

합류관에서의 손실과 유량 Energy Loss and Flow Rate at Junction Pipe

김명관 · 권오봉
M. K. Kim and O. B. Kwon

Key Words : T Junction(합류), Orifice(오리피스), Pressure Loss(압력손실), Loss Coefficient(손실계수) Stenosis(협착현상), Pipe Flow(관유동)

Abstract : This paper presents the study of flows at T-junction pipe with orifices. Experiments were carried out for several flow rates, orifice sizes, and pressure differences. Numerical simulations were also done to get more data for the wide range of flow rates. Experimental results and numerical ones are in a good agreement. Due to the effect of T-junction part, the flow rates at the lateral pipe are greater than those at straight pipe for the same pressure differences. When orifices were added, the effects of T-junction part on the ratio of flow rates and the ratio of loss coefficients reduced.

기호 설명

- A : 면적(m²)
- d : 오리피스직경(mm)
- D : 관의 직경(mm)
- f : 마찰계수
- h : 압력손실(m)
- L : 길이(m)
- p : 압력(Pa)
- Q : 유량(m³/s)
- V : 유속(m/s)
- ζ : 손실계수
- ρ : 밀도(kg/m³)

아래첨자

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

1. 서 론

동력기계의 물질전달 및 유체의 이송은 배관계를 통해서 대부분 이루어진다. 이 배관계는 원유를 수송하는 거대한 송유관에서부터 우리 인체 내의 혈액을 이송하는 모세혈관에 이르기까지 다양하고 매우 복잡하게 구성되어 있다. 특히 공업용, 산업용 배관은 위치, 장소 등의 제약을 많이 받으므로 배관계를 반드시 직선만으로는 구성할 수 없다. 따라서 엘보(elbow), 크로스(cross), 부싱(bushing), 레듀서(reducer), 리턴벤드(return bends), 유니언(union), 티(tees) 등과 같은 관 부속품을 이용하여 복잡한 배관계를 형성한다. 이러한 산업용 액체배관을 장기간 사용하면 액체 중에 포함되어 있는 부유물이 관벽에 침착되고, 액체와 관벽의 화학작용에 의해서 관벽에 스케일이 쌓여 관로를 좁게 하는 협착현상(stenosis)이 생긴다. 이러한 협착현상은 관의 단면과 형태가 급격히 변하는 지점 즉, 유동방향을 조절하기 위하여 설치된 산업용 배관장치 또는 인체혈관의 분기점, 합류점과 같이 유동바리에 의한 재순환영역이 발생하는 곳에서 주로 형성되는 것으로 알려져 있다. 협착현상이 일단 발생되면, 시간이 경과될수록 협착정도가 심해지면서 압력손실이 커지고 유량도 크게 감소되며, 합류관과 분류관 유동 또한 유동방향을 급격한 변화로 인해 배관계나 혈관 내의 원활한 유량수송을 저해하고, 압력손실을 증가시킨다. 따라서 뉴턴 유체와 비뉴턴 유체의 합류관,

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

분류관내의 유동에 관한 연구는 공학적 해석과 인체의 동맥혈관에서 발생하는 병적 원인을 규명하는데 매우 중요하다.

최근의 분기관 유동에 대한 연구경향을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 혈류유동에 관해서 살펴보면, 관벽에 미치는 전단응력은 분기점 근처에서 증가하며 인체혈관에 관해서는 분기점 근처에서 동맥경화가 발생할 경향이 있음을 임상실험을 통해서 연구했으며¹⁾, Rodkiewicz 와 Howell²⁾은 분기관에서의 유동상태를 연구하여 순환계통의 질병치료를 응용하기 위하여 많은 노력하고 있다.

Oka 등³⁾은 합류지점의 배관결합과정에서 곡률반지름에 따른 에너지 손실에 관한 연구를 실험적으로 했으며, 분기형 덕트내 뉴턴유체의 유동가시화에 대해서 입자영상유속계를 이용하여 심⁴⁾이 연구하였고, 분기관의 각도변화에 따른 유동현상은 고⁵⁾가 연구했다. 하⁶⁾는 비뉴턴 유체인 점탄성 유체를 사용하여 분기관의 층류영역에서 분기 유동 특성을 실험을 통하여 연구하였다.

