

분기관내 뉴턴 유체 및 비뉴턴 유체의 유동특성에 관한 연구

A Study on the Flow Characteristics of Newtonian Fluid and Non-Newtonian Fluid in Dividing Tubes

하 옥 남*, 전 운 학**, 김 중***, 이 봉 규***, 이 회 상***, 윤 치 한****, 이 종 인****
O. N. Ha, U. H. Chun, G. Kim, B. K. Lee, H. S. Lee, C. H. Yun, J. I. Lee

ABSTRACT

The objective of the present study is to investigate the characteristics of the dividing flow in the laminar flow region. Using glycerine water solution(wt43%) for Newtonian fluid and the polymer of viscoelastic fluid(500wppm) for non-Newtonian fluid, this research investigates the flow state of the dividing tube in steady laminar flow region of the two dimensional dividing tube by measuring the effect of Reynolds number, dividing angle, and the flow rate ratio on the loss coefficient.

In T- and Y-type tubes, the loss coefficients of the Newtonian fluid decreases in constant rate when the Reynolds number is below 100. The effect of the flow rate ratio on the loss coefficients is negligible. But when the Reynolds number is over 100, the loss coefficient with various flow rate ratios approach an asymptotic value.

The loss coefficient of the non-Newtonian fluid for different the Reynolds number shows the similar tendency of the Newtonian fluid. And when the Reynolds number is over 300, the loss coefficient is approximately 1.03 regardless of flow rate ratio or the dividing angle.

The aspect ratio does hardly influence the reattachment length and the loss coefficient of both Newtonian and non-Newtonian fluid. The loss coefficient decreases as the Reynolds number increases. The loss coefficient of Newtonian fluid is larger than that of non-Newtonian fluid.

주요기술용어 : Viscoelastic Fluid(점탄성 유체), Energy Loss Coefficient(에너지 손실 계수), Aspect Ratio(단면종횡비), Reattachment Length(재부착 길이), Dividing Angle(분기각도)

* 정회원, 조선대학교 기계공학부
** 정회원, 국민대학교 기계공학부
*** 국민대학교 대학원 기계공학과
**** 조선대학교 대학원 기계공학과

1. 서 론

최근에는 이상 유체와 뉴턴 유체는 응용에 대한 제한 때문에 연구가 줄어드는 반면 화학, 제조, 식품, 생물 및 의학 분야에서 실제로 이용되고 있는 비뉴턴 유체에 관한 연구가 점점 늘어나고 있다. 또한 고분자 화학 공업의 눈부신 발달로 말미암아 여러 종류의 새로운 고분자 물질이 만들어지고 있으며, 이들 고분자 물질의 희석 용액은 뉴턴의 점성 법칙을 따르지 않는 것이 대부분이다.^{1~5)}

점탄성 유체는 비뉴턴 유체로서 유로가 급격히 변화하는 곳에서는 특이 현상을 나타내고, 특히 층류 영역에서 이러한 현상(유동저항 증가, 압력강하)은 더욱 심하게 나타나고 있으며⁶⁾, 오늘날 성인병 중 하나인 혈관 질환의 일부 원인이 혈관 분기부 유동으로 알려지고 있고, 혈액은 물리적 특성(점성, 탄성 등)으로 미뤄 볼 때 비뉴턴 유체라고 할 수 있으므로 의학 분야^{7~9)}에서도 혈관내 분기 유동 특성은 관심 있는 연구 대상 중의 하나이며, 산업용으로도 분기관이 많이 사용되고 있으므로, 분기관내에서 비뉴턴 유체의 정상, 비정상 층류 유동은 매우 중요한 연구의 대상이다.

그러나 분기부 유동에 관한 연구는 대부분 난류 유동에 관한 산업적 응용을 바탕으로 연구되었고^{10~12)}, 층류 영역에 있어서의 연구로는 Suu¹³⁾가 유동 양상을 가시화하여 연구했고, Karino¹⁴⁾와 Yamakuchi¹⁵⁾는 속도 분포, 벽면 압력 분포 및 벽면 전단 응력의 측정에 관하여 주로 연구하였으나, 에너지 손실을 측정하는 연구는 이루어지지 않고 있으며, 단지 Jamison와 Villemonte¹⁶⁾에 의해 분기관에서의 손실이 보고되었을 뿐이다. 특히 분기관에서 비뉴턴 유체를 이용한 연구는 거의 없고, 고분자 수용액의 저 레이놀즈 수에 대한 유동의 가시화 실험과 수치해석이 Nishimura¹⁷⁾ 및 Seiji¹⁸⁾에 의해서 이루어졌을 뿐이다.

Nishimura¹⁷⁾는 레이놀즈 수가 1정도인 2차원 분기관로에서 분기관 입구의 상류 본관 벽면에 발생하는 순환류에 대하여 연구하였고, 압력 측정공을 이용하여 압력을 측정할 경우에 압력공 현상, 즉 점탄성 유체는 측정공 입구 근방의 유동의 변화로부터 압력 측정 오차가 생긴다는 보고를 하였다.

분기부 근처에서 유체 유동의 변화가 심하기 때문에 이러한 유동 양상의 특성에 관해서는 산업적(분기관)으로는 물론 유체역학적으로도 매우 중요한 연구의 대상 중 하나임에 틀림없으나, 층류 범위에서의 비-뉴턴 유체의 분기부 유동의 유동 양상 및 에너지 손실 등에 관한 연구는 레이놀즈 수가 거의 10 이하에서 조사되었으며, 광범위한 층류에서 실험이 거의 없는 실정이다.

따라서, 뉴턴 유체 및 점탄성 유체에 대하여 보다 넓은 층류 영역에서 분기 유동 특성을 아는 것이 요구되고 있으므로, 우선 뉴턴 유체로 분기부에서 2차원 정상 층류의 유동 상태를 가시화하여 관찰함과 동시에 압력 손실을 측정하고, 손실 계수에 대한 유량 분배비, 레이놀즈 수, 분기 각도 및 단면 중형비의 영향을 조사하고, 다음으로 비뉴턴 유체로 뉴턴 유체에서 행한 것과 같은 방법으로 조사하여, 이들 결과로부터 분기관내에서의 유동 양상과 손실 계수와의 관계를 규명하는 것이 필요하다. 본 연구 결과에 의해 분기관내 유동특성의 기본자료를 제시하고자 한다.

2. 분기부 유동과 에너지 손실

2.1 분기부 유동 양상

Fig.1은 분기부 재부착의 크기를 나타내기 위한 그림으로, 이탈점부터 재부착점까지의 길이(L_{12} 와 L_{13}), 폭(W_2 , W_3) 및 본관쪽의 재부착의 위치(X_s)를 규정한 것이다.¹³⁾

이러한 분기 유동에 있어서 지관 상류쪽 모서리

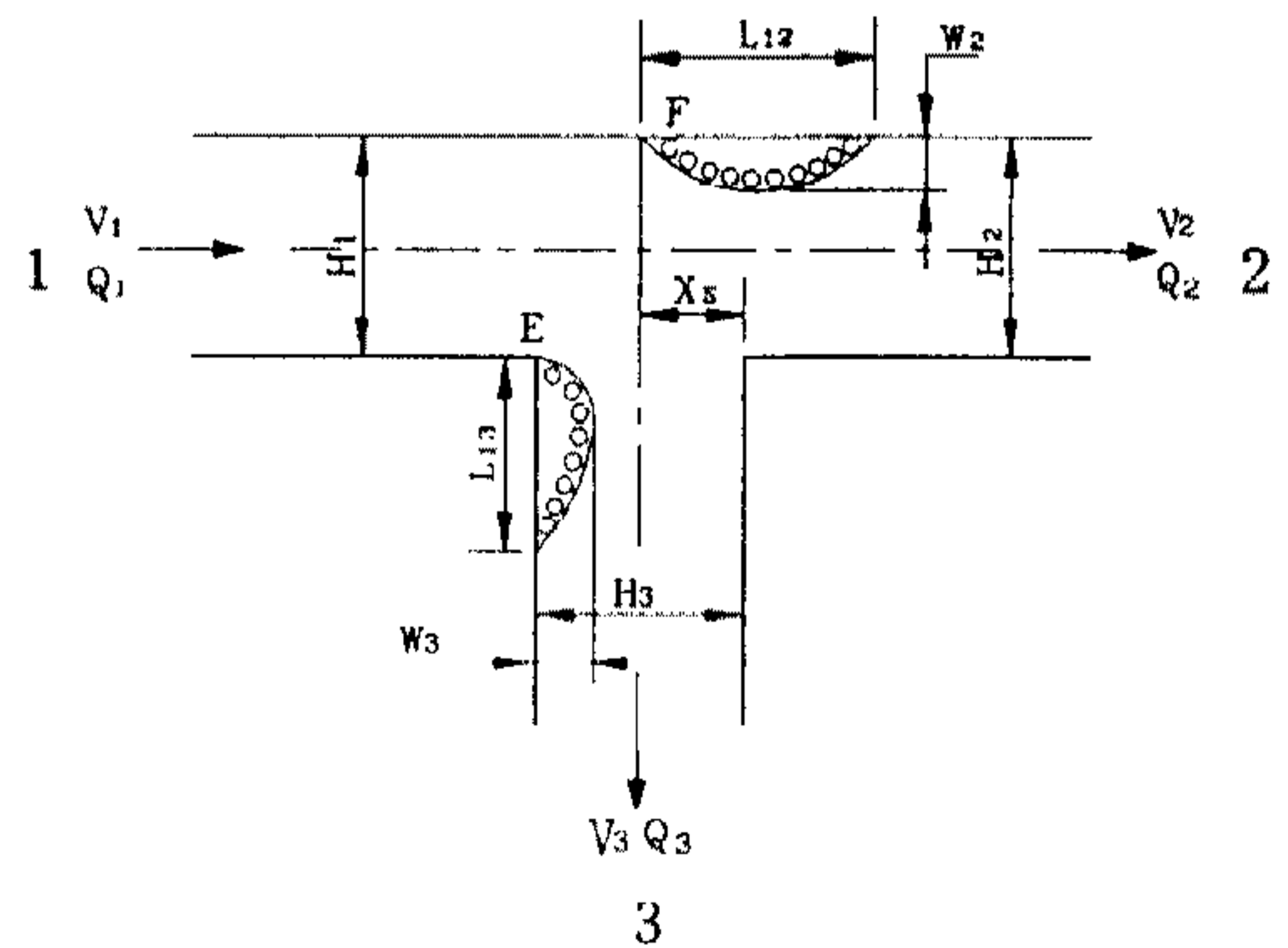


Fig.1 Dividing tube and separation

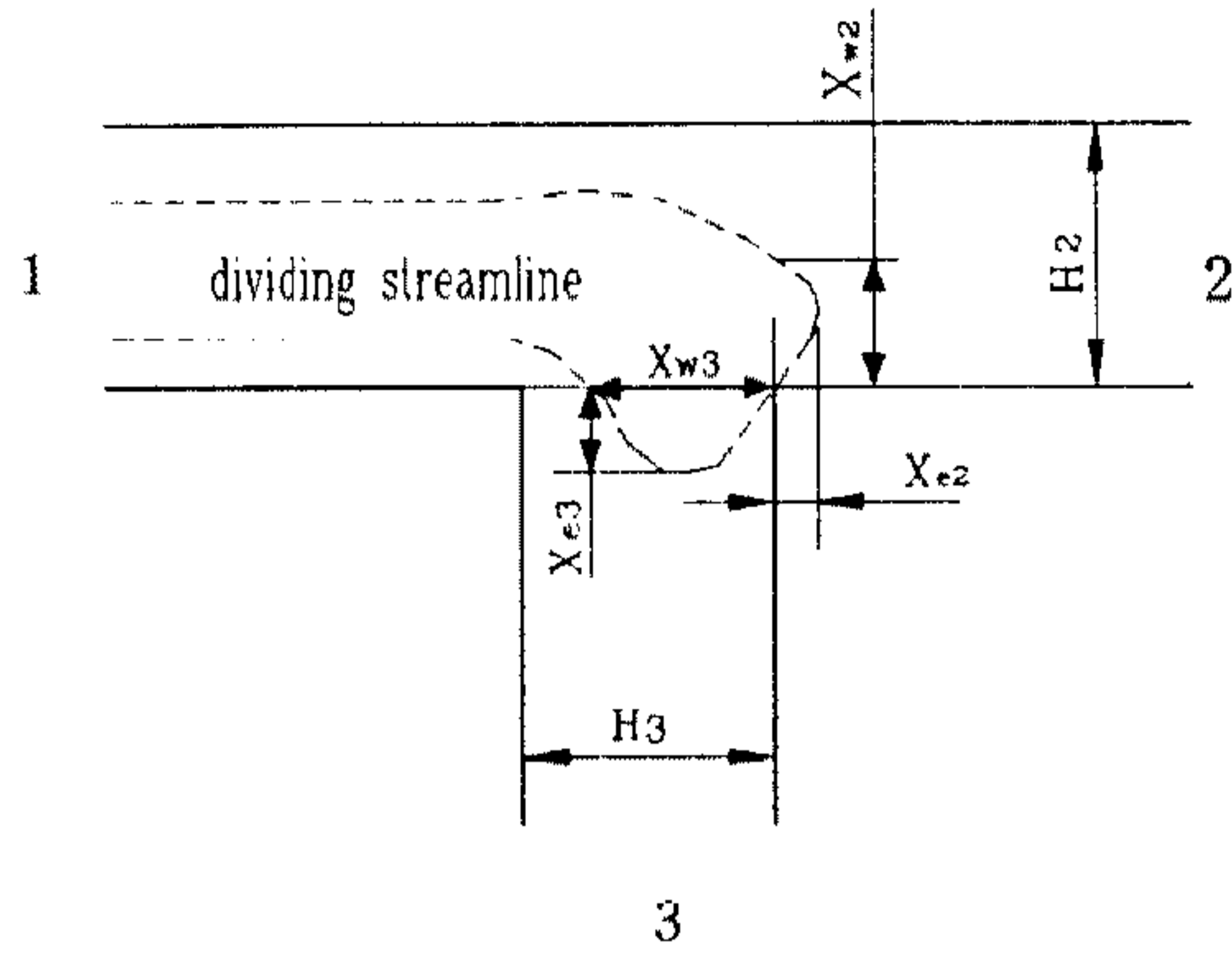


Fig.2 Dividing tube and streamline

(E)와 분기부 본관 상벽부(F)에는 박리가 생기며, 재부착이 생기지 않는 부분에는 본관 하류와 지관 상류에 확대 유동이 생긴다.

Fig.2는 분기관내 유로에서 나타나는 분기 유선을 표시했고, 분기 유선을 평가하기 위하여 그 크기를 그림과 같이 정의한다.

유선의 무차원의 유입 길이 및 무차원의 폭은 각각 X_{e2}/H_2 , X_{e3}/H_3 및 X_{w2}/H_2 , X_{w3}/H_3 으로 나타낸다.

2.2 에너지 손실 계수의 정의

Fig.1에서 1-2와 1-3사이의 손실 수두(head)를 각각 h_{12} , h_{13} 이라 하면 본관의 손실 계수 ζ_{12} 와 지관의 손실 계수 ζ_{13} 은 다음 식으로 나타낸다¹⁹⁾.

$$\zeta_{12} = h_{12} / (V_1^2 / 2g) \quad (1)$$

$$\zeta_{13} = h_{13} / (V_1^2 / 2g) \quad (2)$$

$$h_{1j} = \left(\frac{P_1 - P_j}{\rho g} \right) + \alpha \left(\frac{V_1^2 - V_j^2}{2g} \right) - \lambda_1 \frac{l_1}{H_1} \frac{V_1^2}{2g} - \lambda_j \frac{l_j}{H_j} \frac{V_j^2}{2g} \quad (3)$$

Denn model에서²⁰⁾

$$\alpha = \frac{6(2n+1)^2}{(4n+3)(3n+2)} \quad (4)$$

여기서, λ_j 는 관 마찰 계수이고, 2차원 유로의 경우에 층류에서 $\lambda_j = 24/R_e$ (Fig.5 참조), P_j 는 압력, V_j 는 평균 유속, l_j 및 H_j 는 Fig.1에 표시한 유로의 길이 및 폭, ρ 는 유체의 밀도를 나타낸다. 첨자 j 는 2와 3으로 각각 본관과 지관을 나타내며, n 은 Denn model에서 Rheology 정수^{20,21)}이고, 본 실험에서 사용한 폴리머의 n 값이 0.58~0.62, α 는 운동 에너지 보정 계수로 3.09~3.22의 범위이다.(참고: 뉴턴 유체의 α 값은 1이다)

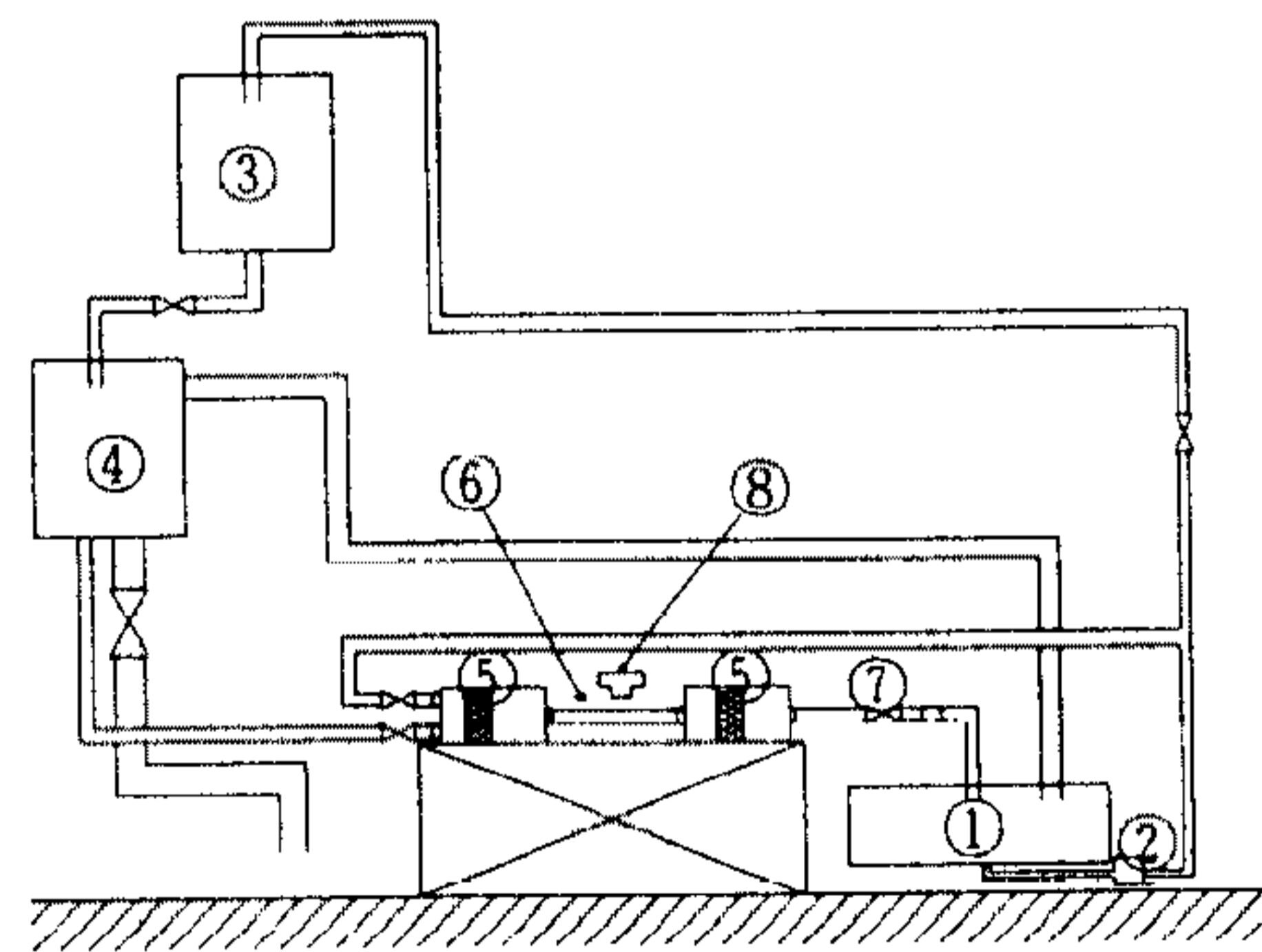
3. 실험 장치 및 실험 방법

3.1 실험 장치

Fig.3은 본 실험 장치의 개략도를 나타내고 저장 탱크, 펌프, 제어실, 오버플로 탱크(overflow tank) 및 분기관으로 구성되어 있다.

저장 탱크는 지름 800mm, 높이 350mm의 원통형으로 실험실 바닥에 설치하여 실험 유체를 저장하였으며, 여기서 최대 유량 20 l/min인 순환 펌프(model TM-030PM, KOREA)로 실험 유체를 지상 탱크로 수송하였다. 지상 탱크의 크기는 지름 460mm, 높이 510mm이며, 지상 탱크의 바닥에 관을 설치하고, 밸브를 부착하여 오버플로 탱크에 실험 유체를 정속하게 공급하였다.

제어실은 지름 150mm, 길이 250mm이고, 중간



- ① Storage tank
- ② Pump
- ③ Upper tank
- ④ Overflow tank
- ⑤ Calming chamber
- ⑥ Test section
- ⑦ Electromagnetic flowmeter
- ⑧ 35mm camera

Fig.3 Schematic diagram of experimental apparatus

에 균등하게 뚫은 아크릴판 2개를 놓고 그 사이에 허니컴(honeycomb)을 넣어 오버플로 탱크에서 내려온 실험 유체가 시험부에 정상 상태의 층류로 유입하도록 하였다. 이와같은 제어실은 본관 및 지관의 입구와 출구의 3곳에 설치하였다.

Fig.4는 시험부인 분기관을 나타낸 것으로 본관과 지관으로 구성되며, 두께 3mm인 투명한 아크릴로 제작하였다. 본관은 단면이 직사각형으로 윗면폭이 10mm이고, 높이는 10mm, 20mm 및 40mm의 3종류로 종횡비가 1, 2, 4로 되게 하였으며, 길이는 1,000mm이다. 지관은 단면이 본관의 단면과 같은 크기이며, 본관의 중간 지점에 수평이 되게 설치하였고, 실험에 사용된 분기관의 종류는 Fig.5에 표시하였다.

