

기어 물림 효과에 의한 횡-비틀림 연성을 갖는 터보-냉동기

로터-베어링 시스템의 동특성

Dynamic Characteristics of a Turbo-chiller Rotor-Bearing System having a Lateral-Torsional Coupling by Gear Mesh Effect

⁰이 안 성* · 하 진 용**

An Sung Lee and Jin Woong Ha

ABSTRACT

In turbo-machines operated at high speeds through gear speed increasers a precise coupled analysis of lateral and torsional vibrations is required to achieve highly reliable designs with low vibration and low noise levels, where the vibration coupling is due to the gear pair mesh stiffness. In this paper, applying the generalized coupled lateral-torsional finite element model of a gear pair element, has been analyzed a coupled lateral-torsional vibration of the prototype 800 RT turbo-chiller rotor-bearing system with a bull-pinion gear speed increaser. Results have shown that the coupled torsional natural frequencies have decreased due to the coupling effect of lateral vibration and particularly, the 2nd torsional natural frequency and its mode shape have had big changes. However, changes of lateral vibration characteristics have been noticed only at high lateral whirl natural frequencies above 15,000 rpm.

1. 서론

축 직경과 길이의 비가 $D/L \gg 0.01$ 인 일반 로터 시스템에서는 횡 진동과 비틀림 진동의 연성효과는 무시될 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나, 기어 박스 또는 기어 전동 로터-베어링 시스템에서는 기어 물림 효과에 의해 횡 진동과 비틀림 진동이 연성 되는 특성이 나타난다. 특히, 기어 쌍의 증속 시스템에 의해 고속 운전되는 터보 기계에서는 시스템의 동특성이 전통적인 비연성 횡 또는 비틀림 진동만의 해석결과와 허용

오차범위를 넘어 다를 수 있기 때문에, 이들 고성능 기계에서 저진동·저소음의 신뢰성 높은 설계를 달성하기 위해 횡-비틀림 연성 진동을 고려한 정밀 동특성 설계해석이 요구 된다.

Neriya 외[1]는 단순 기어 축 시스템에 대해 기어 쌍을 두 개의 관성, 강성, 감쇠 요소로 연성(횡-비틀림이 연계된) 이산(Discrete) 모델링하여 횡-비틀림 연성 진동해석을 수행하였다. Kahraman 외[2]는 기어 쌍을 연성 유한요소 모델링하여 기어 로터 시스템의 횡-비틀림 연성 진동을 연구하였으며, 자이로스코픽 효과는 고려되지 않았다. Rao 외 [3]는 자이로스코픽 효과를 고려한 일반화된

* 한국기계연구원 회전체 연구그룹

** 한양대학교 대학원

기어 쌍의 연성 유한요소 모델을 적용하여, 기어 박스 시스템 및 감속 기어를 갖는 터보 기계 로터-베어링 시스템의 연성 고유진동 해석을 수행하였다. Rao 외[3]의 부분 연구를 제외하면, 이상을 비롯한 지금까지 그 밖(전달행렬법이 적용된 것들을 포함하여) 대부분의 기어 물림 효과에 의한 횡-비틀림 연성 진동연구들은 기어가 핵심을 이루면서 비틀림 진동이 주 관심사인 단순 기어 쌍 또는 기어 박스 로터 시스템을 적용 대상으로 하고 있다. 한편, 이안성과 하진웅[4]은 기어 진동 메카니즘을 갖는 로터-베어링 시스템에 대해 기어에 의한 횡진동과 비틀림진동의 연성 동특성해석을 위해, 기어 쌍의 일반화된 연성 유한요소 모델을 개발하였다.

본 논문에서는 기어 쌍의 일반화된 횡-비틀림 연성 유한요소 모델을 적용하여 불-피니언 기어의 증속기를 채택하고 있는 시제 개발 800 냉동톤 터보-냉동기 전체 로터-베어링 시스템의 횡-비틀림 연성 고유진동 해석을 수행하고, 연성에 따른 진동 특성의 변화를 분석 검토하고자 한다.

