

자기부상 자석용 고온 초전도 선재 연구개발 현황

유재무, 고재웅, 김영국, 정국채 | 한국기계연구원

1. 서 론

자기부상에 의한 고속 운송수단 (Maglev)은 소음과 진동이 적고, 속도 면에서 우수하여 기존의 항공기, 자동차, 고속 열차 등을 대체할 수 있는 교통수단으로 각광받고 있다. 1930년대에 자기 부상에 의한 고속 운송의 개념이 최초로 제안된 이후 최근에는 일본, 독일 등에서 시속 400km 이상의 고속 운행이 가능한 자기부상열차가 개발되는 등 실용화를 위한 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

자기력에 의한 차체의 부상을 위해서는 부피와 무게가 작으면서도 강력한 자기장을 발생시킬 수 있는 자석의 개발이 필요하다. 이러한 강한 자석을 만들려면 도체를 많이 감거나 전류를 많이 흘려주어야 한다. 그러나 구리 등의 금속 도체를 이용하는 경우 도체를 많이 감으면 크기가 너무 커지거나 무게가 많이 나가게 되고, 전류를 많이 흘려주면 코일의 저항 때문에 열이 많이 발생하는 단점이 있다. 이에 따라 저항 없이 다량의 전류를 흘릴 수 있는 초전도 선재를 이용하여 무게와 부피가 작은 자기 부상용 전자석의 개발이 이루어지고 있다. 최근 일본에서는 초전도 선재를 이용한 고자장 자석을 적용하여 500km/h 이상의 고속 주행이 가능한 자기부상열차를 개발하였으며, 2003년에는 581km/h의 속도를 기록하였다.

신뢰성이 높고 자기 부상 특성이 우수한 전자석을 개발하기 위해서는 고자장 하에서도 다량의 전류를 흘릴 수 있는 초전도 선재의 개발이 선행되어야 한다. 1911년 수은에서 초전도 현상이 발견된 이후 초전도 특성을 지니는 물질의 탐색이 지속적으로 이루어져 왔으며, 1960년대 Nb-Ti 등 합금계에서 10K 근처의 임계온도를 가지는 저온 초전도체가 발견되었다. 저온 초전도체는 금속합금으로 이루어져 있으므로 장선재 형태로 기계가공이 용이하고, 고자장 하에서도 높은 임계전류값을 가지므로 다량의 전류를 흘릴 수 있으며 선재의 가격 면에서도 수 \$/kAm로 낮다는 장점이 있다. 그러나 임계온도가 10K 정도로 낮아서 냉각을 위해서는 고가의 액체헬륨이 필요하여 고가의 냉각 및 운전비용이 소요된다.

한편 1980년대 후반 액체질소 온도에서도 초전도성을 지니는 고온초전도체가 발견된 이후, 전력 수송, 저장 및 고자장 생성 분야에 고온 초전도체를 응용하고자 하는 노력이 다방면으로 이루어지고 있다. $\text{Bi}_{2-x}\text{Pb}_x\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_z$ (BSCCO), $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) 등의 초전도체는 액체질소의 비등점인 77K보다 높은 온도에서도 초전도성을 지니며 다량의 전류를 흘릴 수 있으며, 냉각 비용이 저렴하다. 따라서 고온 초전도체를 적용하여 초전도 자석을 제작하는 경우 저온 초전도체에 비하여 냉각 비용이 저렴하고 고자장의 발생이 가능해 질 것이다. 그러나 고온초전도체는 산화물로 존재하므로 가공성이 떨어진다는 단점이 있다. 이에 따라 고온 초전도체와 금속의 복합체 형태로

장선 형태의 초전도 선재를 개발하려는 노력이 활발하며, 현재 우수한 개발 결과가 속속 보고되고 있는 실정이다. 본고에서는 자기 부상용 자석에 적합한 고온초전도 선재를 개발하기 위해 해결되어야 할 문제점 및 그 해결을 위한 연구개발 현황을 살펴보고자 한다. 특히 자기장 하에서도 임계전류값의 저하가 적고 다량의 전류를 흘릴 수 있는 YBCO 초전도 선재의 개발현황에 대해 중점적으로 정리하고자 한다.

2. 고온 초전도 선재의 개발 현황

2.1 1세대 BSCCO 고온 초전도 선재

1988년 일본 금속재료연구소의 Maeda 박사가 $T_c : 110K$ 인 $Bi_{2-x}Pb_xSr_2Ca_2Cu_3O_z$ (BSCCO) 고온초전도체를 발견한 이후 장선의 초전도 선재를 제작하기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다. BSCCO 선재는 Powder-in-Tube (PIT) 공정으로 제조되며 은 튜브 내에 BSCCO 전기 분말을 채우고, 인발(drawing) 후 압연(rolling)한 뒤에 열처리하는 공정으로 구성된다(그림 1).

