

이 승 원
서울대학교

Status and Trends of Development on Superconducting
Magnetic Energy Storage

Sung-Won Rhee
S.N.U

1. 電氣에너지 관련 기술의 發達과 그 特徵

석탄과 증기기관 즉 화석연료의 화학에너지를 열에너지로 변환하고 이것을 또다시 기계에너지로 변환한다는 변환기술과 그 이용기술은 생산수단에 큰 변혁을 초래하여 산업형태를 생산성이 낮은 수공업으로부터 대량생산이 가능한 기계공업으로 바꾸고 인류역사를 농습시대로부터 공업시대로 바꾸는 원동력이 되었다. 그후 공업사회가 오늘과 같은 고도의 과학기술사회로 발달한 것은 19세기 초부터 현재까지 발전한 전기에너지의 관련기술의 발달에 기인되었다고 해도 과언이 아닐 것이다. 열에너지라든가 기계에너지의 이용은 근대 인류가 자연중에서 경험한데서 터득한 경험적 기술에 기인되는 것이나 전기에너지의 이용은 경험에 의해서 얻어진 것이 아니라 "르네상스" 이래 발달한 근대과학에 의해서 이룩된 학문에 기인된 것이다. 즉 電磁氣現象에 관한 일련의 科學的諸法則을 기관으로 해서 여러가지 전기에너지의 이용기술(전력의 發生, 輸送配分, 利用技術)을 개발 오늘날 전기공학이라고 부르는 광범위한 전기에너지의 응용분야를 구축하였다. 이와 같이 전기에너지가 오늘날 널리 이용되어 인류사회 발전에 크게 이바지 하고 있는 것은 다른 에너지로서는 도저히 따라올 수 없는 많은 장점을 갖고 있기 때문이다.

전기에너지는 다른 여러 에너지와 같이 자연상태 중에 존재하고 있지 않을 뿐만 아니라 열에너지나 기계에너지처럼 소비의 최종목적으로 사용되는 에너지도 아니다. 전기에너지의 첫째 특성은 에너지를 이용하기 쉽게 하는 중간매체 즉, 2차에너지로서 이용되는 에너지인 것이다. 이와 같이 2차에너지로 변환하면서까지 에너지시스템상 중요한 위치를 점하고 있는 이유는 다음과 같은 여러가지 우수한 성질 때문이다. 그 첫째는 다른 에너지와 전기에너지간의 상호변환의

용이성이며 그 둘째는 에너지의 제어가 용이한 점 즉, 전압, 전류, 주파수, 파형 등의 변환, 제어 및 제속이 용이, 신속, 정확한 것이며 그 셋째는 대용량 고밀도에너지 수송이 가능할 뿐 아니라 소량배분이 가능한 점이며 그 넷째는 에너지 사용시 자연환경을 오염하지 않는 청결에너지이기 때문이다. 이상과 같이 에너지로서의 거의 완벽한 특징을 가지고 있는데 단 하나의 큰 결점이 있다. 그것은 에너지 저장이 어렵다는 것이다. 그래서 전기기술자들은 이를 위한 많은 노력을 경주하고 있는 것이다.

2. 電氣에너지 貯藏의 必要性和 그 해결책

우리는 자연중에 존재하는 여러가지 에너지를 우리 생활양상에 도움이 되는 에너지로 변환하여 사용하고 있는데 상기한 편리성 때문에 많은 부분은 일단 전기에너지로 변환 사용한다. 그런데 이 자연중에 존재하는 에너지들을 우리 생활의 필요시에 맞추어서 쓸 수 있는 것(석유, 석탄, 원자력등)도 있고 또 우리의 필요시기와 맞지 않는 것(풍력, 조력, 파력등)이 있다. 이 경우 후자는 일단 전기에너지로 변환해서 저장했다가 필요시에 사용할 수 있어야 한다. 또 전자의 경우라 할지라도 그 경제성 때문에 불필요시 그 잉여전력을 저장했다가 대량 필요시에 쓰기 위해서 전력저장이 필요한 것이다. 이를 위해 현재까지 개발된 방법으로서 축전지, 慣性貯藏, 압축용기, 수소 변환저장 등이 있으나 이들은 그 용량이나 효율면에서 현상태에 있어서의 필요 욕구에 미치지 못하고 있다. 다만 우리의 생활필요기에 맞추어 발전할 수 있는 경우 그 경제성 때문에 심야잉여전력을 저장하는 방법으로서 현재 실용화되고 있는 것으로서 양수발전이 있는데 이는 上下池가 있어야 하고 그 낙차가 커야 하는 관계로 입지의 제한이 있고 또 일반수력발전소보다 물을 퍼올리는 과정이 더 있기 때문에 그

초전도 에너지 저장장치의 현황과 과제

효율이 대단히 낮다 (60 ~ 70 %).

그래서 많은 과학자들이 눈을 돌린 것이 1911년 하란의 H. Kamerling Onnes 교수가 발견한 초전도현상의 발견을 기점으로 해서 개발된 초전도체를 이용하여 이것으로 코일을 만들어서 이에 영구전류를 흘림으로써 (초전도체는 전기저항이 전혀 없으므로 이에 일단 전류가 흐르게 하면 그 전류는 영구히 흐른다) 전기에너지를 직립자기에너지로서 결손없이 저장하는데 착안하여 개발중에 있는데 이것이 초전도 에너지 저장장치로서 미국에서는 Wisconsin 대학, 일본에서는 고에너지연구소, 우리나라에서는 서울대학교에서 이 초전도 저장장치의 개발에 필요한 기술연구에 주력하고 있다.

