

## 미세 엔진 운용성 검증 및 요소 기술 개발

이대훈\* · 박대은\*\* · 최권형\* · 윤준보\*\* · 권세진\* · 윤의식\*\*

### Fabrication and feasibility estimation of Micro Engine Component

Dae Hoon Lee, Dae Eun Park, Kwon Hyoung Choi, Joon Bo Yoon, Sejin Kwon, and Euisik Yoon

**Key Words :** Micro Combustor(미세 연소기), Component(요소), fabrication(제작), combustor(연소기), Electrode(전극)

#### Abstract

As a part of micro engine development feasibility estimation was done through fabrication and test of down scaled combustor and MEMS fabricated spark electrode. In an experimental observation of the down scaled combustion phenomena where flame propagation was observed by optical method and pressure change in combustor which gives the information about the reaction generated thermal energy was recorded and analyzed. Optimal combustor scale was derived to be about 2mm considering increased heat loss effect and thermal energy generation capability. Through the fabrication and discharge test of MEMS electrode effects of electrode width and gap was investigated. Electrode was fabricated by thick PR mold and electroplating. From the result discharge voltage characteristic in sub millimeter scale electrode having thickness of 40  $\mu\text{m}$  was obtained. From the result base technology for design and fabrication of micro engine was obtained.

#### 기호설명

$E_i$	점화 에너지
$h$	연소실 벽면 높이
$H$	열함량(heating value)
$i$	전류량
$m_T$	총질량
$P$	압력
$t$	시간
$V$	체적
$Y$	질량분율
$\phi$	당량비
$\eta$	열전환 효율

#### 1. 서론

미세 가공 기술, 정밀 기계 기술의 발달로 인한

미세한 시스템 개념의 연구와 개발로 야기된 미세 동력, 추력 장치의 제작에 대한 요구와 수요가 증가하고 있다. 소형 경량의 시스템이 요구하는 동력원의 요구 조건을 만족시킬 수 있고 기존의 배터리 기술의 한계를 넘을 수 있는 새로운 개념의 동력 장치에 대한 매력적인 대안으로 Power MEMS 즉 미세 연소장치가 제안되었고 이를 제작하기 위한 노력들이 소수의 연구 그룹에 의해 수행되어 지고 있다.[1]

기존의 엔진이나 연소기와 다른 미세한 크기에서 작동하는 장치를 개발하기 위해서는 운용 가능성이 여러 방면에서 점검이 되어져야 한다. 첫째 스케일 축소에 따른 연소기의 연소특성과 일 생산 능력의 저하가 어느 정도인지 파악이 되어야 하고 형상 축소에 따른 이점과 에너지 손실, 이득을 고려한 최적의 형상 크기를 결정해야 한다. 둘째 이러한 크기와 성능을 내는 장치를 제작하기 위한 제작 기술이 확보되어야 한다. 미세가공의 경우 제작 공차와 재연성의 한계와 가공 정확도, 가공 방식 등에 따른 설계가 수행되어져야 한다. 셋째

\* KAIST 항공우주공학전공

\*\* KAIST 전기전자공학전공

이러한 장치를 시스템에 탑재하고 운용할 수 있는 호환성을 유지할 수 있는지에 대한 평가가 이루어져야 한다. 이러한 운용 가능성이 차례로 점검되어지고 엔진을 구성하는 각 요소의 제작과 성능평가를 통해 엔진 시스템으로의 통합이 이루어져야 한다. 본 연구에서는 형상 축소된 연소기의 화염 거동에 따른 특성을 관찰하고 이로부터 미세 엔진을 제작하기 위한 연소기 설계 파라미터를 구하였다.

일반적으로 엔진점화는 압축점화와 불꽃 점화 방식으로 분류되는데 이중 미세 엔진에 장착 가능한 불꽃 점화 방식 전극을 제작하기 위한 연구를 수행하였다. 미세 엔진에서는 엔진 스케일의 축소와 함께 생산되는 열에너지가 작아지게 되므로 엔진 성능과 효율을 높이기 위해 점화 등을 위한 입력 에너지 값을 최소화 해야 한다. 불꽃 점화 방식을 택할 경우 전극의 형상과 특성에 따라 방전 전압특성이 변화하고 입력 점화 에너지가 변화하므로 전극의 특성에 따른 방전실험을 수행하여 설계 파라미터를 구하였다. 실제 전극 제작과정을 통해 엔진과의 통합공정 가능성을 확인하였고 제작 공정에 대한 기술 축적이 가능하였다.

