

MgB<sub>2</sub> 박막 제조 공정 및 최근 동향

김철진, 박성창  
경상대학교 나노신소재공학부

## 1. 서론

MgB<sub>2</sub>는 RE-Ba-Cu-O(RE=Rare earth)를 비롯한 다른 고온초전도체 물질에 비하여 비교적 낮은 39K의 임계온도를 가지나 단순한 결정 구조, 긴 coherence length, 낮은 비등방성을 가지는 비산화물 초전도체이다[1]. 또한 2원계 화합물이기 때문에 물질의 합성 공정도 단순하고 출발물질의 가격이 낮으며 냉동기로서 충분히 임계온도 T<sub>c</sub> 이하로 냉각시켜 사용할 수 있기 때문에 많은 각광을 받아 왔다 [2-3]. 실제 전력기기 등에의 응용을 위한 선재형태로 가공을 위해서 PIT(Powder-In-Tube)방법이 많이 연구되었고, 전류밀도(J<sub>c</sub>)를 증대시키는 동시에 교류손실(AC-Loss)을 줄이기 위하여 C, SiC, CNT를 비롯한 여러 가지 물질을 도핑하는 연구 또한 경쟁적으로 많이 연구되어 왔다[4-5]. 그러나 MgB<sub>2</sub>는 2300K의 높은 융점을 가지는 B와 922K의 비교적 낮은 융점을 가지는 Mg의 확산반응에 의해 형성되기 때문에 실제 반응온도에서 Mg의 휘발에 따르는 기공의 형성이 선재에서 MgB<sub>2</sub>가 차지하는 부피분율을 제한하는 요소로 작용하고 있어 현재까지 실용화에 장애 요소가 되고 있다. 한편 박막공정은 기상합성을 이용하므로 기공의 형성을 원천적으로 방지할 수 있어 치밀한 조직을 얻을 수 있고 임계전류밀도 J<sub>c</sub>값이 ~100A/cm<sup>2</sup>의 높은 값을 나타내고 있으나[6] 기판의 종류 및 형태, MgB<sub>2</sub> 박막의 크기 등에 의해 그 이용 분야가 제한되고 있다. 최근에는 카본 섬유 등에 박막형태로 증착시켜 여러 다발의 섬유를 합쳐서 선재로 이용하고자 하는 연구도 시도되고 있어 MgB<sub>2</sub> 박막이 PIT공법을 이용한 선재를 대체할 수 있을 것으로 기대되고 있으나 아직은 연구 초기 단계이다. 또한 Mg 및 B의 증기상을 형성하는 방법에 따른 박막 공정 분류 외에도 박막증착과 동시에 합성과정을 겪는 in-situ 공정과 증착 이후 MgB<sub>2</sub>의 합성을 위

한 열처리 공정이 포함되는 ex-situ 공정 등 여러 가지 박막 공정이 시도되고 있으므로 이 글에서는 MgB<sub>2</sub> 박막 제조를 위한 열화학적 조건과 여러 가지 공정을 이용한 국내외 연구 동향을 살펴보고, 향후 전망에 대하여 기술하고자 한다.

2. MgB<sub>2</sub> 박막 제조의 열화학적 조건

MgB<sub>2</sub> 제조를 위한 박막 공정은 MgB<sub>2</sub>의 형성 온도에 따라 저온 박막공정과 고온 박막공정으로 크게 분류되기도 하나 근본적으로 Mg의 증기압에 따른 구분이므로 Mg와 B의 증기상(vapor phase)을 형성하는 방법에 의해 일반적으로 분류된다. B는 융점이 높기 때문에 전자비임이나 레이저 비임(PLD)[7-8]을 이용한 스퍼터링에 의하거나 혹은 HPCVD (Hybrid Physical Chemical Vapor Deposition), MBE (Molecular Beam Epitaxy), CVD (Chemical Vapor Deposition) 공정에서처럼 diborane (B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) 가스를 이용한다. 그러나 Diborane 가스는 공기중의 수분과 반응하여 순간적으로 폭발위험성이 있을 뿐만 아니라 고가이어서 대량 생산용 보다는 실험실용으로 적합하다. Mg는 증기압이 높기 때문에 대부분 Knudsen cell을 이용한 열적증발(Thermal evaporation)을 주로 사용한다. MgB<sub>2</sub>는 육방 최밀격자(HCP)의 Mg층과 흑연(Graphite)구조의 B층이 교대로 적층된 구조를 가지는 AlB<sub>2</sub> 육방정 결정구조를 가지고 격자 상수는 a=0.3086nm, c=0.3524nm으로서 에피 성장을 하기 위해서는 기판의 선택이 중요하다. MgB<sub>2</sub> 박막이 증착되는 기판의 표면은 육방정계의 (0001)면이나 입방정 혹은 능면정계의 (111)면으로서 MgB<sub>2</sub>와 격자 결합성이 좋아야 한다. 격자 불일치(lattice mismatch)를 줄이기 위하여 YSZ, SiO<sub>2</sub>, SrTiO<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, MgO, ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlN, Ta<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와 같은 완충층을 사용하기도 하며 많이 사용되는

Table 1. Structural parameters of the typical substrates and buffer layers used for MgB<sub>2</sub> thin film growth.

