

다중 오리피스 노즐을 이용한 충돌분류의 열전달 향상에 관한 실험적 연구

An experimental study on the heat transfer augmentation by using the multiple orifice nozzle

김 예 용*, 정 기 호**, 김 귀 순***, 서 태 범****
Y. Y. Kim, G. H. Jung, K. S. Kim, T. B. Seo

Key words: Multiple orifice nozzle (다중 오리피스 노즐), Transient method (과도방법),
Steady method (정상방법), Heat transfer (열전달), Liquid crystal (액정)

ABSTRACT

An experimental study has been performed to investigate the heat transfer characteristics of impinging jets with multiple orifice nozzles. Four different shapes of multiple orifice nozzle were tested to improve the heat transfer characteristics of impinging jet. Heat transfer coefficients were obtained by using transient and steady method based on the liquid crystal thermography, and both methods showed very similar results. The effects of multiple orifice nozzles on the heat transfer characteristics of impinging jets were discussed in detail. The results showed that multiple orifice nozzles improved the heat transfer characteristics of impinging jet. Especially, heat transfer coefficients around stagnation region of impinging jets were highly increased.

기 호 설 명

- A : 금박막 필름의 면적 [m^2]
- c : 비열 [$J/kg \cdot K$]
- D : 원형분류 직경 [m]
- f : 금박막 필름의 도금 균일도
- H : 분류 출구와 충돌판사이의 거리 [m]
- I : 전류 [A]
- h : 대류 열전달 계수 [$W/m^2 \cdot K$]
- k : 열전도율 [$W/m \cdot K$]

- \ddot{q}_w : 열플럭스 [W/m^2]
- Re : Reynolds 수, $\frac{UD}{\nu}$
- t : 시간 [sec]
- T : 온도 [$^{\circ}C$]
- V : 전압 [V]

그리스 문자

- $\beta = h\sqrt{t}/\sqrt{\rho ck}$: 무차원화된 시간
- $\theta = (T_w - T_i)/(T_{ref} - T_i)$: 정규화된 온도
- ρ : 밀도 [kg/m^3]

* 부산대학교 대학원 기계공학과
 ** 부산대학교 대학원 항공우주공학과
 *** 부산대학교 항공우주공학과
 **** 인하대학교 기계·항공·자동화 공학부

하첨자

- i : 초기 조건
 ref : 기준값
 w : 벽면 조건

1. 서론

충돌분류는 정체점 부근에서 높은 열전달 계수를 나타내므로 가열, 냉각 및 건조 등에 매우 효과적이다. 그래서 뜨거운 철판의 냉각, 종이나 필름의 건조, 터빈 블레이드의 냉각 그리고 전자 부품의 냉각 등 많은 분야에 응용되고 있다. 그리고 충돌분류는 전형적인 분류유동 외에도 정체유동, 벽면 분류유동 등 다양한 유동특성을 나타내고 있어서 많은 연구자들의 관심을 집중시키고 있으며, 광범위한 응용 사례로 인해 충돌분류 연구의 중요성이 학문적으로나 산업 현장에서 갈수록 더해지고 있다. 이에 따라 충돌분류에 관해서는 Downs 와 James⁽¹⁾에 요약된 바와 같이 이론적으로나 실험적으로 많은 연구가 수행되었다.

먼저 Gardon 과 Cobonpue⁽²⁾는 충돌분류가 다른 유동장에서 보다 훨씬 큰 열전달 계수를 나타냄을 보여주었다. 그리고 Gardon 과 Akfirat⁽³⁾은 분류와 평판 사이의 거리와 Reynolds 수가 열전달 특성에 미치는 효과를 고찰하였는데, 이 두 가지가 열전달 특성에 가장 크게 영향을 미치므로 충돌분류에 대한 대부분의 연구는 이들이 미치는 효과를 고찰하였다. Obot 등⁽⁴⁾과 Gundappa 등⁽⁵⁾은 분류 노즐 형태의 영향을 고찰하였으며, Hollworth 와 Berry⁽⁶⁾는 기존의 충돌분류 실험 결과들과 간의 상이성이 분류의 출구유동 조건이 서로 다른데서 기인하는 것으로 결론지었다. Sparrow 와 Lovell⁽⁷⁾은 분류 입사각의 영향을, Metzger 등⁽⁸⁾과 Hrycak⁽⁹⁾은 충돌판의 곡률효과를 고찰하였다. Striegl 과 Diller⁽¹⁰⁾는 뜨거운 분류를 이용하여 유입 효과를 살펴보았다. Goldstein 등⁽¹¹⁾은 분류 모양을 배열형태, 다시 말해서 여러 개의 분류가 배열되어있을 때의 열전달 특성을 고찰하였다. 이 실험에서는 열전달 표면에 액정을 사용하여 가시화와 열전달 계수 측정을 동시에 수행하였다. 이 외에도 많은 연구가 수행되어 충돌분류의 유동 특성이나 열전달 특성

은 잘 알려져 있는 단계이고 많은 경험식이 제시되어 현장에서 사용되고 있다.

