

## Magnetic Pulsed Compaction(MPC)법으로 성형된 Cu 나노 분말 성형체의 미세구조 및 기계적 특성

이근희 · 김민정 · 김경호 · 이창규 · 김홍희

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150, 305-353

### Nanostructures and Mechanical Properties of Copper Nano Powder Compacted by Magnetic Pulsed Compaction (MPC) Method

Geun Hee Lee, Min Jung Kim, Kyung Ho Kim, Chang Kyu Rhee and Whung Whoe Kim

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Dukjindong Yusonggu Daejeon, 305-353, Korea

(Received 15 March 2002 ; Accepted form 15 April 2002)

**Abstract :** Nano Cu powders, synthesized by Pulsed Wire Evaporation (PWE) method, have been compacted by Magnetic Pulsed Compaction(MPC) method. The microstructure and mechanical properties were analyzed. The optimal condition for proper mechanical properties with nanostructure was found. Both pure nano Cu powders and passivated nano Cu powders were compacted, and the effect of passivated layer on the mechanical properties was investigated. The compacts by MPC, which had ultra-fine and uniform nanostructure, showed higher density of 95% of theoretical density than that of static compaction. The pure and passivated Cu compacted at 300°C exhibited maximum hardnesses of 248 and 260 H<sub>v</sub>, respectively. The wear resistance of those compacts corresponded to the hardness.

**Keywords :** Nano Cu powder, Pulsed Wire Evaporation(PWE), Magnetic Pulsed Compaction(MPC)

## 1. 서 론

나노기술은 주요 기존기술을 대체하거나 새로운 산업을 창출하고 에너지, 환경, 전산, 의약, 우주항공, 전기, 통신 등 모든 분야에서 전형적인 과학적 모델들을 변화시킬 잠재력을 가지고 있다.<sup>1-6)</sup> 이러한 나노기술의 핵심요소인 나노재료는 조대한 결정립 재료에 비해 경도, 인성, 연성들의 기계적 특성이 우수할 뿐만 아니라 전자기적, 광학적, 촉매기능 등에서 여러 가지 우수한 성질을 보인다.<sup>7)</sup> 특히, 금속 나노분말은 입자 미세화에 따른 전자기적 특성, 기계적 특성 향상 및 기존재료와는 다른 새로운 특성<sup>8)</sup>으로 인해 차세대 소재로서 크게 기대된다.

금속 나노분말의 제조는 액상환원법, 기상합성법, 증발응축법, 침전법, 전기폭발법, 기계적 분쇄법 등 여러 가지 방법으로 가능하다.<sup>9-14)</sup> 본 연구에서 적용

한 전기폭발법<sup>15-16)</sup>(Pulsed Wire Evaporation:PWE)은 펄스파워를 이용하여 대전류, 고전압을 순간적으로 금속 도선에 인가하여 금속분말을 제조하는 방법으로 증발응축법 중 하나이며 나노 크기의 순수한 금속분말을 제조하고, 대량생산이 가능하다는 장점이 있다.

한편 제조된 나노 분말의 우수한 성질을 상업화하기 위해서 나노분말의 성형 및 벌크화 기술이 필요하다. 분말의 성형 및 압축의 궁극적인 목적은 균일하고 높은 밀도의 성형체를 얻기 위함이다. 성형시 발생하는 불균일한 밀도는 소결시 제품의 뒤틀림을 유발하고, 소결체 내의 잔류 기공들이 기계적 성질을 저하시킨다. 균일하고 높은 밀도를 얻기 위한 분말의 성형 방법으로는 상압 압축(Pressureless pressing), 열간 압축(Hot pressing), 단조(forging) 및 정수압 압축(Isostatic pressing) 등 여러 가지 방법들이 있

다.<sup>17-20)</sup> 최근에는 자기적 펄스를 이용하여 적절한 온도와 상당히 높은 압력으로 분말을 급속히 치밀화시키는 동적 성형 방법<sup>20)</sup>이 개발, 적용되고 있다. 기존의 성형 방법들이 수백MPa의 압력을 수초에 걸쳐 천천히 분말체에 가하여 압축하는 정적 성형방법이라면, 동적 성형방법은 수 GPa의 높은 압력이 마이크로 초( $\mu$ s)내에 분말체에 가해지면서 순간적으로 분말을 압축 성형하는 방법이다. 짧은 시간동안 고에너지가 분말체에 가해지므로 분말의 변형 및 결합에너지를 초과하여 치밀화를 가능하게 한다. 이러한 원리를 이용한 자기 펄스 압축법<sup>21)</sup>(Magnetic Pulsed Compaction : MPC)은 자기력에 의해 분말자체에 압축응력을 가하는 동시에 기계적인 힘으로 압축할 수 있다. 이 방법은 주어진 압축온도에서 순간적인 펄스를 이용하여 하중을 가하므로 압축시간을 줄일 수 있고, 짧은 압축 시간임에도 불구하고 높은 밀도의 치밀한 구조를 갖는 성형체를 얻을 수 있다. 한편 일반적인 동적 성형 방법 이외에 폭발력을 이용한 성형법<sup>22)</sup>도 있으나 이러한 방법은 고온, 고압에서 적용되므로 금속분말의 성형법으로는 적합하지 않다.

