응집물질 연구를 위한 고압연구장치 소개

DOI: 10.3938/PhiT.27.013

민병훈·장동현·Dilipkumar Bhoi·김찬희·서예환·남기완·이윤한·Keizo Murata·김기훈

Introduction to a High-Pressure Apparatus for Condensed Matter Research

Byeong Hun MIN, Dong Hyun JANG, Dilipkumar BHOI, Chanhee KIM, Yeahan SUR, Ki Wan NAM, Yoon Han LEE, Keizo MURATA and Kee Hoon KIM

High pressure has become an important physical parameter in condensed matter physics as various novel physical phenomena have been discovered. Motivated by such progress, we have built four different systems for applying pressure on the sample from 0.2 to 60 GPa for measurements of transport and magnetic properties under high pressure: piston cylinder cells, a cubic anvil cell system, a bridgeman cell, and diamond anvil cells. All the cells can be installed in conventional cryostats such as a PPMS™ and a dilution refrigerator. Using those pressure cells, we can investigate such topics as the insulator-metal transition in correlated electron systems, the interplay between the charge density wave and superconductivity in chalcogenides, and the superconducting dome in Fe-based superconductors.

저자약력

민병훈 박사는 성균관대학교 박사(2011)로 서울대학교 첨단복합물질상태연구단 박사후연구원을 지낸 뒤 현재 기초과학연구원(IBS) 연구위원으로 재직하고 있다.

장동현 박사는 서울대학교 박사(2018)로 현재 삼성전자에 재직하고 있다.

Dilipkumar Bhoi 박사는 인도 Univ. of Calcutta 박사(2014)로 현재 서울대학교 첨단복합물질상태연구단에 박사후연구원으로 재직하고 있다.

김찬희, 서예환, 남기완, 이윤한은 첨단복합물질상태연구단에 박사과정학생으로 연구하고 있다.

Keizo Murata 교수는 일본 Tokyo Univ. 박사(1977)로 일본 Osaka City Univ. 교수로 정년 퇴직(2015) 후, 첨단복합물질상태연구단에 초빙교수로 재직하고 있다.

김기훈 교수는 서울대학교 박사(1998)로 미국 Rutgers Univ.(1998-2001)와 Los Alamos 국립연구소에서 연구원(2001-2003)을 지낸 뒤 2004년부터 서울대학교 물리학과에 교수로 재직하고 있다.(khkim@phy.snu.ac.kr)

들어가는 말

고체의 물리적 특성 및 상전이를 조절하며 연구하기 위한 방법으로써 압력 변수가 자주 사용되어오고 있다. 가장 쉬운 예로 전자들이 움직이지 않는 부도체에 압력을 가했을 때, 전자들이 자유롭게 움직이는 전도체를 만들 수 있다. 가령 단일 원자 부도체(3-5족)에 압력을 가한다면, 다이렉트 밴드(direct band) 갭(gap)을 가진 부도체의 에너지 갭을 10-15 meV/kbar로 줄어들게 하며, 궁극적으로 금속 성질을 얻을 수 있다.^[1] 또한, 압력을 이용하여 물질의 다양한 자성 상전이 및 대표적으로 잘 알려진 금속에서 초전도체로의 상전이 등을 유도할 수 있음이 실험적으로 알려져 있다.

일반적으로 물질이 상전이를 일으키는 압력범위는 물질의 특성에 크게 의존하여, 대략 0.1 GPa의 작은 압력에서 시작하여 인간이 가할 수 있는 한계 압력치인 600 GPa까지, 그 범위가 매우 넓다. 자연스럽게 광범위한 압력을 단일압력장치로 구축하는 것은 거의 불가능하게 된다. 이로 인해 다양한 압력 장치가 역사적으로 발전되어 오고 있다. 고체의 성질을 연구하기 위한 것으로 국한되기는 하나, 현재까지 알려진 압력장치 중에서 본 연구실에서 현재 이용하고 있는 대표적인 압력 장치를 그림 1에 보이는 바와 같이 대략 4 종류의 압력 장치로 정리하였다.

