

## 자성유체의 밀폐공간내의 열전달 특성에 관한 실험적 연구

박정우 · 서이수\* · 전철호

동아대학교 기계공학과, 부산시 사하구 하단동840 동아대학교, 604-714

박길문

조선대학교 기계공학과, 광주시 동구 서석동375 조선대학교, 501-759

(2003년 5월 15일 받음, 2003년 6월 12일 최종수정본 받음)

자성유체의 자연대류는 부력 이외에 자기체적력이 존재하기 때문에 뉴턴유체와 다르다. 본 연구에서는 좌측 및 우측 벽면이 고온 및 저온으로 설정된 정방형 케비티 공간내에서 자성유체의 자연대류를 실험하였다. 실험은 열전대에 의한 온도측정과 감온액정에 의한 가시화를 실시하였다. 그 결과 케비티 공간내 자성유체의 전열특성 및 외부에서 가하는 자장의 방향과 세기에 따라 자연대류가 제어됨을 알 수 있었다.

**주제어** : 자장, 자성유체, 감온액정, 자력, 영구자석.

### I. 서 론

자성유체(magnetic fluids)는 금속특유의 강자성 특성과 유체특유의 유동특성을 겸비한 유체이다[1]

자성유체에 대한 연구는 1930년대에 물리학자인 Bitter, Hamos 및 Tiessen 등에 의해서, 강자성체의 자구를 가시화하기 위한 강자성 콜로이드입자를 함유한 콜로이드용액이 사용되면서 시작되었다[2]. 그 후의 연구를 보면 자성유체에 관한 열전도율의 측정[3] 및 내부입자의 농도에 관한 영향[4-5]은 규명되었으나, 자성유체의 열역학적 성질과 열전도 및 대류에 관한 심도있는 연구가 되어 있지 않은 상태에 있다.

특히, 열의 제거에 있어서 부력의 영향을 무시할 수 없는 밀집형의 열교환기, 원자로의 냉각장치 및 반도체 등 복잡한 형상의 기계 내에 발생하는 대류열전달 문제에 있어서 자성유체가 효과적인 방법이 될 수 있으므로[6] 이 분야에 대한 보다 밀도있는 연구가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 실험적인 방법으로 작동유체를 자성유체로 하여 기본적인 이차원 유동인 정방형 cavity내에 있어서 가장 적절한 5곳을 선택하여 온도를 측정하고, 인가자장의 방향과 세기에 따라 자연대류 현상의 변화와 열전달특성을 연구하였다. 또한 자성유체가 흑색이어서 실제 흐름의 가시화가 곤란하기 때문에 감온액정(Thermosensitive Liquid Crystal) 필름에 의해 가시화하여, 자장이 자성유체의 자연대류에 미치는 열전달특성에 대하여 비교하였다.

### II. 실험 장치 및 방법

#### 2.1. 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 실험에 사용된 유체로는 물과 Water Base W-40를 선택하였다. 실험에 사용된 자성유체의 입자는  $Fe_3O_4$ 이고, 농도는 20%이다. 또한 25°C에서 밀도는  $1212 \text{ kg/m}^3$ 이고, 절대점도는  $1.06 \times 10^{-2} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 이다. 가열부의 물 공급을 제어하기 위해 제어변을 이용하였다. 또한 가열부의 온도 손실여부를 확인하기 위하여 온도계를 삽입하여 이를 확인하였다. 측정부는 한 번 50 mm(L=50 mm)의 입방체 cavity를 이용하였으며, 미주보는 두 벽면을 고온벽면과 저온벽면으로 하였다.