2. 기어쌍의 일반화된 연성 유한요소 모델

Fig. 1의 전체 좌표계에 대한 기어 쌍의 일반화된 변위 벡터는 Eqn. (1)으로 정의된다.

$$\{q^G\} = [u_1^G \ v_1^G \ \theta_{X1}^G \ \theta_{Y1}^G \ u_2^G \ v_2^G \ \theta_{X2}^G \ \theta_{Y2}^G]^T \quad (1)$$

전체 시스템 좌표계에 대한 기어 쌍의 연성 유한요소 방정식은 기어의 압력선을 따른 좌표계의 연성 유한요소 방정식(이안성과 하진웅[4])과 압력각을 고려한 변환 행렬을 사용하여 Eqn. (2)로 얻어진다.

$$[M^G]\{\ddot{q}^G\} + [C^G]\{\dot{q}^G\} + [K^G]\{q^G\} = \{Q^G\} \quad (2)$$

여기서, 전체 시스템 좌표계에서의 관성,

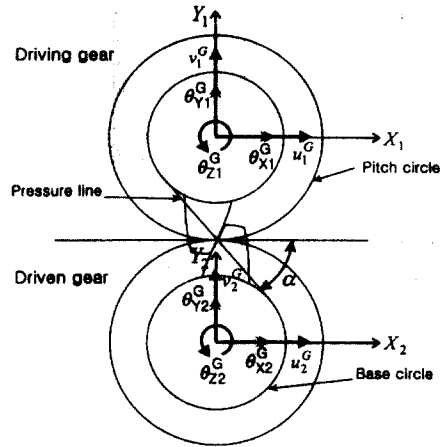


Fig. 1 A model of gear pair element at the general coordinate.

감쇠, 자이로스코픽, 강성 행렬과 외력 벡터는 Eqns. (3)~(7)으로 구해진다.

$$[M^G] = [T][M^G][T]^T \quad (3)$$

$$[C^G] = [T][C^G][T]^T \quad (4)$$

$$[G^G] = [T][G^G][T]^T \quad (5)$$

$$[K^G] = [T][K^G][T]^T \quad (6)$$

$$\{Q^G\} = [T]\{Q^G\} \quad (7)$$

그리고, 기어의 압력선을 따른 국소 좌표계에서 전체 시스템 좌표계로의 변환 행렬, $[T]$, 는 Eqn. (8)로 정의된다.

$$[T] = \begin{bmatrix} -S & C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -C & -S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -S & C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -S & C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C & -S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -S & C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C & -S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

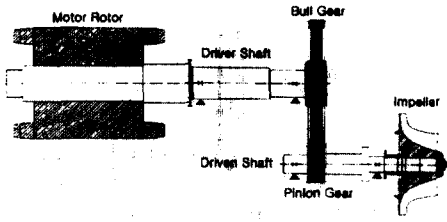


Fig. 2 Schematic of a 800RT turbo-chiller rotor-bearing system.

여기서, α : 압력각, $S : \sin \alpha$, 그리고 $C : \cos \alpha$ 이다.

3. 해석 결과 및 토의

기 개발된 기어 전동 로터-베어링 시스템의 횡-비틀림 연성 유한요소 모델을 적용하여, 증속 기어 쌍을 갖는 터보-냉동기 로터-베어링 시스템의 연성 고유진동 해석을 수행하였다. Fig. 2는 해석대상 시제 개발 800 냉동톤 터보-냉동기의 구성을 나타내며, 정격 3,420 rpm인 모터와 불 기어의 구동 로터-베어링 시스템은 불-피니언 기어 쌍의 증속기를 통해 압축기 임펠러와 피니언 기어의 피동 로터-베어링 시스템을 정격 11,845 rpm으로 구동하고 있다.

