

자성유체의 물리적 성질과 그의 응용

민 만 기

고려대학교 기계공학과 교수



● 1935년생
● 空氣調和 및 冷凍을 專攻하였으며, 熱負荷, 에너지解析 및 에너지所要量等 에너지節約分野 그리고 熱펌프의 全負荷性能 및 季節性能等에 關心을 가지고 있다.

서 이 수

동아대학교 기계공학과 교수



● 1952년생
● 유체공학을 전공하였으며, 특히 磁性流體의 유동특성과 그 응용에 關心을 가지고 있다.

1. 머리말

磁性流體는 金屬特有的 強磁性體와 流體特有的 流動特性을 兼備한 流體이다. 天然的으로는 存在하지않는 人工流體로서 1960年代 美國의 NASA의 Papel⁽¹⁾博士가 磁石을 利用해서 無重力下에서 로켓의 液體燃料을 制御할 目的으로 開發研究가 行해진 것이 계기가 되었다. 그 이래 지금까지 없던 유체로서 世中에 관심을 모으게 된 것은 宇宙服內에 1氣壓를 유지하면서 頭部의 헬멧을 자유롭게 回轉 시키기 위해 磁性유체가 使用되면서 부터라고 한다. Papel 박사는 1965년 美國特許 3215572(1965, 11, 2)를 取得하였고, 그의 着想으로 부터 생겨난 磁性유체는 技術開發의 進展과 함께 新素材 개발의 一環으로서 그 特性을 살린 새로운 應用面의 開發研究가 各방면에서 行하여져 오고 있다. 國內에서도 최근 상공부 또는 과기처 주관의 特定 研究開發의 研究費 지원에 따라 磁性유체의 國產化가 시작되고 있다. 특히 각종 카

드用(은행, 전화) 磁性流體는 전량 外國에 의존한 상태에 있다. 한편 이와 같이 해서 誕生한 磁性流體는 基礎研究의 面에 있어서도, 磁場의 作用下에서 특이한 현상 때문에 관심이 집중되고, 磁性流體力學으로서 學問의 體系化가 進진되고 있다. 이의 계기를 만든 것은 NASA의 Rosensweig 博士이고, 1971年 소련의 Shliomis博士가 極性流體로 取扱해서 力學의 基礎式을 提案하였다. 兩 博士가 提案한 基礎式은 理想化된 粒子의 모델에 起因한 것이지만, 磁性流體力學의 基礎研究에 있어서 중요한 貢獻이라고 말 할 수 있으나, 學問의 體系로서는 未完成의 部分이 많다.

2. 構造와 特性

자성유체는 一般的으로 有機溶媒등의 液體중 到 強磁性體(Fe_3O_4)의 超微粒子(100\AA)를 多量(10^{16} 개/ cm^3)으로 分散시킨 懸濁液이고 靜止 狀態에 있어서도 安定된 분산이 유지되도록 粒子間에 작용하는 吸引力에 의한 입자의 凝集을

막기 위해 입자의 表面에는 1粒子마다에 오래인酸(CH₃, (CH₂)₇, CH) 등의 界面活性劑가 吸着被覆되어 있다. 또한 중력에 의한 沈降은 미세화된 입자 자신의 브라운運動에 의해 억제되기 때문에 통상 體積力이 작용하여도 안정적이고 균일한 분산이 유지된다. 磁性流體를 構成하고 있는 강자성체 미립자는 그 입자가 1磁區로 되어 있기 때문에 殘留磁化를 갖지 않으며 磁化曲線에 히스테리시스곡선을 동반하지 않는 特徵을 갖고 있다.

