

Magnet applications of HTS wires

Sang-Soo Oh

Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon 641-120, Korea

Abstract

HTS wires processed by PIT method are now available for magnet applications. But, those wires can not be used over 40 K due to weak link. This leads to necessity of development of coated conductor which can retain high J_c at high field in liquid nitrogen. In this paper, various technical issues and the R&D status for both PIT wires and coated conductor were discussed. The difference of coated conductor's processes were also investigated and summarized. Various requirements for a design of HTS magnets were discussed. Anisotropic J_c property with respect to magnetic field was considered to determine the coil's critical current. Low n value is a critical parameter to degrade a field stability with respect to time for a persistent mode HTS magnet. The relation between the margin of operation current and n value was investigated. Prototype HTS magnets with PIT wires are being developed for various applications such as crystal growth, MRI, magnetic separator and etc. HTS magnets will come into wide use in various fields of industries if the HTS wires with a low performance cost is developed.

Keywords : HTS wire, magnet, design, persistent mode, n value

1. 머리말

초전도기술의 응용을 크게 보면 전자적 응용과 전기적 응용으로 나눌 수 있다. SQUID 나 정보통신 소자 등의 전자적 응용에는 주로 박막 재료를 사용한다면 전기적 응용에서 가장 중요한 기본 소재가 되는 것이 초전도도체이다. Nb-Ti, Nb₃Sn 등의 금속계 저온초전도도체가 이미 1960년대부터 상용화에 성공하여 실제로 MRI 나 NMR 등의 초전도마그네트에 사용되고 있다는 것은 익히 알고 있는 사실이다. 반면 높은 임계온도를 갖는 산화물계 고온초전도도체를 사용하면 저온초전도도체에 비하여 마그네트의 냉각비용을 낮출 수 있다는 장점에 실용화 연구개발이 세계적으로 활발하게 이루어지고 있으며 매년 도체의 임계전류밀도 특성 향상과 함께 제조할 수 있는 단위길이도 지

속적으로 증가하고 있다. 상업적 생산이 가능해지고 있는 제 1 세대 도체인 Bi-2223 계의 경우는 스미토모전공, NST사에서 J_c 가 2 만 A/cm²(@77K, self field)을 넘는 1 km 급의 은시스 선재를 개발하는데 성공[1]하였으며 아직은 대부분 R&D 목적이지만 케이블 및 마그네트용 도체로 공급되어지고 있다. 앞으로 고온초전도도체를 여러 산업 분야에서 실질적으로 응용하기 위해서는 J_c 특성과 코스트 면에서 DOE가 분석한 요구조건에 맞는 도체 개발이 필요하다.

최근 냉동기 기술이 발달하면서 4 K 극저온까지 냉각할 수 있는 고효율 GM 단단 냉동기가 개발되고 있고 금속계 저온초전도 도체로 만든 무헬륨 방식의 전도냉각 저온초전도마그네트 경우 이미 상용화되어 일부 제품이 생산되고 있다. 앞으로 고온초전도마그네트를 실용화하기 위해서는 무엇보다 액체질소에서 사용할 수 있는 고성능 도체 개발이 요구되며 최종적으로는 성능대비 도체가격을 기존의 Nb-Ti

*오상수 Tel: +82 55 280 1696

e-mail: ssohi@keri.re.kr

도체나 구리선 보다 낮출 수 있어야 한다. 제 1세대 도체가 갖고 있는 단점인 낮은 J_c 특성의 문제를 해결하기 위한 시도로서 초전도결정립의 면내 배향성을 크게 향상시킨 차세대도체(제 2세대 도체)가 선진국뿐만 아니고 국내에서도 연구 개발되고 있다. 차세대 도체는 개발에 성공하면 초전도마그네트 응용에 있어서 획기적인 진전이 예상되기 때문에 많은 연구기관에서 집중적으로 연구하고 있다.

설계 차원에서 고온초전도마그네트와 저온초전도마그네트는 공통성이 많으나 재료의 특성을 잘 이해하지 못하고는 고효율의 마그네트를 개발할 수 없다. 저온초전도도체와 비교하여 고온초전도도체는 외부자장 방향에 대한 임계전류이방성이 나타나기 때문에 새로운 설계 방법이 요구된다. 또한 고온초전도마그네트가 많은 분야에서 실용화되기 위해서는 켈치에 대한 안정성에 대해서도 저온초전도도체와 어떻게 다른지 파악할 필요가 있다.

