

제 2 장

점도

2.1 서론

점도 ~ 전통적으로 가장 중요한 물성

개념은 1.2절에서 소개한 뉴턴의 가정으로부터 도입

면찰 응력 σ 는 속도 기울기 또는 면찰 속도 $\dot{\gamma}$ 와 관련

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

여기서, η 는 면찰 점도(shear viscosity)

표 2.1 몇 가지 친숙한 물질의 상온에서의 점도

| 액체 | 대략적인 점도 (Pa.s) |
|--------------|----------------|
| 유리 | 10^{40} |
| 용융 유리(500°C) | 10^{12} |
| 역청(Bitumen) | 10^8 |
| 용융 고분자 | 10^3 |
| 금 시럽 | 10^2 |
| 액체 꿀 | 10^1 |
| 글리세롤 | 10^0 |
| 올리브 기름 | 10^{-1} |
| 자전거 기름 | 10^{-2} |
| 물 | 10^{-3} |
| 공기 | 10^{-5} |

뉴턴 액체의 경우에 η 는 때때로 점도 계수라고 불리나, 간단히 점도라 부름.

대부분의 액체에서는 η 가 계수가 아닌 면찰 속도 $\dot{\gamma}$ 의 함수이기 때문에 유변학이라는 맥락 속에서는 점도라는 용어가 타당

문헌에서는 $\eta(\dot{\gamma})$ 를 흔히 '겉보기 점도' 또는 때때로 면찰 의존 점도라고 부르기도 하지 만 여기서는 '면찰 점도' 또는 간단히 점도라고 정의

‘점도계(viscometer)’: 점도를 측정하기 위해서 고안된 장치
 점도계는 점도 측정을 위해 제작된 특별한 형태의 유변물성측정기(rheometer)

점도의 SI 단위는 Pa.s (Pascal-second)
 전통적인 cgs 계에서 쓰였던 점도의 단위는 Poise인데 Pa.s보다 10배 작은 단위
 (예: 20.2°C에서의 물의 점도는 1 mPa.s 로 이는 1cP (centipoise)에 해당)

2.2 점도에 영향을 미치는 변수의 실제적인 범위

실제 물질의 점도는 면찰 속도, 온도, 압력 그리고 면찰을 걸어준 시간 등과 같은 변수들에 크게 영향을 받을 수 있음.

2.2.1 면찰 속도에 따른 변화

산업적, 일상적 상황에서 접할 수 있는 면찰 속도의 대략적인 범위(표 2.2)

표 2.2 몇 가지 친숙한 물질 및 공정에 대한 대표적인 면찰 속도

| 상황 | 면찰 속도의 범위 (s^{-1}) | 응용 분야 |
|---------------------------|------------------------|--------------------|
| 현탁 액체 속에서의 미세 분말의 침전 | $10^{-6} - 10^{-4}$ | 의약품, 페인트 |
| 표면 장력에 의한 평준화 (levelling) | $10^{-2} - 10^{-1}$ | 페인트, 인쇄용 잉크 |
| 중력에 의한 배수 | $10^{-1} - 10^1$ | 페인트칠과 코팅, 변기 표백제 |
| 압출기 | $10^0 - 10^2$ | 고분자 |
| 저작 및 삼키기 | $10^1 - 10^2$ | 식품 |
| 함침 코팅 | $10^1 - 10^2$ | 페인트, 제과류 |
| 혼합 및 교반 | $10^1 - 10^3$ | 액체류 제조 |
| 관 흐름 | $10^0 - 10^3$ | 펌핑, 혈액 흐름 |
| 분무 및 솔질 | $10^3 - 10^4$ | 분무 건조, 페인트칠, 연료 분무 |
| 문지름 | $10^4 - 10^5$ | 피부에 크림과 로션의 응용 |
| 유체 속에서의 안료의 밀링 | $10^3 - 10^5$ | 페인트, 인쇄용 잉크 |
| 고속 코팅 | $10^5 - 10^6$ | 종이(제지) |
| 윤활 | $10^3 - 10^7$ | 가솔린 엔진 |

대략적인 면찰 속도는 흘러가는 유체의 평균 속도를 액체가 흐르는 기하학적 형태의 특성 길이(즉, 튜브의 반지름 또는 면찰층(sheared layer)의 두께)로 나눈 것으로 추정

수많은 응용분야의 면찰 속도는 10^{-6} 에서 10^7 s^{-1} 크기까지 넓은 범위에 걸쳐 존재 전범위에 걸친 점도를 측정하기 위해서는 최소한 세 가지의 다른 점도계가 요구됨. 점도계를 구입하기 전에 특정한 응용적 측면을 미리 염두에 두어야 함.

2.2.2 온도에 따른 변화

수용성 계와 관련된 응용 분야의 경우, 온도에 관해서는 0에서 100°C까지만 관심
 윤활유와 그리스(grease)는 약 -50°C에서 300°C 범위
 고분자 용융체는 일반적으로 150°C에서 300°C의 범위
 용융 유리는 500°C보다 조금 높은 온도에서 가공

대부분의 점도계는 외부 온도 조절기와 순환 유체 또는 담금조(immersion bath)를 사용하여 온도를 -50°C에서 150°C 범위에서 조절할 수 있는 장치를 가짐.

