

입구유동 가진이 있는 충돌제트 유동의 유동 및 열전달 변화에 대한 난류모델 적용

권동호*, 김희영*, 박태선***

Application of turbulent model to characteristics of heat transfer in impinging jet flow with pulsed inlet

Dong Ho Kwon*, Hee Young Kim*, Tae Seon Park***

Key Words : Impinging jet, Turbulent model, Heat transfer

Abstract

Because of good performance of heat transfer characteristics, impinging jets are widely used in many industries for cooling or heating. And the present numerical studies attempt to show the effects of impinging jet. This paper considers the application of the turbulent models to impinging jet flow with pulsed inlet. It is assumed two-dimensional turbulent flows. The jet Reynolds number is set at 23,000 and the distance from the exit of the nozzle to the plate is 3 times larger than the diameter of the nozzle. The influence of the Strouhal number(pulsation frequency) on Nusselt number at the impinging region is investigated. Strouhal numbers are ranged 0.0 to 0.5 and the forcing amplitudes are 1%, 5%, 9% of mean inlet velocity. In this study, the Nusselt number at the impinging region is sensitive to the pulsation frequency. Heat transfer coefficient strongly increase at Strouhal number of 0.4.

1. 서론

충돌 제트는 주 흐름의 방향이 수직방향에서 수평방향으로 급격히 변하는 유동 특성으로 인해 난류를 발생시킨다. 이에 따라 형성된 유동장의 변화가 충돌영역에서의 열전달 계수를 증가시키는 효과가 있다. 충돌 제트의 이러한 냉각 효율 증가는 작동온도가 높은 연소기나 터빈의 블레이드의 냉각, 고밀도 전자장치 혹은 강관, 유리 등 접착을 통한 냉각이 어려운 장치의 냉각, 종이의 건조 등 많은 산업분야에 응용되고 있다.

충돌 제트의 유동 및 열전달 특성은 제트의 속도, 분사각도 및 분사거리, 병렬 교차 배열 등의 많은 인자에 영향을 받기 때문에 이에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 노즐의 형상, 음파 및 자기장 등의 외부 가진을 통해 그 효과를 증대시키는 방법 또한 많은 공학자들에 의해 연구 되어 지고 있다. F.Hussain et al. and M.A.Z.Hasan(1983)은 Whistler-nozzle현상에 대해 연구했다. S.D. Hwang and H.H.Cho(2003)는 음파를 이용한 가진이 충돌 제트의 열전달 특성에 미치는 영향에 대해 연구했으며 Lee et al.(2005)은 자기장의 영향에 대해 연구했다. [1,2,3]

본 연구에서는 제트 입구에 주 유동 방향의 가진이 있는 경우에 난류 모델을 적용하여 가진에 따른 벽면의 열전달 특성 변화를 살펴보았다.

2. 본론

* 경북대학교 기계공학과, mandegari@naver.com

* 경북대학교 기계공학과, hykim@nate.com

*** 경북대학교 기계공학과, tsparkjp@knu.ac.kr

2.1 계산 영역 및 계산 방법

본 연구에서는 축대칭 원형 충돌 제트의 2차원 단면을 Fig.1 과 같이 계산영역으로 설정하였다. 노즐의 레이놀즈수는 계산 결과의 검증에 위해 기존의 실험 데이터가 존재하는 23000으로 설정하였다. 입구 가진은 주 유동방향의 성분만 존재하는 것으로 가정하였고, 섭동의 형태는 평균속도에 St(Strouhal number) = 0.1~0.5의 주기를 가지는 sine 함수 형태로 부여하였다.

$$U = U_0 + u' \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

추가적으로 가진 진폭 크기의 변화에 따른 유동 및 열전달 변화를 살펴보기 위하여 주유동방향의 평균속도 크기에 대하여 1%, 5%, 9%의 3가지 경우를 비교 하였다. 타겟 벽면에는 균일한

