

자기베어링으로 지지된 터보냉매압축기의 동적 거동 해석

Dynamic analysis of turbo refrigerant compressor supported by magnetic bearings

*#박철훈¹, 최상규¹, 윤동원¹, 함상용¹, 손영수¹

*#C. H. Park(parkch@kimm.re.kr)¹, S. K. Choi¹, D. W. Yun¹, S. Y. Ham¹, Y. S. Son¹,
¹ 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부

Key words : Turbo refrigerant compressor, Magnetic bearing, Rotor dynamics, Finite Element Method, Imbalance response

1. 서론

터보냉매압축기는 건물의 냉난방기, 수송기기의 냉난방기, 항공항습설비, 환경시험설비 및 식품저장설비 등과 같이 냉동공조기술을 이용하는 각종 산업에 사용되는 터보냉매 동기의 핵심구성품이다. 본 연구원에서는 무급유 직결구동 소형 터보냉매압축기의 성능 및 신뢰성 향상을 위한 회전체-베어링계에 관한 연구를 수행하고 있으며, oil-free 베어링 중의 하나인 에어포일베어링을 사용한 정격운전속도 60,000 rpm 의 50RT 급 터보냉매압축기를 개발하였다. 터보냉매압축기에서 oil-free 베어링을 사용할 경우 냉매가 오일에 오염되지 않기 때문에 지속적인 운전이 가능하다는 장점이 있다. 그러나, 에어포일 베어링은 초기 기동 시 축과 베어링 사이의 마찰이 발생하며, 유지보수비용이 높은 편이고 안정성이 낮은 문제점이 있다. 이에 비해 자기 베어링은 초기 기동을 포함한 모든 운전영역에서 접촉이 발생하지 않으므로 유지보수의 부담이 거의 없으며, 기존 oiled 베어링에 비해 1/500 이하의 마찰 손실을 가지므로 에너지 효율이 높고, oil-free 베어링 방식 중 가격이 저렴한 편인 것으로 알려져 있다. 최근 미국의 TurboCor 사와 YORK 사, 스웨덴의 abs 사 등에서 이러한 자기베어링의 장점을 강조하며 자기베어링을 사용한 압축기를 판매하고 있다. 본 연구원에서도 기존에 에어포일베어링을 이용하여 개발한 50RT 급 터보냉매압축기를 전자석 자기베어링을 사용하는 형태로 개발을 시도하고 있다. 본 연구에서는 50RT 급 터보냉매압축기를 PID 제어를 사용한 전자석 자기베어링으로 지지할 경우의 위험속도, 불평형 응답 등의 동적 거동을 유한요소법을 사용하여 예측하였다.

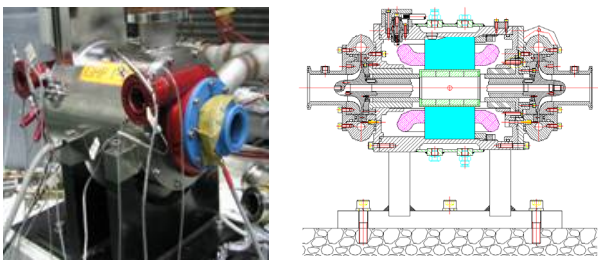


Fig. 1 Picture and draft of turbo refrigerant compressor using air foil bearings

2. 회전체와 자기베어링 설계

래디얼 자기베어링을 설계하기 위해서는 먼저 지지해야 하는 최대 힘을 고려하여야 한다. 터보냉매압축기에 사용되는 회전체는 수평으로 배치되어 있으므로 래디얼 자기베어링에 작용하는 힘은 회전체의 자중과 회전체 불균형에 의한 원심력이다. 이 중 회전체 불균형에 의한 원심력은 ISO1940 규격에서 터보압축기에 적용되는 G2.5 를 기준으로 3kg 질량의 회전체를 60,000rpm 으로 회전시킬 때의 허용 불평형량에 의한 것으로 하였을 때 약 27N 이 작용한다. 자중과 원심력이 앞과 뒤의 베어링에 동일하게 작용한다고 가정하면, Table 1 과 같은 사양으로 래디얼 자기베어링을 설계하였다. 설계에 근거하여 새롭게 구성한 전자석 자기베어링에 의해 지지되는 회전체를 Fig. 2 에 나타내었다.

