

Pressure Effects on the Hg-doped Heavy-fermion Superconductor CeRhIn_5

S. Seo^a, S. Ju^a, E. D. Bauer^b, J. D. Thompson^b, T. Park^{*,a}

^a *Department of Physics, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea*

^b *Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, USA*

(Received 9 August 2012; revised 16 August 2012; accepted 18 August 2012)

Hg을 도핑한 무거운 페르미온 초전도체 CeRhIn_5 의 압력에 따른 변화

서순범^a, 주술^a, E. D. Bauer^b, J. D. Thompson^b, 박두선^{*,a}

Abstract

The heavy-fermion compound CeRhIn_5 is a prototypical antiferromagnet where Ce $4f$ moments align antiferromagnetically below 3.8 K. When doped with Hg, the antiferromagnetic transition T_N initially decreases, becomes flat, and increases again with further increasing Hg concentration. Here we report pressure effects on the electrical resistivity of a 0.45 % Hg-doped CeRhIn_5 , where T_N is 3.4 K and the magnetic structure is same as that of the undoped compound with $Q=(1/2, 1/2, 0.298)$. With increasing pressure, T_N is suppressed and a superconducting state emerges. The temperature dependence of the electrical resistivity near an optimal pressure shows a power-law behavior that deviates from a T^2 dependence, indicating presence of abundant quantum fluctuations near the optimal pressure.

Keywords : CeRhIn_5 , Hg doped CeRhIn_5 , pressure, heavy fermion superconductor, quantum critical point

I. 서론

무거운 페르미온 물질(heavy fermion material)은 1975년 CeAl_3 의 저온 물성측정을 통해 처음 발견된 뒤 흥미로운 물리적인 현상들로 인해 사람들의 관심을 끌고 있다. 무거운 페르미온 물질들은 일반적으로 $4f$ 또는 $5f$ 전자를 포함

하며 복잡한 상전이 현상들이 보인다 [1, 2]. 특히 저온에서 열적 변수들(thermal parameters)이 아닌 다른 조절변수에 의해 자기적인 성질이 나타나거나 초전도현상이 발생할 수 있으며, 외부 압력으로 인가되는 초전도현상은 자기 상과 밀접한 연관성을 가지는 것으로 보고되었다 [3-5]. 이러한 물질들의 상도표에서 자기상과 함께 나타나는 돔(dome) 형태의 초전도상은 대부분 비정상 초전도체(unconventional superconductor)의 성질을 보인다. 최근에는 무

*Corresponding author. Fax : +82 31 290 7055

e-mail : tp8701@skku.edu

거운 페르미온 물질에서 발견되는 양자임계성 (quantum criticality) 혹은 양자임계점 (quantum critical point)과 초전도상과의 관련성에 대하여 연구가 진행되고 있다 [5-7]. 일반 금속의 경우 저온에서 페르미 액체 이론(Fermi liquid theory)을 따르는 반면, 양자임계점 근처에서는 비 페르미 액체 현상(non-Fermi liquid behavior) 등이 발견되지만 이를 설명할 수 있는 이론이 아직 없다. 비정상 초전도 역시 완벽히 설명할 수 있는 이론이 부족한 상태이므로, 무거운 페르미온에 대한 연구가 서로 다른 두 현상을 이해하는데 도움을 줄 수 있다. 이러한 관점에서 활발히 연구되고 있는 물질 중의 하나는 $CeTIn_5$ (T =Group VIII transition metal)이며 압력, 자기장 그리고 화학적 치환을 통하여 다양한 상도표를 보여준다 [8-11].

