압력을 이용한 에너지 저장매체로서의 수소화합물 합성

DOI: 10.3938/PhiT.27.011

김 재 용

High Pressure and Hydrogen: Properties and Application for Energy Storage

Jaeyong KIM

Pressure is a physical parameter for exploring nature under extreme conditions. The results obtained by using pressure, combined with temperature, are expected to increase our understanding of fundamental science by revealing previously unknown properties of materials and to lead to the creation of super-materials having high energy-density, superconductivity and superhardness. Representative results on metallic hydrogen and on improved hydrogen storage that were obtained by employing pressure are discussed.

들어가는 글

20세기 후반에 들어 고압연구 분야의 가장 획기적인 발견은 다이아몬드를 이용한 고압발생 장치 발명과 루비분광을 이용한 압력측정이라 할 수 있다. 1949년 Andrew W. Lawson, Ting Yuan Tang 등은 두 개의 다이아몬드 사이에 시료를 넣어 2 GPa까지 압력을 가한 상태에서 X-선을 이용한 구조분석을 하였다.^[1] 참고로 다이아몬드는 모스경도가 10으로 가장 높은 뿐 아니라 X-선을 투과하는 성질이 있기에 시료의 구조와 흡수, 형광, 포논모드도 측정할 수 있는 장점이 있다. 단결정 합성으로 유명한 Percy W. Bridgeman은 자체 개발한 고압장치와 고압연구로 1946년 노벨 물리학상을 수상하였고 이는 압력연구가 물리변수로서의 연구분야로 시작되는 시점이기도 하였다. 현재와 같이 스크류와 워서를 이용하여 수백 GPa(10^9 Pa) 단위까지 가할 수

있는 압력셀이 도입된 것은 1958년 Charlie Weir^[2] 등에 의해 서인데 올해 2018년은 다이아몬드 압력셀(Diamond Anvil Cell, DAC)을 이용하여 고압연구를 시작한 지 60년이 된 해이기에 고압연구 현황을 언급해 보는 것도 의미가 있으리라 생각한다. 압력은 발생뿐 아니라 정확한 측정 또한 중요한데 1972년 Forman 등^[3]은 다이아몬드 앤빌셀에 갇힌 루비에서 나오는 라만 형광신호를 측정하여 시료에 가해진 압력을 측정하였고 이는 오늘날 보편적이면서도 손쉽게 압력을 측정할 수 있는 방법으로 채택되고 있다. 이렇듯, 다이아몬드를 이용한 고압연구는 수백 GPa, 수천 도 단위의 지구 내부 조건을 실험실에서 구현하고 고압-극저온에서의 물리현상을 탐구하는 등, 극한환경에서 물성을 이해함으로써 과학의 지평을 넓히는 연구라 할 수 있다. 누구나 인지하듯이 압력은 단위면적당 받은 힘으로 정의되며 분자 분모에 모두 길이의 차원을 곱하면 압력은 에너지로 환산될 수 있는 바, 100 GPa는 $116,000 \text{ K}/\text{\AA}$ 에 해당한다. 따라서 온도를 올리는 대신 압력을 가하여 열로 가할 수 없는 높은 에너지 상태에서의 물성을 분석할 수 있다.

최근 나노기술에 힘입어 원자 날개를 직접 눈으로 볼 수 있고, 측정기술의 발달에 따라 아토초까지 분석할 수 있는 과학 기술의 발달에 따라 물리학의 중요한 축을 이루는 시공간은 거의 한계에 다다랐고 이제 새로운 변수, 즉 압력을 조절함으로써 새로운 물리현상을 규명하는 연구가 도입되고 있는 바, 본 특집호에서는 다이아몬드를 이용한 압력 발생과 측정, 에너지 저장매체 응용, 고압저온에서의 양자전이, 그리고 비정질 산화물의 원자구조에 대해 기술하고자 한다.