수치해석으로는 김⁷⁾이 엘보가 있는 배관계에서 엘보내의 유동손실을 줄이는 방법을 해석하였으며, 민과 김⁸⁾은 2단 오리피스에서의 난류유동을 맥동유동에 대하여 수치해석 하였고, 오리피스 링이 부착된 원관내 정상 및 맥동 난류유동에 대해서는 맹 등⁹⁾이 수치적으로 해석하였다.

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. 이때문에 축방향에는 박리유동(separated flow)이 생기고, 축방향에 수직인 단면내에는 2차 유동(secondary flow)이 발생하여 새로운 유동현상으로 바뀌게 된다. 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 유동특성을 이해하는데 매우 유용할 것이다.

본, 연구에서는 실험과 수치시뮬레이션을 이용하여, T형 합류관에서 협착부가 발생된 경우 협착부에 따른 유동현상과 합류지점에서의 유동현상을 해석하여 배관계에서 합류부의 최적설계에 필요한 정성적 자료를 제공하는 것을 목적으로 한다.

2. 합류관내에서의 유동

2.1 T형 합류관 유동과 에너지 손실

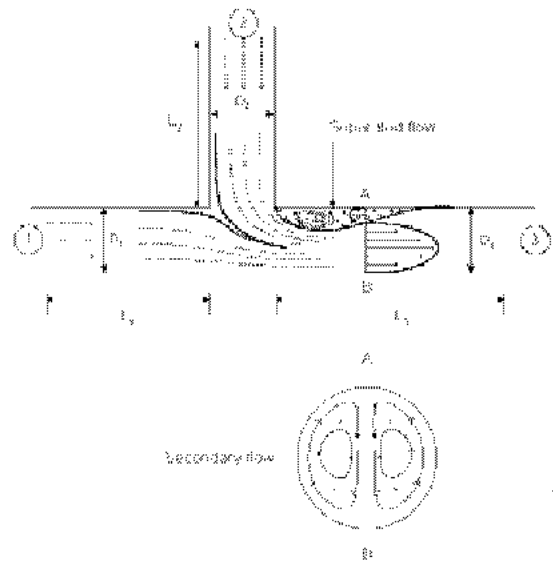


Fig. 1 Combination of flows at pipe junction

Fig. 1은 일반적인 합류부의 유동분포를 나타낸 것으로 관의 직경은 모두 동일하다. 그림과 같이 합류부의 벽에서는 유동박리(separated flow)가 생기거나 원심력에 의하여 2차유동(secondary flow)이 일어나기 때문에, 단순한 Moody의 마찰손실보다 항상 큰 손실이 있게 마련이다¹⁰⁾. 합류부 직후에는 유동박리가 생겨 유체가 흘러갈 수 있는 유로가 상당히 줄어들며, A-B단면에서 보면 2차 유동과 박리가 많이 발생되는 것을 볼 수 있다.

2.2 에너지 손실 계수의 정의

Fig. 1에서 보는 것과 같이 유동의 합류부 중 직선관 ①과 ③사이의 압력손실 h_{L13} 은 식(1)의 에너지 방정식에 의해서 표현되었다.

$$\begin{aligned}
 h_{L13} = & \left(\frac{p_1}{\gamma} + \frac{1}{2g} V_1^2 \right) \\
 & - \left(\frac{p_3}{\gamma} + \frac{1}{2g} V_3^2 \right) \\
 & - f_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{1}{2g} V_1^2 \\
 & - f_3 \frac{L_3}{D_3} \frac{1}{2g} V_3^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

본관 직선 흐름 손실계수 ζ_{13} 은 다음과 같다.

