

# 박판이 부착된 사각노즐에서 분사되는 Sweeping jet의 유동 및 열전달 특성

김동욱\* · 정재훈\* · 서현덕\* · 김현동\*\* · 김경천†

## Heat transfer and flow characteristics of sweeping jet issued from rectangular nozzle with thin plate

Donguk Kim\*, Jae Hoon Jung\*, Hyunduk Seo\*, Hyun Dong Kim\*\*, Kyung Chun Kim†

**Abstract** This study investigated heat transfer and flow characteristics of a sweeping jet issued from a rectangular nozzle with a thin plate. A thin vertical aluminum plate was attached on outlet of fluidic oscillator to increase velocity of central area with Coanda effect and enhance heat transfer performance. From visualization and PIV experiments, sweeping jet with a thin plate has larger velocity distribution in center region than that of the normal sweeping jet while oscillating frequency is similar as the normal one. Thermographic phosphor thermometry method was used to visualize the temperature field and Nu distribution of plate with impinging sweeping jet with thin plate. Four Reynolds numbers and three jet-to-wall distances were selected as parameters. It is found that heat transfer performance in the low jet-to-wall spacing was enhanced as the cooled area was expanded. However, when the jet-to-wall spacing became greater than  $8dh$ , heat transfer performance became similar due to reduced impinging velocity.

**Key Words** : Fluidic oscillator (유체진동기), Nozzle with thin plate (박판 부착 노즐), Phosphor Thermometry (인광기반 온도측정), Particle Image Velocimetry (입자영상유속계), Coanda effect(코안다 효과)

### 1. 서론

열과 물질 전달에 효율이 높은 Impinging jet는 가스터빈 블레이드 냉각<sup>[1]</sup>, 제철과정에서의 열처

리<sup>[2]</sup>, 전자제품 냉각<sup>[3]</sup> 등 다양한 산업분야에 적용되어 왔다. 단순한 구조에도 불구하고 우수한 성능으로 널리 이용되고 있다.<sup>[4]</sup>

본 연구에 사용된 sweeping jet는 Impinging jet 종류의 하나로서 유체진동기의 형상을 통해 유동의 분사 방향이 일정한 주기를 가지고 좌우로 변동되는 제트를 뜻한다.<sup>[5]</sup>

유체진동기는 내부 형상에 따라 수동적으로 유동을 제어하는 장치로서 별다른 유지보수가 필요 없다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에 적용된 유체진동기는 Feedback type

---

† School of Mechanical Engineering,  
Pusan National University, Busan, South Korea  
E-mail: kckim@pusan.ac.kr

\* School of Mechanical Engineering,  
Pusan National University, Busan, South Korea

\*\* Rolls-Royce University Technology Center,  
Pusan National University, Busan, South Korea

으로서 가장 널리 사용되고 있는 종류이며 유체가 공급되는 노즐, 두 개의 피드백 채널, 혼합 채널, 출구 등으로 구성되어 있다. 노즐을 통해 유입된 유체가 Coanda effect로 인해 벽면을 따라 유동이 진행되며 일부가 피드백 채널로 분리되어 진행된다.<sup>[6]</sup> 피드백 채널을 통과한 유동이 주 유동을 반대로 밀게 되어 제트의 방향이 반대로 바뀌게 된다.<sup>[7]</sup> 이런 특성을 가진 sweeping jet는 다양한 분야에 이용되고 있다.

항공분야에서는 항공기 날개에 분사하여 항력 감소와 박리 제어 등 유동 제어에 활발하게 이용되고 있고<sup>[8]</sup>, 터빈 블레이드 리딩 엣지 냉각 등 열전달 분야에 적용하기 위해 연구가 활발하게 진행되고 있다.<sup>[9]</sup> 또한 유체진동기의 주기적인 유동 특성을 이용하여 유량계 분야에도 활용되고 있다.<sup>[10]</sup>

지금까지 sweeping jet 유동에 대해 연구하고 그 유동 특성을 이용하여 열 및 물질 전달의 향상을 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다.

