

## 고온초전도 벌크재료의 기술개발 현황 및 전망

유 상 임  
서울대학교 재료공학부

### 1. 서 론

1986년 Bednortz와 Muller에 의해 임계 온도( $T_c$ )가 30 K이 넘는 고온초전도 재료가 La-Ba-Cu-O계의  $(La, Ba)_2CuO_4$  화합물에서 발견된 후, 여러 동산화물(cuprates)계에서 보다 높은  $T_c$ 를 가지는 재료가 연속적으로 발견되었다. 현재까지 개발된 여러 고온초전도 산화물 가운데 산업적 응용성이 높아 연구개발이 집중되어 온 재료로는 90 K급  $T_c$ 를 가지는 Y(혹은 RE: 희토류 원소)-Ba-Cu-O 계의 소위 Y(혹은 RE)123  $\{Y(혹은 RE)Ba_2Cu_3O_{7-d}\}$  화합물과 Bi-Sr-Ca-Cu-O 계의 85K급 Bi-2212  $(Bi_2Sr_2CaCu_2O)$  및 105 K급 Bi-2223  $(Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O)$  화합물을 꼽을 수 있다. 최근에는 39 K급  $MgB_2$ 라는 금속간 화합물 초전도 재료가 발견되어 세계적인 연구개발이 집중되고 있으나 앞서 언급한 재료들에 비하면 그 응용 가능성을 논하기에는 아직 이른다.

고온초전도 재료의 산업적 응용은 소재의 유형에 따라 크게 선재(wires and tapes), 벌크(bulks) 그리고 박막(thin films)으로 나눌 수 있다. 이 가운데 선재나 박막은 9 K급 Nb 및 Nb-Ti 합금과 18 K급  $Nb_3Sn$ 으로 대표되는 소위 저온초전도 재료가 실용화되어 있으나 이들 재료의 작동을 위해서는 고가의 희귀한 액체 헬륨을 냉매로 사용해야 하므로 이를 액체 질소로 대체할 수 있는 고온초전도 선재 및 박막의 개발 경쟁이 미국, 일본 및 유럽 등의 선진국을 중심으로 활발하게 이루어져 왔다. 그 결과 고온초전도 선재의 경우 Bi-2223의 km급 선재가 상용화되어 있고, 최근에는 Y123를 장선화하려는 소위 coated conductor의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 박막의 경우 Y123를 주요 재료로 하여 통신 기지국용 마이크로파 필터가 상용화되어 있으며, 초 고감도 자기 센서인 SQUID 소자의 다양한 산업적 응용이 모색

되고 있다. 이에 반해, 고온초전도 벌크는 저온초전도 재료로는 산업적으로 응용해본 경험이 없는 새로운 유형의 소재이다. 금속이나 합금을 바탕으로 하는 저온초전도 재료는 열용량이 낮고 열전도도가 높아 국부적으로 발생하는 열에 대한 안정성이 매우 낮기 때문에 벌크소자로 응용되지 못한 반면에 산화물인 고온초전도 재료는 열용량이 월등히 높고 열전도도가 낮아 발생하는 열에 대한 안정성이 매우 높으므로 벌크로도 응용이 가능하게 된 것이다. 고온초전도 재료 가운데에도 벌크 응용이 가능한 재료는 Y(혹은 RE: 희토류 원소)-Ba-Cu-O계 가 유일하다. 이 Y(혹은 RE)123 초전도체는  $T_c$ 가 Bi-Sr-Ca-Cu-O계, Tl-Ba-Ca-Cu-O계 (최고  $T_c = 125K$ ), Hg-Ba-Ca-Cu-O계 (최고  $T_c = 134 K$ ) 보다 훨씬 낮지만 Bi계 재료는 액체 질소 온도(77.3 K)에서 자장하 임계전류밀도( $J_c$ ) 특성이 급격히 열화된다는 단점이 있고, Tl계나 Hg계는 온도에 따른 비가역자장(irreversibility fields)은 123보다 우수하지만 Tl원소는 유독성이 매우 높다는 점, Hg계는 순수화합물 합성의 난해하다는 점 등의 문제점이 있을 뿐 아니라, 이들 재료로는  $J_c$ 를 높이기 위해 필수적인 집합조직을 가지는 대형 벌크의 제조가 어려우므로 123 초전도 재료가 벌크 응용의 유일한 선택이 된 것이다. 본 특집에서는 이러한 Y(혹은 RE: 희토류 원소)-Ba-Cu-O 계에 대해 지금까지 벌크 재료의 연구개발의 진전과 현황 및 전망을 먼저 살펴보고, 벌크소자의 응용 현황 및 전망에 대해서도 살펴보고자 한다.

