

DOI <http://dx.doi.org/10.9725/kstle.2015.31.2.35>

가속시험법을 활용한 자동차용 워터펌프 베어링의 수명특성에 관한 연구

양희선¹ · 신정훈² · 박종원^{1*} · 성백주¹

¹한국기계연구원 신뢰성평가센터, ²대구경북첨단의료산업진흥재단 첨단의료기기개발지원센터

A Study on the Life Characteristic of an Automotive Water-pump Bearing Using the Accelerated Test Method

Hui Sun Yang¹, Jung Hun Shin², Jong Won Park^{1*} and Baek Ju Sung¹

¹Korea Institute of Machinery & Materials, Reliability Assessment Center,
153, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

²Daegu-Gyeongbuk Medical Innovation Foundation, Medical Device Development Center,
88 Dongnae-ro, Dong-gu, Daegu, Korea

(Received November 27, 2014; Revised March 26, 2015; Accepted April 1, 2015)

Abstract – A water-pump located in the cooling area of a car circulates cooling water. A particular bearing element, known as a water-pump bearing, installed in the rotating part carries the entire load. The failure of this water-pump bearing has a direct impact on the failure of the automobile engine, and so securing its reliability is crucial. Several researchers have examined the design principles of the water-pump bearing, but there are no reports on the life characteristic of the bearing yet. Herein, we report the construction of test equipment to reproduce the spalling of the roller contact, which is the main failure mode of the chosen water-pump bearing. We chose the radial load as an accelerated stress factor and validated the failure mode by monitoring the surface defects. We conducted the accelerated life test after determining the accelerated stress level through a combination of finite element analysis and a preliminary test. In the life tests, we used an accelerometer to perform failure diagnosis. In the last stage of this study, we present a statistical reliability analysis. Thus, we fully estimated the shape parameter of the water-pump bearing, accelerating level on the load, and the lifetime (MTTF and B₁₀ life) under real use conditions, and finally proposed an interval estimation value considering the uncertainty of the estimated value.

Keywords – water-pump bearing(워터펌프베어링), accelerated life testing(가속수명시험), reliability(신뢰성), weibull analysis(와이블 분석)

1. 서 론

엔진은 자동차 구동의 심장부로서 수많은 부품들이 유기적으로 작동하여 오랜 시간 동안 원활한 출력을 발생시켜야 한다. 엔진 작동 중 발생된 열은 워터펌프(water pump)에 의해 순환하는 냉각수를 통해 냉각된

다. 워터펌프 베어링은 자동차 엔진을 냉각시키기 위한 냉각수 순환용 워터펌프의 부품으로 사용되며, 임펠러(impeller)와 벨트 풀리(belt pulley)의 원활한 회전 기능을 수행한다. 또한 볼과 롤러가 조합되어 고속 회전에 유리하며, 부하 지지율이 우수하다. 주 고장모드는 반복적인 하중에 따른 롤러 접촉부의 스폐링(spalling)이며, 그것이 누적되어 파손이 발생할 경우 자동차 엔진의 고장으로 직결되기 때문에 신뢰성 확보가 절실히 요구된다. 베어링은 실제 사용시간이 매우 길고 시험 비용이 고가이기 때문에 가속 수명 시험에 대한 필요성

*Corresponding author : jwpark@kimm.re.kr
Tel: +82-42-868-7107, Fax: +82-42-868-7082

© 이 논문은 한국윤활학회 2013년도 추계학술 대회(2013. 10. 16-18/여수) 발표논문임.

이 증대되고 있다.

Yang and Han(2006)은 자동차용 워터펌프 베어링의 돌출(walkout) 문제를 해결하기 위해 원인 요소를 규명하고, 워터펌프 시스템의 설계인자와 고유 진동수와 의 관계를 연구하였다[1]. Li and An(2012)은 자동차용 워터펌프 베어링의 축 굴절과 롤러 기울기를 고려하여 부하 계산 및 수명예측이 가능한 분석적 계산방법을 제시하였다[2]. 하지만 실제 워터펌프용 베어링 샘플에 대해 시험을 실시하여 그 결과로부터 수명을 예측하는 연구는 지금까지 존재하지 않는다.