그러나 이러한 연구들은 현상 파악에 치중하였고, 열전달 특성의 개선 혹은 보다 큰 열전달 계수를 얻기 위한 노력은 부족하였다. Schlunder 와 Gnielinski⁽¹²⁾가 열전달 표면에 trip wire를 부착하여 난류도를 증가시키면서 보다 큰 열전달 계수를 얻으려고 시도한 적이 있으며, Ali Khan 등⁽¹³⁾이 다공판을 이용하여 보다 큰 열전달 계수를 얻을 수 있었다. Huber 와 Viskanta⁽¹⁴⁾는 spent 공기 출구를 가진 배열형 분류를 이용하여 분류간의 거리와 분류와 충돌판 사이의 거리에 대한 열전달 특성을 고찰하였다. Behbahani 와 Goldstein⁽¹⁵⁾은 엇갈린 배열을 가진 충돌분류에 대한 열전달 특성을 고찰하였으며, Florschuetz 등⁽¹⁶⁾은 초기 교차흐름을 가지는 배열형태의 충돌분류에 대한 열전달 특성을 고찰하였다. 국내에서는 정기호 등⁽¹⁷⁾이 다공판을 이용하는 방법으로 열전달 향상을 꾀하였고, 금성민 등⁽¹⁸⁾은 충돌판 앞에 사각로드를 설치하여 열전달 증가를 시도하였다.

본 연구는 하나의 원형 충돌분류를 기준으로 총유량이 일정할 경우에 열전달 증가를 도모할 수 있는 방법을 찾는데 주안점을 두었다. 다공판을 설치했을 경우에 열전달 특성이 좋아짐을 확인할 수 있으나 추가적인 설치물이 필요하고 이 추가적인 설치물은 산업현장에서는 추가 비용으로 나타나게 된다. 배열 분류의 경우에도 이론적으로나 실험적으로 열전달 특성이 향상됨이 입증되었고, 총 유량이 일정할 경우 다중 분류는 단위 분류의 직경이 작아짐에 따라 정체점에서의 경계층 두께가 작아져서 열전달 특성이 향상되므로 배열분류의 특성을 원형 분류에 적용하여 더 나아진 열전달 특성을 기대할 수 있으리라는 목적으로 연구를 진행하였다.

이에 따라 본 연구에서는 충돌분류의 열전달 계수를 증가시키고 열전달 계수의 균일도를 향상시키는 차원에서 다중 오리피스 노즐을 도입하여 이에 대한 열전달 특성을 실험적으로 규명한다. 이러한 실험을 통하여 얻은 충돌분류에 대한 폭넓은 이해와 실험 데이터는 산업 현장에서 사용되고 있는 충돌분류와 관련된 제반 문제를 해결하는데 사용될 수 있다. 그리고 냉각이나 가열

시스템의 개발 시 설계 기본 자료로 활용될 수 있으므로 개발에 따르는 시행오차를 많이 줄일 수 있을 것이다.

2. 액정을 이용한 온도측정

액정은 물질이라기보다는 물질의 상태를 말한다. 액정상을 가지는 유기물질들은 두개의 뚜렷한 용융점을 가진다. 첫번째와 두번째 용융점 사이의 뿌우연 액체 상태를 액정 상태라 부르는데, 이 상태는 물리적으로는 액체의 성질을 가지고 있으나 다른 액체와는 달리 방향성을 가진 결정 조직을 가진다. 이 결정 조직은 고체 결정과 유사한 광학적 성질을 가지는데, 이 성질로 인해 온도에 따라 다양한 색상을 보이게 된다. 이 색상 반응은 정확하게 같은 온도에서 같은 색상이 재현되므로 온도에 민감한 액정의 다양한 색상 변화가 온도지시계로 이용될 수 있다. 이러한 온도 변화에 대한 액정의 색상 반응은 5-50 milliseconds로 매우 빨라서 비정상 열전달 해석에 사용될 수 있다. 이러한 특성으로 인해, 열전달 모델상의 한 점의 온도는 바로 그 점에서 보여지는 색의 색상값과 관계된다. 즉, 색상, 순도, 명도의 세 가지 색의 정의는 액정이 칠해진 어떤 표면의 대류 열전달 연구에 쓰이는 영상처리시스템에 있어서 매우 편리하고도 알맞은 것이다. 왜냐하면 색은 빛에너지의 주파수 특성에 의해 좌우되고, 색상, 순도, 명도 등은 그 주파수 특성들을 나타내는 척도이기 때문이다. 여기서 색상은 빛의 지배적인 주파수에 의해 결정되는 값이다. 그리고 액정은 온도에 따라 특정한 주파수의 빛을 반사하는 특성이 있으므로 액정 영상과 온도 사이에 직접적인 관계가 있다.

열전달 모델 영상은 고감도 칼라 CCD(Charge Coupled Device) 감지기를 가진 카메라(Panasonic, WV-CL320)를 이용하여 RGB(Red, Green, Blue) 정보를 포함하고 있는 액정 표면의 영상으로 획득된다. 이 카메라는 액정이 칠해진 반대편에 열전달 표면에 수직하게 위치시킨다. 이렇게 함으로써 CCD 카메라와 열전달 표면 사이의 장애물이 없어지므로 정확한 색상 측정을 가능하게 한다. 그리고 선명한 액정영상을 얻기 위해 필요한 광원은 카메라 방향에 나란히 위치시킨다. 이는 열전달 표면과 CCD 카메라가 수직

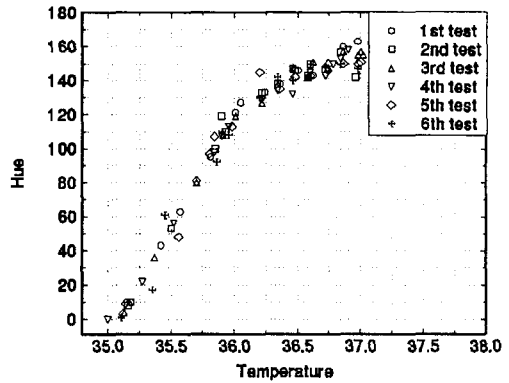


Fig. 1 Hue versus temperature relation.

