

論 文

삼각형상 그루브 채널의
비정상 유동특성에 관한 연구

조 대 환*

A Study on Unsteady Flow Characteristics
of Triangular Grooved Channel

*Dae-Hwan Cho**

〈目 次〉

Abstract	3. 실험결과 및 고찰
1. 머리말	4. 맺음말
2. 실험방법	참고문헌

Abstract

This experimental study was performed to investigate internal flow and unsteady flow characteristics using a model for actual shape of a plate heat exchanger and visualization of flow through the particle image velocimetry. Seven Reynolds numbers were selected by calculation with the height of grooved channel and sectional mean velocity of inlet flow in the experiment, and instantaneous velocity distributions and flow characteristics were experimentally investigated.

The triangular grooved channel had a compound flow consisting of the flow in lower channel and the groove flow receiving shear stress by the channel flow in the experiment. The sheared mixing layer, in the boundary between the triangular groove and the channel, affected main flow to raise turbulent in the channel.

* 목포해양대학교 기관시스템공학부

1. 머리말

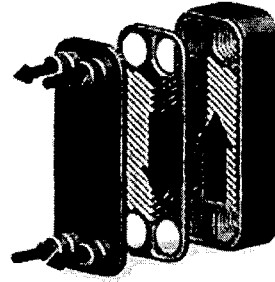
육상의 냉동·공조분야에서 뿐만이 아니라 선박에서도 엔진(주기관 및 보조기관)의 윤활유 및 냉각수 냉각기, 드레인쿨러, 급수 가열기, 주 및 보조복수기, 버터워스히터(butterworth heater) 및 드레인쿨러 등에 가열 및 냉각 목적으로 열교환기를 많이 사용하고 있다. 선박용 열교환기는 해상에서의 안전을 위하여 주기관과 마찬가지로 신뢰성을 가져야 하며 가능한 한 효율이 우수하고 중량 및 용적이 가볍고 작은 것이 요구된다. 판형 열교환기는 전열판의 주름(corrugated channel)이 낮은 레이놀즈수(Re)에서도 난류를 형성하므로 셸-튜브(shell-tube)형식의 열교환기에 비하여 열전달계수가 3배 이상 높다. 따라서 전열면적을 1/3 내지 1/5 정도로 소형·경량화할 수 있는 고효율의 열교환기이다.1)

판형 열교환기에 관한 지금까지의 연구는 종횡비, 세브론 각(chevron angle), 판 사이 간격 등의 기하학적 설계변수에 대한 열역학적 특성 및 압력강하 특성을 실험에 의해 해석하는 것이 주류를 이루고 있으며 내부유동 특성을 규명한 연구는 그리 많지 않은 실정이다.

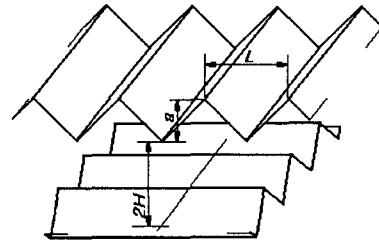
Nishimura 등2)은 그루브 홈의 길이(L)를 3가지로 변화시켜 사각형상의 그루브 채널에서 물질전달 실험을 하였다. 그리고 $Re=234$ 및 $Re=500$ 에서 유동공진 현상이 존재하며, 최적의 스트로할수(strouhal수, St)가 그루브 홈의 길이에 따라 달라지는 결과를 얻었다. Kim 등3~4)은 두 개의 가열 블록이 설치된 채널에서 맥동유동의 열전달 향상 메카니즘(mechanism)은 와홀림(vortex shedding)에 의하여 층류유동하의 정체된 영역에서 유동의 혼합이 촉진됨으로 인하여 열전달이 향상된다고 보고하였다. Lee 등5)은 축방향으로 대칭인 주름진 채널에서의 층류유동 영역에서 최적의 스트로할수(St)가 레이놀즈수(Re)가 증가할수록 감소하며, 채널의 주름의 간격에 반비례한다고 보고하였다. 판형 열교환기를 모사한 삼각형상 그루브 채널 형상에 대한 선행 연구로서는 Greiner and Chen6)의 연구가 있다. 평판채널에 비하여

삼각형상의 그루브 채널에서는 낮은 레이놀즈수에서도 그루브 안에 정체된 영역에 자력진동(self-sustained oscillation)이 형성되기 때문에 최대 65%까지 효율이 향상될 수 있음을 보고하였다.