Wen et al.<sup>[11]</sup>은 sweeping jet의 유체역학적 성질을 정량화했고  $Re = 11,700$ 에서의 불균일한 시간, 공간적 분포에 대해 연구했다. Kim et al.<sup>[12]</sup>은 입자영상 유속계를 통해 sweeping jet의 유동구조를 정량적으로 측정했다. 레이놀즈 수가  $Re = 24000$ 까지 증가함에 따라 진동수가 선형적으로 증가하였고, 평균속도장에서 속도는 증가하지만 속도 분포와 sweep angle 등의 조건이 유사하게 유지되었다. Agricola et al.<sup>[13]</sup>은 열유속 센서와 적외선 열화상 카메라를 이용하여 Feedback type의 충돌 sweeping jet와 원형 충돌제트 사이의 열전달 특성을 비교하였다. 충돌 sweeping jet가 원형 충돌제트만큼 열전달 성능이 우수하지는 않지만, 더욱 균일한 Nu수 분포를 나타냄을 보여주었다. Park et al.<sup>[14]</sup>은 열전대와 입자영상 유속계를 이용하여 sweeping jet의 유동 특성을 측정하고 열전달 특성을 정량화 하였으며, 충돌 sweeping jet의 난류 유동 특성에 의해 충돌 중심 영역에서 상대적으로 Nu가 높게 분포되는 것을 확인하였다. Kim et al.<sup>[15]</sup>은 phosphor thermometry기법을 이용하여 제트와 벽면 사이의 간격을 변화시켜 가면서 sweeping jet와 square

jet의 2차원 열전달 특성을 비교하였다. 제트와 벽면 사이의 간격과 유체진동기 출구의 수직직경의 비율이 5보다 작은 경우 ( $Z/d_h \leq 5$ )에서는 sweeping jet의 열전달 성능이 우수했지만,  $Z/d_h$ 가 5보다 커지게 되면 square jet의 성능이 우수함을 확인하였다. 또한 충돌 sweeping jet에 대한 입자 영상 유속계 측정 결과를 바탕으로 유동 특성이 열전달 특성에 미치는 영향을 설명하였다.

sweeping jet에서는 유동의 방향이 주기적으로 변하게 되므로 출구 근처에서 난류강도가 높은 영역이 형성된다. 이러한 특성으로 인해 제트와 벽면 사이의 간격이 가까울 때는 열전달 성능이 우수하다. 그러나 출구에서 거리가 멀어지게 되면 중심부에서의 유속은 급격하게 감소하게 되고 양 끝단으로 유동이 분산되어 충돌 제트에 의한 냉각효과가 감소하게 된다. 이와 같은 열전달 특성은 sweeping jet를 실제 냉각 장치에 활용하는데 제한적인 요인으로 작용하므로 유체진동기의 내부 구조 변경을 통한 개선이 필요하다.

본 연구에서는 유체진동기의 사각노즐 출구에 알루미늄 재질의 수직 박판을 부착하여 sweeping jet의 전체적인 유동 구조와 평균 유동 분포에 있어서 편차를 줄이고자 하였다.

출구에 부착한 박판을 통해 유동이 한쪽 끝에서 반대쪽 끝으로 전환되는 스위칭 타임을 지연시키고, Coanda effect를 유도하여 중심부에서의 평균 유속을 증가시켜 열전달을 촉진하고 제트와 벽면의 거리가 늘어나더라도 제트 유동에 의한 열전달율이 급격하게 감소하는 문제를 개선하고자 하였다.

먼저, 수직 박판을 장착한 유체진동기의 유동 특성을 파악하기 위해 물을 작동 유체로 하여 시간 분해 입자영상유속계 (Time-resolved Particle Image Velocimetry) 실험을 수행하였다. 또한 열전달 특성을 파악하기 위해 phosphor thermometry 기법을 이용하여 평판에서의 열전달 실험을 수행하였다. 기존의 sweeping jet의 유동 및 열전달 실험 결과와 비교함으로써 박판으로 인한 유동과 열전달 특성의 변화를 분석했다.

## 2. 실험장비 및 실험방법

### 2.1 Fluidic oscillator with a thin plate

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 유체진동기의 내부 형상이다. 가장 널리 쓰이는 Feedback type으로서 1979년 Bowles Fluidic에 의해 발명되었다.

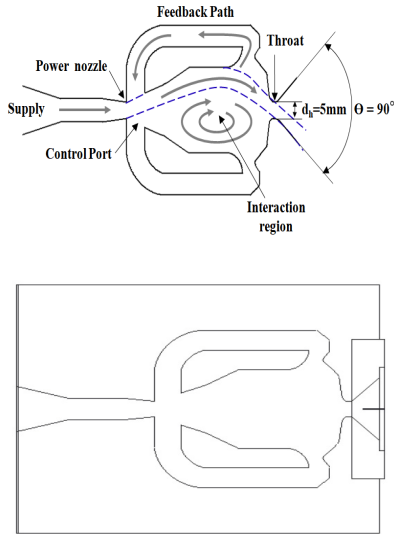


Fig. 1. Schematic of the fluidic oscillator

열전달 실험은 약 200 °C의 온도에서 진행되기 때문에 알루미늄으로 제작되었으며 노즐 출구의 각도는 90도, throat의 폭과 높이는 5 mm이므로 수력직경( $d_h$ )은 5 mm이다. 노즐 출구 중앙 부분에 두께 0.25 mm, 높이 5 mm, 길이 5 mm의 알루미늄 박판을 부착하였다. 입자영상유속계에 사용되는 모델은 기존 모델의 2:1 크기로 확대하여 아크릴로 제작되었고, throat의 폭과 높이가 10mm이며 박판의 두께는 동일하다.

