

MR 유체의 화학적 조성에 따른 물리특성 실험연구

백대성¹, 이석현¹, 김기영¹, 권영철^{1*}
¹선문대학교 기계공학과

Experimental Study on Physical Characteristics along Chemical Compositions of MR Fluid

Dae-Sung Baek¹, Seok-Hyun Lee¹, Ki-Young Kim¹ and Young-Chul Kwon^{1*}

¹Dept. of Mechanical Eng., Sunmoon University

요 약 MR 유체의 물리적 특성은 자기장에 의해 영향을 받으며, 베이스 오일에 마이크로 크기의 자성 파우더가 분산되어 있다. 그러므로 오일과 파우더의 밀도 차이로 MR 댐퍼에 사용되는 MR 유체의 분산 안정성은 중요한 문제이다. 본 실험연구에서는 MR 댐퍼에 사용되는 MR 유체의 화학적 조성에 따른 물리적 특성을 규명해보고자 MR 유체를 제조하여 분산 안정성과 물리적 특성을 조사하였다. 216종의 MR 유체는 자성파우더(2종), 계면활성제(2종), 베이스오일(2종), 특성첨가제(3종), 밀도(3종), 점도(3종)를 이용하여 제조되었다. 실험결과로부터 SEM, 자속밀도, MR 유체의 상등액과 침강층의 분산 자료를 확보하였다.

Abstract Physical characteristics of a magneto-rheological(MR) fluid can be influenced by a magnetic field. MR fluid is a suspension of micrometer-sized magnetic particles in a base liquid such as oil. Therefore, the key issue is dispersion stability because density of micrometer-sized magnetic particles are different from that of oil. In the present study, dispersion stability and physical characteristics along chemical compositions of MR fluid are investigated. 216 kinds of MR fluids are made by using magnetic powder(#2), surfactant(#2), base oil(#2), functional additive(#3), density(#3) and viscosity(#3). From experimental results, SEM photograph, magnetic flux density, supernatant and sediment of 216 kinds of MR fluids are obtained.

Key Words : Dispersion stability, MR fluid, Magnetic flux density, Powder, Surfactant

1. 서론

MR 유체는 오일을 매체로 미크론 또는 나노 크기의 자성체 입자를 분산시켜 만든 유체로, 자기장이 가해지면 자성체 입자들이 수 밀리초 이내에 체인을 형성하여 고체화가 되어 점소성 거동을 가지게 되므로 점성이 변하는 성질을 이용하는 유체이다.

MR 유체에 관한 연구는 1990년대부터 여러 연구기관과 대학연구소를 중심으로 활발히 이루어지고 있다[1-3]. 현재 국내에서도 MR 댐퍼는 성능분석 기술과 제작 기술

을 확보하여, 실용화 단계에 있으나, MR 유체에 관한 연구는 일부 대학과 연구소에서 기초연구를 진행하는 수준이다[4,5]. Fig. 1은 MR 유체를 주입하여 사용하는 MR 댐퍼의 일반적인 구조를 보여준다.

MR 유체의 개발 기술은 유체의 자기적 특성을 결정하는 자성재료 기술과 계면활성제를 응용한 분산기술, 베이스 오일의 개질 기술 그리고 특성첨가제로 이루어진다. Fig. 2는 MR 유체의 개념적인 구조를 보여주고 있다. 자성체 파우더는 근본적으로 자기장에 감응하여 전단응력을 발생시키는 중요 특성물질로 파우더의 크기에 따라

본 연구의 일부는 지식경제부 산업원천기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

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

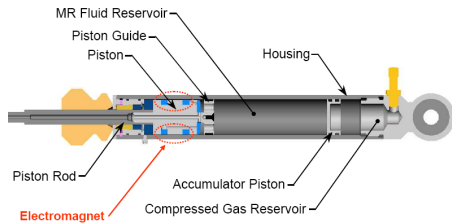
Tel: +82-10-8523-0923 email: yckweon1@sunmoon.ac.kr

Received May 24, 2013

Revised (1st June 13, 2013, 2nd July 3, 2013)