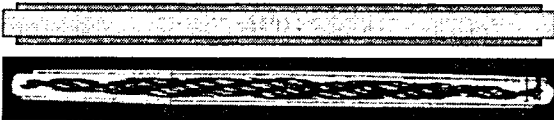
본 논문에서는 우선 현재 국내외적으로 개발 중인 고온초전도도체의 개발 현황과 개선해야 할 기술적 문제점들에 대하여 고찰하고 고온초전도마그네트 설계시 필요한 여러 가지 요소 기술들에 대하여 간략하게 설명하고자 한다. 그리고 고온초전도마그네트를 실제 산업적으로 응용하기 위한 연구 개발이 세계적으로 어떻게 이루어지고 있는지 그 현황과 전망에 대하여 기술하고자 한다.

2. 최근의 고온초전도도체 기술

고온초전도체를 선재화할 수 있는 가장 대표적인 간편한 방법은 PIT(Powder-In-Tube)프로세스이다. 가공이 어려운 초전도체 산화물을 연성이 풍부하고 화학적 내반응성이 우수한 Ag 튜브와 결합시켜 복합체로서 가공하는 방식으로 대표적인 Bi-2223 계의 경우 가공량이 커질수록 결정립이 c축으로 배향되는 성질이 있으나 산화물코아의 불균일성이 커지고 열처리시에 원하는 초전도상만의 단상조직을 만드는 것이 어렵기 때문에 임계전류밀도를 자기장하에서 10 만 A/cm² 이상 향상시키는 것이 어렵다고 할 수 있다. PIT 프로세스는 일견 간단하게 보이는 제조방법이지만 Bi-2223 초전도체

의 미세조직이 precursor 분말의 상태, 가공조건, 열처리온도, 냉각 조건 등에 민감하게 영향을 받기 때문에 J_c 특성을 박막 수준으로 향상시키는 것이 쉽지 않다. 도체에서 실용적으로 중요한 공칭전류밀도 J_c 를 향상시키기 위해서는 미세조직의 개선과 함께 가공 공정이 더욱 최적화될 필요가 있다. PIT 법으로 Bi-2223 도체를 만드는 경우 산화물 필라멘트 내에 존재하는 void, 상전도 계재물, 불순물 등에 의하여 전류의 흐름이 제한을 받는다. 이것은 결과적으로 초전류(supercurrent)가 서로 잘 연결된 Bi-2223 결정립 들을 따라서만 흘러간다는 percolation 이론으로 설명되는데 J_c 가 아주 높은 도체에서 조차 필라멘트 단면적의 2/3 정도만이 전류 수송에 기여를 하는 것으로 이해할 수 있다. PIT 법에서 산화물 조성, 열처리조건 등의 최적화에 의한 미세조직의 개선은 지속적으로 이루어졌으나 박막이나 단결정 수준의 조직을 만드는 데에는 한계가 있다. Bi-2223 PIT 도체는 지금까지 단척시료에서 77 K, 0 T에서의 J_c 가 58 kA/cm² [2], 1,250 m 길이에서는 23.3 kA/cm² 수준의 도체[1]가 만들어지고 있다. 최근의 도체개발에 따른 실험적인 분석에 의하면 Bi-2223/Ag 선재의 J_c (77 K, 0T) 최고 한계치는 130 ~ 200 kA/cm² 정도가 될 것으로 예측되고 있다[3]. 그러나 필라멘트의 미세조직, 시스의 bubbling 문제 등을 해결하지 않고는 km급 장척 선재에서 100 kA/cm² 이상의 J_c 를 갖는 PIT 도체 개발은 거의 불가능하다고 할 수 있다. PIT 법에서 최근에 시도되는 유효한 방법은 가공을 최적화함으로써 산화물 필라멘트의 filling factor를 높이는 것이다. 최근 ASC사에서 그림 1과 같은 J_c (J_c)특성이 아주 우수한 도체를 개발하는데 성공하고 있다. ASC 도체의 특징은 그림 1의 단면에서 알 수 있듯이 초전도체의 filling factor가 아주 높다는 것이다. 필라멘트간의 간격을 상당히 좁히고 최외층시스의 두께는 상대적으로 크게 하여 J_c 를 높이면서 두꺼운 시스를 확보하여 신선 가공시에도 시스가 터지지 않게 하였으며 bubbling 발생의 원인이 되는 열처리동안 가스 방출시의 압력에도 견딜 수 있는 구조로 만들어 졌다. 필라멘트 구조와 충전 빌렛구조를 최적화하고 압출에 의하여 구성 요소간의 결합을 강하게 유지시켜

건전한 인발 신성가공이 가능하게 한 것 같다. ASC사의 선재는 마그네트 설계시 중요한 파라메타인 J_c 가 아주 높은 것이 특징이며 고강도 선재의 경우 SUS 판재를 샌드위치식으로 접합하여 일반 은시스 선재 보다 3배 이상이 되는 265MPa의 높은 강도를 나타내고 있다. ASC사는 대량생산에 의하여 도체가격을 현재의 \$300 /kA·m 수준에서 \$50 /kA·m로 낮출 수 있다는 보고이다.



