

## PIV기법을 이용한 분기 사각덕트내의 유동특성에 관한 실험적 연구

이행남\* · 박길문\* · 이덕구\*\*

### An Experimental Study on the Flow Characteristics in Dividing Rectangular Duct by using a PIV Technique

H-N Lee\* · G-M Park\* · D-G Lee\*\*

**Key words :** PIV(입자영상유속계), CFD(전산유체역학), Dividing Duct(분기덕트), Mean Velocity Vector(평균속도벡터), Mean XY-Stress Distributions(평균 xy-축 응력 분포), Mean Vorticity(평균와도), Total Pressure Distributions(전 압력분포)

#### Abstract

The flow characteristics in a bifurcated duct are investigated experimentally. Physical properties such as mean velocity vectors, mean x-y stress distributions, mean vorticity and total pressure distributions are obtained for three different Reynolds numbers(578, 620, 688) using PIV measurements and CFD analysis. Also, three different rates of discharge( $Q=26.11$  l/min,  $Q=28.11$  l/min,  $Q=31.17$  l/min) were selected for experimental conditions. The results of this study would be useful to the engineer in designing the flow systems for heating, ventilation, air conditioning and wastewater purification plants.

#### 1. 서 론

오늘날 산업현장의 유체역학에 관련된 각종 기계나 기기 및 분기판 덕트 설계, 성능향상 및 고 효율을 위한 제반설계 과정에서 가장 기본적인 것은 유동장의 거동을 파악하는 것이다. 복잡한 유동양상 거동에 대해서 정확한 해석에 많은 어려움이 있지만, 최근에 컴퓨터나 측정장치가 발전함에 따라

보다 정확한 유동양상 거동을 파악하는 것이 수월하게 되었다.

사각 분기 유동은 복합 관로계에서 열, 풍동, 공기조화 등과 결합되어지는 장치와 폐수처리장치 및 수로계 유동에 응용되어지고 있다.

기존 연구들은 공기나, 물 등과 같은 유체로 실험을 했고, 분기관내에서 정상, 비정상 층류 유동에 관하여는 많은 연구가 이루어지지 않았으며, 분

\* 조선대학교 공과대학 기계공학부

\*\* 조선대학교 대학원 기계공학과

기부 유동에 관한 연구는 대부분 난류 유동에 관한 산업적 응용을 바탕으로 연구가 진행되어 왔다<sup>1~3</sup>. 본 연구는 사각 분기 덕트의 주판과 지판의 유량 및 Re수를 변화시키면서 PIV를 이용한 유동가시화를 통한 실험과 CFD 분석을 통하여 평균속도벡터, 운동에너지, 평균xy-축응력분포 및 전 압력분포 등 분기부 유동특성을 연구 하고자 한다.

최근 PIV는 정밀한 가시광 레이저와 광학 장치 사용으로 전체 유동장의 순간 속도분포, 난류강도, 운동에너지 및 와류 등을 잘 재현할 수 있으며, PIV는 입력광치를 통한 실험부의 연속적인 해석이 언제라도 가능하여 보다 정확한 분기부 유동특성을 규명할 수 있다<sup>4</sup>.

본 실험에서는 사각 분기덕트의 주판과 지판의 유속을 변화시키면서 PIV를 이용한 유동가시화와 CFD 분석을 통해서 순간 속도벡터, 평균운동에너지, 평균xy-축 응력분포 및 평균 와도, 전압력 분포 등의 유동특성을 실험연구 하고자 한다.

## 2. 실 험

### 2.1 실험장치

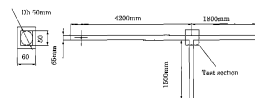


Fig.1 Tested Dividing Rectangular Open Duct

Fig.1은 본 연구를 위한 개방된 분기 사각덕트를 도시하였다. 본 실험에서는 사각 분기덕트의 주판과 지판의 유량 및 레이놀즈수를 변화시키면서 PIV를 이용한 유동가시화를 통해서 평균속도벡터 및 평균운동에너지, xy축 평균응력 분포, 평균 와도 등 분기부 유동특성을 고찰하고자 한다.