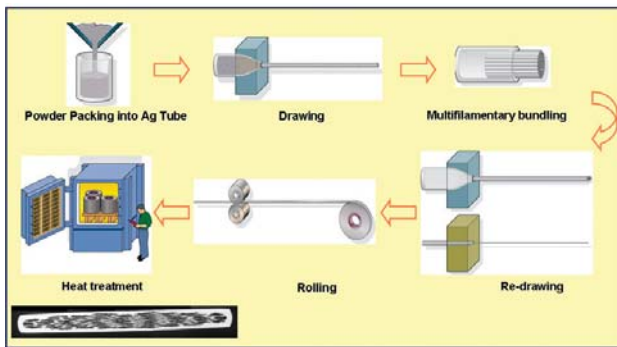


그림 1. PIT법에 의한 1세대 고온 초전도 선재 (BSCCO선재) 제조 공정



그림 2. BSCCO 선재를 이용하여 제조된 초전도 자석에 의한 자기 부상

PIT 공정으로 제조된 BSCCO 선재는 1세대 고온 초전도 선재로 일컬어지며, 미국 AMSC, 일본의 SEI 등의 업체에서 현재 800m의 길이를 가지며 150A 이상의 전류를 흘릴 수 있는 장선재의 상업적인 판매가 이루어지고 있다. 그림 2는 일본에서 BSCCO 선재를 이용하여 제조된 초전도 자석이다. 사용된 총 22km의 BSCCO 선재가 사용되었으며, 20K의 온도에서 75kg의 무게를 12.5cm의 높이로 띄우는 것이 가능하다. 한편 2005년 12월 일본 JR central에서는 시험용 자기부상열차에 BSCCO 고온 초전도 선재를 이용하여 제조한 초전도 자석을 탑재하여 얻은 주행실험 결과를 발표하였다. 저온 초전도 선재를 이용하는 초전도 자석을 탑재하고 있는 기존의 시험용 자기부상 열차에서 8개 자석 module 중 1개의 부상용 자석 module을 고온 초전도 선재를 이용하여 제작한 초전도 자석으로 대체한 결과 500km/h 이상의 고속 주행에서도 안정된 성능을 얻었다고 발표하였다. 이로써 자기부상열차에 대한 고온 초전도 선재의 적용이 가능하다는 것이 기술적으로 증명되었다.

그러나 BSCCO 선재는 현재 상업적인 생산 및 판매가 가능한 시점임에도 불구하고 선재 제조를 위해 고가의 은 (Ag)을 사용하므로 선재 자체의 가격이 \$200/kA-m로 높은 편이다. 또한 액체질소의 비등점인 77K 근처에서는 자기장 하 임계전류값의 저하가 크다는 단점이 있어 자기 부상용 전자석 제조에 충분할 정도의 자기장을 발생시키

기 위해서는 20K 정도로 냉각하여야 한다. 따라서 BSCCO 선재를 이용한 자기부상용 초전도 자석의 실용화를 위해서는 이러한 가격 및 자기장하 임계전류 감소 문제가 먼저 해결되어야 할 것으로 생각된다.

2.2 2세대 YBCO 고온 초전도 선재

1987년 미국의 Chu 교수에 의해 발견된 YBCO ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$)는 BSCCO 보다 먼저 발견되었으나, 결정 입계가 전류 수송을 저해하는 약결합(weak link) 문제로 인해 선재로서의 개발이 늦어졌다. 이러한 약결합 문제를 해결하기 위해 YBCO계 초전도 선재는 이축배향성을 지니는 금속 기판(니켈계 합금) 위에 YBCO 층을 증착시킴으로써 전류 수송특성이 우수한 초전도 선재를 제조할 수 있는 “coated conductor”의 형태로 제조된다(그림 3).

