

# 사각분기 덕트내의 유동특성에 관한 연구

이 행 남\* · 박 길 문\* · 이 덕 구\*\*

## A Study on the Flow characteristics in dividing Rectangular ducts

Haengnam Lee, Gilmoon Park and Duckgu Lee

**Key Words:** Mean Velocity Vector, Turbulence Kinetic Energy, Turbulence Viscosity  
PIV(Particle Image Velocimetry), CFD(Computational Fluid Dynamics)

### Abstract

The characteristics of flow in dividing regions are precise, therefore their classification is very important not only in industry but also in hydrodynamics. By now, many studies of flow in dividing regions have been performed, but flow characteristics that use visualization in dividing regions have not been studied.

The present study of the PIV and the CFD exhibit average velocity distributions, kinetic energy distributions and total pressure distributions etc of the total flow field due to the development of the accurate visualization optical laser and of optical equipment. Also, PIV is accurate with the flows characteristics of the dividing region as continuous analysis is done using input equipment.

The study analyzes velocity vector field, turbulence kinetic energy, turbulence viscosity of dividing regions with flow for visualization of the PIV and the CFD measurement in a dividing rectangular ducts.

### 1. 서 론

오늘날 산업현장의 유체역학에 관련된 각종 기계나 기기 및 분기관 덕트 설계, 성능향상 및 고효율을 위한 제반설계 과정에서 가장 기본적인 것은 유동장의 거동을 파악하는 것이다. 종래에는 원리적 및 복잡한 유동양상 거동에 대해서 정확한 해석에 많은 어려움을 겪게 되었지만, 최근에 컴퓨터나 계측장치가 발전함에 따라 보다 정확한 유동양상 거동을 파악하는 것이 훨씬 수월하게 되었다.

사각 분기 유동은 복합 관로계에서 열, 통풍, 공

기조화 등과 결합되어지는 장치와 폐수처리장치 및 수로계 유동에 응용되어지고 또 다른 응용분야로는 공업용세관 및 의학용 혈관의 분기부 유동 등이 있으며, 대부분 연구들은 공기나, 물 등과 같은 유체로 실험을 했고, 분기관내에서 정상, 비정상 층류 유동에 관하여 많은 연구가 이루어지지 않았으며, 분기부 유동에 관한 연구는 대부분 난류 유동에 관한 산업적 응용을 바탕으로 연구가 진행되어 왔다.

분기부 근처에서 유체 유동의 변화가 심하기 때문에 이러한 유동양상의 특성에 관해서도 산업적으로는 물론 유체역학적으로도 매우 중요한 연구의 대상 중 하나임에 틀림없으며, 지금까지 많은 분기관내 유동에 관한 연구들이 선행되어 왔지만 층류 범위에서 분기부 유동특성의 가시화를 통한 해석적 실험 연구는 아직은 그다지 많지 않다.

본 실험에서는 사각 분기덕트의 주관과 지관의

\* 조선대학교 기계공학부

\*\* 조선대학교 대학원

유량 및 레이놀즈 수를 변화시키면서 PIV계측을 이용한 유동가시화를 통해서 순간 속도벡터, 평균운동에너지 등 분지부 유동특성을 실험연구하고자 한다.

또한 PIV계측실험에 통해서 얻어진 자료를 바탕으로 CFD(Computational Fluid Dynamics)상용코드인 STAR-CD를 사용하여 PIV계측실험 결과 값들과 CFD분석 결과 값들의 비교와 PIV계측실험에서 얻지 못했던 난류운동에너지 및 난류 점성변화 등을 규명하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 계측

