

내구시험을 통한 베어링의 열화 특성과 그리스의 화학적 열화 특성 연관성 분석

Correlation Analysis Between Chemical Degradation Characteristics of Grease and Degradation Characteristics of Bearing Through Durability Test

강보식^{1*}, 이충성¹, 류경하¹

Bo-Sik Kang^{1*}, Choong-Sung Lee¹, Kyung-Ha Ryu¹

〈Abstract〉

This paper introduces the effect of grease on the degradation characteristics of bearings used as key components of packaging equipment and automation systems. Bearings parts are installed to fix and support the rotating body of the system, and performance degradation of the bearings has a great effect on the life of the system too. When bearings are used in various devices and systems, the grease is applied to reduce friction and improve fatigue life. Determining the type of lubricant (grease) is important because it has a great influence on the operating environment and lifespan and ensures long lifespan of systems and facilities. However, studies that simultaneously compared and analyzed the change in mechanical degradation characteristics and the comparison of chemical degradation characteristics according to grease types under actual operating conditions are insufficient. In this paper, three types of small harmonic drive, high-load reducer, and low-load reducer grease used in power transmission joint modules are experimentally selected and finally injected into ball bearings with a load (19,500N) to improve bearing durability. Degradation characteristics were tested by attaching to test equipment. At this time, after the durability test under the same load conditions, the mechanical degradation characteristics, that is temperature, vibration according to the three greases types. In

1 한국기계연구원 신뢰성평가연구실

1* 교신저자, 한국기계연구원, 책임연구원
E-mail: kbs668@kimm.re.kr

1 Dept. of Reliability Assessment, Korea Institute of Machinery and Materials

1* Corresponding Author, Dept. of Reliability Assessment, Korea Institute of Machinery and Materials, Principal Researcher

addition, the chemical degradation characteristics of the corresponding grease was compared to present the results of mutual correlation analysis.

Keywords : Bearing, Mechanical Degradation of Bearing, Chemical Degradation of Grease, Durability

1. 서론

최근 공정설비 및 스마트 팩토리, 수소압축기 시스템의 구동 안전성 요구 외에 신소재 적용, 사용 환경의 변화 등으로 인하여 관련 부품 및 모듈의 열화가 시스템에 미치는 영향에 대한 열화특성 분석 요구와 이를 고려한 공정 및 자동화 설비 산업 현장에서 널리 적용되고 있는 시스템 구동부 또는 동력전달 모듈의 수명과 신뢰성 향상을 위한 요구가 날로 높아지고 있다.

이러한 수명 및 신뢰성 향상을 위해서는 생산 공정 현장에 사용되는 시스템 및 모듈부의 요소 부품 열화특성에 대한 검증 비교 요구와 고장 및 열화로 인한 설비 시스템의 작동 문제에 대한 연구가 체계적으로 이루어져야 하고, 각 요소부품의 정밀성 등의 성능 향상 외에 신뢰성 및 안전성 요구에 대응하기 위한 연구가 체계적으로 진행되어야 한다[1].

이와 관련하여, 공정설비 및 자동화 설비 시스템에서 널리 사용되고 있는 로봇 감속모듈의 핵심 요소부품인 베어링의 열화특성 연구를 본 연구의 테마로 결정하여 연구를 진행하였다[2,3].

시스템의 회전체부 고정 및 지지를 위해 장착되는 핵심 요소부품인 베어링의 성능 열화 및 수명에 미치는 영향의 주요 요인으로는 베어링의 구조와 재료, 조립 및 공차 조건, 하중 및 운용조건 최적 결정 등이 있으나, 유막 형성을 통한 마찰력 감소와 피로수명이 길어지도록 중요한 역할을 하

는 윤활제(그리스)의 종류 결정은 운전 환경 및 수명에 큰 영향을 미치며 시스템 및 설비의 장수명을 보장하게 된다[4].

하지만 연구의 대부분이 그리스에 대한 화학적 열화 특성과 온도 및 진동의 기계적 열화 특성, 수명시험, 가속 수명열화 특성에 대한 연구를 계속 진행하고 있으나, 동일부하조건에서의 적용 그리스 종류에 따른 기계적 열화 특성 변화와 화학적 열화 특성 비교를 동시에 비교 분석한 연구는 미흡한 실정이다[5,6,7].