압력을 이용한 연구: 신소재 개발 및 에너지 저장

신소재를 개발함에 있어 초고압과 같은 극한 조건이 왜 중요

저자약력

김재용 교수는 미국 Washington University in St. Louis에서 응집물리학분야 박사학위를 받고 Brookhaven National Laboratory 박사후 연구원과 포항공기연구소 연구원을 거쳐, 현재 한양대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. 2016년부터 한양대-HPSTAR-카네기 고압연구센터장을 역임하고 있다. (kimjy@hanyang.ac.kr)

REFERENCES

- [1] W. A. Bassett, High Pressure Research **29**, 163 (2009).
- [2] C. E. Weir, E. R. Lippincott, A. Van Valkenburg and E. N. Bunting, J. Res. Natl. Bur. Stand. **63A**, 55 (1959).
- [3] R. A. Forman, G. J. Piermarini, J. D. Barnett and S. Block, Science **176**, 284 (1972).

한지를 설명해 주는 좋은 예는, 1955년 Trach Hall 등을 비롯한 GE 연구진들이 섭씨 2000도, 10 GPa에서 인공적으로 합성한 다이아몬드이다. 다이아몬드를 산업적으로 응용하기 위한 과정에서 고압이 필요 없는 화학증착 합성법까지 개발하게 되었다는 점은 잘 알려진 사실이다. 최근에는 압력과 온도를 매개로 고온초전도체를 만들거나, 질소, 탄소, 붕산, 산소 등 가벼운 원소 기반(low-Z) 원자들을 고온-고압 조건에서 합성하여 새로운 에너지원을 설계하는 연구가 진행되고 있다.^[4]

수소는 고압연구에 있어 매우 중요한 원소이다. 수소는 전자를 줄 수도 동시에 받을 수도 있어서 다른 물질과 합성되었을 경우 상대원소와의 전자밴드 겹침으로 인해 고에너지 밀도(high-energy density), 고온초전도체(high Tc-superconductor), 초유동체(superfluidity) 등 다양한 현상을 보이는 바, H₂S의 경우 141 GPa에서 195 K 초전도를 보이는 것이 그 예이다.^[5] 또한 메탄의 경우 10 GPa 단위에서 CH₄(H₂)₄와 같은 수소다량체 합성이 가능한 바, 에너지저장을 목적으로 하는 초수소 물질 합성은 압력을 활용하는 주요 연구 분야이다.^[6] 특히, 초수소 물질의 경우 기존의 탄소 중심의 에너지 체제가 이산화탄소 배출이 없는 수소 에너지 중심으로 혁명적으로 바뀔 수 있기 때문에 그 파급 효과는 폭발물을 포함한 국방산업뿐 아니라 자동차연료나 로켓 추진제(propellant)를 포함한 산업을 비롯한 전체 에너지 공급 시스템에 일대 변혁을 가져올 수 있다.

1. 금속수소(Metallic hydrogen) 합성과 의미

열역학적으로 고온에서 온도를 내리면 물질은 가스상태에서 액상을 거쳐 고체가 된다. 수소도 예외가 아니며 절대온도 14도 이하에서는 분자상태의 고체가 된다. 하지만 여기에 압력을 가하면 고밀도 분자상태를 지나 원자상태의 금속수소가 된다는 것이 80여 년 전 Huntington 등이 제시한 금속수소(metallic hydrogen) 이론이다^[7](그림 1). 즉, 분자상태의 수소에 압력을 가하여 원자상태의 금속수소(atomic metallic hydrogen)을 만들 수 있고 이때 형성된 금속수소는, 마치 카본이 고온고압에 의하여 다이아몬드로 바뀐 후 형상을 유지하듯이, 형상을 유지할 뿐 아니라 초전도 현상을 나타낼 것이라고 예측하였다.^[8] 수소는 알칼리금속에 속하지 않으며, 분자상태에서는 15 eV의 밴드갭을 가지는 부도체이지만, 초고압에서는 밴드갭이 0이 되어 전형적인 부도체-도체 전이를 보이는 원소이다. 1972년 Brovman, Kagan 등^[9]은 절대온도 0도에서 분자상태의 액체수소와 보다 안정한 상태의 금속수소와의 에너지 차이는 1 eV인데 압력 혹은 외부 열을 가하여 에너지 장벽을 넘기면 더 낮은 상태의 금속수소를 만들 수 있고 이렇게 형성된 금속수소는 압력을 풀어도 고체 상태에 머물 것이라 예견하였다.

