

차량용 휠베어링의 접촉 피로수명 예측에 관한 연구

이 상 돈^{*1)} · 문 길 환¹⁾ · 조 용 주²⁾

부산대학교 정밀기계공학과¹⁾ · 부산대학교 기계공학부²⁾

Contact Fatigue Life Prediction of Automotive Wheel Bearing

Sangdon Lee^{*1)} · Kilhwan Moon¹⁾ · Yongjoo Cho²⁾

¹⁾Precision and Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received 4 October 2007 / Accepted 29 January 2008)

Abstract : For most bearings, it is a common requirement to have long durability. Especially wheel bearing fatigue life is the most important in automotive quality. The contact fatigue life analysis of automotive wheel bearing considering real raceway rough surface is presented in this paper. Contact stresses are obtained by contact analysis of a semi-infinite solid based on the use of influence functions; the subsurface stress field is obtained using rectangular patch solutions. Mesoscopic multiaxial fatigue criterion which can yield satisfactory results for non-proportional loading is then applied to predict fatigue damage. Suitable counting method and damage rule were used to calculate the fatigue life of random loading caused by rough surface. The life analysis considering real rough surface of wheel bearing raceway is in good agreement with the experimental results.

Key words : Contact fatigue(접촉피로), Wheel bearing(휠 베어링), Fatigue life(피로수명), Rough surface(거친 표면)

Nomenclature

C : fatigue life, cycles
P : load, N
R_a : centerline average roughness, μm
 σ : stress, N/m^2

Subscripts

M, N : contact point

1. 서론

일반적으로 차량용 휠베어링의 수명은 접촉피로에 의한 것으로 정의되며, 접촉피로 마멸은 반복적

인 국부응력 집중으로 인해 피로마멸이 발생해 표면에 심각한 손상을 야기하는 것이다. 이러한 접촉 피로마멸의 중요성은 접촉현상을 고려하지 않고 베어링을 설계했을 때 수명을 심각하게 단축시켜 경제성 손실을 입힐뿐더러 자동차 전체의 안전성을 저하시키게 되는데 있다.

접촉 피로에 관한 연구는 Way¹⁾에 의하여 처음으로 실험적 접근이 이루어졌으며, Tallian²⁾에 의해 폭넓은 연구가 진행되었다. Dufourg³⁾는 침탄질화처리된 기어의 접촉피로 손상을 금속학적 관점에서 연구하였으며, 접촉 피로 균열은 표면에서 시작된다는 사실을 밝혀냈다. Batista⁴⁾는 2차원 표면 거칠기를 고려하여 기어의 피로 수명을 예측하는 수치적 모델을 제시한 바 있다. 그 외에도 다양한 연구자들에 의해 구름접촉 피로 현상에 대한 연구가 진행되었다.⁵⁾

*Corresponding author, E-mail: lsd1975@pusan.ac.kr

거친 표면의 3차원 접촉상태, 예를 들어 돌기의 영향을 고려한 구(Sphere)의 표면 아래는 다축 비비례(Multi-axial non-proportional), 불규칙 하중(Variable loading)을 겪는다고 할 수 있다. 따라서 불규칙 하중을 증가된 규칙하중의 조합으로 변화시키기 위해 적절한 카운팅 법(Counting Method)을 적용하여야 한다. 그 후에 균열의 시작을 예측하기 위해 다축 비비례 하중에 적절한 다축 피로 이론을 적용하여야 한다.

재료 내부에서 가장 큰 응력이 작용하는 결정의 전위 수준에서 제시된 이론은 공학적으로 실용적이지 못하다. 많은 피로 모델 중에서, Papadopoulos⁶⁾가 제시한 메조스코픽 피로 이론(Mesososcopic fatigue criterion)은 피로문제에 메조스코픽(Mesososcopic) 물리량을 이용해 접근할 수 있게 하여 다축 비비례 하중에서도 적절한 예측을 하는 것으로 나타났다.

현재 국내에서도 베어링의 피로수명에 관련된 많은 연구가 진행되고 있지만, 대부분 실험적 기법에 기반을 둔 수명식을 이용한 연구에 그치고 있다.⁷⁾

본 연구에서는 실제 휠베어링 궤도륜의 거친 표면 형상을 이용하여 탄성접촉해석을 수행⁹⁾하여 표면 및 표면아래의 응력상태를 해석한 후 접촉피로 수명을 예측하고, 이를 실제 휠베어링의 수명시험 결과와 비교하고자 한다.

2. 접촉피로수명

2.1 접촉 해석

2.1.1 접촉표면응력

두 탄성체에서 작용하는 수직과 수평 하중은 Fig. 1과 같으며, 물체는 등방성이며 균질한 거동을 보인다고 가정한다. 이 때 접촉면의 압력분포는 사각조각표면에 작용하는 균일한 분포하중에 의한 변위의 해를 이용하여 두 탄성체 사이의 접촉문제를 수식적으로 해석한다. Fig. 1에서와 같이 비접합 탄성체의 접촉영역은 탄성체의 다른 크기에 비해 매우 작으므로 두 탄성체는 반무한체로 생각할 수 있다.

