

저온초전도도체의 제조기술과 개발동향



오상수

한국전기연구소 초전도응용연구
사업팀



류강식

한국전기연구소 초전도응용연구
사업팀

1. 서론

초전도체가 갖고 있는 특성중에서 가장 중요한 것은 전기저항제로의 성질이다. 이러한 특성을 응용한 초전도기기를 개발하기 위해서는 기본적으로 초전도도체가 필요하다. 현재 상용화되어 있는 초전도도체는 대부분 금속

계의 저온초전도도체이며 헬륨 온도 (1.8 - 4.2 K)에서 사용하는 것이 일반적이다. 저온초전도도체의 경우 소선(strand)은 다심의 초전도체 필라멘트와 안정화재 매트릭스로 구성되어 있으며 필라멘트는 정상 통전시 초전도전류가 흐르는 경로에 해당한다. 안정화재는 외적, 내적 교란에 의하여 초전도체 필라멘트의 온도가 상승하여 임계전류이상의 전류가 도체에 흐를 때 초과 전류를 통과시키고 필라멘트에 발생한 열을 주위의 액체 헬륨 쪽으로 신속하게 전달시켜 초전도도체를 안정화시키는 역할을 한다.

초전도도체는 물리적, 기계적 성질이 서로 다른 여러 재료로서 이루어진 복합재료이며 이러한 복합초전도도체를 제조하기 위해서는 금속용해, 기계가공, 용접,

소성가공, 열처리 등의 많은 공정이 필요하다. 소성가공은 선재의 직경을 점으로 줄여 나가면서 길이를 늘여나가는 공정이라고 할 수 있는데, 구리전선과 같이 가공 중간에 선을 잇는 용접이 불가능하므로 최대한 단위길이 (piece length)를 길게, 단선이 발생하지 않도록 가공하는 것이 중요하며 장척의 초전도선은 마그네트를 감을 때 유리하다. 본고에서 기술하는 초전도도체란 형태적으로 초전도소선(superconducting strand) 단독의 경우이거나 구성 요소로서 초전도 소선과 안정화재 혹은 구조재와 결합된 형태의 도체를 지칭한다. 일반적으로 동작전류가 작은 초전도기기에는 단독의 초전도소선이 사용되며 이 경우의 초전도 도체를 초전도선 혹은 초전도선재

표 1. 대표적인 저온초전도선재의 임계특성치 및 응용분야

재 료	T _c (K) @0 T	μ ₀ H _{c2} (T) @4.2 K	J _c (A/m ²)	응용 분야
Nb-Ti	10.4	11.5	~10 ⁹ (4.2K,8T)	MRI/NMR, SMES, 발전기, 입자가속기, 핵융합용 폴로이달 코일, 자기부상열차, 변압기, 한류기, 결정 성장장치
Nb ₃ Sn	18	22	~10 ⁹ (4.2K,12T)	NMR, 핵융합용 토로이달코일
Nb ₃ Al	18.9	32	~10 ⁹ (4.2K,12T)	고자장마그네트

(superconducting wire)라고 부르기도 한다. 다수 개의 초전도 소선을 집합한 초전도도체는 대용량의 전류가 필요한 마그네트나 교류용 초전도 기기등에 사용된다. 표 1에 대표적인 저온초전도체의 특성과 응용분야를 열거하였다. 초전도기기의 응용의 범위와 용도는 초전도체의 종류와 도체로서 가공된 형태 및 특성에 좌우된다고 할 수 있다. 초전도도체의 제조 공정에서 고려해야 할 실용적으로 중요한 요소는 단위 면적 당 손실 없이 최대로 흘릴 수 전류의 최대치인 임계전류밀도(J_c)라고 할 수 있고 초전도도체의 임계전류밀도는 초전도체의 종류, 사용 온도 와 자장 값에 의존한다. 합금계의 Nb-Ti 초전도선재가 주로 8 T이하의 자장 범위에서 MRI 및 초전도 전력기기 등에 가장 많이 사용되고 있으며 고자장 발생이 가능한 Nb₃Sn은 NMR과 핵융합용 토로이달 코일에 사용되고 있다. 반면에 Nb₃Al은 일반적인 가공열처리법으로는 A15화합물상을 얻는 것이 곤란하였으나 최근에 새로운 제조 공정이 개발되면서 차세대 고자장 발생용 초전도도체로 기대되고 있다. 응용 분야중에서 초전도MRI, NMR 등은 상용화에 성공한 대표적인 제품으로 국내에도 많이 보급되고 있고 저자들 그룹에서도 현재 MRI용 초전도선[1]과 마그네트[2]를 개발하고 있는 중이다.

