

고농축 복합화약 시물란트: Exact/Dechlorane 현탁계의 유변물성

이상목 · 홍인권 · 이재욱*[†] · 이근득**

단국대학교 화학공학과, *서강대학교 화공생명공학과, **국방과학연구소
(2013년 10월 28일 접수, 2013년 12월 26일 수정, 2013년 12월 27일 채택)

Highly Concentrated Polymer Bonded Explosive Simulant: Rheology of Exact/Dechlorane Suspension

Sangmook Lee, In-Kwon Hong, Jae Wook Lee*[†], and Keun Deuk 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*

***Agency for Defense Development, Daejeon 305-600, Korea*

(Received October 28, 2013; Revised December 26, 2013; Accepted December 27, 2013)

초록: 에너지 고분자인 poly(BAMO-AMMO)와 유사한 특성을 갖는 폴리에틸렌 플라스틱머인 Exact를 고분자 결합제로, RDX(research department explosive)와 유사한 특성을 갖는 dechlorane을 충전제로 사용한 고농축 복합화약 시물란트 현탁계의 유변물성을 연구하였다. 회분식 용융혼련기를 사용하여 현탁계의 혼화거동을 조사하였는데 상당한 점성소산열이 발생하였다. 충전율이 70 v% 이상에서는 토크의 지속적인 감소가 있었는데 이는 벽면 미끌어짐 현상에 기인한다고 사료되었다. SEM 관찰 결과 충전제 입자들은 잘 분산되어 있었고 혼화 조건의 영향은 크지 않은 것으로 판단되었다. 현탁계의 뚜렷한 전단박화(shear thinning) 특성으로 인하여 낮은 전단속도의 평판-평판 레오미터에서 측정이 어려운 고충전 현탁계도 높은 전단속도의 모세관 레오미터에서 유변물성 측정이 가능하였다.

Abstract: The rheology of highly concentrated polymer bonded explosive (PBX) simulant was studied. An energy material, polyethylene plastomer (ExactTM) having similar properties to poly(BAMO-AMMO) was selected as a binder. Dechlorane with similar properties to RDX (Research Department eXplosive) was chosen as a filler. Mixing behavior in a batch melt mixer was investigated. During mixing a large amount of heat of viscous dissipation was generated and a continuous decrease in torque was observed when the filler content was above 70 v%. It was believed due to wall slip phenomena. From the SEM images, the fillers were well dispersed and the effect of mixing condition affected slightly on the dispersion. Owing to distinct shear thinning behavior of the suspensions, measuring viscosity of highly filled suspensions was possible in a high shear rate capillary rheometer though it was impossible even in a low shear rate plate-plate rheometer.

Keywords: highly concentrated, explosive, polymer bonded explosive (PBX), simulant, suspension.

서 론

이축 압출기를 이용하여 복합화약을 펠렛이나 쉬트상으로 연속 생산하는 기술을^{1,2} 개발하기 위해서는 이축 압출기 내에서의 주어진 체류시간 동안에 활성 충전제와 고분자 결합제를 균일하게 분산 혼련시킬 수 있는 기술, 활성 충전제의 충전율을 극대화 할 수 있는 기술, 성형조건의 최적화를 통하여 성형성을 향상시키는 기술, 낮은 성형 결함과 균일한 충전 입자밀도 등을 유지하기 위한 기술 등 관련된 많은 정보

를 필요로 하고 있다.^{3,5} 그러나 저감폭약이라⁶ 할지라도 복합화약을 구성하고 있는 활성 충전제(AP, AN, HMX, RDX, CL-20 등)와 고분자 결합제 수지(HTPB, CTPB, GAP) 및 가소제들은 폭발력이 상당히 강하므로, 보다 안정적인 조건에서 다양한 실험을 수행하여 관련 정보를 수집할 수 있는 방안 마련이 절실히 요구된다. 따라서 복합화약을 구성하고 있는 성분들과 매우 유사한 물성과 특성을 지닌 물질로서 이루어진 불활성의 시물란트를 개발함으로써 복합화약의 압출 거동과 관련된 다양한 실험을 안정적으로 수행하는 것이 필요하다.

복합화약의 제조공정조건을 효과적으로 설정하기 위해 사용되는 시물란트가 실제 시스템에 근접하는 혼화 거동을 나

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

타내기 위해서는 시물란트를 구성하는 충전제의 밀도, 입자의 크기, 입도 분포, 표면 특성 및 고분자 결합제와의 접착력 등이 복합화약에 사용하는 활성 충전제와 유사하여야 하며, 충전제의 용점은 고분자 결합제의 가공온도보다 훨씬 높아야 한다. 또 고분자 결합제는 복합화약의 가공온도에서 실제 복합화약 결합제와 유사한 점도 거동을 가져 점성 소산에 의한 열을 잘 예측할 수 있어야 하며, 관능기 극성의 유사함도 고려되어야 한다.

