

맥동유동에 의한 그루브 채널내 유동혼합 촉진에 관한 PIV 이용 연구

김 동 옥, 김 서 영, 이 대 영[†], 이 윤 표
한국과학기술연구원 열유동제어연구센터

PIV Investigations of the Flow Mixing Enhancement by Pulsatile Flow in a Grooved Channel

Dong-Xu Jin, Seo Young Kim, Dae-Young Lee[†], Yoon-Pyo Lee

Thermal/Flow Control Research Center, Korea Institute of Science & Technology(KIST), Seoul 136-791, Korea

(Received November 7, 2003; revision received February 10, 2004)

ABSTRACT: Particle Image Velocimetry (PIV) measurements have been carried out to investigate the pulsatile flow characteristics in a triangular grooved channel. The results showed that a vortex was generated at the tip of the groove and flowed into the groove rotating inside during the acceleration phase of the main stream promoting the mixing of the fluid. Then, at the deceleration phase of the main stream, the vortex entrained fluid from the relatively slow moving main stream to grow bigger than the groove size. Finally the vortex was ejected to the main stream carrying the fluid away from the groove, resulting in the enhancement of mixing between the stagnant fluid in the groove and the main stream in the channel. It was found that the fluid mixing enhancement is maximized when the pulsatile period is the same as the time duration which the vortex takes to grow larger enough to fill the groove and to be ejected to the main stream.

Key words: Pulsatile flow(맥동유동), Grooved channel(그루브 채널), PIV(입자영상속도법), Vortex(와류), Flow mixing(유동혼합)

기 호 설 명

a : 그루브 깊이 [m]
 d : 와류의 직경 [m]
 E : 열전달촉진비, $h/h_{\eta=0}$
 f : 맥동주파수 [Hz]
 H : 채널 높이 [m]
 h : 열전달계수 [W/m^2K]

L : 그루브 길이 [m]
 m : 유량 [kg/s]
 Re : Reynolds 수, UH/ν
 St : Strouhal 수, fH/U
 T : 맥동주기 [s]
 t : 시간 [s]
 U : 최소 단면적 기준 시간 평균 유속 [m/s]
 u : 최소 단면적 기준 유속 [m/s]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-958-5674; fax: +82-2-958-5689

E-mail address: ldy@kist.re.kr

그리스 문자

η : 맥동비율, $\overline{m_p/m}$

- ν : 동점성 계수 [m^2/s]
- ω : 와류의 평균 각속도 [$1/s$]
- Ω : 와류의 무차원 각속도, $\omega H/U$

상첨자

- $\bar{\tau}$: 시간 평균

하첨자

- ρ : 맥동

1. 서 론

최근의 연구에서는 기존의 열 시스템의 구조를 변화시키지 않고 유동의 자연적인 불안정성을 이용하여 층류유동에 특정 주파수로 유동교란을 가하여 유동공진을 야기시킴으로써 유체혼합을 향상시켜 열전달을 촉진시키는 유동공진 열전달 촉진기술이 주목을 받고 있다.

Ghaddar et al.⁽¹⁾, Greiner,⁽²⁾ Kim et al.⁽³⁾은 삼각형상 그루브 채널 내에서 열전달에 대한 맥동유동의 영향을 연구하였다. Ghaddar et al.⁽¹⁾은 수치해석방법을 이용하여 맥동유동에 의한 유동공진 열전달 현상을 보고하였으며, 이를 Greiner⁽²⁾가 실험적으로 입증하였다. Greiner는 $Re=700$, 맥동비율 20%인 조건에서 유동공진에 의한 열전달 촉진실험을 수행하여 최적의 공진주파수에서 160%까지 열전달이 촉진됨을 보고하였다. Kim et al.⁽³⁾은 수치해석을 통해 두 개의 가열 블록(block)에 설치된 채널에 맥동유동이 부가될 때 특정 주파수에서 열전달이 촉진되는 공진현상이 있음을 밝혔다.

