

## 동시 전기 폭발법에 의한 나노 합금 분말 제조에 관한 연구 Part I - 동시 전기 폭발을 위한 이론적 배경

이근희 · 이창규 · 김홍희 · O. M. Samatov<sup>1</sup> · Yu. A. Kotov<sup>1</sup> · 권영순<sup>2</sup>

한국원자력연구소 원자력재료기술개발부, <sup>1</sup>러시아 전기물리 연구소  
<sup>2</sup>울산대학교 기계부품 및 소재 특성평가연구센터, 첨단소재공학부

## A Study on the Nano Alloy Powders Synthesized by Simultaneous Pulsed Wire Evaporation (S-PWE) Method, Part I - Background

Geun Hee Lee, Chang Kyu Rhee, Whung Whoe Kim, O. M. Samatov<sup>1</sup>, Yu. A. Kotov<sup>1</sup> and Young Soon Kwon<sup>2</sup>

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Dukjindong, Yusonggu, Daejeon, Korea

<sup>1</sup>Institute of Electrophysics, Ural Branch RAS, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Regional Research Center(RRC)/ReMM, School of Materials Eng., Univ. of Ulsan, Ulsan, Korea

(Received 2 January 2004 ; Accepted form 5 February 2004)

**Abstract** Pulsed wire evaporation (PWE) method is known as the promising production-technique for nano powders. In this study, we developed and modified the previous single wire explosion equipment to the simultaneous two-wire explosion one for the fabrication of alloy or mixture of nano metallic powder. First of all, both the theoretical and empirical background of pulsed wire explosion of single wire were summarized, and compared with our experimental results for Cu and Al single wire explosion. After then, the simultaneous wire evaporation equipment was designed, constructed, and tested. The current and voltage behavior were well matched between the calculated ones from the circuit equations, and the experimental results from simultaneous explosion of Cu and Al wire.

**Keywords :** Nano powders, Pulsed Wire Evaporation (PWE), Simultaneous Pulsed Wire Evaporation (S-PWE)

### 1. 서 론

지금까지 초미세 금속분말 제조 및 응용 연구는 세라믹 분말에 비하여 분말 합성 및 취급이 어려워 많은 연구가 되어 있지 않다. 초미세 분말의 합성은 여러가지 물리적인 합성법과 화학적인 합성법으로 구분할 수 있다. 물리적인 방법은 입자크기가 비교적 균일하고 고순도의 입자를 제조할 수 있으며 입자의 응집을 방지할 수 있는 장점이 있다. 한편 화학적인 방법은 대량 생산을 가능하게 함으로써 양산화 가능성이 높다는 장점이 있다.

여러 가지 나노분말 제조 기술 중 전기폭발 방식<sup>1,2</sup>을 이용한 기술은 세계적으로 소수의 나라만이 그

기술을 확보하고 있는 첨단 기술 분야 중 하나이다. 전기폭발방법은 물리적 기상합성법 중의 하나로 펄스 파워를 이용해 전기에너지를 저장, 압축한 후 금속 도선에 매우 짧은 순간(수 ns ~ 수  $\mu$ s)동안 고전압, 대전류( $10^4 \sim 10^5$ V,  $10^{10}$ A/m<sup>2</sup>)를 집중 투입하여 증발 응축 과정을 거쳐 초미세 분말을 합성하는 방법으로 다른 제조방법에 비해 에너지 효율이 높고, 전기 펄스의 폭, 전압, 전류 등을 조절함으로써 분말의 크기를 조절할 수 있으며, 에너지 효율이 낮은 다른 물리적 방법에 비하여 양산화의 가능성이 높다. 이 방법은 고순도, 무응집 결정상을 얻을 수 있으며 낮은 증기압을 갖는 고용점 재료(W, Co 등)의 초미세 분말화가 가능하고, 다른 부산물들이 발생하지 않아

환경친화적이며, 금속 분말 뿐만 아니라 분위기를 조절함으로써 산화물, 질화물, 탄화물 등의 세라믹 분말의 제조 또한 가능하다.

이러한 전기폭발 기술을 이용하여 합금 나노 분말을 제조하기 위한 다선 금속 투입장치나 동시 폭발에 관한 연구는 아직 미미한 상태이다. 합금 분말을 제조하기 위해서는 합금계에 따라 2개 이상의 금속선이 동시에 투입되어야 하고, 금속선이 투입된 후에 펄스 파워가 고르게 양쪽에 인가되어야 하므로 고도의 기술이 요구된다. 본 연구에서는 이러한 동시 금속선 투입장치를 개발하고, 동시 폭발을 가능하게 함으로써 서로 다른 재질의 금속 도선을 전기 폭발(electric explosion)하여 혼합상(mixture), 합금(alloys) 및 금속간 화합물(intermetallic compound) 나노 분말을 제조하고자 하였다. 본 논문에서는 우선 동시 전기 폭발 실험에 앞서 전기폭발에 대한 모델 제시 및 이러한 모델에 근거한 동시 폭발 모델 및 폭발 조건 등을 이론적으로 고찰한 후 선실험(pre-experiment) 결과와 비교하고자 하였다.