### 2.2 TR-PIV experimental setup

Fig. 2 에는 시간 분해 입자영상유속계에 대한 실험 장치를 나타내었다. 1 m x 1 m x 1 m 크기의 투명 아크릴 수조에 유체진동기를 수직으로 설치하고 펌프를 통해 물을 공급하였다. 평균 직경 10  $\mu$ m의 silver coated hollow glass를

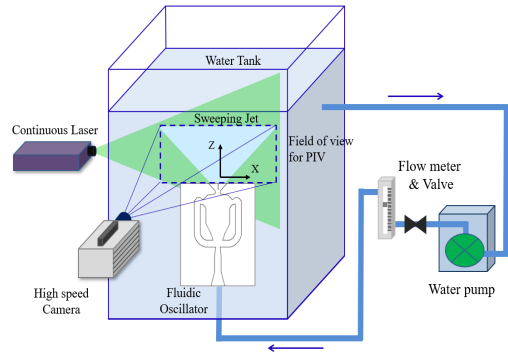


Fig. 2. Schematic of PIV experiment setup

추적입자로 사용하였으며, 532 nm의 파장을 가지는 다이오드 레이저 평면빔을 조사하여 초고속카메라(Photron FastCam SA1.1)로 입자 이미지를 획득하였다. 레이놀즈수 8000, 12000, 16000에 대응하는 유량을 조절해 가면서 유속 분포의 변화를 측정하였다.

### 2.3 Experimental setup for phosphor thermometry

Fig. 3은 phosphor thermometry를 위한 실험 장치 구성을 보여주고 있다. 본 연구에 적용한 phosphor thermometry 기법은 Kim et al. [15]의 선행 연구에서 사용한 실험 방법과 동일한 방법으로 표면의 2차원 온도측정 및 열전달 해석에 활용될 수 있음이 확인된 바 있다. 온도 감응 센서인 인광 물질은 MFG (Mg<sub>4</sub>FGeO<sub>6</sub>:Mn, BOC Science)를 사용하였으며, MFG분말과 화학적 수성 HPC 결합재(ZYP Coating, Inc)를 질량비 1:3으로 혼합하고 압축 공기 스프레이로 알루미늄 평판에 분사하여 코팅한 후 24시간 동안 건조시켰다.

Fig. 4의 알루미늄 평판의 크기는 150 mm x 150 mm이고 두께는 1 mm이다. hot plate는 on/off 방식으로 일정 열유속을 가하는 형태이다. 코팅된 평판을 hot plate에 올려 4개의 K-type thermocouple (Class:special)을 kapton tape로 좌우 부분에 2개씩 부착시켰다. 신호 발생기(BNC 555, Berkeley Nucleonics Corporation)를 이용하여 UV-LED에 50 ms 마다 TTL신호를 줄 수 있도록

