

## 철기반 초전도체 소개

최 형 준  
연세대학교 물리학과

### 1. 서 론

철기반 초전도체는 2006년에 LaFePO에서 초전도성이 발견되면서[1] 시작되었는데 초전도 전이온도가 4 K에 불과하여 큰 주목을 받지 못하다가 2008년에 인(P) 대신 비소(As)를 사용한 LaFeAsO<sub>1-x</sub>Fx에서 26 K의 전이온도가 보고되면서[2] 세계적으로 활발히 연구되었다[3]. 철기반 초전도체는 중요한 구성 성분을 볼 때 철과 인 또는 비소가 결합한 층상 구조를 가지는 철 닉타이드(pnictide) 물질이 있으며, 철과 셀레늄(Se) 또는 텔레륨(Te)이 결합한 층상 구조를 가지는 철 칼코저나이드(chalcogenide) 물질이 있다. 이러한 물질들의 벌크 시료에서 발견된 초전도 전이 온도는 지금까지 약 55 K가 최고값이다[4].

철기반 초전도체는 Fe 자기 쌍극자의 반강자성(antiferromagnetism) 상태[5] 근처에서 초전도성이 발현되는 특징을 가지고 있고, 발견 초기의 이론연구[6]에서 전자-포논 상호작용이 전이온도를 설명할 수 없을 정도로 작다는 것이 보고 되어 기존의 BCS 이론이 아닌 다른 상호작용에 의해 초전도성이 발현되는 것으로 생각되고 있다. 철기반 초전도체를 좀더 자세히 분류하면, 철 닉타이드 계열 물질에는 LaFePO, LaFeAsO<sub>1-x</sub>Fx와 같이 4개의 성분이 중심이 되는 1111계열[1,2], Ba<sub>1-x</sub>KxFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>와 같이 3개의 성분이 중심이 되는 122계열[7], LiFeAs와 같이 3개의 성분이 1:1:1의 비율로 결합된 111계열[8], Sr<sub>4</sub>Sc<sub>2</sub>O<sub>6</sub>Fe<sub>2</sub>P<sub>2</sub> 등과 같은 42622계열[9]이 있으며, 철 칼코저나이드 계열 물질에는 FeSe, FeTe<sub>1-x</sub>Sex 등과 같은 11계열[10,11], KxFe<sub>2</sub>Se<sub>2</sub>와 같이 122 조성비를 가지는 122계열[12]이 있다.

이 글에서는 철기반 초전도체에 대해 밝혀진 물리적인 특성들과 국내 연구 현황 및 전망에 관하여 기술하고자 한다.

### 2. 철기반 초전도체의 원자 구조

철기반 초전도체는 철과 인, 비소, 셀레늄, 또는 텔레륨으로 구성된 원자층 구조를 공통으로 가지고 있다. 그림 1은 LaFeAsO의 원자구조이며, 철과 비소가 결합한 FeAs층과 란타늄(La)과 산소(O)가 결합한 LaO층이 교대로 반복되어 적층된 구조이다. FeAs층을 자세히 보면 Fe 원자들이 사각 격자를 이루어 평면으로 배열되고 As 원자가 Fe가 배열된 평면의 위 아래에 교대로 위치하여 한개의 As 원자가 4개의 Fe 원자와 결합함으로써 구조를 유지한다. 철 닉타이드에서는 FeAs층 또는 FeP층의 사이에 놓이는 물질에 따라 물질이 달라진다. BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>에서는 FeAs층 사이에 Ba 원자가 놓여있으며, LiFeAs는 FeAs층 사이에 Li 원자가 놓여있다. 한편, 철 칼코저나이드 물질인 FeSe에서는 FeSe층이 단순히 반복되어 적층된 구조이고, KxFe<sub>2</sub>Se<sub>2</sub>에서는 FeSe층 사이에 K 원자가 놓여진 구조이다.

철기반 초전도체의 구조에서 핵심적인 부분은 FeP, FeAs, FeSe, 또는 FeTe층이며, 이 층에 있는 자유전자들이 쌍을 이루어 초전도성이 발현된다.

