

부가유로를 갖는 MR 댐퍼의 퍼지 제어성능 및 승차감 평가

Fuzzy Control Performance and Ride Comfort Evaluation of MR Damper with Additional Flow Path

전 경 호* · 정 유 섭* · 한 영 민** · 오 종 석†

Kyungho Jeon*, Ruseob Juong*, Young-Min Han** and Jong-Seok Oh†

(Received September 15, 2020 ; Revised November 5, 2020 ; Accepted November 24, 2020)

Key Words : MR Damper(MR 댐퍼), Additional Flow Path(부가적인 유로), Skyhook Control(스카이훅 제어), Fuzzy Control(퍼지 제어), Performance Evaluation(승차감 평가), Sensitivity Analysis(민감도 분석)

ABSTRACT

Recently, with the increasing demand to improve the ride comfort of passengers, studies on the Magnetorheological(MR) dampers that improve the ride comfort have been increased significantly. Among these studies, study on the MR damper with additional flow path is being focused due to its good ride comfort and driving performance. However, there are no studies related to sensitivity analysis and fuzzy control. Particularly, to determine the design parameters of passenger vehicle, sensitivity analysis is required. Therefore, in this study, to evaluate the driving performance according to various driving conditions, fuzzy rule and design direction are discussed. After constructing the dynamic control system using MATLAB and Simulink, the effectiveness of the proposed sensitivity analysis and fuzzy control is verified.

1. 서 론

최근 차량 승차감 성능 향상에 대한 요구가 갈수록 증가함에 따라 반능동 MR 댐퍼에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Carlson, J. D. et al.⁽¹⁾은 스카이훅 제어를 구현한 차량용 MR 댐퍼를 제안하여 댐퍼의 우수성을 입증하였다. Spencer, Jr. B. et al.⁽²⁾은 지진에 대한 피해를 방지하기 위해 MR 댐퍼를 제안하였고, 이론적 모델의 타당성을 입증하였다. Wereley, M. N. et al.⁽³⁾은 반능동형 MR 댐퍼를 제안하고 히스테리시스(hysteresis) 감쇠력에 대한 이론적 모델을

제시하였으며 실험결과와 비교 분석하였다. 최근에 Choi, S. B. et al.⁽⁴⁾은 실린더형 MR 댐퍼를 제안하고, quarter car model에 HILS(hardware-in-the-loop simulation) 및 강건제어를 적용해 제안된 댐퍼를 장착한 차량의 승차감 향상을 위한 연구를 진행했다.

기존의 MR 댐퍼의 경우 차체 속도에 따라 감쇠력이 급격하게 작용할 때 자기장이 생성 되면 승차감에 부정적인 영향으로 작용하는 락업(lock-up)현상이 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위해 Fig. 1과 같이 MR 댐퍼에 부가유로를 추가하여 락업 현상을 방지하고 승차감을 향상시키는 MR 댐퍼가 제안되었다. 제안된 MR 댐퍼의 피스톤로드 주변에는 자기장이 통하지 않

† Corresponding Author; Member, Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University
E-mail : jongseok@kongju.ac.kr

* Member, Department of Future Convergence Engineering, Kongju National University

** Member, Ajou Motor College

‡ Recommended by Editor Chan Jung Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

는 부가 유로가 존재하여 피스톤의 상하운동에 따라 MR 유체가 자유롭게 유동할 수 있게 설계되어 있다. 자기장을 인가하지 않았을 때는 간극과 부가 유로 두 곳을 통해 MR 유체의 유동이 가능하고, 자기장을 인가할 때는 부가 유로를 통해서만 MR 유체의 유동이 발생하게 되어 부드러운 감쇠력인가가 가능해졌지만^(5,6) 이러한 부가유로를 갖는 댐퍼를 장착한 차량의 설계를 위한 민감도 분석이나 부가유로의 특징에 기인한 퍼지 제어기가 연구된 바가 없기에 이 연구에서는 민감도 분석 및 퍼지제어성능을 평가하였다. 특히, 퍼지 제어를 통해 승차감을 포함한 각 차량 성능의 변화상에 대해 구체적으로 제시하고 더 나아가 각 성능을 개선시키기 위한 방향성을 제시하려고 한다.