피스톤 실린더 셀(piston cylinder cell)은 최대 압력이 4 GPa로써 샘플공간이 대략 직경 3 mm 높이 15 mm의 원기둥으로 이루어져 있다. 시편 크기가 mm 크기의 실험이 가능하며 압력을 전달하는 매질인 기름으로 인해 등방한(isotropic) 압력이 가해진다. 최대 압력이 8 GPa인 브리지만 앤빌 셀(Bridgeman Anvil Cell)은 시료 장착 공간이 상대적으로 넓고 시료 장착이 쉬운 특성이 있다. 큐빅 앤빌 셀(Cubic Anvil Cell)의 최대 압력은 10-12 GPa이며, 가장 큰 장점은 아주 등방한 압력을 가할 수 있다는 점이다. 다이아몬드 압력 셀은 최대압력 600 GPa까지 가능한 셀이 개발되어 있음이 알려져 있으나, 실험실에서는

REFERENCES

- [1] W. Paul, in *High pressure in Semiconductor Physics I*, edited by T. Suski and W. Paul (Academic, New York, 1998).

Fig. 1. Various pressure experimental apparatus in the laboratory of Center for Novel States of Complex Materials Research (CeNSCMR).

Fig. 2. Schematic of the improved pressure cell and picture of the cell attached to the adapter for the PPMS™.

100 GPa까지 설계하였으며, 등방도는 떨어지는 단점이 있다.

현재 전 세계적으로 압력 셀과 저온 유지장치(예: Physical Property Measurement System, Dilution Refrigerator 등)를 함께 결합하여 응집물질의 고압상태에서 일어나는 다양한 상전이 현상에 대해서 연구가 이루어지고 있다. 현재 본 연구실의 경우, 온도 범위 20 mK–700 K에서 실험이 가능하며, 최대 자기장 14 Tesla 환경에서 실험을 진행하고 있다.

본 글에서는 이러한 압력 셀들의 대략적인 특징들을 간단히 소개하고, 이와 관련한 과학적 성과를 최근 결과를 중심으로 소개하고자 한다.

피스톤 실린더 셀(Piston Cylinder Cell)

압력을 이용한 물성 및 상전이 현상 연구에 가장 많이 사용되는 도구이다. 비교적 다른 압력 셀에 비해서 제작이 용이하며, 다양한 저온 유지 장치에 장착하기 용이하고 비교적 큰 시편 크기로 인해 실질적인 실험이 용이하다.

저온, 자기장 내에서 피스톤 셀을 이용한 실험을 진행할 때,

Fig. 3. Resistance of strain gauge (s.g.) indicating solidification pressures for Daphne 7373 and Daphne 7474 oils.

셀의 구조를 이루고 있는 물질의 성질이 매우 중요하다. 두 가지의 특성을 만족해야 하는데, 첫째는 최대 4 GPa를 견딜 수 있는 재질이어야 하며, 다음은 자성이 없어야 한다. 압력에 강하면서 비자성인 물질은 현재까지 NiCrAl^[2]이 가장 좋은 재료로 알려져 있으나, 고가이면서 구하기가 어렵다. 반면에 MP35 금속은 NiCrAl보다 조금 강한 자성을 띠지만, 4 GPa에서 사용하기에 충분한 강도를 가지고 있어서 많이 이용되고 있다. 본 연구실에서 지난 2008년부터 수년간 피스톤 셀 개발을 진행해 왔으며, 현재는 4 GPa까지 비교적 안정된 실험을 진행하고 있다. 중요한 개선은 다음의 두 가지로 요약할 수 있다. 첫째는 셀의 몸체를 이중으로 구조를 개선하였으며, 내측 몸체의 경우는 NiCrAl를 이용하여 자기장하에서도 정밀한 실험이 가능하다. 두 번째로는 기존의 셀에서 샘플 공간을 위한 오브튜레이터(obturator)의 구조를 크게 개선하여, 최대 4 GPa에서도 안정된 압력이 유지되게 만들었다. 보통 샘플 공간을 위한 테프론 실린더를 사용하는데, 그림 2에서와 같이 오브튜레이터에 테프론을 장착 후 링을 사용하여 테프론과 오브튜레이터를 밀착시킴으로써 내부의 압력이 4 GPa까지 변하지 않는 구조로 개선하였다.

