



# 베어링 윤활

## 목 차

내 용	Page
1. 베어링 윤활 일반	
1. Plain 베어링	
1-1 Plain 베어링의 윤활	
1-2 Grooving	
1-3 윤활제의 선택	
2. Anti-Friction 베어링	
2-1 Anti-Friction 베어링의 윤활	
2-2 구름 베어링에 있어서의 윤활제 역할	
2-3 오일 윤활에 있어서 윤활 유막	
2-4 그리이스 윤활에 있어서의 윤활 유막	
2-5 건조 윤활에 있어서의 윤활제 층	
2. 베어링에 있어서 윤활제의 선택	
1. 베어링 윤활제의 적절한 선택 법	
2. 특수한 작동과 주변 환경 상태	
3. 베어링을 위한 적절한 오일의 선택	
4. 오일 물성에 따른 선택	
5. 그리이스의 선택	
6. 불완전 윤활에 기인한 베어링의 손상과 대책	



## 1. 베어링 윤활 일반

일반적으로 베어링의 목적은 회전축의 운동을 지지하고 제어하며 투입된 윤활제가 유체 윤활 막을 형성하므로 서 회전과 미끄럼에 대한 마찰저항을 감소 시키는 것이다.

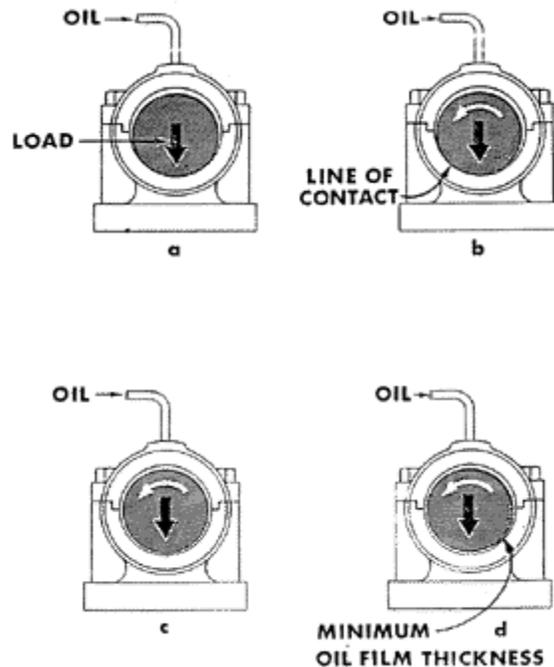
각 유형별로 대단히 많은 종류의 베어링이 있지만 모든 베어링은 크게 Plain 베어링과 Anti-Friction 베어링으로 구분을 할 수가 있다.

### 1. Plain 베어링

#### 1-1 Plain 베어링의 윤활

가장 간단한 형태의 베어링은 Plain 혹은 Journal 베어링이다. 일반적으로 Plain 베어링에 있어서 하중은 언제나 축의 센터 라인에 수직한 한 방향으로 작용하고 있으며 이러한 하중을 Radial 하중이라 한다. 수직 하중을 받고있는 Plain 베어링에 있어서의 유체 유막 형성 과정을 보면 다음과 같다.

(그림 1)



수직 하중을 받고 있는 Journal 베어링에서의 유체 유막의 형성 과정

그림 설명;

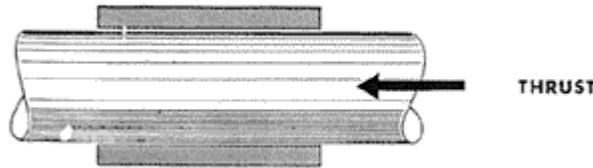
- (a) 기계가 정지 되어 있는 상태에 있어서 베어링과 축의 바탕 부분 사이의 유막은 금속 표면들 사이에서 어떤 부위는 실제로 접촉하고 있을 정도로 극단적으로 얇은 유막을 형성하고 있다.
- (b) 기계가 구동 하기 시작할 때, 축이 회전을 시작 하므로 공극 부위에 오일이 채워지기 시작한다. 첫 마찰력이 높기 때문에 축은 베어링의 왼쪽 편으로 올라 가기 시작하고, 구름 동작이 오일 유막 위에서 이루어질 때 마찰이 감소 하게 되므로 축은 다시 밑쪽으로 미끄러져 내려 온다.



- (c) 축의 속도가 점점 증가하면 빼기 부위로 오일이 들어가게 되고 축을 들어 올릴 만큼 충분한 압력이 발생되어 오른쪽으로 축이 밀려서 올라가게 된다.
- (d) 축이 최대 속도가 될 때 축은 오일 유막 위에서 회전 하게 된다.

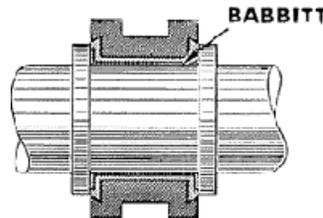
종종 Plain 베어링은 추력이나 축 방향의 하중을 전달 하게끔 요구되어 지는데, 이것은 축의 센터 라인과 평행한 방향으로 움직이는 하중을 의미 한다.

(그림 2)



가벼운 추력은 Plain 베어링의 끝면에서 움직이고 있는 축의 Collar 나 Shoulder 에 의해 지탱되어질 수 있다. 그림은 베어링의 양 측면에 설치 되어 있는 2 개의 Collar 가 어떻게 양쪽 방향으로 움직이는 하중을 지탱할 수 있는가를 나타내 준다.

(그림 3)



종종 “BABBITT”이 Plain 베어링과 함께 사용되는데 베어링 내부에 사용되는 합금으로서 주석을 주원료로 구리와 안티몬이 함유되어 있는 금속이다. 이 라이닝은 상대적으로 교체하기가 쉬우므로 저렴한 가격으로 Plain 베어링의 사용 수명을 연장시켜 준다. Plain 베어링의 재질은 황동, 주철, 테프론, 나무등 다채롭게 사용되고 있으며 일반적으로 Plain 이나 Journal 베어링은 “정밀 베어링”으로 구분되어 질 수가 없다.

만약에 장비가 오래된 것이라면 연속적인 마모로 인하여 공극이 커지게 되고 베어링이 헐겁게 되므로 윤활유는 언제나 NLGI No.2 혹은 No.3 그리이스가 적합한데 이러한 공극의 윤활유만이 장시간 베어링에 남아 있을 수 있기 때문이다.

Plain 베어링에 있어서는 반드시 축의 속도가 고려 되어져야 한다. 즉 저속 회전의 경우는 금속과 금속의 접촉을 막기 위해서 고 점도의 오일이 요구되며 축의 회전 속도가 빨라짐에 따라서 저 점도의 오일이 필요 하게 된다. 이는 베어링이 고속으로 회전을 할 경우일수록 회전 부위로 오일이 잘 떨어져 들어 가야 하기 때문이다.

축에 작용하는 하중은 축 아래의 유막을 파괴 하려고 하고, 축을 베어링과 접촉하게 하기 때문에 가장 적합한 윤활제의 점도를 결정함에 있어서 축에 작용하는 하중은 회전 속도 만큼이나 중요하다. 이럴 경우 좋은 방법은 하중이 2 배로 되면 오일의 점도도 2 배로 하는 것이다.