### 2.1 실험 장치

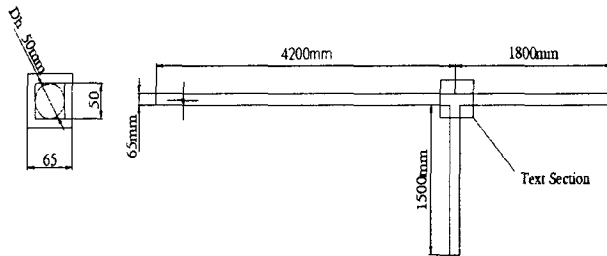


Fig.1 Tested Dividing Rectangular Open Duct

Fig. 1은 본 연구를 위한 개방된 분기 사각 덕트를 도시고, 사각 분기덕트의 주관과 지관의 유량 및 Re수를 변화시키면서 PIV계측을 이용한 유동가시화 및 CFD 분석을 통해서 평균속도벡터 및 평균운동에너지, 난류운동에너지, 난류점성력 등 분지부 유동특성을 실험적으로 연구하고자 한다.

본 실험에 사용한 개방된 분기 사각 덕트는 두께가 7.5mm인 가시화를 위해서 투명아크릴로 제작했으며, 내부 단면적이 50mm×50mm, 수력직경은 ( $D_h$ )50mm, 입구 쪽에서 분기부까지 거리를 4.2m로 잡았으며, 분기부에서 출구 쪽 길이를 1.8m잡았다. 주관의 총 길이는 6m이며, 지관의 길이는 1.5m이다. 또한 충분히 발달된 유동을 만들어 내기 위해서 입구길이를 4m로 설정했다.

본 실험에 가시화를 위하여 사용된 장치로는 아르곤 가시광 레이저(최대 7W), 고속도 카메라(최대 240pps, 흑백, 640×240픽셀), 고속도 카메라Controls(최대160MB저장),송풍팬(최대1400rpm),Optical Fiber Cable(5m), LLS Probe(Laser

Light Sheet), 가시화 화상 분석을 위한 DT-3152 Board를 장착한 Host-Computer 및 분석 프로그램으로는 Cactus2000을 사용하였다. 입구로 유입되는 작동유체는 상온의 공기(20 °C ±1)이며 유동 가시화를 위한 입자로 Pine pollen(산란입자의 크기 :10~25 $\mu$ m)을 이용했다.

### 2.2.1 PIV 계측

Table. 1 Experimental condition

	Item	Specification
Visualization Equipment	Image Board	DT3152 ( 640×480 pixel )
	Light Source	7W Argon-Ion Laser
	Sheet Light	LLS probe
Measuring Condition	Working Fluid	Air
	Temperature	20 °C ±1
	Particle	Tiny pine flower seed powder(10~25 $\mu$ m)
	Time Resolution	1 / 60 sec
Image Processing	Host Computer	PentiumIII PC ( CPU 450MHz RAM128M )
	Calculation Time	30 sec/frame
	Identification	Cactus'2000(grey-level cross correlation algorithm)
	Number of data for time-mean	135frames

Table 1은 실험조건과 실험장치의 설정을 나타낸다. 먼저 실험하는 동안의 온도는 20 °C 이고, 온도의 변화는 ±1°C 일정하게 유지했으며, 사각 분기관 주관 입구 쪽에 송풍기를 사용하여 작동 유체를 유동하고, 송풍기의 일정한 회전수를 위해 220V 정전압 트랜스를 이용하여 유량 및 Re 수 변화를 Q=26.11 l/min, 일때  $Re_1=578$ , Q=28.11 l/min, 일때  $Re_2=620$ , Q=31.17 l/min, 일때  $Re_3=688$  주면서 가시화 입자인 Pine pollen을 송풍기 팬을 통해서 주입시키며, 분기관에 충분히 발달된 유동이 형성되어지면, 아르곤 가시광 레이저(LEXEL사, 최대7W)를 입구 쪽 유량 및 Re수에 따라 1W~1.5W정도의 가시

광으로 발달된 유동장인 시험부(Test Section)에 비추게 하여 고속카메라(Photron사, 최대 240pps, 640×240 Pixel)를 가시광 레이저와 수직 방향으로 frame 속도를 30pps로 설정하고 촬영하였다. 고속카메라 Controls의 자체 메모리(최대 160MB)에 매초 135장의 비율로 임시 저장되어 있는 유동장 연속영상을 이미지 보드 DT-3152Board(Data Translation사, 640×480 Pixel)가 장착한 Host-Computer에 고속카메라 Controls를 연결하여 이진 원시파일로 변환시켜 저장하여 평균속도 벡터 및 평균운동에너지, 등을 CACTUS'2000을 통해서 분지부 유동특성을 해석하였다.

