

## 나노 크기 분말 제조를 위한 펄스파워 전기선(線)폭발 기술

정용훈 · 김종수 · 권영순\* · 김지순\* · 임근희

한국전기연구원

\*울산대학교 기계부품 및 소재 특성평가연구센터, 첨단소재공학부

### Pulsed-Energy Wire Electric Explosion Technology for Production of Nanoscale Powder

Yong-Hun Jung, Jong-Soo Kim, Young-Soon Kwon\*, Ji-Soon Kim\* and Geun-Hie Rim

Korea Electrotechnology Research Institute, Chang-Won, Korea

\*Regional Research Center(RRC)/ReMM, School of Materials Eng., Univ. of Ulsan, Ulsan, Korea

#### 1. 서 론

현대 산업기술의 급속한 발달로 극도의 미세한 부품 및 이를 이용한 기기들의 요구에 부합하는 새로운 재료의 필요성에 의해서, 기존의  $\mu\text{m}$  크기의 재료에 비해 탁월한 성질을 갖는 수십 nm 이하의 나노분말의 합성·응용에 관한 연구가 21세기를 선도하는 첨단재료과학의 연구분야로 관심을 모으고 있다.

나노분말의 제조는 기계적 에너지에 의한 입자들의 단순 파괴로는 용이하지 않은 것으로 알려져 있다. 대신에, 특정분위기 내에서 과포화된 금속 증기를 균일하게 응축시키는 공정이 주로 이용되고 있는데, 이러한 금속 증기를 발생시키는데 사용되는 실질적인 방법으로는 화학적인 방법과 물리적인 방법이 있다. 화학적인 방법은 가스들 사이의 화학반응을 이용하여 재료의 증기를 발생시키는 방법이고, 물리적인 방법은 가열에 의해서 재료의 증기를 발생시키는 방법이다. 물리적인 방법은 화학적 반응에 비해 불순물의 생성을 억제할 수 있어서 높은 순도의 분말을 생산할 수 있지만 생산성이 낮은 단점이 있다. 반면에 화학적인 방법은 분말의 생산성은 높으나 합성되는 분말의 응집도가 높고 순도가 떨어진다는 단점이 있다. 또한 재료계에 따라서는 물리적인 방법에 의해서 재료를 증발시키는데 매우 높은 온도가 요구되기 때문에, 전통적인 DC 가열이 효과적이지 못할 수 있다. 이런 경우에 펄스 파워(pulsed power)를 이용한

기술들은 매우 효과적인 도구라고 할 수 있다. 예를 들면, 고출력 펄스 레이저(high-power pulsed laser) 또는 펄스 이온빔(pulsed ion beam)은 거의 모든 종류의 재료를 증발시킬 수 있다. 실험적으로, 펄스 레이저 또는 펄스 이온빔을 사용하여 나노분말을 생산할 수 있음이 증명되었다.<sup>1)</sup> 하지만, 이러한 기술들을 이용하여 분말을 생산하기 전에 선결되어야 할 문제들이 있는데, 펄스 레이저의 경우에는 레이저의 효율이 실질적으로 응용하기에는 너무 낮고, 레이저에 의한 재료의 증발 속도가 분말을 생산하기에 충분하지 않다는 문제점이 있으며, 펄스 이온빔의 경우에는 빔(beam) 발생 영역에서 진공이 필요한 반면, 증발 영역에서는 특정한 가스 분위기가 필요하다는 문제가 여전히 남게 된다. 이에 비해, 펄스 파워를 이용한 또 하나의 기술인 전기선(線)폭발법은 매우 효과적인 도구라고 할 수 있다.

전기선폭발(Wire Electric Explosion, WEE) 기술은 고밀도 대전류가 금속 와이어를 통과할 때, 저항 발열에 의해 와이어가 미세한 입자나 금속증기 형태로 폭발하는 현상을 이용하여 나노분말을 합성하는 방법으로 다른 제조법에 비해 값싼 비용으로 1~50  $\mu\text{sec}$ 의 짧은 시간 동안 극히 높은  $10^4\sim 10^6$  K의 온도에 도달할 수 있고, 와이어 전체가 동시에 기화되기 때문에 원재료의 조성을 갖는 분말의 합성이 가능하며, 와이어에 공급되는 에너지의 양을 제어함으로써 평균 분말 크기를 조절할 수 있다는 장점이

있다.<sup>2)</sup> 또한, 금속 와이어 주위의 분위기를 조절함으로써 금속 분말뿐만 아니라 산화물·질화물·탄화물 분말, 합금 분말, 화학적 화합물이나 복합재료 분말들을 만들 수 있어서, 금속합금의 강도를 증가하는 세라믹, 극미세 기공으로 구성된 필터 그리고 초고밀도 집적회로 반도체 및 분자크기의 마이크로전자소자 분야를 위시하여, 우주 항공용 고온구조재료와 센서, 촉매, 차세대전지, 수소저장재료 등과 같은 다양한 기능의 첨단재료로 응용이 크게 기대되고 있다.

본고에서는 나노분말 합성에 활용이 크게 기대되고 있는 전기선폭발 기술의 역사적 고찰과 현상을 설명하고, 복잡한 폭발변수를 제어함으로써 원하는 크기의 나노분말을 제조할 수 있는 전기선폭발 이론을 소개하고자 한다. 그리고 이를 통하여 최근 차세대 신기술로 각광받고 있는 나노재료 기술개발의 초석이 될 수 있는 나노분말 양산기술의 대안을 제시하고자 한다.