## 2. 금속선 폭발을 위한 이론적 배경

### 2.1. 단일 금속선으로의 입력 에너지

금속선 폭발에 있어서 도선의 직경(단면적)과 길이에 따른 입력 에너지에 대한 예측이 필요하다. 이것은 주어진 금속의 승화 에너지(Sublimation energy,  $W_s$ )에 대한 입력에너지 비( $W$ )인 과열도(Superheat,  $K = W/W_s$ )에 따라 전기 폭발에 의해 제조되는 입자의 크기가 달라지기 때문이다<sup>3)</sup>. 입력 에너지의 개략적인 계산은 다음과 같다. 우선 폭발 이전에 펄스 전류(pulsed current)에 의한 입력 에너지는 식(1)과 같이 표현 된다.<sup>4,5)</sup>

$$\frac{W}{W_0} = \sqrt{\frac{h_b s^2 z}{W_0}} \quad (1)$$

여기서  $W$ ,  $W_0$ ,  $s$ ,  $z$ ,  $h_b$ 는 금속선에 인가되는 입력 에너지, 캐패시터(Capacitor)에 저장된 에너지, 금속선의 단면적, 회로의 파동저항( $\sqrt{LC}$ ), 평균 전류 밀도( $h_b = \frac{1}{2} \int_0^{t_0} I^2 dt$ )이다. 식(1)을 과열도에 대한 식으로 바꾸면<sup>5)</sup>

$$K = \frac{W}{W_s} = \frac{W_0}{W_s} \cdot \frac{W}{W_0} = \frac{W_0}{w_s s l} \sqrt{\frac{h_b s^2 z}{W_0}} = \frac{\sqrt{h_b}}{w_s} \cdot \frac{U_0}{l} \sqrt{\frac{LC}{2}} \quad (2)$$

와 같다. 여기서  $w_s$ ,  $l$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $U_0$ 는 각각 단위체적당 승화에너지, 폭발되는 금속선의 길이, 회로의 인덕턴스(inductance)와 캐패시턴스(capacitance), 캐패시터에 걸린 초기 전압을 의미한다. 위 식에서 금속 성질에 의존하는 부분은  $\sqrt{h_b}$ 이며 이것을 폭발상수<sup>6)</sup>라 한다. 구리의 폭발 상수를  $w_s$  기준으로 한 다른 금속들의 폭발 상수들을 비교한 값을 Table 1에 정리하였다. 이것은 금속선이 승화되기 전 얼마나 큰 전류가 흐를 수 있는지의 정도를 의미한다. 즉 폭발상수가 클수록 보다 쉽게 승화를 시킬 수 있게 되지만 폭발상수가 작은 경우 승화시키기 어렵다는 것을 의미한다. 한편 과열도에 영향을 주는 다른 인자들은 회로조건( $U_0$ ,  $L$ ,  $C$ )과 금속선의 단면적( $s$ ) 및 길이( $l$ )에 의해 결정된다. 식(2)에서 금속선의 길이( $l$ )가 감소함에 따라 과열도는 무한대로 커질 수 있지만 실제로 이러한 과열은  $l \geq l_{cr}$  (임계길이)인 경우에서만 유효하다<sup>4)</sup>. 즉 임계 길이 이상에서는 과열이 계속 진행될 수 있으나 임계 길이보다 작은 영역에서는 일정 과열 이상에서는 더 이상 과열시킬 수 없고 금속선의 폭발이 일어나게 된다. 식(2)에 의하면 다른 종류의 금속이라도 동일한 회로에서 길이를 달리하거나 다른 전압에서 폭발시킬 수 있다면 같은 과열도를 얻을 수 있다. 과열도가 최소 1 이상이 되어야 금속이 증기 상태가 되는 폭발이 가능해진다. 한편 금속선에 투입될 수 있는 최대 에너지는 캐패시터에 저장된 모든 에너지가 투입되는 경우이며 이 경우 식(1)의 값은 1이 된다. 즉

$$W_0 = h_b s^2 z \quad \text{or} \quad U_0 = s \sqrt{\frac{2h_b z}{c}} \left( QW_0 = \frac{1}{2} CU_0^2 \right) \quad (3)$$

일 때 회로 손실을 무시한다면 캐패시터에 저장된 모든 에너지를 사용하게 된다.

### 2.2. 두 개의 평행 금속선에 대한 입력 에너지

식(1)을 두 개의 금속선에 인가되는 입력에너지를 예측하는데 적용하면 좌변의  $W = W_1 + W_2$ 는 명백하나 우변은 보다 복잡해진다. 우변의  $h_b s^2$ 은 로서 두 개의 서로 다른 금속선에 대해 식(4)로 정리된다. 즉

$$\begin{aligned} \int I^2 dt &= \int (I_1 + I_2)^2 dt = \int (j_1 s_1 + j_2 s_2)^2 dt \quad (4) \\ &= s_1^2 \int j_1^2 dt + s_2^2 \int j_2^2 dt + 2s_1 s_2 \int j_1 j_2 dt \end{aligned}$$

$$= s_1^2 h_1 + s_2^2 h_2 + 2s_1 s_2 \int j_1 j_2 dt$$

여기서  $j_1, j_2$ 는 각 금속선의 전류 밀도이며 마지막 항은  $h_1$ 과  $h_2$ 로 표현되지 않는다. 이 항을 예측하기 위하여 두 가지 경우를 고려할 수 있다. 첫 번째는  $j_1$ 과  $j_2$ 가 거의 유사할 때, 즉 두 금속의 전기적 특성이 거의 동일한 경우이고 식(1)은

$$\frac{W_1 + W_2}{W_0} = \sqrt{\frac{(s_1^2 h_1 + s_2^2 h_2)z}{W_0}} \quad (5)$$

가 된다. 두 번째 경우는 전류가 한쪽 금속선으로 모두 흐른 뒤 다른 도선으로 흐르는 경우로서, 즉 두 금속이 매우 다른 전도율을 갖는 경우이다. 이 경우이므로,

$$\frac{W_1 + W_2}{W_0} = \sqrt{\frac{(s_1^2 h_1 + s_2^2 h_2)z}{W_0}} \quad (6)$$

이 된다. 이 두 경우를 고려하게 되면 실제의 거의 모든 경우를 다룰 수 있다.