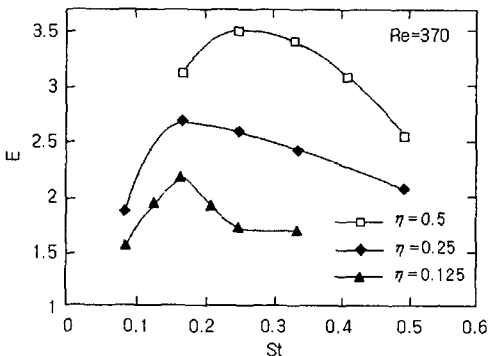


Fig. 1 Heat transfer enhancement ratio.⁽⁴⁾

Kwon et al.⁽⁴⁾는 삼각형상 그루브 채널에서 맥동유동이 열전달에 미치는 영향을 실험적으로 연구하여 열전달의 촉진이 최대가 되는 맥동주파수가 있음을 보였다. Fig. 1은 Kwon et al.⁽⁴⁾의 실험 결과의 일부로서 $Re=370$ 일 때 열전달 촉진에 대한 맥동주파수의 영향을 나타내고 있다. 맥동비율이 일정할 때 맥동주파수가 증가하면 열전달촉진비가 처음에는 증가하다가 어느 특정주파수를 지난 후 다시 감소되는 경향을 잘 나타내고 있다.

본 연구에서는 열전달 촉진이 최대로 되는 최적 맥동주파수의 존재 원인을 규명하기 위하여 삼각형상 그루브 채널 내의 맥동유동에 대해 PIV 실험을 수행하였고 와류중심의 위치, 와류의 직경, 와류의 각속도 등을 정량적으로 구하여 맥동주파수가 와류의 생성과 발달에 미치는 영향을 고찰함으로써 맥동유동에 의한 열 및 물질전달의 촉진 원인을 규명하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 삼각형상 그루브 채널의 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 이 형상은 Kwon et al.⁽⁴⁾의 것과 동일하며, 채널의 높이(H)는 15 mm, 그루브 길이(L)는 18 mm, 그루브 깊이(a)는 9 mm이다. 채널은 유동방향을 따라 나란히 배열된 30 개의 그루브로 이루어졌고 폭은 187.5 mm이다.

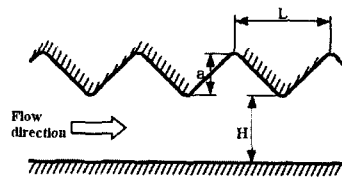


Fig. 2 Grooved channel.

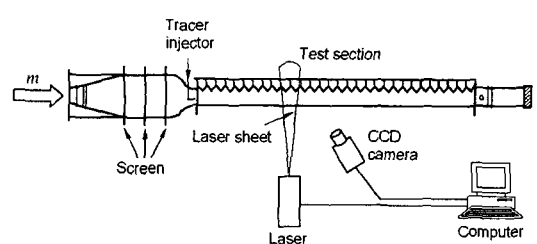


Fig. 3 Schematic diagram of the apparatus.

작동유체인 물은 수조로부터 원심펌프와 다이어프램(diaphragm) 펌프를 통해 설정된 평균 유량, 맥동비율, 맥동주파수로 실험부에 공급되고, 실험부를 거친 물은 전자저울과 초시계를 사용하여 유량을 측정 후 수조로 순환하도록 유로를 구성하였다. 채널 입구에 균일 속도의 유동이 유입되도록 수축부를 설치하였고 실험부 측면에는 강화유리를 부착하여 채널 내 유동을 관측할 수 있도록 하였다. Fig. 3은 실험부인 삼각형상 그루브 채널과 PIV 속도측정시스템의 주요 구성요소들이다. CCD 카메라는 실험부 입구로부터 12번째 그루브가 위치한 지점의 실험부 측면에 설치하였고, 레이저는 실험부의 아래에 실험부에 수직되게끔 설치하였다. PIV 실험의 추적입자는 알루미늄 입자(평균 직경 $30 \mu\text{m}$)를 사용하였다. 예비실험을 통해 유동은 대체로 입구에서 7번째 그루브부터 유동방향에 따라 주기적으로 반복되는 완전 발달된 형태를 보이는 것을 확인하였다.

2.2 실험결과 처리방법

실험부에 공급되는 맥동유동은 원심펌프와 다이어프램 펌프를 이용하여 발생시켰다. 평균 맥동유량(다이어프램 펌프의 시간 평균 토출유량)과 맥동주파수는 다이어프램 펌프의 행정 길이와 펌프 회전수를 통해 조절하였으며, 원심 펌프에 의하여 공급되는 유량은 펌프 출구에 설치된 밸브로 조절하였다. 채널을 통과하는 맥동유동의 총 유량은 원심펌프에 의한 정상유동 유량과 다이어프램 펌프에 의한 맥동유량의 합으로 결정된다.

