

# 윤활유 개선을 통한 에너지 절감 동향

이 안 성

한국기계연구원 회전체연구그룹

## Overviews on Energy Savings through Lubrication Improvements

An Sung Lee

Rotor Dynamics Group, Korea Institute of Machinery & Materials

### Abstract

As one of the strategies to sustain the maximum output with the total minimum cost, huge plants worldwide, such as steel mills, refineries, petrochemical plants, and etc., may and will plan and implement the minimization of operating and maintenance costs for their own. This paper is to review the foreign cases of energy savings through lubrication improvements as one of the actions for that purpose and summarize their directions, and also to look at one such local test case.

### 1. 서론

전세계적으로 산업화된 국가에서는 현재 에너지가 많이 소비되는 제철, 정유·석유화학 등의 플랜트들은 신규로 건설되지 않는 추세에 있다. 자연적으로, 이들 플랜트들은, 가격이 전 지구적으로 결정되는 지구 경제속에서, 상대적으로 고비용의 인력들에 의해 운전·보전되는 노화하는 설비를 가지고 이익이 보장되는 생산을 해야만 하는 상황에 있다. 따라서, 각 플랜트들은 총체적 저비

용으로 최고의 생산성을 유지하는 전략의 하나로 각자의 실정에 맞는 운전 및 보전 비용의 최소화를 추진 시행하고 있다. 본 논문에서는 이러한 운전 및 보전 비용의 최소화를 달성하기 위한 실천방안의 하나로 시행되고 있는 윤활유 개선을 통한 에너지 절감과 관련한 외국의 보고사례와 실행방향을 요약하는 한편, 국내 시험 사례를 살펴보고자 한다.

### 2. 외국의 사례 및 실행 방향

2.1 프리미엄 합성 윤활유 적용에 의한 비

용절감

합성 윤활유는 세계적으로 많은 진취적 플랜트에서 상당한 승인을 받고 있으나, 이들 윤활유의 보다 폭 넓은 승인을 방해하는 오해들은 여전히 존재하고 있다. 오해의 하나는 수배 값비싼 합성 윤활유가 정당화되기 위해서는 오일의 교체 주기가 광유에 비해 수배 더 길어야 한다는 것이다. 그러나, 이러한 논리는 노동력, 에너지, 고장 회피, 사용 윤활유의 폐기, 그리고 장비 수명의 연장과 같은 중체적 절약을 고려하지 않은 것이다.

합성 윤활유의 가장 널리 알려진 포물레이션은 PAO(polyalphaolefin)/diester 혼합이다. 이들 우수한 합성 기유는 요구되는 높은 수준의 성능을 얻기 위해서 우수한 첨가제와 혼합되어야 한다. 우수 합성 기유와 우수 첨가제의 혼합에 의해 얻어지는 공동 상승작용은 모든 바람직한 성능 특성과 베어링 메탈에 이온으로 결합하는 능력을 함하여 마찰계

Table 1 Operating budget for rotating equipment in a chemical plant.

비용 항목	금액	퍼센트
년간 에너지 비용	\$121,461,630	96
년간 Maintenance 비용 (직접 노동비, 부품비용 포함)	\$4,938,122	4
년간 윤활유 비용	\$99,840	0.008

수를 감소시키고 유막 강도를 크게 증가시킨다. 결과로 얻어지는 강인하고, 점착력 있는, 미끄러운 합성 유막은 장비를 보다 길게 쓰게 하며, 보다 낮은 온도에서 보다 조용하고 보다 원활하게 그리고 보다 효율적으로 작동하게 한다. 이렇게 합성 유막에 의해 마이크로 폴리싱된 베어링 표면은 베어링의 진동과 마찰을 저감하며, 에너지 소비를 최소화한다. 임의의 회전 장비에 대한 보전 예산에서 윤활유의 비용은 전체 비용에서 중요시되지

Table 2 Energy savings with premium oil.