본 실험에 사용한 개방된 분기 사각 덕트는 두께가 7.5mm인 가시화를 위해서 투명아크릴로 제작

했으며, 내부 단면적이 50mm×50mm, 수직직경은 50mm, 입구 쪽에서 분기부까지 거리를 4.2로 잡았고, 분기부에서 출구 쪽 길이는 1.8m이다. 주판의 총 길이는 6m이며, 지판의 길이는 1.5m이다. 또한 충분히 발달된 유동을 만들기 위한 입구 길이는 4m이다.

Fig.2는 본 실험에 사용된 장치를 도시하였다. 본 실험의 가시화를 위하여 사용된 장치로는 아르곤 가시광 레이저(최대 7W), 고속도 카메라(최대 240pps, 축백, 640×240픽셀), 고속도 카메라 Controls(최대 160MB저장), 송풍팬(최대 1400rpm), Optical Fiber Cable(5m), LLS Probe(Laser Light Sheet), 가시화 화상 분석을 위한 DT Board를 장착한 Host-Computer 및 분석 프로그램으로는 Cactus2000을 사용하였다. 입구로 유입되는 작동유체는 상온의 공기(20℃±1℃)이며, 가시화 입자로 Pine pollen(산림입자의 크기 :10~25μm)을 사용했다.

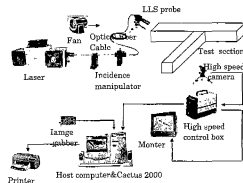


Fig.2 Schematic Arrangement of PIV System

### 2.2 PIV계측

Table 1은 실험조건과 실험장치의 설정을 나타내었고, Photo.1은 본 실험의 실험장치를 보여주고 있다. 먼저 실험하는 동안의 온도는 20℃이고, 온도의 변화는 ±1℃ 이하로 유지했으며, 사각 분기판 주판 입구 쪽에 송풍기를 사용하여 작류체를 유동하고, 송풍기의 일정한 회전수를 위해 220V 정전압 트랜스를 이용하였고, 유량 및 Re 수는

$Q=26.11$  /min 일때  $Re_1=578$ 이고,  $Q=28.11$  /min, 일때  $Re_2=620$  이며,  $Q=31.17$  /min 일때  $Re_3=688$ 이다.

가시화 입자인 Pine pollen을 송풍기 팬을 통해서 주입시키며, 분기관에 충분히 발달된 유동이 형성되어지고, 아르곤 가시광 레이저 (LEXEL사, 최대 7W)를 인구 쪽 유량 및 Re수에 따라 1W~1.5W 정도의 가시광으로 시험부 (Test Section)에 비추게 하여 고속카메라 (Photron사, 최대 240pps,  $640 \times 240$  Pixel)를 가시광 레이저와 수직 방향으로 frame 속도를 30pps로 설정하고 촬영하였다. 고속 카메라 Controls의 자체 메모리 (최대 160MB)에 매초 30장의 비유로 임시 저장되어 있는 유동상 연속영상을 이미지보드인 DT-3152Board (Data Translation사,  $640 \times 480$  Pixel)가 장착한 Host-Computer에 고속카메라 Controls를 연결하여 이전 원시파일로 변환되어 저장하여 속도 벡터, 난류 강도, 운동에너지 및 와류 등을 cactus'2000을 통해서 유동특성을 해석하였다. 고속도 카메라에 실제로 포착한 부분의 Test Section은 주관과 지관을  $135\text{mm} \times 170\text{mm}$ 로 잡았다.

본 실험은 고속카메라를 사용하여 유동을 촬영했지만, 유량변화량 값들이 그다지 크지 않기 때문에 일반 CCD 카메라와 같은 분석을 위해서 Field Selection에서 1st Frame에 Odd와 Even을 선택하여 입자의 최대 이동거리와 계조치상 상관법을 적용하였다. 측정영역의 순간속도분포를 얻는데 Host-Computer (펜티엄 II - 450, RAM128MB) 처리시간은 약 20초 전후였다.

