

Nd:YAG 레이저 어블레이션을 이용한 PZT 액츄에이터의 빗살형 전극 제작

Interdigitated electrodes fabrication of PZT actuator by using Nd:YAG laser ablation

한국기계연구원 지능형 정밀기계본부 홍진욱*, 이재훈, 서정, 신동식

1. 서론

21세기에 접어들면서 최신 항공우주 비행체의 기능 집적화 및 소형화를 통하여 그 성능을 향상시키기 위한 다기능 지능 복합재료 구조물에 대한 개발의 필요성이 대두되고 있다. 그러나 지능재료 및 구조물에 대한 개발이 시작된 지 20여년이 지난 현재에도 커다란 진척을 보지 못하고 있다. 가장 중요한 원인은 생체 근육과 같이 충분한 작동력과 변위를 낼 수 있는 작동기가 개발되지 못하였기 때문이다¹⁾. 대표적인 압전 재료인 PZT는 perovskite 구조를 갖고 벌크에서 우수한 압전 특성을 가지고 있어 초고집적화 산업, 경량의 고성능 능동 작동기 산업에 이용 가능하다²⁾. PZT 액츄에이터 제작을 위해 PZT 가공 기술은 다양한 방면에서 연구되어왔다. 그러나 휠 커터를 이용한 다이싱(dicing)이나 식각 및 증착의 MEMS공정 위주로 연구 및 진행되어 왔고, 레이저를 이용한 스크라이빙(scribing)이나 커팅에 대한 연구는 미진하였다. 특히, 빗살형 전극을 갖는 PZT 액츄에이터의 전극 제작 있어서 다이싱은 취성재료 가공 및 미세선평 가공이 어렵고, MEMS 공정은 제작 과정이 복잡하다는 문제가 있다. 그러나 레이저를 이용한 PZT 미세 가공은 적절한 렌즈의 선택을 통해 초점크기를 쉽게 전환함으로써 다양한 선평의 미세 가공이 가능하고³⁾, 공정이 비교적 간단하다. 이에 본 연구는 Nd:YAG 레이저를 이용하여 빔 주사 속도, 파워, 가스 등의 레이저 공정 변수들을 변화 시켜가면서 직접 PZT를 미세가공을 하였고, PZT의 무전해 동도금을 통해 가공된 그루브(groove)에 빗살형 전극 제작을 시도하였다. 따라서 본 연구를 통해 다이싱, 본딩, MEMS 공정을 대체하여 보다 빠르고 정밀하게 PZT 액츄에이터의 빗살형 전극 제작이 가능할 것이다.

2. 실험방법

2.1 레이저 어블레이션을 이용한 PZT의 미세가공

본 실험은 레이저를 이용한 압전 세라믹 PZT의 미세 가공 실험으로서 실험조건은 Table 1과 같다. 실험에 사용된 PZT는 두께 260~280 μ m의 압전 세라믹으로서 EDS 분석한 결과, 화학조성은 Table 2와 같다.

Table 1 Experimental conditions of Nd:YAG laser

Laser type	KrF excimer	Pico-second	Nd:YAG
Wavelength(nm)	248	355	1064
Power	10 mJ	1W	3.5W
Rep.(kHz)	0.2	100	2
Pulse duration(ns)			70
Scanning speed (mm/s)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5	0.05, 0.1, 0.2, 0.3 0.05 x 2times, 0.05 x 4times	1, 2 ,3 ,4 ,5, 6, 7, 8
Shield gas	-	-	N ₂ , O ₂ (5bar)

Table 2 Chemical composition of PZT(wt%)

	C	O	Ti	Zr	Pb
PZT	5.52	20.23	4.11	12.42	57.72

PZT 빗살형 전극을 제작하기 위해서는 PZT에 그루브 가공이 선행되어야 한다. 그루브 가공에 적합한 레이저를 선정하기 위하여 Table 1과 같이 세 종류의 레이저로 그루브 가공실험을 하였다.

