

# 초고속가열에 의한 금속세선의 폭발현상에 관한 연구

장 인 성 · 김 종 수  
 (부경대학교 냉동공조공학과)  
 (1997년 1월 20일 접수)

## The Study on Explosion Phenomena of a Metal Wire by Rapid Heating in Water

I. S. Jang and J. S. Kim

Dept. of Refrigeration & Air Conditioning Engin., of Pukyong Univ., Pusan  
 (Received January 20, 1997)

### Abstract

The aim of the present study is to investigate experimentally the mechanism of an exploding wire in water and also to observe the bubble motion induced by an exploding wire. The experiment of an exploding wire is carried out in a water tank. As a metallic wire, a tungsten wire of 0.2mm in diameter and 10mm in length is employed. The electric energy of 50~300J is fed to the wire from a capacitor of 100 $\mu$ F charged up to 1~2.5kV. The explosion is recorded by a CCD camera with the resolution of 1 $\mu$ sec. The explosion process of metallic wire is divided into three phases. Phase 1 : As the voltage is applied to the wire, the temperature increases due to Joule heating and the wire emits light. Phase 2 : Then the wire melts and the cylindrical plasma is formed between the electrodes. Up to this stage, strong light emission is observed. Phase 3 : The light emission goes out and a vapor bubble begins to grow spherically. The radius of a bubble oscillates in time, but the amplitude of oscillation diminishes in several cycles.

### 기호설명

### 첨 자

c : 음속  
 C : 콘덴서 용량  
 P : 압력  
 R : 반경  
 t : 시간  
 T : 주기  
 v : 속도  
 V : 전압

(m/sec)  
 (F)  
 (Pa)  
 (m)  
 (sec)  
 (sec)  
 (m/sec)  
 (V)

b : 기포  
 e : 평형상태  
 i : 초기상태  
 m : 최대값  
 w : 물  
 $\infty$  : 무한원  
 그리스문자  
 $\rho$  : 밀도

(kg/m<sup>3</sup>)

$\phi$ : 직경  
 $\gamma$ : 비열비

(m)

## 1. 서 론

전극간에 대전류를 순간적으로 공급하면 전극간의 방전에 의해 충격적인 압력파가 발생한다. 또한 금속세선에 대전류를 공급한 경우에도 금속세선의 폭발적인 기화에 의해 충격적인 압력파가 발생한다. 후자는 세선폭발(Exploding wire)현상으로 널리 알려져 있으며, 이 현상은 일반적으로 1) 고체상태에서의 온도상승, 2) 용점에 달한 후의 용융과정, 3) 액체상태에서의 온도상승, 4) 비점에서 기화 후 아크발생을 거쳐 파괴되는 과정으로 나눌 수 있다. 이와 같은 세선폭발현상은 공업적으로 그 응용범위가 넓어 고체에서 기체로의 상변화는 퓨-즈로서 이용되고 있으며, 또한 세선폭발시 발생하는 강한 아-크광을 이용한 순간광원은 고속의 열유체 현상을 관측하는 경우 광원으로서 이용되어 왔다<sup>1)</sup>. 특히 수중에서 금속선이 폭발할 때 발생하는 충격파를 이용한 응용으로서는 재료의 성형가공<sup>2)</sup>이나 이질적인 재료의 접합에도 응용되고 있다<sup>3)</sup>.

그러나 액체 중에서의 세선폭발현상은 순간적인 대전류에 의해 단시간에 주위 액체와의 급속한 열교환에 의해 일어나는 현상이므로 강한 비평형성과 비선형성을 가지고 있다. 이러한 현상은 온도차가 매우 큰 두 액체가 직접 접촉하여 저비점 액체가 급격하게 증발하여 그 결과로서 충격적인 압

력을 발생하는 열물리적 현상인 증기폭발 현상<sup>4)</sup>과 유사하다고 생각할 수 있다. 이와 같은 증기폭발현상은 금속공장 및 원자력 관계의 연료 및 냉각수의 직접접촉에 의하여 발생되는데, 현상의 발생이 확률적이므로 지금까지의 연구에도 불구하고 현상의 발생을 판단하기에는 어려운 실정이다. 그러나 Exploding wire의 연구에서는 직경 수 mm의 금속세선이 이용되므로 용융된 금속은 미세한 다수의 미립자로 되어 액중에 비산되고, 비교적 초기단계에 활발한 열교환을 일으킨다. 따라서 폭발의 확률적 요소는 증기폭발현상에 비해 적다고 생각할 수 있다<sup>5)</sup>. 이와같은 이유에서 Exploding wire에 의해 형성되는 기포의 거동은 액-액 접촉에 의해 발생하는 기포의 거동과 유사하고, 또한 현상의 재현성이 높기 때문에 Exploding wire의 실험에 의해 증기폭발에서 발생하는 기포의 운동 해석이 가능하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 방전 매질이 액체인 경우, 금속세선의 폭발상태 및 막비등 열전달 현상에 의해서 발생하는 기포의 거동을 실험적으로 조사하고, 또한 세선폭발의 부유물인 금속 미립자의 제작에 관한 기초적인 현상을 규명하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 측정방법

### 2-1. 실험장치

Exploding wire에 공급하기 위한 고전압 발생 장치의 회로도를 Fig. 1에 나타내었다.

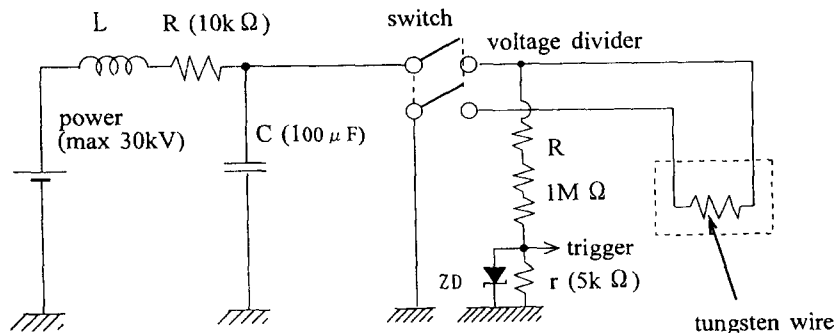


Fig. 1 Schematic diagram of experimental circuit.

