Polymer(Korea), Vol. 38, No. 2, pp. 213-219
http://dx.doi.org/10.7317/pk.2014.38.2.213

ISSN 0379-153X(Print)
ISSN 2234-8077(Online)

고농축 복합화약 시뮬란트의 유변학적 특성: 벽면 미끄러짐, 틱소트로피, 유동불안정성

이상묵 · 홍인권 · 안영준* · 이재욱*,†

단국대학교 화학공학과, *서강대학교 화공생명공학과

(2013년 10월 23일 접수, 2013년 11월 19일 수정, 2013년 11월 20일 채택)

Rheological Characteristics of Highly Concentrated Polymer Bonded Explosive Simulant: Wall Slip, Thixotropy, and Flow Instability

Sangmook Lee, In-Kwon Hong, Youngjoon Ahn*, and Jae Wook Lee*,†

Division of Chemical Engineering, Dankook University, 126 Jukjeon-dong, Suji-gu, Gyeonggi-do 448-701, Korea
**Applied Rheology Center, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Sogang University, Seoul 121-742, Korea*

(Received October 23, 2013; Revised November 19, 2013; Accepted November 20, 2013)

초록: 고분자 결합제로 hydroxyl terminated polybutadiene(HTPB)와 폴리에틸렌 플라스토머인 Exact를 사용한 고농축 복합화약 시뮬란트의 유변학적 특성을 연구하였다. 충전제로서 설탕 및 research department explosive(RDX)와 물리적 특성이 유사한 Dechlorane을 사용하였다. HTPB 사용시에는 가소제로 diethyl hexyl adipate(DEHA or DOA)를 첨가하기도 하였다. 농축 현탁계의 혼화는 시그마 블레이드가 장착된 회분식 혼련기(Rheomix 600, Haake)를 사용하였고 유변학적 물성은 평판-평판 레오미터 및 모세관 레오미터를 이용하였다. 고농축 결합제/충전제 현탁계의 벽면 미끄러짐 현상, 전단 히스테리시스에 따른 틱소트로피 거동, 전단속도 및 충전제 첨가에 따른 유동불안정성 변화를 조사하였다.

Abstract: The rheological characteristics of highly concentrated polymer bonded explosive simulant were studied. Hydroxyl terminated polybutadiene (HTPB) and polyethylene plastomer (Exact) were used as binders. Sugar and Dechlorane particles whose physical properties are similar to research department explosive (RDX) were used as fillers. When HTPB was used, diethyl hexyl adipate (DEHA or DOA) was used as a plasticizer together for some cases. Highly concentrated suspensions were mixed in a batch melt mixer (Rheomixer 600, Haake) and rheological properties were measured by plate-plate and capillary rheometers. Wall slip phenomena, thixotropy with shear hysteresis, and flow instability were investigated as shear rate and amount of fillers changed.

Keywords: polymer bonded explosive, simulant, wall slip, thixotropy, flow instability.

서 론

충전제를 함유한 고분자 현탁재료는 다양한 분야에서 사용되고 있다. 이들은 열가소성 및 열경화성 수지를 회분식 또는 연속 컴파운딩하는 방법으로 제조되며 유변학적 거동이 연구되어 왔다.[1-3]

이러한 현탁계의 유변 특징 중 하나는 가공이나 측정 중 구조변화에 의한 복잡성이다. 유체와 구형입자 사이에 미끌어짐이 없는 계에 대하여 상대점도는 2.5(아인스타인 상수)가 되지만[4] 완전 미끌어짐이 일어나면 1이 된다.[5] 비등방입자들에 대해서는 종횡비가 증가함에 따라 상대점도는 증가하게 되며[4] 고유점도는 전단응력이 증가함에 따라 비등방 입자들의 배향으로 인해 감소하는 반면 구형입자들의 고유점도는 전단응력과는 무관하다.[6] 이와 같은 이유로 점도는 동일 전단속도에서가 아니라 동일한 전단응력 하에서 비교하여야 한다는 주장이 있다.[7-10] 높은 충전 부피분율에서 현탁계의 상대점도는 입자 크기, 모양, 다분산성 등의 변화에 매우 민감하게 변하게 된다.[9]

둘째로, 점도계의 벽면에서의 가능한 미끄러짐이다.[11] 고전단응력 하에서 젤, 농축현탁계, 에멀젼, 발포체, 용융물에 대한 유변학적 측정은 종종 고체 경계면에서의 미끄러짐 현상을 직면하게 된다. 고분자 용융물의 벽면 미끄러짐은 자세하게 연구되었고[12,13] 벽면에서의 속도의 불연속성, 즉, 실제 미끄러짐을 보인다. 저점도 기지재에 저농도에서 중간농도 입자 현탁계의 모세관 흐름에서의 벽면 미끄러짐 효과가 보고되었고,[14,15] 최근 논문은[16] 고분자 용액뿐 아니라 현탁계에서 미끄러짐 현상을 보고하였다. 현탁계에서 벽면 미끄러짐은 낮

