

# 자동차용 깊은홈 볼베어링의 조기파손 : 2보 - 임계압흔의 크기

현준수 · 박태조\*

FAG한화베어링(주)

\* 경상대학교 BK21사업단, 항공기부품기술연구센터

## Premature Failure of Deep Grooved Ball Bearing for Automobiles : Part 2 - Critical Dent Size

Joons Hyun and Tae Jo Park\*

FAG Hanwha Bearings Corp.

\* Gyeongsang Natl. Univ., ReCAPT

**Abstract** - In this paper, the dent printing phenomena and critical dent size which lead to premature failure of deep grooved ball bearing for automobiles are presented. The results of newly assembled test bearings showed that the ball dent size strongly affect the bearing life and inner ring raceways were the major failed parts in spite of using the dented balls. The dent printing phenomena are a root cause of premature failure, which was not reported until now. And there exist the critical ball dent size for given rolling bearings and operating conditions. So, the initial condition of tribologically mating parts should be treated as important as the failed body itself.

**Key Words** : Deep Grooved Ball Bearing, Premature Failure, Dent, Printing, Critical Dent Size

### 1. 서론

구름베어링의 조기파손을 유발시키는 주요 원인으로서는 윤활제의 오염 등에 따른 이물질과 윤활면에 존재하는 압흔(Dent)이다. 특히, 압흔은 베어링 내부부품의 상호작용에 의하거나 윤활부품의 접촉부에 매개되는 제3의 입자에 의한 2차적인 손상으로 생성될 수 있다. 이렇게 생성된 압흔이 구름베어링의 수명에 악영향을 미친다는 것은 널리 알려져 있다. 즉, 압흔의 존재는 압흔주변에서의 응력장 및 EHL 상태를 열악하여 결과적으로는 조기파손을 유발시켜서 구름베어링의 수명을 크게 단축시킨다는 것이다.

구름베어링 취급설명서 등에는 베어링의 궤도면과 전동체의 손상을 방지하기 위한 많은 주의사항을 제시하고 있다. 여기에는 취급부주

의 등에 의해서 전동체나 궤도면이 손상되면 압흔이 발생하고 이로 인하여 베어링의 성능과 수명이 크게 감소한다고 설명하고 있다. 하지만 허용가능한 압흔의 크기, 수명의 단축정도, 파손기구 등에 대한 자료는 아직 제시되지 않고 있다.

Loroesch[1]는 여러 종류의 압흔을 구름베어링면에 만들고 이의 영향을 조사한 결과, 압흔의 모서리가 날카로울수록 베어링의 수명은 크게 단축된다는 사실을 발견하였다. 예로서 직경이 0.4mm인 볼을 사용하여 생성한 크기가 13 $\mu$ m인 압흔 베어링은 압흔이 없는 경우에 비하여 수명이 98.5%나 감소하였지만 압흔의 날카로운 모서리는 없어지지 않았다. Ionnides & Harris[2]는 압흔의 존재와 이에 의한 응력 분포에 기초한 새로운 구름베어링 수명이론을 제안하였으며, Webster 등[3]은 압흔의 수와

관계하여 이 수명이론과 상당히 잘 일치하는 실험결과를 발표하였다. Sayles & Ioannides [4]는 압흔의 생성과정에 관련된 입자형상에 대한 연구에서 구름접촉부에 영향을 주지 않는 입자의 임계 Aspect Ratio가 존재한다는 결과를 보였다. Ai[5]은 압흔주변에 대한 EHL 해석결과, 압흔이 순수한 구름접촉상태에서는 수명감소를 초래하지 않지만 미끄럼이 있는 경우에는 큰 영향을 미쳤다. Fujii & Maeda [6-8]는 2-Roller 시험기의 대형 로울러 표면에 로크웰 혹은 비커스 압입자(Indentor)를 압입한 후 소형 로울러에서 플레이킹이 발생하는지를 조사하였다. 이 결과, 대형 로울러의 압흔이 반복적으로 소형 로울러에 영향을 미쳐 내부기점파손이 발생한다는 사실을 보고하였다.

지금까지 구름베어링의 압흔에 관련된 대부분의 연구에서는 압흔과 압흔주변에서의 표면 불균질이 균열의 진전에 미치는 영향을 조사하기 위하여 베어링의 궤도륜이나 시험 로울러에 다이아몬드 콘이나 볼 등으로 인위적인 압흔을 생성시켰다. 하지만 이러한 형태의 압흔은 동일형상을 재현할 수 있지만 실제 베어링에서의 압흔과는 차이가 클 것으로 쉽게 예상된다. 특히, 사용베어링에서 조기파손을 초래할 수 있는 압흔의 크기에 대한 연구결과는 아직 보고되지 않고 있다.