REFERENCES

- [2] Yoshiya Uwatoko, Sakae Todo, Kazuhiro Ueda, Ahimusa Uchida, Masashi Kosaka, Nobuo Mori and Takehiko Matsumoto, J. Phys.: Condens. Matter **14**, 44 (2002).

Fig. 4. (a) Inside anvils for the cubic anvil cell apparatus. (b) Pressure calibration of Bi with respect to the load in the cubic anvil cell.

압력 측정 시 고려해야 할 중요한 요소 중 하나는 압력 전달 매개체(medium)이다. 샘플을 감싸는 압력 전달 매개체가 액체일 때는 시료에 등방압을 가하지만, 미디움이 압력에 의해 고체가 될 경우 압력의 등방성이 급격히 떨어져 시료의 변형을 야기하게 된다. 이를 개선하기 위하여 고체화 압력이 높은 액체가 많이 사용되는데, 현재는 상온 고체화 압력이 2.2 GPa인 Daphne 7373, 3.7 GPa인 Daphne 7474,^[3] 4.0 GPa인 Daphne 7575 기름이 널리 사용되고 있다(그림 3).

큐빅 압력 실험 장치(Cubic Anvil Press)

큐빅 앤빌 셀의 경우에는 압력의 등방성을 유지하면서 압력 범위를 10 GPa까지 측정할 수 있는 장비로, 텅스텐 카바이드(WC) 앤빌을 6방향으로 동시에 누르기 때문에 등방압을 가할 수 있다(그림 4(a)). 큐빅 셀의 특이한 점은, 앤빌로 쓰는 WC 재질이 도체이기 때문에 앤빌 자체를 도선으로 사용하여 저항을 측정한다는 점이다. 자세한 구조는 사진에 나와 있는 바와 같이, 테프론 통 안에 시료를 넣고, 그 주위를 정육면체 모양의 파이로플라이트(pyrophyllite) 개스킷(gasket)으로 감싸는 형태이다. 전기 저항은 이 개스킷 사이로 4개의 금선을 뺀 후, 금속성 앤빌에 연결하여 측정한다.

큐빅 앤빌 셀의 또 다른 장점은 압력 피드백이 실시간으로

이루어진다는 점이다. 다른 클램프 타입 셀들은 온도가 내려가면 압력도 같이 내려가는데, 큐빅 앤빌 셀은 압력 피드백을 실시간으로 해주기 때문에 모든 온도구간에서 같은 압력에서의 측정을 할 수 있다. 큐빅 셀의 압력 교정은 그림 4(b)와 같이 Bi 금속의 저항을 측정하여 하는데, Bi 금속은 10 GPa 이내에 1차 상전이 지점이 3개가 있어 이를 알려진 압력과 비교하여 교정한다.^[4] 압력이 안정적으로 잘 구현되기 위해서는 파이로플라이트 개스킷 내부에 들어가는 실린더 형태의 테프론셀의 크기가 중요하다. 3 mm 길이의 테프론셀을 이용하여 생겨난 압력 구현의 불안정함으로 많은 초기 실패를 경험하였다. 이후 역학계의 전산 모사를 이용하여 2 mm 길이로 테프론셀의 크기가 적절함을 찾아내고, 이후 압력을 안정적으로 구현하였다.

다이아몬드 압력 셀

다이아몬드 앤빌 셀(Diamond Anvil Cell, DAC)은 세상에서 가장 단단한 물질인 다이아몬드를 모루로 사용하는 압력 발생 장치로써 현존하는 압력 발생 장치들 중 가장 높은 정적 압력을 시료에 인가할 수 있는 장치이다. DAC에서는 다이아몬드가 투명하다는 특성으로 인해 고압하에서의 시료의 광학적 물성을 측정할 수 있으며, 셀의 구조에 따라 시료의 고압하에서의 전기적 특성 및 자기적 특성 또한 측정 가능하다.

