

DOI <http://dx.doi.org/10.9725/kstle.2014.30.6.350>

## 자동조심 롤러 베어링의 재제조 공정 및 피로수명 향상

다리스렘 스투멩다와 · 아마노프 아웨즈한 · 김준형 · 이승철 · 최갑수 · 편영식<sup>†</sup>

선문대학교 기계공학과

### Remanufacturing Process and Improvement in Fatigue Life of Spherical Roller Bearings

Shirmendagva Darisuren, Auezhan Amanov, Jun-Hyong Kim, Seung-Chul Lee,  
Gab-Su Choi and Young-Sik Pyun<sup>†</sup>

*Dept. of Mechanical Engineering, Sun Moon University, Asan 336-708, Korea*

(Received; September 23, 2014 Revised; November 2, 2014; Accepted; November 5, 2014)

**Abstract** – This study proposes a sustainable bearing remanufacturing process using the ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) technique. The UNSM technique is a newly developed and sophisticated surface modification technique that can increase the mechanical properties and improve the friction and wear performance of materials. Taking advantage of the bearing manufacturing process is the most significant way of optimizing the life of a bearing. The proper maintenance and usage of repaired bearings can increase their life to be equal to or greater than that of new bearings. This paper discusses the restoration of certain mechanical properties of worn, damaged, and discarded bearings, and suggests a remanufacturing process for used bearings, which can impart them with a lifespan equivalent to that of new bearings. The most damaged part of the discarded bearings is the raceway, which is the site of accumulated fatigue. The existing polishing or barrel finishing processes can recover the accumulated fatigue only partially. Rolling contact fatigue tests performed on UNSM-treated new and used specimens polished after  $4 \times 10^6$  cycles reveal that UNSM-treated new specimens exhibit the longest fatigue life compared to other specimens. This study verifies the proposed complete fatigue recovery process, which can increase the fatigue life of used bearings to a level greater than that of new bearings.

**Keywords** – spherical roller bearing (자동조심 롤러 베어링), bearing raceway (베어링 궤도륜), ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM, 초음파나노표면개질), rolling contact fatigue (RCF, 구름 접촉 피로)

#### 1. 서 론

FAG, SKF, TIMKEN, BRENCO 등과 같은 국외 유명 베어링 제조 기업들은 자원과 비용 절감을 위하여 베어링 재제조를 수행하고 있으며, 베어링 재제조 산업 육성에 앞장서고 있다. 전통적인 방법으로 재제조된 베어링 수명은 신제품 대비 87~99%까지 회복되며, 선진국에서는 항공기, 철도 차량, 선박 등 여러 분야에 재제조 베어링을 사용하고 있다. Glenn Research

Center에서 발표된 논문에서는 재제조베어링 생산비용은 신제품 대비 53~82%까지 절감할 수 있다는 결과를 나타내었고, 이러한 경제적 이득이 선진 국가에서 앞장서서 베어링 재제조를 수행하게 만드는 원인이기도 하다[1].

그러나 국내의 경우, 자체 개발된 베어링 재제조 기술이 있음에도 불구하고, 노후된 베어링은 산업계에서 요구하는 수준의 재제조 적용조차 이루어지지 못하고 폐기되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 국내 특허(베어링 재제조 방법, 101341100) 기술을 이용하여 자동조심 롤러 베어링의 초음파나노표면개질(ultrasonic nanocrystal surface

<sup>†</sup>Corresponding author : [pyoun@sunmoon.ac.kr](mailto:pyoun@sunmoon.ac.kr)  
Tel: +82-41-530-2333, Fax: +82-41-530-8018

modification, UNSM) 재제조 공정 적용을 통한 수명 향상과 그에 따른 비용절감 효과를 확인하여, 국내에서 폐기되는 베어링의 재제조 가능성을 살펴보았다. 재제조하고자 하는 베어링은 주로 기어박스, 풍력터빈, 펌프, 환풍기 및 송풍기, 건설장비, 제지설비, 철강산업장비, 철도차량 등 여러 분야의 부속 부품으로 사용되고 있다. 본 연구의 목적은 폐기된 자동조심 롤러 베어링의 성능 및 수명을 신제품베어링과 동등하거나 향상될 수 있도록 초음파나노표면개질 재제조 공정 기술을 활용하여 실제 재제조하는 것이다.