이를 위해 C-class hatchback의 각종 파라미터값을 기준값으로 하여 시뮬레이션 프로그램인 Matlab / simulink를 이용하였다. 승차감 평가는 ISO2631 평가 기준에 근거해 승차감 평가를 수행했으며 제안된 MR 현가장치에 대한 퍼지 제어기의 우수성을 평가하기 위하여, 랜덤로드 환경을 생성해 시뮬레이션을 수행하고자 한다.

2. 평가 방법

이 장에서는 이 연구에서 평가하게 될 차량 성능과 평

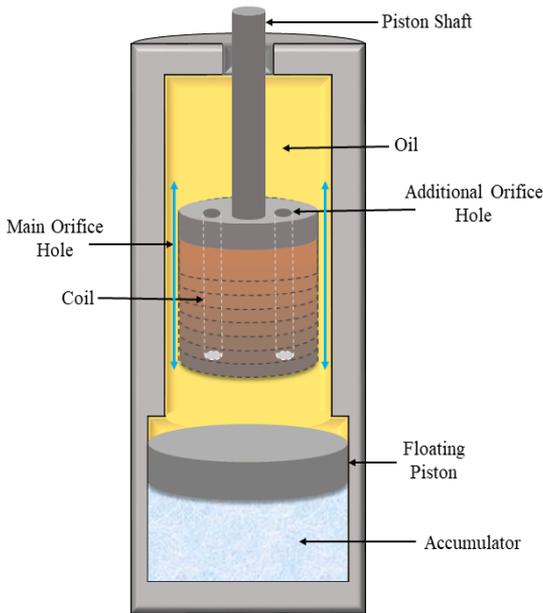


Fig. 1 Configuration of MR damper with bypass hole

가 방법에 대해 서술한다. 차량의 제원은 Table 1과 같이 C-class hatchback의 값을 사용하였고 도로는 ISO 2631-1에서 규정한 E-class 랜덤로드로 설정하였다.

승차감의 경우에는 식 (1)과 같이 ISO 2631-1의 규격에 따라 가중치된 sprung mass의 가속도 값인 Wacc의 RMS값을 기준으로 평가한다. ISO 2631-1은 전신진동에 노출된 인체에 대하여 진동 인지 가능성 등의 현상을 정량화하여 평가하는 방법을 정의하고 있고 차량에서 발생하는 진동에 노출된 운전자의 안락감에 대한 영향을 정량화하기 위한 측정 및 평가방법을 규정하고 있다^(7,8).

$$Wacc = H(S) \times s^2 X(S) \tag{1}$$

여기서 X 는 차량 수직 변위를 나타낸다. 라플라스 변환을 통해 $s^2 X(S)$ 는 S평면에서의 차량 수직 가속도를 나타내며 가중치 함수인 $H(S)$ 와 곱해져 가중치된 가속도 값 Wacc을 얻을 수 있게 된다.

주행 안정성을 보기 위해 주로 활용되는 unsprung mass의 거동값, TD (tire deformation)값은 아래 식 (2)에 의해서 계산되며 타이어 접지에 영향을 주어 RMS값이 작을수록 선회시의 주행안정성이 좋다고 할 수 있다.

$$TD = R + Z_{\text{gnd}} - U_{\text{smDisp}} \tag{2}$$

여기서 R 은 변형이 되지 않은 상태의 타이어 반지름, U_{smDisp} 는 지면으로부터 unsprung mass의 중심까지의 거리고 Z_{gnd} 는 지면에서 타이어 밀면까지의 거리를 나타내는 가진 변위이다. 진동 제어성능을 보기 위해 주로 활용되는 Sprung mass의 가속도와 수직 속도값은 Pitch velocity와 CG velocity의 RMS값에 의해 계산된다.

