

온도, 속도, 그리고 하중 변화에 따른 볼 베어링용 그리스의 수명평가

손정훈¹ · 김세웅² · 최병호³ · 이승표^{4*}

¹㈜일진베어링 기술연구소 고분자재료연구팀 책임연구원

²㈜일진글로벌 기술연구소 고분자재료연구팀 팀장

³고려대학교 기계공학과 교수

⁴㈜일진글로벌 기술연구소 이사

Life Evaluation of Grease for Ball Bearings According to Temperature, Speed, and Load Changes

Jeonghoon Son¹, Sewoong Kim², Byong Ho Choi³ and Seungpyo Lee^{4*}

¹Senior Research Engineer, Polymer Material Research Team, R&D Center, ILJIN Bearing

²Team Leader, Polymer Material Research Team, R&D Center, ILJIN Global

³Professor, Department of Mechanical Engineering, Korea University

⁴Director, R&D Center, ILJIN Global

(Received February 4, 2021 ; Revised February 21, 2021 ; Accepted February 22, 2021)

Abstract – Ball bearing is a device that supports and transmits a load acting on a rotating shaft, and it is a type of rolling bearings that uses the rolling friction of the balls by inserting balls between the inner ring and the outer ring. Grease, which is prepared by mixing a thickener with a base oil, is a lubricant commonly used in bearings and has the advantage of a simple structure and easy handling. Bearings are increasingly being used in high value-added products such as semiconductors, aviation, and robots in the era of the 4th industrial revolution. Accordingly, there is an increasing demand for bearing grease. The selection of grease is an important factor in the bearing design. Therefore, a study must be conducted on the grease life evaluation to select an appropriate grease according to operating conditions such as a high temperature, high rotational speed, and high load. In this study, we evaluate the life of ball-bearing grease according to various operating conditions, namely, temperature, speed, and load changes. For this, we develop and theoretically verify a grease life test machine for ball bearings. We conduct a life test of grease according to various operating conditions of bearings and predict the grease life with a 10% and 50% failure probability using the Weibull analysis. In addition, we analyze the oxide characteristics of the grease over time using the Fourier transform infrared spectroscopy and the deterioration characteristics of the grease using the carbonyl index.



© Korean Tribology Society 2021. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

Keywords – grease life evaluation(그리스의 수명평가), ball bearing(볼 베어링), grease life test machine(그리스 수명시험기), weibull(와이블), FT-IR(적외선 분광분석)

*Corresponding author: Seungpyo Lee

Tel: +82-2-2192-9015, Fax: +82-2-565-8553

E-mail: leeseungpyo@iljin.com

<https://orcid.org/0000-0002-1812-2896>

<https://orcid.org/0000-0003-3538-334X> (Jeonghoon Son)

1. 서 론

볼 베어링(ball bearing)은 회전 축(shaft)에 작용하는 하중을 지지하고 전달하는 동력 장치이며, 내륜(inner

ring)과 외륜(outer ring) 사이에 볼(ball)을 넣어서 이들의 구름 마찰을 이용하는 구름 베어링(rolling bearing)의 한 종류이다. 기유(base oil)에 증주제(thickener)를 혼합하여 만드는 그리스(grease)는 베어링에 많이 사용하는 윤활제로서 구조가 간단하고 취급이 용이하다는 장점이 있다. 베어링은 자동차, 철도, 선박 등 수송산업 뿐만 아니라 설비기계, 건설기계, 전기기계 등 거의 모든 제조업에 사용되는 부품으로 최근 4차산업혁명 시대를 맞아 반도체 제조, 항공, 로봇 등 고부가가치 제품을 중심으로 사용이 증가하고 있다. 이에 따라서 베어링용 그리스의 필요성도 증가하고 있다. 그리스는 종류를 변경시키는 것만으로도 베어링의 수명 차이가 발생하므로 베어링 설계에 있어서 그리스의 선정은 매우 중요한 요소가 된다. 따라서, 고온, 고속 회전, 고 하중 등 운전조건에 따른 적절한 그리스를 선정하기 위해서는 이에 따른 그리스 수명평가에 대한 연구가 선행되어야 한다[1-4].

