

윤 활 품 질



# 윤활유장래의 품질개선 방향

중앙대학교  
교수 강용식

이 원고는 지난 12월4일 한국종합전시장대 회의실에서 있는 한국석유품질검사소 주최 석유제품 품질관리세미나에서 행한 주제발표 내용임(편집자주)

근년 트라이볼로지의 분야에서는 극한 환경하에서의 기기의 고성능화나 고효율화를 꾀하기 위해서 현상기술의 개량이나 새기술의 개발이 활발해지고 있다.

그 목적을 달성하기 위해서 가혹한 환경, 작동조건에 있어서의 트라이볼로지 기술의 확립이 불가결하다.

환경조건으로는 온도, 압력, 분위기등이 또 작동조건으로는 속도, 하중, 점동형태, 접촉형태등이 있다. 극한환경하라 하면 곧 우주환경을 연상하게 되나, 거기에서는 거의 모든 경우에 고체윤활제가 유일하게 쓰이고 있다. 윤활유로는 인공위성등에 퍼플로오알킬폴리에테르(PFPE)가 쓰이고 있을 정도이다.

따라서 여기서는 일반산업기계, 항공기 또는 자동차에 쓰이는 기계 요소에 대해서 가혹한 환경, 작동조건에서는 현재 어떠한 윤활유가 쓰이고 있는가를 살펴보고, 또 장래 윤활유가 어디까지 쓸수가 있을 것인가에 대해서 전망해 본다.

## 1. 온도조건

온도조건은 트라이볼로지 기술이 흔히 부닥치는 가장 중요한 문제이며, 윤활유가 액체이기 때문에 직면하게 되는 큰 벽이기도 하다. 큰 벽이란 고온의 경우에는 점도, 증기압 또는 열산화안

정성의 문제이며, 저온의 경우에는 점도(유동점)이다.

### ① 고온

고온영역에서는 광유계 윤활유의 사용온도한계가 약 150~160℃이기 때문에 그 이상의 가혹한 조건에서는 통상 합성윤활유가 쓰인다.

표1에 합성윤활유의 고온에 있어서의 사용한계를 실었다. 고온윤활유가 필요한 대표적예는 단열다이젤엔진이나, 가스터빈엔진이다. 예컨대 단열다이젤엔진의 경우에는 톱링의 배면온도

〈표1〉 합성윤활유의 고온사용한계 (단위 :℃)

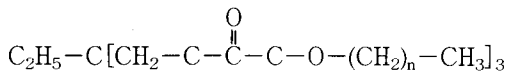
합 성 윤 활 유	열안정성	산화안정성
디-2-에틸헥실세바케이트	285	205
디-이소-옥틸아디베이트	285	205
C <sub>4</sub> -C <sub>10</sub> 펜타에리트리테스테르	330	240
트리메틸프로판에스테르	330	240
복합에스테르	330	250
염소화디페닐	315	140
프로오로카이본	300	280
폴리글리콜	200	200
디메틸실리콘	240	220
페닐메틸실리콘	300	260
클로로페닐메틸실리콘	300	230
트리플루오로프로필실리콘	320	260
폴리페닐에테르	500	350
규산에스테르	300	200
퍼플루오로폴리에테르	350	350

가 400°C 이상이 되고, 또 크랭크케이스의 온도도 200°C 가까이 도달한다. 그 때문에 폴리올에테르, 폴리페닐에테르, PFPE등이 검토되고 있다.

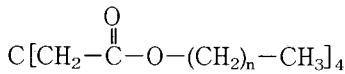
그림1에 폴리올에스테르의 화학구조를 실었다. 폴리올에스테르는 톱링의 배면온도를 340°C까지는 쓸수가 있다.

펜타에리트리톨(PE) 에스테르나 트리메틸올프로판(TMP) 에스테르로 대표되는 폴리올에스테르는 에스테르의 쇠길이가 길어짐에 따라서 산화안정성이 낮아진다(그림2).

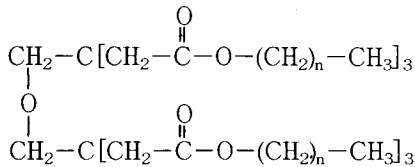
그림1에 실은 3종류의 폴리올에스테르의 산화안정성을 같은 점도(SAE 30)의 것과 비교해 보면, 에스테르의 쇠의 길이의 관계에서 아래와 같이 될것이 추정된다.