자성유체는 통상의 유체와 다른 성질을 갖고 있다. 그 하나는 磁性이고, 다른 하나는 内部 각운동량을 갖고 있다. 어느쪽이나 고체미립자를 분산시킨 것에 의하지만, 자성의 특성을 유체가 갖도록 하는 것이 목적인데, 내부 각운동량은 副產物로 더하여진 성질이다. 자성유체로 분산된 유체는 1개가 1磁區의 構造를 갖고 그 自體가 하나의 자성이다. 외부로부터 자장이 작용하지 않으면 자기모우멘트 m 의 방향이 각각의 입자에 대해 각양각색이고 적당한 체적에 의해 평균을 취하면 0(영)이 되며 외부에 대해서 자성을 표시하지 않는다. 외부자장 H 가 작으면 각각의 자기모우멘트 m 은 H 방향으로 향한다. 그러나 磁場이 충분하지 못한 경우는 모두가 H 方向으로 도달되는 것은 아니다. 磁氣모우멘트 m 과 H 사이의 각이 θ 와 $\theta + d\theta$ 라 하고, 그 사이에 있는 粒子數를 $N(\theta) d\theta$ 라 할 때 流體가 靜止해 있는 경우 外部磁場을 받으면 10^{-9} 秒 정도의 빠른 시간에 자장의 방향으로 그 입자수는 $N(\theta) = Ce^{-W/KT} \sin Nd\theta$ 가 된다. 여기서 W 는 입자의 에너지이고, k 는 볼츠만常數, 그리고 T 는 絶對溫度이다(그림 1).

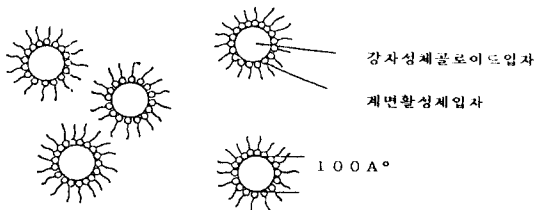
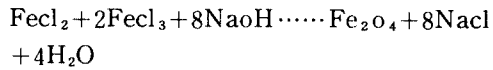


그림 1 磁性流體의 構造

3. 磁性流體의 製造

자성유체는 強磁性體 微粒子를 분산시키는 溶媒의 種類에 따라 性質이 각각 다르다. 初期에는 天然產의 마그네타이트를 오래인酸이 포함된 석유(kerosine)에 장시간 분쇄해서 제조하였다. 그후 下飯坂⁽²⁾이 濕式의 化學反應을 통하여 단시간에 大量의 磁性流體를 製造하였다.



그후 마그네타이트粒子를 에스텔類 또는 물 등의 용매에 분산시킨 자성유체가 開發되고, 각각의 용매의 특성을 살리는 應用의 方面이 檢討되고 있다. 또한 자성유체의 磁化를 한층 높이는 目的으로 철, 코발트, 니켈 및 이들 合金의 粉末을 有機溶媒속에서 분산시킨 製法도 研究되고 있으며, 熱傳達特性이 좋은 液體金屬을 용매로써 이용하는 法 이외에도, 熱分解法, 紫外線分解法, 眞空蒸發法등에 의한 製法이 이용되고 있다. 國內에서는 金⁽³⁾ 등에 의한 廢酸化鐵을 利用하는 製法으로 高麗素材에서 製造하고 있는 狀態로서 初創期에 있다고 볼 수 있다.

4. 磁性流體의 舉動

磁場下에서 자성유체의 舉動은 大略적으로 다음과 같다.

- (1) 磁場은 比重, 壓力, 遠心力, 그 밖의 힘에 대해 影響을 받고 이것을 증가시키는 方向으로 일을 한다.
- (2) 磁場에 놓여진 磁性流體는 중력, 압력, 원심력에 影響을 미치고 磁氣의 力로 任意의 位置로 移動이 가능하다.
- (3) 磁性流體中에 놓여진 磁性體는 안정된 狀態로 浮揚한다.
- (4) 자성유체중에 놓여진 非磁性體는 자성유

체의 比重을 磁場으로 制御하므로써 自由로 浮揚의 位置를 결정할 수 있다.

(5) 자성유체를 가열 또는 냉각하므로써 발생하는 磁氣熱사이클은 機械的 驅動力이 없는데도 流體運動을 일으킨다.

(6) 軸 또는 接線方法으로 磁場을 걸면 進行中인 表面波의 제어가 가능하다.