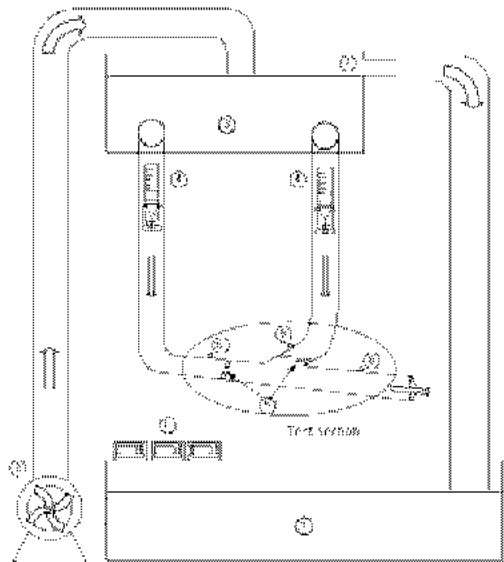
$$\zeta_{13} = h_{L13} / \left(\frac{1}{2g} V_3^2 \right) \tag{2}$$

지관으로부터 본관으로의 유동에 대한 압력손실 h_{L23} 과 손실계수 ζ_{23} 은 각각 (1)과 (2)에서 아래첨자 1을 2로 대체함으로써 얻어질 수 있고, 연속 방정식은 아래와 같다.

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 \quad (3)$$

3. 실험 및 수치해석 방법

3.1 실험장치



- ① Storage tank ② Pump ③ Upper tank
- ④ Flowmeter ⑤ Orifice ⑥ Pressure tap
- ⑦ Overflow pipe ⑧ Pressure gage

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2는 본 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로 하부탱크, 펌프, 상부탱크, 유량계, 합류관, 압력계 등으로 구성되어 있다. 실험유체는 하부수조에 저장되어 있으며, 원심펌프를 이용하여 상부수조(upper tank)까지 작동유체를 공급한다.

시험부(test section)에 유체의 압력이 가해지도록 하기 위해서 시험부에서 상부 탱크까지의 최소 높이가 1m로 하였으며, 최대 높이가 1.4m까지 0.1m씩 높이를 조절할 수 있도록 제작하였다. 또 상부수조 상부에 가로 0.5m, 세로 0.1m의 일수관을 설치하여, 펌프에서 공급된 과잉유체를 흘려보냄으로써 상부수조에서 발생하기 쉬운 수위변화를 발생하지 않도록 하여 시험부에 균일한 압력이 가해지도록 하였다. 일수관으로 흘러들어간 과잉유체는 하부수조로

다시 보내지게 되어있다.

Fig. 3는 본 논문의 시험부인 합류관을 상세히 나타낸 것으로 본관(straight pipe), 지관(lateral pipe), 오리피스(orifice)를 나타내었다.

실험장치의 시험부는 두께3mm의 투명아크릴로 구성되어 있으며, 본관과 지관은 직경이 34mm이고, 본관과 지관의 길이는 합류점에서부터 약 1.6m이다. 시험부는 불안정한 유동이 발생하므로 합류점을 기준으로 수평이 되게 하였으며, 본관과 지관에 설치된 오리피스는 합류점에서 파이프 직경의 2배 거리에 설치되었다. 합류관 유로의 구분을 위해서 본관상류를 ①, 지관을 ②, 본관하류를 ③이라 하여, 본관상류유량은 Q_1 , 지관유량은 Q_2 , 본관하류의 유량은 Q_3 으로 나타내었다.

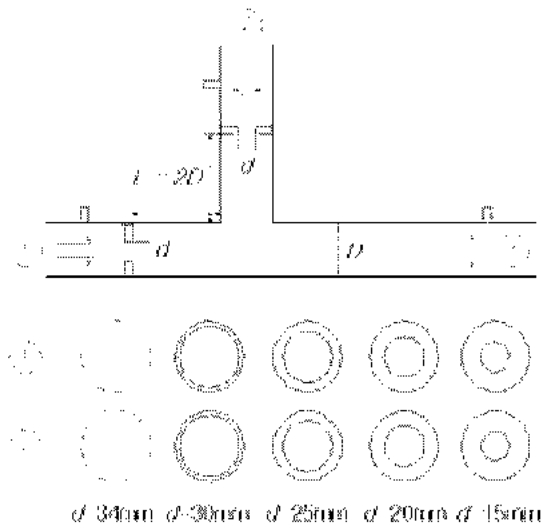


Fig. 3 Main test section and orifices

3.2 수치해석

본관과 지관의 손실을 알아보기 위해 작동유체를 동일한 유량으로 각각 공급해야 하지만, 4.1절에서 알 수 있듯이 실험으로는 본관과 지관에 동일한 유량을 공급하기가 어렵다. 그러므로 CFD가 해결책이라 볼 수 있다. 원형의 단면을 가진 T-합류관에서의 내부유동을 수치해석하기 위한 grid는 Fig. 3의 모형을 고려하였으며, 격자는 오리피스 주변과 합류부 근처에 집중시켰고, 총 격자수는 약 250,000개이다.