### 2.3 CFD 분석

본 연구에서는 PIV계측 실험을 바탕으로 실제적인 실험과 동일한 조건으로 CFD분석 프로그램인 STAR-CD를 이용하여 송 압력 분포를 분석하였다. 분기부내의 유동이 저속이므로 열 전달과 압축성 효과를 무시했으며,, 본 분석에서 난류 모델을 위해서 K-L조건과 저 레이놀즈 조건을 사용했으며,, 해석 알고리즘으로 SIMPLE를 사용했다.

본 실험장치에서 주관부는 총 6m이고 지관부는 총 1.5m이며, 1cm 당 1개의 격자로 잡았으며, 총

Table 1 Experimental Condition of Flow Visualization Tests

	Item	Specification
Visualization Equipment	Image Board	DT3152 ( $640 \times 480$ pixel)
	Light Source	7W Argon-Ion Laser
	Sheet Light	LIS probe
Measuring Condition	Working Fluid	Air
	Temperature	$20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1$
	Particle	pine pollen ( $10 \sim 25 \mu\text{m}$ )
	Time	Resolution 1 / 60 sec
Image Processing	Host Computer	Pentium II PC (CPU 450MHz RAM128M)
	Calculation Time	30 sec/frame
	Identification	Cactus'2000/gr ey-level cross correlation algorithm)
	Number of Data for Time-Mean	135frames

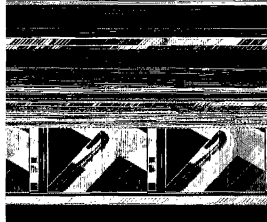


Photo. 1 Experimental equipment

적자의 수는 27,108개였고, 입구 쪽의 속도는 실험과 동일하게 3개의 유량 값을 변화시켜 ( $Q=26.11 \text{ l/min}$ ,  $Q=28.11 \text{ l/min}$ ,  $Q=31.17 \text{ l/min}$ ) 속도변화를 주면서 분석했으며, 각각의 solver에서 iteration값은 208, 209, 211에서 수렴했다5).

### 3. 결과 및 고찰

입구 쪽으로부터 유량을 각각  $Q=26.11 \text{ l/min}$ ,  $Q=28.11 \text{ l/min}$ ,  $Q=31.17 \text{ l/min}$ 로 변화시켜, 발생되어지는 평균 속도 벡터장, 평균운동에너지, x y 축 평균응력분포, 평균와도, 평균 압력분포 등을 분석했다. 이때 입구 쪽 유량 값에 대한 Re수는 각각  $Re_1=578$ ,  $Re_2=620$ ,  $Re_3=688$ 이다.

Fig. 3의 (a), (b), (c)는 입구 쪽 속도 및 레이놀즈수 변화에 따른 평균 속도 벡터장을 보여준다. (a)평균속도 벡터장 분포도에서 나타나듯이 본 실험에서 낮은 유량 및 레이놀즈수에서는 분지부 주변에서는 그다지 큰 변화가 없지만, 지관 쪽 입구에 와류 및 제점착(박리 종결지점)<sup>6,7)</sup>이 매우 작게 나타남을 알 수 있다. 하지만 (c)의 평균속도 벡터장 분포도는 분지부 주변 쪽 외벽과 지관 쪽 내벽에 강한 와류에 의한 제점착점 위치의 크기가 커짐을 알 수 있다.

속도는(a)에서  $0.1929\text{m/s}$ , (b)에서  $0.2110\text{m/s}$ 이며(c)에서는  $0.2159\text{m/s}$ 이다. 또한 분지부의 주변 쪽 부분의 외벽에 Re수가 증가할수록 와류의 제점착점 위치와 빠른 속도 벡터가 발생됨을 알 수 있다.

Fig. 4는 CFD로 분석한 분지부의 속도벡터 장을 보여 주고 있다. PIV를 통한 실험은 실제적인 형태에서 발생되어지는 여러 가지 손실에 의해서 입구 쪽의 레이놀즈수와 유량의 변화에 따라 분지부의 속도벡터장의 형태가 변화되고 있지만, CFD 사용한 분석은 입구 쪽 레이놀즈수와 유량 값이 변화해도 속도 벡터장의 형태가 거의 변화하지 않음을 알 수 있다.