본관과 지관이 이루는 분기 각도에 따라 90°인

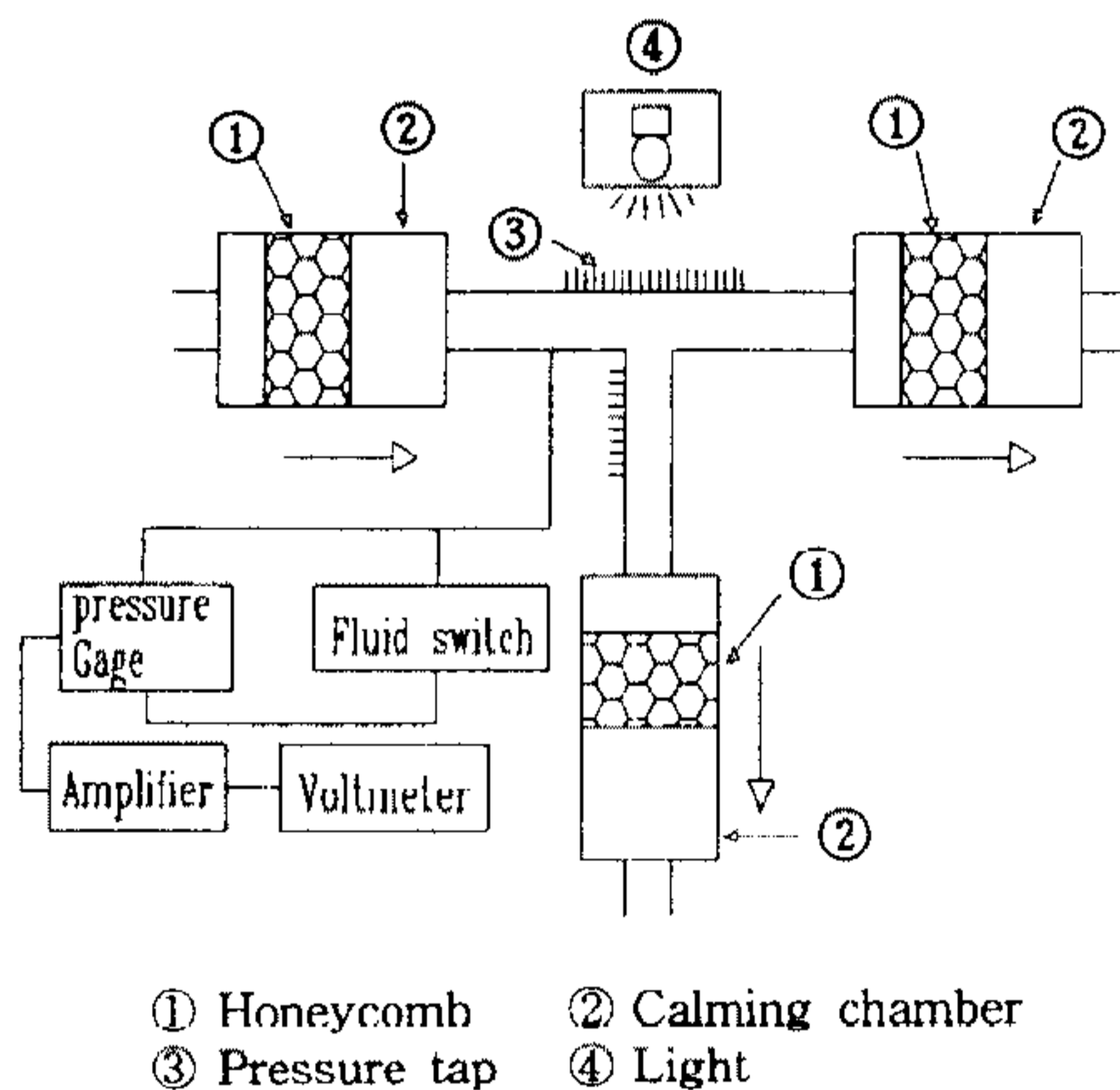


Fig.4 Enlarged view of the main test section

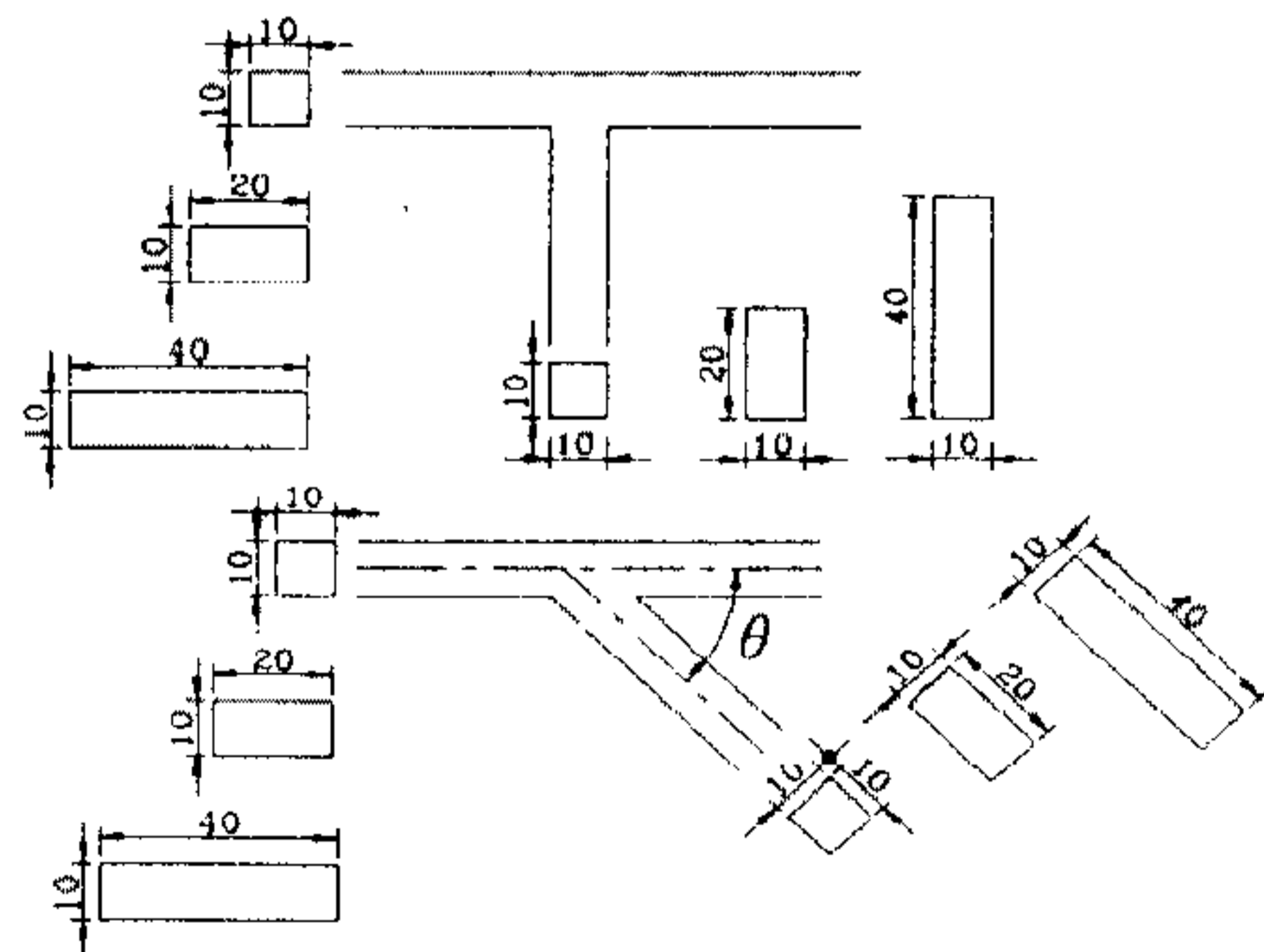


Fig.5 Schematic diagram of dividing tubes for the experiment

T형과 60°, 45°, 15°인 비대칭 Y형의 4종류이다. 따라서, 분기관의 종류는 종횡비와 분기 각도에 따라 총 12개를 제작하였다. 실험 유체가 흐를 때 분기관내의 정압을 측정하기 위하여 지관이 설치된 중앙으로부터 본관의 상류, 하류 및 지관에 20mm 간격으로 지름 0.85mm인 정압공을 총 31개를 뚫었다. 이 정압공에 바깥 지름이 0.8mm인 주사 바늘을 바늘 구멍이 막히지 않게 길이가 3mm가 되도록 끝을 절단하여 설치하고, 에폭시 접착제로 밀봉하였다. 이때 바늘 끝은 윗면 아크릴판 안쪽면과 일치되도록 하였고, 제작시 시험부 안쪽면에 부착된 이물질은 완전히 제거하여 이들이 실험 유체의 유동에 영향을 미치지 못하게 하였다.

정압을 측정하기 위하여 주사 바늘의 플라스틱 부분에 길이 2mm, 내경 $\phi 5$ mm인 비닐관을 연결하여 시험부 뒤에 설치된 판넬에 수직으로 부착하여 이 비닐관을 통해 올라온 실험 유체의 높이로 정압을 측정하였다.

유동 상태를 가시화하기 위한 잉크 주입구를 시험부의 본관 입구 부분에 설치하였다.

제어실에서 출구관까지의 시험부는 매우 작은 레이놀즈 수의 유동에서 외부조건에 매우 민감하고, 불안정한 유동이 발생하므로 수평으로 되게 하였으며, Fig.4는 시험부의 상세도이다.

3.2 실험 유체

본 실험에 사용된 실험 유체로는 뉴턴 유체와 비뉴턴 유체를 1종류씩 사용하였으며, 뉴턴 유체로 글리세린 농도 43wt%, $\mu = 4.620484$ 인 물-글리세린 수용액을 비뉴턴 유체로 폴리머 농도가 500wppm인 고분자 수용액을 사용하였다. 폴리머는 Junsei Chemical Co, Ltd 회사 제품인 Polyacrylamide Separan AP-30을 사용하였다.

이들 수용액은 혼합 후 플라스틱 병으로 잘 저어서 완전히 혼합된 후 실험을 하였다.

실험 유체의 점도 측정은 토크식 점도계(Tokimec Inc, Japan)와 Brookfield 디지털 점도계(LVTDV-I, Serial No: A12646, USA)로 측정하였으며, 유체의 응력인 수직응력과 전단응력은 평행 평판형 Rheogoniometer(carrimed, England)로 측정하였다. 실험하는 동안의 실험 유체 온도는

20°C(±1°C)로 일정하게 유지시켰으며, 질량 유량은 주어진 시간동안 흐르는 유체의 양을 측정하여 환산하였다.

3.3 실험 방법

저장 탱크에 실험 유체를 채우고, 순환 펌프를 가동시켜 지상 탱크 및 오버플로 탱크에 실험 유체의 수면이 일정하게 유지되도록 밸브들을 조정하였다. 레이놀즈 수를 변경하기 위해서는 시험부의 본관과 지관의 출구에 설치된 밸브를 조절하여 시험부를 흐르는 유량을 조절하였다.

유동 상태를 가시화하기 위하여 잉크 주입 류맥법을 이용하였으며, 시험부의 본관 입구에 마련된 잉크 주입구를 통하여 흑색 아크릴 물감인 염료를 실험 유체에 공급하였다. 이때 염료를 주입하므로 인한 실험 유체의 비중 차이는 염료에 알코올을 첨가하여 보정²²⁾하였다.

실험 유체속에서 흑색 아크릴 물감이 퍼져 흐르는 상태를 고속 카메라(Minolta 9000 Sam Sung, KOREA)로 초당 6장의 속도로 24장을 계속해서 촬영하여 현상 인화하였다.

시험부 내의 정압 측정은 정압 측정공에 연결된 비닐관 마노미터로 측정하였으며, 이 측정값의 정확도를 확인 및 보정하기 위하여 압력 트랜스듀서(Transducer)를 이용하여 측정 비교하였다. 압력 트랜스 듀서에 의한 압력 측정은 압력 측정공에 연결된 관지름 5mm인 비닐관을 압력 트랜스듀서에 연결하고, 다채널 디지털 압력 지시계(Druck. DPI 420, England)로 측정하였다.

시험부의 분기관을 흐르는 유량을 측정하기 위하여 주어진 시간 동안에 본관과 지관을 흐르는 유체를 측정하여 디지털 저울(Ka, seu, Inc DI1200)로 무게를 측정한 방법과 Universal Clamp-on 포터블 유량계(Controlotron, Model: 990P, U.S.A)를 본관의 출구와 지관의 출구에 설치하여 직접 측정하는 방법을 이용하였으며, 이 두가지 방법에 의한 유량 측정값을 비교함으로써 측정오차(±5%)를 최대로 줄였다.

분기관 유로의 위치를 나타내기 위하여 Fig.1과 같이 본관 상류를 1, 본관 하류를 2, 지관 하류를 3으로 지정하였으며, 이들 숫자는 첨자로 이용하였다. 즉, Q₁은 본관 상류에서의 유량을 나타낸

것이다.

분기관에서 유량 분배비는 지관 유량 Q₃을 전 유량 Q₁으로 나눈 Q₃/Q₁으로 정의하였으며, 본 실험에서는 유량 분배비를 0, 0.25, 0.50, 0.75 및 1.00의 5종류로 변경시켰다. 유량은 본관 하류 및 지관 하류에 설치된 밸브로 조절하였다.

본 실험에서 사용된 물 및 물-글리세린 수용액이 뉴턴 유체인가를 확인하기 위하여 지관에서의 유량 Q₃를 0으로 하고, 본관 상류의 직관부에서 예비 실험을 하였다.

2차원 유로에서 관 마찰 계수 λ와 레이놀즈 수(Re)와의 관계에 대한 레이놀즈 수 10~1,000 사이에서 측정한 결과는 뉴턴 유체의 층류 영역에 대한 이론식 λ=24/Re¹⁸⁾에 잘 일치하였고, 본 실험에서 사용한 물과 물-글리세린(43wt%) 수용액은 뉴턴 유체인 것이 확인되었다.

비뉴턴 유체에 대하여 각 유로에서 Reynolds number(Re)와 K. Weissenberg²³⁾ 수(W_e)는 다음식과 같이 정의된다.

$$Re = \rho H \frac{V}{\eta} \quad (5)$$

$$W_e = 2 \frac{\lambda}{\mu} \dot{\gamma} (s - n) \quad (6)$$

여기서,

- ρ : 유체의 밀도(kg/m³)
- H : 유로폭(m)
- V : 유로의 평균 유속(m/s)
- η : 겔보기 점도(Pa·s)
- μ : 점성 계수(kg/m·s)
- λ : 마찰 계수
- γ̇ : 충분히 발달된 유동에서의 전단률(1/s)
- n : Denn model의 Rheology 상수
- s : Denn model의 Rheology 상수(second)
- ξ : 에너지 손실 계수

또한, 위의 겔보기 점도(η)와 충분히 발달된 유동에서의 전단률(γ̇)은 다음식으로 정의된다.²⁴⁾

$$\eta = \mu \left\{ \frac{2(2n+1)}{n} \frac{V}{H} \right\}^{(n-1)} \quad (7)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{(2n+1)}{3n} \frac{6V}{H} \quad (8)$$

본 실험에서 사용된 비뉴턴 유체인 고분자(500ppm) 수용액에 대한 위의 상수값은 $n=0.58\sim 0.62$, $s=0.89$, $\mu=0.075\sim 0.087\text{Pa}\cdot\text{s}$, $\lambda=0.12$ 이었다.²⁰⁾

4. 결과 및 고찰

4.1 분기부 근처의 유동 양상

4.1.1 뉴턴 유체의 분기부 유동 양상

Fig.6과 7은 실험 유체가 글리세린 수용액(43wt%)의 유동 형상으로, 시험부 단면적이 $10\times 10\text{mm}$ 인 T형의 분기관에서 각각 레이놀즈 수와 유량 분배비를 변화시켰을 때 본관과 지관에서 재부착 현상을 가시화 시킨 사진이다.

Fig.6은 T형에 의한 유량 분배비 Q_3/Q_1 은 일정한 값 0.75이고, 레이놀즈 수를 50, 100, 150 및 250으로 변화시킬 때 가시화에 의한 유동 양상을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와같이 지관쪽의 재부착 발생은 레이놀즈 수가 50일 때 가장 적고, 레이놀즈 수가 100, 150 및 250으로 증가됨에 따라 재부착 크기는 현저하게 커짐을 알 수 있었다.

한편, 본관쪽에서는 레이놀즈 수가 50일 때 재부착 크기는 아주 작게 나타나고, 레이놀즈 수가 100, 150 및 250으로 증가함에 따라 재부착 크기는 증가하였으나, 지관보다는 그다지 큰 증가를 보이지 않았다. 즉, 레이놀즈 수가 증가할수록 본관쪽과 지관쪽의 재부착이 모두 증가하였고, 유량이 많은 지관쪽이 유량이 적은 본관쪽보다 재부착 크기의 증가량이 많음을 알았다.

Fig.7은 T형에서 레이놀즈 수가 100이고, 유

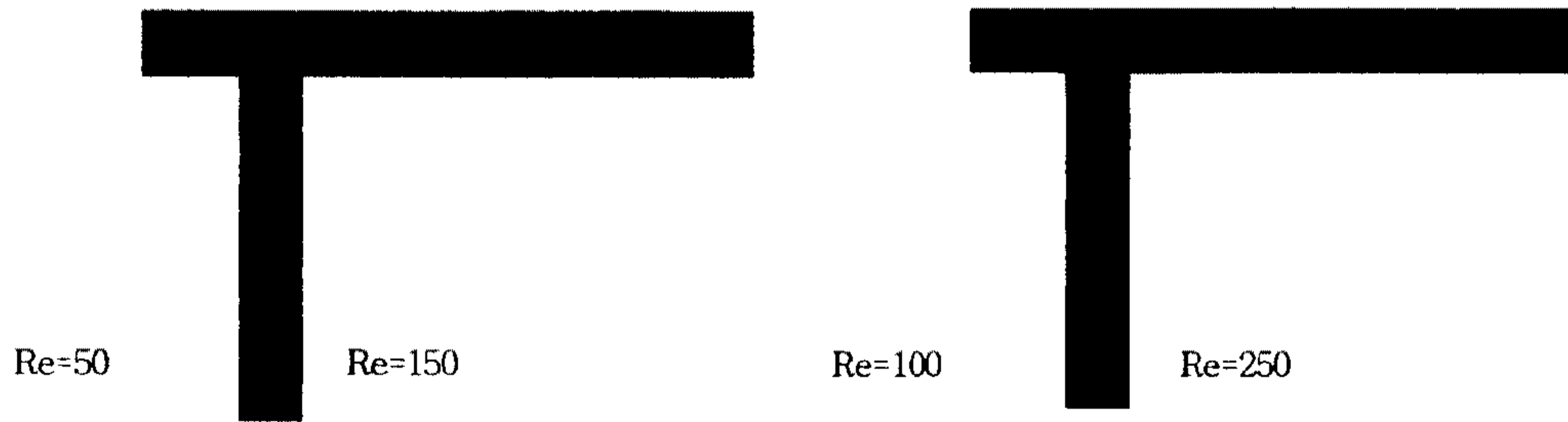


Fig.6 Flow pattern for various Reynolds numbers of the Newtonian fluid($Q_3/Q_1=0.75$)

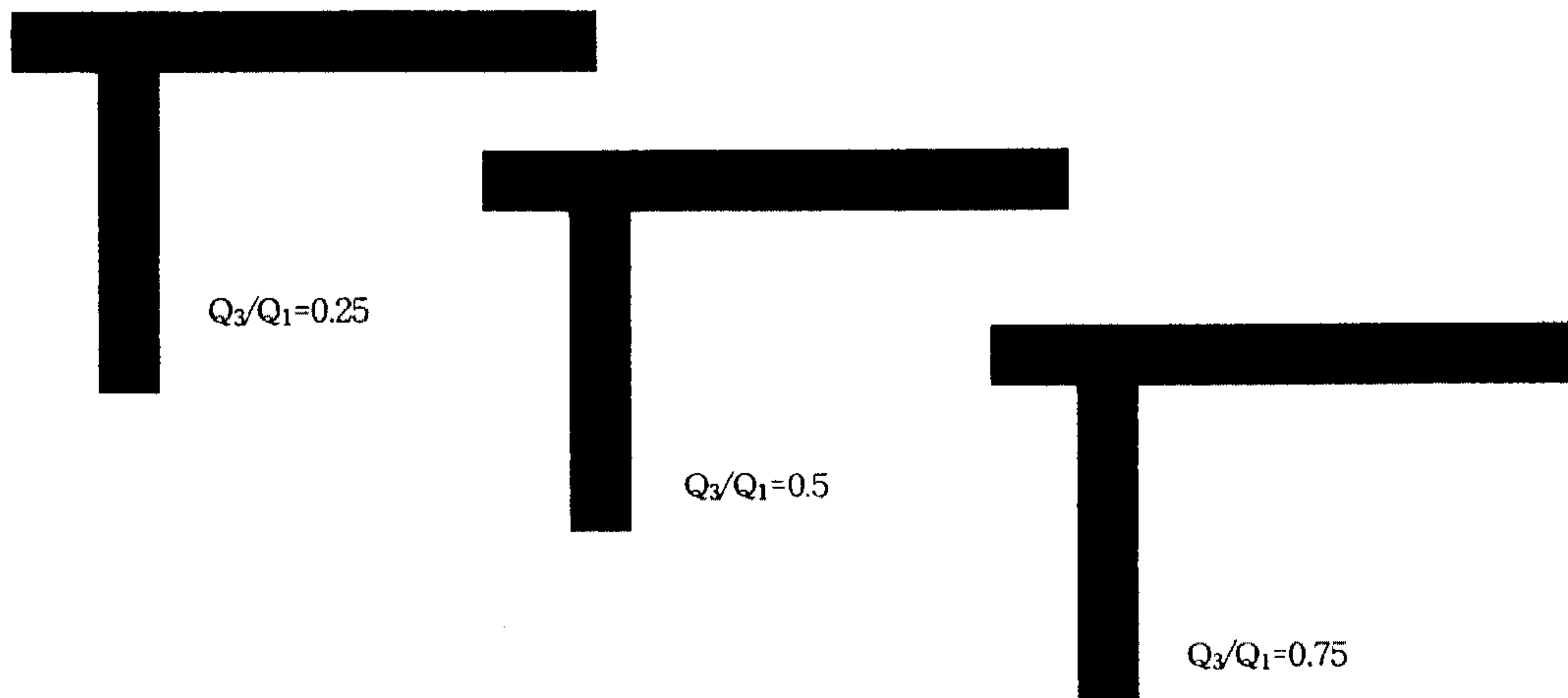


Fig.7 Flow pattern for various flowrate ratios of the Newtonian fluid(T type, $Re=100$)

량 분배비 Q_3/Q_1 을 0.25, 0.5 및 0.75로 변화시킬 때의 유동 형태를 가시화한 사진이다.

