

ER 유체의 내구성능이 전체차량의 진동제어성능에 미치는 영향

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

Fatigue Test of ER Fluid and Their Influence  
 on Vibration Control of Passenger Vehicle Featuring ER Suspension Unit

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

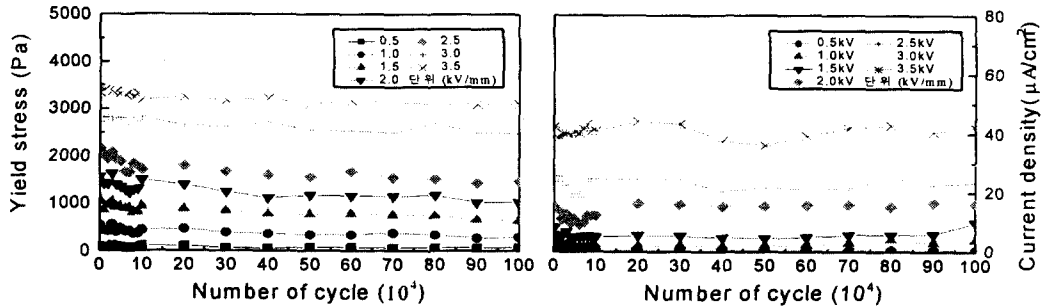
1. 서론

전기유동유체(Electro-rheological fluid)는 외부에서 부하 되는 전기장의 강도에 비례하여 유동특성이 변하는 현탁액을 총칭하는 것으로, 그 반응은 매우 빠르고 또한 가역적으로 발생한다. 이러한 특징으로 인하여 ER 유체를 이용한 다양한 응용장치의 개발에 대한 연구가 지속되고 있다.<sup>(1)-(5)</sup> 응용장치의 제어기 설계에 필요한 가장 기초적인 ER 유체의 성능은 전기장 부하에 대한 항복전단응력의 변화인 Bingham 특성식으로 판단한다. 이러한 ER 유체의 성능에 영향을 주는 여러 요소들로는 응용장치의 작동모드, 마모, 침전 및 내구성 등을 들 수 있다. 작동모드에 관한 영향은 기존의 연구에서 증명된 바와 같이 동일한 작동모드형 전기 점도계를 사용하는 것이 바람직하다.<sup>(6)</sup> 내구성은 마모와 연관된 문제로 ER 유체 조성에 사용된 입자의 크기가 달라지게 되며, 이로 인해 입자간 상호 작용력의 크기에 영향을 주게 된다. 결국 동일한 전기장에 대해 ER 유체의 항복전단응력의 크기가 달라질 수 있는 것이기 때문에, 응용장치 설계에 반드시 고려되어야 할 사항이다.

본 논문에서는 자체 조성한 ER 유체를 이용하여 사용시간에 대한 ER 유체의 내구성능 실험을 실시했다. 이를 기초로 ER 유체가 적용된 가변 댐퍼에서의 성능변화를 컴퓨터 시뮬레이션을 이용 확인했으며, ER 현가장치가 전 차량에 적용된 차량의 진동절연 성능 변화를 고찰하였다.

2. ER 유체의 내구 성능

ER 유체를 응용장치에 적용 시 사용시간이 ER 효과에 미치는 영향을 고려하고자, 양방향 실린더에 의해 구동 되는 유동모드형 점도계를 이용하여 ER 유체의 내구성 실험을 수행했다.<sup>(6)</sup> 실험은 1.4Hz, 625mm 의 변위로 100 만번 가진 했으며, 초기엔 매 1만번 단위로 10 만번까지, 이 후엔 매 10 만번 단위로 전기장을 부하하며 항복 전단응력의 변화와 이때의 전류밀도 변화를 측정했다. 또한 사각파의 전기장에 대한 응답특성을 실시하여, 이에 대한 영향도 고찰하였다. 온도 변화에 의한 영향을 없애고자 냉각장치를 사용하여 실험장치 내부가 25°C 상온을 유지하도록 하였다.



(a) Yield stress variation (b) Current density variation

Fig. 1 Bingham characteristics variation of ISS50 ER fluid.