### 2. 고온초전도 벌크의 발전

#### 2.1. 연구개발의 진전

고온초전도 다결정의 임계전류밀도( $J_c$ )가 낮아 실용성이 의문시되던 1988년 경, 당시 AT&T Bell 연구소의 S. Jin 등[1]은 산화물

세라믹스에 금속재료의 전통적 제조공정인 일방향 응고법(unidirectional solidification process)을 적용하여 Y123의 c-축 방향으로 집합조직이 잘 발달된 YBCO 벌크결정을 제조한 결과, 세라믹스의 전통적 제조공정인 소결법(sintering process)을 통해 제조한 다결정 시편의 입계에서 초전도 전류의 흐름이 크게 손상되던 소위 약결합(weak link 혹은 weak coupling)의 문제점을 크게 개선할 수 있는  $104 \text{ A/cm}^2$  이상의 높은  $J_c$ 를 얻는데 성공하여 고온초전도체의 실용화를 위한 연구개발의 기폭제가 되었다. S. Jin 등은 앞서 설명한 제조방법을 MTG(melt-textured growth)법이라 명명하였는데, 이 제조방법의 단점은 제조할 수 있는 벌크결정의 크기가 매우 제한되어 있다는 것이었다. 이 문제는 곧 Univ. of Houston의 K. Salama 등[2]에 의해 한층 개선되었는데, 그들은 S. Jin 등이 사용한 온도구배하 일방향 응고법 대신에 결정성장에 흔히 사용되어 오던 서냉법(slow cooling process)을 적용한 소위 LP법(Liquid-phase process)으로 보다 큰 YBCO 벌크 결정을 얻을 수 있었고, 제조된 YBCO 벌크 결정은 Y123의 c-축 방향으로 집합조직이 보다 잘 발달되어  $J_c$ 를 조금 더 향상시킬 수 있었다. 그 후, 벌크형 고온초전도체의 연구개발은 보다 높은  $J_c$ 의 달성을 위한 자속 피닝센터의 개발과 c-축 배향 벌크결정의 대형화를 위한 제조기술의 개발을 양축으로 하여 발전되어 왔다.

먼저 자속 피닝센터 개발을 통한  $J_c$ 의 향상은 벌크결정 성장시 YBCO 벌크 초전도체의 Y123 초전도상 내에 포획되는 제2상인  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y211)이나  $T_c$ 에 영향을 주지 않는 제2상인  $\text{BaCeO}_3$ ,  $\text{BaZrO}_3$ ,  $\text{BaSnO}_3$  등의 크기와 양을 제어함으로써 얻을 수 있었다. Y211의 제어를 위한 대표적인 공정이 M. Murakami 등[3]에 의한 QMG법(quench-melt-growth process), H. Fujimoto 등[4]에 의한 MPMG법(melt-powder-melt-growth process) 등이다. 흥미로운 점은 이들 공정 또한 금속의 조직제어에 주로 사용되어오던 용융 및 급냉법을 적용하여 의외의 좋은 결과를 얻게 되었다는 점이다. 이들 공정에 대해 간략히 설명하면 Y123를  $\text{Y}_2\text{O}_3 + \text{liquid}$ 가 평형상을 이루는 고온( $1400\text{-}1500^\circ\text{C}$  정도)에서 용융