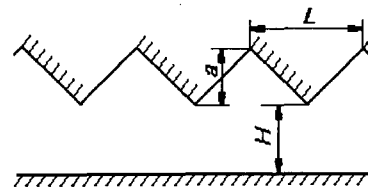
그루브 채널에 관련된 가시화와 PIV 계측에 관련된 연구로는 Lee 등7)이 레버린스 패킹을 모사하고 내부유동장을 입자영상유속계로 계측하였다. 상부의 채널흐름에 의해 구동되는 그루브 유동에서는 내부에 강제와류 형태의 주와류가 존재하며 모서리부분에서 발생하는 2차와류와 벽면사이에 작은 규모의 와류가 발생하는 현상을 그루브에서의 독특한 유동현상으로 설명하고 있다.



(a) Plate Heat Exchanger



(b) Channel Geometry



(c) Modeled Channel Geometry

Fig. 1 Modeling of a Plate Heat Exchanger

그리고 채널흐름과 내부의 주와류가 충돌하는 영역에서 전단혼합작용의 영향으로 압력 및 속도의 변동이 심한 결과를 보고하였다. Mansell 등8)은 성질이 다른 액체가 상부에서 채널흐름(최대속도: 10 cm/sec, 그루브 높이: 9 mm)으로 작용할 경우에 그루브 내부의 액체에 대해 전단력의 전달에 따른 액체간의 혼합에 대한 가시화 실험과 이에 대한 수치계산 결과와 비교하여 분석하였다.

본 연구에서는 판형 열교환기의 설계 개발에 기초 자료로 이용할 수 있고, 선박에서 근무하는 해기사들에게도 판형 열교환기와 관련된 교육자료로 활용하기 위해 가시화기법과 입자영상유속계를 이용하여 내부유동 및 비정상유동특성을 규명하고자 하였다. 실제 판형 열교환기에는 여러 가지 형태가 있지만, 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되고 있는 세브론 무늬의 120°헤링본(herringbone) 전열판을 가진 용접식 판형 열교환기(compact brazed heat exchanger)를 모사에 사용하였다. Fig. 1(a)는 실제 모사에 사용되었던 용접식 판형 열교환기의 그림을 나타내고 있다. 그리고 Fig. 1(b)는 판형 열교환기의 유로 구조를 간략하게 나타낸 그림이다. 유로 구조를 살펴보면, 판형 열교환기는 헤링본 무늬로 인하여 형성되는 삼각형 형상의 유로를 형성한다. 이러한 구조는 아래·위로 엇갈리게 교차하는 형태로서 유체 유동은 서로 엇갈리게 유입되어 교차하므로 와류의 생성을 쉽게 할 수 있는 구조이다. 이러한 구조 때문에 생성된 와류는 낮은 유량에서도 난류유동으로 촉진시킴으로써 다른 열교환기에 비해 대류 열효율이 높다.

판형 열교환기의 모사에서는 아래·위측의 유로의 형상이 동일한 점에 착안하여 판형 열교환기의 유로에서 위측의 유로만을 모사하여 Fig. 1(c)와 같이 삼각형상의 그루브 채널로 모사하였다. 위측 유로만을 모사함으로써 유동가시화가 가능할 뿐 아니라, 그루브 형상을 제외한 채널의 형상이 기존 선행 연구의 형상과 유사하여 실험장치 설계 및 실험결과의 비교·분석이 용이한 장점이 있다.

실험은 채널의 높이와 유입흐름의 단면평균유속에 의해 계산된 7종류의 레이놀즈수에 대하여 가시화 및 PIV에 의한 전유동장의 속도분포를 측정하

였으며, 시계열특성과 순간 속도분포를 이용하여 내부유동 및 비정상 유동특성을 고찰하였다.

2. 실험방법

판형 열교환기를 모사한 삼각형상 그루브 채널의 형상 및 실험 범위는 선행 연구자들의 연구를 바탕으로 설계를 하였다. 채널의 폭(W)과 높이(H)는 2차원 유동만을 고려하기 위하여 채널의 폭을 기존 Greiner9)의 연구의 $W=12.5H$ 보다 크게 선정하여 본 연구에서는 $W=19.8H$ 로 하여 $W=188$ mm, $H=9.5$ mm로 설계하였다. 유량의 범위는 Kwon10)의 연구와 PIV 측정 관련논문을 참고하여 실험 레이놀즈 범위는 $700 < Re < 1750$ 으로 설정하였다. 그루브 간격(L)과 깊이(a)는 형상비 $L/H=1.89$, $L/a=2.0$ 으로 선정하여, $H=9.5$ mm, $L=18$ mm, $a=9$ mm로 설계하였다. 여기서 $L/a=2.0$ 은 모사에 사용된 판형 열교환기의 형상비와 동일하다.



