한국산학기술학회논문지
Vol. 11, No. 2, pp. 443-448, 2010

힌지구조 진동절단장치에 관한 연구

강동배[1], 안중환[1], 손성민[2*]
[1]부산대학교 기계공학부, [2]울산과학대학 디지털 기계학부

Study on Vibrated Cutting Blade with Hinge Mechanism

Dong-Bae Kang[1], Joong-Hwan Ahn[1] and Seong-Min Son[2*]
[1]**School of Mechanical Engineering, Pusan National University**
[2]**School of Digital Mechanics, Ulsan College**

요 약 기능이 극대화된 초소형 전자기기를 제조하기 위해 사용되는 적층형 소자들 중, 적층 세라믹 콘덴서(MLCC: Multi Layer Ceramic Capacitor)는 휴대전화, 노트북 등에 전자회로의 평활, 안정화, 노이즈 제거, 커플링 등 다양한 용도로 사용되고 있다. 적층형 세라믹 콘덴서는 생산과정에서 압축소결된 미세 다층구조의 적층형 소자 바(bar)를 하나 하나의 칩으로 절단하여야 한다. 현재 적용되고 있는 cutting, dicing 등의 방법을 대신하여 수율의 향상을 도모하기 위해 진동절삭법을 적용하여 그 특성을 조사하였다. 유연 힌지구조를 이용한 진동 절단 구조를 설계하고 해석하여 적층형 세라믹 콘덴서의 절단에 알맞은 진동절단기구를 제안한다. 또한, 설계결과를 바탕으로 제작된 진동절단 기구의 절단가공 특성을 조사하여 기존 절단법과의 성능비교를 통해 힌지 구조를 이용한 진동 절단의 타당성을 검증하였다.

Abstract Rapid advance in information technology requires high performance devices with compact size. Integrated multi-layer electronic element with different functions enables those compact devices to possess various performances and powerful capabilities. In mass production, the multi-layer electronic element is manufactured as a bulk type with a large number of parts for productivity. However, this may cause the electronic part to be damaged in the cutting process of the bulk elements to separate into each part. Therefore the cutting performance of multi-layer element bulk is playing an important role in the view of production efficiency. This study focuses on the cutting characteristics of multi-layer electronic elements. In order to increase the efficiency, the vibration cutting method was applied to the blade cutting machine. Flexure hinge structure, which is an physical amplifier of increasing displacement, was attached to the vibration cutting device for machining efficiency. The behaviors of flexure hinge were modeled with Lagrange equation and simulated with finite element method (FEM). Performance of hinge structure was verified by experimental modal analysis (EMA) for hinge structure to be tuned to the specific mode of vibrations. Cutting experiments of multi-layer elements were conducted with the proposed vibrating cutting module, and the characteristics was analyzed.

Key Words : Vibration cutting, Hinge mechanism, Multi-layer material

1. 서론

기능의 극대화 실현은 21세기 첨단 전자산업의 가장 중요한 목표이다. 첨단 산업의 급속한 발전으로 세라믹스가 가지는 전기적인 특성이 각광 받으면서 전자세라믹스는 미래 산업을 담당할 중요한 기초 재료로 인식되고 있다. 전자세라믹스는 IT, NT, BT 등 미래 전략산업을 이끌어갈 성장엔진의 주역이 될 신소재로 전자세라믹스를 이용한 부품의 소형화 없이 첨단전자기기의 소형화는 불가능하다. 그러나 대부분의 소재가 그렇듯이 전자세라믹스도 크기가 작아질수록 능력, 즉 용량은 줄어들 수 밖에 없으며, 따라서 소형화에도 한계가 있다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 박막기술과 적층기술을 이용하여 실장밀도를 높이는 '적층형 소자'라는 새로운 기술이 제시되

*교신저자 : 손성민(semson@mail.uc.ac.kr)
접수일 09년 11월 30일 수정일 10년 02월 11일 게재확정일 10년 02월 24일

었으며, 이를 통해 집적화, 소형화를 실현하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 실용화 되고 있다 [1,2]. 적층형 소자 중, 적층 세라믹 콘덴서(MLCC: Multi Layer Ceramic Capacitor)는 휴대전화, 노트북 등에 전자회로의 평활, 안정화, 노이즈 제거, 커플링 등 다양한 용도로 사용되어 개별적으로 휴대전화에서는 200~300개가, LCD TV에는 약 700개 정도가 사용되어 제품의 소형화에 크게 기여하고 있다. 한편, 적층 세라믹 콘덴서는 생산과정에서 압축소결된 미세 다층구조의 적층형 소자 바(bar)를 하나하나의 칩으로 절단하여야 하는데 이때 적층된 각 층의 소성변형이 최소화 되어야 수율의 저하를 방지할 수 있다. 현재 절단(cutting), 다이싱(dicing) 등이 적용되고 있으나 수율의 향상을 위해서는 새로운 절단 메커니즘에 관한 연구가 요구된다.

