

PIV 가시화에 의한 합류덕트에서의 유동특성 Flow Characteristics for PIV Visualization at Junction Duct

김명관 · 권오봉 · 배대석
M. K. Kim, O. B. Kwon and D. S. Bae

Key Words : T Junction(합류), Orifice(오리피스), PIV(Particle Image Velocimetry : 입자영상유속계), Stenosis(협착현상), Pipe Flow(관유동), Grey Level Cross Correlation(계조치상호상관법)

Abstract : Characteristics of flows at T-junction duct with and without orifices are investigated in this paper. Experiments and PIV visualization were carried out for several flow rates. Two-dimensional PIV experimental apparatus was decided by numerical analysis. PIV visualization was also coded to visualize flow fields at junctions for two-dimensional case. For the PIV visualization system, Grey-Level Cross-Correlation particle tracking algorithm was used to calculate the flow fields. Vinyl chloride polymer particles of 100 ~ 150 μ m of diameter are used in this visualization.

The PIV visualization results showed relatively good agreement with Experimental data.

기호 설명

1. 서 론

- A : 면적(m^2)
- Ar : 중형비
- d : 오리피스직경(mm)
- D : 관의 직경(mm)
- L : 길이(m)
- p : 압력(Pa)
- Q : 유량(m^3/s)
- Re : Reynolds number
- V : 유속(m/s)
- ζ : 손실계수
- ρ : 밀도(kg/m^3)

아래첨자

- 1 : 직관 상류부 파이프
- 2 : 측면 파이프
- 3 : 직관 하류부 파이프

물질전달과 유체수송의 통로가 되는 배관시스템은 수많은 합류관, 분기관, 곡관 등으로 구성된다. 이러한 액체배관을 장기간 사용하면 액체중에 포함되어 있는 부유물이 관벽에 침착하고 액체와 관벽의 화학작용에 의해서 관벽에 스케일이 쌓이게 되어 관로를 좁게하는 협착현상(stenosis) 현상이 생긴다. 이러한 협착현상은 관의 단면과 형태가 급격히 변하는 지점 즉, 유동방향을 조절하기 위하여 설치된 산업용 배관장치 또는 인체혈관의 분기점, 합류점과 같이 유동박리에 의한 재순환영역이 발생하는 곳에서 주로 형성되는 것으로 알려져 있다. 협착현상이 일단 발생되면, 시간이 경과될수록 협착정도가 심해지면서 압력손실이 커지고 유량도 크게 감소된다. 합류관과 분류관 유동은 유동방향의 급격한 변화로 인해 배관계나 혈관내의 원활한 유량수송을 저해하고, 압력손실을 증가시킨다. 따라서 뉴턴 유체와 비 뉴턴유체의 합류관, 분류관 내의 유동에 관한 연구는 공학적 해석과 인체의 동맥혈관에서 발생하는 병적 원인을 규명하는데 매우 중요하다^{1,2)}.

공기 조화 측면에서 본다면 쾌적한 실내 온도분포 유지를 위하여 적절한 유량분배가 필요하며, 제습(demist)덕트와 제상(defrost)덕트 사이에서도 적절한 유량분배가 필요하다. 특히 자동차, 항공기, 선박 등의 좌석과 좌석사이의 쾌적한 실내를 위하여

접수일 : 2005년 6월 14일
 김명관(책임저자) : 부경대학교 산학협력단
 E-mail : kimmk@mail.pknu.ac.kr, Tel : 051-620-1607
 권오봉, 배대석 : 부경대학교 기계공학부

적절한 유량분배가 필요하다고 볼 수 있다.

최근의 관 유동에 대한 연구경향을 살펴보면 다음과 같다. 분지관 덕트내의 유량분배 및 180도 덕트 내의 난류유동에 대해서는 윤 등³⁾과 김과 최⁴⁾가 수치적으로 연구 했으며, 직선배관에서 균일한 공기 흡입을 하는 오리피스 직경변화에 대한 연구는 김⁵⁾이 하였고, 분기형 덕트내 뉴턴 유체의 가시화에 대해서는 심⁶⁾이 연구하였다.

