

과다 예압을 받는 테이퍼롤러 베어링의 수명단축효과에 대한 실험적 연구

박종원, 김도식 | 한국기계연구원

[요약문]

테이퍼롤러 베어링의 축방향 과다 예압에 의한 수명 단축 효과를 실험적으로 검증하고 그 결과에 의한 베어링의 수명 분포를 분석하여, 기존의 L_{10} 수명식에 비하여 현장 작동 조건에 따른 실질적인 수명을 산출할 수 있는 축방향과 반경방향을 고려한 수명식을 도출하고 이를 프로그램화 하여 설계 및 생산 현장에서 용이하게 활용할 수 있도록 하였다.

1. 서론

테이퍼롤러 베어링은 축하중과 반경방향 하중이 동시에 인가되는 회전기계의 핵심 부품으로, 자동차의 변속기 출력축과 입력축 등에 주로 사용되고 있다. 특히, 변속기에 사용되는 테이퍼롤러 베어링의 경우 조립시에 축방향 과다 예압이 인가된 상태로 조립된 경우 베어링의 수명이 단축되는 결과를 가져올 수 있다. 축방향 과다 예압에 의한 테이퍼롤러 베어링의 고장사례를 그림 1에 나타내었다.

본 연구에서는 테이퍼롤러 베어링의 축방향 과다 예압에 의한 수명 단축 효과를 실험적으로 검증하고 그 결과에 의한 베어링의 수명 분포를 분석하여, 기존의 L_{10} 수명식에 비하여 현장 작동 조건에 따른 실질적인 수명을 산출할 수 있는 축방향과 반경방향을 고려한 수명식을 도출하고 이를 프로그램화 하여 설계 및 생산 현장에서 용이하게 활용할 수 있도록 하였다.

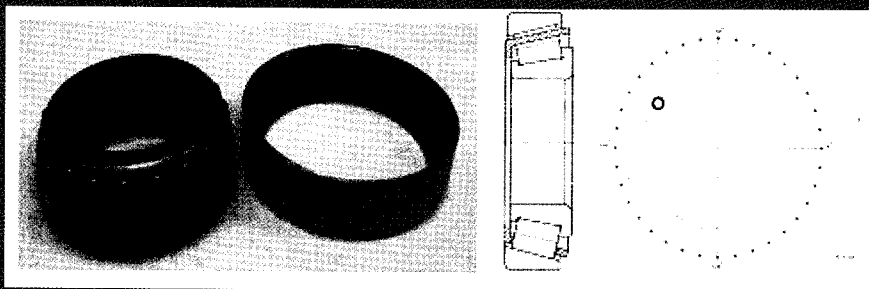


그림 1. 테이퍼롤러 베어링의 고장사례

2. 기존의 L_{10} 베어링 수명과 B_{10} 수명

2.1 L_{10} 베어링 수명식

베어링의 ISO 규격에 따른 내구 수명은 아래 식과 같다.



$$L_{10} = \left(\frac{C}{P_{eq}}\right)^n (10^6 \text{ revolutions}) = \left(\frac{C}{P_{eq}}\right)^{10/3}$$

여기서 n 값은 베어링의 종류에 의해 결정되어지며 볼베어링의 경우 3, 롤러베어링의 경우 10/3을 갖는다. 그러나 실차계측 시험결과 데이터로부터 얻어진 S-N 커브를 분석한 결과, 차량용 변속기 테이퍼 롤러 베어링의 경우 n 값은 3.04로 볼베어링의 승수 값을 가지는 경향을 보인다.