Type	3-Ply Narrow	3-Ply Wide
Thickness	0.266 (+/-0.02mm)	0.305 (+/-0.02mm)
Width	3.1 (+/-0.2mm)	4.1 (+/- 0.2mm)
J_c	>7.5 kA/cm ² *	>8 kA/cm ² **
I_c	>62A*	>100A*
Max Stress (77K)	265 MPa	265 MPa
Max Strain	0.4%**	0.4%**
Min. Bend Dia.	70 mm**	70 mm**

* at 77K, sf, 1μV/cm
 ** With 95% I_c Retention

그림 1 ASC사에서 최근에 개발한 고강도 Bi-2223/Ag/SUS 도체의 단면구조와 특성치 [4]

그림 2는 ASC사에서 만든 세계 최고수준의 Bi-2223 PIT 도체의 전류자장 특성을 나타낸 것이다. 동작온도가 높을수록 자장중 임계전류 특성이 저하하는데 특히 50 K 이상에서 임계전류가 현저하게 감소하고 있다. 약자장하에서 J_c 가 크게 떨어지는 것은 결정립의 열악한 배향성에 의하여 약결합 부분이 존재하기 때문이다. 그림 2에서 확인할 수 있는 것은 기본적으로 PIT 도체를 액체질소온도에서 자장 발생용 마그네트로 응용하는 것은 어렵다는 것이다. 그러나 온도를 35 K 이하로 냉각하면 I_c 의 자장의 존성이 크게 개선되는 효과를 보이며 20 K 온도에서는 0 T 기준으로 5배의 I_c 증가를 확인할 수 있다. PIT 도체의 약결합에 의한 I_c -B 특성 저하 문제를 해결하기 위하여 표 1에 정리한 것 처럼 새로운 프로세스들이 최근에 많이 시도되고 있다. 흔히 coated conductor 라고 불리는 차세대도체는 기술적으로는 크게 진공프

로세스와 비진공 프로세스로 나눌 수 있고 중간층을 포함한 금속기판을 제조할 때 RABITS와 같이 금속 모재를 결정배향시켜서 중간층을 입히는 방법과 다결정 금속 모재위에 IBAD나 ISD와 같이 중간층을 결정 배향시키는 방법이 있다.

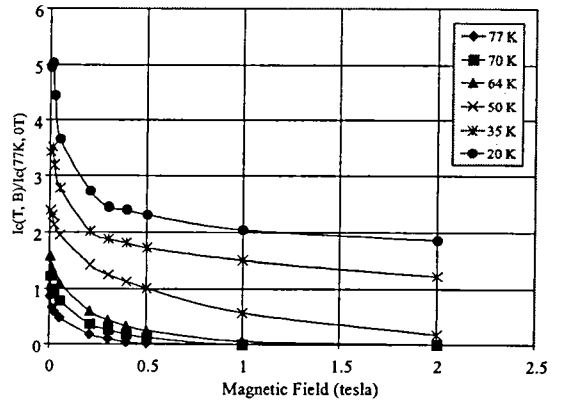


그림 2 ASC사 Bi-2223 PIT 선재의 I_c 자장특성 [4]

3 차원적으로 결정 배향된 중간층위에 기상법, 액상법 등으로 3 차원 배향된 격자 구조를 갖는 YBCO 초전도층을 성막하는 공정에 의하여 액체질소온도에서 사용할 수 있는 고성능 저가격 도체를 개발하는 것이 목표이다. PIT 프로세스에서는 주로 결정립의 c축 배향성 만을 향상시킬 수 있었다면 coated conductor 프로세스는 금속 기판이나 중간층 조직의 면내 배향성을 향상시켜 3 축이 배향된 epitaxy 구조의 YBCO 초전도체층을 그 위에 코팅하는 방법을 개발하는 것이다. 이미 $J_c(77 K, 0T)$ 가 ~1 MA/cm² 인 2 축 배향 YBCO 단척시료가 여러 기관에서 제조[5-9]되었다. 1 m 길이의 선재에서는 $J_c(77 K, 0T)$ 가 ~200 kA/cm² 수준으로 떨어지기 때문에 장선화에 따른 약결합을 어떻게 개선할 수 있는가가 액체질소 응용의 관건이라고 할 수 있다. Coated conductor 프로세스의 또 하나의 큰 문제는 약 1%에 불과한 아주 낮은 초전도체 filling factor 이다. 예를 들어 1 μm 두께의 YBCO 층을 100 μm 두께의 금속 테이프위에 코팅하여 $J_c(77 K, 0T)$ 가 1 MA/cm² 라고 하면 J_c 는 10 kA/cm² 정도에 해당되므로 ASC사

가 만든 현재 최고 수준의 PIT 도체의 J_c 에 못 미친다. 성능 면에서는 진공프로세스에서 높은 J_c 값이 보고되고 있으나 성막 속도가 느리고 연속

