

PIV를 이용한 3차원 파형관 내부 유동장의 실험적 연구

김 성 균[†]

건국대학교 기계공학과

An Experimental Investigation on Flow Field in a Pipe with Sinusoidally Wavy Surface by PIV

Sung-Kyun Kim[†]

Department of Mechanical Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

(Received November 24, 2003; revision received February 25, 2004)

ABSTRACT: A flow field in a passage with periodically converging-diverging cross-section is investigated experimentally by PIV measurement. A tube with a sinusoidally wavy cross section is one of several devices employed for enhancing the heat and mass transfer efficiency due to turbulence promotion and unsteady vortical motion. While the numerical flow visualization results have been limited to the fully developed cases, existing experimental results of this flow were simple qualitative ones by smoke or dye streak test. Therefore, the main purpose of this study is to produce quantitative flow data for fully developed and transient flow regime by the Correlation Based Correction PIV (CBC PIV) and to conjecture the analogy between flow characteristics and heat transfer enhancement with low pumping power. Another purpose of this paper is to examine the onset position of the transition and the global mixing, which results in transfer enhancement. At $Re=2000$, evidences of the global mixing are captured at 2.5 wavy module through the variation of RMS values and instantaneous velocity plot.

Key words: CBC PIV(CBC 입자영상유속계), Sinusoidally wavy pipe(단조화 파형관), Global mixing(대규모 혼합)

1. 서 론

주기적으로 축소와 확대를 반복하는 정현파형관 내부 유동해석의 주된 적용 분야는 고성능 열교환기의 열교환 성능해석과 혈관 내의 혈액유동의 모사이다. 그동안 발간된 논문들은 주로 열 및 물질 전달량에 대한 결과들이었으며, 파형관 내부 유동장에 관한 수치해석은 완전발달 유동장

에 대한 것들이었다.^(1,2) 그리고 해석결과로는 스트릭 기법을 이용한 비교적 간단한 정성적인 가시화 실험들이 행해졌다.^(3,4) 최근 발표된 논문들은^(3,4) 유동특성과 유동의 불안정성, 와동의 형성과 이탈, 대규모 혼합(Global mixing), 코어 유동(Core flow) 등 열 및 물질 전달량 증가와의 밀접한 상호 연관성을 보여주고 있다.

이러한 현상은 2차원 파형 수로의 수치해석 및 실험적 결과에서도 관측되었다.^(1,3,5-7)

본 논문에서는 파형관 내부 유동에 대해 완전 발달한 이후뿐만 아니라 천이과정에 대하여 PIV 기법을 이용한 유동장 측정을 하였다. 정확한 속

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-450-3472; fax: +82-2-3436-0540

E-mail address: sungkim@konkuk.ac.kr

도백터 추적을 위해 최근 개발된 CBC PIV 알고리즘⁽⁸⁾을 도입하였다. 투명 실리콘을 이용하여 사각형 아크릴 상자의 내부에 파형 유로를 만들었다.⁽⁹⁾ 작동유체는 유로를 형성하고 있는 투명 실리콘과 굴절률을 동일하게 하기 위해 글리세린과 물을 혼합하여 사용하였으며, 실험조건은 레이놀즈수가 동일하도록 유량을 결정하였다. 파형관의 형상은 기존의 결과와 비교를 위해서 Russ and Beer⁽⁴⁾와 동일한 형상으로 제작하였다. Russ and Beer⁽⁴⁾의 모델은 금속으로 만든 파형관으로 가시화는 불가능하며 나프탈렌 승화실험에 의한 간접적인 열전달량 측정법이며, 가시화를 위한 모델은 유리관을 변형시켜 만든 2개의 파형 모듈 내의 스모그 스트릭 기법에 의한 정성적 측정이었다. 본 논문에서는 정확한 기하학적 형상의 투명관을 제작하였으며, 12개의 모듈 중 입구에서 9번째의 모듈을 완전발달 유동에 대한 실험대상 모듈로 선정하였다. 정성적인 순간 속도장과 정량적인 평균 속도장을 발표된 논문의 결과들과 비교하였다. 네거티브 모델의 NC 제작과정유입 유출관의 직경을 고려하여 모듈의 최대직경부터 시작되어, Russ and Beer⁽⁴⁾의 모델보다 반 모듈을 더 갖고 있어서 모듈의 순서에 0.5를 첨가하였다. 임계 레이놀즈수(약 400)를 넘어서면 코아 유동과 벽 근처 재순환영역 사이에서 대규모 혼합이 관찰되었으며, 그 결과 열 및 물질 전달이 증가함을 알 수 있다.