DAC는 대칭적으로 배치된 매우 작은 큐렛(culet) 크기(직경 수백~수십 μm)의 두 다이아몬드 모루와 하중 인가 및 유지 구조물로 구성되어 있으며, 다이아몬드 모루의 큐렛의 크기에 따라 수십 GPa에서 수백 GPa까지의 압력을 인가할 수 있다. 과거에는 다이아몬드 모루 정렬을 위한 구조물도 포함되어 있었으나, 최근에는 기계 공작 기술이 발전하여 다이아몬드를 놓는 자리를 최대한 평평하고 평행하게 만들고 모루 정렬을 위한 별도의 장치는 달지 않는 추세이다. 그림 5(a)는 DAC에 나사를 조여 하중을 인가하고 유지하는 DAC의 예시이다.

DAC에 시료를 넣을 때는 시료와 압력 전달 물질이 새어나가지 않도록 개스킷(gasket)을 넣고, 개스킷의 구멍 안에 압력 전달 물질을 채운 뒤 그 속에 내부 압력 측정을 위한 루비와 시료를 넣어준다. 이때 안정적인 압력 인가를 위해서 개스킷이 매우 중요한데 너무 무른 물질을 사용할 경우 압력이 올라가면 개스킷

REFERENCES

- [3] Keozhi Murata, Keiichi Yokogawa, Harukazu Yoshino, Stefan Klotz, Pascal Munsch, Akinori Irizawa, Mototsugu Nishiyama, Kenzo Iizuka, Takao Nanba, Tahei Okada, Yoshitaka Shirga and Shoji Aoyama, Rev. Sci. Instrum. **79**, 085101 (2008).
- [4] Jiro Osugi, Kiyoshi Shimizu, Kazuo Inoue and Kazuo Yasunami, The Review of Physical Chemistry of Japan **34**, 1 (1964).

Fig. 5. (a) Schematic diagram of the diamond anvil cell and the picture for a real diamond anvil cell. (b) Pressure measurement using the peak shift of ruby photoluminescence inside the diamond anvil cell.

이 시료와 압력 전달 물질을 가둬 두지 못하고 밀려나서 더 이상 압력을 가할 수 없다. 일반적으로 사용하는 개스킷은 BeCu, 스테인리스 스틸, 레늄 등을 사용한 금속 개스킷이다. DAC에서의 전하 수송 실험의 경우에는 도전과 금속 개스킷 사이의 합선으로 금속개스킷을 사용하기 힘들어 입방정 질화붕소 가루, 다이아몬드 가루 등 단단한 절연체 물질로 개스킷을 만들고, 그 바깥을 금속 개스킷으로 보강하여 사용한다. DAC에서 사용하기 위한 개스킷 제작에는 두 가지 과정이 필요한데 실제 실험 전 개스킷에만 먼저 압력을 인가하여 실제 실험 시 개스킷의 변형을 최소화하는 전사(pre-indenting) 과정과 개스킷에 시료와 압력 전달 물질을 넣기 위한 구멍을 뚫는 과정이다. 이 중 개스킷에 구멍을 뚫는 과정이 어려운데 반지름 수십 μm 의 구멍을 정확한 크기로 정확히 중심에 뚫어야 하기 때문이다. 개스킷에 구멍을 뚫는 방법으로는 마이크로드릴로 기계적으로 뚫는 방법, 방전 가공을 이용하여 뚫는 방법, 레이저를 이용하여 뚫는 방법 등이 있다. 이 중에서 레이저 드릴링은 정밀성 입장에서 우월하며 특히 절연체 개스킷에 정밀하게 구멍을 뚫을 때 필수적인 기술이다(그림 6).

DAC에서 사용하는 압력 전달 물질은 고체, 액체, 기체로 분류할 수 있는데 일반적으로 고체에서 기체로 갈수록 등방성이 좋아진다. 고체 압력 전달 물질로는 NaCl 등의 무른 고체 물질이 사용되며, 흐르거나 하지 않는 고체의 특성상 다루기 쉽다는 장점이 있지만 액체나 기체 압력 전달 물질에 비해 등방압성이 좋지 않다

Fig. 6. Laser drilling system for making a hole on a gasket.