시킬 때 사용한 백금도가니에서 Pt가 용융액에 녹아들어가 나중에 YBCO 벌크결정이 성장되기 직전의 평형상인  $\text{Y211} + \text{liquid}$ 의 영역에서 Pt가 Y211의 입성장을 억제하여 submicron 직경의 침상형으로 자라기 때문이다. 이러한 제2상의 입자크기 및 형상 제어법의 개발은 더욱 발전하여 출발원료의 조성을 벌크결정이 성장되기전의 반응용체( $\text{Y211} + \text{liquid}$ )상태에서 Y211의 양이 과잉으로 존재할 수 있도록 제어함으로써 액체질소 온도에서  $J_c$ 를 보다 향상시킬 수 있었고, 더불어 벌크결정 성장시 시편으로부터 액상의 누출을 최소화할 수 있는 것도 알게되었다. Pt외에도 여러 첨가제가 제2상의 제어에 효과적이라는 것이 보고되었는데, 그 가운데에 C.J. Kim 등[5]이 개발한  $\text{CeO}_2$  첨가제는 Pt의 첨가가 YBCO벌크의 Y211 입자제어만큼 효과적이지 않은 LREBCO(LRE: 경희토류 원소) 벌크의 LRE422(LRE = La, Nd) 혹은 LRE211(LRE = Sm, Eu, Gd) 입자 제어에는 매우 효과적임이 최근 밝혀지게되었다[6,7]. 1994년에는 필자인 S.I. Yoo 등[8]에 의해 위의 제2상 제어와는 전혀 다른 제조공정을 통해  $J_c$ 의 향상을 얻게 되었다. 이들은 그동안 YBCO에 비해 열등하다고 알려진 REBCO 벌크 초전도체 가운데, 경희토류 원소의 하나인 Nd-Ba-Cu-O에서 OCMG법(oxygen-controlled melt growth process)으로 고자장에서 YBCO보다 월등히 우수한  $J_c$ 를 가지는 NdBCO 벌크결정을 제조하는데 성공하였고, 이 고정으로 다른 경희토류원소들인 La, Sm, Eu, Gd와 이들을 적절히 혼합한 경우에도 유사한 결과를 얻을 수 있음을 밝히게 되었다[9,10]. 이것은 LRE-Ba-Cu-O계의 경우, Y계나 중희토류계와 달리 123 화합물이  $\text{LRE}_{1+x}\text{Ba}_{2-x}\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$  고용체를 형성하게 되므로, 성장된 벌크결정 내에 국부적으로 LRE가 Ba자리에 들어간 영역이 존재하고, 이 영역의  $T_c$ 는 다른 LRE123 기지상 보다 낮으므로 자장을 인가할 때 상전도상으로 바뀌어 피닝센터가 되는 소위 자장 유도형 피닝센터로 작용하기 때문이다. 따라서 이러한 경희토류계 벌크는 공통적으로 소위 anomalous peak effect(혹은 fishtail effect)라는  $J_c$ -B 특성을 나타낸다. 이들 LREBCO 벌크 초전도체에 대한 보다 상세한 내용은 M. Murakami 등[11]에 의한 review article을 참고하기 바란다

다. 최근에는 M. Muralidhar 등[12]에 의해(Nd,Eu,Gd)BCO와 같이 희토류 원소를 혼합한 벌크에서 77 K에서 보다 높은  $J_c(B)$  특성이 보고되었다.

