

형상비변화에 따른 직선냉각유로에 대한 난류열전달 LES해석

박태선*

Large Eddy Simulation of Turbulent Heat Transfer in a Straight Cooling Passage with Various Aspect Ratios

Tae Seon Park**

ABSTRACT

Large eddy simulation is applied to the turbulent flow and heat transfer in straight cooling passages with varying aspect ratio. The turbulent statistics of the flow and thermal quantities are calculated and the characteristics of Nusselt number are investigated. To scrutinize near-wall streamwise vortices, a conditional sampling technique is adopted. Clockwise and counter-clockwise rotating streamwise vortices are sampled and the probability density function of the vortex circulation Reynolds number and wall Nusselt number are calculated.

초 록

형상비 변화가 있는 덕트의 난류유동 및 난류열전달에 대한 LES해석이 수행되었다. 다양한 난류통계량이 계산되어졌고 각각 형상에 대한 열전달계수의 특징이 조사되었다. 특히 벽면근처에서 주유동방향의 와류의 영향을 조사하기 위하여 conditional sampling기법이 도입되었다. 와류의 회전방향에 따른 열전달계수의 pdf가 계산되어졌다.

Key Words: Large Eddy Simulation(큰에디모사법), Cooling Passage(냉각유로), Turbulent Heat Transfer(난류열전달), Aspect Ratio(형상비), Streamwise Vortex(주유동방향와류)

1. 서 론

직선냉각유로는 가스터빈, 제트엔진, 로켓엔진, 전자제품 등에 널리 이용되고 있는 냉각장치의 기본형상이다. 이러한 냉각유로의 단면은 일반적

으로 원형이 아닌 사각형 형태의 형상을 가지고 있다. 그렇지만 평행평판 내부의 난류유동 및 열전달에 관한 연구는 많이 진행되어 왔지만 냉각유로의 기본형상인 비원형덕트에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 이러한 덕트 내부의 유동은 둘러 쌓인 벽면에 의한 전단유동의 변화에 크게 영향을 받기 때문에 채널유동과 매우 다른 구조를 가지게 된다. 특히 단면에 존재하는 수직

* 경북대학교 기계공학부

† 교신저자, E-mail: tsparkjp@knu.ac.kr

레이놀즈응력의 변화로 인해 2차유동이 발생하게 된다[1-2]. 이러한 2차유동은 단면형상에 따라 다르지만 주유동방향의 평균속도에 비해 약5% 정도의 크기를 가지고 있다. 이렇게 주유동 방향의 속도성분에 비해 매우 작지만 벽면근처에서는 주유동 방향의 속도성분이 작아지므로 이러한 2차유동은 난류유동 및 열전달에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, 비원형 냉각유로의 난류유동 및 난류열전달에 대한 심도있는 연구는 냉각 시스템 설계에 유용한 정보를 제공할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 여러 비원형단면중에 사각단면을 선택하여 LES(Large Eddy Simulation)해석을 수행하였다. 또한, 단면 형상비가 일정하지 않은 냉각장치의 냉각유로에 대한 열전달 특성규명을 목표로 단면 형상비를 바꾸어가면서 난류열전달 분석이 이루어졌다.

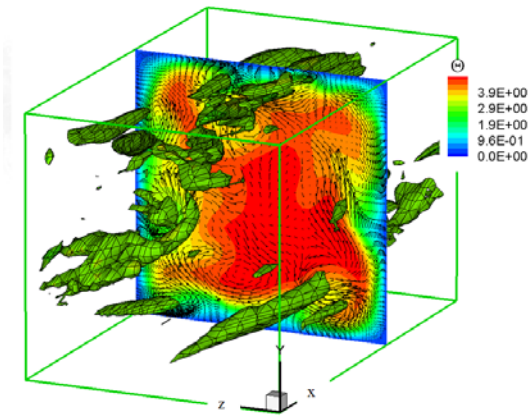


Fig. 1 Instantaneous turbulent flow and thermal fields for a cooling passage

2. 계산방법 및 결과

2.1 지배방정식

본 연구에서는 계산비용 및 계산의 정확도를 고려하여 LES를 사용하여 난류유동 및 열전달을 해석하고자 한다. 따라서 지배방정식과 계산과정은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial t} + \hat{u}_j \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} = \nu \frac{\partial^2 \hat{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \hat{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x_i} + F_3 \delta_{3i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \hat{\theta}}{\partial t} + \hat{u}_j \frac{\partial \hat{\theta}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\nu}{Pr} \frac{\partial \hat{\theta}}{\partial x_j} - \hat{h}_j \right] - \hat{u}_i G_3 \delta_{3i} \quad (3)$$