대부분의 Plain 베어링은 균일 하중 하에서 작동하나, 하중의 작용 방향이 바뀌거나, 변동 하중이 발생 할 경우에는 특별한 문제가 발생하게 된다. 예를 들어 축의 운동 방향이 뒤 바뀌게 되면 초생달 모양의 틈새 양 끝에 있는 영역들에 오일의 공급이 되어야 하는데, 이는 오일이 베어링 안으로 가압 되어 들어가야 함을 의미 한다.

따라서 이 경우에는 극압 첨가제나 내 마멸 첨가제가 함유되어 있는 오일을 사용하여야 한다. 이러한 오일은 일반 오일보다 더 큰 하중 지지 용량을 갖기 때문이다.

표 1.1 은 오일을 쓰는 미끄럼 베어링의 윤활에 대한 권장치 이며, 표 1.2 는 여러 가지 작동 온도에 대해 가장 적합한 그리이스를 보여주고 있다.

(표 1.1)

하중 (psi)	속도 (rpm)	1 회 사용		재순환 시스템	
		점도 (cSt)	점도 (cSt)	점도 (cSt)	점도 (cSt)
250 이상	5000~10.000	10~15	61~82	5~10	43~61
	3500~5000	15~22	82~115	10~15	43~61
	2000~3500	22~32	115~165	15~22	82~115
	1000~2000	32~68	165~352	22~32	115~165
	500~1000	68~100	352~524	32~68	165~352
	300~500	100~150	524~788	68~100	352~524
	100~300	150~220	788~1167	100~150	524~788
	50~100	220~320	1167~1709	150~220	788~1167
	50 이하	320~460	1709~2455	220~320	1167~1709
100~250	1000~2000	68~100	352~524	32~68	165~352
	500~1000	100~150	524~788	68~100	352~524
	300~500	150~220	788~1167	100~150	524~788
	100~300	220~320	1167~1709	150~220	788~1167
	50~100	320~460	1709~2455	220~320	1167~1709
	50 이하	460~680	2455~3659	320~460	1709~2455
100 이하	100~300	320~460	1709~2455	460~1000	2455~5419
	50~100	320~460	1709~2455	460~1000	2455~5419
	50 이하	460~1000	2455~5419	460~1000	2455~5419

주) 60~140°F 의 정상조건 하에서의 사용을 전제로 하였음. 충격하중이 있는 곳에는 극압첨가제 사용. 가벼운 하중이 걸리는 곳에서는 산화 및 녹 방지제 첨가, 재순환 시스템용 오일에는 내마멸 첨가제 및 소포제 첨가점도(cSt)는 40°C 에서 측정, 점도는 100°F 에서 측정.



<표 2> 미끄럼 베어링용 그리스 등급

작동온도(°F)	속도(rpm)	그리스 주입방법	리튬계	알루미늄	복합체
32 이하	ALL	Pressure gun	0	0	
		Grease cup	1	0	
		Hand packed	1	0	
32~149	300 이하	Pressure gun	1	1	
		Grease cup	2	1	
		Hand packed	2	1	
32~149	300 이상	Pressure gun	1	1	
		Grease cup	2	2	
		Hand packed	2	2	
150~203	All	Pressure gun	2	2	
		Grease cup	2	2	
		Hand packed	2	2	
203 이상	All	Pressure gun	NA	2	
		Grease cup	NA	2	
		Hand packed	NA	2	

1-2 GROOVING

Plain 베어링에 있어서 베어링에 윤활제가 공급될 수 있도록 하고 하중에 노출된 표면 전체에 걸쳐 도포 되어야 하는데 일반적으로 급유를 위한 Hole 과 전체 도포를 위해서 Grooving 이 필요 하게 된다.

Hole 의 위치나 Grooving 형태는 급유 장치의 형태, 하중의 형태와 방향, 베어링의 요구 조건에 따라 변하게 된다.

(오일을 위한 Grooving)

다음 그림과 같이 Hole 은 오일의 압력이 낮은 위치 즉 하중을 받지 않는 부분에 위치 해 있어야 하며 Groove 는 일반적으로 하중을 받는 부분까지 파져 있지는 않다. 왜냐하면 하중을 받는 면적까지 Groove 를 만들어 주면 오히려 오일이 빠져 달아나기 쉬운 통로를 만들어주는 결과가 되기 때문이다.

그러나, 강제 급유 되는 베어링에서 냉각 효과를 높이기 위해 축 방향이나 원주 방향으로 하중을 받는 면적 까지 Groove 를 만들 수 있으며 하중 방향이 바뀌는 베어링에 있어서도 Groove 는 하중을 받는 면적 까지 Grooving 을 해야 한다. 하중 방향이 일정한 경우, Hole 은 하나면 충분하고 오일의 유동이나 분배를 향상 시키기 위해서 다음 그림과 같이 Hole 좌우에 Groove 를 만들 수도 있으나 베어링 끝까지 Grooving 을 해서는 Leakage 때문에 절대로 안 된다.

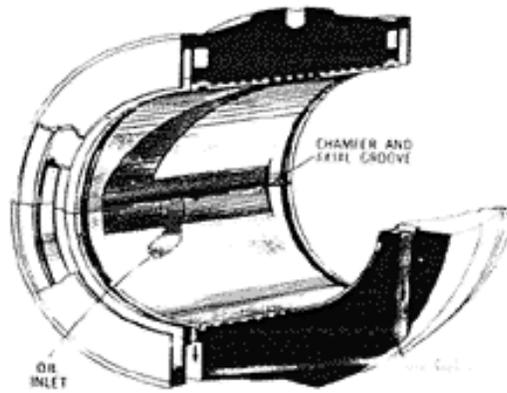
냉각을 목적으로 오일의 유동을 많이 시켜야 할 경우, 예외적으로 베어링의 끝까지 Groove 를 팔 수 있으며 중간 정도의 속도를 갖더라도 오염물질을 Flushing 을 하기 위해서 라면 역시 끝까지 Groove 를 해도 좋다.



**(그리이스를 위한 Grooving)**

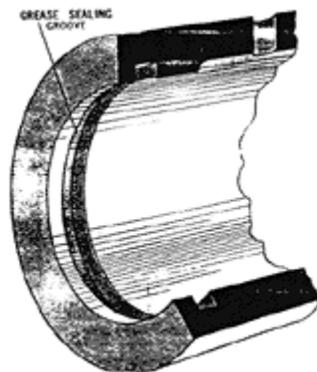
그리이스를 위한 Grooving 원리는 실제적으로 오일과 대동 소이하다. 그러나 그리이스는 유동 저항이 크기 때문에 반드시 오일의 Groove 보다 깊고 커야 한다.

(그림 4)



(오일을 위한 Grooving)

(그림 5)



(그리이스를 위한 Grooving)



### 1-3 윤활제의 선택

Plain 베어링을 위한 윤활제의 선정에는 많은 주의를 기울여야 한다.

#### (오일의 선택)

유체 유막 베어링을 위한 모든 윤활 장치는 순환 장치 System 이 필수적이다. 이렇게 하므로 서 오일을 장시간에 걸쳐 여러 번 사용을 할 수 있다.