특히, 공업용, 산업용으로 사용빈도가 높은 엘보, 밴트, 티 등을 갖는 배관계의 유동은 직선만으로 구성된 배관계와는 달리, 원심력이 작용하게 되어 배관 내측벽과, 외측벽에 압력차가 발생하게 된다. 이 때문에 축방향에는 박리유동(separated flow)이 생기고, 축방향에 수직인 단면내에는 2차 유동(secondary flow)이 발생하여 새로운 유동현상으로 바뀌게 된다^{7,8,9)}. 이와 같이 엘보와 티 등에 의해서 직선부에 급격히 곡관으로 변화하는 유동영역에 있어서 매우 복잡한 유동특성을 나타내는데도 불구하고, 이러한 영역에서의 유동에 대한 연구는 미미한 실정이다. 배관계에 있어서 이러한 유동특성들에 대한 자료들은 유체기계의 설계에 기초 자료가 될 뿐 아니라, 압축기, 가스터빈, 공기조화의 덕트 설비 등의 유동 특성을 이해하는데 매우 유용할 것이다.

본, 연구에서는 합류 덕트에서 협착부가 있는 경우와 협착부가 없는 경우에 따른 유동현상을 실험과 PIV가시화를 이용하여 합류덕트의 설계에 필요한 정성적 자료를 제공하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험장치 예측

입자영상유속계의 실험 장치를 제작하기 이전에 고려해야할 사항은 실제 유동이 사각덕트형이라 하더라도 유선 형상이 2차원이 아닌 3차원의 형상이 나타날 수 있다고 볼 수 있다. 따라서 첫 번째 작업으로 시뮬레이션을 통한 2차원의 유선 형태를 먼저 파악하고, 두 번째로 덕트형 실험장치의 종횡비를 변경해 가면서 시뮬레이션 한다. 그리고 2차원의 계산 결과와 덕트형의 계산결과를 비교하여, 2차원의 계산 결과에 가장 가깝게 나타내는 종횡비를 찾아서 실험장치로 제작되어야 한다.

Fig. 1는 시뮬레이션을 위한 사각덕트를 나타내고 있는 것으로 가운데 단면의 유동이 (a) 2D에 가까운 실험장치를 만들기 위해서 종횡비(Ar)를 1, 2, 4로 변형시킨 형상들을 보여주고 있다.