Table 1 specification of radial magnetic bearings

Item	Value
air gap[mm]	0.4
Area of pole[mm ²]	165
Number of turn[times]	40
Bias current[A]	3
Current gain, Ki [N/A]	6.22
Position gain, Kx [N/m]	-4.66×10^4

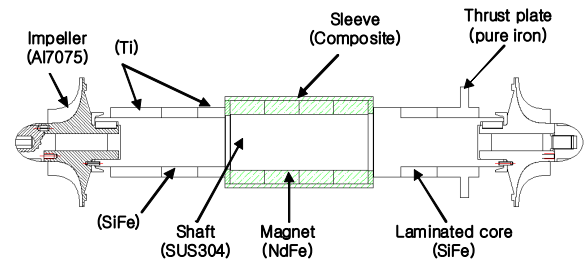


Fig. 2 New design of rotor for turbo refrigerant compressor using magnetic bearings

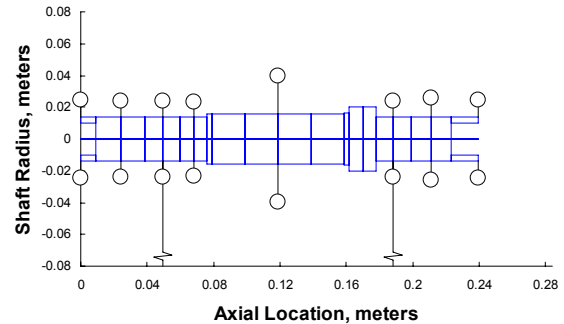


Fig. 3 Rotor dynamic model for FEM analysis

3. 회전체의 동적 거동 해석

새롭게 설계된 회전체를 유한요소법을 이용하여 연성 회전체로 모델링한 후 동적 거동을 해석하기 위하여 Fig. 3 과 같이 20 개의 요소로 나누었다. SUS304 소재의 중심 축 이외의 다른 구성품들은 부가질량으로 간주하여 배치하였다. 연성 회전체의 유한요소 모델은 식(1)과 같고, 여기에 식(2)의 자기베어링 선형화 모델을 결합하면 식(3)과 같다.

$$[M]\{\ddot{q}\} + [G]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{F\} \quad (1)$$

$$\{F\} = -[K_x]\{q\} + [K_i]\{i\} + \{f_e\} \quad (2)$$

$$[M]\{\ddot{q}\} + [G]\{\dot{q}\} + ([K] + [K_x])\{q\} = [K_i]\{i\} + \{f_e\} \quad (3)$$

여기서 $[M]$, $[G]$, $[K]$ 는 각각 질량, 감쇠, 강성 행렬이고, $[K_x]$, $[K_i]$ 는 각각 자기베어링의 위치강성, 전류 강성 행렬이다. 그리고, $\{q\}$, $\{f_e\}$ 는 각각 변위, 외력 벡터이다. 식(3)에 대한 선형 해석을 위해 1 차식으로 변환하면 식(4), (5)와 같다.

$$\{\dot{x}\} = A\{x\} + B\{i\} + B_1\{F_e\} \quad (4)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -M^{-1}(K + K_x) & -M^{-1}G \end{bmatrix}, \{x\} = \begin{Bmatrix} q \\ \dot{q} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}K_i \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix}, \{F_e\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ f_e \end{Bmatrix}$$

위 식들을 바탕으로 자기베어링과 외력을 포함한 회전체 모델식에 제어기, 전류앰프모델 등을 결합하여 Fig. 4와 같은 형태의 제어시스템 구성에 대한 해석을 실시하였다. 제어기는 자중에 의한 영향을 보상하기 위해 PID 제어기를 사용하였다. 회전속도 0~65,000rpm 사이에 대한 휘둘림속도 해석과 대수감쇠해석을 실시하였고 그 결과를 Fig. 5와 6에 나타내었다. 병진모드와 원추모드의 강제모드에 대한 휘둘림속도는 전자석 자기베어링의 전류강성, 위치강성 및 제어기의 게인 등에 의해서 결정이 되는데, 만족할 만한 외란 제거성능을 가지도록 PID 게인을 선정하여 해석에 사용한 결과, 회전속도 1,890rpm, 2,000rpm에서 병진모드와 원추모드를 각각 돌파할 것으로 예상되었다. 굽힘모드가 존재하는 주파수는 회전체의 설계에 의해 결정되는데, 정격운전속도인 60,000rpm에서의 1, 2차 후방굽힘모드는 각각 1,433Hz, 3,281Hz에 존재할 것으로 예측되었다. 1차 굽힘모드 주파수에 비해 정격운전속도인 1,000Hz가 70%이하에 존재하고 1차 굽힘모드의 대수감쇠가 모든 동작영역에서 0보다 크므로 굽힘모드에 의한 큰 영향없이 안정적인 운전이 가능할 것으로 예상된다. ISO1940 규격 G2.5에 맞춰 회전체가 밸런싱이 되었다고 가정하고 4번과 16번 노드에 180도의 위상차를 주고 불평형력을 균등배분시켜 불평형 응답을 계산한 결과, 앞뒤 베어링 모두 모든 동작영역에서 zero-to-peak 변위가 0.5 μm이내의 매우 작은 변위를 가지고 동작할 것으로 예측되었다.

