

고압력 발생 기술 및 응용

윤 우영* · 안 영재**

(*고려대 공대 금속공학과 조교수)

(**한국과학기술원 기계공학부 선임연구원)

1. 서 론

20세기 초 하버드 대학교의 Bridgman 교수가 물성 연구를 위하여 압력을 본격적으로 도입한 이후, 금속 화합물의 상평형, 새로운 재료의 제조, 재질의 압력에 따른 기계 및 물리적 또는 전기적 성질의 변화에 관한 많은 연구가 고압하에서 수행되어 왔다.¹⁾ 새로운 고압발생 장치의 개발과 함께, 수심만 기압의 정압(Hydrostatic Pressure) 뿐만 아니라 속-웨이브(Shock-wave)에 의한 동압(Dynamic Pressure)하에서의 물성 연구 또한 많은 진척이 있었다.²⁾ 물리, 화학, 그리고 금속학자들 뿐만 아니라, 지질학자들도 압력을 이용하여 지구의 맨틀 층에서 생성되어 화산활동에 의하여 분출되었을, 그리하여 현 지구상에서는 관찰되어지지 않으나, 화산석에서는 발견되는 새로운 광물질의 제조에 성공하였다.

1955년 미국의 제네럴 일렉트릭 회사에 의하여 고압하에서의 다이아몬드제조가 발표된 이후, 신재료 제조에 있어 압력의 이용은 비로소 실험실 단계를 넘어 본격적으로 산업에 이용되기 시작하였다. 즉, 수년에 걸쳐 수많은 새로운 조밀상이 기존의 원소에서 발견되었고, 이러한 고압하에서 안정한 상(고압상)은 대기압하에서의 안정한 상과 매우 다른 물리적 성질을 지닌다. 예를 들면, 실리콘(Si)과 게르마늄(Ge)의 고압상은 백주석의 경우와 같이 금속 구조를 가지며, 비스무스의 고압상 중 Bi II와 III은 저온에서 초전도 현상을 보인다. 심지어 매

우 높은 압력(수백만에서 수억기압까지) 하에서는 대기에서 기체인 수소나 헬륨까지 고체 금속이 될수있다.

이성분계의 압력에 관한 연구는, 1960년대 초 주기율표상의 III-V 족과 II-VI 족 반도체 화합물에서 조밀한 금속상의 발견과 더불어 시작되어, 1965년 이래 고압기술의 빠른 성장에 힘입어, 이성분계뿐만 아니라 삼성분계에서도 새로운 고압상을 여러 조성에서 발견하게 되었다.

압력이 새로운 물질의 제조와 물질의 성질 변화에 이용되는 이유는 크게 열역학적인 원인과 동역학적인 원인으로 나눌수 있다. 물질의 상태를 나타내는 자유에너지 구성분중 압력에 의존하는 항인, $(P\Delta V)$ 의 변화로 각 상의 평형조건이 바뀔뿐 아니라, 평형 결함조성(Equilibrium Defect Concentration), 평형 입계 및 전위 에너지 또한 바뀌고, 동적 요소인 물질의 확산도(Diffusivity)등도 바뀌게된다.³⁾ 자유에너지중 압력 의존도는 온도 의존도에 비하여 매우 작은 량으로 사료되나, 동질이 상(Polymorphism)에서의 결정 구조에 따른 에너지 차이 또한 매우 작기 때문에, 고압하에서는 결코 그 양을 무시할수 없다. 예를 들면, 주석의 경우 다이아몬드 입방정 구조의 상(회주석)과 정방정 구조의 상(백주석)간의 에너지 차이는 절대 온도 0°에서 단지 0.022 eV/atom 또는 510 cal/mole 이며, 코발트의 경우는 더욱 줄어 0.0026 eV/atom 또는 60 cal/mole 에 불과하게 된다.⁴⁾ 바륨(Ba)과 탈륨(Tl)의 고압상과 대기압상의 에

너지 차이 또한 100 cal/mole 정도에 불과하다.⁶⁾실제로, 이 정도의 차이는 금속 응집력의 양자역학적 계산상에 발생하는 오차의 단위보다도 적은 양인것이다. 그러므로, 고압하에서의 자유에너지 변화는 무시되어 질수 없으며, 또한 주어진 온도와 압력 영역에서 특정 금속이 어떠한 결정구조를 갖을 것인가에 대한 예측은 거의 불가능하게 된다.

