초전도 공업의 현황과 문제점

김 상현* · 윤 문수** · 안 우희***
* 한국전기연구소 극저온 재료실장
** 한국전기연구소 연구위원
*** 한국전기연구소 소장

1. 서 론

超電導技術은 本質的으로 에너지技術로 IC時代를 초래한 Transistor, 光通信과 CD(Compact Disk)를 낳은 Laser, Nylon 등의 合成化學 그리고 에너지전환을 초래한 原子力과 더불어 今世紀의 5大技術革命의 하나로 今世紀의 최후의 技術革命이라고 일컬어 지고 있다. 그것은 最近의 高温超電導材料(High Tc Superconductor)의 發見과 더불어 앞으로 예상되는 産業社會의 변화는 너무나도 크기 때문이다. 첫번째는 重電機器, 列車 등의 大型機械의 革命, 두번째는 電力網, 核融合 등의 에너지 分野에서의 새로운 可能性, 세번째는 Josephson 컴퓨터나 腦磁氣Sensor에의 電子分野의 새로운 應用의 展開이며 그밖에 粒子加速器 등의 實驗裝置, 宇宙防衛무기 등 대단히 넓은 範圍에 영향을 미칠 것이다.

이러한 의미에서 最近 世界는 흥분에 휩싸여 있으며 科學者는 Nobel賞을 목표로 基礎研究에 급급하며 産業界에서는 應用技術開發에 혈안이 되어 있다. 한편 政府는 國家主導下의 産·學·研의 協同體制의 구축과 더불어 研究會, 간담회, 委員會 등을 구성하여 推進하고 있다. 우리나라에서도 이미 超電導技術의 開發촉진을 위하여 國家主導의 大型協同研究 프로젝트로 선정하고 産·學·研이 參與하는 開發研究協議會를 구성, 발족한 事實[1]은 讀者여러분도 잘 아시는 일이다.

本 報告에서는 超電導의 應用技術과 展望 그리고 共通부분인 超電導材料에 촛점을 두고 問題點을 記述하고자 한다.

2. 超 電 導

2.1 性 質

超電導는 常電導와는 달리 特異한 性質을 갖고 있다. 첫째는 完全導電性 즉 電氣抵抗이 零이며 永久電流를 흐를 수 있는 점이다. 둘째는 物質의 內部에 磁場이 全然 침투하지 못하는 完全反磁性 즉 Meisser效果를 표시하는 점이다.

한편, 超電導 狀態에 있어서는 温度(T), 磁場(H), 電流密度(J)의 座標軸에 각각의 臨界值보다 작은 領域에서만이 超電導가 얻어진다. 따라서 超電導의 應用에서는 이 3개의 臨界値 즉 臨界温度(Tc), 上部臨界磁場(Hc_2) 그리고 臨界電流密度(Jc)의 값이 큰 것이 重要하다.(그림 1) 또한 Tc, Hc_2, Jc의 균형도 必要하다. 다시 말하면 2개의 臨界値가 커도 하나의 臨界値가 작으면 問題가 된다.[2)-4)] 그외에 壓力의 문제가 있으나 생략하기로 한다.[5)]

2.2 時代의 區分

現在 人類는 超電導의 제3期에 접하고 있다고 한다. 지금까지의 超電導의 발전사를 簡單히 소개한다.

제1期(1911年~1956年)는 低温物理學의 時代로 1911年 水銀의 超電導現象이 K.Onnes교수에 의해 發見된 이래 低温物理의 基礎的인 側面으로부터 活發한 研究가 進行되었다. 이 시기의 실험결과를 基礎로 두 개의 電子가 Copper쌍을 이루어 相互間에 에너지를 교환한다는 BCS(Bardean-Cooper-Schrieffer)理論[6)] 이 탄생되었고

