

# 저비용 수제 연신레오미터 개발 및 성능 평가

김시현\* · 박한별\* · 김정현†

## Development and performance evaluation of a low-cost custom-made extensional rheometer

Sihyun Kim\*, Hanbyeol Pak\*, and Jeong-Hyun Kim†

**Abstract** Characterizing the extensional rheological properties of non-Newtonian fluids is crucial in many industrial processes, such as inkjet printing, injection molding, and fiber engineering. However, educational institutions and research laboratories with budget constraints have limited access to an expensive commercial extensional rheometer. In this study, we developed a custom-made extensional rheometer using a CO<sub>2</sub> laser cutting machine and 3D printer. Furthermore, we utilized a smartphone with a low-cost microscopic lens for achieving a high spatial resolution of images. The aqueous polyethylene-oxide (PEO) solutions and a Boger fluid were prepared to characterize their extensional properties. A transition from a visco-capillary to an elasto-capillary regime was observed clearly through the developed rheometer. The extensional relaxation time and viscosity of the aqueous PEO solutions with a zero-shear viscosity of over 300 mPa·s could be quantified in the elasto-capillary regime. The extensional properties of the solutions with relatively small zero shear viscosity could be calculated using a smartphone's slow-motion feature with increasing temporal resolution of the images.

**Key Words** : Non-Newtonian fluids (비뉴턴 유체), Dripping-onto-Substrate (DoS) rheometry (디오에스 레오메트리), Extensional relaxation time (인장완화시간)

### 1. 서론

비뉴턴 유체는 전단 변형율에 따라 전단점도

가 일정하지 않고 비선형으로 감소하거나 증가하는 유체로 정의된다. 이러한 비뉴턴 유체는 인쇄 및 코팅, 사출 성형 등의 산업 현장에서 사용되고 있으며, 보통 챔버에서 좁은 유로를 거쳐 대기압 조건으로 토출되는 공정 과정을 거치기 때문에 전단 흐름 뿐 아니라 인장 (혹은 연신) 흐름에 대한 이해와 분석이 요구된다.<sup>(1)</sup> 대표적인 유체의 인장 물성으로는 유체에 작용하는 응력을 제거한 뒤 원래의 상태로 회복하기까지 소요되는 시간인 인장완화시간 (Extensional relaxation time,  $\lambda_E$ )과 유체가 인장 흐름에 저항하

---

† Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea, Assistant Professor

E-mail: kimjh@seoultech.ac.kr

\* Department of Mechanical Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Master Student

는 척도인 인장점도 (Extensional viscosity,  $\eta_E$ )가 있다. 인장완화시간과 인장점도는 Filament Stretching Extensional Rheometer (FiSER)<sup>(2)</sup>, Capillary Breakup Extensional Rheometer (CaBER)<sup>(3)</sup>, Dripping-onto-Substrate (DoS) Rheometer<sup>(4)</sup> 등의 장비를 활용하여 계측이 이루어져 왔다. FiSER와 CaBER는 둥근 원판 사이 소량의 유체를 적층시킨 후 인장시켜 형성되는 유체 끈의 반경 변화를 관측한다는 점에서 측정의 유사성이 있다. FiSER는 유체가 구속된 두 원판을 상하로 각각 이송시키는데, 이 때 원판의 속도를 지수적으로 증가시켜 유체 끈의 일정한 연신율을 유지한다. 원판에 부착된 로드셀을 통해 유체 끈에 작용하는 힘을 측정하며, 레이저 빔을 통해 유체 끈의 반경 변화를 관측하여 최종적으로 인장점도를 계산한다.<sup>(2)</sup> 반면, CaBER의 경우 두 개의 원판 중 아래 판은 고정하고 위 판을 일정 속도로 이송시켜 구속된 유체를 인장 시킨다. 위 판의 운동이 멈춘 후 관성, 점성, 표면장력, 탄성력의 대결에 따라 변화하는 유체 끈의 반경 변화를 레이저 혹은 초고속 이미징을 기반으로 계측하고 유체의 인장 물성을 계산한다.<sup>(5,6)</sup> FiSER의 경우 물의 전단점도에 약 1000배 이상이 되는 고점도 유체의 경우 측정이 원만히 이루어지며, CaBER는 FiSER보다 비교적 낮은 영점전단점도 (zero-shear viscosity)를 가진 유체의 인장 물성 측정에 효과적인 것으로 알려져 있다.<sup>(6,7)</sup> CaBER의 경우 묽은 폴리머 수용액이나 잉크젯 유체와 같이 영점전단점도가 물과 상당히 유사한 경우 판에 부착된 반구형의 유체 적층면이 관성으로 인해 진동하여 유체 끈 반경 변화 관측에 영향을 준다.<sup>(8)</sup> 따라서, 기존의 인장 물성 측정 장비들은 저점도 유체의 물성 계측에 한계를 가지고 있었다. 2015년 Sharma 그룹은 저점도 유체 인장 물성 측정이 가능한 새로운 측정 기법을 소개하였다.<sup>(4)</sup> 시린지 펌프에 연결된 주사기 바늘을 통해 소량의 유체를 친수성 고체판에 적층시킨 후 측방향으로 일정한 반경을 갖는 유체 끈을 형성시켜 시간에 따른 끈의 소멸 과정을 초고속 이미징 기법으로 가시화하였다. 그들은 이러한 기법을 사용한 장치를 Dripping-onto-Substrate (DoS)