전원은 0~30kV의 마이나스극의 직류 고전압을 발생시킬 수 있는 Nichicon High - Voltage Generator DCG30K10E를 사용하였다. 또한 그림 중의 C는 Nichicon제의 고전압용 콘덴서로서 용량 100 $\mu$ F,내압 5kV이다. Trigger 신호를 얻기 위해 분압기를 콘덴서와 병렬로 연결하였으며, 스위치의 개폐에 따라서 콘덴서의 고전압이 분압기 R 및 r에 걸리게 된다. R은 전류 제어용 저항기로서 1개 50k $\Omega$ , 용량 2W인 금속피막 저항을 20개 직렬로 접속하였다. r은 2k $\Omega$ ,용량 1W의 금속피막 저항 2개와 1k $\Omega$ ,용량 1W의 저항 1개를 직렬로 접속하고, 또한 접지 시켰다. 따라서 r에 걸리는 전압 v는 고전압 발생장치의 표시전압 V로부터 (5/1005)  $\times$  V=v(V)로 계산된다. 또한 r에 병렬로 zener 다이오드를 접속하여 v를 일정값 -4.3V로 하였다.

본 실험에서 이용한 장치의 개략도는 Fig. 2에

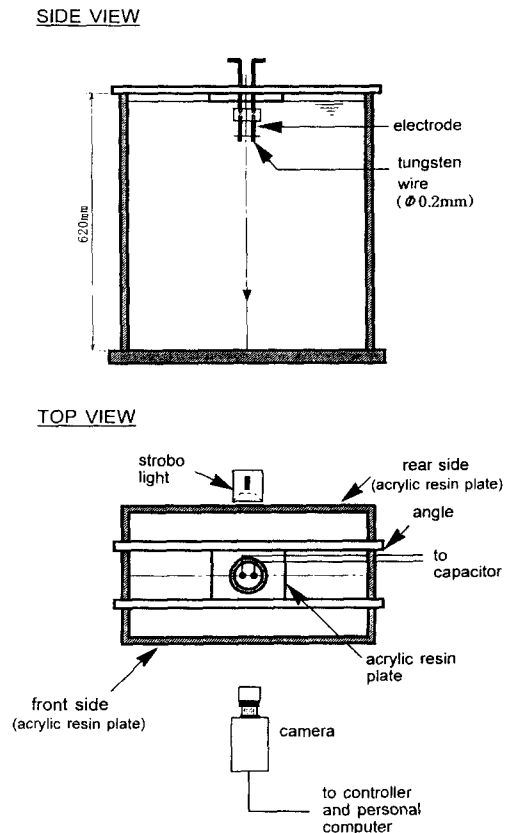


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup.

나타내었다. 본 실험에서는 길이 500 $\times$ 폭 300 $\times$ 높이 620mm의 아크릴체의 수조를 이용하였으며, 작동유체로서는 물을 사용하였다. 그리고 수심은 560mm로 하였다.

실험에 사용한 전극은  $\Phi$ 6mm의 동(銅)전극으로서 하부에는  $\Phi$ 0.2mm, 길이 10mm의 텅스텐선을 삽입할 수 있도록 제작하였다. 텅스텐선은 전극의 하부에서 볼트로 고정시켰다.

이와 같이 제작된 동전극은 수조의 상부로부터 삽입되어 수조 중앙부에 고정시켰다. 전극의 상단부는 고전압 발생장치에 접속되어 있으며, 전기에너지는 100 $\mu$ F의 콘덴서를 1.0~2.5kV까지 충전하여 스위치를 통해 공급하게 된다. 즉 금속세선에 인가되는 전기에너지는 50~300J까지의 범위이다.

## 2-2. Exploding wire 및 기포거동 관측

Exploding wire의 폭발상태는 강한 발광을 동반하고, 또한 순간적으로 일어나는 현상이므로 wire의 상태를 정확하게 관측하기 위해서는 강한 광원이 필수적이다.

Exploding wire의 폭발상태 및 막비등에 의해 생성된 기포는 수조 전면에 설치한 1 $\mu$ s의 시간분해능을 가진 고속도 CCD카메라(PCO, Flash Cam)로 촬영하였다. 촬영시의 광원은 4 $\mu$ s의 발광시간을 가진 스트로브스코프를 백라이트로서 이용하였다. 또한 카메라에 의해 촬영된 화상(수평 752픽셀 $\times$ 수직 240픽셀 $\times$ 농도 8비트)은 카메라와 컴퓨터와의 인터페이스에 의해 컴퓨터에 입력시킨 후 화상 처리하였다.

그리고 금속세선이 수중에서 폭발한 후, 수조 밀면에 잔유하는 미립자를 확인하기 위해 실험 종료 후에는 미립자를 회수하여 현미경(Olympus BH-2)으로 미립자의 직경과 표면형상을 조사하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3-1. Exploding wire의 상태변화

수중에 설치된 금속세선에 약 1kA 정도의 대전류를 순간적으로 인가하는 것에 의해 일어나는 금

속세선의 폭발현상은 금속세선의 형태에 따라 3단계의 과정으로 나누어 설명할 수 있다.

제 1과정에서는 금속세선에 전압을 인가하면 Joule 가열에 의한 금속세선의 온도상승과 용해(전압인가 후  $t \approx 20\mu\text{s}$ 까지), 제 2과정에서는 과도 아크방전에 의한 플라즈마의 형성과 팽창( $t \approx 20 \sim 200\mu\text{s}$ ), 제 3과정에서는 금속세선과 주위 유체와의 급속한 열전달에 의한 구형기포의 팽창·수축운동이다( $t \approx 500\mu\text{s}$ 이후). 특히 제 1,2 과정에서는 금속세선의 강한 발광현상이 나타나므로, 이 현상의 촬영시에는 광원을 이용하지 않았다.

