

외팔보의 결합조건에 따른 모드형상의 실험적 분석

Experimental Analysis on Conditions of Joint for Cantilever Beam

윤지현*· 심현진*· 누를 파와지*· 이유엽**· 오재웅†
Ji-Hyun Yoon, Hyun-Jin Sim, Noor Fawazi, You-Yub Lee and Jae-Eung Oh

Key Words : Cantilever Beam(외팔보), Mode Shape(모드 형상), Joint(결합)

ABSTRACT

Joints are used extensively in various industries. For instance, structural adhesives are used in place of the traditional mechanical fasteners, such as screws and bolts, because they are much lighter and spread the stresses more uniformly across the joints. For efficient designs of joints, knowledge of static and dynamic characteristics of joints is essential. Most analysis of joints are carried out using analytical equations or finite element method. In this paper, the characteristics of four conditions of lap-joint beam are investigated experimentally. The mode shapes and nodal points of beam show that there are different deformations in each condition. These deformations may cause high stresses and may initiate local cracking and delamination failures.

1. 서론

여러 부품으로 이루어진 기계구조물에서 결합부의 존재는 불가피하다. 자동차, 우주, 선박, 반도체, 가전 등 대부분의 기계공학적인 제품들은 다양한 종류의 결합부를 포함하고 있다. 특히 항공기의 패널이나 자동차의 차체 등과 같이 경량화, 고성능, 저진동을 고려한 설계가 필수적인 제품의 경우, 부품 간의 결합방식에 대한 관심이 증가하고 있으며, 현재까지도 다수의 기계구조물에서는 가공이 용이하고, 가벼우면서도 결합부에 가해지는 응력을 보다 균일하게 분포시킬 수 있는 볼트를 이용한 결합방식, 혹은 설계형상의 유연성, 응력 분포, 가공성에서 유리한 접착 방식이 주로 사용된다.

결합부에 대한 신뢰성을 결정하는데는 몇 가지 요인이 있다. 이 요인들에는 결합부의 강도뿐만 아니라 설계, 재료, 제조방식 등이 포함되며 보다 효율적이고 효과적인 설계를 위해서는 결합부에 대한 정적, 동적 특성에 대한 데이터가 필수적이다. 현재 대부분의 연구는 수식을 이용한 해석적인 방법, 혹은 유한요소해석을 사용한 방법을 통해 이루어지고 있다 [1]. Saito 와 Tani[2], He and Rao[3,4], Renton and Vinson[5] 등이 수식을 이용한 해석적인 방법을 이용하여 결합부에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 이는 결합부가 균질한 재료로 구성되었을 경우이며 복합재료로 이루어진 경우에는 일반적으로 유한요소해석으로 접근하는 방식을 택하고 있다 [6,7]. 이러한 연구는 대부분 결합부를 포함하는 보나 평판에 대해 자유진동을 시켜 전체 길이에 대한 결합부 길이의 비와 고유진동수, 모드형상에 대한 연구에

초점을 맞추고 있다 [1,6].

본 연구에서는 결합부에 대한 기초연구로서 동일한 면적의 결합부(lap-jointed)를 포함하는 4 가지 결합조건에 대한 외팔보에 대해 고유진동수, 모드형상, 노드점의 결합조건에 따른 특성변화를 일반적인 접근 방식과 동일하게 수식을 이용하거나 유한요소해석을 수행하지 않고 실험적인 방법으로 비교분석 하였다.

