

엇갈리게 기울어진 충돌제트들에 의한 오목면 상의 열전달 성능해석

허 만 응,¹ 이 기 돈,¹ 김 광 용*²

ANALYSIS OF HEAT TRANSFER OF INCLINED IMPINGING JETS ON A CONCAVE SURFACE

M.W. Heo,¹ K.D. Lee¹ and K.Y. Kim*²

Numerical analyses have been carried out to analyze the three-dimensional turbulent heat transfer by impingement jet on a concave surface with variation of geometric configurations. Three-dimensional Reynolds averaged Navier-stokes equations have been calculated using the shear stress transport turbulent model. The numerical results for heat transfer rate were validated in comparison with the experimental data. The distance between jet nozzles and angle of inclined jet nozzle were selected as the geometric variables. Area-averaged Nusselt numbers on concave surface are evaluated to find the characteristics of heat transfer with the two geometric variables. The heat transfer increases as the distance between jet nozzles increases, and the inclined impinging jets show much better heat transfer performance than the vertical impinging jet.

Key Words : 충돌제트(Impinging Jet), 기울어진 노즐(Inclined Nozzle), 오목 면(Concave plate), 누셀트 수(Nusselt Number), 열전달(Heat Transfer), 삼차원 레이놀즈 평균 나비에-스톡스 방정식(Three-Dimensional Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation)

1. 서 론

충돌제트 냉각은 유체를 냉각면을 향해 분사함으로써 강제대류를 발생시켜 물체를 냉각시키는 방법으로서 열전달을 효과적으로 증가시킬 수 있기 때문에 고온에 노출되는 가스터빈 블레이드 등의 냉각을 위한 목적으로 널리 사용되고 있다.

충돌제트의 유동 및 열전달 특성은 분사속도, 노즐의 배열, 노즐 홀의 출구형상, 노즐과 충돌 면 사이의 거리, 충돌면의 형상 등 많은 인자들의 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 지난 수십 년 동안 이 특성을 이해하기 위한 많은 연구가 수행되어 왔다. 단일 노즐로부터 분사된 유체와 평판사이의 열전달 성능에 관한 연구들이 주로 이루어졌다. Bouchez 과 Goldstein[1] 은 노즐과 충돌면 사이의 거리를 변화시키며 일

정한 열유속조건을 갖는 충돌면에서의 열전달특성을 조사하기 위한 실험을 수행하였다. 이외에도 노즐과 충돌면 사이의 거리 뿐 아니라 레이놀즈수 등 다양한 변수들의 변화에 따른 충돌면에서의 열전달 성능의 변화를 파악하기 위한 연구들이 다수 수행되었다[2-5].

한편, 여러 개의 노즐이 있는 경우는 단일 노즐의 경우와 달리 분사된 제트유동이 이웃한 것과 서로 상호작용하여 복잡한 난류 열유동특성을 보이게 된다. Zu 등[6]은 다중제트노즐의 일렬(in-line)과 엇갈림(staggered) 배열에 따른 평판에서의 열전달계수를 비교하기 위하여 수치적 연구를 수행하였다. 또한, Rao 등[7]은 다열(29×29) 제트노즐에 대한 수치해석을 수행함에 있어 주기조건이 고려된 일렬만을 계산영역에 포함하여 열유동장을 해석하였고, 실험값과의 비교를 통해 SST (Shear Stress Transport) 난류모형을 사용한 해석결과와의 타당성을 입증하였다.

일반적으로 충돌제트냉각은 가스터빈 블레이드 내부 냉각 유로에서 전연(leading edge) 부분의 냉각을 위한 목적으로 많이 사용되고 있다. 블레이드 전연 부분 내부냉각유로의 냉각면은 오목한 곡면 형상을 갖고 있어서 평판면에 대한 충돌제트냉각과는 차별되는 열유동특성을 갖는다. Fenot 등[8]은 오

접수일: 2011년 1월 10일, 심사완료일: 2011년 4월 29일,

게재확정일: 2011년 5월 2일.

