

論文

미세 방전가공 기계 구조를 위한 복합재료-포움 샌드위치 구조 설계에 관한
파라메트릭 연구

김대일*, 장승환**+

**Parametric Study on Design of Composite-Foam Sandwich Structures for Micro
EDM Machine tool structures**

Dae-Il Kim*, Seung-Hwan Chang**+

ABSTRACT

In this paper, parametric study was carried out to design sandwich structures for EDM machines controlling stacking sequence, stacking thickness of composites and rib configuration. Sandwich structures which are dealt with in this paper are composed of fibre reinforced composite for skin material and foam or resin concrete for core materials. The sandwich column has cruciform rib to enhance bending stiffness of the structure and the bed has several vertical ribs to resist the normal forces and vibration. The design parameters such as rib thickness and stacking sequence were controlled to enhance the system robustness. Finite element analysis was also carried out to verify the variation of static and dynamic stiffness of the structures according to the variation of the parameters. Vibration tests were performed to verify the natural frequencies and damping ratios of the manufactured composite structures. The appropriate shape and configuration conditions for micro-EDM machine structures are proposed.

초 록

본 논문에서는 미세 방전가공(Electrical Discharge Machining; EDM) 기계를 위한 샌드위치 구조를 설계하기 위해 복합재료의 적층 순서, 두께, 그리고 리브의 형상 등을 고려한 파라메트릭 연구를 수행하였다. 샌드위치 구조는 면재인 섬유강화 복합재료와 심재인 레진 콘크리트 및 고분자 포움으로 이루어졌다. 컬럼은 정적 굽힘강성과 비굽힘강성을 높이기 위해 십자 리브를 가진 형상으로 설계하였으며, 적층 순서와 두께를 조절하였다. 베드의 경우 양방향의 강성을 동시에 향상시키기 위해 적층 순서와 리브 형상을 조절하였다. 최적의 고강성을 얻기 위하여 리브의 두께와 면재의 두께 등 설계 파라메터의 최적치를 제안하였다. 각 설계 파라메터의 변화에 따른 구조의 정적, 동적 강성의 변화를 확인하기 위해 유한요소해석을 수행하였으며, 진동 실험을 통하여 각 요소의 고유진동수와 감쇠비를 측정하여 비교하였다. 이러한 결과로부터 고정밀 미세 방전가공 기계 구조를 위한 최적의 형상조건을 제안하였다.

Key Words : 샌드위치 구조(Sandwich structure), 굽힘강성(Bending stiffness), 비굽힘강성(Specific bending stiffness), PVC 포움(PVC foam), 섬유강화 복합재료(Fiber reinforced composite material), 파라메트릭 연구(Parametric study)

* 중앙대학교 기계공학부 대학원

**+ 중앙대학교 기계공학부, 교신저자(E-mail: phigs4@cau.ac.kr)

1. 서론

공작기계 요소들과 전자기기들의 정밀도는 요구되는 제품의 성능이 향상됨에 따라 점점 높아져 가고 있으며, 생산기술이 발달함에 따라 기계들의 구성요소와 전자기기들의 부품들은 제품들의 다양한 기능과 정확한 작동을 위해 점점 작아지고 있다. 기전기계시스템(MEMS)과 같이 미세 초정밀 기계요소는 구동제어 시 마이크로 미만의 정확도가 필요하고, 이 기기들의 일부 부품들은 요구되는 기능들을 구현하기 위해서 보다 복잡한 형상과 작은 크기가 요구된다. 밀링머신 같은 전통적인 공작기계는 가공 과정에서 공작기계와 가공대상이 직접 접촉하기 때문에 발생하는 진동과 열로 인하여 최종 가공품의 치수를 변화시킬 수 있기 때문에 높은 정밀도를 요구하는 미세 가공에는 한계가 있다. 반면 방전가공, 전해가공(Electro-Chemical Machining; ECM) 기계와 같은 비접촉 방식의 가공기는 마이크로 미만의 정밀도를 가진 복잡하고 정밀한 제품을 가공할 수 있는 장점을 가지고 있다. 비접촉 가공과 방전가공 및 전해가공 기계의 개발에 대한 연구들은 다양한 기계 및 전자 부품들의 정밀도와 가공 수준을 발전시켜 왔다. Masaki 등은 $5\mu\text{m}$ 의 지름을 가진 구멍과 축 가공에 있어서 정밀도가 $0.1\mu\text{m}$ 수준인 미세방전가공을 성공하였으며, Kim 등은 $300\mu\text{m}$ 이하의 3차원 미소형상물의 가공을 목적으로 미세 방전가공을 이용한 가공시스템을 개발하였다. Lee 등은 새로운 경로 알고리즘을 이용하여 가공시간을 단축시켰고, 3차원 구조물에 대한 가공 정밀도를 향상시켰다. 또한 Kim 등은 수 μm 크기의 미세 구멍, 슬롯, 포켓 등의 다양한 형상에 대한 방전가공 실험을 수행하였으며, Chae 등은 와이어 방전가공(Wire Electrical Discharge Machining; WEDM)에서 와이어의 진동특성을 측정하여 가공 과정에서 와이어의 인장과 고유진동수 사이의 관계를 규명하였다[1-5].

