

# 이중원관내 자성유체의 자연대류에 관한 실험적 연구

박정우\* · 이준희\*\* · 서이수\*\*\*

## Experimental study of natural convection for magnetic fluids in annular pipes

Joung-Woo Park, Jun-Hee Lee and Lee-Soo Seo

Key Words: Natural convection(자연대류), magnetic fluid(자성유체), annular pipes(이중원관), magnetic field(자장), Thermo-sensitive liquid crystal film(감온액정)

### Abstract

The applications of magnetic fluid can be normally made by 1) using changes of a property of matter caused by applied magnetic field; 2) preserving magnetic fluid at a certain position or in a magnetic fluid keeping the body in a floating condition; 3) controlling the flow of magnetic fluid by means of magnetic field. However, these are usually made by using their methods together.

In this study, the natural convection flow of a magnetic fluid in annular pipes is experimentally analyzed. High temperature is kept constantly inside of a circular pipe of experimental model, on the other hand, low temperature is kept constantly outside of it. In experiments, several cases are carried out in order to clarify the fluence of direction and intensity of magnetic fields on the natural convection of magnetic fluid. Therefore magnetic fields are applied in various intensity and up and down directions by permanent magnets.

### 1. 서론

자성유체는 금속특유의 강자성체와 유체특유의 유동특성을 함께 갖는 유체이다. 그 구조는 계면활성제에 의해 특수한 표면처리를 한 콜로이드 크기의 강자성 미립자를 물이나 케로신 등의 액상 중에 안전하게 분산시킨 콜로이드(colloid)상태의 현탁액(suspension)이다<sup>(1)</sup>. 즉, 원심력이나 자장을 가하여도 분리가 일어나지 않고 마치 단상의 유체가 걸보기에 강한 자성을 갖는 것처럼 거동하는 고액혼상유체이다.

자성유체의 연구는 제법과 물성, 기초학문분야로서의 자성유체역학, 그리고 여러 가지 응용측면의 개발에 있어서 확실한 진전을 보여주고 있다. 그러나 아직 학문체계로서는 미완성의 부분이 많고 또 새로운 응용측면의 개발에 있어서도 충분한 검토가 되어지고 있다고는 할 수 없다. 그 의미에서도 금후 더욱 진전이 전망되는 연구 분야라고 할 수 있다. 그러나, 기초학문분야로서의 자성유체에 관한 연구는 그 미시적 구조가 복잡하기 때문에 이론적으로도 실험적으로도 아직 충분한 성과를 얻지 못하고 있다<sup>(2)</sup>.

자성유체의 응용에 대한 기초가 되는 작동원리는 1)인가자장에 의해 나타나는 자성유체의 물성 변화를 이용하는 것, 2)비균일자장 또는 자장분포의 형성에 따라서 자성유체를 임의의 위치에 보존시키거나 혹은 자성유체중에 물체를 부유상태로 유지시키는 것과 3)자성유체의 유동을 자장에

\* 회원, 동아대학교 기계공학과 대학원

\*\* 회원, 동아대학교 기계공학과 대학원

\*\*\* 회원, 동아대학교 기계공학과

의하여 제어하는 것 등으로 분류할 수 있고, 현재 응용측면에서 이 원리들의 복합적인 연구가 진행되고 있다<sup>(3,4,5)</sup>. 또한, 자성유체의 열전달에 관한 연구가 최근에 시작되고 있다<sup>(6,7)</sup>. 즉, 공학적 응용에 있어서 밀집형 열 교환기 및 반도체 등과 같이 유체의 유속이 느리고, 표면과 주위 유체와의 밀도 차에 의한 부력의 영향을 무시할 수 없는 형상의 기기 내에 발생하는 열전달 문제에 있어서 열의 효과적인 제거에 새로운 방법이 요구된다<sup>(8)</sup>.

본 연구에서는 자성유체를 이용한 열의 제거에 관한 기초연구로서 자성유체의 자연대류에 미치는 외부자장의 영향에 대해 연구하고자 한다. 특히, 기본적인 이중원관내 자성유체의 유동에 있어서 인가자장의 방향과 세기에 따른 자연대류 현상을 실험적 방법으로 연구하고자 한다. 또한, 본 실험에서는 자성유체의 불투명한 색깔(암갈색)에 의해 실제 흐름의 가시화가 곤란하다. 따라서, 감온액정(Thermo-sensitive liquid crystal film)을 사용하여 인가자장이 자연대류에 미치는 전열유동특성에 대하여 연구하고자 조사한다.