(7) 자성유체중에 回轉磁場을 주면 자성유체중에 소용돌이가 發生하는 등, 보통의 流體에서 볼 수 없는 特異한 現象을 나타낸다.

자성유체가 磁氣의 성질을 갖는 것을 斷的으로 表示해보면 그림 2에서 보는 것 처럼 작은 캡슐에 자성유체를 넣어 봉인한 후 자석을 가까이 해보면 알 수 있다. 캡슐은 鐵板을 가까이 했을 때와 같이 자석에 끌려간다. 다음은 유리그릇에 자성유체를 넣고 자석을 붙여 보면 자석이 있는 측이 올라가는 것을 발견할 수 있다. 또한 試驗管에 少量의 자성유체를 그림과 같이 磁極사이에 놓으면 기대되로 자성유체는 磁極사이로 올라가 靜止됨을 알 수 있다.

그림 3에서 처럼 자성유체를 容器에 채우면 보통의 유체와 같이 水平을 만든다. 여기에 電流를 銅線에 통과시키면 銅線을 타고 유체가 상승하는 것을 볼 수 있다. 전류가 강하면 강

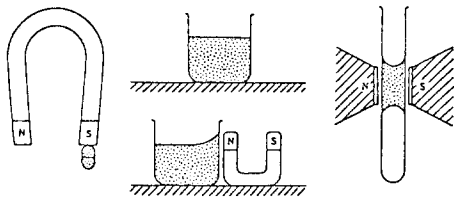


그림 2 磁石에 印加된 流體

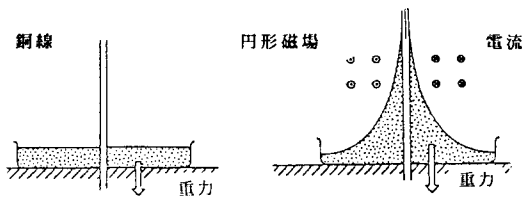


그림 3 電流에 의한 磁性流體의 界面變化

할수록 도달되는 높이가 높게 된다. 이 現象은 磁性流體의 基本的인 特性을 反映하고 있다는 것을 의미하고, 이 變化를 일으킨 것은 銅線에 電流가 흐르기 때문이지만, 자성유체는 電流와 相互作用을 하지 않으므로 直接的인 原因이 아니고 界面을 變化시킨 것은 전류에 의해 발생된 磁場이 작용하기 때문이다.

그림 4는 透明容器에 磁性流體를 넣고 자성유체보다 比重이 큰 작은 非磁性體를 넣어보면 갈아 앉게 된다. 이 용기 밑에 磁石을 가까이 해 보면 갈아앉아 物體가 浮上하는 것을 發見하게 된다. 이는 非磁性體에 磁場이 直接的으로 作用하는 것이 아니고, 磁石에 의해 만들어진 磁場이 流體에 $M \cdot \nabla H$ (M : 磁化, H : 磁場) 힘이 物體에 작용하여 물체를 浮上시키기 때문이다.

5. 基礎方程式系

자성유체는 嚴密하게 말하면 固體粒子和 液體의 混合體(固液二相流體)이다. 粒子가 超微粒子이고 각각의 입자에 表面을 處理하므로 分散性이 좋아 單相의 液體와 다름이 없다.

통상 固液二相流體에서 固相과 液相의 分離에 利用된 遠心分離器로써도 또는 강력한 자장을 작용시켜도 分離가 일어나지 않는다. 이러한 事實을 자성유체의 舉動을 理論的으로 記述할 경우 單相流體로 취급하여도 된다고 보는 것이다. 물론 物質定數는 자성유체의 固有值를 利用할 必要가 있다. 보통의 유체와 다른 점은 外部磁場과 相互作用하는 것이고 다른 하나는 내부 각 운동량을 갖는 것이다. 자성유체의 거동을 기술하는 이론적 基礎方程式은 뉴우튼流

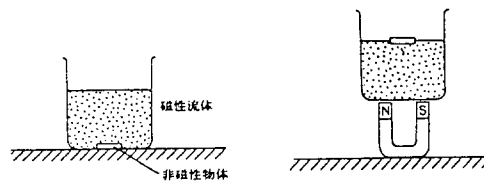


그림 4 物體의 浮揚

體力學에서誘導할 수 있다. 유체중에 작은體積要素를 설정하여 그의要素內의 시간적變화와要素表面을 통하는物理的 量을 생각한다면質量, 運動量, 角運動量 및 에너지保存의法則으로 부터基礎方程式이誘導된다.