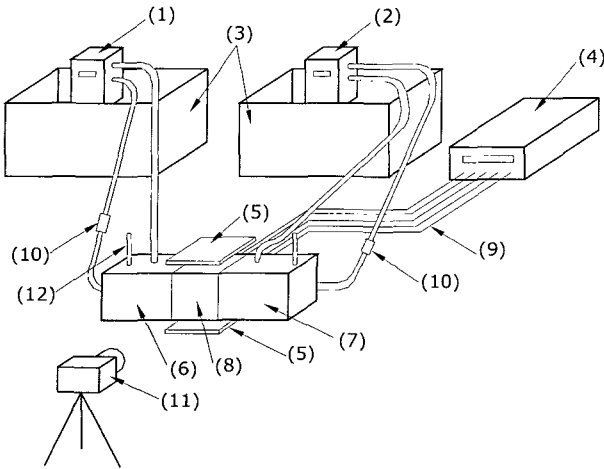
고온 및 저온의 벽면으로는 열전도계수가 큰 두께 0.2 mm의 동판을 이용하였다. 그 외의 벽면에는 두께 10 mm의 아크릴 판을 이용하였다. 또한, cavity의 전방벽면에서 온도분포를 가시화하기 위해 감온액정을 측정부에 부착하고, 후방벽면으로 열전대를 삽입하여 중앙단면의 내부온도를 측정하였다. 액정을 이용하여 온도 트레이서(tracer)로 흐름의 가시화를 실시하였고, 감온액정의 최상의 반응온도는 20에서 25°C였다. 영구자석의 자장의 세기는 Gauss meter로 측정하였다.

또한, 고온 및 저온벽면은 항온수 순환장치(Coolnics Circulator)에 의해 고온수와 저온수를 각각 순환시켜 동판 전체의 온도를 균일하게 하였다. 온도측정에는 해석기록계(Data Analysis Record)를 이용하였다.

#### 2.2. 실험방법

감온액정의 반응온도가 20에서 25°C이기 때문에 자성유체

\*Tel: (051)200-7647, E-mail: lsseo@donga.ac.kr



**Fig. 1.** Schematic diagram of experimental apparatus.  
 (1) Coolnics circulator (hot side), (2) Coolnics circulator (cold side),  
 (3) Temperature control units, (4) Analysis record, (5) Permanent magnet, (6) Thermostat (hot side), (7) Thermostat (cold side), (8) Thermo-sensitive liquid crystal film, (9) Thermocouples (K type), (10) Control valve, (11) Camera (12) Thermometer

의 온도를 고려할 필요가 있다. 따라서, 실내온도를 저온벽면 온도보다 낮게 유지시켰다.

저온의 항온수 순환장치에 저온벽면온도를 설정하고, 고온의 항온수 순환장치에 고온벽면온도를 설정한 후, 약 10분 정도 순환시켜 저온 측의 항온조를 20 °C로 유지시키고, 고온의 항온조를 25 °C로 유지시켰다. 항온조의 온도가 저온의 벽면 온도와 고온의 벽면온도로 유지되면 밸브를 열어 실험을 개시하였다.

실험은 감온액정의 색깔변화가 더 이상 일어나지 않는 시점까지 실시하였다. 해석기록계로 1분마다 셀 중앙 5곳의 온도를 측정하였으며, 감온액정의 변화는 카메라를 이용하여 5분마다 촬영하였다. 작동유체로는 수성 자성유체 W-40을 사용하여 Table I과 같은 조건으로 실험을 하였다. 여기서, 자장의 방향에 있어서 Down은 자석이 실험부의 아래쪽에 있을 경우로 중력과 같은 방향으로 인가됨을 의미하고, Up은 자석이 실험부의 윗쪽에 있을 경우로 중력과 반대 방향으로 인가

**Table 1.** Experimental conditions

Condition	Fluid	Strength (mT)	Direction
1	Water		
2	Magnetic	0	
3	Magnetic	20	Down
4	Magnetic	20	Up
5	Magnetic	40	Down
6	Magnetic	40	Up
7	Magnetic	90	Down
8	Magnetic	90	Up

됨을 의미한다. 자장은 영구자석(60 mm×60 mm×15 mm×3 개)을 이용하여 가하였고 자장의 크기는 실험부와 자석 사이의 거리로서 조정하였다. 또, 고온의 벽면온도는 25 °C, 저온의 벽면온도는 20 °C로 하여 5 °C의 온도차를 고려하였다.

