

제 7 장

현탁액 유변학

7.1 서론

현탁액의 유변학은 실제 산업에서 넓은 범위에 걸쳐 중요하게 응용됨.

현탁액으로 된 제품: 시멘트, 페인트, 인쇄용 잉크, 석탄 슬러리, 굴착용 점토(drilling muds), 의약품, 액체 연마 세제, 음식물 등

구성 입자들이 변형될 수 있는 현탁액: 유탁액(emulsion)에서 혈액에 이르기까지 다양

7.1.1 현탁액에 대한 점도 곡선의 일반적인 형태

모든 현탁액에 대한 일반적인 점도/면찰 속도 곡선 (그림 7.1)

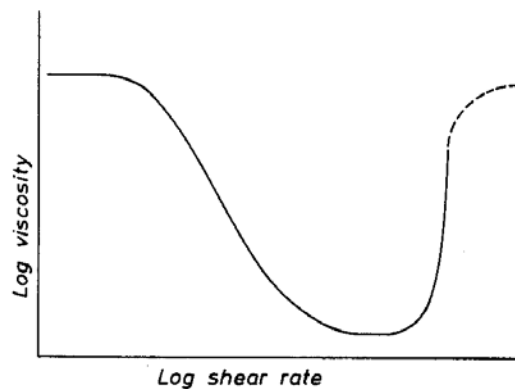


Fig. 7.1 Schematic representation of the flow curve of a concentrated suspension.

면찰 속도가 작을 때 ~ 하위(첫번째) 뉴턴 평탄면(plateau)이 나타남.

면찰 속도 증가 ~ 역수 법칙 면찰 담화 영역 지나 상위(두번째) 뉴턴 평탄면이 나타남.

적당한 조건이 주어지면 상위 뉴턴 영역의 어느 지점에서 고체 입자 현탁액의 점도 증가가 있을 수 있음.

첫번째 뉴턴 평탄면은 매우 높아서 때때로 측정이 불가능한 경우도 있음.

==> 낮은 면찰 속도에서의 거동은 종종 겉보기 항복 응력으로 묘사됨.

액체에 분산되어 있는 물질의 양에 대한 척도 ~ 상 부피 ϕ

: 현탁액에서 분산된 물질이 차지하고 있는 공간의 분율

농도 정의시 사용하는 질량에 대한 질량 분율이 아닌 부피에 대한 부피 분율

상 부피가 중요한 이유: 유변학은 입자 밀도와 상관없이 입자나 입자들의 집합체 (aggregates) 표면에 작용하는 유체동력학적 힘에 크게 의존하기 때문

7.1.2 액체에 분산되어 있는 입자에 미치는 힘에 대한 요약

흐름이 있는 현탁액에는 세 종류의 힘이 공존

첫째, 입자들 사이의 상호 작용에서 유발되는 콜로이드 기원의 힘

분극성(polarizability)과 같은 유체의 성질에 의해서는 조절 (점도에 의해서는 조절되지 않음)

이 힘에 의해 입자간에 전체적인 척력이나 인력이 발생

척력: 정전기적 전하에 의해 발생할 수 있음.

입자표면에 존재하는 고분자나 계면활성제의 엔트로피 척력으로도 발생

인력: 입자간에 항상 존재하는 London-van der Waals 인력

입자의 다른 부분에 있는 반대 전하들 간의 정전기적 인력 (즉, 점토 입자간의 모서리/면 인력)

모든 힘의 합력이 인력이라면 입자들은 응집하려는 경향이 있음.

전체적으로 척력이라면 입자들은 분리된 채로 남아 있음.

각각의 콜로이드 힘은 입자 표면에서부터 감소 속도가 다름.

함께 작용하는 수많은 힘들의 전체적인 결과 예측은 매우 복잡함.

(그림 7.2: 단일한 힘과 조합한 힘에 대한 몇 가지 형태)

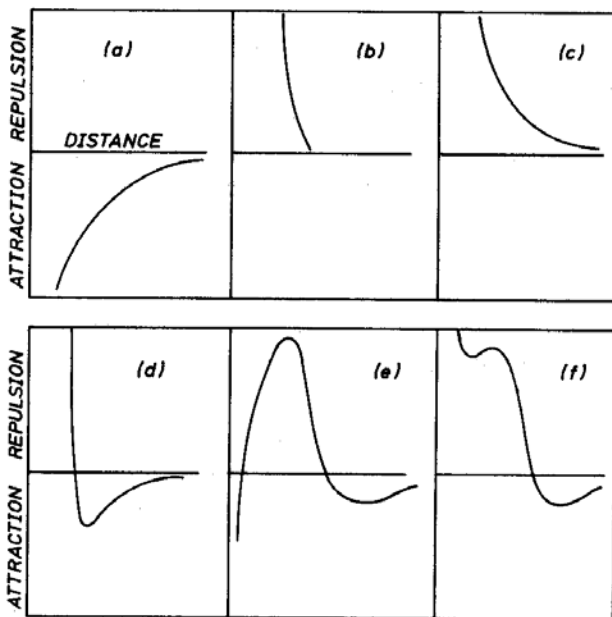


Fig. 7.2 Examples of the typical interaction forces between a pair of sub-micron particles: (a) van der Waals attraction (omnipresent); (b) Steric repulsion due to adsorbed macromolecules; (c) Electrostatic repulsion due to the presence of like charges on the particles and a dielectric medium; (d) A combination of (a) and (b); (e) A combination of (a) and (c); (f) A combination of (a), (b) and (c).

