

## 새로운 초전도체 MgB<sub>2</sub>의 물리적 성질 소개

이 성 의, 최 재 혁  
포항공과대학교 물리학과 초전도 연구단

초전도 현상의 발견 이후 이 분야의 가장 큰 관심사 중 하나는 그 임계 온도( $T_c$ )를 높이는 것이었다. 지금까지 가장 높은 임계온도를 보이는 물질은 구리산화물계 초전도체이다. 고온초전도체의 메커니즘은 아직도 베일에 가려져 있으며 이것은 또한 물리학자들에게 가장 매력적인 논제이기도 하다. 반면 포논-전자 결합 메커니즘에 의해 초전도가 나타나는 재래식 초전도체의 경우, 임계온도를 올리는 일반적인 방법은 분명하고 간단하다. 바로 붕소나 탄소와 같은 가벼운 원소를 결합하여 격자 진동 즉 포논 진동수를 높이는 방법이다. 최근에 상당한 관심을 끌고 있는 금속간 붕소계 초전도체 (intermetallic boride superconductor) MgB<sub>2</sub>가 바로 그 예이다.

2001년 1월, 새로운 세기를 여는 여명에 39 K의 놀랄 만한 임계온도를 가지는 간단한 이원소 화합물 MgB<sub>2</sub>의 초전도성이 Akimitsu에 의해서 보고되었다[1,2]. 이 임계온도는 비산화물, 비탄소-60 화합물에서 지금까지 알려진 어떤 임계온도보다 두 배 정도 높다. 이 물질은 이미 1950년대에 처음 합성되었고 상업적으로 쉽게 구할 수 있었음에도 불구하고, Akimitsu와 그의 동료들 이전에는 아무도 이 물질의 초전도성을 측정하려는 시도를 하지 않았던 것이다.

이 MgB<sub>2</sub> 초전도성의 발견 소식에 많은 과학자들이 크게 고무되었다. 가장 주목을 많이 받는 점 중의 하나는 MgB<sub>2</sub>의 초전도 메커니즘이다. 기존의 초전도 이론을 따르는가 아니면 새로운 메커니즘이 필요한가? 그 질문에 답하기 위해 전자구조 계산과 동위원소 효과와 같은 실험들이 진행되었다. 과학자들은 MgB<sub>2</sub>에 대한 이해를 바탕으로 단순한 조성의 다른 화합물들에서도 더 높은  $T_c$ 를 찾거나  $T_c$ 를 높일 수 있을 것이라고 희망하고 있다. 또 하나의 큰 관심사는 이 물질의

응용 잠재력에 대한 것이다. 현재 보급되어 있는 Nb<sub>3</sub>Sn 또는 Nb-Ti 합금 초전도 전선과 비교하여 MgB<sub>2</sub>는 높은  $T_c$ 를 가진다는 두드러진 장점을 가지고 있다. MgB<sub>2</sub>로 만들어진 전선이나 박막은 액체 헬륨이 아닌 전기냉동장치에 의해서도 초전도 상태를 유지할 수 있다. 비록 구리산화물계 초전도체가 더 높은  $T_c$ 를 가지긴 하지만, 실제로 흘릴 수 있는 임계 전류 밀도가 충분히 높지 않다는 심각한 단점을 가지고 있다. 이것은 각각의 결정 알갱이가 가지는 내부 임계전류 밀도가 높음에도 불구하고 알갱이 사이의 약한 결합 때문이다. 이러한 논점을 포함해서, 우리는 앞으로 지금까지 밝혀진 MgB<sub>2</sub>의 기본적인 성질에 대해 개략적으로 살펴볼 것이다.

그림 1에서 볼 수 있듯이 MgB<sub>2</sub>는 Mg층과 B<sub>2</sub>층이 서로 번갈아 있는 육방정계 AlB<sub>2</sub>-형 구조를 가지고 있다. 이때 Mg층은 육방정계 구조이고 B<sub>2</sub>층은 흑연구조 즉 벌집구조를 가지고 있다. 분말 시료에서 얻어진 격자 상수는  $a=3.086 \text{ \AA}$ ,  $c=3.524 \text{ \AA}$ 이다[2].