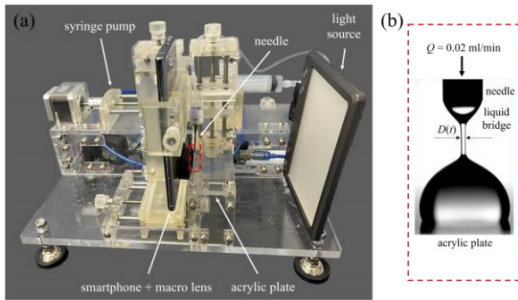
레오미터로 명명하였다.<sup>(4)</sup> 이러한 Dripping 방식의 기법으로 다양한 종류의 폴리머 수용액과 복잡 유체의 인장 물성 측정이 가능한 것을 실험적으로 밝혔으며,<sup>(1,9,10)</sup> 지금까지 고안된 인장 물성 측정 방법 중 사용 가능한 유체의 점도 범위가 가장 넓다.<sup>(9)</sup> 하지만 현존하는 대부분의 인장 물성 측정 장치들은 고가의 초고속카메라를 포함하는 영상부를 필요로 하는 경우가 많으며, 또한, 시린지 펌프 혹은 레이저 장치와 같은 고가의 장비가 추가로 포함되어 소규모 실험실이나 교육기관에서 구매하여 활용하기 힘들다. 본 연구에서는 접촉각 측정을 위해 개발되었던 저비용 고니오미터 장비에 DoS 측정 기법을 적용하여 연신레오미터로서의 활용 가능성을 타진하고자 하였으며 (이하 본문에서는 수제 연신레오미터로 명명함),<sup>(11)</sup> 기존의 고가 연신레오미터 장비와 유사한 정확도의 인장 물성 측정이 가능한지 확인하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 장비

#### 2.1.1 수제 연신레오미터

수제 연신레오미터는 Fig. 1에 보이는 것과 같이 시린지 펌프를 포함한 액적 발생 장치 및 영상부로 구성된다. 제작 장비의 많은 영역을 구성하는 직렬 이송 시스템에는 전산 볼트 (나비엠알오, 직경 5 mm, 피치 0.8 mm), 리니어 가이드 (McMaster-Carr, 직경 0.25 inch), 볼 베어링 (나비엠알오, 직경 5 mm), 슬리브 베어링 (나비엠알오, 직경 5 mm), 너트 (나비엠알오, 직경 5 mm, 피치 0.8 mm) 등 많은 기계 요소가 포함되었으며, 스테레오리소그래피 기반 3D 프린터 (Formlabs, Form 3)를 이용해 출력한 샤프트 하우징 및 캐리지, 손잡이를 결합하여 제작하였다. 시린지 펌프 제작을 위해 스텝모터 (42BYGHM809, 0.9°/step)를 커플링을 이용하여 직렬 이송 시스템의 전산 볼트와 체결하고 모터의 회전운동을 선형 운동으로 변환할 수 있도록 하였다. 시린지 펌프는 5



**Fig. 1.** Photograph of (a) a custom-made extensional rheometer and (b) a liquid bridge formed between a syringe needle and a plate

- 60 ml 용량의 주사기를 거치할 수 있도록 설계되었으며, 작동 유체가 초순수 물인 경우를 기준으로 유량을 최소 5  $\mu\text{l}/\text{min}$ 에서 최대 30 ml/min까지 아두이노를 통해 제어가 가능하도록 제작하였다. CO<sub>2</sub> 레이저 커팅기 (Universal Laser System, VLS 2.30)를 이용해 아크릴 판을 절단/조립하여 아두이노 보드 및 케이블 선의 보관을 위한 공간을 제작하였으며, 스텝모터와 직렬 이송장치 또한 가공된 아크릴 판 위에 고정되었다. 시린지 펌프를 통해 0.02 ml/min의 매우 느린 유량으로 유체를 공급하여 유체 끈에 관성에 의한 효과가 미미하도록 설정하였다. 유체는 유연한 튜빙을 거쳐 주사기 바늘 (15 Gauge, 외경 1.83 mm, 내경 1.37 mm)을 통해 토출되고 최종적으로 아크릴 표면에 적층되었다. 기존 문헌에서는 적층판을 유리로 사용하였으나 아크릴로 대체하여도 실험 결과에 큰 영향을 주지 않는 것으로 분석되었다. 유체 끈의 원활한 형성 및 관측을 위해 시린지 펌프 제작에 활용한 직렬 이송 시스템을 도입하여 주사 바늘을 상하로 미세하게 조절하였다. 문헌에 제시된 것과 같이 주사 바늘과 아래 판 사이의 거리는 유체 끈의 초기 직경의 세 배가 되도록 거치하였다.<sup>(10)</sup>