Material	Crystal structure	Lattice type	a [nm]	c [nm]	Crystallographic Plane	Matched spacing [nm]
Si	Diamond	Cubic	0.354	-	(111)	0.3833
ZnO	Wurtzite	Hexagonal	0.325	0.5207	(0001)	0.325
GaN	Wurtzite	Hexagonal	0.316	0.5125	(0001)	0.316
AlN	Wurtzite	Hexagonal	0.308	0.493	(0001)	0.308
4H-SiC	Wurtzite	Hexagonal	0.3073	1.0053	(0001)	0.3073
MgO	NaCl	Cubic	0.4211	-	(111)	0.2982
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Corundum	Hexagonal	0.4762	1.2995	(0001)	0.2749

기판은 Table 1에 요약하였다. 여러 가지 물질 중에서 기판과 증착되는 MgB<sub>2</sub>와의 격자 결합성이 좋은 것은 SiC, AlN, GaN 등이 있으나 단결정 성장이 어렵거나 고가이므로 많이 사용되지 못하고 있다. Table 1에 표시한 물질 외에도 LaAlO<sub>3</sub>, NdGaO<sub>3</sub>, LaGaO<sub>3</sub>, SrTiO<sub>3</sub>, hastelloy, glass, Cu-tape 등도 사용한 경우가 있으나 증착방법에 따라 기판의 선택에 제한을 받는다. 즉, 단결정이 아닌 금속의 다결정이나 비정질상의 기판에 MgB<sub>2</sub>를 증착시키기 위해서는 비교적 낮은 반응온도를 선택하는 경향이 많다. Fig.1에서 열역학적인 관점으로만 고려하면 MgB<sub>2</sub>가 안정하게 형성될 수 있는 영역은 저온-높은 P<sub>Mg</sub> 영역으로서 P<sub>Mg</sub> < 10<sup>-5</sup> torr의 고진공과 300°C 이상의 온도

만 유지하면 MgB<sub>2</sub>가 형성될 것으로 추정되지만 실제로는 Mg와 B가 반응하는 속도가 느리고 기판에 부착되는 속도(sticking coefficient)도 느려서 증착되지 않는다. MgB<sub>2</sub> 제조를 위한 많은 박막공정에서 Knudsen cell을 사용하여 Mg의 증기를 형성시키나 저온에서는 Mg의 증기압이 낮을뿐더러 Knudsen cell과 기판사이의 거리에 비례하여 기판 근처에서의 P<sub>Mg</sub>가 급격히 저하되므로 박막을 형성시키기 어렵다. 한편 기판 온도가 올라가면 충분한 반응속도를 얻을 수 있지만 MgB<sub>2</sub> → MgB<sub>4</sub> + Mg vapor의 반응이 발생한다. 또한 Ellingham diagram에서 볼 수 있듯이 반응온도에서 Mg와 O의 반응성이 아주 높아서, 챔버 내에 남아있는 잔류 산소와 반응하여 MgO를 쉽게 형성하거나 심지어는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등의 산화물 기판을 사용하였을 경우 산화물이 환원되고 MgO층이 기판과 MgB<sub>2</sub>층 사이에 형성될 정도이다. 따라서 화학량론적이고 안정된 구조의 MgB<sub>2</sub>박막을 형성하기 위해서는 기판 부근에서 충분한 P<sub>Mg</sub>가 확보되고 챔버 내에 잔류 산소가 없어야 하며 온도는 충분한 반응속도를 얻을 수 있는 반면 MgB<sub>2</sub>에서 Mg가 재취발을 억제할 수 있는 온도영역을 사용하여야 한다. 반응 용기 내의 잔류 산소량을 최소화하기 위해서 Ar+4%H<sub>2</sub>의 flushing gas를 수십~수백 μm크기의 Mg 금속입자들로 충전된 밀폐된 용기를 400°C~500°C의 온도 범위에서 통과시켜 사용하기도 한다. 또한 기판 부근에서 충분한 Mg 증기압을 확보하기 위해서는 B의 플럭스에 영향을 주지 않는 범위 내에서 Mg 증기가 이동을 제한하는 가이드를 사용할 수도 있다.