다이어프램 펌프에 의한 맥동유동과 원심펌프에 의한 정상유동은 실험부의 입구부분에 진입하기 직전에 합쳐져서 실험부로 유입된다. 총 평균 유량 \bar{m} 에 대한 다이어프램 펌프를 통과하는 평균 맥동유량 \bar{m}_p 의 비를 나타내는 맥동비율 η 를 다음과 같이 정의하였다.

$$\eta = \frac{\bar{m}_p}{\bar{m}} \quad (1)$$

레이놀즈 수(Re)와 무차원 맥동주파수인 스트라울 수(St)는 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{Re} = \frac{UH}{\nu} \quad (2)$$

$$\text{St} = \frac{fH}{U} \quad (3)$$

여기서 U 는 채널의 가장 좁은 지점에서의 시간 평균 유속, f 는 맥동주파수이다.

레이저로 평면광을 만들어 측정하고자 하는 유동평면을 조사하게 한 후, 해상도 480×420 픽셀의 CCD 카메라를 이용하여 250 frame/s의 속도로 유동형태를 기록하였다. 본 연구에서는 탐색영역의 크기를 32×32 픽셀로 하고 주변의 추출면적과 50% 겹치게 하여 480×420 픽셀의 영상으로부터 672(28×24)개의 속도 벡터를 추출하였다. 이때 유속은 연속적인 두 번 순간의 입자영상에 대해 2-frame cross correlation⁽⁵⁾ 알고리즘을 적용하여 구하였다.

Kwon et al.⁽⁴⁾의 열전달실험 결과와 비교 분석하기 위해 맥동실험은 $\text{Re}=370$, $\eta=0.5$ 의 조건하에서 $\text{St}=0.17, 0.25, 0.42$ 인 3가지 경우에 대해 수행하였다. 이에 대응하는 실제 맥동주파수는 각각 $f=0.33, 0.5, 0.83$ Hz이다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 정상유동일 때의 유동가시화 결과로서 5장의 연속된 입자영상 사진을 중첩시켜서 얻은 것이다. 유체는 왼쪽에서 오른쪽으로 흐르고 있다. 그루브 내부에 와류가 하나 있고 그루브 밖 주유동의 유체는 그루브의 영향을 거의 받지 않고 직선방향으로 흐르고 있음을 확인할 수 있다. 그루브 내의 추적입자가 주유동의 추적입자보다 적은 것을 볼 수 있는데 이는 그루브 내의 유체

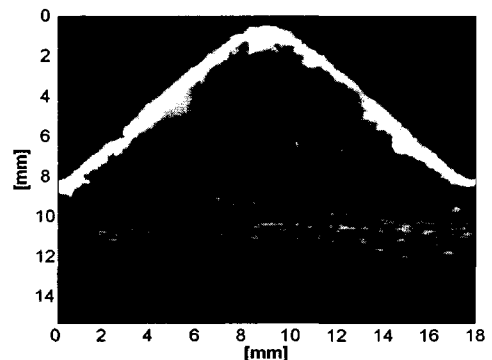


Fig. 4 Flow visualization at $\text{St}=0$.

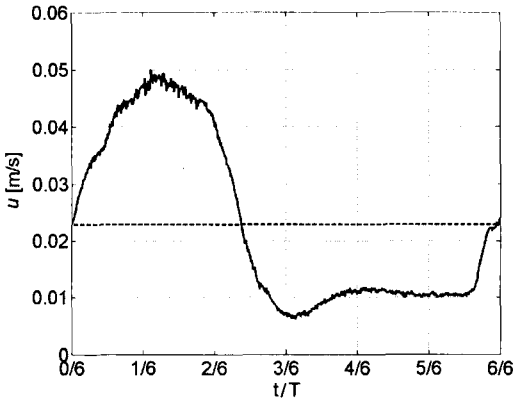


Fig. 5 Flow velocity at $St=0.17$.

와 주유동 유체와의 혼합이 잘 이루어지지 않고 있음을 나타낸다.

Fig. 5는 $St=0.17$ ($f=0.33$ Hz)일 때 채널 내에서 단면적이 최소인 곳의 유동속도(u)를 나타내고 있다. 유속계산을 위한 유량은 PIV로 구한 속도장에서 각 속도벡터가 위치한 단면(28개 단면) 별로 적분한 후 모든 단면을 평균하여 구하였다.