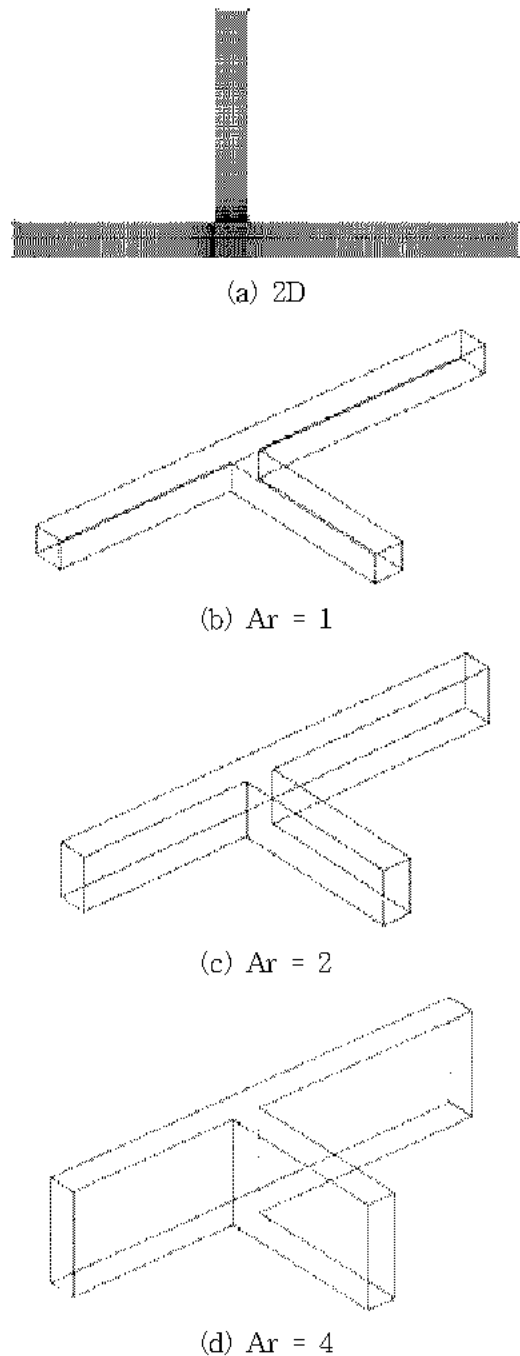


Fig. 1 Computational geometry

Fig. 2는 Fig. 1의 각각의 geometry에 해당하는 시뮬레이션한 결과를 압력분포도로 나타낸 것으로, (a)는 2차원 압력장을, (b)는 종횡비가 1인 덕트의 압력장을, (c)는 종횡비가 2, (d)는 종횡비가 4인 덕트의 압력장을 나타낸 것이다. 여기서 2차원인 (a)와 가장 잘 일치하는 것은 종횡비가 4인 (d)형의 덕트로 나타났다.

따라서 입자영상유속계의 실험장치로는 종횡비 4인 경우를 선택하여야 한다. 하지만, 종횡비 4인 실험장치를 제작할 경우 실험장치는 사각형의 덕트형

이고, 실험장치 이전까지는 원형의 배관이므로 서로 결합하는데 상당한 어려움이 있기 때문에 차선택으로 종횡비가 2인 (c)를 선택하여 가로 25mm, 세로 50mm의 덕트를 입자영상유속계의 실험장치로 제작하였다.

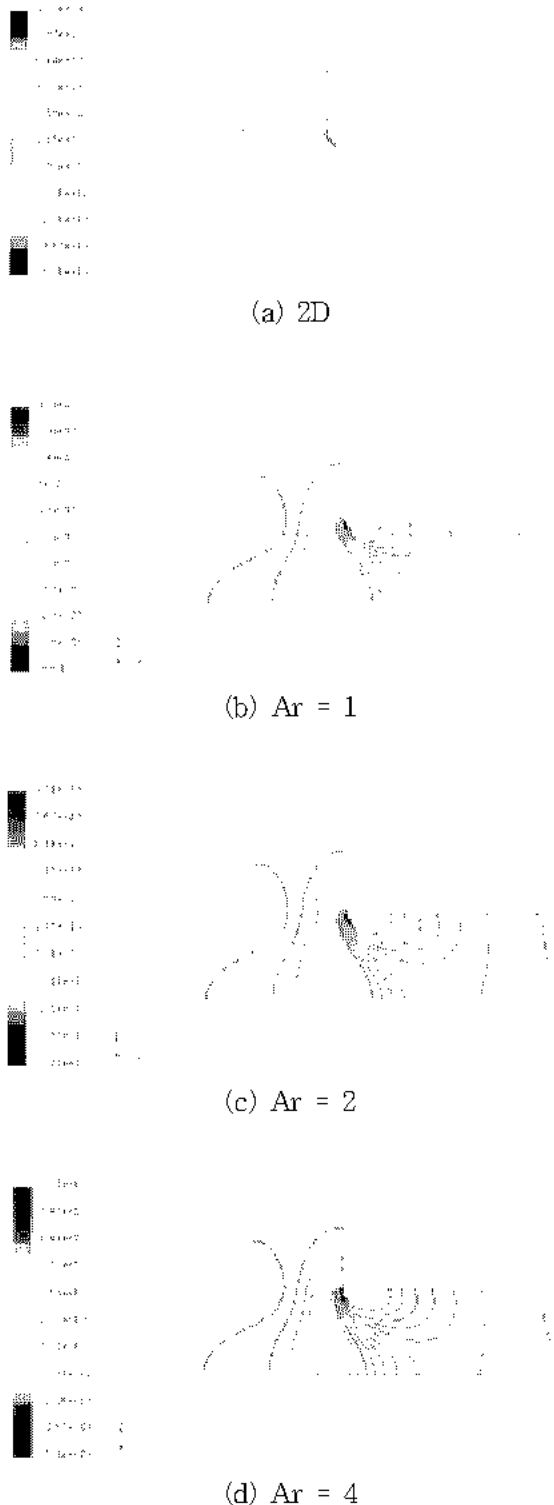
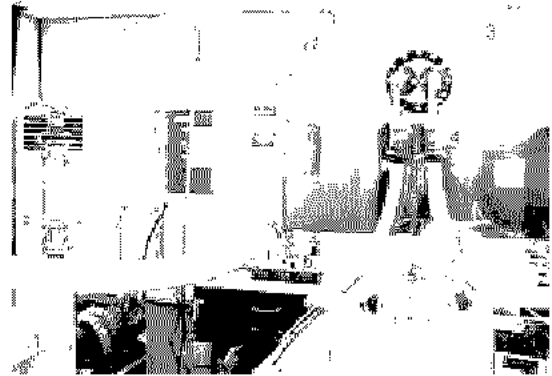