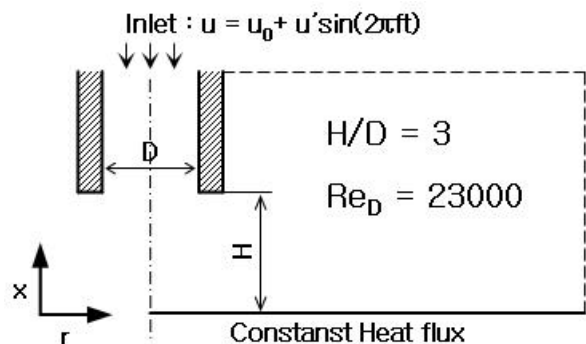


Fig.1 Computational Domain

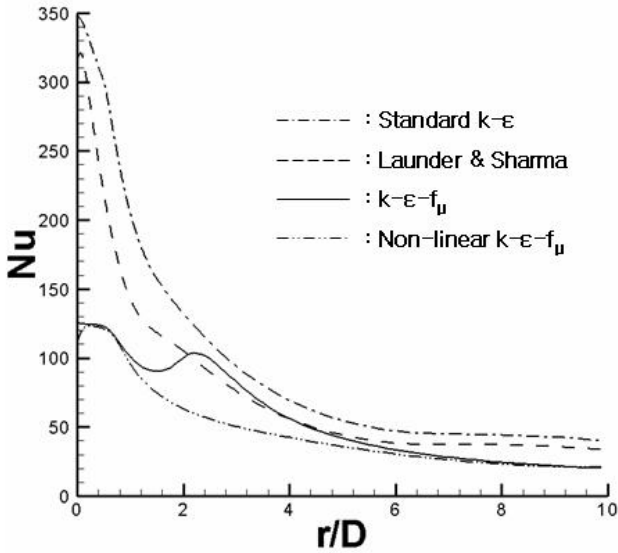


Fig.2 Distribution of local Nu

heat flux가 있는 것으로 가정하였다.

난류 모델은 RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes equation) 모델을 기반으로 한 Park & Sung[4]의 $k-\epsilon-f_\mu$ 모델을 사용하였다. $k-\epsilon-f_\mu$ 모델은 저 레이놀즈 층돌 제트의 유동 및 열전달 해석에 좋은 결과를 보여주는 것으로 알려져 있다. Fig.2는 난류 모델에 따른 벽면의 열전달 계수 변화를 나타낸 결과이다. $k-\epsilon-f_\mu$ 모델에서 Bough and Shumizy[5], Yan[6]의 층돌 제트 실험에서 보여진 2차 peak를 확인할 수 있다. 대류항의 차별화는 급격한 구배가 있는 유동의 안정성을 도모한 Zhu[7]의 HPLA (Hybrid Linear/Parabolic Approximation)를 사용하였고 시간의 적분법에는 완전 음해법을 적용하였다. 시간변화에 따른 유동의 주기적 변화는 원주 방향 0.35D, 축 방향 1.9D의 지점에서 원주 방향 속도성분(u)과 입구의 주 흐름 평균속도(U_m)의 비를 추적하였다. 원주 방향 0.35D, 축 방향 1.9D의 지점은 노즐의 출구부분으로 유동의 시간적 변화가 잘 나타나는 부분이다.

2.2 지배 방정식

난류 유동에 대한 지배방정식은 Park and Sung이 제안한 선형 $k-\epsilon-f_\mu$ 모델에 근거한다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$U_i \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\rho \partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right] \quad (3)$$

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} + F_{ij} \quad (4)$$

$$U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \epsilon \quad (5)$$

$$U_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t / \sigma_\epsilon) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right]$$

$$+ (C^*_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} f_2 \epsilon) / T_s + C_p (1 - f_w) \nu \nu_t \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_k} \right)^2 \quad (6)$$

난류에너지의 생성항은 $P_k = -\overline{u_i u_j} \partial U_i / \partial x_j$ 로 표현되고 난류 레이놀즈수는 $R_t = k^2 / \nu \epsilon$ 로 정의된다. 난류시간척도(T_s)

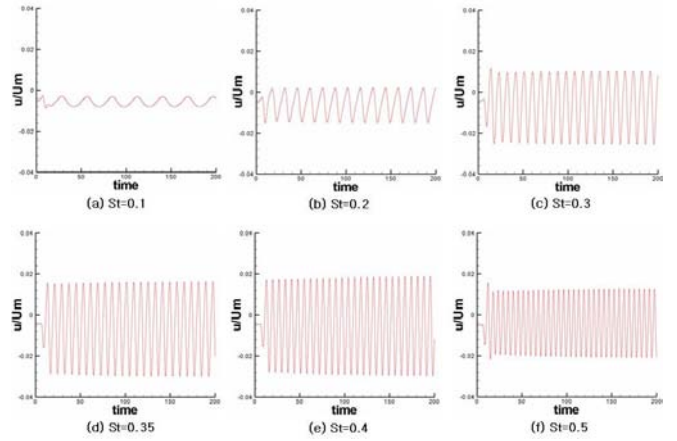


Fig.3 u/U_m History - [Amplitude=5%,H/D=3]