## 2. 전기선(線)폭발 기술의 역사적 고찰

전기선폭발 실험은 Nairne(1774)가 전기선폭발에 의한 금속 와이어의 스파터링에 흥미를 가지고 개발한 것이 시초이다.<sup>3)</sup> 19세기 초에 Singer와 Cross(1815)는 전기선폭발의 구동력을 조사하였고, 최근에 상업적으로 중요한 공정이 된 전기성형(electroforming)의 사용 가능성을 조사하였다. Michael Faraday(1857)는 광학 현미경에 의한 입도의 측정과 분말형상 연구를 통한 전기선폭발 현상을 조사하였고,<sup>4)</sup> 진공 분위기에서 금(gold) 와이어를 폭발시킴으로써 금이 코팅된 거울(gold coating mirror)을 성공적으로 만들었다. 그 이후의 실험은 흔히 전기폭발의 아버지로 불리는 John A. Anderson(1920)때까지 보고되지 않았다. 그는 분광기에 의한 연구를 실시하였고, 전기선폭발 순간 거의 태양의 온도에 접근한다는 이론을 제시하였다.<sup>5)</sup> Bennett(1962)은 스트리크카메라(streak camera)와 인터페로미터(interferometer)를 사용하여 실험을 행하였으며, 전기선폭발 반응이 빛을 방출하며 진행되는 동안 충격파가 발생하는 것을 관찰하였다. 이외에도 커다란 폭발음과 많은 양의 빛 방출이 항상 관찰되었다. 과학적인 관점으로 보면, 폭발 온도가 극히 빠르게 올라가면, 자연계의 단열법칙에 의해서 극히 빠른 냉각이 수반될 것이라고 고려

할 수 있다.<sup>6)</sup> 전기선폭발에 관련된 과거 문헌은 이후에도 여러 출처에서 발견할 수 있다. Chace와 Watson(1962, 1965, 1967), 그리고 Richardson(1955) 등은 이 주제로 서지(書誌)를 달고 출판하였고 Bennett(1968)은 폭발 공정의 현상과 『fast』 폭발에 대한 모델의 개발을 소개하였으며, 부적절한 실험 기술의 토론과 미래의 전기폭발 실험에 대한 표준을 제시하였다. 그리고, Chace와 Moore(1959, 1962, 1964, 1968)는 전기선폭발 현상을 다룬 출판물들을 4개의 심포지엄에 소개하였다.<sup>7)</sup>

전기선폭발 현상에 대한 과학적인 접근들은 비록 수세기 동안 시도되었지만, 실질적인 이 기술의 응용은 20세기 중반에서야 실현되었다. 전기선폭발 기술은 두 가지 독특한 특성을 갖는다. 첫째로, 폭발하는 동안  $10^4 \sim 10^6$  K의 온도에 도달할 수 있고, 둘째로 1~50  $\mu$ sec 이내의 짧은 공정시간을 갖기 때문에 단열법칙에 의한 빠른 급랭이 가능하다는 것이다. 이들 특징들은 화학자들에게 특별한 흥미를 제공하였을 뿐 아니라, 간단한 장비를 이용하여 상대적으로 값싼 비용으로 극히 높은 온도에 도달할 수 있어서 중요한 개발을 이끌 수 있는 계기를 마련하였다.

전기선폭발 과정에서 플라즈마는 폭발이 일어나는 동안 발생하는데, 와이어의 길이와 직경 또는 주위 분위기 등에 따라서 두 가지 플라즈마(하나는 와이어로부터, 다른 하나는 와이어 주위의 가스로부터)를 형성시킬 수 있다. Fig. 1은 와이어 방전에 의해서 플라즈마가 발생하고, 결국에는 나노분말이 제조되는 원리를 나타내고 있다. 이들 두 가지 플라즈마들 사이에서 일어나는 반응들은 고온을 연구하는 화학자들에게 주요한 흥미를 제공하였으며, Bennett(1968)과 Bennett, Burden 그리고 Shear(1962)는 전기선폭발시 사용되는 와이어의 길이에 따른 공정의 변화에 대해서 논의하였고, 그들은 와이어를 기화시키기엔 충분한 에너지를 갖는 적당히 빠른 폭발의 경우에 대하여 다음과 같이 간단히 요약하였다. LC 회로에 전

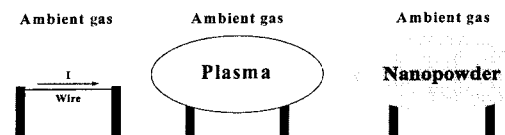


Fig. 1. Principle of nanopowder synthesis by pulsed wire discharge.<sup>1)</sup>

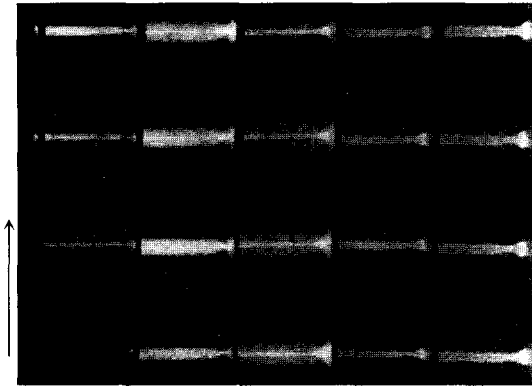


Fig. 2. Streak camera photograph of discharge through exploding wire (start: left down, end: right up, time interval: 0.1  $\mu$ sec).

압을 인가하면, 와이어를 통과하는 전류가 최대 10~50 kA까지 증가하면서 저항 발열을 유도하여 와이어가 빠르게 가열되고 수  $\mu$ sec 이내에 초기체적에 비해 2~3배나 팽창한 후 폭발하게 된다. 이때 유도된 전자들은 금속 원자들 사이에 『국부화』 되고 결과적으로 저항이 급속히 증가하며, 와이어의 폭발로 급속히 금속 증기의 부피가 감소하게 된다.<sup>8-10)</sup> Fig. 2는 스트리크카메라(streak camera)를 이용하여 전기선 폭발의 과정을 0.1  $\mu$ sec 주기로 찍은 사진이다.

전기선폭발시 나타나는 오실로스코프의 파형(waveform)은 폭발 현상에 대한 중요한 정보를 제공하는데, 이에 대해 많은 이론적인 연구가 이미 수행되었다. 이들은 David(1958)와 Chace, Moore(1959, 1962, 1964)에 의해서 자세히 다루어졌으며, Bennett(1968)에 의해서 요약되었다. Fig. 3은 시간에 따른 전류의 변화를 나타내는 오실로그래프로써 전기선폭

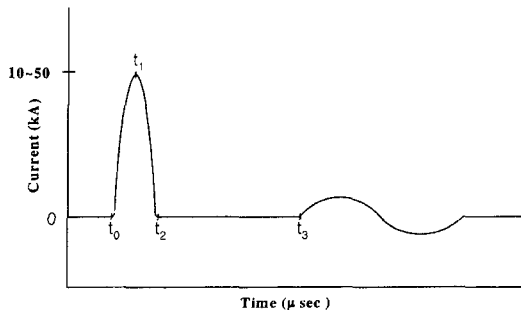


Fig. 3. General shape of oscillogram during exploding wire.