## 2. 실험 절차

### 2-1. 초음파나노표면개질 기술

UNSM은 초음파 진동에너지를 응용하여 아주 큰 정적 및 동적 하중이 부가된 볼로써 1초에 20,000번 이상의 타격(1,000~100,000회/mm<sup>2</sup>정도)을 금속 표면에 주어, 강소성변형(severe plastic deformation, SPD) 및 탄성변형을 발생시키고, 이로 인해 표층부의 조직을 나노결정조직으로 개질함과 동시에 심층부에 큰 압축잔류응력 등을 부가하는 한국 특허기술이다. UNSM 기본 원리는 Fig. 1과 같다[2].

연마된 표면에 UNSM 처리를 하면 마이크로 덩굴이 생성되면서 균일한 패턴을 형성하게 되고, 이 표면은 연마면보다 거칠기가 감소된다. 더불어 나노 구조화, 표면경도 향상, 압축잔류응력이 형성된다[2].

### 2-2. 베어링 재제조 공정

기계 제품의 수명은 무한하지 않기 때문에, 제품 자체나 부품들은 한번 이상의 교체 주기가 발생한다. 베어링 역시 사용 조건 및 윤활 조건 등이 최적의 상태라도 언젠가는 파손되거나 노후화되어 교체할 시기가

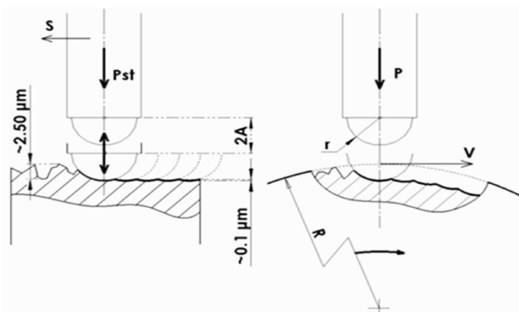


Fig. 1. Basic mechanism of UNSM technique.

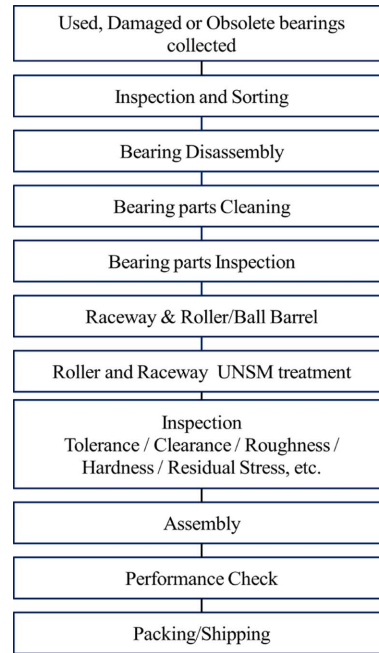


Fig. 2. Bearing remanufacturing process.

찾아온다.

상기와 같이 파손되거나 노후화된 베어링의 경우, 볼 또는 롤러가 접촉되는 내측링 및 외측링의 표면층에 많은 피로가 누적되어 있고, 더 나아가 깨지거나 파인 형태와 같은 손상이 존재한다. 상기와 같은 베어링을 재제조하기 위해 개발된 공정은 다음 Fig. 2와 같다[3-5].

### 2-3. 자동조심롤러베어링 재제조

UNSM기술을 이용한 재제조 공정과 전통적인 재제조 공정의 차이점은 베어링의 내측링과 외측링의 레이스웨이를 연마 및 폴리싱 후 UNSM 처리하는 것이다. 본 연구에서 사용되는 베어링은 FAG24020자동조심 롤러 베어링이며, UNSM 공정 조건은 다음 Table 1과 같다. 내측링 및 외측링의 UNSM 조건이 동일할 수

Table 1. UNSM treatment parameters of inner and outer raceways

Raceway	Amplitude [μm]	Load [N]	Speed [rpm]	Number of strikes, [strikes/mm <sup>2</sup> ]
Inner	30	40	15	3033
Outer		30	10	3211

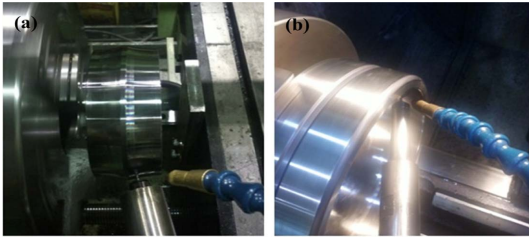


Fig. 3. UNSM treatment process: inner (a) and outer (b) raceways.