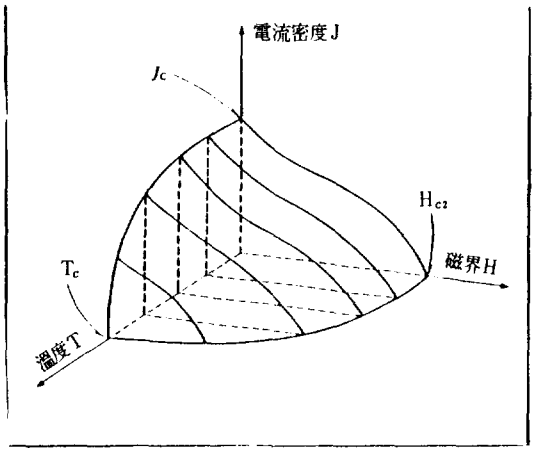


그림 1. 초전도상태의 T-H-J특성

실험결과를 잘 理解시켜 주었다. 이어서 제2期(1957年~1986年)에는 Nb-Ti, Nb_3Sn, Nb_3Ge 등의 Hc_2가 높은 合金, 金屬間化合物의 제2種 超電導材料(低温超電導材料)가 發見되었고 極細多芯線의 線材加工技術과 應用技術의 開發이 進行되었다.[7)-9)] 한편 應用技術은 액체He(沸點 : 4.2K)의 極低温의 사용이 불가피하여 極限技術의 蓄積이 必要했다. 작년말(1986年)부터는 ceramic系의 Tc가 높은 超電導材料(高温超電導材料)[10),11)]가 잇달아 發見되어 超電導의 應用이 액체He으로부터 값이 싸고 使用이 편리한 액체N_2(沸點 : 77K)의 時代로 이동하려는 時期가 되었다. 이 時期가 제3期이다.

2.3 問 題 點

超電導技術의 致命的인 문제점은 超電導材料의 冷却이다. 즉 現在까지의 應用이 可能한 超電導材料는 Nb-Ti, Nb_3Sn 등의 低温超電導材料로 最高의 Tc를 갖는 Nb_3Ge가 23K이므로 액체He의 사용은 불가피하다. 그러나 액체He의 근본이 되는 He가스[12)]는 天然가스, 大氣中(5ppm), 地球의 地殻內部(3ppm)에 미량이 포함되어 있으며 産出地도 대부분 美國이므로 비싼 가격으로 輸入해야만 하는 制限性을 갖고 있다. 따라서 超電導와 低温物理의 實驗用으로 사용하는 정도라면 問題는 없지만 大量의 액체He이 必要한 實用化에는 큰 障壁이 되고 있다. 또한 액체He은 4.2K의 極温度이므로 취급이 어렵고 比熱이 작으며 He液化機도 極低温을 達成해야 하므로 大規模이고 에너지소비가 크며 裝置도 복잡한 것도 事實이다.

이러한 意味에서 超電導材料의 Tc를 높이는 것은 큰 의의가 있다. 最近의 高温超電導材料의 Tc가 77K에서 확실시 되고 액체N_2를 冷却劑로 사용되는 應用이 1차단계로 성공하더라도 액체He을 사용한 應用보다는 經濟性, 安定性, 信賴性 등의 問題點은 거의 해소시킬 것이다. 더 나아가 室温 근처에서의 常温超電導材料가 發見되면 超電導材料를 사용한 Micon이 電氣밥솥, 에어콘, 세탁기 등의 모든 것에 내장되어 超電導의 應用技術을 우리 주변에서 利用되도록 될 것이다.

