

# 원형 노즐의 직경 변화 및 표면으로 부터의 거리변화에 따른 오목한 표면에 충돌하는 제트의 온도장 측정 및 CFD해석

조영민\* · 임유진\*\* · 염은섭†

## Temperature field measurement and CFD analysis of a jet impinging on a concave surface depending on changes in nozzle to surface distance and the diameter of a circular nozzle

Yeongmin Jo<sup>\*</sup>, Yujin Im<sup>\*\*</sup>, Eunseop Yeom<sup>†</sup>

**Abstract** The characteristic of jet impinging on the concave surface were analyzed through thermographic phosphor thermometry (TPT) and numerical investigation. Under a jet Reynolds number of 6600, nozzle diameters and nozzle-to-surface distances (H/d) were changed 5mm and 10mm and H/d=2 and 5. The RNG k- $\epsilon$  turbulence model can accurately predict the distribution of Nusselt number, compared to other models (SST k- $\omega$ , realizable k- $\epsilon$ ). Heat transfer characteristics varied with the nozzle diameter and H/d, with a secondary peak noted at H/d =2, due to vortex-induced flow detachment and reattachment. An increase in nozzle diameter enhanced jet momentum, turbulence strength, and heat transfer.

**Key Words** : Impinging Jet (충돌제트), Temperature field (온도장), Computational Fluid Dynamics(CFD) simulation (전산유체역학), Concave Surface (오목한 표면), Thermographic Phosphor Thermometry(TPT, 인광 온도 측정법)

### 1. 서론

충돌 제트는 다양한 산업 분야에서 금속 표면을 냉각하는 데 활용된다. 대표적인 예로 터빈 블레이드 냉각과 전자제품의 공정 과정에서의

냉각 등에 사용된다. 충돌 제트와 금속 표면의 열전달 측정을 위해 물체의 온도장 측정이 필요 한데 기존의 IR 카메라나 온도 감응형 페인트 등은 측정 가능 온도 범위나 해상도 등이 제한적이다. 써모 커플 등은 접촉식 측정 방식이므로 충돌 제트가 사용되는 곳에서의 유동 등을 확인하기 어렵다는 단점이 있다. 인광 온도 측정법은 인광 물질에 여기광을 조사하고 안정화되는 과정에서 인광을 방출하는 특성을 이용하는 것이고 이 특성은 온도, 압력 등 주변 환경에 따라 다르게 나타난다. 이러한 비접촉식 인광 온도 측정법은 유동에 영향을 주지 않고 온도를 측정할 수

---

† School of Mechanical Engineering, Pusan National University (PNU), Associate Professor  
E-mail: esyeom@pusan.ac.kr

\* School of Mechanical Engineering, PNU,  
MS student

\*\* School of Mechanical Engineering, PNU,  
Master

---

있다. 또한 고속 측정이 가능하여 높은 해상도로 온도장을 볼 수 있다. Yi 등은 인광 물질을 활용하여 평평한 표면 위 충돌제트의 온도장과 PIV를 활용하여 유동장을 관찰하였다.<sup>(1)</sup> Kim 등은 곡면의 표면에 충돌하는 제트 표면의 온도장을 인광 온도계측법으로 얻었으나, 볼록한 표면에 충돌하는 제트에 대하여 수행하였다.<sup>(2)</sup>

본 실험에서는 곡면의 표면 중 오목한 고온의 표면에 충돌하는 제트에 의해 변화하는 온도장을 인광 온도 측정법을 이용하여 가시화하고 최적의 CFD 시뮬레이션 조건을 확인하려 한다. 오목한 표면에 충돌하는 제트의 노즐 직경과 H/d (노즐과 충돌면 사이의 거리)를 다르게 하여 유동과 온도 분포를 시뮬레이션을 통해 살펴보고, 오목한 표면에서의 온도장을 결정하는 유동 특성을 확인하려 한다.

