

온도조건에 따른 MR 유체의 물리 특성에 대한 실험 연구

이석현¹, 손준¹, 백대성¹, 권영철^{1*}
¹선문대학교 기계공학과

Experimental Study on Physical Characteristics of MR Fluid along Temperature Conditions

Seok-Hyun Lee¹, June Son¹, Dae-Sung Baek¹ and Young-Chul Kwon^{1*}

¹Dept. of Mechanical Eng., Sunmoon University

요 약 본 연구에서는 온도조건에 따른 MR 유체의 물리적 특성을 연구하고자 침전 및 전단응력실험을 수행하였다. MR 댐퍼에 사용되는 MR 유체는 자성 파우더를 포함하고 있어 침전현상이 발생하므로 침강성과 인가전류에 의한 전단응력 변화를 상온과 고온조건에서 실험하였다. 침강특성을 조사하기 위하여 강제 대류형 오븐을 인가전류에 의한 전단응력을 측정하기 위하여 점도계를 사용하였다. 실험결과로부터 MR 유체는 시간과 온도에 따른 침강 특성이 다를 것을 그리고 교반시간이 큰 경우에 MR 유체의 분산성이 2배 이상 우수하였다. 전단률이 증가할수록 전단응력은 로그 함수의 증가분포를 인가전류를 증가할수록 2차 함수의 증가분포를 그리고 MR 유체의 전단응력은 상온보다 고온에서 6-18% 낮은 분포를 보였다.

Abstract In the present study, sedimentation and shear stress of MR fluid are investigated to physical characteristics of MR fluid along temperature conditions. MR fluid is a suspension of micrometer-sized magnetic particles in a base liquid. Therefore, dispersion of MR fluid is important in the case of the design and optimization of the system using MR fluid. Due to sedimentation characteristics of MR fluid by magnetic particles, the sedimentation and shear stress of commercial MR fluid are investigated at 25°C and 80°C temperatures by using a forced convection oven and a viscometer. From experimental results, the sedimentation and shear stress are more affected by the temperatures of 80°C than 25°C and the mixing time of 5min than 10min. Shear stress by the applied current increases the shape of a quadratic equation and are lower 6-18% at 80°C than 25°C.

Key Words : Current, Mixing time, Magnetorheological fluid, Sedimentation, Shear stress, Temperature

1. 서론

정밀 가공이 요구되는 생산 설비와 교통차량 등의 진동 저감을 위한 방법들 중에서 MR 유체를 이용한 능동 제어가 활발히 연구되고 있다. MR 유체를 이용한 방법은 인가되는 전류의 세기에 따라 MR 유체 내 자성 파우더의 결합력이 변하면서 전단력을 발생시키는 유체로 자기장에 의한 반응속도가 빠르다.

MR 유체에 관한 연구는 1990년대부터 연구기관과 대학 연구소를 중심으로 진행되고 있지만, 대부분 MR 유체

보다는 MR 유체를 적용한 댐퍼 시스템에 집중되어 있다. Lee 등[1]은 MR 유체의 자기 유동 특성을 이해하고자 가시화 실험을 통해 자기장이 MR 유체에 미치는 영향을 조사하였고, Baek 등[2]은 MR 유체의 화학적 조성에 따른 물리적 특성을 살펴보고자 216종의 방대한 샘플을 실험적 방법으로 연구하였다. Lim 등[3]은 유한요소법을 이용하여 MR 밸브 내부의 전자기적 현상을, Baek 등[4]은 MR 댐퍼의 설계 변수에 따른 감쇠력의 변화를 연구하였다. Dyke 등[5]은 B-W 모델을 제시하여 반 능동 댐퍼와 모델의 유용성을 조사하였다. Kelso 등[6]은 주행 차량용

본 연구의 일부는 지식경제부 산업원천기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Young-Chul Kwon(Sunmoon Univ.)