1 정희원, 인하대학교 대학원 기계공학과

2 정희원, 인하대학교 기계공학부

* Corresponding author, E-mail: kykim@inha.ac.kr

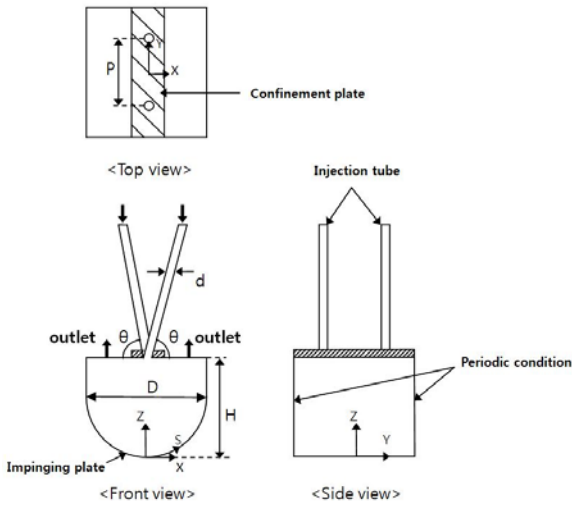


Fig. 1 Geometry and computational domain

목면에 대한 충돌제트의 열전달특성을 이해하기 위하여 오목면의 곡률(curvature)과 제트노즐 출구와 충돌 면 사이의 거리를 변화시켜 실험을 수행하였다. Lee 등[9]은 노즐의 기울기와 노즐출구와 오목 면 사이 거리변화에 따른 열 유동특성을 연구하였다. 이로부터 정체점에서 열전달은 노즐출구와 오목면 사이의 거리가 노즐직경의 약 6배가 되는 경우에 가장 좋은 성능을 보이고 이차 최고점이 발생하는 위치가 평판의 경우와 비교하여 다르다는 것을 확인했다. Kumar와 Prasad[10]는 오목한 형상을 대상으로 충돌제트의 열유동특성을 조사하기 위하여 수치해석을 수행하였고 Alvarez 등[11]은 엇갈리게 분사되도록 제트 노즐을 배열시킨 상태에서 실험과 수치해석의 결과치들을 비교하였다. 이들은 수치해석을 위한 난류모델로 실험치와의 비교를 통해 SST 모델을 추천하였다.

본 연구에서는 오목한 곡면에 대한 충돌제트냉각에서 형상 변화에 따른 충돌면의 열전달성능을 파악하기 위해 일련의 수치해석을 수행하였다. 삼차원 Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) 해석을 통해 일렬로 배열된 제트노즐들 사이의 간격과 엇갈림 분사를 위한 노즐의 기울기 변화에 따른 유동특성과 열전달 성능을 평가하였다.

2. 유동해석방법

본 연구에서는 블레이드 전연부 내부냉각유로 내 오목면에 대한 충돌제트의 삼차원 유동 및 열전달 특성을 RANS 방정식을 통해 해석하였으며, 해석을 위해서는 상용 CFD코드인 ANSYS CFX 11.0[12]를 사용하였다. 난류해석을 위해서는

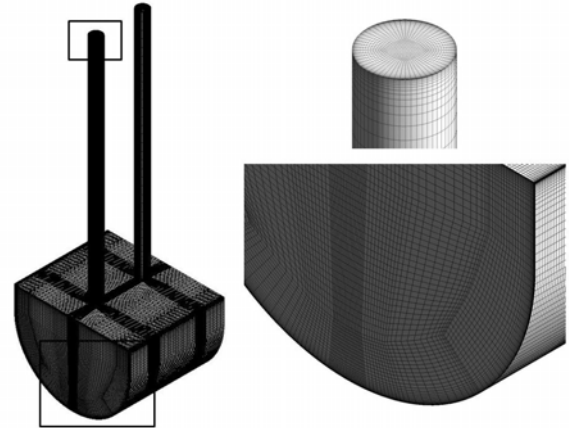


Fig. 2 Example of grid system

SST 난류모델을 사용하였다. 이 모델은 벽면 근처 유동영역에서는 $k-\omega$ 난류모델, 이 외의 영역에서는 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하는 모델로 역 압력구배로 인한 유동박리의 예측에 효과적이라고 알려져 있다[13].