한편 양 도선에 걸리는 입력 에너지 비율을 생각해 보면 다음과 같다. 일반적으로 병렬로 연결된 일정 저항에 입력되는 에너지는 저항에 반비례하므로

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (7)$$

이다. 여기서 상 변화에 의해 금속선의 저항이 변하는 경우 폭발하는 금속선의 저항의 평균값에 반비례하는 입력 에너지를 가정하기로 한다. 우선 폭발 금속선의 평균 저항을  $\bar{R}$ 로 표시하면

$$\bar{R} = \rho_s^{-1} \left( \bar{\rho} = \frac{w_s}{h_b} \right) \quad (8)$$

로 표현할 수 있다. 따라서 금속선의 단위 부피당 투입되는 에너지의 비율은 다음과 같다.

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{W_1}{W_2} \frac{s_2 l_2}{s_1 l_1} = \frac{\rho_2 l_2 s_1}{\rho_1 l_1 s_2} \frac{s_2 l_2}{s_1 l_1} = \frac{\rho_2 l_2^2}{\rho_1 l_1^2} = \frac{w_{s_2} h_1}{w_{s_1} h_2} \frac{l_2^2}{l_1^2} \quad (9)$$

이 때 각 금속선에 대한 과열도의 비는 다음과 같다.

$$\frac{K_1}{K_2} = \left( \frac{h_1}{w_{s_1}} / \frac{h_2}{w_{s_2}} \right) \cdot \frac{l_2^2}{l_1^2} \quad (10 \text{ (a)})$$

즉 과열도의 비는 폭발상수 비율의 제곱에 비례하고, 금속선 길이비의 제곱에 반비례한다. 예를 들어, 같은 길이의 구리(Cu)와 알루미늄(Al)의 과열도 비를 구해보면,

$$\frac{K_{Cu}}{K_{Al}} = \frac{1}{0.97^2} = 1.06 \quad (10 \text{ (b)})$$

가 얻어지는데 이것은 같은 입력에너지에 대하여 구리 도선에서 약간 높은 과열도가 얻어짐을 나타낸다. 만약 전기 전도도에 큰 차이를 갖는 금속의 경우 - 예를 들어 텅스텐(W)-구리(Cu) 등 - 의 경우 과열도 차이를 해결하기 위해 각 금속선에 대한 LC회로의 스위칭 조건에 의해 과열도의 값이 식(10-a)에서 1에 가까워지도록, 즉 동일한 두 금속이 동일한 과열도를 얻도록 하는 것이 필요하다. 또한 동일 조건에서 같은 시간에 폭발이 일어날 수 있도록 해야 한다. 따라서 위와 같은 개략적인 접근에서는 실험에서 얻을 수 있는 동시 폭발에 대한 금속선 저항의 변화, 필요한 입력 에너지, 폭발 현상의 실험적 결과를 모사할 수 있는 체계적인 모델을 이용한 보다 정확한 접근이 필요하다.

### 2.3. 금속선에 인가되는 입력 에너지와 저항의 변화 모델

금속선에 투입되어야 하는 입력 에너지를 보다 정확하게 알기 위해서는 전기회로식(Circuit equation)을 계산하여야 한다. 입력 에너지, 과열도 등이 금속선 저항에 의존하므로 계산을 통해 금속선 저항 모델을 제시함으로써 전기 폭발 모델을 제시할 수 있다. 전기회로는 일반적으로 LC 회로를 포함하며, 캐패시터(C), 인덕터(L), 폭발 금속선의 저항( $R_1, R_2$  등)을 갖는 저항( $R_c$ )을 포함한다. 계산의 단순화를 위하여 폭발 금속선 자체의 인덕턴스를 무시할 때 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$-U_0 + \frac{Q}{C} + L \frac{dI}{dt} + (R + R_c)I = 0 \quad (11)$$

$$\frac{dQ}{dt} = I, \quad I = I_1 + I_2, \quad I(0) = I_1(0) = I_2(0) = Q(0)$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{dW_1}{dt} = R_1 I_1^2, \quad \frac{dW_2}{dt} = R_2 I_2^2$$

여기서  $R$ 는 회로 전체에 흐르는 전류,  $I_1$ 과  $I_2$ 는 각 금속선에 흐르는 전류이다.  $W_1, W_2$ 는 두 금속선에 인가되는 입력에너지,  $U_0$ 는 캐패시터에 충전된 전압,  $Q$ 는 회로에 흐르는 총 전하량이다. 전기폭발 모델에 대한 전기회로식의 해를 구하기 위해서는 크게 두 가지 방법을 적용할 수 있다. 첫 번째는 전자기역학(MHD, Magnetohydrodynamic) 식을 계산하는 것으로 이를 통해 모든 전자기 동적 수량을 수식적으로 표현할 수 있다. 그러나 이러한 방법은 매우 복잡하기 때문에 본 논문에서는 구체적으로 다루지 않을 것이다. 두 번째는 실험적 모델(engineering model)로서 저항에 대해 현상학적으로 단순화한 모델이다. 이러한 실험적 모델에서는 전기 폭발을 (1) 폭발을 위해 과열이 되는 단계, (2) 폭발 상태, (3) 폭발 후 절연 파괴 또는 폭발 재료의 이온화 상태로의 세가지 단계로 구분할 수 있다<sup>4)</sup>. 본 연구에서는 이러한 상태에서의 저항변화를 실험적으로 모델화하여 모델 식을 고찰, 제시하고자 하였다. 첫 번째의 과열 상태는 고상의 금속을 용융점으로, 또는 액상의 금속을 폭발점에 다다르게 하는 것을 의미한다. 이때 여러 전류밀도 범위에서 비저항의 변화( $\rho = R_l^s$ , 저항  $\frac{R}{R_0}$ ,  $R_0$ 는 초기저항)는 입력 에너지에 대해 일정한 경향을 나타내는데, 예를 들어 구리의 경우 과열 상태에서의 비저항이 입력 에너지의 증가에 대해 선형적으로 증가하는 특성을 보인다. Fig.1<sup>6)</sup>는 이러한 현상을 나타낸 그래프이다. 한편 Fig.1에서 전류 밀도가 증가하면서 ( $j_1 \rightarrow j_3$ ) 폭발 전까지의 저항이 보다 증가하며, 따라서 폭발 시작점도 전류 밀도의 증가에 따라 보다 높은 입력 에너지쪽으로 이동하였다. 이것은 보다 높은 과열도에서 폭발이 일어나는 것을 나타내며, 이러한 조건에 최후에 생성되는 금속 분말의 크기에 영향을 미칠 것을 예상할 수 있다. Fig.1의 전기 폭발 현상을 모사한 실험식은 아래와 같이 세가지 정도로 정리될 수 있다.