공작기계 구조의 동강성을 높이기 위해 높은 비굽힘강성과 감쇠특성을 가진 섬유강화 복합재료가 고성능 공작기계와 로봇 구조의 설계에 성공적으로 적용되고 있다. Chang 등과 Lee 등은 복합재료와 강철을 이용한 초정밀 연삭기의 컬럼과 헤드스톡을 설계하고 제작하였으며, Lee 등은 기존의 텅스텐 보링바를 복합재료를 이용한 하이브리드 보링바로 대체하여 동강성(Dynamic stiffness)을 30% 향상시켰다. 그리고 Jeong 등은 얇은 복합재료 보를 이용하여 적층각도에 따른 복합재료의 동특성을 해석하였으며, 최진호는 방전가공 기계용 외팔보를 복합재료로 설계하고 제작하여 금속 외팔보와 비교하였다. 높은 강성을 가진 면재와 가벼운 심재로 구성된 샌드위치 구조는 높은 비강성(E/ρ)과 비굽힘강성(El/ρ) 및 감쇠 특성을 가진다는 것이 입증되었다[6-12]. 그러나 샌드위치 구조를 공작기계 구조에 성공적으로 적용시키기 위해서는 면재의 두께, 심재의 밀도, 리브의 구성과 같은 여러 가지 파라미터의 최적화가 고려되어야 한다[13]. 김대일 등은 섬유강

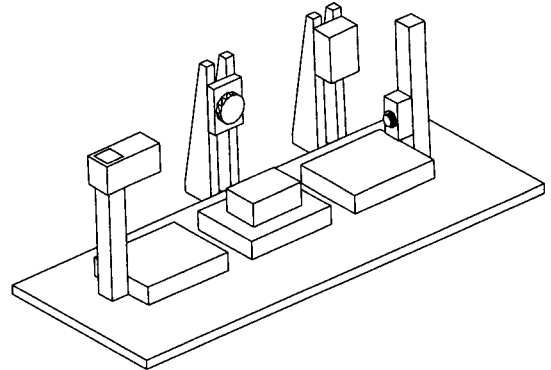


Fig. 1 Concept of a micro-factory system.

화 복합재료를 이용한 샌드위치 구조를 공작기계의 평판과 보에 적용하기 위한 파라메트릭 연구를 수행하였다[14].

본 논문에서는 섬유강화 복합재료, 고분자 포움, 레진 콘크리트로 구성된 샌드위치 구조를 이용하여 미세 방전가공 기계 구조를 설계 및 제작하는 연구를 수행하였다. 각 파라미터의 민감도와 구조물의 적절한 형상과 크기를 결정하기 위하여 유한요소해석을 수행하였고 진동 실험을 통해 제작된 구조의 동적 특성을 검증하였다.

2. 마이크로 머신 구조

여러 대의 정밀 마이크로 공작기계로 구성된 마이크로 팩토리는 MEMS에 필요한 정밀요소를 위한 초정밀 부품들을 제작하기 위해 설계되었다(Fig. 1). 스테이지 등의 이송 기구를 포함한 시스템의 모든 구성요소들은 높은 위치 정밀도와 가공 정밀도가 요구된다.

마이크로 팩토리를 구성하는 주요 공작기계들은 미세 방전가공 기계와 미세 전해가공 기계로 구성되며(Fig. 1), 이를 통해 가공 중 공구와 공작물의 비접촉 상태를 유지하여 높은 가공 정밀도를 얻을 수 있다. 그러나 방전가공 중 방전용 펄스 단속주기 및 기타 외부 진동원에 의한 가진 요소에 적절히 대응하기 위해 섬유강화 복합재료와 고분자 포움 등으로 구성된 샌드위치 구조를 제안하였다. 미세 방전가공의 주요 구성 요소들은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 베드와 컬럼이다.

샌드위치 구조는 면재인 섬유강화 복합재료와 심재인 고분자 포움 및 레진 콘크리트로 구성되었으며, 굽힘강성을 강화시키기 위해 베드와 컬럼에 각각 수직 리브 및 십자 형태의 리브를 삽입하였다.