압력에 의한 자유에너지 변화는 대략계산에 의하면 다음과 같다. 금속상의 1 mole 당 부피는 대략 10cm³이며, 구조변화에 따른 부피 변화 ΔV는 대개 5% 내외라고 하면, 50 Kbar의 압력에 따라 발생하는 자유에너지(PΔV)는 약 600 cal/mole에 상응한다. 이미 언급하였듯이, 기타 압력에 따른 다른 변화들을 무시하고서도, 이 양만으로 충분히 새로운 결정구조, 즉 동질이상을 기대할 수 있다. 이성분계 이상의 경우는 고압상이 존재할 확률이 많아진다. 다시 말해, 대기하에서 들뜨는 그 이상 원소의 일정 정수비에 의하여 존재하는 화합물들은 대개 고압하에서는 불안정하게 되어 보다 조밀한 상으로 상변태를 하게되며, 구성 원소들의 압력 변화에 적응하는 형태가 일반적으로 일정하지 않기 때문에 이들의 혼합물들에서는 더욱 많은 새로운 상들이 존재할 수 있게 된다. 더우기, 대부분의 고압상들은 고압하에서 급냉을 시키면 대기중에서도 준 안정상으로 존재가 가능하므로 새로운 재료의 제조에 있어 압력의 이용은 그 전망이 매우 밝다고 할수있다.

고압하에서의 물성 연구와 더불어 발전된 고압 발생 기술은 기계 생산 및 가공 분야에도 많은 파급효과를 가져왔다. 초고압 프레스 및 용기 제작과 이를 통한 정수압 성형(Hydrostatic Forming) 기술과 유체 분사 절단(Liquid Jet Cutting) 기술은 대표적인 예이다. 또한 폭발(Detonation)에 의한 고압 발생과 이를 이용한 표면처리 기술이 유니언 카바이드회사에 의하여 개발되어 항공기 소재의 성능 및 내구성 향상에 이용되는 등 기계공업 분야에서의 고압 이용도 점차 증진되고 있다. 이 논문에서는, 최근 극한 기술, 즉, 고온, 고압, 저온 및 진공 기술에 대한 관심이 고조됨에 따라 고압에 대한 기본적인 이해와 응용영역의 소개에 중점을 두고있다.

2. 고압 발생 장치 및 기술

고압 사용의 증가에 따라 고압 발생 장치 및 안전 문제

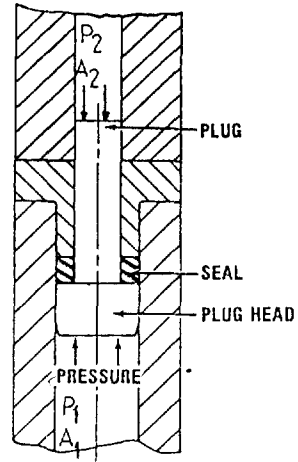


그림 1. 고압 발생 원리

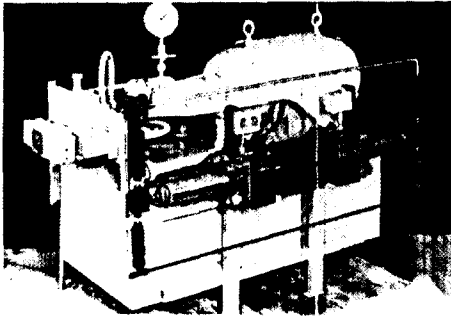
에 관한 기본적 지식이 요구된다. 고압 발생 장치의 설계, 생산, 시험 및 작용에 관하여 단순한 지침을 갖기란 불가능하며 고압 원리의 이해와 경험의 축적이 안전하고 성공적인 고압 이용에 필수적이다. 고압 발생의 기본 원리는 그림 1과 같이 플러그 또는 피스톤 양단의 면적의 차이에 기인한다. 즉, 피스톤 양단에 걸리는 압력과 면적을 각각 P₁, P₂ 그리고 A₁, A₂라 하고 관성을 무시하면, 고압부의 압력 P₂는 다음과 같이 표시된다.

$$P_2 = P_1 \times (A_1 / A_2)$$

본장에서는 sockbar까지의 압력영역에서 주로 사용되어지는 압력 발생 장치를 간단히 설명하겠다.

2.1 상업용 고압 발생 장치

일반적인 고압 발생 장치는 여러 부품으로 구성된다(그림 2). 고압 사용자는 전기회로의 경우와 마찬가지로 각 부품들의 특성을 이해하고 시스템의 연결이 잘 맞는가를 염두에 두어야한다. 가장 중요한 두 부분은 펌프/컴프레서와 고압 용기이며 압력 발생 장치의 성능을 결정한다. 이와 함께, 압력 측정 장치, 튜브, 커넥터, 밸브, 실, 안전장치 및 전기장치들도 중요한 부품들이며 목적에 부합하는 압력의 발생 및 안전성에 큰 영향을 미친다. 상업용 고압 발생 장치는 20 Kbar가 최대 압력이며 그 이상의 고압은 새로운 장치에 의해서만 가능하다.