## 2. 본 론

### 2.1 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 1에 나타내었다. 실험에 사용된 작동유체는 물과 자성유체(Water Base W-40)를 사용하였다. 또한, 실험의 고온부와 저온부에 대한 온도조절은 각각 침수 전열기(Circulation)를 사용하였다.

이중원관은 바깥원관( $d=50\text{mm}$ )을 저온부로 하고, 안쪽원관( $d=10\text{mm}$ )을 고온부로 하였다. 안쪽원관에는 작은 관을 하나 더 넣어서 관벽면온도를 균일하게 주도록 하였다. 자성유체에 대한 자장은 영구자석( $80\text{mm} \times 80\text{mm} \times 10\text{mm} \times 6\text{개}$ )을 사용하여 실험부와의 간격을 조절하여 인가하였다. 또한, 그 세기는 Gauss meter를 이용하여 측정하였고, Table 1에 나타내었다. 본 실험에 사용된 인가자장의 크기는  $20\text{mT}$ ,  $28\text{mT}$  및  $35\text{mT}$ 이다. 실험의 검사체적내의 자연대류는 2차원이고, 이 경우에 있어서 내부온도분포는 실험부 앞쪽 벽면의 온도분포와 거의 유사하다. 따라서, 본실험에서는 불투명한 암갈색의 자성유체를 가시화하기 위해

서 실험부 앞쪽 벽면에 온도변화에 반응해서 색깔변화를 보이는 감온액정을 부착하였다. 가시화에 대한 액정필름의 촬영은 디지털 카메라(C-3030ZOOM)를 사용하였고, 자장으로 인한 시스템 에러를 예상하여 거리( $50\text{cm}$ 이상)를 두고 줌(zoom)으로 사진을 캡처하였다.

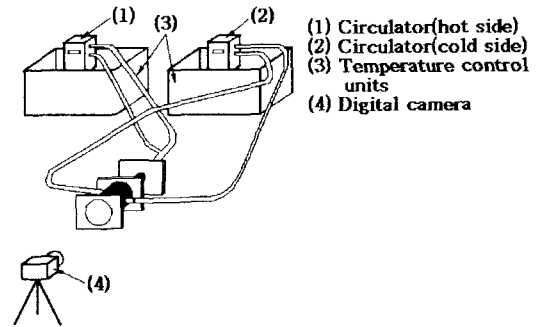


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

본 실험에서의 경계조건은 Fig. 2에 나타내었다. 실험부는 이중원관으로 안쪽원관을 고온측(HOT)으로 하고 바깥원관을 저온측(COLD)으로 설정하였다. 또한, 감온액정의 온도범위 및 상온을 고려하여 고온측의 온도는  $25^\circ\text{C}$ 로 하고 저온측의 온도는  $20^\circ\text{C}$ 로 설정하였다.

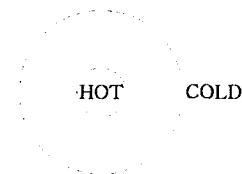


Fig. 2 Boundary condition

실험은 저온온도와 고온온도를 세팅하고 침수 전열기를 작동시켜 영구자석의 위치를 변화시키면서 실시한다. 또한, 실험의 종료는 감온액정의 정색(color development)변화가 일어나지 않는 시점까지 하고, 감온액정의 색깔변화를 시간(분)간격으로 디지털 카메라(C-3030ZOOM)로 촬영하였

다. 즉, 실험은 작동유체가 물과 자성유체(Water Base W-40)일 경우에 대해서 하였고, 자성유체의 경우 인가자장의 세기와 방향에 따라 각각 하였다. 또한, 디지털카메라에 의해 캡처된 사진은 바로 칩에 저장되어 컴퓨터프로그램(CAMEDIA Master2.0)을 사용하여 재생하였다.