2. 결합부를 포함하는 외팔보의 제작

4 가지 결합조건(볼트-너트, 접착, 고무, 용접)을 포함하는 외팔보 [Fig.1]를 제작하기 위해 폭 4cm, 두께 0.3cm의 알루미늄빔을 준비하여 17cm와 빔의 고정을 위한 5cm가 포함된 22cm의 길이로 절단하였다. 절단한 알루미늄빔을 결합면이 전체 외팔보의 중앙에 위치하고 정사각형의 형태를 가질 수 있도록 4cm로 포개어 각 결합조건에 맞게 제작하였다. 볼트는 직경 5mm, 나사길이 3cm의 크기를 선택하였고, 접착은 에폭시 접착제(Power Epoxy, Yoo Sun Chemical)를 이용하였다. 고무는 천연고무(NR)를 [Fig.2]와 같이 절단한 후, 두 개의 알루미늄빔의 결합면에 에폭시 접착제를 사용하여 결합하였으며, 용접의 경우, 용접봉을 이용한 아크용접을 하였다. 또한, 볼트와 너트의 결합 시 네 개의 볼트-너트가 일정한 결합력을 나타낼 수 있도록 토크렌치로 조임토크를 측정하면서 4Nm와 8Nm로 체결이 되도록 하였다. 그리고 기하학적인 형상에 의해서 토션모드가 발생하지 않게 하기 위해 네 개의 볼트 위치를 정사각형 형태로 배치하였다. [Fig.3]

† 교신저자; 한양대학교 기계공학부

E-mail : jeoh@hanyang.ac.kr

Tel : (02) 2294-8294, Fax : (02) 2299-3153

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 호원대학교 자동차기계공학부

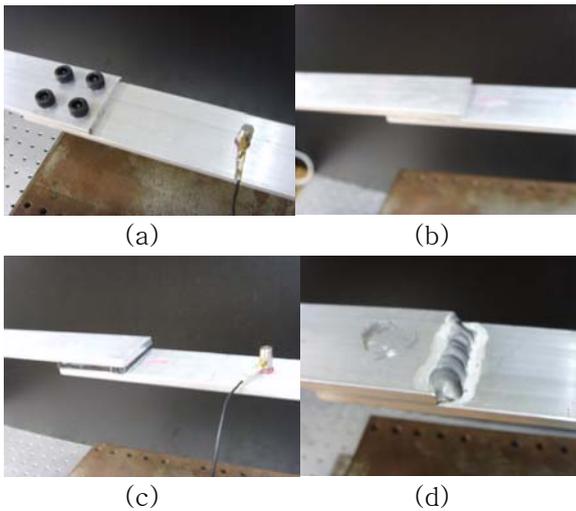


Fig.1 Beams with four conditions of joints
(a) Bolt-Nut (b) Adhesion(Epoxy) (c) Rubber (d) Welding

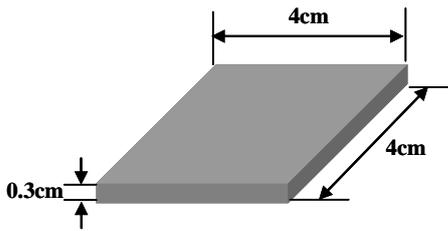


Fig.2 The configuration of rubber

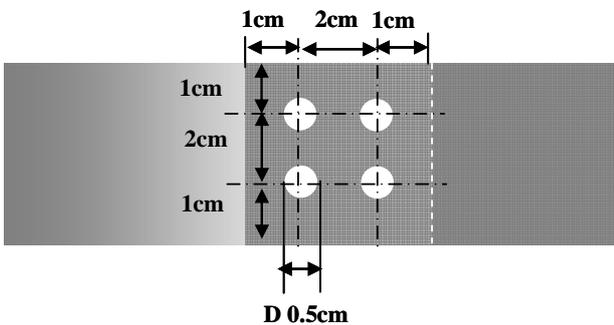


Fig.3 The position of bolt in surface of joint

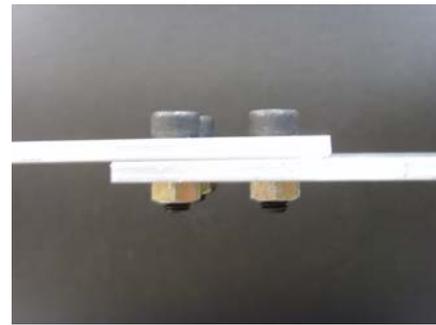


Fig.4 The joint of bolt-nut

3. 실험

본 실험에서는 FFT 신호분석 장비(B&K Pulse3560-B040), 가속도계(Rion PV-90B), 임팩트 해머(Dynapulse), Power amplifier(B&K2692), 결합부가 포함된 알루미늄빔을 사용하였다. 다음의 [Fig.5]는 실험장치구성에 대해 나타내었다.

