

論文

방전 가공기용 복합재료 외팔보의 제작 및 성능평가

최진호*

Manufacture and performance test of the composite cantilever arm for electrical discharge wire cutting machine

Jin Ho Choi*

ABSTRACT

Electrical discharge machining (EDM) cuts metal by discharging electric current across a thin gap between tool and workpiece. Electrical discharge wire cutting, a special form of EDM, uses a continuously moving conductive wire as an electrode, and is widely used for the manufacture of punches, dies and stripper plates. In the wire cutting process, the moving wire is usually supported by cantilever arm and wire guides. As the wire traveling speed has been increased in recent years to improve productivity, the vibration of the cantilever arm occurs, which reduces the positional accuracy of the machine. Therefore, the design and manufacture of the cantilever arm with high dynamic characteristics have become important as the machining speed increases.

In this paper, the cantilever arm for guiding the moving wire was designed and manufactured using carbon fiber epoxy composite in order to improve the static and dynamic characteristics. Specimens for the composite cantilever arm were manufactured and tested to investigate the effect of the number of reinforcing plies and length fitted to steel flange on the load capacity. Also, the finite element analysis using layer and contact elements was performed to compare the calculated results with the experimental ones. From the results, the prototype of the composite cantilever arm for the electrical discharge wire cutting machine was manufactured and the static and dynamic characteristics were compared with those of the conventional steel cantilever arm.

초 록

방전가공은 공구와 공작물 사이의 얇은 간극에 전류를 방전시켜 금속을 가공하는 방법이다. 방전 와이어 가공은 전도성 와이어를 사용하는 방전가공의 특수한 예로서, 펀치나 금형제조에 널리 이용되고 있다. 와이어 방전가공에서 와이어는 와이어 가이드 및 외팔보로서 지지되어있다. 최근 생산성의 증가추세와 더불어 와이어의 이송속도가 증가함에 따라 외팔보의 진동 등으로 인한 기계 정밀도의 저하가 우려된다.

본 논문에서는 정, 동특성이 우수한 방전가공기용 복합재료 외팔보를 설계, 제작하였다. 끼워맞춤길이의 보강 적층수의 변화에 따른 정, 동특성의 변화를 살펴보기 위하여 시편을 제작하여 하중실험을 수행하였다. 또한 유한요소

* 경상대학교 수송기계공학부 항공기부품기술연구센터

해석을 수행하여 하중실험의 결과와 상호 비교하였다. 시편실험의 결과로부터 방전가공기용 복합재료 외팔보를 설계, 제작하여 기존의 금속 외팔보와 그 성능을 상호 비교하였다.

1. 서 론

방전가공은 구리와 흑연등의 전도성 공구 전극과 공작물사이에 불연속적인 방전을 이용하여 공작물을 가공하는 방법이다. 방전 와이어 가공은 구리, 황동, 텅스텐 등의 전도성 와이어를 공구 전극으로 사용한 가공법으로 펀치나 금형제조에 널리 이용되고 있는 방법이다(1). 최근의 대량생산체제 하에서 공작기계는 고속도화, 고정밀화 추세가 가속화되고 있다. 방전가공기의 경우, 이송속도가 300mm/min 이상으로 급속도로 향상되고 있으며, 가공정도 또한 2-3 μ m 이하의 우수한 표면정도를 추구하고 있다. 고속도, 고정도의 방전가공기를 제작하기 위해서는 최적제어를 위한 다양한 알고리즘 개발과 더불어 기계 자체의 고 감쇠, 고 강성화를 추구하여야 한다(2). 특히 와이어 주행방향으로의 변형과 와이어 지지부의 고 강성화 구조는 방전 가공속도와 가공정도에 큰 영향을 준다.

