

충돌제트 노즐의 다중 배열 형상에 따른 열전달 특성 Study on the Characteristics of Heat Transfer with Array of Multiple Impinging Jet Nozzle

김동균·손종동

D. K. Kim and J. D. Son

Key Words : Heat transfer(열전달), Multiple array impinging jet(다중배열 충돌제트)

Abstract : In this paper, we present the flow and heat transfer characteristics with the array of impinging jet nozzles by using the numerical computation and experiment. Numerical solutions were obtained for dimensionless gap $H=6$, dimensionless outlet length $L=10$ and Reynolds number $Re=1500$ by using the commercial CFD code, CFX-5. Experimental and numerical results were agreed well with each other. It was found that the impinging jet with circular array nozzles generated the uniform heat transfer area and the maximum heat transfer is higher than rectangular array nozzles for certain parameter sets. It is one of the most important utilities providing steam to turbine in order to supply mechanical energy in thermal power plant. It is composed of thousands of tubes for high efficient heat transfer.

1. 서 론

최근 산업발전의 고도화와 함께 열 및 유체기기의 활용 범위가 점점 넓어지면서 열전달 촉진, 효율적인 냉각 방법 등에 대한 연구의 필요성이 더욱 증가하고 있으며, 효율적인 냉각방법으로서 국소적으로 집중적인 열부하를 받는 요소를 냉각시키기 위해 고온의 표면에 냉각유체를 직접 분사시켜 많은 열을 제거하는 충돌제트 냉각법이 가장 효과적이기 때문에 가스터빈 블레이드나 고집적 전자부품의 냉각 및 박막액정표시(TFT-LCD) 장치의 제조, 프레스 가공기구와 같은 금속표면의 열처리 등등, 많은 산업분야에 폭 넓게 응용되고 있다. 충돌제트에 관한 연구는 레이놀즈수의 변화, 노즐과 충돌면 사이의 거리, 노즐의 형상, 다중 제트, 교차유동, 충돌면의 형상 등의 변화가 유동 과 열전달 특성에 미치는 영향에 대해서 이루어지고 있다. Camussi 등¹⁾, Chuang 등²⁾, Sami³⁾과 Goldstein 등⁴⁾은 교차유동이 유동과 열전달에 미치는 영향에 대해서, Yang 등⁵⁾

은 다중 제트 유동에 대해서 실험과 LES 기법을 사용한 수치모사를 수행하였다. Huber 등⁶⁾과 Rhee 등⁷⁾은 제트 충돌면에 설치된 유출홀의 영향에 대해서, 최 등⁸⁾과 이 등⁹⁾은 다공질 분사판의 영향에 대해서 실험적인 연구를 수행하였다. 충돌제트에 관한 연구에 있어서, 수치해석적인 어려움으로 인해 대부분 실험적으로 이루어지고 있으며 최근 들어서 LES를 사용한 수치모사가 활발히 이루어지고 있으나 분사 노즐이 충돌면과 수직인 경우에 대해서 주로 이루어져왔다. 그러나 분사 출구가 경사지거나 분사 노즐이 요동을 할 때, 다중 분사노즐의 배열방법에 의한 연구는 아직 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 충돌면에 수직으로 분출되는 충돌제트의 다중 노즐의 배열방법에 따른 유동 및 열전달 특성을 분석하고 최적열전달 조건을 얻고자 한다.

2. 유동 모델

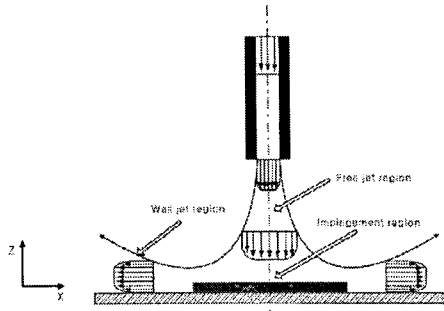
Fig. 1은 본 연구에서 사용된 충돌제트 유동모델 및 노즐을 나타낸 것이다. 제트로부터 분사되는 제트는 20°C 공기로 노즐 내부에서 완전 발달된 유동을 얻기 위해서 노즐의 길이는 600mm로 두었으며, 내부 직경은 20mm, 노즐 출구 직경은 내부 직경의 1/2인 10mm이다.

