

17RTRP-
C137646-01

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개() 발간등록번호 (11-B552989-000140-01)
철도기술연구사업 2019년도 최종보고서

R&D / 17RTRP-C137646-01

나 고
노 성
유 능
체

기 저
반 비
용

철
도 운
차
량 제

회 개
전 발
기
용

최
종
보
고
서

2019

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

나노유체 기반 철도차량 회전기기용 고성능 저비용 운할제 개발 최종보고서

2019. 8. 20.

주관연구기관 / (주)원에스티
공동연구기관 / 한국철도기술연구원
위탁연구기관 / 한국화학연구원

국 토 교 통 부

(전문기관) 국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘나노유체 기반 철도차량 회전기기용 고성능 저비용 윤활제 개발’(연구개발 기간 : 2017. 10. 23 ~ 2019. 6.22) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2019. 8. 20.

주관연구기관명 : (주)원에스티	(대표자) 이 택 원 (인)
공동연구기관명 : 한국철도기술연구원	(대표자) 나 희 승 (인)
위탁연구기관명 : 한국화학연구원	(대표자) 김 성 수 (인)

주관연구기관책임자: 현 준 수
공동연구기관책임자: 김 보 경
위탁연구기관책임자: 김 윤 호

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	17RTRP-C137646-01	해당 단계 연구 기간	2017.10.23 ~ 2019.6.22	단계구분	1/1
연구사업명	중사업명	철도기술연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	나노유체 기반 철도차량 회전기기용 고성능 저비용 윤활제 개발			
	세부과제명				
연구책임자	현준수	해당단계 참여연구원 수	총: 18명 내부: 14명 외부: 4명	해당단계 연구비	정부: 612 천원 민간: 204 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 816 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 18명 내부: 14명 외부: 4명	총 연구비	정부: 612 천원 민간: 204 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 816 천원
연구기관명 및 소속 부서명	(주)원에스티			참여기업명	
공동연구	연구기관명: 한국철도기술연구원			연구책임자: 김보경	
위탁연구	연구기관명: 한국화학연구원			연구책임자: 김윤호	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	
-------------------------	--

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기탁 번호	1(게재) 1(제출)	1 (출원)	1		1		1				

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)	보고서 면수 110
---	------------

요약문

연구의 목적 및 내용	○ 철도차량 구동장치 중 기어박스에 활용되는 베어링의 윤활, 냉각성능 및 수명향상을 위해 기계적 성능 (강도, 전도도, 친환경성 등)이 우수한 나노유체 (Nano-fluids) 기반 윤활제 (oil) 제조기술 개발 - 기존 윤활제 대비 마모율 및 냉각성능 20~40 % 향상 - 사용 수명 3~5년 연장 ○ 나노유체 기반 윤활제 시작품 제조, 부품단위/현차적용 시험 평가를 통한 상용화 기반 마련				
연구개발성과	○ 나노유체 기반 철도 기어박스용 윤활제 시작품 개발 - 알루미늄 나노입자 함유 기어박스용 나노유체 윤활제 개발 - 나노입자 표면처리 공정 최적화를 통한 열특성, 분산 장기안정성 향상 - 개발성과품 소재 물성 공인시험성적서를 발급을 통한 적용성 확보 ○ 개발 윤활제 부품단위 적용시험을 통한 윤활 성능 검증 - RCF 부하시험 결과, 기존 제품 대비 베어링 마모율 약 40 % 향상 - RCF 부하 가속운영 중 기존 제품 대비 온도저감을 26.8 % 이상 실현 - 가속수명시험 환산을 통한 윤활제 수명 2.6 배 향상 평가 ○ 대전도시철도 운영노선 적용을 통한 개발품 현차적용 가능성 검증 - 도시철도 운영노선 차량 기존 윤활제 및 개발 성과품 동시 적용 - 3개월 적용시험 후 성과품 물성 유지 검증 - 시험 중 피크열 및 온도구배 저감 효과 확인 ○ 나노유체 기반 철도차량 기어박스용 윤활제 대량생산 방안 및 유지보수 매뉴얼 도출				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 기존 고속철도 및 도시철도 차량용 기어박스 윤활제 대체 기술로 활용 - 나노유체 윤활제의 기계적 성능 및 수명향상으로 인한 철도차량의 운행 효율 향상, 유지보수 비용 저감 효과 ○ 다양한 기계류 윤활제 성능향상을 위한 나노유체 윤활제 연구 확대 - 나노유체 기반 윤활제 제조기술의 핵심기술을 응용하여 타 산업분야 (윤활제 및 베어링 제조)로의 기술과급 및 성과확산 가능 ○ 나노유체 기반 윤활제 제조기술의 윤활제 제조 및 철도차량용 베어링 관련 업체로의 기술이전 - 철도 차량용 베어링의 국산화 시 베어링 신뢰성 및 수명 향상을 위한 기술 제시 가능 ○ 소재 및 제조기술, 부품단위 및 현차시험 결과 등을 토대로 국내 상용화 후 해외시장 진출 추진 - Global Industry Analysts, Inc. 에 따르면 2018년 전세계 베어링 시장의 규모가 1,010억 달러에 달할 것으로 예상				
국문핵심어 (5개 이내)	윤활제	나노유체	철도차량	기어박스	베어링
영문핵심어 (5개 이내)	Lubricant	Nano-Fluid	Railway car	Gearbox	Bearing

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	1
1.1. 연구개발의 목적 및 범위	1
1.2. 연구개발의 필요성	2
1.3. 연구개발의 중요성	5
2. 국내외 연구개발 현황	7
2.1. 국외 기술 동향	7
2.2. 국내 기술 동향	9
3. 연구수행 내용 및 성과	11
3.1. 철도차량 윤활제 요구사항 분석	11
3.2. 나노입자 선정 및 물성 분석	26
3.3. 나노유체 윤활제 제조 및 성능평가	37
3.4. 부품단위 윤활성능 평가	47
3.5. 현차적용 시험 및 성능 평가	72
3.6. 나노유체 윤활제 상용화 방안 연구	98
4. 연구 목표 달성도	101
5. 연구개발성과의 활용 계획	105
6. 참고문헌	107

< 그 림 목 차 >

그림 1-1-1. 연구개발 목표	1
그림 1-2-1. 철도차량 내 윤활제 사용 회전부품	2
그림 1-2-2. 베어링의 고착 마모 손상과 손상 메커니즘	3
그림 1-2-3. 나노 유체 기반 윤활제 개념도	4
그림 1-2-4. 자동차 엔진용 나노 고체윤활제 (NanoLub)의 내마모성 향상	4
그림 2-1-1. NanoMaterials 구상형 고체윤활제의 마모특성	7
그림 2-1-2. 연도별 및 국가별 세계 윤활제 시장 규모	8
그림 3-1-1. KTX-산천 차축 감속장치(기어박스) 부하시험 하중 사이클	12
그림 3-1-2. KTX 기어박스 구조 및 실물 이미지	13
그림 3-1-3. 도시철도 (전동차) 기어박스 구조 및 실물 이미지	14
그림 3-1-4. 국내 철도 기어유 사용 현황 및 점도특성	17
그림 3-1-5. 기술 Concept 요약도	22
그림 3-1-6. 연도별 논문 출판	23
그림 3-1-7. 나노윤활제 분야 논문 국가별 분석	23
그림 3-1-8. 기어유 및 철도차량 분야 논문 국가별 분석	24
그림 3-1-9. 나노윤활제 및 기어유 분야 특허 분석	24
그림 3-1-10. 윤활제 시장 규모 분석	25
그림 3-2-1. 나노입자에 따른 윤활제의 평균 마모율 비교	26
그림 3-2-2. 나노금속입자에 따른 나노유체의 열전도 특성	27
그림 3-2-3. 계면활성제와 표면처리 간 탄소나노튜브 나노유체의 입도 비교	28

그림 3-2-4. 실제 제작된 탄소나노튜브 기반의 나노유체 (0.05 및 0.1 vol%)	28
그림 3-2-5. 상용기어유 내 0.5 vol% 나노입자 (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3)의 분산능	29
그림 3-2-6. 상용윤활제 내 알루미나 입도분포	30
그림 3-2-7. 상용윤활제 내 TiO_2 및 SiO_2 입도분포	30
그림 3-2-8. APTES로 처리된 (a) Al_2O_3 , (b) TiO_2 , (c) SiO_2 의 SEM 이미지	31
그림 3-2-9. 나노유체 윤활제의 열전도도 분석장치	32
그림 3-2-10. 수용액 내 나노알루미나의 함유량 별 열 전도도	32
그림 3-2-11. 알루미나 및 알루미나-APTES 함량에 따른 나노윤활제 열전도도	33
그림 3-2-12. 나노금속입자-APTES 함량에 따른 나노윤활제 열전도도 실험값	34
그림 3-2-13. 나노유체 열전도도 측정 시스템	34
그림 3-2-14. 나노유체의 열전도도 계산을 위한 변수 설정	35
그림 3-3-1 APTES를 이용한 Al_2O_3 나노입자 표면처리 모식도	37
그림 3-3-2. APTES로 표면처리된 Al_2O_3 나노입자의 TGA 열분석, TEM 및 원소 분석 ·	39
그림 3-3-3. 나노입자 APTES 표면처리 및 함량에 따른 분산안정성 결과.	40
그림 3-3-4. Turbiscan-AGS 장비와 Back Scattering Transmittance 측정 원리 모식도 ·	41
그림 3-3-5. 나노유체 윤활제의 장기 분산안정성 Turbiscan 결과	42
그림 3-3-6. 다양한 조성을 가지는 나노유체 윤활제의 장기 분산안정도	44
그림 3-3-7. 농도별 나노유체 재분산 Turbiscan 결과	45
그림 3-3-8. APTES-NP 나노유체 윤활제의 분산횟수에 따른 장기분산안정성 평가	46
그림 3-3-9. 나노유체 윤활제를 이용한 4-Ball 테스트 분석	47
그림 3-4-1. RCF 시험기	49
그림 3-4-2. 6개 볼을 사용한 시험편의 응력 계산 결과	50
그림 3-4-3. 시험기 사진	51
그림 3-4-4. 시험편 고정구의 설계	54
그림 3-4-5. 시험 전. 후 RCF 시험편	55

그림 3-4-6. 기존 윤활제의 수명	57
그림 3-4-7. 나노 윤활제의 수명	57
그림 3-4-8. RCF 시험편의 표면 형상 비교	58
그림 3-4-9. RCF 시험 중 온도변화 곡선	59
그림 3-4-10. 고무셀의 형상	61
그림 3-4-11. 시험 시간별 썰림의 변화	63
그림 3-4-12. 시험 후 베어링 내부 (900시간)	63
그림 3-4-13. 베어링 썰의 장착시 변형, * 베어링 기술 - 한화베어링	64
그림 3-4-14. 베어링 썰 단면 (시험 전.후 비교)	64
그림 3-4-15. 베어링 궤도륜과 썰 형상 (시험 전.후 비교)	65
그림 3-4-16. 베어링 썰 단면 (시험 전.후 비교)	65
그림 3-4-17. 4-Ball 시험기 및 시험 볼 위치	67
그림 3-4-19. 기어박스에 사용하는 테이퍼 롤러 베어링의 접촉응력 계산 결과	70
그림 3-4-20. 고속철도차량 기어박스 외형	71
그림 3-5-1. 기어박스 센서 설치 위치(1)	75
그림 3-5-2. 기어박스 센서 설치 위치(2)	75
그림 3-5-3. 시험 윤활제 주입(2018.09.13)	78
그림 3-5-4. 기어박스 센서 설치 부착(4개소)	79
그림 3-5-5. 계측기 설치	80
그림 3-5-6. 전동차 운행기록(TCMS)	81
그림 3-5-7. 데이터 수집장치(WR310) 데이터	81
그림 3-5-8. 본선 시험 운행 데이터 분석	82
그림 3-6-1. 실험실 규모 나노윤활제 합성 단계	99
그림 3-6-2. 나노윤활제 생산 공정 모식도	100

< 표 목 차 >

표 3-1-1. 철도차량 주요 회전기기 부품	11
표 3-1-2. 전동차 무부하 실험결과	14
표 3-1-3. RCF 및 철도차량용 기어박스 운전 조건 비교	15
표 3-1-4. 고속철도 감속기유 점도 특성값	16
표 3-1-5. 디젤동차 감속기유 규격	16
표 3-1-6. 전기기관차 기어유 규격	16
표 3-1-7. 도시철도 윤활제 점검주기 및 방법	18
표 3-1-8. 고속철도 윤활제 점검주기 및 방법	19
표 3-1-9. 3P 분석용 Tool	22
표 3-1-10. 기술분석을 위한 핵심어 추출	22
표 3-2-1. 금속 나노입자 소재별 기본 물성	27
표 3-2-2. 입도분석을 위한 물성특성 값	29
표 3-2-3. 나노입자별 특성 비교분석	36
표 3-3-1. 다양한 조성을 가지는 나노유체 윤활제의 동점도 및 점도지수	40
표 3-4-1. 응력 계산 결과	53
표 3-4-2. RCF 시험결과 (기존 윤활제)	55
표 3-4-3. RCF 시험결과 (나노 윤활제)	56
표 3-4-4. RCF 온도데이터 분석	60
표 3-4-5. 쉘링 시험기 시험조건과 작동 시간	62
표 3-4-6. 4-Ball 시험결과 (Scar Diameter측정결과)	68
표 3-4-7. 기어 강도 계산 결과 (*유진기공)	69

표 3-4-8. 고속철도 기어박스 사양	71
표 3-4-9. RCF 및 철도차량용 기어박스 운전 조건 비교	72
표 3-5-1. 나노윤활제 물성 검증 결과	73
표 3-5-2. 윤활제 수분함량 분석	73
표 3-5-3. 시험 편성 및 차호 (대전도시철도 1호선)	74
표 3-5-4. 계측기 (WR310) 사양	76
표 3-5-5. 센서 사양	76
표 3-5-6. 기어박스 윤활제 규격(대전도시철도 1호선 전동차 적용)	77
표 3-5-7. 도시철도 기관별 윤활제 점검주기 및 방법	97
표 3-6-1. 국내 철도운영기관별 철도차량 보유현황	98
표 3-6-2. 성과품 상용화 제품단가 산출	100

1. 연구개발과제의 개요

1.1. 연구개발의 목적 및 범위

가. 연구 목표

- 기계적 성능 (강도, 전도도, 친환경성 등)이 우수한 나노유체 (Nano-fluids) 기반 윤활제의 상용화를 위한 제조기술 개발 및 성능 검증
 - 기존 윤활제 대비 기어박스 내 베어링 마모율 및 냉각성능 20~40 % 향상
 - 사용수명 3~5년 연장을 통한 유지보수비용 저감 및 환경성 증대
 - Two-step 기법을 이용한 나노유체 기반 윤활제 제조 및 물성 향상 기술 개발



그림 1-1-1. 연구개발 목표

나. 세부 연구 범위

- 나노유체 기반 철도차량 기어박스 베어링용 윤활제 요구성능 도출
 - 수요처 (철도운영기관/철도차량제작사) 요구사항 조사 및 분석
 - 철도차량 주요 회전기기 부품별 운용환경 분석
- 기초소재 설계 및 제조기술 개발
 - 적용 대상 철도부품 (기어박스)의 운용환경을 고려한 나노입자 특성 (점성, 열전도도 등) 설계 및 최적 나노입자 선정
 - 고속 및 도시철도 차량의 운용환경을 고려한 나노유체 기반 윤활제 적용방안 설계
 - 저농도 (~5 vol% 이하) 나노유체 기반 윤활제 제조기술 개발

- 유체 내 나노입자의 분산안정도 (colloidal stability)를 장기간 유지하기 위한 나노유체 합성방법 개발
 - 나노입자의 종류 (형상, 크기, 열특성 등), 유체조건 (농도, pH, Zeta potential)에 따른 대량 합성기술 개발
- 나노유체 기반 철도차량 기어박스용 윤활제 시작품 제작 및 성능검증
- 나노유체 기반 철도차량 기어박스용 윤활제 시작품 제작
 - 시험절차서 (기준) 개발 및 부품단위/현차 검증시험
 - 성과품 공인시험성적서 취득
 - 교체주기 등 유지보수 방안 도출

1.2. 연구개발의 필요성

- 윤활제는 철도차량 내 각종 회전기기의 원활한 작동을 위해 사용됨. 윤활제는 베어링 등 금속 간 마찰면 사이에 윤활막을 형성하여 마찰 및 마찰열 감소, 공기 또는 수분의 접촉 차단 등을 통한 부식방지 등 다양한 역할을 함.
- 윤활제는 크게 윤활오일 (Lubricant oil)과 고체윤활제인 그리스 (Grease)로 나뉘며, 윤활제가 사용되는 대표적인 철도차량 내 회전기기 부품은 그림 1-2-1과 같음. 윤활 오일은 열 발산이 좋고, 회전 저항등의 효율이 우수하며, 윤활특성이 좋은 반면, 그리스는 충전이 가능하고, 외부 이물질의 침입 차단 및 밀봉이 쉬워 소형화, 경량화가 가능하고, 유지보수 성능이 우수한 특징을 가짐 [5].

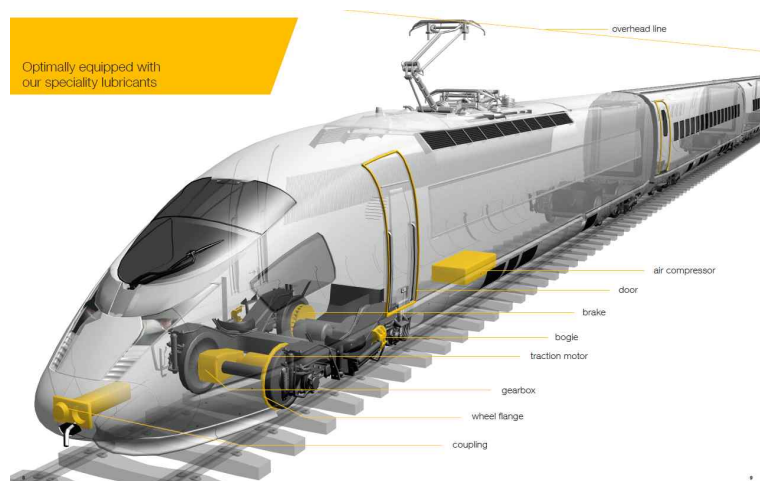


그림 1-2-1. 철도차량 내 윤활제 사용 회전부품

- 고속/도시철도의 전인전동기 및 차축감속기 등의 회전기기에 설치되는 베어링은 구름접촉에 근거하여 설계되어 마찰 효과가 낮은 하지만, 무시할 정도가 아니므로 윤활이 필수적임.

고성능 윤활제를 사용함으로써 윤활 및 냉각성능을 향상시키고, 부품의 수명을 증가시킬 수 있으며, 동력의 소모를 줄여 기계 효율을 증가시킬 수 있음. 이는 철도차량 시스템의 안정적인 운영 및 유지보수 비용 절감과 직결됨.

- 특히, 차축 감속기에 설치된 고속철도용 베어링의 경우, 원가 비용 등의 문제로 국내에서 제작하지 않아 전량 수입하고 있기 때문에 베어링의 고장기성 수명 연장을 위한 윤활제의 연구개발이 시급함.

- 윤활제는 사용하는 동안 금속간의 마찰열/접촉열, 금속 마모입자, 공기 중의 산소 및 수분 등에 의해 물리적, 화학적 변형이 진행됨. 오염된 윤활제나 부적절한 실 (Seal) 등 윤활제로 인한 문제는 베어링의 마모손상, 재경화 (rehardening), 나아가 균열이나 플레이킹 손상으로 발전할 수 있음 (그림 1-2-2). 윤활제의 수명을 증가시키기 위해 이러한 마찰열/접촉열을 냉각할 수 있는 열전도성 향상 및 베어링 금속면의 마찰 최소화가 요구됨. 또한 최적화 된 실 (Seal)을 통해 이물질의 침입이나 윤활제의 누출을 방지할 수 있음 [6].

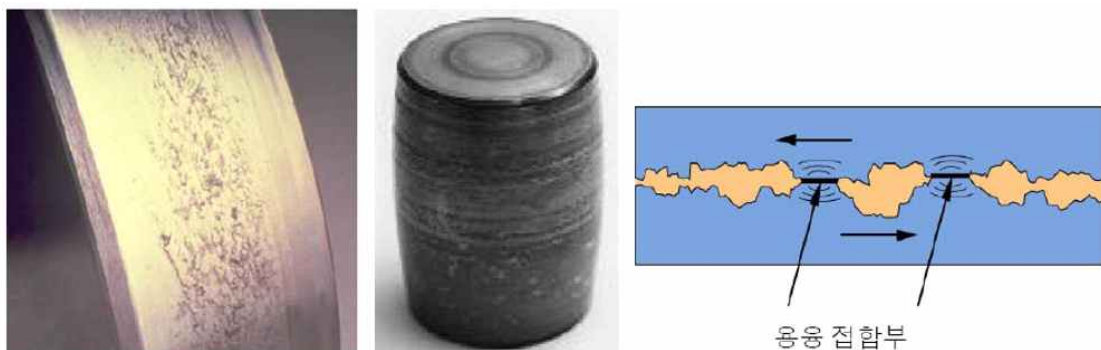


그림 1-2-2. 베어링의 고착 마모 손상과 손상 메커니즘

- 나노유체란, 일반 유체에 직경 100 nm 이하 크기의 나노입자 또는 나노튜브와 같은 섬유들을 분산, 부유시켜 만든 유체임. 높은 열전도 특성으로 차세대 냉각유체로 활발히 연구되고 있음. 나노유체 기반 윤활제란, 기계적 특성 (강도 및 열전도도, 친환경성)이 우수한 나노 크기의 입자가 기존 윤활제 내 분산되어 수용액 상태로 안정화 된 2상 (Two phase) 유체를 의미함.
- 베어링 윤활제 내의 나노입자는 그림 1-2-3과 같이 금속 볼 (Ball)과 기저면 (Substrate) 사이에 입자막을 형성하여, 두 금속면의 접촉면을 점접촉화 하여 Rolling effect를 향상시키고, 운전 중 상승되는 열을 냉각시킬 수 있음. 또한 미세한 손상부위를 채워주어 표면을 매끄럽게 재생하는 효과를 주는 등 윤활성능을 향상시킴.

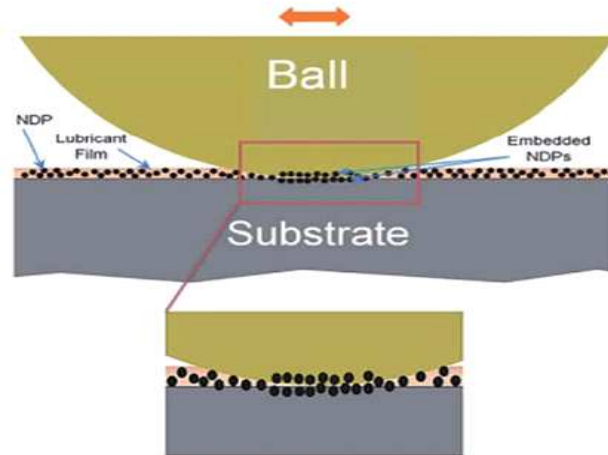


그림 1-2-3. 나노 유체 기반 윤활제 개념도

- 이에 따라, 금속나노분말, 탄소성 물질 등 다양한 나노입자를 고체 또는 오일 윤활제에 적용시키려는 연구가 활발함.
- 국내 LUBCHEM KOREA社는 자동차용 윤활제에 무기나노물질을 첨가하여, 극압성 및 내마모성을 향상시킴 (그림 1-2-4) [7].

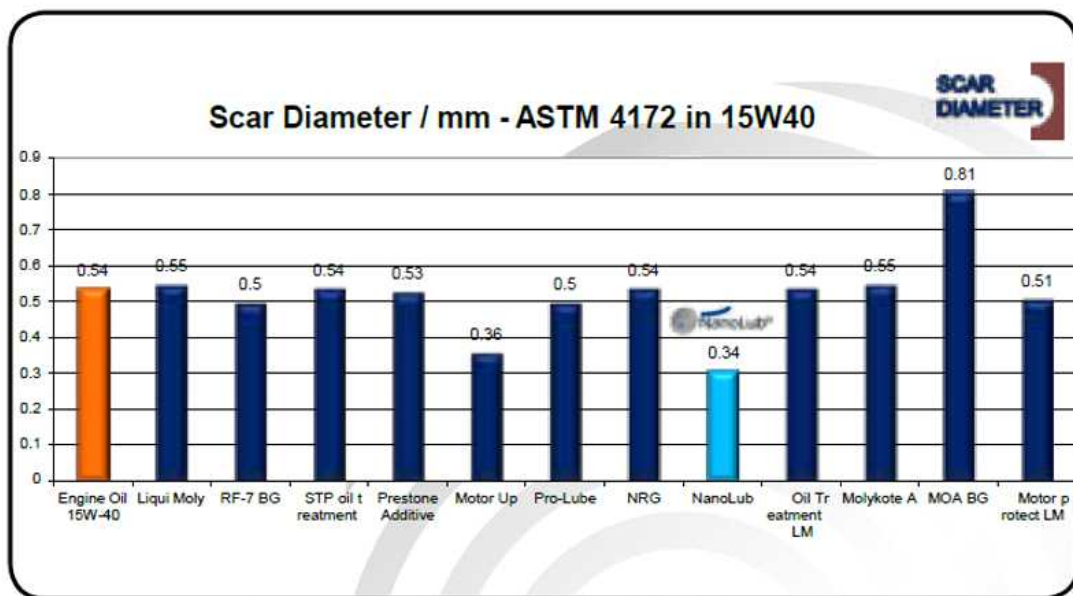


그림 1-2-4. 자동차 엔진용 나노 고체윤활제 (NanoLub)의 내마모성 향상

- 하지만, 철도차량 윤활제에 나노유체가 적용된 사례는 전무하며, 철도 회전기기와 같은 고하중, 장기사용 환경에서 안정적인 분산도 및 점도 등 기계적 특성을 유지할 수 있는 나노유체 윤활제의 연구가 필요함. 또한, 나노유체 기반 철도부품 윤활제의 성능 평가를 위한 시험장비/시험절차 설계 및 구축을 통해, 개발되는 윤활제의 상용화를 위한 신뢰성을 확보하는 것이 중요함.

- 따라서, 본 과제에서, 철도 회전부품의 윤활 특성 요구사항에 부합하는 고성능, 장기적인 안정성을 가지는 나노유체 기반 윤활제를 개발하고, 부품단위/현차시험의 성능검증을 통한 실용화 기반을 마련하고자 함.

1.3. 연구개발의 중요성

가. 기술적 중요성

- 철도차량용 기어박스의 내 마찰 및 윤활 성능 향상 필요
 - 고성능 윤활특성 (고온 장기간 윤활 등)이 요구되는 고속철도 차량 기어박스 베어링의 마찰 및 윤활 성능 향상이 필요함.
 - 나노유체를 기존 상용윤활제에 분산시켜 극압성, 냉각성과 윤활성을 개선하여 고속철도 차량 기어박스 베어링의 마찰 및 윤활 성능 향상을 도모
- 고속/도시철도 차량 기어박스에 사용되는 윤활부품 (베어링)의 안전성 및 신뢰성 향상 필요
 - 고성능 나노유체 기반 윤활제의 사용으로 철도차량 기어박스의 구동성능을 향상시킬 수 있으며, 부품 내구성을 향상시켜 장기적으로 차량의 안전성을 증가시킬 수 있음.
 - 철도차량 기어박스의 안정적인 성능은 차량의 내구성 및 운영신뢰성 확보에 직접적인 영향을 미침.
 - 윤활제 성능 개량은 도시철도와 같은 일반철도는 물론 고속철도 윤활부품의 안정성과 신뢰성 향상에 기여 가능
- 나노유체 기반 윤활제 대량생산 기술 선점 필요
 - 선진국을 중심으로 각종 수요에 대응하는 나노윤활제의 연구 및 상용화가 급속히 진행되고 있으며, 본 연구를 통해 철도차량용 나노유체 기반 윤활제의 대량생산 기술을 선점, 주도할 수 있음.

나. 경제 산업적 중요성

- 철도차량 유지보수 비용 절감에 따른 경제적 효과
 - 고속철도 차량의 회전기기 (견인전동기 및 차축감속기 등)에 설치되는 베어링의 윤활/냉각 성능 및 수명 향상은 고속철도의 안정적인 운영과 유지보수 비용절감에 직결됨.
 - 고속철도 차량 윤활부품 (베어링)은 해외수입에 의존하고 있어 사용주기 연장이 요구됨.
- 국내외 베어링 및 윤활제 시장의 확대에 따른 기술 확보 필요
 - 고급 윤활제 시장에서 윤활제 사용수명향상이 최대 관점이므로, 차세대 제품인 나노유체 기반 윤활제의 제조기술을 확보하고, 상용화 기반 마련이 필요함.
 - 특히, 중국 등 철도 강국의 경쟁적 기술개발 노력에 따라 고속철도용 베어링/윤활제 시장은

급성장 하고 있음.

- 타 산업으로의 파급효과를 통한 국가 산업발전 기여 가능
 - 철도차량 회전기기용 나노유체 기반 윤활제 제조 연구의 핵심 기술들은 철도 이외의 다양한 회전기기 베어링/윤활제 산업에 기초기술로 활용되는 등 파급효과가 기대됨.
 - 철도차량용 나노유체 기반 윤활제의 선진기술 확보를 통한 수입대체 및 고부가가치 수출산업 형성을 통한 국가경쟁력 강화가 가능함.

다. 사회 문화적 중요성

- 안전한 철도운영에 따른 국민 행복 실현
 - 고성능, 장기 안정성 나노유체 기반 윤활제를 사용한 철도차량의 안전한 운영을 통한 고객의 행복지수 증대가 가능함.
 - 안정적인 철도 회전부품 운영을 통한 운행안정성 확보에 따른 철도운영 신뢰성 증대 기여할 수 있음.
- 친환경 나노유체 기반 윤활제 사용을 통한 환경오염 저감
 - 철도차량 회전기기 및 윤활제의 수명 증대로 인한 교체주기 증가로, 폐기물 배출 저감 등 환경 보호가 가능함.

2. 국내외 기술개발 현황

2.1. 국외 기술 동향

- 윤활제는 기계요소 부품의 원활한 작동을 위하여 사용되는데 금속 마찰면 사이에 윤활제 막을 생성시킴으로써 마찰 감소 및 마찰열을 제거하는 냉각작용을 하며 공기와의 접촉 및 수분 침입을 차단하여 부식을 방지하는 효과가 있음.
- 윤활제는 사용하는 동안 금속간의 마찰이나 접촉에 의한 열, 금속 마모입자, 공기 중의 산소, 수분 등의 영향을 받아 점차 물리적 화학적 특성이 변하게 됨. 즉, 사용하는 동안 수분 유입이나 금속성이물질에 의한 산화가 진행되므로 윤활제 내에 포함된 수분 및 마모물질 등이 적정수준을 초과하면 이를 제거하거나 윤활제 자체를 교체해 주어야 함. 이는 기계장치 내의 오염물질이 윤활제의 열화를 촉진시킬 뿐만 아니라 기계장치의 신뢰성과 수명에 지배적인 영향을 미침.
- 이스라엘 Weizmann Institute의 Reshef Tenne 교수는 판상형 고체윤활제의 윤활성 한계를 극복한 구상형 (Spherical) 나노입자를 세계 최초로 제조하였고, 이는 이스라엘 NanoMaterials, Ltd.에 의해 상용화 됨. 구상형 고체 윤활제는 마모율과 마모계수에 우수한 특성을 나타내는 것으로 보고됨 (그림 2-1-1) [8].

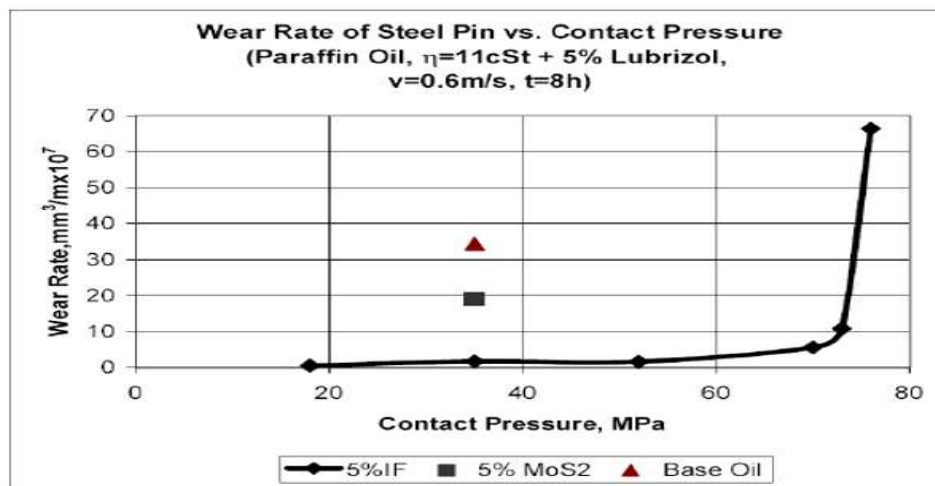


그림 2-1-1. NanoMaterials 구상형 고체윤활제의 마모특성

- 기술적으로는, 독일이 윤활제 분야의 우위를 점하고 있으며, FUCHS는 전세계 최대 독립 윤활제 제조업체로 85년 이상 윤활제 및 관련 기술을 선도하고 있음. BECHEM은 150년 이상 윤활제를 제조해 독일 기업으로 최근에는 친환경 첨가제를 포함한 철도용 윤활제를 생산 판매하고 있음. KLuber는 90년의 역사를 가진 특수 윤활제품 생산 기업으로 철도차량의

각종 회전기기에 사용되는 윤활제를 생산함.

- 세계 윤활제 시장은 2011년 약 44,018 USD(생산량 35,605 Kilo Tons)에서 해마다 증가하고 있으며, 중국과 미국이 압도적으로 윤활제 시장을 점유하고 있음. 특히 중국의 기차 속도의 발전 조치에 따라 철도용 베어링의 수요가 증가하면서, 이에 따라 철도용 윤활제 시장도 확대될 것으로 판단됨 (그림 2-1-2) [9].

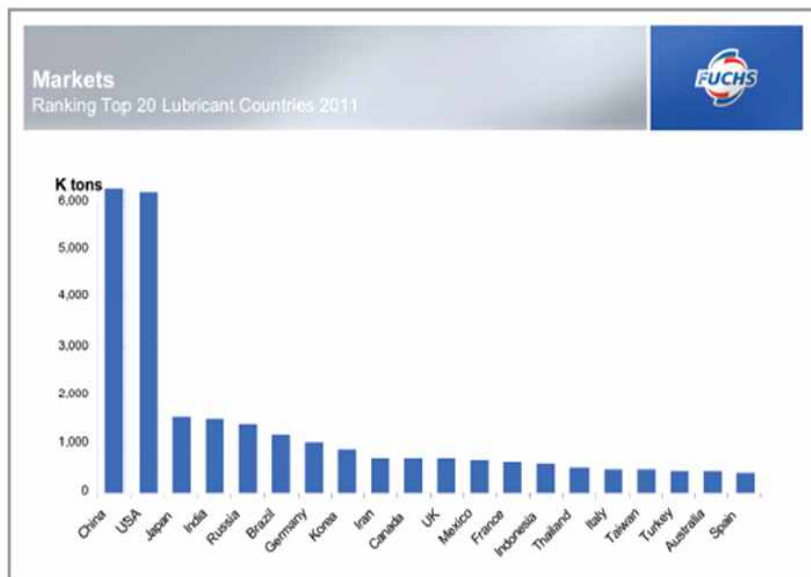
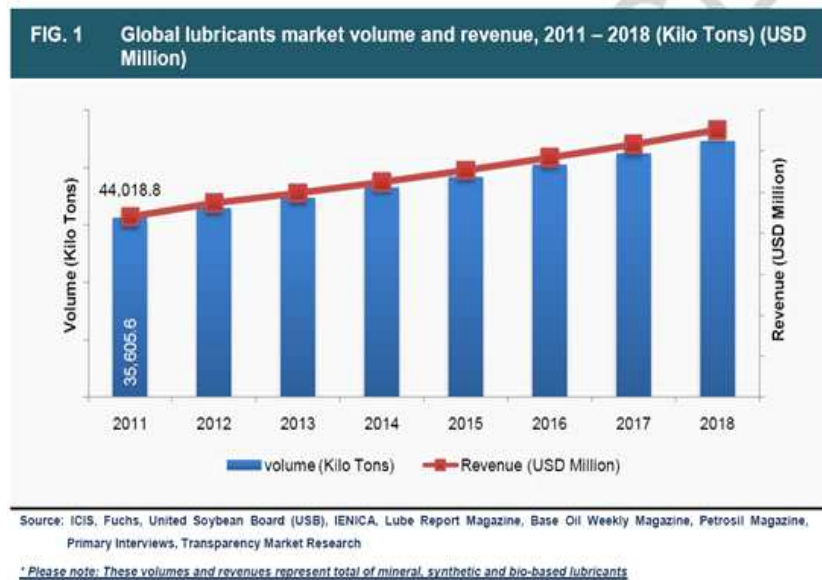


그림 2-1-2. 연도별 및 국가별 세계 윤활제 시장 규모

2.2. 국내 기술 동향

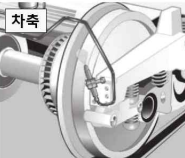
- 국내의 경우, 2000년 이후 자동차 윤활제용 나노윤활제 연구가 활발하며, 금속나노입자 (Cu, Ni, Ag 등) 또는 탄소성 나노입자 (그래파이트 등)를 활용한 나노윤활제가 연구 또는 상용화 됨.
 - 고체 윤활제로 탄소(Graphite, CNT (Carbon NanoTube) 등) 기반 나노합성 소재의 윤활성능 연구가 수행되어, 현재 국내외 기업을 중심으로 상용화 중임.
 - 액체 윤활제 분야에서는 구름베어링의 플레이킹(Flaking) 방지 및 수명 연장을 위해 윤활제에 나노카본을 첨가한 나노소재 기반의 윤활제 연구가 국내에서도 이루어짐.
- 해양대 정재현 교수 연구진은 자동차 엔진 윤활제용 나노구리합금 윤활제의 엔진특성향상을 연구함. 부산대 이재근 교수 연구진은 에어컨 또는 냉장고의 압축기 윤활 특성 향상을 위해 Fullerene 입자 기반 나노오일을 개발하고, 또한 나노 크기 및 형상에 따른 윤활 특성을 연구함.
- 기계연구원은 그래핀을 이용한 나노고체 윤활막을 세계 최초로 개발하였으며, 이는 기존 윤활제를 사용할 수 없는 초고밀도집적회로, 초소형기어 등 미세전자기계시스템에 적용할 수 있는 낮은 마찰계수의 윤활코팅제로 활용 가능함.
- 국내 상용화 기술의 경우, 뉴멘나노텍은 축구공 모양의 분자구조를 가진 탄소소재 풀러렌을 이용한 자동차 윤활제를, 삼창기업은 CNC (탄소나노콜로이드) 입자를 이용하여 100℃ 이상 고온 운전시에도 수입제품보다 69 % 마찰저감 성능을 가지는 자동차 및 산업용 고성능 나노윤활제를 개발하여 상용화하는 등 나노윤활제의 상용화 연구가 활발함.
- 국내 LUBCHEM은 2002년 처음 상용화된 무기 다층 구조의 풀레린 (Fullerene)을 생산하여 고체 및 오일 윤활제에 분산한 제품을 상용화함. 무기 다층 풀레린은 온도 저항성 및 극압성이 우수한 소재로, 마찰 환경에서 Tribofilm 구조를 형성하여 마모 표면을 복구, 윤활막을 형성함. 고온 엔진 베어링 등 자동차용 윤활제로 활용
- 국내 (세플러코리아)의 경우, 나노 탄소소재의 기술우위 및 수요기반을 갖고 있으나, 세계시장을 선점하기 위한 원소재 생산기술 확보를 통한 상용화가 이루어지지 못함.
- 일부 국내기업 (일진멀티리얼즈, 한화, 동진세미컴 등)은 그래핀 플레이크(Graphene Flake)를 생산하기 위한 연구 중임.
- 국내 학계 (성균관대)를 중심으로 밀링 가공공정에 사용되는 절삭유의 윤활성능 향상을 위한 나노유체 적용기술 연구를 수행함.