Fig. 1은 일반적인 방전 가공기의 개략도를 나타낸 그림으로, 외팔보는 주철 실린더와 방전선 가이드 및 절연부로 구성되어 있다. 본 논문에서는 방전 와이어 가공기에서 와이어를 지지하고 회수하는 역할을 하는 외팔보의 고 강성, 고 감쇠 설계에 관한 연구를 수행하였다. 고 강성 외팔보를 설계하기 위해서는 외팔보의

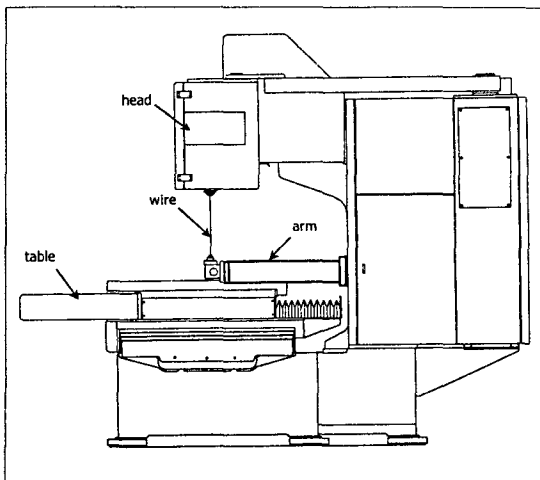


Fig. 1 Schematic diagram of a typical electrical discharge wire cutting machine.

직경과 두께를 증가시켜 2차 단면 관성모멘트를 증가시키는 것이 일반적이다. 그러나 외팔보의 직경과 두께는 방전 가공기의 작업 반경에 의해 제한을 받을 뿐만 아니라, 외팔보 자체의 무게 증가로 인하여 자체 변형과 방전가공기의 동특성 저하로 나타날 수 있다. 따라서 무게가 가볍고 강성이 우수한 소재로의 대체가 절실히 요구되어지고 있다. 복합재료는 높은 비강성, 비강도 특성으로 인하여 기존의 항공산업 뿐만 아니라 공작기계, 로봇 팔 등에 그 적용이 확대되고 있는 소재이다(3-6).

본 논문에서는 복합재료를 이용하여 정강성 및 동특성이 우수한 방전 와이어 가공기의 외팔보를 설계, 제작하였다. 복합재료로 된 외팔보의 한쪽 끝단은 금속 플랜지와 연결된 결합구조로 되어 있으며, 그 특성상 구조적으로 가장 취약한 부분이다. 본 논문에서는 복합재료 외팔보와 금속 플랜지의 결합부에 대한 유한요소해석을 수행하고, 1/4 축소 시편을 제작하여 이에 대한 정, 동특성을 평가하였다. 또한 해석과 실험의 결과로부터 방전 가공기용 외팔보를 설계하고 제작하여, 기존의 금속으로 제작된 외팔보와 정, 동특성을 상호 비교하였다.

2. 본 론

본 논문에서는 복합재료를 이용한 방전가공기용 외팔보를 설계, 제작하여 그 특성을 평가하고자 한다. 복합재료 외팔보의 해석과 제작에 사용된 복합재료는 (주) 선경에서 공급한 USN 125로서, 보강재는 탄소섬유이고 기지는 에폭시로 구성되어 있다. USN 125 복합재료의 물성치는 Table 1에 나타나 있다. 복합재료 외팔보는 주로 수직하중을 지지하게 되어 있으므로, 수직하중에 대한 강성을 높일 수 있도록 복합재료의 섬유각을 배열하여야 한다. 본 논문에서는 복합재료의 섬유각을 $\pm 5^\circ$ 로 설계, 제작하였다.

Fig. 2는 복합재료 외팔보의 구조를 나타낸 그림으로, 복합재료 튜브와 금속 플랜지가 결합된 구조로 되어 있다. 복합재료와 금속 플랜지를 연결하는 방법에는 접착제에 의한 접합 방법과 기계적인 체결방법 등이 있다. 결합구조를 접착방식으로만 구성할 경우, 결합부

Table 1. Mechanical properties of the composites(USN 125*)

E_x (GPa)	131	X_T (MPa)	2000
E_y (GPa)	8.2	X_C (MPa)	-1400
E_z (GPa)	8.2	Y_T (MPa)	61
G_{xy} (GPa)	4.5	Y_C (MPa)	-130
G_{yz} (GPa)	4.5	Z_T (MPa)	61
G_{xz} (GPa)	3.5	Z_C (MPa)	-130
u_{xy}	0.281	S_{xy} (MPa)	70
u_{yz}	0.470	S_{yz} (MPa)	40
u_{xz}	0.281	S_{xz} (MPa)	70

