

1열 원형 충돌수분류군에 의한 열전달의 실험적 연구 (제2보, 노즐-전열면간 거리의 영향)

Impingement heat transfer within 1 row of circular water jets: Part 2-Effects of nozzle to heated surface distance

엄 기 찬*, 이 종 수**, 김 상 필***
K. C. Ohm, J. S. Lee, S. P. Kim

Key words: Heat transfer(열전달), Array of water jet(수분류군), Cone type nozzle(원추형 노즐), Reverse cone type nozzle(역원추형 노즐), Vertical circular type nozzle(수직원통형 노즐)

ABSTRACT

In a previous paper, we have examined the effects of nozzle configuration and jet to jet spacing on the heat transfer of 1 row of circular water jets. In this paper, experiments have been conducted to obtain the effects of nozzle to target plate distances on the heat transfer of 1 row of 3 jets and 1 row of 5 jets. The nozzle configurations are Cone type, Reverse cone type and Vertical circular type. Nozzle to target plate distance H was varied from 16 mm($H/D=2$) to 80 mm($H/D=10$).

For fixed value of mass flow rate and nozzle to target plate distance, larger values of average Nusselt number were obtained for the smaller jet to jet spacing. For the array of water jets, the average heat transfer was decreased slightly with increasing nozzle to target plate distance at low jet velocity of $V_o=3$ m/s. However, except for $V_o=8$ m/s of 1 row of 5 jets, it was increased with increasing nozzle to target plate distance at high jet velocity of $V_o \geq 6$ m/s. We proposed to apply the nozzle configuration of maximum average heat transfer to each nozzle to target plate distance for 1 row of 3 jets, and, it was Reverse cone type nozzle for 1 row of 5 jets(Reynolds number ≥ 36000).

기 호 설 명

D : 단일노즐의 직경 [m]
 d : 군분류 노즐의 직경 [m]
 H : 노즐-전열면간 거리 [m]
 h : 국소 열전달계수 [W/m^2K]

\bar{h} : 평균 열전달계수 [W/m^2K]
 k : 열전도계수 [W/mK]
 Nu_D : 국소 Nusselt수, $\frac{hD}{k}$
 $\overline{Nu_D}$: 평균 Nusselt수, $\frac{\bar{h}D}{k}$
 q : 열유속 [W/m^2]
 r : 반경방향 거리 [m]
 Re_D : Reynolds수, $\frac{V_o D}{\nu}$

* 인하공업전문대학 기계설계과
** 안동정보대학 기계과
*** 동양공업전문대학 공장자동화과

V_0 : 노즐출구속도 [m/s]
 X : 노즐간 피치 [m]

그리스 문자

ν : 동점성계수 [m^2/s]

하첨자

3 : 1열 3분류
 5 : 1열 5분류

1. 서 론

제1보⁽¹⁾에서는 노즐형상을 세 가지, 즉 원추형, 역원추형, 수직원통형으로 하여 1열 3분류군과 1열 5분류군을 구성한 충돌수분류계에서 노즐-전열면간 거리가 80 mm로 일정한 상태의 열전달특성을 보고하였다. 본 연구에서는 이러한 노즐형상의 군분류에서 노즐-전열면간 거리변화에 따른 열전달계수의 변화와 최적 노즐형상 및 군분류조건을 실험에 의해 제시하고자 한다.

군분류에서의 열전달에 미치는 노즐-전열면간 무차원 거리(H/D)의 영향은 Huber와 Viskanta⁽²⁾에 의해 4각형 조합배열의 공기 군분류에서 H/D의 증가에 따라 평균 Nusselt수가 감소하는 경향(H/D=0.25~6)이 보고되었으며, 아울러 평균 Nusselt수가 최대가 되는 노즐간 피치는 노즐경의 8배임이 밝혀졌다. Hollworth와 Berry⁽³⁾는 4×4배열의 4각 배열형 공기 군분류에서 노즐간 피치(X_n)가 노즐경의 15배 이하인 조건에서 평균 Nusselt수가 H/D>5에서는 급격히 감소하지만 $X_n/D \geq 20$ 으로 커지면 $5 \leq H/D \leq X_n/D$ 에서는 H/D에 거의 무관함을 보고하였다. 그러나 Bensmaili와 Coeuret⁽⁴⁾는 7개의 3각배열 조합형과 9개의 4각배열 조합형의 액체분류군에서 평균 Sherwood수가 H/D=8까지는 H/D에 무관하며, H/D≥8에서 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 3×3배열의 4각 배열 조합형 공기 군분류의 H/D에 따른 국소 Nusselt수는 Sheriff와 Zumbrunnen⁽⁵⁾의 연구에서 정체점에서 H/D=6의 경우가 H/D=2의 경우보다 더 크나, 그 영역을 벗어난 하류영역에서는 H/D=2의 경우가 더 크게 나타났다.

