

## PIV를 이용한 파형채널 입구영역의 유동특성에 관한 연구

이철재\* · 조대환†

(원고접수일 : 2009년 7월 7일, 원고수정일 : 2009년 9월 11일, 심사완료일 : 2009년 9월 21일)

### A Study on Flow Characteristics of the Entrance Region of Wavy Channel by PIV

Cheol-Jae Lee\* · Dae-Hwan Cho†

**Abstract :** An experimental flow visualization study of the entrance section of channels formed with wavy plates was made. The experiments were conducted in a water channel and a laser illuminated particle tracking was used as the technique of flow visualization. The flow region that were found in the experiments are steady, unsteady and significantly-mixed flows. Instabilities of the flow first appear near the exit of the channel. As the Reynolds number increases, the flows are characterized by the appearance of flow separation and the growth of recirculation region.

**Key words :** Wavy walls(파형벽면), Channel flow(채널유동), Visualization(가시화), Recirculation region(재순환영역)

#### 1. 서 론

매끄러운 표면에서의 열이나 물질 전달 효율은 높지 않기 때문에 이 효율의 증가시키기 위해 열이나 물질 교환이 일어나는 경계층 주위의 유체와 관 중심부를 흐르고 있는 유체의 혼합이 필요하게 된다. 이러한 전달효율을 향상 시키는 방법에는 내부 관관을 엇갈리게 배치하거나 와류발생기(vortex generator)의 채용 및 파형관(wavy channel)을 이용하는 방법 등이 있다. 파형관은 간단하면서도 전달효율을 높일 수 있으며 이에 대한 연구는 주로 완전 발달한 유동에 대해 수치적, 실험적으로 이루어져왔다. 김<sup>(1)</sup>은 투명실리콘으로 제작한 파형관에

물과 글리세린을 혼합한 작동유체를 흐르게 하여 PIV측정을 하였다. 완전발달 유동과정에 있는 파형관내부 유동을 계측한 결과  $Re=2 \times 10^3$ 에서 대규모혼합이 2.5번째 모듈부터 발생하며 Reynolds 수가 낮은 경우 몇 개의 파형모듈로 이루어진 열교환기는 원형관에 비해 열전달 향상을 기대할 수 없음을 보고하였다. Mahmud 등<sup>(2)</sup>은 저레이놀즈수의 유동에서  $Re=35$ 를 기준으로 박리가 발생하는 임계점이 존재함을 수치해석을 통하여 보고하였다. 그러나 실험조건과 모델에 따라 다르지만 파형벽면을 갖는 유동에서 완전 발달유동은 8번째 혹은 그 이상인 경우가 대부분이다<sup>(3)</sup>. Nishimura 등<sup>(4)-(6)</sup>은 대형 파형관에서 정상상태나 맥동유동에 관련된

† 교신저자(목포해양대학교 기관시스템공부부, E-mail:dhcho@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7217)

\* 동명대학교 자동차공학과

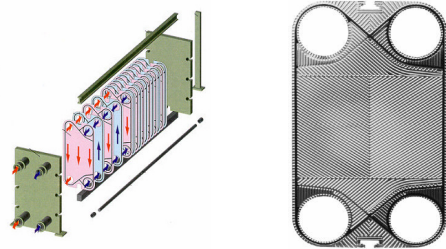
일련의 실험과 수치해석을 통해 연구하였다. 여기서 Reynolds수가 증가 할수록 정상유동에서 2차원 비정상 유동으로 천이하며 이 경우 주유동과 재순환 유동사이에 활발한 상호작용에 의해 벽면에서 열 및 물질 전달이 크게 증가하는 것으로 보고하였다. 그러나 유동구조를 파악하기 위해서는 발달과정과 입구의 비대칭 혼합영역에 대한 연구도 매우 중요하다. 실제 현장에서 사용되는 판형열교환기<sup>[7]</sup>는 경우 유량이 약 30m<sup>3</sup>/HR 이다. 이를 환산하면 실제 Reynolds수는 기존의 연구결과보다 높은 Re=5.0×10<sup>2</sup> 이상의 비정상유동의 범주에 포함되며 특히 유입 유량의 변화에 따른 유동장 내부의 속도특성은 체계적인 검토가 필요하다.

