

스윙 충돌제트의 열전달 특성에 관한 실험적 연구

조정 원* · 이 상 준†

(2001년 1월 20일 접수, 2001년 7월 10일 심사완료)

Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Swirling Impinging Jet

Joung Won Cho and Sang Joon Lee

Key Words : Heat Transfer(열전달), Swirling Impinging Jet(스윙 충돌제트), Swirl Number(스윙 수), Turbulent Intensity(난류강도)

Abstract

The heat transfer characteristics of a swirling air jet impinging on a heated flat plate have been investigated experimentally. The main object is to enhance the heat transfer rate by increasing turbulence intensity of impinging jet with a specially designed swirl generator. The mean velocity and turbulent intensity profiles of swirling jet were measured using a hot-wire anemometry. The temperature distribution on the heated flat surface was measured with thermocouples. As a result, the swirl effect on the local heat transfer rate on the impinging plate is confined mainly in the small nozzle-to-plate spacings such as $L/D < 3$ at the stagnation region. For small nozzle-to-plate spacings, the local heat transfer in the stagnation region is enhanced from the increased turbulence intensity due to swirl motion, compared with the conventional axisymmetric impinging jet without swirl. For example, the local Nusselt number of swirling jet with swirl number $Sw=0.75$ and $Sw=1$ is about 9.7~16% higher than that of conventional impinging jet at the radial location of $R/D=0.5$. With the increase of the nozzle-to-plate distance, the stagnation heat transfer rate is decreased due to the diminishing axial momentum of the swirling jet. However, the swirling impinging jet for all nozzle-to-plate spacings tested in this study does not enhance the average heat transfer rate.

기호설명			
A	: 금박막의 표면적	n	: 공기유입구의 개수
A_i	: 스윙장치의 공기유입구 면적, 식 (1)	q_c	: 전도 열유속
D	: 노즐출구직경	q_r	: 복사 열유속
D_i	: 스윙장치의 공기유입구 직경	q_v	: 대류 열유속, 식 (4)
f	: 금박막의 균일성	R	: 정체점으로부터 반경방향 거리
h	: 국소 열전달 계수, 식 (2)	Re	: 레이놀즈 수, UD/ν
I	: 금박막을 관통하는 전류	Sw	: 스윙 수(Swirl number), 식 (1)
k	: 열전도계수	T_a	: 주위 온도
L	: 노즐과 평판사이의 거리	T_j	: 제트 온도
L/D	: 노즐과 평판사이의 거리비	T_w	: 가열된 평판의 국소 벽면 온도
m_a	: PVC 파이프를 지나는 유량	ΔT	: 평균 온도차이, 식 (6)
m_θ	: 스윙장치를 지나는 유량	u'	: 축방향 속도성분의 R.M.S, $(\overline{u^2})^{1/2}$
Nu	: 국소 Nusselt 수, 식 (3)	U	: 축방향 평균속도
\overline{Nu}	: 평균 Nusselt 수, 식 (7)	v'	: 반경방향 속도성분의 R.M.S, $(\overline{v^2})^{1/2}$
		V	: 반경방향 평균속도
		X	: 노즐 출구로부터의 거리
		ε	: 방사율(emissivity)
		σ	: Stefan-Boltzmann 상수
		ν	: 동점성 계수

* 회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

TEL : (054)279-2169

FAX : (054)279-3199

1. 서론

충돌제트(impinging jet) 열전달은 학문적 관심뿐만 아니라 넓은 응용 분야를 가지고 있다. 충돌제트는 충돌면에서 높은 열 및 물질 전달률을 가지며 주로 냉각, 건조 공정 등에서 널리 사용되어 왔다. 따라서, 충돌제트 열전달을 향상시키는 것은 매우 중요하며, 그 동안 이에 대한 많은 연구들이 수행되어 왔다. 이들 연구를 통해 충돌면에서의 열전달은 충돌제트의 난류강도 변화에 따라 크게 달라짐이 밝혀졌다.

본 연구에서는 충돌면에서의 열전달을 향상시키는 방법으로 충돌제트에 스웰(swirl)유동을 부가하여 초기 난류강도를 증가시키는 방법을 고려하고자 한다. 충돌제트에 스웰을 부가하게 되면 축방향으로 진행되는 유동에 접선방향의 회전하는 속도성분이 추가되어 난류특성을 크게 변화시키게 된다. 이와 같은 스웰효과는 내연기관에서 연소효율을 향상시키는데 많이 응용되고 있다.

Huang 과 El-Genk⁽¹⁾는 기존 방식의 충돌제트와 스웰효과를 이용한 충돌제트의 열전달 특성을 비교하였다. 여기서 그들은 스웰효과를 이용할 경우, 충돌면에서의 국소 열전달계수와 평균 열전달계수가 모두 향상되는 결과를 보여주었다. 또한 세 가지 스웰 각도(15°, 30°, 45°)에 따른 열전달 특성을 연구하여 스웰 각도가 작은 $\theta=15^\circ$ 인 경우가 열전달 향상에 가장 효과적임을 밝혔다. Yan 과 Sanici⁽²⁾는 내경이 2.05cm 인 원형 파이프에 세 개의 공기 유입구를 갖는 스웰장치를 설치하여 파이프 노즐을 통해 분사되는 스웰제트가 충돌면의 열전달에 미치는 영향을 연구하였다. 그들은 스웰효과가 큰 제트일수록 노즐과 충돌면 사이의 거리가 짧은 조건에서 충돌영역($RD < 2$)의 열전달이 향상된다고 하였다. Shtern 등⁽³⁾은 수치해석을 통하여 스웰유동을 연구한 결과, 스웰효과로 인하여 열교환기에서 열전달이 향상되며, 충돌면에서의 열전달이 강화된다는 것을 보여주었다.

