

## 미세 연소기 개발 (III)

- 감광 유리를 이용한 마이크로 엔진의 제작 -

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

(2001년 4월 19일 접수, 2002년 10월 23일 심사완료)

### Design and Fabrication of Micro Combustor (III)

- Fabrication of Micro Engine by Photosensitive Glass -

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

**Key Words :** Micro Engine(마이크로 엔진), Micro Combustor(마이크로 연소기), Micromachining(미세가공), Combustion(연소), Photosensitive Glass(감광유리)

#### Abstract

Micro engine that includes Micro scale combustor is fabricated. Design target was focused on the observation of combustion driven actuation in MEMS scale. Combustor design parameters are somewhat less than the size recommended by feasibility test. The engine structure is fabricated by isotropic etching of the photosensitive glass wafers. Electrode formed by electroplating of the Nickel. Photosensitive glass can be etched isotropically with almost vertical angle. Bonding and assembly of structured photosensitive glass wafer form the engine. Combustor size was determined to be 1 mm scale. Movable piston is engraved inside the wafer. Ignition was done by nickel spark plug which was electroplated with thickness of 40 μm. The wafers were bonded by epoxy that resists high temperature. In firing test due to the bonding method and design tolerance pressure buildup by reaction was not confirmed. But ignition, flame propagation and actuation of micro structure from the reaction was observed. From the result basement of design and fabrication technology was obtained.

#### 기호설명

A : 도금 영역  
l : 도금조 전류  
l : 전극 간격  
T : 도금된 두께  
t : 도금 시간

#### 1. 서론

일반적인 동력장치의 크기 대 출력 비를 고려할 때 미세한 크기에서도 높은 출력을 가지는 동력 장치를 만들기 위한 시도들이 수행되어 지고 있다.<sup>(1)</sup> 미세가공 기술의 발달과 함께 이루어지고 있는 시스템의 축소화는 미세한 동력장치에 대한 연구의 필요를 가져온 동기가 되었다. 이러한 배경 하에서 마이크로 동력장치를 개발하기 위한 연구의 일환으로 미세한 공간에서의 화염의 점화 및 전파 가능성과 열에너지 생산 특성에 대한 기반 연구가 수행되었다.<sup>(2)</sup> 기반 연구의 결과를 바탕으로 이와 더불어 수행된 엔진 요소로서의 마이크로 점화 전극의 성능에 대한 연구를 배경으로 시험적

\* 회원, 한국과학기술원 항공우주공학전공

\*\* 한국과학기술원 전기전자공학전공

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 항공우주공학전공,

E-mail : melody@kaist.ac.kr

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

인 마이크로 엔진이 제작되었다.

엔진과 같은 동력장치를 미세한 크기로 제작하는 것은 몇 가지 극복해야 할 과제를 안고 있다. 기반 연구에서 수행되어진 바와 같이 연소현상에 대한 이해와 연소실 설계 파라미터가 확립되어 있어야 하고, 연소기에서 점화를 위한 방식과 점화 특성에 대한 이해가 있어야 한다. 또한 동력 전달과 에너지 전환을 위한 구조물을 가공하기 위한 미세 가공 기술이 요구된다.

미세한 구조물을 가공하기 위해서는 장치의 목적에 부합한 재료의 선정이 중요하다. 목적으로 하는 장치의 성능에 맞는 재료특성을 가지고 있어야 하며 이 재료가 미세 가공 기술로 구조체 형성이 가능한 재료여야 한다. 형상 축소된 장치는 단순히 크기만 줄여진 장치가 아니기 때문에 형상 축소된 크기에서 재료의 특성, 가공성을 확인하는 것이 큰 하나의 기술적 과제를 형성한다. 이것은 또한 선택한 재료에 대해 구조체를 제작할 수 있는 공정의 개발을 요구한다. 미세한 크기에서 재료를 식각하고 접합하는 기술은 공정 단계 하나하나마다 특정한 공정을 선택하고 결정해야 하는 기술적 과제이다. 구조체를 형성하기 위한 공정방식의 결정, 식각과 같은 경우 재료에 적합한 식각액의 선정, 식각률의 특성 파악 등 미세한 크기의 장치는 기존의 기계가공과 달리 장치의 작동과 응용 이전에 장치의 제작 단계가 하나의 기술적 주제가 된다.