본 연구에서는 오목한 형상의 충돌면의 중심선에 유체를 충돌시키기 위해 노즐들을 Fig. 1과 같이 배열시키고, 주기조건을 사용하여 그림에 나타난 것과 같이 두 개의 노즐만을 포함하는 계산영역에 대하여 해석을 수행하였다. 노즐의 길이는 유입된 유체의 완전발달을 위하여 노즐직경(d)의 20배 가 되도록 하였고, 채널의 높이(H)는 7배, 충돌면의 직경(D)은 10배이다. Fig. 2는 해석을 위하여 사용된 격자계를 보여준다. SST 난류모델의 저레이놀즈수 모델을 적용하기 위하여 벽면 근처의 첫 번째 격자점을 y^+ 가 2 이하가 되도록 위치시켰다. 또한 분사된 제트유동의 정확한 예측을 위하여 충돌이 발생되는 영역에 격자를 조밀하게 구성하였다.

계산을 위해 경계조건으로 Fig. 1과 같이 주기조건을 주었으며, 노즐 입구에는 등온(311°C)의 균일유속 조건을 주었고, 출구에는 일정 압력조건을 설정하였다. 충돌 면은 등온조건(273°C)이 부여되고 모든 벽면에는 점착(no-slip)조건이 적용되었다. 작동유체는 이상기체(공기, $Pr=0.7$)로 가정하였다. 작동유체의 비열량은 $1.004 \times 10^3 (\text{J/kg} \cdot \text{K})$, 동점성은 $1.831 \times 10^{-5} (\text{kg/m} \cdot \text{s})$ 그리고 열전도도는 $2.61 \times 10^{-2} (\text{W/m} \cdot \text{K})$ 이다.

한번 해석을 위해 Intel Xeon CPU E5420 (8CPUs) 를 사용하여 약 18시간이 소요되었다.

