

조성 조건에 따른 ER유체의 침전특성

이호근, 최승복, 서문석*, 신민재*
 인하대학교 기계공학과, *국방과학연구소

Sedimentation Characteristics of ER Fluids

H. G. Lee, S. B. Choi, M. S. Suh* and M. J. Shin*

Department of Polymer Science and Engineering, Inha University, Inchon, 402-751, Korea

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

1. 서 론

ER 유체는 부하되는 전기장의 강도에 따라 그 역학적 특성이 변하는 유체를 총칭하는 것으로, 일반적으로 비전도성 유체 속에 약한 전도성 입자들을 분산시킨 콜로이드 용액이다. 1949년 Winslow가 부하되는 전기장에 의해 실리카를 입자로 한 유체의 점성이 변하는 것을 처음으로 발표하였으며, 이 후 Winslow 유체라고도 불리운다. ER 유체의 두드러진 장점은 매우 빠른 응답속도와 폭 넓고 연속적인 힘을 발생시킬 수 있는 점이다. 또한 전기장만을 유체에 부하하기 때문에 응용장치 설계의 단순화를 가져올 수 있으며, 상변화에 요구되는 전기장은 높지만 전류는 매우 낮아 소비전력이 적게되는 장점을 갖고 있다. 이러한 특징으로 인해 ER 유체를 이용한 많은 응용장치가 연구되고 있으나, 개발 초기에는 정확한 ER 효과 메카니즘 현상의 이해 부족으로 인하여 많은 성과를 얻지 못하였다. 그러나 1980년대 들어 이에 대한 심도 있는 연구 결과와 전기공학, 전자공학 그리고 제어 기술의 발달과 더불어 고전압의 전기장을 발생시킬 수 있는 장치와 소재들이 개발됨에 따라, ER 유체를 이용한 응용장치에 대한 연구가 중흥기를 맞고 있다. 특히 자동차 관련 장치인 댐퍼와 엔진마운트 등 제어가 가능한 가변댐퍼 및 지능 구조물에 대한 응용 연구가 활발히 진행되고 있으며, 스퀴즈 필름 댐퍼, 클러치 및 브레이크 시스템 등, 다양한 산업분야에서 활발한 투자와 연구가 국내외적으로 진행되고 있다.¹⁾⁴⁾ 이러한 여러 방면의 응용장치의 제어기 설계에 필요한 가장 중요한 것이 빙햄 특성식이라 불리는 ER 유체의 성능 결과이다. 이들 ER 유체의 성능에 영향을 미칠 수 있는 여러 요인들로는 응용장치의 작동모드, 침전, 마모 및 내구성 등을 들 수 있다.⁵⁾

이들 ER 유체의 성능에 영향을 미치는 요인들 중에서 침전은 전도성 입자가 비전도성 용매에 분산되어 있는 ER 유체의 특성상 발생할 수 밖에 없으며, 이러한 침전으로 인하여 부분적으로 ER 유체의 입자 중량비가 달라지며 균일하지 않은 부분이 발생한다. 이러한 부분은 ER 유체의 성능에 영향을 주며, 입자가 전극 주위에 지나치게 많이 모이게 되면, 절연파괴의 원인이 될 수도 있다. 또한 응용장치의 성능에도 지대한 영향을 미칠 것으로 판단되기에, 침전률을 정량적으로 측정하여 ER 유체의 조성조건이 침전률에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

2. ER 댐퍼의 댐핑력 변화

본 연구에서 ER 유체를 적용한 가변 ER 댐퍼를 이용 전기장에 대한 댐핑력 실험을 실시했다.⁴⁾ 가변 ER 댐퍼는 전기장 무부하시에는 유체점성으로 인한 댐핑력만을 발생시키게 되나, 전기장 부하시에는 유체점성으로 인한 댐핑력에, ER 유체의 항복응력으로 인한 댐핑력이 더해지므로 더 큰 댐핑력을 발생시키게 된다. Fig. 1은 전기장을 부하하며 가변 ER 댐퍼의 댐핑력 변화를 측정된 결과이다. Fig. 1(a)에 도시한 초기 댐핑력과 6시간 침전후의 댐핑력을 비교해 보면, 초기엔 전기장이 0, 1, 2, 3kV/mm로 증가하며, 댐핑력의 크기도 200N, 250N, 570N 그리고 770N으로 증가하고 있다. 그러나, 6시간이 경과한 후의 결과를 살펴보면, 0, 1 그리고 2kV/mm의 경우 254N, 280N과 562N으로 전기장 무부하시 댐핑력이 약간 증가한 것을 제외하고는 초기 결과와 큰 차이가 없으나, 3kV/mm의 경우에는 962N으로 크게 증가하고 있다. 이는 ER 유체가 균일하지 못하고 입자와 오일이 일부 분리되어, 입자 중량비가 다소 높은 부분이 전극을 통과하며 높은 ER 효과를 발생시켜 큰 댐핑력이 나타난 것이다. 이후 댐핑

