

MR 유체의 자기유동 특성에 대한 실험연구

이석현¹, 김기영¹, 백대성¹, 권영철^{1*}, 박삼진¹
¹선문대학교 기계공학과

Experimental study on Magnetic Flow Characteristics of MR Fluid

Seok-Hyun Lee¹, Ki-Young Kim¹, Dae-Sung Baek¹, Young-Chul Kwon^{1*}
and Sam-Jin Park¹

¹Dept. of Mechanical Eng., Sunmoon University

요약 MR 유체의 물리특성은 자기장에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서는 MR 유체의 자기장에 의한 유동변화를 실험적으로 조사하고자, MR 유체의 밀도와 점도를 변경하면서 자기장에 의한 유동 가시화와 전단응력 변화를 측정하였다. 이를 위해 밀도 3종, 점도 3종에 대한 MR 유체를 제조하였고 MR 유체 가시화 실험장치를 제작하였다. 자기장이 인가되면, MR 유체 파우더의 유동흐름은 띠를 형성하면서 자기장이 인가되지 않은 경우와는 다른 유동흐름을 보여주었다. 또한 전단응력은 인가전류와 밀도가 높을수록 더 크게 증가하였으며, 인가전류 2.0A에서 MR 유체의 밀도가 1300kg/m³에서 1700kg/m³로 변하면 전단응력은 33% 정도 증가하였다.

Abstract Physical characteristics of a magneto-rheological(MR) fluid can be influenced by a magnetic field. In the present study, the behaviors of MR fluid are visualized and the shear stresses are measured under the magnetic field for density 1.3, 1.5 and 1.7 g/cm³, and viscosity 100, 1000 and 10000cp. When the magnetic field is applied, particles of MR fluid are arranged along lines of magnetic field. It is observed that the flow pattern of MR fluid under the magnetic field is different from that of MR fluid without the magnetic field. Shear stress of MR fluids under the magnetic field changes significantly. Shear stress by the magnetic field increases the shape of a quadratic equation. When the density changes from 1300kg/m³ to 1700kg/m³ at 2.0A, the shear stress increases about 33%.

Key Words : Magnetic flow, Magnetic field, Magneto-Rheological fluid, Shear stress, Visualization

1. 서론

차량 및 정밀 시스템에 의해 유발진동을 줄이기 위한 능동적 진동제어 방법으로 MR 유체를 이용한 MR 댐 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. MR 댐퍼의 개발을 위해서는 MR 유체의 적용가능성과 운전특성을 체계적으로 조사하여야 한다. 그리고 MR 댐퍼의 정밀 운전 제어를 위해서는 자기장의 영향에 대한 MR 유체의 유체

거동을 정확히 이해할 필요가 있다. MR 유체는 외부로부터 인가되는 자기장의 세기에 따라 그 결합력이 변화하여 그에 상응하는 감쇄 전단력을 발생시킨다. MR 유체는 낮은 전류로도 우수한 성능구현이 가능하며 응답 반응속도가 빠르고 운전소음이 낮아 기존 진동저감 분야 외에 정밀분야까지 적용이 가능한 유체이다.

MR 유체에 관한 연구는 1990년대부터 여러 연구기관과 대학연구소를 중심으로 활발히 이루어지고 있

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.
본 논문은 대한설비공학회 2011 학술발표논문의 일부 데이터가 인용되었음
*Corresponding Author : Young-Chul Kwon(Sunmoon Univ.)

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

Received May 21, 2013

Revised (1st June 21, 2013, 2nd July, 3, 2013)

Accepted August 7, 2013

다.[1,2,3] Jeon 등[4]은 원관 내부의 자기장에 의한 MR 유체의 특징과 자연대류 현상을 연구하였다. 그러나 자기장에 의한 MR 유체의 유체거동에 대한 실험연구는 거의 보고되고 있지 않다. 최근 Kim 등[5,6]은 자기장이 형성된 채널 내의 밀도변화에 따른 MR 유체의 유동을 가시화하고 물리적 특성을 해석하고자 하였다.