質量保存의法則으로 부터連續方程式은

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

運動量保存의法則으로 運動方程式은

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla p + \eta \nabla^2 v + (\eta + \beta^2) \nabla (\nabla \cdot v) + \frac{1}{2\tau} \nabla \times (1\Omega - 1\omega) + M \cdot \nabla H \quad (2)$$

角運動量保存의法則으로 부터內部角運動量方程式은

$$I \frac{d\Omega}{dt} = (\alpha + \beta) \nabla (\nabla \cdot \Omega) + \gamma \nabla^2 \Omega - \frac{1}{\tau_s} (\Omega - \omega) + M \times H \quad (3)$$

에너지保存의法則으로부터 에너지方程式은

$$\rho T \frac{ds}{dt} = k_T \nabla^2 t + t^{(n)} : D + T^{(n)} : \epsilon \cdot (\omega - \Omega) + \Lambda : \nabla \Omega + HM : \epsilon \cdot \Omega \quad (4)$$

非電導性磁性流體의 定常磁場에 관한 Maxwell의 방정식은

$$\begin{aligned} \nabla \times H &= 0 & B &= \mu_0 H + M \\ \nabla \cdot B &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

磁化를 支配하는 磁化緩和方程式은

$$M = \frac{M_0}{H} (I - \tau_B \Omega \cdot \epsilon) \cdot H \quad (6)$$

위 方程式은, 棚橋, 志澤⁽⁴⁾에 의해 內部回轉을 고려한 자성유체의 새로운 기초방정식으로力學的 保存의 법칙에 記因한 熱力學的手法을誘導된 것이다. 非壓縮性이라면 $\nabla \cdot V = 0$ 이고 I는 微分 밖으로 나올 수 있다. 다시 여기서 입자의 剛體回轉의 假定고 있기 때문에 $\nabla \cdot \Omega = 0$ 은 나타나지 않는다.

- I : 恒等 텐서
- n_2 : 渦粘性係數
- Ω : 셸의 평균각속도
- τ_B : 回轉브라운運動緩和係數
- σ_s : 유체마찰에 기인한 回轉運動緩和時間
- H : 磁場의 세기
- Λ : 偶應力 텐서
- ω : 유체의 회전각속도
- M_0 : 平衡磁化의 세기
- s : 단위질량당엔트로피
- $T^{(n)}$: 응력 텐서 점성계수
- α, β, γ : 스핀점성계수
- I : 단위체적당입자의 慣性모멘트
- T : 절대온도
- μ_0 : 眞空透磁率
- η : 전단점성계수

6. 應 用

(1) 軸의 시일링

자성유체의 시일링의 原理를 그림 5에서 간단히 說明할 수 있다. 공간 A에 있는 高壓의 流體가 공간 B의 低壓으로 移動하는 것을 防止하기 위해 케이싱과 軸 사이에 磁性流體를 注入하고 여기에 磁場을 걸면 틈사이로 유체의 흐름을 防止할 수 있다. 液體와 고체의 接觸에 의한 시일링이므로 높은 氣密性을 유지할 수 있고, 眞空度는 10^{-6} Pa까지 가능하며, 摩擦에 의한 摩滅과 씰링材의 摩滅粉에 의한 汚染이 없고 摩擦熱 및 騒音의 발생이 적다.

