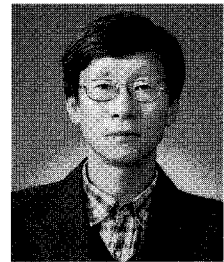


윤 활 연 구

그리스의 수명시험과 수명예측 기법



한국화학연구원
정근우 박사

1. 서론

그리스는 액체윤활유 즉 윤활기유에 증주제라고 부르는 미세한 고체를 분산시킨 후 용도에 따라 첨가제를 적절한 비율로 배합하여 만든 반고체상의 윤활제이다. 반고체상이라는 의미는 보통의 상태에서는 페이스트 상태로 취급할 때 느낌이 고체보다는 부드럽고 액체보다는 단단하여 어느 경우에는 고체로, 또 다른 경우에는 액상으로 작용하는 것이다. 즉 정지된 상태에서는 일정한 형태를 유지하면서 유동성이 없는 고체로서 존재하지만 격렬하게 움직이는 기계 내부에서는 연화되어 액체에 가깝게 된다. 이러한 성질을 이용하여 구름 베어링에 적용하면 베어링이 정지하여 있을 경우는 내부에 부착되어 흘러나오지 않지만 베어링이 회전하면서 전단을 받게 되면 거의 기유에 가까운 상태의 액상으로 변해 윤활작용을 한다. 다시 회전이 정지되면 고체상으로 바뀌면서 베어링에 부착하게 된다.

이와 같이 그리스도의 성능은 화학적인 안정성 이외에도 그리스 자체의 구조물리적 성질에 큰 영향을 받으며 특히 베어링 윤활에 있어서의 윤활수명은 베어링의 구조에 따라 달라지므로 그리스의 수

명평가는 주로 베어링에 장착된 상태로 평가되어 진다.

특히 자동차의 기술발전과 그리스 성능개선에 따라 최근 자동차용 그리스는 무교환을 목표로 하고 있다. 따라서 베어링이 윤활수명에 다다를 때까지 베어링 내부에 있는 그리스가 어떠한 화학적·물리적 변화를 겪는지를 아는 것은 그리스 수명을 예측하는 데 매우 중요하다.

본 해설에서는 그리스 수명시험을 수행하면서 베어링 내부의 그리스 시료를 채취하여 물성변화를 측정함으로써 그리스 수명을 화학적 방법으로 예측할 수 있는 방법론을 제시하고자 한다.

2. 그리스의 열화정도에 의한 수명예측 기법

그리스에 포함된 윤활기유 등의 물질은 온도가 상승함에 따라 열분해가 일어난다. 일반적으로 그리스는 상온에서도 장시간 보관하면 서서히 열화되지만 구동되는 기계의 경계면 사이에서 마찰열에 의한 온도상승이나 기계적 전단 등에 의해 산화되기 쉬운 환경에 놓이게 된다. 일반적으로 산화에 영향을 미치는 요인은 온도, 금속촉매, 산소

농도 등이 알려져 있으며 그 중에서도 특히 온도 상승에 의해 그리스의 열화속도가 빨라진다. 열화 속도(K)는 아래와 같은 아레니우스의 식으로 표현될 수 있다.

$$K = A \exp \{-E/RT\}$$

K = 열화속도 상수
 A = pre-exponential factor (constant)
 E = activation energy (cal/mol)
 R = gas constant (cal/deg mole)
 T = absolute temperature (K)

또한, 그리스의 수명은 열화속도에 반비례하므로 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\text{수명} \propto (1/A) \exp \{-E/RT\}$$

$$\log \{\text{수명}\} \propto C/T - \log A \quad (\because E/R \log e \equiv C)$$

즉, 온도가 높을수록 그리스의 열화속도는 빨라지고 수명은 상대적으로 짧아진다.

한편 그리스가 열화되면 유기산의 생성으로 인해 전산가(total acid value)가 증가하고 기유함량이 감소하여 그리스 중에 기유가 부족하게 되어 이유도가 증가하며 누설도 역시 증가하게 되므로 이러한 측정가능한 물성치를 측정함으로써 고장시간을 예측할 수 있으며 그리스의 수명은 이러한 물성치가 한계값을 나타낼 때의 시간으로 정의할 수 있다.