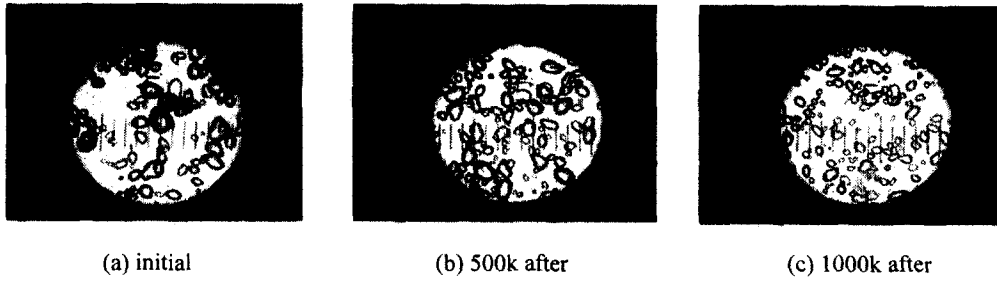


Fig. 2 Microscopic shape of ISS50 ER fluid

Fig. 1 은 사용시간에 따른 항복전단응력의 변화와 전류밀도의 변화를 전기장에 대해 도 시한 것이다. 실험장치의 누유에 의하여 입자중량비가 달라지는 것을 방지하기 위해 매 10 만번 마다, 오일을 보충해 주며 실험을 실시하였다. 사용시간이 증가함에 따라 전류밀도의 크기는 거의 동일한 반면, 항복전단응력의 크기는 아주 조금씩 감소하고 있다. 이는 ER 유체를 사용함에 따라 입자가 분쇄되어 크기가 작아지며, 입자간 결합력의 절대크기가 감소했기 때문이다. 그러나 전체 입자 중량비에는 변화가 없으므로 전류밀도의 크기는 비슷한 경향을 나타내고 있다. 응답특성 결과는 전기장의 세기에 따라 1m 미만의 차이를 보이며, 사용시간이 변화하여도 거의 유사한 6ms 내외의 크기를 보이고 있다.

실험을 마친 후 수거한 ER 유체를 이용, 현미경 촬영을 실시했다. Fig. 2(a)는 ER 유체를 처음 조성 시 입자의 사진으로, 아주 고운 입자에서부터 눈금을 두 칸 이상 차지하는 큰 입자까지 고르게 섞여있다. 이 사진에서 눈금을 30 $\mu$ m 를 나타내므로, 최대입자의 크기는 약 60 $\mu$ m 임을 알 수 있다. 100만번 이후의 사진인 Fig. 2(c)는 가장 큰 입자의 크기가 30 $\mu$ m 미만 인 것을 알 수 있다. 이로부터 앞선 항복전단응력의 결과에서 예측한 원인이 정확한 것으로 판단된다. 그러나, ER 입자의 크기는 응용장치 내 피스톤 헤드와 내부전극사이의 간격보다 작게 분쇄되지는 않을 것으로 보여, 이 정도의 일정한 크기를 계속 유지할 것으로 생각된다. 따라서, 항복전단응력이 지속적으로 감소하지는 않을 것으로 판단된다.

본 실험을 통해 ER 유체의 내구성은 만족 할 만한 것으로 판단되며, 향 후 보다 오랜 시간에 걸친 실험을 수행하여, ER 효과의 감소 및 입자 크기의 변화가 어느 정도까지 지속적 으로 진행되는지 확인할 예정이다.

### 3. 가변형 ER 댐퍼

본 실험에서는 유체작동모드로 유동모드를 갖는 실린더형 ER 댐퍼를 설계, 제작하였다.<sup>5)</sup> 제작된 ER 댐퍼를 이용하여 전기장 증가에 따른 댐핑력 시험을 수행하였으며, 내구성능 변화 에 따른 댐핑력의 변화를 예측하여 ER 유체의 사용시간이 ER 댐퍼의 성능에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

