

고온용 폴리머 윤활 베어링의 특성 연구

김상근* · 김병관 · 한종대†

*세플러 코리아(주), 창원대학교 화공시스템공학과

Preparation and Characterization of Polymer Lubricating Bearings

Sang-Keun Kim*, Byung-Kwan Kim and Jong-Dae Han†

*R & D Center, Schaeffler Korea Corp.

Dept. of Chemical Engineering, Changwon National University

(Received July 15, 2008; Revised July 28, 2008; Accepted August 4, 2008)

Abstract – Microporous polymer lubricants(MPLs) are solid polymer materials containing micropores which are filled with liquid lubricants, and which are molded or formed to suit rolling bearings or other machine parts requiring lubrication. MPLs can be effectively applied to provide long-term, maintenance-free lubrication of a variety of machine elements without fully replacing of oils and greases. The application of rolling bearings packed fully with an MPL could reduce or eliminate the problems such as grease deterioration, leakage, under-lubrication caused by insertion of water or foreign matters under severe operation conditions. This paper discuss the application of MPLs for lubrication of rolling ball bearings. Two different MPLs were synthesized and the features of MPLs were tested. Characteristics of the bearings which are packed fully with synthesized MPLs were investigated using SEM, TG/DSC, extents of oil leakage, OIT, and life time test. After these preliminary tests twelve MPLs were synthesized and evaluated by measuring extents of oil leakage and OIT values. Then synthesis conditions for the optimum MPL were selected by SSRED(Six Sigma Robust Engineering Design) program using extents of oil leakage and OIT values respectively. The optimum MPL by means of OIT value showed higher performance such as long life time and application at higher temperature of 140°C than previous temperature of 100°C.

Key words – polymer lubricant, rolling bearing, polyethylene

1. 서 론

폴리머 윤활제(MPLs, microporous polymer lubricants)는 일반적으로 베어링용으로 이용되는 그리이스와 동일한 오일을 수지재료로 고형화 시킨 것이다. 폴리머 윤활제는 오일이나 그리이스의 완전한 교체 없이 적용이 가능하고 장비의 수명동안 윤활작용을 하므로 윤활유의 재공급이 필요 없으며 윤활제의 과부족과 누출을 방지할 수 있고 계절적인 교체 등의 필요가 없어 유지가 간편하다. 또한 적은양의 윤활제가 사용되므로 더욱 고가의 오일이나 첨가제의 적용이 가능하여 초저온이나

고온용 윤활 베어링의 제작이 가능하다[1]. 폴리머 윤활제의 적용은 먼지와 수분의 접촉이 되는 각종 산업용 베어링 또는 원심력을 받아 윤활제의 누설이 심한 곳의 베어링 분야에서 활용이 기대된다.

구름베어링은 산업기계, 모터, 가전기기, 자동차용 등의 다양한 분야에 적용이 되고 구름베어링의 80% 이상에서 윤활용 그리이스를 사용하고 있으며 이는 구조가 간단하고 취급이 용이하기 때문이다[2]. 일반적으로 윤활 그리이스는 오일의 보유기구를 증주제(thickener)로 한 반고체상이다. 반면 폴리머 윤활제는 수지가 미세한 다공질의 구조를 형성하고 형성된 작은 세공이 윤활유를 보유하는 형태[1,3]로 고형상을 이루고 있다. 일반적인 취급조건에서는 오일이 흘러나오지 않으며 표면

†주저자 · 책임저자 : jdhan@changwon.ac.kr

에 매우 얇은 오일 막으로 덮여있는 일반적인 플라스틱처럼 보인다[1]. 폴리머 윤활제는 조성이 고품으로 되어있는 MoS₂, graaphite와 같은 고체 윤활제와도 다르다.

폴리머 윤활제는 1965년 미국의 Joseph E. Ferrir에 의하여 최초로 기본적인 기술이 확립하였으며, 1~3×10⁶의 분자량을 갖는 PE(polyethylene) 수지와 광유로 구성된 윤활 조성물과 그 제조방법에 관한 특허를 출원하였다. 수지로는 PE(polyethylenes), PP(polypropylenes), PMMA(polymethy methaacrylates) 등의 열가소성 수지가 일반적으로 사용되며 에폭시(epoxies), PU(polyurethanes)와 같은 열경화성 수지가 사용되기도 한다. 오일은 광유(mineral oils), 합성유(synthesized hydrocarbons), esters, silicones 등이 사용된다[1].

