

돌연 확대관에서 비뉴우튼 유체의 재접착 실험

An Experimental Study on the Reattachment of Non-Newtonian Fluid Flows in a Sudden Expansion Pipe

전 운 학*, 이 행 남**
U. H. Chun, H. N. Lee

ABSTRACT

The reattachment lengths of the Non-Newtonian fluid are investigated in the sudden expansion pipes whose ratios are 2.316 and 3.368, and the range of the Reynolds numbers is 100~30000. The reattachment lengths for the viscoelastic fluid in the laminar flow region are found to be much shorter than those of the Newtonian fluid, and decrease significantly with the increase of the concentration of viscoelastic fluid at the same Reynolds number. In the turbulent flow region, the reattachment length for the viscoelastic fluid is two or three times longer than those of water, and gradually increases with the increase of the concentration of viscoelastic fluid.

주요기술용어 : Reattachment length(재접착길이), Non-newtonian fluid(비뉴튼 유체), Concentration of viscoelastic fluid(점탄성 유체의 농도), Reynolds number(레이놀즈수), Visualization of flow(유동의 가시화), Expansion ratio(확대비)

1. 서 론

덕트와 돌연 확대관에서의 유동은 복잡한 난류유동과 박리 및 재접착이 나타나므로 매우 관심있는 연구중 하나이며, 종래의 대부분 연구들은 공기, 물과 같은 뉴우튼 유체 등으로 실험이 되어졌지만, 최근에는 이상유체와 뉴우튼 유체 응용에 대한 제한 때문에 화학, 제조, 식품, 생물, 의학 분야에서 이용되고 있는 실제 유체에 관한 연구가 점점 늘어나고 있다. 이에 따라 확대관과 덕트를 통한 비뉴우튼유체의 거동에 관한 연구

가 많이 진행되고 있다. 층류영역에서의 점성 비뉴우튼 유체의 거동은 Iribarne⁷⁾ 등에 의해 수행되었지만, 큰 레이놀즈수와 난류 영역에서의 연구는 드물다. 점탄성 유체에 관한 연구에서도 층류 영역에서만 행해졌다. 이들 종래의 연구에서는 층류 영역에서만의 실험이 이루어져 천이 영역과 난류영역에서의 유체의 특성을 관찰하지는 못했다. 뉴우튼 유체에 대한 연구로는 후면 유동의 현상을 더 잘 이해하기 위한 시도로 많은 연구^{3~7)}가 다양한 기술로서 가시화 실험이 실행 되어졌다. Macagno와 Hung⁶⁾, Iribarne 등⁷⁾은 각

* 정회원, 국민대학교 기계공학과

** 정회원, 조선대학교 조선공학과

각 확대관에서의 층류유동 현상에 대한 해석적 연구와 실험적 연구를 시행했다. 후자는 발산 주기가 레이놀즈수의 평방근에 비례한다는 것을 알아냈다. Macagno와 Hung⁶⁾, Iribarne 등⁷⁾은 각각 확대관에서의 층류유동 현상에 대한 해석적 연구와 실험적 연구를 시행했다. 후자는 발산 주기가 레이놀즈수의 평방근에 비례한다는 것을 알아냈다. Macagno와 Hung⁶⁾은 미네럴 오일에 현탁 알루미늄 가루를 사용하여 유선을 사진으로 관찰 기록했다. Iribarne⁷⁾는 외란없는 유동의 가시화 연구를 하였고 자외선을 이용한 발광, 발색성 염료를 사용하여 유선의 자취를 나타나게 하였다. 이들이 사용한 용매는 에칠알콜과 등유이다. Goldstein⁸⁾과 Sinha⁹⁾등은 공기의 사용으로 스모크 유동을 가시화 하여 재접착 길이를 찾아냈다. 염료분사 기술은 Reiman과 Sabersky¹⁰⁾가 시도한 직사각형관에 관한 유동 연구, Back와 Roschks¹⁵⁾에 의해 연구된 돌연 원형 확대관 유동 연구에서 나타나 있다.

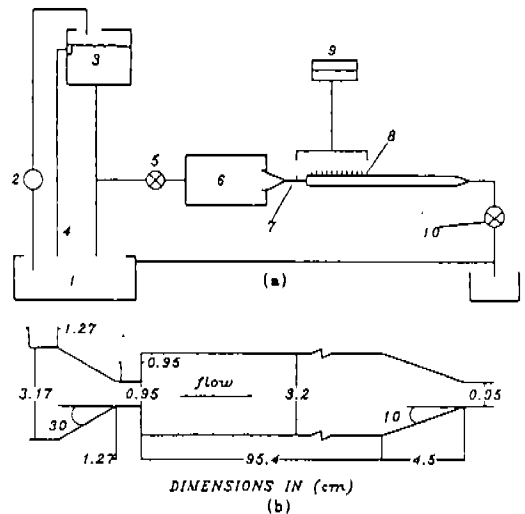
비뉴우튼 유체 유동에 관한 연구^{10~11)}가 많이 행해졌으며 비교적 낮은 영역의 레이놀즈수에서 실험되었다. Halmos¹⁾등은 지수법칙유체(즉, 탄성이 없는 점성 유체)에 대해 n (Flow behavior index)이 일정할 때, 레이놀즈수가 증가함에 따라 재접착 길이는 증가함을 알았다. 또한 재접착에서의 팽창비 영향은 팽창비의 증가에 따라 재접착 길이가 증가함을 알았다. Perera와 Walters²⁾는 탄성이 확대관에서 와류의 영향을 줄이는 것에 관한 연구를 수치적으로 계산하였다. 또한 확대관에서 탄성의 영향을 증명하기 위하여, 비탄성 유체 유동은 큰 와류가 생기는 반면 이상 유동 조건하에서 탄성유체 유동의 와류는 거의 사라짐을 알아냈다. 최근에는 층류와 난류영역을 포함한 광범위한 레이놀즈수에서 원형 확대관에서의 비뉴우튼 유체의 특성을 가시화하는 연구가 시도되고 있다. 따라서 본 논문에서는 팽창비가 2.316와 3.368인 돌연 확대관을 제작하고 레이놀즈 수 100~30000인 확대관 유동에서 재접착 길이, 전단층의 성장, 팽창비에 관한 영향과 비뉴우튼 유체의 농도에 따른 영향을 관찰하여 돌연 확대관에서의 비뉴우튼 유체 유동의 특성