## 2. 연소기 실험

### 2.1 실험장치의 구성

형상 축소된 연소기에서의 연소 특성을 파악하기 위해 연소기를 제작하였다. 제작된 연소기는 연소실 높이를 변화 시켜서 연소기의 표면적 대 체적 비를 변화시키고 소염거리 보다 작은 연소실 높이를 만들 수 있도록 설계한 이대훈 등[2] 의 연소기와 동일한 연소기 이다. 연소실에 연결된 전극의 높이가 0.4mm 이므로 연소실 높이는 0.4mm 에서 5mm 까지 변화가 가능하다. 높이에 따른 연소실 체적은 0.07 cc 에서 0.88 cc 정도의 범위 에 해당한다.

실험에 사용된 연료는 수소와 공기의 당량비 1 인 에혼합 가스이다. 수소의 경우 다른 연료에 비해 상대적으로 소염거리와 최소 점화 에너지가 작아서 미세한 크기의 연소 현상을 연구하기 위한 실험에 유리하다. 측정은 연소 반응으로 인한 연소실내의 압력 변화측정과 측정 창을 통해 관찰되는 화염 전파의 가시화를 통해 수행되었다.

점화는 압전 물질 스위치로부터 발생하는 방전을 이용하였다. 압전 물질에 의해 유도되는 전극 간의 방전 시 연료에 공급되어지는 점화 에너지를 측정하기 위해 전극과 연결된 점화 선에 전압계

전류계를 연결하여 방전에 의한 전압 전류 값을 측정하였다. 방전이 일어날 때의 전압 값과 전류 값으로부터 점화 에너지는 Equation 1 과 같이 구해진다.

$$E_i = \int v \cdot i dt \quad (1)$$

전체적인 점화 시스템의 구성과 방전 에너지 측정을 위한 장치의 구성은 Figure 1 과 같고 측정된 점화 에너지는 1.7mJ 정도의 값을 가진다.

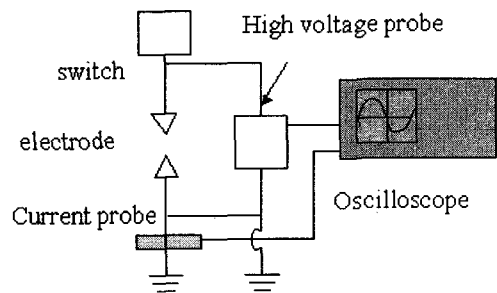


Fig. 1 schematic of ignition system

### 2.2 실험 조건

연소특성을 알아보기 위한 실험은 연소실의 높이와 연소실 초기 압력을 변화시켜 가며 수행하였다. 연소실 높이 축소를 목적으로 수행된 실험 조건은 아래 Table 1 과 같다.

Table 1 Test condition matrix

P init (psig)	10	20	30	40		
Chamber height (mm)	0.61	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0

## 3. 결과

### 3.1 연소실 압력 변화

연소반응에 의해 연소실 내에서 일어나는 압력 변화는 일반적인 연소기 보다 압력 강하가 급격히 일어나는 것이 그 특징이다

각각의 실험조건에 대해 압력변화를 측정하여 변화하는 연소실 조건이 연소실내의 연소 특성에 미치는 영향을 알아보았다. 연소반응으로 인한 최고 압력과 압력 변화를 알 수 있으면 연소기에서 생산된 열에너지량을 추산해 낼 수 있게 된다.