Photo. 1에는 제 1,2과정에서의 대표적인 금속세선의 폭발상태를 나타내었다. 제 1과정에서의 금속세선의 상태변화는 다음과 같이 설명된다. 가열초기의 금속세선의 상태는 현재의 실험에서는 확인이 불가능하다. 그러나 금속세선의 주위에 나타나는 연기와의 같은 것은 급속한 가열에 따른 금속세선 부근의 액체의 밀도변화에 따른 것이라 생각된다. 또한 이때의 금속세선의 형상은 고체상태라고 예상된다. 전압인가 후  $t \approx 15\mu\text{s}$ 일 때는 Joule 가열에 의한 금속세선의 온도상승과 용해가 금속세선의 전 영역에서 발생하고, 강한 발광현상이 나타나며  $t \approx 20\mu\text{s}$ 까지 유지된다. 이때 금속세선은 고체상태로부터 용융까지 용해하여 액체상태로서 팽창한다. 이 과정에서 용융상태의 고온 금속과 주위액체와의 급속한 열전달이 일어나기 시작하여 저비점액체의 증발이 일어난다고 생각할 수 있다.

제 2과정에서는 금속세선의 온도가 더욱 상승되어 고비점의 액체금속이 기체금속으로 된다. 또한 과전류에 의해 과열되면서 기체금속은 전리하여 플라즈마로 된다. 이 과정에서는 금속세선의 주위에 플라즈마가 형성되어 시간에 따라 플라즈마가 팽창하는 현상이 나타난다. 이와같은 현상은 금속세선에 전압인가 후  $t \approx 20 \sim 100\mu\text{s}$ 까지 생기는 과도아크방전에 의한 것이라고 생각할 수 있다.

특히, 전압인가 후  $t \approx 23\mu\text{s}$ 부터 금속세선의 양단에는 발광 상태가 어두운 곳과 밝은 곳으로 분리되는 띠모양의 형상이 나타난다. 이와같은 띠모양의 형상은 시간이 경과하면서 점점 성장하여,  $t \approx 26\mu\text{s}$ 일 때는 축대칭으로 팽창하는 원통상의 플라

즈마 표면에 전류의 방향과 직교하는 농염이 주기적으로 관측된다. 이와같은 띠모양의 형상은 시간적으로 정상적으로 발생하여 성장하게 된다. 이러한 현상은 플라즈마의 불안정<sup>6)</sup>에 의한 것이라고 생각된다.

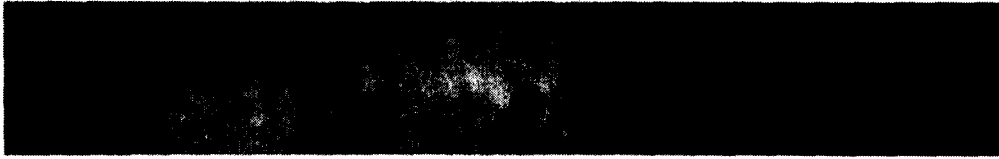
제 1,2과정에서는 고속가열에 의한 금속세선의 급격한 상변화 때문에 강력한 압력파의 발생이 예상된다. 이 압력파는 금속세선이 국부적으로 파단하여 구상의 충격파가 발생하고, 이 국부적으로 발생한 충격파가 합성되어 최종적으로는 하나의 큰 충격파로서 수중을 전파한다는 것이 이미 보고되어 있다<sup>7)</sup>.

제 1,2과정을 사진촬영으로 관측한 금속세선 반경의 시간적 변화를 Fig. 3에 나타내었다.  $t \approx 30\mu\text{s}$  이후는 금속세선의 폭발에 따라 발생한 플라즈마의 반경을 나타내었다. 반경은 금속세선의 중앙부에서 측정하고, 시간간격은  $t = 5\mu\text{s}$ 로서 일정하게 하였다. 그러나 가열초기( $t \approx 10\mu\text{s}$ )에는 금속세선의 모습이 확인되어 있지 않지만, 고체상태라 추정하여 반경을 측정하였다. 금속세선에 전류가 흐르기 시작해  $t \approx 20\mu\text{s}$ 까지는 반경의 변화는 거의 볼 수 없으나, 그 후 급격한 플라즈마의 생성과 팽창이 시작되는 것을 알 수 있다. 특히,  $t \approx 25 \sim 30\mu\text{s}$  사이에서의 금속세선 주위의 급격한 플라즈마의 생성은 금속세선에 흐르는 전류에 의해 형성되는 자기자장의 영향이라고 생각할 수 있다. 즉  $t \approx 25\mu\text{s}$ 까지는 자기자장이 금속세선 주위의 플라즈마의 팽창을 억제하다가 시간이 경과함에 따라 자장이 약하게 되어 급격한 팽창이 일어난다고 할 수 있다.

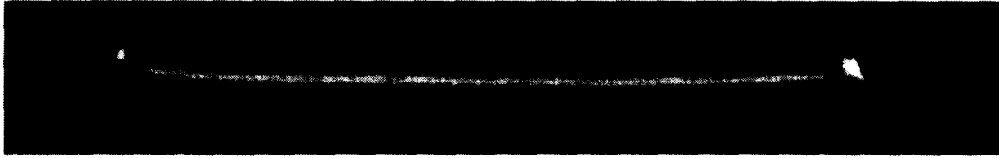
금속세선 폭발의 제 3과정에서는 제 2과정의 액중 과도아크방전에 의해 생성된 플라즈마가 주위 유체와의 열전달에 의해 저비점액체가 증발하게 된다. 이에 따라 제 2과정에서 형성된 기포의 외형이 축대칭으로부터 구대칭으로 변화하면서 팽창한다. 금속세선 폭발의 제 3과정에서 일어나는 기포의 거동을 Photo. 2에 나타내었다.