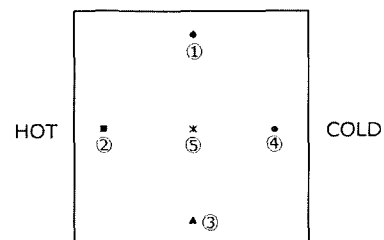
### III. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1. 해석기록계에 의한 온도분포

Fig. 2는 온도측정점을 나타낸 것이고, Fig. 3은 후방에서 주입한 해석기록계를 이용하여, 내부의 온도변화를 1분 간격으로 측정하는 것이다. 먼저, 모든 실험조건에 대해서 실험 초기에는 온도의 흐트러짐을 볼 수 있다. 이것은 측정부 내부의 온도가 아직 전체적으로 균일하지 않기 때문에 발생하는 현상으로 생각된다. 또한, 고온의 벽면온도를 순간적으로 일정하게 상승시킬 수 없어서 고온의 벽면온도가 정상으로 되기까지 다소 느린 온도변화를 나타낸다. 그러나, 이와 같은 현상은 실험 초기에만 나타나는 것으로 전체적으로 볼 때는 무시할 수 있다.

Fig. 3의 a)는 실험유체로 물을 사용한 것이다. 여기에서 측정점 ③은 완만한 기울기를 보이며 서서히 증가하다가 30분을 지나면서 거의 일정한 온도분포를 보이고 있다. 단열재로서 만약 열전도도가 낮다면 온도구배는 크며, 열전도도가 크다면 온도구배는 작다. 측정점 ②, ④, ⑤는 실험초기에는 온도분포가 어느 정도의 온도구배를 가지고 있으나, 20분을 지나면서 거의 일정한(22 °C) 온도분포를 보이고 있다. 측정점 ①은 실험초기에 급격한 구배의 온도분포를 나타내지만, 약 10분을 지나면서 그 구배는 서서히 완만해지며, 20분을 지나면 거의 일정한 온도(24 °C)가 된다. 이것은 셀 상부가 고온영역으로서 셀 하부의 저온영역에 비해 활발한 대류현상을 보이고 있는 것을 나타낸 것이다. 즉, 전형적인 정방향 공간 내 자연대류현상을 나타내고 있다.

Fig. 3의 b)는 인가자장이 없는 경우에 대한 자성유체의 온도분포를 나타낸 것이다. 여기서 보면, Fig. 3의 a)와 온도분포에 있어서 분포경향의 차이는 그다지 나타나지 않고 있다. 즉, 자연대류에 있어서 자성유체는 뉴턴유체의 온도분포와 같



**Fig. 2.** Temperature measuring points.

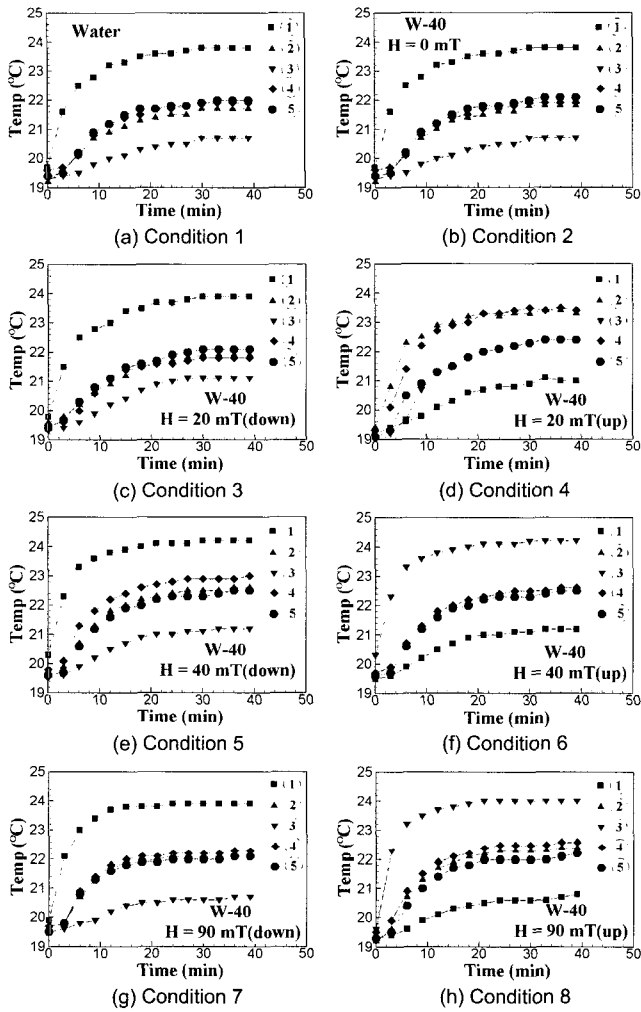


Fig. 3. Variation of temperatures with time.