(a) TMP 에스테르



(b) PE 에스테르

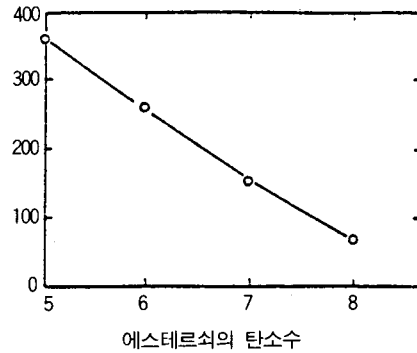


(c) DiPE 에스테르

〈그림1〉 폴리올에스테르의 화학구조

DiPE 에스테르>PE에스테르>TMP에스테르 즉 디펜타에리트리톨에스테르가 가장 산화안정성의 점에서 우수하다. 단기통 디젤엔진을 사용한 시험(유온 149°C, 실린더벽의 온도 288°C, 20hr.)에서는 PE에스테르계 엔진유의 경우에 브로우바이가스가 많고, 링교착을 일으킨데 대해서 DiPE에스테르계 엔진유의 경우에는 침전물이 대단히 적고, 완전히 문제가 없는 수준이었다. 이 결과에 의해서 미국육군은 단

유도시간, min:



〈그림2〉 PE에스테르의 산화안정성과 에스테르 쇠장의 관계

열엔진(low heat rejection diesel engine)에 DiPE에스테르계 엔진유를 쓰고 있다. 폴리페닐에테르나, PFPE는 폴리올에스테르와 비교해서 산화안정성이 우수하다. 그러나 생산량이 적고, 또 값이 비싼 것이 장해가 되고 있다. 장래톱링 배면온도는 500°C 유온 250°C가 목표가 되고 있으며, 특히 PFPE가 그것에 가까운 윤활유로서 주목되고 있다.

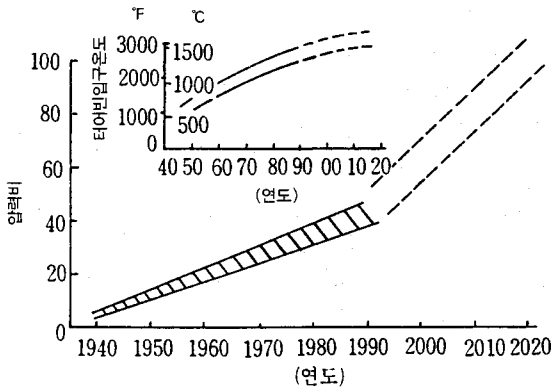
항공기용 가스터빈의 경우에는 고온조건은 대단히 가혹하다. 표2에 순항속도와 윤활계통의 온도의 관계를 나타낸다. 마하2.2에서 윤활유온도가 상당히 높아지는 것을 알 수가 있다.

터빈유로 최초로 채용된 것은 타입 1이라 불리우는 디옥틸세바케이트, 디이소옥틸세바케이트, 디노닐아디페이트등의 디에스테르이다. 그러나 디에스테르는 점도가 낮기(3cSt @100°C)때문에 고부하의 감속기어 등에서 내하중능이 부족한 것을 알게 되어, 복합에스테르나 폴리글리콜을 가한 7, 5cSt의 것도 쓰이게 되었다.

그후 가스터빈유에 대한 열부하의 증대나, 오일교환 인터벌의 연장 등에 대처하기 위해서 타입2라 불리우는 5cSt의 폴리올에스테르(PE나 TMP의 에스테르)가 쓰이게 되었다. 이들의 에스테르계 합성윤활유에는 산화방지제, 극

〈표2〉 순항속도와 윤활계통의 온도

순항속도, M(마하)	0.9	2.2	3.0
윤활유 온도(°C)	150	180	260
베어링봉밀실공기온도(°C)	260	250	540
베어링 온도(°C)	260	260	320
배출유 온도(°C)	200	290	330



〈그림3〉 엔진압력비 및 터빈 입구온도의 경향

압제, 부식방지제 소포제가 약 5% 첨가되어 있다. 그 결과 200°C의 조건에서도 안정하다.

1985년 이후가 되어 생년비(省燃費)가 중요 과제가 되어 엔진은 보다 고온, 고압력비의 방향으로 진행되고 있다. 가스터빈엔진의 열효율은 싸이클압력비와 터빈 입구온도의 함수이며, 그림3에 나타내듯이 압력비는 민간수송기용 고바이패스 터보팬엔진으로 35에 달하고 있다.

