

가속수명시험을 이용한 볼 베어링 수명분석

Life Analysis of Ball Bearings by Accelerated Life Test

김형의 · 이윤표 · 유영철

H. E. Kim, Y. P. Lee, Y. C. Yoo

한국기계연구원, khe660@kimm.re.kr, yplee@kimm.re.kr, ilike072@kimm.re.kr

Abstract

The failures such as flaking, wear, crack and seizing caused by the high contact pressure accompanied with sliding motion between inner or outer ring and ball are potential failures of ball bearing. In this research, we have qualitatively selected the efficient test items through the analysis of the life and potential failures of ball bearing. The bearing's failures are related closely to the whole system in using the bearing. So, the bearing itself requires an estimation of life in order to operate the system safely. We have tested ten ball bearings. Our research has applied both radial and axial direction force of maximum torque conditions simultaneously for the accelerated life testing. The result is established by employing the weibull plot and compared the predicted life of ball bearing to the experimental result.

1. 서론

산업용 기계류 핵심부품인 베어링의 신뢰성 향상이 각 방면으로부터 강하게 요구되고 있고, 특히 차량 수동 변속기용 볼 베어링은 사용조건에 따른 영향이 크기 때문에 신뢰성 향상에 초점이 맞춰지고 있는 실정이다. 고회전속도, 고하중이 요구되는 곳에 사용되는 볼 베어링은 내륜, 외륜, 볼, 시일, 케이지등으로 구성되어 있으며, 베어링에 요구되는 사용조건과 환경 조건에 따라 다양하게 분류된다.

수동 변속기에 사용되는 볼 베어링의 경우 높은 속도로 회전하면서, 각 단수별 하중의 반복 작용과 적용된 작동유의 사용조건(작동유 온도, 작동유 오염도)으로 인한 고장이 증가하고 있으며, 이러한 베어링의 고장은 베어링이 사용되는 전체 시스템의 작동을 불가능하게 하는 요인이 되고 있다.

이와 같이 베어링이 사용된 전체 시스템을 안정적으로 운영하기 위해서는 고장이 발생하기 전에 베어링을 교체해야 한다. 따라서 베어링의 수명 예측을 통한 적절한 교

체시기의 결정이 중요하다.

본 연구에서는 베어링의 잠재적 고장을 해석하여 효과적인 시험방법을 선정하였으며, 10개의 베어링을 사용하여 수동 변속기의 실제 사용조건을 검토한 후 각 단수별 최대 토크 조건을 적용한 가속모델을 이용하여 베어링의 수명을 평가하였다.

2. 베어링 시험 관련 배경 지식 및 고장분석

2.1 깊은 홈 볼 베어링의 구조 및 명칭

깊은 홈 볼 베어링은 부하를 직접 받는 외륜, 내륜, 볼과 볼을 등간격으로 유지하기 위한 케이지 및 이물 침투 방지를 위한 씨일 등으로 구성된다. 베어링의 내, 외륜과 볼은 높은 접촉 압력을 반복하여 받으면서 미끄럼 운동을 수반하는 구름 접촉을 하며, 케이지는 내, 외륜 및 볼과 혹은 어느 한쪽과 미끄럼 접촉을 하면서 인장력과 압축력을 받게 된다. 베어링은 이와 같이 높은 반복 응력을 받으면서 장시간 사용하게 되면 재료 조직에 피로 현상이 일어나며 또한 미끄럼 접촉부에서는 마찰과 마모가 발생하여

결국은 베어링 손상에 이르게 된다.

따라서, 내, 외륜 및 볼의 재료는 기계적 강도 및 구름 피로 강도가 크고 경도가 높아야 하며 내마모성이 우수한 재료를 사용해야 한다. 그리고, 깊은 홈 볼 베어링은 개방형 및 비접촉 씨일, 접촉 씨일이 부착된 밀봉형 베어링이 있으며, 우수한 밀봉 성능을 갖고 있다. 깊은 홈 볼 베어링의 구조 및 각 부품의 명칭은 Fig 1과 같다.