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: jwlee@sogang.ac.kr

은[17,18] 또는 보통 양의[19] 입자를 함유하는 액체의 이동효과(migration effect)에 밀접하게 관계되어 있는데 모세관에서 매우 희박한 현탁계의 흐름동안 입자들은 중심에서 약 0.6 떨어진 거리로 벽면으로부터 이동하는 것이 발견되었다.[17,18] 강직구(rigid sphere)가 중간 농도로 농축된 현탁계가 큰 저장소(reservoir)로부터 좁은 관을 통하여 흐름에 따라 이동효과 때문에 구의 농도감소가 발생한다는 것이 관찰되었다.[19] 보통 농도의 입자를 함유하는 고분자 용융물의 모세관 흐름에 있어 이동효과는 전단응력이 증가함에 따라 증가하지만[20,21] 위에서 언급한 경우 실제 미끄러짐은 발생하지 않고 벽면근처의 더 큰 속도구배 영역에 의해 야기되는 겉보기 미끄러짐이 발생한다. 예를 들면 고농축 현탁계에서 현탁된 입자들의 국부농도는 벌크에서보다 벽에서 더 낮다. 이는 물질이 전단을 받았을 때 큰 속도구배가 낮은 점도 층에서 발생하고 벌크유체의 겉보기 미끄러짐을 초래하기 때문이다.[17-19,22] 이와 비슷하게, 고분자 젤과 용액의 모세관 레오미터 측정시 저점도 유체로부터 야기되는 벽면 미끄러짐이 관찰되었다.[16,23] Coette과 모세관에서의 벽면 미끄러짐의 전통적인 분석들은 Mooney의[24] 이론을 이용하며 수 많은 연구자들에 의해 인용되었다.[16,23]

평판-평판 레오미터 실험에서 미끄러짐 속도와 실제 전단속도를 결정하기 위해 Yoshimura와 Prudhomme은[22] 두 가지의 틈간격(gap distance)에서의 실험에 기반한 방법과 측정한 데이터를 보정하기 위한 절차를 서술하였다. 평판-평판 레오미터의 디스크 모양(disk geometry)은 Figure 1과 같이 나타낼 수 있다. 위 디스크는 각속도 Ω로 아래 디스크에 상대적으로 회전한다. 좁은 틈간격에 대해 응력은 임의의 r 방향 위치에서 간격을 가로질러 거의 일정하다. Figure 1에 선형속도 구배의 결과를 나타냈다. 여기에서 응력이 같기 때문에 미끄럼 속도는 두 벽면에서 같다. 위 디스크의 속도는 Ωr이고 평행 디스크 비틀림 유동(parallel disk torsional flow)에서 겉보기 전단속도는 반지름, r,의 선형함수이다.

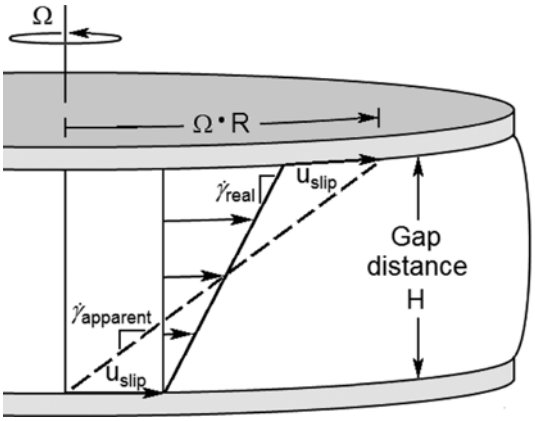


Figure 1. Parallel disk velocity field at radius R. The figure shows wall slip velocity, actual shear rate, and apparent shear rate.

$$\Omega r = H\dot{\gamma}(\tau_{z\theta}) + 2u_s(\tau_{z\theta}) \tag{1}$$

$$\dot{\gamma}_a = \frac{\Omega r}{H} \tag{2}$$

여기서, r; 디스크 중심으로부터 반지름거리, $\dot{\gamma}_a$; 겉보기 전단속도, H; 틈간격, Ω; 위 디스크의 아래 디스크에 대한 상대적인 각속도, $\dot{\gamma}(\tau)$; 실제 전단속도, $u_s(\tau)$; 미끄러짐 속도이다.