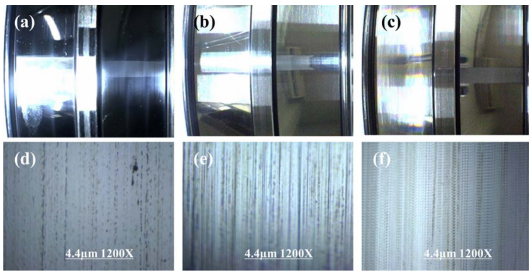


Fig. 4. Inner raceway surface photography and microstructure of the used (a, d), polished (b, e) and UNSM-treated (c, f) spherical roller bearings.

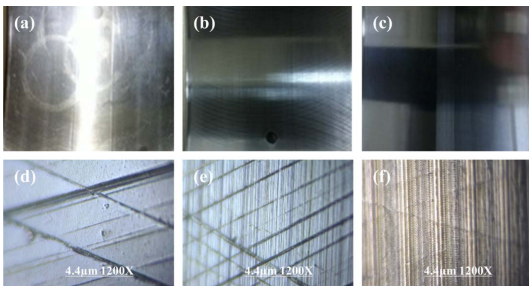


Fig. 5. Outer raceway surface photography and microstructure of the used (a, d), polished (b, e) and UNSM-treated (c, f) spherical roller bearings.

있도록 1 mm<sup>2</sup> 면적당 UNSM 타격횟수를 10%이내인 각각 3,033번과 3,211번으로 맞추었다. Fig. 3은 실제 UNSM 기술을 적용하는 모습이다.

Fig. 4 및 Fig. 5는 여러 공정으로 얻어진 베어링 내측링 및 외측링의 레이스웨이를 거시적 모습 (a, b, c)과 광학현미경을 통한 미시적 모습 (d, e, f)으로 나타내었다. (a, d)는 사용 표면, (b, e)는 폴리싱 표면, (c, f)는 UNSM 표면이고, 특히 (f)에서는 마이크로 딤플이 생성되었다.

상기와 같이 FAG24020자동조심 롤러 베어링의 내측링 및 외측링은 UNSM 기술을 활용하여 재제조를

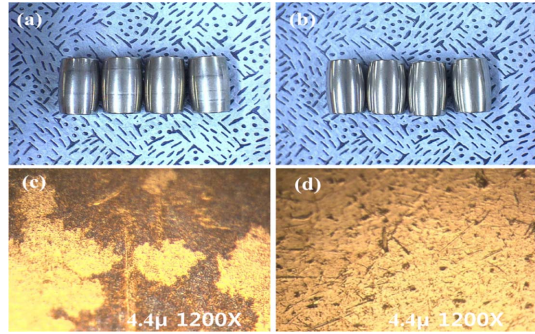


Fig. 6. Roller photography and microstructure of the used (a, c) and polished (b, d) of spherical roller bearings.

Table 2. Surface hardness and roughness of bearing roller

	Used	After barrel polishing
Hardness [HRC]	50.99	51.51
Roughness (R <sub>a</sub> ) [μm]	0.100	0.097

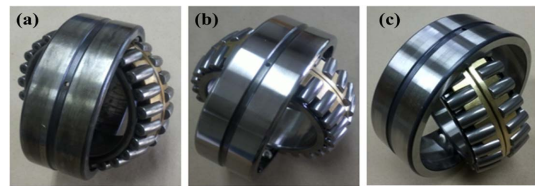


Fig. 7. Comparison of the used (a), remanufactured (b) and new (c) spherical roller bearings.

수행하였지만, 상대적으로 상태가 좋은 롤러의 경우 바렐 연마를 통해 재제조를 수행하였다. Fig. 6은 롤러의 바렐 연마 전/후를 보여주며, Table 2는 바렐 연마 전/후의 롤러의 표면경도 및 표면거칠기를 나타낸다. 바렐 연마 후 롤러 표면의 거칠기는 감소되었고 경도는 향상되었다.

Fig. 7은 FAG24020 자동조심 롤러 베어링의 비교 사진이며, 노후 베어링 (a), UNSM 기술 적용한 재제조 베어링 (b), 신품 베어링 (c) 이다.

