

< 논문 >

## 보텍스튜브를 이용한 충돌냉각의 실험적 연구

신운철<sup>†</sup> · 김창수\* · 배신철\*\*

(2006년 6월 12일 접수, 2006년 10월 15일 심사완료)

### An Experimental Investigation of Jet Impingement Cooling Using the Vortex Tube

Woon-Chul Shin, Chang-Soo Kim and Shin-Chul Bae

**Key Words:** Impingement Cooling(충돌냉각), Vortex Tube(보텍스튜브), Cold Exit(저온출구) Nozzle-Block Spacing(노즐-블록간격)

#### Abstract

The jet impingement cooling characteristics are investigated experimentally. The study is motivated by the potential application of local hot spot cooling by means of the vortex tube. The purposes of this research are to examine the effect of the nozzle-block spacing and flow rate. The results of jet through vortex tube is compared with ones of circular jet. Flow visualization by the smoke-wire technique is also performed to investigate the flow structure. As the nozzle-block spacing is increased and flow rate decreased, the cooling effect of the jet through the vortex tube decreases more remarkably than that of the circular jet. So the cooling effect for the jet through the vortex tube is higher than that for the circular jet at  $H/D \leq 3$ ,  $Q \geq 10 \text{ m}^3/\text{h}$ .

#### 기호설명

$A$  : 면적 [ $\text{m}^2$ ]

$D$  : 원형노즐 및 보텍스튜브노즐 지름 [ $\text{m}$ ]

$H$  : 노즐과 블록 사이의 거리 [ $\text{m}$ ]

$Nu$  : Nusselt 수,  $\frac{Q \cdot D}{A_b \cdot \alpha_f (T_b - T_f)}$

$Q$  : 공급열량 [ $\text{W}$ ]

$\dot{Q}$  : 유량 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

$T$  : 온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]

그리스 문자

$\kappa$  : 열전도계수 [ $\text{W/mK}$ ]

상첨자

- : 평균값

하첨자

$b$  : 가열블록

$c$  : 원형노즐

$f$  : 경계층

$v$  : 보텍스튜브

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 단국대학교 대학원 기계공학과

E-mail : s88119@kosha.net

TEL : (053)609-0551 FAX : (053)421-8626

\* 회원, 경북대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 단국대학교 기계공학과

#### 1. 서론

산업현장에서 다양하게 응용되고 있는 충돌 냉

각기술은 기계요소 및 전자부품의 고집적화로 발생하는 국소적인 고온 및 고열유속의 제거를 위해 가장 적절한 방법 중 하나이다.

또한 공기를 사용한 충돌냉각 방식은 전자제품과 같이 절연유체에 의한 냉각이 요구되는 분야에서 그 신뢰성이 더욱 크게 나타난다.

그러나 공기냉각 방식으로 제거할 수 있는 열량은 제한되어 있으며 고집적화가 매우 빠른 속도로 진행되고 있어 그 효율성이 감소하고 있다.

따라서 이러한 한계성을 극복하기 위하여 전자장비 냉각에 공급되는 공기의 냉각효율을 증가시킬 필요가 있다.

이러한 목적에 부합하게 사용될 수 있는 장치로 보텍스 튜브가 가장 이상적인 것으로 생각된다.

보텍스 튜브는 어떠한 화학적인 반응과 구동부 없이 상온 압축공기로부터 저온 및 고온의 공기를 발생시킬 수 있는 에너지 분리장치이다.

보텍스 튜브는 공작기계의 국부냉각, 전자장치 캐비넷냉각, 금형제품의 급속냉각, 공구 바이트의 냉각 및 극한환경(고온, 오염물질발생공정)에서 작업하는 작업자의 쿨링자켓 및 호흡기 보호용구 등에 실제 사용되고 있다.

보텍스 튜브를 이용한 충돌냉각에 관한 체계적인 연구는 현재 미미한 상태이고 이와 유사한 연구로 Huang & El-genk<sup>(1)</sup>는 스월발생기를 창작한 원형노즐과 일반 원형노즐을 이용한 열전달을 가시화와 실험을 통하여 연구하였으며 이 등<sup>(2)</sup>은 직교하는 두 방향의 공기유동을 이용하여 스월제를 발생시키고, 충돌면의 열전달에 미치는 스월효과를 실험적으로 연구하였다. 또한 조<sup>(3)</sup>는 보텍스 튜브의 저온공기를 이용한 충돌냉각과 슬롯노즐을 이용한 충돌냉각을 비교 연구하였다.