2. 투명한 파형관 제작 및 작동유체

2.1 유동통로 제작

투명한 아크릴 상자의 내부에 투명 실리콘으로 제작된 파형관 유로는 다음과 같은 과정을 통해서 제작되었다.^(9,10)

- (1) 파형관 내부의 공동형상을 NC 선반을 이용하여 알루미늄으로 제작한다.
- (2) 완성된 모듈을 긴 직육면체 아크릴 박스의 증앙에 위치하도록 고정시킨다.
- (3) 투명 실리콘을 경화제와 혼합하고, 혼합액이 담긴 용기를 진공 챔버 안에 넣는다. 진공 펌프로 챔버 내부의 압력을 낮추며 혼합액이 담긴 용기를 가진 하여 혼합액에 포함된 미세한 기포를 제거한다.

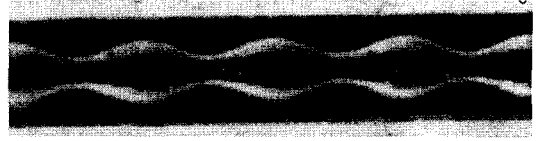


Fig. 1 Wavy passage in a transparent rectangular box.



Fig. 2 Photo of model filled with water (left) and with water-glycerol mixture (right).

(4) 탈포한 혼합액을 기제작된 아크릴 상자 안에 기포가 생기지 않도록 주의하며 주입한다.

(5) 오븐(70℃에서 3시간)에서 경화시킨다.

(6) 아크릴 박스를 열어 경화된 실리콘 유로의 한쪽 단면을 절개하여 내부에 있는 금속 모듈을 제거하고 실리콘의 절개부를 시안화 아크릴레이트로 접착해 아크릴 상자를 닫는다.

Fig.1은 위의 과정에 따라 완성된 유로의 일부 사진이다.

2.2 작동유체

투명 실리콘으로 제작된 유로의 광학적인 굴절이 물 또는 공기와 다르기 때문에 본 실험에서는 Fig.2와 보는 바와 같이 물과 글리세린을 혼합(체적비 58 : 42, 점도 $6.55 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$, 비중 약 1.2)하여 동일한 굴절률을 갖도록 하였다.

3. PIV 실험

Fig.3는 실험장치의 개략도이다. Double Head Nd : Yag 레이저, 최대해상도 1208×1024 pixels, 80 nano-sec 이상의 시간 간격의 2쌍의 영상들을 초당 4쌍까지 처리 가능한 CCD 카메라(Lavision Co), 105 mm 마크로 렌즈(Nikon), CCD 카메라와 레이저를 동조시키기 위한 트리거 콘트롤러, 그리고 프레임 그래버를 내장한 더블 CPU PC로 이루어져 있다. 폴리에스테르 입자(Glass Bead-Hollow's part #900890, 직경 8~12 μm)를 추적입

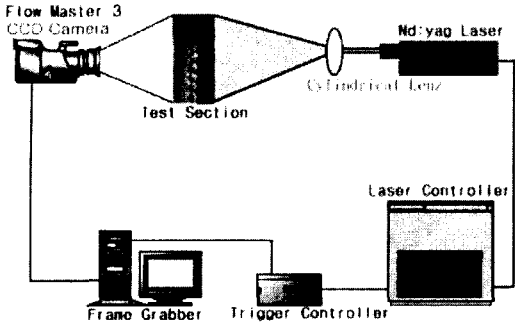


Fig. 3 Experimental setup and test section geometry ($L=37.7$ mm, $D_{max}=20$ mm, $D_{min}=10$ mm, $D_{mean}=15$ mm).

자로는 사용하였다. 완전발달 유동에 대한 측정은 입구에서 아홉번째 모듈(평균 지름 15mm)에서 행해졌다. 이 실험의 해석 알고리즘은 CBC PIV가 사용되었다.