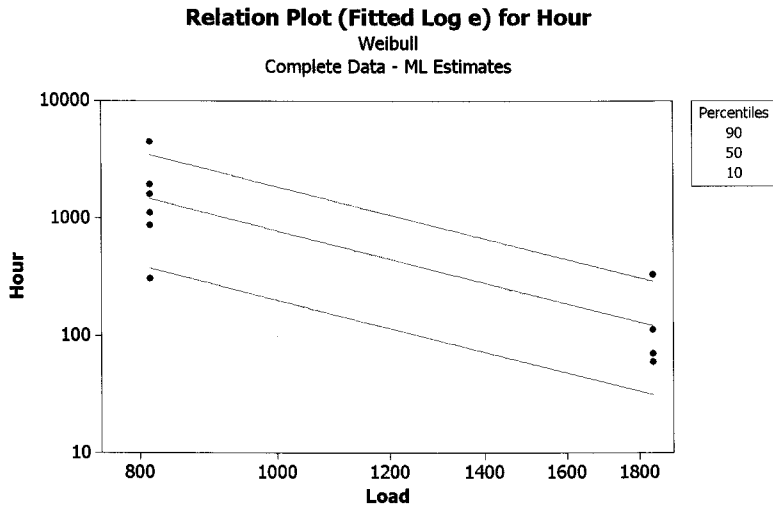


그림 2. 테이퍼롤러 베어링의 S-N 커브

2.2 L₁₀ 베어링 수명과 B₁₀ 베어링 수명의 차이

L₁₀ 베어링 수명식에 의한 수명계산 결과와 Weibull 분포에 의한 B₁₀ 수명측정 결과는 약 6~7배의 차이를 보인다. 이는 L₁₀ 수명식의 경우 실제 작동환경에서 수명에 영향을 미칠수 있는 윤활, 이물질 등의 효과가 고려되지 않았기 때문이라 사료된다.

따라서, 회전기계의 축계를 설계할 때 L₁₀ 식에 의하여 베어링을 선정하는 경우가 대부분인데, 이 경우 현장에서의 실질적인 베어링 수명은 가속수명시험 등을 통하여 Weibull 수명분포를 구한 후 설계에 반영되어야 더욱 정확한 수명 산정이 가능하리라 판단된다.

중국, 인도, 동남아의 급속한 경제 성장에 따른 에너지 블랙홀이 형성되고 이로 말미암아 세계 에너지 자원이 아시아 지역으로 대규모 흡수되고 있는 상황이다. 따라서 향후 환경/에너지 분야에 대한 적극적인 투자가 요구된다.

3. 축방향 과다 예압의 영향

테이퍼롤러 베어링에 축방향 과다예압이 인가되면 내륜과 외륜에 손상이 발생할 수 있고 이렇게 발생된 국부적인 손상이 피로하중에 의해 표면손상 및 플레이킹으로 발전될 수 있다.

3.1 축방향 과다 예압에 대한 FEA

변속기 출력축에 조립되는 테이퍼롤러 베어링에 대하여 축방향으로 과다예압을 인가한 FEA 결과를 그림 3에 나타내었다.

해석결과에서 볼 수 있듯이 베어링 내륜에 등간격의 하중분포가 형성됨을 알 수 있는데, 이는 필드 고품에서 발견되는 등간격 플레이킹과 유사한 고장모드를 발생시킬 수 있는 하중 분포라 생각된다.

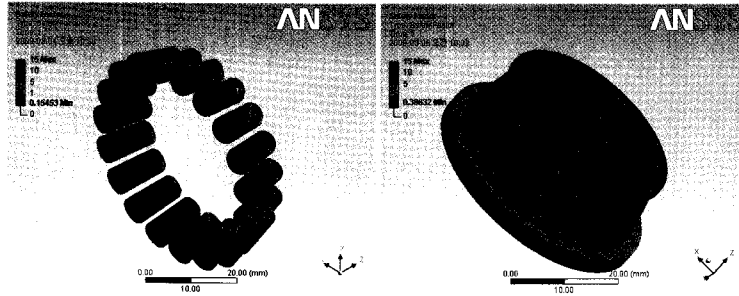


그림 3. 축방향 과다 예압 하중에 대한 FEA 결과

3.2 베어링 조립시 발생할 수 있는 축방향 예압의 측정

변속기의 조립공정에서 발생할 수 있는 축방향 과다예압의 측정을 위하여 그림 4와 같이 변속기 출력축을 특수 가공하여 3축의 힘과 Torque를 측정할 수 있도록 스트레인 게이지를 장착한 후 조립시의 축방향 하중을 측정하였다. 측정결과 그림 5와 같이 조립시에 설계시 제시된 스페이서와 다른 두께의 스페이서를 삽입할 경우 매우 큰 축방향 하중이 인가될 수 있음을 확인하였고, 이는 베어링의 수명단축 효과를 유발할 수 있다.