그리스에 대한 기존 연구를 살펴보면 Kim 등[1]은 자동차 전장 베어링용으로 적용되는 우레아(urea)계 그리스에 대하여 증주제의 함량, 첨가제(additives)의 종류와 함량, 가공조건을 변수로 하여 12종의 그리스를 합성하고 그리스의 적점(dropping point)과 OIT(oxidation index time)값을 조사하여 최적의 그리스 합성조건을 결정하였다. 최적의 그리스를 합성하고, 합성된 그리스의 수명과 물성을 조사하여 기존의 그리스 성능과 비교평가 하였다. Lim 등[5]은 휠 베어링 그리스에 미량의 일정 수분을 혼합시킨 후, 이들 그리스 시료를 국내 품질규격에 의거해 실험함으로써 수분과 휠 베어링 그리스의 상호관계에 대해 분석하였다. Park 등[6]은 고속용 그리스에 대하여 회전속도에 따른 온도특성의 변화를 평가하였다. 이와 같이 기존의 연구들은 그리스의 합성이나 수분, 온도 등의 특성 비교 등이 주요한 내용이었고, 그리스의 수명평가에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구의 목적은 다양한 운전조건, 즉 온도, 속도, 그리고 하중 변화에 따른 볼 베어링용 그리스의 수명평가이다. 이를 위하여 볼 베어링용 그리스 수명시험기를 개발하고 이론적으로 검증하였다. 개발된 그리스 수명시험기를 이용하여 베어링의 다양한 운전조건 즉, 온도, 속도, 그리고 하중 변화에 따른 그리스의 수명시험을 수행하고 Weibull 분석을 통하여 각각 10%, 50%의 파손 확률을 갖는 그리스의 수명(grease life with a 10% and 50% failure probability, B_{10} and B_{50})등을 예측하였다. 또한, 적외선 분광분석(Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)을 통하여 시간에 따른 그리스의 산화물 특성을 분석하고, 카르보닐 인덱스(Carbonyl index,

CI)를 통하여 그리스의 열화 특성을 분석하였다.

2. 볼 베어링용 그리스 수명시험기

2-1. 볼 베어링용 그리스 수명시험기의 개발

그리스의 수명시험은 중간속도 및 중간 축하중을 받는 구름 베어링 윤활 그리스의 사용수명 및 최대 사용온도의 결정을 위한 시험으로 Table 1에 언급한 시험조건을 기반으로 FE-9 시험기로 호칭되는 시험기를 이용하여 90%의 신뢰수준(confidence level)으로 각각 B_{10} , B_{50} 을 예측하는 것이 일반적인 방법이다[1,7]. 그러나, FE-9 시험기는 독일에서 개발된 시험기로서 현재까지 국내로 수입된 이력이 없고, 시험을 위한 표준 베어링도 독일 베어링으로 국내에서 구입이 불가능할 뿐만 아니라 장착 가능한 치수가 단 1종(FAG-special type 529689 S 2)으로 한정되어 있기 때문에 그리스 수명평가가 현실적으로 불가능한 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 FE-9 시험기의 한계를 극복하기 위하여 볼 베어링용 그리스 수명시험기를 개발하였다. 개발된 수명시험기는 일반적인 모든 종류의 볼 베어링에 대하여 평가가 가능하도록 구성하였다. 수명시험기의 형상은 Fig. 1에 나타내었고, 시험조건은 Table 1에 나타내었다.

2-2. 볼 베어링용 그리스 수명시험기의 검증

개발된 그리스 수명시험기에 대하여 검증을 수행하였다. 2.1에 언급한 바와 같이 FE-9 시험기는 국내 수입된 이력이 없고, 표준 베어링도 국내 구입이 불가능하여 현실적으로 시험을 통한 검증은 불가능한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 아레니우스 방정식(Arrhenius equation)을 통한 이론적 검증을 수행하였다. Eq. (1)의 아레니우스

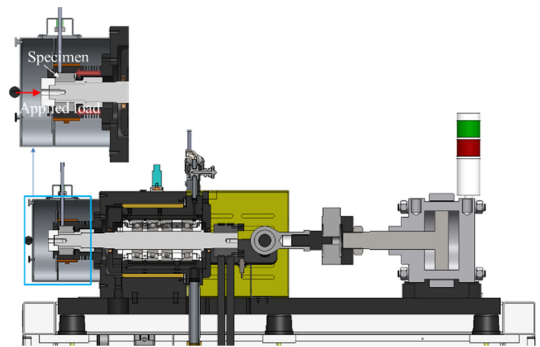


Fig. 1. Developed grease life test machine.