본 연구에서는 워터펌프 베어링의 주 고장모드를 재현하기 위한 시험장비를 구축하여 가속수명시험(accelerated life test)을 수행한다. 가속인자로는 경방향 하중(radial load)을 선택하고, 예비시험을 통해 그 가속시험의 3가지 스트레스의 수준을 결정한다. 시험 데이터에 대한 통계적인 분석결과를 통해서 워터펌프 베어링의 형상모수(shape parameter), 하중에 대한 가속지수 및 실 사용조건에서의 수명을 추정한다. 또한 추정 값의 불확실성을 고려하여 구간 추정 값도 함께 제시하고자 한다.

2. 시험편 및 시험장치

워터펌프 베어링에 경방향 하중을 가할 수 있도록 지그 및 시험장치를 다음과 같이 구성하였다.

2-1. 시험편

워터펌프 베어링은 Fig. 1과 같이 롤러와 볼의 조합으로 구성되며, 중앙에 홈이 형성된 축은 내륜 역할을



Fig. 1. General configuration of water-pump bearing.

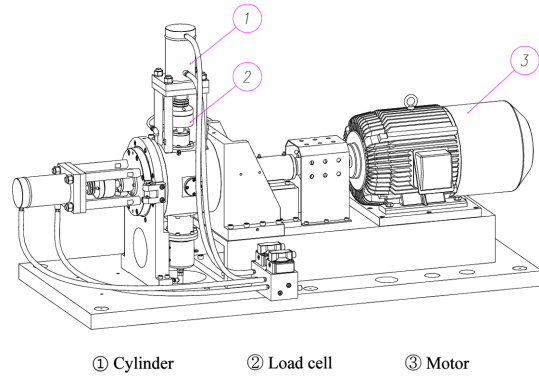


Fig. 2. Bearing test equipment.

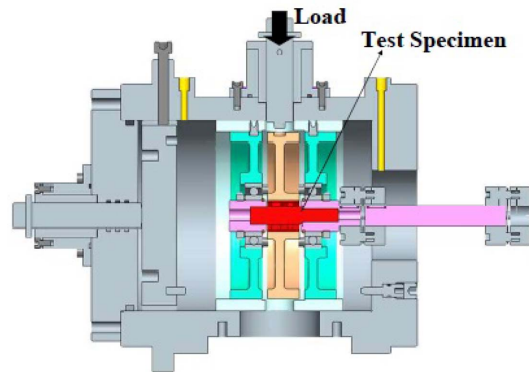


Fig. 3. Test apparatus.

하여 하중을 지지한다. 본 논문에서는 동정격하중이 13.1 kN인 워터펌프 베어링의 시료로 사용하였다.

2-2. 시험장치

워터펌프 베어링의 주 고장모드인 롤러 접촉부의 스폴링을 재현하기 위해 경방향 하중을 부여한 상태에서 베어링을 회전시킬 수 있도록 Fig. 2와 같이 시험장치를 구성하였다. 시험 장치는 하중을 인가할 수 있는 유압실린더(hydraulic cylinder)와 하중 측정용 로드셀(load cell), 시료를 회전시키는 모터(motor)로 구성되어 있다. 유압실린더는 로드셀의 출력 값을 받아 서보밸브(servo-valve)의 제어에 따라 자동으로 작동한다. 유압실린더에 의해 경방향 하중이 가해진 상태에서 전동 모터의 회전으로 베어링의 실사용 조건을 재현할 수 있다.

시험용 지그는 3개의 원판으로 구성되어 있으며, 중앙부의 원판은 유압실린더에 의해 베어링 외륜(outer race)에 경방향 하중을 가하게 된다. Fig. 3과

같이 워터펌프 베어링의 양단을 지지하는 구조로 지그를 제작하고, 지그의 중심에는 시험대상품보다 내구성이 높은 내경 30 mm의 볼베어링을 적용하였다.