그러나 이러한 연구들은 대부분 압축공기를 스월형 노즐 또는 스월제를 이용한 냉각특성만을 연구하는 것으로 보텍스 튜브의 저온공기만을 이용할 경우 기존의 충돌냉각 방식에 비해 어느 정도의 냉각효과가 증가하는가에 대한 연구는 미미한 수준이다.

따라서 동일한 입구 조건 하에서 보텍스 튜브를 이용한 충돌냉각과 원형노즐을 이용한 충돌냉각에서 유량 및 노즐과 블록사이의 거리가 냉각 특성에 미치는 영향을 조사하고, 유동가시화를 통해 출구에서의 유동형태와 거리에 따른 유동형태

를 조사하여 냉각특성을 예측하고자 한다.

최종적으로 원형노즐과 보텍스 튜브를 이용한 충돌냉각에서 냉각효율을 검토하여, 보텍스 튜브를 사용할 경우 최적의 사용범위를 선정하는 기초자료를 제시하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험장치는 Fig. 1과 같이 크게 압축공기 공급부, 제트 분사부, 데이터 측정 및 수집부, 전원공급부로 구성된다.

압축공기 공급부는 공기의 온도, 습도 및 압력을 일정하게 유지하기 위한 필터, 열교환장치 및 압력조정기로 구성되었다.

제트분사부는 공급되는 공기의 맥동을 막고 압력을 확인하기 위한 챔버실 및 압력계로 구성되어 있다.

데이터 측정부에는 온도데이터를 수집하여 PC로 송신하는 데이터 획득장치(NetDaq 2645A)가 사용되었다. 유량은 유량계(Flowcell flowmeter, SGK-1)를 이용하여 측정한다.

전원공급부는 실험조건에 맞는 전압을 공급하기 위한 직류전원공급장치(HP E3611A) 및 전류 및 전압을 측정하기 위한 디지털 멀티미터(FLUKE, 8842A)로 구성된다.

실험에는 k형 열전대를 사용하였으며 실험 전 Ice point(KAYE, K140-4A)와 항온조(HTR-300A), 전위차계(373A)를 이용하여 보정하였다. 즉, 실험에 사용하는 열전대와 표준백금저항온도계(serial no. 124094)의 센서를 Ice point와 항온조에 넣은 후 두 가지 센서에서 얻은 값을 비교하여 scale factor와 offset값을 구하였다.

이때, 표준백금저항온도계의 값과 보정한 열전대의 값을 비교한 결과 실험범위 내에서  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다.

실험에 사용된 발열블록은 Fig. 2와 같이 두께 4mm, 가로×세로 31mm의 알루미늄 블록 하부에 고열전도성 접착제(OMEGA 201)로 Kepton™ thermofoil heater (Minco, HK5583R70.0L12A)접착하고 3개의 열전대를 이용하여 평균온도를 측정하였다.

발열블록에서 하부로 전도에 의한 열손실을 방지하기 위하여 공기층과 스티로폼을 이용하여 단

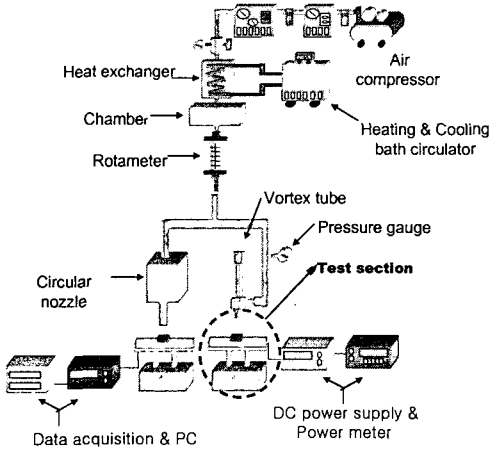


Fig. 1 Experimental apparatus

열시켰다. 예비실험결과 전체 실험범위 내에서 전도에 의한 열손실은 최대 2.7% 정도였다.

Fig. 3은 본 실험에 사용된 보텍스튜브를 계략적으로 보여주는 그림이다.