따라서 고장시간에 영향을 미치는 측정가능한 물성치로 전산가, 이유도, 누설도를 선정하여 이들의 한계치가 아래 표 1과 같이 되었을 때를 고장시간으로 가정하였다.

표 1 측정가능 물성치의 고장시간 한계치

측정가능 물성치	고장시간 한계치
전산가 변화량	초기값 +2mgKOH/g
이유도	초기값의 50%
누설도	초기값의 50%

온도를 달리하면서 베어링 수명시험을 수행하면서 전산가 변화, 이유도, 누설도 등의 물성치를 측정하고 이들의 한계치를 적용하면 일정온도에서의 고장시간을 평가할 수 있으므로 물성측정치를 사용하여 1/T에 대해 log(고장시간)을 plot 하게 되면 임의의 온도 (실제 사용 범위의 온도)에서 그리스의 고장시간을 예측할 수 있다.

3. 그리스 수명시험 및 결과

3. 1 수명시험 조건

그리스의 고장시간을 예측하기 위하여 ASTM D1741 ball bearing grease life test 시험방법을 이용하여 시험온도를 변화시켜가면서 그리스의 전산가(mgKOH/g), 이유도(%), 누설도(%) 변화를 측정한다. 시험조건은 표 2와 같다.

표 2 그리스 수명시험조건 (ASTM D1741)

그리스 봉입량, g	하중, N		회전속도, rpm	온도, °C	운전 조건	운전시간, h	고장의 판정
	라더알	엑시얼					
5.4 ± 0.1	221	178	3500	90~130	20h 운전 4h 정지	24~720	기동불능, 과전류, 온도상승, 소음 등

3. 2 수명 시험결과

수명시험결과 다음 표 3과 같은 결과를 얻었다.

표 3 수명시험 후 전산가, 이유도 및 누설도 측정값

Temp (°C) Exp Time(h)		90	100	110	120	130
		0	전산가 0.79	0.79	0.79	0.79
0	이유도	0	0	0	0	0
	누설도	0	0	0	0	0
	24	전산가 0.79	0.80	0.82	0.84	0.86
24	이유도	1.8	2.0	2.3	2.8	3.6
	누설도	0.9	1.0	1.5	2.0	2.8
	72	전산가 0.80	0.81	0.84	0.86	0.92
72	이유도	2.2	2.5	3.5	5.7	9.7
	누설도	1.3	1.5	2.0	3.8	7.6
	168	전산가 0.81	0.83	0.90	0.93	0.98
168	이유도	3.9	5.1	7.1	8.6	15.0
	누설도	2.5	2.8	4.2	7.9	15.8
	336	전산가 0.83	0.86	0.98	1.04	1.06
336	이유도	5.8	7.8	10.6	16.0	26.5
	누설도	3.2	5.2	8.2	14.6	26.5
	720	전산가 1.00	1.20	1.40	1.80	2.20
720	이유도	11.6	20.0	28.0	40.0	61.0
	누설도	6.4	14.2	23.0	36.0	53.0

3. 3 고장시간 예측

(1) 전산가 변화

표 3에서의 시험결과를 이용하여 시험온도 이외의 온도에서의 전산가 결과를 예측하기 위하여 시험결과를 시험시간 (x축)과 전산가값 (y축)을 plot하면 아래 그림 1과 같다.

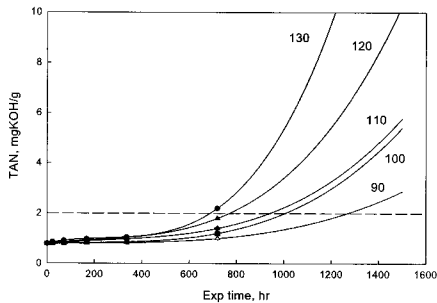


그림 1 수명시험 시간에 따른 전산가 변화

그림 1의 그래프로부터 시험온도에서의 fitting 그래프식은 다음과 같다.