을 유지하면서 광원과 CCD 카메라가 근접할수록 색상과 온도와의 관계가 선형성을 유지하고 분산 오차도 작아진다는 김예용 등⁽¹⁹⁾의 연구 결과에 따른 것이다. CCD 카메라에서 받아들인 NTSC(National Television System Committee) 신호는 영상처리장치(Data Translation, DT2871)를 거쳐 컴퓨터에서 RGB/HSI(Hue, Saturation, Intensity) 정보로 변환되어 본 연구에서 필요한 색상값(hue)을 얻게 된다.

색상값은 아래 식 (1)과 같이 RGB신호로부터 변환될 수 있으며, 색상값과 온도와의 관계 규명을 위해서 액정이 칠해진 면에 얇은 박판 형태의 열전대(Omega, CO2-K)를 부착하여 표면 온도를 측정하는데, 그 결과는 온도지시계(Omega, DP41-TC)에 나타나 액정 영상과 함께 카메라에 포착된다.

$$Hue = \frac{255}{360} \arctan(\sqrt{3}/F) \quad (1)$$

여기서

$$F = (2R - G - B)/(G - B)$$

이렇게 함으로써 열전대 위치의 색상과 열전대로 측정된 온도를 비교할 수 있게 된다. 이러한 방법으로 Chiral-Nematic 액정(Hallcrest, BM/R35C1W)에 대한 색상과 온도와의 관계를

보면 Fig. 1과 같다. 이 그림에서 보면 hue 값은 35.3 °C와 36.3 °C 사이에서 온도와 거의 선형적인 관계를 나타내고 있다. 이는 색상 값이 온도 지시계로 훌륭하게 사용될 수 있음을 말해 준다.^(20, 21)

3. 열전달 모델 및 실험 방법

열전달 측정은 액정을 이용하여 수행하는데, 액정을 이용한 열전달 계수 측정 방법은 크게 두가지로 분류할 수가 있다. Transient(과도) 방법과 steady(정상) 방법이 그것이다. 본 연구에서는 두가지 방법을 모두 적용하여 두 방법의 장단점을 비교하면서 열전달 실험 방법의 정립을 꾀하였다. 대류 열전달 계수(h)는 다음과 같이 정의된다.

$$h = \frac{\ddot{q}_w}{T_w - T_{ref}} \quad (2)$$

\ddot{q}_w 의 측정 없이 벽면 온도를 측정하는 과도방법은 열플럭스를 측정하는 대신 비정상 열전달 모델에서 벽면온도와 시간을 측정하여 열전달 계수를 구하는 방법으로서, Schultz와 Jones⁽²²⁾를 포함한 많은 연구자들에 의해 시도되었다. 열전달 모델을 열전도도가 낮은 물질로 사용할 때 갑작스런 온도 변화가 벽면에서 발생하면 순간적으로 벽면 부근에서 온도기울기는 수직인 방향으로 아주 큰 값을 가진다. 이 때 다른 방향의 열전달 크기는 수직인 방향에 비해 상대적으로 무시할 수 있을 정도로 작다. 그러므로 열전달 모델 내에서는 1차원 비정상 전도방정식에 따라 열전달이 이루어진다.

이를 위한 실험 구성은 Fig. 2(a)에 나타내었다. 액정을 도포한 총돌판은 낮은 열전도도를 가지는 10 mm 두께의 아크릴판을 사용하였고 크기는 700 mm×700 mm이다. 도포된 액정과 검정페인트의 두께는 합쳐서 40 μ m 정도로 총돌판 두께에 비해 무시할 정도로 작기 때문에 액정과 검정페인트의 두께가 열전달 특성에 미치는 영향은 무시할 수 있다. 열전달계수 계산에 사용되는 \sqrt{pck} 값은 Baughn 등⁽²³⁾이 $\pm 5\%$ 의 불확실성을

갖는다고 기술한 $569 \text{ W(sec)}^{1/2}/(\text{m}^2\text{K})$ 를 사용하였다. 과도방법의 실험 성공 여부는 정확한 온도 측정과 아울러 유동 온도가 step 함수로 주어지게 실험을 수행하느냐에도 달려 있다. 이를 위해 본 연구에서는 분류 출구와 총돌판 사이에 막을 설치하여 순간적으로 막을 제거하는 순간부터 타이머를 작동시켜서 총돌판의 액정 영상과 타이머에 나타난 시간이 동시에 녹화되게 촬영을 해 나간다. 이때 각 영상들은 0.85 초 간격으로 컴퓨터의 하드디스크로 저장된다. 이 저장된 영상들을 시간순으로 재생시켜서 색상 획득방법을 이용하여 영상에 나타난 액정 색상과 온도와의 관계를 토대로 표면 온도 산출과 동시에 열전달 계수 계산을 수행해 나간다.^(20, 21) T_w 값은 총돌판에 부착된 열전대로 측정된 값을, T_{ref} 는 분류 출구 부분에서 열전대로 측정된 값을 온도지시계(Omega, DP41-TC)로 확인한다.

과도방법에서 가열된 분류를 쓸 경우 주위의 찬공기가 유입되어 heating potential을 많이 감소시킨다. Kim⁽²¹⁾에 의하면 이러한 유입 효과를 보정하려면 기준 유동온도(T_{ref})를 노즐 출구유동 온도 대신 회복 온도를 사용하면 보다 정확한 열전달 계수를 예측할 수 있는 것으로 나타나 있다. 그리고 회복 온도는 정체점 부근에서는 분류 출구 유동의 온도와 거의 같은 값을 가지나 정체점으로부터 멀어질수록 낮은 값을 보이는 것으로 알려져 있다. 그러므로 본 과도방법 실험 결과는 정체점 부근에서는 정확하지만 정체점에서 멀어질수록 실제보다 낮은 열전달 계수 값을 보인다. 그러나 본 연구에서는 정체점 부근의 열전달 특성에만 관심이 있고 또 회복 온도의 측정에는 많은 시간과 노력이 소모되므로 회복 온도를 사용하지 않았다.