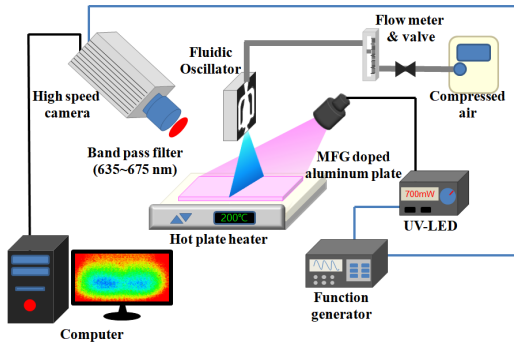


Fig. 3. Schematic of thermometry phosphor setup

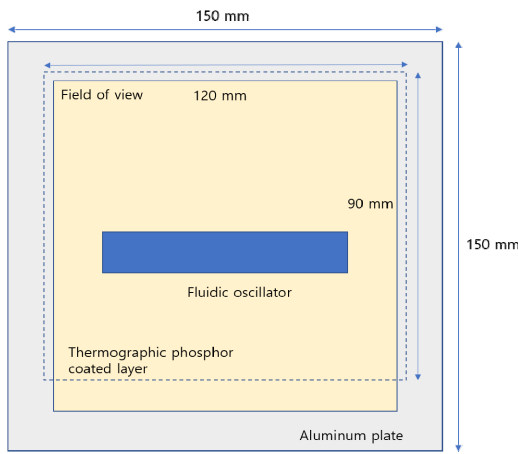


Fig. 4. Schematic of test section

설정하고 초고속카메라(Photron SA 1.1, Photron)로 이미지를 촬영하였다. 유체진동기를 수직 방향으로 설치하여 200 °C의 온도로 가열된 알루미늄 평판에 대해 압축공기제트를 분사시켜 정상상태 온도에서 인광 이미지를 촬영하였다. 제트와 벽면 사이의 간격은 throat로부터  $Z/d_h = 3, 5, 8$ 으로 설정하였으며 수직 이송장치를 통해 정밀하게 이동시켰다. Re 수는  $Re = 8000, 16000, 24000, 32000$ 에 대하여 진행하였다. 기존 sweeping jet의 phosphor thermometry 실험에서  $Re = 24000$  이상에서 중심부의 Nu수가 큰 폭으로 증가하였는데<sup>[15]</sup> 비슷한 경향이 예상되어 입자유속영상계 실험보다 높은 Re수 범위까지 실험을 진행하였다. 신속한 데이터 처리를 위해 Decay slope 기법을 사용하였다.<sup>[16]</sup>

### 2.3 Calibration procedure for thermometry phosphor

실험에 앞서 온도에 대한 보정 과정을 실시하였다. MFG가 도포된 알루미늄 평판을 25 °C 부터 300 °C까지 40 °C 간격으로 8개의 지점에 대해 인광 이미지를 획득하였다. 온도변화는 데이터 획득 시스템 (Hydra, Fluke)를 통해서 실시간으로 모니터링하였다. 신호 발생기 (BNC 555, Berkeley Nucleonics Corporation)를 통해 TTL신호를 주어서 UV-LED는 초고속카메라와 동시에 작동을 시작하여 50 ms 동안 켜지고, 다음 50 ms는 꺼져서 0.1 s를 한 주기로 하여 작동을 한다. 초고속카메라의 이미지 획득 속도는 초당 4000 frames으로 설정하였으며 400 frames가 한 주기가 되어 1초에 10주기에 해당하는 영상 데이터를 획득하게 된다.

각각의 온도에 대해 decay-slope 상수를 획득하고 각 점에 대해서 3차 curve fitting을 하여 보정곡선을 획득하였다.<sup>[15]</sup>

### 2.4 Analysis of heat transfer

알루미늄 평판을 200 °C의 hot plate에 부착하고 유체진동기로 정상상태에 대하여 인광 이미지를 획득하였다. hot plate의 열 유속은 다음과 같은 식으로 획득하였다.

$$q = \frac{(V_h I_h)}{A} = h(T_w - T_m) \quad (1)$$

$V_h$ 는 hot plate의 전압이며  $I_h$ 는 회로의 전류,  $A$ 는 hot plate의 면적이다.  $T_w$ 는 알루미늄 평판의 온도,  $T_m$ 은 유체진동기로 공급되는 공기의 온도이다. 국소 대류 열전달 계수와 Nu 수는 다음과 같이 표현된다.

$$h = \frac{V_h I_h}{A(T_w - T_m)} \quad (2)$$

$$Nu = \frac{hd_h}{k} = \frac{V_h I_h d_h}{kA(T_w - T_m)} \quad (3)$$

k는 알루미늄 평판의 열전도 계수이며, 식 (3)으로 기존 sweeping jet와 박판을 부착한 sweeping jet의 Nu수 분포를 도출하여 비교했다.

### 3. 실험결과 및 해석

#### 3.1 박판을 부착한 sweeping jet의 유동특성

Fig. 5에서는 입자영상유속계 실험 데이터로부터 추출한 박판을 부착한 sweeping jet와 기존 sweeping jet의 진동수를 비교하였다. 박판을 부착한 sweeping jet 역시 기존 sweeping jet처럼 Re