접수일 : 2006년 3월 21일, 채택확정 : 2006년 5월 22일

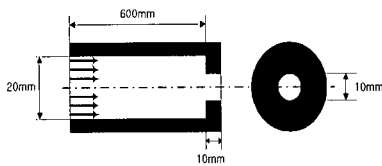
김동균(책임저자) : 동명대학교 기계공학과

E-mail : kim@tu.ac.kr Tel. 051-620-3339

손종동 : 동명대학교 기계공학과

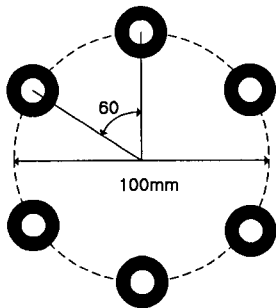


(a) Impinging jet flow model

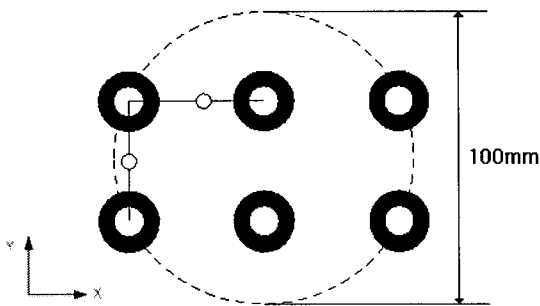


(b) Nozzle

Fig. 1 Schematic diagram of an impinging jet flow model and nozzle



(a) Circular array



(b) Rectangular array

Fig. 2 Array type of the jet nozzles

노즐로부터 분사된 제트는 80°C로 일정하게 온도가 유지된 바닥면에 충돌하게 되며 충돌면과 노즐 출구사이의 거리는 노즐 출구 직경의 6배에 해당하 는 600mm로 두었다. 단일 노즐에 대한 유동해석은 실험과 수치해석의 결과 비교를 위해서 수행하였으

며, 다중노즐 충돌제트에 대해서는 수치해석을 수행 하였다. Fig. 2는 다중노즐 충돌제트 유동에 대한 노즐의 배치방법을 간략하게 나타낸 것이다. 지름 100mm 의 가상 원주 상에 6개의 노즐을 일정한 간격으로 배치한 경우(Circular array)와 직사각형으로 배치한 경우(Rectangular array)에 대해서 수치해석을 수행하였다.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \vec{u} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) T = \frac{1}{Re \cdot Pr} \nabla^2 T \quad (3)$$

$$Re = \frac{u_{inlet} d}{\nu}, Pr = \frac{\nu}{k} \quad (4)$$

여기서, Re 는 레이놀즈수(Reynolds number), Pr 은 프란틀수(Prandtl number)이며 case 1은 $Re=5927$, $Pr=0.7$ 로, case 2는 $Re=1500$, $Pr=0.7$ 두고 수치해석을 수행하였다.

경계조건은 다음과 같다.

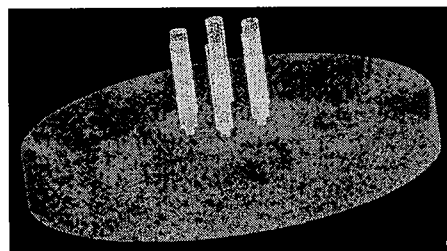
$$u = v = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (5)$$

