

## 미세 연소기 개발 (II)

- 미세동력 장치용 미세 전극의 제작과 성능평가 -

이대훈\* · 박대은\*\* · 윤준보\*\* · 권세진† · 한철희\*\*

(2001년 3월 5일 접수, 2002년 2월 26일 심사완료)

### Design and Development of Micro Combustor (II)

- Design and Test of Micro Electric Spark Discharge Device for Power MEMS -

Dae Hoon Lee, Dae Eun Park, Joon Bo Yoon, Sejin Kwon, Chul-Hi Han

**Key Words :** Electrode(전극), MEMS(미소기전집적시스템), Electroplating(전기도금), Micro Combustor(미세 연소기), Discharge(방전)

#### Abstract

Micro electric spark discharge device was fabricated on a FOTURAN glass wafer using MEMS processing technique and its performance of electron discharge and subsequent formation of ignition kernel were tested. Micro electric spark device is an essential subsystem of a power MEMS that has been under development in this laboratories. In a combustion chamber of sub millimeter scale depth, spark electrodes are formed by electroplating Ni on a base plate of FOTURAN glass wafer. Optimization of spark voltage and spark gap is crucial for stable ignition and endurance of the electrodes. Namely, wider spark gaps insure stable ignition but requires higher ignition voltage to overcome the spark barrier. Also, electron discharge across larger voltage tends to erode the electrodes limiting the endurance of the overall system. In the present study, the discharge characteristics of the prototype ignition device was measured in terms of electric quantities such as voltage and current with spark gap and end shape as parameters. Discharge voltage shows a little decrease in width of less than  $50\mu\text{m}$  and increases with electrode gap size. Reliability test shows no severe damage over  $10^6$  times of discharge test resulting in satisfactory performance for application to proposed power MEMS devices.

#### 기호설명

A : 도금 영역  
h : 전극 두께  
I : 도금조 전류  
i : 방전 전류  
l : 전극 간격  
T : 도금된 두께  
t : 도금 시간

V : 방전 전압  
w : 전극 폭

#### 1. 서론

미세 연소기를 제작하기 위해서는 연소실 크기에 따라 변화하는 화염특성을 고려한 설계 파라미터를 구하여야 하고 이와 동시에 점화 시스템을 구성하기 위한 기반 연구가 수행되어야 한다. 기존 연소기의 출력 에너지는 점화나 시스템 유지를 위한 입력 에너지를 고려하지 않아도 될 만큼 상대적으로 큰 양이었지만 미세 연소기의 경우 점화 시스템의 입력 에너지와 시스템이 차지하는 형상 등은 미세 연소기 제작의 한계 파라미터로 작용할

\* 회원, 한국과학기술원 항공우주공학전공

\*\* 한국과학기술원 전기전자공학전공

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 항공우주공학전공

E-mail : melody@kaist.ac.kr

TEX : (042)869-3721 FAX : (042)869-3710

수 있기 때문에 시스템이 요구하는 입력 에너지와 형상등에 대한 최적화된 파라미터를 구하는 것은 연소기 설계를 위한 중요한 설계인자가 된다. 또한 기존의 점화 장치와는 다른 미세한 크기의 전극과 같은 장치에서 형상의 축소와 함께 일어나는 변화는 어떠한 것인지 분석이 되어져야 한다. 실제 연소기의 제작에 있어 미세한 크기로 점화와 관련된 전극이나 시스템을 가공하는 기술 또한 확립이 되어야 할 중요한 요소이다.