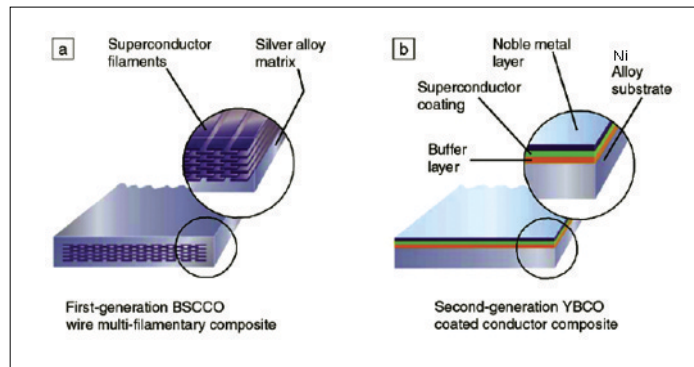


그림 3. (a) 1세대 BSCCO 선재와 (b) 2세대 YBCO 선재의 구조

coated conductor는 이축배향성이 우수한 금속기판, 완충층, 초전도층 및 보호층으로 이루어져 있으며 YBCO 초전도 선재의 대표적인 제조 공정은 니켈합금 등을 압연한 후 열처리하여 이축배향 금속기판을 형성하고, 완충층 및 초전도층을 형성시킨 후 최종적으로 보호층을 증착하는 공정으로 구성된다. 이때 YBCO 초전도층의 제조를 위해서는 PLD (pulsed laser deposition), CVD (chemical vapor deposition), MOD (metal-organic deposition) 등 다양한 공정이 적용되고 있다^[1]. 특히 MOD 공정은 완충층이 형성된 금속기판 표면에 전구체를 coating한 후 calcination에 의한 유기물 분해 및 annealing에 의한 YBCO상 생성 등의 공정으로 구성되어 있으며, 제조 비용이 저렴하고 높은 임계전류값을 가지는 초전도층의 제조가 가능하여 현재 연구개발이 활발히 진행되고 있다(그림 4). 더불어 화학적 공정인 MOD법에 의한 YBCO 선재는 향후 완충층 증착도 화학적 공정이 가능하여 가격이 \$10/kAm가 가능하다.

YBCO 선재는 1세대 BSCCO 선재에 비하여 자기장 하에서도 전류 수송특성의 저하가 적다는 장점이 있다(그림 5). 2005년 EUCAS학회에서 발표된 일본 ISTECH의 Shiohara 박사의 발표자료(그림 5 참조)에 따르면 자기 부상용 전자석 응용을 위해 요구되는 공학적 임계전류밀도값(J_c)의 크기는 5T의 외부 자기장 하에서 $J_c = 40,000A/cm^2$ 이다^[2]. 따라서 YBCO 선재를 50K 정도의 온도로 냉각하는 경우 자기부상용 초전도 자석에 충분한 정도의 전류 인가가 가능하다. 그러나 저가의 액체질소를 냉매로 사용하는 자기부상용 초전도 자석의 제작을 위해서는 궁극적으로 액체질소의 비등점 이상의 온도 (77K) 및 5T의 자기장 하에서 $J_c > 40,000A/cm^2$ 특성을 갖는 선재 개발이 반드시 필요하다.