Table 1 C-hatchback parameter

Parameter	Value
Sprung mass M	1270 kg
Unsprung mass m_f, m_r	35.5 kg
Spring stiffness k_f, k_r	28 500 N/m
Damping coefficient c	1850 Ns/m
Damper response time	7 ms
Tire radius r	0.335 m
Tire stiffness k_{tf}, k_{tr}	268 000 N/m
CG to front wheel	1.02 m
CG to rear wheel	1.9 m
Vehicle tread	1.7 m

3. 모델링

차량의 제원 값은 Table 1의 값과 같이 차량 시뮬레이션 프로그램 carsim에 내장되어있는 C-class hatchback 차량의 각종 파라미터 값을 가져왔고 차량 모델은 풀카 모델을 구현하였으며 식 (3)과 같은 상태 공간 방정식을 simulink에 구현하였다.

$$\begin{aligned} X' &= AX + BU + L \\ Y &= CX + DU \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 ABCD는 상태공간방정식을 이루는 행렬들이며 L은 도로가진을 나타내고 제어입력 U는 이 연구에서 댐퍼의 자기장 입력에 따른 추가적인 감쇠력을 뜻한다⁽⁹⁾.

4. 민감도분석

이 장에서는 앞서 소개된 부가유로를 갖는 MR 댐퍼를 장착한 차량의 제원 값 결정을 위해 민감도 분석이 수행되었다. 민감도 해석은 설계 변수를 조금씩 변화시킬 때의 시스템 응답의 변화를 계산하여 실시하였으며⁽¹⁰⁾ 이 연구에서는 Table 1에 제시한 기존의 설계 파라미터를 각각 ±(10, 20, 30, 40, 50) % 만큼 변화시켜 시스템의 성능이 변화양상을 오차형태로 구하였다. 오차로 나타낼 수 있는 목적함수는 다음과 같이 식 (4)으로 나타낼 수 있다.

$$\text{Error} = |(s(\text{var}) - s(b)) / s(b)| \tag{4}$$

여기서 Error는 Table 1에 제시된 기존 파라미터에 대한 RMS값을 $S(b)$ 라고 하고 기존 파라미터 대비 10% ~ 50% 변화한 파라미터에 대한 RMS값을 $S(\text{var})$ 이라 할 때 식 (4)을 통해 계산하여 파라미터 변화에 따라 시스템 응답의 RMS값 변화가 얼마나 큰지를 나타내는 민감도를 나타낸다.

이 연구에서는 부가유로를 가지는 MR 댐퍼 시스템의 다양한 파라미터에 대해서 민감도 분석을 실시하여 각 성능에 대해서 다양한 파라미터가 어떤 영향을 미치는지에 대해 분석하였다. 승차감과 관련된 가중치된 가속도의 경우 sprung mass의 질량인 M 이 지배적이고 핸들링 성능과 관련된 타이어 변형량은 unsprung mass의 질량인 m 에 영향을 받는다는 것을 알

수 있었다. 또한 차량 진동제어 성능과 연관된 차량 각속도와 수직속도는 각각 감쇠계수 c , 스프링상수 k 에 민감하다는 것을 알 수 있었다. 하지만 이와 같은 결과에 따라 차량을 설계할 때 원하는 성능을 달성하기 위해 파라미터 값을 얼마로 설정해야 할지에 대한 전반적인 설계 방향을 제시 할 수는 있지만 실제 차량을 설계할 때 감쇠계수 c 를 제외한 M, m, k 의 값은 크게 변하지 않으므로 반응동 댐퍼와 같이 추가적인 제어입력을 넣어줄 수 있는 제어기의 경우 계인 값을 조절하여 감쇠력을 조절하고 원하는 성능을 달성할 수 있게 하여야 한다. 이에 따라 감쇠계수의 변화에 따라 각 성능의 오차변화를 Fig. 2에 나타내었다.

5. 퍼지 제어

퍼지 제어는 기존의 수학적인 모델링에서는 잘 나타내기 복잡하고 잘 정의되지 않는 시스템을 if-then의 형태로 언어적인 규칙에 의해 잘 나타낼 수 있게 인간의 제어방식을 모사한 제어방식이다⁽¹¹⁾.