샌드위치 구조에 사용된 재료들과 전통적인 금속 재료들의 물성을 비교하여 Table 1에 정리하였다. 설계에 사용된 프리프레그 한 장의 두께는 0.125 mm 이다.

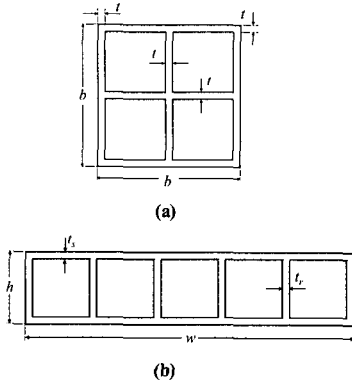


Fig. 2 Proposed sandwich structures for micro-EDM machine; (a) column, (b) bed.

Table 1 Major material properties for sandwich structures

Materials	Density [kg/m ³]	Young's modulus [GPa]
USN 125 (Carbon/epoxy prepreg, UD)	1550	E ₁ : 130 E ₂ : 10 G ₁₂ : 5.06 ν ₁₂ : 0.28
Resin Concrete*	2207	15
PVC foam (HT90)	90	0.062
Cast iron	7480	138
Aluminium	2800	70

*Note - the resin weight fraction of the resin concrete above is 7.5%.

3. 파라메트릭 연구

3.1 십자 리브를 가진 샌드위치 컬럼

각 재료의 조합에 따른 컬럼의 정·동적 특성을 파악하기 위해 섬유강화 복합재료의 적층순서와 두께 및 심재의 종류에 따른 컬럼의 굽힘강성(EI)과 비굽힘강성(EI/ρ)을 계산하였다. 고분자 포움과 레진 콘크리트가 심재인 경우를 고려하였으며, 십자 리브만 삽입된 중공 구조에 대해서도 다른 경우와 비교하였다. 본 논문의 선행 연구를 통해 섬유강화 복합재료의 여러 가지 적층 순서에 대한 굽힘강성과 비굽힘강성을 비교하였다. 90° 방향의 적층각도는 컬럼의 길이 방향의 강성을 저하시키기 때문에 적층각도 후보에서 제외하였다[14]. 비교 결과[±5]_{nr}와 [0]_{nr} 및 [±5/0]_{ns}의 적층각도에 대한 컬럼의 굽힘강성과 비굽힘강성의 차이는 각각 1.02%, 0.62%로 거의 동일함을 확인하였다. 따라서 제작 과정(적층의 용이성 및 성형 후 외부 금형에서의 탈형시 Splitting에 의한 성형물 손상 방지 등)에 있어 편리한 [±5]_{nr}를 선택하였다. 섬유강화 복합재료의 두께(t)에 따른 샌드위치 컬럼의 등가 굽힘강성(EI)과 등가 비굽힘강성(EI/

ρ)은 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$EI(t) = E_s I_s(t) + E_c I_c(t) \tag{1}$$

$$E_s I_s(t) = \frac{E_s}{12} [b^4 - (b-2t)^4 + (b-2t)(t)^3 + (t)(b-2t)^3 - t^4] \tag{2}$$

$$E_c I_c(t) = \frac{E_c}{12} [(b-2t)^4 - (b-2t)(t)^3 - (t)(b-2t)^3 + t^4] \tag{3}$$

$$\frac{EI(t)}{\rho(t)} \tag{4}$$

$$\rho = \frac{m_s + m_c}{V} \tag{5}$$

$$m_s = [b^2 - (b-2t)^2 + (2t)(b-2t) - (t)^2] \times l \times \rho_s \tag{6}$$

$$m_c = [(b-2t)^2 - (b-2t)(2t) + (t)^2] \times l \times \rho_c \tag{7}$$

아래첨자 s와c는 각각 면재와 심재를 의미하며, 식 (1)~(7)의 변수들이 의미하는 바는 아래와 같다.

m : Mass [kg]

ρ : Equivalent mass density [kg/m³]

V : Total volume [m³]

t : Composite thickness [mm]

b : Column width [mm]

l : Column length [mm]

Fig. 3과 Fig. 4는 면재의 두께 및 심재의 종류에 따른 샌드위치 컬럼의 굽힘강성과 비굽힘강성을 전통적인 금속 재료와 비교하여 나타낸 것이다. 계산에 사용된 컬럼의 폭 (b)은 20 mm 이다.