계산에 사용된 지배방정식은 정상상태의 비압축성 유체의 연속방정식, 운동량방정식 및 스칼라량에 대한 보존방정식으로 스칼라량에 대한 보존방정식은 $k-\epsilon$ 모델 방정식의 계산에 사용된다. 이들 방정식을 풀기 위해서 본 연구에서는 3차원 유동해석이

가능한 FLUENT를 사용하였고, 이 프로그램은 유한체적법을 기본으로 한다. 난류모델로는 간편하고 폭넓게 응용할 수 있는 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였고, 수치해석에 선택된 해법은 상류차분, SIMPLE알고리즘을 사용하였다^{11~13)}.

경계조건은 실험에서 얻은 유속과, 전압력으로 입구에 주었고, 완전발달유동을 만들기 위해 입구영역을 관 직경의 30배 길게 계산영역을 잡았다. 출구조건으로는 관의 끝에서 일정 압력(대기압)으로 하였고, 나머지 벽면에 대해서는 점착조건으로 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 동일한 압력에서의 유량

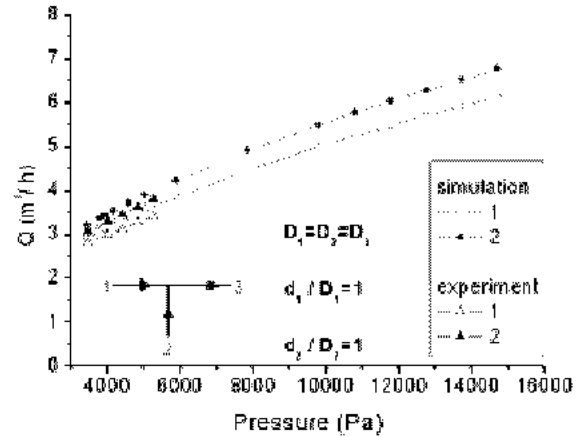
본 연구에서는 본관과 지관에 동일한 직경을 가진 오리피스를 설치하여 관내의 유동형태, 유량, 손실에 대해서 오리피스가 어떠한 영향을 미치고 있으며, 또 관내의 합류부에 의해서 유동, 유량 및 손실이 어떻게 나타나고 있는가 알아보기 위해서 동일한 오리피스를 본관과 지관에 각각 직경이 34mm, 30mm, 25mm, 20mm, 15mm를 설치하여 실험과 시뮬레이션을 비교 검토하였다.

실험은 본관과 지관에 동일한 압력으로 작동유체를 공급하여 유량과 압력을 측정하였다. 본관과 지관 그리고 합류관의 직경 D 는 모두 같으며, 실험실의 여건상 공급수조의 높이를 높게 할 수가 없기 때문에 상부수조를 최소높이 1m에서 최고 높이 1.4m까지 0.1m 마다 차등을 두어 실험을 행하였다.

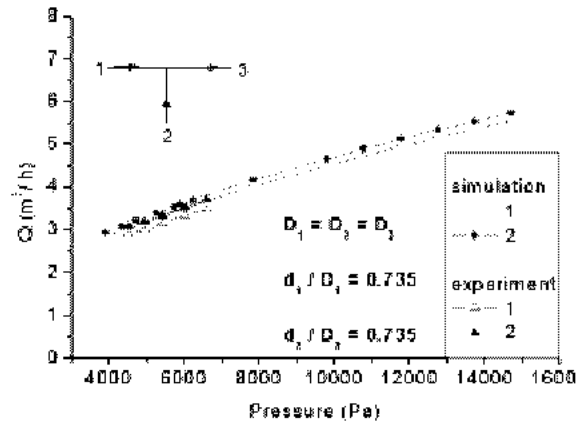
시뮬레이션에서는 본관과 지관의 입구조건으로 실험에서 얻은 압력 값을 고려하였으며, 압력은 3500Pa에서 15000Pa까지 실험보다 넓은 범위에서 계산했다.