(1) Burtsev 모델<sup>7)</sup>

Burtsev 모델은 알루미늄 포일(foil)에 대한 Fig.1의

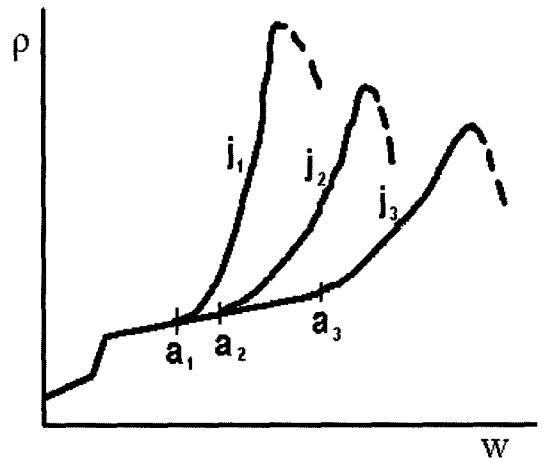


Fig. 1. Typical dependences of resistivity during an electric explosion on the specific input energy at different current densities ( $j_1 < j_2 < j_3$ ).  $a_1, a_2, a_3$  indicate the position of explosion start point.

입력에너지 - 저항 그래프에서 폭발 직전까지의 과열 구간을 3개의 선형식으로 구분하고, 폭발이 일어나는 시점으로부터 절연 파괴가 일어나기 직전까지를 지수함수(Exponential function)으로 근사화한 것이다. 즉 과열 구간의 저항은

$$\frac{R}{R_0} = 1 + 6.25w, \quad 0 \leq w < 0.64 \text{ kJ/g} \quad (12 \text{ (a)})$$

$$\frac{R}{R_0} = 5 + 5.8(w - 0.64), \quad 0.64 \leq w < 1.02 \text{ kJ/g}$$

$$\frac{R}{R_0} = 7.2 + 5.06(w - 1/02), \quad 1.02 \leq w < w_a$$

로 표현하였고, 폭발점의 위치  $w_a$ 는

$$w_a = 2.5 + 2.3 \cdot 10^{-46} j_m^4 \text{ kJ/g} \quad (j \text{ in } A/m^2) \quad (12 \text{ (b)})$$

로 결정하였다. 여기서  $j_m$ 는 금속에 흐를 수 있는 최대 전류 밀도이다. 한편 폭발 상태에서의 저항은 식 (12-c)와 같은 지수함수로 표현하였다.

Table 1. Relative explosion constant of various metals to that of Cu.

Metal	Cu	Ag	Al	Ni	Fe	W	Au
$\frac{\sqrt{h_b}}{w_s} \left( \frac{\sqrt{h_b}}{w_s} \right)_{Cu}$	1	1.26	0.97	0.47	0.47	0.34	0.87

$$\frac{R}{R_0} = \frac{R_a}{R_0} \exp[\delta(w-w_a)] \quad (12 \text{ (c)})$$

$$\delta = 0.42 + 0.012 j_m^2 \cdot 10^{-22}$$

$$j_m^2 = (4 \sim 13) \cdot 10^{22} \text{ A}^2/\text{m}^2$$

**(2) Bennett의 증기 파장 모델<sup>8)</sup>**

이 모델은 폭발 후 금속선의 증기 파장의 이동에 따라 비전도성을 띄게 되므로 금속선의 저항이 파장의 진행에 따라 증가되는 것으로 간주한다. 이 경우 금속선의 저항 R은 아래의 식(13)으로 표현되었다.

$$R = \frac{\rho(w)l}{\pi \left( r_0 - \int V dt \right)^2} \quad (13)$$

여기서  $r_0$ 는 금속선의 초기 반경, V는 증기 파장의 속도를 의미한다. 이 모델에서 저항은 파장이 금속선 축으로 접근함에 따라 무한히 커지는 경향이 있다.

**(3) Golub - Gondarenko - Iskoldsky 모델<sup>9)</sup>**

이 모델에서 저항은 폭발 후 증가하는 저항  $R_+$ 와 이온화 상태가 되므로 감소하는 저항 R의 비선형적 평형 저항으로 모사되고 있다. 이 때의 저항은 아래의 식(14)로 표현되었다.

$$\frac{dR_+}{dt} = C_+ I_2 R_+^2 \quad (14)$$

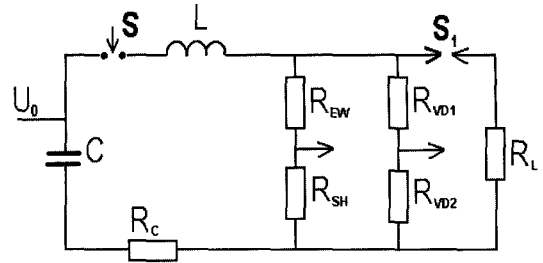
$$\frac{dR_-}{dt} = -C_- I_2 R_-^2$$

$C_+$ ,  $C_-$ 는 비례 상수이다. 본 연구에서는 주로 첫 번째 제시한 Burtsev 모델을 이용하여 실험 결과를 모사하였다.