식 (1)-(3)은 각각 필터링된 연속방정식, 운동방정식 그리고 에너지방정식을 나타낸다. 여기서 \hat{u}_i , \hat{p} , $\hat{\tau}_{ij}$ 는 각각 속도, 압력, subgrid-scale 응력을 나타낸다. 또한, $\hat{\theta} = T_w - \hat{T}$ 는 벽면의 온도에서 유체의 온도를 빼준 형태로 정의하였고, \hat{h}_j 는 Subgrid-scale 열유속으로 $\hat{\tau}_{ij}$ 와 같이 Lilly[3]의 모델을 이용하여 계산되었다. 또한 F_3 와 G_3 는 각각 주유동 방향으로 주기경계조건 (Periodic Boundary Condition)을 주기 위하여 도입된 항들이다. 경계조건은 주유동 방향으로 주기적인 조건이 부여되었고, 열경계조건은 모든 벽면에서 일정 열유속조건이 주어졌다. 또한 수력직경 (Hydraulic Diameter) 및 평균속도에 근거한 레이놀즈수는 모든 경우에 대하여 $Re_b = 4410$ 으로 고정하였다.

Fig. 1은 어느 한 순간에 사각덕트의 난류열유동장을 나타내고 있다. 그림에서 순간적인 와유동구조를 표현하기 위하여 jeong[4]의 방법이 사용되었고, 속도분포와 온도분포를 동시에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 벽면의 모서리쪽에 유동방향으로 정렬된 와유동이 존재하고 이런 와유동구조에 의해서 벽면의 모서리쪽으로 덕트 중앙부의 고온/고속의 유체가 벽면의 저온/저속부로 전달되는 것을 확인할 수 있다. 주유동방향 와유동의 순간적인 변화는 난류운동에너지의 변화와 밀접한 관계가 있기 때문에 시간평균된 난류유동장과 열전달에 크게 영향을 미치게 된다.

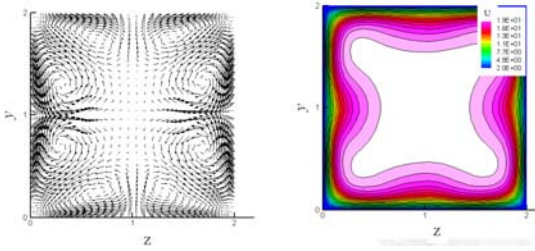


Fig. 2 Time averaged turbulent flow field

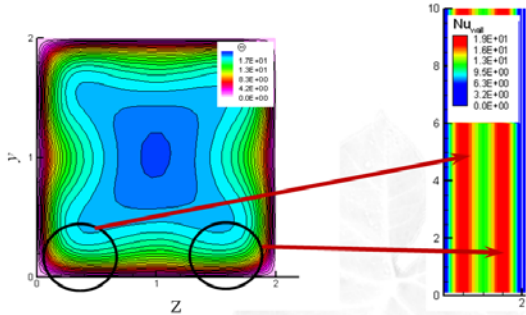


Fig. 3 Time averaged temperature and Nusselt number

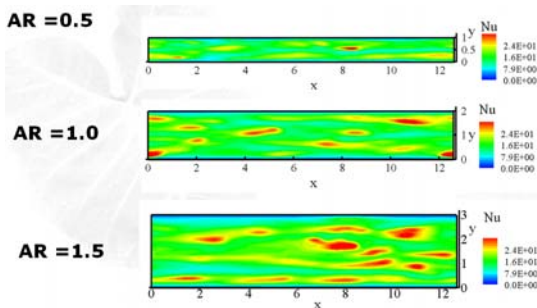
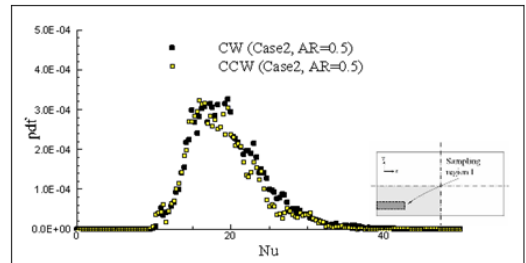


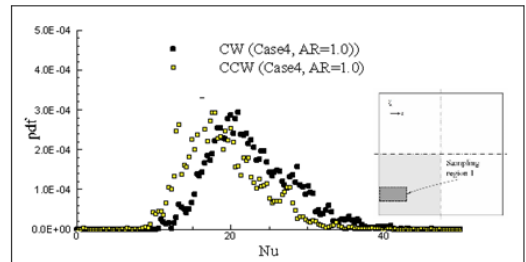
Fig. 4 Contour of instantaneous Nusselt number at side walls

Fig. 2와 Fig. 3은 시간평균된 속도장, 온도장, 열전달 계수를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 시간평균된 유동장은 사각단면의 사분면에서 각각 서로 반대방향으로 회전하는 2차유동이 형성되어 있다. 이러한 2차유동은 덕트 중앙을 흐르는 고속/고온유동의 운동에너지와 열에너지를 벽면근처의 저속/저온 유체에 전달한다. 결과적으로 벽면근처의 하강유동이 있는 부근에서 유동 및 열경계층의 두께가 얇아진다. 특히, 2차유동에 의해서 벽면 모서리 부근에서 온도의 기울

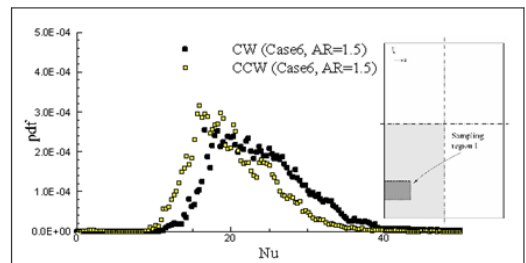
기가 커지는 것을 알 수 있고, 결과적으로 이 부근에서 열전달계수가 증가하게 된다. 이러한 2차유동의 특성은 단면형상이 바뀔에 따라 달라지게 되고 그에 따른 열전달 특성 또한 변하게 된다.