실험에 사용된 보텍스 튜브는 유동형태가 역류형이고 노즐면적비는 0.155, 저온출구 오리피스지름비( $d_c/D$ ) 0.571, 튜브직경비( $D/L$ ) 23, 길이( $L$ ) 130mm로 기존 논문<sup>(4,5)</sup>에서 가장 우수한 특성을 나타낸 것을 사용하였으며, 저온출구의 직경은 원형노즐과 동일한 직경(10mm)이 되도록 제작하였다.

일반적으로 충돌냉각은 원형노즐이나 보텍스튜브의 저온출구 유동특성, 즉 출구 평균속도 분포, 3차원 스윙정도, 난류강도 등에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있으나 보텍스튜브의 저온출구 유동특성이 매우 복잡하고 현재 연구를 진행 중이므로 차후에 발표할 예정이다.

2.2 실험방법

원형노즐과 보텍스튜브의 저온출구 형상을 동일하게 제작하고 공급되는 공기량도 동일하게 하여 실험조건을 일치시켰다.

보텍스튜브의 저온유량비는 냉각효율이 가장 우수한 0.5<sup>(4,5)</sup>로 조정하여 보텍스 튜브의 저온출구 체적유량이 공급유량 및 원형노즐의 충돌유량의 1/2이 된다. 체적유량의 영향을 확인하기 위해 공급되는 체적유량을 5가지로 변화시키며 실험을 수행하였다.

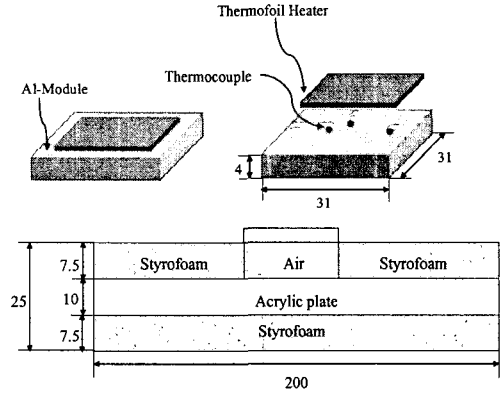


Fig. 2 Geometries of heating block and test section

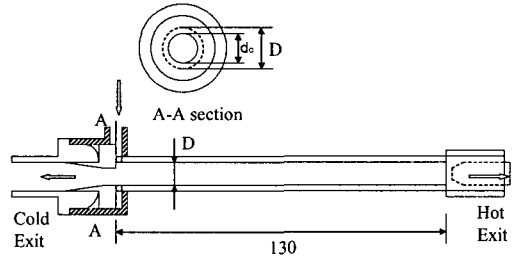


Fig. 3 Geometry of vortex tube

Table 1 The state of air of cold exit

| Input Flow rate(m <sup>3</sup> /h) | Cold exit flow rate(m <sup>3</sup> /h) | Cold exit air temperature(°C) |
|------------------------------------|--|-------------------------------|
| 4                                  | 2                                      | 6.8                           |
| 6                                  | 3                                      | -3.3                          |
| 8                                  | 4                                      | -6.8                          |
| 10                                 | 5                                      | -4.5                          |
| 12                                 | 6                                      | -3.9                          |

또한 노즐 출구와 발열블록 사이의 거리에 따른 영향을 고려하기 위해 기존의 연구결과<sup>(2)</sup>를 고려하여  $H/D$ 가 3 이하는 조밀하게 3 이상은 넓게 실험을 하였다.

보텍스튜브의 저온공기를 이용하는 경우는 냉각에 참여하는 공기의 유량과 공기의 온도가 원형노즐의 충돌공기와 다르게 되므로 보텍스튜브의 저온출구의 체적유량과 온도를 Table 1에 나타내었다.

공급되는 공기는 일정한 온도를 유지하도록 열교환기를 통과시켰으며 가열블록에 공급하는 열량은 1W로 한정시켰다.

발열블록의 온도가 정상상태에 도달하면 원형 노즐 및 보텍스튜브 저온출구와 발열블록 사이의 거리를 변화시켜가면서 공기를 분사시켰으며 분사된 공기로 인하여 발열블록의 온도가 10분 동안  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  이내로 변하지 않으면 정상상태로 판정하였다.