본 연구에서는 순수 및 부동태 피막처리한 나노 구리(Cu) 분말을 전기폭발법으로 제조한 후 동적 성형 방법인 MPC법을 이용하여 성형체를 제조하였다. 그 후 미세구조를 관찰하고, 기계적 특성을 측정하여 나노 금속 분말을 동적 성형방법으로 압축하기 위한 최적조건을 모색하였다. 또한 기존의 정적 성형 방법으로 압축한 성형체와 비교하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 전기폭발법을 이용하여 제조된 평균 80 nm의 구형 나노 구리분말을 출발원료로 하였다. 압축방법으로는 동적 성형방법인 MPC법과 정적 성형방법인 일축 압축법(MTS)을 사용하였다. MPC법은 전기펄스 파워를 자기력에 의한 기계적인 펄스로 전환하고 이것을 압축하고자 하는 영역에 집중시켜 분말을 압축하는 방법이다. 본 실험에서 사용한 자기펄스 압축장치는 펄스력(pulse force) 850kN, 인가 시간 300  $\mu$ s 이상, 축적에너지 30 kJ, 인터커 전압은 50 kV 이상으로 사용 가능하다. 시편의 직경은 30 mm 이상으로 제조 가능하며 본 연구에서는 직경 15 mm의 디스크 시편을 제조하였다. 자기펄스 압축

장치는 전기 펄스 제어장치, 고온 압축을 위한 가열·냉각 및 진공장치, 컴퓨터 조절 장치, 오실로스코프, 압력 제어장치, 그리고 압축이 가해지는 다이로 구성되어 있으며 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

순수 구리 분말과 부동태 피막처리한 구리 분말을 각각 3.5 g씩 다이(die)안에 주입하고, 다이가 상·하부 펀치에 일직선이 되도록 정렬하였다. 고온압축시 다이와 분말의 접합을 방지하기 위하여 이형체를 얇게 바른 후, 가열로 내부에 설치하고 일정한 하중과 속도로 압축하였다. 압축온도는 20, 150, 300, 400°C로 변화시켰으며, 압축력은 1.6 GPa, 압축속도는 0.01 m/s, 일정 압축전압 2.4 kV pulse에서 압축하였다. 압축 중 구리 분말의 산화 및 오염을 방지하기 위하여 탈가스 처리한 후 진공상태를 유지하였다. 일부 20, 300, 400°C 압축온도에서 압축 회수를 2, 5회 증가시켜 압축함으로써 압축회수에 따른 영향도 조사하였다. 압축 후 다이와 시편을 가열로 안에서 냉각한 후 꺼내어 아르키메데스 법으로 밀도를 측정하였다. 이 후 0.05  $\mu$ m까지 미세 연마하고 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + NH<sub>4</sub>OH 용액에서 약 10초간 에칭한 후 주사

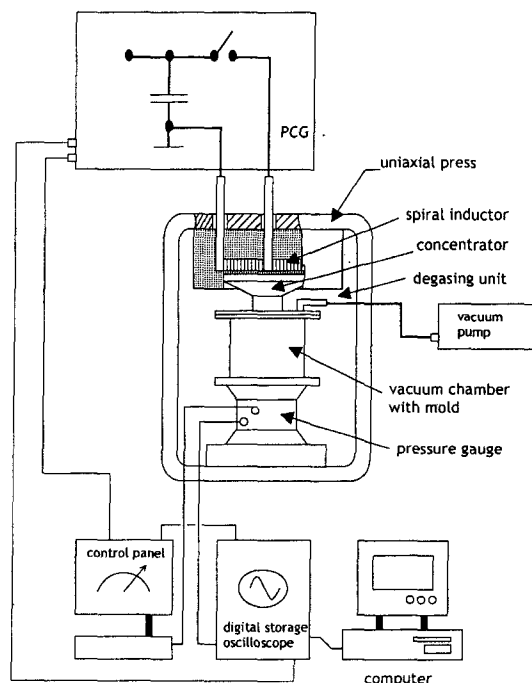


Fig. 1. A schematic diagram of the magnetic pulsed compaction equipment.

전자현미경(SEM)으로 미세구조를 관찰하였고, Micro Vicker's 경도를 시편 중심에서 바깥쪽으로 15회 측정하여 이들의 평균 경도값을 얻었다. 또한 Pin-on-disk 형태의 마모 시험기로 내마모 특성을 조사하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 나노 분말 및 상대밀도

전기폭발법으로 제조된 순수 구리분말과 부동태 피막처리된 구리분말을 주사 전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과가 Fig. 2이다. 제조된 구리분말은 평균 80 nm의 구형 입자였다. 순수 나노 구리분말과 부동태 처리한 나노 구리분말 모두 약간의 양분된 입자 크기분포를 나타내었고, 일부 응집된 입자도 관찰되었다. 이러한 나노 구리분말을 출발원료로 하여 동적 성형법(MPC)과 기존의 정적 성형법(MTS) 법으로 성형한 후 비교하였다.