대부분의 기존 연구는 노즐 내부에 나선형의 홈이 패인 스웰장치나 팬(fan)을 설치하여 스웰유동을 생성시켰기 때문에 주유동의 운동량 손실이 크다. 그런데, 반경방향과 수직하는 법선방향의 유동으로 스웰효과를 생성시키면 주유동의 운동량 손실을 최소화 시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 스웰장치를 이용하여 스웰유동이 축방향으로 진행되는 충돌제트에 추가되었을 때, 스웰효과가 충돌면의 열전달 특성에 미치는 영향을 실험적으로 알아보하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

스웰을 이용한 충돌제트 실험장치의 전체적인 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 공기는 압력조절장치(pressure regulator)를 통해 공급되어 허니컴, 열교환기, 스크린, 그리고 유량계를 지나게 된다. 전체 공급유량을 측정하는 오리피스 유량계를 지난 공기는 두 방향으로 분기하여 내경 52.3mm, 두께 4mm 인 PVC 파이프를 각각 흐르게 된다. 스웰유동을 발생시키는 스웰장치로 향하는 유체는 두 번째 오리피스 유량계를 지나게 되며, 나머지는 길이가 4m 인 PVC 파이프를 흘러 지나게 된다. 한편, 서로 다른 방향으로 분기되는 공기의 유량은 PVC 파이프에 부착된 밸브를 이용하여 유량을 조절할 수 있도록 하였다. 제트의 온도를 측정하기 위해서 반경 0.25mm 의 보정된 T형 열전대를 노즐 출구로부터 상류쪽으로 170mm 위치에 유동에

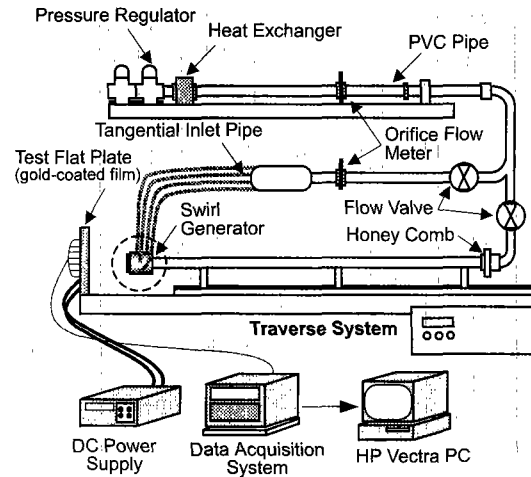


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

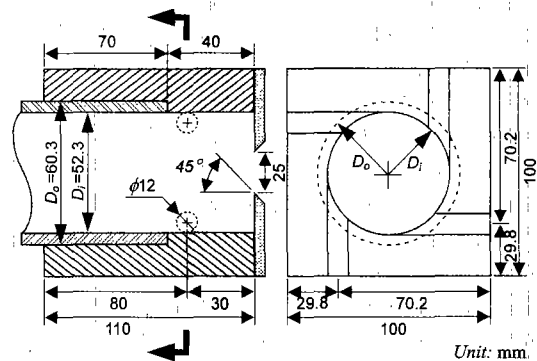


Fig. 2 Cross-sectional views of swirl nozzle

방해를 주지 않도록 부착하였다. 주위온도 측정에도 동일한 열전대를 사용하였다. 이들 열전대들은 HP3852A 데이터 획득장치에 연결되어 있다. 그리고 실험시 제트의 온도를 제어하여 분출된 제트와 주변공기와의 온도차를 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이내가 되도록 하였다.

Fig. 2는 날카로운 모서리를 가진 오리피스 노즐과 스월을 만들어주는 스월장치에 대한 단면도를 나타낸 것이다. 스월유동을 발생시키기 위하여 노즐 출구로부터 30mm 떨어진 위치에는 파이프 반경방향과 직교하는 4개의 법선방향 공기 유입구(inlet)를 설치하였다. 이들 공기 유입구는 Fig. 2에 나타낸 것처럼 PVC 파이프 내경과 일치하도록 하여 긴 PVC 파이프를 거쳐 충분히 발달한 유동에 스월효과가 매끄럽게 추가되도록 하였다. 또한, 스월장치로 공급되는 유량의 계산이 용이하도록 오리피스 노즐 면적과 4개의 공기 유입구 전체 면적을 거의 같게 하였다.

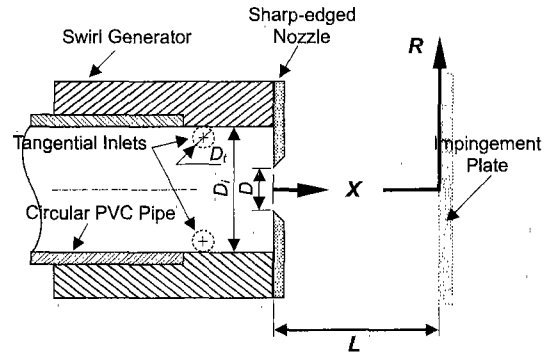
Fig. 3는 스월장치를 이용한 충돌제트 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 서로 다른 네 가지의 스월 수($Sw = 0, 0.5, 0.75, 1$)에 대하여 실험하였는데, 스월 수는 다음과 같이 정의하였다.

$$Sw = \frac{\pi D_i D / 4}{n \times A_i} \left[\frac{m_\theta}{m_\theta + m_a} \right], \quad A_i = \pi \frac{D_i^2}{4} \quad (1)$$

여기서 m_θ 와 m_a 는 각각 스월장치로 들어가는 유량과 PVC 파이프를 지나는 유량을 나타낸다. A_i 는 스월장치의 공기 유입구 면적이며, n 은 공기 유입구의 갯수로 실험에서는 $n=4$ 이다. 실험하는 동안 전체 공급 유량($m_\theta + m_a$)을 일정하게 유지하였기 때문에, 스월장치로 들어가는 유량(m_θ)이 증가할수록 스월 수는 증가하게 된다.