**3. 폭발 저항 측정 실험**

**3.1. 단선 폭발 저항 측정**

입력 에너지에 의한 금속선 저항 변화를 측정하기 위하여 100ns의 해상력을 갖는 C9-8 전자식 전류 측정기를 이용하였다. 우선 본 연구에서는 구리선의 독립적인 전기폭발 실험을 수행하였고, 알루미늄선의 경우는 Burtsev의 결과<sup>7)</sup>를 참조하였다.



**Fig. 2. Circuit diagram for the examination of variation of resistance during PWE process.**

전기 폭발시 금속선의 저항 변화를 측정하기 위하여 Fig.2에 제시한 바와 같은 개략도의 회로를 구성하였다. 캐패시터 뱅크(C), 제어 가능한 gas spark gap(S), 가변형 인덕턴스(L), 길이 가변형 금속선 ( $R_{EW}$ )을 구성하였다. 고정된 spark gap( $S_1$ )을 통해 금속선( $R_L$ )을 설치하여 실험하였다. 금속선에 흐르는 전류는 셉트저항( $R_{SH}$ )을 통해 측정되었다. 금속선에 걸리는 전압은 분배용 저항  $R_{VD1}$ ,  $R_{VD2}$ 를 통해 측정하였다. 전압과 전류는 나노초(ns, nano-second) 단위로 오실로스코프를 통해 측정하였다. 센서에 연결된 전선들은 2ns 이내로 동기화되도록 길이를 맞추었다. 전기폭발(PWE)시 저항은 전류 밀도와 금속선의 직경에 따라 변하기 때문에 회로의 캐패시터, 인덕터, 부하 저항 등을 쉽게 교체할 수 있도록 구성하였다. Table 2는 구리선의 전기 폭발에 대한 회로 설정 값을 정리한 것이다. 구리선의 경우 직경이 각각 0.2, 0.05 mm일 때 도선에 흐를 수 있는 최대 전류 밀도는 다음과 같이 계산된다.

$$j_m = (1.0 \sim 4.3) \cdot 10^{11} \text{ A/m}^2 \quad d=0.2\text{mm} \quad (15)$$

$$j_m = (2.0 \sim 8.5) \cdot 10^{11} \text{ A/m}^2 \quad d=0.05\text{mm}$$

**Table 2. Setting values of explosion circuit for the measurement of resistance change of Cu wire.**

Wire diameter (mm)	0.2~0.05
Wire length (mm)	22~400
Capacitor (μF)	0.116~25
Circuit Inductance (μH)	0.6~20.5
Circuit period (μsec)	3.3~125
Charging voltage (kV)	4~30

이 때의 팽창비 및 팽창 속도<sup>4)</sup>는 아래의 식(16)과 같이 정리된다.

$$j_m^2 d = (0.2 \sim 4) \cdot 10^{19} A^2 / m^3 \quad (16)$$

$$v = \sqrt{\frac{LC}{d}} \quad v = 10 \sim 100 \mu s / min$$

$$\epsilon = \frac{CU_0^2}{d n^2 z} ; \epsilon = 0.32 \sim 2.2 J / mm^4 \cdot \Omega$$

실험 과정은 다음과 같다. 우선 전기 폭발이 일어나는 임계 도선 길이를 결정하는 조건이  $v, \epsilon$  곱의 지수 함수로 표현되므로<sup>4)</sup>  $v, \epsilon$  평면에서 한 점을 선택한 후 이 값들을 구현하는 회로를 구성하여 폭발이 일어날 수 있는 금속선의 임계 길이를 결정한다. 본 연구에서는 (1) $v = 100, \epsilon = 0.32$ , (2) $v = 100, \epsilon = 1.3$ , (3) $v = 40, \epsilon = 0.4$ , (4) $v = 10, \epsilon = 2.2$  값들을 적용하였다. 그 후 출력 그래프와 시간 지연된 폭발 트리거 신호를 기록한다. 저항과 입력 에너지는 다음 식에 의거하여 계산한다.

$$U_R = U_{VD} - L_{VD} \frac{dI}{dt} - R_{sh} I \quad (17)$$

$$R = \frac{U_R}{I}$$

$$W = \int_0^t U_R I dt$$

여기서  $U_{VD}, U_R, L_{VD}, R_{sh}$ 는 각각 전압 검출 저항을 통해 측정된 전압, 금속선에 걸리는 전압, 분기 회로의 인덕턴스, 셉트 저항을 의미한다. 실험 중에는 최대 전류 밀도와 전체의 세기도 측정된다. 비저항은 다음 식(18)에 의해 보다 구체적으로 결정된다.

