

1. 머리말

우리나라는 지난 1970년대부터 중화학, 석유화학 설비산업 및 제철, 발전시설을 비롯한 중공업 분야에서의 설비사업이 주된 산업 구조를 이루고 있으므로, 상기 설비의 가동률을 최대화함과 동시에 이들 설비의 피해가 최소화 할 수 있도록 최적의 상태진단기술을 적용하는 것이 무엇보다도 중요한 경제적/기술적 주요 과제라고 할 수 있다.

기계상태진단(machine condition monitoring) 기술은 오래전 산업혁명 시절 이후에 엔지니어링 기술이 본격적으로 등장한 시절 이후부터 기계 분야에 종사하는 엔지니어들에게는 익숙하게 알려져 있는 기술로서, 특히 1970년대 들어 기계의 동특성 분석을 통하여 기계 설비의 안전성을 평가하는 첨단기법이 등장한 이후로 본격적으로 많은 산업계 현장에서 상기 기술을 적극적으로 도입하고 활용하고 있음을 볼 수 있다.

기계의 상태진단은 전문 기술자 육감에 의존하는 방법이 가장 기본적이라 할 수 있으나, 기술자의 주관적인 판단에 의존하는 방법에 따른 문제가 발생하므로, 기계의 상태 변화를 객관성 있게 정량적으로 어떻게 측정할 수 있느냐의 측면에서 많은 연구개발이 진행되어 왔다. 즉 기계시스템과 관련된 각종 요소부품에서의 압력, 유량, 속도 및 온도를 측정하는 방법(compliance monitoring), 기계 구조의 응력이나 변위를 측정하여 기계의 건전성을 평가하는 방법(structure integrity monitoring), 기계의 진동량이나 소음 발생을 측정하는

방법(vibration and noise monitoring), 기계에 사용하는 윤활유의 물성변화나 윤활유내의 마모입자를 분석하는 방법(lubricant and wear debris monitoring), 요소 부위의 온도를 측정하는 방법(thermography), 그리고 초음파 혹은 음향파(AE) 방출 등과 같이 비파괴적 측정방법(NDT) 등이 잘 알려진 기계 상태진단 측정방법들이다.

따라서 상기와 같은 다양한 기계 상태진단 기술들 중에서 어떠한 기술을 선정하고 활용할 것인가가 산업계 현장에서 가장 중요한 현실적인 관심 사항이라고 할 수 있다. 다만 상태진단기술의 선택은 마치 장님 코끼리 만지기에 관한 우화를 연상할 정도로 편협한 정보에 의하여 자칫 오류를 범하기 쉬운 점이 존재한다고 보인다.

상대 접촉을 행하는 두 물체로서 기본적으로 구성이 되는 기계시스템 내부를 세부적으로 살펴보면, 접촉면은 다음의 그림 1에서 보이는 바와 같이 실제적으로 수マイ크로미터 크기의 많은 접촉 돌기(asperity)들이 상호 부딪히는 상대 접촉을 행하는 것으로 알려져 있다.

이와 같은 접촉돌기에서의 충돌 결과로서 발생하는 에너지의 대부분은 열에너지 형태로 변환되어 재료 내부로 확산되어 주변의 온도를 증가시키게 되며, 임팩트 형태의 탄성파가 주변 재료를 통하여 전달되어 기계재료의 진동을 야기하며, 상기 에너지가 인접한 공기 매체로 전달되면 소음의 형태로 나타나게 된다. 또한 접촉 부위에 윤활유가 존재할 때에는 충격에 따른 재료 파손물들이 마모입자 형태로 부유함과 동시에 발생된 열에 의하여 윤활유의 열화를 초래한다. 따라서 실제 접촉면의 극소 부위에서 발생한 접촉 에너지가 다양한