본 실험은 고속카메라를 사용하여 유동을 촬영했지만, 유량변화량 값들이 그다지 크지 않기 때문에 일반 적인 Field Selection에서 1st Frame에 Odd와 even를 선택하여 입자의 최대 이동거리와 계조치상호상관법을 적용하였다. 계측된 영역을 Host-Computer(펜티엄 III-450, Ram 128Mb)에 분석프로그램인 CACTUS'2000을 사용하여 평균속도벡터 및 평균운동에너지, 평균난류강도, 평균 와도 등을 분석 해석하였다.

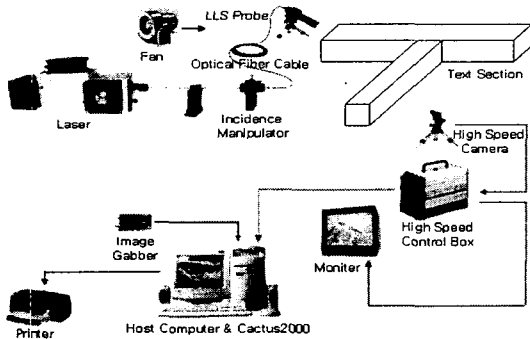


Fig.2 Schematic Arrangement of PIV System

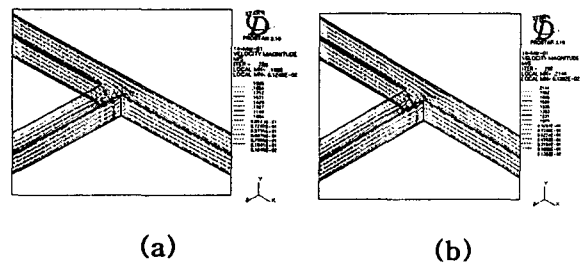
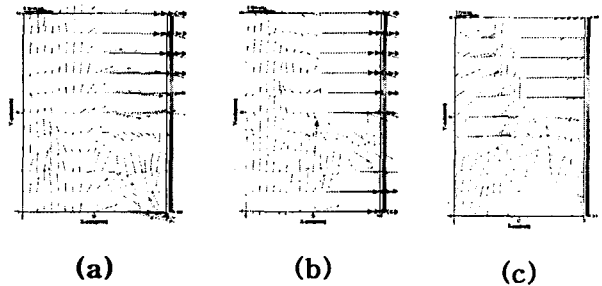
## 2.2 CFD 분석

본 연구에서는 PIV계측 실험을 바탕으로 실제적인 실험과 동일한 조건으로 CFD분석 프로그램인 STAR-CD를 이용하여 90° 분지관와 60° 분지관에서의 분지부의 속도벡터와 난류 운동에너지 및 난류 점성등을 분석하였다. 분지부내의 유동이 저속이므로 열 전달과 압축성 효과를 무시했으며, 본 분석에서 난류 모델을 위해서 K-L 조건과 저 레이놀즈 조건을 사용했으며, 해석 알고리즘으로 SIMPLE를 사용했다.본 실험장치에서

주관부 총 6m와 지관부 총 1.5m이며, 1cm 당 1개의 격자로 잡았으며, 총 격자의 수는 27108와 35312개였다. 90° 분지관에서의 입구 쪽의 속도는 실험과 동일하게 3개의 유량에 값에 대한  $Q=26.11 \text{ l/min}$ ,  $Q=28.11 \text{ l/min}$ ,  $Q=31.17 \text{ l/min}$  속도변화를 주면서 분석했으며, 60° 분지관에서는 본 실험의 최소 값과 최대 유량에 대해서 분석했다. 각각의 solver에서 iteration값은 208, 209, 211 값과 3178, 3295에서 수렴했다.