$CeTIn_5$ 그룹에서 T 자리에 Rh이 채워진 $CeRhIn_5$ 는 압력하에서 자기적인 성질이 사라지고 초전도상이 나타나며 양자임계점을 가지는 물질이다 [12]. Fig. 1(a)는 $CeRhIn_5$ 의 결정 구조를 보여준다. 정방정계구조(tetragonal structure)를 가지며 격자 상수는 각각 $a=4.654 \text{ \AA}$ 과 $c=7.542 \text{ \AA}$ 이다. $CeRhIn_5$ 는 주기적으로 정렬된 Ce원소의 국소화된(localized) $4f$ 전자들이 자기 모멘트역할을 하는 콘도격자계(Kondo-lattice system)성질을 가지고, 약 3.8 K에서 상자성에서 반강자성으로 자기 상전이가 일어난다. 이 온도를 반강자성 자기 정렬 온도 T_N 으로 표시한다. 외부에서 $CeRhIn_5$ 에 압력을 가하게 되면 T_N 이 점차 낮아지고 초전도현상이 보이게 되는데, 압력으로 인가된 초전도상은 온도-압력 상도표에서 돔 형태로 존재하고, 최고 초전도 상전이 온도(maximum T_C)가 나타나는 최적 압력(optimal pressure)에서 양자임계점(quantum critical point)이 초전도 돔 영역 안에 존재하는 것이 실험적으로 발견되었다 [6, 12]. 또한 In원소 자리에 화학적 치환을 통해서도 $CeRhIn_5$ 의 상전이 현상이 변화하게 되는데 [13, 14], 그 중 우리는 Hg도핑으로 인한 변화에 초점을 맞추었다. Hg원소는 In원자에 비해 최 외각전자의 수가 적어 홀(hole)도핑 효과를 주지만, 원자반경은 Hg이 더 커서 치환하였을 때 시료 내부에서 외부로 주는 압력이 커지는 것과 같은 음압(negative pressure)효과를 기대할 수 있다.

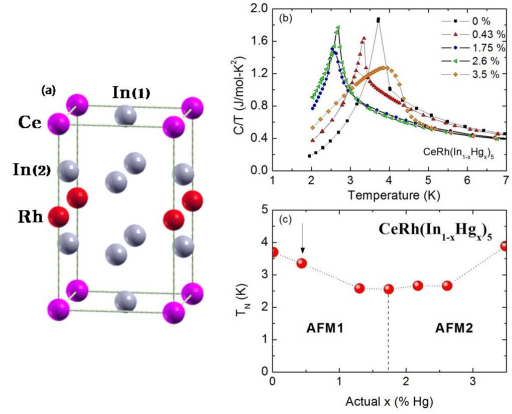


Fig. 1. (a) Tetragonal unit cell of $CeRhIn_5$. (b) Temperature dependence of the specific heat C/T of $CeRh(In_{1-x}Hg_x)_5$ for $0 \leq x \leq 3.5$ %. (c) Phase diagram of a Hg substituted $CeRhIn_5$. Black dashed line is a matched boundary of antiferromagnetic phases that have different magnetic structure. Black arrow indicates the Hg concentration studied in this research.

저온에서 초전도상만 갖던 $CeCoIn_5$ 에 소량의 Hg를 도핑함으로써 초전도상이 사라지고 반강자성 상이 나타나는 등 $CeTIn_5$ 물질에서 Hg은 자기적 성질에 큰 영향을 주는 원소이기도 하다 [14].

Fig. 1(b)는 Hg치환율에 따른 반강자성 상전이 온도변화를 비열의 변화로 찾아낸 그래프이다. 그래프에서 보이는 피크(peak)지점이 T_N 을 나타낸다. Hg원소의 치환율을 높여줌에 따라 처음에는 T_N 이 감소하다가 약 1.3 %에서 2.6 %까지는 변화가 크게 일어나지 않고, 2.6 %이상이 다시 T_N 이 상승하였다. Fig. 1(c)는 Hg치환율에 따른 T_N 의 변화를 보여주는 상도표이다. Fig. 1(c)의 x축은 실제 Hg치환율을 나타내며 이번 실험에서 선택한 Hg원소 치환율인 0.45 %지점을 화살표로 표시하였다. 또한 추가적인 실험을 통해 치환율을 높여줌에 따라 자기 구조가 바뀌어 다른 성질의 반강자성 상으로 존재하는 것이 이미 발견되었고 [13], 이 지점을 그래프에서 검정 수직 점선을 이용하여 AFM1과 AFM2로 구분하였다.

본 논문에서는 $CeRhIn_5$ 물질에 자기 구조를 바꾸지 않을 정도의 Hg도핑을 하여 $CeRhIn_5$ 가 가지는 자기적 성질에 영향을 준 뒤, 압력하에

서 전기 저항을 측정 함으로써 도핑하기 전과 비교하였을 때 상도표의 형태에 어떠한 변화를 주는지 확인하는 것이다. 특히 초전도상에 나타나는 변화와 함께 양자임계점의 변화를 도핑 전 결과와 비교하여 Hg도핑이 미친 영향을 논의할 것이다.

