

체결력에 따른 볼트 결합구조물의 응력집중계수 평가

송준혁*(전북대학교 대학원), 강희용, 양성모(전북대학교 기계공학부, 자동차신기술연구소)

Estimation of stress concentration factor in bolt jointed structure with variable preload

J. H. Song, H. Y. Kang, S. M. Yang

Abstract

Most of mechanical structures are combined of substructures such as beam and/or plates. There are few systems with unibody structures but are not a few systems with united body structures. Generally the dynamic analysis of whole structures is performed under alternating load. However, the analysis of each joint area is more important than others for zero severity.

This paper presents the results of analysis of concentration stress in bolt jointed structure with variable preload. At first, a static vibration test was performed to find out a nominal stress of bolt jointed plates from the relationship between natural frequency and nominal stress. Then a concentration stress was computed at contact point between bolt and plate in the structure. It is believed that the proposed method has promising implications for safer design with fatigue quality index of stress concentration factor and has merit for cost down and saving time at the beginning of vehicle development.

key-word : joint(결합부), pre-load(체결력), fatigue quality index(피로설계인자), stress concentration factor(응력집중계수), natural frequency(고유진동수)

1. 서 론

대부분의 기계구조물은 보 또는 평판 등의 서보구조의 결합구조로 되어있다. 따라서 기계구조

물을 설계할 때는 동적 하중에 대한 해석은 물론 구조물에 존재하는 불연속지점 즉, 보 또는 평판들을 연결하는 조인트에 대한 해석은 아주 중요한 의미를 가진다.

기존의 연구방법 즉, 피로수명 평가실험은 그 비용 면에서나 시간적인 면에서 매우 비경제적이다. 결합부에 대한 해석은 해석기법의 차이에 따라 그 오차가 심하고 실제 실험과 같은 결과를 얻기 위해서는 많은 사항들을 고려해 주어야 하기 때문에 아주 복잡한 것이 사실이다[1,2,3]. 특히 조인트 부위의 해석은 아주 복잡해서 실제로 전체 구조물의 해석시 무시하고 해석하는 것이 일반적이다.

현재 대부분의 기계구조물에서는 용접에 의한 결합보다는 볼트 또는 리벳을 이용하여 조인트를 구성한다. Jarfall, L.E.[4]는 볼트/리벳의 체결형태(fastener type), 설치방법(installation), 틈새(clearance), 구멍 가공 방법 등에 의한 영향을 고려하여 볼트/리벳에 작용하는 응력집중현상을 평가하였다. 하지만, Gerhard H. Junker[5]의 연구에서 볼트의 경우 강제 진동 하에서, 그 체결력(pre-load)에 변화를 일으킨다. 필연적으로 처음 설계한 하중보다 훨씬 작은 하중에서 체결체로서의 그 의미를 상실하게 되는 것이다. 따라서 설계 응력보다 훨씬 낮은 응력에서 구조물의 파손을 설명하기 위해서는 체결력의 변화에 따른 응력집중계수의 변화를 계산할 필요가 있다.

본 연구에서는 우선, 구조물의 결합상태를 포괄적으로 표현하는 구조물의 고유진동수변화를 측정한다. 다음에는 고유진동수와 응력사이의 관계와 볼트의 피로설계인자로부터 볼트 결합부에 작용하는 최대응력을 계산한다.

본 연구방법의 장점은 간단한 실험을 통해

조인트 부위의 거동이 전체 구조물의 거동에 미치는 영향을 평가할 수 있다는 것이다. 특히 조인트의 동적거동에 따른 전체 구조물의 용력집중 현상을 간단하게 예측할 수 있어 신규 기계구조물의 초기 설계단계에서 매우 유용하게 쓰일 수 있다.

Open holes	1.0
Lock bolt(steel)	0.75
Rivets	0.75
Threaded bolts	0.75 - 0.9
Taper -Lock	0.5
Hi-Lock	0.75

2. 이론적 배경

2.1 용력집중계수

용력집중계수(SCF)는 기준 용력에 대한 최대 용력의 비로 표현된다.

$$SCF = \alpha \beta \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ref}}} \quad (2-1)$$

α : Hole or surface condition factor

β : Hole filling factor

본 연구에서는 볼트의 구멍 가공 방법, 형태에 따른 인자 α, β 를 고려하여 볼트 결합 구조물의 용력 집중을 평가한다. Severity Factor(SF)[5] 개념은 볼트가 기준 체결력으로 완전하게 체결되었을 경우에 대한 최대용력집중계수를 계산한 것으로, 실제 작동 조건에서 설계치에 못 미치는 환경에서 그 기능을 상실하는 것을 설명하지 못한다. 또한 SF 개념은 표준 시편에서 그 결합 형태에 대한 상대적인 평가만이 가능하다. 따라서 설계용력보다 낮은 용력 조건에서 파손에 이르는 경우에 대해서는 설명하지 못한다.

본 연구에서는 볼트의 체결력과 구조물의 고유진동수 관계를 밝히고, 그 관계를 이용하여 볼트 풀림 정도에 따른 σ_{\max} 를 계산하는 방법을 제시한다.

Table 2-1 Hole condition factor - α [4]

Fillet radii	1.0 - 1.5
Standard hole drilled	1.0
Broached or reamed	0.9
Cold worked holes	0.7 - 0.8

Table 2-1 Hole filling factor - β [4]

2.2 진동응답과 용력 사이의 관계

강제진동을 받는 구조물의 진동응답과 구조물이 받는 용력사이에는 다음의 상호 관계가 존재한다.

$$\{q\} = [\alpha(\omega)]\{F\} \quad \text{진동응답} \quad (2-2)$$

$$\{\sigma\} = [T]_{\epsilon}^{\sigma} [T]_q^{\epsilon} \{q\} \quad \text{용력벡터} \quad (2-3)$$

여기서, $\alpha(\omega)$ 는 구조물의 동적유연성(dynamic flexibility)이고, $[T]_q^{\epsilon}$ 는 응답벡터에서 변형률 벡터로의 변환행렬, $[T]_{\epsilon}^{\sigma}$ 는 변형률에서 용력으로의 변환행렬이다. 위의 두 행렬을 계산하는 것은 컴퓨터 계산 시간이 많이 걸리므로 다음의 주파수-용력 파라미터(frequency-dependent stress parameter), $\beta_{ij}(\omega)$ 를 도입한다. 따라서 식(2-2)과 식(2-3)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\sigma = \beta_{ij}(\omega) |[\alpha(\omega)]\{F\}| \quad (2-4)$$

식(2-1)과 (2-4)에서 볼트 풀림 정도에 따른 결합 구조물의 SCF를 평가할 수 있다.

3. 볼트 결합 구조물의 SCF 평가

3.1 볼트 결합 구조물의 진동 응답

볼트로 결합된 Fig. 3-1, Table 3-1과 같은 구조물을 생각해보자.

볼트의 풀림에 따른 구조물의 진동 응답을 유도하기 위해 Fig. 3-2와 같은 모델을 세울 수 있다. 여기서, m 은 부분질량이고, k_i , c_i 는 각각 i 번째 섹터의 강성 그리고 감쇠계수이다. \vec{X}_i 는

외력벡터 \vec{F}_i 에 의한 i 번째 구조물의 응답이다.

Fig. 3-2에서 i 번째 계의 운동방정식은

$$m\ddot{x}_i + c\dot{x}_i + kx_i = F_i(t) \quad (3-1)$$

$$F_i(t) = F_0 e^{i(\omega t + (2\pi r(i-1)/N))}$$

이다. 강제조화진동에 대한 조화응답은, 다음의 행렬 형태로 나타낼 수 있다.

$$\{\mathbf{q}\} = [\alpha(\omega)]\{\mathbf{F}\} \quad (3-2)$$

$$\{\mathbf{q}\}^T = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$$

i 번째 볼트가 기준 체결력보다 낮게 체결되었을 경우, 동적강성행렬 $[Z]$ 는 :

$$[Z] = [\alpha_{ii}]^{-1} = [k_{ii}] - [m_{ii}]\omega^2 + i[C_{ii}]\omega \quad (3-3)$$

이 된다. 여기서, A =단면적, E =탄성계수, ℓ =볼트 피치이다. 따라서 i 번째 위치에서의 응답은 식(3-2), (3-3)에서 다음과 같다.

$$X_i = \sum_{j=1}^N \alpha_{ij} F_j \quad (3-4)$$

식(2-5)과 식(3-4)에서 구조물의 응력은 다음과 같다.

$$\sigma = \beta_{ij}(\omega) \left| \sum_{j=1}^N \alpha_{ij} F_j \right| \quad (3-5)$$

체결력 변화에 따른 영향을 확실히 알아보기 위해, 볼트의 피치를 일정하게 하고 8개 볼트 모두를 10Nm에서 70Nm까지 10Nm씩 변화시켜 시험하였다.

볼트 피치가 일정하고 8개 모두 일정한 프리로드를 받으므로, Fig. 3-3과 같은 1자유도계 모델로 등가화 할 수 있다. 그리고 가진력은 단위 가진력 $\vec{F}_e = 1$ 로 가정한다. 진동 응답 벡터 \vec{X}_e 는 Fig. 3-3과 식(3-4)에서

$$X_e = \alpha_e F_e \quad (3-6)$$

이다. 응력은 식(3-5)에서 식(3-7)과 같다.

$$\sigma = \beta_{ij}(\omega) |\alpha_e F_e| \quad (3-7)$$

3.2 주파수-응력 (Frequency-stress) 파라미터

Fig. 3-4에서 β_{ij} 는 점 j 에서의 진동응답에 대한 점 i 에서의 응력의 비로 표현된다[3].

$$\beta_{ij}(\omega) = \frac{\sigma(s)|_{s=s_i}}{q(s)|_{s=s_i}} \quad (3-8)$$

표면에서의 응력은

$$\sigma(s) = \frac{EB}{2} \frac{d^2 q(s)}{ds^2} \quad (3-9)$$

이고, 응답벡터는 다음과 같다.

$$q(s) = \frac{[-(\sin \lambda L + \sinh \lambda L)(\cos \lambda s - \cosh \lambda s)]}{2EI\lambda^3(1 + \cos \lambda L + \cosh \lambda L)} \quad (3-10)$$

여기서, $\lambda^4 = \frac{\rho A \omega^2}{EI}$, 단면적 $A=B \times t$, $B=\frac{\pi}{4}$, $t=$ 두께, E =탄성계수이다. 위 식을 정리하면, 주파수-응력 파라미터는 다음과 같다.

$$\beta_{ij}(\omega)$$

$$= \frac{E\lambda^2 \omega}{2} \frac{\begin{bmatrix} (-\cos \lambda s_i - \cosh \lambda s_i) \\ + \frac{\cos \lambda L + \cosh \lambda L}{\sin \lambda L + \sinh \lambda L} (\sin \lambda s_i + \sinh \lambda s_i) \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} (-\cos \lambda s_i - \cosh \lambda s_i) \\ - \frac{\cos \lambda L + \cosh \lambda L}{\sin \lambda L + \sinh \lambda L} (\sin \lambda s_i - \sinh \lambda s_i) \end{bmatrix}} \quad (3-11)$$

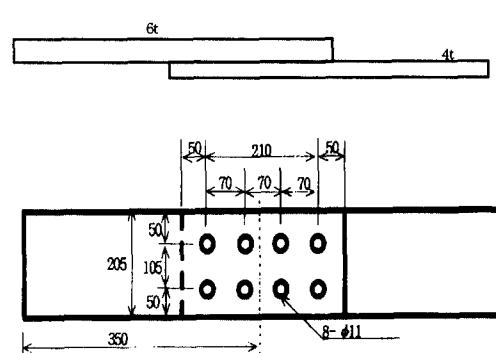


Fig. 3-1 Actual structure

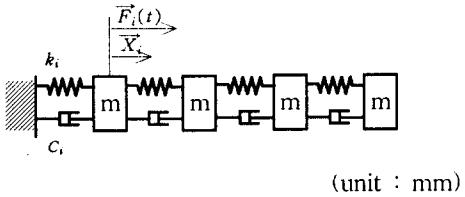


Fig. 3-2 Analytic model under forced vibration

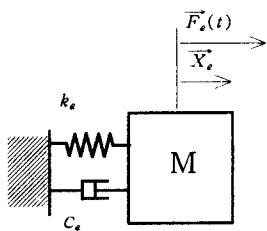


Fig. 3-3 Equivalent model of Fig. 3-2

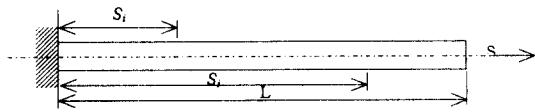


Fig. 3-4 Frequency-dependent stress parameter[3]

Table 3-1 Specimen for free vibration test

Total length	700mm	
Thickness	6mm	4mm
Length	505mm	
Width (B)	205mm	
Young's Modulus (E)	21087.7 kg/mm ²	
Poisson's ratio (ν)	0.29	
Density (ρ)	7.8 × 10E-6 kg/mm ³	

4. 결과 및 토의

Fig. 3-1, Table 3-1과 같은 시험편에 대해, 체결력을 70Nm에서 10Nm까지 10Nm씩 변화시

켜가면서 정적진동 시험을 행하였다. Fig. 4-1는 볼트 체결력이 낮아질수록 고유진동수가 낮아지는 것을 잘 보여주고 있다.

Fig. 4-1로부터 기준 체결력을 50Nm로 결정한다. 또한 볼트 구조물에서 질량 변화 없이 고유 진동수가 낮아지는 현상을 설명할 수 있다. 70~50Nm까지는 변화가 없다가 40Nm에서부터 급격한 고유진동수 변화를 보인다.

Fig. 4-2는 Fig. 4-1과 식(3-7)로부터, 구조물의 볼트 위치에서의 용력값을 도시한 것이다. 체 결력이 낮아질수록 용력이 더 커짐을 알 수 있다. 40Nm까지는 완만한 변화를 보이다가 30Nm부터는 급격한 국부용력집중 현상을 보인다.

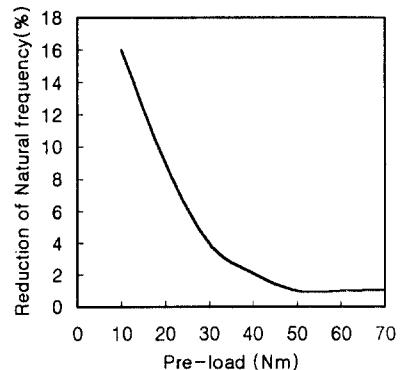


Fig. 4-1 Reduction of natural frequency with reduction of pre-load of bolts

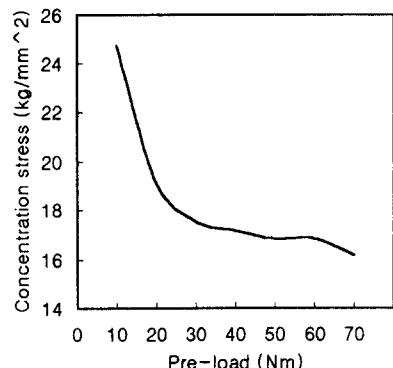


Fig. 4-2 Concentration stress with variable pre-load

Fig. 4-3은 위의 결과를 종합하여 식(2-1)로부터 계산되어진 응력집중계수를 도시한 것이다. 응력집중계수는 70Nm~50Nm까지는 12 정도로 균일한 값을 보인다. 하지만 체결력이 낮아지면 본 실험결과 17.81로 46.8%까지 증가한다. Table 4-1은 체결력 변화에 따른 응력집중계수를 정리한 것이다.

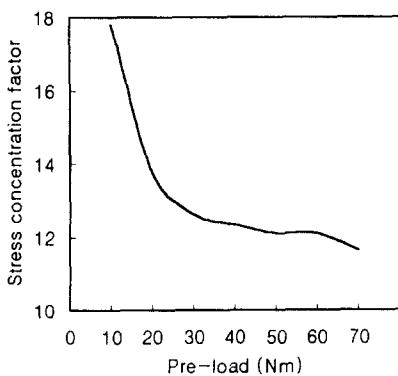


Fig. 4-3 Stress Concentration Factor with variable pre-load

Table 4-1 Stress Concentration Factor

Pre load	10Nm	20Nm	30Nm	40Nm	50Nm	60Nm	70Nm
ref. 50Nm	20%	40%	60%	80%	100%	120%	135%
SCF	17.81	13.77	12.63	12.36	12.13	12.13	11.67

5. 결 론

볼트 결합 구조물에서 체결력 변화에 따른 고유진동수변화와 응력의 변화관계를 이용하여 응력집중계수를 해석하였다. 응력집중계수는 피로안전설계에서 매우 중요한 개념으로, 현재까지는 볼트가 완벽하게 체결된 것으로 가정하고 설계하

였기 때문에 변동하중을 받는 구조물의 수명 평가에서 많은 오차를 초기설계부터 포함하는 것이다.

본 연구에서는 8개의 볼트로 결합된 두께가 다른 두 평판에 대해 볼트 체결력을 70Nm에서 10Nm까지 10Nm씩 변화시켜 가면서 진동실험을 수행하였다. 본 연구에 이용된 구조물에 요구되는 최소 볼트 체결력은 50Nm이었다. 기준 체결력을 50Nm로 하고 체결력변화에 따른 응력집중계수의 변화를 평가하였다. 체결력이 기준 체결력에 비해 60% 수준까지 낮아지는 동안 응력집중계수는 완만한 곡선을 따라 소폭 증가를 보인다. 하지만 60% 미만으로 낮아지게 되면 응력집중계수는 급격히 증가하여 기준 체결력으로 체결되었을 때보다 46.8% 까지 증가함을 알 수 있다. 체결력 변화에 따라 응력집중계수는 최고 52%까지 변화한다.

본 논문에서 제시한 개념을 통해 볼트 결합 구조물에서 볼트의 체결력이 요구되는 값보다 작게 체결되었거나 사용 중에 볼트의 체결력 감소함에 따라 응력이 집중되는 현상을 정량적으로 설명할 수 있다. 따라서 본 연구의 결과를 적용하여 볼트 결합 구조물의 피로설계를 할 경우, 기준의 경우보다 더욱 안전한 설계가 가능하다.

본 연구에서는 볼트 결합 구조물의 경우에 응력집중현상을 해석하였다. 다음에는 본 개념을 확장시켜 피로수명에 관한 연구가 이뤄져야 할 것이다.

6. 참고문헌

- [1] Toshiaki Sakurai, Yoshinobu Kamada, "Structural joint stiffness of automotive body", SAE 880550, 1988
- [2] E. Nikolaidis, Kwangju Lee, "A 3-D joint model for automotive structures", SAE 921088, 1992
- [3] 김윤영, 김진홍, 장정훈, 임홍재, "박스보 T형 조인트의 강성 평가에 관한 연구", 한국자동차공학회논문집, 제3권, 제4호, p.68~77, 1995
- [4] Jarfall, L.E. "Optimum Design of Joints-The Stress Severity Factor Concept", The Aeron-

- autical Research Institute of Sweden, 1967
- [5] Gerhard H. Junker, "New Criteria for Self-Loosening of Fasteners Under Vibration", European Research and Engineering, Stnadard Pressed Steel Co., Unbrako Koblenz, 1969
- [6] Bishop R.E.D., and Johnson D. J., "The Mechanics of Vibration", Cambridge University Press, 1979