어지며 실린더는 여러개의 링을 가지며 안쪽의 링에 의하여 반경 및 축방향의 지지를 받는다. 재료는 백금으로 만든 용기 안에 위치하며 pyrophyllite 라는 물질이 압력을 재료에 전달한다. 용기의 외부는 몰리브데넘이나 그라화이트 슬리브로 된 로(furnace)와 접촉되어 있고 이 로는 피스톤을 통하여 저압 고전류의 파워와 연결되어 재료의 온도를 1,500°C~2,000°C까지 올릴 수가 있다. 이 피스톤-실린더 장치는 200톤 프레스와 0.1cm² 부피의 캡슐을 사용하여 50 Kbar까지의 고압을 발생시킨다.⁶⁾

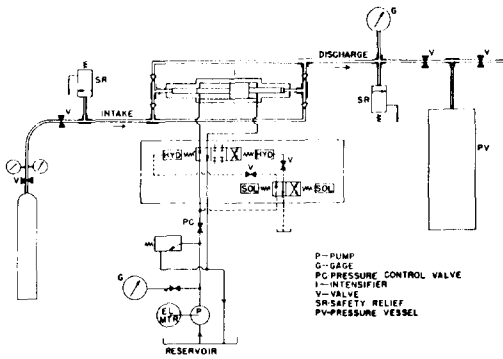


그림2. 상업용 압력 발생 장치

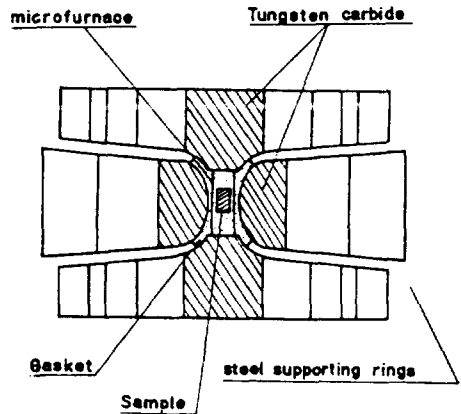


그림4. 벨트형 고압 발생 장치

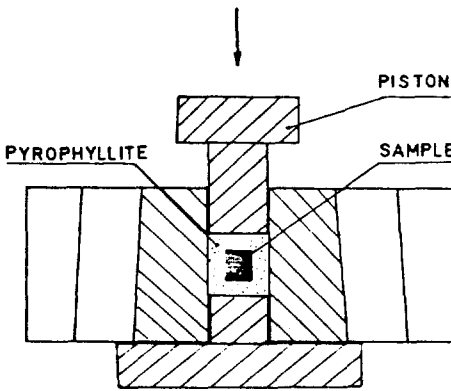


그림3. 피스톤-실린더 고압 발생 장치

2.3 벨트형 장치(Belt-type Apparatus)

피스톤-실린더 장치는 기하학적 모양에 의하여 40 Kbar 이상의 압력에서 자주 균열이 발생하기 때문에 이 경우 그림 4와 같은 벨트형 장치가 추천된다.⁷⁾ 벨트형 장치는 비교적 큰 부피에 고압 발생이 용이하며 고온을 쉽게 만들수 있기 때문에 대부분의 인조 다이아몬드나 육각 보론나이트라이드의 제조에 사용된다. 외부로 부터 앤빌(Anvil)에 추가의 지지가 가능하므로 50~100 Kbar의 압력 발생에 사용되며 압력용기 안에서 재료에 비교적 균일한 압력을 가할수 있는 장점을 가지고 있다.

2.2 피스톤-실린더 장치(Piston-Cylinder Apparatus)

이 장치는 그림 3과 같이 피스톤과 실린더의 두 주요 부분으로 구성되어 있으며 직접 재료에 고압을 가한다. 피스톤은 일반적으로 세멘트드 텅스텐 카바이드로 만들

2.4 사면체 장치(Tetrahedral Apparatus)

이 장치는 비교적 복잡한 모양을 가지지만 기본적 개념이 그림 5에 나타나 있다. 여러 가지 응용된 장치들이

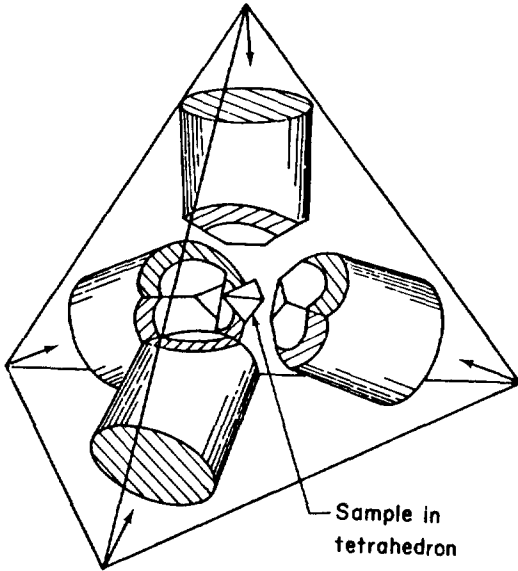


그림5. 사면체 고압 발생 장치

있으며 상업용으로도 개발이 되어있다. 중앙에 위치한 사면체 모양의 재료가 각기작동되는 4개의 피스톤에 의하여 힘을받는 4개의 앤빌에 의하여 압력을 받는다. 압력이 가해짐에 따라 플라스틱 유동이 생기며 이것이 앤빌 사이의 공간을 메꾸는 가스켓(Gasket)의 역할을 한다. 이 장치는 벨트형 장치에 필적하는 온도와 압력 범위에서 사용된다.⁹⁾

