

비뉴턴유체의 협착관내 유동 특성에 관한 연구

A Study on the Flow Characteristics in the Stenosed Tube of the Non-Newtonian Fluids

박 상 언*, 윤 재 복,** 유 상 신***
S. A. Park,* J. B. Yoon,** S. S. Yoo***

Key Words : Stenosis(협착), Pressure loss coefficient(압력손실계수), Non Newtonian fluid(비뉴턴 유체), Percent contraction(협착비율), Stenosis length ratio(협착길이비), Reynolds number(레이놀즈 수)

ABSTRACT

An experimental investigation of the stenosis effects on the pressure drop and flow change in the internal flow is presented. Stainless steel tubes of small diameter(3.175mm, 3.4mm) are used for the test section of the flow loop. Percent contraction ranges from 35% to 83% and the stenosis length ratio (L/d) is varied from 2.8 to 8. Water and aqueous glycerol solutions are used for Newtonian fluids and polymer solutions of Separan AP-273 (500 wppm, 1000 wppm) for non-Newtonian fluids. Pressure loss coefficients of non-Newtonian fluids decrease just as those of Newtonian fluids. The loss coefficients of Newtonian and non-Newtonian fluids increase as the percent contraction increases and the loss coefficients of non-Newtonian fluids are larger than those of Newtonian fluids for the same stenosed tube. The loss coefficient increases as the stenosis length ratio increases.

기호설명

<p>D : 관의 직경(mm)</p> <p>d : 협착부 직경(mm)</p> <p>f : Darcy 마찰계수</p> <p>K_e : 압력손실계수</p> <p>K_s : 협착관 전후의 압력손실계수</p> <p>K_r : 협착관 전후의 압력손실계수</p> <p>L : 협착관 또는 압력탭 사이의 거리(mm)</p>	<p>P : 정압(Pa)</p> <p>Q : 체적 유량(m^3/sec)</p> <p>Re_a : 레이놀즈수</p> <p>V : 관속의 평균유속(m/sec)</p> <p>α : 협착비율($(1-\beta^2) \times 100$)</p> <p>β : 직경비(d/D)</p> <p>$\dot{\gamma}$: 전단율</p> <p>μ : 점성계수(c.p)</p> <p>μ_a : 겔보기 점성계수(c.p)</p>
--	---

* 인천전문대학

** 숭실대학교 기계공학과

*** 한국항공대학

τ : 전단응력($P_a \cdot s$)

τ_w : 벽에서 전단응력($P_a \cdot s$)

1. 서 론

유체가 관내를 유동할 때 유체중에 떠있는 부유물이나 스케일이 관의 벽에 부착하여 침착이 계속되면 관내 협착 현상이 발생한다. 또한 유량 측정을 위하여 오리피스장치가 설치되어 있는 경우나 밸브가 설치되어 있는 배관에서 밸브를 부분적으로 개방하는 경우 등 관속에 협착 현상이 발생하면 압력의 급격한 강하와 펌핑 동력 손실이 증가되고 유량이 크게 감소된다. 인체의 동맥 혈관벽에 콜레스테롤이나 지방질이 침착하면 혈관에 협착 현상이 발생하고 이로 인하여 혈액순환을 보상하기 위한 생리적 작용에 의하여 혈압이 증가되고 심장에 크게 부담을 주는 현상이 발생된다.

현재까지 문헌에 발표된 연구결과들⁽¹⁻⁸⁾을 종합해 보면 산업용 배관의 경우에는 실험결과들이 대부분 레이놀즈 수 20,000 이상인 난류경우에 대하여 중점적으로 연구되었고, 혈관 유동과 관련된 연구는 대부분 레이놀즈 수 1,000 이하인 층류에 대하여 연구되었다. 미소한 관을 사용하는 산업용 배관의 유동과 인체의 동맥 혈관 유동을 연구하기 위해서는 레이놀즈 수 1,000 내지 10,000 범위에서 실험적 연구를 수행해야 한다.

협착관의 단면변화를 고찰해보면 점차적 축소-점차적 확대 형상과 급격한 축소-급격한 확대 형상에 대한 연구가 주로 발표되어 있으며 어느 경우나 협착관 면적의 축소를 나타내는 협착비율과 협착관 길이의 영향이 중요한 것으로 나타나 있다. 실험 유체는 대부분의 경우 뉴튼 유체인 공기나 물을 이용한 실험결과들이다.