폴리머 윤활제는 수지의 분말에 폴리머 윤활제 질량의 80%까지 윤활유를 혼합하고 수지의 용점 이상의 온도로 가열한 후 고품화를 시켜 제조한다[1]. 윤활유 중에 분산된 수지의 입자는 용융점 이상으로 가열시키면 주변의 유분을 흡수하여 용융하고 다른 주변의 입자와 결합한다. 이렇게 혼합된 윤활 조성물은 전체적으로 겔(gel)상이 된다. 이것을 냉각하면 수지분이 미세한 다공질 구조를 형성하고 이러한 기공에 다량의 오일을 함유한 상태로 고품화 한다. 수지의 기공은 수 크기 정도의 대단히 미세한 구조를 이루므로 유분이 즉시 분리되어 유출 또는 고갈되는 것을 방지한다. 고품화가 가능한 윤활제로는 오일과 그리이스를 이용할 수 있다. 오일을 이용한 폴리머 윤활제는 수지분말과 혼합된 원료(미고형 시)의 유동성 때문에 그리이스를 이용한 경우와 비교하여 보면 복잡한 형상의 베어링 공간용적에서의 고품화를 용이하게 하고 동시에 균질한 제조가 가능한 특성을 가지고 있다.

폴리머 윤활제의 오일은 표면장력에 의하여 미세한 다공질 내부에 존재하게 되며, 압력, 열, 모세관 흡수력의 작용으로 스며 나오고 마찰면에 공급되어 윤활작용을 하게 된다[1]. 폴리머 윤활제에 직접적인 하중에 의한 압축을 가하면 수지의 다공질 구조는 탄성변형을 한다. 압축변형에 의한 체적이 감소하여도 함유한 유분은 압축되어 폴리머 윤활제의 내압을 상승 시키고 이와 같은 내압에 의해 유분이 스며 나온다. 다시 하중을 제거하면 수지구조는 탄성력에 의해 원상태로 복원된다. 이때 유분을 배출한 표면 부근과 폴리머 윤활제 내부와의 유압차가 발생하여 내부에 저장되었던 유분은 표면 부근에 보충된다.

주된 오일 윤활작용은 열과 모세관력에 의한 심지작

용 이다[1]. 폴리머 윤활제는 열에 의하여 윤활제가 표면으로 스며 나온다. 폴리머 윤활제에 사용되는 윤활유의 열팽창계수는 수지의 열팽창계수보다 더 큰 수치를 나타낸다. 때문에 동일한 온도로 가열되어도 수지보다 윤활유 쪽이 더 크게 팽창하여 유분이 폴리머 윤활제의 표면으로 스며나와 윤활작용을 한다[1]. 기계가 작동될 때 약간의 열이 발생하므로 이는 기계부품으로 적용될 때 유리한 요소가 된다.

폴리머 윤활제의 수지 쪽의 다공질 구조는 매우 미세(수μm크기)하여 유분의 표면장력에 의해 모세관현상이 생긴다. 고분자 윤활제가 표면 위를 미끄러질 때 표면장력에 의한 모세관력으로 오일이 스며나와 고분자 표면에 얇은 막을 형성하게 된다[1]. 모세관 현상은 윤활제 표면의 유막 두께를 일정하게 해준다. 표면에 유막이 소모되어도 내부에서 유분이 스며 나오게 되며 유분이 스며 나오는 양은 수지의 입자크기, 오일의 점도, 표면장력 등에 영향을 받는다. 표면에 남아있는 유분이 충분히 많으면 내부의 유분이 포화될 때까지 흡수하는 작용도 있어 한번 유출된 유분을 다시 폴리머 윤활제 중에 흡수하여 저장하는 특성을 갖는다.

