

超傳導現象과 그 應用 [I]

趙 正 萬

建國大學校工大 名譽教授

1. 超傳導 現象

1911년에 Onnes는 水銀의 電氣 抵抗이 4.2°K 附近에서 0으로 됨을 發見하였다. 이와 같이 어떤 種類의 物質은 그 溫度를 내려가면, 어떤 溫度 以下에서 그 電氣 抵抗이 消失되어 0으로 된다. 이 現象을 超傳導(superconduction)라고 하고, 이 現象을 가진 物質을 超傳導體(superconductor)라고 한다. 이 超傳導體는 現在 25種의 金屬元素와 100種 以上에 達하는 多數의 合金 및 金屬間化合物이 알려져 있다. 超傳導體의 溫度를 내려갈 때, 電氣 抵抗이 常傳導(normal conduction)狀態로 부터 電氣 抵抗이 0인 超傳導 狀態로 轉移하는 溫度를 臨界溫度(critical temperature) T_c 라고 한다. 超傳導 狀態에 있는 物質은 電氣 抵抗이 0이므로 이에 흐르는 電流는 外部로 부터 妨害를 받지 않는 限, 永久히 持續 될 것이다. (永久電流) M.I.T.의 Collins는 超傳導의 Pb의 圓環에 誘導된 電流가 2年 半이나 減衰되지 않고 持續됨을 實驗的으로 發見하였다. 이와 같은 實驗으로 超傳導에 있는 物質의 抵抗率은 $4 \times 10^{-21} \Omega m$ 以下인 것이 確認되었다. 超傳導體인 Cu의 極低溫에서의 抵抗은 겨우 $10^{-7} \Omega m$ 程度이다. 超傳導 物質의 溫度를 臨界溫度 T_c 以下로 하고, 外部 磁界를 加할 경우 磁界가작을 동안은 超傳導 狀態이나, 어떤 臨界值

에 達하면 電氣 抵抗이 回復하여 超傳導 狀態가 破壞되어 常傳導 狀態로 轉移한다. 이 磁界值를 臨界磁界(critical field) H_c 라고 한다. 臨界磁界 H_c 는 溫度에 依하여 變化하여 近似的으로 다음의 式으로 表示된다.

$$H_c = H_0 [1 - (T/T_c)^2]$$

여기에 H_0 는 0°K에서의 臨界磁界이다. 몇 個의 超傳導 元素의 H_c -T 特性을 圖示하면 그림 1과 같다.

超傳導 物質로 半徑 r (cm)의 丹筒狀試料를 만들어, 그 軸方向에 直流電流를 흘릴 경우, 그 電流가 어떤 臨界值에 達하여 超傳導가 破壞된 것이다. 그리하여 臨界電流 I_c 는 다음의 式으로 表示된다.

$$I_c = 5rH_c$$

이것을 Silsbee의 法則이라고 한다. 外部 磁界와 電流가 만든 自己 磁界와의 合이 H_c 에 達할

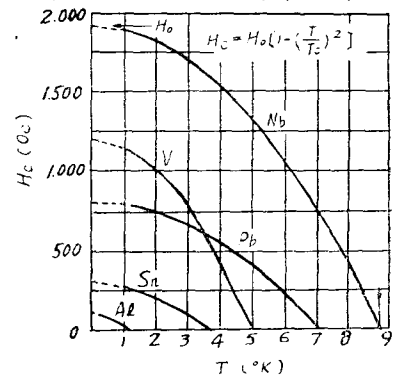


그림 1. 超傳導 元素의 H_c -T 特性

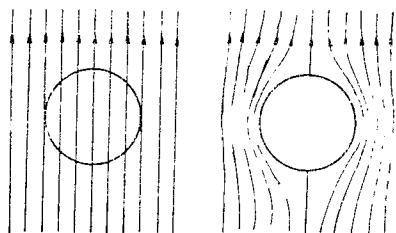
때 超傳導가 破壞되어 常傳導 狀態에로 轉移한다.