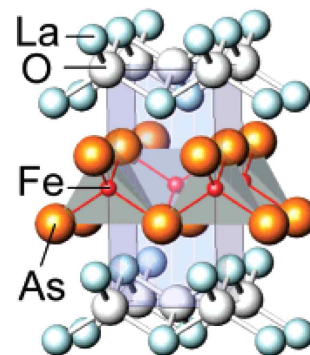


그림 1. 철기반 초전도체 LaFeAsO의 원자 구조. 그림 출처: Ref. 2: Y. Kamihara et al., J. Am. Chem. Soc. 130, 3296 (2008).

### 3. 상평형도(phase diagram)

철기반 초전도체는 일부 예외가 있지만 대부분의 물질들이 그림 2와 같이 도핑을 하지 않은 상태에서 반강자성을 가지며, 도핑을 함에 따라 반강자성이 사라지고 초전도성이 발현된다. 그림 2와 같이 반강자성 부근에서 초전도성이 발현되는 것은 구리산화물계 초전도체와 공통된 성질이다. 그러나 도핑이 없을 때 구리산화물계 초전도체가 반강자성 부도체인 것과 달리, 철기반 초전도체는 도핑이 없을 때 반강자성 도체이다.

도핑 없는 철기반 초전도체가 도체 상태를 가지는 것은 철기반 초전도체에서 전자 사이의 상관성(correlation)이 구리산화물에서처럼 크지 않다는 것을 의미한다. 이는 전자들이 페르미 액체에 가까운 상태에 있다는 것을 뜻하며, 밀도 범함수 이론(density functional theory, DFT)에 근거한 전통적인 전자구조계산 방법론을 철기반 초전도체에 적용하여 의미있는 계산 결과를 도출할 수 있게 한다.

도핑 없는 FeAs계 물질의 반강자성은 그림 3(c)와 같은 홀띠(single stripe)형 자기 쌍극자 배열을 가지며[5], 이론적인 물성계산결과도 이와 잘 일치한다. 한편, FeTe의 경우에는 그림 3(d)와 같은 겹띠(double stripe)형 자기 쌍극자 배열을 가

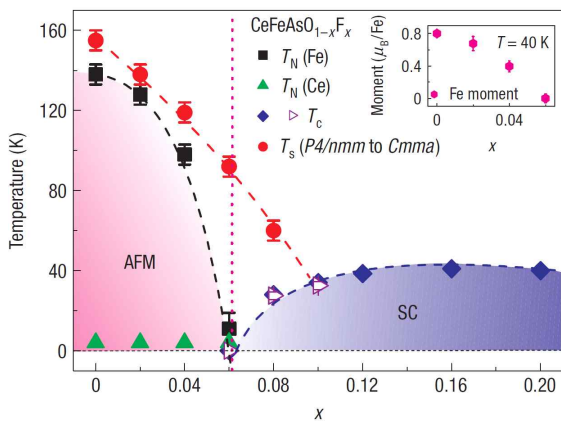


그림 2. CeFeAsO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>의 상평형도. AFM은 반강자상태를 뜻하고, SC는 초전도상태를 뜻한다. 가로축의 x는 불소(F)의 함량이다. 그림 출처: Ref. 13: J. Zhao et al., Nature Mater. 7, 953 (2008).

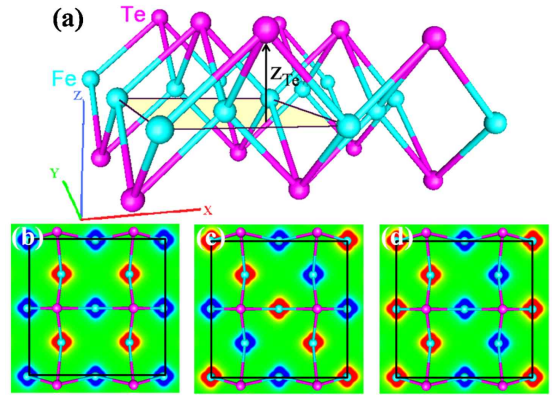


그림 3. FeTe의 반강자성. (a) FeTe의 원자구조. (b) Fe층에서 Fe 자기 쌍극자의 체커보드형 배열 모형, (c) 홀띠(single stripe)형 배열 모형, (d) 겹띠(double stripe)형 배열 모형. (b)-(d)에서 빨간색과 파란색은 서로 다른 방향의 Fe 자기 쌍극자를 나타낸다. 그림 출처: Ref. 14: C.-Y. Moon and H. J. Choi, Phys. Rev. Lett. 104, 057003 (2010).