둘째, 항상 존재하는 Brown (열적) 불규칙화 힘

이 영속적인 불규칙화는 반지름 방향 분포 함수의 형태에 영향을 줌.
구형이 아닌 입자의 경우에는 공간적 배향도 불규칙하게 됨.
Brown 힘은 입자 크기에 의존성이 강해 크기가 $1\mu\text{m}$ 이하일 때 영향이 큼.
이 힘에 의해 입자들은 끊임없이 움직임.
(입자들의 공간적 분포는 시간에 대한 평균으로 묘사)

셋째, 입자에 작용하는 점성력

점성력은 입자와 주위 유체 사이의 국부 속도 차이에 비례
현탁액의 점도에 영향을 미치는 이 힘은 연속상의 점도를 경유하여 나타나게 됨.
따라서 “현탁액 점도”는 연속상 점도에 대한 상대적인 점도로 고려됨.

거시적 유변학은 이러한 미시구조적인 고려사항에 강하게 연관되어 있음.

(예: 고립된 입자들의 존재는 유체의 흐름선에 편차를 생기게 함. --> 점도 증가
고농도에서는 입자들이 서로의 운동 경로를 피해 움직임. --> 많은 저항 발생
입자들이 응집 구조 형성시 더 많은 저항을 겪음 (응집체들이 연속상을 포위)
--> 연속상 일부를 고정시켜 겉보기 상 부피를 증가 --> 더 높은 점도를 보임.

7.1.3. 정지 구조

정지상 액체에 입자들을 넣을 때 Brown 운동이 지배적인 경우
==> 불규칙 무질서 상태의 열역학적 평형 상태로 가정

콜로이드 힘이 지배적일 때, 입자들은 구조를 형성함.
(인력일 때는 응집체를 형성하며 척력일 때는 유사 격자(pseudo-lattice)를 형성함)

특정 응집체의 형태는 구형에 가까운 응집체에서 줄 모양의 것까지 다양함.
(안료 분산액은 응집체(flocs)를 형성하고 실리카 분산액은 줄 구조를 이룰 수 있음)

유사 격자는 극성 연속상에 분산되어 있는 같은 정전하를 지닌 입자계에서 형성
입자들은 가능한 한 서로로부터 멀리 위치
전하가 매우 크다면, 움직임에 제약을 받아 유사 결정(pseudo-crystal)으로 가시화됨
: 격자 공간이 빛의 파장 정도라면, 간섭 현상이 생겨 현탁액은 무지개 빛을 보임.

입자 표면에 계면 활성제를 흡착시키면 구조를 변화시킬 수 있음.
정전하에 의해 형성된 구조는 전해질을 가해 변화시킬 수 있음.

기본 입자가 비등방성이라면, 매우 복잡한 구조가 형성될 수 있음.

(예 1) 벤토나이트 점토 수성 현탁액: 기본 입자는 판상으로 면과 모서리에 반대의 전하
를 가짐 --> 모서리가 면에 끌려 카드로 만든 집 같은 응집체 구조를 형성

(예 2) 비누 결정의 현탁액: 비누는 긴 리본의 형태로 결정화될 수 있음 --> 리본들은
서로 감겨 윤활 그리스에서와 같이 엉킨 구조를 형성

콜로이드 힘의 중요성 판단 방법: 처음으로 이웃하는 입자 사이의 평균 거리 \bar{h} 를 입자 크기 d 와 부피 분율 ϕ 의 함수로 계산

$$\frac{\bar{h}}{d} = \left[\left(\frac{1}{3\pi\phi} + \frac{5}{6} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (7.1)$$

네 크기의 입자에 대한 콜로이드 힘의 작용 범위 (그림 7.3)

부피 분율 0.2, 입자 크기 0.05 μm 인 현탁액 ~ 정전기적 상호작용이 매우 중요
입자가 이 값보다 크거나 농도가 이 값보다 작으면 중요치 않음.

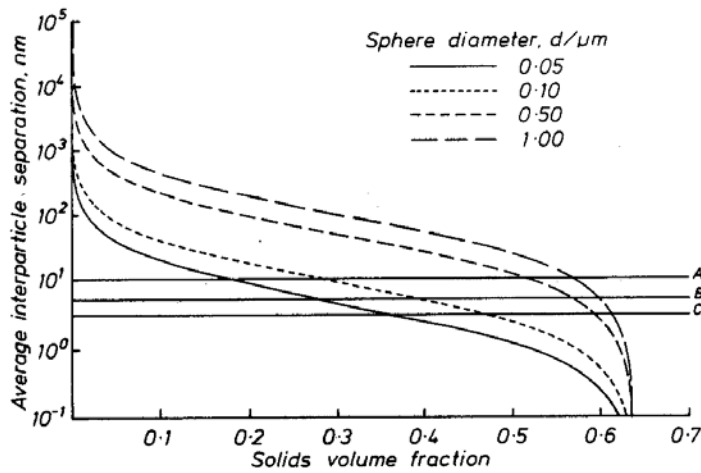


Fig. 7.3 Average interparticle separation as a function of concentration for monodisperse spheres (according to eqn. (7.1)) plotted for four particle sizes. The horizontal lines show twice the distance over which various interparticle forces typically operate: (A) Electrostatic forces in aqueous suspensions with low salt levels; (B) Steric forces originating from adsorbed macromolecules; (C) Steric forces originating from adsorbed nonionic detergents.

7.1.4 흐름에 의해 형성된 구조

Brown 힘이 지배적이어서 상대적으로 응집이 덜 된 경우

매우 낮은 면찰 속도에서 흐름이 일어나기 위해서는 입자들은 피해가거나 “건너뛰”

==> 큰 저항을 수반함. 즉, 높은 점도를 유발

입자들의 분포는 그대로 남아있음.

(Brown 운동이 면찰 운동보다 지배적이어서 정지 상태 분포의 불규칙화를 유지시킴)

약간 높은 면찰 속도에서 형성된 입자 구조 배향은 Brown 운동에 의해 회복되지 않음.

그러나 매우 낮은 면찰 속도일 때보다 더 자유롭게 이동 --> 점도 더 낮아짐.