기존 고가의 초고속카메라 대신 최근 유체 유동 및 입자 연구에 활용되고 있는 스마트폰을 사용하여 영상부를 구성하였다.<sup>(12,13)</sup> 또한, 스마트폰용 접사렌즈, 스마트폰 홀더, 광원도 사용되었다. 비뉴턴 유체 끈의 소멸 과정을 녹화하기 위하여 갤럭시 노트10 스마트폰을 사용하였

다. 스마트폰 카메라 모듈에 접사렌즈 (APEXEL 100× Microscope)를 부착하여 4  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 의 높은 공간분해능과 16.7 ms의 시간분해능으로 영상을 촬영하였다. 스마트폰 홀더는 다양한 너비를 갖는 스마트폰을 고정할 수 있도록 좌우 방향으로 크기 조절이 가능하도록 설계하였다. 또한, 직렬 이송 시스템을 통해 스마트폰의 높낮이를 조절할 수 있도록 하여 사용되는 스마트폰 카메라의 위치가 상이하여도 영상 촬영에 제약을 받지 않도록 제작하였고, 홀더를 앞뒤로 이송 가능하도록 하여 초점 거리 (3.6 - 5 mm)를 정밀하게 제어할 수 있도록 하였다. 비뉴턴 유체 끈의 가시화를 위해 LED 면광원 (LUXPAD K22H, 220 lux)을 적용하였고, 카메라-표면-면광원 순으로 장비들을 배치하여 영상을 배면광으로 촬영하도록 하였다. 모든 구성 장비들은 베이스 아크릴판 위에 볼트로 결합되었으며, 베이스 아크릴 모서리에 4개의 높낮이 지지대를 설치하여 전체 측정 시스템의 수평 조절이 가능하게 하였다. 수제 연신레오미터 제작에 소요된 3D 프린터 레진, 아크릴, 스텝모터, 각종 기계 부품들의 총 가격은 약 40만원 정도이다.

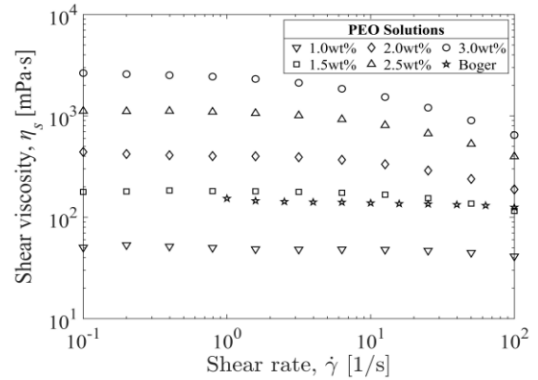
## 2.1.2 초고속 이미징 기반 Capillary Breakup Extensional Rheometer (CaBER) 및 Dripping-onto-Substrate (DoS) Rheometer

CaBER와 DoS 기법을 기반으로 한 연신레오미터를 실험실 내에서 부품을 구성하고 재현하였다. CaBER 실험 부품들은 Arnolds et al.이 제시한 방법에 준하여 구성되었다.<sup>(3)</sup> 구체적으로 살펴보면, 6 mm의 직경을 갖는 두 개의 원판 사이 약 80  $\mu\text{l}$ 의 유체를 적층시킨 뒤 리니어모터 (LINMOT P01-23x160/270x41-LC)에 부착된 상판을 0.25 m/s의 속도로 10 mm 수직 방향으로 이송하여 유체를 인장시켰다. 두 원판 사이 형성된 유체 끈의 시간 변화에 따른 반경 변화를 관측하기 위해 초고속카메라 (Phantom, VEO-E-310L)와 매크로 렌즈 (Laowa, 25 mm f/2.8 2.5-5x ultra macro)를 사용하여 4  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 의 공간분해능과 1 ms (1000 fps)의 시간분해능으로 영상을 촬영하였으며, LED 광원 (NANLITE, Forza 200)을 사

용하였다. DoS 레오미터는 수제 연신레오미터와 동일한 방법으로 비뉴턴 유체의 인장 물성을 측정하나 고가의 장비들로 구성되었다. 시린지 펌프 (Harvard Apparatus Pump 11 Elite)를 이용하여 유체를 고체 관에 적층시켰다. 또한, 주사 바늘과 원판 사이에 형성된 유체 끈의 반경 감소를 CaBER 장비와 동일한 영상부 (초고속카메라, 매크로 렌즈, 광원)를 사용하여 높은 공간 및 시간 분해능에서 영상을 촬영하고 분석하였다. 실험은 섭씨 20도 내외 온도 및 상대습도가 30 - 40%인 조건에서 수행하였다.