본 논문에서는 구름베어링의 실제 사용조건에서 전동체에 발생할 수 있는 압흔으로 인하여 베어링의 조기파손에 영향을 줄 수 있는 압흔의 임계크기를 실험적으로 구하고자 한다. 이를 위한 시험베어링은 자동차용의 깊은홈 볼베어링을 사용하였다.

## 2. 시험용 베어링의 제작 및 성능시험

본 논문에서는 만능시험기를 사용하여 베어링에 하중을 작용시켜 베어링의 장착이나 작동중에 볼에 생성될 수 있는 압흔과 동일한 형태의 압흔을 발생시켰다. 다음으로 분해된 베어링에서 볼만 추출하여 초음파 세척기로 이물질들을 제거한 다음 압흔의 형상과 크기를

측정하였다. 최종적으로는 압흔이 있는 볼을 선별하여 신품인 궤도륜 등과 조합하여 시험용 베어링을 제작하였다. 시험용 베어링은 Fig. 1에 나타낸 FHBC형 볼베어링 수명시험기를 사용하여 시험하였다. 성능시험을 완료한 베어링은 분해하여 볼과 궤도륜의 손상유무를 조사하고 압흔의 형상과 크기를 측정하였다. 시험용 베어링의 제작, 시험방법 등은 참고문헌[9]에 상세하게 나타내었다.

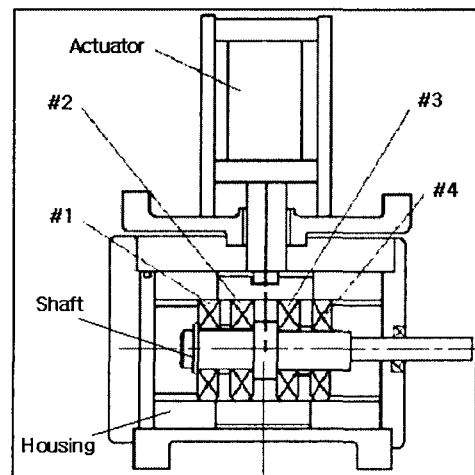


Fig. 1 FHBC type bearing endurance life tester.

한편, 볼에 생성된 압흔은 크기가 매우 작을 뿐만 아니라 경면상태인 표면에 생성되어 있으므로 육안으로는 식별이 거의 불가능하다. 또한, 일반 측정기로는 확인이 쉽지 않기 때문에 본 논문에서는 다음과 같은 특수한 측정기를 사용하였다. 압흔의 크기는 최대배율이 20만배인 RTH사의 고배율 형상측정기(모델번호 : 120L)를 사용하여 측정하였으며 결과는 돌출량(또는 산높이, Peak ; Rp)으로 주로 나타내고 보조로 압흔의 최대 골-산과의 거리(Peak to valley ; Rt)로 나타내었다. 원통형인 궤도륜에서의 압흔측정에는 최대배율이 20만배인 Mahr사 진원도측정기(모델명 : MMQ40)를 사용하였다. 한편, 압흔의 형상관찰에는 배율이 1,000배인 광학현미경을 사용하였으며 굴곡면에는 편광기법을 채용하였다. 또한, 고배율이 요구되는 파단면 등의 굴곡이 있는 표면

의 세밀한 관찰에는 주사전자현미경(SEM)을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수명시험

수명시험은 정격하중의 25%인 3.48kN의 반경방향하중을 작용시킨 상태에서 내륜회전수 2,900rpm으로 1,300시간동안 실시하였다. 이 시간은 계산  $L_{10}$ 수명의 3.5배 정도에 상당하며 이를 표준 Weibull 기울기로 계산하면  $L_{50}$ 수명시간 정도이다. 따라서, 본 베어링의 사용조건에서 약 1,300시간 이상의  $L_{10}$ 수명일 경우에 정상적인 피로파손으로 간주할 수 있다.