2. 5 브리지만 앤빌 장치(Bridgman Anvil Device)

브리지만 앤빌 장치(그림 6)는 150~250 Kbar에 해당하는 정압을 발생 시킬수 있다.⁹⁾ 텅스텐 카바이드로 만들어진 앤빌은 안쪽으로 스트레스를 가할수 있게 만든 스틸 바인딩에 의하여 지지된다. 재료는 얇은 디스크 형태로 되어 있으며 파이프스톤(pipstone)으로 된 가스켓으로 둘러 쌓여있다. 얇은 금속 스트립이 로(furnace)의 역할을 하며 800~1,000℃의 온도를 유지한다. 이 장치의 단점은 재료가 없다는 것이며 매우 작은 부피에도 불구하고 온도를 가하는데 문제가 있는 것이다. 앤빌은 쉽게 손상을 받을수 있으나 장치의 단순함때문에 다방면에서 사용되고 있다.

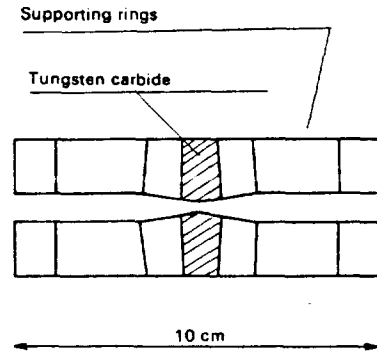


그림6. 브리지만 앤빌 고압 발생 장치

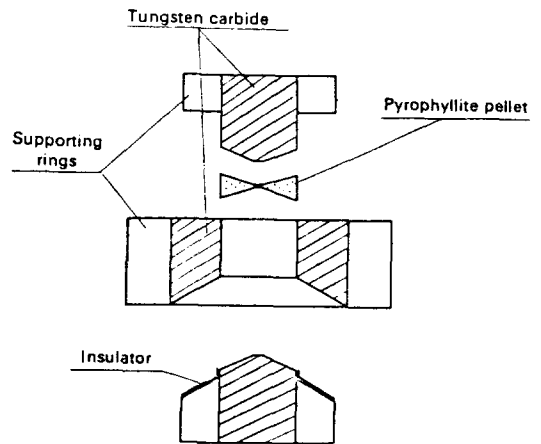


그림7. 드리크마 앤빌 고압 발생 장치

2. 6 드리크마 앤빌 장치(Drickmar Anvil Device)

500 Kbar 까지의 고압 발생시는 그림7과 같은 드리크마 앤빌 장치가 사용된다.¹⁰⁾ 이 장치는 브리지만 앤빌 장치를 개량한 것으로 pyrophyllite pellet에 의하여 앤빌이 지지된다. 이 장치는 고압하의 전기 저항 측정, 광학 성질 측정, 엑스레이 회절및 핵자기 공명의 측정에 사용되나 온도의 제약(500℃)때문에 무기물 합성에는 부적합하다. 이외에 500~1,000 Kbar의 압력 범위에는 속웨이브(Shock wave)방식이 쓰이는데 장치가 매우 복잡하므로 특수 목적에 국한 되어 있다.

3. 고압의 응용

물질의 특성이나 자연현상을 이해하는데, 나아가서는 새로운 상을 제조하는데까지에 걸쳐, 자연과학의 거의 모든 분야와 공학의 여러 분야에서 고압을 이용한 연구가 거듭되어 왔다. 그리하여, 1986년 카네기멜런 대학교에서 성공한 수소금속의 제조로부터, 고압하에서의 비정질 얼음의 제조까지, 새로운 반도체상과 금속상의 제조, 나아가 태양계내의 혹성과 우주의 여러 항성 내부에서 일어남직한 자연계의 비밀을 이해하는데까지 압력은 큰 역할을 하고 있다. 본장에서는 먼저 압력하의 고체 결정구조 변화의 경향에 대한 경험적인 법칙을 간략히 설명하고 몇가지 응용예를 설명하겠다.

3.1 압력하의 고체 결정구조 변화의 일반적 양상

압력하에서는 배위수(Coordination)가 증가하는 방향으로 결정구조가 변한다. 만약 원자가 일정한 반지름을 갖는 딱딱한 구라 한다면, 가장 조밀하게 쌓인 결정구조인 면심 입방 격자(face centered cubic)와 조밀육방정(hexagonal close packed)일 경우에도 (배위수 12)단지 단위 결정의 74%만 원자로 채워져 있다. 이것이 배위수 8인 체심입방격자이면 단지 68%에 불과하게 된다. 이러한 충전율의 감소는 배위수가 낮은 결정구조로 갈수록 그 정도가 심하게 된다. 그러므로, 압력이 증가함에 따라 보다 충전율이 좋은, 즉, 고배위수로의 결정구조 변화가 일어날 것이다. 이런 경우에 해당되는 몇가지 예는 흑연이 압력하에서 다이아몬드를 바꾸는(즉, 배위수 3→4), 또 반도체인 실리콘과 게르마늄이 고압하에서 백주석 구조인 금속으로 바뀌는(즉, 배위수 4→6), 또 철의 bcc→fcc변화(배위수 8→12)등이 이에 속한다. 다만 이경우의 경험법칙은 원자구가 일정한 반지름이고 결정구조간에 수축도(Compressibility)가 같다는 조건하에서이다. 만약 bcc구조때의 원자구의 반지름이 fcc구조때보다 3% 정도 작다면 실제의 밀도는 동일하다. 실제로 Goldschmidt¹¹⁾의 보고에 의하면 배위수의 감소는 격자간의 거리 감소를 수반함을 알수 있다. 즉, 배위수가 8, 6, 4로 떨어질 경우 격자거리가 3%, 4%, 12% 줄어들면 밀도는 배위수가 12인 경우와 같음을 알수 있다. 그러므로, 딱딱한 구모델로는, 철의 경우 bcc→fcc변화에 있어 10%

