한국소음진동공학회 2008년 추계학술대회논문집, pp.210~211

열박음 간섭량에 따른 로터의 고유진동수에 관한 연구

A Study on Natural Frequency of Rotor According to Interference of Shrink Fit

홍도관* · 우병철* · 안찬우†

Do-Kwan Hong, Byung-Chul Woo and Chan-Woo Ahn

1. 서 론

회전기계의 운전속도는 1 차 위험속도 이하가 되도록 설계하여 운전하기 때문에 문제가 되지 않으나 최근 산업의 발전에 따라 고속화, 고정밀화가 요구되고 있어 점차 1 차 위험속도 이상에서 운전되는 경우가 증가하고 있는 추세에 있다. 전동기의 회전축에서 예전부터 많이 사용하고 있는 열박음(shrink fit)은 두 재료 사이의 온도차를 이용한 대표적인 구속방법으로 심할 경우, 깨어지거나 비틀림이 발생할 수 있으며 적절하지 못한 열박음은 회전 중 회전자의 일부가 파손되는 사고가 발생할 수 있다.

본 논문은 15 kW, 120,000 rpm 의 초고속 연료전지용 Air blower 전동기를 개발 및 제작하는데 있어서 로터의 고강도 sleeve 와 영구자석(permanent magnet) 및 앞 뒤의 stub shaft 과의 열박음을 3 차원 해석으로 구현하였다. 개발모델의 제작된 간섭량(interference)을 결정하고 정적인 상태에서 고강도 sleeve 에 열을 가하여 팽창 시키고 영구자석은 질소에 알코올을 섞어서 냉각하여 수축시킨다. 그리고 조립한 후 상온에서 냉각시킨다. 이때 영구자석은 압축에 걸리고 sleeve 와 stub shaft 는 인장에 걸리는데, 소재의 항복과 인장, 압축응력으로 구조적인 안정상태를 평가한다. 그리고, 고속회전 시 발생하는 원심력에 의한 원심응력 ($\rho\omega^2 r^2$)과 스테이터와 로터 사이의 작은 공극으로 인하여 열이 발생하게 되는데, 고온조건인 200℃에서도 구조적인 안전성이 보장되어야 한다. 고속회전 시 원심력과 열에 의한 팽창으로 sleeve 와 영구자석의 슬립 발생 여부도 고찰하였다. 마지막 단계로 열박음으로 인한 축강성의 변화를 구현하기 위하여 로터 다이나믹해석을 통하여 로터의 위험속도를 체크하였다. 로터의 3 차원 해석을 통하여 열박음 구현, 고속회전을 통한 원심력 해석 및 로터 다이나믹스까지 순차적인 시뮬레이션을 통해서 로터의 정적, 동적인 안정성을 평가하고 그 방법을 제시하고자 한다. 초고속 연료 전지용 Air blower 전동기는 고온 고속 환경에 적응할 수 있는 공기포일 베어링(Air foil bearing)을 적용하였다.

† 교신저자; 동아대학교 기계공학부
E-mail : cwahn@dau.ac.kr
Tel : (051) 200-7643, Fax : (051) 200-7659
· 한국전기연구원 전동력연구그룹

2. 로터모델 및 해석

2.1 로터모델

Fig. 1 에 개발 로터의 형상과 명칭을 나타내었다. Table 1 에는 사용된 소재의 기계적 물성을 나타내었으며, 구조적인 문제는 소재의 항복응력과 인장/압축응력으로 평가하였다. Table 2 에는 모델의 치수를 나타내었다.

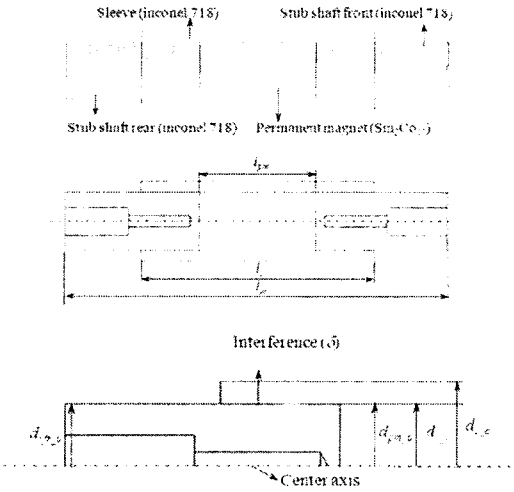

Fig. 1 Dimension of rotor

Table 1 Material properties

Item \ Material	Core steel	Permanent Magnet
	Inconel 718	Sm_2Co_{17}
Density(kg/m^3)	8,190	8,400
Elastic Modulus(GPa)	211	120
Yield Strength(MPa)	1036	—
Tensile/Compress Strength(MPa)	—	35/800
Poisson' ratio	0.284	0.24

Table 2 Manufactured dimension of rotor

Item	Unit (mm)
Sleeve inner diameter (d_{s_i})	$X^{-0.05}_{-0.08}$
Sleeve outer diameter (d_{s_o})	$Y^{+0.013}_{-0.0}$
Sm_2Co_{17} outer diameter (d_{pm_o})	$X^{+0.007}_{-0.0}$
Stub front/rear shaft outer diameter (d_{sfr_o})	$X^{+0.007}_{-0.0}$
Interference (δ)	0.06~0.087
Sm_2Co_{17} length (l_{pm})	50
Sleeve length (l_s)	100
Model length (l_m)	164.4