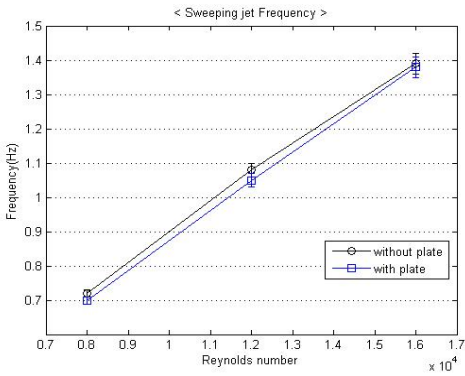


Fig. 5. Comparison of sweeping jet frequency

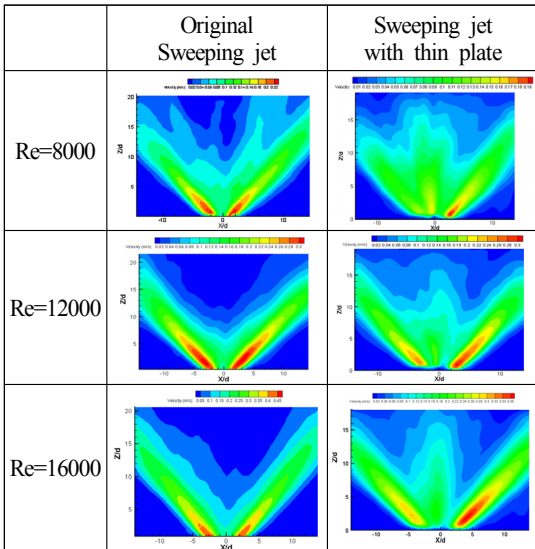
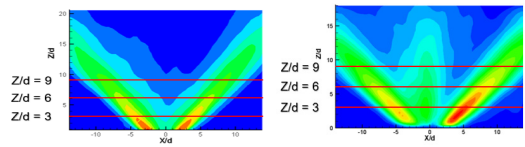
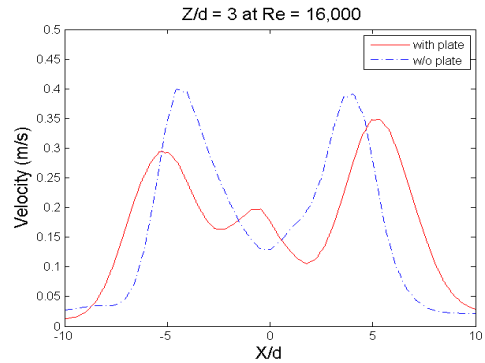


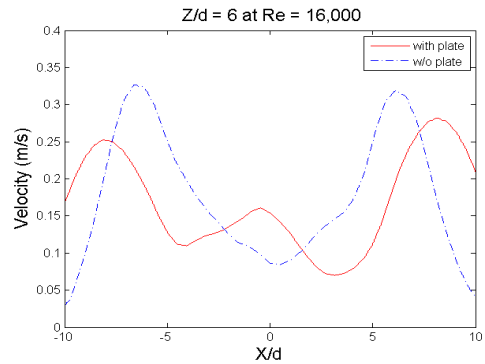
Fig. 6. Comparison of mean velocity field of sweeping jet and sweeping jet with thin plate



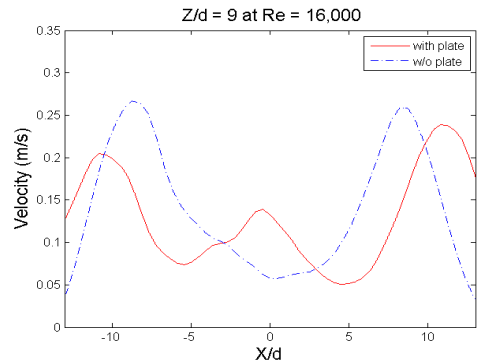
(a) Mean velocity field



(b)  $Z/d_h = 3$



(c)  $Z/d_h = 6$



(d)  $Z/d_h = 9$

Fig. 7. Comparison of sweeping jet velocity at Re = 16000

수의 증가에 따라 진동수가 선형적으로 증가하는 모습을 보인다.<sup>[12]</sup>  $Re = 8000$  일 때 박판을 부착한 sweeping jet의 진동수는 0.7 Hz로서 박판을 부착한 모델이 조금 낮으나,  $Re = 16000$  일 때는 진동수가 거의 일치함을 볼 수 있다. 박판이 분사방향 전환이 지연시켜 sweeping jet의 진동수가 소폭 감소하지만 진동수에는 크게 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 sweeping jet와 박판을 부착한 sweeping jet의  $Re$  수에 따른 평균 속도장을 비교하였다. 박판을 부착한 모델의 중심부에서의 평균 속도가 기존 모델에 비해 크게 증가했음을 볼 수 있다. 모든  $Re$ 수에 대하여 sweeping jet는  $Z/d_h = 5$  이후로 중심부 유속의 분포가 급격히 감소하지만, 박판을 부착한 sweeping jet는  $Z/d_h = 10$ 부근까지 중심부 유속 분포가 증가하였다. 한쪽 끝단에 있던 유동이 반대쪽 끝단으로 전환될 때 출구에 있는 박판으로 유동이 부착되고 Coanda effect가 발생하여 중심부에서의 유속이 증가한 것으로 추정된다.