3. 연구수행 내용 및 성과

3.1. 철도차량 윤활제 요구사항 분석

철도차량 내부에는 원활한 구동을 위해 고체 및 액체 윤활제를 사용하는 다양한 회전기기 부품들이 있다. 철도부품을 기능으로 구분하면, 크게 드라이브 및 새시, 대차, 객차 및 연결부 및 기반시설로 나눌 수 있다. 각 범주 내에서 윤활이 요구되는 대표적인 부품들은 아래 표 3-1-1과 같다.

표 3-1-1. 철도차량 주요 회전기기 부품

구분	기능	윤활제 사용 부품
드라이브 및 새시	철도차량의 주행을 가능하게 하는 기계장치 및 장치간의 조합으로, 동력전달, 제동, 현가, 전기 등 장치	트랙션 모터 베어링, 휠셋 기어, 휠셋 하우징 및 볼트 연결부, 곡선 기어 커플링 기어 치면, 디스크 브레이크 볼트, 부쉬, 슬라이드웨이, 블록 브레이크 평면 베어링, 연결장치, 가이드, 스크류 연결부 등   
대차	철도 차량 주행을 위해 차체 전체를 받치는 직접 주행장치 구성체	스크류 및 볼트 연결부, 휠 플랜지, 차축 등   
객차 및 연결부	승객이 이용하는 벤치 또는 좌석이 배치된 차량 및 객차를 연결하는 부위	출입문 리니어 가이드, 드라이브 스피들, 기능표면, 잠금장치, 스프링, 별톱니바퀴, 마운팅 레일, 비틀림 스프링, 버퍼헤드, 스크류 커플링, 자동커플링, 에어 컴프레서 등  
기반시설	교통시스템 운영환경과 관련된 모든 요소로, 선로, 신호설비, 환승장 등 시설 유지 시스템의 모든 고정된 구성요소	선로전환기, 레일 플랭크, 고정 윤활 시스템, 전력공급 트롤리션, 전기접점부, 에스컬레이터 기어박스, 체인  

본 과제에서는 철도차량 회전기기 부품 중 기어박스를 중심으로 윤활제의 개발 및 성능평가를 수행하였다. 철도차량의 중요 주행장치 중 하나인 기어박스는 감속구동장치 (Driving Gear) 라고도 하며, 구동모터의 회전을 차륜에 전달하는 장치로 철도 주행안전성에 매우 중요한 역할을 한다. 기어박스는 고하중, 고압력 및 높은 속도/진동의 가혹한 환경하에서 운전되어 고성능 윤활제를 요구한다.

가. 국내 고속철도 및 도시철도 기어박스 운영환경 조사

기어박스(감속기)란, 동력 발생기의 회전 속도를 제어하기 위한 장치로써, 철도차량 기어박스는 구동 모터에서 나오는 회전을 트리포트를 통하여 차륜에 전달하는 역할을 수행하고, 고속운행을 위한 필수 장치이다.

(1) 고속철도 기어박스

한국형 고속열차 (KTX) 기어박스 (감속기)는 견인전동기에서 나오는 회전을 기어의 치차비를 이용 300 km/h 시 최대 4,000 rpm의 회전수를 1,800으로 감속시켜 차축의 감속기로 전달하는 장치이다. 모터와 연결된 감속기인 모터감속기 (MRU)와 차축과 연결된 차축감속기 (ARU)가 1 세트로 모터의 동력을 차축에 전달하게 되며, 동력 축 당 하나씩 장착되어 1편성 당 총 12개의 기어박스가 조립된다. 고속철도차량의 기어박스는 기어와 베어링, 내부 윤활 시스템으로 구성되어 있다.

현재 동력분산식 고속철도 차량용 기어박스는 전량 해외 부품장치를 수입하고 있는 실정으로, 최대속도 300 km/h인 KTX 및 KTX-산천은 각각 Alstom (프랑스) 및 Voith (독일)에서 제작한 기어박스를 사용하고 있다. 철도용품 공사규격서에 따르면, KTX-산천 감속장치의 차축 감속장치의 부품 부하시험 시 최대 견인 토크는 600 rpm 속도로 1시간을 적용하며, 하중 사이클은 다음과 같다. 하중은 1,750 Nm~4968 Nm (178 kgfm~506 kgfm) 범위이다.

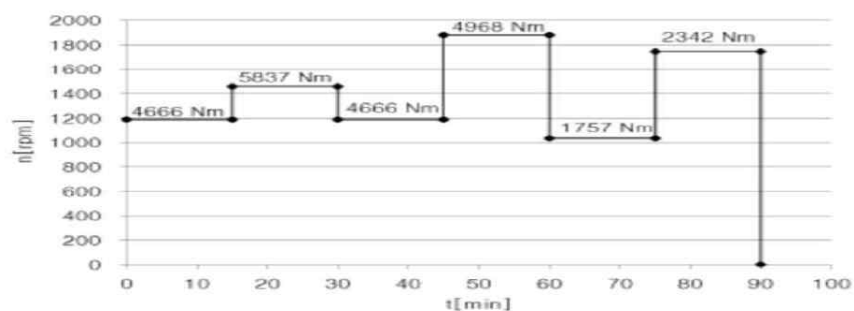


그림 3-1-1. KTX-산천 차축 감속장치(기어박스) 부하시험 하중 사이클

기어박스 내의 온도가 기준치 이상 상승하는 경우 산화율의 증가와 점도의 감소에 의해 기어와 베어링의 손상이 발생, 기어박스의 고장이 발생할 수 있다. 실제 고속철도의 운행에 따른

온도특성 연구결과 [10]를 바탕으로 기어박스의 운영온도 환경을 살펴보면, 경부선 KTX의 구동장치의 경우, 광명역에서 출발 후 차량이 약 300 km/h의 속도로 운행할 때 구동장치의 온도변화는 즉각적으로 이루어지지 않고 약 3분 정도 늦게 온도변화를 나타내어, 1차 감속장치의 중간 기어 (P7)에서 76 ℃, 출력 기어 (P8)에서 87 ℃를 나타냈으며, 2차 감속장치의 입력 기어 (P6)는 76 ℃를 그리고 차축 기어 (P3)에서는 65 ℃를 나타냈으며, 외기 온도 (P5)는 약 35 ℃ 정도를 나타내는 것으로 보고되었다. 또한, 호남선 KTX의 경우, 용산역을 출발하여 광주역까지를 왕복운행 하면서 운행 속도가 증가함에 따라 각 부분의 온도도 모두 상승하여, 차량의 최대 속도가 200 km/h 부근에 이르렀을 때 1차 감속장치의 중간 기어는 55 ℃, 출력 기어는 45 ℃를 나타냈으며, 2차 감속장치의 입력 기어는 47 ℃를 나타냈고, 온도는 약 20 ℃ 정도를 나타내는 것으로 조사되었다.

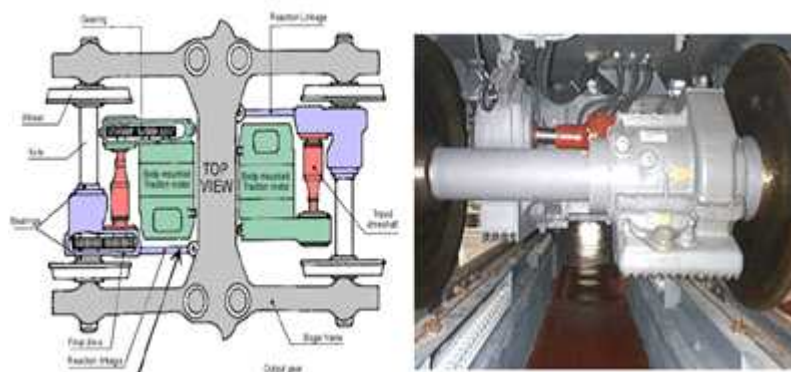


그림 3-1-2. KTX 기어박스 구조 및 실물 이미지

(2) 도시철도 기어박스

국내 110 km/h급 일반 전동차 구동기어는 거의 표준화 되어있으며, 일반적으로 코레일이나 서울교통공사에서 사용하는 구동기어의 모델은 다음 그림과 같다. 감속비는 7.07, 기어의 경우 SCM 계열의 소재를 기어 케이스는 GCD 계열을 사용한다. 도시철도 차량 기어박스 (대전 도시철도 차량 기준)의 경우 최대토크는 141.3 kgfm, 최대 접촉응력 1,075 Mpa의 사양을 가지고 운용되는 것으로 조사되었다.

전동차 운용 온도환경은, 김경환 외 [11]는 전동차용 기어에 대한 윤활제/온도특성 해석연구에서 살펴볼 수 있으며, 운행 조건에 따른 기어박스 내부 온도 상승을 모사하여, 표 3-1-2와 같은 결과가 제시되어 있다.

결론적으로, 기존 연구의 실험결과를 기반으로, 열차 운행상황에 따른 기어박스 내부온도의 조건이 다르게 나타남을 확인하였으며, 고속철도의 경우 약 90 ℃, 전동차의 경우 약 70 ℃ 이하의 온도부하가 형성됨을 확인하였다.

표 3-1-2. 전동차 무부하 실험결과

구분	시험구동	윤활유 주입량 (ℓ)	MS/WS부 회전 속도			총 시험시간	발생소음 (dB)	측정온도 (℃)	기준온도 (℃)
			900 RPM	2700 RPM	5060 RPM				
Case 1	Pulley 중속 구동	4.8	5min	—	100min	105min	104	70	80
Case 2		4.0	15min	15min	60min	90min	104	65	
Case 3		3.8	30min	30min	30min	90min	105	66	
Case 4	Motor 감속 구동	3.8	—	—	30min	30min	108	64	
Case 5		3.6	5min	5min	105min	115min	102	64	
Case 6		3.4	5min	—	85min	90min	102	62	
Case 7		3.2	—	—	60min	60min	104	58	
Case 8		3.0	—	—	60min	60min	103	56	
Case 9		2.8	—	—	60min	60min	106	60	
Case 10		2.6	—	—	60min	60min	109	60	

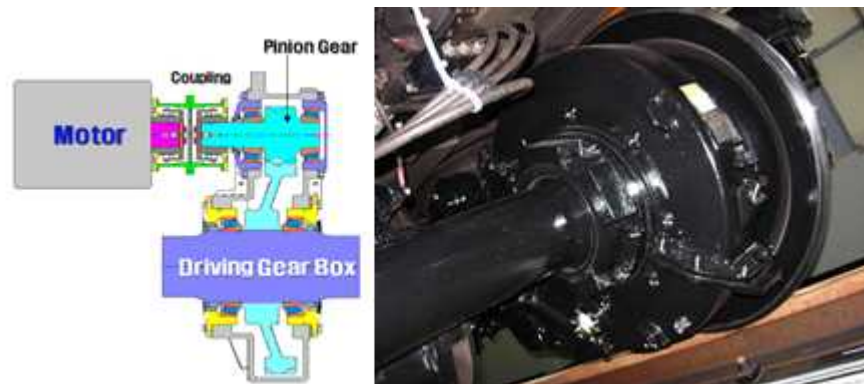


그림 3-1-3. 도시철도 (전동차) 기어박스 구조 및 실물 이미지

나. 철도차량 운영조건 기반 조건 모사 가속시험 설계

철도 차량용 기어박스는 윤활제가 유속 윤활을 하고 있으며 윤활요소인 기어와 베어링의 형태가 구름접촉을 하고 있다. 이런 구름접촉을 하는 시험은 베어링 시험기나 기어박스 시험기로 구현할 수 있으나 본 연구과제의 경제성 및 연구기간을 고려하여 윤활요소의 파손기구가 구름피로라는 내용에 적합한 RCF시험기 (Rolling Contact Fatigue Testing Machine) 등을 이용하였다.

RCF 시험은 구름피로 현상을 구현하기 위한 시험기로 소재의 피로수명은 접촉응력의 승수에 비례한다는 Lundberg Palmgren의 이론을 바탕으로 한다. 특히 베어링과 같은 고정정강을 사용하는 고정도의 제품은 이 이론에 잘 맞으며 기어 등의 경우도 이를 응용할 수 있다. 수명의 해석은 기계장치 수명의 분포를 나타내는 Weibull 분포로 가정하여 분석한다. RCF 운전 조건과 철도차량 운전조건은 표 3-1-3에 표시한 내용과 같이 RCF 시험조건이 철도차량의 운전조건에 비해 가혹한 가속시험 조건에 해당한다. 가속시험의 정도는 하중 계수와 환경 계수로 평가하여 수십 배 정도를 구현할 수 있다. 단순 계산하여

적용 하중만으로 보면 적용하중은 Co값의 2.9배 정도로 수명시간 값으로 환산하면 약 25배 정도가 된다. 그러나 실차의 기어박스 조건에 비해 RCF 시험 조건은 한정된 공간의 유체로 유욕 윤활을 하고 있으므로 윤활계수가 약 0.5 정도로 총 큰 가속시험을 할 수 있으며 계산수명의 1/50 정도의 시험으로 결과를 추론할 수 있다.

표 3-1-3. RCF 및 철도차량용 기어박스 운전 조건 비교

항목	RCF 시험조건	철도차량용 기어박스
하중	550 kg	최대토크 141.3 kgf·m
대상 부품	RCF 시험편	기어박스 지지베어링
시험형태	원판형	테이퍼롤러 베어링
전동체	볼	롤러
최대 접촉응력	2,234.8 Mpa	1,075 Mpa
하중 형태	축방향 하중	경방향+축방향
윤활 형태	유욕 윤활	유욕 윤활

본 연구에 적용되는 RCF 시험조건은 기존 여러 논문에서 논의된 베어링강 피로수명시험 조건을 사용하였다. 이 시험조건은 하중을 550 kg 부가하며 원판형 시험편 위에 6개의 볼을 얹어놓고 시험하는 조건이며 이때 윤활제는 일반 기어박스 오일을 사용한다. 본 연구에서 철도차량용 기어박스를 상정할 경우 이 조건을 사용하기에 매우 적합하다.

다. 국내 철도시스템의 기어박스 윤활제 운영 현황 조사

윤활제는 기계요소 부품들의 마찰면 사이에 윤활제막을 형성하여 접촉면에서 발생하는 마찰이나 진동 등을 저감시켜 기계 작동을 원활히 하고 부식을 방지하는 기능을 한다. 따라서 윤활제가 원활히 작동하게 하기 위해서는 윤활제 내에 포함된 수분이나 철분 등 마모물질 등이 규정된 한계 내에 들도록 유지하여야 하며 이를 초과하면 오염물질 제거나 윤활제 교체 등의 정비를 해주어야 한다.

(1) 철도 기어박스 윤활제 요구사항

아래 표들은 국내 고속철도 및 도시철도 운영사에서 제시하고 있는 기어박스 윤활제 요구사항(규격)을 정리한 것이다.

표 3-1-4. 고속철도 감속기유 점도 특성값

	KTX	KTX-산천
오일명칭	Shell Engrenage 3470	Mobil Delvac Synthetic Gear Oil 75W-90
점도 (cSt , 40 ℃)	233	120
점도 (cSt , 100℃)	20.7	15.9

표 3-1-5. 디젤동차 감속기유 규격

시 험 과 목	규 격
인 화 점 (COC, ℃)	210 이 상
동 점 도 (cSt , 100℃)	16 ~ 18
유 동 점 (℃)	-20 이 하
점 도 지 수	95 이 하
동판부식 (100℃, 3hrs)	1 이 하

표 3-1-6. 전기기관차 기어유 규격

시 험 과 목	1 종	2 종	3 종
인 화 점 (COC, ℃)	190 이 상	190 이 상	190 이 상
동 점 도 (cSt , 100℃)	7.5 ~ 12.5	16.5 ~ 20.0	30.0 ~ 36.5
유 동 점 (℃)	-25 이 하	-15 이 하	-7.5 이 하
색	4.5 이 하	5.5 이 하	
점 도 지 수	90 이 상	85 이 상	80 이 상
4 구 마모시험 (mm)	1 이 하	1 이 하	1 이 하
기포시험 (10 분 후 ,ml)	0 - 0 - 0	0 - 0 - 0	0 - 0 - 0
아카리가 (KOH mg/g)	0.5 이 상	0.5 이 상	0.5 이 상

● 고속철도



	KTX	KTX-산천
오일명칭	Shell Engrenage 3470	Mobil Delvac Synthetic Gear Oil 75W-90
점도(cSt, 40°C)	233	120
점도(cSt, 100°C)	20.7	15.9

● 일반전기철도



	ITX-새마을
오일명칭	Shell Engrenage 3470
점도(cSt, 40°C)	233
점도(cSt, 100°C)	20.7

● 디젤동차

	규격
오일명칭	미상
점도(cSt, 100°C)	16~18

● 도시철도

	대전도철	대구도철	
오일명칭	Shell Spirax EP 80	Shell Spirax G80W(2호선)	Shell Spirax A90 (Gear unit 유)
점도(cSt, 40°C)	73.4	160.5	145
점도(cSt, 100°C)	9.2	16.1	14.3

그림 3-1-4. 국내 철도 기어유 사용 현황 및 점도특성

(2) 철도 기어박스 윤활제 유지보수 현황

국내 고속철도 KTX 기어박스는 견인계통에 직결되어 결함 발생 시 운행을 정지해야 하는 중요한 장치이므로 5,000 km 주행 시 마다 1회씩 감속기 오일 및 결함상태를 체크하는 일상 정비를 실시하고 있으며, 3~4년 주기로 부품을 완전분해 검사하는 중정비 검수를 실시하고 있다.

국내 도시철도 윤활제는 각 기관별 윤활제 점검방법 및 주기를 전동차 관리내규로 정하여 운영하고 있다. 그러나 윤활제 점검 방법은 경정비 시 육안 점검위주로 시행하여 누유 등 필요 시 보충하고 중정비 시 전량 교체하여 시행하고 있다.

표 3-1-7. 도시철도 윤활제 점검주기 및 방법

기관	점검 주기 및 방법	교체주기
서울교통공사	· 7D(일) 윤활제 변색, 누유여부 및 적정량	2년
	· 4M(개월) 윤활제 변색, 누유여부 및 적정량	
	· 4Y(년) 전량 교체	
대전도시 철도공사	· 2,000Km 윤활제 변색, 누유여부 및 적정량	1.5년
	· 3만Km 윤활제 변색, 누유여부 및 적정량	
	· 4Y(년) 전량 교체	
기관	점검 주기 및 방법	교체주기
부산-김해 경전철	· 3M(개월) 윤활제 변색, 누유여부 및 적정량	3년
	· 3Y(년) 전량 교체	
	· 4Y(년) 전량 교체	

(3) 철도공사 (고속철도) 윤활제 검사주기 및 방법

국내에서 운용되고 있는 고속철도 차량의 감속기는 주행기어 검수규정에 따라 기어유의 수분 및 철분 허용 함유량 기준으로 관리하고 있으며 기어유에 이상이 있다고 판단 될 경우 적법한 검수지침에 따라 윤활제의 보충, 교체 등을 실시한다.

① 검사 현황

한국철도공사의 주행기어검수(Running Gear Inspection) 규정에 따라 기어유의 수분 및 철분의 허용 함유량 기준을 두어 관리하고 있으며 정기적으로 그 상태를 점검하고 있다.

현재의 기어유 검수 시스템은 기어유에 포함되어 있는 철분 및 수분 함유량의 이상 유무를 판단하는 것인데 차량이 기지에 입고되어 감속기가 정지된 상태에서 기어유를 샘플링하여 분석을 수행하고 있다.

주기적(주행회기 14일 이내 또는 20,000 km 주행)으로 윤활제의 색상을 점검하고 있다. 색상 점검 결과 이상이 있다고 판단되면 수분 및 철분성분 검사를 실시하고 허용치를 초과하면 적법한 검수지침에 따라 윤활제의 보충, 교체 등 감속기의 윤활제를 관리하고 있다.

표 3-1-8. 고속철도 윤활제 점검주기 및 방법

기관	점검 주기 및 방법	교체주기
철도공사 (고속철도)	· 20,000 km (14일), 50,000 km, 240,000 km - (영향) 오염 윤활제 열화 촉진 → 기계장치 신뢰성 /수명 저하 - (시험) 20,000 km (14일), 50,000 km, 240,000 km 마다 장치 분해 없이 시료 채취 - (시험항목) 점도, 수분 함유량, 전사가, 마모입자 함유량 / 오일 시료 샘플링 시험기 - (판정) 윤활제 사용 한계 → 열화 정도 결정	2년

② 문제점

시료 샘플링 분석은 제한된 공간에서 고가의 분석 장비를 이용하여야 하므로 장비구축에 많은 비용이 들고 윤활제 시료의 대표성도 떨어질 뿐만 아니라 실시간 분석이 어려워 기계상태의 적기 분석이 불가능하다는 단점이 있다.

점검자의 주관적 판단에 의지하는 경우가 많아 객관성 및 신뢰성이 떨어지고 추적관리가 어렵기 때문에 윤활제의 상태를 지속적으로 추적관리하고 문제 발생을 사전에 예방할 수 있는 오일상태 모니터링 기법 개발이 필요하다.

③ 필요성

고속철도 차량 감속기의 작동을 원활하게 유지시키는 윤활제 내에 오염물질의 양이 허용수준 이상으로 증가하면 윤활제의 열화를 촉진 시킬 뿐만 아니라 기계장치의 신뢰성과 수명에 지배적인 영향을 미치므로 윤활제 내의 오염물질의 양을 적정 오염도 이하로 유지하기 위한 윤활제 오염 관리가 필요하다.

기존의 방법으로는 실제 운행 시의 동적인 변화상태를 알기가 어렵고 실시간으로 대처하기 어려우므로 차량의 안전 운행을 위해 감속기에 직접 온라인 유분석 센서를 설치하여 차량 운행 시의 윤활유의 온도, 습도, 열화상태 등을 상시 감시하고 이상이 발생할 경우, 경보 하는 시스템을 고려하는 것이 필요하다.

현재까지 개발되었거나 개발 중인 윤활제 모니터링 기술은 주로 항공산업, 풍력발전기, 자동차 산업에 집중되어 있으며 고속철도 감속기 전용 윤활제 열화 감시 시스템의 경우는 전 세계적으로 아직 실제 차량에 상용화 적용된 사례는 없으므로 고속철도 차량의 운용 신뢰성을 높이고 고속철도의 경쟁력 확보를 위해서 감속기 상태 모니터링 관련 기술 개발이

필요한 시점이다.

④ 테스트

(고려항목) 윤활제 분석시험에서 고려하여야 할 주요 항목은 점도, 수분 함유량, 전산가 (TAN, Total Acid Number), 마모입자 함유량 등이다.

(장비) Argo-Hytos사의 LubCos H2Oplus II 센서이다. Argo-Hytos사의 LubCos H2Oplus II 센서는 오일의 상대유전율, 전기전도도, 습도, 온도 등을 측정하여 오일의 열화 상태를 감지할 목적으로 제작된 센서이며 수분이나 철분의 양을 직접 측정하는 전용 센서는 아니다.

(방법) 오일의 열화도 및 오염 상태 측정 방법

- A. 전산가 (TAN)의 변화를 측정하는 방법
- B. 윤활제의 상대유전율 혹은 유전상수를 측정하는 방법
- C. 전기 전도도(Electric Conductivity) 변화를 측정하는 방법
- D. 유산화/열화 시에 발생하는 유의 색상변화를 측정하는 투과광 색상 측정방법
- E. 오염물이나 마모입자 분석 방법

(실험방법) 온도를 조절할 수 있는 열판 위에 위치한 비이커에 1,000 ml의 감속기유 신유를 채우고 유중에 센싱부가 완전히 잠기도록 한 후 철분 및 수분량을 변화시켜가면서 상대 유전율을 측정한다.

A. 수분함유량 실험

고속철도 감속기의 운행 중 유 온도와 유사한 60 ℃ 내외로 유지하면서 수분을 1분에서 1분 30초 간격으로 100 ppm 씩 증가시켜 가면서 상대 유전율을 측정한다. 1,000 ml의 고속철도 감속기유 신유가 담긴 비이커를 열판 위에 놓고 70 ℃로 유지하면서 비이커에 센서를 담근 후 5분 간격으로 수분 100 ppm씩 투입하여 3000 ppm까지 수분 함유량을 늘리면서 2분 간격으로 상대 유전율 (P40) 값을 측정한다. 고속철도 감속기유 신유가 담겨있는 실험 장치에 센서를 설치하고 약 30 ℃로 유지하면서 10분 간격으로 수분 95 ppm씩 약 1500 ppm까지 수분 함유량을 늘리며 2분 간격으로 상대 유전율 (P40) 값을 측정한다. 이때 투입된 수분이 기어유에 균일하게 분포될 수 있도록 시험기 상부에 위치한 교반기를 230 rpm의 속도로 회전시킨다.

B. 철분 실험

윤활제의 온도를 약 60 ℃ 내외로 유지하면서 철분을 50 ppm 씩 증가시키면서 1000 ppm에 도달할 때까지 상대 유전율을 측정한다. 철분 88 ppm씩 1496 ppm까지 함유량을 늘리며 2분

간격으로 상대 유전율 (P40) 값을 측정한다.

C. 온도 실험

고속철도 감속기유의 신유 시료를 이용하여 유의 온도를 61 ℃로 올린 후 자연냉각 방식으로 상온까지 내리는 과정에서의 상대 유전율 변화를 매 2분 마다 측정한다.

⑤ 광섬유 센서를 이용한 오일 내 수분량 모니터링 시스템에 대한 연구

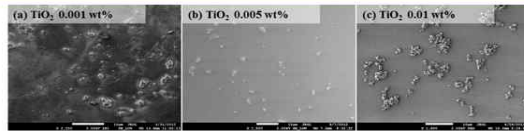
(이론) 레이저 다이오드 (Laser Diode, LD)에서 발생한 빛은 투광섬유 (Transmitting Optical Fiber)를 통해 수조에 담겨있는 오일을 통과하여 수광섬유 (Receiving Optical Fiber)에 입사하게 된다. 이때 입사된 광속 (Optical Flux)의 크기는 투광섬유와 수광섬유 사이에 존재하는 오일의 혼탁한 정도에 따라 달라지는데 이는 파장에 따른 광 손실이 일어나기 때문에 생기는 결과이다. 오일을 거쳐서 전달된 빛은 포토다이오드 (Photo Diode, PD)로 전송되어 전류신호를 만들어 내고 전류 신호는 신호처리 회로를 통해 센서 출력 전압으로 나타난다. 유정압 베어링의 작동 오일에 수분이 함유되었을 때의 문제점을 해결하기 위한 방안으로 광섬유 센서를 이용한 오일 내 수분 모니터링 시스템을 구축하기 위한 시도이다.

(실험방법) 오일 10 L에 단계별로 수분함유량을 다르게 하여 측정하고, 수분의 함유량 변화 범위는 100 ppm ~ 2000 ppm까지로 1 ml ~ 20 ml의 수분을 1 ml 단위로 첨가시켜서 측정한다. 이때 각각의 단계에서 투광섬유와 수광섬유를 통과하는 오일의 거리를 10 mm 단위로 다르게 배치하여 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm의 구간에 대해서 측정한다. (투광섬유와 수광섬유 사이의 최적화된 거리를 찾는 방법의 일환임)

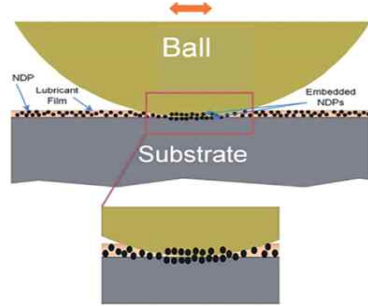
라. 기어박스 윤활유 성능향상 연구 3P 분석

(1) 기술 핵심어 요약

- ◎ **나노유체** : 일반유체에 직경 100 nm 이하 나노입자 또는 나노튜브 등 첨유를 분산/부유시켜 만든 유체
- ◎ **나노유체 기반 윤활제** : 기계적 특성(강도 및 열전도도, 친환경성)이 우수한 나노 크기의 입자가 기존 윤활제 내 분산되어 용액 상태로 안정화된 2상(Two phase) 유체



나노입자의 농도에 따른 표면상태의 전자현미경(SEM) 사진



나노 유체 기반 윤활제 개념도

- ✓ 금속 Ball 과 Substrate 사이 입자막 형성
- ✓ 두 금속 면의 점 접촉화를 통한 Rolling Effect 향상
- ✓ 운전 중 상승하는 열 냉각
- ✓ 미세 손상부위를 채워 표면을 매끄럽게 재생

그림 3-1-5. 기술 Concept 요약도

(2) 3P 분석 툴

표 3-1-9. 3P 분석용 Tool

구분	분석 Tool	검색 대상 기간
논문	Web of Science	1990~현재
특허	Thomson Innovation	2002~현재
시장	Frost &Sullivan	최근 5 년이내 시장보고서

(3) 기술분류별 검색식 및 검색 건 수

표 3-1-10. 기술분석을 위한 핵심어 추출

대분류	중분류	검색식	검색건수		
			논문	특허	시장
나노유체 기반 윤활제	나노입자를 활 용한 나노유체 기반 기어 윤활 제	CTB=((nano or nanofluid or nano-fluid) and (lubricant or lubrication or tribology))	1,604	567	윤활유 시장 분석
		CTB=((nanofluid or nano-fluid or nano) and (lubricant or lubrication or tribology) and (gear or gearbox))	55	31	
		CTB=((nanofluid or nano-fluid or nano) and (lubricant or lubrication or tribology) and (train or rail or railroad or railway or car or vehicle))	40	11	

(4) 분석 결과

본 분석을 통해 국가 R&D로 수행 개발 중인 나노유체 기반 철도차량 기어용 윤활유 기술의 논문 및 특허 출원의 증가 추세, 즉 기술수요 및 연구 활동이 증가하고 있음을 확인할 수 있었다. 매년 성장하고 있는 시장 규모에 대응하는 대비가 필요하나, 현재 중국이 대부분의 기술특허를 독점하고 있는 것으로 파악되므로, 본 과제 및 연계과제를 발굴 수행함으로써 원천기술의 확보가 중요하다고 평가할 수 있다.

○ 연도별 논문 출판 추이

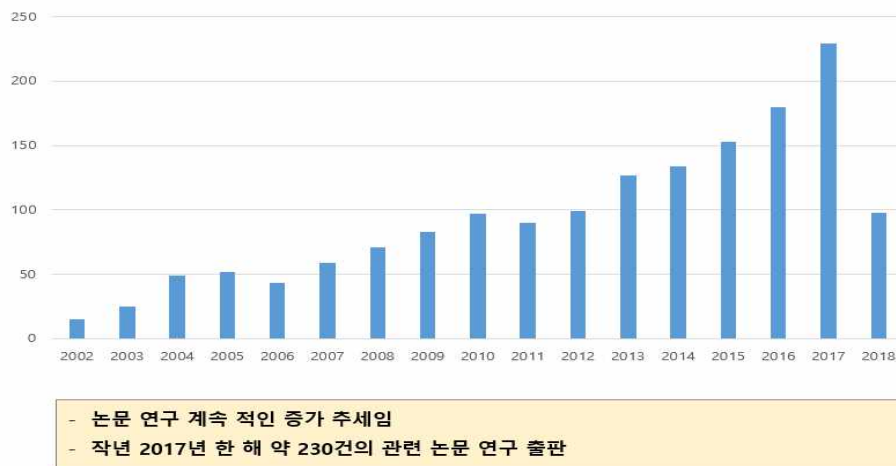


그림 3-1-6. 연도별 논문 출판

○ 나노윤활제 관련 분야 및 국가 분석

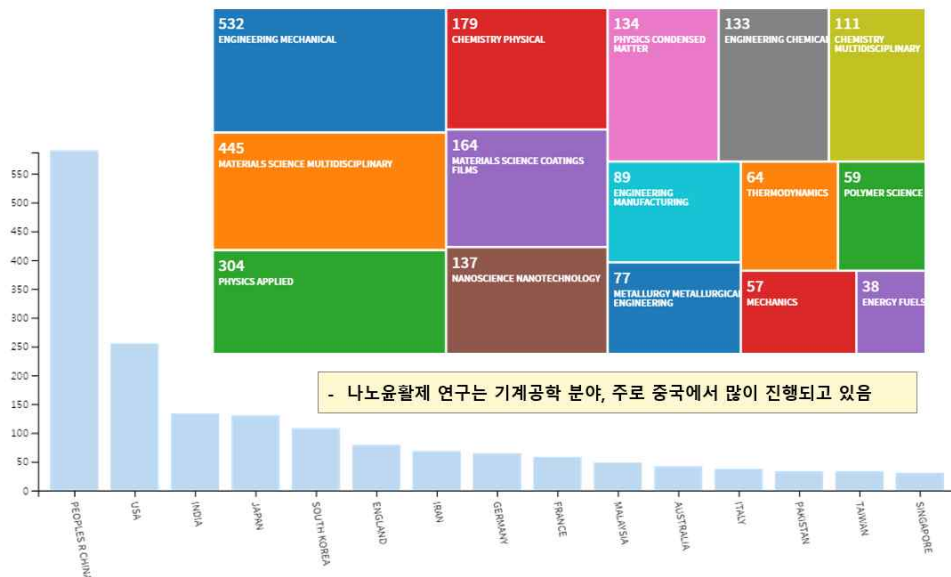


그림 3-1-7. 나노윤활제 분야 논문 국가별 분석

○ 기어유 및 철도/차량 관련 분야 논문 분석

- 기어유 관련 분야



- 철도/차량 관련 분야

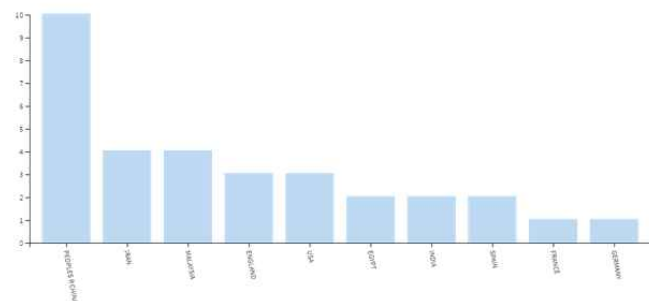


그림 3-1-8. 기어유 및 철도차량 분야 논문 국가별 분석

○ 연도별 특허 추이 및 국가 현황 분석

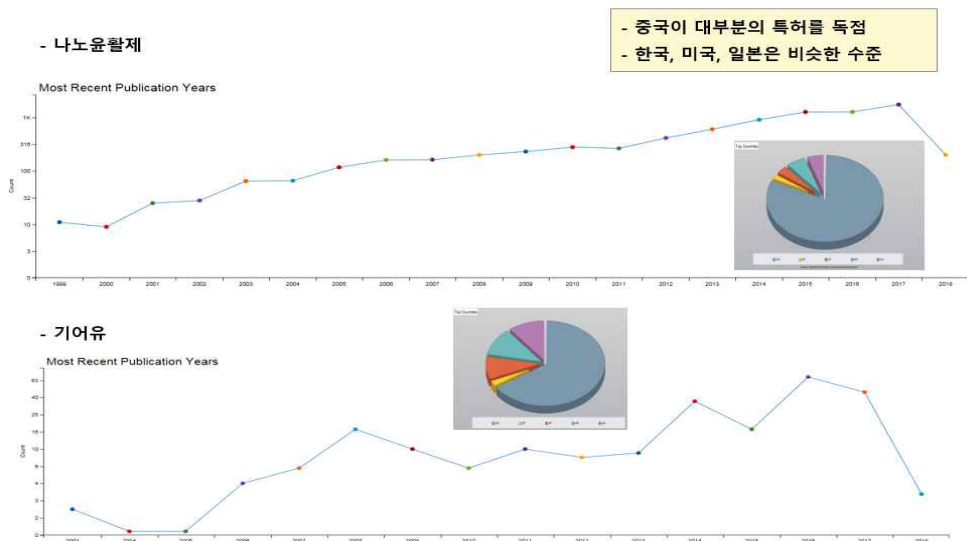
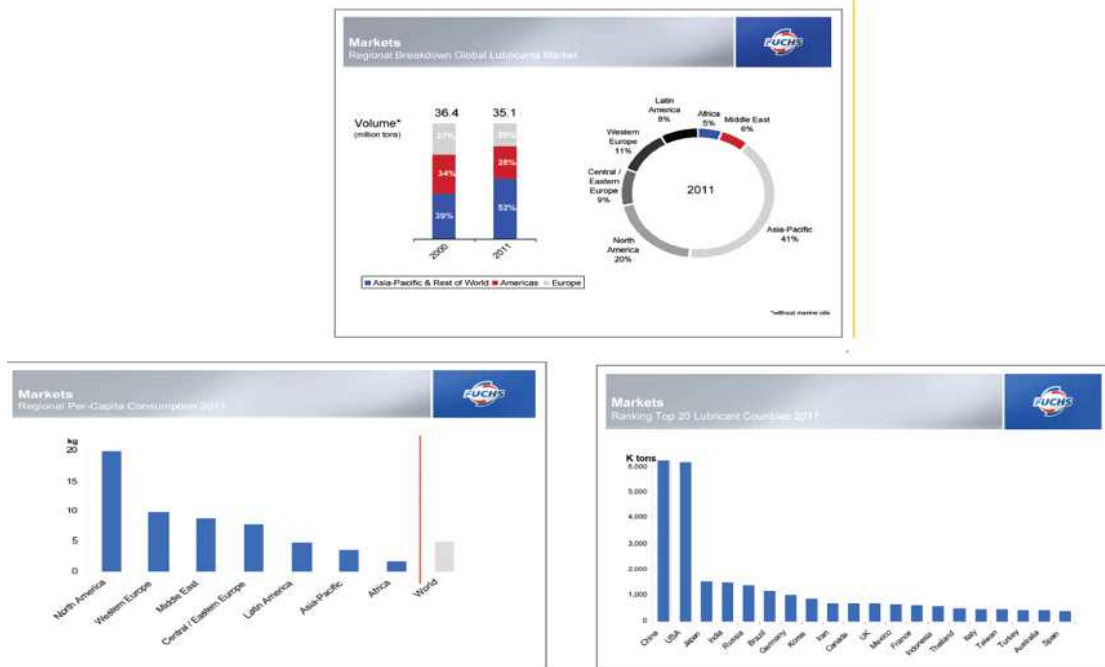


그림 3-1-9. 나노윤활제 및 기어유 분야 특허 분석

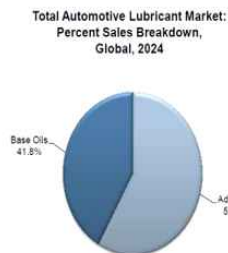
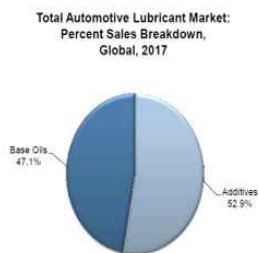
○ 시장 분석 (참고-외부자료 활용)

○ 지역별 시장 규모

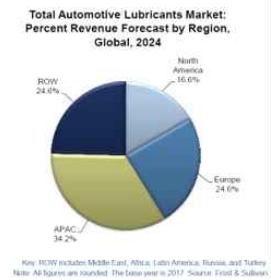
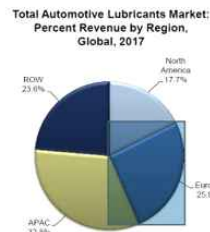


Lube Tech Sustainability and the Global Lubricants Industry

○ 기유 및 첨가소재 분야 비율



○ 시장 지역적 분포



○ 시장규모 및 성장률



그림 3-1-10. 윤활제 시장 규모 분석

3.2. 나노입자 선정 및 물성 분석

가. 윤활제 첨가 나노소재 후보군 탐색

기존 연구동향 및 실용화 윤활제 기술정보를 기반으로 나노윤활제 후보군을 탐색하고, 본 철도차량 기어유에 적합한 나노소재를 선정하고자 하였다.

윤활제 성능향상을 위해 연구되고 있는 나노재료로 나노금속입자, 풀러렌(Fullerene), 그래핀, BN (Boron nitride), MoS_2 , 탄소나노튜브 등이 있다. 윤창석 외 연구자료 [12]에 따르면, 카본나노튜브 및 알루미나의 첨가제 사용 시, 마찰계수 감소, 마모 흔적의 단면적 및 마모율 감소 등의 효과를 나타낸 것으로 확인되었다. 특히 마찰저감 효과는 상대적으로 저속구간에서 두드러지게 나타나는데, 저속시험 시 윤활막 두께가 얇아 윤활제 내 첨가제(나노입자)의 영향이 커지기 때문으로 평가하였다.

