

적외선 열화상 응력측정법에 의한 동적 응력집중계수 예측

최만용*, 강기수#, 박정학*, 안병욱**, 김경석***

Estimation of Dynamic Stress Concentration Factor by Infrared Thermography Stress Analysis

Man Yong Choi*, Ki Soo Kang#, Jeong Hak Park*, Byung Wook Ahn** and Koung Suk Kim***

ABSTRACT

Structural components subjected to high frequency vibrations, such as those used in vibrating parts of gas turbine engines, are usually required to avoid resonance frequencies. Generally, the operating frequency is designed at more than resonance frequencies. When a vibrating structure starts or stops, the structure has to pass through a resonance frequency, which results in large stress concentration. This paper presents the transient thermoelastic stress analysis of vibrating cantilever beam using infrared thermography and finite element method (FEM). In FEM, stress concentration factor at the 2nd resonance vibration mode is calculated by the mode superposition method of ANSYS. In experiment, stress distributions are investigated with infrared thermography and dynamic stress concentration factor is estimated. Experimental result is agreed with FEM result within 10.6 %. The advantage of this technique is a better immunity to contact problem and geometric limitation in stress analysis of small or micro structures.

Key Words : Thermoelastic stress (열탄성 응력), Infrared thermography (적외선 열화상), Dynamic stress Concentration factor (동적응력집중계수), Resonance frequency (공진주파수)

1. 서론

회전운동을 하는 외팔보 형태의 구조물은 항공기의 회전익 및 터진 블레이드 등에서 쉽게 그 응용 예를 발견할 수 있다. 이러한 구조물의 회전주파수는 공진주파수를 피하기 위해 대부분 공진주파수보다 높은 값으로 설계되어 구동되고 있다. 따라서 이렇게 설계된 구조물이 운전을 시작할 때나

동작을 멈출 때 그 공진주파수 대역을 통과하는 것은 불가피한 현상이다. 구조물 설계 개념에서 이러한 구조물들이 공진주파수 부근에서 운동하거나 운전 전후에 공진주파수를 통과 할 때 응력의 정도를 파악하는 것은 중요한 고려사항이 된다.^{1,2} 그러나 이와 관련된 연구를 살펴보면, 대부분 특정 구조물의 주파수 응답 특성 연구 또는 특정 공진주파수에서의 운동거동에 대한 내용을 다루고

접수일: 2007년 11월 23일; 게재승인일: 2008년 2월 14일

* 한국표준과학연구원 안전그룹

한국표준과학연구원 안전그룹

E-mail: kskang@kriss.re.kr Tel. (042) 868-5257

** 한밭대학교 기계공학과

*** 조선대학교 기계설계공학과

있으며, 과도상태의 구조물에서 응력분포 연구는 거의 발견할 수 없다. 또한, 이러한 구조물이 원공, 홈 등의 기하학적 불연속을 포함하게 되면 구조물의 진동특성과 안정성을 변화시켜 구조물의 불안정 및 파괴를 유발하는 주요한 원인이 된다. 그러나 이러한 구조물에 대해 과도상태에서 불연속부에서 응력측정은 기존 접촉식 기법으로는 시험장치구성의 어려움으로 실험적 연구³ 보다는 유한요소해석을 이용한 수치 해석적 접근으로 응력분포를 예측하게 된다.⁴ 이를 위하여 본 연구에서는 원공 불연속부를 갖는 외팔보 구조물의 과도상태에서 열탄성 응력변화 분포를 적외선 열화상 기술 (Infrared thermography: IRT)⁵ 을 이용하여 측정하였으며, 이 결과로부터 원공에서 동력 응력 집중 계수를 예측하고 유한요소해석 결과와 비교하였다.