겉보기 전단속도는 실제 전단속도 및 미끄러짐 속도와 아래 식에 의해 관련되어 있다.

$$\dot{\gamma}_a = \dot{\gamma}(\tau) + \frac{2u_s(\tau)}{H} \tag{3}$$

여기에서 디스크 모서리에서의 전단응력은 다음으로부터 결정될 수 있다.

$$\tau_R = \frac{T}{2\pi R^3}\left[3 + \frac{d\ln T}{d\ln \dot{\gamma}_{aR}}\right] \tag{4}$$

여기서, T는 위 디스크를 회전시키는데 필요한 토크이고 $\dot{\gamma}_{aR}$은 디스크 끝에서의 겉보기 전단속도이다. 식 (4)는 모세관 데이터의 보정에 사용되는 Rabinowitsch[25] 보정과 비슷하다. 식 (4)에서 함수 $f = d(\ln T)/d(\ln \dot{\gamma}_{aR})$은 틈간격에 의존한다.[22] 식 (3)은 또한 $r = R$에서 응용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\gamma}_{aR} = \dot{\gamma}_R(\tau_R) + \frac{2u_s(\tau_R)}{H} \tag{5}$$

마지막 식은 $\dot{\gamma}$ *vs* $1/H$ plot을 일정 τ에서 그린다면 직선을 얻는다. 외삽된 절편은 디스크 모서리에서 실제 전단속도이고 기울기는 $2u_s$가 된다.

고분자를 결합제로 사용하는 복합화약의 경우 충전율이 높을수록 그 성능이 증대하나 가공 중 내부의 과다한 발열로 사고를 초래할 수 있는 바 화약과 가공특성이 유사한 충전제를 사용한 복합화약 시뮬란트를 대상으로 한 여러 특성 분석이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 평판-평판 레오미터를 사용한 유변학적 거동을 연구하였다.

실 험

원료. 고분자 결합제 수지로는 hydroxyl terminated polybutadiene(HTPB) 및 폴리에틸렌 플라스토머인 Exact를 사용하였으며, HTPB의 경우에는 가소제 diethyl hexyladaipate(DEHA or DOA)를 질량비 10:2로 혼합하여 사용하기도 하였다. 충전제로는 설탕 및 research department explosive (RDX)와 물리적 특성이 유사한 dechlorane을 사용하였다. 결합제와 충전제의 특성을 Table 1과 Table 2에 각각 수록하였고 그 중 HTPB와 dechlorane 25의 구조식을 Scheme 1에 도시하였다.

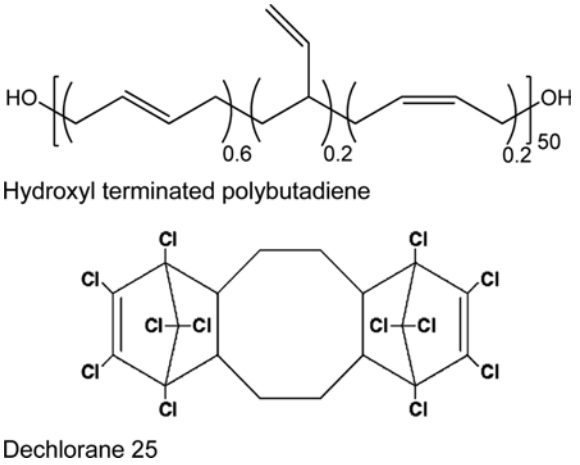
Table 1. Polymeric Binders Used in This Study

Trade name	Material type	Producer	Density (g/cm^3)	Remark
R-45M	HTPB	Arco Chem. Co.	0.9	T_g: -76 °C M_n: 2800 Viscosity at 30 °C: 4400 mPa·s
Exact 5361	Ethylene octene copolymer	Exxon mobil chemical	0.860	T_m: 36 °C M.I.*: 3
Exact 5371	Ethylene octene copolymer	Exxon mobil chemical	0.870	T_m: 53 °C M.I.*: 5

*ASTM 1238.

Table 2. Fillers Used in This Study

Trade name	Material type	Producer	Density (g/cm^3)	Mean particle size (μm)	T_m (°C)
Caster suger	Sugar (sucrose)	CJ Corp.	1.6	104	160-186
Milled suger	Sugar (sucrose)	Air pulverized	1.6	4	160-186
Dechlorane plus 25	$C_{18}H_{12}Cl_{12}$	OxyChem	1.8	4.5	350



Scheme 1. Structures of the materials used in this study.

실험 장치. 농축 현탁계의 혼화는 시그마 블레이드가 장착된 회분식 혼련기(Haake, Rheomix 600)를 사용하였는데, 혼련기 내의 온도와 혼련속도와 충전 부피분율 등을 변화시키면서 실험을 수행하였으며, 혼화 거동에 따라 변하는 토크와 온도를 토크미터와 열전대를 사용하여 측정하였다. 본 실험에서 사용한 결합제/충전제의 비율은 모두 부피분율이며 결합제로 HTPB에 DEHA(or DOA)를 혼합한 경우 HTPB와 DEHA의 혼합비에만 질량비를 사용하였다. 낮은 전단속도 범위에서의 현탁계의 유변물성은 평판-평판 레오미터(Physica MCR-500, Anton Paar)를 이용하였는데 지름 25 mm의 평판을 사용하여 0.01-10 s^{-1}의 전단속도 범위에서 측정하였다. 또 높은 전단속도에서는 모세관 레오미터(Rheograph 2003, Goettfert)를 이용하였는데 직경 1 mm이고 L/D가 30인 다이를 사용하여 10-3000 s^{-1} 전단속도의 범위에서 측정하였다. 측정된 점도와 전단속도는 일차적으로 Rabinowitsch 보정과 Mooney 보정없이 겉보기 값들로 나타내었다.