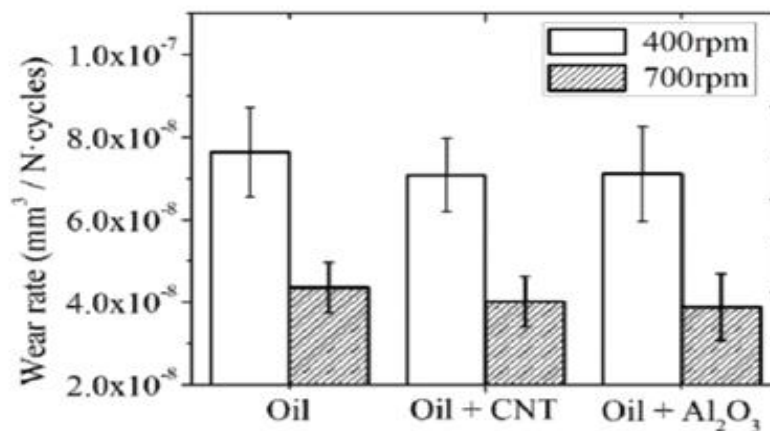


그림 3-2-1. 나노입자에 따른 윤활제의 평균 마모율 비교

(1) 산화금속 나노입자

본 연구의 경우, 대표적인 탄소 소재인 CNT와 주요 산화금속 나노입자들을 대상으로 나노윤활제 내 소재로서의 적합성을 평가하고자 하였다. 산화금속 나노입자 후보는 다음 3가지 금속입자로 입자별 특성은 다음 표 3-2-1과 같다.

표 3-2-1. 금속 나노입자 소재별 기본 물성

특성	단위	Al ₂ O ₃ (알루미나)		TiO ₂ (타이타니아)		SiO ₂ (실리카)	
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Density	Mg/m ³	3	3.98	3.97	4.05	2.17	2.65
Hardness	Mpa	5500	22050	9330	10290	4500	9500
Thermal conductivity	W/mK	12	38.5	4.8	11.8	1.3	1.5

그림 3-2-2는 수용액 내에서 나노소재별 열전도성을 나타낸다 [13]. 그림에서 보는 바와 같이 유체 내에서 이론적 및 실험적 열전도 수치는 상이하게 나타나며, 이는 유체 환경에 따라 윤활제 내에 열전도 특성 등 기초 물성이 이론과 다른 양상을 보일 수 있음을 말해준다. 나노유체 내의 입자는 Brownian motion을 통한 특이거동을 나타내는 것으로 알려져 있으나, 세부 메커니즘에 대한 사항은 아직 명확하지 않은 것으로 보고되고 있다.

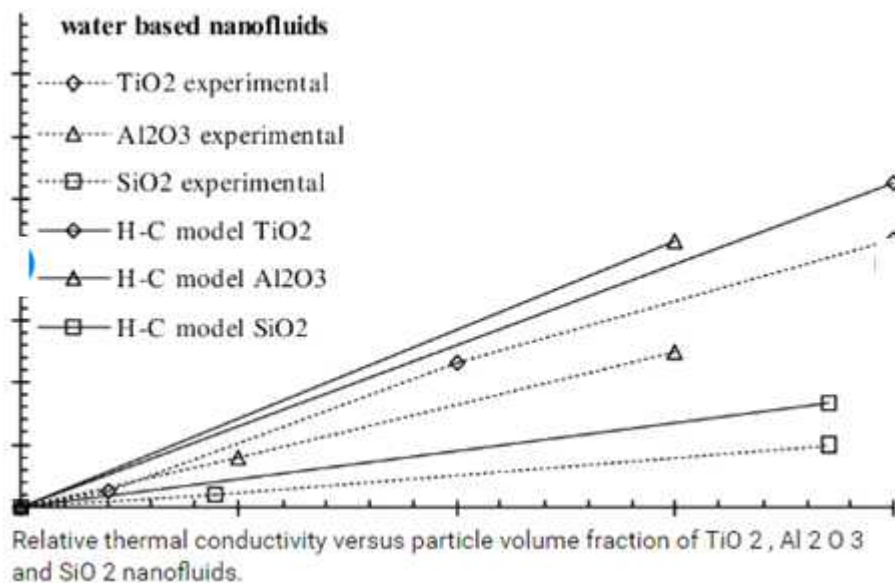


그림 3-2-2. 나노 금속입자의 종류에 따른 나노유체의 열전도 특성

위와 같이 나노 산화금속의 고유한 물성 데이터 및 산화금속 기반 나노유체의 기존 연구 사례를 기반으로 알루미나가 기계적 강도가 우수하고, 소재 및 유체의 열전도성이 높은 입자임을 알 수 있었다. 따라서, 나노유체 윤활제의 성능향상을 위해 알루미나 나노입자를 도입하는 것이 적합할 것으로 판단하였다.

(2) 탄소계 나노입자

탄소나노튜브는 원기둥 모양의 나노구조로 다이아몬드의 2배에 이르는 열전도도 뿐만 아니라, 철의 100배에 이르는 인장강도, 구리의 100배에 이르는 전기전도성을 가지는 등 기계적,

전기적으로 우수한 특성으로 꿈의 물질로 각광받고 있다. 본 연구에서도 탄소계 나노입자의 적합성을 검토하기 위해 탄소나노튜브 (Multi-Walled Carbon Nanotubes) 기반 나노유체의 열전도 특성을 살펴보았다. 탄소나노튜브는 원천적으로 표면이 소수성을 띄기 때문에 화학적인 표면개질을 통해 기저유체에 분산시킬 수 있다. 이에 우선 계면활성제 (Gum Arabic)와 표면처리 (Carboxyl 그룹)를 했을 때의 분산안정도를 살펴보았다.

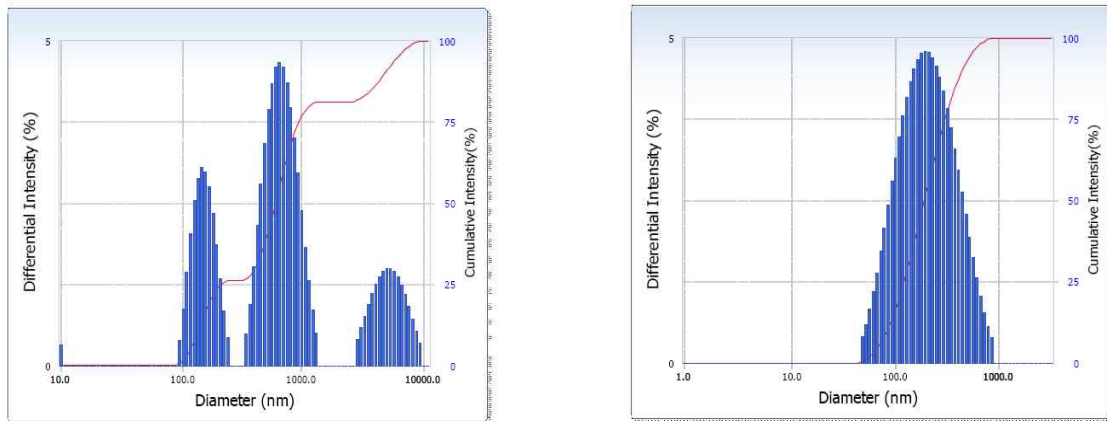


그림 3-2-3. 계면활성제와 표면처리 간 탄소나노튜브 나노유체의 입도 비교

탄소나노튜브가 분산된 수용액의 평균 입자크기는 계면활성제가 대략 555.8 nm를 나타내었고 표면처리의 경우에는 약 176 nm로 측정되었다. 이를 통해 최종적으로 표면처리 된 나노입자를 기반으로 한 두 종류의 나노유체 (0.05 및 0.1 vol%)를 제조하여 열전도율을 측정 한 결과 같은 온도에서 기저유체(DIW) 대비 대략 2 % 이내의 열전도도 상승을 관측하였다 (0.05 vol%: 0.616 W/mK, 0.1 vol%: 0.620 W/mK). 하지만, 종횡비 (Aspect Ratio)가 매우 큰 실린더 형태인 나노유체가 구름마찰 측면에서 구형인 입자에 비해서 불리하며, 가격 또한 고가이기 때문에 본 연구에서는 배제되었다.



그림 3-2-4. 탄소나노튜브 나노유체

나. 상용윤활제에 대한 알루미나 분산특성 및 열전도성 분석

(1) 알루미나 나노입자의 분산특성 및 입도분포 분석

알루미나는 산화물로써 표면에 수산화기 (-OH)를 다수 가지고 있으며, 이는 유기성 유기용매 환경에서 고른 분산에 어려움을 준다. 그림 3-2-5에서는 상용윤활제 하에서 응집 침전된 나노입자를 보여준다.

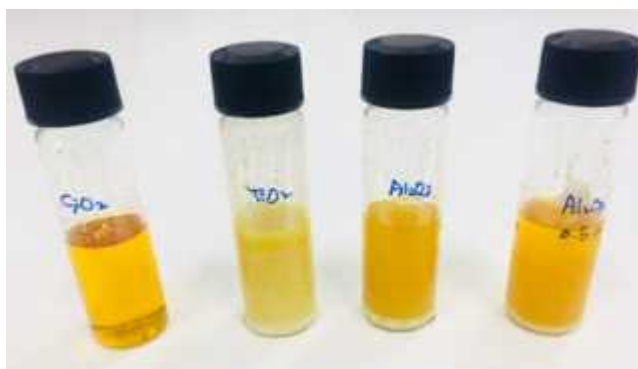
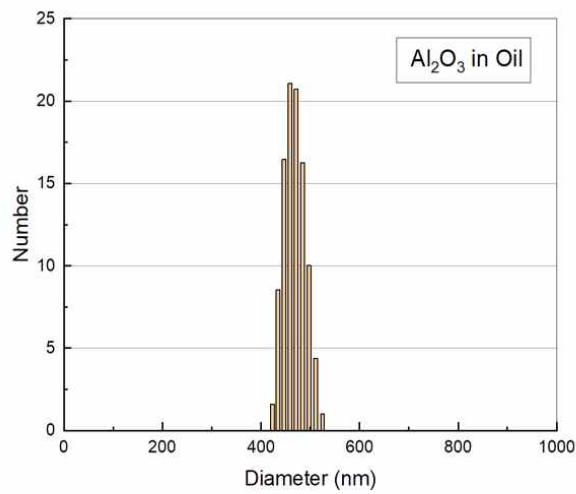


그림 3-2-5. 상용기어유 내 0.5 vol% 나노입자 (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3)의 분산능

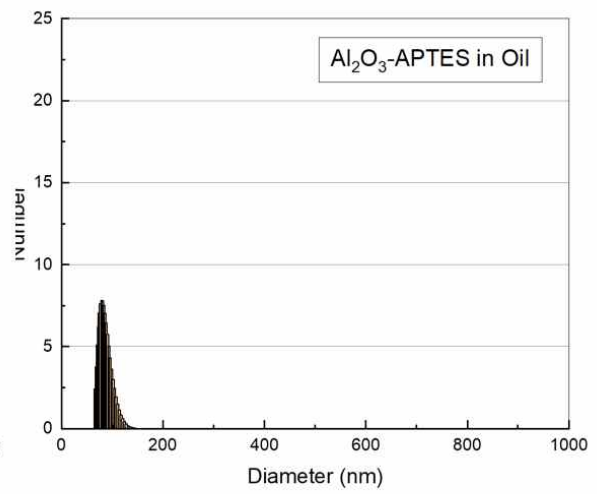
40~50 nm의 입도를 가진 알루미나의 경우, 상용윤활제 내에서, 그림 3-2-5에서 보는 바와 같이 약 10배의 평균입도로 분산되는 것으로 확인되었다. 이후 APTES를 처리하여 분산도를 높이면, 나노입자의 평균직경은 약 184.8 nm로 단순 분산 대비 절반 이상 작은 크기로 분산되는 것을 확인하였다. Particle size analyzer를 통한 입도분포를 분석하였으며, 이때 활용한 특성값은 표 3-2-2와 같다.

표 3-2-2. 입도분석을 위한 물성특성 값

항목	값	비고
Temperature	25.0	측정온도
Refractive index	1.4670	Mineral oil 문헌자료 참조
Viscosity(cp)	65.5462	Spirax EP80 동점도 값 (73.4 mm ² /s)를 밀도 893 을 이용하여 점도 cp 단위값으로 환산
Dielectric constant	2.1	Mineral oil 문헌자료 참조

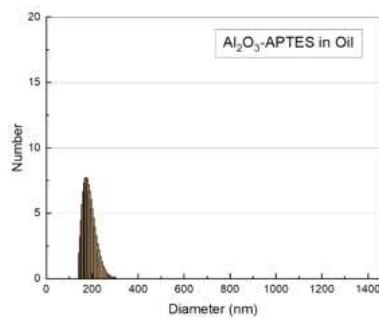


(a) Al_2O_3 0.1 v%, 480.8 nm

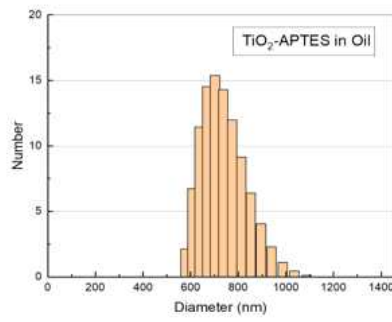


(b) Al_2O_3 -APTES 0.1 v%, 184.8 nm

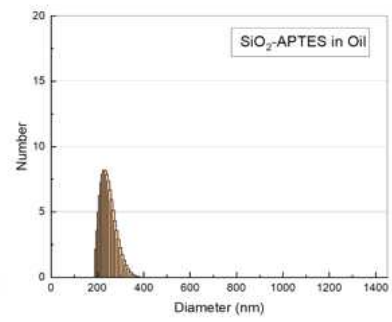
그림 3-2-6. 상용유탄제 내 알루미나 입도분포



(a) Al_2O_3 -APTES 0.1 v%, 184.8 nm



(b) TiO_2 -APTES 0.1 v%, 732.5 nm



(c) SiO_2 -APTES 0.1 v%, 244.3 nm

그림 3-2-7. 상용유탄제 내 TiO_2 및 SiO_2 입도분포

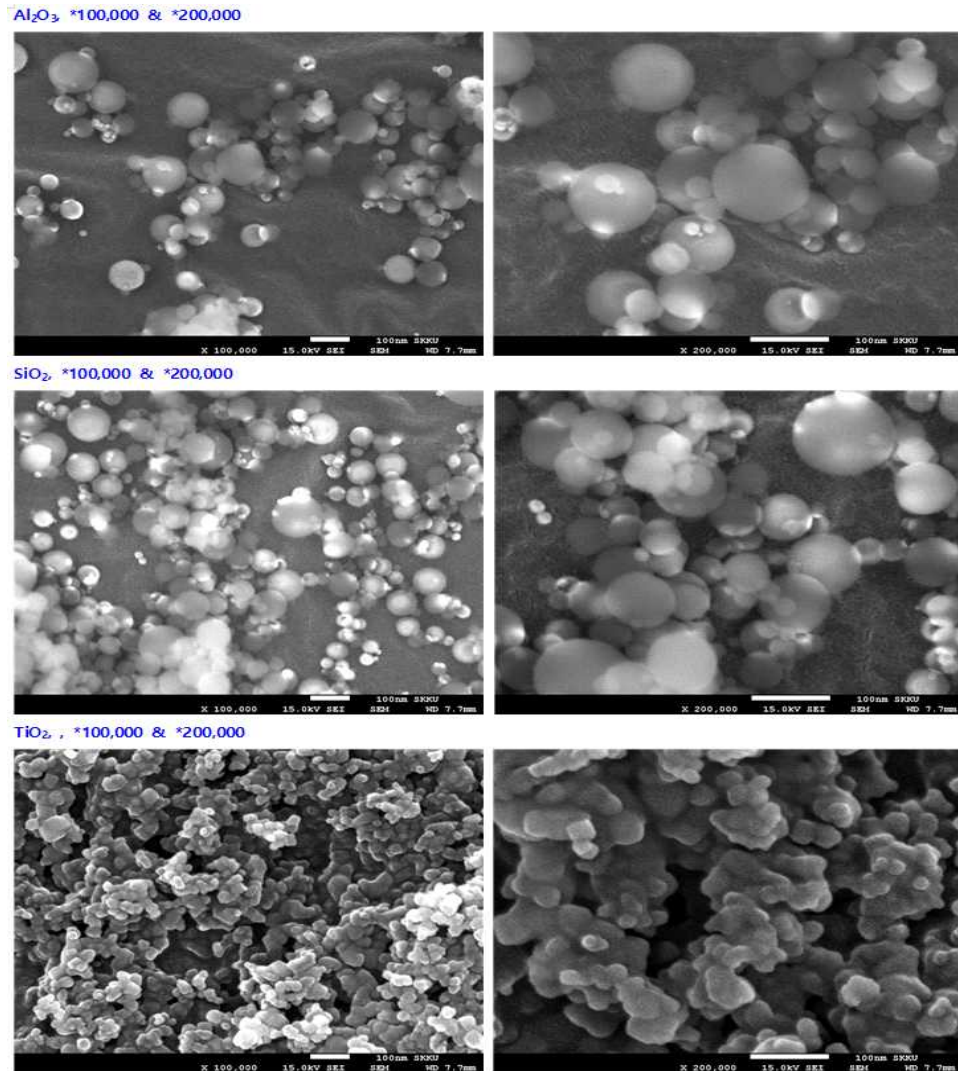


그림 3-2-8. APTES로 처리된 (a) Al_2O_3 , (b) TiO_2 , (c) SiO_2 의 SEM 이미지

(2) 나노알루미나 기반 나노유체 윤활제의 열전도성 분석

나노알루미나가 함유된 윤활제를 제조하여 함유농도에 따른 열전도성 향상을 살펴보았다. 분석장비는 KD2-Pro를 이용하였으며, 실험장치는 그림 3-2-9와 같다.

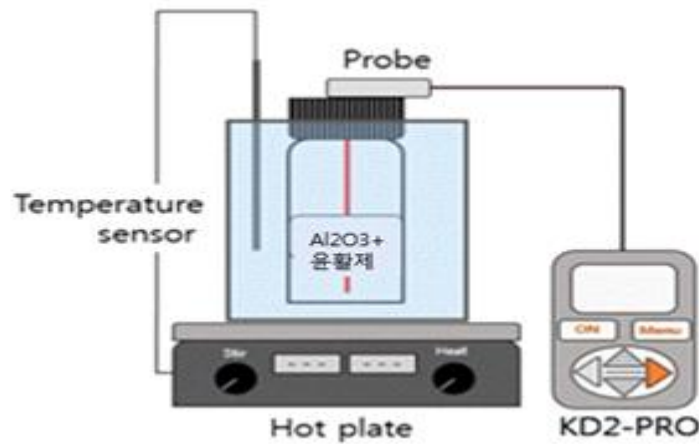


그림 3-2-9. 나노유체 윤활제의 열전도도 분석장치

나노알루미나의 함유농도에 따라 열전도도는 선형적으로 상승하는 것을 확인하였다. 유체 내에서 알루미나는 함유농도의 증가에 따라 열전도도의 증가를 가져온다. 0.5 %의 알루미나가 함유된 수용액은 평균 약 0.55 W/mK의 열전도도를 보이나, 1 % 이상의 나노알루미나가 함유될 때, 0.707 W/mK, 5%일 때 0.97 W/mK로 열전도성이 약 77 % 가량 향상되었다.

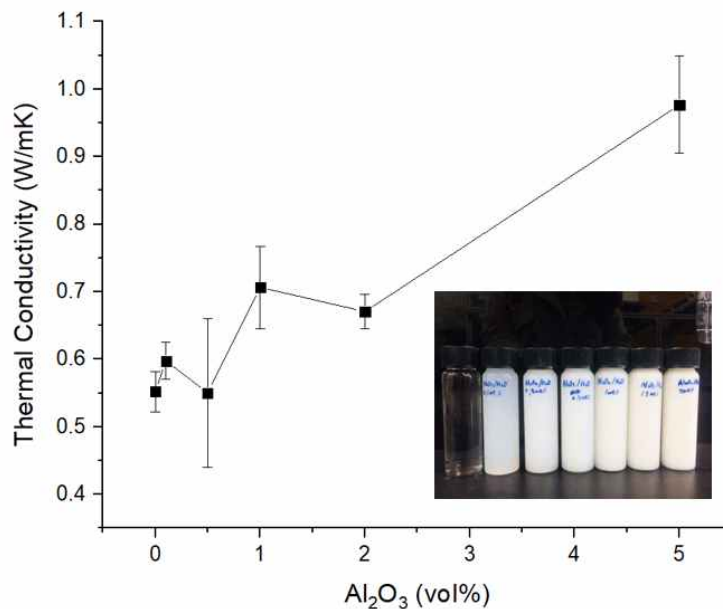
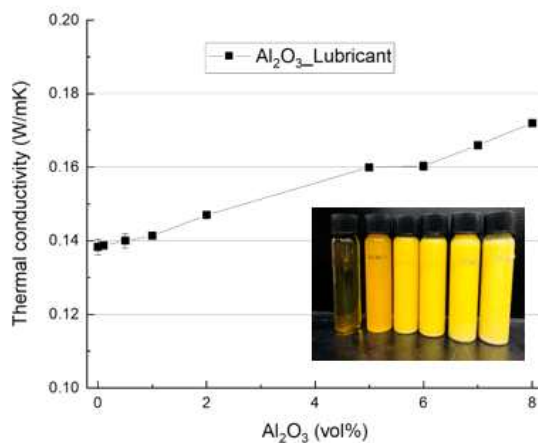


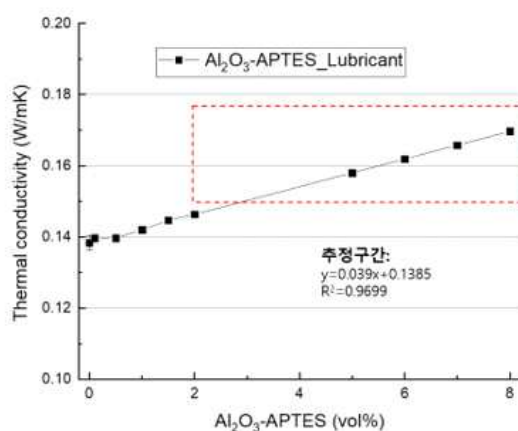
그림 3-2-10. 수용액 내 나노알루미나의 함유량 별 열 전도도

본 연구를 통해 나노입자의 함량 증가는 윤활제의 열전도도 향상에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 다음 그림과 같이, 알루미나와 알루미나를 APTES로 표면처리 한 경우의 열전도도의 경향은 거의 유사하게 나타났다. 나노알루미나를 윤활제 기유에 분산시켜 농도별 열전도도의 변화를 분석하였다. 실험 농도구간 (0.1~8 vol%) 내에서 나노알루미나

윤활유의 열전도도는 선형으로 증가하는 것을 알 수 있었으며, 8 vol%에서 기유의 약 20 %까지 증가하는 것을 확인하였다. APTES 처리 나노알루미나를 함유한 윤활제는 실험 농도구간 (0.1~2 vol%) 내에서 순수 나노알루미나와 유사한 열전도 향상을 보이는 것을 알 수 있었으며, 이 구간에서 산출된 추세선에 따라 8 vol%에서 22.68 %의 열전도도 증가가 가능한 것을 알 수 있었다.



함량 (vol%)	k (W/mK)	증가량(%)
Base oil	0.13833	-
0.1	0.13867	0.25
0.5	0.14000	1.21
1.0	0.14133	2.17
2.0	0.147	6.27
5.0	0.1600	15.67
6.0	0.16033	15.90
7.0	0.166	20.00
8.0	0.172	24.34



Al ₂ O ₃ -APTES (vol%)	k (W/mK)	증가량 (%)
Base oil	0.13833	-
0.1	0.13967	0.97
0.5	0.13967	0.97
1.0	0.142	2.65
1.5	0.14467	4.58
2.0	0.14633	5.78
5.0(추정)	0.158	14.21
7.0(추정)	0.1658	19.86
8.0(추정)	0.1697	22.68

그림 3-2-11. 알루미나 및 알루미나-APTES 함량에 따른 나노윤활제 열전도도

이러한 열전도도의 향상률은 나노입자의 종류에 따라 다르게 나타났는데, TiO₂의 경우 소재의 높은 밀도 값 (4.26 g/cm³)으로 동일 부피농도에서 더 높은 열전도도의 향상을 나타냈다.

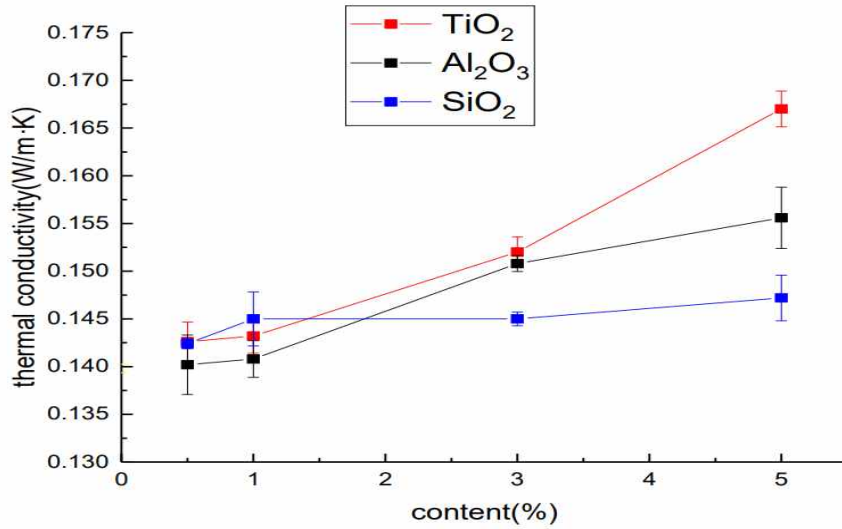


그림 3-2-12. 나노금속입자-APTES 나노윤활제 열전도도

또한, 간이 분석장치의 실험적 한계 (입자거동 영향 및 진동 효과)를 극복하기 위한 나노유체 열전도도 측정시스템을 구축하였다. 시스템 구축 후 시스템 신뢰성 검증을 수행하였다.

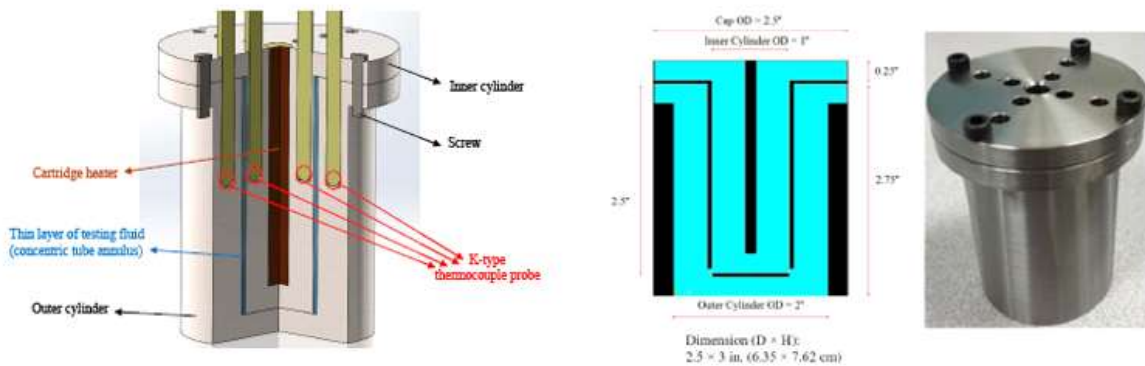


그림 3-2-13. 나노유체 열전도도 측정 시스템

위의 열전도도 측정 시스템을 활용하여 나노유체의 실제 열전도도를 구하기 위해서는 아래의 식을 이용한다:

$$k = \frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{(T_1 - T_2)2\pi L} Q$$

여기서, Q는 장치의 중앙에 위치한 열원에 의해 공급된 열량, T₁과 T₂는 R₁과 R₂에서의 온도를 나타낸다.

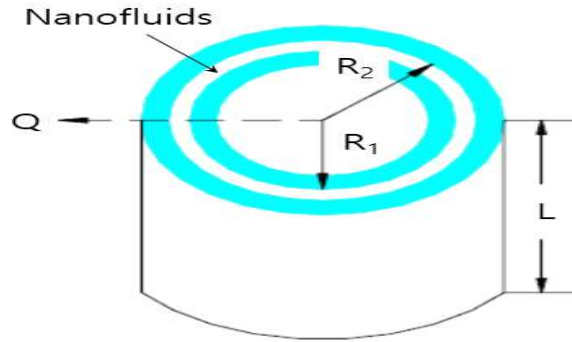


그림 3-2-14. 나노유체의 열전도도 계산을 위한 변수 설정

측정결과, 오일/ Al_2O_3 0.1 vol%의 나노유체에 대해 순수 오일 대비 30 ℃와 60 ℃에서 대략 2%의 상승을 확인하였다. 일반적으로 입자의 농도가 높아짐에 따라서 열전도도의 상승률이 증가하기 때문에 F-K모델을 기준으로 계산할 경우 대략 5 vol%에서 15 %의 상승률을 기대할 수 있을 것으로 계산되었다.

연구결과를 통해 윤활제 상용기유의 점도 및 미상의 첨가제들은 열전도도의 향상을 저해하는 것으로 판단하였다. 이는 앞서 참조한 연구문헌 (그림 3-2-2)에서와 유사한 경향으로 입자에 따른 열전도율의 증가 추세가 윤활유 매질 내에서도 같은 원리로 작용함을 말해준다.

G. Colangelo et al의 논문에서 기유가 오일인 경우 높은 점도 (증류수 대비 약 65배)로 인해 입자의 Brownian motion이 제한되고, 이는 다음의 열전도 모델(F-K 모델)에서의 열전도도와 점도의 반비례 관계식에서도 확인된다.

$$k_{nf} = k_{static} + k_{Brownian}$$

$$k_{Brownian} = 49500 \frac{k_B}{6\pi\mu_f d_p} (\rho c_p)_{nf} \phi^2 (\bar{T} \ln \bar{T} - \bar{T})$$

본 실험 및 연구자료를 통해, 나노알루미나를 활용한 윤활제의 열전도도는 그림 3-2-11과 같은 관계식을 가지고 입자 함유농도에 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 이러한 증가 추세는 위의 열전도 모델에서 알 수 있듯 윤활유의 점도 증가에 의해 저해된다. 연구대상으로 사용한 나노유체의 기유인 상용윤활제 (Shell Spirax EP80)는 동점도 약 70 cSt (40 ℃)인 고점도 유체이다. 따라서, 초기 연구목표인 나노윤활제의 열전도도를 기존 윤활제 대비 20 % 이상 향상하기 위해서 약 7-8 vol% 이상 고농도의 나노입자가 필요한 것을

알 수 있었다. 하지만 고농도의 나노입자는 분산성 저해, 윤활특성 저감 및 가격상승의 문제를 일으킨다.

본 연구에서 개발되는 나노유체 윤활제 시작품은 열전도도 뿐만 아니라 분산성, 윤활성, 유체 온도저감 특성, 그리고 대량생산에 따른 가격경쟁성 등 복합적인 목표요구성능을 가지고 있다. 특히 나노유체의 경우 열전도도의 향상은 유체로 활용 시에 발휘되는 냉각 특성 (장치 운용 중 온도저감 특성)에 민감하게 반응하므로, 소폭의 열전도성 향상으로 최종목표인 나노유체 윤활제 냉각특성 20 % 향상 달성이 가능하다. 따라서, 최종 나노유체 윤활제의 시작품은 연구 목표인 윤활제 냉각특성을 최대화 (기존 대비 20 % 이상 향상) 하고 분산성을 향상 (분산안정도 30 이하) 할 수 있도록 나노입자 함량을 조절하여 제조하고자 하였다.

(3) 나노유체 윤활제 제조를 위한 최적 나노입자 선정

기존 문헌 자료, 연구자료 및 기초 성능시험 결과를 기반으로 대상 철도차량 윤활제에 대한 최적 나노입자를 선정하고자 하였다. 검토 후보군은 대표적인 나노유체 연구용 나노입자인 탄소나노튜브, 나노알루미나 (Al_2O_3), 나노타이타니아 (TiO_2) 및 나노실리카 (SiO_2)를 대상으로 하였다. 본 연구과업에서 요구하는 기본 성능 및 전처리 등 제조 용이성 뿐 아니라, 실용화를 위한 소재수급 및 가격 등 경제성 항목까지 종합적으로 고려하였으며, 최종적으로 나노알루미나를 시작품 대상 나노입자로 결정하였다. 나노알루미나의 표면처리를 통해 분산성을 개선하여 경제성 있는 나노윤활제의 생산이 가능할 것으로 판단하였다.

표 3-2-3. 나노입자별 특성 비교분석

특성	탄소계	금속계		
	탄소나노튜브	나노 Al_2O_3	나노 TiO_2	나노 SiO_2
물리적 강도	◎	◎	○	△
열전도도	◎	◎	○	○
표면처리 용이성	○	◎	◎	◎
분산성(처리전)	◎	△	△	△
소재 가격	△	◎	○	○
소재 수급성	△	◎	△	△

3.3. 나노유체 윤활제 제조 및 성능평가

가. 나노입자 표면 처리

(1) 나노입자 표면처리

우수한 특성을 가지는 나노유체 윤활제 제조를 위해서는 기능성 나노입자가 기유 (base-oil) 안에서 응집현상 없이 잘 분산되어야만 한다. 대표적인 파라핀계 윤활기유는 C_nH_{2n+2} 단일결합을 가지고 있는 직선형태이거나 곁가지를 가지는 탄소와 수소로 구성된 분자구조를 가진다. 일반적으로 C_{12} - C_{16} 수준의 긴 alkyl 그룹을 가지고 있기 때문에 소수성 성질을 가진다. 나노유체 윤활제 제조에 사용되는 다양한 기능성 나노입자들은 대부분 표면에 oxide (-OH) 또는 carboxyl (-COOH) 그룹을 가지고 있어서 친수성 특징을 나타낸다. 이러한 친수성 나노입자를 윤활기유에 잘 분산시키기 위해서는 기유와 유사한 화학적 성질을 가지도록 나노입자 표면을 개질할 필요가 있다. 본 연구에서 사용한 알루미나 (Al_2O_3) 나노입자 역시 표면에 oxide 그룹을 가지고 있어 강한 친수성을 나타낸다. 이러한 세라믹 산화물 소재의 표면특성은 고분자 소재를 grafting 시키거나 자기조립단일막 (self-assembled monolayer, SAM)을 이용하여 손쉽게 개질이 가능하다. 특히 자기조립단일막을 이용하는 방법은 단일분자층으로 나노입자 표면을 고르게 처리할 수 있기 때문에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서도 알루미나 표면에 존재하는 oxide 그룹과 반응성이 우수한 silane 그룹을 가지고 있는 자기조립단일막 소재를 이용하여 표면을 처리하였다.

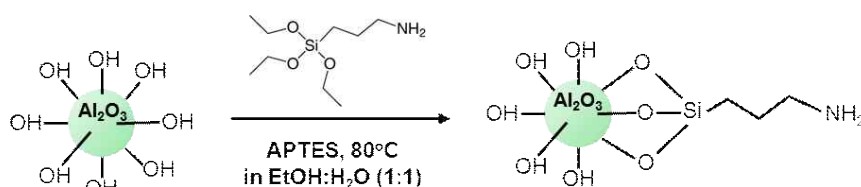


그림 3-3-1 APTES를 이용한 Al_2O_3 나노입자 표면처리 모식도

전체적인 알루미나 나노입자의 표면처리 모식도 및 실제 실험장치를 위 그림에 나타내었다. 알루미나 나노입자는 산업계에서 매우 다양한 분야에서 사용되고 있는 소재로서, 여러 종류의 크기와 모폴로지를 가지는 알루미나 소재가 시판 중이다. 본 연구에서는 나노유체 윤활제 제조를 위해, 경도가 우수하고 평균직경 45 nm를 가지는 구형의 알루미나 나노입자를 사용하였다. (Al_2O_3 , Alfa Aesar, Nanodur) 직경 100 nm 이하의 나노입자들은 질량대비 표면적이 커서 서로 응집될 가능성이 매우 높기 때문에 분산성을 높이기 위해서는 적절한 표면처리가 필요하다. 표면처리제로는 대표적인 자기조립단일막인 3-aminopropyl triethoxy silane (APTES, Sigma-Aldrich)를 이용하였다. APTES를 이용한 산화물 소재의 표면 개질에 대한 연구는 이미 다양한 문헌에 보고되었으며, 알루미나 나노입자에 대한

표면 개질 반응 역시 선행문헌을 참고하여 진행하였다. APTES의 한쪽 말단은 산화물 나노입자 표면에 다수 존재하는 -OH 그룹과 매우 잘 반응한다고 알려진 triethoxysilane 그룹으로 이루어졌으며, 다른 한쪽은 철도 회전기기에 주로 사용되는 금속재질과의 계면특성을 향상시킬 수 있도록 극성을 가지는 amine (-NH₂) 그룹이 도입되어 있는 구조이다. 알루미나 나노입자 5 g에 에탄올과 증류수를 1:1의 부피비로 총 200 mL를 넣고 혼합하여 물리적 교반 (3시간) 시킨 후 초음파처리 (1시간)를 통해 입자를 충분히 분산시킨다. 알루미나 입자가 분산된 서스펜션에 3-aminopropyl triethoxy silane (APTES) 33.75 mM (7.47 g)를 시린지를 이용해서 10분 간 한 방울씩 떨어뜨려 넣어준다. 80 °C에서 환류 (reflux)시키며 3시간 동안 교반 후, 상온에서 12시간 추가적으로 교반한다. 알루미나 나노입자가 포함된 콜로이드를 원심분리기 (5000 rpm, 50분)를 이용하여 에탄올로 3회 세척한다. 원심분리를 이용해서 회수한 나노입자를 상온과 60°C의 진공오븐에서 각각 12시간 건조하여 표면처리 된 알루미나 나노입자를 (APTES-NP) 얻을 수 있었다. 비교군으로 사용된 표면처리 되지 않은 알루미나 나노입자는 Pristine-NP로 명명하였다.

(2) 표면처리 된 나노입자 중량 및 표면 분석

알루미나 나노입자의 표면처리 여부는 thermal gravimetric analysis (TGA)와 transmission electron microscopy (TEM) 분석을 통해 확인할 수 있다. 먼저 TGA를 이용하여 나노입자 표면에 처리된 APTES의 함량을 정량적으로 분석하였다. Al₂O₃ 나노입자는 1000 °C 이상의 내열성을 갖는 반면, 표면에 처리된 APTES는 유기물이기 때문에 일반적으로 500 °C 이하의 내열성을 갖는다. 질소 분위기에서 700 °C까지 승온하면서 (승온속도 10 °C/min) 발생하는 중량변화를 관찰하였다. Pristine-NP는 중량감소가 거의 일어나지 않는 반면에, APTES-NP의 경우 350 °C 지점에서 중량감소가 발생하는 것을 확인할 수 있다. Pristine-NP 대비 0.68 %의 중량감소가 추가적으로 일어났으며, 이는 APTES-NP 시료에 존재하는 APTES 함량을 의미한다. 하지만 이러한 결과가 APTES가 알루미나 나노입자 표면에 존재하는 것을 의미하는 것은 아니다. 표면처리 여부를 직접적으로 확인하기 위해, APTES-NP를 TEM을 통해 관찰하였다. 고해상도 TEM 분석을 통해 Al₂O₃ 나노입자 표면에 존재하는 APTES 박막을 직접적으로 관찰한 결과, Al₂O₃ 입자 표면에 APTES가 약 1 nm 두께로 막을 형성하고 있는 것을 확인하였다. 또한, Energy Dispersive Spectrometer (EDS) 기법을 이용한 원소분석을 통해 APTES 표면처리 여부를 좀 더 명확하게 확인할 수 있었다. EDS 분석 결과에서 보는 바와 같이 APTES-NP 시료로부터 Al, O, Si, C 에 대한 원소분석을 진행하였다. Al₂O₃ 입자이기 때문에 당연히 Al, O 원소에 대한 이미지를 확인할 수 있다. 그리고 APTES 분자에 존재하는 Si와 C 원소들이 알루미나 입자 표면을 따라 고르게 분포되어 있다. 이를 통해, APTES가 알루미나 표면에 잘 처리되었음을 확인하였다.