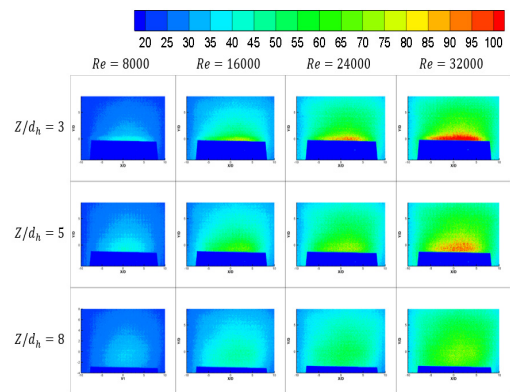
Fig. 7은 두 모델에 대하여 출구로부터의 거리  $Z/d_h = 3, 6, 9$ 의 단면에서  $Re = 16000$ 일 때 속도 분포를 추출하여 정량적으로 비교하였다. 세 단면 모두 양 끝단에서의 속도는 줄었고 유속의 최고점이 중심으로부터 더욱 멀어지지만, 중심부에서의 속도가 증가하였다.  $Z/d_h = 3$ 의 경우 양 끝단의 속도가 0.4 m/s에서 0.3 m/s로 감소하였지만 중심에서는 0.12 m/s에서 0.2 m/s로 증가하였다.  $Z/d_h = 9$ 에서는 양 끝단에서는 0.25 m/s에서 0.2 m/s로 감소하였지만, 중심에서는 0.06 m/s에서 0.14 m/s로 증가하였다. 수직 박판을 부착함으로써 전체적인 속도 분포가 균일해지는 효과를 볼 수 있다. 각 단면에서의 속도를 비교해 보면 sweeping jet와 유사하게 출구에서 거리가 멀어질수록 유속이 감소한다.

### 3.2 $Re$ 수와 제트와 벽면 사이의 간격에 따른 Nu 분포 비교

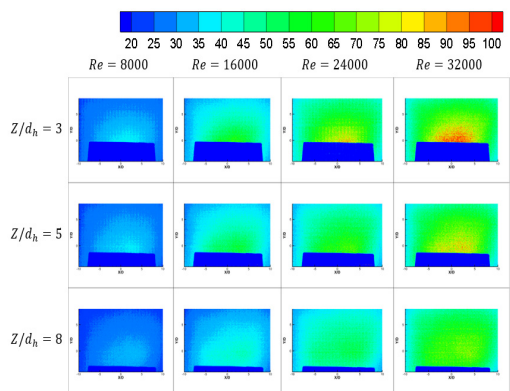
Fig. 8은 sweeping jet와 박판을 부착한 sweeping jet의 평판에서의 충돌 열전달 성능을 Nu수 분포로 나타내 그림이다.  $Re$  수는 8000, 16000, 24000,

32000에서, 제트와 벽면 사이의 간격은  $Z/d_h = 3, 5, 8$ 로 증가시켜 가면서 열전달 실험을 진행하였다.

각각의 경우에 대하여 제트 유동에 의한 냉각이 시작되고 난 후 일정한 시간이 경과하고 알루미늄 평판의 온도가 정상상태에 도달하였을 때 온도 분포를 측정하였으며, 식 (3)을 통해 Nu 수 분포를 계산하였다. 전체적인 Nu 분포를 보면 sweeping jet의 냉각 형태와 유사하게 타원 형태로 평판을 냉각시키며, 거리가 가까워질수록  $Re$  수가 커질수록 냉각효과가 커지는 것을 확인할 수 있다.<sup>[15]</sup>  $Z/d_h = 3, Re = 32000$ 에서 냉각 성능이 가장 우수하게 나타나며 충돌 중심부에서 상대적으로 넓게 냉각되는 것을 볼 수 있다.