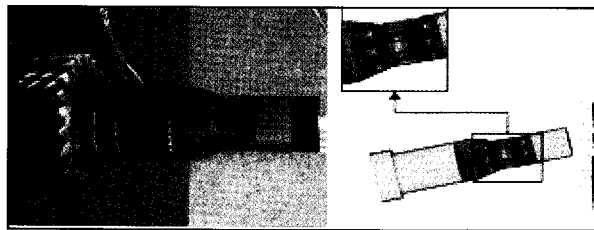


그림 4. 스트레인 게이지 장착 후 조립시의 축방향 하중 측정

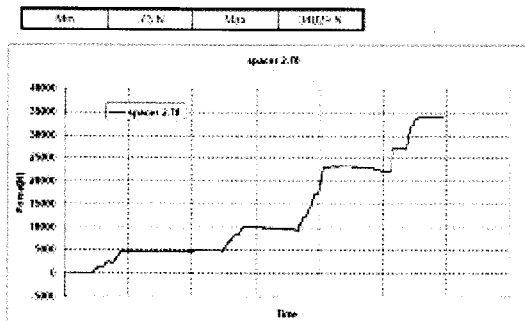


그림 5. Spacer 두께에 따른 축방향 예압 측정 시험결과

4. 축방향 과다 예압에 대한 가속수명시험

3.2절에서 변속기 조립시 발생할 수 있는 축방향 예압을 확인하였으므로, 이에 대한 수명단축 효과를 규명하기 위하여 가속수명시험을 설계하고 시험장비를 구축한 후 시험을 수행하였다.

4.1 시험 조건 설계

변속기 출력축에 테이퍼롤러 베어링을 조립시 사용되는 스페이스 두께에 대한 하중해석의 결과를 그림 6에 나타내었다. 이러한 하중해석 결과를 근거로 표 1과 같이 축방향 하중에 대한 시험 조건을 선정하였고, 반경방향과 축방향 하중의 상관관계 규명을 위한 가속시험의 조건도 선정하였다.

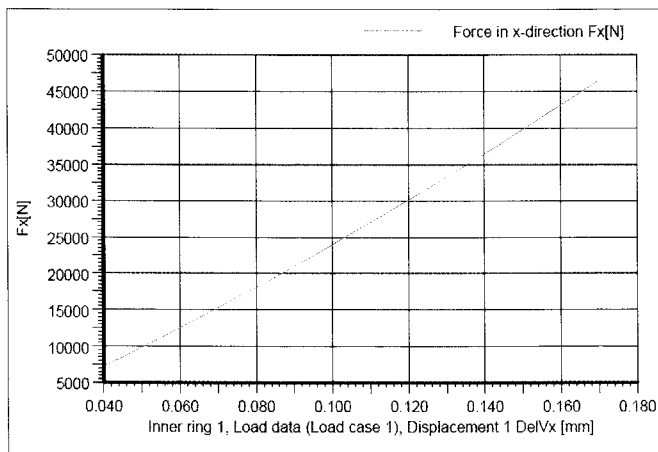


그림 6. Spacer 두께에 따른 축방향 하중해석 결과

표 1. 변속기용 테이퍼롤러 베어링 고장 가속수명시험 조건

축방향 하중			축방향 및 반경방향 하중		
Test Condition	Axial Load [kgf]	Radial Load [kgf]	Test Condition	Axial Load [kgf]	Radial Load [kgf]
1	813	918	1	813	918
2	1273	918	2	813	2140
3	1893	918	3	1893	918
			4	1893	2140

4.2 시험 장비 구축

4.1절에서 설계된 가속수명시험의 수행을 위하여 전용시험장비를 그림 7과 같이 구축하였다. 그림 7의 테이퍼롤러 베어링 시험장비는 특수 차량 및 자동차 변속기에 장착되는 베어링을 마찰토크 측정 시험을 포함한 종합 성능과 수명 시험을 수행할 수 있도록 설계된 시험 장비로서, 크게 하중인가부, 모터부, 시료장착부 및 오일순환부로 구성되어 있으며 윤활유의 순환을 위한 oil 주입구가 가공되어 있다.

