



Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2017.21.2.083>

## 충돌제트의 경사각도가 파형 구조의 열유동 특성에 미치는 영향

황병조<sup>a</sup> · 김선호<sup>a</sup> · 주원구<sup>a</sup> · 조형희<sup>a,\*</sup>

# Oblique Angle Effect of Impinging Jet on Heat Flow Characteristics of a Corrugated Structure

Byeong Jo Hwang<sup>a</sup> · Seon Ho Kim<sup>a</sup> · Won Gu Joo<sup>a</sup> · Hyung Hee Cho<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>*School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Korea*

<sup>\*</sup>*Corresponding author. E-mail: hhcho@yonsei.ac.kr*

### ABSTRACT

A numerical analysis is made of the fluid flow and heat transfer characteristics in the corrugated structure that traps the spent air in the corrugations between impinging jets to reduce crossflow effects on downstream jets in the array. All computations are performed by considering three-dimensional, steady state, and incompressible flow by using the ANSYS-CFX 15.0 code. Averaged jet Reynolds number is 10,000. The oblique angles of impingement jets on the spanwise section are 70°, 80°, 90°, and the oblique angles of impingement jets on the streamwise section are 70°, 90°, 110°. The investigation focuses on the oblique angle influence of impinging jet array on the fluid flow and heat transfer characteristics of a corrugated structure.

### 초 록

파형 구조는 배열 충돌제트 하류에서의 횡방향 유동 영향을 줄이기 위해 충돌제트 사이의 파형 속에 사용된 냉각 공기를 유입시키며, 이러한 파형 구조에서의 유동 및 열전달 특성에 대해 수치해석을 수행하였다. 모든 계산은 3차원, 정상상태, 비압축성 유동으로 고려하였으며 ANSYS-CFX 15.0 코드를 사용하였다. 제트 홀에서 평균 Reynolds 수는 10,000이며, Spanwise 단면에서 충돌제트의 경사각도는 70°, 80° 및 90° 이고, Streamwise 단면에서 충돌제트의 경사각도는 70°, 90° 및 110° 이다. 본 연구에서는 배열 충돌제트의 경사각도가 파형 구조의 유동 및 열전달 특성에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

Key Words: Oblique Impinging Jet(경사 충돌제트), Corrugated Structure(파형 구조), Crossflow(횡방향 유동), Staggered Array(엇갈림 배열), Turbulence Model(난류 모델)

### 1. 서 론

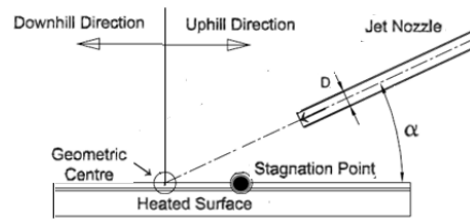
Received 20 December 2016 / Revised 26 February 2017 / Accepted 2 March 2017  
Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers  
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

충돌제트 냉각은 고온의 벽면에 냉각 공기를 직접 분사시켜 많은 열을 흡수/제거하는 방식으

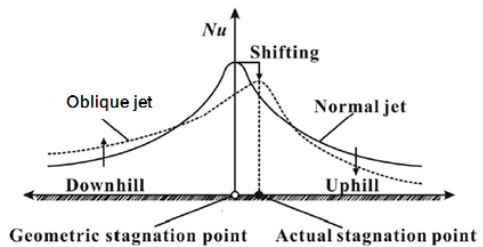
로 국소적으로 높은 열전달 효과를 얻을 수 있기 때문에, 가스터빈의 연소실 내벽이나 터빈 블레이드 냉각, 항공기 날개의 동결방지(Anti-icing), 전자부품 내부의 반도체 냉각, 제지와 필름의 건조공정, 유리/금속의 제조공정 등 국소적으로 큰 열부하를 받는 산업분야에 많이 응용되고 있다[1-3].

충돌제트는 그 효율성 때문에 열전달 및 유동 특성에 대한 많은 실험과 수치해석 연구가 수행되었다. Jambunathan 등[4] 및 Viskanta[5]는 다양한 연구결과 분석을 통해 수직 충돌제트로 인한 열전달이 제트 Reynolds 수, 제트 노즐과 충돌면의 간격, 제트 노즐의 모양, 충돌면의 곡률 등 많은 변수와 관련이 있다는 것을 제시하였다. Goldstein 등[6] 및 Vipat 등[7]은 Fig. 1과 같은 경사 충돌제트에 대해 수직 충돌로부터 경사각이 크게 될수록 기하학적 중심(Geometric Center)으로부터 열전달이 최대가 되는 정체점(Stagnation Point)이 더 멀어져 즉, Uphill 방향으로 이동하고, 정체점에서 최대 Nusselt 수가 수직 충돌에 비해 작아짐을 밝혔으며, 이에 대한 실험식을 제시하였다. Weigand 등[8]은 여러 개의 제트로 된 배열 제트의 열전달 특성에 관한 많은 연구결과를 종합하여 인접한 제트 홀 사이 간격, 제트 Reynolds 수, 제트 노즐과 충돌면의 간격, 횡방향 유동(Crossflow) 등의 영향을 분석하고, 단일 제트의 특성과 비교하였다. Hwang 등[9]은 터빈 블레이드 전연면(Leading-edge)을 모사한 곡면 형상에서 엇갈림 배열(Staggered Array)에 대한 충돌제트의 열유동 특성을 고찰하였다. 배열제트의 경우 분사된 제트가 충돌면을 냉각시킨 후 유동이 하류로 흘러가면서 횡방향 유동을 형성하여 하류에서의 열전달을 감소시키고 상,하류 간의 불균일한 열전달을 유발시킨다.

