

# 超電導 電氣 機器

李 允 鍾

〈漢陽工大教授・工學博士〉

## 1. 超電導 現象

銅, 銀 등 良導體는 抵抗의 溫度係數의 見地에서 보면 絶對溫度  $0[^\circ\text{K}]$ 에서 抵抗이 零이 될 것 같으나 실제로는 그림 1의 Cu 曲線과 같이 抵抗이 남는다.

그러나 1911年 Onnes(1853~1926)는 水銀을 液體헬륨(氷點  $4.2[^\circ\text{K}]$ )로 冷却시킬 때 그림 1의 Hg 曲線과 같이 갑자기 불연속적으로 抵抗이 零이 됨을 발견하였고, 그 후 常溫에서 電導率이 그다지 좋지 않은 金屬에 이러한 現象이 있는 것이 많다는 것을 알아냈다. 이와 같이 水銀 등의 抵抗消滅은 實로 그 前에는 생각할 수 없었던 새로운 상태 즉 超電導狀態를 나타낸 것이며, 그 後 현재까지 物理學分野에서 큰 關心의

對象이 되어 왔을 뿐만 아니라 工學分野에서도 이 現象應用에 관한 研究에 沒頭하고 있다.

위에서 超電導 現象에서는 抵抗이 零이 된다고 하였는데 一般物理定數에서는 抵抗值가 零이 된 것은 단지 그 값이 零에 가깝다는 것 밖에 意味하지 않는 경우가 많으므로 超電導에서도 이와 같은 생각으로 抵抗 零의 性質을 받아 들이기 쉬우나 超電導에서는 어떠한 方法으로든지 抵抗의 痕跡조차 發見할 수 없다는 程度의 零抵抗狀態가 되는 것이다. 따라서 超電導 코일에 電流를 흘리면 減衰하지 않고, 계속 같은 세기로 흐른다. 한 例로 抵抗의 影響이 가장 敏感하게 나타나는 그림 2의 回路(코일을 短絡한 回路)에서 超電導코일이라면 이 때의 電流減衰는 전혀 觀測되지 않고 時定數는  $10^9$ 年 이상이 되며, 이로부터 계산한 抵抗率은  $10^{-25}[\Omega\cdot\text{m}]$ 이하가 되는 것이다.

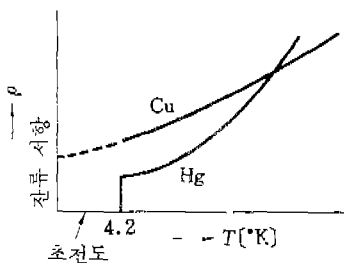


그림 1.

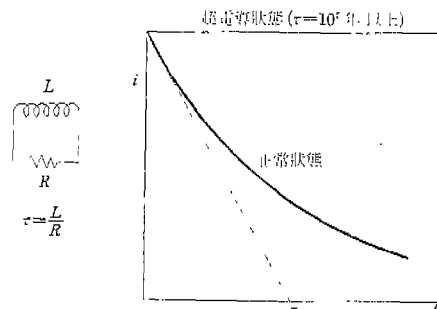
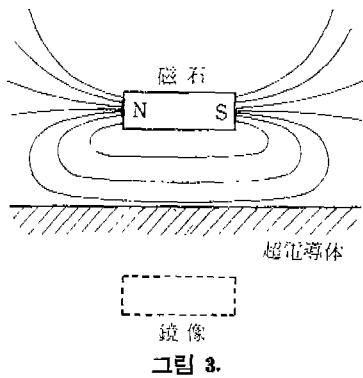


그림 2.



이와 같이 減衰하지 않는 상태의 電流를 永久電流라 부르며 超電導 磁石이나 記憶素子에 이용되고 있다.

이상과 같이 超電導의 중요한 性質은 抵抗零에 있으나 超電導體 內部에서 磁束密度가 零이 되는 현상도 看過할 수 없는 性質이다. 이러한 現象을 이용한 것에 磁氣遮蔽와 磁氣浮上이 있다. 磁氣浮上은 그림 3과 같이 超電導板 위에는 永久磁石의 발생 磁束이 板속에 浸透할 수 없으므로 板表面에서 反撥되어 磁石이 浮上하는 現象이다.