더 높은 면찰 속도에서는 구조의 배향이 많이 이루어짐

(연속상만으로 이루어진 뚜렷한 층들에 의해 분리된 입자층들이 형성)

==> 점도는 최소값이 되며, 현탁액은 면찰 담화를 보임.
입자층의 존재는 광회절(light diffraction)에 의해 확인 가능

면찰 흐름을 멈추면, 흐름에 의해 형성된 층구조는 사라짐.
임계값 이상으로 면찰 응력을 증가시키면, 층이 파괴되어 서서히 사라짐.
==> 점도는 다시 증가, 또한 면찰을 걸어준 시간이 길수록 증가
흐름에 의해 생기는 구조는 점도와 비누 현탁액에서도 형성 가능
: 흐름은 판과 리본을 흐름의 방향으로 정렬시킴 --> 광학 기술로 확인 가능
흐름에 의해 응집이 증가하는 현상에 대한 예도 있음.

7.2 뉴튼 액체 내의 고체 입자 현탁액의 점도

7.2.1 묽게 분산된 현탁액

묽은 현탁액(10% 이하의 상 부피)의 점도 예측
본질적으로 구형 입자들에 대한 Einstein(1906, 1911)의 연구를 확장
입자 형태, 전하, 한 입자가 다른 입자에 근접시의 유체동력학적 상호작용 고려 가능

Einstein 식:

$$\eta = \eta_s(1 + 2.5\phi) \quad (7.2)$$

여기서, η : 현탁액의 점도, η_s : 연속상의 점도

식 (7.2) ==> 입자의 크기나 위치에 의한 영향이 없음

입자사이의 상호 작용을 고려하면 복잡해짐.
다른 입자의 존재는 ϕ 의 높은 차수의 항에 의해 설명
(신장 흐름의 경우에만 이론적으로 해석 가능
--> 이 흐름에서만 입자들의 상대적인 위치를 해석 가능)

Batchelor 식:

$$\eta = \eta_s(1 + 2.5\phi + 6.2\phi^2) \quad (7.3)$$

여기서 점도는 반드시 신장 점도(5장)로 해석해야 함.

면찰 흐름에 대해서는 많은 실험을 하였으나 ϕ^2 에 곱해진 값은 5 ~ 15까지 분포

묽은 현탁액 이론은 상 부피가 10% 이하인 범위에 적합

(연속상에 대하여 대략 40% 정도의 점도 증가)

7.2.2 최대 충전 분율

최대 충전 분율 ϕ_m

: 입자들이 “움직일 수 없이 꼭 들어찬(jam up)” 상태로 될 때의 입자 상부피
==> 연속적인 3차원 접촉으로 흐름이 불가능해지며 무한대의 점도를 갖게 됨.
==> 최대 충전 분율값은 입자들의 배치에 의존

단분산의 구인 경우의 최대 충전 분율 (대략적으로 0.5~0.75 사이에 분포)

표 7.1 다양한 배열에 따른 단분산 구의 최대 충전 분율

배열	최대 충전 분율
단순 입방	0.52
열역학적으로 가장 안정한 배위	0.548
육각형 형태로 충전된 쉬트	0.605
불규칙 충전	0.637
체심 입방 충전	0.68
면심 입방 / 육각형 형태의 충전	0.74

최대 충전 분율 ~ 충전 형태, 입자 크기 분포, 입자 형상과 관련

입자 크기 분포가 넓을수록 ϕ_m 이 커짐 <-- 작은 입자들이 큰 입자들 틈에 채워짐.
비구형 입자는 입자간의 공간이 효과적으로 채워지지 못하기 때문에 ϕ_m 값이 작음.
응집된 입자 ~ 최대 충전 분율이 작음. <-- 응집체는 조밀하게 충전된 것이 아님.

==> 비율 ϕ/ϕ_m 을 적절히 정규화된 농도로 사용

7.2.3 진한 뉴튼 현탁액

ϕ^2 보다 높은 차수의 항들이 중요해지는 진한 현탁액 ~ 이론적 해석은 어려움.
==> 해결 방법: 이웃하는 입자들의 영향을 평균하거나 컴퓨터 모델링을 이용

평균 기법에 의한 해석(Ball과 Richmond(1980))

--> 현탁액 내의 모든 입자들은 순차적으로 가해진 입자의 영향의 합으로 가정

미분 형태의 Einstein 식:

$$d\eta = (5\eta/2)d\phi \tag{7.4}$$

최종 현탁액의 정도는 상 부피를 0과 ϕ 사이에서 적분하여 얻어짐.

$$\eta = \eta_s \exp(5\phi/2) \quad (7.5)$$

==> 이 식은 구형 입자의 유한한 크기에 의한 입자간의 상관관계가 고려되지 않음.

==> 한 입자가 현탁액에 가해지면 충전이 어려워 $d\phi$ 보다 더 많은 공간을 필요로 함.

==> 그러므로 $d\phi$ 는 $d\phi/(1-K\phi)$ 로 대체 (K 는 “혼잡(crowding)” 효과를 나타냄)

이를 적분 하면,

$$\eta = \eta_s(1-K\phi)^{-5/(2K)} \quad (7.6)$$

==> $\phi = 1/K$ 일 때 정도가 무한대가 됨

($1/K$ 은 최대 충전 분율 ϕ_m 과 동일)

Ball과 Richmond의 표현은 Krieger와 Dougherty(1959)의 표현과 동일

Krieger와 Dougherty의 이론은 일반적인 경우 $5/2$ 는 고유 정도 $[\eta]$ 로 대신 가능

<-- 값 $5/2$ 는 구형 입자의 이상적으로 묶은 현탁액에 대한 고유 정도

==> $[\eta]$ 로 바꾸면 어떠한 형태의 입자들에 대해서도 설명이 가능해짐.

Krieger와 Dougherty 식:

$$\eta = \eta_s(1 - \phi/\phi_m)^{-[\eta]\phi_m} \quad (7.7)$$

==> ϕ 가 작을 때, 식 (7.6)과 (7.7)은 모두 Einstein 식으로 환원됨.