超傳導狀態에서는 電氣抵抗이 $\rho=0$ 인 完全導電性을 나타낼 뿐 아니라, 超傳導 狀態에서는 磁束은 試料內部에 存在치 아니하여 磁束密度도 $B=0$ 인 完全反磁性을 나타낸다. 이는 1933년에 Meissner가 實驗的으로 確認한 現象으로서, 이 現象을 Meissner 効果라고 한다. 超傳導 狀態에서 完全反磁性을 나타내는 試料內部에의 磁束의 侵入을 妨害하도록, 그 表面에 反磁性的인 超傳導電流가 흐르기 때문이다. 이 表面電流가 흐르는 層까지의 磁束이 侵入할 것으로서, 이 侵入層의 두께를 磁界侵入度 λ 라고 한다. 磁界侵入度 λ 는 溫度에 依하여 變하며 近似的으로 다음式으로 表示된다.

$$\lambda = \lambda_0 [1 - (T/T_c)^4]^{-1/2}$$

여기에 λ_0 는 0°K 에서의 磁界侵入度로서, 보통 數百 Å 程度이다.

그림 2 a와 같이 常傳導狀態($T > T_c$)에서 球形試料 磁界를 加할 때는 磁界가 試料內部까지 侵入하나, 그림 2 b와 같이 超傳導 狀態($T < T_c$)에서 球形試料에 磁界를 加할 때는 磁界는 試料로 부터 排出되어 Meissner 効果를 나타낸다.

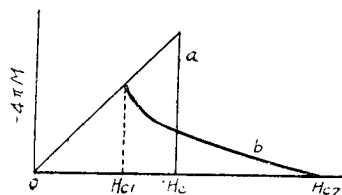


a. 常傳導 狀態의 磁界 分布 b. 超傳導 狀態의 磁界 分布

그림 2. Meissner 効果

2. 超傳導體의 種類

完全導電性과 完全反磁化는 超傳導體의 基本的 性質이다. 超傳導體의 磁化曲線을 圖示하면 그림 3과 같다. 超傳導體를 磁氣의 性質에 依하여 分類하면 다음과 같다.



a. 第1種 超傳導體 b. 第2種 超傳導體

그림 3. 超傳導體의 磁化曲線

2.1 第1種 超傳導體

그림 3 a와 같이 磁界 H 가 臨界磁界 $\rightarrow H_{c1}$ 보다 작을 때 完全反磁性을 나타내고, H_{c1} 에서 常傳導狀態에로 轉形하는 物質을 第1種 超傳導體(type 1 superconductor) 혹은 軟超傳導體(soft superconductor)라고 한다. 非遷移金屬 超傳導 元素, 高純度の 遷移金屬 超傳導 元素(Nb, V는 除外)는 이에 屬한다. 第1種 超傳導體의 超傳導 現象은 1957년에 Bardeen, Cooper 및 Schrieffer가 提案한 量子理論(B.C.S.理論)에 依하여 解明되었다. BCS理論에 依하면, 金屬 中の 傳導電子間의 相互作用을 생각할 때, 우선 2個의 電子間에는 Coulomb 斥力이 發生한다. 또 한 個의 電子가 正이온 格子에 스트레인(strain)을 일으키면, 다른 格子의 運動은 이 스트레인의 影響을 받게 된다. 이 格子振動 즉 音子(phonon)를 媒介로 하여 2個의 電子間에 引力이 發生한다. 즉 한 個의 電子가 音子를 放出하여, 다른 電子가 그 音子를 吸取하는 過程에서 2個의 電子間에 引力이 發生한다. 이 電子·音子 相互作用

用에 의한 引力이 Coulomb 斥力에 이기면, 相互 反對 方向의 運動量 및 스핀(spin)을 갖는 電子對(Cooper pair)를 形成하여 常傳導 狀態로부터 超傳導 狀態로 된다. BCS 理論에 依하면 臨界溫度 T_c 는 다음의 式으로 表示된다.