## 2. 실험셋업 및 연구방법

### 2.1 인광 온도계측법

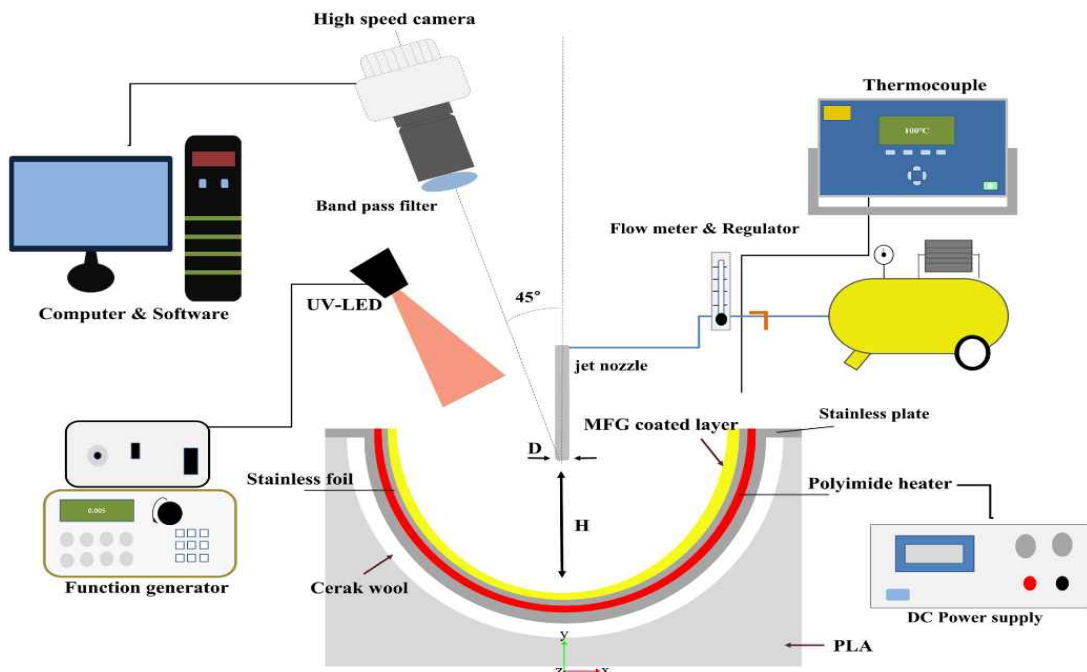


Fig. 1. Schematic of the experimental setup for impinging jet on concave surface by using thermographic phosphor thermometry

본 연구에서는 주변 온도에 따라 인광주기가 변하는 인광 물질을 이용하여 온도를 측정하는 방법을 사용하였다. 물질이 여기 되고 안정화됨에 따라 발광 시간이 변하는 특성을 활용하며, 이는 반비례로 표현되는 형광체의 광도  $I(t)$ 와 수명( $\tau$ ) 사이의 관계로 표현될 수 있다.<sup>(3,4)</sup>

$$I(t) = I_0 \times e^{(-t/\tau)} + b \quad (1)$$

여기서  $I_0$ ,  $t$ 는 각각 초기 인광 강도, 시간이다. 이 관계를 사용하여 적용된 표면 온도를 추정할 수 있다. 접촉식 측정을 적용할 수 없는 복잡한 시스템에서 온도를 측정할 수 있으므로 높은 시간적 및 공간적 해상도로 온도 변화를 감지하는데 특히 유용하다.

### 2.2 실험셋업

Fig. 1은 인광 온도 측정법을 사용하여 온도장을 측정하는 셋업을 나타내고 있다. 오목한 스테

인리스 플레이트(두께 1.5mm) 위에 폴리이미드 히터(두께 0.3mm)와 스테인리스 호일(두께 0.1mm)을 부착했다. 스테인리스 스틸 호일은 그 아래에 부착된 히터를 사용하여 일정한 열유속으로 균일하게 가열되었으며 Mg4FGeO6:Mn(MFG) powder와 HPC 바인더(ZYP Coatings Inc., Oak Ridge, USA)를 3:1의 비율로 혼합하고 에어브러시를 사용하여 스테인리스 스틸 호일의 오목한 표면에 고르게 코팅하였다. UV-LED(Mightech, 365nm)를 사용하여 10Hz의 펄스 속도, 50ms의 지속 시간 및 50ms의 지연으로 조사하였다. MFG에서 방출되는 빛은 고속 카메라(Phantom VEO710L)를 사용하여 10,000fps의 속도로 촬영하였고, 밴드 패스 필터(Edmund Optics)가 전면에 설치되어 655±50nm의 파장을 가진 빛만 통과시킬 수 있도록 하였다. 마지막으로 원형 제트노즐(직경 5, 10mm)을 수직 방향으로 고정하고, 반구형 플레이트의 직경은 100mm, 노즐 높이는 H/d(2, 5)에 따라 각각 다르게 고정하였고, 제트 레이놀즈수는 6600으로 설정하였다. 카메라를 통해 얻은 영상은 데이터 처리 프로그램(MATLAB))을 사용하여 온도장으로 변환하였다.