수분이나 다른 오염 물질이 들어갈 위험이 있는 장치에서의 오일이 가져야 하는 필수적인 조건은

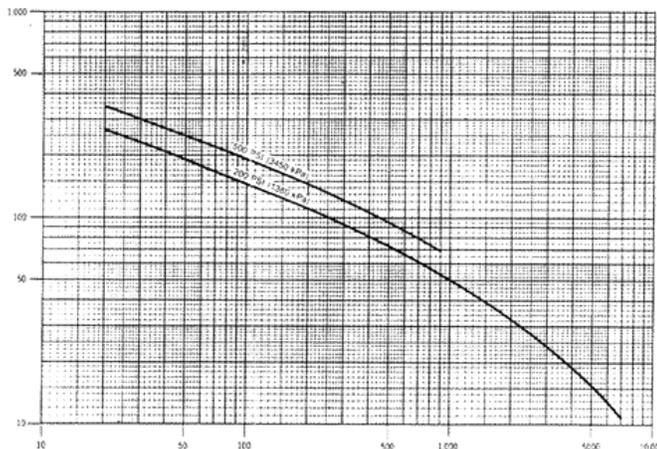
1. 장시간 사용 중에 잔류물 형성이나 산화에 저항 할 수 있는 화학 안정성이 있어야 하며,
2. 산화와 부식에 대한 보호 성능이 있어야 하며,
3. 유화 되는 것을 방지하기 위해서 쉽게 수분과 분리되어야 하며,
4. 기포 형성이 되면 안 된다.

이러한 성능이 기본적으로 충족되기 위해서는 고 품위의 순환 오일이 필수적이 되며, 오일의 점도를 선택하기 위해서 속도, 하중, 작동 온도 등이 사전에 충분히 검토, 결정 되어야 한다. 속도(RPM)는 일반적으로 쉽게 구해질 수 있으며 베어링 하중은 베어링에 부과된 총 무게(Weight)를 베어링 총 투영 면적으로 나누어서 산출 하면 된다.

통상 Plain 베어링 설계를 고려 해볼 때 충격 하중이 없고 보편적인 하중에서 작동 하는 베어링의 경우 200psi 정도가 되며 충격 하중을 동반하고 극심한 하중이 부과 되는 베어링의 경우 500psi 가 된다고 보면 된다. 작동 온도는 베어링 속으로 온도 Sensor 를 집어 넣어 측정 하면 된다. 이러한 3 가지 요소의 수치가 구해지면 유첨된 Chart 의해 오일의 점도를 산출해내면 되는데 베어링이 낮은 온도에서 구동 될 경우 낮은 온도에서의 유동 특성들이 필수적으로 고려 되어야 하며 시동 시 순환을 보장하기 위해서 적정치 보다 낮은 점도의 오일 사용이 간혹 필요 하게 된다.

얇은 유막 윤활을 하는 베어링의 경우에 있어서 , 오일은 통상 재 사용을 할 수 없으며 이렇게 하므로 서 오일이 쉽게 분포가 되며 베어링 표면에 강하고 점착성이 강한 유막이 형성 될 수가 있다. 일반적으로 이런 경우에는 내 마모, 마찰 감소 특성이 있는 오일이 효과적이다.

(그림 6)



주)KLT

ISO9001 Registered, Single Point Lubricator Company

Page 7 of 7



## (그리이스의 선택)

Plain 베어링을 윤활하기 위해 사용되는 System 은 Loss System 이기 때문에 사용된 그리이스는 장시간 재 사용을 할 수가 없으며, 그리이스의 빈약한 냉각 특성으로 인해 오일로 윤활 되는 베어링 보다 작동 온도가 높아지게 된다.

따라서 그리이스가 베어링에 남아 있는 동안에 높은 온도에 노출되고 부분적으로 하중 전달 영역으로 들어가서 전단 안정성이 저하 되기 때문에 그리이스가 연화 되고 끝 단에서의 Leakage 발생 원인이 된다.

적용 방법은 그리이스의 타입이나, 주도에 의해 큰 영향을 받게 되는데 중앙 집중식일 경우 필요한 곳까지 쉽게 유동 될 수 있고 저온에서도 펌핑성이 뛰어난 연질 그리이스의 선택이 필수적이다.

## 2. Anti-Friction 베어링

### 2-1 Anti-Friction 베어링의 윤활

Anti-Friction 베어링은 주로 Ball 과 Roller 베어링을 일컫는 말로서 이들 베어링은 정밀 부품으로 취급되며 넓은 범위의 형태와 디자인이 있다. Plain 베어링은 단순한 구조이므로 온도 변화, 진동 혹은 갑작스러운 충격 하중에 영향을 덜 받지만 Ball 과 Roller 베어링은 아주 정교한 제품으로서 이들에 의해 영향을 많이 받게 된다.

기본적으로 Roller 베어링은 2 Raceway 로 구성 되어 있으며 구름 요소에 의해 분리되어 있다. 구름 요소는 구형, 원추형, 원통형, 혹은 Barrel 형태로 되어 있으며, Cage 나 Separator 를 제외한 부품은 높은 단계의 강철로 되어 있다.

온도변화는 베어링의 작동에 영향을 미칠 수 있으며 진동은 사용 중에 심각한 마모의 원인이 될 수 있다. 설치 중의 갑작스러운 충격 하중과 취급 부주의는 점진적인 손상을 야기 시킬 수 있고 사용 수명을 단축시킬 가능성이 있다. Roller 베어링은 Ball 베어링과 비슷한 기능을 하고 있으나, 접촉 면적이 넓기 때문에 훨씬 높은 하중을 지지 할 수 있고 같은 직경의 Ball 베어링 보다 조악한 작업 환경에 견딜 수 있다.

다량의 윤활제가 소량의 경우보다 열을 잘 발산시킬 수 있을 것 같으나, 이는 실제와는 다르다. 종종 베어링의 유체 마찰이 구름 마찰보다 더 많은 열을 발생시킨다.

그러므로, 윤활이 필요 하더라도 윤활제의 과다는 이점 보다 손해가 많다. 사실, 과다한 윤활은 윤활이 부족한 경우와 마찬가지로 구름 베어링에 많은 영향을 미친다.

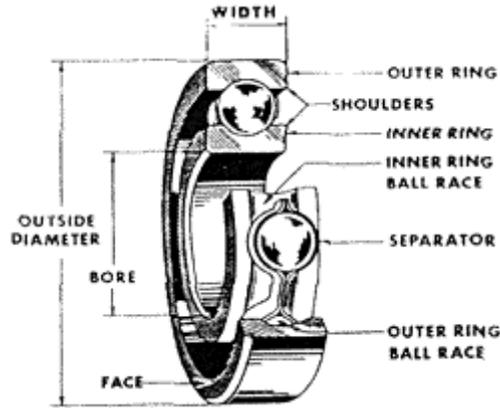
일반적으로 최적의 윤활은 저 점도의 윤활제가 순간적인 미끄럼 마찰을 극복하고, 발생 하는 열을 제거 하며, 유체 마찰을 최소로 유지하며, 베어링 금속을 녹과 부식 그리고 외부의 오염물질로부터 베어링을 보호할 수 있는 최소의 양이 공급 될 때 이루어 진다.

구름 베어링에 알맞은 그리이스를 선택 하는 것은 오일을 선택하는 것 만큼 중요하고 아마 어려울 것이다. 그리이스에 의해서 생기는 마찰은 베어링의 윤활 특성에 적합 해야 하며, 운전 온도에서 그리이스의 밀착성이 중요시 된다.