이 과정에서는 현상의 촬영시에는 백라이트로서 스트로브스코프를 이용하였으며, 발광시간은  $4\mu\text{s}$ 로서 일정하게 하였다. 스트로브스코프는 고전압의 분압으로부터 trigger에 의해 고속도 CCD카

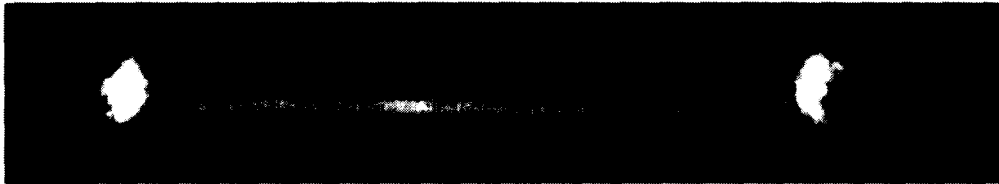
초고속가열에 의한 금속세선의 폭발현상에 관한 연구



(a) 10  $\mu$ s



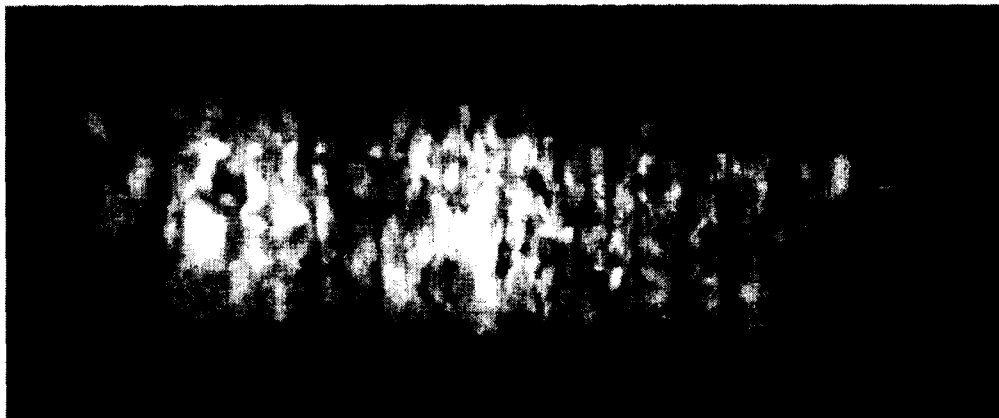
(b) 20  $\mu$ s



(c) 24  $\mu$ s



(d) 26  $\mu$ s



(e) 50  $\mu$ s

**Photo. 1. Initial stage of exploding wire. (a) and (b) Phase 1 : The temperature of wire is increasing by Joule heating. (c)~(e) Phase 2 : After the disintegration of molten metals, an exploding cylindrical plasma is formed.**

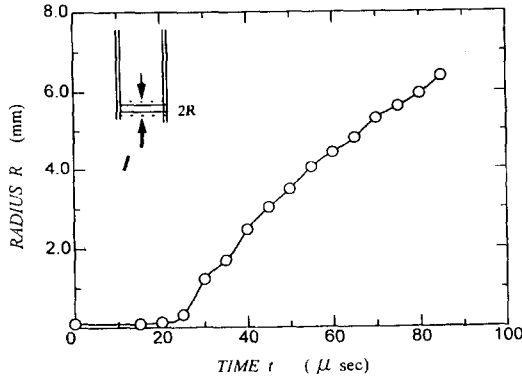


Fig. 3 The variation with time of the radius of the 0.2mm diameter W wire at initial stage. The electric is energy 113J.

배라와 동기시켜 발광한다.

제 1,2과정에서 나타난 강한 발광현상은 나타나지 않지만, Photo. 2에 나타나는 하얀 부분은 본 연구에서 이용한 고속도 CCD카메라의 특성으로 매우 밝은 물체를 촬영할 때에 발생하는 현상(Halation phenomenon)이며 본 연구의 물리적 현상은 아니다.

구대칭의 기포의 모습은 전압인가 후  $t \approx 500 \mu s$ 에서부터 관측된다. 기포가 형성된 직후에는 비교적 큰 내부에너지를 가지고 내부압력이 매우 높아 주위액체를 밀어내면서 급격하게 팽창해 간다. 배제한 액체의 관성에 의해 기포의 내부압력이 주위액체의 정압보다 충분히 낮을 때까지 운동을 계속하여 과팽창한 기포는 최대기포반경( $t \approx 3500 \mu s$ )에 달한다. 그 후 기포는 팽창운동을 반전시켜 속도를 증가시키면서 주위액체의 압력에 눌려져 내부압력을 서서히 높이면서 수축을 시작하게 된다. 이러한 기포의 수축운동은 일정한 크기까지 계속되다가 재팽창으로 전이한다. 이때 내부기체의 압축에 근거하는 압력파를 주위의 액중에 구면 압축파로서 분출하게 된다. 이 압력파는 기포의 운동에너지 일부가 수축에서 팽창으로 전이될 때 방출되어 발생하는 것이라고 할 수 있다. 이와 같이 수중에서 생성된 구형 기포는 팽창·수축운동을 반복하면서 일정시간 후에는 소멸하게 된다. 또한 제 1 주기의 팽창·수축과정에 있어서는 기포의 계면은 거의 구형을 유지하지만, 일단 수축한 후 재팽

창하게 되면 기포의 계면은 붕괴되어 구의 형상이라고는 말할 수가 없게 된다.

### 3-2. 기포운동의 시간변화

수중에서의 기포운동은 4500 frame/s의 고속 비디오카메라(Photron, Fastcam - ultima)를 이용하여 계측하였으며, 화상은 수평 256 픽셀 × 수직 256픽셀 × 농도 8 비트로서 구성된다.

금속세선에 공급되는 전기에너지(50~300J)에 따른 기포반경의 시간변화를 Fig. 4에 나타내었다. 고온의 용융금속과 물의 열전달에 의해 생성된 기포는 공급에너지에 의하지 않고 진동이 발생한다. 기포의 최대반경은 공급에너지에 의존하며, 제 1 주기의 진동과정에서 항상 나타나는 것을 알 수 있다.

기포주위의 물의 유동속도는 기포의 팽창속도와 일치한다고 예상된다. 이와 같은 현상은 분말을 이용한 가시화실험을 통하여 확인하였다. Fig. 4로부터 기포운동에 의한 유체의 유동을 예상할 수 있는 2종류의 기포팽창속도가 정의된다. 하나는 에너지를 공급한 직후의 기포반경의 팽창속도인 초기평균 팽창속도이고, 다른 하나는 기포의 반경이 최대값을 가질 때의 팽창속도로서 최대평균 팽창속도이다. 전자는 약 20m/s, 후자는 약 10m/s로서 본 실험의 영역에서는 거의 일정하게 나타난다. 이러한 결과는 기포 근방의 물이 공급에너지에 의하지 않고 약 10~20m/s의 속도로 바깥쪽으로 운동하는 것을 나타낸다. 그러나 기포의 최대반경은 공급에너지에 의존하므로 기포의 팽창에 따라 유동하는 물의 체적은 공급에너지가 증가함에 따라 증가한다.