본 연구에서는 베어링에 적용이 가능한 일반용 폴리머 윤활제와 고온용 폴리머 윤활제의 2종을 합성하여 제작하고 특성을 조사하였다. 이를 바탕으로 최적 고온용 폴리머 윤활제의 합성조건을 선정하여 제조하고, 제조된 폴리머 윤활제의 기초적 물성시험과 구름베어링에 응용한 수명시험으로 성능을 비교 평가하였다.

2. 시료제조 및 시험방법

2-1. 폴리머 윤활제의 제조

시험을 위한 폴리머 윤활제의 고분자 수지는 내열성이 우수한 고분자량의 HDPE(high density polyethylene) 2종을 사용하였다. 사용된 수지는 저온용(100°C용)의 HDPE(high density polyethylene, molecular weight 1-3×10⁶)와 고온용(140°C용)의 UHMWPE(ultra high molecular weight polyethylene, molecular weight 3-5×10⁶, HIZEX Million, Mitsui Chemical, Japan)를 구분하여 표기하였다.

윤활유로 적용된 오일은 기본적으로 산화안정성과 내열성이 우수한 ester 오일을 사용하였다. 폴리머 윤활제의 배합비율은 수지 40 wt%에 오일 60 wt%의 비율을 기본으로 하고 가공성과 성능 향상을 위한 산화방지제와 마모 방지제를 각각 1.0 wt%와 1.5 wt%

Table 1. Conditions of oil leakage test

Classification	Bearing A	Bearing B
Direction of centrifugal acceleration	Radial	Axial
Centrifugal acceleration	3,000 G	
Test bearing	PG6000AAF	
Ratational speed	0 min ⁻¹ (static)	

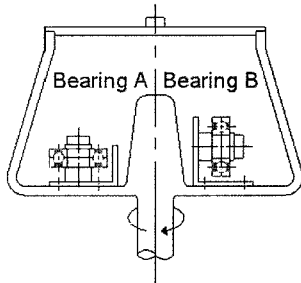


Fig. 1. Schematic diagram of oil leakage tester.

로 첨가하여 160~180°C로 혼합 교반시켜 합성을 하였다. 용융혼합 공정이 끝나면 상온까지 냉각시킨 후 200°C, 10 kg/cm²으로 고온에서 가압하며 성형하여 폴리머 윤활제를 제작하였다.

2.2. 시험방법

가공 전후의 폴리머 수지의 구조는 SEM(JEOL, JSM-5610 Scanning Electron Microscope)으로 조사하였다. 분석을 위하여 HDPE, UHMWPE의 분말은 그대로 백금으로 코팅한 후 분석하였다. 제조된 폴리머 윤활제는 상온에서 benzene으로 오일을 완전히 추출한 후 건조하고 백금으로 코팅하여 분석하였다.

폴리머 입자와 제조된 폴리머 윤활제의 열적 특성은 열분석기(TGA/DSC, SDT 2960 TA Co.)를 사용하였다.

누유량(extent of oil leakage)은 Table 1과 같은 조건의 원심가압하에서 32시간 동안 시험하면서 1시간 간격으로 중량감소분을 측정하였다. 시료당 5회를 실시하여 전체측정치의 산술평균값을 누유량으로 사용하였다. 사용된 원심가속기는 Fig. 1과 같다.

폴리머 윤활제의 OIT(oxidation index time) 값은 PDSC(pressure differential scanning claorimeter, PSC-TGA SDT2960 TA Co.)시험기를 이용하고 ASTM D5483의 시험규격에 준하여 시험하였다[4]. OIT값이 클수록 산화 및 열적 특성이 유리하다고 볼 수 있다[4,5].

성능평가를 위한 회전토크 분석은 1,800 rpm에서

Table 2. Conditions of polymer lubricant life test

Test bearing	PG6000AAF
Amount of MPLs	1.5±0.1 g (100% volume of free space)
Temperature	140°C, Max. 250°C
Rotational speed	3,000 rpm, Max. 10,000 rpm
Applied load	100 kg _r

10분간 회전시켜 토오크를 안정화 시킨 후에 8시간 동안 1시간 간격으로 회전토크를 측정하였다.