PIV를 사용하여 분석한 (a)에서 최대속도 값  $0.1929\text{m/s}$ 이고, CFD로 분석 한 최대 속도는

$0.1995\%$ 이며, (b)의 PIV분석 값은  $0.2110\%$ 이고, CFD 분석한 최대속도 값은  $0.2144\%$ 이며, (c)의 PIV 분석 값은  $0.2159\%$ 이며, CFD 분석한 최대속도 값은  $0.2292\%$ 를 얻었다. 분지부의 PIV분석한 최대속도 값과 CFD로 분석한 최대 속도 값의 일치도는 평균  $96.4\%$ 의 일치함을 알 수 있다.

Fig. 5의 (a), (b), (c)는 평균운동에너지를 보여준다. (a)에서는 지관 및 주관에서 운동에너지 값들이 고르게 분포됨을 알 수 있으며, 반면 분지부 근처의 운동에너지 값들은 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

그 이유는 주관 쪽 입구의 유량 및 레이놀즈수가 작을 때에는 분지부의 주관과 지관으로 들어가는 2차 유동의 영향이 비교적 적게 작용하기 때문이며, (b)와 (c)에서는 주관 입구 쪽 유량 및 레이놀즈수가 증가할수록 상대적으로 지관 쪽 운동에너지의 값들이 적어짐을 알 수 있다. 그것은 Fig. 4의 (a)에서는 지관과 주관의 속도벡터 값이 그다지 큰 차이를 나타내지 않고 있지만, 유량 및 레이놀즈수가 증가할수록 주관과 지관의 속도벡터 값들의 차이가 많이 나타나기 때문으로 생각된다.

즉, 유량 및 Re수가 증가함에 따라 주관 쪽에 외벽 운동에너지가 증가함을 알 수 있다. 이것은 Re수가 증가할수록 주관 쪽에 속도벡터 값들이 증가하기 때문이다.

또한, 유량 및 레이놀즈수가 증가함에 따라서 지관쪽 외벽의 운동에너지 변화는 그다지 큰 변화를 나타내지 않았지만, 내벽은 와류의 증가에 의한 운동에너지 증가와 제점착점(박리 종결)<sup>6,7)</sup> 위치가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6은 XY축의 응력분포를 나타내고 있다.

(a)에서는 응력 크기를 보면 그다지 큰 응력이 발생되지 않음을 알 수 있으며, 응력분포는 분지부 입구 쪽과 분지부 입구가 끝나는 부분에서 주관의 응력 분포가 발생됨을 알 수 있으며, 지관의 입구 와류가 작게 발생하는 부분에서 응력 값이 발생됨을 알 수 있다.

(b)에서는 주관 외벽에 응의 응력이 발생되고, 지관부가 시작되는 외벽에 응력이 발생하는 되는 것을 알 수 있다. 그것은 2차 유동이 (a)에서보

다 지관으로 들어가는 유량이 증가하면서 나타나는 영향으로 와류가 더크게 발생하기 때문인 것을 사료된다.

하지만, 입구 쪽에 유량 및 레이놀즈수가 (b)보다 더 증가한 (c)에서는 지관부에서 일정한 용력값을 나타내지만, 주관부 외벽에서는 음의 용력 분포가 매우 크게 증가함을 알 수 있다.

Fig. 7의 (a), (b), (c)는 평균 와도를 보여주고 있다. (a)에서는 주관과 지관의 모두에 매우 작은 와도 분포가 균일하게 나타남을 알 수 있다. 즉, 입구 쪽의 유량 및 레이놀즈수가 작을 때는 지관입구 쪽에서 작은 와도가 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 3의 평균속도벡터장과 Fig. 5의 평균운동에너지에서 보여주고 있듯이 주관과 지관의 속도벡터 값과 운동에너지 값들의 차이가 그다지 크게 나타나지 않음을 알 수 있다.

즉, 주관과 지관의 유량비율이 그다지 크지 않다는 것을 알 수 있다. (b)에서는 분지부가 시작되는 주관에서 음의 와도 값이 나타남을 알 수 있다. 또한 지관 쪽에는 주관보다 상대적으로 적은 와도 값이 균일하게 나타남을 알 수 있다.