3. 예비시험

3-1. 시험조건

우선 부가된 가상의 하중에 대한 재료의 응력분포와 처짐을 예측하기 위해 Fig. 4와 같이 유한요소해석(finite element analysis)을 수행하였다. 해석 소프트웨어는 ANSYS를 사용하였고 선형탄성(linear elastic) 조건에 수명시험에서와 동일한 부하지점에서 면하중을 가하였다. 구름요소와 축은 bonding 조건, 구름요소와 하우징은 frictionless 조건으로 경계를 설정하였다. 해석결과 10.6 N의 부하에서 최대응력 지점이 바뀌는 것을 착안하여, 10.6 N까지 워터펌프 베어링의 고장모드가 유지되는 것으로 간주하였다. 그러므로 이 스트레스 수준을 시험가능 최대부하로 선정하였다. 이 최대부하로부터 임의로 선정된 예비시험의 6가지 스트레스 수준을 Table 1에 나타내었다. 베어링의 고장 판단기준은 최대가속도 2.5 g 혹은 외륜온도 75°C로 정하였다.

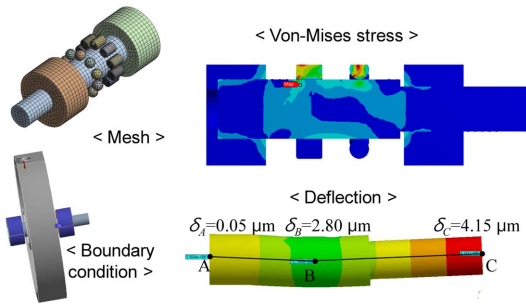


Fig. 4. Finite element analysis.

Table 1. Preliminary test conditions

Stress level (%)	Test load (kN)	Revolution (r/min)	Failure criterion
300	3.6	3,000	Vibration acceleration (grms) ≥ 2.5 g or temp. at outer race 75°C
400	4.8		
500	6.0		
600	7.2		
700	8.4		
800	9.6		

3-2. 시험결과

고장 확인을 위해 시험 지그의 전면부에 가속도 센서를 부착하여 진동을 계측하였다. 초기 진동값은 0.4 g 수준이었으나, 시험단계 800% 수준에서 47시간 경과 후 롤러 접촉부 스폴링의 진전으로 진동이 2.7 g 로 확인되어 고장으로 판단하였다. 또한 Fig. 5와 같이 주파수 분석을 통해 베어링의 BPF(내륜결함주파수)인 305 Hz의 약 2배수에 해당하는 609 Hz의 주파수가 검출되었다. 손상된 내륜에 롤러가 통과되면서 발생하는 베어링 결함주파수는 식 (1)과 같이 계산될 수 있다[3].

$$BPF = \frac{N}{2} Hz \left[1 + \left(\frac{B}{P} \right) \cos \phi \right] \quad (1)$$

여기서, N은 구름요소의 수, B는 구름요소의 직경, P는 피치직경, φ는 접촉각, Hz는 초당 회전수를 의미한다. 워터펌프 베어링의 롤러측 단면을 Fig. 6에 나타내었다.

롤러 접촉부의 고장 사진은 Fig. 7과 같다. 베어링 축의 표면을 200배율로 관찰한 결과로부터 롤러 마찰에 의해 스폴링이 발생한 것을 알 수 있었으며, 이는 실사용 조건의 고장모드와 동일함을 확인하였다. 실사용 조건에서의 고장모드는 Fig. 8에 나타내었다. 베어링

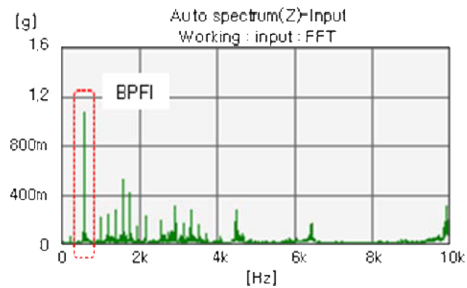


Fig. 5. FFT analysis of failure specimen.

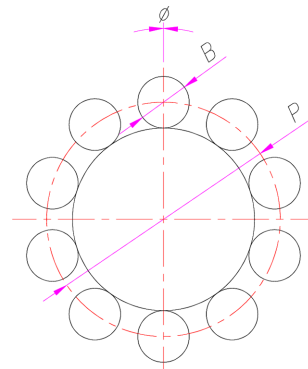


Fig. 6. Section view of water-pump bearing.



Fig. 7. Spalling of roller contact area (preliminary test).