2-4. 시험

2-4-1. 구름접촉피로 시험

SUJ2 보다 경화능이 좋은 SUJ3는 대형 볼 및 대형 롤러의 소재로 사용된다. 구름접촉피로 (rolling contact fatigue, RCF) 시험 소재는 진공침탄열처리된SUJ3를 사용하였다. 시험의 형상 및 크기는 ASTM G99 규격

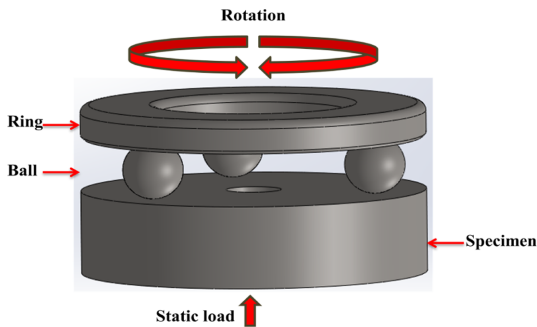


Fig. 8. Schematic view of a RCF tester.

Table 3. RCF test specimens

Designation	Specimen type
S1	New
S2	UNSM-treated
S3	Polished after RCF tests
S4	UNSM-treated S3

Table 4. RCF test conditions

Contact	Ball diameter [mm]	Contact stress [GPa]	Speed [rpm]	Lubrication
3-ball	7.14	4.6	1,500	Oil

을 참고하여 선정하였고, Fig. 8은 시험 방법을 도식화하였다.

피로가 누적된 표면층에 대한 UNSM 적용 효과를 확인하기 위하여 시편을 아래 Table 3과 같이 분류하였고 시험 조건은 Table 4와 같다.

모든 시편의 표면거칠기 값은 Ra 0.15~0.2 μm 내외로 동일하게 맞추었고, 표면경도 값은 S1 약HRC 63, S3 약HRC 61, S2 및 S4 HRC 64~65.5이다[6].

2-4-2. 베어링 성능 및 수명 시험

본 시험에서는 개발된 재제조 공정 검증을 위하여 FAG24020의 재제조 베어링 및 신품베어링에 대한 비교 시험을 진행하였다. 시험할 베어링을 다음 Table 5와 같이 분류하였고 시험 조건은 Table 6과 같다.

베어링 내구성 피로시험기에서는 진동, 시간, 토크, 온도 등을 설정할 수 있다. 이 시험기의 하중은 1~300 kN, 회전속도는 1~270 rpm까지 조정이 가능하다.

Table 5. Spherical roller bearings

Designation	Bearings
BR1	New
BR2	UNSM-treated
BR3	Polished after using
BR4	UNSM-treated after polishing

Table 6. Spherical roller bearing life test conditions

Time [h]	Load [kN]	Speed [rpm]	Lubrication
83.24	255	200	oil



Fig. 9. Appearance of bearing control board (a) and durability tester (b).

다. 베어링 내구성 피로시험기의 외관은 Fig. 9와 같다.

상기 자동조심 롤러 베어링의 내측링과 외측링 레이스웨이 비교 모습은 Fig. 10과 같다. UNSM 적용된 재제조 및 신품 베어링의 내측링 및 외측링 레이스웨이에서 마이크로 딥플이 생성된 것을 확인할 수 있었다. 또한 폴리싱 및 연마한 레이스웨이보다 표면거칠기 및 표면경도가 향상되었고, 압축잔류응력이 부가되었다.

Fig. 10의 (BR1a)는 신품 베어링 내측링 레이스웨이, (BR1b)는 신품 베어링 외측링 레이스웨이, (BR2a)는 신품 베어링에 UNSM 기술을 적용한 베어링 내측링 레이스웨이, (BR2b)는 신품 베어링에 UNSM 기술을 적용한 베어링 외측링 레이스웨이, (BR3a)는 폴리싱을 통한 재제조 베어링 내측링 레이스웨이, (BR3b)는 폴리싱을 통한 재제조 베어링 외측링 레이스웨이, (BR4a)는 UNSM 기술을 통한 재제조 베어링 내측링 레이스웨이, (BR4b)는 UNSM 기술을 통한 재제조 베어링 외측링 레이스웨이 등이다.