물론 超電導 狀態는 溫度와 磁界의 어떤 制限範圍 內에서만 얻을 수 있는 것이다. 이러한 點에서 臨界溫度, 臨界磁界가 다같이 높은 超電導體의 發見이 현재까지 꾸준히 계속되어 왔다.

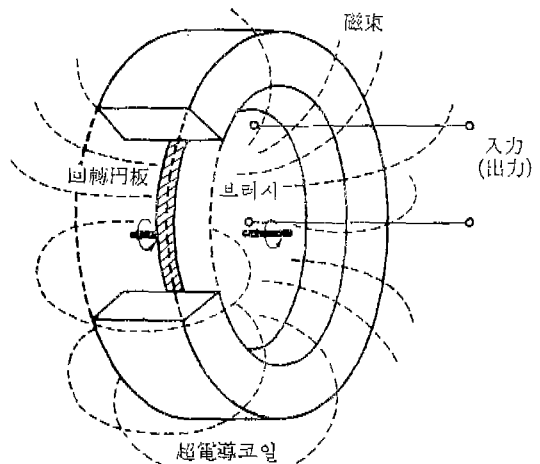
超電導의 臨界溫度를 몇가지 物質에서 알아보면 표 1과 같다.

표 1. 超電導의 臨界 溫度[°C]

物 質	臨界溫度	物 質	臨界溫度
Hg	4.15	Nb	9.23
In	3.40	Sn	3.72
La	6.06	V	5.30

## II. 直 流 機

超電導 直流機는 電解用, 船舶用 등의 大容量機로 적당하며, 超電導를 電力用 回轉機에 처음



試圖한 것은 IRD社(英國)의 50[HP] 超電導單極電動機이다.

直流機를 構造上에서 大別하면 異極機(heteropolar machine)와 單極機(homopolar machine)로 나누어지며 前者는 整流子를 가진 普通 構造의 것이며 後者의 單極機에서는 電機子에 대하여 항상 一定方向의 磁界단이 存在하고, 이 磁界안에서 電機子가 同一方向으로 運動함으로써 起電力을 유지시키게 되어 있으며, 異極機와 같이 N. S. 두 磁極의 磁束을 끊어 電壓을 발생하는 機械와 構造를 달리한다. 즉 처음부터 直流가 발생하므로 整流를 必要로 하지 않는 直流機가 된다. 그림 4는 超電導 圓板形 單極直流機의 原理를 나타내는 그림이다.

「솔레노이드」形 超電導 코일에서 回轉圓板(電機子)에 直交하는 磁束이 발생하여 圓板 內에는 半徑方向으로 電壓이 誘起되고, 「브러시」를 통하여 電力을 流入하거나 流出하면 각각 電動機 또는 發電機가 된다.

單極機는 구조가 간단하고, 效率이 높지만 非超電導機에서는 낮은 端子電壓 밖에는 얻을 수 없는 것이 缺點이었다. 따라서 從來의 單極機는 低電壓 大容量機로 알려지고 있어 電氣鍍金 등 限定된 分野에만 이용되었다. 그러나 單極機의 超

電導化에 따라 몇百 V의 端子電壓이 쉽게 얻어지며 電流도 「카아본 브러시」 대신 液體金屬 NaK 「브러시」를 사용함으로써 몇百 KA의 通電이 가능하게 되었다.

표 2는 各國에서 製作된 超電導 單極機의 例이다.

표 2. 超電導 單極機의 例

規格	機關	IRD (英國)	GE (美國)	LCIE (佛國)	東 (日 芝 本)
出力 [KW]		2,440	150	69	3,000
電壓 [V]		430	9	4.6	150
電流 [A]		5,800	17,000	15,000	20,000
回轉數 [rpm]		200	3,600	600	1,000
最高磁界 [T]		3.5	6.0	2.5	6.0
電機子	圓板 segment형 ×2장		—	圓板×5장	圓板×2장
브러시	固體브러시	NaK브러시	Hg-In 브러시		固體브러시