는 단점이 있다. 액체 압력 전달 물질로는 4:1 메탄올:에탄올, 실리콘 기름, Daphne oil 등이 사용되며 보통 10 GPa 이하의 압력에서 고체화되지만 고체화되기 이전에는 등방압을 유지하고 고체화된 이후에도 고체 압력 전달 물질보다 나은 등방압성을 보인다. 기체 압력 전달 물질로는 헬륨, 네온, 아르곤 등의 비활성 기체가 사용되며, 수십 GPa 압력에서도 등방압이 유지되지만 압력에 따른 부피 변화가 심하고 쉽게 날아가버리기에 다루기 어렵다.^[5]

DAC에서 셀 내부의 압력을 측정하는 방법으로 일반적으로 사용하는 것은 루비의 형광의 피크의 압력에 따른 변화를 이용하는 것이다. 아래의 식은 루비의 형광의 피크의 변화로부터 셀 내부의 압력을 구하는 식이다. (λ_0 는 상압에서의 루비의 형광의 피크, $\Delta\lambda$ 는 압력에 따른 루비의 형광의 피크의 변화량)^[6] 그림 5(b)는 본 연구실에 측정한 루비 형광 피크와 압력 변화에 대한 측정 결과이다.

$$P = \frac{A}{B} \left[\left(1 + \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \right)^B - 1 \right] \quad (A = 19.04, B = 7.665)$$

REFERENCES

- [5] M. I. Eremets, *High Pressure Experimental Methods* (Oxford University Press, Oxford, 1996).
- [6] H. K. Mao, J. Xu and P. M. Bell, *J. Geophys. Res.* **91**, 4673 (1986).

Fig. 7. Pressure induced electronic phase diagram of the single crystal $\text{Pd}_{0.06}\text{TaSe}_2$.

고압셀을 이용한 실험 결과

1. 압력으로 조절된 전하밀도파 상태와 초전도 상태의 상호작용

초전도 물질 중 하나인 2H-TaSe_2 에서는, 압력을 가할 경우 초전도 전이 온도가 증가하는데, 이는 압력이 초전도와 경쟁하는 비결맞음 전하밀도파(ICDW)와 결맞음 전하밀도파(CCDW) 상을 억제시켜 주기 때문이다. 본 연구단에서는 이 물질의 초전도 전이온도를 높이기 위하여, 첫째로, 2H-TaSe_2 물질 사이에 Pd 이온을 끼워 넣기 하여 초전도 전이온도를 0.14 K에서부터 3.3 K로 높인 바 있다.^[7] 초전도 온도를 더욱 높이기 위하여, 이온의 첨가정도 $x = 0.06$ 인 단결정 Pd_xTaSe_2 에 압력을 가하여 상평형도를 탐구하였다(그림 7). 그 결과, 압력에 따라 전하밀도파 상이 완전히 억제됨을 관찰하였고, 이에 따라 초전도 전이온도를 7.35 K로 50배 이상 증가시키는 데 성공하였다.

2. 준 일차원 유기전도체의 금속-비금속 상전이

강상관전자계에서, 전자 간의 쿨롱 반발력(Coulomb repulsion) U 와 운동에너지 W 의 비 U/W 에 따라 물질은 금속과 절연체로 나뉜다.^[8] 여러 매개변수(도핑, 압력 등)를 통한 U/W 의 조정은 금속-절연체 상전이(metal-insulator transition, MIT)가 나타난다.

금속-절연체 상전이에서, 양자임계점이 공존영역에서의 1차 상전이 현상에 의해 가려짐으로써 절대영도에서의 양자임계점의 측정이 방해 받는다. 그러나 $T_c < T \ll U$, W 인 조건하에서는 유한한 온도에서도 양자임계현상이 나타날 수 있음이 2011년 제시되었다.^[10] 이어 준 이차원 유기 전도체 conductors $\kappa-(\text{ET})_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$, $\kappa-(\text{ET})_2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Cl}$ 와 $\text{EtMe}_3\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ 에서 유한한 온도에서의 양자임계현상을 관측했음이 보고된 바 있다.^[11] 양자임계현상은 계의 유니버설리티 클래스(Universality class)와 관계되는 특정한 임계지수(critical exponent)들의 존재와 임계지수 사이의 관계식이 성립하는데, 삼차원 모트 시스템

Fig. 8. The resistivities versus temperature (left) and the conductivity versus pressure plot(right) of the quasi one dimensional organic conductor $[(\text{S,S})\text{-DM-MeDH-TTP}]_2\text{AsF}_6$.

