

# 전단희석 액적의 건조 벽면 충돌 후 전개-수축 거동의 관찰

안상모\* · 이상용†

## Examination of Spread-Recoil Behavior of a Shear-thinning Liquid Drop on a Dry Wall

Sang Mo An and Sang Yong Lee

**Key Words:** Shear-thinning Liquid(전단희석 유체), Drop(액적), Viscosity(점도), Spread-Recoil Behavior(전개-수축 거동), Dry Wall(건조 벽면)

### Abstract

In the present study, spread-recoil behavior of a drop of shear-thinning liquid (xanthan solution) on a dry wall (polished stainless-steel plate) was examined and compared with that of Newtonian liquid (glycerin solution). Nine different kinds of xanthan and glycerin solutions were tested, including three pairs of xanthan and glycerin solutions, each having the same viscosity in low shear rate region ( $10^{-2}$ - $10^0$  1/s). The drop behavior was visualized and recorded using a CCD camera. The maximum diameter and the spreading velocity of the xanthan drops turned out to be significantly larger and the time to reach their final shape was much shorter compared to the cases with the glycerin solutions, due to the smaller viscous dissipation resulted from lower viscosity in the higher shear rate region ( $>10^0$  1/s). As a result, the maximum diameters were measured to be larger than the predicted values based on the model proposed for Newtonian liquids, and the deviation was more pronounced with the solution with the larger viscosity variation. Consequently, viscosity variation with the shear rate was found to be a dominant factor governing the spread-recoil behavior of shear-thinning drops.

### 기호설명

D	충돌 전 액적의 등가직경	[m]
D(t)	충돌 후 경과시간에 따른 액적의 직경	[m]
E	에너지	[J]
k	흐름 조밀도 지수	[Pa·s <sup>n</sup> ]
n	흐름 거동 지수	[-]
Re	액적의 레이놀즈 수 ( $=\rho \cdot V \cdot D/\mu$ )	[-]
V	액적의 충돌속도	[m/s]
We	액적의 웨버 수 ( $=\rho \cdot V^2 \cdot D/\mu$ )	[-]

$\dot{\gamma}$	전단 변형율	[1/s]
$\theta$	정적 접촉각	[degree]
$\mu$	유체의 점도	[Pa·s]
$\rho$	유체의 밀도	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	표면장력	[N/m]

### 이래첨자

diss	소산
k	운동
max	최대
o	영점 전단
s	표면
1	충돌 직전 상태
2	최대 액막 상태

(2009년 9월 5일 접수 ~ 2009년 9월 30일 심사완료)

\*한국과학기술원

†책임저자, 회원, 한국과학기술원

E-mail : sangyonglee@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3026 FAX : (042)869-8207

## 1. 서 론

액적이 표면에 충돌하는 현상을 비롯한 액적과 표면 간의 상호작용은 분무 도장, 분무 냉각, 직접 분사식 내연기관, 잉크젯 프린팅, 화재진압용 스프링클러 시스템 등의 여러 응용분야에서 광범위하게 나타나며, 약 100여 년 전부터 현재에 이르기까지 이와 관련된 수 많은 연구가 진행되어왔다<sup>(1)</sup>. 그러나 이러한 노력에도 불구하고 아직까지 그 현상을 완벽하게 이해하고 있지 못하며, 끊임없이 여러 분야에서 연구의 대상이 되고 있다.<sup>(2)</sup>

액적과 표면간의 상호작용에 관한 기존연구들은 주로 비교적 해석이 용이한 뉴턴 유체를 대상으로 진행되어왔다<sup>(1-3)</sup>. 그러나, 주변에 편재하는 대부분의 유체들, 특히 실제 응용분야에서 사용되는 대부분의 유체들은 복잡한 비뉴턴 유체의 물성을 갖는다. 뿐만 아니라, 비뉴턴 유체의 물성을 활용하여 부착효율을 향상시킬 수 있는 가능성이 제기되면서, 약 20여년 전부터 비뉴턴 유체를 대상으로 한 연구가 주목을 받기 시작하였다<sup>(4)</sup>.

비뉴턴 유체의 액적과 표면간의 상호작용에 관한 기존의 연구들은 비뉴턴 유체가 갖는 유변학적 물성(점도의 변화 및 탄성)을 토대로 시간에 따른 액적의 거동특성을 예측하는 것이라고 할 수 있으며, 연구내용에 따라 다음과 같이 크게 두 가지로 구분된다. 한 가지는 일정한 속도로 표면에 충돌한 액적의 시간에 따른 형상변화(액적의 직경 및 높이, 최대 액막 직경 등) 및 수력학적 거동 영역(스프레드/리바운드(spread/rebound) 혹은 스프레드/스플래시(spread/splash) 천이조건)의 구분에 대한 연구이며, 다른 한 가지는 표면의 젖음성 특성에 따른 액적의 퍼짐(spreading 혹은 wetting) 과정, 즉, 충돌과정 없이 표면 위에 놓여진 액적의 시간에 따른 형상변화(퍼짐 속도, 동적 접촉각 등)에 초점을 둔 연구이다.