을 가시화 하였다.

2. 실 험

2.1 실험장치

실험장치는 250×50×40cm의 저장탱크, 원심 펌프, 제어실(Calming Chamber), 수축단면, 짧은 입구단면, 직경 0.95cm인 출구관과 연결된 수축 출구노즐, 300×80×80cm의 저장탱크로 구성되어 있으며 Fig.1(a)에 나타나 있다. 재접착 길이는 팽창비에 어떠한 영향을 미치는가를 실험하기 위하여 팽창비가 2.316과 3.368인 다른 직경의 확대관을 제작하였다. 확대관은 내경 2.20cm와 3.20cm로 되어있고, 박리 유동영역에서 후류와 전단층 성장을 관찰하기 위하여 입구 단면 위와 아래(팽창관에서 입구직경만큼 떨어진 곳)에 2개의 작은 구멍을 뚫었다. Fig.1(b)에 팽창비 3.368일 때의 상세한 치수를 나타내었다. 팽창 단



1: Reservoir tank 2: Pump 3: Working fluid
4: Over flow drainage 5: Valve 6: Calming chamber
7: Converging entry section 8: 51 Dye injection hole
9: Dye 10: Flow rate control valve

Fig.1 (a) Schematic diagram of experimental apparatus

(b) Enlarged view of the main test section for flow visualization experiment. Expansion ratio 3.368

면입구에서 유동은 수축단면과 짧은 입구 길이 때문에 거의 균일한 유동이 된다.

총 49개의 염료 분사구멍을 팽창단면에서부터 2~50까지의 숫자를 표시하여 $h(D-d/2)$ 만큼의 간격으로 구멍을 뚫었다. 바늘(내경 0.8mm)을 내경 0.85mm인 분사구멍에 넣고, 에폭시로 실험관 바깥쪽에서 붙였다. 구멍을 뚫을 때 생긴 잔재를 유동에 미치는 영향을 줄이기 위하여 제거했다. 유동의 관찰을 쉽게 하기 위하여 매 2번째 측정점마다 얇은 보조원을 그렸다. 제어실에서 출구관까지의 실험단면은 매우 작은 레이놀즈수에서의 유동에서, 외부조건에 매우 민

감하고 불안정한 유동이 생기기 때문에 수평으로 일직선이 되게 고정시켰다.

2.2 실험 방법과 실험 유체

실험하는 동안 온도의 변화는 1°C보다 작게 유지했으며, 질량 유량은 주어진 시간동안 흐르는 물의 양을 측정하여 계산한다. 실험 조건과 변수 조건들의 범위를 Table 1에 나타냈다.

뉴우톤 유체로는 물을 사용했고, 점탄성 유체로는 200, 500, 1000ppm의 polymer를 사용했다. 점탄성 유체의 점성은 점성계(FNV 200)를 사용하여 측정했다. 실험대보다 1.00m위에 있는 저장 탱크의 실험 유체의 수면을 일정하게 유지하여 레이놀즈수 계산의 불확실성을 없앴다. 점탄성 유체 물성용액은 250×50×40cm의 저장 탱크로 직접 들어가고, 기계적 손실을 막기 위해 플라스틱 봉으로 잘 저어준다. 점탄성 유체의 점도가 각각의 실험이 이루어지는 동안에 변하지 않게 하기 위해 저장 탱크의 수위를 일정하게 유지하도록 장치했다. 또한 저장 탱크의 단면적은 실험 오차를 최소화 하기 위해 크게 만들었다.

실험 유체에 흰색 아크릴 물감을 사용하여 염료로 사용하였다. 이때 생기는 비중차이를 염료에 알콜을 첨가하여 보정하였으며, 비중계를 사용하여 실험 유체와의 비중을 맞추었다. 팽창관에서의 전단층은 입구 노즐에서의 구멍에서 분사된 염료의 운동으로 관찰하고 염료의 운동은 초당 5장의 사진을 찍을 수 있는 driving motor를 부착한 Nikon FM-2 카메라를 사용하였다. 셔터 속도는 0.008초이고, ASA 400 Tri-X 필름을 사용하였다.