은 경향을 나타내고 있다. Fig. 3의 c), e), g)는 인가자장의 방향을 중력방향으로 한 경우에 대해서 자장의 세기를 각각 20 mT, 40 mT, 90 mT로 한 것을 나타낸 것이다. 여기서, 각 경우에 대한 측정점 ①의 온도분포를 보면, 인가자장이 증가할수록 실험초기의 온도구배는 점점 커지고, 일정한 온도분포를 갖는 시간은 자장의 세기에 따라 점점 짧아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 중력방향의 인가자장이 증가할수록 셀 상부에 있어서의 고온부 발달이 더 활발해짐을 나타낸 것이다. 또한, 셀 중앙부 (측정점 ②, ④, ⑤)와 셀 하부 (측정점 ③)에서도 이와 같은 경향을 보이고 있다. 이것은 자장이 증가할수록 외관상 중력이 더 크게 작용하고 있기 때문이라 생각 된다.

Fig. 3의 d), f), h)는 인가자장의 방향을 중력과 역방향으로 한 경우에 대해서 자장의 세기를 각각 20 mT, 40 mT, 90 mT로 한 것을 나타낸 것이다. 40 mT(Fig. 3의 f)와 90 mT(Fig. 3의 h)를 각각 인가한 경우에는, 중력방향으로 자장을 인

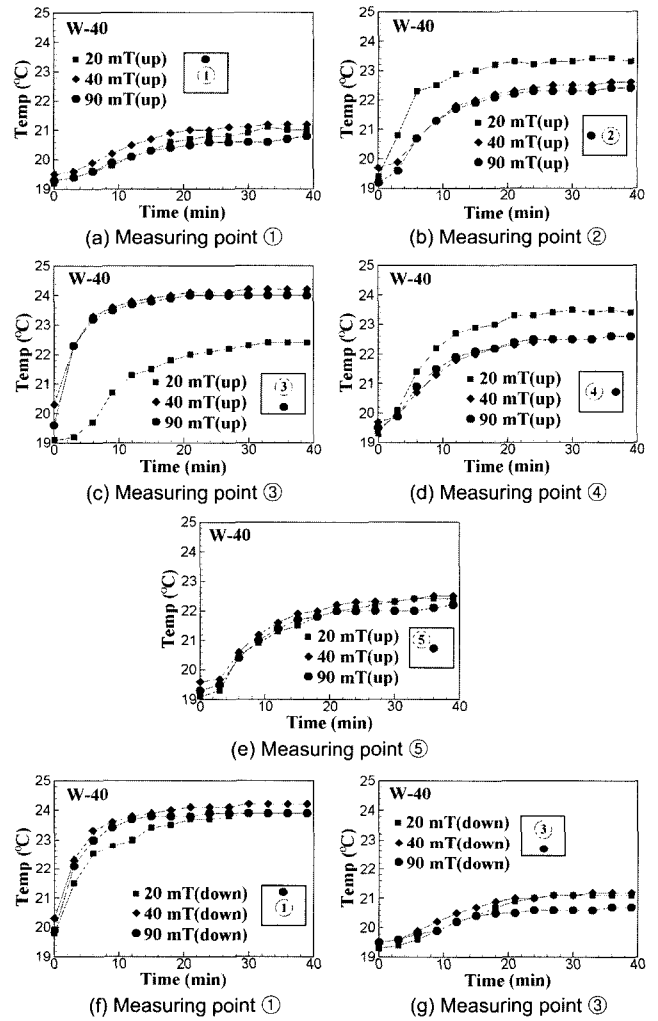


Fig. 4. Variation of temperatures with time.

가한 경우(Fig. 3의 e)와 g)와 비교하여 볼 때, 측정점 ①과 측정점 ③이 서로 바뀌는 역의 온도분포를 나타내었다. 이는 자장의 방향에 따라 현저한 온도 차이를 보이는 것으로 외관상 중력의 방향이 달라지기 때문이다. 하지만, 20 mT의 자장을 중력과 역방향으로 인가한 경우에는 중앙부에서 고온영역의 발달을 보였다. 이는 자장이 약해짐에 따라 자장보다는 중력이 외력에 영향을 미치지 때문에 셀 하부에서도 저온영역이 발달하고 있는 것을 말해준다.