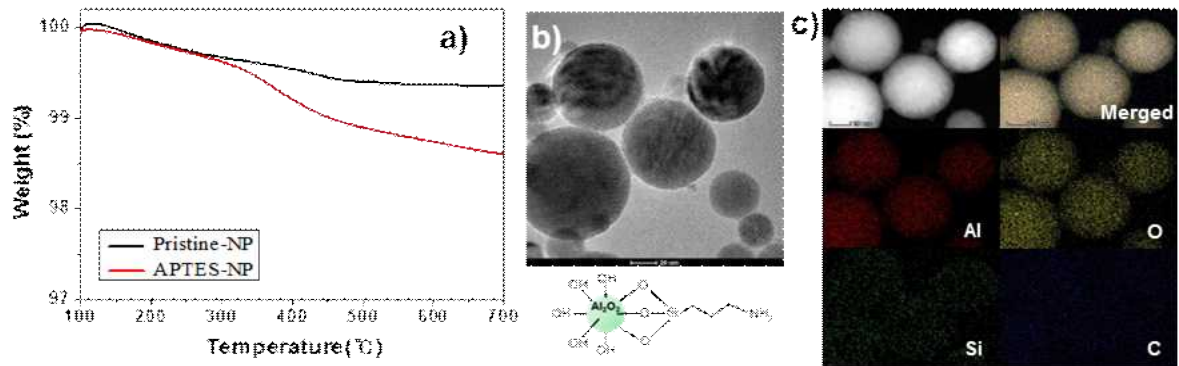


그림 3-3-2. APTES로 표면처리된 Al_2O_3 나노입자의 a) TGA 열분석, b) TEM 및 c) 원소 분석

나. 나노유체 제조 및 분산안정성 특성 평가

(1) 나노유체 제조 및 기초 물성 평가

철도차량 기어박스용 윤활제 (Spirax EP 80W, Shell)를 기유(base-oil)로 선정하였다. 나노유체 윤활제 제조를 위해 APTES-NP 나노입자를 각각 0.1, 0.3, 0.5 vol% 넣고 초음파처리 (1시간) 후 나노입자가 분산될 수 있도록 5시간 이상 충분히 교반하여 나노유체 윤활제를 제조하였다. 비교 실험을 위해, Pristine-NP를 이용하여 동일한 조성을 가지는 나노유체 윤활제도 함께 제조하였다.

아래 그림은 각각 Pristine-NP와 APTES-NP의 농도별 나노유체의 분산 안정성을 제조 직후부터 8일까지의 시간 변화에 따라 보여주는 사진이다. 총 7개의 시료 중 첫 번째 시료는 Spirax EP 80W 기유이며, 2~4번째의 시료는 Pristine-NP를 각각 0.1, 0.3, 0.5 vol% 농도별로 넣은 것이고, 5~7번째 시료는 APTES-NP를 0.1, 0.3, 0.5 vol% 농도별로 넣은 나노유체이다. 육안상으로 제조 직후에는 큰 변화가 없지만, 시간이 지남에 따라 나노입자의 표면처리 여부에 따라 분산성에 큰 차이가 나타나는 것을 볼 수 있다. 특히 1-2일째 결과를 보면, 동일한 함량을 넣었음에도 불구하고, Pristine-NP를 넣은 나노유체에서 발생하는 침전량이 APTES-NP를 넣은 나노유체 보다 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향성은 모든 조성에서 유사하게 관찰된다. 제조한 6개의 나노유체 중에서는 APTES-NP 농도가 0.1 vol%일 때 가장 좋은 분산안정성을 보이며, 나머지 나노유체의 경우 침전현상이 발생하여 투명한 상층부와 침전이 일어난 바닥층이 뚜렷하게 분리되는 것을 관찰하였다. 또한 0.5 vol%의 나노입자가 포함될 경우 표면처리 여부에 상관없이 침전량이 매우 많은 것을 볼 수 있다. 하지만 보다 정량적인 장기분산안정성 평가가 필요하며, 이는 다음 절에서 좀 더 자세히 서술하겠다.

Spirax EP 80W 기유와 Pristine-NP와 APTES-NP를 각각 0.1 vol%, 0.3 vol% 포함하는 나노유체 윤활제 4종에 대한 동점도 (Kinematic Viscosity) 결과를 Table 1에 나타내었다.

분산성이 떨어지는 나노입자 0.5 vol% 포함하는 나노유체 윤활제는 점도 측정을 하지 않았다. 동점도는 HVM 472 (HERZOG) 점도측정기로 ASTM D445 규격에 맞춰 측정된 결과이다. Spirax EP 윤활제의 동점도는 40℃와 100℃에서 각각 71.07(73.4) cSt와 9.323(9.2) cSt로 측정되었으며 점도지수 (Viscosity Index)는 108이다. 이는 Spirax EP 80W 제조사에서 제공하는 물성표의 결과와 매우 유사한 결과이며, 제조사의 결과는 괄호 안에 표기하였다. Pristine-NP와 APTES-NP를 함유한 나노유체 윤활제의 동점도 및 점도지수 결과를 보면, 나노입자가 0.1 vol%, 0.3 vol% 포함되더라도 동점도와 점도지수 특성에는 크게 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다. 또한, 나노입자의 표면처리 여부에 따른 점도 특성 변화에도 큰 차이는 나타나지 않았다.

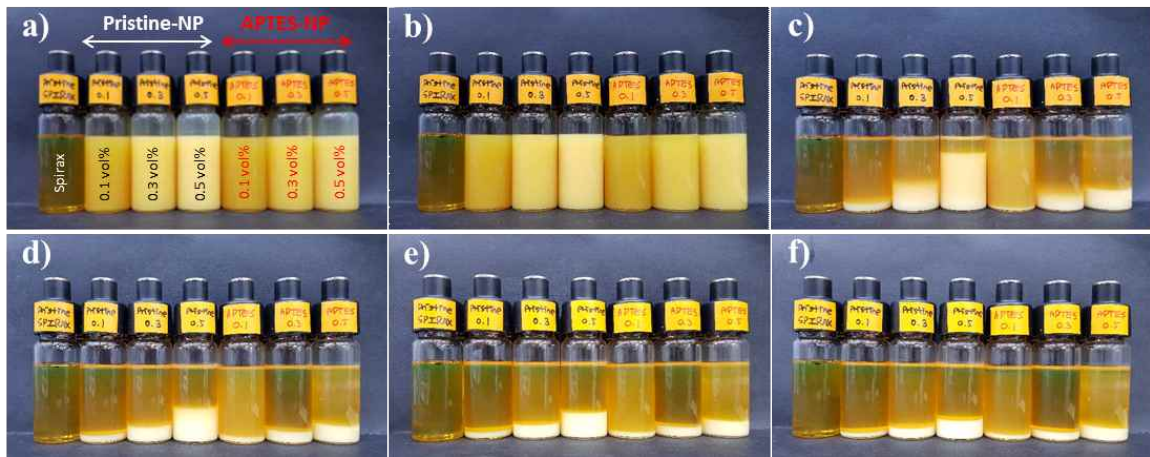


그림 3-3-3. 나노입자 APTES 표면처리 및 함량에 (0.1, 0.3, 0.5 vol%) 따른 분산안정성 결과. 나노유체 제조 후 시간에 따른 분산성 비교 결과. a) 제조 직후, b) 1시간, c) 1일, d) 2일, e) 3일, f) 8일

표 3-3-1. 다양한 조성을 가지는 나노유체 윤활제의 동점도 및 점도지수 (Viscosity Index)

나노입자 종류	나노입자 함량 (vol%)	동점도 @40℃ (cSt)	동점도 @100℃ (cSt)	점도지수
- (Bare Spirax EP 80W)	0	71.07	9.32	108
Pristine-NP	0.1	72.24	9.43	108
Pristine-NP	0.3	74.21	9.74	110
APTES-NP	0.1	71.37	9.45	110
APTES-NP	0.3	72.61	9.54	109

(2) Turbiscan을 이용한 장기 분산 안정성 평가

다양한 구동 및 회전기기에 사용되는 윤활제의 특성상 운전상태 뿐만 아니라 회전기기가 운전하지 않는 시간에도 안정적인 분산성을 유지하고 있어야 한다. 특히 기유에 화학적으로 용해되어 있는 첨가제와 달리 물리적으로 분산되어 있는 나노유체 기반의 윤활제의 장기

분산안정성은 더욱 중요하다. 윤활제와 같은 유체의 분산성을 평가하는 국내 공인시험 인증기관은 전무하므로, 본 연구에서는 나노유체 윤활제의 분산성을 정량적으로 측정하기 위해, Turbiscan AGS (Formulaction社) 장비를 이용하여 분석결과를 제시하였다. Turbiscan은 시료를 통과하는 다중 광산란 방식을 통해 복합적인 투과도 (Back Scattering Transmittance, BST)를 측정하여 분산특성을 정량화할 수 있다. 일정 시간이 지난 뒤 측정한 투과도 변화 (Delta BST)를 계산함으로써, 유체 내 입자들의 분산안정도 (Stability Index)를 정량적으로 구할 수 있다. 본 연구에서 사용한 Turbiscan AGS 장비의 실제 이미지와 투과 및 산란도 측정 개념도를 아래 그림에 나타내었다. 전용용기에 분산액을 담아 측정함으로써 용기의 하층부부터 상층부까지 촘촘히 스캐닝함으로써, 거품화, 침전, 상분리, 응집, 거품화 등을 구별할 수 있기 때문에 분산 저해 메커니즘을 연구할 수 있다. 또한, 로봇팔을 이용하여 정해진 시간마다 최대 54개의 시료를 동시에 측정가능하기 때문에 다양한 종류 및 조성을 가지는 시료들에 대한 장기 분산안정성 분석을 안정적으로 할 수 있다.

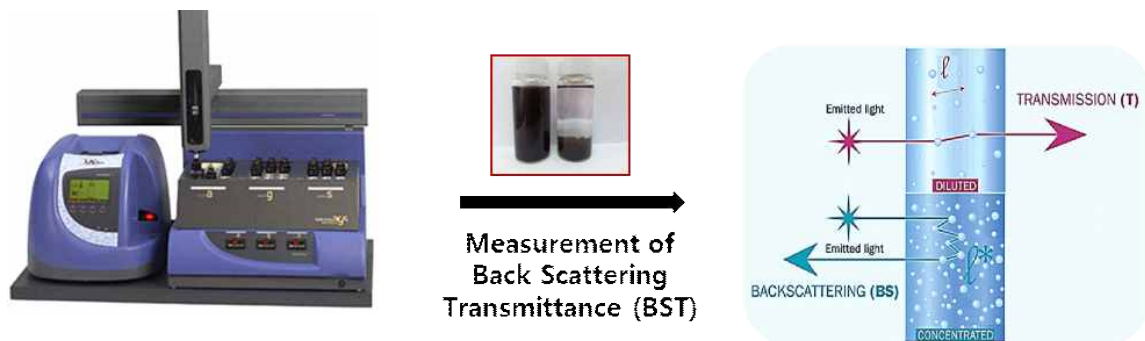


그림 3-3-4. Turbiscan-AGS 장비와 Back Scattering Transmittance (BST) 측정 원리 모식도

(3) 나노입자 표면처리 및 함량에 따른 나노유체 분산안정성 평가

상온에서 제조한 6종의 나노유체 윤활제를 매 2시간 간격으로 6일 동안 스캐닝 하여 얻은 Turbiscan 분산안정성 결과를 아래 그림에 나타내었다. 시료의 높이 (X축)에 대해 각 스캔 시간에 따른 Transmission의 변화 (ΔT)와 Back-scattering의 변화 (ΔBS)를 Y축에 나타내었다. 그림 a-c는 Pristine-NP가 각각 0.1, 0.3, 0.5 vol% 포함된 나노유체 윤활제이며, 그림 d-f는 APTES-NP를 포함하는 나노유체 윤활제의 결과를 보여준다. 시간에 따른 투과도와 산란도의 변화가 작을수록 장기분산안정성이 높으며, 변화량과 변화속도가 클수록 분산성이 낮음을 의미한다. 일반적으로 나노유체 윤활제의 경우, 세라믹 또는 금속 나노입자의 밀도가 기유에 비해 현저히 높기 때문에 교반 없이 장기 보관할 경우, 초기 분산특성이 좋더라도 시간이 지남에 따라 침전현상에 의한 분산성의 저하가 예상된다. 본 연구에서 사용한 알루미나 나노입자의 밀도는 $3.60 \text{ cm}^3/\text{mL}$ 이며, 기유인 Spirax EP 80W의 밀도는 $0.89 \text{ cm}^3/\text{mL}$ 로서 역시 침전이 발생할 가능성이 매우 높다.

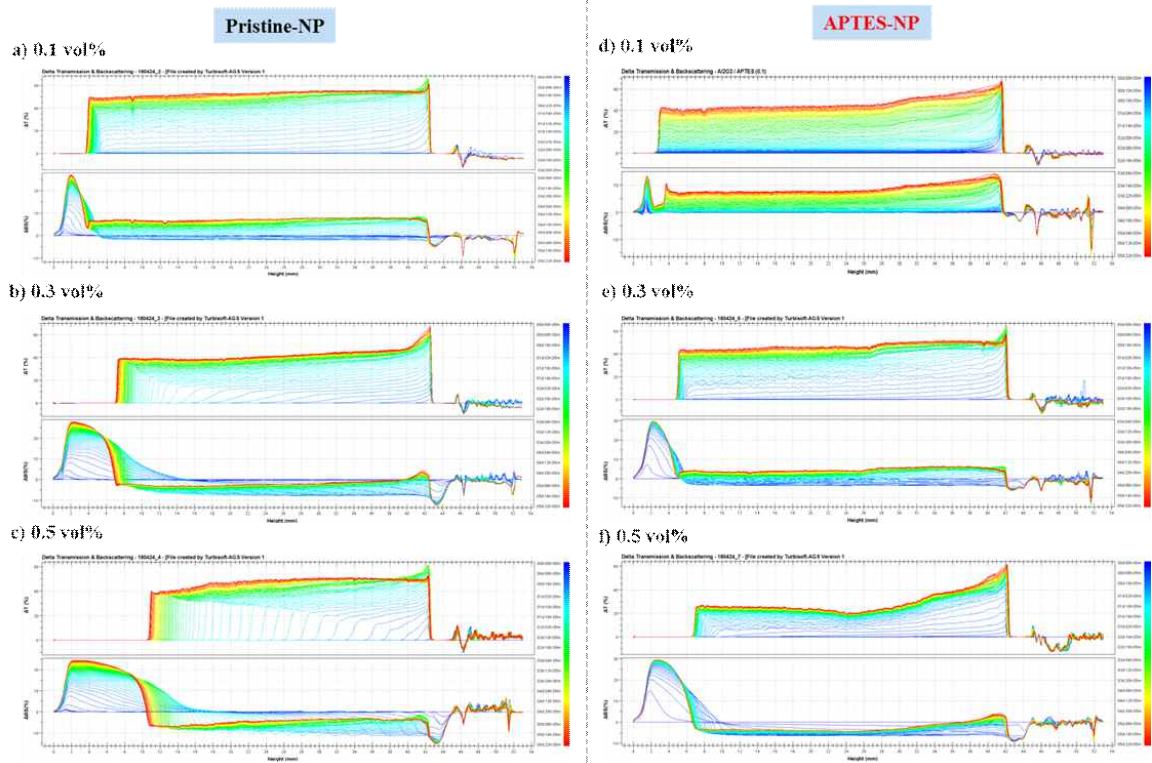


그림 3-3-5. 표면처리 하지 않은 나노입자와 (Pristine-NP)와 표면처리 한 나노입자 (APTES-NP)로 제조한 다양한 조성의 나노유체 유탄제의 장기 분산안정성 Turbiscan 결과

Turbiscan 결과를 보면 APTES-NP 0.1 vol% (그림 d) 시료를 제외한 모든 시료의 하층부에서 ΔBS 의 값이 크게 증가하는 것을 볼 수 있으며, 예상한 바와 같이 전형적인 침전현상에 의해 투과도의 변화가 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 침전현상은 첫 24시간 이내에 빠르게 진행되었으며, 그 이후에는 침전현상이 안정화 되었다. 하지만 APTES-NP 0.1 vol% 시료의 경우, 침전현상이 나타나기는 하지만 다른 시료에 비해 현저히 낮을 뿐만 아니라, 분산특성을 측정한 6일에 걸쳐 균일한 속도로 매우 천천히 침전되는 것을 볼 수 있다. 이는 분산안정성이 충분히 확보되어 있고, 중력에 의해서 무거운 입자들이 서서히 가라앉기 때문이다. 또한, 시료들의 중간층의 ΔBS 를 살펴보면, Pristine-NP를 사용할 경우, 시료의 높이에 따라 투과도가 불균일하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 분산특성이 좋지 않는 나노입자들이 서로 응집 되어 입자의 크기가 커질 뿐만 아니라 상층부와 하층부 사이에 상분리가 발생하는 것을 의미하며, 분산특성이 좋지 않을 때 나타나는 전형적인 모습이다. 하지만, APTES-NP를 사용할 경우에는 0.5 vol%의 고농도의 나노입자가 함유된 경우를 제외하고는, 시료 높이에 따른 ΔT 와 ΔBS 가 균일하게 변화하는 것을 볼 수 있다. 표면이 APTES로 처리되었기 때문에 기유와의 계면특성이 향상되어, 입자간 응집현상이 크게 발생하지 않음을 의미한다. 하지만 그림 f와 같이, 표면처리가 APTES-NP를 사용하더라도 0.5 vol%의 고농도로 입자가 포함되는 경우에는 장기분산안정성이 크게 저하되는 것을 볼 수 있다.

전체적인 분산안정성의 차이를 Turbiscan stability index (TSI)값을 구함으로써 정량적으로 비교할 수 있다. Turbiscan stability index (TSI)는 아래 수식과 같이 지정한 시료 높이 (H)에서

시간에 따라 측정된 각 profile간의 distance (d_i)값이며 시간에 따른 분산안정성의 변화로 인한 각 profile간의 면적을 적분하여 누적시킨 것을 말한다. 이때 정확한 높이를 계산하기 위하여, Turbiscan 전용 용기에 시료를 넣어 측정해야 한다.

$$d_i = \frac{\sum_h |scan_i(h) - scan_{i-1}(h)|}{H}$$

아래 그림에 제조된 6종류의 나노유체 윤활제의 TSI 값을 (Y축) 나타내었으며, X축은 보관시간을 의미한다. 이러한 그래프를 통해 나노유체 윤활제의 stability kinetics를 판단할 수 있다. Destabilization Kinetics 가 많이 변할수록, 즉 TSI 값이 클수록 분산안정성이 더 나쁘다는 것을 의미하며, APTES-NP가 0.1 vol% 포함된 나노유체 윤활제가 가장 좋은 장기분산안정성을 나타내었다. 일반적으로 TSI 값이 20 이하의 경우 분산안정성이 유지되는 것을 의미한다. 나노입자 함량이 0.1 vol% 이하일 경우에는 표면처리 여부와 상관없이 분산안정성이 어느 정도 유지되는 것을 볼 수 있다. 분산안정성이 가장 좋은 APTES-NP 0.1 vol% 경우, 36시간 이후 응집 및 침전 현상에 의해 TSI 값이 상승하지만 그 이후에는 TSI 상승폭이 매우 작다. 하지만, Pristine-NP 0.1 vol% 시료의 경우, 초기에는 APTES-NP 0.1 vol% 시료와 유사한 거동을 보이지만, 시간이 지남에 따라 TSI값이 지속적으로 증가하여 20 이상의 값을 보였다. 이는 초기 중력에 의한 입자 침전 뿐만 아니라, 나노입자 간의 응집이 지속적으로 발생하고 있음을 의미한다. 나노입자 함량이 0.3 vol% 이상이 되면 표면처리 여부와 상관없이 0.1 vol% 시료보다 더 높은 TSI 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 밀도가 높은 알루미나 입자들의 많이 포함되어 있어 침전현상이 빠르게 발생하기 때문인 것으로 이해된다. 또한, 입자함량이 0.3 vol% 이상이 되는 시료들에서는 표면처리 여부가 분산성에 훨씬 더 많은 영향을 미쳤다. Pristine-NP 0.3 vol%와 0.5 vol% 시료의 경우, 분산 후 2일 만에 40 이상의 TSI 값이 측정되었으며, 6일 후에는 50을 넘는 매우 높은 값을 나타내었다. 이는 분산성이 매우 악화되었음을 의미한다. 입자의 함량도 높고 표면처리가 되지 않았기 때문에, 응집 현상이 발생하여 입자크기가 커지고 침전이 빠르고 많이 발생한다. 반면에 APTES-NP를 분산시킬 경우, 입자 함량이 0.3 vol% 이상이 되어도 TSI 값은 6일 이후에도 30 이하에서 안정화되는 것을 확인할 수 있다. 입자 함량이 높아서 침전이 발생하지만, 표면처리 덕분에 입자 간 응집현상을 막기 때문이다. 일반적으로 용액의 TSI 값이 20 이하이면 분산안정성이 유지되는 것으로 판단할 수 있다. 이런 기준으로 볼 때, APTES-NP가 0.1 vol% 나노유체 윤활제만이 7 일 이상의 장기분산안정성을 확보한다고 볼 수 있다. 이러한 결과는 육안으로 분산성을 관찰한 결과 및 Turbiscan 투과도 변화를 통해 얻은 결과와도 일치한다. 이를 통해 나노입자의 함량과 표면처리 여부가 나노유체 윤활제 장기분산안정성에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

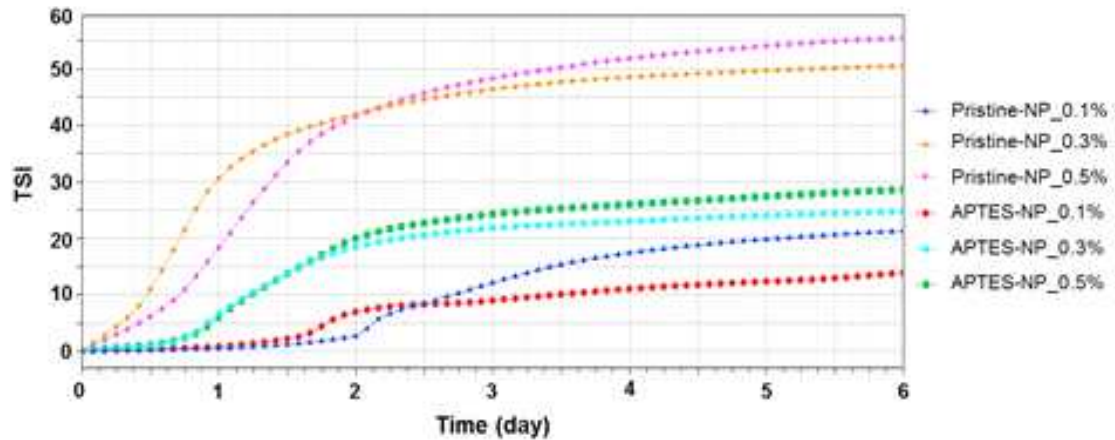


그림 3-3-6. 다양한 조성을 가지는 나노유체 율활제의 장기 분산안정도

(4) 나노유체 율활유 재분산성 평가

나노유체 율활유에 포함된 나노입자들의 응집, 침전 여부를 판단하기 위하여, 제조된 나노유체 율활유의 재분산 특성을 Turbiscan을 이용하여 분석하였다. 다양한 조성의 (0.1, 0.3, 0.5 vol%) 나노입자를 포함하는 나노유체 율활유 제조 후, 7일 경과 후, 초기 율활유 제조에 사용한 조건과 동일한 방법으로 (초음파 처리 1시간 및 교반 5시간) 나노유체 율활유를 2차 분산하였다. 2차 분산된 나노유체의 분산안정성을 2시간 간격으로 6일 (144시간) 간 스캐닝하여 분산안정성을 평가하였다. 아래 그림은 각 스캔 시간 (X축)에 따른 Transmission과 Backscattering (BS) profile의 변화 (Y축)를 reference mode로 나타낸 그래프이다. 표면처리 여부나 나노입자의 농도에 상관없이, 제조 직후 인 1차 분산된 나노유체 비해, 2차 분산된 나노유체의 경우 침전현상이 좀 더 빠르게 진행되는 것을 확인할 수 있다. 이는 분산되어 있는 나노입자들이 침전 후 응집현상이 일부 발생하여 분산된 나노입자의 크기가 증가했으며 침전 현상이 좀 더 빠르게 진행되기 때문이다.

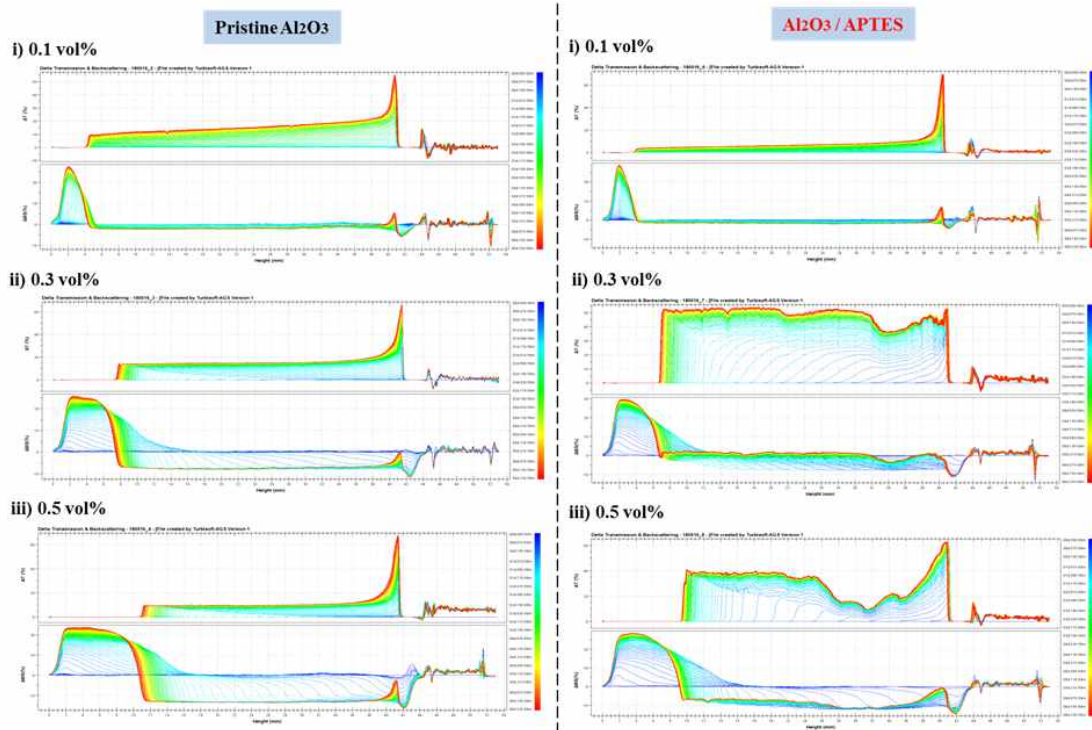


그림 3-3-7. 알루미나 나노입자와 APTES 표면 처리된 알루미나 나노입자의 농도별 나노유체 재분산 Turbiscan 결과

하지만 2차 분산된 나노유체를 7일간 방치 후 3차 분산했을 경우, 2차 분산 나노유체와 유사한 분산안정성 결과를 확인할 수 있었다. 이때 2차, 3차 분산 나노유체의 분산안정도는 측정이 진행된 6일 동안 15 이하로 확인되었으며, 이는 본 과제에서 제시한 분산안정도 목표수준 (20 이하)를 만족한다. 이는 2차 분산 이후에는 지속적인 입자의 응집은 일어나지 않는 것을 의미한다. 또한, 제조된 나노유체 유회유를 이용한 유회특성 평가는 제조 직후인 1차 분산 나노유체 보다는, 분산 후 1회 이상 방치된 나노유체를 사용했다고 판단하는 것이 바람직하다. 재분산성 비교 역시, 제조 직후의 장기 분산안정성이 아니라 2차 분산 이상의 나노유체 유회유와 비교하는 것이 바람직하다.

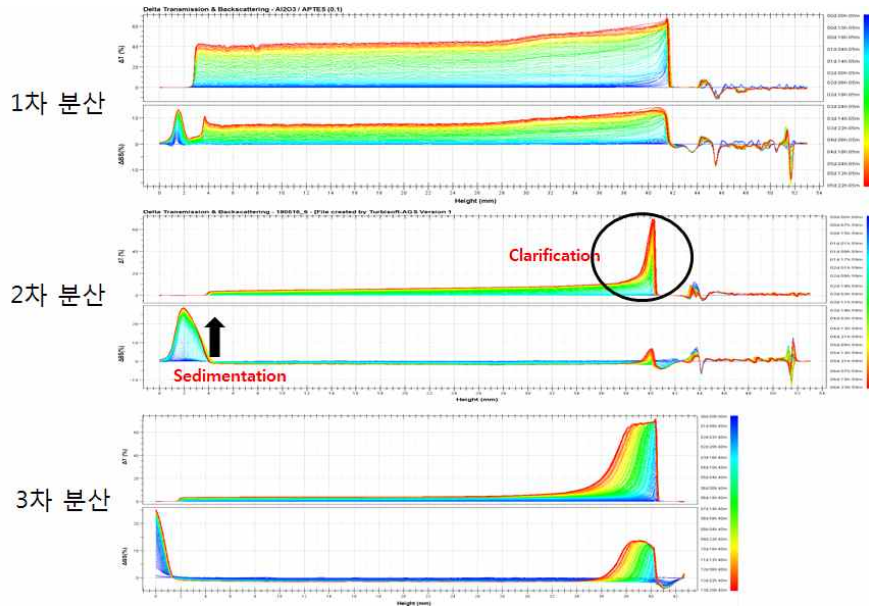


그림 3-3-8. APTES-NP (0.1 vol%) 나노유체 유회제의 분산횟수에 따른 장기분산안정성 평가

다. 나노유체 유회제의 유회특성 분석

(1) 4-Ball test를 이용한 마모특성 평가

제조된 나노유체 유회제의 유회특성을 분석하기 위해 4-ball test를 진행하였다. 4-ball test는 ASTM D4172 규격에 따라, 금속 ball 4개를 유회제 내부에서 회전시키고 각 ball 간의 접촉점에서 발생하는 scar diameter를 측정하는 방식으로 유회 및 마모특성을 평가하였다. 실험은 75 °C의 온도에서 40 ± 0.2 kgf의 하중을 인가하였으며 1200 ± 50 rpm의 회전속도로 60분간 진행되었다. 회전실험이 끝나고 회수한 금속 ball 표면에 묻은 유회제를 제거한 뒤, 광학현미경을 이용하여 scar를 관찰하고 직경을 측정하였다. 각 시료에 대해 동일 조건으로 3회씩 반복 실험하였으며, 발생한 scar의 직경은 샘플 당 각각 6회씩 측정하여 평균값을 사용하였다.

Pristine-NP와 APTES-NP를 각각 0.1 vol%와 0.3 vol%를 넣은 나노유체 유회제를 이용하였을 때, 금속 ball 표면에 발생한 scar의 광학현미경 이미지를 그림 a-d에 나타내었다. 또한, 각 시료에 대해 3회씩 실시한 결과로부터 얻은 scar diameter의 평균값을 그림 e에 나타내었다. 표면처리 한 APTES-NP를 사용한 나노유체 유회제의 경우 0.1 vol%와 0.3 vol% 시료에서 각각 $0.597 \pm 0.038 \mu\text{m}$ 와 $0.633 \pm 0.027 \mu\text{m}$ 의 평균 지름을 가지는 scar가 발생하였다. 표면처리 하지 않은 Pristine-NP를 이용하여 동일한 조성으로 제조한 나노유체의 경우에는 이보다 11-13%이상 큰 $0.678 \pm 0.045 \mu\text{m}$ 와 $0.707 \pm 0.069 \mu\text{m}$ 의 scar가 발생하였다. 이러한 마모특성의 차이는 나노입자의 분산특성에서 찾을 수 있다. 앞서 분산안정성 결과에서

서술한 바와 같이 APTES-NP 0.1vol%의 나노유체 윤활제는 입자의 응집이 거의 일어나지 않고 고르게 분산되어 있으나, 표면처리가 되지 않은 입자를 사용하거나 입자 함유량이 증가할 경우, 입자 간 응집 및 침전현상이 발생하여 나노입자의 크기가 커지는 현상이 나타났다. 응집된 나노입자들이 많아질 경우, 나노입자의 윤활특성은 감소하고 표면을 마모시키는 연마제의 역할을 하게 된다. 그 결과 분산성이 낮을수록 훨씬 큰 scar가 발생하는 것을 알 수 있었다.

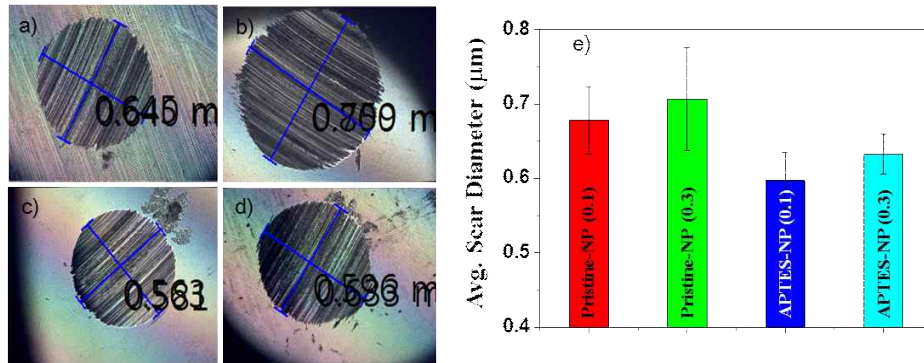


그림 3-3-9. 다양한 조성의 나노유체 윤활제를 이용한 4-Ball 테스트 후 발생한 scar 사진 (a-d) 및 e) scar 지름 크기 분석

3.4. 부품단위 윤활성능 평가

가. 성능 시험기의 설계 및 제작

(1) 나노 윤활제 성능 시험기 설계

시스템에서 윤활제와 관련하여 가장 주요한 요소는 사용 윤활제가 시스템 내의 기계부품 수명에 영향을 미치는 정도이다. 철도 차량용 기어박스 (그림 3-1-3)의 구성요소는 피니온 기어와 드라이빙 기어, 이 두 기어를 지지하는 각각 2개의 테이퍼드 로울러 베어링, 윤활제 유출을 방지하는 씰, 기어케이스와 윤활제이다. 여기서 윤활제 특성과 관련하여 수명에 관련하는 요소 부품은 베어링과 기어이다.

윤활제에 따른 기계 요소 부품 (베어링 및 기어류)의 성능시험을 하기 위해 그 윤활제가 작동하는 부품과 관련된 모사 시험 방법은 많은 연구 결과가 있다. 기어와 베어링의 운동의 경우, 헤르쯔 응력을 받는 구름 접촉 (Rolling Contact)을 하며 이들의 접촉 응력이 매우 높기 때문에 이를 견딜 수 있는 고경도와 고강성을 갖는 소재를 사용하여 제작된다. 이 높은 접촉응력에 기인하여 윤활 특성은 계면윤활과 EHL윤활 상태에서 운전되고 있다고 평가된다. 이런 윤활 조건은 미끄럼 베어링의 윤활 조건인 EHL에서 유체 윤활 조건보다

훨씬 열악한 상태이다. 그러므로 본 연구에서 주 성능을 시험하는 시험기는 구름 접촉 특성을 시험할 수 있는 구조를 선택하여 시험기를 설계, 제작하였다.

이런 목적을 달성하기 위한 시험기 구조는 이 분야에서 가장 널리 사용되는 시험기인 Thrust type Rolling Contact Fatigue (RCF) 시험기이다. 이 시험기의 특징은 축방향 하중을 주어 시험하는 형태로 간단한 부하장치로 일정한 하중을 줄 수 있으며 비교적 용이하게 시편과 윤활제를 교환할 수 있도록 설계되었다. 시험기의 상세는 다음 항에서 상세하게 기술한다.

기어박스 시스템에서 윤활제의 하중지지 특성에 가장 주요한 요소는 구름 접촉 부품인 베어링과 기어인데 반하여 윤활제와의 친화성과 깊은 관련이 있는 요소는 쉘이다. 그러므로 윤활장치에 사용하는 쉘을 시험하는 것은 윤활제의 물리, 화학적 특성을 시험하는 것으로 큰 의미가 있다. 이를 위하여 쉘링 시험기를 설계 제작하여 나노 윤활제가 쉘에 대한 물리적, 화학적 유해성 여부를 시험하였다. 쉘링 시험기의 설계와 제작에 대하여서 상세한 내용은 다음항에서 설명한다.

(2) RCF 시험기

일반적으로 구름 윤활 및 피로를 시험하는 시험기 형태는 RCF Type 시험기로 잘 알려져 있다. 본 연구에서 개발한 시험기는 시편에 일정한 축방향 하중을 주고 시험을 진행하도록 하였으며 시편의 형태가 도넛형태인 스러스트베어링과 유사하여 단순한 형상을 가지게 하여 동일한 품질로 제작이 용이하도록 설계하였다. 또한, 시험에 필수적인 요소인 시편과 윤활제의 교환이 용이한 구조를 갖도록 제작하였다. 하중의 부하는 시험기간 동안 일정한 하중이 가해질 수 있도록 하중 추를 사용하였으며 20:1의 지렛대를 이용하여 비교적 손쉽게 운전되도록 하였다.

그림 3-4-1에 본 과제에서 시험에서 사용하기 위해 제작한 RCF 시험기의 사진을 나타낸다. 이 시험기를 설명하기 위하여 다음의 운용 방법을 설명한다. 1) 시험기 본체의 윤활제 통에 시편을 장치시키고 2) 윤활제를 시편 용기의 내용적의 80 % 정도를 채운 다음 3) 시험기에 시편 용기를 위치시킨다. 4) 이때 위치 조절 놉을 사용하여 추의 하중이 걸리도록 상,하 위치를 조정한다 (추의 하중은 20:1을 기준으로 선정한다). 5) 온도센서를 위치시켜 고정하고 시험기 본체에서 최고 온도 셋팅을 한다.

가동 중 시험용기의 윤활제가 이 셋팅치를 넘어가게 되면 시험기가 정지되도록 되어있다. 다음에 6) 진동센서를 위치시키고 최고 진동 강도 셋팅을 한다 (시험 도중 시험기의 하중 추에서 이 진동 값을 넘기게 되면 시험기가 멈추게 된다). 7) 안전 커버를 켜준다 8) 컴퓨터의 모니터링 모드를 켜고 모니터링 준비를 한다. 9) 가동 시간 셋팅, 온도 셋팅 등을 확인한다. 10) 가동 스위치 모터 ON을 눌러 기기를 가동시킨다. 11) 약 1분간 시스템이

완전한지를 확인한 후 안전하다고 판단되면 계속 가동시킨다. 12) 가동 시작일시, 초기 진동값 및 온도를 기록한다. 13) 가동이 정지되면 알짜와 시간 정지 원인을 기록하고 14) 총 회전수를 기록한다. 15) 조립과 역순으로 시편용기를 분해하고 16) 사용윤활제를 별도로 수집한 후 (필요시 성분 분석) 17) 시편을 제거하여 검사하고 18) 시편 통을 세척한다. 이때 초음파 세척기를 이용한다

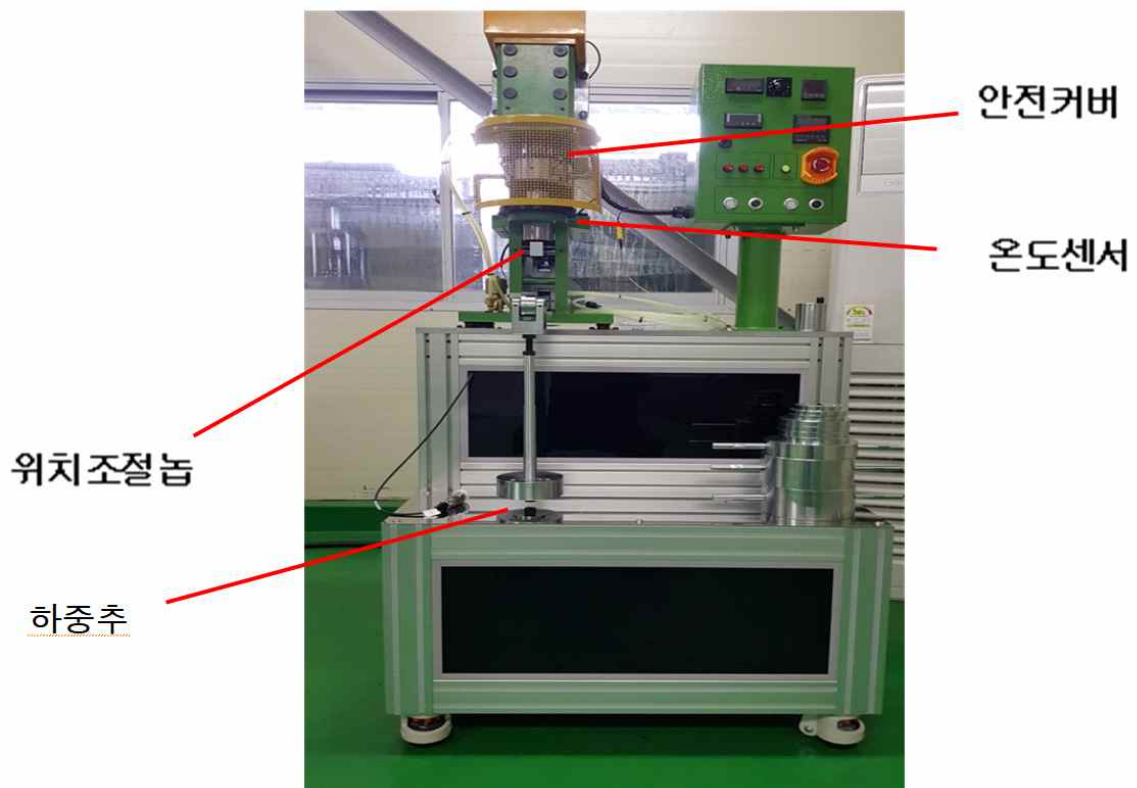


그림 3-4-1. RCF 시험기

- 시험 하중의 결정

시험 하중은 시험기에 가해지는 추의 무게가 시험편에 가해지는 접촉면당 하중으로 나타낸다. 이 시험기는 하중 추의 하중의 20배가 시험 편에 가해지게 되어 있으며 시험 편에는 볼이 3개 또는 6개가 지지 되게 설정할 수 있다. 하중은 하중추에 의해 20:1 지레대에 부가되게 만들어져서 볼 당 하중은 초기 무게 추 무게 $\times 20 \div 3$ 또는 6이 된다. 여기서 사용되는 볼은 3/8 인치 볼을 사용하며 지지베어링은 내경 20 mm 외경60 mm 의 51305 베어링을 상부에 장치시키며 이 베어링과 같은 크기의 도너츠형 시편을 시험편으로 제작하여 하부에 고정시켜 시험한다.