재접착을 정의하기 위하여 염료를 얇은 구멍에서 분사시키며, 위치를 바꾸어 나간다. 그 다음

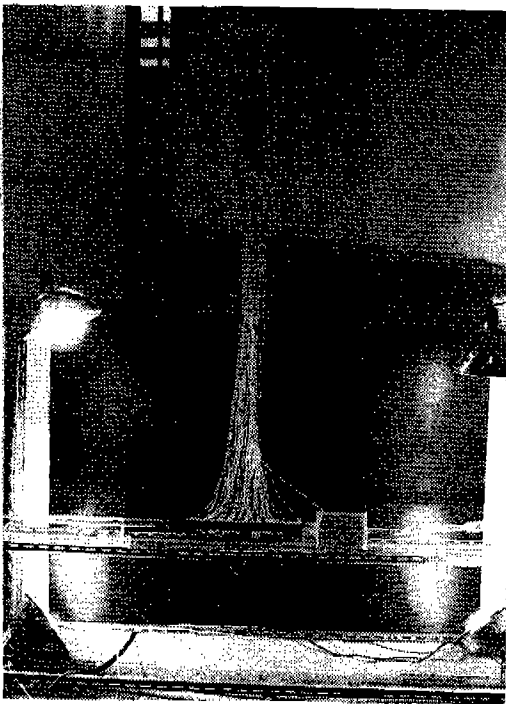


Fig.2 Photo of the experimental apparatus.

Table 1. Experimental conditions of flow visualization tests

Test fluid	Concentration	Reange of Reynolds number ^a
(1) Newtonian fluid, water	—	Re=100-30000
(2) Viscoelastic non-Newtonian fluids.	200, 500 and 1000ppm	Rea=100-30000

Test conditions, isothermal flow condition(19~20°C) and uniform inlet

Profile : Expansion ratios(D/d), 2.316 and 3.368.

^a Note : The Reynolds number was calculated based on the upstream diameter, d.

구멍에서 분사된 염료의 운동 방향을 주의 깊게 관찰하여, 만약 어떤 두개의 구멍에서 염료의 움직임이 반대 방향으로 된다면, 그 두개 구멍의 중간 위치가 재접착 길이가 되는 것으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

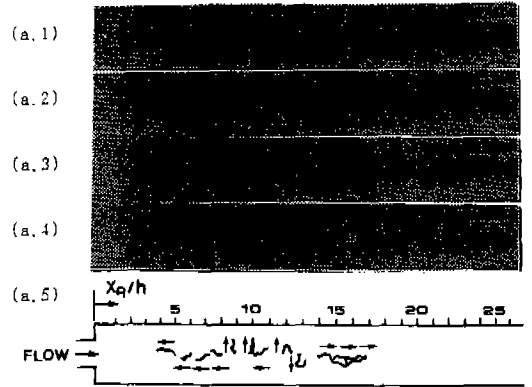
3.1 재접착 길이

층류 유동하에서 재접착은 염료의 운동으로 쉽게 정의할 수 있다. 그러나 난류에서 유량의 증가에 따라 재접착 근처에서 불안정한 유동이 나타나고 앞 뒤로 흔들린다. 재접착을 정의하는데 이용된 방법이 Fig.3에 나타나 있다. 이 그림에서의 결과는 Re 수가 4012일 때 물의 유동에 관한 것이다. Fig.3(a)는 5에서 16번째 측정점까지의 구멍에서 3개씩 동시에 분사된 염료($t=0.0$ 초)의 초기 운동을 나타내고, Fig.3(b)는 1초 후($t=1.0$ 초) 염료의 운동을 나타낸다.

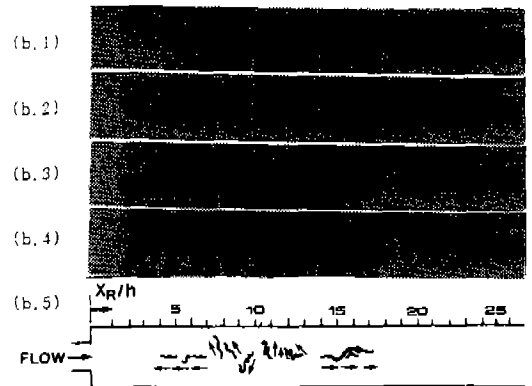
모든 구멍에서 나오는 염료의 운동은 각 부분 아래(Fig.3(a.5)와 Fig.3(b.5))에 걸쳐서 도면으로 나타냈다. 이 2개의 그림에서 나타난 것 같이 7번째 측정점에서 분사된 염료는 상류 방향으로 움직인다. 반면 14에서 16번째 측정점에서 분사된 염료는 하류 방향으로 움직인다. 중간 영역에서 염료의 움직임은(Fig.3(a.5)와 Fig.3(b.5)에서 위와 아래로 나타난 것 같이) 원주 방향으로 마구 흔들린다. 따라서 이 경우($Re=4012$ 일 때 물의 경우) 재접착 길이는 14와 7의 중간 값인 10번째 측정점으로 정의한다.