KrF 엑시머 레이저 가공에서는 빔 주사속도를 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 그리고 0.5 mm/s로 변화시키면서 PZT 그루브 형상을 SEM을 통해 관찰하였다. 선폭은 500 μ m의 홀 마스크를 사용하여 빔 스팟 사이즈를 1/10 로 축소하였고, 펄스당 에너지는 10mJ로 설정 하였다.

피코초 레이저 가공에서는 빔 조사속도와 스캔횟수를 변화시키면서 PZT 그루브 가공성에 대해 관찰하였다. 피코초 레이저에서 낼 수 있는 파장인 355, 532, 1064nm 중 355nm의 파장을 이용하였고, 빔파워는 1W, 반복율은 100kHz로 설정하여 실험하였다.

Nd:YAG 레이저 가공에서는 빔 주사속도, 보호가스를 변화시켜가면서 PZT 그루브 가공에 적합한 가공조건을 찾고자 실험 하였으며, 빔파워는 3.5W, 반복율은 2kHz로 설정하였다. 또한 가공시에 생기는 잔유물 제거 효과를 위해 동일한 조건에서 5 bar의 압력으로 각각 질소와 산소를 분사 시키는 방법과 동일조건으로 가공한 후 0.87W, 5mm/s의 빔 주사속도로 디버링(deburring)시키는 실험을 병행하였다.

2.2. 무전해 도금을 위한 PZT 그루브 내의 시드 형성

Nd:YAG 레이저의 PZT 그루브 가공 후, 가공된 그루브를 전극으로 만들기 위해서는 무전해 도금법을 이용하였다. PZT 그루브의 무전해 도금을 위해서는 그루브 내에서 시드로 작용될 수 있는 물질을 넣어야 한다. 후속 공정에 사용될 무전해 동도금에서 동이온을 석출시킬 수 있는 촉매 역할을 할 시드로 사용될 용액을 $PdCl_2$ 0.05g과 $SnCl_2$ 2.5g을 염산 30ml에 넣은 후 증류수를 넣어서 100ml가 되도록 제조하였다. PZT 그루브 위에 스포이드로 시드용액을 한방울 떨어뜨린 후,

평평한 플라스틱으로 스퀴징(squeezing)하였다. PZT 표면에 묻은 시드 용액을 잘 닦은 다음, 10분 이상 자연 건조 시킨 후, 드라이어로 1분간 건조시켰다.

2.3. 빗살형 전극 제작을 위한 무전해 동도금

무전해동도금은 플라스틱, 세라믹 등 비전도체 표면을 금속화하는 방법으로서, Nd:YAG 레이저를 이용하여 가공한 PZT 그루브에 전극을 형성하기 위해서 무전해동도금 실험을 수행하였다.

본 실험에서는 냄새와 독성이 강한 포르말린을 환원제로 사용하지 않고, 더 낮은 pH에서 작업하기 위해 차아인산염 환원의 도금욕을 사용하였다. 도금욕의 구성성분은 Table 3과 같으며 용매로는 증류수를 사용하였다. 이 욕의 작업온도는 65°C가 적당하며 pH는 9.2나 그 이하일 때도 사용할 수 있다.⁴⁾

Table 3 Component of electroless Cu plating

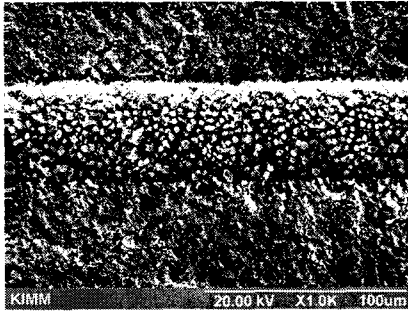
Component	Concentration of mole
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	0.024 M
$NiSO_4 \cdot 6H_2O$	0.002 M
$Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$	0.052 M
$NaH_2PO_2 \cdot H_2O$	0.27 M
H_3BO_3	0.5 M

도금에 적합한 적정온도의 효율적 유지를 위해 도금욕이 담긴 비커를 오일이 담긴 비커에 넣고 가열하였으며, 도금욕의 가열과 원활한 섞임을 위해 핫플레이트 스타터러(Hotplate stirrer)를 사용하였다. 도금욕의 온도는 핫플레이트와 연결된 백금 온도계를 도금욕 안에 넣음으로써 설정온도인 65°C에서 $\pm 0.5^\circ C$ 이내로 피드백 제어 되었다.

