

2세대 고온초전도 선재의 저가화 공정개발 현황 및 전망

글 _ 홍계원
한국산업기술대학교

1. 서론

1911년 네덜란드의 기계공학자 Heike Kamerlingh Onness에 의해 4.2 K에서 수은의 전기저항이 완전히 사라지는 초전도현상이 발견된 후 100년이 지난 오늘날에도 초전도 현상을 이용하는 전기/전자 기기를 일상생활에서 많이 찾아보기는 힘들다. 초전도 현상은 극저온이 되어야 일어나기 때문이며 극저온환경을 만들기 위해 투자해야 하는 비용보다 초전도 현상으로 인해 얻어지는 이익이 많아져야 응용이 가능한데 이런 경우가 일부 특수한 분야에서만 가능하기 때문이다. 따라서 현재까지 초전도 현상으로 가장 큰 상업적인 성공을 거둔 분야는 인간의 건강과 직결된 의료용 MRI가 유일하며 핵융합과 고에너지 물리에서 사용하는 입자가속기와 같은 원천과학 분야에 초전도 현상의 응용이 제한되어 왔다. 이런 상황은 액체질소의 비등점인 77 K 보다 높은 92 K에서 초전도 현상을 나타내는 고온초전도 산화물(Y-Ba-Cu-O)가 발견되었을 때까지 계속되었으며, 고온초전도 산화물이 발견되었을 때 많은 과학자와 기술자들이 열광적으로 이 분야의 연구에 참여하였던 이유의 하나이다. 초전도 현상을 발현하기 위한 냉각비용은 구현하고자 하는 목적 온도가 낮아짐에 따라 비선형적으로 증가하며, 4.2 K 냉각환경을 위해 사용되는 액체헬륨의 자원이 매우 한정됨에 비하여 77 K의 냉각환경을 위해서는 거의 무한정이라고 할 수 있는 공기의 주성분인 질소를 사용할 수 있기 때문에 고온초전도체는 그 응용분야에 있어서 아주 유리

하다고 할 수 있다.

그러나 고온초전도체가 발견된지 25년이 지난 지금도 고온초전도체를 활용한 응용기기는 아직도 우리 주변에서 쉽게 찾아보기 어렵다. 그 이유는 아직도 초전도현상을 응용하기 위해서 필요한 극저온 환경 조성비용이 초전도 현상을 이용하여 얻는 이득보다 크기 때문이다. 이 글에서는 고온초전도 현상을 활용하기 위해 필요한 기술과 비용에 대한 분석과 이들에 대한 기술개발 동향 및 앞으로의 기술적인 방향에 대하여 소개한다.

2. 초전도 전기/전자 기기의 응용비용

초전도 기기를 활용하기 위해서 필요한 비용은 초전도 기기의 제작비용과 운영비용으로 나눌 수 있다.

초전도 기기의 제작비용은 초전도 선재의 구입비와 기기의 제작비용, 극저온 유지용기, 극저온 발생장치 등으로 구성되며, 운영비용은 극저온 발생장치의 운전비용과 유지보수비로 구분할 수 있다.

이들 중의 어떤 부분은 기술발전에 따라서 비용이 크게 감소할 수 있는 분야와 기술이 발전하더라도 비용감소가 적은 분야로 나눌 수 있다.

이때 운영비를 구성하는 극저온 발생장치의 운전비용은 상온과 운전온도 사이의 온도차이에 의해서 냉각에 필요한 에너지가 더 많이 필요하기는 하지만 일단 냉각이 이루어지면 운전온도에서 변화가 없기 때문에 단열기술이 확보되면 운전온도의 상승에 의한 비용절감효과

Table 1. Effect of Various Parameters on Economics of Superconducting Devices

| | | 일반전력기와의 비교 | 저온(4.2 K 액체 헬륨)과의 비교 |
|----------|-----------|------------|----------------------|
| 응용기기 제작비 | 초전도선재 구입비 | 매우 큼 | 매우 큼 |
| | 기기제작비 | 큼 | 큼 |
| | 극저온용기 | 비용추가 | 조금 감소 |
| | 극저온발생장치 | 비용추가 | 많이 감소 |
| 운영비 | 극저온용기 | 크게 증가 | 변화 적음 |
| | 극저온발생장치 | 크게 증가 | 감소 |