일반적인 내연기관의 경우 점화를 위한 방법은 크게 압축착화 방식과 불꽃 점화 방식이 있고 소형 R/C 엔진에 사용되는 가열 점화 방식이 있다. 미세 내연기관의 경우 가공 기술의 한계로 인한 기밀성이 한계를 가지기 때문에 연소실 내에서 점화에 비해 상대적으로 긴 시간 동안 높은 압력 상태를 유지하기가 어렵다. 또한 정확한 사이클 제어에 난점이 있으므로 압축 점화 방식은 적용에 어려움이 있다. 가열 점화 방식 또한 가열부 제어가 없으므로 정확한 사이클을 얻기가 어렵고 계속적인 고온 환경상태로 인한 재료물성 변화를 초래하게 될 가능성이 크다. 미세 내연기관의 경우 일반 금속성 재료를 사용하지 않고 Si 계열이나 유리 와 같은 재료를 사용하게 되므로 고온을 계속적으로 유지하게 될 때 구조에 손상이 가게 될 가능성이 많다. 불꽃 점화 방식의 경우 점화시의 고온 환경으로 유지되는 시간이 일반적인 연소기보다 큰 벽면 열손실에 의해 상대적으로 작고 정확한 사이클 제어가 가능하다는 점과 점화플러그의 재질과 연소기의 재질을 동일하게 선정하여 제작하게 되면 통합된 공정으로 제작이 가능하게 되므로 연소기 전체 제작 공정을 단순화 하고 단계를 줄일 수 있다. 이러한 점들을 고려해 볼 때 불꽃 점화 방식이 미세 연소기에 가장 적합한 점화 방식으로 판단된다.

미세한 구조물에서의 방전 문제는 미세한 액츄에이터에서 작은 간극을 가지는 구조물 사이에서 발생 가능한 방전 현상을 방지하기 위한 연구의 형태나 미세한 회로에서의 발생 가능한 방전 현상에 대한 연구의 형태로 진행되어져 왔다.<sup>(1,2)</sup> 정전기력을 이용한 액츄에이터의 경우 변위를 크게 하기 위해 고전압을 구조물 양단에 걸어주게 되고 이 경우 고전압 상태의 전계에 의해 구조물 간 방전이 발생할 수 있기 때문에 안정적인 액츄에이터의 제작을 위해 방전특성에 대한 연구가 필요하다. 최근 미세 연소기에 적용 가능한 전극 특성을 파악하기 위한 연구가 시작되었지만 아직 시작 단계이므로 미세 연소기를 위한 미세 전극의 제작과

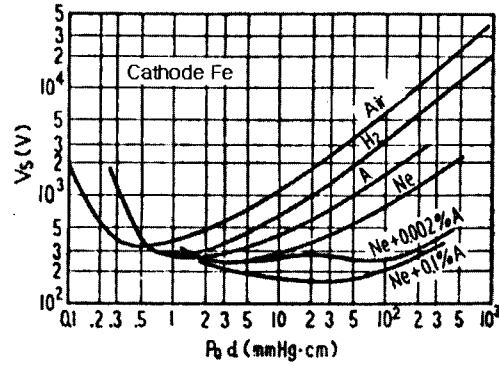


Fig. 1 Paschen's curve

점화에 대한 연구는 체계적으로 정리되어 있지 않은 상황이다.<sup>(3)</sup>

일반적인 기체 방전의 경우 기체 분위기와 압력, 전극 간격에 따른 방전시의 전압 특성은 Fig. 1에 나와있는 Paschen 곡선과 같은 형태를 가진다.<sup>(4)</sup> 방전시의 기체 분위기나 전극 간극에 대한 영향은 이 곡선에서 제시되어 있으나 실제 미세 연소기에 적용하기 위한 미세한 크기를 가지는 전극의 경우 형상에 따른 방전 특성에 대한 연구는 부족한 실정이다. 또한 높은 전계가 걸리는 방전 전극 구조물에서 전기적 절연을 얻는 구조물에 실제 미세한 전극을 형성하는 가공 기술 또한 확립되어져 있지 않다.

본 연구에서는 독일 Forturan사에서 제조한 유리 웨이퍼에 니켈 도금을 통해 형성된 미세 전극을 제작하고 방전실험을 통해 전극 특성에 따른 방전 특성을 파악하고 미세 전극을 제작하기 위한 기반 가공 기술을 확립하였다.