Fig. 9. Temperature pressure phase diagrams of quasi 1D organic conductor $[(\text{S,S})\text{-DM-MeDH-TTP}]_2\text{AsF}_6$.

에서 발견된 임계지수 β , γ , δ 가 Widom's identity라 불리는 관계식 $\gamma = \beta(\delta - 1)$ 을 만족함이 보고되었고,^[8] 이어 준이차원 유기 전도체^[9]에서도 Widom's identity가 만족함이 보고된 바 있다. 모트 절연체의 이해를 위한 압력 연구들은 이처럼 많이 진행되고 있지만 대부분 삼차원 및 준이차원물질계에서의 물성 측정에 집중되어 있다. 그에 비해 준-일차원 물질의 압력에 대한 임계현상에 대한 연구는 아직 미진한 상황이다.

따라서 본 연구단에서는 준 일차원 유기 전도체(quasi-one dimensional organic conductor) $[(\text{S,S})\text{-DM-MeDH-TTP}]_2\text{AsF}_6$ 의 압력에 따른 전도성의 변화를 측정하였다. 특히, 일정한 등방압을 제공하는 큐빅 앤빌셀을 이용하여 저항-온도 그래프와

REFERENCES

- [7] D. Bhoi, S. Khim, W. Nam, B. S. Lee, Chanhee Kim, B.-G. Jeon, B. H. Min, S. Park and Kee Hoon Kim, Sci. Rep. **6**, 24068 (2016).
- [8] P. Limelette, A. Georges, D. Jerome, P. Wzietek, P. Metcalf and J. M. Honig, Science **302**, 3 (2003).
- [9] F. Kagawa, K. Miyagawa and K. Kanoda, Nature **436**, 534 (2005).
- [10] H. Terletska, J. Vučičević, D. Tanasković and V. Dobrosavljević, Phys. Rev. Lett. **107**, 026401 (2011).
- [11] T. Furukawa, K. Miyagawa, H. Taniguchi, R. Kato and K. Kanoda, Nature Physics **11**, 221 (2015).

저항-압력 데이터를 얻었고, 이를 분석하여 금속-절연체 상전이 현상의 관측 및 이를 이용하여 임계지수와 양자임계점의 위치에 대한 분석을 진행하였다.

그림 8에서 보인 바와 같이 특정 온도 및 압력 사이에서 물질이 금속의 성질을 나타내게 된다. 그러나 1차 금속-절연체 상전이를 관측하지는 못하였고, 이는 이 물질에 강한 요동이 있음을 의미한다. 같은 이유로 $d\sigma/dP$ 가 34.4 K에서 최대가 됨을 확인할 수 있었으나 2D의 경우와 다르게 발산하지 않음을 볼 수 있고, 이 또한 이 계에서 1차 상전이 현상이 없음을 의미한다. 1차 상전이 온도 T_c 를 정의하지 못했으나 우리는 다른 데이터 분석을 통하여 임계지수를 얻을 수 있었다. 그 결과 그림 9에서 정리한 대로, 임계지수가 Widom's identity를 잘 따르는 것을 확인할 수 있었지만, 임계지수는 2차원계와 마찬가지로 매우 비정상적인 값을 보여주고 있었다.

3. 압력하에서 양자상전이가 발현되는 $\text{Ca}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{FeAs}_2$

철계 초전도체는 스핀, 궤도(orbit)/네마틱(nematic) 자유도 사이의 복잡한 상호작용으로 인하여 화학적 도핑, 그리고 압력의 함수로 한 아주 풍부한 상도표를 보여준다.^[12] 최근에는 La 도핑된 CaFeAs_2 계 초전도체에서 아주 높은 초전도 전이 온도 ($T_c \sim 36$ K)를 보이는 것이 보고되었다. 본 연구실에서는 개선된 용제법을 사용하여 초전도 전이온도가 약 46 K이고 초전도 부피율이 약 70%인 La 도핑된 CaFeAs_2 단결정을 성장하고 압력에 따른 전기수송특성을 측정하여 상평형도를 연구 중이다. 그림 10에 보인 바와 같이, T_c 의 압력 의존도는 단조롭게 변화하지 않는다. 압력을 가함에 따라 T_c 는 0 GPa에서 45 K, 1.7 GPa에서 51 K이며 기울기는 $dT_c/dP \sim 3.6$ K/GPa이며, 압력을 1.7 GPa 이상 가하면 T_c 는 계속 줄어들어 원형 돔(dome) 형태의 압력 대 T_c 상평형도를 보여주고 있다.