II. 실험 방법

$CeRh(In_{1-x}Hg_x)_5$ 의 단결정(single crystal) 시료는 플럭스 법(flux method)으로 제작 되었다 [13]. Fig. 1(a) $CeRhIn_5$ 의 결정구조에서 In(1)자리와 In(2)자리에 각각 절반의 확률로 Hg이 치환된다. 각 원소의 구성과 실제 Hg원소의 치환율을 알아내기 위해 전자 마이크로프로브 분석(electron microprobe analysis)방법을 이용하였고 Hg의 실제 치환율은 0.45 %이다. 전기 저항을 측정하기 위해 사용한 방법은 4단자 법(4-probe method)으로, 점 용접(spot welding)과 은 에폭시(silver epoxy)를 이용하여 시료에 4 개의 단자선을 연결하였다. 압력실험을 하기 위해 시료의 크기는 가로와 세로가 약 1 mm였으며 두께는 약 300 μm 정도였다. 사용된 압력 셀은 혼합 형식 고 압력 셀(hybrid type high pressure cell)로 Be-Cu와 Ni-Cr-Al 특수 혼합물로 만들어졌으며 최대 약 3 GPa까지 균일한 압력을 시료에 가해줄 수 있다. 셀 안의 실제 압력의 크기는 납(lead)의 압력에 따른 초전도 전이 온도의 변화 값을 이용하여 측정하였다 [15]. 시료의 온도를 낮추기 위해서 액체 헬륨 저온장치(4He cryostat)를 이용하였고, 액체 헬륨이 담겨 있는 듀어(dewar)를 펌핑(pumping)하여 300 K에서 약 1.2 K까지 냉각하였다. 시료의 전기 저항은 LR700 Resistance Bridge 실험장비를 이용하여 Ce-In 평면방향(in-plane)으로 측정하였다.

III. 결과 및 논의

압력에 따른 0.45 %의 Hg이 치환된 $CeRhIn_5$ 의 ab평면 방향의 전기 비저항 결과는 Fig. 2에서 확인 할 수 있다. 도핑하지 않는 $CeRhIn_5$ 의 압력에 대한 전기 비저항 결과와 비슷한 경향

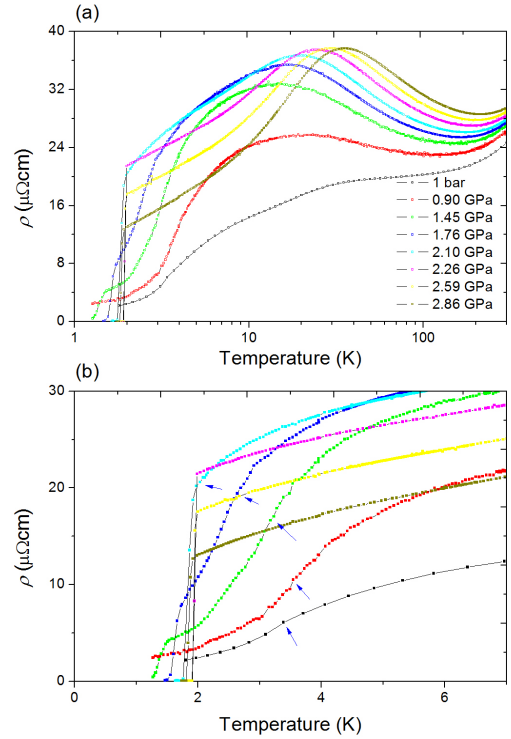


Fig. 2. (a) Temperature dependence of the in-plane electrical resistivity ρ of a 0.45 % Hg-doped $CeRhIn_5$ under pressure on a semilogarithmic scale. (b) The in-plane electrical resistivity of a 0.45 % Hg-doped $CeRhIn_5$ is magnified near the phase-transition temperatures. Blue arrows mark the antiferromagnetic transition temperatures.