본 연구에서는 적층형 세라믹 콘덴서 바의 절단에 진동절삭법을 적용하기 위하여 유연 힌지구조를 이용한 진동 절단 구조를 설계하고 그에 따른 진동 특성을 알아보고자 한다. 우선, 유연 힌지 이론를 토대로 진동구조를 설계하고 해석하여 적층형 세라믹 콘덴서의 절단에 알맞은 진동절단기구를 제안하다. 그리고 설계결과를 바탕으로 제작된 진동절단 기구의 절단가공 특성을 조사하여 기존 절단법과의 성능비교를 통해 힌지 구조로 이루어진 진동 절단장치의 타당성을 검증해보고자 한다.

2. 진동 절단장치 설계 및 해석

2.1 절단 특성 비교

적층형 세라믹 콘덴서는 여러 층의 시트(seat)가 교대로 중첩되어 압축 소결된 형태를 가지고 있다. 대량생산을 위해 바(bar)형태로 생산되므로 다이싱과 블레이드 절단 등의 방법으로 절단되고 있다. 다이싱의 경우에는 전단 정도가 높아 품질이 우수하지만, 저생산성과 고비용의 단점을 가지고 있으며 블레이드 절단의 경우에는 생산성이 높지만 가공 후 소성변형, 디래미네이션 등의 불량 발생이 상대적으로 많다. 적층 세라믹 콘덴서 바의 절단에 적용하고자 하는 진동을 이용한 가공기술은 1950년대에 일본에서 제안되어 절삭품질을 높이기 위해 여러 가공분야에 사용되어왔다. 진동절삭기술은 가공용 공구에 주기적인 진동을 주어 제거가공 능률을 향상시키는 방법으로 짧은 시간에 적은 가공량이 수십번 반복되므로 정밀한 가공과 함께 실용적인 가공속도를 낼 수 있는 가공법이다. 이 가공법을 절단에 적용한 연구에서 Lucas 등은 다층복합 물질 절단에서 진동절단이 소재와 공구사이에 마찰계수를 감소시킨다고 보고하였다 [3]. Cardoni 등은 뼈의 절단에 진동절단을 사용하여 chip 제거, 반력의 감소로 정밀한 절단이 가능하다고 보고하였다 [4].

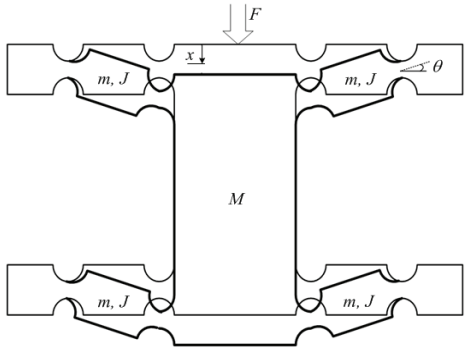
2.2 힌지 구조의 설계

일반적으로 유연 힌지 구조(Flexure Hinge Structure)는 일체 구조로 부품의 결합오차와 부품 간의 마멸이 없고, 변형이 매끄럽고 연속적인 움직임을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 온도 변화에 따른 영향을 덜 받도록 하는 대칭 구조로 만들어 진다. 변위는 유연 힌지구조의 탄성 변형에 의한 것이기 때문에 반복정밀도가 높고, 가공 오차에 대해 예상이 가능하기 때문에 보상하기 쉽다. 취성 재료를 사용할 때 피로나 큰 하중에 의한 파괴 메커니즘은 쉽게 발견할 수 있어서 안전이 중요한 시스템에 적용하면 유리하다. 반면에 유연 힌지구조의 단점은 최소변위의 분해능이 유연 힌지구조의 크기와 강성에 따라 제한된다. 작용하는 응력은 선형 탄성범위 내에 있어야 하므로 큰 변위를 필요로 하는 응용에는 불리하다. 또한 직각방향의 강성은 다른 베어링 시스템에 비해 상대적으로 낮고 주 운동 방향의 강성은 상대적으로 높다.