## 2. 실험

### 2.1 전극

#### 2.1.1 전극 실험 구성

전극 구조물에 급격히 높은 전계가 인가 되면 음극에서 전자가 방출되어지고 이 전자와 기체 원자와의 충돌로 인해 원자가 이온화 된다. 이렇게 이온화 된 원자가 전계로 인해 가속되면 충돌이 확대 되면서 전극 사이에 플라즈마가 형성된다. 이 과정에서 급격히 증가한 전자들이 전극에 도달하며 전극 양 단 간에 전류가 흐르게 되는 데 이러한 현상을 방전이라 하며 이 과정에서 전압이 갑자기 감소하며 전류가 증가하는 순간을 항복 (breakdown)이라 한다. 이러한 현상이 일어날 때 전극 사이에 형성된 플라즈마로부터 기체로 에너

Table 1 Electrode geometry matrix

Gap ( $\mu$ )	100	200	500	800	1000	1500
Width ( $\mu$ )	10	50	100	200		

지가 확산이나 대류 등의 형태로 전달되어서 점화를 가능하게 한다.

본 실험에서는 전기절 절연을 위해 전극이 만들어질 기관으로 Foturan Glass 웨이퍼를 사용하였다. Glass 웨이퍼 위에 니켈 도금을 통해서 전극을 구성하게 된다. 미세 가공 기술로 전극 구조물 구현이 가능 하려면 큰 체적을 증착 할 수 있고 연소시의 고온 환경에 견디기 위해 높은 녹는점을 가져야 하며 연소 시 산화가 잘 되지 않는 물질이어야 한다. 미세 가공 기술을 이용해 구조화가 가능한 물질로는 텅스텐, 백금, 니켈 등이 있는데 니켈은 텅스텐 보다 산화가 잘 되지 않고 백금보다 녹는점이 높고 스퍼터링이 잘 되지 않는다. 이러한 도금을 위한 물질 조건을 고려해서 상대적으로 좋은 특성을 가진 니켈이 전극 물질로 선정되었다. 니켈은 이러한 장점으로 인해 미세 전극 물질로서의 가능성이 주목 받고 있다<sup>(3)</sup>.

미세한 크기를 가지는 전극에서 전극의 형태에 따른 특성을 알아보기 위해 전극의 형상을 결정하는 전극 간격, 폭 끝 단 모양 등을 파라미터로 설정하였다. 끝 모양은 90 도의 끼인각을 가지는 이등변 삼각형과 직사각형 모양 두 가지 형상으로 제작하였고 전극의 간격과 폭에 대한 변수는 아래 Table 1 과 같다.

전극 간격의 경우 스퍼터링에 의해 전극 양 단이 접합될 가능성이 있어서 100 $\mu$ m 를 최소값으로 설정하였다. 전극 간격의 최대값은 미세 연소기를 제작할 경우의 연소기 스케일이 기준이 된다. 미세 연소기 제작에 대한 논문에서 제시된 바와 같이 미세 연소기로 적용 가능한 연소기의 최소 스케일은 1~2mm 전후의 값이므로 미세 전극의 간격 최대값은 연소기 스케일이 되어야 한다. 본 실험에서는 이에 해당하는 1.5mm 까지의 간격에 대해 방전 실험을 수행하도록 실험을 설계하였다. 전극의 폭은 반복되는 방전에서 구조물이 손상되어서 파괴되거나 전극의 길이가 급격히 줄어드는 것을 방지하기 위해 10 $\mu$ m 까지의 값을 테스트 하였다.

전체 실험은 방전 전압을 측정하기 위한 단발 방전 실험과 내구성을 검사하기 위한 반복 싸이클 실험으로 구성되었다.

Table 2 PR mold condition

PR Coating	2000 rpm
Air stabilization	20 min
Soft bake (oven)	84 $^{\circ}$ C, 50 min
Soft bake (hot plate)	115 $^{\circ}$ C, 2 min
Air stabilization	60 min
UV Exposure	3350 Mj/cm $^2$
DV 5:1	15-20 min

Table 3 Electroplating condition

pH	3.5 ~ 4.5
Temperature	40 ~ 60 $^{\circ}$ C
Current density	20 Ma / cm $^2$
Plating rate	0.25 $\mu$ m / min