성을 보였으며, 전체적으로 도핑을 한 시료가 약 22 %가량 더 큰 비저항 값을 갖는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 2(a)는 상온에서 1.2 K까지 전체 온도구간의 전기 저항 그래프로, x축은 로그 스케일의 온도를 나타낸다. 고온 영역에서는 온도가 낮아질수록 비교적 선형적인 저항의 감소를 보이지만, 콘도 영역에서 저항의 상승이 있으며 콘도 결맞음 온도(Kondo coherence temperature)에서 급격하게 비저항이 작아진다. 저온 영역에서는 상자성에서 반강자성으로 자기 상전이가 일어나는 지점에서 저항의 감소 기울기가 변화하며 다시 한 번 급격히 비저항이 감소한다. 1 bar부터 2.86 GPa까지 압력이 높아 질수록 상온에서의 비저항도 함께 증가하는데, 이는 일반 금속에서 보여주는 압력에 따른

변화와 반대이다. 일반 금속의 경우 압력이 커질수록 원자 간의 간격이 가까워져 저항이 감소하는 반면, Ce원소기반 화합물의 경우 압력을 가할수록 Ce의 국소화된(localized) 4f 전자들과 자유 전자간의 교환 결합 상수(exchange coupling parameter) J 값이 커짐에 따라 자유 전자들이 4f 스핀에 더욱 크게 산란되어 전기 저항이 커지게 된다. 비슷한 이유로 압력이 증가함에 따른 J 값의 상승으로 콘도효과(Kondo effect)가 강해지는데, 콘도온도에서의 저항 상승 효과가 더욱 커지게 되고 저항값이 최대가 되는 온도(T_{max}) 혹은 콘도 결맞음 온도(Kondo coherence temperature)가 압력에 따라 높아지는 것을 확인할 수 있다. 반면에 콘도 효과와 RKKY 작용의 경쟁 (Kondo-RKKY competition)으로 인해 T_N 이 압력에 따라 낮아진다 [16].

압력이 높아짐에 따라 T_N 이 낮아지지만 반강자성이 모두 사라지기 전에 초전도 현상이 나타나게 됨을 Fig. 2(b)에서 자세하게 확인할 수 있다. Fig. 2(b)는 상전이가 발생하는 온도 근처에서 선형 온도 스케일로 비저항을 압력에 따라 나타낸 그래프이다. 검정 원 모양으로 데이터가 표시된 선이 1 bar에서의 비저항을 나타내며, 약 3.4 K에서 반강자성 상전이가 발생한다. 상자성에서 반강자성으로 자기 정렬이 일어날 때, 전기저항의 기울기가 변화하여 변곡점(kink)이 발생하고 이 지점을 찾아 T_N 을 결정하게 된다. Fig. 2(b)에서 파란 화살표가 각 압력의 T_N 지점을 표시하고 있다. 압력이 증가함에 따라 T_N 값은 점차 낮아지고, 1.45 GPa에서는 T_N 아래에서 한 번 더 상전이가 발생하며 저항이 0으로 감소하게 된다. 이 상전이는 초전도 상전이로서 2.1 GPa까지 반강자성 상전이 아래에서 초전도 상전이가 한 번 더 일어나는 현상을 보여준다. 이 현상은 도핑하지 않은 CeRhIn₅의 실험결과에서 이미 확인하였고, 초전도 상전이가 일어나는 온도 T_C 아래에서 반강자성상과 초전도상이 함께 공존하는 것을 발견하였다. 압력이 증가함에 따라 T_C 는 점차 높아지고 2.1 GPa 이후에는 T_N 보다 높아져 반강자성 상전이는 저항 데이터에서 더 이상 보이지 않는다. 더 높은 압력 구간에서는 T_C 가 지속적으로 증가하여 약 2.6 GPa에서 최대치를 보인 후 다시 감소한다. 압력에 따른 상변화 경향성은 뒤에