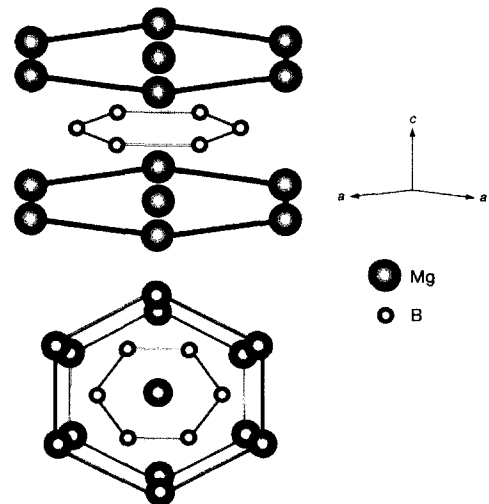


그림 1. MgB<sub>2</sub>의 결정 구조

전자구조 계산에 의하면[3,4] 페르미 에너지  $E_F$  근처에서의 전자상태는 그림2에서 보는 것처럼 주로 붕소 오비탈에 영향을 받는다. 붕소 오비탈에 의한 띠(band)는  $\sigma$  띠 ( $B p_{x,y}$  평면 상태)와  $\pi$  띠 ( $B p_z$  상태)가 있고 각각은 이차원과 삼차원의 특성을 보인다. 그 중 두 개의  $\sigma$  띠가 띠끝머리(band edge)에서 페르미 준위와 교차하고, 그 페르미 면이  $k_z$  축을 둘러싼 두 겹의 원기둥 모양을 하고 있다. 층간 결합은 이온결합이며, An과 Pickett에 의하면  $Mg^{+2}$ 와  $(B_2)^{2-}$  층 사이의 인력 퍼텐셜이  $\pi$  띠를 낮추게 된다[4]. 이 때문에  $\sigma$  띠에서  $\pi$  띠로 전자가 옮겨가게 되고 결과적으로, 가득 차

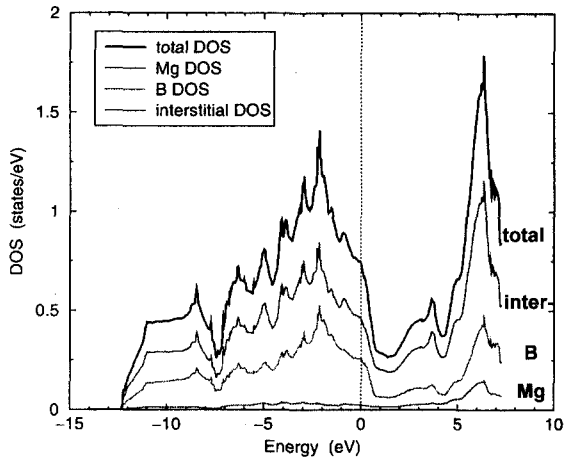


그림 2. MgB<sub>2</sub> 화합물의 전체 및 부분 상태 밀도(DOS).

있던  $\sigma$  띠에 양공(hole)의 도핑이 이루어진다.  $\sigma$  띠의 이차원적 특성 때문에 작은 도핑 수준(0.067holes/B)과는[4] 무관하게 전체 상태밀도에 ~30%정도로 적지 않은 기여를 하게 된다[3].

An과 Pickett[4]은 MgB<sub>2</sub>의  $T_c$ 가 높은 것이,  $\sigma$  띠에 있는 양공들이 붕소  $E_{2g}$  포논 모드 즉 B 격자의 평면 진동과 강하게 결합해 있기 때문이라고 생각한다. 최근에 Mg 대신 Al을 부분 치환한 결과들은 초전도 메커니즘에서  $\sigma$  띠의 양공을 중요하게 생각하는 이러한 관점을 지지한다. Mg를 Al로 부분 치환한 것이 초전도성을 약화시키는 데 이것을 각각의 Al 원자가 내어놓는 한 개의

전자가  $\sigma$  띠의 빈 전자상태를 채우기 때문이라고 이해할 수 있다.

$\sigma$  띠의 이차원적 특성에도 불구하고, 평면 방향( $v_{x,y}$ )과 수직 방향( $v_z$ )의 평균 페르미 속도가 거의 같은 등방적인 전자구조를 가지는 것이 이론적인 예측이다. ( $v_{x,y} = 4.90 \times 10^7$  cm/s,  $v_z = 4.76 \times 10^7$  cm/s)[3].  $\pi$  띠가 등방성이고,  $\sigma$  띠의 비등방성은 띠끝머리 근처에서 작아지기 때문이다.