2. 열탄성 효과

외부와 단열된 물체가 외력으로 인해 변형이 될 때, 열-기계 연성효과(thermo-mechanical coupling effect)가 나타나며, 탄성구간 내에서 열탄성 방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.⁶

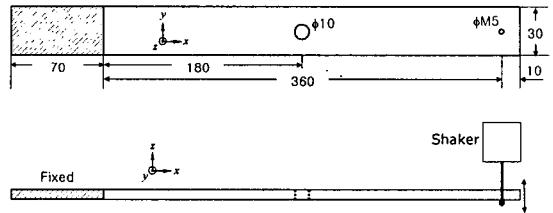
$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{E}{1-2\nu} \alpha T_a \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \quad (1)$$

여기에서, ρ 는 밀도, c 는 비열, T 는 물체의 온도변화, t 는 시간, E 는 탄성계수, ν 는 포와송비, α 는 열팽창계수, T_a 는 주변온도, ϵ 는 외력에 의한 물체 변형이다. 식(1)은 재료감쇠에 의한 비가역적 $\partial \epsilon / \partial t$ 항과 시간에 의존하는 T_a 항으로 인하여 비선형방정식으로 나타나게 된다. 실제 문제에 적용하기 위해 시험하는 동안 주변온도가 일정하고, 탄성구간 내에서 응력-변형율의 관계가 선형을 유지한다고 가정한다면, 선형미분방정식으로 취급하여 식(1)은 다음 식(2)와 같이 쓸 수 있다. 본 논문은 적외선 열화상 카메라로 대상체의 온도를 측정하고 식(2)의 관계식으로부터 열탄성응력을 예측하게 된다. 여기에서 $\Delta \sigma_{1,2,3}$ 는 3축 응력의 합을 나타내며, K_m 은 열탄성계수이다.

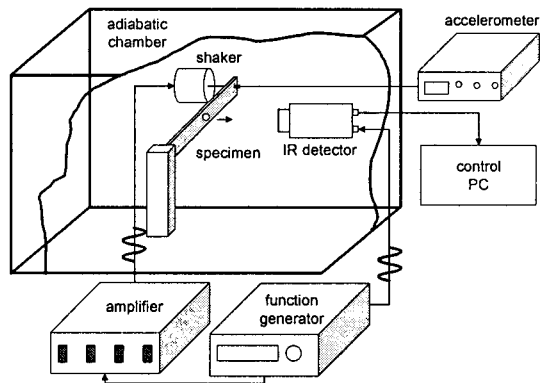
$$\Delta T = -\frac{\alpha}{\rho c} T_a \frac{E}{1-2\nu} \Delta \epsilon = -K_m T_a \Delta \sigma_{1,2,3} \quad (2)$$

3. 시험장치 구성 및 시험방법

정확한 열탄성 응력해석을 위해서는 시험편은 진도 및 대류에 의한 열손실이 없어야 하며, 시험중에는 주위와 열교환이 없도록 열적 평행상태가 유지되어야 한다. 본 연구에서는 시험편의 단일조건을 만족시키기 위해 일정한 주파수와 하중으로 반복적으로 가진함으로써 시험편에서 열적 평행상태에 도달할 수 있도록 하였으며, 외부와의 열교환을 일정하게 하기 위해 내부온도 및 대류, 방사율을 일정하게 유지할 수 있는 챔버를 제작하여 챔버 내부에서 시험하였다. 시험편은 Euler-Bernoulli 조건의 외팔보로 시험편을 제작하여 원공주변에서 굽힘 하중만을 받을 수 있도록 하였다. 시험편의 재질은 STS304 로서 열탄성계수는 $4.51 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ 이다. 시험편의 형상과 경계조건은 Fig. 1(a)에 표시하였으며, 시험장치 개략도를 Fig. 1(b)에 나타내었다. 적외선 검출장치는 Cedip Infrared System 사의 Sliver 480M 을 사용하였으며, 온도 측정분해능(NEDT)은 $0.02 \text{ }^\circ\text{C}$ 이다.