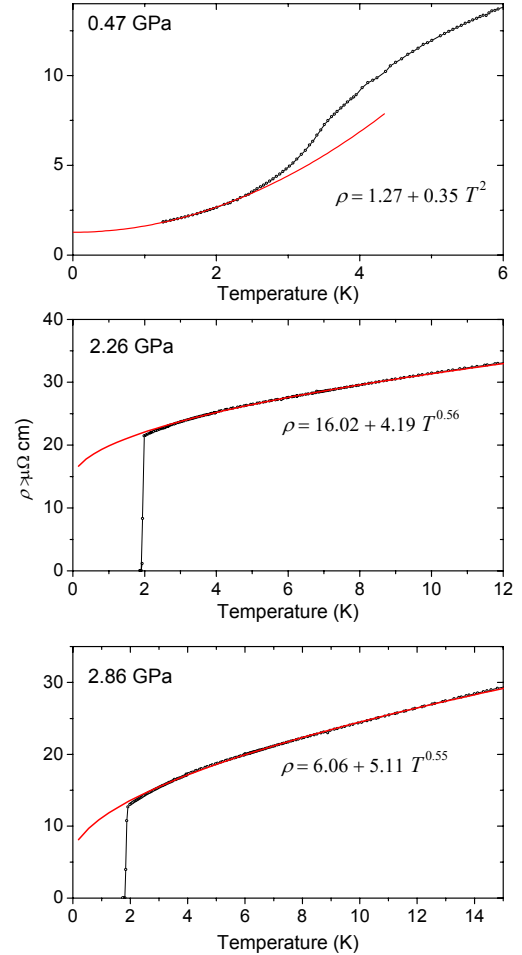


Fig. 3. Low-temperature least-squares fits of $\rho = \rho_0 + AT^n$ at various pressures. The resistivity exponent n is 2, 0.56 and 0.55 for 0.47 GPa, 2.26 GPa and 2.86 GPa, respectively.

상도표 그래프에서 좀 더 자세히 논의 할 것이다.

CeRhIn₅는 압력으로 야기되는 양자임계점을 갖고 있고 이 근처에서 비 페르미 액체 현상이 발견된다 [6]. 비 페르미 액체 현상은 온도에 따른 전기저항의 변화로 확인할 수 있는데, 0.4 5 % Hg 도핑된 CeRhIn₅의 비저항을 저온 영역에서 분석한 그래프가 Fig. 3이다. Fig. 3에서 붉은 선은 저온 영역에서 최소자승맞춤 (least-squares fit) 식인 $\rho = \rho_0 + AT^n$ (ρ_0 는 잔류 비저항, T 는 온도)을 이용하여 fitting한 결과를 나타낸다. 가장 적합한 상수 A 값과 n 값을 세 가지 압력에서 표시하였다. 최소자승법으로 fitting

해서 구한 n 값이 2일 때 페르미 액체 이론을 따르고, 2보다 작은 값을 보일 때 비 페르미 액체 행동을 보인다. 계산 결과 1 bar ~1.45 GPa 영역에서는 페르미 액체 현상을 보였고, 1.75 GPa~2.8 GPa 영역에서는 비 페르미 액체 행동을 보였다. 이미 CeRhIn₅의 경우 비 페르미 액체 행동을 보인 압력 구간 내에서 양자임계점이 발견되었으므로 0.45 % Hg 도핑된 CeRhIn₅의 경우에도 비 페르미 액체 행동을 보이는 압력구간에서 양자임계점이 존재할 수 있는 가능성을 보여준다.

Fig. 4(a)는 온도-압력 상도표(phase diagram)이다. 검정 사각모양 데이터는 도핑이 되지 않은 CeRhIn₅의 결과를 나타내고, 빨강 사각모양 데이터는 0.45% Hg 도핑된 CeRhIn₅의 결과를 나타낸다. 상도표에서 AFM으로 표시된 빗금영역을 나타내는 데이터는 T_N 값을 의미하며 Fig. 2(b)에서 화살표로 표시된 변곡점의 위치로 결정하였다. SC로 표시된 빗금영역을 나타내는 데이터는 T_C 값을 의미하며 초전도전이 일어나는 시작 온도 값으로 결정하였다. 또한, T_N 과 T_C 가 모두 존재하는 압력 영역에서는 T_C 아래에서 반강자성과 초전도성이 공존하므로 AFM+SC로 표시하였다. 0.45% Hg 도핑된 CeRhIn₅의 상도표 결과를 도핑하지 않은 CeRhIn₅의 결과와 비교해보면, 전체적인 상전이의 경향성이 일치한다. 1 bar 에서 압력을 증가시킬수록 반강자성 상전이온도는 원호(circular arc) 형태를 그리며 감소하고 초전도상과 공존하는 영역이 존재한다. 더 높은 압력에서는 반강자성이 사라지고 T_C 만 존재하게 되며 처음에는 초전도 전이 온도가 증가하다가 돔 형태로 다시 감소하는 경향성을 보여준다. 상도표의 형태는 도핑 전 결과와 매우 흡사하지만 전체적으로는 상전이 온도가 모두 도핑 전 상전이 온도에 비해 낮아진 형태를 보여준다. 특히 대기압에서의 T_N 값은 Fig. 1(c)에서 예측한 것과 같이 3.8 K에서 3.4 K로 약 0.4 K 감소한 것을 확인할 수 있다. 압력의 경우에는 Hg 원소가 치환되면서 음압효과가 생기게 되어 상도표가 도핑되기 전과 비교하였을 때 오른쪽으로 전체적으로 이동된 것으로 보인다. 자기 상전이 온도와 초전도 상전이 온도가 만나는 점을 기준으로 0.45 % Hg 도핑한 결과값을 재구성하여(normalize) 도