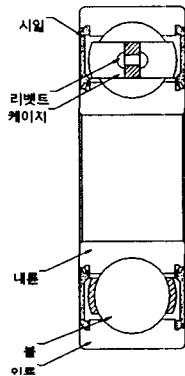


Fig 1 Ball bearing structure

2.2 베어링의 수명분석 이론

기계류 부품의 수명분포로는 마모나 열화 특성이 잘 반영되는 와이블 분포가 주로 사용되고 있다. 와이블 분포는 분포의 형태를 반영하는 형상모수(β)와 수명을 반영하는 척도모수(θ)를 가지며, 감소형 고장률, 일정형 고장률, 증가형 고장률을 모두 표현할 수 있다. 와이블분포의 확률밀도함수 계산식은 다음과 같다.

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(-\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}} \quad (1)$$

$$t > 0, \beta > 0, \theta > 0$$

β : 형상모수 (shape parameter)

θ : 척도모수 (scale parameter)

t : 고장시간

베어링의 누적피로 손상은 금속의 스트레스에 대한 수명 사이클 선도(S&N curve)와 유사하고, 토크(T)에 대한 수명-부하 방정식은 다음과 같다

$$t_{test} = t_{field} \cdot \left(\frac{T_{field}}{T_{test}}\right)^n \quad (2)$$

여기서 t_{test} 는 베어링의 가속수명시험에서의 수명이고 t_{field} 는 사용조건에서의 수명을 나타내며, n은 수명-부하 방정식의 지수이며, 볼베어링의 경우 n=3이다.

2.3 볼 베어링의 시험항목 분석

볼 베어링의 잠재적 고장을 해석하여 효과적인 시험방법 선정을 위하여 고장모드 및 고장 메커니즘 분석(FMMA; Failure Mode and Mechanism Analysis)과 치명도 매트릭스 분석(Critically Matrix Analysis)을 실시하고, 고장 메커니즘의 영향과 치명도 평가(FMECA; Failure Mode Effects and Critically Analysis)를 실시하였다. 마지막으로 2단계 품질기능 전개(Quality Function Deployment Level I, II)를 통해, 주요 시험항목의 우선순위를 결정하였다.

1) 고장모드 및 고장메커니즘 분석

볼 베어링의 주요 구성품인 회전체(내륜, 외륜, 볼, 케이스), 씨일, 윤활등에 대하여 기능과 고장형태 및 고장 메커니즘을 분석한 결과는 Table 1과 같다.

Table 1 Failure modes and failure mechanism analysis

| Primary components | Function | Failure modes | Failure mechanism |
|--------------------|----------|---------------|----------------------|
| 윤활 | 마찰줄임 | 윤활성 저하 | 1-1 열파괴 1-2 이물 함유 |
| | | 윤착 | 2-1 마모/스미어링 |
| 회전체(내륜/외륜/볼/케이지) | 회전원활 | 변형 | 2-2 브리넬링 |
| | | 분리 또는 파괴 | 2-3 파괴, 크래킹 |
| | | 마모 | 2-4 스킨핑 |
| | | | 2-5 스톨링 |
| | | | 2-6 마모 |
| | | 부식 | 2-7 전류부식 |
| | | | 2-8 프래팅 |
| | | 씨일 | 이물 투입 방지 |

2) 고장심각도 및 발생빈도 분석

볼베어링의 고장심각도를 세로축으로, 발생빈도를 가로축으로 하여 치명도 분석을 수행한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Critically matrix analysis

| | | | | | |
|----------|--------|-------------------|-----------|---|-----|
| Severity | High | III 2-1 2-3 | II 2-2 | I 1-1 1-2 2-6 2-7 2-8 3-1 | 2-5 |
| | Medium | IV | III | II 2-4 | |
| | Low | V | IV | III | |
| | | Low | Medium | High | |

Failure frequency

3) 고장모드의 영향과 위험도 분석
 볼 베어링의 고장모드 영향과 치명도 분석 결과는 Table 3과 같다.