Tel: +82-10-8523-0923 email: yckweon1@sunmoon.ac.kr

Received January 28, 2014

Revised February 19, 2014

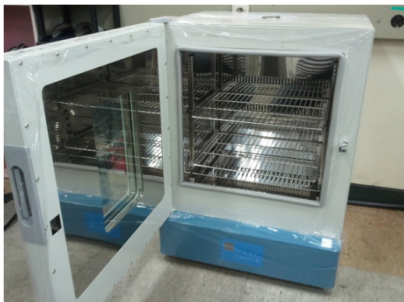
Accepted March 6, 2014

MR shock absorber에 대한 연구를 수행하였으며, Delphi 사 [7]은 자동차의 반 능동 현가장치에 사용될 MR 댐퍼를 개발하여 차량에 적용하고 있다.

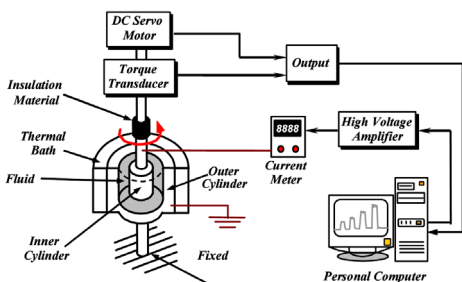
본 연구에서는 MR 유체의 침강성과 자기장에 의한 점도변화를 실험적으로 조사하고자 상용 MR 유체의 분산성과 인가전류에 따른 점도의 변화를 상온(25℃)과 고온(80℃)에서 조사하였다. MR 유체를 장시간 사용하거나 고온의 외부환경에 놓이게 되면 MR 유체가 온도의 영향을 받아 물리적인 특성이 변할 것이다. 그러나 이에 대한 연구가 거의 보고되지 않았다. 운전조건이나 외부환경에 따라 MR 유체가 어떤 거동을 보이는 지를 보다 자세히 이해하여야 MR 댐퍼의 최적설계 및 제어로직 개발에 도움이 될 것이다.

2. 실험장치 및 방법

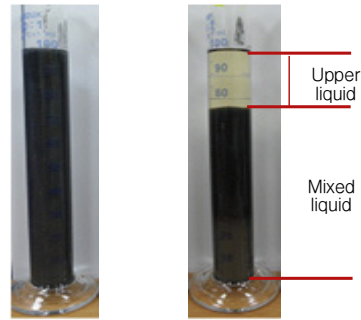
MR 유체의 상온(25℃)과 고온(80℃)에서의 침강성을 관찰하기 위하여 Fig. 1의 강제 대류형 오븐을 이용하였다. 실험에 사용된 MR 유체는 상용 유체로 밀도 3.0g/cm³, 점도 5000cP를 가진다. 점도는 ROOKFIELD사 LV-DV II+ 측정기를 이용하였고, 밀도는 중량을 계량하여 측정



[Fig. 1] Forced convection oven



[Fig. 2] Schematic diagram of viscometer



(a) before

(b) after

[Fig. 3] Sedimentation of MR fluid

하였다. 또한 MR 유체의 침강 특성은 MR 유체를 혼합하는 교반시간과도 관계가 있으므로 5분과 10분의 교반시간에서의 MR 유체의 분산 특성을 조사하였다. 교반시간은 MR 유체의 조성을 균질하게 만들기 위한 혼합시간으로, MR 유체는 시간에 따라 자성 파우더의 침강이 진행된다. 따라서 교반시간에 따른 MR 유체의 침강특성을 실험하였다. 본 실험연구에 사용된 MR 유체의 기본 물성은 succinic acid를 계면활성제로 white oil을 베이스 오일로 침강방지제를 특성첨가제로 선정하였다. Fig. 3은 100ml 비이커에 담긴 MR 유체의 자성 파우더가 아래로 침강되는 모습을 보여준다. 실험은 30시간 진행되었으며 침강에 의한 상등액과 혼합액의 분리 정도를 측정하여 MR 유체의 침강 특성 평가하였다. 상등액과 혼합액의 비율은 유체의 침강과 점성에 영향을 받는다.