3. 형상변수 및 성능지수

형상 변수는 Fig. 1에 나타난 제트노즐의 직경에 대한 피

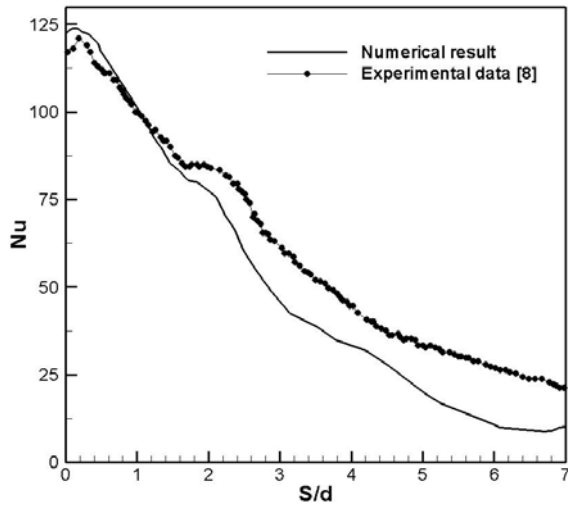


Fig.3 Comparison between predicted and measured Nusselt numbers

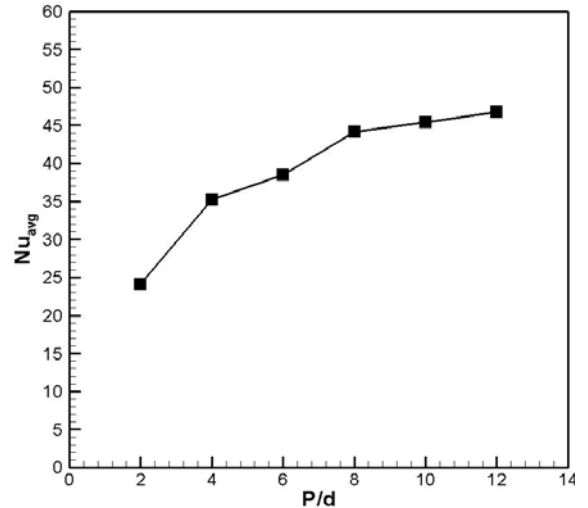


Fig.4 Area averaged Nu vs. jet nozzle pitch

치(P)의 비(P/d)와 엇갈리게 기울인 노즐의 각도(θ)이다. 본 연구에서는 냉각유로로 유입되는 전체 유량을 고정시킨 상태에서, 두 개의 형상변수인 P/d 와 θ 를 변화시키며 총돌 면에서의 열전달 특성을 조사하였다. 각 변수들의 범위는 Table 1에 나타난 바와 같이 설정하였다. 형상변수에 따른 총돌면에서의 열전달 성능을 비교하기 위하여 곡면에서 면적 평균한 누셀트(Nusselt)수를 성능지수로 정하고 다음과 같이 정의하였다.

$$\bar{N} = \frac{\bar{h}d}{\lambda} \tag{1}$$

여기서, λ는 열전도율이다. \bar{h} 는 곡면 상에서 면적 평균된 열전달계수이며 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{h} = \frac{\int_{-\pi D/4}^{\pi D/4} \int_0^{2P} \frac{q}{T_j - T_w} dy ds}{A} \tag{2}$$

여기서, q 는 열유속이고 T_j 는 제트유동의 온도, T_w 는 벽면의 온도를 나타내며 A는 곡면의 면적을 나타낸다.

Table 1 Design variables and design space

Design variable	Lower bound	Upper bound
P/d	2	12
θ	40	90

4. 결과 및 검토

본 연구에서는 유동해석의 타당성을 검증하기 위하여 Fenot 등[8]의 오목면에 대한 총돌제트의 실험과 동일한 유동장 형상(H/d=7, d/D=0.1, P/d=4)을 계산하여 계산치와 실험치를 비교하였다. Fig. 3은 오목면을 따른 국부 누셀트수 분포에 대해 Fenot 등[8]의 실험결과와 유동해석의 결과를 비교해 놓은 그래프이다. 계산은 Re_j=23,000 과 T_j-T_w=38 °C의 조건에서 수행하였다. Fig. 3에서 확인할 수 있는 바와 같이 계산된 결과는 실험값과 대체적으로 좋은 일치성을 보인다. 실험치의 Nu분포는 S/d≈0.2에서 최대 Nu값을 갖고 S/d=2 근처에서 기울기변화를 보인다. 그러나, 계산치는 이 S/d=2 근처에서 완화된 기울기를 잘 예측하지 못하여 이후 실험치 보다 낮은 값을 나타내고 있다. 이는 총돌 이후 생기는 벽제트유동(wall jet)이 층류에서 난류로 천이하는 현상을 반영하지 못하는 난류모델로 인해 발생하는 오차로 사료된다. Fig. 4는 제트노즐 사이 간격(P/d)의 변화에 따른 총돌 면에서 면적 평균한 Nu수의 변화를 그래프로 보여준다. 채널로 유입되는 전체유량을 고정시키기 위하여 제트노즐 사이 간격이 변함에 따라 단일 제트노즐로 유입되는 유량을 변화시켰다. P/d=8의 경우는 P/d=4일 때보다 단일제트노즐로 두 배의 유량을 유입시켰고 마찬가지로 P/d=2의 경우는 P/d=4의 경우와 비교하여 절반의 유량을 단일제트노즐로 유입시켰다. P/d 의 증가에 따라 열전달계수는 증가하는 경향을 보이고 있으나 증가율은 서서히 감소하여 P/d 가 8 이상이 되면 열전달성능의 변화폭이 낮아짐을 알 수 있다. 이는 노즐사이 간격이 커질수록 제트유동