배열 충돌제트에서 횡방향 유동을 감소하기 위한 방안의 일환으로 본 연구와 유사한 파형 구조에 대한 연구동향을 살펴보면, Esposito 등[10]은 TLC (Thermochromic Liquid Crystal)를 이용한 실험 연구를 통해 평판 제트 판에 비해 파형 제트 판이 횡방향 유동을 억제시켜 열전달 향상에 효과가 있음을 보였다. Yang 등[11]은



(a) Oblique jet impinging on a flat plate



(b) Nusselt number for normal and oblique jets

Fig. 1 Schematic variation of heat transfer distribution on a flat plate for normal and oblique jets[7].

제트 판과 충돌면 사이에 핀을 추가로 설치하고, Chi 등[12]은 파형 단면 형상을 변경하면서 횡방향 유동을 억제하는 실험 및 수치해석 연구를 수행하였다. Correia[13]은 가스터빈 엔진의 터빈 슈라우드 냉각을 위해 제트 판을 경사지게 하여 파형 단면을 유동방향으로 더 증가시켜 횡방향 유동을 감소시키는 형상을 특허 등록하였다. 또한 Haumann 등[14]은 사각형 보다 면적을 더 증가시킨 사다리꼴 단면을 가진 파형 구조를 특허 등록하였다. Bunker[15]는 가스 터빈 블레이드 냉각을 위해 이중벽(Double Wall) 내부로 열 분사 또는 이열로 경사지게 분사되는 충돌제트의 파형 구조를 특허 등록하였다.

파형 구조에서 경사각도가 충돌제트의 유동 및 열전달에 미치는 영향에 대한 연구는 지금까지 수행되지 않았으며, 평판 구조에 대해서는 Goldstein 등[6] 기존 연구자들이 충돌제트의 경사각도가 벽면 열전달에 크게 영향을 미침을 확인한 바 있다. 파형 구조는 충돌제트 판 사이의 공간 뿐 만아니라 파형 속으로도 냉각 공기가 흘러갈 수 있어 횡방향 유동의 속도를 낮추고, 열전달과 차압 특성을 개선시키는 효과가 있다.

또한 파형 구조를 가지는 충돌제트의 경우 제트 홀 각도에 따라서 파형과 그 주변 채널에서 유동 구조가 바뀔에 따라 열전달 특성이 달라진다. 따라서 본 연구에서는 파형 구조에 대해 충돌제트의 경사각도를 변화시키면서 횡방향 유동에 미치는 영향 및 충돌면에서의 열전달 특성을 비교 분석하였다.

## 2. 수치해석 모델링

### 2.1 해석 모델

Fig. 2는 파형 구조를 가지는 본 해석 모델에 대한 여러 단면에서의 개략적인 형상을 보여준다. 냉각 공기는 제트 홀이 엇갈림 배열로 된 파형 구조의 윗면으로 들어가서 충돌면(Target Surface)에 부딪친 후 채널 벽면을 따라 횡방향 유동을 형성하면서 우측 출구로 빠져 나간다. Table 1은 제트 홀 직경( $d$ ) 기준으로 무차원화된 파형 단면의 주요 형상 제원을 나타낸다. 파형 구조의 형상을 고정하고 Spanwise 단면에서 충돌제트의 경사각도인  $\alpha$ 를  $70^\circ$ ,  $80^\circ$  및  $90^\circ$ 로, Streamwise 단면의 경사각도인  $\beta$ 를  $70^\circ$ ,  $90^\circ$  및  $110^\circ$ 로 변화시켰다.  $P_x$ 와  $P_z$ 는 각각 Streamwise 단면과 Spanwise 단면에서 제트 홀 사이 간격을 나타낸다.

Reynolds 수는 제트 홀 직경 기준으로 Eq. 1과 같이 정의되며, 무차원수인 Nusselt 수는 Eq. 2와 같다.

$$Re = \frac{\rho V_j d}{\mu} = \frac{4 \dot{m}_j}{\pi \mu d} \quad (1)$$

$$Nu = \frac{h d}{k} \quad (2)$$

여기서  $V_j$  및  $\dot{m}_j$ 는 각각 제트 홀에서의 평균 속도 및 질량유량이며,  $d$ 는 제트 홀의 직경,  $h$ 는 대류열전달계수이다.

마찰계수  $f$ 와 열적 성능(Thermal Performance) 지수  $\eta$ 는 각각 Eq. 3, Eq. 4와 같이 정의된다.

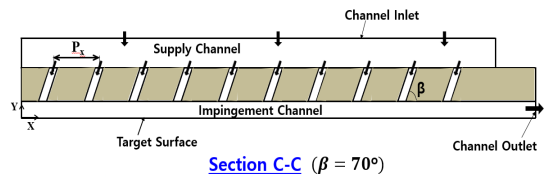
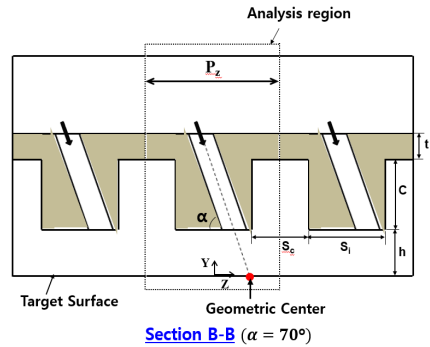
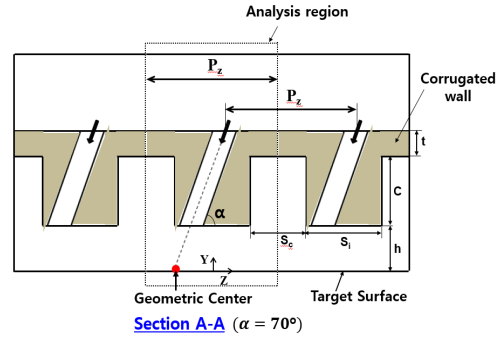
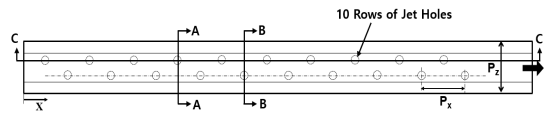


Fig. 2 Schematic diagrams of corrugated structures with oblique impingement jet.