뉴턴 액체의 점도는 온도가 증가함에 따라 대략 Arrhenius 관계식을 따르면서 감소:

$$\eta = Ae^{-B/T} \quad (2.2)$$

여기서, T 는 절대 온도, A 와 B 는 액체에 의존하는 상수

뉴턴 액체에서는 일반적으로 점도가 커질수록 온도 의존성이 커짐.
 (그림 2.1은 여러 가지 윤활유에 대해서 이런 경향성을 보여주고 있다.)

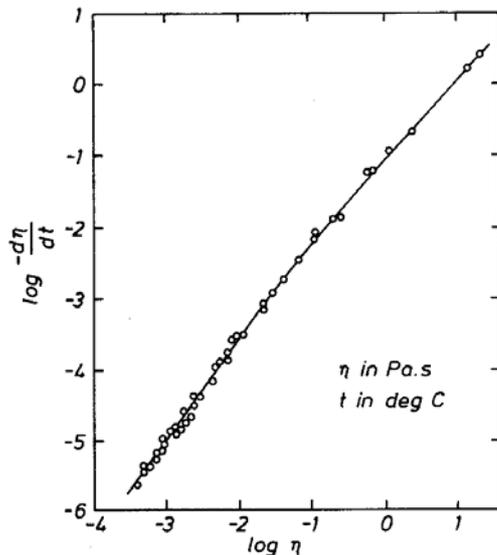


Fig. 2.1. Logarithm of viscosity/temperature derivative versus logarithm of viscosity for various lubricating oil fractions (Cameron 1966, p. 27).

점도의 온도 의존성은 매우 크기 때문에 점도계의 온도 조절에 주의해야 함.

--> 물의 경우 점도의 온도 민감도는 상온에서 매 온도마다 3%이므로 $\pm 1\%$ 정확도를 얻기 위해서는 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 범위 내에서 온도가 유지되어야 한다. 높은 점도를 가진 액체에서는 보다 큰 온도 의존성을 갖기 때문에 훨씬 많은 주의를 기울여야 한다.

점도 측정에서 항온조의 온도를 일정하게 유지하는 것만으로 충분한 것은 아님; 면찰을 걸어줄 때 생기는 열을 제거하기 위한 충분한 조치를 취하지 않으면 점도를 감소시킬 수 있다. 면찰이 걸린 유체의 단위 부피당 에너지 소멸 속도(dissipation rate)는 면찰 응력과 면찰 속도의 곱(또는 점도와 면찰 속도의 제곱의 곱)으로 주어진다.

열 배출률에 대한 고려 (두 가지에 의존)

첫째, 장치의 종류: 어떤 점도계에서는 시험 액체는 장치를 통해서 들어오고 나가지만, 다른 점도계에서는 시험 액체가 장치 안에 계속 머무름.

슬릿(slit) 또는 모세관(capillary)에서는 액체의 흐름 자체가 약간의 열을 대류를 통해 배출하지만 동심 원통관(concentric cylinder), 콘-평판(cone-and-plate) 점도계 같은 장치에서는 표면으로의 열전도가 열전달의 유일한 과정임.

둘째, 점도계의 기하학적 길이: 슬릿과 모세관 점도계에서는 채널 길이가 중요하지만 동심 원통관과 콘-평판 장치에서는 간격 폭이 중요 (간격은 작은 것이 바람직함)

2.2.3 압력에 따른 변화

액체의 점도: 압력에 따라 지수적으로 증가(30°C 이하 온도의 물은 유일한 예외)

물의 경우에는 점도가 처음에는 감소하다가 결국 지수적으로 증가
대기압과의 차가 약 1 bar 정도까지의 압력에서는 매우 작음.

--> 대부분의 실용적 목적상 압력의 효과를 무시 (주의가 필요함)

예: 높은 압력하의 윤활유와 굴착용 유체의 점도 (그림 2.2)

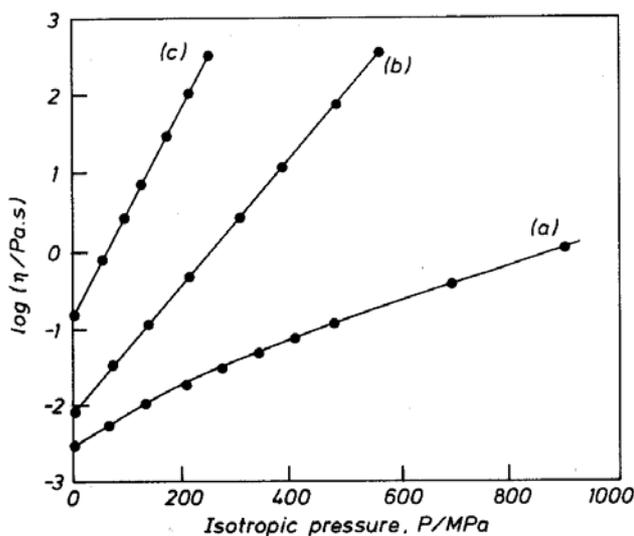


Fig. 2.2. Variation of viscosity with pressure: (a) Di-(2-ethylhexyl) sebacate; (b) Naphthenic mineral oil at 210°F ; (c) Naphthenic mineral oil at 100°F . (Taken from Hutton 1980.)