접촉 응력은 Hertzian 접촉응력으로 계산되며 접촉 응력 2,500 MPa이하에서 시험한다. 이 접촉응력 시험은 한화베어링, 일진 베어링 등에서 장기간 동안 소재 및 윤활제 시험을 진행하여 결과를 발표한 바 있다.

그림 3-4-2에 MESYS 프로그램에 의하여 시험조건에 대한 응력 해석 결과를 표시한다, 이 응력 해석의 결과 최대 응력 점이 2,235 MPa 정도로 한계점인 4,000MPa보다 낮기 때문에 시험 가능한 조건으로 평가한다. 그러나 이 조건은 일반 베어링 적용조건 보다 가혹하므로 가속 시험 대상이 된다. ** MESYS : 베어링 하중 해석 프로그램

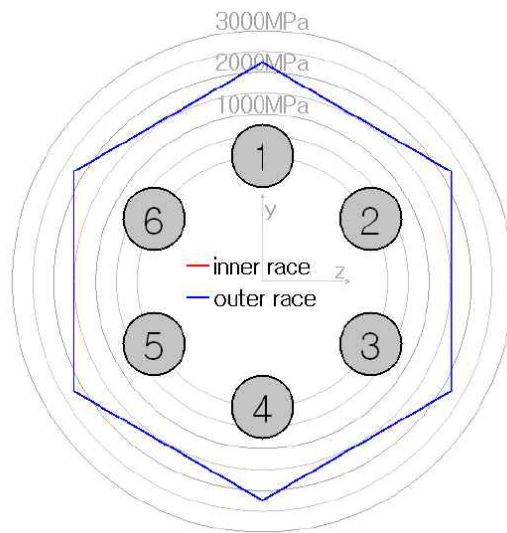


그림 3-4-2. 6개 볼을 사용한 시편의 응력 계산 결과
* Mesys calculation

- 시험 속도의 결정

사용되는 회전 속도는 윤활제 온도가 60 ℃를 넘지 않는 조건으로 선정하는 것이 좋다. 일반적으로 500~1000 rpm이 선호되나 본 시험에서는 기어 오일 등의 시험에 적용 경험에 있는 1000 rpm으로 시험하였다. 이 이상의 조건에서는 전동체의 원심력이 증가해서 궤도륵에 과도한 마모나 열 발생을 일으키기 쉽다. 특히 이 시험조건은 스러스트 베어링 사용조건과 유사하여 원심력에 대단히 취약한 구조를 하고 있다.

- 시험결과의 기록 및 판정

시험기 가동을 시작하여 시편이 파손될 때까지 시험시간 또는 총 회전수를 수명으로 기입하여 표기하였으며 기계류의 파손이 Weibull 분포를 한다는 가정을 바탕으로 Weibull 수명분석을 실시하였다. 시험결과 기록을 Weibull 분포를 가지고 분석하는 이유는 기계 재료의 파손(고장)의 전형적인 분포가 Weibull 분포를 한다는 연구 결과에 기인한 것이다. 베어링류의 파손, 기어류의 파손, 기어박스과 같은 기계장치의 고장 등이

모두 이 Weibull 분포를 따른다고 알려져 있다.

(3) 베어링 썰링 시험기

기어박스 시스템에서 윤활제가 주변 부품과 친화성이 있느냐를 검토하는 것은 시스템에 사용 가능 여부를 결정하는 데 중요한 요소 중 하나이다. 그러므로 윤활장치에 사용하는 썰을 시험하는 것은 윤활제의 물리, 화학적 특성을 시험하는 것으로 큰 의미가 있다. 기어박스용 썰을 시험하기 위해 시험기는 Radial Type 베어링 시험기를 기초로 설계되었다. 베어링썰과 철도차량용 기어박스 오일 썰이 Radial Type인 점과 내부에는 기어오일과 항상 접촉하고 있고 외부에는 공기 중과 접촉하고 있는 상태를 고려하여 비교적 기구가 간단한 유욕윤활 방법을 적용하는 구조를 도입하였다. 이 시험기의 특징은 지지 베어링을 모두 동일한 베어링으로 사용하여 베어링 교환이 편리하도록 하였으며 시험하는 동안 베어링 썰 부를 직접 볼 수 있도록 설계하여 윤활제 누유 정도를 확인할 수 있도록 하였다. 그림 3-4-3에 썰 시험기의 사진을 첨부한다.

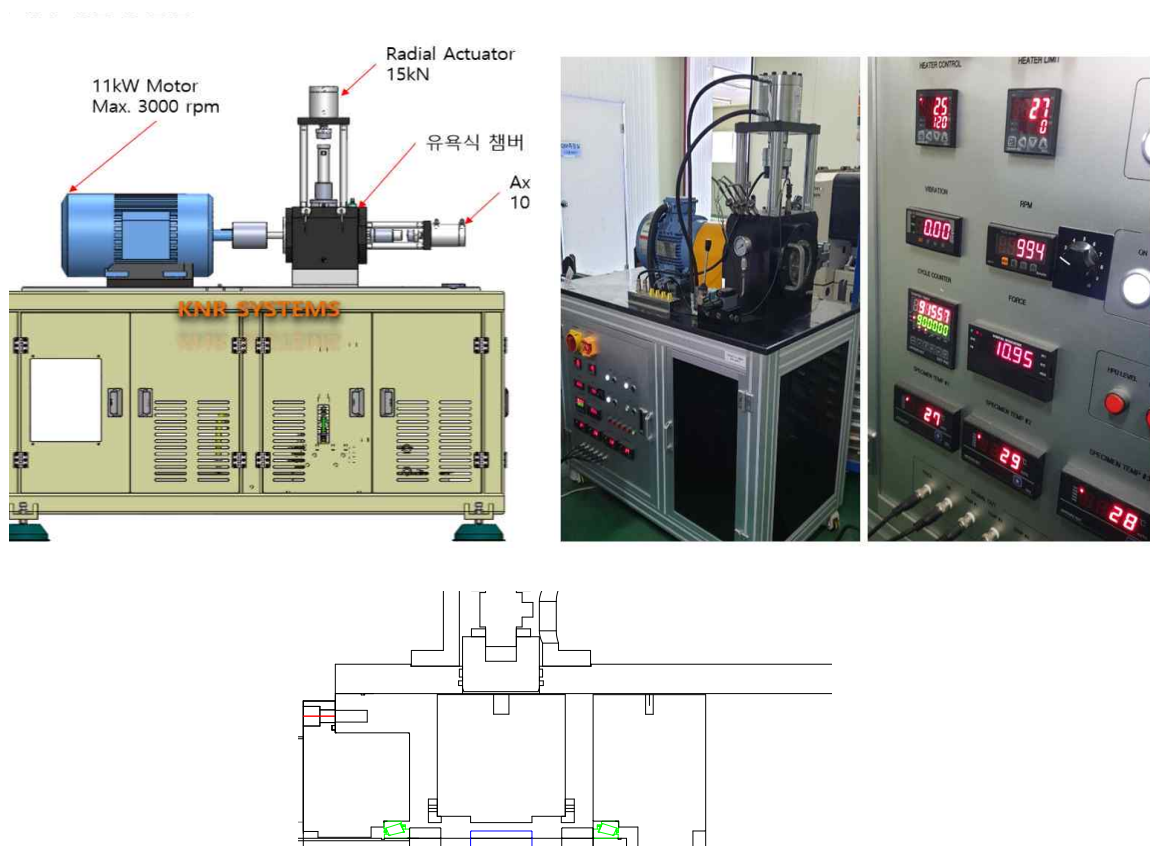


그림 3-4-3. 시험기 사진

이 시험기는 중앙부는 기어 오일 (시험유)을 주입하고 양측면에 썰을 장착하여 기어 오일 (시험유)에 의하여 썰이 직접 접촉하도록 설계하였으며 이 시스템을 지지하면서 회전상태를

유지하기 위하여 중앙부에 베어링을 지지 베어링으로 장착하였다. 하중에 의해 지지 베어링의 변위와 이에 따른 쉘링 성능을 시험이 가능하도록 하중부가 설계되었으며 주로 베어링 부에 경방향 하중을 주도록 하였다. 여기 사용가능한 베어링은 깊은 홈 볼 베어링, 앵글러 컨택트 볼베어링, 테이퍼드 롤러 베어링, 원통 롤러 베어링, 크로스 롤러 베어링 등이 장착 가능한 구조로 되어있으며 베어링의 최대크기는 외경 150 mm 이다. 이 베어링 크기는 통상 사용되는 중 소형 크기는 소화할 수 있다.

시험기의 최대 속도는 3,000 rpm으로 설계되었으며 일반 운전은 약 1,000 rpm 정도가 안정하도록 하였다. 시험 온도는 모니터링 할 수 있으며 상온에서 약 120℃ 정도까지 측정할 수 있게 하였다. 모터 측과 시험기 측은 직선 커플링으로 연결되어 있으며 하중은 유압 시스템으로 줄 수 있도록 하였다. 시험기는 과도한 진동이 생기면 자동 정지할 수 있도록 안전 정치를 추가하였다.

- 시험결과와 기록 및 판정

윤활 쉘의 시험에서 시험 결과 기록 및 판정 방법은 일정 시간 가동하여 쉘 립이 마모되었는지 여부를 확인하며 특이한 쉘 립의 변형 등을 육안으로 확인한다. 또한 윤활제가 최초 누유 시간을 기록할 수 있으나 설비의 가동시간이 일일 24시간 운전되므로 자동장치가 없이는 판단 불가능하다. 시험 시간의 기록, 온도 상승의 기록 등으로 가동 이력을 판단하며 쉘의 마모 정도로 성능평가를 한다,

나. 나노 윤활제의 구름 부품 수명에 미치는 영향

(1) 나노 윤활제 RCF 시험

일반적으로 구름 윤활 및 피로를 시험하는 시험기 형태는 RCF Type 시험기로 잘 알려져 있다. 본 연구에서 개발한 시험기는 시편에 일정한 축방향 하중을 주고 시험을 진행하도록 하였으며 시편의 형태가 도넛형태인 스러스트베어링과 유사하여 단순한 형상을 가지게 하여 동일한 품질로 제작이 용이하도록 설계하였다. 또한, 시험에 필수적인 요소인 시편과 윤활제의 교환이 용이한 구조를 갖도록 제작하였다. 하중의 부하는 시험기간 동안 일정한 하중이 가해질 수 있도록 하중 추를 사용하였으며 20:1의 지렛대를 이용하여 비교적 손쉽게 운전되도록 하였다.

그림 3-4-1에 본 과제로 시험에서 사용되기 위해 제작한 RCF 시험기의 사진을 나타낸다. 이 시험기를 설명하기 위하여 다음의 운용 방법을 설명한다.

1) 시험기 본체의 윤활제 통에 시편을 장치시키고 2) 윤활제를 시편 용기의 내용적의 80 % 정도를 채운 다음 3) 시험기에 시편 용기를 위치시킨다. 4) 이때 위치 조절 높을 사용하여

추의 하중이 걸리도록 상,하 위치를 조정한다 (추의 하중은 20:1을 기준으로 선정한다). 5) 온도센서를 위치시켜 고정하고 시험기 본체에서 최고 온도 셋팅을 한다. 가동 중 시험용기의 윤활제가 이 셋팅치를 넘어가게 되면 시험기가 정지되도록 되어있다. 다음에 6) 진동센서를 위치시키고 최고 진동 강도 셋팅을 한다(시험 도중 시험기의 하중 추에서 이 진동 값을 넘기게 되면 시험기가 멈추게 된다). 7) 안전 커버를 씌운다 8) 컴퓨터의 모니터링 모드를 켜고 모니터링 준비를 한다. 9) 가동 시간 셋팅, 온도 셋팅 등을 확인한다. 10) 가동 스위치 모터 ON을 눌러 기기를 가동시킨다. 11) 약 1분간 시스템이 완전한지를 확인한 후 안전하다고 판단되면 계속 가동시킨다. 12) 가동 시작일시, 초기 진동값 및 온도를 기록한다. 13) 가동이 정지되면 알짜와 시간 정지 원인을 기록하고 14) 총 회전수를 기록한다. 15) 조립과 역순으로 시험용기를 분해하고 16) 사용윤활제를 별도로 수집한 후 (필요시 성분 분석) 17) 시편을 제거하여 검사하고 18) 시편 통을 세척한다. 이때 초음파 세척기를 이용한다.

(2) 시험조건

나노 윤활제의 RCF 시험 조건은 시험편 외경 60 mm x 내경 25 mm x 두께 6 mm 도너츠형 시험편을 사용하였으며 이 시험편은 경도 HRC 60°C 로 경화되어 베어링 웨드론과 같은 경도를 갖는다. 표면 거칠기는 0.2 um.Ra를 갖는다. 시스템의 속도는 1000 rpm이고 6개 볼을 사용하여 수직하중 550 kg로 시험하였다. 이 시험 조건은 각 볼에 걸리는 응력을 MESYS로 계산한 결과 2,235 MPa 이다 (표 3-4-1 참조).

표 3-4-1. 응력 계산 결과

Maximal pressure inner race	pmax_i	2234.8 MPa
Maximal pressure outer race	pmax_e	2234.8 MPa

여기에 사용되는 윤활제량은 50 ml/회 정도이다. 표 3-4-2, 3-4-3에 시험결과를 요약한다.

시험기는 냉. 난방이 되는 실내에서 작동하였으며 기존윤활제와 나노 윤활제를 번갈아 시험하여 인원 및 시차에 의한 요인을 최소화하려 하였다. 시험 완료된 시편과 시편 통은 초음파 세척을 행하여 잔류물의 영향을 최소화하도록 노력하였다.

본 연구에서 사용한 나노유체 윤활제는 위탁연구기관에서 본 연구 결과로 연구하여 얻어진 나노입자를 기어 윤활제와 혼합한 용액으로 실험실적으로 구현하였다. 이미 설명한 대로 실험실적으로 합성한 나노 윤활제는 복잡한 과정을 거쳐 제작되며 실험실적으로는 제한된 양을 합성하는데 만족해야 했다. 나노 윤활제를 분산해서 원심 분리하여 얻는 양은 일주일에 10 g 남짓하여 시험기의 윤활제 필요량은 제작 범위를 훨씬 웃도는 정도였다. 그러므로 시험 횟수 증가와 윤활제 제작용 나노 입자의 합성 및 추출이 매우 큰 문제였다.

본 연구로 제작된 RCF 시험에서는 기본 500 ml를 제작하기 위해 약 5 g의 나노 입자가

필요하였다. 이는 RCF 시험을 20회 시험 시 기존 윤활제와 나노 윤활제 시험에 100 g의 나노 입자가 필요하였다. 그러므로 시료량을 줄이기 위하여 시험 윤활제량을 줄일 필요가 있어서 시험 용기를 개량하였다.

개량된 시험 용기는 매회 시험 윤활제량을 30 ml 정도가 되도록 특별한 고안된 형태를 채택하였다. 즉, 시험통의 여유 공간 면적을 최소화시키는 작업이었다. 아래 그림 3-4-4에서와 같이 지그를 제작하여 윤활제 대신에 구조체를 잠기게 하여 윤활제량을 최소화하였다

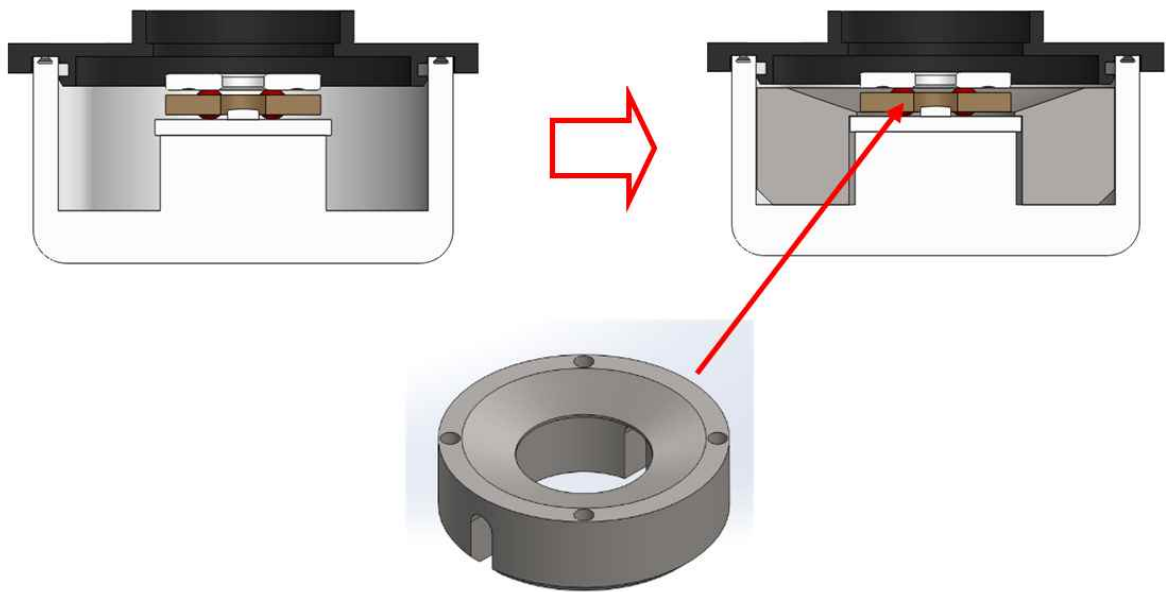


그림 3-4-4. 시험편 고정구의 설계

(3) RCF 시험 결과

그림 3-4-5에 시험 전, 후의 시험편 상태를 나타낸다. 시험 전의 평탄 부에 시험후 시험편에는 시험에 의해 생긴 궤적이 보인다. 시험편은 스러스트 베어링의 외부 폭면을 이용하였으며 표면 조건 0.2 μmRa 를 맞추기 위하여 맞춤가공을 행하였다.



시험전



시험후

그림 3-4-5. 시험 전 후 RCF 시험편

RCF 시험 시편의 마모궤적의 계측을 통해 나노윤활제의 윤활특성을 살펴보았다. 기존윤활제 대비 나노윤활제는 마모폭이 약 1.12 배 감소된 것으로 나타났고, 이를 마모율로 산출하였을 때 약 1.4배의 마모능 향상을 확인하였다. 표 3-4-2 및 3-4-3에서 기존 윤활제로 시험된 시편의 마모 궤적은 평균 1.16 mm 인데 반하여 나노 윤활제 시험에 의한 마모궤적은 1.05 mm 이어서 그 비율은 1.12이다.

표 3-4-2 및 3-4-3에 나타난 것처럼 기존 윤활제 시험결과는 시편이 파손될 때까지 평균 회전수가 2.02 백만 회전이었으며 나노 윤활제는 5.31 백만 회전으로 계산되었다. 평균 수명으로 보아 약 2.6 배의 수명을 보인다. 그러나 기존 윤활제의 산포는 1.5~3.5 백만 회 (최대/최소 배수 약 1.3) 정도의 크기를 가지고 있으나 나노 윤활제는 1.8~12.4 백만 회 (최대/최소 배수 약 7)로 기존 윤활제보다 훨씬 큰 산포를 가지고 있다

표 3-4-2. RCF 시험결과 (기존 윤활제)

종류	시작일자	종료일자	하중	RPM	BALL 수	총 회전수	궤적폭 (mm)	비고
기존윤활제	05월 29일	05월 31일	450KG	600±30 RPM	6	1,724,600	1.522	파손
기존윤활제	06월 01일	06월 03일	450KG	600±30 RPM	6	1,873,700	1.430	파손
기존윤활제	06월 22일	06월 26일	450KG	600±30 RPM	6	3,480,900	1.496	파손
기존 윤활제	06월 27일	07월 02일	550KG	600±30 RPM	6	1,925,600	0.867	파손
기존 윤활제	08월 03일	08월 06일	550KG	600±30 RPM	6	1,504,400	0.849	파손
기존 윤활제	08월 31일	09월 03일	550KG	600±30 RPM	6	1,605,000	0.836	파손

표 3-4-3. RCF 시험결과 (나노 윤활제)

종류	시작일자	종료일자	하중	RPM	BALL 수	총 회전수	궤적폭 (mm)	비고
나노 윤활제	05월 24일	05월 28일	550KG	600±30 RPM	6EA	3,389,400	0.781	파손
나노 윤활제	06월 04일	06월 11일	450KG	600±30 RPM	6EA	5,020,800	1.469	파손
나노 윤활제	06월 13일	06월 21일	450KG	600±30 RPM	6EA	7,163,000	1.456	계속
나노 윤활제	08월 06일	08월 09일	550KG	600±30 RPM	6EA	1,996,600	0.862	파손
나노 윤활제	08월 09일	08월 16일	550KG	600±30 RPM	6EA	1,845,200	0.872	파손
나노 윤활제	08월 16일	08월 31일	550KG	600±30 RPM	6EA	12,429,600	0.833	파손

이를 기계 수명을 해석하는 Weibull 분포로 분석해서 그린 그래프를 그림 3-4-6과 3-4-7에 나타내었다. 이 데이터를 Weibull 분석을 행하여 비교하여 보면 기존윤활제와 나노 윤활제의 평균 수명은 평균수명은 약 2.6배의 차이를 보인다. 이 데이터를 고장수명 확률분포로 가정하여 Weibull 분포로 정리하여 L10 수명을 환산하면 기존윤활제 1.07백만 회, 나노 윤활제가 1.39 백만 회로 나노 윤활제의 수명이 약 30% 정도 긴 것으로 계산된다.* (여기 사용되는 수명분석은 Minitab Weibull분석을 이용하였다)

나노 윤활제가 기존 윤활제 대비 평균 수명과 L10 수명 모두가 길지만 평균수명은 2.6배인데 비해 10수명은 1.3배 정도로 초기 고장에 대한 확률이 상대적으로 높다. 이는 나노 윤활제가 기존 윤활제 대비 수명의 산포가 큰 것을 의미하므로 파손 메카니즘의 차이가 있다고 생각된다. 즉, 나노 윤활제가 기존 윤활제와는 달리 파손현상에 다른 영향인자가 존재하는 것으로 추측된다. 이를 확인하기 위하여 시험 완료된 제품의 표면 분석을 행하였다.

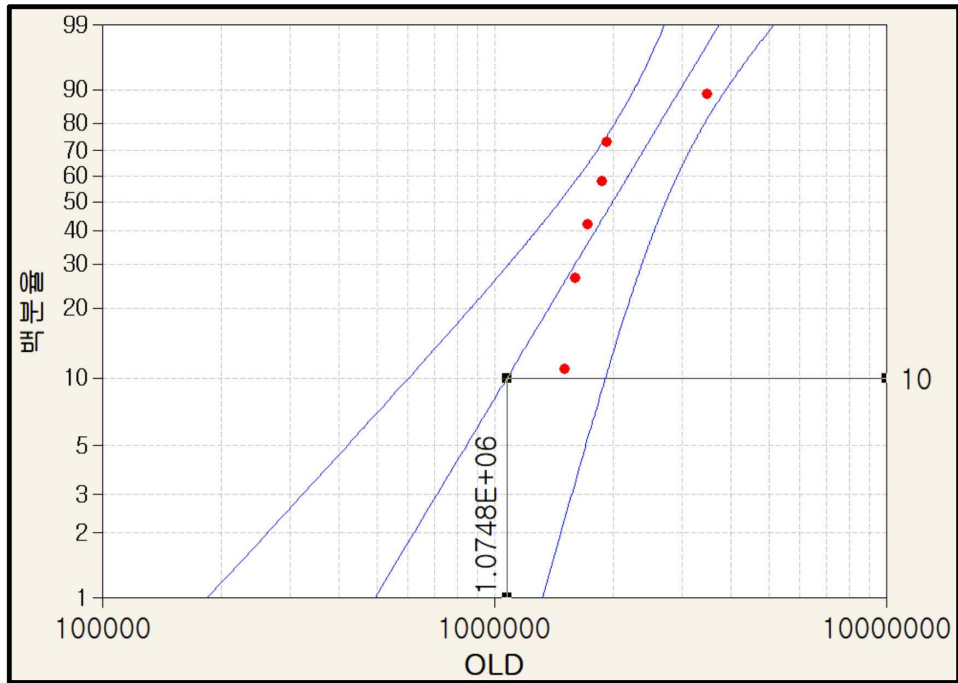


그림 3-4-6. 기존 윤활제의 수명

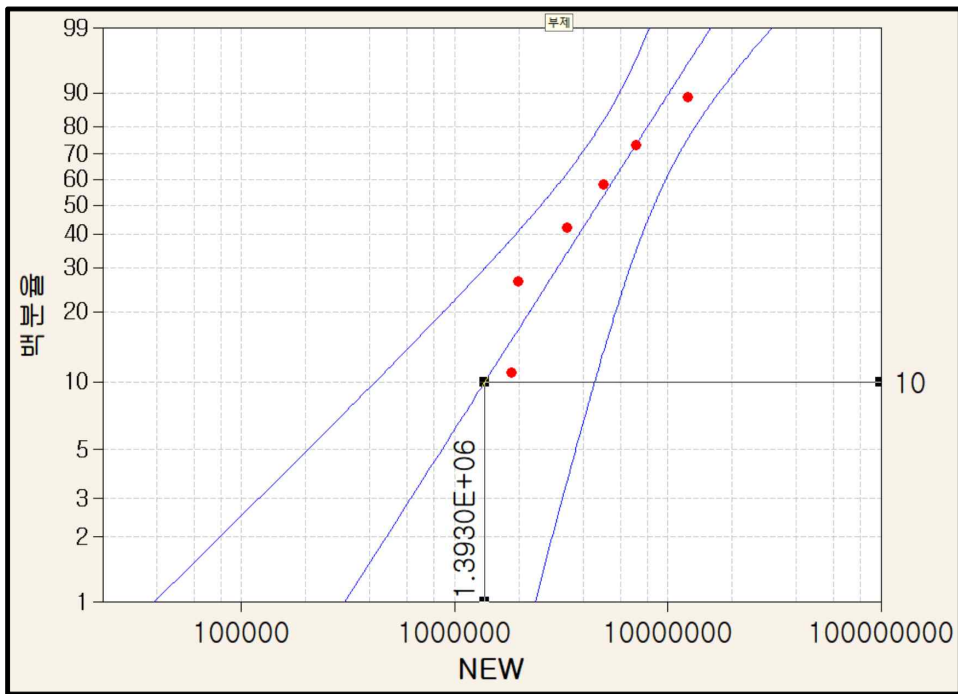
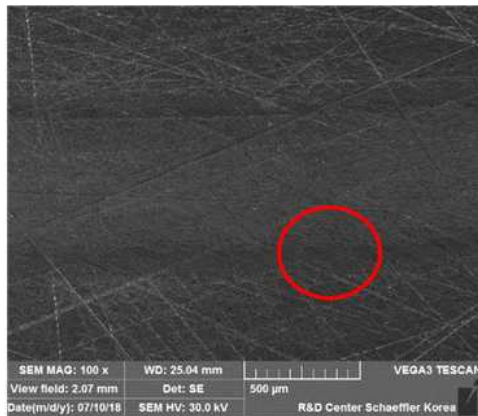


그림 3-4-7. 나노 윤활제의 수명

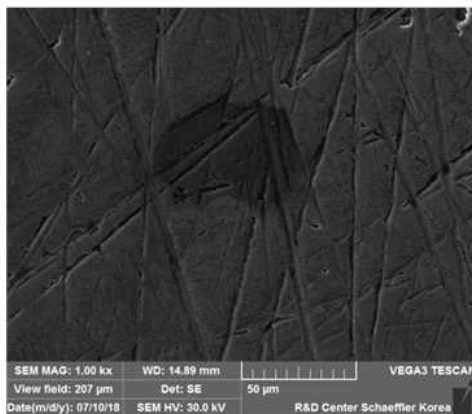
RCF 시험 편의 마모 및 파손 기구를 파악하기 위하여 시험 완료된 시험 편의 표면을 전자 현미경을 이용하여 분석하였다. 그림 3-4-8에 시험 후 시험편의 표면 형상을 조사한 내용을 표시하였다. 주사 전자 현미경(SEM)을 이용하여 진행하였으며 동일한 부분을 100배, 1000배, 5,000배 확대하여 비교하였다.



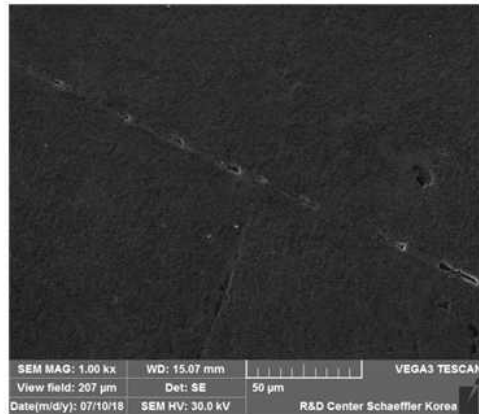
<기존 윤활제 시편 표면>



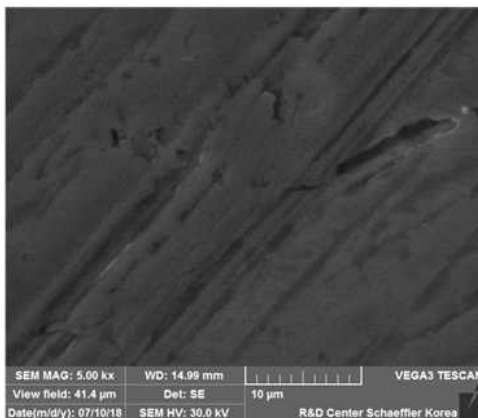
<나노윤활제 시편 표면> 100배



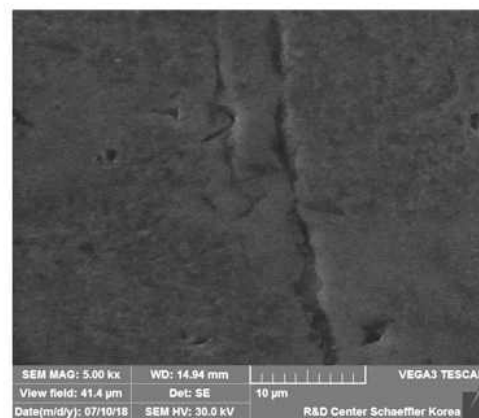
<기존 윤활제 시편 표면>



<나노 윤활제 시편 표면> 1,000배



<기존 윤활제 시편 표면>



<나노 윤활제 시편 표면> 5,000배

그림 3-4-8. RCF 시험편의 표면 형상 비교

그림 3-4-8에서 보는 바와 같이 기존 윤활제 및 나노 윤활제를 사용하여 시험된 시편의 표면 상태에서 형태상 상이한 점을 볼 수 있다.

그림 3-4-8에서의 2가지 시편(좌측과 우측)은 각각 유사한 회전수를 갖는 시편으로 좌측은 기존 윤활제로 시험한 시편의 표면이고 우측은 새로 개발하는 나노 윤활제로 시험한

시편의 표면 사진이다. 위에서부터 배율 100배, 1000배, 5000배 전자 현미경 확대 사진을 순차적으로 나타내었다. 사진에서 보는 바와 같이 기존 윤활제 시편 표면의 초기 연삭 흔은 가동 후에 상당량 남아 있는 데 반해 나노 윤활제 윤활 시편의 경우 시험 가동 후 시편 표면은 초기 연삭 흔이 상당히 없어진 것으로 관찰된다. 즉, 나노 윤활제 시편의 경우 동일한 하중의 구름 접촉에 의해 더 많은 표면 변화가 생긴 것으로 보여진다.

이는 나노 윤활제가 기존 윤활제에 비하여 초기 표면 불균일성을 제거하는 효과가 있는 것으로 추정된다. 이런 현상이 시험의 구름 수명을 증가시키는데 기여했다고 생각된다. 즉, 나노 윤활제를 사용한 시편이 파손 없이 초기 불균일성을 제거하여 매우 평탄한 표면을 유지한다면 수명은 길어지게 되고 초기에 불균일성 제거가 되지 못하고 파손되는 경우에는 짧은 수명을 나타낼 것으로 생각된다. 이런 현상에 의하여 수명의 산포가 커지는 결과를 나타낸 것으로 추정된다.

(4) 나노 윤활제 윤활 중 온도저감 특성

RCF 마모실험을 수행하는 동안 유체 마찰부에 온도센서를 통한 온도변화 데이터를 수집/분석하였다. 그림은 운전시간에 따른 유체 온도변화 곡선이다. RCF 마모가 진행되어감에 따라, 나노윤활제에 의한 온도저감 효과가 나타남을 확인하였다.

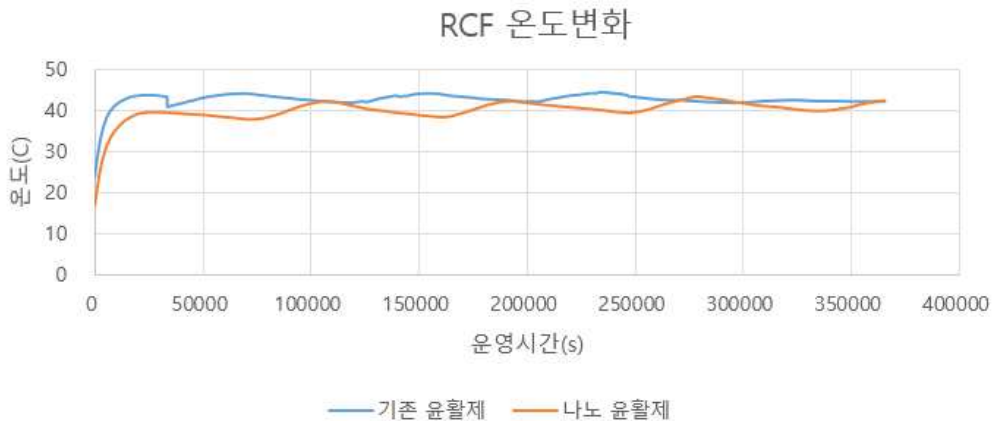


그림 3-4-9. RCF 시험 중 온도변화 곡선

초기 안정화 기간 120분을 제외한 시험기간 중 전체 데이터에 대한 평균치와 표준편차 및 최대/최소치의 값을 기반으로 온도저감 효과를 평가하였으며, 산출식은 다음과 같다.

$$E = \frac{T_{c, ave} - T_{n, ave}}{T_{c, max} - T_{c, min}} \quad \text{또는} \quad E = \frac{T_{c, ave} - T_{n, ave}}{T_{max} - T_{min}}$$

여기에서, E는 온도저감율, T_c는 기존윤활제에 의한 시험 중 온도, T_n은 나노윤활제에

의한 실험 중 온도, T_{ave} 는 평균온도, T_{max} 는 최대온도, T_i 는 최저온도이다.

표 3-4-4. RCF 온도데이터 분석

특성값	기존 윤활제	나노 윤활제
평균치	42.888	40.367
표준편차	0.7794	1.513
최대치(산출)	45.227	44.907
최소치(산출)	40.550	35.825

기존 윤활제만의 온도구배 환경을 고려하였을 때, 나노 윤활제는 기존 윤활제 대비 약 53.9 %의 온도저감율을, 전체온도구배 환경을 고려하였을 때, 나노윤활제는 기존윤활제 대비 약 26.8 %의 온도저감 효과를 나타내는 것으로 확인되었다.

특히, 나노 윤활제의 경우, 열전도 특성이 우수하여 기존 윤활제에 비해 온도변화가 급격하게 일어난다. 이는 RCF 시험 중 주변환경의 온도에 더욱 민감하게 반응하는 것으로 나타났으며, 전체 기간의 온도평균 대비 개별 온도데이터의 표준편차를 증가시키는 원인이 된 것으로 사료된다. 밤과 낮의 기온차에 의한 영향으로 RCF 시험 중 나노 윤활제의 온도변화는 심했으나, 전체적으로 마찰에 따른 온도저감 효과를 나타내는 것을 알 수 있었다.

다. 나노 윤활제 썰링 시험

(1) 나노 윤활제 썰링 시험의 목표

나노 윤활제 썰링 시험은 썰링 시험기 (그림 3-4-3)를 이용하여 시험되었다. 시험의 목적은 나노 윤활제가 구름 운동에서 요소부품의 수명에 미치는 효과와 달리 미끄럼 운동에서의 윤활제 효과를 모니터링 하기 위함이며 아울러 고무 등 고분자 재료에 대한 물리 화학적 유해성 여부를 파악하기 위해서 진행되었다. 윤활제의 변경에 따른 고분자 부품으로서 썰의 변형이나 마모, 기본 물성 저하 등이 가장 큰 관심사항이다.

본 시험에 사용되는 썰은 기어 박스 등에 사용되는 내유 특성이 우수한 니트릴 고무 (NBR) 제품이며 120도 정도의 내열특성을 갖는 고무 제품이다. 이 썰은 철제로 제작된 보강테에 접착제를 도포시켜 밀봉부에 고무를 성형시키는 공법으로 제작된다. 고무썰의 외관 형상을 그림 3-4-10에 나타낸다

(2) 시험조건

썰링 시험기 시험 조건은 주축의 속도 1000 rpm, 경방향 하중 1,000 kg (500 kg/베어링)을 주어 사용하였으며 기존 윤활제 및 나노 윤활제를 유육에 장착한 후 역 900시간 동안

작동하였다. 표 3-4-5에 시험 조건과 작동 시간을 표시하였다.

베어링은 깊은 홈 볼베어링6308 (내경 40 mm, 외경80 mm)을 사용하였으며 시험에 사용한 씰은 Face seal형태의 보강재가 보강된 초슬립형 씰이다. 이 씰은 베어링에 사용되기 위해서 별도의 금형을 제작하여 시험되었다. 사용한 재질은 NBR 재질의 시편이었으며 성형 가공 후 약 2주간의 안정화 후에 시편으로 사용되었다.