Table 1. Geometric detail of corrugated structures.

Parameter	$h/d$	$C/d$	$P_x/d$	$P_z/d$	$t/d$
Values	2	3	6	6	1
Parameter	$S_i/d$	$S_c/d$	$\alpha$	$\beta$	
Values	3.5	2.5	$70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$	$70^\circ, 90^\circ, 110^\circ$	

\*  $\alpha$  : oblique angle on the spanwise section.

$\beta$  : oblique angle on the streamwise section.

$$f = \frac{P_{in} - P_{out}}{\frac{1}{2} \rho u_{in}^2} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\overline{Nu}}{Nu_o} / \left( \frac{f}{f_o} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

여기서  $P_{in}$ 과  $P_{out}$ 은 각각 유량공급채널 (Supply Channel) 입구와 충돌면 채널 출구의 압력이며,  $u_{in}$ 은 유량공급채널의 입구 속도를, 상첨자  $-$ 는 평균값을, 하첨자  $o$ 은 비교대상의 기준값을 나타낸다. 본 연구에서 사용된 기준 모델의 경사각도는  $\alpha=90^\circ$ ,  $\beta=90^\circ$ 이다.

## 2.2 수치해석 방법 및 경계조건

수치해석은 상용 코드인 ANSYS-CFX 15.0을 사용하였으며, 이는 유한체적법(Finite Volume Method)으로 3차원 정상상태 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 차분화하여 수치해를 구한다. CFX-15.0 코드는 수치계산을 통해 얻어진 해를 격자점(Node)에 저장하지만 지배방정식의 대류항, 확산항, 압력구배항 등은 적분점에서의 해나 해의 구배값을 필요로 하므로 격자(Element) 내부에서의 해의 변화를 계산하기 위해 유한요소 형상함수가 사용된다. 이는 다른 CFD 코드와 같은 수의 격자를 사용하여도 적분점이 많기 때문에 격자가 더 조밀한 효과가 있으며, 격자 의존성이 상대적으로 적다. 대류항(Advection Term)에 대해서는 2차 정확도를 가지는 Upwind-based Approach인 High Resolution 기법을 사용하였다. 운동량 방정식의 Reynolds 응력항 난류 모델링을 위해 3차원 충돌제트 난류 유동에 양호한 해석 결과를 얻은 바 있는 BSL  $k-\omega$  난류모델[16]을 적용하였다. 입구 난류강도는 CFX에서 제공하는 기본 값인 5%를 적용했다. 수치해의 수렴을 위해 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지방정식 및 난류방정식의 Residual 오차는  $10^{-5}$  이하가 되도록 하였다.

해석 모델 내부는 비정렬 격자로, 벽면에 가까운 유체 영역은 정렬 격자로 만들고 벽면 부근에서 격자 크기는 충돌면으로부터 10%씩 점차적

으로 증가시켰다. 또한 난류 유동 해석의 정밀도를 높이기 위해 충돌면에서  $y^+$ 는 1.0 이하를 유지하였다. 격자 크기 영향을 최대한 줄이고 적절한 격자수를 선정하기 위하여 격자수를 변화시키면서 충돌면의 평균 Nusselt 수 변화 경향을 비교하였다. 격자 오차는 1% 이하가 되도록 하였고, 총 격자수는 제트 경사각도에 따라 차이는 있었지만 약 1천만 개이다. 작동유체인 공기는 이상기체 모델을 사용하였고, 유량공급 채널에서 총 질량유량은 8.62 g/s, 공기 온도는 50°C이며, 제트 홀에서 평균 Reynolds 수는 10,000 이었다. 충돌면 채널을 빠져 나가는 출구 조건으로는 대기압(101,325 kPa)을 적용하였고, 채널 출구조건이 출구에 가장 가까운 마지막 제트 홀에 미치는 영향을 줄이기 위해 마지막 제트 홀과 채널 출구 사이 간격은 홀 사이 간격( $P_x$ ) 보다 2배 크게 하였다. 그리고 벽면에서 열적 경계조건으로 충돌면은 일정한 온도(20°C)를, 나머지 면에는 단열조건을 적용하고 점착조건(No-slip)을 주었다. 또한 Fig. 1의 해석영역(Analysis Region)에 접한 좌, 우측 단면에는 Periodic 경계조건을 부여하였다.

## 3. 수치해석 결과

### 3.1 수치해의 타당성 검증

충돌제트에서 난류 유동의 정확도를 높이기 위해 다수의 연구자들이 그동안 난류모델 비교 연구를 수행하였다. Zuckerman 등[17], Hofmann 등[18] 및 Sagot 등[19]은 표준(Standard)  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$ , Realizable  $k-\epsilon$ , 표준  $k-\omega$ (Wilcox' 1998 Model), SST  $k-\omega$ ,  $v^2f$ , Algebraic Stress 모델, DNS/LES 모델 등 많은 난류 모델을 적용한 결과 계산시간과 해의 정확도를 동시에 고려할 때 SST  $k-\omega$  모델이 비교적 적절하다고 제시하였다. 최근에 Li 등[20]은 제트 판과 충돌면 사이 간격이 좁은( $h/d=1$ ) 충돌제트인 경우에 대하여 SST  $k-\omega$ , BSL  $k-\omega$  등 6개의 난류 모델로 수치해석을 수행하고 실

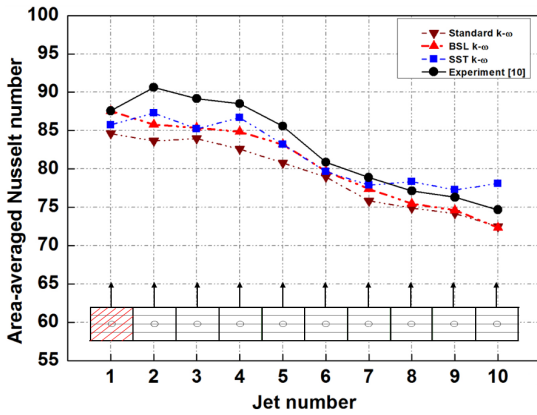


Fig. 3 Comparison of calculated and experimental results for corrugated structure.