4. PIV 알고리즘

PIV 해석 알고리즘에서 아픽셀 정확도를 위협하는 주된 요인 중 하나는 오류벡터의 제거와 보간에 의한 복원이다. 현재 주로 사용되는 방법들은 국소 중간치 필터 등 후처리과정에서의 제거와 복원이 이루어지고 있으며 벡터장이 조밀하더라도 정확도의 손상은 피할 수 없다. 상호간섭 계산단계에서 이루어지는 제일 큰 피크와 2번째 피크의 비율로서 오류벡터를 판정하는 방법은⁽⁸⁾ 후처리과정의 경우보다 나은 것이지만, 올바른 벡터 또한 일정량 제거하게 되며 이는 후처리과정에서의 복원시 정확도의 손실을 초래한다. Hart⁽⁸⁾의 CBC 알고리즘은 처리시간의 큰 증가 없이 신호-잡음 비를 증가시키는 이상적인 방법으로 보인다. 이는 상호간섭 계산시 2번째 영상 데이터의 검색영역을 50% 겹치는 2개의 영역에 대한 상호간섭계수 테이블을 각각 구해서 화소 대 화소의 곱을 계산한 새로운 표를 만들어 여기서 최대치를 갖는 변위를 구하는 방법이다. 50% 겹침으로 인해 연산횟수의 증가는 크지 않으나 오류벡터의 수가 크게 감소되어 정확도가 증가된다. 이의 확인을 위해, 먼저 Re 수 1000의 사각공동유동(Lid Driven Cavity Flow)의 수치해석해를 이용하여 Fig.4와 같이 가상영상(Synthetic Image)

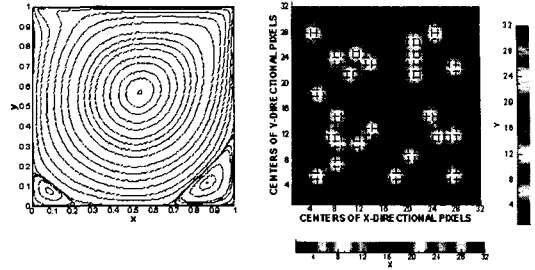


Fig. 4 Numerical solution (left) and a part of synthetic data (right).

Table 1 CPU time and mean pixel error

	Max move= 7 pixel		Max move= 10 pixel		Max move= 15 pixel	
	CPU (sec.)	Error	CPU (sec.)	Error	CPU (sec.)	Error
FSBM	79.89	0.161	155.22	0.189	643.73	0.286
HYB	3.46	0.179	3.99	0.208	13.40	0.328
HPM	1.19	0.217	1.61	0.322	2.01	0.582
NTSS	2.42	0.207	3.99	0.267	6.08	0.426
CBC	4.56	0.120	4.61	0.158	4.61	0.232

을 생성하였다.⁽¹¹⁾

상관영역이동(Window Shift) 없는 단순한 PIV 코드에서 벡터추적 알고리즘 부분만 직접계산 전 영역추적법(Full), FFT 이용 전영역추적법 (HYB), 그리고 영상압축 및 코드화 분야에서 도입된 새삼단계추적법(NTSS), 프로젝션 이미지법(HPM)과 CBC 알고리즘을 부착하여 가상 영상 이미지에 적용한 결과를 Table 1에 요약하였다.⁽¹¹⁾

SNR의 증가로 인하여 오류벡터가 감소되어 후처리 필터가 생략될 수 있었으며, 통신 및 영상압축 분야의 전제조건인 최대이동거리 7픽셀에서는 NTSS, HPM 등에 비해 계산시간은 좀 많으나 정확도는 크게 향상되었으며, 그 이외의 큰 이동거리에서는 CPU와 오차 모두에서 우월함을 볼 수 있다.