MR 유체의 전단응력은 Fig. 2의 점도계를 이용하여 측정하였다. 점도계의 전단률과 인가전류를 변경하면서 MR 유체의 점도변화를 측정하였다. 점도계는 MR 유체를 주입하여 시험하는 챔버와 자기장을 인가하는 자극 부분, 작동을 제어하는 제어장치와 온도 챔버로 구성되었다. 실험하기 전에 MR 유체의 점도에 영향을 줄 수 있는 MR 유체의 균질성의 유지 및 MR 유체에 존재하는 기포를 최대한 제거하여야 한다. 점도계의 전단률은 15, 180, 340, 510, 680, 840, 1010, 1170 s⁻¹의 8점을 선정하여 전단률을 증가시키면서 인가전류 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0A의 5점에서 MR 유체의 전단응력을 측정하였다. 그리고 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2A의 9점에서 인가전류를 증가시키면서 MR 유체의 전단응력을 측정하였다.

3. 결과

3.1 MR 유체의 침강 특성

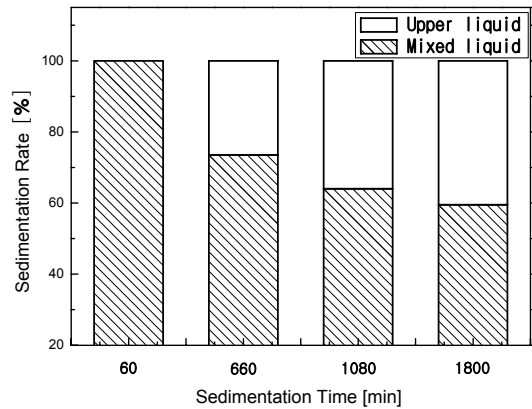
MR 유체가 장시간 정지 상태가 되면 MR 유체 내

자성 파우더가 침전하게 된다. MR 유체는 마이크로미터 크기의 자성 파우더로 연결, 카보닐 철과 같은 강자성체로 만들어져 있어 본질적으로 침강하게 된다. 침강되는 정도에 따라 MR 유체 내 파우더의 균일성은 저하되어 MR 유체의 분산 상태와 점성에 영향을 미치게 된다. 이 상태에서 자기장이 주어지면 MR 유체 내 자성 파우더의 불균일성으로 MR 유체를 이용하는 장비 운전성과 응답성이 나빠지게 되며 심각한 경우에 장비 안전성 문제를 유발할 수 있다. 입자의 침전을 억제하기 위해서 자성입자의 크기가 작을수록 분산안정성은 뛰어나지만 나노 크기의 입자크기에서는 자기장에 의한 전단응력 효과가 미미하여 적용성이 떨어진다. 따라서 상용 MR 유체의 침강 특성을 이해할 필요가 있다. 침강 특성은 온도에 영향을 받을 것이므로 온도조건에 따른 침강 특성을 조사하였다.