2.2 실험측정방법

충돌면의 열전달계수 측정에 사용되어진 평판은 강화 폴리에스테르 판(Plexiglas plate), 금박막 Intrex(Courtaulds Performane Films Co.), 그리고 33개의 열전대로 구성되어진다. 충돌면은 가로 0.305m, 세로 0.305m, 두께 12.7mm인 폴리에스테르 판으로 되어있다. 이 판의 표면에는 세로 40mm, 가로 120mm, 두께 0.13mm의 금박막을 분무접착제를 이용하여 접착시켰고, 이 금박막 Intrex에 직류 전류를 가해줌으로써 균일 벽면 열유속(uniform wall heat flux) 경계조건을 만들었다. Intrex 표면에 전류를 흘려주기 위하여 얇은 구리 테이프를 전극으로 사용하였다. 구리전극은 50mV, 5A 용량의 차단 저항기(shunt register)와 HP6555A



Sw	m_θ / m_a	m_θ (kg/s)
0	0	0
0.50	1/4	0.001328
0.75	1/3	0.001770
1	1/2	0.002655

Fig. 3 Configuration of Swirling nozzle and coordinate system

직류 전원 공급기에 연결되었고, 두 대의 전압계(Fluke 8840A)로써 Intrex 사이의 전압강하와 Intrex에 가해지는 전류를 측정하였다. 국소 열전달계수는 다음과 같은 식을 이용하여 구하였다.

$$h = \frac{q_v''}{(T_w - T_j)} \quad (2)$$

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3)$$

$$q_v'' = \frac{fIV}{A} - q_r'' - q_c'' \cong \frac{fIV}{A} - \epsilon\sigma(T_w^4 - T_a^4) \quad (4)$$

여기서 h 는 국소 대류열전달 계수이며, T_w 는 충돌면 온도, T_j 는 제트온도 그리고 T_a 는 주위공기의 온도를 나타낸다. 식 (4)에서, 대류 열유속(heat flux) q_v'' 는 직류 전원공급기로 공급된 열유속에서 벽면으로의 전도 열유속 q_c'' 와 Stefan-Boltzmann의 식으로부터 계산되는 복사 열유속 q_r'' 을 빼줌으로써 구한다. 전도 열유속 q_c'' 는 미소 크기의 열전대로 이루어진 열유속 게이지(heat flux gauge) 센서로 측정하였으며, 전도에 의한 손실은 총발열량의 약 1~2%이었다. f 는 평균 가열량에 대한 국소 가열량의 비율로 금박막의 도금 균일성을 나타낸다. Baughn⁽⁴⁾ 등은 본 실험에서 사용되어진 금박막과 같은 경우 96% 이상의 균일도를 가진다고 하였다 따라서 전체 Nusselt 수의 불확실성에 기여하는 열유속 계산에 있어서 $f=1$ 로 가정하였다.

본 실험에서 구한 Nusselt 수의 불확실성에 대한 해석결과를 Table 1에 나타내었다. Kline과 Mcklintock⁽⁵⁾의 방법을 사용하여 불확실성을 해석

한 결과, Nusselt 수에 대한 불확실성은 2.77~3.66%였으며, 급박막의 균일성(f)에 기인한 불확실성이 가장 큰 것으로 나타났다.

평균 열전달계수는 국소 열전달계수를 다음과 같이 평균하여 구하였다.

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{hD}}{k} = \frac{D}{k} \int_A h \frac{(T_w - T_j)}{A \Delta T} dA \quad (5)$$

$$\overline{\Delta T} = \overline{(T_w - T_j)} = \int_A \frac{(T_w - T_j)}{A} dA \quad (6)$$

충돌면에서 $(T_w - T_j)$ 는 일정하며 축대칭 분류이므로 위의 식은 다음과 같이 단순화 시킬 수 있다.

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{hD}}{k} = \frac{2}{R^2} \int_0^R Nu(r) r dr \quad (7)$$

분류가 노즐 출구를 나간 이후 주위 공기와의 온도차에 기인한 유입(entainment) 효과를 무시하기 위하여 실험하는 동안 제트와 주위 공기 사이의 온도차를 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이내로 유지하였다.

스윙 노즐을 지나는 충돌제트의 유동특성을 조사하기 위하여 X 형 열선 프로브(DANTEC 55P61)를 이송장치로 이동시키면서 유속을 측정하였다. 정온형 열선유속계(TSI IFA-100)로 취득한 전압신호는 먼저 저역필터를 거치도록 하였다. 그리고 열선유속계에서 나온 아날로그 속도신호는 데이터 취득장치(DT2838)를 이용하여 초당 2000 개의 비율로 취득하였다. 열선유속계로 측정된 전압신호(E)는 다음과 같은 King's law 를 사용하여 실제 속도(U)로 보정하였다.

$$E^2 = A + B \cdot U^n \quad (8)$$

Table 1 Uncertainty analysis of total Nusselt number

Individual Measured Value		$\left \frac{\partial x_i}{Nu} \frac{\partial Nu}{\partial x_i} \right \times 100(\%)$
x_i	Unit	
f	-	2.06 ~ 2.42
T_w	[$^\circ\text{C}$]	1.57 ~ 2.12
V	[V]	0.65 ~ 1.12
I	[A]	0.44 ~ 1.20
ϵ	-	0.61
T_a	[$^\circ\text{C}$]	0.01 ~ 0.14
T_j	[$^\circ\text{C}$]	0.01 ~ 0.11
A	[m^2]	0.08

$$\text{Total Nu Uncertainty: } \frac{\delta Nu}{Nu} = 2.77 \sim 3.66(\%)$$

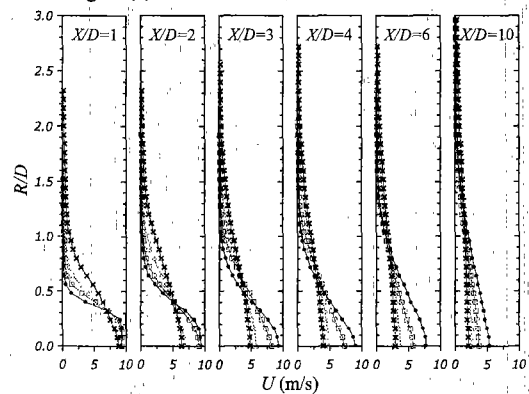
여기서 지수 n 은 일반적으로 통용되는 값인 0.45 를 사용하였다. X 형 열선 프로브는 실험전 effective yaw 보정법(Bradshaw⁽⁶⁾)을 이용하여 보정하였다.