Table 1은 나노 구리분말과 부동태 피막처리한 구리분말의 압축온도에 따른 상대 밀도를 나타낸 것이다. 동적 성형된 경우 300°C에서 가장 높은 상대밀도 값을 가지며 400°C가 되면서 약간 감소하였다. 일반적으로 분말들을 압축함에 따라 입자들의 변형과 입자간의 결합에 의해 충진도가 높아지는데, 특히 구리와 같은 연성재료에서 압축시 주된 변형은 입자들 간의 접촉점에서 발생한다.<sup>23)</sup> 압력이나 온도가 증가에 따라 입자 재배열로 인하여 접촉점 수는 증가하며, 입자간 미끄러짐은 입자들을 가깝게 하고 동시에 기공 크기 및 기공률을 감소시키므로 높은 밀도를 갖게 한다. 동적 성형방법으로 압축하는 경우 순간적으로 가해지는 압력이 분말 입자의 표면쪽에 많이 걸리면서 집중적으로 변형시키고, 입자간의 접촉점을 많게 하는 것으로 사료된다. 그러나 400°C에서는 소결이 일어나 입자 및 기공의 성장으로 인해 상

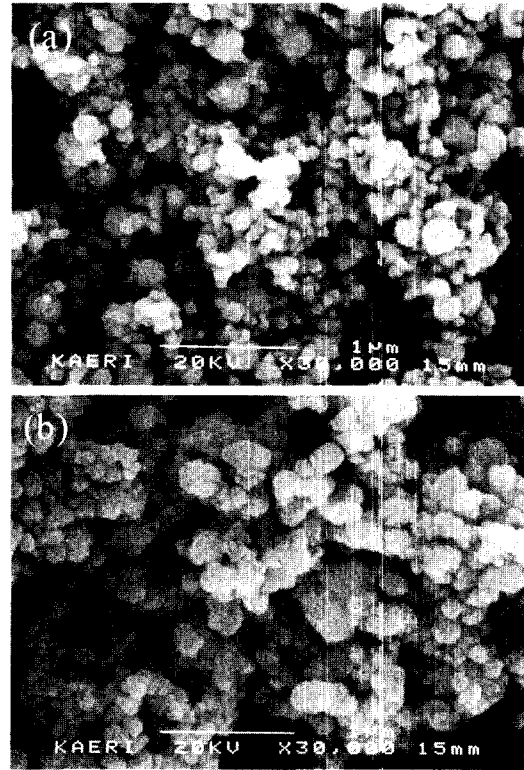


Fig. 2. Scanning electron micrographs of nano (a) Cu and (b) oxide passivated Cu powders fabricated by pulsed wire evaporation(PWE) method.

대밀도가 300°C의 경우보다 작아진 것을 알 수 있다. 한편 정적 압축법으로 압축한 시편은 150°C에서 가장 높은 상대밀도를 나타냈다. 이것은 정적 압축법이 동적 성형법에 비해 낮은 일정 하중이 오랜 시간 동안 작용하면서 압축시간의 영향으로 낮은 온도에서 치밀화 될 수 있었기 때문으로 사료된다. 그러나 동적 성형법으로 압축한 성형체의 최대 상대밀도보다 전반적으로 낮은 상대밀도를 가졌으며, 따라서 높은 상대밀도를 갖기 위해서는 짧은 시간동안 효과적

Table 1. Relative Density of Compacted Sample by Magnetic Pulsed Compaction

Compaction Method	Raw Powder	Relative Density (%)				
		Compaction Temperature (°C)				
		20	70	150	300	400
MPC	Nano Cu	89.44	90.98	93.52	95.40	93.60
	Oxide passivated Nano Cu	86.32	77.62	85.25	95.34	91.24
MTS	Nano Cu	83	-	93	85	-

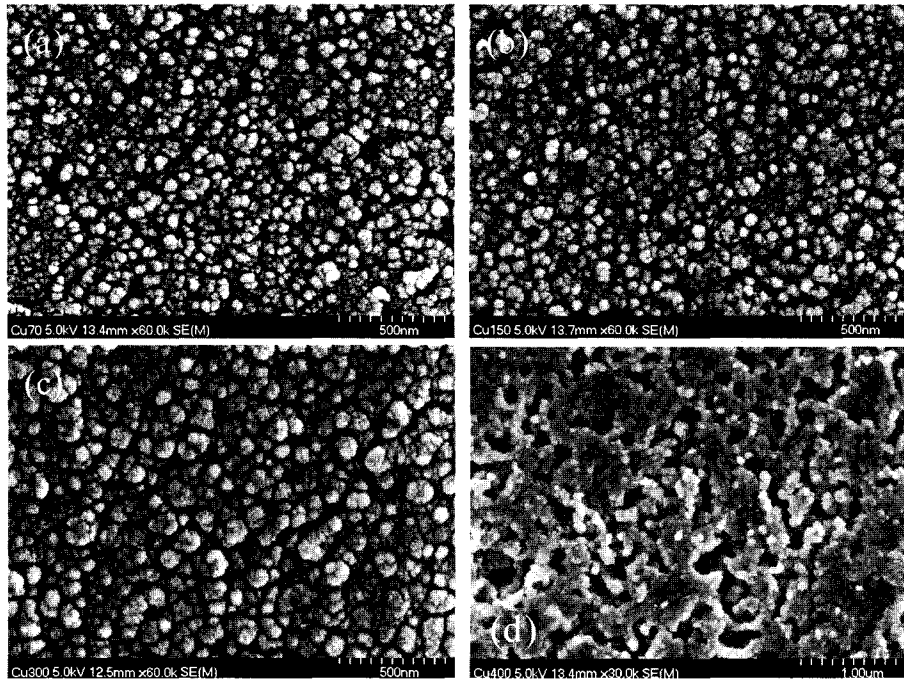


Fig. 3. Scanning electron micrographs of nano Cu compacted at (a) 20°C, (b) 150°C, (c) 300°C and (d) 400°C by magnetic pulsed compaction method.

으로 높은 압력을 가할 수 있는 동적 성형방법이 정적압축보다 효과적이라고 할 수 있다.