레이놀즈 수 1,000 내지 10,000 범위에서 협착비율과 협착관 길이비 등에 따른 유동특성의 변화에 대하여서는 제한된 연구 결과들이 발표되어 있을 뿐이다. 또한 비뉴튼유체를 이용한 협착관내 유동연구는 최근에 발표되고 있으며, 특히 비뉴튼 유체중에서 저항감소 현상을 나타내는 폴리머 용액을 이용한 협착관내 유동에 관한 실험적 연구는 극소수에 불과하다^(9,10)

본 연구에서는 산업용 배관중 미소한 크기를 가지는 배관과 인체의 동맥 혈관에 해당하는 크기의 미소한 관을 실험관으로 사용하고 협착부는 급격한 축소-급격한 확대 형상으로 제작하여 유동에 따른 협착비율과 협착길이비의 영향을 검토하고 레이놀즈 수를 층류-천이-난류구역을 포함하는 10에서 10,000까지 범위에서 실험을 수행하고자 한다. 뉴튼유체로서는 물과 글리세롤-물 혼합물을 사용하여 기존 연구들과 비교하고 비뉴튼유체로서는 Polyacrylamide Separan AP-273의 500 wppm과 1000 wppm을 사용하여 주어진 협착관에서 유동특성을 연구하고자 한다.

2. 유동실험 장치

유동순환 실험장치는 액체저장조, 펌프, 정체부, 시험부, 유량계로 구성되어 있고, 시험부의 길이에 따르는 압력변화를 측정하기 위한 액주계 및 실험 유체온도를 조절하는 자동항온장치를 유동실험장치에 연결하였다. 실험장치의 개략도는 Fig.1과 같다.

시험부는 협착부를 중심으로 상·하류에서 내경이 3.175mm 또는 3.4mm인 원형 스테인레스 강관을 연결하였고, 협착부에서 충분히 발달된 유동을 얻기 위해 협착부 상류의 길이는 직경의 185배가 되도록 하였다. 협착관 상류에 4개의 압력탭과 하류에 16개의 탭을 설치하였으며 각 압력탭의 직경은 0.5mm, 탭사이의 거리는 Fig.2와 같으며, 압력탭에는 스테인레스강 주사바늘(내경 0.7mm, 외경 1.1mm)을 특수용접하여 연

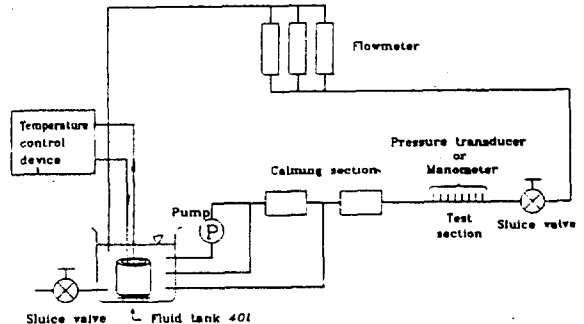


Fig.1 Schematic diagram of flow loop for stenosis experiment.

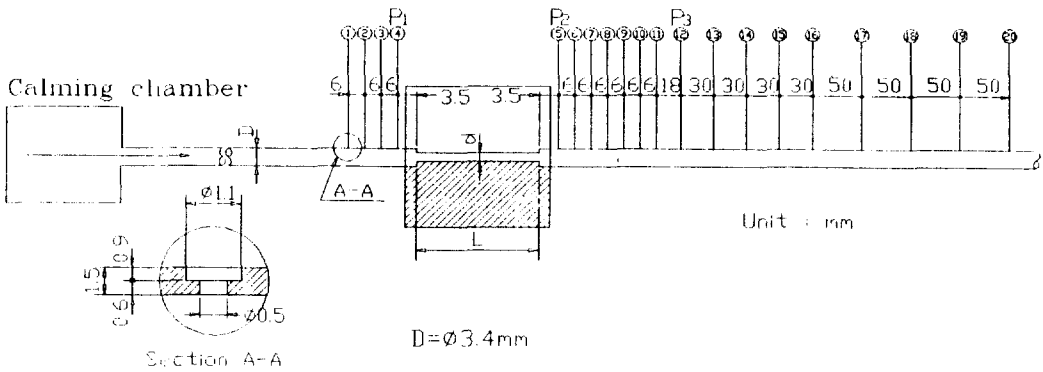
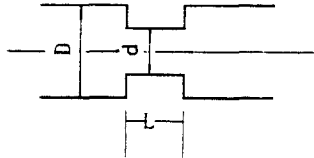
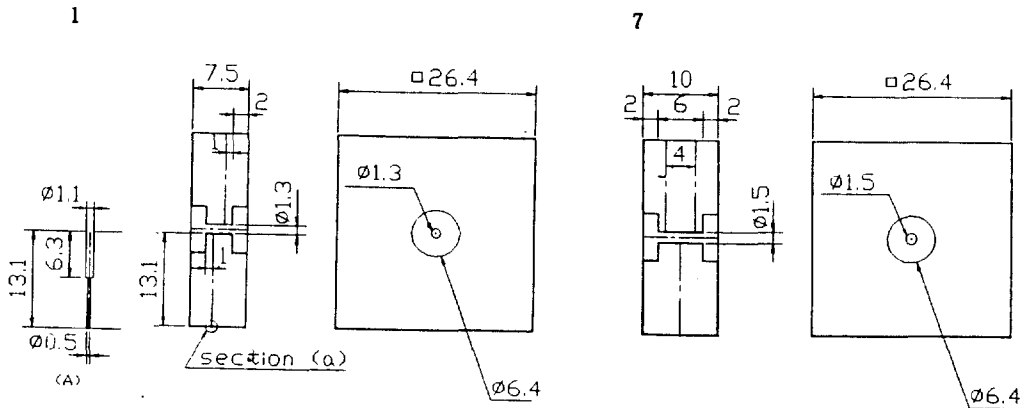