(유정 굴착용 점토(oil-well drilling muds)는 압력이 약 20 MPa인 깊이에서 작동되어야 하는가 하면, 기어에서 윤활유가 겪는 압력은 종종 1GPa을 초과할 수 있음. 윤활유의 점도에 대한 압력의 영향을 나타낸 몇 가지 예인 그림 2.2를 보면 압력이 상압에서 0.5GPa로 변화할 때 점도는 10^4 배 커짐을 알 수 있음.)

2.3 비뉴턴 액체의 면찰 의존 정도

2.3.1 뉴턴 거동의 정의

뉴턴 거동의 특징(일정 온도와 압력하에서):

(i) 단순 면찰 흐름에서 생기는 유일한 응력은 면찰 응력 σ 이고 두 가지의 수직 응력 차이는 0

(ii) 면찰 정도는 면찰 속도에 따라 변하지 않음.

(iii) 정도는 면찰을 걸어준 시간에 무관. 면찰이 멈추면 응력은 즉시 0으로 됨. 차후에 가해진 면찰에 대해서도 정도는 이전의 값과 동일

(iv) 다른 형태의 변형에서 측정된 정도들은 언제나 단순 비례. 예를 들어 1축 신장 흐름에서 측정된 정도는 단순 면찰 흐름에서 측정된 값의 3배(5.3절을 참조).

⇓

위의 특징에서 벗어난 거동을 보이는 액체: “비뉴턴 액체”

2.3.2 비뉴턴 액체의 면찰 담화(shear thinning)

분산액(dispersion), 유탁액(emulsion), 고분자 용액과 같은 많은 물질

~ 뉴턴 거동으로부터 벗어남.

많은 경우에 정도는 면찰 속도가 증가함에 따라 감소

--> 일시적 정도 손실(temporary viscosity loss) 또는 ‘유사가소성(pseudoplasticity)’으로 부르기도 하지만, 일반적으로 ‘면찰 담화’ 거동이라고 부름.

면찰 속도에 따라 정도가 증가하는 경우도 있음.

--> ‘다일레이턴시(dilatancy)’라고 부르기도 하지만,

일반적으로 ‘면찰 농화(shear thickening)’라고 부름.

면찰 담화 물질의 면찰 응력에 따른 정도의 변화를 나타내는 일반적인 형태(그림 2.3)

매우 낮은 면찰 속도(혹은 응력)에서 정도 ~ 일정

매우 높은 면찰 속도(혹은 응력)에서도 정도 ~ 작은 값이지만 일정

각각 하위와 상위 뉴턴 영역이라고 불림. (혹은 “1차 뉴턴 영역”과 “2차 뉴턴 영역”)

(하위와 상위라는 용어는 점도가 아니라 *면찰* 속도에 따른 것)

하위 뉴턴 영역의 상수 값 ~ “영점 면찰 점도(zero shear viscosity)”라고 불림.

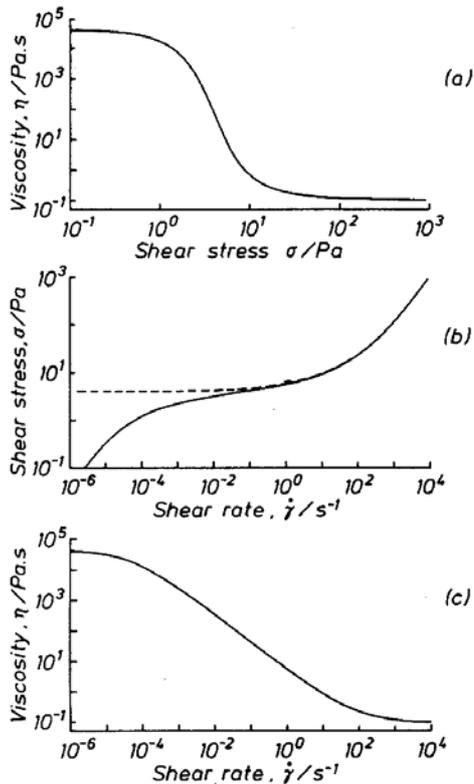


Fig. 2.3. Typical behaviour of a non-Newtonian liquid showing the interrelation between the different parameters. The same experimental data are used in each curve. (a) Viscosity versus shear stress. Notice how fast the viscosity changes with shear stress in the middle of the graph; (b) Shear stress versus shear rate. Notice that, in the middle of the graph, the stress changes very slowly with increasing shear rate. The dotted line represents ideal yield-stress (or Bingham plastic) behaviour; (c) Viscosity versus shear rate. Notice the wide range of shear rates needed to traverse the entire flow curve.

그림 2.3의 액체의 면찰 속도 범위: $10^4 \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$

‘항복 응력(yield stress)’ 거동을 보이지 않음(그림 2.3(b))

‘빙햄(Bingham)’ 플라스틱 거동은 점선으로 나타남.

빙햄 플라스틱은 임계 항복 응력 σ_y 를 넘을 때까지는 흐르지 않음.

영점 면찰 속도에서 점도는 무한대이므로 1차 뉴턴 영역은 정의할 수 없음.

항복 응력의 존재 유무:

묾은 용액과 현탁액 --> 작은 응력에서도 흐름이 일어남.

