

300HP급 초고속 전동기용 회전체의 동력학적 해석 및 설계

이용복, 이희섭, 김승중, 김창호
한국과학기술연구원

Design and Dynamic Analysis of Rotor for 300HP Class Super High-Speed Motor

Yong-Bok Lee, Hee-Sub Lee, Seung-Jong Kim, Chang-Ho Kim
Korea Institute of Science and Technology

Abstract - The Super High-Speed Motor is a turbo machine which operates at high speed, so air foil bearings suit their purpose as bearing elements. The rotordynamic stability was predicted using the numerical analysis of air foil bearings. From this study, the stability of rotor of the Super High-Speed Motor was confirmed by campbell diagram and logarithmic decrement.

1. 서 론

포일 베어링은 윤활제로 공기 또는 다른 유체를 사용하는 동압 베어링으로서 설계 단순화, 경량화, 고속화, 고온화 등 많은 장점을 얻을 수 있으며, 이러한 장점들은 최근 터보 기계류의 개발 경향과도 잘 부합된다. 1970년대에는 주로 공기 조화 장치 등 저하중의 제한적인 영역에서 사용되어 왔으나[1], 하중지지능력의 증가, 코팅 기술의 발전과 해석 기술의 발전으로 인하여 적용분야가 점점 넓어지고 있다. 이에 따라 중대형 플랜트에 적용되는 다단압축기에 친환경적인 포일 베어링의 적용이 기대되고 있다.

본 논문은 300HP급 초고속 전동기의 회전체에 대한 설계 및 동력학적 해석에 대하여 다루고자 한다. 회전체의 반경 방향 하중을 지지하는 공기 포일 저널 베어링에 대한 설계 및 해석을 수행하였으며, 도출된 동특성을 기초로 하여 회전체의 동력학적 특성을 해석함으로써 초고속 전동기에 대한 회전체의 적합성을 확인하였다.

2. 공기 포일 저널 베어링 설계 및 해석

2.1 공기 포일 베어링 해석

그림 1은 초고속 전동기에 적용된 공기 포일 저널 베어링의 구조를 나타내고 있다. 공기 포일 베어링의 이론적인 해석을 통하여 베어링의 정특성 및 범프 포일과 유막 내의 압력장 발생에 따른 공기 포일 베어링의 동특성을 해석하였다.[2]

2.2 지배방정식

공기 포일 베어링 내의 공기 유막은 Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식을 연립한 형태인 레이놀즈 방정식으로 표현되며, 식 (1)과 같이 표현이 가능하다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{ph^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{ph^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6U \frac{\partial}{\partial x} (ph) \quad (1)$$

유막 두께는 편심과 범프의 변형에 의해서 변화하게 되며, 이는 식 (2)와 같이 표현이 가능하다.

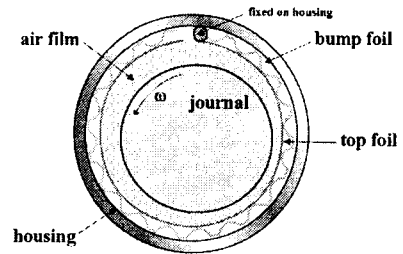


그림 1. 공기 포일 저널 베어링의 구조

$$h = C - x \cos \theta - y \sin \theta + K(p - p_a) \quad (2)$$

식 (2)에서 C는 포일 베어링의 반경 방향 틈새를, K는 범프의 강성을 반영하는 상수이며, 다음과 같이 표현된다.

$$K = \left(\frac{\alpha C}{P_a} \right) \quad (3)$$

여기서, α 는 범프 베어링의 컴플라이언스이며, 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\alpha = \frac{2p_a S}{CE} \left(\frac{l_0}{t} \right)^3 (1 - \nu^2) \quad (4)$$

2.2 공기 포일 베어링의 유막력, 강성 및 감쇠

유막에 대한 지배 방정식과 경계 조건을 이용하여 정적 압력 및 섭동된 압력 분포를 구할 수 있으며, 이를 통하여 하중 지지 능력, 강성 및 감쇠 계수를 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \bar{F}_x \\ \bar{F}_y \end{Bmatrix} = \int_{-(L/D)}^{+(L/D)} \int_0^{2\pi} (p-1) \begin{Bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{Bmatrix} d\theta dz \quad (5)$$

무차원화된 하중과 작용각은 무차원화된 유막력을 통하여 구하면 다음과 같다.

$$\bar{W} = \frac{W}{p_a R^2} = \sqrt{\bar{F}_x^2 + \bar{F}_y^2} \quad (6)$$

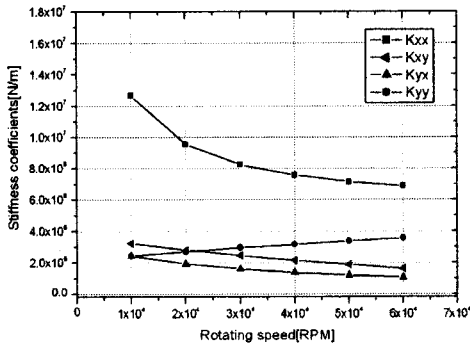
$$\tan \phi_z = (\bar{F}_x / \bar{F}_y) \quad (7)$$

섭동된 압력을 구하면, 아래와 같이 강성과 감쇠 계수들을 구할 수 있다.