Table 1 Result of magnetometry  
( unit : mT )

N \ D	1	2	3	4	5	6	average
5 mm	50	40	43	41	45	50	45
10 mm	34	44	50	47	43	35	40
15 mm	30	35	38	37	35	30	35
20 mm	25	30	33	31	29	25	28
30 mm	17	20	23	22	20	17	20
40 mm	13	15	17	16	15	13	15

Table 2 Experimental conditions

Condition	liquid	Strength	Direction
1	Water	0 mT	
2	Magnetic fluid	0 mT	
3	Magnetic fluid	20 mT	Down(↓)
4	Magnetic fluid	28 mT	Down(↓)
5	Magnetic fluid	35 mT	Down(↓)
6	Magnetic fluid	-20 mT	Up(↑)
7	Magnetic fluid	-28 mT	Up(↑)
8	Magnetic fluid	-35 mT	Up(↑)

### 3. 실험결과 및 검토

본 실험에서의 실험조건은 Table. 2에 나타내었다. 조건1은 작동유체로서 보통 뉴턴유체로 취급이 용이한 물을 사용한 것이고, 조건2는 자성유

체에 자장을 가하지 않은 경우이다. 그리고, 조건3에서 조건5는 영구자석이 실험부 아래쪽에 위치해 있는 것으로 중력방향으로 자장을 인가한 경우이고, Table. 1에서 나타냈듯이 실험부와의 거리를 조절함에 따라 각 실험조건에서 인가자장의 크기는 20mT, 28mT, 35mT를 나타낸다. 또한, 조건6에서 조건8은 영구자석이 실험부 윗쪽에 위치해 있는 것으로 중력과 반대방향으로 자장을 인가한 경우이고, 각 실험조건에서 인가자장의 크기는 -20mT, -28mT, -35mT를 나타낸다. 여기서, 인가자장의 크기가 陰(-)으로 나타난 것은 중력과 반대방향을 의미한다.

가시화를 위한 감온액정의 색깔은 저온에서 반응온도의 증가에 따라 黑, 赤, 黃, 綠, 靑으로 변화한다.

본 실험에서의 가시화는 실험부내의 자연대류에 관한 것이지만 유동의 양상이 거의 2차원이기 때문에 실험부 전방벽면의 온도분포가 내부와 거의 유사하다고 생각한다. 따라서, 실험부 전방벽면에 부착된 감온액정의 반응온도에 따른 색깔변화에 의해서 실험부 내부의 열유동의 형상을 알 수 있다.

조건1과 조건2는 물과 인가자장이 없는 경우의 자성유체에 대한 실험결과로서 Fig. 3에 나타내었다. 이 경우 시간진행에 따른 온도분포를 보면 그 경향이 유사한 것을 볼 수 있다. 즉, 자성유체에 자장을 인가하지 않은 경우의 자연대류는 뉴턴유체와 같은 경향을 보인다고 할 수 있다.

Fig. 4과 Fig. 5는 자성유체에 자장을 인가한 경우에 대한 것으로 실험이 시작된지 30분이 경과하면 더 이상 온도변화를 보이지 않는 정상상태가 되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4은 조건3에서 조건5를 나타낸 것으로 자장을 중력방향으로 인가한 경우에 대해서 나타낸 실험결과이다. 여기서 보면, 인가자장의 방향이 중력과 같은 경우, 시간이 진행됨에 따라 고온영역이 실험부의 상부로 발달하는 것을 볼 수 있다. 또한, Fig. 4의 조건3에서 조건5까지의 정상상태(30min)를 보면 인가자장이 크게 될수록 고온부 영역은 실험부의 상부에서 더 좁아지고, 저온부 영역은 실험부의 하부에서 더 넓어지는 것을 볼 수 있다. 이것은 자장이 중력과 같은 방향으로 인가되면 검사체적 상부와 하부의 밀도차가 더 크게된다. 따라서, 실험부 하부에서 상부로 향

하는 부력은 크게되고, 고온부 영역은 좁아지게 된다. 또한, 인가자장의 크기가 증가할수록 그 영향은 더 크게 되고, 마치 외견상 중력이 더 크게 되는 것과 같은 유동을 보인다.