유동구조와 열전달 현상사이의 상관관계를 정성적으로 규명하기 위하여 유동가시화 기법중의 하나인 연기열선법(Smoke-wire technique)을 사용하였다.

CCD카메라를 이용하여 촬영 후 영상을 분할하여 필요한 사진만을 사용하였다. 또한 연기열선을 이용한 유동가시화법은 속도 한계가 있기 때문에 본 실험에서는 제트의 유속이 3m/s에서 실험하였다. 실험에 사용된 열선은 직경이 0.1mm인 백금선을 사용하였고 조명은 1kW 할로겐광을 슬릿에 통과시켜 만든 슬릿광을 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 유동가시화 결과

Fig. 4는 원형노즐과 발열블록사이의 거리에 따른 유동 형상을 가시화한 사진이다.

Fig. 4(a)에서  $H/D=1$ 인 경우, 공기제트가 블록에 충돌한 뒤 유동이 심하게 혼합되는 현상이 발생한다. (b)에서  $H/D=2$ 의 경우, 제트는 충돌 후 블록면을 따라 유동하는 유량이 많고 유동이 정돈되어 나타난다. (c), (d), (e)의 경우 제트가 블록에 충돌 후 전체 유량이 블록면을 따라 유동하는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 4(a)에서 공기제트가 발열블록에 충돌하는 동안 유입공기(entrainment air)와 충돌제트가 좁은 공간에서 서로 간섭하여 유동이 심하게 흐트러져 나타나는 것으로 생각된다. 반면 (b)에서 충돌제트는 어느 정도 안정이 되어 열전달이 원활하게 나타날 것이다. 또한 (c), (d), (e)에서는 충돌제트의 유동구조가 유사하고 충돌제트가 외기와의 접촉면에서 전단력에 의한 운동량 교환만이 작용하기 때문에 노즐과 블록의 거리에 따른 냉각효과는 조금 감소할 것으로 예측된다.

Fig. 5는 보텍스튜브의 저온출구와 발열블록 사이의 거리에 따른 유동을 가시화한 사진이다. (a), (b), (c)에서 충돌제트는 강한 스윙유동의 형태로 반경방향으로 확장되고 있다. 반면 (d), (e)의 경

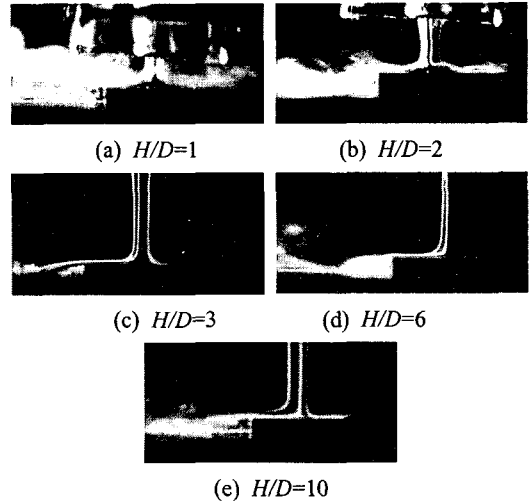


Fig. 4 Visualization of impingement on the block with circular nozzle

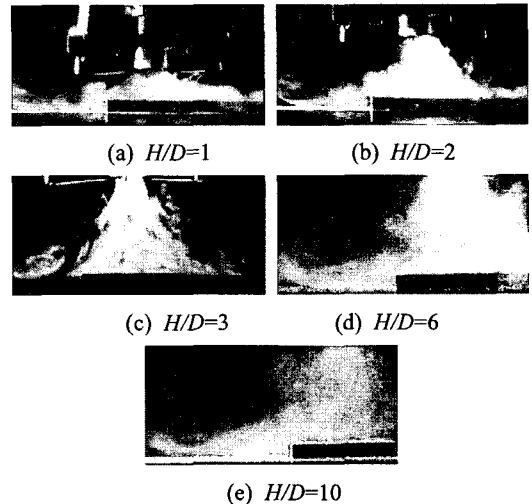


Fig. 5 Visualization of impingement on the block with vortex tube

우에서는 제트가 반경방향으로 매우 넓게 확장되고 외기와 혼합에 의해 연기의 유동형상이 뚜렷하지 않다.