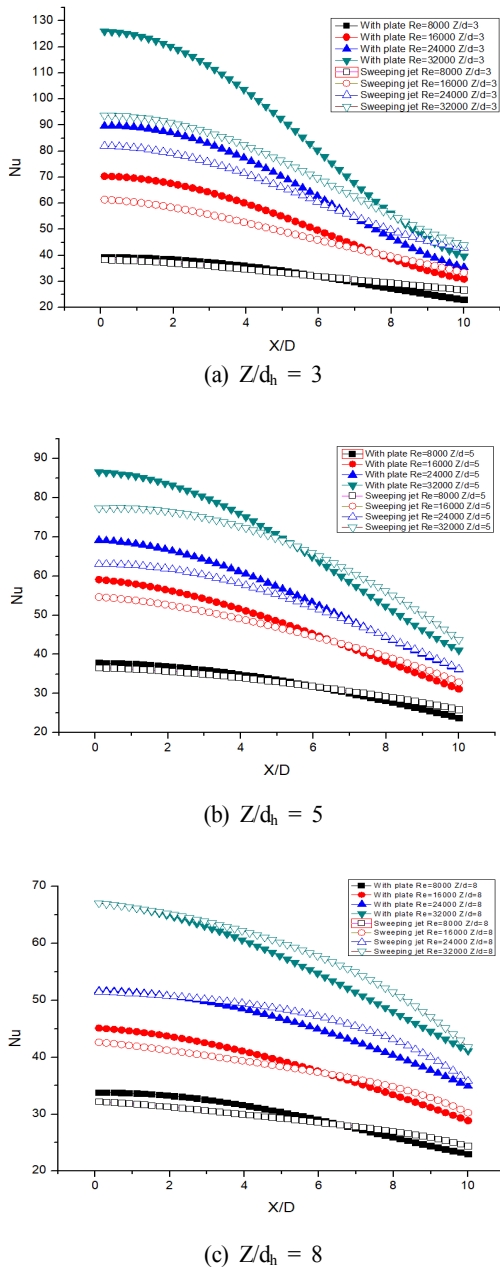


(a) Sweeping jet with a thin plate



(b) Original sweeping jet

Fig. 8. Nusselt number distribution



**Fig. 9.** Comparison of Nusselt number distribution along center line ( $Y/d_h = 0$ )

이 때 정체점 부근에서( $Y/d_h = 0$ ) 최저 온도는  $45\text{ }^\circ\text{C}$  였으며 최고 Nu 수는 약 125이다. 이에 비해 sweeping jet는  $Z/d_h = 3$ ,  $Re = 32000$ 에서 최저온도  $52\text{ }^\circ\text{C}$ , 최고 Nu 수는 약 95이다. 제트

와 벽면 사이의 간격이 커질수록 최고 Nu수는 박판을 부착한 sweeping jet 역시 열전달 성능이 큰 폭으로 감소하는 형태를 보인다.

Fig. 9는 두 모델의 자세한 비교를 위해 x축을 따라 Nu 수를 추출하여 그래프로 나타내었다. 유체진동기의 노즐 중심에서 ( $Y/d_h = 0$ )  $X/d_h = -10 \sim 10$  범위에서 제트와 벽면 사이의 간격  $Z/d_h = 3, 5, 8$  조건에 대한 결과를 비교하였다.

$Z/d_h = 3$ 에서는 Re 수가 커질수록 두 모델의 열전달 성능의 차이가 커지는 것을 정량적으로 확인할 수 있다.  $Re = 32000$ 의 경우 중심부에서 박판을 부착한 모델의 Nu가 기존 모델보다 30이상 높으며, Re수가 감소하더라도 박판을 부착한 sweeping jet의 열전달 성능이 더욱 우수하다. 이는 Sweeping jet의 유동이 한쪽 끝단에서 반대쪽 끝단으로 전환될 때 출구 중앙에서의 박판에서의 Coanda effect로 인하여 제트가 체류하는 시간이 늘어났고 박판 구조를 지날 때 난류 강도가 상대적으로 증가하여 열전달율을 증가시키는 것으로 추정된다.

$Z/d_h = 5$ 에서는 충돌 중심부에서 대체로 박판을 부착한 sweeping jet가 열전달 성능이 더 우수하지만,  $X/d_h = 6$ 이후로는 sweeping jet가 더 우수한 경향을 보인다. 낮은 Re수 범위에서는 두 모델이 유사한 Nu수 분포를 보이고 있다.

$Z/d_h = 8$ 에서는 모든 Re수에 대하여 두 모델이 충돌 중심부에서 유사한 열전달 성능을 보이며,  $X/d_h = 6$ 이후로는 sweeping jet가 우수한 성능을 보이고 있다.

박판을 부착한 모델 역시 제트와 벽면 사이의 간격이 증가할 때 열전달 성능이 급격히 감소하는 모습을 보인다.  $Z/d_h = 3$ 에서  $Z/d_h = 8$ 로 증가할 때  $Re = 32000$ 의 경우 Nu수가 최대 125에서 67로 50% 정도 감소한다. 기존 sweeping jet와 같이 유동의 분포가 분산되기 때문에 거리가 멀어짐에 따라 유속이 급격하게 감소하므로 그와 유사하게 열전달 성능이 감소하는 것으로 추정된다. 박판을 통해 중심부의 유속이 이전보다 증가하였지만, 양 끝단의 속도는 감소하므로 중심으로부터 반경이 큰 영역에서는 sweeping jet에 비해 열전달 성능이 감소한다.

#### 4. 결 론

근접한 제트와 벽면 사이의 간격에서는 우수한 열전달 성능을 보이지만, 일정 간격 이상에서는 성능이 감소하는 sweeping jet의 열전달 성능을 향상시키기 위해 유체진동기 출구에 알루미늄 수직 박판을 부착시켜 유동 및 열전달 특성을 비교했다.

입자영상유속계 측정 결과 sweeping jet와 유사한 진동수에서 작동하였고, 양 끝단의 평균 유속이 감소하였지만, 수직 박판에서의 Coanda effect로 인해 중심부에서의 속도 분포가 증가하여 전체적으로 고른 유동의 분포를 나타내고 있다.

