

전기폭발(wire explosion)에 의한 나노분말 제조

조주현[§], 임근희[§], 이홍식[§], Weihua Jiang^{§§}

§ 한국전기연구원, §§ 나가오카 기술과대학

Synthesis of Nanosized Powders by Wire Explosion

Chuhyun Cho¹, Geun-Hie Rim¹, Hong-Sik Lee¹, Weihua Jiang²

1. Korea Electrotechnology Research Institute, 2, Nagaoka University of Technology, Japan

Abstract - Silver nanosized powder have been synthesized using wire explosion technology. The discharge system of 10kW (10uF, 20kV, 0.5 shots/s) was set up for mass production of 300g/h. The high purity silver powder was collected and separated by cyclone and fabric filters.

1. 서 론

전기 폭발이라고 불리는 wire explosion은 전기에너지가 열에너지로 변환되고 나아가 기계적 에너지로 바뀌는 현상이고, 그 에너지 변환이 급속히 진행될 때 폭발이라고 불릴 정도의 위력을 갖는다. 급속 와이어가 온도상승에 의한 용단에서 폭발로 바뀌기 위해서는 급속의 녹는점 근처에서 큰 전류의 흐름이 있어야 한다. 왜냐하면 급속 와이어를 증발시키기 위해서 필요한 대부분의 에너지는 녹는점에서부터 기체화 하는 과정에서 소요되기 때문이다. 따라서 와이어 물질이 비산하기 전의 짧은 시간 동안 대량의 에너지를 와이어에 전달하지 않으면 와이어는 폭발까지 이르지 못하고 액체 상태로 비산하게 되는 퓨즈의 역할을 하게 된다. 이와 같이 수 us 시간 동안 수백 J에 이르는 에너지를 전달하기 위해서는 수백 MW의 파워가 필요하고 이러한 파워는 펄스파워 기술을 이용하여 얻을 수 있다. 역으로 wire explosion은 반드시 펄스 대전류에서 만 일어날 수밖에 없는 이유이기도 하다. 전기 에너지에 의해서 와이어가 폭발할 수 있는 또한 가지 중요한 원인은 온도상승에 의해서 저항이 증가하는 급속의 고유한 성질 때문이기도 하다. 즉 급속의 온도증가에 의한 저항률의 상승은 에너지 소비를 공간적으로는 와이어 부분에 집중시키며, 또한 시간적으로 에너지 전달을 가속시킬 수 있어 수백 MW 이상의 파워를 제한된 공간에 집중시킬 수 있다. 따라서 급속 고유의 성질에 따라 전기폭발에 유리한 급속과 불리한 급속으로 나누어진다. 이와 같은 전기폭발은 매우 극적인 현상들을 수반하며 그 현상 하나하나를 다음과 같이 이용하는 연구들이 진행되고 있다.

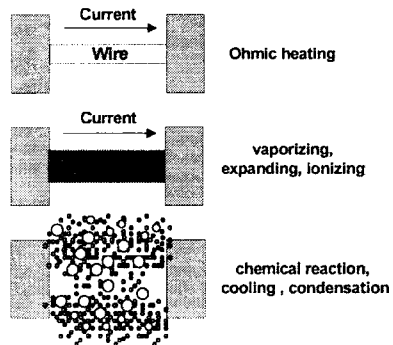
1. 급속한 부피팽창에 의한 충격파발생 : 큰 임펄스 압력을 이용하여 물체를 가속시키거나 파괴시키는 응용이 가능하다[1-3].
2. 전류의 흐름을 차단하여 고전압 펄스를 발생시키는 Opening switch : 적절하게 설계된 퓨즈를 이용하고 explosion시 플라즈마 발생을 효과적으로 억제하면 아주 짧은 시간에 대전류를 차단하는 것이 가능하며, 이 경우 방전회로의 인덕턴스에 저장된 자기에너지가 부하에 큰 전압을 유도하게 된다[4].
3. Wire explosion에서 발생하는 고온 고밀도 플라즈마를 이용한 intense soft x-ray 발생 : wire explosion에 의해서 발생하는 플라즈마를 통하여 내

전류의 전류가 지속적으로 흐르게 되면 전류가 만드는 자기장에 의해서 발생하는 내부로 수축하려는 전자기력이 플라즈마의 팽창력보다 더 커지게 되어 플라즈마가 압축되고, 더 높은 온도와 밀도의 플라즈마로 가열되어 강력한 세기의 soft x-ray가 발생한다 [5-6].