Table 3 Failure mode effects and critically analysis

| Primary components | Failure modes | Failure causes | Failure effects | Criticality | | | |
|--------------------------|---------------|----------------------------|-----------------|-------------------|-----------|--------------|---|
| | | | | Freqency | Seve rity | Critical ity | |
| 운활 | 운활성 저하 | 과부하 방열안됨 부적절운활 씨일 피로 | 열과 마찰증가 | 2 | 2 | 5 | |
| | | 마찰증가 | 2 | 2 | | | |
| 회전체 (내륜/외륜/ 볼/케이지) | 윤활 | 윤활유희 방열안됨 | 속고정 | 1 | 3 | 5 | |
| | | 변형 | 과부하 부적절설치 | 진동, 소음 마찰증가 | 2 | 3 | 7 |
| | 마모 | 분리 또는 파괴 | 과부하 부적절설치 | 진동, 소음 마찰증가 | 1 | 3 | 5 |
| | | 스커핑 | 스커핑 | 운활유희 방열안됨 | 3 | 2 | 7 |
| | | | 스플링 | 피로 정렬안됨 과부하 | 3 | 3 | 9 |
| | 부식 | 마모 | 마모 | 이물질 | 2 | 2 | 5 |
| | | 전류부식 | 전류부식 | 씨일피로 이물질 | 2 | 2 | 5 |
| | 프레팅 | 프레팅 | 프레팅 | 진동부하 이물질 | 2 | 2 | 5 |
| 프레팅 | | 프레팅 | 진동부하 이물질 | 2 | 2 | 5 | |
| 씨일 | 누유 또는 침입 | 악화 | 방열안됨 부적절운활 | 2 | 2 | 5 | |

4) 2단계 품질기능 전개
 볼 베어링의 효과적인 시험항목을 선정하기 위해서, 우선 사용자의 요구조건 또는 제품의 사양과 주요 구성품별 고장모드와의 관계를 평가하여 1단계 품질기능 전개표를 Tabel 4와 같이 작성하였다. 또한 주요구성 품별 고장 모드와 시험 항목들과의 관계를 평가하여 Table 5와 같이 2단계 품질기능 전개표를 작성하였다. 위와 같은 2단계에 걸친 품질기능전개 결과로부터 도출된 주요 시험항목들은 수명시험(life test), 강성확인시험(stiffness test), 그리고 마찰확인시험(friction torque test) 등의 순서로 나타났다.

Table 4 Quality function deployment level I

| Primary components | 운활 | 회전체(내륜/외륜/ 볼/ 케이지) | 씨일 |
|--------------------|--------------|--------------------|--|
| Failure Modes | 열 파괴 | 이물질 | 마모 / 스미어링 브리넬링 스커핑 스플링 피로파괴 전류부식 프레팅 마모 악화 |
| | Requirements | | |
| 낮은 소음 방출 | ▲ | ◎ | ● ◎ ● |
| 내진 | | | ▲ ▲ ◎ ▲ |
| 고온 | ◎ | ● | ◎ ● ● ● |
| 열전도 | ◎ | ● | ◎ |
| 운활 용이 | | ● ◎ | ● ▲ ● |
| 고부하 견딤 | ● | | ◎ ◎ ◎ ▲ |
| 고속 회전 | ● | | ◎ ◎ ◎ ▲ |
| 장수명 | ● ● ▲ ▲ ▲ | ◎ ◎ ◎ ◎ ◎ | ◎ ◎ ◎ |
| 사인파 부하 견딤 | | ▲ | ● ▲ |
| scores | 33 | 13 | 25 21 26 40 44 17 31 23 14 |

가장중요 ◎(9), 중요 ●(5), 보통 ▲(3)

Table 5 Quality function deployment level II

| 주요 구성품 (Primary Components) | 고장형태 (Failure Modes) | 점수 | 시험항목(Standard Test) | | | | | | | |
|-----------------------------|----------------------|----|---------------------|----------|-------|--------|-------|-----|--------|----------|
| | | | 강성 확인 시험 | 마찰 확인 시험 | 수명 시험 | 고유온 시험 | 저온 시험 | 오염 | 정밀도 시험 | 단품 소착 시험 |
| 운활 | 열파괴 | 33 | | ◎ | ● | ▲ | | ▲ | ● | |
| | 이물질 함유 | 13 | ◎ | | ▲ | | ● | ▲ | | |
| 회전체 | 마모/ 스미어링 | 25 | ◎ | ● | | | ▲ | | | |
| | 브리넬링 | 21 | ◎ | | | | | | | |
| | 스커핑 | 26 | | | ▲ | | | | | |
| | 스플링 | 40 | | ● | ◎ | ● | | | ▲ | |
| | 피로파괴 | 44 | ◎ | ◎ | | | | | | |
| | 마모 | 23 | | ● | ◎ | ▲ | | ▲ | ● | |
| | 전류부식 | 17 | | | ▲ | | | | | |
| 프레팅 | 31 | | | ▲ | | | | | | |
| 씨일 | 악화 | 14 | | | ● | | | ▲ | | |
| Test effectiveness scores | | | 810 | 557 | 1460 | 473 | 174 | 176 | 334 | 204 |
| | | | 2 | 3 | 1 | 4 | 8 | 7 | 5 | 6 |