지관쪽의 재부착 크기는 유량 분배비 0.25일 때 가장 크게 나타나며, 유량 분배비가 0.25, 0.5 및 0.75로 증가할수록 재부착 크기는 작아짐을 알았다.

본관쪽에서는 유량 분배비가 0.25일 때 가장 적게 나타나며, 유량 분배비가 0.5, 0.75(본관 하류의 유량 감소)로 증가됨에 따라 재부착 크기는 점점 커짐을 알았다.

즉, 지관쪽의 재부착 크기는 유량 분배비의 증가에 따라 재부착 크기가 작아지며, 본관쪽의 재부착 크기는 본관 하류의 유량 감소에 따라 감소함을 알 수 있고, 이는 분기관내 유량 증감이 재부착 크기에 영향을 미치는 것임을 알았다.

Fig.8은 실험 유체가 글리세린 수용액(43wt%) 이고, 시험부 단면적이 $10 \times 10\text{mm}$ 이며, 유량 분배

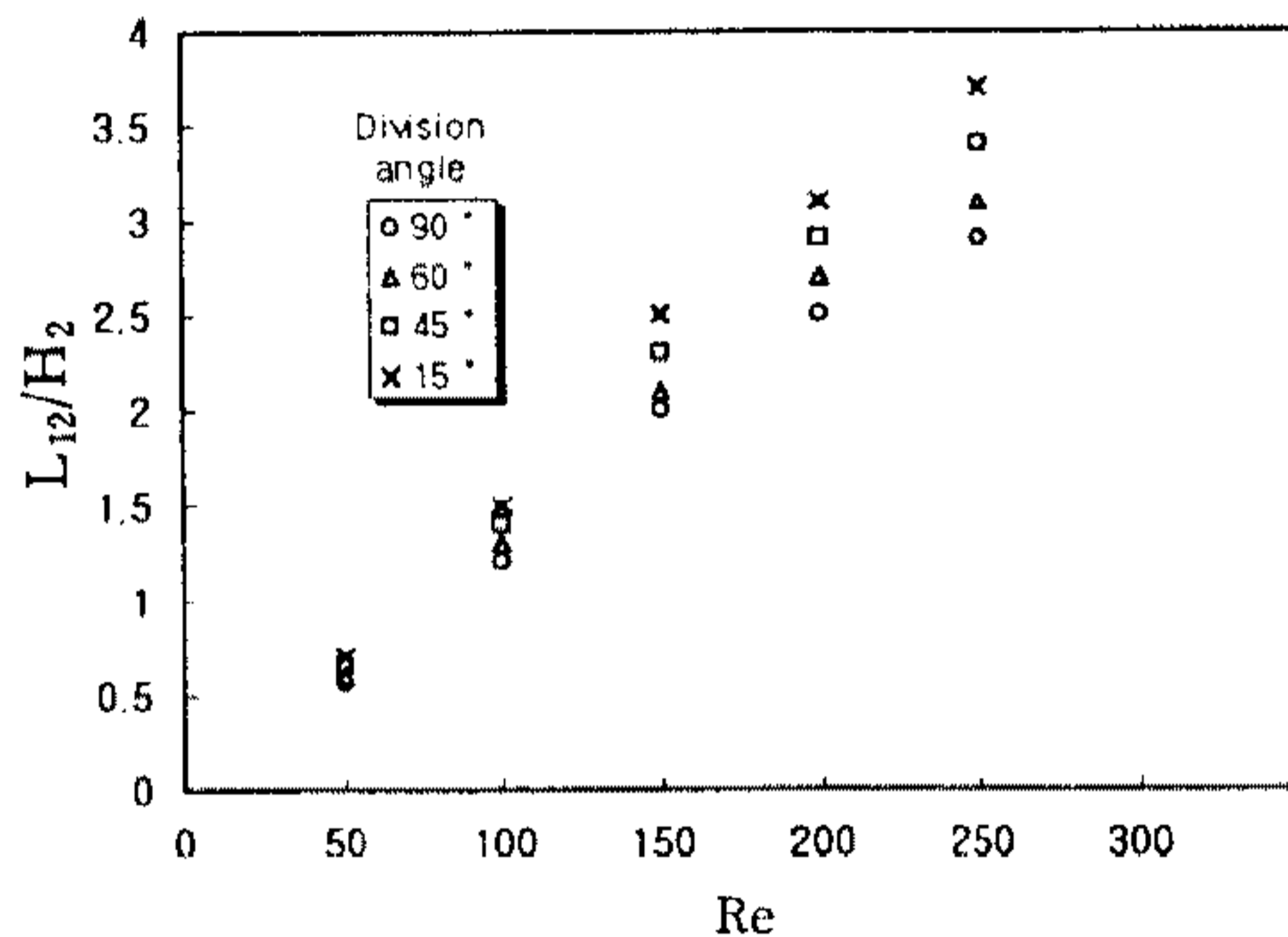


Fig.8 Reattachment length of the main tube of the Newtonian fluid vs. Reynolds number($Q_3/Q_1=0.75$)

비가 0.75일 때 레이놀즈 수와 분기 각도에 따른 본관쪽의 재부착 길이를 무차원 수로 나타낸 것이다.

본관쪽의 무차원 재부착 길이는 레이놀즈 수가 증가함에 따라서 무차원 길이는 대략 레이놀즈 수에 정비례하여 증가하고 있으며, 레이놀즈 수가 50일 때 분기 각도가 90° , 60° , 45° 및 15° 로 변화에 따라 본관쪽의 무차원 재부착 길이는 0.57, 0.60, 0.65 및 0.70으로 재부착 길이가 매우 작게 증가하였고, 레이놀즈 수가 150일 때 무차원 재부착 길이는 2.0, 2.1, 2.3 및 2.5, 레이놀즈 수가 250일 때

는 무차원 재부착 길이가 2.9, 3.1, 3.4 및 3.7로 레이놀즈 수가 증가함에 따라 증가하고, 레이놀즈 수가 클수록 분기 각도 영향도 점점 증가한다.

Fig.9는 실험 유체가 글리세린 수용액(43wt%) 이고, 시험부 단면적이 $10 \times 10\text{mm}$ 이며, 본관 상류에서의 레이놀즈 수가 100일 때, 분기 각도와 유량 분배비에 따른 지관에서의 재부착 길이를 무차원으로 나타낸 것이다.

T형 지관에서의 본 실험 결과값과 Suu¹³⁾의 실험값이 거의 일치하고 있으며, Seiji¹⁸⁾의 수치해석 값과도 거의 비슷한 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

즉, T형에서 무차원 재부착 길이는 유량 분배비에 무관하게 거의 일정한 1.1~1.3의 값을 갖는다.

Y형에서는 무차원 재부착 길이는 유량 분배비가 0.25, 0.50 및 0.75로 증가함에 따라 감소하였

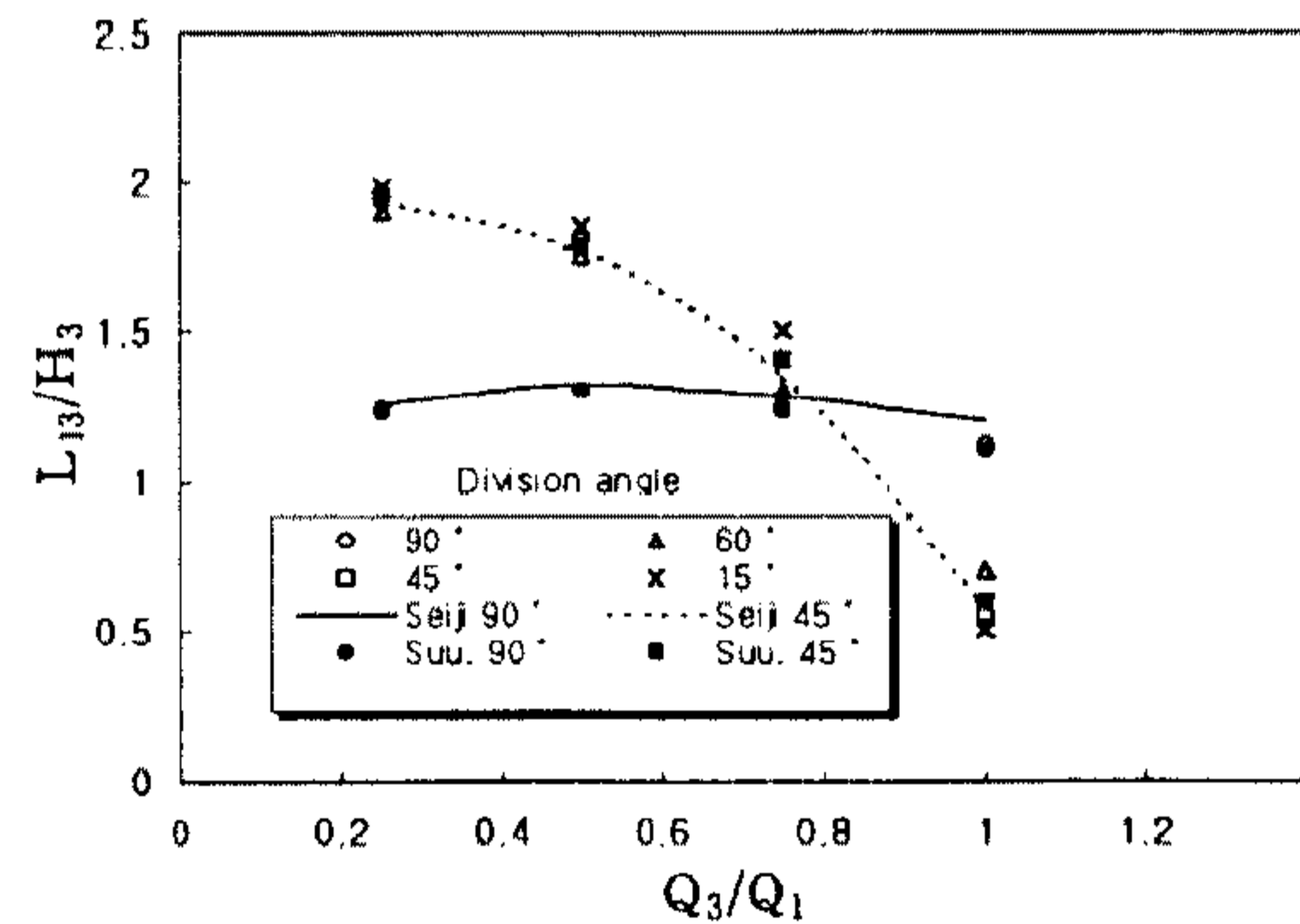


Fig.9 Reattachment length of the lateral tube of the Newtonian fluid vs. flowrate ratio ($Re=100$)

고, 분기 각도의 변화에 따른 무차원 재부착 길이는 T형과 Y형에서 크게 나타났으나, Y형에서 분기 각도의 변화에 따른 차이는 그다지 크게 나지 않았으며, 이 결과로 Suu의 실험 결과와 Seiji에 의 이론값과 잘 일치한다.

4.1.2 비뉴턴 유체의 분기부 유동 양상

Fig.10과 11은 실험 유체가 폴리머 500wppm 수용액인 비뉴턴 유체이고, 시험부 단면적이 $10 \times 10\text{mm}$ 인 T형 분기관에서 각각 레이놀즈 수와 유량 분배비를 변화시켰을 때 본관과 지관에서의 재부착 현상을 가시화시킨 사진이다.

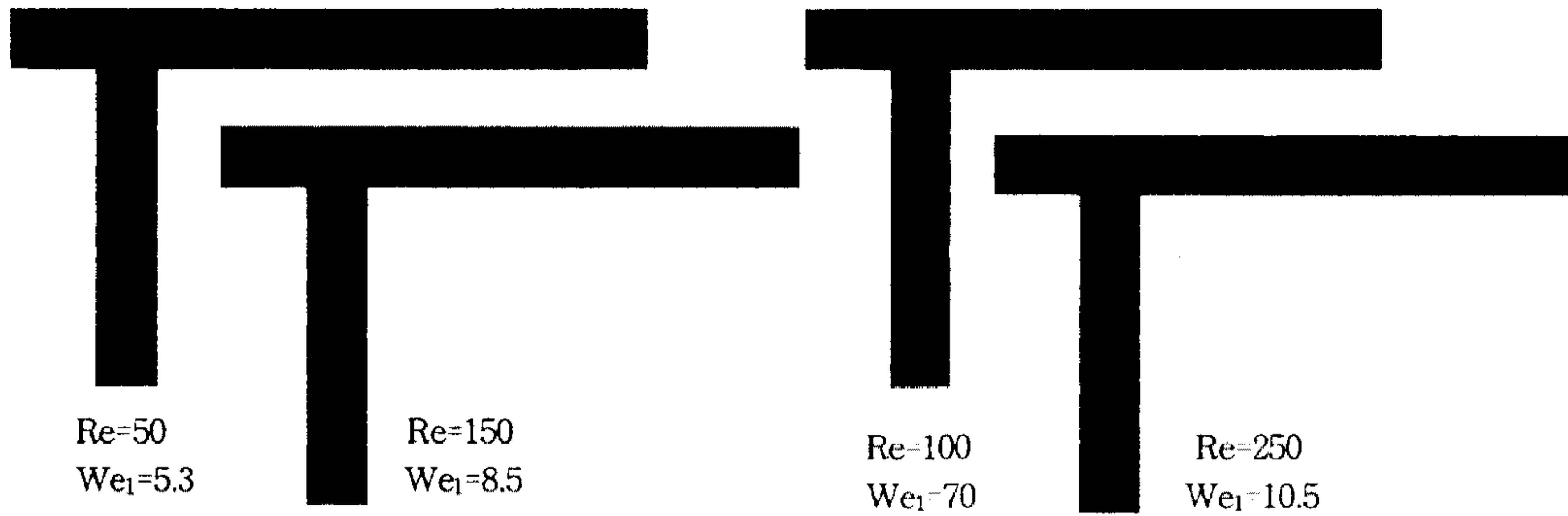


Fig.10 Flow pattern of the non-Newtonian fluid for various Reynolds numbers ($Q_3/Q_1=0.75$)

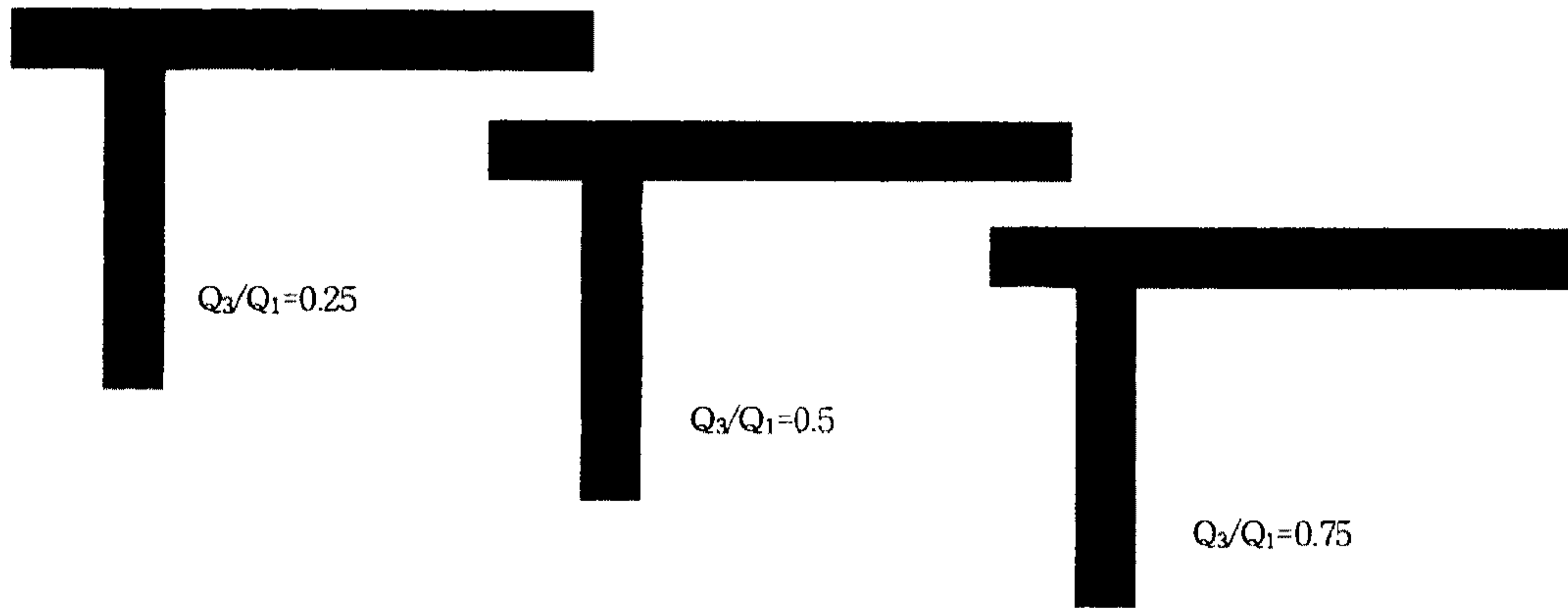


Fig.11 Flow pattern for various flowrate ratios of the non-Newtonian fluid (T type, $Re=100$, $We_1=10.5$)

Fig.10은 T형에서 유량 분배비 Q_3/Q_1 가 0.75이고, 레이놀즈 수를 50, 100, 150 및 250으로 변화시킬 때 기시화에 의한 유동 양상을 나타낸 사진이다.

지관쪽의 재부착 발생은 레이놀즈 수가 50일 때 가장 적고, 레이놀즈 수가 100, 150 및 250으로 증가함에 따라 재부착 크기는 현저하게 커졌으나, 하류쪽의 팽창 현상은 생기지 않는다.

본관쪽에서는 레이놀즈 수가 50일 때 재부착 크기는 작았으나, 레이놀즈 수가 100, 150 및 250으로 증가함에 따라 재부착 크기는 약간씩 증가되고 하류쪽에 팽창 현상이 생겼다. 즉, 레이놀즈 수가 증가할수록 지관쪽의 재부착 크기는 크게 증가하고, 본관쪽의 재부착 크기는 약간씩 증가함을 알았다. 또한, 본관쪽의 하류에 팽창 현상과 역류 현상이

나타났는데 이것은 레이놀즈 수 증가의 영향을 받는 것으로 생각된다.

따라서 Fig.6과 Fig.10을 비교하면, 뉴턴 유체와 비뉴턴 유체는 레이놀즈 수의 증가에 따라 재부착 크기는 모두 증가하지만, 비뉴턴 유체일 때가 뉴턴 유체보다 그 크기가 일반적으로 작게 나타났다으며, 그 원인은 본관 하류쪽의 팽창 및 역류 현상이 뉴턴 유체일 때는 나타나지 않지만, 비뉴턴 유체일 때는 나타나는 유동 양상에 기인되는 것으로 보인다.

Fig.11은 T형의 레이놀즈 수 100이고, 분배비를 0.25, 0.50 및 0.75로 변화시킬 때의 유동 양상을 나타낸 사진이다.

지관쪽의 재부착 크기는 유량 분배비가 0.25일 때 가장 작게 나타났으나, 분기 유선이 팽창하고

역류 현상이 나타났다. 또한, 분배비가 0.5, 0.75로 증가됨에 따라 재부착의 크기는 점차 증가하였으나, 역류 및 팽창 현상은 나타나지 않았다.

본관쪽의 재부착 크기는 유량 분배비 0.75일 때가 0.25, 0.5일 때 보다 더 크게 나타났으며, 분배비가 0.75, 0.5 및 0.25로 감소됨에 따라 작아졌고, 분배비 0.25일 때는 분기 유선이 팽창하고 역류 현상도 생긴다. 즉, 재부착 크기는 유량 분배비가 증가할수록 커지고, 지관에서의 팽창 현상은 유량 분배비가 0.25일 때 발생되었고, 본관에서의 팽창 현상은 유량 분배비가 0.75일 때 발생되었다. 그러나, 분배비 0.5일 때는 지관과 본관 어느 쪽에서도 팽창 현상이 생기지 않았다.

Fig.7과 Fig.11를 비교하면, 뉴턴 유체와 비뉴턴 유체는 유량 분배비의 증가에 따른 재부착 크기의 증가 현상은 서로 역으로 나타났다. 유량 분

배비가 0.25일 때 뉴턴 유체에서는 나타나지 않았던 분기 유선 팽창과 역류 현상이 비뉴턴 유체에서는 나타났다.

Fig.12는 비뉴턴 유체에서 유량 분배비 0.75이고, 레이놀즈 수가 100일 때 시험부 단면적이 10×10mm인 Y형 분기관에서 분기 각도에 따른 유동 양상을 나타낸 사진이다.

본관에서의 재부착 길이는 분기 각도가 60°, 45° 및 15°로 작아지면 조금씩 길어지고, 지관에서의 재부착 길이는 분기 각도가 작아지면 짧아진다. 동일 조건에서, 뉴턴 유체와 비뉴턴 유체와 T형의 실험 결과를 비교하면 비뉴턴 유체에서 재부착 길이는 뉴턴 유체에 비하여 현저하게 작아졌는데, 이것은 T형의 분기 유선이 분기쪽으로부터 유입 때문이라고 생각된다.