험결과와 비교하였으며, SST  $k-\omega$ 와 BSL  $k-\omega$  모델을 적용한 해석 결과가 실험치와 잘 일치한다고 제시하였다. BSL  $k-\omega$  모델[16,21]은 SST  $k-\omega$  모델과 동일하게 벽면 근처에서는 표준  $k-\omega$  모델을 사용하고 바깥쪽에서는 표준  $k-\varepsilon$  모델을 사용하지만, 표준  $k-\varepsilon$  모델내의 상수 및 난류 점성계수(Turbulent Viscosity)의 정의에서 차이가 있다.

본 수치해의 타당성을 검증하기 위해 파형 형상에 대해 실험을 수행한 Esposito 등[10]의 실험치와 비교하였다. Fig. 3은 각 제트 홀 기준으로 면적 평균한 충돌면의 Nusselt 수 변화에 대해 실험과 수치해석 결과를 보여준다. 실험에서는 1번에 접한 좌측 벽면을 통한 열전도가 고려되므로 인해 충돌제트 효과가 저하되어 1번이 인접한 2번 보다 Nusselt 수가 좀 낮은 값을 나타내며, 수치해석에서 충돌면은 일정한 온도를, 나머지 면은 단열조건을 적용했으며 난류 모델에 따라 차이는 있지만 1번에서 Nusselt 수는 2번 보다 약간 높거나 낮은 값을 보였다. 난류 모델 적용에 따른 영향을 살펴보면 표준  $k-\omega$  모델은 전반적으로 실험치 보다 낮았고, SST  $k-\omega$  모델은 제트 홀 전반부(홀 1~7)에서는 실험치 보다 낮고 후반부(홀 8~10)에서는 높은 값을 보이는 반면에, BSL  $k-\omega$  모델은 제트 홀 전반부나 후반부에서 실험치 보다 다소 낮게 예측되나 유사한 변화 경향을 나타내었다.

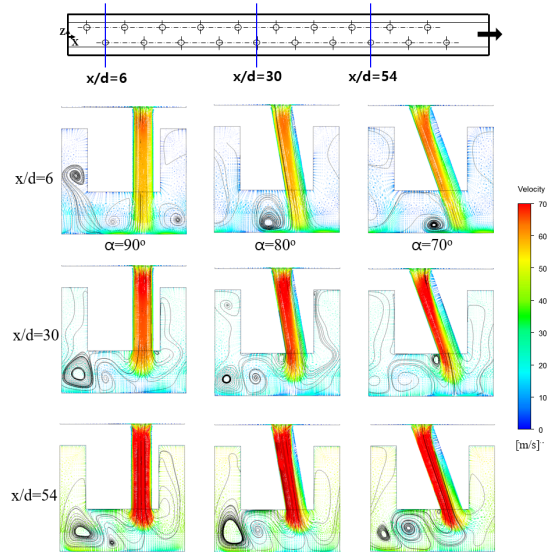


Fig. 4 Velocity vectors and streamlines at spanwise section for  $\alpha=90^\circ, 80^\circ, 70^\circ$  with  $\beta=90^\circ$ .

### 3.2 Spanwise 단면에서 경사각도( $\alpha$ ) 변화의 영향

Fig. 4는 Spanwise 단면의  $x/d=6, 30, 54$ 인 위치에서 충돌제트의 경사각도  $\alpha$ 를  $90^\circ, 80^\circ, 70^\circ$ 로 감소시킨 경우에 유동장을 나타낸다. 그림에서 보듯이 경사각도에 따라서 유동장이 변하는 것을 볼 수 있으며 Vortex의 크기도 서로 차이가 있었다. 제트 홀에서 속도는  $x/d=6$  보다  $x/d=54$  위치에서 더 빨라지는 것(붉은색이 많음)을 볼 수 있다. 이는 제트 홀 후방으로 갈수록 앞선 홀에서 유입된 유량이 누적되어 충돌면에 평행한 횡방향 유동 속도가 빨라져서 압력이 낮아지게 되며, 제트홀 상부와 하부의 압력 차이가 커짐에 따라 야기된 현상이다. Fig. 5는 Spanwise 단면에서 충돌제트의 경사각도  $\alpha$  변화에 따른 각 제트 홀의 질량유량 변화를 정량적으로 보여준다. 각 제트 홀의 평균 질량유량은  $0.43 \text{ g/s}$ 로, 제트 홀 12번이 평균 질량유량이 낮고 제트 홀 전방에서 후방으로 갈수록 질량유량은 점차적으로 증가하였으나, 경사각도  $\alpha$  변화에 따라 각 제트 홀에서 질량유량 차이는 거의 없었다.

Fig. 6은 충돌제트의 경사각도  $\alpha$ 를  $90^\circ, 80^\circ, 70^\circ$ 로 감소시킨 경우에 충돌면에서 Nusselt 수

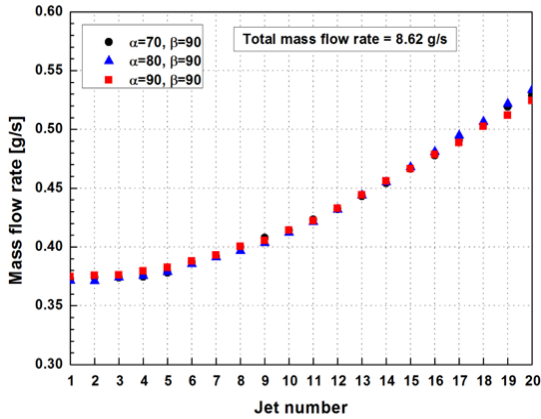


Fig. 5 Variations of mass flow rates of each jet hole for  $\alpha=90^\circ, 80^\circ, 70^\circ$  with  $\beta=90^\circ$ .