기본적인 형태의 마이크로 엔진 시험 제작에서는 이러한 극복과제에 대한 기본 연구를 바탕으로 엔진을 설계하고 제작하였다. 구조물의 재료로는 자외선 노광 영역이 식각(etching) 가능케 되어 일반 유리로는 얻을 수 없는 등방성(isotropic)식각 구조를 얻을 수 있도록 하는 감광유리(Photosensitive Glass)가 사용되었으며 연소실의 크기와 형상은 형상 축소 연소기 실험 데이터를 기반으로 한 설계를 수행한다.

## 2. 미세 엔진의 제작

### 2.1 마이크로 엔진의 설계

시험 제작되는 마이크로 엔진의 형태는 피스톤이 연소에 의해 왕복운동을 하는 형태로 결정하였다. 회전하는 구조물은 회전축과 구조물의 형성에 어려움이 있으므로 상대적으로 단순한 형태를 가지는 왕복동 구조를 선택하였다. 엔진은 실린더 양 끝단에 설치된 연소기에서 발생하는 연소반응에서 얻어진 에너지를 통해 왕복운동을 하도록 설

계되었으며 연소기에는 연료공급을 위한 채널이 연결되어져 있다. 전체적인 마이크로 엔진의 구조에 대한 개략도는 Fig. 1 과 같다.

연료의 흡입과 압축, 연소, 배기의 단계로 연결되어 지는 엔진의 구동 개략도는 Fig. 2 와 같다. 피스톤이 연소기를 향해 움직이면 연료 채널 뒤쪽에 연결된 수동형 체크 밸브에 의해 연료의 유입이 차단되어 지고 연료 채널을 통해 들어온 연료는 연소실에서 피스톤에 의해 압축이 된다. 이 때 연소실에서 점화를 통해 피스톤이 실린더 내를 이동해서 상대편 연소기를 향해 움직이고 화염이 연소실에서 피스톤을 따라 실린더 내로 전파해 간다. 피스톤이 실린더 중반을 지나면 설치된 배기홀을 통해 연소가스가 배출되고 피스톤은 상대편 연소기의 연료를 압축하게 되어 하나의 사이클을 완료하게 된다. 연소실의 자세한 설계 파라미터는 Fig. 3 에 제시되어 있다.

점화에 의해 연소실 내부에서 화염이 형성될 경우 연료 채널 내부로 화염의 역류(flame back)가 발생할 수 있으므로 이를 방지하기 위해 연소기로 연결된 채널의 폭을 사용된 연료인 수소 공기 예혼합 화염 소멸거리의 절반 정도에 해당하는 0.3 mm 로 정하였다. 연소기의 크기는 1 mm × 1 mm ×

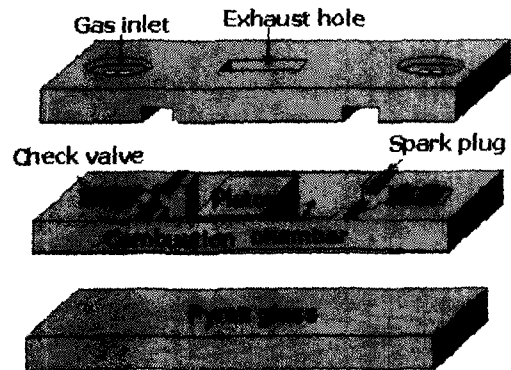


Fig. 1 Schematic of micro engine structure

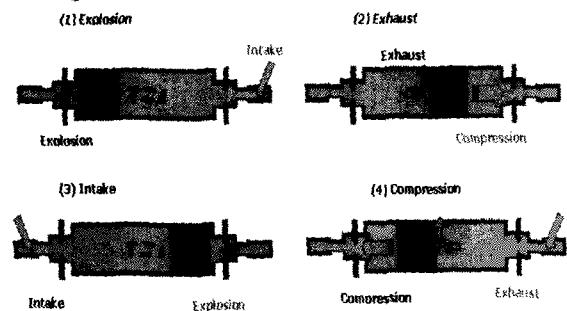


Fig. 2 Schematic of engine operation mode

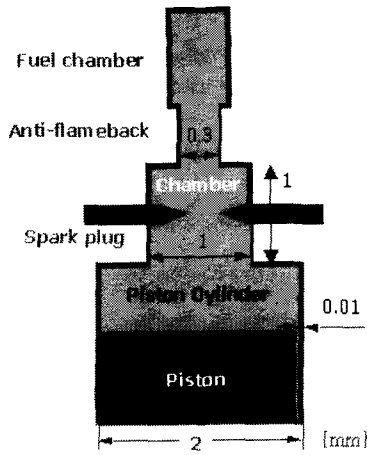


Fig. 3 Design parameters of micro combustor

1 mm 로 결정하였는데 이는 형상 축소된 연소기 실험으로부터 1 mm 크기에서도 점화와 부분적인 화염 전파에 의해 2~3 배 정도의 압력축적(pressure buildup)이 가능하다는 것을 확인하였기 때문이다.