Fig.13은 실험 유체가 폴리머 500wppm 수용

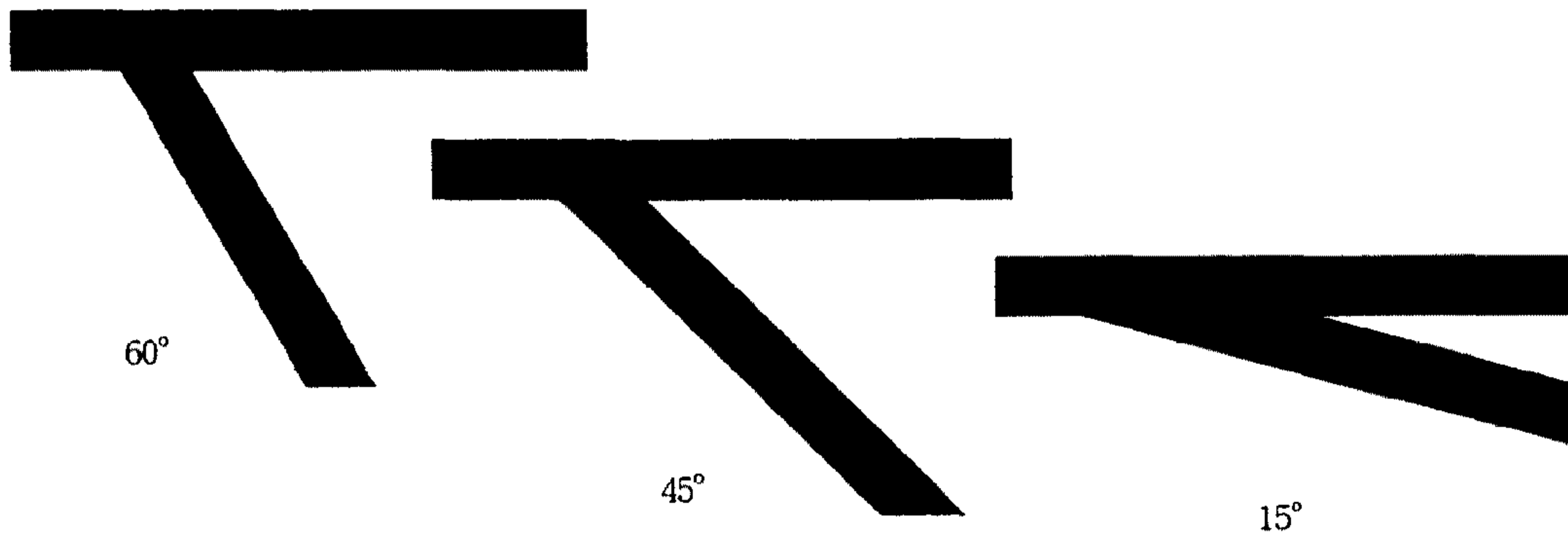


Fig.12 Flow pattern for various division angles of the non-Newtonian fluid (Y type, $Re=100$, $Q_3/Q_1=0.75$)

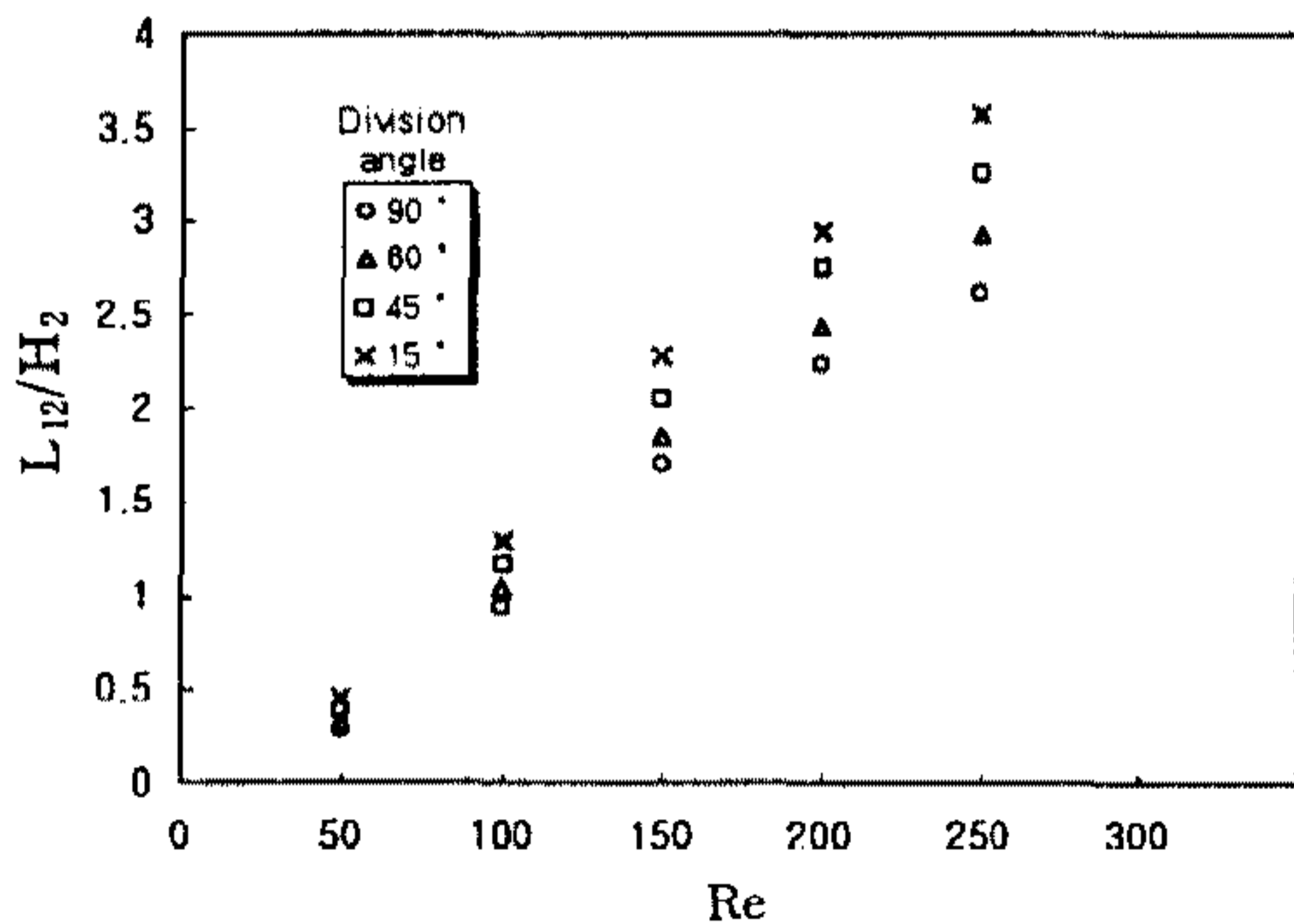


Fig.13 Reattachment length of the main tube of the non-Newtonian fluid vs. Reynolds number($Q_3/Q_1=0.75$)

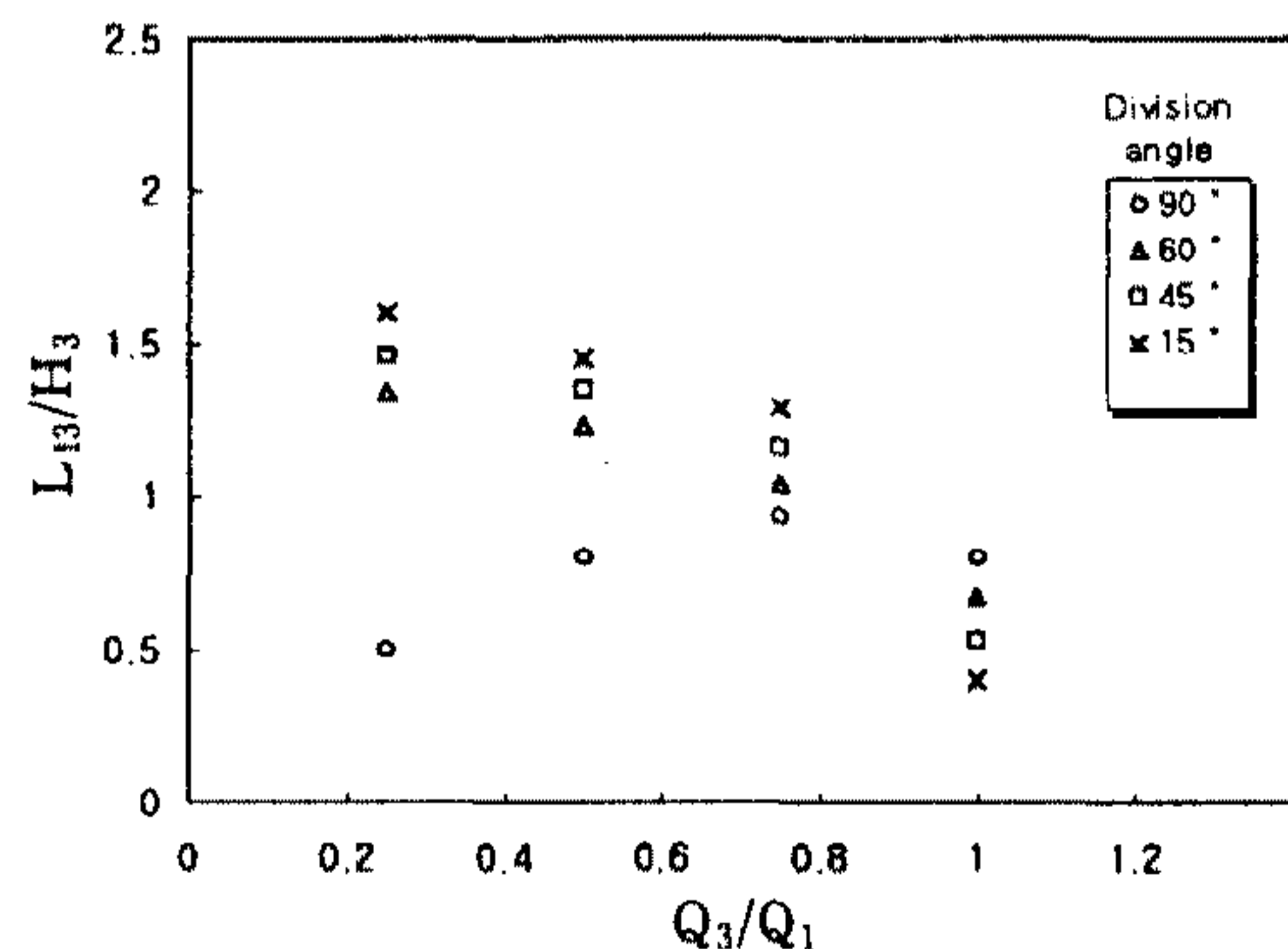


Fig.14 Reattachment length of the lateral tube of the non-Newtonian fluid vs. flowrate ratio($Re=100$)

액이고, 시험부 단면적이 $10 \times 10 \text{mm}$ 일 때 분기 각도 및 레이놀즈 수의 변화에 따른 본관에서의 무차원 재부착 길이 L_{12}/H_2 의 변화를 나타낸 것이다.

레이놀즈 수 50일 때 분기 각도 T형의 본관쪽에서의 무차원 재부착 길이는 0.29이고 분기 각도 60° , 45° 및 15° 인 Y형에서는 각각 0.33, 0.39 및 0.45로 그 차이가 작았으며, 레이놀즈 수 150일 때는 각각 1.70, 1.85, 2.05 및 2.28이고, 레이놀즈 수 250일 때는 2.62, 2.93, 3.25 및 3.57로 레이놀즈 수가 증가할수록 분기각의 변화에 대한 재부착 길이의 차이가 점점 증가하고, 레이놀즈 수가 증가함에 따라 무차원 재부착 길이의 증가율이 커졌으며, T형과 Y형의 차이는 약간 영향이 있으나 큰 차이는 나타나지 않았다.

따라서, Fig.8과 Fig.13을 비교하면, 뉴턴 유체에서 보다 비뉴턴 유체에서 무차원 재부착 길이가 작게 나타났으며, 그 차이는 그다지 크지 않았고, 레이놀즈 수에 따른 무차원 재부착 길이는 두 유체의 경우가 거의 비슷한 양상을 보이고 있다.

Fig.14는 폴리머 500wppm 수용액인 비뉴턴 유체에 대하여 시험부 단면적이 $10 \times 10 \text{mm}$ 이고, 본관 상류에서의 레이놀즈 수가 100일 때 분배 각도와 유량 분배비가 지관에서의 무차원 재부착 길이에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

T형 지관에서 유량 분배비 0.25, 0.5, 0.75 및 1일 때 무차원 재부착 길이가 각각 0.5, 0.8, 0.93 및 0.8로 유량 분배비 0.75 부근에서 재부착 길이가 최대가 되었고, 분기 각도가 60° , 45° 및 15° 인 Y형에서 유량 분배비 0.25일 때 무차원 재부착 길이는 각각 1.34, 1.46 및 1.6이고, 0.75일 때는 각각 1.04, 1.16 및 1.29로 유량 분배비가 증가함에 따라 무차원 재부착 길이는 감소하였고, 분배비 1에서는 T형보다 더 작은 재부착 길이를 나타낸다.

즉, T형에서는 유량 분배비 0.75에서 무차원 재부착 길이가 최대로 되었고, Y형에서는 유량 분배비가 0.25, 0.5 및 0.75로 증가함에 따라 감소를 나타냈으나, Y형에서의 재부착 길이가 T형에서 보다 길지만, 유량 분배비 1일 때는 T형일 때가 Y형일 때 보다 재부착 길이가 작음을 알았다. 그러나 Y형에서 분기 각도의 변화에 따른 재부착

길이는 큰 차이를 나타내지 않았고, 이 원인은 분기 유선의 유량이 작은 쪽 벽으로 유입되기 때문이라고 여겨진다.

Fig.9와 Fig.14에서의 뉴턴 유체와 비뉴턴 유체와의 실험 결과를 비교하면 T형의 경우 뉴턴 유체에서는 유량 분배비 0.5일 때 재부착 길이는 최대가 되고, 비뉴턴 유체 Separan 수용액은 분배비 0.75에서 최대가 되며, 동일 조건에서 뉴턴 유체가 비뉴턴 유체보다 재부착 길이가 길다는 것을 알았다.

Fig.15는 폴리머 500wppm 수용액인 비뉴턴 유체에 대하여 시험부 단면적이 $10 \times 10 \text{mm}$ 이고, 레이놀즈 수가 100일 때 T형 및 Y형의 지관에서 박리폭과 유량 분배비의 관계를 나타낸 것이다.

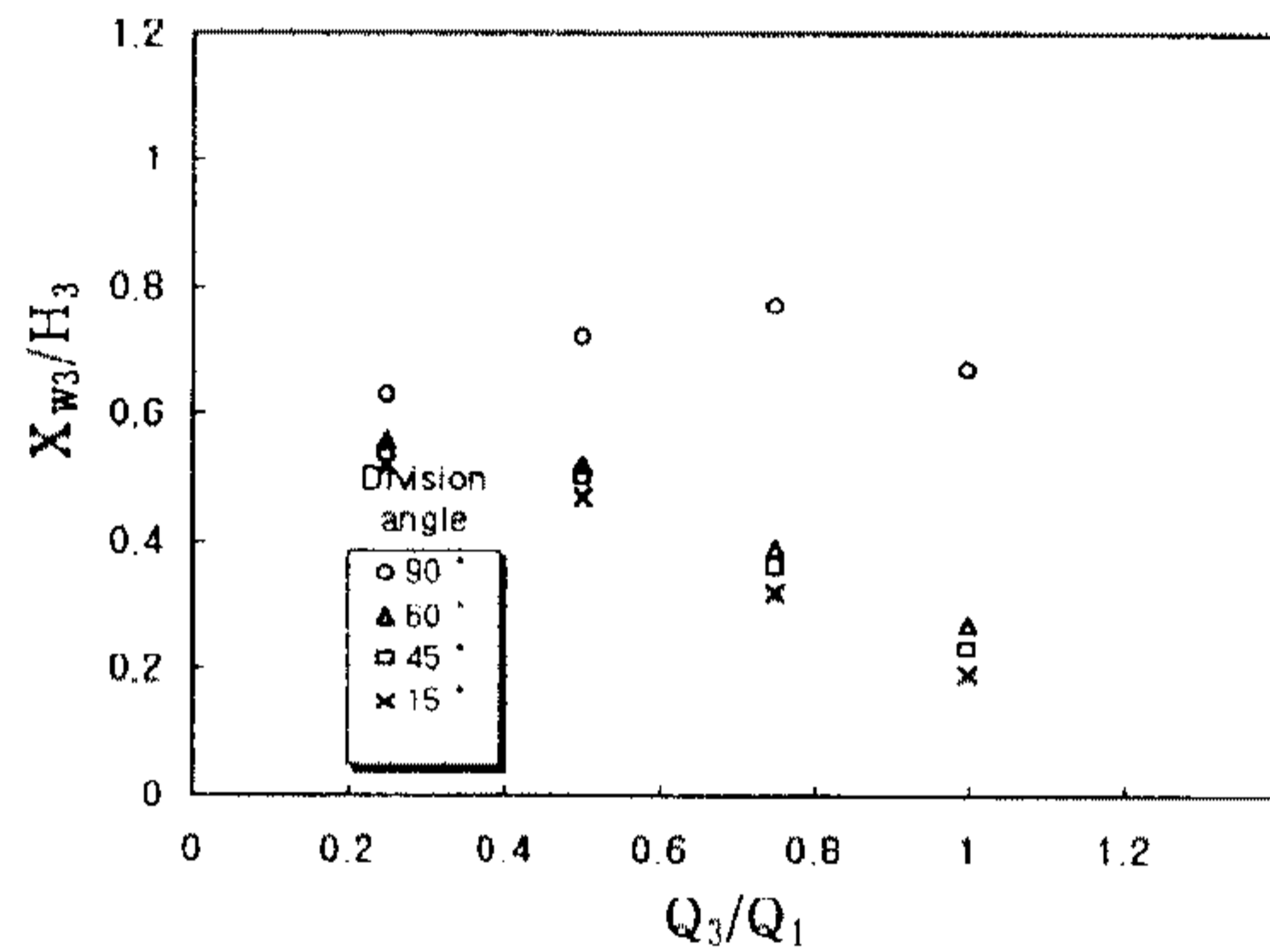


Fig.15 Reattachment width in dividing tube of the non-Newtonian fluid vs. flowrate ratio($Re=100$)

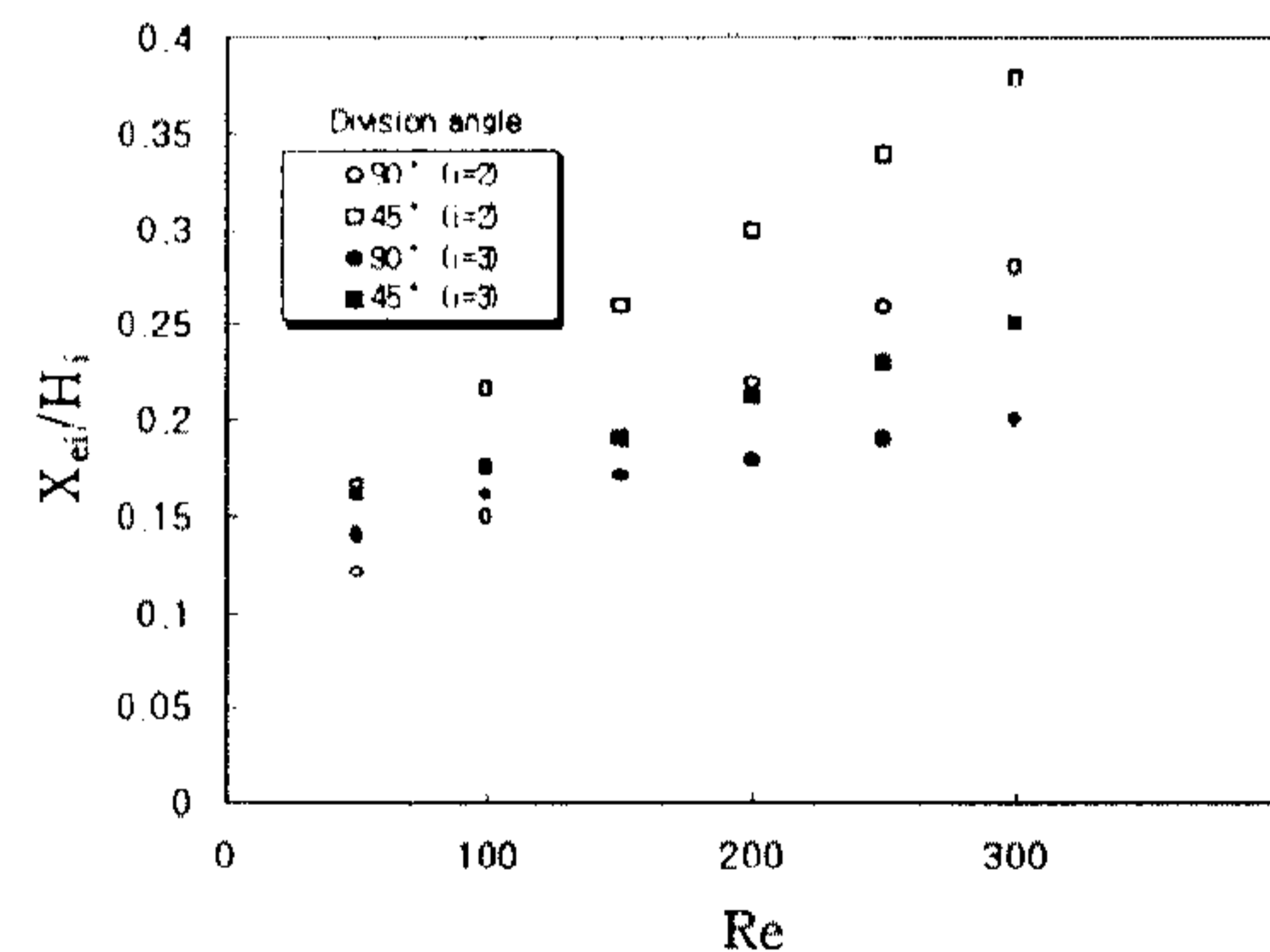


Fig.16 Entrance length of streamline of the non-Newtonian fluid vs. Reynolds number($Q_3/Q_1=0.75$)

T형인 경우 유량 분배비 0.25, 0.5, 0.75 및 1에서 무차원 재부착 폭이 각각 0.63, 0.72, 0.77 및 0.67로 재부착 폭이 최대인 유량 분배비가 존재하며, Y형인 경우 유량 분배비가 0.25, 0.5, 0.75 및 1로 증가하면 무차원 재부착 폭은 점차 감소하고, 분기 각도가 60°, 45° 및 15°이고 유량 분배비가 0.75일 때 무차원 재부착 폭은 각각 0.39, 0.36 및 0.32로 그 차이가 별로 크지 않다.