표 1 차세대 도체 프로세스 비교

기술구분	프로세스 (연구기관)	특징 및 특성(77K,0T)
진공 저속성막	IBAD-PLD (LANL)	hastelloy, Ni 합금 다결정 기판 위에 2축 배향 YSZ를 IBAD로 증착. •단척시료 J_c : 2.4 MA/cm ² , •1 m시료 J_c : ~0.2 MA/cm ²
	ISD-PLD (Sumitomo)	금속기판을 레이저 plume에 대해서 대향각도를 변화시키면서 2축 배향의 YSZ 중간층을 증착. •단척시료 J_c : 0.43 MA/cm ² , •1 m시료 J_c : 0.15 MA/cm ²
	RABiTS-PLD (ORNL)	가공열처리에 의하여 2축 배향 재결정 Ni 금속기판을 만들고 그 위에 CeO ₂ / YSZ / CeO ₂ 다층 중간층을 증착. •단척시료 J_c : 3 MA/cm ²
	RABiTS/IBAD-BaF ₂ (ORNL)	RABiTS 혹은 IBAD 기판위에 Y, BaF ₂ , Cu를 증착한 후에 ex-situ 열처리하여 초전도층을 형성. 단척시료 J_c •RABiTS: 2.3 MA/cm ² •IBAD: 2.5 MA/cm ²
비진공 고속성막	RABiTS-MOD(TFA) (ASC)	RABiTS 기판위에 유기금속전구체 TFA를 이용한 YBCO 액상코팅후 열처리하여 초전도상을 생성. •단척시료 J_c : 2 MA/cm ²

장선화가 어려우며 낮은 J_c 가 문제가 된다. 한편 비진공프로세스는 장선화에 유리하고 제조비용을 낮출 수 있는 장점이 있다. 최근 ASC에서 TFA 법으로 만든 선재에서 진공프로세스로 만든 YBCO 박막에 필적하는 높은 J_c 를 나타낸 것은 크게 주목할 만한 일이다. 도체 제조 가격에 대해서 ASC의 Malozemoff는 Bi-2223 PIT 도체는 공정최적화와 대량생산에 의하여 궁극적으로 20\$/kA·m 까지 가격 저감이 가능한 것으로 보고 있으나 고온초전도도체가 구리선을 대체할 정도로 광범위하게 응용되기 위해서는 차세대 도체가 지향하는 최종목

표 가격인 10\$/kA·m 까지 내려가야 한다고 보고 있다. 이 정도 수준의 고온초전도도체가 시장에 공급되면 대부분의 구리선을 이용하는 마그네트가 초전도화될 것으로 예상된다. Coated conductor에 대한 미국 측의 연구 투자는 세계 최고 수준으로 현재 연간 2,400 M\$의 연구비를 투자하고 있으며 2002년 까지 10 ~ 100 m 길이의 차세대 도체가 제조될 것으로 보고되고 있다[10].

3. 고온초전도마그네트 기술

초전도마그네트 설계시 일반적으로 고려해야 할 사항[11]들을 정리하면 다음과 같다.

Specification of material

- S1 : overall $J_c(B, T), I_c, J_c$
- S2 : anisotropy of critical current
- S3 : mechanical issues, strain issues, differential contraction
- S4 : normal state properties, resistivity, thermal conductivity
- S5 : resistive transition, n- value
- S6 : transient dissipation, quench stability, ac losses
- S7 : joints, contact
- S8 : insulation issues

Design requirements

- D1 : operating temperature, field - temperature environment
- D2 : dimensions, composite structure, piece length, uniformity
- D3 : price target, pay-off against price

위 사항들 중에서 특히 고온초전도마그네트의 설계에 있어서 유의할 점들에 대해서 살펴보기로 한다. 우선 고온초전도도체의 전자기특성이 기존의 저온초전도도체에 비하여 다르다는 점이다. 저온초전도도체는 자장 방향에 따른 J_c 특성이 등방적이지만 고온초전도도체의 경우는 이방적 성질을 갖고 있으며 J_c 의 각도의존성을 조사하면 테이프면에 대하여 자장이 평행으로 인가될 때 가장 높은 값을 보이고 수직으로 인가될 때 가장 낮은 값을 나타낸다. 20 K 운전의 팬케이크형 고온초전도코일을 Bi-2223/Ag 도체로 제작할 때 코일의 동작전류를 결정하기 위한 로드라인을 비교해 보기로 한다. 그림 3은 단척 Bi-2223/Ag 도체의 수직 자장 B_1 및 평행

자장 B_{\parallel} 에서의 I_c - B 실측데이터 곡선과 축자장 및 반경자장에서 두개의 로드라인을 나타낸 것이다. 등방성의 도체를 사용할 때는 코일의 임계전류가 최대층 중심부의 축자장 최대값 $B_{z,max}$ 에 의하여 결정되지만 이방성의 도체를 사용하는 고온초전도마그네트의 경우 반경자장 최대값 $B_{r,max}$ 에서 결정되기 때문에 코일 중심 자장의 발생 효율이 더 낮다고 할 수 있다.