또한 기포 팽창수축의 주기 T와 최대기포반경  $R_m$ 과의 관계는

$$T = 1.83R_m \left( \frac{\rho}{P_\infty} \right)^{1/2} \quad (1)$$

로서 나타낸다고 보고하고 있다<sup>8)</sup>.

Fig. 5는 본 실험에서 기포의 팽창수축 주기와 최대기포반경과의 관계를 나타내었다. 인가전압이 높아짐에 따라 기포의 운동주기 T는 이론식과 같이 완전한 직선관계는 아니지만 거의 이론값에

일치하는 것을 알 수가 있다. 따라서 본 실험에서의 임의의 기포 최대반경을 관측하여 식(1)을 이용하므로서 기포의 팽창수축의 주기가 예측 가능하다.

Exploding wire에 의해 생성되는 기포의 에너지는 크게 내부에너지, 운동에너지, 포텐셜에너지 등으로 나눌 수 있다. 내부에너지는 기포의 표면압

력에 비례하지만, 이 압력은 기포의 반경과 병진속도에 의존하고, 내부기포의 운동에는 의존하지 않는다. 또한 포텐셜에너지도 내부기포의 운동에 의존하지 않고 기포의 반경과 평균밀도에 의존한다. 따라서 기포에너지의 차는 거의 운동에너지의 차라고 생각할 수 있다. 따라서 본 실험에서 공급한

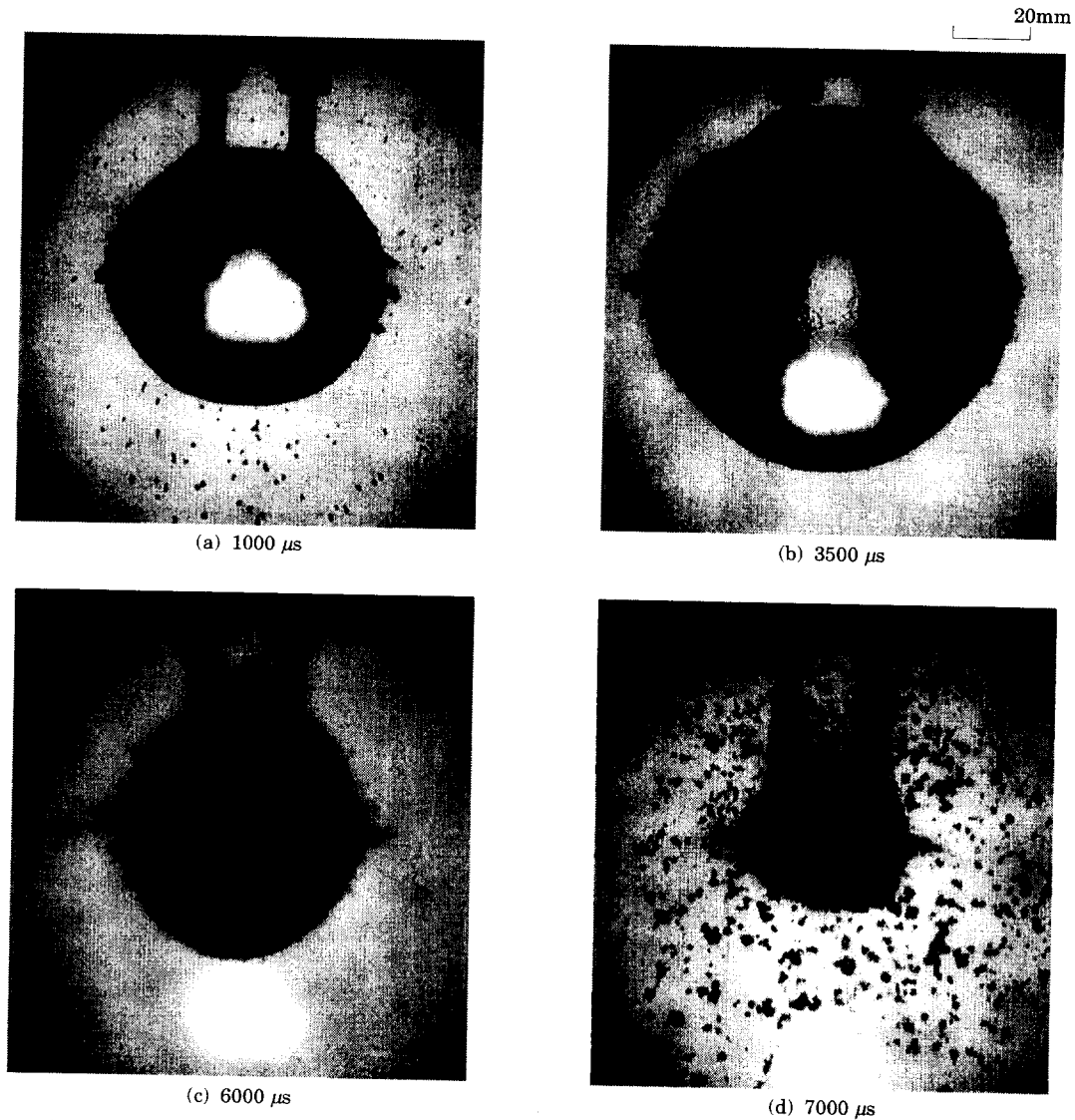


Photo. 2. Final stage, the phase 3, of exploding wire where the growth and shrink of a vapor bubble play an essential role. The white and large spots going downward with time come from electronic error of the CCD camera occurred after radiated by strong light emission in the phases 1 and 2. Small but black spots observed at 7000 $\mu$ s are bubbles due to negative pressure induced by the shock wave generated at the minimum of vapor bubbles.