실험으로 식 (7.7)을 사용하여 얻은 ϕ_m 값은 입자 크기 분포에 강하게 의존함.

==> 다분산도(polydispersity; 크기의 퍼진 정도)가 클수록 ϕ_m 은 증가 (그림 7.4)

큰 입자의 분율 0.6 근처에서의 큰 정도 감소 (Farris 효과)

이 효과는 전체 상 부피가 50% 이상에서 매우 큼.

상 부피를 같게 유지하면서 여러 크기의 입자를 혼합하면 정도는 감소함

여러 크기의 입자를 혼합하면서 같은 정도를 유지하려면 상 부피를 증가시켜야함.

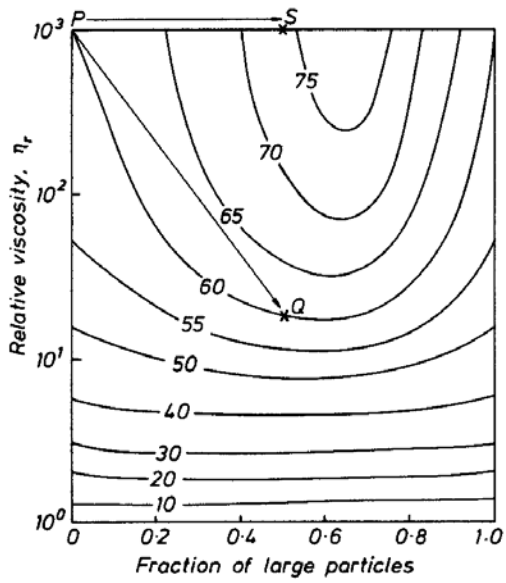


Fig. 7.4 Effect of binary particle-size fraction on suspension viscosity, with total % phase volume as parameter. The particle-size ratio is 5:1. P → Q illustrates the fiftyfold reduction in viscosity when a 60% v/v suspension is changed from a mono- to a bimodal (50/50) mixture. P → S illustrates the 15% increase in phase volume possible for the same viscosity when a suspension is changed from mono- to bimodal.

세 가지 크기의 단분산 입자 혼합물의 경우 (그림 7.5)

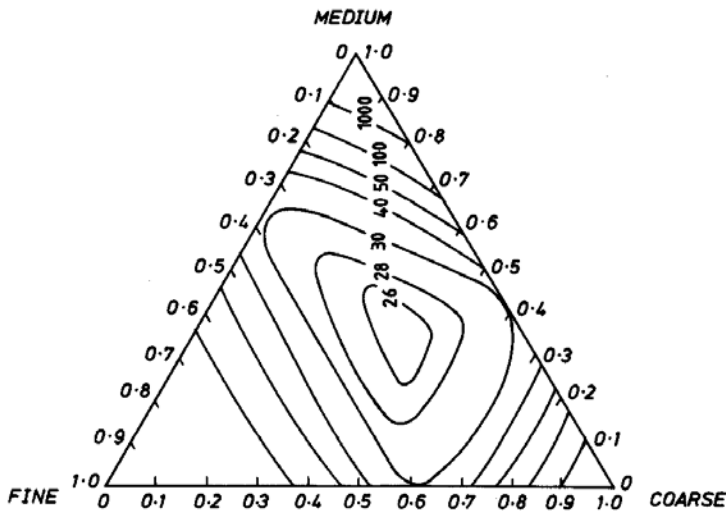


Fig. 7.5 Effect of particle-size distribution on trimodal suspension viscosity. Contours show values of the relative viscosity at 65% total solids (from the theoretical relationship of Farris (1968)).

==> 상대 점도 최소값은 최적화된 혼합물의 25 정도, 2성분 혼합물의 경우 30 정도

두 가지 크기의 입자에 대한 결과는 식 (7.7)을 사용할 때 작은 입자들이 연속상을 진하게 한 다음 큰 입자들이 이 상을 진하게 하는 경우로 볼 수 있으므로

$$\eta = \eta_s (1 - \phi_1 / \phi_{m1})^{-[\eta_1] \phi_{m1}} (1 - \phi_2 / \phi_{m2})^{-[\eta_2] \phi_{m2}} \quad (7.8)$$

ϕ_m 의 결정 ~ 계마다 측정하여 비선형 곡선 맞추기(curve fitting)를 통해 구해야 함.

ϕ_m 은 분산상의 농도나 연속상의 점도가 전체 점도에 미치는 영향 평가시에 유용

입자의 비대칭성은 고유 점도와 최대 충전 분율에 큰 영향을 줌.

구형 입자가 아닌 경우 같은 상 부피에 대하여 점도가 증가함 (그림 7.6과 7.7)

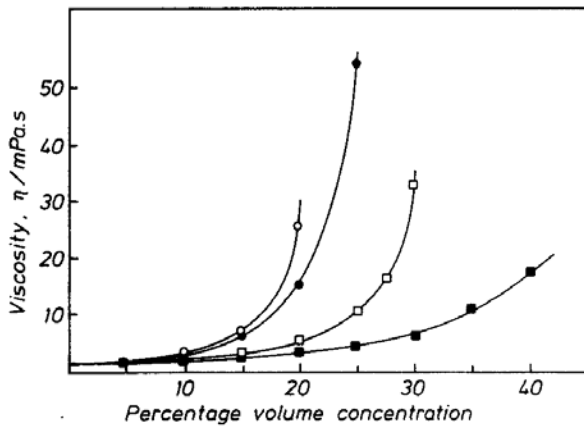


Fig. 7.6 Dependence of the viscosity of differently shaped particles in water on concentration at a shear rate of $300s^{-1}$ (from Clarke 1967). (■) spheres; (□) grains; (●) plates; (○) rods. (See Table 7.2.)