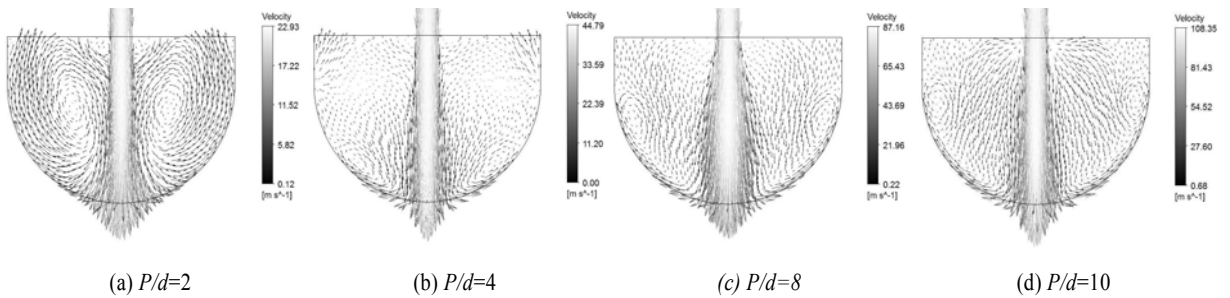


Fig.5 Velocity vector plots on x-z plane with different P/d($\theta=90^\circ$)

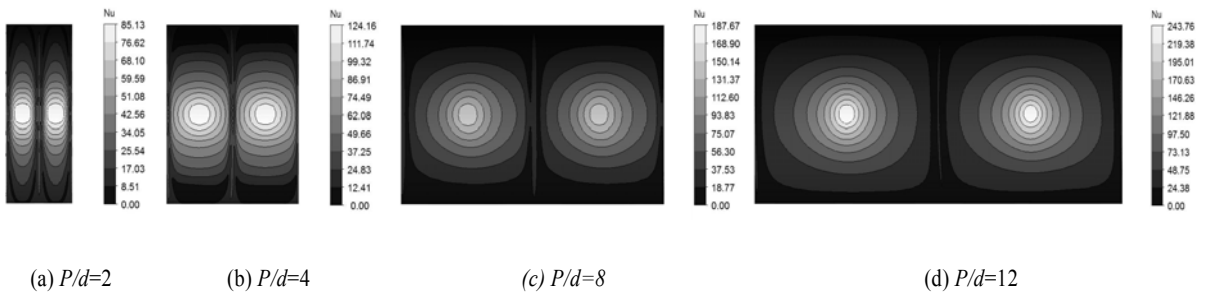


Fig.6 Nusselt number contours on concave wall with different P/d ($\theta=90^\circ$)

간의 간섭이 줄어들어 열전달이 증가하는 것으로 사료된다. Fig. 5에 나타낸 x-z 평면상의 속도벡터분포를 통해 90도의 노즐기울기에서 P/d의 변화에 따른 제트유동의 구조변화를 알 수 있다. 노즐 사이 간격이 증가할수록 단일노즐로 유입되는 유체유량은 증가하므로 분사속도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. P/d = 2에서는 유동장을 가득 채우는 두 개의 대칭형의 큰 재순환유동이 발생하고 있으나 P/d = 4, 8 및 10에서는 크기가 현저히 줄어든 재순환유동이 곡면 근처에서 발생함을 알 수 있다. 이 재순환유동은 충돌로 발생된 벽제트유동과 상대적으로 정체된 주변유동 사이의 상호작용에 의해 발생하는 것으로 사료된다. P/d가 4에서 8로 증가하면서 이 재순환유동의 중심은 곡면을 따라 하류로 이동하고 있으나 P/d = 8 이후에서는 재순환유동의 위치에 변화가 없음을 알 수 있다. 이 현상이 Fig. 4에 나타난 평균 Nu수의 변화와 정성적으로 일치하는 것은 상대적으로 속도가 큰 벽제트유동이 발생하는 곡면 상의 영역, 즉 높은 열전달 영역이 재순환유동이 하류로 이동하면서 확대되기 때문이다.