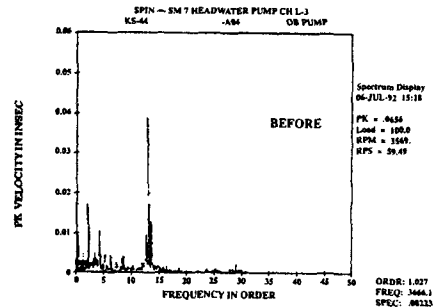
설비모델	전류(A) 기존 오일	전류(A) 프리미엄 오일	변화 (%)	년간 에너지 절감 (\$)	증가된 오일 비용 (\$)	년간 최종 절감 (\$)
MXDA214B	4.0	3.85	-3.75	46.49	22.48	24.01
MXRA2325	9.0	8.6	-4.4	123.98	18.64	105.34
P2132	3.5	3.28	-6.3	68.19	39.76	28.43
P2133	18	17.6	-2.2	123.98	9.93	114.05
P2213	21	20	-4.76	309.94	4.96	304.97
P2223	14	13	-7.1	309.94	4.96	304.97
P2952A	41	40	-2.4	309.94	13.98	295.96
P2961	135	130	-3.7	1549.70	39.76	1509.94
P2968B	197	195	-1.0	619.88	19.88	19.88
합계				3462.4	174.35	3287.69

않는 매우 작은 부분을 차지하고 있다. 그러나, 윤활유의 질은 앞서 언급된 에너지 소비, 부품 구매, 장비 신뢰성, 그리고 고장 시간과 같은 큰 예산 항목의 궁극적인 비용에 직접적으로 영향을 미친다. 한 잘 관리된 에틸렌 플랜트에서 윤활유의 비용은 직접 보전 (Maintenance) 비용의 단지 2%이며, 보전과 에너지의 종합 비용의 단 0.008%에 불과하다고 (Table 1) 보고되고 있다. Table 1의 예에서 소개된 실제 값들은 플랜트마다 다르겠지만, 전달되는 교훈은 공통적이다. 이 예에서 에너지가 운전중인 기계들의 가장 큰 비용이며, 에너지 소비의 2% 저감은 윤활유 전체 비용의 24배를 증가할 수 있다는 것이다. Table 2의 플랜트 사례는 프리미엄 고-유막-강도를 갖는 합성 윤활유를 적용한 9개 장비(펌프와 기어 박스)에서의 에너지 절감을 나타내고 있다. 전기 절감은 높게는 7.1%에서 낮게는 1.0% 범위에 이른다. 총 에너지 사용은 프리미엄 윤활유의 적용에 따른 증가된 비용에 대해 19일의 보상 기간을 소요하면서 2.53% 감소하였다.

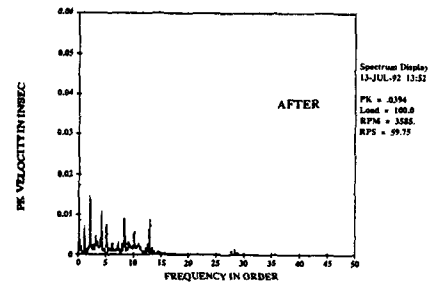
한편, 프리미엄 합성유 사용 전·후 한 원심 펌프의 진동 변화를 보여주는 한 예가 Fig. 1에 나타나 있다. 합성유의 사용 후 진동 레벨이 0.0656 in/s에서 0.0394 in/s로 현저히 저감되었다.

## 2.2 자체 비용절감 기록의 중요성

절감에 대한 큰 가능성 때문에, 보다 많은 회사들이 에너지-효율적 오일의 적용에 집중할 것 같아 보이나, 실제로 그러한 회사들



(a)



(b)

Fig. 1 Vibration spectrums.

(a) With a mineral oil (Before)

(b) With a synthetic oil (After)

은 별로 없다. 회사들이 윤활유 질의 향상을 가능한 비용 절감원으로 보지 않은 이유는 전통적으로 사용되어온 보다 저가인 광유 제품과 측정할 만한 차이가 없으며, 또한 어떤 오일이 에너지를 절감할 것인지를 사전에 결정하기 위한 인정되는 시험법이 없었기 때문이다. 그러나, 프리미엄 오일이 보다 많은 비용이 든다는 것은 쉽게 구입 소요비용으로

증거 된다. 따라서, 에너지-효율적 오일을 사용하길 희망하면 먼저 자체 조직의 내부 절감 기록을 작성하여야 한다. 에너지 절감은 소량의 프리미엄 오일을 적용하여 단순히 오일 교환 전·후의 모터 전류를 측정하여 예측될 수 있다.