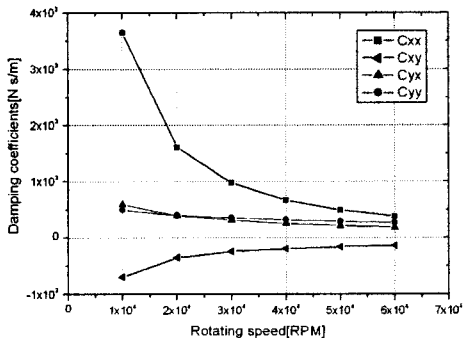
$$\begin{Bmatrix} \bar{K}_{xx} & \bar{K}_{xy} \\ \bar{K}_{yx} & \bar{K}_{yy} \end{Bmatrix} = \int_{-(L/D)}^{(L/D)} \int_0^{2\pi} \begin{Bmatrix} p_x \cos \theta & p_y \cos \theta \\ p_x \sin \theta & p_y \sin \theta \end{Bmatrix} d\theta dz \quad (8)$$

$$\begin{Bmatrix} \bar{C}_{xx} & \bar{C}_{xy} \\ \bar{C}_{yx} & \bar{C}_{yy} \end{Bmatrix} = \int_{-(L/D)}^{(L/D)} \int_0^{2\pi} \begin{Bmatrix} p_x \cos \theta & p_y \cos \theta \\ p_x \sin \theta & p_y \sin \theta \end{Bmatrix} d\theta dz \quad (9)$$

위 해석을 통하여 회전체에 대한 운전 속도를 고려한 강성 및 감쇠 값들은 그림 2와 같으며, 베어링의 설계 사양은 표 1에 나타내었다. 그림 2의 베어링 해석 결과 중, 회전속도의 증가에 따른 강성계수의 변화를 살펴보면 축의 하중지지와 관련 있는 Kyy 성분은 속도 증가에 따른 유막력 증가에 따라 증가하는 것을 볼 수 있는 반면, 축이 부상하기 때문에 Kxx 성분은 감소하는 결과를 나타내고 있다. 각각의 회전 속도에 따라서 구한 범프 포일 베어링의 강성 값과 감쇠 값은 회전체 해석의 입력 값이 되어, 위험 속도, 불균형 응답, 및 안정성 확보를 위한 감쇠 값 등을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 2. 회전체의 구동 속도에 따른 공기 포일 베어링의 동특성 해석: (a) 강성, (b) 감쇠

표 2. 공기 포일 베어링 설계 사양

Parameter	Unit	Value
Radius of shaft	mm	30.00
Radius of sleeve	mm	30.90
Thickness of top foil	mm	0.22
Coating of top foil	-	MoS2
Thickness of bump foil	mm	0.2
Height of bump foil	mm	0.62
Width of foils	mm	60.00
Material of foils	-	SUS

3. 초고속 전동기용 회전체의 동력학적 해석

3.1 회전체 모델

초고속 전동기용 회전체의 설계 특성은 1차 굽힘 모드를 넘는 초임계 회전체이다. 따라서 안정성을 고려한 회전체와 베어링의 설계 및 해석이 필수적이다. 베어링 해석을 통해 구해진 회전 속도에 따른 강성, 감쇠의 동특성은 초고속 전동기의 회전체 해석을 위한 중요한 파라미터로서 작동 속도 구간에서의 안정성 판별에 적용된다. 그림 3은 회전체 해석을 위해 63개의 요소로 나뉘어진 초고속 전동기의 회전체를 보여주고 있다. 좌측 베어링(L/D=1)과 우측 베어링(L/D=1)의 크기는 같으며, 각각 베어링에 대한 특성 값은 회전체의 중심부에 위치시킨다. 초고속 전동기의 회전체는 위치에 따라 비균일한 특성을 갖기 때문에 분할에 의한 유한 요소법을 이용하여 회전체의 강체, 굽힘 모드를 계산하였다.