5. 결 과

먼저 입구에서 아홉번째 모듈에 대한 유동을 Re=500, 800, 1000, 2000에 대해 CBC PIV로 측정하였다. 1024쌍의 순간 속도장을 구해서 이로부터 평균 속도장과 RMS 분포를 구하였다. Fig. 5

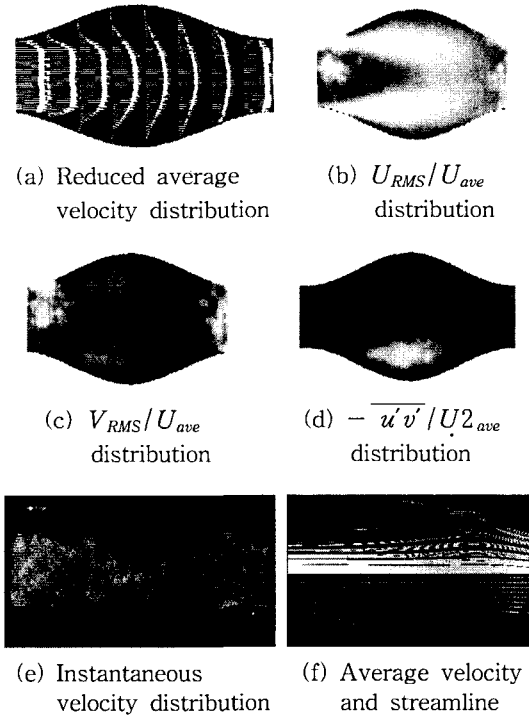


Fig. 5 PIV results of the flow in 9.5th module at Re=2000.

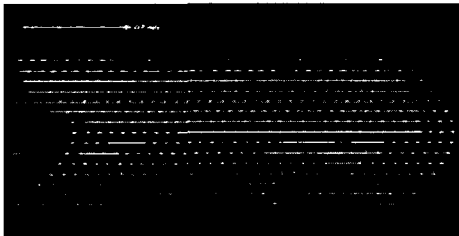


Fig. 6 Average velocity distribution at inlet.

는 Re 수 2000에 대한 결과이며, 평균 속도장파 유선은 수치해석해와 유사하다. 그러나 U_{RMS} 가 V_{RMS} , 난류 전단응력보다 상당히 큰 값을 가진다. 순간 속도장(Fig. 5(e))에서는 수개의 와들을 볼 수 있는데, 와류이탈의 효과가 U_{RMS} 성분에도 포함되었기 때문에 보인다. 입구 유동은 층류이며, Fig. 6에서 보듯이 층류발달 유동이다(Max. RMS 값은 3% 이하).

열 및 물질전달의 강화에는 두 가지 원인이 있다. Helmholtz Instability에 의한 대규모 혼합의 발생과 난류로의 천이가 그것인데, 이번 경우에는 두 개의 기여 비율을 나누는 것이 쉽지 않다.

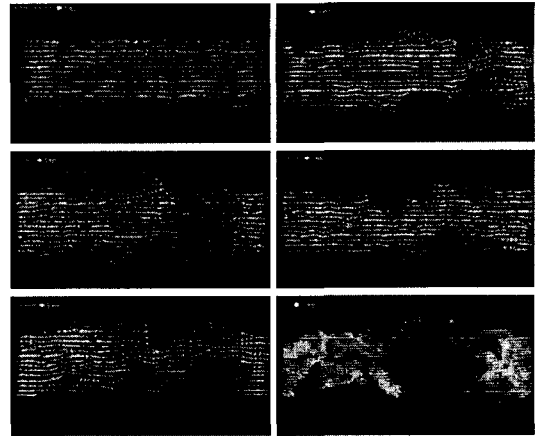


Fig. 7 Instantaneous velocity in 1.5 to 6.5 module (from left to right) at Re=2000.

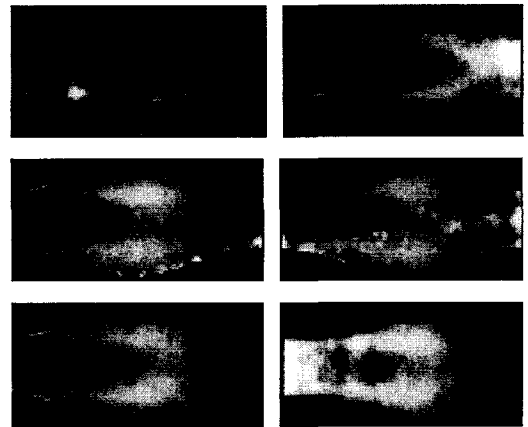


Fig. 8 RMS distribution ($\sqrt{U_{RMS}^2 + V_{RMS}^2} / U_{ave}$) in 1.5 to 6.5 wavy module (from left to right) at Re=2000.

