

진동 시험을 통한 횡등방성 블레이드 소재의 기계적 물성 측정

Mechanical Property Measurement of a Transversely Isotropic Material for Gas Turbine blades by the Experimental Modal Analysis

이두영† · 배용채* · 김희수* · 이옥륜*

Dooyoung Lee, Yongchae Bae, Heesoo Kim and Yookryun Lee

1. 서 론

가스터빈은 석탄가스화복합발전 등의 저탄소 신발전기술의 개발과 함께 활용이 증대되고 있는 설비로, 효율을 높이기 위해 블레이드의 제작에 있어서 일방향응고 및 단결정 소재, 진보된 냉각 설계 및 코팅기술을 적용한다. 가스터빈 블레이드 국산화 소재로 사용되는 CM247LC는 고온의 환경에서 강도, 부식, 크립에서 우수한 특성을 가지며, 주조성도 양호한 것으로 알려져 있다⁽¹⁾. 종탄성계수, 횡탄성계수, 포아송비로 표현되는 기계적 물성은 신소재의 특성, 제작 또는 건진성 평가를 위한 정보로 사용된다. 특히 구조체의 진동 특성과 밀접히 관련되어, 해석을 통한 블레이드 진동 특성 분석의 신뢰성을 제고하기 위해 정확히 결정되어야 한다⁽²⁾.

본 논문에서는 가스터빈 블레이드 일방향응고 CM247LC 소재의 기계적 특성을 측정하기 위해 횡등방성과 직교등방성으로 가정한 진동 시험과 해석, 최적화를 수행하고 그 결과를 기술하였다.

2. 진동시험에 의한 탄성 계수 측정

2.1 탄성 계수 측정 방법

소재의 종탄성계수, 횡탄성계수 및 포아송비 등의 기계적 물성을 측정하는 방법은 정적 시험법과 동적 시험법으로 구분된다. 정적 시험법은 응력과 변형률을 표준화된 형상으로 제작된 시편에 대해 인장, 압축, 굽힘 등의 기계적 시험을 다수의 시편에 대해

반복하여 수행함으로써 측정하는 것으로, 소성변형 또는 파괴에 이를 때까지 시험이 이루어지기 때문에 다른 시험을 위해 사용할 수 없는 단점이 있다. 진동에 의한 동적 시험법은 기계적인 진동 시험을 통해 시편의 고유진동수를 측정하고, 시편의 형상과 질량으로 부터 소재의 탄성계수를 해석적으로 계산하는 방법으로, 정적 시험법에 비해 비파괴적 방법으로 다양한 형태의 시편과 구속조건에 대해 적용이 가능한 장점이 있다. 등방성 소재에 대해 진동 시험법은 ASTM E 1876-07의 표준을 적용할 수 있지만, 아직 이방성 소재에 대한 관련 규정은 지정되어 있지 않다⁽³⁾.

최근 특히 고비용, 장시간이 소요되는 복합재 등의 이방성 소재에 대한 시험법의 개발에 많은 연구가 진행되고 있으며, 시편의 거동을 모델링하기 위해 Rayleigh's method, 유한요소법 등을 사용하고 있으며, 전산처리기술의 향상과 함께 복잡한 형상과 다양한 경계조건을 모사할 수 있는 유한요소법이 가장 적합한 선택으로, 본 측정에서는 Fig. 1과 같이 시편에 대한 모드시험과 해석을 통해 구한 고유진동수 측정치와 해석치를 서로 비교하고, 두 값의 평균 오차를 최소화하는 최적화를 통해 탄성계수를 결정하였다.

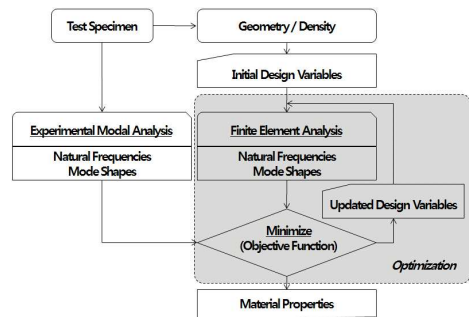
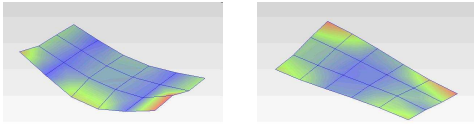