결과 및 토론

벽면 미끌어짐. 고농축 현탁계에 전단응력이 부가되면 입자의 내부 이동에 의한 결과로 벽면 미끌어짐 현상을 보이게 된다. 이와 같은 벽면 미끌어짐 현상은 평판-평판형 레오미터를 사용할 경우 평판 사이의 간격을 변화시키거나, 또 모세관 레오미터를 사용할 경우 모세관의 지름을 변화시키면서 실험을 수행하게 되면 조사할 수 있다. Figure 2에는 Exact 5361/Dechlorane(50/50) 현탁계를 대상으로 평판 사이의 간격을 변화시키면서 측정한 전단응력과 전단속도의 관계를 도시하였는데, 평판 사이의 간격 변화에 따른 영향이 거의 없음을 볼 수 있었다. 또한 Figure 3에는 Exact 5361/Dechlorane(40/60 v/v) 현탁계를 대상으로 지름이 서로 다른 세 종류의 모세관을 사용하여 측정한 점도를 전단속도에 따라 도시하였는데

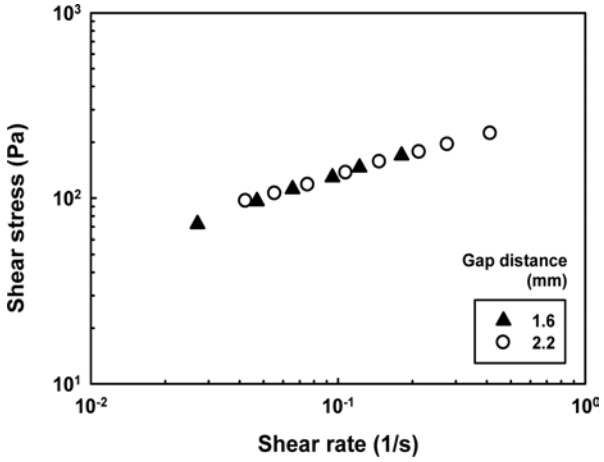


Figure 2. Shear stress *vs*. shear rate for Exact 5361/Dechlorane(50/50) with two gap distances at 60 °C.

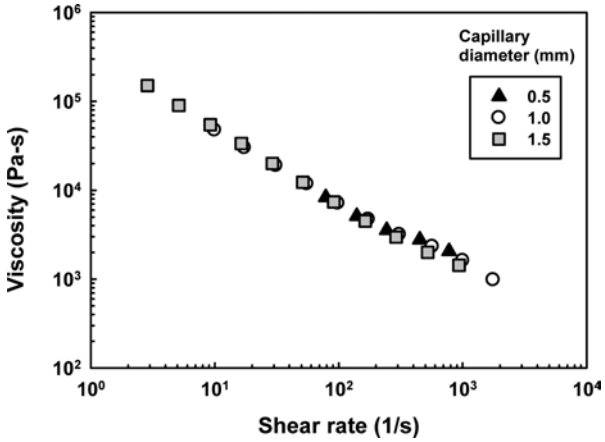


Figure 3. Viscosity *vs*. shear rate for Exact 5361/Dechlorane (40/60) measured in capillary rheometer (L/D=30) at 60 ºC.

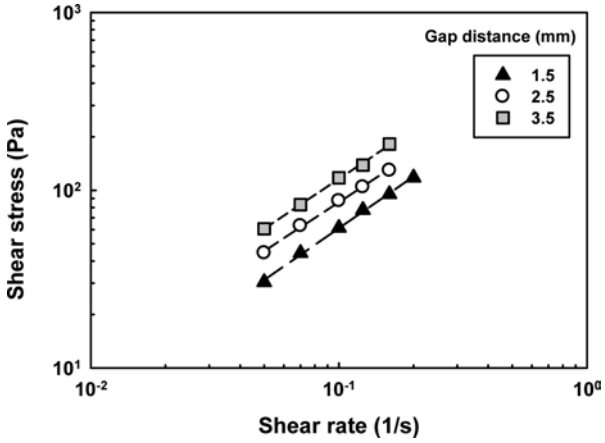


Figure 4. Shear stress *vs*. shear rate for HTPB/sugar (mirip:air pulverized=3:1) (45/55) at 60 ºC.

이 경우도 모세관 지름 변화에 따른 영향이 별로 없음을 알 수 있다.