## 3. 실험과 분석 결과 및 고찰

입구 쪽으로부터 유량을 각각,  $Q=26.11 \text{ l/min}$ ,  $Q=28.11 \text{ l/min}$ ,  $Q=31.17 \text{ l/min}$  변화시켜, 발생되어지는 평균 속도 벡터장, 평균운동에너지, X축의 응력분포, 총 압력분포 등을 분석프로그램인 CACTUS'2000 및 STAR-CD를 사용하여 PIV와 CFD를 분석해석 했다. 이때 90° 분지관 일때 입구 쪽 유량 값에 대한 레이놀즈 수는 각각  $Re_1=578$ ,  $Re_2=620$ ,  $Re_3=688$ 이며, 60° 일 때는(d) $Q=26.11 \text{ l/min}$ ,  $Re_1=578$ , (e) $Q=31.17 \text{ l/min}$ ,  $Re_3=688$ 이다. 이후 모든 90° Fig에서(a), (b), (c)는 각각 (a)는  $Q=26.11 \text{ l/min}$ ,  $Re_1=578$ , (b)는  $Q=28.11 \text{ l/min}$ ,  $Re_2=620$ , (c)는  $Q=31.17 \text{ l/min}$ ,  $Re_3=688$  값을 나타낸다.



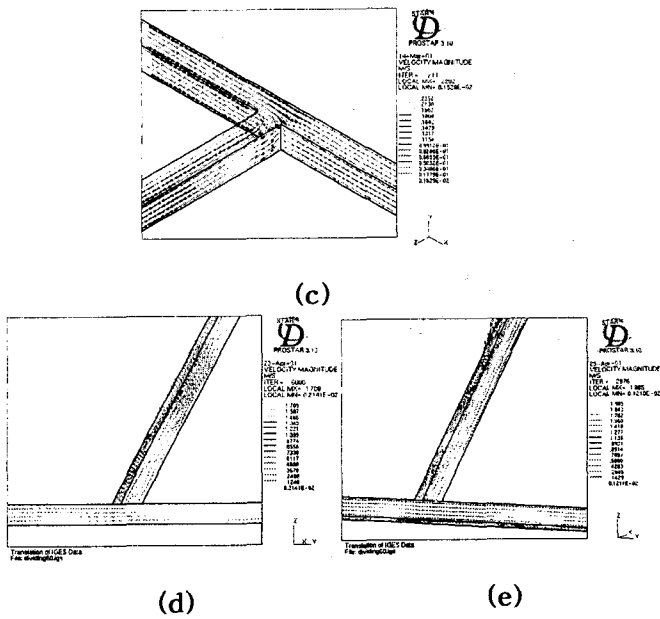


Fig. 3 Velocity magnitude

Fig. 3에서 각각의 (a), (b), (c)는 90° 분지관 입구 쪽 속도 및 Re수 변화에 따른 평균속도벡터 및 (d), (e) 60° 분지관 에서 속도벡터 값을 보여 준다. (a)평균속도 벡터장 분포도에서 나타나듯이 본 실험에서 가장 낮은 유량 및 Re수 때문에 분지부 주관에서는 그다지 큰 변화를 보여주지 못하고 있지만 지관 쪽 입구에 와류와 재부착점 위치가 매우 작게 나타남을 알 수 있다. 하지만 (c)의 평균속도 벡터장 분포도에서는 분지부 주관 쪽 외벽과 지관 쪽 내벽에 강한 와류에 의한 재부착점 위치의 크기가 커짐을 알 수 있다. 분지부에서 (a)에서 (c)로 갈수록 입구 쪽 유량 및 Re수가 증가하며, 와류의 크기와  $Q_2/Q_1$  값은 증가함을 나타내며, 이것은 지관쪽 와류가 발생하는 부분에서 최대 속도는(a)에서0.1929m/s, (b)에서 0.2110m/s이며 (c)에서 0.2159m/s이다. 와류의 재부착점의 위치도 증가한다. 또한 분지부의 주관 쪽 부분의 외벽에 Re수가 증가할수록 와류의 재부착점 위치와 빠른 속도 벡터가 발생됨을 알 수 있다.