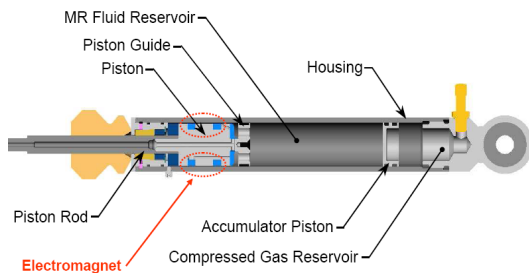
본 연구에서는 MR 유체의 자기장에 의한 유동변화를 실험적으로 조사하고자 MR 유체의 밀도와 점도를 변경하면서 자기장 세기 변화에 따른 MR 유체의 유동을 가시화하였고 전단응력을 측정하였다. MR 유체의 자기유동 현상에 대한 본 연구결과는 MR 댐퍼의 최적설계를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 실험조건 및 방법

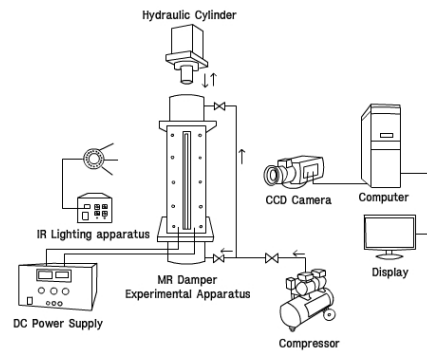
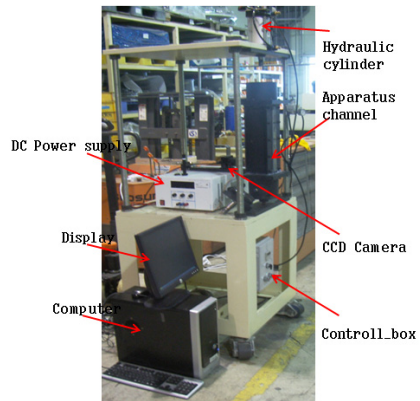
2.1 MR 유체 가시화

Fig. 1은 피스톤방식의 MR 댐퍼 구조로 MR 유체가 들어있는 실린더 본체, 자기장을 형성하는 코어부, 피스톤부로 구성되어 있다. 코어부에 자기장이 인가되면 오리피스를 흐르는 MR 유체에 전자기 현상이 발생하여 MR 유체의 점성력이 일시적으로 변한다.

Fig. 2는 MR 유체의 전자기 유동 현상을 관찰하기 위해 설계 제작된 MR 유체 가시화 실험장치와 개념도를 보여준다. 실험장치는 강화유리로 제작된 평판 채널, 공압실린더, CCD 카메라, 컴퓨터, 공기압축기, 적외선 조명, DC 전원공급장치 등으로 구성되어 있다. MR 유체는 가시화 댐퍼 상부에 설치된 공압실린더에 의해 피스톤이 움직이면서 가시화 채널을 흐르게 설계되어 있다. 공압실린더는 최대 9 bar까지 압력을 가할 수 있으며, 카메라는 x6 배율의 렌즈를 사용하였다. 또한 채널부에 자기장을 인가하기 위해 전류발생장치를 이용하였다. Table 1은 가시화 실험조건을 보여준다.



[Fig. 1] Structure of MR damper



[Fig. 2] Schematic of visualization apparatus

[Table 1] Experimental condition for flow visualization of MR fluid

Density (kg/m ³)	1300 / 1500 / 1700
Viscosity (cp)	100 / 1000 / 10000
Magnetic strength (T)	0 / 0.1 / 0.2 / 0.3 / 0.4
Flow pressure (bar)	5
Mixing time (min)	5
Flow temperature (°C)	25

2.2 실험조건 및 실험방법

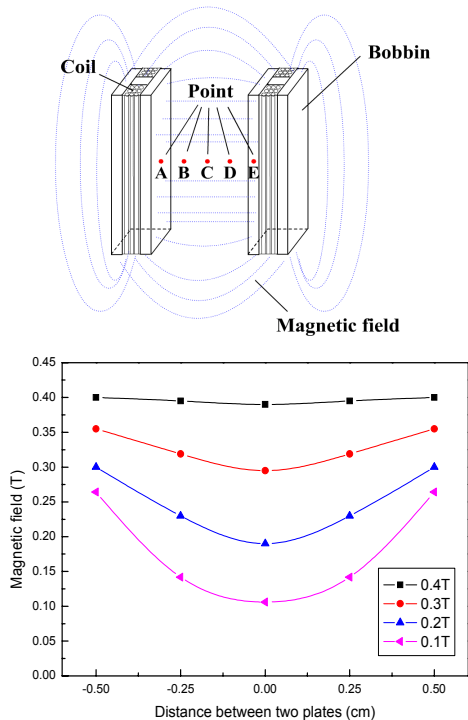
본 연구에 사용된 MR 유체는 밀도 3종(1300, 1500, 1700kg/m³), 점도 3종(100, 1000, 10000cp)으로 총 9종을 제조하였다. MR 유체의 화학적 조성은 강자성 철 파우더, 계면활성제, 베이스 오일로 구성되어 있으며, 특성 강화제로 지방산 아미드계 침강방지제가 첨가되었다. MR 유체의 밀도는 파우더 입자의 수가 많을수록 높아진다. MR 유체는 제작 시에 교반기의 회전수가 1500rpm 이상으로 약 60°C 이상에서 2시간 정도의 교반을 거쳐 제작된다. MR 유체는 자기적 특성을 구현하는 철 파우더의 표면에 계면활성제의 친수기를 배향시켜, 기능성 오일에