이 연구에서는 선박에 사용되는 판형열교환기를 기준으로 실험조건을 설정하고 파형관의 벽면을 코사인웨이브(Cosine wave)형상으로 한 모델에 대해 유동장을 PIV기법으로 속도분포를 측정하여 고찰하였다. 파형관의 입구영역에 대해 유입유량의 증감(Reynolds수의 변화)에 따라 변화되는 유동특성을 비교 검토함으로써 설계 및 운용에 기여하고자 한다.

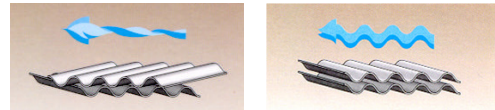
## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1에 선박에 사용되는 판형열교환기의 예를 보였다. 냉각수는 열교환기의 하부로 유입하여 플레이트사이를 지나 출구 측으로 진행한다.(Fig. 1(a)참조) 이때 플레이트의 반대편 측면에 흐르는 대상유체가 벽면을 통해 열교환을 하게 된다. 열교환효율을 높이기 위한 플레이트의 배치방식은 헤링본형(Herringbone type)과 파형(Corrugate type)으로 크게 분류 할 수 있다(Fig. 2(c),(d)). 실제의 유량조건은 현장 사용설명서<sup>[7]</sup>에 명기된 기준을 유입 단위면적으로 환산하면 약 0.16m<sup>3</sup>/s이며 이를 고려하여 실험의 유량범위를 측정단면 기준 Q=0.15 l/sec에서 Q=0.25 l/sec, 평균유속의 범위를 0.09m/s에서 0.21m/s로 정하였다. Fig. 2는 실험장치구성과 파형관의 개략도이다. 판형열교환기 내부 유동장의 속도를 측정위해 제작한 실험모델은 실제 다양한 형태의 판형열교환기의 파형과 완벽하게 일치하지는 않으나 이와 유사한 해석이 가능한 형상으로 하기 위하여 양쪽 벽면을

코사인 웨이브형상으로 제작하였다. 양쪽벽면간의 간격, 진폭 및 주기는 H=17.5mm, a=12mm, 2L=150mm이며 계측영역은 파형관의 4번 모듈이다. 실험 장치는 크게 유동장 형성 장치, 영상관련 장치 및 PIV계측장치로 구분된다. 유동장에 유입되는 흐름이 균일 하도록 입구에 허니콤을 부착하여 2차원 평판흐름이 형성되도록 실험 장치를 구성 하였다. 영상 관련 장치는 광원(아르곤이온레이저, 5W)과 평면 광을 유동장에 조사하는 광케이블 및 원통형 렌즈 그리고 영상기록용 고속카메라(FASTCAM-X, 1280pixel×1024pixel)이다.

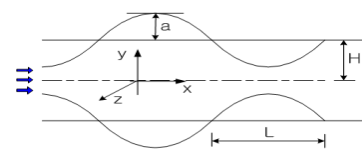


(a) Typical fluid flow (b) Heat transfer plate

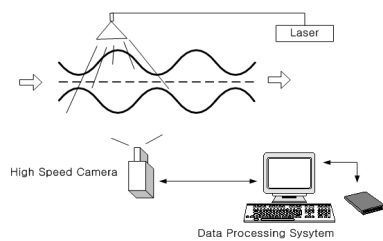


(c) Herringbone type (d) Corrugate type

Fig. 1 Plate heat exchanger



(a) wavy walled channel



(b) PIV system

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

PIV계측은 고속카메라로 획득한 영상을 PIV 해석 상용프로그램을 이용하여 속도벡터를 구하였다.

가시화 실험은 유동장에 입자가 고루 분포되었을 때 시트라이트를 상부에서 조사하고, 계측영역인 4번 모듈 전면에 고속카메라를 설치하여 2,000프레임의 영상을 획득하여 PIV계측에 이용하였다.