발시 나타날 수 있는 일반적인 경우를 보여주고 있다. 한편 화학자들은 가스 분위기에서 와이어의 반응과 이 반응의 급랭 등에 대한 여러 가지 부가적인 점에 관심을 갖게 되었다. 결과적으로 많은 화학적인 연구가 수행되었지만 매우 짧은 시간 동안 이루어는 반응으로 인하여 전체적인 수치를 계산하는 것이 어려워져서, 단지 폭발공정에서 생성된 최종 생성물의 분석만을 가지고 유추하였다.

Cook과 Siegel(1967), Johnson과 Siegel(1968)은 전기선폭발의 열역학적인 반응에 관하여 다음과 같이 지적하였다.<sup>11-15)</sup> 만약 공급된 전기 에너지가 열역학적으로 와이어를 기화시키기에 충분한 에너지를 갖는다면, 초기에 폭발된 와이어는 대부분이 금속 증기 상태일 것으로 추측할 수 있으며, 이때 상당히 높은 열용량을 갖는 금속 증기는 주위의 가스로 빠르게 에너지를 전파시킬 것이다. 이 순간 두 가지의 공정이 가능하다. 즉, 냉각중인 금속 증기가 가열된 가스와 화학적으로 반응하여 금속 원자들을 포함하는 나노분말을 형성하는 경우와 가열된 가스 분자들이 분해 반응이 일어나는 동안에 금속 증기와 독립적으로 반응이 일어나는 경우가 있다. 상대적으로, 공급된 전기 에너지가 와이어를 용융시킬 정도로 낮다면, 단지 액상-기상 반응만을 관찰할 수 있을 것이다.

전기선폭발에 대한 많은 연구가 수소폭탄 개발기간 동안 미국에서 실행되었다. 미국에서는 1962~1964년 사이에 금속 분말을 생산하는 과정에서 발생하는 충격파와 강한 섬광, 이들의 화학적인 화합물 등과 같은 전기폭발 현상에 대한 포괄적인 연구 결과를 4권의 책으로 출판하였다.<sup>16)</sup> 하지만 기술적인 한계로 인하여 전기선폭발의 공정 경로가 충분히 심도 있게 연구되지는 못하였다. 미국과 경쟁관계이던 러시아에서도 거의 같은 1970년대 중반에 나노분말 연구 프로그램이 수립되었으며, 이 시기에 TPU(Tomsk Polytechnic University)의 HVRI(High-Voltage Research Institute)에서 전기선(線)폭발법을 이용한 나노분말의 합성 연구를 시작하였다.<sup>17-23)</sup>

최근에는 미국과 러시아를 비롯한 영국, 독일, 일본 등의 여러 연구소 및 회사에서 전기선폭발에 대한 폭넓은 연구가 이루어지고 있으며, 국내에서도 차세대신기술개발사업의 일환으로 추진되는 고기능 나노복합재 개발 사업에 포함되어 1999년부터 산·학·연 공동연구로 나노재료의 개발과 상업화에 중점을

두고 연구가 진행 중에 있다.

### 3. 전기선(線)폭발 메커니즘

전기선폭발법은  $10^{10} \text{ A/m}^2$  이상의 고밀도 전류를 금속 와이어에 인가하여 순간적으로 폭발시키는 기술로써, 와이어 주위의 매개체에서 강한 섬광, 날카로운 소리, 충격파, 팽창과 같은 현상들을 수반한다. Fig. 4는 전기선폭발 메커니즘을 도식적으로 나타낸 것으로써, 전극 사이에 위치한 금속 와이어에 강력한 충격전류를 인가하게 되면 와이어는 먼저 저항 발열에 의해 용융이 되며, 지속적인 온도 상승에 따라 와이어의 표면은 주위의 매개체에 의해 냉각되는 반면, 와이어 내부는 액적(droplet)을 형성하여 액적 간에 방전이 일어나서 기화하게 된다. 기화된 금속 가스는 펀치 효과와 관성의 법칙에 의해 와이어 내부에 구속되어 있다가 압력이 임계값 이상으로 도달되면, 순간적으로 팽창하여 충격파를 형성하고, 금속 미립자와 가스가 고속으로 분출되어 미세한 입자를 형성하게 된다. 이러한 폭발 과정은 극히 짧은 시간(수  $\mu\text{sec}$  이내) 동안 이루어지며, 금속 와이어의 재료와 직경 또는 주위의 매개체를 제어함으로써 금속 분말, 산화물·질화물·탄화물 분말, 합금 분말, 화학적 화합물이나 복합재료 분말들을 얻을 수 있다.<sup>24-26)</sup>

Fig. 5는 금속 와이어가 트리거(trigger) 역할을 하는 자발방전(self-discharge) 타입의 전기선폭발용 챔버와 분급장치의 개략도이다. Fig. 6은 RLC-회로도로서 충전기, 충전용 커패시터 बैं크, 갭전극과 평판전극, 접지전극, 피딩장치, 전류변압기, 오실로스코프

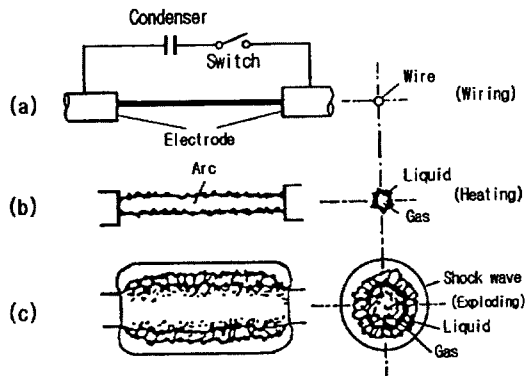
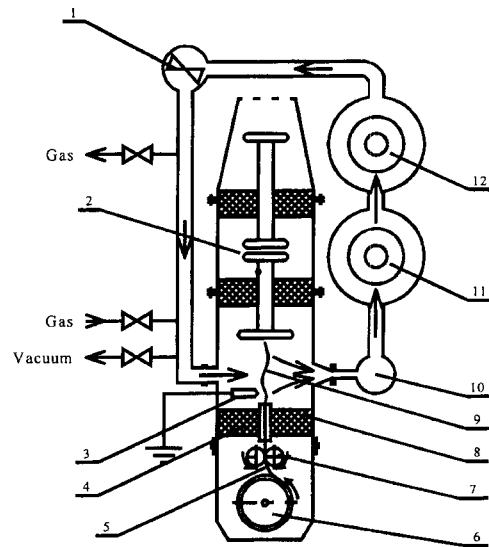


Fig. 4. Mechanism of wire electric explosion resulting from electric discharge.