Copper-Whitez 등을 포함한 몇몇의 연구자들<sup>(4-6)</sup>은 점도는 거의 일정하지만 탄성만을 갖는 유체 의 액적이 표면에 충돌할 경우, 신장점도의 증가로 인하여 퍼짐 과정 이후에 액적의 회복하는 속도가 감소하며, 결과적으로 뉴턴 액적에 비하여 리바운드 현상이 현격히 억제된다고 보고하였다. 반면, Rozhkov 등<sup>(7)</sup>은 이와 유사한 종류의 액적을 매우 좁은 표면에 충돌시킴으로써 액적과 표면간의 상호작용을 배제시킬 경우, 회복속도가 지연되는 현상이 발생되지 않을 뿐만 아니라, 뉴턴 유체에 속하는 물의 경우와 동일한 최대 액막 직경을 갖는다는 것을 실험적으로 확인하였다. 따라서, 상대적으로 넓은 표면에 탄성을 갖는 액적이 충돌할 때 회복 속도가 감

소하는 이유는 유체의 신장점도가 증가하기 때문이 아니라, 액적과 표면간의 상호작용에 의한 접촉각의 변화로 액적의 움직임이 방해받기 때문이라고 보고하였다. 한편, Bartolo 등<sup>(8)</sup>은 액적이 넓은 표면에 충돌할 경우, 탄성의 정도와는 무관하게 동일한 최대 액막 직경에 도달한다 것을 실험적으로 확인하였다. 따라서, 신장점도로는 그들과 Rozhkov 등<sup>(7)</sup>의 실험결과를 설명할 수 없다고 하였다. 왜냐하면, 유체의 신장점도가 액적의 회복속도를 감소시키는 주요인이었다면, 퍼짐 과정에서 이와 동일한 이유로 최대 액막 직경은 현격히 감소해야 하고, 액적과 표면의 상호작용을 배제시킬 경우에는 순수한 신장흐름 조건에 해당되어, 오히려 회복속도가 물의 경우보다 훨씬 느려져야 하기 때문이다. 뿐만 아니라, Rozhkov 등<sup>(7)</sup>의 해석과는 달리, 탄성의 정도에 무관하게 액적의 동적 접촉각의 차이는 미미함을 확인하였다. 따라서, 탄성을 갖는 액적이 넓은 표면에 충돌할 때 회복속도가 감소하는 이유는 신장점도나 접촉각의 변화 때문이 아니라, 접촉선 부근에 발생한 수직응력이 액적의 회복을 방해하기 때문이며, 앞선 연구 결과들은 이러한 관점에서 재해석 되어야 한다고 주장하였다. 그 밖에 Nigen<sup>(9)</sup>은 항복응력을 갖는 빙햄 유체(Bingham liquid)를 빠른 속도로 표면에 충돌시킬 경우, 표면장력이 항복응력을 이기지 못하여 회복현상이 현격하게 억제되기 때문에, 도장 및 코팅 공정에서의 효율을 극대화 할 수 있다고 보고하였다.

한편, 비뉴턴 액적의 충돌 후의 수력학적 거동 영역을 구분하는 연구로서, Crooks와 Boger<sup>(10)</sup>은 탄성을 갖는 액적이 표면에 충돌할 경우, 뉴턴 액적보다 스프래시 현상이 현격히 억제됨을 확인하였다. 이로부터 그들은 Stow와 Hadfield 등<sup>(11)</sup> 및 Cossali 등<sup>(12)</sup>이 뉴턴 유체를 기반으로 제시한 스프레드/스플래시 천이조건을 지적하였다. 이 밖에 Copper-Whitez 등<sup>(4)</sup>도 탄성을 갖는 액적의 경우 리바운드 현상이 현격히 억제됨을 확인함으로써, Mao 등<sup>(13)</sup>이 제시한 스프레드/리바운드 천이조건으로는 이러한 비뉴턴 유체의 거동을 적절히 예측할 수 없다고 보고하였다.

마지막으로 비뉴턴 액적의 퍼짐 과정에 대한 연구 결과로서, Carré 와 Eustache<sup>(14)</sup>는 전단회석 액적의 퍼짐 속도와 동적 접촉각의 관계에 대한 이론적인 모델을 제시하였으며, Rafai 와 Bonn<sup>(15, 16)</sup>은 전단회석 액적의 퍼짐 속도가 뉴턴 액적의 퍼짐 속도보다 미미하게 작음을 확인하고, Starov 등<sup>(17)</sup>이 제시한 모델의 타당성을 입증하였다. 이후 Wang 등<sup>(18, 19)</sup>은 표면의 젖음성(wettability)에

다른 동적 접촉각 및 액적의 반경 변화와 같은 액적의 형상을 예측할 수 있는 포괄적인 관계식을 제시하였다.

지금까지 살펴본 바와 같이, 일정한 속도로 표면에 충돌하는 비뉴턴 액적에 대한 대부분의 기존연구들은, 탄성만을 갖는 유체를 대상으로 하고 있으므로, 점도의 변화에 의한 영향은 고려되어 있지 않다. 한편, 탄성의 영향과는 별개로, 유체의 점도는 액적의 거동을 지배하는 매우 중요한 인자들 중에 하나로 알려져 있다<sup>6)</sup>. 이는 점도에 따라 충돌과정 동안 점성에 의해 소산되는 에너지의 양이 달라지며, 그 결과로 액적은 다른 매우 거동 특성을 보이기 때문이다<sup>13)</sup>. 따라서, 전단희석 유체와 같이, 충돌과정 동안 전단 변형률에 따라 점도가 변하는 비뉴턴 유체의 경우, 충돌 과정에 상관없이 일정한 점도를 갖는 뉴턴 유체의 경우와 구별되므로, 이로 인한 액적의 거동은 매우 다를 것으로 예상된다.