이렇게 구한 속도데이터를 통계 처리하여 각 지점에서의 평균속도와 난류강도를 구하였다. 실험 측정구간 주위 온도를 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이내로 일정하게 유지시켜 온도차에 기인하는 속도측정 오차를 최소화 시켰다.

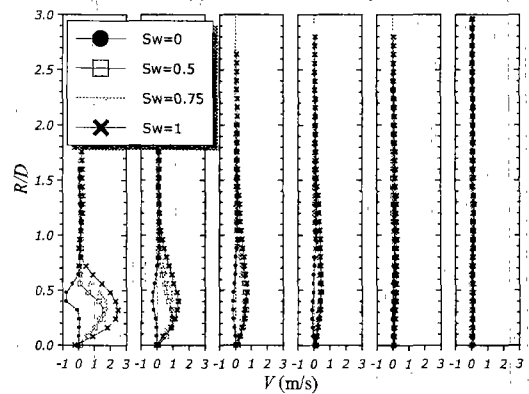
3. 결과 및 토의

3.1 유동구조

스윙 수에 따른 유동구조 변화를 관찰하기 위하여 서로 다른 스윙 수(Sw)의 자유제트에 대하여 상온 21.5°C 조건에서 레이놀즈 수를 15,000 에 맞추어놓고 노즐 출구로부터의 거리를 $X/D = 1, 2, 3, 4, 6, 10$ 으로 변화시키면서 X 형 열선 프로브를 이용하여 제트의 평균속도와 난류강도분포를 측정하였다. Fig. 4(a)는 스윙 수와 제트 노즐로부터의 거



(a) Mean axial velocity



(b) Mean radial velocity

Fig. 4 Mean axial and radial velocity profiles measured at several downstream locations

리비에 따른 축방향 속도성분의 평균속도분포를 나타낸 것이다. 제트 중심 영역에서 축방향 속도 성분은 스윌효과가 없는 $Sw=0$ 인 경우에 비해 스윌 수가 증가할수록 노즐과 근접한 $X/D < 4$ 영역에서 빠르게 감소하며, 제트 중심영역의 운동량이 반경방향으로 확산되는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 4(b)는 노즐 출구로부터의 거리비(X/D)에 따른 반경방향 속도성분의 평균속도분포를 나타낸 것이다. 노즐 출구에 근접한 $X/D < 3$ 영역에서는 스윌 수가 커질수록 반경방향의 속도성분이 $R/D < 0.7$ 구간에서 큰 값을 갖는다. 이것으로부터 스윌 수가 커지게 되면 제트 근접영역에서 축방향 속도 성분은 감소하는 반면 반경방향의 속도성분이 증가되어 유체흐름을 반경방향으로 넓게 확장시킴을 알 수 있다. 스윌의 효과가 없는 $Sw=0$ 인 경우, $X/D=1, 2$ 위치 단면에서 오리피스 노즐 제트의 *vena contracta* 영향으로 인하여 노즐 출구 주위 유동이 유입되는 현상을 $R/D=0.4\sim 0.5$ 부근에서 관찰할 수 있다.

이에 반해 스윌효과가 주어지는 경우에는 노즐 출구에 가까운 영역에서 *vena contracta* 에 의한 주위 유동의 유입보다는 반경방향으로 확장하려는 속도 성분이 매우 강하게 나타나는 것을 알 수 있다. 노즐 출구로부터 $X/D > 4$ 인 하류영역으로 나아갈수록 반경방향 속도 성분은 감소하며 $X/D=10$ 위치에서는 스윌 수에 무관하게 스윌효과가 없는 경우의 속도분포로 수렴하며 거의 일정한 값을 보여주고 있다.

Fig. 5는 X/D 와 R/D 변화에 따른 축방향과 반경방향 속도성분의 난류강도분포 변화를 나타낸 것으로서, 노즐 출구속도(exit velocity) U_e 로 무차원하였다. Fig. 5(a)를 보면 스윌 수가 큰 $Sw=0.75$ 와 $Sw=1$ 의 경우, 노즐과 아주 근접한 $X/D=1$ 위치에서 상당히 큰 난류강도 값을 가진다. 그러나 노즐로부터의 거리가 $X/D > 4$ 이상으로 멀어지게 되면 난류강도가 스윌이 없는 경우에 비해 오히려 감소하게 된다. 이것은 축방향 속도성분이 하류로 나아감에 따라 급격히 감소하기 때문에 나타난 현상으로 생각되어진다. $Sw=0.75$ 와 $Sw=1$ 인 조건에서 $X/D > 6$ 인 하류 위치의 제트 중심영역에서 난류강도는 스윌이 없는 경우에 비해 약 절반 이하의 값을 가진다. 그러나 반경방향 속도성분의 난류강도 분포는 축방향 속도성분의 난류강도 분포와는 크게 다른 난류특성을 보여주고 있다. Fig. 5(b)를 보면 노즐 출구와 근접한 $X/D < 4$ 인 영역에서는 스윌 수가 증가할수록 반경방향 난류강도는 높은 값을 가지나, 하류로 나아감에 따라 점차 감소하여 $X/D > 6$ 인 구간에서 난류강도 차이는 거의 보이지 않게 된다.