로 구성되어 있다. 충전기를 통하여 커패시터 बैं크가  $U_0$ 의 전압을 가질 때까지 저장되고, 금속 와이어가 평판전극에 접근하면 방전 갭(discharge gap;  $S_1$ )과  $S_2, S_3$ 에서 거의 동시에 절연파괴가 일어나면서 와이어가 폭발되도록 연결된다. 이 공정에 대한 주요 정보는 전압과 전류의 파형(waveform)으로부터 얻을 수 있다. Fig. 7의 오실로그램은 전기폭발이 여러 단계별로 나누어져서 반응이 일어남을 보여준다. 고밀도의 전류가 인가되면 와이어 내부의 원자들 사이에 전도 전자들이 『궤부화』되면서 저항체로 작용하여 와이어는 가열되고, 전압 시간 오실로그램의 초기에 용융되기 시작하여  $t_1$  순간까지 액체상태로 가열된



1 - fan, 2 - electrodes, 3 - grounded electrode, 4 - deformation unit, 5 - wire supply, 6 - wire wheel, 7 - feeding rollers, 8 - insulator, 9 - explosion wire, 10 - filter, 11 - collector (1), 12 - collector (2)

Fig. 5. Schematic of wire electric explosion chamber and separation unit.

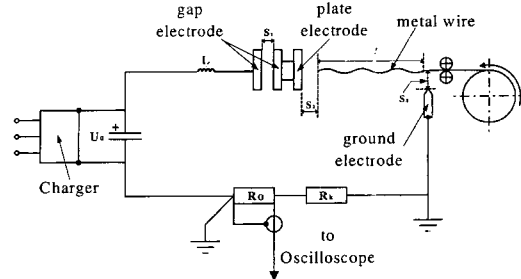


Fig. 6. Real RLC-circuit of wire electric explosion.

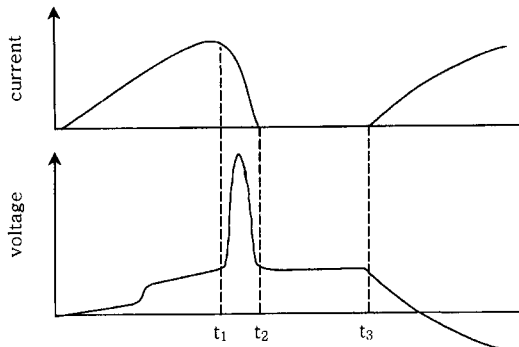


Fig. 7. Schematic of oscillogram current and voltage.

다.  $t_1$ 이 되면 용융된 액적 간에 1차 펄스방전이 일어나서 대부분 기화하게 되고, 회로의 전류가 급격하게 떨어지면서 와이어는 강한 체적 팽창과 함께 폭발하게 된다.  $t_2$  순간에 회로의 전류는 거의 0이 되고 휴지(pause)가 일어나게 된다. 휴지 영역에서 커패시터 뱅크의 잔류 전압이 폭발 미립자에 인가되어, 이들은 팽창되고 밀도는 감소하게 된다.  $t_3$  순간에는 폭발 미립자에 의한 절연파괴가 일어나서, 2차 방전이 발생한다. 만약, 커패시터 뱅크의 잔류 전압이 작거나 거의 0과 같다면 2차 방전은 일어나지 않는다. 폭발 조건에 따라서  $t_2$  순간에 절연파괴가 일어나거나 그 이전에 절연파괴가 일어나서 휴지 구간이 나타나지 않을 수도 있다.

Fig. 8은 전기선폭발시 처음 반주기(half-period;  $T_h$ ) 동안 일어날 수 있는 전형적인 전류시간의 파형(waveform)을 보여 주고 있으며, 변수에 따라 여러 가지 다른 형태를 가질 수 있음을 나타내고 있다. 커패시터 뱅크에 저장된 에너지는 전기 방전에 의한 폭발뿐만 아니라 폭발 미립자들의 2차 방전에도 사용될 수 있다. 여기서 2차 방전은 팽창된 폭발 미립자와 주위의 매개체에 존재할 수 있다. 즉, 방전 에너지의 특징에 따라서 폭발 미립자들은 주위 매개체와

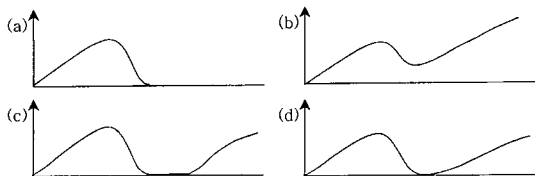


Fig. 8. Typical current waveforms, which can be observed in real experiments.

여러 가지 상호 작용을 하게 된다.

Fig. 8을 자세히 설명하면,

- a) 에너지가 전부 와이어에 사용되어 1차 펄스방전만 발생하였을 때이고,
- b) 일부 에너지가 와이어에 사용되어 1차 펄스방전이 발생하고 이 과정이 끝나기 전에 나머지 에너지가 폭발 미립자와 와이어 주위의 가스 매개체에 사용되어 2차 방전이 발생하였을 때이고,
- c) 에너지의 상당량이 와이어에 사용되어 1차 펄스방전이 발생하고 이 과정이 끝나고 얼마간의 시간이 지난 후에 잔류 에너지의 영향으로 폭발 미립자와 가스 매개체 사이에 절연파괴가 일어나면서 2차 방전이 발생하였을 때이다.