여기서 주기의 시작점($t/T=0$)은 가속단계에서 유속이 시간 평균 유속에 도달하는 시점으로 하였다. 다이어프램 펌프의 작동특성으로 인해 맥동유속의 변화형태는 직사각형이 아니었다.

Fig. 6은 $St=0.25$ ($f=0.5$ Hz)인 경우의 유동가시화 사진이다. 맥동유동의 한 주기를 6등분하여 각 순간의 유동가시화 결과를 나타내었다. 유동이 가속될 때 그루브 내에서 와류가 생성되며 이와류는 그루브 내에서 회전하면서 그루브 내의 유체를 휘저어 유체혼합을 촉진시킨다. 이후 주유동이 감속하면 그루브 내의 와류는 속도가 상대적으로 느린 그루브 밖 주유동의 유체를 끌어들면서 회전이 점차 느려지게 된다. 한편 끌려들어온 유체에 의하여 와류의 회전반경은 점차 증가하면서 그루브의 깊이보다 더 커져 주유동 채널 안으로 확대된다. 이후 몸집이 커진 와류는 주유동에 밀려 그루브 밖으로 토출된다. 이와 같은 일련의 과정들을 통하여 그루브 안의 유체가 혼합된 후 주기적으로 그루브 밖으로 토출됨으로써 주유동 유체와 그루브 내 유체의 교환이 촉진된다.

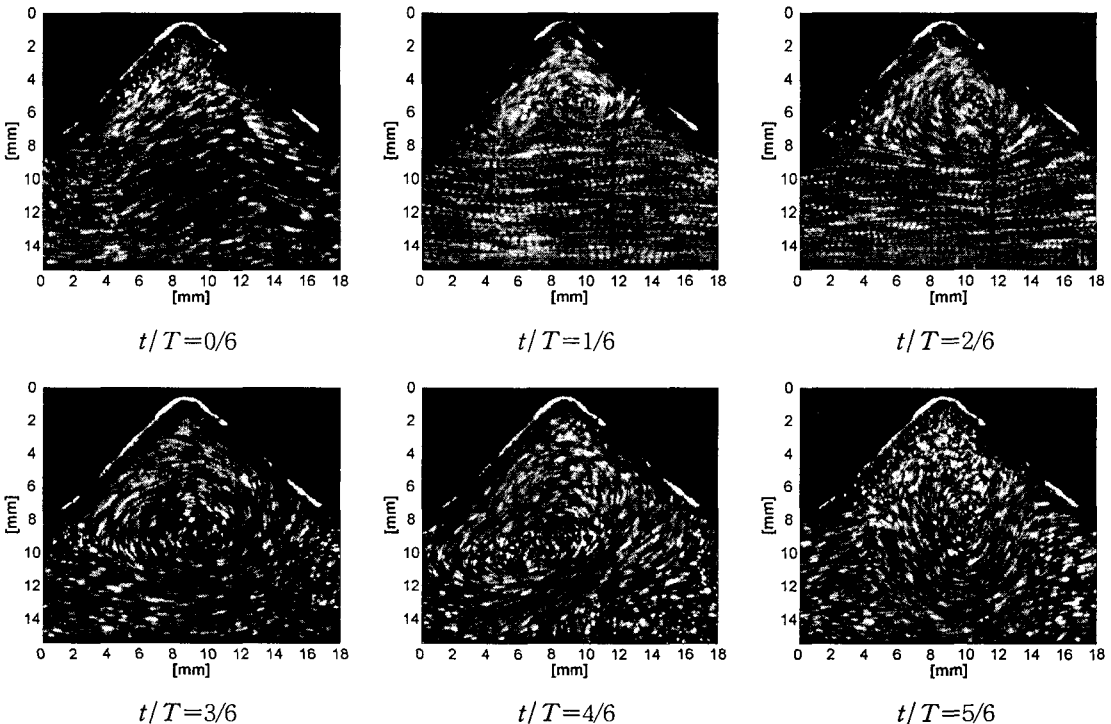


Fig. 6 Flow visualization at $St=0.25$.