### 2.3 오일 청결도 관리

청결함은 오일과 유회되는 장비의 수명 모두를 증가시킨다. 오일의 청결함은 레이저 파티클 카운터를 사용하여 ISO 청결도 척도에 따라 쉽게 정량화 될 수 있다. Table 3은 세계 유수 회사들의 청결도 관리 추천을 보여 준다. 간단히 보다 청결한 오일을 사용하여 유압 부품과 구름 베어링의 수명을 200%에서 500% 증가시킬 수 있다. 그러므로, 많은 회사들이 현재 오일 미스트 시스템 또는 베어링 하우스 시일을 장비에 설치하고 있으나, 많은 회사들이 레저보아로 유입하는 새 오일의 청결 레벨을 설정하지는 않고 있다. 따라서, 오일의 청결도를 명시하는 것이 확실히 합리적이며, ISO 청결 레벨 14/13/11 또는 그 이상을 갖는 매우 청결한 베어링과 유압 오일을 공급받는 것이 시장으로부터 가능하다.

한편, 청결한 오일의 구입이 가능하지 않으면, 오일이 사용되기 전에 앞서 오일을 청결히 하는 장비의 설치를 고려한다. 일단 오일이 청결하면, 오일이 장비에 도달하기까지 청결을 유지하도록 최선을 다한다. 각 오일 타입에 대해 오로지 청결한 전용 수송 용기 또는 펌프를 사용한다. 터빈 오일 속의 흔적

Table 3 Selected cleanliness level recommendations.

ABB	· ·	ISO 16/12
Siemens AG	· ·	ISO 15/12
Parsons	· ·	ISO 16/12
Westinghouse	· ·	ISO 16/13
GE-large steam	· ·	ISO 16/13
GE-industrial steam	· ·	ISO 15/12
STLE/CRC Lubrication Handbook	· ·	ISO 14/12/10
SKF	· ·	ISO 13/10
FAG/Losche, et al	· ·	ISO 12/9
Vickers	· ·	ISO 15/11

정도 양의 모터 오일은 물과 유화작용을 일으킬 수 있다. 저장 용기를 열린 채 방치하지 않는다. 수송 용기가 사용 후마다 밀봉되고 용기가 단지 한 타입의 오일용으로 분명히 명기되도록 한다. 유회유를 적절히 저장하고 취급하는 추가적 시간과 노력은 장비의 신뢰성에 있어서 큰 효과를 가져다 준다.

### 2.4 드라이 오일 관리

오일 속의 물은 베어링에 치명적이다. 보통의 오일에서, 단지 0.002%의 물은 베어링의 수명을 반으로, 3%의 물은 85% 줄일 수 있다. 오일은 물로부터 바로 분리되어야 하며 우유빛 오일 또는 물 유상액을 형성하지 않아야 한다. 발견된 즉시 유화된 오일은 드레인되고 새 오일로 교체되어야 한다. 오늘날의 프리미엄 오일은 물로부터 신속히 분리되며 노동력, 새 오일 구매, 그리고 유화된 오일의 폐기와 연관된 비용을 절감할 수 있다. 일부 특수 포물레이션은 메탈 표면과 결

합을 형성하여 습기를 밀어낼 수 있다. 프리미엄 오일을 사용한 미국 걸프만의 한 화학 회사는 수 개의 펌프에서 일년 여에 걸친 실험을 수행하였으며, 오일이 물과 50대 50으로 섞인 후에도 문제없이 운전하였다.