## 2.2 실험 유체

수제 연신레오미터의 성능을 확인하기 위해서 기존 연신레오미터 연구에 활발히 사용된 분자량이  $M_w = 1 \times 10^6$  g/mol인 Polyethylene oxide (PEO, Sigma-Aldrich Korea)를 초순수 물에 질량비를 달리하여 섞어서 준비하였다.<sup>(3,5,14)</sup> 저점도 유체에 대한 질량비 오차를 줄이고자 높은 질량비인 3.0 wt% PEO 수용액을 우선 제작한 후, 물을 추가로 섞고 희석하여 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 wt% 총 다섯 가지 고분자 PEO 수용액을 준비하였다. 3.0 wt% PEO 수용액은 자석 교반기를 이용해 350 rpm으로 48시간 혼합하였으며, 1.0 - 2.5 wt% PEO 수용액을 제작하기 위해 물을 추가하여 교반기로 24시간 추가로 섞어주었다. 비뉴턴 유체들을 제작 후 전단레오미터 (Anton Paar, MCR 92)를 통해 전단점도를 측정하였으며 그 결과가 Fig. 2에 제시되었다. 고분자 PEO 수용액은 질량비가 증가할수록 영점전단점도 (zero-shear viscosity)와 전단 박화 (shear thinning) 정도가 증가하는 것으로 관측되었으며, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 wt% PEO 수용액의 영점전단점도는 약 물의 50, 160, 420, 1000, 2600배로 측정되었다. 영점전단점도가 1.5 wt% PEO 수용액의 경우와 유사한 보거 (Boger) 유체를 추가로 제작하고 인장 물성을 측정 비교하였다. PEO 수용액과는 달리 보거 유체는 전단 박화 성질이 존재하지 않고 유체의 탄성 성질만 존재하는 유체로서, 낮은 분자량의 PEO ( $M_w = 2 \times 10^4$  g/mol)와

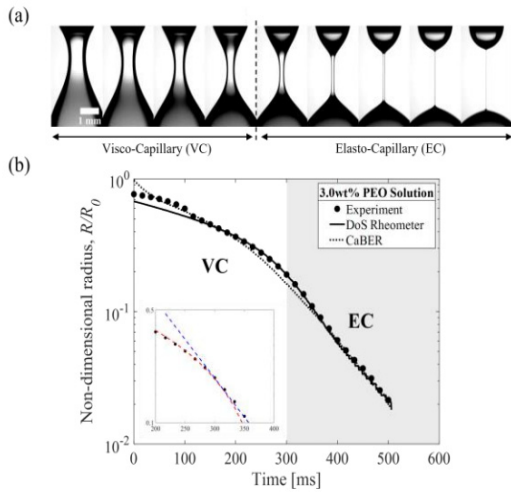


**Fig. 2.** Shear viscosity as a function of shear rate for aqueous PEO solutions and a Boger fluid with zero shear viscosity ( $\eta_0$ ) of  $\sim 150$  mPa·s.

높은 분자량 PEO ( $M_w = 8 \times 10^6$  g/mol)를 초순수 물에 각각 20 wt%와 0.1 wt%의 비율로 섞어 제작하였다. Fig. 2에 제시된 것과 같이 유체들의 영점전단점도는 약 150 mPa·s내외로 관측되었으며, 그에 따른 Ohnesorge 수 ( $Oh = \eta_0 / \sqrt{\rho \sigma R_0}$ )는 약 0.5내외로 계산되었으며, 여기서 는 영점전단점도,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\sigma$ 는 유체의 표면장력,  $R_0$ 는 주사기 바늘의 반경이다.

## 3. 결과 및 고찰

고분자 PEO 수용액의 끈의 형성과 소멸과정을 설명하기 위하여 3.0 wt% PEO 수용액의 실험 결과 중 대표되는 이미지를 선별하여 Fig. 3(a)에 제시하였다. Fig. 3(a)의 이미지들은 유체 끈의 직경이 바늘 직경 (1.83 mm)의 절반이 되는 지점부터 유체 끈이 파단될 때까지 0.05초 간격으로 나타내었다. 3.0 wt% PEO 수용액은 선정된 실험 용액 중 가장 고점도의 용액으로 Ohnesorge 수 ( $Oh = \eta_0 / \sqrt{\rho \sigma R_0}$ )가 1을 초과하여 유체 끈의 초기 반경 감소가 점성 힘과 모세관 힘에 의해 지배된다.<sup>(4)</sup> 따라서, 저점도 뉴턴 유체에서 관측되는 역전된 원뿔 형태의 끈 형상은 보이지 않고, 상하 대칭인 덩벨 형태의 끈이 관측되었다. 시간이 경과하면서 유체 끈은 매우 얇은 원통형의 형상을 갖게 되고 반경이 점차 줄어들다 최종적으로 파단되었다. 유체 끈이 이러한 원통형