핑하지 않은 CeRhIn₅의 상도표와 일치시켜 본 결과 다음 식 (1)과 (2)만큼의 차이가 존재하였다.

$$\Delta T = T_{\text{undoped}} - T_{\text{Hg-doped}} = 0.3 \text{ K} \quad (1)$$

$$\Delta P = P_{\text{undoped}} - P_{\text{Hg-doped}} = -0.4 \text{ GPa} \quad (2)$$

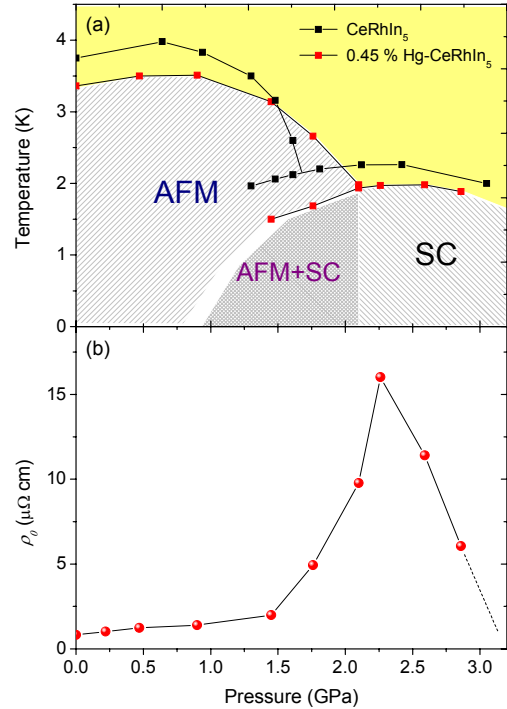


Fig. 4. (a) Temperature-pressure phase diagram of CeRhIn₅ and a 0.45 % Hg-doped CeRhIn₅. (b) Pressure dependence of a residual resistivity ρ_0 of a 0.45 % Hg-doped CeRhIn₅.

따라서 Hg도핑으로 인해 발생한 상전이 온도의 변화와 음압효과 만큼을 Fig. 4(a)의 0.45 %Hg 도핑한 CeRhIn₅의 상도표에 더하거나 빼주어서 재구성하였을 때, 두 상도표의 형태나 상전이 온도가 일치함을 확인하였다. 다만 T_N 값이 차이 나는 영역이 존재하는데, 어떠한 효과로부터 발생하였는지 아직 정확하게 설명할 수 없다. 한 가지 추측은 Hg치환이 초전도 영역의 상도표에는 영향을 주지 않고 반강자성 영역의 상도표 모양에만 영향을 준 것은 이전의 연구에서 보여주듯이 Hg원소 치환이 CeTlIn₅ 시스템의 자기적인 성질에 큰 영향을 주기 때문일 것으로 생각할 수 있다. 초전도

상도표의 경우 도핑하기 전 형태와 0.45 % Hg 도핑한 후 형태가 크게 다르지 않으며, 특히 T_C 가 최대가 되는 최적압력 역시 도핑하지 않았을 때 약 2.2 GPa에서 도핑한 후 약 2.6 GPa로 Hg치환으로 발생한 음압효과 만큼 정확히 이동한 것으로 나타난다. 도핑하지 않은 CeRhIn₅의 연구결과를 보면, 정확히 최적 압력에서 양자임계점이 존재한다. 따라서 CeRhIn₅의 양자임계점은 초전도상 영역 안에서 존재하게 되며, 양자임계현상들은 초전도 돔 영역 위에서 관찰이 되는데, 0.45 % Hg도핑한 CeRhIn₅ 역시 초전도 돔 영역 위에서 양자임계현상 중 하나인 비 페르미 액체현상이 존재한다는 사실을 이미 Fig. 3에서 확인하였다.