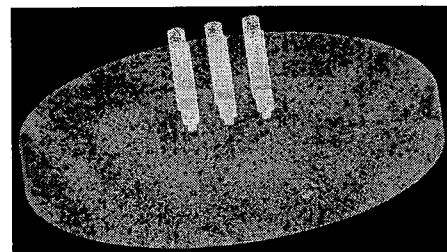
$$T_{inlet} = 20, T_b = 80$$

3. 수치해석 및 실험방법

3.1 수치해석



(a) Circular array nozzles



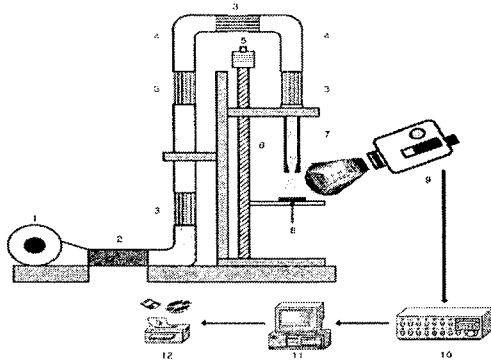
(b) Rectangular array nozzles

Fig. 3 Schematic diagram of grid system for an impinging-jet flow models

본 연구에서 수치해석을 위해서 CFX-5 상용코드를 사용하였으며, 난류 모델링으로는 LES를 사용하였다. 격자생성을 위해서는 ICEM CFD를 사용하였으며 Fig. 3은 수치해석을 위해서 생성한 격자구성을 나타낸 것이다. 총 격자수는 270만개이며, tetra mesh를 사용하였다.

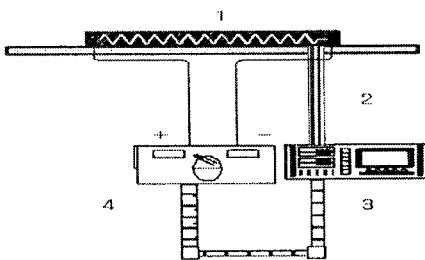
3.2 실험방법

Fig. 4는 실험장치의 개략도이다. 인버터에 의해서 속도가 조절되는 팬으로 공급된 공기는 정류기를 통해서 균일한 흐름을 이루며 노즐을 통해서 충돌면에 분사된다. 충돌면에는 일정한 열원을 공급하기 위해서 직류 전열기를 설치하였다. 충돌면의 온도변화를 측정하기 위해서 온도에 따라서 색의 변화를 나타내는 적외선열화상장치를 사용하였으며 열 플럭스를 고려하여 보정 작업을 거쳤다.



- | | |
|-------------------|----------------------|
| 1. Fan | 2. Rubber Pipe |
| 3. Rectifier | 4. Flexible tube |
| 5. DC Motor | 6. Screw |
| 7. Nozzle | 8. Impingement plate |
| 9. Detector | 10. Main controller |
| 11. Host Computer | 12. Output |

(a) Experimental apparatus



- | | |
|----------------------|--------------------------|
| 1. Impingement Plate | 2. Thermo Couple(T-type) |
| 3. Thermo Controller | 4. Power supply |

(b) Detail of impinging jet plane

Fig. 4 Experimental apparatus and detail of impinging jet plane

4. 결과 및 검토

4.1 수치해석결과와 실험결과와의 비교

Fig. 5는 단일 노즐의 impinging jet 유동에 대한 충돌면의 온도변화를 나타낸 것으로 수치해석결과와 실험 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 이를 통해서 수치해석에 적용한 격자시스템, 유동의 경계조건 및 난류 모델링의 타당성을 확인할 수 있다.

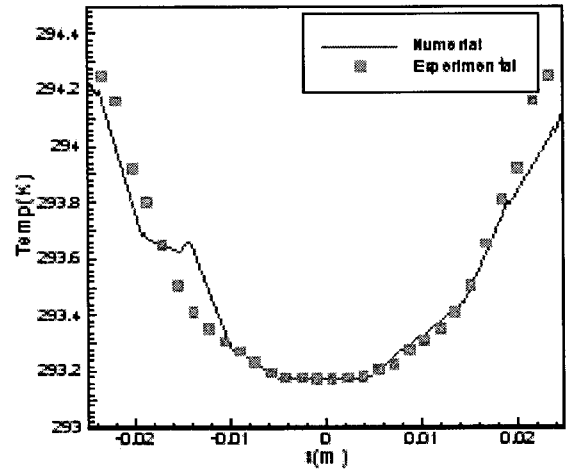
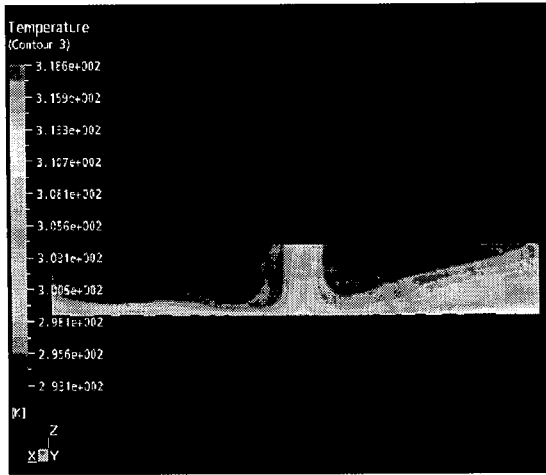


Fig. 5 Temperature distribution on the center of impingement plate ; $h=6, Re=2500$

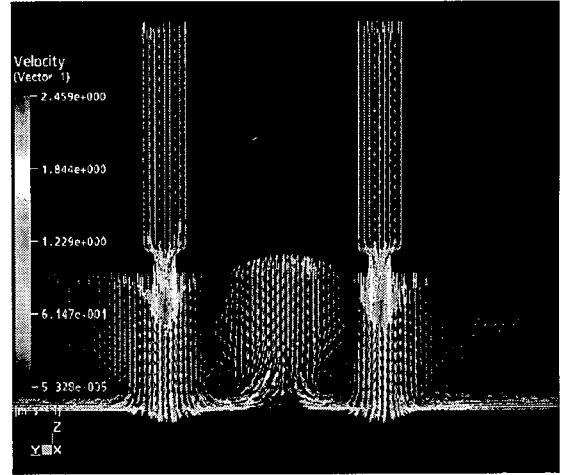
4.2 노즐의 배치에 따른 유동의 열전달 효과

다중노즐에서 분사되는 제트의 경우, 단일 노즐의 분사제트의 유동과는 달리 노즐의 배열 형상에 관계없이 유동 상호간의 간섭에 의한 영향으로 인해서 노즐 배열의 중심부에서 상승하는 유동형태가 나타난다. 이로 인해서 충돌면의 중심부에서는 냉각효과가 미약함을 확인할 수 있다. 하지만, 단일 분사제트 유동에 비해서 높은 냉각효과를 얻을 수 있다.

Fig. 6과 7은 원형으로 배열된 충돌제트 유동의 온도($^{\circ}K$)와 속도벡터(m/s)를 노즐과 충돌면사이의 거리비(h)에 대해서 나타낸 것이다. 거리비는 노즐 출구의 직경을 기준으로 6배(60mm)로 하였다. plane 1과 2에 나타난 것으로 유동이 노즐 배열 중심축을 기준으로 비대칭임을 확인할 수 있으며 이러한 비대칭성은 각 노즐에서 분사된 유동이 서로 영향을 미치는 부근에서 강하게 나타남을 알 수 있다.

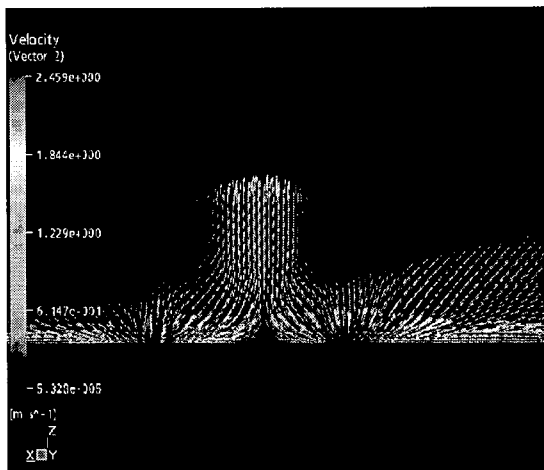


(a) temperature contour



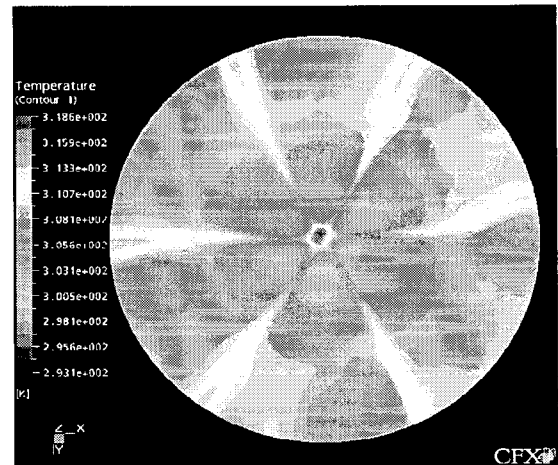
(b) Velocity vector

Fig. 7 Temperature contour and velocity vector plot on the y - z plane for circular array nozzle ; $h=6$, $Re=1500$

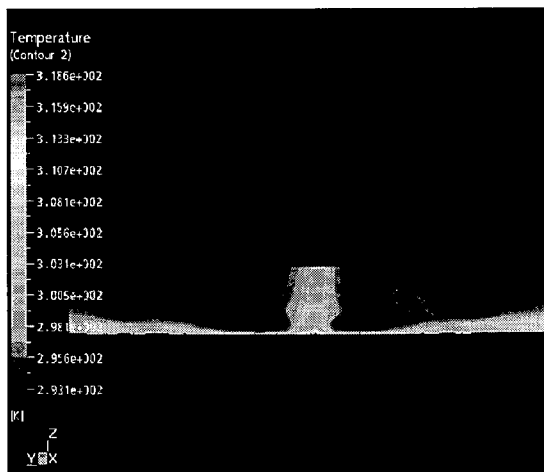


(b) Velocity vector

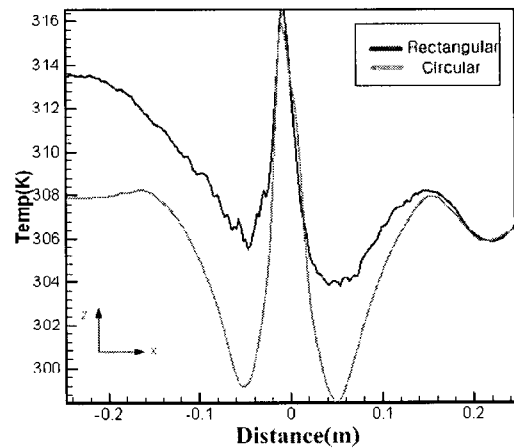
Fig. 6 Temperature contour and velocity vector plot on the x - z plane for circular array nozzle ; $h=6$, $Re=1500$



(a) Temperature contour



(a) temperature contour

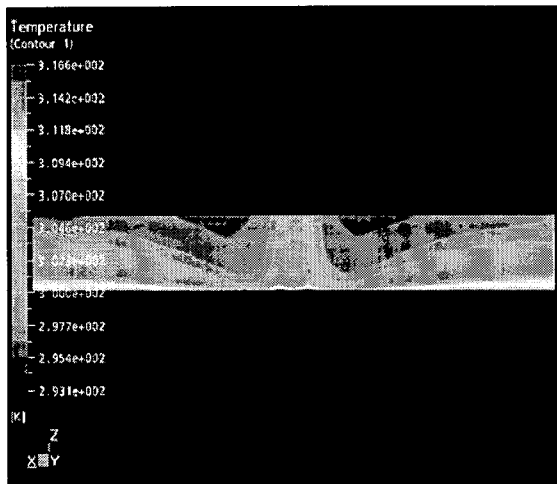


(b) Temperature distribution

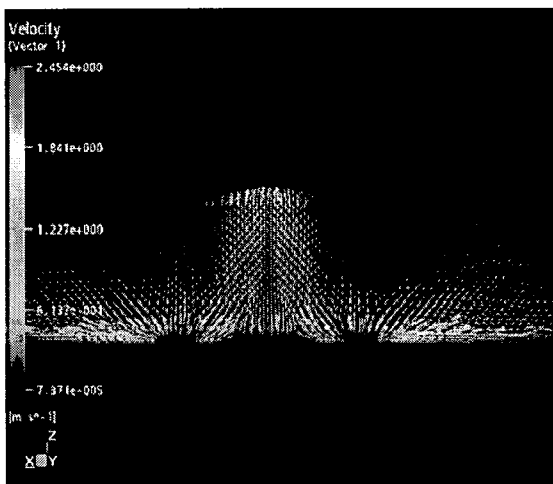
Fig. 8 Temperature contour and distribution on the impinging bottom ; circular array

Fig. 8은 노즐과 충돌면사이의 거리비($h=6$)에 대해서, 충돌면의 온도분포를 나타낸 것으로 원형 배열 노즐에서 분사된 제트의 경우 전체적으로 고온 냉각효과를 나타내지만 각 노즐에서 분사된 유동이 서로 영향을 미치는 부근에서는 냉각효과가 작음을 알 수 있다.

Fig. 9와 10은 직사각형으로 배열된 충돌제트 유동의 온도와 속도벡터를 plane 1과 2에 나타낸 것으로 원형 배열 노즐 유동에 비해서 노즐 배열중심축을 기준으로 대칭적임을 알 수 있다. 하지만 전체적으로 냉각효과는 원형 배열 노즐의 경우보다 낮다. 이러한 사실은 Fig. 11을 통해서도 확인 할 수 있다.

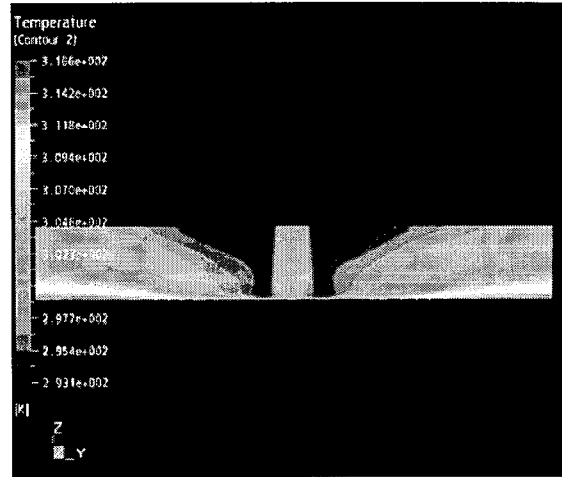


(a) temperature contour

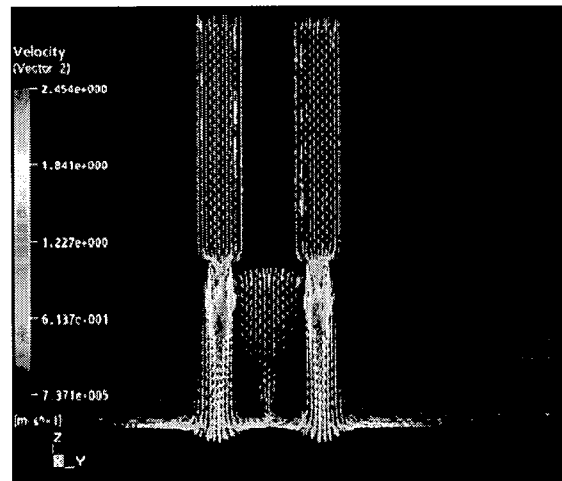


(b) Velocity vector

Fig. 9 Temperature contour and velocity vector plot on the x - z plane for rectangular array nozzle ; $h=6$, $Re=1500$



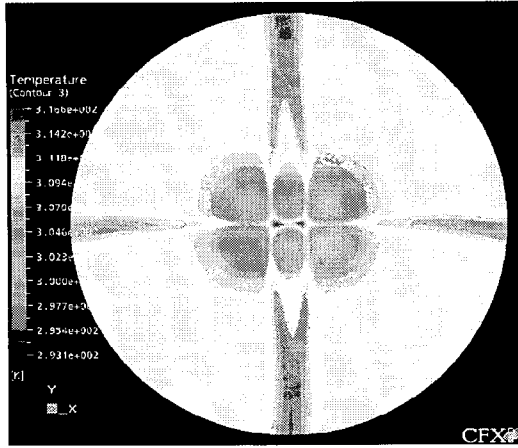
(a) temperature contour



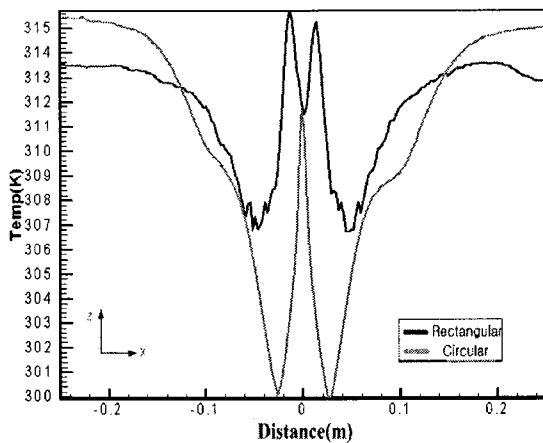
(b) Velocity vector

Fig. 10 Temperature contour and velocity vector plot on the y - z plane for Rectangular array nozzle ; $h=6$, $Re=1500$

Fig. 11은 충돌면의 온도분포를 나타낸 것으로 원형 배열 노즐에서 분사된 제트의 경우와는 달리 직사각형으로 배열된 노즐의 경우, 중심의 두 노즐에서 분사된 유동은 좌우의 노즐에서 분사된 유동의 영향으로 인하여 충돌면의 냉각효과에 거의 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 이로 인해서 충돌면에서 전체적으로 고르지 못한 냉각효과를 나타냄은 물론 냉각효율 역시 원형 배열 노즐보다 낮음을 알 수 있다. 위의 결과를 통해서, 같은 동력을 사용하여 다중노즐의 충돌제트 시스템을 설계할 경우, 노즐의 배치를 원형으로 배치함으로써 효율을 높일 수 있음을 알 수 있다.



(a) Temperature contour



(b) Temperature distribution

Fig. 11 Temperature contour and distribution on the impinging bottom ; rectangular array

5. 결 론

다중 배열 노즐에 따른 Impinging Jet의 열전달 특성에 관한 본 연구를 통해서 다음과 같은 결론에 도달할 수 있었다.

- 1) 다중노즐에서 분사되는 제트는 노즐의 배열 형상에 관계없이 유동 상호간의 영향으로 인해서 노즐 배열의 중심부에서는 냉각효과가 미약하지만, 단일 분사제트 유동에 비해서 높은 냉각 효과를 얻을 수 있다.
- 2) 원형 배열 노즐에서 분사된 제트의 경우, 전체적으로 고른 냉각 효과를 나타내지만 각 노즐에서 분사된 유동이 서로 영향을 미치는 부근에서는 냉각 효과는 다소 미흡한 결과를 보였다.
- 3) 직사각형으로 배열된 노즐의 경우, 중심의 두 노즐에서 분사된 유동은 충돌면의 냉각효과에는 거의 영향을 미치지 못하며 충돌면에서 전체적으로

고르지 못한 냉각 효과를 보였으며, 냉각 효율 역시 원형 배열 노즐보다 낮은 결과가 나타났다.

참고 문헌

1. R. Camussi, G. Gui and A. Stella, "Experimental study on a jet in a crossflow at very low Reynolds number", J. Fluid Mech., Vol. 454, pp. 113-144, 2002.
2. Shu-Hao Chuang, Ming-Hua Chen, Shen-Wu Lii and Fang-Mei Tai, "Numerical simulation of twin-jet impingement on a flat plate coupled with cross-flow", Int. J. Numerical Methods in Fluids, Vol. 14, pp. 459-475, 1992.
3. Sami Al-Sanea, "A numerical study of the flow and heat transfer characteristics of an impinging laminar slot-jet including cross-flow effects", 1991.
4. R. J. Goldstein and A. I. Behbahani, "Impingement of a circular jet with and without cross flow", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 25, No. 9, pp. 1377-1382, 1982.
5. Yue-Tzu Yang and Chih-Huah Shyu, "Numerical study of multiple impinging slot jet with an inclined confinement surface", Numerical Heat Transfer, Part A, pp. 23-37, 1998.
6. A. M. Huber and R. Viskanta, "Convective Heat Transfer to a confined impinging Array of air jet with spent air exits", Trans. ASME, Vol. 116, pp. 570-576, 1994.
7. Dong Ho Rhee, Pil-Hyun Youn and Hyung Hee Cho, "Flow and heat/mass transfer characteristics of array of impingement jets with effusion holes", KSME(B), Vol. 25, No. 11, pp. 570-576, 2001.
8. Jong Hyun Choi, Dong Ho Rhee and Hyung Hee Cho, "The effects of impingement hole arrangements on heat transfer of an impingement effusion cooling system", KSME(B), Vol. 26, No. 1, pp. 1-109, 2002.
9. Yun Taek Kim, Young Min Lee, Se Youl Won and Dae Hee Lee, "Heat transfer enhancement by the Perforated plate of round impinging air jets", KSME(B), Vol. 25, No. 4, pp. 475-484, 2001.