Fig. 6은 곡면에서의 Nu분포를 보여준다. 제트노즐 사이간격이 증가할수록 단일제트로 유입되는 유량은 증가하므로 분사속도가 상승하고 이로 인해 충돌면의 정체 점에서 열전달 계수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 충돌 후에

y방향으로 생기는 벽제트유동이 이웃한 노즐로부터 생성된 것과 상호작용을 하며 노즐 사이 중간영역에서 열전달은 국부적으로 증가하게 된다. 그러나 P/d가 증가할수록 노즐사이 거리가 멀어져 이와 같은 효과는 줄어든다. 결과적으로 P/d가 증가할수록 정체 점에서 열전달은 증가하지만 노즐사이 중간 영역에서는 열전달이 줄어들어 P/d>8에서의 성능지수 값은 큰 차이를 보이지 않게 된다.

Fig. 7은 P/d=4에서 제트노즐의 기울기변화에 따른 곡면에서의 면적평균 Nu수의 변화를 보여준다. 일렬로 배열된 노즐 들은 서로 엇갈리게 기울어진다. 노즐을 기울일 경우 $\Theta = 60^\circ$ 에서 최대 열전달 효과를 가짐을 확인할 수 있다. Fig. 8은 제트노즐의 기울기 변화에 따른 곡면 상 정체점에서의 Nu수의 변화를 나타낸다. 경사가 60도 이하의 경우 노즐기울기의 증가에 따라 Nu값은 소폭 증가하는 경향을 갖는다. 반면에 60도 이상의 경우에는 정체점에서의 Nu수는 노즐기울기의 증가에 따라 급격하게 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 9는 곡면에서의 Nu수 분포를 보여준다. 노즐이 엇갈리게 기울어져 있으므로 충돌이 발생하는 영역이 왼쪽과 오른쪽으로 나뉘어 발생한다. 왼쪽과 오른쪽 각 부분에서 이웃한 제트유동과의 상호작용으로 중간 영역에서 열전달계수가 커지는 영역이 발생함을 알 수 있다. 열전달은 60도에서 가장

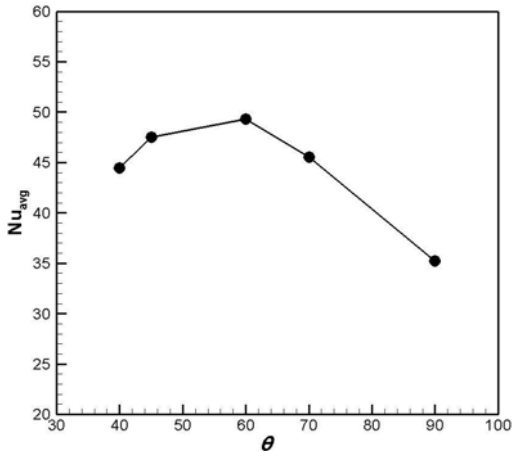


Fig.7 Area averaged Nu vs. inclined nozzle angle (P/d=4)

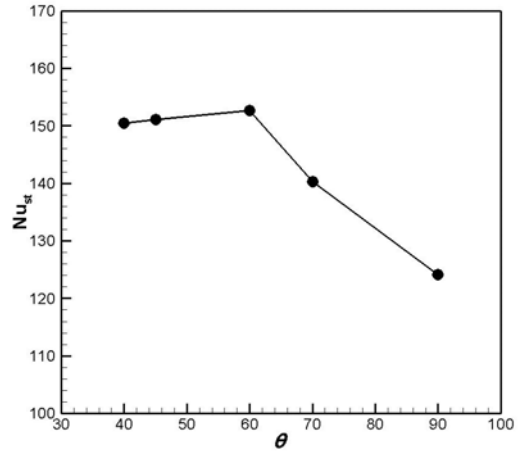


Fig.8 Nu at stagnation point vs. inclined nozzle angle (P/d=4)