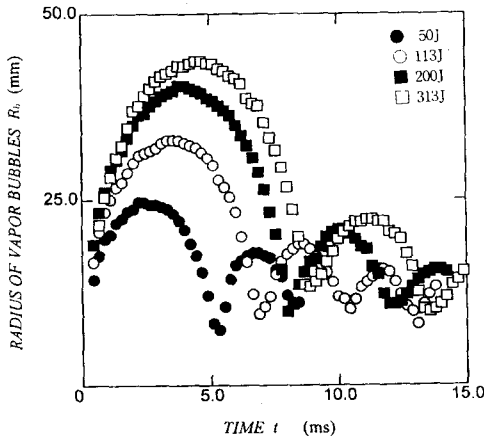


Fig. 4 The radius of vapor bubbles by an exploding wire as a function of time.

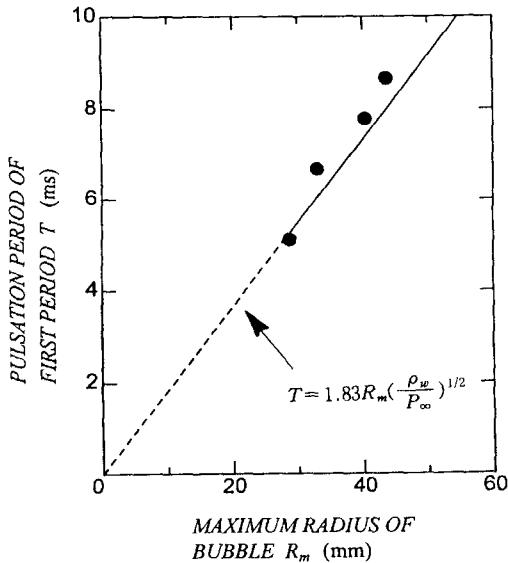


Fig. 5 The relation between maximum expanded of bubbles and period of first period. The solid circles are obtained from the maximum radii in Fig. 4.

전기에너지로부터 물의 운동에너지로의 변환효율을 다음과 같은 개략적인 계산에 의해 추정한다.

금속선에 공급한 전기에너지  $E_e$ 는

$$E_e = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2)$$

로 표현된다. 여기서  $C$ 는 콘덴서의 용량을 나타내

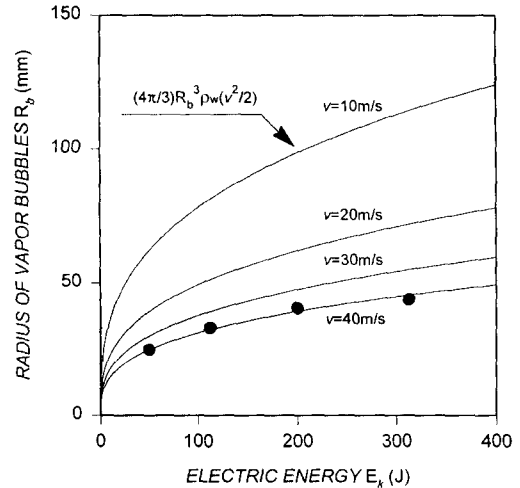


Fig. 6 The radius of vapor bubbles as a function of the electric energy. The solid circles are obtained from the maximum radii in Fig. 4

며 본 실험에서는  $100\mu F$  이다.

그리고 물의 운동에너지는 기포벽 근방에서의 물의 이동속도가 기포팽창속도와 동일하다는 가정하에서 평가된다. 반경  $R_b$  내의 물은 속도  $v$  로서 가속되며 이 때 물의 운동에너지  $E_k$ 는

$$E_k = \left(\frac{4\pi}{3}\right) R_b^3 \frac{\rho_w v^2}{2} \quad (3)$$

로서 표현된다. 여기서  $R_b$ 는 팽창하는 기포의 최대 반경을 나타내며, 물의 밀도는  $10^3 kg/m^3$ , 기포의 팽창속도  $v$ 는 Fig. 4로부터 구한 최대 평균 팽창속도  $10m/s$ 을 이용하였다.

금속선에 공급되는 전기에너지가 전부 운동에너지로 변화한다고 가정하면, 기포 반경  $R_b$ 는 전기 에너지의 함수로서 나타낼 수 있다. 전기에너지와 에너지식으로부터 계산된 기포반경을 Fig. 6에 나타내었으며 실측한 최대기포반경(Fig. 4)을 그림 중에 표시하였다.

실험으로부터 구한 기포의 최대반경은 식(3)으로 계산된 값보다 작게 나타나는 것을 알 수가 있으나, 물의 운동에너지로의 변환효율은 약 20~25%로서 나타난다. 그러나  $v=40m/s$ 의 경우에는 기포의 최대반경은 실험값과 잘 일치하는 것을 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 전기에너지가 유체의 운동에너지 이외에 압축과 에너지 및 열복사에



너지의 형태로 대부분 소비되는 것을 말해주고 있다. D. Bennett<sup>9)</sup>의 보고에 의하면 수중에서 금속선을 폭발시켜 충격파 및 열복사에너지로 각각 공급한 전기에너지의 약 63%, 약 6%의 에너지가 분배되는 것을 나타내고 있다. 그러나 에너지의 변환이 단시간(數 ms)에 일어나므로 적은 에너지로서도 유체의 고속유동이 가능하다고 할 수 있다<sup>10)</sup>.

Exploding wire의 폭발형태 중 제 3과정에서 나타나는 구형기포에 대해 팽창·수축운동과 압력과 발생을 이론적으로 조사하기 위하여 작동유체가 압축성과 비압축성인 경우의 기포운동방정식을 이용하여 검토하였다.

비압축성 유체중에서의 기포의 운동방정식은 속도포텐셜과 베르누이식을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>11)</sup>.

$$R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + \frac{1}{\rho} [P_\infty - P(R)] = 0 \quad (4)$$

여기서  $P(R)$ 은 기포 경계면에서의 압력이다. 식(4)는 Rayleigh의 식으로서 알려져 있다.

