

T-합류관의 유동특성

김명관⁺·배대석⁺⁺·권오봉⁺⁺⁺·양정규⁺⁺⁺⁺

Flow Characteristics of T-junction Pipe

M. K. Kim⁺, D. S. Bae⁺⁺, O. B. Kwon⁺⁺⁺, J. K. Yang⁺⁺⁺⁺

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.

Key words : Junction(합류), Orifice(오리피스), Pressure Loss(압력손실), Loss Coefficient(손실계수), Pipe Flow(관유동)

기호설명

A : 면적, m^2
 d : 오리피스직경, mm
 D : 관의 직경, mm
 f : 마찰계수
 h : 압력손실, m
 L : 길이, m
 p : 압력, Pa
 Q : 유량, m^3/s
 V : 유속, m/s
 ζ : 손실계수
 ρ : 밀도, kg/m^3

3 : 직관 하류부 파이프
 L : 손실

1. 서론

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 압력

Subscripts

1 : 직관 상류부 파이프
2 : 측면 파이프

+ 김명관(부경대학교 기계공학과), E-mail:kimmk@mail.pknu.ac.kr, Tel: 051)620-1607
++ 배대석, 부경대학교 기계공학부
+++ 권오봉, 부경대학교 기계공학부
++++ 양정규, 여수대학교 동력시스템공학과

손실이 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.

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 적절한 유량분배가 필요하다고 볼 수 있다^[1].

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 연구했으며^[2], Rodkiewicz 와 Howell^[3]은 분기관에서의 유동상태를 연구하여 순환계통의 질병치료를 응용하기 위하여 많은 노력하고 있다.

OKA 등^[4]은 합류지점의 배관결합과정에서 곡률반지름에 따른 에너지 손실에 관한 연구를 실험적으로 했으며, 분기형 덕트내 뉴턴유체의 유동가시화에 대해서 입자영상유속계를 이용하여 심^[5]이 연구하였고, 분기관의 각도변화에 따른 유동현상은 고^[6]가 연구했다. 하^[7]는 비뉴턴 유체인 점탄성 유체를 사용하여 분기관의 층류영역에서 분기 유동 특성을 실험을 통하여 연구하였다.

수치해석으로는 김^[8]이 엘보가 있는 배관계에서 엘보내의 유동손실을 줄이는 방법을 해석하였으며, 민과 김^[9]은 2단 오리피스에서의 난류유동을 맥동유동에 대하여 수치해석 하였고, 오리피스 링이 부착된 원관내 정상 및 맥동 난류유동에 대해서는 맹 등^[10]이 수치적으로 해석하였다.

특히, 공업용, 산업용으로 사용빈도가 높은 엘보, 밴트, 티 등을 갖는 배관계의 유동은 직선만으로 구성된 배관계와는 달리, 원심력이 작용하게 되어 배관 내 측벽과, 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. 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 합류관 유동과 에너지 손실

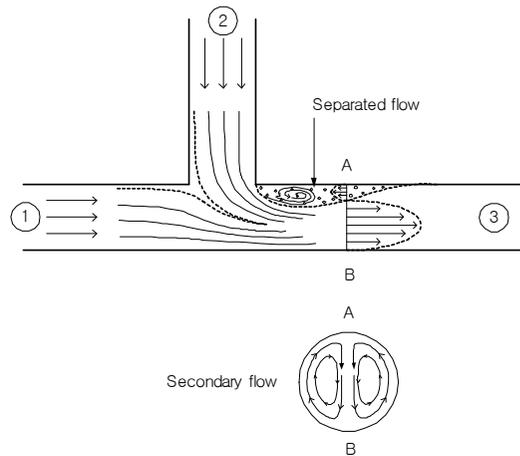


Fig. 1 Combination of flows at pipe junction

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 마련이다^[11]. 합류부 직후에는 유동박리가 생겨 유체가 흘러갈 수 있는 유로가 상당히 줄어들며, A-B단면에서 보면 2차 유동과 박리가 많이 발생하는 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.

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

본관 직선 흐름 손실계수 ζ_{13} 은 다음과 같다.

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

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

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

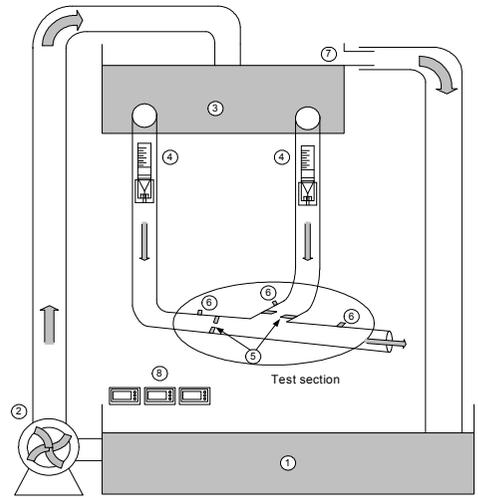
3. 실험 및 수치해석 방법

3.1 실험장치

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 높이 1m로 하였으며, 최대 높이가 1.4m까지 0.1m씩 높이를 조절할 수 있도록 제작하였다. 또 상부수조 상부여가로 0.5m, 세로 0.1m의 일수관을 설치하여, 펌프에서 공급된 과잉유체를 흘러보냄으로써 상부수조에서 발생하기 쉬운 수위변화를 발생하지 않도록 하여 시험부에 균일한 압력이 가해지도록 하였다. 일수관으로 흘러들어간 과잉유체는 하부수조로 다시 보내지게 되어있다.