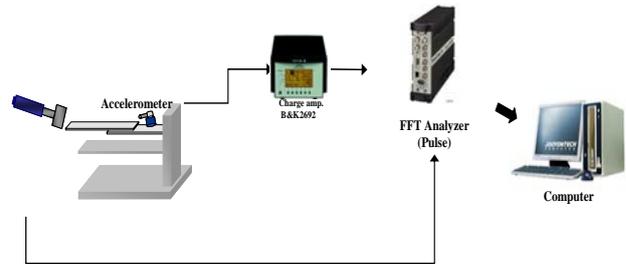


Fig.5 Equipment of experiment

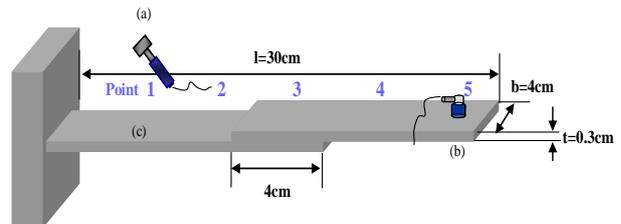


Fig.6 The position of excitation and measurement
(a) Impact hammer (b) Accelerometer (c) Aluminum beam (lap-jointed)

알루미늄보의 한 쪽 끝단을 고정시키고 임팩트 해머를 이용하여, 제작된 결합부를 포함하는 알루미늄보의 한 점(Point 1)을 가진시키며 일정한 거리(6cm)의 5 점에서 가속도계로 측정을 하였다. 오차를 줄이기 위해 동일한 위치에서의 실험을 3 회 실시한 후 평균을 내었다. 이를 통해 각 측정점의 FRF 를 구한 후 1,2,3 차 고유진동수에서의 허수부 값을 가장 큰 값으로 정규화하여 모드형상을 도출했다. 또한, 얻어진 모드형상에서 측정점 사이의 값을

선형으로 가정하여 노드점의 위치를 구하였다.

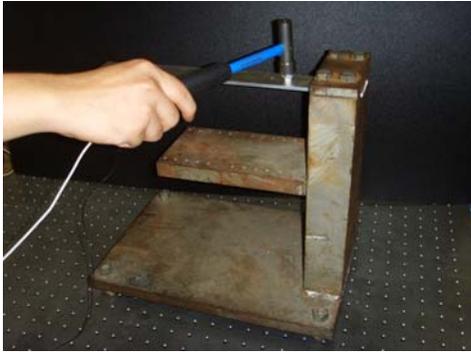


Fig.7 Equipment of modal testing

4. 결과 및 고찰

모달테스팅을 통해 얻은 데이터를 FFT 하여 FRF를 구하고 1,2,3 차 고유진동수를 확인 한 후, 각 차 고유진동수에서의 측정위치에 따른 FRF의 허수부 값으로 모드형상을 구하였으며, 절대값이 가장 큰 값으로 정규화하였다. 노드점이 생기는 2 차와 3 차 모드형상의 경우, 선형으로 가정하여 노드점의 위치를 찾아냈다. 1,2,3 차를 통틀어 고무가 가장 낮은 고유진동수를 보였으며, 1,2 차 고유진동수는 접착이, 3 차는 볼트-너트 8Nm 가 가장 높은 경향을 나타내었다. 이 결과는 각 결합부에 대한 상대적인 강성의 크기 비교를 가능케 한다. 상대적으로 고무결합은 4Nm의 결합보다도 낮은 고유진동수를 가지므로 결합부의 체결력이 4Nm 이하였다는 것을 알 수 있다.[Table1]

Table1. Natural Frequency

Joints		Natural Frequency(Hz)		
		1st	2nd	3rd
Bolt-Nut	4Nm	34	208.8	620
	8Nm	34	209.6	620.8
Adhesion		35.2	226.8	614
Rubber		33.6	197.2	594
Welding		34.4	234.8	612

