

경량 베어링 수명 특성에 관한 연구

A Study on the Life Characteristics of Lightweight Bearings

이충성¹, 박종원¹, 임신열¹, 강보식^{1*}

Choong-Sung Lee¹, Jong-Won Park¹, Sin-Yeol Lim¹, Bo-Sik Kang^{1*}

〈Abstract〉

In the industry, the use of lightweight bearings is increasing to minimize motor power loss, and in particular, the application of next-generation systems such as robots and drones is increasing. Bearing manufacturers are producing lightweight bearings by changing the bearing material, but related researches is insufficient. In this paper, life test and structural analysis were performed for lightweight bearings, and shape parameters and scale parameters were derived based on the life test results. It was confirmed that the shape parameter was 2.52 and the scale parameter was 164 hours. As a result of calculating the dynamic load rating based on the B_{10} life, it was confirmed that the dynamic load rating of the lightweight bearing was 7% compared to the formula suggested by ISO 281. The reason is that the material of the retainer, which is a major failure part, is a polyamide 66 series that reacts sensitively to heat, so It is judged to show a lot of difference from the ISO 281 calculation formula.

Keywords : Lightweight Bearing, Dynamic Load Rating, B10 Life, Polyamide 66, Shape Parameter, Scale Parameter

1 한국기계연구원 신뢰성평가연구소

1* 교신저자, 한국기계연구원, 책임연구원
E-mail: kbs668@kimm.re.kr

1 Dept. of Reliability Assessment, Korea Institute of Machinery and Materials

1* Dept. of Reliability Assessment, Korea Institute of Machinery and Materials

1. 서론

베어링은 크게 외륜 및 내륜, 볼, 볼 사이 간격을 유지하는 리테이너 등으로 구성되어 있으며, 산업체에서는 베어링 내륜에 회전축을 결합하여 활용하고 있다[1]. 또한, 베어링은 회전체의 고정 및 지지를 위해 장착되는 핵심 부품임에 따라, 고장 발생시 전체 시스템의 정지 문제를 발생시킬 수 있다[2].

이와 같은 문제를 설계 단계에서 방지하고자 국제 규격인 ISO 281에 명시된 베어링 동정격 하중 수식 활용하여 베어링 활용 시스템 설계자들은 관련 기구 및 시스템의 안전을 도모하고 있다[3].

최근, 스마트 팩토리의 활용성이 증대됨에 따라 관련 로봇 및 드론 등과 같이 다양한 전동기 활용 시스템이 증가하고 있으며, 전동기의 동력 손실을 최소화 하고자 경량 베어링의 사용이 점차 증가하는 추세이다[4, 5].

경량 베어링은 세라믹 및 플라스틱 계열의 소재를 활용하여 베어링의 전체 무게를 줄인 제품으로서, 기존 ISO 규격에서 제안하는 베어링 소재와 상이함에 따라 다른 수명 특성을 보일 것으로 예상되지만, 이와 관련된 연구가 미흡함에 따라 관련 기구 및 시스템 설계자들은 관련 연구에 대해 요구하고 있는 실정이다.

또한, ISO 및 KS 규격 등에서는 베어링의 내륜 및 외륜, 강구(볼, 롤러)의 소재에 대한 규정만 있을 뿐, 리테이너에 대한 소재 규정은 미흡함에 따라, 일부 베어링 제조사에서는 플라스틱 계열의 소재를 사용하고 있으며, 이로 인한 고장들이 발생하고 있다.

따라서, 본 논문에서는 경량 베어링 중 하나인 폴리머 리테이너 베어링을 대상으로 실험한 결과를 바탕으로 고장 및 수명 특성 분석 결과를 제시하고자 한다.

2. 연구 대상품 구조 및 사양

2.1. 연구 대상품의 구조

본 논문에서 다루어지는 경량 베어링은 스테리스트 타입의 베어링으로서, 구조는 아래 Fig. 1과 같이 크게 내륜, 외륜, 리테이너, 볼 등으로 구성 되어 있다.

연구대상품인 경량 베어링의 내부 구성품의 소재는 아래 Table 1과 같으며, 내륜 및 외륜, 볼은 베어링 강으로 제작되었으나, 볼의 간격을 지지하는 리테이너는 폴리아미드 66계열의 소재로 제작되었다.