Fig. 4는 셀 상부에서 자장을 걸고, 자장의 세기를 20 mT, 40 mT, 90 mT로 바꾸었을 때의 내부온도분포를 나타낸 것이다. Fig. 4의 a)는 측정점 ①에서의 온도변화를 나타낸 것으로, 조건 4, 조건 6, 조건 8에서 별 차이를 보이지 않았다. 즉, 측정점 ①은 자장에 의한 온도변화가 크지 않았다. Fig. 4의 b)는 측정점 ②에서의 온도분포를, Fig. 4의 d)는 측정점 ④에서의 온도분포를 각각 나타낸 것이다. 이 두 조건에서 40 mT와 90 mT를 가한 경우에 별 차이가 없었으나, 20 mT를

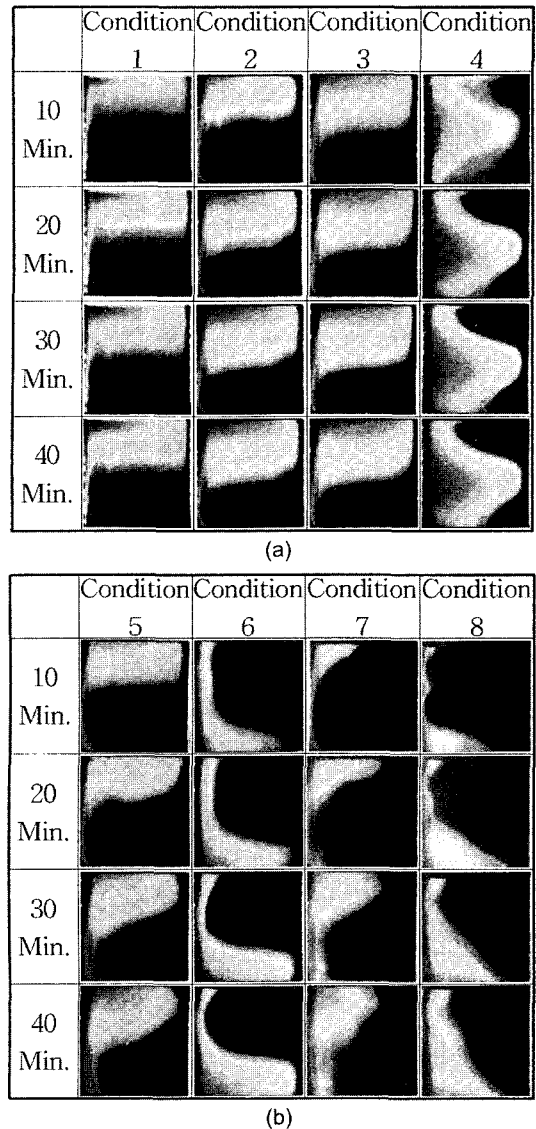
가한 경우에는 보다 빠른 고온부 발달을 보였다. 이는 자장이 약해짐에 따라 셀 하부에서 발달하는 고온부가 서서히 셀 상부로 이동하기 때문이라고 생각된다. 그리고 Fig. 4의 c)는 측정점 ③에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 다른 조건(40 mT, 90 mT를 가한 경우)보다 20 mT를 가한 경우의 온도가 낮아졌는데, 이것은 자장이 약하기 때문에 셀 하부에서의 고온부의 발달이 활발하지 않기 때문이라 생각된다. Fig. 4의 e)는 측정점 ⑤에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 이 경우도 측정점 ①과 마찬가지로 자장에 의한 온도 변화가 크지 않았다.

Fig. 4의 f)와 g)는 자장을 중력방향으로 인가한 경우, 측정점 ①, ③에서의 내부의 온도분포를 나타낸 것이다. Fig. 4의 f)는 Fig. 4의 a)와 측정점 ①에서 비교하여 볼 때 반대모양을 나타내었고, Fig. 4의 g)는 Fig. 4의 c)와 측정점 ③에서 비교하여 볼 때, 반대모양을 나타내었다. 이것은 자장을 중력방향으로 인가한 경우에는 저온영역이 셀 하부에서 발달하고, 중력과 역방향으로 자장을 인가한 경우에는 셀 상부에서 저온영역이 발달하기 때문이라 생각된다.