따라서, 본 연구에서는 전단희석 유체 및 뉴턴 유체의 액적을 표면에 충돌시키고 시간에 따른 액적의 거동을 가시화 기법을 이용하여 관찰함으로써, 전단 변형률에 따른 유체의 점도변화가 액적의 충돌 후 거동에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서 알아보았다.

## 2. 실험장치 및 방법

표면에 충돌한 이후의 시간에 따른 액적의 거동 관찰하기 위하여, 그림 1과 같이 암실 내부에 가시화 실험장치를 구성하였다. 유체는 실린지 펌프(syringe pump)로부터 일정한 유량으로 공급되고, 내경이 0.41 mm인 바늘을 통과하면서 균일한 크기의 단일 액적이 생성된다. 생성된 액적은 표면을 향하여 수직인 방향으로 떨어지면서 표면과 바늘 사이를 통과하는 적외선 레이저 빔

(LTC100-B, Thorlabs)을 통과하게 되는데, 그 순간 광학 센서(PDA50B-EC, Thorlabs)로부터 발생된 5 V 범위의 TTL 신호가 디지털 지연 신호 생성기(digital delay generator, DG565, BNC)로 전달된다. 이후 전달된 신호에 의해 구동된 지연 신호 발생기는 일정 지연시간이 경과한 시점에 신호를 발생시켜 CCD 카메라(ProgRes<sup>®</sup> MF Cool, Jenoptik)와 광원(stroboscope)을 각각 개별적으로 작동시킨다. 이러한 일련의 과정으로부터 충돌 이후 정해진 경과 시간에서의 액적의 형상을 선명하게 기록하는 것이 가능하다. 한편, 이전 실험에 의해 표면에 형성된 액적들은 크리닝 티슈를 이용하여 제거함으로써, 각각의 실험조건에 대하여 건조한 표면의 상태가 유지되도록 하였다.

충돌 직전의 액적의 직경과 속도는 CCD 카메라를 통하여 얻은 이미지를 통하여 측정하였다. 액적은 완벽한 구형이 아닐 가능성을 고려하여 액적의 수평방향 길이 ( $D_h$ )와 수직방향 길이 ( $D_v$ )를 모두 측정하고, 식 (1)을 이용하여 충돌 전 액적의 등가직경을 구하였다(실제로 측정된 수평방향과 수직방향 길이의 차이는 매우 작았으며, 따라서 충돌 전 액적의 모양은 거의 완벽한 구형에 가까웠다). 충돌 전 액적의 직경은 유체 별 물성의 차이로 인하여 각 액체 별로 2.4 와 2.7 mm 범위에 분포하였고, 매 실험 시에 측정하였다. 한편, 액적의 충돌 속도는 광원을 다중 노출시켜 촬영된 이미지로부터 측정하였다. 즉, 연속된 노출 사이의 시간 간격과 액적의 수직방향 이동거리를 측정함으로써 액적이 충돌하기 직전의 속도를 계산하였으며, 충돌속도는 모든 실험 조건에서 2.9 m/s로 고정하였다.

$$D = \sqrt[3]{D_h^2 D_v} \quad (1)$$

전단희석 유체로는 xanthan gum(G1253, Sigma-Aldrich) 분말과 증류수가 혼합된 용액을 사용하였으며, 혼합 시 24시간 동안 자력 교반기를 사용함으로써 분말이 증류수에 완전히 용해되도록 하였다. 한편, xanthan 용액의 대조군인 뉴턴 유체로는 글리세린(glycerin, 순도: 99.0%)과 증류수를 위와 같은 방법으로 혼합한 용액을 사용하였다. 이와 같은 방법으로 농도가 다른 다양한 xanthan 및 글리세린 용액을 구성하였으며, 각각의 점도를 회전식 레오미터(rheometer Mars, Haake)를 이용하여 측정하였다. 점도 측정결과의 신뢰도를 평가하기 위하여 표준유체(mineral oil: 1.65 Pa·s)을 이용하여 점도를 측정해 본 결과, 측정결과는 측정 전단 변형률 범위( $10^{-2} - 10^3$  1/s)에서 약 ±4% 이내로 만족함을 확인하였다. 점

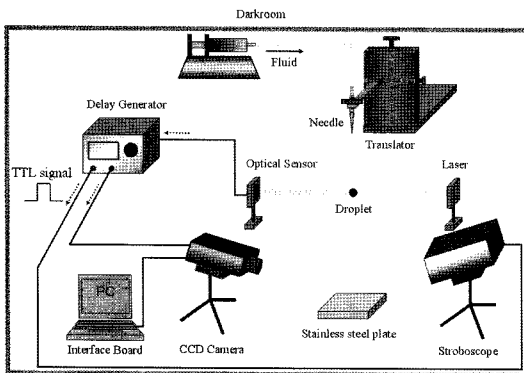


Fig. 1 Experimental setup for visualization

Table 1 Properties of test fluids

Test fluids	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\sigma$ [mN/m]	$\mu$ (or $\mu_0$ )[Pa·s]	$k$ [Pa·s <sup>n</sup> ]	n	$\theta$ [degree]
X <sub>0.05</sub>	998 ± 1	72.12	0.12	0.068	0.54	79.76
X <sub>0.1</sub>		71.98	0.36	0.168	0.47	80.37
X <sub>0.15</sub>		71.50	0.62	0.263	0.43	80.72
X <sub>0.2</sub>		71.38	1.51	0.446	0.37	81.81
X <sub>0.35</sub>		71.51	12.46	1.283	0.28	82.99
X <sub>0.5</sub>		72.13	49.70	3.049	0.21	83.52
G <sub>88</sub>	1145	65.76	0.11	-	1	79.88
G <sub>96</sub>	1204	65.09	0.34	-	1	75.34
G <sub>pure</sub>	1231	64.97	0.67	-	1	68.92

도측정의 결과를 바탕으로 선정된 실험유체의 표면장력은 자동식 계면 장력계(Sigma 700, KSV Instrument Ltd.)를 이용하여 측정하였다.