가장중요 ◎(9), 중요 ●(5), 보통 ▲(3)

3. 시험 및 결과 분석

3.1 볼 베어링의 수명시험

본 연구에서는 차량 수동변속기 입력축 전방에 사용되는 내경 $\phi 25\text{mm}$, 외경 $\phi 68\text{mm}$, 높이 18mm의 깊은 홈 볼 베어링을 시험 대상으로 하였으며, B_{10} 수명은 20만 Km이다.

Fig 2와 같은 절차를 이용하여 와이블 분포의 형상모수 및 무고장 시험시간을 설정하고, 시험을 통하여 이를 검증하는 방법을

사용하였으며, 볼 베어링 10개 모두 고장날 때까지 Fig 3의 시험조건으로 가속수명시험을 실시하였다. 가속수명 시험은 Fig 4의 test mechanism에 의거하여 하중 및 속도 등을 적용하였으며, 시험장비는 Fig 5와 같이 5대의 장비와 제어반으로 구성되어 있어 총 10개의 베어링을 동시에 시험하였다.

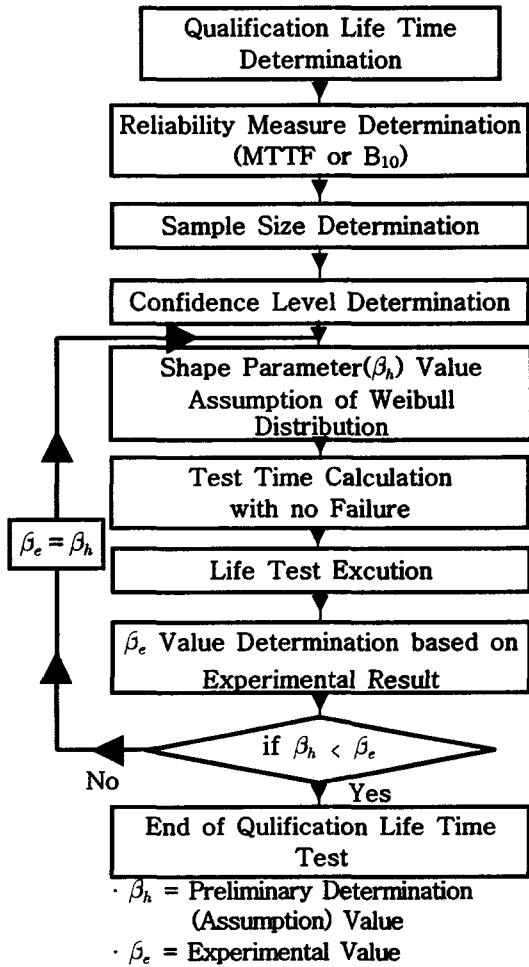


Fig 2 β vs Test time calculation with no failure

3.1.1 가속수명시험 조건 계산

1) 가속수명시험 하중 조건 산정

가속수명시험시 하중은 엔진 입력 최대 토크 적용시 각 단수별 반지름 방향 하중과 축방향 하중을 아래와 같이 계산하였다.

① 각 단 기어에 작용하는 하중 분석

a) 원주 방향 힘 (F)

$$F = \text{Torque} / (D/2)$$

b) Thrust 방향 힘 (F_a)

$$F_a = F \times \text{TAN}(\beta')$$

c) Radial 방향 힘 (F_r)

$$F_r = F \times \text{TAN}(\alpha) / \text{COS}(\beta')$$

여기서 D = Gear pitch circle dia. (mm)