### 3.2. 압축온도 및 회수에 따른 미세구조 변화

전기폭발법으로 제조된 순수 나노 구리분말을 20, 150, 300, 400°C에서 MPC법으로 압축한 후 미세구조를 관찰한 것이 Fig. 3이다. 20, 150°C에서 압축한 경우 출발원료의 입자크기를 유지하면서 치밀하고 균일한 구조를 보인다. 300°C에서 압축된 성형체는 온도 증가에 따라 20, 150°C에서 압축한 경우보다 약간의 입자 성장이 일어난 것으로 관찰된다. 이는 온도가 증가함에 따라 입자 성장 속도가 증가하기 때문이다. 400°C에서 압축한 경우 미세한 구리 입자들이 결합하면서 소결되는 현상을 보였다. 400°C는 녹는점이 1083°C인 구리에 있어서 약  $0.5T_M$ 으로 소결이 일어나는 이론적인 값과 거의 일치한다. 따라서 위의 온도에서는 압축의 효과보다 소결의 효과가 더 지배적이었을 것이다.

기존의 정적압축법으로 압축한 시편의 미세조직은 Fig. 4에서 보는 바와 같다. MPC로 압축한 시편과

는 상당히 다른 양상의 미세조직을 보였다. 정적 압축법으로 나노 분말을 압축하게 되면 낮은 온도에서 균열이 심하게 발생하며, 나노 구조를 관찰하기 어려운 결과를 나타내었다. 이것은 MPC의 경우보다 오랜 시간동안 압축하게 되면서 미세한 분말들이 서로 엉겨붙고 변형되기 때문에 발생한 것으로 사료된다. 또한 압축응력이 표면에 집중되므로써 많은 균열이 발생한 것으로 사료된다. 온도 증가에 따라 전반적으로 치밀화되는 정도가 증가하여 표면 균열이 미세해지고 줄어드는 양상을 보였다. 그러나 온도가 증가하면서 소결이 진행되어 분말끼리 접촉하는 힘이 강해지고, 이런 분말의 결합이 표면에 형성되면 내부는 더 이상 치밀화 되지 못하고 기공이 성장할 것이다. 결국 온도증가에 따라 표면은 치밀하지만 동적 성형법으로 압축한 경우보다 낮은 상대밀도를 나타내는 것으로 사료된다.

Fig. 5는 나노 구리분말을 MPC법으로 20, 300, 400°C에서 각각 2회 및 5회 압축하여 얻은 미세구조 사진이다. 20°C에서 2회 압축한 시편은 1회 압축한 것과 큰 차이가 없었다. 재 압축된 시편은 미세

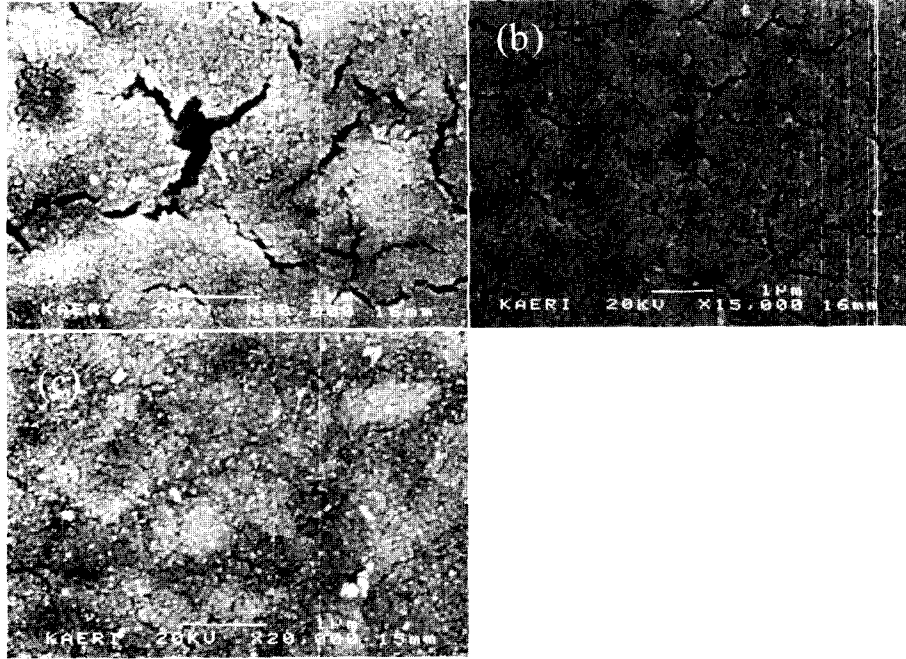


Fig. 4. Scanning electron micrographs of nano Cu compacted at (a) 20°C, (b) 150°C, and (c) 300°C by the static compaction of mechanical testing system.

