에너지공학, 제20권 제2호(2011)
Journal of Energy Engineering, Vol. 20, No. 2, pp. 96~102 (2011)

충돌제트 천이영역에서 로드에 의한 열전달특성

금성민†
한라대학교 기계자동차공학부
(2011년 1월 20일 접수, 2011년 4월 29일 수정, 2011년 5월 3일 채택)

Heat Transfer Characteristics by Rods in Transition Region of Impinging Air Jet

Sung-Min Kum†
School of Mechanical and Automotive Engineering, Halla University
(Received 20 January 2011, Revised 29 April 2011, Accepted 3 May 2011)

요 약

본 논문은 2차원 충돌제트 시스템에서 충돌판이 천이영역에 위치할때, 열전달성능이 감소하는 벽면분류영역의 열전달증진을 목적으로 난류촉진체인 정 4각 로드를 평판전열면 앞에 설치하고 로드와 로드사이의 피치(P)를 40 mm로 고정한 후 로드의 폭(W) 변화(4, 6, 8 mm) 및 로드와 전열면사이의 간극(C) 변화(1, 2, 4, 6 mm)에 따른 유동특성과 열전달특성에 대해 실험을 수행하고, 그 결과를 수치해석과 비교 검토하였다. 또한 로드가 설치되지 않은 경우와 정량적으로 비교하여 충돌제트 시스템에서 난류촉진체를 이용한 열전달증진에 관한 기초적 자료를 제공하고자 한다.

주요어 : 사각로드, 충돌제트, 천이영역

Abstract — This research has been proceeded over the transition region(H/B=10) of two-dimensional impinging air jet system, in which square rods has been set up in front of heating surface in order to increase heat transfer. The objective of this research was to investigate the characteristics of heat transfer and air flow, in cases the clearance from rods to heating surface(C=1, 2, 4, 6 mm) and the width of rods(W=4, 6, 8 mm) changed. And this research compared the above with the experimentation without rods. As result, heat transfer performance was best under the condition of C=1 mm, and as the width is 8 mm, it is largely influenced by eddies and acceleration in case width of rods changed.

Key words : Square rods, Impinging air jet, Transition region

1. 서 론

물체의 가열 혹은 냉각 [1,2]을 목적으로 광범위하게 사용되고 있는 충돌제트는 정체점에서 높은 열전달계수를 얻을수 있는 반면 정체점을 지나 벽면분류영역으로 진행하면서 분류의 속도감소와 온도경계층의 발달로 열전달성능은 급격히 약화되기 때문에 벽면분류영역에서 열전달율의 감소를 최소화하고, 전영역에서 높은 열전달율을 확보할 수 있다면 에너지의 유효이용이라는 측면에서 가치가 있을 것으로 생각된다.

지금까지 보고된 충돌제트를 이용한 열전달증진에 관한 기술은 열전달면의 확대·가공, 노즐배열 및 전열면 앞에 난류촉진체를 설치하는 방법 [3-5] 등이 있는데 특히 난류촉진체에 의한 열전달증진방안이 비교적 큰 성과를 거두고 있다고 할수 있다 [5,10].

†To whom corresponding should be addressed.
School of Mechanical and Automotive Engineering, Halla University
28 Halladaegil, Wonju, Gangwon, 220-712, Korea
Tel : 033-760-1217; E-mail : smkum@halla.ac.kr

특히 충돌제트 시스템의 천이영역(transition region, 일반적으로 노즐출구폭의 약 8~12배 되는 위치)에서는 대규모 와류가 발생하고 이 와류들은 운동량 및 에너지 교환을 증가시키기 때문에 포텐셜코어영역(potential core region)이나 발달영역(well-developed region)보다 열전달성능은 우수하다 [6].