21세기에는 약 50에 접근할 전망이다.

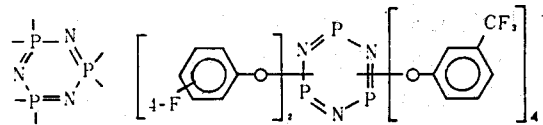
또 터빈 입구온도도 상승경향을 취하고 있으며 전투기용 엔진에서 1500°C가 된다. 이것도 21세기에는 1700°C가 될 전망이다. 그 결과 베어링 온도의 상승에 따르는 가스터빈유의 탄화가 염려가 되고 있다. 그 때문에 타입 3이라 불리우는 장래의 윤활유가 검토되고 있다.

최초로 폴리페닐에테르가 300°C의 고온에서도 쓸수 있다는 것이 주목되었으나, 저온유통성이 나쁘기 때문에 채용될 가능성이 적다. 표3

〈표3〉 타입 3후보유의 성능

합성윤활유	산화안정성 (250°C)	부식방지성	유동점(°C)
폴리페닐에테르	◎	◎	-7
폴리페닐에테르(알콕시)	○	◎	-30
폴리페닐에테르(플로오르)	◎	×	-30
플로오로에스테르	△	×	-30
플로오로에테르	◎	×	-40
실리콘(메틸)	○	◎	<-40
실리콘(아릴, 알콕시)	◎	◎	<-40
실리콘(플로오르)	◎	×	<-40
폴리올에스테르(첨가제함유)	△	××	-54

◎최량, ○양, △보통, ×떨어짐, ××불량.



(a) 시클로트리포스파젠

(b) X-1P

〈그림 4〉 시클로트리포스파젠과 그의 유도체

에 타입 3의 후보유의 성능특성을 나타낸다.

이 외에 1, 3, 5-트리노르마르알킬벤젠이 열산화안정성이나, 윤활성의 점에서 우수하다는 보고도 있다. 또 시클로트리포스파젠도 열산화안정성이 좋은 것과, 휘발성이 낮은 것으로 해서 검토가 추진되고 있다. 그림 4에 시클로트리포스파젠 및 그의 유도체의 구조를 나타낸다. 알킬, 알콕시, 치환체에 비해서 아릴, 아릴옥시 치환 시클로포스파젠은 열산화안정성이 우수하고, 휘발성도 낮다. 표 4에 CF<sub>3</sub>이나 F로 치환된 아릴옥시시클로트리포스파젠(X-1P)과 5P4E 폴리페닐에테르의 성능비교를 나타낸다.

PDSC(Pressure Differential Scanning Calorimetry)에 의한 산화안정성의 평가에서는 X-1P는 381°C에서 산화가 되는데에 대해서 5P4E는 429°C이며 약 50°C의 메리트가 있다. 또 유동점은 5P4E의 경우 +5°C로 높은데 대해

〈표4〉 시클로트리포스파젠과 폴리페닐에테르의 성능비교

합성윤활유		X-1P	5P4E
동점도(40℃)	cSt	312	240
(100℃)	cSt	15.6	14.8
유동점	℃	-15	+5
산화온도(PDSC)	℃	429	381
10% 증발온도(TGA)	℃	314	326
4구시험, °M50강	45N	0.68	1.65
mm	135N	0.79	72.00
	NC132	0.92	0.79
	135N	1.20	1.83

※1200rpm, 300℃, 1hr

서 X-1P는 -15℃이다. 유동점에 관해서는 치환기를 변화시킴으로서 -30℃까지 내릴수가 있다. 휘발성은 X-1P의 경우는 5P4E와 대체로 같다.

한편 4구시험에 의한 내마모성의 평가에서는 가스터어빈 주축의 로울러베어링에 쓰이고 있는 M-50강의 경우는 X-1P쪽이 좋다.

또 내열성이 좋으므로 베어링재료로서 개발이 추진되고 있는 질화규소(WC 132)의 경우는 5P4E에 비해서 약간 좋다.

아릴옥시시클로트리포스파젠은 마모방지제로서도 우수하며 표5에 나타내듯이 펜타에리트리톨에 1~5% 첨가하므로 4구시험에 있어서의 마모를 반감할 수가 있다.