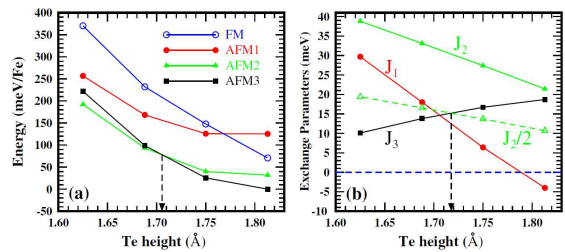


그림 4. (a) Te의 높이와 반강자성 배열 차이에 따른 FeTe의 에너지의 변화. (b) Fe 자기쌍극자간의 상호작용 에너지의 Te 높이의 의존성. 그림 출처: Ref. 14: C.-Y. Moon and H. J. Choi, Phys. Rev. Lett. 104, 057003 (2010).

지는데[15,16], 이는 그림 3(a)에서와 같이 철 평면으로부터 Te 원자가 떨어져 있는 높이가 FeAs계 물질에서 철 평면으로부터 As 원자가 떨어져 있는 높이보다 상당히 크기 때문임이 이론적으로 밝혀졌다(그림 4).

### 4. 전자 구조

철기반 초전도체의 전자구조는 밀도 범함수 이론으로 비교적 잘 기술되고 있으며

[17,18,19], 밀도 범함수 이론과 동적 평균 장 근사 이론(Dynamic Mean Field Theory, DMFT)을 결합함으로써 보다 정

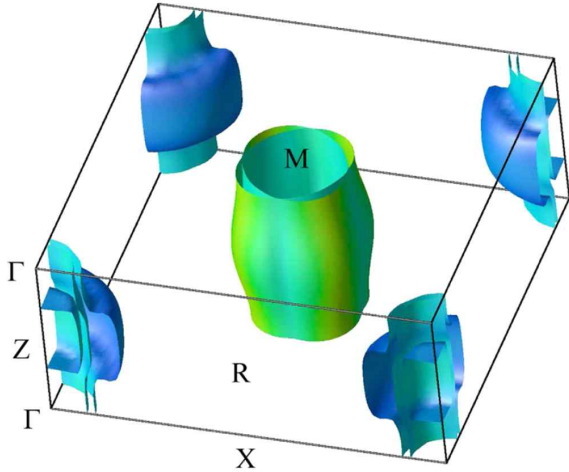


그림 5. LaFeAsO의 페르미 표면. 그림 출처: Ref: 18. D. J. Singh and M.-H. Du, Phys. Rev. Lett. 100, 237003 (2008).

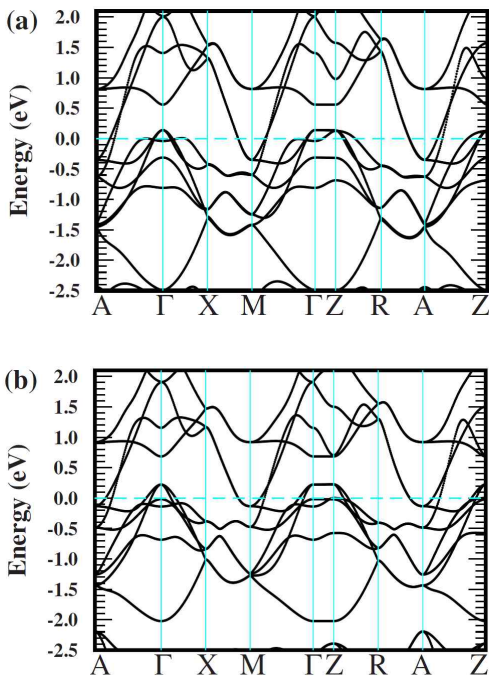


그림 6. (a) LaFePO의 밴드구조. (b) LaFePO의 밴드구조. 그림 출처: Ref. 19: C.-Y. Moon, S. Y. Park, and H. J. Choi, Phys. Rev. B 78, 212507 (2008).