고속에서의 성능을 평가하기 위한 열안정성 시험은 10,000 rpm으로 상온에서 450시간 동안 실시하며 시간에 따른 베어링의 온도변화를 측정하였다.

내구성의 평가를 위한 수명시험은 Table 2와 같은 조건에서 시험베어링을 사용하여 수명시험기[6]에서 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

제작된 폴리머 윤활제의 기본적인 물성을 측정하기 위한 방법과 시험결과는 Table 3과 같다. 경도값은 70 HS_A을 나타내었으며, 이는 고무(NBR)와 PA66 플라스틱의 중간정도 경도가 된다. 인장강도는 10 MPa 이상의 양호한 값을 나타내고, 굴곡탄성율은 고무(NBR)의 2.5배에 달하는 우수한 성능을 보였다. HDPE 보다는 UHMWPE를 사용한 고온용이 전반적인 고분자 물성이 우수하게 나타났다.

제조된 윤활제를 베어링에 직접충진(베어링의 용적 공간에 100% 충전)하여 폴리머 윤활베어링을 제작하

Table 3. Physical properties of polymer lubricants with HDPE and UHMWPE

Properties	Test method	Unit	HDPE	UHMWPE
Specific gravity	ASTM D792	g/cm ³	1.1	1.2
Hardness	KS M6518	HS _A	70	70
Tensile strength	ASTM D638	MPa	14	15
Tensile elongation	ASTM D638	%	13	16
Flexural modulus	ASTM D790	MPa	250	270

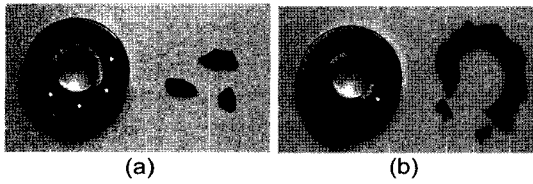


Fig. 2. Photographs of ball bearings packed fully with polymer lubricants with (a) HDPE and (b) UHMWPE after life test.

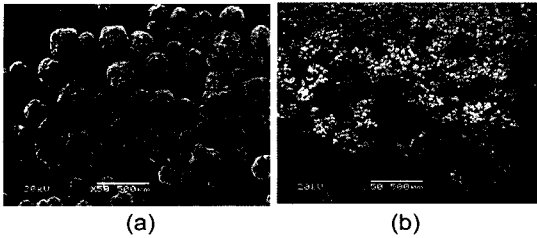


Fig. 3. SEM images of powders of (a) HDPE (50x), (b) UHMWPE (50x).

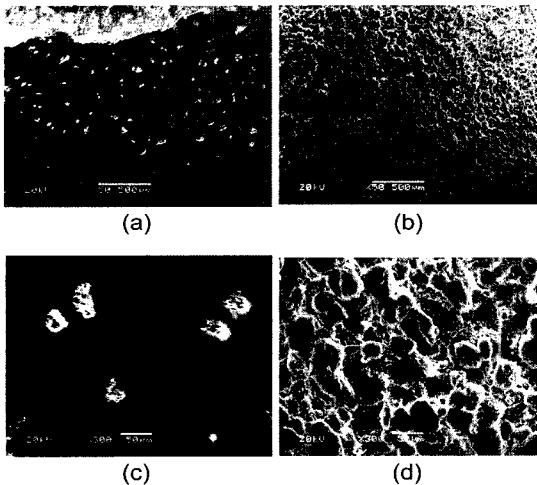


Fig. 4. SEM images of polymer lubricants with (a) HDPE (50x), (b) UHMWPE (50x), (c) HDPE (300x), and (d) UHMWPE (300x).

고 수명시험 한 후의 모양은 Fig. 2과 같다. 수명시험 후에 일반용의 HDPE 윤활제는 변색과 함께 변형되고 건조한 표면의 특성을 보였으나, 고온용의 UHMWPE 윤활제는 색상을 유지하고 원래의 형태를 많이 보존하고 있었다.

가공전의 수지 분말의 SEM 사진은 Fig. 3과 같다. HDPE는 50~200 μm 정도의 크기를 나타내었고, UHMWPE는 50 μm 정도의 입자 크기를 나타내었다.