유량 분배비가 0.25, 0.5 및 0.75로 커질수록 T형과 Y형에서의 무차원 재부착 폭의 차이가 크게 나타났으며, 그 원인은 분기 유선의 유량이 작은 쪽 벽으로 유입되기 때문이라 여겨진다.

Fig.16은 비뉴턴 유체에서 분기관 시험부 단면적이 10×10mm이고 유량 분배비가 0.75일 때 분기 각도 90°와 45°인 분기관에서 분기관내 본관 및 지관에서의 무차원 유입 길이와 레이놀즈 수와의 관계를 나타낸 것으로 $i=2$ 는 본관, $i=3$ 은 지관을 표시한다.

이러한 분기 유선의 유입을 평가하기 위해 Fig. 2에 나타냈던 것과 같이 그 크기를 정의하였고, 유선의 유입 길이는 각각 X_{e2}/H_2 , X_{e3}/H_3 로 나타낸다.

분기 각도에 따른 본관에서의 유선 유입을 살펴 보면, 레이놀즈 수가 50, 100, 150, 200, 250 및 300으로 증가함에 따라 T형의 무차원 유입 길이는 각각 0.12, 0.15, 0.19, 0.22, 0.26 및 0.28이고, Y(45°)형의 무차원 유입 길이는 각각 0.165, 0.215, 0.260, 0.300, 0.340 및 0.380로 나타난다. 즉, 레

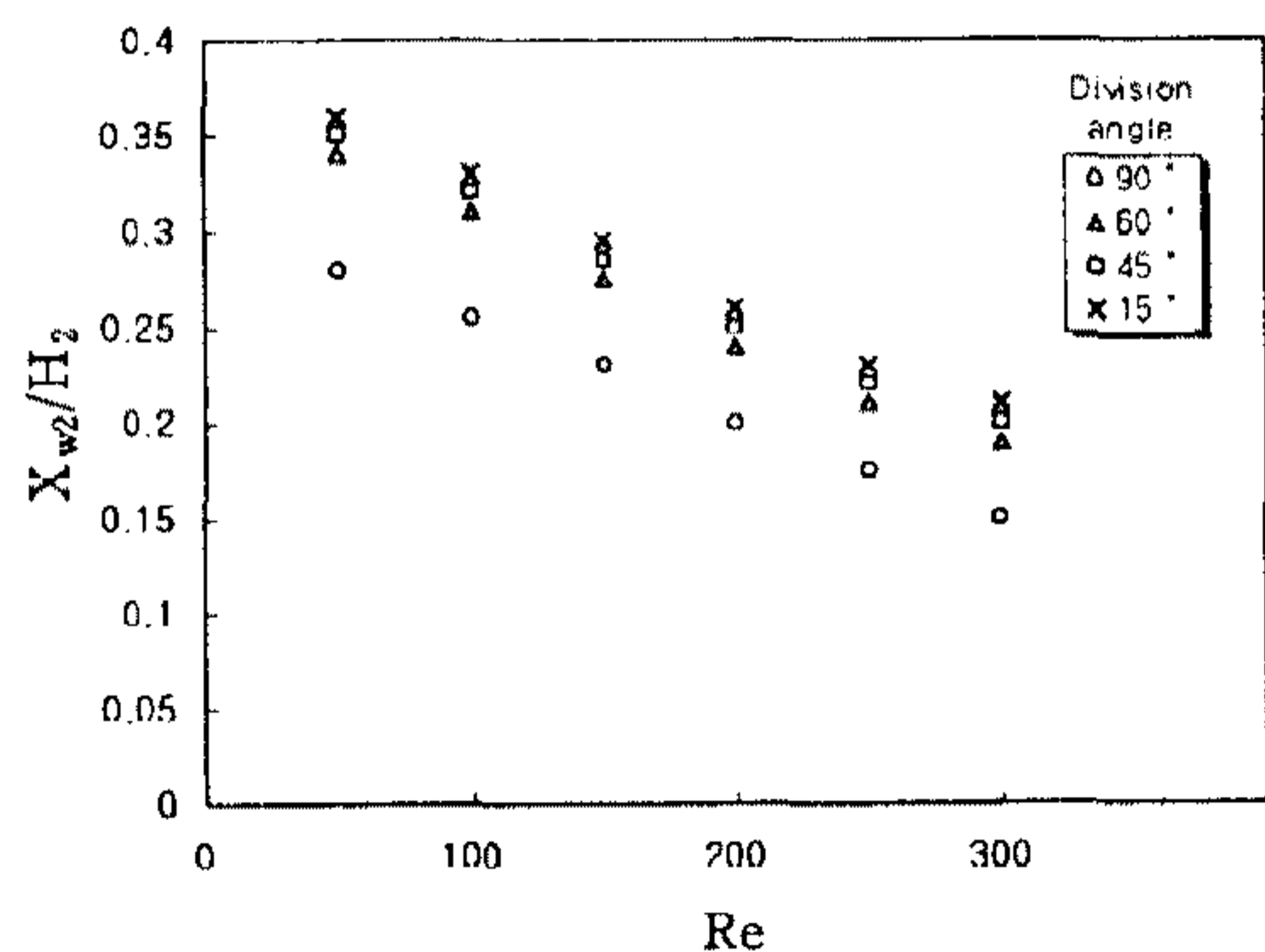


Fig.17 Entrance width of streamline of the non-Newtonian fluid vs. Reynolds number($Q_3/Q_1=0.75$)

이놀즈 수 변화에 따라 유입 길이 증가율이 크게 나타난다.

분기 각도에 따른 지관에서의 유선 유입은 레이놀즈 수가 50, 100, 150, 200, 250 및 300으로 증가함에 따라 T형에서는 무차원 유입 길이가 각각 0.14, 0.16, 0.17, 0.18, 0.19 및 0.20이고, Y(45°)형에서는 무차원 유입 길이가 각각 0.16, 0.175, 0.19, 0.21, 0.23 및 0.25로 그 증가율이 본관에서 보다 훨씬 작음을 알았다. 즉, 지관 및 본관에서의 유선 유입 길이는 레이놀즈 수의 증가에 따라 증가하며, 그 증가율은 본관쪽이 지관쪽보다 크다는 것을 알 수 있으며, 본관 및 지관에서 분기 각도에 따른 유입 길이 차이는 T형에서 증가율이 약간 작게 나타나고 있다.

Fig.17은 비뉴턴 유체에서 분기관 시험부 단면적이 10×10mm이고 유량 분배비가 0.75일 때 분기 각도 및 레이놀즈 수가 본관 분기관내 무차원 유입폭에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 이미 Fig. 2에 정의한 바와 같이 유선의 무차원 유입폭은 X_{w2}/H_2 로 나타내고, 분기각도 90°인 T형 분기관에서 레이놀즈 수가 50, 100, 150, 200, 250 및 300으로 증가하면 무차원 유입폭은 각각 0.280, 0.255, 0.230, 0.200, 0.175 및 0.150으로 감소하고, Y(60°)형에서는 무차원 유입폭이 각각 0.340, 0.310, 0.275, 0.240, 0.210 및 0.189로 감소한다.

또한, 분기 유선이 분기 각도에 따라 미치는 영향은 차이가 크지 않으나, T형에서 보다 Y형이 유입폭 감소율이 크며, Y형에서의 분기각도에 따른 감소율은 그 차이가 매우 적다고 할 수 있다.²⁵⁾

Fig.18은 시험부 단면적이 10×10mm이고, 본관이 폐쇄되어 있는 경우, T형과 Y형(60°)($Re=100$, $W_{e1}=7.0$)일 때 가시화에 의한 비뉴턴 유체의 유동 양상을 나타낸 사진이다.

본관 하류가 폐쇄되어 있는 경우는 유동 일부가 본관 하류쪽으로 들어갔다 지관에 유입된다. 즉, 본관 하류쪽의 팽창이 보여지고 팽창 및 순환류가 나타난다. T형에서 순환류 및 하류 팽창이 Y형보다 더 많이 나타내며 그 차이는 작다. 따라서, 분기각이 팽창에 미치는 영향은 미소하다.

Fig.19는 시험부 단면적이 10×10mm이고, 지관이 폐쇄되어 있는 경우, T형과 Y형(60°)($Re=$



Fig.18 Flow pattern of the non-Newtonian fluid by closing the main tube



Fig.19 Flow pattern of the non-Newtonian fluid by closing the lateral tube

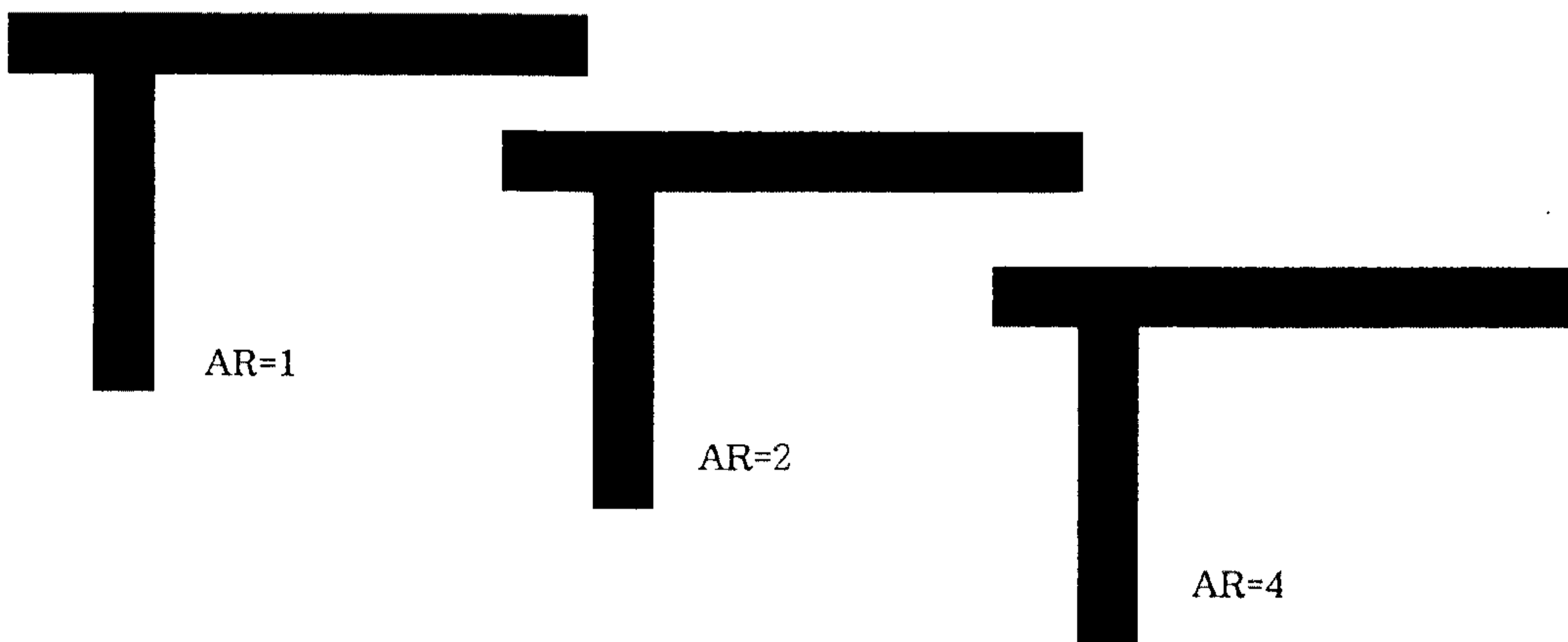


Fig.20 Reattachment length and width for various aspect ratio of the non-Newtonian fluid($Q_3/Q_1=0.75$, $Re=100$)

100, $W_{e1}=7.0$)일 때 가시화에 의한 비뉴턴 유체의 유동 양상을 나타낸 사진이다.

지관 하류가 폐쇄되어 있는 경우는 유동의 일부가 지관 하류쪽으로 들어갔다 본관에 유입된다. 즉, 지관 하류쪽의 팽창이 보여진다.

따라서, Fig.18과 Fig.19는 본관과 지관 폐쇄의 경우를 비교하면 폐쇄된 쪽의 하류쪽에 팽창이

보임을 알 수 있고, 본관쪽 폐쇄 경우가 지관쪽 폐쇄 경우보다 더 많은 순환류 및 유동 팽창이 일어났다.

Fig.20은 유량 분배비 Q_3/Q_1 이 0.75이고, 레이놀즈 수가 $Re=100$ 일 때 T형의 단면 종횡비(AR)가 1, 2 및 4로 변화시켰을 때의 비뉴턴 유체의 유동 양상을 나타낸 사진이다. 사진에서 알 수 있

듯이 AR=1일 때가 AR=2, 4일 때보다 재부착 길이나 폭 모두 가장 크지만, 그 차이는 아주 작고, 재부착 길이와 폭이 가장 작은 경우는 AR=4일 때이다. 따라서, 단면 중횡비가 재부착 길이나 폭에 미치는 영향은 매우 적다고 할 수 있다. Y형 역시 T형과 마찬가지로 단면 중횡비는 재부착 길이, 폭에 영향을 거의 미치지 않았다.

4.2 에너지 손실

4.2.1 뉴턴 유체의 에너지 손실

4.2.1.1 뉴턴 유체의 본관 손실 계수

Fig.21은 실험 유체가 글리세린 수용액이고 시험부 단면적이 $10 \times 10\text{mm}$ 일 때 T형 분기관의 본관에서 유량 분배비에 따라 유체의 분기 손실 계수와 레이놀즈 수와의 관계를 대수 그래프로 나타낸 것이다.

본관의 손실 계수 ζ_{12} 값은 레이놀즈 수가 10에서 100까지 증가하면 손실 계수는 직선적으로 감소하고, 100 이상에서는 그 감소율이 매우 적으며, 레이놀즈 수 10에서 유량 분배비가 각각 1, 0.75, 0.5, 0.25 및 0에서 손실 계수가 각각 6.0, 8.0, 9.1, 10.5 및 11.2로 유량 분배비 1에서 가장 작고 유량 분배비 0이 가장 컸으나, 레이놀즈 수 100에서는 유량 분배비 1, 0.75, 0.5, 0.25 및 0에서 손실 계수가 각각 1.10, 1.00, 0.71, 0.60 및 1.00으로 유량 분배비가 1일 때 가장 크다. 그러므로, 레이놀즈 수가 40~80사이에 유량 분배비에 따른 손실 계수의 변화가 역으로 됨을 알았다.

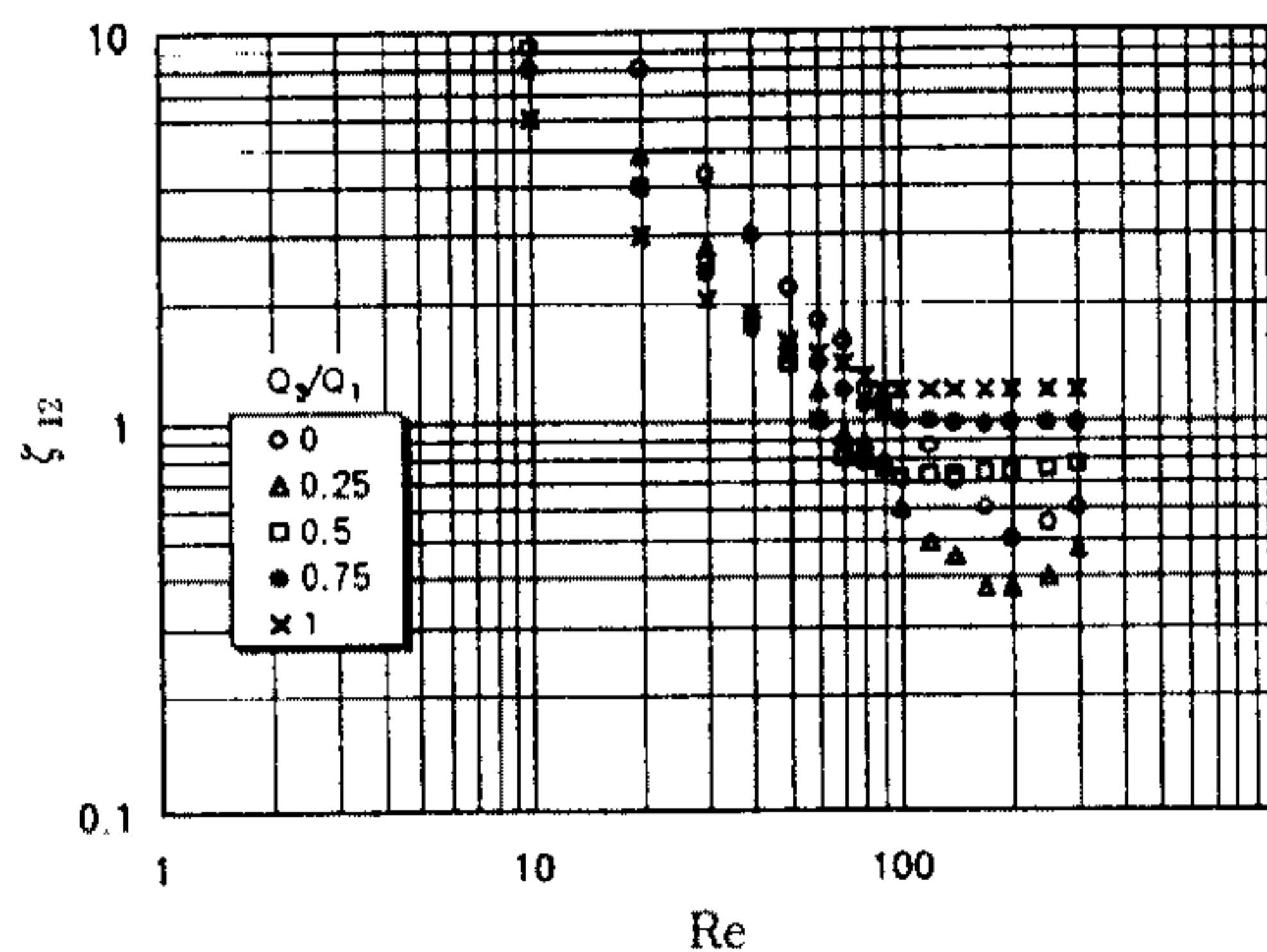


Fig.21 Loss coefficient of the main tube vs. Reynolds number of the Newtonian fluid in T(90°) type

또한, 레이놀즈 수 120~300 범위에서는 유량 분배비가 1, 0.75, 0.5, 0.25 및 0일 때 손실 계수는 1.2, 1, 0.72, 0.49 및 0.86으로 거의 일정값을 갖는다.

가시화에서 나타낸 것과 같이 본관쪽의 재부착 크기는 유량 분배비에 영향을 받기 때문에, 레이놀즈 수가 작은 영역에서는 유량 분배비가 적을수록 손실 계수 값이 크고, 레이놀즈 수가 큰 영역에서는 재부착이 생기지 않기 때문에 손실 계수 값은 작다. 유량 분배비가 클수록 손실 계수 감소율은 작고, 레이놀즈 수가 100 이상으로 증가하면 손실 계수는 거의 일정값을 갖는다.

Fig.22는 실험 유체가 글리세린 수용액이고 시험부 단면적이 $10 \times 10\text{mm}$ 일 때 분기각이 45° 인 Y형 분기관의 본관에서 유량 분배비에 따라 유체 분기 손실 계수 ζ_{12} 와 레이놀즈 수와의 관계를 대수 그래프로 나타낸 것이다.

손실 계수 ζ_{12} 는 레이놀즈 수가 10에서 100까지는 거의 직선적으로 감소하고, 100 이상이 되면 감소율이 작아진다. 또한, 레이놀즈 수 100 이하에서는 유량 분배비가 0일 때 손실 계수가 가장 크고, 레이놀즈 수 100 이상에서는 유량 분배비가 1일 때 손실 계수가 가장 크며, 그 값은 1.3으로 거의 일정하다.