$$\rho(w, t) = \rho_w \eta \quad (18)$$

$$\eta = \exp\left(\frac{1}{r_0} \int_0^t V(w) dt\right)$$

여기서 비저항  $\rho_w$ 는 단위부피당 입력 에너지와 관련이 있다. 따라서  $\eta$ 는 금속의 팽창에 의한 밀도 감소에 따른 저항 증가 변수이다.  $r_0$ 는 금속선의 초기 반경,  $V$ 는 팽창속도(expansion rate)이다.  $\rho_w$ 는 식(12)와 유사하게

$$\rho_w = \rho_i + b_i(w - w_i) \quad (19)$$

로 표현할 수 있다. 이때 첨자  $i$ 는 각각의 단계를 의미하는데 1, 2, 3은 폭발전의 과열단계를 세가지로 구분한 것, 4는 폭발 시점, 5는 절연파괴 시점, 6은 아크 방전이 일어나는 시점을 의미한다. 한편 각 단계에서의 팽창속도  $V$ 는 다음의 식으로 정리될 수 있다. 즉 폭발전까지는 증기 팽창이 없으므로

$$V = 0, w \leq w_4 \quad (20)$$

이고, 폭발 후에는

$$V = 127[\exp(-0.112(w - w_4)) - \exp(-0.117(w - w_4))] ; w > w_4, mm / \mu sec \quad (21)$$

로 변하게 된다. 금속선의 과열이 증가함에 따라 저항은 계속 증가한다. 저항의 증가는 절연 파괴가 일어나지 않는 경우 최대값  $\rho_{max}$ 에서 멈출 것이다. 반면 절연 파괴가 일어나는 경우 비저항의 변화는

$$\rho = [\rho(w_s) - \rho_{arc}] \cdot \left[1 - \left(\frac{w - w_5}{w_6 - w_5}\right)^2\right] + \rho_{arc}, w_s < w \leq w_6 \quad (22)$$

로 표현되며, 이때  $w_s$ 는 절연파괴를 위한 입력에너지,  $w_6$ 는 아크 방전이 일어나기 위한 에너지 (약  $1.34 \cdot w_5$ ),  $\rho_{arc}$ 는 아크 저항치이다. 한편 알루미늄선의 경우는 Burtsev<sup>7)</sup>의 결과로부터  $\rho_i, b_i, w_i$ 를 Table 3에 요약한 바와 같이 정리할 수 있다.

직경 0.2 mm와 0.05 mm인 구리선에 대한 전기 폭발시 시간에 따른 전류 및 전압 곡선을 Fig.3과 같이 얻을 수 있었다. 서로 다른 직경의 금속선이지만 같은 구리선에서의 전압과 전류 곡선이 매우 유사하며 최대 편차는 약 8%였다. 금속선의 직경이 줄어들면서 전류, 전압의 변화에 대한 반응이 약간 더 빨라졌음을 알 수 있다. 한편 Fig.4의 입력에너지에

Table 3. The values of  $\rho_i, b_i, w_i$  for wire explosion of Al<sup>5)</sup>.

i	$w_i, J/mm^3$	$\rho_i \cdot 10^5, \Omega \cdot mm$	$b_i \cdot 10^5, \Omega \cdot mm^4/J$
0	0	2.846	3.955
1	1.811	10.007	10.88
2	2.924	22.12	2.138
4 (폭발시점)	15.0	-	-

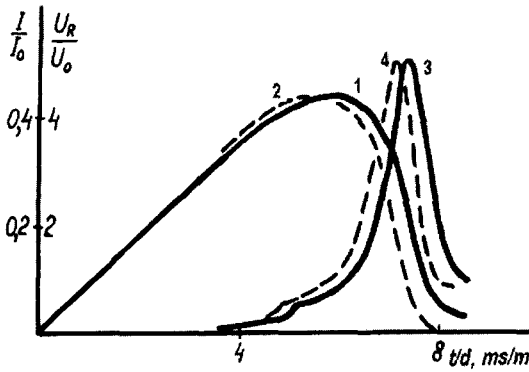


Fig. 3. Oscillograms of wire explosion at  $v = 10$  and  $\epsilon = 2.2$ . (1 and 2 are current curves, 3 and 4 are voltage curves, wire diameter of 1 and 3 are 0.2 mm, and 2 and 4 are 0.05 mm).

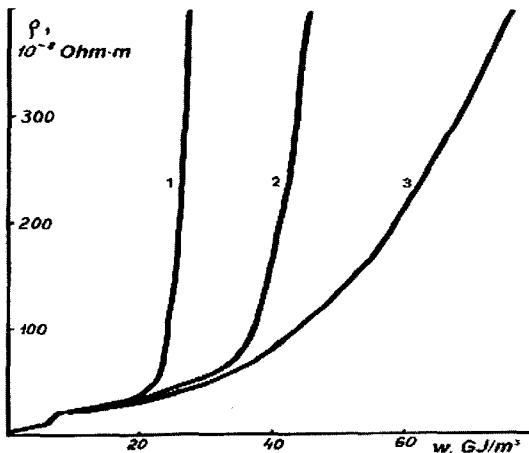


Fig. 4. Resistivity vs. specific input energy (1 =  $0.2 \times 10^{19} \text{ A}^2/\text{m}^3$ , 2 =  $0.7 \times 10^{19} \text{ A}^2/\text{m}^3$ , 3 =  $5 \times 10^{19} \text{ A}^2/\text{m}^3$ ).

대한 저항변화는 Fig.1의 알루미늄과 동일한 양상을 보이고 있다. 또한 Fig.4에서 보는 바와 같이 팽창비  $j^2md$ 가 증가함에 따라 폭발 범위가 넓어짐을 알 수 있다. 즉 같은 전류밀도에서 직경이 증가하게 되면 투입되는 입력에너지의 증가에 대한 저항의 증가 속도가 줄어드는 결과를 보이며 따라서 가는 직경의 금속선보다 폭발이 점점 늦게 발생하는 것을 의미한다.