#### 4. 전기선(線)폭발 변수

##### 4.1. 표준이론의 유도

전기선폭발 이론의 부재는 인가전압, 커패시터 뱅크의 커패시턴스, 회로의 인덕턴스 등과 같은 회로 구성의 특징과 폭발 와이어의 길이, 직경, 인덕턴스 그리고 와이어 주변의 매개체와 같은 변수 선택을 어렵게 한다. 따라서 원하는 특성을 갖는 분말을 얻기 위해서 적당한 폭발 변수를 제공할 수 있는 전기선폭발 이론이 절실히 필요하게 되었다. 많은 연구자들은 이 문제를 해결하기 위해서 이전에 사용되어 오던 유사한 이론에 그 동안 실험을 통해 축적되어온 값을 적용하여 전기선폭발 현상의 표준 이론을 개발하고자 하였다.

전기선폭발에 사용되는 RLC 직렬회로를 고려해 보면 회로의 실제 저항이 가열된 와이어와 파동(wave)의 저항에 비해 훨씬 낮아 무시가 가능하므로 아래의 다음 식들을 이용하여 표준이론을 유도할 수 있다.

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = U_0, i_0 = 0 \quad (1)$$

저항  $R$ 은

$$R = \frac{l}{s} \rho_0 f \left( \frac{h(t)}{h^*} \right) \quad (2)$$

여기서,  $s$ 와  $l$ 은 폭발 와이어의 단면적과 길이,  $\rho_0$ 는 초기 비저항,  $i_0$ 는 초기 전류,  $h(t)$ 는 비활동 함수,  $h^*$ 는 비활동(specific action) 크기를 갖는 와이어 재

료의 상수이다.

$$h(t) = \int_0^t \frac{i^2}{s^2} dt \quad (3)$$

변수들을 바꾸어 주면,

$$\tau = \frac{t}{\sqrt{LC}}, \quad y = \frac{iZ}{U_0}, \quad m = \frac{R}{Z} \quad (4)$$

$$\frac{dy}{d\tau} + my + \int_0^\tau y d\tau = 1, \quad y(0) = 0 \quad (5)$$

$$m = \frac{\rho_0 l}{Zs^2} f \left( \frac{CU_0^2}{Zs^2 h^*} Y(\tau) \right) \quad (6)$$

$$Y(\tau) = \int_0^\tau y^2 d\tau \quad (7)$$

위의 (5)-(7) 식을 이용하여 간단히 하면,

$$\pi_1 = \frac{CU_0^2}{Zs^2 h^*}, \quad \pi_2 = \frac{\rho_0 l}{Zs} = m_0 \quad (8)$$

위의 (8)식을 토대로 표준 이론 3가지 식이 제안되었는데 이러한 표준 이론식은 가열 단계와 폭발 단계에서 나타나는 여러 가지 전기선폭발의 특징 묘사를 가능케 했다.

$$\pi_1 = \frac{\rho_M CU_0^2}{e_M n^2 d^4 Z}, \quad \pi_2 = \frac{\rho_M l}{nd^2 Z}, \quad \pi_3 = \frac{v_M \sqrt{LC}}{d} \quad (9)$$

위의 식에서  $l, d, n$ 은 각각 와이어의 길이, 직경 그리고 와이어의 수이고  $C, L, Z$ 는 커패시턴스, 인덕턴스, 회로의 파동(wave) 임피던스이고,  $U_0$ 는 충전 전압,  $\rho_M$ 과  $e_M$ 은 전기선폭발에 사용된 금속의 비저항과 비에너지 값,  $v_M$ 은 와이어의 전도도 감소 속도를 나타낸다. 단일 금속을 사용할 경우에는 일정한 값을 갖는 변수의 생략이 가능하게 되어 표준 이론식보다 간단한 아래와 같은 일반화된 식을 이용할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{10^{-18} CU_0^2}{n^2 d^4 Z}, \quad \lambda = \frac{10^{-6} l}{nd^2 Z}, \quad \nu = \frac{10^3 \sqrt{LC}}{d} \quad (10)$$

위의 식을 이용하여 얻어진  $\varepsilon, \lambda, \nu$ 를 변화시키면서 만든 그래프 결과와 폭발 초기 조건(전압 펄스의 반주기 폭, 과도전압 비율, 와이어에 인가되는 에너지,

폭발 시간, 최대 전류값 등)에 의존적인 많은 변수들을 변화시키면서 실험한 결과를 그래프로 만들어 적용한 결과들이 거의 일치함을 확인하였다.<sup>3)</sup> 즉, 위의 표준 이론은 이전의 복잡한 변수들을  $\varepsilon, \lambda, \nu$ 의 변수로 최소화시킴으로써 원하는 특성의 분말을 보다 손쉽게 만들 수 있게 해주었다.

## 4.2. 임계길이의 결정

대기 중에서 전류의 휴지를 갖는 폭발과 전류의 휴지가 없는 폭발사이의 경계를 와이어의 임계 길이(critical length)  $l_c$ 라고 결정하면,

$$l_c = 10^6 \lambda_c n d^2 Z \quad (11)$$

여기서  $l_c$ 는 전류의 휴지가 거의 0인 와이어의 최소 길이이다(Fig. 8(a)).

높은 전기 전도도를 갖는 Cu, Ag, Al과 같은 금속의 실험적인 자료를 종합해 보면,

$$\lambda_c = \alpha(\varepsilon \cdot \nu)^{0.36} \quad (12)$$

위의  $\alpha$ 는 금속과 매개체에 의존적인 계수이다. 대기 중에서 폭발되면 Cu 와이어의 경우에는  $\alpha=1.35$ , Ag 와이어는  $\alpha=1.5$ , Al 와이어는  $\alpha=2.0$ 의 값을 갖는다.

Fe 와이어의 경우

$$\lambda_c = 1.95 \varepsilon^{0.6} \quad (13)$$

Ni 와이어의 경우

$$\lambda_c = \alpha(\varepsilon \cdot \nu)^{0.55} \quad (14)$$

와 같이 표현되어 진다.

W과 Mo 와이어의 폭발 과정은 Ni의 폭발과는 차이가 있고, Al의 폭발과는 상당히 다르다. 이것은 근본적으로 W과 Mo의 이온화 에너지가 승화 에너지보다 약간 크거나 거의 같아서 1차 펄스방전이 끝나기도 전에 와이어의 일부가 이온화되어 2차 방전의 초기 형성을 이끌기 때문이다. 이런 연유로 W을 폭발시키면 와이어가 어떤 길이가 되더라도 Fig. 8의 (a)와 같은 파형을 가질 수 없게 된다. 따라서, W과 Mo와 같은 재료는 임계 길이( $l_c$ )를 다른 방법으로 결정한다.