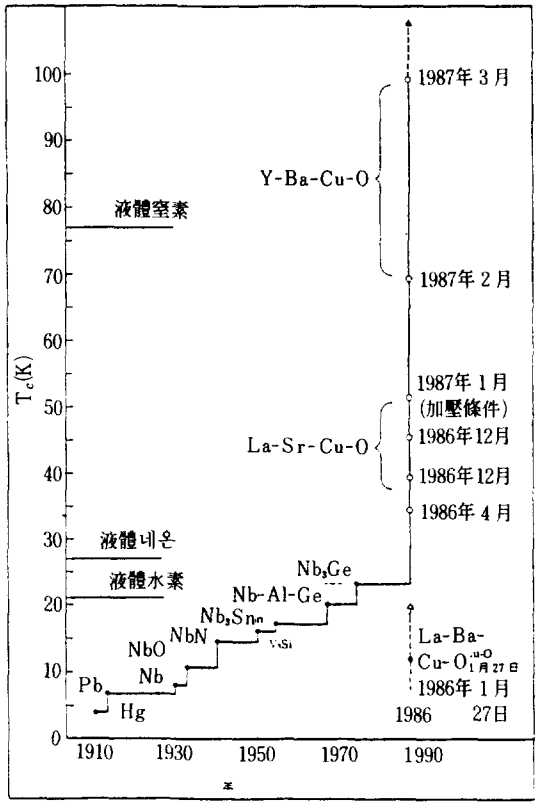


그림 2. 초전도 재료의 Tc의 변환

3. 高温超電導材料

3.1 高温超電導材料의 發見

高温超電導材料는 앞에서 說明한 바와 새로운 것은 아니다. 다만 超電導材料가 電流가 잘 통하는 金屬이 아니라 絶緣體인 酸化物Ceramic이라는 事實과 지금까지 타당했던 BCS理論의 壁이라는 Tc=40~50K의 한계를 넘었다는 事實이 흥미롭고 기묘한 일이라 하겠다.

高温超電導材料의 開發競爭의 발산은 1986年(작년)4月 스위스의 IBM社 츄리히研究所의 J. Bednorz와 K.

Müller博士가 Zeitschrift für Physik誌에 La－Ba－Cu－O系의 Ceramic系로 Tc가 30K이라고 發表[10]되고 부터이다. 11月에는 日本 東京大學의 田中교수[13]가 獨自的으로 高温超電導材料를 만들고 完全導電性과 Meissner 効果를 측정하여 超電導를 확인하고 結晶構造가 Perovskait型이라고 發表한 것을 계기로 Ceramic系 酸化物이 急速히 研究目標로 떠 올라 美, 日, 中 등의 大混戰의 開發競爭이 시작된 것이다.(그림 2)[14),15)] 유럽에서 새싹을 만들고 일본에서 재배하여 美國에서 꽃을 피게 하고 있다고 요약하고 있다.

1973年까지의 Tc의 변천은 그림2에서 알 수 있는 바와 같이 완만한 進步를 이루고 있으나 1986年부터 1987年에 걸쳐서는 1개월에 대략 7度씩의 빠른 比率로 進行하고 있다고 할 수 있다. 이러한 추세로 進行된다면 300K 근처의 常温超電導材料의 發見은 가까운 날에 實現되리라는 樂觀的인 期待도 무리는 아닐 것이다.

한편 Ceramic系의 高温超電導材料의 開發研究는 設備投資가 그리 必要하지 않아 손쉽게 제조할 수 있는 매력을 지니고 있다. 제조법으로서는 混式法과 乾式法이 널리 알려져 있다. 그림3에 乾式法에 의한 제조공정을 표시한다. 酸素가 많은 雰圍氣에서 焼成하여 徐冷 또는 焼成後에 酸素中에서 Annealing 하고 다시 徐冷하면 누구나도 만들 수 있다. 그러나 Tc의 측정은 時間에 따라 약간 變한다. 다시말하면 高温超電導材料는 不安定한 것도 事實이나 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$의 경우 100K(Tc)근처인 것은 틀림없다.

3.2 問題點

3.2.1 Jc

지금까지의 開發競爭은 Tc가 話題의 촛점[16),17)]이었지만 高温超電導體의 제1의 問題點은 Jc의 向上이다. Hc의 경우는 低温超電導材料인 Nb-Ti가 12T, Nb_3Sn이 24T정도인데 반하여 Y－Ba－Cu－O系의 高温超電導材料는 액체N_2온도에서 110~120T에 到達하므로 그리 問題는 없으나 문제는 Jc이다. Jc에 대해서는 初期부터 發表하지 않고 비밀로 한 것도 事實이다. 그것은 Jc가 數~數십(A/㎠)정도로 너무 작아 화제가 되지 않는다는 意味에서 였다고 한다. 지금까지의 高温超電導材料의 Jc의 世界最高記錄은 77K에서 ATT(미국 電話電信)社 Bell研究所가 發表[15]한 1100(A/㎠)이나 低温超電導材料인 Nb-Ti가 10^4~10^5(A/㎠), Nb_3Sn이 10^5~10^6(A/㎠)이다. 따라서 實用의 超電導磁石으로 應用되기 위해서는 앞으로 10^2倍以上 Jc를 向上시키지 않으면 안되는 實情이다.