4. 나노분말 제조 : 와이어의 금속물질이 미세하게 분해되거나 혹은 증발하여 원자화 한 후 분위기 가스와의 충돌하여 냉각되면 응축되어 입자화 한다. 이때 와이어 물질이 급격히 팽창한 만큼 분위기가스와의 충돌에 의한 냉각 또한 급속히 이루어지므로, 입자는 성장이 억제되어 일반적으로 수십 nm 정도의 직경을 갖게 된다[7-10].

이와 같은 전기폭발 기술의 다양한 응용분야 중에서 나노분말 제조는 산업기술로서의 이용이 유망하여 기대를 모으고 있으며 국내외 연구기관에서 관련 연구가 수행되고 있다. 나노 분말은 벌크형태의 재료를 원자화하여 다시 재결합시키는 방식을 통하여 만들어지며, 통상적으로 사이즈가 100nm 이하의 입자들의 집단을 말한다. 벌크 재료를 원자화하는 방식에 따라서 기상법과 액상법으로 나누어진다. 벌크재료를 가열하여 증기화 하는 기상법(vapor phase)은 가열 방식에 따라서 다양한 방법들이 있으며, 펄스 대전류를 이용하여 가열하는 것이 본 연구의 특징이다. 본 논문에서는 전기폭발에 의한 나노분말 제조장치 구성과 제조된 나노 분말 특성에 대해서 서술한다.

2. 전기폭발에 의한 나노분말 제조원리



○ ambient gas molecule ● vapor ○ nanosized particle

그림 1 전기폭발에 의한 나노분말 생성

그림 1은 전기폭발에 의한 나노분말 제조과정을 개략적으로 나타낸 것이다. 전기폭발에 의한 나노 분말 제조에 사용되는 와이어는 일반적으로 직경 1mm 이하의 금속 와이어이고, 초기에는 작은 저항률을 갖지만 전류에 의한 가열이 진행됨에 따라서 저항률은 상승하게 된다. 저항의 상승은 에너지 소비를 가속시키고 또한, 에너지 소비가 대부분 와이어에서 일어나도록 하는 중요한 역할을 하게 된다. 이와 같은 와이어의 특성과 펄스 대전류에 의한 급속 가열로 인하여 와이어는 매우 짧은 시간에 고체->액체->기체->플라즈마로 상태변화를 하게 되며 부피팽창과 온도상승에 의한 압력증가로 급격히 팽창하게 된다. 팽창하는 증기 및 플라즈마는 주변의 분위기가스와 충돌하여 냉각되며 냉각된 증기가 모여서 입자를 만든다. 냉각 또한 급속히 이루어지므로 입자의 성장시간이 짧고 입자의 크기가 100nm 이하의 나노 분말의 제조가 가능하게 된다. 보고된 바에 따르면 분위기 가스의 압력상승은 입자사이의 증가로 이어지고 있다[8]. 이처럼 분위기가스 압력에 따라서 입자의 평균 사이즈를 제어할 수 있는 이유는 분위기가스의 압력이 증기의 팽창범위를 한정하기 때문이다. 팽창범위의 변화는 증기의 농도를 변화시키며, 높은 압력에서 증기의 농도가 높아지므로 입자가 크게 성장할 가능성이 높아지는 것이다.