실험은 일정한 열 유속 조건에서 실험을 진행하였기 때문에 뉴턴의 냉각법칙을 그대로 적용할 수 있었다. 열전달 속도(Q [W])는 뉴턴의 냉각 법칙을 통해 대류 열전달 계수(h[W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>]), 측정 면적(A[m<sup>2</sup>]) 및 온도 차이(T[K])와 관련될 수 있으며, 이는 다음 공식을 산출한다:

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (2)$$

(2)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h = \frac{Q}{A(T_W - T_\infty)} \quad (3)$$

여기서,  $\Delta T = T_W - T_\infty$ ,  $T_W$ 는 벽 온도,  $T_\infty$ 는 기류 온도 (표면에서 충분히 멀리 떨어져 있음)이다. 따라서 Nusselt 수는 다음과 같이 정의된다.

$$Nu = \frac{Qd}{A(T_W - T_\infty)\lambda_{air}} \quad (4)$$

여기서 d는 특성 길이로 사용되는 제트 노즐 직경이고  $\lambda_{air}$ 는 공기의 열전도도이다.

### 2.3 지배방정식

유동은 비압축성이고 불안정하다. 유체는 공기이며 일정한 열 물리적 특성을 가진 뉴턴 유체로 가정하였다. 따라서 Navier-stokes와 에너지 방정식을 포함한 문제의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{u_i u_j})}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial(u_i \bar{T})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - \rho \overline{u_i T'} \right) \quad (7)$$

**Table 1.** Uncertainties for the measuring thermographic phosphor thermometry

Equipment	Measuring errors
K-type thermocouples	0.4%
Image resolution	125 $\mu\text{m}$ / pixel
Power supply	(0.5% of rdg + 2digits)

### 2.4 시뮬레이션 조건

충돌 제트 유동에서는 벽 근처 그리드의 선정과 적절한 난류 모델의 결합을 하는 것이 정확한 유동과 열전달 예측을 달성하는 중요한 요인이 된다. RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 모델은 시간 평균 방정식을 기반으로 유동 해석을 진행한다. 벽면 근처 해석의 용이성과 시간적으로 효율적인 RANS 모델이 선택되어 해석이 진행되었다.<sup>(5)</sup> RANS 난류 모델 중 RNG k- $\epsilon$ , realizable k- $\epsilon$  및 SST k- $\omega$ 의 3가지 난류 모델을 사

용하여,  $H/d=2$ , 5의 2가지 경우에 대하여 해석을 진행하였다.

RNG  $k-\epsilon$  모델은 소용돌이 또는 곡률과 같은 복잡한 유동과 역 압력 구배에서 더 나은 성능을 발휘한다. Realizable  $k-\epsilon$  은 회전 및 유선 곡률과 같은 효과를 설명할 수 있다. 또한 층류에서 난류로의 전환을 보다 정확하게 예측할 수 있다.  $k-\omega$  모델은 벽 근처에서 유동 흐름을 보는 데 적합하고  $k-\epsilon$  모델은 벽에서 멀어지는 흐름에 적합하다. SST  $k-\omega$  모델은 두 모델을 합친 모델로서 다양한 범위에서의 유동 조건을 예측하는 데 적합하다.<sup>(6,9)</sup>

경계조건으로는 제트 입구에서 일정한 온도(303K)의 각각의 유량을 가진 공기가 주입되고, 일정한 열 유속( $4500\text{W/m}^2$ )의 no slip condition이 오목면에 적용되었다. Pressure outlet으로 3개의 열린 면이 지정되었다(위쪽 및 측면). 본 연구에서는 계산 영역을 최적화하기 위해 바닥 면에 5겹의 boundary layer를 추가하였고 요소 기반 유한 체적법을 적용하였다. 이것은 유한 제어 체적에 대해 지배 방정식을 통합하여 수행되었다. 운동량, 난류 및 에너지 방정식의 대류 항과 압력-속도 결합을 위한 coupled 알고리즘을 이산화하기 위해 second order upwind이 사용되었다. 시뮬레이션은 운동량, 질량, 에너지 및 난류 방정식의 평균 제곱근 잔차가  $10^{-5}$ 이 될 때 수렴하는 것으로 보였다. Cell의 개수는 5,224,031개로 설정하였다.