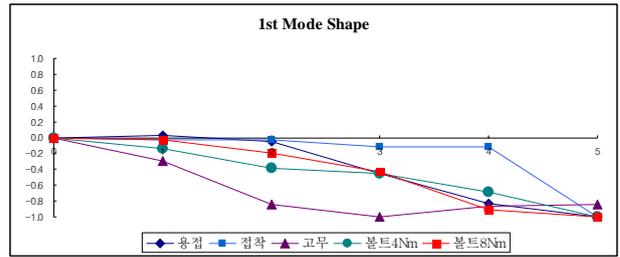


Fig.8 Comparison of 1st mode shape

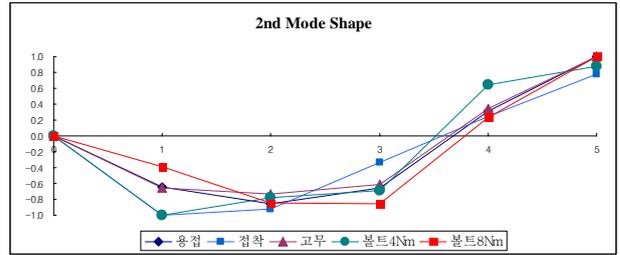


Fig.9 Comparison of 2nd mode shape

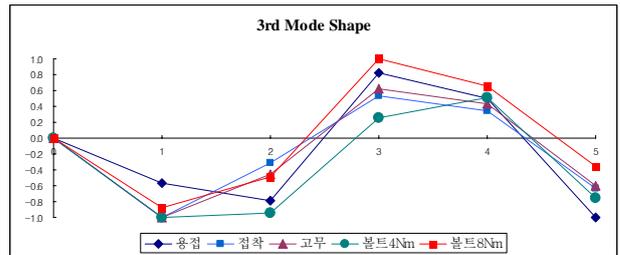


Fig.10 Comparison of 3rd mode shape

결합부를 포함하는 외팔보의 전체길이(30cm)에 대한 노드점의 위치를 고정단에서부터의 비로 나타내었다.[Table2]

Table2. The ratio of positions of nodal points on total length of beam

Joints	2 nd Mode	3 rd Mode	
		Node1	Node2
Normal	0.797	0.461	0.873
Bolt-Nut	4Nm	0.703	0.881
	8Nm	0.758	0.930
Adhesion	0.715	0.474	0.870
Rubber	0.727	0.485	0.884
Welding	0.736	0.498	0.867

결합부를 갖지 않는 일반적인 외팔보에 대한 노드점 위치변화를 전체길이에 대한 비(%)로 나타내었다. 노드점의 위치과약을 통해 구조물이 진동

할 경우 크랙 발생 가능성이 높은 부분을 예측하고 강성보강 등의 조치를 취할 수 있다.[1]

2 차 고유진동수의 경우, 결합부의 존재로 인해 노드점의 위치가 모두 좌로 이동했으며 3 차 고유진동수에서 고정단에 가까운 노드점은 우로 이동하는 경향을 보였다.[Fig.11,12] 이는 노드점이 0.433~0.566 (전체 길이에 대한 비율)의 위치에 제작된 결합부의 중앙을 향하여 이동한 것으로 보여진다.

Table3. Change of positions of nodal points to normal cantilever beam (%)
(+) : Right, (-) : Left

Joints	2 nd mode	3 rd mode	
		Node1	Node2
Bolt-Nut	4Nm	-9.43	9.60
	8Nm	-3.97	0.41
Adhesion	-8.22	1.25	-0.25
Rubber	-7.00	2.36	1.15
Welding	-6.14	3.73	-0.59

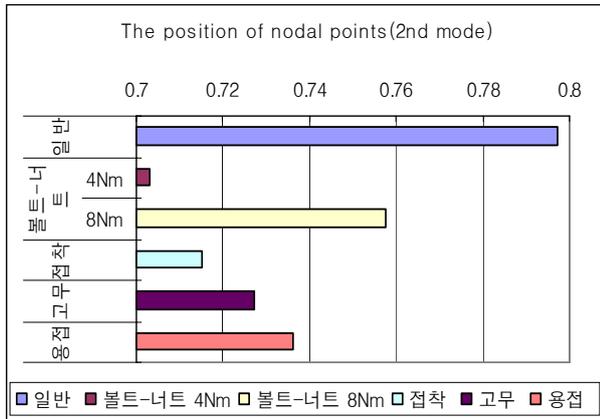


Fig.11 The position of nodal points(2nd mode)