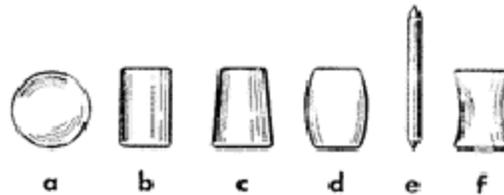
알맞은 운전 조건 하에서는 그리이스의 사용량이 적으나 산화가 발생 하기 때문에 고속 회전 일수록, 베어링이 클수록, 더욱 잦은 주기로 그리이스를 주입하여야 하는데 빈번한 그리이스의 공급이 필요한 경우에는 순환 급유 방식이나 자동 그리이스 주유 방식에서의 전환을 고려 해 보는 것도 바람직 하다.



(그림 7)



(그림 8) ROLLING ELEMENTS



(a) Ball (b) Cylindrical (c) Tapered (d) Radial spherical (e) Needle (f) Concavex

### 2-2 구름 베어링에 있어서의 윤활제의 역할

윤활제는 두 가지의 주된 기능을 갖고 있는데,

- 상대 운동을 하고있는 접촉 표면에서의 마모 방지나 감소
- 베어링에 있어서의 마찰 감소

이때, 이것은 미끄럼 베어링 이나 구름 베어링에 있어서 하중을 전달 할 수 있는 윤활제를 접촉 부위에 주입을 해야 만이 가능해 진다. 구름 접촉이 발생하는 표면에 정착성이 있는 오일을 주입하면 유막은 금속 마찰을 방지 하기 위해서 접촉 표면을 분리 시킨다 (물리적인 윤활).

구름 베어링에 있어서 구름과 더불어 미끄럼도 접촉 표면에 발생하는데 미끄럼의 양은 미끄럼 베어링에 있어서 보다 훨씬 작다. 미끄럼은 베어링 부품의 탄성 변형에 기인하며 순수한 미끄럼 접촉 상태는 구름 요소들과 Cage 사이 혹은 구름 요소 표면과 lip 표면 사이에 존재하고 있으며 접촉 압력은 구름 접촉 상태하에서 보다 훨씬 낮다. 구름 베어링에 있어서 미끄럼 운동은 미약하므로 마찰에 기인한 에너지 손실이라든지, 마모는 일반적으로 무시 할 수 있다. 윤활제의 부가적인 기능은 부식 방지, 베어링으로부터 열 방산, 마모 입자와 베어링 내의 오염물질의 배출(순환 오일 윤활의 경우 오일은 반드시 필터에 의해 걸러져야 한다), 윤활유의 실링 효과 등이다.

주)KLT

ISO9001 Registered, Single Point Lubricator Company

Page 9 of 9



### 2-3 오일 윤활에 있어서의 윤활 유막

윤활 상태의 해석에 있어서 주된 기준은 하중을 전달하는 구름과 미끄럼 접촉 표면 사이의 윤활 유막 두께이다. 구름 접촉 표면 사이의 윤활 유막은 탄성 유체 동력학적 윤활(EHD;Elasto-Hydrodynamic Lubrication)의 이론을 사용하여 설명할 수가 있고 미끄럼 접촉 상태 하에서의 윤활은 미끄럼 접촉 면에서의 접촉 압력이 구름 접촉 면적에서 보다도 훨씬 작기 때문에 유체 동력학적 윤활 이론에 의해 설명하는 것이 더 적합하나 실제적으로 EHD 이론에 근거를 둔 단순한 방식이 윤활 해석에 주로 많이 사용되어지고 있다.

가장 높은 사용 수명은 구름 요소와 Raceway 사이의 접촉 면적이 윤활 유막에 의해 완전히 분리되고 금속 접촉이 일어나지 않는 유체 동력학적 윤활 상태하에서 나타난다.

이러한 윤활 상태에 있어서는 높은 하중일 경우 베어링 수명은 Raceway 표면 직하의 최대 응력을 받고 있는 부위에 피팅이 형성 되므로 서 끝나게 되며 만약에 하중이 적당하다면 피로 손상은 이러한 이상적인 작동 상태하에서는 발생하지 않는다. 일반적으로 오일에서는 첨가제가 베어링 금속 표면과 반응해서 반응 물질을 생성 해내므로 서 유막의 부족을 보충할 수 있으며 주로 점도와 첨가제가 오일의 선정을 위한 기준으로 사용 되어 진다.

### 2-4 그리이스 윤활에 있어서의 윤활 유막

베어링은 주로 작동 표면에 접촉 되고있는 그리이스 기유에 의해서 윤활 되며 베어링 내부나 베어링의 측면에 잔류한다.일반적으로 높은 온도에서 총 그리이스 량으로부터 연속적으로 오일의 분리를 측정할 수 있으며 오일 분리 비율(이유도)은 그리이스의 타입,기유의 점도,오일이 분리되고 있는 표면의 크기, 그리이스의 온도에 크게 의존 한다.

긴 윤활 주기를 갖고 있을 경우 그리이스는 베어링 윤활에 필요한 많은 오일이 분리되므로 이 경우 장 시간에 걸친 오일의 분리가 확보되어야 한다. 매우 높은 점도의 기유를 가진 그리이스는 오일 분리도가 낮으며 이 경우 적절한 윤활은 소모량에 따라 적정량의 그리이스를 하우징이나 베어링내에 충전해 등으로써 만 가능하다.

그리이스의 윤활 성능은 기유에 의해서 뿐만 아니라 증주제나 첨가제에 의해서도 영향을 받는다.그러므로 조그마한 점도비를 가지고도 양호한 윤활을 할 수가 있다.

올바른 그리이스의 선정은 높은 비율의 미끄럼 마찰을 가진 베어링이나, 큰 베어링, 높은 하중이 걸리는 베어링 등에서 특히 중요 하게 되는데 높은 하중일 경우 증주제의 윤활성 이나 첨가제의 역할이 또한 중요 하게 된다.

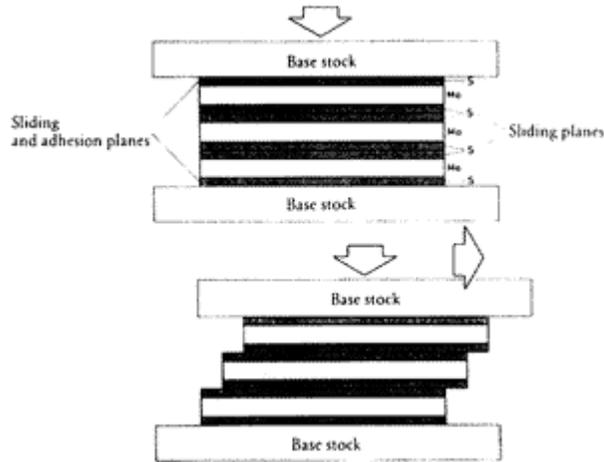
### 2-5 건조 윤활에서의 윤활제 층

건조 윤활제의 효과는 거칠기 깊이를 감소 시키므로 서 표면 거칠기를 보완 시켜 주는 것인데 하중과 재질의 형태에 따라서, 건조 윤활제가 금속 표면에 묻질러 지거나, 미끄럼과 구름 과정 중에 표면과 화학 반응을 일으킨다.