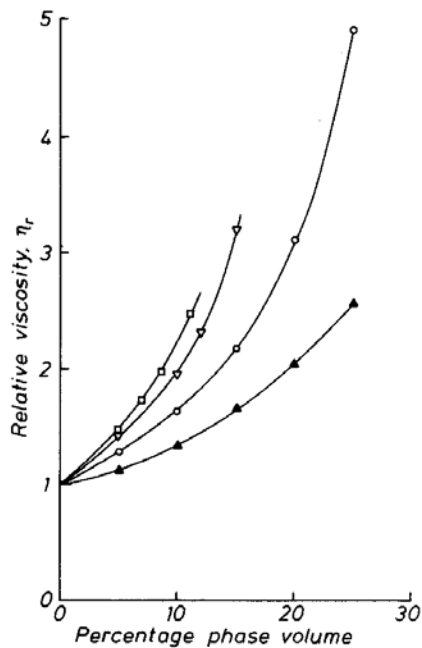


Fig. 7.7 Dependence of the relative viscosity of glass fibre suspensions of various length/diameter ratios (L/D) (cf. Giesekus 1983). (▲▲) spheres; (○○○) $L/D = 7$; (▽▽▽) $L/D = 14$; (□□□) $L/D = 21$ (see Table 7.2).

막대는 디스크보다 점도 증가 효과가 큼.
 ==> 묽은 현탁액의 경우 이론과 일치

아주 큰 축 비율(axial ratio)이 고유 점도 $[\eta]$ 에 주는 영향에 대한 실험식

$$\text{디스크: } [\eta] = 3 (\text{axial ratio}) / 10, \quad (7.8a)$$

$$\text{막대: } [\eta] = 7 [(\text{axial ratio})^{5/3}] / 100 \quad (7.8b)$$

비대칭 입자의 현탁액에 대한 측정결과로 얻은 $[\eta]$ 과 ϕ_m 값 (표 7.2)

==> 비대칭성 증가에 따라 $[\eta]$ 는 증가, ϕ_m 는 감소

==> 두 항의 곱은 거의 일정

==> $[\eta]$ 의 값은 식 (7.8a)와 식 (7.8b)가 예측하는 것과 정성적으로 일치함.

표 7.2 비대칭 입자 현탁액에 대한 실험 데이터를 식 (7.7)에 상관시켜 구한 $[\eta]$ 와 ϕ_m

구성계	$[\eta]$	ϕ_m	$[\eta]\phi_m$	참고문헌
구 (μm 이하 크기)	2.7	0.71	1.92	de Kruif et al. (1985)
구 ($40 \mu\text{m}$)	3.28	0.61	2.00	Giesekus (1983)
석고 분말	3.25	0.69	2.24	Turian and Yuan (1977)
이산화 타이타늄	5.0	0.55	2.77	Turian and Yuan (1977)
Laterite	9.0	0.35	3.15	Turian and Yuan (1977)
유리 막대 ($30 \times 700 \mu\text{m}$)	9.25	0.268	2.48	Clarke (1967)
유리판 ($100 \times 400 \mu\text{m}$)	9.87	0.382	3.77	Clarke (1967)
수정 분말 ($53 - 76 \mu\text{m}$)	5.8	0.371	2.15	Clarke (1967)
유리 섬유:				
형상비-7	3.8	0.374	1.42	Giesekus (1983)
형상비-14	5.03	0.26	1.31	Giesekus (1983)
형상비-21	6.0	0.233	1.40	Giesekus (1983)

7.2.4 진한 면찰 담화 현탁액

지금까지의 이론(식 (7.6))은 매우 낮은 면찰 속도의 경우에 대해 유도된 것임.
 이방성 구조에서도 어느 정도의 면찰 속도 범위에서 잘 맞음.

$[\eta]$ 와 ϕ_m 이 면찰 속도에 따라 변할 수 있음.

흐름에 의해 좀 더 안정된 입자의 배열이 이루어짐. ==> 면찰 담화 설명 가능

3차원 구조보다는 2차원 구조를 형성하는 것이 선호하는 재배열임.

매우 낮거나 매우 높은 면찰 속도에서 점도/상 부피 관계
 ==> Krieger-Dougherty 식이 잘 맞음(그림 7.8)

두 상황에 적절한 $[\eta]$ 과 ϕ_m 의 값:

$$\begin{aligned} \phi_m(\dot{\gamma} \rightarrow 0) &= 0.632, & [\eta](\dot{\gamma} \rightarrow 0) &= 3.13, \\ \phi_m(\dot{\gamma} \rightarrow \infty) &= 0.708, & [\eta](\dot{\gamma} \rightarrow \infty) &= 2.71 \end{aligned}$$

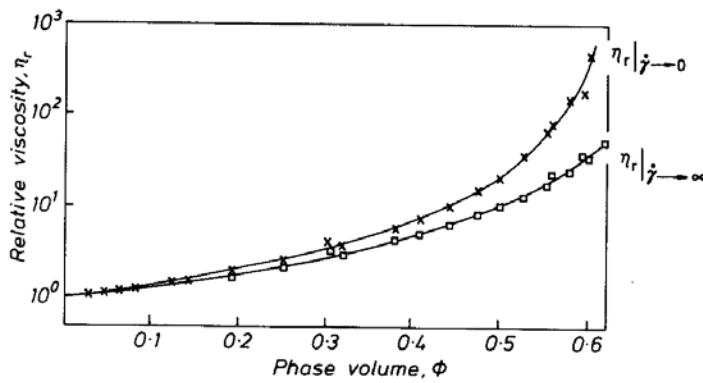


Fig. 7.8 Relative viscosity versus phase volume for monodisperse latices. Data points are those of Krieger (1972) and de Kruif et al. (1985) combined. The upper line relates to the zero shear-rate asymptotic relative viscosity, and is the best fit to the Krieger-Dougherty eq. (7.7) with $\phi_m = 0.632$ and $[\eta] = 3.133$. The lower line relates to the high shear-rate asymptotic value of 'relative viscosity' and is the best fit to eqn. (7.7), with $\phi_m = 0.708$ and $[\eta] = 2.710$.