앞서 설명한 제조법으로는 아직 시편 전체에 단일 도메인 (single domain) 혹은 단일 결정립(single grain)으로 된 벌크결정을 얻을 수 없으므로 다른 한 편으로는 c-축으로 배향된 벌크결정을 대형화하려는 기술개발이 진행되었다. 이 문제는 단결정 성장시 사용되는 씨앗결정(seed crystal)을 반응용체 위에 놓아 그 주위로부터 123 벌크결정이 자라게 하는 TSMG(top-seeded-melt-growth)법이 K. Sawano 등[13]에 의해 개발됨으로서 해결의 실마리를 찾게 되었다. 이 결정성장법은 현재 직경 3cm 이상 두께 2cm 정도의 대형 단일 도메인 YBCO 및 REBCO 벌크결정의 제조에 성공적으로 적용되고 있다.

**2.2. 벌크 초전도체의 개발 현황 및 전망**

현재, 대형의 벌크 초전도체는 YBCO의 경우 공기 중에서, LREBCO의 경우 산소분압을  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  atm으로 낮춘 상태에서 공기 앞서 설명한 TSMG법으로 제조되고 있다. 지금까지 개발된 벌크에 대한 특성을 표1에 요약하였다. 표 1에 나타난 바와 같이, YBCO 벌크의 경우, 액체질소 온도에서 제2

로 고자장 영역에서 높은  $J_c$ 값을 얻을 수 있는 제어로 상대적으로 낮은 자장하에서  $J_c$  값을 향상시킬 수 있고, LREBCO의 경우 제음을 알 수 있다. 또한 LREBCO 벌크의 경우 고자장하에서  $J_c$ 의 향상으로 단일 도메인 벌크결정의 최대 포획 자장(trapped field strength)이 YBCO 보다 2배 이상 향상됨도 알 수 있다.

향후, 벌크 초전도체는  $J_c(B)$  특성 향상, 실용화에 요구되는 기계적 특성 향상, 단일 도메인 벌크결정 성장기술의 최적화에 의한 특성의 재현성 확보 등등이 개발과제라 할 수 있다. 먼저 자장하 임계전류밀도를 보다 증가시키시 위해서는 상대적으로 낮은 자장에서 자속의 피닝에 효과적인 제2상 입자를 보다 미세화시키는 것이 한 방법이 될 것이다. 최근 나노기술의 발달에 따라 나노입자의 합성법이 크게 발전될 것으로 예상되므로 이를 이용하면 현재의 제2상 제어 수준 보다 1/10 정도 이하로 평균입경을 줄일 수 있을 것으로 기대되므로 이에 따른  $J_c$ 의 향상이 가능할 것으로 예상된다. 다음에 실제 응용시 요구되는 기계적 특성의 향상을 위해 은(Ag)을 첨가한 복합체 벌크결정의 성장이 시도되어 왔고, 제조된 벌크에 epoxy를 침투시켜 기공을 메우는 방법 및 벌크 외부에 보강 재료를 붙혀 기계적 강도를 향상시키는 방법 등이 시도되어 왔는데 이러한 기술은 벌크 실용화에 크게 기여할 것으로 여겨진다.

표 1. 현재까지 보고된 고온초전도 벌크의 특성 비교

	YBCO 벌크2상의 제어에 의한 저자장 영역의 $J_c$ 값 향상	LREBCO 벌크
임계전류밀도	$J_c(77K, 0T) = 5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ $J_c(77K, 3T) = 1 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$	$J_c(77K, 0T) = 8 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ $J_c(77K, 3T) = 6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ $J_c(77K, 3T) = 1 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$
최대 벌크결정의 크기	10cm dia × 2cm thick	6cm dia × 2cm thick
최대 반발력	800 N/piece	unknown
상압하 액체질소에서 최대 포획 자장	1 Tesla cf) 3 Tesla (irradiated sample)	2.4 Tesla cf) 3.3 Tesla (sandwiched sample)