Fig. 2 Photos of the Grooved Test Section

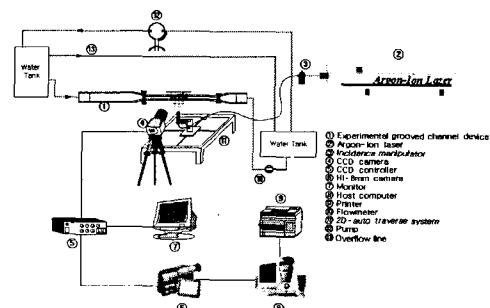


Fig.3 Schematic Diagram of the Experimental Setup

삼각형상 그루브 채널의 유동장은 균일 속도조건(uniform velocity condition)으로 실험을 수행할 수 있도록 입구부에 풍동의 설계방법¹¹⁾을 도입하여 균일 속도조건을 유지하였다. 유동장의 입구 부분은 풍동의 설계방법을 도입하여 확산부(diffuser), 정지부(settling chamber), 수축부(contraction)를 설치하였다. 수축부는 실험장치의 크기를 고려하여 수축비(C.R)를 6.3:1로 설계하여 균일한 속도분포를 얻을 수 있으며, 정지부에서 유입된 유동의 평균속도 분포의 비균일성을 감소시키며, 면적이 넓은 정지부에서부터 평균유속을 증가시켜 상대적인 난류도를 감소시키는 역할을 한다. 그루브 채널의 유동장 아래에는 광파이버 케이블로 연결된 원통형 렌즈(laser light sheet probe)를 설치하여 유동장을 2차원으로 조명하였다. 그리고 그루브 안의 유동을 가시화 할수 있도록 유동장의 옆면을 투명한 아크릴로 제작하였다. 출구부는 유동장을 거친 작동유체인 물을 수조로 순환시키기 위하여 모아두는 역할을 한다.

Fig. 2와 Fig. 3은 이상과 같이 설계하고 제작한 입구부, 유동장부, 출구부가 완전히 조립되어 실험이 수행되었던 실험장치의 사진과 전체 그루브 실험장치를 간략히 나타낸 그림이다. 전체 시스템은 2개의 수조, 원심펌프, 유동장 및 유량계로 구성되어 있다. 작동유체는 상부수조(reservoir)에서 그루브 채널을 통과하여 유량계를 거친후 150ℓ 용량의 하부수조로 모아지고 원심펌프를 통해 상부수조로 이송된다. 상부수조에서 하부수조로 넘침관을 연결하여 일정 수위(수압)를 유지하도록 설계하였으며 유량은 유량계의 입구밸브로서 조절하였다. 실험 결과는 레이놀즈수로 분석하였다.

동점성계수(ν)는 물의 입출구 평균온도에서의 물성치를 사용하고, 질량유량을 측정하여 계산된 평균속도를 사용하여 레이놀즈수를 계산하였다.

실험에서 사용한 고체 추적입자는 지름 100 μm 정도의 PVC(poly vinyl chloride) 백색 구형입자이며, 고속카메라(Photron사, 640x240픽셀, 흑백, 240 pps)로 영상을 기록하였다. 그리고 PIV 계측소프트웨어는 (주)IIT사의 "CACTUS 2000"이다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4은 실험에 적용된 유동장에 대한 개략적인 유동형태이다. 삼각형상 그루브 채널은 하부의 채널흐름과 이 채널흐름에 의해서 전단응력을 공급받는 삼각형상 그루브의 복합유동장이다. 그루브 내부에는 강제와류의 형태를 갖는 순환류가 있으며 그루브의 하부와 채널의 경계면에 큰 속도구배에 따른 전단혼합층(sheared mixing layer)이 형성된다. 또한 삼각형상 상부의 좌측벽면 부분에서 작은 규모의 2차와류가 시간진행에 따라 생성되어 성장 및 소멸되면서 강제와류형태의 주순환류의 크기와 위치에 영향을 미치고, 전단혼합층의 형태도 굴곡진 형태를 보였다. 이러한 현상은 레이놀즈수가 증가할수록 크게 나타났다.