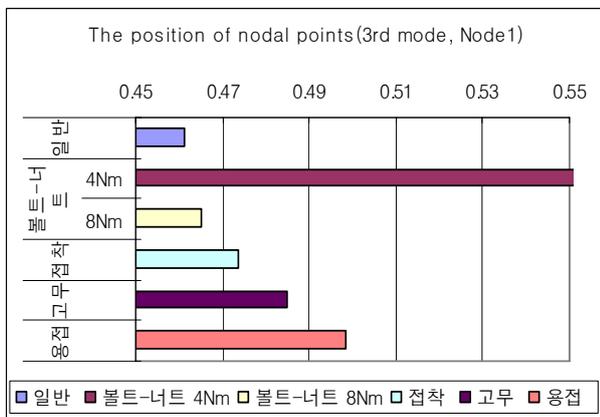


Fig.12 The position of nodal points(3rd mode) (Point2-Point3)

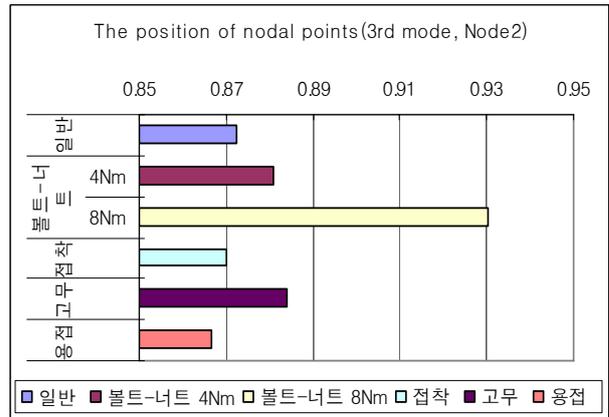


Fig.13 The position of nodal points(3rd mode) (Point4-Point5)

5. 결론

네가지 조건의 결합부를 포함하는 외팔보를 제작한 후, 모달테스팅을 통하여 고유진동수와 모드 형상 그리고 노드점의 위치를 파악하였다. 고무와 같이 방진의 효과가 있는 결합의 경우 고유진동수가 다른 결합들에 비해 상대적으로 낮아지는 것을 알 수 있었다. 노드점의 파악은 진동으로 인한 파괴나 고장을 예측하고 대책을 세우는데 필요하며, 네 가지 결합조건 모두 노드점이 결합부의 중앙을 향하여 이동하는 경향이 나타났다.

참고 문헌

- (1) X.He., S.O. Oyadiji 2001, "Influence of adhesive characteristics on the transverse free vibration of single lap-joined cantilever beams", Journal of Materials Processing Technology
- (2) H. Saito, H. Tani, 1984, Vibration of bonded beams with a single lap adhesive joint, J. Sound Vib.92 299~309
- (3) M.D. Rao, S. He, 1992, Vibration analysis of adhesively bonded lap joint. I. Theory, J. Sound Vib.152 405~416.
- (4) S. He, M.D. Rao, 1992, Vibration analysis of adhesively bonded lap joint.II. Numerical solution, J. Sound Vib.152 417~425.
- (5) W.J. Renton, J.R. Vinson, 1977, Analysis of adhesively bonded joints between panels of composite

materials, ASME J. Appl. Mech.44 101~106

(6) T.C. Ko, C.C. Lin, R.C. Chu, 1995, Vibration of bonded laminated lap-joint plates using adhesive interface elements, J. Sound Vib.184 567~583

(7) J.N. Reddy, Free vibration of antisymmetric, angle-ply laminated plates including transverse shear deformation by the finite element method, J. Sound Vib.66 565~576