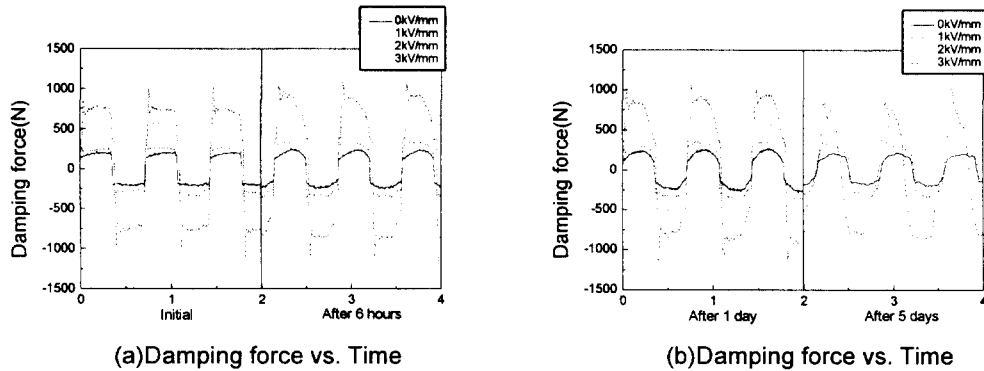


Fig.1 Damping characteristics of ISS50 for sedimentation time variation

력이 600N 이하로 다소 감소하는 것은, ER 유체가 균일하지 못해 관성력이 큰 부분이 존재하기 때문으로 생각된다. 이러한 경향은 1 일 침전 후의 실험 결과인 Fig. 1(b)에서도 관찰되고 있으며, 6 시간과 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나, 5일간 침전 시킨 Fig. 1(b)의 결과는 다소 다른 경향이다. 그래프가 많이 찌그러져 댐핑력 곡선이 수직으로 올라가지 못하고 있다. 또한 3kV/mm 부하시의 댐핑력도 864N 에서 751N 으로 떨어지며, 앞선 다른 결과에 비해 오히려 감소하고 있다.

3. ER 유체의 침전특성

앞선 실험 결과로부터 ER 유체의 침전특성이 ER 유체를 적용한 응용장치의 성능에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있으며, ER 유체의 침전에 영향을 미치는 여러 인자에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 ER 유체의 종류, 입자 중량비, 오일의 점도 및 첨가제 등 ER 유체의 조성 조건에 따른 침전 특성을 정량적으로 살피고자 한다. 이를 위해 Fig. 2 에 나타난 바와 같이 메스실린더를 사용하여 ER 유체의 시간에 대한 침전률을 정량적으로 측정하여, ER 유체 조성에 필요한 참고자료로 제공하고자 한다.

3-1 입자의 중량비에 따른 침전특성

ISS 계 ER 유체를 이용하여 입자 중량비를 40wt%, 50wt% 그리고 60wt%로 변화시켜 침전 특성 실험을 수행했다. 입자 중량비를 60wt%로 조성한 ISS60 ER 유체의 실험결과를 Fig. 3에 사진과 함께 도시했다. 유체 주입 후 20 분이 경과한 지점에서 0.975의 침전률을 보인 ER 유체가 이 값을 계속 유지하다 6 일이 경과한 후 0.95의 침전률을 보였다. 이후 10 일이 지나자 0.925의 침전률을 나타내고 있다. ISS50 ER 유체는 실험시작 10 분만에 0.95 까지 침전한 ER 유체가 20 분 경과 후엔 0.9, 그리고 1 시간 경과 후엔 0.8의 침전률을 나타냈다. 이후 3