면찰 속도의 양 극단이 아닌 중간 값에서의 점도
 상 부피와 상관 관계를 갖고 있음.
 같은 면찰 속도가 아닌 면찰 응력에서 측정한 점도를 상관시켜야 함.

데이터를 좀더 환산시키는 것이 가능함(Krieger(1972)의 제안)

==> $[\eta]$ 과 ϕ_m 이 응력에는 의존하지만 입자의 크기에 대해서는 무관

==> 서로 다른 크기의 입자로 이루어진 현탁액 점도와 상관 관계를 알기 위하여 면찰 속도 대신 새로운 변수의 사용을 제안함.

$$P_e = 6\sigma a^3/kT \tag{7.9}$$

여기서, a : 입자의 반지름, σ : 면찰 응력, kT : 열 에너지 단위

상호작용이 없는 μm 이하 크기 현탁액의 점도/면찰 응력 곡선은 입자 크기, 온도, 연

속상의 정도에 상관없이 한 곡선으로 환산 가능함(그림 7.9).

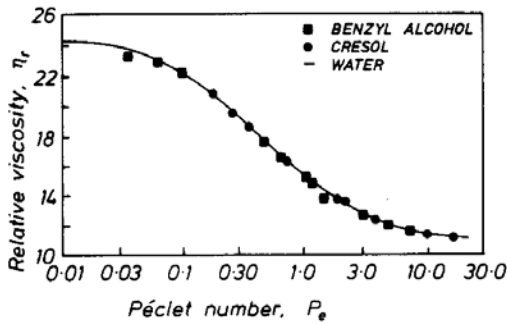


Fig. 7.9 Composite curve of relative viscosity versus modified Péclet number (see eqn. (7.9)). Points are for 0.1–0.5 μm latex particles dispersed in two solvents; the solid line is for the same-sized particles dispersed in water; the volume fraction is 0.50 (reproduced from Krieger 1972).

이 “Krieger 변수”는 무차원으로 사실상 수정된 Péclet 수에 해당 (Péclet 수는 입자에 의해 생긴 점성력에 대한 Brown 힘의 비로 정의)

진한 현탁액을 설명할 경우 연속상보다 현탁액의 정도가 더 적절함.
대개의 경우 정도 대 P_e 곡선의 형태는 실험식인 Ellis 모델을 따름:

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + b(P_e)^p} \quad (7.10)$$

여기서, b 와 p는 무차원 양(2.3.2절 참조).

7.2.5 상 부피 효과의 실제 결과들

1 질량측정 오차

식 (7.7) ==>농도 30% 이하의 상 부피에서 정도는 농도에 따라 천천히 변함.
매우 낮거나 매우 높은 면찰 속도에서의 정도 동일
즉, 묽은 현탁액은 기본적으로 뉴턴 유체

0.5 근처의 ϕ 값에서 ϕ 나 ϕ_m 의 작은 변화는 정도를 크게 변화시킴.

면찰 담화의 정도를 변화시킴.

==> 입자의 질량측정에 작은 오차는 큰 정도 차이를 유발시킬 수 있음(그림 7.10).

소량의 부유상이 매질상에 흡수되면 진한 현탁액의 정도를 크게 변화시킬 수 있음.

(제조한 후의 고분자 라텍스에서 흔함)

연속상의 0.5%가 분산상에 흡수되면 상 부피는 1% 증가(단지 0.2%의 입자크기 증가)

==> 상 부피가 큰 경우 정도가 두 배 이상 증가할 수 있음.

==> 현탁 유변학에서 정도는 매우 민감한 변수임.

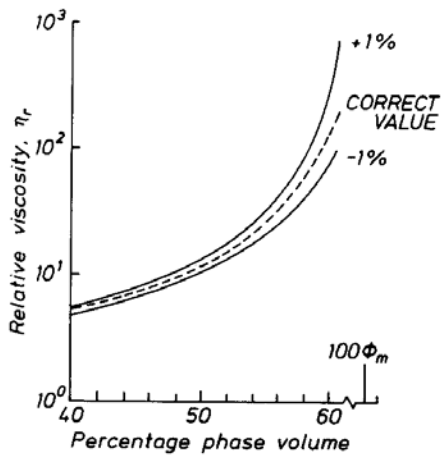


Fig. 7.10 Relative viscosity versus nominal phase volume showing the effect of a 1% error in phase volume.

II 상분리 효과

입자의 침전 또는 '크리밍(creaming)'은 측정 정도의 증가를 유발시킴.
대략 0.5 이상의 상 부피에서 이 효과는 극도로 현저함.

III 벽면 효과

"벽면 효과(wall effect)": 흐름 통로의 고체 벽면에 근접한 현탁액의 농도 감소 현상
==> 첫째, 입자들이 기하학적으로 벽 근처에서는 내부처럼 배열해 있을 수 없음.

둘째, 높은 면찰 속도 영역에서 낮은 면찰 속도 영역으로 입자 이동

(Segré 와 Silberberg(1962)에 의해 입증된 입자들의 유체동력학적 재분포)

벽면 고갈을 설명하기 위해 벽에서만 연속상 층의 개념을 사용하고 다른 곳에서는 정상적인 분산을 적용함(고갈된 층 두께는 입자 반지름 정도의 차수).