Table 7은 시험 베어링의 내측링과 외측링 레이스웨이 표면의 경도 및 거칠기를 나타내었다. UNSM 적용

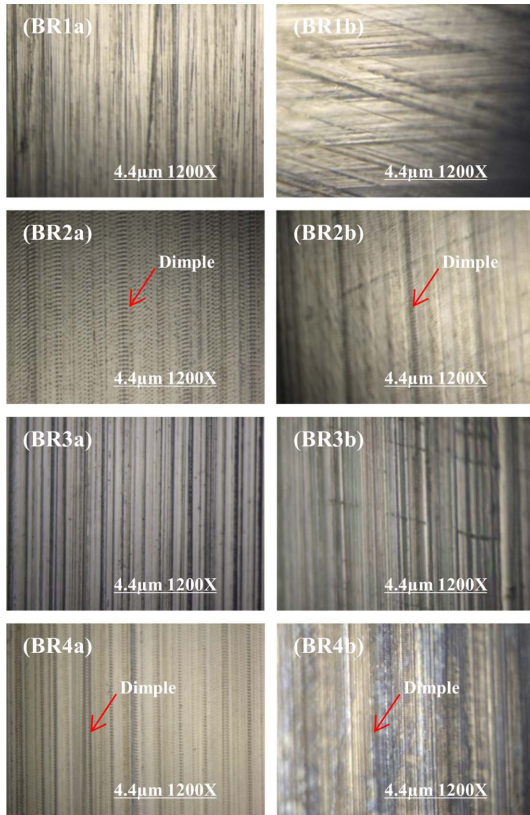


Fig. 10. Optical microscopic images of inner (a) and outer (b) raceways of spherical roller bearings.

Table 7. Surface hardness and roughness of inner and outer raceways of spherical roller bearings

	Inner raceway		Outer raceway	Radial clearance [mm]
	Hardness [HRC]	Roughness ( $R_a$ ) [ $\mu\text{m}$ ]	Roughness ( $R_a$ ) [ $\mu\text{m}$ ]	
BR1	61.3	0.120	0.185	0.10~0.11
BR2	62.3	0.073	0.070	0.11~0.12
BR3	60.5	0.154	0.096	0.12~0.14
BR4	63.6	0.084	0.127	0.12~0.14

된 신품 베어링과 재제조 베어링은 경도가 증가되었다. 베어링 내측링 레이스웨이의 잔류응력을 측정하기 위하여 사용된 (X-ray diffraction, XRD) 잔류응력 측정분석기는 핀란드 Stresstech사 XSTRESS 3000이며, 재료 표면에서 작용하고 있는 특정방향의 응력상태를

Table 8. Comparison of compressive residual stress of inner bearing raceway

	Before UNSM [MPa]	After UNSM [MPa]
BR2	-516.35	-1095.75
BR4	-401.55	-1356.10

상기 장치를 통해 측정하였다. 측정 조건은 collimator 직경 2 mm에서 노출시간 20초, 직경 3 mm에서 노출시간 10초 조건으로 분석되었다. 내측링 레이스웨이의 압축잔류응력 값은 Table 8에 나타내었다.

신품베어링 및 재제조베어링의 내측링 레이스웨이에 대한 UNSM 처리 전/후의 압축잔류응력을 측정된 값을 비교하면, UNSM 적용된 신품베어링의 압축잔류응력은 적용되지 않은 것 보다 약 2.1배 증가하였고, UNSM 적용된 재제조베어링은 적용되지 않은 것 보다 약 3.4배 증가한 것을 확인하였다.

### 3. 시험 결과

#### 3-1. 구름접촉피로 시험 결과

Table 9는 시험의 피로수명 결과를 나타내었다. S1을 기준으로 S2는 2.18배, S4는 1.8배 향상되었고, S3는 1.9배 감소하였다.

#### 3-2. 베어링 시험 결과

베어링 시험 중 발생하는 진동이 0.4G를 넘어설 경우 시험이 정지되도록 하였다. Table 10을 보면

Table 9. RCF test results

Specimen type	Cycles to failure	Ratio [%]
S1	$4.641 \times 10^6$	100.0
S2	$1.0119 \times 10^7$	218.0
S3	$2.340 \times 10^6$	49.6
S4	$8.323 \times 10^6$	179.3

Table 10. Comparison of bearing fatigue life test results

	Time [h]	Cycles to failure	Ratio [%]
BR1	53:47	$6.454 \times 10^5$	100.0
BR2	83:24	$1 \times 10^6 \sim \text{run out}$	155.0
BR3	29:26	$3.532 \times 10^5$	45.0
BR4	57:37	$6.915 \times 10^5$	107.1

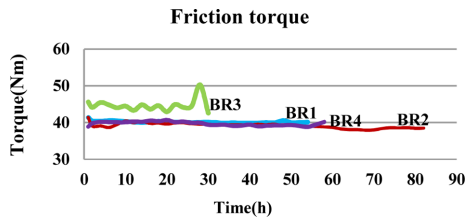


Fig. 11. Comparison of friction torque of BR1, BR2, BR3 and BR4 bearings.