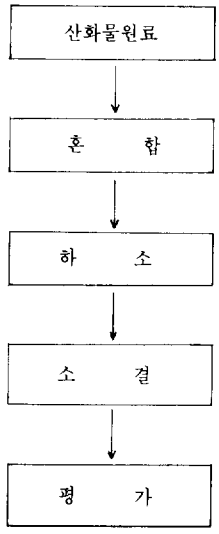


그림 3. 건식법

3.2.2 Process技術

Ceramic系 超電導材料를 에너지分野에서 實用化하기 위해서는 電線으로 사용하도록 線材化시킬 必要가 있으며 電子Device나 Sensor의 應用에는 薄膜化시킬 必要가 있다. 다시말하면 Process技術이 必要한데 여기에는 몇가지의 問題點이 있다.

Process技術은 Ceramic의 致命的인 弱點인 견고성과 脆性때문에 線材化技術, 薄膜技術, 焼結成型技術, 單結晶化技術이 注目되고 있다.

線材化技術은 金屬管에 超電導材料의 분말을 넣고 引抜 및 壓延하여 單芯線이나 極細多芯線으로 하거나 超電導材料를 薄膜으로 coating하여 Tape狀의 線材를 製作하는 것이다. 日本 東芝와 昭和電線에서는 Tc가 93.7K의 YBa_2Cu_3Ox를 使用하여 直徑 6㎜, 길이 數十㎜의 線材를 제작했다.[15] 그러나 線材의 Tc는 87K가 世界新記錄인 실정이다. 즉 高温超電導재료를 加工하면 Tc가 낮은 温度로 이동되며 더우기 큰 問題點은 YBa_2Cu_3Ox의 焼結體의 Jc가 110(A/㎠)인데 반하여 線材의 Jc는 6(A/㎠)이며 Tape狀의 線材의 Jc도 數(A/㎠)정도인 것이다.

薄膜化技術은 塗布方法, 蒸着方法, Sputterring方法 등이 알려져 있으며 線材나 電子部品의 應用으로서 檢討되고 있다. 그러나 앞에서 說明한 Jc의 問題와 製品化할 때의 生産에서의 信賴性, 酸素의 제어 등이 큰 問題點이다. 電子應用의 代表인 Josephson素子의 경우는 高温超電導材料上에서 數㎜의 絶緣膜을 어떻게 만들 것인가도 問題點으로 나타나고 있다.

그외 燒結成型技術, 丹結晶化技術이 있으나 加工技術과 加工時의 性能向上, 再現性의 問題 등이 심각하다.

3.3 今後의 課題

Ceramic系 高温超電導材料의 今後의 課題는 基礎的인 面, 材料的인 面 그리고 應用的인 面으로 압축할 수 있다.

첫째로 材料的인 面에서는 우선 常温超電導材料의 發見과 더불어 構造, 造成, 處理 등의 검토가 필요하다. 즉 Ⅱ族과 Ⅲ族의 酸化物을 바탕으로 한 高温과 常温超電導材料의 탐색은 물론이지만 1차단계로 액체N_2온도에서 安定하게 사용할 수 있도록 信賴性있는 材料設計의 硏究가 必要하다.

둘째로 지금까지 金屬의 低温超電導材料에서 타당했던 BCS理論을 대치하는 새로운 高温超電導材料의 理論의 定立과 더불어 物性硏究가 필요하다.

세째로 線材와 薄膜의 應用硏究로 方向性, 內部欠陷, 燒結温度, 燒結雰圍氣, 열처리 등과 Jc향상, Process技術開發이 필요하다.