기어 물림 강성의 변화에 따른 비연성 비틀림 진동만의 고유진동수가 Fig. 3에 나타나 있다. 낮은 기어 물림 강성에서는 모터 축과 임펠러 축이 실질적으로 독립적인 진동을 하며, 기어 물림 강성이 $1 \times 10^6 N/m$ 를 넘어 증가함에 두 축이 연계되어 1, 2차 비틀림 고유진동수가 크게 증가하고, 기어 물림 강성이 설계 강성 값($6.31 \times 10^8 N/m$) 을 넘어 더욱 증가함에 따라 1, 2차 비틀림 고유진동수가 포화 수렴하는 것이 관찰된다. 한편, 설계 물림 강성에서 비연성 비틀림 1, 2, 3차 고유진동수는 9,780 rpm, 27,763 rpm, 30,396 rpm이다.

모터 축의 정격속도에서 기어 물림 강성의 변화에 따른 연성 횡-비틀림 진동의 고유진

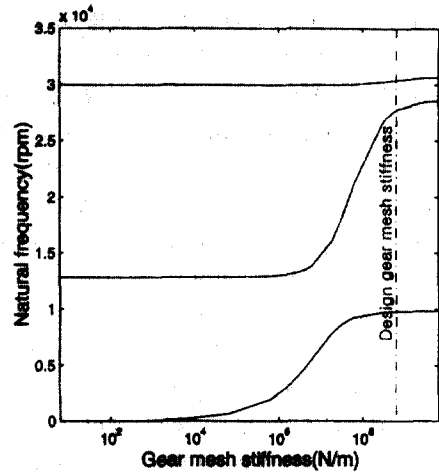


Fig. 3 Torsional natural frequencies vs. gear mesh stiffness with the torsional analysis only for rotating speed 3420 rpm.

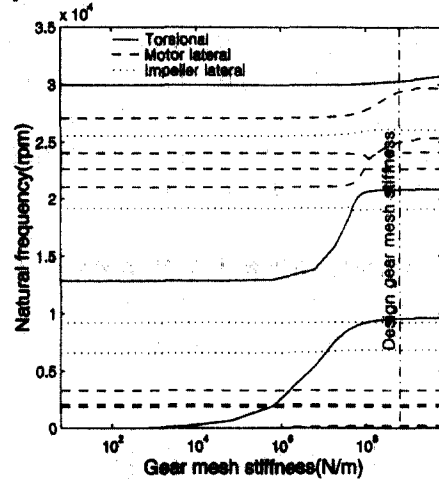


Fig. 4 Natural frequencies vs. gear mesh stiffness with the coupled rotordynamic analysis for rotating speed 3420 rpm.

동수가 Fig. 4에 나타나 있다. 10,000 rpm 이하의 저차 연성 횡 진동 선회 고유진동수는 기어 물림 강성에 의해 실질적인 영향을 받지 않으며, 15,000 rpm 이상의 고차 연성 횡 진동 선회 고유진동수는 기어 물림 강성이 $1 \times 10^7 N/m$ 이상으로 증가함에 따라 영향

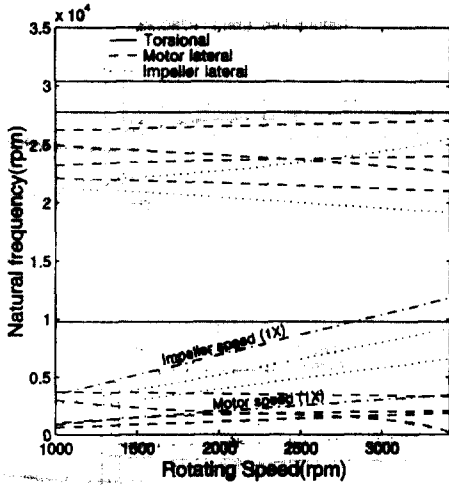


Fig. 5 Campbell diagram of the uncoupled rotordynamic analysis.