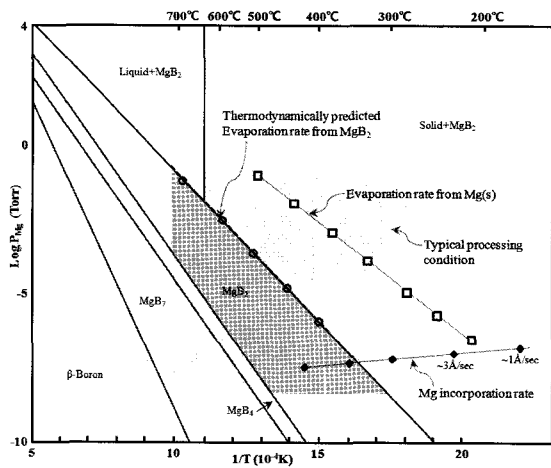


Fig. 1. Pressure-temperature phase diagram of the binary Mg-B system derived from the thermodynamic analysis[9] and the experimental evaporation and incorporation rate of Mg extracted from the References [10-12].

## 3. 연구동향

MgB<sub>2</sub>박막 제조를 위한 초기의 연구에서는 출발물질을 밀봉한 튜브에 넣고 700°C~900°C의 온도범위에서 박막을 형성한 다음 후열처리를 통하여 MgB<sub>2</sub>박막을 형성하는 2단계 박막제조(2-step process)공정을 사용하였으나 재현성이나 제한된 시편의 크기 및 형상으로 인하여 근래에는 거의 사용되지 않고 있다. 여러 가지 박막증착 방법들중에서 최근에는 좋은 결과를 얻고 있는 HPCVD, PLD, Co-Evaporation 방법을 위주로 최근의 연구동향을 검토하고자 한다.(Fig.2) PLD방법에 의한 MgB<sub>2</sub>박막은 여러 연구 그룹[13-15]에 의해서 시도되었으나 대부분 충분한 P<sub>Mg</sub>를 얻기가 쉽지 않고 정확한 화학량론을 유지하기가 쉽지 않다. 또한 대부분의 연구에서 증착된 전구체들이 합성되도록 600°C 이상의 온도에서 후열처리 과정이 필요하며 이 과정에서 산소의 흡착에 의한 MgO, 이미 형성된 MgB<sub>2</sub>의 분해에 의한 MgB<sub>4</sub> 등 2차상에 의한 오염을 피하기 어려운 결과를 보여주었으며 성장된 MgB<sub>2</sub> 박막의 결정성도 떨어져서 ΔT<sub>c</sub>값도 범위가 비교적 크다.

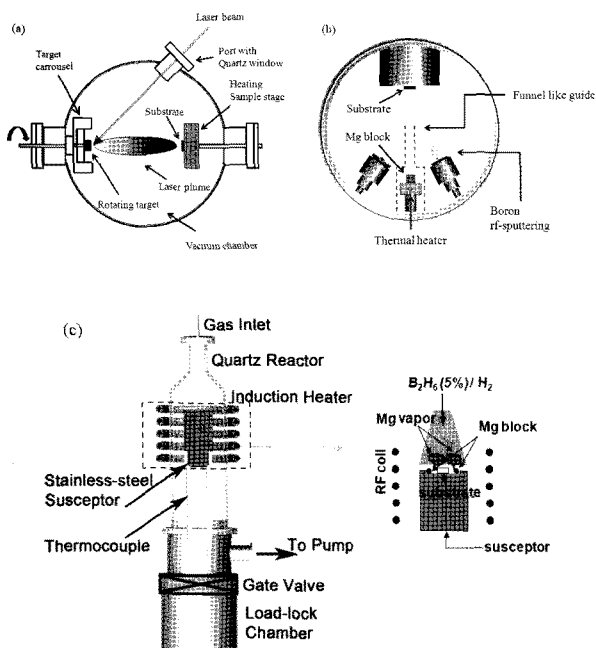


Fig. 2. Schematic diagram of the thin film deposition apparatus a) PLD, b) Co-evaporation, and c) HPCVD with the enlarged view of the reaction chamber.