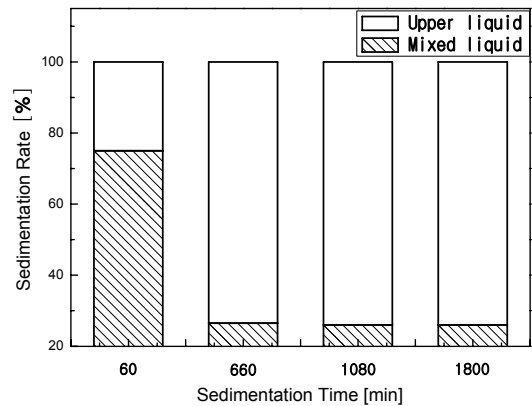
Fig. 4와 5는 교반시간 5분일 때 MR 유체의 침강 환경 온도는 25℃와 80℃에서의 침강정도를 침강시간에 따른 침강율로 나타낸 그림이다. 침강 환경 온도가 높으면 MR 유체의 침강율이 크게 빨라진다. 그림에서 침강정도는 흰색으로 확인할 수 있다. 60분경과 시 25℃ 침강율은 0%, 80℃는 25%가 침강하여 상등액이 뚜렷히 관찰되었다. 660분경과 시 25℃ 침강율은 16%, 80℃는 73%, 1080분경과 시 25℃ 침강율은 36%, 80℃는 74%, 1800분경과 시 25℃ 침강율은 40%, 80℃는 74%가 침강되었다. 이 실험결과로부터 온도변화에 따른 MR 유체의 침강 특성은 상온보다 고온에서 더 확연히 MR 유체 내 자성 파우더가 침전된다는 것을 알 수 있다. 상온에서 침전량은 선형적인 감소 경향을 보이지만, 고온에서는 일정시간 내에 급격히 감소하여 MR 유체의 자기장 효과가 효과적이지 못할 것을 예상할 수 있다. 고온 환경에서는 MR 유체의 베이스 오일의 점도가 크게 낮아져 MR 유체 내 자성 파우더의 침강이 빨라졌기 때문이다.

Fig. 6과 7은 교반시간 10분일 때 MR 유체의 침강 환경 온도는 25℃와 80℃에서의 침강정도를 침강시간에 따른 침강율로 나타낸 그림이다. Fig. 31과 32의 교반시간 5분일 때의 침강율과는 달리 MR 유체의 침강율이 많이 낮아진 것을 확인할 수 있다. 60분경과 시 25℃ 침강율은 0%, 80℃는 2%가 침강하여 상등액은 크게 줄어들었다. 660분경과 시 25℃ 침강율은 9%, 80℃는 46%, 1080분경과 시 25℃ 침강율은 11%, 80℃는 47%, 1800분경과 시 25℃ 침강율은 14%, 80℃는 48%가 침강되었다.

Fig. 4, 5, 6 그리고 7로부터 침강 환경온도와 교반시간에 따라 MR 유체의 침강율이 크게 달라진다는 것을 알 수 있었다. 교반시간이 증가하면 MR 유체 내 밀집되어 있는 파우더의 분산성을 향상시켜 MR 유체 내 자성 파우더와 오일의 혼합정도가 우수해져 파우더의 침전이



[Fig. 4] Sedimentation rate of MR fluid at mixing time; 5 min, temperature 25℃



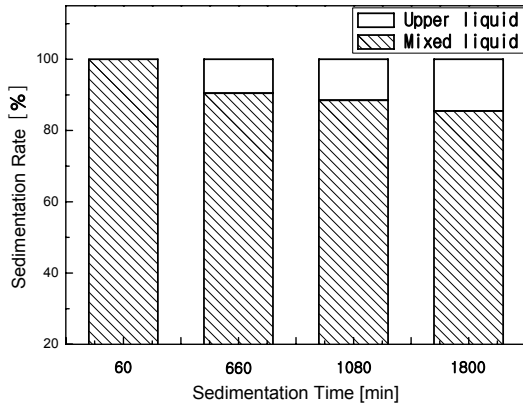
[Fig. 5] Sedimentation rate of MR fluid at mixing time; 5 min, temperature 80℃

지연되는 것으로 판단된다. 따라서 동일한 환경 조건에서 일정시간을 두고 중력에 의한 MR 유체의 침전을 관찰하는 경우는 교반시간이 큰 MR 유체에서 분산 안정성이 우수하였다.