충돌실험을 위한 기관으로는 위치 별로 균일한 표면 거칠기를 갖도록 연마된 스테인리스 스틸(stainless steel) 기관을 사용하였으며, 표면 조도 측정기(SJ-400, Mitutoyo)를 이용하여 기관의 표면 조도를 측정한 결과 평균 조도는 0.03 μm였다. 한편, 기관 위에서의 유체의 정적 접촉각은 접촉각 분석기(Phoenix 300 plus, CEO)를 이용하여 측정하였다.

유체의 점도를 포함한 모든 실험유체에 대한 물성치를 표 1에 나타내었다(실험유체간 구별이 용이하도록, xanthan 용액은 'X'로, 글리세린 용액은 'G'로 표기하였으며, 각각의 혼합 질량 분율(wt%)을 하첨자를 이용하여 표기하였다). 실험유체로는 영점 전단점도가 같은 세 쌍의 xanthan 및 글리세린 용액(첫 번째 쌍: Fluid X<sub>0.05</sub>와 Fluid G<sub>88</sub>, 두 번째 쌍: Fluid X<sub>0.1</sub>와 Fluid G<sub>96</sub>, 세 번째 쌍: Fluid X<sub>0.15</sub>와 Fluid G<sub>pure</sub>)과 이들보다 높은 영점 전단점도를 갖는 3 종류의 xanthan 용액(Fluids X<sub>0.2</sub>, X<sub>0.35</sub>, X<sub>0.5</sub>)을 포함하여 총 9 종류가 선정되었다. 한편, k와 n은 각각 비뉴턴 유체의 점도변화를 특성화할 때 주로 사용되는 멱급수 법칙(power law, 식 (2))에서의 상수들로서, k가 클수록 유체의 점성

$$\mu = k \cdot |\dot{\gamma}|^{n-1} \quad (2)$$

이 크다는 것을 의미한다. 또한, n이 1일 경우에는 뉴턴 유체의 점도를 의미하며, 1에서 멀어질수록 비뉴턴 유체의 물성이 두드러지게 나타남을 의미한다. 특히, 전단

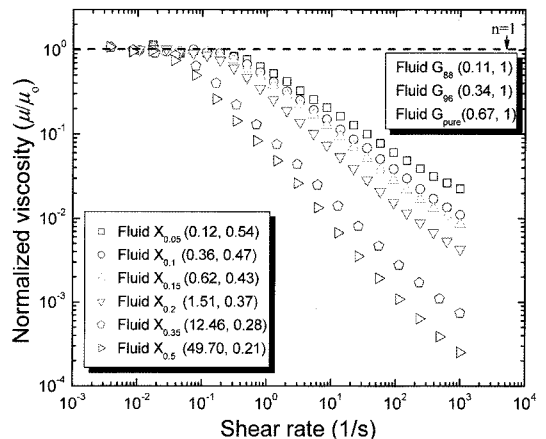


Fig. 2 Normalized viscosity with shear rate of test fluids

희석 유체의 경우에는 n이 작아질수록 전단 변형율이 증가함에 따라 점도가 크게 감소함을 의미한다. 영점 전단점도 (zero-shear viscosity, μ<sub>0</sub>)는 매우 낮은 전단 변형을 영역에서 나타나는 일정한 점도의 값을 의미하며, 이후 3.2 절의 식 (3)과 (5)에서 xanthan 용액에 대한 액적의 레이놀즈 수를 계산하는데 사용된다.

실험유체 별 점도 변화의 특성을 살펴보기 위하여, 각각의 전단 변형율에 해당하는 점도를 영점 전단점도로나는 정규화 점도(μ/μ<sub>0</sub>, normalized viscosity)를 그림 2에 나타내었다(괄호안의 첫 번째 숫자는 각각 글리세린 용액의 점도 혹은 xanthan 용액의 영점 전단점도를 의미하며, 두 번째 숫자는 표 1에서의 n값을 의미한다). 글리세린 용액의 경우, 전단 변형율에 상관없이 점도가 항상 일정하므로 정규화 점도는 항상 1인 반면, xanthan

용액의 경우에는 전단 변형율이 증가함에 따라 정규화 점도가 1에서 멀어진다. 또한, xanthan 분말의 혼합농도가 증가할수록 전단 변형율이 증가함에 따라 점도가 더욱 급격히 감소함을 알 수 있다( $n$ 이 감소한다).

표 1에서 실험 유체들 간의 물성치를 서로 비교해 보면, 점도를 제외한 유체 별 물성치의 차이는 무시할 수 있을 정도로 작음을 알 수 있다. 따라서, 충돌 후 거동에 영향을 미치는 인자로서 점도만의 영향을 분석하는 것이 가능하다(실험 유체 중 xanthan 용액의 혼합 농도(0.05-0.5 wt%)는 탄성을 무시할 수 있는 농도영역에 해당되므로<sup>(15, 16)</sup>, 본 연구에서 유체의 탄성에 의한 영향은 고려되지 않았다).

