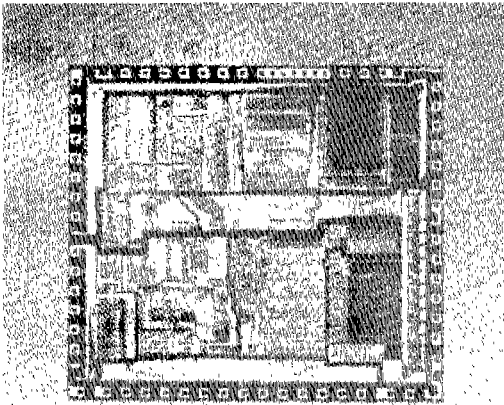


超傳導의 電力設備 에의 利用展望

Utilization Prospect of Super Conduitivity in the Power Facilities



李 承 院

서울大 工大 教授

1. 超傳導性的 發見

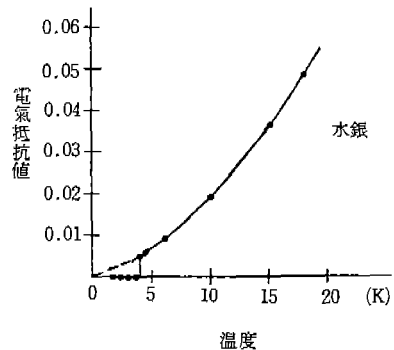
電氣傳導는 金屬中の 自由電子에 의해서 이루어 짐은 周知의 事實이다. 自由電子는 格子 모양으로 配列되어 있는 原子 사이의 空間을 通過함으로써 電氣를 運搬한다. 그러나 高溫狀態가 되면 熱運動이 심해져서 그 通路가 狹소해지고 많은 電子가 原子와 衝突하게 됨으로써 電氣抵抗이 增大하게 된다 反對로 溫度가 내려가면 電子의 通路는 점점 넓어져 電氣抵抗이 減少한다. 그리하여 熱運動이 전혀 없는 絶對零度가 되면 最低 電氣抵抗狀態가 되어진다.

이러한 金屬의 性質을 利用하여 溫度를 測定할 수 있다. 1911년 Leiden大學의 Kamerlingh Onnes 교수는 水銀을 使用하여 그 電氣抵抗을 測定함으로써 液体 He의 溫度를 測定했다.

溫度 測定 媒体로서 水銀을 使用했던 이유는 純粹金屬이어야만 熱運動 停止후에도 原子 配列格子가 이그러지지 않아 電氣抵抗이 最小狀態가 되는데 水銀은 室溫에서도 流動性을 가진 液体金屬이므로 이를 증류 純度가 높은 金屬으로 만들기가 용이하였기 때문이었다. 이때 Onnes 교수가 測定한 水銀의 溫度抵抗曲線이 그림 1과 같이 되었다.

이 曲線을 살펴보면 4.2K까지는 상상했던 대로 溫度의 減少에 따라 전기저항이 比例적으로 減少했는데 4.2K 近處에서 전기저항이 急減하여 거의 零狀態에 이르렀다.

古典物理學에 따르면 不純物에 의한 金屬格子의 결함으로 인한 電子의 衝突때문에 저온부분에서는 그림 1의 점선과 같이 되어야 하며 不純物이 없더라도 破線과 같이 되어야 하는데 4.2K에서 갑



〈그림-1〉 水銀의 溫度抵抗曲線

〈表-1〉第一種 超電導材料

元素	T _c (k)	元素	T _c (k)
Al	1.18	Ru	0.49
Ga	1.08	Ta	4.39
In	3.41	Tc	8.22
Ir	0.14	Tl	2.38
La	4.80	Th	1.37
Pb	7.23	Ti	0.42
Hg	4.15	W	0.01
Mo	0.92	U	0.68
Nb	9.17	V	5.3
Os	0.66	Zn	0.85
Re	1.70	Zr	0.55

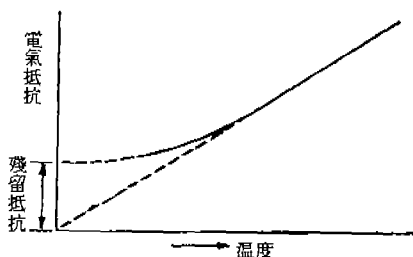
자기 잔류저항 조차도 없어져 버린 것이다.