따라서 본 연구에서는 2차원 충돌제트 시스템에서 충돌판이 천이영역에 위치할때, 열전달성능이 감소하는 벽면분류영역의 열전달증진을 목적으로 난류촉진체인 정 4각 로드를 평판전열면 앞에 설치하고 로드와 로드사이의 피치(P)를 40 mm로 고정했을때 로드의 폭(W) 변화(4, 6, 8 mm) 및 로드와 전열면사이의 간극(C) 변화(1, 2, 4, 6 mm)에 따른 유동특성과 열전달특성에 대해 실험을 수행하고, 그 결과를 수치해석과 비교 검토하였다. 또한 로드가 설치되지 않은 경우와 정량적으로 비교하여 충돌제트 시스템에서 난류촉진체를 이용한 열전달증진에 관한 기초적 자료를 제공하고자 한다.

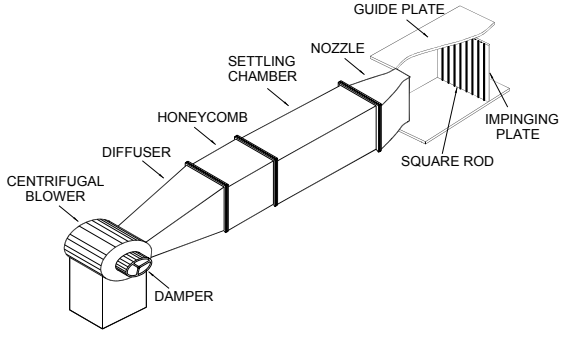

Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

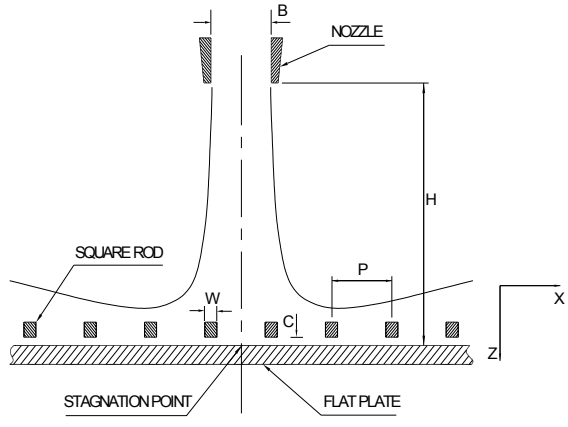

Fig. 2. Coordinate of flat plate with rods(1).

2. 실험장치 및 조건

2-1. 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 공기는 원심식 송풍기에서 송출되며 유량은 유량조절 댐퍼에 의해 조절되고 디퓨저를 지나 하니콤과 세틀링챔버에 의해 균일화 되면서 노즐을 통해 분출된다.

특히 노즐은 형상 및 축류비가 분류의 평균속도, 난류 유동특성, 분류의 확산 등에 큰 영향을 미치게 되므로 [7] 유체역학적 특성을 고려하여 노즐 출구에서 균일한 속도분포와 저난류강도를 유지할수 있도록 출구 폭 50 mm, 높이 500 mm, 길이 300 mm인 사인곡선형으로된 사각 노즐을 제작 사용하였으며, 2차원 분류가 되도록 분출 후의 유로상하면에는 평행판을 설치하였고 충돌판은 전후 좌우이동이 가능하도록 하였다.

Fig. 2, 3은 평판전열면 앞에 난류촉진체인 로드를 설치한 경우의 좌표계로써 로드 폭을 W, 로드와 전열면간의 간극을 C, 로드사이의 피치를 P, 노즐 출구폭을 B, 노즐의 높이를 L, 평판의 정체점(stagnation point)으로 부터 노즐 출구폭 방향의 거리를 X, 노즐 출구로 부터 전열면까지의 거리를 H로 하여 X와 H를 각각 X/B, H/B의 무차원화 하였으며, 노즐중심은 전열면 중앙부에 인접한 두개의 로드 사이의 중심선과 일치하도록 하였다.