Fig. 3에서 나타난 바와 같이 높은 탄성계수를 가진 주철 컬럼과 샌드위치 컬럼의 굽힘강성은 큰 차이를 보이지 않고 있다. 그리고 비교적 탄성계수가 낮은 알루미늄 컬럼에 비해 샌드위치 컬럼은 2배 이상의 높은 굽힘강성을 가짐을 알 수 있다. 섬유강화 복합재료만으로 구성된 중공구조 컬럼의 비굽힘강성은 가장 낮은 밀도에 기인하여 가장 높은 것을 확인하였다 (Fig. 4). 그러나 중공구조의 컬럼은 표면에 하중이 작용할 경우 표면 수직방향(Out-of-plane)으로의 과도한 변형이 발생할 수 있다[14]. 컬럼의 경우 헤드스톡과의 체결에 의한 수직압축력을 효과적으로 지지하고 구조의 굽힘강성을 향상시키기 위해 컬럼 내부에 십자 리브를 삽입하였다.

Fig. 4에서 보이는 바와 같이 섬유강화 복합재료-고분자 포움 샌드위치 컬럼의 비굽힘강성은 면재인 복합재료의 두께가 1 mm 전후인 경우에 최고치를 나타내었으며, 이 값은 금속재료와 비교하면 3배 이상 높은 값이다. 복합재료의 두께가 1 mm보다 더 두꺼워지면 컬럼의 질량이 증가하기 때문에 비굽힘강성은

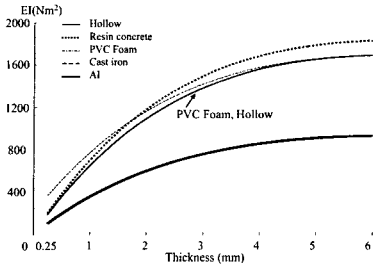


Fig. 3 Bending stiffness of columns with respect to the composite thickness and various core materials.

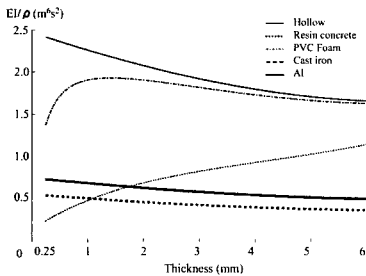


Fig. 4 Specific bending stiffness of columns with respect to the composite thickness and various core materials.

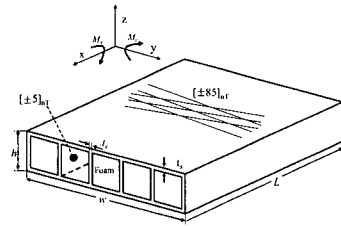


Fig. 5 Sandwich bed structure with several ribs.

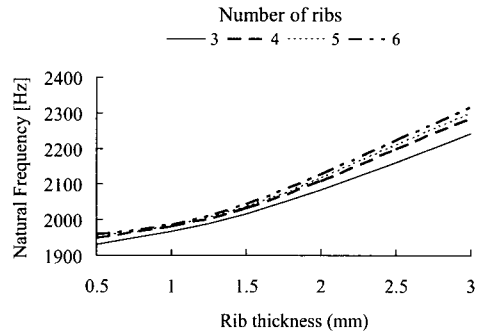


Fig. 6 The first natural frequency of the sandwich bed with respect to the rib thickness and number of ribs.

서서히 감소하게 된다(Fig. 4). 따라서 컬럼의 폭이 20 mm로 고정된 경우 1 mm를 초과하는 면재의 두께는 비굽힘강성의 개선에 오히려 부정적인 영향을 끼침을 확인할 수 있었다. 섬유강화 복합재료-레진 콘크리트 샌드위치 컬럼의 비굽힘강성은 면재인 복합재료의 두께가 증가함에 따라 서서히 증가하지만 면재 두께의 대폭적인 증가에도 불구하고 비강성이 낮아 적합하지 않음을 확인하였다. 미세 방전가공 기체는 상대적으로 작은 정적 하중을 지지하는 반면 초정밀 가공을 위해서는 외부 진동에 강한 구조를 요구하기 때문에 비굽힘강성이 높은 섬유강화 복합재료-고분자 폼 샌드위치 컬럼을 선택하였다.