또한 (c)에서는 분지부가 시작되는 주관쪽에 (b)보다는 적은 음의 와도를 나타내지만, 주관 쪽 쪽으로 넓게 퍼져서 나타남을 알 수 있으며, 지관 쪽에서 (b)와 달리 불규칙적으로 와도가 발생함을 알 수 있다.

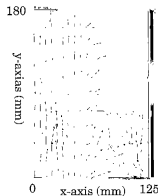
그 이유는 분지부에서의 운동에너지 값들과 속도값들로 인한 주관과 지관으로 들어가는 유량을 제외한 2차유통의 영향으로 인해서 이와 같은 현상이 나타난다고 사료된다.

Fig. 8의 (a), (b), (c)는 CFD를 통해 분석한 전압력 분포를 나타내고 있고, (a)에서 분지부의 입구 쪽 주관부 외벽에 지관부 단면적 크기 만큼의 재접착 현상이 일어나고, 이 재접착점에서 최대압력은  $0.1463E-01Pa$ 이며, 또한 지관의 입구 쪽 내벽에도 재접착이 나타나고 있으나 이곳에서의 압력은  $-0.1436E-01Pa$ 이다.

(b)에서도 분지부의 입구 쪽 주관의 외벽에 재부착점이 나타나고, 이때 최대압력은  $0.16991E-01Pa$ 이며, 지관의 입구 쪽 내벽의 재접착점이 시작되는 부분에서는 진공압은  $-0.1643 E-0.1Pa$ 이다.

(c)의 경우(a), (b)에서와 달리 재접착점은 분지부 입구쪽 주관 외벽의 약 50mm 이 후 지점에서 재접착이 시작되고 최대압력은  $0.1936E-01Pa$ 이다. 반면, 지관의 내벽에서는 (a), (b)의 경우와 같은 위치에 재접착지점이 발생되고 이 곳에서 압력은  $-0.1863E-0.1$ 이다.

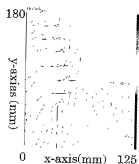
즉, 유량 및 레이놀즈수가 증가할수록 최대압력은 감소하고, 진공압은 증가함을 알 수 있다. 이것은 레이놀즈수가 증가할수록 분지부 입구의 주관 외벽에서 운동에너지와 와류발생으로 인한 2차 유통에 의해 재접착 지점이 하류 쪽으로 이동하기 때문으로 생각된다.



(a) Re=578

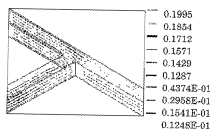


(b) Re=620

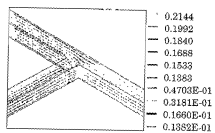


(c) Re=688

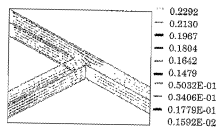
Fig.3. Mean Velocity Vector Field by PIV