기포주위 액체의 압축성을 고려할 경우의 기포의 운동방정식은

$$\begin{aligned} & \left(\frac{dR}{dt} - c\right)R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 - \frac{1}{\rho} (P(R) - P_\infty) \\ & = \left(\frac{dR}{dt}\right)^3 - \frac{1}{R\rho} \frac{d}{dt} (R^2(P(R) - P_\infty)) \quad (5) \end{aligned}$$

이다<sup>12)</sup>. 식(5)에서 음속  $c \rightarrow \infty$ 로 두면 식(4)와 동일하게 된다. 기포방정식 식(4),(5)는 4차의 Runge-Kutta 방법으로써 초기조건을 적용하여 수치해를 구할 수가 있다. 초기조건으로는 Fig. 4에서 구한 기포의 최대반경을 초기반경으로 하여, 그때의 기포의 경계면의 초기속도  $dR/dt=0$ 을 이용하였다. 그리고 기포내부의 기체는 단열변화한다고 가정하였으며, 비열비  $\gamma=1.33$ 을 이용하여 기포의 내부압력을 구하였다. 수치계산 방법은 기포가 최대반경일 때를 기준으로 하여 시간을 전진 또는 후진시켜 계산하였다.

Fig. 7에 나타난 실선과 점선은 기포 주위의 액체가 압축성 및 비압축성인 경우의 무차원 기포반경 및 무차원 압력의 수치계산 결과를 나타낸 것이

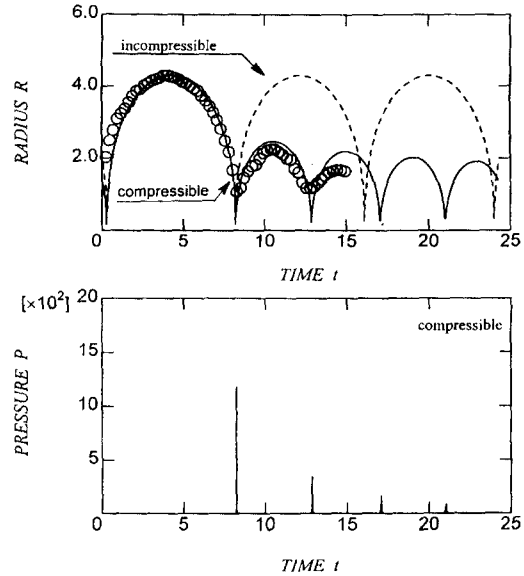
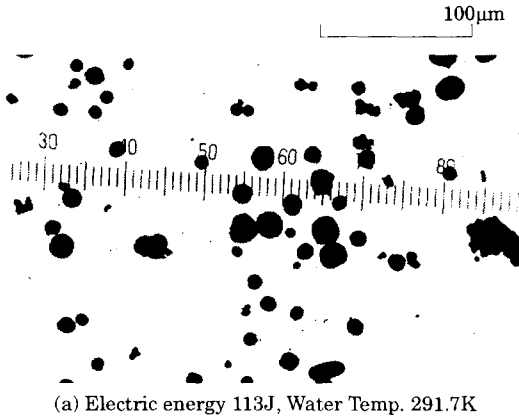


Fig. 7 The bubble radius as a function of time for an explosion. The ratio of length is  $R(t)/R_e$ , the ratio of time is  $Re^{-1}(P_\infty/\rho)^{1/2}$  and the ratio of pressure is  $P/P_\infty$ . The equilibrium radius of the bubble  $R_e$  is  $(3/4\pi)^{1/3} (K/P_\infty)^{1/3\gamma}$ . The electric energy is 200J.

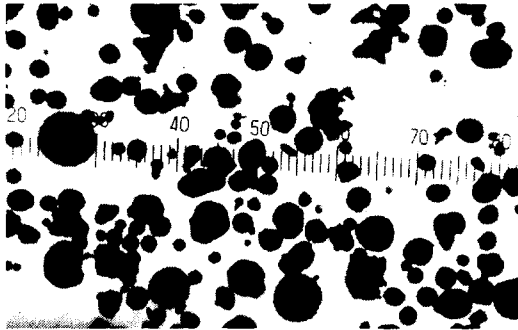
다. 유체의 압축성의 유무에 관계없이 기포는 진동을 하지만, 압축성을 고려한 계산에서는 비압축성인 경우와는 달리 비주기적인 감쇄진동이 일어나 기포반경의 시간변화는 실험값(Fig. 4)과 잘 일치하는 것을 알 수가 있다. 또한 유체의 압축성의 영향이 기포가 재팽창을 시작하면서 나타나는 결과로부터 기포가 재팽창할 때 기포의 팽창속도가 음속에 비해 무시할 수 없게 된다는 것을 알 수가 있다. 이와 같은 기포의 급속한 팽창속도는 유체에 전달되어 수중에서 충격적인 압력의 발생을 초래한다고 할 수 있다.

### 3-3. 금속미립자의 물성

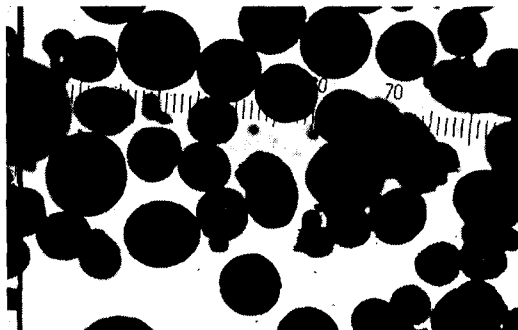
Photo. 3은 실험 종료후 수조에서 회수한 미립자를 현미경으로 촬영한 대표적인 사진을 나타낸 것이다. 미립자의 형상은 거의 구형이고, 공급에너지가 증가함에 따라 직경이 작은 미립자가 대부분을 차지하지만, 직경이 큰 미립자의 형상도 다소 나타나는 것을 알 수가 있다. 그리고 미립자의 형상이 구형이라는 것은 금속세선이 수중에서 용융



(a) Electric energy 113J, Water Temp. 291.7K



(b) Electric energy 200J, Water Temp. 291.5K



(c) Electric energy 300J, Water Temp. 291.1K

Photo. 3 Typical appearance of fragments.

상태로 파괴되어 그 후에 응고된 것이라고 생각할 수 있다.