### 3. 고온초전도 벌크소자의 응용

#### 3.1. 벌크소자 응용의 기본 원리

벌크소자는 작동원리에 따라 수동소자와 능동소자로 나눌 수 있다. 먼저 수동소자는 Nd-Fe-B자석과 같은 영구자석을 초전도 벌크에 접근시킬 때 발생하는 전자기적 상호작용을 이용하는 것이다. 전자기적 상호작용은 서로 밀어내는 반발력(혹은 부상력)과 잡아당기는 인력이 동시에 발생된다. 반발력은 영구자석이 발생하는 자장에 대한 벌크의 반자장(즉 Messner) 효과에 기인하는 것이고, 인력은 영구자석에서 발생한 자장이 양자화된 자속인 vortex 형태로 초전도 벌크 내부로 침투할 때 벌크 내의 피닝센터가 이들을 고정하여 그 움직임을 막아주는 자속 피닝(flux pinning)에 의한 것으로, 벌크 초전도체가 영구자석에 이끌리어 올려지는 fishing 현상을 잘 설명해준다. 이러한 두 종류의 힘이 함께 작용하여 두개의 금속 자석이 보이는 불안정한 자기부상과 달리 벌크초전도체 위에 영구자석(혹은 영구자석 위에 벌크초전도체)이 안정적으로 자기부상하게 되는 것이다. 영구자석에 대한 초전도체의 부상력(혹은 반발력)  $Fr$  은  $Fr = \int m \Delta H dv$ 로 나타낼 수 있다. 이 식을 일차원에서 표기하면,  $Fr = m dH/dx = (Mv)dH/dx = (AJ_crv)dH/dx$ 이 되므로, 부상력은 초전도체의 자화  $M$  (혹은  $J_c$ )와 부피  $v$ 에 그리고 영구자석이 발생하는 자장의 기울기  $dH/dx$ 에 비례함을 알 수 있다. 여기서  $m$ 은 자기모멘트이고  $A$ 는 상수이다. 따라서 주어진 영구자석(즉 주어진  $dH/dx$ )에 대해 부상력을 극대화하려면 초전도 벌크의  $M$ 을 높여야 하는데 이것은 곧  $J_c$ 와  $c$ -축으로 배향된 단일 도메인의 직경  $r$ 을 증가시킴으로 얻어질 수 있다.

한편, 능동소자의 경우, 초전도 벌크를 자장하에서  $T_c$  이하로 냉각하는 소위 field-cooling을 하거나 먼저  $T_c$  이하로 냉각한 후 자장을 가하는 소위 zero-field-cooling을 한 후 자장을 인가(이 경우 주로 pulse field를 사용함)하여 자속이 벌크 내의 피닝 센터에 포획되게 함으로서 영구자석화하여 소자로 응용하는 것이다. 초전도벌크가 포획할 수 있는 최대 자장에 대한  $J_c$ 와 벌크 직경의 영향을 Bean 모델을 사용하여 그림 1

에 도시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 초전도 벌크자석에 포획되는 최대 자속밀도는 같은 크기의 벌크라도  $J_c$ 가 큰 경우 벌크 주변에서 중심으로 포획된 자속밀도의 기울기가 크게 되므로 보다 높은 자속을 포획할 수 있게된다. 또한 같은  $J_c$ 를 가지더라도 단일도메인의 벌크결정 직경이 커지면 포획되는 자속이 더 높아지는 효과를 얻게 되는 것이다. 어느 경우라도 주어진 온도에서 자속피닝이 더 이상 효과적이지 못한 한계치가 존재하는데 이것이 바로 비가역자장이다.