2-2. 전열면 형상 및 온도 측정방법

Fig. 4는 전열면의 형상을 나타낸 것으로 베이클라이트판(500 × 500 × 20 mm)에 스테인레스 박판(길이

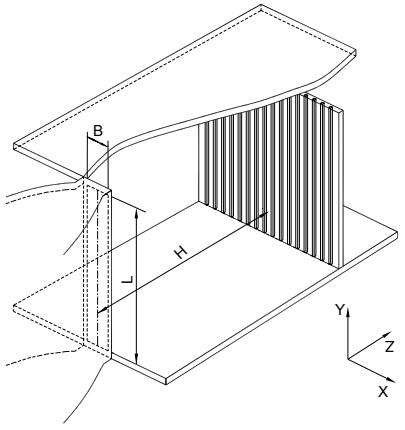

Fig. 3. Coordinate of flat plate with rods(2).

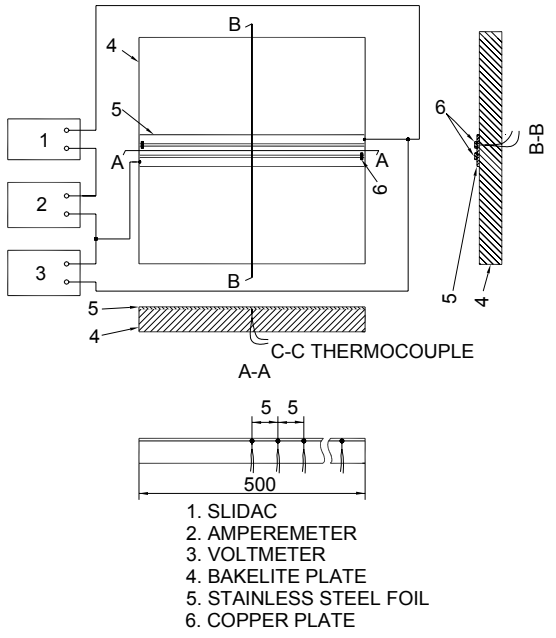

Fig. 4. Heating apparatus.

500 mm, 폭 10 mm, 두께 0.03 mm) 3매를 접착제로 부착하고 단면 B-B에 표시된 바와 같이 동판으로 연결하였다. 전열면의 가열은 q=1020 W/m^{2}의 등열유속 조건으로 하여 통전 가열하였으며, 이 때 전압은 자동 전압조정기를 사용하여 일정하게 유지시켰고 온도측정은 스테인레스 박판 뒷면에 직경 0.07 mm의 C-C열전대(thermocouple : T-type) 45개를 정체점으로 부터 5 mm 간격으로 납땜 부착하여 데이터로거(Fluke Co, Helios Ⅰ)에 연결하고, 전열면이 정상상태에 도달한 것을 확인한 후 3분 간격으로 10회 측정하여 평균온도를 읽었으며, 베이클라이트판(열전도율 0.042 kcal/m·℃)에서의 방출열량은 전체 가열량의 0.125% 이내의 범위였기 때문에 베이클라이트판을 통한 열손실은 무시하였다. 또한 자유분류의 유속측정으로 부터 좌우 대칭성을 확인했기 때문에 정체점으로 부터 한방향으로만 온도를 측정하였다.

3. 로드가 없는 평판의 열전달특성

본 절에서는 2차원 공기제트가 로드를 설치하지 않은 평판 전열면에 충돌할 때의 유동특성 및 열전달특성에 대하여 고찰하고자 한다.

Fig. 5는 U=18 m/s일 때 로드를 설치하지 않은 평판 전열면에서 노즐출구로부터 전열면까지의 거리

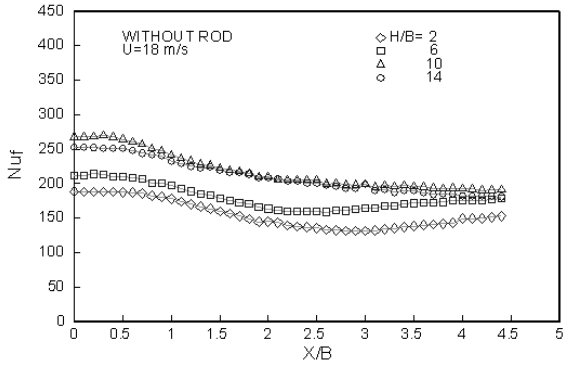

Fig. 5. Effect of H/B on Nu_f.

