

터보분자펌프의 회전체 동해석 Rotordynamic Analysis of a Turbomolecular Pump

한정삼†
Jeong Sam Han

Key Words : Rotordynamics(회전체동역학), Turbomolecular pump(터보분자펌프), Rotor(회전자); Model order reduction(모델차수축소법), Bearing stiffness(베어링강성), Campbell diagram(캠벨선도)

ABSTRACT

In this paper, rotordynamic analyses of the Campbell diagram, critical speeds, and harmonic responses for a TMP rotor system are performed. Since the finite element model of the TMP rotor system has a very large number of degrees of freedom because of its complex geometry, and dynamic analyses for investigating the critical speeds, stability, and harmonic response are repeated for various design parameters, model order reduction (MOR) is necessary to reduce the computational cost. The Krylov-based model order reduction via moment matching significantly speeds up the rotordynamic analyses for the TMP rotor system.

1. 서 론

과학 및 각종 산업 분야에서 진공의 이용 증가와 오염 물질을 포함하지 않은 깨끗한 진공 공간의 필요성이 부각되고 있다. 이러한 고진공 및 고청정 진공을 위한 펌프들 중에서 반도체산업 및 핵융합을 중심으로 터보분자펌프(turbomolecular pump, 이하 TMP)가 많이 이용되고 있다. TMP는 최대진공도가 대략 10^{-10} Torr이며, 오일을 사용하지 않기 때문에 깨끗한 진공상태를 생성할 수 있다. 또한 부대설비 및 대체설비 등이 거의 필요 없고, 작동 후 비교적 단시간 내에 정상상태 작동속도를 얻을 수 있다⁽¹⁾.

TMP는 회전자 블레이드(rotor blade)가 고속회전(대략 10,000~100,000 rpm)하면서 블레이드 영역으로 들어온 분자를 쳐서 그 운동을 펌프의 배출구 방향으로 향하게 함으로써 배기가 이루어 진다. 따라서 수소나 헬륨처럼 분자 열운동속도(thermal velocity)가 큰 기체는 배기속도의 저하를 방지하기 위하여 회전자의 고속회전이 요구된다. TMP 회전자의 고속회전 하에서 안정적인 운전과 구조적 안

전성은 반드시 확보되어야 할 설계요소이다. 본 발표에서는 고속회전 하는 TMP 회전자의 선회고유진동수해석, 위험속도해석 및 조화응답해석의 회전체 동역학과 관련된 모델링 및 해석에 관하여 언급하고자 한다. 또한, 이러한 해석에 대한 모델차수축소법의 결과도 소개하고자 한다.

2. 본 론

회전체 동역학의 운동방정식을 정지 참조 프레임(stationary reference frame)에 대하여 유한요소해석의 행렬 형태로 나타내면 다음과 같이 이차 상미분방정식으로 표현된다⁽²⁾.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + (\mathbf{C} + \mathbf{G})\dot{\mathbf{x}}(t) + (\mathbf{K} + \mathbf{B})\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{x}(t) \in R^N$ 은 시간 t 의 함수인 상태변수벡터, $\mathbf{f}(t)$ 은 입력, 그리고 행렬 $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K} \in R^{N \times N}$ 는 각각 시스템의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬이다. 행렬 \mathbf{G} 와 \mathbf{B} 는 회전속도에 의존적으로 각각 자이로스코픽행렬(gyroscopic) 및 회전댐핑(rotating damping) 행렬을 의미한다.

본 발표에서 고려한 터보분자펌프의 회전자 및 축의 CAD 및 유한요소모델은 Fig. 1과 같다. 회전체 동역학해석을 위하여 축대칭한 부분 이외의 회전자 블레이드는 집중질량으로 모델링되었다. 본 TMP의 정격운전속도는 22,000 rpm이다. Fig. 2에는 작동회

† 한정삼: 정회원, 안동대학교 기계설계공학과
E-mail : jshan@andong.ac.kr
Tel : 054-820-6218, Fax :

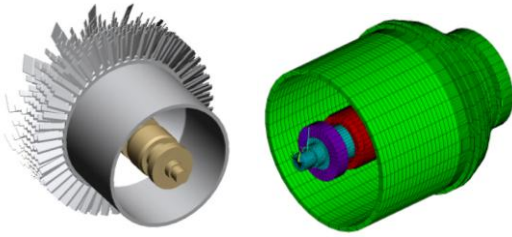


Fig. 1 CAD model of a TMP rotor and its FE model for rotordynamic analysis

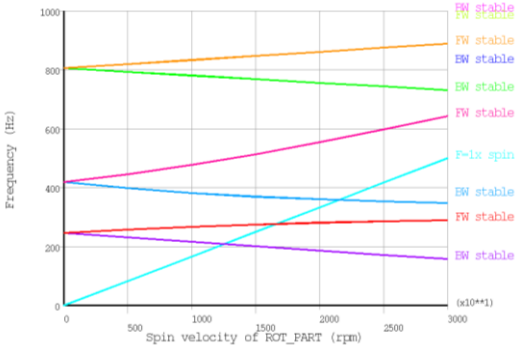


Fig. 2 Campbell diagram for the TMP rotor system

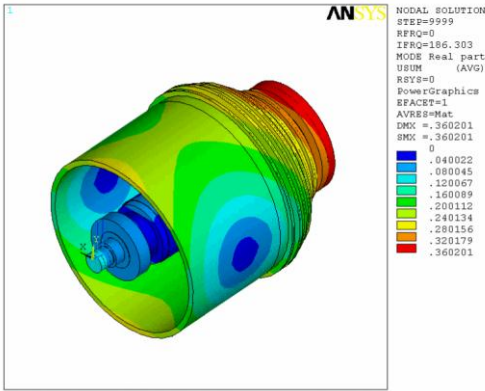


Fig. 3 The first mode at the rotational speed of 20,000 rpm

전속도에 따른 고유진동수의 변화를 나타내는 캠벨 선도(Campbell diagram)를 나타내었다. 이 결과는 사용되는 베어링강성에 의존적이므로 이 부분에 대한 검토가 필요하다. 이와 더불어, 발표에서는 TMP의 조화응답해석과 이러한 해석에 축소모델을 이용한 결과들에 대하여 언급될 것이다.

3. 결 론

본 발표에서는 고속회전 하는 TMP 회전자

의 회고유진동수해석, 위험속도해석 및 조화응답해석의 회전체동역학과 관련된 모델링 및 해석에 대하여 논의되며 이러한 해석에 대한 모델차수축소법에 대한 내용이 언급될 것이다.

후 기

이 논문은 2009학년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2009-0087705). 또한, (주)대주기계-안동대학교 협력연구센터의 일부 지원을 받았다.

참 고 문 헌

- (1) Hwang, Y. K., Heo, J. S. and Park, C. Y., 2000, Analysis of two - dimensional flow fields in the multi - stage turbomolecular pump using the DSMC method, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 83~94.
- (2) ANSYS, 2010, ANSYS Mechanical APDL and Mechanical Applications Theory Reference 13.0, SAS IP, Inc.
- (3) Nelson, H. D. and McVaugh, J. M., 1976, The Dynamics of Rotor-Bearing Systems Using Finite Elements, J. of Eng. for Industry, pp. 593~600.
- (4) Han, J. S. and Ko, J. H., 2009, Frequency Response Analysis of Array-Type MEMS Resonators by Model Order Reduction Using Krylov Subspace Method, Transactions of the KSME A, Vol. 33, No. 9, pp. 878~885.