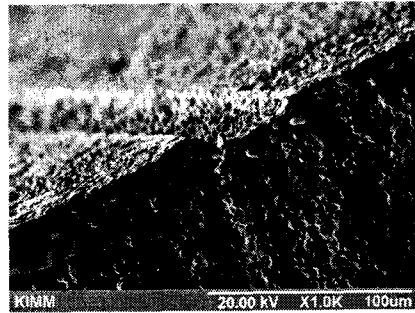
그루브 내에 시드가 형성된 PZT를 도금욕 안에 넣고 pH 7.2에서 1시간 정도 무전해 도금을 하였으며, pH는 NaOH에 의해 조절하였다.

3. 실험결과 및 고찰

KrF 엑시머 레이저를 이용하여 가공한 PZT 형상은 Fig.1과 같다. Fig. 1의 (a)는 마스크를 사용하여 0.1mm/s의 빔 주사속도로 가공한 것으로 50 μm 의 선폭을 얻을 수 있었다. 선폭제어가 용이하고 직진도 높은 그루브 가공이 가능하였으나, (b)의 단면 형상에서 볼 수 있듯이 약 10 μm 의 얇은 가공깊이로 인해 PZT 가공에는 적합하지 않았다.



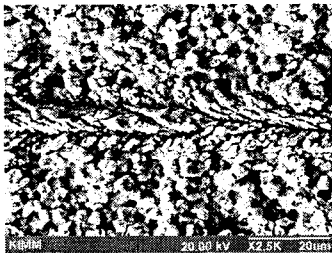
(a)



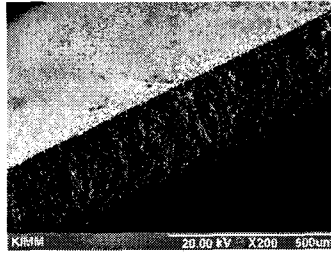
(b)

Fig.1 Surface and cross section profiles of PZT at 0.1mm/s, 10mJ, 200Hz

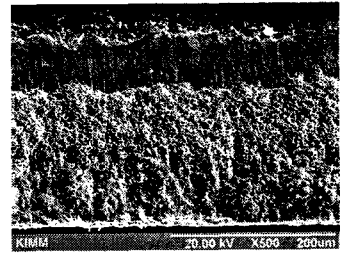
피코초 레이저를 이용한 PZT 가공 형상은 Fig. 2와 같다. 선폭이 약 $10\mu\text{m}$, 가공깊이는 약 $200\mu\text{m}$ 정도로 높은 세장비의 그루브 가공이 가능하였으나, Fig. 2와 같이 그루브 내부가 가공 잔유물 (debris)의 미분출로 꽉 막혀 있었다. 잔유물 제거를 위해 $50\mu\text{m}$ 의 속도로 2회와 4회에 걸쳐 가공하였지만, Fig. 3과 같이 그루브 내부에는 여전히 가공 잔유물이 분출되지 않음을 알 수 있었다. 따라서 높은 세장비의 그루브 가공에도 불구하고 그루브 내 가공 잔유물의 미분출로 인해 피코초 레이저는 PZT 그루브 가공에 적합하지 않음을 확인할 수 있었다.