1열 공기군분류의 경우 Koopman과 Sparrow⁽⁶⁾는 정체점 Sherwood수는 H/D가 증가함에 따라 증가하여 H/D=4에서 최고치를 이룬 후 H/D가 증가함에 따라 감소하는 결과를 얻었으며, 평균 Sherwood수도 동일한 경향을 보이고 있다.

본 연구에서는 전술한 세 가지 노즐형태를 이용한 1열 3분류와 1열 5분류군의 경우에 대하여 노즐-전열면간 무차원거리 H/D=2~10(D는 단일분류경 8 mm)의 변화에 따라 열전달특성을 조사하고 최적의 노즐형상과 노즐-전열면간 거리를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치와 노즐형상 및 그 노즐의 배열도는 제1보⁽¹⁾와 같다. 단, 실험장치에서 전열면을 좌우 조정은 물론 상하조정이 가능하게 하였다. 또한 전열면도 10×158×0.03 mm의 스테인레스 박판이며 열유속 $q=0.1 MW/m^2$ 의 등열유속 조건도 비교를 위해 제1보의 조건과 동일하게 하였다. 그리고 중앙분류 정체점($r=0$)으로부터 3.125 mm 간격으로 20개 점의 온도를 T형 열전대(50 μm)에 의해 10초 간격으로 5회 측정하여 그 평균치를 취하는 방법도 동일하다. 단일분류는 노즐직경 $D=8$ mm, 1열 3분류는 노즐경 $d_3=4.6$ mm, 노즐간 피치 $X_3=37.5$ mm이며, 1열 5분류는 노즐경 $d_5=3.6$ mm, 노즐간 피치 $X_5=25$ mm이다. 분류속도는 $V_0=3 \sim 8$ m/s($Re_D=27000 \sim 70000$), 노즐-전열면간 거리 $H=16 \sim 80$ mm(H/D=2~10)이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 국소 열전달

상향 수분류군에 의한 평판 전열면상의 열전달은 분류의 운동량과, 수분류가 전열면에 충돌할 때 발생하는 액적류에 의해 이웃하는 분류기둥의 유동교란에 의한 전열면상에서 경계층의 불규칙적인 파괴의 영향으로 구분할 수 있으며, 이 두 영향의 대소가 열전달의 크기를 좌우한다고 생각된다.

Fig. 1, 2, 3은 분류속도 $V_0=3$ m/s의 경우, 각각 노즐-전열면간 무차원거리 H/D=2, 4, 6에서

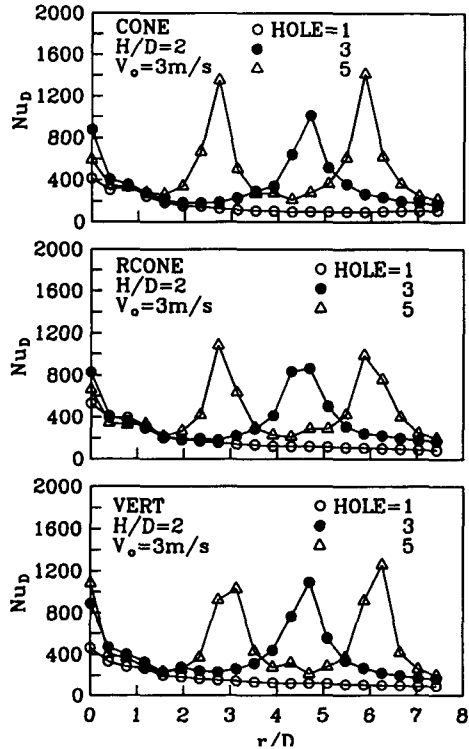


Fig. 1 Comparison of local Nusselt number for the three nozzle configurations at $V_o=3$ m/s and $H/D=2$.

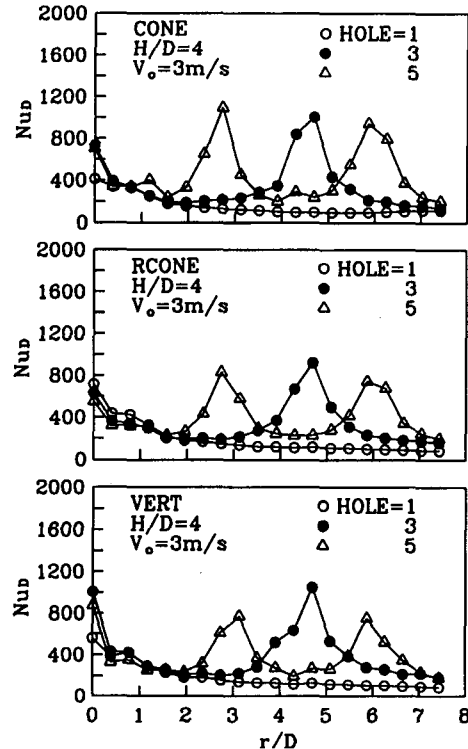


Fig. 2 Comparison of local Nusselt number for the three nozzle configurations at $V_o=3$ m/s and $H/D=4$.