### 2.1.2 전극의 제작

전극을 제작하기 위한 전체적인 공정은 크게 두꺼운 PR 작업과 도금으로 구성되며 그 세부 공정순서는 다음과 같다. 우선 도금시의 접합 특성을 좋게 하기 위해 먼저 Seed layer 를 증착 한다. 니켈과의 접착성 및 공정 조건을 고려하여 Cr 과 Au 를 각각 250 $\text{\AA}$  / 2500 $\text{\AA}$  증착 한다. 증착은 Thermal evaporator 로 수행한다. 이후 AZ9260 PR 로 45 $\mu$ m 두께의 볼드를 형성한다. 두꺼운 PR 작업의 경우 일반 PR 과 달리 공정이 까다롭고 Air stabilization 등의 추가적인 공정을 거쳐야 한다. PR 몰드 형성을 위한 조건표는 Table 2 와 같다.

몰드가 형성된 후 니켈 도금을 한다. 제작된 전극 구조물의 경우 종횡비가 길고 두께가 비교적 두껍기 때문에 구조물 내부 응력에 의해 glass 면에의 접착 특성이 안 좋아져서 구조물이 떴게 되어 구조물이 기관에서 떨어져 나가기 쉽다. 이와 같이 도금 시 형성되는 구조물의 응력 발생으로 인한 리프트 오프를 방지하기 위해 응력 특성이 우수한 설파민산 니켈 도금액을 사용하였다. 도금 공정 시 도금되는 니켈의 두께는 다음 식 (1) 과 같이 결정 된다. 도금조의 전류량과 도금 시간을 이용해 전극의 두께를 조정한다.

$$T(\mu\text{m}) = \frac{I(\text{mA}) \times t(\text{sec})}{50.5 \times A(\text{cm}^2)} \quad (1)$$

도금 공정의 조건표는 Table 3 과 같다. 전극을 제작하기 위한 전체적인 과정의 개략도는 Fig. 2 와 같다.

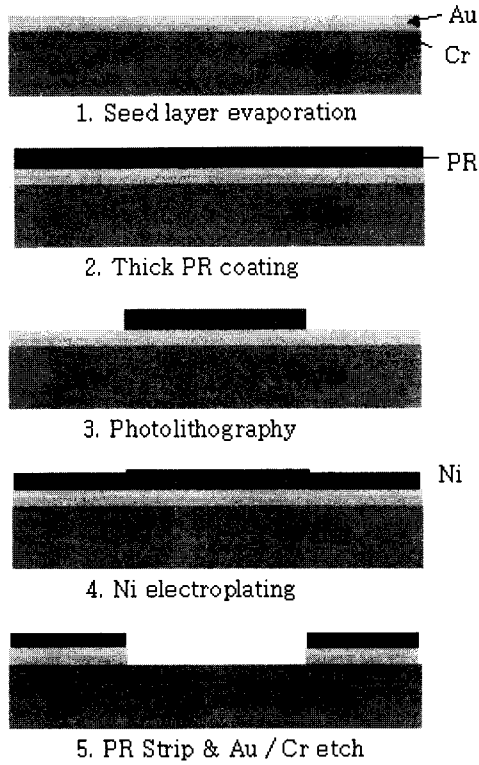


Fig. 2 Schematic of fabrication process

2.2 점화 시스템의 구성

본 연구에서 제작된 전극에서의 전극간 방전을 유도하기 위한 방식은 크게 두 가지 방식을 사용한다. 기계적 에너지를 전기적 방전 에너지로 변환하는 압전 물질을 이용한 방식과 1 차 코일에서의 단락으로 2 차 코일에 유기된 고전압을 이용해서 방전 시키는 방식이다. 압전 물질 방식의 경우 스위치에 부착된 압전 물질과 양극 전극을 연결하고 음극 전극을 접지 시킨다. 압전 물질을 이용한 실험은 점화 장치의 변화 없이 고정된 점화 조건의 연소 실험에서 주로 수행되었고 전극특성에 대한 연구에서는 코일을 이용한 방식을 사용하였다. 사용된 코일-점화 시스템은 Fig. 3 과 같은 구조를 가진다.

반복된 사이클에서의 내구성 실험의 경우 Power TR 에 연결된 파형 발생기에서 펄스 스위치를 일정 주파수로 고정시킨 후 고정된 주파수로 방전이 일어나도록 설치하여 수행한다. 코일, 파형 발생기, 접지와 트랜지스터의 연결은 Fig. 3 에 나와 있는 바와 같다.