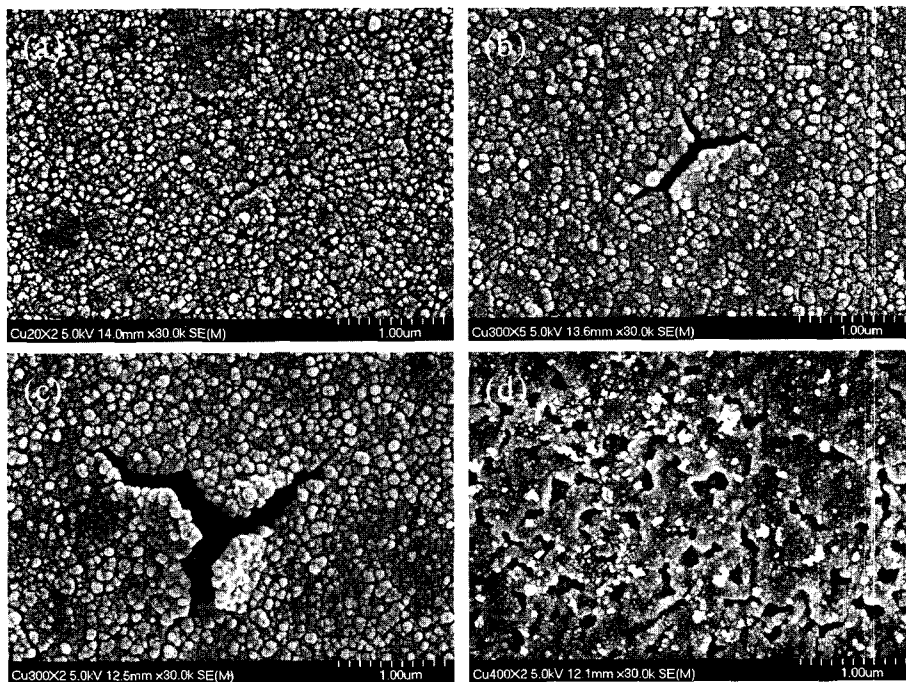


Fig. 5. Scanning electron micrographs of nano Cu compacted at (a) 20°C, 2 times, (b) 300°C, 2 times, (c) 300°C, 5 times and (d) 400°C, 2 times by magnetic pulsed compaction method.

한 입자들이 균일하게 압축되어 있으면서 대부분 구형을 유지하고 있었다. 이는 상온에서 압축하는 경우 온도의 영향이 적고 자기 펄스에 의한 압축만 대부분 작용하여 치밀화된 것이다. 그러나 300°C에서 2회 압축한 시편은 치밀한 미세구조를 유지하였지만 균열(crack)이 발생하였다. 이는 자기펄스에 의해 응력이 가해지는 동시에 온도의 영향으로 보다 치밀해진 시편에 다시 펄스압력을 가함으로써 시편에 충격이 가해짐으로 균열이 발생한 것으로 사료된다. 300°C에서 5회 압축한 시편에서는 이러한 충격이 누적되면서 2회 압축한 시편에서 발생한 균열이 더욱 성장한 형상을 보였다. 한편, 400°C에서 2회 압축한 시편에서는 같은 온도에서 1회 압축한 시편과 유사한 미세구조를 나타내었다. 이것은 소결에 의해 이미 입자들끼리 강하게 결합되고 그 사이에 기공이 형성되면서 가해진 펄스 충격을 완충할 수 있게 되어 전체적으로 기공의 크기만 작아지고 균열 등은 발생하지 않은 것으로 사료된다. 결국 적정온도에서의 동적 압축은 1회의 압축만으로도 충분히 균일하고 높은 밀도를 갖는 시편을 제조할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

Fig. 6은 부동태 피막처리된 나노 구리분말을 여러 압축온도에서 MPC법으로 압축한 후 미세구조를 관찰한 결과이다. 이 경우 역시 압축된 시편들은 압축온도가 300°C를 넘으면서 입자성장이 관찰되었고, 400°C에서 압축한 시편에서는 순수 구리분말에서와 같이 입자들간의 결합이 관찰되었다. 미세구조로만 보면 피막처리하지 않은 것과 거의 유사한 결과를 보였다. 이것은 구리분말 표면의 부동태 피막이 매우 얇고, 동적 성형시 분말 표면에 집중된 응력에 의해 피막이 쉽게 깨지면서 순수 구리입자들 사이의 결합이 가능하게 되므로 앞의 경우와 큰 차이를 보이지 않는 것으로 사료된다. 한편, 부동태 피막처리한 구리분말을 압축온도 20, 300, 400°C에서 각각 2, 5회 압축한 시편들의 미세구조를 Fig. 7에 나타내었다. 20, 300°C에서 2, 5회 압축한 시편의 경우 입자 크기가 유지되면서 균열이 발생하지 않는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 순수 구리의 경우와는 다른 결과로서 부동태 피막처리한 구리분말의 재압축시에는 산화피막에 의하여 균열발생이 억제된 것으로 사료된다. 즉 표면에 존재하는 산화 부동태 피막으로 인해 1회 압축만으로는 분말간의 강한 결합이 형성되지 못