〈표5〉 아릴옥시시클로트리 포스파젠에의 마모 방지효과(기유: PET 에스테르)

첨가량Wt(%)	마모흔경 mm	마찰계수
0	0.99	0.10
1	0.43	0.06
5	0.42	0.06
10	0.48	0.05
100	0.78	0.11

4구시험: AISI E-52100강구, 1200rpm, 535N, 200℃, 1hr

이 외에 항공기의 레이다나 미사일시스템의 절연유, 쿠우란트로서 고온안정성이나 저온유동성이 우수하고, 점도지수가 큰 규산에스테르가 쓰이고 있다. 그러나 규산에스테르는 가수분해에 의해서 알콜이 생성해서 화제를 유발하던가, 제라틴상의 침전물이 필터를 막히게 하는 문제가 있다. 이 문제를 해결하는 방법으로서 Si-알콕시 결합이 없는 폴리실옥산이나 실라탄화수소가 검토되고 있다.

산업기계의 분야에서도 고온용 윤활유의 요구는 있다. 예컨대 제지기계의 스워밍로울의 경우, 표면온도를 윤활유로 높이는 방식을 취한 것도 있다. 로울의 표면온도를 150℃ 이상으로 상승시키기 위해서는 베어링, 유압, 기어 겸용유의 유온을 200℃ 가까이까지 높일 필요가 있다. 그때문에 고점도의 폴리글리콜계 합성윤활유가 쓰이고 있다.

② 저온

항공기용 가스터어빈유의 경우, 저온성능도 중요하다. 극저온에 있어서의 펌프의 시동성이 문제가 되기 때문에, 미군에서는 -54℃에 있어서의 시동성을 증시하여 타입 1의 디에스테르의 경우 3cSt인 것만이 인정되어, -54℃의 저온 점도규격을 1700cSt이하로 하고 있다.

저온조건이 가혹한 예로서 남극이나, 알라스카등의 극한지가 있다. 거기에서 사용하는 설상차등의 엔진유나 기어유에는 합성윤활유가 쓰이고 있다. 예컨대 남극에서는 유동점이 -60℃ 정도의 합성계 기어유가 채용되고 있다.

2. 압력조건

압력조건에는 고압과 저압(고진공)이 있다.

① 고압

윤활유가 고압환경하에서 쓰이는 대표예로는 유압작동유가 있다. 유압펌프의 출력은 압력과 유량의 곱이며, 각분야에서 고출력밀도화(단위중량당의 출력향상)를 위해서 펌프의 고압화가 추진되고 있다. 예컨대 유압삼에서는 현재 이미

유압시스템의 압력이 35~42MPa의 것이 등장하고 있다. 건설기계나 산업기계에 쓰이는 유압작동유는 거의가 광유계이다.

그러나 장래 더욱 고압화가 진행되면 윤활유의 수명이 문제가 될 가능성도 나타나고 있다. 그러한 경우에는 난연성이라는 관점 이외에서 합성윤활유의 채용이 검토되고 있는 것으로 생각이 된다. 항공기의 유압시스템에서는 합성계 작동유가 쓰이고 있다. 예컨대 제트여객기의 경우는 인산에스테르가 난연성이나 저온유동성이 우수하므로 채용이 되고 있다.

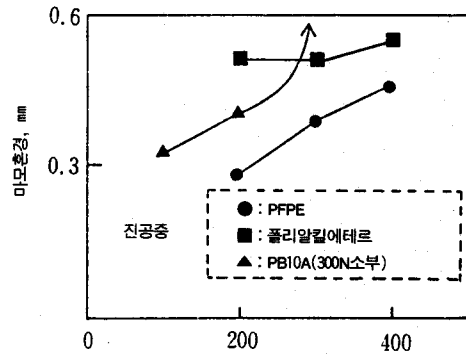
② 저압(고진공)

우주환경은  $10^{-5}$ Pa이하의 초고진공이기 때문에 쉽게 타불기가 발생하고, 더우기 윤활유는 증발하기 쉽다.

인공위성이나, 우주정거장의 경우, 구동기구의 베어링의 윤활에는 증기압이 낮고, 점도지수가 큰 PFPE가 쓰이고 있다.