HPCVD방법은 Mg 금속 덩어리를 열적증발에 의해서 Mg증기를 형성하고 B는 B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 가스로 공급하여 물리적인 증착방법과 화학적인 증착방법을 이용하여 MgB<sub>2</sub>박막을 증착시키는 방법이다. PLD에 비하여 반응 용기의 부피가 작아서 충분한 P<sub>Mg</sub>를 얻을 수 있음과 동시에 반응로의 온도를 조절하여 정확한 화학량론적 MgB<sub>2</sub>를 형성하기에 용이하다. CVD 반응로에 희석한 B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>-H<sub>2</sub> 가스를 흐르게 하고 고주파 유도 가열에 의하여 Mg 금속 덩어리와 기판을 동시에 가열시키면서 증착시킨다. 일반적으로 B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>-H<sub>2</sub> 가스는 B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>농도가 약 5%정도로 유지하고 전체적인 압력은 약 100 torr정도로 유지할 때 기판의 온도에 따라서 차이가 있지만 대개 0.2~1.5nm/sec의 성장속도를 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 박막은 단결정의 물성과 거의 같은 수준을 유지하며 후열처리 과정을 거치지 않으므로 불순물의 유입을 차단하기에 유리하다.

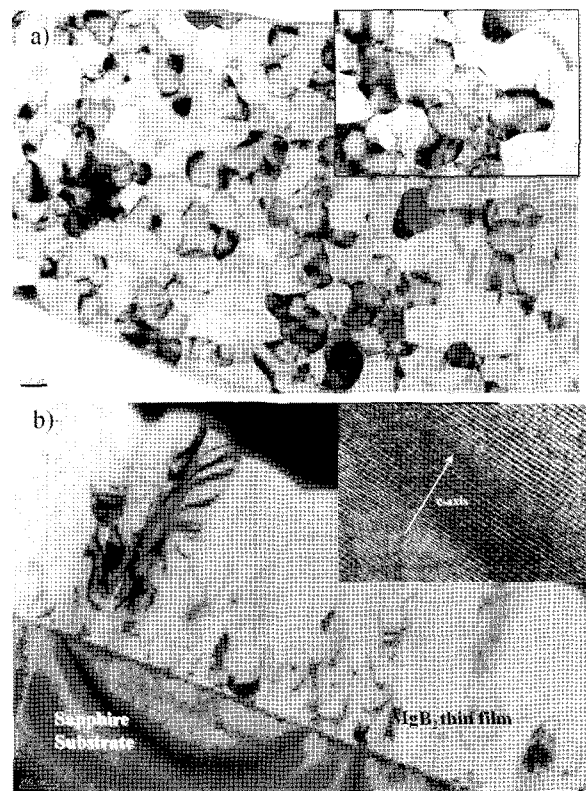


Fig. 3. TEM images of the MgB<sub>2</sub> thin film grown by HPCVD method. a) surface view and the enlarged view with the average grain size of 220~250nm, b) cross-sectional image and HREM image showing the growth direction of MgB<sub>2</sub> grains.

Fig.4는 sapphire 기판위에 HPCVD방법으로 약 1.7 $\mu$ m의 두께로 증착시킨 MgB<sub>2</sub>박막의 SEM 표면과 columnar 형태로 입자들이 성장한 것을 보여주는 TEM 사진, 그리고 XRD 패턴이다. 여기에서 확인할 수 있는 것은 Fig. 3에서 보았듯이 박막의 내부뿐만 아니라 표면까지 2차상의 생성없이 MgB<sub>2</sub>입자들이 매우 치밀하게 기판부터 박막의 표면까지 c-축 방향을 에피 성장하였으며, 이는 XRD 패턴으로도 확인된다.

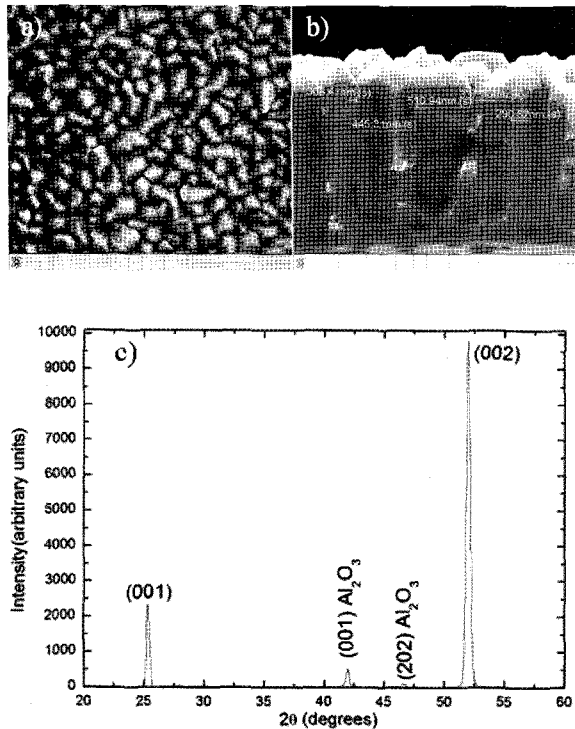


Fig. 4. a) SEM micrograph of the surface of the MgB<sub>2</sub> thin film grown by HPCVD method, b) cross-sectional image of the film showing the columnar growth behavior in c-direction of MgB<sub>2</sub>, and c) XRD pattern indicating epitaxial growth on the c-cut sapphire substrate.