금속수소를 형성하는 방법은 2가지가 있다. 하나는 저온에서

Fig. 1. Schematic diagram of structure of hydrogen as increasing pressure.

압력을 가하여 원자상태의 고체금속수소를 만드는 것이고 또 다른 방법은 중간압력 범위(약 100만 기압 정도)에서 온도를 올려 액체금속수소를 만드는 방법이다(그림 2). 후자의 경우 분자 고체상태에서 분자 액체상태를 지나 1차전이(1st order transition)인 액체금속상태에 이를 수 있지만, 응용면에서의 관심은 고체상태 금속수소 합성이 더 크다 할 것이다.

금속수소를 제작하는 것은 물리학적 면에서 매우 중요하다. 분자상태의 수소가 원자금속수소가 되면 아마도 상온을 웃도는 고온초전도가 될 것으로 기대하고 압력이 풀어도 형상을 유지하여 고에너지 밀도를 가진 에너지 추진매체로 활용될 수 있기 때문이다. 참고로 고체상태의 금속수소는 밀도면에서 액체수소보다 15배 이상 높으며 일단 형성되었을 시, CVD 방법으로 탄소에서 다이아몬드를 성장시키듯이, 핵을 형성하여 다량의 금속수소를 제작할 수 있으리라 기대한다. 그러하면 초전도와 에너지문제를 비롯한 획기적인 현상을 발견하리라 기대한다. 특히 고체수소를 로켓의 추진연료로 사용할 경우 비충격값(specific impulse)이 1700 sec로써 수소와 산소를 섞어서 사용하는 현재 방식의 450 sec보다 3배 이상 효율이 좋다. 왜냐하면 수소는 분자결합에너지가 4.74 eV(55,000 K)인데 영점 에너지 값(zero point energy)을 빼고 나면 4.47 eV(51,960 K)을 가지며 이를 에너지로 환산시킬 수 있기 때문이다. 참고로 중수소의 경우 4.55 eV를 가지기에 원자 금속수소를 만드는 데 필요한 에너지는 수소가 더 적다.^[10]

REFERENCES

- [4] J. H. Lim and C. S. Yoo, Phys. Rev. Lett. **120**, 165301 (2018).
- [5] A. P. Drozdov, M. I. Eremets, I. A. Troyan, V. Ksenofontov and S. I. Shylin, Nature **525**, 73 (2015), doi:10.1038/nature14964.
- [6] M. S. Somayazulu, L. W. Finger, R. J. Hemley and H. K. Mao, Science **271**, 1400 (1996).
- [7] E. Wigner and H. B. Huntington, J. Chem. Phys. **3**, 764 (1935).
- [8] N. W. Ashcroft, Phys. Rev. Lett. **21**, 1748 (1968).
- [9] E. G. Brovman, Y. Kagan and A. Kholas, Sov. Phys. JETP **34**, 1300 (1972).
- [10] I. F. Silvera, Rev. Modern Physics **52**, 393 (1980).

Fig. 2. Experimental/theoretical P-T phase diagram of hydrogen showing two pathways to reach metallic hydrogen. Low temperature (pathway 1), and high temperature (pathway 2) will lead solid metallic atomic hydrogen, and liquid metallic atomic hydrogen, respectively. Ref. [12] for more details.

실제로 1995년 S. T. Weir 등 Lawrence Livermore National Laboratory 팀들에 의해^[11] 충격파를 이용하여 150 GPa, 3000 K 근처에서 수 마이크로초 동안 전기 저항 값이 0으로 나타나는 금속수소 존재를 보고하였다. 하지만 이러한 현상을 정적압력 (static pressure)에서 구현하고자 하는 것이 현재 압력연구의 시도이다.