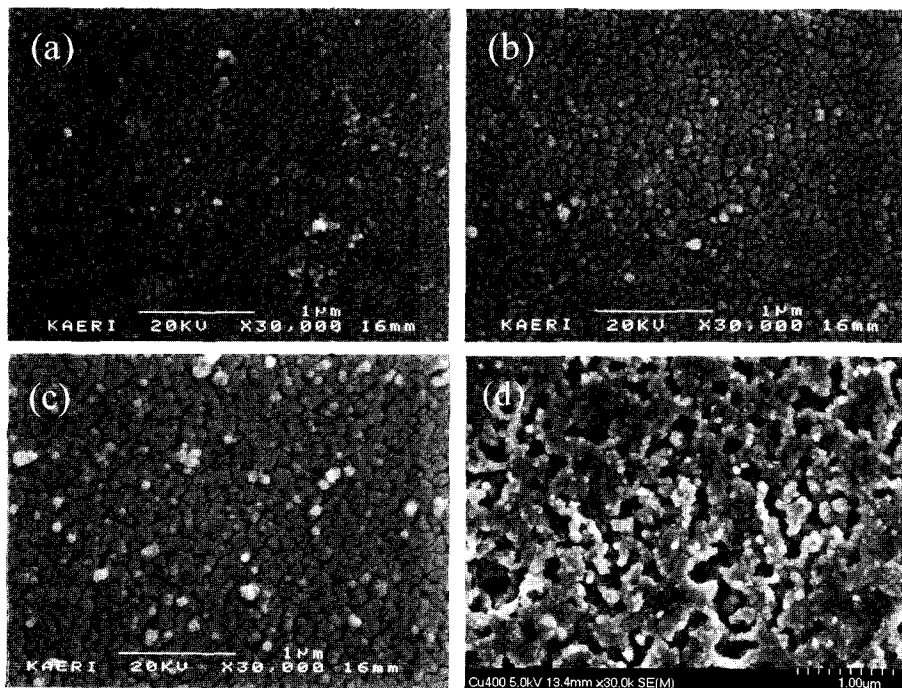


Fig. 6. Scanning electron micrographs of oxide passivated Cu compacted at (a) 20°C, (b) 150°C, (c) 300°C and (d) 400°C by magnetic pulsed compaction method.

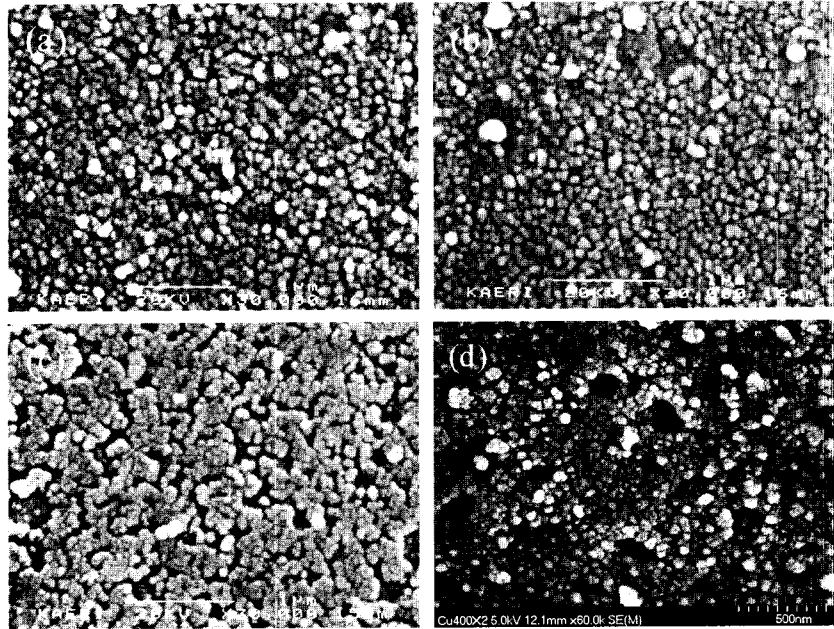


Fig. 7. Scanning electron micrographs of oxide passivated Cu compacted at (a) 20°C, 2 times, (b) 300°C, 2 times, (c) 300°C, 5 times and (d) 400°C, 2 times by magnetic pulsed compaction method.

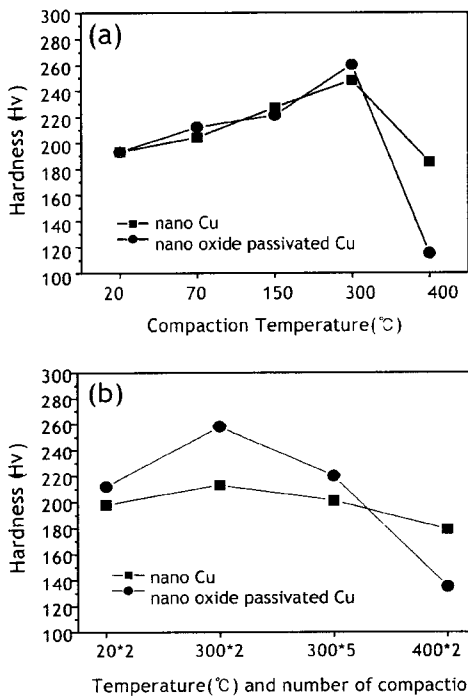


Fig. 8. Hardness of compacted Cu by magnetic pulsed compaction method as a function of (a) temperature and (b) temperature and number of compaction.

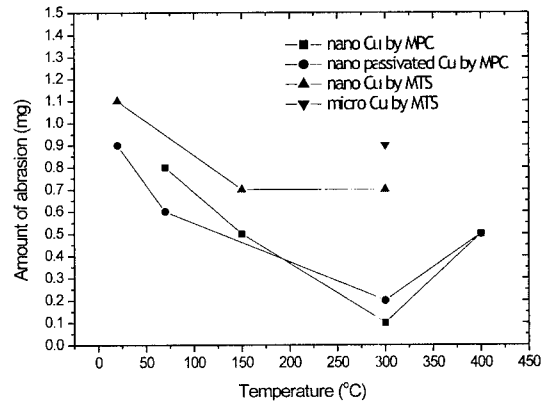


Fig. 9. The amount of wear of Cu compacted by dynamic(MPC) and static(MTS) compaction as a function of various temperature.