이것이 바로 초전도 현상으로서 이제까지의 古典物理學으로서는 解明이 되지 않는 現象이었으나 때 마침 發達하기 시작한 量子論의 해석이 可能하게 되었고 이 현상을 超傳導現象이라고 부르게 되었다.

2. 超傳導 物質

極低溫에서 超傳導現象을 나타내는 物質은 Onnes의 水銀 以後 거듭되는 研究에 의하여 表1과 같이 많은 純粹物質들이 發見되었다. 이는 그림2에 표시된 바와 같이 純粹物質과 不純物 混入 物質의 超傳導 特性이 다른데 모든 學者들이 純粹物質에서만 超傳導性을 찾았기 때문이다. 그런데 超傳導物質의 利用上 가장 큰 소망은 高磁界의 實現인데 이 純粹物質들은 극히 低磁界에서도 磁界의 浸入으로 말미암아 그 超傳導를 상실하고 만다.

以上 두가지 이유, 純粹物質의 超傳導性 發見에의 注力과 低臨界磁界 때문에 超傳導에 관한 興味 상실로 超傳導現象의 發見 以後 50년의 세월이 헛되게 지나갔다.



〈그림-2〉不純物 混入物質의 抵抗曲線

그런데 1954년에 이르러 B. T. Mathius 등이 純粹物質이 아닌 Nb₃Sn라는 化合物이 超傳導性을 가짐을 發見하고 이에 依하여 J. E. Kunzler가 8.8 T의 高磁界 發生에 成功함으로써 低迷狀態에서 깨어나게 되었다.

이것은 전혀 예기하지 않았던 發見으로서 純粹한 單一元素가 아니고 金屬化合物이 超傳導性을 띄게 되어 高磁界를 發生할 수 있었다는 점, 이는 그 당시 理論的으로 해석을 할 수 없었던 것이었다.

그러나 美國의 工業界에서는 이 高磁界의 發生可能性 때문에 그후 많은 研究를 強行하여 1963年 10 T의 磁界를 發生하는 超電傳磁石을 만드는데 成功, 이때부터 超傳導는 活氣를 띄기 始作했다.

Nb₃Sn과 같은 超傳導材料는 單一元素 金屬의 超傳導와는 그 現象이 異質의이므로 別途의 理論的 背景을 必要로 하는 超傳導材料로서 이를 表示한 것이 表2와 같다.

그래서 종래와 같은 單一金屬體를 第一種 超傳導體라 하며, 化合物 또는 合金을 第二種 超傳導體라고 한다.

Onnes의 高磁界 發生의 꿈은 이 第二種 超傳導體에 依해서 이룩되었으며 美國 工業界에서 이 第二種 超傳體의 出現으로 超傳導時代가 도래 되었다.

3. 超傳導의 特徵

科學技術 발달 중 電氣에 관한 技術의 발달은 대단히 많은 부분을 차지한다.

〈表-2〉第二種 超電導材料

材 料 名	T _c (k)
(化合物)	
Nb ₃ Sn	18.2
V ₃ Ga	16.8
Nb ₃ (Al _{0.3} Ge _{0.2})	20.7
Nb ₃ Ge	~23
Nb ₃ Al	17.5
(合金)	
Nb·Zr	~10
Nb·Ti	~9
Nb·Zr·Ti	~10

특히 最近에 있어서의 電子技術은 半導體의 出現으로 因해서 눈부신 發展을 이룩하고 있다. 그러나 이 技術은 電氣技術이라기 보다는 半導體 物性 기술과 光學等에 起因하는 部分이 많으며 전자계산기도 Computer 科學에 起因한 發展이라고 볼 수 있는 반면에 超傳導 技術은 電氣의 根本 原理의인 新技術로서 革新的 電氣技術 發達에 도움을 줄 것으로 생각된다.