연소실 초기 압력과 연소실 크기를 변화시켜 가며 수행된 실험에서 각 조건에 따른 최고압력 변화는 Figure 2 과 같다. 연소실 초기 압력의 증가

와 함께 반응으로 인한 최고 압력이 증가하고 있고 이러한 증가는 연소기의 높이가 높아 질 수록 커지는 경향을 가지고 있음을 확인 할 수 있다. 수소의 소염거리에 해당하는 0.61mm 높이의 연소실에서 이러한 경향이 동일하게 유지되고 있음을 통해 소염 거리에 해당하는 높이의 연소실에서도 연소반응을 통해 점화 및 국부적인 화염 전파로 인한 압력 상승이 있음을 확인할 수 있다.

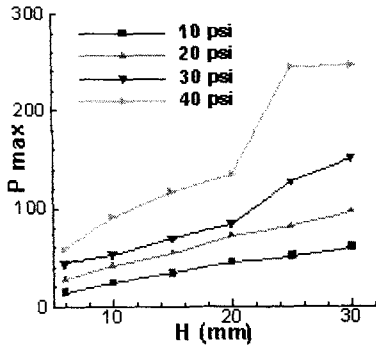


Fig. 2 Peak pressure in each case

### 3.2 열전달 효과

위의 결과들에 대해 연소실의 높이 축소 자체가 가지는 효과를 알아보기 위해 연료량을 대표하는 값 즉 연소실 높이와 초기 압력의 곱을 새로운 파라미터로 정하고 파라미터의 변화에 따른 최고 압력의 변화를 구해 보았다. Figure 3 에 나와 있는 결과를 통해서 알 수 있듯이 높이 축소 자체에 의한 최고 압력의 저하 현상은 발견되어지지 않는다.

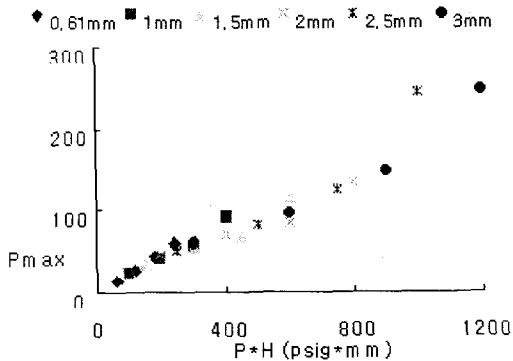


Fig. 3 Maximum pressure in pressure-mass domain

실험 결과를 분석해 볼 때 전반적으로 연소실 높이에 따라서 연소실 최고 압력 대 초기의 비가 일정한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 전체적인 실험 조건에 대해 연소실 초기 압력과 연소 반응으로 인한 연소실내 최고 압력의 비를 구해 보면 Figure 4 와 같다. 화염이 발생할 때 2mm 이하의

높이에서는 열전달 효과로 인해 소염이 발생해서 종횡비 5~10 에 이르는 거리를 전파해 가지 못하고 소염이 발생한다. 실제 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 화염이 연소기 벽면까지 도달하지 않는 2mm 까지의 연소실 높이에 대해서는 초기 압력 대 최고 압력의 비가 거의 일정하고 화염이 연소기 전체 면적에 대해 전파되기 시작하는 2.5mm 이상의 경우에는 초기 압력의 증가에 따라 초기압력 대 최고압력의 비가 증가하는 것을 알 수 있다.

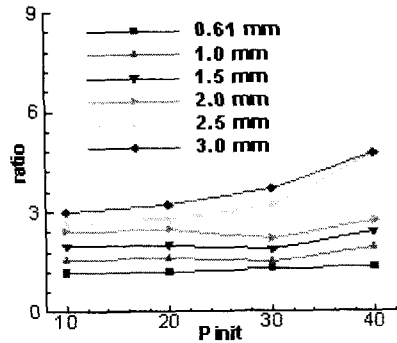


Fig. 4 Maximum to initial Pressure ratio in each case

좀더 개괄적으로 확인하기 위하여 각 연소실 높이 조건에 대해 압력 비 값을 산술 평균을 내고 연소실 높이에 해당하는 표면적대 체적 비 도면에 표시를 하면 Figure 6 과 같이 표시할 수 있다.