액체 표면은 중력 때문에 평평(항복 응력은 없음)

젤(gel), 윤활 그리스, 아이스크림, 마가린, 그리고 딱딱한 반죽 같은 물질

--> 항복 응력의 존재 유무는 불확실

자신의 무게 하에서 결코 평평해지지 않지만,

영점 점도가 매우 높기 때문에 흐르지 않는 것처럼 보임.

점도 곡선의 낮은 면찰 속도 부분 측정:

Deer 형태의 일정 응력 점도계 (예: Haake 버전은 약 1에서 1,000s⁻¹)

Ferranti-Shirley의 콘-평판 점도계 같은 일정 면찰 속도 점도계

(사용 가능 면찰 속도: 약 20에서 20,000 s⁻¹)

크리프(creep) 실험(3.7.1절)과 가소도계(plastometer)와 같은 장치

일반적인 흐름 곡선의 중간과 상위 영역 측정:

Umstätter 모세관 점도계 (모세관의 선택에 따라서 10⁶ 정도의 범위 측정가능)

==> 오늘날에는 다른 면찰 속도 영역에서 측정된 점도간의 겹치는 부분이 일치됨.

* 일반적인 흐름 곡선의 형태를 예측하는 모델

Cross 모델(1965) -- 최소한 4개의 인자(parameter)를 필요

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{(1 + (K\dot{\gamma})^m)} \quad (2.2a)$$

또는 동등하게 표현하면,

$$\frac{\eta_0 - \eta}{\eta - \eta_{\infty}} = (K\dot{\gamma})^m \quad (2.2b)$$

여기서 η_0 와 η_{∞} 는 각각 매우 낮은 면찰 속도와 매우 높은 면찰 속도에서의 점도,

K 는 시간의 차원을 갖는 상수 인자, m 은 무차원 상수

Carreau 모델(1972) -- Cross 모델에 대한 대체식

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{(1 + (K_1\dot{\gamma})^2)^{m_1/2}} \quad (2.3)$$

여기서, K_1 과 m_1 은 Cross 모델의 K 와 m 과 유사

여러 가지 선택된 물질에 대해 Cross 모델이 적용된 예 (그림 2.4)

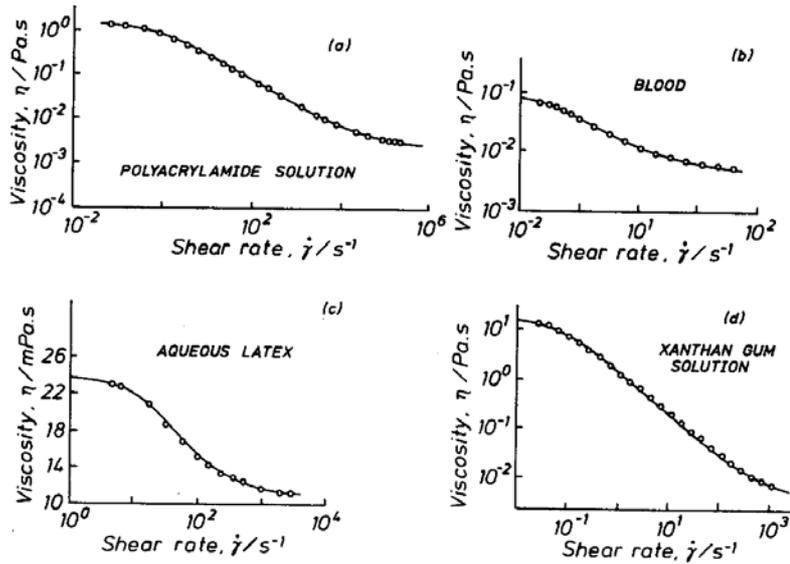


Fig. 2.4. Examples of the applicability of the Cross equation (eqn. (2.2a)): (a) 0.4% aqueous solution of polyacrylamide. Data from Boger (1977(b)). The solid line represents the Cross equation with $\eta_0 = 1.82$ Pa.s, $\eta_\infty = 2.6$ mPa.s, $K = 1.5$ s, and $m = 0.60$; (b) Blood (normal human, $Hb = 37\%$). Data from Mills et al. (1980). The solid line represents the Cross equation with $\eta_0 = 125$ mPa.s, $\eta_\infty = 5$ mPa.s, $K = 52.5$ s and $m = 0.715$; (c) Aqueous dispersion of polymer latex spheres. Data from Quemada (1978). The solid line represents the Cross equation with $\eta_0 = 24$ mPa.s, $\eta_\infty = 11$ mPa.s, $K = 0.018$ s and $m = 1.0$; (d) 0.35% aqueous solution of Xanthan gum. Data from Whitcomb and Macosko (1978). The solid line represents the Cross equation with $\eta_0 = 15$ Pa.s, $\eta_\infty = 5$ mPa.s, $K = 10$ s, $m = 0.80$.

Cross 모델은 다른 점도 모델로 변환가능하기 때문에 유용함.