Fig. 4(b)는 압력에 따른 잔류 비저항 ρ_0 그래프이다. Fig. 3에서 낮은 온도영역에서의 최소자승법 fitting으로 구하였던 ρ_0 를 각 압력에 대해 나타내었다. 1 bar에서부터 1.45 GPa까지는 큰 변화가 보이지 않는다. 보통의 금속물질의 경우 압력에 따라 잔류 비저항값이 변하지 않는 것이 일반적인데, 그 이유는 압력을 증가시킴으로써 물질에 가장 크게 영향을 미치는 것은 원자 사이의 거리를 줄여주는 것으로 이러한 효과는 잔류 비저항에 크게 영향을 주기 힘들기 때문이다. 온도가 0 K에서의 저항은 대부분 구조에 존재하는 불순물에 의한 효과이지만 압력의 변화로 이러한 불순물의 효과가 달라지기 힘들다. 하지만 Fig. 4(b)에서 보이는 것처럼 1.45 GPa이후, 즉 비 페르미 액체 행동을 보이는 압력구간에서 ρ_0 값이 상승하였다 다시 감소하는 모습을 보여준다. 특히 2.26 GPa에서 최대값을 가지며 피크(peak)모양의 형태를 가지는 것을 확인할 수 있다. ρ_0 의 증가는 비 페르미 액체 행동을 보이는 영역에서 특별한 충돌(special scattering)이 발생하였기 때문이며, 2.26 GPa에서는 이러한 추가적인 충돌효과가 극대화 되었음을 알 수 있다. 일반적으로 무거운 페르미온 물질에서의 특별한 충돌효과는 양자임계점에서 존재하는 강한 양자 요동(quantum fluctuation)에 의한 것으로 이해하고 있다. 따라서 ρ_0 값이 최대가 되는 지점 근처에서 양자임계점이 존재할 것으로 유추할 수 있으며 실험 결과로는 2.26 GPa임을 보여주고 있다. 2.26 GPa은 Fig. 4(a)에서 찾은 0.45 % Hg 도핑한

CeRhIn₅의 최적압력인 2.6 GPa과 차이가 있다. 오히려 도핑하지 않은 CeRhIn₅의 최적압력과 일치한다. 따라서 이와 같은 결과는 Hg원소의 치환으로 인해 전체적인 상도표와 T_C 가 최대가 되는 최적압력은 일정한 압력만큼 이동하였지만 양자임계점은 이동되지 않았음을 의미한다. 양자임계점의 위치를 정확히 파악하는 추가적인 분석과 실험이 필요하다.

IV. 결론

CeRhIn₅에 Hg를 0.45 % 도핑한 시료의 전기 저항을 외부 압력을 가해주며 측정하였다. 압력에 따른 저항의 변화와 상전이의 변화는 CeRhIn₅의 결과와 비슷하였다. 압력을 증가시켜줄수록 콘도효과가 강해지고 저온에서의 반강자성은 약해지며 초전도상이 나타났는데, 초전도상과 반강자성상이 공존하는 영역이 존재하였다. Hg원소 치환으로 인해 발생한 상전이 온도의 감소와 음압효과를 고려하여 상도표를 재구성한 뒤 도핑하지 않은 CeRhIn₅의 상도표와 비교하였을 때, T_N 의 감소율이 약간 차이가 있었지만 압력으로 인가된 초전도상의 돔 형태가 일치하였다. 최적압력 역시 음압 효과만큼 이동하여 Hg의 도핑 효과가 초전도상에 국한되어 나타나지 않았음을 확인하였다. 상도표의 초전도 돔 위에서는 여전히 특정 압력구간에서 비 페르미 액체 현상을 보여주었고 Hg의 도핑 효과로 인해 양자임계현상이 바뀌거나 없어지지 않았음을 확인하였다. 하지만 잔류 비저항값을 구해본 결과 도핑하지 않은 CeRhIn₅에서 존재하였던 양자임계점 압력에서 최대값을 보였다. 따라서 양자임계점은 Hg도핑으로 인한 변화가 없을 가능성을 가지지만 확실한 결론은 추가적인 실험과 분석을 통해 확실한 양자임계점 위치를 찾아야 내릴 수 있다. 이와 같은 결과들을 바탕으로 더 높은 압력에서 상도표의 변화와 양자임계현상 등을 관찰하거나 최적압력 근처에서 자세한 압력실험이 요구된다. 또한 더 높은 양의 Hg원소 치환을 한 뒤에 나타나는 변화를 관찰하는 것 역시 무거운 페르미온 물질에서의 초전도현상과 양자임계현상을 이해하는데 도움을 줄 것으로 예상된다.