4. 超電導의 應用과 問題點

앞에서도 說明한 바와 같이 超電導現象이 1911年에 發見되고 이미 70여년이 경과하고 있으나 實際로 超電導의 應用이 시작된 것은 불과 20年 以內라 할 수 있다. 그 원인은 現在까지의 超電導의 應用에는 액체He(4.2K)의 極低温을 사용해야만 하는 極限技術인 點이며 그로 인한 技術蓄積이 적었으며 더우기 超電導材料의 開發이 부진했던 탓이라 하겠다.

超電導의 應用은 大電流와 強磁界發生의 특징을 이용하여 표1에 표시한 바와 같이 주로 電氣的인 應用과 電子的인 應用으로 추진되고 있으며 小型의 應用에는 이미 實用段階에 들어 간 것이 많다. 今後 수년내에는 最近의 高温超電導材料를 大型으로 應用할 수 있는 첫걸음이 시작될 것이다. 여기에서는 電氣的인 應用만을 다루기로 한다.

표. 1 초전도 응용

분 야	용 도
전 력	발전기, 포터 송전케이블, 변압기, 전력저장
에너지	핵융합, MHD발전
고에너지 물리실험장치	가속기, 입자검출기
수송기기	자기부상열차, 선박
의료장치	NMR-CT, 중간자 발생장치
반도체 제조장치	단결정 증계기
통신 Cable	광섬유 증계기
Device	고속동작 LSI, Josephson소자, SQUID

표 2. SMES와 양수발전의 비교

區 分	ENERGY 形 態	규 모 (MWh)	綜合效率 (%)	建 設 費 (千원/KW)	比 考
揚水發電	위 치 ENERGY	1000 ~10000	56~70	165	
SMES	磁 氣 ENERGY	1000 ~10000	>90	83	高温超電導線材의 開發로 建設費가 더욱 低下

4.1 超電導에너지 貯藏

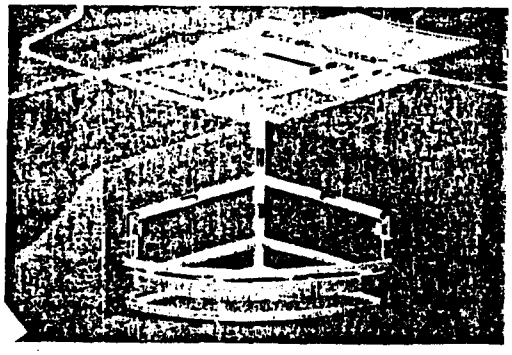
現在 利用되는 發電設備는 電力消費의 Peak時에 맞춘 것으로 유감스럽지만 深夜의 잉여전력은 버리는 형태이다. 그러므로 深夜의 잉여전력으로 揚水發電을 하고 있지만 표2에서 알 수 있는 바와 같이 效率을 60%밖에 얻을 수 없어 에너지의 거의 반 정도는 버리는 셈이다. 그러므로 超電導의 永久電流의 性質을 利用하여 電力에너지를 저장하였다가 必要時에 利用하는 超電導에너지貯藏(Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES) 이 注目되고 있다.

1960年代 발표되었지만 超電導技術의 進步에 따라 1970年代 美國 Wisconsion大學의 R. Boom교수를 中心으로 具體的인 開發硏究가 進行되었고 現在는 10GWH級의 槪念設計가 美國, 日本에서 행해지고 있다. 現在의 計畫으로는 低温超電導材料를 사용하여 2010年頃에 商用Plant 건설의 計畫을 하고 있으며 그 상상도는 그림4와 같다. 原理는 액체He이 들어있는 低温槽에 超電導磁石을 삽입하고 電磁力의 問題로 岩盤에 設置하는 것으로 지진등에 대한 岩盤의 立地條件, 信賴性技術, 低温構造材料, 斷熱材料 및 超電導材料 등의 Magnet材料技術이 今後의 과제이다. 한편 宇宙Station에서 太陽發電을 하고 이 電力을 Micro波로 海上基地에 送電하고 SMES로 貯藏하여 必要時에 利用하는 方式도 檢討中이다.