벽면 효과로 점도 측정치가 작아짐(관 반지름이 감소할수록 감소 정도 증가: 그림 7.11)

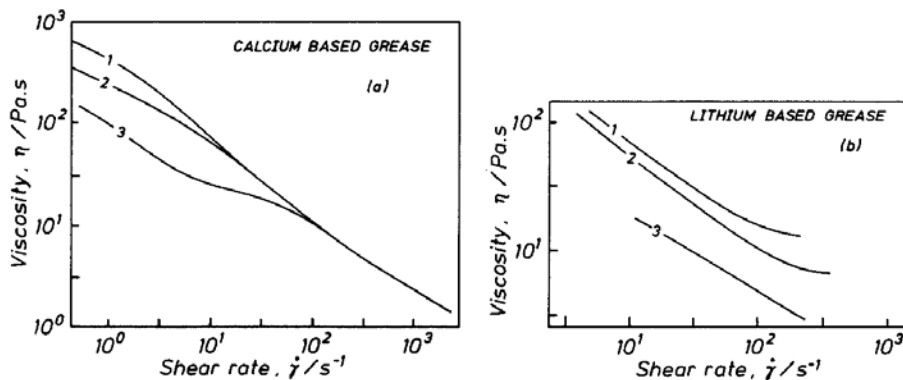


Fig. 7.11 (a) and (b): Viscosity measurements for greases measured in axial flow between parallel cylinders (plunger viscometer) using various annular gaps. Gap/mm: (1) 0.624; (2) 0.199; (3) 0.042. The viscometer-size effect disappears at higher shear rates away from the "yield stress" region. (Bramhall & Hutton 1960).

7.2.6 진한 현탁액의 면찰 농화

응집하지 않는 고체 입자의 진한 현탁액은 면찰 농화의 경향을 보임.
 면찰 농화의 특징이나 정도는 상 부피, 입자 크기 분포, 연속상 점도에 의존
 면찰 농화 영역은 2차원 층의 형성에 의해 야기되는 면찰 담화 영역 다음에 나타남.
 층의 배열은 불안정하고 임계 면찰 응력 이상에서 파괴됨.
 계속해서 일어나는 불규칙 배열은 정도를 증가시킴.

일정 범위의 입자 농도에 대한 점도/면찰 속도의 결과(그림 7.12)

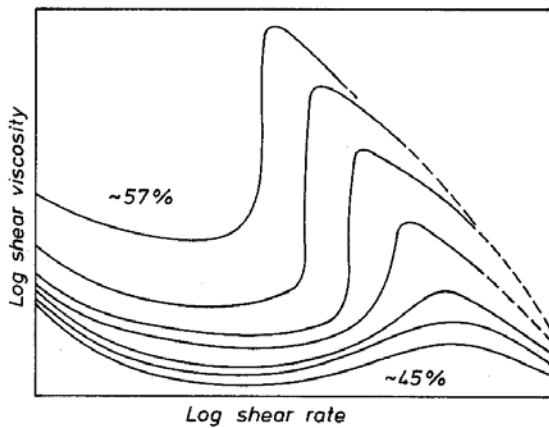


Fig. 7.12 Schematic representation of viscosity versus shear rate for shear-thickening systems, with phase volume as parameter (cf. Barnes, 1989).

면찰 농화로 전이되기 위한 임계 면찰 속도는 ϕ 가 0.5 근처일 때 거의 변하지 않음.
 0.5보다 훨씬 큰 상 부피에서 임계 면찰 속도는 감소
 0.5보다 훨씬 작은 상 부피에서는 임계 면찰 속도 증가(그림 7.13)

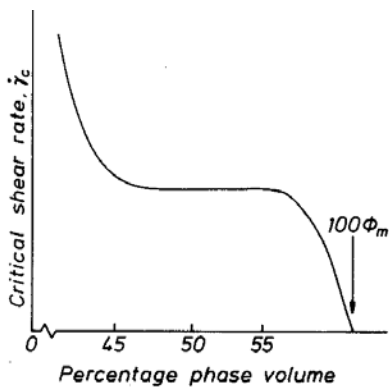


Fig. 7.13 Schematic representation of the dependence of the critical shear rate for the onset of shear-thickening $\dot{\gamma}_c$, as a function of the phase volume of the dispersed phase ϕ .

전이 상태 이상에서의 점도/면찰 속도 곡선의 크기와 기울기는 입자의 농도 증가에 따라 증가(그림 7.12와 7.14)

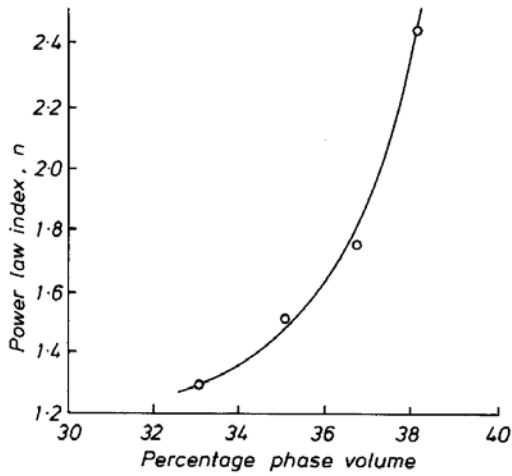


Fig. 7.14 The power-law index n for the shear-thickening region of starch suspensions (after Grisley and Green 1971).

아주 큰 상 부피에서는 흐름 불안정성 때문에 실험을 수행하는 것이 어려움.
 면찰 속도가 매우 높은 영역에서 점도는 다시 감소함.

상 부피가 0.5 근처에서는 입자 크기가 임계 면찰 속도에 미치는 영향이 매우 큼.
 (대략적으로 입자 크기의 제곱의 역수에 비례함: 그림 7.15).