* SK Chemicals, 948-1 Daechi-3-dong, Kangnam-ku, Seoul, Korea

의 동특성은 강성이 가장 낮은 접착제의 특성에 의해 지배를 받게되므로 구조물의 동특성이 크게 저하될 우려가 있다. 따라서 본 논문에서는 결합구조를 Fig. 2에서 보는바와 같이 접착제에 의한 접합방식과 기계적 끼워맞춤의 혼합 방식으로 구성하였다. 복합재료 외팔보의 한쪽 끝단에 수직하중이 작용할 경우, 복합재료 튜브의 원주방향으로 응력이 발생하게 된다. 따라서 Fig. 2에서 보는 바와 같이 결합부에 원주방향 강성 및 강도증가를 위하여 원주방향(Hoop)으로 섬유를 배열하였다.

2.1 유한요소해석

복합재료 외팔보 결합부의 효율적인 설계를 위하여 1/4축소 시편을 제작하고 실험을 수행하여 유한요소해석의 결과와 비교하였다. Fig. 3은 복합재료 외팔보의 응력분포와 하중전달능력을 살펴보기 위한 유한요소모델로서, 외팔보의 한쪽 끝단에 수직하중을 작용시켰다. 해석에 사용한 프로그램은 상용프로그램인 ANSYS

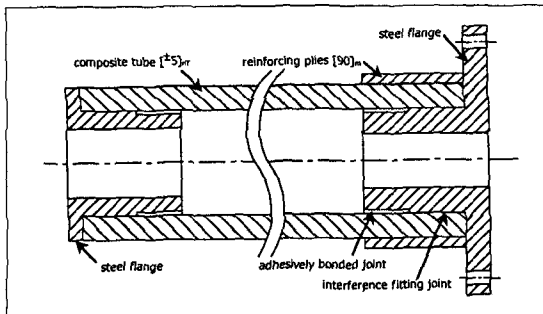


Fig. 2 Schematic diagram of a composite cantilever arm for a wire cutting machine.

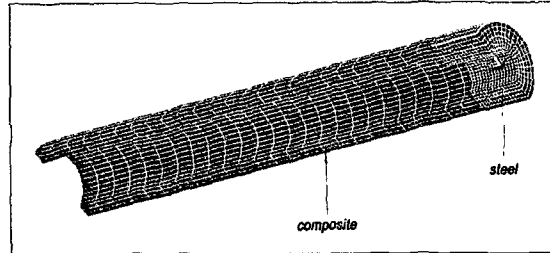


Fig. 3 Finite element model.

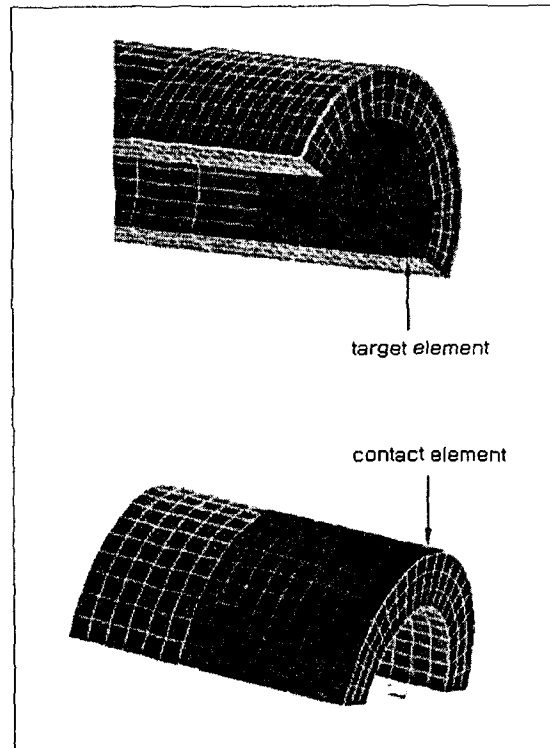


Fig. 4 Configuration of the contact element for the mechanical fitting joint.

5.5 이며, 전체 절점수는 5985개이고, 요소수는 4820개이다(7).