最近의 高温超電導材料의 開發로 이들의 開發計劃이 액체He 대신에 액체N_2에서 實用化되면 效率이나 建設費의 面에서 엄청나게 우수할 것이며 취급이 용이하여 家庭用으로서의 利用도 가능케 될 것이다.

4.2 超電導 送電

現在 人類가 소비하고 있는 에너지의 30%가 電氣에



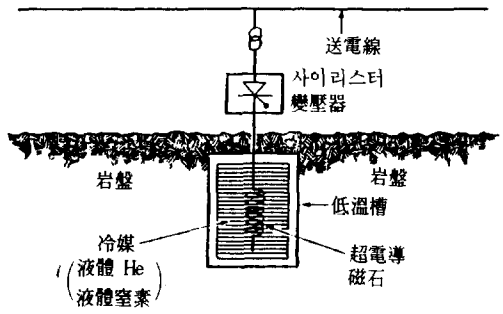


그림 4. SMES

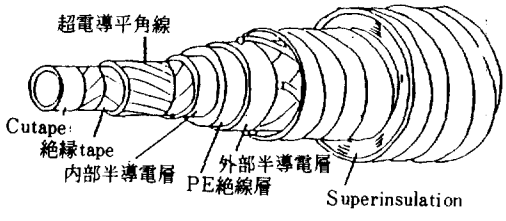


그림 5. 초전도 Cable

더욱 增加해 갈 것이며 大電力의 輸送을 위한 送電線路도 大容量化가 될 것이다. 이에 對處하기 위하여 都市美觀을 고려해 高密度大容量의 地中送電이 檢討되고 있으나 현재의 油入Cable의 경우 強制冷却을 한다해도 2~3GW級에 용량의 한계가 있어 그 以上이 될 경우에는 電氣抵抗 "0"의 超電導Cable에 의한 送電이 唯一한 方法이다. 超電導送電이 利用되어야만 하는 또하나의 큰 原因이 있다. 送電效率을 높이기 위하여 最近 交流電壓에서 50万V 以上으로 높이는 등 여러 方面에서 努力을 하고 있지만 現在 사용되는 Al 이나 銅系의 送電線을 사용한 常電導에서는 全發電量의 6~10%의 損失은 불가피하다.

예를들면 100万W의 電力을 흘린 때의 손실은 100万W의 原子力發電所 1개에 相當하다고 하면 損失의 중요성은 쉽게 이해되리라 믿는다.

그림5에 현재 日本에서 開發中인 超電導Cable(SC Cable) 의 構造를 표시하지만 OF Cable과 크게 다른 것은 아니다. 다만 액체He의 冷却劑에 의해 導體(超電導體)가 잘 冷却하는 構造가 必要하고 특히 SC Cable에서는 절연체를 통하여 熱을 放出시킬 필요가 없는 점만이 다르다고 할 수 있다. 이 경우 問題가 되는 것은 Cable의 비용절감, 신뢰도확보, 수명보증을 위한 極低温電氣絶緣技術의 確立 및 그것을 支持하는 材料技術이다.

또한 電壓方法도 큰 問題點으로 남아있다. 즉 交流送電은 送電時에는 Hysterisis損과 表皮效果에 의한 損失이 크다. 한편 直流送電은 交流와 같은 問題는 없지만 Converter와 Inverter로 直流를 交流로 變換할 必要가 있다. 그 選擇은 어떠한 超電導材料가 開發되는가에 따라 좌우될 것이다.

4.3 MHD 發電

MHD(Magneto Hydrodynamic)發電 system은 現在의 石油火力에서는 40%밖에 되지 않는 熱效率이지만 이것을 55%정도로 向上시키는 소위 에너지 절약형 system 이다. 특히 石油波動이후 石油燃料의 安定的인 確保가 큰 問題로 등장하는 最近은 에너지 자원을 石炭에서 해결코자 하는 경우 MHD發電은 지극히 적절한 發電形態라 할 수 있다. 現在 미국, 소련, 日本등지에서 活發히 研究開發中이며 특히 소련은 50万kW의 Plant을 建設中이다.