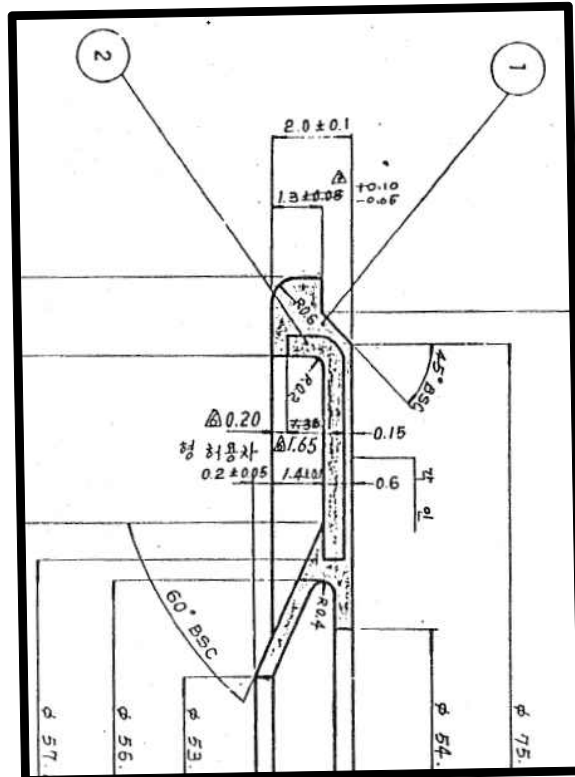


그림 3-4-10. 고무씰의 형상

(3) 시험결과

시험결과 씰립은 기존 윤활제와 나노 윤활제 모두에서 매우 유사한 립 부위의 변화를 확인할 수 있었다. 48 시간 작동 후에는 씰립 부의 변형 현상이 일어나기 시작하였으며 900 시간 운전에서는 씰 립부의 변형은 확인되나 과도한 마모흔적은 보이지 않는다. 또한 그 형상도 기존 윤활제와 나노 윤활제 모두에서 유사한 특성을 보였다. 볼 베어링 6308에 대한 결과로 그림 3-4-11과 그림 3-4-14에 시험전, 후 씰립의 변화된 사진을 첨부하였다. 이 이해를 위해서 그림 3-4-13의 실장착시 씰의 변형 현상을 설명하였다.

900시간 가동된 씰의 내부 색상이 변화한 것은 유육 윤활 환경에서 장기간 가동된 윤활제의 색상 변화에 의한 현상이다. 이는 베어링 내부 색상 변화와 비교해도 유사한 색상으로

이해될 수 있다 (그림 3-4-12 참조).

이 시험에서는 나노 윤활제가 기존 윤활제와 쉘 립의 변형이나 마모 현상의 차이를 발견할 수 없어서 나노 윤활제의 적용이 쉘이나 케이지 등 베어링 부품에 특이한 유해성이 발견되지 못했다. 이 시험은 장기간 시험하는 것으로 장기 운영으로 인한 특이점 발견을 목적으로 진행하였다.

유사한 시험을 크로스 톨레베어링 CB8013에서도 동일하게 진행하였고 그 결과를 그림 3-4-15와 그림 3-4-16에 나타내었다.

표 3-4-5. 쉘링 시험기 시험조건과 작동 시간

베어링	윤활제	하중 (kg)	속도 (rpm)	시작 일자	종료 일자	가동 일수	가동 시간	베어링 상태
BB 6308	기존 윤활제	1000	1000	05월 30일	08월 30일	75	900	이상없음
	나노 윤활제	1000	1000	09월 15일	12월 20일	75	900	이상없음
CB 8013	기존 윤활제	1000	100	01월 12일	02월 11일	25	300	이상없음
	나노 윤활제	1000	100	02월 15일	03월 20일	25	300	이상없음

그림 3-4-13에 베어링의 운전 중 쉘의 역할과 단면 형상에 변형에 대한 연구 결과를 나타낸다. 이 연구에 의하면 쉘의 주립은 베어링 내륜과의 접촉에 의해 설계 각도보다 작은 각도로 변형하며 쉘립의 초기 형상을 변경시키는 이상마모나 뜯김, 변형 등이 없다면 정상적인 접촉에 의한 변형으로 판단한다. 쉘립의 마모가 일어나면 쉘립 끝의 립 길이가 짧아지거나 립의 두께가 얇아지게 된다.

본 시험에서 시험품은 기존 윤활제 및 나노유체 윤활제와 접촉하는 상태에서 900시간 시험이 되었다. 이 후 쉘의 외관 변화와 쉘 립의 변형 상태를 그림 3-4-11와 3-4-14에 나타낸다. 그림3-4-11에서 보는 바와 같이 900시간 기동으로 베어링 쉘의 내부 색상의 변화가 관찰되며 이는 장기간 오일 중에 노출될 때 생기는 일반적인 변화이다. 기존 윤활제와 나노 윤활제의 경우 차이는 육안으로 구별할 수 없을 정도로 유사하다.

그림 3-4-14에 이 쉘의 단면 관찰 결과를 나타낸다. 쉘의 단면에서 쉘립의 마모나 뜯김 등의 이상 현상이 발견되지 않았다. 이는 가동 중 윤활제가 쉘 립의 거동에 특이한 이상을 주지 않는 것으로 판단된다. 단 쉘립의 단부가 초기에 비해 립 각도변화가 나타나는데 이는 그림 3-4-13과 비교하여 관찰하면 장착 특성에 의한 정상적인 변형으로 판단된다.

그림 3-4-16에 기존 윤활제와 나노 윤활제의 운전으로 인한 쉘립의 변화를 보여주는 데 그림에서와 같이 나노 윤활제가 기존 윤활제 대비 특이성은 관찰되지 않았다.

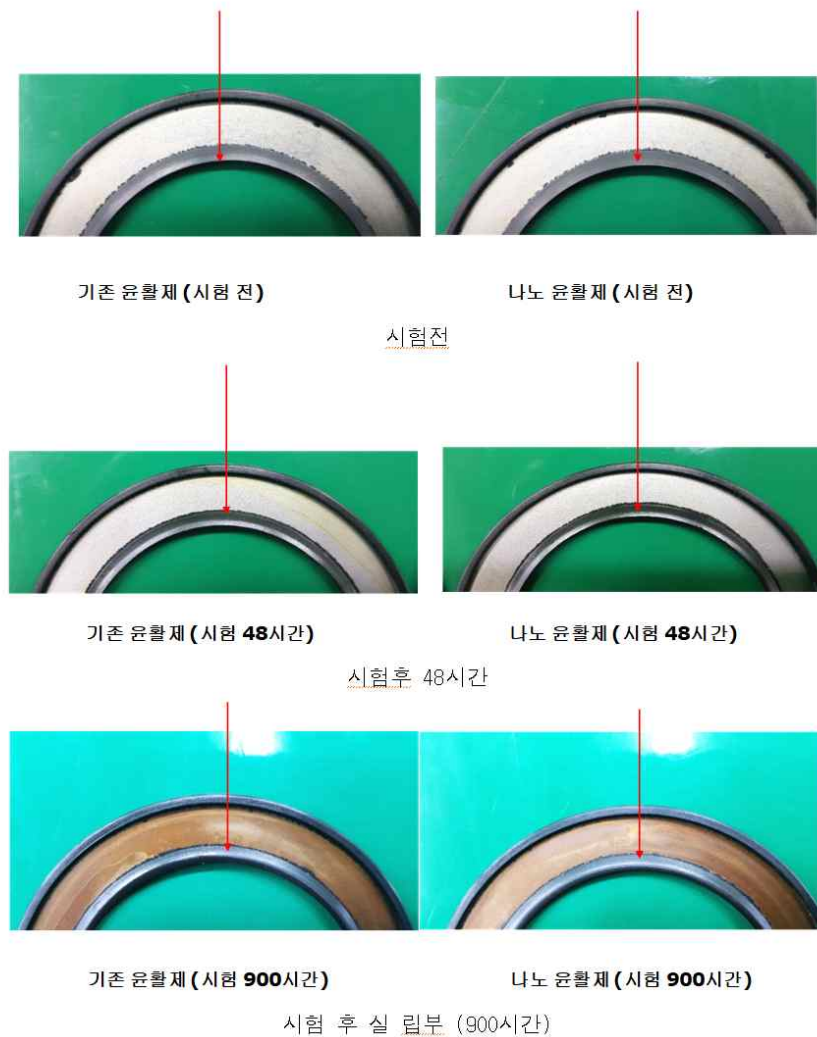
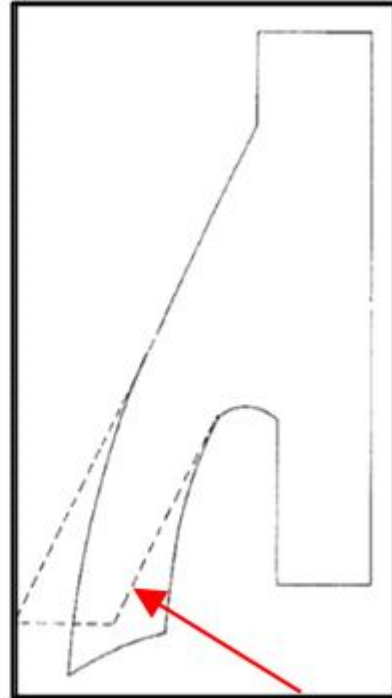
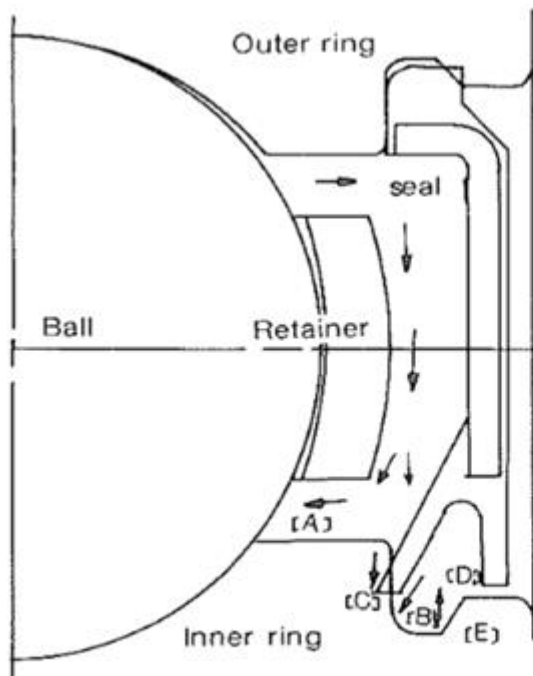


그림 3-4-11. 시험 시간별 쉘립의 변화

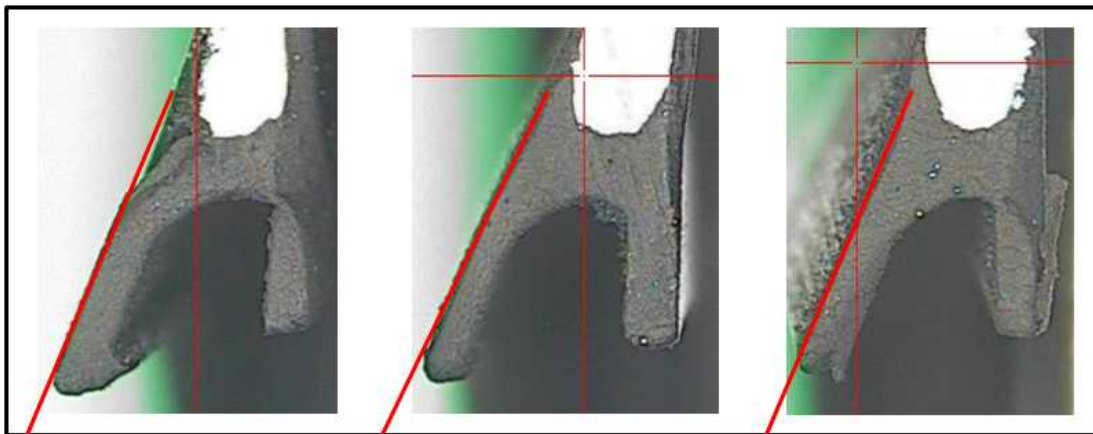


그림 3-4-12. 시험 후 베어링 내부 (900시간)



셀립의 변형

그림 3-4-13. 베어링 셀의 장착시 변형, * 베어링 기술 - 한화베어링



시험전

시험후
(기존윤활제)

시험후
(나노윤활제)

그림 3-4-14. 베어링 셀 단면 (시험 전후 비교)



시험전

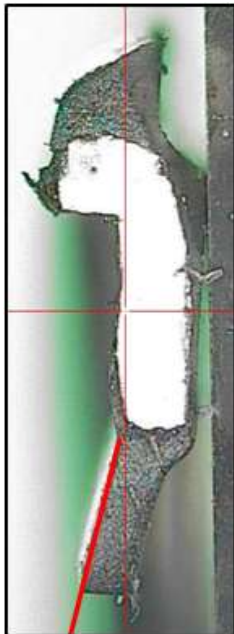


시험후
(기존윤활제)



시험후
(나노윤활제)

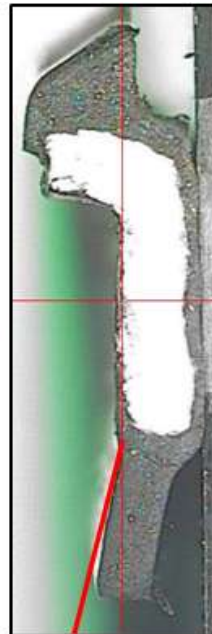
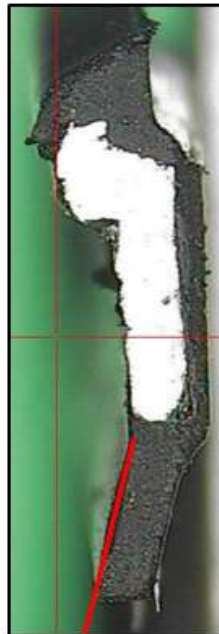
그림 3-4-15. 베어링 궤도륜과 쉘 형상 (시험 전후 비교)



시험전



시험후 (기존윤활제)



시험후 (나노윤활제)

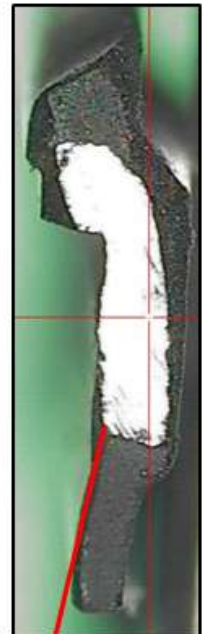


그림 3-4-16. 베어링 쉘 단면 (시험 전후 비교)

라. 나노 윤활제의 4 Ball 시험

(1) 나노 윤활제의 4 Ball 시험의 목적

나노 윤활제의 윤활에 기여하는 현상은 구름 운동을 원활하게 하는 Micro rolling 현상이 구름운동에 도움을 주어 재 파손을 경감시키는 기구가 연구되어지고 있다, 그러나 이런 현상이 미끄럼 마모 기구에서 윤활제의 기능에 도움을 주는지에 대한 검토가 필요하여 Sliding 마찰 시험의 기본 시험 방법인 4-Ball sliding 시험으로 나노 윤활제의 효과를 검증하기 위하여 시험을 채택하였다

(2) 시험 조건

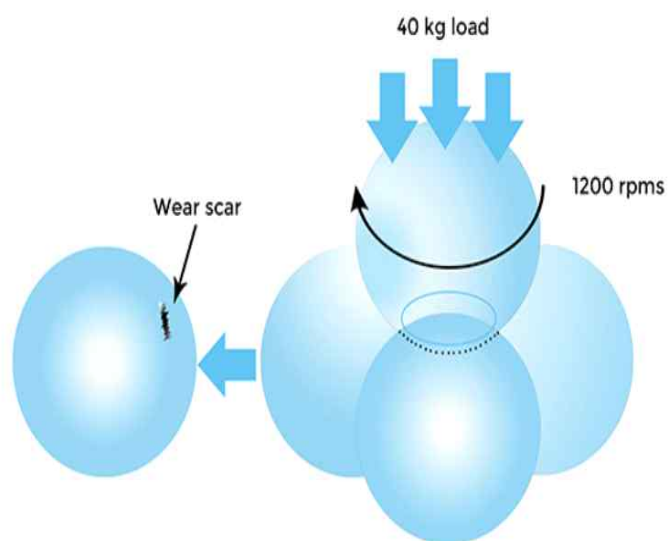
그림 3-4-13에 4-Ball 시험기를 나타낸다, 시험 조건은 ASTM 4-Ball Test 조건을 기본으로 시험하였다. 4-Ball 시험에서 볼의 위치는 그림 3-4-17에서 보는 바와 같이 상부 축에 1개의 볼이 고정되어 회전하고 하부 시편 용기에는 3개의 Ball이 고정되어 있게 된다. 시험기 가동 시 상부 축 볼(1개)이 하부 볼 3개에 모두 접촉하여 미끄러지게 된다. 시험 시간 동안 상부 볼과 하부 볼 사이에 열이 발생하여 윤활제가 기능을 하지 못하여 볼 표면이 마모되게 되는데 일정시간 시험 후 하부 볼의 이 갈려 나간 부분(Scar)의 직경을 측정하여 극압성에 대한 정도를 표시하게 된다
시험조건은 다음과 같다.

<4-Ball 시험의 시험조건>

- ① Temperature $75 \pm 1.7^{\circ} \text{C}$ ($167 \pm 3^{\circ} \text{F}$)
- ② Speed $1200 \pm 50 \text{ rpm}$
- ③ Load $40 \pm 0.2 \text{ kgf}$ ($392 \pm 2 \text{ N}$)
- ④ Duration of test $60 \pm 1 \text{ min}$



<4- Ball 시험기>



<4 ball 시험에서의 볼 위치도>

그림 3-4-17. 4-Ball 시험기 및 시험 볼 위치

(3) 시험 결과

시험결과는 표 3-4-5에 표시한다. 표에서 보는 바와 같이 평균값으로 보면 나노 윤활제의 Scar 직경의 크기는 약간의 차이가 있으나 두 집단의 크기 차이는 우열을 판단하기 어렵다고 할 수 있겠다.

기존 윤활제의 경우 Scar 직경이 0.42 mm, 나노 윤활제의 경우 0.52 mm를 나타내고 있고 최대의 최소 결과의 차이가 0.194 mm와 0.547 mm 정도로 평균치는 20 % 정도의 차이를 보이지만 산포가 커서 두 경우의 우열을 판단할 수는 없다.

특이한 점은 기존 윤활제에 비해 나노 윤활제의 결과가 매우 큰 산포를 나타내고 있다. 이 산포가 큰 것은 RCF 시험 결과에서도 동일하게 확인되었다. 이 산포가 큰 요인에 대해서는 더 많은 시료로 시험하여 결과를 관찰할 필요가 있다.

표 3-4-6. 4-Ball 시험결과 (Scar Diameter 측정결과)

시험 번호	기존 윤활제				나노 윤활제			
	최소	최대	치수차	평균	최대	최소	최소	평균
1	0.399	0.474	0.075	0.440	0.249	0.294	0.045	0.266
2	0.480	0.500	0.019	0.480	0.410	0.485	0.075	0.453
3	0.480	0.592	0.112	0.538	0.259	0.314	0.055	0.295
4	0.435	0.475	0.040	0.450	0.330	0.378	0.048	0.360
5	0.384	0.386	0.002	0.386	0.685	0.732	0.047	0.662
6	0.336	0.368	0.032	0.344	0.761	0.812	0.051	0.812
7	0.330	0.359	0.029	0.346	0.701	0.717	0.016	0.782
평균				0.426				0.519
R				0.194				0.547

마. 시험 조건의 검토

(1) 철도 차량용 기어박스 운전 조건

① 도시철도 차량용 기어박스

본 연구에서 검토하는 기어박스는 대전도시철도공사에서 사용하는 분리 기동식 감속기를 모델로 하였다. 이 차량의 철도차량용 기어박스는 그림 3-4-14와 같은 구조를 하고 있다. 그림에서 A 부분은 피니언 측으로 주행 모터의 출력을 전달하는 부분이며 C부분은 출력축 D와 연결되어 차량에 출력을 전달하는 부분이다. 입력 측(A)과 출력 측(C) 사이에는 감속기(B)로 속도를 감소하고 출력을 높이는 감속기어와 이를 지탱하는 축과 베어링이 장착되어 있다. 베어링에 가해지는 하중은 모터 기동력에 의해 생성되는 축방향 하중과 경 방향 하중으로 주어지게 되며 이 값은 기어 맞물림 각에 의해 만들어진다.

이 기어박스에 작용하는 최대 모터 토크는 143.6 kg.m이고 이를 기어박스 데이터로 환산한 결과 최대 기어 접촉응력은 1.5~1.6 kgf/cm² (1,500 MPa 정도)이다 (기어 강도 계산서-유진기공산업㈜). 표 3-4-6에서 보는 바와 같이 안전율은 충분해서 적용에 문제가 없다.

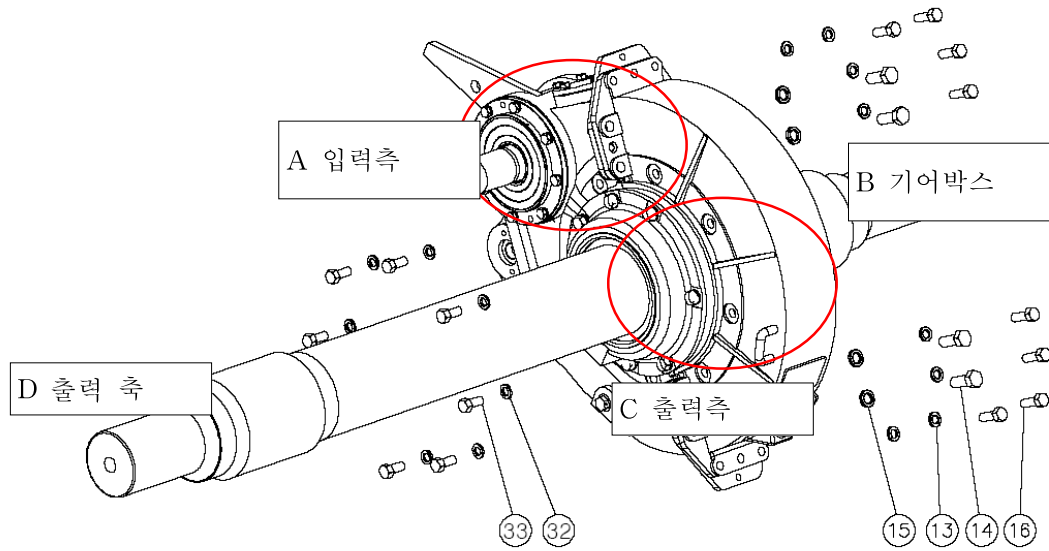
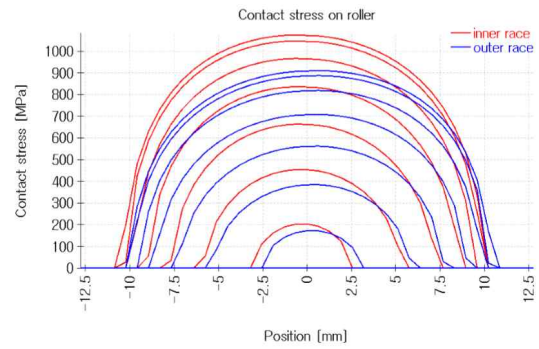
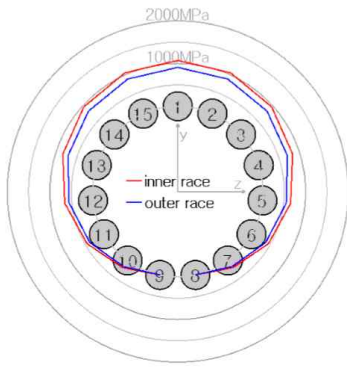


그림 3-4-18. 철도차량용 기어박스

표 3-4-7. 기어 강도 계산 결과 (*유진기공)

구 분	소기어	대기어
항 목		
재 질	SNM420	S40C-H
재질의 피로한도 (σ_{oi})	45.00 kgf/cm ²	31.50 kgf/cm ²
기어의 굽힘강도 (σ_{wi})	14.02 kgf/cm ²	12.66 kgf/cm ²
안전율 (S_{Bi})	3.02	2.59
치면 접촉에 의한 피로강도(k_{Di})	2.88 kgf/cm ²	2.04 kgf/cm ²
안전율 (S_{Gi})	1.79	1.36

대형 기어쪽의 사용 베어링은 외경 160 mm, 내경 75 mm, 폭 40 mm의 테이퍼드 롤러 베어링이다. 이를 기준으로 롤러의 접촉하중을 계산한 결과 최대 접촉하중이 약 1,075 MPa 정도로 계산되었다.



<베어링 전동체가 받는 접촉응력>

<1번 전동체의 길이방향 접촉 응력>

그림 3-4-19. 기어박스에 사용하는 테이퍼 롤러 베어링의 접촉응력 계산 결과

* Mesys 계산결과

② 고속철도 차량용 기어박스

국내 도입된 고속철도 (KTX) 감속기는 견인모터에서 나오는 회전력을 모터의 회전속도보다 감속하여 차축에 감속장치로 전달하는 역할을 동일하다. 감속기는 1차 감속기와 윤축에 취부된 2차 감속기로 구분되는데 1차 감속기는 감속기 케이싱, 모터, 모터 구동기어, 중간기어, 감속기어로 구성되어 있다.

감속기 케이싱은 감속기 내 세 개의 기어와 각 기어 베어링의 윤활유를 내장하기 위한 장치로서 강판의 용접구조물이며 하부는 윤활유조로 그 용량은 24 L이다.

동력대차 감속기의 치차열은 기어비에 의해 결정되는 감속비로 견인력을 차축에 전달하게 되는데 견인전동기의 회전력을 감속기 중간기어에 전달하며 형단조 경화강으로 제작되어 있다. 27개의 잇수를 가진 헬리컬기어이며 헬리컬 각도는 우측으로 15° 이고 중간기어는 견인전동기의 회전력을 감속기어로 회전수를 줄여서 전달하는 역할을 하며 역시 형단조 경화강으로 제작되었다. 또한 41개의 잇수를 가진 헬리컬이며, 헬리컬 각도는 좌측으로 15° 이다. 감속기어(출력기어)는 견인전동기의 감속된 회전력을 트리포드에 전달하며, 형단조 경화강으로 제작되었다. 51개의 잇수를 가진 헬리컬기어이며 헬리컬 각도는 우측으로 15° 이다.

표 3-4-8. 고속철도 기어박스 사양

항목	사양	항목	사양
기어비	1.889:1	기어 최대 입력토크	11,218 Nm
최대입력속도	4,100 rpm	안전계수	1.354
최대 기동 토크	6,023 Nm	기어 소재	18CrNiMo7-6
모터감속기의 중량	350 kg	기어박스 소재	EN-GJS-500-7
오일용량	4.8 L		



기어박스 외형



기어 내부

그림 3-4-20. 고속철도차량 기어박스 외형

(2) RCF 시험조건과 철도차량 운전조건 비교

철도 차량용 기어박스는 윤활제가 유출 윤활을 하고 있으며 윤활요소인 기어와 베어링의 형태가 구름접촉을 하고 있다. 이런 구름 접촉을 하는 시험은 베어링 시험기나 기어박스 시험기로 구현할 수 있는데 이의 가속 시험은 다이نام로 시험기를 기본으로 하고 시험시간이 수개월 걸리므로 프로젝트의 경제성과 프로젝트 기간에 적합하지 않아 배제하였다. 기어박스 내 윤활요소의 파손기구가 구름 피로라는 점에 착안하여 구름피로를 시험하기에 적합한 RCF시험기를 기본 시험기로 선정하였다,

RCF 시험조건과 철도차량 운전조건은 표 3-4-8에 표시한 내용과 같이 차이를 보인다. 그러나 비교한 결과 시험조건이 철도차량의 운전조건에 비해 가혹한 조건으로 가속 시험에 해당한다 하겠다. 가속 시험의 정도는 하중 계수와 한경 계수로 계산할 수 있는데 일반 조건과 비교해서 약 50 배 정도의 가속시험으로 평가할 수 있다. 단순 계산하여

적용 하중만으로 보면 적용하중은 Co값의 2.9배 정도로 수명 시간 값으로 환산하면 약 25배 정도가 된다. 또한, 시험 조건이 소형으로 한정된 공간의 유체로 유욕 윤활을 하고 있으므로 윤활계수가 약 2 정도로 추정되어 총 50 배 정도의 가속시험으로 추정되며 시험결과도 계산수명의 1/50 정도였다.

표 3-4-9. RCF 및 철도차량용 기어박스 운전 조건 비교

항목	RCF 시험조건	철도차량용 기어박스
하중	550 kg	최대토크 141.3 kgf•m
대상 부품	RCF 시험편	기어박스 지지베어링
시험형태	원판형	테이퍼롤러 베어링
전동체	볼	롤러
최대 접촉응력	2,234.8 Mpa	1,075 Mpa
하중 형태	축방향 하중	경방향+축방향
윤활 형태	유욕 윤활	유욕 윤활

(3) 4-Ball 시험조건과 철도차량 운전조건 비교

앞서 언급한 바와 같이 철도차량의 운전조건은 윤활요소가 구름접촉을 하고 있다. 이에 반해 4-Ball 시험은 1개의 볼에 대해 3개의 볼이 정지한 상태에서 미끄럼 마찰에 의한 마모를 확인하는 시험으로 미끄럼 접촉을 하고 있다. 이 시험은 원래 극한 윤활에 사용하는 극압 윤활제의 극압 특성을 시험하기 위한 것으로 새로 개발한 시료인 나노 윤활제의 극압 성능을 참고적으로 확인하기 위해 시험하였다.

3.5. 현차적용 시험 및 성능 평가

가. 나노 윤활제 성능 검증 공인시험 수행

현차 적용에 앞서 시작품의 기본 물성에 대한 공인시험을 수행함으로써, 기존 윤활유 대비 도입 가능성을 검증하였다.

분석은 한국기계전기전자시험연구원에 의뢰하여 진행하였으며, 시험 항목은 40℃ 동점도 및 100℃ 동점도, 점도지수, 수분, 산가, 인화점, 연소점, 기포성, 부식성 및 금속 함량(철, 알루미늄, 니켈, 크롬, 몰리브덴)과 색도이며, 다음 표에서 각 항목 결과값을 정리하였다.

공인시험을 수행한 시작품은 APTES로 표면처리 된 나노알루미나 0.1 vol% 가 상용윤활제 Shell Spirax EP 80W 기유 내에 분산 공정을 거친 나노 윤활제이다. 이는 본 연구보고서 내에 구성된 RCF, 쉘 시험 등 부품 및 현차시험에 모두 동일하게 적용된 시작품으로 기유와 함께 시작품 샘플명은 ‘기존 윤활제’ 및 ‘나노 윤활제’로 통칭하여 사용하고자 한다. (부품/현차 시험 및 공인시험성적서 샘플명 동일)

표 3-5-1. 나노윤활제 물성 검증 결과

No.	분석항목	단위	기존윤활제	나노윤활제
1	동점도	40℃	mm ² /s	71.36
		100℃	mm ² /s	9.057
2	점도지수	-	100	106
3	수분	mg/kg	278.8	169.8
4	산가	mg KOH/g	0.4	0.3
5	인화점	℃	236	238
6	연소점	℃	254	254
7	색(ASTM)	-	L2.5	L3.5
8	기포성	ml	0	0
9	부식성	-	A급	A급
10	금속성분	철	mg/kg	14.85
		알루미늄	mg/kg	96.92
		니켈	mg/kg	N/D
		크롬	mg/kg	2.841
		몰리브덴	mg/kg	N/D

수분함량의 경우, 칼피셔법과 수분센서측정법을 적용하여 추가로 비교분석 하였다. 윤활유 내의 수분은 윤활유 첨가제, 마모입자, 오염물 등의 간섭으로 교란이 많은 것으로 알려져 있으며, 따라서, 동일 기법으로 적용하여 두 윤활유를 비교하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

표 3-5-2. 윤활제 수분함량 분석

분석방식	분석기준	분석의뢰 기관	단위	기존윤활제	나노윤활제
칼피셔식 전기량 적정법	KS M ISO 1037:2003	한국기계전기 전자시험연구원	mg/kg	278.8	295
상대수분센서법	ASTM D7546-15	(주)솔지	mg/kg	169.8	200

나. 현차 적용 방안 도출

(1) 시험 차량

대전도시철도 1호선 운영 전동차의 대차 시험 계측기를 설치하고 본선 운행에 따른 온도계측 시험을 시행한다. 시험 적용 차호 및 편성을 표 3-5-3과 같이 진행하고 향후 지속적인 시험을 위해 동일 편성 동일 차호에서 시험을 진행하였다.

표 3-5-3. 시험 편성 및 차호(대전도시철도 1호선)

시험 편성	115 편성 5호차(M2)	
-------	----------------	--

시험 대차	2위 대차	
-------	-------	--

시료 시험 (시험 위치)	기존윤활제	Gear Box 1
	나노윤활제	Gear Box 2

(2) 센서 설치 위치

대전도시철도 1호선 전동차 차량의 윤활제 온도특성을 측정하기 위해서 전동차 1개 편성 (115편성) 2위 대차 2개소 동일 위치에 그림 3-5-1, 3-5-2과 같이 4개소에 센서를 설치하여 설치하였다.

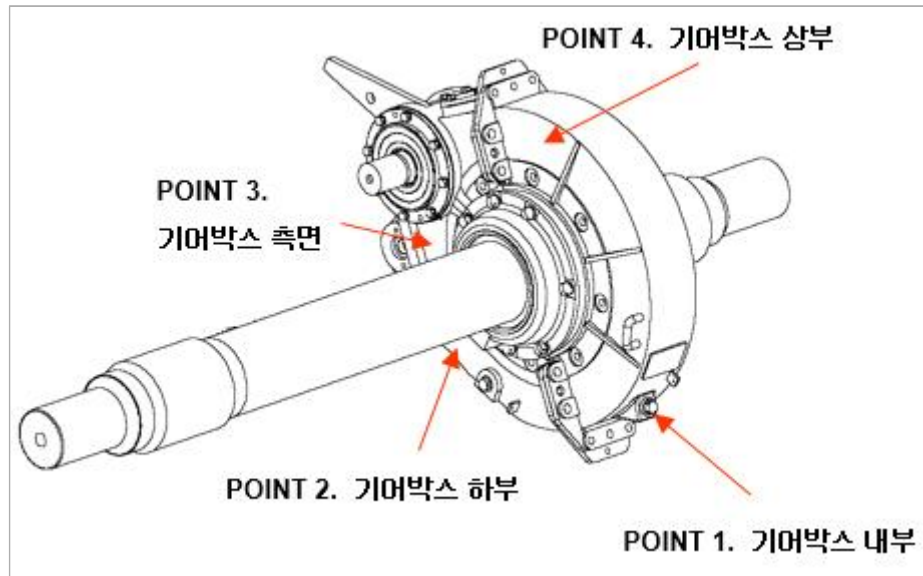


그림 3-5-1. 기어박스 센서 설치 위치(1)

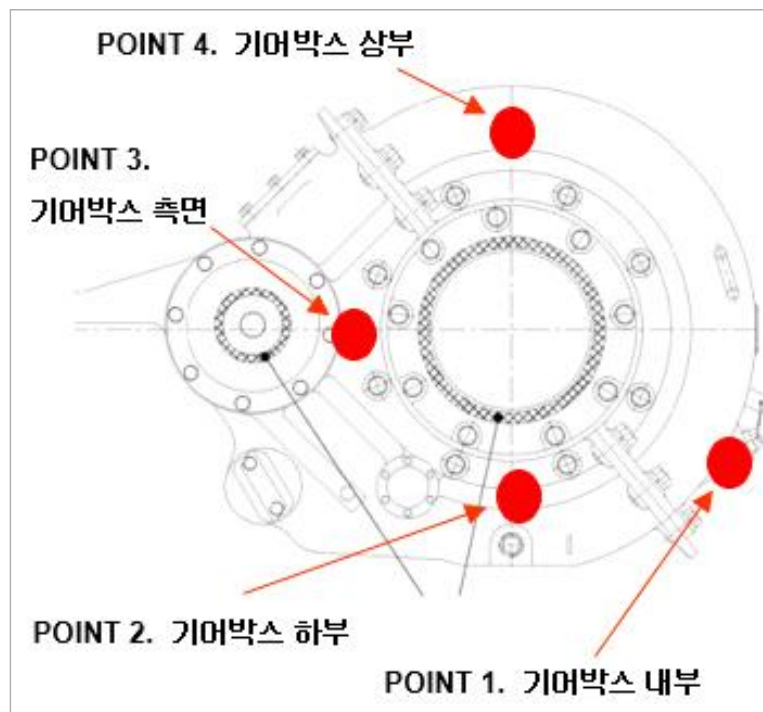


그림 3-5-2. 기어박스 센서 설치 위치(2)

(3) 계측기 사양

① 계측기

표 3-5-4. 계측기(WR310) 사양

항 목	내 용
품명	GRAPHTEC WR310-16
저장용량	40GB 2.5인치 하드디스크
스캔 속도	Ch당 최대 1 ms/s
디스플레이	8.4" 컬러 LCD 모니터, 200mm 와이드 프린터
인터페이스	이더넷, USB1.1, PCMCIA
측정모드	Recorder mode, FFT mode
INPUT	Multi-function input (Plug in amplifier)
절연전압	AC power supply 와 casing 간 : 1 minute at 1500V ac
절연저항	AC power supply 와 casing 간 : 20 MΩ at 500V dc

② 센서

표 3-5-5. 센서 사양

항 목	내 용
품명	Thermocouple Wire PSC K2-T
사용범위	-270 ~ 1372℃
피복 종류	FEP teflon
허용오차	KSC(한국규격) 1609 표준 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ※ -20 ~ 150℃사용시
일반적 길이	200M
절연저항	1500 MΩ /Km

(4) 윤활제

① 기존 사용 윤활제

대전도시철도 1호선 기어박스내 사용하는 기존 윤활제는 Shell Spirax S2 G 80W를 사용하고 있으며 기어박스 1개소에 4리터를 주입하여 운영하고 있다. 기존 사용하고 있는 윤활제의 규격은 표 3-5-6과 같이 제품규격 및 대표적인 윤활제의 시험결과를 나타내고 있다.

표 3-5-6. 기어박스 윤활제 규격 (대전도시철도 1호선 전동차 적용)

시험항목	시험방법	제품규격		시험결과
외관 냄새	VISUAL	NORMAL	~ NORMAL	NORMAL
동점도@40 °C, cSt	ASTM D 445	~		69.71
동점도@100 °C, cSt	ASTM D 445	8.500	~ 9.900	9.282
점도 지수 VI	ASTM D 2270	90	~	110
인화점, COC(C)	ASTM D 92	180	~	238
유동점 (°C)	ASTM D 97	-39.0	~ -27.0	-39.0
동판부식, (100°C×3hrs)	ASTM D 4048	1A	~ 1B	1A
기포생성도, SEQ # 1(mL)	ASTM D 892	~ 20		10
기포생성도, SEQ # 2(mL)	ASTM D 892	~ 50		10
기포생성도, SEQ # 3(mL)	ASTM D 892	~ 20		10
색(ASTM)	ASTM D 1500	~		L2.5
Brookfield 점도 @-26°C, mPa-s	ASTM D 2983	~ 150000		14760
기포안정도, SEQ # 1(mL)	ASTM D 892	0	~ 0	0
기포안정도, SEQ # 2(mL)	ASTM D 892	0	~ 0	0
기포안정도, SEQ # 3(mL)	ASTM D 892	0	~ 0	0
밀도 @15C, g/cm3	ASTM D 1298	~		.8716
P 함량(%)	ASTM D 4951	.011	~ .013	.012

제공 : 한국셀석유주식회사(2018.05.03)

② 개발 윤활제

기존 대전도시철도 1호선에서 사용하고 있는 동일 윤활제에 Al_2O_3 나노입자 표면처리(APTES)한 나노 윤활제를 현차에 적용하여 기존 윤활제와 나노 윤활제에 대한 화학적, 물리적인 기능을 비교 분석한다.

다. 본선 시험

(1) 윤활제 주입

대전도시철도 1호선 차량의 기어박스내 윤활제는 1개소당 4리터 주입으로 기존 및 나노 윤활제를 동일한 량으로 주입한다.



윤활제 주입 준비



윤활제 제거



윤활제 주입



주입 완료

그림 3-5-3. 시험 윤활제 주입 (2018.09.13)

(2) 센서 및 계측기 설치

본선 시험을 위해서 시험차량은 대전도시철도 1호선 차량으로 센서시험 검증하기 위해 차량의 1개 대차 2개소의 기어박스에 온도센서와 운전실에 계측기를 설치하였다.