연구대상품의 각부 사양은 Table 2와 같으며, ISO 281에 명시된 스테리스트 볼 베어링 동정격 하중 산출식에 대입하면, 연구대상품의 동정격 하중 사양은 27 kN인 것으로 산출된다[6].

$$C_a = b_m f_c Z^{2/3} D_w^{1.8}$$

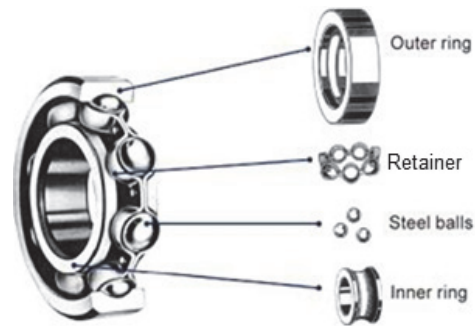


Fig. 1 Configuration of bearing

Table 1. Material by bearing component

Component	Material	Component	Material
outer ring	bearing steel	steel ball	bearing steel
retainer	polyamide 66	inner ring	bearing steel

Table 2. Specification of bearing components

Component	Specification	Component	Specification
b_m	1.3	Z	22
f_c	73.3	D_w	7.4

2.2 시험 장비 및 고장 판정 기준

경량 베어링의 내구성을 확인하기 위하여 아래 Fig. 2의 베어링 시험 장비를 통해 베어링 고장 판정 기준 정립 및 내구성 시험을 수행하였고, 본 시험 장비의 사양은 수평 하중 Max. 20,000 kg, 회전 속도 6,000rpm 이다.

베어링 시험 절차는 ISO 281 및 베어링 제조사 기술 자료를 참고하여, 외륜을 고정시킨 상태에서 내륜을 회전시켜 시험을 수행하는 것으로 하였다.

베어링 내구 시험에 앞서, 고장 판정 기준 정립을 위해, 고장 재현을 위한 가속 시험을 수행하였고, 가속 시험 기준은 실사용 기준이 200 kg@2,000 rpm 조건을 바탕으로 동일 고장 모드가 도출되는 800 %의 하중 조건까지 3분할하여 실험을 수행하였다.

가속 시험 수행 결과는 아래 Table 3와 같이 실사용 조건 하중 800 % 상태에서 5시간이 경과

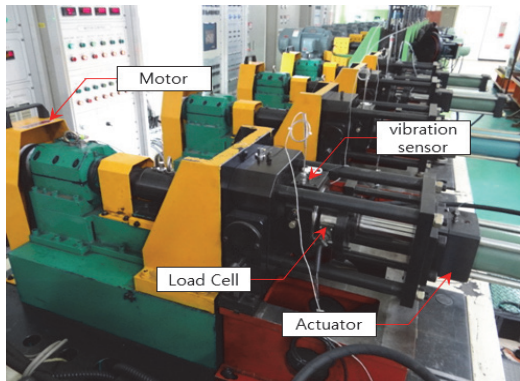


Fig. 2 Test equipment of bearing durability

Table 3. Result of acceleration test

	Load condition	Rotation Speed	Vibration value	Note
case 1	600 kg	2,000 rpm	16.7 m/s ²	normal
case 2	1,200 kg	2,000 rpm	17.0 m/s ²	normal
case 3	1,600 kg	2,000 rpm	67.1 m/s ²	failure

된 뒤 고장이 발생하였다.

고장품인 Case 3에 대한 진동 결과는 Fig. 3와 같이 최고 67.1 m/s²인 것으로 확인되었으나, 그 외의 진동 값은 40 m/s²내외로 판단됨에 따라, 고장 판정 기준을 40 m/s²로 설정하였다.

고장 베어링의 내부 상태 확인을 위해 Fig 4와 같이 X-ray를 촬영하여 볼 상태를 확인하였고, 그 결과 볼 사이 간격이 불균일함에 따라 베어링의 성능이 유지되지 않는 것으로 확인되었다.

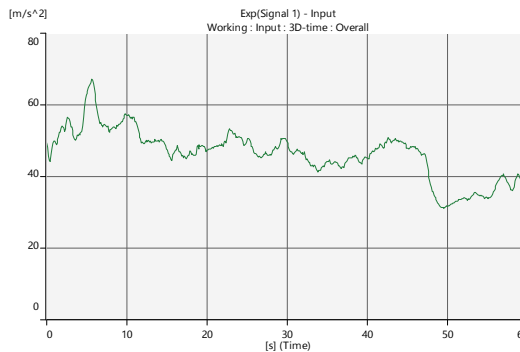


Fig. 3 Vibration graph of failure sample

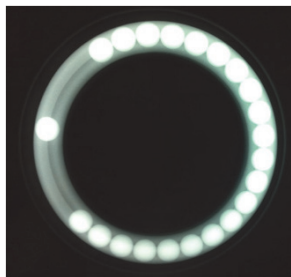


Fig. 4 Bearing internal condition after test

2.3 수명 시험 결과

경량 베어링의 수명 특성 확인을 위해 수명 시험을 진행하였고, 사용 조건을 반영하여 200 kg의 하중이 인가된 상태에서 2000 rpm의 회전 속도로 구동하는 것으로 하였다. 수명 시험 결과 아래 Table 4와 같이 250시간 이내에서 모두 고장이 발생함을 확인하였다.