밀한 기술이 가능하다[20]. 자성을 띠지 않는 경우에 철기반 초전도체의 페르미 (Fermi) 표면 구조와 밴드 구조는 각각 그림 5와 그림 6과 같다. 중요한 특징은  $k=0$ 인  $\Gamma$ 점 주위에 홀(hole)형 밴드가 있고 M점 주위에 전자(electron)형 밴드가 있다는 것이며, Fe의 층상 구조에 있는 전자들이 페르미 에너지 부근에 있기 때문에 전자 구조가 2차원적 특징을 가지게 되어 페르미 표면의 모양이 실린더 형태를 하고 있다.  $\Gamma$ 점 부근의 홀형 페르미 표면과 M점 부근의 전자형 페르미 표면을 연결하는 네스팅(nesting) 파수 벡터(wave vector)가 존재하므로 페르미 표면 네스팅 효과와 반강자성의 관계에 대해서도 연구가 많이 수행되었다.

### 5. 초전도 에너지 갭

페르미 표면이 여러 개로 나뉘어진 물질에서 초전도성이 나타날 때는 초전도 에너지 갭이 페르미 표면의 각 부분에서 다른 값을 가질 수 있다. 철기반 초전도체는 앞에서 기술한 바와 같이 여러 개의 기둥형 페르미 표면을 가지고 있으며, 초전도 상태가 되면 초전도 에너지 갭의 크기가 그림 7과 같이

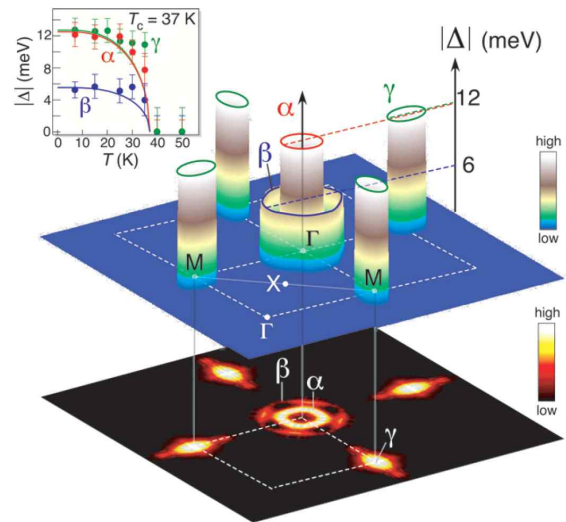


그림 7. 15 K의 온도에서 각분해광전자분광법(ARPES)로 측정된 Ba0.6K0.4Fe2As2의 초전도 에너지 갭. 왼쪽 상단의 inset은 초전도 에너지 갭의 온도 의존성. 그림 출처: Ref. 21: H. Ding et al., Europhys. Lett. 83, 47001 (2008).

페르미 표면에 따라 다른 값이 되는 것이 각 분해 광전자 분광법 (ARPES)으로 측정되었다[21]. 전자-포논 상호작용에 의해 초전도 현상이 발현될 때는 초전도 에너지 갭이 페르미 표면 전체에서 동일한 부호를 가져야 하지만, 이와 다른 상호작용의 경우에는 초전도 에너지 갭의 부호가 페르미 표면의 각 부분에서 다를 수 있다. 철기반 초전도체의 경우에는 초전도 에너지 갭이  $\Gamma$ 점 부근의 페르미 표면과 M점 부근의 페르미 표면에서 다른 부호를 가진다는  $S_{\pm}$  이론[22]이 활발히 논의되고 있다.