원추형(이하 Cone형) 노즐, 역원추형(이하 Rcone형) 노즐, 수직원통형(이하 Vert형) 노즐의 단일분류, 1열 3분류(이하 3분류), 1열 5분류(이하 5분류)의 국소 Nusselt수를 중앙분류 정체점($r/D=0$)으로부터 r 방향 무차원거리 r/D 에 대하여 표시한 선도이다. 우선 중앙분류 정체점의 Nusselt수에 주목하면 $H/D=2\sim 4$ 에서는 Cone형, Rcone형, Vert형 노즐 공히 3분류가 5분류보다 크나 $H/D=4$ 에서는 그 차가 감소하며, $H/D=2$ 의 Vert형 노즐에서는 5분류가 더 큰 점이 특이한 현상이다.

이것은 저속분류($V_o=3$ m/s)의 경우 문헌^[7]에서 제시한 Rcone형 노즐과 제1보⁽¹⁾의 Cone형 노즐의 유동사진에서 보듯이 중앙분류에서는 액적류에 의한 유동교란작용이 아주 미약하여 열전달계수는 $H/D=2\sim 4$ 에서 분류가 전열면에 충돌시 거의 운동량의 영향을 주로 받기 때문으로 생각된다. 그러나 $H/D=6$ 에서는 Cone형 및 Rcone형 노즐의 경우 3분류와 5분류가 거의 같은 값을 가지

며, Vert형 노즐의 경우는 3분류가 더 크게 나타났다. 이와 같이 노즐-전열면간 거리가 $H/D=6$ 으로 증가하면 Vert형 노즐의 경우는 운동량의 크기가 열전달에 주된 영향을 끼치지만 Cone형과 Rcone형 노즐의 경우는 운동량 크기의 영향이 상실되는 경향으로 볼 수 있다.

Fig. 4, 5, 6은 각각 Fig. 1, 2, 3의 조건에서 분류속도를 6m/s로 증가시킨 경우의 선도이다. 역시 중앙분류 정체점의 Nusselt수를 비교하면 $H/D=2$ 에서는 Cone형 및 Rcone형 노즐에서 5분류보다 3분류가 더 크나 Vert형 노즐에서는 5분류가 더 커서 고속분류에서도 Cone형이나 Rcone형 노즐과는 다른 특성을 갖는다. $H/D\geq 4$ 에서는 세형태의 노즐에서 공히 3분류와 5분류의 중앙분류 정체점 열전달의 차가 아주 작아져 분류속도가 클수록 운동량 크기의 열전달에 미치는 영향이 상실되는 H/D 의 크기가 작아진다.

다음에는 중앙분류 정체점을 제외한 양단분류

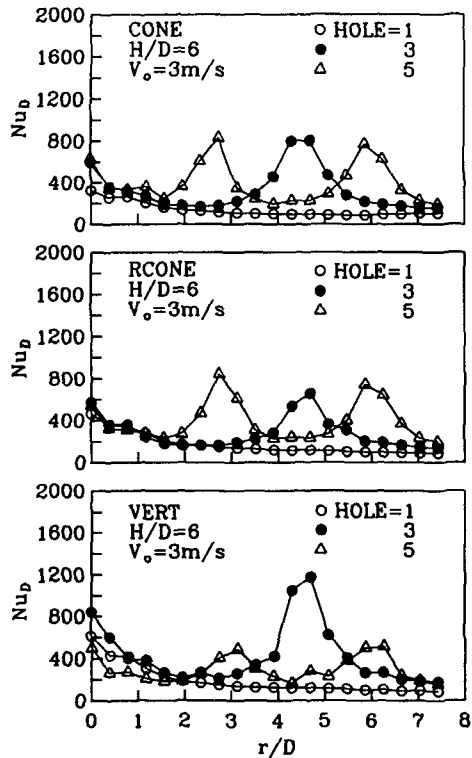


Fig. 3 Comparison of local Nusselt number for the three nozzle configurations at $V_0=3$ m/s and $H/D=6$.