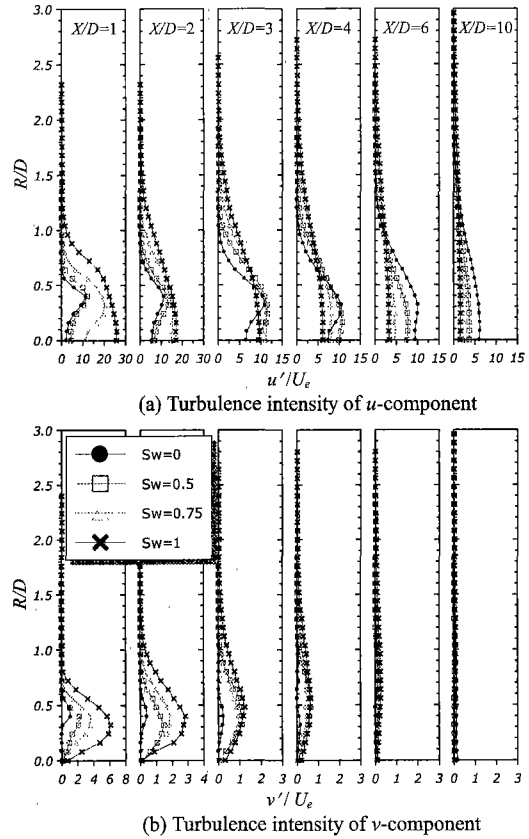


Fig. 5 Turbulence intensity profiles of axial and radial velocity components

Fig. 6은 노즐 출구로부터의 거리 X/D 를 변화시키면서 제트 중심축을 따른 축방향 속도성분의 평균속도 U_c 와 난류강도분포를 나타낸 것으로 노즐 출구속도 U_e 로 무차원하였다. Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이, 스윌효과가 없는 $Sw=0$ 의 경우에는 $X/D < 4$ 의 제트 코어영역에서 중심속도(center velocity)가 거의 일정한 값을 갖는다. 제트 코어를 벗어나 하류로 나아감에 따라 중심속도는 점차 감소한다. 스윌효과가 작은 $Sw=0.5$ 의 경우, $X/D=2$ 인 영역을 지나면서 중심속도가 거의 선형적으로 감소하게 되는데, 이것은 스윌유동으로 인해 제트 코어영역이 짧아진 것과 같은 효과를 보인다. 그러나 스윌 수가 높은 $Sw=0.75$ 와 $Sw=1$ 의 경우에는, 노즐과 근접한 $1 < X/D < 4$ 인 영역에서 중심속도가 급격히 감소하며, $X/D > 4$ 구간에서는 제트 중심속도가 스윌이 없는 경우($Sw=0$)에 비해 절반 정도의 작은 값을 가지며, 하류로 나아갈수록 속도 감소율이 점차 완만해지고 있다. 이것으로부터 우리는 스윌 수가 증가할수록 제트 코어영역이 축소되어짐을 알 수 있다.

Fig. 6(b)는 제트 중심축을 따라 측정된 난류강도분포 변화를 나타낸 것이다. 앞에서 설명한 바와 같이 노즐에 가까운 근접영역에서는 스윙 수가 클수록 난류강도가 큰 값을 갖지만, $X/D > 3$ 인 하류영역에서는 오히려 난류강도 값이 감소하게 된다. $Sw=0.5$ 의 경우에는 스윙효과가 없는 $Sw=0$ 인 경

우의 난류강도분포와 거의 유사하지만 $X/D > 5$ 영역에서는 $Sw=0$ 인 경우에 비해 작은 난류강도 값을 가진다. 반면에, $X/D < 5$ 인 근접영역에서는 $Sw=0$ 보다 큰 난류강도 값을 보여주고 있다. 결국, 스윙 제트는 노즐과 가까운 근접영역에서 높은 난류강도 값을 가지나, $X/D=5$ 위치를 기준으로 하류영역으로 나아가게 되면 오히려 난류강도가 감소하는 결과를 보여주고 있다. 특히, 스윙 수가 $Sw=1$ 인 경우, $X/D=1$ 위치에서 측정된 축방향 난류강도는 스윙이 없는 $Sw=0$ 인 경우에 비해 약 10 배 정도 큰 난류강도 값을 가지나, $X/D > 5$ 영역에서는 $Sw=0$ 인 경우에 비해 약 1/3 로 감소되어진다.

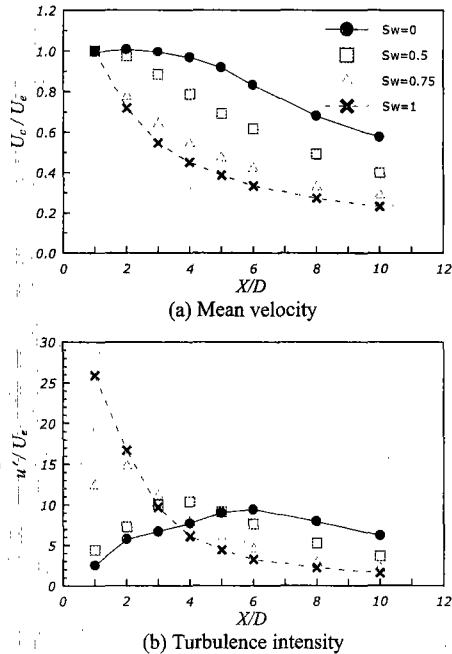


Fig. 6 Variation of mean velocity and turbulence intensity of axial velocity component along the jet centerline

3.2 스윙 충돌제트의 열전달을 변화

Fig. 7 은 레이놀즈 수 $Re=15,000$ 조건에서 Sw 변화에 따른 충돌제트의 열전달 특성을 노즐과 충돌면 사이의 거리비 L/D 의 함수로 나타낸 것이다. 충돌면에서의 국소 열전달계수는 Nusselt 수로 표시하였다.