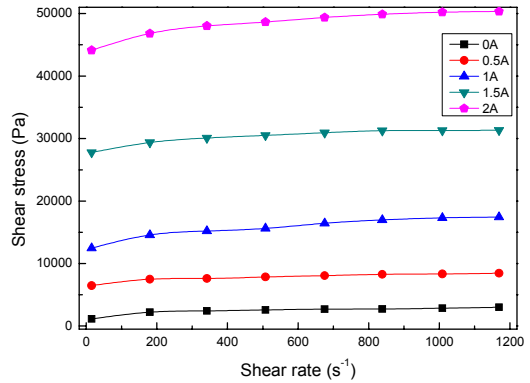
3.2 MR 유체의 전단응력

MR 유체가 자기장의 영향을 받게 되면 자성 파우더 입자들끼리 유동의 수직방향으로 띠 형상으로 결합한다. 띠 형상은 MR 유체의 유동흐름을 방해하여 자기장 인가 시 MR 유체의 겔보기 점도가 증가하게 된다. 이를 정량적으로 조사하기 위하여 MR 유체의 인가전류에 따른 전단응력을 측정하였다. 자기장의 인가에 따른 MR 유체의 전단응력 변화는 회전식 점도계를 이용하여 측정하였다. 점도계의 전단률은 15~1170 s⁻¹까지 8점에서 그리고 전류는 0.5A씩 증가시켜 최대 2A까지 인가하였다.

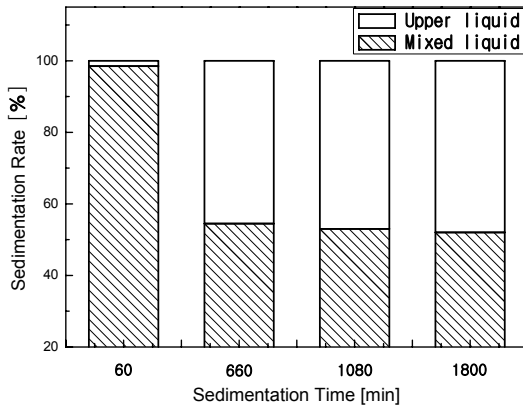
Fig. 8은 25℃ MR 유체의 전단응력 변화를 전단률을



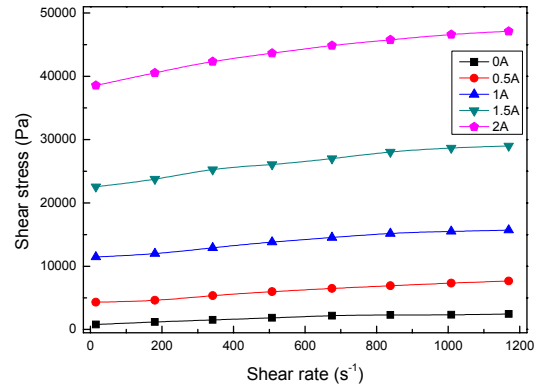
[Fig. 6] Sedimentation rate of MR fluid at mixing time; 10 min, temperature 25°C



[Fig. 8] Shear stress vs. shear rate of MR fluid at mixing time; 10 min, temperature 25°C

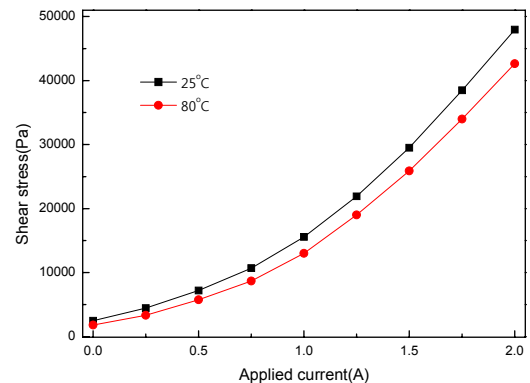


[Fig. 7] Sedimentation rate of MR fluid at mixing time; 10 min, temperature 80°C



[Fig. 9] Shear stress vs. shear rate of MR fluid at mixing time; 10 min, temperature 80°C

