

# 소형가스터빈의 동적 모델링 및 해석

## Dynamic Modeling and Analysis of a Small-size Gas Turbine Engine

\*유태규<sup>1</sup>, #홍성욱<sup>2</sup>, 이종원<sup>3</sup>, 정혁진<sup>4</sup>, 김경택<sup>3</sup>, 하진웅<sup>5</sup>

\*T. G. Yu<sup>1</sup>, #S. W. Hong(swhong@kumoh.ac.kr)<sup>2</sup>, C. W. Lee<sup>3</sup>, H. J. Chung<sup>4</sup>, K. T. Kim<sup>3</sup>, J. W. Ha<sup>5</sup>  
<sup>1</sup> 금오공과대학교 기전공학과, <sup>2</sup> 금오공과대학교 기계공학부, <sup>3</sup> 한국과학기술원 기계공학과, <sup>4</sup> 한국수력원자력, <sup>5</sup> 두산중공업 가스터빈개발팀

Key words : Gas Turbine, Campbell Diagram, Critical Speed, SAMCEF, ANSYS, Unbalance Response

### 1. 서론

가스터빈 회전체는 경량 고출력의 높은 에너지 밀도 구현을 위해 높은 속도에서 정상운전이 이루어지며, 대부분 정상운전속도에 이르기까지 몇 개의 위험속도를 지나게 된다. 이때 회전체-베어링 계에 연관된 다양한 진동문제에 노출될 가능성이 높다. 따라서 가스터빈 회전체는 진동특성에 대한 안전성 확보가 필수적이며, 특히 제작 후에 동적 특성을 변경하는 것이 제한적이기 때문에 설계단계에서 동적 안정성을 확보하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 3 차원 요소를 기반으로 한 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 복잡한 형상을 가진 가스터빈 회전체의 임계속도 및 불균형응답 해석을 실시하였다. 회전체 해석 시 3 차원 유한 요소를 사용한 사례는 아직까지 많이 발표되지 않았고 그 신뢰성을 확보하기 어렵다. 본 연구에서는 해석의 신뢰도를 높이기 위하여 SAMCEF 와 ANSYS 등 두 상용소프트웨어를 사용하였으며 각 소프트웨어 별로 서로 다른 모델링 방법을 적용하여 얻어진 해석 결과를 상호 비교하여 검증하였다.

### 2. 가스터빈 회전체 모델링 및 위험속도 해석

Fig. 1 은 본 연구의 대상이 되는 가스터빈의 모델을 보여주고 있다. Fig. 1(a) 는 SAMCEF 를 이용하여 3 차원 모델링을 한 것이고<sup>1</sup>, Fig. 1(b)는 ANSYS 를 이용하여 1 차원요소와 3 차원요소를 혼합하여 사용한 모델이다. Fig. 2 는 계산결과 얻어진 Campbell 선도와 임계속도를 보여주고 있다. 전체적으로 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 고차 모드에서의 오차는 주로 SAMCEF 와 ANSYS 의 기어 커플링 연결 방법에 의해 나타나는 차이로 추정된다. 해석 결과 회전체 위험속도는 1 차 39Hz, 2 차 60~64Hz, 3 차 위험속도는 251~262Hz 로 계산되었다<sup>2</sup>.

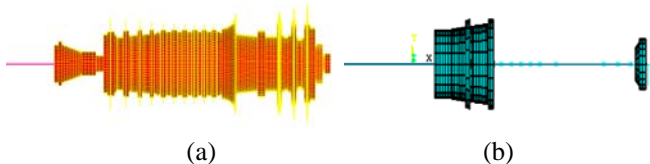


Fig. 1 Finite element model for gas turbine:(a)SAMCEF(b) ANSYS

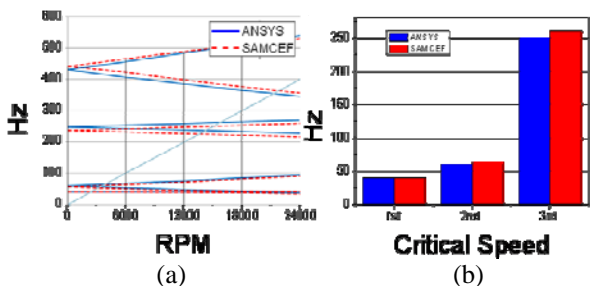


Fig. 2 Critical speed analysis result with SAMCEF and ANSYS: (a) Campbell Diagram (b) Critical Speed

### 3. 가스터빈 불균형 응답 해석

#### 3.1 Gas Turbine 의 불균형 응답 해석 절차 수립

가스터빈은 고속으로 운전되므로 과도한 진동이 발생할 수 있는데 특히 불균형은 고속 운전 시 가장 중요한 진동원이 된다. 따라서 운전 안전성을 확인하기 위해 가스터빈의 불균형응답 해석을 실시 하였다. Fig. 3 는 본격적인 계산에 앞서 프로그램의 검증을 위해 참고문헌<sup>3</sup>에서 제시된 계산결과와 제안된 프로그램을 이용해 동일한 모델을 동일한 조건에서 계산한 결과를 비교해서 보여주고 있다. 사용한 두 상용프로그램 모두 매우 신뢰성 있는 결과를 주고 있음을 알 수 있다.