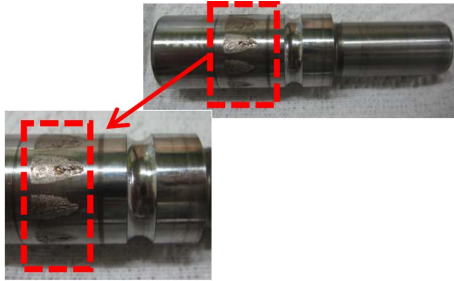


Fig. 8. Spalling (actual condition of usage).

링 내륜 역할을 하는 샤프트의 롤러 궤도부에 스폐링이 현저하게 발생된 것을 확인할 수 있다.

주파수 분석을 통해 실사용 고장을 확인할 수 있었으며, 시험 하중이 실사용 조건의 800% 일 때 주 고장모드가 재현되었다. 따라서, 가속수명시험에서 최대 스트레스 수준인 제 1수준의 하중을 실사용 하중 대비 800%로 선정하였다.

따라서 가속수명시험에서 실제로 스트레스 수준으로 정할 수 있는 범위는 100% 이상에서 800%까지 이다. 스트레스 수준이 800%에 가까울수록 시험시간은 단축되지만 사용조건의 수명을 예측할 때 오류는 증가한다. 반대로 스트레스 수준이 100%에 가까울수록 시험시간은 늘어나지만 사용조건의 수명을 예측할 때 오류는 감소한다.

4. 가속 수명 시험

4-1. 가속 시험조건

위더펌프 베어링의 가속인자는 예비 시험과 동일하게 경방향 하중으로 선정하였으며, 시험시간 동안 일정하게 스트레스를 추가하였다. 최대 스트레스 수준인

Table 2. Accelerated test conditions and sample size

Stress factor	Stress level		No. of samples
Radial load	1 st	800%[9.6 kN]	4
	2 nd	750%[9.0 kN]	3
	3 rd	600%[7.2 kN]	4

제 1 수준은 실사용 고장과 동일한 형태인 롤러부 내륜(inner race)의 스폐링이 발생한 800% 수준으로 하였으며, 2수준은 750%, 3수준은 600%로 설정하였다. 각 스트레스 수준과 수준별 샘플 수는 Table 2와 같다.

4-2. 가속 시험결과

시험 초기에서의 진동 가속도는 0.5 g 미만에서 발생되고 있는 반면, 고장이 발생하게 되면 2.5 g 이상의 진동을 검출할 수 있었으며, 결과는 Fig. 8과 같다. 또한 Fig. 10과 같이 베어링의 BPFI(내륜결함주파수)인 305 Hz의 약 2배수에 해당하는 612 Hz가 검출되

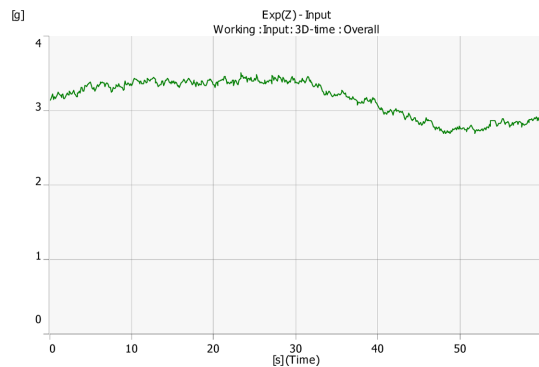


Fig. 9. Vibration acceleration.

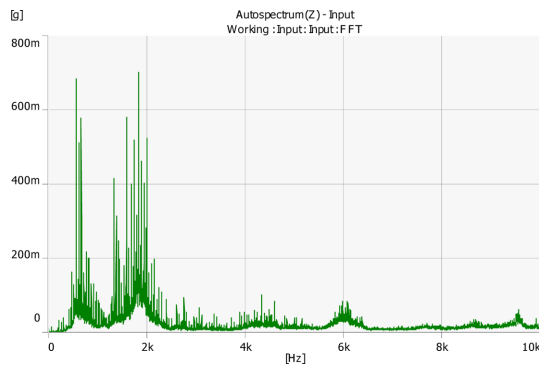


Fig. 10. Peak acceleration.



Fig. 11. Spalling of roller contact area.