두번째 방법인 정상방법은 벽면의 \ddot{q}_w 를 아는 경우로서 Baughn 등⁽²³⁾에 의해 시도되었고, \ddot{q}_w 를 공급하기 위해서 금박막 필름을 사용한다. 금박막 필름은 모양이 정방형이기만 하면 균일한 열플럭스를 내는 필름이며, 직류 전원공급기로 전원 공급을 한다. 그러므로 단위 면적당 발생하는 열플럭스는 금박막 필름에 공급된 전력을 금박막 필름의 면적으로 나누어서 구한다. 표면온도는 금박막 필름 위에 뿌려진 액정에 의해 나타난 영상의 색상을 영상 획득방법을 통해 구할 수 있

다. 이렇게 되면 식(2)에서 우변에 있는 모든 변수를 알게 되므로 열전달 계수의 계산이 가능해진다. 정상방법에 대한 실험 구성과 충돌판 세부 단면형상은 Fig. 2(b)에 나타내었다. 먼저 금박막 필름 표면에 전원 공급을 위하여 electrical band(3M)를 금박막 필름 표면 가장자리에 10 mm의 너비로 붙이고, 은납(Dotite, D-500)을 금박막 필름 표면과 electrical band 위에 5 mm 너비로 도포하여 금박막 필름과 electrical band 사이에 전도성을 가지게 한다. 그리고 나서 금박막 필름과 충돌판을 투명 에폭시를 이용하여 접합시키고, 금박막 필름 표면 위에 액정을 air-gun으로 고르게 뿌린 후 검정색 페인트를 뿌린다. 일정 시간이 지난 다음, 즉 정상 상태에 도달했을 때 그 순간에 공급되고 있는 전압과 전류를 기록해 나간다.

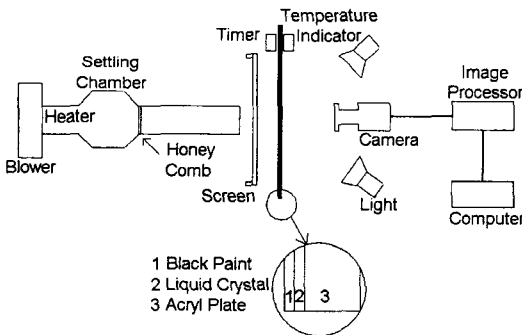
그 후 전압과 전류를 변화시키면서 그 때마다 나타나는 액정영상을 해석하며, 벽면온도의 측정과 나머지 조건들은 과도방법 때와 같다. 정상방법인 경우, 충돌판 벽에서의 열전도 손실을 고려해야되는데, 이는 표면에서의 전체 가열에 비하여 매우 작은 양이기 때문에 무시할 수 있는 양이다.

4. 결과 및 고찰

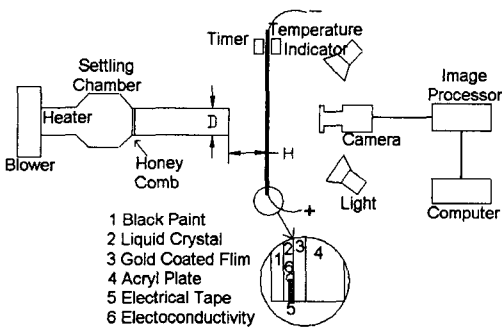
4.1 다중 오리피스 노즐 형상 1

본 연구에서는 분류의 총유량이 일정한 경우를 비교하였으며, 비교 기준으로서의 원형분류는 직경이 90 mm이다. 같은 유량을 가진 상태에서 오리피스 노즐구멍사이의 간격과 각 간격에서 충돌판과의 거리에 따른 열전달 특성을 고찰하였다. 아래에 제시될 다중 오리피스 노즐들의 단면적의 합은 원형분류의 노즐면적과 동일하게 설계되었다.

먼저 오리피스 구멍 직경이 34 mm이고, 갯수는 7개, 구멍 사이의 간격이 구멍 직경의 1배인 경우의 노즐 형상 1은 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 4에는 과도방법과 정상방법을 비교한 결과를 나타내었다. Fig. 4에서 보듯이 두 방법의 결과가 거의 유사하며, 원형분류의 열전달 계수 값 최대치가 70 정도인데 비해, 원형분류 출구 직경 3배만큼의 넓은 영역에서 열전달 계수값 최대치가 98 정도까지 증가하였음을 알 수 있다. 특히 각 구멍이 위치한 부분에서 최대치를 보이면서 열전달 계수가 크게 증가하였다.



(a) Transient test



(b) Steady test

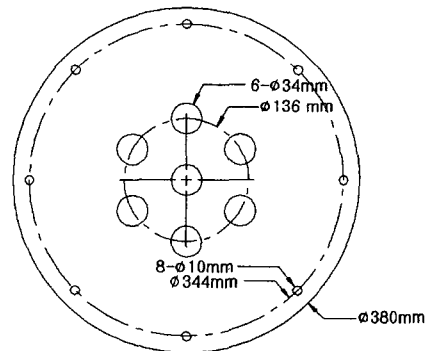


Fig. 3 Geometric detail of nozzle shape 1.

Fig. 2 Schematic of the experimental setup.