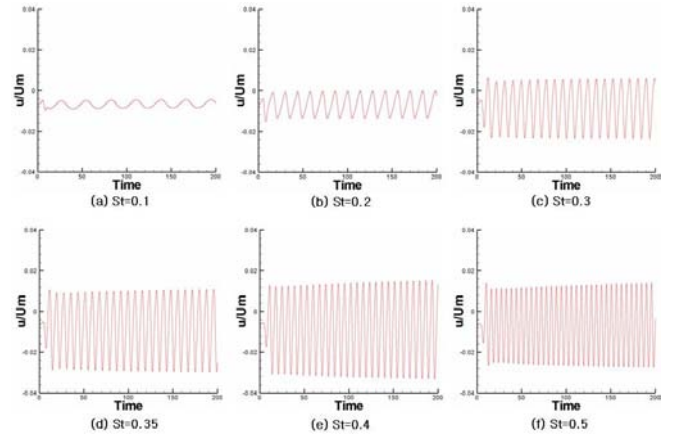


Fig.4 u/U_m History - [Amplitude=5%,H/D=2]

는 특이점을 없애기 위하여 Kolmogorov 시간척도를 최소값으로 이용하여 $T_s = \sqrt{(k/\epsilon)^2 + 36(\nu/\epsilon)}$ 으로 정의되었다.

2.3 결과 고찰

Fig.3, Fig.4는 섭동의 크기가 입구 평균 속도의 5% 인 경우 관찰점에서의 u/U_m 변화 history를 Strouhal number에 따라 나타낸 그림이다. 속도장의 변화는 입구에 부여된 가진 주기와 거의 일치된 주기로 나타냄을 볼 수 있다. 진폭은 $St=0.3\sim 0.5$ 에서 상대적으로 크게 나타났으며 $St=0.4$ 에서 그 폭이 가장 크게 나타남을 확인할 수 있었다. $St=0.4$ 이상이 되면 유동의 진폭폭은 다시 감소하였다.

Fig.5는 각각 H/D=3일 때 가진에 따른 벽면에서의 열전달

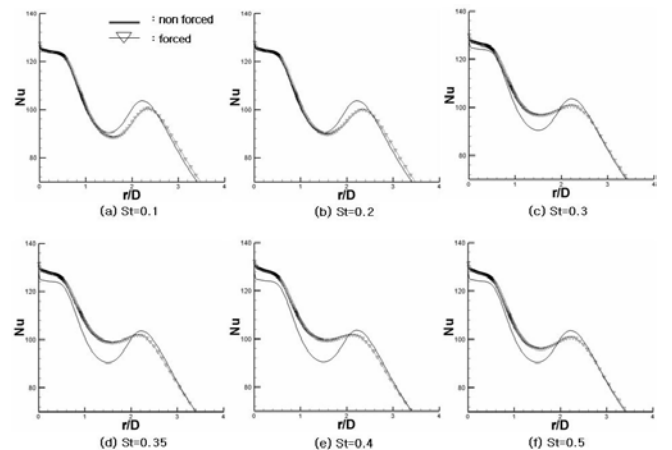


Fig.5 Time-Averaged Nu - [Amplitude=5%,H/D=3]

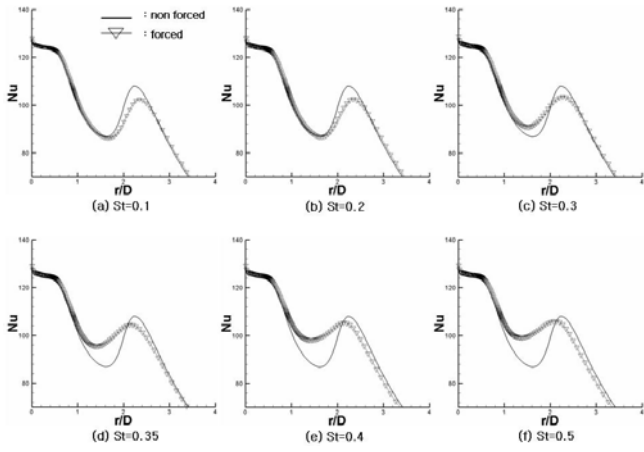


Fig.6 Time-Averaged Nu - [Amplitude=5%, H/D=2]