(H/B)변화에 따른 열전달특성을 나타낸 것으로 전체적으로 분류가 X방향으로 진행할수록 Nu_f(Nusselt number)가 정체점보다 감소하는데 이것은 벽면분류 영역으로 진행할수록 유속 감소, 분류의 확산으로 인한 온도경계층 발달 [10]이 원인이다. 그러나 H/B=2, 6에서는 X/B≒2.5부터 Nu_f가 다시 증가하는데 이것은 노즐 양끝에서 생성된 와류가 성장하여 전열면상의 온도경계층을 교란시키기 때문이다.

H/B변화에 대해 Nu_f는 H/B=10에서 가장 높게 분포되어 있는데 이것은 분류가 전열면에 충돌하기 전에 주위유체와의 혼합작용이 충분히 이루어져 난류강도가 증가되었기 때문이다. 이러한 현상은 속도변화시에도 확인할수 있었는데 특히 노즐형상 변화와 관계없이 자유분류의 주축상에서 최대 전열성능을 얻을 수 있는 위치는 천이영역이라는 것이 많은 연구자들 [8,9]에 의해 밝혀진바 있다. 따라서 본 연구에서는 벽면분류영역에서 열전달증진을 목적으로 난류촉진체인 로드를 설치하고 난류강도가 충분히 발달되어 열전달성능이 가장 크게 나타날 것으로 예상되는 천이영역(H/B=10)을 중심으로 로드사이의 피치를 40 mm로 고정할 때 로드의 폭변화 및 로드와 전열면사이의 간극을 변화시켜 이때의 유동특성 및 열전달특성을 밝히고 로드를 설치하지 않은 평판과 비교 검토하고자 한다.

4. 로드가 있는 평판의 열전달특성

4-1. 간극변화가 열전달에 미치는 영향

Fig. 6은 U=18 m/s, W=4 mm일때 로드와 전열면사이의 간극(이하 C라 함) 변화에 대한 Nu_r의 분포를 나타낸 것으로, 로드가 없는 평판(◆표시한 선)과 비

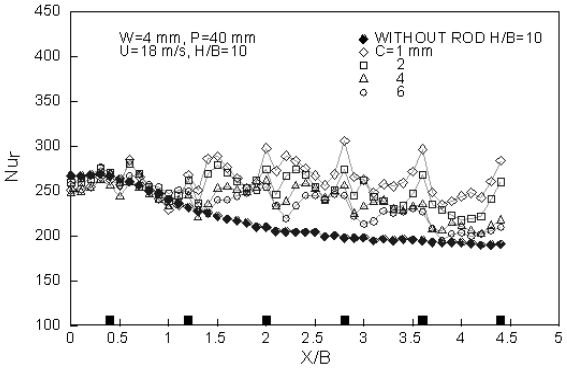

Fig. 6. Distribution of Nu_r on the flat plate as a function of X/B for various C(W=4 mm).

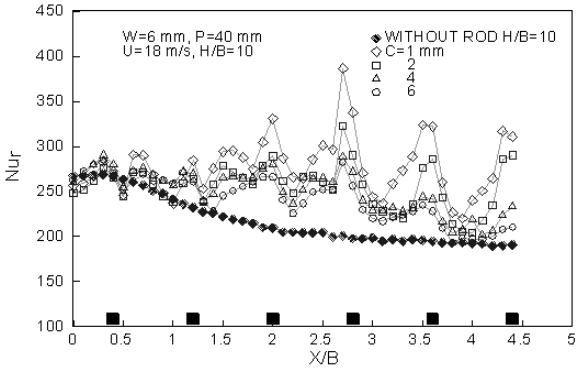

Fig. 7. Distribution of Nu_r on the flat plate as a function of X/B for various C(W=6 mm).

교해 보면 정체점 부근을 제외한 전영역에서 높게 분포되어 있다.