기어박스 좌측



기어박스 상부



기어박스 내부



기어박스 하부

그림 3-5-4. 기어박스 센서 설치 부착 (4개소)



센서 설치전



센서 설치후(1)



센서 설치후(2)



계측기 설치(운전실)

그림 3-5-5. 계측기 설치

본선 시험은 전동차 운행 스케줄에 의해서 특정 시간대 (11시24분 ~ 19시40분)에 운행하는 정상 운행 차량으로 시험하였다. 본 과제에서 수행하는 시험은 모두 동일 시간대에서 시험을 수행하여 동일 운행 조건(자동운전)으로 수행하여 가능한 동일한 시험환경 조건으로 진행하였다.

(3) 시험 분석

본선 시험에 대하여 각 시험 개소에 대한 계측과 전동차 내 운행기록의 속도 자료를 추출하여 데이터를 분석하였다. 시험조건으로 샘플링 타임을 1초로 하고 시간을 동기화하여 수행하였다.

odel	GL220					
ersion	Ver1.05					
mping Is						
ral data	2420					
art time	2018-06-19					
d time	2018-06-19					
igger tin	2018-06-19					
JP settings						
1	Signal name	Range	Filter	Span		
41	CH 1	TC_T	2	50	0 [degC]	
42	CH 2	TC_T	2	50	0 [degC]	
43	CH 3	TC_T	2	2000	-200 [degC]	
44	CH 4	TC_T	2	2000	-200 [degC]	
	gic/Puls Off					
ita						
umber	Date&Time	CH1	CH2	CH3	CH4	Alarm1 -1Alarm 1
0.	Time	degC	degC	degC	degC	A12345671AO1234
1	2018-06-19 11:29	23.9	24	23.7	23.8	
2	2018-06-19 11:29	23.9	24	23.7	23.8	
3	2018-06-19 11:29	23.9	24	23.7	23.8	
4	2018-06-19 11:29	23.9	24	23.7	23.8	
5	2018-06-19 11:29	23.9	24	23.7	23.8	
6	2018-06-19 11:29	23.9	24	23.7	23.8	
7	2018-06-19 11:29	23.9	24	23.7	23.8	
8	2018-06-19 11:29	23.9	24	23.7	23.8	
9	2018-06-19 11:29	23.9	23.9	23.7	23.8	
10	2018-06-19 11:29	23.9	23.9	23.7	23.8	

그림 3-5-6. 전동차 운행기록(TCMS)

TIME	PERIOD	UNIT	TEL	PUH	HEF	P/B	GROUP	E
4:15:38	23	96	40	1	0	100 (X)	1	
4:15:39	23	104	41	1	0	100 (X)	1	
4:15:40	23	123	44	1	0	0 (X)	1	
4:15:41	23	138	47	1	0	0 (X)	1	
4:15:42	23	146	47	1	0	0 (X)	1	
4:15:43	23	160	46	1	0	17 (X)	1	
4:15:44	23	179	46	1	0	93 (X)	1	
4:15:45	23	186	47	1	0	100 (X)	1	
4:15:46	23	207	50	1	0	100 (X)	1	
4:15:47	23	207	50	1	0	100 (X)	1	
4:15:48	23	234	55	1	0	61 (X)	1	
4:15:49	23	251	56	1	0	40 (X)	1	
4:15:50	23	258	56	1	0	34 (X)	1	
4:15:51	23	275	57	1	0	33 (X)	1	
4:15:52	23	284	57	1	0	35 (X)	1	
4:15:53	23	307	57	1	0	36 (X)	1	
4:15:54	23	323	58	1	0	35 (X)	1	
4:15:55	23	333	58	1	0	36 (X)	1	
4:15:56	23	350	58	1	0	33 (X)	1	
4:15:57	23	373	59	1	0	31 (X)	1	
4:15:58	23	383	59	1	0	30 (X)	1	
4:15:59	23	400	59	1	0	27 (X)	1	
4:16:00	23	406	59	1	0	27 (X)	1	
4:16:01	23	423	59	1	0	24 (X)	1	
4:16:02	23	449	60	1	0	0 (X)	1	
4:16:03	23	456	60	1	0	0 (X)	1	
4:16:04	23	473	59	1	0	0 (X)	1	
4:16:05	23	500	59	1	0	-19 (X)	1	
4:16:06	23	507	59	1	0	-26 (X)	1	
4:16:07	23	523	58	1	0	-45 (X)	1	
4:16:08	23	533	57	1	0	-47 (X)	1	
4:16:09	23	550	55	1	0	-49 (X)	1	
4:16:10	23	566	52	1	0	-48 (X)	1	

그림 3-5-7. 데이터 수집장치(WR310) 데이터

본선 시험 완료에 따른 시험데이터(전동차 운행기록, 데이터 수집장치)의 분석으로 속도, 온도 등 특성 추이를 확인하였다.

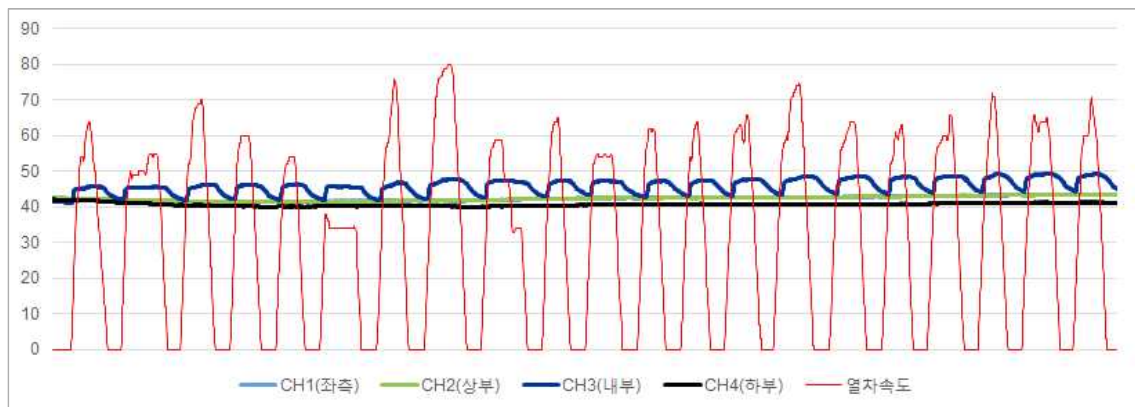
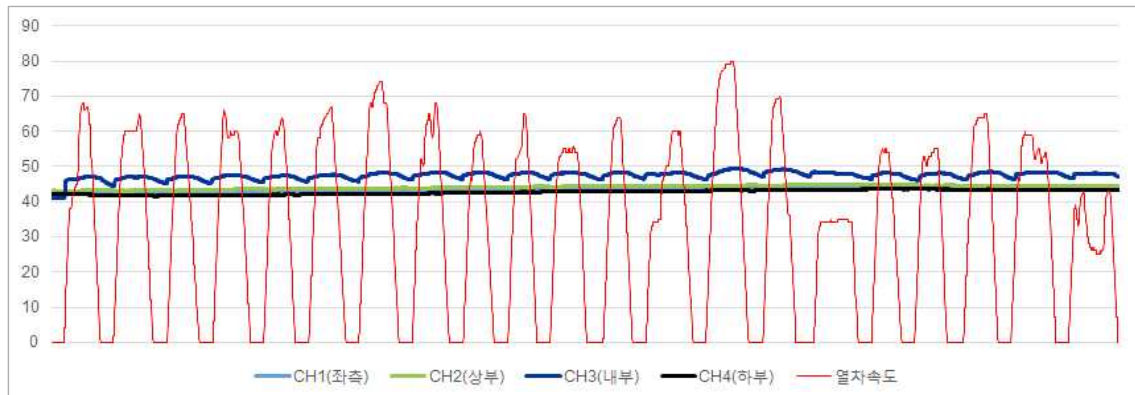


그림 3-5-8. 본선 시험 운행 데이터 분석

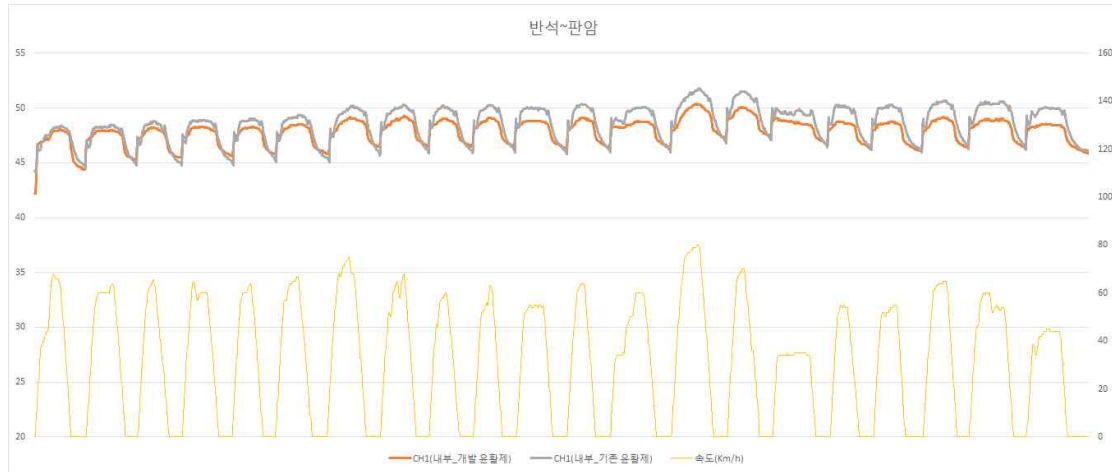
라. 본선 시험 전후 윤활제 시험 결과 분석

대전도시철도 1호선 현차 사용 기존 윤활제 (Shell Spirax S2 G 80W)와 나노 윤활제에 대한 현차 온도 특성 시험에 대한 결과이다. 시험구간은 대전도시철도 1호선 전구간 (판암~반석)으로 동일 운행 조건으로 윤활제 적용 (2018.09.~2018.11.) 온도시험 결과를 분석하였다.

분석 point는 기어박스 내부, 기어박스 외측 상부/하부/측부 4개소이다.

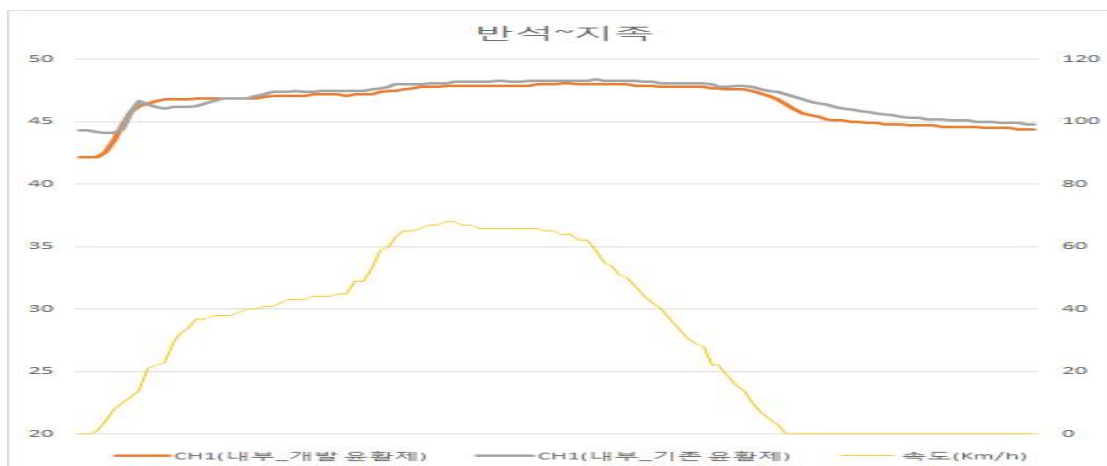
(1) 기어박스 내부 윤활제 온도

반석역~판암역



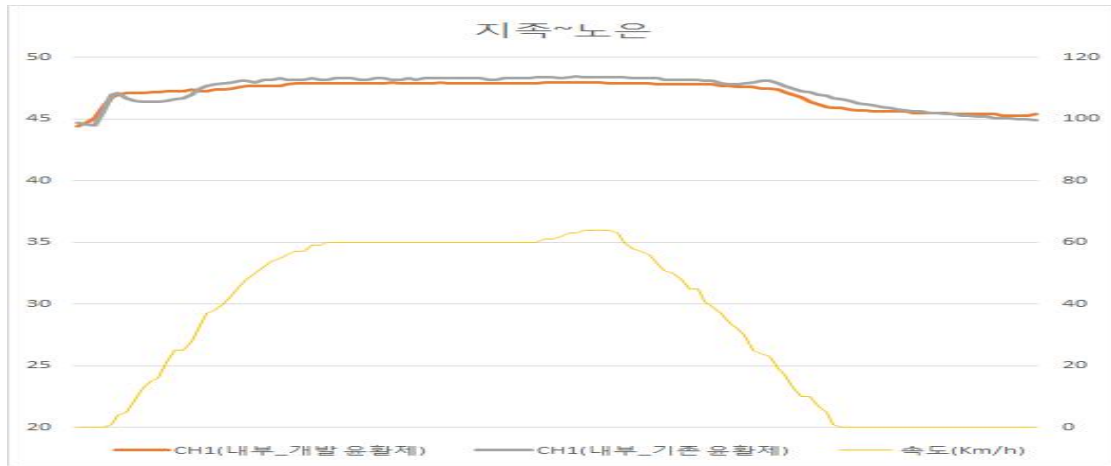
구 분	CH1(내부_나노 윤활제)	CH1(내부_기존 윤활제)
최고온도(℃)	50.4	51.8
최저온도(℃)	42.2	44.1
평균온도(℃)	47.9	48.6

반석역~지족역



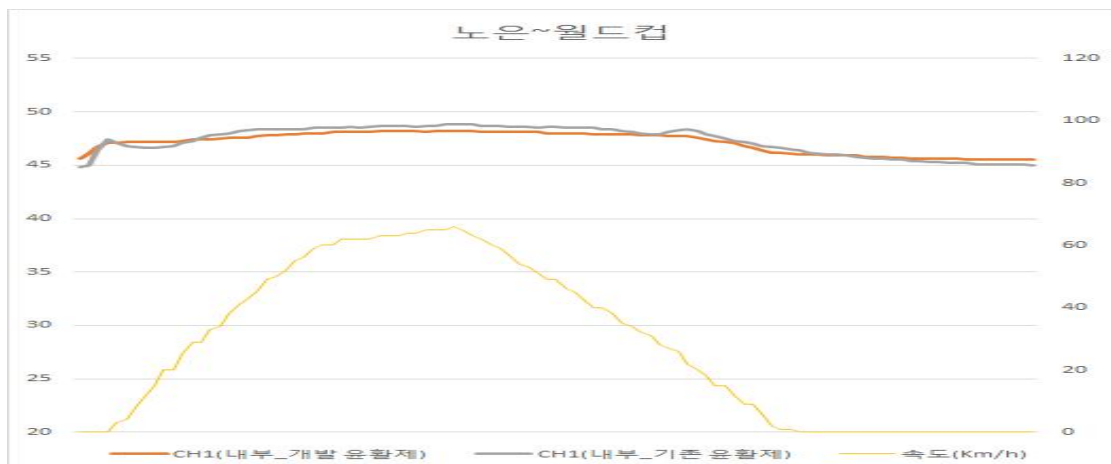
구 분	CH1(내부_나노 윤활제)	CH1(내부_기존 윤활제)
최고온도(℃)	48.1	48.4
최저온도(℃)	42.2	44.1
평균온도(℃)	46.5	46.9

지족역~노은역



구 분	CH1(내부_나노 유향제)	CH1(내부_기존 유향제)
최고온도(℃)	48	48.5
최저온도(℃)	44.4	44.5
평균온도(℃)	47.1	47.3

노은역~월드컵경기장역



구 분	CH1(내부_나노 유향제)	CH1(내부_기존 유향제)
최고온도(℃)	48.2	48.8
최저온도(℃)	45.5	44.8
평균온도(℃)	47.1	47.3

월드컵경기장역~현충원역



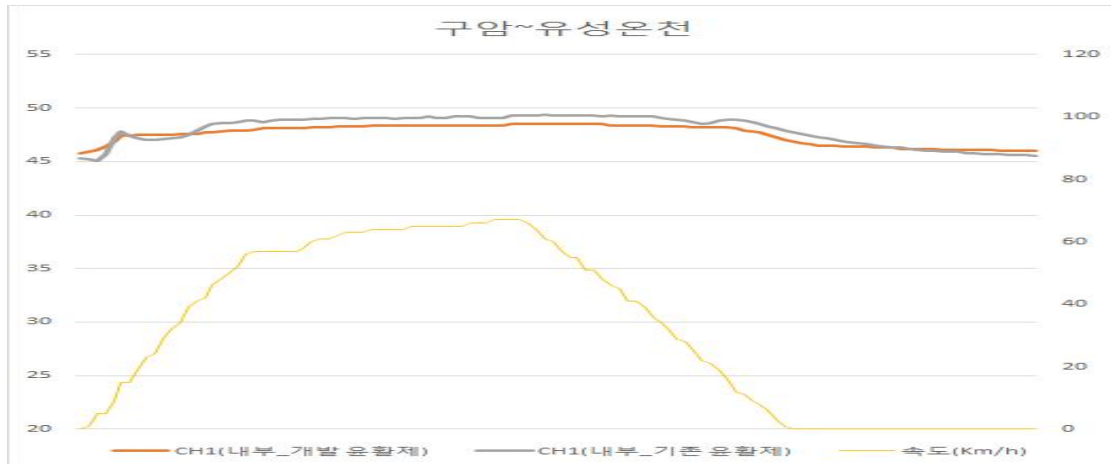
구 분	CH1(내부_나노 유탄제)	CH1(내부_기존 유탄제)
최고온도(℃)	48.3	48.9
최저온도(℃)	45.5	44.8
평균온도(℃)	47.4	47.6

현충원역~구암역



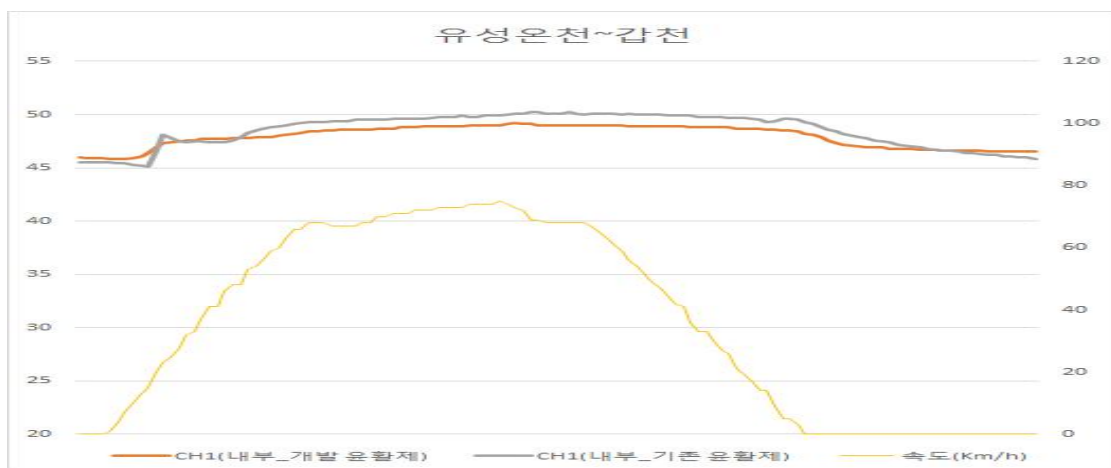
구 분	CH1(내부_나노 유탄제)	CH1(내부_기존 유탄제)
최고온도(℃)	48.3	49
최저온도(℃)	45.7	44.8
평균온도(℃)	47.4	47.8

구암역~유성온천역



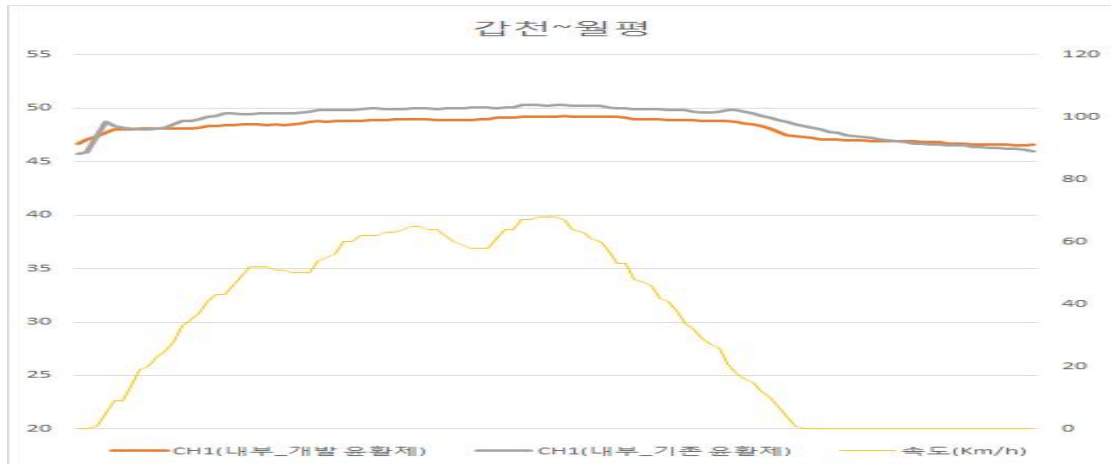
구 분	CH1(내부_나노 유탄제)	CH1(내부_기존 유탄제)
최고온도(℃)	48.5	49.4
최저온도(℃)	45.8	45.1
평균온도(℃)	47.6	48.0

유성온천역~갑천역



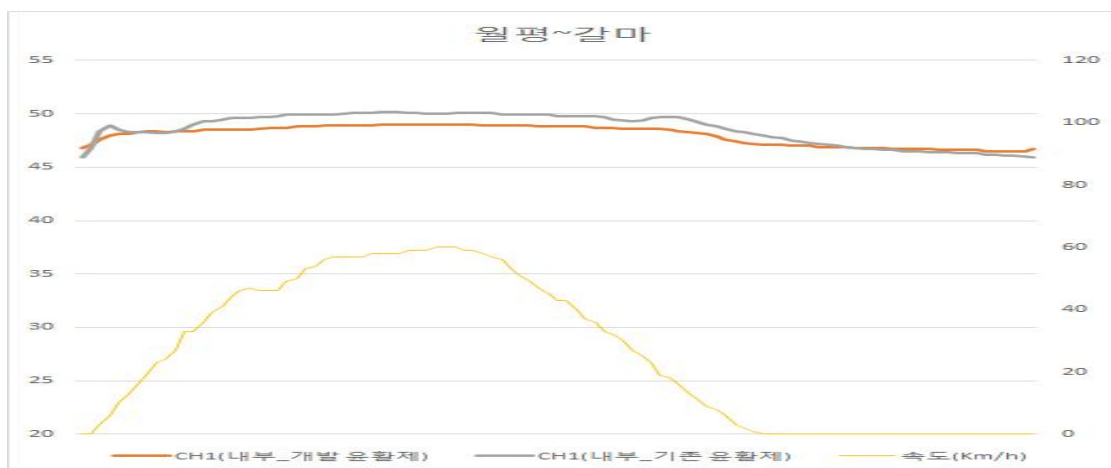
구 분	CH1(내부_나노 유탄제)	CH1(내부_기존 유탄제)
최고온도(℃)	49.2	50.2
최저온도(℃)	45.8	45.1
평균온도(℃)	47.9	48.5

갑천역~월평역



구 분	CH1(내부_나노 유탄제)	CH1(내부_기존 유탄제)
최고온도(℃)	49.3	50.3
최저온도(℃)	46.5	45.7
평균온도(℃)	48.2	48.8

월평역~갈마역



구 분	CH1(내부_나노 유탄제)	CH1(내부_기존 유탄제)
최고온도(℃)	49	50.2
최저온도(℃)	46.5	45.9
평균온도(℃)	48	48.6

갈마역~정부청사역



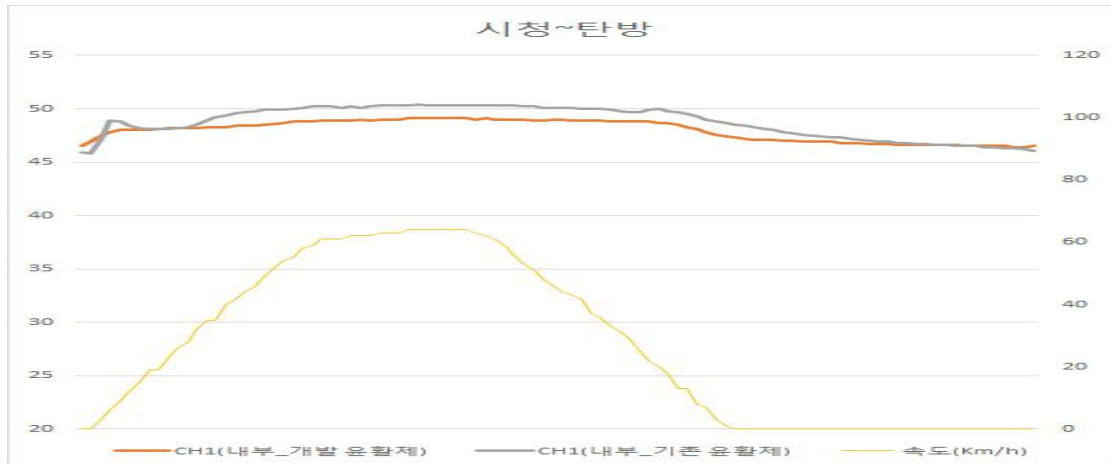
구 분	CH1(내부_나노 유탄제)	CH1(내부_기존 유탄제)
최고온도(℃)	49.1	50.3
최저온도(℃)	46.5	46.1
평균온도(℃)	48	48.8

정부청사역~시청역



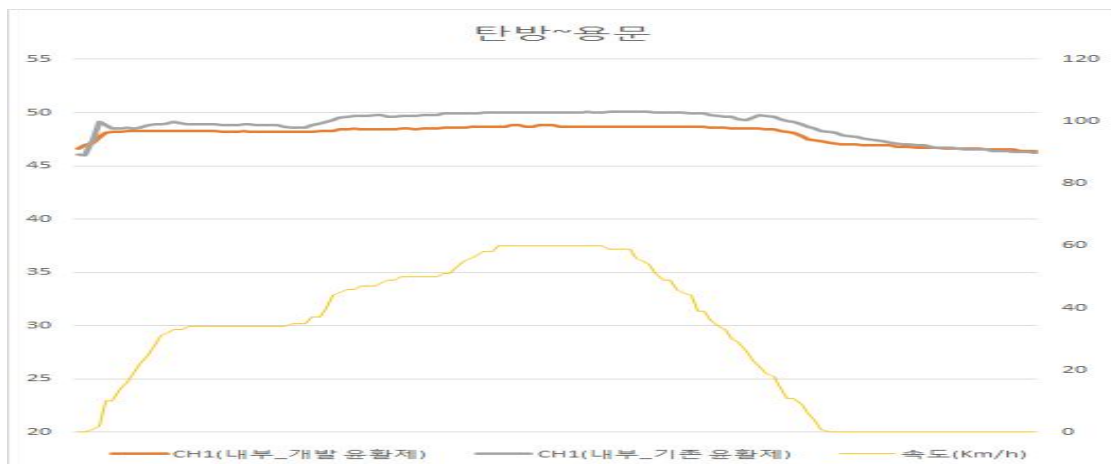
구 분	CH1(내부_나노 유탄제)	CH1(내부_기존 유탄제)
최고온도(℃)	48.8	50.1
최저온도(℃)	46.3	46
평균온도(℃)	48	48.8

시청역~탄방역



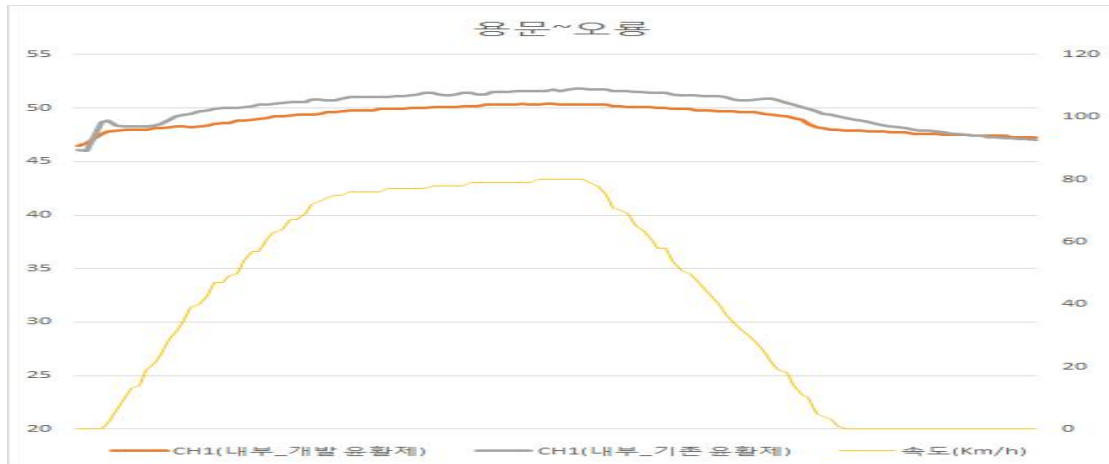
구 분	CH1(내부_나노 유탄제)	CH1(내부_기존 유탄제)
최고온도(℃)	49.1	50.4
최저온도(℃)	46.4	45.8
평균온도(℃)	48	48.8

탄방역~용문역



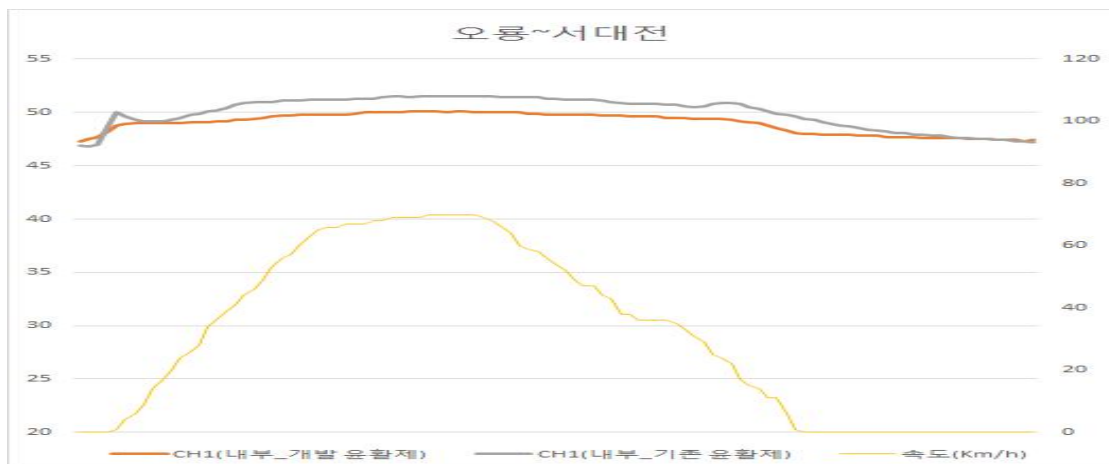
구 분	CH1(내부_나노 유탄제)	CH1(내부_기존 유탄제)
최고온도(℃)	48.8	50.1
최저온도(℃)	46.4	46
평균온도(℃)	48.0	48.8

용문~오룡



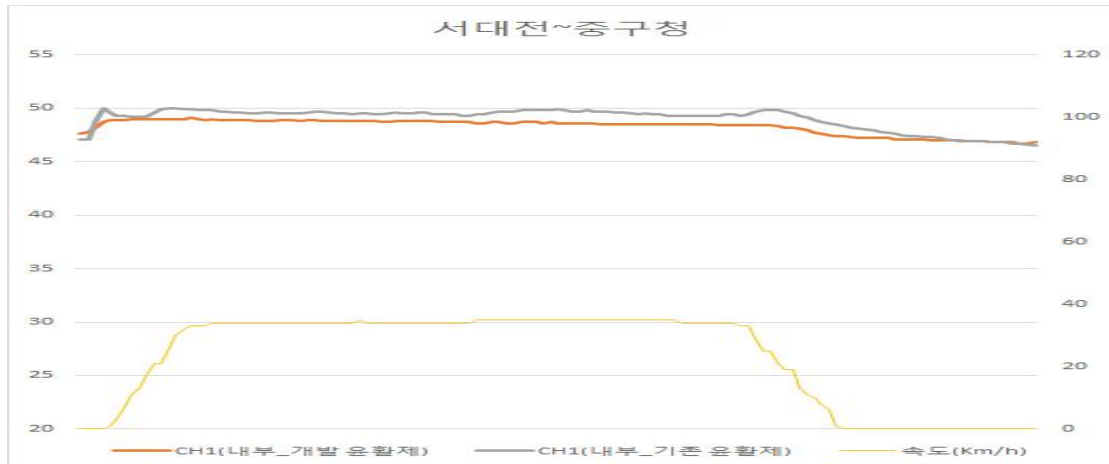
구 분	CH1(내부_나노 유탄제)	CH1(내부_기존 유탄제)
최고온도(℃)	50.4	51.8
최저온도(℃)	46.5	46
평균온도(℃)	49.0	50.0

오룡~서대전네거리



구 분	CH1(내부_나노 유탄제)	CH1(내부_기존 유탄제)
최고온도(℃)	50.1	51.5
최저온도(℃)	47.3	46.8
평균온도(℃)	49	50

서대전네거리~중구청



구 분	CH1(내부_나노 유탄제)	CH1(내부_기존 유탄제)
최고온도(℃)	49.1	50
최저온도(℃)	46.7	46.5
평균온도(℃)	48.3	49

중구청~중양로



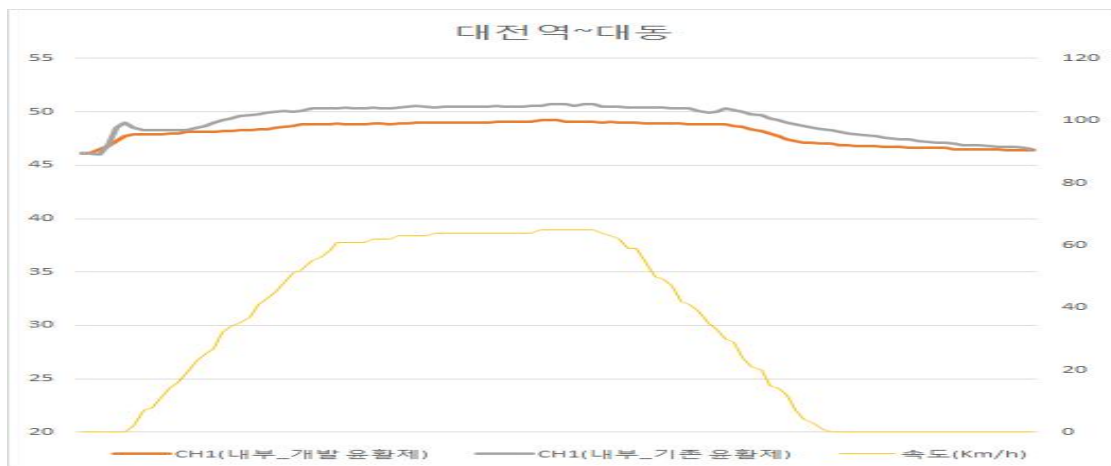
구 분	CH1(내부_나노 유탄제)	CH1(내부_기존 유탄제)
최고온도(℃)	48.8	50.3
최저온도(℃)	46.3	46.4
평균온도(℃)	47.9	48.9

중앙로~대전역



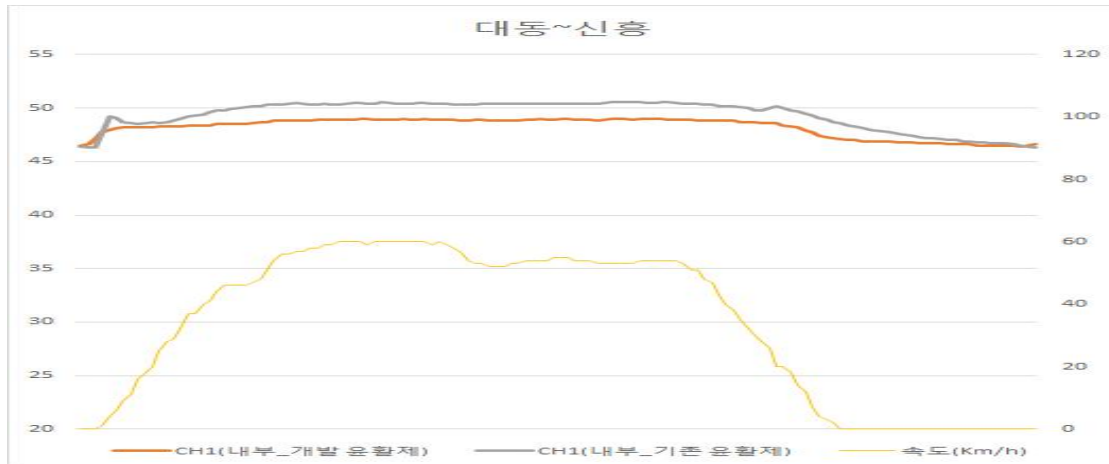
구 분	CH1(내부_나노 유탄제)	CH1(내부_기존 유탄제)
최고온도(℃)	48.8	50.3
최저온도(℃)	46.1	46.2
평균온도(℃)	47.7	48.7

대전역~대동



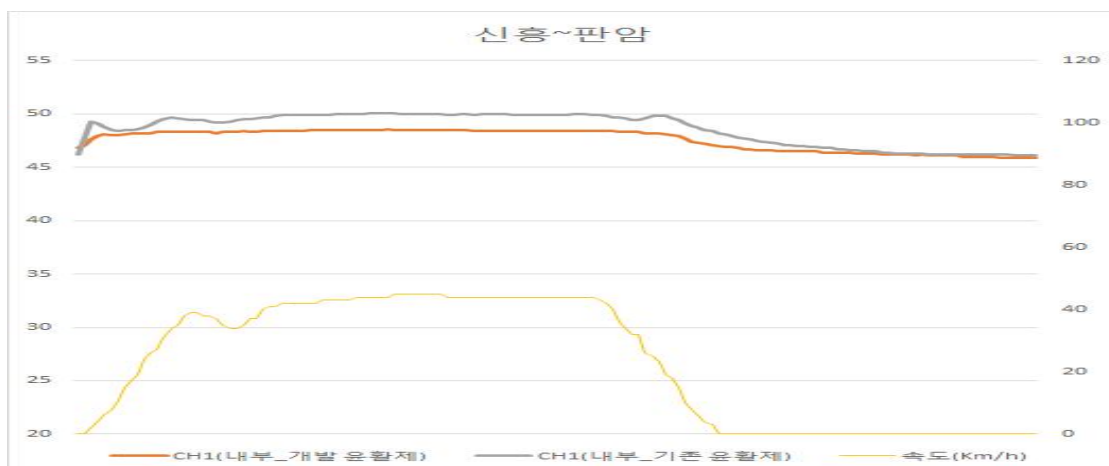
구 분	CH1(내부_나노 유탄제)	CH1(내부_기존 유탄제)
최고온도(℃)	49.2	50.7
최저온도(℃)	46.1	46
평균온도(℃)	48.1	49.2

대동~신흥



구 분	CH1(내부_나노 유탄제)	CH1(내부_기존 유탄제)
최고온도(℃)	49	50.6
최저온도(℃)	46.4	46.3
평균온도(℃)	48.2	49.4

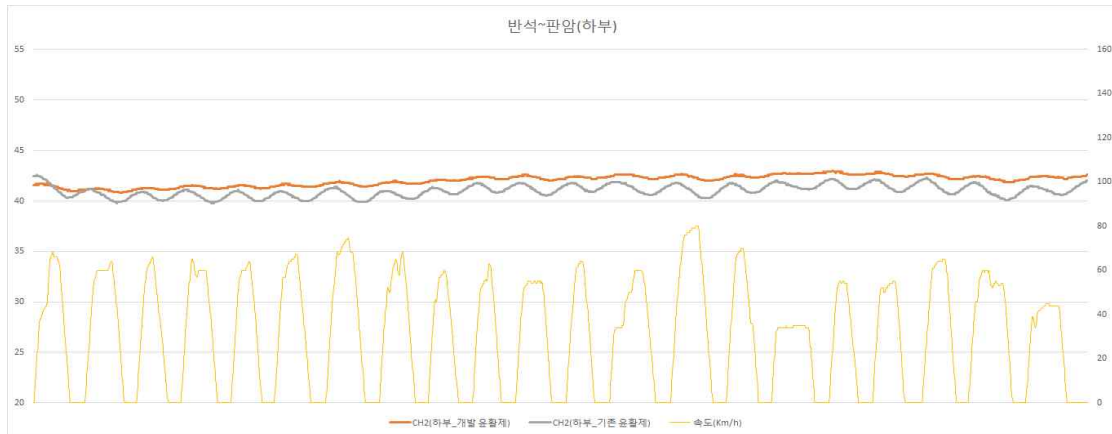
신흥~판암



구 분	CH1(내부_나노 유탄제)	CH1(내부_기존 유탄제)
최고온도(℃)	48.6	50.1
최저온도(℃)	45.9	46.1
평균온도(℃)	47.6	48.6

(2) 기어박스 하부 윤활제 온도

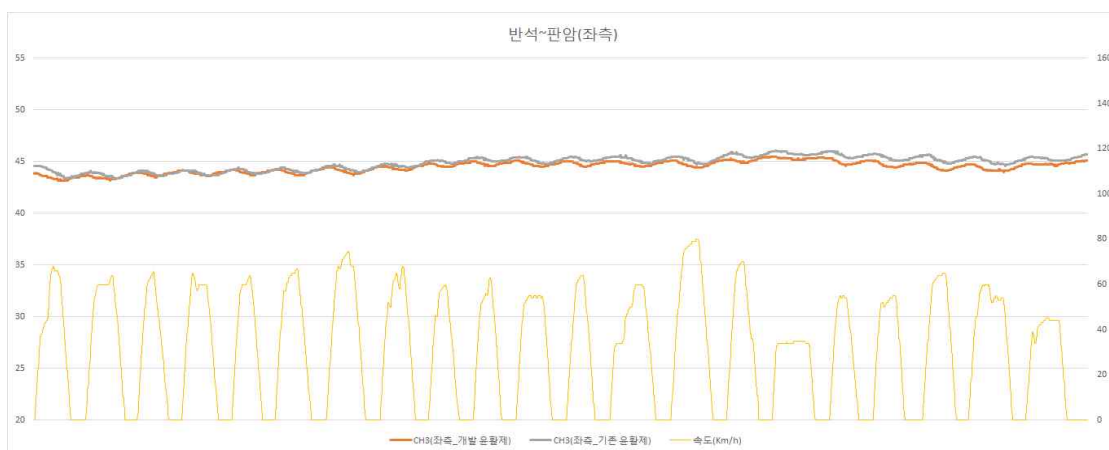
반석~판암(하부)



구 분	CH2(하부_나노 윤활제)	CH2(하부_기존 윤활제)
최고온도(℃)	43	42.6
최저온도(℃)	40.8	39.8
평균온도(℃)	42	41

(3) 기어박스 좌측 윤활제 온도

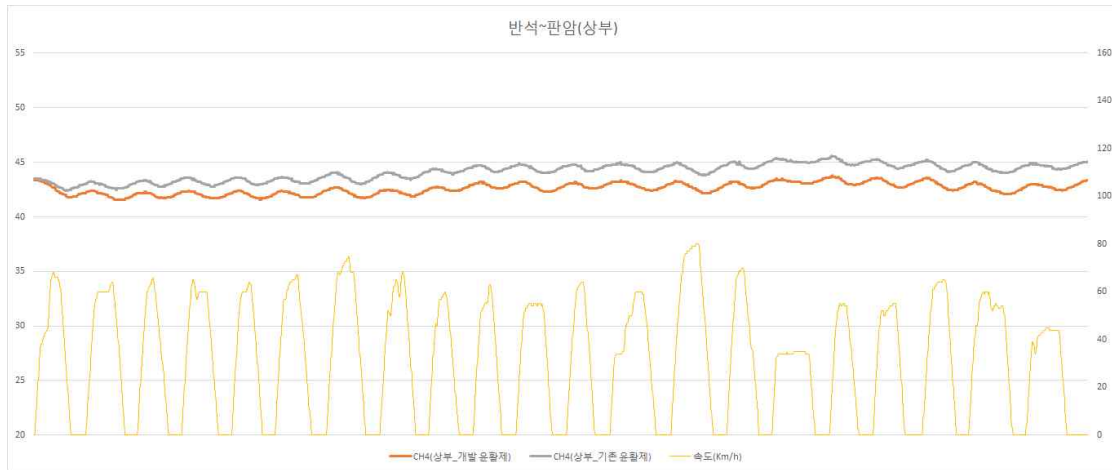
반석~판암(좌측)



구 분	CH3(좌측_나노 윤활제)	CH3(좌측_기존 윤활제)
최고온도(℃)	45.5	46.1
최저온도(℃)	43.2	43.4
평균온도(℃)	44.5	44.9

(4) 기어박스 상부 윤활제 온도

반석~판암(상부)



구 분	CH4(상부_나노 윤활제)	CH4(상부_기존 윤활제)
최고온도(℃)	43.8	45.6
최저온도(℃)	41.6	42.4
평균온도(℃)	42.6	44.1

(5) 성분시험 분석

3개월의 현차운영 시험 수행 후 기존 윤활제 및 나노윤활제의 물성 분석을 통해 윤활제의 기계적/열적 안정성을 확인할 수 있었다.