분산시킨 유체이므로 시간경과에 따른 침전효과가 존재한다. 이 침전현상을 상쇄시켜 유체상태를 동일 조건으로 회복시키기 위해 5분 동안 교반하였다. 온도는 MR 유체의 점도에 영향을 주므로 온도변화에 따른 실험이 필요하지만, 본 실험에서는 상온 25°C 에서 MR 유체의 자기장에 의한 유동현상을 실험하였다.

3. 결과

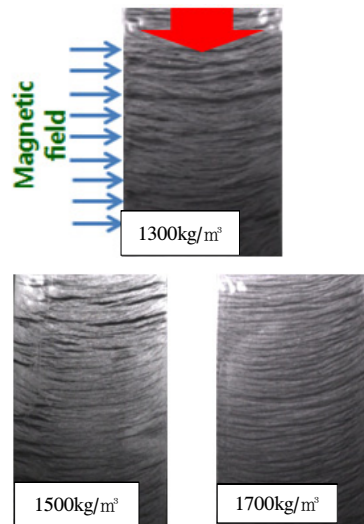
3.1 MR 유체 유동가시화

Fig. 3은 가시화 채널 내부의 자기장 세기 측정위치(5 점)와 각 점에서의 자기장 강도의 분포를 보여준다. 각 위치별로 자기장을 5회 측정하여 산술평균하였다. 자기장의 강도는 자기장이 형성되는 위치와 거리에 따라 변하며, 채널 내부 표면에서 자기장이 최대값을 나타내었다. 높은 자기장이 주어진 경우에는 두 채널 사이(A~E 점)의 자기장 크기가 거의 균일하였으며, 낮은 자기장에서는 채널의 중앙부근으로 갈수록 자기장 강도가 크게 낮아져 C점에서 가장 작은 값을 나타내었다.



[Fig. 3] Distribution of magnetic field between two plates

Fig. 4는 점도 1000cp와 자기장 강도 0.4T에서 밀도 1300, 1500, 1700kg/m³의 3종 MR 유체에 대한 자기유동 현상을 보여준다. 자기장의 영향으로 MR 유체 파우더 입자들끼리 자기장 방향(채널면의 수직방향)으로 띠를 형성하고 있음을 보여준다. 밀도 1500와 1700kg/m³의 MR 유체 유동패턴은 밀도 1300kg/m³의 유동패턴과 다르게 관찰되었다. 자기장이 인가되면 자기장의 세기가 강한 채널 표면에서부터 파우더 입자들이 빠르게 성장하기 시작하여 점차 채널 내부로 발달하면서 띠를 형성하였다. 즉, MR 유체 파우더들은 가시화 채널 벽면부근에서 강한 자기장으로 밀집도가 높아짐을 의미한다.

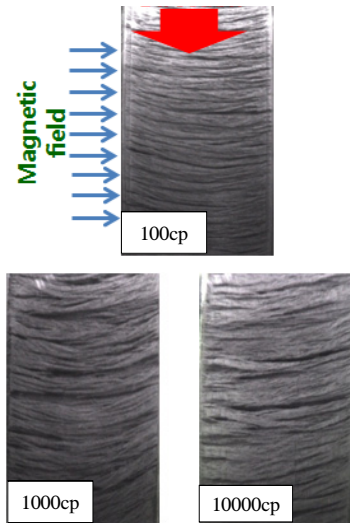


[Fig. 4] Flow visualizations on density change(magnetic strength 0.4T, viscosity 1000cp, density 1300, 1500, 1700kg/m³)