미국, 일본, 러시아, 유럽 등에서는 이미 1960년대 초부터 금속계의 초전도도체를 개발하기 시작하여 현재까지 다양한 제품이 개발, 생산되고 있다. 최근에 초전도발전기[3], 초전도에너지저장장치(SMES)[4], 핵융합용 토카막장치[5], 입자가속기용 대형 마그네트 등이 일본, 미국, 유럽

등에서 활발하게 개발되면서 대용량도체에 대한 수요가 증가하고 있고 도체 특성을 향상시키기 위한 연구개발이 많이 이루어지고 있다. 국내에서도 G7선도기술과제로 초전도핵융합토카막장치 개발(KSTAR)이 진행중이어서 초임계헬륨을 강제 순환시키는 구조의 Nb₃Sn 관내연선도체(CICC)가 개발 중에 있다.

본고에서는 초전도체의 종류별로 도체 제조기술에 대한 기본적인 공정과 특징을 소개하고 미세조직과 임계전류밀도 등의 특성에 대하여도 기술하고자 한다. 또한 국내의적으로 진행중인 초전도도체 개발 동향에 대해서도 언급하기로 한다.

2. 소선의 제조기술과 특성

2.1 Nb-Ti 초전도선

금속계의 저온초전도 소선의 제조 시에 중요한 요소는 무엇보다도 가공성이라 할 수 있다. 지금까지 개발된 초전도도체 중에서 Nb-Ti가 가장 많이 사용되는 이유는 바로 가공이 쉽고 변형에 강하기 때문이다. 그러나 Nb-Ti 자체적으로는 소성가공이 어렵기 때문에 일반적으로 Nb-Ti 초전도소선은 무산소동과 결합시킨 복합체의 구조로서 가공하는 경우가 일반적이다. 구리 봉재에 길이 방향으로 구멍을 뚫고 Nb-Ti 합금봉을 결합시킨 복합체의 빌렛을 만들고 열간 압출을 하면 기계적 특성이 서로 다른 소재일지라도 계면에서 반응에 의한 결합이 강하게 일어나 인발-신선 등의 후 가공에서 서로 슬립이 일어나지 않고 Nb-Ti 필라멘트가 수 μ m의 정도까지 용이하게 소성가공이 가능하다. 초전도소선의 가공에 있어서 빌렛의 조립 과정은 미세 이물질 등

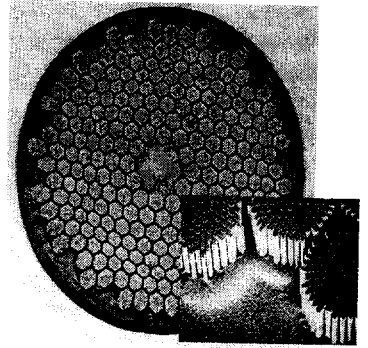


그림 1. 극세다심 Nb-Ti 초전도 소선의 단면(GEC-Alsthom사 제조)