HPCVD방법은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgB<sub>2</sub>계면이나 MgB<sub>2</sub> 박막 내부에 MgO, MgB<sub>4</sub> 등의 2차상의 형성을 피하고 매우 치밀하고 단결정에 버금가는 MgB<sub>2</sub> 박막 조직을 얻을 수 있다. 최근에는 HPCVD방법을 이용하여 평판의 기판이 아닌 섬유형태에 core-shell구조를 가지는 박막의 연구가 국내 연구진의 주도로 진행되고 있다. 일부 외국의 연구에서는 MgB<sub>2</sub> nano-whisker 형태로 제조한 경우[15]가 있으나 무질서한 배열과 제한된 크기로 인하여 실제 응용은 어

려우며, B가 코팅된 상용의 텅스텐 와이어를 기판으로 사용하여 Mg의 확산반응에 의한 MgB<sub>2</sub> 박막 제조 특허도 있으나 이 역시 선제료의 응용에는 제한이 있다. 충분한 기계적 강도, 화학적 안정성을 가지고 fiber형태로 기판으로 응용할 수 있는 물질들은 카본, SiC, W 등이 있다. Fig.5는 직경 약 10 $\mu$ m의 직경을 가지는 카본 섬유 표면에 HPCVD방법으로 MgB<sub>2</sub>층을 증착시킨 것인데, 균일하게 증착이 되었지만 대부분의 입자들이 c축이 섬유의 길이방향과 평행인 방향으로 성장되었음을 알 수 있고 B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>의 유입량과 반응온도에 따라서 입자크기가 변화함을 알 수 있다.

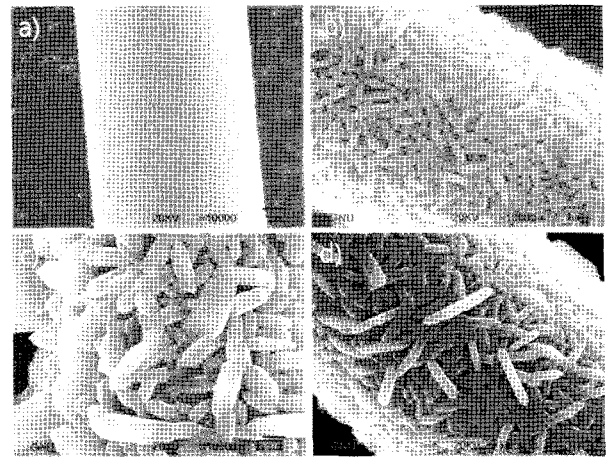


Fig. 5. SEM images of MgB<sub>2</sub> films deposited on the carbon fibers by HPCVD method with the different flow rates of 5% B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>+H<sub>2</sub> gas and temperatures. a) 5 sccm at 590°C, b) 15 sccm at 590°C, c) 25 sccm at 590°C, and d) 15 sccm at 610°C

특이한 점은 사파이어 단결정 기판을 사용한 경우에는 c-축이 기판에 수직인 방향으로 성장하였으나 카본 섬유를 사용하였을 경우에는 Fig. 6과 같이 길이방향에 평행한 방향으로 성장하였음을 알 수 있다.

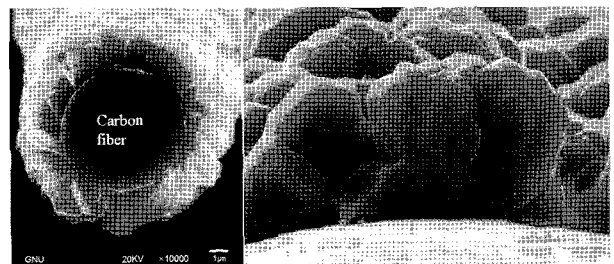


Fig. 6 SEM images of the MgB<sub>2</sub> film on the carbon fiber deposited by HPCVD method.