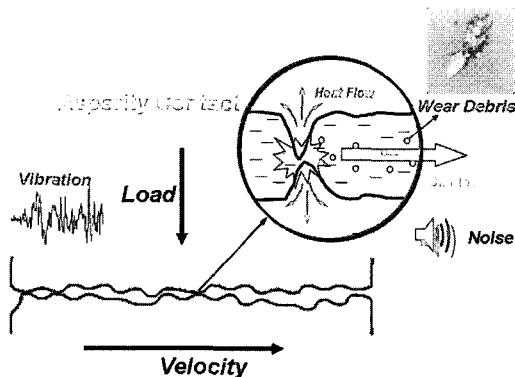


그림 1 상대 접촉운동을 행하는 미세 돌기들에 의한 기계 접촉면

형태의 에너지로 변환됨을 파악할 수가 있으며, 이들 중 어떠한 현상을 측정하는 것이 상태진단하고자 하는 기계시스템에서 가장 효율적이냐가 가장 핵심적인 사항이라고 할 수 있다.

이 글에서는 이들 기계 상태진단 기술들 중 트라이볼로지 기술을 기반으로 하여 기계설비의 상태를 진단하는 사항에 관하여 초점을 맞추고자 한다. 이미 잘 알려진 바와 같이, 트라이볼로지는 상대 운동을 하는 표면의 상호 작용, 즉 마찰 윤활 및 마모에 관하여 연구하는 종합학문이다. 윤활유를 사용하는 기계시스템에서 마모된 표면에서 떨어져 나간 마모입자는 전술한 바와 같이 윤활유에 의해 이송되어 윤활 부위 내를 순환하는데, 기계의 손상 상태를 윤활유 내에 존재하는 마모입자들을 분석함으로써 검출할 수 있다. 아울러 윤활유 및 가공유 특성을 분석하면 부수적으로 기계의 상태, 마모 발생의 가능성 및 마찰 영역에 관한 정보를 알 수 있으며, 따라서 상기 방법을 오염입자들의 해석과 병행하면 트라이볼로지 기술을 기반으로 한 상태진단 방법의 감시 및 진단 특성의 수준을 향상시킬 수 있다. 트라이볼로지 기술을 기반으로 하는 상태 감시 및 진단기술들은 크게 분류하여 두 가지 방법론, 즉 오염입자 해석을 기반으로 하거나 윤활유의 물리/화학적 물성 변화를 분석하는 상태진단기술들로서 구성된다.

2. 윤활유 물리화학적 물성 변화의 분석기술

접촉운동을 행하는 기계요소에서의 윤활유는 기계 요소부위가 지지하는 하중을 지지함과 동시에 접촉면

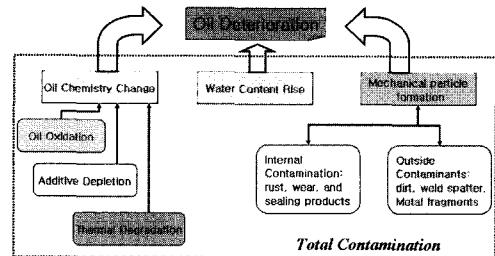


그림 2 윤활유의 열화 요인

에서의 마찰력을 낮은 수준으로 저감함으로써 기본적으로 마찰 에너지를 낮추는 이외에도 냉각 및 방청 효과 등 다양한 역할을 담당하고 있다. 그러나 상기의 윤활유는 기계 사용시간이 경과함에 따라서 접촉면에서 발생한 열에너지에 의하여 서서히 열화(deterioration)되어 본래의 기능이 저하되므로, 기계요소 부위의 보호하는 역할이 감소되어 기계의 손상을 초래하게 된다. 윤활유의 열화는 상기 요인 이외에도 다양한 사유에 의하여 발생할 수 있으며, 그림 2에 나타난 바와 같이 정리할 수 있다.