가 그리 크지 않다. 유지보수에 필요한 비용은 초전도 기기를 도입함으로써 인하여 추가로 필요한 비용이므로 상전도 현상을 이용하는 구리 전도체 기반 기기에 비하여 비용이 추가로 소용되는 비용이며 도입 초기에는 기기의 신뢰성을 확보하기 위하여 더 많은 비용이 필요하다. 초전도기기가 장기간의 현장적용 경험을 확보하며 이 비용은 장기적으로는 감소할 것이나 그 기간에 대하여 이론이 있을 수 있으므로 우선 도입 초기에는 이 비용은 크게 변하지 않을 것으로 예상해야 한다.

극저온 유지용기와 극저온 발생장치의 비용은 저온초전도 기기를 사용할 때와 비교하여 어느 정도 감소될 것인가 그 감소가 어느 정도일 것인가에 대하여는 많은 논의가 필요하다. 극저온 용기는 단열과 구조적인 안정성이라는 두 가지 기능을 만족시키는 것이 필요하여 열전도도가 낮은 재료로 진공층을 가지는 2중벽 재료로 만든다. 현재 일부 분야 외에는 stainless steel로 만든 이중 진공용기를 가장 많이 사용한다. 재질과 구조가 액체헬륨과 액체질소를 사용하는 경우가 크게 차이가 나지 않으므로 극저온용기의 비용은 변화요인이 크지 않다. 극저온 발생장치의 경우는 운전온도에 따라서 상당한 영향을 미치게 된다. 같은 규격의 냉동기라고 하더라도 온도가 낮아질수록 냉각효율이 감소하므로 운전온도가 낮으면 더 큰 용량의 냉각기를 설치해야 하며 운전비용도 증가한다. 극저온 냉각기는 현재 수요가 많지 않아서 대당 가격이 높지만 앞으로 수요와 응용분야가 확대되어 생산량이 늘어나면 대당 가격이 크게 낮아질 것으로 예상된다.

초전도 기기의 제작비용은 운전온도에 따라 요구하는 단열용기의 성능에 따라 어느 정도는 차이가 있을 수 있으나 기본적으로는 같은 용량의 전력기라고 하면 거의 비슷한 정도가 될 것으로 생각할 수 있다. 한가지 지적해야 할 점은 이제까지 사용되고 있는 초전도체의 대부분

을 차지하고 있는 금속계 저온초전도체인 NbTi와 Nb₃Sn 전도체는 초전도특성에 이방성이 없어서 일반 구리선과 같이 원형이므로 전력기에 사용되는 형태인 코일로 가공할 때 극저온 환경과 고 전류밀도에 대한 고려외에는 일반 전력기와 비슷한 방법을 사용할 수 있으나, 고온초전도 선재의 경우는 이방성이 커서 대부분 얇고 평평한 테이프 형태로써 구조적으로 코일로 감는데 특별한 방법을 사용해야 하여 이에 대한 고려가 필요하여 제작비가 상승할 가능성이 있다는 점을 고려해야 한다.

따라서 초전도 기기가 상업적으로 광범위하게 사용되기 위해서는 응용기기의 경제성이 높아져야 하는데 이를 높일 수 있는 방법은 현재로서는 선재의 가격을 낮추는 것이 가장 중요하다고 할 수 있다. 이제부터 2세대 고온초전도선재의 생산비용에 대하여 고려해보자.

3. 초전도 선재의 제작비용

2세대 고온초전도 선재의 제작비용의 분석을 위해 먼저 2세대 선재의 구조와 특성에 대한 분석이 필요하다.

고온초전도선재는 고온초전도 세라믹결정의 특성인 취성과 결정학적 이방성 때문에 전선으로 사용하기 위해서 요구되는 유연성과 통전성을 만족시키기 위하여 금속 모재위에 여러 층의 세라믹스와 금속 박막층을 적층하여 Fig. 1과 같은 형태로 제작된다.