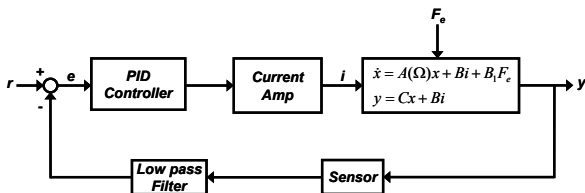


Fig. 4 Block diagram of magnetic bearing control system

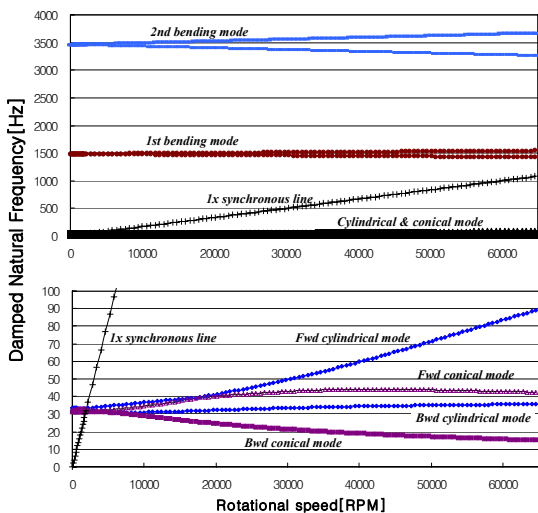


Fig. 5 Campbell diagram of rotor supported by magnetic bearings

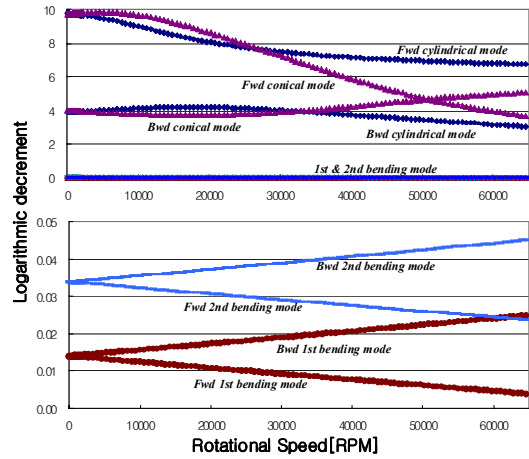


Fig. 6 Logarithmic decrement of rotor supported by magnetic bearings

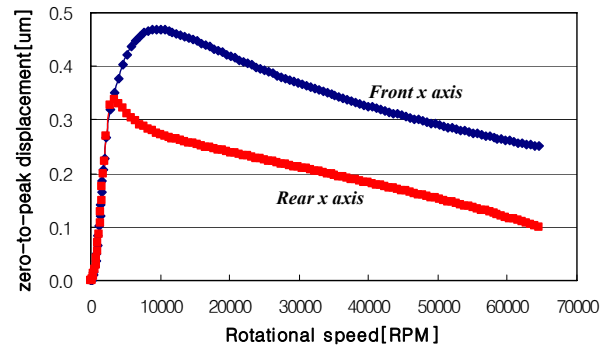


Fig. 7 Unbalance response at front and rear sensor location

4. 결론

에어포일베어링을 이용하여 개발된 50RT급 터보냉매압축기를 전자석 자기베어링을 사용할 경우에 대해 유한요소법을 이용하여 동적 거동을 해석하였다. 자기베어링용으로 설계된 회전체는 정격운전속도에 비해 충분히 높은 주파수에 1차 굽힘모드가 존재하였고, PID 제어기를 사용할 경우 zero-to-peak 변위 0.5 μm이내의 불평형 응답을 가질 것으로 예측되어 전 동작영역에서 안정적인 운전이 가능할 것으로 예상된다. 향후 자기베어링 사용한 터보냉매압축기를 제작한 후 운전실험을 통해 예측결과를 검증할 계획이다.

후기

본 연구는 전략기술개발사업의 일환으로 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. <http://www.turbocor.com>
2. <http://www.york.com>
3. <http://www.absgroup.com>
4. Park, C.H., Choi, S.K., Lee, J.P. and Han, Y.H., "On the Dynamic Behavior of a 5kWh FESS Mounted on AMBs", The 11th International Conference on Mechatronics Technology, 416-420, 2007
5. Zorzi, E. S. and Nelson, H. D., "Finite Element Simulation of Rotor-Bearing Systems with Internal Damping", Trans. ASME, J. of eng. Pow., Jan., pp. 71~75, 1997
6. 유승열, 박철훈, 최상규, 노명규, "유한요소법을 이용한 대용량 플라이휠 에너지 저장 장치의 연성 회전체 모델링," 대한기계학회 동역학 및 제어부분 춘계학술대회는문집, 79-81, 2008.