3.2 뉴우튼 유체의 실험결과

팽창비 $D/d=3.368$ 인 팽창관에서 무차원 재접착 길이(XR/h)는 레이놀즈수 Re_d 의 함수로 나타나고, Fig.4에서 참고문헌⁶⁻⁷⁾의 값들과 비교하여 나타났다. Table 2는 본 실험과 이전 연구와의 비교를 위해 팽창관 치수와 결과를 간단히 나타낸 것이다. 본 연구의 재접착 길이(Fig.4 참조)는 층류와 난류영역에서 이전 실험과 거의 일치한다. Iribarne et al.⁷⁾, Back과 Roschke¹⁵⁾의 연구에서 최대 무차원 재접착 길이는 25~28번째 측정점이 되고, Feuerstein et al.¹⁶⁾의 연구에서는



(a) $Re=4,012, D/d=3.368, \text{ water, } f125/16$



(b) One second later after Fig.(a)

Fig.3 Qualitative description in the determination of reattachment lengths. Note that f125/16 indicates camera setting.

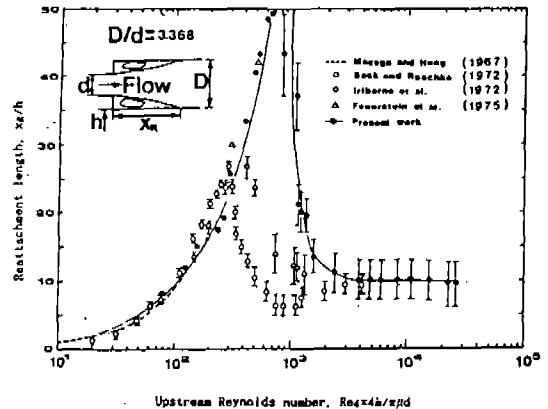


Fig.4 Reattachment length in a sudden expansion pipe flow with a Newtonian fluid ($D/d=3.368, \text{ water}$).

Table 2. Geomertrics and results of prior and current investigations in the flow visulizatin study with Newtonian fluids

Investigator	Geometry		Test fluid	Inlet flow condition	$(X_r/h)_{max}$ at Re	Range of the Reynolds number
	h/d	h/D				
Maccagno and Hung ⁶⁾	0.5	0.25	Oil	Parabolic		1-200
Back and Roschke ¹⁶⁾	0.8	0.385	Water	Uniform	25 at Re=250	20-4200
Iribarne et al. ⁷⁾	0.49	0.505	Water	Uniform	27 at Re=350	90-1355
Feuerstein et al. ¹⁷⁾	0.294	0.185	Liquid	Parabolic	113 at Re=1090	222-755
Bockchoon Pak et al. ¹²⁾	0.500	0.250	Water	Uniform	Both are >50	30-20000
	0.833	0.313	Water	Uniform	at Re=700	
Current study	0.658	0.284	Water	Uniform	Both are >50	100-20000
	1.184	0.352	Water	Uniform	at Re=680	100-30000

Re=1090일 때 113번째 측정점이 되고, Reschke와 Back¹⁷⁾은 유입조건에 따라 재접착 길이는 차이가 있다고 하였다. 또한 전자^{7,15)}의 유입속도분포는 균일하고 후자¹⁶⁾는 포물선형태의 속도분포로 실험했다. 본 유동 실험결과는 Fig.1(b)에서 나타난 것 같이 노즐과 짧은 유입관을 이용하여 균일한 속도분포로 실험했다.

레이놀즈수 660이하에서 전단층은 실험대 또는 유입에서의 작은 진동과 같은 외부작용에 매우 민감하게 작용한다. 실험하는 동안 외부에서의 작용이 실험계에 작용하면 염료의 움직임은 빠르게 아래로 떨어진다. 그러므로 최대 재접착 길이는 다른 어떤 인자들 보다도 유입조건에 가장 민감하게 작용한다.

재접착 길이에서 팽창비에 따른 영향을 위해 다른 팽창비 $D/d=2.316$ 과 3.368 에서 실험한 결과는 Fig.5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 실험의 전구간에서 팽창비 변화에 따른 재접착 길이는 별차이가 없었고 그 이유는 농도가 무관한 뉴튼유체이기 때문으로 생각된다. 정지한 유체와 일정속도 u 로 흐르는 유동이 혼합되는 영역의 속도분포는 상사변수에 의존한다.³⁾ 이 경우 b (전단층 두께의 $1/2$)는 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{b}{x} \left| \frac{ux}{v} \right|^{1/2} = C \quad (1)$$

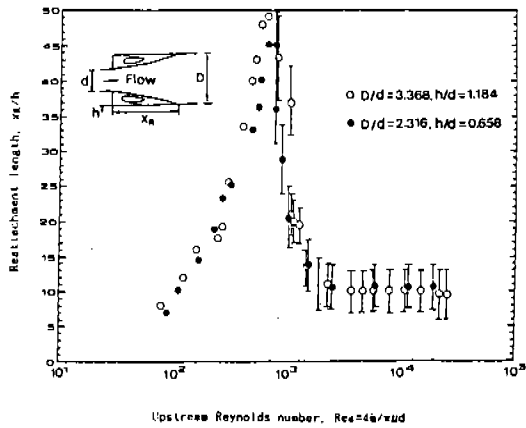


Fig.5 The effect of an expansion ratio(D/d) on reattachment length(water).