일반적으로 모세관 내에서 희박 또는 중간농도의 현탁계에 전단응력이 부가되면 벽면의 고체입자 들이 중심을 향해 이동한다는 것이 알려져 있다.[17-19] 그러나 고분자 결합제인 Exact 5316의 경우는 낮은 M.I.(즉, 높은 점도)로 인하여 벽면 미끄러짐이 뚜렷하게 관찰되지 않은 것으로 사료된다. 반면에 HTPB를 결합제 수지로 사용한 시뮬란트 현탁계에서는 벽면 미끌어짐 현상이 확연히 관찰되었다. HTPB/설탕(미립당과 분쇄당이 3:1의 비율로 충전) (45/55) 계를 대상으로 평판-평판 레오미터에서 평판 사이의 간격을 변화시키면서 측정한 전단응력과 전단속도의 관계를 Figure 4에 도시하였는데, 일정 전단속도에서 평판 사이의 간격이 증가함에 따라 전단응력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 전단응력이 증가함에 따라 점도가 거의 무한대인 입자가 중심부 쪽으로 이동하게 되고 그 결과 벽면에는 수지 성분만이 존재하게 됨에 기인하는 것

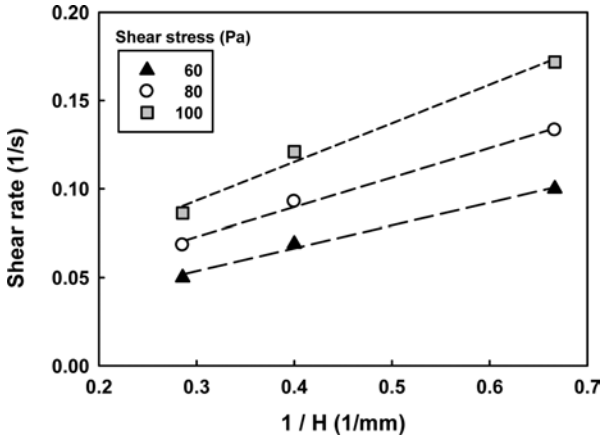


Figure 5. Apparent shear rate *vs*. 1/*H* at constant shear stress.

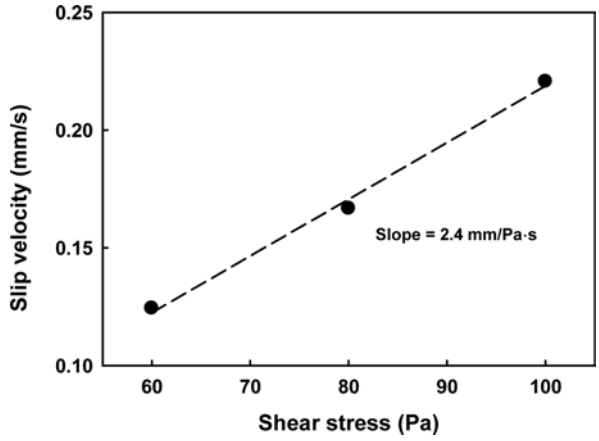


Figure 6. Slip velocity *vs*. shear stress.

으로 판단된다. 따라서 Figure 5와 같이 일정 전단응력의 조건에서 전단속도 변화를 평판 사이 간격의 역수의 겉보기 전단속도가 감소하여 벽면 미끌어짐이 증가하는 것을 알 수 있다.

기울기로부터 미끌어짐 속도를 구하면 미끌어짐 속도는 Figure 6에서 보는 바와 같이 전단응력이 증가함에 따라 미끌어짐 속도가 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 중간농도의 입자를 함유한 고분자 용융물의 모세관 흐름에서 전단응력이 증가함에 따라 입자이동효과가 증가한다는 보고와 부합하였다.[21] Soltani 등도[26] HTPB/aluminum(37/63) 현탁계에서 벽면 미끌어짐 현상이 일어남을 발견하였으며 60 ºC에서 전단응력이 100 Pa일 때 미끌어짐 속도는 약 0.1 mm/s가 됨을 보고하였다.

틱소트로피 거동. Figure 7에는 (HTPB/DOA)/설탕(60/40) 현탁계를 대상으로 전단속도를 시간에 따라 선형적으로 증가시켜 설정된 최대 전단속도까지 올렸다가 선형적으로 감소시키는 과정을 반복적으로 수행하였을 때 보이게 되는 전단응력과 전단속도 관계를 도시하였는데 히스테리시스 루프를 형

성하며 2번 정도의 싸이클을 지나면 히스테리시스 루프가 거의 사라지는 것을 볼 수 있다. 이는 첫 번째 싸이클의 과정에서 전단속도에 의해 현탁계 내부구조가 완전히 깨어져서 그 이후로의 반복된 싸이클 과정에서는 전단속도 하강과 증가에 따른 전단응력-전단속도 곡선들이 동일 선상에 있음을 볼 수 있었다. 따라서 첫 번째 싸이클의 전단속도 증가와 하강으로 만들어지는 전단응력-전단속도 폐곡선 내의 면적은 내부구조를 파괴하는데 필요한 에너지에 해당한다고 할 수