로드를 설치한 경우, 정체점 부근에서의 Nu_r이 로드를 설치하지 않았을 때보다 낮게 나타나는 것은 분류가 로드의 저항을 받기 때문에 벽면분류로의 진행이 원활하지 않아서 약간의 정체현상이 일어나기 때문이며 [10] C변화와 관계없이 로드 바로 밑에서 Nu_r이 높게 나타나는 것은 로드 바로 밑을 지나가는 공기가 가속되면서 전열면과 열교환하기 때문으로 생각된다. 로드 밑에서의 Nu_r을 살펴보면 C가 클수록 낮게 나타나는데 이것은 C가 클수록 로드 밑에서의 공기속도는 빠르지만 전열면과 충분하게 열교환을 하지 못하고 빠져나가기 때문이라는 것이 수치해석 결과 나타났다. 그리고 C변화와 관계없이 로드를 지나면서 Nu_r이 급격하게 낮아진 후 다시 증가한다. Nu_r이 급격하게 낮아지는 것은 분류가 로드 바로 밑을 빠져나오면서 전열면에서 이탈하는 박리현상과 로드사이에서의 정체현상(Fig. 12참조) 때문이며, 다시 높아지는

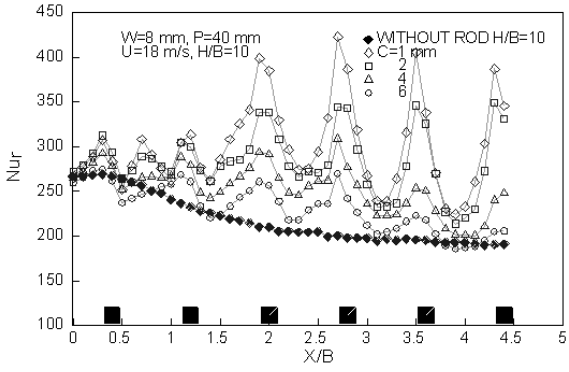

Fig. 8. Distribution of Nu_r on the flat plate as a function of X/B for various C(W=8 mm).

것은 로드사이를 지나가는 공기가 로드사이를 재부착하고 또한 로드 측면에 충돌하면서 로드 밑으로 진행하기 때문으로 생각된다.

Fig. 7은 W=6 mm인 경우로서 C 변화에 대한 Nu_r 분포는 Fig. 6의 W=4 mm일 때와 유사하나 4, 5, 6번째 로드 직전의 Nu_r이 로드 바로 밑 보다 높게 나타난다. 이것은 로드 측면에 충돌하는 분류가 와류를 일으켜 이 부근의 온도경계층을 박막화시키기 때문이다. 이 효과는 로드 바로 밑에서의 열전달향상보다 크게 작용하며 C=2 mm에서도 이와같은 현상을 확인할수 있다. 또한 C의 변화에 대한 Nu_r의 분포는 C가 클수록 전체적으로 낮아진다.

Fig. 8은 본 실험범위내에서 열전달성능이 가장 우수한 W=8 mm인 경우로 W가 넓어짐에 따라 C변화에 의한 열전달효과가 가장 명확하게 나타난다. 와류에 의한 영향은 C변화와 관계없이 세번째 로드직전부터 나타나고 있으며 로드사이에서의 재부착 현상은 볼수가 없다.

즉 분류의 재부착은 로드위를 타고 넘어온 유체가 전열면에 다시 부착하는 현상이므로 재부착을 위해서는 일정한 거리가 유지되어야만 가능한 것으로 판단되며, 따라서 재부착은 주로 로드사이의 피치에 의한 영향을 받지만 본실험 결과에 의하면 로드의 폭에 의한 영향도 받고 있음을 알수 있다.

지금까지 고찰한 C의 변화에 대한 영향을 종합해 보면 C가 작을수록 로드 바로 밑에서의 열전달성능이 좋아지며, 와류생성에 의한 효과가 크게 작용한다. 결국 C가 클수록 위의 두가지 영향은 크게 기대할 수 없으므로 열전달성능을 향상시키기 위해서는 C를 작게 하는 것이 바람직하다.