따라서, 본 논문에서는 동력전달 조인트 모듈(Joint Module)에 사용되는 그리스 3종(소형 하모닉 드라이브용, 고 부하 감속기용 그리스, 저부하 감속기용 그리스)을 선정하여, 하중(19,500N) 볼 베어링을 윤활 특성 시험 메커니즘에 장착하고, 동일 부하조건하에서 내구시험한후, 그리스 3종에 따른 기계적 열화 특성(온도, 진동)과 해당 그리스의 화학적 열화 특성을 비교 분석한 결과를 제시하고자 한다.




2. 그리스 종류 선정 및 시험조건

2.1 그리스 윤활제 선정

본 논문에서 다루어지는 열화특성 분석에 활용하기 위한 그리스 선정은 시스템 공정 설비의 동력전달 핵심부인 조인트 모듈에 널리 주입되어 사

용되고 있는 그리스 중 고부하 및 저부하용 그리스 2종과 정밀 소형 드라이브에 적용되는 하모닉 드라이브용 그리스 1종을 선정하여 총 3종을 선정하였다[8].

Table 1. Selection results of testing grease

No	Test Sample	Grease Type	Test Module
1	Specimen 1	Grease for Harmonic Drives	
2	Specimen 2	Grease for Reducer [Heavy Load]	
3	Specimen 3	Grease for Reducer [Low Load]	

2.2 그리스 윤활제 열화 시험조건 결정

그리스 3종에 대한 열화특성 시험조건은 Table 2와 같으며, 베어링의 정격하중 및 적용 모듈의 사용시간을 고려하여 결정하였다.

시험을 위한 베어링은 산업 현장에서 많이 사용하고 있는 볼베어링을 선정하였고, 베어링 장착 및 그리스 주입이 가능한 테스트 모듈(Test Module)을 3종 제작하였으며 Fig. 1과 같다.

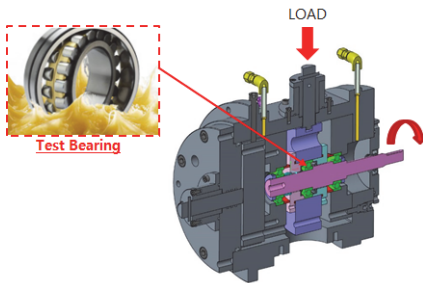


Fig. 1 Configuration of test module

Table 2. Testing condition

	Module 1	Module 2	Module 3
Test Speed (rpm)	2,500	2,500	2,500
Load (kgf)	585	585	585
Temperature Limit (°C) [Min/Max]	20/100	20/100	20/100
Torque Limit (N/m)	5.0	5.0	5.0
Acceleration Limit (G) [Max]	2.0	2.0	2.0
Testing Time (min)	4,020	4,020	4,020

Fig. 1에 그리스 열화 특성 확인을 위한 내구 시험을 위하여 3종의 테스트 모듈(Test Module)에 그리스를 주입한 시험베어링을 장착하고, 정격하중을 고려한 시험 하중 가압이 가능한 연결부를 연결하여 조립 완료한 테스트 모듈(Test Module) 3종은 Fig. 2와 같다.

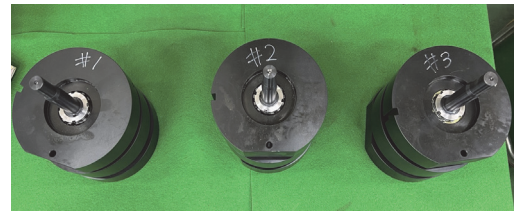


Fig. 2 Test module equipment of bearing durability

3. 열화특성시험 시험장치

3.1 시험장비 및 그리스 열화시험 베어링 장착 모듈

베어링 그리스 열화 내구 시험을 위한 시험장비는 Max 10kN을 가압할 수 있는 실린더와 12.5N의



Fig. 3 Test mechanism of bearing durability

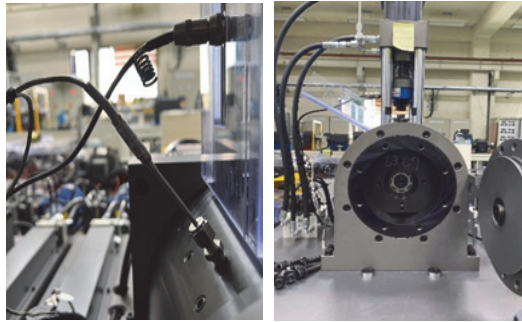


Fig. 4 Sensor mounting of test module equipment

로드셀, MAX 12,000 RPM을 가변 조작할 수 있는 사양으로 시험 메커니즘을 구성하였으며, Fig. 3과 같다[9].