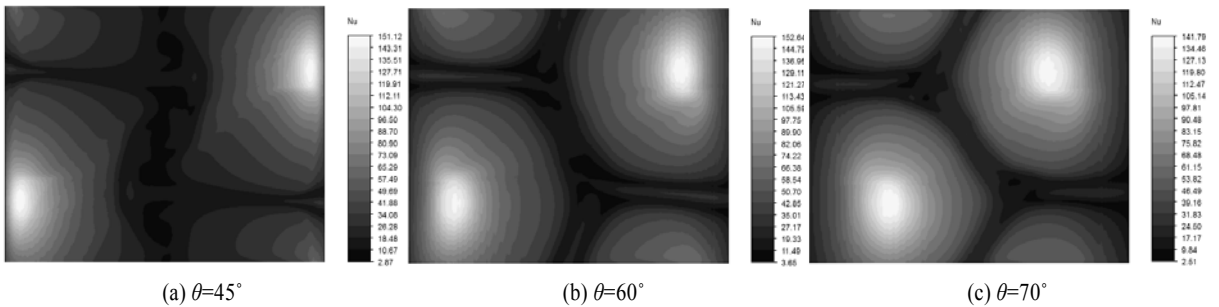


Fig.9 Nu contours on concave wall with different inclined nozzle angles

크게 발생되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 노즐기울기 변화에 따른 x-z평면에서의 속도벡터 분포를 보여준다. 노즐로부터 분사된 유체는 곡면에 충돌한 후 벽면을 따라 벽 제트유동을 형성하며 재순환유동을 만든다. 이 재순환 유동은 충돌면과 유체 사이의 열전달을 증진시킨다. 60도 이하에서는 노즐기울기가 증가할수록 재순환유동의 크기가 커지는 경향이 있고, 60도 이상에서는 다시 작아지는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 곡면 상의 총돌제트시스템에 대하여 유동 및 열전달의 수치해석을 수행하였다. 주유로에 유입되는 전체 유량을 고정시킨 상태에서 노즐직경에 대한 노즐 사이 거리의 비(P/d)와 노즐 기울기에 따른 난류열전달특성을 검토하였다. 두 형상변수에 따라 열전달 성능에 영향을 미치는 재순환 유동의 위치와 크기가 변하는 것을 확인할 수 있었다. 제트노즐 사이 거리가 증가함에 따라 열전달은 증가하나 증가율은

이 거리의 증가에 따라 감소하여 P/d=8 이상에서는 열전달 성능의 변화가 크지 않다. 제트노즐을 엇갈리게 기울일 경우 수직총돌의 경우와 비교하여 열전달 성능이 크게 향상하는 것을 확인할 수 있었다. 노즐의 기울임 각도가 60도인 경우에서 가장 큰 재순환유동이 형성되고 열전달성능도 최대가 된다.

후 기

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받은 '다중현상 CFD연구센터(ERC)'의 과제료 수행된 연구임(No.20090083510).