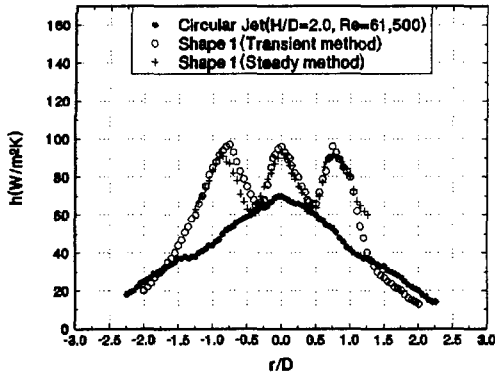


Fig. 4 Comparison of transient and steady method for nozzle shape 1.

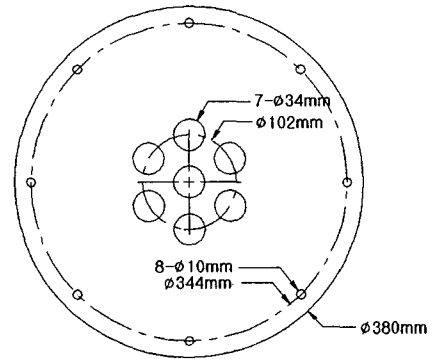


Fig. 5 Geometric details of nozzle shape 2.

4.2 다중 오리피스 노즐 형상 2

두 번째로 7개의 오리피스 구멍 직경을 34 mm로 둔 채 구멍 사이의 간격을 구멍 직경의 0.5배로 가깝게 하여 열전달 실험을 수행하였는데, 이 경우의 오리피스 형상 2는 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 6에는 과도방법과 정상방법을 비교한 결과를 나타내었는데, 두 결과 사이에 큰 차이는 발견되지 않고 있다. $H/D=2$ 인 조건에서, 원형분류의 열전달 계수 최고치가 70 정도인데 비해 형상 2의 열전달 계수 최대치는 82 정도로 상승폭이 크지는 않으나 원형분류 직경 2.5배 정도의 넓은 범위에서 향상된 열전달 특성을 나타내고 있다. 형상 2의 경우도 형상 1과 같이, 오리피스 구멍이 있는 부분에서 열전달 계수 최대치를 보이지만, 형상 1보다는 최대치가 낮아짐을 알 수 있다.

Fig. 7은 오리피스 출구와 충돌판 사이의 거리를 줄여 가면서 정상방법으로 실험한 결과를 나타내었다. 형상 2의 $H/D=0.5$ 일 때의 열전달 계수 최대치는 88 정도이고, $H/D=1.0$ 일 때는 96 정도, $H/D=2.0$ 일 때는 82 정도를 나타낸다. 다시 말해, $H/D=1.0$ (오리피스 출구와 충돌판 사이의 거리가 90 mm)인 경우에 열전달 계수의 상승폭이 가장 큰 것을 알 수 있다. 이 경우는 오리피스 구멍 직경이 34 mm이므로 충돌판의 위치가 오리피스 구멍 직경의 2.65배만큼 떨어진 경우에 해당된다. 이는 Ali Kahn 등⁽¹³⁾의 연구 결과와 마찬가지로

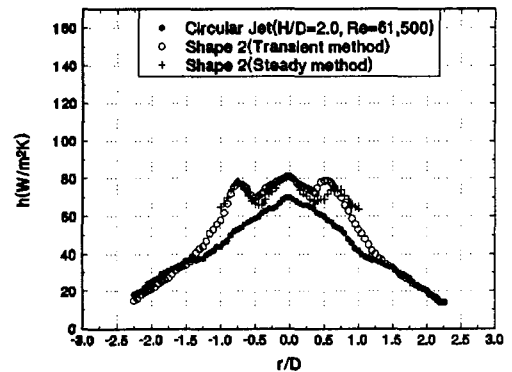


Fig. 6 Comparison of transient and steady method for nozzle shape 2.

충돌판이 오리피스 구멍 직경의 2~3배 가까이 떨어진 경우에 열전달 계수가 많이 증가한다는 것을 말하고 있다.

4.3 다중 오리피스 노즐 형상 3

세 번째로 7개의 오리피스 구멍 직경을 34 mm로 둔 채 구멍 사이의 간격을 구멍 직경의 0.2배로 더욱 가깝게 하여 열전달 실험을 수행하였는데, 이 경우의 오리피스 형상 3은 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 9에는 과도방법과 정상방법을 비교한 결과를 나타내었는데, 전반적으로 열전달 계

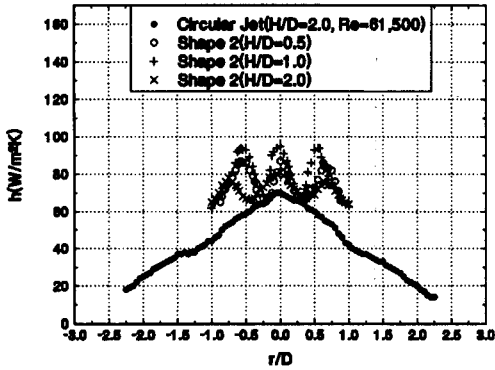


Fig. 7 The effect of nozzle-to-plate distance on the heat transfer coefficient for nozzle shape 2.

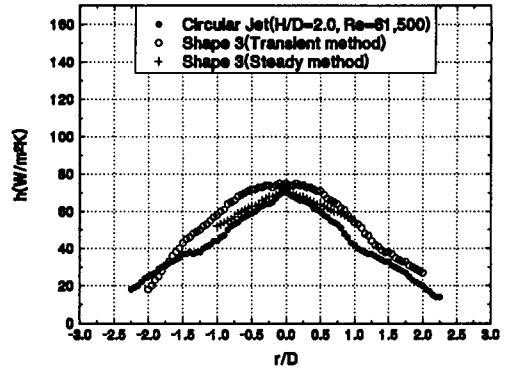


Fig. 9 Comparison of transient and steady method for nozzle shape 3.