Fig. 5(a), (b), (c)에서는 충돌제트가 확장되면서 주위공기와 혼합이 활발할 것으로 예상되지만 보텍스튜브의 저온출구와 발열블록이 가깝기 때문에 운동량 감소가 크게 나타나지 않고 외기의 유입으로 인한 저온공기의 온도도 크게 증가하지 않을 것으로 예상된다. 반면 거리가 먼 (d), (e)의 경우 운동량 감소가 크게 발생하고 동시에 외부

에서 유입된 공기로 인하여 저온 공기의 온도가 상승하여 열전달이 원형노즐에 비해 크게 감소하고 일반적인 스윙 충돌제트보다 냉각효과가 감소할 것으로 추정된다.

3.2 충돌냉각 특성 비교

Fig. 6은 발열블록의 초기 평균온도가 61°C이고 입구유량이 4, 6, 8, 10, 12m<sup>3</sup>/h일 때 노즐 및 보텍스튜브의 저온출구와 발열블록 사이 무차원 거리(H/D)에 대한 발열블록의 평균온도를 나타낸 그림이다.

Fig. 6(a)은 원형노즐일 때, 무차원 거리에 따른 발열블록의 평균온도를 나타낸 그림이다.

H/D ≤ 3일 때 발열블록의 온도변화는 거의 나타나지 않지만 H/D > 3일 때는 원형노즐과 발열블록사이의 거리가 멀어질수록 발열블록의 평균온도는 조금 증가한다.

이러한 현상은 H/D ≤ 3일 때는 충돌제트가 주위 공기에 의한 운동량 감소가 크게 발생하지 않아 발열블록의 냉각에 충분한 유속이 발생하지만 H/D > 3일 때는 노즐과 발열블록 사이의 거리가 멀어지면서 충돌제트가 주위공기와 운동량교환으로 인하여 유속이 감소하고 이에 따라 열전달도 감소하기 때문이다.<sup>(2)</sup>

그러나 발열블록의 평균온도가 가장 많이 변동하는 입구유량 4m<sup>3</sup>/h의 경우 거리에 따른 발열블록의 온도변화는 최대 7% 내외로 나타나 원형노즐에서 H/D에 따른 냉각효과는 미소하게 나타난다.

이는 H/D가 증가하여도 유동의 구조가 유사하고 운동량 교환에 따른 유속감소가 크게 나타나지 않기때문으로 생각된다. 이는 Fig. 1의 유동가시화 결과로부터 유추할 수 있다.

Fig. 6(b)는 보텍스튜브일 때, 무차원 거리에 따른 발열블록의 평균온도를 나타낸 그림이다.

저온출구와 발열블록 사이의 거리가 멀어질수록 발열블록의 평균온도는 원형노즐일 때 보다 크게 증가한다. 즉, 저온출구와 발열블록사이의 거리가 멀어질수록 냉각효과가 크게 감소함을 보여준다.

이는 저온출구로 배출되는 유동자체가 Fig. 5에서 나타난 것처럼 스윙유동과 유사하여 저온출구와 발열블록 사이의 거리가 멀어질수록 주위공기와 운동량 전달이 급격히 증가하여 유속이 감