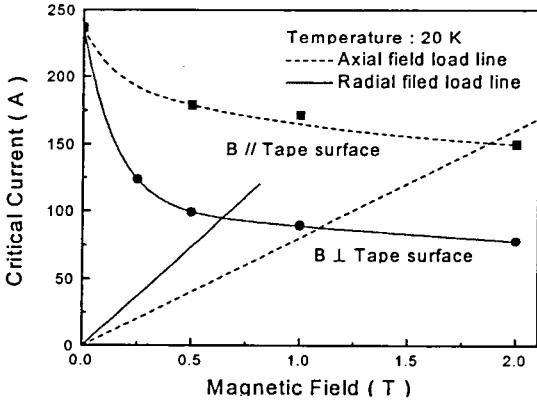


그림 3 고온초전도 팬케이코일에서의 로드라인

팬케이코일형 코일을 설계할 때 중심자장을 향상시키기 위한 방법으로 자장 분포를 고려하여 각 요소코일에서의 전류밀도와 테이프 폭을 변화[12]시키거나 턴수를 증가시키는 방법 그리고 코일전체를 철요크로 감싸서 자속 회로를 변경시킴으로서 반경자장(B_r)을 저감시키는 것도 유효한 방법으로 보고되고 있다[13]. 코일 설계에서 두 번째 고려사항은 도체의 기계적 강도에 대한 고려이다. 고온초전도체는 산화물 이어서 기계적 응력에 취약하기 때문에 보빈에 도체를 권선할 때 굽힘변형률과 도체의 임계전류특성과의 관계를 참고하여 코일 내반경을 결정해야 한다. 도체에 걸리는 변형률 ϵ 는 도체의 두께 t 와 팬케이코일의 내직경 D 와 $\epsilon = t / D$ 의 관계를 갖고 있다. 일반적으로 시스를 합금화하던지 필라멘트를 다심화함으로써 기계적 강도가 향상되므로 코일 내경을 증가시킬 수가 있다. 순은 시스 Bi-2223 선재의 경우 0.8% 굽힘변형률에서 50%정도로 I_c 가 감소하지만 시스를 합금화하면 1.2% 굽힘변형률에서 80%의 I_c 가 유지된다. 일반적으로 약 0.2% 인

장 변형률에서 PIT 도체의 초전도 산화물층에 크랙이 발생하는 것으로 보고되고 있다.

고온초전도마그네트를 영구전류모드로 제작하고자 할 때 그 특성은 임계전류 이하에서 미소 저항발생과 관련된 고온초전도도체의 n 값 직법 관련이 있다. 마그네트의 자장감쇠를 실질적인 영구전류 수준인 0.01ppm/h 이하로 낮추기 위해서는 n 값이 충분히 커질 필요가 있다. 코일에서 최대자장이 걸리는 부분의 도체 길이를 ℓ_{mx} , 임계전계를 E_c , 코일의 자기인덕턴스 L_m 이라고 하면 전류감쇠는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [14].

$$\frac{dI_{op}(t)}{dt} = -\frac{E_c}{L_m} \left(\frac{I_{op}}{I_c} \right)^n \ell_{mx} \quad (1)$$

마그네트에서 I_{op} 와 중심자장 H_o 는 직접 비례하므로 자장감쇠율 dH/dt 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dH}{dt} \equiv -\left(\frac{\Delta H}{\tau_p} \right) \propto -\frac{E_c}{L_m} \left(\frac{I_{op}}{I_c} \right)^n \ell_{mx} \quad (2)$$

자장안정도 $\Delta H / (H_o \tau_p)$ 가 임계 값 이하가 되도록 설계한다고 가정할 때

$$\frac{dH}{dt} \equiv \left(\frac{\Delta H}{\tau_p} \right) \propto -\frac{E_c}{L_m} \left(\frac{I_{op}}{I_c} \right)^n \ell_{mx} \quad (3)$$

$$\left(\frac{\Delta H}{H_o \tau_p} \right) = \frac{E_c}{L_m I_{op}} \left(\frac{I_{op}}{I_c} \right)^n \ell_{mx} \quad (4)$$

(4)식을 I_{op}/I_c 에 대해서 풀면

$$\frac{I_{op}}{I_c} \leq \left[\frac{L_m I_{op}}{E_c \ell_{mx}} \left(\frac{\Delta H}{H_o \tau_p} \right) \right]^{1/n} \quad (5)$$

동작전류 $I_{op} = 300$ A, $E_c = 0.1 \mu\text{V/cm}$ 인 조건에서 $10^{-8}/\text{hr}$ 의 자장안정도를 만족하기 위한 n 값과 I_{op}/I_c 와의 관계를 (5)식으로 계산한 결과를 그림 4에 나타냈다.