(a) Geometry and boundary condition of specimen



(b) System configuration
Fig. 1 Experimental setup

온도측정은 적외선 검출장치와 시험편을 동기화시키는 위상잠금(lock-in)방법으로 측정하였다.⁷ 측정시험편은 함수발생기로 제어되는 가진장치로 가진하여 일정 진폭과 주파수로 진동하게 되며, 시험편의 공진주파수와 진폭은 가속도계(352B10, PCB Piezotronics Co.)에 의해 측정된다. 측정된 공진주파수는 유한요소해석의 모드해석(modal analysis) 결과와 비교되며, 측정된 가속도는 유한요소해석에서 응력분포를 구하는데 사용된다. 최종적으로 유한요소해석에 의한 응력집중계수와 적외선 열화상기술에 의해 측정된 응력집중계수를 비교하게 된다.

4. 유한요소해석 및 시험결과

4.1 유한요소해석 결과

유한요소해석은 상용프로그램(ANSYS, element shell 181)을 사용하여 모달(modal) 해석을 수행하여 시험편의 공진주파수와 공진모드를 각각 구하고, 다시 가속도계에 의해 측정된 가속도값을 이용하여 각 공진주파수에서 시간에 따른 하중변화 값을 입력하여 모드중첩해석(mode superposition analysis)으로 3축 응력의 합(stress intensity)를 구하였다. Fig. 2 는 FEM 를 이용하여 구한 공진주파수에서 공진모드와 응력분포를 나타내었다. Fig. 3 은 각 공진주파수에서 응력의 최대값을 기준으로 응력분포를 비율(σ / σ_{max})로 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 2 차 모드일 때 원공주변에서 응력이 최대가 되는 것을 알 수 있으며, 3 차 모드에서는 원공주위에서 노달라인(nodal line)이 형성되어 응력은 "0"에 근접하고 고정점에서 응력이 최대가 된다.

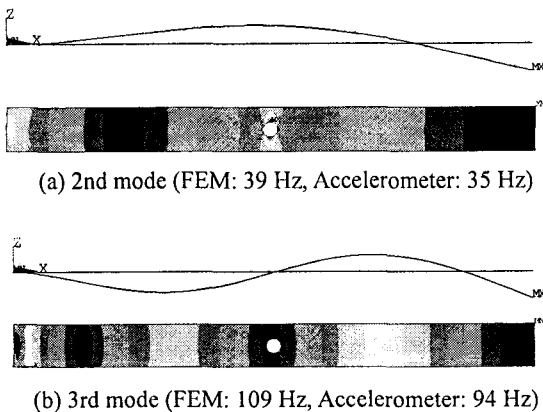


Fig. 2 Modal and stress analysis by FEM

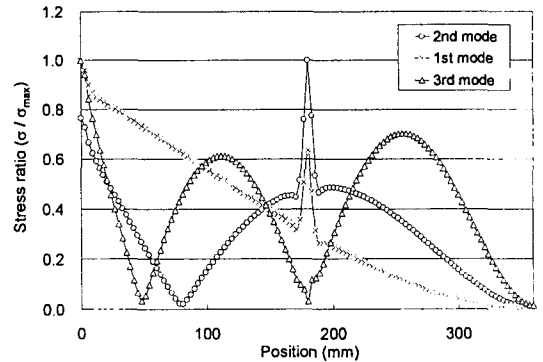


Fig. 3 Stress ratio at resonance frequency by FEM

해석결과로부터 2 차 모드에서 응력집중이 가장 높다는 것을 알 수 있으므로 2 차 모드의 해석결과로부터 응력집중계수를 구하고 적외선열화상 시험결과와 비교하였다.

4.2 적외선 열화상 시험 결과

적외선 열화상 시험은 주파수변화에 따른 응력분포해석과 진폭변화에 따른 응력분포해석을 수행하였다. 주파수 변화는 2 차 모드의 공진주파수인 35 Hz 와 40, 50, 60, 70, 80 Hz, 그리고 3 차 모드의 공진 주파수인 94 Hz 에서 응력분포를 측정하였다. Fig. 4 는 2 차 모드에서 IRT 를 이용한 응력분포 이미지와 FEM 해석 이미지를 비교하였다. 원공 주변에서 응력분포형태가 일치함을 보여 주고 있으며, Fig. 5 는 적외선 열화상을 이용하여 주파수 변화에 따라 원공주변에서 응력분포 변화를 나타내었다.