Fig. 4는 압력에 대한 유량을 나타낸 것으로 그래프 내의 삼각 symbols는 실험의 결과를 나타낸 것이고, 원 symbols는 시뮬레이션의 결과를 나타낸 것이다. (a)는 오리피스가 없는 경우이며, (b)는 25mm (c)는 15mm의 오리피스를 각각 본관과 지관에 설치하였고, 30mm와 20mm의 그래프는 생략하였다. 오리피스 변화에 따른 유량비는 실험과 시뮬레이션에서 유사한 경향을 나타내고 있으며, 모든 그래프에서 지관의 유량이 본관의 유량보다 많음을 보이고 있다. 실험과 시뮬레이션에서 관 마찰계수가 정확히 일치하지 않기 때문에 유량이 정확히 일치하지는 않다고 볼 수 있다. 또 본관과 지관에 설치

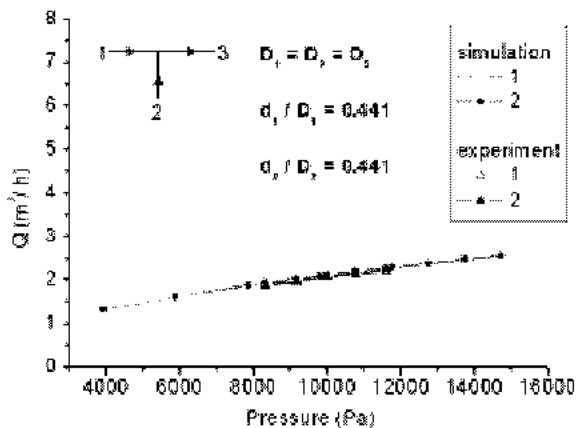
된 오리피스의 직경이 작아질수록 지관과 본관의 유량차는 점점 줄어들고 있으며, 오리피스 직경이 15mm에서는 지관과 본관의 유량이 비슷하게 나타남을 알 수 있다.



(a) Without orifice



(b) $d_1 = d_2 = 25\text{mm}$



(c) $d_1 = d_2 = 15\text{mm}$

Fig. 4 Flow rate vs. pressure

Fig. 5은 Fig. 4를 직경비에 대한 유량비를 나타낸 것으로 본관과 지관에 직경이 동일한 오리피스가 설치되어져 있다. 오리피스와 관의 직경비가 1,

0.88, 0.74, 0.59, 0.44로 줄어들수록 지관과 본관의 유량비도 1.1, 1.065, 1.035, 1.021, 1.009로 점점 줄어드는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 4와 5에서 보인 지관의 유량이 본관의 유량보다 크게 나타나고 있음을 뒷받침하는 것으로서 대표적으로 오리피스를 설치하지 않은 경우의 등속선을 나타낸 것이다. T-합류부에서 나타나는 이와 같은 현상은 본관유동은 지관유동에 의해서 유로가 많이 좁아지는 반면, 지관에는 원심력이 크게 발생하며, 여기에 본관압력이 가해져 지관의 유속이 본관의 유속보다 증가하기 때문에 나타나는 현상이라고 볼 수 있다.