격자 구조층을 가지고 있는 건조 윤활제는 윤활제의 얇은 판막들이 압력하에서 다른 구조층과 상대적으로 미끄러지므로 서 미끄럼이 금속 표면 사이에 발생하지 않고 윤활제 층에서 발생하도록 한다.



(그림 7)



격자 구조층을 갖고 있지 않는 건조 윤활제에는 Phosphates ,Oxides ,Hydroxides , Sulfides 등이 있는데 이러한 종류들은 그들의 낮은 전단 강도에 기인하므로서 그들 나름대로의 윤활 특성을 갖고 있다.

일반적으로 시동 시간은 오일이나 그리이스 보다도 건조 윤활이 짧으며 많은 윤활제가 건조 윤활제로 쓰여지고 있으나  $MOS_2$  가 가장 적절하다.

일반적으로 오일 속에  $MOS_2$  의 비율은 0.5% - 3%wt 를 혼합해서 쓰고 있으며  $MOS_2$  의 보다 높은 비율은 높은 점도의 오일일 경우 윤활 효능을 개선시키기 위해서 필요하다.

1  $\mu m$ 이하의 입자가 분산되어 있는 것이 적당하며 순환 오일 장치의 경우 필터 Mesh Size 가 60  $\mu m$ 이상이 되어야  $MOS_2$  의 제거를 피할 수가 있다.

오일이나 그리이스내의 건조 윤활제는 접촉 표면이 윤활 막에 의해서 완전 분리되지 않을 경우에만 윤활에 기여를 하며 마찰 감소와 하중 전달 성능을 증대 시킨다.

오일 속에서의 건조 윤활제는 장치의 길 들이기 기간 중에 이점이 있으나 높은 속도의 베어링의 경우에 오히려 베어링 마찰과 온도가 증가하기 때문에 건조 윤활제 첨가제는 고속 베어링 작용에 역 효과를 가져올 수 있다.



## 2.베어링에 있어서 윤활제의 선택

베어링 윤활을 위해 윤활제를 선택 할 때는 하중,속도,작동 온도와 같은 작동 상태가 가장 중요하지만 외부의 환경도 반드시 고려 해야 한다. 윤활제의 선택과 적용 방법의 선택에 영향을 미치는 여러 가지 요소로서는

1. 속 도
2. 하 중
3. 온 도
4. 일반 작동 조건
  - 과도한 진동
  - 분진이 매우 많은 환경
  - 극단적으로 습기가 많은 상태
5. 급유의 방법
  - oil hole
  - drip cup
  - reservoir
  - Automatic system etc.

### 속 도

베어링 작동 중 구름 요소에 마찰이 발생하고, 속도가 낮은 경우 경계나 접촉 윤활 상태 하에서 작동하게 될 것이며 이러한 상태가 발생할 경우에는 윤활성 고체 입자가 금속 접촉을 방지 하기 위해서 적절한 접촉 윤활을 제공할 것이다. 과도한 마모에 대한 이러한 보호 성능은 일반 오일이나 그리이스로는 얻어질 수 없다.오일로서 윤활 되는 고속 베어링의 경우 일반적으로 완전 윤활 상태 하에서 작동되며 만약에 윤활유가 적절한 정도를 갖고 있다면 마찰은 감소가 될 것이다.

그러나 고부하가 걸리게 되면 경계,접촉 윤활 상태가 되고 마찰과 마모가 발생하게 된다.

정상상태로 작동 중이고 그리이스로 윤활 되는 베어링에서는 만약에 잘못된 Grade 의 그리이스를 사용 하게 되면 쉽게 그리이스가 열화 되며,고속의 경우에는 온도가 상승하게 되고 그리이스가 뭉어지게 된다. 반면에 높은 주도의 그리이스를 사용하게 되면 베어링 하우징의 양측면에 단단하게 누적 되어 Channel 을 형성하게 되고 마찰도 증가하게 되고 조기 마모를 초래한다.

### 하중

Plain Bushing 을 위해 선택된 오일과 그리이스는 베어링이 전달해야 될 하중과 직접 관계가 있다. 즉 다시 말하자면 유막이 파괴됨이 없이 하중을 지지할 수 있어야 한다. 대부분 베어링에 있어서 오일이나 그리이스 유막이 아주 얇아진 상태에서는 “경계 윤활” 상태가 되는데 이때 하중 계수가 중요하게 된다. 정밀 베어링에 있어서 하중에 의해 Race 로부터 거의 모든 윤활유가 빠져 나오게 되고 얇은 유막만 남게 되는데 이로 인해 구동부는 부분적으로 접촉하게 되고 마모가 발생한다. 보다 큰 하중이 걸리게 되면 유막이 급속히 파괴되고 이 때문에 윤활 재급유 주기가 짧아지게 된다.



## 온도

베어링 온도는 다음과 같은 요소에 의해 영향을 받는다.

1)속 도

2)그리이스의 주도나 오일의 점도

3)작동 상태와 주위의 온도

온도가 상승하면 대부분 윤활 유막이 얇아지는 경향이 있으므로 반드시 작동 온도를 고려 해야 한다.

### 1. 베어링 윤활제의 적절한 선택 법

산업용 베어링을 위한 윤활제 선택은 일반적으로 “DN” 수치에 의존 한다.

**Plain Bearing;**  $DN = RPM \times BORE \text{ DIA}$

**Anti-Friction Bearing ;**  $DN = RPM \times (BORE \text{ DIA} + BEARING \text{ DIA})/2$

DN 은 국제적으로 통용 되고 있으며 직경은 mm 로 나타낸다.

#### \*그리이스로 윤활 되는 베어링 \*

DN 수치	그리이스의 NLGI NO
0 - 50,000	#3
50,000 - 125,000	#2
125,000 - 250,000	#1
250,000 - 350,000	#0

주) 상기의 일반적인 DN Guide 는 기유 오일 점도가 100°F 에서 1200 SSU 이하인 다용도 그리이스에 적용 되며, DN 수치가 낮은 경우는 점착성을 가진 그리이스나 높은 점도를 갖고 있는 오일을 사용할 수가 있다.

#### \*오일 윤활 되는 베어링 \*

DN 수치	Ball & Roller 베어링	Spherical Roller 베어링
10,000	800 Secs	1700 Secs
25,000	400 Secs	700 Secs
50,000	200 Secs	400 Secs
100,000	130 Secs	200 Secs
150,000	100 Secs	160 Secs
200,000	80 Secs	130 Secs
300,000	65 Secs	100 Secs

주) 선택된 윤활 장치와 윤활제는 서로 밀접한 관계를 갖고 있으며, 고 품위로 정제된 광유나 합성유를 사용할 때는 Seal 이나 베어링 재질과 적합한지 반드시 Check 해야 한다.

주)KLT

ISO9001 Registered, Single Point Lubricator Company

Page 13 of 13



## 2. 특수한 작동과 주변 환경 상태

### 고온

만약에 높은 하중과 외부 열에 노출 되어있다면 마땅히 고온 그리이스를 채택 해야 하며 일반적인 구분 온도 한계는 리튬 Soap 그리이스는 70℃, 소듐 Soap 그리이스는 40 - 60℃, 광유에다 열에 안정한 증주제가 함유되어 있는 고온 그리이스일 경우 짧은 기간동안에 190℃ 까지 사용이 가능하며 보통 80 - 110℃까지 가 온도 제한치가 된다.