3. 초전도현상의 발견과 그特徵

1) 초전도현상의 발견

1911년 Leiden 대학의 Kamerling Onnes 교수는 수은을 사용하여 그 전기저항을 측정하던 중 그 온도저항곡선이 그림 3.1과 같이 되었다. 고전물리학에 따르면 불순물에 의한 금속격자의 결합으로 인한 전자의 충돌 때문에 저온부에서는 그림 3.2의 점선과

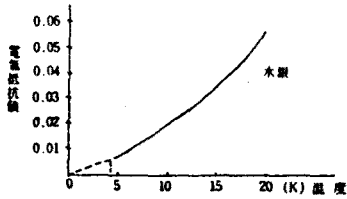


그림 3.1 수은의 온도저항곡선

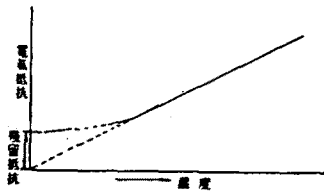


그림 3.2 불순물 혼입물질의 저항곡선

같이 되며 불순물이 없다고 하더라도 과선과 같이 되어야 하는데 그림 3.1을 살펴 보면 4.2K 까지는 상상했던대로 온도의 감소에 따라 전기저항이 비례적으로 감소하다가 4.2K 근처에 와서 전기저항이 급격히 감소하여 완전히 0이 되어버렸다. 이것이 바로 초전도현상으로서 이제까지의 고전물리학으로서는 설명할 수 없는 현상이었다. 그러나 뒤이어 발달하기 시작한 양자론의 해석이 가능하게 되어 이의 이론적

뒷받침이 가능하게 되었다.

2) 초전도물질

극저온에서는 초전도현상을 나타내는 물질은 Onnes 교수의 수은 이후 많은 과학자들에 의해서 연구가 거듭되어 표 3.1과 같이 많은 순수 초전도 물질들이 발견되었다. 그런데 초전도 물질의 이용상 가장 큰 소망은 고자기의 실현인데 이 순수물질들은 극히 저자기에서도 자계의 침입으로 말미암아 그 초전도성을 잃게 되었다. 이로 인하여 초전도에 대한 흥미가 상실되어 이 현상의 발견 이후 50년이란 긴 세월이 흐르며 지나갔다. 그런데 1954년에 B.T. Mathius 등

표 3.1 제 1종 초전도재료 표 3.2 제 2종 초전도재료

元素 Tc(K)	元素 Tc(K)
Al 1.18	Re 0.49
Ca 1.08	Ta 4.39
In 3.41	Tc 3.22
Ir 0.44	Tl 2.38
La 4.30	Th 1.37
Pb 7.23	Ti 0.42
Hg 4.15	W 0.01
Mo 0.92	U 0.08
Nb 9.17	V 5.3
Cu 0.66	Zn 0.85
Ru 1.70	Zr 0.55

材料名	Tc(K)
(化合物)	
Nb ₃ Sn	18.2
V ₃ Co	16.8
Nb ₃ (Al _{0.7} Co _{0.3})	20.7
Nb ₃ Co	~23
Nb ₃ Al	17.5
(合金)	
Nb-Zr	~10
Nb-Ti	~9
Nb-Zr-Ti	~10

이 순수물질이 아닌 Nb₃Sn 이란 화합물이 초전도성을 발휘함을 발견하였고 그 뒤 J.E. Kunzler 가 8.8 T의 고자계를 발생하는데 성공함으로써 다시 연구가 활발히 진행되기 시작하여 1963년에는 10 T의 자계를 발생하는 초전도磁石을 만드는데 성공하기에 이르렀다. Nb₃Sn 과 같은 초전도 재료는 단일원소 금속의 초전도 재료와는 그 현상이 상이하고 이론적으로도 좀 상이한 점이 있다. 이들을 표시한 것이 표 3.2와 같다. 그리고 단일금속으로 된 것을 제 1종 초전도체, 화합물 또는 합금으로 된 것을 제 2종 초전도체라고 구별해서 부르고 있다. 이 제 2종 초전도체의 출현으로 초전도시대 도래의 전망이 뚜렷해졌다.

3) 초전도의 특징

과학기술의 발달중 전기기술의 발달은 많은 부분을 차지한다. 특히 최근에 있어 電子技術은 半導體의 출현으로 인하여 눈부신 발전을 이룩하고 있다. 그러나 이 기술은 電氣技術이라기 보다는 光學에 기인하는 부분이 많으며 전자계산기도 Computer 과학에 기인하는 발전이라고 볼 수 있는 반면 초전도技術은 電氣의 근본 원리적인 신기술로서 전기기술 발전에 혁신적인 도움을 줄 것으로 생각된다.

초전도體는 다음 4가지 특징을 가지고 있다.

① 電氣抵抗이 없다.

② 大電流를 흘릴 수 있다 (동선의 10¹¹ 배).

3) 強磁界의 磁石을 만들 수 있다 (20 T 이상).

4) 영구전류를 흘릴 수 있다.

省에너지의 관점에서 볼때 전기기기를 초전도체로 제작할 경우 저항에 의한 발열을 없게 할 수 있으며 대전류를 흘릴 수 있다는 특징은 기계를 아주 작게 만들 수 있다는 것이다. 大電流를 흘릴 수 있다는 것은 도체의 단면을 작게 할 수 있을 뿐만 아니라 기계의 구성요소인 磁石에 철심을 쓰지 않아도 된다는 것을 의미하므로 경량화될 이룰 수 있게 한다.

다음에 超傳導의 영구電流의 특징은 신비하에 이해하기 어려운 성질이다. 常傳導 코일에서 電壓을 가해서 전류를 흘리다가 전원과 분리시켜 보면 그 전류는 대체적으로 L/10 초 이내로 사라져 버리는데 반하여 초전도체로 만든 코일에서는 거의 영구적으로 이 전류가 흐른다. 이 성질을 이용해 전기에너지를 저장하려는 연구가 바로 前記한 에너지 저장장치이다. 이와 같이 초전도는 현재 기대되고 있는 신기술 중에서도 가장 소망스러운 것으로 이것이 얼마나 빨리 선기술분야에 혁명적 기술로 등장하느냐는 것은 고온초전도체의 출현에 달려 있다고 보고 있었는데 드디어 그것이 실현되었고 아마도 앞으로 5년이 못가서 액체질소환경하에서 더욱 쉽게 초전도 연구를 진행하게 될 것으로 기대된다.

