

가스터빈 블레이드 개발품의 확률론적 진동 평가

Vibrational Integrity of the Gas Turbine Blade by Probabilistic Analysis

이두영† · 조철환* · 김연환* · 배용채* · 이성호*

Dooyoung Lee, Cheolhwan Cho, Yeonhwan Kim, Yongchae Bae and Sungho Lee

1. 서 론

국내에 운영되는 약 110여기 가스터빈의 고온부품은 일부 국산화를 통한 조달이 이루어지고는 있지만 극히 미비하고, 블레이드와 같은 주요 핵심 부품은 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 향후 복합화력발전이 분산전원 운영과 석탄가스화복합발전 등의 확대에 따라 지속적인 성장이 예상되며, 이에 따라 설비의 유지보수 및 신규 도입에 소요되는 수입비용도 매년 증가될 것이다. 고온 부품의 국산화를 통해 수입품을 대체할 수 있는 기반이 조성되면 부품단가의 절감을 통한 발전비용을 낮출 수 있고, 안정적 부품 수급에 의한 전력공급의 안정성을 제고할 수 있을 것으로 기대된다. 가스터빈 블레이드는 비용측면에서 뿐만 아니라 기술적으로도 차지하는 비중이 큰 부품으로 지속적인 국산화 개발이 수행되고 있으며, 본 연구는 개발품의 실사용을 위해서 진동 측면의 안정성을 평가하기 위한 것으로, 제작된 블레이드에 대한 진동 특성 시험 및 해석을 수행하였으며, 주조시 OEM 블레이드와 달리 일방향응고(directionally solidified) 기술로 제작된 점을 고려하여, 횡등방성의 기계적 물성치 변동에 따른 진동 특성 변화를 민감도 분석을 통해 검토하였다. 터빈 블레이드에 대한 진동 특성은 루트와 디스크의 접촉에 따른 디스크와의 연성 해석을 통해 분석하며, 단일 블레이드 시험을 통한 해석모델 제작, 주요 가진력과의 공진 여부 및 동응력 해석을 통해 운전 중 진동 안정성을 평가한다^(1,2).

2. 블레이드 개발품 진동 특성 분석

2.1 블레이드 개발품 고유진동수 측정

연구개발을 통해 최종적으로 완성된 4개의 개발품에 대한 고유진동수를 측정하였다. Table 1과 같이 1차 고유진동수의 표준편차가 2.93%였다. 제품의 중량 변동이 매우 적었다는 점을 고려하면 물성치 변동이 큰 것으로 사료된다. 구속되지 않은 단일 블레이드 해석시 고유진동수 오차가 약 3% 내외로 완성품의 편차에 비해 조금 큰 값으로 복잡한 내부형상에 기인한 것으로 보여진다.

2.2 고유진동수 민감도 분석

블레이드 개발품은 일방향응고 주조 제품으로 횡등방성 특성을 갖는다. 고유진동수에 영향을 미치는 종탄성계수(E_{xx} : 블레이드 길이 방향), 횡탄성계수(G_{xy}) 및 밀도의 변동에 의한 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 민감도 분석을 수행하고, 고유진동수 변동을 확인하였다. 입력변수에 대해서 각각 +/-5%의 표준편차를 갖는 정규분포로 가정하였다. Table 2에 나타낸 바와 같이 고유진동수 편차는 약 4% 내외로 입력변수의 변동에 비해 작다는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1 Natural frequencies of the test blades

#Blade	Mode[Hz]		
	1st	2nd	3rd
#A	1922	2630	3375
#B	1829	2559	3357
#C	1824	2591	3337
#D	1799	2623	3294
Average	1844	2601	3341
STD(%)	2.93	1.25	1.04

Table 2 Natural frequencies of the test blades

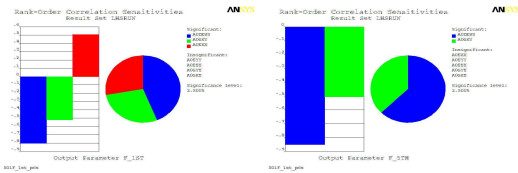
Mode	STD[Hz]	STD[%]
1st	28.5	3.9
2nd	39.4	3.1
3rd	72.0	3.8
4th	86.6	3.8
5th	98.9	3.3
6th	142.8	4.0

† 교신저자; 정희원, 한전전력연구원 그린에너지연구소

E-mail : dylee@kepri.re.kr

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

* 한전전력연구원 그린에너지연구소



(a) 1st N.F. (b) 5th N.F.