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

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. 따라서 CFD가 해결책이라 볼 수 있다. 원형의 단면을 가진 T-합류관에서의 내부유동을 수치해석하기 위한 grid는 Fig. 3의 모형을 고려하였으며, 격자는 Fig. 4에 보인 바와 같이 오리피스 주변과 합류부 근처에 집중시켰고, 총 격자수는 약 250,000개이다. 계산에 사용된 지배방정식은 정상상

태의 비압축성 유체의 연속방정식, 운동량방정식 및 스칼라량에 대한 보존방정식으로 스칼라량에 대한 보존방정식은 $k-\varepsilon$ 모델 방정식의 계산에 사용된다. 이들 방정식을 풀기 위해서 본 연구에서는 3차원 유동 해석이 가능한 FLUENT를 사용하였고, 이 프로그램은 유한체적법을 기본으로 한다. 난류모델로는 간편하고 폭넓게 응용할 수 있는 $k-\varepsilon$ 모델을 사용하였고, 수치해석에 선택된 해법은 상류차분, SIMPLE 알고리즘을 사용하였다^{[12], [13], [14]}.

경계조건은 실험에서 얻은 유속과, 전압력으로 입구에 주었고, 완전발달유동을 만들기 위해 입구영역을 관 직경의 30배 길게 계산영역을 잡았다. 관으로는 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 압력으로 작동유체를 공급하여 관내 합류부에 의해서 유동형태와 유량이 어떻게 나타나고 있는가 알아보기 위해 실험과 시뮬레이션을 비교 검토하였다.

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

시뮬레이션은 본관과 지관의 입구에 실험에서 얻은 압력 값을 그대로 입구조건으로 하여 계산을 했으며, 압력은 3500Pa에서 15000Pa까지 실험보다 넓은 범위에서 계산했다.

Fig. 5는 압력에 대한 유량을 나타낸 것으로 그래프 내의 삼각 symbols은 실험의 결과를, 원 symbols은 시뮬레이션의 결과를 나타낸 것이다.

실험과 시뮬레이션의 모든 그래프 영역에서 지관의 유량이 본관의 유량보다 많음을 보이고 있다.

Fig. 6은 합류부에서의 유선을 나타낸 것으로 합류부에서 지관의 유속이 크게 나타남을 볼 수 있다.

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.

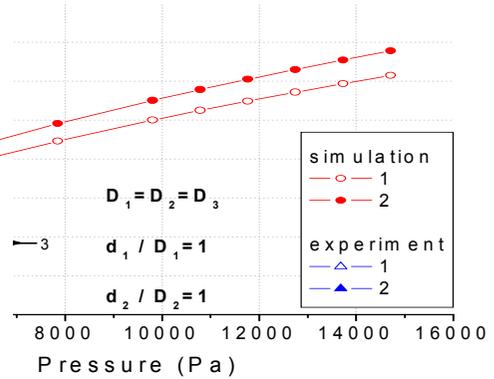


Fig. 5 Flow rate vs. pressure

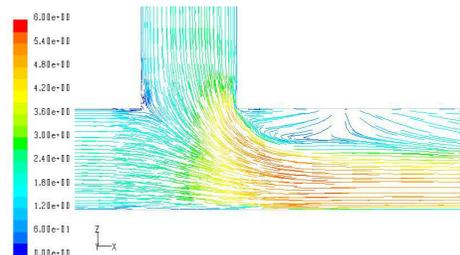


Fig. 6 Enlarged streamline

4.2 동일한 유량에서의 에너지 손실

본 절에서는 지관과 본관의 손실계수 (ζ)의 크기에 대해서 알아보았다. 에 동일한 유량을 공급하고 각각의 압력을 측정하여, 손실계수의 크기에 대해서 알아보았다.

Fig. 7은 지관과 본관에 동일한 유량을 공급하여 지관과 본관의 손실을 나타낸 그래프이다. 저유량에서부터 고유량까지 지관과 본관의 손실계수 비는 거의 일정하다 볼 수 있으며, 공급유량이 증가되어질수록 손실계수는 줄어들고 있는 것을 볼 수 있다. 직선

유동인 본관상류에서 본관 하류로의 유동이 지관이 접하는 합류부에서 본관의 손실계수 ζ_{13} 은 지관의 손실계수 ζ_{23} 보다 크게 나타나고 있다. 이것은 Fig. 5의 그래프에서 유량이 점점 증가하는 것과 비슷한 결과로 볼 수 있다. Fig. 8은 합류부에서의 압력분포도를 나타낸 것으로 본관직선흐름의 압력이 높게 나타남을 볼 수 있다.