또한 직경 50 $\mu\text{m}$ 의 직경을 가지는 텅스텐 와이어의 표면에 HPCVD 방법으로 MgB<sub>2</sub> 박막을 형성시키면 실험조건에 따라 다양한 형상의 미세구조와 방향성을 가지는 MgB<sub>2</sub> 입자들을 형성할 수 있다(Fig. 7). 반응 온도, Mg 및 B의 유량, 전기전도도와 같은 기판의 물성, 그리고 기판 표면에 접근하는 입자들의 하전 상태 등에 따라서 미세구조가 변화하고, 이는 박막 성장에 있어 하전입자모델[16]로서 설명이 가능할 것으로 추정되나 자세한 MgB<sub>2</sub> 입자 성장모델을 규명하기 위해서는 더 많은 실험과 분석이 필요하다.

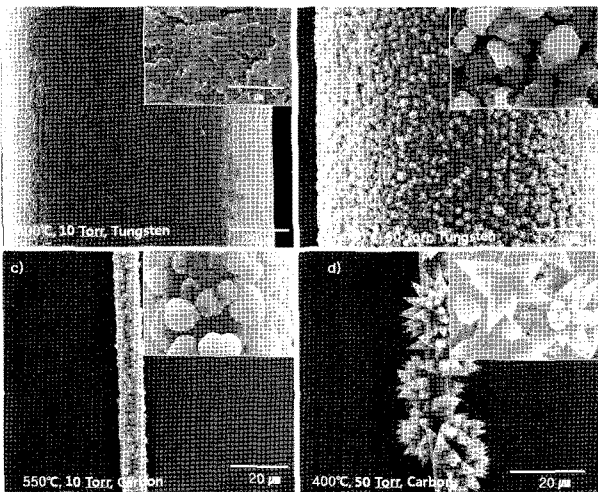


Fig. 7. Various microstructure developments in the MgB<sub>2</sub> thin film deposition by HPCVD method using W(a,b) and carbon fiber (c,d) as substrate.

HPCVD 방법은 MgB<sub>2</sub> 박막의 형성에 매우 유리하지만 제한된 크기와 B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 가스의 높은 가격이 대규모 혹은 장선재에의 실제 적용에 장애물이 되고 있다.

한편 Mg를 Knudsen cell을 이용하여 Mg 증기를 형성하고 용점이 높은 B는 전자비임 스퍼터링에 의한 co-evaporation 방법[17-18]은 비교적 장치 구성이 단순하고 평판의 기판 뿐만 아니라 섬유형태의 기판에 박막을 형성시킬 수 있는 장점이 있고 reel-to-reel 공정을 적용하면 장섬유 MgB<sub>2</sub> 박막을 얻을 수 있다. 또한 반응 용기내에 Mg나 B의 플럭스에 영향을 주지 않으면서 기판의 온도를 쉽게 제어할 수 있는 장점이 있으나 기판 부근에서 충분한 Mg 증기압을 형성하는 것이 쉽지 않고 반응 용기 내 금속에 흡착되거나 flushing

gas에 혼합되어 유입되는 산소 때문에 MgO와 같은 2차상의 생성을 억제하기가 힘들어 좋은 특성의 MgB<sub>2</sub> 박막을 얻을 수 없었다. 그러나 Fig. 8과 같이 최근 Mg 박판으로 제조한 깔대기 형태의 유도관을 Knudsen cell의 위쪽에 설치함으로써 기판 부근에서 충분한 Mg 증기압을 확보하고 유입되는 잔류 산소의 양을 필터를 통해서 최대한 억제함으로써 좋은 특성의 MgB<sub>2</sub> 박막을 형성할 수 있음은 물론 카본 섬유, 텅스텐 와이어, SiC 섬유 등에 core-shell 형태로 MgB<sub>2</sub> 박막을 형성함으로써 reel-to-reel 공정으로도 이용될 수 있는 가능성을 보여주는 연구가 본 연구진 위주로 시도되었다[19-23].



Fig. 8. a) Co-evaporation chamber with funnel-guide, b) oxygen filter with Mg granules and temperature control unit.

Co-evaporation 방법에서는 Knudsen cell의 온도 조절을 통한 Mg 증기압, 스퍼터링 파워 제어를 통한 B 플럭스 양, 기판의 온도가 주요 변수이고 잔류 산소량, 기판 섬유의 회전 속도 및 이동 속도 등의 변수에 따라서 형성되는 미세조직의 변화를 가져올 수 있다. MgB<sub>2</sub>의 박막이 아주 치밀하게 형성되며 기판으로 사용하는 재료들과의 계면접합성도 아주 우수하나 HPCVD 공법에 의해서 제조된 박막과는 달리 계면에서 MgO 층이 형성되기도 하였다(Fig. 9).



