

2.4 면찰 점도를 측정하기 위한 점도계

2.4.1 일반적인 고려사항

측정의 정확도는 점도계에서 중요한 쟁점

원칙적으로는 속도, 기하학적 형태, 민감도 따위로 장치를 보정

일반적으로는 점도가 알려진 표준화된 뉴튼 액체(기름)를 사용하여 보정
기름의 분자량을 변화시킴으로써 폭 넓은 범위의 점도를 고려 가능
기름은 화학적으로 안정하고 휘발성이 매우 적음.

이러한 기름 자체는 유리 모세관 점도계를 사용하여 보정이 이루어짐.

이 점도계는 물의 점도에 대해 국제적으로 공인된 표준값을 사용하여 보정
(20.00°C에서 1.002 mPa.s, 이 값은 ±0.25%의 오차가 있음)

직접 또는 비교 측정에서 누적된 오차를 영두에 둔다면 더욱 큰 오차가 발생

2.4.2 산업용 shop-floor 측정장치

산업계에서 사용되는 몇몇 점도계 ~ 복잡한 유동장 및 응력장 수반

뉴튼 액체의 경우: 표준 액체로 보정할 수 있기 때문에 적절

비뉴튼 액체의 경우: 재현성이 있는 점도 데이터를 얻기 위해선 많은 주의 필요

산업용 점도계는 크게 세 가지 형태로 분류 (그림 2.10)

- 1) Brookfield 점도계와 같이 회전 장치로 구성 (일관성 있는 데이터 해석 가능)
- 2) “수축부를 지나는 흐름” (Ford-cup 배열에 의한 특징)
- 3) Glen Creston 낙구 장치에서와 같이 방해물 주위의 흐름으로 이루어진 장치 (상승하는 방울을 이용한 기술도 이 범주에 포함)

뉴튼 액체에 대해서 고안된 식을 비뉴튼 경우에 적용할 때는 주의를 요함.

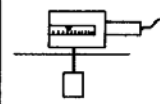

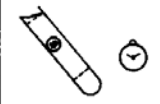
VISCOMETER TYPE	VARIABLES TO CHANGE	MEASUREMENT	CONVENIENCE	ROBUSTNESS
	BOB SPEED AND DIAMETER	COUPLE	* *	*
	EXIT TUBE DIAMETER	EFFLUX TIME	* * * *	* * * *
	BALL SIZE	VELOCITY	* *	* *

Fig. 2.10. Examples of industrial viscometers with complicated flow fields, including star-ratings for convenience and robustness.

2.4.3 회전식 측정장치; 일반적인 설명

많은 형태의 점도계 ~ 회전 운동을 통해 단순 면찰 흐름을 얻음.

흐름을 유발시키는 두 가지 방법:

- 1) 한 요소를 변화시켜 생겨나는 토크를 측정(1888년, Couette에 의해 도입)
- 2) 토크를 작용하여 생겨나는 회전 속도를 측정(1912년 Searle에 의해 도입)

회전을 일으켜서 토크를 측정하는 두 가지 방법:

- 1) 한 요소를 구동시키고 *동일한* 요소의 토크를 측정하는 방법
(Haake, Contraves, Ferranti-Shirley, Brookfield 사의 장치에 채택)
- 2) 한 요소를 구동시키고 *다른* 쪽에 작용하는 토크를 측정하는 방법
(Weissenberg, Rheometrics 사의 장치에 채택)

토크를 걸어주는 장치 ~ 토크를 한 요소에 걸어주고 회전 속도를 측정

Searle의 최초의 설계 -- 토크는 추와 도르래에 의해서 작용

Deer의 일정 응력 장치 -- 전기적인 drag-cup 모터가 토크를 발생

(상업적 장치를 사용하여 얻을 수 있는 토크 범위: $10^{-6} - 10^{-2}$ Nm,
측정될 수 있는 면찰 속도 범위: $10^{-6} - 10^3$ s⁻¹)

가장 작은 면찰 속도는 매 2년마다 1회 완전히 회전하는 것에 해당하지만 한 시간 이
내에 정상 상태 측정을 하는 것이 가능함.

2.4.4 좁은 간격(narrow-gap) 동심 원통관(concentric-cylinder) 점도계

두 동심 원통관 사이의 간격이 작고 두 원통관이 상대적인 회전을 하는 경우

--> 간격 사이에 있는 시험 액체는 거의 일정한 면찰 속도를 겪음.