### 3. 실험결과 및 해석

#### 3.1 시간에 따른 액적의 충돌 후 거동 관찰

그림 3은 동일한 영점 전단점도를 갖는 3 쌍의 xan-

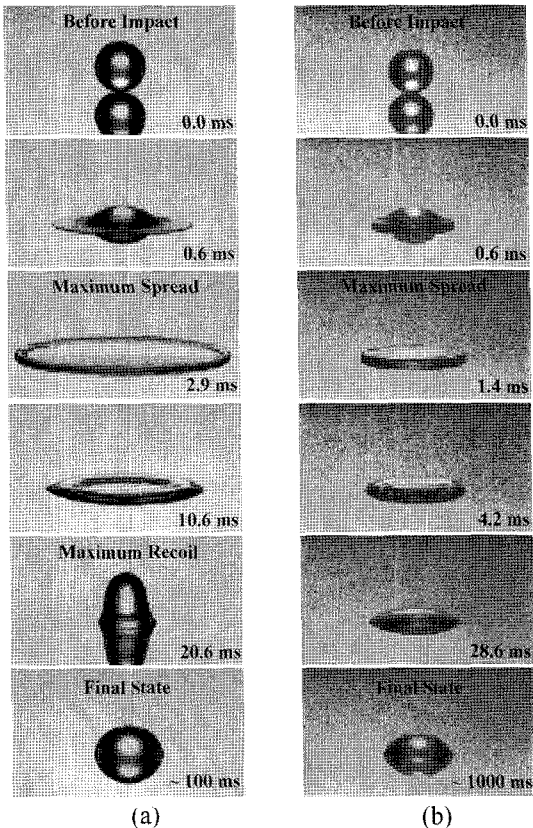


Fig. 3 Impact of (a) Fluid X<sub>0.05</sub> and (b) Fluid G<sub>88</sub> drops on stainless steel plate

than 및 글리세린 용액 중에서, 대표적으로 Fluid X<sub>0.05</sub>와 Fluid G<sub>88</sub>에 대하여 시간에 따른 액적의 가시화 결과를 비교하여 나타낸 것이다. Fluid X<sub>0.05</sub>의 경우, 액적은 충돌 이후 퍼져 나가다가 2.9 ms가 지난 시점에서 최대 액막 상태에 도달한다. 이후 표면장력에 의해 수축하면서 20.6 ms에 최대 회복 상태(최소 직경 상태)에 도달하고 다시 퍼짐과 회복과정을 반복하며 진동하다가, 결국 약 100 ms이후에는 완전히 정지하였다. 반면, Fluid G<sub>88</sub>의 경우에는 충돌 이후 1.4 ms가 지난 시점에서 최대 액막 상태에 도달하였다가, 점성감쇠로 인하여 진동 없이 매우 천천히 회복하면서 약 1000 ms 이후 최종상태에 도달하였다.

전단 변형율에 따른 점도변화가 액적의 충돌 후 거동에 미치는 영향을 보다 자세히 살펴보기 위하여, 실험유체에 대한 충돌 후 시간에 따른 무차원 액막의 직경

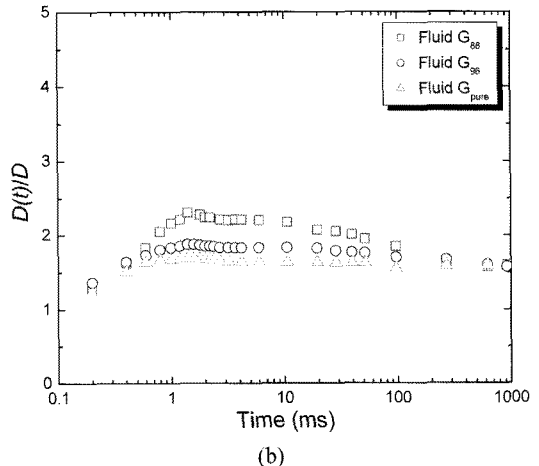
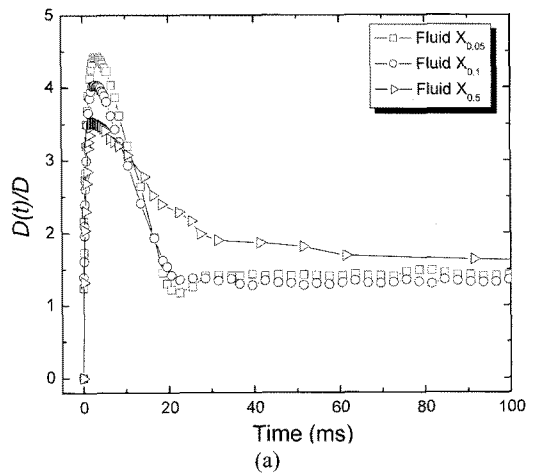


Fig. 4 Non-dimensional drop diameter versus time for (a) xanthan and (b) glycerin solutions

( $D(t)/D$ )을 그림 4에 나타내었다(Xanthan 용액의 경우, 구별이 용이하도록 3종류의 실험유체에 대한 결과만을 선별하여 나타내었다). 그림으로부터 알 수 있듯이, 충돌 직후 액적이 퍼지는 속도는 점도의 변화 여부와 관계없이 유사하였으나, 이후 유체의 점도가 낮을수록 액적은 빠른 속도로 더 넓게 퍼지고 빠르게 회복하였다. 한편, 영점 전단점도가 동일한 xanthan 및 글리세린 액적의 거동을 각각 살펴보면, 같은 영점 전단점도를 갖는다 하더라도, xanthan 용액의 액적이 글리세린 용액의 액적보다 빠른 속도로 넓게 퍼짐과 동시에 회복 과정도 빠르다는 것을 알 수 있다.