하게 되고 그 후 재압축시 분말간의 압축에 의하여 더욱 치밀화될 뿐 균열은 발생하지 않게 되는 것으로 판단되었다. 300°C에서 5회를 반복하여 압축을 하여도 이러한 치밀화가 가속될 뿐 균열은 여전히 발생하지 않았다(Fig. 7(c)). Fig. 7(d)와 같이 400°C에서 2회 반복하여 압축하는 경우 피막처리되지 않는 시편과 동일하게 전반적으로 균일하게 분포

되었던 기공이 줄어들어 것을 관찰할 수 있었다. 이것은 펄스압력이 가해지더라도 내부에 존재하던 기공이 완충역할을 하게 되어 전체적인 미세구조의 변화없이 기공의 크기만 조금 감소한 것으로 사료된다.

### 3.3. 경도 및 내마모성

MPC법으로 제조된 여러 시편들을 Micro Vicker's 경도시험하여 기계적 특성을 조사하였다. 또한 Pin-on-disk 타입의 마모시험기로 내마모 특성을 조사하였다.

Fig. 8(a)는 압축 시편들의 Micro Vickers 경도의 변화를 압축온도에 대하여 나타낸 것이다. 20°C 상온에서 제조된 시편의 경우 순수 구리나 부동태 피막처리한 구리의 경우 모두 193 H<sub>v</sub> 값을 가졌다. 압축 온도가 증가하면서 압축된 시편들의 경도가 증가하였는데, 이것은 온도 증가에 따라 입자들이 치밀화 정도가 증가되어 밀도 증가와 마찬가지로 경도가 증가된 것이다. 그러나 압축온도가 400°C인 경우 순수 구리와 부동태 피막처리한 구리 모두 경도가 115 H<sub>v</sub>, 185 H<sub>v</sub>로 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 3(d)와 Fig. 6(d)의 미세구조에서 관찰한 바와 같이 0.5 T<sub>M</sub>의 고온에서 펄스에 의한 압축보다 소결에 의한 입자들 간의 결합이 주로 형성되면서 치밀화되지 못하고 이 때 형성된 기공의 영향으로 경도가 급격히 감소한 것으로 사료된다. 기공은 분말 압분체 내의 입자들 사이에 빈 공간으로 존재하게 되는데, 입자들의 불균일한 상분포, 비평형적 확산, 분위기와 반응, 용융시 액체의 모세관 퍼짐 등으로 인하여 생성된다.<sup>24)</sup> 기공은 입자들의 치밀화를 저해하며 기계적인 물성을 떨어뜨린다. 순수 구리나 부동태 피막처리한 구리 분말 모두 300°C에서 압축하였을 때 가장 큰 경도를 나타내었다. Fig. 8(b)는 구리 분말과 부동태 피막처리한 구리 분말을 자기펄스로 각 온도에서 압축회수를 2, 5회로 변화시켜 경도를 측정된 결과이다. 1회 압축한 시편과 마찬가지로 20°C에서 재압축한 시편(순수 구리: 198 H<sub>v</sub>, 부동태 피막처리한 구리분말: 212 H<sub>v</sub>)보다 300°C에서 재압축한 시편(순수 구리: 213 H<sub>v</sub>, 부동태 피막처리한 구리분말: 258 H<sub>v</sub>)에서 경도가 증가되었고, 400°C에서는 부동태 피막처리한 구리분말이 재압축시 경도가 증가(115 → 135 H<sub>v</sub>)하였다. 20°C에서 재압축한 경우 순수 구리 시편은 경도의 변화가 거의 없으며 피막

처리한 시편의 경우 펄스압력에 의해 치밀화가 보다 이루어져 약간의 경도 증가를 보였다. 300°C에서는 순수 구리의 경우 Fig. 5(b,c)에서 보는 바와 같이 압축이 반복되면서 균열이 발생하고 균열 발생에 따라 내부에 존재하던 응력이 방출되면서 오히려 현저하게 경도가 감소하는 결과를 보였다. 이러한 경향은 압축이 5회가 되면서 더욱 뚜렷해졌다. 균열이 발생하지 않은 피막처리된 구리의 경우에는 1회 압축한 시편과 거의 동일한 경도값을 보인다. 압축 횟수가 5회의 경우에는 Fig. 6(c)의 미세조직에서는 나타나지 않았으나 균열이 발생할 가능성이 높아지면서 경도가 약간 감소하는 결과를 보이는 것으로 사료된다. 400°C에서 재압축된 시편은 치밀화 정도가 증가하고 반복 펄스압에 의하여 내부에 존재하는 기공의 크기가 줄어들면서 경도가 약간 증가한 것으로 사료된다. 한편, Fig. 8의 최고 경도값을 비교해 본다면 300°C에서 부동태 피막처리한 구리 분말 시편이 순수 구리 시편보다 경도가 약간 높음을 알 수 있다. 이것은 피막을 구성하는 산화물의 효과로 사료된다. 정적 압축법으로 압축한 시편은 표면의 균열로 인해 Micro Vicker's 경도를 측정된 결과가 일정치 않았으므로 비교하기가 곤란했다.

Fig. 9는 Pin-on-disk 타입 마모 시험기로 내마모성을 측정된 결과를 정리한 것이다. 마모시험은 MPC와 정적 압축법으로 제조된 구리 시편에 대하여 측정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 전반적으로 동적 성형된 시편이 정적 성형된 시편보다 각각의 온도에서 내마모성이 우수한 것으로 나타났다. 이것은 동적 성형을 통해 압축된 시편들이 미세한 구조를 유지하고 있기 때문으로 사료된다. 한편 경도와 마찬가지로 300°C에서 압축된 경우에 가장 높은 내마모성을 보였다. 또한 입자의 크기가 나노로 미세해지면서 마이크로분말을 성형한 시편보다 우수한 내마모 성질을 나타내는 것을 확인하였다.