이 연구에서는 기존의 스카이 훅 제어⁽¹²⁾만을 사용할 때는 적용되지 않았던 댐퍼의 스트로크가 저 변위일 때도 차량의 속도에 의해서만 제어가 되어 큰 제어입력 값이 들어가면 승차감에 악영향을 미친다는 점을⁽¹³⁾을 개선하기 위해 식 (5)와 같이 퍼지제어의 조건을 설정하였다.

$$\begin{aligned} &\text{if stroke} > S_v \\ &\text{then } \in_{\text{put}} = \text{Input} \\ &\text{else if storke} < S_v \\ &\text{then } \in_{\text{put}} = \text{Amp} * \in_{\text{put}} \end{aligned} \tag{5}$$

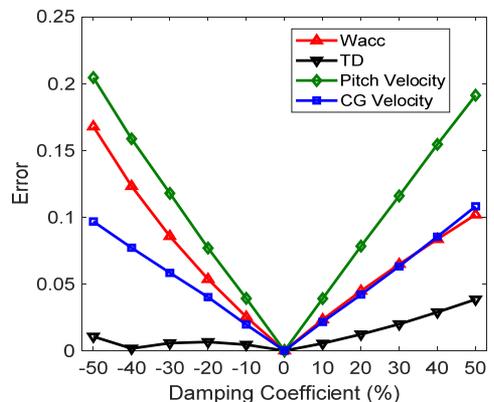


Fig. 2 Error of performances according to damping coefficient

여기서 S_v 는 기존의 스카이 혹 제어만 적용하였을 때의 스트로크 RMS값이며 퍼지제어를 추가한 경우 댐퍼 스트로크 값이 S_v 보다 크면 제어입력이 시스템에 그대로 들어가게 되고 S_v 보다 작으면 제어입력에 0%~100%에 해당하는 Amp값이 곱해져 들어가게 되는 것을 나타내고 있다.

5.1 스트로크 조건 값 설정

S_v 에 -90%, -70%, -50%, 100%, 200% 만큼의 변화를 주고 Amp값은 20%으로 설정하여 식 (6)와 같이 스카이 혹 제어만 적용한 결과의 RMS값인 $S(\text{sky})$ 와 퍼지제어를 추가한 결과의 RMS값 $S(\text{fuzzy})$ 값을 계산한 오차인 Error를 Table 2와 Fig. 3에 나타냈다.

$$\text{Error} = (S(\text{fuzzy}) - S(\text{sky})) / S(\text{sky}) \quad (6)$$

(a) 스트로크 조건 값을 $0.5 \times S_v$ 으로 했을 경우 각 평가요소는 성능개선이 미비하나 모든 성능이 좋아졌다고 할 수 있다.

(b) 스트로크 조건 값을 S_v 로 했을 경우 승차감의

성능개선과 속도제어성능감소가 비례하면서 상승하기 때문에 어느 정도의 트레이드오프를 감안하면서 나머지 성능들의 개선이득을 취할 만하다.

(c) 스트로크 조건 값을 S_v 보다 큰 값으로 했을 경우 평가요소는 Fig. 3과 같이 속도제어성능감소의 기울기가 가파르게 되면서 승차감 성능개선으로 연계되는 이득보다 속도제어성능감소가 많아지게 되므로 승차감만을 중요시 하는 게 아니라 다른 성능들의 개선도 염두에 둔다면 적절한 값은 아니다.

5.2 Amp값 설정

승차감을 개선시키기 위한 적절한 스트로크 조건 값을 S_v 로 설정한 뒤 적절한 Amp값을 설정하기 위해서 0%에서 100%에 해당하는 값을 Amp값으로 설정하였을 때 차량의 성능이 변화양상을 식 (6)으로 계산해 Fig. 4와 Table 3에 나타내었다. Amp값을 낮게 할수록 승차감은 좋아지고 속도제어성능은 감소하므로 이 연구에서는 승차감 성능개선을 주로 다루기 위해 Amp값을 10%~20%으로 선정하여 승차감을 포함한 다른 성능들의 변화를 적절하게 얻어낼 수 있었다.