이를 위해 고분자 결합제 수지로는 성형 온도조건, 분자량, 분자량 분포, 유변물성 등을 고려하여 열경화성 수지인 HTPB, CTPB와 열가소성 수지인 EVA, polyethylene plastomer 등이 주로 사용되고 있다.⁷⁻⁹ 불활성 충전제로는 활성 충전제와 유사한 입자형상, 크기, 표면에너지 등을 고려하여 탄산칼슘 (CaCO₃), Al₂O₃, 동공이 빈 유리구슬과 같은 무기물 충전제와 설탕, Dechlorane 등과 같은 유기물 충전제들이 주로 사용되고 있다. 충전제로서 설탕은 흡습성이 매우 높고 입자간의 응집이 잘 일어난다는 단점에도 불구하고 RDX나 HMX 등 활성 충전제와 같은 유기물일 뿐만 아니라 다양한 입도분포를 만들 수 있고 쉽게 구할 수 있는 장점으로 인해 복합화약 시물란트의 충전제로 사용한 연구 결과들이 보고되고 있다.¹⁰⁻¹⁵

Patenaude는¹⁶ 난연제로 주로 사용되는 aliphatic chlorine containing crystalline organic compound인 OxyChem사의 Dechlorane이 입도, 밀도, 정전기적 특성 및 코팅 거동에 있어서 RDX와 매우 유사하다고 보고하였으며, RDX와 Dechlorane 모두 유방성이어서 흡습성에 문제가 없음을 언급하였고, 또한 poly(BAMO-AMMO)와 유사한 특성을 갖는 고분자 결합제로 가능한 용융온도가 낮으면서 용융지수가 높은 ethylene-butene based plastomer(Exxon Mobil, Exact 4049)와 ethylene vinyl acetate copolymer(Equistar Chemicals, Petrothene UE 635-000)를 결합제로 사용하여 Dechlorane 충전제와 결합제의 무게비를 3:1로 하여, 시물란트를 구성하였다. Gallant는¹⁷ ammonium perchlorate와 비슷한 밀도를 갖는 potassium chloride를 충전제로 사용하였으며 용융지수가 높은 polyolefin plastomer인 DuPont Dow Engage 8401를 고분자 결합제로 하는 시물란트를 개발하고 이축압출기의 체류 시간분포 실험을 수행하였으며, 다른 실험에서는 충전제로

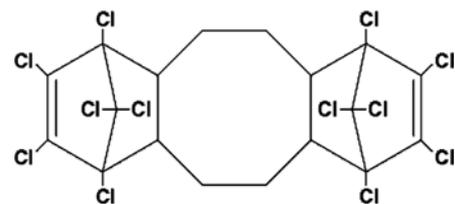
potassium chloride, 고분자 결합제로 열경화성의 HyTemp 4404(Zeon Chemical)를 사용하여 복합화약 시물란트를 구성하였다.¹⁶

실 험

원료. 에너지 고분자인 poly(BAMO-AMMO)와 유사한 특성을 갖는 공단량체로 octene을 사용한 폴리에틸렌 플라스틱을 고분자 결합제로, RDX(research department explosive)와 유사한 특성을 갖는 Dechlorane을 충전제로 사용하여 시물란트 개발 실험을 수행하였으며, 본 연구에서 사용한 결합제 및 충전제의 물성을 Table 1에 수록하였고 충전제인 Dechlorane 25의 구조를 Scheme 1에 도시하였다.

실험 장치. 시그마 블레이드가 장착된 회분식의 고전단 혼련기(Haake Rheocoder, Rheomix 600)를 사용하여 혼련속도, 혼련온도, 충전제의 함량, 주입 방법 등을 변화시키면서 실험을 수행하였으며, 혼화거동에 따라 변하는 토크와 온도를 토크미터와 열전대를 사용하여 측정하였다. 일정한 온도로 예열되어 있는 혼련기에 낮은 회전속도에서 결합제와 충전제를 정해진 부피비(100/0, 60/40, 50/50, 40/60)로 동시에 주입한 후 회전속도를 약간 상향 조정하여 40~80 rpm으로 유지하여 약 40분간 혼련하였다.

낮은 전단속도 범위에서의 현탁계의 유변물성은 평판-평판 레오미터(Physica MCR-500, Anton Parr)를 사용하여, 또 높은 전단속도에서의 유변물성은 모세관 레오미터(Rheograph 2003, Goettfert)를 사용하여 측정하였다. 평판-평판 레오미터에서는 25와 50 mm의 평판을 사용하여 0.01~10 s⁻¹의 전단속도 범위에서 측정하였으며, 모세관 레오미터에서는 직경 1 mm 이고 L/D가 30인 다이를 사용하여 10~3000 s⁻¹ 전단속도의



Scheme 1. Structure of Dechlorane 25.

Table 1. Properties of Materials Used in This Study

Trade name	Material	Density (g/cm ³)	T _m (°C)	Remark
Exact 5361	Ethylene octane copolymer (Exxon mobil chemical)	0.86	36	Melt index*: 0.5
Exact 5371	Ethylene octane copolymer (Exxon mobil chemical)	0.87	64	Melt index*: 5
Dechlorane 25	C ₁₈ H ₁₂ Cl ₁₂ (Oxychem)	1.8	350 w/decomp	Mean particle size: 4.5 μm

*ASTM 1238.

범위에서 측정하였다. 측정된 점도와 전단속도는 일차적으로 Rabinowitsch 보정과 Mooney 보정없이 겔보기 값들로 나타내었다.