## 6. 국내 연구 현황 및 전망

철기반 초전도체에 대한 연구는 국내에서도 매우 활발히 진행되어 왔다. 이론 및 계산 분야에서는 고려대학교 이관우 교수 연구팀, 성균관대학교 최한용 교수 연구팀, 전남대학교 방윤규 교수 연구팀, 포스텍 심지훈 교수 연구팀, 본 저자의 연구팀이 연구를 수행해 왔으며, 시료 제작 및 측정 분야에서는 광주과학기술원 조병기 교수 연구팀, 대구경북과학기술원 권용성 교수 연구팀, 서울대학교 김기훈 교수 연구팀, 성균관대학교 박두선 교수 연구팀, 연세대학교 김창영 교수 연구팀, 포스텍 김준성 교수 연구팀이 연구를 수행해 왔다.

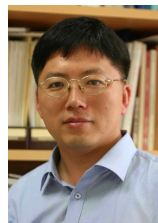
철기반 초전도체에 대한 연구는 향상된 품질의 시료를 사용한 정밀 측정과 이론적 발전을 필요로 하고 있다. 철기반 초전도체의 초전도성 원인을 규명하는 것은 기존의 BCS 이론을 뛰어 넘는 고체물리학의 새로운 장을 여는 중요한 연구 성과가 될 것이며, 구리산화물계 고온 초전도성의 이해에 한 걸음 더 다가가는 것이 될 것이다.

## 참고문헌

[1] Y. Kamihara et al., J. Am. Chem. Soc. 128, 10012 (2006).  
 [2] Y. Kamihara et al., J. Am. Chem. Soc. 130, 3296 (2008).  
 [3] Review papers: K. Ishida, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 78, 062001 (2009), H. Oh et al., Progress in Superconductivity 13, 65 (2011); arXiv:1201.0237.

[4] Z.-A. Ren et al., Chin. Phys. Lett. 25, 2215 (2008).  
 [5] C. de la Cruz et al., Nature 453, 899 (2008).  
 [6] L. Boeri et al., Phys. Rev. Lett. 101, 026403 (2008).  
 [7] M. Rotter, M. Tegel, and D. Johrendt, Phys. Rev. Lett. 101, 107006 (2008).  
 [8] X. C. Wang et al., Solid State Commun. 148, 538 (2008).  
 [9] H. Ogino et al., Supercond. Sci. Technol. 22, 075008 (2009).  
 [10] F.-C. Hsu et al., Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 105, 14262 (2008).  
 [11] B. C. Sales et al., Phys. Rev. B 79, 094521 (2009).  
 [12] J. Guo et al., Phys. Rev. B 82, 180520 (2010).  
 [13] J. Zhao et al., Nature Mater. 7, 953 (2008).  
 [14] C.-Y. Moon and H. J. Choi, Phys. Rev. Lett. 104, 057003 (2010).  
 [15] F. Ma et al., Phys. Rev. Lett. 102, 177003 (2009).  
 [16] S. Li et al., Phys. Rev. B 79, 054503 (2009).  
 [17] S. Lebègue, Phys. Rev. B 75, 035110 (2007).  
 [18] D. J. Singh and M.-H. Du, Phys. Rev. Lett. 100, 237003 (2008).  
 [19] C.-Y. Moon, S. Y. Park, and H. J. Choi, Phys. Rev. B 78, 212507 (2008).  
 [20] G. Lee et al., Phys. Rev. Lett. 109, 177001 (2012).  
 [21] H. Ding et al., Europhys. Lett. 83, 47001 (2008).  
 [22] I. I. Mazin et al., Phys. Rev. Lett. 101, 057003 (2008).

## 저자이력



### 최형준(崔炯俊)

1992년 서울대학교 물리학과 학사, 1994년 서울대학교 물리학과 석사, 2000년 서울대학교 물리학과 박사, 2000-2003년 미국 University of California, Berkeley, Miller Research Fellow, 2003-2005년 고등과학원 교수, 2005년-현재 연세대학교 물리학과 교수.