Table 3. Failure data obtained from accelerated test

	1 st Stress level [800%]	2 nd Stress level [750%]	3 rd Stress level [600%]
Failure data (hours)	24	75	77
	47	248	515
	206	372	1,008
	227	-	865 *

이 고장난 것으로 판정하였다. 시험 지그를 분해하여 베어링 샤프트의 표면을 관찰한 결과, Fig. 11과 같이 롤러 접촉부의 표면에 사용조건에서 발생할 수 있는 스폐링이 발생되었다. 각 스트레스 수준에서 시험을 실시한 후 얻은 고장시간은 Table 3과 같다. 제 3수준의 경우 865시간은 고장시간이 아니라 분석시점에 고장이 발생하지 않아 관측을 중단한 시점이다. 일반적으로 이러한 데이터를 관측중단 데이터(censored data)라고 한다.

4-3. 통계분석

일반적으로 기계류 부품의 수명분포로 와이블 분포(Weibull distribution)를 적용하고 있으며[4], 와이블 분포의 확률밀도함수 $f(t)$, 분포함수 $F(t)$, 신뢰도 함수 $R(t)$, 그리고 고장률 함수 $h(t)$ 는 식 (2)~(5)와 같다[5].

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad \beta > 0, \eta > 0 \quad (2)$$

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (4)$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (5)$$

여기서, β 는 분포의 형상을 결정하는 형상 모수로서 고장물리에 의해 설명되며, η 는 척도모수로서 재질에 따라 변할 수 있는 내구성의 척도로 볼 수 있다[6, 8]. 와이블 분포의 척도모수는 또한 특성수명으로도 불린다.

워터펌프 베어링의 가속수명시험 데이터에 대해서 와이블 분포가 적합한지 검정을 실시하였다. 분포에 대한 적합도 검정의 방법으로 최우추정법을 적용하였으며, 이를 통해 AD(Anderson-Darling) 통계량을 얻을 수 있다. AD 통계치는 확률지에 도시된 점과 이들을 적합한 직선의 대응점과의 차이를 측정하는 값으로 후보 분포 중에서 더 적은 AD 통계치를 가지는 분포에 더 잘 적합 된다는 것을 의미한다. 워터펌프용 베어링의 가속수명시험 데이터에 대해 분포 적합도 검정을 수행하면 Fig. 12와 같은 결과를 얻을 수 있다.

분석 결과의 AD 통계치를 살펴보면, 기계류 부품에 널리 사용되는 와이블 분포와 나머지 분포들 간의 큰 차이는 존재하지 않는다. 따라서 워터펌프용 베어링의 수명 분포는 와이블 분포가 적합하다고 볼 수 있다.

기 언급한 바와 같이 워터펌프 베어링의 주 고장모드를 가속화할 수 있는 가속 스트레스 인자로는 경방향 하중을 선택하였고, 이에 따른 가속모델은 베어링 수명분석에서 널리 활용되는 역승 모델(Inverse power law model)로 선정하였다. 수명과 스트레스 인자와의 관계식은 아래 식 (6)과 같다[9].

$$L = \frac{1}{K \cdot V^n} \quad (6)$$

- L: 와이블 분포의 특성수명
- K: 모델의 상수
- n: 하중 가속지수
- V: 경방향 하중

워터펌프용 베어링에 대해 3가지 하중 수준에서 시험한 데이터(Table 3 참조)를 이용하여 신뢰성 분석을 실시하였다. 먼저, 와이블 분포의 형상모수 β 는 1.338이며, β 에 대한 95% 신뢰구간은(0.82, 2.38)이다.

그리고 워터펌프용 베어링에 적용한 역승모델의 상수 K는 2.9097×10^{-20} 이며, 하중에 대한 가속지수 n은 5.98로 추정되었다. 가속지수 n에 대한 95% 신뢰구간

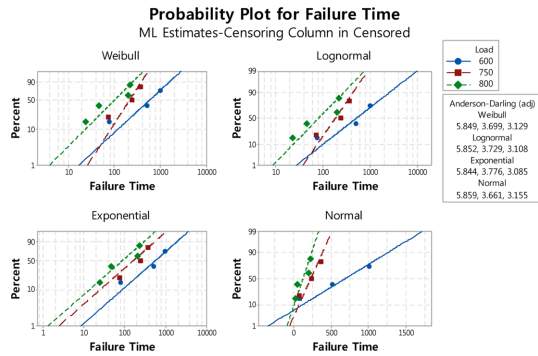


Fig. 12. Distribution goodness-of-fit test plots.