PIV를 통한 실험은 실제적인 형태에서 발생되어지는 여러 가지 손실에 의해서 입구 쪽의 레이놀즈수와 유량이 변화에 따라 분지부의 속도벡터장의 형태가 변화되고 있지만, CFD 사용한 STAR-CD 에서는 입구 쪽 레이놀즈수와 유량

값이 변화해도 속도 벡터장의 형태가 거의 변화하지 않음을 알 수 있다. 이것은 아크릴의 마찰로 인한 손실 및 기타 손실 등을 무시했으며, 실제 유체가 아닌 이상유체로 가정했기 때문으로 생각된다. PIV계측을 사용하여 분석한 (a)에서 최대속도 값 0.1929m/s이고, STAR-CD에서 분석한 최대 속도는 0.1995m/s이며, (b)의 PIV분석 값은 0.2110m/s이고,CFD 분석 최대속도 값은 0.2144m/s이며, (c)또한 PIV 분석 값은 0.2159m/s값이며, CFD 분석최대속도 값은 0.2292m/s를 얻었다. 분지부의 PIV분석 한 값과 CFD로 분석한 최대속도 값의 일치도는 평균 96.4%의 일치함을 알 수 있다.

60° 분지관 에서는 90° 분지관보다 큰 최대속도 값이 입구 쪽 0.174m/s, 0.2m/s일 때 1.709m/s와 1.833m/s값을 나타냄을 알 수 있으며, 지관부의 속도벡터의 방향이 균일하지 못함을 알 수 있다. 이는 지관부의 각도 변화로 인한 이차유동에 의한 와류 발생이 크기 때문이다.

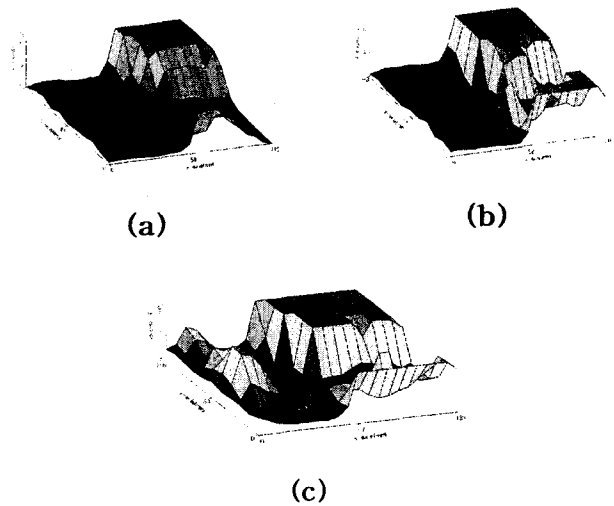


Fig. 4 Average kinematic energy

Fig. 4 (a), (b), (c)는 평균운동에너지를 보여준다. (a)에서는 주관 쪽에 그다지 큰 운동에너지 값들이 없지만 (b)에서 (c)로 갈수록 주관 쪽에 운동에너지 값들이 증가함을 보여주고 있음을 알 수 있다. 즉, 유량 및 Re수가 증가함에 따라 주관 쪽에 외벽 운동에너지가 증가함을 알 수 있다.

그 이유는 Re수가 증가할수록 Fig. 5에서 나타나듯이 주관 쪽에 속도벡터 값들이 증가하기 때문이다. 그것은 주관 쪽의 와류의 크기와 재부착점이 증가하기 때문이다. 또한, 유량 및 Re수가 (a)에서(c)로 증가함에 따라서 지관쪽 외벽의 운동에너지 변화는 그다지 큰 변화를 보여주지 못했지만, 내벽은 와류의 증가에 의한 운동에너지와 재부착점 위치도 증가함을 알 수 있다.