윤활유의 열화는 기본적으로는 외관이나 색 그리고 냄새와 같이 간단하게 감각으로 느낄 수 있는 시험들로서 대상 윤활제의 상태를 알 수 있다. 예를 들면, 수분 혹은 냉매 오염에 의하여 오일이 흐릿하게 보일 수 있는데, 수분 함량이 0.05 % 이상을 초과하면 오일 몇 방울을 섭씨 120도로 가열한 후에 플레이트 위에 떨어트리면 거품이 발생하고 탁탁 소리를 낸다. 또한 색이 겹게 변하면서 콕 쏘는 냄새가 나고 윤활제의 점도가 증가하는 것은 심각한 산화를 암시하는데, 오일의 열화를 간단하게 조사하는 것으로는 blotter spot 체크방법이 현장에서 간단하게 사용되기도 한다. 블로팅 페이퍼 위에 오일 한 방울을 떨어트리면 건조하면서 선명한 링이 보이는데, 원형 오점의 외곽 주위에 밝은 색의 입자들이 링을 이루고 있으면 상기 오일은 분산 특성을 유지하고 있는 증거이다. 검정색의 중앙 오점은 슬러지의 생성과 분산성의 손실을 의미하며, 블로터 오점 위의 갈색 또는 노란색의 얼룩은 산화를 의미한다. 다만 이와 같이 간단한 측정방법들은 시험결과들이 주관적이거나 정성적인 결과로서 보다 신뢰성 있는 물성변화를 얻기 위하여는 시료 오일 샘플을 채취하고 이를 다음과 같이 정량적으로 분석하는 방법을 사용함이 요구된다.

2.1 점도 측정

오일의 점도란 유체의 흐름에 저항함의 측정값으로서 상대 접촉운동을 하는 두 물체 사이의 하중을 지지하는 능력을 대변하는 중요한 물성이다. 산업용 오일에서 점도의 증가는 산화, 먼지 또는 수분 혹은 높은 등급의 점도 유체가 시스템에 오염되었음을 암시한다. 산업용 오일의 점도가 사용 중에 감소하는 경우는 별로 없으나, 만약에 상기의 현상이 발생한다면 이는 솔벤트 성분이나 점도가 낮은 오일이 혼입되었음을 의미한다. 엔진유의 경우는 연료의 혼입에 의하여 점도의 두드러진 감소가 야기 될 수 있다. 따라서 대상 윤활유의 점도가 정상적인 등급에 비하여 10 % 이상이하로 변하면, 통상적으로 윤활유 공급자는 오일을 교환하도록 하고 있으므로, 이를 기준으로 윤활유의 점도 변화를 정량적으로 측정하고 관리하게 된다.

2.2 적외선 분광도 해석(FTIR)

사용유 내에 존재하는 유기계 오염물 및 수분 그리고 오일 열화 생성물을 검출하기 위한 분광분석 기법으로서, 윤활유의 화학적 구조를 평가하고 화학적 오염원의 존재와 첨가제 고갈을 평가하는 분석방법이다. 프리에르 변환 적외선 분광분석(FTIR)이 상기 측정방법을 위하여 사용되는데, 통상적으로 검출되는 화합물들은 수분과 에틸렌글리콜과 같은 블로-바이 생성물, 타지 않은 연료 및 냉매용 가스 등이 있다. 첨가제가 고갈되는 정도에 의하여 대상 오일의 청정성 및 분산성, 알카리도, 내마모성 변화를 알 수 있듯이, 윤활유가 산화, 탄화 및 황화되어 열화되는 것을 직접적으로 측정할 수 있다.

2.3 수분

오일 내에 수분이 존재하면 이들에 의하여 부식이 촉진되고 베어링, 기어 및 유압작동 부품들 사이의 마모를 증가시킬 수 있다. 수분가를 측정하기 위한 방법들로는 간단하게 가라앉히는 방법과 핫플레이트를 사용하는 간단한 방법과 칼-피셔 적정 방법 및 FTIR 측정방법들이 있다. 흔히 측정을 정확하게 하는 것을 요하지는 않으므로 물의 존재를 투명한 플라스크 내에 넣고 뿐만 정도를 본다거나 가라앉히거나 하여 검출할 수도 있다. 오일 한 방울을 핫플레이트 위에 떨어뜨려서 턱 턱 튀기는 소리가 나면 일반적으로 0.05 % 또는 500

ppm 이상의 수분 함량을 의미한다. 정확한 측정이 필요할 경우는 칼-피셔 적정 등과 같은 보다 정밀한 시험방법들이 사용된다. 통상적으로 수분함량이 0.2 % 보다 큰 경우에는 이를 바로 잡는 작업이 채택되어야 하나, 폴리글리콜계 오일에서는 2 % 이상의 수분도 허용될 수 있다. 심한 응력을 받는 구름요소 베어링의 경우는 0.01 % 정도의 수분 오염에 의하여도 수명이 정상 값의 반으로 감소할 수 있다고 알려져 있다.