표 2에서 보는 바와 같이 超電導 單極機에서는 磁界가 強하다고 할지라도 (IRD에서 3.5 Tesla, GE에서 6.0 Tesla 등) 圓板의 크기와 回轉數에 限度가 있으므로 電機子內의 導體를 多數 直列로 연결하여 比較의 높은 任意的 端子電壓을 發生하는 異極機에 비하여는 電壓이 낮은 것을 피할수 없다. 그러나 電壓은 낮아도 從來의 直流機에서는 생각할 수 없던 大出力(例를 들면 500[V], 100~200[KA] 정도)을 經濟的으로 낼 수 있다는 點에서 將來性이 있으며, 電氣化學分野에의 適用이 고려되고 있다.

### Ⅲ. 同期機

電力用的 交流機器에는 同期機, 誘導機, 變壓器, 遮斷器, 整流器 등이 있으며 이들은 어느 것이나 原理的으로 超電導化가 가능하나 實用的인 見地에서 開發의 對象이 되고 있는 것은 同期機 뿐이다.

超電導 同期機(여기서는 發電機)는 그림 5와 같이 超電導 코일이 만드는 直流界磁가 電機子 卷線 中에서 回轉하여 電機子 卷線에 起電力을 誘

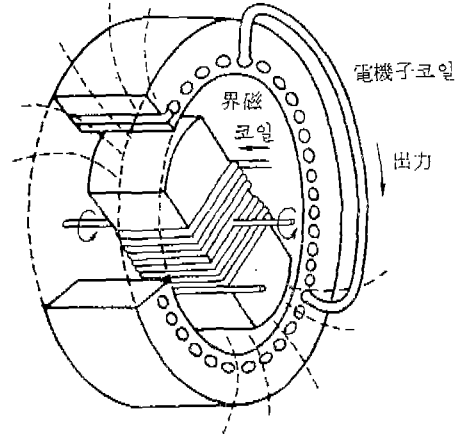


그림 5.

起시켜 交流電流를 흘리는 回轉機이다. 이와는 반대로 超電導界磁가 靜止하고 있고, 이의 外側에서 電機子가 回轉하는 構成도 생각할 수 있으나 현재로는 많은 檢討結果 그림 5의 구조가 一般的으로 採用되고 있다.

超電導 同期發電機를 처음 試作한 것은 AVC의 8[KW] 規格의 發電機이다. 이것은 界磁側을 超電導 코일로 하고, 電機子는 常電導 코일로 한 半超電導方式이 었다. 界磁와 電機子를 모두 超電導化한 全超電導方式은 1968年 Dynatech社에서 試圖되었으나, 規格 50[KW]에 대하여 約 6 [KW]의 出力 밖에는 얻지 못했다고 報告하고 있다.

그러나 50~60[Hz]의 交流에 사용될 수 있는 實用 超電導線이 存在하지 않는 이상 界磁, 電機子 모두 超電導化한 全超電導方式은 開發의 對象이 될 수 없을 것이며 界磁「코일」을 超電導化한 回轉界磁型 半超電導方式의 開發이 實用性이 있다.

그 후 1969年 MIT가 80[KVA]의 超電導 回轉界磁方式의 半超電導 同期發電機를 試作하고 이것을 기초로 2[MVA]의 發電機를 製作하였으며 WH社도 5[MVA]의 發電機에 대한 試驗結果를 발표하였다. 日本에서도 30[KVA]의 回轉 電機子型 發電機를 製作한 例(富士電機)가 있다.

超電導 發電機의 回轉界磁는 超電導 코일이브

로 鐵心이 必要없는 대신 高速으로 回轉하는 眞空斷熱容器 안에서 超電導 코일을 冷却하기 위한 새로운 까다로운 技術이 必要하게 된다.

回轉數는 回轉子の 極數, 發電 周波數에 따라 定해지나 300~12,000[rpm] 정도이다. 例를 들면 WH社의 連續定格 1,000[KVA] 400[Hz]의 交流發電機에서는 4極, 25[cm] 直徑의 回轉子が 12,000[rpm]으로 回轉한다. 또, 具體的인 設計 sheet 가 발표되어 있는 IRD의 50萬[KW]超電導 發電機에서는 回轉子直徑이 約 1[m]이며 超電導코일이 만드는 磁界는 回轉子卷線에서 3.2[T], 固定子卷線에서 0.8[T]이다.