Fig. 2 Contours of pressure

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치



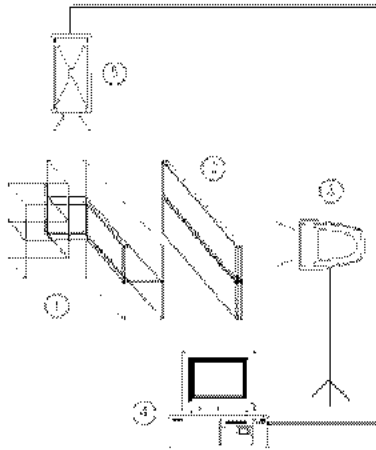
- ① Storage tank ② Pump ③ Upper tank
- ④ Flowmeter ⑤ Test section
- ⑥ Pressure gage ⑦ Overflow pipe

Fig. 3 Experimental apparatus

Fig. 3은 실험장치를 나타낸 것이다. 대표적으로 저장탱크, 펌프, 상부수조, 유량계, 합류관, 압력계 등으로 구성되어져있다. 실험실 바닥에 위치한 저장탱크는 가로 1m, 세로 1m, 높이 0.8m인 사각수조이며 실험유체를 저장한다. 유체 공급펌프는 최대유량 18m³/h인 원심펌프를 이용하여, 상부수조까지 공급하며, 상부수조의 크기는 가로 0.6m, 세로 0.6m, 높이 0.6m 이다. 시험구역에 유체의 압력이 가해지도록 하기 위해 상부수조에서 시험부까지 최소 높이 0.5m에서 최대 높이 1m까지 0.1m씩 가변 할 수 있도록 제작되어져 있다. 또 펌프에서 보내지는 과잉유량에 의해서 상부수조에서 발생하는 수위변화를 줄이고, 시험부에 균일한 압력이 가해지도록 하기 위해서 상부수조의 상층부위에 가로 0.5m, 세로 0.1m 사각모양의 일수관(overflow pipe)을 설치하여 시험부에 유체를 정속하게 공급하였다. 일수관을 통과한 과잉유체는 다시 지상의 저장수조로 보내지게 되어있다.

Fig. 4는 PIV 가시화 실험 장치도를 보여주고 있다. 실험장치는 고속카메라, 시험부, 시이터광, 조명, 컴퓨터 등으로 구성되어 있으며, 유동 가시화를 위하여 투입된 입자는 작동유체인 물의 밀도와 거의 유사하고 크기가 100~150μm인 플라스틱 분말(vinyl chloride polymer)을 사용하였다. 사각단면을

가진 90°합류형 덕트를 통해 물과 함께 유동하는 입자들을 고속카메라를 이용하여 영상을 획득하고, 화소영역은 500 fps일 때 512 × 240이다.