복합재료 부분의 해석을 위하여 3차원 적층고체요소(3-D layered structural solid element)를 사용하였다. 또한 외팔보의 결합부위에서 기계적 끼워맞춤부는

Table 2. Mechanical properties of the epoxy adhesive(IPCO 9923)

E_x (GPa)	1.3
u_{xy}	0.41
σ_y (MPa)	45

수직하중이 작용할 경우, 금속플랜지와 복합재료의 접촉이 일부구간에서만 일어나는 현상이 발생하므로, 유한요소해석시 이를 고려하여야 한다. Fig. 4는 복합재료와 금속 플랜지의 접촉이 불규칙적으로 발생하는 구간에 접촉요소를 형성한 그림으로, 면(Surface to surface) 요소를 사용하였다. 실험과 해석에 사용한 접착제는 IPCO사의 IPCO 9923으로 그 물성치는 Table 2와 같다. 해석의 결과로부터 복합재료의 파괴정도를 예측하는 방법에는 여러 가지 평가식이 제안되고 있다. 본 논문에서는 Tasi-Wu의 파괴식을 적용하였으며, 파괴지수 F. I.(Failure index)는 다음과 같이 계산된다(8).

$$F.I. = F_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j \quad (1)$$

$$i, j = 1, \dots, 6$$

$$F_1 = 1/X_t + 1/X_c, F_{11} = -1/X_t X_c,$$

$$F_2 = 1/Y_t + 1/Y_c, F_{22} = -1/Y_t Y_c,$$

$$F_{66} = 1/S^2$$

Fig. 5는 유한요소해석 결과로부터 복합재료에 작용하는 응력을 계산하여 Tasi-Wu 파괴지수로 환산한 그림으로, 각 요소내에서 파괴지수의 최대값을 나타낸 그림이다. 그림에서 보는바와 같이 끼워맞춤된 결합부위에서 파괴지수값이 최대가 됨을 볼 수 있다. Fig. 6은 결합부의 끼워맞춤 길이변화에 대한 복합재료 파괴지수의 변화를 유한요소해석으로 계산한 결과를 나타낸

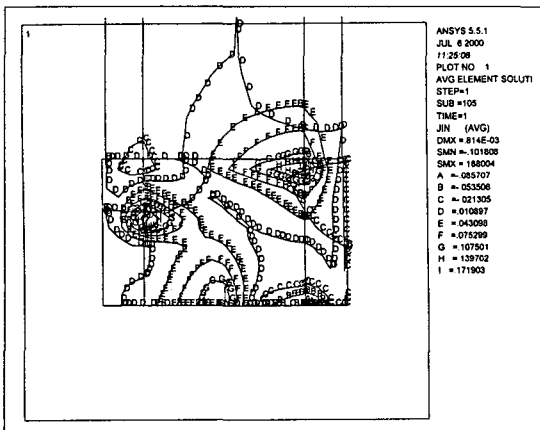


Fig. 5 Tasi-Wu failure indices in the joint part of the composite arm. (Fitting length=8mm, Hoop plies=3)

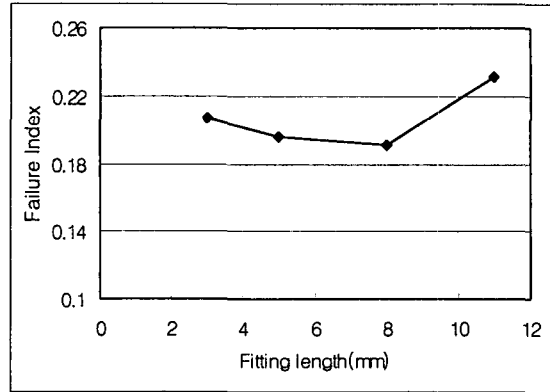


Fig. 6 Failure indices of the composites w.r.t interference fitting length. (Number of hoop plies=3)

그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 결합부의 끼워맞춤 길이가 8mm 부근에서 가장 낮은 파괴지수값을 가짐을 볼 수 있다.

Fig. 7은 결합부의 보강을 위한 원주방향의 섬유층수 변화에 대한 복합재료 파괴지수의 변화를 유한요소해석으로 계산한 결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 원주방향의 섬유층수가 증가할수록 파괴지수가 감소함을 볼 수 있다. Fig. 8은 결합부의 보강을 위한 원주방향의 섬유층수변화에 대한 접착제의 최대 응력값의 변화를 유한요소해석으로 계산한 결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 섬유층수가 증가함에 따라 응력이 감소하는 경향을 보이지만 현저한 차이는 나타나지 않음을 볼 수 있다. Fig. 9는 결합부의 보강을 위한 원주방향의 섬유층수변화에 대한 하중점의 최대변