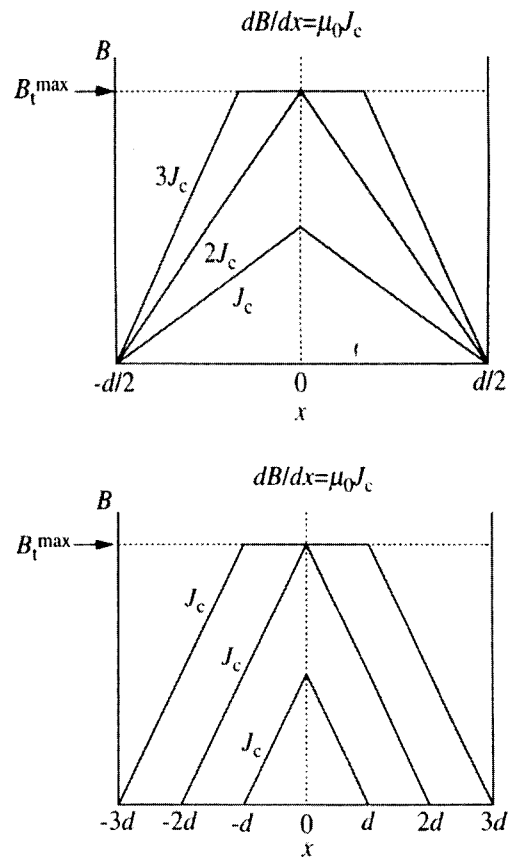


그림 1. Bean 모델을 이용한 초전도벌크의 최대 포획자장에 미치는  $J_c$ 와 벌크 직경의 영향을 나타내는 모식도.

결국 수동소자와 능동소자 모두 성능향상을 위해서는 보다 높은  $J_c$ 를 가지는 단일도메인의 벌크결정을 대형화하는 것이 필수적임을 알 수 있다. 벌크 초전도 영구자석은 기존의 금속 영구자석에 비하여 매우 높은 잔류자화를 가지는 영구자석을 만들 수 있다는 장점이 있다.

### 3.2. 벌크소자의 응용기술 개발 현황 및 전망

고온초전도 벌크는 기존의 금속 영구자석에 대한 반발력 및 인력을 이용한 수동소자로 자기베어링, 플라이휠 에너지 저장장치 등의 응용기기 개발이 진행되고 있고, 착자를 통해 초전도 영구자석을 만든 능동소자로 자장발생장치, 자기분리기, 모터 등의 응용기기 개발이 진행되고 있다. 여기서는 초전도체의 응용기기 중에 현재 가장 실용화에 근접한 대규모 응용기기인 플라이휠 에너지 저장장치와 일본에서 이미 실용화된 자기분리기에 대해 주로 설명하고, 이 밖의 벌크 응용기기에 대해 간략히 설명하고자 한다.

#### 3.2.1. 플라이휠 에너지 저장장치

벌크 고온초전도체는 대용량 전력 저장용 기기인 플라이휠 에너지 저장장치에 응용하고자 하는 노력이 다년간 지속되고 있다. 이 장치는 전기에너지를 이용하여 자기부상된 플라이휠을 고속으로 회전시켜 기계적인 에너지로 저장하였다가 필요시 다시 전기에너지로 변환하여 전력수효가 발생하는 요소에 공급하는 장치이다. 미국, 일본 및 유럽에서는 수 kWh급 초전도 플라이휠을 개발한 바 있으며 현재는 수십에서 수백 kWh급을 개발 중에 있다. 국내의 경우도 한국전력연구원에서 수년전부터 수백 Wh급의 소형 플라이휠을 개발하고 있다. 이러한 플라이휠의 부상을 위해 상용화된 초전도체는 직경 5~10cm, 두께 2 cm 정도의 YBCO 벌크가 주로 사용되고 있는데, 바닥에 벌크 초전도체를 깔고 밑면에 영구자석을 부착한 플라이휠을 부상시킨 후 회전시키는 수직형 플라이휠이 주로 시도되고 있으나, 최근에는 영구자석간의 반발력으로 부상시키고 회전하는 플라이휠 축의 고정을 위해 플라이휠 축에 일련의 영구자석을 붙이고 그 주위에 초전도체 벌크를 배열하여 회전시 축의 흔들림을 최소로 고정하는 자기베어링의 원리를 사용하는 방법도 시도되고 있다.