초전도 메커니즘을 알아보기 위한 기본적인 시험은 동위원소효과 실험이다. MgB<sub>2</sub>에서 B는 동위원소 효과를 상당히 많이 보여주지만 Mg에 대해서는 아주 작은 효과만을 보여준다. 동위원소효과 상수  $\alpha$ 는  $\alpha_i = \Delta \ln T_c / \Delta \ln M_i$  으로 정의되며,  $M_i$  는  $i$  성분의 원자량이다. 단원소 시스템에 대해 BCS 이론이 예측하는  $\alpha$ 는 0.5 인데, MgB<sub>2</sub>의 붕소 동위원소효과 상수  $\alpha_B$  는  $^{10}B - ^{11}B$  치환에 대해 ~0.26 이었고[6],  $\alpha_{Mg}$ 는  $^{24}Mg - ^{26}Mg$  치환에 대해 ~0.02에 불과했다[7]. 이것은 초전도가 포논 매커니즘에 의해서 실현된다는 것을 말하며, 특히 붕소 포논 모드가 중요하다는 것을 알 수 있다.

비열 연구에서 데바이 온도와 비열의 선형 계수가 각각  $\Theta_D = 750 \pm 30$  K,  $\gamma = 3 \pm 1$  mJ/mol K<sup>2</sup>으로 얻어졌다[6]. 터널링 분광 실험에서 초전도 간격(gap)  $\Delta$ 는 BCS 이론의 온도 의존성을 따르고[8], 5 meV ( $2\Delta \sim 3k_B T_c$ ) [8]에서 8 meV ( $2\Delta \sim 5k_B T_c$ ) [9]의 값을 가지는 것으로 보고되었다. 한편 약한 결합을 하고 있는 BCS 초전도체의 경우  $2\Delta \sim 3.5k_B T_c$ 이다. 그러므로 MgB<sub>2</sub>의 전자-포논 결합의 세기는 중간이나 강한 정도에 해당한다.

소결한 Mg<sup>10</sup>B<sub>2</sub> 알갱이의 자화측정 연구에서 얻은 열역학적 변수들을 보면, 침투길이가  $\lambda = 140$  nm, 결맞음길이가  $\xi_0 = 5.2$  nm, Ginzburg-Landau 변수가  $\kappa = 26$ , 그리고 절대영도에서의 윗임계자장이  $H_{c2}(T=0) = 12.5$  T

이었다[10]. 그러나 이 값들은 임의방향으로 섞인 MgB<sub>2</sub> 알갱이들로부터 얻은 것으로, 방향에 대해 평균된 자화를 바탕으로 한 결과임을 유의해야 한다. 만약 이 물질이 비등방성을 가지고 있다면 이 값들은 각 방향에 대해서 갱신되어야 한다.

이제 MgB<sub>2</sub> 응용의 잠재력에 대해 주의를 돌려보자. 다결정 MgB<sub>2</sub>의 자화 측정과 자화-광학 연구에서[9,11] 알갱이 사이의 결합력이 좋은 것으로 밝혀졌는데 이것은 응용할 때 중요한 요소이다. 이 경우 임계 전류 밀도는 알갱이 사이의 연결성보다는 자화 다발의 낫음 (flux pinning)에 의해 결정되며 대체로 높은 값을 보인다. 예를 들어, 다결정 시료에 대해 보고된 임계 전류 밀도는 20 K 이하의 낮은 온도와 1 테슬라의 자기장에서  $\sim 10^5 \text{ Acm}^{-2}$  정도로 높았다[9,11].