터빈發電機를 위의 原理에 따라 超電導化할 때 고려하여야 할 點은 超電導化로 말미암아 信賴度를 低下시키지 없이 同一製作費로 보다 큰 大容量機를 高性能, 高効率로 製作할 수 있어야 하고, 從來의 發電機로는 不可能하였던 大容量機가 經濟的으로 製作되어야 한다는데 있다. 그리고 文獻에 의하면 高出力密度의 超電導機가 將來 可能하다고 할지라도 冷凍機, 其他 附屬設備을 감안할 때 數百[MVA]이상이 되어야만 從來의 發電機에 比하여 有利하다고 한다.

現用 大容量 터빈發電機는 3,600[rpm]에서

1,500[MVA]程度가 限界이나 超電導 界磁의 터빈 發電機에서는 10,000[MVA]程度도 計算上 可能하다. 이것은 發電機 出力이 發生磁界와 「암페어」 導體數에 比例하므로 超電導化함으로써 發生磁界는 현재의 1.2[T] 정도에서 5倍인 6[T]가 되고, 「암페어」 導體數도 2倍程度로 할 수 있어 같은 크기라면 常電導 發電機의 約 10倍의 出力을 낼 수 있다는 理論 根據에서도 理解할 수 있다.

이와 같은 大容量機의 開發에는 今後 莫大한 開發費를 要할 것이므로 1980年代 末이나 1990年代에나 實用機의 出現이 豫想된다는 것이 一般的인 見解이다.

그림 6은 超電導 「터빈」發電機(model)의 原理圖이다.

超電導 「코일」은 圓筒狀의 回轉子用 眞空斷熱容器 속에 넣는다. 眞空斷熱容器 兩端部는 超電導코일을 冷却媒體 「헬륨」의 歸還가스와 熱交換을 시킴으로써 斷熱效果를 높이고자 한다. 眞空斷熱容器 外周에는 斷熱과 電磁遮蔽를 위하여 遮蔽圓筒이 배치되고 있다. 冷却媒體 「헬륨」은 軸端에서 mechanical seal 로 軸封하고 送液된다. 電機子內周는 絶緣筒으로 구성할 必要가 있으며 電

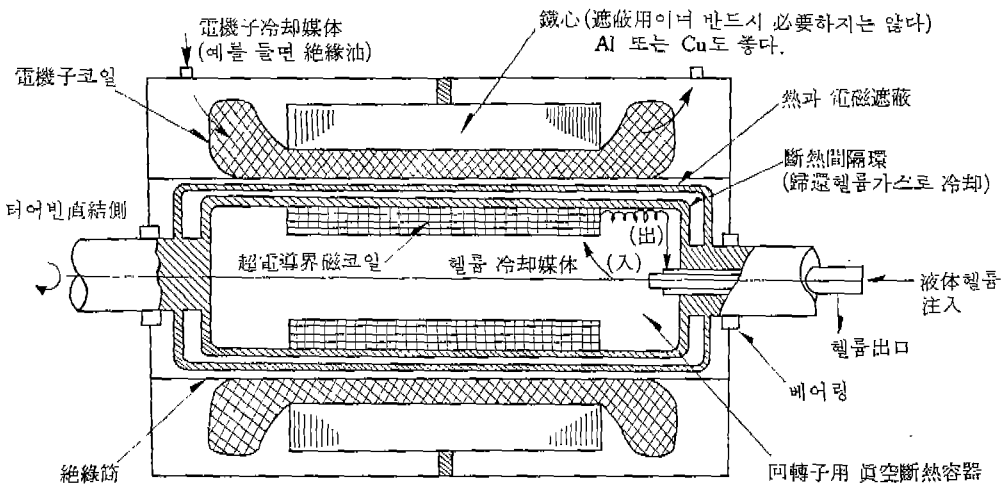


그림 6.

機子코일은 冷却效果를 크게함과 동시에 絶緣을 접하여 絶緣油로 油冷하는 것이 좋다. 參考로 超電導實用機를 想定하여 特性, 치수, 重量 등을 WH社에서 計算하여 比較한 例를 표 3에 표시한다.