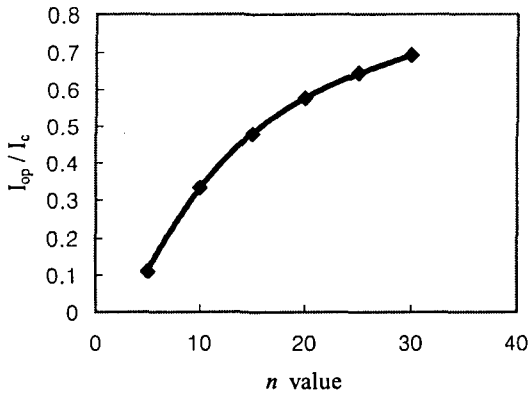


그림 4 I_{op}/I_c 의 n 값 의존성

고온초전도도체의 n 값은 자장의 증가에 비례하여 감소하기 때문에 초고자장 NMR 과 같은 영구전류모드 코일 개발은 상당히 어려운 과제라고 할 수 있다. 고온초전도도체의 n 값은 결함이나 필라멘트 소세징과 직접 관계가 있으므로 영구전류모드 마그네트 개발을 위해서는 도체의 n 값과 J_c 를 동시에 향상시키기 위한 도체 공정개발이 더욱 요구된다고 할 수 있다. 초전도마그네트 설계시 경제성과 함께 중요하게 고려해야할 사항이 퀘칭에 대한 안정성이다. 고온초전도마그네트는 동작온도에 따라 달라지나 저온초전도체에 비하여 임계온도가 높고 비열이 크기 때문에 77 K 기준으로 Nb-Ti 저온초전도마그네트에 비하여 퀘칭에 대한 에너지 마진이 $\sim 10^6$ 배 향상되기 때문에 안정성면에서 고온초전도마그네트는 아주 유리하다고 할 수 있다. 그러나 NZP(Normal Zone Propagation)속도는 예를 들어 단열조건의 Bi-2223 도체를 20 K 에서 사용하는 경우 ~ 11 cm/s 로 Nb₃Sn 의 400 cm/s 에 비하여 아주 느리기 때문에 이에 대한 적절한 보호기술이 필요하다[14].

고온초전도마그네트의 냉각방법은 마그네트의 특성에 크게 영향을 주는 동작온도에 따라 결정될 사항이나 시스템의 운전 편의성과 경제성을 모두 고려할 필요가 있다. 이미 본지를 통하여 초전도마그네트 냉각기술에 대해서 자세하게 보고된 바 있기 때문에 여기서는 저자가 개발하고 있는 고화질소를 이용한 고온초저도마그네트 냉각방법에 대해서 간단하게 설명

하고자 한다.

그림 5는 한국전기연구소와 MIT가 공동으로 개발하고 있는 고화질소 냉각 고온초전도 마그네트 시스템[15]의 개념도이다. cryostat 외층과 냉각체 사이에는 복사열 침입을 최소화하기 위해 진공구조에서 super-insulation 층을 두고, 저온부는 기본적으로 코일과 고화질소로 구성된다. 냉각 코일은 질소를 고화시키기 위하여 액체 헬륨을 순환시키는 것으로 저온부의 안쪽에 설치된다. 저온부가 상온 일 때 냉각코일을 통하여 액체 헬륨을 순환시키면 질소가스의 액화와 고화가 이루어진다.

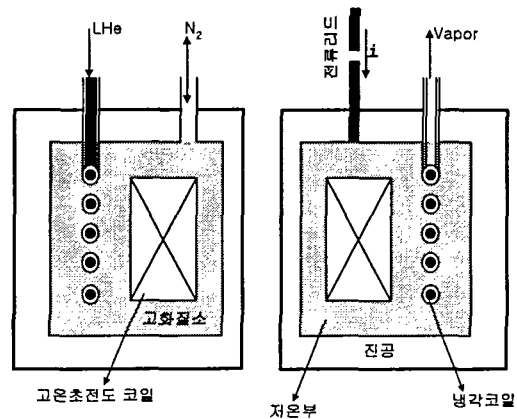


그림 5 고화질소 냉각 고온초전도마그네트 개념도

마그네트 운전 중 발열 및 열침입에 의하여 저온부 온도가 최대 동작온도(예를 들면 40 K)가 되었을 때, 마그네트가 영구전류 모드로 여자된 상태로 단순히 냉각코일을 통한 액체헬륨의 순환에 의해 시스템을 초기 동작 온도로 재냉각시킬 수 있다. 본 시스템은 외부 전원과 냉각장치를 분리한 채로 사용할 수 있는 이동형 개념이기 때문에 향후 교통기관의 탑재용으로 사용이 가능하다.