유연 힌지구조에는 다양한 종류가 사용되고 있는데 그 중 노치타입(notch type)이 가장 보편적이다. 노치타입의 유연 힌지구조는 Paros와 Weisbord에 의해 처음 개발된 이후 많은 연구자들에 의해 연구되었으며 고정밀의 작은 변위를 요구하는 장치에 이용되고 있다 [5].

본 연구에 사용된 힌지구조는 노치타입의 힌지구조를 적용한 1자유도 선형 운동 가이드이며 최대 구동 범위는 20 ㎛이상이 되도록 하고 1차 공진은 500 ㎐이상(액츄에이터 부착 시)이 되도록 하였다.

설계된 유연 힌지구조는 그림 1과 같으며 Lagrange 방정식을 이용하여 힌지구조의 운동방정식을 구하였다. 유연 힌지구조의 운동에너지(T)를 유도하고 외팔보의 회전관성모멘트(J)와 각변위(θ)를 대입하여 정리하면 식 (1)



[그림 1] 유연 힌지 구조의 개요

과 같다.

$$T = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + 2m (\frac{\dot{x}}{2})^2 + 2J\dot{\theta}^2$$
$$= \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{2}{3} m \dot{x}^2$$
$$= (\frac{1}{2} M + \frac{7}{6} m) \dot{x}^2 \quad (1)$$

$$[J = \frac{1}{3} ml^2, \theta = \frac{x}{l}]$$

유연 힌지구조의 위치에너지(V)를 유도하고 회전각과 변위에 관한 식을 대입하여 정리하면 식 (2)와 같다.

$$V = 4K_\theta \theta^2 = 4K_\theta (\frac{x}{l})^2 = \frac{4K_\theta}{l^2} x^2 \quad (2)$$

Lagrange 방정식을 이용하면 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}}) - \frac{\partial (T - V)}{\partial x} = F \quad (3)$$

$$(M + \frac{7}{3} m)\ddot{x} + \frac{8K_\theta}{l^2} x = F \quad (4)$$

Lagrange 방정식에 의해 유도된 운동방정식 (4)에서 구한 등가질량(M_{eff})과 등가탄성계수(K_{eff})를 이용하면 고유진동수는 식 (5)와 같다 [6].

$$w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{eff}}{M_{eff}}} \quad (5)$$

$$[M_{eff} = (M + \frac{7}{3} m), K_{eff} = \frac{8K_\theta}{l^2}]$$

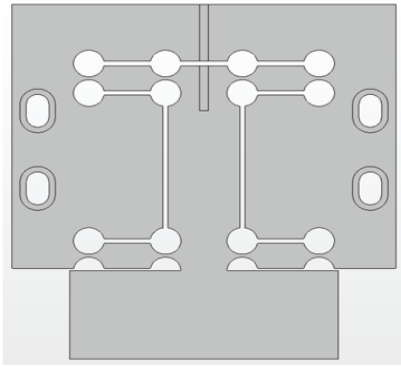
이 때, 최대 운동변위(x_{max})는 다음과 같다.

$$x_{\max} = l\theta_{\max} \quad (6)$$

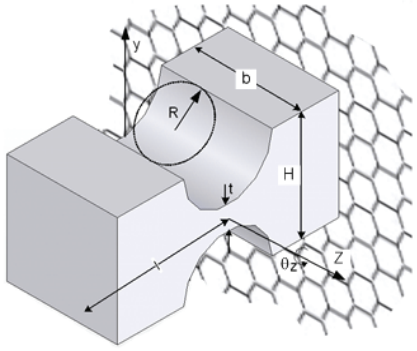
운동방정식에 사용된 파라미터와 변수들은 그림 2와 같이 정리된다. 제작되는 유연 힌지구조의 재질은 Al 7075, 힌지의 폭 b는 20 [㎜], 길이 l은 30 [㎜]로 하였다. 반경 R은 3~8 [㎜], 두께 t는 0.8~1.68 [㎜] 범위에서 여러 값을 대입하여 계산하였다. 기하학적으로 반경 R의 범위는 t<R<5t 에 있어야 하기 때문에 범위 내의 R만을 계산하였다. 계산한 결과를 표 1과 같이 정리하였으며 b = 20 [㎜], l = 30 [㎜], t = 1.3 [㎜], R = 6 [㎜]로 선정하였다. 이를 통해 설계·제작된 유연 힌지구조는 그림 3과 같다.