의 부피 감소가 예견되나 실제로는 1% 정도에 불과한데 이는 변태 온도때의 fcc구조의 격자 거리 2.578 Å보다 bcc때의 격자 거리 2.515 Å으로 약 2.5%가 작기 때문이다.

또다른 변수인 수축율 또한 배위수의 함수이다. 즉, 저배위수때 수축율은 더 커진다. 그러므로, bcc의 수축율이 fcc보다 크기 때문에 결과적으로 고압하에서는 격자간 거리와 고 수축율의 영향으로 bcc가 fcc보다 밀도가 높은 더욱 조밀한 구조가 될 수도 있다. 그러므로, 고압하에서 fcc→bcc로의 변태또한 가능한 것이다. 실제로 천이원소(transition element)에서 이러한 예가 발견된다(고압하에서 Mg은 hcp에서 bcc구조로 상변태).

합금이나 화합물의 경우는, 즉 둘 이상의 서로 다른 원소들이 규칙적으로 배열되어 있는 경우는, 각 구성원소들의 수축율이 서로 다를 뿐아니라 결합방법에 따라서도 달라지는 것을 고려해야한다. 일반적으로, 큰 음이온(anion)은 작은 양이온(cation)보다 수축율이 크다고 생각된다. 그러므로, 압력하에서는 양이온대 음이온의 반지름비 R_c/R_a 가 증가하는 방향으로, 배위수가 증가하는 구조 쪽으로 반응이 진행된다. 예를 들면, CdTe은 압력하에서 배위수 4인 zincblende 형 구조에서 배위수 6인 rocksalt 구조로 바뀌고¹²⁾; HgTe와 HgSe는 zincblende 형 구조에서 역시 배위수 6인 cinnabar 형 구조로 바뀐다.¹³⁾ 반도체인 InSb 또한 zincblende구조에서 백주석 구조(bct, 배위수 6)인 금속으로 바뀐다.¹⁴⁾ 그러나, 고압하에서 양이온과 음이온의 배위수가 모두 증가하는 방향으로 변태가 진행되는 것들도 다수 보고되었고, 특히 이러한 경우의 변태에서는 배위수 변화가 없는 변태때보다(0~10%) 훨씬 부피 변화가(10~14%) 많음이 보고되었다.¹⁵⁾

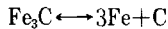
이온 결합 화합물에서의 압력에 의한 상변태는 양이온과 음이온의 배위수 증가 쪽으로도 진행되지만, 또한 배위수 변화가 없는 상변태 또한 많이 관찰되었다. 예를 들면, 석영에서 coesite로, PbO₂ rutite에서 α-PbO₂¹⁶⁾, olivine에서 spinel로 (Fe₂SiO₃¹⁷⁾, Co₂SiO₄¹⁸⁾등의 변태가 이에 속한다. 즉, 이온 결합 화합물에서의 유일한 경향은 anion packing이 고압하에서 보다 적절하게 되는 쪽이라는 것이다.¹⁹⁾

위의 여러 예에서 보듯이, 여러 모순되는 경향이 존재하는 듯하다. 하지만, 단 하나 절대적인 원리는 고압에 의한 변태는 적절한 충전(packing)이어야 한다는 것이

다. 그러므로, 고압상의 밀도는 대기압상보다 항상 커야 한다.²⁰⁾ 즉, 만약 대기압상이 충전율이 좋지 않은 구조라면, 압력에 의한 상변태가 일어날 확률이 더욱 많은 것이다.

3.2 고압하의 물성치 연구 및 신소재 제조

철-탄소계에서는 1,000°C, 3~4 Kbar 정도의 압력하에서도 다음과 같은 반응이 오른쪽으로 진행된다.²¹⁾



그러므로, 이 정도의 압력하에서도 백주철, 회주철 모두의 상변태가 소둔처리중 크게 변할수 있음을 알수 있다. 위와 같이 압력은 반응의 평형을 변화시킬 뿐만아니라, 순원소에서 동질이상을 갖게 하며, 화합물이나 합금에서는 액상선(liquidus)과 대기하에서의 상변태를 변화시킨다. 뿐만 아니라, 대기하에서는 존재하지 않는 상을 만들어내며, 더우기 이 고압상은 왕왕 준안정상으로 상온·상압에서도 존재할 수 있어 새로운 재료로 사용되어 지기도 한다.