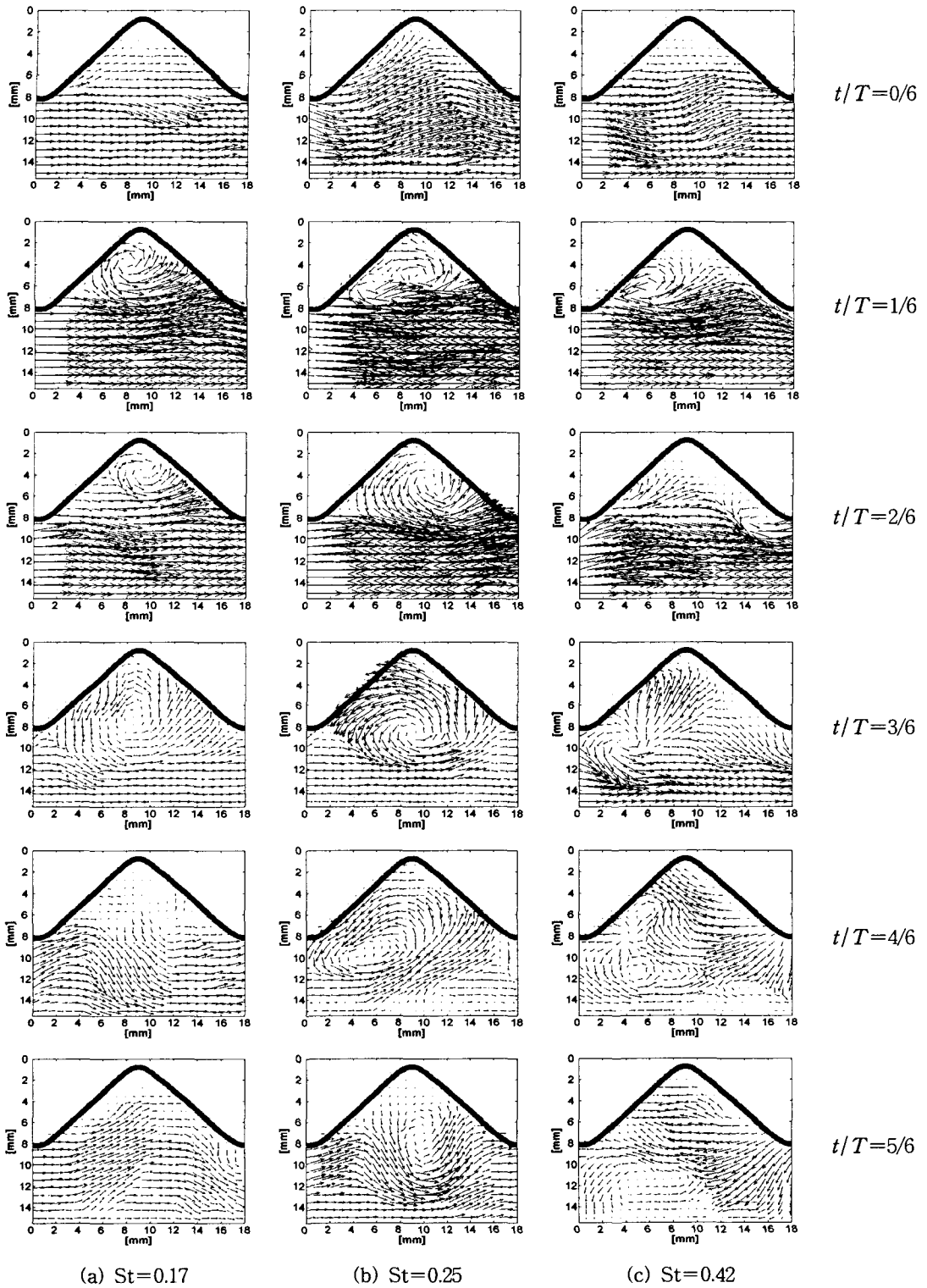


Fig. 7 Instantaneous velocity fields.

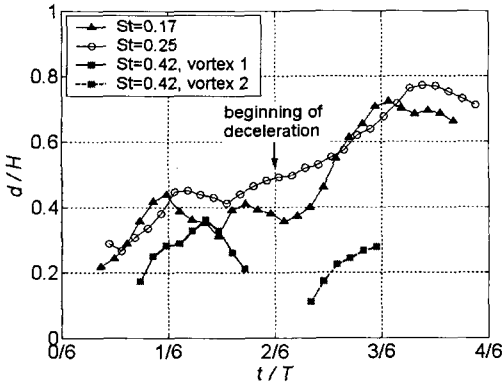


Fig. 8 Vortex diameter.