原理는 그림6과 같이 化石燃料의 高温가스를 2000℃ 이상으로 하여 Plasma로 한 후 強磁界中에 高速으로 通過시키면 이온화된 高温가스와 磁界에 의한 Farady 效果에 의해 磁界와 直角方向에 電位를 發生시키는 즉 熱→電氣의 에너지變換過程의 發電이다. 1000℃정도의 高温의 연소가스는 다시 熱交換하여 蒸氣化하여 터빈發電機로 再利用한다.

MHD發電의 특징은 燃料의 多樣化, 높은 熱效率, 環境問題의 輕減 등이 있지만 몇가지의 問題點도 대두되고 있다. MHD發電의 效率을 向上시키기 위해서는 強磁界(상용하에는 6T이상)가 必要하며 이를 위해서는 常電導의 磁石보다 電力損失없이 強磁界를 發生시키는 超電導磁石開發은 피할 수 없는 실정이다. 또한 2000℃ 이상의 高温가스를 利用하므로 高温耐熱材料의 問題도

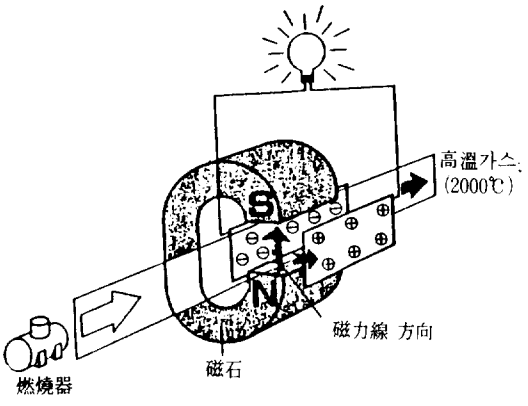


그림 6. MHD 發電

기각하다.

4.4 超電導 發電機

電動機와 같이 發電機는 coil과 磁石으로 구성되며 그 原理는 磁石이 만드는 磁場속을 coil이 回轉하여 coil에 電流를 發生시키는 Farady의 電子誘導法則을 應用한 것이다. 그러나 電機子卷線과 界磁卷線에는 大電流가 흐르고 coil이 갖는 電氣抵抗때문에 電力損失이 發生한다. 또한 電氣抵抗에 의한 發熱로 大容量發電機의 제작은 어려운 실정이다. 따라서 超電導發電機가 注目되는 것이다. 즉 초전도의 電氣抵抗 "0"인 性質은 發電機의 效率向上에 그리고 大電流 및 強磁界는 小型輕量의 大容量發電機가 可能하다.

1960年代부터 開發되어 美國(MIT工大, Westing House社, GE社등), 소련, 西獨(Gimens社), 프랑스, 日本등에서 活發히 進行하고 있다.

現在는 Nb-Ti, Nb_3Sn의 超電導線材를 사용하며액체He으로 冷却하는 形式이나 高温超電導體의 출현으로 상태가 급변하리라 짐작된다. 技術的으로는 高速回傳하는 界磁卷線에서 安定한 超電導狀態를 유지해야 하므로 安定性, 加工性, 機械強度 등이 問題로 남아 있다.

4.5 磁氣 浮上列車

磁氣浮上列車는 그림7과 같이 線路에 設置한 短絡된 coil과 列車에 실은 超電導磁石과의 반발력으로 列車를 浮上시켜 비행기와 같이 마찰없이 推進시키는 것으로 西獨, 日本, 美國등지에서 開發中이다. 西獨은 吸引式, 日本은 超電導技術을 必要로 하는 誘導反發式을 각각 使用하고 있다. 誘導反發式은 10cm정도 浮上할 수 있으므로 列車가 低速이 되기까지는 큰 문제가 없으나 西獨