또한, 유량 분배비 1, 0.75 및 0.5에서는 레이놀즈 수 100~200범위에서 손실 계수는 1.30, 0.99 및 0.88로 거의 일정값을 갖으나, 유량 분배비 0, 0.25에서는 손실 계수가 계속 감소 추세를 보이며

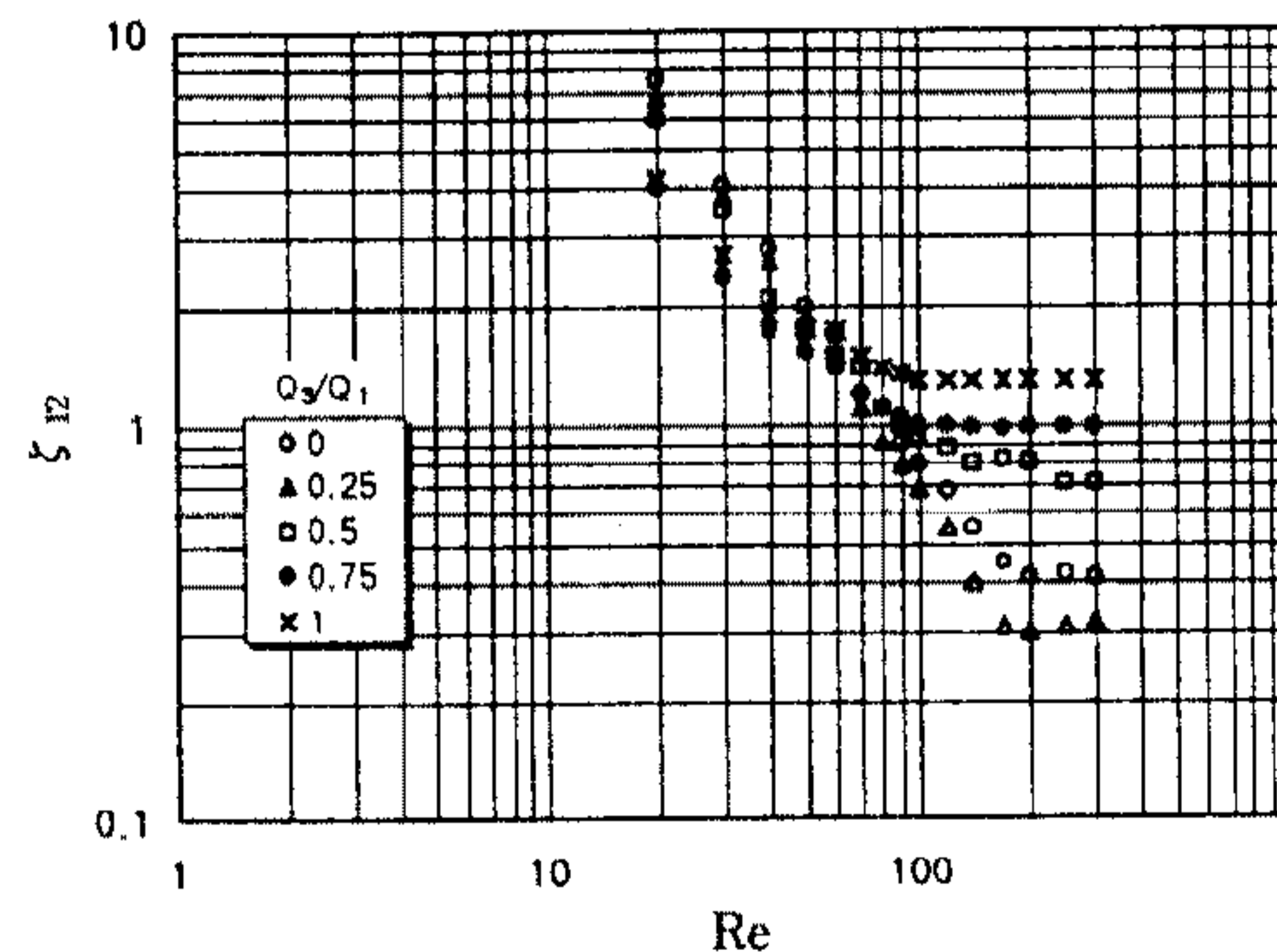


Fig.22 Loss coefficient of the main tube vs. Reynolds number of the Newtonian fluid in Y(45°) type

레이놀즈 수가 200 이상이 되면 일정값을 갖는다. 따라서 Fig.21의 T형과 Fig.22의 Y형을 비교하면 손실 계수와 레이놀즈 수와의 양상은 비슷하나, 레이놀즈 수 200 이상일 때 유량 분배비에 따른 손실 계수의 차가 Y형이 T형 보다 약간 크게 나타났다.

이것은 재부착 현상이 생기지 않을 때에는 분기부에서 확대되면서 본관 하류로 유동이 일어나기 때문에 유량이 많은 쪽이 손실 계수의 값은 커지게 된다. 레이놀즈 수가 증가하고 재부착이 생기는 것은 유량 분배비가 작을수록 축소 확대되어 본관 하류로 유동이 일어나기 때문에 손실 계수의 감소율은 레이놀즈 수의 증가에 따라 작아지게 된다.

4.2.1.2 뉴턴 유체의 지관 손실 계수

Fig.23은 시험부 단면적이 $10 \times 10\text{mm}$ 인 T형 분기관의 지관에서 유량 분배비에 따라 뉴턴 유체의 분기 손실 계수 ζ_{13} 와 레이놀즈 수와의 관계를 대수 그래프로 나타낸 것이다.

손실 계수 ζ_{13} 은 레이놀즈 수가 10에서 100까지 증가하면 거의 직선적으로 감소하고 100 이상에서는 손실 계수가 유량 분배비에 따라 1.72~2.05 범위에서 거의 일정하게 나타났다.

이것은 가시화에서 나타낸 바와 같이 재부착이 없는 경우 지관에서 유동이 확대됨을 나타내고, 손실 계수는 레이놀즈 수의 증가와 함께 감소하지만 레이놀즈 수가 적은 영역에서는 유량 분배비가 클수록 즉, 지관에 유량이 많아질수록 손실 계수의 값이 증가한다. 재부착이 생기어 유동이 축소

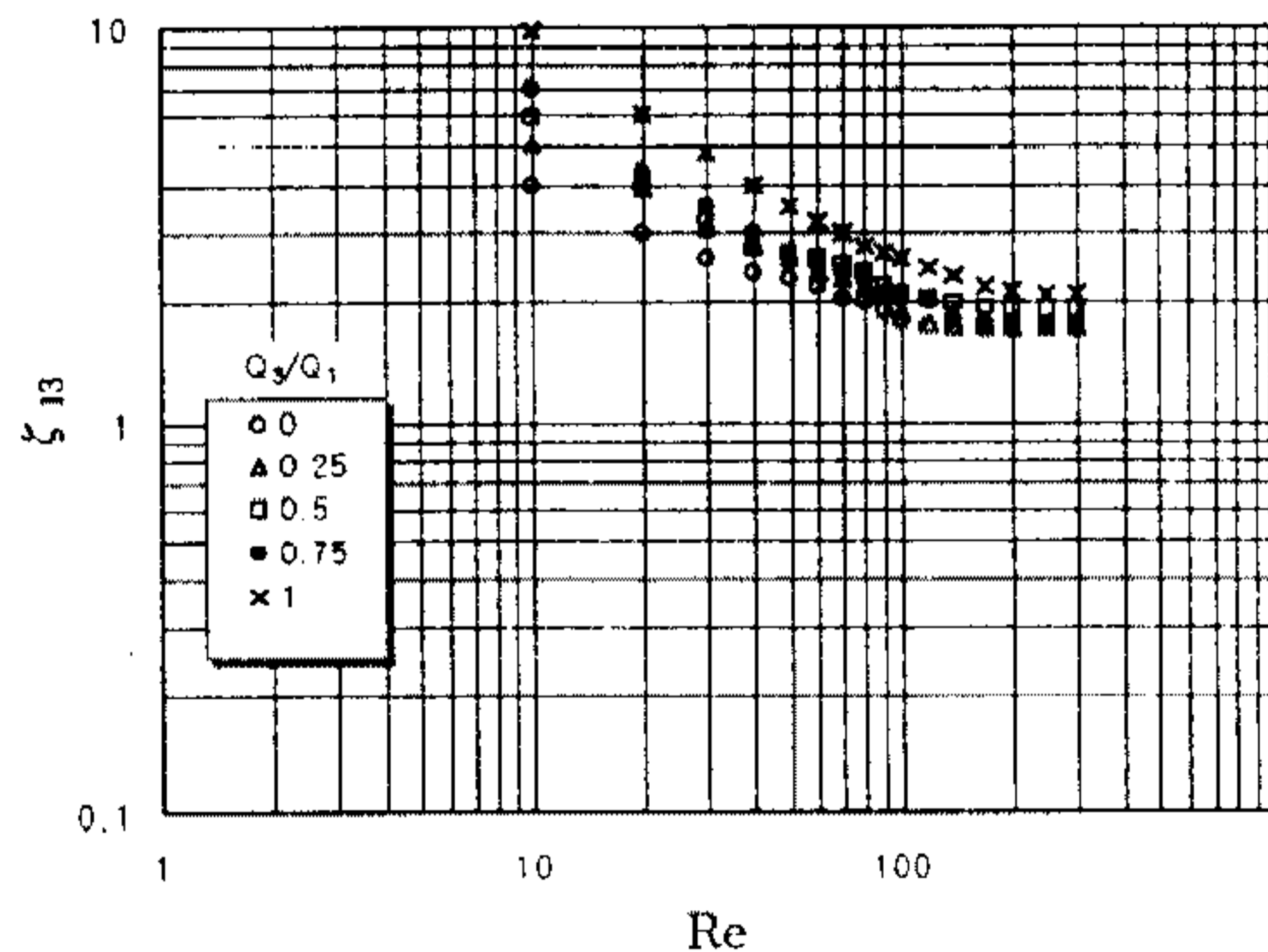


Fig.23 Loss coefficient of the lateral tube vs. Reynolds number of the Newtonian fluid in T(90°) type

확대 되면, 재부착은 레이놀즈 수의 증가와 함께 커지므로 손실 계수의 감소율은 작아지게 되어 손실 계수는 일정한 값에 접근한다고 생각된다.

Fig.24는 실험 유체가 글리세린 수용액(43wt%)이고, 시험부 단면적이 $10 \times 10\text{mm}$ 일 때 분기각이 45° 인 Y형 분기관의 지관에서 유량 분배비에 따라 유체의 분기 손실 계수 ζ_{13} 와 레이놀즈 수와의 관계를 대수 그래프로 나타낸 것이다.

손실 계수 ζ_{13} 은 레이놀즈 수가 10에서 100까지 증가하면 손실 계수가 거의 직선적으로 감소하고 레이놀즈 수 200부근 이상에서 손실 계수는 거의 일정한 값을 갖는다.

따라서, 유량 분배비에 따른 손실 계수는 레이놀즈 수에 대해 살펴보면, 레이놀즈 수 10~80에 시는 유량 분배비가 1일 때 손실 계수는 가장 크

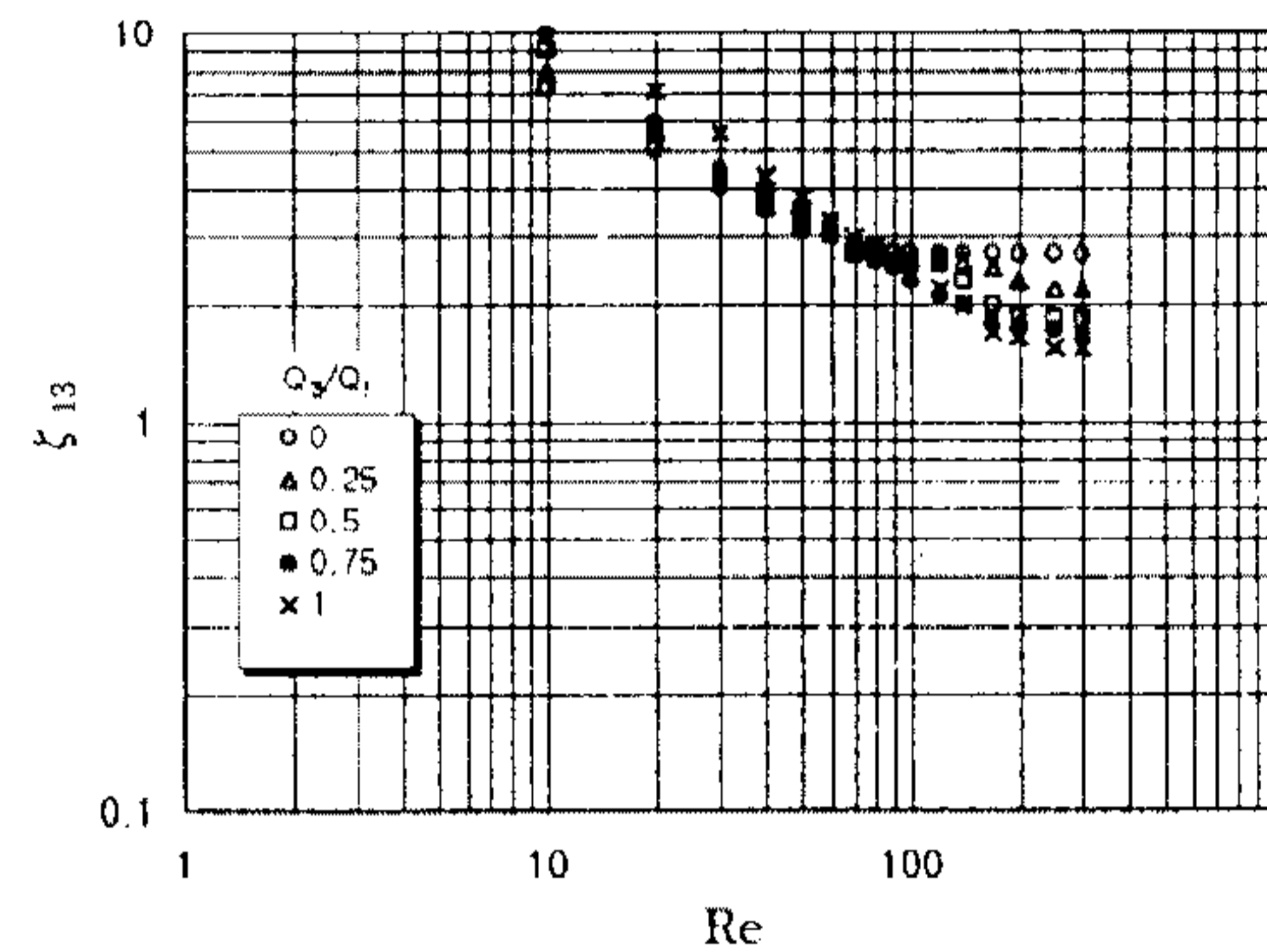


Fig.24 Loss coefficient of the lateral tube vs. Reynolds number of the Newtonian fluid in Y(45°) type

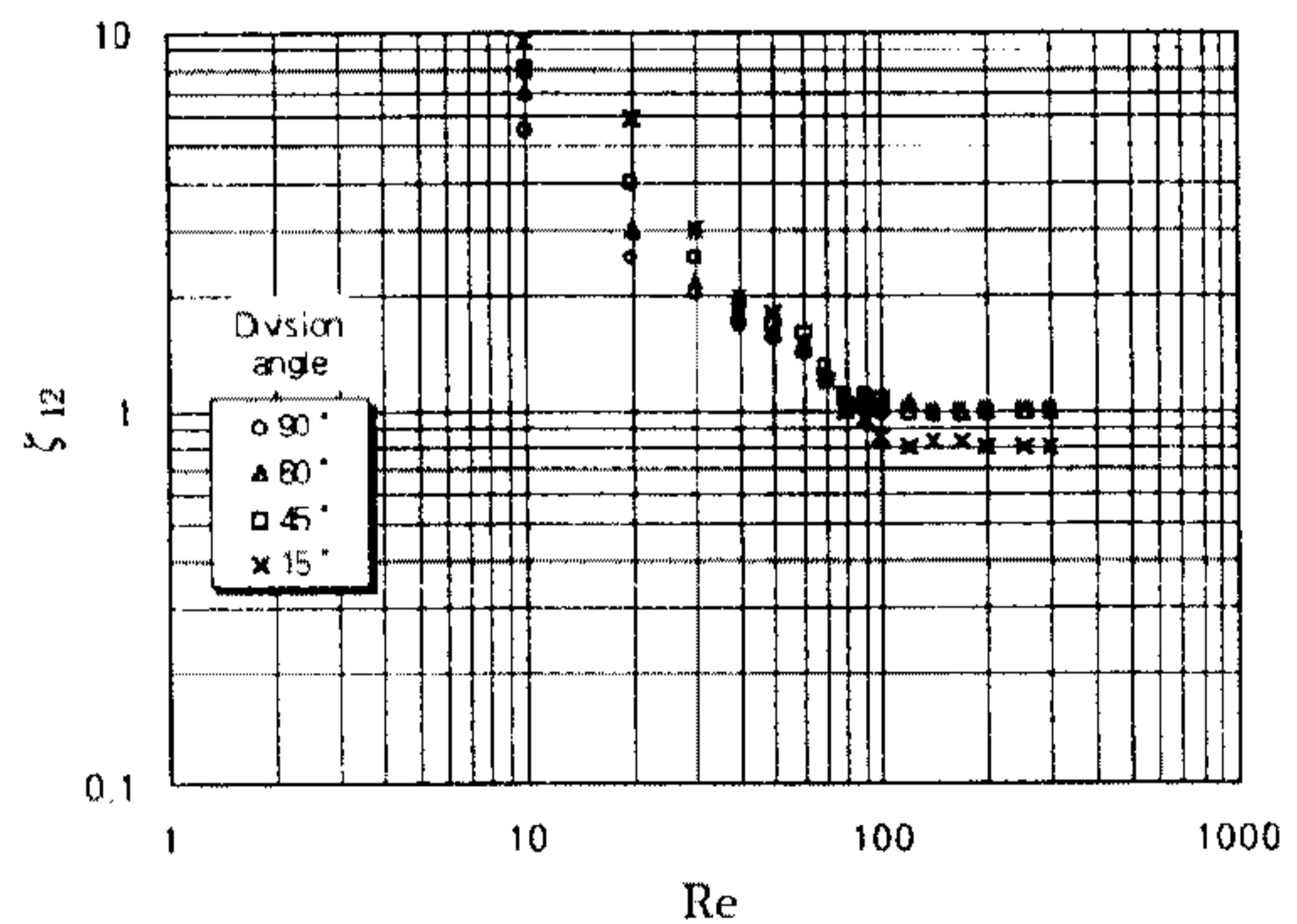


Fig.25 Loss coefficient vs. distribution of the flowrate of the Newtonian fluid in the main tube($Q_3/Q_1=0.75$)

며, 레이놀즈 수가 200 이상에서는 유량 분배비가 0일 때 가장 크게, 유량 분배비가 1일 때 가장 작게 나타난다.

따라서, Fig.23과 Fig.24를 비교하면, T형과 Y형의 지관에서 레이놀즈 수가 증가하면 T형과 Y형이 모두 거의 직선적으로 감소하고, 레이놀즈 수 100 이상일 때 감소율이 일정한 값에 근접하여 그 차이는 그다지 크지 않았다.

Fig.25는 시험부 단면적이 $10 \times 10\text{mm}$ 이고, 뉴턴 유체의 유량 분배비가 0.75일 때 분기 각도의 크기에 따라 본관에서의 레이놀즈 수와 손실 계수의 크기의 관계를 대수 그래프로 나타낸 것이다.

레이놀즈 수가 100 이하에서는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 손실 계수는 감소하였고, 레이놀즈 수가 100 이상에서는 손실 계수의 감소폭이 적어져 0.85~1사이 값에 접근하였다.

Fig.26은 시험부 단면적이 $10 \times 10\text{mm}$ 이고, 뉴턴 유체의 유량 분배비 0.75일 때 분기 각도의 크기에 따라 레이놀즈 수와 지관에서 손실 계수의 크기를 대수 그래프로 나타낸 것이다.

레이놀즈 수의 증가와 함께 손실 계수는 감소함을 나타내고 있고, 레이놀즈 수가 100 부근 이상에서는 손실 계수의 감소폭이 작아져 2.05~2.3사이의 값에 접근함을 알았다.

따라서, 일반적으로 지관이 본관에서 보다 손실 계수가 더 크게 나타나고 있으며, Y형의 경우 마찰 계수와 분기 각도에 대한 영향은 지관에서 보다 본관에서 더 크게 나타났다.

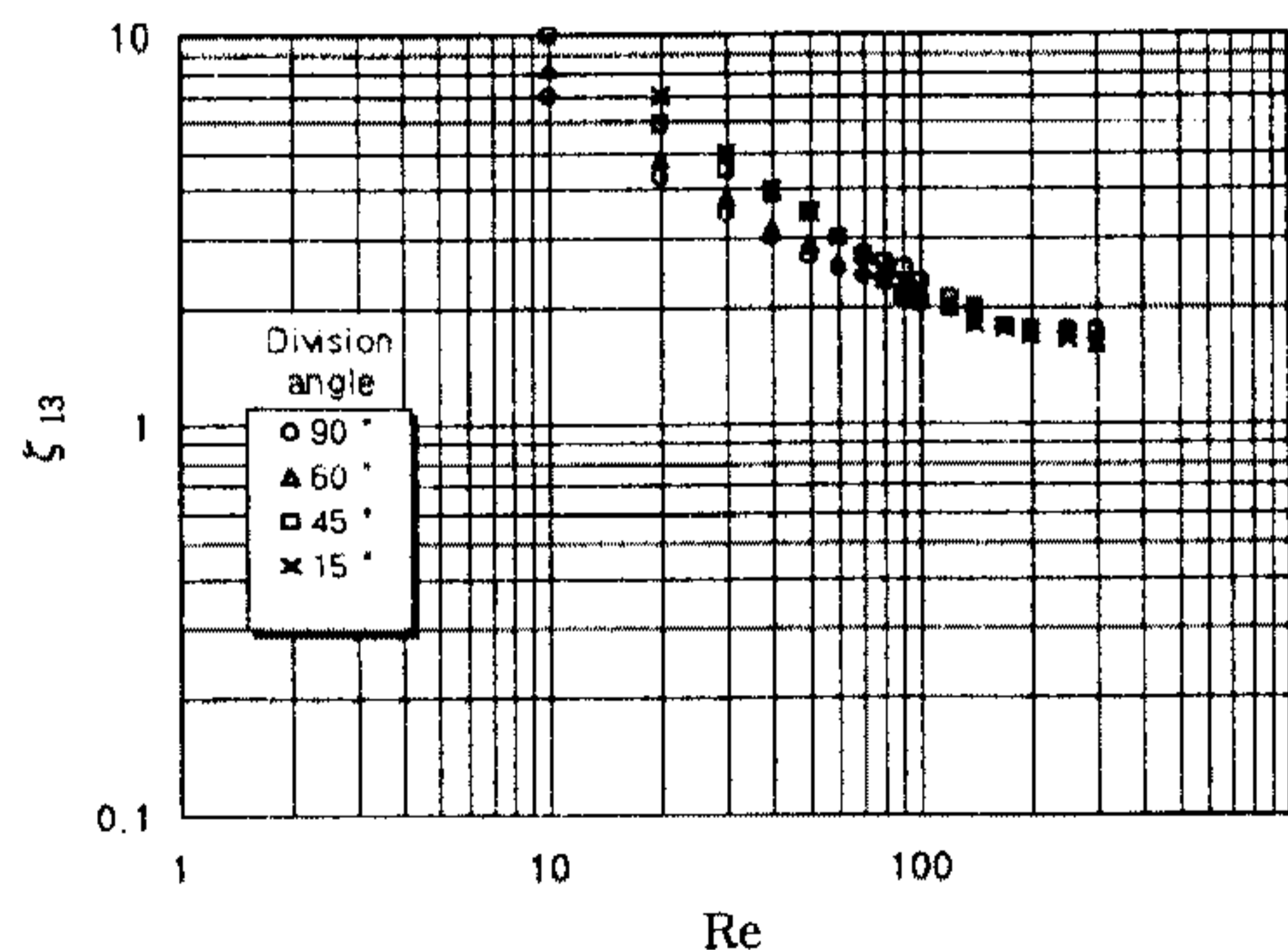


Fig.26 Loss coefficient vs. distribution of the flowrate of the Newtonian fluid in the lateral tube($Q_3/Q_1=0.75$)

4.2.2 비뉴턴 유체의 에너지 손실

4.2.2.1 비뉴턴 유체의 본관 손실 계수

Fig.27은 실험 유체가 폴리머 500wppm 수용액이고, 시험부 단면적이 $10 \times 10\text{mm}$ 일 때 T형 분기관의 본관에서 유량 분배비에 따라 유체의 분기 손실 계수 ξ_{12} 와 레이놀즈 수와의 관계를 대수 그래프로 나타낸 것이다.