또한, 테이퍼 롤러 베어링과 관련된 국제 규격 ISO281, ISO355 그리고 SAE AIR 4403, MIL-STD-810F 등의 수명시험과 종합성능시험 그리고 내환경성 시험을 수행할 수 있도록 구축하였다.

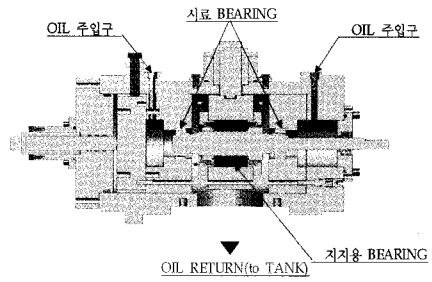
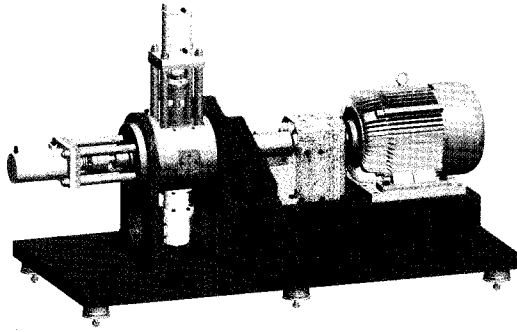


그림 7. 테이퍼롤러 베어링 가속수명 시험장비

5. 가속수명시험 결과의 분석

5.1 베어링 수명 분포

4장에서 수정된 가속수명시험에서 발생한 고품과 시험결과에 대한 수명분포를 나타낸 그래프가 그림 8에 표시되었다.

가속수명시험 결과 하중별 수명분포 곡선의 기울기가 동일하여 고장모드가 하중이 증가됨에 따라서 변하지 않았음을 알 수 있다. 축방향 하중과 축방향 및 반경방향을 고려한 테이퍼롤러 베어링의 수명식을 Weibull 분포와 S-N Curve로부터 유도한 결과는 다음과 같다.

$$L_{axial} = \exp\{28.525 - 3.06243 \ln(\text{축방향하중})\}$$

$$L_{axial-radial} = \exp\left\{51.8862 - 3.03 \ln(\text{반경방향하중}) - 3.436 \times \ln(\text{축방향하중})\right\}$$

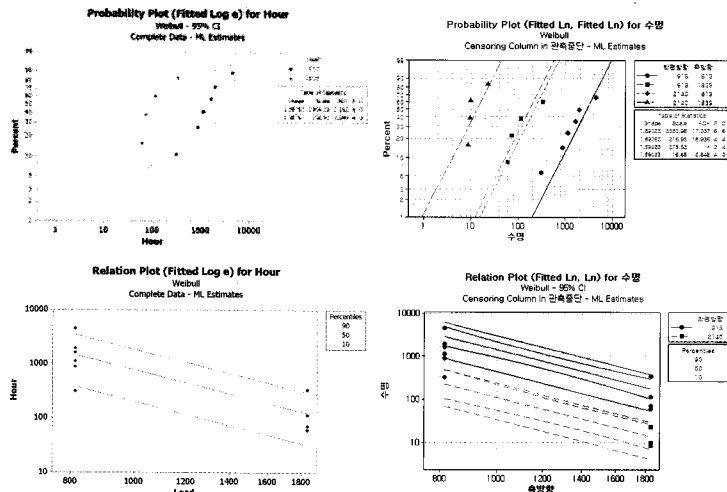


그림 8. 테이퍼롤러 베어링의 Weibull 수명분포



5.2 가속수명시험 결과를 활용한 수명예측 프로그램 개발

고장재현 가속수명시험의 결과를 토대로 수명 예측식을 유도하고, 축방향 및 반경방향 하중과 스페이스 두께에 따른 테이퍼롤러 베어링의 수명을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

개발된 프로그램은 그림 9에 나타내었다.

타기종 베어링에 대한 확대 적용을 위하여 Input Parameter를 수정할 수 있도록 하였으며, 수명시험 Cycle과 등가 수명거리 간의 환산인자를 수정할 수 있도록 하였다.

또한, 실차 계측을 통하여 출력축 부하량을 수명 예측 프로세서에 대입함으로써, 테이퍼 롤러베어링의 수명계산을 보다 정확하게 할 수 있을 것으로 기대된다.