Fig. 5는 유동가시화의 결과를 3/240초 동안 중첩하여 도기한 사진이다. 유동가시화의 결과는 고속카메라를 이용하여 기록하였으며 CACTUS 2000으로 PIV 계측을 수행하였다.

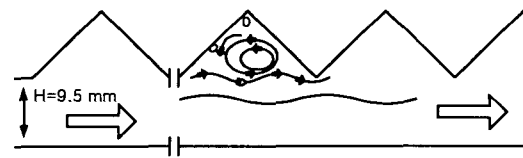
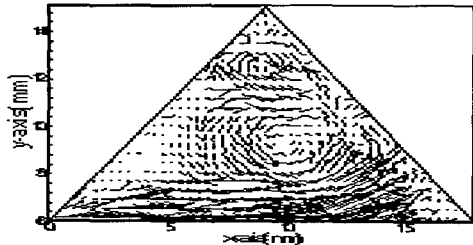


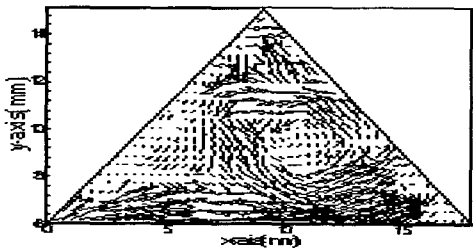
Fig.4 Schematic Diagram of Grooved Channel



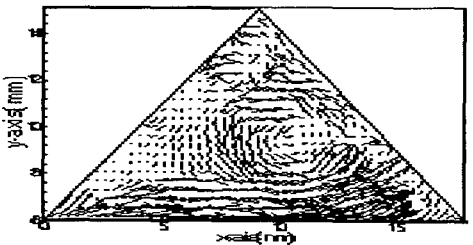
Fig. 5 Flow Visualization



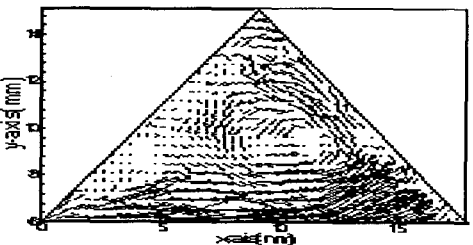
(a) 1/240 sec



(b) 2/240 sec



(c) 3/240 sec



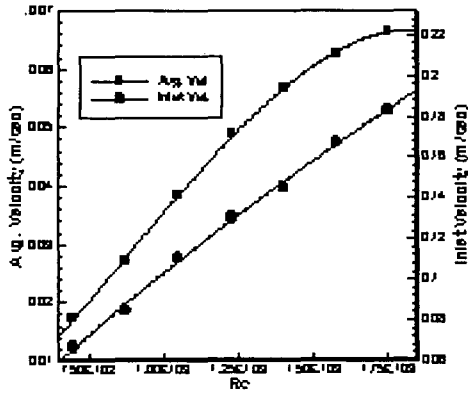
(d) 4/240 sec

Fig.6 Instantaneous Velocity Distribution
($Re = 1.05 \times 10^3$)

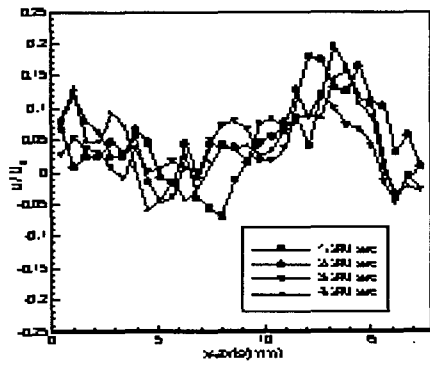
Fig. 6에서는 $Re = 1.05 \times 10^3$ 에 대한 순시의 속도 벡터 분포를 시계열로 보이고 있다. Fig. 6(a)는 1/240초 간격의 임의 순간에 삼각형상 그루브 내부를 계측한 결과이고, Fig. 6(b), Fig. 6(c) 및 Fig. 6(d)는 각각 1/240초의 시간간격을 갖는 속도분포이다. 그림에서 주유동은 좌측에서 우측으로 흐르게 되며 전단응력을 그루브 내부로 전달하게 된다. 그루브의 형상이 사각과는 다르게 삼각형상 그루브인 경우, 전단혼합층이 그루브 내부로 타원형의 형태로 굴곡되어 들어와 있는 유동형태를 보이고 있다. 따라서 주유동의 일부가 그루브의 우측 벽면 근처에서 한정된 출구 공간 때문에 직진성을 잃어버리고 내부 순환류의 회전 방향으로 이동하게 되며, 전단혼합영역의 위치는 삼각형상 그루브 하부 중간부근이다.