입자는 100 $\mu$ m 전후의 PVC(poly vinyl chloride) 입자를 선별하여 사용하였으며 빛의산란을 방지하기 위하여 촬영부분과 광원이 조사되는 곳을 제외하고 모두 음영 처리하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 3는 유입부에 설치된 허니콤을 부착한 평판 흐름을 촬영하여 해석한 것 중  $Re=3.68 \times 10^3$ 의 경우이다. 계측 위치는 파형관 입구에서 약 90mm 상류측이다. 계측 값의 오차를 확인하기위해 유입평판

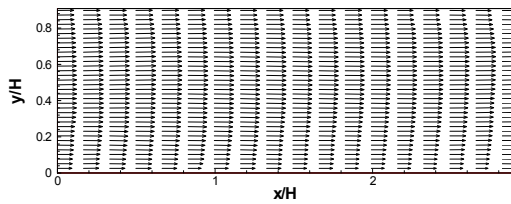
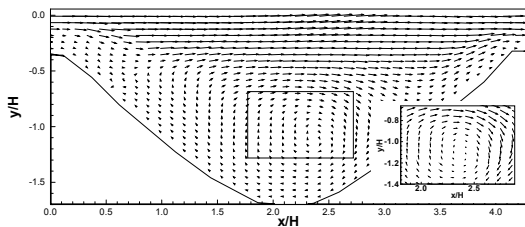
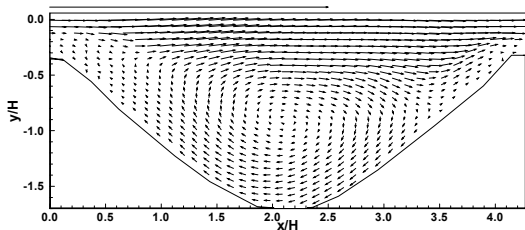


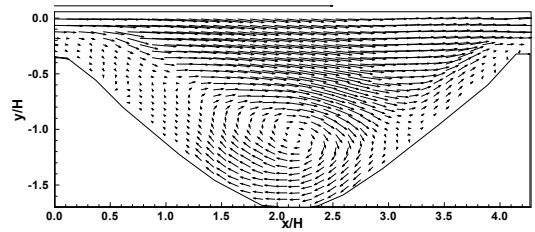
Fig. 3 Average velocity distribution at inlet flow