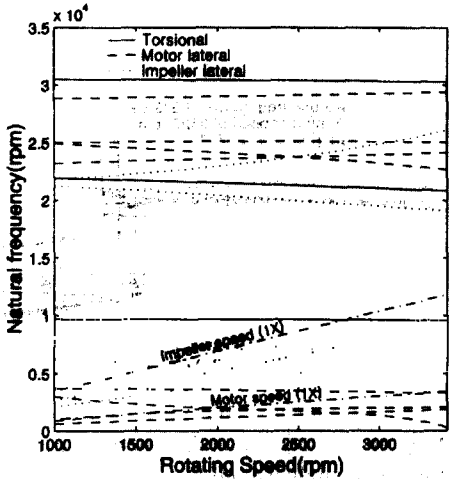


Fig. 6 Campbell diagram of the coupled rotordynamic analysis.

을 받는 것으로 관찰된다. 한편, 설계 기어 물림 강성에서 연성 비틀림 1, 2, 3차 고유진동수는 9,573 rpm, 20,832 rpm, 30,281 rpm으로, 비연성의 경우에 비해 비틀림 고유진동수가 모두 감소하였으며, 특히 2차 비틀림 고유진동수는 25% 정도로 크게 감소하였다.

설계 기어 물림 강성에서, 모터 축의 속도 변화에 따른 비연성 횡 진동과 비틀림 진동의 고유진동수가 Fig. 5의 캠벨선도에 나타

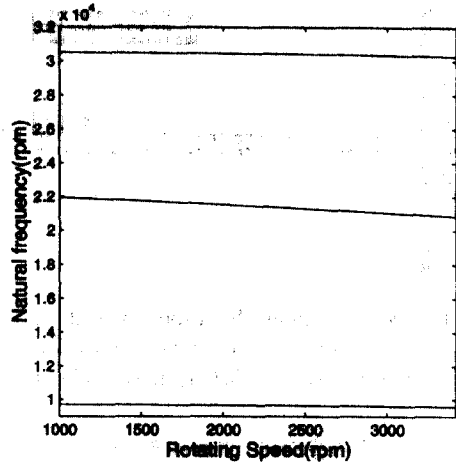


Fig. 7 Zoomed view of the torsional natural frequencies from Fig. 6.

나 있으며, 예상대로 비틀림 고유진동수가 속도에 관계없이 일정함을 볼 수 있다. 그리고, 설계 기어 물림 강성에서, 모터 축의 속도 변화에 따른 연성 횡 진동과 비틀림 진동의 고유진동수가 Fig. 6의 캠벨선도에 나타나 있다. Fig. 5과 Fig. 6의 비교를 통해, 10,000 rpm 이하의 저차 횡 진동 선회 고유진동수에서는 속도변화와 연계된 연성의 효과가 실질적으로 관찰되지 않는 반면, 15,000 rpm 이상의 고차 횡 진동 선회 고유진동수에서는 속도변화와 연계된 연성의 효과가 관찰되며, 특히 연성 비틀림 고유진동수들의 경우는 연성의 영향으로 속도증가에 따라 고유진동수들이 감소하는 현상이 관찰된다.

Fig. 7는 Fig. 6의 연성 캠벨선도로부터 연성 비틀림 진동 부분만을 확대한 것이다. 모터 속도가 1,000 rpm에서 3,420 rpm으로 증가함에 따라, 1, 2, 3차 비틀림 고유진동수가 각각 1.28%, 5.05%, 0.71% 감소하였다. 이러한 속도 증가에 따른 연성 비틀림 고유진동수의 감소원인을 조사하기 위해, 설계 기어 물림 강성에서 불기어의 극관성 I_p 값(실제 불기어의 I_p 에 대한 배율) 별로 모터 속도 1,000 rpm과 3,420 rpm 사이의 연성 비

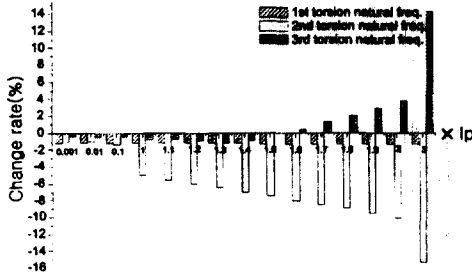


Fig. 8 Bull gear I_p times variation vs. torsional natural frequencies variation for the rotating speed 1000 rpm & 3420 rpm.