증가시키면서 측정하였다. 또한 인가전류를 증가시켜 각 전류에서의 전단응력의 변화를 관찰하였다. 전단률이 커질수록 전단응력은 증가하며, 낮은 전단률에서는 전단응력의 뚜렷한 증가를 보이지만 높은 영역에서는 증가율이 둔화되었다. 전단률보다는 인가전류에 의한 전단응력이 더 높게 측정되었다. 인가전류가 증가할수록 전단률에 의한 전단응력 변화곡선은 선형적인 증가에서 로그함수의 증가형태를 나타내었으며, 증가폭도 인가전류의 증가에 따라 크게 증가하였다. 인가전류 0A, 전단률 15 s⁻¹를 기준으로 전단률 15 s⁻¹에서 0.5A, 1.0A, 1.5A, 2A의 전단응력 증가율은 각각 5.7, 11.0, 24.6, 39.1배 이었다. 인가전류 0A, 전단률 1170 s⁻¹를 기준으로 0.5A, 1.0A, 1.5A, 2A의 전단응력 증가율은 각각 2.8, 5.8, 10.5, 16.8배 이었다. 이는 MR 유체에 전류를 일시적으로 인가할 때 MR 유체의 겔보기 점성이 증가하여 유동흐름을 방해할 것이라는 것을 보여준다.



[Fig. 10] Shear stress vs. applied current of MR fluid at mixing time; 10 min, temperature 25°C and 80°C

Fig. 9는 80°C MR 유체의 전단응력 변화를 보여준다. 전단률과 전단응력은 25°C의 경향과는 다르게 대략적으로 선형적인 증가를 보였다. 이는 고온조건에서 MR 유체

의 점도가 낮기 때문이다. 전단률보다는 인가전류가 증가할수록 전단응력이 더 높게 측정되었다. 인가전류 0A, 전단률 15 s⁻¹ 기준으로 전단률 15 s⁻¹에서 0.5A, 1.0A, 1.5A, 2A의 전단응력 증가율은 각각 5.4, 14.2, 28.1, 48.0배 그리고 인가전류 0A, 전단률 1170 s⁻¹ 기준으로 0.5A, 1.0A, 1.5A, 2A의 전단응력 증가율은 각각 3.1, 6.4, 11.3, 19.2배 이었다.

Fig. 8과 9로부터 MR 유체의 사용 환경온도에 따라 MR 유체의 전단응력은 크게 달라진다는 것을 확인하였다. 25℃, 전단률 1170 s⁻¹ 기준으로 0A, 0.5A, 1.0A, 1.5A, 2A에서 80℃ 전단응력의 크기는 각각 82, 90, 88, 94% 이었다.

Fig. 10은 점도계 전단률을 400s⁻¹로 고정한 상태에서 인가전류를 0A 에서부터 0.5A씩 2A까지 변화하면서 MR 유체의 전단응력을 측정하였다. Fig. 8과 9에서 알 수 있는 것처럼, MR 유체의 전단응력은 상온보다 고온에서 상대적으로 낮은 분포를 보이고 있으며, 인가전류에 따른 MR 유체의 전단응력 변화는 2차 함수의 형태로 나타났다. 인가전류 0A의 25℃와 80℃ 각각의 점도를 기준으로 인가전류 2A에서 25℃와 80℃의 점도는 각각 19.5배와 23.6배 크게 증가하였다. 또한 0A와 2A에서 80℃의 점도를 기준으로 25℃의 점도를 비교하면 각각 36.5%와 12.5% 높았다. 전단응력 증가율은 인가전류가 높을 때 더 낮는데, 이는 인가전류가 높아지게 되면 MR 유체 내 자성 파우더들이 자기장에 더 강하게 반응하여 자기결속이 커지기 때문에 온도보다 자기장 영향이 전단응력 증가에 더 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 결론

MR 유체의 침강성과 인가전류에 의한 점도변화를 조사하고자 상용 MR 유체를 상온과 고온에서 실험적으로 연구하였다.