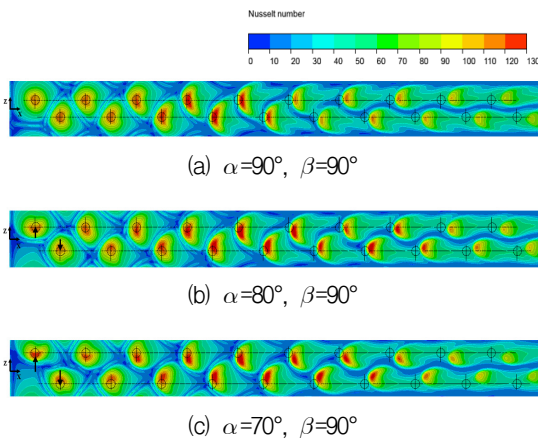
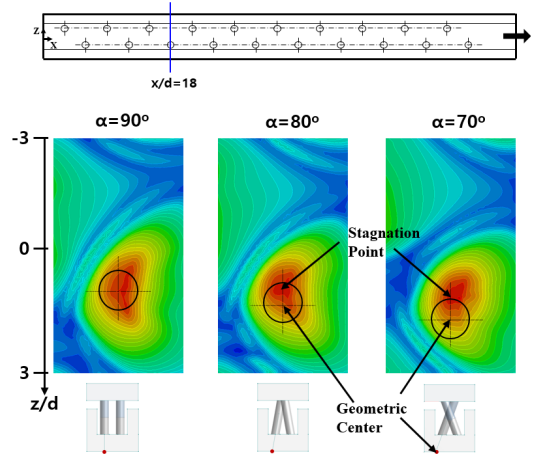


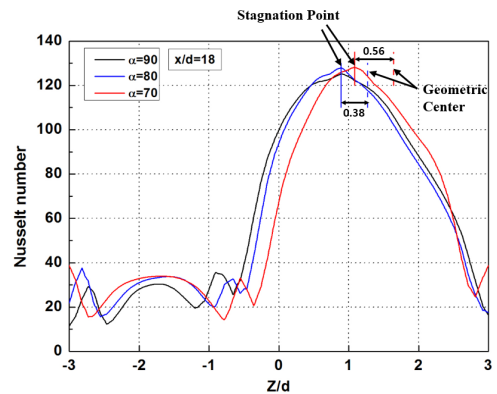
Fig. 6 Nusselt number contours on target surface for  $\alpha=90^\circ, 80^\circ, 70^\circ$  with  $\beta=90^\circ$ .

분포를 나타낸다. 그림에서 보듯이 경사각도  $\alpha$ 가  $90^\circ$ 에서  $80^\circ$ 로 작아질수록 횡방향 유동 영향이 줄어들어 특히 하류 제트 홀에서 Nusselt 수가 더 높아졌으나 경사각도  $\alpha$ 가  $70^\circ$ 로 더 작아지면 오히려 낮아지는 것으로 볼 수 있다. 이를 통해 충돌면에서의 열전달을 좋게 하는 경사각도가 존재함을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 충돌체트의 경사각도( $\alpha$ )를  $90^\circ, 80^\circ, 70^\circ$ 로 감소시킨 경우에  $x/d=18$  부근에서 충돌면의 Nusselt 수 상세 분포도 및  $x/d=18$  단면에서 Span 방향으로 Nusselt 분포를 나타낸다. Fig. 7(a)에서 보듯이 경사각도  $\alpha$ 가  $90^\circ$ 인 경우에는



(a) Nusselt number contours near  $x/d=18$



(b) Nusselt number distributions at  $x/d=18$

Fig. 7 Geometric centers and stagnation points on target surface for  $\alpha=90^\circ, 80^\circ, 70^\circ$  with  $\beta=90^\circ$ .

충돌면에 부딪치는 충돌체트의 기하학적 중심과 열전달이 최대가 되는 정체점의 위치가 일치하지만 경사각도  $\alpha$ 가  $80^\circ, 70^\circ$ 로 점차 감소할수록 정체점이 기하학적 중심으로부터 더 멀어지는 것을 볼 수 있다. Fig. 7(b)에서 경사각도 변화함에 따라 정체점이 기하학적 중심으로부터 이동한 거리를 정량적으로 살펴보면, 경사각도  $\alpha$ 가  $80^\circ$ 에서는  $0.38 \text{ mm}$ ,  $70^\circ$ 에서는  $0.56 \text{ mm}$  이동하였다.

Table 2는 유량공급 채널 입구와 충돌면 채널 출구 간의 압력강하, 충돌면에서 면적 평균된 Nusselt 수 및 열적 성능 지수를 나타낸다. 표에



서 보듯이 충돌제트의 경사각도에 따른 채널 입, 출구간의 압력강하 특성을 살펴보면 경사각도  $\alpha$ 가 90°에서 80°로 작아지면 압력강하는 115 Pa 이었고, 70°로 더 작아지면 압력강하는 99 Pa로 감소폭이 줄어들었다. 또한 경사각도  $\alpha$ 에 따른 평균 Nusselt 수 변화를 보면 경사각도 90°에서 80°로 작아지면 Nusselt 수가 1.48 증가하여 좋아졌지만 70°로 더 작아지면 Nusselt 수는 반대로 3.31 더 크게 감소하여 열전달 효과의 저하를 가져왔다. 따라서 압력강하와 열전달을 동시에 고려하는 열적 성능( $\eta$ ) 측면에서 보면  $\alpha=90^\circ$ , 80°, 70° 중에서  $\alpha=80^\circ$ 가 제일 우수하였다. 이러한 현상의 원인으로는 Fig. 4에서 보듯이 경사각도  $\alpha$ 가 90°에서 70°로 감소할수록 제트 홀의 상부에서 유동이 박리되어 Vena Contracta 현상이 더 크게 발생되어 실제 유동이 지나가는 단면적이 좁아지게 되면서 제트 홀의 전체 단면에서 속도분포가 불균일하게 되며, 이러한 불균일한 속도 분포로 인해 충돌면 채널에서 Vortex 크기나 위치에서 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 5를 자세히 보면 제트 홀 후방(15-20번)에서 질량 유량은 경사각도  $\alpha=80^\circ$ 가 90°나 70° 보다 약간 큰 것을 볼 수 있으며 이는 충돌제트의 유속이 80°에서 커서 배열 충돌제트인 경우 후방에서 야기되는 횡방향 유동 영향을 상대적으로 적게받는 요인이 될 수 있다. 또한 Fig. 6에서 경사각도  $\alpha$ 가 80°인 경우에 제트 홀 바로 밑에