3. 장치구성 및 방전특성

그림 2는 개략적인 실험장치의 구성을 나타내고 있다. 커패시터는 10uF 이며, 40kV 까지 충전가능하다. 커패시터 충전 장치는 독자적으로 개발된 인버터 타입의 고속 충전장치로서 10uF의 커패시터를 0.2초 내에 20kV 까지 충전시킨다. 와이어의 폭발이 일어나는 챔버 내부에 와이어가 감겨있는 롤을 설치한 후, 맞물려 도는 롤러를 이용하여 와이어를 가이드를 통하여 전극 사이로 공급한다. 와이어가 진행하여 전극사이의 간격이 좁아지면 갭 스위치가 자발 하면서 커패시터에 충전된 에너지가 와이어를 통하여 방전되어 와이어를 폭발시킨다. 폭발이 일어나면 고속 고전압 충전기에 의해서 커패시터는 즉시 재충전된다. 한편, 와이어는 모터에 의하여 연속적으로 공급되므로 초당 0.5회 정도의 속도로 연속적으로 방전하게 된다.

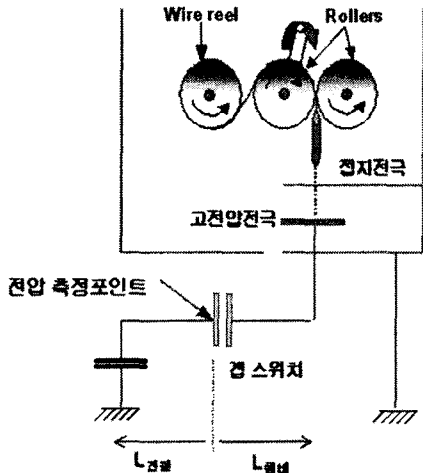


그림 2 방전 시스템 개략도

그림 3에 은 와이어 직경 0.5mm, 길이 160mm를 10uF, 19kV의 충전에너지로 방전하였을 때의 전압과 전류파형을 나타내었다. 파형은 전류의 급감과 전압의 급상승이라는 전기폭발의 전형적인 특징을 잘 나타내고 있다. 급격한 전류변화에 따라 발생하는 전압은 시스템의 인덕턴스에만 의존하여 분배된다. 방전초기의 급격한 전압강하와 와이어 폭발시의 급격한 전압상승은 인덕턴스 분포에 따른 전압분배를 나타낸다. 인덕턴스를 전압측정 포인트를 기준으로 전원 측과 챔버 측으로 나누어 생각하면, 방전초기 전원 측에 걸리는 전압은 충전전압 19kV 중에서 5kV이다. 따라서 전원 측의 인덕턴스는 전체 시스템 인덕턴스의 5/19라는 것을 알 수 있다. 한편 와이어 폭발 시 오프닝 스위치 효과로부터 발생하는 전압 또한 인덕턴스 비율로 분배되고, 그 결과 전원 측에 14kV가 인가되었음을 측정결과로부터 알 수 있다. 그러므로 오프닝 효과에 의해서 유도되는 전체 전압은 $19/5 \times 14kV = 53.2kV$ 로 추정된다. 즉, 전원 측 인덕턴스 = $5/19 \times$ 전체인덕턴스 이고, 전체 오프닝 전압 = $19/5 \times V_0 = 19/5 \times 14kV = 53.2kV$ 가 된다. 이와 같은 관계로 와이어 폭발 시 발생하는 전압은 충전전압의 약 2.8배에 이르고 있음을 알 수 있다. 이러한 급격한 전압상승에 의해서 발생하는 전자파 노이즈와 주변 장치의 절연파괴 등은 문제가 될 수 있다.