$$T_c = A\theta \exp\left[-\frac{1}{N(0)V}\right]$$

여기에 $A=1.14$ 의 定數, θ 는 Debye 溫度, $N(0)$ 는 Fermi 面에서의 電子의 狀態密度, V 는 電子·音子 相互作用과 Coulomb 斥力作用과의 合의 에너지로써 $V>0$ 되면 超傳導로 된다. 中空 圓筒의 超傳導體에 溫度를 臨界溫度 T_c 以下로 하고, 外部 磁界를 加하여 超傳導狀態로 하면, Meissner 効果에 依하여 試料內部로부터 磁束이 排出되어, 中空 部分의 磁束은 거의 變化되지 않는다. 다음에 外部 磁界를 除去하면, 中空 部分의 磁束은 變化되지 않고 그대로 凍結된다. 이는 圓筒內壁의 두께 λ 層에 超傳導 電流가 흘러 磁束을 트랩(trap)시키기 때문이다. 이 電流(電子의 圓運動)의 角 運動량의 量子化로부터 磁束 ϕ 도 量子化 되어 다음의 式으로 表示된다.

$$\phi = \frac{nhc}{e} \quad (n: \text{整數})$$

2.2 第2種 超傳導體

그림 3 b 와 같이 磁界 H 가 第1 臨界磁界 H_c (lower critical field)보다 작을 때는 第1種 超傳導體와 同樣으로 完全 反磁性을 나타내나, 磁界 H 가 第1 臨界磁界 H_{c1} 을 넘으면 完全反磁性은 破壞되어 磁束은 試料 內部에 侵入하여 磁化가 減少된다. 또 다시 磁界 H 를 增加하여 第2 臨界磁界 H_{c2} (higher field)에 達하면 常傳導體 狀態에로 轉移한다. H_{c1} 과 H_{c2} 間에서는 磁界는 量子化 되어, 이 量子 磁束線이 試料內部에 侵入하여 規則整然한 格子 配列을 取한 것으로 생각된다. 즉 量子 磁束線의 心(core)은 常傳導

狀態로 殘在 되어 있다. H_{c1} 과 H_{c2} 間의 狀態를 混合狀態라고 하고 이러한 物質을 第2種 超傳導體(type 2 superconductor) 혹은 硬超傳導體(hard superconductor)라고 한다. Nb, V 및 多數의 合金, 金屬間 化合物은 이에 屬한다.

第1種 超傳導體와 第2種 超傳導體의 存在 및 第2種 超傳導體의 超傳導現象은 1950년에 Giegburg와 Londau가 提出한 現象論에 依據하여 1957년에 Abrikosov가 豫測하고, 1960년에 Gorkov가 確立한 量子理論(GLAG 理論)에 依하여 確立되었다. GLAG에 理論에 依하면, 超傳導體는 金屬 中の 電子狀態로 決定되는 量(Gingburg Landau parameter) κ 의 值의 大小에 依하여, 磁界中の 舉動이 相異하여, $\kappa < 1/\sqrt{2}$ 의 경우가 第1種, $\kappa > 1/\sqrt{2}$ 의 경우가 第2種의 超傳導體이다.

$$\text{純金屬에서는 } \kappa = \frac{0.96\lambda_0}{\xi_0}$$

$$\text{合金에서 } \kappa = \frac{0.96\lambda_0}{\xi_0} + 7.5 \times 10^3 \frac{\gamma_{1/2}}{\sigma_n}$$

여기에 λ_0 는 0°K 에서의 磁界侵入度, $\xi_0 = 0.18 hV_0/kT$ 이고, V_0 는 Fermi 面에서의 電子 速度이다. γ 는 正常 狀態에서의 電子比熱의 係數 σ_n 은 正常 狀態에서의 電氣 傳導率이다. 兩臨界磁界 H_{c1} H_{c2} 와 κ 와의 關係는 $\kappa > 1$ 의 경우 다음과 같이 表示된다.