이 소재내로 끼어들면 필라멘트의 극세 가공이 어려워지므로 특히 주의를 해야한다. 그림 1은 Nb-Ti소선의 단면을 나타낸 것으로 모노 필라멘트의 선재를 두 번 적층하여 만든 구조로 되어 있다. 우측 하단부의 확대된 사진에서 Nb-Ti 필라멘트가 벌집모양의 육각 세그먼트안에 촘촘하게 배열되어 있는 것을 볼 수 있다. 이 소선은 프랑스의 GEC-ALSTHOM사에서 LHC dipole 마그네트용으로 개발한 것으로 소선 직경이 1.29 mm이고 직경 5 μ m의 Nb-Ti 필라멘트 28,314개가 무산소동 안에 트위스트된 채로 박혀있는 구조를 하고 있다. 선재의 J_c 는 4.2 K, 8 T에서 1,114 A/mm²이다.

Nb-Ti 초전도선의 임계전류밀도는 Nb-Ti 초전도체의 미세조직 제어기술이 발전하면서 크게 향상되었다. Nb-Ti 필라멘트 속을 흐르는 초전도전류는 주로 Nb-Ti내의 상전도석출물에 자속선이 고정됨으로서 전기저항 제로의 상태로 흐르게 되는데 Lee 등의 TEM 관찰[6]에 의하면 강가공에 의하여 제어가 잘 된 미세조직의 경우 두께 1 nm 정도의

α -Ti상 석출물이 선재 길이 방향으로 리본상으로 길게 늘어진 형태를 하고 있으며 리본의 평균 간격이 수 nm인 것으로 밝혀지고 있다. 미세조직을 제어하기 위해서는 석출열처리와 강가공의 조건을 최적화해야 한다. 조건으로서의 열처리 횟수와 최종열처리 후의 가공량, ϵ_f 가 중요하다 할 수 있다.

$$\epsilon_f = \ln(A_o/A_f)$$

여기서 A_o , A_f 는 각각 최종열처리 후의 선재 단면적, 최종 가공이 끝난 선재의 단면적이다. Matsumoto 등의 연구[7]에 의하면 J_c 가 최대가 되는 열처리 횟수는 4회 이상이며 ϵ_f 는 5 - 8 T의 가장 범위에서 4 - 5 인 것으로 보고하고 있다. 이렇게 미세조직을 최적화함으로써 SSC용으로 개발된 Nb-Ti극세다심선재의 경우, 5 T에서 3,000 A/mm² 이상의 J_c 가 얻어지게 되었다. 석출열처리에 의한 J_c 향상에는 한계가 있기 때문에 최근에는 인공고정점법(Artificial Pinning Method)이 시도되고 있다[8]. 이 방법은 Nb와 Nb-Ti를 결합한 다층 클러스터 구조를 만들어서 Nb/Nb-Ti 계면에서 자속선 고정점이 일어나도록 하는 방법으로 임의로 고정점의 구조를 설계할 수 있기 때문에 빌렛 제작 단계에서 J_c 를 제어할 수 있는 것이 특징이라 할 수 있고 5 T에서 4,000 A/mm²을 넘는 J_c 가 보고되고 있어 앞으로 더욱 J_c 가 향상될 것으로 기대되고 있다.

초전도선재를 초전도전력기기 등에 응용하기 위하여는 교류손실을 줄이는 것이 중요하다. 초전도선이 변화하는 자장중에 놓이면 초전도선에는 필라멘트내에서는 히스테리시스 손실이 그리고 필라멘트들 사이에는 매트릭스 금속을 매개로 한 결합전류

손실과 안정화용의 구리 부분에는 와전류 손실이 유기된다. 히스테리시스 손실은 필라멘트경에 비례하기 때문에 교류용 초전도선의 경우는 가능한 필라멘트경을 초극세로 아주 가늘게 가공하는 것이 필요하다. 최근에는 0.5 μ m경의 필라멘트가 수만개 이상 박혀 있는 교류용 Nb-Ti초전도선이 개발되고 있다. 결합전류 손실을 작게 하기 위해서는 필라멘트의 트위스트 피치를 아주 짧게 해야하고 Cu-Ni합금[9]을 사용하여 매트릭스의 저항을 높이는 방법도 일반적으로 사용되고 있다. Cu-Ni합금을 사용하면 가공성은 나빠지나 안정화재 부분을 분할하듯이 배치하면 전체의 교류손실을 크게 줄일 수 있다.[10]