Table 1.은 시험결과를 초기압흔의 크기로 구분하여 나타낸 결과이다. 압흔이 없거나 압흔의 크기가  $1.0\mu\text{m}$  이하인 경우에는 1,300시간인 목표수명시간 동안에 전혀 파손되지 않았으며, 크기가  $1.0\sim 3.0\mu\text{m}$ 인 경우에는 13개의 시료 중에서 2개가 내륜만 파손되었다. 그러나, 압흔의 크기가  $3.0\mu\text{m}$  이상인 경우에는 14개의 시료 중에서 7개가 파손되었다. 이와 같이 압흔의 크기가  $1.0\mu\text{m}$  이하인 경우와  $3.0\mu\text{m}$  이상인 경우의 시험결과가 구별되게 차이를 나타내는 것은 본 논문의 시험조건에서는 압흔으로 인하여 조기파손을 유발시키는 임계압흔의 크기 범위가  $1.0\sim 3.0\mu\text{m}$ 이라고 추정할 수 있다.

Table 1. Number of failed bearings according to initial dent size.

Size( $\mu\text{m}$ ) Number	No dent	<1.0	1.0-3.0	>3.0
Failed	0	0	2	7
Sustained	8	5	11	7
Total	8	5	13	14

#### 3.2 볼 압흔의 형상변화

압흔의 형상변화를 조사하기 위하여 반경방향하중이 3.48kN인 상태에서 2,900rpm으로 1시간동안 시험하였다. 따라서, 베어링 내륜의

총회전수는 174,000회이므로 내륜은 불과 650,000회 정도 접촉하게 된다.

시험전·후에 대한 볼의 압흔형상을 측정된 결과를 Fig. 2~Fig. 4에 나타내었다. Fig. 2 (a)의 시험전 압흔형상은 초승달모양으로 모서리부가 날카로우며 길이가 선명하고 다른 부분의 반사광이 없이 외관이 깨끗하다. 하지만 시험후인 (b)에서는 모서리에 마멸흔적과 표면에 많은 난반사 흔적을 관찰할 수 있다. Fig. 3은 Fig. 2의 시료를 확대하여 촬영한 사진으로 돌출부분(A)에서는 시험후에 마멸흔적이 관찰되지만 함몰부분(C)에는 초기의 늘림 흔적이 그대로 보존되어 있다.

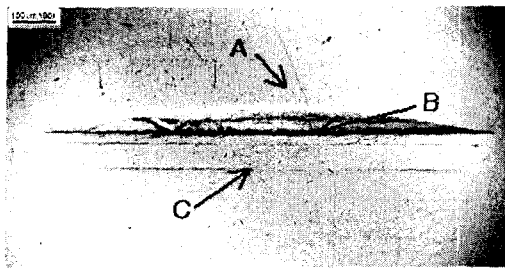


(a) Before test

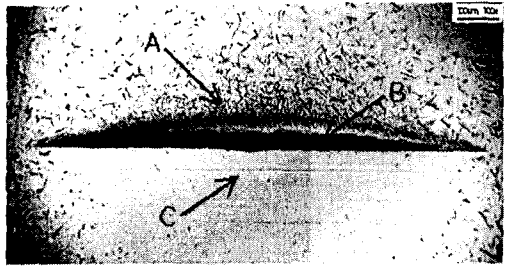


(b) After test

Fig. 2 Change of ball dents.

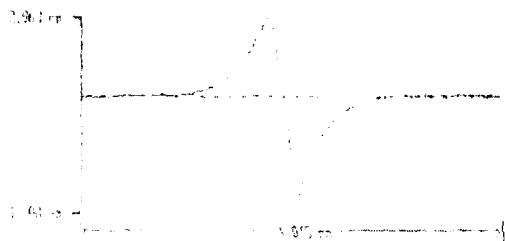


a) Before test

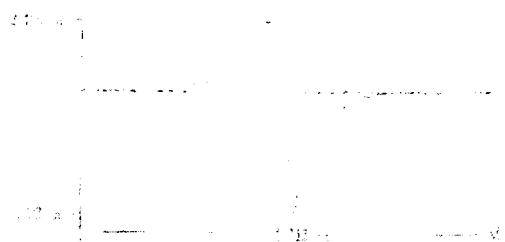


b) After test

Fig. 3 N type dents on ball.



a) Before test



b) After test

Fig. 4 Change of ball dents.