4) 超傳導 이론

정상상태에서 도체가 초전도체로 되는 것은 냉각에 의해서 액체가 고체로 되는 것과 비슷한 일종의 응축상태로의 相移轉이다. 액체에서 고체로의 변화에 있어서 그 구성원자의 배열이 규칙성을 이루게 되는데 초전도의 경우는 자유전자도 질서정연한 상태로 되어 系鏈체로서 정상상태보다 낮은 에너지상태를 이루게 된다. 극저온에서 초전도상태를 이루는 모든 물질의 超傳導電子는 電子, 格子 (Lattice) 간의 상호작용을 통하여 반대방향의 운동량과 스핀을 갖는 두개의 전자가 電子對 사이에서 引力을 끼쳐서 쌍 (Cooper-Pair)을 이룬다. 이 Cooper-Pair 불이룩한 전자쌍이 서로 강한 상관관계를 갖게 되어 일단 전기를 가하여 기동시켜 놓으면 양자와 충돌함이 없이 질서정연하게 이동하여 전류에 기여하게 된다. 이것이 超傳導에 있어서의 完全傳導性, 完全反磁性, 磁束量子化 등의 독특한 특성이 원인이 되는 것이다. 이 이론은 Bardeen, Cooper 및 Schrieffer 에 의해서 정립되었기 때문에 B.C.S 이론이라고 한다. 이 현상은 그 도체가 어떤 극저온의 임계온도 이하가 되어서야 일어나며 온도가 임계온도 이상으로 올라가면 Cooper-Pair는 깨져서 常傳導가 되어 버린다.

5) 高溫超傳導體의 出現

작년까지 발견된 초전도체의 임계온도의 최고치는 23.2K로서, B.C.S 이론상으로는 이것이 최고일 것이라고 생각되었는데 작년 4월 Switzerland 의 I.B.M. Zürich 연구소에서 K. Alex Müller 와 J. Georg Bednorz 에 의해 Ba, Lt, Cu, O 화합물로 된 물체가 35K에서 초전도성을 나타내는 것을 발견한 후 금속 산화물에 대한 관심이 급격히 높아지게 되어 日本 東京大學의 Shoji Tanaka 교수가 이의 재시험에 의해서 37K에서 초전도체로 傳位함을 확인하였고 그후 이 온도는 계속상승 39K (일본), 40K (미국), 43K (일본), 54K (일본)로 상승해더니 지난 2월 15일에는 Müller의 산화물의 Lt 대신 Yt를 사용함으로써 액체질소 온도에서 사용할 수 있는 98K의 고온초전도체가 미국의 Houston 대학의 물리학자 C.W. Chu 박사 에 의해서 발명되었다. 그후 U.C. Berkeley에서 233K의 것이 만들어졌다고 했다가 곧 취소되었고 또 日本의 兒島大學에서 常溫 즉 15℃에서 초전도성을 발휘하는 것을 개발했다고 했으나 이것은 불확실하다. 그러나 이로 미루어 봐서 常溫超傳導體의 출현도 그리 멀지 않을 것으로 예상된다.

이와 같은 산화물의 초전도성의 원리는 여러 가지 說이 주장되고 있으나 아직 공인된 定說은 없다. 이것을 해명할 수 있게 되면 常溫超傳導體 개발에 박차를 가하게 될 것이다.

6) 高溫超傳導의 理論

高溫超傳導體는 결정 중의 격자가 물리적 진동 뿐만 아니라 銅이온을 중심으로 한 電荷의 전기적 진동도 생기며 그것도 引力의 중간역할을 하고 있을 것이라고 생각하고 있다. 이와 같은 電子의 진동을 무라스몬이라고 부름으로써 이전부터 제안되고 있던 說이기는 하나 이것이 꼭 고온초전도설에 관계된다는 확정은 없다. 오히려 이런 說은 다 적용되지 않고 지금까지 자성은 전자쌍을 깨뜨린다고 생각되었는데 이것이 전자쌍을 만드는 방향으로 작용할 수도 있다고 보기도 한다. 또, Phonon으로도 150K까지는 설명이 가능하다는 설도 있고 또 전자간의 전기적 반발력만 가지고 인력을 설명한 논문도 있으며 Zürich 대학에서도 新理論이 나오고 있어 앞으로 계속 이런 新理論이 발표될 것으로 예상되는데 어떤 것이 맞을 것인가는 실험결과에 의해서 판정될 것이다.

금후 임계온도가 어느 정도까지 상승할 것인가 그리고 어떤 획기적인 이론이 튀어나올 것인가 그리고 이에 대한 노벨상은 누구의 것이 될 것인가는 전세계 학자의 주목거리가 되고 있다.

초전도 에너지 저장장치의 현황과 과제

1) 高温超導體의 實用化

고온초전도체는 그 발견이 얼마 안되는 데다가 이론도 아직 정립되지 못한 실정이라서 오늘 내일로 실용화된다고 보기는 힘들지만 그 실용화의 유망성을 검토해 보기로 한다.

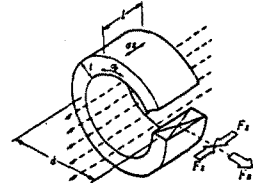
현재 개발중인 磁氣浮上列車, 실용중인 N.M.R. CT 등에는 액체헬륨으로 생각하는 초전도체를 사용하고 있다. 그런데 이 He 은 희소자원으로 그 가격도 1ℓ 당 20,000 원 정도한다. 이에 반하여 액체질소는 1ℓ 당 300 원인 데다가 공기중의 3/4 이 질소이므로 자원으로서는 무한정하다. 이런점에서 볼때 前記한 여러가지 초전도 응용기구들이 얼마나 손쉽고 값싸게 개발될 수 있을까는 가히 짐작하고도 남음이 있을 것이다. 실로 高温超導體의 출현은 2의 산업혁명을 일으킬 수 있다고 보아도 무방할 것이다. 그러나 아직은 이의 線材化 등에 다소의 시간이 소요될 것이므로 그의 실용화에 약간의 시간적 지연이 있을 것으로 예상된다. 물론 常溫超導體의 출현도 예상되고 있는데 이 경우 그 효과가 얼마나 지대할 것인지 前記 사실에 비추어 보면 가히 짐작하고 남음이 있을 것으로 본다.

4. 超傳導에너지 貯藏裝置의 原理와 特徵

초전도에너지 저장의 원리는 코일에 전류를 흘릴 때 저장되는 자기에너지 ($1/2 LI^2$)를 이용하는 것이므로 導體가 超傳導體이므로 초전도체의 특성과 손실 측면에서 다음과 같은 특징이 있다.