Table 1. Specification comparison between FE-9 test machine and developed test machine

Parameter	FE-9 test machine	Developed test machine
Bearing	Type	FAG 529689, Single row
	Inner diameter	30 mm
	Outer diameter	62 mm
	Thickness	16 mm
Test conditions	Temperature	120~200°C
	Rotational speed	3,000~6,000 rpm
	Applied load	1,500~4,500N

스 방정식은 화학반응 내에서 절대온도, 빈도 및 다른 변수에 대한 속도의 의존도를 나타내는 방정식으로 1889년 아레니우스가 제안한 방정식이다[8].

$$K = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

where, K: 반응속도,
 E_a: 활성화 에너지(kJ/mol),
 R: 기체상수(=8.314 J/K mol),
 T: Kelvin 온도(=273.15+°C).

수명(t_r)은 반응속도에 반비례하므로 Eq. (1)은 Eq. (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\ln K = \ln\left(\frac{1}{t_r}\right) = -7080.2\left(\frac{1}{T}\right) + 12.1 \quad (2)$$

아레니우스 방정식으로 개발된 그리스 수명시험기를

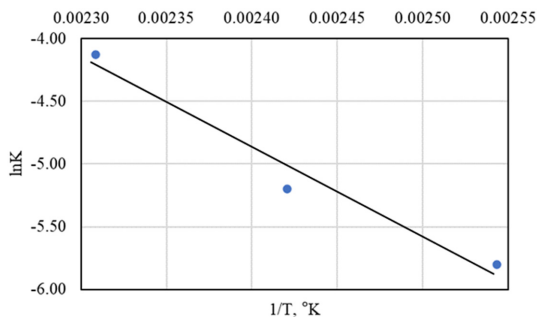


Fig. 2. Verification for developed grease life test machine: grease life according to temperature change.

검증하기 위하여 온도에 따른 수명시험을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 온도에 따른 그리스 수명시험은 Eq. (2)의 선형이며 R²=0.96으로 아레니우스 방정식을 잘 만족한다. 따라서, 개발된 그리스 수명시험기를 간접적으로 검증할 수 있다.

3. 볼 베어링용 그리스 수명시험

3-1. 시험 조건

2.1에 언급한 바와 같이 그리스 수명시험을 위한 표준 베어링은 국내 구입이 불가능하여 Table 1에 언급한 FE-9 시험기와 유사한 치수의 베어링을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 표준 베어링은 Fig. 3에 나타내었다.

시험은 다양한 운전조건을 고려하여 온도, 속도, 그리고 하중을 변화하면서 수행하였고, 시험 시간의 단축을 위하여 가속조건을 사용하였다. 본 연구에서 수행된 시험 조건은 Table 2에 나타내었다.

시험 시 고장의 정의는 기준온도보다 20°C 이상의 온도가 발생하거나, 가속도 센서 측정 시 기준대비 이상진동이 발생하거나, 모터 출력값 중 모터 과부하가 발생하는 경우이며, 이 현상이 발생하는 경우 시험을 종료하였다. 시험 대상이 되는 그리스의 물성은 Table 3과 같다.

3-2. 시험 결과 및 고찰

그리스의 수명시험을 Table 2에서 언급한 조건으로 온



Fig. 3. Test bearing.

