

체결방법에 따른 랩조인트의 동특성 해석

정영도* · 박명균** · 박세만** · 최영식*

A Study on Dynamic Characteristics of Single Lap Joints with Different Joining Methods

Y. D. Jung, M. K. Park, S. M. Bahk, Y. S. Choi

Key Words: Bolted Lap Joint(볼트체결 랩조인트), Loss Factor(손실계수), Natural Frequency(고유진동수), Viscoelastic Damping Polymer(점탄성재)

Abstract

Two types of bolted lap joints, one with a viscoelastic layer and the other without the viscoelastic layer were chosen to analyze the dynamic characteristics of the joints with the mechanical properties of the bolts of the joints being taken as computational variables. The finite element method was used along with the impact hammer technique to verify the FEM model. The results in the bolted lap joints reveal that the higher the Young's Modulus for the bolts are the higher the natural frequencies results for the joints. However, the natural frequency differences in the first and second mode are not substantial but become noticeable in the higher modes. Lower natural frequencies were obtained for the bolted lap joints with the viscoelastic layer when compared with those of the bolted lap joints without the viscoelastic layer. And the differences in the natural frequencies for the two types of joints are relatively small in the first and second mode whereas in the higher mode the differences become significant. The loss factors were observed to be significant especially in the second mode for the bolted lap joints with the viscoelastic layer.

1. 서론

기계구조물 결합의 대부분은 볼트결합이나 용접의 방법을 사용한다. 볼트결합의 경우 볼트의 이완과 피로파괴는 전체구조물의 수명을 단축시키는 결과를 가져오게 된다. 이에 볼트 결합부에 발생하는 응력 분포에 관한 연구⁽¹⁾⁽²⁾가 진행되어 왔다. 또한 구조물에서 발생하는 소음과 진동을 줄이기 위하여 구조물을 복합화하는 연구가 이루어져왔는데, 그 중 주로 사용하는 방법이 점탄성재를 흡진재로 사용, 구조재에 접촉·적층하여 구조물의 방진·흡진 특성을 극대화하는 방법이

다.⁽³⁾⁽⁴⁾

이는 특히 동적 하중을 받아 진동하는 구조물이 공진할 때 그 진폭과 고유진동수를 크게 감소시킬 수 있기 때문에 구조물 설계에 있어 매우 중요한 사항이다.

볼트 체결시 볼트의 강도, 체결력, 오버랩 되는 면적 등 많은 변수가 작용한다. 이와 같은 변수 중에서 진동을 감소할 수 있는 방법인 점탄성재를 삽입하는 방법을 이용하여, 본 연구에서는 볼트로 체결한 경우와 체결되는 시편사이에 점탄성재를 삽입하므로써 볼트로 체결할 때 점탄성재의 영향과 흡진효과를 실험해 보았다.

그러나, 아직 이런 실험에 관해서는 이론적 정리나 공식이 성립되어 있지 않으므로, 실험에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여 유한요소해석 프로그

* 회원, 명지대학교 기계공학과 대학원

** 회원, 명지대학교 기계공학과

램인 ANSYS 5.5를 이용하여 실험치와 해석치를 비교·검토하였다.

2. 기본 이론

2.1 모달변형에너지법(modal strain energy method)

모달변형에너지법⁽⁵⁾은 댐핑이 없는 경우의 모달 해석을 통해 구한 각 모드형상과 각 부위의 재료에 대한 손실계수를 이용하여 전체 계의 손실계수를 평가하는 방법으로 구조물의 복잡한 형상에 대해서도 계의 손실계수를 구할 수가 있다.

$$\frac{\eta_s^{(r)}}{\eta_d^{(r)}} = \frac{(\phi^{*(r)})[K_{vR}](\phi^{*(r)})}{(\phi^{*(r)})[K_R](\phi^{*(r)})} = \frac{U_{visco}}{U_{total}} \quad (1)$$

여기서 U_{total} 와 $\eta_s^{(r)}$ 은 각 모드에서 각계의 전체 스트레인에너지와 계의 손실계수이며, U_{visco} 와 $\eta_d^{(r)}$ 은 r번째 모드에서 점탄성층의 스트레인에너지와 재료 손실계수이다. $\phi^{*(r)}$ 은 r번째 모드의 계의 모달벡터, $[K_R]$ 은 계의 실수부 강성 매트릭스, $[K_{vR}]$ 은 점탄성층의 실수부 강성매트릭스이다.