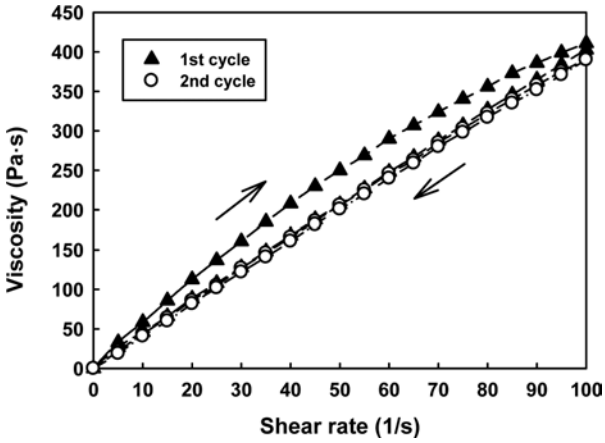


Figure 7. Thixotropic hysterisis behavior for (HTPB/DOA)/sugar (60/40) at 60 ℃.

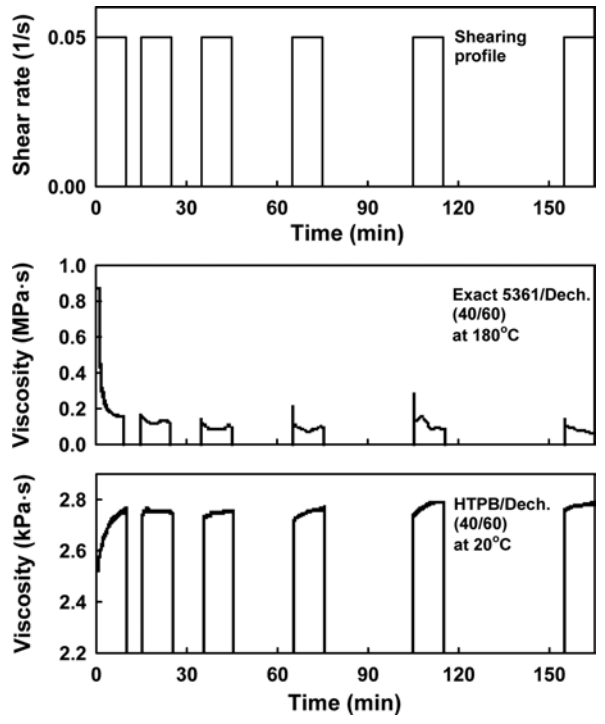


Figure 8. Thixotropic behaviors of suspensions measured by sequential step shear rate test.

있으므로 (HTPB/DOA)/설탕(60/40) 현탁계의 혼련에는 이 이상의 에너지를 더 필요하다는 것을 알 수 있었다.

틱소트로피 현상을 측정하는 또 다른 실험 방법으로 단계 전단속도를 순차적으로 부가하는 방법(sequential step shear rate)이 있다. Figure 8에서 보인 바와 같이 구간과 구간 사이의 쉬는 시간을 5, 10, 20, 30, 40분으로 하고 각 구간에서 전단속도 0.05 s^{-1}를 10분씩 가했을 때의 현탁계의 과도(transient) 점도 거동을 관찰하였다. Exact 5361/Dechlorane(40/60) 현탁계에서는 첫 번째 구간에서 입자간 연결이 과도하게 파괴되고 세 번째 구간 이후 구조적 회복을 진행되는 틱소트로픽 거동을 보였고 HTPB/Dechlorane(40/60) 현탁계 또한 세 번째 구간 이후 구조적 회복이 되는 틱소트로픽 거동을 보였다. 이 같은 경향은 전단응력이 제거된 후 즉시 젤 형성이 시작되는 하이드로젤(hydrogel)의 흐름과 회복거동과 매우 유사하였는 바 입자간의 응집의 파괴와 회복에 의한 것 때문이라 사료된다.[27]

Exact/Dechlorane 농축 현탁계의 유동 안전성. 고분자 용융물은 점탄성체이기 때문에 매우 낮은 레이놀즈수에 대응되는 낮은 전단속도에서 유동 불안정성을 나타내며, 제품의 표면외관, 모양, 치수 불규칙성을 초래하게 된다. 따라서 복합화약을 압출 공정으로 제조할 때 높은 생산성과 제품의 균질성을 확보하기 위해, 고농축 현탁계 시뮬란트를 대상으로 하는 유동 안정성에 대한 연구가 필요하다. 60과 80 ℃의 온도 조건에서 모세관 레오미터로부터 압출된 순수 Exact 5361와 Exact 5371 및 그 현탁계의 시편들의 사진을 Figure 9에 나타내었다.