Table 2. Test conditions

Temperature	120°C, 140°C, 160°C (speed = 4,000 rpm, load = 1,500N)
Rotational speed	3,000 rpm, 4,000 rpm, 5,000 rpm, 6,000 rpm (temperature = 140°C, load=1,500N)
Applied load	1,500N, 3,000N, 4,500N (temperature = 140°C, speed = 6,000 rpm)

Table 3. Physical properties of test grease

Test item	Test method	Value
Thickener	-	urea
Base oil	-	mineral oil
Worked penetration	ASTM D 217	300
Dropping point	ASTM D 566	min. 260°C
Oil separation (100°Cx24hr), mass%	ASTM D 1742	4.2
Oxidation stability (99°Cx100hr), kPa	ASTM D 942	15
Rust prevention in bearing (52°Cx48hr)	ASTM D 1743-73	#1
Base oil kinematic viscosity at 100°C, mm ² /s	ASTM D 445	9.3

도, 속도, 하중을 변화하면서 각각 5회 실시하였다. 수명 시험 결과를 분석하기 위하여 상용소프트웨어 Minitab[9]을 사용하였다. 통계분석 방법은 parametric distribution analysis with right censoring을 적용하였고, 수명분포는 Weibull 분포로 가정하였다[10]. 최대우도추정(maximum likelihood estimation)과 90% 신뢰수준으로 각각 B₁₀, B₅₀을 예측하였다.

3-2-1. 온도 변화에 따른 그리스 수명

속도와 하중을 고정하고 온도를 120°C, 140°C, 160°C로 변화시키면서 볼 베어링용 그리스의 수명시험을 수행하였다. 수명시험 결과를 Weibull 분포로 나타내면 Fig. 4와 같다. 120°C 수명시험은 총 5개 시험 중에서 2개 베어링이 500°C에서 고장없이 시험 중단(censored) 되었다.

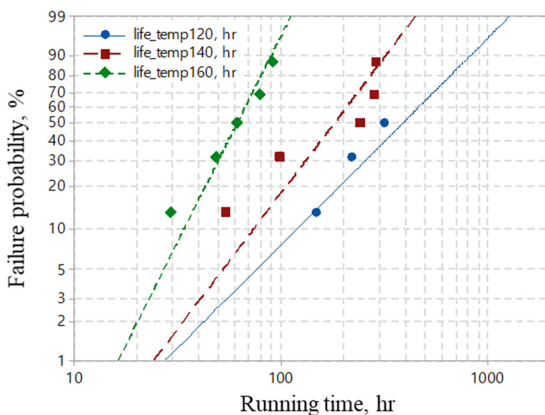


Fig. 4. Weibull distribution for grease life test according to temperature change.

이로 인하여 시험의 신뢰도를 나타내는 AD 통계량 (Anderson-Darling)[11]이 19.27로서 140°C, 160°C의 2.78, 2.46 대비 상대적으로 높다. 즉, 120°C 수명시험의 신뢰도는 다른 두 시험 대비 상대적으로 낮음을 예상할 수 있다.

Weibull 분포에서 기울기를 나타내는 형상모수(shape parameter)는 확률분포도의 분포모양을 결정하는 파라미터이다. 수명 시험 결과, 온도가 120°C, 140°C, 160°C로 상승함에 따라서 형상모수값이 각각 1.60, 2.10, 3.19로 증가한다. 즉, 온도가 상승할수록 그리스의 수명은 급격하게 감소함을 알 수 있다. 120°C 그리스 수명은 초기 고장이 많이 발생하며, 140°C, 160°C 수명은 초기 고장과 후기 고장이 유사해지는 정규분포의 형태를 가지는 것으로 예상할 수 있다. 척도모수(scale parameter)는 데이터의 63.2 백분위 수(percentile)를 의미한다. 수명 시험 결과, 온도가 상승함에 따라서 척도모수값은 감소한다. 즉, 그리스의 63.2%가 고장 나는데 걸리는 시간이 각각 488시간, 216시간, 69시간으로 감소함을 알 수 있다. 온도가 120°C, 140°C, 160°C로 상승함에 따라서 평균고장 시간(mean time to failure, MTTF)은 각각 437시간, 191시간, 62시간으로 감소한다. 그리스의 평균고장시간의 비율이 120°C에서 140°C에서는 44%로 감소하는데 비하여 140°C에서 160°C에서는 32%로 감소한다. 이 결과로부터 온도가 상승함에 따라서 평균고장시간의 비율이 점점 더 감소함을 예상할 수 있다. 표준편차(standard deviation)는 온도가 120°C, 140°C, 160°C로 상승함에 따라서 각각 279, 96, 21로 감소하며, 이로부터 온도가 상승함에 따라서 시험 산포가 감소함을 예상할 수 있다.