현재의 난제 중 하나는 벌크 초전도체와 쌍을 이루는 영구자석의 성능이 최고 0.5 Tesla 정도 밖에 되지 않아 대용량의 전력을 저장할 때 요구되는 중량이 매우 큰 대형 플라이휠을 보다 큰 간격으로 부상시키기 어려운 문제가 있다는 것이다. 이 문제의 해결책으로는 능동소자인 벌크 초전도 영구자석의 사용도 고려되고 있다. 그 이유는 앞서 설명한 바와 같이 초전도 벌크자석으로 기존의 영

구자석 보다 월등히 큰 자장을 발생시킬 수 있으므로, 기존의 영구자석과 초전도 벌크자석을 쌍으로 사용하면 보다 큰 간격으로 무거운 플라이휠을 부상시킬 수 있기 때문이다. 고갈되어 가는 에너지 문제를 해결하기 위해 플라이휠 에너지 저장장치가 해결책의 하나가 될 수 있으므로 미국과 일본 등의 선진국에서는 이 장치의 개발에 박차를 가하고 있으므로 향후 10년 이내에 상용 플라이휠이 상용화될 것으로 전망된다.

#### 3.2.2. 자기분리기

고온초전도 벌크자석은 자기분리기에도 응용할 수 있다. 자기분리기는 큰 구배의 자기장을 발생시키는 자력을 이용하여 강자성체는 물론 약자성체와 상자성체를 띠는 입자나 미생물을 포획하여 분리하는 기술로 원래는 주로 점토에 포함된 철분을 제거하기 위한 목적으로 사용되었으나 각종 오폐수의 처리, 자원회수, 가스처리 등등의 분야로 응용범위가 확대되고 있다. 이러한 목적의 자기분리기에 사용되는 자장원으로 벌크 초전도체의 응용이 크게 기대되고 있다. 전자석이나 기존의 영구자석보다 고온초전도 벌크자석을 사용할 때의 장점은 액체질소를 냉매로 1 Tesla 이상의 고자장을 얻을 수 있다는 점과 초전도 벌크자석이 발생하는 자속밀도가 벌크의 중심부에서 가장자리까지 기울기가 매우 급격하여 자기분리시 자력이 매우 크므로 자기 분리에 매우 유리하다는 점이다. 최근 일본의 ISTECS과 Hitachi사가 공동으로 개발하여 상용화되고 있다.

#### 3.2.3. 기타 응용분야

이밖의 고온초전도 벌크소자의 응용분야는 대전류용 초전도 전류인입선(current leads), 초전도 한류기(fault current limiters), 자기차폐재(magnetic shielding materials), 자기부상운송 시스템(magnetic levitation transport system), 자기 베어링(magnetic bearing), 자장원(magnetic field source) 등이 포함된다. 고온초전도 벌크의 경우 수천 Ampere이상의 전류를 단일 벌크재료로 통전할 수 있으므로 전류인입선으로 응용될 수 있다. 이 경우 인입성이 일정한 길이가 요구되므로 벌크결정의 접합기술등이 수반되어야 하는데, 이 접합기술은 여러 가지 방법이 이미 개발되어 있고 향후 새로운 접합기술이 개발될 여지가 많다. 초전도 한

류기의 경우 선재나 박막 형태외에도 초전도 벌크를 이용한 유도형 한류기의 제조가 시도되고 있다. 반도체산업의 기관 운송 시스템으로도 응용이 시도되고 있는데 초기의 수동 소자로서의 수평 운송시스템에서 최근에는 능동소자를 사용한 수직 운송시스템이 일부를 중심으로 개발되고 있다. 자기 베어링의 경우, 기존의 모터용 베어링은 베어링과 회전축이 기계적으로 접촉하여 축을 지지하므로 마찰에 따른 손실이 문제가 되어왔다. 그러나 벌크 초전도체와 영구자석을 사용하면 비접촉으로 회전축을 앞서 설명한 반발력과 인력이 동시에 작용하여 회전축을 접촉없이 부상한 상태로 고정할 수 있기 때문에 이를 응용하기 위한 연구가 다년간 진행되어 왔고 멀지 않은 장래에 실용화될 것으로 기대된다. 자장원의 경우 초전도 영구자석을 쌍으로 배치하여 2Tesla 정도의 균일한 자장을 약 10cm의 air gap에서 얻을 수 있고 전류를 통전할 필요가 없는 장점이 있으므로 다양한 목적의 산업적 응용이 기대된다.