超傳導는 다음 4 가지 特徵을 가지고 있다.

- ① 電氣抵抗이 없다.
- ② 大電流를 흘릴 수 있다(銅線의 10¹¹ 배)
- ③ 強磁界를 發生시킬 수 있다(20T)
- ④ 永久電流를 흘릴 수 있다(10만년 이상)

電氣抵抗이 없다는 것은 電氣抵抗이 낮다는 것과는 本質的으로 相異하다. 超傳導라는 것은 原理的으로 抵抗이 없다는 것이다. 이것은 現在까지 使用되고 있는 銅線으로 製作된 전기기계와 비교하면 懸絶한 차이점이 있다.

즉 省에너지의 觀點에서 보더라도 전기기계를 超傳導體로 제작한 경우 저항에 의한 발열, 即 일과는 關係없는 주위에 발산되는 Joule 열을 없애 버릴 수가 있다. 또 大電流를 흘릴 수 있다는 特徵은 기계를 아주 적게 만들 수 있다는 장점이 있다. 大電流를 흘릴 수 있다는 것은 도체의 단면을 적게 할 수 있다.

即 現기계의 경우 銅量을 적게 할 수 있다는 것과 같다. 또한 大電流를 흘릴 수 있다는 것은 전기기계의 구성요소인 磁石에 鐵心을 쓰지 않아도 된다는 것을 의미함으로 小形化에 공헌할 수 있을 것이다. 超傳導에 依해서 強磁界를 만들 수 있다는 것은 전기에너지 변환에 반드시 必要한 것이 磁界인데 작게는 音聲發生器에서 부터 크게는 대형 電動機나 발전기에 이르게까지 이 磁界가 必要하게 되므로 이것을 前記한 大電流를 흘릴 수 있는 경우와 같은 의미에서 小形輕量의 에너지 변환장치를 만들 수 있다.

이것은 1948년 전자기술계에 트랜지스터가 탄생한 것과 흡사한 사실이라고 볼 수 있다. 라디오나 T.V에 진공관을 쓰고 있을 때 누가 현재와 같은 라디오나 T.V가 나오리라고 생각했겠는가. 마찬가지로 超傳導體의 出現은 電力界에도 이에 相應한 現象이 곧 實現될 것으로 推測된다.

다음에 超傳導의 영구전류 특징은 신비한 特徵으로 理解하기 어려운 性質이나 常傳導 코일에 超電力을 加해서 電流를 흘리다가 電源으로 부터 分離시켜 보면 그 電流는 약 1/10로 이내에 사라져 버리는데 반하여 超傳導體로 만든 코일에서 위경우와 같은 과정을 거쳐도 10만년 이상 아니 永久히 電流를 흘릴 수가 있다. 그래서 이 性質을 利用해 電氣 에너지를 저장하려는 研究가 進行되고 있다.

이와같이 超傳導는 現在期待되고 있는 新技術中에서도 가장 바라는 것으로 이것이 얼마나 빨리 電氣界에 혁명적 기술로 등장하느냐는 우리 電氣人의 이에 對한 認識與否에 달려 있다고 본다.

4. 超傳導 理論

前述한바 있듯이 超傳導體는 電氣抵抗이 전혀 없는 導體를 말한다. 이것은 금속격자의 열진동에 의한 전도전자의 산란이 온도가 내려감에 따라 감소, 결국에는 저항이 없어지는 현상으로 종래의 전도이론과는 다르다. 이러한 理論은 Bordeen Cooper 및 Schrieffer에 依해서 定立되었다. 이 理論을 이 3 사람의 이름 첫자를 따서 B. C. S. 이론이라고 한다.