- (1) 상용 MR 유체는 자성 파우더의 입자를 포함하고 있으므로 시간과 온도에 따른 침강 특성이 다를 수 있음을 확인하였다.
- (2) 온도변화에 따른 MR 유체의 침강 특성은 상온보다 고온에서 더 확연히 관찰되었다. 상온에서 침전량은 선형적인 감소 경향을 보이지만, 고온에서는 일정시간 내에 급격히 감소하였다. 그리고 교반시간이 큰 경우에 MR 유체의 침전량이 적어 분산성이 우수함을 확인하였다.
- (3) 전단률이 커질수록 전단응력은 로그함수의 증가형

태를 보였으며, 증가폭은 전단률보다 인가전류의 증가에 따라 더 뚜렷하였다. MR 유체의 전단응력은 상온보다 고온에서 낮은 분포를 보이며 인가전류에 따른 MR 유체의 전단응력 변화는 2차 함수의 형태로 나타났다.

- (4) MR 댐퍼의 설계 및 정밀제어를 위해서는 MR 유체의 운전조건이나 외부환경에 대한 체계적으로 연구가 필요하지만, 본 연구에서는 온도와 교반시간에 대한 문제점을 제시하였다. 향후 더 세밀한 교반시간과 온도조건에 대한 실험이 필요하다.

References

- [1] Lee, S. H., Kim, K. Y., Baek, D. S., Kwon, Y. C. and Park, S. J., 2013, Experimental study on magnetic flow characteristics of MR fluid, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol 14, No. 8, pp. 3611-3616
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.8.3611>
- [2] Baek, D. S., Lee, S. H., Kim, K. Y. and Kwon, Y. C., 2013, Experimental Study on Physical Characteristics along chemical compositions of MR fluid, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol 14, No. 10, pp. 4747-4752
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.10.4747>
- [3] Lim, W. H., Du, H. and Guo, N. Q. 2003,, Finite element analysis and simulation evaluation of a magnetorheological valve, International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, Vol. 21, No. 6, pp. 438-445.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s001700300051>
- [4] Baek, W. K., Lee, J. S., 2004, High-performance Magneto-rheological Damper Design, Transactions of the Korean society for noise and vibration engineering, Vol. 14, No. 6, pp. 470-477
DOI: <http://dx.doi.org/10.5050/KSNVN.2004.14.6.470>
- [5] Dyke, S. J., Spencer Jr., B. F., Sain, M. K. and Carlson, J.D., 1998, An experimental study of MR damper for seismic protection, Smart. Mat. and Struct., Vol. 5, pp. 693-703.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/7/5/012>
- [6] Kelso, S. P. and Gordaninejad, F., 1999, Magneto-rheological fluid shock absorber for off-highway high-payload vehicles, Proceeding of SPIE, Vol. 3672, pp. 44-54
DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.349803>
- [7] <http://www.delphiauto.com>

이 석 현(Seok-Hyun Lee)

[준회원]



- 2013년 2월 : 선문대학교 기계공학과 (공학사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학과 (대학원)

<관심분야>
냉동공조, 전산해석

권 영 철(Young-Chul Kwon)

[정회원]

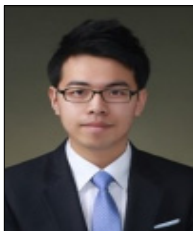


- 1989년 2월 : 부산대학교 정밀기계공학과 (공학사)
- 1991년 8월 : 포스텍 기계공학과 (공학석사)
- 1996년 8월 : 포스텍 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 9월 ~ 1999년 2월 : 한국전력 전력연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
냉동공조, 열전달

손 준(Jun Son)

[준회원]



- 2014년 2월 : 선문대학교 기계공학과 (공학사)

<관심분야>
냉동공조, 플랜트 설계

백 대 성(Dae -Sung Baek)

[정회원]



- 1990년 2월 : 숭실대학교 화학과 (이학사)
- 2008년 8월 ~ 현재 : (주) RMS 테크놀로지(주) 개발팀장
- 2013년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학과 (대학원)

<관심분야>
자성유체 및 응용