- ① Test section ② Sheet light ③ Light source
- ④ Computer ⑤ High speed camera

Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

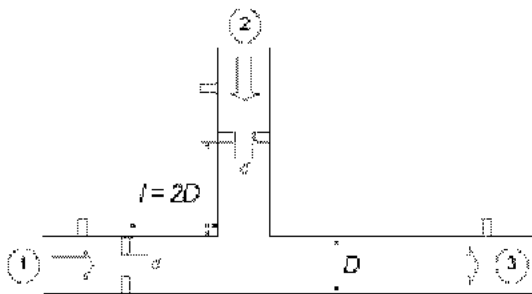


Fig. 5 Enlarged view test section

Fig. 5는 Fig. 4의 ① Test section을 확대하여 위에서 본 그림이다. 합류부를 중심으로 ①은 본관상류, ②는 지관, ③은 본관하류를 나타낸다. 실험과 PIV가시화실험에서는 오리피스가 설치되지 않은 경우와 10mm의 오리피스가 설치된 경우에 대해서만 실험을 하였다. 즉, 가로 25mm, 세로 50mm인 덕트는 오리피스를 설치하지 않은 것이므로 $(d_{1-2} / D_{1-2}) = 1$ 이 된다. 또 10mm의 오리피스가 설치된 경우는 가로 15mm, 세로 50mm이므로 $(d_{1-2} / D_{1-2}) = 0.6$ 이 된다.

4. 결과 및 고찰

4.1 오리피스가 없는 덕트에서의 유동

Fig. 6은 촬영영상에 계조치 상호 상관법을 적용하여 속도장을 속도벡터와 속도크기를 확인할 수

있는 속도 윤곽을 나타낸 것이다¹⁰⁾. 합류지점 이후의 안쪽 내벽에서 심한 와류현상(separated flow)이 발생되는 것을 볼 수 있다. Fig. 7은 Fig. 6을 유선으로 나타낸 것으로 본관유동형상과 지관유동형상을 각각 볼 수 있으며, 본관의 유동은 지관유동에 의해서 유로가 많이 줄어들는 것에 반해서 지관유동은 본관유동의 압력에 의해서 원심력이 강하게 작용하기 때문에 유속이 빨라지는 것을 볼 수 있다.

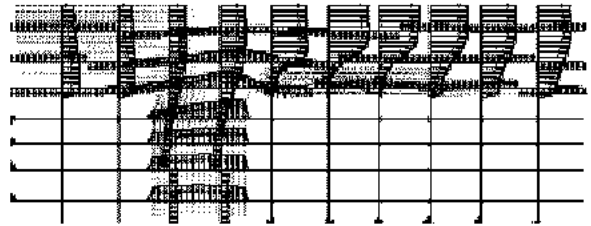


Fig. 6 Velocity profile ($Re_3 \approx 43500$)

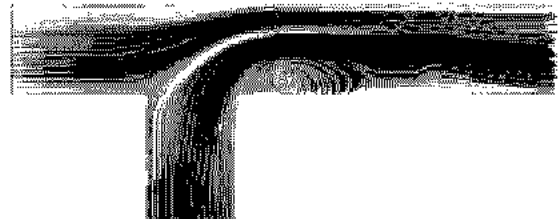
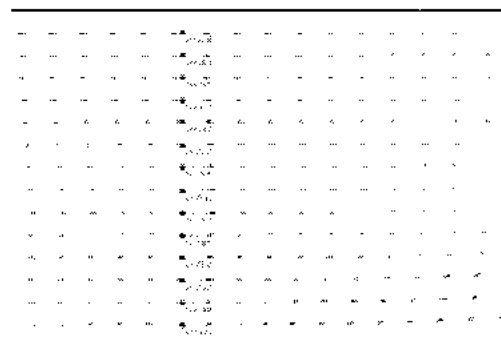
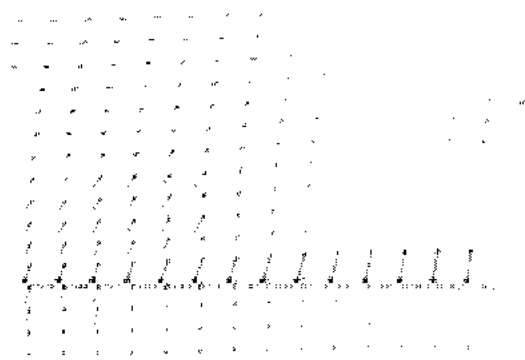


Fig. 7 Streamlines



(a) Main pipe ($V = 0.674$ m/s)