**Fig. 3.** (a) Sequence of images to show thinning dynamics of 3.0 wt% PEO in water solution. The time interval between images is 0.05 s. (b) Time evolution of non-dimensional radius of 3.0 wt% PEO in water solution. Inset shows fitting lines of visco-capillary (red) and elasto-capillary (blue) scaling formulas.<sup>(10)</sup>

형상을 가질 때 유체의 탄성 힘과 모세관 힘이 유체 끈의 소멸과정을 지배하는 것으로 알려져 있다.<sup>(4)</sup> PEO 수용액의 질량비가 낮아지면 유체 끈의 형태학적 차이는 크게 보이지 않으나, Ohnesorge 수는 1보다 낮은 값을 갖게 되며 유체 끈의 초기 소멸과정에서 점성력보다 관성력에 의한 효과가 지배한다.<sup>(4)</sup>

원통형 형태의 유체 끈의 반경 (radius,  $R(t)$ )은 촬영한 영상에서 이미지들을 추출하여 자체 개발한 MATLAB 코드를 통해 측정되었으며 초기 반경 ( $R_0$ )으로 무차원화 하였다. Fig. 3(b)는 시간에 따른 유체 끈의 무차원 반경 변화를 보여준다. 참고문헌<sup>(1,4)</sup>에서 제시된 점성-모세관 영역과 탄성-모세관 영역의 스케일링 식을 실험 데이터에 피팅한 결과 (Fig. 3 inset), 약  $t = 300$  ms인 지점에서 스케일링 식으로 표현된 곡선들이 겹쳐지는데 이는 점성-모세관 영역에서 탄성-모세관 영역으로의 전이를 의미한다. 점탄성 용액의 점성-모세관 영역에서의 반경 변화는 아래의 식으로 표현된다.<sup>(10)</sup>

$$\frac{R(t)}{R_0} = 0.0709 \frac{\sigma}{\eta_0 R_0} (t_p - t) \quad (1)$$

여기서  $t_p$ 는 유체 끈의 pinch-off 시간이다. 또한, 탄성-모세관 영역에서의 반경 변화는 아래의 식으로 표현되는 것으로 알려져 있다.<sup>(10)</sup>

$$\frac{R(t)}{R_0} = \left( \frac{GR_0}{2\sigma} \right)^{\frac{1}{3}} \exp\left(-\frac{t - t_c}{3\lambda_E}\right) \quad (2)$$

여기서,  $G$ 는 탄성계수이다. 탄성-모세관 영역에서 지수적으로 감소하는 기울기를 통하여 유체의 인장완화시간 ( $\lambda_E$ )을 계산할 수 있다.

또, 식 (3)을 이용해 인장점도 ( $\eta_E$ )를 계산할 수 있다.<sup>(4)</sup>

$$\eta_E = \frac{\sigma}{\dot{\epsilon}R} \quad (3)$$

여기서,  $\dot{\epsilon}$ 는 연신율 (strain rate)을 나타내며 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.<sup>(4)</sup>

$$\dot{\epsilon} = -\frac{2}{R} \frac{dR(t)}{dt} \quad (4)$$

식 (4)를 (3)에 대입하면 식 (5)와 같다. 이 수식을 통해 반경 감소 데이터를 이용한 인장점도 ( $\eta_E$ )를 계산할 수 있다.<sup>(4)</sup>

$$\eta_E = -\frac{\sigma}{2dR(t)/dt} \quad (5)$$

위의 이론에 기반하여 3.0 wt% PEO 수용액의 인장완화시간은  $\lambda_E = 32.1$  ms로 계산되었으며, 문헌에 제시된 값 ( $\lambda_E = 30.8$  ms)과 매우 근접한 것으로 분석되었다.<sup>(5)</sup> 또한, Fig. 3(b)에 보이는 것과 같이 실험실에서 재현한 초고속 이미징 기반 CaBER와 DoS 레오미터를 사용하여 측정된 데이터와 상당히 유사한 것으로 보아 수제 연신 레오미터를 사용하여 측정된 데이터를 신뢰할

수 있다고 판단된다. CaBER와 DoS 기반 장비로 측정된 초기 유체 끈의 소멸 과정이 조금 다르게 표현된 것은 각 장비의 유체 인장 방식의 차이에 기인한 것으로 보인다.<sup>(10)</sup>