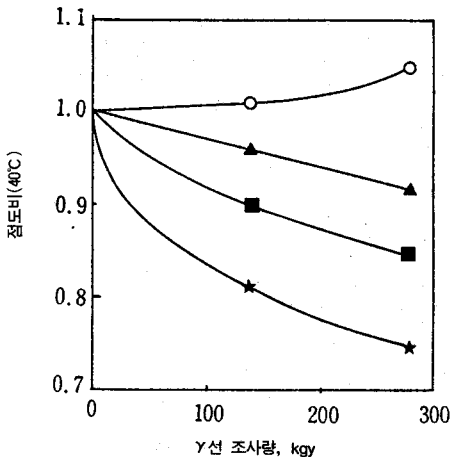
PFPE에는 실온에서 증기압이  $10^{-9}$ Pa이하의 것도 있다. 그러나 최근에는 PFPE의 내방사성, 장기간 진공중에서 접동한 경우의 물성의 안정성에 의문이 제기되고 있다. 즉 PFPE는 X선이

나,  $\gamma$ 선 조사에 의해서 분해해서 부식성의  $COF_2$ 가스등이 발생해서 또 그림5에 나타내듯이 가교반응에 의해서 점도가 느는 경우도 있다. 진공분위기( $1.3 \times 10^{-3}$ Pa)에서의 내마모성은 그림6에 나타내듯이 PFPE는 폴리알킬에테르나 폴리이소부텐(PB10A)에 비해서 우수하다. 그러나 장래에는 내방사성이 우수한 합성윤활유의 개발이 필요할 것이다.



(그림6) 진공중에서의 내마모성(4구시험 :  $1.3 \times 10^{-3}$ Pa, 100rpm, 30min)

- ★-( $CF_2CF_2O$ )<sub>m</sub>-( $CF_2O$ )<sub>n</sub>-
- ( $CF_2CF_2CF_2O$ )<sub>n</sub>-
- [ $CF(CF_2)CF_2O$ ]<sub>n</sub>-
- ▲-[ $CFCF_2CF_2O$ ]<sub>n</sub>-( $CF_2O$ )<sub>m</sub>-



(그림5)  $\gamma$ 선 흡수에 의한 PFPE의 점도변화

3. 분위기조건

분위기라 해도 다종다양하나 여기에서는 클린 환경과 냉매환경에 대해서 기술한다.

① 클린환경

정보기기는 클린환경하에서 구동하는 기구가 필요하게 된다. 또 그의 고성능화, 경량화가 진행됨에 따라서 마이크로트라이볼로지라 불리우는 극표면층에 있어서의 마찰, 마모가 중요하게 되었다.

정보기기의 윤활에는 기름증기에 의한 오염을 막기 위해서 증기압이 낮은 광유계, 실리콘계 및 불소계의 윤활유나 그리이스가 채용되고 있다. 특히 PFPE는 증기압이 낮기 때문에 넓은 온도영역에서 쓰이고 있다. 그러나 기름윤활의 결점은 장기간에 걸쳐서 기름을 윤활면에 공급하는

것이 어려운 것이다. 또 미소한 기계요소로 구성되는 마이크로메신의 경우 마모나 마찰력의 문제 또는 윤활유의 표면장력의 문제등 해결해야 할 문제가 많다.

② 냉매환경

지구환경보호를 목적으로 한 플레온규제에서는 급세기중에 특정플레온을 전폐하는 것으로 되어 있다. 그 때문에 차에어콘이나 가정용 전기냉장고에 쓰이고 있는 R-12(CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>)의 대체냉매로서 R-134a(CF<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>F)가 현재 검토되고 있다. R-134a는 염소원자를 함유하지 않고, 극성이 크며, 분자량이 작은등의 특징이 있다.

냉동기유에 필요한 성능으로서 냉매와의 상용성이 있으나, R-134a는 무극성의 광유, 폴리- $\alpha$ -올레핀, 알킬벤젠등에는 상용성이 없다. 따라서 차에어콘의 경우는 폴리알킬렌글리콜(PAG)이나 변성 PAG등이 검토되고 있다. 거기에서 문제가 되는 것은 상용성, 흡습성 및 콤파렉서의 접동부에 쓰고 있는 알루미늄제의 윤활이다. 표6에 나타내듯이 R-134a와 상용성이 있는 합성윤활유의 알루미늄제를 쓴 경우의 내마모성은 광유계 냉동기유에 비해서 뒤진다. 비교적 약호한 것은 에스테르계, PAG-Z(트리올)이다.