3.2 수직 리브를 가진 샌드위치 베드

베드는 일반적으로 X-Y 스테이지, 공작물 그리고 절연 용기 등을 지지하는 작업 테이블로 사용되기 때문에 표면 수직방향으로의 정적 하중을 지지하며, 가공물의 정확한 이송을 위해 높은 동적강성이 요구된다. 높은 비굽힘강성과 적절한 압축강성을 가진 베드 구조를 설계하기 위해 Fig. 2(b)에서 보이는 바와 같이 내부에 수직 리브를 가진 두꺼운 샌드위치 평판을 제안하였다. 평판은 보와는 달리 동시에 두 직교 방향에 대하여 물성을 강화시켜야 한다. 따라서 본 연구에서는 y-방향 굽힘모멘트(M_y)와 표면의 수직압축력을 지지하기 위하여 내부에 수직 리브를 삽입하고, 면재는 x-방향의 굽힘모멘트(M_x)와 비틀림모멘트(M_T)를 지지 하도록 설계하였다. 이를 위하여 다른 조건

(외부치수, 적층수 등)을 동일하게 정한 상태에서 면재의 적층각도가 $[90]_{nT}$, $[\pm 85]_{nT}$, $[\pm 45]_{nT}$, $[0/90]_{nT}$ 인 경우에 대하여 유한요소해석을 통해 고유진동수를 계산하였다. 해석 결과 $[90]_{nT}$ 와 $[\pm 85]_{nT}$ 가 다른 적층각도에 비해 높은 고유진동수를 보였으며, 두 적층각도 간의 차이는 약 1% 정도로 미미하였다. 따라서 컬럼의 경우와 같은 이유로 $[\pm 85]_{nT}$ 를 베드의 면재 적층각도로 선택하였다. Fig. 5는 면재의 적층각도 ($[\pm 85]_{nT}$)와 리브의 형상 및 적층각도 ($[\pm 5]_{nT}$)를 도식적으로 표현한 것이다. 베드의 폭(w)과 길이(L)는 마이크로 팩토리 내에서 작업하는 여러 공작기계들의 이동경로와 크기 및 베드 위에 장착될 X-Y 스테이지의 치수를 고려하여 각각 $100+\alpha$ mm (α 는 적층수에 따른 아주 작은 값)와 120 mm로 정하였다. 베드의 높이(h)는 구조의 굽힘강성, 고유진동수 및 가공에 필요한 작업공간(z-방향 스트로크 등)을 고려하여 심재의 두께를 20 mm로 결정하고 그 위에 면재를 적층하여 최종치수를 결정할 수 있도록 하였다.

베드 설계의 경우 설계 변수가 너무 많아 모든 변수를 동시에 최적화하는데 많은 어려움이 있어 특정 변수를 적절한 값으로 고정한 후 나머지 변수들의 변화에 따른 구조의 거동을 계산하는 방식으로 연구를 진행하였다. 리브의 수와 두께를 결정하기 위한 진동 모드해석에서는 면재의 두께(t_s)를 2 mm로 가정하였다. 모드 해석으로부터 1차 고유진동수에서의 진동 모드가 비틀림 모드임을 확인하였다. 고유진동수는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 리브가 3개에서 4개로 증가할

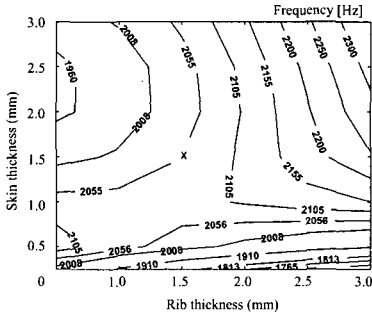


Fig. 7 The first natural frequency of the sandwich bed with respect to the rib thickness and composite skin thickness.

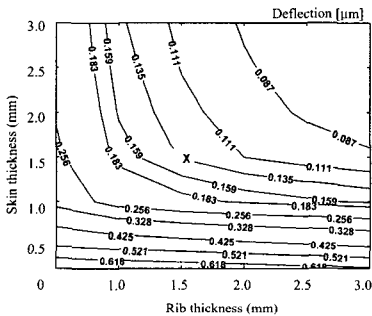


Fig. 8 The deflection of the sandwich bed with respect to the rib thickness and composite skin thickness.

경우에는 상대적으로 큰 고유진동수 증가를 보이고 있으나, 리브의 수를 4~6개로 증가시켜도 고유진동수는 큰 차이를 보이지 않음을 확인하였다. 그리고 리브의 수가 3개 미만인 경우에는 정적치침량이 클 것으로 예상하여 비교 대상에서 제외하였다. 선행연구를 통해 심재가 고분자 포움인 경우 급힘강성, 비급힘강성과 수직압축력에 의한 정적변형량은 리브의 두께와 개수의 몇 가지 조합에 따라 동일한 결과값을 가질 수 있음을 확인하였다. 이에 따라 고유진동수와 수직압축력에 의한 정적치침량 및 베드의 질량 최소화 등을 고려하여 리브의 수를 4개로 제한하였으며, 리브의 두께를 조절하여 최종 리브 사양을 결정하였다.[14]