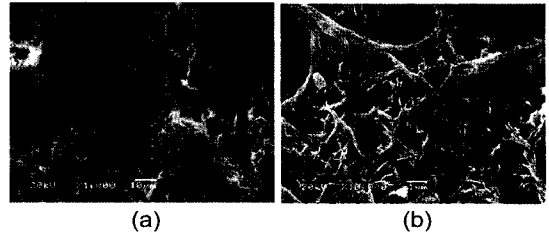


Fig. 5. SEM images of polymer lubricants with (a) HDPE (1,000x) and (b) UHMWPE (10,000x) after life test.

제작된 폴리머 윤활제의 SEM 사진은 Fig. 4와 같다. 모두 미세한 망상의 구조를 나타내고 있었다. HDPE 윤활제는 다소 큰 입자들 때문인지 미세한 기공과 함께 다소 큰 10~20 μm 정도의 기공이 형성되어 있었다. 반면 고온용의 UHMWPE 윤활제는 아주 균일한 미세 기공이 잘 형성되어 있었다.

수명시험 후의 폴리머 윤활제의 SEM 사진은 Fig. 5와 같다. HDPE 윤활제는 수명시험 후에 50 μm 정도의 입자들이 엉겨있는 형태를 나타내었으며 수명시험 전의 폴리머 윤활제에서와 같이 10~20 μm 정도의 다소 큰 기공도 관찰되었다. 반면 UHMWPE 윤활제는 수명시험 후에 10~20 μm 정도의 기공이 나타나기도 하였으나 수명시험 전의 폴리머 윤활제의 형태를 대부분 유지하고 있었으며 가교 결합된 수지의 전형적인 다공성 구조를 잘 나타내었다.

가공되기 전의 HDPE와 UHMWPE의 TG/DSC 결과는 Fig. 6(a)와 같다. DSC 피크를 보면 HDPE와 UHMWPE의 녹는점은 각각 145°C와 147°C 정도를 나타내고 약 250°C 정도에서 발열피크를 나타내어 결정성이 형성되어 있음을 알 수 있으며 HDPE보다는 UHMWPE의 결정성이 더욱 많음을 알 수 있다. 이들 HDPE와 UHMWPE를 사용하여 합성한 폴리머 윤활제의 TG/DSC 결과는 Fig. 6(b)와 같다. 가공된 폴리머 윤활제의 녹는점은 134°C와 135°C 정도로 가공전의 폴리머 입자보다 낮은 값을 나타낸다. 이는 폴리머 윤활제에 존재하는 윤활오일 때문으로 생각된다. HDPE 윤활제의 경우에는 250~290°C 정도에서 발열 특성을 나타내며 가교결합에 의한 결정성이 형성된 특성을 나타내고 있으며, UHMWPE 윤활제의 경우에는 290°C 정도에서 발열특성을 나타내며 HDPE에 비하여 가교결합에 의한 결정성이 강하게 형성되어 있음을 나타낸다. 이후 370°C 정도에서 오일의 분해피크가 나타나고, 500°C 정도에서 PE의 분해피크를 나타내고 있