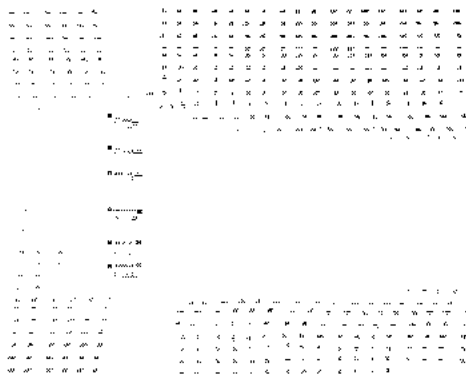
(b) Lateral pipe ($V = 0.769$ m/s)

Fig. 8 Enlarged velocity vectors without orifice

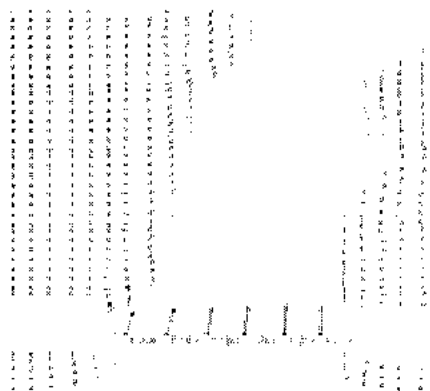
Fig. 8은 오리피스를 설치하지 않은 경우의 속도벡터를 확대한 것으로 각 포인트의 대표속도를 나타내어 보았다. (a)는 본관의 속도벡터를 나타낸 것으로 평균유속은 0.674m/s 이고, (b)는 지관의 속도벡터를 나타낸 것으로 평균유속은 0.769m/s 이다. 실험장치에서 동일한 높이에서 지관과 본관에 압력이 가해지도록 되어 있기 때문에 지관유속이 본관유속보다 약 0.095m/s 크게 흘러간다는 것을 알 수 있다.

4.2 오리피스를 설치한 덕트에서의 유동

Fig. 9는 오리피스가 설치된 합류관의 속도벡터를 확대해서 나타낸 것으로 오리피스 직후의 와류현상까지 상세히 관찰할 수 있다. 본관(a)의 평균유속은 약 1.102m/s로 나타났고, 지관(b)의 평균유속은 약 1.185m/s로 나타났다. 즉, 지관의 유속이 본관의 유속보다 약 0.083m/s 크게 흘러간다는 것을 나타내고 있다. 이는 4.1절의 결과와 비슷한 결과를 나타내고 있다.



(a) Main pipe (V = 1.102 m/s)



(b) Lateral pipe (V = 1.185 m/s)

Fig. 9 Enlarged velocity vectors with orifices

Fig. 10과 Fig. 11은 합류부 이후의 레이놀즈수에 따른 지관과 본관의 유량비를 나타낸 그래프로 상

부 수조의 높이를 변경해가면서 실험했고, 실험에서 얻은 유량과 PIV가시화실험에서 얻은 데이터를 같이 나타낸 것이다. Fig. 10은 오리피스를 설치하지 않은 경우이고, Fig. 11은 오리피스를 설치한 경우로서 두 경우 모두 레이놀즈수가 증가함에 따라 완만한 상승 그래프를 나타내고 있으며, 지관과 본관의 유량차는 일정한 간격을 두고 있다. 실험에서 얻은 결과와 PIV가시화실험에서 얻은 데이터가 완전히 일치하지는 않지만, 그래프의 경향은 매우 유사하다고 볼 수 있다. 즉, $(d_{1-2} / D_{1-2}) = 1$ 인 (a)의 경우 지관유량과 본관유량 비는 약 1.14이므로 지관유량이 약 14%정도 많은 것으로 나타났고, $(d_{1-2} / D_{1-2}) = 0.6$ 인 (b)의 경우, 지관유량과 본관유량 비가 1.075이므로 지관이 본관보다 약 7.5% 많이 흐른다는 것을 나타내고 있다.