그림 3 (a) 는 소결된 Mg<sup>10</sup>B<sub>2</sub>의 자화 이력 현상을 나타내고 있다[10]. 각 온도에서 자장 증가 영역 (M<0)과 감소 영역 (M>0)이 다양한 범위의 자장에 걸쳐서 대칭을 이루고 있으며, 이것은 커다란 자화낫음을 의미한다. 이 두 자화 영역의 차이로부터 임계전류값  $J_c$  이 얻어진다. 그림 3 (b) 에서 보면,  $J_c$  값이 약한 자장에서는 초전도 전선으로 사용되는 Nb<sub>3</sub>Sn 의 값과 비슷할 정도로 크지만, 자장을 증가함에 따라 빠르게 감소하는 것을 볼 수 있는데[10,12] 이는 응용에 있어서 단점이 될 수 있다. 하지만 강원남 등[13,14]에 의해 만들어진 MgB<sub>2</sub> 박막의 자기 및 수송 특성에 대한 연구 결과는, 그림 4에서 보듯  $J_c$ 가 Nb<sub>3</sub>Sn의 값과 비슷하거나 오히려 클 수 있음을 보여주며 또한 5 테슬라까지 자기장을 높히더라도 급격하게 감소하지 않는다는 것을 알 수 있다. 엄 등도 MgB<sub>2</sub> 박막에서 유사한 높은  $J_c$ 를 얻었다[15]. 또한 수소원자 조사 (proton irradiation)를 통해 높은 자기장에서의  $J_c$ 를 향상시킬 수 있음이 확인되었다[16]. 이러한 결과들은 MgB<sub>2</sub>의 응용에 큰 기대를 걸게 한다. 이미 Jin 등이 1 T, 25 K에서  $J_c=3 \times 10^4 \text{ Acm}^{-2}$  값을 가지는 철제피복의 MgB<sub>2</sub> 전선의 실용화에 성공했다[17].

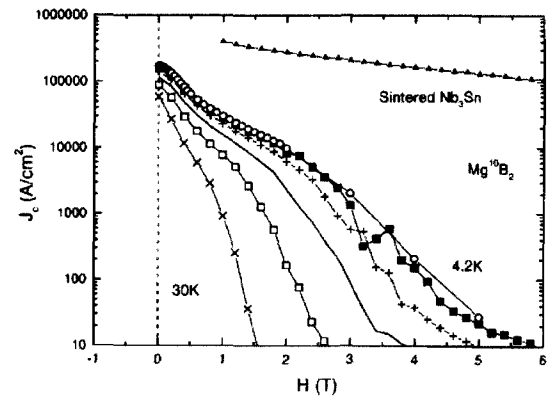
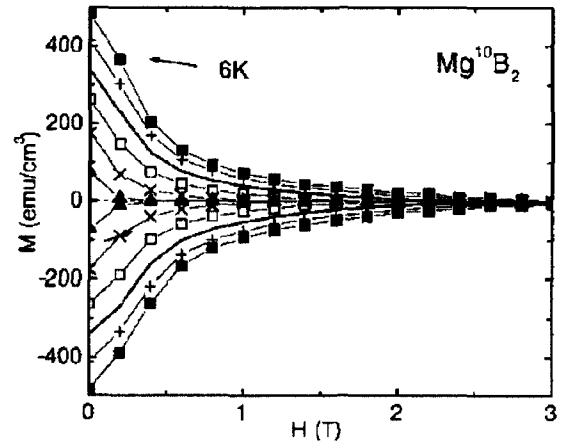


그림 3. a) 소결된 Mg<sup>10</sup>B<sub>2</sub>의 자화 이력 현상 b) 자장에 대한 임계 전류밀도

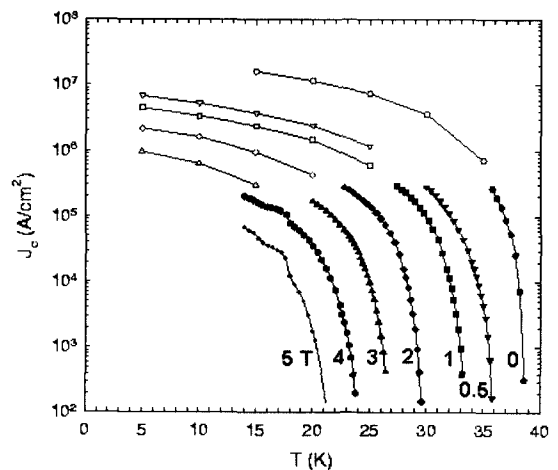


그림 4. MgB<sub>2</sub> 박막에서의 임계 전류밀도의 온도 의존성

이  $J_c$  값은 바로 전력 전송 케이블에 사용될

수 있을 정도로 충분히 높다. MgB<sub>2</sub> 물질을 이용한 초전도체 상용화의 혁명이, 과학자들의 소망 속에서가 아니라 이젠 현실로서 성큼 우리 앞에 다가서 있는 것이다.