$$H_{c1} = \frac{H_c}{\sqrt{2}\kappa} (\ln\kappa + 0.08)$$

$$H_{c2} = \sqrt{2}\kappa H_c$$

여기에 H_c 는 第2種 超傳導體의 磁化曲線을 等面積의 第2種 超傳導體의 磁化曲線으로 變換한 경우의 臨界磁界로써 熱力學的 臨界磁界라고 한다. $H_c = 2.42 \gamma^{\frac{1}{2}} T_c$ 로 表示된다. 均質인 理想的 第2種 超傳導體(ideal type 2 superconductor)에서는 H_{c1} 以下에서 第2種과 同樣으로

Silsbee 法則이 成立하나, H_{C1} 과 H_{C2} 間的 混合狀態에서는 I_c 는 거의 0이다. 그러나 不均質인 非理想的 第2種 超傳導體(non-ideal type 2 superconductor)에서는 混合狀態에서도 큰 I_c 가 흐른다. 이는 混合狀態에서의 量子 磁束線이 試料中에 散在한 不均質 點에서 그 移動이 妨害 되기 때문이다. κ 가 큰 物質일수록 H_{C2} 가 크다. 遷移金屬의 合金, 金屬間 化合物 中에는 大端히 큰 H_{C2} 를 가진 것이 있다. 이들을 高磁界 超傳導體라고 한다. 이들은 H_{C2} 가 클 뿐 아니라 高磁界까지 큰 I_c 를 가져 超傳導 磁石의 材料로써 利用되고 있다.

3. 超傳導磁石 및 그 應用

3.1 超傳導磁石

從來 數十 KG 以上の 磁界는 大電流空心코일로 만든 普通 磁石을 使用하여 왔는데, 이 普通 磁石은 코일이 電氣 抵抗을 가지고 있기 때문에 電力의 消費도 크고, 高磁界의 發生도 無理이며 製作 維持에는 큰 經費를 要한다. 여기서 超傳導線의 코일로 만든 超傳導 磁石을 使用하면, 電力의 消費도 極히 적고, 高磁界의 發生도 容易하며, 小形으로 構成되어 製作 維持도 經濟적이다. 超傳導 磁石은 大形 電氣機器, MHD 發電機, 核融合裝置, 粒子 加速器 등에 重要한 役割을 할 수 있다.

3.2 超傳導線의 材料

超傳導線의 材料로는 臨界溫度 T_c , 臨界磁界 H_c 및 臨界電流 I_c 가 큰 것이 필요하다. 그런데 金屬 元素의 T_c 는 Hb : 9.5°K, T : 5.3°K, Ta : 4.5°K 등으로써 超傳導線으로써의 實用성이 없다. 現在 超傳導線의 材料로는 合金 및 金屬間 化合物이 實用되고 있다. 合金으로는 Hb-2r : 0.8°K, Nb-Ti : 9.5°K系로 100KG 程度의 體

磁界 發生이 可能하고. 金屬間 化合物로는 Nb₃Sn : 18°K, Nb₃Al : 18.3°K, Nb₃Ge : 18.0°K, Nb₃(Al_{0.75} Ge 0.25) : 23°K, V₃Si : 17.0°K, V₃Ga : 16.5°K系로 150KG 程度의 高磁界 發生이 可能하다. 超傳導線은 臨界電流 I_c 가 外部溫度 및 磁界의 影響을 받아 不安定하기 때문에, 超傳導線은 보통 合金線 혹은 金屬間 化合物線을 極細多心線으로 하여, 常傳導金屬 Cu, Al 등에 埋入하여 所謂 混合線(composite wire)으로 만들어 使用한다. 超傳導線은 直流로 使用할 경우에는 電氣抵抗이 없어 損失을 發生치 않으나, 交流에서는 多少損失을 發生한다. 4.2°K와 같은 極低溫에서의 損失을 途去하기 爲한 冷凍機로는 그 損失의 千倍 程度의 入力を 要하는 大形 冷凍機가 필요하게 되어, 이것이 超傳導의 交流機器에의 應用에 一大 難點으로 되고 있다.