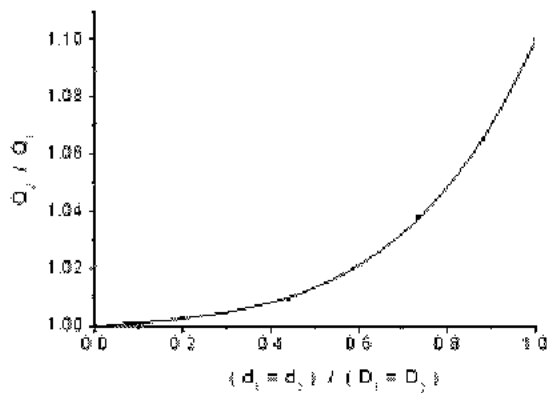


Fig. 5 Flow ratio vs. diameter ratio

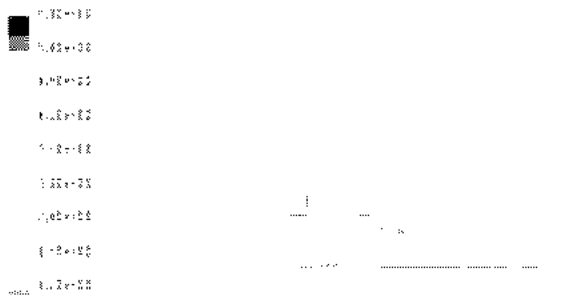
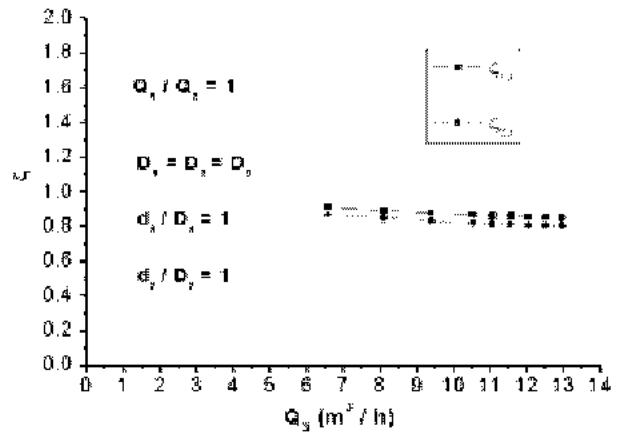


Fig. 6 Contours of velocity magnitude without orifice

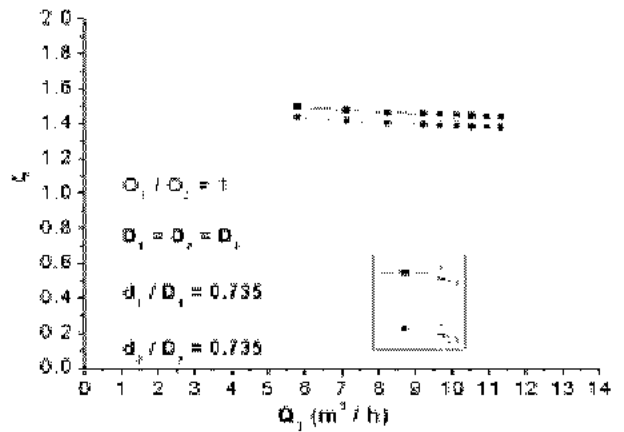
4.2 동일한 유량에 대한 손실계수

합류부와 오리피스에 대한 손실계수를 알아보기 위한 시뮬레이션 결과로 본관과 지관의 입구 조건은 동일유량을 주었고, 본관과 지관의 압력을 계산하여 손실계수를 구하였다.

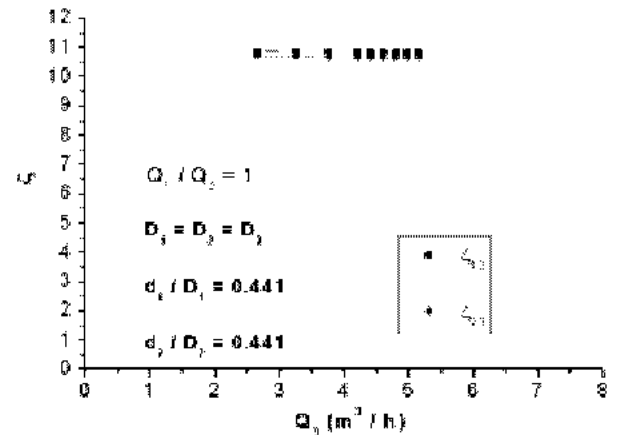
Fig. 7의 (a)는 오리피스가 없으므로 합류부만의 영향을 받으며 오리피스에 의한 손실은 없다고 볼 수 있다. 하지만 (b), (c)에서는 직경이 작은 오리피스가 설치되어질수록 합류부에 의한 영향보다는 오리피스에 의한 손실이 점점 커지는 것을 볼 수 있다.