2.4 절연상수

오일의 물성 및 전기화학적 특성들은 오일의 사용 중에 변할 수 있으므로 이 변화를 감지하고 이들이 윤활유 능력에 미치는 영향을 아는 것이 중요한 사항이며, 상기 변화값을 정량적으로 측정하는 센서들이 사용되고 있다. 절연도의 측정은 대상 오일의 절연도에 오염이 미치는 총 효과를 측정하여 나타내기 때문에, 상기 방법은 비교 시험으로서 유사한 종류의 신유 샘플에 대한 보정을 필요로 한다. 다만 상기 시험은 산화 및 수분, 산화도 변화 요인 이외에도, 금속 입자 및 연료의 혼입, 또는 먼지, 수트 및 슬러지 등에 의한 오염에 의하여도 민감하게 반응할 수 있어서 분석 결과를 해석함에 각별한 주의를 요하는 문제가 있다.

2.5 산가 및 알카리가

윤활유의 산가는 전통적으로 산을 중화하는데 필요로 하는 수산화칼륨의 양으로 표시하며 오일 1그램당 KOH 밀리그램으로 표현한다. 오일의 전산가가 갑작스럽게 증가하는 것은 비정상적인 작동 상황(예로 과열)을 나타내기 때문에, 윤활유 공급자들은 전산가 사용한계를 제시하는데, 원래 값의 두 배 정도가 통상적으로 허용되는 수준이다. 유압작동유 및 기어유는 대상 윤활유가 산화됨을 평가하는 것으로 TAN(전산가)를 시험할 수 있다. 반면에 디젤엔진 오일은 연료의 황 함량이 대상 오일의 열화를 유도하여 궁극적으로 부품의 부식을 초래함으로 TBN(전알카리가)를 시험할 수 있다. TBN이 보통 정상 값의 50 % 정도로 고갈되게 되면 상기 오일을 교환함이 요구된다. 상기 방법의 다른 접근 방법으로는 오일의 페아(pH) 값을 측정할 수 있으나 사용유에 이 방법을 적용하는 것은 제한적인 값을 가질 수 있음을 이해할 필요가 있다. 왜냐하면 이 값이 대상

오일이 얼마나 부식적인 가를 직접적으로 측정하는 것도 아니며 측정값들이 오일의 기본적인 물성에 좌우되 기 때문이다.

3. 윤활유 오염도 측정기술

기계 상태진단에 사용하는 기술들 중 윤활유를 분석하는 방법의 가장 커다란 장점 중의 하나는 다른 상태 진단 방법들에 비하여, 기계류 윤활에 사용되는 오일은 기계가 사용됨에 따라서 발생되는 다양한 변화 및 역사들을 그 내부에 모두 포괄적으로 담고 있다는 것이다. 기계의 동특성을 측정하는 방법들의 경우에는 접촉면

에서의 일련의 이벤트가 진행되는 바로 그 순간을 놓치면 그 현상을 올바르게 평가하기 어려우나, 오일은 그림 3에서와 같이 기계접촉면에서 그동안 발생한 많은 이벤트 이력들을 모두 누적하여 함유하고 있기 때문에, 측정 타이밍과 크게 상관없이 기계 상태변화 특성을 직간접적으로 평가할 수 있다.

오일을 오염시키는 요인은 윤활시스템 외부로부터 먼지들이 혼입되는 외부적 요인과 기계시스템 내부 접촉면에서 기계재료가 파손되어 마모가 발생하여 내부적 요인으로 나뉠 수 있다. 이와 같이 오일 속에 존재하는 오염물들은 기계 접촉하중을 지지하는 윤활막에서 하중지지 능력이 현저하게 떨어지는 요인이 됨과 아울러 특히 기계 요소간 간극이 매우 적은 정밀부품의 운동을 방해하는 직접적인 요인으로 작용할 수 있으므로 이를 허용수준 이하로 청결하게 유지함이 필수적이라 할 수 있다. 오일의 오염도를 평가하는 가장 간단한 방법은 오일 필터에 여과되어 있는 물질을 수동적으로 체크하는 방법을 사용할 수 있으나, 정량적으로 오염도를 평가하기 용이하지 않으며 오염입자들이 서로 엉켜있는 형태라서 이를 오염입자들을 개별적으로 상세 관찰하기 용이하지 않은 단점이 있다.