노즐과 충돌면 사이의 거리비 L/D 에 따른 충돌면에서의 국소 열전달률은 노즐 반경에 가까운 $R/D=0.4$ 부근에서 최대값을 가진후 점차 감소하다가 $R/D=1.0$ 부근에서 다시 열전달률이 상승하기 시작하여 $R/D=1.4$ 부근에서 2 차 정점을 가지게 된다. 그리고 반경방향으로 나아감에 따라 열전달 계수는 단조롭게 감소한다.

노즐과 충돌면 사이의 거리가 근접한 $L/D=1, 2$ 조건에서는 스윙이 있는 충돌제트가 스윙이 없는

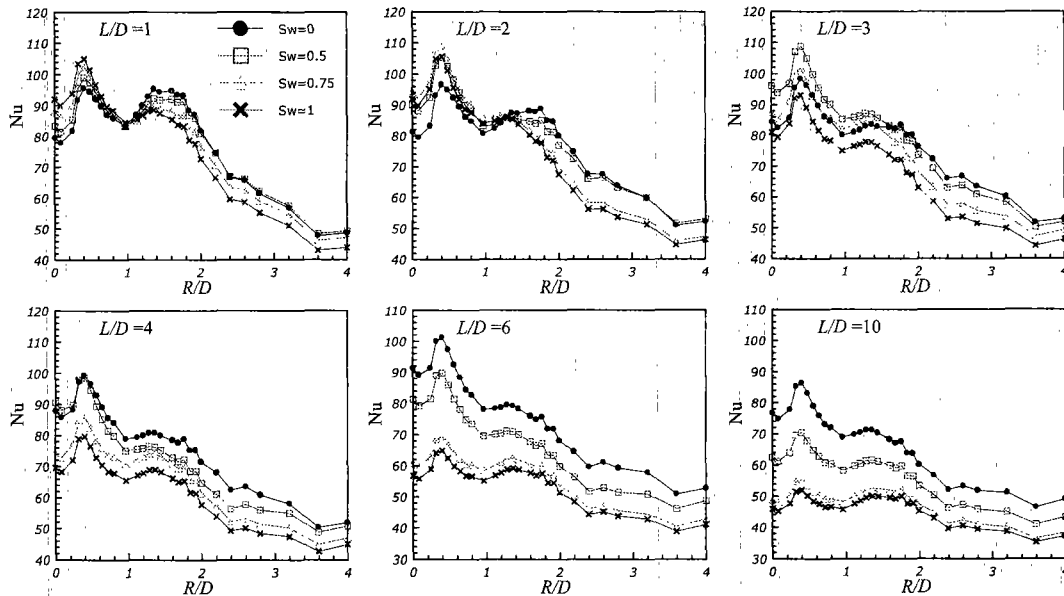


Fig. 7 Variation of local Nusselt numbers for swirling impinging jet

충돌제트에 비해 $R/D < 1$ 인 정체구간에서 국소 열전달률이 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 노즐과 충돌면 사이의 거리가 $L/D=3$ 인 조건에서도 스윌효과가 가장 큰 $Sw=1$ 인 경우를 제외한 나머지 스윌제트들도 $R/D < 1.5$ 인 구간에서 스윌이 없는 경우에 비해 여전히 높은 국소 열전달계수 값을 가진다. 그러나, $L/D=4$ 인 경우에는 스윌제트가 스윌이 없는 일반 충돌제트에 비해 오히려 낮은 국소 열전달계수 값을 보여주고 있다. 노즐과 충돌면 사이의 거리비(L/D)가 4 보다 큰 경우에는 스윌 수가 클수록 국소 열전달계수 값이 크게 감소되어진다. 정체점($R/D=0$) 위치에서 $Sw=1$ 과 $Sw=0$ 인 경우의 국소 열전달계수 값을 비교하여 보면, $L/D=1$ 조건에서 $Sw=1$ 인 경우에는 $Sw=0$ 보다 약 15% 큰 값을 가지나, L/D 가 증가함에 따라 그 차이는 점차 감소하여 $L/D=3$ 조건에서는 오히려 스윌이 없는 경우가 $Sw=1$ 인 경우보다 약 4%정도 큰 값을 갖는다. 노즐과 충돌면 사이의 거리(L/D)가 이보다 더 커지면 열전달계수의 차이는 더욱 심해지며 $L/D=10$ 인 조건에서 $Sw=1$ 의 정체점 열전달계수는 $Sw=0$ 인 경우에 비해 약 40% 작은 값을 가진다.

그리고 $L/D=1$ 인 조건에서는 2 차 정점이 뚜렷이 나타났으나, 노즐과 충돌면 사이의 거리가 $L/D=2$ 보다 커지게 되면 일반적인 충돌제트의 2 차 정점위치 부근에서 거이 평편한 분포를 보여준다. 이것은 앞의 유동특성에서 설명한 바와 같이 스윌효과로 인해 제트 유동이 반경방향으로 확장되기 때문으로 사료되어진다.

Fig. 8 은 서로 다른 스윌 수에 대하여 노즐과 충돌면 사이의 거리비(L/D)에 따른 정체점에서의 열전달계수 변화를 나타낸 것이다. 노즐과 충돌면 사이의 거리가 근접한 $L/D=1, 2$ 조건에서 스윌 효과가 큰 $Sw=0.75$ 와 $Sw=1$ 의 경우, 정체점 열전달계수는 스윌효과가 없는 $Sw=0$ 의 경우에 비해 약 15.7~16% 정도 큰 값을 가진다. 그리고 $L/D=3$ 인 조건에서 스윌 수가 $Sw=0.5$ 인 경우는 $Sw=0$ 의 경우에 비해 약 14% 정도 큰 값을 가진다. 그러나 $L/D=3$ 을 경계로 하여 노즐과 충돌면 사이의 거리가 멀어지면서 스윌이 없는 일반적인 충돌제트에 비해 스윌 수가 클 경우 정체점에서의 국소 열전달률은 빠르게 감소한다.