압력연구의 성배(holy grail)라 불릴 만큼 중요성을 가지고 오랫동안 추진되어 온 금속수소 형성에 관해 최근 흥미있는 연구결과가 보고되었다. 2017년 1월 하버드대학 물리학과 Silvera 교수팀의 연구결과에 의하면 495 GPa에서 금속수소 합성을 보고하였는 바,^[12] 이는 육안을 통한 광학적 관찰과 자유전자밀도 계산에 근거한 결과이다. 즉, 기체상에서 부도체인 수소는 광학적으로 투명하지만 335 GPa에서 시료가 검은 색으로 변하고 압력을 더 가하였을 때 495 GPa에서 다시 투명하게 됨을 확인하여 금속수소를 형성하였다고 보고하였다(그림 3). 또한 Drude 자유전자 모델에 의한 수소의 플라스마 진동수, $\omega_p^2 = 4\pi n_e^2/m_e$ (여기서 n_e 와 e 는 전자질량과 전하)를 계산하여 전자밀도가 1 electron/atom에 해당하는 금속수소를 형성하였다고 보고하였다. 즉, 시료로부터 측정된 반사율, $R(\omega) = [(N_D - N_H)/(N_D + N_H)]^2$ (다이아몬드의 굴절율, N_D 은 2.41)과 복소수로 표시되는 금속수소의 굴절율, $N_H^2 = 1 - \omega_p^2/(\omega^2 + j\omega/\tau)$ (ω 와 τ 는 각각 가해진 에너지와 산란시간)을 연동하여 구한 플라스마 진동수 값을 근거로 시료의 전하밀도 (charge density)를 계산하였는 바, 이는 1 전자/원자를 가지는 금속수소에 해당한다고 하였다(자세한 내용은 [12] 참조).

Fig. 3. Photographs of hydrogen under compression showing the color change from transparent-black-transparent as increasing pressure to 495 GPa. The sample dimensions are approximately 8-10 microns with thickness ~1.2 microns. Original picture and article were provided by reference [12].

하지만, 금속수소의 가장 핵심적 내용인 초전도측정 결과가 함께 보고되지 못하였고(실제로 시료 크기가 10 마이크로미터 단위라서 실제로 전기 전도도 값을 측정하는 것이 가능할는지 의문인 하) 측정 후 시료를 분실하였기에 학계에서는 아직 금속수소 합성을 공식화하지 못하고 있다. 실제로 고압연구에서 500 GPa의 압력을 가한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 이유는, 시료의 크기를 줄이는 외형적인 문제 외에 수소의 침투성 때문이다. 수소는 맞닿고 있는 주변물질에 침투성이 좋아 용기를 바스라지게(embrittlement) 하며 압력을 가하기 위해 맞닿고 있는 다이아몬드도 예외가 아니다. 따라서 많은 경우 원하는 압력에 도달하기 전 앤빌로 사용하는 다이아몬드가 깨질 것이며 수소를 압력매체로 사용하는 경우 다이아몬드가 깨질 확률은 더 높다. 이를 위하여 Silvera 교수는 앤빌로 사용하는 다이아몬드 표면에 50 nm 두께의 알루미늄 코팅을 하여 수소침투를 방지하였다. 또한 초고압을 정확히 측정할 수 있는 방법이 없다는 점이다. 압력을 측정함에 있어 가장 보편적으로 사용하는 방법은 라만 루비형광을 측정하거나^[13] 압력에 따른 격자상수 변형값이 알려진 금속(일반적으로 gold가 많이 사용됨)의 상태방식(equation of state)을 이용한다. 하지만 이들의 경우 약 80 GPa까지만 타당성이 인정되며 그 이상의 초고압에서는 방사광원을 이용한 다이아몬드 앤빌의 국소변형^[14] 혹은 다이아몬드 포논의 라만형광을 측정하여 시료에 가해진 압력을 유추하는 바^[15] 이는 루비형광법에 비해 압력을 정확히 판단할 수 있는 방식은 아니기 때문이다.