2.2 Nb₃Sn 초전도 소선

동작온도를 낮추면 Nb-Ti 마그네트의 발생 자장도 다소 증가하지만 7 - 8 T이상의 자장 응용에서는 상부임계자장치(μH_{c2})가 큰 화합물계 초전도선재를 선택할 수 밖에 없는데 Nb₃Sn초전도도체를 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 화합물계 초전도선재는 화합물 특유의 취성으로 인하여 열악한 임계전류밀도의 내변형특성(strain tolerance)이 마그네트로서의 사용 한계를 저하시키는 중요한 요소이며 마그네트 제작시도 이러한 요소를 충분히 고려해야 한다. Nb-Ti초전도선의 제조시 가공 중간에 석출열처리를 통하여 자속선의 고정점의 수를 크게 증가시킴으로서 임계전류밀도가 향상되는 반면 Nb₃Sn초전도선은 브론즈법이든 내부확산법(Internal Tin Process)이든 가공 도중에는 Nb₃Sn화합물이 생성되는 열처리는 실시하지

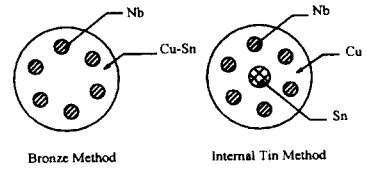


그림 2. Nb₃Sn 제조방법 도식도

않는다. 이것은 일단 화합물이 생성되면 재료적으로 다루기가 너무 취약하여 코일 권선 등의 작업이 어렵기 때문이다. 따라서 대부분의 Nb₃Sn초전도선은 Nb와 Sn이 가공 도중에는 서로 확산 반응 없이 그림 2에서 처럼 단일 금속 혹은 합금(Cu-Sn 브론즈)의 형태로 존재하다가 최종 가공 후 유리섬유포등으로 전기 절연하고 SUS보빈등에 권선하여 비산화성 분위기의 전기로에서 열처리를 함으로서 확산반응에 의하여 Nb₃Sn화합물층이 생성된다. 이러한 공정을 Wind & React라고 한다.

Nb₃Sn선재는 최근에 ITER 핵융합 모델코일용으로 표2에서 제시한 HP1, HP2 선재가 각 회사들에 의하여 개발되면서 J_c 및 교류손실 특성이 많이 향상되었다. 일반적으로 J_c 와 교류손실치는 비례하기 때문에 J_c 를 향상시키기 위한 제조방법을 도입하면 교류손실도 같이 증가하기 때문에 문제가 되기도 한다.

저자들도 KSTAR용 초전도소선을 내부확산법으로 개발하고 있다. 내부확산법은 그림 2에서 처럼 브론즈법에 비하여 순구리 매트릭스를 사용하기 때문에 가공 도중에 소둔 열처리를 하지 않아도 되고 Sn의 고용량에 제한 없이 Sn을 구조적으로 배치하여 높은 J_c 를 얻을 수 있는 것이 특징이다. 가공성을 유지하면

서 높은 Non-Cu J_c 를 얻기 위해서는 Nb/Sn/Cu로 이루어진 Sub-element 복합체봉을 안정화재 튜브내에 충전할 때의 단면 구조가 중요하고 확산방지막의 두께도 가능한 줄일 필요가 있다. 또한 필라멘트 브릿징이 일어나지 않는 범위내에서 Nb 필라멘트의 체적율을 높이는 것이 중요하다고 할 수 있다. 구리 매트릭스에 Ge를 약간 첨가하면 가 공성이 별로 저하하지 않고 생성된 Nb₃Sn의 결정 조직이 미세하게 되므로 특히 고자장에서의 J_c 가 향상된다[11,12].