Accepted October 10, 2013

그 포화자화 특성이 달라지며, MR 댐퍼에서 자기장이 걸리는 오리피스를 통과하는 순간 밀도가 달라지기 때문에 MR 댐퍼의 요구 특성에 따라 파우더의 크기분포를 조절해야 한다. 따라서 자성 파우더의 종류별, 조합되는 크기별 특성에 대한 데이터의 구축이 필요하다. 계면활성제 기술에 있어서는 계면활성제의 함량과 작용기의 종류에 따라 금속 표면과의 결합력 차이가 생긴다. MR 유체의 개발은 계면활성제 선택과 함량 결정, 그리고 베이스 오일의 친화력을 최적화하여 이루어진다. MR 유체는 사용 중 산화되지 않아야 하고, 저온과 고온에서 성능저하가 되지 않아야 하므로, 필요한 성능 첨가제의 선택과 적용은 중요한 문제이다.

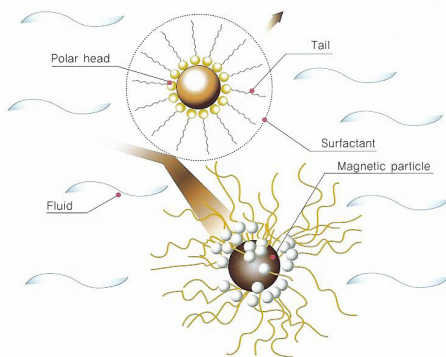


[Fig. 1] Structure of MR damper

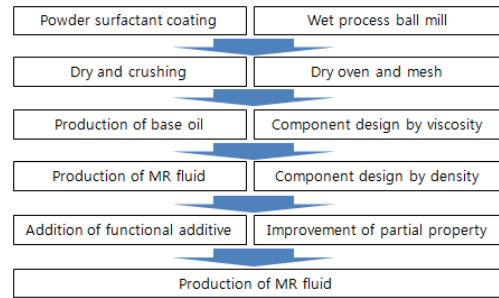
본 연구에 있어서는 MR 댐퍼에 사용되는 MR 유체의 화학적 조성에 따른 물리적 특성을 체계적으로 이해하기 위하여 MR 유체의 제조와 실험그룹 선정을 고려하였고, 점도, 밀도, 포화자속밀도 등의 물리적 특성과 원심분리 방법을 이용하여 MR 유체의 분산 안정성을 평가하였다.

2. 실험조건 및 방법

2.1 MR 유체 제조



[Fig. 2] MR fluid system

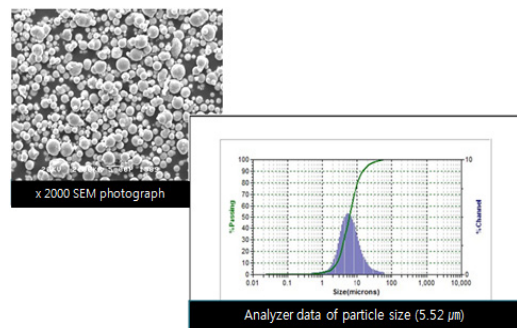


[Fig. 3] Manufacture process of MR fluid

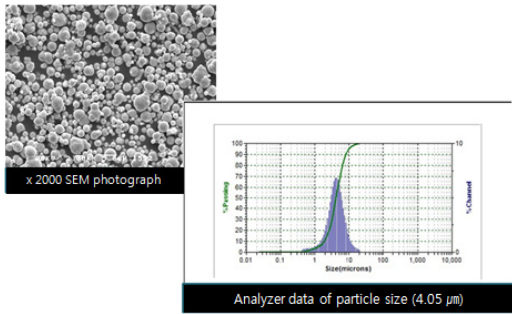
MR 유체를 제조하기 위하여 계면활성제 코팅방법으로 습식 볼 밀공정을 이용하였다. Fig. 3은 MR 유체 제조 과정을 보여준다. 볼 밀 과정에서 사용된 볼은 2mm 질코니아를 사용하였으며 200 rpm으로 1시간 동안 질코니아로 코팅하였다. 볼 밀 후 건조오븐에서 75℃로 12시간 건조하였으며, 이를 기준으로 베이스 오일과 파우더 함량을 설계하여 MR 유체의 물리적 조건별로 점도 500 cP, 1000 cP, 2000 cP 각 3종씩, 밀도 1.7 g/cc, 2.6 g/cc, 3.0 g/cc 각 3종씩을 제조하여 밀도와 점도 변화에 따른 MR 유체의 물리적 특성을 연구하였다.