- 1) 무손실: 원리적으로는 손실 (양수 경우는 누수)이 없는 영구저장이 가능하다.
- 2) 철심불필요: 대전류로 코일의 저항손을 발생하지 않고 강자제를 만들수 있으므로 포화 특성과 철심이 있는 철심 등의 자기재료가 필요없다.
- 3) 에너지밀도와 전자력: 강자제일수록 에너지저장밀도 $\frac{B^2}{2\mu_0}$ [J/m³]가 높으나 전자력 $\frac{B^2}{2\mu_0}$ [N/m²]이 또한 커지므로 (그림 4.1 참조) 코일의 기계적 강도 및 지지문제와 초전도성의 임계치 (전류밀도, 온도, 자계) 등에서 자제를 정한다.

4) 초전도성의 유지대책: 초전도성은 그림 4.2 와 같이 임계치 이내에서만 초전도체가 되고 이것을 벗어나면 상도체가 되는데 이 경우 상도체화에 따른 전기저항에서 극부적으로 발생한 열은 다시 인접부분을 가열하여 또다시 상도체화하는 현상이 눈사태 식으로 확대되는 즉 갑작스러운 대규모 상도체전이를 Quench 라 하는데 이것은 양수발전소의 댐붕괴에 해당하는 것으로 이의 발생방지 대책이 필요하다. 이를 위해서



$$\text{徑方向的牽引力 } F_L = \alpha d l \cdot \frac{B^2}{2\mu_0} \text{ (N)}$$

$$\text{Hub 應力 } \sigma_\theta = \frac{d}{2t} \cdot \frac{B^2}{2\mu_0} \text{ (N/m}^2\text{)}$$

$$\text{軸方向的壓縮力 } F_z = \frac{\alpha d^2}{4} \cdot \frac{B^2}{2\mu_0} \text{ (N)}$$

$$\text{應力的壓縮應力 } \sigma_z = \frac{d}{4t} \cdot \frac{B^2}{2\mu_0} \text{ (N/m}^2\text{)}$$

그림 4.1 원형코일에 작용하를 전자력과 응력

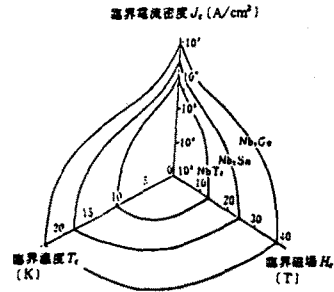


그림 4.2 초전도체의 임계치

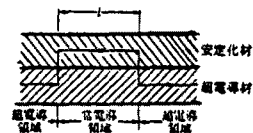


그림 4.3 초전도 복합선의 전류경로

는 그림 4.3 과 같이 초전도 복합선을 써서 극부적으로 상도체화한 부분의 전류는 열 및 전기의 전도도가 좋은 안전화 재료 (동 또는 알루미늄)에 바이패스시켜 상도체화의 확대방지 및 초전도성의 회복을 기하는 완전 안전화이론 (식 4.1 참조) 과 초전도체의 제작 및 가공의 고신뢰화 기법으로 해결한다. 초전도 복합선의 안전조건은

$$I^2 \phi / A < S / h \Delta T \tag{4.1}$$

I : 전류, ϕ : 안전화 재료의 비저항

l : 상도체 발생부분의 길이

A : 안전화 재료의 단면적

S : 복합선의 外周長

h : 액체헬륨의 열전달 계수

JT : 복합선과 액체헬륨의 온도차

초대형 코일로 되면 안전화 재료를 포함한 초전도선의 평균전류밀도는 동으로 만든 코일과 같은 정도로 전류밀도는 높지 않으나 전기저항이 0 인 점에서 그 의미를 갖게 된다. 저장에너지가 클수록 전류밀도는 코일의 지지 및 보호를 위하여 식 4.2 와 같이 낮게 된다.

$$EJ^2 = 10^{23} \quad (4.2)$$

E : 저장에너지 [J]

J : 전류밀도 [A/m]

5) 초전도코일의 지지 : 초전도코일의 소요 극저온유지와 강한 전자력에 견디도록 하는 방법에는 저온지 지구조와 상온지 지구조가 있다. 저온지 지구조는 소형에 적합한 것으로 코일 및 코일지지물 일체를 액체 He 속에 넣는 구조이며 상온지 지구조는 코일만 액체 He 속에 넣고 코일지지물은 암반에 지탱되도록 하고 코일간을 열절연하도록 한 구조로서 대형에 적합하다.

6) 코일의 모양 : 코일의 모양에는 슬래이드와 같은 축대칭형의 것과 토로이달과 같은 비축대칭형이 있는데 대동양의 것은 경제성의 면에서 슬래이드형이 채용되며 또 코일에 가해지는 상력을 줄이기 위하여 그림 4.4 와 같이 리플 (ripple) 구조를 취한다.

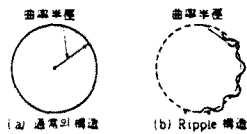


그림 4.4 Ripple 구조

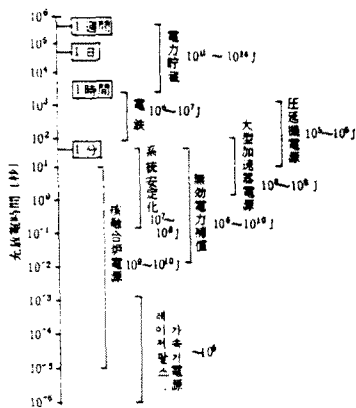


그림 4.5 증방전시간과 초전도에너지 저장의 응용

7) 초전도에너지 저장의 응용과 증방전시간 : 초전도코일의 에너지저장 (충전) 및 회수 (방전) 시간에 관련한 초전도에너지 저장의 응용은 그림 4.5 와 같다. 증방전시간이 짧은 것은 (Pulse magnet) 증방전시간이 긴 것과 달리 교류성분이 크므로 설계개념이 다르다. 즉 증방전시 와류손과 히스테리시스손을 감소시키기 위하여 코일의 선재는 연선을 사용하고 권선의 감이를 등의 와류손을 줄이기 위하여 비자성체 재료를 사용하며 또 냉각채널을 충분히 두어 손실열의 냉각을 좋게 한다.