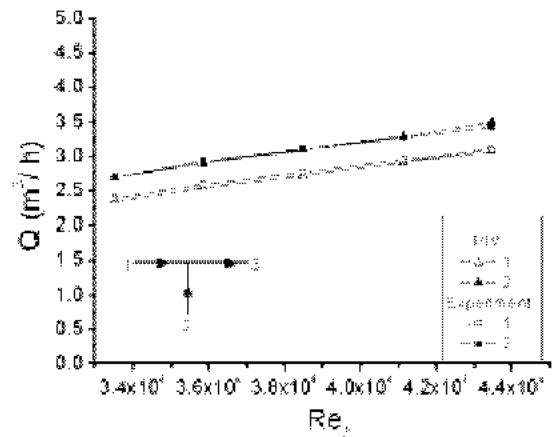


Fig. 10 Flow rate vs Re_3 without orifice

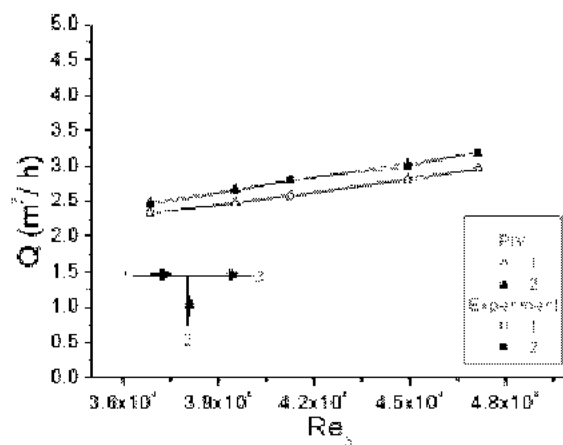


Fig. 11 Flow rate vs Re_3 with orifices

5. 결 론

실험과 PIV가시화를 통해서 합류 덕트에서의 유

동특성을 알아본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 종횡비가 2이고 오리피스를 설치하지 않은 경우 즉, $(d_{1-2} / D_{1-2}) = 1$ 일 때는 지관의 유량이 본관의 유량보다 약 14% 많이 흐른다는 것으로 나타났다. 또 여기에 10mm의 오리피스를 설치한 경우 즉, $(d_{1-2} / D_{1-2}) = 0.6$ 일 때 지관의 유량이 본관의 유량보다 약 7.5% 많이 흐르는 것으로 나타났다. 이처럼 덕트 내에 직경이 작은 오리피스가 설치되어지면, 지관과 본관의 유량비는 줄어드는 현상이 나타나는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 지정 부경대학교 친환경 첨단에너지기계연구센터의 지원(과제번호 : R12-2003-001-03006-0)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. F. J. Walburn, H. N. Sabbah and P. D. Stein, 1981, "Flow visualization Aorta", ASME Journal of Biomechanical Engineering, Vol. 103, pp. 168~170.
2. C. M. Rodkiewicz, and D. H. Howell, 1971, "Fluid dynamics in a Large Arterial Bifurcation", 2284~2286.
3. 윤영환, 배택희, 박원구, 2002, "두개의 분지관을 가진 직사각형 덕트 내의 유량분배에 관한 실험 및 수치해석 연구", 설비공학논문집, 제14권, 제 9호, pp. 766~773.
4. 김원갑, 최영돈, 2002, "단면의 폭이 감소하는 180°곡덕트 내 난류유동의 수치해석적 연구", 설비공학논문집, 제14권, 제12호, pp. 1056~1062.
5. 김진국, "직선배관에서 균일한 공기 흡입을 하는 오리피스 직경변화에 대한 연구", 방재기술, 제24호, pp. 17~22.
6. 심준환, 1995, "입자영상유속계를 이용한 분기형 덕트내 뉴턴유체의 유동가시화", 숭실대학교, 서울, pp. 3~15.
7. F. M. White, 1997, "Fluid Mechanics", Mcgraw-hill, New York, pp. 395.
8. 고흥중, 권오봉, 김희동, 사종엽, 이연원, 정희택,

주상우, 2000, "쉽게 배우는 유체역학", 인터비전, pp. 413~469.

9. 박이동, 1992, "기본 유체역학", 보성문화사, pp. 145~180.
10. 서상호, 최을, 노형운, 도덕희, 1999, "입자영상유속계와 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 분기관내 유동해석", 대한기계학회논문집, 제23권, 제1호, pp. 123~130.