또한 Fig.5는 구리선의 경우 입력 에너지에 대한 팽창속도를 도시한 것이다. 입력에너지가 증가하면서 전기 폭발시의 팽창 속도가 급격하게 증가하지만 일정 입력 에너지 이상이 되면 그 팽창 속도가 거의 일정해 지는 경향을 나타내고 있다. 이것은 입력에너

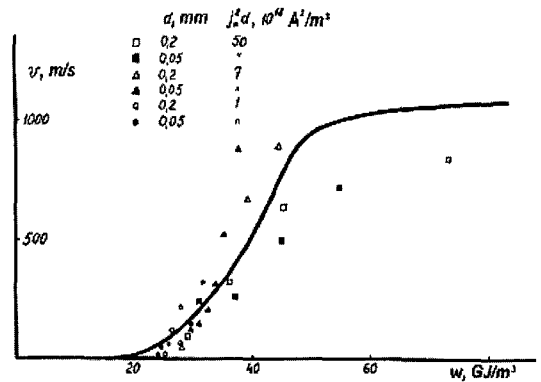


Fig. 5. Dependence of the expansion speed on the input energy.

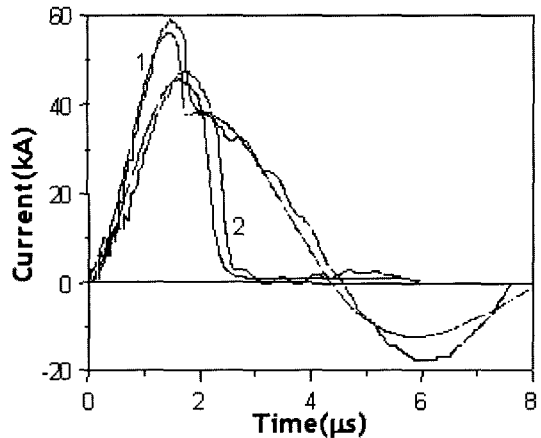


Fig. 6. Calculated (blue) and experimental (black) current curves for explosion of Al wire. Conditions are as follows;  $d = 0.45 \text{ mm}$ ,  $l = 97 \text{ mm}$ ,  $C = 3.1 \mu\text{F}$ ,  $L = 0.432 \mu\text{H}$ . (1)  $U_0 = 31 \text{ kV}$  and (2)  $U_0 = 23 \text{ kV}$ .

지의 증가에 따라 전열 파괴가 일어나기 전까지는 팽창 속도가 증가하지만 전열 파괴가 일어나는 입력에너지 이상에서는 더 이상의 팽창속도 증가가 발생하지 않기 때문에 사료된다.

Fig.6은 알루미늄(Al) 금속선의 폭발에 대해 계산 결과와 실험 결과를 비교한 것이다. 이것은 직경 0.45 mm, 과열비(K)가 2와 1.3인 두 경우의 폭발에 대한 전류 및 계산 곡선을 비교하고 있다. 우선 시간에 따른 전류의 변화 양상은 Fig.3의 구리의 경우와 거의 동일하다. 입력 전압이 큰 경우 (31kV) 보다 짧은 시간에 최대 전류값에 도달하며, 높은 과열도에서 전기 폭발현상이 발생하였다. 한편 계산된 곡선과

실험 결과와도 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

### 3.2. 복수선 폭발 저항 측정

Fig.7은 동시 폭발을 위한 회로도를 나타낸 것이다.  $R_1, R_2$ 는 금속선 저항,  $I_1, I_2$ 는 금속선에 흐르는 전류,  $I$ 는 총 전류,  $S$ 는 스위치를 의미한다. 본 연구에서는 구리선과 알루미늄선을 이용한 동시 폭발 실험을 수행하였다.

우선 Fig.7의 회로도에 관한 식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dt} &= \frac{1}{L}(U_c - U_s - U - IR_c), I(0) = 0 \\ \frac{dU_c}{dt} &= -\frac{1}{C}U_c, U_c(0) = U_0 \\ \frac{dw_1}{dt} &= \left(\frac{I_1}{s_1}\right)^2 \rho_1, w_1(0) = 0 \\ \frac{dw_2}{dt} &= \left(\frac{I_2}{s_2}\right)^2 \rho_2, w_2(0) = 0 \\ \frac{d\eta_1}{dt} &= \frac{2}{d_1}\eta_1 V_1, \eta_1(0) = 1 \\ \frac{d\eta_2}{dt} &= \frac{2}{d_2}\eta_2 V_2, \eta_2(0) = 1 \\ R_1 &= \frac{\rho_1 l_1}{s_1}, R_2 = \frac{\rho_2 l_2}{s_2}, U = I \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, I_1 = \frac{U}{R_1}, I_2 = \frac{U}{R_2} \end{aligned} \quad (23)$$

$$U_s = U_0 \exp\left(-\frac{t}{t_{com}}\right)$$

여기서  $U_s$ 는 switching voltage,  $t_{com}$ 은 switch 정류 시간, 숫자 1과 2는 각각 동시폭발에 사용된 두 금속을 의미한다. 금속선에 걸리는 전압이 절연 파괴 전압을 넘었을 경우의 회로 설정값을 기록하고, 이 값을 이용하여 방전에 대한 저항을 계산하였다. 계산이 완료되면 계산된 전류와 전압 곡선을 출력하였다. 최종적으로 폭발에 최적화된 최대 전류와 전압을 계산하고 입력되는 에너지를 출력하였다. 입력에너지  $W$ , 금속선에 걸리는 전압  $U_R$ , 저항  $R$ 은 식(24)와 같이 표현할 수도 있다.

$$W = U_0 Q - \frac{Q^2}{2C} - \frac{LI^2}{2} - R_c J \quad (24)$$

여기서  $U_0, C, L, R_c, I, t$ 은 각각 충전전압, 캐패시턴스, 인덕턴스, 스위치를 포함한 회로저항, 금속선

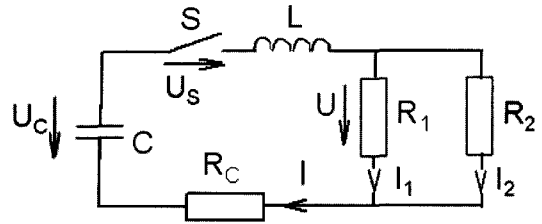


Fig. 7. Electric circuit for simultaneous explosion of two wires.