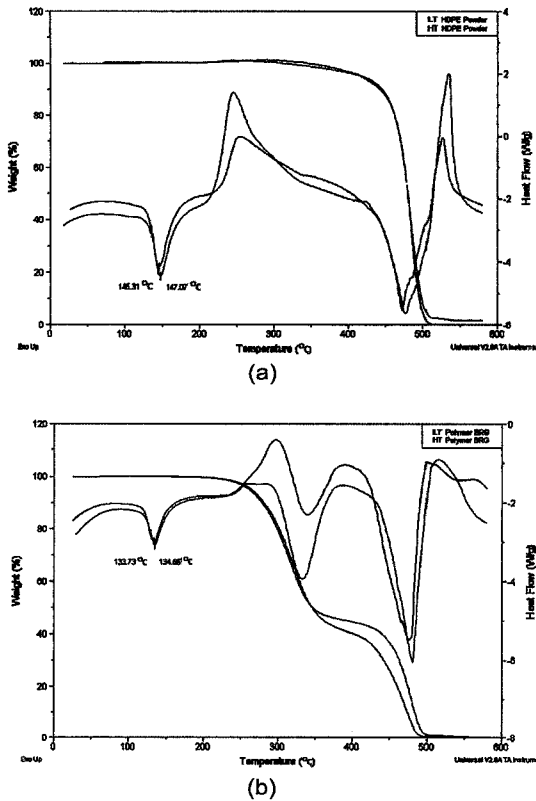


Fig. 6. TG/DSC analysis curves of (a) polymer powders, (b) polymer lubricants.

다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)의 TG 특성을 비교하면 폴리머 윤활제의 경우에 가교결합이 분해되기 시작하는 것으로 나타난 250°C 정도에서 오일이 세공을 빠져나오고 증발에 의한 질량이 감소하는 것으로 나타났다.

원심가속도 하에서의 누유시험 결과는 Fig. 7과 같다. HDPE 윤활제의 누유량이 UHMWPE 윤활제의 누유량 보다 다소 적게 나타났으나 값으로 보면 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있다.

회전토크 시험결과는 Fig. 8과 같다. 토크 성능은 UHMWPE 윤활제가 HDPE 윤활제 보다 우수한 성능을 보였다.

고속 열안정성 시험결과는 Fig. 9와 같다. 열안정성 특성에서도 UHMWPE 윤활제가 HDPE 윤활제 보다 양호한 성능을 나타내었다.

UHMWPE는 정형외과용 이식조직에서의 베어링 물질로 많이 사용되고 있으며[7,8], 고분자 수지가 가진 약한 마모 저항성과 짧은 수명의 한계를 극복하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. HMMWPE의 결정화

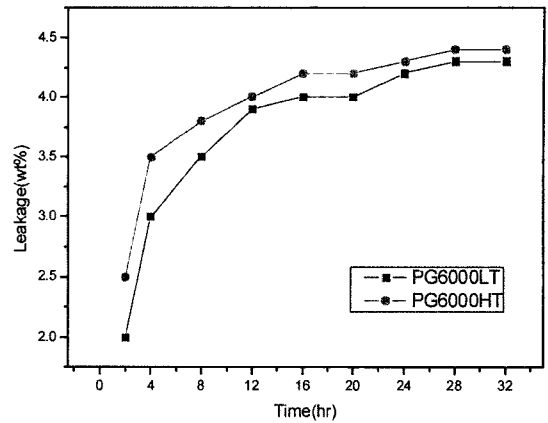


Fig. 7. Result of oil leakage test.

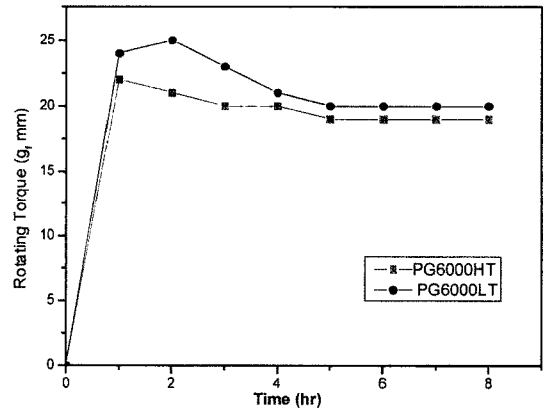


Fig. 8. Results of rotating torque test.

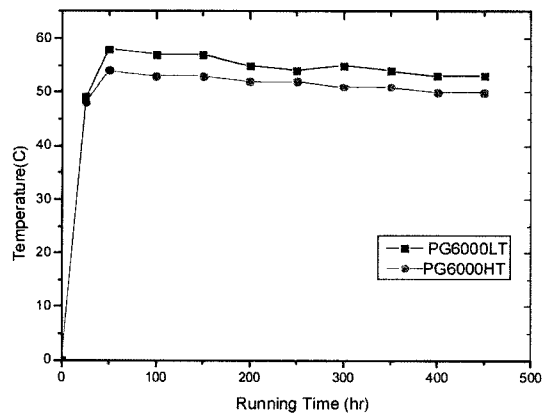


Fig. 9. Results of high speed running heat stability test.