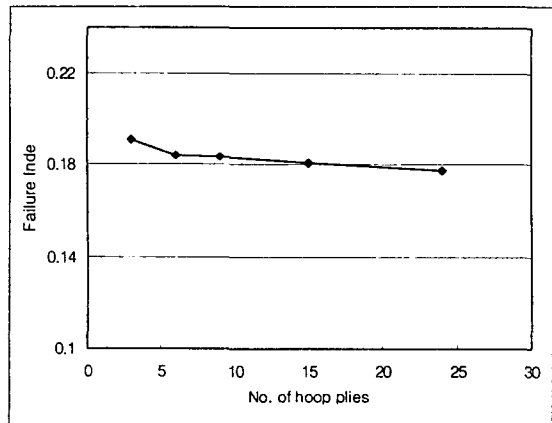


Fig. 7 Failure indices of the composites w.r.t number of the hoop plies. (Fitting length of the joint=8mm)

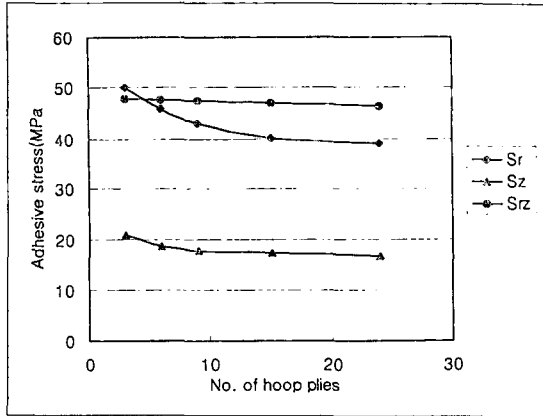


Fig. 8 Adhesive stresses w.r.t number of the hoop plies. (Fitting length of the joint=8mm)

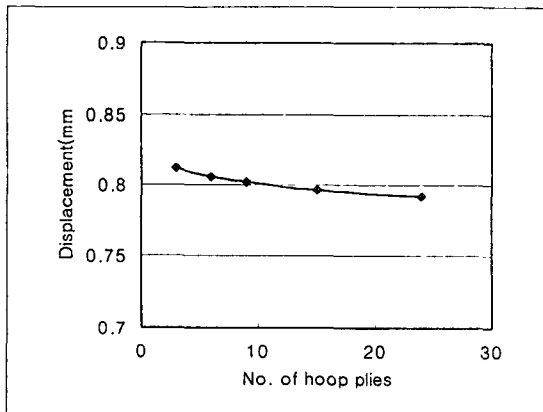


Fig. 9 Displacement of the composite arm w.r.t number of the hoop plies. (Fitting length of the joint=8mm)

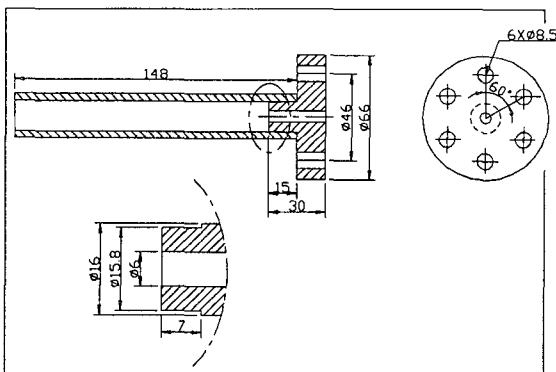


Fig. 10 Dimension of the 1/4 scale specimen.

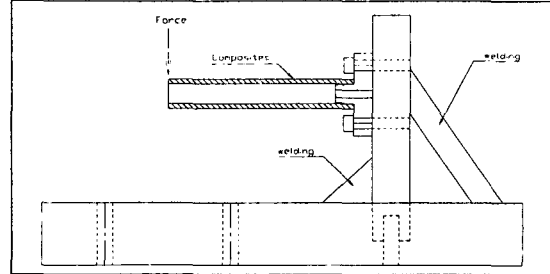


Fig. 11 Schematic diagram of the static bending test setup.

위를 나타낸 그림으로, 섬유층수가 증가할수록 작은 변위가 발생하여 강성이 향상됨을 볼 수 있다.