손실 계수 ξ_{12} 는 레이놀즈 수가 10~100 범위에서는 레이놀즈 수의 증가에 따라 거의 직선적으로 감소하며, 레이놀즈 수가 100 이상으로 증가하면 유량 분배비에 따른 손실 계수의 차가 점점 적어지며, 레이놀즈 수가 200 이상이 되면 그 감소 추세는 더욱 적어져 손실 계수 1.62에 근접하게 되어 유량 분배비의 영향은 매우 작다. 가시화에서 나타낸 것과 같이 본관쪽의 재부착 크기는 유량 분배비에 많은 영향을 받고, 레이놀즈 수가 적은 영역에서는 유량이 많을 수록 손실 계수는 적고 레이놀즈 수가 큰 영역에서는 유량의 영향을 적게 받는다. 재부착이 생기지 않을 때에는 분기부에서 확대되어 본관 하류로 유동이 일어나고, 그 때문에 유량이 많을수록 즉, 분배비가 적을수록 손실 계수 ξ_{12} 는 커지게 된다. 레이놀즈 수가 증가하고 박리가 생기는 것은 축소 확대되어 본관 하류로 유동하기 때문에 손실 계수는 레이놀즈 수의 증가와 함께 감소율은 작아진다고 생각된다.

Fig.28은 실험 유체가 폴리머 500wppm 수용액이고, 시험부 단면적이 $10 \times 10\text{mm}$ 일 때 분기각이 45° 인 Y형 분기관의 본관에서 유량 분배비에

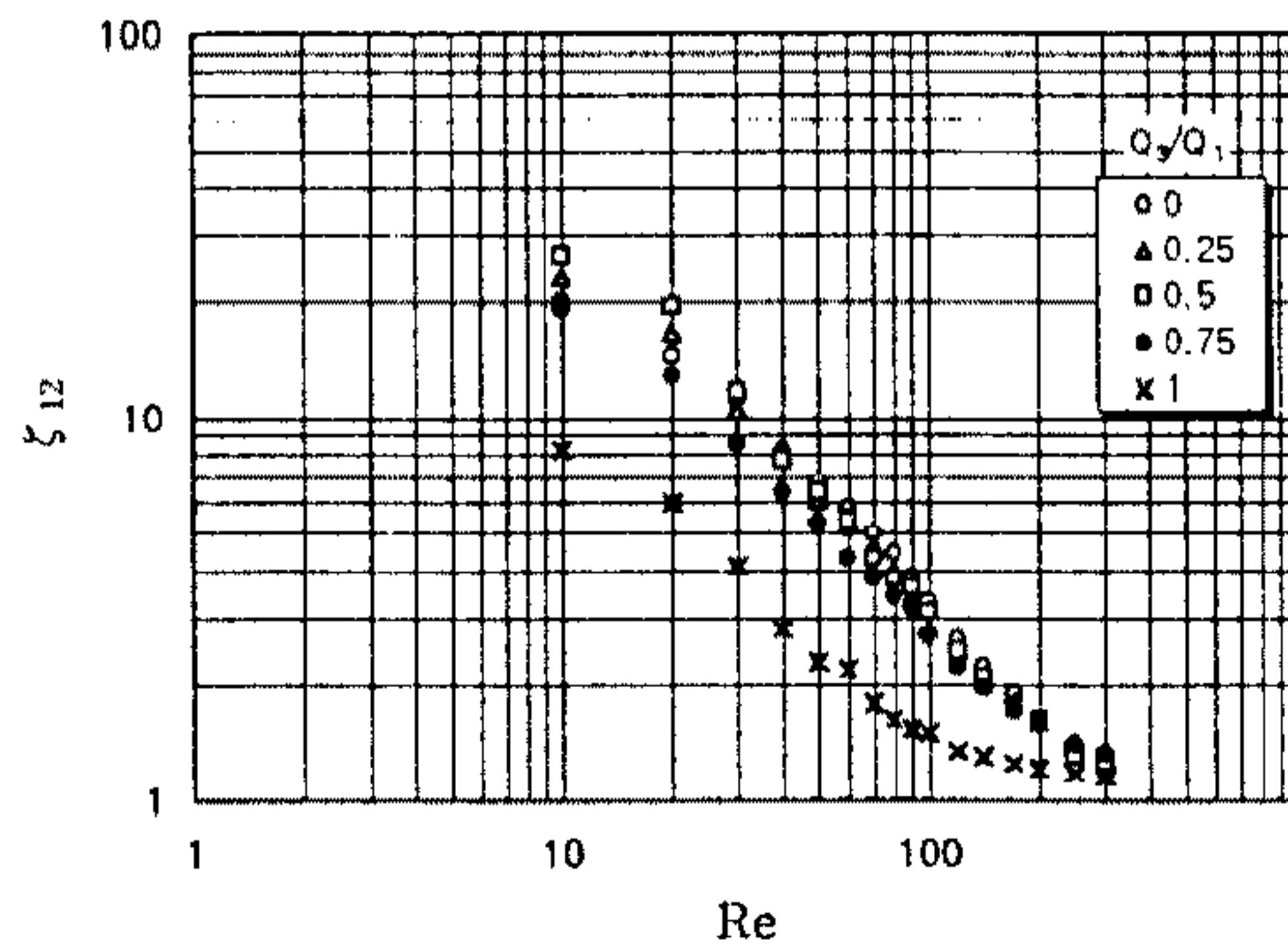


Fig.27 Loss coefficient of the main tube vs. Reynolds number of the non-Newtonian fluid in T(90°) type

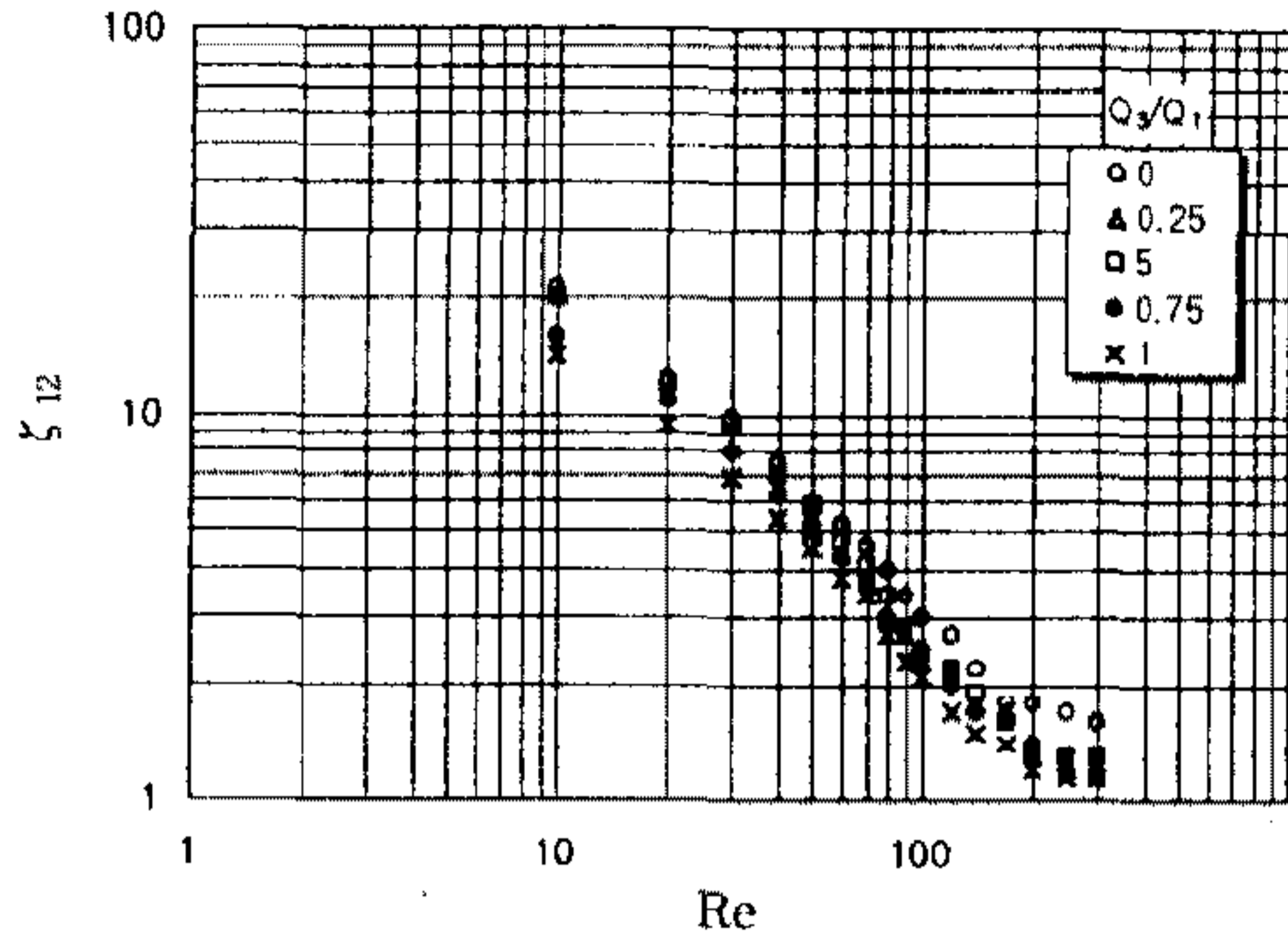


Fig.28 Loss coefficient of the main tube vs. Reynolds number of the non-Newtonian fluid in Y(45°) type

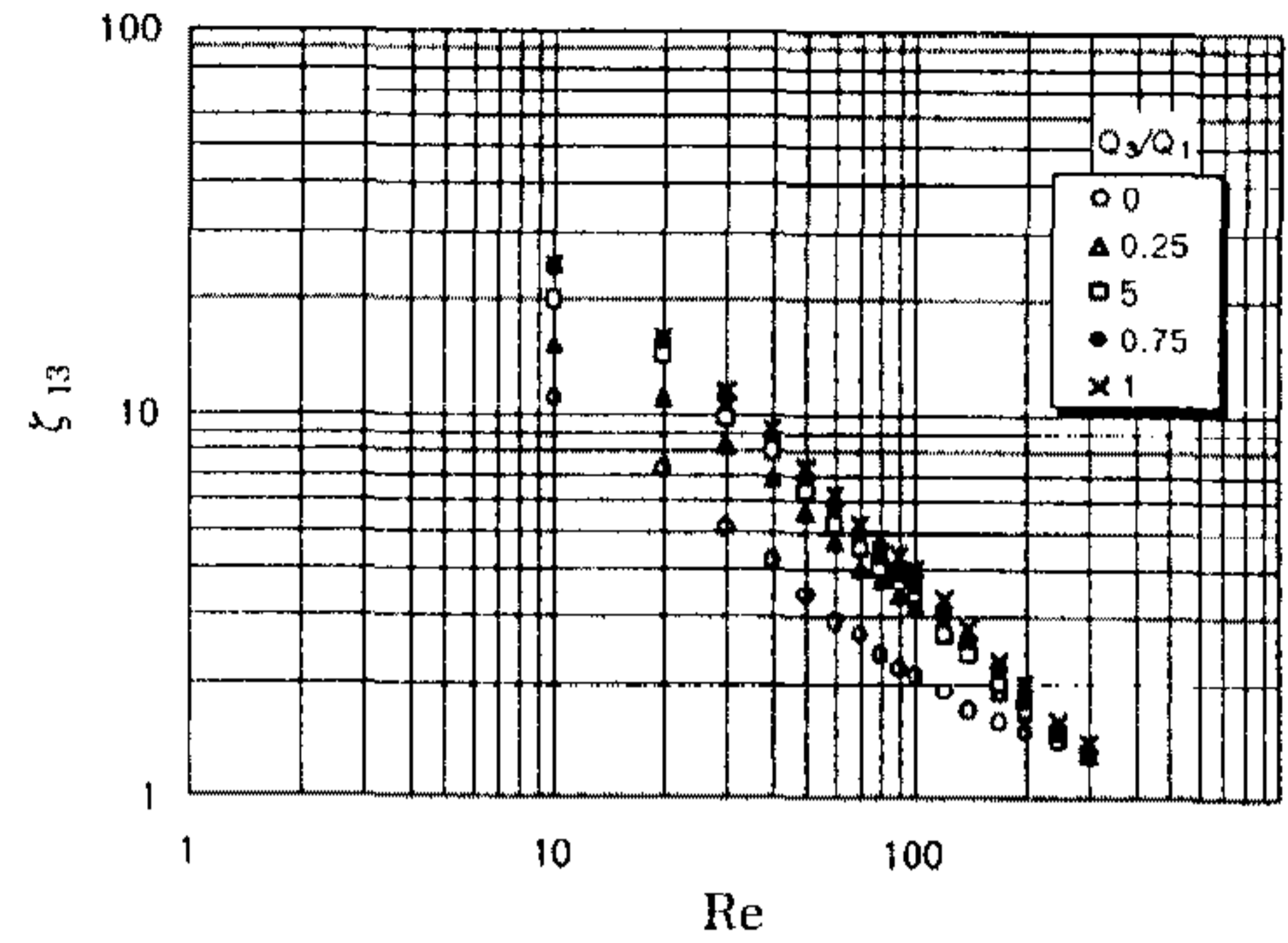


Fig.29 Loss coefficient of the lateral tube vs. Reynolds number of the non-Newtonian fluid in T(90°) type

따라 유체의 분기 손실 계수 ξ_{12} 와 레이놀즈 수와의 관계를 대수 그래프로 나타낸 것이다.

T형에서 관찰한 바와 마찬가지로 레이놀즈 수가 100 이하에서는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 거의 직선적으로 감소하며, 레이놀즈 수가 200 이상이 되면 그 감소 추세는 적어지며, 손실 계수는 1.2~1.7 정도로 나타났다.

이것 역시, T형에서와 거의 비슷한 경향이 나타났으나, 유량 분배비가 1인 경우 즉, 본관 하류가 막혀 있는 경우는 T형에서의 손실 계수가 Y형에서 보다 크게 나타났다.

지금까지 살펴본 바와 같이, T형과 Y형의 분기관에서 레이놀즈 수의 변화에 따른 뉴턴 유체와 비뉴턴 유체에 대한 본관의 분기 손실 계수를 비교하면, 레이놀즈 수 100 이하에서는 뉴턴, 비뉴턴 유체 모두 레이놀즈 수의 증가와 함께 손실 계수는 거의 직선적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 레이놀즈 수 100 이상에서 뉴턴 유체에서의 손실 계수는 1.0~0.3에 근접하고, 비-뉴턴 유체에서의 손실 계수 1.2~2.7에 근접하므로, 비뉴턴 유체가 뉴턴 유체보다 손실 계수가 큰 것을 알 수 있었다.

4.2.2.2 비뉴턴 유체의 지관 손실 계수

Fig.29는 지관에서 유량 분배비에 따른 비뉴턴 유체의 분기 시험부 단면적이 $10 \times 10 \text{mm}$ 인 T형 분기관의 손실 계수 ξ_{13} 와 레이놀즈 수와의 관계를 대수 그래프로 나타낸 것이다.

유량 분배비에 따른 지관에서의 손실 계수는 본

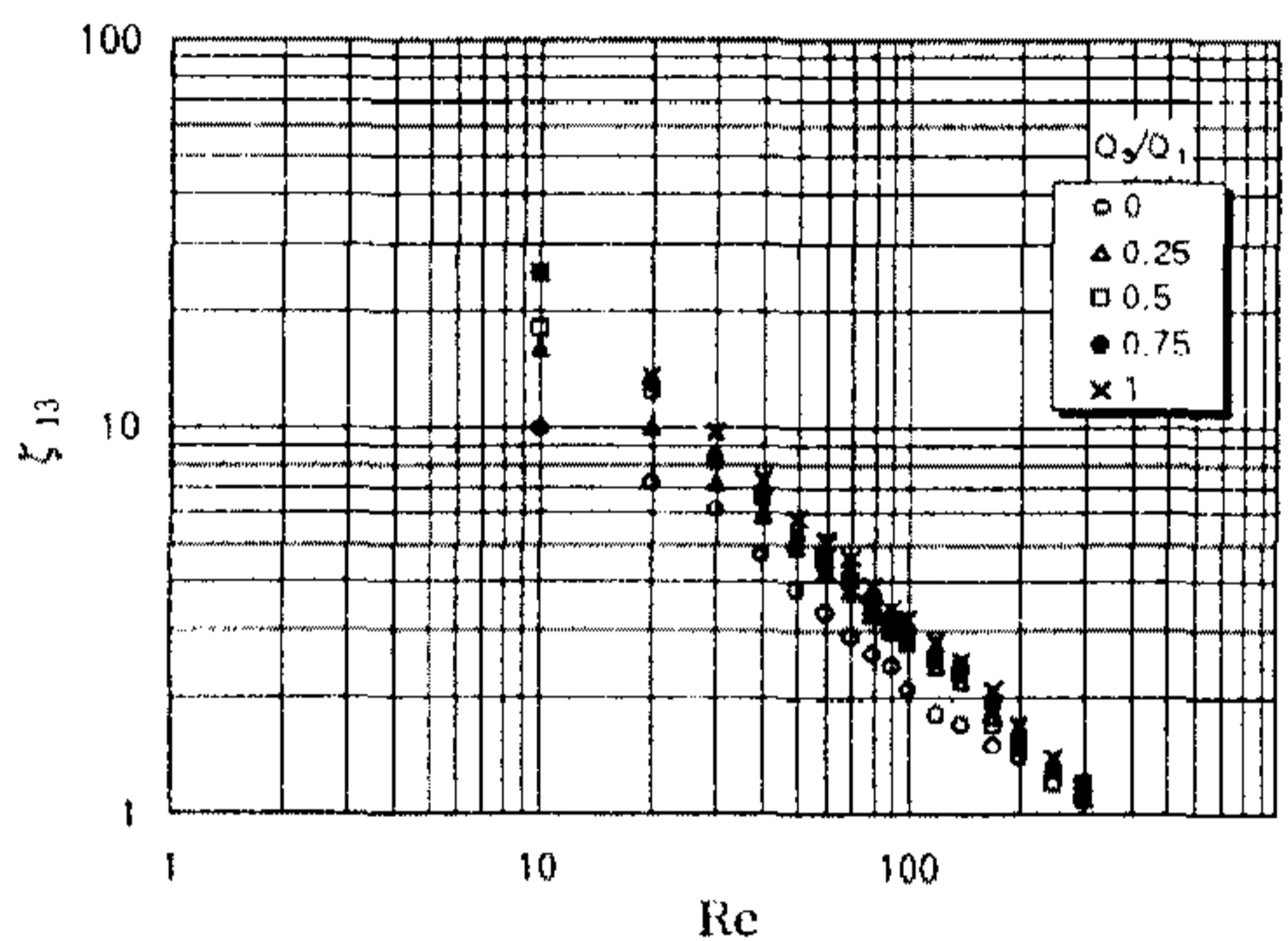


Fig.30 Loss coefficient of the lateral tube vs. Reynolds number of the non-Newtonian fluid in Y(45°) type

관에서와 마찬가지로 거의 직선적으로 감소하며, 레이놀즈 수가 150 이상이 되면 유량 분배비에 의한 차이가 점차 적어져서 레이놀즈 수 200 이상에서는 유량 분배비에 관계없이 손실 계수는 1.3으로 일정하였다.

Fig.30은 Fig.24와 같은 조건에서 단지, 실험 유체가 뉴턴 유체에서 비뉴턴 유체로 교체되었을 경우 유체의 분기 손실 계수 ξ_{13} 와 레이놀즈 수와의 관계를 대수 그래프로 나타낸 것이다.