리브의 두께(t_r)와 면재의 두께(t_s)는 고유진동수와 표면 수직방향의 압축력(50N)에 의한 변형량에 영향을 미친다. Fig. 7은 리브의 두께와 면재의 두께에 따른 1차 고유진동수를 나타낸 것이다. 해석 결과 베드의 1차 진동 모드는 비틀림 모드이며, 리브의 두께 변화가 동강성에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 해석 결과로부터 샌드위치베드의 1차 고유진동수는 해석에서 고려한 리브 두께의 전 범위에 걸쳐 면재의 두께(t_s)가 1.0~2.0 mm인 구간에서 포화됨을 알 수 있었다.

면재의 두께가 아주 얇은 경우($t_s \leq 0.5$ mm)에는 리브의 두께(t_r)가 증가할수록 1차 고유진동수가 감소하는데 그 이유는 두꺼워진 리브가 베드의 비틀림 진동을 제대로 억제하지

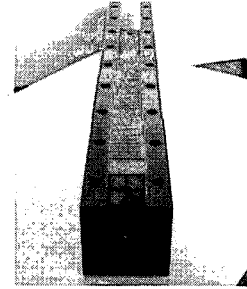


Fig. 9 Fabrication procedure of the sandwich column with a mould.

못하는 상태에서 구조의 질량이 증가하기 때문이다.

표면 수직방향의 하중에 의한 최대 변형량을 리브와 면재의 두께 변화에 따라 계산하여 Fig. 8에 나타내었다. 샌드위치 베드의 변형은 면재의 두께가 1.5 mm 이후부터 급격히 감소하며, 해석에서 고려한 리브 두께의 전 범위에서 포화되는 것을 확인하였다. 그리고 상대적으로 두꺼운 면재($t_s \geq 1.0$ mm)에 대해서는 리브의 두께가 1.5 mm 전후이면 하중에 의한 변형량이 포화되는 것을 확인하였다.

위의 유한요소해석의 결과에 따라 면재의 두께(t_s)와 리브의 두께(t_r)를 모두 1.5 mm로 결정하였다.

4. 구조물의 제작

섬유강화 복합재료-고분자 포움 샌드위치 컬럼과 베드는 PVC 포움(HT90)과 탄소섬유/에폭시 프리프레그를 사용하여 오토클레이브 진공백 성형법으로 제작하였다. 컬럼 제작을 위해 고분자 포움 위에 프리프레그를 $[\pm 5]_{2T}$ 로 적층하여 9×9 mm²의 단면적을 가지는 보 4개를 제작한 후 2×2 형식으로 배열하여 4개의 보 주위를 동일한 프리프레그를 사용하여 $[\pm 5]_{2T}$ 로 적층한 후 외부 금형에 삽입하여 오토클레이브에 넣고 성형하였다 (Fig. 9 참조). 베드 제작을 위해 고분자 포움의 위와 아랫면은 $[\pm 5]_T$ 로, 포움의 양 옆면은 $[\pm 5]_{3T}$ 로 적층된 (Fig. 10 참조) 5개의 샌드위치 보를 경화시킨 후 에폭시 접착제를 이용하여 성형된 5개의 보를 열방향으로 접합하였다. 그리고 $[\pm 85]_{6T}$ 로 적층된 프리프레그를 결합된 5개의 보 주위로 둘러싼 후 알루미늄 금형을 이용하여 4개의 수직 리브를 가진 베드를 완성하였다.

샌드위치 컬럼과 베드를 조립하기 위해 컬럼의 한 쪽 끝에 짧은 샌드위치 보를 접착하여 L-조인트 형태로 수정하였다. L-조인트의 강성 저하를 방지하기 위해 접착 부분에 복합재료 적층판을 사용하여 결합 부분을 강화시킨 후 접착부를 헐거운 끼워 맞춤 상태로 가공하여 베드와 컬럼을 접착하였다. Fig. 11은 제작된 미세 방전가공 기계 구조의 사진이다. 샌드위치 컬럼과 베드를 체결한 전체 구조물의 질량은 167g이다.

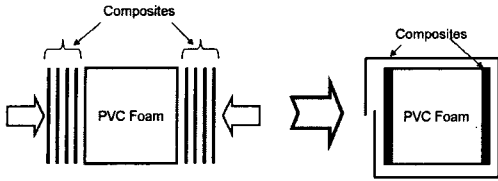


Fig. 10 Stacking process of sandwich beams for sandwich bed fabrication.