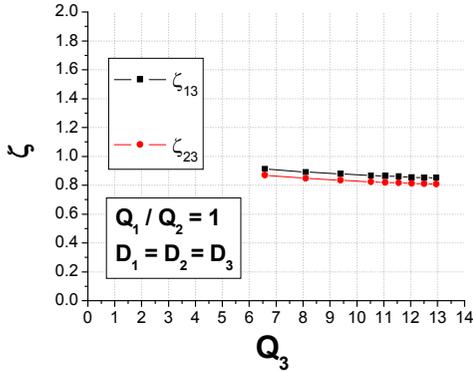


Fig. 7 Loss coefficient vs. flow rate

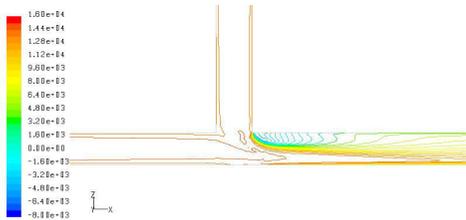


Fig. 8 Contours of total pressure

4.3 이형직경오리피스가 설치된 관에서의 유동

관을 설계할 때 T 합류관만을 사용하여야할 상황이 발생했을 때와 종류가 다른 두 유체를 같은 유량으로 혼합해야 하는 경우나 본관과 지관에서 동일한 유량으로 신속히 배출을 시켜야 하는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 본 절에서는 지관과 본관에 동일한 압력을

가했을 때 본관과 지관에 동일한 유량을 흘려보낼 수 있는 방법을 찾는 것을 목적으로 한다.

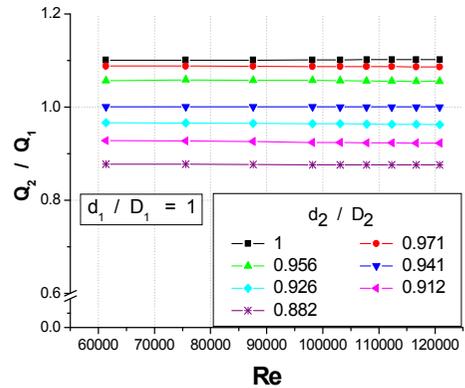


Fig. 9 Flow ratio vs. Re ($d_1 / D_1 = 1$)

Fig. 9는 레이놀즈 수에 따른 지관과 본관의 유량 비를 그래프로 나타낸 것으로, 본관과 동일한 유량을 공급하기 위해서 지관에 오리피스를 설치하여 유량을 비교해본 결과 지관 오리피스 직경과 지관 직경의 비가 0.941일때 본관과 지관에 동일한 유량이 흐른다는 것을 보이고 있다.

Table 1은 위의 시뮬레이션 결과들을 표로 나타낸 것이다. 본관에 협착부가 발생한 경우 즉, 본관에 오리피스가 설치된 경우 본관과 지관에 동일한 유량을 흐르게 하기 위해서 지관에 설치해야할 오리피스를 나타낸 것이다. 따라서 본관에 설치된 오리피스 직경과 본관의 직경비가 1, 0.882, 0.735, 0.588, 0.441 일 때 지관오리피스와 지관직경비가 0.914, 0.847, 0.721, 0.579, 0.44이면 본관과 지관에 동일한 유량이 흐르는 것을 나타내고 있다.

Table 1 Diameter ratios of the main and lateral pipes to match flow rates

d_1 / D_1	d_2 / D_2
1	0.941
0.882	0.847
0.735	0.721
0.588	0.579
0.441	0.440

5. 결 론

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

(1) 오리피스 설치되지 않고, 동일한 압력이 가해진 경우, 합류부의 영향에 의해 지관의 유량이 본관의 유량보다 약 10% 큰 것으로 나타났다.

(2) 본관과 지관에 동일한 유량이 흐르는 경우 손실계수비를 알아본 결과 본관에서의 손실이 지관에서의 손실보다 약 7.7% 크게 나타남을 알 수 있었다.

(3) 본관오리피스직경과 본관직경 비가 1, 0.882, 0.735, 0.588, 0.441일 때 지관오리피스직경과 지관직경비가 0.941, 0.847, 0.721, 0.579, 0.44 이면 본관과 지관에 동일한 유량이 흐르는 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] 윤영환, 배택희, 박원구, “두개의 분지관을 가진 직사각형 덕트 내의 유량배분에 관한 실험 및 수치계산 연구”, 설비공학논문집, 제14권, 제9호, pp. 766-773, 2002.
- [2] F. J. Walburn, H. N. Sabbah, and P. D. Stein, “Flow visualization Aorta”, ASME Journal of Biomechanical Engineering, Vol. 103, pp. 168-170, 1981.
- [3] C. M. Rodkiewicz, and D. H. Howell, “Fluid dynamics in a Large

Arterial Bifurcation”, AIAA Journal, Vol. 9, No. 11, pp. 2284-2286, 1971.

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