常傳導의 電氣抵抗의 原因은 전도전자와 금속이온과의 散亂때문인데 이 현상은 호논의 교환에 依한 것이다. 즉 열운동을 하고 있는 金屬이온에 依해서 電子가 散亂했을 때 그 전자는 호논이 가지고 있는 運動量을 흡입 또는 방출한다. 即 저온이 되어가면 金屬이온의 진동이 작아지기 때문에 호논교환도 적어져 전기저항이 점차로 減少해 간다.

그런데 그 溫度가 어느 限界點 以下에 도달하게 되면 그 樣相이 달라진다. 이와같은 호논교환에 依해서는 설명할 수 없는 지경에 이르게 된다. 前記한 B. C. S. 이론 정립자중의 한사람인 Cooper 는 그 이론 정립당시 Irioni 大學의 大學生으로 Bell 研究所의 Bordeen의 指導下에 금속중의 電子의 相互作用을 연구하고 있었다. 이때 상호간에 斥力이 作用해야 할 電子間에 引力이 作用하는 경우를 發見했다. 이 現象은 쿨롬의 힘을 부인하는 현상으로 不可思議한 현상이 아닐 수가 없었다. 그래서 Bordeen, Schrieffer 등이 토론한 결과 이상태에서는 전자가 들쭉 붙어다님을 발견했다. 이 두

개의 전자가 결합된 것을 현재 Cooper Pair 라고 부르고 있다.

常傳導상태에서는 한자리에 한개의 전자만이 들어가는 것이 허용될 뿐인데 초전도 상태에서는 두개의 電子 結合體인 Cooper Pair는 얼마든지 들어갈 수 있다는 것이다.

超電導 상태라는 것은 전자가 Cooper Pair가 되고 있는 상태로서 한쪽 전자의 衝突로 일어나는 抵抗이 同時에 일어나는 다른쪽 電子의 衝突에 依해서 相殺됨으로 전혀 抵抗이 일어나지 않는다는 것이다.

이 現象은 그 導體가 어떤 極低溫의 臨界溫度 以下가 되어서야 비로소 일어나며 溫度가 그 臨界溫度 以上으로 올라가면 Cooper Pair는 깨어져 電子의 相互作用에 依한 抵抗은 相殺의이 되는 것이 아니라 상보적인 것으로 변한다. 이 B. C. S. 理論에 依해서 超傳導現象의 說明이 可能할 뿐 아니라 많은 實驗에 依해서도 그것의 正當성이 입증되고 있다.

5. 超傳導의 電力分野에의 応力

超傳導體에 依한 高磁界의 發生, 高電流密度 通電, 永久 電流 通電 등의 특징은 전력분야에서 볼 때 魅力的이 아닐 수가 없다.

現在의 전기기계는 磁束과 전류의 相互作用에 의해서 그 기능을 발휘하고 있으며 그 磁氣回路에 鐵, 電氣回路에 銅을 사용하고 있다. 그래서 자속밀도는 最高 1.5T 電流密度는 $10^2 \sim 10^3 \cdot /cm^2$ 가 最高限界值이다. 이것을 超傳導化 하면 磁束密度는 20T 電流密度는 $10^{13}A/cm^2$ 까지도 增大시킬 수가 있다.

이것으로 비추어 보면 超傳導가 電力界에서 볼 때 얼마나 魅力的인가를 가히 짐작하고 남음이 있다. 또 저항이 없기 때문에 이에 의해서 제작된 Coil 은 시정수가 무한대가 되며 영구전류를 흘릴 수 있다. 이것은 損失없이 많은 電力을 저장할 수 있는 可能性을 엿보여 주어 흥미있는 일이라 할 수 있다. 다음에 具體的으로 이러한 応力에 對해서 說明하기로 하겠다.

(1) 直流機

에너지 변환기에의 超傳導應用은 그 高磁界의 發生特徵을 利用하게 되는데 現在까지는 交流磁石은

實用段階에 이르지 못하고 있어 主로 交流勵磁 高磁界의 應用에 그치고 있다.