서 Nusselt 수는 특히 제트 홀 후방에서 90°나 70° 보다 횡방향 유동 영향을 적게 받아 상대적으로 높게 나타남을 볼 수 있다. 따라서 압력강하는 경사각도  $\alpha$ 가 작아질수록 점차적으로 크게 되지만 충돌면의 평균 Nusselt 수는 80°에서 최대가 되어 열적성능( $\eta$ )은 80°에서 제일 높게 나타난 것으로 보인다.

### 3.3 Streamwise 단면에서 경사각도( $\beta$ ) 변화의 영향

Fig. 8은 Spanwise 단면에서 충돌제트의 경사각도  $\alpha$ 는 90°로 고정하고 Streamwise 단면에서 충돌제트의 경사각도  $\beta$ 를 70°, 90°, 110°로 증가시킨 경우에 제트 홀 중심에서 Stream 방향 단면의 유동장을 나타낸다. Fig. 8(a)에서 보듯이 경사각도  $\beta$ 가 90° 이하이면 횡방향 유동과 마주 보는 방향으로 분사하게 되므로 인해 횡방향 유동을 억제하는 효과가 있으며, 충돌제트가 기동 역할을 하여 제트 홀 전방(좌측)과 후방(우측)에 큰 재순환 유동영역이 생성되는 것으로 볼 수 있다. 또한 경사각도  $\beta$ 가 90° 이면 제트 홀 전방(좌측)에서만 큰 재순환 유동영역이 생성되었다. 그러나 경사각도  $\beta$ 가 90° 이상이면 횡방향 유동과 같은 방향으로 분사하게 되어 횡방향 유동을 크게 받게 되고, 충돌제트 부근의 재순환 유동은 거의 발생하지 않았다.

Fig. 9는 충돌제트의 경사각도  $\beta$  변화에 따른 각 제트 홀에서의 Reynolds 수 변화를 정량적으로 보여준다. 제트 홀 후방으로 갈수록 Reynolds 수가 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 제트 홀 후방으로 갈수록 누적된 유량 증가로 횡방향 유동 속도가 빨라져서 압력이 낮아지게 되며, 이로 인해 후방 제트 홀에서 질량유량이 증가하게 되어 야기된 현상이다. 경사각도  $\beta$ 가 클수록 전방(1번)과 후방(20번) 제트 홀 간의 Reynolds 수 차이는 줄어들었고 경사각도  $\beta$ 가 70° 인 경우에 Reynolds 수는 8,390~12,998로, 110° 인 경우에는 9,341~11,192로 변화였다. 제트 홀 12번에서는 경사각도에 상관없이 Reynolds 수는 거의 일치하였다.

Fig. 10은 충돌제트의 경사각도  $\beta$ 를 70°, 90°, 110°로 증가시킨 경우에 충돌면에서 Nusselt 수

Table 2. Pressure drop, average Nusselt number and thermal performance for  $\alpha=90^\circ$ , 80°, 70° with  $\beta=90^\circ$ .

Item	$\alpha=90^\circ$	$\alpha=80^\circ$	$\alpha=70^\circ$
Pressure Drop Between Channel Inlet and Outlet (Pa)	4,388	4,503	4,602
Averaged Nusselt Number on Target Surface	44.03	45.51	42.20
Thermal Performance ( $\eta$ )	1.000	1.025	0.988

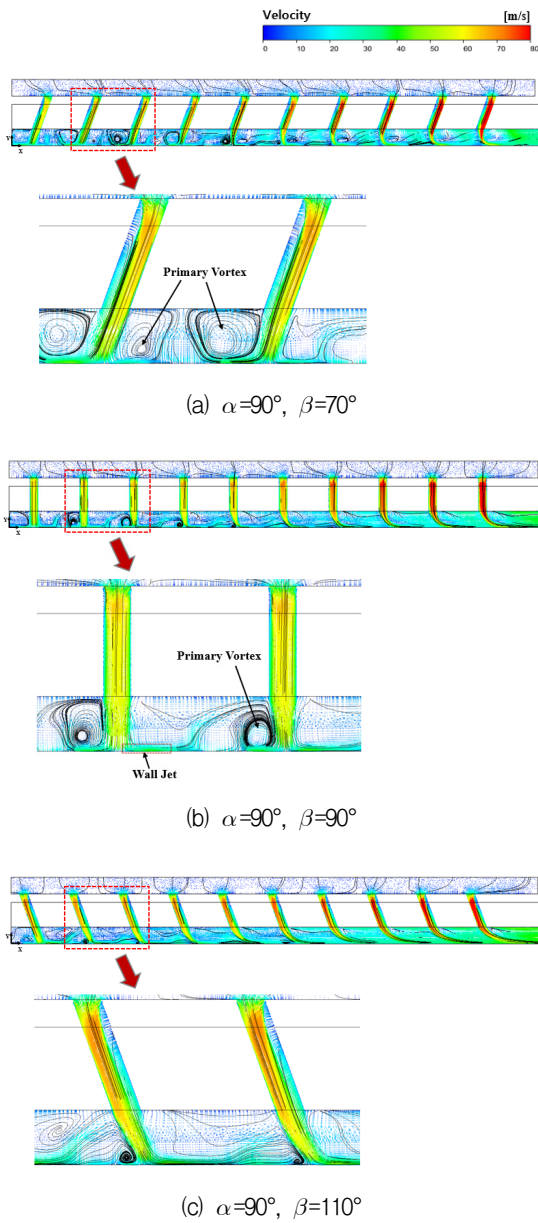


Fig. 8 Velocity vectors and streamlines along target plane for  $\beta=70^\circ, 90^\circ, 110^\circ$  with  $\alpha=90^\circ$ .