열전달 특성을 알아보기 위해서 phosphor thermometry 기법을 사용하여 온도장을 4개의 Re 수와 3개의 제트와 벽면 사이의 간격에 대하여 열전달 실험을 진행하였다.

기존 sweeping jet와 유사하게 Re 수가 증가함에 따라 제트와 벽면 사이의 간격이 감소할수록 Nu 수가 증가하였다. Nu 분포를 비교한 결과, 제트와 벽면 사이의 간격이  $Z/d_h = 5$  이하일 때는 박판을 부착한 모델이 더 우수한 열전달 성능을 보인다. 하지만 간격이 멀어질수록( $Z/d_h = 8$ ) 열전달 성능이 유사한 형태를 가진다.

박판으로 인해 중심부의 유속이 증가함에 따라 중앙의 열전달 성능이 높아졌지만 양 끝단의 유속이 감소함으로써 중심으로부터 반경이 큰 영역의 열전달 성능이 감소한다.

수직 박판을 부착한 sweeping jet의 열전달 특성을 기반으로 근접한 거리에서 효율적인 열과 물질 전달 효과를 기대할 수 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0030013)

#### REFERENCE

- 1) Laroche, E., Fenot, M., Dorignac, E., Vuillerme, J., Brizzi, L. E., Larroya, J. C., 2017, "A combined experimental and numerical investigation of the flow and heat transfer inside a turbine vane cooled by jet impingement", J. Turbomach 140(3), 031002 (9 pages)
- 2) H. Wang, W. Yu, Q. Cai, 2012, "Experimental study of heat transfer coefficient on hot steel plate during water jet impingement cooling", J. Mater. Process. Technol. 212 (9) 1825-1831.
- 3) P.A. de Oliveira, J.R. Barbosa Jr., 2017, "Novel two-phase jet impingement heat sink for active cooling of electronic devices", Appl. Therm. Eng. 12, 952-964.
- 4) N. Zuckerman, N. Lior, 2006, "Jet impingement heat transfer: physics, correlations, and numerical modeling", Adv. Heat Transf. 39, 565-631.
- 5) S. Gartlein, R. Woszidlo, F. Ostermann, C.N. Nayeri, C.O. Paschereit, 2014, "The time resolved internal and external flow field properties of a fluidic oscillator", in:52nd AIAA Aerospace Science Meeting, p. 1143.
- 6) M. Koklu, 2016, "Effect of a Coanda extension on the performance of a sweeping-jet actuator", AIAA J. 54 (3), 1131-1134.
- 7) B.C. Bobusch, R. Woszidlo, J.M. Bergada, C.N.N. Nayeri, C.O. Paschereit, 2013, "Experimental study of the internal flow structures inside a fluidic oscillator", Exp. Fluids 54 (6), 1559.
- 8) C. Cerretelli, K. Kirtley, 2009, "Boundary layer separation control with fluidic oscillators", J. Turbomach., 131, p. 041001.
- 9) M.A. Hossain, L. Agricola, A. Ameri, J.W. Gregory, J.P. Bons, 2018, "Sweeping jet film cooling on a turbine vane", Proc. ASME Turbo Expo 2018, GT2018-77099.
- 10) R.B. Beale, M.T. Lawler, 1974, "in: Flow: Its Measurement and Control in Science and



- Industry” Instrument Society of America, pp. 989-996.
- 11) X. Wen, Y. Liu, H. Tang, 2018, “Unsteady behavior of a sweeping impinging jet: time resolved particle image velocimetry measurements”, *Exp. Therm Fluid Sci.* 96, 111-127.
  - 12) S.H. Kim, H.D. Kim, 2019, “Quantitative visualization of the three-dimensional flow structures of a sweeping jet”, *J. Visualization.* 22, 437-447.
  - 13) L. Agricola, M.A. Hossain, R. Prenter, R. Lundgreen, A. Ameri, J. Gregory, J.P. Bons, 2017, “Impinging sweeping jet heat transfer”, in: 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, p. 4974.
  - 14) T. Park, K. Kara, D. Kim, 2018, “Flow structure and heat transfer of a sweeping jet impinging on a flat wall”, *Int. J. Heat Mass Transf.* 124, 920-928.
  - 15) S.H. Kim, H.D. Kim, K.C. Kim, 2019, “Measurement of two-dimensional heat transfer and flow characteristics of an impinging sweeping jet”, *Int. J. Heat Mass Transf.* 136, 415-426.
  - 16) S.J. Yi, H.D. Kim, K.C. Kim, 2014, “Decay-slope method for 2-dimensional temperature field measurement using thermographic phosphors”, *Exp. Therm Fluid Sci.* 59, 1-8.