변환 1) $\eta \ll \eta_0$ 이고 $\eta \gg \eta_\infty$ 인 경우에 Cross 모델은 식(2.4)와 같이 표현됨.

$$\eta = \frac{\eta_0}{(K\dot{\gamma})^m} \quad (2.4)$$

이것은 인자의 간단한 재정의를 통하면 다음과 같이 변형됨.

$$\eta = K_2 \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.5)$$

==> '멱수 법칙(power-law) 모델'

(n : 멱수 법칙 지수, K_2 : '견실도(consistency)')

변환 2) $\eta \ll \eta_0$ 이면 다음과 같이 표현됨.

$$\eta = \eta_\infty + \frac{\eta_0}{(K\dot{\gamma})^m} \quad (2.6)$$

이것은 다음과 같이 쓸 수 있음.

$$\eta = \eta_{\infty} + K_2 \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.7)$$

==> Sisko(1958) 모델

변환 3) Sisko 모델에서 n 을 0로 둘 경우

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{K_2}{\dot{\gamma}} \quad (2.8a)$$

이것은 인자의 간단한 재정의를 통하면

$$\sigma = \sigma_y + \eta_p \dot{\gamma} \quad (2.8b)$$

여기서 σ_y : 항복 응력, η_p : 가소성 점도(plastic viscosity) (둘 모두 상수)

==> 병행 모델

이렇게 유도된 식은 흐름 곡선의 제한된 범위에 적용됨.

그림 2.5는 멱수 법칙 모델은 단지 중간 영역에서만 잘 들어맞고, Sisko 모델은 중간영역에서부터 높은 면찰 속도 영역에까지 잘 들어맞음을 보여줌.

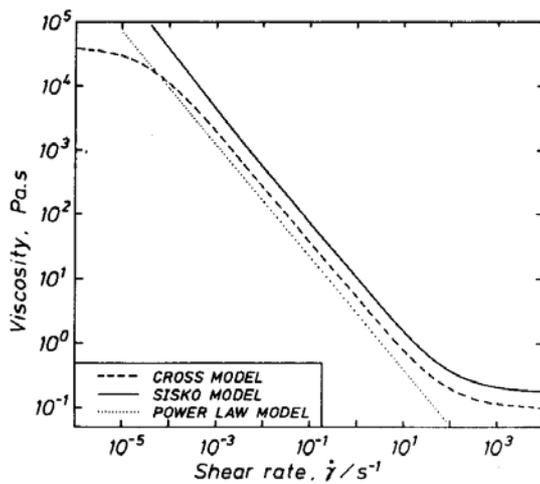


Fig. 2.5 Typical viscosity/shear rate graphs obtained using the Cross, power-law and Sisko models. Data for the Cross equation curve are the same as used in Fig. 2.3. The other curves represent the same data but have been shifted for clarity.

빙행식은 낮은 면찰 속도 영역에서 면찰 담화 현상을 보이는 물질의 거동을 묘사하지만 면찰 속도의 범위가 십진 지수 1 정도의 제한된 범위에만 적용 가능

그림 2.6(a)와 (b): 두개의 다른 면찰 속도 영역에서 측정된 합성 라텍스의 빙행 거동 ==> 곡선이 식과 일치하지만 유도된 인자는 면찰 속도 범위에 의존