고장 발생 베어링의 고장 모드 확인을 위해 아래 Fig. 3와 같이 분해하여 확인한 결과 가속 시험 결과와 같이 리테이너 파손에 의한 고장임을 확인하였다.

Table 4. Result of durability test

	Load condition	Rotation speed	Failure time	Failure cycles
sample 1			80.06 hour	9,607,200
sample 2			233.26 hour	27,991,200
sample 3	200 kg	2,000 rpm	104.90 hour	12,588,000
sample 4			138.87 hour	16,664,400
sample 5			170.06 hour	20,407,200



Fig. 5 Disassemble failure bearing

3. 결과 및 토의

본 논문에서는 경량 베어링 중 하나인 폴리미드 계열의 리테이너의 베어링 5개에 대해 수명 시험을 진행하였고, 그 결과 베어링 5개 모두 리테이너 파손이 주요 고장 모드임을 확인하였다.

일반적인 베어링의 고장 모드 및 메커니즘은 아래 Table 5와 같으며, 이를 경량베어링의 고장 모드 대입하였을 때, 스프링 고장 메커니즘에 의한 마모인 것으로 판단된다[8].

Table 5. Failure modes and failure mechanism analysis

Primary components	Failure modes	Failure mechanisms
lubrication	reduced lubricity	thermal destruction
		particle invasion
body (inner ring/outer ring/ball/retainer)	fusion bonding	wear/smearing
	deformation	brinelling
	separation or destruction	fatigue destruction, cracking
	wear	scuffing
		spalling
		wear
	corrosion	current corrosion
fretting		

기존 베어링의 경우, 볼의 마모에 의한 고장이 일반적이지만, 경량 베어링의 고장 모드는 리테이너의 마모·파손으로서, 기존 베어링과의 고장 모드가 달라 이를 확인하고자 구조 해석을 수행하였다.

경량 베어링 볼 및 리테이너에 인가되는 하중 확인을 위해 Fig. 6 및 Fig. 7와 같이 ABAQUS 2019 프로그램을 활용하여 구조 해석을 수행하였고, 해석 조건은 Explicit Dynamic을 적용하였다 [9,10,11].

구조 해석 결과 경량 베어링 볼에 417 MPa의 최대 응력이 발생하며, 이는 원 소재의 인장강도와

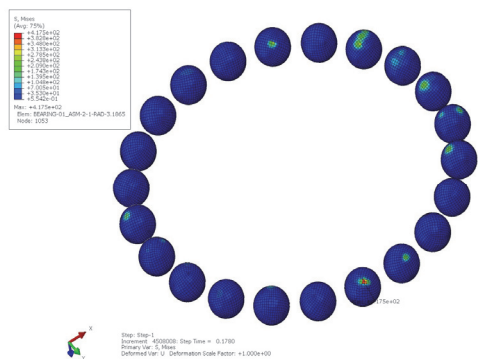


Fig. 6 Simulation result of bearing ball

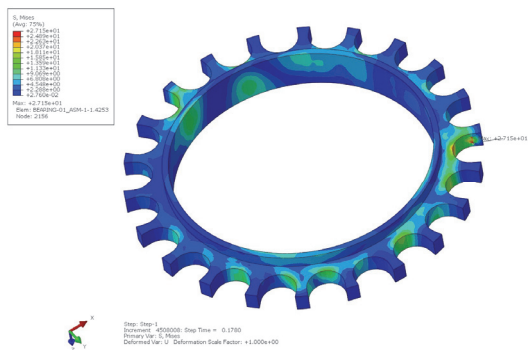


Fig. 7 Simulation result of bearing retainer

비교하였을 때, 베어링 강 인장 강도의 35%에 해당하는 것으로 확인되었다.

리테이너의 최대 응력은 27 MPa의 수준으로서, 폴리아미드 66 인장강도의 3%에 해당하는 응력이 집중됨을 확인하였다.