이제 각 층의 특성과 역할 그리고 제조공정에 대하여 알아보자. 고온초전도 선재가 Fig. 1과 같은 테이프 형태로 제작되는 이유는 우선 전선에서 기본적으로 초전도 전류를 흘리는 역할을 하는 초전도층의 결정이 perovskite 단위정 세개가 결합된 구조를 가지며 여기에서 c축에 수직인 001 면으로 배향된 CuO 면이 전류통전을 담당하기 때문이다. 이 결정면의 결점립계가 약결합 특성이 있기 때문에 아주 적은 misfit angle에서만 초전도 전류가 잘 전달되므로 단결정 수준의 소각입계(low angle grain boundary)로 만들어져야 원하는 전류밀도를 얻을 수 있다. 이렇게 2축 정렬된 초전도 산화물의 결정질 박막을 증착시키기 위해서 2축정렬된 기판층의 준비가 선행되어야 하며, 이 기판층(template)의 제조공정에 따라 초전

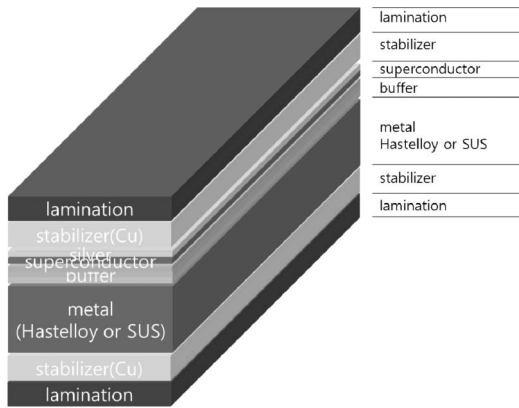


Fig. 1. Architecture of 2G HTS coated conductor.

도선재공정은 Fig. 2와 같이 크게 두 가지로 나누어 진다.

3.1. 이축 정렬 금속기판층(textured metal template)

우선 선재의 기본 구조층인 금속층에서부터 2축 정렬 조직을 가지는 RABiTS 기반 초전도선재(Fig. 2(a))와 다결정 금속층위에 2축 정렬된 buffer 층을 증착시키는 IBAD 기반 초전도 선재(Fig. 2(b))가 있다. RABiTS 공정에서 금속층의 재료는 Ni를 주재료로 사용하며 기계적인 강도와 자기적 특성 향상을 위해서 순수한 Ni에 W를 첨가한 합금을 주로 사용하고, IBAD 공정의 경우에는 고강도 Hastelloy를 많이 사용하였으나 최근에는 SUS를 사용하는 공정개발을 많이 시도하고 있다. RABiTS 공정의 경우는 기계적인 가공과 열처리가 전체 공정이므로 앞으로 RABiTS 기판층의 제조비용이 현재 수준보다 크게 낮아지기는 어려울 것으로 예상할 수 있다. 더 우수한 기계적강도와 비자화 특성을 위해 추가되는 공정비용은 공정의 안정성과 생산성 향상을 통해 상쇄하여 현재보다 비용을 낮추는 노력은 계속될 것으로 예상된다.

IBAD 공정의 경우는 소요비용은 모재비용(Hastelloy 또는 SUS), 모재표면처리비, IBAD 공정비용(설비비 + 속도 + 수율) 등으로 나누어서 생각할 수 있다. 향후 대량생산을 고려할 때 저비용을 위해서는 생산속도-즉 IBAD 이축 배향 박막층의 증착속도와 배향도를 증가시키는 것이 가장 중요하다고 할 수 있다. 즉 빠른 시간에 우수한 이축 배향성을 보이는 두께까지 박막을 성장시켜