Fig. 4는 수제 연신레오미터를 이용해 측정된 다양한 질량비의 PEO 수용액과 보거 유체의 시간에 따른 유체 끈의 반경 변화를 보여준다. Fig. 3의 inset에 나타난 것과 같이 각각의 실험 데이터에 스케일링 식을 피팅하여  $t_c$ 를 찾고 그 그래프에 표현하였다. 따라서,  $t - t_c$ 가 0 ms인 이후 유체의 탄성 힘과 표면장력 힘이 끈의 소멸 과정에 지배적인 영향을 준다고 판단할 수 있다.  $t - t_c < 0$  ms인 영역에서는 PEO 수용액의 농도가 감소할수록 점성-모세관 영역에서 탄성-모세관 영역으로의 변화가 뚜렷하게 관측되었다. 이는 얇은 유체 끈의 인장 흐름에서 발생하는 coil-stretch 전이 (coil형태로 엉켜있는 고분자가 흐트러져서 길게 늘어지는 ‘unravelled’현상)이 수용액의 농도가 증가할수록 더 부드럽게 이루어지기 때문이다.<sup>(14)</sup>  $t - t_c > 0$  ms인 영역에서 유체 끈의 파단 시간 (마지막 실험 데이터)은 약 200 ms에서 20 ms로 급격하게 감소하였다. 이는 수용액의 PEO 농도 감소에 따른 유체의 탄성력

저하에 기인하는 것으로 보인다. 또한, 유체의 탄성 성질 약화는 탄성-모세관 영역에서 기울기의 점진적으로 증가를 유도하고, 이에 따라 인장완화시간은 감소하게 된다. 식 (2)와 탄성-모세관 영역에서의 기울기를 이용하여 계산된 인장완화시간 ( $\lambda_E$ )은 Table. 1에 제시되었으며, 초고속 이미지 기반 연신레오미터로 측정된 데이터와 문헌에 제시된 데이터와 비교한 결과 최대 오차가 약 4.2 % 정도로 분석되었다. 수제 연신레오미터로 측정된 유체 끈의 변화는 Fig. 4에 포함된 문헌의 데이터<sup>(14)</sup>와 유사할 만큼 상당히 신뢰할 수 있으나, 수용액의 농도가 1.5 wt% 이하로 감소할 경우 탄성-모세관 영역에서 확보할 수 있는 데이터의 수가 현저하게 떨어짐을 알 수 있다. 특히, 1.0 wt% PEO 수용액의 경우 낮은 탄성 성질로 인해 탄성-모세관 영역에서 데이터가 3개 미만으로 측정되어 인장완화시간 계산이 어려웠다. 이를 통해 60 fps (16.7 ms)의 시간분해능을 가진 수제 연신레오미터로 측정할 수 있는 유체의 인장완화시간은 대략 10 ms 내외로 판단된다.

Fig. 4에서 나타난 1.5 wt% PEO 수용액과 보거 유체와의 유체 끈 데이터의 소멸 과정을 확인해보면 유체 끈의 초기 반경 감소는 유사하지만 탄성-모세관 영역으로 전환된 이후 보거 유

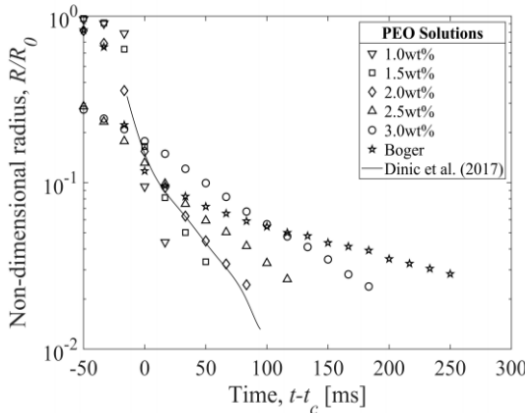


Fig. 4. Time evolution of non-dimensional radius of aqueous PEO solutions and a Boger fluid with zero shear viscosity ( $\eta_0$ ) of  $\sim 150$  mPa·s. 2.0 wt% aqueous PEO solution data (solid line) from the literature<sup>(14)</sup> is included.

Table 1. Extensional relaxation time of testing fluids measured by rheometers.

Fluids	인장완화시간 ( $\lambda_E$ ) [ms]			
	Custom made	DoS	CaBER	Ref. <sup>(3,5,14)</sup>
1.0wt% PEO	-	9.1±0.1	9.2±0.3	9.4±0.4
1.5wt% PEO	12.4±0.4	11.9±0	12.4±0.3	12.0±1.0
2.0wt% PEO	16.9±0.4	16.4±0.6	17.0±0.4	16.5±0.6
2.5wt% PEO	24.0±2.1	23.5±1.41	23.8±0	24.7±3.7
3.0wt% PEO	32.1±1.5	32.9±2.5	32.7±1.3	30.8±0.3
Boger Fluid	66.7±0	64.4±4.4	64.4±4.4	-

체는 1.5 wt% PEO 수용액보다 훨씬 완만한 기울기를 보이며 약 250 ms에서 유체 끈이 파단되는 것을 알 수 있다. 이러한 데이터는 영점전단점도가 유사할지라도 유체를 인장 시키는 경우 유체의 탄성력에 따라 인장완화시간 및 인장점도가 상당히 달라질 수 있음을 암시하며, 비뉴턴 유체의 인장 물성 측정의 중요성을 보여준다.