즉, W 와이어의 경우에는

$$\lambda_c = 4.66\varepsilon^{0.5} \quad (15)$$

와 같이 표현되어 진다.

임계 길이와 같거나 그보다 작은 길이를 갖는 W 와이어( $\lambda \leq \lambda_c$ )가 폭발하면 초기에 2차 방전이 나타나고(Fig. 8의 (b)), 임계 길이보다 크게 되면( $\lambda > \lambda_c$ ) 전류의 휴지가 관찰된다(Fig. 8의 (c)). 와이어 길이가 더욱 증가하게 되면 휴지 구간도 증가되고, 실질적으로 어느 길이까지는 무한한 휴지 구간을 갖게 된다. 예를 들자면, 대기 중에서 Cu 와이어가 폭발할 경우 휴지를 갖는 경계는  $\lambda_c = 40\varepsilon^{0.7} v^{0.35}$  식으로 나타난다. 여기서 무한한 휴지 구간을 갖는 폭발의 경계는 와이어에 부여되는 에너지 밀도가 낮아서 나노분말을 만들기 위한 실제적인 기술적 응용에 흥미를 제공하지 못한다.

일반적으로 Cu, Ni, Al 같은 금속은 와이어 길이가 임계 길이( $l_c$ ) 보다 커지면 휴지 구간을 갖게 되고, 반대로 임계 길이( $l_c$ ) 보다 작아지면 초기에 2차 방전이 형성되어 와이어에 인가되는 에너지 효율이 낮아지게 된다. 즉, 와이어 길이가 임계 길이와 같은 적절한 폭발의 경우(Fig. 8의 (a))일 때 인가된 에너지 대부분이 와이어에 사용되어 에너지 효율이 높아지게 된다. 다만 나노분말의 생산성을 극대화하기 위해서는 와이어 주위의 매개체에 의해 낭비되는 에너지의 양을 고려하여 에너지 손실 양을 보충해 주어야 한다.

와이어 주위의 매개체(즉 아르곤, 헬륨, 질소, 수소, 물, 변압기 오일 등)와 같은 매질의 밀도( $\rho_a$ )와 전기장( $E_a$ )은 폭발 특성에 큰 영향을 미친다. 만약, 전압이 최대일 때 폭발 입자가 가지는 평균 전기장( $\bar{E}$ )의 세기가 절연과파에 필요한 주위 매질의 전기장( $E_a$ ) 보다 낮게 되면( $E_a < \bar{E}$ ), 매질의 전기장( $E_a$ )은 폭발공정에 영향을 미치지 않는다. 이런 경우 임계 와이어의 길이는 매질의 밀도에 영향을 받게 되며, 다양한 매질인 경우에는 아래와 같이 표현된다.

$$l_a/l_c = 0.65(10^{-3} \rho_a)^{-0.08} \quad (16)$$

여기서  $\rho_a$ 는 매질의 밀도로서 단위는  $\text{kg/m}^3$ 이고,  $l_a$ 는 선택된 매질에서 와이어의 임계 길이,  $l_c$ 는 대기 중에서 와이어의 임계 길이이다. 만약,  $E_a < \bar{E}$ 이면 임계 길이는 매질의 전기장( $E_a$ ) 세기에 의해서 결정되며, 매질의 밀도를 변화시켜서  $E_a$ 를 증가시킬 수 있으며

로 식(16)을 이용하여 임계 길이를 선택할 수 있게 된다.

### 4.3. 인가 에너지의 계산

와이어에 인가되는 에너지는 저항의 변화값과 속도, 와이어의 열역학적 상태, 폭발 미립자들의 팽창 속도, 그리고 최종 합성되는 분말 입도 등을 결정하는 가장 중요한 폭발 변수 중의 하나이다. 하지만 이론적으로 와이어에 인가되는 에너지를 계산하는 것이 현재까지는 불가능하기 때문에 실험적으로 와이어에 인가되는 에너지 값을 전류-시간의 오실로그래프를 적분하여 구한 후 정량화 시켜야 한다. 따라서 전기폭발 공정을 기술적으로 고려할 때, 커패시터 뱅크에 충전된 에너지의 최대 이용효율( $\eta$ )과 와이어에 인가되는 에너지 밀도값( $e$ )을 계산하여 폭발 조건을 적절히 선택하는 것이 필요하다.

와이어에 인가되는 에너지 밀도와 커패시터 뱅크에 충전된 에너지의 최대 이용 효율을 나타내어 보면,

$$e = W/V_0 = \frac{2\varepsilon}{\pi\lambda} \eta(\varepsilon, v, \lambda) \quad (17)$$

$$\eta = W/W_0, W_0 = \frac{CU_0^2}{2} \quad (18)$$

여기서  $W$ 는 와이어에 인가된 에너지,  $W_0$ 는 커패시터 뱅크에 충전된 에너지,  $V_0$ 는 와이어의 체적이다.

기본적으로 임계 폭발을 가정하여 식을 만들면

$$e^* = e/e_c, \eta^* = \eta/\eta_c, \lambda^* = \lambda/\lambda_c \quad (19)$$

여기서  $e_c, \eta_c, \lambda_c$ 는 임계 폭발에 대한 알려진 합수들이고, 식(19)를 식(17)에 적용하면  $e = \frac{2\varepsilon}{\pi\lambda_c} \eta_c(\varepsilon, v) \frac{\eta^*(\lambda^*)}{\lambda^*}$  식으로 변환되고,  $e_c$ 는  $\frac{2\varepsilon}{\pi\lambda_c} \eta_c(\varepsilon, v)$  이므로

$$e^* = \eta^*(\lambda^*)/\lambda^* \quad (20)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 식(19)와 (20)의 의존적인 특징을 찾기 위하여 여러 종류의 실험들이 실행되었다. 모든 초기 조건은 표준 모델  $\varepsilon, v, \lambda^*$  형태로 나타내었으며 실험순서는 다음과 같다. 선택된  $\varepsilon$ 와  $v$  값에 대한 임계 폭발을 우선 계산하고, 이를 실험적으로 확인하였다. 이때 매개 변수인  $e_c, \eta_c, \lambda_c$ 를 위의 결과를 이용하여 결정하였다. 다음으로, 와이어 길이를 변화시키면서  $\lambda^*$ 을 구함으로써,  $e^*$ 와  $\eta^*$  값도

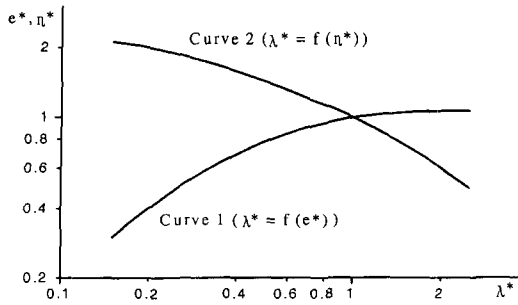


Fig. 9. Dependence of  $e^*$  and  $\eta^*$  on  $\lambda^*$  determined from experiments.