대기 온도가 떨어지면, 모든 오일 드럼과 장비 오일 레저보아 속의 공기 압력이 감소하면서, 상당량의 습기를 포함한 대기가 흡입되게 된다. 이 습기는 용기 속에서 응축하고 연장하여 물을 생성하게 된다. 응축수는 청결한 오일이 검출될 때까지 모든 레저보아의 바닥으로부터 정기적으로 드레인되어야 한다. 오일이 우유빛이면 드레인되고 청결한 드라이 오일로 교체되어야 한다. 바깥에 보관된 드럼의 경우 빗물이 세우진 드럼의 마개를 덮을 수 있어, 드럼이 숨을 쉴 때 상당량의 물이 새 오일에 들어갈 수 있기 때문에, 드럼은 옆으로 놓여 있어야 한다.

## 2.5 고-유막-강도 오일의 기능

베어링을 보호하는 1차 방어선은 유막 두께이다. 베어링의 볼과 레이스 표면 거칠기에 비해 유막이 더 두꺼운 만큼 베어링 수명은 더 연장된다. 이상적 상태에서는 모든 베어링이 항상 완전 유막 위에 지지된다. 그러나, 실제 사용중 10% 미만의 베어링이 설계 수명에 도달하는 현실 상태에서는 오일 속의 물 또는 먼지 때문에 40% 정도가 고장을 일으킨다.

나머지 많은 베어링은 유막을 압도하는 기계 응력(장비 언밸런스, 베어링 미스얼라인먼트 등에 기인한)에 의한 표면 개시 피로

때문에 고장을 일으킨다. 그러한 조건에서 프리미엄 고-유막-강도 윤활유는 다른 방법으로는 얻을 수 없는 보호 여유를 제공한다.

고-유막-강도 오일은 300,000 psi를 초과하는 유막 강도를 제공할 수 있다. 반면, 전통적으로 포물레이션된 산업 오일은 전형적으로 약 6,000 psi의 유막 강도를 갖는다. 베어링 표면을 마이크로 폴리싱하는 능력과 연계된 이러한 부가 유막 강도는 전통적 오일을 쓸 경우 베어링을 파손시켰을 조건에서 많은 베어링이 여러 해 동안 정상적으로 운전 가능하게 한다. 더하여, 극성 첨가제와 함께 포물레이션된 프리미엄 고-유막-강도 오일은 유막 마찰을 증가시킴이 없이 유막 두께를 효과적으로 증가시킬 수 있다.

## 2.6 실질적 오일 교환주기 설정

윤활유는 오염(먼지, 물, 프로세스 유체 등에 의한)되거나 또는 산화(산소와 화학적으로 반응)하기 때문에 교체된다. 오일이 산화할 때, 점성이 보다 증가하며 장비에 슬러지, 바니쉬, 그리고 락카와 같은 침전물을 형성한다. 열이 크면 클수록 오일은 보다 빠르게 산화한다.

특정의 장비에 대한 오일 교환시기를 결정하기 위한 연속 오일 분석 프로그램을 갖고 있지 않은 플랜트에서는 각 서비스에서 오일이 얼마나 오래 지속되는지를 합리적으로 설정하기 위해 사용된 오일을 분석 의뢰하면 된다. 일단 예상되는 오일 수명에 대한 신뢰성 있는 기준이 설정되면, 합리적으로 안전한 오일 교환주기가 그에 맞추어 실행될 수

있다.

오염이 없는 경우, 산화가 오일 수명의 유일한 척도이다. 우수한 기유와 첨가제를 사용하는 프리미엄 윤활유는 전통적 오일 보다 여러 배 이상의 수명을 갖는다. 그러므로, 훨씬 적은 오일이 구매되고, 훨씬 적은 오일이 폐기된다. 폐기 비용은 오일의 원 구매 비용을 흔히 여러 배 능가한다.

### 2.7 다른 비용절감 실천

올바른 오일이 각 장비에 맞게 사용되도록 한다. 오일의 타입과 점성 모두에 대한 제작사의 추천을 체크한다. 첨가제의 화학조성은 다양한 타입의 오일에 대해 크게 다르게 된다. 한 타입의 장비용으로 설계된 오일은 다른 장비에 부적합하거나 심지어는 해로울 수 있다.