또한, 리테이너의 최대 응력 위치를 확인하였을 때, 리테이너의 움직임은 볼의 구름에 의해 결정됨에 따라, 볼 사이를 지지하는 리테이너 파트에 최대 응력이 발생되는 것으로 판단된다.

Table 6과 같이 리테이너 상태를 비교하였을 때, 리테이너의 색상이 변화됨을 확인하였고 이를 통해 리테이너 마모·파손 후 볼 사이 마찰열이 발생한 것으로 판단되었다.

Table 6. Comparison of retainer

	New sample	Failure sample
retainer		
ball guide		

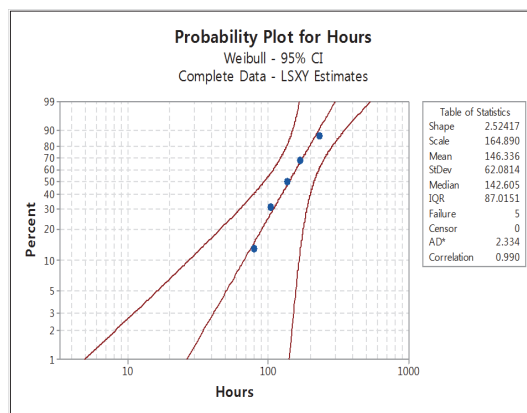


Fig. 8 Result of bearing life analysis

경량 베어링의 수명 특성 확인을 위해, 5개의 경량 베어링 수명 시험 결과를 바탕으로 분석을 수행하였다.

수명 분석은 Minitab을 활용하였으며, 수명 분포는 와이블 분포, 분석 기법은 고장 데이터가 완전 데이터이므로 최소 제곱법을 적용하였다[12].

수명 분석 결과, 경량 베어링의 형상 모수는 2.52, 척도 모수는 164시간, MTTF는 146시간, B₁₀ Life는 67시간으로 확인되었다.

위의 수명 분석 결과를 바탕으로 연구대상품의 동정격 하중을 추정하기 위해 아래와 같은 베어링 식에 대입하여 산출한 결과, 연구대상품의 동정격 하중은 1.9 kN으로 산출되었다[13].

$$L_{10} = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P} \right)^3$$

Table 7. Specification of bearing coefficient

Coefficient	Specification	Coefficient	Specification
L ₁₀	8.04	P	1,962 N
n	2000 rpm		

ISO 281 규격에 따른 베어링 동정격 산출 결과는 27 kN으로 확인되었으나, 수명 시험을 통해 확인된 동정격 하중은 산출 결과의 7 %에 해당하는 1.9 kN으로 확인되었다.

일반적으로 실제 실험을 기반으로 한 동정격 하중 비교를 수행하였을 때, 실사용 환경에서 발생하는 윤활 및 이물질 등의 효과로 인해 약 6 ~ 7배 정도 차이가 발생한다[14].

하지만, 경량 베어링의 수명은 계산식 대비 약 14 ~ 15배 차이가 발생하며, 이에 대한 원인을 구조 해석 및 실험 내용에 대해 종합적으로 검토한 결과, 해석상으로 리테이너의 집중되는 하중은 인장 강도의 3% 수준으로 파손이 발생되지 않을 것으로 판단된다. 하지만, 리테이너의 원소재에 해당하는 폴리아미드 66의 경우 온도에 따라 인장 강도 및 수명이 크게 변하는 것으로 확인되어, 연구대상품의 고장은 볼 사이 상대 운동간 발생하는 마찰열 및 응력에 의해 파손된 것으로 판단된다 [15,16].

4. 결론

베어링은 회전체를 지지, 고정하는 시스템 핵심 부품으로, 최근 드론 및 로봇 등 다양한 기계 시스템 분야에 활용되고 있다.

최근, 전동기의 동력 손실은 저감하고자 소재를 변경한 경량 베어링 사용이 점차 증가하고 있으나, 경량 베어링의 수명 특성과 관련된 연구가 미흡한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 폴리아미드 66 계열의 리테이너를 사용한 경량 베어링에 대해 실험하고 분석한 결과는 아래와 같다.

첫째, ISO 281 규격에 명시된 산출식에 따라 동정격 하중을 산출한 결과 27 kN인 것으로 확인되었음.

둘째, 사전 가속 시험을 통해 고장 판정 기준을 정립하고, 이를 바탕으로 수명 시험을 수행한 결과, 250시간 이내에 시료 5개 모두 고장이 발생하였음.