첫번째 혼합이 일어난 후부터는 유동방향으로 난류강도가 증가되었다. 이 사실은 단 몇 개의 파형 모듈로 이루어진 열교환기에 있어서는 완전발달 유동상태는 없으며, 발달유동해석이 필수적이라 하겠다.

이 레이놀즈수에서는 Fig. 7에서 보듯이 2.5번째 모듈부터 대규모 혼합이 관찰되었다. Fig. 8은 모듈에 따른 RMS의 변화를 나타내며, 이는 모듈의 전반부는 완전발달 유동이 아니라는 사실을 뒷받침한다. 그러나 Russ and Beer⁽⁴⁾의 논문에서는 대규모 혼합이 3~4번째 모듈에서 일어났으며 이것은 물질 및 열전달을 측정하여 간접적으로

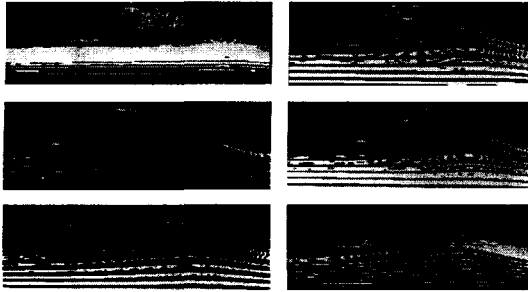
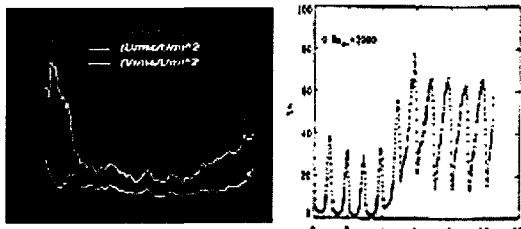
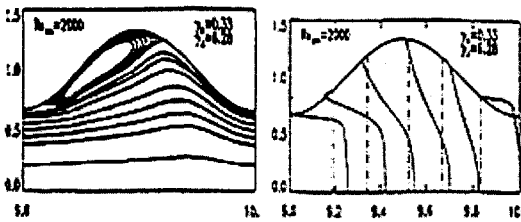


Fig. 9 Mean Streamline (half domain) in 1.5 to 6.5 wavy module (from left to right) at $Re=2000$.



(a) Velocity profil in 9th module

(b) Sherwood No.⁽⁴⁾



(c) Numerical streamline⁽²⁾

(d) Velocity profiles⁽²⁾

Fig. 10 Correlation between mass (heat) transfer and velocity profile.

추정했다(Fig. 10(b)). 이것은 본 논문의 실험은 파형관의 최대 지름으로 유동이 유입되는 반면, Russ and Beer⁽⁴⁾의 실험에서는 입구의 지름이 파형관의 최소지름이었다. 즉, 입구형상의 차이에서 기인한 것이다.

Fig. 8에서 2.5모듈에서 RMS값이 국부적으로 증가하며, 이는 Fig. 10(b)의 열전달 특성치의 변화와 유사한 경향을 보인다. 모듈의 순서에 따른 재순환영역의 형상은 Russ et al.⁽³⁾의 수치해석해에 근접한다(Fig. 10(c)). 이것은 유동장의 특성과 열 및 물질 전달량의 증가 사이에 밀접한 상호연관성이 있다는 것을 시사한다. $Re=500, 1000$ 에