### 3. 결과

#### 3.1 과도 온도장의 가시화

제트가 가열된 표면에 상온의 공기가 충돌하면 시간에 따라 표면이 냉각이 되어 순간적인 온

도장이 변화한다. Fig. 2은 일정한 열 유속 하에서 제트 충돌 시 냉각하는 과정을 열 감지 인광 측정법으로 측정하여 온도장의 변화를 나타낸다. 시간에 따라 냉각 표면의 확장을 관찰할 수 있다. 정상상태(steady) 해석을 한 시뮬레이션 결과의 순간 온도장을 같이 나타내었다. 실험 결과를 통해 표면 가열과 냉각이 일치하는 정상상태에는 16초에 도달하였다.

고온 표면은 대류에 의해 냉각되고 제트 속도가 0이 되는 정체 영역에서 최대 열전달이 발생한다. 충돌 후 빠른 반경 속도로 인해 발생하는 강한 전단 층은 주변 공기의 유입을 초래하고 이 영역에서 가장 높은 열전달이 발생한다. 평평한 표면에 충돌하는 제트와 비교할 때, 정체 지점에서의 열전달 경향은 유사하나 벽 근처 혼합과 벽 열전달에서 차이점이 나타난다. 오목한 경우, 2차 피크가 나타나는 부분이 약한데, 차가운 유체가 덜 유입되어 상대적으로 약한 냉각 효과가 일어난다. 오목 면 위의 벽 제트는 일반 경계층에서보다 더 안정적이며, 이것은 원형으로 운동하는 유체에 의해 유도된 벽 제트의 외부 층의 안정화 효과와 관련된 현상이다. Fig. 3는 CFD와 실험의 중심에서부터 X 축(오목 곡면방향) Nu 수 분포를 비교한 결과를 나타낸다. 실제 실험에서는 플레이트 주변 공기가 가열되어 대류 현상이 발생하지만 시뮬레이션에서는 이러한 영향이 무시 되어 중앙에 더 큰 냉각이 발생하는 경향을 보였다.

앞선 연구들에서 오목한 표면에서 일반적으로 반구형 플레이트와 시뮬레이션과 실험의  $X/d$  방향 Nu 수 분포를 비교를 위해  $R^2$  (correlation coefficient)값을 구했다. 실험데이터와 각 시뮬레