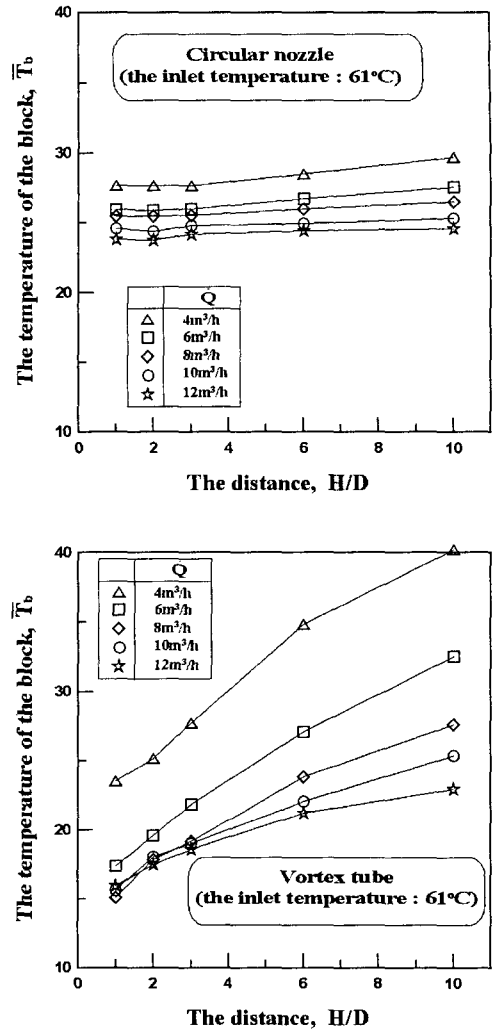


Fig. 6 The mean Temperature of the block .vs. distance between nozzle exit and block with inlet flow rates

소하고 상대적으로 온도가 높은 외부공기의 유입량이 증가하여 충돌제트의 온도가 상승하기 때문이다.

또한 저온출구와 발열블록 사이의 거리가 멀어지면 발열블록은 충돌제트의 영향이 작은 스윙제트의 중심에 위치하게 되어 냉각효과는 급격히 감소된다. 이러한 경향은 기존의 스윙제트를 이용한 열전달 결과와 유사하게 나타난다.<sup>(2)</sup>

특히, 발열블록의 온도변화가 가장 크게 나타나는 입구유량 4m<sup>3</sup>/h의 경우, 저온출구와 발열블

사이의 거리가 증가함에 따라 최대 45%정도 발열블록의 온도가 증가한다.

이는 Fig 6(a)의 원형노즐 결과와 비교하면 약 7배 정도 냉각효과가 감소하는 것으로 나타난다.

또한 원형노즐과 비교하면  $H/D=1$ 일 때는 발열블록의 온도가 약  $4^{\circ}\text{C}$  낮게 나타나고  $H/D=10$ 일 때는 오히려 약  $11^{\circ}\text{C}$  높게 나타난다.

입구유량이 가장 적은  $4\text{m}^3/\text{h}$ 의 경우 다른 입구유량 조건에 비해 발열블록의 온도가 현저하게 높게 나타나는 것은 입구유량이 적어 저온출구 유동의 강도가 작고 Table 1에 나타난 것처럼 에너지 분리에 의한 충돌제트의 온도가 상대적으로 높기 때문이다.

입구유량이 증가하면 발열블록의 평균온도는 감소한다. 즉, 입구유량이 증가하면 냉각에 참여하는 공기량이 증가하고, Table 1에 나타난 것처럼 보텍스튜브의 에너지분리 효과도 증가하여 충돌제트의 온도가 감소하기 때문이다.

거리가 가까운  $H/D \leq 3$ 에서는 입구유량이 8, 10,  $12\text{m}^3/\text{h}$ 로 증가하여도 발열블록의 온도변화는 거의 나타나고 있지 않으나  $H/D > 3$ 의 영역에서는 입구유량이 증가할수록 발열블록의 온도는 감소한다.

이는 Table 1에 나타난 충돌제트의 온도 변화와 충돌제트의 운동량 변화의 상호작용에 의한 것으로 생각된다.

또한 본 실험 범위에서 보텍스튜브의 에너지분리 특성상 입구압력이 계속 증가하여도 임계압력을 지나면 에너지 분리가 더 이상 증가하지 않고, 특히  $H/D \leq 3$ 의 영역에서는 에너지 분리가 최대가 되는 입구유량 이상이 되면 입구유량 증가에 의한 에너지분리가 더 이상 발생하지 않아 발열블록의 온도감소는 기대하기 어렵다.

Fig. 7는 원형노즐과 보텍스튜브에 의한 충돌냉각 시 발열블록의 온도차를 무차원 거리 및 입구유량에 따라 나타낸 그림이다.

Fig. 7(a)는 무차원 거리( $H/D$ )에 대한 보텍스튜브 저온출구로 냉각한 경우와 원형노즐로 냉각한 경우의 발열블록 평균온도의 차를 나타낸 그림이다.

전체적으로 보텍스 튜브로 냉각한 경우가 원형노즐일 때보다 발열블록의 온도가 낮게 나타나고 있다.

그러나 발열블록과의 거리가 멀어질수록, 유량

이 감소할수록 보텍스 튜브의 냉각성능이 감소하는 것으로 나타나고 있다.