야 하며, 이를 위한 전처리 과정인 금속모재의 표면연마, 비정질 및 확산방지층의 공정비용도 중요한 요소이다. 현재 대부분 IBAD-MgO 층을 얇게 증착한 다음 home-epi 공정을 통해 적절한 두께의 MgO 층을 확보하고 있다. 일부에서 MgO 외의 다른 물질을 시도하고 있으나 아직 뚜렷한 성과는 보이지 않는다. MgO 층이 아주 얇은 두께에서 우수한 이축 배향성을 보이며 homo-epi 공정에도 큰 기술적인 문제점이 없으므로 당분간 이 구성은 바뀌지 않을 것으로 예상된다. IBAD 공정에서 가장 느린 부분인 IBAD 이축 배향성 층을 얼마나 빠르게, 즉 얇은 두께에서 우수한 정렬성을 가지도록 하는 것이 저비용의 관건이 된다. 향후 지속적인 기술발전과 박막장비의 대형화와 수요가 증가하면 이 부분에서 많은 비용 감소가 있을 것으로 예상된다.

RABiTS과 IBAD를 비교하면 향후 공정장비 기술과 대량생산이 이루어질 경우 IBAD 공정에서 비용감소의 기회가 더 클 것으로 생각된다. IBAD 공정의 경우 다른 금속이나 합금을 사용할 수 있으므로 자유도가 높으며 새로운 기판재료도 기대할 수 있으며 합금화에 따라 원가가 낮은 금속의 활용도 가능할 수 있다. 또한 현재의 박막공정 장비분야의 기술 발전 속도로 볼 때 IBAD 공정 비용은 현재의 수준에서 크게 낮아질 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 최근 반도체 분야의 기술발전과 생산증가에 따라 메모리 소자의 성능향상과 가격하락 현상이 IBAD 공정기술 분야에서도 반도체의 경우보다는 느리겠지만 일어날 것으로 예상되기 때문이다.

3.2. Buffer 층 증착기술

Buffer 층의 역할은 초전도 결정박막이 잘 증착될 수 있도록 앞절에서 준비된 기판의 이축정렬성을 유지하여 초전도층에 전달하는 것이다. 동시에 금속층이나 하부 buffer 층의 원소가 초전도층에 포함되어 초전도 박막의 결정성에 나쁜 영향을 주어서 초전도 특성을 떨어뜨리지 않도록 확산방지층으로 작용하는 것이다.

CC 개발 초기부터 이 두가지 기능이 잘 작용하도록 2~3 종류의 박막을 적층하여 사용하고 있다. 각 박막층의 두께와 종류는 이축 배향 template에 따라 달라질 수

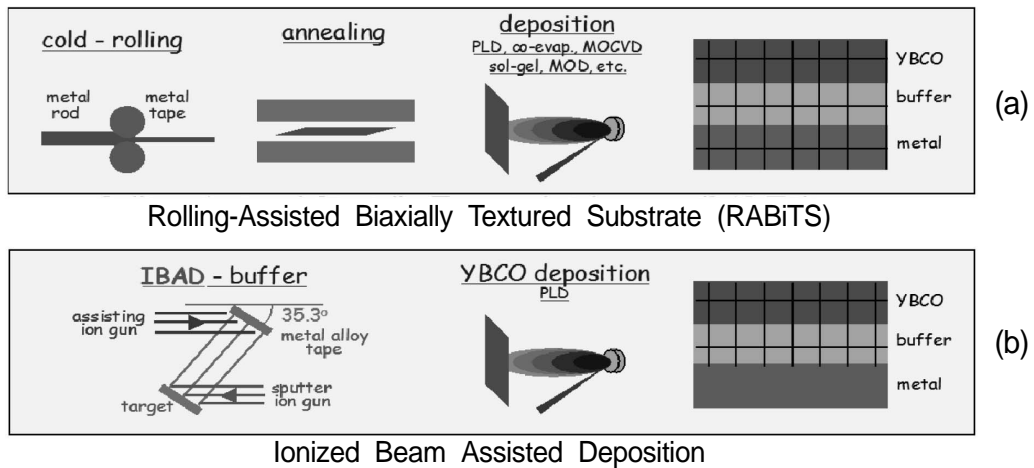


Fig. 2. Procedures for making metal template having bi-axially textured surface layer for depositing HTS oxide layer.