Table 2 Performance evaluation according to storke

Storke condition	$0.5 \times S_v$	S_v	$2 \times S_v$
Wacc	-6.1 %	-12.2 %	-18 %
TD	-1.6 %	-2.8 %	-3.3 %
Pitch velocity	-9 %	-11.1 %	-10 %
CG velocity	+0.3 %	+12 %	+35.1 %

Table 3 Performance evaluation according to Amp

Amp	10 %	20 %	50 %	90 %
Wacc	-12.2 %	-11.1 %	-7.3 %	-1.4 %
TD	-2.8 %	-3 %	-2.8 %	-0.7 %
Pitch velocity	-11.1 %	-11 %	-7.8 %	-1.7 %
CG velocity	+12 %	+9.2 %	+3.7 %	+0.6 %

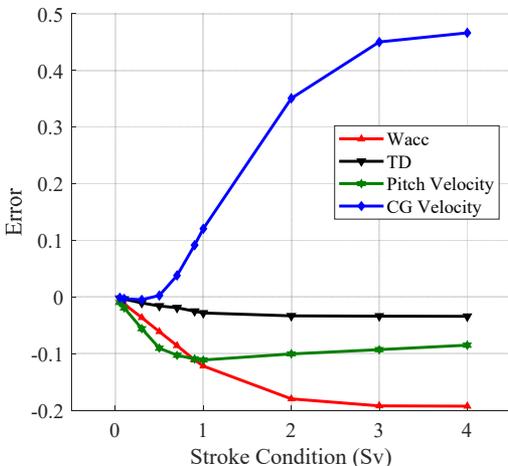


Fig. 3 Error of performances according to stroke condition

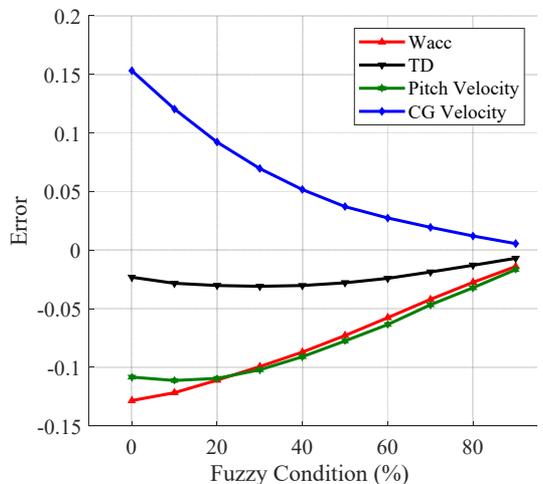


Fig. 4 Error of performances according to Amp. value

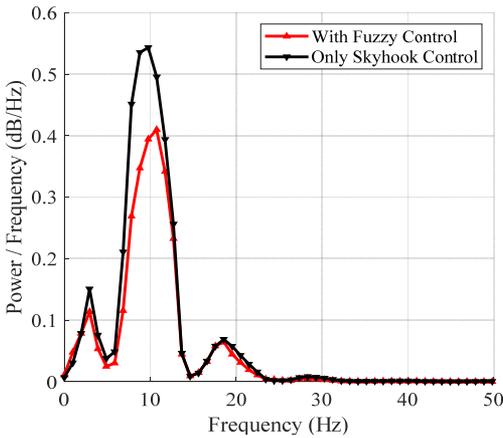


Fig. 5 Power spectral density results of W_{acc}

5.3 퍼지 제어를 통한 승차감 개선

위 결과를 통해 스트로크 조건 값과 Amp 값에 따른 성능의 변화를 알 수 있었고 승차감을 주로 개선시키기 위한 스트로크 조건 값과 Amp 값을 S_v , 20% 으로 선정할 수 있었다. 또한 부가유로를 가지는 MR 댐퍼 시스템에 기존의 스카이 훅 제어만 적용했을 경우와 퍼지제어를 적용했을 경우의 PSD(power spectral density) 함수를 sprung mass의 가속도에 적용해 Fig. 5에 나타내었고 Fig. 5에서 보이듯 퍼지 제어를 추가해준 경우 스카이훅 제어만을 사용할 때에 비해 W_{acc} 의 power spectral density 값이 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