본 실험범위에서 보텍스튜브는  $10\text{m}^3/\text{h}$  이상의 유량에서는 모든 무차원 거리( $H/D$ )에서 원형노즐보다 낮은 발열블록 온도를 나타내고 있으며 무차원 거리( $H/D$ )가 3 이하에서는 모든 유량범위에서 원형노즐보다 낮은 발열블록 온도를 나타낸다.

Fig. 7(b)는 유량에 대한 보텍스튜브 저온출구로 냉각한 경우와 원형노즐로 냉각한 경우의 발열블록 평균온도의 차를 나타낸 그림이다.

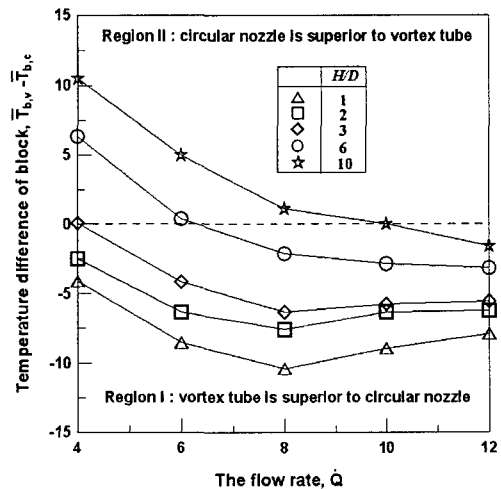
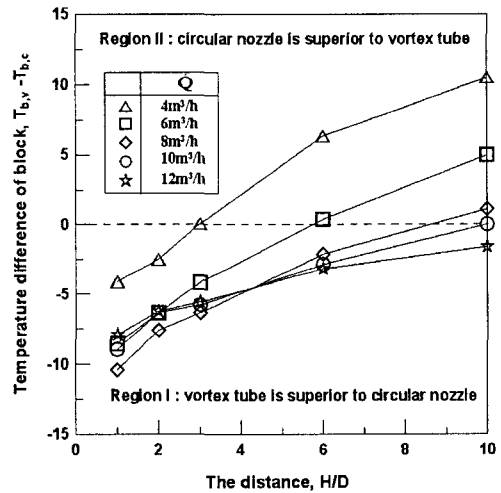


Fig. 7 The temperature difference of the block .vs. distance between nozzle exit and block with inlet flow rates

전체적으로 유량이 증가할수록 보텍스튜브에 의한 냉각효과가 원형노즐보다 우수하게 나타나고 있다. 또한 무차원 거리가 감소할수록 보텍스튜브의 저온출구를 이용하는 경우의 냉각성능이 원형노즐보다 우수하게 나타난다.

$H/D \leq 3$  경우는 실험한 범위내에서 유량에 상관없이 보텍스튜브의 냉각성능이 더욱 우수한 것으로 나타나고 있지만  $H/D=6$ 인 경우 적어도 유량이  $6\text{m}^3/\text{h}$ 를 초과하여야만 보텍스튜브의 성능이 우수하게 유지될 수 있으며  $H/D=10$ 인 경우는 유량이 더욱 증가하여  $10\text{m}^3/\text{h}$  이상이 되어야만 보텍스튜브의 성능이 우수하게 될 수 있다.

Fig. 8은 보텍스튜브의 저온출구온도가 가장 낮게 나타나는 입구유량이  $8\text{m}^3/\text{h}$ 일 때, 노즐과 발열블록 사이의 거리에 따른 발열블록의 평균 Nusselt 수를 나타낸 그림이다.

여기서 두 가지 경우에 대하여 동일한 기준의 Nusselt수를 정의하기는 매우 어려운 실정이다.

왜냐하면 기준온도로 정의되는 충돌제트의 온도가 두 가지 경우 서로 상이하기 때문이다.

그러므로 이러한 문제를 해결하기 위해 가열면의 전원을 끈 후 충돌제트를 방출, 가열면 바로 상부에 열전대를 부착하고 가열면에 삽입된 열전대와 동시에 측정하여 얻은 온도의 평균 값을 막 온도( $T_f$ )로 정의하였다.

보텍스튜브의 경우  $H/D \leq 3$ 의 영역에서는 Nusselt 수가 거의 같은 값을 가지고 있으며, 원형노즐보다 Nusselt 수가 다소 높게 나타난다.