순수 Exact 5361의 경우 60 ℃의 온도 조건에서는 10 s^{-1}의 전단속도에서부터 이미 slip-stick 형태의 유동 불안정성을 보이기 시작하며 32 s^{-1}일 때는 sipral, 100 s^{-1}일 때는 랜덤한 형태의 유동 불안정성을 보인다. 80 ℃의 온도 조건에서는 18 s^{-1} 이하에서는 균일한 성형품을 얻을 수 있으나 18 s^{-1} 이상이 되면 slip-stick, 100 s^{-1}일 때는 spiral, 1778 s^{-1}일 때는 랜덤한 형태의 유동 불안정성을 보이는 것으로 평가되었다. 이는 동일한 전단속도에서는 온도가 높을수록 점도가 낮아 용융 압출물에 부가되는 벽면 전단응력이 낮기 때문에 유동 불안정성이 일어나는 전단속도가 증가하는 것으로 사료된다. Exact 5371의 경우에는 같은 온도와 같은 전단속도에서 Exact 5361보다 Exact 5371이 훨씬 더 좋은 유동 안정성을 보이는 것을 볼 수 있는 바 이는 Exact 5371의 상대적으로 낮은 점도에 기인하는 것으로 판단된다.

한편, 60 v%의 Dechlorane이 Exact 5361에 충전된 현탁계의 압출물 사진을 보면, 이들 압출물에서는 측정된 높은 전단속도의 범위에서도 유동 불안정성이 전혀 관찰되지 않았다. 이는 유동 불안정성과 점탄성 특성간의 관계로[28] 설명할 수 있는데 본 연구에서 Exact 플라스토머는 원래 탄성이 상당히 높기 때문에 낮은 전단속도에서도 유동 불안정성을 보

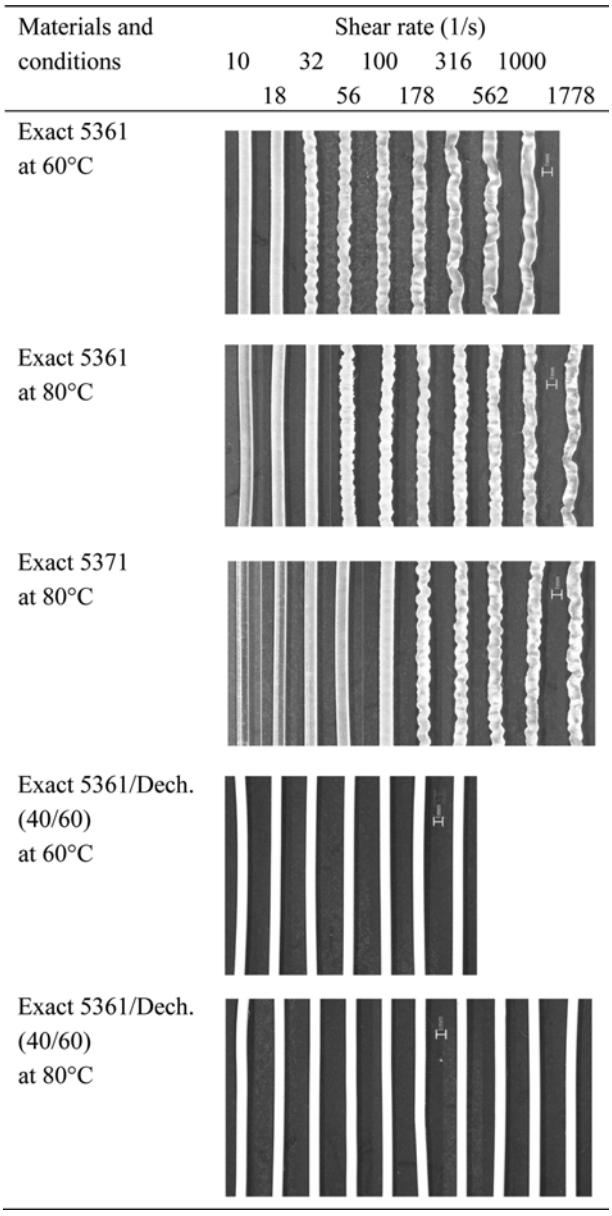


Figure 9. Photographs of extrudates.

이지만 Dechlorane이 다량 첨가된 Exact/Dechlorane 현탁계는 탄성이 크게 감소되었기 때문인 결과로 사료된다.

결 론

Exact 5361/Dechlorane(50/50) 현탁계를 대상으로 평판-평판형 레오미터의 평판 사이의 간격을 변화시키면서 측정한 전단응력과 전단속도의 관계를 조사한 결과 평판 사이의 간격 변화에 따른 영향이 거의 없음을 볼 수 있었으며, 모세관 지름을 달리하여 측정한 Exact 5361/Dechlorane(40/60) 현탁계의 모세관 레오미터 결과에서도 모세관 지름 변화에 따른 영향이 별로 없음을 알 수 있었다. 이는 고분자 결합제인 Exact 5316의 높은 점도로 인하여 벽면 미끄러짐이 뚜렷하게 관찰되지 않은 것으로 판단되었다. 반면에 HTPB/설탕(미립당과 분쇄당이 3:1의 비율로 충전) (45/55) 계를 대상으로 평판-평판 레오미터에서 평판 사이의 간격을 변화시키면서 측정한 전단응력과 전단속도의 관계를 조사한 결과 벽면 미끌어짐 현상이 확연히 관찰되었다.