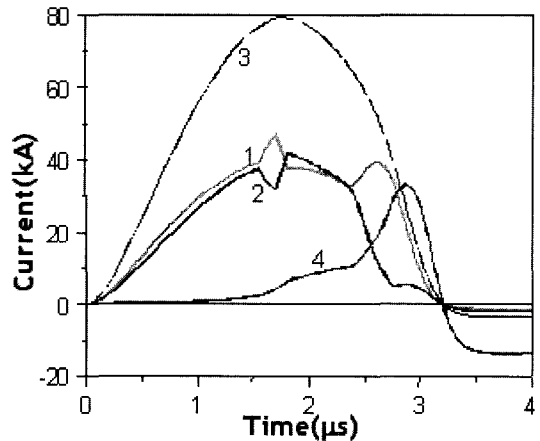


Fig. 8. Simultaneous explosion of Cu and Al wires: 1-Cu current; 2-Al current; 3-total current; 4-voltage.

에 흐르는 전류, 시간을 의미한다. 보다 정확한 값들은 아래의 식(25)와 같다.

$$w = \frac{W}{s l}, \rho = R \frac{s}{l}, j = \frac{I}{s}, E = \frac{U_R}{l} \quad (25)$$

여기서  $s, l, w, \rho, j, E$ 는 각각 금속선의 단면적, 길이, 단위면적당 입력에너지, 비저항, 전류밀도, 전자기장 세기를 의미한다. 이렇게 준비된 두개의 금속선을 동시에 폭발시킬 때 얻어지는 전류의 변화를 Fig.8에 도시하였다. 폭발 조건은 다음과 같다.  $C = 3.1\mu\text{F}$ ,  $L = 0.43\mu\text{H}$ ,  $U_0 = 30\text{kV}$ ,  $d_1 = 0.38\text{ mm (Cu)}$ ,  $d_2 = 0.45\text{ mm (Al)}$ ,  $l_1 = l_2 = 100\text{ mm}$ 이었다. 전류 곡선이 한번 튀는 것은 두 금속선이 동시에 녹지 않기 때문이다. 알루미늄선이 먼저 녹으면서 순간적으로 전류가 감소하고(2), 그 결과 더 많은 전류가 구리선 쪽으로 흐르면서(1) 구리선 쪽의 전류가 순간적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 과열도는 구리선의 경우 1.25, 알루미늄 선은 0.79였다. 이 과열도는



평균 저항값으로부터 예측한 것보다 높았다. 이것은 동시폭발시의 과열도에 대한 예측이 단순히 평균 저항값으로부터만 예측되지 않음을 의미하며, 보다 많은 요인들을 고려해야 됨을 알 수 있다. 한편 동시 폭발에 있어서의 적합한 조건이 두 금속에 흐르는 전류가 시간적으로 동일해야 한다는 측면에서는 성공적인 조절이 가능함을 Fig.8에서 확인할 수 있다. 동시 폭발에 대한 보다 자세한 실험적 결과는 차후에 논문에서 보다 자세하게 다룰 것이다.

#### 4. 결 론

전기 폭발에 관련한 실험적 모델을 과열단계, 폭발 단계, 폭발 후 절연 파괴 단계로 구분하여 실험식으로 정리하였다. 정리된 모델을 이용하여 구리선과 알루미늄선 단일 폭발에 대해 실험적인 결과와 실험식을 비교하였고, 일치된 결과를 도출하였다. 또한 두 금속선을 동시 폭발하여 나노 합금 분말이나 혼합 분말을 제조하고자 하는 연구를 시도하였으며, 동시 폭발에 있어서 중요한 요인인 시간 동기를 성공적으로 수행할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 차세대 나노복합재 사업과 과학기술부의 21세기 프론티어 사업인 차세대 소재

성형 기술개발 사업의 일환으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. C. K. Rhee, G. H. Lee, J. H. Park, and W. W. Kim: Proc.of 2nd Int.Symp.on Pulsed Power and Plasma Application, KERI, Korea (2001) 314.
2. C. K. Rhee et al: 전기폭발에 의한 금속 나노분말 제조 방법 및 장치, 대한민국특허 (2001) 출원번호 10-2001-0029606.
3. N. H. Lee: M. S Thesis, Department of Metals and Materials Science and Engineering, Chosun University, Korea (2002) 32.
4. Y. H. Jung, J. S. Kim, Y. S. Kwon, J. S. Kim, and G. H. Rim: J. Kor. Powder Metallurgy Institute, 9(2)(2002) 73.
5. Y. A. Kotov, V. S. Sedoi, and L. I. Chemezova: Energy and Time Responses LC-circuit with a Blowing up Conductor, In the Book of Development and Application of Radiant of Intensive Bundles, Novosibirsk, Science (1976) 61.
6. C. K. Rhee et al: Research Report, KAERI/RR-2296/2002 (2002) 10.
7. V. A. Burtsev, V. A. Dubanskii, M. P. Kasatkina, A. B. Produvnov, I. V. Shestakov: Study of Electric Explosion of Cylindrical Foils in Air Transl. into English from Russian Report, NIIIEFA Preprint K-0293 (1976) 38.
8. F. D. Bennett, Plasma Phys, 15(1973) 455.
9. N. A. Gondarenko, T. A. Golub, A. M. Iskoldsky: IEEE Transactions on Plasma Science, 20(6) (1992) 967.