[표 1] 설계변수 계산 결과

b(㎜)	l(㎜)	t(㎜)	R(㎜)	$x_{\max}$	K_{eff}	ω
20	30			:		
		1.3	3	0.0386	1.0073E5	350
			4	0.0449	8.7232E5	326
			5	0.0534	7.8023E5	308
			6	0.0598	7.1225E5	294
				:		



[그림 3] 유연 힌지 구조



$$\theta_z = \frac{9\pi R^{1/2} M}{2Ebt^{5/2}} \approx \frac{24KRM}{Ebt^3} \quad \text{for } t < R < 5t$$

$$k_\theta = \frac{2Ebt^{5/2}}{9\pi R^{1/2}} \qquad K = 0.565\frac{t}{R} + 0.166$$

$$M_{\max} = \frac{bt^2}{6K_t}\sigma_{\max} \qquad \sigma_{\max} = (0.1 \sim 0.3)\sigma_y$$

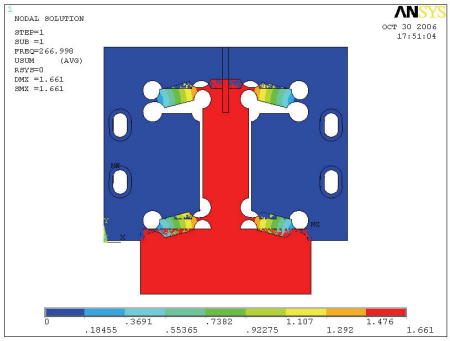
$$K_t = \frac{2.7t + 5.4R}{8R + t} + 0.325$$

$$\rightarrow \quad \theta_{\max} = \frac{4K}{K_t}\frac{R}{Et}\sigma_{\max}$$

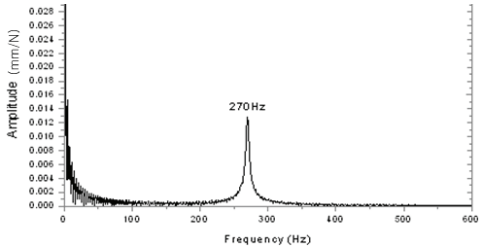
[그림 2] 유연 힌지 구조의 설계변수

[표 2] 유연 힌지의 공진 주파수

Set	Freq'(㎐)	Load step	Sub step	Cumulative
1	267.00	1	1	1
2	818.02	1	2	2
3	1241.1	1	3	3
4	1508.8	1	4	4
5	2382.8	1	5	5



(a) 변위



b) 공진주파수

[그림 4] 유한요소해석 결과

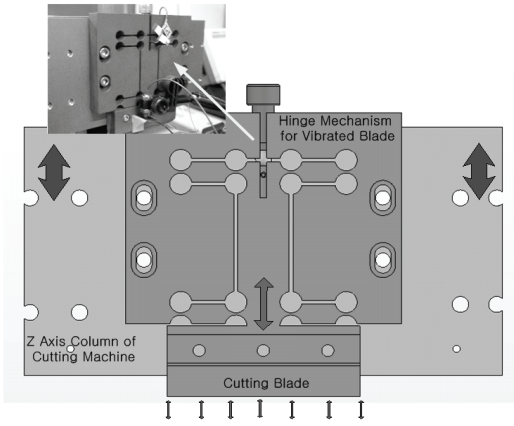
2.3 힌지 구조의 해석

설계된 힌지구조의 유한요소해석을 수행하였다. 모달 해석과 하모닉 해석을 통해 고유진동수와 주파수별 응답을 구하였다. 설계된 유연 힌지구조는 설계에서 의도된 가공방향으로 진동하는 1차 고유진동수가 약 267 ㎐로 계산되었다. 표 2와 그림 4는 유한요소해석 결과를 나타낸다. 그러나 진동자를 삽입하여 절단기계에 부착될 때에는 예압의 발생이 등가 탄성계수의 증가를 가져와 진동절단장치의 고유진동수는 500 Hz로 변화하게 된다.

3. 실험 결과

3.1 실험 장치

그림 5는 진동절단장치를 나타낸다. 진폭이 발생하는



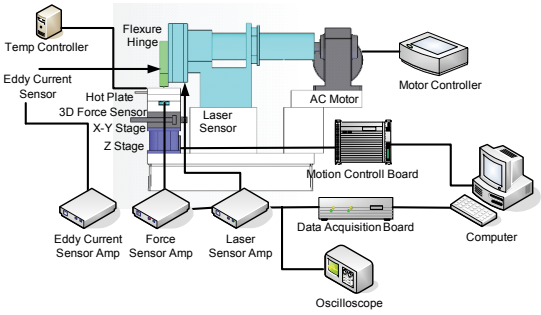
[그림 5] 진동 절단 기구

부분에 적층형 세라믹 콘덴서 바를 절단하는 블레이드가 부착되고 진동절단의 효율이 극대화되는 공진주파수에서 구동된다.