이와 같은 거동의 차이는 액적의 충돌 과정에 따른 점도 변화의 차이로 설명할 수 있다. 표면과 충돌한 액적은 관성력에 의하여 표면 위에서 빠르게 퍼져 나가다가, 초기에 액적이 갖고 있던 에너지 중 일부는 액적 내부 유동에 의하여 소산되며(점성 소산), 나머지는 액적과 공기 및 액적과 고체 표면 사이의 계면을 형성하면서 표면 에너지로 변환되고, 궁극적으로는 최대 액막 상태에 도달하여 정지한다. 일단 액적이 최대 액막 상태에 도달하게 되면, 표면장력의 힘이 지배적으로 작용하면서 중심방향으로 회복되어 최대 회복 상태(최소 직경 상태)에 도달한다. 이후 다시 낮은 속도로 퍼짐과 회복을 반복하다가, 결국 액적이 갖고 있던 모든 운동에너지가 소산된 이후에는 최종 상태에 도달하게 된다. 한편, 이러한 충돌과정 전반에 걸쳐 액적 내부의 유동에 의한 전단 변형율의 크기변화를 살펴보면 다음과 같다.

최초 액적이 표면에 충돌하기 직전에는 액적 내부에 흐름(속도 구배)이 없기 때문에 전단 변형율은 0이다. 이후, 액적이 빠르게 퍼져나가면서 전단 변형율이 급격히 증가하고, 액적이 최대 액막 상태에 도달하여 정지하는 순간 전단 변형율은 다시 0이 된다. 이와 같은 방식으로 이후 회복 및 퍼짐 과정을 반복하는 동안 전단 변형율은 끊임없이 증가와 감소를 반복한다. 따라서, 전단 회석 유체의 경우, 퍼짐 과정뿐만 아니라 회복 과정에서도 전단 변형율의 증가에 따른 점도의 감소로 소산되는 에너지의 양이 상대적으로 감소하기 때문에, 뉴턴 유체의 액적 보다 빠르고 넓게 퍼지고, 다시 빠른 속도로 회복할 수 있는 것이다. 즉, 전단 변형율에 따라 점도가 변하는 비뉴턴 유체의 액적이 표면과 충돌할 경우, 전단 변형율에 따른 점도의 변화가 액적의 충돌 후 거동의 특성을 지배함을 알 수 있다.

한편, 전단회석 액적의 퍼짐 속도가 뉴턴 액적의 퍼짐 속도보다 미미하게 작다고 보고하였던 Rafai와 Bonn<sup>(15,16)</sup>

의 실험결과와 본 실험결과와는 상반되는 것처럼 보인다. 그러나, 본 연구는 액적이 일정한 속도로 표면에 충돌하는 경우에 대한 실험결과로서, 충돌 없이 표면에 놓여진 경우에 대한 Rafai와 Bonn<sup>(15,16)</sup>의 실험결과와는 실험조건이 다르므로 주의하여 구분할 필요가 있다. 즉, 충돌 없이 표면 위에 놓여진 경우, 액적은 자중에 의해서 매우 천천히 퍼지기 때문에(수십 s 이상으로 본 실험(수 ms)에 비하여 액적이 퍼지는 동안의 소요시간이 매우 길다), 이 때의 전단 변형률은 거의 0에 가깝다. 따라서, 이때의 점도변화에 의한 영향은 거의 무시되나, 접촉선 부근의 국부적인 미세한 유동에 의해 퍼짐 속도가 영향을 받을 수 있다<sup>(15, 16)</sup>. 그러나, 본 연구의 충돌실험의 경우에는 충돌속도가 상대적으로 매우 크므로 이러한 미세한 유동에 의한 영향은 거의 무시되며, 본 연구와 유사한 충돌속도 조건에서 뉴턴 유체의 점도가 감소할수록 액적의 퍼짐 및 회복속도가 증가하는 실험결과는 이미 Crooks 등<sup>(6)</sup>을 포함한 기존의 여러 연구자들에 의해 보고된 내용이다.

### 3.2 최대 액막 직경 및 점성 소산 에너지

3.1절에서 논의된 내용을 토대로, 실제 전단회석 유체의 액적이 표면과 충돌한 이후 퍼져 나가는 동안에 점성에 의하여 소산되는 에너지의 양에 따라 최대 액막 직경은 뉴턴 유체의 경우와 어느 정도 차이를 보이는지에 대하여 알아 보았다.

Mao 등<sup>(13)</sup>은 뉴턴 유체의 액적이 충돌 후 최대 액막에 도달할 때까지 소산되는 에너지에 대한 모델을 이론적인 해석과 실험을 통하여 제시하였으며, 다음의 식 (3)과 같이 표현된다. 또한, 충돌 직전과 최대 액막 상태 사이의 에너지 평형 관계식(식 (4)) 및 식 (3)으로부터 유도된 식 (5)에서 무차원 최대 액막 직경( $D_{max}/D$ )이 구해진다.