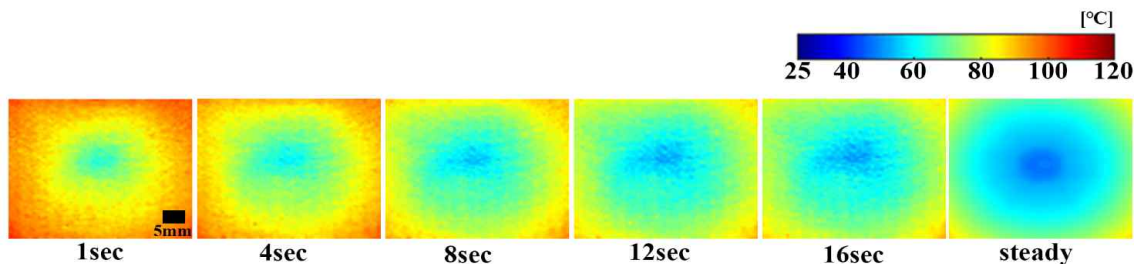


Fig. 2. Transient temperature fields of 5mm round nozzle at  $H/d=2$

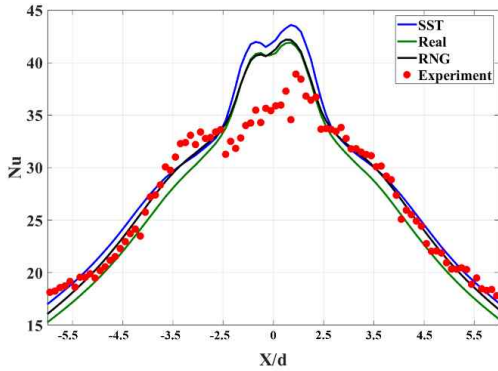


Fig. 3. Comparison of simulation and experiment data

이선 모델의 데이터들을 비교했으며 각각 0.9213 0.9207 0.9080이다. 따라서 RNG k-ε 모델이 실험과 가장 일치하는 결과를 보여준다.

### 3.2 유동 및 온도분포

제트가 표면에 충돌하게 되면 각자 다른 특성의 유동형태를 가지는 세 가지 구역으로 나눈다. 1)자유제트 구역 2)정체 구역 3) 벽 제트 구역이다. Fig. 4의 속도 벡터를 보면 축 방향으로 진행되는 것을 볼 수 있다. 정체 점에서 제트 유동은 벽에 근접하게 되고 유동의 운동에너지는 급격하게 줄어들고 그에 상응하는

압력 에너지가 상승하게 된다. 이러한 압력에너지는 반경 방향으로 흐름을 가속시킨다. 그래서 정체점 근방의 플레이트에는 강한 압력구배가 있다.  $X/d=1$  이후 경계층이 얇아졌다가 잠깐 일정하고  $X/d=2$  이후 두꺼워지면서 최대속도가 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 이와 유사한 속도 분포가  $y-z$ 면에서도 관측이 되나 형상적 변화로 인해 그 경향이 약한 것을 확인 할 수 있다.

노즐과 플레이트가 가까운 경우( $H/d=2$ ), 역 압력 구배가 발생하여 와류가 발생하고 그로 인해 흐름이 불안정해지는 영역이 존재하였다. 와류의 풀업은 표면에 가까운 유체 층을 감속시키는 강한 역 압력구배 영역에서 발생하고 전단층 내부의 속력은 증가시키게 된다. Fig. 5 은 시뮬레이션 결과로 각각 3D 유동구조, 온도분포, 압력 분포를 나타낸다. Fig. 5c의 압력분포에서 음 압력을 찾아볼 수 있었고 볼텍스 구조가 따라 형성되는 것을 볼 수 있었다. 그리고 Fig. 5에서 속도 벡터의 전단층의 바닥부분에서도 제트가 표면에 충돌 후 최대속도에 도달하고 이후 잠깐 감소했다 다시 증가하는 현상이 보였다. 그러나 RANS 모델의 한계로 참조 논문처럼 확인한 와류 구조와 유동 박리, 재접착은 확인할 수 없었다.<sup>(10)</sup> RANS 모델은 시간 평균 방정식을 기반으로 하여 코어 영역 길이의 과대 예측 등의 제트가 충