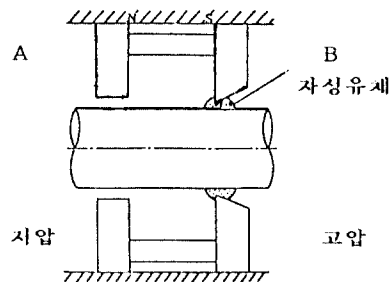


그림 5 磁性流體의 軸의 시일링

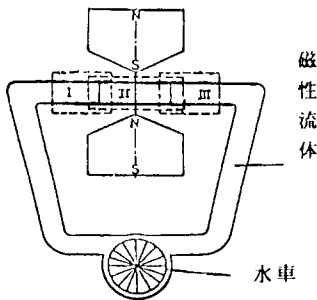


그림 6 磁性流體의 熱엔진



그림 7 磁性流體에 의한 患部治療

(2) 熱엔진

磁性流體의 磁化 M 는 溫度가 上昇해 감에 따라 감소해가고 어떤 온도에서는 0(영)이 되는 것을 이용해서 엔진을 만들수 있다. 이 엔진에는 크랭크 등의 복잡한 機構가 필요 없는 것이 特徵이다. 그림 6처럼 閉廻回路에 자성유체를 가득 채우고 이 回路 一部에 磁石을 끼워서 넣는다. 이때 磁石을 左右對稱인 산모양으로 만들고 I領域의 磁性流體를 냉각하여 온도를 T_1 로 하며, 磁氣勾配 H 를 $+k$ 로 하자. 또 III領域의 磁性流體를 加熱하여 온도를 T_2 로 하고, 磁氣勾配 H 를 $-k$ 하자. 여기서 $T_1 < T_2$ 이다. II영역과 III의 重疊된 부분에서 자성유체는 오른쪽으로 磁氣力 F_1 을 받는다. I과 II의 接合부분에서는 磁氣力 F_2 를 왼쪽으로 받는다. 결국 F_1 와 F_2 差 만큼의 일을 하게 된다. 이 閉廻回路의 一部에 水車를 놓으면 에너지가 發生하게 된다.

(3) 醫療

磁性流體中の 强磁性體 콜로이드粒子는 他의 金屬 또는 金屬化合物과는 다르게 그것 自體는 人體에 해롭지 않는 것으로 알려져 있다. 그래서 溶媒도 人體에 無害한 流體를 使用해서 자성유체를 만들어 治療劑와 함께 注入하고 患部に 外部로 부터 磁石으로 誘導시켜 集中的인 治療가 가능한 것으로 알려져 實際 動物實驗에서 磁性流體를 이용한 여러가지 實驗이 행하여지고 있다(그림 7).

(4) 磁性流體 應用的 例는 실로 그 範圍가

다양하다. 간단히 그 表題만 열거해 보면, 比重差選別, 단파, 스피커, 프린터, 潤滑劑, 벨브, 磁氣테이프, 非破壞檢査, 抵抗抑制 등이 있다.

7. 맺음말

磁性流體의 應用과 物理的 性質에 대해서 간략히 記述하였지만, 이 이외에도 說明을 必要로 하는 部分이 많이 있다.

先進諸國의 最近 磁性流體의 製法과 應用에 대하여 꾸준한 技術의 革新을 圖謀하고 있지만 우리나라는 이들에 대한 研究가 부진한 상태라고 생각된다. 어떤 研究分野에 대해서 장래를 豫測하는 것은 어려운 일이지만, 앞으로 超電導 發電機用 軸의 시일링과 宇宙産業 및 半導體에 지대한 관심 등으로 今後發展이 期待된다.

참 고 문 헌

(1) Papell, S., 1965, US. Pat. No, 215572
 (2) 佐藤敏彦, 下飯坂, 1967, 日本化學會誌, p.293
 (3) 金營三外, 1989, 大韓金屬學會誌, Vol.27, No.9
 (4) 棚橋, 志澤, 1986, 日本機械學會論文集, Vol. 51

- (5) 岡永 외, 1986, 磁性流體講演論文集, Vol. 36, No.6
860
- (6) 徐利洙 외, 1989, 磁性流體講演論文集, Vol.890
- (7) 徐利洙 외, 1989, 分體分末治協會誌, Vol.
- (8) 徐利洙 외, 1989, 可視化學會誌, No.6
- (9) 徐利洙 외, 1990, Journal of Magentism and Magnetic Material 투고중