조건은 UHMWPE의 조직형태에는 큰 영향을 미치지 만 기계적인 특성에는 큰 영향을 미치지 않는다고 하

였다[7]. 그러나 결정성의 증가는 피로균열진행 저항(fatigue crack propagation resistance)에는 유리한 요소로 알려져 있으며, 고압공정에서 결정성이 증가하는 것으로 알려져 있다[8]. UHMWPE의 마찰 거동을 조사한 결과 건조된 상태보다는 윤활제가 존재하는 경우에 마모속도가 낮게 나타났다[9]. 이는 건조된 상태에서는 주로 찢기(tearing)와 균열진행(crack propagation)의 반복적인 작용 때문에 높은 마모 속도가 나타나는 것으로 설명하고 있다.

이와 같이 내구성과 윤활성능이 우수한 폴리머 윤활제를 합성하려면, 결정성이 우수하고 미세한 세공이 잘 형성되어 윤활 오일을 잘 보유하고 있는 형태를 가지는 합성조건을 찾아야 한다. 또한 고압공정으로 처리한 후에 결정성이 증가하는 것으로 알려져 있어[8] 성형시의 조건도 중요하다.

이들 시험 및 분석 결과를 바탕으로 최적의 폴리머 윤활제 합성조건을 찾기 위하여 수지종류, 수지함량, 가소제 및 산화방지제 등의 종류와 함량 및 반응온도 등의 폴리머 윤활제 합성조건을 인자로 하여 공학적인 표준 직교표를 작성하였다. 로버스트 공학(SSRED, Six Sigma Robust Engineering)을 응용한 공학적인 표준 직교표의 작성은 최적화에 유용한 방법으로 알려져 있다[2]. 작성된 직교표의 인자를 변수로 사용하여 12종의 폴리머 윤활제를 합성하고, 폴리머 윤활제의 누유량과 OIT값을 조사하였다. 이들 누유량과 OIT값을 각각 사용하여 로버스트 공학을 응용한 최적의 폴리머 윤활제의 합성을 위한 조건을 선정하였다. 선정된 방법을 이용하여 최적의 폴리머 윤활제를 합성하고, 합성된 폴리머 윤활제의 물성과 수명을 조사하여 기존의 폴리머 윤활제의 성능과 비교평가 하였다.

OIT 값을 기준으로 최적화된 폴리머 윤활제의 제한

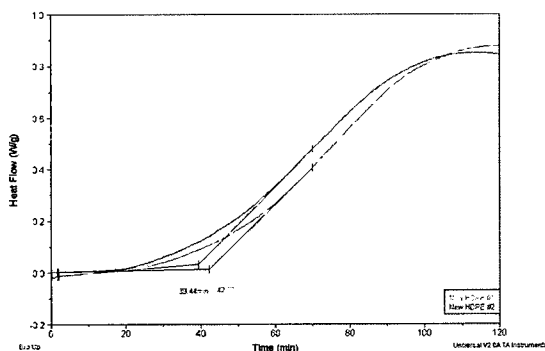


Fig. 10. OIT values of optimized polymer lubricant at 500 psi and 160°C.

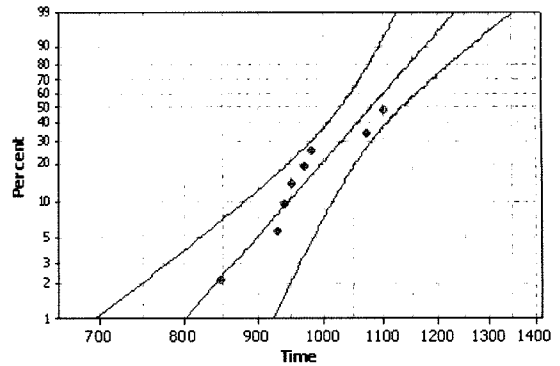


Fig. 11. Results of life test.