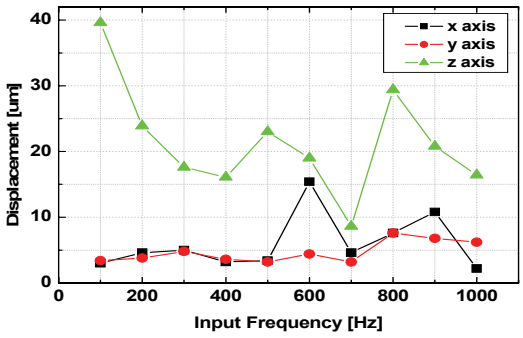
진동절단장치의 구동은 함수 발생기에서 정현파를 발생시키고 이를 10배 증폭시켜 압전진동자에 전달된다. 이 진동자는 입력되는 신호에 따라 가공물에 대해 수직방향으로 상하진동하며 절단작업을 수행한다. 이때의 공구경로는 3개의 와전류 변위센서에 의해 감시되며 절단력은 공구동력계에 의해 측정된다. 그림 6은 전체적인 진동절단 실험장치의 구성도를 나타낸다.

3.2 진동절단기구의 공진주파수

설계된 유연 힌지구조에 저전압(100V 미만)에서 구동되는 압전액츄에이터를 부착한 진동절단기구가 최대진폭을 발생시키는 공진주파수를 조사하였다. 압전액츄에이터에 입력되는 정현파를 0~1 [㎑]까지 100 [㎐]간격으로 입력하되 최대 허용전압의 1/5 정도만 입력하였으며 X, Y, Z 세 방향의 진폭을 와전류 변위센서로 측정하였다. 그림 7은 입력주파수 변화에 따른 진폭측정 결과를 나타낸다. 최대 진폭을 나타내는 주파수는 800 [㎐]이지만 이때 절단방향과 수직인 방향(X, Y)의 진폭이 크게 나타난다.



[그림 6] 실험장치의 구성



[그림 7] 진동 절단 기구의 진폭

Y 방향의 미소 진동은 적층형 세라믹 콘덴서 바의 효율적인 절단에 도움이 될 수 있으나 X 방향의 진동은 불량을 야기하여 수율을 크게 떨어뜨리게 된다. 따라서 500 [Hz]부근에서 보이는 결과와 같이 절단방향 Z축의 진폭은 크고 이와 수직하는 X와 Y 방향의 진폭은 최소가 되는 주파수로 진동절단기구를 가진해야 한다.

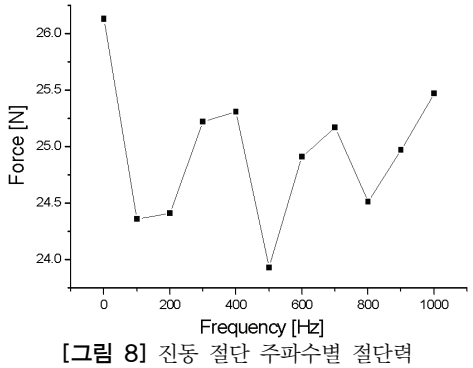
3.3 절단력 감소

절단력의 감소는 가공속도의 증가를 유도할 수 있으며 가공물에 부가되는 부하의 감소로 인해 가공물의 품질이 향상되므로 진동절단기구에서 절단력의 감소는 매우 중요하다. 그림 8은 진동절단기구에 입력되는 주파수별 절단력을 측정한 결과이다. 압전 액츄에이터에는 0~100 [V]의 사인파가 입력된다. 입력 주파수가 0 인 상태는 진동부가가 없는 것으로 일반적인 절단과 같으며 약 26 [N]으로 측정되었다.

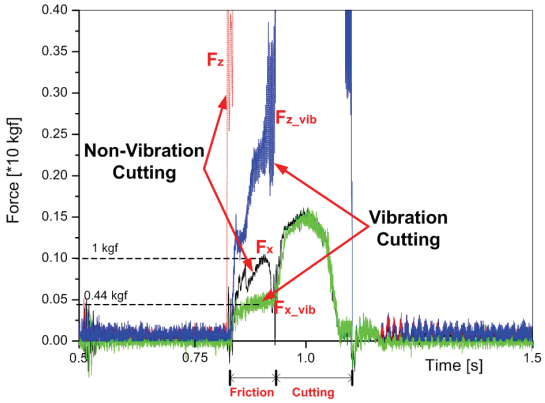
절단력이 최소인 주파수는 진동절단기구의 공진주파수인 500 [Hz]에서 약 24 [N]으로 측정되었다.