셋째, 고장 메커니즘 확인을 위해, ABAQUS를 활용하여, 응력 상태를 확인하였고 리테이너에 볼 최대 응력 대비 6 %에 해당하는 미소 응력이 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 베어링 볼의 상대 운동에 의한 것으로 판단됨.

넷째, 실험 데이터를 기반으로 한 동정격 하중 계산을 위해 수명 분석을 하였고, 그 결과 형상모수 2.52, B₁₀ Life 67시간, 동정격 하중 1.9 kN으로 산출됨.

다섯째, 실험 데이터 기반 동정격 하중은 설계 기반 동정격 대비 7% 수준임을 확인하였고, 이에 대한 원인으로는 리테이너의 소재인 폴리아미드 66의 경우 인장강도 및 수명이 온도에 의해 크게 변화함에 따라 이와 같은 차이가 발생하는 것으로 판단됨.

이에 따라, 시스템 및 기구 설계자들은 베어링의 하중 조건을 포함한 주변 온도 조건, 구동 온도

조건 등을 고려하여 베어링을 선정할 필요가 있음.

감사의 글

이 논문은 2021년도 산업부의 재원으로 한국산업기술평가관리원 지원(No. 20005020) 및 한국산업기술진흥원 지원(No. N0002601), 한국기계연구원 기본사업(NK234B)의 지원으로 수행된 연구임.

참고문헌

- [1] B. S. Kang, C. S. Lee, D. S. Seo, S. G. Kim. "Analysis of lifetime characteristics of polymer retainer bearing.", Proceedings of the KSME Conference, pp.39-40, (2015).
- [2] S. G. Kim, H. S. Kim, S. Y. Lee, J. H. Choi. "Remaining Useful Life Prediction of Bearing based on Neural Network.", Proceedings of the KSME Conference, pp.1411-1413, (2016).
- [3] B. S. Kang, C. S. Lee. "A study of the effects of the retainer material of the clutch release bearing on the lifetime.", Proceedings of the KSME Conference, pp.807-810, (2014).
- [4] S. H. Park, J. S. Do, S. D. Choi, J. W. Hur. "Fault Diagnosis of Drone Using Machine Lear.", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 20, No. 9, pp.28-34 (2021).
- [5] D. H. Park, W. K. Nam, I. H. Jang, S. H. Oh, K. B. Sim. "Development of an Expert System for Precision Reducer Design of Robot.", Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 17, No. 1, pp.19-25 (2007).
- [6] ISO 281, "Rolling bearings - Dynamic load ratings and rating life", (2007).
- [7] H. S. Yang, J. H. Shin, J. W. Park, B. J. Sung. "A Study on the Life Characteristic of an Automotive Water-pump Bearing Using the Accelerated Test Method.", Journal of the Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers, Vol. 31, No. 2, pp. 35-41 (2015).
- [8] H. E. Kim, Y. P. Lee, Y. C. Yoo. "Life Analysis of the Ball Bearings by Accelerated Life Test.", Proceedings of the KORAS Conference, pp.335-342 (2004).
- [9] J. W. Park, J. Y. Heo. "Analysis of Dynamic Characteristics for a Tapered Roller Bearing Cage.", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 8, No. 5, pp.179-184, (2017).
- [10] ABAQUS Analysis User's Manual, Volume II : Analysis, Ver.6.8(2008).
- [11] ABAQUS Example Problems Manual, Volume I : Static and Dynamic Analyses, Version 6.8(2008).
- [12] S. K. Seo, "MINITAB Reliability Analysis.", (2009)
- [13] NSK Bearing General Catalog
- [14] J. W. Park, H. E. Kim, J. O. Kim, Y. J. Sim, W. W. Jung. "Experimental Study of the Effect of Shortening of Life of Tapered Roller Bearings when Subjected to Excessive Axial Pre-Load.", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol. 34, No. 9, pp.1161-1166, (2010).
- [15] W. Y. Jung, J. I. Weon. "Characterization of Thermal Degradation of Polyamide 66 Composite : Relationship between Lifetime Prediction and Activation Energy.", The Polymer Society of Korea, Vol. 36, No. 6, pp.712-720, (2012).
- [16] B. Y. Lee, C. W. Jo, C. U. Shim, S. J. Lim, Y. C. Kim, "Effect of Thermal History on the Physical Properties of Nylon66.", Applied Chemistry for Engineering, Vol. 25, No. 1, 90-95, (2014).