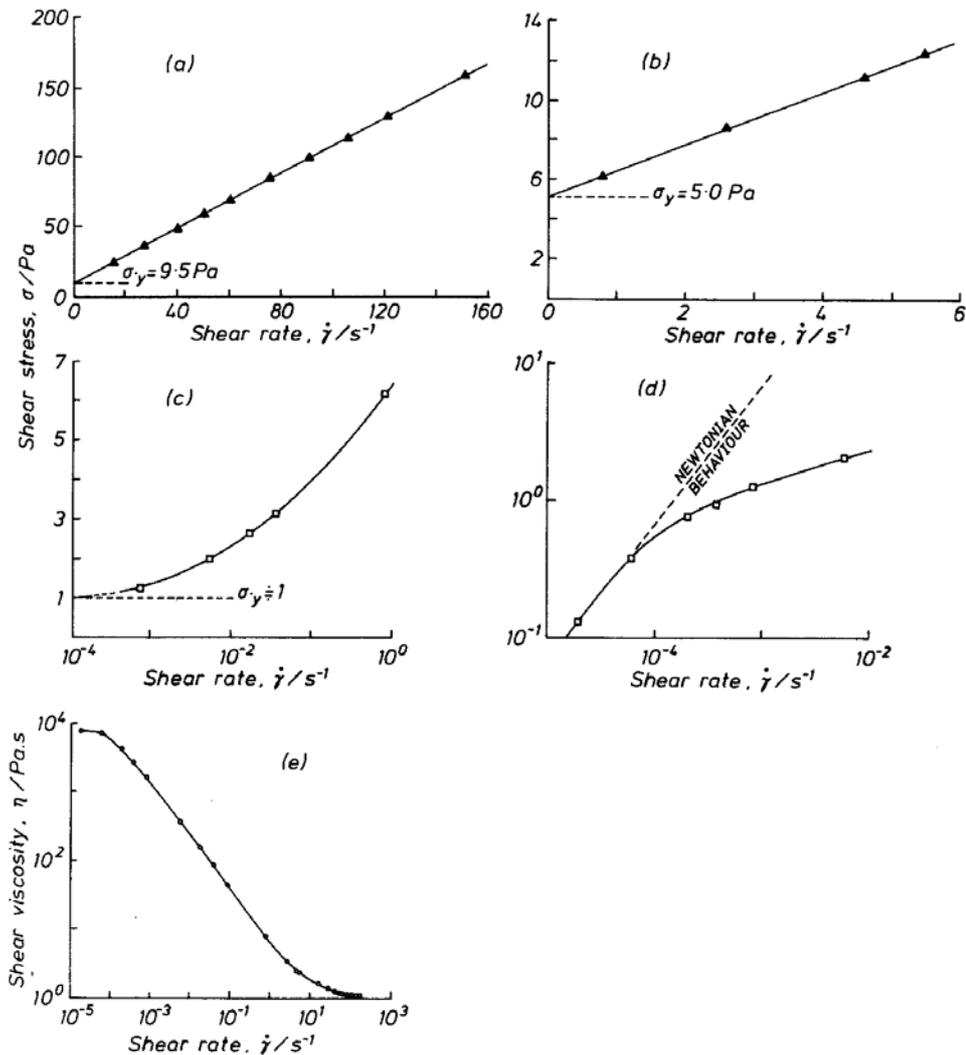


Fig. 2.6. Flow curves for a synthetic latex (taken from Barnes and Walters 1985): (a and b) Bingham plots over two different ranges of shear rate, showing two different intercepts; (c) Semi-logarithmic plot of data obtained at much lower shear rates, showing yet another intercept; (d) Logarithmic plot of data at the lowest obtainable shear rates, showing no yield-stress behaviour; (e) The whole of the experimental data plotted as viscosity versus shear rate on logarithmic scales.

점도 거동을 묘사하기 위해서 빙행식을 사용하는 것은 이 경우에는 적절하지 않음. 항복 응력 개념은 롤러(roller) 베어링에서 뚝 떨어짐(slumping)에 견딜 수 있는 그리스의 능력을 특징짓는 경우와 같은 목적으로는 매우 좋은 근사가 될 수 있음.

이 근사가 유효할 조건은 n 이 작고(예 < 0.2), η_0/η_∞ 의 비가 큰 경우(예 $> 10^9$)

실험실에 있는 점도계를 이용해서 얻은 결과를 병행 형태로 외삽하여 쉘 상태의 액체에 항구적으로 현탁될 수 있는 고체 입자의 크기를 예측하는 데 사용해 옴.

진한 수용액 계에 대해서는 실제로 거의 적용할 수 없음.

--> 액체는 비록 느리기는 하지만 이 응력보다 작은 응력에서도 흐르기 때문

--> η_0 와 Stokes의 항력 법칙(drag law)을 사용하는 것이 입자의 침강 속도(settling rate) 예측에 정확. 이 속도를 충분히 작게 할 수 있다면 현탁액은 “가라앉지 않는 (non-settling)”라고 볼 수 있음.

멱수 법칙 모델(식 (2.5))은 십진 지수 2-3 정도의 면찰 속도 범위에서 여러가지 물질들의 실험 데이터를 맞출 수 있음.

액체의 비뉴턴적 흐름 성질을 묘사하는데 이론 및 응용 분야에서 광범위하게 사용 (데이터의 범위 밖에서는 주의를 요함)

표 2.3 특정한 면찰 속도 범위에 대해 잘 알려진 물질의 멱수 법칙 인자

| 물질 | $K_2(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$ | n | 면찰 속도 범위 (s^{-1}) |
|------------|---------------------------------|------|------------------------------|
| 볼펜 잉크 | 10 | 0.85 | $10^0 - 10^3$ |
| 직물 유연제 | 10 | 0.6 | $10^0 - 10^2$ |
| 고분자 용융체 | 10000 | 0.6 | $10^2 - 10^4$ |
| 용융 초콜릿 | 50 | 0.5 | $10^{-1} - 10^0$ |
| (관절) 활액 유체 | 0.5 | 0.4 | $10^{-1} - 10^2$ |
| 치약 | 300 | 0.3 | $10^0 - 10^3$ |
| 피부 크림 | 250 | 0.1 | $10^0 - 10^2$ |
| 윤활용 그리스 | 1000 | 0.1 | $10^{-1} - 10^2$ |

멱수 법칙 모델은 큰 면찰 속도에서는 사용할 수 없음.

(큰 면찰 속도에서는 점도가 궁극적으로 일정한 값($n=1$)에 접근하기 때문)

멱수 법칙 모델을 적용할 수 없는 윤활용 그리스와 같이 높은 면찰 속도에서 측정

==> Sisko 모델을 사용해서 개선 가능

Sisko 모델의 유용성에 대한 예(그림 2.7)

==> 십진 지수 4-5 정도의 면찰 속도 범위에 측정된 면찰 담화 물질의 흐름 특성

이 절에서 논의된 다양한 점도 법칙을 미시구조적인 관점으로부터 유도하려는 시도가 있어 왔으나 기본적으로 실험결과를 바탕으로 한 것이므로 곡선 맞추기(curve-fitting) 문제로 간주되어야 함.