여기서 C 는 상수, x 는 하류 거리, v 는 동점성 계수이다. 이 식은 재접착 길이 $X=XR$ 에서 b 는 첫번째 측정점 h 와 같게 되므로 레이놀즈수에 대한 재접착 길이와의 관계를 나타내는데 사용할 수 있다. 이것을 식으로 나타내면,

$$\frac{XR}{h} = \frac{1}{C^2} \left| \frac{uh}{v} \right| \left| \frac{1}{C^2} \right| \left| \frac{h}{d} \right| \left| \frac{uh}{v} \right| \quad (2)$$

이 된다. 이 혼합이론은 h 와 레이놀즈수의 항으로서 재접착의 선형적 변화를 나타내며, 형태요

소 h/d 는 돌연 팽창 형태로 의존한다. 본 실험에서 층류의 재접착 길이는 Fig.4에서와 같이 Re_d 의 증가에 따른 거의 선형적으로 증가한다. 그러나 난류영역에서는 큰 변동없이 일정한 값을 갖는다. 한편 뉴우튼 유체에서의 팽창비에 대한 영향은 거의 없다.

3.3 점탄성 비뉴우튼 유체의 실험결과

Fig.6은 점도계로 측정된 점탄성 유체의 점성값을 나타낸 것이다.

$D/d=3.368$ 일 때의 점탄성 유체의 무차원 재

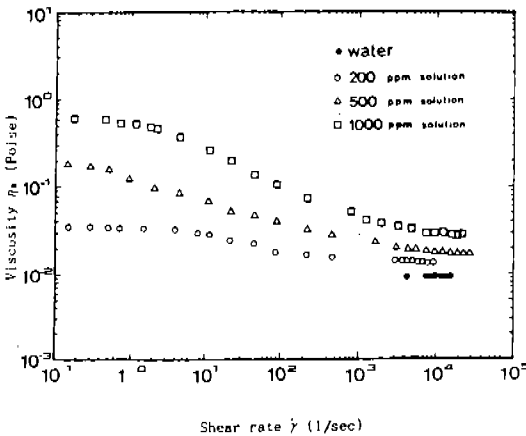


Fig.6 Apparent viscosity vs. shear rate for viscoelastic fluid.

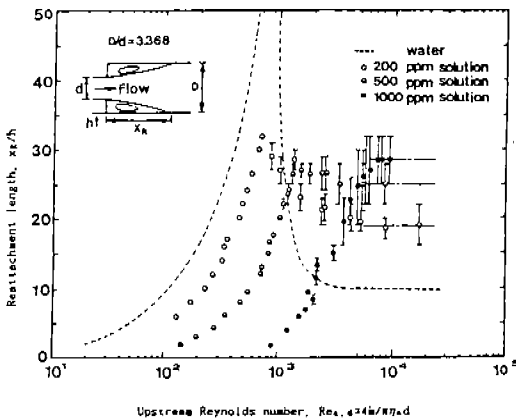


Fig.7 Reattachment length in a sudden expansion pipe flow with viscoelastic flow with viscoelastic fluid($D/d=3.368$).

접착 길이 xR/h 는 Fig.7에 나타나 있다. 짧은 입구 관길이에 의해 상류관에서의 경계층 두께는 매우 얇게 된다. 따라서 돌연 확대관에서의 높은 전단율이 나타난다. 그러므로 무한 전단을 점성이라 불리는 높은 전단율에서의 점성값은 레이놀즈수 Re_d 의 계산에 사용된다.¹⁴⁾ 점탄성 유체의 재접착 길이는 Fig.7과 같이 물의 길이와 차이가 있다. 200ppm에서 재접착 길이는 $Re_{a,b}=690$ 일 때까지 계속 증가한다. 레이놀즈수가 더 증가하면 재접착 길이는 감소한다. 결국 $Re_{a,b}>5000$ 에서 18번째 측정점이 된다. 500ppm과 1000ppm에서의 재접착 길이는 200ppm에서 관찰된 것과 유사한 경향을 갖는다. 층류영역에서 재접착 길이는 점탄성 유체의 탄성이 증가함에 따라 감소한다. 이것은 Perera와 Walters²⁾에 의해 관찰되었고 이들은 탄성이 돌연 팽창관에서의 와류를 줄이는 것이 수치적으로 계산된 결과와 일치한다.

난류지역에서 500ppm과 1000ppm에서의 재접착 길이는 각각 Fig.7에서와 같이 25와 28번째 측정점이 되며, 이것은 뉴우튼유체의 결과(10번째 측정점)보다 훨씬 크다. 또 이 결과로 난류영역에서 탄성이 증가하면 재접착 길이가 증가한다는 것을 알았다.

Fig.8은 200ppm과 1000ppm에서 팽창비의 영향을 나타낸 것이다. 같은 유동조건에서 팽창비

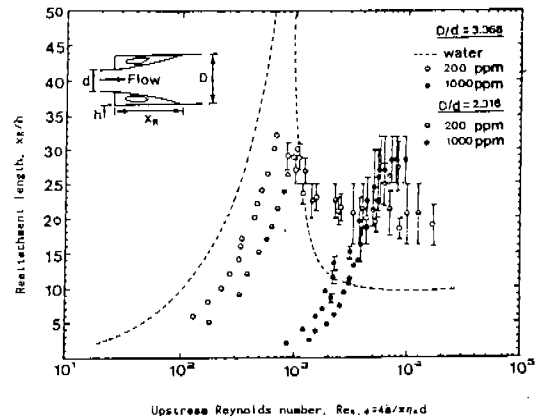


Fig.8 The effect of expansion ratio(D/d) on reattachment lengths (viscoelastic fluid).