Fig. 9. a) carbon fibers with the diameter of 7.1 $\mu\text{m}$ , b) cross-sectional image of the fiber showing the diffusion-reacted MgB<sub>2</sub> shell layer, and c) fractured MgB<sub>2</sub> layer showing the pore-free dense microstructure.

Core-shell 형태로 제조한 단섬유의 임계온도는 Fig. 10과 같이 T<sub>c</sub>=39.5K, ΔT~1.2K의 우수한 초전도특성을 얻을 수 있었다.

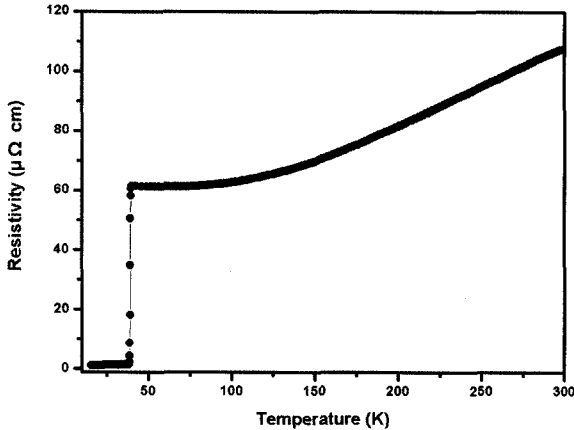


Fig. 10. Resistivity-Temperature curve of the MgB<sub>2</sub>-fiber.

#### 4. MgB<sub>2</sub> 박막 기술의 전망

MgB<sub>2</sub>를 실제 전력기기에 응용하고자 하는 연구는 주로 PIT공법에 의한 선재 연구가 주를 이루었고 MgB<sub>2</sub> 박막은 주로 물리적인 측면에서 물성연구에 주로 이용되어서 상대적으로 구리산화물계의 고온 초전도체 박막보다는 많은 연구가 이루어지지 않았다. 그러나 PIT공법에 의한 MgB<sub>2</sub> 선재는 기본적으로 많은 기공을 포함하고 있고 입자간 연결성도 좋지 않아 HyperTech™에 의해 상용화가 되어 있음에도 불구하고 실제로는 실제 이용되는 예가 드물었다. 최근에 국내 연구진의 시도로 카본이나 SiC 섬유를 기판으로 사용하여 매우 치밀한 조직의 MgB<sub>2</sub> 박막을 제조하는 공법이 제시되어 향후 선재로의 이용이 가능할 것으로 판단된다. 선재로 이용하기 위해서는 선재 자체의 인장강도를 비롯한 기계적 물성이 중요한데 카본 섬유나 SiC 섬유는 그 자체로서 충분한 기계적 강도를 보유하고 있다. 또한 core-shell 형태로 제작된 단섬유의 직경이 보호층을 포함하여도 15~20μm에 불과하고 MgB<sub>2</sub>층과 기판 섬유상과의 계면접합 강도도 높아서 여러 다발을 꼬아서 선재로 가공하기에도 유리하다. 초전도체의 실용화에 걸림돌 중의 하나가 AC-loss라는 점을 감안하면 향후

이와 같은 연구가 활발히 진행될 것으로 예상된다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, J. Akimitsu, "Superconductivity at 39 K in magnesium diboride", Nature, 410, 63 (2001).
- [2] K. Vinod, R. Abhilash Kumar and U. Syamaprasad, "Prospects for MgB<sub>2</sub> superconductors for magnet application", Supercond. Sci. Technol. 20, R1-R13 (2007).
- [3] B.A. Glowacki, M. Majoros, "MgB<sub>2</sub> conductors for dc and ac applications", Physica C, 372-376, 1235 (2002).
- [4] X.L. Wang et al., "Significant enhancement of flux pinning in MgB<sub>2</sub> superconductor through nano-Si addit ion", Physica C, 385, 461-465 (2003).
- [5] Q.W. Yao, et al., "Cu and nano-SiC doped MgB<sub>2</sub> thick films on Ni substrates processed using a very short-time in situ reaction", Physica C, 402, 38-44 (2004).
- [6] M. Naito and K. Ueda, "MgB<sub>2</sub> thin films for superconducting electronics", Supercond. Sci. Technol. 17, R1-R18 (2004).
- [7] H.Y. Zhai, H.M. Christen, L. Zhang, C. Cantoni, M. Parathaman, B.C. Sales, D.K. Christen, D.H. Lowndes, "Superconducting magnesium diboride films on Si with T<sub>c0</sub>~24 K grown via vacuum annealing from stoichiometric precursors", Appl. Phys. Lett. 79, 2603 (2001).
- [8] Y.S. Wu, Y. Zhao, D. Wexler, J.H. Kim, S.X. Dou, "Optimization of in situ annealing conditions for off-axis PLD MgB<sub>2</sub> films", Physica C, 468, 218 (2008).