있으나 기본적으로는 이축집합조직을 잘 전달 할 수 있게 격자상수의 차이가 그리 크지 않은 물질중에서 선택하며, 확산방지를 위해서는 상호 확산 계수가 적은 물질의 조합이 필요하다. Buffer 층의 마지막 층은 초전도 123 산화물과의 격자상수차이가 적으며, 초전도 상으로 확산되지 않는 물질을 선택한다.

Buffer 층의 저가화는 두 가지 방향에서 접근이 가능하다. 박막의 수를 줄이는 방법과 저가형 박막공정의 특성을 향상시키는 방법이다. 즉 박막층의 수를 줄여서 단일 원층층으로 확산방지와 이축 배향성 전달 및 REBCO 초전도층의 seed layer 역할을 할 수 있는 단일 물질 박막의 제조공정을 개발하는 것이 하나의 방법이다. 단일 층이 2~3 층의 역할을 다 할 수 있다면 공정의 수를 하나로 줄일 수 있으므로 제조비용을 크게 감소시킬 수 있다. CeO_2 , $LaMnO_3$, $LaZrO_3$, $LaSrO_3$ 등의 여러 물질들이 후보로 연구되고 있다. 그렇지만 여러가지 기능을 하나의 물질막으로 할 수도 있겠지만 그 특성이 떨어진다 면 여러층을 증착하더라도 저렴한 증착공정을 선택하는 것도 가능하다. 상대적으로 저렴한 증착공정으로 우수한 특성을 얻기 위해서는 증착면적이 넓고, 속도가 빠른 Solution Deposition Process(SDP)가 유력한 후보 기술이나 아직 특성면에서 개선할 점이 있는 것으로 판단된다. Buffer 층의 물질은 초전도 REBCO 산화물에 비하여 단순한 단일 성분이나 2성분계 산화물이므로 여러가

지 기술적 시도가 가능하여 향후 저비용 공정을 도입할 수 있는 가능성이 크다. 하지만 buffer 층은 그 두께가 크게 두껍지 않고, 최소한의 기준만 만족시키면 되므로 전체 원가구성비에서 큰 비율을 차지하지는 않으므로 여기에서의 비용절감효과는 그리 크지 않을 것으로 예상된다.

3.3. 초전도 REBCO 층

REBCO 초전도 산화물은 화학식이 $RE_1Ba_2Cu_3O_{7-d}$ 로서 3종류의 금속원소가 1:2:3의 조성비를 만족하여야 하며 산소의 양도 정확한 화학양론비 보다 약간 적게 유지되어야 가장 우수한 초전도 통전성질을 가지는 특성이 있다. 이런 특성은 이 결정상으로 최적의 특성을 가지는 박막을 증착시키는 것이 매우 어려우며 아주 많은 변수들이 이들의 특성에 영향을 주는 이유가 된다. 금속양이온의 조성비에서부터 증착공정 중의 온도, 산소분압, 진공도 등이 증착되는 결정상의 성장에 영향을 미칠 것이며 이와 함께 기판으로부터 buffer 층을 통하여 전달된 2축 배향성이 유지되도록 증착조건을 만족시켜야 한다. PLD, CVD, MOCVD, MOD, Sputtering, Thermal evaporation, E-Beam evaporation 등의 여러가지 방법이 시도되었으며 현재도 계속 새로운 방법이 시도되고 있다. 2세대 선재의 저비용 공정을 위해서 초전도층의 증착비용은 가장 중요한 변수가 된다. 다른 층의 특성은 단지 초전도 층을 잘 증착시키기 위한 준비층의 성격이므로 요