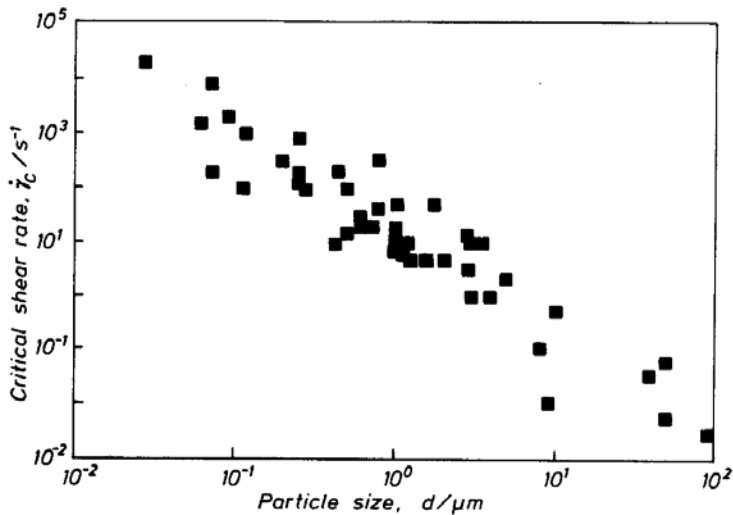


Fig. 7.15 Shear rate for the onset of shear-thickening $\dot{\gamma}_c$, versus particle size for suspensions with phase volumes around 0.5 (Barnes, 1989).

연속상의 점도도 매우 중요

연속상 점도가 증가하면 임계 면찰 속도는 감소함.

==> 면찰 농화의 시작점에 대해 (면찰 속도보다는) 면찰 응력이 보다 관련이 있음을 반영하는 것임(그림 7.16).

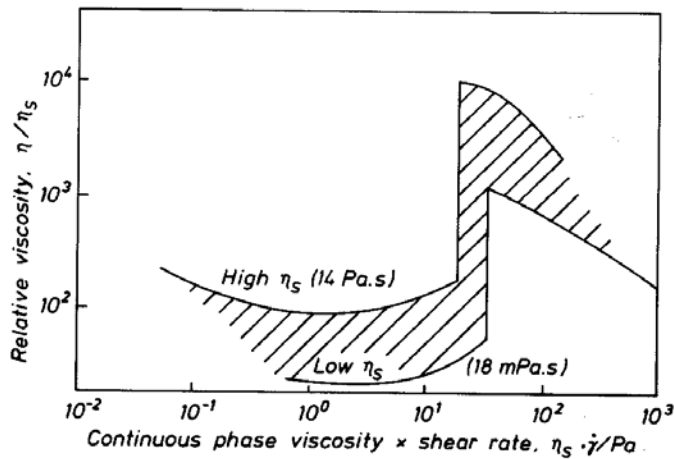


Fig. 7.16 Envelope of flow curves for latices dispersed in various solvents whose viscosities vary from 18 mPa.s to 14 Pa.s. (Redrawn from Hoffman 1972.)

면찰 농화의 정도는 입자 크기 분포가 넓어짐에 따라 종종 완화됨(그림 7.17).

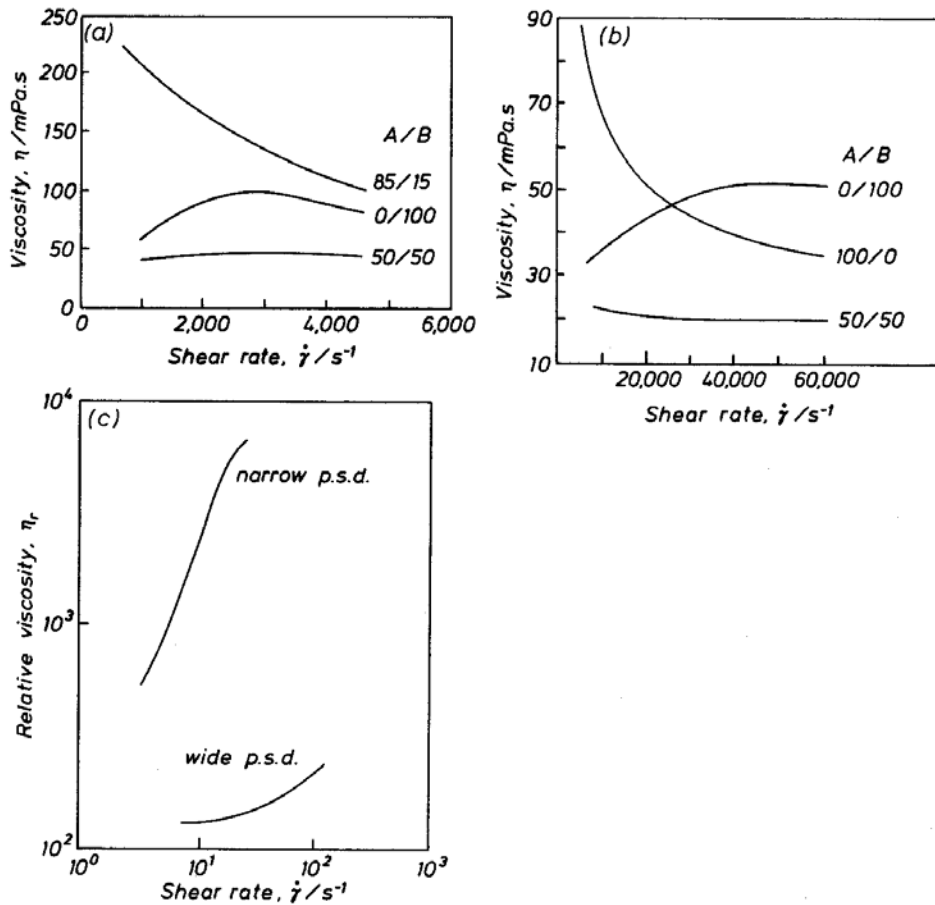


Fig. 7.17 (a) Viscosity of clays A and B at different ratios as a function of shear rate at a solids content of 44% by volume (67% by weight). Clay A 9 μm , clay B 0.7 μm . (Alinec and Lepoutre 1983); (b) Viscosity of calcium carbonate blends at 48% solids content by volume (71.4% by weight) as a function of shear rate. Clay A 12 μm , clay B 0.65 μm . (Alinec and Lepoutre 1983); (c) Effect of particle-size distribution. (Redrawn from Williams et al. 1979).