방전시의 전압특성은 Fig. 4, Fig. 5 와 같다. Fig. 4 에 제시된 그림은 음극 전극이 없이 대기중 방

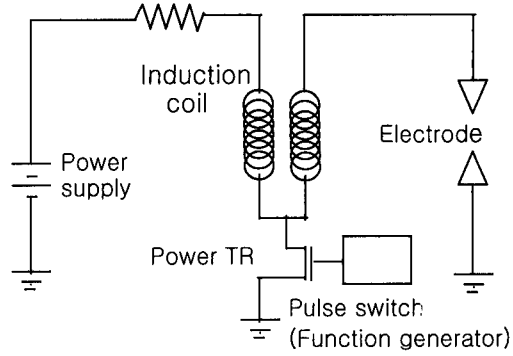


Fig. 3 Schematic of ignition system

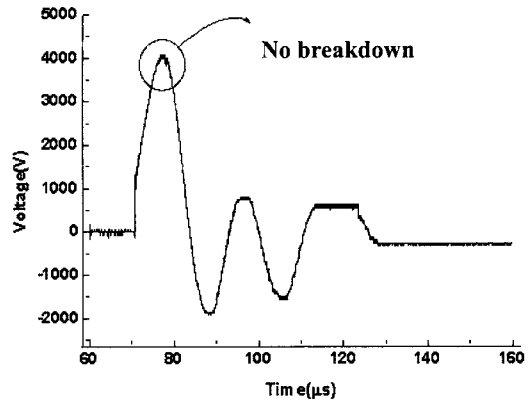


Fig. 4 Discharge voltage - no breakdown

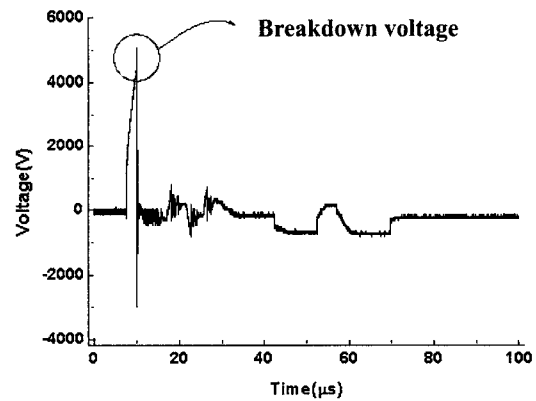


Fig. 5 Discharge voltage - breakdown

전을 일으켜서 항복(breakdown)이 발생하지 않은 상태에서 진동을 하며 에너지가 감쇄 되어져 가는 상태의 전압 신호이고 Fig. 5 의 경우는 접지 전극을 대어서 항복이 발생한 경우이다. 전극의 특성에 의해 결정되는 항복전압이 항복이 발생하지 않을 때의 방전에서 발생하는 최고 전압 값 보다 작

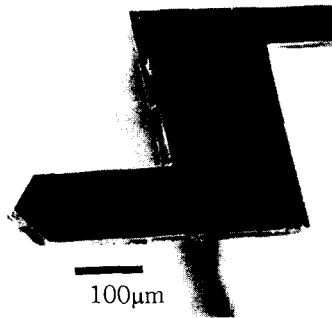


Fig. 6 SEM image of fabricated electrode

은 값일 경우 전압이 방전시의 최고 전압을 향해 상승하다가 항복 전압에 도달하고 급격한 전압 강하가 발생하는 항복이 발생한다. Fig. 5에서는 항복 발생시의 전형적인 급격한 전압 강하가 잘 관찰된다.

전류는 압력 강하가 일어나는 시점에서 급격한 최대값을 보이게 된다. 나노 스케일로 측정해야 하는 전류신호의 특성상 측정장비의 한계로 급격히 증가하는 전류의 최고 값을 정확히 읽어내는데 어려움이 있었다.