피스톤이 연소실 내부로 들어와서 연소실 최소 면적을 줄이고 점화를 위한 전극을 손상시키지 않도록 하기 위해 실린더 폭을 2 mm 로 결정하였다. 피스톤이 움직이는 영역인 실린더의 길이는 10 mm 로 정하였다. 연료의 기밀이 이루어질 경우 대략 4~5 정도의 압축 비를 가지게 된다. 시험 제작된 엔진에서는 피스톤의 운동을 확인하는 것이 가장 큰 목적이므로 마찰저항의 가능성을 줄이기 위해 실린더와 피스톤의 설계 공차를 각 면 당 10  $\mu\text{m}$  로 정하였다. 가공상의 공차 발생을 고려할 때 피스톤이 자유롭게 움직일 수 있도록 상대적으로 큰 공차의 여유를 주게 되었다.

전극은 미세 가공으로 제작된 전극의 방전 특성과 내구성 실험으로부터 얻어진 결과를 토대로 두께 200  $\mu\text{m}$  전극 간격 500  $\mu\text{m}$  의 끝단이 90°의 각을 가지는 두께 40  $\mu\text{m}$  의 니켈 도금을 통해 제작하였다. 전극의 간격이 너무 작으면 전극을 통한 열전달이 커지고 간격이 커지면 방전전압이 높아지게 되므로 적절한 설계 파라미터를 설정하는 것이 중요하다.

전체적인 엔진의 구성은 3 개의 웨이퍼를 접합해서 이루어진다. 바닥층을 구성하는 웨이퍼는 웨이퍼의 가공이나 구조물 형성이 전혀 없이 바닥의 역할 만을 하게 되므로 파이렉스 유리 웨이퍼를 사용하였고 연소실과 실린더를 형성하는 중앙 웨이퍼와 연료 주입 홀과 배기 홀을 구성하는 상면 웨이퍼는 비등방 식각을 이용해 구조체를 만들어야 하므로 감광 유리를 사용하였다.

2.2 감광유리 구조물

미세 구조물에서 큰 종횡비(aspect ratio)를 얻을 수 있는 방법은 실리콘 웨이퍼를 Deep RIE (Reactive Ion Etching)로 식각 하거나 감광유리를 식각 하는 방법이 있다. 미세 엔진의 시험 제작에서는 이 중 엔진의 몸체에 해당하는 중앙 웨이퍼와 상면 웨이퍼의 재료로 감광 유리를 선택하였다.

미세 연소기에서는 점화를 시키기 위해 불꽃 점화방식을 선택하였는데 이 경우 전극 사이에서 방전 시 높은 전압이 발생하게 된다. 일반 실리콘 웨이퍼를 사용해서 미세 가공을 할 경우 방전 시 발생하는 수 천 볼트에 달하는 높은 전계를 이길 수 있는 절연막을 형성하기가 어렵다. 실리콘 웨이퍼의 절연막으로 많이 사용되는 SiO<sub>2</sub> 막의 경우 10<sup>7</sup> V/cm 정도의 값을 가지는 유전체 강도(dielectric strength)를 고려할 때 10  $\mu\text{m}$  이상의 절연막이 요구되는데 일반적인 방법으로는 그러한 두께의 절연 막을 만들기가 어렵다. 반면 절연 특성이 좋은 일반 유리 웨이퍼의 경우 재료 자체의 특성으로 인해 비등방 식각을 얻을 수가 없으므로 연소실과 같은 구조를 만들 수 없는 한계가 있다. 이러한 장점과 단점을 적절히 극복할 수 있는 것이 바로 감광 유리이다. 감광 유리는 일반 유리와 같은 절연특성을 가지면서도 노광 특성에 따라 등방성 식각이 가능해 지기 때문이다.

미세 엔진 제작에 사용된 감광유리는 Mikroglas 사의 Forturan glass 이다.<sup>(3,4)</sup> 이 유리는 350 nm 의 자외선에 반응해서 노광된 영역내부에 있는 은의 산화물로부터 열처리 과정을 통해 결정화가 이루어진다. 이 결정화된 부분이 불산 회석 용액에 식각이 되므로 비등방 식각으로 구조물을 구성할 수 있게 된다. 노광 에너지와 노광된 깊이는 Fig. 4 와 같은 관계에 있다.

웨이퍼 식각 특성을 조사하기 위한 테스트 과정에서는 Quintel 사의 Q-4000 aligner 를 사용하여 4 J/cm<sup>2</sup> 의 에너지를 노광했다. 식각된 에너지가 작을 경우 두꺼운 깊이를 식각해 내기 위해 식각 시간이 길어지고 상대적으로 타겟 영역 외의 영역에 대해 식각이 발생할 가능성이 있으므로 노광 에너지는 필요한 양보다 적절히 많은 양으로 하는 것이 좋다. 노광된 웨이퍼에 대한 식각률 검사 실험의 결과는 Fig. 5 와 같다. 전반적으로 6  $\mu\text{m}/\text{min}$  정도의 식각률을 확인할 수 있었다.

위에 제시된 노광 조건에서 노광을 하고 열처리를 한 후 불산 회석액에서 식각된 구조물의 단면 SEM 사진이 Fig. 6 에 나와 있다. 수직에 가까운 종횡비로 식각이 된 것을 확인할 수 있다. 식

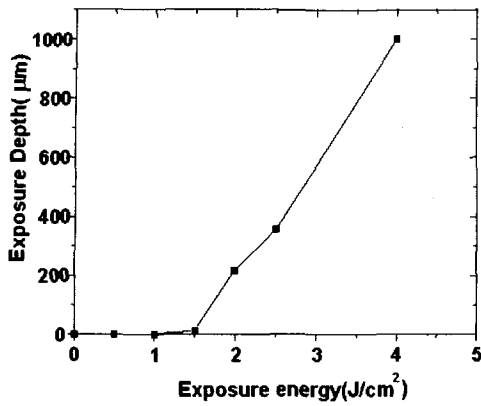


Fig. 4 Exposure depth versus exposure energy relation

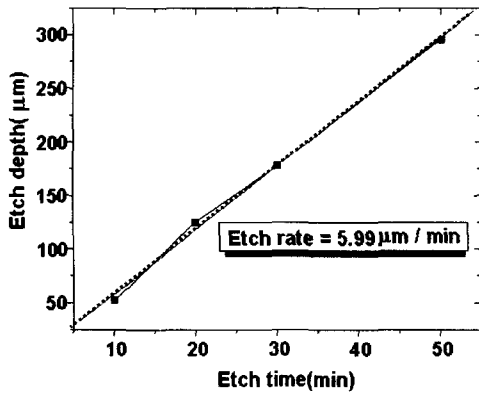


Fig. 5 Etch rate of exposed area

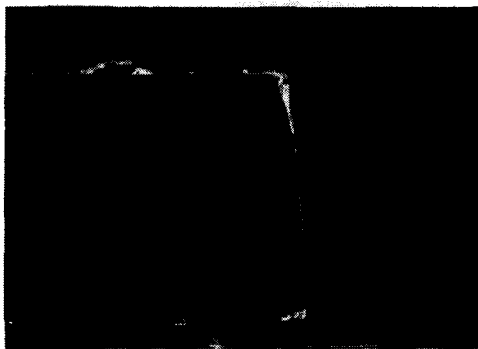


Fig. 6 Cross sectional view of etched photosensitive glass

Table 1 Thermal treatment condition

Ramp rate	Room temperature > 500°C : 3°C/min
Dwell time	500°C : 1 hr duration
Ramp rate	500°C > 600°C : 1°C/min
Dwell time	600°C : 1 hr duration
Cooling rate	600°C > room temperature : 3°C/min

각된 구조물의 특성은 노광 에너지, 식각 시간, 식각 조건 등에 영향을 받기 때문에 적절한 노광 및 식각 조건을 확립하는 것이 중요하다. 식각시 초음파 교반을 사용하면 식각 속도를 빠르게 할 수 있다. 실험에 사용된 식각액은 10:1로 희석된 불산(HF) 용액이다.

### 2.3 제작 공정

엔진의 전체 제작 공정은 엔진 덮개 역할을 하는 상면 웨이퍼 가공과 연소실 실린더를 형성하는 중앙 웨이퍼 가공으로 나누어 진다. 식각과 도금 등의 방법으로 만들어진 구조물은 이들 웨이퍼 간의 접합으로 전체 구조물을 구성하게 된다. 엔진의 몸체를 구성하는 중앙 웨이퍼의 제작 공정은 아래와 같다.

먼저 감광 유리 식각을 위한 노광을 한다. 이때 마스크는 자외선 투과율이 높은 석영 마스크를 사용한다. 노광량은 식각 특성을 높이고 앞 뒤를 관통하는 식각 목적을 위해 8 J/cm<sup>2</sup> 정도의 충분한 노광량을 가했다. 노광 후 열처리를 하게 되는데 열처리 과정은 Table 1 과 같다.

열처리 과정을 통해 결정화된 영역은 glass ceramic 으로 바뀌면서 노광량이 많을수록 진한 색을 띄게 된다. 열처리 후 접화 플러그를 패터닝할 때의 정렬 키(align key)로 사용하기 위해 웨이퍼를 살짝 식각 해서 단차를 형성 한다. 식각을 하는 이유는 다음 공정에서 도금을 위한 접합층(seed layer)으로 사용되는 Cr/Au 를 증착 하게 되는데 이 층이 웨이퍼에 올라가면 노광된 영역의 구분이 안 되기 때문에 연소기와 전극의 위치를 정렬할 수가 없기 때문이다. 도금을 위한 접합층으로 사용된 Cr/Au 는 각각 250 Å /2500 Å 증착이 되었다 다음으로는 웨이퍼에 두꺼운 PR(Photo Resistive)로 전극을 전기도금하기 위한 몰드를 형성한다 두꺼운 PR 의 경우 몰드 형성이 조건에 영향을 많이 받게 된다. 45 µm 높이의 몰드를 형성하기 위한 조건표는 Table 2 와 같다. 몰드가 형성된 후 도금조

Table 2 PR mold condition

PR Coating	2000 rpm
Air stabilization	20 min
Soft bake (oven)	84°C, 50 min
Soft bake (hot plate)	115°C, 2 min
Air stabilization	60 min
UV Exposure	3350 mJ/cm <sup>2</sup>
DV 5:1	15-20 min

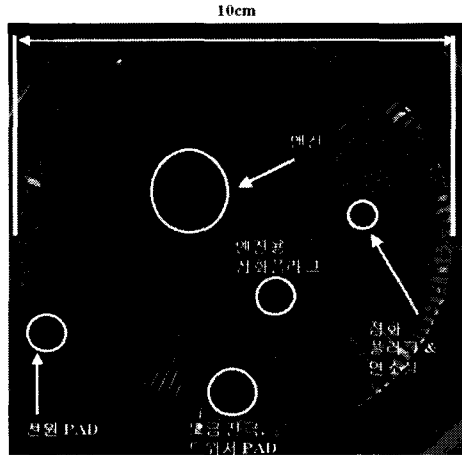


Fig. 7 Fabrication result of structure wafer (middle layer)

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

도금 공정의 조건표는 Table 3 과 같다. 도금이 끝나면 PR 을 제거하고 웨이퍼의 도금된 면에 파라핀을 바른다. 구조물을 형성하기 위해 감광 유리 웨이퍼 식각을 해야 하는데, 이 과정에서 오랜 시간동안 불산 희석액에 노출되면 도금 접합층이 손상을 받아 점화 플러그가 떨어져 나가게 되기 때문이다. 초음파 교반기 내에서의 식각으로 엔진 중앙 웨이퍼의 식각이 끝나면 파라핀을 제거하고 접합층을 제거하여 공정을 마무리 한다. 이 과정을 거쳐 제작된 중앙 웨이퍼의 제작 결과가 Fig. 7 에 나와 있다. 상하면 웨이퍼를 접합한 상태의 엔진 완성품은 Fig. 8 에 나와 있다. 엔진 덮개로 사용되는 상면 웨이퍼는 감광 유리를 사용해서 중앙 웨이퍼와 같은 방식으로 식각해서 연료 유입 배기 홀을 만든다. 상면 웨이퍼는 식각 과정만을 거치므로 상대적으로 공정과정이 단순하다. 이렇게 형성된 웨이퍼들을 접합하여 미세 엔진의 전체 구조가 완성된다. 엔진 제작을 위한 전체적인 과정의 개략도는 Fig. 9 와 같다.

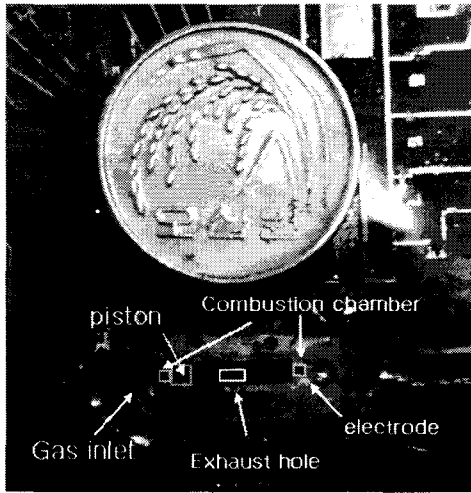


Fig. 8 Fabrication result of engine cover wafer (top layer)

### 3. 제작 결과 및 테스트

시험 제작된 미세 엔진에 대해 점화 시험을 수행하였다. 웨이퍼 상태의 엔진 테스트를 위해 제작된 테스트 모듈에서 고속 카메라를 이용해 화염의 전파와 피스톤의 움직임을 관찰하였다. 연료는 당량비 1 로 예혼합된 수소와 공기 혼합 가스를 사용하였다. 고속 카메라는 초당 9000 프레임 기록하도록 촬영하였다. 연소로 인한 피스톤의 작동을 확인하기 위한 단발 점화 테스트 이미지는 Fig. 10 과 같다. 점화 플러그를 통한 엔진 내부에는 측정장치나 센서를 부착하기가 어려우므로 가시화 이외의 측정은 이루어 지지 않았다. 단발 점화 테스트에서 연소가스의 누설 등으로 압력 축적이 제대로 이루어 지지 않아 피스톤의 운동은 10 cm/s 정도의 낮은 속력을 가진 것으로 측정되었다

연소실과 실린더 공간의 기밀 특성이 좋지 않아서 연소에 의해 발생하는 열에너지 피스톤의 운동 에너지로 전달이 되는 효율이 낮은 것으로 판단된다. 이것은 연소실 내에서 압력 상승이 제대로 이루어 지지 않은 결과이다. 시험 제작된 미세 엔진은 웨이퍼 접합과정에서 용융접합(fusion bonding) 이 아닌 단순한 물리적 접촉인 에폭시 본드를 이용한 접합을 하였다. 이 과정에서 본드 물질이 웨이퍼 층 사이에 두꺼운 층을 형성하게

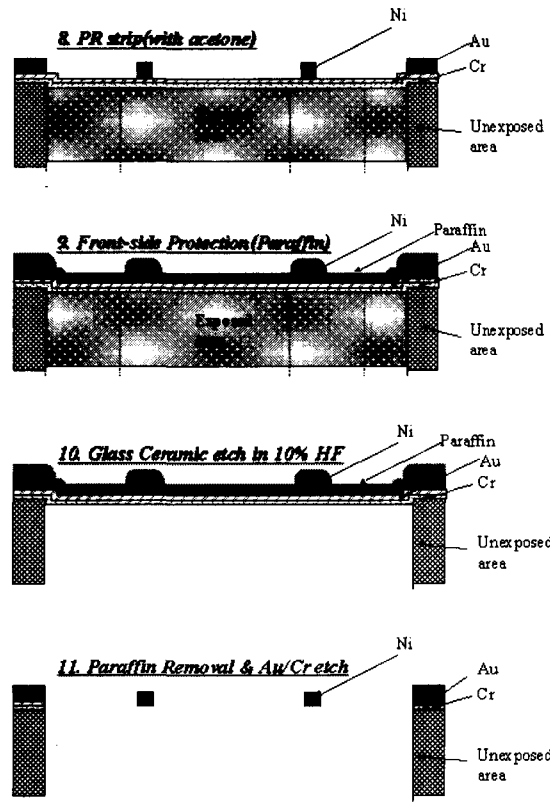
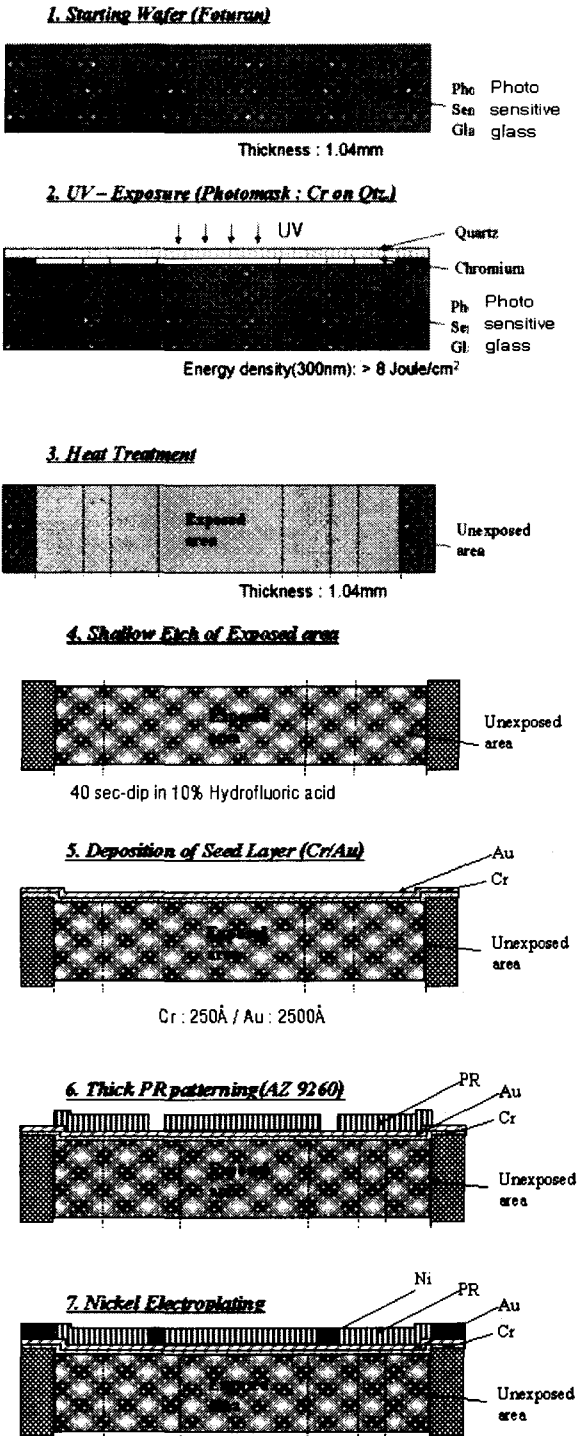
Table 3 Electroplating condition

pH	3.5 ~ 4.5
Temperature	40 ~ 60°C
Current density	20 mA / cm <sup>2</sup>
Plating rate	0.25 μm / min

에서 니켈을 40 μm 두께로 도금한다. 도금 시 형성되는 구조물의 응력문제에 의한 리프트 오프를 방지하기 위해 응력 특성이 우수한 셀파민산 니켈 도금액을 사용하였다.

도금 공정 시 도금되는 니켈의 두께는 다음 Equation 1 과 같이 조정된다.

**Chamber & Spark Plug**



**Gas inlet & outlet**

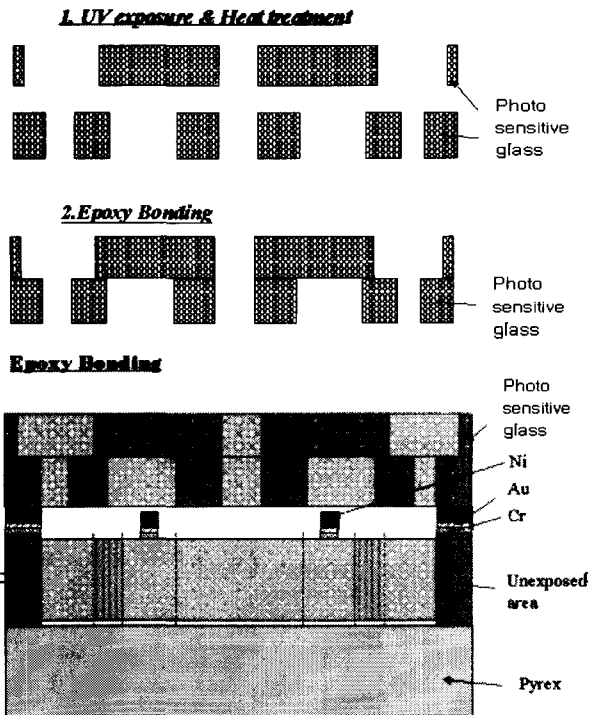


Fig. 9 Schematic of engine fabrication process

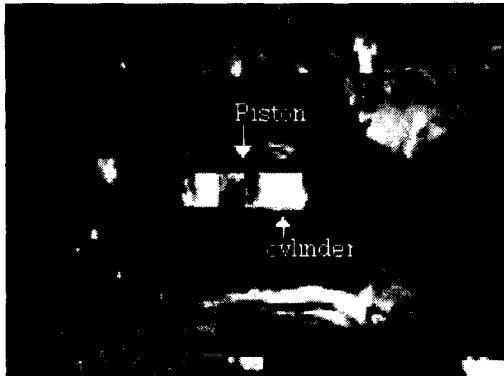


Fig. 10 Captured high speed camera image showing piston movement

되었다. 이러한 접합상의 결과로 웨이퍼 층 사이에 부분적으로는 수십  $\mu\text{m}$  에 달하는 공차가 발생하였다. 이러한 공차로 인해 연소실과 실린더의 기밀유지가 큰 영향을 받았고 기밀이 이루어지지 않은 주 원인이 되었다. 웨이퍼 접합 문제는 추후에 용융접합 (fusion bonding) 방식으로 개선되어야 할 것으로 판단된다. 제작상의 난점으로 인해 구조적인 문제가 되는 피스톤의 실린더 간의 공차와 웨이퍼간의 공차가 연소기에서 발생한 압력 상승을 저하시켜서 연소실 내의 압력 상승을 떨어트린 원인으로 파악된다.

4. 결론

미세 연소기 특성에 관한 기본 연구들의 결과를 토대로 마이크로 내연 엔진을 시험 제작하였다. 시험 제작과정을 통한 결론은 아래와 같다.

(1) 감광유리는 노광과 열처리 과정을 통해 웨이퍼 크기에 달하는 연소기나 구조물을 제작하는데 유용함을 확인할 수 있었고 식각 특성 등으로부터 고 중형비 구조물 제작을 위한 자료를 확립할 수 있었다. 이로써 지속적인 엔진개발을 위한 재료특성 파악 및 공정 확립이 이루어졌다.

(2) 마이크로 내연 엔진을 제작하기 위한 공정을 확립할 수 있었다. 감광유리기판에 도금과 두

꺼운 PR 작업을 통한 구조물 제작과 웨이퍼 관통홀을 제작하기 위한 공정을 확립할 수 있었다.