REFERENCES

- [11] S. T. Weir, A. C. Mitchell and W. J. Nelli, Phys. Rev. Lett. **76**, 1860 (1996).
- [12] R. P. Dias and I. F. Silvera, Science, 10.1126/science.aal1579 (2017).
- [13] H. K. Mao, J. Xu and P. M. Bell, J. Geophys. Res. **91**, 4673 (1986).
- [14] B. Li, C. Ji, W. Yang, J. Wang, K. Yang, R. Xu, W. Liu, Z. Cai, J. Chen and Ho-kwang Mao, PNAS **115**, 1713 (2018).
- [15] Y. Akahama and H. Kawamura, J. Appl. Phys. **100**, 043516 (2006).

(1) 남아있는 문제들..

아직 확인되지 않았지만 설명 고체상태의 금속수소를 제작하였더라도 앞으로 아직 대답해야 할 미지의 문제들이 있다. 물질은 온도를 낮추면 기체-액체를 거쳐 고체가 된다. 금속수소의 경우도 과연 그러할까? 즉, 준안정 상태의 금속수소에 압력을 가하면 카본이 다이아몬드로 변하듯 궁극적으로 안정한 상태의 고체수소를 제작할 수 있을 것인가? 그렇다면 임계온도는 얼마인가? 만약 고체수소를 제작하였다면, 압력을 제거하여 마치 결정을 핵형성(nucleation) 시키듯이 성장시킬 수 있을까? 고체수소를 제작한 후 감압을 하게 되면 액체상태를 거쳐 다시 분자상태의 수소로 되돌아올까? 흔히 수소는 원자모델에서도 가장 간단하고 우주에서 가장 많이 존재하여 원자구조뿐 아니라 열역학적 현상에서도 좋은 모델로 언급되곤 하지만 아직도 많은 물성이 미지의 영역으로 남아 있다. 특히 압력과 온도를 매개로 하는 열역학적 측면에서는 그렇다.

2. 다면체를 이용한 수소저장

실제로 자동차에 적용하기 위한 환경오염의 60% 이상을 차지하는 자동차배출가스를 줄이기 위한 방편으로 대두되는 수소 자동차에 활용하기 위한 수소에너지 저장은 고압가스, 액체수소, 혹은 수소화합물을 이용한 고체물질에 저장하는 방법들이 대두되고 있다. 수소 침투에 따른 용기의 바스러짐 방지와, 700 기압 이상의 고압을 견뎌야 하는 용기의 강도 등을 포함한 기술적인 어려움을 고려하였을 때, 그래도 가장 현실로 대두되는 방법은 활동장벽(activation barrier)이 낮은 물질에 수소를 저장하는 방법이다. 다공성 혹은 대면적을 가진 물질의 표면에 수소를 흡착(adsorption)시키거나 물질의 격자 간에 흡수(absorption)시키는 방법을 이용하여 수소를 저장할 수 있지만 후자의 경우 압력을 이용하면 동일한 구조에서도 더 많은 양의 수소를 저장할 수 있으리라 기대한다. 즉, 수소화합물을 형성하였을 때, 고압을 이용하면 평소 도달하지 못한 수소화합물을 합성할 수 있으며 이러한 시도는 상용화 여부를 떠나 압력을 이용하여 실현 가능성을 타진할 수 있다. 예를 들어, 결정체에서는 이론적으로 금지된 5축 회전대칭을 보이며 회절 스팟 간의 거리가 정수배가 아닌 τ 에 해당하는 피보나치수열(Fibonacci sequence)을 따르는 준결정체의 경우 수소가 차지하는 격자에너지(site energy) 값이 약 0.1 eV로써 수소를 흡수하기에 구조적으로 우호적인 경우이다. 참고로, 급속히 냉각된 Al-Mn 합금으로부터 1984년 Shechtman 박사는 준결정체를 발견하였고^[16] 이는 그 동안 결정의 정의를 평형과 회전대칭의 개념에서 회절스팟(diffraction spot)을 보이는 회절개념으로 바꾸는 계기가 되었으며, 이러한 공로로 2011년 노벨 화학상을 수상하였다.