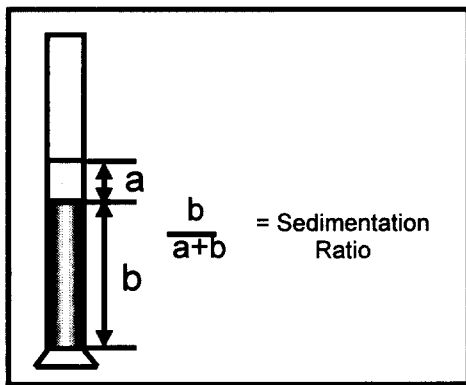


Fig. 2 Sedimentation ratio Measurement

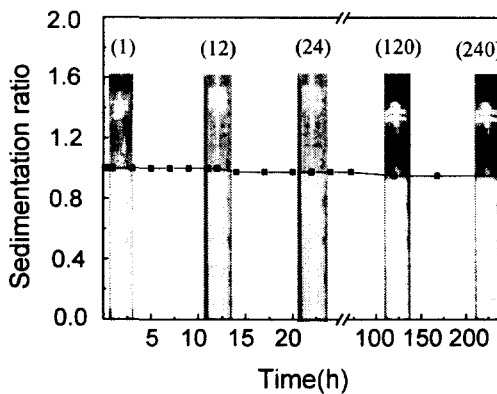


Fig. 3 Sedimentation ratio of ISS60

시간 만에 0.75의 침전률에 도달했으며, 이후 10일간 침전률의 변화가 없었다. Fig. 4에 나타난 결과 중에서 입자 중량비가 40wt%인 ISS40 ER 유체의 결과를 살펴보면, 유체 주입 후 10분만에 0.95까지 진행된 침전률이 30분 후엔 0.85, 50분 후엔 0.75로 떨어지며, 급속한 진행률을 보였다. 이후 5시간만에 0.65에 도달한 침전은 하루가 경과할 때까지 큰 변화가 없었으나, 3일이 경과한 후 측정된 결과를 보면 0.625까지 진행되었다.

본 실험을 통해 입자 중량비가 적을수록 침전이 급속히 발생하며, 침전률도 매우 큰 것을 알 수 있다. 입자 중량비 50wt%인 ISS50 ER 유체를 기준으로 입자 중량비 40wt%의 ISS40 ER 유체는 50% 큰 침전률을 기록했으며, ISS60 ER 유체는 약 30% 정도의 침전률을 나타냈다. 따라서, 입자 중량비가 높을수록 침전은 천천히 적게 발생한다는 것이 본 실험을 통해 확인됐으며, 그 감소율은 지수적으로 증가하는 것으로 판단된다.

3-2 오일의 점도에 따른 침전특성

용매의 점도를 30cs와 50cs로 높인 ISS50 ER 유체와 ISS50 ER 유체를 조성하여, 침전률을 측정된 결과를 Fig. 5에 나타냈다. ISS50 ER 유체의 결과를 살펴보면, 20분 후에 0.975까지 침전된 후 3시간만에 0.925까지 진행됐다. 7시간 경과 후엔 0.85의 침전률을 나타냈으며, 9시간만에 0.775까지 침전된 상태가 이후 계속 유지됨을 볼 수 있다. 이는 ISS50 ER 유체 침전률의 90%에 해당하는 값이다. 또한 ISS50 ER 유체는 침전률이 정상 상태인 0.75에 도달하는데 3시간 정도 소요되었는데, ISS50 ER 유체는 9시간이 필요한 것으로 나타났다. 따라서 오일의 점도가 높아질수록 침전이 서서히 발생하고, 적게 발생하는 것으로 판단된다. 오일의 점도가 50cs로 증가한 ISS50 ER 유체의 결과를 살펴보면, 1시간이 경과한 후에도 침전률은 0.9625이고, 5시간 경과 후엔 0.9로 앞선 ISS50 및 ISS50 ER 유체에 비해 서서히 침전되는 것을 알 수 있다. 이후 7시간 만에 0.85, 9시간에 0.825를 나타냈으며, 12시간 후엔 0.8로 정상상태에 도달하여, 이후 동일한 값을 보이고 있다. 정상상태에 도달한 시간은 ISS50 ER 유체의 3시간, ISS50 ER 유체의 9시간에 비해 12시간으로 가장 느린 침전을 보인다는 것이 확인되었다. 또한 정상상태에 도달한 침전률도 0.8로 앞선 두 ER 유체에 비해 상당히 향상되었음을 알 수 있다.