그림 5(a)는 무차원 최대 액막 직경의 측정값과 Table 1에 주어진 실험유체의 물성치와 식(5)를

$$\frac{E_{diss}}{\pi D^2 \sigma} = 0.2 \frac{We^{0.83}}{Re^{0.33}} \left( \frac{D_{max}}{D} \right)^2 \quad (3)$$

$$E_{k1} + E_{s1} = E_{s2} + E_{diss} \quad (4)$$

$$\left[ \frac{1}{4}(1 - \cos\theta) + 0.2 \frac{We^{0.83}}{Re^{0.33}} \right] \left( \frac{D_{max}}{D} \right)^3 - \left( \frac{We}{12} + 1 \right) \left( \frac{D_{max}}{D} \right) + \frac{2}{3} = 0 \quad (5)$$

이용하여 예측한 값을 비교하여 나타낸 것이며, 그림 5(b)는 이 때 발생하는 점성 소산 에너지를, 측정된 최대 액막 직경과 식 (4)를 이용하여 역으로 계산한 값과

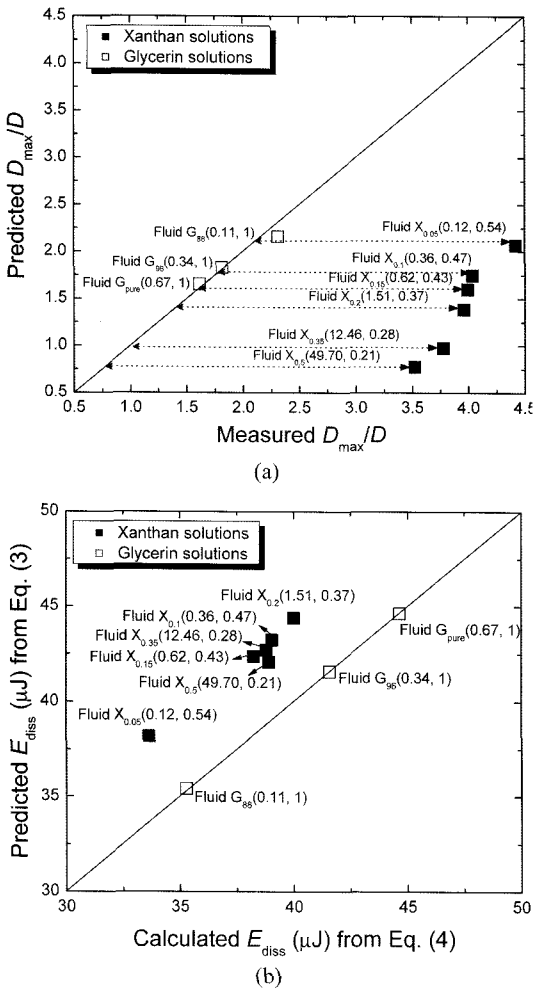


Fig. 5 (a) Measured non-dimensional drop diameter versus the predicted one from Eq. (5)  
 (b) Calculated viscous dissipation energy from Eq. (4) and the measured non-dimensional drop diameter versus the predicted one from Eq. (3)

식(3)을 이용하여 예측한 결과를 비교하여 나타낸 것이다(단, xanthan 용액의 경우, 충돌하는 액적의 레이놀즈 수를 계산하기 위하여 Table 1의 영점 전단 점도( $\mu_0$ )를 사용하였으며, 그림 5(a), (b)에서의 하첨자 및 괄호 안의 숫자는 그림 2에서의 표기 방식과 동일하다). 우선 글리세린 용액의 경우, Mao 등<sup>(13)</sup>의 모델은 액적이 최대 액막 상태에 도달할 때까지 발생하는 점성 소산 에너지를 적절히 예측함으로써, 예측된 무차원 최대 액막 직경 또한 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 반면 xanthan 용액의 경우, 모델은 실제 실험에서 발생하는 점성 소산 에너지를 과대 예측함으로써, 무차원 최대 액

막 직경을 약 50~80% 과소 예측하였다. 또한, xanthan의 혼합비율이 증가하여 전단회석의 정도가 클수록(즉,  $n$ 값이 감소할수록) 예측값과 측정값은 더욱 큰 차이가 남을 알 수 있다(그림 5(a)에서 화살표( $\leftrightarrow$ )는 xanthan 용액의 영점 전단점도와 동일한 점도를 갖는 글리세린 용액의 조합에 대한 예측값과 측정값의 차이를 나타내며, Fluid X<sub>0.05</sub>에서 Fluid X<sub>0.5</sub>로 갈수록 그 차이가 크게 나타난다). 즉, 전단 변형율이 증가함에 따라 점도가 급격하게 감소하는 유체일수록 예측값과 측정값과의 오차가 더욱 크게 발생하였다. 이는 3.1절에서 논의된 바와 마찬가지로, 전단회석 유체의 경우, 충돌 과정에서 전단 변형율이 증가함에 따라 점도가 감소하고 이로 인하여 점성 소산 에너지의 양 또한 감소하기 때문에, 동일한 영점 전단점도를 갖는 뉴턴 유체의 액적보다 더 빠르고 넓게 퍼져나갈 수 있는 것이다. 뿐만 아니라, 식(3)과 (5)는 이와 같은 점도의 변화에 대한 영향을 반영하고 있지 않기 때문에, 전단회석 유체에 대하여 영점 전단점도를 식 (3)에 적용할 경우, 전단 변형율이 증가함에 따라 점도가 크게 감소하는 유체일수록 점성 소산 에너지를 보다 과대 예측하여, 결과적으로 최대 액막 직경을 보다 과소 예측하게 되는 것이다. 따라서, 비뉴턴 유체에 대한 액적의 충돌 후 거동을 적절히 예측하기 위해서는 전단 변형율에 따른 점도의 변화에 대한 영향이 반드시 고려되어야 한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 전단회석 유체의 전단 변형율에 따른 점도의 변화가 액적의 충돌 후 거동(퍼짐 및 회복과정)에 미치는 영향을 가시화 기법을 통하여 파악하였다.