그러나 실제 복합재료 외팔보를 제작할 경우, 섬유층수를 증가시키는데는 많은 노력과 시간이 소요되므로 한계를 가지고 있다. 이상의 결과에 의하면 원주방향의 섬유층수가 6층 이상에서는 그 효과가 현저히 감소되므로, 6층 이하로 적층하는 것이 보다 효율적인 설계라 할 수 있다.

2.2 축소시편 제작 및 실험

앞 절에서 기술한 유한요소해석의 결과와 상호 비교하고 검증하기 위하여, 1/4축소 시편을 제작하여 하중 실험을 수행하였다. 제작한 시편의 기하학적 형상과 치수는 Fig. 10과 같다. Fig. 11은 제작된 축소시편을 이용하여 외팔보(Cantilever beam) 상태의 하중실험을 수행하기 위한 치구의 모습이다. Fig. 12는 1/4축소시편으로 외팔보 상태의 하중실험을 수행한 결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 결합부의 끼워맞춤 길이가 8mm일 때 하중이 최대가 되며, 이상의 실험결과는 Fig. 6의 유한요소해석 결과와 일치함을 볼 수 있다.

제작된 시편의 동특성을 살펴보기 위하여 주파수 신호분석기(Signal analyzer type 2032, B&K)를 이용하여 진동특성을 평가하였다. Fig. 13은 결합부의 끼워맞춤길이에 대한 시편의 고유진동수 및 감쇠특성을 나타낸 그래프로서, 시편의 동특성은 끼워맞춤길이의 변화에 관계없이 거의 일정한 값을 가짐을 볼 수 있다.

2.3 복합재료 외팔보의 제작 및 성능평가

앞 절에서 수행한 1/4축소시편에 대한 실험과 유한요소해석의 결과를 이용하여 방전가공기용 복합재료 외팔보를 설계하고 제작하였다. Fig. 14는 제작된 복합재료 외팔보 및 금속 플랜지의 형상을 나타낸 그림이

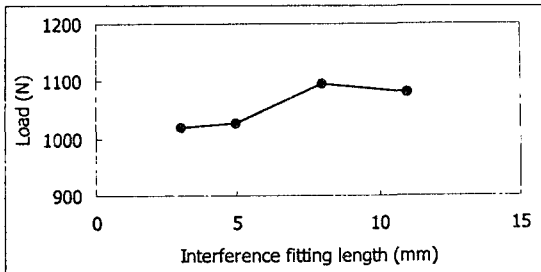


Fig. 12 Failure loads w.r.t to the interference fitting lengths.

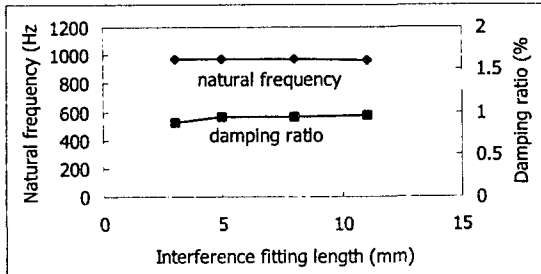


Fig. 13 Fundamental natural frequencies and damping ratios of the specimens w.r.t the interference fitting lengths.

다. 복합재료 외팔보는 진공백 성형방법에 의해 제작되었으며, 외팔보의 두께는 7mm로 고정하였다. 제작된 복합재료 외팔보의 사양은 Table 3에 나타나 있다. 제작된 복합재료 외팔보의 무게는 약 110 N으로, 기존의 금속 외팔보에 비해 약 58%의 무게 감소효과를 나타내었다.

Fig. 15는 방전가공기용 외팔보의 정적강성을 평가하기 위한 실험모습으로, 외팔보 하중상태에서 5kgf의 하중을 가하여 다이얼게이지로 처짐량을 측정하였다. 정적강성도 측정결과, 기존의 금속 외팔보의 처짐량은

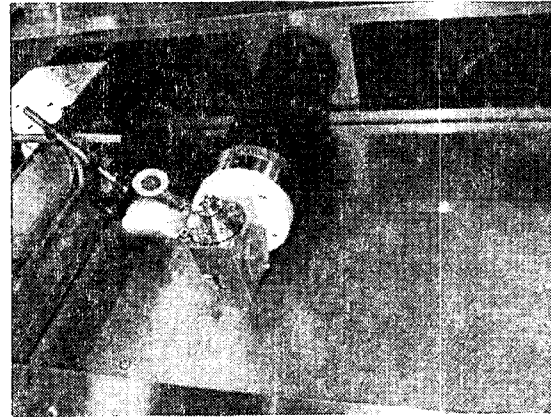


Fig. 15 Photograph of the displacement measurement of the cantilever arm using the dial gauge.

17μm이며, 복합재료 외팔보는 18μm로 나타나 정적강성도가 서로 비슷한 값을 가짐을 볼 수 있었다.

복합재료 외팔보의 동적특성을 살펴보기 위해 자유진동 및 외팔보 조건에서 고유진동수와 감쇠특성을 평가하였다. Fig. 16은 자유진동 및 외팔보 조건에서 방전가공기용 외팔보의 고유진동수와 감쇠특성을 평가한 결과로서, 자유진동상태에서 복합재료 외팔보는 고유진동수와 감쇠특성이 금속 외팔보에 비해 각각 1.27배, 5배 향상되었다. 또한 외팔보 상태에서는 고유진동수와 감쇠특성이 각각 1.41배, 1.2배 향상되어 우수한 진동특성을 나타냄을 볼 수 있었다.

방전가공기는 가공중의 온도상승으로 인하여 방전가공기용 외팔보에 열변형이 발생하여 제품의 치수정밀도를 저하시킬 수 있다. 외팔보의 열적특성을 살펴보기

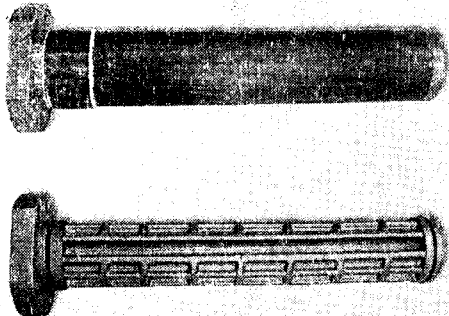


Fig. 14 Photograph of the composite and conventional cast iron cantilever arms

Table 3. Specification of the composite arm.

Specification	Value
Whole length of the composite tube	564 mm
Joint length	60 mm
Adhesively bonding length	28 mm
Interference fitting length	32 mm
Outer diameter of the composite tube	110 mm
Thickness of the composite tube	7 mm
Weight of the composite tube	20 N
Weight of the steel flange(small)	30 N
Weight of the steel flange(large)	60 N
Stacking angle	±5°
Bonding thickness	0.5 mm

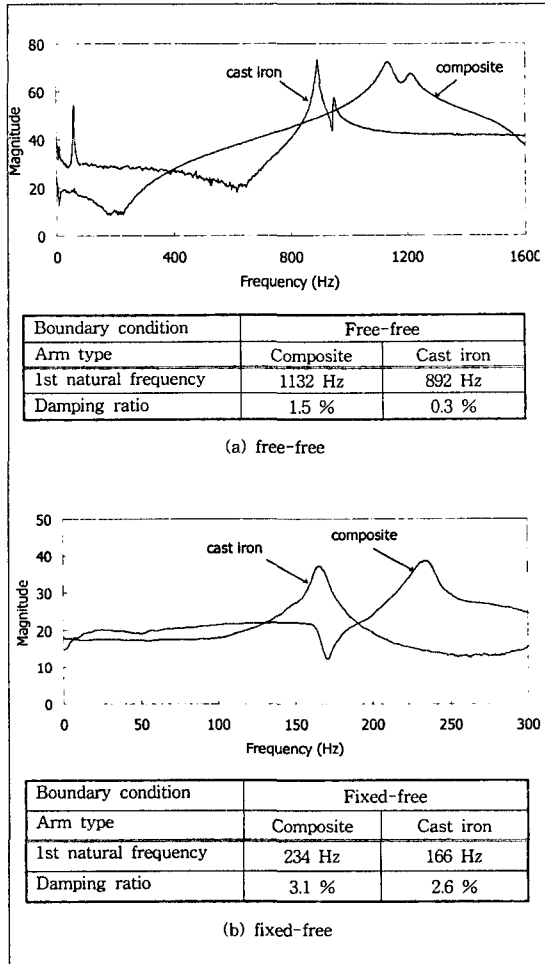


Fig. 16 Impulse frequency responses of the composite and conventional arm.