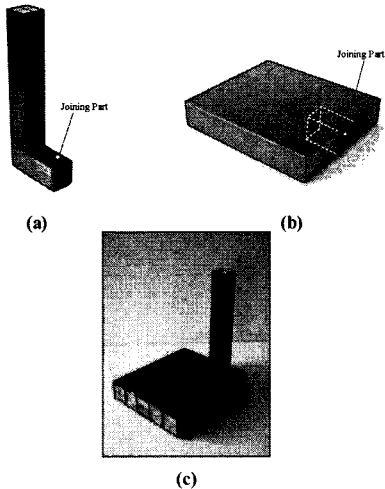


Fig. 11 Sandwich structures for micro-EDM machine; (a) Column, (b) Bed, (c) Assembly.

5. 진동테스트

샌드위치 구조물의 동특성을 파악하기 위해 섬유강화 복합재료-고분자 폼 샌드위치 구조에 대한 자유단-자유단의 경계 조건 상태에서의 진동 실험을 실시하였다. 고유진동수와 감쇠비를 컬럼과 베드에 대해서 각각 측정된 후 비교하였다. Fig. 12에 샌드위치 컬럼과 베드, 그리고 조립체의 FRF(주파수 응답 함수) 결과를 나타내었다. 샌드위치 구조의 1차 고유진동수와 감쇠비는 Table 2에 정리하였다.

유한요소 해석결과 조립체의 1차 고유진동수는 885Hz이며, 진동 모드는 컬럼의 x-방향의 굽힘 모드(M_x ; Fig. 13 참고)이다. 고유진동수의 크기는 조립되기 이전의 각 요소들에 비해 낮다. 고유진동수가 낮아진 이유는 경계조건이 자유단-자유단에서 준고정 상태(Semi-clamped)로 변경되었고 체결에 따른 시스템 질량 증가에 기인하는 것으로 판단된다. 반면 감쇠비는 접착제를 이용한 결합에 의해 각 단품 구조의 감쇠비에 비해 증가하였다

본 연구를 통해 개발 중인 가공기는 수 μm 정도의 미세한 구멍 혹은 특정 모양의 가공을 위해 개발 중이며, 펄스 단속주파수는 600~700 Hz 수준일 것으로 예상하고 있다.

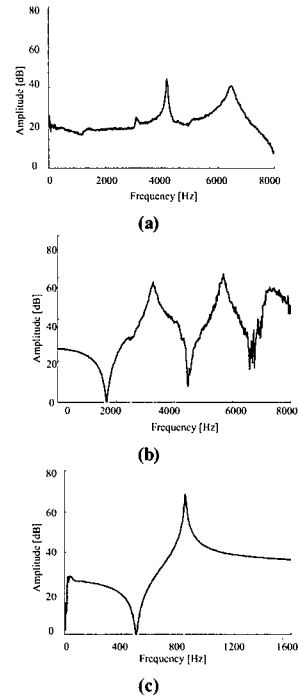


Fig. 12 FRF of columns and beds; (a) Column, (b) Bed, (c) Assembly.

방전 가공기의 가진 주파수는 가공하고자 하는 형상, 크기 및 치수 정밀도에 따라 방전용 펄스의 단속 주기를 조절함에 따라 결정된다. 본 연구를 통해 설계된 샌드위치 구조의 베드와 동일한 크기의 알루미늄 블록에 대해서 진동 실험을 실행한 결과 섬유강화 복합재료-폼 샌드위치 구조의 감쇠비가 알루미늄 블록에 비해 83% 우수함을 확인하였으며, 이러한 복합재료의 금속 대비 높은 감쇠능은 많은 참고 문헌에서 알려진 바이다[15]. 따라서 본 연구를 통해 설계된 샌드위치 구조물 (Fig. 11 (c))은 구조의 고유진동수가 가진 주파수보다 높고 기존 기계구조 재료인 알루미늄에 비해 높은 감쇠비를 가지기 때문에 미세 방전가공 기계구조에 적합한 것으로 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 섬유강화 복합재료-고분자 폼 샌드위치 구조를 이용한 미세 방전가공 기계의 구조를 설계하고 제작하였다. 십자 리브를 가진 샌드위치 컬럼의 면재의 적층순서($(\pm 5)_n$)와 리브 두께(1 mm) 등은 구조의 비굽힘강성(EI/ρ) 계산을 통하여 결정하였다. 탄소섬유/에폭시 프리프레그와 고분자 폼으로 구성된 미세 방전가공 기계의 샌드위치 베드는 평면 내에서 양 방향으로 고강성을 가지도록 1차 고유진동수와 표면 수직방향의 압축력에 대한 변형을 고려하여 면재의 두께(1.5 mm)와