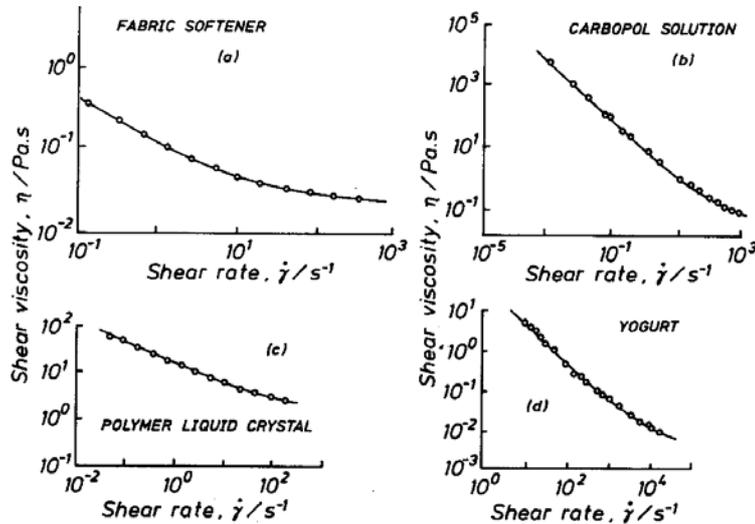


Fig. 2.7. Examples of the applicability of the Sisko model (eqn. (2.7)): (a) Commercial fabric softener. Data obtained by Barnes (unpublished). The solid line represents the Sisko model with $\eta_{\infty} = 24$ mPa.s, $K_2 = 0.11$ Pa.sⁿ and $n = 0.4$; (b) 1% aqueous solution of Carbopol. Data obtained by Barnes (unpublished). The solid line represents the Sisko model with $\eta_{\infty} = 0.08$ Pa.s, $K_2 = 8.2$ Pa.sⁿ and $n = 0.066$; (c) 40% Racemic poly- γ -benzyl glutamate polymer liquid crystal. Data points obtained from Onogi and Asada (1980). The solid line represents the Sisko model with $\eta_{\infty} = 1.25$ Pa.s, $K_2 = 15.5$ Pa.sⁿ, $n = 0.5$; (d) Commercial yogurt. Data points obtained from deKee et al. (1980). The solid line represents the Sisko model with $\eta_{\infty} = 4$ mPa.s, $K_2 = 34$ Pa.sⁿ and $n = 0.1$.

2.3.3 비뉴턴 액체의 면찰 농화

면찰 속도에 따라 흐름에 대한 저항이 증가하는 것처럼 물질을 변형시킴에 의해 미세 구조가 재배열될 수 있음.

면찰 농화 현상의 전형적인 예 (그림 2.8)

면찰 농화 영역이 단지 면찰 속도가 대략 십진 지수로 1 정도에만 걸침.

(이 영역에서 역수 법칙 모델은 1보다 큰 n 값을 사용하여 데이터를 맞출 수 있음)

면찰 농화로 알려진 대부분의 경우에, 낮은 면찰 속도에서는 면찰 담화 영역이 존재

2.3.4 비뉴턴 액체의 시간 효과

지금까지는 주어진 면찰 속도에서의 면찰 응력은 변화하지 않는다고 간주했음.

면찰 응력이나 정도는 면찰을 걸어준 시간에 따라서 증가하거나 감소할 수 있음.

‘씩소트로피(thixotropy)’: 면찰 응력하에서 시간에 따라 정도가 점진적으로 감소하고 이 응력을 제거했을 때 구조가 점진적으로 회복되는 현상

‘음성 켄소트로피(negative thixotropy)’ 또는 ‘반-씩소트로피(anti-thixotropy)’: 응력하에서 시간에 따라 정도가 점진적으로 증가하고 제거했을 때 구조가 회복되는 현상 (‘rheopexy’ 라고도 부름)