위하여 방전가공중의 온도상승에 의한 열변위량을 계산하였다. 복합재료 외팔보는 금속으로 된 플랜지와 복합재료 튜브로 되어 있으므로 축 방향 열변위량 δ 는 다음과 같이 계산된다(9).

$$\delta = (\alpha_s l_s + \alpha_c l_c) \Delta T \quad (2)$$

- α_s : 금속의 열팽창계수
- α_c : 복합재료의 열팽창계수
- l_s : 금속의 길이 l_c : 복합재료의 길이

위 식(2)를 이용하여 방전가공중의 온도상승에 따른

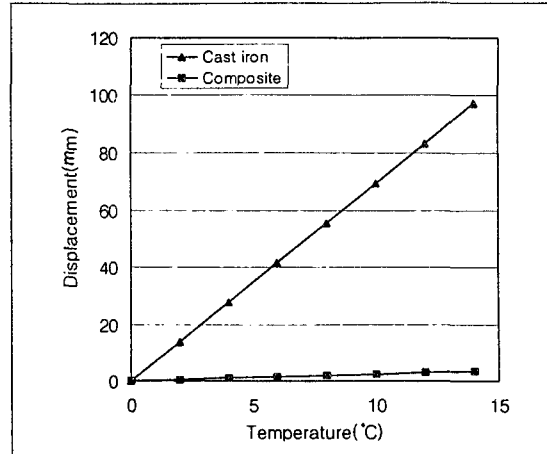


Fig. 16 Axial elongations of the composite and conventional arms w.r.t the temperature difference.

외팔보의 축방향 변위를 살펴보면 Fig. 17과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 복합재료 외팔보의 축방향 열변위량은 온도상승이 10°C일 때 2.5 μ m로 금속의 3.6%에 불과해 열적으로 매우 안정된 구조임을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 복합재료를 이용하여 정강성 및 동특성이 우수한 방전 와이어 가공기의 외팔보를 설계, 제작하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 금속 외팔보와 동일한 정강성을 지닌 방전가공기용 복합재료 외팔보를 설계, 제작하여 약 58%의 무게절감효과를 얻을 수 있었다.
2. 복합재료 외팔보는 금속 외팔보에 비해 1차 고유진동수가 1.41배, 감쇠계수가 1.20배 우수한 동적특성을 나타내었다.
3. 복합재료 외팔보의 축방향 열변위량은 금속 외팔보의 3.6%에 불과해 매우 안정된 열적특성을 나타내었다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부·한국과학재단 지정 항공기부품기술연구센터의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

Reference

1. E. P. DeGarmo, J. T. Black and R. A. Kohser, *Materials and Processes in Manufacturing*; 8th Edition, Prentice-Hall International Inc., 1997.
2. D. G. Lee, S. H. Chang and H. S. Kim, Damping Improvement of Machine Tool Columns with Polymer Matrix Composite Materials, *Composite Structures*, Vol. 43, 1998, pp. 155-163.
3. F. M. Swanstrom and T. Hawke, Design for Manufacturing and Assembly: A Case Study in Cost Reduction for Composite Wing Tip Structures, *Sampe Journal*, Vol. 36, 2000, pp. 9-16.
4. M. G. Gilchrist and L. Curley, Manufacturing and Ultimate Mechanical Performance of Carbon Fibre-Reinforce Epoxy Composite Suspension Push-Rods for a Formula 1 Racing Car, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 22, 1999, pp. 25-32.
5. D. H. Cho and D. G. Lee, Manufacturing of Co-Cured Aluminum Composite Shaft with Compression During Co-Curing Operation to Reduce Residual Thermal Stresses, *Journal of Composite Materials*, Vol. 32, 1998, pp. 1221-1241.
6. H. S. Kim, K. Y. Park and D. G. Lee, A Study on the Epoxy Resin Concrete for the Ultra-Precision Machine Tool Bed, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 48, 1995, pp. 649-655.
7. ANSYS 5. 5 User's manual, 1998.
8. S. W. Tsai and H. T. Hahn, *Introduction to Composite Materials*, Technomic Publishing, 1980.
9. F. P. Beer and E. R. Johnson, Jr., *Mechanics of Materials*, McGraw-Hill, Inc., 1992.