3-2-2. 속도 변화에 따른 그리스 수명

온도와 하중을 고정하고 속도를 3,000 rpm, 4,000 rpm, 5,000 rpm 6,000 rpm으로 변화시키면서 볼 베어링용 그리스의 수명시험을 수행하였다. 시험 결과를 Weibull 분포로 나타내면 Fig. 5와 같다. 시험의 신뢰도를 위하여 AD 통계량을 분석해보면, 속도가 변화함에도 불구하고 2.54~2.73으로 거의 일정하다. 이로부터 속도 변화에 대한 시험의 신뢰도는 유사하다고 판단할 수 있다.

속도 변화에도 불구하고 Weibull 분포의 기울기, 즉 형상모수가 3.56~3.81로 일정하다. 즉, 속도가 증가할수록 그리스의 수명은 일정하게 감소함을 알 수 있다. 다시 말하면, 3,000 rpm, 4,000 rpm, 5,000 rpm, 6,000 rpm에서 초기 고장과 후기 고장이 유사한 정규분포의 형태를 가짐을 예상할 수 있다. Weibull 척도모수값으로부터 속도가 3,000 rpm, 4,000 rpm, 5,000 rpm, 6,000 rpm으로 증

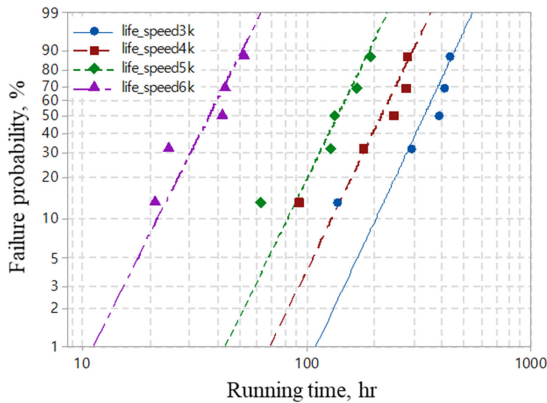


Fig. 5. Weibull distribution for grease life test according to rotational speed change.

가함에 따라서 그리스의 63.2%가 고장 나는데 걸리는 시간이 각각 369시간, 238시간, 152시간, 41시간으로 감소함을 알 수 있다. 또한, 속도가 3,000 rpm, 4,000 rpm, 5,000 rpm 6,000 rpm으로 증가함에 따라서 평균고장시간은 각각 333시간, 215시간, 137시간, 37시간으로 감소한다. 특히 속도가 3,000 rpm에서 5,000 rpm까지는 평균고장시간이 일정한 비율로 감소하는데 비하여 5,000 rpm에서 6,000 rpm에서는 평균고장시간이 급격히 감소하는 현상이 발생하였다. 표준편차는 속도가 3,000 rpm, 4,000 rpm, 5,000 rpm 6,000 rpm으로 상승함에 따라서 각각 98, 65, 41, 11로서 점차 감소한다. 이로부터 속도가 상승함에 따라서 시험 산포가 감소함을 예상할 수 있다.

3-2-3. 하중 변화에 따른 그리스 수명

온도와 속도를 고정하고 1,500N, 3,000N, 4,500N으로 변화시키면서 볼 베어링용 그리스의 수명시험을 수행하였다. 시험 결과를 Weibull 분포로 나타내면 Fig. 6과 같다. 시험의 신뢰도를 위하여 AD 통계량을 분석해보면, 하중 변화함에도 불구하고 2.55~2.63으로 거의 일정하다. 이로부터 하중 변화에 대한 시험의 신뢰도는 유사하다고 판단할 수 있다.