at 90°C : $TAN = 0.79 + 0.00018 * \{exp\ time\} - 4.4 * 10^{-7} * \{exp\ time\}^2 + 8.3 * 10^{-10} * \{exp\ time\}^3$

at 100°C : $TAN = 0.79 + 0.00036 * \{exp\ time\} - 1.1 * 10^{-6} * \{exp\ time\}^2 + 1.96 * 10^{-9} * \{exp\ time\}^3$

at 110°C : $TAN = 0.79 + 0.00081 * \{exp\ time\} - 1.46 * 10^{-6} * \{exp\ time\}^2 + 2.09 * 10^{-9} * \{exp\ time\}^3$

at 120°C : $TAN = 0.80 + 0.00107 * \{exp\ time\} - 2.36 * 10^{-6} * \{exp\ time\}^2 + 3.90 * 10^{-9} * \{exp\ time\}^3$

at 130°C : $TAN = 0.80 + 0.00199 * \{exp\ time\} - 6.82 * 10^{-6} * \{exp\ time\}^2 + 9.38 * 10^{-9} * \{exp\ time\}^3$

시험온도에서 그리스의 고장시간을 예측하기 위하여 위에서의 fitting 그래프식을 이용하여 전산가의 한계값을 2로 하였을 때 그리스의 고장시간

을 예측하면 다음 표 4와 같다.

표 4 TAN의 한계값을 2로 하였을 때 예상
고장시간

온도	90 (2.76)*	100 (2.68)	110 (2.61)	120 (2.55)	130 (2.48)
수명, h	1265	1003	940	769	688
log{고장 시간}	3.102	3.001	2.973	2.886	2.838

* ()안은 1/T, °K x 10³

표 3에서 결과를 사용하여 시험온도를 제외한 임의의 온도에서 고장시간을 예측하기 위하여 log {고장시간} (y축) 과 1/T (x축)을 plot하면 다음 그림 2와 같다.

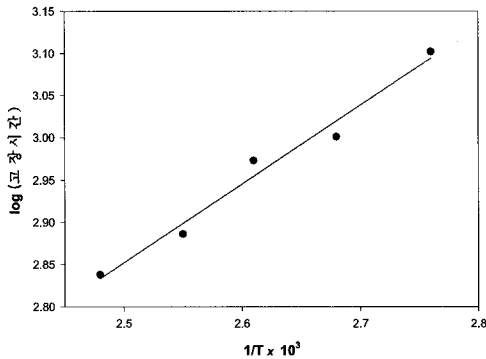


그림 2 전산가 측정치로부터 예측된 log{고장시간}
그래프

위의 그래프로부터 TAN의 한계값이 2로 가정 하는 경우 $\log \{ \text{고장시간} \} = 0.52 + 932/T$ 이고 $\{ \text{고장시간} \} = 10^{(0.52+932/T)}$ 이 된다.

(2) 이유도 변화

표 3에서의 이유도 시험 결과를 이용하여 시험 온도 이외에서의 이유도 결과를 예측하기 위하여 시험결과를 시험시간 (x축)과 이유도 측정치 (y

축)을 plot하면 아래 그림 3과 같다.

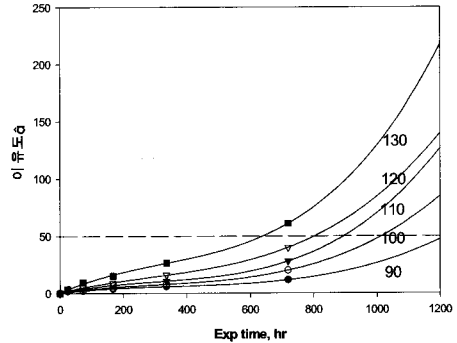


그림 3 수명시험 시간에 따른 이유도 변화

위의 그래프로부터 시험온도에서의 fitting 그래프식은 다음과 같다.

- at 90 °C : $\text{이유도} = 0.46 + 0.030 * \{ \text{exp time} \} - 6.2 * 10^{-5} * \{ \text{exp time} \}^2 + 5.8 * 10^{-8} * \{ \text{exp time} \}^3$
- at 100 °C : $\text{이유도} = 0.41 + 0.039 * \{ \text{exp time} \} - 7.9 * 10^{-5} * \{ \text{exp time} \}^2 + 8.8 * 10^{-8} * \{ \text{exp time} \}^3$
- at 110 °C : $\text{이유도} = 0.36 + 0.057 * \{ \text{exp time} \} - 12.4 * 10^{-5} * \{ \text{exp time} \}^2 + 13.7 * 10^{-8} * \{ \text{exp time} \}^3$
- at 120 °C : $\text{이유도} = 0.74 + 0.065 * \{ \text{exp time} \} - 10.0 * 10^{-5} * \{ \text{exp time} \}^2 + 11.9 * 10^{-8} * \{ \text{exp time} \}^3$
- at 130 °C : $\text{이유도} = 0.67 + 0.12 * \{ \text{exp time} \} - 20.1 * 10^{-5} * \{ \text{exp time} \}^2 + 21.0 * 10^{-8} * \{ \text{exp time} \}^3$