평판-평판형 레오미터에서 (HTPB/DOA)/설탕(60/40) 현탁계를 대상으로 전단속도를 시간에 따라 선형적으로 증가시켜 설정된 최대 전단속도까지 올렸다가 선형적으로 감소시키는 과정을 반복적으로 수행하였는 바 응력과 전단속도 관계에서 틱소트로피 현상을 관찰하였다. 단계 전단속도를 순차적으로 부가하는 방법으로 틱소트로피 판단 실험을 한 결과 Exact 5361/Dechlorane(40/60) 현탁계에서는 첫 번째 구간에서 입자간 연결이 과도하게 파괴되고 세 번째 구간 이후 구조적 회복이 진행되었고 HTPB/Dechlorane(40/60) 현탁계 또한 세 번째 구간 이후 구조적 회복이 되는 틱소트로픽 거동을 보인 바 전단응력의 부가와 제거에 따른 입자간의 응집의 파괴와 회복에 의한 것 때문이라 판단되었다.

60과 80 ℃의 온도 조건에서 모세관 레오미터로부터 압출된 시편들의 유동불안정성을 조사한 결과 전단속도 증가에 따라 유동 불안정성이 증가하는 것을 알 수 있었고 Exact 5371이 Exact 5361에 비해 낮은 점도로 인해 더 낮은 유동불안정성을 보이며 표면이 개선되었다. Exact 5361/Dechlorane (40/60) 현탁계의 경우는 탄성의 감소로 인해 유동 불안정성이 관찰되지 않았다.

감사의 글: 본 연구는 (주)한화와 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다(계약번호: UC120019GD).

참 고 문 헌

1. M. R. Kamal and A. Mutel, *J. Polym. Eng.*, **5**, 293 (1985).
2. A. B. Metzner, *J. Rheol.*, **29**, 739 (1985).
3. S. A. Khan and R. K. Prud'homme, *Rev. Chem. Eng.*, **3**, 205 (1987).
4. R. J. Hunter, *Foundations of Colloid Science*, Oxford University Press, Oxford, 2001.
5. L. E. Nielsen, *Polymer Rheology*, Marcel Dekker, New York, 1977.
6. E. J. Hinch and L.G. Leal, *J. Fluid Mech.*, **52**, 683 (1972).
7. I. M. Krieger, *Adv. Colloid Interface Sci.*, **3**, 111 (1972).
8. R. G. Larson, *The Structure and Rheology of Complex Fluids*, Oxford University Press, New York, 1999.
9. H. A. Barnes, J. F. Hutton, and K. Walters, *An Introduction to Rheology*, Elsevier, Amsterdam, 1989.
10. G. N. Choi and I. M. Krieger, *J. Colloid Interface Sci.*, **113**, 101 (1986).

11. U. Yilmazer, C. Gogos, and D. Kalyon, *Polym. Compos.*, **10**, 242 (1989).
12. A. V. Ramamurthy, *J. Rheol.*, **30**, 337 (1986).
13. O. Bartos and J. Holomek, *Polym. Eng. Sci.*, **11**, 324 (1971).
14. G. V. Vinogradov, G. B. Froishteter, K. K. Trilisskii, and E. L. Smorodinskii, *Rheol. Acta*, **14**, 765 (1975).
15. A. M. Kraynik and W. R. Schowalter, *J. Rheol.*, **25**, 95 (1981).
16. Y. Cohen and A. B. Metzner, *J. Rheol.*, **29**, 67 (1985).
17. G. Segre and A. Silberberg, *Nature*, **189**, 209 (1961).
18. G. Segre and A. Silberberg, *J. Fluid Mech.*, **14**, 115 (1962).
19. V. Seshadri and S. P. Sutera, *Trans. Soc. Rheol.*, **14**, 351 (1970).
20. C. D. Han, *Multiphase Flow in Polymer Processing*, Academic Press, New York, 1981.
21. U. Yilmazer, *SPE ANTEC Technical Papers*, **34**, 1608 (1988).
22. A. Yoshimura and R. K. Prud'homme, *J. Rheol.*, **32**, 53 (1988).
23. T. Q. Jiang, A. C. Young, and A. B. Metzner, *Rheol. Acta*, **25**, 397 (1986).
24. M. Mooney, *J. Rheol.*, **2**, 210 (1931).
25. B. Rabinowitsch, *J. Physik. Chem.*, **A145**, 1 (1929).
26. F. Soltani and U. Yilmazer, *SPE ANTEC Technical Papers*, **1**, 1232 (1999).
27. J. Nanda, A. Biswas, and A. Banerjee, *Soft Matter*, **9**, 4198 (2013).
28. Z. Zhu, *Rheol. Acta*, **43**, 373 (2004).