베어링 시험중 열화로 인한 특성 확인 파라미터로 온도, 진동 그리고 토크를 측정할 수 있도록 센서를 설치하여 내구시험 기간중 실시간으로 데이터를 관찰할 수 있도록 Fig. 4와 같이 모니터링 시스템을 구성하였다.

일정부하조건하에서 Table 2의 조건으로 시험중 성능열화 특성을 확인할 수 있는 대표적인 파라미터는 온도와 진동이며, 이의 측정을 위해 각 테스트 모듈에 온도와 진동을 측정할 수 있도록 Fig. 4와 같이 센서를 삽입 및 장착하여 실시간으로 측정하였다. 특히 온도는 모듈 하우징의 표면



Fig. 5 Monitoring for durability test

이 아닌 그리스가 주입되어 있는 베어링의 실 표면 온도를 측정 가능토록 하였다.

Fig. 5는 열화 시험 제어 및 데이터 처리 모니터링을 나타내며, 그리스가 주입된 베어링의 경방향 수직 하중조건과 속도조건, 시험 중단시간 가능토록 부여한 후, 온도 및 회전토크, 진동을 측정할 수 있도록 제어 프로그래밍 하였다. 시험 베어링은 특정 온도상승 및 진동 조건 하에서 순간적으로 파손됨으로 열화 특성을 확인하기 위해서는 온도 및 토크, 진동시험조건외 최대 제한기준의 결정과 제어가 중요하다. 본 시험에서는 최대 온도 100℃, 최대토크 5 N·m 설정하여 최대기준 초과시 시험을 중단하고 열화 특성을 확인 할 수 있도록 하였다[10].

4. 시험결과 및 고찰

4.1 그리스 종류에 따른 기계적 열화특성 시험결과

그리스가 주입된 베어링이 작동중 열화가 발생하면, 마찰에 의한 열이 발생하여 온도가 상승하

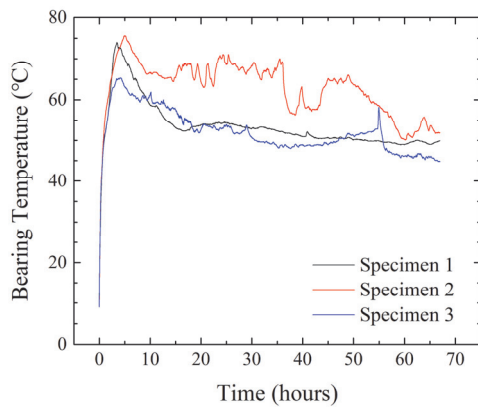


Fig. 6 Temperature degradation characteristics according to grease type

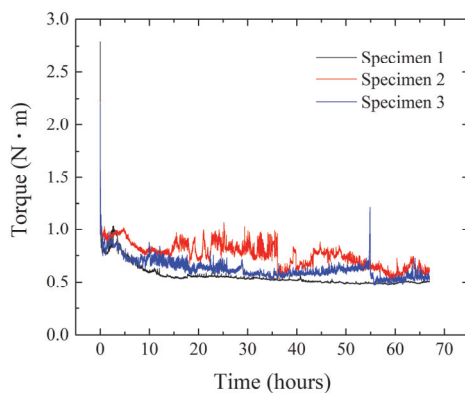


Fig. 7 Torque degradation characteristics according to grease type

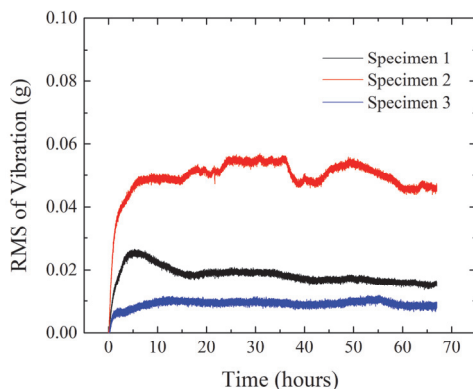


Fig. 8 Vibration degradation characteristics according to grease type

게 된다. 이때 진동이 발생하거나 회전부의 토크가 발생하여 고장을 유발하게 된다[11].