$Re=23,000$ 에서 스윌 수 $S=0.47(m_\theta/m_e \approx 1/2)$; 공기 유입구로 들어가는 유량 m_θ , 축방향으로 나아가는 유량 m_e 인 조건에서 원형파이프 제트를 이용하여 스윌효과를 연구한 Yan 과 Saniei⁽²⁾의 정체점 열전달계수 결과를 본 연구결과와 비교하기 위하여 Fig. 8 에 포함시켰다. 여기서 보면, 제트 출구

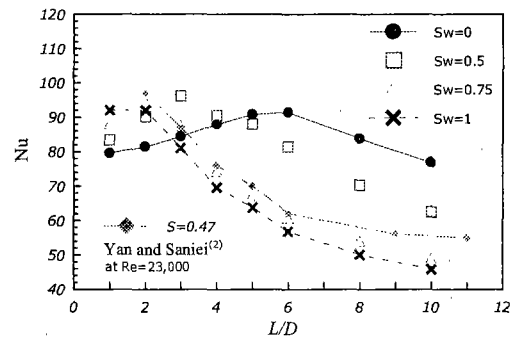


Fig. 8 Stagnation point heat transfer with respect to nozzle-to-plate spacing (L/D) for various swirling number

형상 및 스윌장치가 다르고 레이놀즈 수 조건도 다르기 때문에 정량적인 값의 차이는 있으나, 전반적인 경향은 동일한 $m_\theta/m_e=1/2$ 의 비율을 갖는 스윌 수 $Sw=1$ 의 연구결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 9 는 서로 다른 스윌 수에 대하여 노즐과 충돌면 사이의 거리비(L/D) 변화에 따른 국소 열전달계수의 1 차 정점과 2 차 정점의 변화를 나타낸 것이다. 스윌효과가 없는 $Sw=0$ 의 경우에는 Lee 등⁽³⁾에서처럼 난류강도가 최대값을 가지는 $L/D=6$ 부근에서 국소 열전달계수가 최대값을 가진다.

Fig. 9(a)에서 보는 바와 같이 스윌 수가 큰 $Sw=0.75$ 와 $Sw=1$ 의 경우에는 노즐과 충돌면 사이의 거리가 근접한 $L/D=1, 2$ 조건에서 1 차 정점의 국소 열전달계수 값은 스윌효과가 없는 $Sw=0$ 의 경우에 비해 9.7~12.7% 큰 값을 가진다. 이것은 Fig. 4 와 Fig. 5 에서 언급한 바와 같이 강한 스윌효과로 인하여 노즐 근접 영역에서 제트 코어영역이 크게 감소하고 속도성분 u, v 의 난류강도가 평균속도 강하에 비해 급격히 증가하였기 때문인 것으로 보인다.

$L/D=2$ 보다 노즐과 충돌면 사이의 거리가 증가하게 되면 최대 열전달계수 값은 크게 감소하며 $Sw=0$ 인 경우보다 훨씬 작은 값을 가진다. 한편, 스윌 수가 작은 $Sw=0.5$ 의 경우에는 1 차 정점의 국소 열전달계수는 점차 증가하여 $L/D=3$ 인 조건에서 가장 큰 값을 갖는다. 이때의 국소 열전달계수 값은 본 연구에서 다른 모든 실험조건에 대해서 최대값이며, $Sw=0$ 인 경우에 비해 약 10.6% 증가한 것이다. 이것은 Fig. 4 와 Fig. 5 의 유동구조 결과로부터 알 수 있듯이 $Sw=0.5$ 인 경우, 노즐과 충돌면 사이의 거리가 가까운 근접영역에서 평균속도의 강하가 적은 반면에, 스윌 효과에 의한 난류강도 성분의 증가가 두드러지게 크게 나타났기

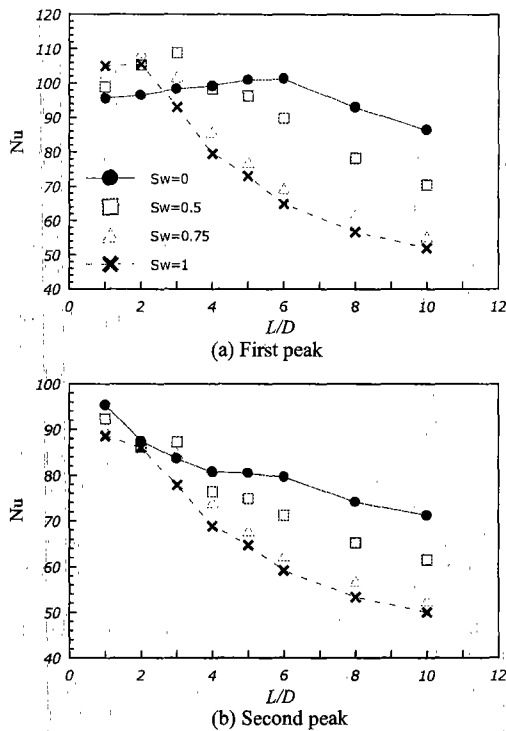


Fig. 9 Variation of Nusselt numbers for the swirling impinging jet

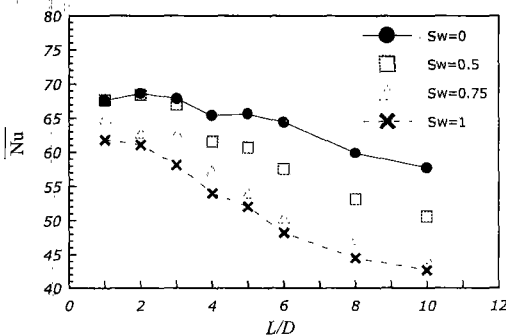


Fig. 10 Variation of average Nusselt numbers with respect to nozzle-to-space spacing(L/D) for various swirling number

때문인 것으로 보인다. 그러나 $L/D=3$ 보다 노즐과 충전면 사이 거리가 멀어지게 되면 열전달률은 단조롭게 감소하게 된다.