본 실험을 통해 오일의 점도가 높아 질수록 침전은 서서히 발생하며, 그 발생률도 작은 것을 알 수 있다. 따라서, 응용장치에 적용이 가능한 범위 내에서는 ER 유체를 조성하기 위한 오일의 점도를 높이는 것이 침전을 줄이는 방법임을 알 수 있다.

3-3 첨가제의 중량비에 따른 침전특성

ER 유체 성능향상 및 침전특성의 개선을 위해 베이킹 파우더를 첨가제로 사용한 ISS50 5A, ISS50 10A 및 ISS50 15A의 3가지 ER 유체를 조성하여 첨가제의 중량비에 따른 침전특성 실험을 수행했다. Fig. 6에서 첨가제를 중량비 5wt%로 하여 조성한 ISS50 5A ER 유체의 결과를 살펴보면, 실험 시작 후 60분까지는 ISS50 ER 유체에 비해 침전이 덜 발생한 것으로 나타났다. 180분 이후 0.75의 침전률이 일정한 값을 유지하는 것을 알 수 있다. 첨가제를 10wt%로 증가시킨 ISS50 10A ER 유체의 결과를 살펴보면, 오히려 침전이 60분만에 0.725에 도달한 후 일정한 값이 오래 유지되는 것으로 관찰되었다. 그러나, 이 값이 실험 시작 후 3일 만에 다시 0.6875로 바뀌었으며, 6일 이후엔 0.675로 더욱 낮아졌다. 따라서 침전 발생

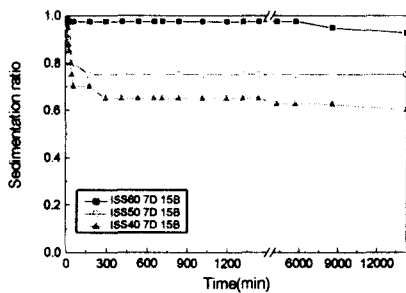


Fig. 4 Different particle concentration

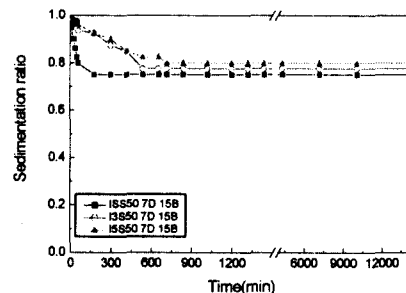


Fig. 5 Different base oil viscosity

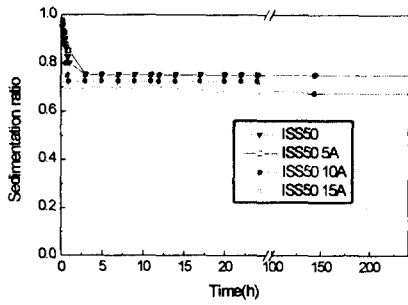


Fig. 6 Different additives concentration

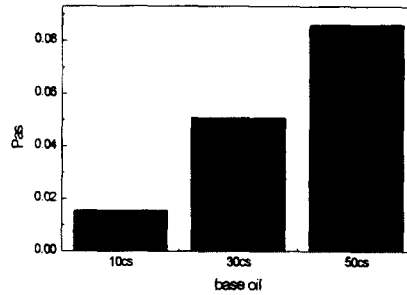


Fig. 7 Comparison of viscosity with different base oils

으로 인해 응용장치에 영향을 미칠 수 있는 가장 좋지 않은 모든 특성을 보인다고 할 수 있다. 첨가제의 중량비를 15wt%로 증가시킨 ISS50 15A ER 유체는 앞선 결과와 마찬가지로 침전이 초반에 매우 급속히 발생하여 50 분만에 0.7 까지 떨어졌으며, 이 후 지속적인 침전이 진행되어 0.65로 매우 침전이 크게 발생한 것을 알 수 있다.