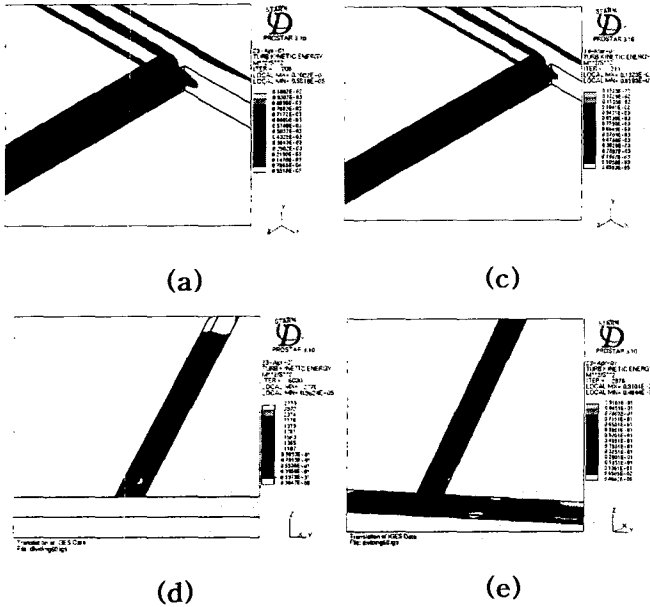


Fig. 5 Turbulence kinematic energy

Fig. 5는 CFD 상용코드를 사용하여 분석한 난류운동에너지를 보여주고 있다. Fig. 3은 PIV계측을 통한 분지부 Test-sectiond의 평균 운동에너지 부분을 나타내고 있다. (a)와 (c)의 90° 분지관에서는 분지부의 지관쪽 입구 쪽에  $0.9662E-03$ ,  $0.1276E-02$ 값의 최대 난류운동에너지 값을 가지며, 유량 및 레이놀즈 수가 증가할수록 난류 운동에너지 최대 값이 증가함을 알 수 있다. 하지만 난류운동에너지 값들이 그다지 큰 값이 아님을 알 수 있으며, 이것은 유량 및 레이놀즈 수가 변화하더라도 그다지 큰 와류가 발생하지 않기 때문이다. 또한 60° 분지관(d), (e)의 난류 운동에너지 최대 값은 각각  $0.2770$ ,  $0.9101E-01$  값을 가지며, 이것은 유량과 레이놀즈 수가 증가할수록 난류 운동에너지는 감소하고, 같은 레이놀즈 수와 유량 값에서 90° 분지관

보다는 난류 운동에너지는 증가함을 알 수 있다. 이것은 60° 분지관에서 분지관으로 나간 유량이 90° 분지관 나간 유량보다 훨씬크기 때문에 이차 유동이 더 크게 발생하여 와류가 생성되었기 때문이다.