Fig. 9(b)는 2차 정점에서 국소 열전달계수의 변화를 나타낸 것이다. $L/D=3$ 인 조건에서 스윙이 없는 일반적인 충전제트($Sw=0$)보다 약 4.4% 큰 2차 정점 값을 가지는 $Sw=0.5$ 인 경우를 제외하면, 스윙효과가 주어진 경우 2차 정점에서의 국소 열전달계수 값들은 스윙이 없는 충전제트($Sw=0$)에 비

해 작은 값을 가진다. 이상의 결과로부터 스윙효과는 주로 $L/D<3$ 인 근접영역에서 충전제트의 열전달계수 향상에 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 10. 은 충전면에서의 평균 열전달계수를 노즐과 충전면 사이의 거리비(L/D)의 함수로 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 평균 열전달계수도 스윙 수의 영향을 크게 받으며, 노즐과 충전면 사이의 거리비(L/D)에 따라 열전달 특성이 변화함을 알 수 있다. 스윙효과가 더해진 충전제트의 평균 열전달계수는 전체적으로 스윙이 없는 경우에 비해 낮은 값을 가지며, 스윙 수(Sw)가 클수록 거리비 L/D 가 증가함에 따라 평균 열전달계수는 크게 감소한다. 스윙 수 $Sw=1$ 의 경우, $L/D=1$ 조건에서 평균 열전달계수는 스윙이 없는 경우에 비해 약 6.6% 적은 값을 가지며, $L/D=6$ 인 조건에서는 $Sw=0$ 인 경우에 비해 평균 열전달계수가 약 27.7%나 감소하였다. 그러나, 스윙 수가 $Sw=0.5$ 인 경우에는 노즐과 충전면 사이 거리(L/D)가 3 보다 작은 조건($L/D<3$)에서 스윙이 없는 $Sw=0$ 의 경우와 거의 동일한 평균 열전달계수 값을 갖는다. 이것은 앞서서도 설명한 바와 같이 스윙 수 $Sw=0.5$ 인 조건에서는 스윙효과가 제트 중심영역까지 영향을 미치지 못하기 때문이다.

4. 결론

스윙효과에 의한 충전제트의 유동구조 변화가 충전면에서의 열전달 특성에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 노즐 출구로부터의 거리가 $X/D<4$ 인 근접영역에서는 스윙 수가 클수록 반경방향의 속도성분과 난류강도는 큰 값을 가지며 축방향의 속도성분은 빠르게 감소한다. 축방향 속도성분의 난류강도 역시 스윙 수가 클수록 $X/D<2$ 인 영역에서 큰 값을 가지며 하류로 나아감에 따라 크게 감소한다.

(2) 노즐과 충전면 사이의 거리가 짧은 $L/D=1, 2$ 인 조건에서는 스윙 수가 $Sw=0.75$ 와 $Sw=1$ 인 경우, 스윙이 없는 충전제트에 비해 강한 스윙효과에 기인한 난류강도의 증가로 정체영역인 $R/D<0.5$ 에서 약 9.7~16% 증가한 국소 열전달계수 값을 가진다. 그러나, 노즐과 충전면 사이의 거리가 $L/D=2$ 보다 커지게 되면 열전달계수는 급격히 감소한다.

(3) $L/D\leq 3$ 인 조건에서 스윙 수가 $Sw=0.5$ 인 경

우, 평균속도의 감소가 적은 반면에, 난류강도가 크게 증가하기 때문에 스월이 없는 $Sw=0$ 에 비해 높은 국소 열전달률을 보인다. $LD=3$ 인 조건에서 $Sw=0$ 인 경우에 비해 정체점과 1 차 정점의 국소 열전달계수는 약 14%와 10.6% 그리고 2 차 정점에서는 약 4.4% 높은 국소 열전달계수 값을 가진다.

(4) 충돌면의 열전달에 미치는 스월효과는 노즐과 충돌면의 거리가 짧은 $LD<3$ 조건에서 크게 나타나며, 이보다 LD 가 커지게 되면 스월제트는 운동량 및 난류강도의 감소로 인하여 열전달 향상 효과를 기대할 수 없다.

(5) 스월 수가 클수록 거리비 LD 가 증가함에 따라 $Sw=0$ 인 일반적인 충돌제트에 비해 평균 열전달계수는 크게 감소한다. 그러나 스월 수가 $Sw=0.5$ 인 경우에는 $LD<3$ 인 구간에서 스월이 없는 경우($Sw=0$)와 거의 유사한 평균 열전달계수 값을 가진다.

후 기

본 연구는 BK21 사업과 국가지정연구실 과제지원을 통해 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Huang, L. and El-Genk, M. S., 1998, "Heat Transfer and Flow Visualization Experiments of Swirling, Multi-channel, and Conventional Impinging Jets," *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 583~600.
- (2) Yan, X. and Saniei, N., 1998, "Heat Transfer Measurements from a Flat Plate to a Swirling Impinging Jet," *Proceedings of 11th IHTC, August 23-28, Kyongju, Korea*, Vol. 5, pp. 497~502.
- (3) Shtern, V., Borissov, A. and Hussain, F., 1998, "Temperature Distribution in Swirling Jets," *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 2455~2467.
- (4) Baughn, J. W. and Shimizu, S., 1989, "Heat Transfer Measurement From a Surface With Uniform Heat Flux and an Impinging Jet," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 1096~1098.
- (5) Kline, S. J. and Mcklintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mech. Eng.* Vol. 5, pp. 5~8.
- (6) Bradshaw, P., 1985, "An Introduction to Turbulence and Its Measurement," *Pergamon Press*.
- (7) Lee, D., Greif, R., Lee, S. J., and Lee, J., 1995, "Heat Transfer from a Flat Plate to a Fully Developed Axisymmetric Impinging Jet," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 117, pp. 772~776.
- (8) Gardon, R. and Akfirat, J. C., 1966, "Heat Transfer Characteristics of Impinging Two-dimensional Air Jets," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 88, pp.101~108.