Fig. 4는 시험전·후의 압흔의 단면을 형상 측정기로써 측정한 결과로서 단면이 "N"자와 유사하다. 여기서, 솟아오른 부분은 Fig. 3에서 A부분이고 압흔생성시 웨도륜의 턱모서리에

의해서 눌러진 부분은 B에 상당한다. 시험전에는 Rp(돌출량)와 Rt(최대 골-산과의 거리)가 각각  $2.92\mu\text{m}$ ,  $7.24\mu\text{m}$ 이었으나 시험후에는  $2.03\mu\text{m}$ 와  $5.94\mu\text{m}$ 으로 각각 24%와 31%가 감소하였다. 시험후 압흔의 산(Edge)부가 뚜렷하게 감소한 것은 금속면간의 직접접촉에 의해서 압흔에 소성변형을 일으킬 수 있을 정도의 높은 응력이 작용한 것으로 추정된다. 또한, 압흔주변에 변색, 많은 굽힘과 마멸흔 등이 존재하는 것은 베어링의 운전시에 발생한 미끄럼 때문으로 생각된다.

Table 2. Dent size change.

Test number	Before ( $\mu\text{m}$ )		After ( $\mu\text{m}$ )		Change (%)	
	Rp	Rt	Rp	Rt	Rp	Rt
1	0.51	1.44	0.41	1.16	20.2	19.3
2	0.52	1.09	0.42	0.99	19.5	9.4
3	0.70	1.58	0.58	1.30	16.7	17.8
4	0.81	1.86	0.69	1.59	14.7	14.2
5	1.55	3.67	0.86	2.26	44.7	38.5
6	1.59	3.96	1.27	3.22	20.3	18.5
7	1.60	3.75	1.39	3.21	13.1	14.4
8	1.66	4.01	1.28	3.21	23.1	20.0
9	1.69	4.05	2.00	5.20	-18.4	-28.5
10	2.00	4.39	1.82	4.60	9.40	-4.8
11	2.66	6.19	1.41	3.16	47.1	49.0
12	2.66	6.37	2.19	5.91	18.0	7.30
13	2.74	6.35	1.57	4.40	42.7	30.7
14	2.83	6.83	1.93	5.38	31.9	21.2
15	2.84	6.47	1.75	4.69	38.5	27.6
16	2.88	6.71	1.70	4.81	41.0	28.3
17	2.91	6.98	1.86	5.06	36.3	27.5
18	2.92	7.24	2.03	5.49	30.5	24.2
19	2.96	7.27	2.19	5.91	26.3	18.8
20	3.15	7.50	1.70	4.81	46.1	35.8
21	3.42	8.11	2.00	5.20	41.5	35.9
22	3.48	8.45	2.03	5.49	41.8	35.0

Table 2.에는 시험전·후 압흔에 대한 Rp 및 Rt, 이의 변화율을 압흔의 크기가 작은 것부터 순서대로 나타내었다. 시험전 압흔의 크기는 Rp로는  $0.51\mu\text{m}$ 부터  $3.48\mu\text{m}$ 까지, Rt로는  $1.09\mu\text{m}$ 에서  $8.45\mu\text{m}$ 까지였고, 이의 최대변화율은 Rp값으로는 47.1%, Rt값으로는 49.0%였다. 운전중에 붙은 베어링 내부에서 웨도륜과 접촉

하므로 주로 돌출부분에는 압축응력이 작용하여 시험후의 압흔의 크기는 시험전보다 작을 것으로 예상된다. 하지만 9번 시료의 변화율이 음(-)의 값을 나타내는 것은 측정초기위치선정에 따른 오차 때문으로 추정된다.

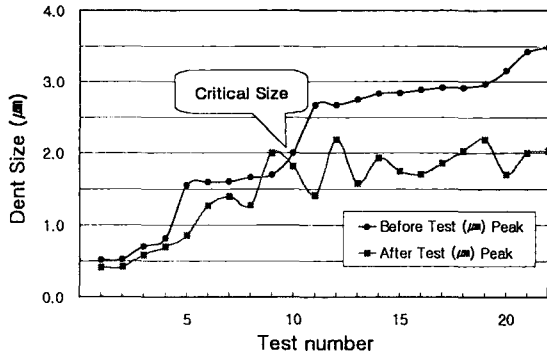


Fig. 5 Change of dent sizes before and after test.

Table 3. Average dent size change.

Initial dent size	Average change (%)		
	Rp	Rt	Rate (Difference)
Below 2μm	20	12	4 (0.115μm)
Above 2μm	37	28	8 (0.923μm)

한편, 시험후 압흔의 크기는 초기의 크기에 따라서 상당히 다른 거동을 나타낸다는 것을 시료별로 나타낸 Fig. 5에서 쉽게 알 수 있다. 즉, 초기 크기가 대략 2μm인 경우를 경계로 이보다 작을 경우에는 크기가 유지되지만 클 경우에는 시험후에 압흔의 크기가 크게 감소하고 있다. 또한, 초기 압흔의 크기가 2μm이상인 경우에는 초기의 크기와 크게 상관없이 시험후에는 대략 2μm정도로 수렴되는 경향을 나타내고 있다. 이러한 결과에서 압흔은 크기가 2μm정도를 경계로 서로 다르게 거동하는 것을 의미하며 이는 3.1에서의 수명시험에서 대략적으로 추정한 1.0~3.0μm의 임계압흔 크기와 일맥상통하는 결과이다.