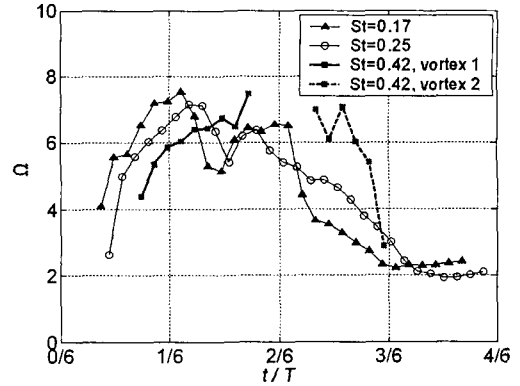


Fig. 9 Angular velocity of the vortex.

Fig. 7은 $St=0.17, 0.25$ 와 0.42 인 3가지 경우에 대해 PIV 기법을 사용하여 구한 속도벡터장을 보여주고 있다. $St=0.25$ 인 경우는 바로 Fig. 6의 유동을 속도벡터로 나타낸 것이다. $St=0.17$ 일 때는 $St=0.25$ 인 경우와 마찬가지로 유속이 빨라지는 단계에서 생성된 와류가 그루브 안에서 회전을 하고 있다가 저속단계에서 점차 주유동의 유체를 끌어들이면서 회전 반경이 커진다. 그러나 $St=0.25$ 인 경우에는 $t/T=5/6$ 일 때까지 그루브 내부에 와류가 존재하는 데 비하여, $St=0.17$ 일 때는 $t/T=4/6$ 일 때 이미 와류가 하류로 밀려 내려가고, 그 이후에는 다음 가속시점까지 그루브 내에 와류가 없는 상태가 지속되는 것을 볼 수 있다. 한편 $St=0.42$ 인 경우에는 고속단계에서 생긴 와류가 그루브 내부로 들어가지 못하고 곧바로 하류로 떠내려가 버리고($t/T=2/6$), 그 직후 상류의 그루브에서 생성된 와류가 흘러들어 왔다가 유동이 감속되면서 곧 작은 와류들로 분해되어 채널 내의 유동이 상당히 복잡하게 된다.

Fig. 8, 9, 10은 각각 와류의 무차원 직경(d/H), 무차원 각속도($\omega H/U$)와 중심위치의 변화를 나타내고 있다. 와류의 직경은 속도장으로부터 유선함수(stream function)를 구하여, 유선이 폐곡선을 이루는 최대 면적으로부터 구하였다. 와류의 평균 각속도(ω)를 와류 내의 와도(vorticity)의 평균값으로부터 구하여, 다음 식과 같은 무차원 각속도(Ω)로 나타내었다.

$$\Omega = \frac{\omega H}{U} \quad (4)$$

와류의 중심이 한 지점에 고정되어 있지 않고 채널 내에서 움직이기 때문에 실제 와류의 중심은 속도벡터장에서 관찰되는 와류의 중심과 일치하지 않을 수 있다. 본 연구에서는 와도의 등고선 도에서 와도가 최대값을 가지는 점을 와류의 중심위치로 정하였다. 또한 와류가 그루브를 빠져나갈 무렵에는 와류중심의 이동속도와 중심에 대한

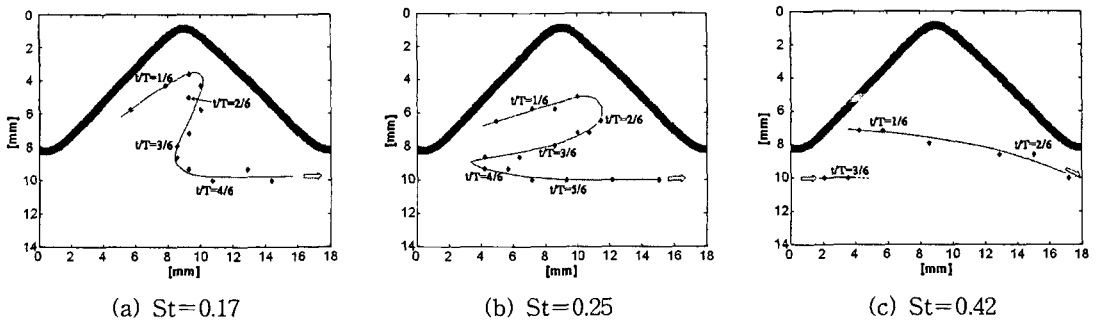


Fig. 10 Trace of the vortex center.