이어 압력을 변화시켜가며 정상 상태 비저항의 온도의존성을 분석하였다. 보통 철계 초전도체 비저항의 온도의존성은 멱함수 $\rho(T) = \rho_0 + AT^n$ (단 ρ_0 은 잔류저항)로 기술된다. $n=2$ 일 때 $\rho(T)$ 는 물질 내 전자가 페르미 유체 상태임을 시사하고, $n<2$ 일 때 $\rho(T)$ 는 물질 내 전자가 비페르미 유체 상태임을 시사한다. 그림 10에 나타난 것처럼 같이 지수 n 은 처음에는 0 GPa에서 1.2이었다가 1.0 GPa에서 1.4 그리고 1.7 GPa 근처에서 1로 줄어든다. 또한 1.7 GPa에서 온도의존성의 선형성 ($n \sim 1$)은 200 K까지 유지된다. 압력을 더 증가하면 n 이 증가하여 1.7 GPa에서 8 GPa까지 n 이 1에서 1.6까지 증가한다. 5 GPa 이상에서는 저온에서 $n \rightarrow 2$ 가 된다. $n=2$ 로의 변이는 다시 전자들이 페르미 유체적 상태로 돌아온다는 것으로 이해할 수 있다. 이러한 적정 도핑, 압력 근처의 정상상태 비저항의 선형 온도 의존성은 다른 철계 초전도체, 구리계 초전도체 그리

Fig. 10. Pressure dependent phase diagram of $\text{Ca}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{FeAs}_2$. Temperature-pressure dependence of the exponent n acquired inside a piston cylinder cell (PCC) and a cubic anvil cell (CAC) is also plotted.

고 무거운 페르미온 초전도체^[13] 등지에서 발견된 바 있으며 주로 양자상전이 점 근처에서 발현되는 비페르미 유체 현상^[14] 혹은 다중밴드에서 Lifshitz 전이 효과 등과 관련될 것으로 예상되고 있다. 본 연구를 통해 얻어진 Ca-112계 초전도체의 양자상전이 효과에 대한 연구를 지속적으로 진행하고 있다.

결론 및 향후 진행 연구

압력연구를 이용한 고체의 상전이 현상에 대한 연구는 매우 흥미로운 영역이다. 우리나라에서 본격적으로 압력하에서 이루어진 실험의 역사는 비교적 짧지만, 본 연구실은 여러 가지의 압력도구 및 측정기술을 구축하여, 다양한 신물질들의 압력과 상전이 현상에 대한 연구를 지속적으로 진행할 예정이다.

이를 위해 추가적으로 압력측정기술개발도 진행 중이다. 현재 브리지만 압력셀이 제작되었으며 시험 가동을 하고 있는 중이며, 압력하에서 열적특성에 대한 측정이 최대 10 GPa 이하에서 실험이 진행될 예정이다. 또, 피스톤셀과 터널다이오드 진동기(Tunnel Diode Oscillator)를 이용한 압력하에서 초전도체의 투과깊이(Penetration depth) 측정을 진행 중에 있으며, DAC와 Raman 분광기를 이용하여 압력에 의한 고체의 구조적 상전이 현상에 대한 연구가 진행될 예정이다. 또, 10 GPa 이상에서 등방압을 가해주거나 기체 시료를 장착하기 위한 기체 장착형 DAC를 구현할 예정이다.

REFERENCES

- [12] Qimiao Si, Rong Yu and Elihu Abrahams, Nature Review Materials **1**, 16017 (2016).
- [13] Philipp Gegenwart, Qimiao Si and Frank Steglich, Nature Physics, **4**, 186 (2008).
- [14] F. Rullier-Albenque, D. Colson, A. Forget and H. Alloul, Phys. Rev. Lett. **103**, 057001 (2009).