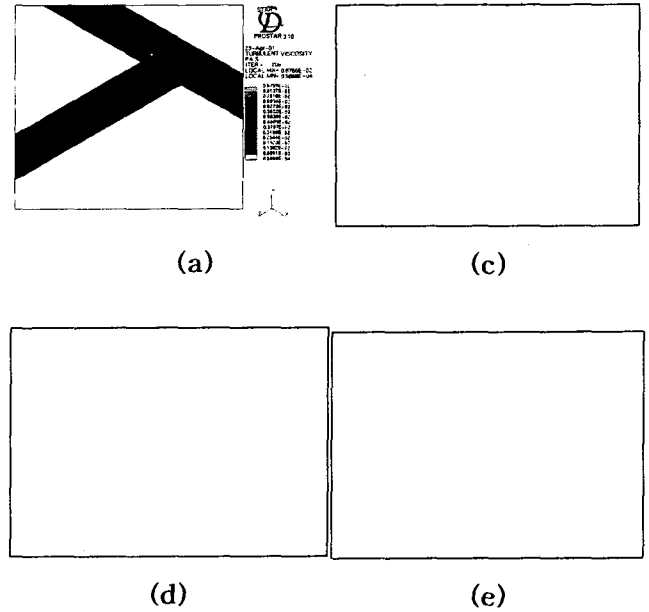


Fig. 6 Turbulence viscosity

Fig. 6은 난류점성을 나타낸다. (a)와 (c)는 90°에서의 난류 점성이며, 주관에서는 난류점성은 큰 변화가 없으며, 분지부 지관의 시작되는 내벽에 다양한 난류점성 값이 분포함을 알 수 있지만, 유량 및 레이놀즈 수가 증가하더라도 각각의 최대 값  $0.8448E-02$ ,  $0.1003E-01$ 은 큰 차이를 나타내지 못함을 알 수 있다. 또한 90°보다 60°에서 점성이 큰 값을 가지며 이것은 난류 운동에너지가 90°보다 60°에서 크기 때문이며, 분지부 지관 쪽 입구에서 멀리 떨어져서 확산 분포함을 알 수 있다. (d)와 (e)의 최대 값은 각각  $1.385$ ,  $0.8894$  가지며, 90°에서와 달리 유량 및 레이놀즈 수가 증가할수록 60°에서는 난류점성이 감소함을 알 수 있다. 이것은 입구 쪽 유량 및 레이놀즈 수가 증가하면 난류 운동에너지가 감소하므로 와류 발생이 적어졌기 때문이다.

#### 4. 결 론

본 연구는 분기사각 덕트내의 유동특성을 가시화하기 위해 PIV계측방법과 CFD분석 방법을 사용하였고, 분기사각덕트 내의 입구 쪽 유량 및 Re수 변화에 따른 분기부의 속도벡터 값 및 평균운동에너지, 난류 운동에너지, 난류 점성 등을 PIV 분석 프로그램인CACTUS'2000과 CFD 분석 프로그램인 STAR-CD 사용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 평균속도 벡터장에서 최대속도에서 와류의 재부착점은 주관 및 지관증가하며, 평균운동에너지는 유량 및 Re수가 증가할 때 지관쪽 보다 주관쪽에 훨씬 크게 변화했다. 또한 90° 분지관에서 PIV실험계측에 의한 값과 CFD로 분석한 값의 최대 속도 값은 평균 96.4% 일치하였고, 주관부와 지관부에서 균일한 속도벡터를 나타내며, 60° 분지관에서는 90° 분지관 보다 더 큰 속도벡터 값을 갖는다.

2. 90° 분지관에서는 분기부의 지관쪽 입구 쪽에 유량 및 레이놀즈 수가 증가할수록 난류 운동에너지 최대 값이 증가했으며, 또한 60° 분지관에서는 입구 쪽 유량과 레이놀즈 수가 증가할수록 난류 운동에너지는 감소하지만, 상대적인 난류운동에너지 값은 60° 분지관이 훨씬 크다.

3. 60° 분지관에서는 90° 분지관과 달리 입구 쪽 유량 및 레이놀즈 수가 증가할수록 난류점성이 감소하며, 분기부 지관 쪽 입구에서 멀리 확산 분포됨을 알 수 있다

#### 참고문헌

1) Ito, H., and Imai, k. "Energy losses at 90degree pipe junction"J. Hydr. Div., ASCE, 99(9), 1353~1368. 1973

2) Blaisdell,F.W.,andManson,P. W."Loss of energy a sharp-edged pipe junction in water conveyance systems."Tech.Bull 1283, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C 1963

3) Gardel, A. "Les pertes de charge dans les ecoulements au travers debranchments en Te."["Pressure drops in flows through T-shaped pipe fitting] Bull Tech. Suisse Rom., 83(9), 123~130(in French) 1957

4) McNown, J. S. "Mechanics of manifold flow." Trans., ASCE, 110, 1103~ 1142. 1954.

5) Miller,D.S."Internal flow."British Hydro-mechanics Research Association, Crainfield, Bedford, England. 1971

6) Bajura. R. A."A model for rlfow distribution in manifolds."J. Engrg. for Power. 93(1). 7~12. 1971.

7) Hager,W.H."Discussionof Separation zone a of open-channel junctions, by James L. Best and Ian Reid." J. Hydr. Engrg., ASCE, 133(4), 539~543. 1987.