Weibull 분포의 기울기를 나타내는 형상모수를 비교해보면, 하중이 1,500N, 3,000N에서 각각 3.56, 3.66으로 유사하며, 4,500N에서 2.64로 감소한다. 즉, 일정수준의 하중까지는 그리스의 수명이 일정하게 감소하며, 그 이상의 하중에서는 그리스의 수명이 둔감하게 감소함을 알 수 있다. Weibull 척도모수값으로부터 하중이 1,500N, 3,000N, 4,500N으로 증가함에 따라서 그리스의 63.2%가 고장 나는데 걸리는 시간이 각각 41시간, 27시간, 23시간

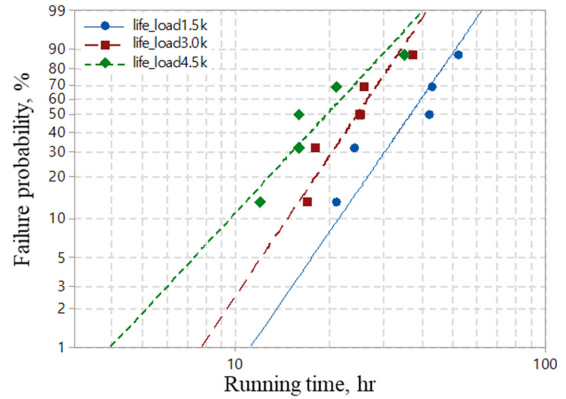


Fig. 6. Weibull distribution for grease life test according to applied load change.

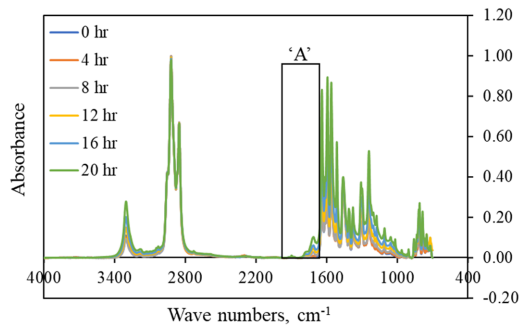
으로 감소함을 알 수 있다. 즉, 하중이 1,500N, 3,000N, 4,500N으로 증가함에 따라서 평균고장시간은 각각 37시간, 25시간, 20시간으로 감소한다. 그리스의 평균고장시간의 비율이 1,500N에서 3,000N에서는 67%로 감소하는데 비하여 3,000N에서 4,500N에서는 83%로 감소한다. 이 결과로부터 하중이 증가함에 따라서 평균고장시간의 비율이 증가함을 예상할 수 있다. 표준편차(standard deviation)는 하중이 1,500N, 3,000N, 4,500N으로 증가함에 따라서 각각 11, 7, 8로 감소한다.

3.2.4 시간에 따른 그리스 산화물 특성 분석

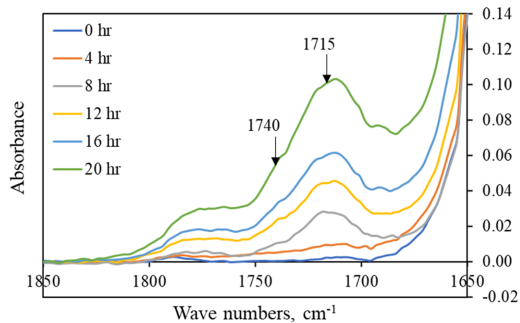
온도, 속도, 하중 조건에 대한 그리스 수명의 상관관계를 화학적으로 분석하기 위하여 시간에 따른 그리스의 산화물 특성 분석을 수행하였다. 수명시험 조건은 시험시간의 단축을 위하여 온도 160°C, 속도 6,000 rpm, 하중 1,500N의 가혹조건으로 설정하였다. 산화물 특성 분석은 적외선 분광분석을 통하여 수행하였다. 본 연구



Fig. 7. Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR: Perkin Elmer spectrum 100.



(a) FT-IR results for grease life test



(b) FT-IR results from 1650 cm⁻¹ to 1850 cm⁻¹ ranges: detail 'A'

Fig. 8. FT-IR results for oxide characterization of grease life test.