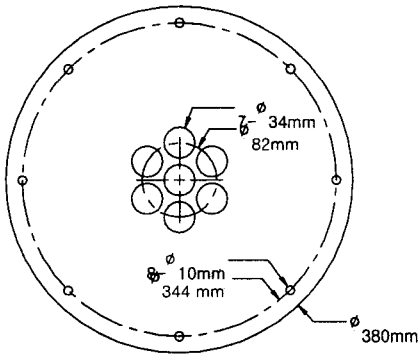


Fig. 8 Geometric details of nozzle shape 3.

수 최대치가 70 정도인 원형분류보다 넓은 영역에서 높은 열전달 계수를 보이나 열전달 계수 최대치가 75 정도로 상승폭은 아주 작다.

Fig. 10에는 원형분류의 결과와 위 세가지 오리피스 형태의 노즐을 사용한 결과를 비교해 보았다. 모든 실험은 $H/D=2$ 에서 수행되었는데, 오리피스 노즐 형상 1의 경우가 가장 열전달이 잘 일어남을 보여주며, 오리피스 구멍 사이의 간격이 줄어들수록 원형분류 유동의 열전달 현상에 가까이 감을 알 수 있다. 이는 각각의 오리피스에서 나오는 분류 각각의 혼합 영역이 충분히 발달하기 전에 서로 겹쳐져서 전체적인 혼합 영역이 감소하기 때문이며, 구멍 사이의 간격이 점점 더

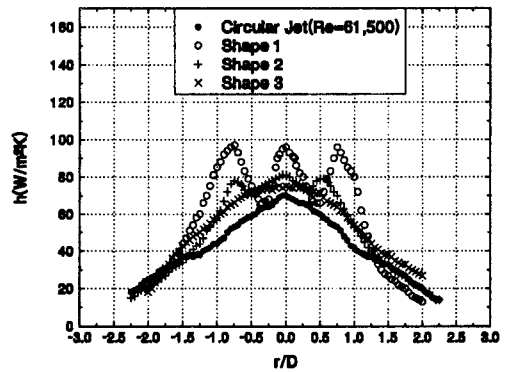


Fig. 10 Comparison of the results for various nozzle shapes, $H/D=2$.

가 가까워지면 결국은 원형분류와 같아진다.

4.4 다중 오리피스 노즐 형상 4

앞에서 다수의 오리피스 형상의 작은 분류를 이용하면 열전달 계수가 증가하는 사실을 확인하였다. 이 사실은 구멍수를 더욱 늘리게 되면 열전달 계수가 더욱 향상됨을 시사한다. 이에 따라 구멍 갯수가 19인 오리피스 형상의 노즐을 시도해 보았다. 원형분류와 같은 면적을 가지게 하기 위해 오리피스 구멍 직경은 21 mm로 하였으며,

구멍 사이의 간격이 구멍 직경의 0.5배로 하였다. 구멍 갯수가 19개인 경우의 오리피스 형상 4는 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 12에는 H/D=2인 경우에 과도방법과 정상 방법을 사용하여 열전달 계수를 측정 한 결과를 나타내었다. 이 결과에서 보면 19 구멍의 오리피스 형상의 노즐을 사용한 경우가 오히려 원형분류 보다 더 낮은 열전달 계수를 보인다. 이 경우는 D=90 mm, H=180 mm, 즉, 오리피스 구멍 직경이 21 mm이므로 충돌판의 위치가 오리피스 구멍 직경의 8.57배만큼 떨어진 경우에 해당된다. 이와 같이 충돌판의 위치가 구멍의 직경에 비해 너무 많이 떨어져 있으면 분류가 확산되어 운동량과 난류도가 저하하게 되어 열전달 계수가 감소하게 된다. 이런 이유로 오리피스 출구와 충돌판 사이의 거리는 더욱 가까워져야 높은 열전달 계수를 얻을 수 있다. 그래서 오리피스 출구와 충돌판 사이의 거리를 변화시키면서 정상방법을 사용하여 열전달 계수를 측정하였다. 실험 결과는 Fig. 13에 나타나 있는 바와 같이 거리를 가까이할수록 열전달 계수 값이 전 영역에서 증가함을 알 수 있다. 열전달 계수의 최대치는 각각 H/D=0.5인 경우, 110 정도, H/D=1.0인 경우, 95 정도, H/D=1.5인 경우, 73 정도이다. 특히 H/D=0.5인 경우가 높은 열전달 계수를 보이는데, 이 때는 충돌판의 위치가 구멍 직경의 2.14배 떨어진 곳에 위치한 경우이다. 앞서 형상 2의 결과의 경향과 같이, 충돌판과 오리피스 출구 사이의 거리가 오리피스 구멍 직경의 2~3배 사이에 위치할 때, 가장 향상된 열전달 특성을 나타내게

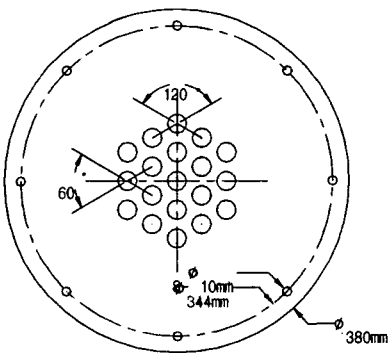


Fig. 11 Geometric details of nozzle shape 4.