각각의 시험온도에서 fitting 그래프식을 이용하여 이유도의 한계값을 50%로 가정하였을 경우 그리스의 고장시간을 예측하면 다음 표 5와 같다.

표 5 이유도의 한계값을 50%로 하였을 때 예상
고장시간

온도	90 (2.76)*	100 (2.68)	110 (2.61)	120 (2.55)	130 (2.48)
수명, h	1219	1015	895	804	640
log{수명}	3.086	3.007	2.952	2.905	2.806

* ()안은 1/T, °K x 10³

임의의 온도에서 그리스의 고장시간을 예측하기 위하여 표 5의 결과를 사용하여 $\log\{\text{고장시간}\}$ 과 $1/T$ 를 plot하면 다음 그림 4와 같다.

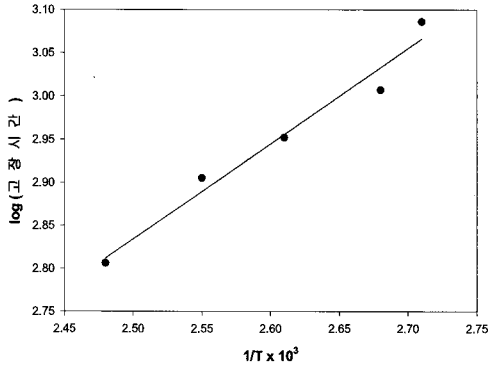


그림 4 이유도 측정치 결과로부터 예측된 $\log\{\text{고장시간}\}$ 그래프

위의 그래프로부터 이유도의 한계값을 50 %로 가정하였을 경우

$$\log \{\text{고장시간}\} = 0.071 + 1105/T \text{ 이고 } \{\text{고장시간}\} = 10^{(0.071 + 1105/T)} \text{ 이 된다.}$$

(3) 누설도 변화

표 3에서의 수명시험 결과를 이용하여 누설도 결과를 예측하기 위하여 시험결과를 시험시간과 누설도값을 plot하면 아래 그림 5와 같다.

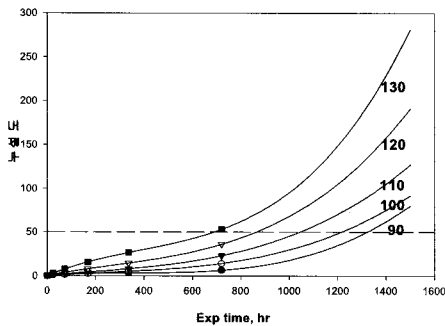


그림 5 수명시험 시간에 따른 누설도 변화

위의 그래프로부터 시험온도에서의 fitting 그래

프식은 다음과 같다.

at 90 °C : 누설도 = $0.15 + 0.021 \cdot (\text{exp time}) - 5.4 \cdot 10^{-5} \cdot (\text{exp time})^2 + 5.0 \cdot 10^{-8} \cdot (\text{exp time})^3$

at 100 °C : 누설도 = $0.24 + 0.019 \cdot (\text{exp time}) - 2.5 \cdot 10^{-5} \cdot (\text{exp time})^2 + 3.5 \cdot 10^{-8} \cdot (\text{exp time})^3$

at 110 °C : 누설도 = $0.36 + 0.026 \cdot (\text{exp time}) - 2.1 \cdot 10^{-5} \cdot (\text{exp time})^2 + 4.0 \cdot 10^{-8} \cdot (\text{exp time})^3$

at 120 °C : 누설도 = $0.31 + 0.053 \cdot (\text{exp time}) - 5.5 \cdot 10^{-5} \cdot (\text{exp time})^2 + 6.9 \cdot 10^{-8} \cdot (\text{exp time})^3$

at 130 °C : 누설도 = $0.03 + 0.11 \cdot (\text{exp time}) - 15.8 \cdot 10^{-5} \cdot (\text{exp time})^2 + 13.7 \cdot 10^{-8} \cdot (\text{exp time})^3$

시험온도에서 누설도의 한계값을 50%로 하였을 때 그리스의 고장시간을 예측하면 다음 표 6과 같다.