계수를 시간 평균하여 가진이 없는 경우와 비교한 결과이다. Fig.3에 나타내었던 유동 변화의 진폭이 크게 발생하였던 St=0.3,0.4,0.5의 경우 정체점(Stagnation point)의 열전달 계수가 상승하였다. 반면에 2차 극대가 있는 r/D=2.5 부근의 peak는 상대적으로 완만해 지는 것을 알 수 있었다. St=0.3,0.4,0.5의 정체점과 2차 극대점 사이 영역에서 열전달 계수가 증가함을 볼 수 있다. Fig.6은 H/D=2에 대해 벽면에서의 열전달 계수를 나타낸 결과이다. H/D=3에서와 같이 St=0.3,0.4,0.5에서 정체점과 2차 극대점 사이 영역의 열전달 계수가 증가함을 볼 수 있다. 열전달 계수의 증가는 2차 peak가 뚜렷이 나타나는 H/D=2에서 H/D=3보다 쉽게 확인 할 수 있었다.

가진의 진폭을 1%,9%로 변화시켜 같은 가진 주기로 계산한 결과에서도 St=0.3~0.5에서 진폭의 증가가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 벽면 전체에 대한 열전달 효과를 알아보기 위하여 벽면에서 열전달 계수의 거리에 따른 적분 값을 비교해 보았다. Fig.7은 시간 평균된 열전달계수의 적분 값을 나타낸 결과이다. 가진 진폭 크기의 변화와 관계없이 St=0.4 이하의 가진

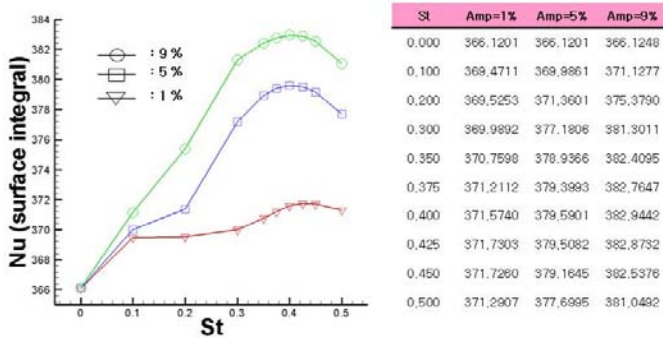


Fig.7 Surface integration Nu [Amplitude=1%,5%,9%]

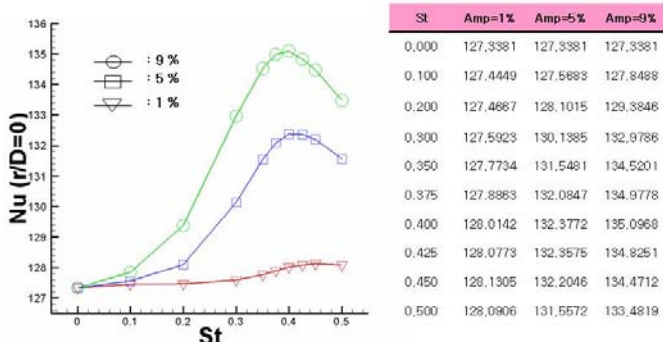


Fig.8 Nu (r/D=0) [Amplitude=1%,5%,9%]

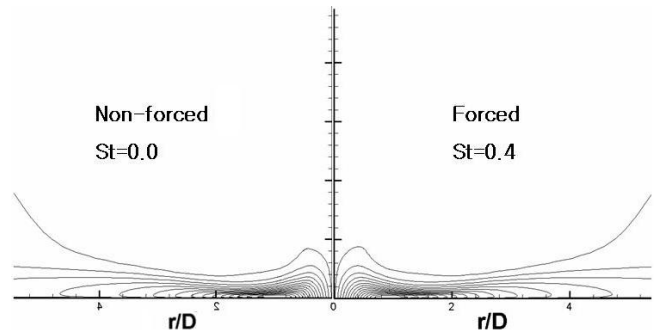


Fig.9 Contour of radial velocity (u) - [H/D=3, Amplitude=5%]