Fig.2 Pressure taps in the test section.

Table 1 Diameter, stenosis ratio and stenosis length ratio of test section



test tube No.	tube diameter D (mm)	stenosed diameter d (mm)	diameter ratio $\beta = d/D$	area ratio $(d/D)^2$	stenosis length ratio L/d	stenosis length L (mm)	percent contraction α (%)
1	3.175	1.3	0.4094	0.1674	2.692	3.5	83.3
2	3.175	1.5	0.4724	0.2231	2.8	4.2	77.7
3	3.175	2.0	0.6299	0.3967	2.8	5.6	60.4
4	3.175	2.5	0.7874	0.6199	2.8	7	38.1
5	3.175	1.5	0.4724	0.2231	8	12	77.7
6	3.175	2.0	0.6299	0.3967	8	16	60.4
7	3.4	1.5	0.4411	0.1946	4	6	80.5



결하였다. 협착관은 투명 아크릴 수지를 내면이 매끈하게 가공하여 제작하였으며 협착길이비가 다른 협착관을 시험부에 편리하게 설치할 수 있도록 협착관 상·하류 관에 스테인레스 판을 용접하고 고정력 볼트로써 협착관을 압축 고정시켰으며, 협착관과 상·하류관은 중심선이 일치선이 되도록 연결하였다. 시험부의 상세도면은 Fig.2와 같고 실험에 사용된 협착관의 직경, 협착비율 및 협착길이 등은 Table 1과 같다.

제작된 실험장치의 신뢰도를 확인하기 위하여 뉴튼유체로서 물과 글리세롤-물 혼합용액은 글리세롤 중량비율로 사용하였고, 비뉴튼유체로서는 Dow Chemical회사 제품인 Polyacrylamide Separan AP-273폴리머를 사용하였으며 농도는 500 wppm과 1,000wppm을 택하였다.

유량은 바이패스 밸브를 조절하고 유량범위에 따라 3개의 유량계중 하나를 선택하여 유량을 측정하고, 동시에 100분의 1초까지 측정가능한 스톱워치와 0.1g 측정용 디지털 저울을 사용하여 측정하였다.

3. 액체의 물리적 성질

액체의 밀도는 Digital density meter(Anton Paar K.G)로 측정하였고 뉴튼유체인 물과 글리세롤 수용액의 점성은 Torque식 Viscometer (Tokimec Inc.)로 측정하였다. 비뉴튼유체의 관내유동현상을 해석할 때 전단응력은 두 점성 특성상수 K와 n을 이용하는 Power Law Model로 나타낼 수 있다¹¹⁾.