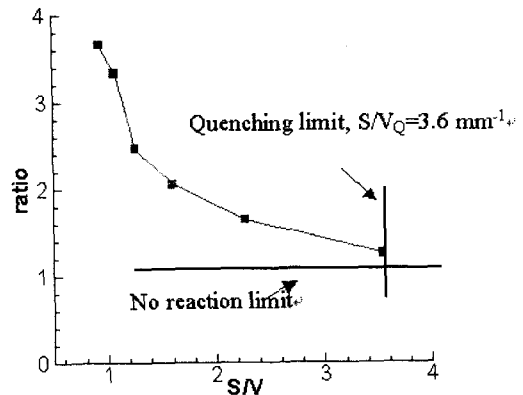


Fig. 5 Pressure Ratio versus S/V graph

Figure 6 의 그림에서 수직선은 화염의 소염 한계를 나타내는 선이고 수평선은 초기압력과 최대 압력이 같은 점 즉 연소 반응이 일어나지 않은 상황을 의미한다. 연소실 축소로 인한 열전달 효과의 증가로 소염거리에 도달하기 전에 반응이 멈춘다면 압력 비 곡선은 수직선보다 수평선에 먼저 도달하게 될 것이지만 실험 결과 소염거리에 도달함에도 불구하고 압력을 얻을 수 있었다. 이것은

연소기의 높이가 소염거리보다 작을 때에도 정상적인 화염의 전파는 이루어지지 않지만 점화와 부분적인 화염의 전파를 통해서 일로 전환할 수 있는 압력을 연소실내에서 얻어 낼 수 있다는 것을 의미한다.

점화 후 연소실에서 최고 압력에 도달하는 시간은 전반적으로 연소실 높이의 영향을 반영하지 않는 것으로 관찰되었다. 초기 압력이 높아질수록 연소실 높이 증가에 따른 도달 시간의 증가 경향이 관찰되기는 하지만 연소실 높이의 영향으로 판단하기는 어려운 경향을 보인다.

### 3.3 연소 에너지 평가

일반적인 연소기의 경우 연소기에서 생산되는 일의 양이 연소기를 운용하기 위해 필요한 에너지 입력보다 크기 때문에 시스템이 요구하는 에너지 입력 값에 대한 출력 값의 비교는 필요가 없다. 하지만 연소기가 작아지면서 연소기를 통해 전환할 수 있는 에너지의 양이 작아지게 되면 시스템으로서의 가치를 가지기 위해서는 에너지 입력 값과의 비교가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 실험에서 구해진 압력 값을 바탕으로 단순화된 정적 연소실 에너지 분석을 통해 미세 연소기의 열에너지 생산 능력을 검증하였다.

정적 연소실의 경우 부피 변화에 의한 일의 양이 없으므로 발생하는 열량은 내부 에너지의 변화량과 같으므로 내부 에너지의 변화량으로 생산 에너지 값을 계산하였다. 또한 연소기의 효율을 평가하기 위해 연소실에서 얻어진 압력 결과로부터 환산한 생산 에너지 값과 연료의 열함량(heating value)와의 비교를 통해 미세 연소실의 연소 효율을 구하였다. 이 관계는 Equation 2 와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta U = \eta m_f H Y_{H_2} \quad (2)$$

연소실에서 발생한 열량과 연소 효율의 결과는 Table 2 에 제시되어 있다.

연소기가 작을수록 효율이 작아지는 것은 화염의 전파영역이 연소기의 높이가 작을수록 급격히 작아지기 때문이다. 이 경우 미연 영역의 값이 포함되어 효율이 저평가 되어 계산된다. 효율은 열 손실로 인해 전체 연료가 연소 되지 않는 부분 연소와 연소실내에서 발생하는 연소현상 자체의 효율을 포함하는 값이다. 또한 최고 압력에 도달하는 과정에서 발생한 열 손실이 효율 계산 내에 포함 되어 있으므로 엄밀한 연소 효율 실험을 한다면 실제 연소 효율 자체의 값은 제시된 값보다

더 높은 값을 가질 것으로 예상된다.