참고문헌

[1] J. Akimitsu, in Proceedings of the Symposium on Transition Metal Oxides, Sendai, 10 January 2001.  
 [2] Jun Nagamatsu, Norimasa Nakagawa, Takahiro Muranaka, Yuji Zenitani, and Jun Akimitsu, Nature **410**, 63 (2001).  
 [3] J. Kortus, I. I. Mazin, K. D. Belashchenko, V. P. Antropov, and L. L. Boyer, Phy. Rev. Lett. **86**, 4656 (2001).  
 [4] J. M. An and W. E. Pickett, Phy. Rev. Lett. **86**, 4366 (2001).  
 [5] J. S. Slusky and N. Rogado, Nature **410**, 343 (2001).  
 [6] S. L. Bud'ko, G. Lapertot, C. Petrovic, C. E. Cunningham, N. Anderson, and P. C. Canfield, Phy. Rev. Lett. **86**, 1877 (2001).  
 [7] D. G. Hinks, H. Claus, and J. D. Jorgensen, Nature **411**, 457 (2001).  
 [8] G. Karapetrov, M. Iavarone, W. K. Kwok, G. W. Crabtree, and D. G. Hinks, Phy. Rev. Lett. **86**, 4374 (2001).  
 [9] Y. Bugoslavsky, G. K. Perkins X. Qi, L. F. Cohen, and A. D. Caplin, Nature **410**, 563 (2001).  
 [10] D. K. Finnemore, J. E. Ostenson, S. L. Bud'ko, G. Lapertot, and P. C. Canfield, Phy. Rev. Lett. **86**, 2420 (2001).  
 [11] D. C. Larbalestier and L. D. Cooley, Nature **410**, 186 (2001).  
 [12] Mun-Seog Kim, C. U. Jung, Min-Seok Park, S. Y. Lee, Kijoon H. P. Kim, W. N. Kang, and Sung-Ik Lee, Phy. Rev. B **64**, 012511 (2001).  
 [13] W. N. Kang, H.-J. Kim, E.-M. Choi, C. U. Jung, and S.-I. Lee, Science **292**, 1521 (2001).

[14] Hyeong-Jin Kim, W. N. Kang, Eun-Mi Choi, Mun-Seog Kim, Kijoon H. P. Kim, and Sung-Ik Lee, (to be published in Phys. Rev. Lett.).  
 [15] C. B. Eom, M. K. Lee, J. H. Choi, L. J. Belenky, X. Song, L. D. Cooley, M. T. Naus, S. Patnaik, J. Jiang, M. Rikel, A. Polyanskii, A. Gurevich, X. Y. Cai, S. D. Bu, S. E. Babcock, E. E. Hellstrom, D. C. Larbalestier, N. Rogado, K. A. Regan, M. A. Hayward, T. He, J. S. Slusky, K. Inumaru, M. K. Haas, and R. J. Cava, Nature **411**, 558 (2001).  
 [16] Y. Bugoslavsky, L. F. Cohen, G. K. Perkins, M. Polichetti, T. J. Tate, R. Gwilliam, and A. D. Caplin, Nature **411**, 561 (2001).  
 [17] S. Jin, H. Mavoori, C. Bower, and R. B. van Dover, Nature **411**, 563 (2001).

저자이력



이성익(李星翊)

1952년 6월30일 생, 1981년 서강대학교 졸업, 1985년 오하이오 주립 대학 물리학 박사, 1985-87년 오하이오주립대학 물성 연구소 박사 후 연구원, 1987-현재 포항공대 물리학과 교수, 1997-현재 초전도 창의과제 연구단 단장.



최재혁(崔宰赫)

1971년 9월 29일 생, 1994년 포항공과대학교 물리학과 졸업, 1996년 동 대학원 물리학과 졸업(이학석사), 2001년 동 대학원 고체물리 실험 전공(이학박사), 현재 포항공대 초전도 연구단 Post. Doc. 2001년 후기 졸업 예정.