현탁계의 모폴로지는 시편을 액체 질소 하에서 파쇄하여 gold coating 한 후 주사 전자현미경(HITACHI S-2500C, 25 kV)을 사용하여 측정하였다. 충전제의 입도분포는 입도분석기(Malvern Mastersizer 2000)를 사용하여 측정하였다.

결과 및 토론

충전제 및 결합제 분석. Figure 1에는 Dechlorane 25 입자의 SEM 이미지를 도시하였다. SEM 이미지에서 보는 바와 같이 Dechlorane 25는 응집구조를 갖는 것을 볼 수 있었다. Patenaude는¹⁶ 열가소성 수지인 폴리에틸렌 플라스틱머 중 낮은 용융온도를 갖고 용융지수가 높은 Exact 4049를 고분자 결합제로 선정·사용하였으나, 현재 국내에서 구하기가 불가능하여 본 연구에서는 Exact 4049와 비슷한 물성을 지닌 Exact 5361과 Exact 5371를 고분자 결합제로 사용하여 실험을 수행하였다. 문헌의 Exact 4049에 비하여 Exact 5371은 약간 높은 용융지수 값을 갖기 때문에 상대적으로 점도가 낮아 입자의 충전에는 다소 유리하겠지만 용융온도가 높다는 단점이 있으며, Exact 5361은 용융온도는 36 °C로 낮아 혼화 온도를 높게 설정하지 않아도 된다는 측면에서는 유리하지만 용융지수가 상대적으로 낮아 점도가 높기 때문에 상대적으로 충전입자의 혼화가 용이하지 않을 것으로 예상되었다.

Figure 2에는 평판-평판 레오미터와 모세관 레오미터를 사용하여 Exact 5361과 Exact 5371의 두 고분자가 모두 용융되는 80 °C에서 측정된 점도값들을 도시하여 비교하였다. Exact 5361의 용융지수가 낮으므로 낮은 전단속도에서는 Exact 5371에 비해 높은 점도값을 갖는 것을 볼 수 있지만 실제 혼련이 일어나는 높은 전단속도 범위에서는 전단박화 현상으로 두 수지의 점도 값에 거의 차이가 없는 것을 볼 수 있으므로

입자 충전 시의 점도 증가를 완화시켜 줄 수 있을 것으로 판단되었다.

Exact/Dechlorane 현탁계의 혼화 거동. Figure 3에는 회분식 혼련기를 사용하여 수행한 Exact/Dechlorane 현탁계의 혼화 거동을 도시하여 비교하였다. 결합제인 Exact 플라스틱머를 혼련기에 넣고 약 5분간 용융 및 균질화시킨 후 충전제를 약 2분에 걸쳐 주입하였는데, 충전제 주입 후 토크는 급격히 상승하며 피크에 도달한 후 감소하여 일정한 값에 도달됨을 관찰할 수 있었고, 균질화 혼련이 일어났다고 볼 수 있는 토크가 일정값에 도달하는 시간이 대략 10분 정도 소요됨에 미루어 통상적인 체류시간이 3분 정도인 이축 압출기를 사용하여 혼련할 경우에는 본 연구에서 사용한 혼화 조건보다 보다 높은 전단장이 요구됨을 알 수 있었다. 또 복합화약의 압출가공 시 압출물의 온도는 구성물질의 폭발을 방지하기 위한 온도 이하로 유지되어야 하는데 복합화약과 같은 고

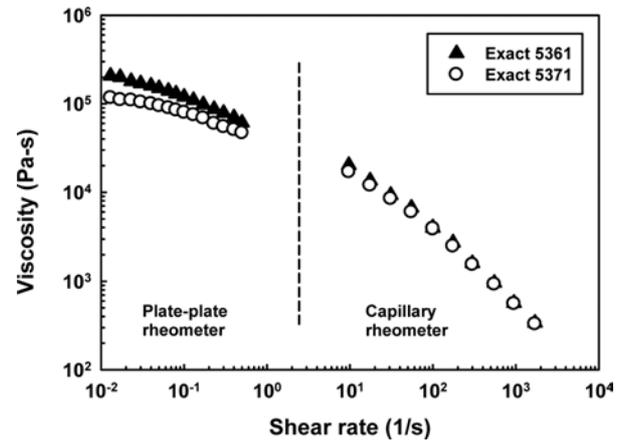


Figure 2. Shear viscosity vs. shear rate for Exact 5361 and Exact 5371 at 80 °C. The measured viscosity and shear rate values from capillary rheometer are apparent values.

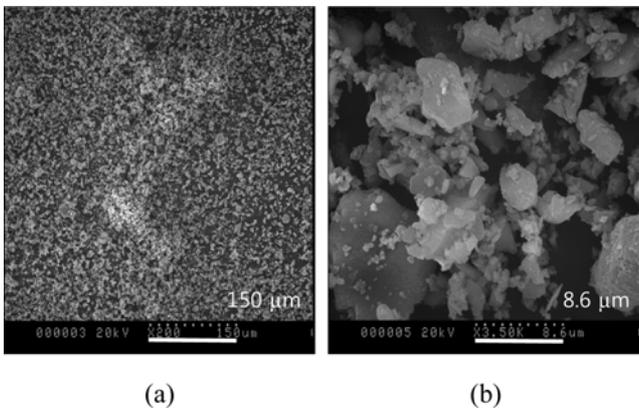


Figure 1. SEM micrographs of Dechlorane 25 (a) ×200; (b) ×3500.