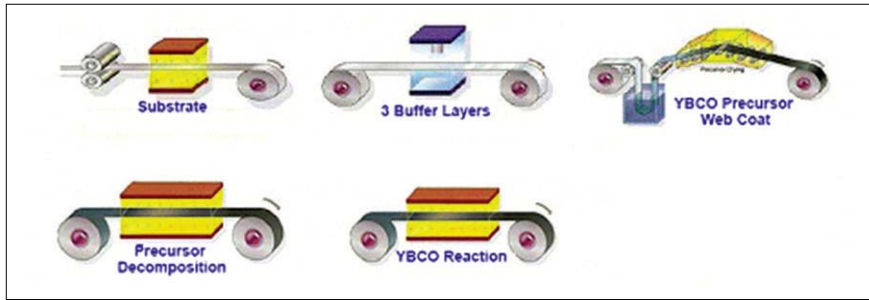


그림 4. MOD 공정에 의한 2세대 YBCO 초전도 선재 제조 공정

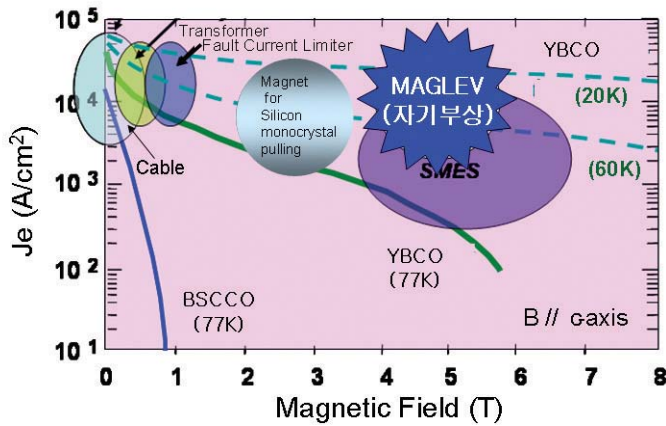


그림 5. 자기장에 따른 고온 초전도 선재의 공학적 임계전류밀도(Je) 변화

3. 자기부상용 초전도 자석 개발을 위해 해결되어야 할 문제점 및 관련 기술 현황

3.1 자기장 하에서의 임계전류 저하

일반적으로 초전도체는 저항 없이 전류를 흘릴 수 있으나, 실제로는 흘릴 수 있는 전류의 상한값이 존재하며 이것을 임계전류값이라고 한다. 초전도 선재에 외부 자기장을 인가한 상태에서 전류를 흘리는 경우 초전도 선재 내부에 존재하는 자속선에 대하여 수직 방향으로 Lorentz 힘을 받게 된다(그림 6). 따라서 흘려주는 전류의 양이 증가하여 이에 비례하여 발생하는 Lorentz 힘의 양이 커지면 자속선이 선재 내에서 유동하게 되며 이에 따라 전기 저항이 발생하게 된다. 따라서 외부 자기장을 인가한 상태에서는 외부 자기장을 인가하지 않았을 때보다 낮은 임계전류값을 가지게 된다. 전술한 바와 같이 YBCO 초전도 선재는 BSCCO 선재에 비하여 자기장 인가에 따른 임계전류값의 감소량이 적지만, 자기 부상용 고자장 자석의 개발을 위해서는 자기장 하에서의 임계전류 저하를 억제하여야 한다(그림 5 참조). 초전도체 내에 존재하는 자속선은 주위에 초전류가 흐르는 상전도 중심으로 이루어져 있다. 따라서 나노크기의 비초전도성 입자들을 초전도체 내에 분산시키면 자속선이 좀 더 강하게 고정됨으로서 초전도체의 자속선 고정(flux pinning) 특성이 향상되어 결과적으로 자기장 하에서의 임계전류값 감소량이 줄어들게

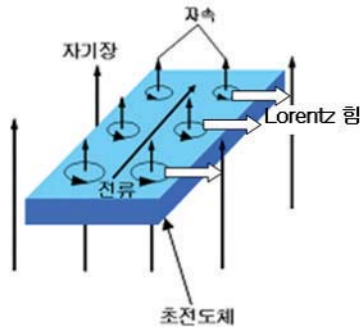


그림 6. 외부자기장 인가시 초전도체 내의 자속선에 작용하는 Lorentz 힘

된다. 미세구조 내에 이러한 나노 구조를 형성시킴으로써 고자장 하에서도 임계전류값의 저하를 상당부분 억제할 수 있다. 이러한 자장하 임계전류를 감소 문제를 최소화시키기 위해 최근 Science지에 발표된 연구 결과에 따르면 미국 ORNL(Oak Ridge National Lab.)에서는 자기장 하 임계전류값을 향상시키기 위하여 타겟에 BaZrO₃를 혼합하고 PLD (pulsed laser deposition) 공정을 적용하여 기동 형태의 나노 구조를 형성시켰다(그림 7). 그 결과 자기장 하에서의 임계전류값 저하를 상당 부분 억제할 수 있음을 알 수 있다^[3].

한편 YBCO 초전도 선재에 Sm, Ho 등 희토류 원소를 첨가하여 초전도층 내에 수십 nm 크기의 구형 입자를 형성시켜 자속 유동을 억제함으로써 고자장하에서의 임계전류 특성을 향상시킬 수 있다는 결과가 보고되었다^[4](그림 8). 특히 희토류 원소인 Ho를 50% 첨가한 결과 임계전류밀도값이 상당부분 향상되었음을 알 수 있다. 초전도층 내에 생성된 나노크기 희토류 산화물 입자들은 주위에 약간의 변형을 일으키며 특히 초전도층의 c축 방향에 대해 pinning 효과가 크다. 또한 최근 희토류 원소 첨가와 더불어 YBCO 초전도층 내부에 존재하는 Y124 적층결함 역시 자속유동에 대한 pinning site로 작용하며 특히 초전도층의 ab면 방향에 대해 pinning 효과가 크다는 것이 밝혀졌다. 이에 따라 희토류 첨가량 및 Y124 적층결함 발생량을 조절하여 자기장 인가 방향에 따른 임계전류특성의

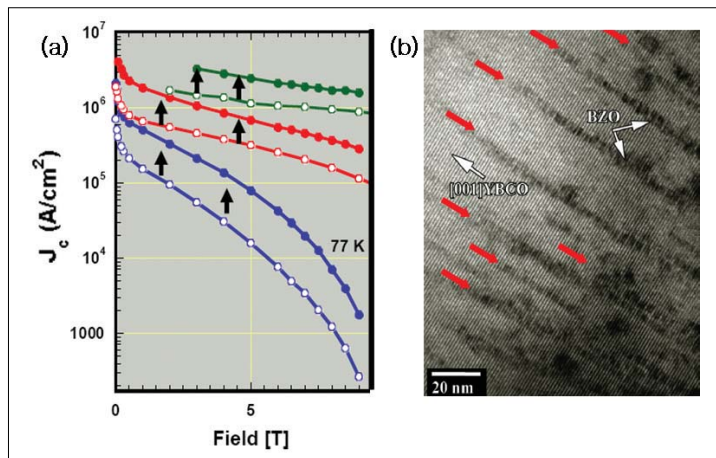


그림 7. (a) 자속고정점 도입에 의한 임계전류 특성 향상, (b) column 형태의 자속고정점이 도입된 YBCO층의 미세구조.