4. 외국의 개발 현황

고온초전도마그네트의 국내외 개발현황을 개괄적으로 살펴보기로 한다. 대부분의 마그네트 형태는 Bi-2223선재를 React & Wind방법으로 제작한 더블 팬케이크형 구조를 하고 있으며 냉각방식으로는 냉동기 부착의 전도냉각방식을

채택하고 있다. 상용화 목적의 시제품으로는 미국의 ASC와 일본의 스미토모전공이 소구경 Bi-2223 고온초전도코일을 냉동기 부착의 전도 냉각방식을 적용한 7 T급의 마그네트 시스템을 개발하였다. 산업 응용을 위한 고온초전도마그네트 개발에서는 도시바가 Si결정성장용 마그네트를 대구경으로 개발하기 위한 기초연구를 수행중이며 옥스포드사도 MRI용 고온초전도마그네트 시제품을 개발하였다.

히타치사에서 Wind & React 방법으로 제작한 Bi-2212 영구전류형 코일에서는 금속계 저온초전도마그네트 18 T의 back-up 자장하에서 인서트 코일로서 1.8 T의 자장을 발생시키는데 성공하여 초고자장 NMR에 적용하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 지금까지 대구경 고온초전도마그네트시스템은 산업적 응용을 탐색하기 위한 연구단계라고 할 수 있다. 그림 6은 축적에너지와 중심자장의 크기에 따른 고온초전도코일의 개발 현황을 나타낸 것이다. 실제 코일의 크기에 비례하여 그래프에 원형으로 나타냈다. 현재까지 수준에서 보면 그림 6에 나타낸 도시바에서 개발한 단결정 성장용 시제품 코일의 축적에너지가 50kJ로서 미국 ASC사에서 개발한 마그네트의 약 100 kJ에 비하여 반 정도이나 외경은 1.2m 로 세계 최대 규모라 할 수 있다.

환경분야에서 고온초전도마그네트의 새로운 응용으로 주목을 받고 있는 것이 자기분리이다.

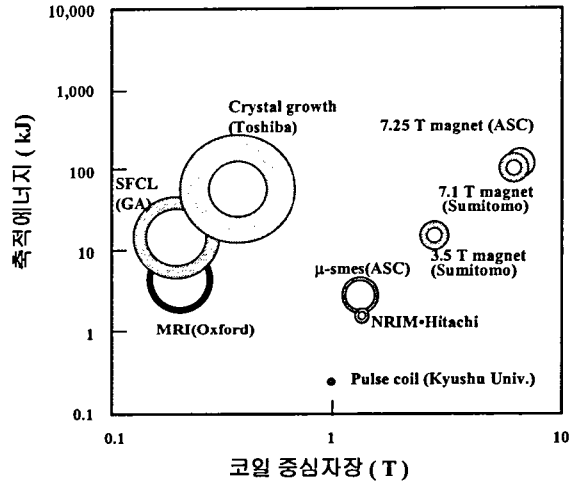


그림 6 코일중심자장과 축적에너지로 본 고온초전도마그네트 개발현황

그림 7은 최근에 일본 NRIM에서 개발한 고온초전도마그네트를 이용한 수평식 고속자기분리기[16]의 사진으로 20cm직경의 상온보아에서 1.7 T의 중심자장을 발생시킬 수 있는 팬케이 크형 고온초전도마그네트를 Bi-2223/Ag도체로 제작하였다. 자기분리시 매트릭스 필터에서 포획한 입자를 연속적으로 마그네트 외부로 배출하려면 자기력을 빨리 ON/OFF해야 하기 때문에 빠른 여자·탈자속도가 요구된다. NRIM마그네트는 최대자장까지의 여자·탈시간이 1분 밖에 걸리지 않은 것으로 보고되었다. 이러한 빠른 고속여자특성은 고온초전도마그네트의 퀘치에 대한 에너지마진이 높기 때문에 가능한 것이다. 앞으로 수질 환경문제가 심각해지면서 고온초전도마그네트를 이용한 HGMS(High Gradient Magnetic Separation)기술이 오피수, 녹적조 등의 고속 처리 공정에 크게 활용될 것으로 예상된다.