따라서 그리스 열화특성 시험은 윤활제인 그리스 열화에 의하여 베어링 작동특성 영향에 미치는 시험시간별 온도 및 토크, 진동특성을 측정 분석하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 585kgf 동일부하조건하에서 4,020 min 내구시험을 실시하여 각 파라미터별 운전중 열화 특성을 분석하였으며, 이의 결과는 아래와 같다.

Fig. 6은 베어링의 기계적 열화특성의 주요 파라미터인 온도 특성을 분석한 결과를 나타내었다.

시료1(하모닉 드라이브용 그리스)과 3(저부하용 그리스)의 온도특성을 분석하여 보면, 초기 길들이기 기간동안의 온도 변화는 있으나, 일정 시간 경과후 안정되어 작동되고 있지만, 시료2(고부하용 그리스)의 경우 내구 작동 초기 시료1과 시료3의 길들이기 특성과 유사하나, 내구시험 진행중 온도 변화가 매우 큰 변동 특성을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 온도상승은 베어링 윤활 및 작동에 영향을 미치게 되며, 그리스의 화학적 열화특성에도 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 시료 3개의 내구시험중 토크 변화특성 측정 결과를 나타내었다. 시료2의 경우 시료1,3에 비하여 큰 변동 특성을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 6의 온도특성 결과와 비교하여 볼 때, 시료 2에 주입된 그리스가 베어링의 기계적 구동 특성에 미세한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 하모닉 드라이브 그리스의 경우 매우 안정적인 토크 특성을 보이고 있으므로 볼 때, 베어링 등 회전체의 주입 그리스 종류 결정이 중요함을 확인 할 수 있다.

Fig. 8은 시료 3개의 내구시험 중, 진동변화 특성 측정 결과를 나타내었다. 시료2의 경우 시료 1,3에 비하여 매우 큰 변동 특성을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 내구작동중 진동특성과 Fig. 6

의 온도특성, Fig. 7의 토크특성 결과를 비교하여 분석하면 베어링 작동에 큰 영향을 미치고 있음을 확인 할 수 있는 파라미터는 온도 및 진동 특성이며, 성능 열화 특성에 상호 연관성을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

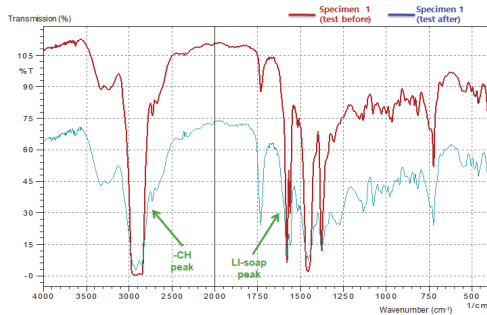
4.2 그리스 종류에 따른 화학적 열화특성 분석결과

4.1에서의 기계적 열화 특성을 분석한 결과와 내구시험후의 그리스 화학적 열화 특성을 비교하기 위해 4,020 min 내구시험을 실시한 후, 3종의 테스트 모듈(Test Module) (Specimen 1,2,3)에 장착된 베어링을 분해하여 내구 시험후(Test after) 열화된 그리스와 시험전(Test before) 그리스를 채취하여 TG-DTA(내열성 분석)과 FT-IR(적외선 분광분석)을 진행하였으며, 이에 대한 열

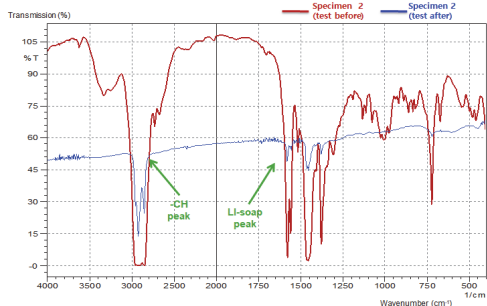
화특성 분석 결과는 다음과 같다.