정체점의 Nusselt수에 주목하면, Fig. 1, 2, 3의 $V_0=3$ m/s에서는 세 노즐 형태의 모든 경우 $H/D=2$ 에서 3분류보다 5분류가 더 크고, $H/D=4\sim 6$ 에서는 Cone형과 Rcone형 노즐의 경우 3분류나 5분류가 거의 같으나 Vert형 노즐의 경우는 3분류가 더 크게 나타났다. 이것은 수분류가 전열면에 충돌할 때 액적류가 하향 경사방향으로 판으로부터 약 30° 로 분포하며 분류속도가 증가하면 그 각도가 작아지는 현상을 관찰할 수 있었다. 따라서 3분류의 경우는 노즐간 피치가 5분류보다 커서 $H/D=2$ ($H=16$ mm)에서는 발생하는 액적류가 이웃하는 분류기동에 미치지 못하지만 5분류의 경우는 이웃하는 분류기동에 미치게 되어 난류도를 높이고, 또한 충돌면상에서 경계층이 불규칙하게 재생되는 작용으로 열전달이 증진되며,⁽⁸⁾ 이 영향이 운동량의 영향을 능가하기 때문으로 생각된다. 그러나 H/D 가 더 증가하여 $H/D=4\sim 6$ 이 되면 노즐간 피치가 큰 3분류에서도 액적류가 이웃

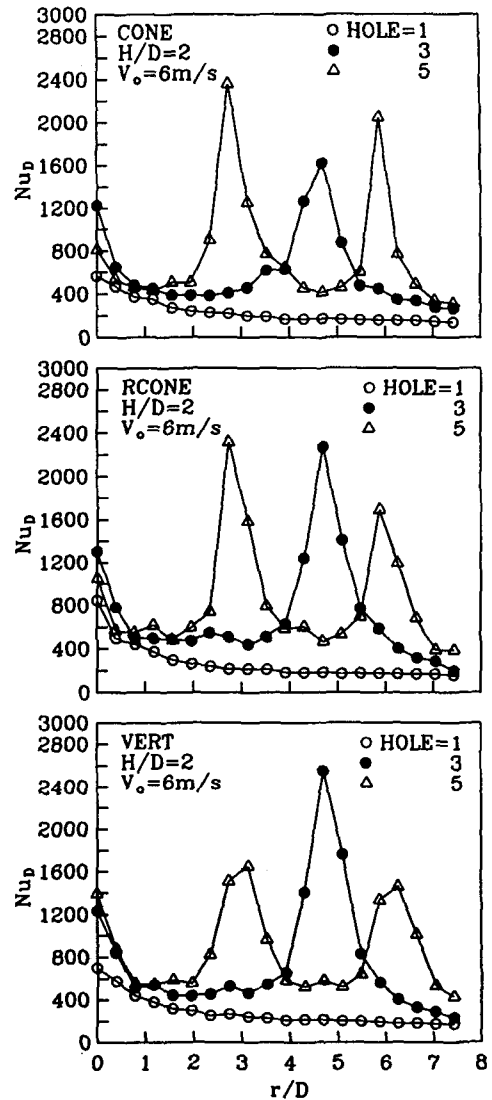


Fig. 4 Comparison of local Nusselt number for the three nozzle configurations at $V_0=6$ m/s and $H/D=2$.

하는 분류기동에 미치게 되는데, 노즐간 피치가 작은 5분류에서는 액적류가 이웃 분류기동에 더 강렬하게 작용하여 Cone형 및 Rcone형 노즐의 경우 운동량의 영향(3분류)과 유동교란의 영향(5분류)이 서로 상쇄되어 Nusselt수가 거의 같은 값을 갖는다고 생각된다. 그러나 Vert형 노즐의 경우는 중앙분류 정체점과 마찬가지로 양단 분류들의 정체점에서도 운동량의 영향이 더 크게 작