따라서 전기기계로서는 直流機와 同期機의 磁界 發生에 超傳導가 利用되고 있는데 우선 직류기중의 하나인 單極機의 경우를 說明해 보기로 하겠다.

종래의 常傳導 코일 磁石의 경우 그 磁界強度는 大略 1 T 정도였는데 이것을 超傳導磁石으로 하면 $B = 5 T$ 정도는 現在 용이하게 얻을 수 있다. 지금 단극발전기 원판의 직경을 2.0m 회전수를 1500 r. p. m.이라고 하면 원판의 평균속도 $V = 100m/s$ 가 된다. 지금 전기자로서의 有效長 L 를 0.7m 라고 하면 유도기전력 E 는

$$E = U \times B \times L [V] \\ = 100 \times 5 \times 0.7 = 350 [V]$$

가 되며 원판 2板을 직렬로 접속하면 700[V] 의 단자전압을 얻을 수 있다. 이와 같이 超傳導化할 경우 단극기를 충분히 범용기로 使用할 수 있음을 알 수 있다.

(2) 同期發電機

同期發電機의 경우도 固定子나 회전자를 다 超傳導化해야 하나 아직 交流磁石은 超傳導에 의해서 얻기가 어렵기 때문에 이 경우에도 直流磁石만을 超傳導化 하고 있다. 그런데 現在 發電機의 大容量化는 主로 냉각방식의 進歩에 依해서 이루어지고 있는데 그렇다 하더라도 기계적 구조상 크게 할 수 있는 치수에 限界가 있다.

따라서 전기가 철심 齒部에 있어서의 누설 磁束에 依한 리액턴스 및 蓄勢輪 効果의 絶對值가 變하지 않기 때문에 容量은 커지나 安定度가 낮은 기계가 된다. 이를 위해서는 齒部를 除去하고 누설자속을 減少시켜 그 減少分이 蓄勢輪의 相對的 減少分보다 크게 해야 한다.

이렇게 함으로 발전기는 10,000 MVA 정도까지 그 용량을 증대시킬 수 있을 것 같다. 이와같이 齒가 없는 긴 공극을 횡단해서 충분한 자속을 통과시키기 위해서 큰 기자력이 필요하게 된다. 이는 常傳導 코일로서는 不可能하고 超傳導코일이어야만 가능한 것이다. 이러한 관점아래 세계 각국에서 超傳導 發電機를 제작 시험하고 있다.

(3) 電力 케이블

現在 人類가 소비하고 있는 에너지의 約 30%가

전기에너지 형태로서 使用되고 있는데 이는 電氣에너지가 가지고 있는 여러가지 特徵 때문이며 人類文明의 向上과 더불어 그 비율은 급증할 것으로 생각된다.

따라서 발전소의 大容量化와 더불어 送電線路의 大容量化는 불가피하게 될 것이다. 또한 人間의 生活 環境內에서 종래의 架空送電線方式에 依해서 大電力을 輸送함이 곤란할 것이다. 따라서 高密度 大容量의 地中送電케이블 개발이 절실히 요망된다.

이에 對해서 종래의 油入케이블로서는 強制冷却을 한다고 해도 500kV 1.5GW까지가 送電容量의 限界가 될 것으로 생각되는바 大容量의 新方式이 開發되어야 하는데 이의 대상으로 管路氣中 送電 極低溫케이블 超傳導케이블이 생각되는데 大容量送電의 最終段階는 역시 超傳導케이블임이 틀림없다.

(4) 超傳導 에너지 저장

一般的으로 夜間電力需要는 주간의 약 1/2 정도 밖에 되지 않는다. 따라서 야간에 막대한 投資를 해서 建設한 電力施設이 늘게 되어 經濟性이 대단히 나빠진다. 특히 原子力發電所의 경우는 그 經濟性이 더욱 나빠진다. 이에 대한 現在의 해결책이 揚水發電所이다. 그런데 이 揚水發電所를 建設함에 있어서는 우선 地點이 有限할 것이며 또 저수지가 2重으로 必要하게 되고 저장 방출 양면으로 손실이 발생함으로 그 損失이 막대하다. 그래서 에너지 절약 時代를 맞이하여 새로운 에너지 저장법이 탐구되고 있다. 이에 가장 有力한 방법이 超傳導磁石에 依한 에너지 저장法인 것이다.