4.2.1 FT-IR을 통한 그리스 열화특성 분석결과

그리스의 유기물질 분석을 위하여 FT-IR 분석을 실시한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 시료는 내구시험을 통하여 기계적 열화 특성 데이터를 확보한 뒤, 베어링에 주입되었던 열화된 그리스 시료와 내구 시험전 그리스를 비교하였다. 분석결과 오일은 탄화수소계 오일, 중주제는 Li-grease로 나타내었고, 시험전과 시험후의 시료 3개 모두 동일 Wavenumber에서 유사한 Peak 특성을 나타내고 있음을 확인하였다. 이는 그리스의 화학적 성분변화는 없으며, 시료 3개 모두 내구시험으로 인하여 그리스가 열화되어 마모분과 이물질이 다량 함유되어 있음을 확인할 수 있다.

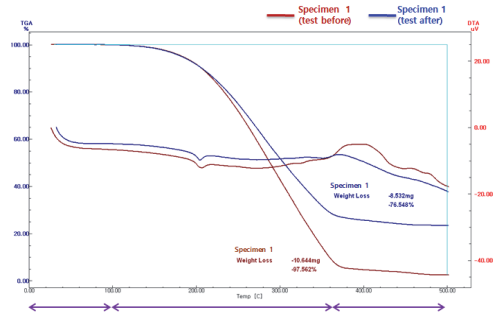


(a) FT-IR test result [Specimen 1]

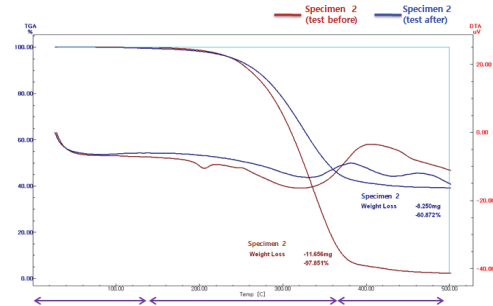


(b) FT-IR test result [Specimen 2]

Fig. 9 Test result of FT-IR



(a) TG-DTA test result [Specimen 1]



(b) TG-DTA test result [Specimen 2]

Fig. 10 Test result of TG-DTA

4.2.2 TG-DTA 그리스 열화특성 분석결과

그리스의 TG-DTA 분석결과를 Fig. 10에 나타내었다. 내열성 분석은 30~500°C에서 하였으며, 시료1은 약 100°C에서 열분해 되어 증발량이 증가하다 180°C에서 급격한 감량이 발생함을 확인 하였으며, 시료2,3은 약 150°C에서 열분해 되어 증발량이 증가하다 200°C에서 급격한 감량이 발생함을 확인할 수 있다. 그리스의 윤활 성능 저하와 연관되는 마모분 분석 결과, 시료 1은 시험전 대비 시험후의 마모분이 21% 있음을 확인할 수 있으나, 시료 2,3은 시험전 대비 시험후의 마모분이 각각 36.98%, 35.91%로 그리스 열화 특성이 시료 1에 비하여 크게 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이는 마모분의 증가로 인한 윤활 성능 저하로 연관될 수 있으며, 4.1의 기계적 열화 특성에서 시료 1과 시료 2의 온도 및 진동 특성의 차이와 상호 연관성을 가지고 있으므로 보증수명 이상의 장기 작동시 그리스 선정에 따라 베어링 수명 및 성능에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 그리스 선정시 이에 대한 고려가 필요함을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 패키징 장치와 자동화 시스템의 핵심 요소부품으로 사용되는 베어링의 열화 특성에 그리스가 미치는 영향을 확인하기 위하여, 베어링 윤활의 핵심 기능을 하는 그리스 3종(소형 하모닉 드라이브용, 고 부하 감속기용 그리스, 저 부하 감속기용 그리스)을 선정하고, 볼 베어링에 시험대상 그리스를 주입하여 윤활 특성 시험 메커니즘에 장착, 동일 부하조건하에서 내구 시험한 후, 그리스 3종에 대한 기계적 열화 특성(온도, 진동)과 해당 그리스의 화학적 열화 특성을 비교 분석한 결과는 아래와 같다.

- 그리스 3종에 대한 기계적 열화 특성 분석 결과, 시료2의 기계적 열화 특성 측정 파라미터인 온도, 진동, 토크 특성이 시료1,3에 비하여 매우 큰 변동 특성을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이는 정격하중이 같은 베어링 시료로 동일한 시험메커니즘에서 같은 시험조건으로 시험한 결과를 고려하여 볼 때, 적용 그리스에 따라 베어링 작동에 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다.
- 또한 열화 특성 측정 파라미터인 온도 및 진동, 토크 특성 분석 결과는 베어링 성능에 미치는 열화의 특성 비교 및 상호 연관성 분석에 활용할 수 있음을 확인할 수 있다.
- 그리스의 유기물질 분석을 위하여 FT-IR 분석을 실시한 결과, 시험전과 시험후의 시료 3개 모두 동일 Wavenumber에서 유사한 Peak 특성을 나타내고 있어 그리스의 화학적 성분변화는 없는 것을 알 수 있으나, 시료 3개 모두 내구시험으로 인한 그리스가 열화 마모분과 이물질이 다량 함유되어 있음을 확인하였으므로, 본 연구에서 진행한 시험시간을 베어링 보증 수명시간과 연계하여 시험한다면 그리스 성분 변화 특성 확인도 가능할 수 있을 것으로 예측된다.
- 그리스의 윤활 성능 저하와 연관되는 마모분 분석 결과, 시험전 대비 시험후의 마모분이 시료1의 경우에는 21% 정도임을 확인할 수 있으나, 시료 2,3은 시험전 대비 시험후의 마모분이 각각 36.98%, 35.91%로 그리스 열화 특성이 시료 1에 비하여 크게 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이는 마모분의 증가로 인한 윤활 성능 저하로 연관될 수 있으며, 기계적 열화 특성에서 시료 1과 시료 2의 온도 및 진동 특성의 차이로 인한 열화 특성 시험결과와 상호 연관성을 가지고 있는

므로, 보증수명 이상의 장기 작동시 그리스 선정에 따라 베어링 수명 및 성능에 큰 영향을 미칠 수 있는 그리스 선정시 이에 대한 고려가 필요함을 확인할 수 있다.

사 사

이 논문은 2021년도 산업부의 재원으로 한국산업기술평가관리원 지원(No. 20005020) 및 2022년도 산업부의 재원으로 한국에너지기술평가원 지원(No. 20223030040060)으로 수행된 연구임.

참고문헌

- [1] N. Kumar. Komal & J. S. Lather. "Reliability Analysis of a Robotic System using Hybridized Technique", *Journal of Industrial Engineering International*, Vol. 14, pp.443-453, (2018).
- [2] A. Raviola. A.D. Martin, R. Guida, G. Jacazio, Stefano Mauro Massimo Sorli. "Harmonic Drive Gear Failures in Industrial Robots Applications", *Proceedings of the 6th European Conference of the Prognostics and Health Management Society*, pp.350-60, (2021).
- [3] J. H. Lee, D. S. Kim. J. J. Lee, S. H. Kim. K. M. Kim, "Study on Accelerated Life Test of RV Reducer for Manufacturing Robot.", *Journal of KSME-A*. Vol. 46, No. 5, pp.471-478, (2022).
- [4] Piet M. Lugt, "Modern Advancements in Lubricating Grease Technology.", *Journal of Tribology International*. Vol. 97, pp.467-477, (2016).
- [5] B. S. Kang, C. S. Lee. "A study of the effects of the retainer material of the clutch release bearing on the lifetime.", *Proceedings of the KSME Conference*, pp.807-810, (2014).
- [6] H. E. Kim, Y. P. Lee, Y. C. Yoo. "Life Analysis of the Ball Bearings by Accelerated Life Test.", *Proceedings of the KORAS Conference*, pp.335-342 (2004).
- [7] ISO 281, "Rolling bearings - Dynamic load ratings and rating life", (2007).
- [8] P. M. Cann, J. P. Doner, M. N. Webster & V. Wikstrom. "Grease Degradation in Rolling Element Bearings.", *Journal of Tribology Transactions*, Vol. 44, No. 3, pp.399-404, (2001).
- [9] Aditya. M. Amarnath, P. K. Kankar. "Failure Analysis of a Grease-Lubricated Cylindrical Roller Bearing", *Journal of Procedia Technology*, Vol. 14, pp.59-66, (2014).
- [10] B. W. Lee, S. K. Cho, Y. S. Cho, H. S. Park. "Real-Time Condition Monitoring with Friction and Vibration Characteristic of Ball Bearing", *Proceedings of the KTS Conference*, pp.53-54, (2016).
- [11] J. H. Son, S. W. Kim, B. H. Cho, S. P. Lee. "Life Evaluation of Grease for Ball Bearing According to Temperature, Speed, and Load Changes", *Journal of Tribology and Lubricants*, Vol. 37, No. 1, pp.7-13, (2021).