압력에 대한 연구의 시작은 순원소의 압력-온도 상태도의 제작으로부터 시작되어²⁰⁽²²⁾, 고압상들의 결정구조 및 성질 연구로 발전되어 왔다.²³⁾ 또한, 금속합금, 반도체 재료, 이온 화합물등의 다원소계에서도 많은 연구가 진행되어, 상온·상압하의 중간 화합물의 변화뿐 아니라, 새로운 조성에서의 중간 화합물을 찾는 데 까지, 그리하여 다성분계의 고압하에서 온도-조성 상태도를 제작하기에 이르렀다.⁵⁽²³⁾⁽²⁴⁾ 심지어는, 최근에 급속히 이용이 증가되는 다이아몬드 앤빌로 수Mega기압하에서의 연구도 가능하며, 이를 이용하여 절연체인 고체 Xenon을 1.3Mega기압하에서 금속상으로 제조하였고, 요오드(Iodine) 또한 200Kbar에서 금속으로 상변태 하였다.²⁵⁾ 특히, 이러한 절연체의 금속으로의 변태는 물리학의 에너지 밴드이론의 증명에 큰 도움이 된다.

지질학 또는 지구과학에서의 압력연구 또한 활발하다. 즉, 모든 흑성의 기원이나 활동의 근본적 이해는 압력과 온도 변화에 크게 영향을 받는, 깊이에 따른 흑성의 화학 성분, 상, 그리고 밀도에 대한 자세한 이해가 선행되어야 한다. 한 예로, 다이아몬드 앤빌 셀과 지진파의 연구 결과로, 지하 400km에서의 지진파의 갑작스런 증가는 마그네슘과 철 실리케이트 올리빈(Mg Fe)₂SiO₄ 이 spinel이라는 보다 조밀한 구조로의 변화때문이며, 지하 670

km에서의 지진파 증가 또한 스피넬에서 perovskite로 알려진 구조로의 상변태 때문임이 알려졌다.²⁶⁾ 앞으로 보다 큰 흑성인 목성이나 토성의 구조, 그리고 태양계의 다른 흑성들, 천왕성, 명왕성 등에 대한 주요 구성 성분의 압력에 따른 구조 등에 관한 연구가 계속 될 것이다.

끝으로 산업계에서 특히 관심을 갖는 합성 다이아몬드와 보론나이트라이드(BN)의 제조에 관해 간략히 설명하겠다. 다이아몬드는 flux를 사용하지 않으면 140 Kbar, 3,700°C의 액체로부터 단결정으로 자랄수 있다.²⁷⁾ 그러나, Ni-Fe-C의 삼성분계를 이용하여 (Ni-C로부터 Fe₃C상을 촉매로 하여) 비교적 저온(1,400~1,450°C), 저압(54Kbar)에서 벨트형 압력 발생 장치로부터 cm 크기의 다이아몬드가 고체 흑연으로부터 제조되었다.²⁸⁾ 보다 구체적인 작업 조건들은 참고 문헌²⁹⁾에서 찾아 볼수 있다. 그러나, 아직도 다이아몬드 제조는 공정 자체가 비싸고 보석급의 제품 생산에는 못 미치는 상태이나 연마제로 쓰이는 작고 색이 있는 다이아몬드의 제조는 가능하다.

BN의 입방정 고압상 또한 연마제로 중요한 가치를 갖고있어 많은 연구가 진행되었다.³⁰⁻³²⁾ 대략 다이아몬드의 제조에서 요구되는 정도의 압력과 온도가 입방정 BN (통칭 Borazon이라 부름)의 제조에 필요하나 단지 촉매만 다를 뿐이다. 이 경우는 알칼리 금속과 알칼린 금속, 또는 그들의 질소 화합물을 촉매로 (또는 flux) 사용한다.

근래에 들어서는 위 예들의 개념과 다른 형태의 실험이 진행되는데, 그 한예는 저온에서 얼음을 가압함으로써 비정질의 얼음의 제조에 이용하는 등³³⁾, 또 가압이나 감압속도 조절로 새로운 상을 제조 하는 방법³⁴⁾ 등이 개발되고 있다. 그러므로, 앞으로의 압력은 물성 조사의 단계를 넘어 본격적으로 기존의 결과를 응용하는 새로운 개념으로 연구가 진행될 것이다.