Acknowledgments

This work was supported by the NRF grants funded by the Ministry of Education Science & Technology (MEST) (No. 2011-0021645 & 220-2011-1-C00014).

References

- [1] G. R. Stewart, “Heavy-fermion systems”, *Rev. Mod. Phys.*, 56, 775-787 (1984).
- [2] J. D. Thompson et al., “Superconductivity and magnetism in a new class of heavy-fermion materials”, *J. Magn. Magn. Mater.*, 226, 5-10 (2001).
- [3] N. D. Mathur et al., “Magnetically mediated superconductivity in heavy fermion compounds”, *Nature*, 394, 39-43 (1998).
- [4] P. Monthoux, D. Pines and G. G. Lonzarich, “Superconductivity without phonons”, *Nature*, 450, 1177-1183 (2007).
- [5] H. Q. Yuan, F. M. Grosche, M. Deppe, C. Geibel, G. Sparn and F. Steglich, “Observation of two distinct superconducting phases in $CeCu_2Si_2$ ”, *Science*, 302, 2104-2107 (2003).
- [6] T. Park et al., “Isotropic quantum scattering and unconventional superconductivity”, *Nature*, 456, 366-368 (2008).
- [7] S. Nakatsuji et al., “Superconductivity and quantum criticality in the heavy-fermion system β - $YbAlB_4$ ”, *Nature Physics*, 4, 603-607 (2008).
- [8] L. D. Pham, Tuson Park, S. Maquilon, J. D. Thompson and Z. Fisk, “Reversible tuning of the heavy-fermion ground state in $CeCoIn_5$ ”, *Phys. Rev. Lett.*, 97, 056404 (2006).
- [9] J. D. Thompson et al., “Magnetism and unconventional superconductivity in $Ce_nM_mIn_{3n+2m}$ heavy-fermion crystals”, *Physica B*, 329, 446-449 (2003).
- [10] P. G. Pagliuso et al., “Coexistence of magnetism and superconductivity in $CeRh_{1-x}Ir_xIn_5$ ”, *Phys. Rev. B*, 64, 100503 (2001).
- [11] A. Bianchi, R. Movshovich, C. Capan, P. G. Pagliuso and J. L. Sarrao, “Possible Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov superconducting state in $CeCoIn_5$ ”, *Phys. Rev. Lett.*, 91, 187004 (2003).
- [12] Tuson Park et al., “Hidden magnetism and quantum criticality in the heavy fermion superconductor $CeRhIn_5$ ”, *Nature*, 440, 65-68, (2006).
- [13] E. D. Bauer, F. Ronning, S. Maquilon, L. D. Pham, J. D. Thompson and Z. Fisk, “Occurrence of magnetism in $CeMIn_{5-x}Hg_x$ ($M=Rh, Ir$)”, *Physica B*, 403, 1135-1137 (2008).
- [14] C. H. Booth et al., “Local structure and site occupancy of Cd and Hg substitution in $CeTIn_5$ ($T=Co, Rh, Ir$)”, *Phys. Rev. B*, 79, 144519 (2009).
- [15] A. Eiling and J. S. Schilling, “Pressure and temperature dependence of electrical resistivity of Pb and Sn from 1-300 K and 0-10 GPa-use as a continuous resistive pressure monitor accurate over wide temperature range; superconductivity under pressure in Pb, Sn and In”, *J. Phys. F*, 11, 623-639 (1981).
- [16] S. Doniach, “The Kondo lattice and weak antiferromagnetism”, *Physica B*, 91, 231 (1977).