2.2 열박음 강도해석

로터의 제작과정에서 먼저 간섭량을 설정한 뒤 영구자석과 양단에 stub shaft 를 본딩한 후 질소냉각을 하여 수축시키고 sleeve 를 고온 가열하여 팽창시킨다. 그리고 조립하여 상온에 냉각시킨다. 정적인 상태에서 구조적인 응력상태와 상온조건일 때 정격속도의 과도상태에서 구조상태를 파악한다. 또한 고온조건 (200℃)에서 정격속도의 정상상태일 경우 구조상태를 체크한다. 마지막으로 고온조건 (200℃)에 최대속도조건(105% 정격속도)의 정상상태에서 구조상태를 체크해야 한다. 각 단품마다 항복응력과 인장, 압축응력의 상태를 파악하여 구조적인 안정상태를 평가하였으며 마지막 최악의 운전조건에서 구조해석의 결과는 구조적으로 안전하며 Table 3 과 같다. Fig. 2 는 운전조건에서 응력분포를 나타낸다.

Table 3 Structural analysis result (@120k rpm, 210℃, δ:0.087)

Item \ Model(Material)	Sleeve	Stub shaft	PM
	Inconel 718	Inconel 718	Sm_2Co_{17}
Radial stress(MPa)	-348	736.83	-628.73
Circumferential stress(MPa)	994	742.9	-628.881

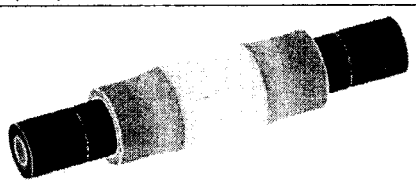

Fig. 2 Stress of rotor (@120,000 rpm, 210℃, δ:0.087)

2.3 열박음 고려한 위험속도해석

열박음을 고려하지 않았을 때와 열박음을 고려했을 때의 위험속도를 Table 4 에 비교하였다. 고온고속 환경에 적응할 수 있는 공기포일 베어링(1.7M N/m)을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 수행결과 개발 목표인 120,000 rpm 의 운전속도를 넘어서는 위험속도가 체크 되었다. 열박음을 하였을 때의 위험속도가 하지 않았을 때의 위험속도보다 축의 강성의 증가효과로 크게 나타났다. 1 차 후방 휘돌림 위험속도가 129,847 rpm 으로 안정하지만 정격회전수와의 분리여유를 적절히 설계할 필요가 있다. Fig. 3 은 1 차 후방 휘돌림 모드이고, Fig. 4 는 Campbell 선도이며 1x 선과 만나는 점이 위험속도가 된다.

Table 4 Rotordynamic analysis result (@120k rpm, 210℃)

Model / Whirling frequency	No Shrink Fit	Shrink Fit
	δ = 0 mm	δ = 0.087 mm
1st backward whirling (Hz)	2060.1	2167.0
1st forward whirling (Hz)	2094.4	2204.3
2nd backward whirling (Hz)	4067.9	4350.8
2nd forward whirling (Hz)	4173.6	4471.1
3rd backward whirling (Hz)	7392.7	7795.4
3rd forward whirling (Hz)	7474.2	7892.6

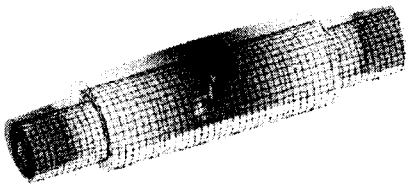

Fig. 3 1st backward whirling mode (210℃, δ:0.087)

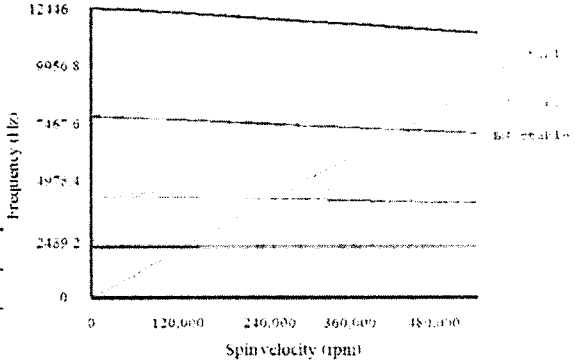

Fig. 4 Campbell diagram (δ:0.087)

3. 결 론

15 kW, 120,000 rpm 의 초고속 연료 전지용 Air blower 전동기를 개발 및 제작하는데 있어서 로터의 열박음 효과를 3 차원 해석을 통해서 구현하였다. 먼저 구조강도해석을 통해서 열박음 시 발생하는 구조적인 안정성을 정적인 상태와 동적인 조건에서 평가하였으며, 또한 구조적인 결과를 연성으로 3 차원 로터 다이나믹해석을 통해서 로터의 위험속도를 체크하였으며, 이는 열박음을 하였을 때의 위험속도가 열박음을 하지 않았을 때 보다 크게 발생하였으며 이는 축 강성의 증가로 인한 것으로 판단된다.