이 연구에서는 부가적인 유로를 가지는 MR 댐퍼 시스템에 대해 민감도 분석을 실시하여 제어기의 스카이 훅 게인 값을 조절하였을 때 각각의 차량성능의 변화양상에 대한 전반적인 결과를 제시하였다. 또한 낮은 변위에서 차량의 속도만으로 제어를 하였을 때 승차감에 악영향을 미친다는 사실을 통해 시뮬레이션으로 구한 스트로크 조건 값과 Amp 값을 퍼지제어로 적용하였을 경우 속도 제어성능에 크게 악영향을 미치지 않으면서 승차감을 좋게 할 수 있다는 세부적인 제어결과를 제시하였다. 이로 인해 차량을 설계할 때 원하는 성능을 내기 위해서 감쇠계수와 스트로크 조건 값과 제어입력 값을 설정하기 위한 설계방향성을 제시하였다. 다양한 퍼지 조건에 대해 시뮬레이션을

하면서 승차감을 개선시키기 위해 일부 속도제어감소를 감수하고 나머지 성능들의 개선을 취하였다. 시뮬레이션을 통해 나타나는 승차감과 속도제어 성능은 다소 반비례적인 성향을 띄고 있다는 경향을 알 수 있었다. 이러한 실차 시뮬레이션을 통해 도출된 차량의 동적 특성은 차량 설계시 사전 지식으로 매우 유용하며, 향후 실차 실험을 진행하면서 동적 특성을 실제로 검증할 예정이다.

후 기

이 논문은 2018년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구지원에 의하여 연구되었음.

References

- (1) Carlson, J. D., Catanzarite, D. M. and St. Clair, K. A., 1996, Commercial Magneto-rheological Fluid Devices, International Journal of Modern Physics B, Vol. 10, No. 23-24, pp. 2857~2865.
- (2) Spencer, Jr. B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K. and Carlson, J. D., 1997, Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 123, No. 3, pp. 230~238.
- (3) Wereley, M. N., Pang, L. and Kamath, M. G., 1998, Idealized Hysteresis Modeling of Electrorheological and Magnetorheological Dampers, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 9, No. 8, pp. 642~649.
- (4) Choi, S. B. and Sung, K. G., 2008, Vibration Control of Magnetorheological Damper System Subjected to Parameter Variations, International Journal of Vehicle Design, Vol. 46, No. 1, pp. 94~110.
- (5) Choi, S. B., Kim, W. H., Hwang, Y. H. and Park, J. H., 2016, Performance Evaluation of a Quarter Car Suspension System Installed with MR Damper Featuring Bypass Flow Holes in Piston, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, p. 154.
- (6) Kang, B. H., Han, C. and Choi, S.-B., 2019, Design of Sky-ground Hook Controller for MR Damper of Aircraft Landing Gear, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 2, pp. 222~229.

(7) An, S. J., 2014, Human Body Vibration ISO 2631-1, Journal of KSNVE, Vol. 24, No. 6, pp. 36~40.

(8) Sung, K. G., Seong, M.-S. and Choi, S.-B., 2013, Performance Evaluation of Electronic Control Suspension Featuring Vehicle ER Dampers, Meccanica, Vol. 48, pp. 121~134.

(9) Kim, C. and Ro, P. I., 2002, An Accurate Full Car Ride Model Using Model Reducing Techniques, Journal of Mechanical Design, Vol. 124, No. 4, pp. 697~705.

(10) Ok, J., Park, D. W., Yoo, W. and Sohn, J., 2006, Development of a New Bushing Model for Suspension Module Design, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 6, pp. 143~150.

(11) Hwang, T. H. and Park, K. H., 2006, A Design of Vehicle Dynamics Controller using CarSim and Fuzzy Controller, Proceedings of KSAE Annual Autumn Conference, No. 3, pp. 1546~1551.

(12) Kang, T. H. and Baek, W. K., 2002, Ride

Analysis of A Semi-Active Suspension Seat with Sky-Hook Control, Journal of Power System Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 33~39.

(13) Fukushima, N., Hidaka, K. and Iwata, K., 1983, Optimum Characteristics of Automotive Shock Absorbers under Various Driving Conditions and Road Surfaces, International Journal of Vehicle Design, Vol. 4, No. 5, pp. 463~472.



Jong-Seok Oh received the Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Inha University in 2015, respectively. He is currently assistant professor in Kongju National University. His research interests are

robust controller design and control of various systems using smart actuators such as magnetorheological (MR), electrorheological (ER) fluids, and piezo actuators.