일반적으로 고온 그리이스로서 증발량이 적고 빨리 열화가 되지 않는 합성유 계통을 많이 사용 하는데 그렇지 못할 경우 자주 재 급유가 이루어져야 하며 반드시 베어링에 경화 현상을 일으키지 않는 것을 선택해서 사용해야 한다.

### 저온

낮은 시동 마찰을 얻기 위해서 기유로서 에스테르나 폴리 알파 올레핀 혹은 묽은 광유의 리튬 Soap Base 그리이스나 젤 타입의 그리이스와 같은 저온용 그리이스를 사용하여야 하며 범용 그리이스를 사용할 시 저온 한계를 벗어날 때는 높은 시동 마찰을 유발할 수 있으며 미끄럼이 구름 요소나 링에 마모를 일으킬 수 있으므로 조심하여야 한다.

### 응축

습윤한 상태의 환경 하에서 구동하는 기계나 장시간 구동 하지않을 경우 베어링이 냉각 되므로 베어링에 응축 현상이 발생하고 부식의 원인이 된다. 이럴 경우, 소듐이나 리튬 Soap Base 그리이스와 같이 수분에 유화되는 그리이스가 추천 된다. 소듐 그리이스는 많은 양의 수분을 흡수해서 베어링으로부터 흘러 내릴 정도로 묽어지고, 리튬 그리이스는 수분에 조금 유화된다. 칼슘 Soap Base 그리이스는 내수성으로서 수분을 거의 흡수하지 않으므로 반드시 베어링 부식을 방지 하기 위해서 부식 방지 첨가제를 첨가 해야 한다.

### 진동

진동으로 인해 기유와 증주제가 분리되는 현상이 발생할 수 있으며 건조 윤활제가 함유 되어 있는 주도#2 의 바리움 복합 Soap 그리이스 나 주도#3 의 리튬 복합 Soap 그리이스 혹은 리튬 Soap 그리이스 등이 진동이 심한 Motor 등에 적합하다.

### 진공

일반적으로 기유들이 진공에서 점차적으로 증발하므로 진공 상태에 적합한 그리이스를 사용하여야 하나, 실온에서 정상적인 사용 수명을 갖고 있는 그리이스의 경우 10<sup>-5</sup>m Bar 까지 도달할 수 있다.

### 짙은 급유

만약에 짙은 급유가 요구되고 배관 Line 이 길 경우, 펌핑 가능한 그리이스(주도#1,2)를 선택해서 사용해야 한다.



### 3. 베어링을 위한 적절한 오일의 선택

올바른 첨가제가 함유된 광유나 합성유는 일반적으로 구름 베어링 윤활에 적합하다. 지금까지 개발된 윤활 기술에서는 광유 Base의 윤활유가 가장 일반적으로 사용되고 있으나 온도, 방사선이라든지 가혹한 환경하에서는 오일의 안정성이 뛰어난 특수 오일, 합성유 등의 사용을 고려해야 한다.

#### 오일의 점도 추천

유막의 두께는 높은 점도의 오일을 선택하면 두꺼워지나 높은 점도의 오일 역시 보다 높은 유체 마찰을 야기시킨다는 단점이 있다. 정상 온도보다 낮은 온도에서의 주유나 배유할 때도 또한 문제가 발생되므로 오일 점도는 베어링에, 오일 급유 장치에 적절한 점도를 선택하여야 한다.

특별한 경우에는 적절한 점도를 사용할 수 없는 경우가 있는데,

- 만약에 오일 선택이 묽은 오일을 사용해야 하는 다른 기계 부품과 연관이 있을 때,
- 순환 오일 윤활의 경우, 오일은 베어링으로부터 오염 물질을 제거하고 열을 분산시킬 수 있을 만큼 묽어야 한다.
- 만약에 일시적으로 높은 온도에 노출되거나, 낮은 속도일 경우 요구되는 점도가 높더라도 일시적인 사항이므로 높은 점도의 오일을 선택해서는 안 된다.

#### A) 정상 작동 상태;

정상 작동 상태(대기압, 최대 온도 120°C, 한계 속도 이하의 속도, 하중비  $P/C < 0.1$ )일 경우 단순 오일나 방지제(부식, 열화 방지제)가 함유되어 있는 오일을 사용하면 되고 만약에 추천된 점도 지수를 얻을 수 없을 경우는 EP나 AW 첨가제가 함유되어 있는 오일을 사용하면 된다.

#### B) 높은 회전 속도

높은 속도에 사용되어질 오일은 산화에 안정하고 양호한 소포성을 갖고 있는 오일이어야 하며 시동시, 온도가 일반적으로 낮을 때에는 높은 점도에 의해서 높은 마찰과 열이 발생하는 것을 반드시 피해야 한다.

#### C) 높은 하중

베어링에 하중이 높게 걸리면 그리고 작동 점도가 비 점도 보다 낮을 경우 AW 첨가제가 함유되어 있는 오일을 사용해야 한다.

#### D) 높은 온도

적절한 오일의 선택은 그들 자체의 물성에 의해서 결정되어야 하며 다음 항에서 따로 기술하기로 한다.

### 4. 물성에 따른 오일의 선택

#### 광유;

150°C-180°C까지의 온도에서는 일반적으로 안정하나, 고온 부위를 통과하는 온도와 시간에 따라서 윤활유의 성능을 저해하는 열화 물질이 생성되거나 베어링 가까이 혹은 안에 고체 잔류물이 생성된다. 광유는 제한된 범위 내에서 안정하며 만약에 수분에 오염된다면 비록 수분과의 적합성을 개선하기 위해 첨가제가 포함되어 있더라도 에멀전 형태 속의 수분량에 따라서 구름 베어링의 수명이 저하된다.



열에 안정하고 낮은 증발성을 갖고 있으므로 고속이나 고온의 경우에 주로 추천된다. 대부분의 경우에 에스테르는 광유와 함께 혼합 되기 쉽다.

#### **폴리 알킬린 글리콜;**

고온이나 저온(-50°C - 200°C)의 경우에 적합하며 높은 산화 안정성에 의해서 고온에서 적용될 경우 급유 주기가 일반 광유에 비해 2-5 배 가량 길어질 수가 있다. 폴리 알킬린 글리콜은 수용성이 아니며 수분을 분리시키는 경향이 약하다. 압력-점도 계수가 다른 오일보다 낮으며 일반적으로 사용되는 폴리 알킬린 글리콜은 광유와 혼합 되지 않으며 알루미늄 Cage 나 하우스에 바니쉬를 형성하거나 Seal 을 손상 시킬 수도 있다.

#### **폴리 알파 올레핀;**

폴리 알파 올레핀은 합성 Hydro-Carbon 으로서 폭넓은 온도 범위에서 사용할 수 있으며 양호한 산화 안정성에 의해 이상적인 조건일 경우 비슷한 점도의 광유 보다도 배 정도의 수명을 나타낼 수 있다. 이 오일은 쉽게 광유와 혼합될 수 있다.

#### **실리콘 오일;**

실리콘 오일은 극단적으로 높은 온도나 극 저온에 사용할 수 있으며 낮은 휘발성과 높은 열 안정성을 갖고 있으나 하중 전달 성능이 낮고 내 마모성이 빈약하다. 또한 페인트를 많이 사용하는 곳에서는 도장 불량을 야기 시킬 수 있으므로 주의 해야 한다.