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \dots\dots\dots (1)$$

직경 D이고 평균 유속V인 관내 유동에서 식(1)은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\tau_w = K' \left(\frac{8V}{D} \right)^n \dots\dots\dots (2)$$

식(1)과 식(2)를 비교하면 다음 관계를 가진다.

$$n' = n$$

$$K' = K \left(\frac{3n + 1}{4n} \right)^n$$

점탄성유체(viscoelastic fluid) 특성을 가지는 비뉴튼 유체의 점성은 식(2)를 변형하여 겔보기 점도(apparent viscosity)로 정의하는 것이 편리하다.

$$\mu_a = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}} \dots\dots\dots (3)$$

겔보기 점도를 이용하여 레이놀즈 수를 아래와 같이 정의한다.

$$Re_a = \frac{\rho VD}{\mu_a} \dots\dots\dots (4)$$

본 실험적 연구에서는 참고문헌¹²⁾에서 측정된 겔보기 점도를 이용하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 무차원 매개변수와 상관관계식

뉴튼유체의 관내 유동해석에는 Darcy마찰계수가 많이 이용된다. 마찰계수 f와 벽에서의 전단응력 τ_w 는 각각 식(5), (6)과 같다.

$$f = \frac{8\tau_w}{\rho V^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$\tau_w = \frac{D\Delta P}{4L} \dots\dots\dots (6)$$

뉴튼유체의 층류유동에서는 마찰계수를 식(7)과 같이 나타낼수 있고, 레이놀즈 수 50,000 이하인 난류유동에서는 Blasius식, 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$f = \frac{64}{Re} \dots\dots\dots (7)$$

$$f = 0.316 Re^{-0.25} \dots\dots\dots (8)$$

협착관의 유동특성을 나타내기 위하여 압력 손실계수(Pressure loss coefficient) K을 식(9)와 같이 정의한다.

$$K_t = \frac{\Delta P}{\rho V^2 / 2} \dots\dots\dots (9)$$

협착관에서 압력차를 무차원 수로 나타내기 위하여 협착의 영향을 받지 않는 상류압력을 P_1 이라 하고 협착부가 끝난 부분의 압력을 P_2 라 하며, 협착부로 인한 압력 강하후 압력이 정상 상태로 회복된 점의 압력을 P_3 라 할때 협착관 전후의 압력차 ΔP 는 $(P_1 - P_2)$ 또는 $(P_1 - P_3)$ 를 이용하여 압력 손실계수를 정의할 수 있다.

$$K_s = \frac{P_1 - P_2}{\rho V^2 / 2} \dots\dots\dots (10)$$

$$K_r = \frac{P_1 - P_3}{\rho V^2 / 2} \dots\dots\dots (11)$$

본 실험적 연구에서 P_1 는 협착관 직전(3.5 mm거리)의 압력탭④의 정압이며 P_2 는 협착관 직후 (3.5mm거리)의 압력탭⑤의 정압이고, P_3 는 협착부 이후에서 경계층의 재부착로 압력이 회복되어 압력이 국소적으로 최대치를 나타내는 지점에서의 정압이다. 그리고 V 는 협착되지 않은 상류관에서의 평균속도이다.

저항감소 현상을 나타내는 폴리머 용액이 최대저항감소 점근선⁽¹³⁾을 따를 때는 아래와 같은 최대저항감소 점근선의 식을 이용하여 마찰계수를 나타낼 수 있다^(4,14,15)

$$f = 0.8 Re_a^{-0.48} \dots\dots\dots (12)$$

4.2 뉴튼유체

뉴튼유체로서는 물, 글리세롤 중량비율 22% 수용액 및 글리세롤 중량비율 43% 수용액을 사용하였다.

Fig.3은 뉴튼유체를 이용하여 측정된 관마찰계수와 레이놀즈 수의 관계이다. $Re = 100$ 로부터 10,000사이에서 측정된 결과를 고찰해보면 층류구역에서는 식(7)로 표시된 층류식과 대체로 잘 일치하고 있음을 볼 수 있고 $Re = 2,000 - 3,000$ 범위에서 천이현상이 발생하며 $Re = 4,000$ 이상에서는 식(8)로 나타낸 Blasius식과 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

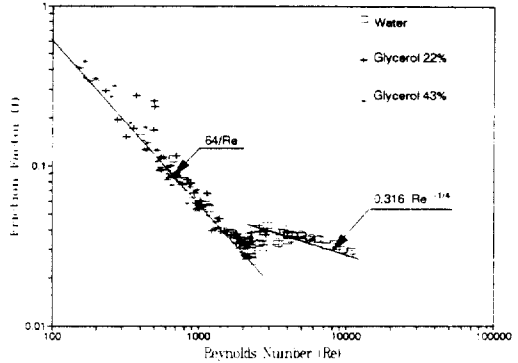


Fig.3 Friction factor vs. Reynolds number for Newtonian fluids.