**3.2. 액정에 의한 벽면온도분포**

액정은 고온에서 저온으로 청, 녹, 황, 적, 흑색으로 변화한다. Fig. 5의 a)는 조건 1에서 조건 4까지를, b)는 조건 5에서 조건 8까지에 대한 벽면온도변화를 나타낸 것이다. 조건 1의 경우 시간이 지남에 따라 고온부 발달이 활발하지만, 20 분이 지나면서 점차 일정한 양상을 보이고 있다. 또한, 정상 상태가 되면 중앙부를 기준으로 해서 고온과 저온영역이 대칭적인 것을 볼 수 있다. 즉, 보통 뉴턴유체의 자연대류과정을 나타내고 있다. 조건 2는 인가자장이 없는 경우에 대한 자성유체의 자연대류에 대한 것으로, 전반적인 경향은 물의 경우와 별 차이가 없다. 그러나, 고온과 저온 영역경계의 구배가 조건 1의 경우 거의 수평인 반면, 조건 2의 경우는 완만한 경사를 가지고 있다. 또한, 우측상부와 좌측하부에 약간의 역전된 구배를 보이는 부분이 있다. 이것은 자성유체의 경우 뉴턴유체보다 점도가 크기 때문에 벽면의 영향이 더 크게 나타나는 것으로 생각된다. 조건 3(중력방향으로 20 mT를 인가)의 경우를 보면, 그 전반적인 경향은 실험부 중심을 기준으로 대칭성을 이루고 있으나, 조건 2에 비해 전체적으로 고온영역이 더 큰 것을 알 수 있다. 이것은 인가자장이 0 mT에서 20 mT로 증가하여 외관상의 중력이 더 커졌기 때문이라 생각된다. 조건 5(중력방향으로 40 mT를 인가)를 보면 정상 상태에서 고온영역과 저온영역이 반대편 부분까지 도달하지 못하는 것을 볼 수 있다. 이는 더 큰 인가자장에 의해 외관상의 중력이 더욱 증가하여 고온영역의 대류를 억제하기 때문이라 생각된다. 또한, 조건 7은 인가자장이 더욱 큰 경우

(중력방향으로 90 mT를 인가)로서 외관상의 중력이 더욱 커지게 된다. 따라서, 고온영역은 조건 5의 경우보다 더 발달하지 못하는 것을 볼 수 있다. 조건 4는 인가자장의 방향이 중력과 역방향으로 20 mT가 인가된 경우이다. 여기에서는 고온영역이 고온벽면 중앙 부분에서 시작되어 발달해 가는 것을 볼 수 있다. 이것은 자장의 영향으로 인해 외관상 중력의 방향이 하부에서 상부로 향하게 되기 때문에 저온영역이 상부에서 발달하게 되고, 이로 인해 고온영역이 셀 상부의 저온영역 밑에서 발달했기 때문이라고 생각된다. 즉 부력의 항과 자장의 항이 균형을 유지하여 자연대류가 일어나지 않게 되며, 따라서 내부유동을 외부에서 제어하는 것이 가능하게 된다. 조건 6(중력과 역방향으로 40 mT를 인가)의 경우를 보면,



**Fig. 5.** Variation of temperature distributions with time: a) Condition 1, 2, 3, 4, b) Condition 5, 6, 7, 8.

조건 5의 온도분포와는 완전히 역전된 것을 볼 수 있다. 실제로 중력의 방향과 반대인 외관상 중력이 더 커짐에 따라서 저온영역이 상부에서 더욱 발달하고 고온영역은 하부에서 발달하는 것을 볼 수 있다. 그리고, 조건 8의 경우는 인가자장이 더욱 큰 경우로서 시간이 경과함에 따라 하부에서 고온영역이 조건 6의 경우보다 발달하지 않는 것을 볼 수 있다. 이것은 조건 7에서의와 같이 자장의 세기가 크게 되어 대류가 억제되기 때문이라 생각된다.