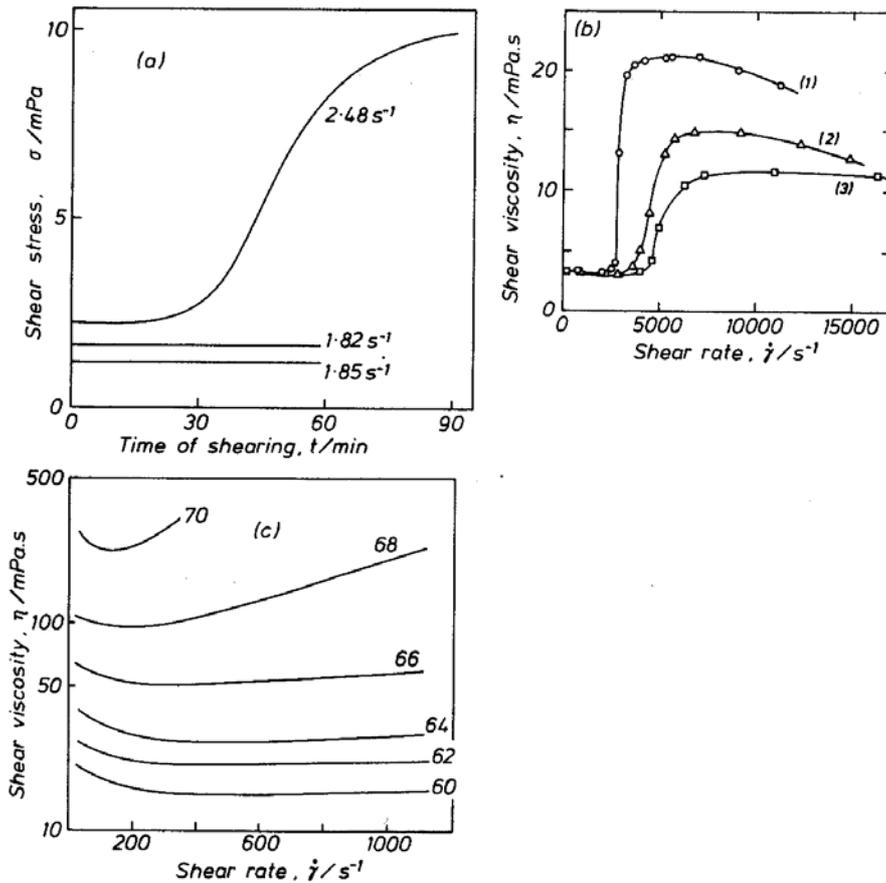


Fig. 2.8. Examples of shear-thickening behaviour: (a) Surfactant solution. CTA-sal. solution at 25°C, showing a time-effect (taken from Gravsholt 1979); (b) Polymer solution. Solution of anti-misting polymer in aircraft jet fuel, showing the effect of photodegradation during (1) 1 day, (2) 15 days, (3) 50 days exposure to daylight at room temperature (taken from Matthys and Sabersky 1987); (c) Aqueous suspensions of solid particles. Deflocculated clay slurries showing the effect of concentration of solids. The parameter is the %w/w concentration (taken from Beazley 1980).

씩소트로피는 일반적으로 액체가 면찰 담화인 상황에서 일어남.

반-씩소트로피는 일반적으로 면찰 농화와 관련됨.

==> 이와 같은 현상들이 나타나는 방식은 측정하는 실험 형태에 의존

비교적 탄성이 나타나지 않는 콜로이드 물질을 대상으로 관찰한 거동 (그림 2.9):

첫째, 가해진 면찰 속도 또는 면찰 응력의 계단 변화(step change)

둘째, 면찰 속도를 연속적이고 선형적으로 증가후 감소시키는 루프 실험(loop test)

매우 탄성이 큰 콜로이드 액체는 거동이 매우 복잡(점탄성에 의한 응력의 성장과 소멸에 대한 기여가 있기 때문)

씩소트로피가 나타나는 것은 흐름 거동을 예측할 때 흐름 이력을 고려해야 함을 암시 (예: 긴 관을 지나는 쉿소트로피 물질의 점도는 관의 길이에 따라 변할 수 있음)

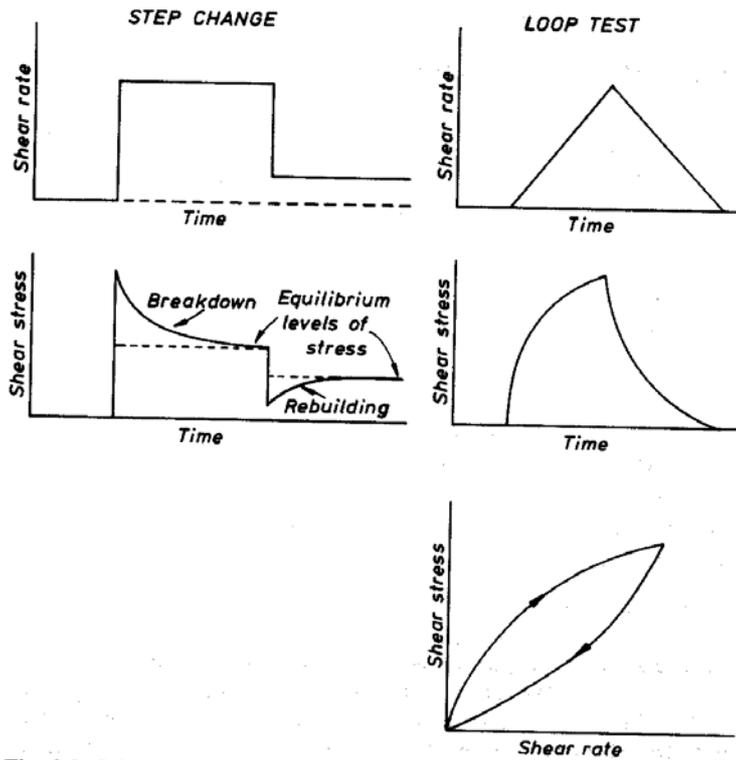


Fig. 2.9. Schematic representation of the response of an inelastic thixotropic material to two shear-rate histories.

2.3.5 2상 비뉴턴 액체에서의 온도 효과

간단한 경우: 2상 액체에서 온도에 따른 점도는 단순히 연속상의 점도 변화를 반영
(상온에서 수용액 계는 1°C당 3%라는 물의 온도 민감도를 가짐)

복잡한 경우:

분산계에서 현탁상은 녹는점을 지날 수 있음 (훨씬 급격하고 큰 점도 감소 초래)

온도에 민감한 콜로이드 입자로 이루어진 분산액 (입자들의 상호작용 영향)

세제용 액체 (온도의 작은 변화가 상변화를 초래할 수 있음)

고분자계 (고분자의 용해도가 온도에 따라 증가하거나 감소할 수 있음)

==> 꼬인 사슬 구조는 풀릴 수 있으며 그 결과로 흐름에 대한 저항이 증가

예) 고분자 첨가 다급 오일(polymer-thickened multigrade oils)

: Base oil의 온도 변화에 따른 점도 감소를 부분적으로 상쇄

높은 온도에서 좋은 윤활 성질을 유지하도록 고안 (6.11.2절 참조)