1970년대말 미국에서 개발된 Ferrography 분석방법은 이와 같은 단점을 극복하여 오일 내에 오염된 입자들을

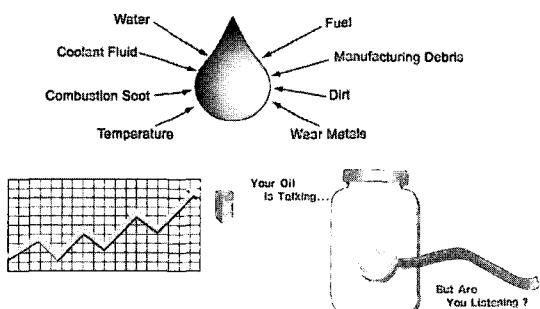


그림 3 오일 내부에 오염된 각종 정보들 및 오일 모니터링 기술

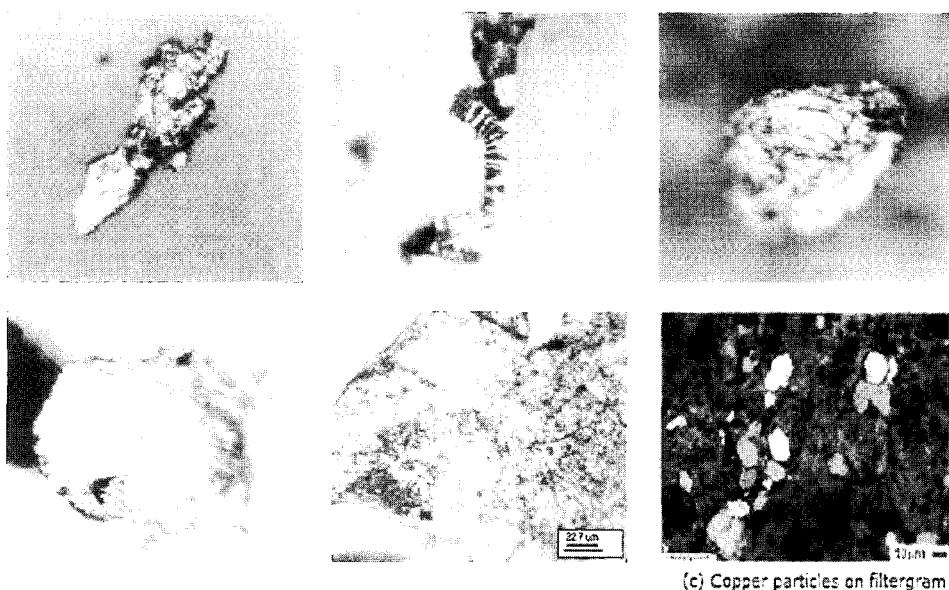


그림 4 오일 내 다양한 마모입자들의 모습

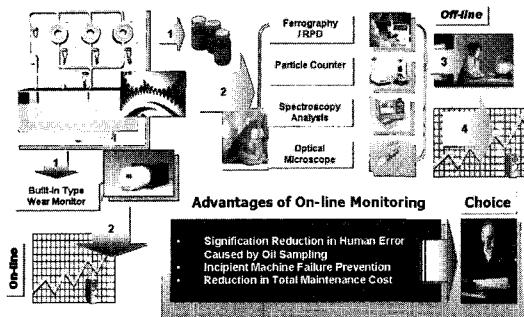


그림 5 실시간 오일 모니터링 기술

효과적으로 분석할 수 있는 기반을 제공한 바 있는데, 상기 기술의 등장 이후로 현재까지 오일의 오염도를 정량적으로 분석할 수 있는 다양한 측정센서들이 시장에 등장하고 있다.