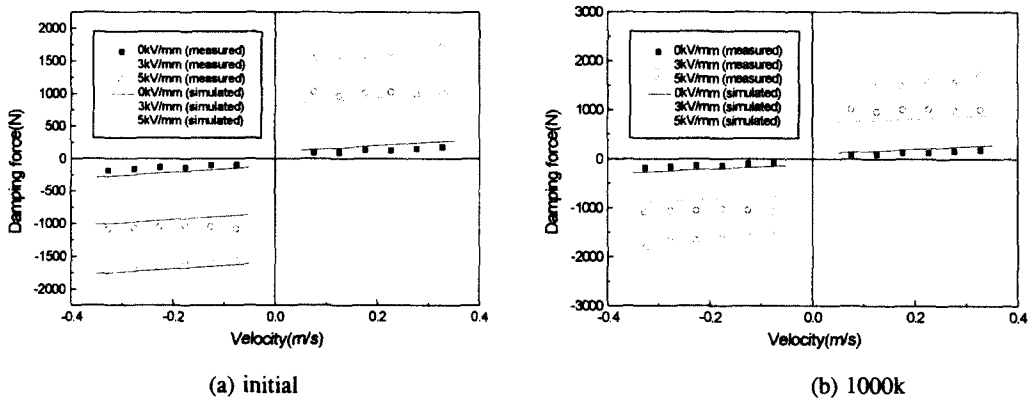


Fig. 3 Damping characteristics of ISS50 ER fluid with different number of cycles

ER 덤퍼의 댐핑력을 피스톤 속도에 따라 나타낸 것이, Fig. 3에 심볼(symbol)로 표시한 것이다. 이때의 댐핑력은 각각의 속도에서의 최대댐핑력으로 구해지며, 피스톤 속도의 변화는 가진진폭을  $\pm 22\text{mm}$  로 고정시키고 가진주파수를 0.4Hz에서 3.0Hz까지 변화시켜 얻었다. 전기장 증가에 따라 ER 덤퍼의 댐핑력이 연속적으로 증가됨을 알 수 있으며, 낮은 피스톤 속도에서 뿐 아니라 높은 피스톤 속도에서도 높은 댐핑력을 발생시킴을 알 수 있다. 이로부터 피스톤 속도에 관계없이 전기장의 변화만으로도 넓은 제어영역을 가짐을 알 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 예측되는 댐핑력의 결과를 Fig. 3에 직선으로 함께 나타냈다. 유동모드형 전기점도계에서 구한 항복전단응력 식은 Table 1에 나타낸 바와 같이 사용시간이 경과하며, 비례상수  $\alpha$ 과 지수값이 다소 달라지고 있다.  $\alpha$ 값은 점차 감소하고 있으며,  $\beta$ 값은 조금씩 증가하고 있다. 따라서 사용시간이 경과함에 따라, 낮은 전기장 영역에서는 댐핑력이 초기 값보다 다소 작아지고, 높은 전기장 영역에서는 보다 증가할 것으로 예측된다. Fig. 3(a)에 나타낸 초기 값을 보면, 실험치와 댐핑력의 예측치가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나, Fig. 3(b)에 나타낸, 100만번 사용후의 예상되는 댐핑력을 살펴보면, 3kV/mm 부하시엔 초기 실험치 보다 작은 결과가 나왔으며, 5kV/mm 부하시엔 그 값이 오히려 증가하고 있어, 사용시간이 경과함에 따라 빙행특성 및 이로 인한 댐핑력이 지속적으로 변하는 것을 알 수 있다. 그 원인은 앞선 실험결과에서 지적한 바와 같이 ER 입자가 잘게 부서지는 것이 원인이다. 그러나, 그 변화폭은 Table 1의 변화량을 살펴보면 알 수 있듯이, 그 증가 혹은 감소폭이 점차 줄어들고 있기 때문에, 어느 한도 까지만 이러한 현상이 발생할 것이다. 이러한 차이를 정량적으로 비교하고자 Fig. 4에 초기 댐핑력과 사용시간 경과 후의 댐핑력 예측치의 비율을 막대그래프로 도시했다. 50만번과 100만번 모두 3kV/mm 부하시엔는 초기 댐핑력 보다 작은 0.913과 0.892를 나타내고 있으며, 5kV/mm의 경우엔 1.058과 1.125로 오히려 큰 값을 보이고 있다. 또한 동일한 전기장 부하 시 50만번과 100만번의 결과를 보면 그 사용시간이 오래될수록 그 차이가 보다 큰 것을 알 수 있다.