균일성을 증진시킬 수 있어 향후 초전도 자석 제작에 적용될 가능성이 더욱 높아졌다.

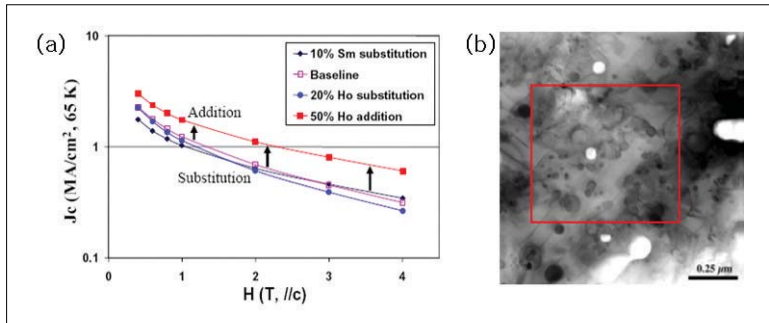


그림 8. (a) 희토류 원소 첨가에 의한 자기장 하 임계전류 특성 향상 : (a) 임계전류 특성 (b) 초전도층의 미세구조

3.2 임계전류 특성 (J_c)

YBCO 초전도 선재의 경우 결정립의 배향성에 따라 임계전류값이 변화한다. 특히 결정립 간의 misorientation이 큰 경우 결정입계에서 임계전류값이 매우 낮아진다는 문제가 있다. 따라서 우수한 임계전류값을 가지는 초전도 선재를 제조하기 위해서는 결정립들이 이축배향성을 이루어 결정립 간의 misorientation이 적어야 한다.(그림 9). 이러한 문제점을 해결하기 위하여 현재 YBCO의 경우 이축배향성이 우수하여 misorientation이 적은 금속기판 및 완충층 위에 초전도층을 코팅함으로써 높은 임계전류값을 가지는 YBCO 초전도 선재를 개발하고 있다.

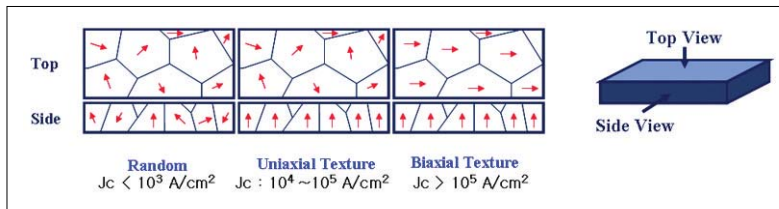


그림 9. 초전도체 내 결정립의 배향에 따른 임계전류밀도값의 변화

이축배향성이 우수한 금속기판을 제조하기 위해서는 니켈합금 모재를 50~100μ m까지 압연한 후 1000℃ 이상에서 열처리하여 재결정화시키는 RABiTS 공정이 주로 사용되고 있다. 현재 압연공정 및 열처리 공정의 개선을 통해 ab-축 방향의 이축배향성이 $\Delta\phi < 6^\circ$ 정도인 니켈합금기판의 제조가 가능해 졌다. 또한 이축배향성을 유도하는 또다른 방식으로 무배향 금속기판 위에 완충층을 성장시키면서 보조 이온빔에 의해 이축배향성을 유도하는 IBAD (Ion Beam Assisted Deposition) 공정을 들 수 있다. IBAD 공정을 이용하여 배향성이 낮은 금속기판 위에 이축배향성이 우수한 완충층을 제조할 수 있게 되었으며, 특히 일본의 ISTECS에서는 IBAD 공정으로 제조한 Gd₂Zr₂O₇ (GZO)층 위에 최종 완충층인 CeO₂ 층을 PLD로 성장시킨 결과 $\Delta\phi \sim 4^\circ$ 근처까지 이축배향성을 향상시킬 수 있었다(그림 10). 이러한 완충층 기판을 적용하여 최근에는 길이 212m에서 245A의 임계전류값을 갖는 YBCO 초전도 선재가 개발되었다. 그러나 IBAD 공정의 경우 고가의 제조 장비가 필요하며 제조 비용이 높아서 향후 완충층 제조에 MOD 등 보다 더 경제적인 방법이 개발되어야 할 것이다.