3. 실험 방법

본연구에 사용된 실험은 일반 상온에서 동적신호 해석기와 충격망치를 이용하는 충격기법(Impulse Technique)을 사용하였다.

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도이다. 방진테이블에 지그를 고정하고 지그에 시편을 고정시킨 다음 충격망치(Model HP35207A)로 시편을 가진 시킨 후 가속도센서(Model PCB 353B16)를 사용하여 신호를 받았다.

충격망치는 노이즈가 없는 정확한 신호를 가진 시킬 수 있는 곳이어야 한다. 본 연구시 모드변화를 찾기 위해서 좌우로 이동할 수 있는 이송장치를 개발하여 고정함으로서 10회 평균값을 얻기 위해 스프링에 고정, 일정한 힘으로 시편을 반복 가진 시킴으로써 손으로 가진 했을 때의 부정확함을 피할 수 있었다.

충격망치와 가속도센서에 의한 신호는 동적신호기(Model HP35670A)를 사용하여 주파수 형상

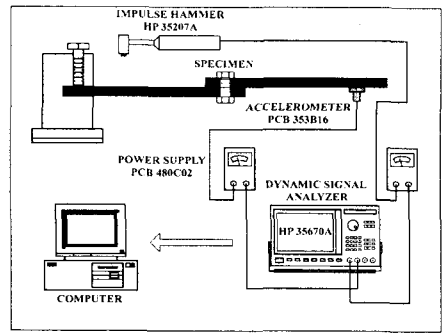


Fig.1 General block diagram of instrumentation

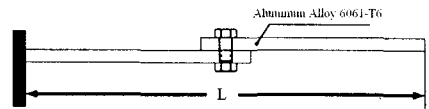


Fig. 2 (a) A structure with a bolted joint

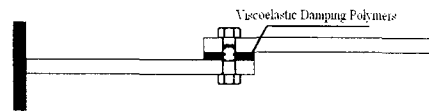


Fig. 2 (b) A bolted joint with an inserted viscoelastic layer

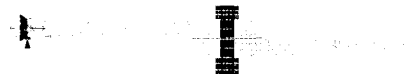


Fig. 3 Finite element model of a bolted joint

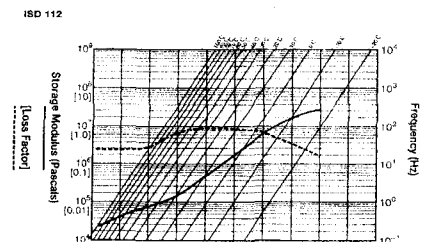


Fig. 4 Storage modulus and loss factor of the viscoelastic layer

함수(Frequency Response Function) 분석을 행하였다.

Bendat과 Piersol는 주파수 반응함수 추정치의 임의의 오차(random error)는 $1/\sqrt{2n}$ 에 비례하고 있다고 설명하고 있다. 여기서 n은 기록수나 평균횟수를 가리킨다. 따라서 전체적인 평균을 통하여 측정오차를 줄일 수가 있다. 본 연구에선 여러 곳에서 시편을 가진 시켜보고 신호를 측정해 본 결과 가지는 지그 근처에 가까운 곳, 그리고 1차 모드 응답신호측정은 시편의 끝단부근에서 가장 좋은 신호를 취할 수 있었다.

또한 충격망치 신호는 다시 증폭기(Model PCB480C02)를 사용하여 신호를 증폭하여 사용함으로써 Coherence가 보다 좋은 신호를 얻을 수 있도록 하였다.

4. 유한요소해석

본 유한요소 해석에 2가지 해석 모델이 사용되었다. 그중 하나는 두 개의 알루미늄 보를 볼트로 결합한 랩조인트 구조물이고 다른 하나는 전자와 동일 하지만 두 개의 보 사이에 점탄성층이 접착·삽입된 랩조인트 구조물이다. 두 구조물 모두 한 쪽 끝단이 완전 고정된 2차원 모델로 가정하였다. 두 모델의 형상은 Fig. 2에 나타내었다. 이때 사용된 기본적 볼트는 M12볼트와 너트를 사용하였다. Fig. 2 (b)는 두 개의 보의 접촉면에 점탄성층이 삽입되고 M12볼트와 너트로 결합된 경우이다. 전체길이 L은 340mm이고, 두께는 10mm, 폭은 40mm, 각각의 보의 길이는 200mm, 접합된 부분의 길이는 60mm이다. 점탄성층의 두께는 $500\mu\text{m}$ 이다.