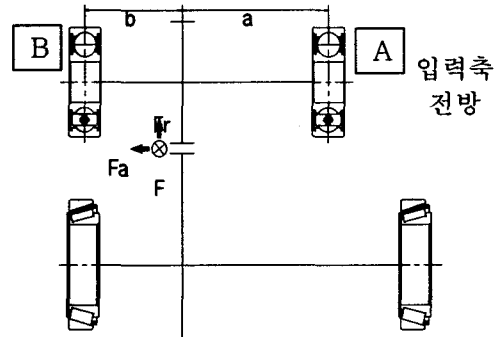
β' = Gear helix angle (°)

α = Gear pressure angle (°)

d) 하중 분석 결과

| gear | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------|----------|----------|---------|---------|---------|
| F (N) | 12824.06 | 8177.67 | 6390.41 | 5450.63 | 4924.80 |
| F_a (N) | 6056.39 | 5392.19 | 3158.33 | 4107.32 | 3711.13 |
| F_r (N) | 6166.62 | 31012.06 | 2179.33 | 2086.56 | 1885.33 |

② 각 Gear에 의한 베어링 A, B 작용력



a) 원주 방향 힘 (F)

$$F_A = (b \times F) / (a + b)$$

$$F_B = (a \times F) / (a + b)$$

b) Thrust 방향 힘 (F_a)

$$F_{aA} = F_a$$

$$F_{aB} = 0$$

c) Radial 방향 힘 (F_r)

$$F_{rA} = (F_r \times b - F_a \times D/2) / (a + b)$$

$$F_{rB} = (F_r \times a - F_a \times D/2) / (a + b)$$

d) radial 방향 합력 (FR)

$$F_{rA} = \sqrt{(F_{rA}^2 + F_{aA}^2)}$$

$$F_{rB} = \sqrt{(F_{rB}^2 + F_{aB}^2)}$$

e) 결과

Engine Max. Torque : 215.7 N m

Engine Max. Speed : 4800 rpm

| 단수 | Radial direction force(N) | | Thrust force(N) (A에 작용) |
|----|---------------------------|---------|----------------------------|
| | A | B | |
| 1 | 12818.76 | 1471.29 | 6056.39 |
| 2 | 5528.11 | 3326.12 | 5392.19 |
| 3 | 3827.14 | 2981.32 | 3158.33 |
| 4 | 1977.81 | 4023.57 | 4107.32 |
| 5 | 1456.31 | 4016.02 | 3711.13 |

2) 가속수명시험 속도 및 시험 시간 산정

가속수명시험시 회전 속도는 4,000rpm을 적용하였으며, 시간은 수동변속기의 일반적인 사용모드(포지션 빈도와 토크사용률)와 식(5)의 가속 모델을 적용하여 각 단수별 최대토크 등가거리를 계산한 후 변속기의 기어비, 최종감속비, 바퀴 반경등을 이용하여 산정하였다. 하중, 속도, 시험시간을 정리하면 Fig 3과 같다.