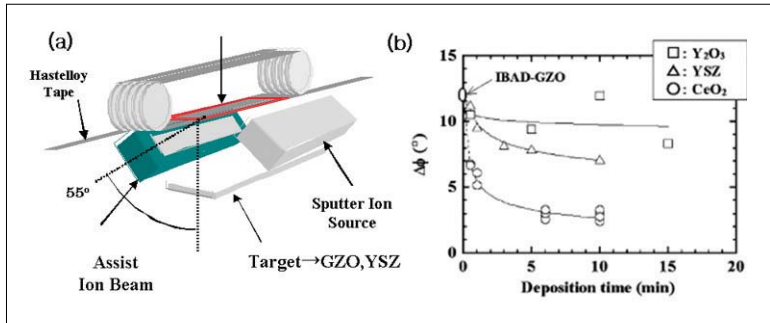


그림 10. (a) IBAD 장비의 모식도 (b) 증착시간에 따른 CeO_2 완충층의 배향성 향상

보다 높은 임계전류특성 향상을 위해서는 초전도층의 두께를 $1\mu\text{m}$ 이상으로 증진시키고, 적절한 공정 제어를 통해 YBCO 상생성 및 phase purity를 증진시켜야 한다. 그러나 두께 증진에 따른 crack 발생 등의 문제로 쉽지만은 않은 실정이다. MOD 공정의 경우 전구용액의 개선을 통하여 YBCO 층의 두께를 $1\mu\text{m}$ 이상으로 증진시키고, annealing 공정을 제어하여 YBCO phase purity를 향상시킴으로써 $I_c > 300\text{A/cm}$ 이상의 임계전류값을 가지는 YBCO 초전도 선재의 제조가 가능하다(그림 11). 그러나 $I_c > 300\text{A/cm}$ 이상의 임계전류값은 아직 수 cm 길이의 단선재에서 얻어진 결과로 기기 제작에 적용하기 위해서는 공정의 scale-up을 통한 장선재 개발이 필요하다. 현재 200m급 이상 장선의 YBCO 초전도 선재 개발 결과가 일부 발표되었으나, 주로 PLD 등 고가의 고진공 장비를 필요로 하는 공정에 의한 결과로서 경제성 측면에서 문제점이 있다(표 1).

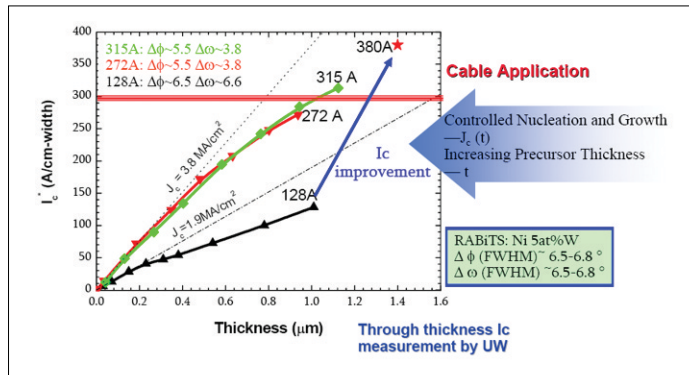


그림 11. YBCO층 두께 증진 및 상생성 제어에 의한 임계전류 특성 향상(미국 AMSC사)

표 1. YBCO 초전도 선재의 최근 top group data

연구기관	길이 (m)	임계전류값 (A/cm)	발표연도	제조 공정
IGC-Superpower (미국)	322	219	2006	PLD
ISTEC (일본)	212	245	2005	PLD
AMSC (미국)	85	160	2005	MOD

MOD 공정의 경우 아직 100m 이하의 선재의 개발 결과만이 발표되고 있어 길이 및 임계전류 측면에서 많은 개선이 필요하다. 향후 $I_c > 500A/cm$ 이상의 실용화급 초전도 선재의 개발을 위해서는 MOD 전구용액의 개발을 통해 초전도층의 두께를 $2\mu m$ 이상 증진시키고, crack의 발생을 억제하는 등 많은 연구개발 노력이 필요하며, 미세 조직 제어를 통해 치밀하고, phase purity가 높은 초전도층을 형성시키는 등 재료공학적 접근 방법을 통해 초전도 선재의 임계전류 특성을 향상시키는 것이 요청된다.

3.3 가격 대비 성능 (cost/performance)

일반적으로 자기 부상용 자석 제작을 위해 주로 적용되어 왔던 저온 초전도선재의 경우 가격 대비 성능비 (cost-to-performance ratio)가 $\$10/kAm$ 이하의 값을 가진다(그림 12). 그러나 저온 초전도 선재의 경우 사용 온도가 10K 이하로 낮아 자기부상용 자석 제작을 위해서는 고가의 액체 헬륨을 이용하여 선재를 냉각하여야 하므로 냉각비용 면에서 불리하다. 반면 고온 초전도 선재의 경우 액체질소의 비등점인 77K 이상에서도 초전도성을 유지하므로 냉각비용을 줄일 수 있다. 현재 개발 단계에 있는 YBCO 선재의 경우 자기장 하에서의 임계전류 감소가 적어 50K 정도로 냉각한다면 자기 부상용 자석에 적용할 수 있다. 특히 향후 자기장 하 임계전류 특성의 개선이 이루어지면 액체질소로 냉각이 가능한 77K에서도 자기 부상용 자석에 적용할 수 있는 YBCO 선재가 개발될 수 있을 것이다. 따라서 YBCO 초전도 선재는 저온 초전도 선재에 비하여 냉각 비용이 저렴하므로 가격 대비 성능을 $\$10/kAm$ 근처로 낮출 수 있다면 자기 부상용 초전도 자석 제작에 있어 기존 저온 초전도 선재를 대체할 수 있을 것으로 예상된다.