2.3 Nb₃Al 초전도체

Nb₃Al은 제조 방법이 어렵기 때문에 지금까지 실용화가 늦추어지다가 최근에 NRIM 및 스키모토모전공등에서 rapid-quenching 법 [13] 및 Jelly-Roll법[14]을 적용하여 성능이 우수한 Nb₃Al 초전도선이 개발되고 있다. Nb₃Sn에 비하여 Nb₃Al은 임계전류밀도의 내변형특성이 우수하고 상부임계자장치가 높기 때문에 차세대 고자장 발생용 초전도도체로 기대되고 있다. NRIM에서 개발한 rapid-quenching법은 우선 Nb 튜브안에 Al 함금을 삽입한 봉재를 double-stacking하여 Nb/Al-Mg 극세다심선을 만든 후 순간 가열급냉장치 장치를 이용하여 연속적으로 준안정상의 과포화고용체를 만든다. Nb/Al-Mg 극세다 심선에 전극과 Ga 욕조를 통하여 교류의 대전류를 흘리면 선재가 주열에 의하여 순간적으로 가열되었다가 Ga 욕조를 통과할 때 고속으로 권취하는 과정에서 급냉되면서 Nb-Al상이 만들어 진다. 이렇게 만들어진 준안정 조직의 다심선을 700 - 900°C에서 열처리하면 Nb₃Al 화합물 초전도상이 만들

표 2. ITER 모델코일용 HP1, HP2 소선의 요구사항

항 목	종 류	
	HPI	HPII
소선 직경	0.81 mm ± 0.003	
Cr층 두께	2 μm -0/ +0.5	
Cu : non-Cu ratio	1.5 ± 0.1	
RRR(@ 0 T, T ~ 18 K)	> 100	
Twist pitch(right hand)	≤ 10 mm	
Non-Cu J_c @12 T, 4.2 K, 0.1 μV/cm)	> 700 A/mm ²	>550 A/mm ²
Non-Cu Hysterisis losses ±3 T	< 600 mJ/cm ³	<200 mJ/cm ³
n value @12 T, 4.2 K, 0.1 μV/cm	> 20	

다.

어 지는데 단시간 열처리하여도 고자장에서 높은 J_c 가 얻어지는 것으로 보고되고 있다.

3. 대용량 도체

실용화 개발중인 대형 초전도마그네트 및 시스템에는 초전도소선을 단독으로 사용하는 경우보다 소선들을 집합 연선(cabling)하여 보강재와 함께 집합시킨 구조의 저온초전도도체가 많이 사용되고 있으며 일반적으로 단면 형태는 그림 3에 나타난 4종류로 분류[15]할 수 있다. 그림중의 (a), (b)는 소선을 몇 가닥씩 여러 단계 꼬아서 만든 연선형 도체(stranded cable)로 주로 (a)는 교류용 초전도도체로 개발된 것으로 각 7본 케이블의 중심에 스테인레스선이나 Cu-Ni 등의 상전도 금속선이 배치되어 보강재로 사용된다. 참고로 최근 Hitachi사에서 개발한 교류용 연선형 도체에는 0.1 μm 직경의 초극세 필라멘트 930,000개가 Cu/Cu-Ni 안정화재에 배치된 직경 0.25mm의 Nb-Ti 소선이 사용되고 있다. 이러한 소선을 6본 2차 연선하여 만든 단척 케이블의 임계전류는 4.2 K, 1 T에서 2,000 A로 확인되었

(b)구조는 1차 연선한 케이블을 turks head roller등을 통과시켜 평평한 사각형상으로 만든 것으로 Rutherford 케이블이라 하며 이 경우에도 도체 중앙에 고강도 재료를 삽입하여 강도를 향상시킨 구조의 도체를 만들기도 한다. (b)구조의 Rutherford 케이블은 입자가속기용 dipole 마그네트