틀림 고유진동수의 변화율을 계산하였으며, 그 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. 볼기어의 극관성 배율이 0.001에서 3으로 증가함에 따라, 1차 고유진동수의 변화율은 음의 방향으로 미량씩 증가하고, 2차 고유진동수의 변화율은 음의 방향으로 크게 증가한다. 그리고, 3차 고유진동수의 변화율은 극관성 배율이 1.5까지 증가함에 따라 음의 방향으로 증가하다 감소하고, 극관성 배율이 1.5를 넘어 3으로 증가함에 따라 양의 방향으로 크게 증가한다. 이상의 결과로부터 자이로스콕픽 효과가 작용하는 횡진동이 비틀림 진동에 연성되어 Fig. 7에 나타난 비틀림 고유진동수의 감소를 가져온 것으로 판단된다. 그리고, 시스템의 자이로스콕픽 효과의 크기에 따라 연성 비틀림 고유진동수가 차수 별로 속도의 증가에 따라 감소 또는 증가할 수 있음이 관찰된다.

Figs. 9~10에는 설계 기어 물림 관성과 모터 속도 3,420 rpm에서 해석된 1, 2차 연성 비틀림 고유진동 모드(b), 비연성 비틀림 고유진동 모드(a), 그리고 해당 연성 횡진동 모드(c)가 나타나 있다. 1차 비틀림 고유진동 모드는 Fig. 9에서 비연성과 연성의 경우 모두 모터 축의 중립선을 한번 교차하는 동일한 형상을 나타낸다. 2차 비틀림 고유진동 모드는 Fig. 10에서 비연성의 경우 모터 축과 임펠러 축의 중립선을 한번씩 교차하나 연성의 경우는 모터 축의 중립선만을 한번

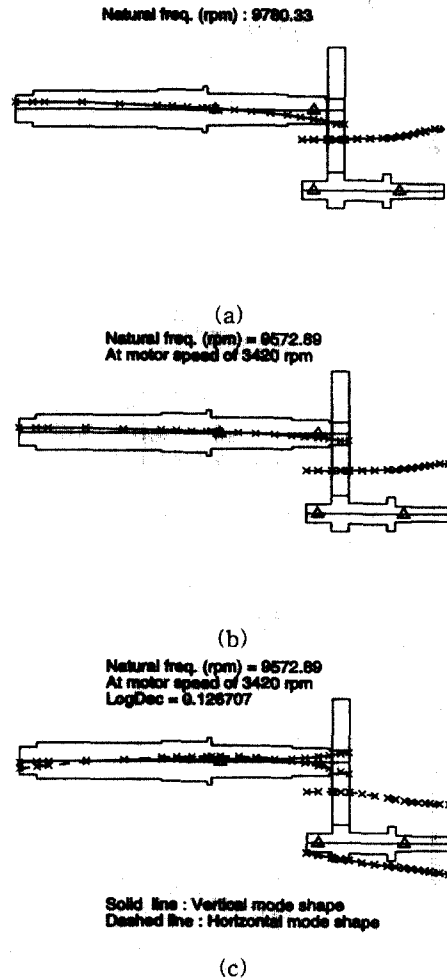


Fig. 9 (a) 1st torsional mode with the torsional analysis only.

(b) 1st torsional mode with the coupled analysis.

(c) 1st lateral mode with the coupled analysis for 1st torsional mode.

교차하는 다른 형상을 나타낸다.