구되는 특성을 가지도록 일정 두께까지만 증착시키는 공정이 필요하여 공정개발도 여기에 초점을 맞추어 개발되고 있다. 그러나 초전도층의 경우는 이 층의 특성이 선재 전체의 성능을 결정하며 가격도 결정된다. 현재 초전도 선재는 1 kA·m를 기준으로 판매된다. 즉 1000 A를 흘릴 수 있는 전선 1 m 길이를 기준으로 가격을 정하며 대규모 응용을 위한 가격기준은 10~20 US\$라고 알려져 있으며 현재 몇몇 회사에서 판매되는 가격은 이의 20~30배 수준으로 예상되고 있다. 따라서 초전도층을 두껍게 증착하거나 특성이 우수하여 통전전류가 2배로 증가되었다면 생산된 선재를 두배의 가격으로 판매할 수 있게 된다. 다른 층의 특성증가도 선재 성능에 영향을 미치지 만 초전도 층과 같이 직접적으로 영향을 주지는 않는다. 따라서 초전도 층의 공정속도나 증착면적 등을 증가시키는 공정은 매우 큰 효과를 준다. 현재까지 장선재 제조에 성공한 공정은 일본 Fujikura 회사에서 선택한 PLD, 미국 AMSC의 MOD, 미국 SuperPower Inc의 MOCVD와 한국의 (주)서남에서 개발된 RCE-DR 공정이 있다. 이들의 장단점을 살펴보면 앞으로 저가화가 어느 방향으로 가야 하는지 예측할 수 있다.

Fujikura와 유럽의 Bruker-HTS가 선택한 PLD 방법은 REBCO 초전도 타겟을 laser로 증발시켜 박막을 증착시키는 방법으로 가장 고가의 장비가 소요되는 기술이다. 산업용 laser를 사용하고 multi beam 이용기술을 적용하여 생산성을 높일 수 있다고 하지만 생산비를 크게 감소시키기에는 한계가 있을 것으로 예측된다. 다만 target의 선정이 자유롭고 여러가지 자속고정점을 도입하는데 유리하여 높은 특성의 박막을 제조하는 데는 다른 방법보다 장점이 있는 것으로 분석된다. 현재까지 가장 높은 $I_c \times L$ 값을 보이는 공정이나 대면적 증착에는 한계가 있어서 어느 한계이상으로 생산비를 낮추기는 어려운 공정으로 생각된다.

미국의 AMSC에서 사용하고 있는 MOD 공정은 RE, Ba, Cu를 포함하는 전구체 용액을 기판에 도포한 다음 열처리를 통하여 전구체 용액을 건조, 유기물 분해, 초전도 상으로의 변환열처리를 통하여 초전도 결정질 박막을 얻는 방법으로 대면적 박막의 제조에 가장 유리한 방법으

로 생산성을 크게 높일 수 있다. 그러나 3가지 이상의 원소를 효과적으로 조절해야 하며, 대면적에서 장선재를 얻기 위해 전체반응 면적을 균일한 조건으로 유지하는 것이 관건이며 부분적인 특성의 불균일성에 의한 고품성 선재 구현에는 아직 문제가 있는 것으로 평가되고 있다. 또 이 공정에서 주요 원소의 하나인 Ba의 강한 반응성으로 인하여 Ba을 BaF₂로 일차적으로 변환시켰다가 REBaCuO로 변환시켜야 하는데 이 과정에서 F의 배출을 위해 수증기의 공급과 생성되는 HF gas의 처리가 필요한데 이 과정이 변환공정의 속도를 제한하게 되어 생산성을 높이는데 한계로 작용한다. 따라서 앞으로의 관건은 F를 사용하지 않고 효과적으로 Ba을 조절할 수 있는 다른 전구체를 활용하는 방법이 가능한가에 달려있다고 할 수 있다. 현재 미국의 AMSC 외에도 일본의 ISTE, Showa 전기 등이 이 공정의 산업화를 추진하고 있으며 유럽연합의 선재개발 과제인 Euro-tape에서도 Barcelona 대학을 중심으로 이 공정의 특성과 생산성을 높이기 위한 연구가 진행 중이다.