수제 연신레오미터를 통한 데이터 수가 비교적 많이 확보된 2.0 - 3.0 wt% PEO 수용액을 대상으로 식 (5)를 이용해 인장점도를 계산하였으며 그 결과를 Fig. 5에 제시하였다. Fig. 5에 함께 제시된 검은색 실선은 문헌에 제시된 2.0 wt% PEO 수용액의 헨키 스트레인에 따른 인장점도 데이터이다.<sup>(14)</sup> 인장점도는 헨키 스트레인 증가에 따라 점진적으로 증가하는 양상을 보였으며, 헨키 스트레인이 약 7 - 8 정도에 도달하였을 때 인장점도가 수렴하는 양상을 보였다. 수렴된 극한 인장점도 ( $\eta_E^\infty$ )는 PEO 수용액의 농도가 증가할수록 증가하는 경향을 보였으며 이는 유체의 탄성이 증가할수록 인장흐름에 저항하는 정도가 증가한다는 것을 보여준다. 인장점도의 전반적인 데이터 변화 양상과 수치는 문헌의 결과와 부합하였다.<sup>(14)</sup> Fig. 4에 제시된 것처럼 수제 연신레오미터의 제한된 영상 시간 분해능은 PEO 수용액의 탄성이 감소할 경우 탄성-모세관 영역에서 유효한 유체 끈 반경 데이터 확보를 어렵게 한다. 이러한 장비 한계점을 극복하고자 스마트폰에 내장되어 있는 slow motion 기능을 활용하여 영상의 시간 분해능을 4배로 증가시켜 영상을 촬영하고 유체 끈 소멸 과정을 추가로 분석하였다. 1.0 wt% PEO 수용액의 경우 60 fps의 시간분해능 기준 탄성-모세관 영역에서의 데이터 수가 2 개 남짓으로 기울기 개형을 정확하게 확인하기에 어려움이 있었다. 하지만, Fig. 6에 보이는 것과 같이 slow motion 기능을 이용해 1.0 wt% PEO 수용액의 인장완화시간을 측정할 경우 탄성-모세관 영역에서 획득한 데이터 수가 7개 내외로 증가하였으며, 이를 통해 계산된 인장완화시간은  $8.9 \pm 0.4$  ms로 계산되었다. 이는 Table. 1에 제시된 것과 같이 초고속 이미징 기반 연신레오미터 및 참고문헌의 인

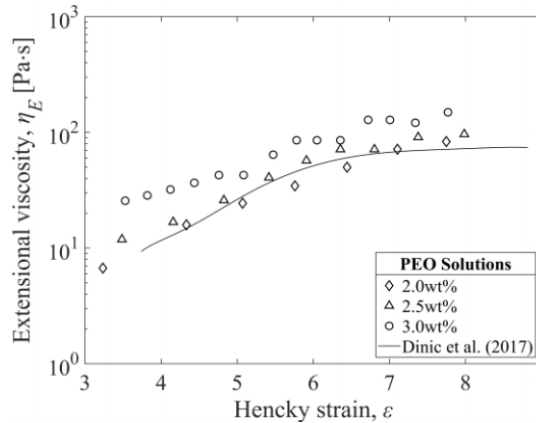


Fig. 5. Extensional viscosity as a function of Hencky strain.

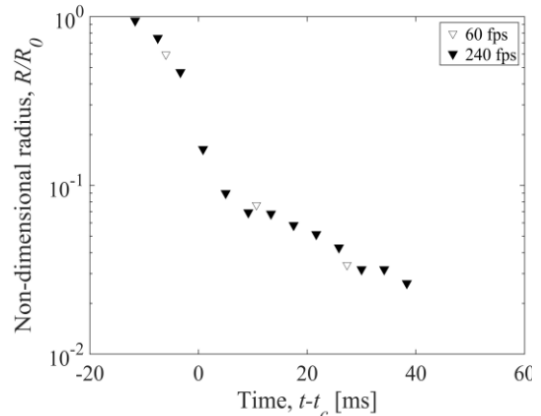


Fig. 6. Non-dimensional radius data of 1.0 wt% PEO solution with different temporal resolutions.

장완화시간과 매우 유사한 값이다. 하지만, slow motion 기능을 이용할 경우 시간 분해능이 개선되는 반면 공간 분해능이  $8.7 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 로 2배 이상 감소하기 때문에 유체 끈의 반경이 매우 얇아질 경우 정확한 데이터 측정이 어렵다. 이러한 추가 실험을 통해 저점도 유체의 인장 물성 측정에 있어 영상의 시간 분해능이 매우 중요함을 알 수 있으며, 잉크젯 유체와 같이 물의 점도와 상당히 유사한 비뉴턴 유체의 경우 본 연구에서 개발된 수제 연신레오미터로 인장 물성 측정이 매우 어려울 수 있다.