분포를 나타낸다. 그림에서 보듯이 경사각도  $\beta$ 가  $70^\circ$ 인 경우에는 제트 홀 밑에서 전반적으로 높은 Nusselt 수를 보여주지만, 경사각도가 커질수록 횡방향 유동 영향을 더 크게 받으므로 인해 특히 채널 후방으로 갈수록 제트 홀 부근에서 Nusselt 수가 크게 저하되었다.

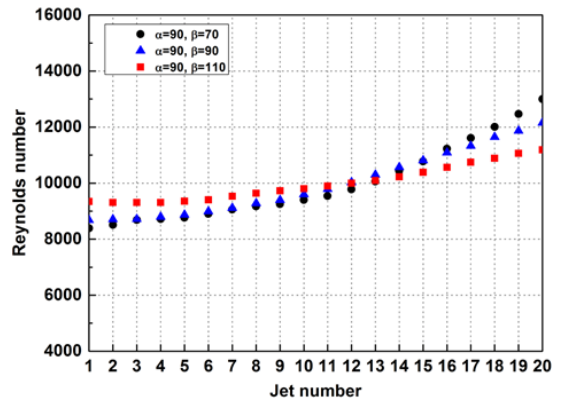


Fig. 9 Variations of Reynolds numbers of each jet hole for  $\beta=70^\circ, 90^\circ, 110^\circ$  with  $\alpha=90^\circ$ .

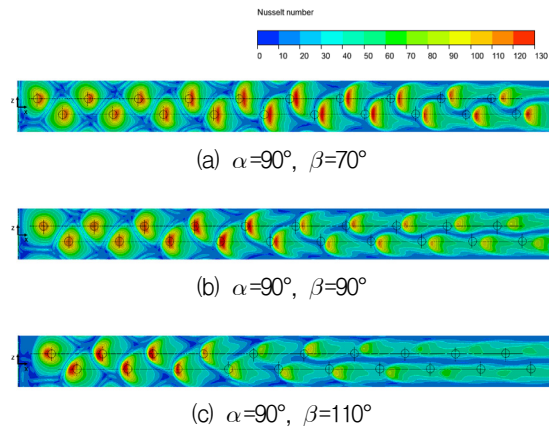


Fig. 10 Nusselt number contours on target surface for  $\beta=70^\circ, 90^\circ, 110^\circ$  with  $\alpha=90^\circ$ .

Fig. 11은 충돌제트의 경사각도  $\alpha$ 와  $\beta$ 가 모두  $90^\circ$ 인 경우 즉, 수직 충돌제트인 경우에 Nusselt 수 분포를 나타낸다. 그림에서 보듯이 제트 홀 바로 밑의 정체점에서 Nusselt 수가 최대로 되고 정체점에서 벗어나갈수록 감소했다가 인접한 제트와 만나는 충돌지점에서 2차 재순환 유동으로 인해 다시 약간 상승하는 것을 볼 수 있다.

Table 3은 유량공급 채널 입구와 충돌면 채널 출구 간의 압력강하, 충돌면에서 면적 평균된 Nusselt 수 및 열적 성능 지수를 나타낸다. 표에서 보듯이 충돌제트의 경사각도  $\beta$ 가 작아질수록 충돌면에서 평균 Nusselt 수가 증가하여 좋아졌지만 압력강하도 크게 되어 상반된 현상이 야기



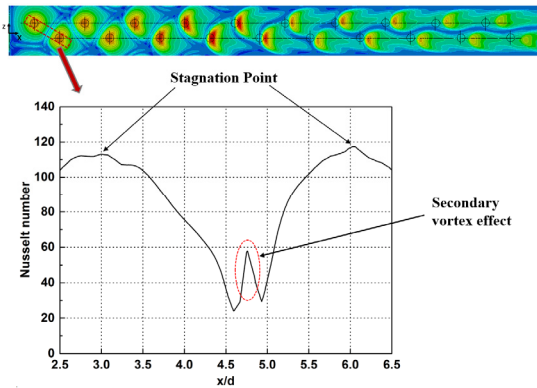


Fig. 11 Nusselt number distributions on target surface between the first and second jet holes for  $\beta=90^\circ$  and  $\alpha=90^\circ$ .

Table 3. Pressure drop, average Nusselt number and thermal performance for  $\beta=70^\circ, 90^\circ, 110^\circ$  with  $\alpha=90^\circ$ .

Item	$\beta=70^\circ$	$\beta=90^\circ$	$\beta=110^\circ$
Pressure Drop Between Channel Inlet and Outlet (Pa)	5,790	4,388	4,038
Averaged Nusselt Number on Target Surface	48.61	44.03	37.69
Thermal Performance ( $\eta$ )	1.007	1.000	0.880

되었다. 따라서 전체적인 열적 성능( $\eta$ ) 측면을 고려하면  $\beta=70^\circ$  가 제일 우수하였다.