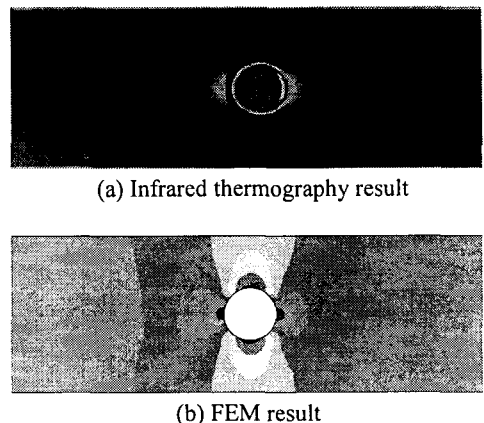
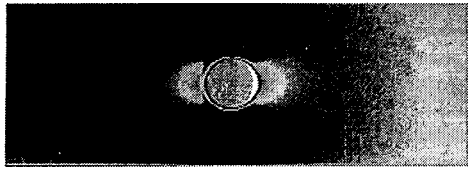
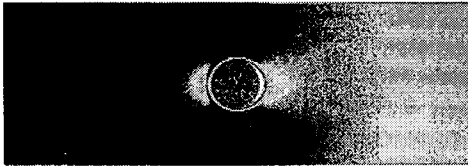


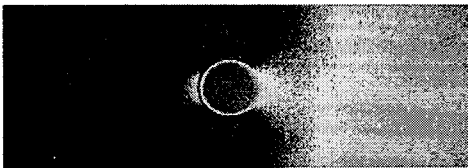
Fig. 4 Stress map of 2nd vibration mode



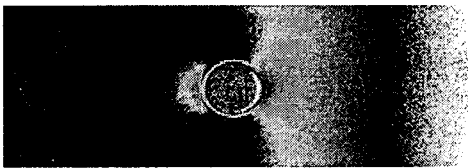
(a) 40 Hz



(b) 50 Hz



(c) 60 Hz



(d) 70 Hz

Fig. 5 Stress map to each frequency by IRT

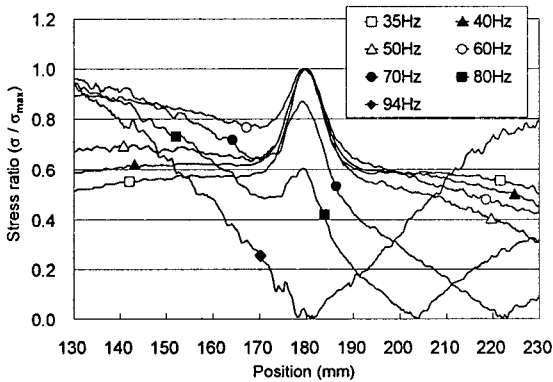


Fig. 6 Stress ratio to each frequency by IRT

Fig. 6 은 응력의 최대점인 원공의 윗부분에서 길이 방향으로 line profile 을 그어, 주파수 변화에 따라 응력분포 비율(σ/σ_{max})을 위치에 따라 나타