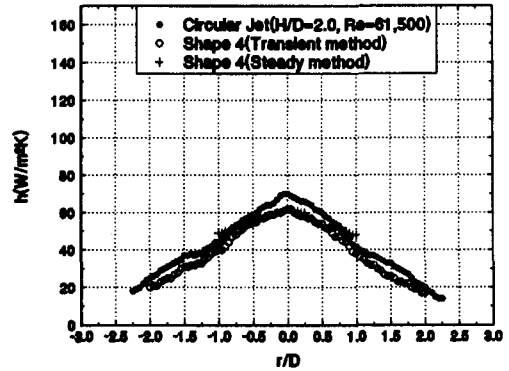


Fig. 12 Comparison of transient and steady method for nozzle shape 4.

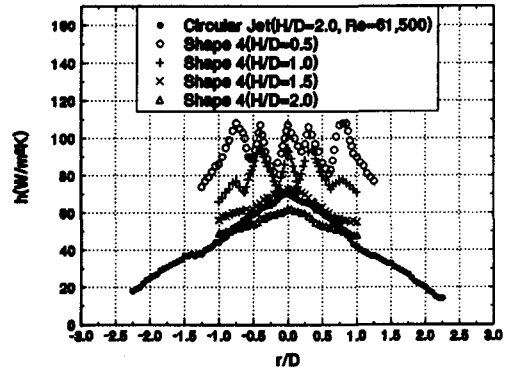


Fig. 13 The effect of nozzle-to-plate distance on the heat transfer coefficient for nozzle shape 4.

됨을 확인할 수 있다.

본 연구의 불확실도는 95% 이상의 신뢰도에서 측정 최대 오차가 Table 1과 같고, 열전달 계수는 이 오차들의 조합이다.

5. 결론

충돌분류의 열전달 특성 고찰과 열전달 성능의 향상을 위해서 다음과 같은 내용의 연구를 수행

Table 1 Uncertainty analysis

Transient test	
$\delta(T_{ref} - T_i)/(T_{ref} - T_i)$	0.4%
$\delta(T_w - T_i)/(T_w - T_i)$	1.3%
$\delta\sqrt{\rho ck}/\sqrt{\rho ck}$	5.0%
$\delta t/t$	0.2%
$\delta\theta/\theta$	1.6%
$\frac{\delta\beta}{\beta} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial\beta}{\partial\theta} \delta\theta$	2.0%
$\frac{\delta h}{h}$	5.3%
Steady test	
$\delta I/I$	1.4%
$\delta V/V$	0.3%
$\delta A/A$	0.1%
$\delta(T_w - T_{ref})/(T_w - T_{ref})$	0.5%
$\delta f/f$	2.0%
$\frac{\delta h}{h}$	2.5%

하였다.

- i) 층돌분류의 열전달 측정 방법 확립
- ii) 과도방법과 정상방법을 이용한 결과들의 비교
- iii) 다중 오리피스 노즐을 사용할 때의 열전달 특성 고찰

이와 같은 원형 혹은 변형된 층돌분류의 열전달 특성을 실험적으로 고찰한 결과들을 토대로 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 과도방법과 정상방법 중에서 전체적인 실험구성은 과도방법이 상대적으로 간단하다. 단, 유입 효과를 충분히 고려하여 회복 온도를 사용할 경우, 정체점 영역뿐만 아니라 전반적인 영역에서 신뢰할만한 실험결과를 얻을 수 있다. 반면에 결과에 제시한 불확실도 해석에서 정상방법이 상대적으로 실험오차가 작은 방법으로 나와있지만, 정상방법은 실험구성이 상대적으로 복잡하고 금박막 필름 표면에서의 균일한 열량발생 조건을 만족시키는 부분에서 매우 세심한 노력이 요구된다. 또한 금박막 필름 표면에 공급되는 열량 공급에 한계가 있어서 층돌판 크기 설정에 어느 정도의 한계가 있으므로 과도방법에 비해 층돌판 크기 설정에 자유롭지 못한 점이 있다. 실험시 소요되는 전체 비용측면에서도 과도방법에 비해 많이 요구된다.

두 방법이 위에 기술한 장단점을 지니고 있기 때문에 실제적으로 어느 방법이 더 우수하다고 단정지을 수는 없다. 단지 과도방법과 정상방법의 결과들이 거의 유사함을 나타내므로, 노즐 출구와 층돌판 사이의 거리가 비교적 떨어진 경우는 과도방법을 사용하는 것이 권장되고, 노즐 출구와 층돌판 사이에 막을 설치할 수 없을 정도로 거리가 좁은 경우는 과도방법 적용이 어려우므로 정상방법을 사용함이 권장된다. 위 결과 및 고찰 부분의 그래프들을 보면 정상방법의 결과들이 과도방법의 결과들보다 반경방향으로 더 짧은 영역까지만 나타나 있음을 볼 수 있고, 과도방법에서는 유입 효과를 고려한 회복 온도를 사용하지 않았다. 이는 본 연구가 정체점 부근에서의 열전달 특성 고찰에 주안점을 두었다는 사실에 기인한다. 정체점 영역을 포함하여 더 넓은 영역에서의 열전달 특성을 고려하기 위해서는 과도방법은 회복 온도를 사용하여야하고, 정상방법은 더 넓은 금박막 필름 표면에 균일한 열량을 공급할 수 있는 실험장치를 구성해야한다.

(2) 다중 오리피스 노즐을 설치했을 경우, 원형분류의 경우보다 전반적인 영역에서 열전달 성능이 좋아진다. 여러 가지 노즐 형상 중에서 H/D=2.0인 경우, 오리피스 구멍 사이의 간격이 구멍 직경 만큼인 형상 1이 높은 열전달 계수를 보인다. 하지만 오리피스 구멍 사이의 간격이 있으므로 그 효과가 열전달 특성에는 일정한 삼각파 형태로 나타나서 전체적인 영역에서의 열전달 증대를 나타내지는 못한다. 오리피스 구멍 사이의 간격을 줄이면 정량적인 열전달계수 값이 전반적으로 줄어들면서 결국에는 원형분류와 유사한 열전달 특성을 나타냄을 알 수 있다.