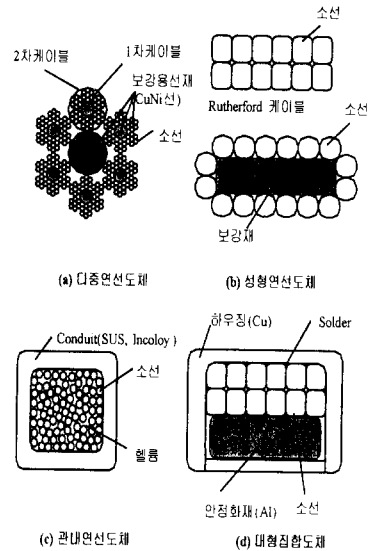


그림 3. 대용량 초전도도체의 단면구조

용 도체로 많이 사용되며 그림 1과 같은 0.8 ~ 1.0 mm 직경의 순 구리 안정화재 극세다심 Nb-Ti 소선이 꼬여져 있다. Rutherford 케이블은 최종 단면의 사이즈가 정밀해야 되고 도체 조장(piece length)이 길어야 한다. SMES 마그네트 나 초전도 발전기 계자코일에 사용되는 펄스용 Rutherford 도체의 경우는 변동자계에 의한 교류손실을 줄이기 위하여 일반적으로 초전도 소선의 안정화재가 Cu 와 Cu-Ni 로 이루어진 경우가 많다. 최근 일본의 SUPER-GM에서는 발전기 계자코일용으로 높은 안정성과 고강도, 고도의 성능을 갖는 10,000 A급의 Nb-Ti 도체를 개발하고 있으며 현재 70MW급 모델기 제작에 사용하여 우수한 성능을 확인하고 있다.

관내연선도체(Cable-In-Conduit Conductor)는 하이브리드 대형 마그네트나 핵융합마그네트 등의 대공간에 강자장을 발생시키는 목적으로 사용되며 막대한 전자력으로부터 도체를 보호하고 안전한 운전을 위하여 소선을 몇 단계로 꼬아서 수백 본의 케이블을 만든 후 incoloy나 SUS316LN 등의 극저온 강도가 높은 재료에 연속으로 삽입하면서 TIG나 전자빔으로 용접 조판하여 만든다. 실제 운전시 관내로 초입계헬륨을 강제적으로 순환시키며 초전도 소선이 냉매와 직접 접촉하고 있기 때문에 외부 교란에 대한 안정성이 높다고 할 수 있다. 그러나 핵융합마그네트의 경우 전자기 및 열적으로 도체의 주위 환경이 아주 가혹하고 운전전류가 크면 안정성마진이 급격히 감소하므로 자장, 초입계헬륨의 유속 및 압력, 도체에 유입되는 예상 교란에너지 값 등을 고려하여 운전전류를 결정한다. 최근

ITER 모델코일에 incoloy908로 조판된 Nb₃Sn 관내연선도체가 사용되었다. incoloy908 재료는 Nb₃Sn 과 열수축율 차이가 작고 극저온에서의 기계적강도가 SUS316LN 보다 우수하나 SAGBO(입계산소 파괴)현상으로 열처리 도중에 incoloy관이 깨어지는 경우가 있다. SAGBO를 피하기 위해서는 열처리온도, 산소농도, 잔류 인장응력 등에 대한 세밀한 대책을 세우는 것이 중요하다. 최근 우리나라에서도 KSTAR 프로젝트가 진행 중으로 전초전도방식의 핵융합용 마그네트를 개발하는 것이 주요한 목표로 되고 있다. 토로이달 및 폴로이달 CS코일에는 Nb₃Sn 관내연선도체가 사용되어 질 예정이다. 여기에 사용되는 Nb₃Sn 소선은 내부확산법으로 국내에서도 제조할 예정이며 중간반제품 상태의 봉재를 외국에서 수입하여 국내 기업에서 선선→필라멘트 트위스팅→크롬코팅→집합연선→조관 공정으로 도체를 제조하는 방법과 일부는 국내 독자 기술로 빌렛을 제작하여 압출과 인발공정을 거치는 방법을 동시에 검토하고 있다. 현재 저자들의 그룹을 중심으로 우리나라 실정에 맞는 내부확산법에 의한 Nb₃Sn 소선 제조공정을 개발하고 있으며 임계전류밀도의 향상과 선재의 장척화에 주력하고 있다.