낮은 밀도의 MR 유체는 단위부피당 파우더의 수가 적다. 따라서 채널 중앙부근에 남아있는 파우더 입자들은 벽면부근보다 응집력이 약해 띠들이 불연속적으로 형성될 수 있음을 이해할 수 있다. 밀도가 커지게 되면 채널의 중앙 부근에 남아있는 파우더들의 자기장에 의한 결합성질이 증가하므로 채널 중앙부근에서도 띠들이 연속적으로 연결되며, 밀도가 더 증가하게 되면 채널 내부 전 유동구간에 띠가 강하게 형성된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 밀도 1300kg/m³와 자기장 강도 0.3T에서 점도 100, 1000, 10000cp의 3종 MR 유체에 대한 자기유동 현상을 보여준다. 동일 자기장하에서 점도 100cp에서 나타나는 유동흐름은 점도 1000과 10000cp의 유동현상과는 다르다. 자기장과 점도가 변하는 경우에 MR 유체의 유동구조는 fig. 4의 밀도가 변하는 결과와 다른 경향을 가진

다. 이는 높은 점도를 가지는 MR 유체 내 부유되어 있는 파우더들의 운동성과 낮은 점도를 가지는 MR 유체 내 파우더들의 운동성이 다르기 때문이다. 따라서 동일 자기장하에서, 점도가 낮은 MR 유체의 파우더는 채널 내의 전 유동구간에서 상대적으로 균일하게 나타남을 알 수 있으며, 점도가 높은 MR 유체에서는 파우더들 간의 밀집 현상이 관찰되게 된다.



[Fig. 5] Flow visualizations on viscosity change(magnetic strength 0.3T, density 1300kg /m³, viscosity 100, 1000, 10000cp)

Fig. 6은 밀도 1500kg/m³와 점도 10000cp에서 자기장의 변화에 대한 MR 유체에 대한 자기유동 현상을 보여준다. 채널 내부에 MR 유체가 흐르고 있지만, 자기장이 인가되지 않은 0T에서는 MR 유체의 유동흐름이 육안으로 관찰되지 않았다. 0.1T의 자기장이 인가되었을 때 채널 내에서 MR 유체유동이 관찰되었으며, 채널 내 MR 유체 파우더들이 띠 형상을 이루었다. 0.4T의 자기장에서

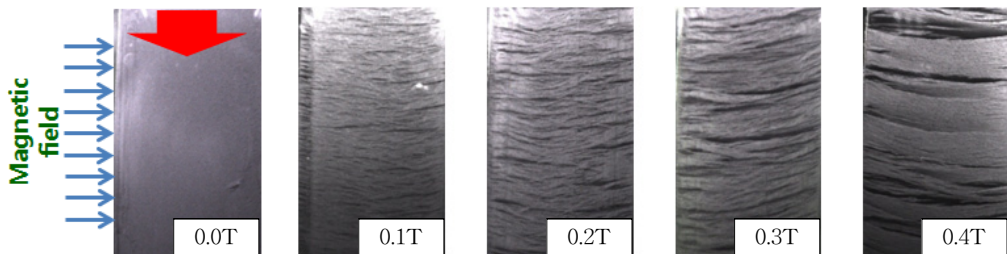
는 파우더들은 더 밀집되고 넓은 폭의 띠 형상으로 변화하였다. 이 결과는 자기장에 의해 생긴 띠 형상의 유동구조가 MR 유체의 유동흐름을 방해하여 MR 유체의 점성력을 증가시키는 역할을 한다는 것을 보여준다.

자기장 강도가 강해진다는 것은 동일한 면적 내에 자기력선의 수가 많다는 것으로, 강한 자기장에서는 MR 유체 파우더 입자들이 더 촘촘히 정렬되어 밀집된 띠 형상을 나타낼 것으로 판단된다. Fig. 6의 자기장 강도 0.4T인 자기유동 가시화 사진으로부터 매우 견고한 띠 구조의 유동을 관찰할 수 있는데, 이는 MR 유체 파우더가 강한 자기장에 의해 견고하게 밀집되었다는 것을 나타낸다. 자기장이 인가된 경우에 MR 유체가 유동을 하려면 MR 유체 파우더의 자기적 결합력을 극복해야 한다. MR 유체가 MR 댐퍼를 흐르기 위해서는 인가된 자기장에 의해 발생하는 자기력 이상의 유동압력이 요구되는데, 이 유동압력이 MR 댐퍼의 자기 감쇠력이다.