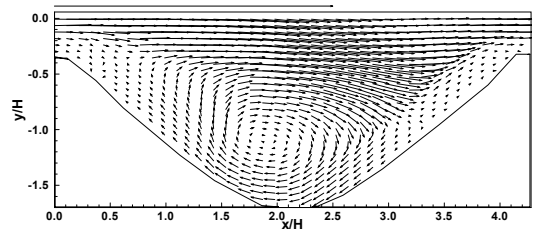
(a)  $Re=1.58 \times 10^3$



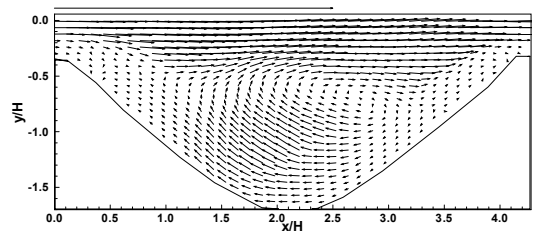
(b)  $Re=1.93 \times 10^3$



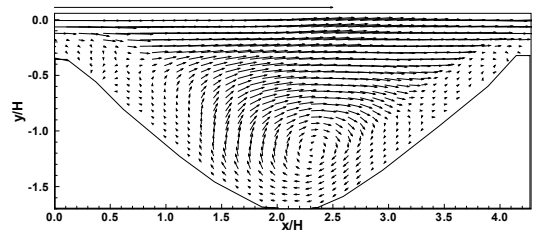
(c)  $Re=2.28 \times 10^3$



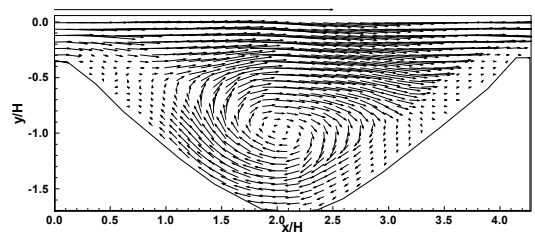
(d)  $Re=2.63 \times 10^3$



(e)  $Re=2.98 \times 10^3$



(f)  $Re=3.33 \times 10^3$

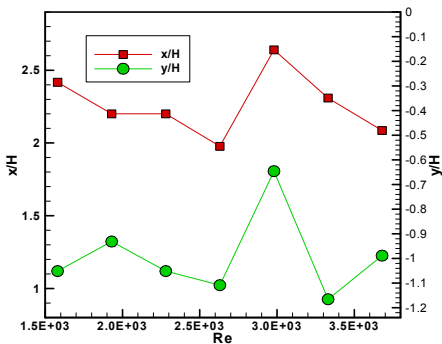


(g)  $Re=3.68 \times 10^3$

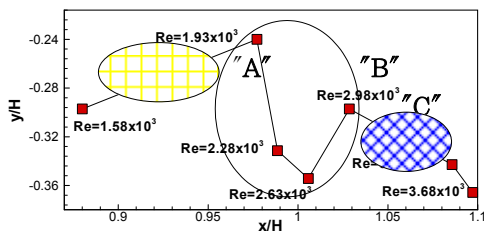
Fig. 4 Time mean Velocity profiles at half domain

의 평균높이와 평판의 폭을 기준으로 한 단면적과 실측된 유량을 계산하여 평균유속을 구하고 평판유동 PIV계측 평균값과 비교한 결과 0.1% 전후의 오차를 보였다. 그림에서 벽면의 속도분포가 다소 낮아 포물선의 형태를 보이는 것은 PIV계측시 카메라의 해상도와 입자의 추종성에 의한 결과로 추정하고 계측영역을 파형관의 4번 모듈로 선정하였다.

Fig. 4는 Reynolds수 증가에 따른 시간 평균 속도벡터분포이다. 시간평균속도분포는 PIV계측으로 얻어진 1,000장의 순간 속도분포를 산술평균하였다. 속도분포에서 Reynolds수의 증가할수록  $x/H=1.6$ 에서  $x/H=2.0$ ( $y/H=0.0$ 기준)사이에서 파형관 입구유속보다 오히려 증가하고 있다. Fig. 4(a)는  $Re = 1.58 \times 10^3$ 의 경우이다. 파형관 내부의 속도가 상부의 약 1/10 정도로 너무 낮아 별도의 창에 확대하여 나타낸 결과에서 보면 강제와류의 형태를 가진 재순환 흐름이 존재하나 그 세력이 매우 미약함을 알 수 있다. 이 강제와류는 Reynolds수가 증가할수록 재순환 영역이 보다 뚜렷하게 나타나고 있다. 파형면의 마루(crest)의



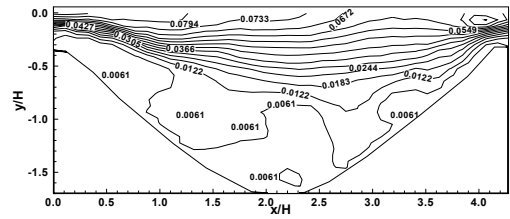
(a) movement of main vortex center



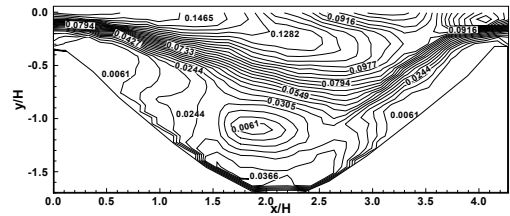
(b) movement of shear layer

Fig. 5 Variation of vortex and shear layer

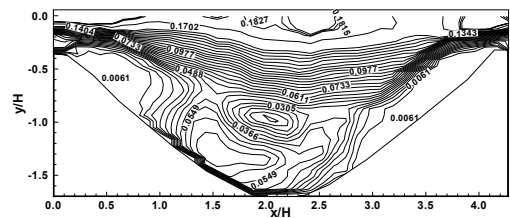
정점을 지나면서 골(trough)로 진입하는 영역에서 급격한 속도구배를 갖는 경계층이 형성되고 박리(separation)가 발생하여 하류로 진행하고 있다. Fig. 5(a)는 파형관 내부의 주순환류의 중심위치의 변동을 Reynolds수에 따른 수평 및 수직방향의 변화를 나타낸 것이며, Fig. 5(b)는 유입부에서 형성되는 전단 혼합층의 위치의 변동을 도시한 것이다.