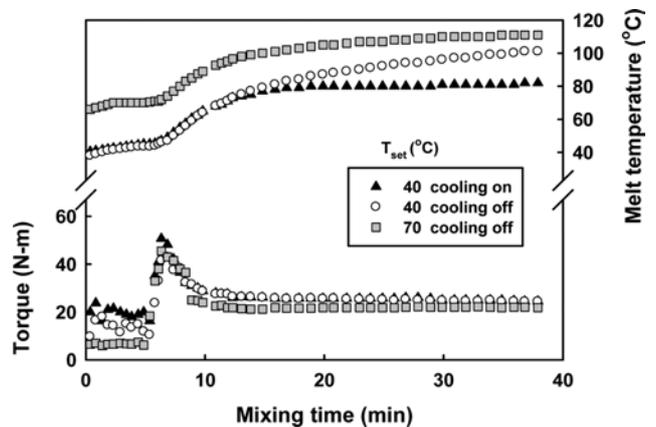


Figure 3. Mixing behavior of Exact 5361/Dechlorane (40/60) suspensions at 40 and 70 °C with cooling off after loading Dechlorane.

농축 현탁계는 점성 소산으로 인한 발열이 매우 크게 나타날 수 있으므로 이에 대한 예측이 필요하다.

Exact 5361은 Exact 5371에 비해 40 °C의 낮은 온도에서도 혼련이 가능하였는데, Figure 3에는 60 v%가 충전된 Exact 5361/Dechlorane 현탁계를 대상으로 40과 70 °C의 두 혼화 온도에 대한 영향을 비교하였다. 또한 점성 소산으로 인한 발열을 관찰하기 위하여 충전제를 충전한 후 냉각 장치를 정지시켰다. 내부 온도는 충전제를 주입한 후 점성 소산으로 인하여 급격히 상승하였고 혼련이 균질화되는 시점 이후부터는 완만한 온도 증가를 보였다. 혼화온도가 40 °C인 경우를 살펴보면 냉각장치를 가동할 경우에는 현탁계의 온도가 80 °C로 유지되지만 냉각장치를 가동하지 않았을 때는 온도가 계속 상승하는 것을 볼 수 있었으며 토크가 일정 값에 도달하는데 긴 시간이 소요됨을 볼 수 있었다. 혼화온도가 70 °C인 경우는 내부 용융물의 온도가 RDX/poly(BAMO-AMMO)의 가공 온도 상한선인 약 110 °C에 거의 도달하는 것을 볼 수 있으므로 혼화온도를 낮출 필요가 있는 것으로 판단되었다.

혼화 조건에 따른 혼화거동을 관찰하기 위하여 공정 변수인 스크류 회전속도, 혼화온도, 충전제 농도를 변화시키며 현탁계의 토크와 온도 변화를 관찰하였다. 먼저 Exact 5361을 20 rpm에서 5분간 용융시킨 다음 스크류 회전속도 40 rpm으로 증가시켜 Dechlorane을 약 2분간에 걸쳐 충전하고 다시 60 rpm으로 증가시켜 30분간 혼련하였다. 혼화 실험의 기본 조건으로 Dechlorane 충전함량은 60 v%(76 wt%), 혼화온도 40 °C, 혼화시간은 30분으로 고정하였다. Figure 4(a)에 Exact 5361/Dechlorane(40/60) 현탁계를 대상으로 스크류 회전속도를 40~80 rpm 범위에서 변화시키면서 조사한 혼화속도에 따른 혼화거동을 도시하였다. 혼련의 균질화가 이루어졌다고 판단되는 시간, 즉, 토크가 일정 값에 도달하는 시간은 약 10분 정도로 혼화속도에 관계없이 거의 같은 값을 보이지만, 이때의 토크값은 오히려 혼화속도가 빠를수록 낮은 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 또 이 때부터 현탁계의 온도도 일정값을 갖는 것을 볼 수 있었는데, 혼화속도가 증가함에 따라 급격하게 온도가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 혼화속도의 증가는 곧, 전단속도의 증가를 의미하며 전단속도의 제곱의 함수로 표현되는 점성 소산에 의해 온도 상승을 초래하게 된다. 이와 같은 온도 상승 효과는 점도의 감소를 유발하여 구동 토크의 감소가 연쇄적으로 일어나는 것으로 판단된다.

Figure 4(b)에는 혼화온도의 효과를 조사하기 위해 혼화온도를 40~80 °C의 범위에서 변화시키면서 나타난 혼화거동을 도시하였다. 혼화온도가 증가할수록 현탁계의 온도는 혼화온도에 거의 비례적으로 증가하는 것을 볼 수 있는 바, 가능한 혼화온도를 낮게 유지하여 가공하여야 하는 충분한 이유가 이 결과로부터 얻을 수 있었다.