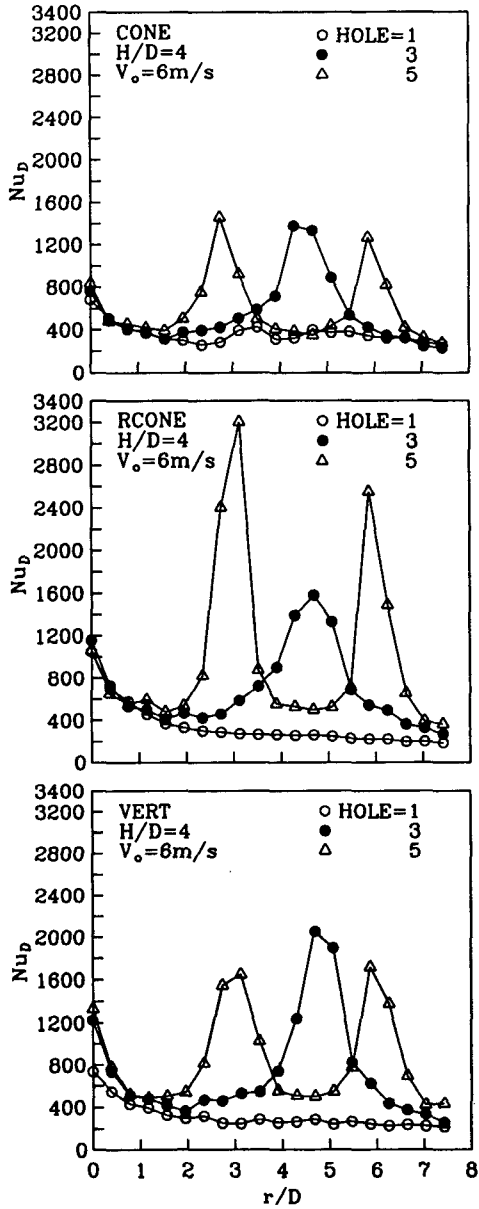


Fig. 5 Comparison of local Nusselt number for the three nozzle configurations at $V_0=3$ m/s and $H/D=2$.

용하여 3분류가 더 크게 나타나고 있다.

Fig. 4, 5, 6의 $V_0=6$ m/s에서 양단분류 정체점들의 Nusselt수에 주목하면, Cone형 및 Rcone형 노즐에서는 $H/D=2\sim6$ 에서 5분류가 3분류와 거의 같거나 크지만 Vert형 노즐에서는 3분류가 더 크

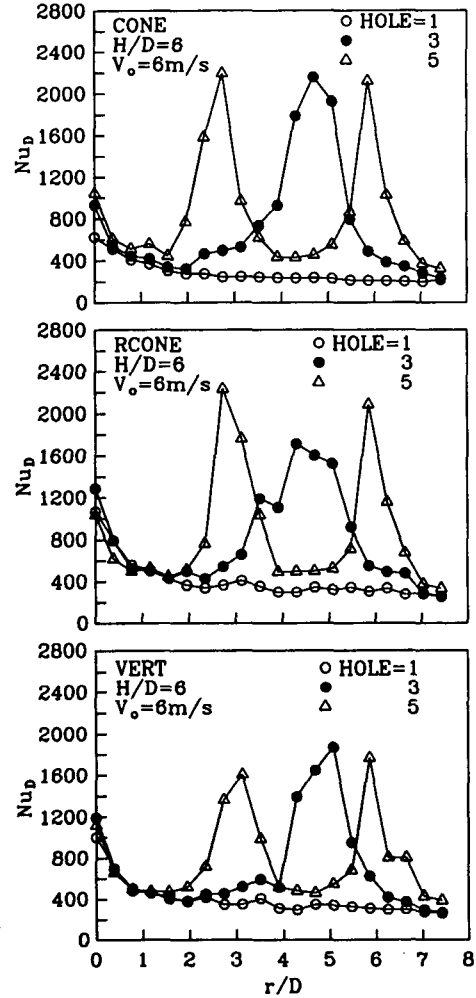


Fig. 6 Comparison of local Nusselt number for the three nozzle configurations at $V_0=6$ m/s and $H/D=6$.

다. 이것은 분류속도를 6 m/s로 증가시키면 노즐 간 피치가 더 큰 3분류의 경우도 $H/D=2$ 에서 액적류의 하향 경사각도가 감소하여 이웃하는 분류기둥에 미치게 되며, 그로 인해 $H/D=2\sim6$ 영역에서 3분류와 5분류의 Nusselt수가 거의 같은 값을 갖지만, Vert형 노즐의 경우는 $V_0=3$ m/s의 경우와 같이 운동량의 영향이 더 크게 작용하여 3분류가 5분류보다 크게 나타난다. 따라서 Vert형 노즐의 특성은 액적류에 의한 유동교란효과 보다는 운동량의 크기가 열전달에 지배적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

3.2 평균 열전달

평균 열전달계수는 제1보⁽¹⁾에서와 같이 $r=0\sim 59.4\text{ mm}$ 에서의 평균치이다. Fig. 7은 분류속도가 3 m/s인 조건에서 노즐-전열면간 거리(H/D)의 변화에 따른 평균 Nusselt수를 단일분류와 3분류, 5분류에 대하여 세 종류의 노즐 형태별로 비교한 선도이며, Fig. 8은 $V_o=6\text{ m/s}$, Fig. 9는 $V_o=8\text{ m/s}$ 인 경우의 선도이다. Fig. 7~9에서, 각각 분류유량이 동일한 조건에서 본 실험범위의 전 H/D 영역에 대하여 평균 Nusselt수는 군분류가 단일분류에 비해 증진되고 있다.