3.3 電氣機器에의 應用

電氣機器에는 發電機, 電動機, 變壓器, 遮斷器, 整流器 등이 있는데, 이들 機器가 超傳導化 되면, 技術의 으로나, 經濟의 으로나 아주 有利한 것이다. 특히 超傳導에 依한 大容量發電機의 開發은 將來 重要한 課題이다. 電氣機器는 一般的으로 超傳導線을 使用함으로써 高磁界를 取할 수 있는데, 現在 高磁界用 交流 超傳導線은 存在치 않다. 따라서 直流 超傳導線을 磁極으로 한 回轉機가 開發의 目標로 되고 있다.

3.3.1 直流機器

大形 直流機器로는 製鐵用 大形 電動機와 電解 工業用 直流 大電流 電源 등이 있는데, 이들 直流 機器를 超傳導化하면 아주 有利한 것이다. 直流 機器는 構造的으로 多極機와 單極機로 分類 되는데, 前者는 汎用機이고, 後者는 特殊機이다. 直流 機器의 超傳導化는 主로 後者에 對하여 進行되고 있다. 從來의 單極機의 誘起電壓은 20~30V程度

超傳導現象과 그 應用(1)

의 誘起電壓을 얻어 大電流로 할 수 있어 大形 汎用機로써 사용될 수 있을 것이다. 現在 回轉子는 從來形과 같이 常溫空間에 두고, 부러시를 通하여 大電流를 外部에 흐르게 하는 半超傳導機가 開發의 對象으로 되고 있다.

3.3.2 交流機器

交流機器에는 同期發電機, 電動機, 變壓器 등이 있는데, 이들 交流機器를 超傳導化하면 아주 유리할 것이다. 交流發電機의 回轉子, 固定子를 全部 超傳導機에는 交流損失이 적고, 臨界溫度 T_c 의 높은 超傳導線을 필요로 하는데, 이에 적당한 것이 개발되지 않고 있다. 현재 交流機도 直流機와 같이 界磁 코일단을 超傳導化한 半超傳導機가 開發의 對象으로 되고 있다. 變壓機를 超傳導化하는 데는 鐵心을 常溫空間에 두고, 卷線을 크라이오스타트(cryostat)中에 納入하여 이것만을 超傳導化한다. 超傳導 케이블과의 接續에는 超傳導 또는 低溫變壓器의 使用이 필요하게 된다. 其他 電力用 機器 超傳導와 常傳導와의 抵抗의 變化를 이용하면, 整流器도 만들 수 있고, 또 이들을 發展시키면 遮斷器도 만들 수 있을 것이다.

3.3.3 未來機器

現用 電氣機器는 磁界에는 鐵을 電流의 通電에는 銅을 使用하고 있다. 未來機器의 代表인 프라즈마(plasma) 機器에서는 前者에는 超傳導磁石을, 後者에는 프라즈마를 使用하게 된다. MHD 發電機를 例로 들어 說明하겠다.

그림 4는 그 原理圖이다. 그 發電原理는 現用 發電機와 같으나, 現用 發電機의 電機子卷線의 銅線 代身으로, 熱電離하여 電氣傳導性을 띤 高溫 가스를 使用한 점이 다를 뿐이다. 發電機의 出力은 磁界의 強度 B 의 2乘에 比例하고, 電離 가스로 構成된 發電通路의 內部抵抗 R 에 反