이들 세가지 ER 유체와 ISS50 ER 유체의 시간에 따른 침전을 변화를 비교해 보면, 베이킹 파우더를 첨가제로 사용할 경우 침전 속도 및 침전률에 좋지 않은 영향을 미친다는 것이 본 실험을 통해 확인되었다. Fig. 7 은 각종 ER 유체의 침전특성에 영향을 미치는 여러 인자 중에서 사용된 용매의 점도를 측정하여 비교한 것이다. 이 결과를 Fig.5 에 나타낸 결과와 함께 비교하면, 초반 침전발생 기울기는 오일의 점도가 낮을수록 급하게 진행되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문은 요즘 많은 응용장치의 연구가 진행 중인 ER 유체에 대해 침전특성을 실험적으로 고찰한 것이다. ER 유체는 약한 전도성 입자가 비전도성 용매에 분산되어 있는 특성상 침전이 발생할 수 밖에 없으며, 이로 인하여 여러 응용장치에 적용 시 입자 중량비가 부분적으로 달라지며, 이러한 부분은 응용장치의 성능에 영향을 미칠 뿐 아니라, 절연파괴의 원인이 되기도 한다. 따라서 본 논문에서는 ER 유체를 적용한 가변 댐퍼의 성능에 침전현상이 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였으며, 나아가 입자 중량비, 오일의 종류와 점도 및 첨가제 등 ER 유체의 조성 조건에 따른 침전특성을 정량적으로 살펴보고자 실험을 실시했다.

입자 중량비에 대한 영향을 살펴보면, 입자 중량비가 높을수록 침전이 적게 발생하며, 그 감소율은 지수함수적인 것으로 보인다. 이는 입자 중량비가 높을수록 상변화가 어렵고 전체적으로 균일한 분포를 보일 확률이 높기 때문으로 생각된다. 전기장 무부하시 ER 유체의 점도가 응용장치의 성능구현에 문제가 안된다면, 가능한 입자 중량비를 높여 ER 유체를 조성하는 것이 유리한 것으로 판단된다. 사용된 오일의 점도에 관한 영향은, 용매의 점도가 높을수록 침전이 느리게 발생하며 또한 적게 발생한다는 것을 알 수 있다. 이는 점도가 높을수록 오일의 밀도가 증가하기 때문에 입자와의 밀도차가 줄어든 것이 원인이다. 실제 오일의 밀도를 살펴보면, 10cs 인 실리콘오일은 0.95 이고 30cs 는 0.96 그리고 50cs 의 경우는 0.97 로 나타났다. 또한 오일의 점도가 낮아 밀도가 적을 경우 동일한 중량에 대해 오일의 부피가 보다 크기 때문에, 입자와의 부피비가 보다 적은 것이 침전발생이 크게 일어나는 원인으로 작용한다. 따라서 입자 중량비와 마찬가지로 오일의 점도는 보다 높은 것이 침전특성에 유리한 것으로 판단된다. 첨가제에 대한 영향을 살펴보면, 베이킹 파우더를 사용한 경우 침전에 오히려 좋지 않은 영향을 미친 것으로 보여, 새로운 첨가제를 사용한 추가 연구가 필요한 것으로 생각된다.

향후 ER 유체의 침전특성에 영향을 미치는 여러 인자 중에서 ER 유체의 온도에 따른 영향을 실험적으로 고찰하고, 본 실험에서 얻은 결론을 바탕으로 침전특성이 ER 가변 댐퍼에 미치는 영향에 대해 보다 심도있는 연구를 진행할 계획이다.

참고 문헌

1. A. R. Johnson, W. A. Bullough, R. Firoozian, A. Hosseini-Sianaki, J. Makin and S. Xiao, 1991, "Testing

- on a High Speed Electro-Rheological Clutch”, *Proc. Of the Int. Conf on ER-fluids*, pp. 424~441.
2. S. H. Choi, Y. T. Choi, S. B. Choi and C. C. Cheong, “Performance Analysis of an Engine Mount Featuring ER Fluids and Piezoactuators”, *Int. J. Mod. Phys. B*, Vol. 10, No. 23, pp. 3143~3157.
3. J. L. Sproston, A. K. El Washed, E. W. Williams and R. Stanway, 1995, “A Comparison of the Performance of ER Fluids in Squeeze”, *Proc. Of the 5th Int. Conf. on ER-fluids*, pp. 259~269.
4. H. G. Lee, J. S. Lim, S. B. Choi, Y. S. Kang, M. S. Suh and M. J. Shin, “Damping Force Characteristics of ER Dampers with Different Electrode Gap, Length and Material”, *J. Of the KASE*, Vol. 7, No. 2, pp. 352~364.
5. H. G. Lee, S. B. Choi and C. C. Cheong, “Characteristics of ER Fluids with Different Working Modes”, *Proc. Of the KSME 1999 Fall Annual Meeting B*, pp. 688~693.