또한, 각 조건에서 열유동 현상의 변화가 없을 때의 상태를 정상상태로 보고 비교하여 보면, 조건 5와 조건 6은 중앙 부분에서 상하가 대칭임을 알 수 있고, 조건 7과 조건 8도 중앙 부분에서 상하가 대칭임을 알 수 있다. 그러나, 조건 3과 조건 4는 상하가 서로 대칭이 아니다. 이것은 인가자장이 약하여 중력이 외력에 영향을 미치지 때문이라 생각된다.

#### IV. 결 론

자성유체의 자연대류를 알아보기 위해 감온액정을 이용해 벽면의 온도분포를 가시화하고, 해석기록계를 이용해 내부의 온도변화를 측정하여 인가자장이 유체 유동에 미치는 영향을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 감온액정을 이용해 벽면의 온도분포를 가시화 함에 따라 인가자장이 자성유체의 자연대류에 미치는 영향을 정성적으로 파악할 수 있었다.
- (2) 자기체적력이 중력과 같은 방향으로 작용하는 경우에는 외관상 Grashof 수가 증가한 것 같은 온도분포를 나타내었다.

(3) 자기체적력이 중력과 반대 방향으로 작용하는 경우에는 하부에서 고온영역이 발달하고, (2)의 경우와 비교해 볼 때, 상하가 역전된 온도분포를 나타내었다.

(4) 부력의 항과 자장의 항이 균형을 유지할 때에는 고온벽면의 중심에서 고온부의 발달이 시작되었다.

(5) 내부의 온도분포는 벽면의 온도분포와 같은 경향을 나타내므로 벽면의 온도분포를 조사함으로써 내부의 온도분포 상태를 추정할 수 있다.

(6) 자성유체의 자연대류는 인가자장에 의해 제어할 수 있다.

#### 감사의 글

본 논문은 2002년도 동아대학교 학술연구비(생산기술연구소)지원에 의하여 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

- [1] 神山新一, 磁性流 入門, 産業圖書, 日本 (1989), pp. 5-16.
- [2] 武富 荒, 近角聰信, 磁性流體의基礎と應用, 初版, 日刊工業新聞社, 東京 (1988), pp. 3-97.
- [3] Tanahashi T., 日本機械學會論文集, **53**(487), 865(1988).
- [4] Kamiyama S., 日本機械學會論文集, **53**(494), 3009(1988).
- [5] Kamiyama S., 日本機械學會論文集, **61**(588), 2954(1995).
- [6] 박정우, 한국자기학회논문집, **13**(1), 41(2003).
- [7] 박정우, 大韓機械學會論文集, **23**(1), 25(1999).
- [8] Kirk D. Hagen, Heat Transfer with Application, Prentice-Hall, Inc. (1999), p. 23.
- [9] J. P. Holman, Heat Transfer, 8/ed., The McGraw-Hill Comp. (1997), p. 9.

## Experimental Analysis on the Heat Transfer Characteristics of Magnetic Fluids in a Cubic Cavity

**Joung-Woo Park, Lee-Soo Seo<sup>\*</sup>, and Chel-Ho Chen**

*Department of Mechanical Engineering, Donga Univ. Hadan840, Saha-gu, BuSan 604-714, Korea*

**Gil-Moon Park**

*Department of Mechanical Engineering, Chosun Univ. Susuk-dong840, Dong-gu, Gwangju 501-759, Korea*

(Received 15 May 2003, in final form 12 June 2003)

Natural convection of a magnetic fluid is different from that of Newtonian fluids because magnetic-body force exists in addition to gravity and buoyancy. In this paper, natural convection of a magnetic fluids (W-40) in a cubic cavity was examined by experimental method. One side wall was kept at a constant temperature (25 °C), and the opposite side wall was also held at a constant but lower temperature (20 °C). The magnetic fields of various magnitude were applied up and down by permanent magnets. We measured temperatures at 5 points which are the most suitable places in cavity by the analysis record. The thermo-sensitive liquid crystal film (R20C5A) was utilized in order to visualize wall-temperature distributions. Several kinds of experiments were carried out in order to clarify the influence of direction and intensity of magnetic fields on the natural convection. It was found that the natural convection of a magnetic fluids could be controlled by the direction and intensity of the magnetic fields.

**Key words :** Magnetic fields, Magnetic fluids, Thermosensitive liquid crystal film, Magnetic force, Permanent magnet.