이는  $H/D \leq 3$ 의 영역에서 보텍스튜브의 저온 충돌제트와 외기의 열전달이 적어 충돌제트의 온도가 낮고 외기와 교환되는 운동량이 적어 충돌제트의 속도감소가 작기 때문이다.

반면  $H/D > 3$ 의 영역에서 Nusselt 수가 급격히 감소한다.

이는 충돌제트와 외기의 혼합이 활발하여 충돌제트의 온도가 외기에 근접하고 외기와 운동량 교환이 활발하여 충돌제트의 속도가 급격히 감소하기 때문이다.

따라서 보텍스튜브를 국소냉각 장치로 사용할 경우 외기와 혼합이 적은  $H/D \leq 3$  영역에서 사용하는 것이 효율적이다.

원형노즐의 경우 노즐과 블록사이의 거리에 따른 Nusselt 수는 선형적으로 감소하고  $H/D$ 가 1에

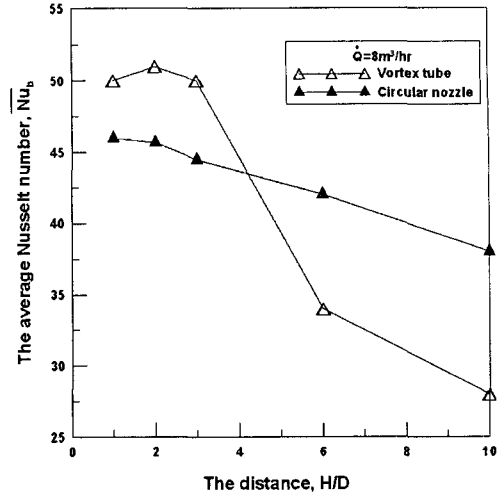


Fig. 8 The average Nusselt number of block .vs. the distance between nozzle exit and block with two cases at the flow rate of  $8\text{m}^3/\text{h}$

서 10까지 변화하는 동안 Nusselt 수는 약 12%내로 감소한다.

#### 4. 결론

원형노즐과 보텍스튜브의 저온출구를 이용한 충돌냉각에 따른 발열블록의 열전달 특성을 충돌제트의 출구와 발열블록사이의 거리 및 입구유량이 발열블록의 냉각특성에 미치는 영향을 실험적 방법으로 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 원형노즐과 보텍스튜브의 저온출구를 이용한 충돌냉각 두 가지 경우 모두 입구유량이 증가할수록, 충돌제트출구와 발열블록의 거리가 가까울수록 냉각효과가 증가한다.

(2) 입구유량이  $10\text{m}^3/\text{h}$  이상일 때는 무차원 거리( $H/D$ )에 상관없이 보텍스튜브의 저온출구를 이용한 충돌냉각이 원형노즐보다 우수하게 나타난다.

(3) 무차원 거리( $H/D$ )가 3 이하에서는 실험된 모든 유량범위에서 보텍스튜브가 원형노즐보다 우수한 냉각특성을 보여준다.

(4) 유동가시화 및 온도측정 결과 보텍스튜브의 저온출구 유동이 강한 스월유동을 나타내므로 충돌면과 무차원 거리가 3 이하에서 가장 효율적인 특성을 나타내는 것을 판단된다.

## 참고문헌

- (1) Huang, L. and El-genk, M. S., 1997, "Heat Transfer and Flow Visualization Experiments of Swirling, Multi-Channel and Convective Impinging Jets," *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 583~600.
- (2) Lee, S. J. and Cho, J. W., 2001, "Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Swirling Impinging Jet," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 25, No. 10, pp. 1346~1354.
- (3) Cho, C. I., 2001, "Impinging Cooling by Means of the Cold Exit of Vortex Tube on Heated Plate," MS thesis, Kyungpook National University, daegu, Korea.
- (4) Fröhlingsdorf, W. and Unger, H., 1998, "Numerical Investigations for the Compressible Flow and the Energy Separation in the Ranque-Hilsch Vortex Tube," *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 415~422.
- (5) Takahama and Kawashima, K. I., 1966, "An Experimental Study of Vortex Tube," *Bulletin of JSME*, Vol. 9, No. 33, pp. 227~245.