동일한 충돌 조건에 대하여, 전단회석 유체(xanthan 용액)의 경우, 액적이 충돌하는 과정 동안 전단 변형율이 증가함에 따라 점도가 감소하여, 결과적으로 최대 액막 상태에 도달하는 동안 점성에 의해 소산되는 에너지는 동일한 영점 전단 점도를 갖는 뉴턴 유체(글리세린 용액) 보다 작은 것으로 나타났다. 그 결과, 전단회석 유체의 액적은 표면 위에서 보다 빠른 속도로 더 넓게 퍼지며, 이후 빠른 속도로 회복하였다. 또한, 이와 같은 차이는 전단회석의 정도가 큰 유체일수록 더욱 분명하게 나타남을 확인하였다. 따라서, 비뉴턴 유체에 대하여 점도변화를 고려한 새로운 점성 소산 에너지에 대한 모델이 제시되어야 하며, 향후 이와 관련된 연구가 진행될 계획이다.

## 후 기

본 연구는 한국학술진흥 재단사업(마이크로 2상 유동 제어, KRF-2008-314-D00045)과 2단계 두뇌한국(BK-21) 사업의 일부 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) S. U., Ryu, "An Experimental Study on Post-impingement Behavior of an Electrically Charged Droplet", Doctoral Dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2008.
- (2) A. L. Yarin, "Drop impact dynamics: Splashing, Spreading, Receding, Bouncing...", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 38, 2006, pp. 159~192.
- (3) M., Rein, "Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces", Fluid Dynamics Research, Vol. 12, No. 2, 1993, pp. 61~93.
- (4) J. J. Cooper-White, R. Crooks, K. Chockalingam and D. V. Boger, "Dynamics of polymer-surfactant complexes: elongational properties and drop impact behavior", Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 41, No. 25, 2002, pp. 6443~6459.
- (5) V. Bergeron, D. Bonn, J. Y. Martin and L. Vovelle, "Controlling droplet deposition with polymer additives", Nature, Vol. 405, No. 6788, 2000, pp. 772~775.
- (6) R. Crooks, J. J. Cooper-White and D. V. Boger, "The role of dynamic surface tension and elasticity on the dynamics of drop impact", Chemical Engineering Science, Vol. 56, No.19, 2001, pp.5575~5592.
- (7) A. Rozhkov, B. Prunet-Foch and M. Vignes-Adler, "Impact of drops of polymer solutions on small targets", Physics of fluids, Vol. 15, No. 7, 2003, pp. 2006~2019.
- (8) D. Bartolo, A. Boudaoud, G. Narcy and D. Bonn, "Dynamics of non-Newtonian droplets", Physical Review Letters, Vol. 99, No. 17, 2007, pp. 174502-1-174502-4.
- (9) S. Nigen, "Experimental investigation of the impact of an (apparent) yield-stress material", Atomization and sprays, Vol. 15, No. 1, 2005, pp. 103~117.
- (10) R. Crooks and D. V. Boger, "Influence of fluid elasticity on drops impacting on dry surfaces", Journal of Rheology, Vol. 44, No. 4, 2000, pp. 973~996.
- (11) C. D. Stow and M. G. Hadfield, "An experimental investigation of fluid flow resulting from the impact of a water drop with an unyielding dry surface", Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol. 373, No. 1755, 1981, pp. 419~441.
- (11) G. E. Cossali, A. Coghe and M. Marengo, "The impact of a single drop on a wetted solid surface", Experiments in Fluids, Vol. 22, No. 6, 1997, pp. 463~472.
- (12) T. Mao, D. C. S. Kuhn and H. Tran, "Spread and rebound of liquid droplets upon impact on flat surfaces, AIChE Journal, Vol. 43, No. 9, 1997, pp. 2169~2179.
- (13) A. Carré and F. Eustache, "Spreading kinetics of shear-thinning fluids in wetting and dewetting modes", Langmuir, Vol. 16, No. 6, 2000, pp. 2936~2941.
- (14) S. Rafai and D. Bonn and A. Boudaoud, "Spreading of non-Newtonian fluids on hydrophilic surfaces", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 513, 2004, pp. 77~85.
- (15) S. Rafai and D. Bonn, "Spreading of non-Newtonian fluids and surfactant solutions on solid surfaces", Physica A, Vol. 358, No. 1, 2005, pp. 54~67.
- (16) V. M. Starov, A. N. Tyatyushkin, M. G. Velarde and S. A. Zhdanov, "Spreading of non-Newtonian liquids over solid substrates", Journal of Colloid Interface Science, Vol. 257, No. 2, 2003, pp. 284~290.
- (17) X. D. Wang, D. J. Lee, X. F. Peng and J. Y. Lai, "Spreading dynamics and dynamic contact angle of non-Newtonian fluids", Langmuir, Vol. 23, No. 15, 2007, pp. 8042~8047.
- (18) X. D. Wang, Y. Zhang, D. J. Lee and X. F. Peng, "Spreading of completely wetting or partially wetting power-law fluid on solid surface", Langmuir, Vol. 23, No. 18, 2007, pp. 9258~9262.