Figure 4(c)에는 Exact 5361/Dechlorane 현탁계를 대상으로 충전제의 충전 부피분율에 따른 토크 변화와 온도 변화를 각

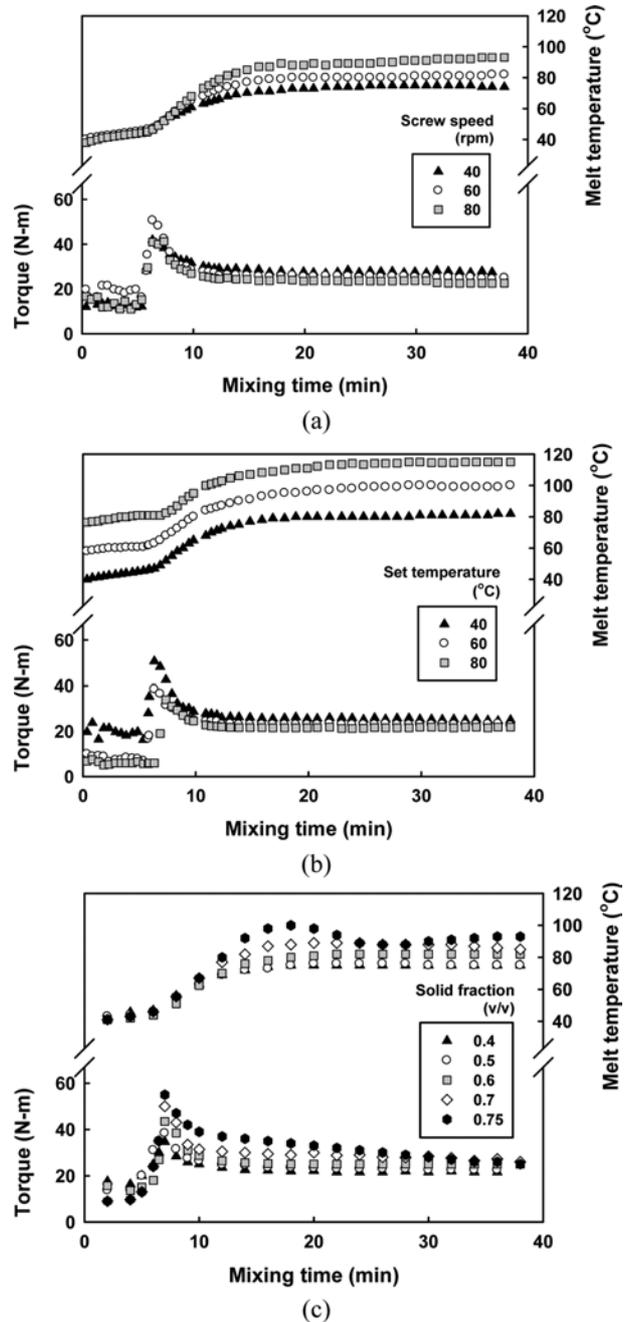


Figure 4. Mixing behavior of Exact 5361/Dechlorane suspensions with various conditions: (a) screw speed effect; (b) set temperature effect; (c) solid fraction effect.

각 도시하였는데, 피크의 토크 값과 플레이트를 이루는 일정 토크 값, 현탁계의 온도 모두 충전 함량에 거의 비례적으로 증가하는 경향을 볼 수 있었다. 그러나 충전율이 70 v% 이상이 되면 충전제를 충전한 후 상당한 시간이 경과한 후에도 토크가 지속적으로 감소하며, 현탁계의 온도도 오버슈트를 보인 다음 감소하였다가 다시 약간 증가하는 경향이 관찰되었

는데, 이는 혼화 과정 중에서도 입자의 이동이 일어나 벽면 미끌어짐과 같은 현상이 나타났기 때문이라 사료되었다.^{19,20} 벽면 미끌어짐 현상은 전단속도보다는 전단응력의 지배를 받는데 충전율이 상당히 높은 경우는 부가된 응력에 대해 여분의 결합제가 벽면에서 층을 형성하여 미끌어짐으로써 실제보다 높은 겉보기 전단속도를 보인다. 뒤에 기술한 유변물성 부분에서와 같이 고체 충전율이 최대 충전율에 가까운 65 v%