에서 사용된 적외선 분광분석기는 Fig. 7에 나타내었고, 분광분석 결과는 Fig. 8에 나타내었다.

그리스의 산화물 특성(oxide properties)은 Table 4와 같이 wave numbers 1700~1740 cm⁻¹ 영역에서 관찰되는 카르보닐기(Carbonyl groups)로부터 확인할 수 있다. Fig. 8로부터 시험 초기부터 4시간까지는 카르보닐기 absorbance intensity가 조금씩 증가하다가 6시간 이후부터는 그 증가량이 커짐을 알 수 있다. 따라서, 본 그리스 수명 시험에서는 시간이 증가함에 따라서 산화가 발생함을 예상할 수 있다.

그리스의 파손기구(failure mechanism)를 이론적으로 예측하기 위하여 산화물 특성뿐만 아니라 그리스 of 열

Table 4. Carbonyl groups affecting the grease oxide properties

Functional group	Type of vibration	Wave numbers, cm ⁻¹
C = O	Aldehyde	1740~1720
	Ketone	1725~1705
	Carboxylic acid	1725~1700

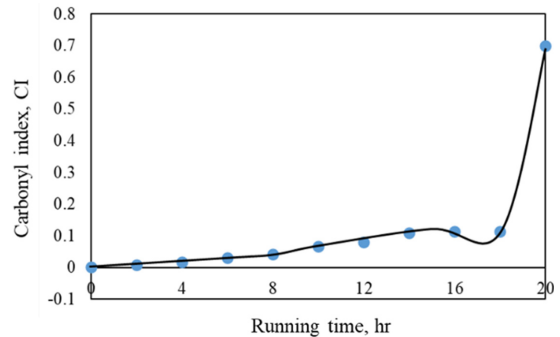


Fig. 9. Carbonyl index.

화 특성을 분석하였다. 이를 위하여 Eq. (3)과 같이 카르보닐 인덱스를 정의하였다.

$$CI = \frac{A_{\text{ketones}} + A_{\text{Carboxylic acids}} + A_{\text{Aldehydes}}}{A_{\text{Alkanes}}} \quad (3)$$

카르보닐 인덱스는 폴리에틸렌(polyethylene) 및 폴리프로필렌(polypropylene)과 같은 폴리올레핀(polyolefin)의 화학적 산화를 측정하는데 가장 일반적으로 사용하는 지표이며, 본 시험에서는 그리스의 열화 정도를 나타내는 지표로 사용하였다. Eq. (3)으로부터 시간에 따른 카르보닐 인덱스를 계산하면 그 결과는 Fig. 9와 같다.

Fig. 9로부터 알 수 있듯이 카르보닐 인덱스값이 시험 초기부터 18시간까지는 0에서 0.12로 천천히 증가하다가 그 이후 0.70까지 급격히 증가하는 현상을 보인다. 이는 분자 사슬의 산화반응에 의하여 카르보닐 화합물이 형성되었기 때문이다[12]. 결론적으로 본 그리스 수명 시험에서는 18시간 이후 급격한 열화가 발생하며 이로부터 그리스 수명 시험 시 파손이 발생함을 예상할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 수행한 그리스 산화물 특성 분석과 카르보닐 인덱스값은 그리스 수명의 지표로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 볼 베어링용 그리스 수명시험기를 개발하였고, 온도, 속도, 그리고 하중 변화에 따른 볼 베어링용 그리스의 수명 평가를 수행하였다. 이에 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 기존 시험기의 한계를 극복하기 위하여 볼 베어링용 그리스 수명시험기를 개발하고, 개발된 수명시험기에 대하여 아레니우스 방정식을 통한 이론적 검증 수행하였다. 검증 결과, 그리스 수명시험

은 아레니우스 방정식을 잘 만족하며, 이로부터 개발된 그리스 수명시험기가 간접적으로 검증되었음을 확인하였다.