(a) Re=578

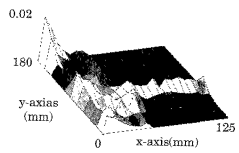


(b) Re=620

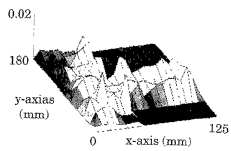


(c) Re=688

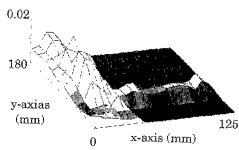
Fig.4 Velocity Magnitude by CFD



(a) Re=578

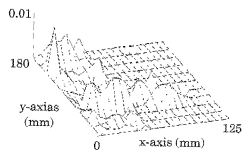


(b) Re=620

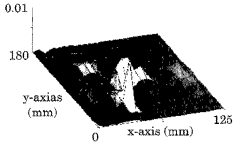


(c) Re=688

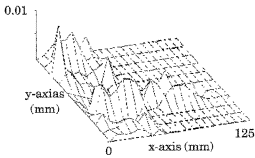
Fig. 5 Mean Kinematic Energy



(a) Re=578

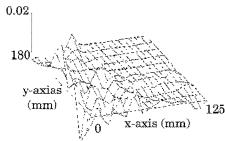


(b) Re=620

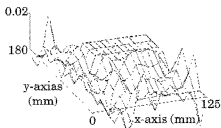


(c) Re=688

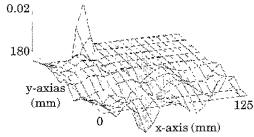
Fig.5 Mean XY-Stress Distributions



(a) Re=578

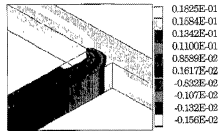


(b) Re=620

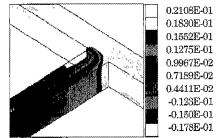


(c) Re=688

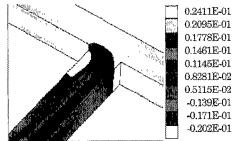
Fig. 7 Mean Vorticity



(a) Re=578



(b) Re=620



(c) Re=688

Fig. 8 Total Pressure Distributions

### 4. 결 론

본 연구는 분기사각 덕트내의 유동특성을 규명하기 위해 PIV 방법과 CFD 분석을 사용하였고, 분기사각덕트 내의 입구 쪽 유량 및 Re수 변화에 따른 분기부의 평균속도벡터 및 평균 운동에너지, xy축 평균운동력 분포와 전압력분포 등을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

[1] PIV 실험 계측에 의한 최대속도 값과 CFD로 분석한 최대 속도 값은 평균 96.4% 일치하였다.

[2] 평균속도 벡터장에서 와류의 재접착점은 분지 입구 주판 외벽과 지관부 내벽에서 각각 발생하였고, 평균운동에너지는 Re수가 증가할 때 지관 쪽 보다 주판쪽에서 훨씬 크게 변화했다.

[3] 응력 및 와도는 레이놀즈수가 증가할수록 분지관 주판부 외벽보다 지관부 내벽에서 상대적으로 크게 변화했다.

[4] 레이놀즈수가 증가할수록 분지부의 지관부 내벽보다, 주판부 외벽에서 압력의 증가율이 더 작다.

### 후 기

이 논문은 2000년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

### 참 고 문 헌

- 1) Ito, H., and Imai, k. "Energy losses at 90degree pipejunction" J. Hydr. Div., ASCE, 99(9), pp.1353-1368, 1973
- 2) Blaisdell, F.W., and Manson, P. W. "Loss energy a of sharp-edged pipe junction in water conveyance systems." Tech. Bull, US Department of Agriculture, Washington, D.C, pp.1283-1291, 1963
- 3) Gardel, A. "Les pertes de charge dans les

écoulements au travers de branchments en Te." [Pressure drops in flows through T-shaped pipe fitting] Bull Tech. Suisse Rom., 83(9), pp.123~130(in French), 1957

- 4) 김진영, 양창조, 김경환, 이영호, "PIV에너메이션에 의한 가정용 냉장고 냉동실의 냉기순환 해석", 대한 기계학회, 춘계학술대회논문집 B, pp.689-691, 2000
- 5) 이형남, 박길문, 이덕구, "T-type 사각덕트내의 유동 특성연구", 대한 기계학회 춘계학술대회 논문집 E, pp.702-707, 2001
- 6) Hager, W. H. "Discussion of Separation zone a of open-channel junctions, by James L. Best and Ian Reid", J. Hydr. Engrg., ASCE, 133(4), pp.539~543, 1987
- 7) Bockchoon Park, Young I. cho & Stephen Choi, "Separation and reattachment of non-Newtonian fluid flows in a sudden expansion pipe", J. non-Newtonian fluid Mechanics, 37, pp.175-196, 1990

### 저 자 소 개



이형남(李行男)

1954년 3월생. 1980년 조선대학교 기계공학과 졸업(학사) 1982년 조선대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사) 1993년 국민대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사) 1983-현재 조선대학교 기계공학부 교수



박길문(朴吉文)

1949년 3월생. 1974년 조선대학교 기계공학과 졸업(학사) 1977년 고려대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사) 1987년 고려대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사) 1978년-현재 조선대학교 기계공학부 교수



이덕구(李德九)

1975년 3월생. 2000년도 조선대학교 기계공학과 졸업(학사) 2002년 2월 조선대학교 대학원 기계공학과 졸업예정(석사)