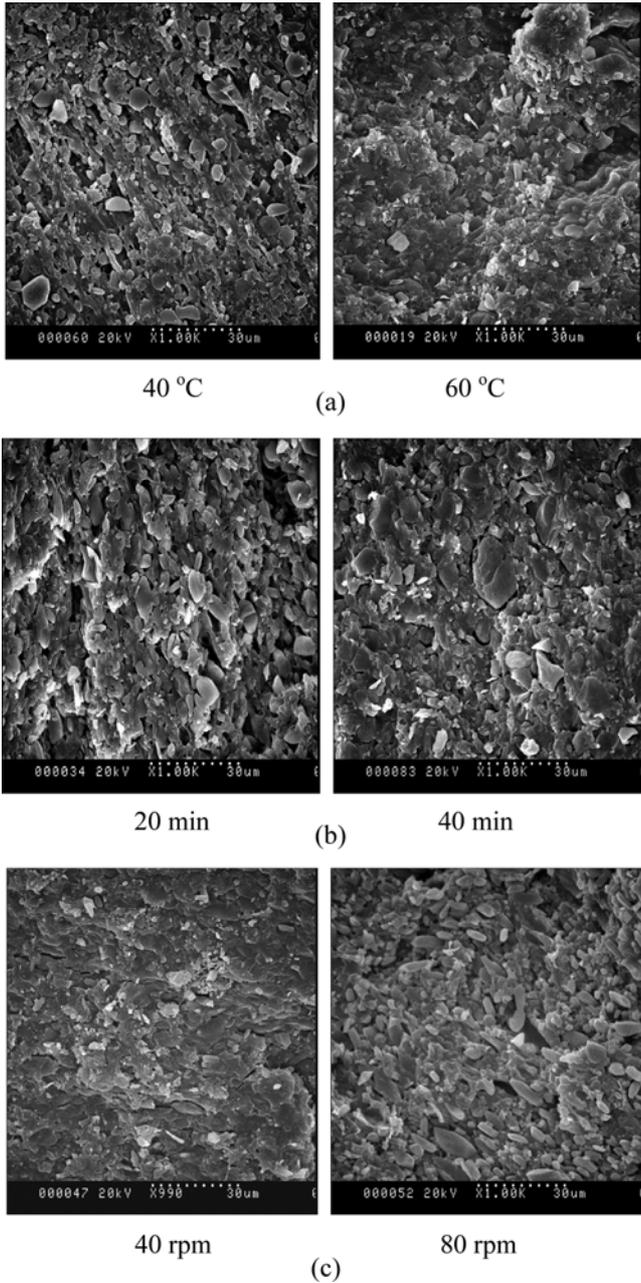


Figure 5. SEM micrographs of Exact 5361/Dechlorane with various conditions: (a) set temperature effect; (b) mixing time effect; (c) screw speed effect.

이상이 되는 경우 저충전 현탁계와는 상이한 유변학적 거동을 보이는 바 충전율 70 v%의 현탁계를 혼련할 때는 흐름에 따라 입자들이 재배치되고 벽면 미끌어짐이 발생하는 안정화 과정이 진행됨에 따라 토크의 지속적인 감소를 보이게 된 것이라고 판단되었다. 그리고 안정화가 완료되기 전 과정에서는 점성소산열에 추가하여 고충전에 따른 입자간의 마찰열 또한 발생하여 온도 증가에 기여한 것이라고 사료되었다.

Figure 5에 Exact 5361/Dechlorane 현탁계의 혼화 조건에 따른 혼화도의 변화를 가시적으로 관찰하기 위하여 각 혼화 조건에서 채취한 시료의 SEM 이미지를 수록하였는데, 충전제 입자들은 고분자 매트릭스에 잘 분산되어 있으며 혼화 조건의 변화에 따른 분산도 또는 혼화도의 변화는 크지 않은 것으로 보인다.

Exact/Dechlorane 현탁계의 유변물성. Figure 6에는 모세관 레오미터를 사용하여 60과 80 °C의 온도조건에서 측정된 Exact 5361 고분자 수지와 Exact 5361/Dechlorane(40/60) 현탁계의 겉보기점도를 도시하여 비교하였는데, 모세관 레오미터를 사용할 경우 평판-평판 레오미터에서는 측정이 불가능한 높은 전단속도에서 Exact 5361/Dechlorane(40/60) 현탁계의 점도를 측정할 수 있었으며, 현탁계의 점도는 전단속도가 증가함에 따라 점도가 감소하는 전단박화 현상을 보였는데 순수 결합제와 비슷한 거동을 보였다.

Figure 7(a)에는 평판-평판 레오미터를 사용하여 180 °C에서 측정된 Exact 5361/Dechlorane 현탁계의 점도를 전단속도에 따라 도시하였다. 충전 부피분율이 60 v%일 때는 원심력에 의해 시편이 평판-평판으로부터 심하게 이탈하는 현상을 보였으며 더 낮은 충전 부피분율의 현탁계보다 점도가 더 떨어지는 현상을 보였다. 또 전단점도를 전단응력에 따라 도시한 Figure 7(b)를 살펴보면 Exact 5361/Dechlorane 현탁계는 40 v%의 낮은 충전 부피분율에서도 항복응력이 존재함을

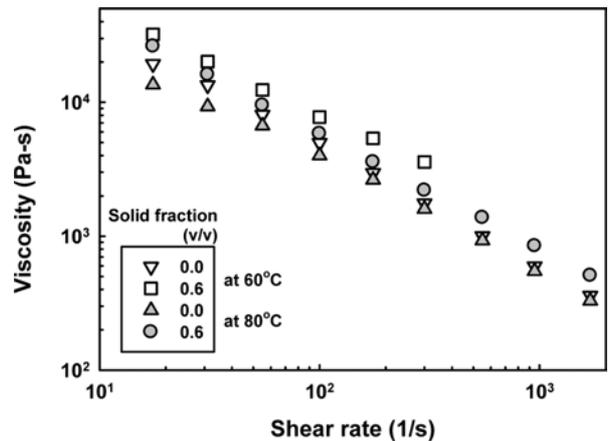


Figure 6. Apparent shear viscosity vs. apparent shear rate for neat Exact 5361 and Exact 5361/Dechlorane (40/60) suspensions at different temperatures.