5. 超傳導에너지 貯藏用 코일

1) 초전도코일

초전도코일은 냉각 측면에서 볼때

a) 코일의 권선중에 액체헬륨이 통과할 채널을 만들어 초전도선이 액체 He 에 접촉하여 냉각이 좋도록 한 浸漬形과 b) epoxy 수지에 함침한 함침형과 c) 초전도 선내부에 액체 He 을 통하게 하는 내부 냉각형이 있고, 코일 모양은 앞에서 설명한 바있는 축대칭형과 비축대칭형이 있으며, 전자력의 분산을 위하여 전코일을 여러 부분으로 나누는 분산형과 비분산형이 있다. 그리고 각종 초전도체 코일이 만들수 있는 임계자계 (Tesla) 와 그것에 대응하는 전자력 및 구조재료의 기계적 강도를 표시하면 그림 5.1 과 같으며

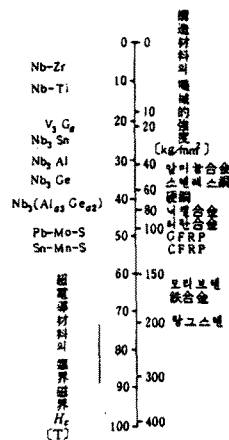


그림 5.1 각종 초전도체의 임계자계와 구조재료의 강도

그림에서 동이나 스테인레스강을 코일구조 재료로 사용하면 발생자계의 한계는 30 [T] 전후이며 임계자계가 높은 새로운 초전체료가 개발되어 보다 높은 자계를 만들려면 보다 강도가 큰 구조재료의 초전도체의 개발이 요구된다.

2) 초전도코일 냉각 및 단열지지계통

초전도 에너지 저장장치의 현황과 과제

초전도코일의 극저온 유지를 위한 냉각계통은 그림 5.2와 같다.

그림 5.2에서 He 액화냉동장치, He 콘덴서, He 회수 장치는 저온구조와 상온구조에 공동되며 저온구조에서는 cryostat의 벽이 최종적인 코일의 지지체이나 상온구조에서는 cryostat의 벽을 다시 그림 5.3과 같이 단열지지물을 통하여 암반이 최종적인 지지체가 되도록 한다.

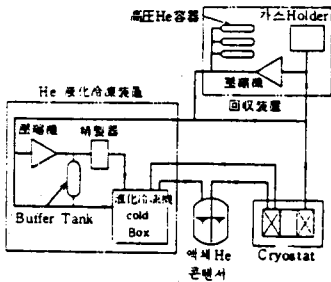


그림 5.2 He 냉각계통

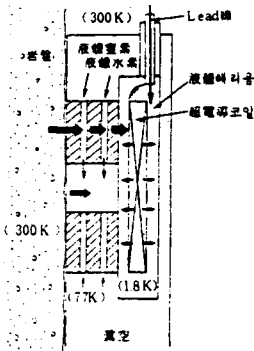


그림 5.3 상온지지구조

a) He 냉각계통

He은 임계점이 5.2°K, 2.25 atm으로 상태는 포화 He, 과냉각 He, He 가스, 초임계 He, 초유동 He으로 나눌 수 있는데 특히 초유동 He (1.9°K, 1.3 atm)은 점성이 없는 초유체와 점성이 있는 상유체의 혼합상태로서 이것은 초전도체에서 액체 He으로의 열전도도가 다른 상태의 것에 비하여 상당히 커서 초전도체와 액체 He과의 온도차를 적게할 수 있어 초전도 코일의 안정성이 향상되므로 전류밀도와 자계를 높일 수 있는 반면에 냉동부하가 증가하나 이의 이점이 크므로 초유동 냉각법의 연구개발이 주목된다. 실용되고 있는 He 액화냉동 사이클의 대표적인 것은

claude 사이클이며 초전도 코일의 냉각법은 액체 He에의 단순한 침적냉각법에서 초임계 He 강제냉각법이나 초유동 He 냉각법 등으로 다양한데 냉각계에서는 냉동효율 향상, 냉각속도, 시간을 포함한 초기냉각문제, He 소요량저감 등의 연구과제이다. 그리고 He의 생산은 천연가스 중의 He 분을 정제하여 만들며 천연가스 중에 0.3% 이상 He이 함유되어야 경제적 채산이 맞다고 하는데 이 He 자원은 지역적으로 미국, 소련, 폴란드, 캐나다 등에 편재되어 있어 이의 회수 사용과 더불어 확보대책이 요망된다. 예로서 1,000 MWH급 초전도에너지 저장장치의 소요 액체 He량을 추정하면 약 1.25×10^8 [ℓ]로서 상당한 양이 된다.

b) 단열지지 계통

초전도 코일은 단열지지구조로 된 극저온 보존용기 (cryostat) 안에서 액체 He에 의하여 극저온으로 유지하는데 저온용기의 단열법은 이중 Cashing 내부의 고전공 지지구조체의 저열방사 및 저열전도의 3가지의 기본적인 단열법을 조합하여 단열한다. 단열구조 재료는 초전도 코일의 극저온 유지와 코일에서 발생하는 강력자계에 의한 전자력의 지지 및 자계의 영향 등에서 구조재로서 필요한 특성은 다음과 같다.

- ① 극저온에서 기계적 강도가 높을 것.
- ② 비자성체일 것.
- ③ 열전도율이 낮을 것.
- ④ 전기저항치가 높을 것.
- ⑤ 열수축율이 초전도선의 것에 근사할 것.
- ⑥ 비중이 적을 것.
- ⑦ 기계가공 및 용접이 용이할 것.

단열구조재에는 금속재료와 복합재료 (비금속)가 있는데 열침입량을 억제하고 큰 전자력에 견디는 특성에 대한 평가지수 f 는 식 5.1과 같고 각종 단열재료의 평가지수 f 는 표 5.1과 같으며 f 가 클수록 단열구조재로서 양호한 것이 된다.

$$f = \frac{\delta}{K} \quad (5.1)$$

δ : 재료의 강복강도 [kg/mm^2]

K : 열전도도 [mW/cmK]

또 방사에 의한 열침입을 막기 위하여 방사를 반사하는 알미늄을 증착한 얇은 플라스틱 필름과 유리 섬유를 수백장 적층한 것을 고온부와 저온부 사이에 넣는다.