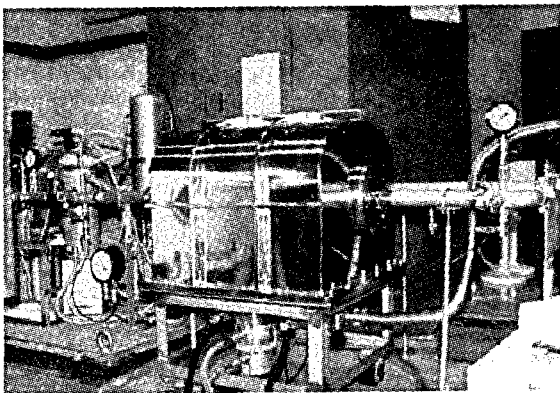


그림 7 일본 NRIM에서 최근에 개발한 고온초전도 자기분리기 전경

5. 맺음말

지금까지 PIT도체 개발에 힘입어 주로 R&D단계에서 많은 고온초전도마그네트 시제품들이 개발되어 기본적인 성능이 검증되고 있다. 조작성이 편리한 전도냉각 방식, 빠른 여자 속도, 높은 안정성 등은 고온초전도마그네트의 장점으로 꼽을 수 있으나 아직 도체 가격이 비싸기 때문에 시스템의 전체 가격면에서 보면 경쟁력이 약하다. 당분간 고온초전도마그네트의 응용은 저온초전도마그네트의 단점을 보완할 수 있거나 초고자장 NMR과 같이 하이브리드화함으로써 새로운 성능을 발휘할 수 있는 일부 분야에 한정적으로 사용될 가능성이 높다. 앞으로 PIT도체와 냉동기 가격이 많이 내려가면 MRI, Si 단결정성장장치, 자기분리기 등의 의료, 반도체, 환경산업분야에 전도냉각형 고온초전도마그네트가 우선 상용화에 진입할 것으로 보인다. 변압기, 발전기, 모터 등의 기존의 전력기기를 대체하는 응용분야는 무엇보다 경제성 면에서 상전도 시스템보다 비교 우위를 갖기 위해서 저가격 고성능의 도체개발이 선행되어야 한다. 선진국에 비하여 국내에서의 고온초전도마그네트기술 개발은 많이 뒤떨어진 느낌이다. 도체기술 개발과 병행하여 상용화가 우선 가능한 아이템을 선정하여 시스템 설

계 연구부터 필요한 요소기술 들을 체계적으로 개발할 필요가 있다. 적어도 coated conductor가 완전 실용화되기 전에 우선 PIT도체를 이용하여 대용량급의 고온초전도마그네트를 설계·제작할 수 있는 기술을 조기에 확립하지 않으면 선진국과의 기술격차가 더 크게 벌어질 것이다.

References

- [1] W. G. Wang, M.D. Bentzon, and P. Vase "High critical current and defect free km long Bi-2223/Ag-alloy multifilament tapes", pre-print of EUCAS'99 in Spain.
- [2] A.P. Malozemoff, Q. Li, S. Flesher, Physica C 282-287(1997)424.
- [3] R. Flukiger, G. Grasso, J.C. Grivel, F. Marti, M. Dhalle, Y. Huang, Supercond. Sci. Technol. 10(1977)A 68.
- [4] ASC web site (<http://www.amsuper.com>)
- [5] Y. Iijima, M. Hosaka, N. Tanabe, N. Sadaka, T. Saitoh, O. Kohno, K. Takeda, J.Mater. Res. 12(1997)2913
- [6] S. R. Foltyn, E.J. Peterson, J.Y. Coulter, P.N. Arendt, Q.X. Jia, P.C. Dowden, M.P. Maley, X.D. Wu, D.E. Perteson, J. Mater. Res. 12(1997)2941.
- [7] F. Garcia-Moreno, A. Usoskin, H.C. Freydhart, J. Wiesmann, J. Dzick, J. Hoffmann, K. Heinemann, A. Issaev, EUCAS'97(1997)661.
- [8] A. Knierim, R. Auer, J. Geerk, G. Linker, O. Meyer, H. Reiner, R. Schneider, Appl. Phys. Lett. 70(1977)661.
- [9] V. Berz, B. Holzapfel, G. Sipos, W. Schmidt, N. Mattern, L. Schultz, EUCAS'97, p.1081.
- [10] SUPERCONDUCTIVITY COMMUNICATIONS, Vol. 8, No. 6, Dec. 1999.
- [11] J.E. Evetts and B.A. Glowacki, Supercond. Sci. Technol. 13(2000)443.
- [12] S. S Oh, H. B Jin, H. S Ha, D. W Ha, D. Y Jeong and K. S Ryu, EUCAS'99(to be published)
- [13] P. Fabbriatore, C. Priano, M.P. Testa, R. Musenich, P. Kovac, A. Matrone, E. Petrillo and M. Ariante, Supercond. Sci. Technol. 11(1998)304.
- [14] Y. Iwasa "Case studies in Superconducting Magnets"
- [15] S.S. Oh, H.S. Ha, D.W. Ha, Y.K. Kwon, H. Lee, Y. Iwasa, Proc. of KIASC conference 2000.
- [16] NRIM web site (<http://www.nrim.go.jp> : 8080 / public /kikaku/japanese/).