2.2 실험 요소 준비

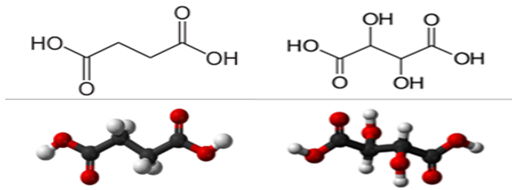
MR 유체 구성조건이 물리적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 실험에 사용된 각각의 구성 요소를 Table 1에 나타내었다. 파우더 입자는 평균입경 4.05, 5.52 μm 2종, 계면활성제로 succinic acid와 tartaric acid 2종, 베이스 오일로 white oil과 hydrocarbon oil 2종, 특성첨가제로 침강방지제, 카본블랙, 분산제 3종을 각각 사용하였다. Fig. 4, 5는 MR 유체의 자성입자 2종에 대한 SEM과 PSA의 이미지와 분석결과를, Fig. 6은 계면활성제의 화학구조를 보여준다.



[Fig. 4] SEM photograph and Analyzer data of particle size 5.52 μm



[Fig. 5] SEM photograph and Analyzer data of particle size 4.05 μm



(a) succinic acid (b) tartaric acid

[Fig. 6] Chemical Structure of acid used this present experiment

[Table 1] MR fluids used the present study

Powder size(μm)	Surfactant	Base oil	Functional additive	Density (g/cc)	Viscosity (cP)
5.52	succinic acid	white oil	sedimentation preventive agent	1.7	500
4.05	tartaric acid	hydro-carbon oil	carbon black dispersant	2.6	1000
				3.0	2000

MR 유체의 구성 조건으로 파우더의 평균크기, 계면활성제, 베이스 오일, 특성첨가제의 종류에 따라 실험군을 나누었다. 밀도 및 점도변화 9종 씩 파우더 크기 5.52 μm 에서 108종, 4.05 μm 에서 108종씩 전체 실험군 216개에 대한 모든 실험을 진행하였으며, 본 논문에는 이들 중 몇 가지 결과를 비교 제시하였다.

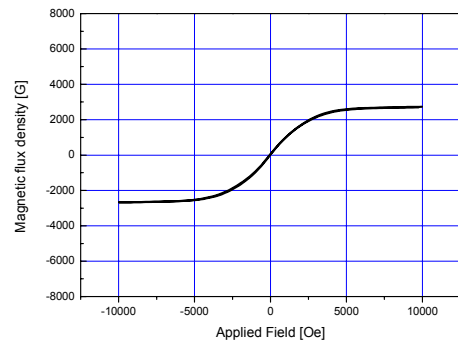
3. 결과

3.1 물리적 특성

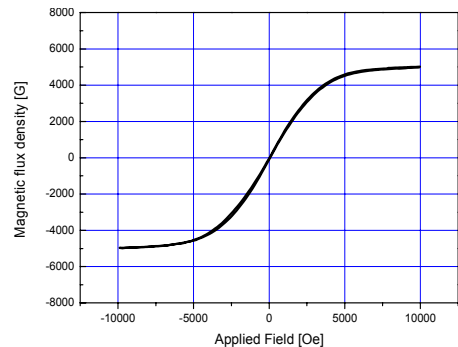
Table 1에 분류된 216종의 MR 유체 기본 물리 특성은

다음과 같이 측정하였다.

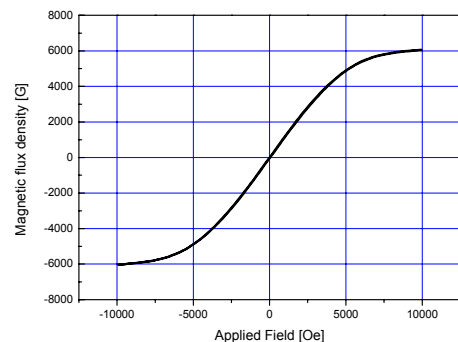
- 1) 점도는 BROOKFIELD사 LV-DV II+ 측정기를 이용하여 상온 27 $^{\circ}\text{C}$, 습도 60%에서 측정하였으며, $\pm 10\%$ 오차범위를 가졌다.
- 2) 밀도는 중량을 계량하여 측정하였으며, ± 0.05 g/cc의 오차범위를 가졌다.
- 3) 포화자속밀도는 LakeShore Model 7404 VSM 측정기를 이용하여 상온 27 $^{\circ}\text{C}$, 습도 60%에서 최대 인가 자기장 10 KOe까지 측정하였으며, $\pm 10\%$ 의 오차범위를 가졌다.