Table 2 The first natural frequencies and damping ratios of sandwich structures before and after assembly

		1 st natural frequency [Hz]	Damping ratio
Before assembly	Bed	3,280	0.0086
	Column	4,208	0.0051
After assembly	Bed	856	0.0106
	Column		0.0060

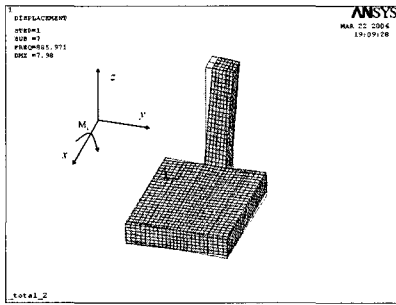


Fig. 13 Mode shape of the assembled structure.

면재 적층순서($\pm 85_6^{\text{GT}}$), 리브 개수(4개), 리브 두께(1.5mm)를 결정하였다. 설계된 샌드위치 구조(컬럼, 베드)는 적절한 금형을 이용하여 오토클레이브에서 진공 성형하여 제작하였으며, 샌드위치 컬럼과 베드는 L-조인트를 이용하여 접착제 결합을 통해 조립하였다. 샌드위치 구조의 고유진동수와 감쇠비를 측정하기 위하여 진동 실험을 수행하여 조립된 구조의 1차 고유진동수(856Hz)와 감쇠비(0.0106-0.006)를 측정하였다. 이상의 결과를 통해 본 논문에서 설계된 미세 방전가공 기계 구조의 적절성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 산업기술개발사업인 “마이크로 전기 화학 복합형상 제거 시스템 개발”, 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- 1) Masaki T., Kawata K., Masuzawa T., “Micro electro-discharge machining and its applications”, *IEEE Micro Electro Mechanical System Workshop*, Napa valley, CA., USA(11-14 Feb 1990), pp. 21-26.
- 2) Kim G.M., Choi D.K., Chu C.N., “Development of micro-EDM machine for microshaft and microhole machining” *Journal of the Korean society of Precision*

- Engineering*, Vol . 15 No. 12, 1998, pp. 55-61.
- 3) Lee B.U., Yi S.M., Kim B.H., Chu C.N.. “Fabrication of 3D micro structure using micro electrical discharge milling”, *Journal of the Korean society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 9, 2004, pp. 41-47.
- 4) Kim Y.T., Park S.J., Lee S.J., “Machining of micro-scale shapes using micro-EDM process”, *Journal of the Korean society of Precision Engineering*, Vol. 20 No. 9, 2003, pp 109-117.
- 5) Chae H.J., Lee S.Y., “Vibration characteristics and tension control of a wire in WEDM”, *Journal of the Korean society of Precision Engineering*, Vol. 18 No. 11, 2001, pp 86-92.
- 6) Chang S.H., Kim P.J., Lee D.G., Choi J.K., “Steel-composite hybrid headstock for high-precision grinding machine” *Composite Structures*, Vol. 53, 2001, pp. 1-8.
- 7) Lee D.G., Chang S.H., Kim H.S., “Damping improvement of machine tool columns with polymer matrix fiber composite material”, *Composite Structures*, Vol. 43, 1998, pp. 155-163.
- 8) Lee D.G., Hwang H.Y., Kim J.K., “Design and manufacture of a carbon fiber epoxy rotating boring bar”, *Composite Structures*, Vol. 60, 2003, pp. 115-124.
- 9) Jeong K.S., Lee D.G., Kwak Y.K. “Experimental investigation of the dynamic characteristics of carbon fiber epoxy composite thin beams”, *Composite Structures*, Vol. 33, 1995, pp 77-86.
- 10) 최진호, “방전 가공기용 복합재료 외팔보의 제작 및 성능 평가”, *한국복합재료학회지*, Vol. 13, No. 6, 2000, pp. 39-46.
- 11) Zenkert D. An introduction to sandwich construction., *Engineering Materials Advisory Services*, 1995.
- 12) Kahng C.H., “Machine tool technology ; The Present And The Future(5)”, *Journal of the KSPE*, Vol. 12, No. 8, 1995, pp. 5-18.
- 13) Vinson J.R., The behaviour of sandwich structure of isotropic and composite materials, *Technomic*, 1999.
- 14) 김대일 , 장승환, , “공작기계를 위한 보와 평판의 샌드위치 구조 설계에 관한 파라메트릭 연구”, *한국공작기계학회지*, Vol. 15, No. 1, 2006, pp. 39-48
- 15) 이대길, 정광섭, 최진호, 복합재료 역학 및 제조 기술, 시그마프레스, 1998, Chapter 1.