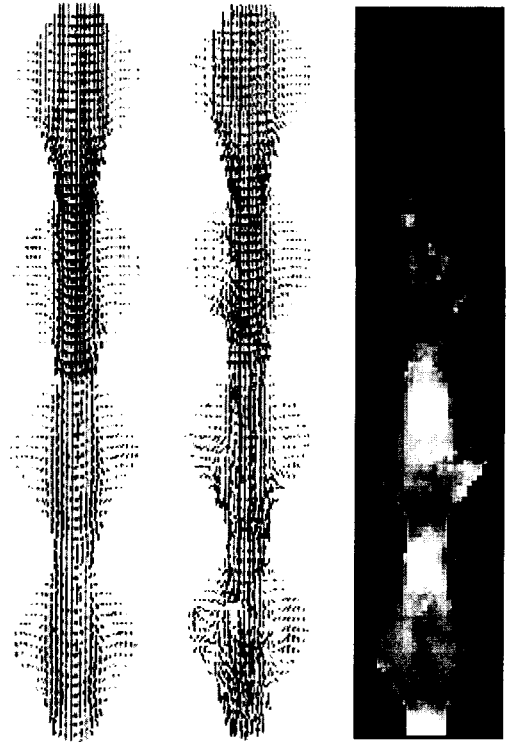


Fig. 11 Average (left), instantaneous (middle), and RMS (right) velocity distribution at $Re=500$ (2.5~5.5 modules, up to down).

서도 이와 유사한 현상이 일어났으나 보다 뒤쪽 모듈에서 완전발달 유동에 도달했다(Fig. 11).

6. 결 론

완전발달 이후와 발달과정에 있는 파형관 내부의 유동($Re=500, 800, 1000, 2000$)에 대해서 PIV 측정을 했다. 간단한 잉크나 스모그에 의한 가시화 결과들과 달리 PIV 계측을 통하여 유동장의 정량적 측정과, 벽 근처 재순환 영역과 코어유동 사이에서 일어나는 대규모 혼합의 발생위치 및 과정을 파악할 수 하였다. 레이놀즈수가 적을 경우, 몇 개의 파형 모듈로 이루어진 열교환기는 원형관에 비해 열전달 향상을 기대할 수 없다.

복잡한 기하학적 형상의 유동통로의 정확한 제작과 작동유체와 통로의 굴절률의 조절을 통해 이와 같은 복잡한 유동가시화가 가능했다.

$Re=2000$ 에서는 대규모 혼합은 2.5번째 모듈에서부터 일어났다. PIV 측정으로 입구부뿐만 아니

라 다양한 위치에서 대규모 혼합을 쉽게 포착했다. PIV 실험결과들로부터 위상평균(Phase averaging)을 수행하여 Kelvin-Helmholtz 불안정성으로 인한 보텍스 이탈주기를 얻어내는 것은 앞으로의 연구과제이다.

후 기

본 연구는 2003년 건국대학교의 학술 진흥연구의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Wang, G. and Vanka, S. P., 1995, Convective heat transfer in periodic wavy passages, *Intl. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 3219-3230.
2. Russ, G. and Beer, H., 1997, Heat transfer and flow field in a pipe with sinusoidal wavy surface-I. Numerical investigation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 1061-1070.
3. Rush, T. A., Newell, T. A. and Jacobi, A. M., 1999, An experimental study of flow and heat transfer in sinusoidal wavy passages, *Int. J. Heat Mass Transfer* 42, pp. 1541-1553.
4. Russ, G. and Beer, H., 1997, Heat transfer and flow field in a pipe with sinusoidal wavy surface-II. Experimental investigation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 1071-1081.
5. Goldstein, J. L. and Sparrow, E. M., 1977, Heat mass transfer characteristic for flow in a corrugated wall channel, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 99, pp. 187-195.
6. Nishimura, T., Yano, K. and Kawamura, Y., 1990, Occurance and structure of Taylor-Goertler vortices induced in two dimensional wavy channels for steady flow, *J. Chemical Engin. Japen*, Vol. 23, pp. 697-703.
7. Kim, S. K., 2001, An experimental study of flow in a wavy channel by PIV, *KSME Int'l J.*, Vol. 15, No. 12, pp. 1853-1859.
8. Hart, D. P., 2000, PIV error correction, *Exp. Fluid*, Vol. 29, pp. 13-22.
9. Hopkins, L. M., Kelly, J. T., Wexler, A. S. and Prasad, A. K., 2000, Particle image velocimetry measurements in complex geometries, *Exp. Fluids*, Vol. 29, pp. 91-95.
10. Kim, S. K. and Son, Y. R., 2002, Particle image velocimetry measurement in nasal air-flow, *Trans. KSME B*, Vol. 26, pp. 566-569.
11. Kim, S. K., 2000, A research on the PIV algorithm using image coding, *Trans. KSME B*, Vol. 24, pp. 153-160.