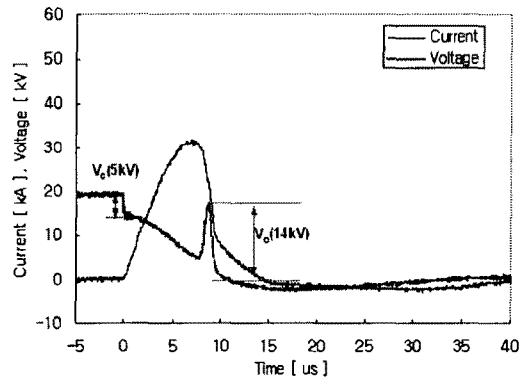


그림 3 전기폭발 시스템의 방전 전압 및 전류

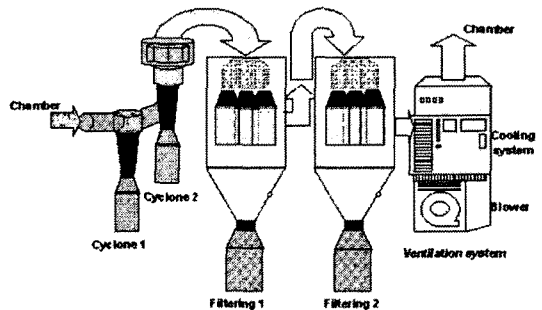


그림 4 분말 포집 및 분급 장치

전기폭발에 의해 제조된 분말을 포집하고, 또한 사이즈별로 분류하기 위해서 그림 4와 같은 시스템이 사용되었다. 챔버 내부에 부유하는 분말들은 분위기 가스와 함께 이동한다. 분위기를 가스를 이동시키는 것은 송풍기에 의한 압력차이다. 폭발 챔버로부터 흡입된 분말들은 먼저 질량차를 이용하는 2단계의 사이클론을 통하여 마이크로 사이즈 입자들이 걸러지고, 다음에 천으로 제작된 필터들을 통하여 다시 2단계로 걸러진다. 이렇게 필터를 통하여 걸러진 가스들은 냉각기에 의해서 냉각되어 송풍기를 거쳐서 다시 챔버 안으로 공급되어진다.

4. Ag 나노분말 제조 및 특성분석

그림 5에 전기폭발에 의해서 제조된 Ag 분말을 FE-SEM을 이용하여 관찰한 미세구조를 나타내었다. 그림 5의 고배율 미세구조를 살펴보면 입자들의 서로 결합하여 neck을 형성하고 있음을 알 수 있는데, 이는 분말합성 중에 입자들끼리 결합하여 소결이 일부 진행된 것으로 판단된다. 한편 사이클론에서 포집된 분말에서는 um 사이즈에 이르는 큰 입자가 드물게 존재하는데, 이러한 um 사이즈 입자들은 분말합성 단계에서 폭발 시 금속액적의 급격한 응집으로 인해 생성되는 것으로 판단된다.

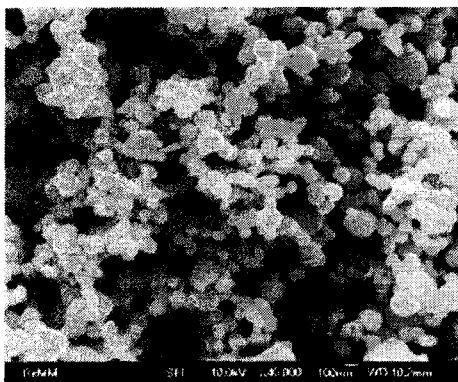
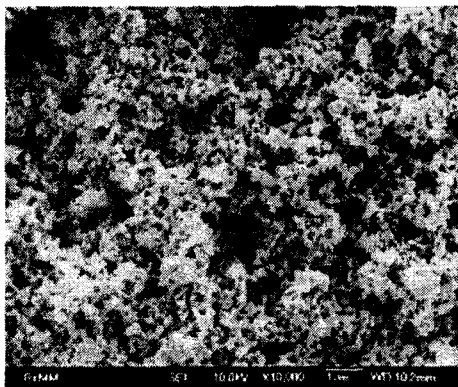


그림 5 제조된 은 나노분말의 SEM 관찰

그림 5의 SEM 미세구조에 대해서 EDS(energy dispersive spectrometry)로 원소분석한 결과 Ag 외에 다른 불순물은 전혀 없는 것으로 나타났다. 따라서 전기폭발법은 높은 순도를 갖는 분말의 제조에 상당히 효과

적인 공정으로 생각된다. 전기폭발법으로 제조된 Ag 분말의 화학적 분석에서는 높은 순도를 갖는 Ag 안정상 분말이 효과적으로 제조된 것으로 조사되었다.