#### **클로로 플루오린 컴파운드;**

수분과 산화에 잘 견디며 밀도와 압력-점도 계수가 같은 점도의 광유 보다도 높다.

#### **화재 방지 수성 유압유체;**

이러한 오일은 특별한 역할을 하는데 윤활성이 좀 떨어지므로 이러한 유체로 윤활 되는 베어링은 수명이 저하된다. 유체에 따라서 같은 점도의 광유로 도달할 수 있는 수명의 5-30% 정도 밖에 되지 않는다. 유압 유체는

- Oil - in - Water 에멀전(HFA)타입은 오일이 낮은 %로 함유되어 있으며 얻을 수 있는 피로 수명은 정상 피로 수명의 10%이하가 된다.
- Water - in - Oil 에멀전(HFB)타입은 오일 함유량이 60% 정도 되며 얻을 수 있는 피로 수명은 15%이하가 된다.
- 수성 글리콜 Solution 은 얻을 수 있는 피로 수명이 역시 15% 이하가 된다.
- Phosphate Ester(HFD)은 얻을 수 있는 피로 수명이 30%까지 된다.
- Chlorinated Hydrocarbon 역시 30%까지 된다.



## 5.그리이스의 선택

적절한 그리이스의 선택은 앞 절에서 서술한 특수한 작동과 주변환경 상태에 따라서 하면 되나,그리이스와 같은 경우 재 보충량,재 급유주기,그리이스의 혼용성등과 같은 사항도 아주 중요하다.

### 그리이스의 재 보충량

그리이스의 많은 재 보충량은 그리이스 벨브나 큰 Free Housing Space 를 갖고 있을 때 추천되며,이 경우는 과 윤활의 위험을 줄일 수가 있다. 많은 그리이스량은 분진이나 수분의 침투를 방지할 수 있고 사용된 그리이스를 새 그리이스로 교환하는데 용이 하다는 이점을 갖고있다.

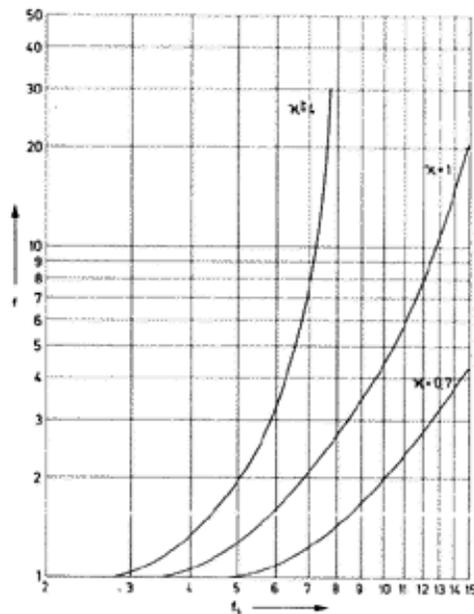
만약에 윤활 주기가 길어진다면 사용된 그리이스를 완전히 교체하고 새로운 그리이스로 채우는 것이 바람직하며 이럴 경우 사용되어진 그리이스를 빼내기 위해서 보다 많은 량의 새 그리이스를 가압해서 주입하면 된다.

가능한 한 사용되어진 그리이스를 많이 빼내기 위해서 기존 사용량의 3 배 이상을 가압주입하여야 한다. 높은 스트레스로 인해 극단적으로 재 급유 주기가 짧은 그리이스의 경우 펌프를 사용하는것이 바람직하며 베어링, 하우징, 급유 배관에서 펌핑이 원활히 될 수 있도록 지속적으로 관심을 기울여야 한다. 이론적인 재 보충량의 계산은 상당히 복잡하고 까다로우므로 다음기회에 설명하도록 할예정이다.

### 그리이스의 사용 수명,윤활 주기,재 윤활

만약에 그리이스의 사용 수명이 베어링의 예상 수명보다도 훨씬 짧다면 그리이스의 보충 및 교환이 요구된다. 이러한 사항은 주로 높은 온도,오염물질,작동 표면 위의 그리이스 유막에 걸리는 높은 기계 동력학적 Stress 에 주로 기인한다. 일반적으로 그리이스의 사용 수명은 실험실에서 주로 측정되며 주로 정적인 Base 에서 수행되므로 윤활제의 수명이 1:10 정도 까지 오차가 생긴다는 사실을 반드시 고려하여야 한다. 따라서 그리이스의 사용 수명이나 윤활 주기도 베어링의 피로 수명 계산법과 비슷한 방식으로 어떤 파손 가능성에 근거를 둔다.

(그림 8)



주)KLT



상기 도표에서 나타난 윤활 주기는 리튬 Soap Base 그리이스, 온도가 70℃ 까지 인 정상 하중 상태, 평균 베어링 하중이 (P/C<0.1)인 경우에 적용이 가능하고 높은 베어링 하중이라든지 온도가 높은 경우에는 윤활 주기가 짧아진다. 또한 베어링에 진동이 발생되면 그리이스가 기유와 증주제로 분리되기 때문에 윤활 주기 역시 짧아진다. 만약에 Seal 을 통해 오염물질이 침투되면 윤활 주기에 영향을 미치고 베어링을 통해 공기가 유동하게 되면 윤활 주기가 현저하게 짧아지게 되는데 공기 유동이 윤활제를 열화 시키고 오염물질을 베어링 속으로 유입 시키는 역할을 하기 때문이다.

따라서 작동 상태와 주변 환경 상태에 따라 반드시 Reduction Factor 를 고려 하여야 한다. 감소된 윤활 주기 Tfg 와 윤활 주기 Tf 사이의 상관 관계식은

$$Tfg = f1 \cdot f2 \cdot f3 \cdot f4 \cdot f5 \cdot Tf \text{ 가 된다.}$$

(f1 --f5 는 오염, 충격 하중, 진동, 온도 상승, 높은 베어링 하중, 공기 유동을 고려한 Reduction Factor 이다.)  
 전 Reduction Factor 는 지면상으로 일일이 나타낼 수는 없으나 단축 윤활 주기 Tfg 는 다음 식으로 간단히 요약할 수 있다. (Q= f1·f2·f3·f4·f5 )

$$Tfg = Q \cdot Tf$$

그러나 윤활 주기는 하중, 온도, 기계 진동, 오염 상태, 윤활제의 종류, 기타 많은 요소에 영향을 받기 때문에 대체적으로 윤활유 제조 업체나 기계 보수 유지 담당자의 경험에 따르면 되고, 대부분의 경우에 있어서 재 윤활할 때 베어링으로부터 사용되어진 그리이스를 완전히 교체하기 어렵기 때문에 재 윤활 주기는 더욱 더 짧아지게 된다. (일반적으로 실제 윤활주기는 계산상의 재 윤활 주기의 0.5-0.7 이 된다.)

특히 고온의 경우에 있어서 값싼 그리이스는 단지 매우 짧은 기간만 안정하므로 반드시 좀 비싸더라도 열적으로 안정된 그리이스를 사용하여야 한다.