〈표6〉 각종 합성윤활유의 내마모성

기 유	Al블록마모, mg	
	대 기 중	R-134a중
에스테르계 1	9.8	9.3
에스테르계 2	9.5	9.6
에스테르계 3	2.5	2.4
PAG-1(모노올)	48.9	20.6
PAG-2(트리올)	14.5	8.0
변성PAG	46.7	20.9
폴리에테르변성실리콘	—	67.4
불소변성실리콘	—	71.8
나프텐계광유VG100	3.9	5.0*

\*R-12취입  
LFW-1형 시험기(60eb, 70°C, 1hr)

또 PAG-1의 경우 각종 마모방지제의 효과도 인정되지 않는다. R-134a용 냉동기유로서 급후에는 에스테르계등의 합성윤활유가 검토되어 갈 것으로 생각이 된다.

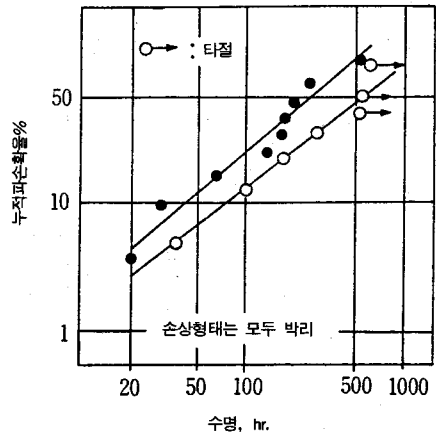
4. 속도조건

속도조건에는 고속과 저속이 있으나, 여기에서는 고속하에서의 트라이볼로지에 대해서 기술한다.

발전기의 용량증가에 따라서 증기터어빈용 미끄럼베어링은 지름이 커져가고 있다. 그 때문에 원주속도는 100m/s를 넘게 되어 베어링의 온도 상승이 문제가 되고 있다. 윤활유는 광유계의 터어빈유가 쓰이고 있으나, 베어링의 출구온도가 60°C 정도이기 때문에 수명에 대한 영향은 적다. 그러나 장래 원주속도가 보다 크게 되면 베어링 출구온도가 80°C로 설계되고 있는 광유계 가스터어빈유와 같은 고온대책이 이루어진 것이 쓰일 가능성이 있다.

항공기 가스터어빈용 로울러베어링의 경우는 dn값이 300~400만 정도이며, 장래 더욱 고속화 될 것으로 생각되고 있다.

그 때문에 내열성이 크고, 가벼운 세라믹베어링(질화규소)이 검토되고 있다.



〈그림7〉 굴음피로수명시험(5800N, 8000rpm, 70°C, 폴리에스테르)

폴리에스테르를 사용한 굴음피로시험에서는 그림7에 나타내듯이 종래의 M50계 볼베어링에 비해서 동등이상의 성능을 나타내고 있다.

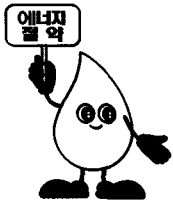
구동장치의 기어에서는 예컨대 일본의 신간센의 경우 유욕윤활이 채용되고 있으나 고속화에 따라서 150℃에서도 쓸 수가 있는 내열기어유의 개발이 추진되고 있다. 금후 이 분야에서도 합성윤활유가 쓰일 것으로 생각된다.

### 5. 고하중조건

고하중조건에서 작동하고 있는 기기의 대표예는 트랙손드라이브방식의 무단변속기이다. 트랙손드라이브는 화학공업장치에 있어서 변속기로 쓰여져 왔다. 트랙손드라이브의 경우에는 탄성유체윤활을 이용해서 동력을 전달한다. 따라서

0.7~4GPa라는 고접촉압에서 트랙손계수가 큰 윤활유가 필요하다. 이 목적에 합당한 윤활유로서는 나프텐계 광유, 알킬벤젠, 합성나프텐 등이 있다. 최근에는 자동차 변속기에의 응용이 검토되고 있으며, ATF정도의 저온유동성을 갖고, 고온영역에 있어서도 트랙손계수가 낮아지지 않는 합성윤활유의 개발이 추진되고 있다. 금세기 중에 등장할 것이, 예상되는 트랙손드라이브기구를 실은 자동차의 성능을 좌우하는 중요부품인 윤활유의 가일층의 성능향상이 요망된다.

극한환경하에 있어서의 트라이볼로지중에서 윤활유의 현상에 대해서 기술하였다. 그러나 윤활유가 쓰일 수 있는 영역은 극한환경에서부터 거리가 먼 것으로 생각이 된다. 그러나 윤활유의 궁극적인 물성이란 차원에서 생각해 보았다.



**에너지 절약을 생활화 합시다.**