Table 3.에는 이러한 결과를 요약하여 나타

낸 것으로 초기 압흔의 크기가 2μm 이하인 경우에는 Rp의 변화율이 약 20%인 반면에 2μm 이상인 경우는 약 37%에 달하였다. 이를 Rt의 변화율로 나타내면 각각 12%와 28%에 해당된다. 압흔의 크기 2μm를 경계로 하여 Rp와 Rt의 평균변화율은 2μm이하에서는 4% 정도인 반면에 2μm이상에서는 8%로 2배정도 높으며, 이를 평균크기 차이로 나타내면 2μm이하인 경우에는 0.115μm 정도이지만 2μm이상에서는 0.923μm로 대략 8배 정도이다. 즉, 압흔의 크기가 큰 경우에는 베어링의 운전에 의해서 표면으로부터 돌출된 량에 대한 변화가 크다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 압흔의 전사와 조기파손

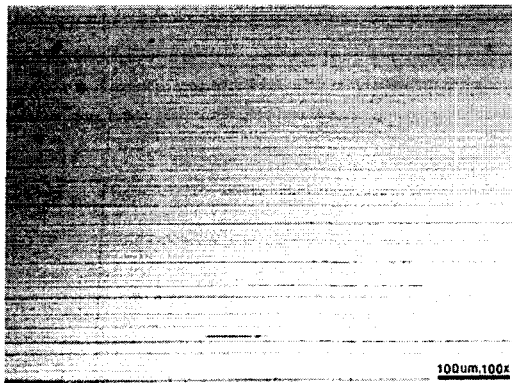
볼의 압흔이 상대부품인 궤도륜에 전사되어 조기파손을 유발시키는지 여부를 확인하기 위하여 성능시험한 후 이들의 형상변화를 측정하고 내·외륜의 표면을 조사하였다.

Fig. 6은 압흔이 없는 볼을 사용하여 1시간 동안 시험한 궤도면으로 시험전과 차이가 거의 나타나지 않고 있다. 그림에서 가로방향의 선은 볼의 공전방향과 일치하는 연삭가공흔적으로 표면의 Rt는 0.3μm, 거칠기는 0.03μmRa 정도로 이는 일반적으로 베어링 운전시에 형성되는 EHL 유막두께보다는 작은 크기이다.

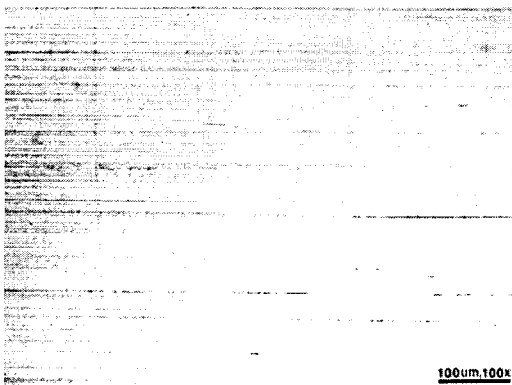
Fig. 7은 압흔이 있는 볼을 장착한 베어링의 시험후 궤도륜 표면에 대한 사진으로 볼의 압흔이 궤도륜에 전사되었음을 보여주고 있다. 특히, 전사된 압흔은 볼 압흔의 돌출부 형상(Fig. 2, Fig. 3의 A부 참조)과 동일하게 직선 형태를 나타낸다. 또한, 전사된 압흔은 내륜의 전궤도륜에서 동일한 형태로 나타나고 있는 반면에 외륜의 궤도륜에는 부하영역에서만 집중되는 것은 베어링의 운전특성과 일치하는 결과이다. 볼 이동궤적부에서의 길이 0.5~1mm, 폭 3~10μm 정도의 전사된 압흔은 볼의 구름방향보다 직각방향으로 많이 발생하였다. 참고로 초기 볼압흔의 길이는 1~2mm정도였다. 궤도부분의 거칠기를 측정한 결과, 전사된 압흔의 깊이는 0.3~0.8μm정도였다.