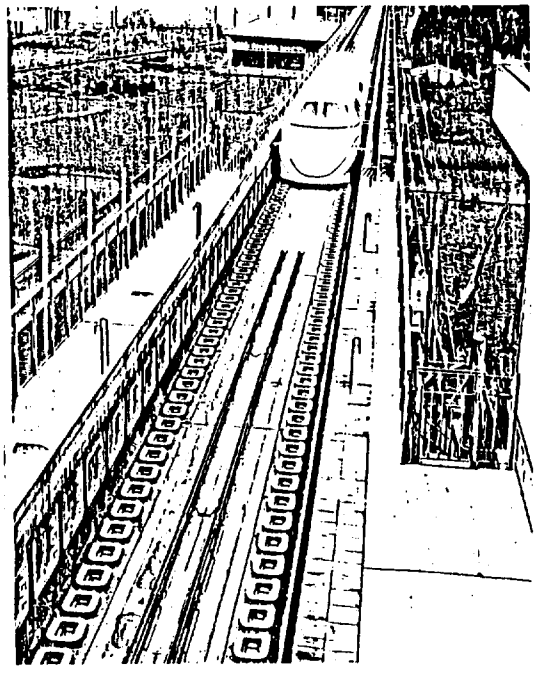


그림7. 자기부상열차

의 吸引式의 경우는 低速으로 浮上하고 기존기술을 利用할 수 있는 長點이 있지만 浮上의 높이는 겨우 1cm정도이므로 軌道를 高精度로 항상 제어하지 않으면 안 된다.

實用上의 문제점은 超電導磁石 및 冷凍液化機의 輕量化, 推進, 浮上, 案內方式의 最適方法의 결정, 電力供給System의 改善, 超電導磁石의 누설자속이 人體 및 所持品에 미치는 영향, 경제성의 문제 등이 있다.

5. 結 論

以上 超電導技術의 應用과 展望 그리고 그 問題點들을 簡單히 紹介하였다. 간략하게 정리하면 超電導技術은 未來産業의 主役으로 에너지, 資源, 輸送, 醫學, 情報 및 基礎科學 등 광범위한 分野에서 大規模로 利用되어 2000年頃에는 超電導産業社會가 예상되는 革新的인 技術임은 명백하다. 또한 工業化에는 超電導材料技術 및 周邊技術에 약간의 障壁이 놓여 있는 것도 事實이다. 그 열쇠는 最近의 高温超電導體의 開發, 더 나아가 常温超電導體의 開發에 있으므로 이들의 비약을 期待하여 본다.

韓國電氣研究所는 超電導技術開發에 전력을 다해 努力을 계속해 가는 研究所로 超電導의 中心機關으로서

첫단계로 高温超電導體의 開發 및 超電導磁石에 주력하여 産業社會에 이바지 하고자 한다.

참 고 문 헌

1) 每日經濟新聞 : 1987. 9. 13日字 (每日經濟新聞社)
2) 增田 : 超電導エネルギ-入門(オ-ム社)(1981)
3) A. C. Rose-Innes and E. H. Rhoderick : Introduction to Superconductivity(Pergamon Press) (1980)
4) 山村, 菅原 : 超電導工學(電氣學會)(1978)
5) 前田哲司 : 高温超傳導(日經 Science社)(1978)
6) J. Bardean, L. N. Cooper and J. R. Schrieffer : Phys Rev. 108(1957) 1175
7) R. P. Reed and A. F.Clark : Advan in Cryoge Eng. Mate. 28(1983)545
8) B. Avitur : TMS Paper Selection A 82-18
9) C. R. Spencer, P. A. Sanger and M. Young : IEEE Trans. on Mag. MAG-15 No1 (1979) 76
10) J. G. Bednorz and K. A. Muller : Z. Phys. B. Condensed Matter 64 (1986)
11) C. W. Chu : Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 911
12) 全 學濟 : 成 百能, 金 基秀, 趙 炳夏 : 理化學大辭典 (創元社) (1976)
13) T.Tanaka et al : Jpn. J. Appl.Phys.26 (1987)No.5
14) 笛木 : 機能材料 5(1987) 5
15) 日經 マグロウヒル社編 : 新超電導體(日經 マグロウヒル社) (1987)
16) 應用物理學會編 : High-Tc Oxide Superconductors (Jpn. J. Appl. Phys.)26 (1987)
17) 應用物理學會編 : Proceeding of the 18th Internation Conference on High Tc Superconductor 26 (1987)