가 2.316에서 3.368로 증가하면 재접착 길이는 200ppm과 1000ppm에서 각각 65%와 50% 증가한다. 이 그림은 같은 레이놀즈수에서 팽창비의 증가에 따라 점탄성유체에 대한 재접착 길이는 증가함을 자세히 나타내고 있다. 이것은 식 (1)의 결과와 일치한다.

3.4 전단층의 성장과 불안정

팽창관에서의 물과 점탄성 유체의 전단층을 관찰하기 위해 상류 노즐에서 천천히 염료를 분사시키고 염료의 운동을 사진으로 찍었다. 염료의 거동 관찰시 동심원 상에서 분사되어야 하고 위와 아래의 밀도차의 영향을 고려하여 실험 관찰해야 한다.

뉴우튼유체의 경우 층류영역에서의 염료의 거동은 물론 염료의 밀도차 때문에 대칭성이 아니다. 입구 단면 아래에서 분사된 염료의 운동은 확대관위에서 분사된 염료의 거동으로 관찰된 재접착 길이(XR/h)보다 짧게 된다.

그러나 점탄성 유체에서의 염료의 운동은 Fig. 9와 같이 대칭성이 나타난다. 재접착 길이는 팽창관에서 유입된 염료의 운동과 일치한다. 따라서 점탄성유체에서 재접착 길이는 밀도차의 영향이 거의 무시할 만큼 적다.

Fig.10은 물에 관한 전단층에서의 염료의 거동을 나타낸다. 일반적으로 레이놀즈 수가 증가함에 따라 전단층은 Fig.10(C)와 같이 변하고 더 증가하면 마구 흔들리는 유동(Fig.10(d, e))이 된다. 레이놀즈 수가 700가까이에서 안정한 전단층이 a, b와 같이 관찰된다. 이번 실험에서의 역류는 레이놀즈수가 660일 때(x/h=50) 관찰되었다. 따라서 이번 실험장치의 제한 때문에 x/h=50을 넘는 범위에서는 재접착길이를 관찰할 수 없었다. 그러나 작은 파동이 레이놀즈 수 700 부근에서 관찰되기 시작했다. 이것은 난류 유동 영역의 시작을 의미한다.

전단층 파동과 유동의 불안정은 재접착 길이의 정의에 중요한 역할을 한다. 관성력이 점성력에 비해 증가함에 따라 이들 파동은 하류에 유동을 전하며, 진폭이 성장하기 시작한다. Fig. 10(C)는 레이놀즈 수 998에서 전단층 파동의

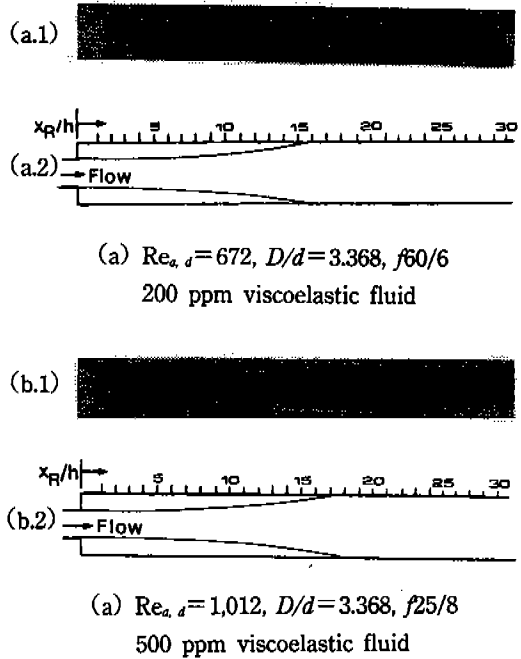


Fig.9 Symmetric dye motion in a sudden expansion pipe with viscoelastic fluid(D/d=3.368, 200 and 500ppm.).

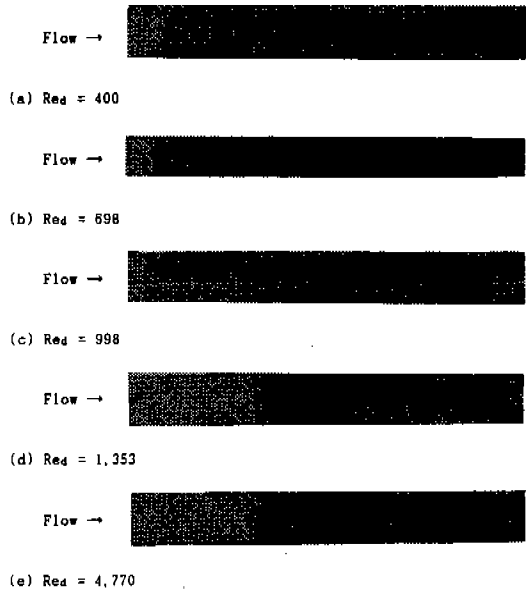


Fig.10 Flow instability and shear layer growth in a sudden expansion pipe flow with water(D/d=3.368, f60/8)

성장을 나타낸다. 레이놀즈 수 700~1200인 천이구역에서 재접착 길이는 층류전단층의 성장에 의해 정의될 수 없고 분자확산에 의존한다. 천이영역에서 전단층의 폭은 레이놀즈 수의 증가에 따라 커진다. 따라서 재접착 길이는 Fig.4에 나타난 것 같이 레이놀즈 수의 증가에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 레이놀즈 수가 698~1353사이에서 물의 무차원 재접착 길이는 47에서 12까지의 측정점으로 감소한다. 레이놀즈 수가 약 1200이나 그 위에서는 유동이 불안정하여 측면으로 전달하기 때문에 전단층은 빠르게 측면 방향으로 퍼진다. 이 영역에서는 염료의 거동은 독특한 파동이 사라지기 시작하고, Fig.10(C)와 10(d)에서 나타나는 것 같이 무작위한 움직임의 소용돌이가 형성되기 시작한다. 따라서 약 10번째 측정점의 무차원 재접착 길이로 짧아지는 결과가 된다.

Fig.11, 12, 13은 각각 점탄성 유체의 100, 500, 1000ppm에서의 전단층의 성장과 불안정성을 나타낸다. 점탄성 유체의 유동도 물의 실험과 유사하게 관찰된다. 그러나, 이들 그림에서 점탄성 유체에 관한 재접착 길이는 층류지역에서(즉 Fig.11(a), 12(a), 13(a) 비교) 점탄성 유체의 농도의 증가에 따라 감소함을 알 수 있다. 예를 들어 Fig.7, 8에서 보는 것과 같이 레이놀즈수가 1100일 때 100ppm 점탄성 유체의 재접착 길이는 6번째 측정점이 되고 500ppm일 때 재접착 길이는 약 20번째 측정점이 된다. 그러나 난류지역에서 염료는 물의 실험에서 관찰된 것과 같이 너무 빨리 확산되어 알 수 없다. 이것은 점탄성 유체의 탄성이 소용돌이를 억제한다는 사실 때문이고, 이 결과로 물의 실험에서 재접착 길이가 10번째 측정점에서 점탄성 유체 1000ppm에서 28번째 측정점으로 증가한다.

물의 경우, 염료의 거동은 빠르게 떨리기 시작하여 불안정한 흐름이 나타나고, 그 결과로 재접착 길이는 감소한다. 그러나 점탄성 유체 유동의 경우 이러한 염료의 불안정은 관찰되지 않고, 재접착 길이는 레이놀즈 수의 증가(즉 500, 1000ppm 점탄성 유체에 대한 Fig.7, 8에서 난류 유동)에 따라 계속적으로 증가함을 알았다. 500,

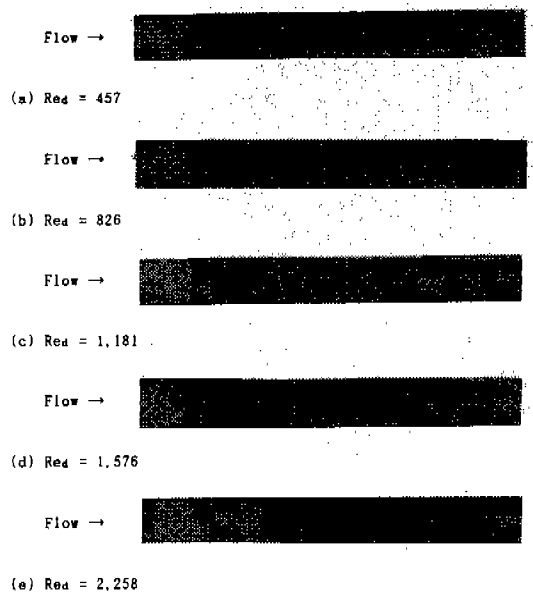


Fig.11 Flow instability and shear layer growth in a sudden expansion pipe flow with a 200ppm viscoelastic fluid($D/d=3.368, f60/8$)

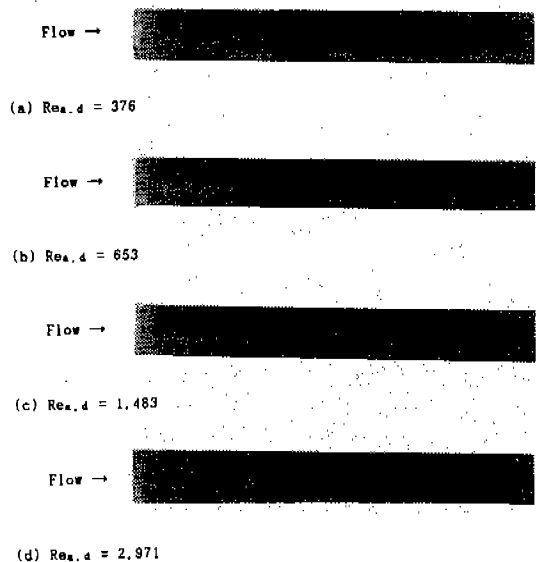


Fig.12 Flow instability and shear layer growth in a sudden expansion pipe flow with a 500ppm viscoelastic fluid($D/d=3.368, f25/8$)