따라서 결정되었다. 이와 같은 과정을 통하여 얻어진 결과들을 종합하여 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9의 곡선들은 Al, Cu, Ni, Au, Fe와 같은 재료의 폭발 결과를 종합하여 얻어진 그래프로써, curve 1은  $\lambda^*$ 에 대한  $\eta^*$ 의 의존성을 나타내고, curve 2는  $\lambda^*$ 에 대한  $e^*$ 의 의존성을 나타낸다. 임계 폭발은  $\lambda^* = 1$ 인 점에서 발생한다.

임계값보다 더 작은 길이를 갖는 영역의( $\lambda^* < 1$ ) 실험값들은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\eta^* = 0.93\lambda^{*0.34}, e^* = 0.93\lambda^{*0.66} \quad (21)$$

또 임계값보다 더 큰 길이를 갖는 영역의( $\lambda^* > 1$ ) 실험값들은 대략적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta^* = 1, e^* = \frac{1}{\lambda^*} \quad (22)$$

위의 결과들에 대한 대략적인 오차는 15%를 초과하지 않는다.

최대  $\eta^*$  값은 임계 폭발에서 얻어지고 이 값들은 와이어 길이가 감소함에 따라 감소하게 된다.  $e^*$  값들은 와이어 길이가 감소함에 따라 증가하고,  $\lambda^* = 0.2$  범위에서는 임계 폭발에서 얻어진 값의 약 2배가 된다. 주어진  $\eta$ 과  $e$  값을 갖는 전기선폭발의 경우에 초기 폭발 변수들은 임계 폭발의 특성과 (19)~(22) 식을 기초로 계산된다. 임계 폭발 조건을 고려할 때, 근본적으로 실험값을 간단하게 표시하는 것이 중요하다. 즉,  $y = f(\epsilon, v, \lambda)$  식 대신에, 전기폭발시 모든 매개 변수의 특징을  $y = f_1(\epsilon, v) \cdot f_2(\lambda^*)$ 과 같이  $\epsilon, v$ 에 대한 2차 함수와 상수  $\lambda^*$ 에 대한 1차 함수의 곱으로 간략히 나타낼 수 있다.

Fig. 10은 대기 중에서 Cu의 임계 폭발에 대한

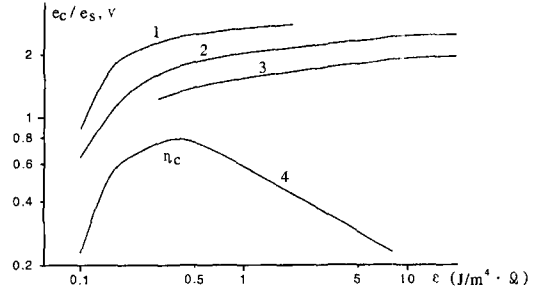


Fig. 10. Change in  $e_c/e_s$  and  $v$  as a function of  $\epsilon$  for the explosion of Cu in air. Curves 1-3 are the energy stored in the explosion of wires with various  $v$  (1-3.8 s/m, 2-10 s/m, 3-20 s/m) and curve 4 is function of  $\eta = \eta(\epsilon, v)$ .

Table 1. Constant A and exponent B for some metals in equation 23.

Type of metal	A	B
Ag	0.35	0.50
Cu	0.50	0.50
Al	0.30	0.50
Fe	0.31	0.47
Ni	0.53	0.20
W	0.20	0.55

$e_c = e(\epsilon, v)$ 과  $\eta_c = \eta(\epsilon, v)$  함수의 의존성을 보여준다. 전기선폭발시 비에너지( $e_c/e_s$ )를 고려할때,  $\epsilon$ 이 증가하면 비에너지는 증가하지만,  $v$ 가 증가하면 비에너지가 감소함을 알 수 있다. 또한  $\eta$ 와  $e$  값의 최대 조합은 오직  $v = 2 \sim 5$  s/m,  $\epsilon = 0.2 \sim 0.8$  J/(m<sup>4</sup> · Ω) 값을 가질 때 얻어짐을 알 수 있다. 대부분의 다른 금속들의 경우에도  $\eta$ 와  $e$ 의 최대값들이 어떠한 표준 모델에서도 일치하지 않는다.

임계 폭발에서  $\eta = \eta(\epsilon, v)$  함수의 의존적인 특징들은 많은 금속들에 대하여 연구되었고 모든 금속들은 아래의 (23)식과 같은 형태로 나타나게 된다.

$$\eta_c = A\epsilon^B \quad (23)$$

여기서 상수 A와 지수 B는 표 1의 폭발 금속의 종류에 의존하며 위 식은  $\epsilon > 0.2$  J/(m<sup>4</sup> · Ω) 경우에 적용이 가능하다.

#### 4.4. 나노분말 평균입도 계산

전기선(線)폭발법에 의해서 제조된 분말들은 Fig. 11과 같이 대부분 구형을 나타내며, 10~100 nm의 입도 분포와 2~50 m<sup>2</sup>/g의 비표면적을 갖는다. 다만, 기



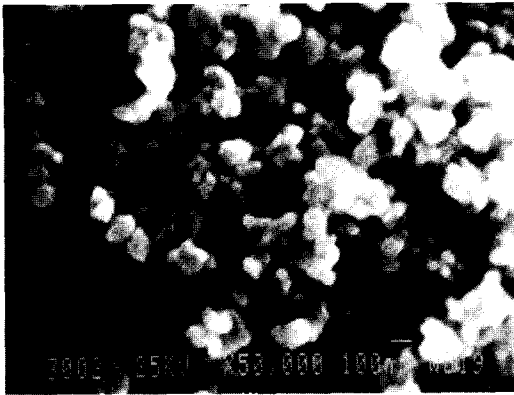


Fig. 11. SEM images of Cu nanopowder produced by wire electric explosion.