2.1.2 표면아래응력

임의의 형상을 갖는 접촉면을 균일한 분포하중이 작용하는 사각조각 표면들로 이산화한다. 하중이

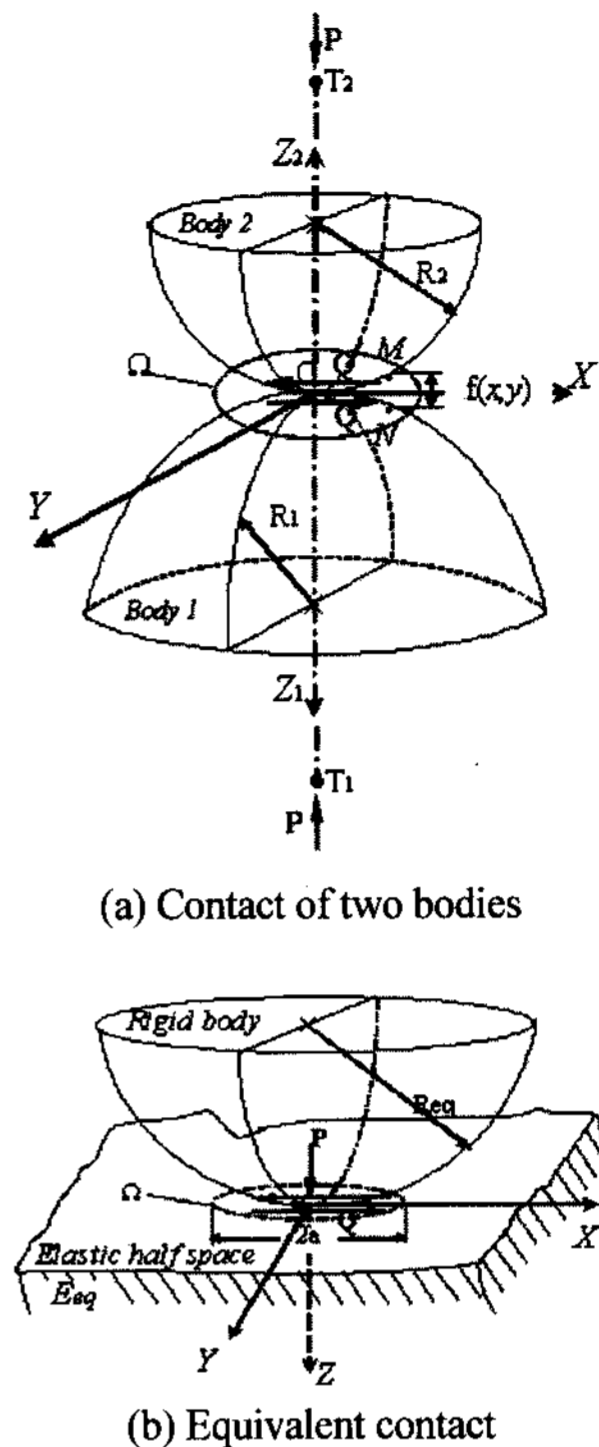


Fig. 1 Contact of two non-conformal bodies

작용하는 반무한체 표면을 미소 사각요소로 나누어, 각 미소 요소의 수직, 접선 분포하중을 사각요소 중심에 작용하는 미소 집중 하중으로 증가시킨다. 각각의 사각요소에 작용하는 집중하중으로 인한 탄성체내 응력 성분은 Love⁸⁾와 Cho et al.⁹⁾의 변위해를 통해 계산할 수 있다. 따라서 응력은 전체 표면의 미소 요소로부터의 영향을 중첩함으로써 구할 수 있다.

2.2 피로 해석

2.2.1 Mesoscopic fatigue criterion

Papadopoulos는 메조스코픽 피로 이론을 제시하기 위해 고주기 피로하중을 받는 재료의 결정 수준에서는 변형량과 응력이 Lyn-Taylor 조건을 만족한다고 가정하였다. 이러한 가정에 근거하여 거시적 관점에서의 물리량(응력, 변형량)과 미시적 관점에서의 물리량 사이의 관계를 규명하였다.

재료의 피로한도는 소성 슬립이 발생하는 결정의 탄소성 거동에 따라 결정된다. 반복 하중에 의하여 결정이 Elastic shakedown 상태에 도달하게 되면 재

료는 무한 수명을 가지게 되는 반면 Plastic shake-down이 발생하게 된다면 결정은 유한 수명 후 피로 균열이 시작된다고 할 수 있다.

결정의 상기와 같은 거동은 결정의 축적된 소성 변형량(Accumulated plastic strain)에 의하여 구분 지을 수 있으며, 축적된 소성 변형량은 분해 전단응력(Resolved shear strain)과 비례관계에 있다. 따라서 분해 전단응력이 특정 임계값을 초과하게 되면 결정에서는 균열이 발생하게 된다.

하지만 공학적 관점에서 균열의 시작은 하나의 결정에 대한 균열을 표현하지 않는다. 즉, 거시적으로 확인될 수 있는 최소 크기의 균열로써 많은 수의 결정을 통과하는 균열이라고 정의할 수 있다. 따라서 분해 전단응력의 평균값을 도입함으로써 이러한 관점을 고려할 수 있다.

평균값을 균열의 시작으로 보았기 때문에 피로 균열이 발생하지 않는 하중에서도 재료 내부에는 미소균열이 존재할 수 있다. 이 미소균열도 피로수명에 상당한 영향을 미칠 것이다. 미소균열의 피로수명에 미치는 영향은 정수압 응력을 통해 고려할 수 있게 된다.

2.2.2 피로 판정식

피로 판정식(Fatigue limit criterion)은 재료의 피로 한도를 판단하기 위한 식이다. Papadopolous에 의해 제안된 피로 판정식은 임계평면법의 형식을 따르며 다음과 같다. 임계 평면은 일반 전단응력(Generalized shear stress)의 진폭이 최대값을 갖는 면으로 정의된다. 우선 분해 전단응력(Resolved shear stress)의 진폭은 다음과 같다.

$$\tau_a(\varphi, \theta, \chi) = \frac{1}{2} \left[\max_{t \in P} \tau(\varphi, \theta, \chi, t) - \min_{t \in P} \tau(\varphi, \theta, \chi, t) \right] \quad (1)$$

여기서 (φ, θ) 는 임의의 고정면을 정의하는 각이다. χ 는 고정면 (φ, θ) 에서 정의되는 임의의 선이다. t 와 P 는 각각 하중의 시간과 주기를 나타낸다. 일반 전단응력(Generalized shear stress, T_a)은 임의 면에서 분해 전단응력의 평균값을 나타낸다.

$$T_a(\varphi, \theta) = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int \tau_a^2(\varphi, \theta, \chi) d\chi} \quad (2)$$

제안된 피로 판정식은 다음과 같다.

$$\max T_a + 3 \left(\frac{t_{-1}}{f_{-1}} - \frac{1}{2} \right) \sigma_{H, \max} \leq t_{-1} \quad (3)$$

여기서 t_{-1} 과 f_{-1} 은 각각 완전 교번 비틀림과 굽힘 피로한도 값이다. $\sigma_{H, \max}$ 는 정수압 응력의 최대값을 나타낸다.

2.2.3 피로 수명식

피로 수명식은 부가된 하중에 의해 재료에서 피로 균열이 발생할 경우 그 피로 수명을 밝혀내기 위한 식이다. Papadopoulos에 의해 제시된 피로 수명식은 다음과 같다.

$$\frac{\max T_a + 3(t_{-1}/f_{-1} - 1/2)\sigma_{H,a}}{1 - \frac{3}{t_{-1}}(t_{-1}/f_{-1} - 1/2)\sigma_{H,m}} \leq \frac{t_{-1}}{1 - \kappa N^{-\lambda}} \quad (4)$$

여기서 κ 와 λ 는 완전 교번 비틀림 실험에서 얻은 S-N Curve를 커브 피팅하여 얻을 수 있다. $\sigma_{H,a}$ 와 $\sigma_{H,m}$ 는 정수압 응력의 진폭과 평균값을 나타낸다.

2.2.4 변동하중에 대한 적용법

피로 이론은 일정한 진폭의 하중이 작용할 경우에 적용이 가능하지만, 거친 표면간의 접촉인 경우에는 돌기의 영향을 받아 불규칙한 변동하중(Variable amplitude loading)이 작용하게 된다. 따라서 적절한 카운팅 방법을 이용하여 변동하중을 일정한 하중(Constant amplitude loading)의 조합으로 등가하기 위해 레인플로우(Rainflow) 카운팅 법을 사용하였다.¹⁰⁾

다축 응력이 작용하는 부재에서 각각의 응력 성분은 평균값이나 진폭이 독립적으로 작용할 뿐만 아니라 주파수 또한 독립적으로 작용하게 된다. 따라서 이러한 응력상태에 대한 사이클 카운팅에서 가장 어려운 문제는 어떠한 응력 성분을 카운팅하여 전체 응력 상태를 대표할 수 있는가 하는 것이다.

임의 평면의 수직응력을 카운팅 변수로 정의하여 다축 응력 성분의 카운팅을 수행한다. 임의의 평면은 손상이 가장 크게 작용하는 면으로 정의한다. 한 사이클에 대한 응력 성분을 얻기 위해 카운팅 변수가 사이클을 형성하는 시간에 상응하는 각각의 성분을 적절한 가중치를 두어 얻는다.

그 후에 Linear Miner법을 사용하여 각각의 손상을 더하여 최종 수명을 얻는다.

3. 휠베어링 접촉피로수명 예측 및 수명시험

3.1 차량용 휠 베어링

Fig. 2는 3세대 차량용 휠베어링의 사진으로써, 3세대 베어링은 허브와 스피들(Spindle)의 일체화로 부품수 및 조립 공정이 1,2세대 휠베어링보다 콤팩트화되고, 구동륜 및 비구동륜의 휠 모두에 적용이 가능하여 최근 널리 적용되고 있는 추세이다.

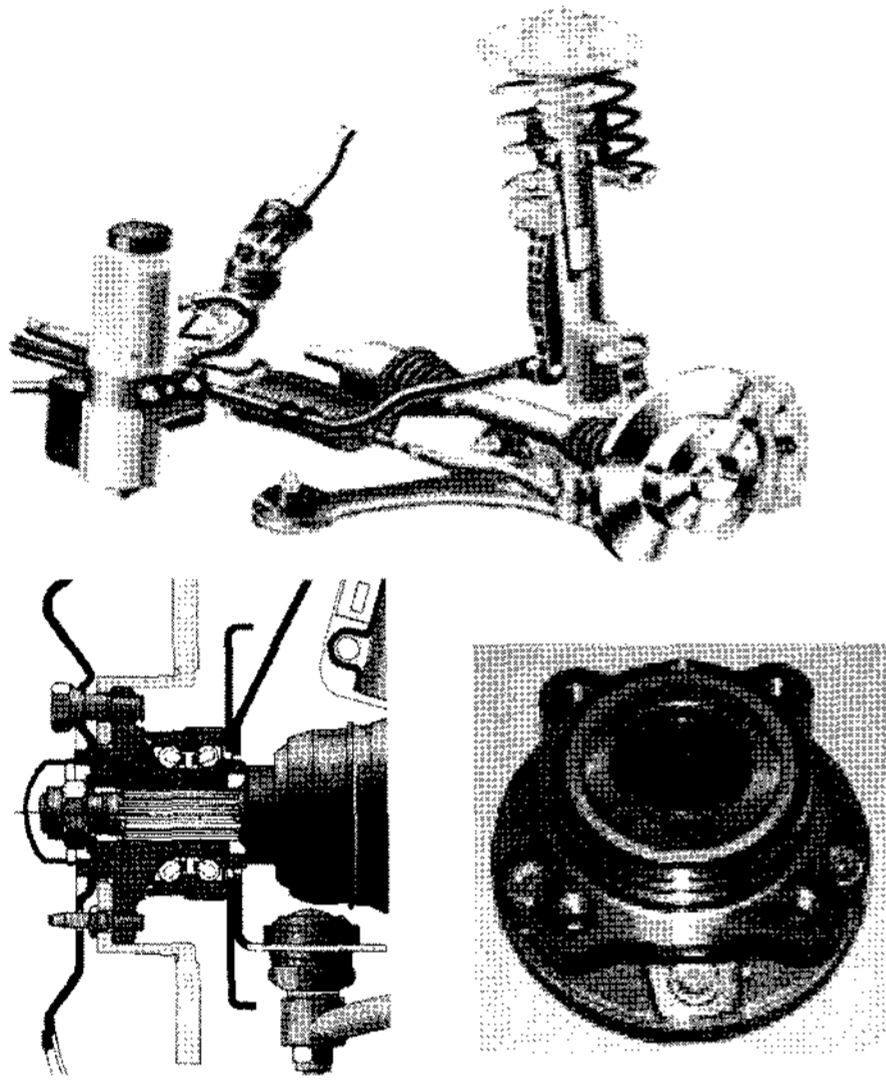


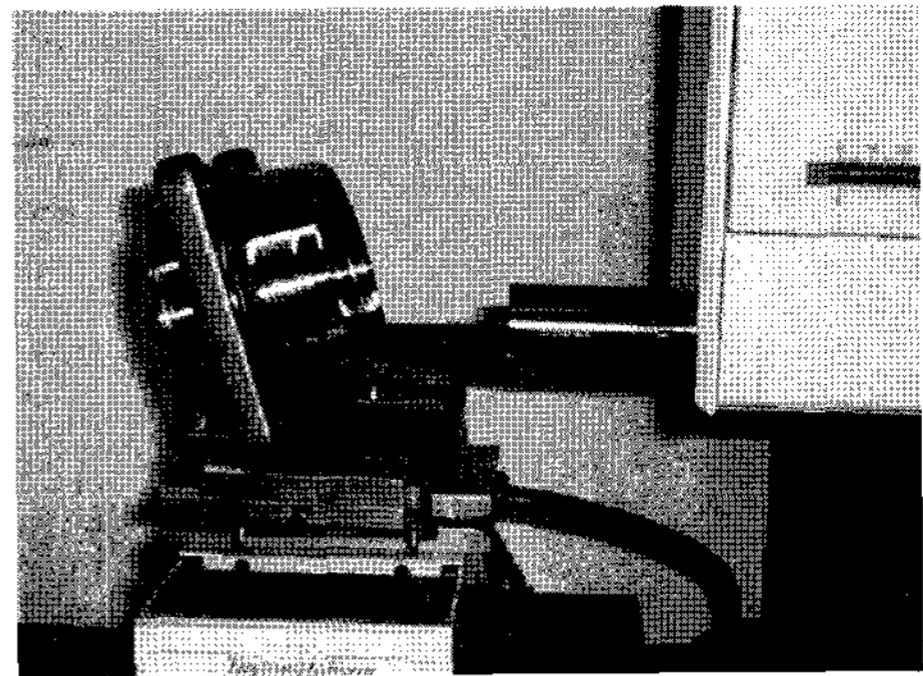
Fig. 2 Automotive wheel bearing

3.2 베어링 표면거칠기 측정 및 분석

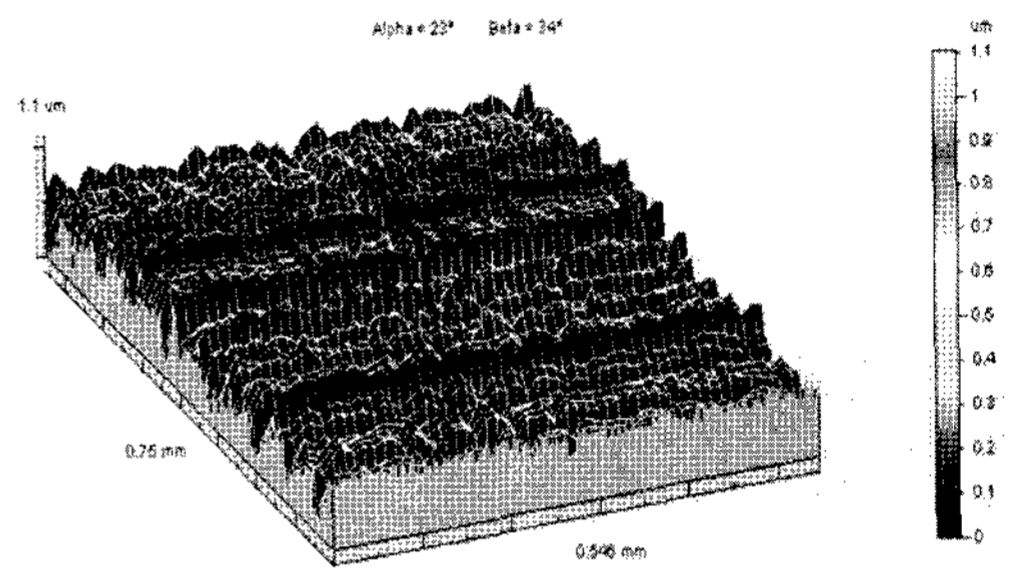
Fig. 3(a)는 3차원 접촉식 표면 조도기를 이용해서 베어링 레도륜의 거친 표면 형상을 측정하는 그림이다. 이와 같은 측정을 통해 획득한 베어링 레도륜의 실제 표면 3차원 디지털 데이터를 Fig. 3(b)에 나타내었다.

3.3 접촉응력해석 및 접촉피로해석

Table 1은 휠베어링의 재질인 고탄소 크롬 베어링강(AISI52100)의 재료물성치를 나타낸 것이다. 3차원 표면조도 측정기를 통해 측정된 실제 휠베어링 레도륜의 거친 표면형상과 베어링 볼의 탄성접촉해석을 통해 레도표면 아래의 응력상태를 계산하였다. Fig. 4(a)는 레도륜의 표면이 매끄러운 상태라 가정했을 때의 표면아래의 응력상태이고, Fig. 4(b)는 표면이 거친 상태, 즉 표면에 돌기들이 존재하는 상



(a)

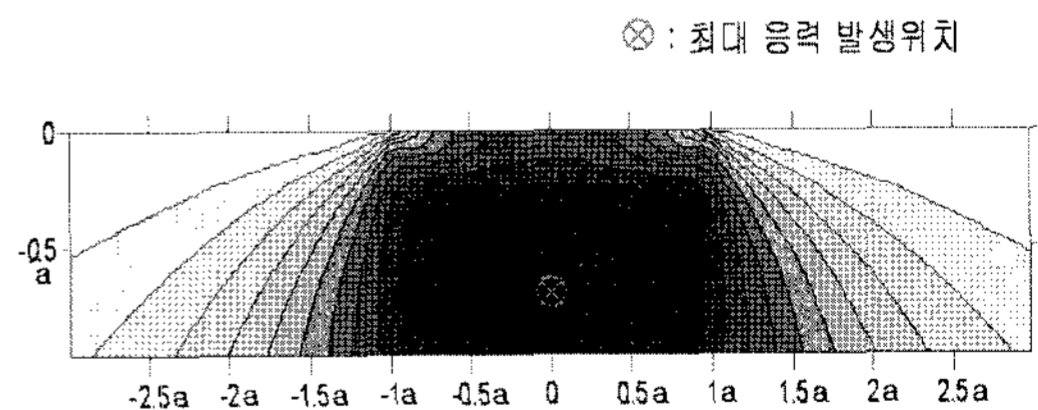


(b)

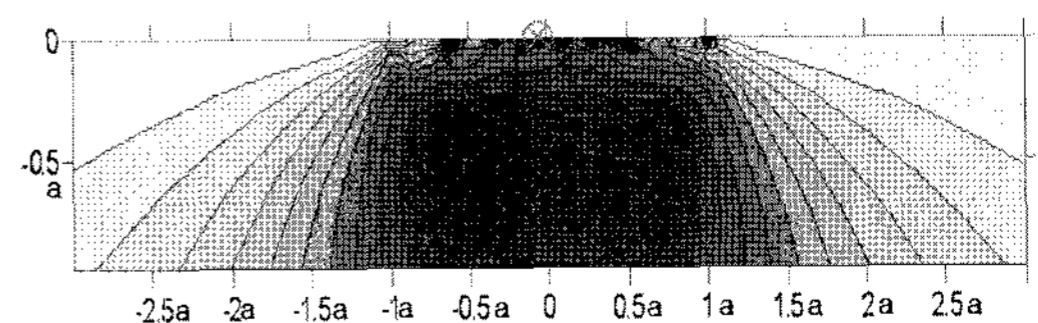
Fig. 3 Measurement of wheel bearing raceway

Table 1 Wheel bearing material properties

Material	AISI52100
E(GPa)	200
ν	0.3
t_1 (MPa)	583
f_1 (MPa)	733



(a) Smooth surface vs ball



(b) Rough surface vs ball

Fig. 4 Subsurface stress distribution (P=0.6G)
(a: half contact length=0.36mm)

태시 표면아래의 응력상태를 계산한 결과 그래프이다.

그림에서 볼 수 있듯이 최대응력의 발생위치가 매끄러운 표면의 경우 표면아래 깊은 곳에서 발생하지만, 거친 표면의 경우 매우 표면에 가까운 곳에서 발생하는 것을 볼 수 있다. 이런 이유 때문에 피로 파괴현상이 표면에서 발생하거나 표면에서 매우 가까운 영역에서 발생하여 표면으로 손상이 전파될 것임을 예상할 수 있다.

3.4 휠 베어링 수명시험

Fig. 5는 실제 휠베어링의 수명시험 장치의 개략도이다. 시험시편은 시험기 중간에 베어링 하부 및 상부 지그로 장착이 된다. 하중은 시험기 상단에 설치되어 있는 두 개의 유압 실린더에 의해 가해지고, 이 실린더는 각각 x, y 축의 축 및 반지름 방향으로 힘이 가해지도록 설계되어져 있다. 베어링 피로수명시험은 피팅의 발생만을 알아보기 위해 500rpm 정도의 낮은 회전속도로 수행하였다.

시험의 중단은 시험자가 임의로 설정해 놓은 진동값 이상의 진동이 발생할 때 시편의 파손이 발생한 것으로 인지하고 시험기의 작동을 중단시키며, 이 때까지의 회전시간을 계산하면, 베어링의 수명을 알 수 있게 된다.

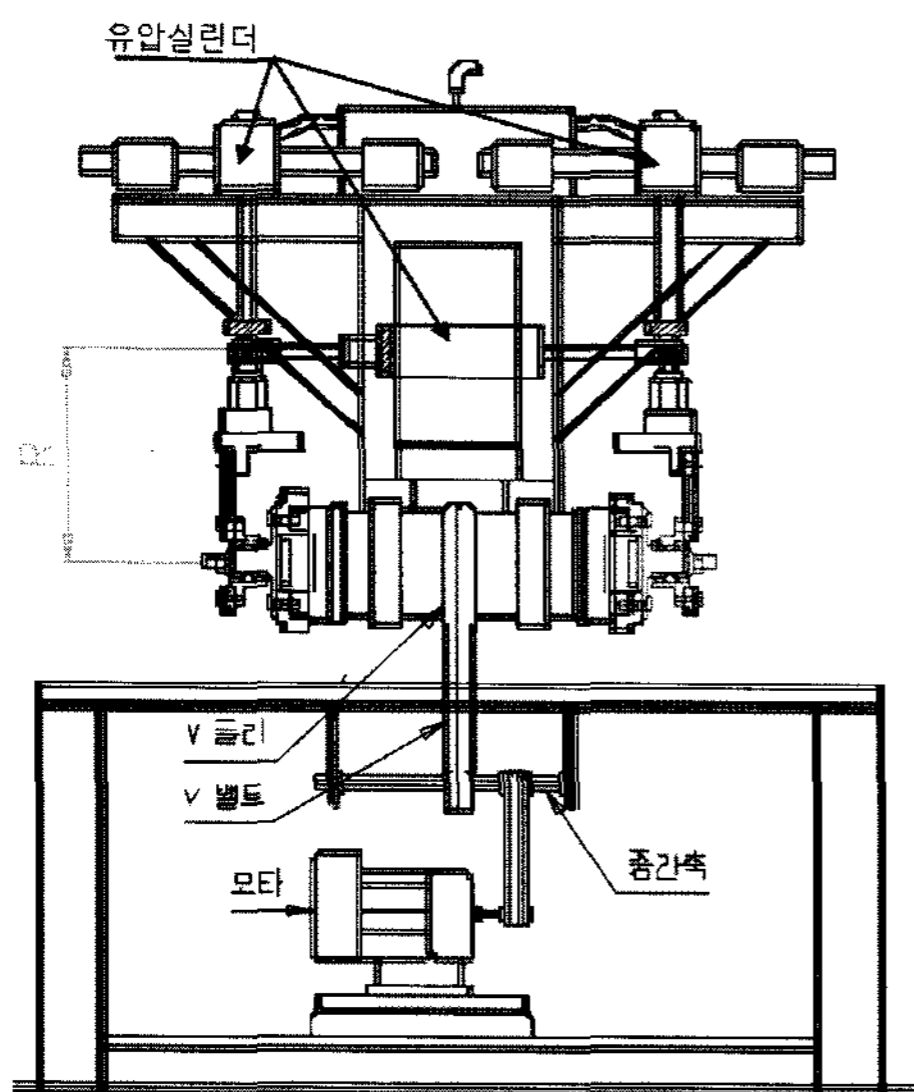


Fig. 5 Wheel bearing tester



Fig. 6 Failed wheel bearing specimens

휠베어링의 피로수명 시험조건은 차량이 선회할 때 휠베어링에 걸리는 관성력을 기준으로 결정한다. 이 관성력을 축방향 및 반지름 방향의 힘으로 환산하여 실제 베어링의 피로수명 시험 시 베어링에 하중을 가하게 된다.

Fig. 6은 수명시험 결과 파손이 발생한 휠베어링의 궤도륜과 베어링의 사진이다. (a)는 베어링 궤도륜 표면에서 피팅이 발생하여 궤도륜 표면이 손상된 사진이고, (b)는 궤도륜 표면손상이 발생한 상태에서 계속 작동하여 베어링 볼의 손상까지 발생한 상태이다. 실험결과 대부분의 손상은 궤도륜 측에서 발생하고 일부의 경우 볼의 손상까지 더불어 발생하였다.

이는 궤도륜이 손상된 상태에서 계속된 작동을 했을 경우 많은 열이 발생하여 볼의 손상까지 유발한 것으로 생각된다.

3.5 휠베어링 접촉피로수명 예측결과와 시험과의 비교

Fig. 7은 실제 휠베어링의 피로수명 시험 결과와 접촉피로수명 예측결과를 비교한 그래프이다.

접촉피로해석을 통한 수명예측 결과값들의 평균값과 실제 베어링 수명시험 결과가 유사한 수명값을 보인다. 다만 해석을 통한 수명예측값은 큰 편차

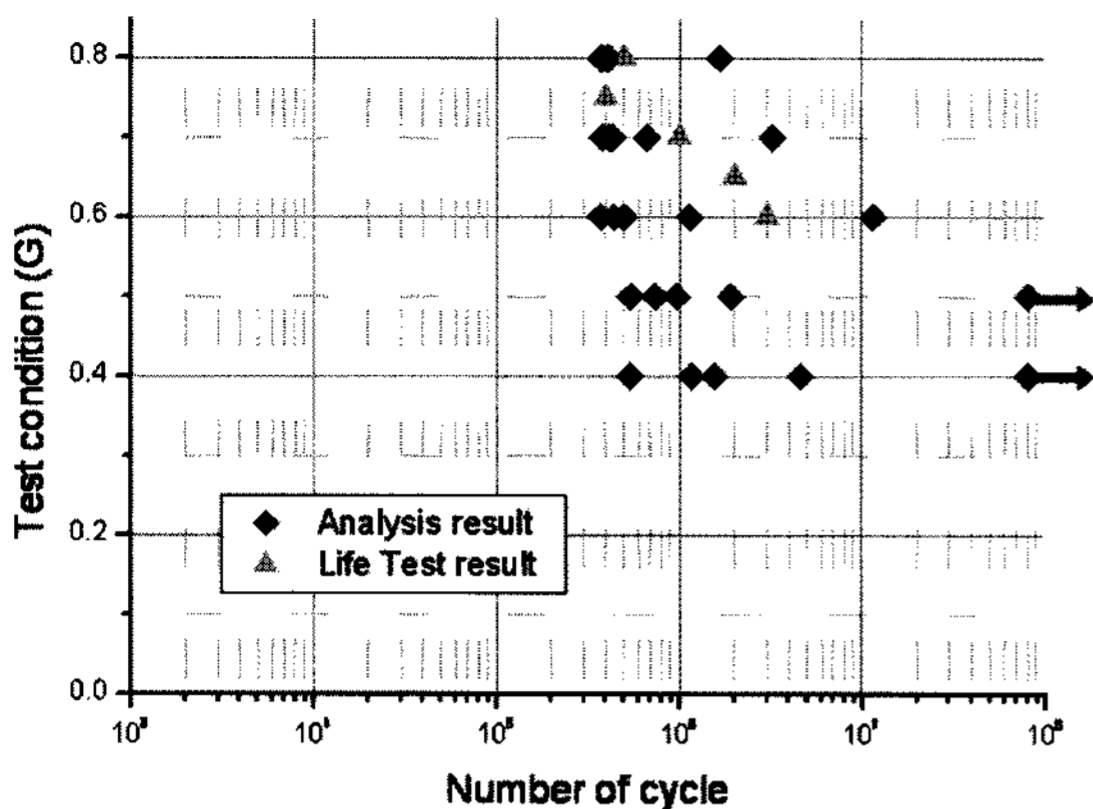


Fig. 7 Analysis result & test result

를 보인다. 이는 실제 베어링 볼이 접촉을 하는 궤도를 전체의 데이터를 이용해서 수명예측을 하는 것은 엄청난 계산양과 계산시간을 요구하기. 때문에 본 연구에서는 실제 휠베어링 궤도론의 표면의 세부분을 측정하여 이를 궤도론 전체의 대표적인 표면으로 가정하고 수명을 예측하였다.

이러한 이유 때문에 해석을 통해 예측한 베어링의 피로수명값에 산포가 발생하게 되었다. 특히 접촉하중이 작은 경우 접촉면적이 작아지기 때문에 더욱 접촉면에 따른 수명예측값의 산포가 커지게 된다. 이는 하중이 높을 때에는 샘플링한 표면들기의 대다수가 접촉하게 되나, 하중이 낮을 때에는 접촉영역의 중심점, 즉 볼과 베어링 궤도론의 접촉중심을 어디로 가정하느냐에 따라 표면들기들의 접촉상태가 달라지고, 이것이 수명예측값의 산포로 나타나게 된다.

따라서 베어링 수명시험을 거치지 않고 해석적 기법을 이용한 수명예측 결과를 사용하기 위해서는 실제 베어링 궤도론 표면의 많은 부위에서 표면형상 데이터를 획득하고 이를 해석한 수명예측 결과들을 평균한 수명값을 이용해야 할 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구를 통해 기존의 실험적 기법에 기반을 둔 수명식에서 탈피하여 실제 표면의 거칠기에 따른 표면아래 응력변화를 고려하여 휠베어링의 접촉피로 수명을 예측할 수 있는 기법을 구축하였다. 이를

위해 차량용 휠베어링의 접촉피로 수명을 해석적 기법을 통하여 예측하고 해석기법의 정확성을 검증하기 위해 실제 차량용 휠베어링을 이용한 수명시험을 수행하였다.

- 1) 실제 베어링의 표면거칠기를 이용하여 접촉피로 수명을 예측할 경우 접촉면의 위치 및 궤도론 표면의 측정위치에 따라 수명예측값이 달라지게 된다.
- 2) 베어링 피로수명 시험을 통해 베어링의 접촉피로 파손현상은 주로 베어링 궤도면에서 우선 발생하여, 볼의 파손까지 발생시키게 된다.
- 3) 해석을 통한 베어링의 수명예측값의 산포는 하중이 낮아짐에 따라 더 커짐을 알 수 있었다.
- 4) 해석을 통한 수명예측값을 사용하기 위해서는 많은 실제 표면의 데이터를 사용한 예측값을 평균화하는 과정이 필요함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

References

- 1) S. Way, "Pitting Due to Rolling Contact," J. Appl. Mech., Vol.2, pp.A49-A58, 1935.
- 2) T. E. Tallian, "Simplified Contact Fatigue Life Prediction Model: Part 1. Review of Published Models," J. Trib., Vol.114, pp.207-213, 1992.
- 3) X. Dufourg, "Pitting des Engrenages de Boite de Vitesse," Ph. D. Dissertation, Universite de Paris-Sud, Orsay, France, 1995.
- 4) A. C. Batista, "Contact Fatigue of Automotive Gears : Evolution and Effects of Residual Stresses Introduced by Surface Treatments," Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol.23, pp.217-228, 2000.
- 5) M. Sraml, "Numerical Procedure for Predicting the Rolling Contact Fatigue Crack Initiation," Int. J. Fatigue, Vol.25, pp.585-595, 2003.
- 6) I. V. Papadopoulos, "Multiaxial Fatigue Limit Criterion of Metals (Chapter 3), High Cycle Metal Fatigue," ed. K. Y. Dang Van and I. V.

- Papadopoulos, Springer-Verlag Wien, New York, pp.89-143, 1999.
- 7) K. C. Yoon, D. H. Choi and J. S. Hyun, "A Study on the Analysis and Design Method of Automotive Wheel Bearing Unit : Part-1 System Life Evaluation," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.407-412, 2000.
- 8) A. E. H. Love, "Stress Produced in a Semi-infinite Solid by Pressure on Part of the Boundary," Phil. Trans. Royal Society, A228, pp.377-420, 1929.
- 9) Y. J. Cho, T. W. Kim and M. J. Lee, "The Stress Field in Body Caused by the Tangential Force of a Rectangular on a Semi-infinite Solid," KSTLE Int. J., Vol.2, No.1, pp.29-34, 2001.
- 10) Langlais, T. E., "Multiaxial Cycle Counting for Critical Plane Methods," Int. J. Fatigue, Vol.25, pp.641-647, 2003.