본 해석시 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 5.5를 사용하였으며 이때 사용된 유한요소 메쉬는 Fig. 3과 같고 각 절점에서 2자유도를 갖는 4절점 요소인 Plane42를 사용하였으며 사용된 요소 수는 볼트로만 체결된 모델의 경우는 240개 점탄성층이 삽입된 모델의 경우는 260개의 요소를 사용하였다. 점탄성층의 탄성계수는 Fig. 4를 이용하여 구하였다. 자유 횡진동을 적용한 모달 해석을 통하여 각 고유치와 모드형상을 확

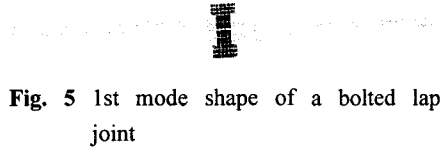


Fig. 5 1st mode shape of a bolted lap joint

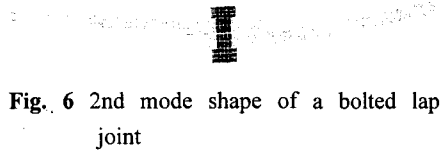


Fig. 6 2nd mode shape of a bolted lap joint

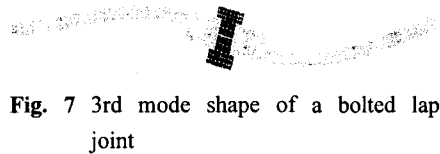


Fig. 7 3rd mode shape of a bolted lap joint

Table 1 Experimental and FEM results data

	method	1st mode	2nd mode	3rd mode
EXP	Only bolt	64Hz	N · A	1104Hz
	viscoelastic layer	60Hz	N · A	N · A
FEM	only bolt	62Hz	328Hz	1103Hz
	viscoelastic layer	62Hz	328Hz	1096Hz

인하고 각 고유치에서의 스트레인에너지를 구하여서 식(1)의 모달변형에너지법으로 손실계수를 구하였다.

볼트의 기본 물성치(M12 볼트체결시)를 적용하여 1차 해석을 하고 실험치와 비교 모델의 타당성을 검증한 후 볼트의 기계적 성질인 탄성계수와 밀도를 파라미터로 하여 파라미터가 변했을 경우 고유진동수의 변화와 손실계수 변화를 예측하였다.

5. 결과 및 고찰

실험 결과 볼트로만 체결한 랩조인트와 점탄성층을 삽입 볼트체결한 랩조인트의 주파수 응답결과를 보면 점탄성층이 삽입된 랩조인트의 주파수 응답함수는 주파수가 증가할수록 점점 더 완만해