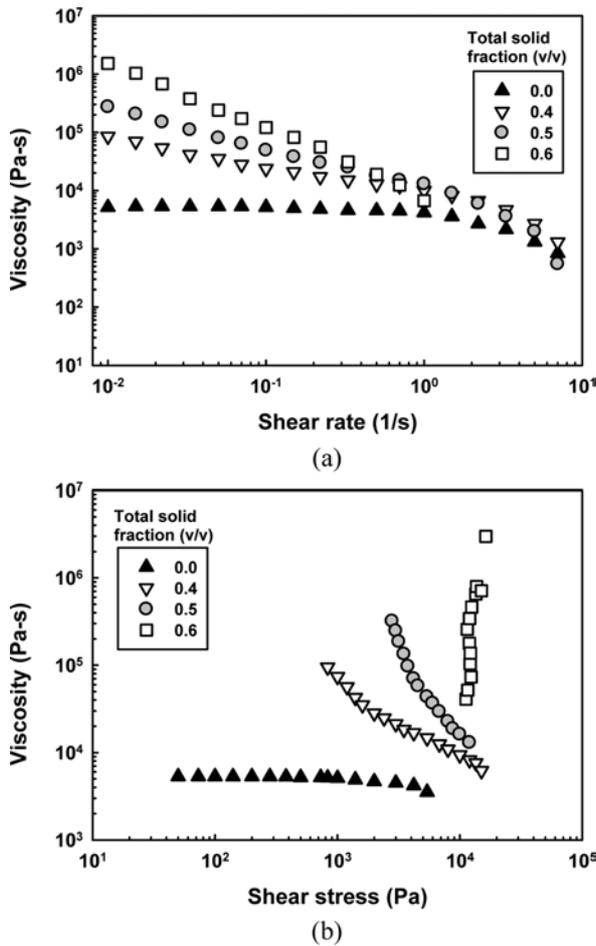


Figure 7. Shear viscosity vs. shear stress of Exact 5361/Dechlorane suspensions at 180 °C: (a) constant shear mode; (b) constant shear stress mode.

볼 수 있었으며 부가되는 전단응력 10^4 Pa이 되면 전단점도가 급격히 감소하는 흐름 불안정성 현상이 나타남을 볼 수 있었다. 60 v% 이상이 충전된 경우에는 평판-평판 레오미터를 사용하여서는 유변 물성을 측정할 수 없음을 알 수 있었는데, 이는 고충전 현탁계에 대한 모세관 흐름에서의 흐름 불안정성에 대한 Yaras의²¹ 결과와 부합하였다.

Figure 8에는 평판-평판 레오미터를 사용하여 0.01 s^{-1} 의 전단속도에서 측정된 Exact 5361/Dechlorane 현탁계의 상대점도를 충전 부피분율에 따라 도시하여 비교하였다. Exact 5361/Dechlorane 현탁계의 유변물성은 저온에서는 점도가 매우 높을 뿐만 아니라 탄성 또한 상당하여 평판-평판 레오미터로는 측정이 매우 어렵기 때문에, 측정온도를 Exact 5361 plastomer가 완전히 녹아 유동성이 매우 좋은 $180 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 설정하였다. 이는 Exact plastomer의 용융점도의 측정온도($190 \text{ }^\circ\text{C}$)와 시편의 열화 온도를 고려하여 정한 것이다. 상대점도는 Lee 등이¹⁸ HTPB/ CaCO_3 와 HTPB/sugar의 bimodal 현탁계에 대해 측정

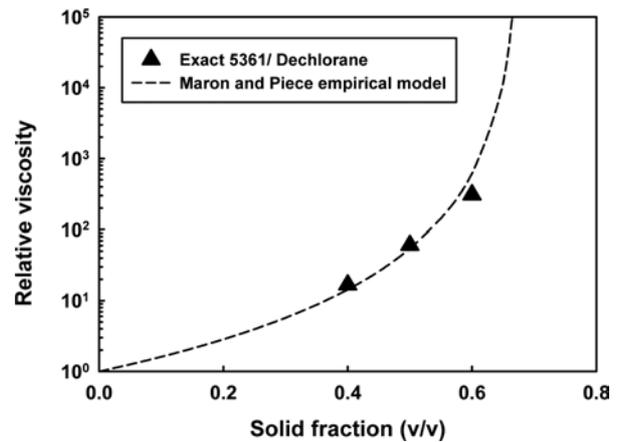


Figure 8. Relative viscosity vs. solid volume fraction for Exact 5361/Dechlorane suspensions at 0.01 1/s and $180 \text{ }^\circ\text{C}$.

한 상대점도 들에 비해 약간 높게 나왔는데 이는 높은 점도의 Exact 5361 매트릭스 내의 Dechlorane 입자들이 HTPB 현탁계의 입자들보다 좀 더 응집이 되어 있기 때문인 것으로 생각된다. 혼합실험에서 고체 충전율을 75 v%까지 높일 수 있었으나, 65 v% 이상 충전된 시편에 대해서는 $180 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 측정 온도에서 조차 여전히 점도 측정의 어려움이 있어서 데이터를 얻지 못하였다. 상대점도의 경향은 입자간 상호작용이 없는 입자들이 뉴턴 유체 내에 고르게 분산된 농축 현탁계의 상대점도를 충전부피분율의 함수로 묘사한 Maron과 Pierce의 경험식과²² 잘 일치하였다.