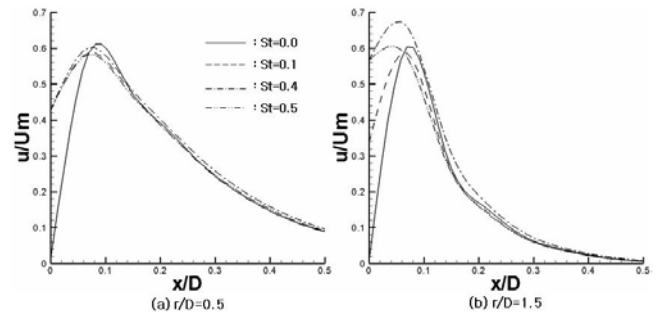


Fig.10 Distribution of u/U_m - [H/D=3, Amplitude=5%]

에서는 주기가 짧아질수록 열전달 계수의 적분 값이 증가하는 반면 St=0.4 이상에서는 주기가 짧아질수록 그 값이 다시 감소하는 것을 알 수 있다. 정체점(r/D=0)에서의 열전달 계수를 Fig.8에 나타내었다. 정체점의 열전달 계수는 적분 값이 최대를 보였던 Fig.7의 결과와 같이 St=0.4에서 최대값을 보였다.

Fig.9는 가진이 없는 St=0.0의 원주 방향 속도성분의 contour line과 5%의 크기 St=0.4 주기로 가진시킨 경우의 contour line을 비교한 결과이다. contour line의 비교를 통해서 두 결과의 차이를 쉽게 확인 할 수 없어 열전달 계수의 변화가 뚜렷이 나타났던 r/D=0.5,1.5에서 축 방향 속도성분의 수직 분포를 Fig.10에 나타내었다. Fig.10 (a)에서 r/D=0.5 일 때 벽면 부근의 원주 방향 속도 성분은 가진이 있는 St=0.1,0.4,0.5의 경우 가진이 없는 St=0.0보다 높은 값을 보였다. Fig.10 (b)에서 r/D=1.5 일 때 벽면 부근의 원주방향 속도 성분이 St= 0.4,0.5의 경우 St=0.0,0.1보다 크게 나타남을 확인할 수 있다.

Fig.11에 나타낸 난류 에너지의 contour line비교 결과는 가진의 유무에 따라 다소 차이를 보인다. 특히 r/D=0.5에서 난류 에너지의 변화가 뚜렷이 관찰된다. Fig.12는 r/D=0.5,1.5에서 난류에너지의 수직 분포를 나타낸 결과이다. 벽면 부근의 난류 에너지는 r/D=0.5에서 가진이 있는 St=0.1,0.4,0.5의 경우 가진이 없는 St=0.0보다 다소 증가 하였다. Fig.12 (b)에서도 같은 결과를

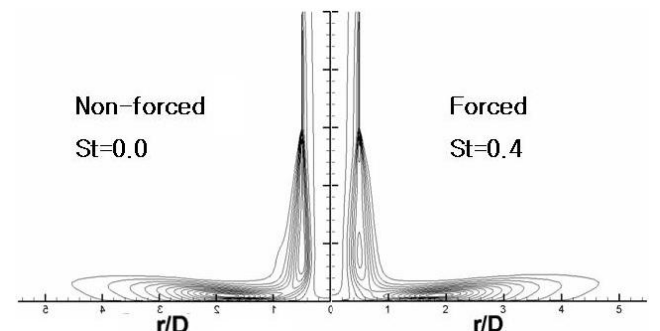


Fig.11 Contour of kinetic energy (k) - [H/D=3, Amplitude=5%]