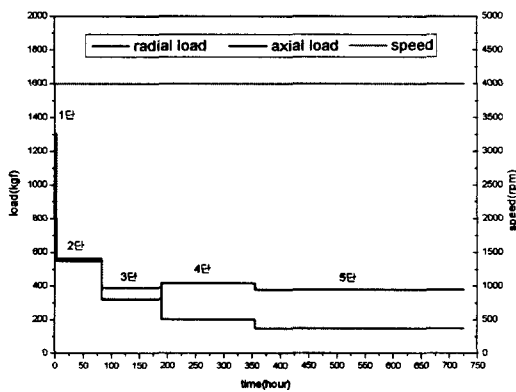


Fig 3 Life test condition of ball bearing

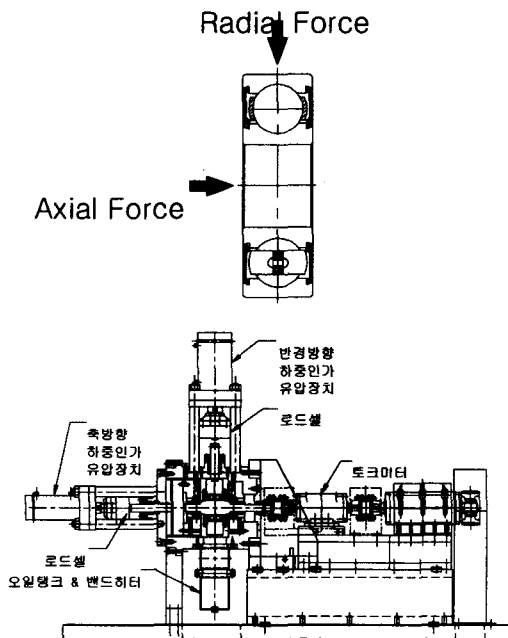


Fig 4 Ball bearing test mechanism

3) 가속계수 산정

가속계수를 구하기 위하여, 가속수명시험

시간 산정시 이용한 수동변속기 일반적인 사용모드(포지션 빈도, 토크사용률)를 사용하여 베어링 실제 작동조건에서의 평균등가토크(T_{eq})를 식(3)을 이용하여 산출하였다.

$$T_{eq} = \left[\frac{\sum \omega_i t_i T_i^n}{\sum \omega_i t_i} \right]^{\frac{1}{n}} = 0.603 T_{max} \quad (3)$$

$T_{eq} = T_{field}$, $T_{test} = T_{max}$ 를 적용하여 식(2)를 이용하여 이론적 가속계수를 산출하면 식(4)에서와 같이 4.6값을 갖는다

$$AF = \frac{t_{field}}{t_{test}} = \left(\frac{T_{field}}{T_{test}} \right)^n = \left(\frac{T_{max}}{0.603 T_{max}} \right)^3 = 4.6 \quad (4)$$

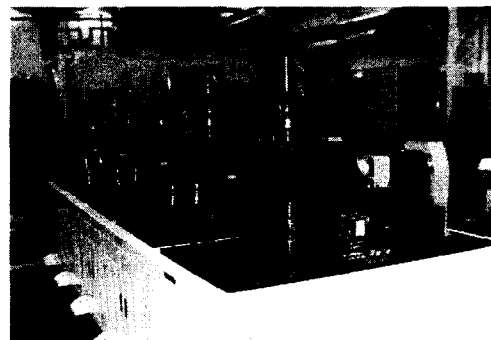
따라서, 가속수명시험을 실시하면, 사용조건에서의 시험보다 1/4.6배만큼 시험시간을 절감할 수 있다.

3.1.2 이론적 신뢰성 시험 설계

참고문헌에 의하면 베어링의 형상모수 $\beta = 1.1$ 이다. 신뢰수준 90%, 샘플수 10개일 때, B_{10} 수명 20만km(1,663.3시간)인 베어링의 무고장시험시간(t_n)을 이론적으로 산출하면 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} t_n &= B_{10} \cdot \left[\frac{\ln(1 - CL)}{n \cdot \ln(1 - p)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (5) \\ &= 1,663.3 \cdot \left[\frac{\ln(1 - 0.9)}{10 \cdot \ln(1 - 0.1)} \right]^{\frac{1}{1.1}} \\ &= 3,460 \text{ 시간} \end{aligned}$$

위의 무고장시험시간에 대하여 식(4)의 가속계수를 적용하여 이론적 가속수명시험시($\beta = 1.1$ 일때)의 무고장시험시간을 계산하면 742.8시간이다.



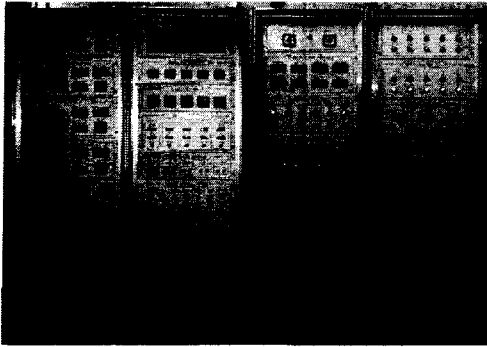


Fig 5 Ball bearing life test equipment and control unit

3.2 볼 베어링의 가속수명시험 결과

엔진 최대 토크 조건을 사용한 가속수명 시험 완료 후, 볼 베어링의 고장 부분을 분석한 결과 플레이킹, 깨짐, 케이지 마모등으로 인한 고장이 발생하였으며 Fig 6과 같다. 그리고, 가속수명시험 결과 베어링의 고장 시험 데이터는 Table 6과 같다.