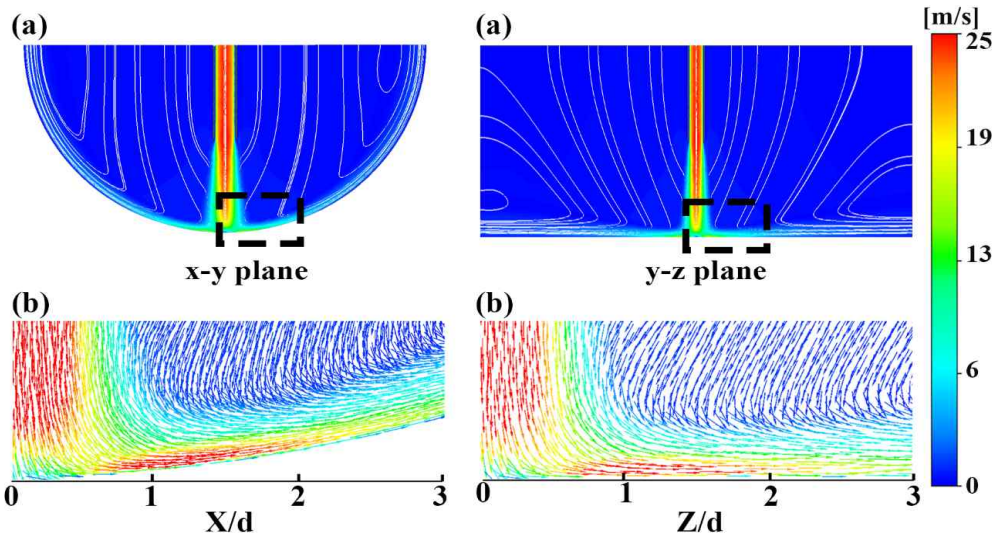


Fig. 4. (a) Velocity streamlines in x-y and y-z planes. (b) Velocity vectors near stagnation region ( $H/d=2$ )



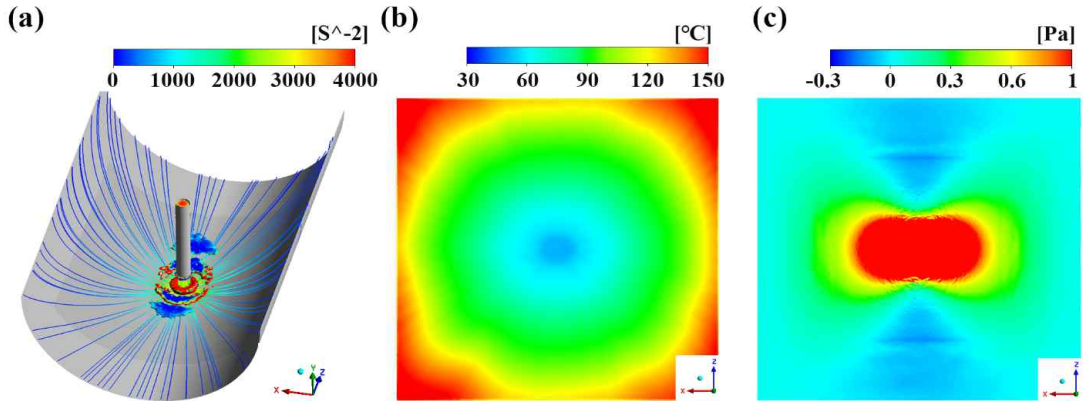


Fig. 5. (a) The three-dimensional flow structure of vortex using iso-surface of Q-criterion. Distributions of (b) temperature and (c) pressure.

돌하는 유동 시뮬레이션에서 단점이 있다. 반면 LES는 제트 출구에서 시작된 대규모 소용돌이 구조가 진화 및 분산되는 것을 더 작은 소용돌이 형태로 재현해 낼 수 있다.<sup>(11)</sup> 그래서 벽 근처의 해석에서는 RANS로 해석이 가능했지만, 벽면에서 떨어져 있는 지역과 free jet 구역을 해석할 때 LES에서는 나타나지만 RANS에서는 나타나지 않는 소용돌이 구조가 존재한 것으로 보인다. 소용돌이 구조에 의해 표면을 따라 흐름이 분리되면 열/질량 전달 대류 계수가 감소하는 반면, 유동이 재부착 되었을 때는 대류 열전달 계수가 증가할 것이다. 따라서 이러한 현상은 벽을 따라

일어나는 열전달에 영향을 줄 것이다. 와류 아래의 압축된 유동은 속도 증가를 일으키고, 와류로 인해 유입되는 유체는 비교적 차갑다. 질량 유량 또한 증가하여 대류 속도를 증가시킬 것으로 예상된다.<sup>(12)</sup>

### 3.3 열전달 특징

실험은 노즐 직경(5mm, 10mm)과 H/d(2, 5)를 다르게 하여 진행하였다. Fig. 6은 제트 분사 16초후 XY평면에서 X축 방향으로의 Nu 수 분포를 나타내고 있다. 노즐 직경과 H/d에 따라 다른 결과를

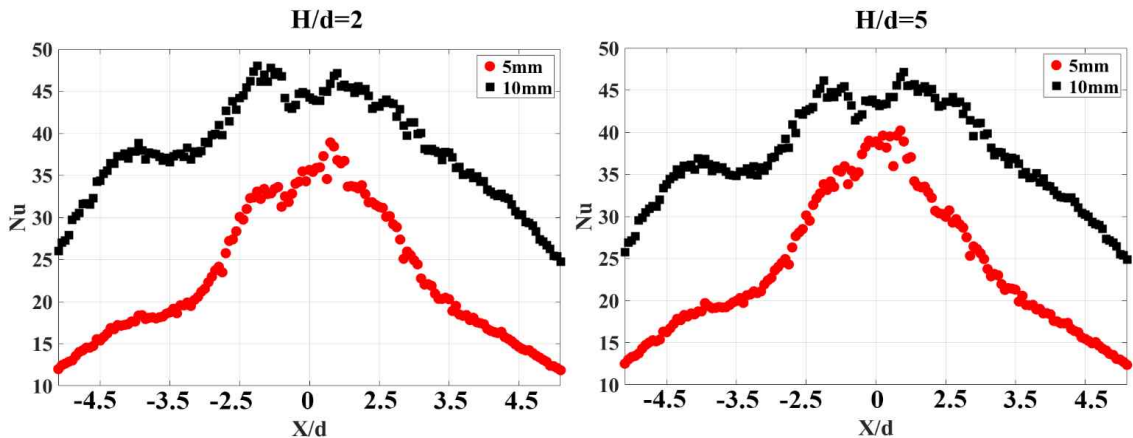


Fig. 6. Comparison of Nu on variable H/d and nozzle diameters (5, 10 mm)

나타내고 있는데, 5mm 노즐의 경우  $H/d = 2$  에서는 피크 정체점 영역 근처에서( $-2.5 < X/d < 2.5$ ) Nu 수 분포가 상대적으로 평평한 형상을 보이거나  $H/d = 5$ 의 경우에서는 보다 뾰족한 형태를 보인다. 10mm 노즐의 경우는 두  $H/d$ 에서 상대적으로 유사한 양상으로 나타내지만, 마찬가지로  $H/d = 2$  케이스에서 조금 더 큰 Nu 수를 가지는 2차 피크를 보여준다 ( $X/d = 2$ 인근). 포텐셜 코어 길이 ( $H=4D$ ) 보다 가까운 거리에서 충돌하는 제트는 자유 제트에서 형성된 소용돌이가 벽 제트영역까지 유지되어 발달하지만,<sup>(12)</sup> 포텐셜 코어 길이 보다 긴 경우( $H > 4d$ )는 볼텍스가 유지되지 않는다. 그러므로 볼텍스 발생에 의한 유동 박리/재부착 현상이 나타나지 않게 되고 불안정한 열전달 분포가 감소된 형태로 나타났기 때문으로 볼 수 있다. 또한 10mm 노즐의 Nu분포가 5 mm 노즐보다 더 크게 나타났는데 정체점 영역에서 10mm 노즐의 평균 Nu수는 5mm노즐 과 비교 하였을 때  $H/d = 2$ 의 경우 30%,  $H/d = 5$ 의 경우 18% 더 크게 나타났다. 노즐 직경이 증가함에 따라 포텐셜 코어의 길이가 증가한다.<sup>(13)</sup> 즉 같은  $H/d$ 와 레이놀즈 수를 갖는 조건에서 직경이 클수록 더 큰 유량과 제트 운동량 ( $U_c / U_{\infty}$ ), 난류강도를 갖게 된다. 포텐셜 코어 내부에서는 일정량의 난류강도를 갖지만 포텐셜 코어 밖에서는 제트가 주변공기와 활발하게 섞이면서 난류강도가 급격하게 상승하게 된다. 그래서 10mm 노즐의 경우 5mm 노즐보다 더 큰 제트 운동량과 난류강도를 갖게 되고, 이는 열전달 상승으로 이어졌다.

#### 4. 결론

CFD 분석을 통해 자유 제트 구역, 정체 구역 및 벽 제트 구역의 세 가지 고유 구역에서 유동 특성을 이해할 수 있었다. 와류를 일으키는 압력 및 속도 구배는 유동 흐름에 중요한 요인이었고 결과적으로 열전달 특성을 결정하는 데 중요한 역할을 했다. RANS 시뮬레이션으로 와류 구조, 유동 박리 및 재접착과 같은 일부 흐름 특성을 발견하는 데 한계가 있었지만, 연구는 벽을 따라 일어 나는 대류에 의한 열전달에 대한 이해를 도

울 수 있었다. 과도 열전달 특성은 노즐 직경과 노즐과 플레이트 사이의 거리( $H/d$ )에 따라 차이가 났는데 낮은  $H/d (=2)$ 에서만 2차 피크가 두드러지게 나타났다. 볼텍스로 인한 유동 박리/재부착 현상이 주요인으로 판단되었다. 또한 노즐의 직경이 증가하면 포텐셜 코어의 길이도 증가하고, 제트 모멘텀 및 난류 강도가 증가하여 열전달이 향상되었다. 오목한면에 충돌하는 제트에 의한 온도 변화를 인광 온도 측정법을 통해 온도장으로 변환하고 그 특성을 확인하였다. 광학 장비를 사용하여 비접촉 방식으로 고온 환경에서 오목한 표면을 촬영하여 높은 해상도의 온도장을 측정하였다.

열 유동 연관성을 체크하는 표본으로서 의미 있는 결과를 획득하였으며, 제트가 충돌하는 오목한 형상을 가지는 기계 부품 등의 냉각에 대한 이해를 제공하며, 열전달 설계 개선 과정 등에 적용되어 효율을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1A5A8018822).

#### REFERENCE

- 1) Yi, S. J., Kim, M., Kim, D., Kim, H. D. and Kim, K. C., 2016, "Transient Temperature Field and Heat Transfer Measurement of Oblique Jet Impingement by Thermographic Phosphor," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 102, No., pp. 691-702.
- 2) Kim, M., Kim, D. and Yeom, E., 2020, "Measurement of Three-Dimensional Flow Structure and Transient Heat Transfer on Curved Surface Impinged by Round Jet," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 161, No., pp. 120279.
- 3) Cai, T., Kim, D., Kim, M., Liu, Y. Z. and Kim, K. C., 2016, "Two-Dimensional Thermographic

- Phosphor Thermometry in a Cryogenic Environment," Measurement Science and Technology, Vol. 28, No. 1, pp. 015201.
- 4) 임유진 and 염은섭, 2021, "온도감응형 인광물질을 이용한 온도장 및 열변형 동시 계측 기법 개발," 한국가시화정보학회지, Vol. 19, No. 3, pp. 77-83.
  - 5) Alimohammadi, S., Murray, D. B. and Persoons, T., 2014, "Experimental Validation of a Computational Fluid Dynamics Methodology for Transitional Flow Heat Transfer Characteristics of a Steady Impinging Jet," Journal of Heat Transfer, Vol. 136, No. 9, pp.
  - 6) Rakhsha, S., Zargarabadi, M. R. and Saedodin, S., 2023, "The Effect of Nozzle Geometry on the Flow and Heat Transfer of Pulsed Impinging Jet on the Concave Surface," International Journal of Thermal Sciences, Vol. 184, No., pp. 107925.
  - 7) Yakhot, V. and Orszag, S. A., 1986, "Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic Theory," Journal of scientific computing, Vol. 1, No. 1, pp. 3-51.
  - 8) Shih, T.-H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J., 1995, "A New  $K-\epsilon$  Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows," Computers & fluids, Vol. 24, No. 3, pp. 227-238.
  - 9) Menter, F. R., 1994, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," AIAA journal, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605.
  - 10) Aillaud, P., Gicquel, L. and Duchaine, F., 2017, "Investigation of the Concave Curvature Effect for an Impinging Jet Flow," Physical Review Fluids, Vol. 2, No. 11, pp. 114608.
  - 11) Kubacki, S. and Dick, E., 2010, "Simulation of Plane Impinging Jets with  $K-\Omega$  Based Hybrid Rans/Les Models," International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 31, No. 5, pp. 862-878.
  - 12) Yadav, H. and Agrawal, A., 2018, "Effect of Vortical Structures on Velocity and Turbulent Fields in the near Region of an Impinging Turbulent Jet," Physics of Fluids, Vol. 30, No. 3, pp. 035107.
  - 13) Lee, D. H., Song, J. and Jo, M. C., 2004, "The Effects of Nozzle Diameter on Impinging Jet Heat Transfer and Fluid Flow," J Heat Transfer, Vol. 126, No. 4, pp. 554-557.