Table 2 Energy generation and efficiency

h	Pi (psi)	10	20	30	40
0.61 mm	$\Delta U$ (J)	0.024	0.037	0.066	0.084
	$\eta$	0.043	0.047	0.066	0.068
1.0 mm	$\Delta U$ (J)	0.095	0.14	0.16	0.33
	$\eta$	0.1	0.11	0.094	0.16
1.5 mm	$\Delta U$ (J)	0.23	0.33	0.38	0.70
	$\eta$	0.16	0.17	0.15	0.23
2.0 mm	$\Delta U$ (J)	0.43	0.63	0.67	1.1
	$\eta$	0.23	0.24	0.20	0.28
2.5 mm	$\Delta U$ (J)	0.62	0.93	1.4	3.0
	$\eta$	0.27	0.28	0.34	0.58
3.0 mm	$\Delta U$ (J)	0.89	1.36	2.1	3.6
	$\eta$	0.32	0.35	0.42	0.58

일반적으로 적용하는 점화 에너지가 1~2 mJ 정도임을 생각할 때 미세 연소기는 유용한 일을 생산할 수 있는 장치임을 확인할 수 있다. 소염거리 근처에서는 연소 반응에 참여하는 영역의 급격한 감소로 효율이 많이 떨어지지만 2mm 부근 혹은 그 이상의 크기에서는 미세 연소기 사용을 통해 동력장치를 제작할 수 있음을 알 수 있다.

## 4. 미세 전극 제작 실험

### 4.1 전극의 설계와 제작

일반적인 기체 방전에서 방전 전압은 전극의 간격과 분위기 압력의 영향을 받으며 그 관계는 Paschen 곡선이 보여주는 바와 같다.[3] 미세 엔진을 제작할 경우 가능한 점화 방식의 하나로써 불꽃 점화 방식을 생각할 수 있다. 이 경우 작은 연소실 안에 들어가는 미세한 크기의 전극을 제작하여야 한다. 미세한 전극을 제작하였을 경우 전극의 형상이 방전 전압에 어떠한 영향을 미치는지는 전극 내구성과 소요 전력 등을 분석하기 위해 필요한 기반 연구이다. 본 연구에서는 이러한 배경하에 미세한 전극을 제작하고 방전 전압 특성을 측정하였다.

전극의 설계 파라미터는 전극의 간격과 폭으로 정하였고 Table 3 에 나와 있는 바와 같다.

Table 3 Electrode geometry matrix

간격( $\mu$ )	100	200	500	800	1000	1500
폭 ( $\mu$ )	10	50	100	200		

전체 실험은 방전 전압을 측정하기 위한 단발

방전 실험과 내구성을 검사하기 위한 반복 싸이클 실험으로 진행하였다. 방전을 위한 전원 시스템은 Figure 6 과 같이 코일과 Power TR 을 이용해서 구성하였다.

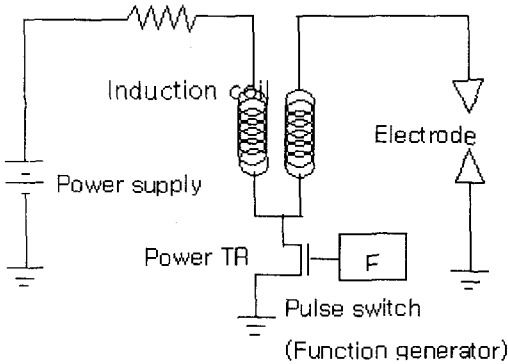


Fig. 6 Coil ignition system

전극 물질은 증착 조건과 높은 녹는점 산화 특성 등을 고려해 니켈로 정하였다. 전극 간격은 스퍼터링으로 인한 접합을 피하기 위해 100 $\mu\text{m}$  이상으로 제작하였고 전극의 폭은 반복된 방전에서 전극 손상으로 인한 전극 간격 변화를 고려해 10 $\mu\text{m}$  이상으로 정하였다. 제작은 두꺼운 PR 몰드와 전기도금을 이용해서 수행되었다. 제작 공정 순서는 Figure 7 에 나와 있는 바와 같다.