(a)  $Re=1.58 \times 10^3$



(b)  $Re=2.63 \times 10^3$

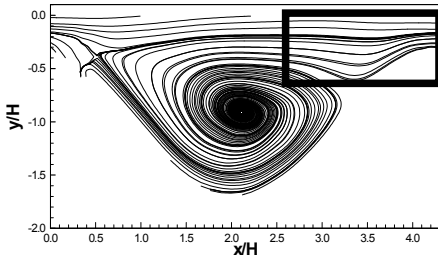


(c)  $Re=3.68 \times 10^3$

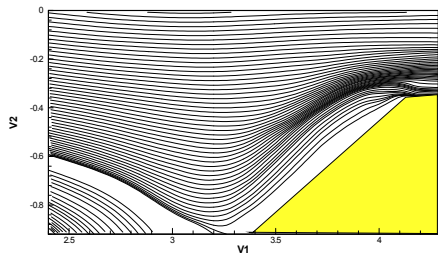
Fig. 6 Comparison of Equi-velocity distribution

Fig. 5(b)에서 전단혼합층은 Reynolds수가  $Re=3 \times 10^2$ 가 증가할 때 평균적으로  $x/H=0.2$  정도 하류방향으로 이동하고 있고 "A"와 "C"에서 이동거리가 증가하는 결과를 보였다. "A"의 경우 내부 재순환류가 강제와류의 형태를 갖추면서 상부의 흐름과 충돌하기 시작하면서 나타나는 현상으로 판단된다. 속도벡터분포에서는 자세히 나타나 있지 않으나 유동가시화의 결과를 관찰해 보면 "B"의 경

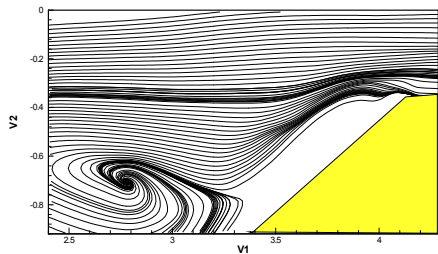
우 Reynolds수가 증가한 만큼 속도가 증가한 일부 흐름이 하류 측으로 순조롭게 진행하지 못하고 우측의 벽면에 부딪혀 벽면을 타고 내부로 진입하기 때문이다. 이러한 결과는 내부순환류의 중심위치에도 영향을 미치며 그 경계점은  $Re=3.98 \times 10^2$  전후이다(Fig. 5(a)참조).



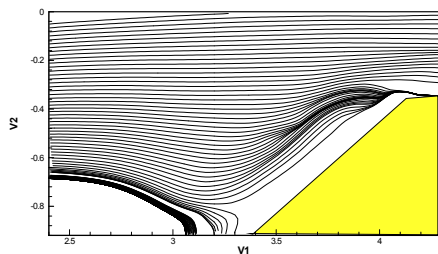
(a)  $Re=2.28 \times 10^3$



(c)  $Re=2.63 \times 10^3$



(c)  $Re=2.98 \times 10^3$



(d)  $Re=3.33 \times 10^3$

Fig. 7 Stream lines

Fig. 6은 Reynolds수에 따른 내부 유동장의 등속도선도이다. 전체적인 유동패턴은 상부의 흐름이 “U”자 형태로 내부로 유입되어 하류로 진행하며 벽면에 두꺼운 경계층이 형성된다.

상부의 주흐름과 내부와의 평균유속의 차이는 5배 이상이며 Reynolds수가 증가 할수록 상부와 내부의 평균속도 차이는 감소하였다. 이것은 Reynolds수가 증가함에 따라 상부 유속이 빨라진 만큼 하류측으로 원활하게 진행하지 못하고 파형관 내부로 유입되기 때문에 판단된다. 또한  $Re=2.98 \times 10^3$ 을 전후로 좌측 하부 벽면에 급격한 속도구배가 형성되고 있다. 이것은 Fig. 5의 고찰에서 언급한 것과 같이 내부로 진행한 흐름의 일부가 우측 상부에 충돌하여 내부로 유입되었기 때문이다. 이 현상이 나타나는 과정은 흐름의 진행에 따라 고찰하면, 우측벽면 부근에서 분리되어 벽면을 타고 내부로 유입하여 좌측하부에 급격한 속도구배가 있는 영역을 형성하고 일부는 내부순환류에 합쳐져 강제와류 형태로 유지되고 일부는 유입부의 전단층으로 진행하여 전단혼합 영역을 형성하게 된다.