상온지지구조에서는 최종의 전자력 지지체인 암반의 강도에 맞게 자계의 강도를 선정할 필요가 있으며 지진에도 지지구조에 이상이 없도록 하여야 한다. 즉 지진에 의하여 암반에 금이 가서 금속으로 만든 단

표 5.1 각종 단열재료의 f

재료명	온도영역 (°K)	밀도 ρ (g/cm ³)	강박강도 σ (kg/mm ²)	평균열전도도 k (mw/cm ² K)	f ($\frac{\sigma}{k}$)
유리섬유강화 (CFRP)	300-77	2.0	84	8.0	10.5
	77-4.2		100	2.9	34.5
탄소섬유강화수지 (CFRP)	300-77	1.5	124	27	4.6
	77-4.2		107	1.5	71.3
스테인레스강 (SUS 316)	300-77	8.0	23	107	0.22
	77-4.2		49	50	0.98
비한 합금 Ti-5Al-2.5Sn	300-77	4.5	72	60	1.2
	77-4.2		124	35	3.5

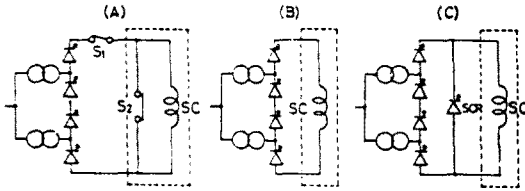


그림 5.4 전력계통과의 연계 계통

열식지벽 (코일과 액체 He 수용 cryostat 의 벽) 이 파손하면 액체 He 에의 급격한 열침입으로 He 이 비등하여 Quench 를 유발하기 때문이다.

그리고 이 구조에서는 그림 5.3 에서와 같이 액체 질소 (77°K) 와 액체 수소 (20°K) 에 의한 열차폐부를 설치하여 냉각에 필요한 전력을 최소가 되도록 한다.

3) 전력계통과의 연계 계통

초전도에너지 저장장치는 교류의 전력계통에서 저장 시에는 교류에서 직류로 변환하여 저장하고 발전 (방전) 시에는 직류에서 교류로 변환할 필요가 있으며 이를 위해서는 그림 5.4 와 같이 계통전압을 맞추어 주는 ① 변압기와 교류에서 직류 또는 직류에서 교류로 변환하는 ② SCR 전력변환계통과 계통의 보호 및 조작용을 위한 ③ Switchgear 와 초전도체 코일과 외부와를 연결하는 ④ 직류도선으로 구성된다. 그림 5.4 에서 S, C 는 초전도 코일을 표시한 것이다.

전류리드선에는 증발하는 He 가스로 리드선의 표면을 냉각하는 가스냉각리드선과 가스로 냉각하지 않는 단열리드선이 있으며 전류도선의 열침입량은 도체의 단순한 열의 전도에 의한 것과 전기저항으로 인한 동손에 의한 것이 있는데 전류도선의 단면적과 길이와 농과 전류간에는 열침입을 최소로 하는 최적조건이 존재하는 바 그 최적조건은 표 5.2 와 같다.

표 5.2 전류리드선의 열침입량

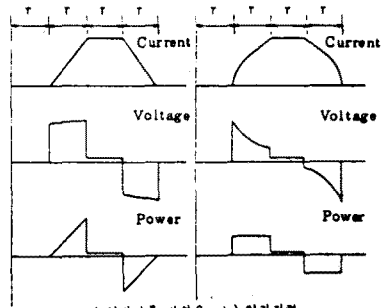
	최적현상 LIS	열침입량 Q/I
가스냉각리드선	$2-3 \times 10^7 \text{ A/m}$	$0.001-0.002 \text{ W/A}$
단열냉각리드선	$\sim 5 \times 10^8 \text{ A/m}$	$0.04-0.05 \text{ W/A}$

L : 길이, S : 단면적, I : 전류, Q : 열침입량

4) 초전도에너지 저장장치의 운용

전력계통용 에너지 저장장치의 운용은 그림 4.5 에서 알 수 있는 바와 같이 저장용량이 양수발전 규모로 크고 ($10^{11} \sim 10^{14} \text{ J}$) 또 증방 전시간이 긴 (1 시간~1 주) 전력저장용량이 적은 반면에 ($10^6 \sim 10^8 \text{ J}$) 증방전시간이 짧은 (10^{-2} 초~1 분)

전력계통 안정용 및 무효전력 보상용으로 볼 수 있는데 후자는 증방전시간이 짧으므로 4 장에서 설명한 초전도펄스 마그네틱틀 사용하는데 계통안정용은 계통 사고시 유효전력의 과부족을 흡수 또는 방출에 의하여 계통안정을 도모하고 무효전력 보상은 계통의 무효전력을 흡수 또는 방출에 의하여 계통의 무효전력을 보상한다. 전력저장용의 증방전 방법에는 그림 5.5 와 같이 일정전류 변화율 방법과 일정전력 방법이 있는데 일반적으로 전자를 채용한다.



a) 일정전류 변화율 b) 일정전력

그림 5.5 전력저장용의 증방전 방법

6. 초전도 전력 저장장치의 효율

본 장치의 효율은 저장에너지 ES 에 대하여 손실로 소비된 에너지 ΔE 를 감한 것에 대한 비로서 식 6.1 로 표시된다.

$$\eta = \frac{ES - \Delta E}{ES} \quad (6.1)$$

ΔE 에는 다음 4 과정의 손실로 나눌 수 있다.

- a) 충전시
- b) 저장시
- c) 방전시 (발전시)
- d) 휴지시 (휴지시의 방각계의 손실)

이중에서 d) 항의 손실은 효율계산에서 고려하는 경우도 있고 무시하는 경우도 있다. 손실발생 부분으로 표시는

초전도 에너지 저장장치의 현황과 과제

a) SCR 변회계통의 손실 : SCR, 변압기 및 배선 손실

b) 냉각계의 손실 : 초전도 코일의 발열에 의한 열 부하와 외부 열침입에 의한 열부하

이중 a) 항의 손실은 충방전시간 동안에 저항손외 적산량으로 충방전시간이 길수록 크다.