저속 $V_o=3\text{ m/s}$ 인 Fig. 7에서, Vert형 노즐의 H/D=6의 조건을 제외하면 모든 노즐형태에서 평균 Nusselt수는 5분류가 3분류보다 크며, 이 현상은 분류속도를 증가시켜도(Fig. 8, 9 참조) 몇 개의 특이조건 외에는 동일하므로 노즐간 피치가 작은 쪽이 유리하다. 단일분류의 평균 Nusselt수는 H/D에 크게 영향을 받지 않으나 군분류의 경우는 세 노즐형태 공히 H/D의 증가에 따라 완만하게 감소하는 경향을 보이고 있다.

그러나 분류속도를 6 m/s로 증가시키면 Fig. 8에서 보듯이 단일분류는 H/D의 증가에 따라 평균 Nusselt수가 증가하는 경향(Vert형 노즐은 H/D=8에서 최대)으로 나타나고, Vert형 노즐을 제외하면 3분류의 경우도 동일한 경향이며, 5분

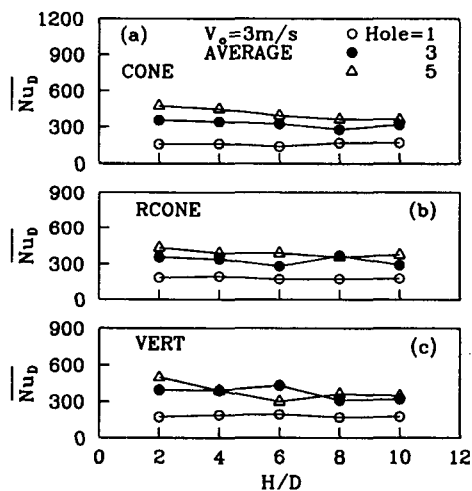


Fig. 7 Effect of nozzle to target plate spacing on average Nusselt number for single jet and multijets at $V_o=3\text{ m/s}$.

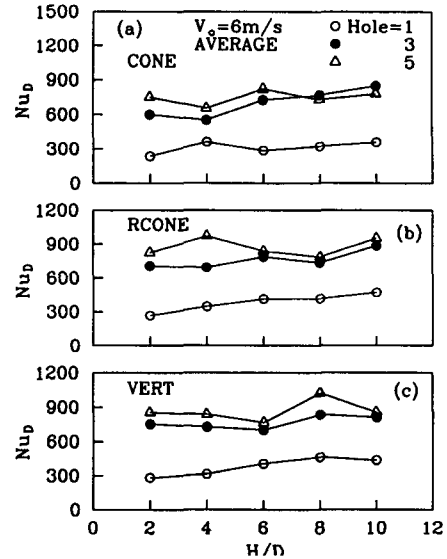


Fig. 8 Effect of nozzle to target plate spacing on average Nusselt number for single jet and multijets at $V_o=6\text{ m/s}$.

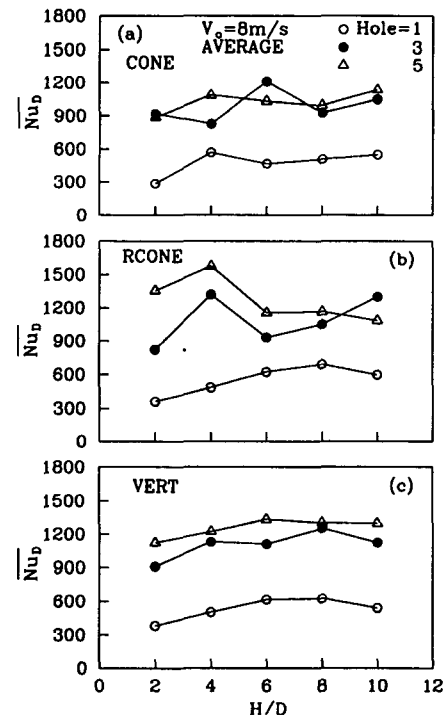


Fig. 9 Effect of nozzle to target plate spacing on average Nusselt number for single jet and multijets at $V_o=8\text{ m/s}$.