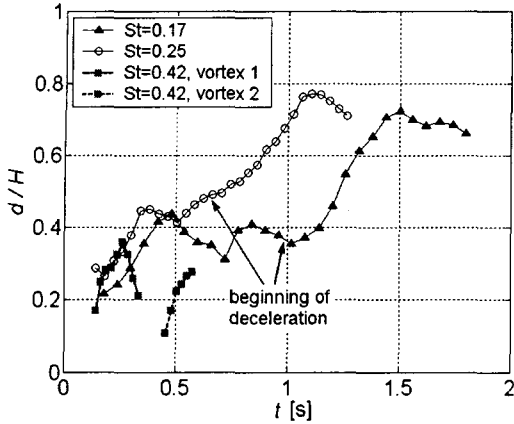


Fig. 11 Variation of the vortex diameter.

외곽의 상대속도는 방향이 반대되고 크기가 비슷하게 된다. 따라서 순간의 유선함수로부터 구한 와류의 형상이 실제 형상을 많이 왜곡하기 때문에 Fig. 8에서는 와류가 그루브를 빠져나가기 전까지만 나타내었다.

Fig. 10의 (a)와 (b)에서 볼 수 있는 바와 같이 $St=0.17$ 과 0.25 인 경우, 가속단계에서 와류의 중심은 출몰 그루브의 안에 갇혀 있다. 가속단계의 초기에 와류의 직경(Fig. 8)과 각속도(Fig. 9)가 빠르게 증가하다가 와류가 그루브에 가득 찰 정도로 커지면 와류의 직경과 각속도는 유동이 감속될 때까지 대체로 일정한 크기를 유지한다. 유동이 감속될 때 와류가 팽창하면서 와류의 직경(Fig. 8)은 커지고 각속도(Fig. 9)는 감소한다. 동시에 와류의 중심이 그루브 밖으로 나오게 되면서 결국 와류는 주유동에 밀려 하류로 떠내려가게 된다(Fig. 10의 (a), (b)). 이 두 경우 와류의 직경과 각속도의 최대크기는 거의 같게 나타났다.

$St=0.42$ 인 경우 고속단계에서 생성된 와류는 Fig. 10의 (c)에서 볼 수 있는 바와 같이 그루브 내부로 진입하지 못하고 충분히 커지지도 못한 상태에서 바로 하류로 떠내려간다. 상류에서 흘러들어온 두번째 와류 역시 그루브 내부에 영향을 줄 만큼 커지지 못한 상태에서 유동이 감속될 때 작은 와류들로 분해된다. $St=0.42$ 일 때도 가속단계의 초기에는 와류의 무차원 각속도가 빠르게 증가한다.

Fig. 11에 Fig. 8의 와류의 직경변화를 실시간으로 다시 나타내었다. 가속단계에서의 와류의 성

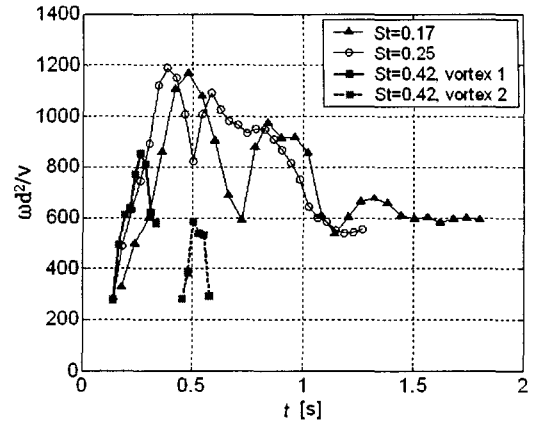


Fig. 12 Ratio of the vortex mixing to the molecular diffusion.

장과 감속단계에서의 와류의 팽창에 걸리는 시간이 $St=0.17$ 과 0.25 의 경우 서로 거의 같음을 볼 수 있다. 이는 와류의 성장과 팽창과정은 주유동과 그루브내 정체유동 사이의 속도차이에 의해 생성된 전단층이 운동량 확산(momentum diffusion)에 의해서 점차 넓어지는 과정이므로, 맥동 주기에 관계없이 운동량확산계수(momentum diffusivity)에 의하여 결정되며 일정한 시간이 소요되기 때문인 것으로 사료된다.