3.2 위험 속도 및 안정성 해석

초고속 전동기의 임계속도는 회전체의 회전과 베어링의 특성에 의한 각 속도에서의 고유 주파수와 회전 속도가 같아질 때 발생하며 로터의 진동 모양에 따라 병진모드, 원뿔형 모드의 강체모드 그리고 굽힘 모드로 나뉜다. 그림 4에 구해진 임계속도를 나타내었다. 강체모드는 3,700 RPM, 4,300 RPM에서 발생하였고, 1차 굽힘 모드는 42,260 RPM에서 발생하였다. 정격속도 60,000 RPM과 비교해 볼 때, 80% 이하에서 1차 굽힘 모드가 발생하여 설계가 잘 되었음을 확인하였다.

대수 감쇠율은 회전체의 회전에 따른 진동량의 증가 또는 감소를 나타내는 지표로서 주어진 영역에서 운전할 수 있는지를 나타내는 매우 중요한 파라미터이며, 회전체의 진동량은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$x = |x| e^{-\lambda} \cos(\omega t + \phi) \quad (10)$$

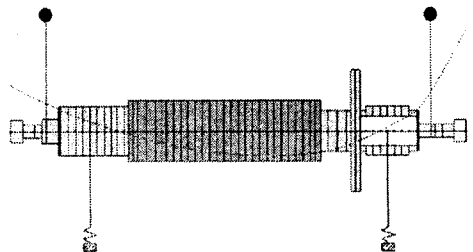


그림 3. 초고속 전동기용 회전체의 FEM 모델

[참 고 문 헌]

- [1] Barnett, M. A. and Silver, A. "Application of Air Bearings to High-Speed Turbomachinery," SAE Paper 700-720, 1970.
- [2] 이남수, 범프 형태를 갖는 공기 포일 베어링의 성능 해석 및 안정성에 관한 연구, 한양대학교 대학원, 박사학위논문, 2002.
- [3] J.W.Lund, "Stability and Damped Critical Speeds of a Flexible Rotor in Fluid-Film Bearings," Journal of Engineering for Industry, pp. 509-517, 1974.

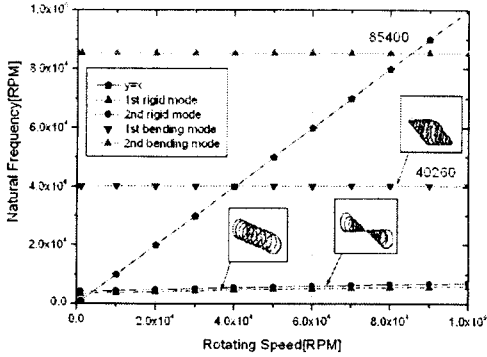


그림 4. 초고속 전동기의 위험속도 해석 결과(Campbell diagram)

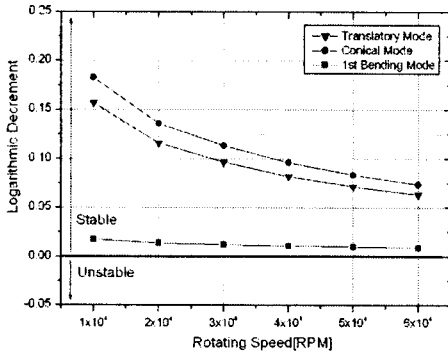


그림 5. 회전체의 안정성 해석 결과

여기에서, 진동량은 λ 즉, 맥 감쇠지수에 의해 지배 받으며 대수 감쇠율은 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$\delta = -\frac{\lambda}{\text{frequency}} \quad (11)$$

이 때, 맥 감쇠지수가 0보다 크면 시간에 따라 진동량이 감소되어 시스템이 불안정성을 갖게 되며, 반대로 0보다 작아지면 불안정성이 감소하게 된다. 이때 대수 감쇠율은 0보다 커지며 회전체는 충분한 감쇠력을 얻게 되어 회전 안정성을 갖게 된다.[3]

그림 5는 회전체의 안정성 해석 그래프이다. 각각의 속도에서의 강체 모드, 1차 굽힘 모드에 대한 대수 감쇠율을 구하였으며, 불안정성의 기준인 0이하의 값이 초고속 전동기의 운전 속도 범위 안에 발생하지 않음을 알 수 있다.

5. 결 론

초고속 전동기의 회전체에 대한 설계 및 동력학적 특성에 대하여 해석하였다. 회전체의 반경 방향에 대한 하중을 지지하는 공기 포일 저널 베어링의 설계 및 해석을 수행하였으며, 도출된 동특성 값을 이용하여 회전체의 위험속도를 구함으로써 안정성을 확인하였다. 또한, 각각의 구동속도의 대수 감쇠율을 구하여 안정성을 확인하였다.