가스터빈에 대한 불균형응답 계산을 위한 해석모델은 SAMCEF 의 경우 Fig. 1(a)와 같이 Full 3D 요소로 구성된 모델을 사용하였고, ANSYS 의 경우 Fig. 1(b)와 같은 1D+3D 요소로 구성된 모델을 사용 하였다.

불균형응답 해석을 위해 적용 불균형량은 API616 기준에 근거하여 결정하였다<sup>4</sup>. 이 방법에 근거하여 2 가지 경우로 불균형을 가정하였다. 먼저, 1 차 굽힘 모드에서 가장 큰 변형량을 가지는 임펠러 위치에 343.99g.mm 의 불균형을 부가하는 경우와, 가스터빈의 Cone 형 모드 및 2 차 굽힘 모드에 대한 최대 변형량을 가지는 압축기 1 번 블레이드 및 터빈 3 번 블레이드 위치에 불균형량 172.45g.mm, 166.47g.mm 를 각각 부가하는 경우로 나누어 해석하였으며 각각의 경우에 대해 베어링 위치에서의 응답을 계산하였다.

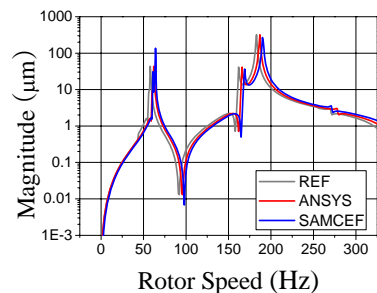


Fig. 3 Comparison of unbalance responses from the reference, SAMCEF and ANSYS

#### 3.2 베어링 적용에 따른 불균형응답

비감쇠 등방성 볼 베어링을 적용 했을 경우 SAMCEF 와 ANSYS 의 1 점 불균형 응답 해석 결과를 Fig. 5 에, 2 점 불균형 응답을 Fig. 6 에 나타내었다. 전반적으로 두 결과가 잘 일치하고 있으나 Fig. 5 에서 ANSYS 응답의 2 차모드에 대한 응답이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 모형을 축약하는 과정에서 발생하는 것으로 감쇠가 포함되면 거의 발생하지 않는 국부적 현상이다. 1 점 불균형 응답의 경우 운행정속도에서의 응답은 전방 베어링 1.3~1.9 µm, 후방베어링 2.6~2.9 µm 으로 두 경우 모두 매우 근접한 값을 나타내

고 있다. 2 점 불균형의 경우 전방베어링 1.8~2.7  $\mu\text{m}$ , 후방 베어링의 4.4~4.5  $\mu\text{m}$  으로 비교적 응답이 크지만 두 프로그램에 의한 계산결과의 차이는 매우 적었다.

Fig. 7 은 지지부에 스퀴즈 필름 댐퍼를 적용했을 경우, SAMCEF 와 ANSYS 의 2 점 불균형 응답을 보여주고 있다. 불균형응답이 감쇠가 없는 경우에 비할 때 월등히 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 전방베어링 1.9~2.7  $\mu\text{m}$ , 후방 베어링의 4.5  $\mu\text{m}$  으로 나타났다. 볼 베어링과의 응답을 비교해보면 스퀴즈 필름 댐퍼 적용 시 운행속도에서의 응답은 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타나지만 임계속도 근처에서의 응답을 크게 감소시키는 것을 알 수 있다.

마지막으로, 틸팅 패드 베어링을 적용 했을 경우 2 점 불균형응답 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. 틸팅 패드 베어링은 회전속도에 따라 베어링의 강성 및 감쇠계수값이 변화하므로 각 회전속도에 따른 계수값을 얻었으며, 선형보간을 하여 적용하였다. 틸팅 패드 베어링을 적용한 불균형 응답에서는 SAMCEF 와 ANSYS 의 베어링 적용 방법의 차이에 따라 약간의 차이를 보이고 있으나 베어링 지점 응답의 크기는 전방베어링 2.4~2.8  $\mu\text{m}$ , 후방 베어링의 5.0~4.8  $\mu\text{m}$  으로 나타났다. 틸팅 패드 베어링을 사용하게 되면, 스퀴즈 필름 댐퍼를 적용한 경우에 비해 가속구간에서의 응답이 더 줄게 되어 안정성은 좋아졌지만 운행속도에서 응답의 크기가 약간 커지는 경향을 보였다.