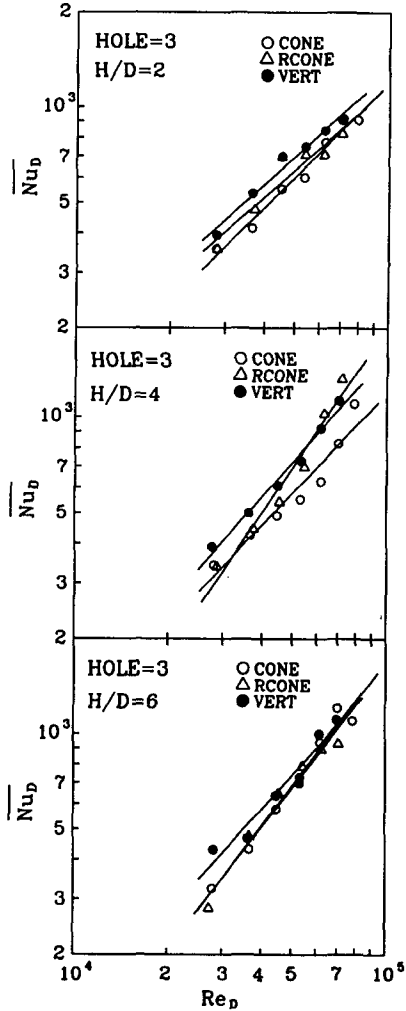


Fig. 10 Comparison of average Nusselt number for the 1 row of 3 jets with the three nozzle configurations at $H/D=2, 4, 6$.

류는 최대 평균 Nusselt수가 나타나는 노즐-전열면간 거리가 Cone형 노즐은 $H/D=6$, Rcone형 노즐은 $H/D=4$, Vert형 노즐은 $H/D=8$ 인 조건으로 나타났다. 분류속도가 더 큰 8m/s의 경우는 Fig. 9에 나타내었다. 여기서 단일분류의 경우 Rcone형 및 Vert형 노즐에서는 H/D 의 증가에 따라 $H/D=8$ 까지 평균 Nusselt수가 증가하여 최대치를. 이룬 후 감소하는데, Cone형 노즐은 $H/D=10$ ($H/D=4$ 와 거의 동일)에서 최대치가 나타난다. 그러나 균분류의 경우는 Rcone형 노즐의 5분류를 제외하면 대체로 H/D 가 증가함에 따라 증가

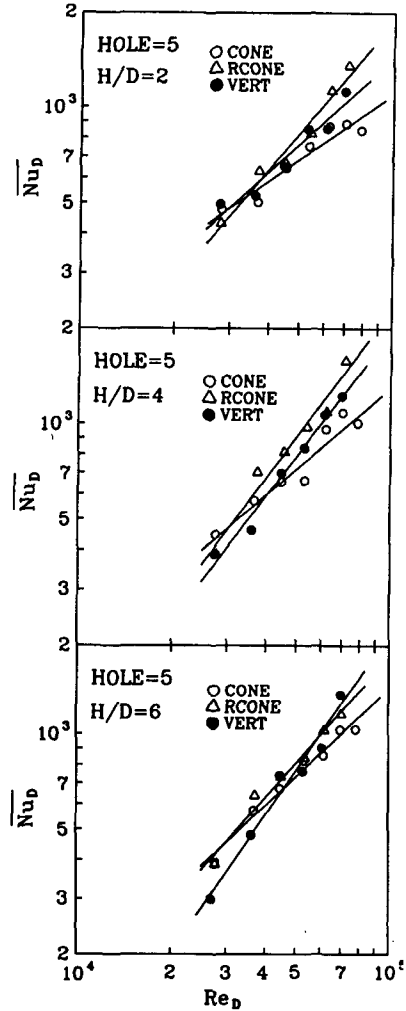


Fig. 11 Comparison of average Nusselt number for the 1 row of 5 jets with the three nozzle configurations at $H/D=2, 4, 6$.

하는 경향이나 각 경우마다 최대치를 나타내는 H/D 가 존재한다. 그 조건은 Cone형 노즐의 3분류는 $H/D=6$, 5분류는 $H/D=10$, Rcone형 노즐의 3분류 및 5분류는 공히 $H/D=4$, Vert형 노즐의 3분류는 $H/D=8$, 5분류는 $H/D=6$ 이다.

Fig. 10은 1열 3분류의 경우 $H/D=2, 4, 6$ 의 각 조건에서 평균 Nusselt수를 Reynolds수에 따라 각 형태의 노즐별로 나타낸 선도이다. $H/D=2$ 에서는 전 Reynolds수의 범위에서 Vert형 노즐이 가장 크며, $H/D=4$ 에서는 $Re_D \leq 54000$ 에서는 Vert형 노즐이 우수하나 그 이상에서는 Rcone형 노즐이

우수하다. $H/D=6$ 에서는 노즐형태간의 우열이 뚜렷치 않아 H/D 가 증가할수록 평균 Nusselt수의 노즐형상에 따른 차이가 감소함을 알 수 있다.

Fig. 11은 1열 5분류의 경우 $H/D=2, 4, 6$ 의 각 조건에서 평균 Nusselt수를 각 노즐형태별로 Reynolds수에 따라 표시한 선도이며, $H/D=2\sim 6$ 에서 대체로 Rcone형 노즐이 가장 우수한 것으로 나타나고 있다.

4. 결 론

본 연구는 제1보⁽¹⁾의 실험과 동일한 조건에서 노즐-전열면간 거리를 변화시킬 때 단일분류를 비롯한 1열 3분류와 1열 5분류의 국소 열전달과 평균 열전달의 변화특성을 원추형 노즐, 역원추형 노즐, 수직원통형 노즐 등 세 형태의 노즐에 대하여 실험한 결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) 3분류 및 5분류의 중앙분류 정체점 Nusselt수는 그 외 양쪽분류 정체점들의 Nusselt수보다 작게 나타난다.

(2) 중앙분류 정체점의 Nusselt수는, 저속분류에서 $H/D\leq 4$: 3분류>5분류, $H/D=6$: 3분류 \approx 5분류, 고속분류에서 $H/D=2$: 3분류>5분류, $H/D=4\sim 6$: 3분류 \approx 5분류이며, 수직원통형 노즐의 경우는 $H/D=2$ 에서 저·고속분류 공히 5분류가 3분류보다 크다.

(3) 중앙분류 이외의 정체점들의 Nusselt수는, 저속분류에서 $H/D=2$: 5분류>3분류, $H/D=4\sim 6$: 3분류 \approx 5분류, 고속분류에서 $H/D=2\sim 6$: 5분류>3분류이며, 수직원통형 노즐의 경우는 저·고속분류 공히 $H/D=4\sim 6$ 에서 3분류가 5분류보다 크다.

(4) 세 노즐형태의 모든 군분류에서 동일유량의 단일분류에 비해 모든 H/D 영역에서 평균 Nusselt수가 증진되며, 5분류가 3분류의 경우보다 증진되었다. 3m/s의 저속분류에서는, 단일분류의 경우 평균 Nusselt수가 H/D 의 크기에 영향을 거의 받지 않으나 군분류의 경우는 H/D 가 증가함에 따라 완만한 감소경향이 있다. 그러나 6m/s 이상에서는 단일 및 군분류 공히 H/D 의 증가에 따라 평균 Nusselt수가 증대하는 경향이 있으나 최대치를 갖는 노즐-전열면간 거리가 존재한다.

(5) 1열 3분류의 경우, $H/D=2$ 에서는 전 Reynolds수 영역에서 평균 Nusselt수가 가장 큰 노

즐형상은 수직원통형이며, $H/D=4$ 에서는 $Re_D\leq 54000$ 에서 수직원통형, $Re_D>54000$ 에서 역원추형이다. $H/D\geq 6$ 에서는 $Re_D\geq 36000$ 에서 노즐형상의 영향을 거의 받지 않는다.

(6) 1열 5분류의 경우, $Re_D\geq 36000$ 범위에서 평균 Nusselt수는 역원추형 노즐이 가장 크게 나타났다.

참고문헌

1. 엄기찬, 김상필, 1999, 1열 원형 충돌수분류군에 의한 열전달의 실험적 연구(제1보, 노즐형상의 영향) 본 논문집.
2. Huber, A. M. and Viskanta, 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.
3. Hollworth, B. R. and Berry, R. D., 1978, Heat transfer from arrays of impinging jets with large jet-to-jet spacing, *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 100, pp. 352-357.
4. Bensmaili, A. and Coeuret, F., 1990, Overall mass transfer between a solid surface and submerged or unsubmerged liquid multijets, *J. Electrochem. Soc.* Vol. 137, No. 6, pp. 1744-1750.
5. Sheriff, H. S. and Zumbrunnen, D. A., 1998, Means to improve the heat transfer performance of air jet arrays where supply pressures are limiting, *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 120, pp. 787-789.
6. Koopman, R. N. and Sparrow, E. W., 1976, Local and average transfer coefficients due to an impinging row of jets, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 19, pp. 673-683.
7. 엄기찬, 이종수, 금성민, 1997, 단일수분류 및 수분류군에 의한 열전달(2)-1열 수분류군-, 대한기계학회논문집(B), 제21권 9호, pp. 1115-1125.
8. Sheriff, H. S. and Zumbrunnen, D. A., 1994, Effect of flow pulsations on the cooling effectiveness of an impinging jet, *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 116, pp. 886-895.