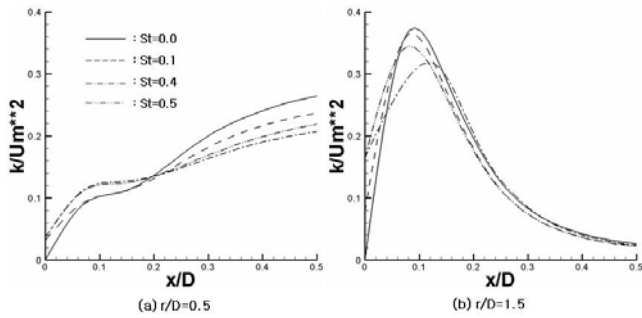


Fig.12 Distribution of $k/U m^2$ - [H/D=3, Amplitude=5%]

확인할 수 있었다. 난류에너지를 비교한 결과는 축 방향 속도 성분을 비교한 결과와 달리 가진이 없는 경우의 값이 가진이 있

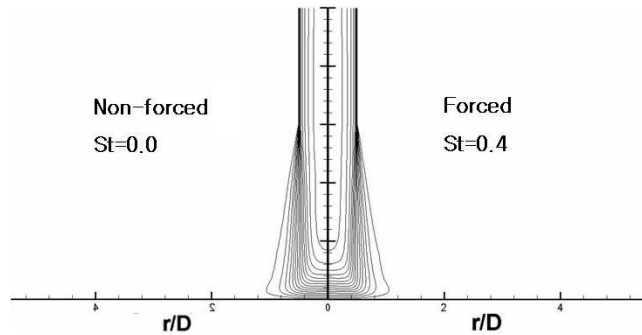


Fig.13 Contour of axial velocity (v) - [H/D=3, Amplitude=5%]

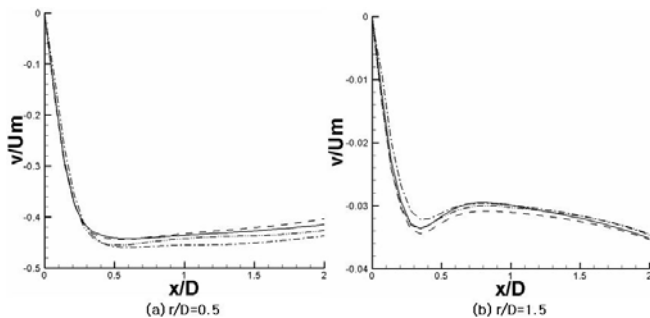


Fig.14 Distribution of $v/U m$ - [H/D=3, Amplitude=5%]

는 경우의 값보다 크게 나타나는 축 방향 높이가 존재하였다.

축 방향 속도성분은 Fig.13, Fig.14에 각각 contour line과 수직 분포로 나타내었다. 축 방향 속도 성분은 Fig.13의 contour line비교에서와 같이 Fig.14의 수직분포에서도 가진의 유무와 관계없이 비슷한 결과를 확인 할 수 있었다.

4. 결론

충돌 제트 유동에서 충돌 벽면에서의 열전달 계수는 가진이 있을 때 가진이 없는 경우보다 증가한다. 동일한 크기의 입구 가진에서 열전달 계수가 최대로 증가하는 가진 주기가 존재하며 그 주기는 유동의 진폭이 크게 발생하는 주기와 일치한다. H/D=3, 노즐 레이놀즈수가 23000일 때 St=0.4에서 그 증가 폭이 가장 크게 나타난다.

참고문헌

- [1] Husian and Hasan, "The whistler nozzle' phenomenon," J,Fluid Mech, Vol. 134(1983), pp431-458.
- [2] S.D.Hwang and H.H.Cho, "Effect of acoustic excitation positions in heat transfer and flow in axisymmetric impinging jet: main jet excitation and shear layer excitation," International Journal of Heat and Fluid, Vol. 24 (2003),pp.199-209.
- [3] Hyun Goo Lee, "A new numerical study on the impinging jet flow characteristics in the presence of applied magnetic fields," KSME, Vol. 29 (2005), pp.537-544.
- [4] Park T.S. and Sung H.J., "A new low-Reynolds-number k- ϵ -f μ model for predictions involving multiple surfaces", Fluid Dynamics Research, Vol. 20, pp.97-113.
- [5] Baughn, J and Shimizu, S, "Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet," Journal of Heat Transfer, Vol. 111, pp.1096-1098.
- [6] Yan, X., "A preheated-wall transient method using liquid crystals for the measurement of heat transfer on external surfaces and in ducts," PhD Thesis, University of California, (1993)