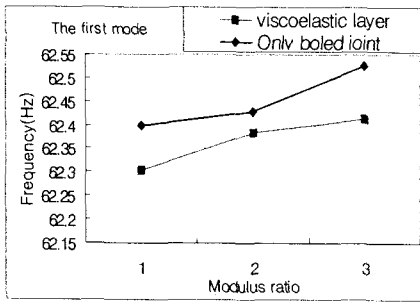


Fig. 8 1st mode for Young's modulus ratio

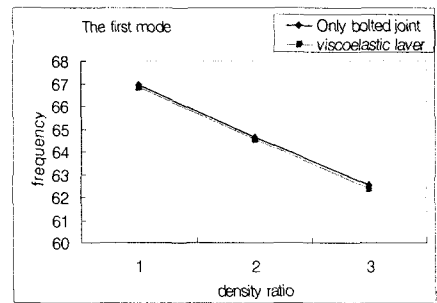


Fig. 11 1st mode for density ratio

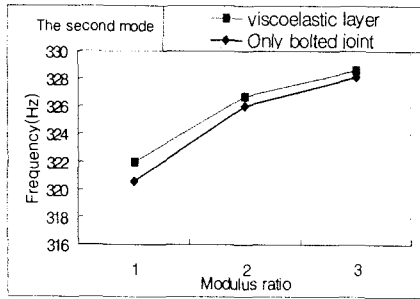


Fig. 9 2nd mode for Young's modulus ratio

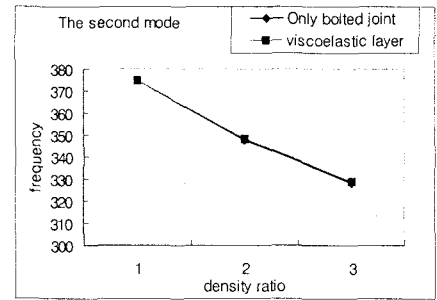


Fig. 12 2nd mode for density ratio

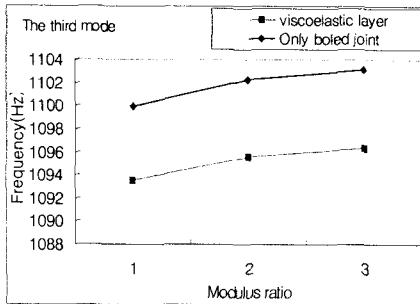


Fig. 10 3rd mode for Young's modulus ratio

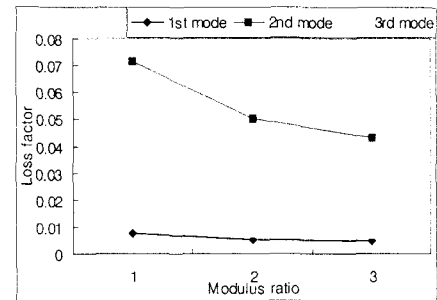


Fig. 13 System loss factor for Young's modulus ratio

졌는데 이는 점탄성층의 삽입시 감쇠 효과가 나타남을 알 수 있다.

본 실험과 유한요소법 해석시 사용된 구조물의 알루미늄과 볼트의 각각의 탄성계수는 70GPa이고 200GPa 이다. 그리고 알루미늄의 밀도값 2710kg/m³ 과 볼트의 밀도값 7860kg/m³ 을 사용하였다. 그 결과 볼트로만 체결한 랩조인트의 경우 실험값은 1차 모드에서는 64Hz, 3차 모드에서는 1104Hz가 나왔으며 유한요소법의 경우 1차 모드에서는 62Hz, 3차 모드에서는 1103Hz가 나

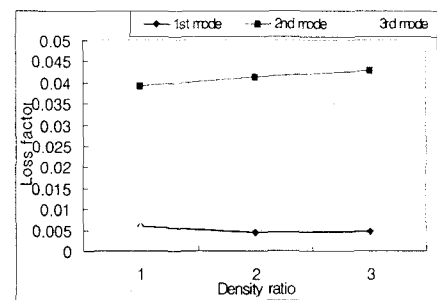


Fig. 14 System loss factor for density ratio

와 실험적 결과와 오차범위 1% 미만으로 잘 일치됨을 알 수 있다. 반면 점탄성층을 삽입한 랩조인트의 경우 실험적으로는 1차 모드만 관찰할 수 있었다. Fig. 5, 6, 7은 점탄성층이 삽입·접착된 볼트체결랩조인트 구조물에 대해 유한요소해석에 의해 구한 모드형상이다.

유한요소해석과 실험한 데이터를 비교한 결과는 Table 1에 나타내었다. 유한요소법 해석결과 점탄성층이 있는 랩조인트 구조물의 경우에는 고모드로 갈수록 볼트만 체결한 구조물에 비해서 고유진동수가 낮아지는 경향을 읽을 수가 있었다. 이는 점탄성층 삽입에 의한 감쇠효과라고 생각할 수 있다. 다양한 볼트를 사용 체결시 고유진동수와 손실계수의 변화(점탄성재 삽입 랩조인트)를 알기 위해서 알루미늄과 볼트의 상대적 탄성계수비(E_{bolt}/E_{Al}) 및 상대적 밀도비(ρ_{bolt}/ρ_{Al})에 따른 고유진동수 변화와 손실계수 차이를 유한요소법을 이용해서 알아보았다. 그 결과 알루미늄과 볼트의 상대적 탄성계수의 비가 커지면 Fig 8, 9, 10에서 보여주듯이 고유진동수는 증가되는 경향을 알 수 있다. 즉 볼트의 탄성계수가 커지면 커질수록 강하고 단단한 볼트체결의 영향으로 전체 체결 랩조인트의 경우 고유진동수는 증가함을 알 수 있다. 이 경우 점탄성층을 삽입한 경우에도 해당됨을 알 수 있다.