- (2) 온도, 속도, 그리고 하중 변화에 따른 그리스 수명 시험을 수행하고, 각각의 경우에 대하여 B_{10} , B_{50} 수명 등을 계산하고 결과를 평가하였다.
- 온도가 120°C, 140°C, 160°C로 상승함에 따라서 그리스의 수명은 급격하게 감소하였다.
 - 속도가 3,000 rpm, 4,000 rpm, 5,000 rpm, 6,000 rpm 으로 증가할수록 그리스의 수명은 일정하게 감소하였다.
 - 일정수준의 하중(1,500N, 3,000N)까지는 그리스의 수명이 일정하게 감소하며, 그 이상의 하중(4,500N)에서는 그리스의 수명이 둔감하게 감소하였다.
- (3) 그리스 수명시험에 대하여 시간에 따른 산화물 특성 분석을 수행하였다. 적외선 분광분석 결과, 시간이 증가함에 따라서 산화가 발생함을 알 수 있다. 또한, 카르보닐 인덱스를 통한 그리스의 열화 특성을 분석하였다. 그리스 수명 시험에서 18시간 이후 급격한 열화가 발생함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 수행한 그리스 산화물 특성 분석과 카르보닐 인덱스값은 그리스 수명의 지표로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

References

- [1] Kim, S. K., Kim, B. K., Han, J. D., “A Study on Synthesis and Characteristics of the Optimum Urea Type Grease for Rolling Bearings”, *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol.22, No.5, pp.269-275, 2006, <https://doi.org/10.9725/kstle.2006.22.5.269>
- [2] Kim, S., Han, H., Han, J., “Endurance and Characteristics of Rolling Bearing Grease after Optimization”, *Proc. Fall Conf. Korean Soc. Tribol. Lubr. Engr.*, pp.63-67, Seoul, Korea, November 2005.
- [3] Choi, B. L., Lee, H. J., Son, J. H., Park, H. S., Choi, B. H., “Grease Lubrication Life Evaluation at High Temperature Environment”, *Proc. Fall Conf. Korean Tribol. Soc.*, Pusan, Korea, October 2019.
- [4] Son, J. H., “Grease Service Life Evaluation at High Temperature/Speed Environment”, *Proc. Fall Conf. Korean Tribol. Soc.*, Daejeon, Korea, September 2020.
- [5] Lim, Y. K., Lee, E. H., Lee, J. M., Jeong, C. S., “Performance of Automotive Wheel Bearing Grease by Water Contents”, *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol.27, No.5, pp.275-280, 2011, <https://doi.org/10.9725/kstle.2011.27.5.275>
- [6] Park, Y. H., Son, J. H., Lee, W. J., “Study on the Temperature characteristics of the Grease according to the rotational speed”, *Proc. Fall Conf. Korean Soc. Tribol. Lubr. Engr.*, Moojoo, Korea, October 2016.
- [7] DIN 51821, “Testing of lubricants - Test using the FAG roller bearing grease testing apparatus FE9”, Deutsches Institut für Normung E.V. (DIN), 2016.
- [8] Jang, S. -G., Kim, J. -H., Ryu, B. -T., Hwang, J. -M., “Arrhenius Kinetic Constants Analysis of BKNO₃ under Accelerated Aging”, *J. Korean Soc. Propuls. Eng.*, Vol.20, No.4, pp.34-39, 2016.
- [9] Minitab, LLC, <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/>, Version 18.1, Accessed February 4, 2021.
- [10] Weibull, W., *A Statistical Theory of the Strength of Materials*, *Ingeniorx Vetenskapsakademiens Handlingar*, Stockholm, Sweden, 1939.
- [11] Yang, H. S., Shin, J. H., Park, J. W., Sung, B. J., “A Study on the Life Characteristic of an Automotive Water-pump Bearing Using the Accelerated Test Method”, *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol.31, No.2, pp.35-41, 2015, <https://doi.org/10.9725/kstle.2015.31.2.35>
- [12] Gedde, U. W., Terselius, B., Jansson, J. F., “A new method for the detection of thermal oxidation in polyethylene pipes”, *Polymer Testing*, Vol.2, Issue 2, pp.85-101, 1981.