Table 4. Estimates of shape parameter and acceleration index

	Point estimate	95% lower confidence limit	95% upper confidence limit
Shape parameter	1.39	0.8157	2.3814
Acceleration index	5.98	2.2116	9.7488

은 하한 2.21과 상한 9.75로서 일반적인 볼 베어링(3)과 롤러 베어링(3.33)의 가속지수[7]와 통계적으로 차이가 있다고 하기 어려운 결과로 볼 수 있다.

본 연구의 가속수명시험 결과로부터 얻을 수 있는 중요한 정보인 형상모수 β 와 가속지수 n 의 추정 값에 대해 정리하면 Table 4와 같다. 신뢰성 분석은 ALTA를 활용하였다.

가속수명시험에서 주의해야 할 점은 가속 스트레스 조건에서 발생하는 고장모드와 실 사용조건에서 발생하는 고장모드는 동일해야만 하고, 이를 만족하는 경우에 가속성이 성립한다고 말한다. 가속성의 확인은 일차적으로 고장 부품에 대한 고장모드 확인이 필요하며, 통계적으로 형상모수의 동일성 검정을 통해 확인할 수 있다. 즉, 여러 가속 스트레스 수준들의 형상모수들이 서로 동일하다면 가속성이 성립한다고 할 수 있다.

본 연구의 경우, 가속 스트레스 수준에서의 고장 부품에 대한 고장모드는 사용조건에서의 고장모드와 동일하게 나타났으며, 형상모수의 동일성 검정은 우도비(Likelihood ratio) 검정을 이용하였다. 우도비 검정 방법에 따라 유의수준 5%에서 $T=0.5998 < \chi^2=5.9915$ 이면 가속성이 성립하는 것으로 판단할 수 있다.

가속수명시험의 각 스트레스 조건에서 와이블 플롯은 Fig. 13과 같으며, Fig. 13은 베어링의 수명과 경

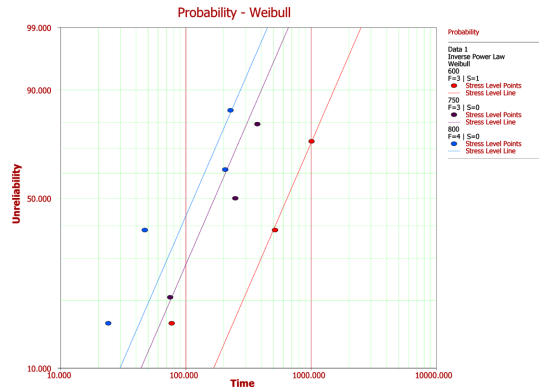


Fig. 13. Weibull plots for each stress levels.

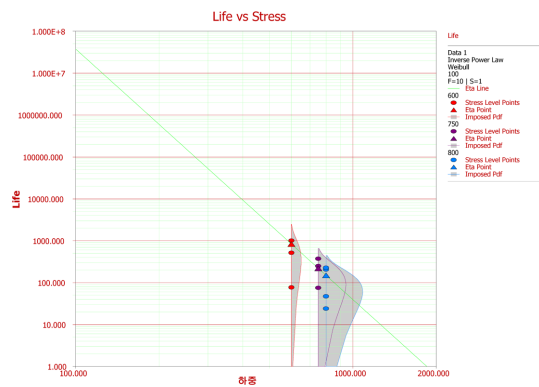


Fig. 14. Relationship between life and load stress.

방향 하중과의 관계(Stress-Life curve)를 나타낸다. Fig. 14에서 직선은 3가지 스트레스 수준에서의 특성수명 3개 지점을 선형피팅(linear fitting)을 수행하여 연결한 선이며, 가로축(하중)이 100%에서 세로축과 만나는 값이 실제 사용조건에서의 특성수명 값이 된다. 이렇게 사용조건에서의 수명이 예측된다.

가속모델을 통한 워터펌프용 베어링의 사용조건(하중 100%)에서의 특성수명은 식 (6)을 이용하여 계산할 수 있으며, 결과는 아래와 같다.

$$L = \frac{1}{K \cdot V^n} = \frac{1}{2.9097 \times 10^{-20} \cdot 100^{5.98}} = 3.76 \times 10^7$$

특성수명의 95% 신뢰구간은 하한이 2.21×10^4 시간이며, 상한은 6.4×10^{10} 시간이다.