그루브 하부에서 보면 채널흐름의 일부가 다소 굴곡된 형태로 출구측으로 진행하고 있으며, 이러한 흐름은 인접한 그루브에도 영향을 미치게 된다. 또한 그루브 내부를 순환하는 주와류는 삼각형상의 그루브안에서 흐름의 진행방향으로 치우쳐 있으며, 시간진행에 따라 크기와 위치가 변화하는 비정상유동형태를 나타내고 있다. 이것은 그루브 좌측의 벽면 중앙 부근(Fig. 6(c)참조)에서와 같이 주순환류에 의해 형성된 2차와류와 굴곡된 형태로 진행되는 주유동(Fig. 6(d)참조)의 영향으로 판단된다. 그리고 상부모서리에서는 미약하지만 스펠방향으로부터 유입 및 유출된 흐름의 경향이 나타나 있다.

Fig. 7(a)은 계측 유동장에서 유량의 변화에 따른 입구유속과 유동장 전체의 시간평균유속을 비교하여 나타내고 있다. 시간 평균의 값은 기록한 영상을 연속적으로 재생하여 샘플링한 300회의 영상 중 3의 배수에 해당하는 영상을 선택하여 동일입자 추적을 행하여 얻은 순시 속도벡터를 산술 평균한 결과이다. 입구유속은 인접한 그루브의 경계면에서 채널을 흐르는 주유동의 평균유속이다. 레이놀즈수의 증가에 따라 거의 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 그러나 시간평균의 유동장 내부 속도는 $Re = 1.5 \times 10^3$ 를 전후하여 증가폭이 다소 둔화되고 있다.



(a) Inlet and Average Velocity in Flow Field



(b) Sheared Mixing Layer at $Re = 1.05 \times 10^3$
Fig. 7 Comparison of Velocity Profile

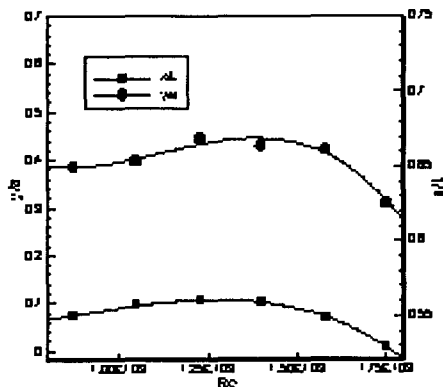
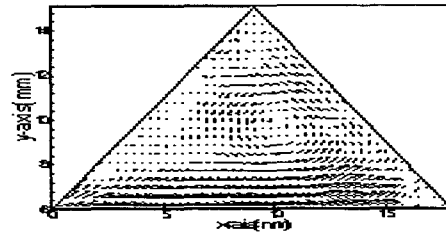
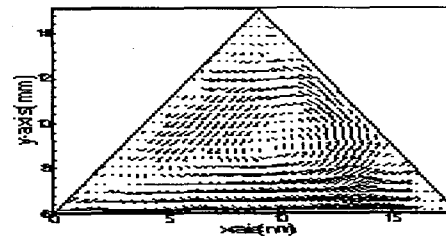


Fig.8 Position of Vortex Center at Triangular Groove



(a) $Re = 1.05 \times 10^3$



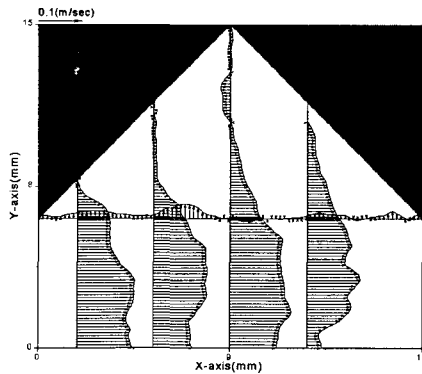
(b) $Re = 1.75 \times 10^3$

Fig. 9 Time-mean Velocity Distribution
Fig. 7(b)는 채널흐름과 그루브의 경계면에서 수직속도성분을 추출하여 입구유속으로 무차원화해서 도시한 것으로 $Re=1.05 \times 10^3$ 의 경우이다. 시간변화에 따른 변동성분이 삼각형상 그루브의 기하학적 중심선에서 주유동의 방향으로 치우친($x=13$ mm) 영역에서 크게 나타나고 있다.