#### 4. 맺음 말

일련의 고온초전도 재료가 발견된 이래 기존의 응용기기와는 전혀 다른 새로운 벌크형 소자가 개발되어 산업적 응용을 위한 연구개발이 진행되고 있다. 다양한 고온초전도 재료 가운데  $T_c$ 가 90 K급인 Y(혹은 RE)-Ba-Cu-O계가 이러한 벌크 재료의 근간을 이루고 있으며, 벌크는 수동소자와 능동소자로서 응용기기가 개발되고 있다. 수동소자로는 자기 베어링, 플라이휠 에너지 저장장치 등이 개발되고 있고, 능동소자로는 자기분리기 및 자장원등으로서도 개발되고 있다. 이러한 응용이 가능하게 된데에는 벌크의 보다 강력한 자속피닝센터의 개발에 의한  $J_c$ 의 향상, c-축 배향의 잘 발달된 집합조직을 가지는 단일 도메인(혹은 단일 결정립)의 벌크결정 제조기술의 개발에 의한 것이다. 더불어 응용기기의 개발이 크게 진척되어 미국, 유럽, 일본을 중심으로 대용량 플라이휠 에너지 저장장치의 개발이 활발히 진행되고 있으며, 일본의 경우 최근 자기분리기의 상품화에 성공하였다. 이밖에 여러 응용기기의 개발이 진행되고 있는 실정이다. 이러한 국외의 벌크 응용기기 개발 현황과 달리 국내에서는 소형 플라이휠의 개발이 한구 전력연구소에 진행되고 있고, 이밖의 벌크소

자를 이용한 응용기기에 대한 개발은 전무한 실정이다. 따라서 향후, 선진국의 기술 독점을 피하기 위해서는 국내의 고온초전도 벌크 재료 및 응용기기의 연구개발을 서두를 시점이라고 생각된다.

#### 참고문헌

- [1] S. Jin et al., Appl. Phys. Lett. 52, 2074 (1988)
- [2] K. Salama et al., Appl. Phys. Lett. 52, 2352 (1989)
- [3] M. Murakami et al., Jpn. J. Appl. Phys. 28, 1189 (1989)
- [4] H. Fujimoto et al., in Advances in Superconductivity 2, T. Ishiguro and K. Kajimura, Tokyo-Springer, 1990, p.285
- [5] C.J. Kim et al., Mater. Lett. 20, 283 (1994)
- [6] M. Matsui et al., Supercond. Sci. Technol.13, 660 (2000)
- [7] S. Nariki et al., Supercond. Sci. Technol.15, 679 (2002)
- [8] S.I. Yoo et al., Appl. Phys. Lett. 65, 633 (1994)
- [9] S.I. Yoo et al., J. Electron. Mater. 24, 923 (1995)
- [10] N. Saki et al., Mat. Sci. Eng. B 53, 109 (1998)
- [11] M. Murakami et al., Supercond. Sci. Technol. 9, 1015 (1996)
- [12] M. Muralidher et al., Physica C 313, 232 (1999)
- [13] K. Sawano et al., Jpn. J. Appl. Phys. 30, L1157 (1991)

#### 저자이력



유상임  
1959년 10월10일생. 1982년 서울대학교 무기재료공학과 공학사. 1984년 동 대학원 무기재료공학과 공학석사. 1992년 (미국) Iowa State University 공학박사. 1992~93년 (미국) Ames Laboratory-USDOE 박사후기 연구원. 1993-95년 (일본) Superconductor Research Laboratory-ISTEC 초빙연구원. 1995-98(일본) Railway Technical Research Laboratory 주임연구원. 현재 서울대학교 재료공학부 교수