[Fig. 7] Magnetic flux density at 1.7g/cc



[Fig. 8] Magnetic flux density at 2.6g/cc



[Fig. 9] Magnetic flux density at 3.0g/cc

Fig. 7, 8, 9는 본 실험에 사용된 밀도 1.7, 2.6, 3.0g/cc MR 유체의 인가자기장에 대한 자속밀도 곡선으로, 1.7g/cc의 포화자속밀도는 2700Gauss를 2.6g/cc는 5000Gauss를 3.0g/cc는 6000Gauss를 보였다. MR 유체의 자기특성은 MR 유체 내 강자성 파우더에 기인한다. 외부 자기장이 0이면 자속밀도는 0이다. 자기장의 세기가 커지면 이에 대응하는 자속밀도가 증가한다. 외부에서 가해지는 자기장의 세기가 포화자속밀도 이상으로 커져도 자속밀도는 포화되어 일정하다.

3.2 분산 안정성 평가

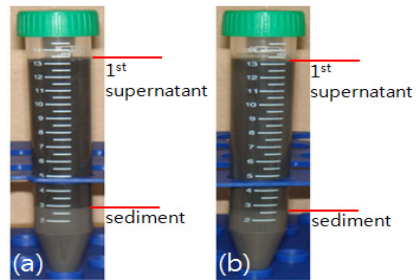
MR 유체의 안정성은 일정시간 정체시켜 침강정도로 평가하여야 하나, 본 실험에서는 원심분리기를 이용하여 MR 유체의 분산 안정성을 실험하였다. 평가조건은 13ml의 MR 유체를 용기에 담고 3000rpm으로 20분간 원심분리 후 1, 2차 상등액과 침강층의 발생 정도에 따라 분산 안정성을 조사하였다. 이를 위한 MR 유체의 기본 물성조건은 계면활성제로 succinic acid를 베이스 오일로 white oil을 특성첨가제로 침강방지제를 그리고 밀도 1.7 g/cc, 점도 500 cP를 선정하였다.

Fig. 10 (a)와 (b)는 기본 물성조건을 갖는 MR 유체의 원심분리 특성결과로, 그림 (a)는 파우더 크기가 5.52 μ m, (b)는 4.05 μ m이다. 여기서 1차 상등액은 파우더와 오일이 혼합되어 있는 혼합액을, 침강층은 MR 유체 내 파우더가 침전되어 고형화 된 상태를 의미한다. 5.52 μ m 파우더의 경우에 1차 상등액은 10.1ml, 침강층은 2.9ml이고 4.05 μ m인 경우에 1차 상등액은 10.5ml, 침강층은 2.5ml로 4.05 μ m보다 1차 상등액은 많고 침강층은 적다. 이는 파우더 크기가 분산특성에 영향을 준다는 것을 보여주는 것이다.

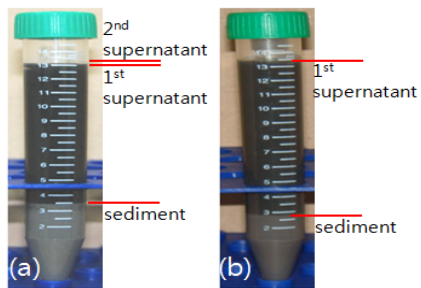
Fig. 11(a)는 기본 물성조건에서 계면활성제를 tartaric acid로 변경한 경우의 결과로, 2차 상등액은 0.2ml 생성되었고 1차 상등액은 9.8ml로 줄어들었다. Fig. 11(b)는 기본 물성조건에서 베이스 오일을 hydrocarbon oil로 변경한 경우의 결과로, 1차 상등액은 10.2ml, 침강층은 2.8ml이었다. MR 유체는 침전현상으로 침강층이 존재하게 되는데, 이 침강층이 적고 2차 상등액이 나타나지 않아야 분산 안정성이 우수하다고 할 수 있다. 계면활성제와 베이스 오일을 변경한 Fig. 11의 분산 안정성 결과는 기본 물성조건인 Fig. 10(b)보다 침강층이 많다. Fig. 10과 Fig. 11의 분산 안정성 결과로부터 계면활성제로 succinic acid를, 베이스 오일로 white oil을, 특성첨가제로 침강방지제를, 그리고 파우더의 크기가 작을 때 분산특성이 더 우수함을 확인하였다.