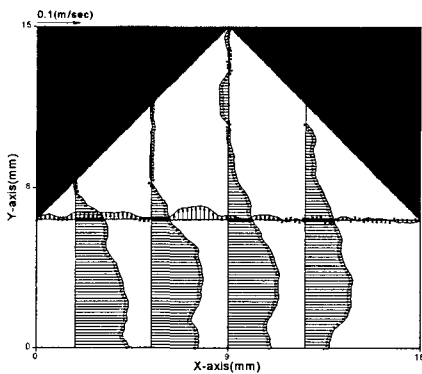
Fig. 8은 삼각형상 그루브내에서 주순환류의 중심위치를 레이놀즈수의 증가에 따라 그루브의 깊이와 피치에 대해 무차원화하여 나타낸 것이다. 주순환류의 중심위치는 삼각형상 그루브의 중앙하부 ($y/a \leq 0.31, x/L \leq 0.53$ 방향)로 이동하는 경향을 보이고 있다. 이것은 레이놀즈수의 증가에 따른 주순환류의 세기가 증가하여 그루브 내부에 형성된 2차와류의 영향이 감소하기 때문으로 판단된다.

Fig. 9(a)는 $Re=1.05 \times 10^3$ 의 시간평균 속도벡터 분포이다. 전체적으로 순간 속도벡터 분포와 비교하여 정연한 모습을 보이고 있으며 와류의 중심위치 등이 확연하게 보인다.

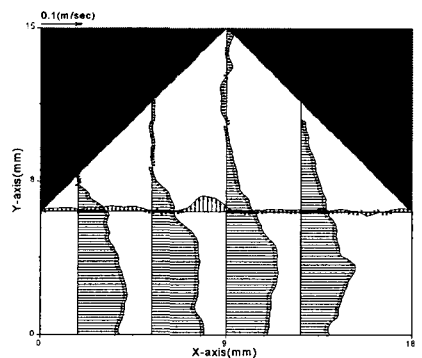
Fig.9(b)는 $Re=1.75 \times 10^3$ 의 결과이다. $Re=1.05 \times 10^3$ 에 비해서 와류의 중심이 그루브 하부로 치우쳐 있으며 레이놀즈수가 증가한 만큼 속도분포도 크게 나타나고 있고, 주순환류의 형태가 타원형의 패턴을 유지하고 있다.



(a) 1/240 sec



(b) 2/240 sec



(c) 3/240 sec

Fig. 10 Velocity Profiles at Various Sections
at $Re = 1.58 \times 10^3$

이것은 사각 그루브의 경우와는 다르게 채널에 흐르는 주유동이 삼각형상 그루브 내부에 미치는 영향이 크기 때문으로 추정된다.

Fig. 10는 순간속도 분포의 수직속도 성분에 대하여 계측단면을 기하학적으로 10등분한 선상에서 좌측으로부터 1, 3, 5, 7의 네 가지 단면을 채택하고 수평속도성분과 삼각형상 그루브와 채널의 경계부분의 수직속도 분포를 동시에 나타낸 것으로 $Re=1.58 \times 10^3$ 경우의 결과이다. 좌측 상부의 기준속도의 크기는 실제 속도의 값이다. 속도분포의 형상에서 주유동이 진행되는 방향으로 변곡점이 보다 많이 나타나고 있다. 이것은 유동장의 불안정성을 나타내는 기본적인 요소로서 전단혼합영역의 영향이 주유동에도 미치고 있음을 알 수 있으며 난류 유동을 촉진하는 특성으로 보여진다. 수직속도 성분의 시계열적 변화를 보면 와류의 이동이 비교적 정연한 것을 알 수 있다.