표 3. 640[MVA] 터어빈發電機의 比較

諸量	型式	超電導機			
		從來機	遮蔽*		
			鐵心	없음	導體
$X_d$ [%]	189.1	43.8	38.5	36.7	
$X'_d$ [%]	31.0	27.8	27.6	27.6	
$X''_d$ [%]	26.4	20.9	21.8	21.9	
實効길이[in]	245	61.6	85	91	
回轉子直徑[in]	40	36	36	36	
固定子外徑[in]	104	105	100	112	
베어링사이距離[in]	413	218	242	248	
回轉子重量[lb]	120,000	36,000	49,500	53,000	
發電機重量[lb]	953,000	350,000	100,000	100,000	
効率[%]	98.6	99.63	99.60	98.93	
勵磁容量[KW]	2.400	6	6	6	
冷凍機容種[ft <sup>3</sup> ]	--	200	200	200	

\*遮蔽는 그림 6參照

超電導發電機는 主로 大電力 發電所用이 되겠지만 이 發電機는 MHD發電과 같은 直接發電方式이 實現되거나 核融合과 같이 無限에 가까운 에너지源이 얻어진다면 할지라도 必要한 機器이며 最近에 있어서 에너지需要의 增加에 따라 發電機 單機容量을 增大시켜야 하는 觀點에서도 實用化에 拍車를 가하여야 한다.

그러나, 航空機나 特殊船舶등 에서와 같이 經濟性보다는 크기나 重量에보다 더 重點을 두어야 할 때에는 같은 出力이면 磁界가 강한 만큼 型體가 작게되는 超電導發電機가 현재에 있어서도 그나름대로의 意義를 가지게 되지만 일반적으로 超電導機器의 實現을 힘들게하는 것의 하나는 超電導 코일을 一氣壓下에서 溫度 4.2[°K]의 液體「헬륨」속에 넣고 超電導狀態로 유지하는 技術이며 이렇게 하기 위하여 「헬륨」의 液化作業이나 冷却裝置가 必要하므로 이것에 消費되는

「에너지」와 「코일」을 超電導化함으로써 利가되는 「에너지」를 比較하는 것이 經濟적으로 問題가 되기 때문이다.

위에서 解説한 超電導 回轉機는 界磁에 超電導電磁(超電導 코일)을 사용한 구조의 機器이므로 超電導 電磁石材料가 開發됨으로써 이와 같은 機器를 구상하게 된 것은 두말할 必要도 없다.

超電導 電磁石은 船舶推進用 磁界發生, 船舶 航空機 등의 動力源, 超高速列車 浮上用 磁界發生 등 強磁界를 필요로 하는 分野 中에도 널리 應用될 것이다. 超電導 電磁石은 1957年 前後 Nb<sub>3</sub>Sn, Nb-Zr 등의 超電導가 Matthias氏와 Kuzler氏에 의하여 알려져지고, 이들 物質이 매우 強한 磁界(數拾~數百[KG])에서도 超電導를 유지한다는 事實이 발견되면서부터 強磁界를 發生하는 超電導 電磁石이 實現되었다.

이와 같이 해서 出現한 超電導 電磁石은 強磁石 發生 뿐만 아니라 無損失이라는 높은 經濟性 때문에 驚異적으로 발전하여 왔으며 앞으로도 超電導 大容量 電氣機器에는 물론이고, MHD用과 核融合分野에서 大型 超電導 電磁石의 實現이 不可缺의 要素가 된다는 點에서 꾸준히 關心의 對象이 된다.

### ◎ 알 림 ◎

본 협회는 그동안 非會員 업체에도 개방해 오던 電氣會館 건물의 임대를 會員 업체에 한정시키기로 하고 현재 입주 중인 非會員 업체에 대해선 지난 1일 이미 퇴거요청을 했습니다. 이에 따라 본 협회는 會館의 임대를 원하는 會員업체에 대해 입주신청을 받고 있으나 입주를 희망하는 會員업체는 협회 사무국에 신청해주시기 바랍니다.