## 4. 결 론

평균 입자크기가 80 nm로 구형인 순수 구리분말과 부동태 피막처리한 구리 분말을 출발원료로 하여 압축온도 및 압축회수를 변수로 하여 자기펄스 압축법으로 압축한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

동적 성형법으로 압축된 시편들은 최고 95% 이상



의 높은 상대밀도를 나타내었다. 정적 압축된 경우보다 MPC로 압축한 것이 보다 높은 상대밀도를 나타내었다. 순수 구리와 부동태 피막처리한 나노 구리 분말의 경우 압축온도 300°C까지 나노 입자가 그대로 유지되는 치밀한 미세구조를 나타내었고, 압축온도 400°C에서는 소결에 의해 일부 입자들끼리 결합되면서 기공이 발생하였다. 또한 순수 구리분말과 부동태 피막처리한 구리분말 모두 온도증가에 따른 치밀화로 인하여 경도가 증가하였지만, 400°C 압축온도에서는 기공생성으로 인하여 오히려 경도가 감소하였다. 순수 구리분말의 경우 300°C에서 압축회수가 증가함에 따라 균열이 발생하여 경도가 감소하였고, 부동태 피막처리한 분말의 경우 균열이 발생하지 않았다. 300°C에서 산화피막의 효과로 부동태 피막처리한 분말이 순수 구리분말보다 높은 경도를 나타내었다. 내마모 특성 역시 300°C에서 가장 높게 나타났다으며, 마이크로 시편보다 나노 시편이, 정적 성형보다 동적 성형법으로 압축한 것이 더욱 우수함을 보였다.

나노 구리분말을 MPC법으로 압축하는 것이 기존의 정적 성형법으로 압축하는 것보다 상대밀도, 기계적 특성면에서 보다 우수함을 확인하였으며, 300°C에서 1회의 압축만으로도 우수한 압축특성을 나타냄을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 2001년도 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환인 '차세대 소재성형 기술개발 사업단'의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. C. Suryanarayana: *Intemat. Mater. Rev.*, **40** (1995) 41.
2. K. Lu: *Mater. Sci. Eng. Rep.*, **R16** (1996) 161.
3. H. Gleiter: *Nanostructured Mater.*, **6** (1995) 3.
4. R. W. Siegel: *Nanostructured Mater.*, **4** (1994) 121.
5. R. Birringer, H. Gleiter, H. P. Klein and P. Marquardt: *Phys. Lett.*, **A102** (1984) 365.
6. C. Vo  $\beta$  loh and H. Micklitz: *Nanostructured Materials*, **6** (1995) 815.
7. C. Suryanarayana: *Processing and Properties of Nanocrystalline Materials*, TMS, Warrendale, **PA** (1996) 199.
8. A. Y. Yermakov, M. A. Uimin, A. A. Mysik, A. Y. Korobeinikov, A. V. Korolyov, N. V. Mushnikov, T. Goto, V. S. Gaviko, and N. N. Schegoleva: *Proc. of ISMANAM2001 conf. (Michigan, USA, 2001)* I-101.
9. S. D, G. Z and H. Yang: *Scripta Mater.*, **44** (2001) 17.
10. H. Gleiter: *Adv. Mat.*, **4** (1992) 474.
11. S. Sako, K. Ohshima and T. Fujita: *J. Phys. Soc. Japan.*, **59** (1990) 662.
12. K. Nihara: *J. Ceram. Soc. Japan.*, **99** (1991) 974.
13. Y. H. Choa, A. Nakahira, T. Sekino and K. Niihara: *J. Kor. Powder Metall.*, **4** (1997) 151.
14. S. T. Oh, T. Sekino and K. Niihara: *Nanostructured Material*, **10** (1998) 327.
15. C. K. Rhee: 전기폭발법에 의한 금속 나노분말 제조 방법 및 장치, 대한민국 특허(2001) 출원번호 10-2001-0029606.
16. C. K. Rhee, G. H. Lee, J. H. Park. and W. W. Kim: *Proc. of 2nd Int. Symp. on Pulsed power and plasma applications*, KERI, Korea (2001) 314.
17. J. Besson and M. Abouaf: *J. Am. Ceram. Soc.*, **75** (1992) 2165.
18. J. Xu and R. M. McMeeking: *Int. J. Mech. Sci.* **34** (1992) 167.
19. K. R. Venkatachai and R. Raj: *J. Am. Ceram. soc.*, **69** (1986) 499.
20. B. H. Rabin, G. E. Korth and R. L. Williamson: *J. Am. Ceram. Soc.*, **73** (1990) 2156.
21. V. Ivanov, Y. A. Kotov, O. H. Samatov: *Nanostructured Materials*, **6** (1995) 287.
22. A. G. Mamalis, I. Kotsis, G. Pantazopoulos, M. Enisz, A. Szalay, and D. E. Manolakos: *Physica C*, **280** (1997) 289.
23. R. A. Andrievski: *Intern. J. powder Met.*, **30** (1994) 59.
24. A. O. Boschi, E. Bilbart, W. E. Worrall and R. J. Brook: *Sci. Sinter.*, **20** (1988) 103.