그림 6은 분류에 따른 입도분포의 변화를 나타내고 있다. 분류의 결과는 후반부의 필터에서 포집된 분말이 평균 사이즈가 작음을 나타내고 있다.

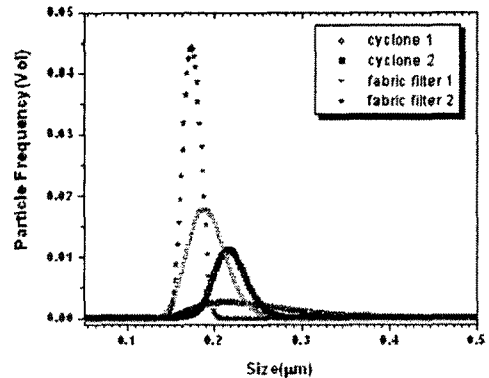


그림 6 필터링에 따른 분말의 입도 분포

5. 결론

본 연구에서는 대기 분위기 중에서 Ag 와이어에 펄스 대전류를 흘려서 150 ~ 250nm의 평균 사이즈를 갖는 Ag 나노 분말을 제조하였다. 현재, 기상법(vapor phase)으로 나노 사이즈 분말을 제조하는 방법은 플라즈마 토치, 아크방전, 유도 가열 등 가열방법을 달리하여 다양하게 시도되고 있으며 각기 장단점을 가지고 있다. 본 연구의 펄스파워를 이용하는 방법은 장치의 간소함과 높은 에너지 효율을 장점으로 한다. 또한 제조 과정에서 불순물이 포함될 기회가 적다는 장점이 있다. 와이어를 공급하는 기술과 제조된 분말을 회수하는 기술의 발달과 더불어 펄스 파워를 이용한 나노 분말 제조법은 대량생산 측면에 있어서도 기타 방법에 비해서 유리할 것으로 생각된다.

[참고 문헌]

- [1] F. D. Bennett, Phys. Fluids, 1, 347(1958).
- [2] William G. Chace, Phys. Fluids, 2, 230(1959).
- [3] Geun-Hie Rim, Chu-Hyun Cho, Young-Wook Choi, Youn-Sik Jin, and E. P. Pavlov, IEEE Trans. on Magnetics, 37, 389(2001)
- [4] N. A. Gondarenko, T. A. Golub, and A. M. Iskoldsky, IEEE Trans. on Plasma Sci., 20, 967(1992).
- [5] I. R. Lindemuth, J. H. Brownell, A. E. Greene, G. H. Nickel, T. A. Oliphant, and D. L. Weiss, J. Appl. Phys., 57, 4447(1985)
- [6] K. M. Chandler, D. A. Hammer, D. B. Sinars, S. A. Pikuz, T. A. Shelkovenko, IEEE Trans. on Plasma Sci., 30, 577(2002).
- [7] Winston A. Saunders, Peter C. Sercel, Harry A. Atwater, Kerry J. Vahala, and Richard C. Flagan, Appl. Phys. Lett, 60, 950(1992)
- [8] W. Jiang and K. Yatsui, IEEE Trans. on Plasma Sci., 26, 1498(1998).
- [9] C. Cho, Y. Kinemuchi, H. Suematsu, W. Jiang, and K. Yatsui, Jpn. J. Appl. Phys., 42, 1763(2003).
- [10] Chuhyun Cho, Keiichi Murai, Tsuneo Suzuki, Hisayuki Suematsu, Weihua Jiang and Kiyoshi Yatsui, IEEE Trans. on Plasma Sci., 32, 2062(2004).