- [9] Z. K. Liu, D. G. Schlom, Q. Li, and X. X. Xi, "Thermodynamics of the Mg-B system: Implications for the deposition of MgB<sub>2</sub> thin films", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, no. 23, 3678 (2001).
- [10] J. Kim, R.K.Singh, N. Newman, and J.M. Rowell, "Thermochemistry of MgB<sub>2</sub> Thin Film Synthesis", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol 13, 3228 (2003).
- [11] G. Balducci, S. Brutti, A. Ciccio, G. Gigli, P. Manfrinetti, A.Palenzona, L. Kudin, L.V. Butman, "Thermodynamics of the intermediate phases in the Mg-B system", *J. Phys. Chem. Solids*, 66, 292 (2005).
- [12] M. Naito, "Current Status of Thin-film Synthesis and Junction Fabrication of MgB<sub>2</sub> and Future Prospects for Device Application", *低温工学*, 41, 463 (2006).
- [13] P. Badica, K. Togano, S. Awaji, and K. Watanabe, "Growth of superconducting MgB<sub>2</sub> films by pulsed-laser deposition using a Nd-YAG laser", *Supercond. Sci. Technol.* 19, 242 (2006).
- [14] W.K. Seong, J.Y. Huh, W.N. Kang, J.-W. Kim, Y.-S. Kwon, N.-K. Yang, J.-G. Park, "Growth of Epitaxial MgB<sub>2</sub> Thick Films with Columnar Structures by Using HPCVD", *Chem. Vap. Deposition*, 13, 680 (2007).
- [15] Y. Wu, B. Messer, and P. Yang, "Superconducting MgB<sub>2</sub> Nanowires", *Adv. Mater.* 13, 1487 (2001).
- [16] N.-M. Hwang and D.-Y. Kim, "Charged clusters in thin film growth", *Intl. Mater. Rev.*, 49, 171 (2004).
- [17] H. Shimakage, A.Saito, A. Kawakami, Z.Wang, "Optimizing preparation of as-grown MgB<sub>2</sub> thin film made using the co-evaporation method", *Physica C*, 392-396, 1291 (2003).
- [18] B.H. Moeckly and W.S. Ruby, "Growth of high-quality large-area MgB<sub>2</sub> thin films by reactive evaporation", *Supercond. Sci. Technol.* 19, L21-24 (2006).
- [19] S.G. Kang, S.C. Park, J.K. Chung, D. G. Jeong, C.-J. Kim, and C.J. Kim, "Microstructure of MgB<sub>2</sub> thin film deposited on r-plane sapphire substrate by co-evaporation method", *Physica C*, 469, 1571 (2009).
- [20] S.C. Park, K.J. Song, S.G. Kang, Y.J. Lim, J.K. Chung, and C.J. Kim, "Fabrication and characterization of superconducting MgB<sub>2</sub> thin films grown by rf sputtering and thermal evaporation method", *Physica C*, 469, 1574 (2009).
- [21] S.C. Park, J.K. Chung, S.G. Kang, K.J. Song, C.-J. Kim, and C.J. Kim, "Fabrication of MgB<sub>2</sub> thin films on r-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrates by rf sputtering and thermal evaporation", *Physica C*, 468, 1879 (2008).
- [22] Y.J. Lim, S.C. Park, J.K. Chung, T.K. Lee, K.J. Song, and C.J. Kim, "Synthesis of the superconducting MgB<sub>2</sub> film on the W-wire by co-evaporation method", *Physica C* (in print, 2009).
- [23] S. C. Park, Y.J. Lim, T. - K. Lee, and C.J. Kim, "Influence of Mg vapor pressure on the MgB<sub>2</sub>/carbon fiber fabricated by co-evaporation method", *Physica C* (in print, 2009).

### 저자이력

#### 김철진 (金哲珍)

1975-1979 서울대학교 요업공학과 학사, 1979-1981 서울대학교 요업공학과 석사, 1986-1991년 Case Western Reserve Univ. (Cleveland, USA) 재료공학과 박사, 현재 경상대학교 나노신소재공학부 교수.



#### 박성창 (朴聖禎)

1996-1998 경상대학교 무기재료공학과 석사, 2000-2008년 경상대학교 세라믹공학과 박사, 현재 경상대학교 나노신소재공학부 연구교수.