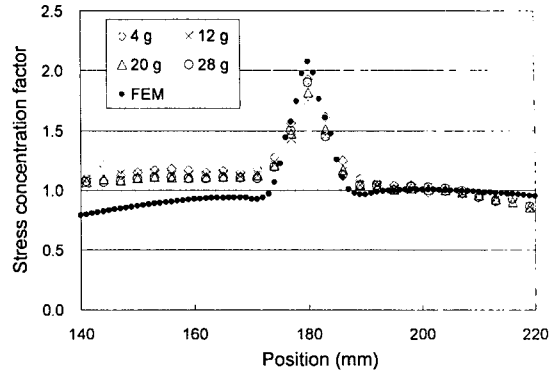


Fig. 7 Comparison of stress concentration factor

낸 그래프이다. Fig. 5 와 Fig. 6 의 측정 결과에서 알 수 있듯이 공진주파수인 2 차 모드 (35 Hz) 뿐만 아니라 60 Hz 까지 원공주변에서 응력집중이 생기고 있으며, 주파수가 증가함에 따라 전단응력의 최대점(응력이 "0" 인 지점)이 왼쪽으로 이동하여 3 차 모드에서 180 mm 지점에 형성되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 적외선 열화상 시험을 통하여 과도상태에서 응력분포의 변화추이를 추적할 수 있게 된다. Fig. 7 은 2 차 모드의 공진주파수 대역인 40 Hz 에서 가진 진폭변화에 따른 동적 응력 집중계수를 나타내었다. 가진 진폭변화는 가속도를 이용하여 측정된 결과로서 가속도값($g, m/s^2$)으로 나타내었으며, 응력집중계수는 195 ~ 210 mm 구역의 평균응력(σ_{Avg})을 구하고 각 위치에 대해 응력의 비(σ/σ_{Avg})로 나타내었다. FEM 에 의한 응력집중계수는 2.07 로 평가되었으며, 적외선 열화상 시험에서는 1.75 ~ 1.92 로 측정되었다. 시험결과의 평균은 1.85 로서 FEM 결과와 상대오차는 10.6%로 정확한 결과를 보여 주고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 적외선 열화상 기술을 이용하여 외팔보 형태 구조물의 과도상태에서 응력분포를 측정하고 응력분포로부터 동적응력집중계수를 예측하였다. 시험에서는 2 차 공진모드와 3 차 공진모드 사이에서 주파수변화에 따른 응력분포변화를 측정하였으며, 원공주변의 응력집중계수를 측정하기 위해 40 Hz 에서 진폭변화에 따른 응력집중계수를 측정하여 유한요소해석 결과와 비교하였다. 측정 상대오차는 10.6%로 나타났으며, 이는

검출소자의 공간분해능 한계와 함께 시험장치 구성 상 시험편의 열적 평형조건을 완전히 만족시키지 못하였기 때문에 판단된다. 적외선 열화상 기술은 비접촉이면서도 검사대상체의 형상조건과 무관하게 대상체의 응력을 측정할 수 있으므로 형상 조건에 의해 오차율이 커지게 되는 소형구조물의 응력분포해석에 활용도가 높을 것으로 기대된다.

A tool to analyses and locate thermo-mechanical mechanisms in materials and structures," Thermosense XXII(Proceeding of SPIE), Vol. 4360, pp. 560-566, 2001.

후 기

이 논문은 2007 년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2007-00467)

참고문헌

1. Choi, C. M., Yoo, H. H. and Yang, H. I., "Study on the Stress Distribution of Rotating Cantilever Beam in Transient Vibration," J. of The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 10, No. 2, pp. 306-311, 2000.
2. Min, S. K., Choi, M. J. and Jang, S. H., "A Study on Stress and Vibration Evaluations and Application of Piping System in Petrochemical Plant," J. of The Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 11, No. 3, pp. 110-116, 2002.
3. Lee, O. S., Jeon, H. S. and Byun, K. H., "Effect of Notch Geometries on Dynamic Stress Concentration Factor," J. of The Society of Naval Architects of Korea, Vol. 35, No. 4, pp. 46-54, 1998.
4. Sim, W. J. and Lee, S. H., "Numerical Analysis of Dynamic Stress Concentrations in Axisymmetric Problems," J. of The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 26, No. 11, pp. 2364-2373, 2002.
5. Choi, M. Y., Kang, K. S., Park, J. H., Kim, W. T. and Kim, K. S., "Measurement of Defects and Stress by Infrared Thermography," J. of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 10, pp. 30-35, 2006.
6. Panteliou, S. D. and Dimarogonas, A. D., "Thermodynamic damping in porous materials with ellipsoidal cavities," J. of Sound and Vibration, Vol. 201, No. 5, pp. 555-565, 1997.
7. Bremond, P. and Potet, P., "Lock-In Thermography: