

## 자동차 변속기용 깊은 홈 볼 베어링의 내구수명 향상

백혜연<sup>1</sup> · 편정민<sup>1</sup> · 이대용<sup>1</sup> · 박태조<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>세플러코리아 연구소, <sup>2</sup>경상대학교 기계공학부 · 공학연구원

### Improving the Endurance Life of Deep Groove Ball Bearings for Automotive Transmission

Hye-Yeon Baek<sup>1</sup>, Jung-Min Pyun<sup>1</sup>, Dae-Yong Lee<sup>1</sup> and Tae-Jo Park<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>R&D Center, Schaeffler Korea Corp.

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, ERI, Gyeongsang National University

(Received September 25, 2015; Revised October 28, 2015; Accepted November 4, 2015)

**Abstract** – Automotive transmission systems are assembled with a large number of gears and shafts, and rolling bearings are used to ensure their smooth operation. Gear oil in the gear box contains solid particles such as wear debris from contacting gears and metallic chips. This particle-enriched lubricating oil can cause premature failure of the rolling bearings. Research aimed at improving the service life of these rolling bearings has been confined mainly to design and lubrication of the inner/outer rings and the rolling elements. In this paper, we redesigned the shape of the cage pocket of a deep groove ball bearing to reduce the premature failure due to particle contamination. Test bearings are assembled with this new cage design containing a hole punched in the cage pocket. Endurance tests are carried out using the contaminated lubricating oil with miracle grid as hard particle. The duration and damaged bearing component shapes are compared for two different cages. The  $B_{10}$  life of bearing with new cage is increased by about 66% compared to the conventional cage. This is because the hard particles can be easily discharged through the pocket hole without staying for a long time in the lubrication regions. This greatly decreases abrasive wear and dents on the highly stressed ball bearing surfaces. Therefore, the cage design of this study, containing a pocket hole, can significantly delay the premature failure of rolling bearings and improve the endurance life.

**Keywords** –abrasive wear(연삭마멸), ball bearing(볼 베어링), particle(이물질), premature failure(조기파손), transmission(변속기)

#### 1. 서 론

자동차의 변속기(Transmission)는 엔진의 출력에 맞게 자동차가 정속주행할 수 있게 하는 필수장치로 많은 종류의 기어(Gear), 축(Shaft)과 함께 이들을 지지하고 원활하게 운전되게 하는 구름베어링(Rolling bearing) 등으로 구성된다[1]. 그리고 이들 부품을 원활하게 운

행시키기 위하여 기어박스(Gear box)에는 윤활유(기어오일)가 채워져 있다. 변속기용 윤활유는 접촉응력이 가장 높은 기어에 적합하도록 개발되기 때문에 일반적인 윤활유에 비하여 점도가 상대적으로 높은 점이 특징이다. 특히, 기어박스에는 기어가 복잡하게 조합되어 있는 관계로 조립과정에서 칩(Chip) 등을 완벽하게 세척하기가 어려울 뿐만 아니라 자동차의 운행에 따라 구성부품으로부터 마멸입자(Wear debris)가 지속적으로 발생한다. 이러한 적용환경으로 인하여 기어박스에 설치된 구름베어링의 수명은 이론수명보다 한층 짧은 것으로 알려져 있다. Fig. 1은 조기파손된 변속기용 깊은 홈 볼 베어링(Deep groove ball bearing) 부품들의 표

\*Corresponding author : tjpark@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1623, Fax: +82-55-772-1577

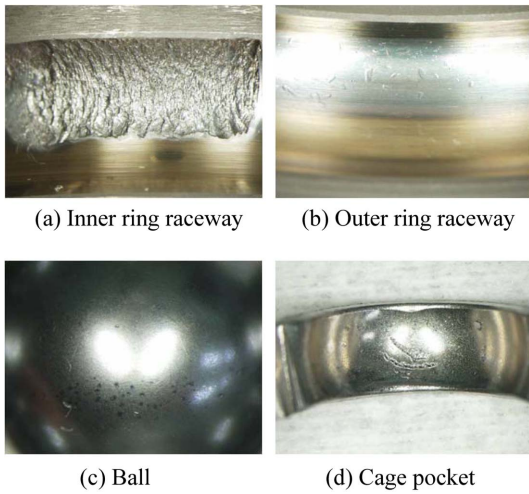


Fig. 1. Damaged bearing parts used in transmission.

면상태를 나타낸 그림으로 내용은 국부적인 플레이킹(Flaking)[2] 단계를 넘어선 총체적인 마멸파손이며, 외륜에서는 부분적인 플레이킹과 함께 (c)의 볼에서와 같이 압흔(Dent)이 관찰되었다.

지금까지 구름베어링의 조기파손을 유발시키는 원인으로 가장 많이 연구된 것은 윤활제의 오염, 마멸입자 등에 관련된 이물질(Particle)과 윤활면에 존재하는 압흔 등이다[3-8]. 윤활제에 이물질이 함유되면 피로수명이 현저하게 감소하는 것은 이것이 구름접촉면을 손상시키기 때문이다. 주로 이물질에 의해서 윤활면에 생성되는 압흔은 주변의 응력장 및 윤활상태를 열악하게 하여 조기파손을 유발시킨다. 이와 같이 이물질 환경에서 사용되는 구름베어링의 수명증대를 위하여 지금까지 수행된 연구의 대부분은 전동체와 내·외륜의 재질, 형상, 코팅(Coating) 및 열처리 방법 등에 집중되었으며, 결과가 베어링의 양산에서 적용되고 있다.

한편, 케이지(Cage, 혹은 리테이너(Retainer))가 구름베어링의 중요한 구성요소임에도 불구하고 내·외륜 사이에 배치되어 전동체의 간격을 일정하게 유지시키는 부품으로만 이해되고 있을 뿐 이의 형상이 윤활특성 및 수명에 미치는 영향에 대한 연구결과는 아직까지 발표되지 않고 있는 실정이다. Fig. 1(d)에 나타낸 케이지 포켓(Pocket)에서 관찰되는 미끄럼 흔적(Skid mark)과 연삭마멸(Abrasive wear) 등의 복합적인 마멸 흔적은 볼과 케이지 사이에 존재하는 이물질에 기인한 것으로 추정된다. 따라서 전동체, 내·외륜 및 케이지 사이로 유입된 이물질이 신속하게 배출되도록 설계하

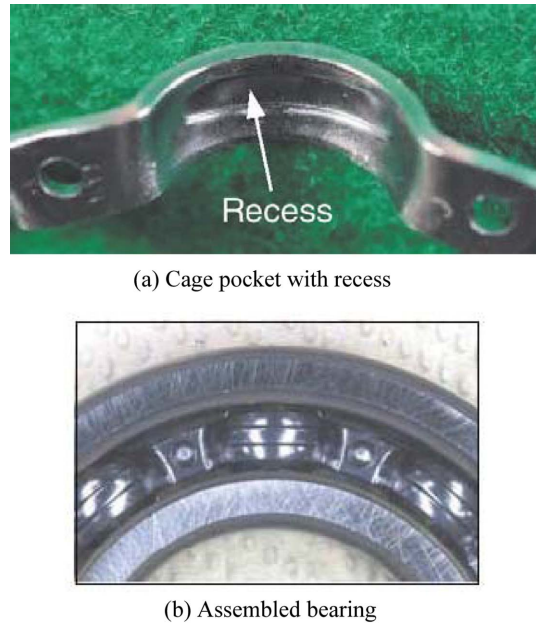


Fig. 2. Cage with recess in pocket [9].

는 것이 베어링의 조기파손을 방지하고 내구수명을 향상시키는데 필요하다. 참고로 구름베어링 제조업체인 NTN사[9]에서는 최근에 볼 베어링의 윤활특성을 향상시키기 위하여 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 케이지의 형상을 변경하였다. 즉, 케이지 포켓의 중앙부분에 리세스(Recess)를 원주방향으로 설계하여 볼과 케이지 사이의 윤활유 유동을 개선하면 베어링의 마찰 토오크가 25% 정도 감소한다는 결과를 제시하였지만 내구수명은 조사하지 않았다.

본 논문에서는 이물질 환경에서 사용되는 구름베어링의 조기파손을 방지하고 내구수명을 증대시키기 위한 방안으로 베어링 내부로 유입된 이물질에 의한 영향이 최소화되도록 케이지의 포켓 형상을 변경하고 이의 효과를 내구성 시험으로 확인하고자 한다.

## 2. 내구성 시험

### 2-1. 케이지 형상

Fig. 3에는 케이지의 포켓 형상이 베어링의 내구수명에 미치는 영향을 비교하기 위하여 새롭게 제작한 펀칭 홀(Punching hole)이 있는 케이지(이하 신규 케이지로 부름)를 나타내었다. 여기서, (a)와 (b)는 포켓의 단면형상과 리벳팅(Riveting)된 한 쌍의 케이지, (c)

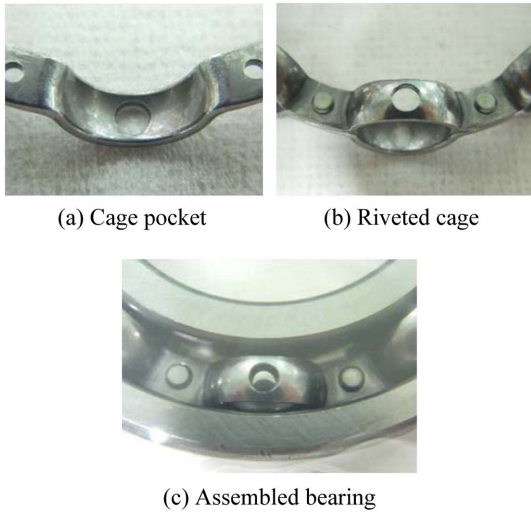


Fig. 3. New cage pocket with punching hole.

는 내·외륜 및 볼과 조립된 베어링 모습이다. 펀칭 홀을 설계한 이유는 윤활유가 베어링을 통과할 때 베어링 내부에서 발생한 마멸입자를 포함한 이물질이 윤활면 바깥으로 쉽게 배출되도록 유도하기 위함이다. Fig. 1(d)에 나타낸 포켓에 펀칭 홀이 없는 일반적인 케이지(이하 기존 케이지로 부름)와는 포켓 형상만 다를 뿐 나머지 치수는 동일하며, 재질은 냉간압연강판(SGCC)이다.

2.2. 시험방법

시험에 사용한 자동차의 변속기용 깊은 홈 볼 베어링의 사양 및 정격하중조건을 Table 1에 나타내었다. 이때, 이물질 환경에서의 기존 케이지와 신규 케이지의 수명을 비교하기 위하여 각 케이지는 동일한 Lot내의 내·외륜 및 볼을 이용하여 시험용 베어링을 조립한 후 시일(Seal)이 없이 개방된 상태로 내구수명 시험

Table 1. Specification of test bearing and load ratings

Items	Value
Designation	F-845409.KL
Bearing size	Ø45 × Ø85 × 17
Ball diameter	Ø13
Number of ball	9
Static load ratings	21,200 N
Dynamic load ratings	34,000 N

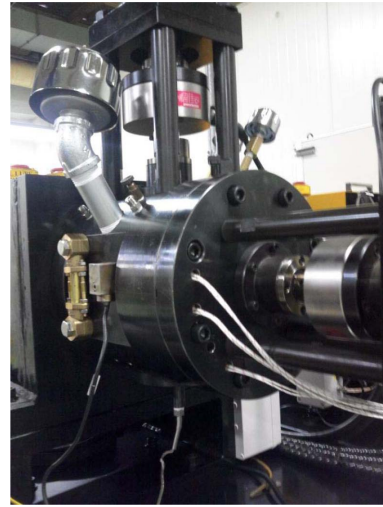


Fig. 4. Photo of endurance test apparatus.

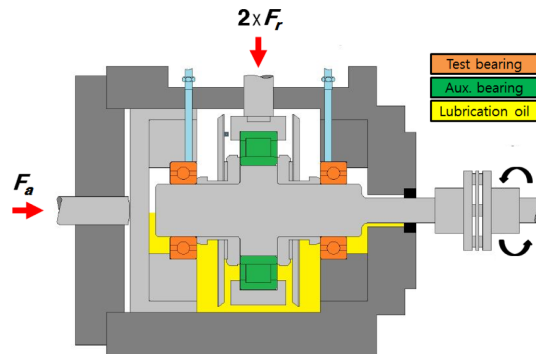


Fig. 5. Schematic diagram of test setup.

기(Fig. 4)에 장착하였다. Fig. 5는 시험기의 개략도를 나타낸 그림으로 상부에는 베어링에 하중을 가하기 위한 유압 액추에이터(Actuator)가 설치되어 있고 시험기의 좌·우에 시험용 베어링이 장착된다. 여기서, 베어링의 외륜은 하우징에 고정되고 내륜이 회전하는 형태이므로 시험기의 축에 베어링을 억지끼워맞춤하였다.

Table 2에는 시험조건을 나타내었다. 여기서, 베어링의 윤활방법은 자동차 변속기에서 가장 널리 사용되는 Oil Bath 방식을 채용하였다. 윤활유는 NISSAN NS-2 CVT Oil로 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 회전축의 중심부 높이까지 채웠으며, 유온은 변속기의 정상운전 상태에서의 최고온도인 120 °C를 유지시켰다. Table 3은 내구시험에 사용한 이물질의 사양을 나타낸 것으로 경도가 700~900 Hv인 Iron 재질의 Miracle grid이다. 입자의 크기는 50 µm이하와 50~100 µm의 2종류이며,

**Table 2. Specification of test conditions**

Items	Value / Condition
Radial load, $F_r$	12,695±254 N
Axial load, $F_a$	5,708 N
Rotational speed	2,000±40 rpm
Lubrication method	Oil bath
Oil brand	Nissan NS-2
Oil level	Shaft center height
Oil temperature	120±5 °C

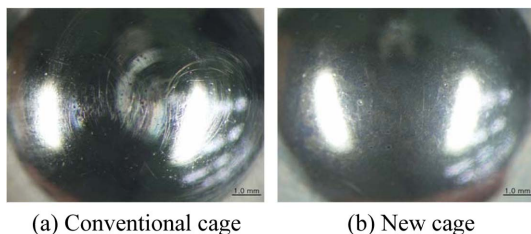
**Table 3. Specification of foreign particle**

Items	Condition	
Material	Miracle grid (Iron)	
Hardness	700~900 Hv	
Size	0~50 $\mu\text{m}$	50~100 $\mu\text{m}$
Amount	0.1455 g/l	0.0045 g/l

주입한 각각의 양(비율)은 윤활유 1 리터당 0.1455 g (97%)과 0.0045 g(3%)이다. 이 조건은 베어링이 운전되는 실제의 변속기 환경보다 한층 가혹한 조건이다. 시험에는 2개의 베어링을 1세트로, 기존 케이지 4세트와 신규 케이지 5세트를 다음과 같이 연속시험하였다. 베어링의 내구수명은 길들이기(Running-in) 기간 이후의 소음, 진동 및 온도 등에 표준치 이상의 변동이 발생하면 파손된 것으로 간주하여 시험을 중지하는 Sudden death 방식으로 결정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 6에는 길들이기를 마치고 동일 시간동안 시험한 조기파손되지 않은 베어링에서 분해한 볼의 사진을



**Fig. 6. Comparison of tested ball with cage type before bearing failure.**

**Table 4. Test results**

Cage type	Set no.	Running time [h]	Failed component
Conventional	C1	15.0	Inner ring
	C2	39.5	Balls
	C3	33.5	Inner ring, Balls
	C4	47.5	Inner ring
New	N1	45.0	Inner ring, Balls
	N2	116.2	Inner ring
	N3	78.8	Inner ring
	N4	43.5	Inner ring
	N5	44.1	Inner ring, Balls

케이지가 다른 경우에 대하여 서로 비교하였다. 기존 케이지를 사용한 베어링에서 많은 수의 압흔과 길이가 긴 긁힘자국(Scratch)이 관찰되는 것은 불과 케이지 사이로 유입된 이물질이 케이지 포켓에 갇혀서 쉽게 배출되지 않았음을 의미한다. 이와는 달리 신규 케이지에서는 상대적으로 압흔의 수가 작을 뿐만 아니라 긁힘자국은 거의 관찰되지 않았다. 이는 케이지 포켓에 가공한 펀칭 홀을 통하여 이물질이 쉽게 배출되었기 때문으로 추정된다. 따라서, 케이지 포켓의 펀칭 홀은 이물질 환경하에서 사용되는 구름베어링의 내구수명향상에 기여할 것으로 예상된다.

Table 4는 두 가지의 케이지 형상에 대한 내구시험 결과를 나타낸 것으로 파손유형은 볼, 내륜이 각각 파손된 경우와 내륜과 볼이 함께 파손된 경우의 3가지이다. 파손으로 판정되기까지의 운전시간은 기존 케이지는 15.0~47.5 시간인 반면에 포켓에 펀칭 홀을 가공한 신규 케이지에서는 43.5~116.2 시간으로 케이지의 형상에 따라서 큰 차이를 나타내었다. Fig. 7과 Fig. 8은 기존 케이지를 사용한 베어링(C3)과 신규 케이지를 사용한 베어링(N5)의 시험후에 분해한 부품모양을 각각 나타낸 것이다. 내륜과 볼에 비슷한 크기의 스포울링(Spalling)이 모두 발생하였지만 신규 케이지의 수명은 기존에 비하여 30% 이상 증가하였다. 특히, 기존 케이지의 포켓에서는 많은 수의 압흔과 긁힘자국이 관찰되었지만 신규 케이지에서는 거의 관찰되지 않은 것은 시험을 위하여 윤활유에 투입한 이물질 뿐만 아니라 내외륜과 볼에서 발생한 마멸입자가 펀칭 홀을 통해서 케이지 바깥으로 쉽게 배출되어 케이지의 연삭마

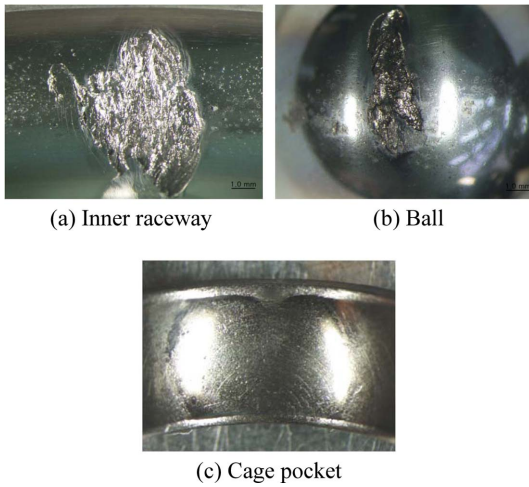


Fig. 7. Failed bearing parts of C3 case.

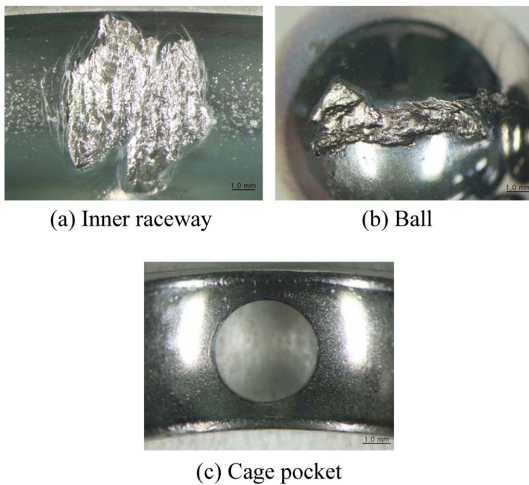


Fig. 8. Failed bearing parts of N5 case.

떨에 관여하지 않았음을 의미한다.

Fig. 9는 Table 4의 시험결과를 와이블(Weibull) 플롯[10]으로 나타낸 것으로  $B_{10}$  수명이 기존 케이지를 사용한 베어링에서는 23.82 시간인 반면에 신규 케이지의 경우에는 39.46 시간으로 66% 가량 크게 증가하였다.

이상의 결과에서, 포켓에 펀칭 홈을 설계한 신규 케이지는 마멸입자를 포함한 이물질이 펀칭 홈을 통하여 윤활면 바깥으로 쉽게 배출되게 하므로 내구수명이 증가하는 것을 확인하였다. 부가적으로 신규 케이지를 채용하면 항상 미끄럼운동이 발생하는 볼과 케이지 사이의 윤활유 전단에 의한 점성마찰을 줄일 수가 있

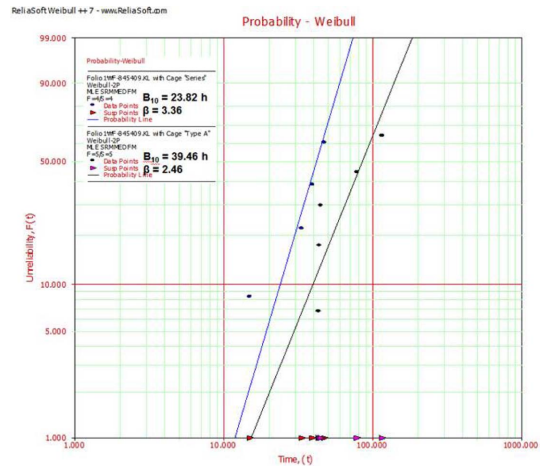


Fig. 9. Weibull plot of experimental data.

을 것으로 예상되므로 참고문헌[9]에서와 같이 베어링의 마찰 토크 저감도 가능할 것으로 기대된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 자동차 변속기용 깊은 홈 볼 베어링의 케이지 포켓 형상이 내구수명에 미치는 영향을 조사하기 위하여 케이지 포켓에 펀칭 홈이 있는 베어링을 새롭게 제작하고 실제 변속기의 기어박스과 유사하게 이물질이 함유된 윤활유를 사용하여 내구수명을 측정하였다. 이 결과, 케이지 포켓에 펀칭 홈을 가공하면 기존의 케이지에서 보다 내구수명이 크게 증가함을 확인하였다. 이는 예상한 것과 같이 베어링으로 유입된 이물질이 볼과 케이지 포켓 사이에 머물지 않고 펀칭 홈을 통하여 쉽게 빠져나가기 때문으로 판단된다. 따라서 본 논문의 결과는 구름베어링의 조기파손이 윤활유에 함유된 이물질에 기인한 경우의 베어링 수명향상에 크게 기여할 것으로 기대되며, 적용조건에 최적인 포켓의 형상설계를 위한 추가연구가 요구된다.

#### Acknowledgements

본 논문은 세플러코리아에서 수행된 연구결과입니다.

#### References

[1] Nangunheimer, H., et al., *Automotive Transmissions*:

- Fundamentals, Selection, Design and Application*, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2011. (ISBN 978-3-642-16213-8)
- [2] Neale, M. J., *The Tribology Handbook*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 1997. (ISBN 0-7506-1198-7)
- [3] Tallian, T. E., "Prediction of Rolling Contact Fatigue Life in Contaminated Lubricant - 2. Experimental," *Trans. ASME, J. Lubr. Technol.*, Vol. 98, pp. 384-392, 1976.
- [4] Hamer, J. C., Sayles, R. S. and Ioannides, E., "Deformation Mechanisms and Stresses Created by Third Body Debris Contacts and Their Effects on Rolling Bearing Fatigue", Proc. of the 14th Leed- Lyon Sympo. on Tribology, Lyon, France, September 1987.
- [5] Sayles, R. S. and Ioannides, E., "Debris Damage in Rolling Bearings and its Effect on Fatigue Life", *Trans. ASME, J. of Tribology*, Vol. 110, pp. 26-31, 1988.
- [6] Moyer, C. A., "The Influence of Debris on Bearing Performance: Chapter II", *SAE Technical Paper* 891906, 1989.
- [7] Hyun, J. S., Moon, H. K. and Park, T. J., "A Study on the Rolling Bearing Failure Mode of Automotive Transmission(1)," *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, *Spring Conference*, Vol. 1, pp. 406-411, 2001.
- [8] Fujii, Y., Maeda, K., "Flaking Failure in Rolling Contact Fatigue Caused by Indentation on Mating Surface(I). Reproduction of Flaking Failure Accompanied by Cracks Extending Bi-directionally Relative to the Load-movement," *Wear*, Vol. 252, pp. 787-798, 2002.
- [9] Sasaki, K., "Low-torque Deep-groove Ball Bearings for Transmissions", *NTN Technical Review*, Vol. 79, pp.78-82, 2011.
- [10] Abernethy, R. B., *The New Weibull Handbook*, 5th ed., SAE International, Florida, USA, 2004. (ISBN 0-9653062-3-2)
- [11] Jo, J. H., Rhim, Y. C., Lee, S. C. and Kim, C. H., "Development of Cryogenic Test Rig for Ball-Bearing and Evaluation of the Performance of the Prototype Ball-Bearing of Turbo Pump", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 28, No. 4, pp.167-172, 2012.
- [12] Baek, H. Y, *A Study on the Endurance Life Improvement of Deep Groove Ball Bearing under Debris Contamination*, Master's Thesis, Gyeongsang National University, Jinju, Korea, 2015.
- [13] Harris, T. A., *Rolling Bearing Analysis*, 4th ed., John Wiley & Sons, New York, USA, 2001. (ISBN 0-471-35457-0)