그림 5.3 과 같은 상온지구조의 초전도 전력 저장 장치의 저장용량별 냉각계의 손실을 보면 표 6.1 과 같다.

표 6.1 초전도 전력저장장치의 냉각계의 부하 (MWH)

손실	종류	10(MWH)	1,000(MWH)	10,000(MWH)
코 일 발 열	키스메리시스온	0.231	5.15	23.94
	파전류 손	0.084	0.90	0.96
	Twist 손	0.455	4.93	5.20
	거체적키스메리시스온	0.004	0.08	0.39
열 침 입	FRP피리대			
	1.8°K에서 침입	1.649	35.00	164.90
	20°K에서 침입	1.759	37.34	175.90
	77°K에서 침입	1.745	37.04	174.50
	투사	0.515	1.09	5.16
리드선	0.90	0.90	0.90	

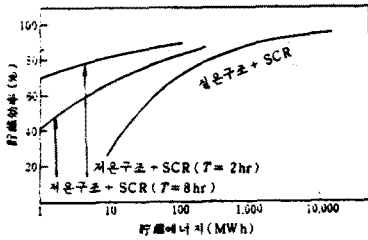


그림 6.1 초전도 전력저장장치의 효율

이상의 것을 종합하여 초전도 전력저장장치의 효율을 도시하면 그림 6.1 과 같다. 저장용량이 클수록 SCR 변회계통의 손실의 비율이 적어져서 대용량화가 용이한 실온구조의 것은 저장용량이 1,000MWH 급에서부터 효율이 90% 이상이 된다.

7. 초전도 저장장치의 안전대책

양수발전의 명봉피에 해당하는 Quench 방지책과 누설자체의 인체 및 기타에 대한 영향문제가 이 장치의 안전대책의 주종이 된다.

7.1 Quench 방지대책

- 1) 완전 안전화한 초전도체 사용
4장에서 설명한 완전 안전화 이론에 입각하여 제작한 초전도체를 사용하고 초전도 코일의 현장가공·조립시에는 제작자의 추천시공법에 따라 고신뢰화 기법으로 시공한다.
- 2) 안전을 고려

초전도체의 입계치에서 실제 적용할 전류밀도, 자계, 온도는 안전율을 고려하여 정한다.

3) 보호저항 설치

Quench 가 발생하면 그것을 방지할 경우에는 초전도 코일의 소손 뿐만 아니라 저항열에 의하여 액체 He 은 증발, 고압화하여 안전번으로 분출하여 막대한 량의 He 증기는 He 의 유실은 물론 주위에 냉해를 주는 큰 재해를 유발한다. 따라서 만약의 경우 Quench 가 발생한다 해도 그림 7.1 과 같이 초전도 코일의 외부에 설치한 보호저항과 전력계통에 저장에

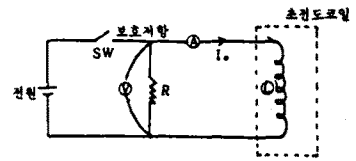


그림 7.1 보호저항 접속도

너지를 급속히 방출하도록 하여 앞서와 같은 사태를 일으키는 온도상승이 일어나지 않도록 한다.

보호저항 R 의 값은 코일 양단전압 $I_0 R$ 의 크기 (절연문제)와 초전도 코일의 극저온 보존용기의 온도상승을 고려하여 정하는데 대용량 코일에서는 단일 보호는 불가능하여 코일을 분할하여 보호하는 분할보호법을 쓴다. 그리고 보호저항 피로의 투입은 Quench 검출에 의하여 작동되며, Quench 검출법에는 전압법, 자계법, 온도법, 음향법 등이 있으나 현재 사용하는 검출법은 전압법이다.

7.2 누설자체의 영향

이것에 대해서는 명확한 의학적 data 가 부족한 상태이며 미국의 스탠포드 직선 가속기센터에서 채용하고 있는 허용자기피폭량은 표 7.1 과 같다.

표 7.1 허용자기피폭량

	장기(시간단위)	단기(분단위)
전선 혹은 머리	200G	2,000G
손 및 팔	2,000G	20,000G

10,000 MWH 급 장치에서 불래 코일 중심에서 반경 530 m 이내는 200 G 에 해당한다. 따라서 자기차폐는 물론 원자력발전소에서와 같이 비주거지역 설정을 고려할 필요가 있다.

8. 초전도 전력저장장치의 경제성 및 개별 설계 사항

실용단계가 아니고 연구개발 단계에서 추정한 cost는 cost 산정기준이 되고 있는 가정 그것이 불안전 요소들 포함하고 있어 정확하다고 할 수 없으나 미국 위스컨신대학의 연구진이 행한 발전 cost는 표 8.1과 같이 설계방침, 신재료의 개발 등으로 해를 거듭할수록 경제성이 향상되고 있고 또 가스터어빈보다는 경제적인을 보인다. 그리고 본 SMES는 대형화할수록 표 8.2에서 보는 바와 같이 유리함 (Scale Merit)을 보인다.

표 8.1 SMES의 발전 cost 평가의 시대추이

평가연대	발전 Cost(mill 1 KWH)	
	연간 365일 가동	연간 260일 가동
1970	10.1	
1974	22.1	
1976	18.7	
1978	19.2	24.8

표 8.2 용량별 상대적 건설단가

용량	상대적 건설 단가
10,000 MWh	0.46
5,000 MWh	0.58
1,000 MWh	1.00
100 MWh	2.14

이 장치의 경제성 도모는 초전도코일 선재의 입계치 (입계전류, 입계자속밀도, 입계온도) 의 상승에 의한 재료절약, Quench 방지를 위한 안전화기법 개선에 의한 재료절약, Quench 및 누설 자속에 대한 안전성 향상, 강력한 전자력의 지지를 위한 열절연지지재 및 지지방법의 개발, 양호한 운전특성 및 효율을 위한 전력제통과의 인터페이스 부분의 부품 및 제어방법 개발, 냉각계통의 열절연 및 냉각효율 향상, He의 소요량 감소 및 회수방법의 개발 등을 통하여 계속 연구수중에 있으며 1900년대 후반에 현재의 양수발전 규모가 실용화될 전망이다.