즉, 고체물리학적 이론에 따르면 결정체는 5축 회전 대칭을

가질 수 없고 비정질은 원자들 간의 위치적 비일관성 때문에 회절패턴을 나타내지 못하는 것이 특징이나, 준결정체는 구조적으로 5축 대칭성을 보이면서 상당히 긴 결맞음 길이를 가지고 있고(수백 마이크로미터 이상) 특히 격자 내부와 격자 간 공간이 크고 그 종류와 숫자가 많아 수소를 저장하기에 알맞은 구조로 되어있다. 이러한 다격자 준결정체의 구조적 특징은 원자들로 이루어진 팔면(octahedral)과 사면(tetrahedral) 구조를 가진 격자 공간이 많은데 이렇게 이루어진 공간들의 크기는 한 변의 길이가 약 3 Å 내외인지라 크기가 작은 원자들을 흡수하기에 알맞은 구조로 되어있다. 특히 TiZrNi로 이루어진 준결정체는 구조적으로 격자(interstitial site)가 많이 존재하고 화학적으로 수소 친화적일 뿐 아니라 밀도면에서 액체 수소보다 많은 양의 수소를 가역적으로 저장할 수 있다는 점이 알려지면서 석유 에너지를 대신하는 깨끗한 차세대 에너지 저장매체의 가능성을 내포하고 있다. 수소저장물질로 활용하기 전 파악해야 할 중요한 성질 중의 하나가 적절한 온도와 압력에서의 수소를 흡수하는 격자에너지 값과 분포이다. 이들은 압력-온도-성분(pressure-temperature-composition)에 따른 평형증기압(equilibrium vapor pressure)곡선을 측정하여 유추할 수 있는 바, 시료에 분포하는 격자에너지는 아래와 같은 방법으로 추론할 수 있다. 먼저, 본 계산을 하기 위해 두 가지 가정을 하였는 바, 첫째, 시료 내에 존재하는 격자에너지 분포는 Boltzman 통계를 따르고, 둘째, 수소원자가 각 site에 차지할 때는 Fermi-Dirac 통계를 따른다는 것이다. 참고로, 수소가 시료에 흡수되었을 경우, 시료에 따라서 혹은 site energy 분포에 따라서 국지적으로 고밀도 현상을 보일 수 있으나, XRD와 NMR 측정에 따르면 수소는 시료에 골고루 분포한다는 것이다. 즉, 만약 수소원자가 균일한 사이트에 골고루 흡수하지 않고 특정한 사이트에만 집중한다면 XRD 회절 픽은 갈라져야 하지만 측정된 픽들은 폭이 결정에 버금갈 만큼 좁고(FWHM, d값 기준 0.105 Å) 특히 수소가 흡수된 시료의 NMR 측정을 하면 수소의 second moment 값은 흡수된 수소량에 선형으로 증가함을 보임으로써, 수소가 흡수되는 격자에너지가 균일하게 분포되어 있다는 것을 알 수 있다.^[17] 또한 시료에 흡수된 수소의 chemical potential은 가스상태 수소의 그것에 비해 평형상태에서 1/2이라는 점을 고려하고 등온흡착 실험을 통해 측정된 수소의 평형증기압과 시료에 흡수된 수소원자의 몰 수와 비교하면 격자에너지 값과 분포를 구할 수 있는 바, Ti/Zr으로

REFERENCES

- [16] D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias and J. W. Cahn. Phys. Rev. Lett. **53**, 1951 (1984).
- [17] K. R. Faust, D. W. Pfirsch, N. A. Stojanovich, A. F. McDowell, N. L. Adolphi, E. H. Majzoub, J. Y. Kim, P. C. Gibbons and K. F. Kelton, Phys. Rev. B **62**, 11444 (2000).

Fig. 4. XRD patterns of TiZrNi quasicrystals as increasing pressure measured after using pressure medium Silicon oil (left) and hydrogen (right). The amounts of absorbed hydrogen in the samples were estimated by measuring the degree of main-peak shifts and the maximum value was determined to be 4.1 wt.% which is close to the target of Department of Energy in US.