특성수명을 사용하여 MTTF(mean time to failure)와 B_{10} 수명을 계산한 결과는 다음과 같으며, MTTF의 95% 신뢰구간은 하한 2.03×10^4 시간, 상한 5.80×10^{10} 시간이며, B_{10} 수명의 95% 신뢰구간은 하한 4,687시

Table 5. Estimates of characteristic life, MTTF, and B₁₀ life

	Point estimate	95% lower confidence limit	95% upper confidence limit
Characteristic life	3.76×10^7	2.21×10^4	6.40×10^{10}
MTTF	3.43×10^7	2.03×10^4	5.80×10^{10}
B ₁₀ Life	7.49×10^6	4,687	1.20×10^{10}

간, 상한 1.20×10^{10} 시간이다.

$$\begin{aligned}
 MTTF &= \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \\
 &= (3.76 \times 10^7) \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{1.39}\right) = 3.4 \times 10^7 \\
 B_{10} &= \eta \times (-\ln(1-p))^{\frac{1}{\beta}} \\
 &= (3.76 \times 10^7) \times (-\ln(1-0.1))^{\frac{1}{1.39}} = 7.5 \times 10^6
 \end{aligned}$$

워터펌프용 베어링의 가속수명시험을 통해 사용조건
의 다양한 수명 예측 결과를 정리하면 Table 5와 같다.
위의 결과로부터 추정(estimate)하자면 워터펌프용 베
어링은 신뢰수준 95%에서 특성수명 22,136시간과 B₁₀
수명 4,687시간을 보장할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 워터펌프 베어링의 주 고장모드로 반
복적인 하중에 따른 롤러 접촉부의 스폴링으로 선정하
였다. 이러한 주 고장모드를 재현하기 위한 시험장비
를 구축하였으며, 고장모드를 가속할 수 있는 가속 스
트레스 인자로는 경방향 하중을 선택하였다. 그리고 예
비 시험을 통해 최대 가속 스트레스 수준을 결정한 후,
이러한 결과를 이용하여 3가지 스트레스 수준에서 가

속수명시험을 실시하였다.

가속수명시험 데이터에 대한 통계적인 분석결과를
통해서 워터펌프 베어링의 형상모수와 실 사용조건에
서의 수명을 추정하였으며, 또한 수명 추정 값의 불확
실성을 고려한 구간 추정 값도 함께 제시하였다.

워터펌프 베어링에 대한 대표적인 신뢰성 정보로는
형상모수가 1.39, 하중에 대한 가속지수는 5.98이며,
그리고 사용조건에서의 B₁₀ 수명은 7,490,300시간으로
나타났다.

References

- [1] Yang, C. and Han, M., "Design Modification of Bearing Walkout of Water Pump by a Finite Element Analysis", *Trans. Korean Soc. Auto. Eng.*, Vol. 14, No. 3, pp. 164-169, 2006.
- [2] Li, Z., Zhou, Q., Tang, J., Wang, J. and An, Q., "Load Calculation and Life Prediction for Auto Water Pump Bearing", *J. Tribol.*, Vol. 134, No. 4, pp. 41103, 2012.
- [3] Ronald L. Eshleman, *Machinery Vibration Analysis I*, pp. 80-82, VIPress, Inc., 2000.
- [4] Bertsche, B., *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering*, Springer, Berlin Heidelberg, Germany, 2008. (ISBN 978-3-540-33969-4)
- [5] Yang, G. B., *Life Cycle Reliability Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, Canada, 2007. (ISBN 978-0-471-71529-0)
- [6] Abernethy, R. B., *The New Weibull Handbook* (5th edition), Abernethy, Robert B., Florida, USA, 2004. (ISBN-10 0965306232)
- [7] NSWC, *Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment*", Naval Surface Warfare Center, 2007.
- [8] Barringer & Associates, Weibull Database, <http://www.barringer1.com>., 2010.
- [9] ReliaSoft, *Accelerated Life Testing Reference*, ReliaSoft Publishing., 2001.