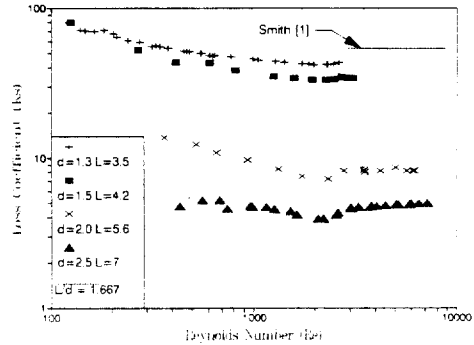


Fig.4 Pressure loss coefficient of the stenosis for water.

Fig.4는 $L/d = 2.8$ 로 제작된 협착부에서 협착관의 직경을 1.3mm에서 2.5mm까지 변화시킬 때의 압력손실계수를 나타내고 있다. 동일한 L/d 의 경우에도 협착관의 직경이 작을수록 압력손실계수는 증가한다. 즉, L/d 보다는 d/D 에 의한 영향이 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig.5는 협착비율(α)을 달리할때, 손실계수와 레이놀즈 수 관계를 나타내고 있다. 협착비율이 클수록 손실계수가 큰것을 알 수 있으며 동일한 협착비율의 경우에는 협착부의 길이가 길수록 손실계수가 큰것을 알 수 있다. 이것은 협착부의 길이가 길때 협착부의 마찰손실이 추가되어 나타나는 현상으로 생각할 수 있다.

Fig.6은 실험에 사용된 물과 글리세롤 수용액의 손실계수를 레이놀즈 수의 관계로 나타낸 것이다. 유체가 다른 경우에도 협착비율이 동일

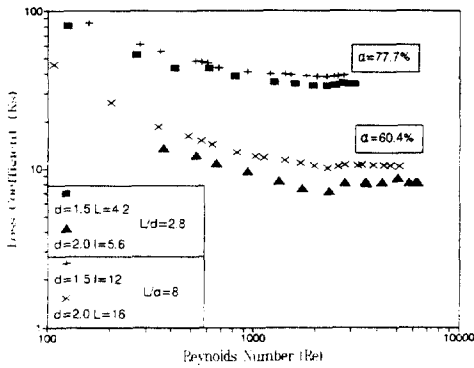


Fig.5 Effects of the percent contraction and the stenosis for water.

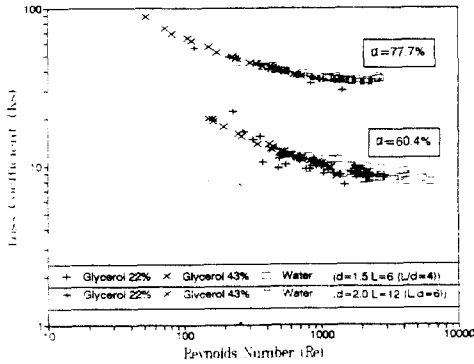


Fig.6 Effects to the percent contraction and the stenosis.

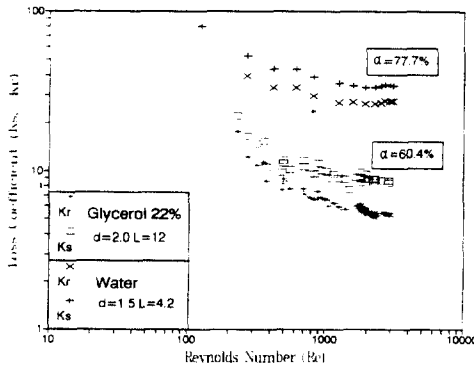


Fig.7 Comparison of K_s and K_r of the stenosis for Newtonian fluids.

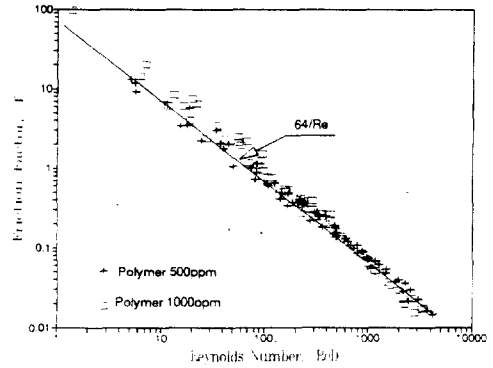


Fig.8 Friction factor vs. Reynolds Number for polymer solutions.

하면 손실계수가 동일하게 나타나는것을 볼 수 있다.