3.4 마찰력 감소

절단력은 공작물의 전단력과 마찰력으로 구성되는데 진동절삭의 경우 마찰력을 감소시켜 절단력을 감소시키



[그림 8] 진동 절단 주파수별 절단력



[그림 9] 일반 절단과 진동 절단의 마찰력 비교

는 효과가 있다. 마찰력의 감소는 절단 되는 적층형 소자의 측면 변형을 감소시키므로 수율의 향상을 기대할 수도 있다. 진동절단기구와 진동을 부가하지 않는 일반적인 절단기구의 마찰력을 측정하여 비교하였다. 그림 9는 MLCC 1회 절단 시의 가공력을 측정한 것으로 진동절단기구에 의한 절단이 진동이 없는 기존의 절단작업에 비해 마찰력이 약 50 %에 그치는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 유연 힌지구조를 이용한 진동 절단장치를 설계·해석하여 제작하고, 절단 실험을 통해 절단 특성 및 성능을 검증해 보았다. 절단 실험 결과 전체적으로 기존의 진동이 없는 블레이드 절단에 비해 진동 절단시 절단력이 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 공진주파수(500 Hz)에서 절단력이 크게 감소하는 것을 확인하였다. 또한 진동 절단시 마찰력이 일정하며 증가하지 않음으로써 블레이드에 진동을 부가하지 않는 일반적인 절단에 비해 마찰력이 감소하였다. 이를 통해 유연 힌지구조 진동절단기구를 적용할 경우 기존의 절단에 비해 절단력을 줄일 수 있어 절단 시에 큰 절단력에 의해 발생하는 불량을 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 다만, 블레이드의 크기가 생산성과 직결되어 있어 이를 고정하기 위한 기구가 진동을 부가하는 액츄에이터 용량에 비해 커서 절단기구의 고유진동수가 높지 않았다.

이로 인하여 진동절단에 의한 긍정적 효과가 충분하게 발휘되지 않아 절단력의 감소폭이 크지 않았다. 향후, 진동절단기구의 질량을 줄이고 탄성계수가 높은 재료로 보다 높은 고유진동수의 진동절단기구를 제작할 경우 공구수명의 확대와 더불어 큰 폭의 생산성 향상을 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

[1] 강남기, 임욱, 유찬세, “고주파 적층형 칩 인덕터 개발”, 한국산학기술학회 춘계학술대회, 2001, 148-150.
[2] 안성준, 안승준, "차세대 고집적 MOS 소자를 위한 ALD ZrO2박막의 특성 연구," 한국산학기술학회논문지, v.9, no.1, 47-52, 2008.
[3] M. Lucas, A. MacBeath, "A finite element model for ultrasonic cutting," Ultrasonics, online 6, 2006.
[4] A. Cardoni, A. MacBeath, "Methods for reducing cutting temperature in ultrasonic cutting of bone," Ultrasonics, online 30, 2006.
[5] Paros, J.M., Weisbord, L., “How to Design Flexure Hinges”, Machine Design, 1965, 151-156.
[6] 권대갑, “Flexure Motion Guide 설계,” 제5차 산학협동단기강좌 (Design of Nano Actuation and Measure -ment System)

손 성 민(Seong-Min Son) **[정회원]**

- 1999년 2월 : 부산대학교 지능기계공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 부산대학교 지능기계공학과 (공학박사)
- 2004년 11월 ~ 2007년 2월 : NUS 전임연구원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 울산과학대학 디지털기계학부 조교수

<관심분야>
특수가공, 정밀가공, 생산공학

강 동 배(Dong-Bae Kang) **[정회원]**

- 2003년 2월 : 부산대학교 지능기계공학과 (공학석사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 지능기계공학과

<관심분야>
정밀가공, 제어/자동화

안 중 환(Jung-Hwan Ahn) **[정회원]**

- 1979년 2월 : 한국과학기술원 생산기계공학 (공학석사)
- 1987년 2월 : 동경대학 정밀기계공학 (공학박사)
- 1980년 03월 ~ 현재 : 부산대학교 기계공학부 교수

<관심분야>
미세공정 감시/진단, 생산공학, 공정자동화