그러나 $St=0.17$ 인 경우 가속 및 감속단계 모두 $St=0.25$ 일 때보다 더 길기 때문에 가속단계에서 와류가 그루브를 다 채운 후 직경이 대체로 일정한 값을 유지하는 시간이 더 길며, 감속단계에서도 와류가 팽창하여 외부로 방출된 후, 다음 주기의 가속단계가 시작될 때까지의 시간이 더 길다.

Fig. 12는 와류에 의한 유체혼합과 분자확산에 의한 유체혼합의 비($\omega d^2/\nu$)를 보여주고 있다. $St=0.17, 0.25$ 인 경우 유체혼합비는 급속히 증가한 후 대체적으로 일정한 값을 유지하다가 다시 감소함을 볼 수 있다. 이 두 경우 유체혼합비의 최대값은 거의 같지만, $St=0.17$ 일 때는 $St=0.25$ 인 경우에 비해 맥동주파수가 더 작아서 그루브 내부와 주유동과의 유체 교환 횟수가 작아지게 된다. $St=0.42$ 인 경우에는 유체혼합비가 작은데다 와류 중심이 그루브 내부로 들어오지 못하고 와류의 직경도 와류가 그루브 내부의 유체를 효과적으로 혼합할 만큼 크지 않기 때문에 $St=0.25$ 인 경우에 비하여 그루브 내부와 주유동과의 유

채 혼합효율이 떨어진다.

후 기

4. 결 론

본 연구에서는 삼각형상 그루브 채널 내에서 맥동유동에 의해 생성되는 와류의 변화특성에 대한 고찰을 통해 맥동유동의 주파수가 유동혼합에 미치는 영향을 살펴보았으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 삼각형상 그루브 채널 내의 유동에 적당한 주파수의 맥동을 가하면 그루브 내에서 와류가 주기적으로 생성되고 토출되면서 그루브 내의 정체된 유체를 혼합시킨 후 주유동으로 밀어내어 그루브 내의 유체와 주유동 유체와의 교환이 촉진되므로 열전달이 향상된다.

(2) 와류에 의한 그루브 내부와 주유동 사이의 유체혼합과 교환이 최대가 되는 최적의 맥동주파수가 존재한다. 맥동주기가 그루브 내부 유체혼합과 와류방출에 필요한 시간과 일치할 때 그루브 내부 유체의 교체효율이 최대로 된다.

(3) 맥동주파수가 최적주파수보다 작으면 와류 직경의 최대크기, 와류의 최대각속도 및 최대유체혼합비는 거의 동일하지만, 와류의 방출 횟수가 작아져 그루브 내부와 주유동과의 유체 교환 횟수가 작아지게 되어, 열전달 향상이 상대적으로 작게 된다.

(4) 맥동주파수가 너무 크면 가속단계에서 와류의 중심이 그루브 내부로 들어가지 못하는데다 와류의 직경이 상대적으로 작아 그루브 내부의 유체가 충분히 혼합되지 못할 뿐더러, 감속단계에서 유동이 복잡해지면서 큰 와류일 때보다 혼합효과가 감소하여, 결과적으로 최적주파수인 경우에 비하여 열전달 향상이 작아진다.

본 연구는 과학기술부 이산화탄소 저감 및 처리기술 개발사업단(C-1-1) 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ghaddar, N. K., Magen, M., Mikic, B. B. and Patera, A. T., 1986, Numerical investigation of incompressible flow in grooved channels, Part 2: Resonance and oscillatory heat transfer enhancement, *J. Fluid Mech.*, Vol. 168, pp. 541-567.
2. Greiner, M., 1991, An experimental investigation of resonant heat transfer enhancement in grooved channels, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 6, pp. 1383-1391.
3. Kim, S. Y., Kang, B. H. and Hyun, J. M., 1998, Forced convection heat transfer from two heated blocks in pulsating channel flow, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, No. 3, pp. 625-634.
4. Kwon, O. J., Lee, D.-Y., Kim, S. Y., Kang, B. H. and Kim, Y. C., 2001, An experimental study on the heat transfer enhancement by pulsatile flow in a triangular grooved channel, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 13, No. 10, pp. 1009-1016.
5. Raffel, M., Willert, C. and Kompenhans, J., 1999, *Particle Image Velocimetry*, Springer-verlag.