후 기

본 연구는 국민대학교 연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. A.L Halmos, D.V. Boger & A.Cabelli, "The behavior of a power-law fluid flowing through a sudden expansion, Part 1 : numerical solution.", *AIChE J*, 21, 540-549, 1975. Part 2 : experimental verification, *AIChE J*, 21, 550-553, 1975.
2. M.G.N. Perera & K. Walters, "Long range memory effects in flows involving abrupt changes in geometry, Part 2 : the expansion/contraction/expansion problem", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 2, 191-204, 1977
3. D.E. Abbot & S.J. Kline, "Experimental investigation of subsonic turbulent flow over single and double facing steps", *J. Basic Eng.*, 84, 317-325, 1962.
4. E.G. Filletti & W.M. Kays, "Heat transfer in separated, reattached and redevelopment region behind a double step entrance to a flat duct", *J. Heat Transfer*, 89, 163-167, 1967.
5. N. Seki, S. Fukusako & T. Hirata, "Turbulent fluctuations and heat transfer for separated flow Associated with a double step at entrance to an enlarged flat duct", *J. Heat Transfer*, 98, 588-593, 1976.
6. E.O. Macagno and T.K.Hung, "Computation and experimental study of a captive annular eddy", *J. Fluid Mech.*, 28, 43, 1966.
7. A.Iribarne, F. Frantisak, R. Hummel & J. Smith, "An experimental study of instabilities and other flow properties of a laminar pipe jets", *AIChE J.*, 18, 689-698, 1972.
8. R.J. Goldstein, V.L. Eriksen, R.M. Olson & E.R.G. Eckert, "Laminar separation, reattachment and transition of the flow over a downs-

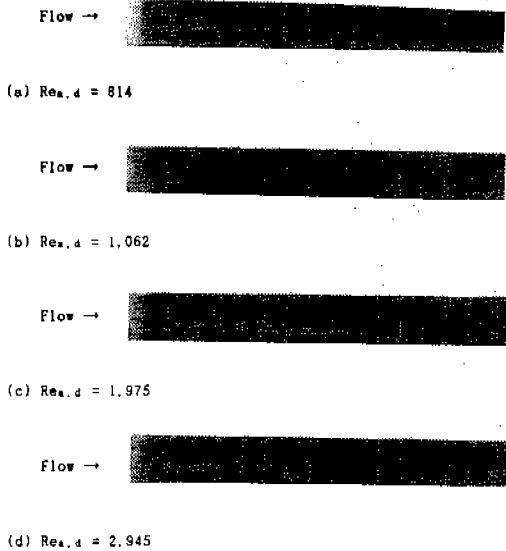


Fig.13 Flow instability and shear layer growth in a sudden expansion pipe flow with a 1000ppm viscoelastic fluid($D/d=3.368$, $f_{25/8}$)

1000ppm 점탄성 유체 유동의 불안정은 레이놀즈 수가 각각 1020과 1100일 때 나타난다.

4. 결 론

원형관의 팽창비(D/d), 레이놀즈 수, 비뉴우튼 유체의 농도의 변화에 따른 비뉴우튼 유체의 재접착 길이 변화에 관한 가시화 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 팽창비의 증가에 따라 비뉴우튼 유체에 재접착 길이는 증가한다.
- 2) 층류 점탄성 유체에서의 재접착 길이는 뉴우튼 유체의 것보다 짧고, 같은 레이놀즈수에서 점탄성 유체의 농도의 증가에 따라 감소한다.
- 3) 난류 점탄성 유체에서의 재접착 길이는 뉴우튼 유체의 것보다 약 2배 길고, 레이놀즈수가 증가함에 따라 증가한다.

- tream-facing step", *J. Basic Eng.*, 92, 732-741, 1970.
9. S.N. Sinha, A.K. Gupta & M.M. Oberai, "Laminar separating flow over backsteps and cavities, Part 1 : backsteps, *AIAA J.*, 19, 1527-1530, 1981.
S.N. Sinha, A.K. Gupta & M.M. Oberai "Laminar separating flow over backsteps and cavities, Part2 : cavities, *AIAA J.*, 20, 370-375, 1982.
 10. P.J. Cabel & D.V. Boger, "A comprehensive experimental investigation of tubular entry flow of viscoelastic fluids : Part 3 Unstable flow", *AIChE J.*, 25, 11-29, 1986.
 11. R. E. Evans & K. Walters, : "Flow characteristics associated with abrupt changes in geometry in the case of highly elastic liquids", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 20, 11-29, 1986.
 12. BockChoon Pak, Young I. Cho & Stephen U.S. Choi, "Separation and reattachment of non-Newtonian fluid flows in a sudden expansion pipe", *J. non-Newtonian fluid flows in a sudden expansion pipe*, *J. non-Newtonian fluid Mechanics*, 37, 175-199, 1990.
 13. T.C. Reiman and R.H Sabersky, "Liminar flow over rectangular cavitis", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 11, 1083-1085, 1968.
 14. Y.I. Cho & J.P. Hartnett, "Non-Newton fluid, in : *Handbook of Heat transfer-Applications*", McGraw-Hill, New York, Chap 2, 1985.
 15. L.H. Back and E.J. Roschke, "Shear-layer flow regimes and wave instabilities and reattachment length downstream of an abrupt circular channel expansion", *J. Appl. Mech.*, 39, 677-681, 1972.
 16. I.A. Feuerstein, G.K. Pike & G.F. Rounds, "Flow in an abrupt expansion as a model for biological mass transfer experiments", *J.Bio-mech.*, 8, 41-51, 1975.
 17. E.J. Roschke & L.H. Back, "The influence of upstream conditions on flow reattachment lengths downstream of an abrupt circular channel expansion", *J. Biomech.*, 9, 481-483, 1976.
 18. T.J.R. Hughes, W.K. Liu & A. Brooks, "Review of finite element analysis of incompressible viscous flows by the penalty function formulation", *J.Comput, Phys.*, 30, 1-60, 1979.