또한 금속세선의 각 직경의 미립자 갯수가 전체 갯수에서 차지하는 비율을 Fig. 8에 도수분포로 나타내었다. 미립자의 직경은 공급에너지에 의하지 않고  $\Phi 5 \sim 8 \mu\text{m}$ 의 입자가 대부분 분포하는 것을 알 수가 있다. 이러한 결과는 증기폭발 실험 후 회수

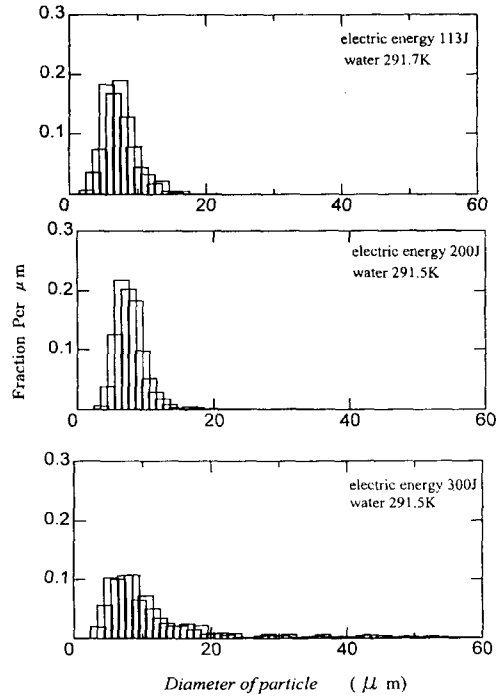


Fig. 8 The particle size distributions.

된 미립자의 형상 및 분포와 거의 동일한 경향을 나타내고 있다. 그리고 공급에너지가 110J, 200J, 300J와 같이 증가함에 따라 입자의 최대직경은  $20 \mu\text{m}$ ,  $30 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{m}$ 로서 직경이 큰 미립자의 분포가 나타나고 있다. 이와같은 결과는 어떤 크기의 금속 미립자를 제작할 때 최적의 공급에너지가 존재하는 것을 의미한다고 생각할 수 있다.

#### 4. 결 론

수중에서 Exploding wire를 이용하여 금속세선의 폭발상태 및 수중에 생성된 구형의 기포에 대하여 관찰한 결과는 다음과 같다.

(1) 수중에서의 Exploding wire의 폭발상태는 시간에 따라 3개의 과정으로 나눌 수 있다. 제 1과정은 Joule가열에 의한 금속선의 온도상승과 용해과정, 제 2과정은 플라즈마의 형성과 팽창과정, 제 3과정은 주위유체와의 급속한 열전달에 의해 생성되는 구형기포의 팽창·수축과정이다.

(2) 금속세선의 폭발과정 중 제 3과정에서 나타

난 구형기포의 감쇄진동은 수치계산한 결과, 주위 유체의 압축성을 고려한 경우 실험값과 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 또한 기포가 일단 최소로 수축한 뒤 재팽창할 때 충격적인 압력이 발생한다.

(3) 실험종료 후 회수한 미립자를 관찰한 결과, 미립자의 형상은 전반적으로 구형이었고, 미립자의 직경은 금속세선에 공급되는 에너지에 관계없이  $\Phi 5 \sim 8mm$  미립자의 분포가 대부분을 차지한다. 또한 금속미립자의 제작시 최적의 공급에너지가 존재한다고 생각할 수 있다.

### 참고문헌

- 1) H. D. Edelsen and T. Korneff(1966) : A Comparative Study of Exploding Wires in Air and Water, J. Appl. Phys., 37, 2166 - 2168.
- 2) 栖原, 福田, 伊藤, 福永(1970) : 線爆發による複合金屬の壓接着, 塑性と加工, 11, 718 - 723.
- 3) 藤村, 五十鈴川(1983) : 放電成形における發弧用導線の效果に関する検討, 電氣工學誌, 16, 37 - 44.
- 4) Y. Iida and T. Takashima(1989) : 蒸氣爆發とその機構に関する實驗, ながれ, 7, 207.
- 5) I. S. Jang and S. Watanabe(1996) : Formation Process of a Vortex Ring by an Exploding Wire in water, J. Soc. Phys. Jpn. 65(2), 462 - 467.
- 6) 物理學辭典編集委員會(1986) : 物理學辭典(日本)
- 7) K. Yukimura(1986) : 銅線の局部溶斷による球狀衝擊波の發生, 電氣學會論文集 A, 106(10), 480 - 486.
- 8) H. Cole(1965) : Under Water explosion, Princeton Univ. Press, 273 - 275.
- 9) F. D. Bennett(1958) : Cylindrical Shock Waves from Exploding Wires, Phys. Fluids, 1, 347 - 352.
- 10) S. Watanabe and I. S. Jang et al.(1995) : Generation of a Vortex Ring with High Reynolds Numbers by an Exploding Wire in water, J. Soc. Phys. Jpn., 64(10), 3748 - 3757.
- 11) 加藤洋治(1990) : キャピテーション, 鎭書店
- 12) B. Keller and I. Kolodner(1956) : Damping of underwater explosion bubble oscillations, J. Appl. Phys., 27(10), 1152 - 1161.
- 13) L. S. Nelson and P. M. Duda(1982) : Steam explosion experiments with single drops of iron oxide with a CO<sub>2</sub> laser, High Temperature - High Pressure, 14, 272.
- 14) 今井田豊(1984) : 放電時の現象と壓力の發生, 塑性と加工, 25(283), 687 - 693.
- 15) M. Shoji, K. Wakamatsu, T. Ohkubo and S. Mizukami(1994) : 白金細線の超高速加熱と爆發現象, 日本傳熱シンポジウム講演論文集第31回 820 - 822.
- 16) S. Watanabe(1995) : Exploding wireを用いた渦輪生成の實驗, 蒸氣爆發の動力學 ニュースレタ, 2(3), 2 - 3.
- 17) S. Watanabe(1995) : 高レイノルズ數渦輪の實驗と金屬微粒子の物性, 蒸氣爆發の動力學 研究成果報告書, 91 - 96.
- 18) In Sung Jang(1996) : 水中Exploding wire법에 의한 고속유동현상에 관한 연구, 공기조화냉동공학회 부산경남지부 추계학술강연집, 1 - 12.