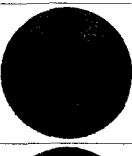
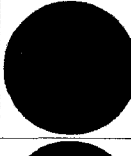





	Condition 1	Condition 2
	Water	Magnetic fluid
5 min		
10 min		
20 min		
30 min		

Fig. 3 Experimental result 1

Fig. 5는 조건6에서 조건8을 나타낸 것으로 자장을 중력과 반대방향으로 인가한 경우에 대해서 나타낸 실험결과이다. 여기서 보면, 인가자장의 방향이 중력과 반대일 경우, 시간이 진행됨에 따라 고온영역이 실험부의 하부로 발달하는 것을 볼 수 있다. 또한, 인가자장이 크게 될수록 고온부 영역은 실험부의 하부에서 더 넓어지는 것을 볼 수 있다. 이것은 자장이 중력과 반대방향으로 인가되면 검사체적 상부의 밀도는 크게되고 하부의 밀도는 작게된다. 즉, 인가자장에 의한 부력은 상부에서 하부로 향하게 되고, 고온부 영역은 검사체적 하부에서 발달하게 된다. 또한, 인가자장의 크기가 증가할수록 부력의 영향은 더 크게 되고, 마치 외견상 중력의 방향이 하부에서 상부로 향하는 것과 같은 유동을 보인다.



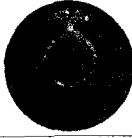
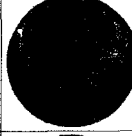








	Condition 3	Condition 4	Condition 5
	20mT	28mT	35mT
5 min			
10 min			
20 min			
30 min			

Fig. 4 Experimental result 2

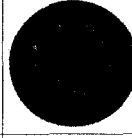


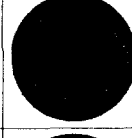


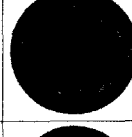





	Condition 6	Condition 7	Condition 8
	-20mT	-28mT	-35mT
5 min			
10 min			
20 min			
30 min			

Fig. 5 Experimental result 3

특히, Fig. 5의 조건6을 보면 고온영역의 발달

이 상하가 아닌 좌우로 발달하는 것을 볼 수 있다. 이것은 중력과 자장에 의한 부력이 균형을 이루고 있는 것으로 마치 외견상 무중력상태에서의 유동을 보이고 있다. 그리고, 인가자장이 -35mT인 Fig. 5의 조건8을 보면 자장의 영향으로 인한 부력이 더욱 크게 되어 고온영역이 거의 실험부의 하부에서 발달한 것을 볼 수 있고, 이것은 자장을 인가하지 않은 Fig. 3의 조건2와 비교해보면 상하가 역전된 형상을 보이고 있다. 즉, 이 경우 자장의 의한 부력에 의해 중력의 영향이 거의 상쇄된 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

이중원관내 자성유체의 자연대류에 관한 실험을 한 결과 이하의 결론을 얻었다.

1. 자성유체는 인가자장이 없는 경우에 뉴턴유체와 같은 거동을 보인다.
2. 자성유체에 인가하는 자장의 세기와 방향은 고온영역 발달에 영향을 준다.
3. 이중원관내 자성유체의 자연대류는 인가자장에 의해 외견상 중력이 증감되는 것과 같은 형상을 보인다.
4. 자성유체의 이중원관내 자연대류현상은 인가자장의 세기와 방향에 따라 제어될 수 있다.

#### 참고문헌

- (1) 神山新一, 1989, “磁性流体入門”, 産業圖書, pp. 5~16.
- (2) 棚橋隆彦, 1995, “電磁熱流体の數値解析”, 森北出版株式會社, pp. 1~30.
- (3) 下田正 外 2名, 1989, “物理學最前線”, 共立出版株式會社, pp. 76~90.
- (4) 武富, 1988, “磁性流体基礎と應用”, 日刊工業新聞社, pp. 123~136.
- (5) 東辻浩夫, 1989, “教養の物理シリーズ(電磁氣學)”, 培風館, pp. 108~126.
- (6) Y. L. Raikher, 1983, “The magnetization curve of a textured ferrofluid”, J. of M.M.M., 39, pp. 11~13.
- (7) S. Kamiyama, 1983, “Pipe flow resistance of magnetic fluids in a nonuniform transverse magnetic field”, J. of M.M.M., 39, pp. 23~26.
- (8) R. MOREAU, 1990, “Magneto hydrodynamics”, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, pp. 1~59.
- (9) L. S. Seo, 1990, “Propagation of surface waves of magnetic fluids in traveling magnetic fields”, J. of M.M.M., 85, pp. 167~170.
- (10) J. W. Park and L. S. Seo, 1999, “A study on the flow behavior of magnetic fluids in a circular pipe with a vertical magnetic field”, KSME, 23-1, pp. 25~32.