Fig.7은 물과 글리세롤 수용액을 사용할 때 협착비율(α)에 따른 압력손실계수 K_s 와 K_r 의 관계를 나타내고 있다. 동일한 협착관에서 압력손실계수 K_s 와 K_r 은 레이놀즈 수 증가에 따라 감소하는 경향이 유사하지만 K_s 값이 K_r 값보다 작게 나타난다. 이것은 식(10)과 식(11)에서 정의한 바와 같이 K_r 은 협착으로 인하여 압력이 최저로 강하하였다가 정상상태로 회복된 지점의 정압을 이용하여 산출했기 때문이다.

이상의 실험적 결과를 종합해 볼때 비뉴튼유체의 실험적 연구를 위하여 제작된 유동실험장치, 압력측정장치, 실험절차는 만족스러운 것으로 판단된다.

4.3 비뉴튼유체

Separan AP-273의 500 wppm과 1,000 wppm 수용액을 이용한 마찰계수 실험결과를 Fig.8에 나타내었다. 층류영역에서의 마찰계수는 뉴튼유체의 층류 마찰계수를 나타내는 식(7)과 잘 일치하고 있으며 $Re = 2,000$ 을 초과해도 폴리머 용액의 마찰계수는 층류식의 연장선상에 나타나 있음을 볼 수 있다. 이것은 Cho와 Hartnett⁽⁴⁾가 제시한 최대 저항감소 점근선, 식(12)을 잘 따르고 있음을 나타내는 것이다. 이것은 폴리머 용액이 최대저항감소 현상을 나타낼때 층류구역에서는 뉴튼유체의 마찰계수식과 잘 일치하

고, 레이놀즈 수 대략 4,000내지 5,000까지는 층류 마찰계수식을 따르다가 급격한 천이현상없이 서서히 층류식으로부터 이탈한다는 Virk⁽¹³⁾와 Cho 및 Hartnett⁽⁴⁾의 실험적 관찰과 동일하다.

Fig.9 및 10은 각각 폴리머 500 wppm과 1,000 wppm용액을 사용할 때 협착비율(α)과 협착 길이비(L/d)에 따른 손실계수(K_s)를 레이놀즈 수의 관계로 나타낸 것이다. 폴리머 농도에 관계없이 협착비율이 크면 클수록 손실계수값이 크게 상승함을 알 수 있다.

뉴튼유체에서와 같이 협착길이비의 영향보다 협착비율의 영향이 크게 나타나고 있으며 협착비율이 동일한 경우에는 협착부의 길이가 길수록 손실계수가 크게 나타나고 있다. 이것은 협착부 길이의 추가되는 마찰손실로 인하여 발생하는 현상으로 생각할 수 있다.

Fig.11과 12는 물과 폴리머 용액을 사용할 때 협착비율과 협착길이비가 압력손실계수에 미치는 영향을 레이놀즈 수의 관계로 표시한 것이다. 협착비율과 협착길이비가 동일할 때 전반적으로 폴리머의 손실계수는 물보다 크게 나타난다. 이 현상은 점탄성유체가 급격한 단면변화를 가지는 통로를 지날때 나타내는 현상으로 생각된다. 실험적 연구에서 점탄성유체가 난류 상태로 흐를때 급격한 확대(sudden expansion)관에서의 손실계수와 급격한 축소-급격한 확대(Stenosis) 관에서의 손실계수 결과들이 상치되는 경향을 나타내고 있는 것으로 발표되어⁽¹⁶⁾ 있으므로 이에 대한 정밀한 실험적 연구가 요구되고 있다.

협착길이비(L/d)가 2.8일 경우, 폴리머 1000 wppm과 500 wppm용액의 압력손실계수는 동일한 값을 나타내며 협착길이비가 8일 경우, 협착비율이 60.4%인 관의 압력손실계수는 폴리머 용액의 농도에 관계없이 동일한 값을 나타내지만 협착비율이 77.7%로 증가되면 폴리머 1000 wppm용액의 손실계수가 500 wppm용액보다 크게 나타난다.