표 6 누설도의 한계값을 50 %로 하였을 때 예상 고장시간

온도	90 (2.76*)	100 (2.68)	110 (2.61)	120 (2.55)	130 (2.48)
수명, h	1322	1216	1044	863	689
log{수명}	3.121	3.085	3.019	2.936	2.832

* ()안은 $1/T, K \times 10^3$

임의의 온도에서 그리스의 고장시간을 예측하기 위하여 표 6의 결과를 사용하여 $\log\{\text{고장시간}\}$ 과 $1/T$ 를 plot하면 다음 그림 6과 같다.

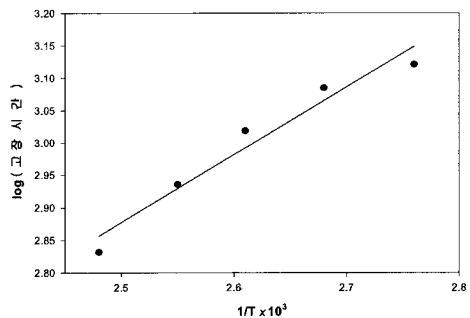


그림 6 누설도 결과로부터 예측된 $\log\{\text{고장시간}\}$ 그래프

위의 그래프로부터 누설도의 한계값을 50 %로 가정하였을 경우

$$\log \{\text{고장시간}\} = 0.27 + 1044/T \text{이고 } \{\text{고장시간}\} = 10^{(0.27 + 1044/T)} \text{ 이 된다.}$$

4. 그리스의 수명예측

이상에서의 결과를 바탕으로 온도의 변화에 따른 측정가능 물성치로부터 계산한 수명예측 결과를 정리하면 아래 표 7과 같다.

표 7 측정가능 물성치로부터 계산한 예상 고장시간

측정항목	예상 고장시간
전산가	$10^{(0.52 + 932/T)}$
이유도	$10^{(0.071 + 1105/T)}$
누설도	$10^{(0.27 + 1044/T)}$

상기 표의 예상 고장시간으로부터 각 온도 별 그리스의 고장시간을 계산하면 표 8과 같다.

표 8 온도에 따른 그리스의 예상 고장시간 (h)

시험온도 ℃	20	40	60	80	90	100	110	120	130
전산가	5,040	3,144	2,088	1,464	1,265	1,003	940	769	688
이유도	6,936	3,984	2,448	1,584	1,219	1,015	895	804	640
누설도	12,360	6,768	2,520	1,680	1,322	1,216	1,044	863	689

표 8에서 보면 측정가능한 물성치로 선정된 전산가, 이유도, 누설도의 측정치와 고장시간에 도달했을 때 이들의 한계값을 가정하여 그리스의 수명을 예상한 결과 저온에서는 전산가나 이유도로 예측한 고장시간이 누설도로 예측한 고장시간과 차이가 많이 있었으나 시험온도가 상승함에 따라 그 차이가 크게 줄어들어 130 ℃에서의 예상수명은 거의 유사한 결과가 얻어짐을 알 수 있었다.

5. 결론

앞에서 검토한 바와 같이 그리스의 수명을 예측하기 위해 베어링 시험을 한 후 그리스를 채취하여 분석하고 이들의 측정가능한 물성치로부터 수명식을 얻어 그리스의 수명 즉 그리스의 신뢰성을 평가할 수 있다.

현재 한국화학연구원에서는 그리스 신뢰성인증 사업을 위해 각종 그리스 수명예측용 베어링 시험장비를 확보하고 있으며 앞으로 그리스의 품질보증 또는 신뢰성 확보차원에서 이러한 수명예측 평가기술이 국내 그리스제조업체 또는 사용업체에 정착되어지기를 기대한다.