### 3. 결과

#### 3.1 전극 제작 결과

두꺼운 PR 몰드와 Ni 전기 도금을 통해 형성된 미세 전극의 제작 결과의 SEM 사진이 Fig. 6에 제시되어 있다. 전반적으로 제작된 전극은 긴 형상에 따른 스트레스를 잘 감쇄하여서 구조의 휨이 관찰되지 않았고 전극 표면 상태 등이 양호하게 제작되었다. 전반적인 전극의 형상 또한 모서리 각이 잘 형성되어 좋은 Step coverage를 가지고 있음을 확인 할 수 있다.

#### 3.2 전극 형상에 따른 방전 특성

전극 형상에 따른 방전 특성을 알아 보았다. 전극의 형상에 따라 항복이 일어나는 전압변화가 어떻게 발생하는지를 관찰하였다.

##### 3.2.1 전극 폭의 영향

비교적 큰 전극에 대해서는 전극 폭 자체가 항복전압에 미치는 영향이 크지 않기 때문에 전극의 간격만이 항복 전압의 주 변수로 알려져 왔다. 하지만 전극이 미세한 크기로 줄어들 경우 전극의 폭은 물질 특성과 손상상태에 큰 영향을 미치는 변수가 된다. 평행한 사각형 전극에 대해 전극 폭이 항복 전압에 미치는 영향을 알아보기 위해 실험을 수행하였다. 결과는 Fig. 7에 제시되어 있다.

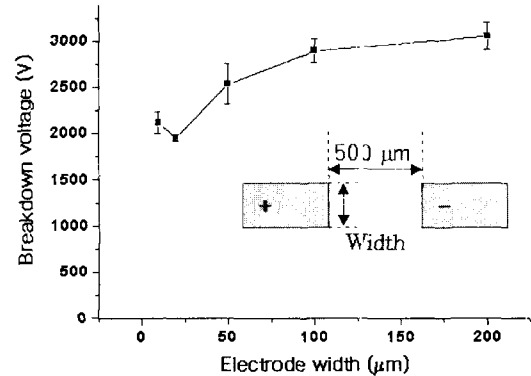


Fig. 7 Discharge characteristic - width

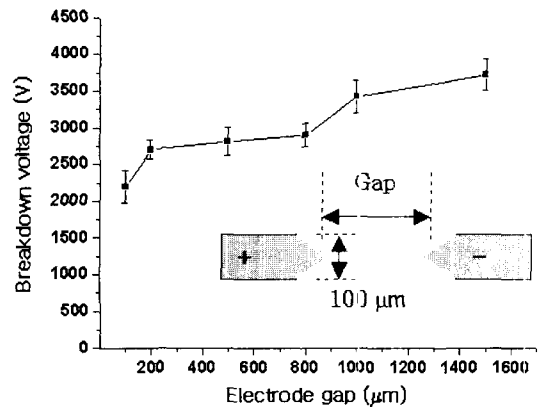


Fig. 8 Discharge characteristic - gap

전반적으로 폭이 좁아 질수록 항복 전압이 저하되는 경향을 보여 주고 있다. 이러한 변화량은 전극 폭이 작아질수록 커진다. 또한 20μm에서 10μm로 줄어들어 가는 과정에서 소폭의 증가를 보이고 있는데 이는 전체적인 경향을 반영하는 결과는 아닌 것으로 판단된다. 미세한 크기를 가지는 전극의 방전에서는 방전 시 조금씩 전극이 손상되어져 가기 때문에 전극의 폭이 작아질수록 이러한 방전 전압의 변화가 커지게 된다. 결과에 제시된 바와 같이 대략적으로 20μm 이하의 전극 폭에서는 항복이 발생할 시 스퍼터링이나 산화로 인해 전극 물질에 입는 손상이 상대적으로 커져서 이로 인한 영향과 전극의 폭이 가늘어 지면서 방전의 불안정성이 증가하게 되어지는 것에 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 반면 전극의 폭이 커질 때는 200μm 이상의 값에서 일정한 값으로 수렴해 가는 것을 알 수 있다. 따라서 이미 알려진 바와 같이 전극의 폭은 특정 값 이상이 되면 항복 전압의 변화에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

3.2.2 전극 간격의 영향

일반적으로 방전 시 항복 전압은 전극의 간격에 의해 결정되어 지는 것으로 알려져 있다. 미세한 전극에서의 항복 전압이 전극 간격에 대해 가지는 특성을 좀 더 정량적으로 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 결과는 Fig. 8 에 제시되어 있다.