적합한 점성을 선정하는 것도 동일하게 중요하다. 오일의 점성이 너무 낮으면, 유막이 너무 얇아 과도한 마모가 초래된다. 점성이 너무 높으면, 유체 마찰이 비정상적으로 높아질 것이며, 따라서 운전 온도와 장비를 운전하는데 필요한 에너지 양이 증가된다. 보다 높은 온도는 오일과 베어링 모두의 수명을 단축한다.

### 3. 국내 시험사례 소개

국내 K 석유화학 회사의 회전설비를 대상으로 베어링의 윤활유로 기존 광유와 합성유 사용시의 비교 시험을 통해 에너지 절감 등의 효과를 검토한 사례를 소개하고자 한다.

#### 3.1 시험 항목 및 절차

시험에 적용된 설비와 시험 항목이 Table

Table 4 Test equipments and test items at the local K-company.

시험 적용 설비 (K 석유화학사 공장설비)	시험 측정 항목
2K-3002, CO <sub>2</sub> Compressor	토출압력, 흡입온도, 윤활유 온도, Panel Ampere, 대기온도, 진동(Acc./Vel.)
2K-2301A, SO <sub>x</sub> Off Gas Blower	토출압력, Hook meter/Panel Ampere, 대기 온도, 진동(Acc./Vel.)
2K-5701, Off Gas Compressor	1st/2nd 토출압력, 1st/2nd Discharge 온도, 윤활유 온도, Hook meter/Panel Ampere, 대기온도, 진동(Acc./Vel.)
2P-1110B, Circulation Pump	토출압력, 흡입온도, Hook meter/Panel Ampere, 대기온도, 진동(Acc./Vel.)
2P-1150A, NO <sub>x</sub> Circulation Pump	토출압력, 흡입온도, Hook meter/Panel Ampere, 대기온도, 진동(Acc./Vel.)
P-5403B, Cyclohexane Pump	토출압력, 흡입도, Hook meter/Panel Ampere, 대기온도

4에 정리되어 있으며, 적용된 개괄적 시험 절차는 다음과 같다.

- 시험 윤활유를 대상 설비에 충전하고 연속운전 중에 각 시험측정 항목을 1일 오전 오후 2회씩 23일간(기존 광유)과 21일간(합성유) 측정하였다. 다만, 진동치는 각 윤활유 별로 일주일 간격으로 오후에 2회 측정하였다.

- 한편, 소비 에너지량과 직결되어 있는 Ampere의 측정 외에, 설비의 부하와 밀접한 상관관계를 갖는 대기온도, 토출압력, 흡입온도, 윤활유 온도 등을 측정하여 소요 에너지의 증감 판단시 참고자료로 활용될 수 있도록 하였다.

- 측정 장비로는 대부분의 경우 K사 공장에 기 설치되어 있는 각종 Panel 또는 계기판을 활용하였으며, Ampere의 경우는 Hook meter 측정을 병행하였다. 한편, 진동치는 VA-11 Vibration Analyzer를 사용하여 측정되었다.

### 3.2 시험 결과 및 토의

각 시험 적용설비에 대한 기존 광유와 교체 합성유 사용시의 소비 Ampere의 평균 결과치를 Table 5에 정리 비교하였다. 표로부터 합성유 사용시 모든 설비에서 기존 광유 사용시에 비해 일관되게 에너지가 절감된 결과가 관찰되지 않는다. 이러한 이유를 고찰하면, 일반적으로, 범용의 회전기계와 달리 석유화학 플랜트의 프로세스 회전기계에서는 소요 에너지와 진동레벨이 흡입온도, 토출압력 등의 주변조건에 민감하게 반응한다. 따

Table 5 Measured amperes with the mineral and synthetic oils at the local K-company.