3.2 MR 유체의 전단응력 변화

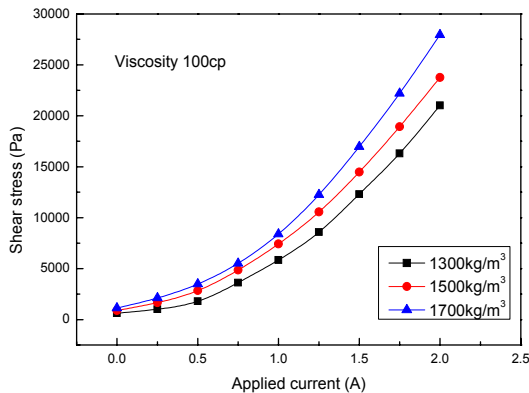
MR 유체의 유동 가시화 실험결과로부터, 자기장에 의해 형성되는 MR 유체의 띠 구조는 MR 유체의 점도가 자기장의 인가 유무와 강도에 따라 일시적으로 변화할 수 있다는 것을 보여준다. 이를 정량적으로 평가하기 위하여 회전식 점도계로 밀도 1300, 1500, 1700kg/m³, 점도 100cp의 3종 MR 유체의 전단응력을 측정하였다. 점도계의 회전수는 40rpm, MR 유체의 온도는 25℃, 전류는 0.25A씩 증가시켜 최대 2A까지 인가하였다.

Fig. 7은 인가전류에 따른 MR 유체의 전단응력 변화를 보여준다. 점도계에 전류를 가하면 MR 유체의 전단응력은 2차 함수의 형태로 증가하였다. 그리고 밀도와 인가전류가 높을수록 전단응력은 더 크게 증가한다는 것을 확인하였다. 인가전류가 0A에서 2A로 높아지면 전단응력은 밀도 1300kg/m³인 경우 34배(0A에서 617Pa), 밀도 1500kg/m³인 경우 27배(0A에서 878Pa), 밀도 1700kg/m³



[Fig. 6] Flow visualizations on magnetic strength change of MR fluid within plate channel (density 1500kg/m³, viscosity 10000cp, magnetic field strength 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, and 0.4T)

인 경우 24배(0A에서 1,140Pa) 정도 그리고 2A에서 밀도가 1300kg/m³에서 1700kg/m³로 증가하면 전단응력은 약 33% 증가한다. 이는 MR 유체에 포함된 파우더의 수와 밀접한 관계가 있으며, 높은 전류인가 시 많은 자성 파우더들이 자기장에 더 강하게 반응하므로 전단응력에 영향을 크게 미치는 것으로 판단된다. 그 결과 MR 유체의 걸보기 점성이 일시적으로 증가하여 유동흐름을 방해하는 것을 알 수 있다.



[Fig. 7] Shear stress of MR fluids (density 1300, 1500, 1700kg/m³ and viscosity 100cp).

4. 결론

자기장에 의한 MR 유체의 전자기 유동 현상을 이해하기 위하여, 평판 채널형 가시화장치를 제작하여 MR 유체 유동가시화 및 전단응력을 측정하여 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 자기장을 인가하면 MR 유체 파우더들은 유동의 수직방향인 자기장의 방향으로 배열하여 강한 띠 구조를 가졌다. 그리고 MR 유체에 발생한 띠 구조는 밀도변화에 따라 다르게 관찰되었다.
- (2) MR 유체의 점도에 따라서도 다른 유동구조를 보였다. 높은 점도에서는 MR 유체 파우더들의 분산성이 낮아 부분적으로 응집되는 유동을 나타내었다.
- (3) 전단응력은 인가전류에 따라 2차 함수의 형태로 표현되며, 밀도가 높을수록 전단응력의 증가폭은 더 크게 나타났다. MR 유체가 높은 자기장에 노출되면 띠 형상의 유동구조를 가지며 파우더들의 결속력이 증가하여 MR 유체의 전단응력이 증가하는 것을 알 수 있다.

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] E. C. Jeon, J. W. Park, T. H. Kim, S. Y. Kim, "A study on the rheology characteristics of magnetic fluids in a circular pipe", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 7, No. 2, pp.38~44, 2008
- [5] J. S. Kim, D. S. Back, K. W. Lee, Y. C. Kwon, G. S. Lee, S. B. Choi, "Flow Characteristics of MR Fluid by Magneto Field and Density", *Proceedings of the SAREK 2011 Winter Annual Conference*, pp. 403-405, 2011
- [6] 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

백 대 성(Dae -Sung Baek)

[정회원]



- 1990 년 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

박 삼 진(Sam-Jin Park)

[정회원]



- 1977년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1979년 8월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학석사)
- 1984년 1월 : Case Western Reserve Univ. (공학박사)
- 1984년 4월 ~ 1994년 2월 : 한국기계연구원 책임연구원
- 1994년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
기계설계, CAD

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, 열전달, 전산해석