체결재인 볼트의 밀도가 고유진동수에 어떠한 영향을 미치는가 알기 위해 체결 모재인 알루미늄과 볼트의 상대적 밀도를 변화시켜 그 영향을 검토하였다. Fig. 11, 12에 나타난 대로 상대적 밀도(ρ_{bolt}/ρ_{Al})가 증가함에 따라 고유진동수는 증가됨을 알 수가 있다. 그 이유는 볼트의 밀도는 전체 랩 조인트의 구조물 무게 증가에 크게 영향을 미치지 않지만 상대적 밀도의 증가는 전체시스템의 중량에 영향을 미친다. 즉 체결모재인 알루미늄과 볼트의 상대적 밀도비가 크다는 것은 전체시스템의 무게 증가를 의미한다. 따라서 전체 랩조인트 구조물의 무게의 증가로 인해서 계의 고유진동수가 감소했기 때문이라고 생각된다. 1차모드와 2차모드의 경우 점탄성층이 삽입된 랩조인트 구조물과 그렇지 않은 구조물과 차이를 발견할 수 없었다. 그러나 3차모드부터는 점탄성층이 삽입된 볼트체결 랩구조물의 경우 고유진동

수가 감소함을 알 수가 있었다. 유한요소법으로 10차모드까지 비교한 결과 점탄성층이 있는 구조물의 경우 고모드로 갈수록 고유진동수가 감소한다는 것을 알 수가 있었다. 즉 고유진동수는 점탄성층이 삽입된 랩 조인트와 삽입되지 않은 랩조인트는 차이가 없이 진행되고 고모드로 갈수록 감쇠효과가 나타나 고유진동수가 상대적으로 낮은 주파수에서 발생함을 알 수 있었다.

Fig. 13과 Fig. 14는 점탄성재가 삽입된 볼트체결 랩조인트의 경우 볼트의 상대적 탄성계수 비 및 상대적 밀도비에 따른 손실계수를 비교한 것이다. 탄성계수비와 밀도비에 관계없이 공히 1, 3차 모드에 비해 2차모드에서 손실계수가 크게 발생함을 알 수가 있다. 또한 상대적 탄성계수비가 증가할수록 손실계수는 감소하는 것을 확인할 수가 있었고, 밀도비가 증가할수록 손실계수 역시 증가함을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구 해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 점탄성층이 삽입된 볼트체결랩조인트의 경우 그냥 볼트만 체결된 구조물 보다 1차모드와 2차모드에서는 비슷하지만 고차모드로 갈수록 고유진동수가 저하됨을 알 수 있다.
- (2) 상대탄성계수비(E_{bolt}/E_{Al})가 증가하면 할수록 고유진동수는 상승됨을 알 수 있다.
- (3) 상대밀도비(ρ_{bolt}/ρ_{Al})가 높아질수록 고유진동수는 낮아진다는 것을 알 수 있다.
- (4) 점탄성층이 삽입된 구조물에서 볼트의 탄성계수비가 커질수록 손실계수는 작아지고 밀도가 커질수록 손실계수는 커지지만 매우 미미하다는 것을 알 수가 있다.

참고문헌

- (1) T. F. Lehnhoff, M. L. McKay, 1994, "Member Stiffness and Contact Pressure distribution of Bolted Joints", *Transactions of the ASME* Vol. 116: pp.550~557.
- (2) Rao, M.D., 1992, "Vibration Analysis of Adhesively Bonded Lap Joint, Part I: Theory",

J. of Sound and Vibration, Vol, 152(3),
pp.405~416.

- (3) 박응순, 1995, "점탄성층을 삽입한 3층
적층보의 진동감쇠특성에 관한 연구",
명지대학교 기계공학과 석사.
- (4) 신현정, 1992, "점탄성층이 샌드위치된
복합적층평판의 진동감쇠 특성", *경북대학교
기계공학과 박사.*
- (5) Conor D. Johnson, David A. Kienholz, 1992,
"Finite Element Prediction of Damping in
structures with Constrained Viscoelastic
Layers", *AIAA Journal*, Vol, 20, No.9,
pp.1284~1290.