(3) 전반적인 영역에서 높은 열전달 계수를 얻고 싶은 경우, 19 구멍 혹은 보다 많은 수의 오리피스 형상의 구멍을 가진 노즐을 출구와 층돌판 사이의 거리가 오리피스 노즐 구멍 직경의 2~3배 부근에 위치시켜 사용하는 것이 유리하다. 하지만 오리피스 구멍 개수를 늘이면 오리피스 구멍 직경이 작아지고 결국에는 운동량을 감소시키는 상황에 이르게된다. 이런 이유로 오리피스 구멍 개수 증가와 직경 선정에는 한계가 있으므로 임의로 오리피스 구멍 개수를 늘일 수는 없다.

후 기

본 연구는 삼성코닝 주식회사의 위탁과제로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Downs, S. J. and James, E. H., 1987, Jet impingement heat transfer - A Literature Survey, ASME paper 87-HT-35, pp. 1-11.
2. Gardon, R. and Cobonpue, J., 1961, Heat transfer between a flat plate and jets of air impinging on it, International Developments in Heat Transfer, Part II, pp. 454-460.
3. Gardon, R. and Akfirat, J. C., 1966, Heat transfer characteristics of impinging two dimensional air jets, Trans. of the ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 88, p. 101.
4. Obot, N. T., Majumdar, A. S. and Douglas, W. J. M., 1979, The effect of nozzle geometry on impingement heat transfer under a round turbulent jet, ASME Paper 79-WA/HT-53.
5. Gundappa, M., Hudson, J. F. and Diller, T. E., 1989, Jet impingement heat transfer from jet tubes and orifices, heat transfer in convective flows, ASME HTD-Vol. 107, pp. 43-50.
6. Hollworth, B. R. and Berry R. D., 1978, Heat transfer from arrays of impinging jets with large jet-to-jet spacing, ASME Paper 78-GT-117.
7. Sparrow, E. H. and Lovell, B. J., 1980, Heat transfer characteristics of an obliquely impinging circular jet, Trans. of the ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 102, pp. 202-209.
8. Metzger, D. E., Yamashita, T. and Jenkins, C. W., 1969, Impingement cooling of concave surfaces with lines of circular air jets, Trans. of the ASME, J. of Eng. for Power, Vol. 91, p. 149.
9. Hrycak, P., 1981, Heat transfer from a row of impinging jets to concave cylindrical surfaces, int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 24, pp. 407-419.
10. Striegl, S. A. and Diller, T. E., 1984, The effect of thermal entrainment on jet impingement heat transfer, Trans. of the ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 106, pp. 27-33.
11. Goldstein, R. J. and Timmers, J. F., 1982, Visualization of heat transfer from arrays of impinging jets, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 25, No. 12, pp. 1857-1868.
12. Schlunder, E. U. and Gnielinski, V., 1967, Heat and mass transfer between a surface and an impinging jet, Chemie-Ing.-Techn., Vol. 39, p. 578.
13. Ali Khan, M. M., Hirata, M., Kasagi, N. and Nishiwati, N., 1982, Heat transfer augmentation in an axisymmetric impinging jet, Proc. of the 7th Int. Heat Transfer Conference, pp. 363-368.
14. Huber, A. M. and Vikanta R., 1994, Effect of jet-jet spacing on convective heat transfer to confined, impinging arrays of axisymmetric air jets, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 37, No. 18, pp. 2859-2869.
15. Behbahani, A. I. and Goldstein, R. J., 1983, Local heat transfer to staggered arrays of impinging circular air jets, ASME J. of Engineering for Power, Vol. 105, pp. 354-360.
16. Florschuetz, L. W., Metzger, D. E., and Su. C. C., 1984 Heat transfer characteristics for jet array impingement with initial crossflow, ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 106, pp. 34-41.
17. 정기호, 김예용, 김귀순, 서태범, 1996, Impinging Jet의 열전달 특성 향상을 위한 실험적 연구, 한국항공우주학회 '96년도 추계 학술대회 논문집, pp. 259-263.
18. 금성민, 이관석, 오수철, 1995, 충돌공기분류계에서 사각로드에 의한 전열증진 효과, 대한기계학회논문집 제19권, 제11호, pp. 3084-3090.
19. 김예용, 김귀순, 1995, 액정을 이용한 열전달 측정 방법에서의 측정 오차를 줄이기 위한

- 연구, 한국항공우주학회지, 제23권, 제4호, pp. 74-82.
20. Camci, C., Kim, K., Hippensteele, S. A. and Poinsette, P. E., 1993, Evaluation of a hue capturing based transient liquid crystal method for high-resolution mapping of convective heat transfer on curved surfaces, Trans. of the ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 115, pp. 311-318.
 21. Kim, K., 1993, An experimental study on the flow and heat transfer characteristics of an impinging jet, KSME J., Vol. 7, No.3, pp. 258-271.
 22. Schultz, D. L., and Jones, T. V., 1973, Heat transfer measurements in short duration hypersonic facilities, AGARD-AG-165.
 23. Baughn, J. W., Ireland, P. T., Jones, T. V., and Saniei, N., 1989, A comparison of the transient and heated-coating methods for the measurement of local heat transfer coefficients on a pin fin, Trans. of the ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 111, pp. 877-881.