구성된 준결정체의 경우 격자에너지 값은 약 0.1 eV 내외임을 알 수 있다.^[18] 하지만, 시료에 흡수된 수소원자의 전기 퍼텐셜을 고려한 수소 원자 간의 최소거리는 2.1 Å이라는 Switendick criterion과^[19] 구조면에서 아직 수소가 차 있지 않은 격자들이 많이 남아 있다는 사실에 근거하여 본 연구팀은 수소분위기하에서 다이아몬드 앤빌 셀을 이용하여 수소흡수를 활성화시키는 연구를 진행하였다. 그 결과 수소 만 기압 단위를 가하였을 경우, 측정된 X-ray 회절 피크 확연히 왼쪽으로 이동하는 바, 압력에 따른 자체 셀의 수축에도 불구하고 수소흡수에 의한 격자가 팽창하는 결과를 얻었다 실제로 압력매질을 실리콘오일을 사용하였을 때와 수소를 사용하였을 때 측정된 XRD 결과는 회절된 주요 피크의 위치가 d값 기준 $0.2588 \text{ \AA}^{-1}$ 이동하며(그림 4), 무게 저장면에서 4.1 wt.%에 해당하는 수소 흡수량이다(그림 5).^[20] 이는 압력을 이용하여 시료의 최대 수소흡수량을 갱신할 수 있는 예이며, DOE에서 2017년 7월 새로 설정한 수소에너지 저장매체 발굴 목표량인 4.5 wt.%에 근접한다.

국제협력을 통한 국내 압력연구

과학을 비롯한 거의 모든 분야에서 그렇듯이 압력연구 또한 그 동안 Lawrence Livermore National Laboratory, University of Nevada Las Vegas, Washington State University, Carnegie Institution for Science 등을 위주로 연구를 수행해왔던 연구의 무게중심이 미국에서 중국으로 급격히 이동 중임

Fig. 5. Comparison of hydrogen loading capacity for TiZrNi quasicrystals with other potential hydrogen storage materials. The increased amount of hydrogen under pressure of a diamond anvil cell is shown by a red-color diamond.

을 느낄 수 있다. 최근 중국에서는 2014년 고압과학연구센터(High Pressure Science and Technology for Advanced Research)를 설립하여 고압관련 전 분야에서 연구를 시작하였다. 최근 한양대에서는 한국연구재단에서 지원하는 해외우수연구기관유치사업(Global Research Development Center)의 일환으로 HPSTAR와 미국카네기연구소의 극한연구팀을 유치하여 관련분야의 국제공동연구 및 국내 고압연구의 허브역할을 수행하고 있다(<http://hpc.hanyang.ac.kr>).

맺음말

측정기술의 발전에 따른 시공간의 한계는 이제 인류의 탐구 영역을 압력을 이용한 극한 분야로 넓혔다. 압력과 온도를 변수로 하면 주기율표상 원소의 물성이 확연히 바뀌게 되는 바, 압력을 새로운 축으로 하는 3차원 주기율표를 제작할 수 있다. 또한 압력을 이용하면 온도가 이르지 못하는 고 에너지 범위를 실험실에서 구현할 수 있다. 현 단계에서 고압연구는 초고압에 이르기 위해 시료 크기가 작고 상대적으로 실험 비용이 많이 들어 상업성보다는 지식의 지평을 넓히는 기초연구면에서 수행되고 있지만, 조만간 다이아몬드를 주원하는 초강도, 상온 초전도, 고밀도-초에너지 등 슈퍼물성 소재를 개발할 뿐 아니라 기초과학전반에 걸친 지식이 확장될 수 있기를 기대한다.

REFERENCES

- [18] J. Y. Kim, R. Hennig, V. T. Huett, P. C. Gibbons and K. F. Kelton, J. Alloys Compd. **404**, 388 (2005).
- [19] A. C. Switendick, Z. Phys. Chem. NF **117**, 89 (1979).
- [20] J. Y. Kim *et al.*, Manuscript in preparation.