열체에 충돌하는 속도범위라고 생각된다.

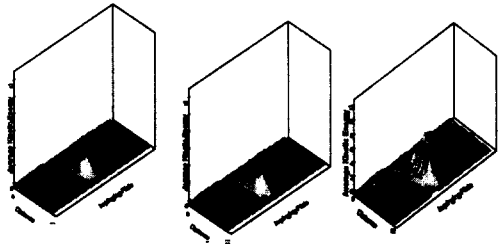


Re=1500 Re=3000 Re=4500

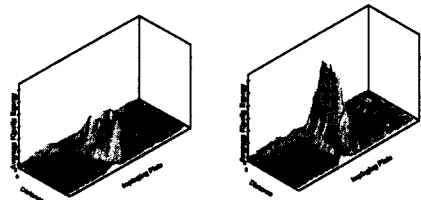


Re=6000 Re=7500

Fig. 5 Experimental results velocity vector for various Reynolds number



Re=1500 Re=3000 Re=4500



Re = 6000 Re = 7500

Fig. 6 Experimental results average kinetic energy for various Reynolds number

Fig. 7은 발열체의 가운데부분($X=0$) 지점에서의 속도변화에 따라 Y방향 속도를 수치해석으로 구한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 살펴보면 모든 Re범위에서 *vena contracta*의 영향으로 노즐의 출구부분에서 속도가 순간적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. Re=1500일 때의 분포를 살펴보면 노즐출구부분에서 *vena contracta*의 영향으로 인하여 속도가 순간적으로 증가하는 경향을 보이다가 $H/D=1.5$ 에서 속도가 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 출구속도크기의 90~95% 범위의 크기인 포텐셜코어(potential core)가 Re=1500인 경우에서는 $H/D=1.5$, Re=3000인 경우는 거리비 $H/D=3.8$ 지점까지 포텐셜코어를 유지하고 있으나 그 이상부터는 속도가 감소하는 경향을 보이고 있다. Re=4500부터는 포텐셜코어가 $H/D=4$ 까지 유지하고 있다. Re의 증가에 따라 포텐셜코어는 바뀌게 되며 이러한 경향은 노즐로부터 유동이 없는 정지된 주위로 분출될 때 제트는 난류이며 노즐의 출구에서 속도는 균일한 특성을 가진다. 그러나 제트의 출구에서부터 멀어질수록 제트와 주위와의 운동량 교환으로 제트의 자유경계층은 확대되고 그 속에서 균일한 출구속도가 유지되는 포텐셜코어가 축소되기 때문이라고 판단된다. 따라서 충돌제트의 유동에서 Re와 거리비(H/D)는 충돌판의 냉각효율 효과측면에서 중요한 인자중의 하나라고 생각된다.

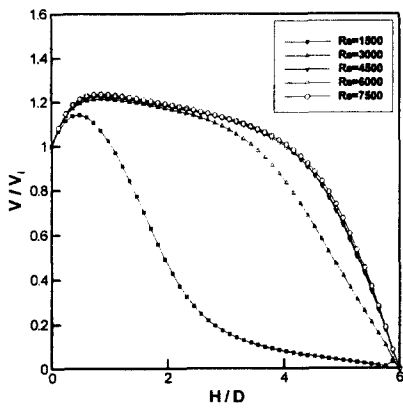


Fig. 7 Dimensionless velocity distribution along the center line for various Reynolds number

Fig. 8은 Re=6000일 때의 $X=0$ 인 지점에서의 Y방향속도를 실험과 수치해석결과의 비교이다. 정성적으로 일치하는 경향을 보이지만, $H/D=2.5\sim4$ 인 지점에서 실험과 수치해석결과가편차를 보이고 있다. 이는 실험시 제트가 자유혼합영역에서 주위유체의 간섭을 받기 때문이라고 판단된다. 따라서 본 연구와 같은 유동가시화실험에서는 제트의 자유혼합영역에서의 보다 면밀한 계측이 필요하다고 판단된다.

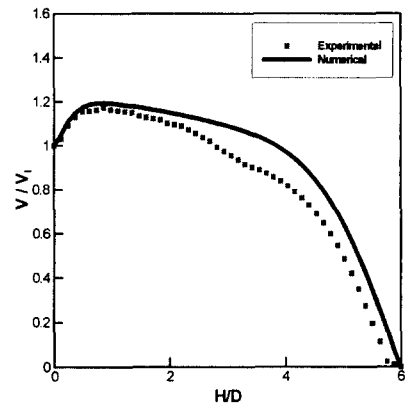


Fig. 8 Compare numerical result with experimental result dimensionless velocity distribution at $X=0$

4. 결론

전열제어를 위한 충돌제트의 유동특성을 PIV와 수치해석을 이용하여 살펴보았다. 노즐의 직경(D)과 형상은 $D=10\text{mm}$, circular sharp edge type을 사용하였으며, 노즐과 발열체사이의 거리비는 6으로 고정하였다. 해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Re=1500~3000범위에서는 제트가 주위 유체의 영향으로 발열체에 영향을 미치지 못하였다.
2. Re=4500부터 포텐셜코어영역이 $H/D=4$ 인 지점까지 유지하였으며 Re=6000과 Re=7500은 유사한 속도분포를 보이는 유동특성을 보였다.
3. PIV와 수치해석결과 Re=6000인 경우가 발열체의 효율적인 전열제어를 위한 속도범위라고 판단된다.

참고문헌

- [1] Gardon, R and Akrifat, J. C., 1965, "The Role of Turbulence in Determining the Heat Transfer Characteristics of Impinging Jets," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 8, pp.1261-1272
- [2] Martin, H., 1977, "Heat and Mass Transfer Between Impinging Gas Jets and Solid Surface." Advances in Heat Transfer, Vol. 13, pp. 1-60
- [3] Lytle, D. and Webb, B. W., 1994, "Air Jets Impingement Heat Transfer at Low Nozzle-Plate Spacing," Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 37, No 12. pp 1687-1697
- [4] C. Gau, W. Y. Sheu and C. H. Shen, 1997, "Impingement Cooling Flow and Heat Transfer Under Acoustic Excitation," ASME J. Heat Transfer, Vol. 119, pp. 810-817
- [5] 이영호, 최장운, "PIV에서의 계조치 상호상관법 개발", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 2권, pp. 396~400(1996)
- [6] 이영호, "PIV의 분류 및 원리", 대한기계학회지 제36권 제12호, pp.1146~1162(1996)