4. 결론

본 논문에서는 기어 전동 메커니즘을 갖는 로터-베어링 시스템의 횡-비틀림 연성 진동 해석을 위해, 기어 쌍의 일반화된 연성 유한 요소 모델을 적용하여 볼-피니언 기어의 증속기를 채택한 800 냉동톤 터보-냉동기 전

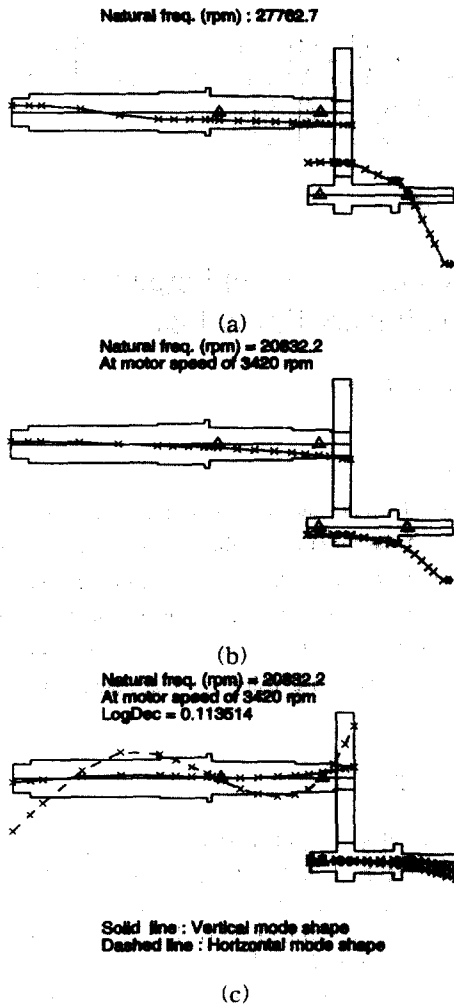


Fig. 10 (a) 2nd torsional mode with the torsional analysis only.
 (b) 2nd torsional mode with the coupled analysis.
 (c) 2nd lateral mode with the coupled analysis for 2nd torsional mode.

체 로터-베어링 시스템의 횡-비틀림 연성 진동 해석을 수행하였다. 해석결과, 연성에 의한 횡 진동의 영향으로 비틀림 고유진동수의 감소와 함께 특히 2차 비틀림 진동수 및 모드형상의 큰 변화가 관찰되었다. 연성에 의한 횡 진동 특성의 변화는 10,000 rpm 이하의 저차 횡진동 선회 고유진동수에서 실질

적으로 나타나지 않았으나, 15,000 rpm 이상의 고차 횡 진동 선회 고유진동수에서는 나타나는 것으로 밝혀졌다. 한편, 불-피니언 기어 증속기를 채택하고 수만 rpm에서 운전되는 2단 이상의 고속 터보 압축기에서는 횡-비틀림의 연성을 고려한 정밀 동특성 해석이 시스템의 신뢰성 확보를 위해 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Neriya, S. V., Bhat, R. B., and Sanker, T. S., 1984, "Effect of Coupled Torsional-Flexural Vibration of a Geared Shaft System on Dynamic Tooth Load," *The Shock and Vibration Bulletin*, Part 3, Vol. 54, pp. 67-75.
- [2] Kahraman, A., Ozguven, H. N., Houser, D. R., and Zakrajsek, J. J., 1992, "Dynamic Analysis of Geared Rotors by Finite Elements," *ASME Trans. Journal of Mechanical Design*, Vol. 114, pp. 507-514.
- [3] Rao, J. S., Chang, J. R., and Shiau, T. N., 1995, "Coupled Bending-Torsion Vibration of Geared Rotors," *ASME DE-Vol. 84-2, Design Engineering Technical Conferences*, Vol. 3, Part B, pp. 977-989.
- [4] 이안성, 하진웅, 1999, "기어 전동 로터-베어링 시스템의 횡-비틀림 진동 연성 로터 다이내믹 해석," 한국소음진동학회지, 추계 학술대회논문집, pp. 424-430.