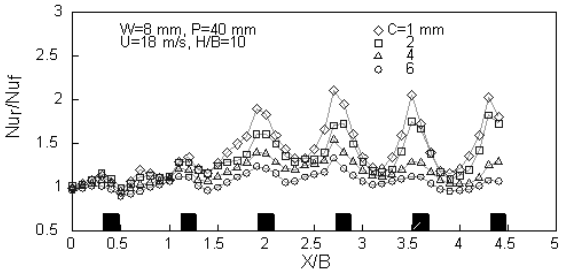

Fig. 9. Comparison of Nu on the flat plate with and without rods.

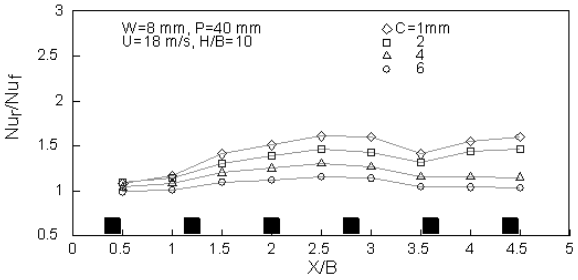

Fig. 10. Comparison of average Nu on the flat plate with and without rods.

Fig. 9는 W=8 mm일 때 C 변화에 대한 국부열전달증진 효과를 나타낸 것으로 C=1 mm일때 4, 5, 6번째 로드 직전에서 로드를 설치하지 않았을 때보다 약 2.2배의 열전달증진율이 나타났다.

Fig. 10은 W=8 mm일 때 로드를 설치하지 않은 경우의 평균 Nu_f와 로드를 설치한 경우의 평균 Nu_r의 비($\overline{Nu_r}/\overline{Nu_f}$)를 나타낸 것으로 로드를 설치함으로서 로드를 설치하지 않은 평판에 비해 C=1 mm일 때는 평균 1.45배, C=2 mm일 때는 평균 1.32배, C=4 mm일 때는 평균 1.25배, C=6 mm일 때는 평균 1.1배의 열전달증진율을 보이고 있다.

4-2. 로드 폭 변화가 열전달에 미치는 영향

4.1절에서 C변화에 따른 열전달특성은 C=1 mm인 경우가 가장 우수하였으므로 C는 1 mm로 고정하고, W가 각각 4, 6, 8 mm로 변할때의 열전달특성을 로드가 없는 평판의 경우와 비교, 검토하고자 한다.

Fig. 11은 U=18 m/s, C=1 mm일 때 W 변화에 대한 Nu_r의 관계를 나타낸 것으로, W 변화와 관계없이 로드를 설치하지 않은 평판에 비해 정체점 부근을 제외한 전영역에서 높은 Nu_r의 분포를 나타내고 있다. 전체적으로 W가 클수록 열전달성능이 우수하게 나타난다. W변화에서 특징적으로 나타나는 현상으로서 W=4 mm일 때는 전영역에 걸쳐 로드 바로 밑에서 Nu_r이 로드 직전보다 높게 나타나지만 W=6, 8 mm일 때는 벽면분류영역(X/B>1.5)으로 진행하면서 로드 직전의 Nu_r이 로드 바로 밑의 Nu_r보다 높게 나타난다. 이것은 4.1절에서도 언급했듯이 로드 직전에서 생기는 와류의 영향 때문으로 와류는 벽면분류영역에서 분류가 로드 측면에 충돌하면서 일어나므로 W가 비교적 작은 W=4 mm인 경우에는 분류의 충돌면적이 작기 때문에 와류의 영향은 크지 않는 것으로 생각된다. 따라서 W가 클수록 와류의 영향도 크다.

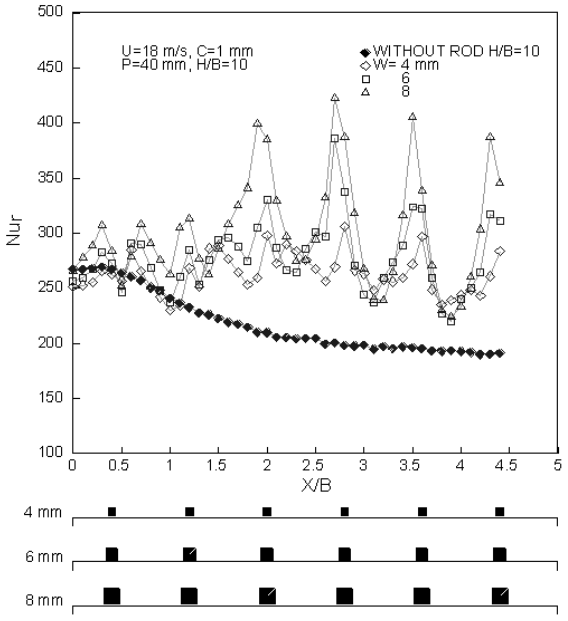

Fig. 11. Distribution of Nu_r as a function of X/B for various rod width.

4-3. 수치해석에 의한 결과

Fig. 12 및 13은 본 실험범위에서 열전달성능이 가장 낮은 W=4 mm와 열전달성능이 가장 높은 W=8 mm에서 C=1, 6 mm 일 때 로드주위의 속도분포와 온도분포에 대한 수치해석(Fluent 6.0) 결과이다. Fig. 12의 속도분포를 살펴보면 전체적으로 로드 윗부분에서 속도가 빠르게 나타나며, 로드 밑에서는 가속되는 현상을 볼 수 있다. W와 관계없이 C=6 mm인 경우가 1 mm인 경우보다 로드 밑에서의 속도는 빠르게 나타나고 있으며, 특히 W=8 mm, C=1 mm인 경우 로드와 로드사이에서 공기가 정체되는 현상을 볼

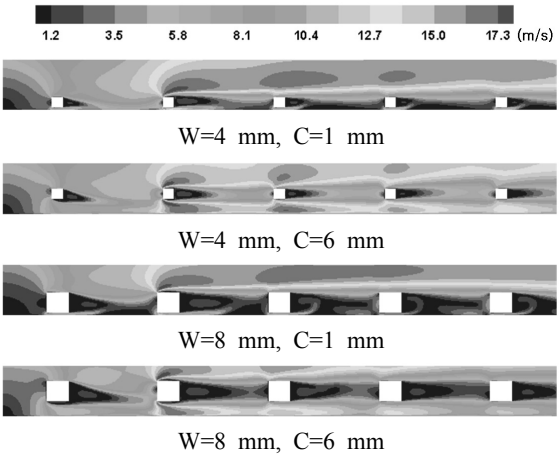

Fig. 12. Velocity distribution within rods.

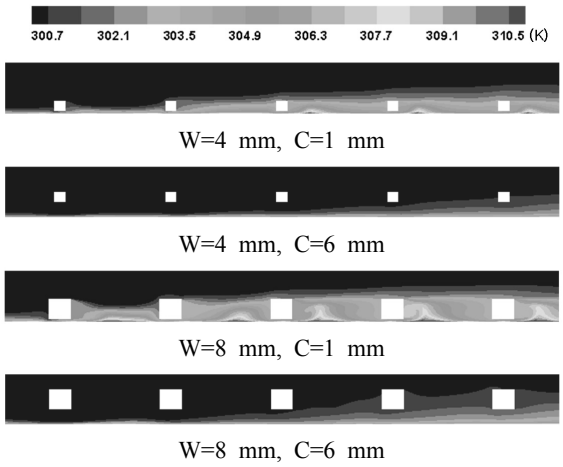

Fig. 13. Temperature distribution within rods.

수 있다.

Fig. 13의 온도분포를 살펴보면 C=1 mm 일 때 로드와 로드사이에서 공기의 온도가 높게 나타나는 부분이 있는데 이것은 로드 밑을 빠져나온 공기와 로드 위를 타고 넘어가는 공기와의 속도차에 의해서 공기가 정체되기 때문이며 이부분에서의 열전달성능은 급격히 낮아진다. 특히 Fig. 12에서 C=1 mm 보다 6 mm 인 경우가 로드 밑에서 속도가 더 빠르게 나타나고 있어 열전달성능이 좋아질것으로 예상되지만 실제 실험결과와 비교하면 오히려 열전달성능이 낮게 나타난다. 이것은 공기가 전열면과 충분히 접촉을 하면서 열전달이 이루어져야하는데 속도가 너무 빠르게 지나가면서 충분한 열교환이 이루어지지 않기 때문인 것으로 수치해석결과 나타났다.