#### 4. 결 론

파형 구조에서 충돌제트의 경사각도가 채널 내의 횡방향 유동과 충돌면에서 열유동 특성에 미치는 영향 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Spanwise 단면의 경사각도( $\alpha$ )를 변화시키는 경우, 각도가  $90^\circ$ 에서  $80^\circ$ 로 작아질수록 평균 Nusselt 수가 증가하였으나  $70^\circ$ 로 더

작아지면 오히려 감소하였다. 또한 경사각도가 작아질수록 압력강하는 점차적으로 크게 되었다. 따라서 열전달과 압력강하를 동시에 고려하는 열적 성능 측면에서 보면 경사각도  $80^\circ$ 가 제일 좋았다. 이는 경사각도가 작아질수록 제트 홀 단면에서 속도 분포가 더 불균일하게 되어 충돌면 채널에서 Vortex 크기나 위치에서 차이가 나고, 제트 홀 후방에서 질량유량은  $80^\circ$ 에서 최대가 되는 등 여러 가지 복잡한 유동특성이 횡방향 유동에 영향을 주어 생긴 현상으로 사료된다.

- 2) Streamwise 단면의 경사각도( $\beta$ )를 변화시키는 경우, 각도가  $90^\circ$  이하이면 횡방향 유동을 억제하는 효과가 있고 제트 홀 부근에 큰 재순환 유동이 생성되었으나  $90^\circ$  이상이면 횡방향 유동을 크게 받아 채널 후방으로 갈수록 제트 홀 부근에서 대류열전달계수는 크게 저하되었다.

#### 후 기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20144030200560)입니다.

#### References

1. Han, J., Dutta, S. and Ekkad, S., *Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology*, CRC Press, New York, N.Y., U.S.A., 2013.
2. Liu, H.H.T. and Hua, J., "Three-Dimensional Integrated Thermodynamic Simulation for Wing Anti-Icing System," *Journal of Aircraft*, Vol. 41, No. 6, pp. 1291-1297, 2004.
3. Wang, B., Guo, X., Xie, O., Wang, Z. and Wang, G., "Heat Transfer Characteristic

- Research During Jet Impinging on Top/Bottom Hot Steel Plate," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 101, pp. 844-851, 2016.
4. Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M.A. and Button, B.L., "A Review of Heat Transfer Data for Single Circular Jet Impingement," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 13, Issue 2, pp. 106-115, 1992.
  5. Viskanta, R., "Heat Transfer to Impinging Isothermal Gas and Flame Jet," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 6, Issue 2, pp. 111-134, 1993.
  6. Goldstein, R.J. and Franchett, M.E., "Heat Transfer From a Flat Surface to an Oblique Impinging Jet," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 110, Issue 1, pp. 84-90, 1988.
  7. Vipat, O., Feng, S.S., Kim, T., Pradeep, A.M. and Lu, T.J., "Asymmetric Entrainment Effect on the Local Surface Temperature of a Flat Plate Heated by an Obliquely Impinging Two-Dimensional Jet," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, Issue 21-22, pp. 5250-5257, 2009.
  8. Weigand, B. and Spring, S., "Multiple Jet Impingement - A Review," *Heat Transfer Research*, Vol. 42, Issue 2, pp. 101-142, 2011.
  9. Hwang, B.J., Chung, H., Joo, W.G. and Cho, H.H., "Numerical Analysis on the Effects of Supply Channel and Jet Hole Arrangement on Heat Flow Characteristics of Impingement Jet," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20, No. 4, pp. 77-86, 2016.
  10. Esposito, E.L., Ekkad, S.V., Kim, Y. and Dutta, P., "Comparing Extended Port and Corrugated Wall Jet Impingement Geometry for Combustor Liner Backside Cooling," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea and Air*, Montreal, Canada, GT 2007-27390, May 2007.
  11. Yang, L., Li, W., Chi, Z., Ren, J. and Jiang, H., "Effect of Corrugated Orifice and Pin-Fin on Multiple Array Impingement Cooling with Low Nozzle to Target Distance," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition*, Dusseldorf, Germany, GT 2014-25494, Jun. 2014.
  12. Chi, Z., Kan, R., Ren, J. and Jiang, H., "Experimental and Numerical Study of the Anti-Crossflows Impingement Cooling Structure," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 64, pp. 567-580, 2013.
  13. Correia, V.H.S., "Impingement Cooling Apparatus for Turbine Shrouds having Ducts of Increasing Cross-Sectional Area in the Direction of Post-Impingement Cooling Flow," U.S. Patent No. 5480281, Jan. 1996.
  14. Haumann, J., Knopfli, A., Sattelmayer, T. and Tresch, R., "Apparatus for Impingement Cooling," U.S. Patent No. 5467815, Nov. 1995.
  15. Bunker, R.S., "Cooling for Double-Wall Structures," U.S. Patent No. 6000908, Dec. 1999.
  16. Menter, F.R., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605, 1994.
  17. Zuckerman, N. and Lior, N., "Impingement Heat Transfer : Corrections and Numerical Modeling," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 127, Issue 5, pp. 544-552, May 2005.
  18. Hofmann, H.M., Kaiser, R., Kind, M. and Martin, H., "Calculations of Steady and Pulsating Impinging Jets - An Assessment of 13 Widely Used Turbulence Models," *Numerical Heat Transfer, Part B*, Vol. 51, Issue 6, pp. 565-583, 2007.

- 
19. Sagot, B., Antonimi, G., Christgen, A. and Buron, F., "Jet Impingement Heat Transfer on a Flat Plate at a Constant Wall Temperature," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47, Issue 12, pp. 1610-1619, 2008.
20. Li, W., Ren, J., Hongde, J. and Ligrani, P., "Assessment of Six Turbulence Models for Modeling and Predicting Narrow Passage Flows, Part 1: Impingement Jets," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 69, No. 2, Issue 2, pp. 109-127, 2016.
21. Isman, M.K. Morris, P.J. and Can M., "Investigation of Laminar to Turbulent Transition Phenomena Effects on Impingement Heat Transfer," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No, 10, pp. 2027-2036, Nov. 2016.