Fig 6 Cage wear and ball flaking of ball bearing

Table 6 Accelerated life test result

| Bearing No. | Life time(hour) |
|-------------|-----------------|
| 1 | 296.00 |
| 2 | 370.05 |
| 3 | 592.00 |
| 4 | 637.38 |
| 5 | 725.20 |
| 6 | 917.90 |
| 7 | 1042.75 |
| 8 | 1405.70 |
| 9 | 1452.38 |
| 10 | 1828.38 |

3.3 볼베어링의 시험결과 분석

Fig 7은 통계적 신뢰성분석 소프트웨어를 이용하여, Table 6의 볼 베어링 고장데이터에 대한 대표적인 4가지 수명분포(와이블분포, 대수정규분포, 지수분포, 정규분포)의 적합성을 분석한 것으로서 이를 나타내는 척도로 Anderson-Darling (A-D)값을 사용한다. 그 결과, 와이블 분포는 1.406, 대수정규분포는 1.420, 지수분포는 2.261, 정규분포는 1.500 값을 가진다. 수명분포의 적합성은 A-D값이 적을수록 좋게 나타내므로 와이블 분포가 베어링 고장에 대한 수명분포로 가장 적합함을 알 수 있다.

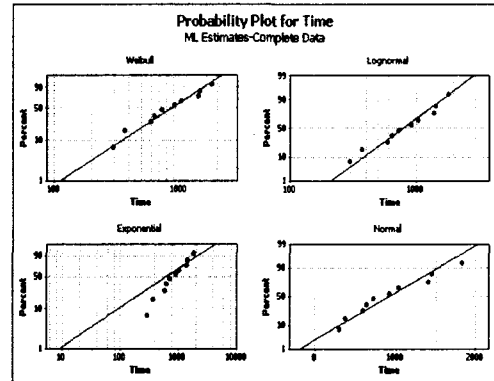


Fig 7 Suitability Analysis of Life Distribution

Fig 8은 개략적인 와이블 분포의 확률밀도함수, 신뢰도함수, 고장률 함수를 도시한 그래프이며, 시간의 증가에 따라 베어링은 고장률이 증가하는 형태를 보이고 있다.

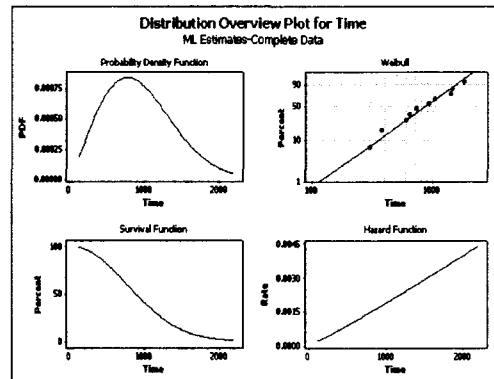


Fig 8 Distribution Overview Plot for Time

가속수명시험의 고장데이터 10개를 와이

볼 확률지에 Fig 9와 같이 타점하여 그래프로 나타내었다. 와이블분포의 형태를 나타내는 형상모수(Shape Parameter)는 $\beta = 2.1$, 수명을 나타내는 척도모수(Scale Parameter)는 $\theta = 1050.8$ 시간, 평균수명(MTTF)는 930.8시간, B_{10} 수명은 356.2시간을 얻었다.

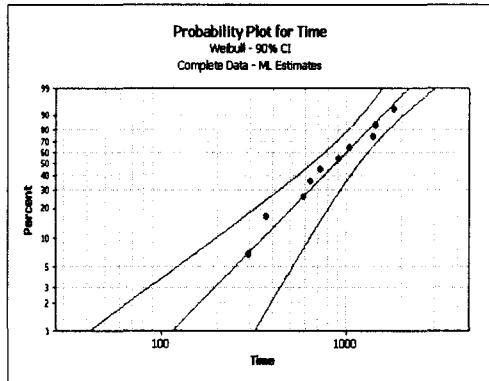


Fig 9 Life Prediction Analysis

3.4 이론값과 실험결과 비교 분석

위의 가속수명시험 고장데이터 분석 결과를 바탕으로 실험을 통한 가속수명시험의 무고장시험을 설계하면, 와이블 분포의 형상모수 $\beta = 2.1$, B_{10} 수명 356.2시간, 신뢰수준(CL)은 90%, 샘플수는 10개일 때 식(5)를 이용하여 무고장 시험시간을 계산하면, 516.9시간이고, 이 시간 동안 10개의 시료가 모두 고장이 없어야 한다.