(a) Without orifice



(b) $d_1 = d_2 = 25\text{mm}$



(c) $d_1 = d_2 = 15\text{mm}$

Fig. 7 Loss coefficient vs. flow rate

표 1은 본관과 지관의 손실계수비를 직경비에 따라 나타낸 것으로 지관과 본관에 동일한 오리피스를 설치하였다. 오리피스를 설치하지 않은 직경비 1인 경우는 본관의 손실계수가 지관의 손실계수보다 약 7.7% 크게 나타나며, 직경비가 0.441 이하에서는 본관과 지관의 손실계수비가 1.8%이하로 나타났다.

따라서 오리피스직경과 관의 직경비가 0.441 이하에서는 본관의 손실계수와 지관의 손실계수 차이가 거의 없다고 볼 수 있으며, 직경비가 작아지면 작아질수록 손실계수비도 점점 줄어들고, 결국에서는 손실계수비가 1에 가까워짐을 간접적으로 알 수 있다.

Table 1 Diameter ratio and loss coefficient ratio

직경비(d_{1-2}/D_{1-2})	손실계수비(ζ_{13}/ζ_{23})
1.000	1.077
0.882	1.063
0.735	1.046
0.588	1.031
0.441	1.018

5. 결 론

본 연구에서는 실험과 수치 시뮬레이션을 이용하여, T형 합류관에서 협착부가 없는 경우와 협착부가 발생된 경우, 협착부에 따른 에너지 손실과 그에 따른 유량의 변화를 알아본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 오리피스가 설치되지 않고, 동일한 압력이 가해진 경우, 합류부의 영향에 의해 지관의 유량이 본관의 유량보다 약 10% 큰 것으로 나타났다.
- (2) 오리피스가 설치된 경우에는 직경이 작은 오리피스가 설치될수록 지관과 본관의 유량비는 점점 줄어들었으며, 오리피스직경과 관의 직경비가 0.441이하에서는 지관과 본관의 유량이 매우 비슷하게 나타났다.
- (3) 오리피스직경과 관직경비가 1, 0.882, 0.735, 0.588, 0.441 일때 손실계수비는 7.7%, 6.3%, 4.6%, 3.1%, 1.8%로 줄어드는 것을 알 수 있다. 이것은 오리피스직경과 관직경비가 커질수록 합류부만의 손실계수가 크게 나타나고, 오리피스직경과 관직경비가 작을수록 합류부에 의한 영향보다는 오리피스 자체 손실이 큰 것으로 나타났다.

후 기

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

참고문헌

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. K. Oka, T. Nozaki and H. Ito, 1996, "Energy Losses Due to Combination of Flow at Tees", JSME, Series B, Vol. 39, No. 3. pp. 489~498.
4. 심준완, 1995, "입자영상유속계를 이용한 분기형 덕트내 뉴턴유체의 유동가시화", 숭실대학교, 서울, pp. 3~15.
5. 고명훈, 1990, "분기관에서의 유체유동에 관한 연구", 금오공과대학, 구미, pp. 1~10.
6. 하옥남, 1996, "분지관내 비-뉴턴 유체의 유동 특성에 관한 연구", 국민대학교, 서울, pp. 1~8.
7. 김강, 2002, "엘보가 있는 배관계의 유동해석", 여수대학교, 여수, pp. 3~7.
8. 민영위, 김유곤, 1999, "관내 오리피스를 지나가는 유동에 관한 수치해석", 대한기계학회논문집 B, pp. 530~535.
9. 맹주성, 양시영, 서현철, 1993, "오리피스 링이 부착된 원관내 주기적인 난류운동에 대한 수치해석", 대한기계학회 논문집, 제17권, 제9호, pp. 2294~2303.
10. F. M. White, 1997, "Fluid Mechanics", Mcgraw hill, New York, pp. 395.
11. S. V. Patankar, 2002, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", 태훈출판사, 서울, pp. 83~85.
12. 명현국, 1999, "전산유체공학", 문운당, pp. 216~219.
13. M.Yasuhara and H. Daiguji, 2002, "수치유체역학", 원기술, 서울, pp. 345~361.