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_0} = \left[1 - \frac{\phi}{\phi_m} \right]^{-2}$$

여기에서, η 는 점도, η_0 는 순수 결합체의 점도, η_r 는 상대점도, ϕ 는 충전 부피분율, ϕ_m 는 최대충전 부피분율을 나타낸다.

결론

Exact 5361/Dechlorane 및 Exact 5371/Dechlorane 고농축 현탁계를 대상으로 각각의 유변물성을 조사하였다. 순수 Exact 5361과 Exact 5371 둘 다 뚜렷한 전단박화 현상을 보였다. 회분식 혼련기를 사용한 현탁계의 혼합거동을 살펴본 바 Exact 5361은 Exact 5371에 비해 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 낮은 온도에서도 혼련이 가능하였다. 내부 온도 상승을 조사하기 위해 냉각장치를 끄고 혼합실험을 하였는데, 낮은 혼합온도 설정에도 불구하고 점성 소산열에 의해 지속적인 내부온도 상승으로 인해 RDX/poly(BAMO-AMMO)의 가공 온도 상한선인 약 $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 에 거의 도달하였으므로 냉각장치가 필수적인 것으로 판단되었다. Exact 5361/Dechlorane 현탁계의 경우 충전 분율이 70 v% 이상이 되면 충전 후 상당한 시간이 경과한 후에도 토크가 지속적으로 감소하였는데 이는 혼합 과정 중에서도 입자의 이

동이 일어나 벽면 미끌어짐과 같은 현상이 나타났기 때문이라 사료되었다. SEM 관찰 결과 충전제 입자들은 고분자 매트릭스에 잘 분산되어 있으며 혼화 조건의 변화에 따른 분산도 또는 혼화도의 변화는 크지 않은 것으로 보였다. Exact 5361/Dechlorane 현탁계의 경우 60 v% 이상 충전 시 흐름 불안정성을 보였으며 낮은 전단속도인 평판-평판 레오미터로는 유변물성을 측정할 수 없었으나 높은 전단속도의 모세관 레오미터에서는 전단박화로 인해 가능하였다. 충전분율에 따른 상대점도는 Maron과 Pierce의 경험식을 따랐다.

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

참 고 문 헌

1. F. M. Gallant, H. A. Bruck, S. E. Prickett, and M. Cesarec, *Compos. Part A - Appl. S.*, **37**, 957 (2006).
2. R. Kavetsky, D. Anand, J. Goldwasser, H. Bruck, R. M. Doherty, and R. W. Armstrong, *Int. J. Energ. Mater. Chem. Prop.*, **6**, 39 (2007).
3. T. Villmow, P. Potschke, S. Pegel, L. Haussler, and B. Kretzschmar, *Polymer*, **49**, 3500 (2008).
4. T. Villmow, B. Kretzschmar, and P. Potschke, *Compos. Sci. Tech.*, **70**, 2045 (2010).
5. P. Peltola, E. Valipakka, J. vuorinen, S. Syrjaia, and K. Hanhl, *Polym. Eng. Sci.*, **46**, 995 (2006).
6. A. Becuwe and A. Delclos, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, **18**, 1 (1993).
7. R. Reed, Jr. and V. L. Brady, U.S. Patent 5,756,006 (1998).
8. S. Ozkan, H. Gevgilili, D. M. Kalyon, J. Kowalczyk, and M. Mezger, *J. Energ. Mater.*, **25**, 173 (2007).
9. D. M. Kalyon, P. Yaras, B. Aral, and U. Yilmazer, *J. Rheol.*, **37**, 35 (1993).
10. M. R. Baer and W. M. Trott, "Theoretical and experimental mesoscale studies of impact loaded granular explosive and simulant materials", *12th International Detonation Symposium*, August 11-16th, 2002.
11. S. G. Grantham, C. R. Siviour, W. G. Proud, and J. E. Field, *Meas. Sci. Technol.*, **15**, 1867 (2004).
12. J. C. F. Millett and N. K. Bourne, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **37**, 2613 (2004).
13. Ö. Ü. Çolak, *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, **28**, 55 (2004).
14. S. A. Sheffield, R. L. Gustavsen, and R. R. Alcon, *AIP Conference Proceedings*, **429**, A.P.S. Amherst, MA (U.S.), 27 Jul - 1 Aug, 1997.
15. J. Corky, W. Riedel, W. S. Hiermaier, P. Weidemaier, and K. Thoma, *Shock Compression of Condensed Matter*, CP620 (2001).
16. K. J. Patenaude, MS Thesis, University of Massachusetts Lowell, 2001.
17. F. M. Gallant, PhD Thesis, University of Maryland, College Park, 2003.
18. S. Lee, I.-K. Hong, J. W. Lee, and W. B. Jeong, *Polymer(Korea)*, **38**, in press (2014).
19. A. Yoshimura and R. K. Prud'homme, *J. Rheol.*, **32**, 53 (1988).
20. U. Yilmazer and D. M. Kalyon, *J. Rheol.*, **33**, 1197 (1989).
21. P. Yaras, D. M. Kalyon, and U. Yilmazer, *Rheol. Acta*, **33**, 59 (1994).
22. S. H. Maron and P. E. Pierce, *J. Colloid Sci.*, **11**, 80 (1956).