미세한 크기의 전극에서도 Paschen 곡선에서 알 수 있는 바와 같이 전극 간격이 커질수록 항복 전압이 높아지는 경향을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 미세 전극을 제작할 경우 전극의 간격을 작게 만드는 것이 항복전압을 낮추고 구조물에 손상을 최소화 시킬 수 있는 방법임을 알 수 있다. 전극 간격을 최소화 하는 과정에서 고려해야 할 것은 스파터링으로 인한 전극의 접합이다. 접합의 가능성을 가지는 한계 간격보다 크다면 전극 간격은 최소화 하는 것이 유리하다. 방전 실험의 특성상 반복되는 실험이 진행 될수록 결과의 재연성이 떨어지기는 하지만 결과에서 전반적으로 전극의 간격에 선형에 가깝게 증가하는 항복전압의 특성을 확인할 수 있다. 추가적인 실험의 결과를 통해 미세 연소기 제작 시 간격 100 $\mu\text{m}$  이하의 간격으로 전극을 제작해서 항복전압을 낮추는 것이 가능하리라 판단되며 이는 더 작은 간격에 대한 제작 및 실험 결과를 통해 결정 될 수 있을 것이다.

3.3 반복 방전에 따른 전극 신뢰성

방전을 계속할 경우 전자와 전극과의 충돌로 인해 전극 표면이 손상을 입게 된다. 충돌 시 발생하는 고온의 환경도 재료에 손상을 입히는 원인이 된다. 본 실험에서는 반복된 방전 실험을 수행하면서 전극의 손상 정도를 확인해 보았다. 전극의 손상된 정도가 미세 연소기의 작동 수명을 결정하는 파라미터가 될 수 있기 때문에 주어진 형상에서 작동 가능한 운용 범위를 구하는 것은 중요하다.

Power TR 에 연결된 파형 발생기에서 1 kHz 의 주파수로 펄스를 가하여 지속적인 방전을 수행하면서 전극의 변화를 관찰하였다. 반복되는 방전에 따라 전극의 형상 및 표면 상태가 변화하는 상태를 보여주는 결과가 Fig. 9 에 제시되어 있다. 결과는 높이 40 $\mu\text{m}$ , 전극 폭 100 $\mu\text{m}$ , 전극 간격 500  $\mu\text{m}$  인 전극에 대해 방전 실험을 수행하기 이전과 10<sup>4</sup>, 10<sup>5</sup>, 10<sup>6</sup> 번의 사이클을 반복하며 수행한 결과들을 비교해 놓은 것이다.

반복된 방전이 10<sup>5</sup> 사이클을 넘어가게 되면 cathode 쪽의 손상이 드러나기 시작하는 것을 알 수 있다. 결과를 토대로 볼 때 두께 40  $\mu\text{m}$  전극의