그림 9. 변속기 출력축 테이퍼롤러 베어링 수명 예측 프로그램 화면

6. 결론

본 연구에서는 테이퍼롤러 베어링의 축방향 과다 예압에 의한 수명 단축 효과를 실험적으로 검증하고 그 결과에 의한 베어링의 수명 분포를 분석하여, 기존의 L_{10} 수명식에 비하여 현장 작동 조건에 따른 실질적인 수명을 산출할 수 있는 축방향과 반경방향을 고려한 수명식을 도출하고 이를 프로그램화 하여 설계 및 생산 현장에서 용이하게 활용할 수 있도록 하였다.

❁ 참고 문헌

- [1] Hwang, C. H., Jun, K. J., Yoon, J. W., Park T. W., Kim, S. H., and Yi, K. D., 2005, "Development of a Fatigue Life Prediction Program for the Hub Bearing Unit," Trans. of the KSAE, Vol. 13, No. 5, pp. 142~151.
- [2] Kim, W. D., 1993, "Reliability Evaluation of the Fatigue Life of Ball Bearing," '93 Asian Pacific Conference on Fracture and Strength, Tsuchiura, Japan, pp. 603~608.
- [3] Moyer, C. A., 1990, "Tapered Roller Bearing Life Prediction and Performance for the 21st Century," Rolling Contact Bearings—Towards the 21th Century, IMechE, pp. 21~29.
- [4] Akturk, N., Uneeb, M., and Gohar, R., 1997, "The Effects of Number of Balls and Preload on Vibrations Associated with Ball Bearings," Trans. Journal of Tribology, Vol. 119, No. 5, pp. 747~753.
- [5] Kotzalas, M. N., and Harris, T. A., 2000, "Fatigue Failure and Ball Bearing Friction," Trans. of Tribology, Vol. 43, No. 1, pp. 137~143.
- [6] Ono, K., and Takahasi, K., 1996, "Theoretical Analysis of Shaft Vibration Supported by a Ball Bearing with Small Sinusoidal Waviness," Trans. of IEEE, Vol. 32, No. 3, pp. 1709~1714.
- [7] Jung, W. W., and Kang, S. S., 1995, "Severity Test of Road Surface Profile by using the Fatigue Life Prediction Method," Trans. of KSAE, Vol. 3, No. 65, pp. 159.
- [8] Ioannides, E., and Harris, T., 1985, "A New Fatigue Life Model for Rolling Bearings," Trans. of ASME, 107, pp. 367~378.
- [9] Harris, T. A., and Barnsby, R. M., 1998, "Tribological Performance Prediction of Aircraft Gas Turbine Mainshaft Ball Bearings," Trans. Journal of Tribology, 41, pp. 60~68.
- [10] Rumberger, J. H., 2004, "Analysis of Rolling Bearings With Reduced Numbers of Balls or Rollers," Trans. of ASME., 126, pp. 407~411.
- [11] Robert, K., and Ivan, P., 2004, "Numerical determination of carrying capacity of large rolling bearings," Journal of Materials Processing Technology., 155~156, pp. 1696~1703.
- [12] Hoepflich, M. R., 1992, "Rolling Element Bearing Fatigue Damage Propagation," Trans. of ASME., 114, pp. 328~333.
- [13] Li, Y., Billington, S., Zhang, C., Kurfess, T., Danyluk, S., and Liang, S., 1999, "Dynamic Prognostic Prediction of Defect Propagation on Rolling Element Bearings," Trans. Journal of Tribology, 42, No. 2, pp. 385~392.
- [14] Jones, A. B., 1960, "A General Theory for Elastically Constrained Ball and Radial Roller Bearings Under Arbitrary Load and Speed Conditions," Trans. of ASME., 82, pp. 309~320.



박 종 원

· 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부
시스템신뢰성 연구실 선임연구원
· 관심분야 : 하이브리드 건설기계, 유·공압 기기,
시스템신뢰성, 가속수명시험
· E-mail : jwpark@kimm.re.kr



김 도 식

· 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부
시스템신뢰성 연구실 선임연구원
· 관심분야 : 건설기계 산업, 유·공압 기기, 시스템
신뢰성
· E-mail : dohsik@kimm.re.kr