SuperPower Inc에서 채택한 MOCVD 공정은 유기금속화합물 전구체를 기화시켜 유기물을 분해시킨 다음 기판에 금속원소를 증착시키는 방법이다. 유기금속화합물 전구체를 사용함으로 낮은 온도에서 기화가 가능하고, 반응용기내에서 비교적 대면적으로 박막의 증착이 가능하여 SuperPower Inc 외에도 일본의 중부전력에서도 이 공정을 개발하고 있다. 현재로서는 SuperPower Inc가 2세대 선재회사중에서 가장 생산성과 특성이 우수한 선재를 생산 공급하고 있으므로 경쟁력이 뛰어나다고 할 수 있다. 그러나 원료로 사용하는 유기금속화합물 전구체의 가격이 비싼 것이 이 공정이 앞으로도 현재의 경쟁력을 유지할 수 있을 것인가에 대해서는 여러가지 고려가 필요하다. 낮은 온도에서 기화되고 분해되는 유기금속 전구체를 만들기 위해서 금속원소에 고분자 유기물을 붙이게 되는데 이에 따라 전체 원료 무게에서 박막물질이 되는 금속원소의 비율이 적으므로 금속원소 중량비로 환산하면 더욱 원료비가 많아지는 단점이 있다. 대량 주문에 의해 원료 전구체 비용을 줄이는데 한계가 있으며, 전구체의 안정성이 낮아서 장기 보관성이 떨어지므로 이에

대한 고려도 필요하다. 하지만 현재 메모리 전자산업에서 이 공정으로 많은 제품이 생산되고 있으므로 이 공정의 가능성은 충분하다고 생각된다.

한국의 (주)서남이 개발한 RCE-DR 공정은 가장 생산성이 높고 가격경쟁력이 있는 것으로 평가된다. RCE-DR 공정은¹⁾ 반응성 동시 증발 공정으로 금속양이온을 증착시킨 다음 초전도산화물 상으로의 변환 열처리를 통해 초전도결정질 박막이 에피택시알 하게 성장하게 하는 공정이다. 순수한 금속을 원료로 사용함으로써 원료의 사용 효율이 가장 높은 공정이다. 다만 금속원료의 기화를 위해 대용량 전자빔 장비를 사용하는 것이 장치 비용을 증가시키는 요인으로 작용한다. 또한 3개 이상의 금속원소를 조성비에 맞추어 증발시키기 위해서 전자빔의 강도와 조절도 장비의 복잡성을 증가시키는 원인으로 작용할 수 있다. 이제까지의 공정에 비하여 전구체 박막을 빠르게 증착시키고 변환공정에서 새로운 개념을 도입하여 MOD에 비하여 변환과 박막의 성장이 아주 빠르게 진행되어 생산성이 높은 것이 큰 장점이다. 앞으로 전구체 박막의 증착에 더 쉽고 저렴한 방법을 사용할 수 있으면 더욱 가격 경쟁력이 높아질 수 있을 것으로 기대되고 있다.

이런 방법 이외에도 각 방법의 장점을 결합하여 새로운 공정 조합이 추진되고 있는데 그 중의 하나가 분무 열분해 및 변환 공정이다. RCE-DR 공정에서 반응성 동시증발법을 무기화합물 전구체를 이용하는 증착으로 대신하고 그 후에 전구체 하소 공정을 거친 다음 산소를 공급하여 초전도 산화물로 변환시키는 공정도 가능성을 확인하여 현재 공정개발이 진행 중이다.^{2,5)}

3.4. 안정화 층(Stabilizer layer)

초전도 층이 증착된 후의 공정은 일반적으로 안정화 층을 증착시키는데 일차로 얇은 은층을 증착한 다음 구리층을 두껍게 증착시킨다. 응용분야에 따라서 brass나 구리, 또는 stainless steel의 얇은 판을 부착하여 취급의 용이성이나 기계적인 강도를 증가시키기도 한다. 이들 공정은 단일금속을 증착시키는 공정으로 기존기술을 적절하게 응용하면 충분히 비용절감이 가능하다. 예를 들

어 은 안정화 층은 초기에는 sputtering 방법을 사용하였으나 PVD 공정의 특성상 수율이 낮고, 공정시간이 많이 걸리므로 이를 solution deposition 공정에 바탕을 둔 nano paste나 silver complex ink를 사용하여도 동일한 특성을 가지는 은 안정화 층의 증착공정이 개발되었다^{6,7)}. 은 안정화층 다음의 구리 안정화층은 전통적인 구리 도금이나 구리 판재를 lamination 하는 방법으로도 충분히 저비용 공정이 가능하여 앞으로는 현재 사용되는 저가공정을 어떻게 적용시키는 방법을 찾는 것이 관건이 될 것으로 판단된다.