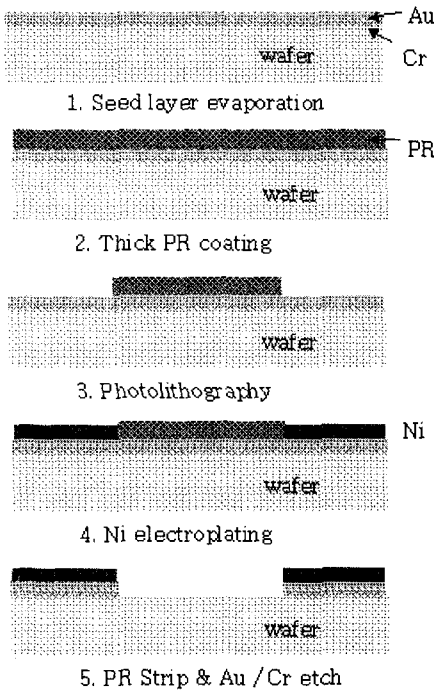


Fig. 7 Schematic of fabrication process

먼저 도금층의 접합특성을 좋게 하기 위해 Cr 과 Au 를 각각 250 $\text{\AA}$  / 2500 $\text{\AA}$  증착 하고 45 $\mu\text{m}$  두께의 두꺼운 PR 몰드를 형성한 다음 니켈을 도금한다. 형성된 전극은 40 $\mu\text{m}$  두께를 가진다.

실제 제작된 전극의 형상은 Figure 7 에 나와 있는 SEM 사진과 같다. 전반적으로 제작된 전극은 긴 형상에 따른 스트레스를 잘 감쇄하여서 구조의 힘이나 표면 상태 등이 양호하게 제작되었고 형상 또한 좋은 Step coverage 를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

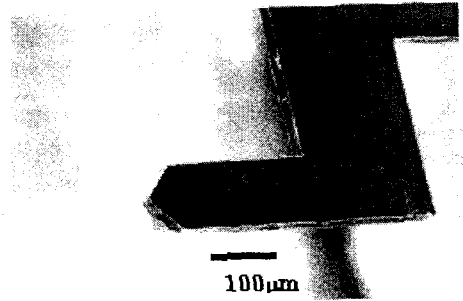


Fig. 8 Fabricated electrode

#### 4.2 방전 테스트

각각의 전극 형상 조건에 대해 방전 실험을 수행하였다. 전극 폭에 대한 방전실험에서 전극 폭에 따른 방전 전압의 변화는 Figure 9 와 같다.

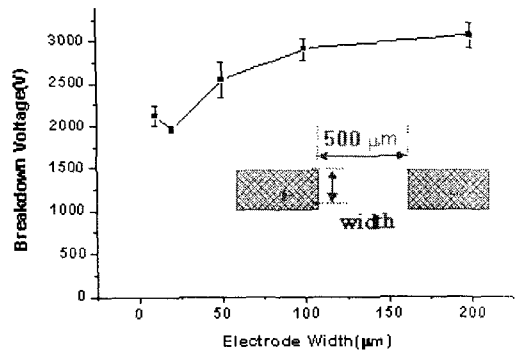


Fig. 9 Discharge characteristic - width

200 $\mu\text{m}$  이하에서는 방전전압이 서서히 줄어들어서 일정한 값에 수렴되어 가는 것을 확인할 수 있다. 20 $\mu\text{m}$  이하의 값에서는 스퍼터링등의 영향으로 인한 전극 손실의 가능성이 있으므로 전극 폭은 100~200 $\mu\text{m}$  정도의 값이 적절할 것으로 판단된다.

전극 간격 변화에 따른 방전 전압의 차이는 Figure 10 에 나와 있는 바와 같다. 전반적으로 Paschen 곡선을 따르는 경향을 보여주고 있다. 미세한 연소기에서 화염이 발생할 경우 전극이 전도 열전달로 인한 열손실원이 되어 화염 전파를 저해

하는 요인이 될 수 있으므로 전극의 간격은 화염 커널을 성장시키는데 지장을 주지 않는 일정한 간격 이상의 값을 유지해야 한다. 방전 전압 값을 고려해서 전극 간격은 500~700 $\mu\text{m}$  정도의 값이 적절할 것으로 판단된다.