4. 맺음말

판형 열교환기의 유로 형상을 모사한 유동장을 대상으로 고속카메라와 PIV상용소프트(CACTUS 2000)를 이용하여 내부유동 가시화 및 전 유동장의 속도를 계측하였으며, 와류의 연속적인 거동특성을 관찰하기 위해 시계열 속도분포를 검토하였다. 그 결과 삼각형상 그루브 내의 유동형태는 채널흐름으로부터 전달받은 전단응력이 그루브 내부를 순환하는 회전에너지로 전환되면서 강제와류와 유사한 타원형의 주순환류가 존재하였다. 그루브 내부를 순환하는 주와류는 삼각형상의 그루브안에서 흐름의 진행방향으로 치우쳐 있으며, 시간진행에 따라 크기와 위치가 변화하는 비정상유동형태를 보였다. 이것은 그루브 좌측의 벽면 부근에 주순환류에 의해 형성된 2차와류와 굴곡된 형태로 진행되는 주유동의 영향으로 판단된다. 주순환류의 크기는 레이놀즈수의 증가에 따라 증가하였으며, 중심 위치는 $Re=1.4 \times 10^3$ 이상에서 그루브의 중앙하부 ($y/a \leq 0.31$, $x/L \leq 0.53$ 방향)로 이동하였다. 또한 삼각형상 그루브와 채널의 경계부분에서의 수

직속도 성분의 시계열적 변화에서 난동성분이 주유동의 방향으로 정연하게 이동하는 현상과 채널흐름에서 주유동이 진행하는 방향으로 수평속도 성분의 분포에서 변곡점이 보다 많이 나타나는 현상이 관찰되었다. 이것은 전단혼합영역의 영향이 주유동에도 미치고 있음을 알 수 있으며 난류유동을 촉진하는 특성으로 추정된다.

삼각형상 그루브 채널 흐름에서 다양한 레이놀즈수에 따른 압력특성과 주순환류에 의한 2차와류의 생성 및 소멸에 관한 연구는 다음의 과제로 남기로 한다.

후 기

이 연구는 목포해양대학교 교내학술연구비의 일부지원으로 이루어 졌으며 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 류해성, 윤재성, "냉동공조에 있어서의 판형열교환기의 응용", 공기조화·냉동공학, 제27권, 제3호, pp. 218~231, 1998.
- [2] Nishimura, T., Oka, N., Yoshinaka, Y., and Kunitsugu, K., "Influence of Imposed Oscillatory on the Mass Transfer Enhancement of Grooved Channels for Pulsatile Flow", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 43, No. 3, pp. 2065~2374, 2000.
- [3] Kim, S. Y., Kang, B. H., and Hyun, J. M., "Forced Convection Heat Transfer from Blocks in Pulsating Channel Flow", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 41, No. 3, pp. 625~634, 1998.
- [4] Kim, S. Y., Kang, B. H., and Jaluaia, Y., "Thermal Interaction between Isolated Heated Electronic Components in Pulsating Channel Flow", Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 34, pp. 1~21, 1998.
- [5] Lee, B. S., Kang, I. S., and Lim, H. C., "Chaotic Mixing and Mass Transfer Enhancement by Pulsatile Flow in an Axisymmetric Wavy Channel", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 42, pp. 2571~2581, 1999.
- [6] Greiner, M., and Chen, R. F., "Heat Transfer Augmentation through Wall-Shape-Induced Flow Destabilization", J. Heat Transfer, Vol. 112, pp. 336~341, 1990.
- [7] Lee, Y. H., Kim, C. S., Doh, D. H., and Choi, J. W., "PIV Measurement of Cubic Cavity Driven by 2-D Plane Poiseuille Flow", Proc. 3rd J/KSME Fluids Eng. Conf., JSME-KSME, pp. 335~340, 1994.
- [8] Mansell, G., Walter, J., and Marschall, E., "Liquid-Liquid Driven Cavity Flow", J. Comput. Phys., Vol. 110, pp. 274~284, 1994.
- [9] Greiner, M., "An Experimental Investigation of Resonant Heat Transfer Enhancement in Grooved Channels", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 34, No. 6, pp. 1383~1391, 1991.
- [10] 권오준, "삼각형상 그루브채널에서 맥동유동에 의한 열전달 성능 향상에 관한 실험적 연구", 고려대학교 대학원 석사학위논문, pp. 10~21, 2001.
- [11] Morel, T., "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions", J. Fluids Engineering, Vol. 97, pp. 225~233, 1975.