손실 계수 ξ_{13} 은 T형과 마찬가지로 레이놀즈 수가 증가함에 따라 거의 직선적으로 감소함을 나타내고 있다. T형과 마찬가지로 레이놀즈 수가 200 이상부터 감소 경향이 적어지고, 손실 계수는 각각의 유량 분배비에 대해(1.4~1.6)으로 근접하며 레이놀즈 수 250 이상에서는 일정치 1.15에 근접

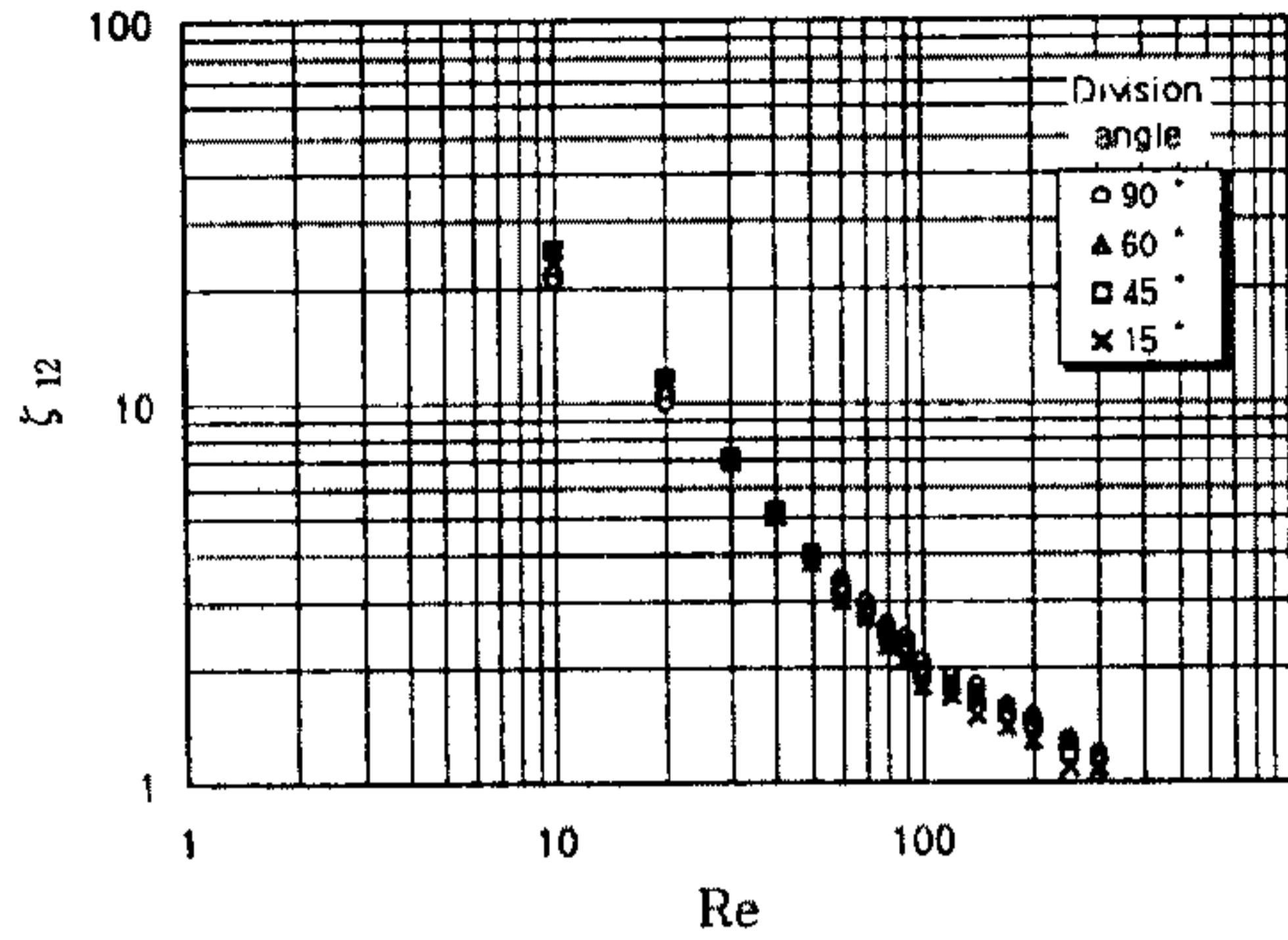


Fig.31 Loss coefficient vs. Reynolds number of the non-Newtonian fluid in main tube for various flowrate($Q_3/Q_1=0.75$)

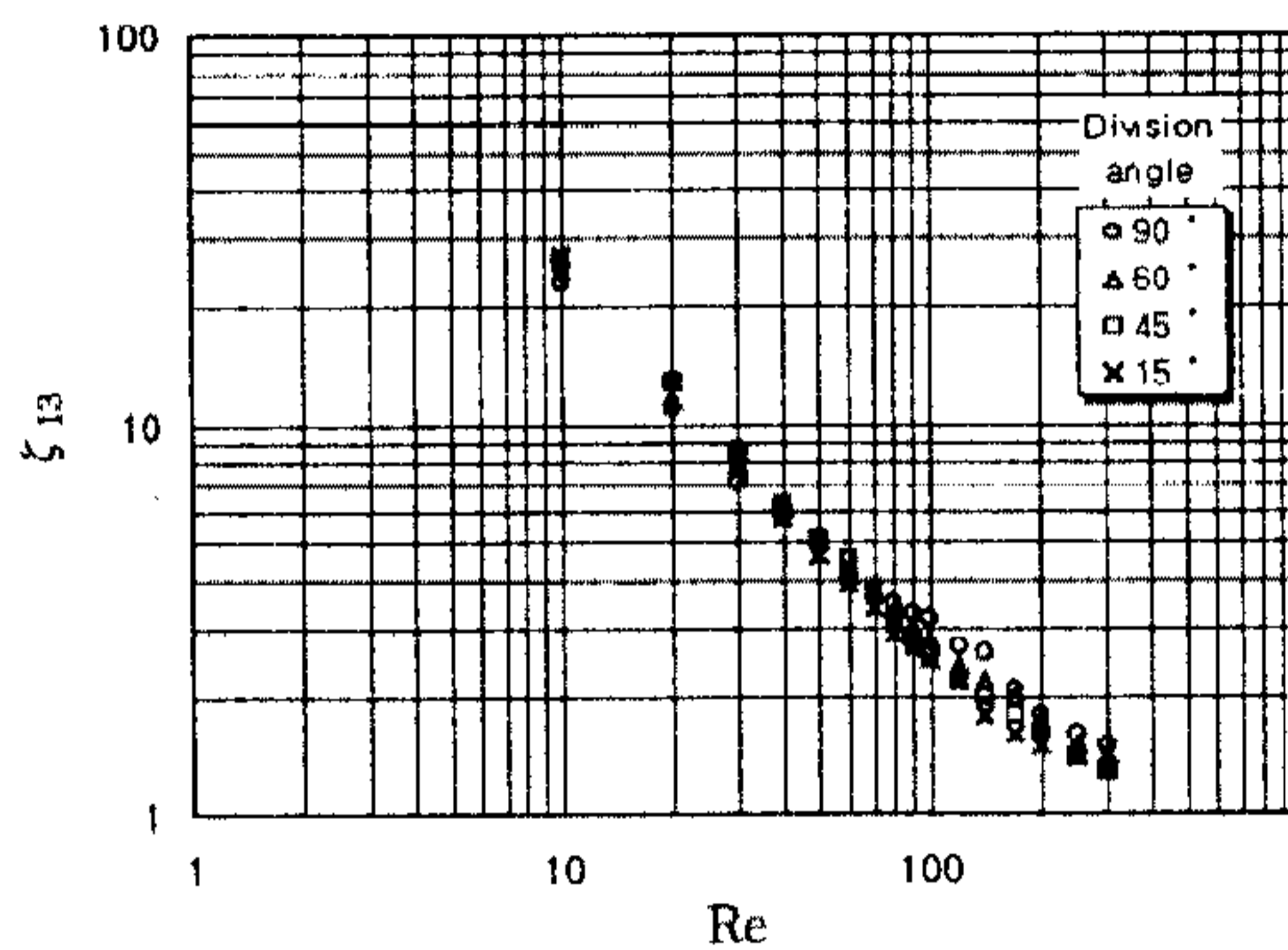


Fig.32 Loss coefficient vs. distribution of the flowrate of the non-Newtonian fluid in lateral tube($Q_3/Q_1=0.75$)

하였다. 이것은 가시화에서 나타낸 바와 같이 재부착이 없는 경우 지관에서의 유동이 확대됨을 나타내고, 손실 계수는 레이놀즈 수의 증가와 함께 감소하지만, 재부착이 생기고 유동이 축소 확대 되면 재부착은 레이놀즈 수의 증가와 함께 커지기 때문에 손실의 감소율은 작아지게 된다고 생각된다. 이것 역시 뉴턴 유체와 같은 현상이다.

결과적으로, T형에 대해서, 레이놀즈 수가 적은 영역에서는 유량 분배비가 클수록 즉, 지관을 유동하는 유량이 많을수록 손실 계수 ξ_{13} 은 커지며, 레이놀즈 수가 증가할수록 유량 분배비에 의한 차이가 점점 감소하여 일정한 값에 근접하는 경향을 나타낸다. 레이놀즈 수 10~150에서 Y형에서의 손실 계수는 T형에서와 같은 양상이지만, 더욱 레이놀즈 수가 증가하면 유량 분배비가 작을 수

록 손실 계수 ξ_{13} 값의 감소 폭이 작아지게 된다. 이런 이유는 Fig.13에서 설명한 바와 같이 T형에서는 재부착의 크기가 유량 분배비에 의해 영향을 많이 받지만, Y형에서는 재부착의 크기가 유량 분배비의 영향을 더 적게 받는 것과 같은 이유라 생각된다.

Fig.31은 시험부 단면적이 $10 \times 10\text{mm}$ 이고, 비뉴턴 유체의 유량 분배비가 0.75일 때 분기 각도의 크기에 따라 본관에서의 레이놀즈 수와 손실 계수의 크기의 관계를 대수 그래프로 나타낸 것이다.

레이놀즈 수의 증가와 함께 손실 계수는 각각의 분기각에 대해 거의 직선적으로 감소하는 경향이 있다. 또한, 레이놀즈 수가 50까지는 분기각 15° 일 때가 손실 계수가 가장 큰 값을 나타냈고, 레이놀즈 수 50이상부터 분기각 15° 일 때가 손실 계수가 가장 적은 값을 나타냈으며, 레이놀즈 수가 40일 때 분기각 15° , 45° , 60° 및 90° 에서의 각각의 손실 계수가 5.0, 5.2, 5.1 및 5.1인데 반해 레이놀즈 수 50일 때는 손실 계수는 3.8, 4.01, 4.0 및 4.0으로 나타났다.

Fig.32는 시험부 단면적이 $10 \times 10\text{mm}$ 이고, 비뉴턴 유체의 유량 분배비가 0.75일 때 분기 각도의 크기에 따라 지관에서의 레이놀즈 수와 손실 계수의 크기의 관계를 대수 그래프로 나타낸 것이다.

본관과 마찬가지로 레이놀즈 수가 증가하면 손실 계수는 감소함을 나타내고 있다. 레이놀즈 수가 20인 경우 분기 각도 15° , 45° , 60° 및 90° 에서의 손실 계수는 각각 12.7, 13, 11.5 및 11이고, 레이놀즈 수가 40인 경우에는 손실 계수가 각각 5.8, 6.2, 6.1 및 6.0으로 나타났다. 레이놀즈 수가 40 이상인 곳에서부터 분기각 15° 인 경우가 손실 계수가 가장 작게 나타나며, 레이놀즈 수 40 이하에서는 분기각 15° 인 경우가 손실 계수가 가장 크다. 이런 현상 역시 Fig.31의 본관과 같음을 알 수 있다.

따라서, Fig.31과 Fig.32의 본관과 지관에서의 손실 계수를 비교하여 보면 본관 및 지관에서 모두 분기 각도의 영향이 있으나, 그 차이는 현저하게 크지는 않았다. 또한 T형에서의 손실 계수의

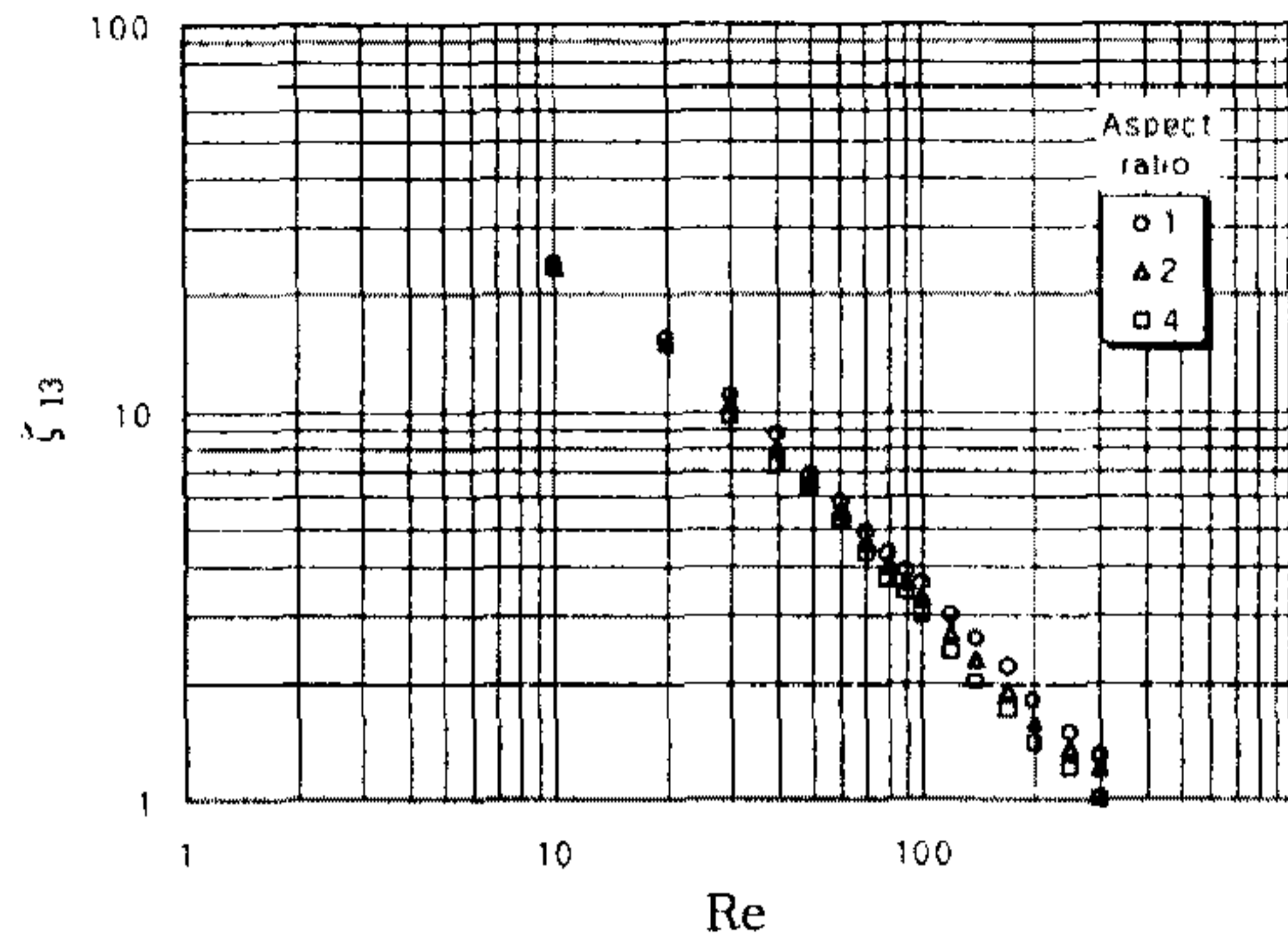


Fig.33 Loss coefficient of the lateral tube vs. Reynolds number of the non-Newtonian fluid in T(90°) type(Aspect ratio 1, 2, 4)

감소폭은 Y형에서 보다 크지만, 그 차이는 거의 없었다.

Fig.33은 실험 유체가 폴리머 500wppm 수용액이고, 유량 분배비 Q_3/Q_1 이 0.75일 때 T형의 지관에서 단면 종횡비가 1, 2, 4로 변함에 따라 레이놀즈 수와 손실 계수와의 관계를 나타낸 것이다.

단면 종횡비가 일정할 때 손실 계수는 레이놀즈 수의 증가에 따라 거의 직선적으로 감소하며, 레이놀즈 수의 증가에 따라 종횡비에 대한 영향이 조금 나타났다.

레이놀즈 수가 100이고, 단면 종횡비 1, 2 및 4일 때 손실 계수는 각각 3.6, 3.3 및 3.0으로 레이놀즈 수 10~30일 때에 비하여 각각의 손실 계수는 단면 종횡비에 따라 약간의 차이를 보이나, 그 차이는 그다지 크지 않음을 알 수 있고, 이는 단면 종횡비에 대한 영향을 가시화 사진인 Fig.20에서 나타난 바와 같이 거의 같은 양상임을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 비뉴턴 유체인 점탄성 유체를 사용하여 분기관류의 층류 영역에서 분기 유동 특성을 연구하는 것을 목적으로 하고 있다. 뉴턴 유체로 글리세린 수용액(43wt%)과 비뉴턴 유체로 점탄성 유체의 폴리머(500wppm)을 사용하여 2차원 분기관 유로의 정상 층류에서의 분기부의 유동 상태를 알아보기 위하여 레이놀즈 수, 분기 각도, 유량

분배비등이 손실 계수에 미치는 영향을 실험으로 구하고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 뉴턴 유체의 유량 분배비가 일정할 때 본관의 무차원 재부착 길이는 레이놀즈 수가 증가할수록 증가하며, 분기각의 영향은 그다지 크지 않다. 레이놀즈 수가 일정할 때 지관의 무차원 재부착 길이는 유량 분배비의 증가에 따라 T형에서는 일정하나, Y형에서는 감소하여 이 실험 결과는 Suu와 Seiji의 결과와 잘 일치한다.
- 2) 비뉴턴 유체의 무차원 재부착 폭은 유량 분배비가 증가하면 T형에서는 증가하다가 감소하고, Y형에서는 거의 직선적으로 감소한다.
- 3) 비뉴턴 유체의 무차원 유선 입구 길이는 레이놀즈 수의 증가에 따라 증가하는 반면, 무차원 유선 입구폭은 감소하여 Y형이 T형보다 큰 값을 갖는다.
- 4) 뉴턴 유체의 손실 계수는 레이놀즈 수 100을 기준으로 하여 100 이하에서 T형과 Y형의 값은 직선적으로 감소하고, 유량 분배비의 영향은 적으며, 100 이상에서는 유량 분배비에 따라 거의 일정한 값, 즉 본관에서는 0.3~1.3, 지관에서는 1.70~2.45의 수치에 접근한다. 그러나, 분기각의 영향은 레이놀즈 수 100 이하에서는 크지만, 100 이상에서는 매우 작아서 일정한 값, 즉 본관에서 약 0.9, 지관에서 약 1.8의 값을 갖는다.
- 5) 비뉴턴 유체의 손실 계수는 레이놀즈 수에 따라 뉴턴 유체와 같은 경향을 보이나 레이놀즈 수 기준이 뉴턴 유체의 100보다 큰 200~300이다. 레이놀즈 수 300 이상에서의 손실 계수는 유량 분배비, 분기 각도에 무관하게 약 1.03의 값이다.
- 6) 단면 종횡비는 뉴턴 유체와 비뉴턴 유체에서의 재부착 길이 및 손실 계수에 미치는 영향은 적고, 레이놀즈 수 증가에 따라서 그 값들은 감소하고 있으며, 비뉴턴 유체에서의 값이 뉴턴 유체에서의 값보다 작다.

후 기

본 논문은 1997년도 조선대학교 학술 연구비에

의해 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Banerjee, R. K., and Cho, Y. I., Effect of the Non-Newtonian Viscosity of Blood on Steady and Pulsatile Flow in Stenosed Arteries, *Biorheology*(in press).
2. Cho, Y. I., and Hartnett, J. P., Non-Newtonian Fluids in circular Pipe Flow, *Advances in Heat Transfer*, Academic Press, Vol. 15 pp. 59~141, 1982.
3. Shliomis, "Equation of motion of a fluid with hydro-magnetic properties", *Sov. Phys., TEPT*.
4. Steven, N. G., Sproston, J. L., and Stanway, R., "An experimental study of electro-rheological torque transmission", *ASME J. of Mechanism, Transmission and automation in design*, vol.
5. Gandhi, T. N., Thompson, B. S., and Choi, S. B., "A new generation of innovative ultra-advanced intelligent composite materials featuring electro-rheological fluids", *J. of composite materials*, vol.
6. Tanner, R. I., *Engineering Rheology*, Oxford, 5, 1995.
7. H. D. de Gennes, "Magnetic Resonance Spectroscopy of Biofluid A New Tool in clinical biology", *World Scientific*, vol.
8. Benken, J. E. W., Brown, B. H., and Skupinski, W., "Biomedical Engineering Program of the European Community", *J. Med. Eng. & Tech.* vol.
9. Rosensweig, R. E., Kaiser, R., and Miscosky, G. J., *coll Interface sci.*, vol.
10. Ito 外 2名, *日本機械學會論文集*, 44-387 B, 3909, 1978.
11. Ito 外 2名, *日本機械學會論文集*, 47-413 B, 214, 1984.
12. Ito 外 2名, *日本機械學會論文集*, 50-450 B, 342, 1984.
13. Suu, T., *Trans. SHASE*, 18, 85, 1982.
14. Karino, T., *Biorheology*, 16-35, 231, 1979.
15. Yamakuchi 外 2名, *日本機械學會論文集*, 57-539, B, 2203, 1991.
16. Jamison, K. D., and Villemonte, J. R., *Hydrul, Div., Pro. ASME, HY7*, 1045, 1971.
17. Nishimura 外 2名, *纖維機誌*, 37, 37-2, 1984.
18. Seiji GoTo, 外 2名, *日本機械學會論文集*, 60-573B, pp. 1605~1611, 1994.
19. Ito 外, 1名, 直角分岐・合流管のエネルギー損失の完全特性, *東北大學速研報告*, 34-335, pp. 163~203, 1974.
20. Denn, M. M., *Chem. Eng. Sci. Vol. 22*, 869, 1967.
21. Satoh, Kamiyama, "Rheological properties of magnetic fluids composed of cluster", *日本機械學會論文集*, vol.
22. 全雲鶴, 李行男, "An Experimental Study on the Reattachment of Non-Newtonian Fluid Flows in a Sudden Expansion Pipe", *韓國自動車工學會誌*, 제15권 제1호 1993.
23. Weissenberg, K., A continuum theory of rheological phenomena, *Nature* 159, pp. 310~311, 1947.
24. Higashitani, K., and Pritchard, W. G., *Trans. Soc. Rheology*, 16-4, 687, 1972.
25. 河鉦男, 全雲鶴, 李行男, "A study on the flow characteristics of Non-Newtonian fluid flows in dividing tubes", *韓國海洋工學會誌*.