2005년 유럽 초전도학회(EUCAS)에서 발표된 분석 결과를 보면 현재 개발 수준에서는 YBCO 초전도 선재의 가격 대비 성능이 $\$150/kAm$ 이상이며 향후 대량 생산 및 scale-up을 통해 $\$40/kAm$ 이하로 낮출 수 있다^[2]. 또한 $\$10/kAm$ 근처로 가격 대비 성능을 낮추기 위해서는 YBCO 초전도 선재 제조비용의 대부분을 차지하고 있는 완충층 및 초전도층의 제조 비용을 저감하여야 한다(그림 13). 완충층 제조 비용의 경우 전체 선재 제조 비용의 60% 이상을 차지하고 있으므로 완충층 제조 공정의 생산성 증진, MOD 등 저가 공정 적용 등의 방법을 통한 공정

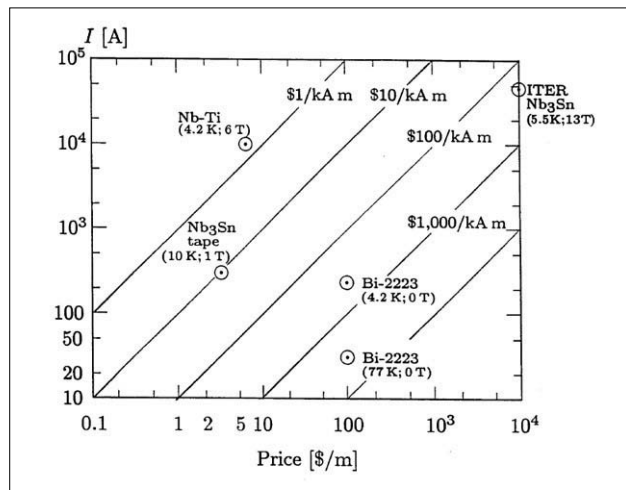


그림 12. 각종 초전도 선재의 가격 및 임계전류특성

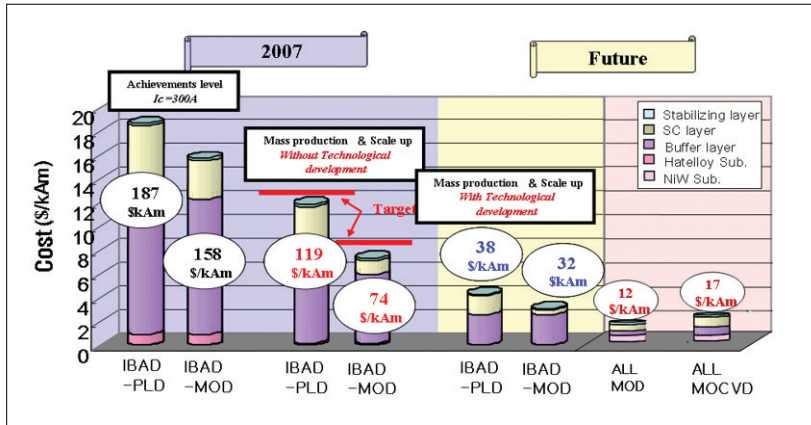


그림 13. YBCO 초전도 선재의 가격대비 성능 (cost/performance) (ref. from Y. Shiohara, EUCAS 2005)

개선이 요청된다. 현재 완충층 제조를 위해서는 sputtering, IBAD (ion beam assisted deposition), e-beam evaporation 등 고진공 공정이 주로 사용되고 있으며, 이를 MOD, sol-gel 등 저가의 화학 공정으로 대체함으로써 YBCO 초전도 선재의 제조 비용을 상당 부분 낮출 수 있다. 특히 완충층 및 초전도층을 모두 MOD 공정으로 제조하는 경우 \$10/kAm의 낮은 가격 대비 성능을 가지는 YBCO 초전도 선재의 제조가 가능할 것으로 예상된다(그림 13). 이에 따라 여러 연구팀에서 완충층 및 초전도층을 MOD 공정으로 제조하고자 하는 연구가 이루어지고 있다. 미국의 ORNL의 경우 완충층 제조를 위해 MOD 공정을 적용하여 이축배향된 Ni-W 금속기판 위에 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{CeO}_2$ 의 두 층으로 이루어진 완충층을 성공적으로 성막하였다. 또한 MOD 공정으로 제조된 완충층 위에 MOD 공정으로 YBCO 초전도층을 성막시킨 결과 140A/cm-w의 임계전류값을 가지는 초전도 선재의 제작이 가능하였다. 더불어 최근에는 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{CeO}_2$ 완충층과 금속기판 사이에 10nm 정도의 얇은 Y_2O_3 층을 삽입함으로써 200A/cm의 임계전류값을 가지는 초전도 선재를 제작하였다(그림 14).