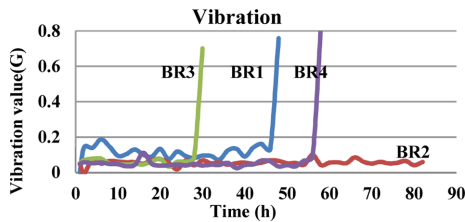


Fig. 12. Comparison of vibration value of BR1, BR2, BR3 and BR4 bearings.

UNSM 기술을 적용한 베어링은 재제조, 신품에 관계 없이 수명이 크게 늘어나는 것으로 나타났다. Table 10에서 BR4베어링(UNSM 적용된 재제조 베어링)의 수명은  $6.915 \times 10^5$  cycles, BR1베어링(신품베어링)의 수명은  $6.454 \times 10^5$  cycles로 획득되었으며, 이것을 통해 UNSM 기술을 이용한 재제조 공정이 베어링 성능 복원 및 향상에 효과가 있다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 베어링 시험시 측정된 마찰 토크를 나타낸 것이다. 시험시 발생된 BR3베어링의 마찰 토크는 BR1, BR2, BR4 베어링의 마찰토크 보다 증가된 경향을 나타내었다.

Fig. 12는 베어링 시험시 측정된 진동값을 나타낸 것이다. UNSM 적용된 베어링의 수명은 적용되지 않은 베어링보다 향상되었고, 진동값은 감소되었다. 특히, 시험시 발생된 BR4베어링의 진동은 BR1베어링의 진동보다 감소된 경향을 나타내었다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 UNSM 기술을 이용한 자동조심롤러 베어링에 재제조 공정을 실제 적용하여 베어링 수명 및 성능 시험을 수행하였다.

구름접촉피로 시험 결과, S2 수명은 S1보다 약 2.1 배 향상되었고, S4의 수명은 S3보다 약 3.5 배 향상되었다. 또한 S1 보다 S4의 수명이 약 1.8배 향상된 것으로 볼 때 UNSM 기술은 누적된 피로층을 회복시켜 성능을 향상시키는데 중요한 요소라고 판단된다.

베어링 시험 결과, 전통적 재제조 방법으로 재제조된 베어링의 수명은 신품 대비 87~99%까지 회복되지만, UNSM 기술을 이용한 재제조 방법으로 재제조된 베어링의 수명은 신품 대비 107% 이상 향상되는 것을 확인하였다. UNSM 기술을 적용한 베어링 레이스웨이는 표면경도 증가, 마이크로 딥플 생성, 압축잔류응력이 증가되며, 이것은 마찰 및 마모 특성 향상과 베어링 수명 향상에 큰 효과가 있다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 재제조 자동조심 롤러 베어링의 철강제조 설비 내 투입을 위하여, 철강제조 설비 업체와 협력하여 실제제품의 현장 시험을 진행 중에 있다.

#### References

- [1] Zaretsky, E. V., Branzai, E. V., "Effect of Rolling Bearing Refurbishment and Restoration on Bearing Life and Reliability", *NASA/TM*, 2005-212966, 2005.
- [2] Lee, C. S., Cho, I. S., Pyun, Y. S., Park, I. G., "Study of Inner Micro Cracks on Rolling Contact Fatigue of Bearing Steels Using Ultrasonic Nano-crystal-Line Surface Modification", *Key Engineering Materials*, Vol. 462-463, pp. 979-984, 2011.
- [3] Pyun, Y. S., Cho, I. H., Kim, J. H., Darisuren, S., Tominaga, Y., *Method for remanufacturing of bearing*, Sun Moon University., KR Patent No. 10-1341100, 2013.
- [4] Darisuren, S., Pyun, Y. S., Kim, J. H., Kayumov, R., "Spherical Roller Bearing Re-manufacturing Process Development", *Proceedings of the elementary Korean Society for Precision Engineering*, pp. 931-932, 2012.
- [5] Chu, H. J., Lee, S.D., Cho, Y. J., "The contact Fatigue Life Analysis of Rough Surfaces", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 21, No. 3, pp. 136-141, 2005.
- [6] Kim, J. H., Pyun, Y. S., Kayumov, R., "Bearing fatigue layer restoration by application of micro cold forging technology", *Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 21-25, 2012.