(a) Case2, AR=0.5



(b) Case4, AR=1.0



(c) Case6, AR=1.5

Fig. 5 of wall Nusselt number near left corner wall

Fig. 4는 형상비 변화에 따른 Nusselt수의 변화를 보여주고 있다. 단면 형상비의 변화에 따라 주유동방향의 와유동구조가 변하기 때문에 벽면에서 열전달계수 또한 크게 변하고 있다. 와유동의 특성에 의해서 벽면근처에 고온부와 열전달 계수가 증가하는 영역이 발생되는데 AR이 클수록 열전달계수가 큰 영역이 증가하고 있다. 이러

한 와유동구조와 열전달계수의 상관성을 자세히 살펴보기 위하여 Fig. 5에 와유동의 회전방향에 따른 열전달계수의 기여에 대한 pdf[5]를 나타내었다. 이결과를 보면 와유동의 회전방향에 따른 열전달기여도를 확인할 수 있다. AR이 증가할수록 CCW의 기여가 증가하고 경향을 보여주고 있다.

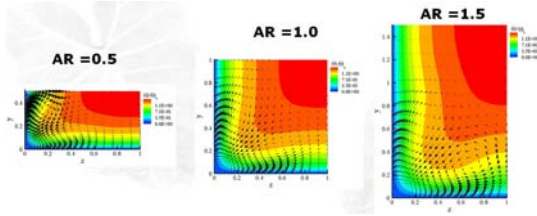


Fig. 6 Time averaged temperature for different AR

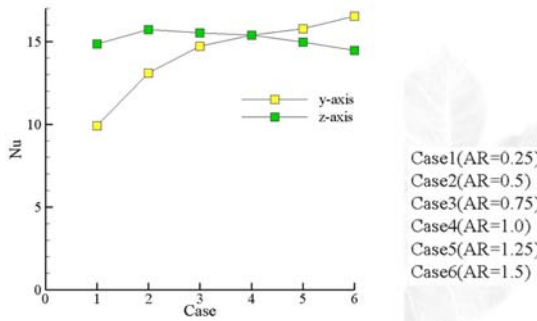


Fig. 7 Time and space averaged Nusselt number

Fig. 6은 시간평균된 온도분포를 보여주고 있다. AR에 따른 2차유동의 변화로 온도분포가 나타나고 있다. Fig. 7은 단면형상비를 변화시켰을 때 가로벽면과 세로벽면에 대하여 면적평균한 열전달 계수를 보여준다. 결과적으로 AR이 큰 경우 열전달계수가 증가한다는 것을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 비원형단면을 가지는 냉각유로에 대한 난류유동 및 열전달에 대하여 LES해석

이 수행되었다. 비원형단면 중에 대표적인 사각덕트에 대하여 형상비를 변화시키면서 열전달 특성의 변화를 살펴보았다. 덕트내부의 난류유동은 수직 레이놀즈응력의 차이로 2차유동이 발생하였고, 형상비 변화에 따라 2차유동의 크기 또한 변하였다. 벽면을 향해 내려오는 2차유동에 의해서 덕트중앙의 고온/고속의 유체가 가지고 있는 운동에너지 및 열에너지가 벽면으로 전달되어 벽면전단응력 침 열전달계수가 증가하는 경향을 보여주었다. 이러한 특징은 형상비가 변하여도 비슷하게 나타났지만 수평벽면과 수직벽면의 열전달계수는 다르게 영향을 받았다. 결과적으로 형상비가 큰 경우가 열전달계수가 증가하는 경향을 보여주었다.

참고 문헌

1. Vazquez, M. S. and Metais, O., "Large-eddy simulation of the turbulent flow through a heated square duct," J. Fluid Mech., Vol.453, 2002, pp.201-238
2. Rahman, M. and Colbourne, P., "Analytical solution for secondary flow with heat transfer in a square duct," Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol.5, 1984, pp.167-177
3. Lilly, D. K., "A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure models," Phys. Fluids, Vol.4, 1992, pp.633-635
4. Jeong and Hussain, F., "On the identification of a vortex," J. Fluid Mech., Vol.332, 1995, pp.339-363
5. Choi, H. S. and Suzuki, K., "Large eddy simulation of turbulent flow and heat transfer in a channel with one wavy wall," Int. J. Heat Fluid Flow, Vol.26, 2005, pp.681-694