Fig. 1 Flow chart for estimation of elastic constants

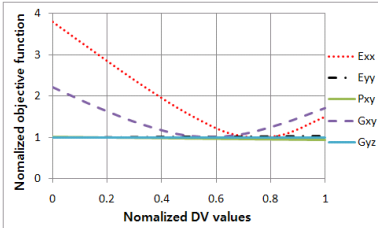
† 교신저자; 정회원, 한전전력연구원 수화력발전연구소
E-mail : dylee@kepri.re.kr

Tel : 042-865-5677, Fax : 042-865-5609

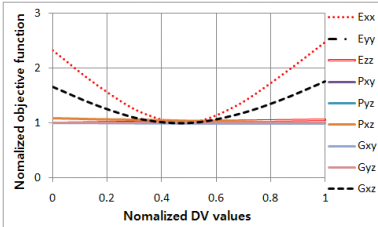
* 한전전력연구원 수화력발전연구소



(a) 1st mode (b) 2nd mode
Fig. 2 Mode shapes of the rectangular plate

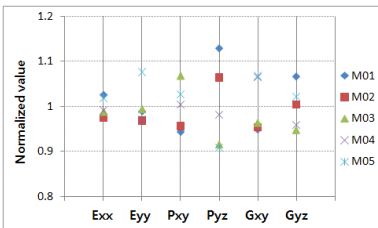


(a) Transversely isotropic material model

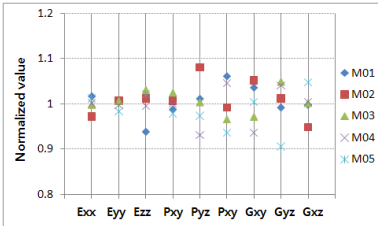


(b) Orthotropic material model

Fig. 3 Normalized objective function



(a) Transversely isotropic material model



(b) Orthotropic material model

Fig. 4 Normalized elastic constants

2.2 시험 및 해석 결과

장축(x 방향)이 일방향응고(directionally solidified) 방향과 일치하는 시편의 진동 모드 형상은 Fig. 2와 같이 DS방향의 1차 굽힘, 비틀림, 2차 굽힘의 순서로 나타났다.

Fig. 3은 종탄성계수와 횡탄성계수 등 설계변수에 따른 목적함수의 변화를 나타낸 것으로, DS 방향과 시편의 형상, 횡등방성 또는 직교등방성의 모델링 방법에 따라 민감한 계수가 달라지는 것을 확인하였다. 최적화를 통해 오차를 최소화한 결과는 Fig. 4와 같다. 평균값으로 정규화된 값으로 횡등방성에 비해 직교등방성으로 모델링한 경우 편차가 작은 것을 보여준다. 한편 DS와 수직인 두 방향의 탄성계수에 존재하는 차이를 고려하면, 실제 소재에서 두 방향의 비대칭이 존재하는 것으로 여길 수 있다. 아울러 길이, 폭, 두께의 시편의 형상에 따라 결과의 차이가 있는 것으로 확인하였다.

3. 결론

가스터빈 소재로 사용되는 CM247LC DS 소재의 탄성계수를 진동 시험과 FEA를 통한 최적화를 통해 측정하였다. 정적 시험법에 비해 진동 시험을 통한 동적 시험법은 유한요소법과 최적화 기법을 동시에 적용하여 횡등방성 소재에 대해 비교적 정확한 탄성계수 측정이 가능한 것으로 판단된다. 횡등방성 특성을 갖는 것으로 예상되는 DS 소재의 경우에도 두 방향의 수직인 특성이 서로 다르게 나타나고 있어, 블레이드 주조시의 결정 진행 방향의 차이를 반영하고, 유한요소모델의 오차를 최소화할 수 있도록 직교등방성 재질로 모델링하는 것이 필요한 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1) Erickson, G. L. and Harris, K., 1994, DS and SX Superalloys for Industrial Gas Turbines, Technical Paper, Cannon-Muskegon Corporation
- (2) Lee, D. Y., Bae, Y. C., Kim, H. S., Lee, Y. R. and Kim, D. Y., 2010, Vibration Analysis for the L-1 Stage Bladed-disk of a LP Steam Turbine, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 29~35
- (3) Pagnotta, L., 2008, Recent progress in identification methods for the elastic characterization of materials, International Journal of Mechanics, Issue 4, Vol.2, pp. 129~140.