즉, 만일 외부와 내부 원통관의 반지름이 각각 r_0 와 r_1 이고 내부 원통관의 각속도가

Ω_1 이라면(다른 쪽은 정지 상태)

$$\dot{\gamma} = \frac{r_0 \Omega_1}{r_0 - r_1} \quad (2.9)$$

타당한 값을 얻기 위해서는 간격을 “좁게” 유지하면서 r_1/r_0 가 0.97보다 커야 함.

원통관에 작용하는 토크가 C라면 액체에 나타나는 면찰 응력은

$$\sigma = \frac{C}{2\pi r_0^2 L} \quad (2.10)$$

식(2.9)와 (2.10)으로부터 점도는 다음과 같이 표현됨.

$$\eta = \frac{C(r_0 - r_1)}{2\pi r_0^3 \Omega_1 L} \quad (2.11)$$

여기서, L: 면찰을 겪는 액체의 유효 잠긴 길이(effective immersed length)
(말단 효과(end effects)를 무시할 수 있다면 이것은 실제 잠긴 길이 / 과 동일)

대부분의 상업용 점도계는 액체의 깊이와 원통관들 사이의 간격의 비가 100 이상
--> 말단 보정(end correction)은 무시할 만함.

원통관의 한쪽 끝과 외부 원통관을 포함하고 있는 바닥과의 상호 작용 최소화 방법:

- 1) 점도계의 내부 원통관에 홈을 두어 공기가 같이 포함되도록 고안
- 2) 원통관 끝의 형상이 콘(cone)의 형태가 되도록 고안
(조작시에는 원추의 끝이 외부 원통관 용기의 바닥과 정확히 닿음)
==> Mooney 씨스템

2.4.5 넓은 간격(wide-gap) 동심 원통관 점도계

좁은 간격 동심 원통관 점도계 ~ 큰 입자를 담고 있는 현탁액 측정시 제약
따라서 상업용 점도계에서 원통관 반지름의 비는 2.4.4절에서 언급된 것보다 작음.

간격 사이에서 면찰 응력/면찰 속도 사이의 관계
==> 내부 원통관에서 액체의 면찰 속도(역수 법칙 형태로 기술)

$$\dot{\gamma} = \frac{2\Omega}{n(1 - b^{2/n})} \quad (2.12)$$

여기서 b: 외부 원통관에 대한 내부 원통관의 비 (즉 $b = r_1/r_0$)
면찰 속도는 좁은 간격 점도계에서의 경우와는 다르게 시험 액체의 성질에 의존함.

내부 원통관에서 액체의 면찰 응력

$$\sigma = \frac{C}{2\pi r_1^2 L} \quad (2.13)$$

점도(내부 원통관의 면찰 속도에서 측정된)는 다음과 같이 표현됨.

$$\eta = \frac{Cn(1 - b^{2/n})}{4\pi r_1^2 L \Omega_1} \quad (2.14)$$

넓은 간격에서의 표현 대신에 좁은 간격 근사를 사용하는데 내재하는 오차 (그림 2.11)

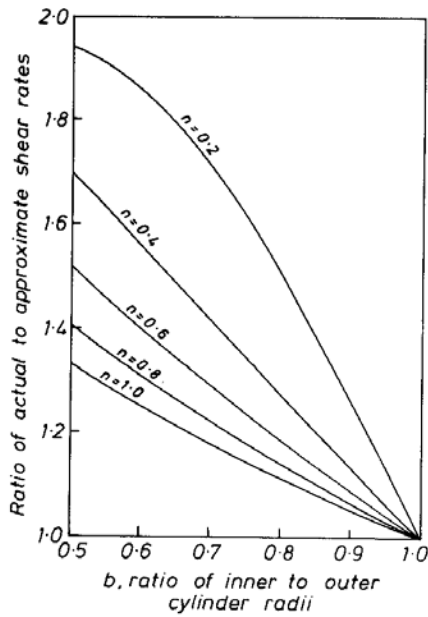


Fig. 2.11. Ratio of actual (eqn. 2.12) to approximate (eqn. 2.9) shear rates at the rotating cylinder as a function of the ratio of the inner to the outer cylinder radii, with n the power law index as parameter.

회전 점도계의 면찰 속도 하한치: 구동 시스템에 의해 좌우
 " " 상한치: 시험 액체에 의해서 결정

점도계의 측정시 발생하는 오차:

심한 점성 가열(viscous heating)이 일어나는 경우

정상 (Taylor) 소용돌이 또는 난류가 발생하는 경우

=> 이러한 두 흐름은 유선 흐름보다 많은 에너지를 필요(겉보기 점도가 증가)

점도가 10 mPa.s보다 작다면 교란이 생길 가능성을 고려하는 것이 바람직함.

2.4.6 큰 부피의 액체 안에서 회전하는 원통관

외부 원통관의 반지름이 무한대에 접근하는 극단적인 넓은 간격 Couette 점도계

=> 식(2.12)와 (2.14)에서 인자 $(1 - b^{2/n})$ 는 1에 접근

역수 법칙 액체에 대하여 반지름 r_1 인 회전 원통관의 경우

$$\dot{\gamma} = 2\Omega_1/n \quad (2.15)$$

$$\sigma = \frac{C}{2\pi r_1^2 L} \quad (2.16)$$

==> 회전하는 원통(bob)이 비이커에 담겨진 Brookfield 형태의 점도계에 적용됨.
 비교적 작은 면찰 속도에 적용이 제한(0.1에서- 10 s⁻¹이 전형적인 범위)

2.4.7 콘-평판(Cone-and-plate) 점도계

콘-평판 점도계에서는 간격 각도(gap angle) θ_0 가 작다면 액체의 어느 곳에서나 면찰 속도가 거의 동일함 (그림 2.12) (자세한 사항은 4장을 참고)

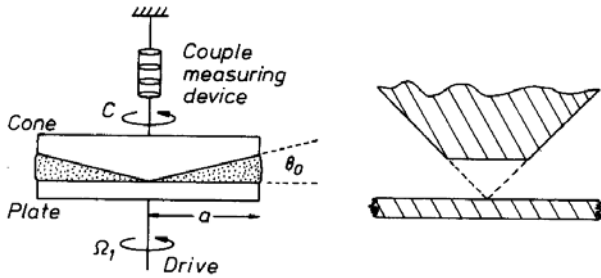


Fig. 2.12. The cone-and-plate viscometer. Cross-sectional diagram of one possible configuration, viz. cone on top, rotating plate and couple measured on the cone. The inset shows the form of truncation used in many instruments.

액체의 면찰 속도:

$$\dot{\gamma} = \Omega_1 / \theta_0 \quad (2.17)$$

여기서 Ω_1 : 회전판의 각속도

==> 면찰 속도는 액체의 성질에 의존하지 않음

면찰 응력(콘에 작용하는 토크 C를 통해 측정되는):

$$\sigma = \frac{3C}{2\pi a^3} \quad (2.18)$$

여기서 a: 콘의 반지름

따라서 점도는 다음과 같이 표현됨.

$$\eta = \frac{3C\theta_0}{2\pi a^3 \Omega_1} \quad (2.19)$$

액체의 점도가 낮은 경우 충분한 토크를 발생시키기 위해 큰 회전 속도를 요구

--> 이런 상황에서는 '2차 흐름(secondary flow)'의 우려

--> 2차 흐름은 여분의 에너지를 흡수하여 토크를 증가
 --> 면찰 농화와 관련짓는 실수를 범할 수 있음.

콘-평판 장치에서는 콘의 끝이 평판의 표면에 정확히 놓이도록 설정하는 것이 중요
 ==> 간격 각도 1°와 콘 반지름 50mm의 장치에서 축 방향의 분리 간격이 매 10μm씩의
 오차가 생길 때 마다 면찰 속도에서 추가적으로 1%씩의 오차가 발생

콘의 끝과 평판이 접촉할 때의 오차를 피하기 위해서 콘의 끝 부분을 약간 절단시킴.
 ==> 이 경우에는 평판의 표면 위에 가상적인 끝이 놓이도록 설치
 절단된 콘은 현탁액의 실험을 용이하게 해 줌.

2.4.8 평행판 점도계

평행한 평판 사이의 비틀림 흐름의 경우 (그림 2.13)

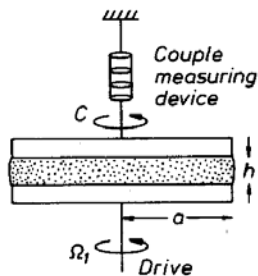


Fig. 2.13. Cross-sectional diagram of the torsional parallel-plate viscometer.

가장자리(r=a)에서의 면찰 속도:

$$\dot{\gamma}_a = a\Omega_1/h \quad (2.20)$$

점도는 다음과 같이 표현됨 (Walters 1975, p. 52).

$$\eta = \frac{3Ch}{2\pi a^4 \Omega_1} \left(1 + \frac{1}{3} \frac{d \ln C}{d \ln \Omega_1} \right) \quad (2.21)$$

멱수 법칙 모델의 경우

$$\eta = \frac{3Ch}{2\pi a^4 \Omega_1} \left(1 + \frac{n}{3} \right) \quad (2.22)$$

평판 가장자리에서의 면찰 속도는 각속도 Ω_1 또는 간격 h를 변화시켜 조정

2.4.9 모세관 점도계

뉴턴 액체가 체적 유량 Q 로 반지름 a 인 곧은 원통관을 흐르는 경우

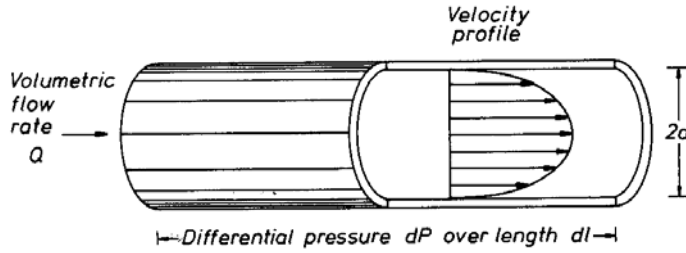


Fig. 2.14. Cutaway diagram of laminar Newtonian flow in a straight circular capillary tube.

원통관을 따라 생기는 압력 기울기(dP/dl) (Poiseuille 방정식):

$$\frac{dP}{dl} = \frac{8Q\eta}{\pi a^4} \quad (2.23)$$

면찰 응력은 모세관 벽의 $(a/2)(dP/dl)$ 로 부터 중심선의 0까지 선형적으로 변함.

면찰 속도는 $4Q/(\pi a^3)$ 에서 0까지 변함.

만일 점도가 면찰 속도에 따라 변화한다면 상황은 복잡해짐.

==> 벽 근처의 흐름에 초점을 둬서 해결

비뉴턴 액체의 경우 벽에서의 면찰 속도는 다음처럼 표현됨(Walters 1975, 5장을 참고)

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi a^3} \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{d \ln Q}{d \ln \sigma_w} \right) \quad (2.24)$$

벽에서의 면찰 응력 σ_w 는 $(a/2)(dP/dl)$ 로 뉴턴 액체와 동등

식(2.24)의 괄호 속의 항을 Rabinowitsch 보정이라 부름.

최종적으로 다음과 같은 표현됨.

$$\eta(\dot{\gamma}_w) = \frac{\sigma_w}{\dot{\gamma}_w} = \frac{\pi a^4 (dP/dl)}{8Q \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{d \ln Q}{d \ln \sigma_w} \right)} \quad (2.25)$$

면찰 담화 액체를 시험할 때 $d(\ln Q)/d(\ln \sigma_w)$ 는 1보다 크게 됨.

역수 법칙 액체일 경우에는 $1/n$ 과 같게 됨.

지수 n 은 0.2 정도로 작을 수 있으므로 $d(\ln Q)/d(\ln \sigma_w)$ 인자가 괄호 항에 대한 기여

도는 실제 벽에서의 면찰 속도를 결정하는데 매우 중요함.

압력 기울기 dP/dl 을 정의하고 측정할 때의 주의 사항:

반지름에 대한 관 길이의 비 >100 이 아닌 한, 입구와 출구 효과를 고려해야 함.
이것은 다음과 같은 원인 때문에 발생:

- (i) 입구까지 수렴하는 흐름에서 생기는 점성과 관성에 의한 손실
- (ii) 관 내부에서 정상 상태 속도 분포에 도달하기까지 입구 속도의 재배열
- (iii) 출구에서 생기는 위와 같은 유사한 효과

관 끝에서 상당히 떨어진 관 벽의 여러 곳에 압력 트랜스듀서가 연결된 구멍에서 압력을 측정하여 말단 효과(end effect)를 피함.

고탄성 액체인 경우 탄성 때문에 입구와 출구에서의 추가적인 압력 강하가 발생

==> Bagley 보정에 의해 탄성 효과의 추정치를 계산할 수 있음.

==> 액체의 신장 정도를 예측하는데도 사용됨 (5.4.6절 참고).

역수 법칙 모델에 대한 압력 기울기/유량간의 관계:

$$\frac{dP}{dl} = \frac{2K_2}{a} \left[\frac{(3n+1)Q}{\pi n a^3} \right]^n \quad (2.26)$$

뉴턴 액체의 경우 주어진 유량에서의 압력 강하는 반지름의 4승에 비례

면찰 담화 액체(예: $n=1/3$)의 경우 압력 강하는 반지름의 제곱에 비례

==> 관 흐름을 pilot plant로부터 공장 조업으로 scale-up하는 경우에 매우 중요

뉴턴 액체의 경우 관 흐름에서의 속도 분포는 포물선 형태

역수 법칙 액체에서의 속도 분포:

$$v(r) = \frac{Q(3n+1)}{\pi a^2(n+1)} \left(1 - \left(\frac{r}{a} \right)^{(n+1)/n} \right) \quad (2.27)$$

면찰 담화 정도의 증가에 따른 효과 (그림 2.15)

벽 근처의 얇은 층에서 면찰이 효과적으로 걸리게 되어 플러그 형태의 흐름이 됨.

가열과 냉각이 관 외부로부터 액체에 작용할 때인 열전달 측면에서는 중요함.

총괄 열전달은 관 벽 주변 액체의 면찰 속도에 의해서 부분적으로 조절

역수 법칙 액체의 경우 면찰 속도는 뉴턴 액체와 $[3+(1/n)]/4$ 만큼 차이가 남.

즉, 열전달은 면찰 담화 액체($n<1$)의 경우는 증가하게 됨을 의미.

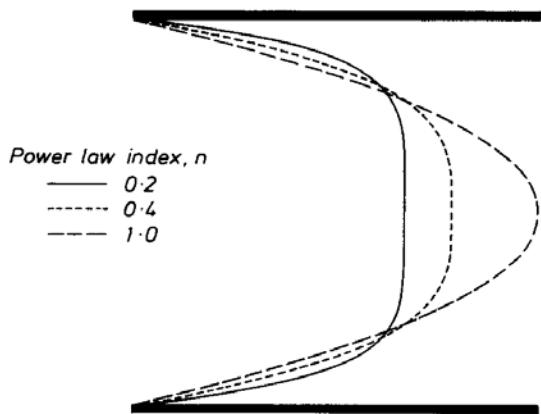


Fig. 2.15. The velocity profiles for the laminar flow of power-law liquids in a straight circular pipe, calculated for the same volumetric throughput. Note the increase in the wall shear rate and the increasingly plug-like nature of the flow as n decreases.

2.4.10 슬릿 점도계

슬릿 흐름: 두 개의 평행한 벽 사이에 가해지는 압력 기울기 하에서의 흐름
 ==> 2차원 모세관 흐름과 유사

슬릿 흐름에 대한 지배 방정식 (Walters 1975, 5장):

$$\sigma_w = \frac{h}{2} \frac{dP}{dl} \quad (2.28)$$

$$\dot{\gamma}_w = \frac{2Q}{bh^2} \left(2 + \frac{d \ln Q}{d \ln \sigma_w} \right) \quad (2.29)$$

여기서, h : 슬릿의 높이, b : 슬릿의 폭, Q : 유량, dP/dl : 압력 기울기

슬릿 흐름은 Lodge 응력계(stressmeter)의 점도계 버전의 기초를 이룸.

이 장치는 점성 가열(viscous heating)로부터의 영향을 거의 받지 않으면서 10^6 s^{-1} 보다도 큰 면찰 속도를 얻을 수 있다는 장점을 가짐.

2.4.11 온라인(On-line) 측정

“온라인”으로 액체의 점도를 측정하는 것이 종종 필요함.

==> 특히 액체의 구성이나 온도가 변화할 가능성이 있는 경우

모세관 점도계와 동심 원통관 점도계는 이런 목적으로 편리하게 적용 가능

모세관 점도계: 모세관은 흐름과 곧 바로 일렬로 설치

비뉴턴 액체에 성공적으로 적용하는 것은 쉽지 않음.

온라인 동심 원통관 장치: 나선형 흐름에 의한 데이터의 해석이 쉽지 않음(주의 요망).

다른 온라인 방법은 흐름 채널에 방해물을 수반하여 구성

예) 로타미터(rotameter)형 점도계의 경우 ~ 수직으로 경사진 튜브 안의 뜨개(float)는
기하학적 구조, 유량, 점도, 뜨개의 무게에 의존하면서 평형 위치에 도달함.

평행판 점도계도 온라인 측정용으로 사용됨 (Noltingk 1975 참고).