참고로 미국 Wisconsin 대학의 연구진이 행한 1,000MWh 급 및 10,000MWh 급의 개념 설계 사항을 보면 표 8.3과 같다.

9. 결 론

1) 초전도에너지 저장의 전력제통에의 응용으로서는 중방전 시간이 긴 양수발전 규모의 전력저장용과 중방전 시간이 짧고 용량은 적어도 되는 전력제통 안정용 및 무효전력 보상용을 들 수 있는데 이중 전력저장은 높은 효율 (90% 이상), 우수한 속용성 (수 m/sec), 대용량화의 용이성, 입지선정의 자유도

표 8.3 SMES의 개략 사항

	1,000MWh	10,000MWh
자속 밀도	5T	5T
도체 온도	1.8°K	1.81.8°K
코일 직경	96m	206m
코일 높이	48m	103m
도체 직경	8cm	8cm
도체 재료	NbTi Cu Al	
코일 권 수	1,968	3,660
인 단 탁 스	157,000H	157,000H
사 용 시 량	8,000t	36,000t
액 체 He 량	1.25×10 ⁸ l	6×10 ⁸ l
용량경방향용력	1.15×10 ¹¹ N	5.32×10 ¹¹ N
축삭방향용력	1.10×10 ¹¹ N	5.10×10 ¹¹ N
Nb-Ti 총 량	160t	710t

가 큰점 등에서 명실상부한 전력적장장치로서 이것이 실용화되면 현재의 양수발전에 대치될 것이며 이의 실용화는 1900년대 후반으로 전망된다. 따라서 우리나라에서도 이의 연구개발에 관심을 갖고 조기적용의 기반을 구축함은 이 장치의 매력적인 이점을 그만큼 조기 향유할 수 있어 전력수요자의 이익은 물론 국가적 이익면에서 그 의의는 크다고 본다.

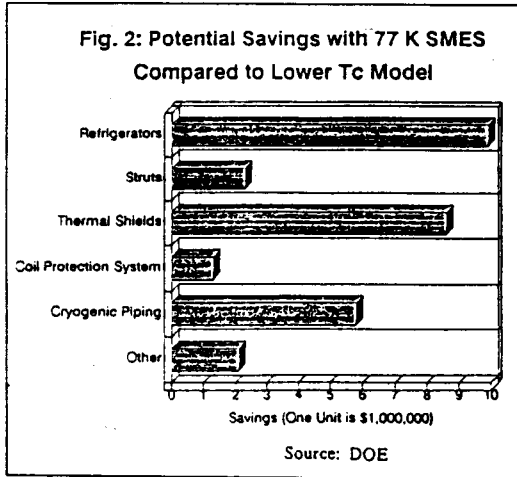
2) 한국전력은 해방후 겪어온 전력난으로 인한 곤경을 또다시 겪는 일이 없이 풍부한 전력을 국민에게 공급할 수 없을까 고심한 끝에 1차에너지가 거의 생산되지 않는 우리나라에서 무한한 전력공급이라는 것은 신기술 (핵융합기술) 이 개발될 때까지는 어려운 일이므로 차선책으로 원자력 발전시설을 국산화하고 그 연구의 가공을 자력으로 이룩하여 전력을 국산화함으로써 또다시 전력빈곤 상태가 오지 않게 하겠다는 것이다.

이의 실현을 위한 보증책으로서 초전도기술의 소산인 초전도에너지 저장장치를 개발 이불 Eneropia 건설의 일환으로 개발하고 있다. 원자력발전을 위주로 하는 Eneropia 시대에는 원자력발전 출력이 Base Load를 훨씬 넘을 것이므로 최첨단 기술인 초전도 기술을 응용하여 에너지 저장장치를 개발, 잉여분의 전력을 저장한다는 것이다. 다행스럽게도 액체질소에서 사용할 수 있는 고온초전도체 (98K)가 발견됨으로써 이의 성공적 이용이 더욱 빨라졌으므로 이의 개발에 더욱 힘써야 할 것이다.

참고로 77°K인 액체질소에 의해 냉각 초전도화 할 수 있는 고온초전도체를 사용할 경우 액체 He에 의해 냉각을 필요로 하는 저온초전도체 사용의 경우에 비해 초전도에너지 저장장치의 비용의 감축을 예상해 본 것이 표 9.1이다. 고온 초전도체의 온도는 더욱 상승할 것으로 예상되는 바 앞으로 전기에너지 저장

의 실현을 더욱 용이해질 것으로 믿는 바이다.

표 9.1



10) Masuda, M. and Shintomi, T.: Superconducting Magnetic Energy Storage, *Cryogenics*, 17, p. 607 (1977).

11) Storobridge, T.R.: Refregeneration for Superconducting and Cryogenic System *IEEE Trans. Nuclear Science*, NS-16 (1969).

참 고 문 헌

- 1) Kunzler, J.E.: Superconductivity in High Magnetic Fields at High Current Densities, *Review of Modern Physics*, 33, 4, p.501(1961).
- 2) Schleich, A.: Superconductors for the Magnet Coils of the Omega Spark Chamber at CERN, *Brown Boveri Review*, 59, p.73(1972).
- 3) Montgomery, D.B.: High Magnetic Field Research and Facilities, National Research Council, National Academy of Science (1979).
- 4) Boom, R.W. et al.: Superconducting Solenoids, *Proc. IRE*, 50, p.274 (March, 1962).
- 5) Boom, R.W. et al.: Wisconsin Superconductive Energy Storage Project, 1, p.1-6, NSF-RA-N-74-065(1974).
- 6) Yamada, T. and Iwamoto, M.: Aspect of Structural Designs of Large Superconducting Energy Storage, *Proc. Int. Symp. on Superconductive Energy Storage*, Osaka (1979).
- 7) Tollstrup, A.V.: Progress Report-Fermilab Energy Doubler, *IEEE Trans. MAG-15*, p.647 (1979).
- 8) 小山, 小笠原, 安河内: 超傳導マグネットのエネルギーと電流密度, *低温工学*, 14, p.184(1979).
- 9) Purcell, J.R.: Experience with Quench Protection of Multi-megajoule Superconducting Coils, *Int. Symp. on Superconductive Energy Storage*, p.216, Osaka (1976).