이전에 사용된 그리이스의 재 급유량이 시간당 베어링 공극의 1-2%면 충분하다고 입증되면 열적으로 안정된 고가의 그리이스는 0.2%정도면 충분하고 이렇게 하므로 서 적은 량의 그리이스가 주입되어 있으므로 회전 시 마찰 모멘트와 베어링 온도 상승을 막을 수 있는 등 부가적인 이득이 있다.

회전 속도가 빠를 경우 적은 량의 그리이스를 단독 급지 장치등을 이용하여 공급해 보는 것도 참고 삼아 고려해 볼 필요가 있다.

### 그리이스의 혼용성

재 윤활의 경우 그리이스의 혼용을 피할 수가 없게 되는데 상대적으로 안전한 혼합은,

- 같은 Soap Base 의 그리이스(동종의 그리이스)
- 리튬 그리이스와 칼슘 그리이스
- 칼슘 그리이스와 벤토나이트 그리이스이며

반드시 혼합을 피해야 할 경우는,

- 소듐 그리이스와 리튬 그리이스
- 소듐 그리이스와 칼슘 그리이스
- 소듐 그리이스와 알루미늄 그리이스
- 소듐 그리이스와 벤토나이트 그리이스
- 알루미늄 그리이스와 벤토나이트 그리이스이며

이런 종류의 그리이스가 혼합될 때는 그리이스의 구조가 바뀌게 될 수 있으며 그리이스가 연화 된다. 좀더 상세하게 설명하면 상호 호환성이 없는 그리이스들이 혼용되어 사용될 경우 다음과 같은 3 가지의 징후가 나타난다.



- 증주제간의 상호 반응으로 인하여 주도가 상승 한다. 즉그리이스가 컴파운드와 같은 왁스나 고무질 형상으로 변하므로 서 유동성이 떨어지고 결과적으로 베어링의 파손으로 이어진다.
- 증주제간의 상호 반응으로 인하여 주도가 떨어진다. 즉 그리이스가 묽어지게 되고 베어링으로 부터 흘러 내리게 되므로 서 베어링의 파손으로 이어진다.
- 그리이스 기유의 상호 반응으로 인하여 딱딱한 침적물을 생성 그리이스의 유동성을 저해하므로 서 베어링의 파손으로 이어진다.

따라서 그리이스의 혼용은 반드시 주의해야 하며 많은 검토가 필요하다.

## 그리이스 윤활

구름 베어링의 90%이상이 그리이스로 윤활 되고 있으며 그리이스 윤활의 주된 이점은 ,

- 간단한 설계
- 그리이스의 Sealing 작용
- 긴 사용 수명과 간단한 윤활 장치
- 적절한 회전 속도에 있어서, 그리이스는 사용 수명이 끝난 후에도 완전히 열화될 때까지 사용이 가능하다.

만약에 사용상의 조건으로,짧은 재 윤활 간격을 갖고 있다면 그리이스 펌프,분배관, 필요 하다면 그리이스 벨브와 사용된 그리이스를 위한 Collect Chamber 가 마련되어 있어야 한다.

그리이스 건을 사용한 수동 급유 방식,중앙 집중 방식,Single-Point Lubricator 를 사용하는 방식 등 여러 가지의 경우가 있다. 그리이스 공급방식의 설명과 각 방식들의 장단점은 다음 장에서 자세하게 서술 하도록 한다.

만약에 주변 기계 장치가 오일로서 공급되거나 열이 윤활제에 의해서 제거 되어져야 만 하는 곳에 사용된다. 특히 속도/하중이 높거나 외부 열에 노출되어 있는 베어링의 경우에는 열 제거를 위하여 오일 윤활이 반드시 필요하다.

보통 적은 량의 오일이 필요한 곳에서는 Drip Feed 형태,오일 미스트 형태 혹은 오일-에어 윤활로 설계되어 있는데 정확한 측정치를 요구한다.

윤활 장치의 선택에 있어서 다음과 같은 사항이 반드시 고려 되어져야 한다.

- 구름 베어링의 작동 조건
- 베어링의 소음,마찰,온도 거동,구동 시의 요구 조건
- 안전한 작동을 위한 조건 즉 마모,피로,부식에 의한 조기 파손과 이 물질의 유입으로 인한 파손을 방지하는 안정성
- 윤활 장치의 보수와 설치 비용



## 불완전 윤활에 기인한 베어링의 손상과 그 대책

### 불완전한 윤활에 기인된 손상의 주된 요인은

- 적합하지 않은 윤활제(너무 낮은 정도의 오일,첨가제 부족,부 적합한 첨가제,첨가제의 부식 작용)
- 접촉 부위에서의 빈약한 윤활
- 윤활제 속의 오염 물질
- 윤활제의 물성 변화
- 과 윤활

이며 빈약한 윤활이나 과 윤활은 적용에 적합한 윤활 공급 장치를 선택하므로 서 수정할 수 있으며 부적절한 윤활제에 의해서나 윤활제 물성의 변화로 인한 손상은 적절한 시기에 교체 하거나 윤활제 선정 시 모든 작동 조건을 고려하므로 서 피할 수 있다.

### 부적절한 윤활에 기인한 손상의 징후

손상의 징후	원 인	해 설
소음	빈약한 윤활	국부적인 금속 접촉,완충 효과나 하중 전달이 없어도 유막이 파괴된다.
	부적절한 윤활제	그리이스의 기유나 오일의 정도가 너무 낮은데 기인,그리이스의 증주제의 구조가 복잡해질 수 있으며 입자들이 소음을 유발 시킨다.
	오염 물질	먼지 입자가 유막을 파괴 소음을 발생 시킨다.
케이지 마모	빈약한 윤활	국부적인 금속 접촉,완충 효과나 하중 전달이 없어도 유막이 파괴된다.
	부적절한 윤활제	내마모 첨가제가 없는 윤활제,기유나 오일의 낮은 정도
구름 요소, Raceway, Lip 표면에서의 마모	빈약한 윤활	국부적인 금속 접촉,완충 효과나 하중 전달이 없어도 유막이 파괴된다. 상대 운동에 기인한 마찰 부식,Slip Marks
	부적절한 윤활제	오일과 기유의 낮은 정도,AW 나 EP 첨가제가 없는 윤활제
	오염 물질	단단한 고체 입자나 부식 물질
피 로	빈약한 윤활	표면에서 높은 인장 응력,마모
	부적절한 윤활제	기유나 오일의 낮은 정도,윤활제가 압력하에서도 거의 정도가 상승하지 않는 물질 함유 (예: 수분)
	오염 물질	단단한 입자가 높은 국부 접촉 압력하에서 구름,부식 물질이 특별히 피로를 촉진 시키는 부식 점을 형성
높은 베어링 온도,베어링 요소의 변색, 과열에 의한 압착 흔적	빈약한 윤활	국부적인 금속 접촉,완충 효과나 하중 전달이 없이 파괴된 윤활 막
	부적절한 윤활	국부적인 금속 접촉에 기인한 높은 마찰과 열이 발생
	과 윤활	중간이나 높은 회전 속도에서의 높은 윤활제 마찰
손상된 윤활제 (변색,고체화,윤활 성능의 손실)	부적절한 윤활제	작동 온도가 윤활제 허용 온도 보다 높을 경우
	과도한 작동 시간	과도하게 긴 윤활 주기나 교체 주기
	오염 물질, 윤활제의 변화	베어링 속에 이 물질이나 마모 입자 윤활제와 베어링 재질 사이의 반응