Fig. 12는 기본 물성조건에서 특성첨가제를 카본블랙으로 변경한 결과이다. 1차 상등액 8.8ml, 2차 상등액

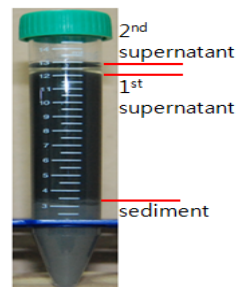
0.7ml, 침강층 3.5ml이다. 카본블랙은 침강방지제보다 2차 상등액을 많이 생성시켰다. 2차 상등액이 많다는 것은 베이스 오일의 혼합성능이 줄어들어 MR 유체의 분산 안정성이 낮아졌음을 나타낸다. Fig. 13은 기본 물성조건에서 특성첨가제를 분산제로 변경한 경우의 MR 유체의 원심분리 특성결과로, 1차 상등액 9.6ml, 침강층 3.4ml이다. 침강방지제를 사용한 경우의 침강층은 2.5ml로 분산제를 사용하게 되면 침강층이 약 36% 늘어난다. 분산제에서는 1차 상등액의 생성량이 감소되어 MR 유체의 분산특성을 저하시키는 것으로 확인되었다. Table 2는 MR 유체의 기본 물성조건을 변경한 Fig. 10, 11, 12, 13에 대한 1, 2차 상등액과 침강층의 생성량을 보여준다.



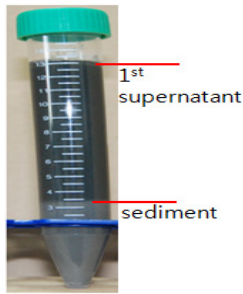
[Fig. 10] Evaluation of separation characteristics (particle 5.52 μ m (a), 4.05 μ m (b))



[Fig. 11] Evaluation of dispersion stability of tartaric acid (a) and hydrocarbon oil (b)

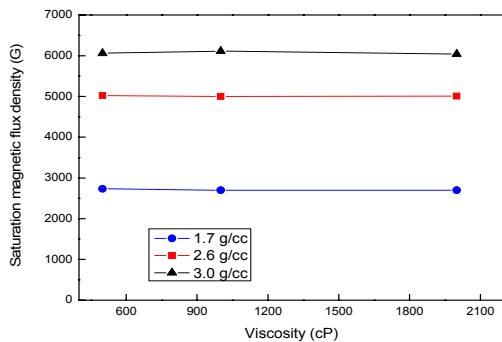


[Fig. 12] Evaluation of dispersion stability of carbon black

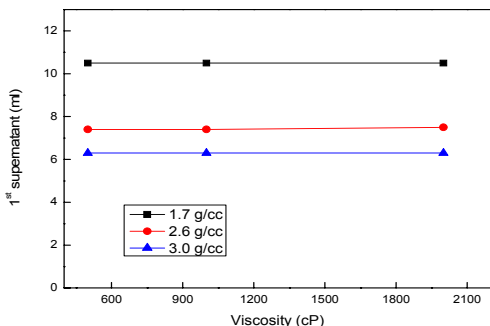


[Fig. 13] Evaluation of dispersion stability of dispersant

Fig. 14와 Fig. 15는 3종 밀도를 갖는 MR 유체의 점도를 500, 1000, 2000cP로 변경하면서 포화자속밀도와 1차 상등액을 비교한 것이다[6]. 밀도가 1.7g/cc에서 2.6g/cc와 3.0g/cc로 각각 증가하면, 포화자속밀도는 1.8배와 2.2배 증가를 그리고 1차 상등액은 30%와 66% 감소한다. MR 유체의 밀도가 일정할 때 자속밀도의 변화는 미미하며, 또한 MR 유체 제조환경이 정해지면 점도가 500cP에서 2000cP까지 변화하여도 1차 상등액의 생성량은 비슷하여 MR 유체의 침강 안정성이 유사함을 확인하였다. 높은 밀도에서 포화자속밀도가 높고 1차 상등액이 줄어드는 이유는 자성 파우더들이 결합특성과 중력에 의한 침강효과 때문으로 판단된다.