(3) 감광유리와 파이렉스 유리등 3 장의 웨이퍼 접합을 통해 엔진 구조물을 형성하였다. 제작된 엔진에 대한 점화 실험에서 미세한 공간에 형성된 연소기로부터 발생한 점화와 화염전파를 통해 피스톤을 구동할 수 있는 구조물을 제작할 수 있음을 확인하였다.

(4) 마이크로 엔진을 설계 제작하는 과정을 통해 웨이퍼의 접합과 제작 공차 등의 개선점을 발견하였다. 접합 방식, 제작 공정상의 개선으로 작동 가능한 미세 엔진을 제작 할 수 있는 가능성을 확인하고 관련된 제작 기술을 확립할 수 있었다.

본 연구에서는 새로운 개념의 마이크로 엔진을 구현하기 위해 기초 연구인 연소 현상에 대한 연구를 바탕으로 실제 시스템 차원의 엔진을 구현하기 위한 기반이 되는 구조물 제작 공정을 확립하고 점화기 등의 요소 부품을 제작하였다. 마이크로 시스템의 경우 구조체를 제작하기 위한 재료를 선정하고 공정을 확립하는 것이 하나의 주제로 매우 중요한 의미를 가진다. 본 연구의 후속 연구로 계속 되어질 실제 작동이 되는 엔진의 성능 평가에 대한 연구는 제시된 결과를 토대로 제작되어진 마이크로 엔진에 대해 수행되어질 수 있을 것이다

참고문헌

- (1) Epstein, A. H., Senturia, S. D., Anathasuresh, G., Ayon, A., Breuer, K., Chen, K-S., Erich, F. E., Gauba, G., Ghodssi, R., Groshenry, C., Jacobson, S., Lang, J. H., Lin, C-C., Mehra, A., Miranda, J. M., Nagle, S., Orr, D. J., Piekos, E., Schmidt, M. A., Shirley, G., Spearing, M. S., Tan, C. S., Tzeng, Y-S. and Waitz, I. A., 1997, "Power MEMS and Microengines," *Transducers97*, Chicago, pp. 753~756.
- (2) Lee Dae Hoon, Choi Kwon Hyoung and Kwon Sejin 2002, "Design and Development of Micro Combustor (I)," *Trans. of the KSME, B*, Vol. 26, No. 1, pp. 74~81.
- (3) <http://www.mikroglas.com>.
- (4) <http://www.design.caltech.edu/micropropulsion/forturan.html>.