본 실험을 통해 ER 덤퍼를 적용한 시스템의 진동 제어 시 필요한 요구 댐핑력을 얻기 위해서는 사용시간이 경과할수록 보다 높은 전기장을 부하 해야 할 것이다. 그러나 그 차이는 그리 크지 않은 것으로 판단되며, 내구성능에서 관찰한 바와 같이 어느 한도까지만 차이가 증가할 것으로 보인다.

4. ER 현가장치

본 장에서는 제안된 ER 덤퍼가 전차륜에 부착된 전체차량에 대한 진동절연성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다. 본 현가장치의 제어에는 스카이hook 알고리즘을 사용했다. 차량의 제어성능을 해석하기 위하여 랜덤 가진을 주어 그 특성을 고찰하였다. 성능해석에 사용된 ER 현가장치의 시스템 변수는 실제 소형승용차에 적용되는 값들을 사용하였다. Fig. 5는 랜덤 가진에 따른 결과를 보여주고 있다. Fig. 5(a)(b)는 수직가속도와 피치 각 속도를 나타내며, Fig. 5(c)(d)는 전륜과 타이어 변형을 나타낸다. Fig. 5(e)(f)는 전륜과 후륜의 입력전압을 나타낸 것이다. 제어를 7초까지 수행하였으나, 그 변화가 너무 심해 눈으로 확인 할 수 없어서, 초반 1초까지 결과만을 나타낸 것이다. Fig. 5(e)(f)에 나타낸 입력전압을 보면, 사용시간에 따라 조금씩 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나, 이러한 차이가 제어성능에는 아무런 영향이 없어, ER 유체를 응용장치에 적용 시 문제가 없음을 확인하였다.

Table 1 Bingham characteristics variation of ISS50 ER fluid

	$\alpha$	$\beta$
Initial	590.37	1.39
500k	339.98	1.78
1000k	263.81	1.98

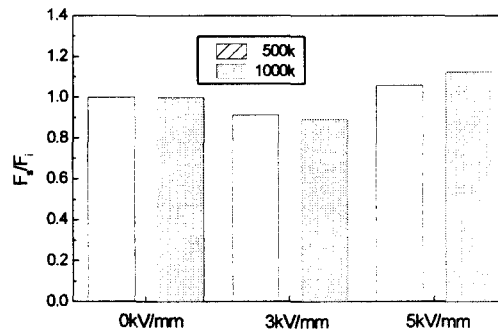


Fig. 4 Damping force ratio

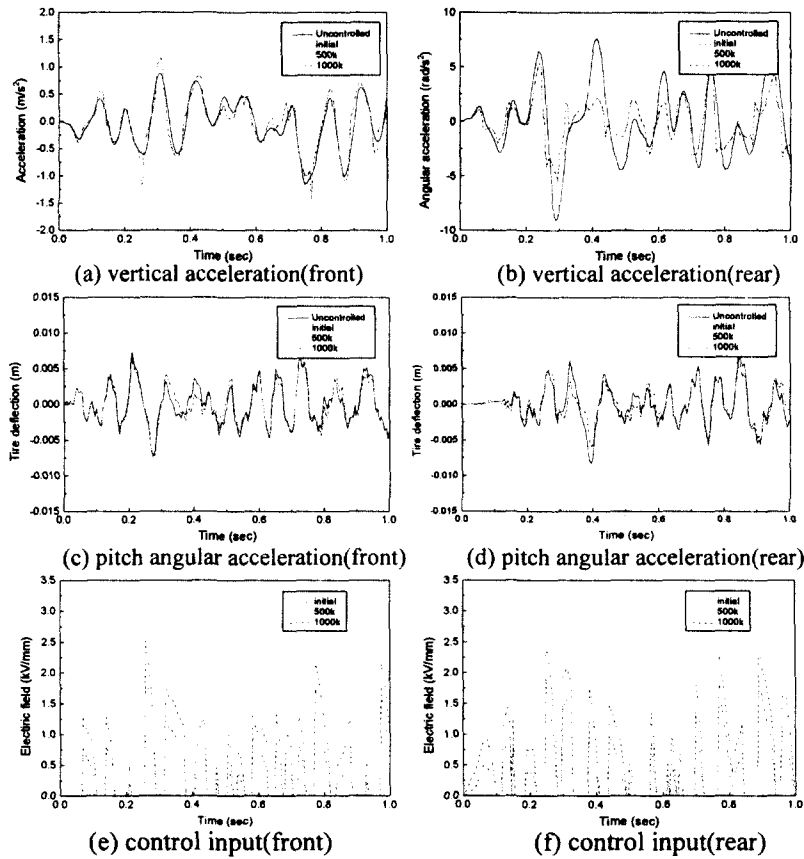


Fig. 5 Random responses of the ER suspension system.