[Fig. 14] Magnetic flux density along viscosity change



[Fig. 15] 1st supernatant along viscosity change

[Table 2] Dispersion stabilities of MR fluids

Power size	1 st supernatant	2 nd supernatant	sediment	note *
5.52 μm	10.1ml	x	2.9ml	basic condition * (Fig. 10)
4.05 μm	10.5ml	x	2.5ml	
4.05 μm	9.8ml	0.2ml	2.9ml	tartaric acid (Fig. 11(a))
4.05 μm	10.2ml	x	2.8ml	hydrocarbon oil (Fig. 1(b))
4.05 μm	8.8ml	0.7ml	3.5ml	carbon black (Fig. 12)
4.05 μm	9.6ml	x	3.4ml	dispersant (Fig. 13)

4. 결론

MR 유체의 화학적 조성 변화에 대한 물리적 특성을 조사하기 위하여 MR 유체 216종의 점도, 밀도, 포화자속 밀도를 측정하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1) MR 유체의 제조과정에 대한 자성재료 기술과 계면활성제를 응용한 분산기술, 베이스 오일의 개질 기술 그리고 특성첨가제에 대한 자료를 확보하였다.
- 2) 동일한 화학적 조성에서 파우더 평균입경이 작은 경우에 분산 안정성이 더 우수하였다.
- 3) 계면활성제가 MR 유체의 분산특성에 미치는 영향은 뚜렷하였으며, succinic acid가 MR 유체의 자성 파우더와 더 친화성을 가졌다. 베이스 오일로 white oil, 특성첨가제로 침강방지제일 경우에 분산특성이 더 우수하였다.
- 4) MR 유체의 자속밀도 변화는 동일 밀도에서 비슷하며, 점도에 대한 MR 유체의 침강 안정성도 유사하였다.

References

- [1] J. H. Yoo, N. M. Wereley, Performance of a magneto-rheological hydraulic power actuator system", J. Intell. Mater. Syst. Struct., Vol. 15, pp. 847-858, 2004
DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X04044536>
- [2] H. Gavin, J. Hoagg, M. Dobossy, Optimal design of MR dampers, Proc. U.S.-Japan Workshop on Smart Structures for Improved Seismic Performance in Urban Regions, Seattle, WA, pp. 225-236, 2001
- [3] D. Goncalves, J. Koo, M. Ahmadian, A review of

the state of the art in Magneto-rheological fluid technologies (Part I : MR fluids and MR fluids models), The Shock and Vibration Digest, Vol. 38, No. 3, pp. 203-219, 2006

DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0583102406065099>

- [4] K. W. Lee, J. S. Kim, Y. C. Kwon, J. T. Kwon, G. S. Lee, Physical Characteristics of MR fluid according to chemical compositions, Proceedings of the SAREK 2012 Winter Annual Conference, pp. 547-549, 2012
- [5] J. S. Kim, K. J. Lee, K. W. Lee, D. S. Back, Y. C. Kwon, Basic Study on Magneto-Rheological Flow Analysis of MR Fluid in Magnetic Field, Proceedings of the SAREK 2011 Summer Annual Conference, pp. 1239-1241, 2011
- [6] D. S. Back, J. S. Kim, Y. C. Kwon, G. S. Lee, Study on Physical Properties of MR Fluid by Chemical Composition, Proceedings of the SAREK 2011 Summer Annual Conference, pp. 1242-1244, 2011

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

이 석 현(Seok-Hyun Lee)

[준회원]



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

<관심분야>

냉동공조, 전산해석

김 기 영(Ki-Young Kim)

[준회원]



- 2012년 2월 : 선문대학교 기계공학과 (공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학과 (대학원)

<관심분야>

냉동공조, 열교환기, 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, 자성유체, 전산유체