참고문헌

[1] 1975, Bouchez, J.P. and Goldstein, R.J., "Impingement

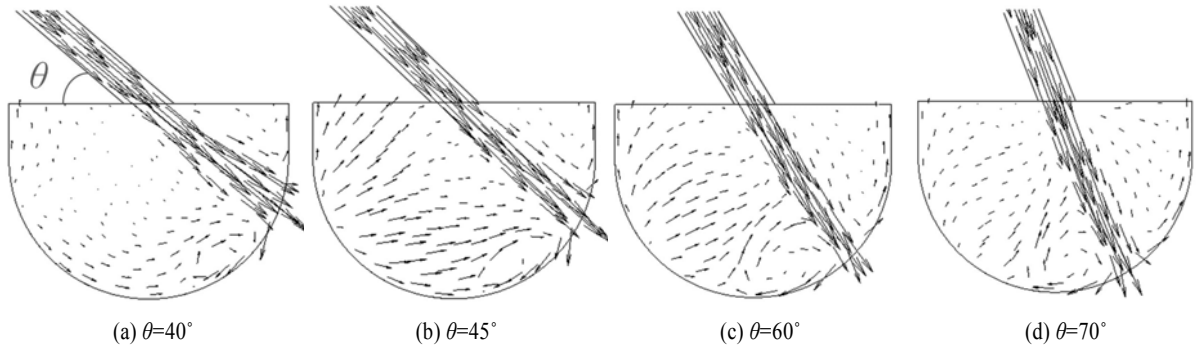


Fig.10 Velocity vectors on x-z plane with different inclined nozzle angles (40, 45, 60 and 70°)

- Cooling from a Circular Jet in a Cross Flow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.18, pp.719-730.
- [2] 1986, Goldstein, R.J., Behbahani, A.I. and Heppelmann, K.K., "Streamwise Distribution of the Recovery Factor and the Local Heat Transfer Coefficient to an Impinging circular Air Jet," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.29, No.8, pp.1227-1235.
- [3] 2008, Sagot, B., Antonini, G., Christgen, A. and Buron, F., "Jet Impingement Heat Transfer on a Lat Plate at a Constant Wall Temperature," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol.47, pp.1610-619.
- [4] 2008, Paz, M.L.D. and Jubra, B.A., "Predictions of Thermal and Hydrodynamic Characteristics of a Single Circular Micro-jet Impinging on a Flat plate," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2008*, GT2008-50490.
- [5] 2008, Lee, H.G., Yoon, H.S. and Ha, M.Y., "A Numerical Investigation on the Fluid Flow and Heat Transfer in the Confined Impinging Slot Jet in the Low Reynolds Number Region for Different Channel Heights," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.51, pp.4055-4068.
- [6] 2009, Zu, Y.Q., Yan, Y.Y. and Maltson, J.D., "CFD Prediction for Multi-jet Impingement heat Transfer," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2009*, GT2009-59488.
- [7] 2009, Rao, G.A., Kitron-Belinkov, M. and Levy, Y., "Numerical Analysis of a Multiple Jet Impingement System," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2009*, GT2009-59719.
- [8] 2008, Fenot, M., Dorgnac, E. and Vullierme, J.J., "An Experimental Study on Hot Round Jets Impinging a Concave Surface," *International Journal of heat and Fluid Flow*, Vol.29, pp.945-956.
- [9] 2007, Lee, C.H., Lim, K.B., Lee, S.H., Yoon, Y.J. and Sung, N.W., "A Study of the Heat Transfer Characteristics of Turbulent Round Jet Impinging on an Inclined Concave Surface Using Liquid Crystal Transient Method," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.31, pp. 559-565.
- [10] 2006, Kumar, B.V.N.R. and Prasad, B.V.S.S.S., "Computational Investigation of Flow and Heat Transfer for a Row of Circular Jets Impinging on a Concave Surface," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2006*, GT2006-90851.
- [11] 2008, Alvarez, J.J., de la Calzada, P. and Krulic, G., "Heat Transfer and Flow Characteristics of a Leading Edge Impingement Cooling System for Low Pressure Turbine Vanes," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2008*, GT2008-50142.
- [12] 2006, *Ansys CFX-11.0*, Ansys Inc.
- [13] 1997, Bardina, J.E., Huang, P.G. and Coakley, T., "Turbulence Modeling Validation," *AIAA Journal*, pp.1997-2121.