Fig. 1 Rank-order correlation sensitivities

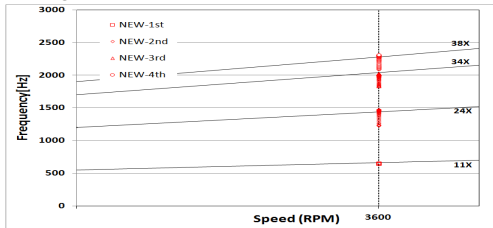


Fig. 2 Campbell diagram

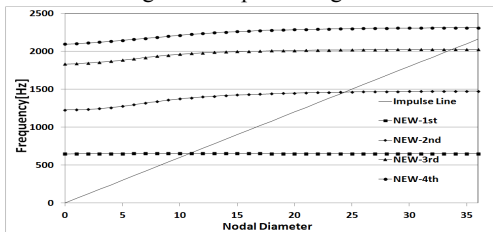
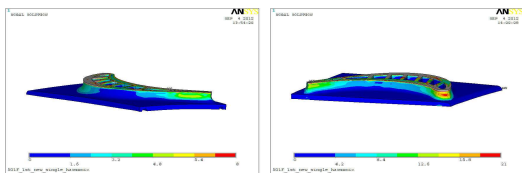


Fig. 3 Interference diagram at 3600 rpm



(a) 11th harmonic (b) 24th harmonic
Fig. 4 Dynamic stress at resonance

Fig. 1의 민감도 결과를 보면 횡동방성인 개발품의 경우, 1차 고유진동수에서 종탄성계수에 비해 횡탄성계수의 영향이 크고, 5차 고유진동수에서는 종탄성계수의 영향이 거의 없다는 것을 알 수 있다.

2.3 블레이드-디스크 연성 해석 결과

(1) 블레이드-디스크 연성 진동 해석

고온, 고압의 가스터빈 운전 환경을 모사하기 위해서 전산유동해석과 열전달해석을 통해 계산된 압력분포와 온도분포를 부과하였다. 루트와 디스크의 접촉은 접촉면에 대해 구속방정식을 사용하였고, 순환대칭해석에 의한 블레이드-디스크 연성 모드 해석을 수행하였다. Fig. 2는 3600rpm에서 그룹화된 고유진동수 분포를 도시한 것으로 운전속도의 하모닉

및 노즐통과주파수 등의 전형적인 가진 성분과의 공진 여부를 확인할 수 있다. 3600rpm에서의 노달직경(nodal diameter)에 따른 고유진동수를 나타낸 Fig. 3의 간섭선도를 통해 11 N.D.의 1차 및 24 N.D.의 2차 고유진동수 등 공진 가능성이 큰 모드를 결정하였다.

(2) 동응력 해석 결과

개발품 블레이드-디스크 연성 진동 해석 결과를 통해 동일 노달직경을 갖는 전형적인 가진원과의 공진 가능성은 매우 적은 것으로 분석되었다. 한편 이 모드에서 공진이 일어나는 경우, 동하중은 굽힘하중의 10%, 감쇠비는 0.1%로 가정하여 동응력 해석을 수행한 결과 전익단 플랫폼 필렛부에서 최대 약 21 MPa로 나타났다.

3. 결론

국산화 개발 가스터빈 블레이드에 대한 진동 특성 분석을 수행하였다. 기계적 물성치 변동이 고유진동수에 미치는 영향을 고려하여, 제품의 고유진동수 최대 편차를 반영한 주파수여유율을 적용할 필요가 있다. 본 국산품의 경우 공진의 가능성이 매우 낮고, 공진이 일어날 경우에도 발생할 동응력이 구조적 신뢰성에 영향을 미치는 수준은 아닌 것으로 계산되어, 진동 측면에서 안정성을 확보한 것으로 분석되었다.

후 기

이 연구는 지식경제부 주관 전력산업연구개발사업 “501F급 가스터빈 블레이드/베인 국산화 기술개발” 과제의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) 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
- (2) Scheibel, J. R., 2008, F-Class Combustion Turbine Life Management, EPRI Report 1014279