Fig.13은 폴리머 용액을 사용할 경우 압력손실계수 K_s 와 K_r 의 실험결과를 레이놀즈 수의 관계로 나타낸 것이다. 동일한 협착관에서 폴리머 1000 wppm용액의 압력손실계수는 500 wppm용액보다 크게 나타나며 K_s 와 K_r 은 레이

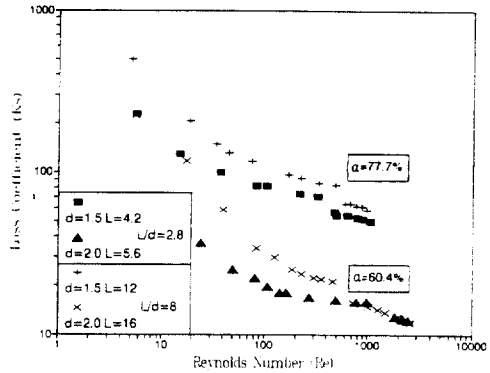


Fig.9 Effects of the percent contraction and stenosis length ratio on loss coefficient for 500 wppm polymer solution.

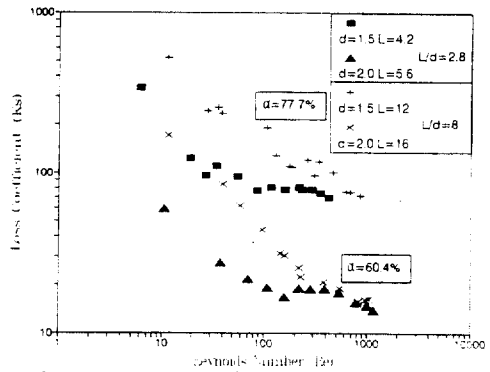


Fig.10 Effects of the percent contraction and stenosis length ratio on loss coefficient for 1000 wppm polymer solution.

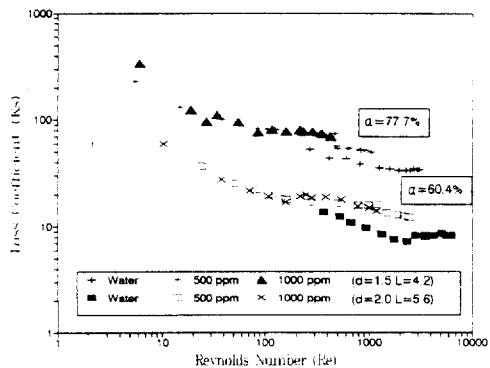


Fig.11 Effects of the percent contraction on loss coefficient For the same length ratio of $L/d = 2.8$

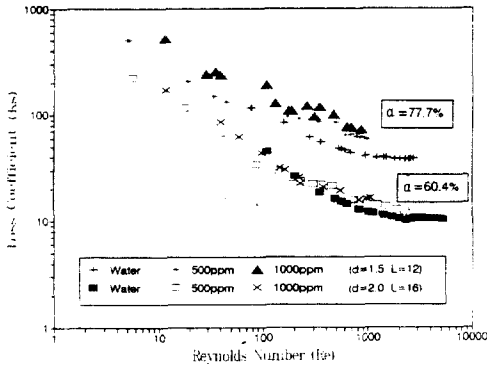


Fig.12 Effects of the percent contraction on loss coefficient For the same length ratio of $L/d = 8$

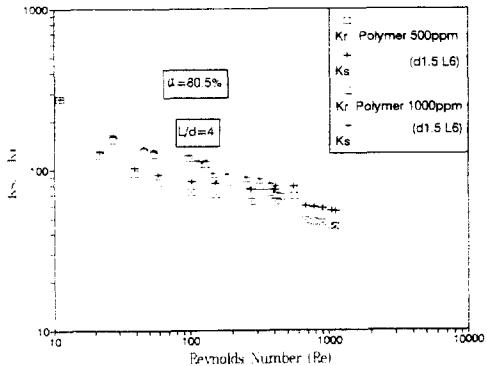


Fig.13 Comparison of K_s and K_r of the stenosis for 500 wppm and 1000 wppm polymer solutions.

늘 수 증가에 따라 감소하는 경향은 유사하지만 K_r 값이 K_s 값 보다 약간 적게 나타나는 것은 뉴턴유체와 같은 경향이다.

5. 결 론

뉴턴유체인 물과 글리세롤 수용액, 비뉴턴유체인 폴리머 수용액 (Separan 500 wppm 및 1,000 wppm) 을 사용하여 $Re = 10 - 10,000$ 범위에서 협착비율 (α) 과 협착길이비 (L/d) 에 따른 유동특성을 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 층류 유동인 $Re = 2000$ 이하에서 뉴턴유체와 비뉴턴유체의 구분없이 마찰계수는 동일한

식으로 나타낼 수 있으나 $Re = 2000$ 이상에서 뉴턴유체는 천이현상을 나타내며 폴리머 수용액은 최대저항 감소 점근선을 따른다.

2) 동일한 협착비율과 협착길이비를 가지는 협착관에서 압력손실계수 (K_s) 는 레이놀즈 수의 함수이며, 물과 폴리머 수용액의 손실계수는 레이놀즈 수의 증가에 따라 감소하는 경향이 유사하지만 폴리머 용액의 손실계수가 물보다 약간 크게 나타난다.

3) 협착비율이 클수록 압력손실계수는 크게 증가되며 협착비율이 협착길이비보다 손실계수에 더 큰 영향을 미친다.

4) 동일한 협착비율을 가진 협착관에서 협착부 길이가 길수록 압력손실계수는 증가한다.

5) 압력손실계수 K_r 과 K_s 는 레이놀즈 수의 증가에 따라 감소하는 경향이 유사하지만 K_r 값은 K_s 값보다 작게 나타난다.

후 기

본 연구는 한국과학재단이 지원하는 첨단유체공학센터의 연구지원 (AFR-92-DO2) 으로 수행된 연구내용의 일부이다. 관계자 여러분께 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

1. Ward-Smith, A.J., 1971, "Pressure Losses in Ducted Flows", Butterworth Group, London, pp. 135-191.
2. Benedict, R.P., Wyler, J.S., Dudek, J.A., and Glead, A.R., 1976, "Generalized Flow Across an Abrupt Enlargement", Trans. ASME, J. Engineering for Power, July, pp. 327-334.
3. Young, D.F., 1979, "Fluid Mechanics of Arterial Stenoses", J. Biomechanical Eng., vol. 101, pp. 157-175.
4. Cho, Y.I. and Hartnett, J.P., 1982, "Non-Newtonian Fluids in Circular Pipe Flow", in "Advances in Heat Transfer", Academic Press, New York, Vol. 15, pp. 59-141.
5. Acrivos, A. and Schrader, M.L., 1982, "Steady

- Flow in a Sudden Expansion at High Reynolds Numbers”, *Phys. Fluids*, Vol. 25, No. 6, pp. 923-934.
6. Iguchi, M. and Sugiyama, T., 1988, “Study on the Flow Near the Wall of the Larger Pipe, Downstream of a Sudden Expansion”, *Trans. JSME*, Vol. 54, No. 507, pp. 3010-3015.
 7. Iguchi, M. and Ohmi, M., 1985, “Loss Coefficients for Flows Through a Sudden Expansion and a Sudden Contraction Closely Placed”, *Trans. JSME*, Vol. 52, No. 481, pp. 3252-3257.
 8. 양인균, 1988, 협착관 및 외부압에 의한 압출 관내의 유동특성에 관한 연구, 홍익대학교 대학원, 박사학위 논문.
 9. Pak, B., Cho, Y.I. and Choi, S.U.S., 1990, “Separation and Reattachment of Non-Newtonian Fluid Flows in a Sudden Expansion Pipe”, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol. 37, pp. 175-199.
 10. Pak, B., Cho, Y.I. and Choi, S.U.S., 1991, “Turbulent Hydrodynamic Behavior of a Drag-Reducing Viscoelastic Fluid in a Sudden-Expansion Pipe”, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol. 39, pp. 353-373.
 11. 황태성, 1988, 난류상태로 유동하는 점탄성 유체의 열전달 현상에 관한 연구, 단국대학교 대학원, 박사학위논문.
 12. 엄정섭, 1990, 원관내 유동에서 점탄성 유체의 열전달 증진 방법에 관한 연구, 단국대학교 대학원, 박사학위 논문.
 13. Virk, P.S., Mickely, H.S. and Smith, K.A., 1990, “The Ultimate Aysmptote and Mean Flow Structure in Tom’s Phenomenon”, *Trans. ASME J. Applied Mechanics*, Vol. 37, pp. 488-493.
 14. 유상신, 황태성, 엄정섭, 1988, “점탄성 특성을 가진 폴리머 용액의 난류유동 열적입구 길이에 관한 연구”, *대한기계학회 논문집* 제 12권 제5호, pp. 1189-1196.
 15. 엄정섭, 전찬열, 유상신, 1990, “점탄성 유체의 저항 및 열전달 감소 현상과 퇴화의 영향에 관한 연구”, *공기조화 냉동공학회 논문집* 제2권 제1호, pp. 37-48.
 16. 유상신, 박노억, 백승희, 1979, “폴리머를 이용한 거친관과 관이음부의 유동손실에 관한 연구”, *공사논문집* 제10집, pp. 321-341.