Fig. 7은  $Re=2.28 \times 10^3$ 과 우측 상부 영역을 확대한 시간평균 스트림라인이다.  $Re=2.98 \times 10^3$ 을 경계로 우측벽면의 경계층의 크기가 증가하였다가 다시 감소하는 결과를 보이고, 우측 벽면의 정점 상부로 빠져나가는 흐름의 형태도 차이가 나타나고 있다. 이것은 고레이놀즈수의 캐비티유동<sup>[8]</sup>과 같이 우측벽면부근에서 하강하는 전단응력성분이 내부 유동에 영향을 미치기 때문이며 유동패턴이 변화하는 임계레이놀즈수로 여겨진다. 이에 관해서는 비정상유동을 대한 보다 엄밀한 고찰이 필요하다.

#### 4. 결 론

파형벽면을 갖는 채널입구영역의 유동특성을 고찰하기위하여 판형열교환기 내부와 유사하게 벽면을 코사인 웨이브형상으로 제작 한 모델내부의 유동장을 PIV기법으로 계측하였다. 그 결과 상부의 주흐름과 내부와의 평균유속의 차이는 5배 이상이며  $Re=2.98 \times 10^3$ 을 전후로 좌측 하부 벽면에 급

격한 속도구배가 형성되었다. 이것은 내부로 진행한 흐름의 일부가 우측 상부 영역에서 분리되어 내부로 유입되었기 때문이다.

속도특성은 Reynolds수의 증가할수록  $x/H=1.6$ 에서  $x/H=2.0$ ( $y/H=0.0$ 기준)사이에서 파형관 입구유속보다 빨라지는 경향을 보였으며, 재순환 영역이 보다 뚜렷하게 나타났다. 또한 파형관 상부흐름과 내부 재순환흐름의 평균속도 차이는 Reynolds수의 증가에 따라 파형관우측상부에 충돌하여 내부로 유입되는 흐름의 영향으로 감소하는 경향을 나타내었다.

### 참고문헌

- [1] 김성균, "PIV를 이용한 3차원 파형관 내부유동의 실험적 연구", 설비공학논문집, 제16권 제4호, pp. 368-373, 2004
- [2] S. Mahmud, A.K.M. Sadrul, M.A.H. Mamun, "Separation characteristics of fluid flow inside two parallel plates with wavy surface", J. Engineering Science, Vol. 40, pp. 1495-1509, 2002
- [3] 조기주, 파형벽면의 관내에서의 유동 및 열전달 특성, 한국과학기술원, 박사학위논문, 1999
- [4] T. Nishimura, N. Oka, Y. Yoshinaka, K. Kunitsugu, "Influence of imposed oscillatory frequency on mass transfer enhancement of grooved channels for pulsatile flow", J. Heat and Mass Transfer, Vol. 43, No. 1, pp. 2365-2374, 2000
- [5] T. Nishimura, S. Matsune, "Vortices and wall shear stresses in asymmetric and symmetric channels with sinusoidal wavy walls for pulsatile flow at low Reynolds numbers", J. of Heat and Fluid Flow, Vol. 19, pp. 583-593, 1998
- [6] T. Nishimura N. Kojima, "Mass transfer enhancement in a symmetric

sinusoidal wavy-walled channel for pulsatile flow", J. Heat and Mass Transfer, Vol. 38, pp. 1719-1731, 1995

- [7] Engineering Services, "Sec Plate and Frame Service Manual", SEC Heat Exchangers Inc., pp. 2-32, 2009
- [8] 김진구, 조대환, 이영호, "고레이놀즈수에 있어서 2차원 정방형 캐비티의 유동특성", 한국항공우주학회지, 제24권, 제6호, pp. 31-39, 1996

### 저 자 소 개



#### 이철재(李哲載)

1995년 동아대학교 대학원 졸업(공학박사), 현재 동명대학교 자동차공학과 교수



#### 조대환(趙大煥)

1998년 한국해양대학교 대학원 졸업(공학박사), 현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수