4. 고압을 이용한 생산기술

과학과 기술의 발전과 함께 신소재, 복합재료, 그리고 특수 합금의 사용이 급증되고 있다. 이들 재료들은 가는 와이어나 튜브 형태뿐만 아니라 특별한 모양으로의 가공이 요구되며 재질 특성에 따른 난형성때문에 생산의 어려움이 야기된다. 이런 생산의 난점을 극복하기 위하여 새로운 가공기술이 개발되고 있다. 정수압 압출³⁵⁾ 같

은 고압을 이용한 금속 성형 방법은 하나의 예가 되며 신소재의 가공 및 생산뿐만 아니라 기존의 철, 구리합금, 알루미늄과 같은 재료의 생산에도 큰 힘을 발휘하고 있다. 정수압 압출은 고압 작동 유체를 이용, 금속을 다이를 통하여 압출시킴으로써 원하는 형상, 대개 와이어나 튜브를 만드는 기술이다. 사용되는 압력은 재질에 따라 다르며 이 기본적 개념을 이용한 여러가지 변형된 형태의 기술들도 개발되어 있다.^{36) 37)}

또한 고압은 유체 제트 분사장치에 이용되고 있다. 이 장치는 유체에 고압을 가한 후 노즐을 통하여 유체의 압력을 속도를 바꾸어 제트를 발생시키는 개념을 이용한 것으로 연속 제트와 파동(pulsed) 제트를 만들기 위하여 각각 14Kbar와 70Kbar의 압력에서 연구가 진행되고 있다. 유체 제트 분사장치는 크게 3가지 분야, 즉, 제트 절단, 취성재료의 제트 분해(disintegration) 및 재료 분리(Separation)에 응용되고 있다. 제트 절단은 최근에 산업계에 소개된 절단 기술로 주로 목재, 플라스틱, 고무, 가죽, 종이 냉동 식품등의 가늘고 예리한 절단에 사용된다.³⁸⁾ 유체는 4Kbar 정도의 압력을 받으며 보통 0.4mm보다 적은 직경을 갖는 초경 노즐을 통하여 음속의 2~3배 정도의 속도를 갖는 제트를 발생 가공물 표면을 강타하여 가공물을 절단한다. 최근에는 제트에 연마제를 혼합시켜 연마제가 제트와 함께 절단하는 연마제 절단법이 개발되어 강철뿐만 아니라 항공기에 사용되는 타이타늄 및 고분자 복합재료의 절단에도 크게 각광을 받고 있다.³⁹⁾ 제트 분해는 바위, 광석, 석탄등의 채석, 터널링 및 드릴링뿐 아니라 콘크리트 절단 제거에 사용되는 기술이다. 4Kbar의 연속 제트와 2Kbar에서 70Kbar 사이의 파동 제트가 사용되며 제트와 바이트가 같이 사용되는 혼합방식도 개발되어⁴⁰⁾ 광산 및 도로공사에 쓰이고 있다. 또한 원격 조정 장치에 의하여 해저 공사에서도 쓰이는 예가 있다. 끝으로, 제트 분리는 제트 세척으로 배의 세척 및 기계 가공물의 burr 제거에 널리 사용된다.⁴¹⁾ 압력은 1,000기압 이하이며 다량의 압축된 유체가 사용된다. 최근에 유럽에서는 유체 제트 절단에 관한 심포지움이 격년제로 개최되고 있으며 고압의 응용의 확산에 큰 영향을 미치고 있다.

5. 결 론

고압 장치 기술의 급속한 발전에 힘입어, 여러 종류의 고압 장치와, 보다 높은 기압 조건에서의 연구가 진행되고 있으며, 이러한 기술을 이용하여 새로운 재료의 제조뿐 아니라, 종래 기술과 압력의 복합된 기술 또한 산업계에서 실용화 되고 있다. 고압하에서의 단결정 성장 기술 개발로 인조 다이아몬드와 BN 등을 만들수 있었으며, 새로운 반도체 재료 또한 만들어져 왔다. 이와 함께 산소재의 제조에 중요한 역할을 해온 초급속 응고법(rapid solidification processing)들과 압력과 연계하여, 준안정상의 생성과 그 결정구조등의 제 성질의 확인도 보다 쉽게 되어지고 있다. 학문적으로도 여러 원소뿐 아니라 화합물들의 열역학적 성질을 확인 할 수 있었으며 결정학적인 면에서의 결정 격자의 안정성등은 앞으로 압력 실험으로 그 이해가 크게 증진될것이다. 또한 지구과학적인 면으로도 발전을 하여 우주의 신비를 푸는데 기여 할 것으로 간주된다.

고압 장치 기술의 발전은 기계 생산 및 가공 분야에서도 큰 영향을 주고 있으며 고압 기술의 응용을 통한 난형난삭재의 가공에 돌파구를 주고 있으며 기계 및 생산공학 분야에서의 고압 사용은 산업재료의 응용 확산과 함께 급증되어 갈것이며 고압 사용에 따른 안전문제에 크게 관심을 보이게 될 전망이다.