분석 일	시험 목적	샘플내용	분석항목						
			동점도 (40℃)	동점도 (100℃)	점도 지수	수분	산가	인화점	연소점
			mm ² /s	mm ² /s	-	mg/kg	mg KOH/g	℃	℃
2018. 11	현차시험 후 기존 및 나노윤활제 물성변화 분석	기존 윤활제	69.68	9.242	109	27.1	0.3	232	266
		나노 윤활제	71.18	9.353	108	28	0.3	232	258

시험결과

시험성적서

성적서 번호: T2018-13249
 회사명: 한국철도기술연구원
 대표자: 최희승
 주소: 경기도 고양시 일대동로 176(일일동)
 1. 시험명: ①기존 윤활제, ②개발 윤활제
 2. 규격 및 형식: /
 3. 성적서의 용도: 자체참고용
 4. 접수일자: 2018.11.16
 5. 시험일자: 2018.11.16 ~ 2018.12.05
 6. 시험방법: 시험결과 참조
 7. 시험결과: 2 페이지 참조

시험자: 최희승

최희승

승인자: 정홍만

정홍만

1. 이 성적서는 타격자가 제공한 시료 및 시료명으로서 시험한 결과로서 실제 제품에 대한 품질을 보증하는 것임에 유의한다.
 2. 이 성적서는 타격자가 제공한 시료 및 시료명으로서 시험한 결과로서 실제 제품에 대한 품질을 보증하는 것임에 유의한다.
 3. 이 성적서의 사용은 무효이다.



한국기계전기전자시험연구원



www.ktc.re.kr | 15309 경기도 군포시 일대동로 176빌딩 74
TEL: 031-420-3011, FAX: 031-425-7385

서식PS10-05(Rev.2)

Page: 1 of 2

(성적서 번호: T2018-13249)

시험항목	단위	시험결과		시험방법
		기존 윤활제	개발 윤활제	
동점도 (40℃)	mm/s	69.68	71.18	KS M ISO 3104:2008
동점도 (100℃)	mm/s	9.242	9.353	KS M ISO 3104:2008
점도 지수	-	109	108	KS M ISO 2909:2016
수분	mg/kg	27.1	28.0	KS M ISO 10337:2003
산가	mg KOH/g	0.3	0.3	KS M ISO 6618:2003
인화점 (C.O.C)	℃	232	232	KS M ISO 2592:2007
연소점 (C.O.C)	℃	266	258	KS M ISO 2592:2007
색 (ASTM 색도법)	-	L3.0	D8	KS M ISO 2049:2012

끝

서식PS10-06(Rev.2)

Page: 2 / 2

바. 윤활제 유지보수 방안

본 과제에서 개발된 윤활제 현차 운영에 따른 성분 분석 시험 결과는 동점도, 점도지수, 수분, 산가, 인화점, 연소점 등 기존 윤활제 대비 동등 이상의 결과를 얻고 또한 수명시험 및 온도 특성은 부품단위 시험을 통해 성능이 향상된 결과를 얻었다.

개발윤활제는 현차시험을 통하여 그 사용성을 검증하였으나 짧은 과제기간을 통해 충분한 시험과 검증으로 장기적인 윤활특성과 신뢰성을 확보가 추가적으로 필요하다. 그러나 본 과제에서 운행시험 결과를 바탕으로 유지보수에 대한 방향은 다음과 같이 정리할 수 있다.

개발윤활제는 검사주기를 차량제작사에서 권고하는 일상검사, 월상검사, 중정비 검사에 시행하는 체계에 대하여 일상검사를 제외하고 월상검사 및 중정비 검사로 수행하여도 유지 관리하는데 전혀 지장이 없다.

국내 도시철도 윤활제는 각 기관별 윤활제 점검 방법 및 주기를 전동차 관리내규로 정하여 운영하고 있다. 그러나 윤활제 점검 방법은 경정비시 육안 점검위주로 시행하여 누유 등 필요시 보충하고 중정비시 전량 교체하여 시행하고 있다.

이와 같이 윤활제의 유지보수에 대한 검사주기 및 방법에 대해서는 기존 차량 제작사의

정비지침 권고에 의해서 정해지는 사항으로 전동차 기어박스 제작에 따른 특성과 사용 윤활제의 성분 및 사양을 고려하여 장치의 원활한 윤활과 장치 동작을 만족하도록 운영하고 있다.

도시철도 운영기관의 윤활제 점검주기 및 방법은 각 기관의 정비주기에 따라 정기적으로 시행하고 있고, 사고 등 이례사항 발생에 따른 비정기적 주기에 의한 시행하는 특별검사로 시행하고 있다. 본 과제에서 개발된 나노 윤활제의 경우, 아래 표와 같이 유관 도시철도 운영기관의 점검주기를 따라 유사하게 점검을 진행하도록 권고한다.

표 3-5-7. 운영사별 도시철도 윤활제 점검주기 및 방법

운영 기관/점검주기			점검 방법
서울교통공사	대전도시철도공사	부산-김해경전철	
· 7D(일)	· 2,000Km	-	점검 방안 개선 가능
· 4M(개월)	· 3만Km	· 3M(개월)	윤활제 변색, 누유여부 및 적정량
· 4Y(년)	· 4Y(년)	· 3Y/6Y(년)	전량 교체

위 표에서와 같이 윤활제에 대한 점검방법은 주기적인 육안관찰에 의한 윤활제 변색, 누유 여부 및 적정량에 대해서 시행하고 그 성분에 대한 시험은 수행하지 않는다.

일상검사의 경우 철도차량의 운행 거리 정도와 기존 유관기관에서 검사했던 방법 및 검사 결과를 고려할 때 점검 생략이 가능하다. 그러나 월상검사 및 중정비 검사의 경우 기존 검사 주기 및 방법을 유지할 필요가 있다.

월상검사 및 중정비 검사의 경우 월상검사는 육안검사를 통하여 윤활제의 기본 색상과 량을 확인하여 관리하고 중정비 검사에 따른 전량 교체한다. 이때 개발 윤활제에 대하여 성분 분석을 통하여 장기간 운영에 따른 윤활제 상태 및 성분분석 확인이 필요하다.

윤활제 교체에 대해서는 정기점검에 따른 이상유무를 판단하여 이상이 없다고 판단되면 지속 사용하고, 나노 윤활제의 개선된 수명 주기에 따라, 4~6년의 교체주기로 전량 교체할 수 있다.

단, 본 과제에서 현차 적용한 개발윤활제는 짧은 현차 적용 기간으로 그 특성을 완전히 파악하기는 어려우므로 장기간 운영에 따른 현차 적용성을 확인하고 그에 따른 최적의 점검 및 검사 방법을 도출하는 것이 필요하다.

3.6. 나노유체 윤활제 상용화 방안 연구

국내 고속/일반/도시철도 차량 내 기어박스 윤활제로 도입하기 위한 나노윤활제의 대량생산을 위하여, 생산량 예측 및 단위공정 분석, 재료기반 단가산출을 수행하였다.

가. 수요 예측을 통한 생산량 산출

국내 철도차량의 수요를 중심으로 생산량을 산출하고자 하였다. 2017년 철도통계연보에 따르면, 지역간 철도(철도공사 운영)가 약 6,000량, 광역도시철도 약 5,800량이 운행되고 있는 것으로 조사되었다.

철도 차량 1편성 중 기어박스가 존재하는 Motor-car 차량 내 기어박스의 개수를 산출하면 약 23,000 개의 기어박스가 존재하며, 기어박스 당 4L의 윤활제가 투입되므로 약 92 톤의 철도차량 기어박스 윤활제의 수요가 발생하고 있음을 알 수 있다.

표 3-6-1. 국내 철도운영기관별 철도차량 보유현황

No.	운영기관	보유차량(량)
1	한국철도공사	고속철도
		기관차
		동차
2	서울교통공사	3,551
3	서울시메트로9호선(주)	144
4	서울메트로9호선운영(주)	54
5	부산교통공사	926
6	대구도시철도공사	468
7	인천교통공사	346
8	광주광역시도시철도공사	92
9	대전광역시도시철도공사	84
10	부산-김해 경전철(주)	50
11	의정부 경전철(주)	30
12	용인 경량전철(주)	30
13	우이신설경전철(주)	36
합계		11,835

나. 단위 공정 분석

본 연구에서는 나노입자를 효과적으로 윤활제 내에 분산하기 위한 다양한 전처리 기법을

연구하였다. 최종적으로 선정된 생산 기법에 대한 합성공정 단계는 다음 그림과 같다. 일반적으로 나노입자 합성공정은 규모가 작고, 비연속식으로 생산 단계의 복잡성이 요구된다. 따라서, 동일 성능의 나노유효제의 생산이 가능하면서 공정의 대량생산의 용이성 및 재료 단가의 저가화를 위하여, Two-step 반응이 가능한 저가의 Self-Assembled monomer를 선정하였다. 나노입자 처리 공정은 크게 분산, 환류반응(Reflux), 세척/건조로 구성되며, 최종적으로 건조된 분말 파우더 형태의 나노알루미나는 대상 유효제 내에 분산하여 제품화 된다.

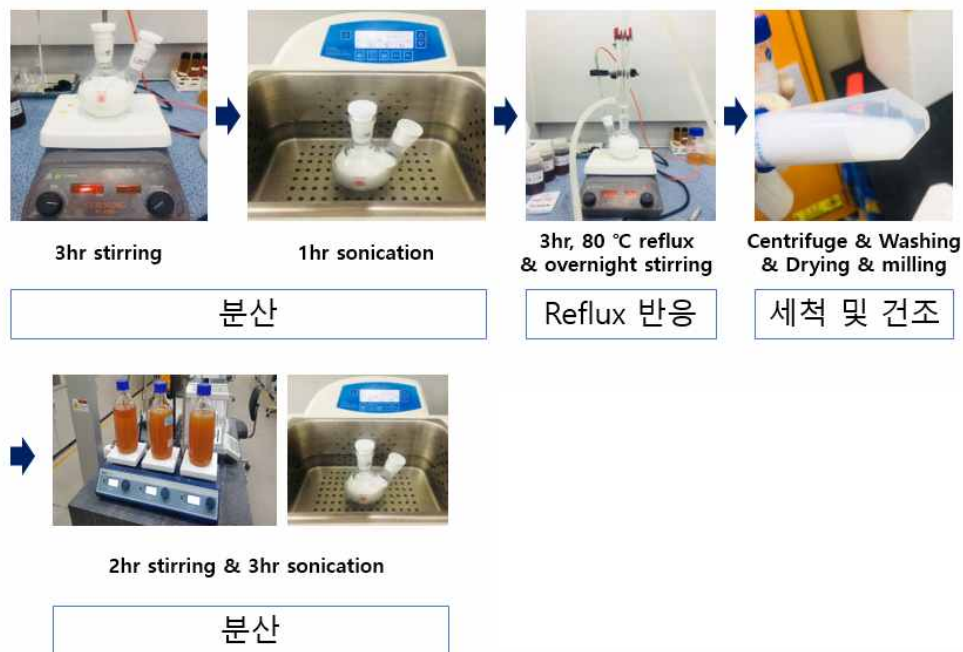


그림 3-6-1. 실험실 규모 나노유효제 합성 단계

다. 대량생산 공정(안) 도출

아래 공정도에 보이는 각 단계의 생산라인은 교반, 분산 및 분리/세척 공정으로 단순화하여 시설 적용이 가능하며, 일반적인 나노재료 생산라인에 적용되는 설비를 활용 가능한 것으로 판단된다.

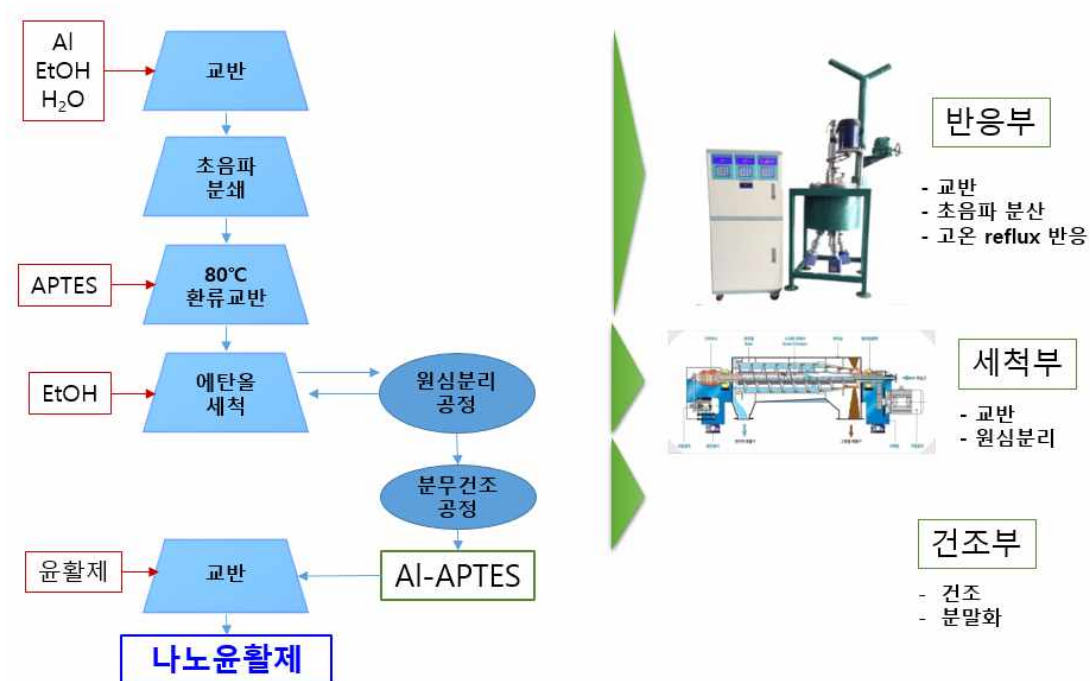


그림 3-6-2. 나노윤활제 생산 공정 모식도

라. 투입 재료 예상 비용 기반 최종 제품 가격 산정

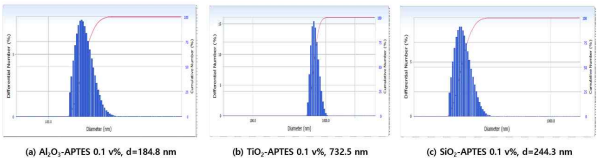
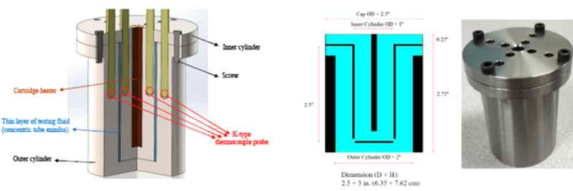
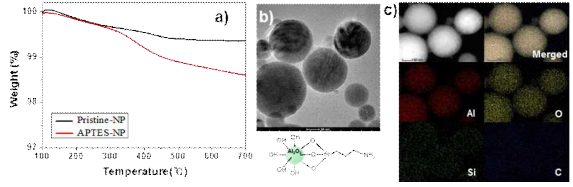
앞에서 산출한 92톤의 수요를 고려하였을 때, 톤당 소재 단가를 기반한 대량생산 공정을 구축하는 것이 가능하며, 이에 따른 생산품 가격을 산출하였다.

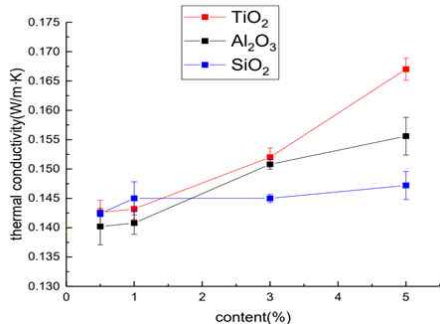
아래 표에서 Alibaba 거래가 기준 톤 당 재료 단가를 고려하여 계산하였을 때, 기존 5,000,0000/톤의 윤활유는 5,536,880원으로 약 10 %의 가격상승이 예상된다.

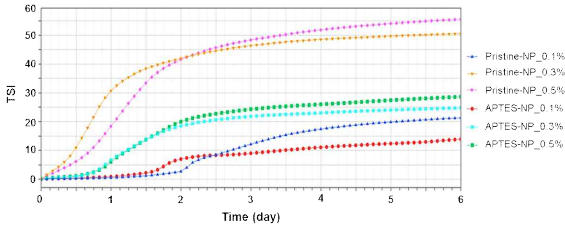
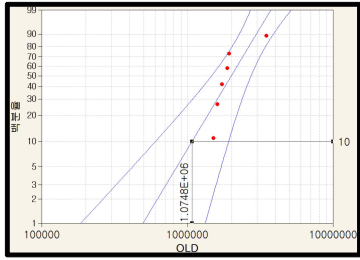
표 3-6-2. 성과품 상용화 제품단가 산출

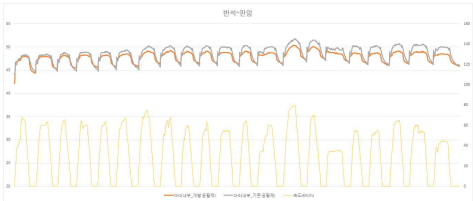
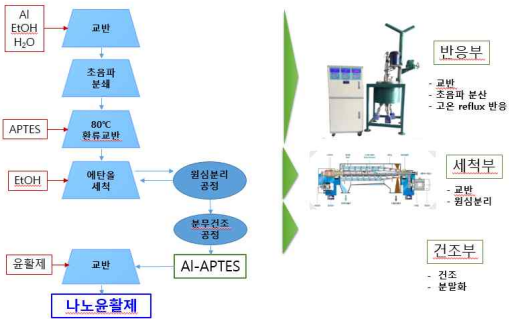
chemical	amount/batch	Pilot	가격 (원)	단가	비고
nano alumina	5 g	4 kg	3,840	800\$/ton	
ethanol	100 mL	80 L	68,160	710\$/ton	Alibaba 공장단가 가격 참조
APTES	7.47 g	6 kg	38,880	5,400\$/ton	
Washing EtOH	600 mL	500 L	426,000	710\$/ton	
Lubricant	1.26 L	1,000 L	5,000,000	10만원 /20 L	
계			5,536,880		1\$=1,200원 환산

4. 연구 목표 달성도

성과목표	성과지표	추진실적	달성율
나노유체 유회제 제조기술 개발	나노유체 유회제 시작품 물성 검증 및 냉각특성 평가	- 나노입자별 분산도, 열전도도 등 성능 시험 수행 - 탄소나노입자 및 Al, Ti, Si 계열 금속 산화물의 분산성 등 물성 분석  (a) Al₂O₃-APTES 0.1 v%, d=184.8 nm (b) TiO₂-APTES 0.1 v%, d=732.5 nm (c) SiO₂-APTES 0.1 v%, d=244.3 nm - 고농도 나노유회제 열전도성 정밀분석을 위한 유체 열전도도 분석시스템 구축  - 성능 및 비용, 공정효율성을 고려하여 나노알루미나 선정 - 나노입자 표면 처리 및 다양한 조성의 나노유체 유회제 제조 - Al₂O₃의 표면을 APTES로 표면처리하여 기유와의 분산성을 높임 - APTES 표면처리 여부를 열분석 및 전자현미경 기법을 이용하여 정량, 정성적으로 분석하였음 - 다양한 조성의 (0.1-0.5 vol%) 나노입자를 포함하는 나노유체 유회제 제조  (a) TGA plot showing Weight (%) vs Temperature (°C) for Pristine-NP and APTES-NP. (b) SEM image of nanoparticles. (c) EDS map showing Al, O, Si, and C.	100%

		- 나노입자 함유농도에 따른 유체 열전도성 평가 - 나노입자에 따라 나노유허제 열전도도가 증가하는 것을 확인하였으며, TiO_2의 경우 약 20% @ 5 vol%, Al_2O_3의 경우 약 20% @ 7 vol%의 열전도도 향상 달성 																															
	나노유체 유허제 점도 제어	- ASTM D445 기법을 이용한 유허제 동점도 측정 - 유허제의 점도는 온도에 따라 많이 변화함 - 나노입자를 포함하는 유허제 제조 시, 기유로 사용한 유허제와 유사한 점도지수 나타냄 - 동점도 목표치인 300cSt@40°C, 30cSt @100°C을 충족하는 유허제 제조하였음 - 실제 측정값은 71~74cSt@40°C, 9~10cSt @100°C 수준임 <table border="1" data-bbox="790 1261 1362 1489"><thead><tr><th>Type of Nanoparticles</th><th>Contents of Nanoparticle (vol%)</th><th>Kinematic Viscosity @40°C (cSt)</th><th>Kinematic Viscosity @100°C (cSt)</th><th>Viscosity Index</th></tr></thead><tbody><tr><td>None (Bare Spirax EP 80W)</td><td>0</td><td>71.07</td><td>9.32</td><td>108</td></tr><tr><td>Pristine-NP</td><td>0.1</td><td>72.24</td><td>9.43</td><td>108</td></tr><tr><td>Pristine-NP</td><td>0.3</td><td>74.21</td><td>9.74</td><td>110</td></tr><tr><td>APTES-NP</td><td>0.1</td><td>71.37</td><td>9.45</td><td>110</td></tr><tr><td>APTES-NP</td><td>0.3</td><td>72.61</td><td>9.54</td><td>109</td></tr></tbody></table>	Type of Nanoparticles	Contents of Nanoparticle (vol%)	Kinematic Viscosity @40°C (cSt)	Kinematic Viscosity @100°C (cSt)	Viscosity Index	None (Bare Spirax EP 80W)	0	71.07	9.32	108	Pristine-NP	0.1	72.24	9.43	108	Pristine-NP	0.3	74.21	9.74	110	APTES-NP	0.1	71.37	9.45	110	APTES-NP	0.3	72.61	9.54	109	100%
Type of Nanoparticles	Contents of Nanoparticle (vol%)	Kinematic Viscosity @40°C (cSt)	Kinematic Viscosity @100°C (cSt)	Viscosity Index																													
None (Bare Spirax EP 80W)	0	71.07	9.32	108																													
Pristine-NP	0.1	72.24	9.43	108																													
Pristine-NP	0.3	74.21	9.74	110																													
APTES-NP	0.1	71.37	9.45	110																													
APTES-NP	0.3	72.61	9.54	109																													
	나노유체 분산 장기안정성	- 분산안정도 (TSI) 30 이하 달성 - 장기 분산안정성 평가 - Turbiscan-AGS를 이용한 장기 분산안정성 평가함 - 투과도와 산란도를 동시에 측정하여 나노입자의 침전 및 응집현상을 분석 - 투과도와 산란도의 누적값을 이용하여 Turbiscan Stability Index (TSI) 값을 측정하였음																															

		· 표면처리 한 나노입자 사용 시 TSI 값이 모두 30 이하로 측정된 반면, 표면처리 하지 않은 입자를 사용할 경우, 0.3 vol% 이상의 조성부터 TSI 값이 30을 넘는 것을 확인하였음 · 나노입자 표면처리가 장기분산안정성에 매우 큰 영향을 미치는 것을 확인하였음 	
나노유체 윤활제 부품단위 성능검증	· 기존 윤활제 대비 나노유체 윤활제 마모 및 냉각특성 개선	· 나노유체 윤활제 윤활성능 평가용 RCF 시험장치 및 베어링 쉘링 시험기 제작  · 부품단위 시험결과 마모율 40% 향상달성 · 평균수명 2.6배, L10수명 1.3배 달성  · RCF 시험중 시간에 따른 온도변화 데이터 분석 결과 나노윤활제는 기존윤활제 대비 약 26.8 %의 온도저감 효과 확인 	100%

나노유체 윤활제 현차적용 시험	• 현차적용 적용에 따른 윤활제 거동 및 적용성 검증	• 실제 운영중인 대전도시철도 전동차량 내 기존 윤활제 신유 및 개발품 나노윤활제 동시 주입 후 3개월 운행시험  – 기존윤활제 대비 냉각성능 향상으로 추정되는 기어박스 온도상승 둔화 확인 	100%
나노윤활제 대량제조 공정 효율화 방안	• 대량생산성 적합성 검토	• 재료 공급 용이성 및 생산비용을 고려하여 알루미나 기반 나노윤활제 선정 – 공장공급 단가를 기준으로 나노윤활제의 경우 기존 윤활제 대비 톤당 약 110%의 가격 형성 가능 – 수명을 고려하여 경제적 타당성 입증 	100%

5. 연구개발성과의 활용 계획

< 활용계획 >

- 기존 고속철도 및 도시철도 차량용 기어박스 윤활제 대체 기술로 활용
 - 나노유체 윤활제의 기계적 성능 및 수명향상으로 인한 철도차량의 운행효율 향상, 유지 보수 비용 저감 효과
- 다양한 기계류 윤활제 성능향상을 위한 나노유체 윤활제 연구 확대
 - 나노유체 기반 윤활제 제조기술의 핵심기술을 응용하여 타 산업분야 (윤활제 및 베어링 제조)로의 기술파급 및 성과확산 가능
- 나노유체 기반 윤활제 제조기술의 윤활제 제조 및 철도차량용 베어링 관련 업체로의 기술이전
 - 일반철도용 베어링의 경우, 국내 기업에서 개발 후 성능 검증 중이며, 고속철도용 베어링은 국가 R&D 개발 검토 중
 - 철도 차량용 베어링의 국산화 시 베어링 신뢰성 및 수명 향상을 위한 기술 제시 가능
- 소재 및 제조기술, 부품단위 및 현차시험 결과 등을 토대로 국내 상용화 후 해외시장 진출 추진
 - Global Industry Analysts, Inc. 에 따르면 2018년 전 세계 베어링 시장의 규모가 1010 억 달러에 달할 것으로 예상
- 윤활성능과 마모저감에 효과가 뛰어난 새로운 윤활제 추가 개발
 - 현단계의 개발 윤활제는 경제성있는 알루미늄 나노 입자를 사용하였으나 상업적인 용도로 사용하기 위해서는 추가적인 물성 향상과 기타 첨가제와의 최적합 윤활제 개발이 요구된다. 또한 이의 대량 생산 기술의 개발이 요구된다

< 기대효과 >

- 기술적 및 산업적 측면
 - 기존 윤활제 내 나노입자의 분산에 따른 회전기기 윤활 표면에서의 마찰 (Friction) 감소 및 열전도도율 증가
 - 나노유체 기반 윤활제 제조기술 개발을 통한 기술 선점 및 수입대체 효과 발생 가능
 - 회전기기의 사용주기 연장에 따른 유지보수비용 절감 가능
 - 나노유체 기반 윤활제 제조기술의 핵심기술을 응용하여 타 산업분야 (윤활제 및 베어링 제조)로의 기술파급 및 성과확산 가능
- 나노합성 유체윤활제 개발을 통한 선도 기술 확보로 국내 산업 수출 증대
 - 세계 윤활유 시장은 약 1,260,000 억 (2014년 기준), 연평균 5.4 % 성장
 - 윤활유 분야 중 윤활그리스 (베어링용 윤활제 등) 분야 약 2.7% 차지 (약 35 ,000 억)
 - 국내 윤활유 수요량 약 1,043,957 kL (2016년 기준)으로, 경제성장률과 연동하여 증가

- 철도 차량의 경제적 운영을 위한 부품 국산화 연구에 따른 철도 부품 국가 R&D 추진 방향과 부합하여, 베어링 윤활제 기술의 국산화 기대
- 나노합성 유체 윤활제 개발을 통한 철도 차량 베어링 수명 연장에 따른 유지보수 비용 절감
 - 철도 차량 회전기기 구매 비용 중 베어링 13 % 차지 (1량 기준)
 - ※ 회전기기 가격별 베어링 차지 비율: 견인전동기: 15 %, 차축감속기: 10 %

6. 참고문헌

- [1] S. M. Sohel Murshed, C. A. Nieto de Castro (2014) Nanofluids: Synthesis, properties and application, *Nanotechnology Science and Technology*.
- [2] Luis A. S. A. Prado, Montira Sriyai Marcos Ghislandi, Ana Barros-Timmons, Karl Schulte (2010) Surface modification of alumina nanoparticles with silane coupling agent, *Journal of the Brazilian Chemical Society*, **21**(12), pp. 2238-2245.
- [3] K.Y. Leong, K. Z. Ku Ahmad, Hwai Chyuan Ong, M. J. Ghazali, Azizah Baharum (2017) Synthesis and thermal conductivity characteristic of hybrid nanofluids-A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **75**, pp. 868-878.
- [4] Anuj Kumar Sharma, Arun Kumar Tiwari, Amit Rai Dixit (2016) Rheological behaviour of nanofluids: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **53**, pp. 779-901.
- [5] <http://www.klueber.com>.
- [6] 공석일 (2017) 국내 철도 기술 경쟁력을 향상시켜 주는 특수 윤활 솔루션, *철도저널*, **20**(5), pp. 28-33.
- [6] 한국철도기술연구원 (2014) 고속열차용 감속기 모니터링 시스템 기술개발 연구보고서.
- [7] <http://www.lubchem.com>.
- [8] <http://www.apnano.com/products/nanolub-de-s4100-classic-diesel-engine-oil-additive/>.
- [9] Lube-Tech (2011) *The european lubricants industry magazine*.
- [10] 이동형, 권석진, 박병수, 조덕영, 김진우 (2013) 고속열차용 감속기 모니터링 시스템 개발, *한국정밀공학회지 학술발표대회논문집*, **30**(7), pp. 667-672.
- [11] 김경한, 이태훈, 김학수, 서영진, 고형근 (2011) 전동차용 Driving gear unit의 윤활유량 선정에 관한 연구, *한국철도학회 학술발표대회논문집*, pp. 132-137.
- [12] 윤창석, 오대산, 김현준 (2018) 카본 나노튜브 및 알루미늄 첨가제가 윤활 및 마모특성에 미치는 영향에 대한 연구, *윤활학회지*, **33**(5), pp. 220-227.
- [13] Microfluidics based microsystems, pp.139-162.
- [14] R. Saidur, K.Y. Leong, H.A. Nohammad (2011) A review on applications and challenges of nanofluids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, pp. 1646-1668.
- [15] E. Ettefaghi, H. Ahmadi, A. Rashidi, A. Nouralishahi, et al. (2013) Preparation and thermal properties of oil-based nanofluid from multi-walled carbon nanotubes and engine oil as nano-lubricant, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **46**, pp. 142-147.
- [16] S. Mukherjee, S. Paria, (2013) Preparation and stability of nanofluids-A Review, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, **9**(2), pp. 63-69.
- [17] K.S. Lee, K.A. Lee, J.S. Lee, H.Y. Lee, , et al. (2012) Experimental study on dispersion and thermal properties of nanofluids based on POE oil, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, **32**(3), pp. 170-177.

- [18] A. Ghadimi, I. H. Metselaar (2013) The influence of surfactant and ultrasonic procession on improvement of stability, thermal conductivity and viscosity of titania nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 51, pp. 1-9.
- [19] W. Yu, H. Xie (2012) A review on nanofluids: preparation, stability mechanism, and applications, *Journal of Nanomaterials*, 435873 (17 pages).
- [20] M.K.A. Ali, H. Xianjun (2015) Improving the tribological behavior of internal combustion engines via the addition of nanoparticles to engine oils, *Nanotechnology Review*, 4(4), pp. 347-358.
- [21] S. Senthilraja, M. Karthikeyan, R. Gangadevi, (2010) Nanofluid applications in future automobiles: Comprehensive review of existing data, *Nano-Micro Letters*, 2(4), pp. 306-310.
- [22] T. M. Duc, T. T. Long, N. T. Bao (2017) Performance of Al₂O₃ nanofluids in minimum quantity lubrication in hard milling of 60Si2Mn steel using cemented carbide tools, *Advances in Mechanical Engineering*, 9(7), pp. 1-9.
- [23] K.K. Joshi, R.K. Behara, Anurag (2018) Effect of minimum quantity lubrication with Al₂O₃ Nanofluid on Surface Roughness and its prediction using hybrid fuzzy controller in turning operation of Inconel 600, *Materialstoday: Proceedings*, 5, pp. 20660-20668.
- [24] X. Zhang, C. Li, Y. Zhang, D. Jia, B. Li, Y. Wang, M. Yang, Y. Hou, X. Zhang (2016) Performances of Al₂O₃/SiC hybrid nanofluids in minimum-quantity lubrication grinding, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(9), pp. 3427-3441.
- [25] M.F. Zawrah, R.M. Khattab, L.G. Girgis, H. El Daidamony, R. E. A. Aziz, (2016) Stability and electrical conductivity of water-base Al₂O₃ nanofluids for different applications, *HBRC Journal*, 12, pp. 227-234.
- [26] L. Kong, J. Sun, Y. Bao (2017) Preparation, characterization and tribological mechanism of nanofluids, *RSC Advances*, 7, pp. 12599- 12609.
- [27] G.H.B. Davis, A.J. Blackwood (1931) Improved Parffin-Base Lubricating Oils, *Industrial and Engineering Chemistry*, 23(12) pp. 1452-1458.
- [28] Y.-H. Lien, T.-M. Wu (2008) Preparation and characterization of thermosensitive polymers grafted onto silica-coated iron oxide nanoparticles, *Journal of Colloid and Interface Science*, 326(2), pp. 517-521.
- [29] A. Khabibullin, K. Bhangaonkar, C. Mahoney, Z. Lu, et al. (2016) Grafting PMMA Brushes from α -Alumina Nanoparticles via SIATRP, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(8), pp. 5458-5465.
- [30] J. Xiang, P. Zhu, Y. Masuda, K. Koumoto (2004) Fabrication of Self-Assembled Monolayers (SAMs) and Inorganic Micropattern on Flexible Polymer Substrate, *Langmuir* 20(8), pp. 3278-3283.
- [31] S. Kim, T. Ha, S. Yoo, J. W. Ka, et al. (2017) Metal-oxide assisted surface treatment of polyimide gate insulator for high performance organic thin-film transistors, *Physical Chemistry Chemical Physics* 19, pp. 15521-15529.

- [32] M. Wåhlander, F. Nilsson, E. Larsson, W.-C. Tsai, et al. (2014) Polymer-grafted Al₂O₃-nanoparticles for controlled dispersion in poly(ethylene-co-butyl acrylate) nanocomposites, *Polymer* 55, pp. 2125-2138.
- [33] A. Kim, Y. Jo, J. C. Won, Y. Choi, et al. (2015) Site-Selective Multi-Stacked Assembly of Silver Nanoparticles on Amine-Functionalized Printed Patterns, *Advanced Materials Interfaces* 2, pp. 1500129.
- [34] X. Zeng, G. Xu, Y. Gao, Y. An, (2011) Surface Wettability of (3-Aminopropyl)triethoxysilane Self-Assembled Monolayers, *The Journal of Physical Chemistry B* 115(3), pp. 450-454.
- [35] W. Al-Shatty, A. M. Lord, S. Alexander, A. R. Barron, (2013) Tunable Surface Properties of Aluminum Oxide Nanoparticles from Highly Hydrophobic to Highly Hydrophilic, *ACS Omega*, 2(6), pp. 2507-2514.
- [36] www.epc.shell.com/documentRetrieve.asp?documentId=118127836
- [37] www.formulaction.com/en/stability-size/stability
- [38] T. Amann, C. Dold, A. Kailer (2013) Complex fluids in tribology to reduce friction: Mesogenic fluids, ionic liquids and ionic liquid crystals, *Tribology International*, 65, pp. 3-12.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.