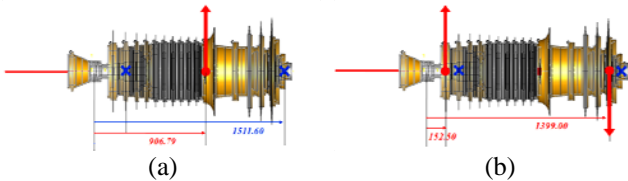


Fig. 4 Location and size of the maximum allowable residual unbalance

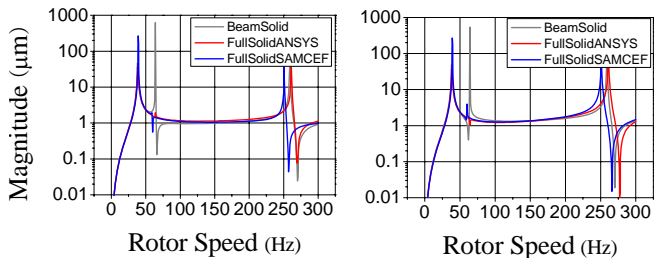


Fig. 5 Unbalance response with ball bearings subjected to 1 point unbalance: (a) Front bearing (b) Rear bearing

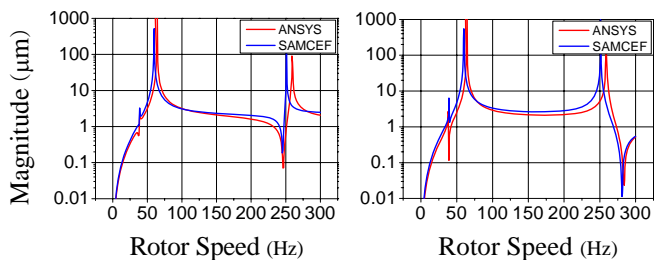


Fig. 6 Unbalance response with ball bearings subjected to 2 point unbalances: (a) Front bearing (b) Rear bearing

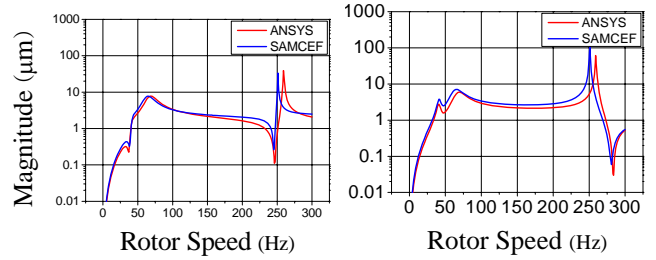


Fig. 7 Unbalance response with ball bearings and a squeeze film damper subjected to 2 point unbalances: (a) Front bearing (b) Rear bearing

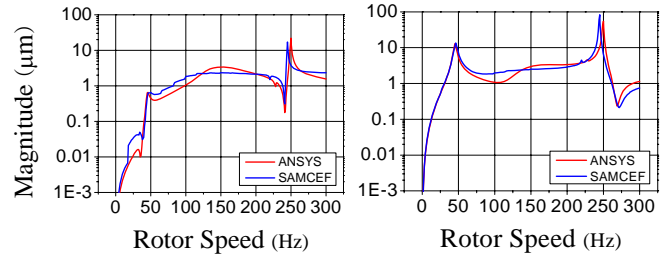


Fig. 8 Unbalance response with tilting pad bearings subjected to 2 point unbalances: (a) Front bearing (b) Rear bearing

#### 4. 결론

본 연구에서는 상용 유한요소프로그램을 이용하여 소형 가스터빈의 동적 해석을 실시하였다. 3 차원 요소를 이용하여 소형가스터빈 모델을 구성하였고, 위험속도 및 불균형 응답 해석을 실시하였다. 특히 해석의 신뢰성을 높이기 위해 SAMCEF 와 ANSYS 등 2 가지 상용 프로그램을 동시에 적용하였으며, 각 프로그램 별로 모델링 방법에 차이를 두고 그 결과를 비교함으로써 계산결과의 신뢰성을 확보하였다. 본 연구를 통해 얻어진 위험속도 및 불균형응답 계산 과정 및 결과는 실제 시스템의 제작 및 검증과정에 유용하게 활용되었다.

#### 후기

본 연구는 지식경제부, 전력원자력연구개발 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

1. SAMTECH, "Rotor Module for the Analysis of Rotating system," 2006
2. Chung, H.J., "Dynamic Analysis of the Small-size Gag Turbine Engine Rotor using Commercial S/W and its Limitations," Department of Mechanical Engineering. M.S., KAIST, 56-68, 2008
3. Lalanne, M., Ferraris, G., "Rotordynamics Prediction in Engineering," John Wiley & Sons, 1990
4. API616, "Gas Turbine for the Petroleum, Chemical, and Industry Service," Chapter 4.7, 11-28, 2009