(a) surface

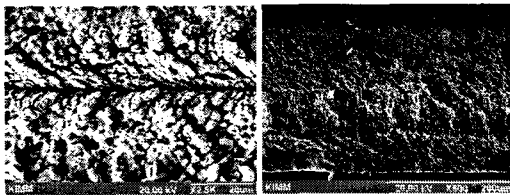


(b) perpendicular cross section
to scan direction

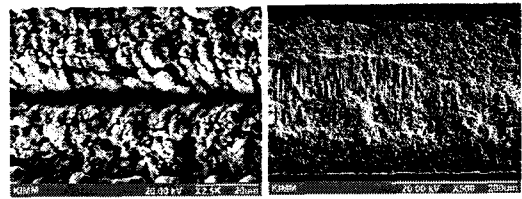


(b) horizontal cross section
to scan direction

Fig. 2 Surface and cross section profiles of PZT at 0.1mm/s, 1W, 100kHz



(a) 0.05mm/s x 2times



(b) 0.05mm/s x 4times

Fig. 3 Surface and horizontal cross section profiles of PZT at 1W, 100kHz

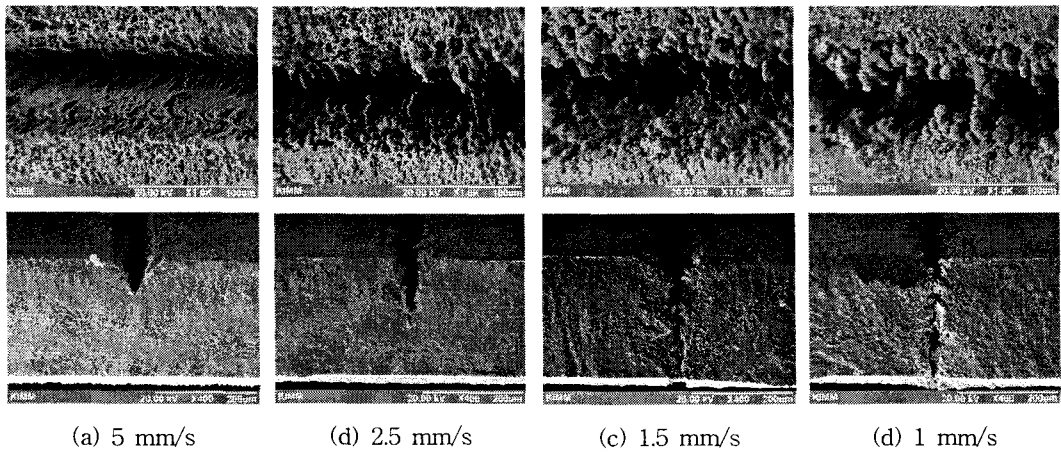


Fig. 4 Surface and cross section profiles of PZT at 3.5W, 2kHz

Nd:YAG 레이저를 이용하여 가공한 PZT 형상은 Fig. 4와 같다. 가스분사 조건에 따라 약간의 차이가 있었으나 빔 주사속도가 1.5 mm/s 이하일 때 PZT가 관통되었다. 역시머 레이저 가공결과에 비해 깊은 가공깊이를 얻을 수 있었고, 피코초 레이저에 비해서는 가공 잔유물의 비교적 원활한 분출로 그루브가 막히지 않음을 알 수 있었다. 그러나 빔 주사속도가 느려질수록 열충격에 의한 크랙발생 및 깊은 가공 깊이로 인한 가공 잔유물의 미분출 문제가 발생하였다. 따라서 크랙과 가공 잔유물 발생이 적으면서 적정 가공 깊이를 얻을 수 있는 5 ~ 8mm/s의 빔 주사속도영역에서 PZT 그루브 형상을 비교 분석하였다.