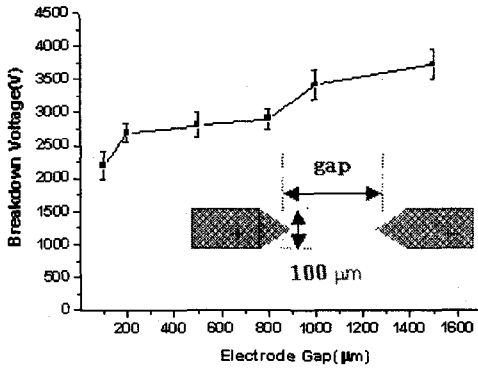


Fig. 10 Discharge characteristic - gap

반복방전에 따른 전극의 신뢰성을 평가하였다. 방전시 방출되는 전자와의 충돌로 전극 표면이 손상을 입게 되므로 전극의 내구성을 평가하는 것은 연소기의 성능을 결정하는 중요한 인자가 된다. 높이 40 $\mu\text{m}$ , 전극 폭 100 $\mu\text{m}$ , 전극 간격 500  $\mu\text{m}$  인 전극에 대해 방전 이전,  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$  번의 싸이클을 1kHz로 반복하며 수행한 결과들이 Figure 11에 나와 있다.

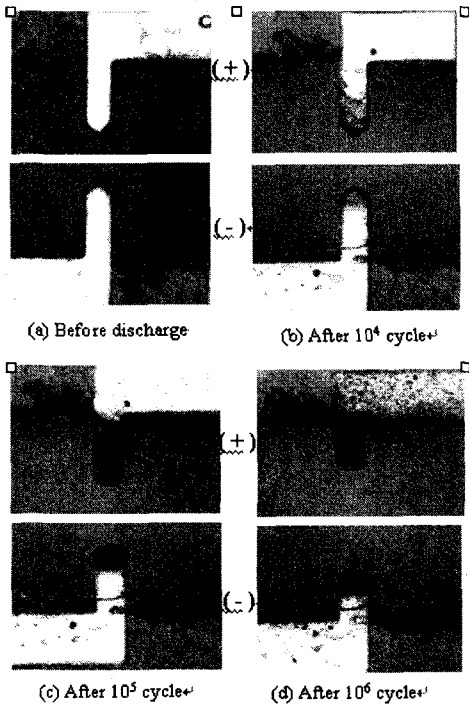


Fig. 11 Reliability test results

전체적인 결과를 볼 때  $10^6$  싸이클 정도에서도 심각한 손상을 입지 않는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

미세 엔진을 제작하기 위한 기반연구로 항상 축소된 연소기에서의 연소특성을 알아보았다. 높이 조절이 가능한 연소기를 제작하여 수행한 실험에서 1mm 이하의 높이에서 3mm의 높이로 변할 때 연소에 의한 압력상승과 연소반응에 의한 열에너지 생성량을 구하였다. 결과로부터 대략 2mm 정도 이상 크기의 연소기에서 적절한 동력을 얻을 수 있는 장치 개발이 가능할 것으로 판단된다.

엔진 요소를 개발하기 위해 접화를 위한 전극을 미세 가공을 이용해 제작하고 방전전압을 테스트하였다. 두꺼운 PR 몰드와 전기도금으로 제작된 전극의 전극폭과 전극 간격에 따른 방전 전압의 결과로부터 두께 40 $\mu\text{m}$  니켈 전극에서 적절한 전극의 크기는 두께 100~200 $\mu\text{m}$ , 전극간격 500~700 $\mu\text{m}$  정도가 적절한 것으로 판단된다.

이상의 연구들을 통해 미세엔진을 개발하기 위한 설계 파라미터와 요소 기술들을 확립할 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) 이대훈, 권세진, 윤의식, "미세엔진 개발 현황," 한국군사과학기술학회 2000년도 추계 학술대회 논문집, pp.331-336, 2000.
- (2) 이대훈, 최권형, 권세진, "소염거리에 근접하는 연소실 환경에서의 연소특성," 한국연소학회지 제 5 권 제 2 호 pp. 63-68, 2000.
- (3) "기체방전" 동북대학 기초전자공학입문강좌 자료, 제 4 권, 1968.