5. 결 론

본 논문에서는 ER 유체의 내구성능이 가변 ER 댐퍼 및 댐퍼를 장착한 승용차량의 성능에 미치는 영향에 대해 연구했다. ER 유체는 사용시간이 경과함에 따라, 조성 시 사용된 입자의 크기가 점차 작아지는 현상이 관찰되었다. 이로 인해 전기장 부하 시 항복전단응력의 크기가 다소 감소했으며, 빙햄 특성식에 변화가 발생했다. 그러나, 전류밀도 및 응답특성에는 거의 변화가 없었다. 빙햄 특성의 변화로 인하여 유동모드형 응용장치인 가변 ER 댐퍼의 성능이 사용시간에 따라 변화되었다. 낮은 전기장 영역에서는 초기보다 낮은 성능을 보이고 있으나, 높은 전기장 영역에서는 오히려 높은 댐핑력을 나타냈다. 그러나, 그 차이는 그리 크지 않았다. 가변 댐퍼를 전차륜에 장착한 승용차량의 외부 가진에 대한 진동절연 성능실험을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 고찰하였다. 제어기로는 일반적으로 널리 사용되는 스카이 훅 제어기를 사용했으며, 랜덤가진에 대한 성능을 살펴보았다. 제어성능은 사용시간과 무관하게 동일한 결과를 보여 ER 유체를 응용장치에 적용시 아무 문제가 없을 것으로 보였다. 그러나, 제어를 위해 필요한 부하 전압이 사용시간 경과에 따라 다소 증가하는 것으로 나타나, 보다 큰 요구 동력을 필요로 하고 있다. 이는 ER 입자가 사용시간에 따라 크기가 작아지기 때문에, 전체 입자 표면적이 증가하는 것이 원인이다. 그러나, ER 입자의 크기는 어느 정도 감소한 후 일정 수준을 유지할 것으로 보여, 내구성능의 변화량도 지속적으로 증가하지는 않을 것이다. 따라서, 제어에 필요한 요구 동력도 어느 한도까지만 증가할 것으로 보여, ER 유체를 적용한 응용장치의 설계 시 제약조건으로 작용하지는 않을 것이다.

향후 ER 유체의 내구성능이 전단모드형 응용장치에 미치는 영향에 대한 실험을 통하여, 본 논문에서 얻은 결론이 일반적인 사실임을 입증할 것이다. 또한 최적제어기를 사용한 승용

차량의 진동절연 성능을 고찰하여, 제어기에 따른 차이를 살펴볼 예정이다.

참고문헌

1. Karnopp D., Corsby M. J. and Harwood R. A., 1974, "Vibration Control Using Semi-Active Force Generator", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 96, No. 2, pp.619-626
2. Petek N. K., 1992, "An Electronically Controlled Shock Absorber as an Application of Electro-rheological Fluid", *SAE Technical Paper Series*, No. 920275
3. Nakano M., 1995, "A Novel Semi-Active Control of Automotive Suspension Using an Electrorheological Shock Absorber", *Proceeding of the 5<sup>th</sup> International Conference on ER Fluid, MR Suspension and Associated Technology, Sheffield, United Kingdom*, pp. 645-653
4. Petek N. K., Romstadt D. J., Lizell M. B. and Weyenberg, 1995, "Demonstration of an Automotive Semi-Active Suspension Using electro-rheological Fluid", *SAE Technical Paper, Series, No.950586*
5. 안창섭, 최영태, 최승복, 1998, "HILS를 통한 ER 현가장치의 성능평가", *대한기계학회논문집(A)*, 제 22 권, 제 11 호, pp. 2061-2071
6. 이호근, 최승복, 정재천, 1999, "작동모드에 따른 ER 유체의 특성 비교", *대한기계학회 추계 학술대회 논문집*, pp. 688-693