화되지 못하고 용융된 일부 분말들은 플랫(flat)한 구형을 나타내며, 수~수십  $\mu\text{m}$ 의 크기를 갖는다. 개수(number)를 기준으로 한 분말의 평균 크기는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{a} = 0.3 \cdot 10^{-6} (e/e_s)^{-3}, [m] \quad (24)$$

단  $0.7 \cdot e_s < e < e_i$ ,  $e/e_d < 1$ ,  $10^{-7} < t_b < 10^{-5}$ 의 조건을 만족하여야 한다. 여기서  $e$ 는 금속 와이어에 인가된 에너지이며,  $e_s$ 는 와이어의 승화 에너지이다. 또한  $e_i$ ,  $e_d$ ,  $t_b$ 는 각각 이온화 에너지, 방전에 사용된 에너지, 와이어에 에너지가 인가된 시간이다.

## 5. 결 언

1980년대 후반부터 연구되기 시작한 전기선(線)폭발법을 이용한 나노분말 합성은 러시아를 비롯하여 미국, 일본과 유럽에서 활발한 연구가 진행 중이며, 일부 재료에 대해서는 이미 대량생산을 하고 있는 실정이다. 최근 국내에서도 나노분말 제조에 대한 연구가 여러 가지 방법으로 시도되고 있지만 경제성, 품질 안정성 등의 문제로 인하여 실험실적인 단계를 벗어나지 못하고 있는 경우가 대부분이다.

즉, 지금까지 소개한 전기선폭발 기술을 개발하여 산업 현장에 적용한다면, 기술적 도약이 시급히 요구되고 있는 국내 분말야금 산업계에 제반 물성이 우수한 나노분말을 공급함으로써 국내 기술 수준 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대되어 한국전기연구원(KERI)에서는 전기선폭발 제조장치에 필요한

고전압 충전장치(40 kV급) 및 Fig. 5와 같은 챔버와 분급장치를 제작하여 기초연구를 수행하였으며, 이를 바탕으로 금속 및 세라믹 나노분말 합성에 관한 산업화를 위하여 전기선(線)폭발 시스템화 연구를 수행 중이며, 울산대학교 지역협력연구센터와 공동으로 제조된 나노금속분말의 부동태화 및 응용에 관한 연구를 진행중에 있다.

## 감사의 글

본 연구는 한국전기연구원과 울산대학교 지역협력연구센터의 협력연구(2002년) 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. K. Yatsui, C. Grigoriu, H. Kubo, K. Masugata and Y. Shmatori: *Appl. Phys. Lett.*, **67** (1995) 1214.
2. E. I. Azarkevich, Yu. A. Kotov and V. S. Sedoi: Requirements of origin of current pause at electrical explosion of conductors. *J. Tech. Phys.*, **45** (1975) 175.
3. A. D. Rakel: About Metal Evaporation by High Density Electrical Current, *GTF*, **65** (1995) 27.
4. J. N. Dimarro and L. C. Burkhardt: *J. Appl. Phys.*, **41** (1969) 3894.
5. W. G. Chace and Moore: *Exploding Wires*, Editors, Plenum Press, New York (1964).
6. E. Cook and B. Siegel: *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **29** (1967) 2739.
7. W. G. Chace and H. K. Moore: Plenum Press, New York (1959, 1962, 1964, 1968).
8. A. P. Baikov, L. S. Gerasimov and A. M. Iskoldsky: Experimental research of an electrical conductance of an aluminum foil during electrical explosion, *J. Tech. Phys.*, **45** (1975) 49.
9. V. M. Volkov and I. A. Shaikevich: The phenomenon of an incision of a conductor in an incipient state of electrical explosion, *Tidings of high schools, Phys.*, **45** (1975) 15.
10. Yu. V. Krivitsky and V. P. Litvinenko: about the mechanism of explosion of conductors by current pulses, *J. Tech. Phys.*, **46** (1976) 2081.
11. B. Siegel: *Uses of Exploding Wires in High Temperature Chemistry*, International Symposium on High Temperature Chemistry, Argonne, **III** (1967).
12. R. L. Johnson and B. Siegel: *J. Electrochem. Soc.*, **115** (1968) 24.
13. B. Siegel and R. L. Johnson: *A Thermal Model of Wire*

- Explosions in Methane, Editors, Plenum Press, New York (1968).
14. E. Cook and B. Siegel: *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **30** (1968) 1699.
  15. B. Siegel: *J. Chem. Educ.*, **40** (1963) 143.
  16. *Exploding Wires*, Editors, Plenum Press, New York (1959, 1965, 1968).
  17. N. A. Yaborovsky: Autoreferense of dissertation Tomsk, TPU, (1982).
  18. V. I. Davydovich: Autoreferense of dissertation Tomsk, TPU, (1986).
  19. M. I. Lerner: Autoreferense of dissertation Tomsk, TPU, (1987).
  20. E. I. Azarkevich: Application of a similarity theory to calculation of some performances of electrical explosion of conductors, *J. Tech. Phys.*, **43** (1973) 141.
  21. Yu. A. Kotov, V. S. Sedoi and L. I. Chemezova: Energy and time responses LC-circuit with a blowing up conductor, In the book *Development and application of radiants of intensive bundles*, Novosibirsk, Science, (1976) 61.
  22. Science-technique report No 72045750 in BHTULS, Tomsk, HVRI, (1973) 110.
  23. V. S. Sedoi: Some regularities of electrical explosion of conductors, *J. Tech. Phys.*, **46** (1976) 1707.
  24. H. C. Early and F. T. Martin: *RSI*, **36** (1965) 1000.
  25. Ch. Maisonnier, J. G. Linhart and C. Gourlan: *RSI*, **37** (1966) 1380.
  26. J. Salge, N. Pauls and K. Nenmann: *Z. Angew. Phys.*, **29** (1970) 339.