적용 설비 모델명	Hook Meter 전류 (A)	Panel 전류 (A)	전류 소비량 비교 (광유 Vs. 합성유)		
			Hook Meter	Panel	
2K-3002	광 유	146.20		0.60% 감소	
	합성유	145.33			
2K-2301A	광 유	71.89	74.27	1.60%	2.25%
	합성유	70.74	72.60	감소	감소
2K-5701	광 유	101.44	103.34	1.92%	0.44%
	합성유	102.37	103.79	증가	증가
2P-1110B	광 유	10.97	11.03	0.82%	0.09%
	합성유	11.06	11.02	증가	감소
2P-1150A	광 유	35.65	37.34	0.48%	0.43%
	합성유	35.82	37.50	증가	증가
P-5403B	광 유	134.16	130.90	6.08%	3.19%
	합성유	126.00	126.72	감소	감소

라서, 주변 조건이 일정하게 유지되지 않는 상황에서, 부분적인 소요 에너지의 증감이 사용 윤활유의 성능차이에서 기인한 것인지를 규명하는 데는 상당한 무리가 따른다. 본 시험 적용 설비에서도 기존 광유와 교체 합성유 사이의 에너지 소비량(Ampere 량) 그리고 진동 레벨과 관련한 분명한 경향(즉, 합성유가 일관되게 기존 광유에 비해 유리한)이 관찰되지 않는 상황이다. Table 5로부터 P-5403B 설비에서 윤활유 교체후 큰 폭의 에너지 절감이 나타나기는 하나, 현장의

보수기록에 의하면 기존 윤활유로 운전중이던 시험기간의 중간시점에서 베어링의 과다 마멸로 사용 베어링을 신제품으로 교체한 것이 확인되었다. 본 시험을 통해 우수 윤활유 교체에 따른 에너지 절감의 효과가 분명하게 확인되지 않은 안타까움은 있으나, 외국의 사례 및 경향에 비추어 볼 때 금번 시험의 실시를 의미있게 평가한다. 향후, 보다 주변 조건의 통제가 가능하고 시험목적에 적합한 적용설비를 채택한 윤활유 개선을 통한 에너지 절감 성공사례가 국내에서도 보고되기를 기대한다.

#### 4. 결론

전세계적으로 에너지를 많이 소비하는 제철, 정유·석유화학 등의 플랜트에서는 총체적 저 비용으로 최고의 생산성을 유지하는 전략의 하나로 각자의 실정에 맞는 운전 및 보전 비용의 최소화가 추진·시행되고 있다. 이러한 노력과 연계된 실천 방안의 하나로 윤활유 개선을 통한 에너지 절감이 주목되고 있으며, 일부 외국의 성공적 사례가 보고되고 있다. 따라서, 국내의 대형 에너지 소비 중심적 플랜트에서도 윤활유 개선을 통한 에너지 절감을 그간의 다소 관찰적 유보자세에서 탈피하여 전향적으로 실행해야 할 것으로 판단된다. 다만, 국내의 한 시험 사례에서와 같이 적절한 시험조건의 설정 미비로 원하는 소기의 결과를 얻지 못할 수도 있기 때문에, 이를 추진하고자 하는 설비보전분야 엔지니어들에 대한 조언은 다음과 같다. 개개 장비의 최대 성능을 위해 필요한 요구사항을 확

인하고, 다양한 오일의 공개된 사양자료를 조사하며, 목적된 용도에 대한 상대적인 장점들을 결정한다. 그리고 사실에 기초하여 충분한 정보가 고려된 결정을 하고, 현장에서의 모니터링을 실시한다.

#### 참고 문헌

1. Halliday, K. R., 1977, "Why, when and how to use synthetic lubricants."
2. Morrison, F. F. and Zielinski, J. R., 1980, "Effects of Synthetic Industrial Fluids on Ball Bearing Performance" ASME Paper 80-Pet-3.
3. Zielinski, J. R., and Perrault, G. E., 1983, "Survey of Commercial Experience With Diester-Based Synthetic Lubricants in Refinery Equipment," NPRA Paper 83-20.
4. Douglas, P. J., 1992, "An Environmental Case for Synthetic Lubricants," Lubrication Engineering, Sept., pp. 696-700.
5. Heinz, P. and Williams, J. B., 1994, "High Film Strength Synthetic Lubricants Find Application in Process Plant Machinery," P/PM Technology, April.
6. Heinz, P., 1994. "Synthetic lubricants: when and which?," HP in Reliability.
7. Maintenance log, "Advanced Lubricants Produce Savings," Maintenance technology, April 1997.