$$t_n = B_{10} \cdot \left[\frac{\ln(1 - CL)}{n \cdot \ln(1 - p)} \right]^{\frac{1}{\beta}}$$

$$= 356.2 \cdot \left[\frac{\ln(1 - 0.9)}{10 \cdot \ln(1 - 0.1)} \right]^{\frac{1}{2.1}}$$

$$= 516.9 \text{ 시간}$$

3.1.2절의 이론적 신뢰성 시험 설계시 산정된 무고장 시험시간 742.8시간은 $\beta = 1.1$ 인 경우에 대한 값이다. 따라서, 본 연구에서의 실험결과와 비교하기 위하여 $\beta = 2.1$ 인 경우 가속수명시험시에 대한 이론적 무고장 시험시간을 식(5)를 이용하여 계산해보면 524.7시간이 나온다. 이 값은 실험값에서 계산된 무고장 시험시간인 516.9시간과 유사함을 알 수 있다. 다시 정리하면 Table

7과 같다. 그리고, 시험 결과값으로 추정된 B_{10} 수명과 식(4)를 이용하여 가속계수를 계산하면 약4.7로서, 식 (4)를 이용하여 계산한 이론상의 가속계수 4.6과 유사함을 알 수 있다.

Table 7 test result vs. theoretical result

| 구분 | β | B_{10} (시간) | 가속조건에서의 무고장시험시간 |
|----|---------|------------------|--------------------|
| 이론 | 1.1 | 1663.3 | 742.8 |
| | 2.1 | 1663.3 | 524.7 |
| 실험 | 2.1 | 356.2 | 516.9 |

4. 결론

1) 본 연구에서는 볼 베어링의 잠재적 고장을 해석하기 위한 방법으로 고장모드 및 고장 메커니즘 분석(FMMA)과 치명도 매트릭스 분석을 실시하고, 고장 메커니즘의 영향과 치명도 평가(FMECA), 품질기능전개 I, II(QFD Level I, II)를 실시하여 효과적인 시험항목을 선정하였으며, 시험항목의 우선순위를 정량적으로 결정하였다.

2) 가속수명 시험 중 볼 베어링의 고장은 베어링의 내, 외륜과 불사이에서 미끄럼을 동반한 반복 접촉하중에 의한 피로와 마찰과 마모로 인한 플레이킹, 깨짐, 케이지 마모등이 발생하였으며, 베어링의 주 고장모드를 확인하였다.

3) 본 연구에서 베어링 고장은 와이블분포를 따르며, $\beta = 2.1$ 이었다. 신뢰수준 90%에서 B_{10} 수명의 추정값은 356.2시간이다.

4) $\beta = 2.1$ 일때의 이론적 무고장가속시험시간(524.7시간)과 가속시험시의 무고장시험시간(516.9시간)이 유사함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

[1] W. Nelson(1990), Accelerated Testing; Statistical models, test plans, and data analysis, Wiley.
[2] D. Kececioglu(1993), Reliability Engineering

Handbook, Handbook, Vol. 1, Prentice Hall,
pp. 337~563

[3] Garry S. Wasserman(2003), Reliability
Verification, Testing, and Analysis in
Engineering Design, Marcel Dekker, pp.
117~125

[4] NSWC(Naval Surface Warfare Center
Carderock Division(1998), Handbook of
Reliability Prediction Procedures for
Mechanical Equipment, 7-1~7-21

[5] Johannes Brandlein, Paul Eschmann,
Ludwig Hasbargen and Karl Weigand(1999),
Ball and Roller Bearings-Theory Design and
Application, John Wiley & Sons,

[6] Rau, J.G.(1970), Optimization and
Probability in Systems Engineering, Van
Nostrand Reinhold Company.

[7] Wayne Nelson(1985), Weibull Analysis of
Reliability Data with Few or No Failures,
Journal of Quality Technology, Vol. 17, No.
3, pp. 140 ~ 146

[8] Heinz P. Bloch and Fred K.
Geitner(1994), Machinery Failure Analysis and
Troubleshooting, Gulf Publishing Company,
pp. 490 ~ 493

[9] A.D.S. Carter, Mechanical Reliability,
Macmillan, pp. 117 ~ 159