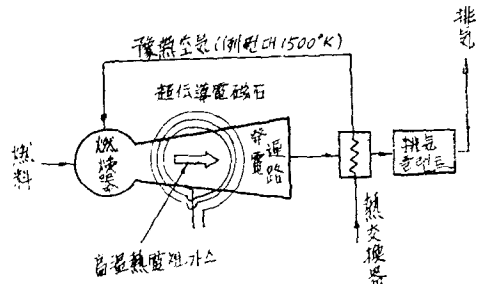


그림 4. MHD 發電機의 原理圖

比例한다고 생각하면 된다. 그런데 MHD 發電에서는 $2,000^{\circ}\text{C}$ 또는 若干 그 以上の 溫度에서 高溫가스의 電氣傳導率이 銅의 그것의 $10^6 \sim 10^7$ 分の 1 程度이다. 따라서 高出力の MHD 發電에서는 高磁界와 極端으로 큰 發電通路를 필요로 한다. 내부저항 R 이 큰 發電通路에서 低下된 高사하고라도, 이 큰 發電通路 全體에 高磁界를 加하는 일은 從來의 電磁石으로는 容易치 않다. 勵磁電力이 莫大하게 되어 高效率의 發電은 도저히 達成할 수 없다. 여기서 超傳導電磁石은 勵磁電力을 要치 않고, 高磁界 發生이 可能하므로 適當한 應用 例라고 할 수 있다.

3.4 輸送機關에의 應用

輸送機關用諸機器는 小形, 輕量 및 高度의 性能이 要求되고 있다. 여기서 超傳導機器는 將來 大形 輸送機關用으로써 유리하다.

3.4.1 高速列車에의 應用

高速 列車에서는 從來의 回轉電動機로는 最高 350km/h 程度가 限度이고, 實用的으로는 250km/h 라고 한다. 따라서 高速 例컨데 500km/h 程度로 運轉하려면 線形電動機(linear motor)로 車輛을 驅動하고, 車輛을 地上에서 浮上시키면 된다. 車輛浮上方式으로는 空氣浮上(美, 英, 佛 등), 普通電磁石浮上(獨逸 등), 超傳導電磁石浮上(日本, 美, 獨 등) 등이 개발되고 있다. 超傳導

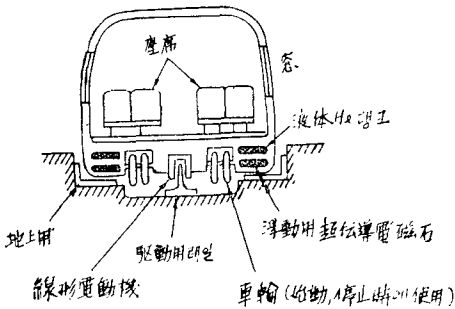


그림 5. 超傳導電磁石浮上高速列車의 原理圖
 電磁石浮上 高速列車에 對하여 說明하면, 그림 5와 같이 車體 下에는 超傳導電磁石을 裝置하고, 地上에는 레일 대신으로 短絡된 코일을 直線上에 配列한다. 列車은 停止 時에는 浮力이 없으므로, 처음에는 고무 車輪으로 走行하다가, 어느 程度의 速度로 되면 超傳導電磁石에 依하여 地上의 코일內에 誘起되는 電流와 超傳導電磁石과의 사이의 電磁力으로 車輛을 浮上시킨다.

3.4.2 高速 船舶에의 應用

超傳導發電機, 電動機는 小形 輕量이어서 船舶用으로 適當하다. 超傳導電磁石과 海水와 組合한 MHD 推進 方式이 개발되고 있다. 高速 輸送船으로는 造波抵抗이 적은 潛水船이 有利하다고 한다. 超傳導電磁石 推進 高速 潛水船에 對하여 說明하면, 그림 6과 같이 超傳導電磁石을

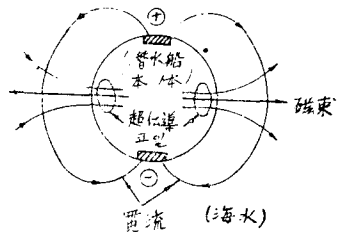


그림 6. 超傳導 電磁石 推進 高速 潛水船의 原理 使用하여 船體와 直角 方向으로 磁束을 발생하여, 이에 直交하여 海水중에 電流를 通하면, 磁束과 電流間의 電磁力으로 船舶을 推進시킨다. 이러한 潛水船을 實用化하려면 超傳導 電磁石에 依한 高磁界의 發生이 필요하다.

(다음 號에 繼續...)