Fig. 8은 전사된 압흔이 포함된 궤도륜의 형상을 나타낸 것으로 압흔의 최대깊이는 0.84

$\mu\text{m}$ 이다. 이 깊이는 초기 볼 압흔의 돌출량  $2.66\mu\text{m}$ 의 30%정도에 해당하며, 이로부터 볼 압흔의 돌출부분 일부가 상대면인 궤도륜에 각인되어 소성변형이 발생한 것으로 추정된다.



a) Before test



b) After test

Fig. 6 Tested raceway without dent ball.



Fig. 7 Tested raceway with dent ball.

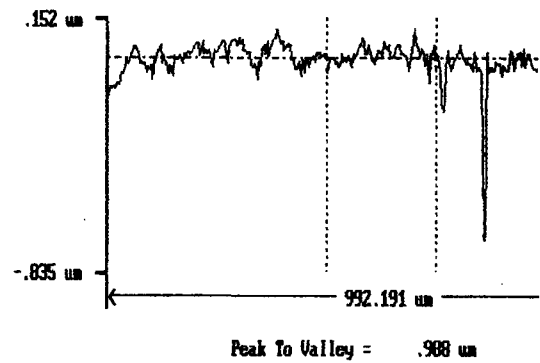


Fig. 8 Reprinted dents on raceway.

#### 4. 결론

본 논문에서는 구름베어링의 조기파손에 영향을 미치는 임계압흔의 크기와 파손기구를 규명하기 위하여 압흔이 있는 볼을 채용한 시험용 베어링으로 수명시험하고 압흔의 변화를 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 볼의 압흔은 베어링을 조기파손에 이르게 하는 중요한 원인중의 하나이며, 이의 크기(기준면에서의 돌출량)가 클수록 베어링의 수명은 감소하였다. 특히, 볼에 압흔이 있었음에도 불구하고 내륜이 가장 많이 파손되었다.

2. 볼베어링에서는 수명에 영향을 미치는 압흔의 최소임계크기가 존재하며, 이는 기존의 연구결과와 정성적으로 일치하였다. 본 논문에서 시험한 깊은홈 볼베어링에 대한 임계압흔의 크기는  $2\mu\text{m}$  정도로 매우 작았다.

3. 깊은홈 볼베어링의 조기파손은 베어링의 운전에 따라 볼에서 궤도륜으로 압흔이 전이되는 압흔의 전사현상과 직접적인 관련이 있음을 처음으로 규명하였다.

4. 본 논문의 결과는 구름베어링의 수명향상과 신뢰성향상에 크게 기여할 것으로 기대되며 상세하고도 정량적인 결과의 도출을 위해서 추가적인 연구가 요구된다.

#### 후 기

본 논문의 일부는 과학기술부·한국과학재단 지정 항공기부품기술연구센터의 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Lorosch, H., Influence of Load on the Magnitude of the Life Exponent for Rolling Bearings, ASTM STP 771, pp.275~292, 1982.
2. Ioannides, E. and Harris, T. A., A New Fatigue Life Model for Rolling Bearings, Trans. ASME., Journal of Tribology, Vol.107, pp.367~378, 1985.
3. Webster, M. N., Ioannides, E. and Sayles, R. S., The Effects of Topographical Defects on the Contact Stress and Fatigue Life in Rolling Element Bearings, Proceedings 12th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Elsevier, pp.121~131, 1985.
4. Sayles, R. S. and Ioannides, E., Debris Damage in Rolling Bearings and its Effect on Fatigue Life, Trans. ASME, Journal of Tribology, Vol.110, pp.26~31, 1988.
5. Ai, X., Effect of Slide-to-Roll Ratio on Interior Stresses around a Dent in EHL Contact, STLE Tribology Trans., Vol.39, pp.881~889, 1996.6. Fujii, Y. and Maeda, K., Flaking Failure in Rolling Contact Fatigue Caused by Indentation on Matin Surface[I], Wear, Vol.252, pp.787~798, 2002.
7. Fujii, Y. and Maeda, K., Flaking Failure in Rolling Contact Fatigue Caused by Indentation on Matin Surface[II], Wear, Vol.252, pp.799~810, 2002.
8. Fujii, Y. and Maeda, K., Flaking Failure in Rolling Contact Fatigue Caused by Indentation on Matin Surface[III], Wear, Vol.252, pp.811~823, 2002.
9. 현준수, 박태조, 자동차용 깊은홈 볼베어링의 조기파손 : 1보 - 파손기구의 규명, 한국윤활학회 제37회 추계학술대회 논문집, 2003.