## 4. 결론

본 연구에서는 DoS (Dripping-onto-Substrate) 기법을 채택한 저비용 연신레오미터를 개발하고 측정된 유체의 인장 물성을 초고속 이미지 기반 CaBER 및 DoS 레오미터와 비교/분석하였다. 장비의 범용성을 증명하고자 다양한 질량비의 고분자 PEO 수용액과 보거 유체를 사용하여 시간에 따른 유체 끈 반경 변화를 관측하였다. 탄성 성질이 강한 1.5 wt% 이상의 PEO 수용액과 보거 유체의 경우 수제 연신레오미터 장비로 인장 물성 측정이 가능하였다. PEO 수용액의 인장완화시간은 문헌과 비교하였을 때 최대 오차가 4.2 %로 나타났다. 탄성 성질이 매우 약한 저점도 PEO 수용액은 스마트폰에 내장된 slow motion 기능을 활용하여 인장완화시간을 계산할 수 있었으며 문헌에 제시된 값과 유사한 것을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 3D 프린팅, CO<sub>2</sub> 레이저 가공을 통해 연신레오미터를 저렴한 비용으로 제작할 수 있으며, 낮은 시간 분해능을 갖는 휴대폰을 사용하여 일정 정도의 탄성을 갖는 비뉴턴 유체의 인장 물성을 측정할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 개발된 저비용 연신레오미터는 고가의 장비 사용이 제한적인 소규모 실험실 및 교육기관에서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

## 후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1C1C1005588).

## REFERENCE

- 1) Jelena Dinic, Leidy Nallely Jimenez, Vivek Sharma, 2017, "Pinch-off dynamics and dripping-onto-substrate (DoS) rheometry of complex fluids", *Lab on a Chip*, Vol. 17, pp. 460~473.
- 2) Gareth H. McKinley and Tamarapu Sridhar, 2002, *Filament-Stretching Rheometry of Complex Fluids*, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 34, pp. 375~415
- 3) Oliver Arnolds, Hans Buggisch, Dirk Sachsenheimer, Norbert Willenbacher, 2010, "Capillary breakup extensional rheometry (CaBER) on semi-dilute and concentrated polyethyleneoxide (PEO) solutions" *Rheol Acta*, Vol. 49, pp. 1207~1217.
- 4) Jelena Dinic, Yiran Zhang, Leidy Nallely Jimenez, and Vivek Sharma, 2015, "Extensional Relaxation Times of Dilute, Aqueous Polymer Solutions" *ACS Macro Lett*, Vol. 4, pp. 804~808.
- 5) 전현우, 최찬혁, 김병훈, 박진수, 2021, "접탄성유체의 Capillary Breakup 가시화 및 신장유변물성 측정", *한국가시화정보학회지*, Vol. 19(1), pp. 81~87.
- 6) Shelley L. Anna and Gareth H. McKinley, 2001, "Elasto-capillary thinning and breakup of model elastic liquids", *Journal of Rheology*, Vol. 45(1), pp. 115~138.
- 7) Samrat Sur and Jonathan Rothstein, 2018, "Drop breakup dynamics of dilute polymer solutions: Effect of molecular weight, concentration, and viscosity", *Journal of Rheology*, Vol. 62(5), pp. 1245~1259.
- 8) Lucy E. Rodd, Timothy P. Scott, Justin J. Cooper-White, Gareth H. McKinley, 2005, "Capillary break-up rheometry of low-viscosity elastic fluids", *Applied Rheology*, Vol. 15(1), pp. 12~27.
- 9) Maxime Rosello, Samrat Sur, Bruno Barbet, Jonathan P. Rothstein, 2019, "Dripping-onto-substrate capillary breakup extensional rheometry of low-viscosity printing inks", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 266, pp. 160~170.
- 10) Jelena Dinic and Vivek Sharma, 2019, "Macromolecular relaxation, strain, and extensibility determine elastocapillary thinning and extensional viscosity of polymer solutions", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 116(18), pp. 8766~8774.



- 11) 박한별, 김정현, 2021, “저비용 접촉각 측정기를 활용한 표면 젖음성 평가”, 한국가시화정보학회 학술발표대회 논문집, pp. 80~81.
- 12) 박춘호, 조명옥, 이동희, 김중경, 2012, “스마트폰 기반 Mobile SmartScope를 이용한 혈구 영상 분석”, 한국가시화정보학회지, Vol. 10(2), pp. 25~31.
- 13) 유상규, 박현민, 김현구, 김사염, 송시몬, 2019, “스마트폰을 이용한 휴대용 색차계와 입도계 개발”, 한국가시화정보학회지, Vol. 17(3), pp. 19~23.
- 14) Jelena Dinic, Madeleine Biagioli, Vivek Sharma, 2017, “Pinch-off Dynamics and Extensional Relaxation Times of Intrinsically Semi-Dilute Polymer Solutions Characterized by Dripping-onto-Substrate Rheometry”, POLYMERPHYSICS, Vol. 55, pp. 1692~1704.