超傳導코일은 前記한바 있듯이 電氣抵抗이 없으므로 그 時定數가 無限大이다. 일단 電流를 흘린다음 超電力을 除去하더라도 永久히 電流는 흐른다. 따라서 영구히 電磁에너지로서 전력을 저장할 수가 있다. 즉

磁束密度가 B라 하면 $W = \frac{1}{2} \frac{1}{\mu_0} B^2 [J/m^3]$ 의 에너지 密度로 에너지를 저장할 수 있다. 여기서 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ 로서 超傳導코일로 $B = 5 T$ 의 磁界를 만들면 m^3 당 $10^7 J$ 의 에너지가 저장된다. 따라서 직경 200m 높이 100m의 超傳導 코일을 만들고 그 平均磁界가 5 T가 되게하면 $3 \times 10^{13} J$ 의 에너지 즉 10,000MWh의 에너지를 저장할 수 있다. 이것은 大形揚水發電所와 같은 규모이다.

여기서 10,000MWh의 揚水發電所의 크기를 한번 생각해 보기로 하자. 揚水發電所 저장에너지는 저수량을 $M[m^3]$ 낙차를 $h[m]$ 라고 하면 그 저장에너지 W 는 $W = Mgh \times 10^3 [J]$

따라서 $h = 300[m]$ 일 경우 10,000MWh를 저장하려면 $1.22 \times 10^7 m^3$ 의 貯水量이 있어야 한다. 이것은 직경 1km 길이 15m의 上池와 下池가 落差 300m가 되어야 한다. 따라서 超傳導코일의 경우가 얼마나 그 시설 규모가 작은가를 알 수 있다. 그리고 揚水發電所보다 효율이 25% 정도나 좋다(부속장치에서 손실을 제외하면 超傳導코일에서는 損失이 발생하지 않으므로) 10,000MWh의 揚水發電所의 경우보다 하루 2,500MWh의 電力이 節約된다.

또 하나의 揚水發電所를 훨씬 능가하는 잇점이 있는데 그것은 高応答度(10ms 台)로서 발전기교장시에 지체없이 放電시킬 수가 있어 연쇄반응에 依한 사고파급을 막아 大停電이 되는 것과 같은 事故를 未然에 防止할 수가 있다.

이상으로서 超傳導에너지 저장장치가 어떻게 揚水發電所를 대신할 수 있는가에 대해 설명했다. 특히 우리나라는 石油資源의 全無와 需給展望의 불투명 때문에 앞으로 發電所는 거의 原子力으로 이용할 예정인데 原子力發電은 투자비라는 점과 원자력 발전량 조절에 따르는 위험성을 감안할 때 電力의 發電과 저장의 양면을 고려하지 않을 수 없을진대 여러 면에서 양수발전소를 능가하는 超傳導에너지 저장에 관심을 가져야 할 것으로 생각된다.

(5) 超傳導에너지 저장에 依한 安定度 向上

電力系統에 落雷等の 事故가 일어났을 경우 피뢰기가 동작하면 負荷가 가벼워져서 發電機가 加速되어 폭주하는 경우가 있고 또 L과 C의 분포정수회로인 송전선에 異常振動이 發生하는 경우가 있는데 이 경우 超傳導에너지 저장장치를 系統에 연결 에너지 방출 또는 흡입케 해서 이 현상을 막을 수 있다.

미국에서는 太平洋연안 5,000MW의 교류 및 직류송전계통의 異常振動 억제용으로 직경 3m 높이 1.2m 용량 30MJ의 超傳導코일을 제작중인데 금년 말까지 작동시킬 예정이다.

(6) 超傳導코일에 依한 역율調整

超傳導에너지의 저장장치는 다이리스터回路와 結