일본의 SWCC (Showa Electric Wires and Cables, Co. Ltd.)에서도 MOD 공정으로 $\text{RE}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (RE=Sm, Ce, Gd, etc.)/ CeO_2 로 이루어진 완충층 및 초전도층을 성막시켜 임계전류밀도값이 $J_c=0.3\text{MA}/\text{cm}^2$ 인 초전도 선재를 제작하는 등 저가의 MOD 공정을 적용하여 완충층 및 초전도층을 성막하려는 연구 노력이 활발하다. 최근 본 연구팀에서도 화학적 공정으로 기판부터 완충층 및 초전도층까지 제조할 수 있는 경제적인 공정을 개발 중에 있으며,

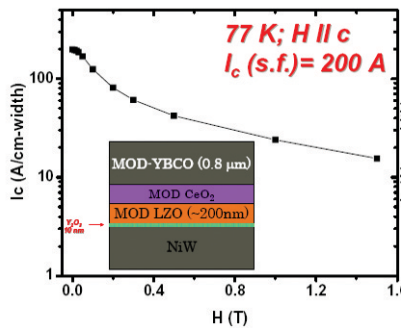


그림 14. 10nm의 Y_2O_3 층을 증착한 후 MOD 공정으로 완충층 및 초전도층을 성막시킨 YBCO 선재의 임계전류 특성

배향성이 우수하고 금속과 초전도층의 반응을 억제할 수 있는 치밀한 완충층을 MOD 공정으로 성막시키기 위해 노력하고 있다.

4. 요약

본 기고에서는 자기 부상용 자석 제작에 필요한 고온 초전도 선재의 연구개발 현황을 정리하였다. 고온 초전도 선재는 기존 저온 초전도 선재에 대비하여 높은 임계온도를 가지므로 냉각을 위해 고가의 액체헬륨을 사용할 필요가 없고, 다량의 전류를 흘릴 수 있는 장점을 지닌다. 특히 YBCO 초전도 선재는 1세대 고온 초전도 선재인 BSCCO 선재에 비하여 자기장 하에서도 임계전류 특성이 우수하고, 냉각비용이 저렴하여 경제성 측면에서도 유리하다. 앞서 언급한 바와 같이 자기부상용 초전도 자석의 제작을 위해서는 i) 온도 77K 및 5T의 외부 자기장 인가 하에서 $J_e > 40,000\text{A}/\text{cm}^2$ 이상의 공학적 임계전류 밀도를 필요로 하며, ii) $\$10/\text{kAm}$ 이하의 가격 대비 성능비를 가지는 초전도 선재의 개발이 요구된다. 이러한 요건을 만족하는 고품성 YBCO 초전도 선재를 개발하기 위해 다각적인 자속선 고정(flux pinning) 향상 연구 및 MOD 등 저가 공정에 의한 완충층 및 초전도층 제조 등 다양한 시도가 행해지고 있으며 우수한 연구결과가 계속 발표되고 있다. 향후 기술 개발을 통해 가격이 저렴하고 자기장 하 임계전류 특성이 우수한 YBCO 초전도 선재가 개발되면 자기부상용 초전도 자석 제작에 적용되어 자기부상열차의 실용화를 앞당길 것으로 전망된다.

❁ 참고 문헌

- [1] T. Araki, I. Hirabayashi, "Review of a chemical approach to $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ -coated superconductors-metalorganic deposition using trifluoroacetates" Supercond. Sci. Technol. 16, R71, 2003.
- [2] Y. Shiohara, "Highlights of coated conductor development in Japan" EUCAS2005, Vienna, Austria, 2005.
- [3] S. Kang, A. Goyal, "High performance and high T_c superconducting wires" Science, 311, 1911, 2006.
- [4] X. Li, "High I_c TFA-MOD(YBCO) films on RABiTS", wire development workshop, USA, 2005.



유재무

- 한국기계연구원 분말재료연구소 책임연구원
- 관심분야 : 고온 초전도 선재 제조
- E-mail : yjm1682@kmail.kimm.re.kr



고재웅

- 한국기계연구원 분말재료연구소 책임연구원
- 관심분야 : 고온 초전도 선재 제조
- E-mail : kjw1572@kmail.kimm.re.kr



김영국

- 한국기계연구원 분말재료연구소 선임연구원
- 관심분야 : 고온 초전도 선재 제조
- E-mail : voice21@kmail.kimm.re.kr



정국채

- 한국기계연구원 분말재료연구소 선임연구원
- 관심분야 : 고온 초전도 선재 제조
- E-mail : kcchung@kmail.kimm.re.kr