지금까지 고찰한 로드의 폭(W)변화에 대한 영향을 종합해 보면 W가 클수록 로드 바로 밑에서 열전달성능이 우수하고, W가 클수록 벽면분류영역에서 로드 직전에 생기는 와류의 영향이 크게 작용한다. 또한 로드와 전열면사이의 간극(C)이 변할 때 C=6 mm인 경우가 로드밑의 공기속도는 빠르지만 열전달성능은 C=1 mm인 경우가 우수하다.

5. 결 론

본 연구는 2차원 충돌제트 시스템의 천이영역(H/B=10)에서 열전달증진을 목적으로 전열면 앞에 정 4각 로드군을 설치하고 로드와 로드 사이의 피치를 40 mm로 고정했을때, 로드의 폭 변화(W=4, 6, 8 mm) 및 로드와 전열면사이의 간극변화(C=1, 2, 4, 6 mm)에 따른 유동특성과 열전달특성을 실험적으로 규명하고 로드를 설치하지 않았을 경우와 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 로드를 설치하지 않은 평판의 경우에는 정체점 이후 열전달성능이 계속적으로 감소하지만, 로드를 설치 할 경우에는 로드 바로 밑에서의 가속 및 로드직전의 와류생성에 의해서 정체점보다 높은 열전달성능을 얻을 수 있다.
(2) 로드와 전열면사이의 간극(C)을 변화시킬 경우, C가 작을수록 로드 바로 밑에서의 열전달성능은 우수하다.
(3) 로드의 폭(W)를 변화시킨 경우 본 실험범위내에서 W=8 mm인 경우가 가장 열전달성능이 우수하다.

참고문헌

1. 김동균; 손종동. 충돌제트 노즐의 다중 배열 형상에 따른 열전달 특성, 한국동력기계학회, 2006, 10(3), 32-37.
2. 정인기; 박시우; 박수철. 돌출 발열블록표면에서 충돌분류 열전달 특성에 관한 연구, 대한기계학회, 2000, 24(12), 1670-1677.
3. 임성환; 신창환; 조형희. 액체 충돌제트의 표면조도변화에 따른 이상유동 열전달 특성, 대한설비공학회, 2005, 17(8), 714-721.
4. 박재현; 서용권; 김동균; 김시범. 충돌제트 노즐의 배열방법에 따른 열전달 특성에 관 한 연구, 대한기계학회 2004 추계학술대회논문집, 2004, 1476-1481.
5. 정인기, 박시우, 박수철. 난류촉진체를 가진 2차원 분류

충돌면에서의 열전달 특성, 대한기계학회 1999 추계학술대회논문집, 1999, 200-2005.
6. Gardon, R; Akfirat, J. C. The Role of Turbulence in Determining the Heat-Transfer Characteristics of Impinging Jets, Int. J. Heat Mass Transfer, 1965, 8, 1261-1272.
7. Hussain, A. M; Ramjee, V. Effect of the Axisymmetric Contraction Shape on Incompressible Turbulent Flow, ASME Journal of Fluids Engineering, 1976, 981, 58-69.
8. Gau, C; Chung, C. M. Surface Curvature Effect on Slot-Air-Jet Impingement Cooling Flow and Heat Transfer Process, ASME Journal of Heat Transfer, 1991, 113, 858-864.
9. Goldstein, R. J; Timmers, J. F. Visualization of Heat Transfer from Arrays of Impinging Jet, Int. J. Heat Mass Transfer, 1982, 25, 1857-1868.
10. Kum, S. M. Heat Transfer and Flow Characteristics by Trapezoid Rod Array in Impinging Jet System, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 2001, 13(9), 904-913.