4. 결론

이상과 같은 논의를 통하여 2세대 초전도선재의 생산 비용 절감에 대한 여러가지 변수에 대하여 분석하면 현재 공정 개선을 통하여 2세대 선재의 가격에 가장 크게 영향을 미칠 수 있는 부분은 초전도 층의 증착이다. 증착 속도가 빠르고, 대면적에서 균일한 특성을 가지는 박막을 제조할 수 있으며 원료비가 낮은 공정의 개발이 필요하다. 액상 전구체를 이용하는 방법으로 고품질의 선재 제조가 가능하면 가장 저렴한 공정이 가능하다고 할 수 있으나 특성을 만족시키기 어려운 경우 현재 가장 생산성과 경쟁력이 뛰어난 것으로 평가되는 RCE-DR 공정의 개선에 초점을 맞추어 공정을 개선하는 것이 필요하다. 초전도층 이외에 buffer 층과 안정화층의 증착은 성분이 비교적 단순하므로 여러 다른 분야에서 개발되고 있는 공정중에서 초전도 층과 공정이 충돌하지 않는 공정을 선택하여 적용하는 방향으로 추진하는 것이 효과적으로 판단된다.

참고문헌

1. S.-M. Choi, J.-W. Lee, G.-H. Shin, J. H. Lee, G.-W. Hong, S.-H. Moon, and S.-I. Yoo, "Characteristics of High-Jc GdBCO Coated Conductors Fabricated by the RCE-DR Process," *IEEE Trans on Appl. Supercon.*, in Press (2013).
2. B.-J. Kim, S.-K. Hong, J.-G. Kim, J.-H. Kim, S. X. Dou, L. Dunlop, A. Kursumovic, J. L. MacManus-

- Driscoll, H.-G. Lee, and G.-W. Hong, "Deposition of YBCO Thin Film by Aerosol Assisted Spray Pyrolysis Using Nitrates", *IEEE Trans on Appl. Supercon*, **21** [3] 2937-40 (2011).
3. H. J. Kim, J. Joo, S. G. Park, S. K. Hong, S. W. Lee, S. W. Lim, G. W. Hong, and H. G. Lee, "Effects of Deposition Conditions on the Phase Formation of YBCO Films Prepared by Spray Pyrolysis Method," *Physica C*, **445-448** 598-602 (2006).
 4. S. K. Hong, J. G. Kim, H.-J. Kim, H. W. Cho, S. K. Yu, J. H. Ahn, J. Joo, G. W. Hong, and H. G. Lee, "Preparation of High Jc YBCO Films on LAO by Spray Pyrolysis Process Using Nitrate Precursors," *Physica C*, **463-465** 536-39 (2007).
 5. J. G. Kim, S. K. Hong, S. K. Yu, H. W. Cho, B. J. Kim, J. H. Ahn, G.W. Hong, and H. G. Lee, "Reel-to-reel Deposition of YBCO Films by Spray Pyrolysis Using Nitrate Precursors," *Supercond. Sci. Technol.*, **20** 1-5 (2007).
 6. J.B. Lee, S.U. Lee, S.S. Kim, B.J. Kim, H.J. Kim, Y.S. Yoo, J.G. Kim, G.W. Hong, and H.G. Lee, "Mechanical and Electrical Characteristics of Silver Stabilizer Layer Prepared by Using Nano Silver Paste for Coated Conductor" *Physica C*, **469** 952-55 (2009).
 7. J.B. Lee, S.J. Park, S.S. Kim, S.H. Moon, H.G. Lee, J.H. Kim, S.X. Dou, and G.W. Hong "Fabrication of Silver Stabilization Layer of Coated Conductor Using Organic Silver Complexes" *Physica C*, **470** 1338-41(2010).

●● 홍계원



- 1978년 서울대학교 요업공학과 학사
- 1983년 한국과학기술원 재료공학과 박사
- 1983년 한국원자력연구소 핵연료설계실
조사후 시험실, 초전도체 연구실
- 2001년 한국산업기술대학교 에너지 대학원 교수
- 2011년 한국초전도학회 회장