6. 맺 음 말

본고에서는 개괄적으로 초전도 도체의 종류별 제조방법 과 최근의 개발동향에 대하여 간략하게 기술하였으나 짧은 지면 관계로 생략된 부분도 많았으며 초전도 도체의 안정성 및 전자기적 특성에 대하여는 자세히 설명하지 못하였다. 외국의 연구동향을 볼 때 대규모 초전도응용의 경우는

시스템의 신뢰성과 도체의 특성 면에서 저온초전도도체를 필요로 하고 우리나라에서도 향후 다양한 초전도시스템을 개발하기 위해서는 저온초전도도체에 대한 더 많은 관심과 지원이 필요하다고 할 수 있다. 본고에서 요약한 초전도도체의 기본적인 사항들이 연구 개발에 다소나마 도움이 되었으면 한다.

참 고 문 헌

1. D.W.Ha, S.S.Oh, H.S.Ha, S.C.Kim, K.S.Ryu and I.Y.Han : Proc. of ICEE'98, July 21-25, 1998, Kyongju, Korea, Vol II p.159
2. 진홍범, 오봉환, 이연용, 오상수, 조전욱, 권영길, 하동우, 최병주, 류강식, 나완수 : 전기학회논문지 46권7호 (1997)1011
3. A.Ueda, S.Maeda, T.Hirao, K.Mio, Y.Nagata, T.Yamada, M.Morita and H.Yoshimura : Proc. of MT-11, Tsukuba, August, Japan p.525
4. T.Imayoshi, H.Kanetaka, H.Hayashi, K.Honda, K.Tsutsumi, F.Irie, M.Takeo, K.Funaki, H.Okada, T.Ezaki, F.Sumiyoshi : IEEE on Appl. Sup. Vol.7, 2(1997)844
5. P.Bruzzzone, N.Mitchell, M.Steeves, M.Spadoni, Y.Fakahashi, V.E.Sytnikov : IEEE on Mag., 32(1996)2300.
6. P.J.Lee and D.C.Larbalestier : Acta Metall., 35(1987)2523.
7. K.Matsumoto, M.Nakajima, Y.Tanaka and K.Osamura : IEEE on Mag., 27(1991)1125.
8. O.Miura, C.Tei, D.Ito and S.Endo : Proc. of ICEC16/ICMC, Kitakyushu, May,

- Japan, 1996 p.1821
9. K.Ohmatsu, H.Yumura, K. Takahashi, K.Sato, T.Ueda, Y.Suganuma : T.IEE Japan 116-B(1996)1374.
 10. Ogiwara : 應用超電導, 日刊工業新聞社 刊
 11. K.Tachikawa, M.Terada and M.Endo ; Sci. Rep. RITU A-Vol, 37 (1992)108.11.
 12. T.Pyon and E.Gregory ; IEEE on Appl. Supercond. 5(1995)1760.
 13. Y.Iijima, M.Kosuge, T.Ta-keuchi and K.Inoue : Adv. in Cryo. Eng. 40(1994)899.
 14. A.Mikumo, N.Ayai, Y.Ya-mada, K.Takahashi, K.Sato, N.Koizumi, M.Sugimoto, T. Ando, H.Tsuji and S.Shi-mamoto : Proc. of ICEC16/ICMC, Kitakyushu, May, Japan, 1996 p.1821
 15. 船木和夫, 住吉文夫 : 多芯線と導體, 産業圖書, 1995

< 추진호 위원 >