시험된 OIT 측정결과는 Fig. 10과 같다. 최적화 프로그램에서 예상된 OIT 값은 40.12 정도 였는데 합성된 폴리머 윤활제의 OIT값은 측정결과 39.44와 42.30을 나타내며 예상치의 값을 얻을 수 있었다.

Fig. 11은 OIT 값을 기준으로 최종 선정된 최적 폴리머 윤활제의 140°C에서의 수명시험 평가의 결과이다. 최적화된 폴리머 윤활제는 기존의 100°C 보다 높은 140°C에서의 적용이 가능하였다. OIT 값을 기준으로 최적화된 폴리머 윤활제의 수명시간(L_{10} 수명, 신뢰도 95%)은 950시간으로 이유도를 기준으로 한 최적 폴리머 보다 1.5배 정도의 긴 수명을 나타내었다. 이들 결과로부터 폴리머 윤활제의 최적화 도구로 누유량 보다 OIT 값을 활용하는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

OIT 값은 urea계 그리이스의 특성 평가에서도 효과적인 기준이 되었는데[2], 폴리머 윤활제의 평가 도구로도 효과적인 것으로 나타났다.

4. 결 론

이상의 결과로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 폴리머 윤활 조성물의 물성은 양호하게 나타났으며, 분자량이 크고 입자가 균일한 UHMWPE를 사용한 윤활 조성물이 다소 우수한 특성을 보였다.
2. 폴리머 윤활제에서 PE수지는 미세한 망상구조를 가지고 오일을 효과적으로 보유하며 그리이스에서의 증주제와 같은 역할을 하는 것으로 나타났다.
3. 로버스트 공학을 응용한 최적화 프로그램은 유용하였고 누유량 보다는 OIT 값의 활용이 효과적으로 나타났다.
4. 최적화된 폴리머 윤활제는 장수명을 나타내었고 기존의 100°C 보다 높은 140°C에서의 적용이 가능하였다.

후 기

이 논문은 2006년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었으며, 세플러 코리아(주)의 지원과 협조에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Jamison, W. E., "Applications of Microporous Polymer Lubricants," *Lubrication Engineering*, Vol. 38, No. 12, pp. 758-761, 1982.
2. Kim, S. K., Kim, B. K. and Han, J. D., "A Study on Synthesis and Characteristics of the Optimum Urea Type Greases for Rolling Bearings," *J. KSTLE*, Vol. 22, No. 5, pp. 269-275, 2006.
3. Jamison, W. E., Nelson, C. D. and Cuckler, J. H., "New Developments in Microporous Polymer Lubricants," *Lubrication Engineering*, Vol. 41, No. 5, pp. 274-279, 1984.
4. Rhee, I. S., "Development of a New Oxidation Stability Test Method for Grease Using a Pressure Differential Scanning Calorimeter," NLGI's 57th Annual Meeting, TA-052, pp. 2-11, 1990.
5. Keller, M. A. and Sara, C. S., "Behavior of High Temperature Lubricants in a Pressure Differential Scanning Calorimeter," *Trans. Trans.*, Vol. 41, No. 4, pp. 586-592, 1998.
6. Kim, S. K., Park, C. N., Kim, B. K. and Han, J. D., "Study on Oxidation Stability and Life of Rolling Bearing Grease," *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, Vol. 15, No. 8, pp. 907-912, 2004.
7. Turell, M. B. and Bellare, A., "A Study of the Nanostructure and Tensile Properties of Ultra-high Molecular Weight Polyethylene," *Biomaterials*, Vol. 25, pp. 3389-3398, 2004.
8. Simis, K. S., Bistolfi, A., Bellare, A. and Pruitt, L. A., "The Combined Effects of Crosslinking and High Crystallinity on the Microstructural and Mechanical Properties of Ultra High Molecular Weight Polyethylene," *Biomaterials*, Vol. 27, pp. 1688-1694, 2006.
9. Liu, C. Z., Wu, J. Q., Li, J. Q., Ren, L. Q., Tong, J. and Arnell, A. D., "Tribological Behaviours of PA/UHMWPE Blend under Dry and Lubricating Condition," *Wear*, Vol. 260, pp. 109-115, 2006.