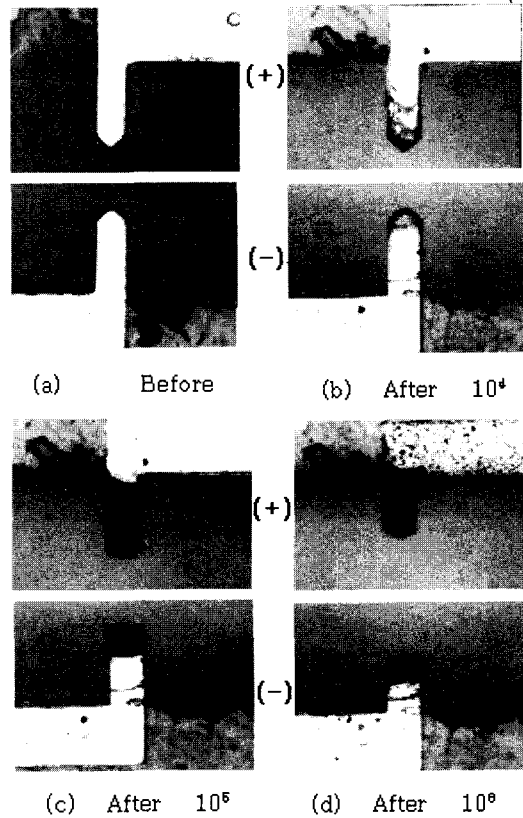


Fig. 9 Reliability test results

경우 대략적으로 10<sup>6</sup> 사이클 정도에서도 전극으로 작동 할 수 있는 것으로 판단된다. 전극의 수명을 늘리기 위해서는 전극의 두께를 두껍게 하는 방법과 인가 에너지를 최소화 하는 방법이 있다. 전극의 두께가 두꺼워질 경우 구조물의 스트레스 문제와 두꺼운 몰드의 균일성을 보장할 수 있어야 하는 문제와 도금과정에서의 증착물의 균일성 문제 등을 극복해야 한다. 이에 대해서도 실험적인 관찰이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

불꽃 점화 방식을 사용하는 미세 연소기 제작을 위해서는 미세 전극의 제작이 필요하다. 미세 연소기에 들어갈 수 있는 크기의 미세 전극을 제작하여 전극의 형상과 재료가 전극 특성에 미치는 영향을 평가해 보았다. 전극은 유리 웨이퍼 기판 위에 두꺼운 PR 몰드와 Ni 도금으로 40 $\mu\text{m}$  두께로 제작 하였다.

전극의 폭의 영향은 항복전압이 전극 폭 200 $\mu\text{m}$  이하의 경우에는 전극 폭의 감소와 함께 감소하

는 경향을 보였고 20 $\mu\text{m}$  이하의 경우는 전극 손상으로 인한 항복 전압 변화의 가능성이 확인되었다. 전극 폭이 200 $\mu\text{m}$  를 넘어 가면서는 일정한 값에 수렴이 되어가는 경향을 보였다. 미세 전극을 제작할 경우 200 $\mu\text{m}$  정도에 해당하는 폭을 넘으면 전극의 폭은 항복전압에 영향을 주지 않는 것으로 볼 수 있음이 확인되었다.

전극의 간격은 일반적으로 알려진 바와 같이 간격의 증가와 함께 항복전압이 증가했으며 이를 미뤄 볼 때 스퍼터링으로 인한 전극 접합의 가능성만 배제하면 전극 간격을 100 $\mu\text{m}$  정도의 크기까지도 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

전극의 내구성을 평가하기 위한 반복 방전 실험에서 두께 40 $\mu\text{m}$  인 전극이 경우  $10^6$  정도의 사이클 정도에 해당하는 반복 방전에서도 사용할 수 있는 정도의 손상을 보여 주었다. 전극 구조체의 스트레스 문제와 제작상의 문제가 해결된다면 전극의 두께를 두껍게 하는 것이 전극 수명의 연장에 유리할 것으로 판단된다.

미세 연소기 제작을 위한 미세 전극의 설계 제

작 테스트를 통해 연소기와 통합 공정으로 제작할 수 있는 공정을 확립하였고 전극 특성을 최적화할 수 있는 설계 접근 방식을 수립할 수가 있게 되었다. 계속되는 연구를 통해 최적의 성능을 가진 미세 연소기 제작이 가능할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- (1) Ono T., Sim D. Y. and Esashi M., 2000, "Imaging of Micro-Discharge in a Micro-Gap Electrostatic Actuator," *Micro Electro Mechanical Systems, 2000. MEMS 2000. The Thirteenth Annual International Conference on.* pp. 651~656.
- (2) Janischewkyj W., Hussein A. M., Santiago N. H. C., 1988, "Performance and Analysis in a Micro-Gap Discharge Circuit," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.3, No.2.
- (3) Kercher D. S., Seriburi P. and Allen M. G., 1999 "An Experimental Study of Microfabricated Nickel Spark Plugs," *Transducers '99 Sendai, Japan*, pp.1412~1415.
- (4) "기체방전" 1968, 동북대학 기초전자공학입문 강좌 자료, 제 4 권.