참 고 문 헌

- 1) P.W. Bridgman, "The Physics of High Pressure," G. Bell & Sons, Ltd, London, (1952)
- 2) M.H. Rice, R.G. McQueen, and J.M. Walsh, "Solid state physics," F. Seitz and D. Turnbull (Eds.), Vol. 6, Academic Press, Inc., N.Y., 1, (1959)
- 3) J.H. Hilliard and J.W. Cahn, in "Progress in Very High Pressure Research," F.P. Bundy, W.R. Hibbard and H.M. Strong (Eds.), John Wiley & Sons, N.Y., 109, (1961)
- 4) D.R. Stull and G.C. Sinke, Thermodynamic Proper-

- ties of the Elements, American Chem. Soc., Washington D.C., (1956)
- 5) L. Kaufman, in "Solids under Pressure," M. Paul and D.M. Warschauer(Eds.), McGraw-Hill, N.Y., 303, (1963)
 - 6) F.R. Boyd and J.L. England, *J. Geophys. Res.*, 65, 741, (1960)
 - 7) H.T. Hall, *Rev. Sci. Instr.*, 31, 125, (1960)
 - 8) L.F. Vereschchagin, V.A. Golaktinov, A.A. Smerchan, and V.N. Slesarv, *Dokl. Akad. Nauk., SSSR*, 132(5), 1059, (1960)
 - 9) P.W. Bridgman, *Proc. Am. Acad. Arts sci*, 81, 165, (1952)
 - 10) A.S. Balchan and H.G. Drickmar, *Rev. Sci. Instr.*, 32, 308, (1961)
 - 11) V.M. Goldschmidt, *Mat. Naturv. K.*, 57, (1926)
 - 12) I.Y. Borg and D.K. Smith, *J. Phys. Chem. Sol.* 28, 49, (1967)
 - 13) A.N. Mariano and E.P. Warekois, *Science*, 142, 672., (1963)
 - 14) H.A. Gebbie, P.L. Smith, I.G. Austin and J.H. King, *Nature*, 188, 1095, (1960)
 - 15) R.D. Shannon and C.T. Prewitt, *Mat. Res. Bull.* 4, 59, (1969)
 - 16) W.H. White, F.Dackille, and R. Roy, *J. Amer. Cer. Soc.* 44(4), 170, (1961)
 - 17) A.E. Ringwood, *Nature*, 187, 1019, (1960)
 - 18) A.E. Ringwood, *Nature*, 198, 79, (1963)
 - 19) M. Marezio, *Trans. Am. Cryst. Assoc.* 5, 29, (1969)
 - 20) W. Klement and A. Jayaraman, in "Progress in solid state chemistry", Vol. 3, 289, Pergamon, (1966)
 - 21) T.P. Ershova and E.T. Ponyatovskii, *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 151(6), 1364, (1963)
 - 22) A. Jayaraman, in "Annual Review of Materials Science", Vol.2, (1972).
 - 23) W. Yoon, Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, (1987)
 - 24) J.C. Joubert and J. Chenvas, in "Treatise on solid state chemistry", N.B. Hannay(Ed.), Plenum, N. Y. 5, 463, (1975).
 - 25) A. Jayaraman, *Scientific America*, Apr., 54, (1984).
 - 26) Y. Kudoh, E. Ito and H. Takeda, *Phys. chem. Minerals*, 14, 350, (1987).
 - 27) F.P.bundy, *Science*, 137, 1057, (1962).
 - 28) H.M.Strong, in "Symp. on Rate Processes at High Pressure", Chemical Institute of Canada, American chemical society, Toronto, Ontario, May28, (1970)
 - 29) R.H. Wentorf, *J.Phys. chem.* 75(12), 1833,(1971).
 - 30) R.H.Wentorf, *J.Chem. Phys.* 26, 956, (1957)
 - 31) R.H.Wentorf, *J. Chem. Phys.* 36, 1990,(1962)
 - 32) F.P.Bundy and R.H.Wendorf, *J. Chem. Phys.* 38, 1144,(1963)
 - 33) O.Mishima, L.D. Calvert and E.Whalley, *nature*, 310(2), 393, (1984)
 - 34) J.A. Sekhar and T.Rajasekharan, *Nature*, 320, 153, (1986)
 - 35) H.L.D.Pugh, *Mechanical Behaviour of Materials under Pressure*, ch. 9, Elsevier, Amsterdam,(1971)
 - 36) H.T.Larker and J.O.H. Nilsson, *Engineering Solids under Pressure*, Inst. Mech. Engrs., 161, London, (1971)
 - 37) A.H.Low, C.J.H.Donaldson and P.T.Wilkinson, *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, 182(3C), (1968)
 - 38) I.L.Spain and J.Paauwe, *High Pressure Technology*, Vol.2, Ch. 13, Marcel Dekker, Inc., N.Y., (1977)
 - 39) M.Hashish, *Proc. 6th Int. Symp. on Jet Cutting Tech.*, BHRA Fluid Eng., Cranfield, England, 447, (1982)
 - 40) R.J.Fowell and S.T.Johnson, *Proc. 7th Int. Symp. on Jet Cutting Tech.*, BHRA Fluid Eng., Cranfield, England, 315, (1984)
 - 41) R.Thiel, K.Przyklenk and M.Schlatter, *Proc. 7th Int. Symp. on Jet Cutting Tech.*, BHRA Fluid Eng., Cranfield, England, 337, (1984)