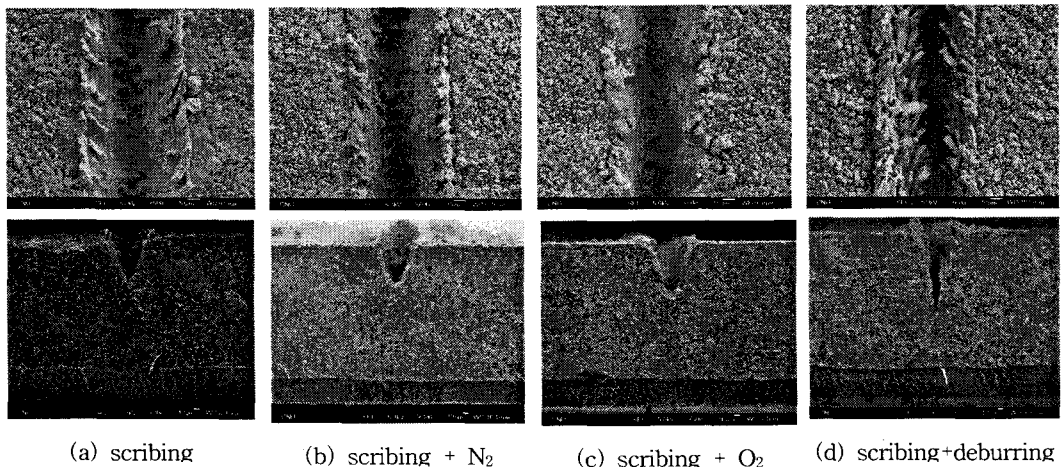


Fig. 5 Surface and cross section profiles of PZT at 5mm/s, 3.5W, 2kHz

Fig. 5의 (a)는 5mm/s, 3.5W, 2kHz의 조건에서 보호가스를 사용하지 않고 가공한 것으로 표면부의 선폭은 $68\mu\text{m}$, 깊이는 $72\mu\text{m}$ 정도이다. 그러나 가공의 여파로 그루브 표면과 내부에 약간의 가공 잔유물이 생성 되었다. (b)는 (a)와 같은 조건에서 질소 가스를 분사하면서 가공한 것으로 가공 선폭과 깊이는 각각 약 $60\mu\text{m}$ 이었다. 질소를 불어넣어줌으로써 가공 잔유물 제거 효과를 볼 수 있었다. (c)는 동일 조건에서 가공시에 산소를 불어넣은 공정으로 $80\mu\text{m}$ 의 선폭과 $56\mu\text{m}$ 의 깊이를 얻을 수 있었다. (b)와 같이 가공 잔유물 제거 효과를 볼 수 있었고, 질소를 분사한 (b)에 비해 더 깊은 가공 깊이의 그루브를 얻을 수 있었다. 이는 산화반응열에 의해 가공깊이가 더 깊어졌을 것으로 판단된다. (d)는 동일한 조건에서 가공한 다음, 0.87W, 2kHz, 5mm/s의 조건으로 디버링한 것으로서, 깊고 높은 세장비의 그루브 가공이 가능하였으나 디버링의 효과보다는 재가공됨으로 인해 가공 잔유물이 오히려 더 많이 발생함으로써 전극 형성을 위한 무전해 도금 공정의 적용에 부적합 하였다.

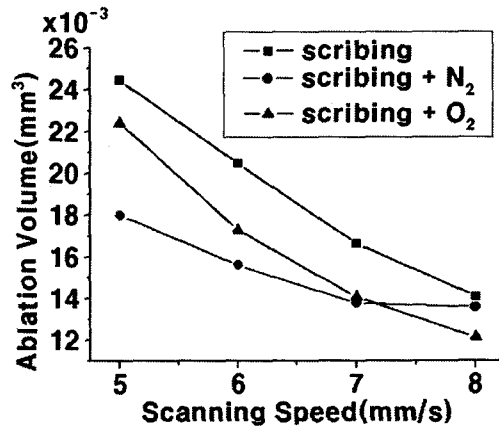
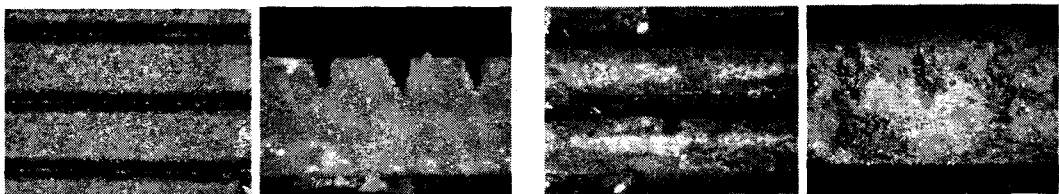


Fig. 6 Ablation volume of PZT after Nd:YAG laser Processing(scanning length : 10mm)

Fig. 6은 가공조건과 주사속도에 따른 PZT의 가공체적(ablation volume)으로서 속도에 따라 선형적으로 나타남을 볼 수 있다. 가스를 불어넣지 않은 경우의 가공체적이 가장 높았고, 그 다음으로 산소, 질소 순으로 나타난다.



(a) before

(b) after

Fig. 7 Surface and cross section profiles of PZT using electroless plating at pH=7.2

Fig. 7 (a)는 무전해 도금 전의 PZT 그루브 표면과 단면 형상이고, (b)는 pH=7.2에서 약 1시간 동안 무전해 동도금 공정을 통해 PZT 그루브 내에 동도금이 되어 전극이 형성돼 있는 형상이다. (b)의 표면사진을 보면 전극과 전극사이, 즉 PZT의 표면에 약간의 동 피막이 형성됨을 볼 수 있다. 이는 시드 형성을 위해 사용된 $PdCl_2 + SnCl_2$ 용액을 PZT의 그루브 내로 삽입한 후 PZT 표면을 닦았을 때, PZT 표면의 $PdCl_2 + SnCl_2$ 용액이 다 제거되지 않았기 때문일 것이다. 이와 같이 본 실험에 사용된 PZT 표면의 시드 제거법은 한계가 있었고, 이러한 물리적인 방법이 아닌 다른 시드형성법에 대한 연구가 더욱 필요할 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 PZT 액츄에이터 제작에 적용되는 다이싱, 본딩, 식각 및 증착의 MEMS 공정을 Nd:YAG 레이저를 이용한 어블레이션 공정으로 대체하기 위한 가능성을 제시하였고, 후속 공정인 무전해 도금을 통한 빗살형 전극 제작을 시도하였다. 강도가 약해서 취급 및 가공이 어려웠던 PZT의 그루브 가공을 여러 가공조건에 따른 Nd:YAG laser 실험을 통해, 그루브 형상을 관찰하고 잔유물을 최소화할 수 있는 방안을 모색함으로써 보다 신속하고 정밀하게 PZT 그루브 가공을 할 수 있다는 점을 보여주었다. 그루브 가공시 발생될 수 있는 잔유물 발생과 관련하여 질소와 산소를 가공시에 각각 분사하여 잔유물을 최소화할 수 있었다. 그러나 질소 분사 방식보다 산소 분사 방식이 산화반응에 의해 더 높은 재료 제거율을 나타냄을 알 수 있었다. 그러나 더 깊은 그루브 가공을 위해서는 깊이가 깊어지면서 발생하는 가공 잔유물 최소화 및 제거방법, PZT 액츄에이터 강도문제 해결방안에 대한 연구들이 더욱더 필요할 것이다. 또한 빗살형 전극 제작을 위한 무전해 동도금 공정의 적용에서 PZT 표면에 동피막이 형성되지 않고 그루브에만 시드를 형성하여 도금이 될 수 있도록 하기 위한 연구가 더욱더 요구 되어진다.

참고문헌

1. 박기훈, 윤광준, 박훈철, “곡면형 압전 복합재료 작동기 LIPCA 개발”, 한국항공우주학회지, Vol.30 No.5, 2002
2. M.C. Kim, et. al., “Dielectric and Piezoelectric Properties of $xPb(Al_{0.5}Nb_{0.5})O_3-(1-x)Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ Thin Films Prepared by PLD”, Journal of KIEEME Vol. 16, No.9, P.795, September 2003
3. 양성빈 외, “UV 레이저 빔 중첩 가공에 의한 마이크로 채널 제작”, 한국정밀공학회 2003년도 추계학술대회논문집
4. 김남일, 장시성, ‘무전해 도금’, 동화기술, 1996