Ferrography 분석방법은 오일 속에 미세한 크기의 입자로서 존재하는 마모입자들을 개별적으로 분리하여 정성적으로 분석할 수 있는 기술인데, 그림 4에 나타난 바와 같은 입자들의 다양한 기하학적 특징들과 칼라 등을 종합적으로 판독하여 상기 입자들이 발생하게 된 고유한 마모생성기구(governing wear mechanism)을 판단하게 함으로써, 상태진단 기술자가 상기 마모가 발생하는 근본적인 root causes를 제거하는 효과적인 방법을 색출하게 하는 근거를 제공하는 점에 크게 기여하는 것으로 알려져 있다.

최근 들어서는 입자계수기(particle counter)와 같이 다양하게 오일 시료의 오염도를 정량적으로 측정하는 센서들을 사용하여 NAS, ISO 등급을 정량적으로 평가하는 방법이 산업계 현장에서 폭넓게 활용되고 있다.

4. 오일 상태진단기술의 향후 발전 방향 및 맷음

윤활유 관리기법을 기반으로 하는 설비 상태진단기술이 국내외 산업체 현장에서 광범위하게 사용되고 있었음에도 불구하고 타 기계 상태진단기술에 비하여 뒤처지는 인상을 주는 것은 그동안 상기 기술이 실험실 위주의 고가 분석 장비에 의존했기 때문이라고 보인다. 윤활유를 분석하기 위해서는 첫 번째 사항으로 기계시스템 현장으로부터 오일 시료를 샘플링하나, 적은 용량의 오일 샘플링이 대상 기계의 윤활유 상태를 보편적으

로 대변할 수 있는 지의 대표성 문제가 기본적으로 존재하며, 시료의 샘플링 자체에도 수많은 인적 에러 요인을 내포할 수 있을뿐더러 샘플링으로부터 실험실 분석/평가, 최종적으로 리포트 작업까지 소요되는 시간이 상대적으로 길어서 많은 기계시스템에 적용하기 어렵고 불시에 발생할 수 있는 기계파손을 사전에 예방 조치하기가 어려운 문제점들이 존재하였다.

그러나 전 세계적으로 반도체 센서기술 및 IT 신기술들이 비약적으로 발전함에 따라서 점차적으로 경제적이며 소형화된 측정센서들이 시장에 많이 선을 보이고 있는 실정에 있으며, 특히 상기 측정센서들을 측정하고자 하는 여러 기계요소 부위 on-site들에 직접 장착하고 측정센서 네트워크를 통하여 실시간적으로 관련된 정보들을 측정함으로써 과거의 문제점들이 획기적으로 개선될 수 있을 것으로 기대된다. 측정센서의 개발도 윤활유의 다양한 물리/화학적 물성 변화를 실시간적으로 측정할 수 있는 광범위한 수준으로 진행되고 있어서 과거의 실험실적 분석방법으로부터 현장 환경에 적합한 실시간 측정방법으로 전환될 것으로 보인다.

아울러 머지않은 장래에는 소형화된 다종의 측정센서들이 하나의 소형 유니트로서 병합되어 한 측정센서의 활용으로도 여러 가지 귀중한 오일의 변화 특성을 측정하고 이들 결과를 근거로 오일 및 기계 상태를 종합적으로 진단하는 이른바 스마트 센서가 등장할 것으로 보여서 윤활유 관리기법을 기반으로 하는 설비 상태 진단기술에 획기적인 발전이 될 것으로 사료된다. ■

참고문헌

- (1) KOCITI - Korea Oil and Chemical Inspection Testing Institute 1989, "Lubricant and Lubrication Management - Lubrication Engineering Series-9", Jung Moon Publishers, pp. 117~120.
- (2) Turner, J. D., Austin, L., 2003, "Electrical Technique for Online Condition Monitoring", Measurement Science and Technology. Vol. 14, No. 10, pp. 1794~1800.
- (3) Kwon, O. K., Kong, H. S., Han, H. G., Yoon, E. S., Myshkin, N. K., Markova, L. V., Semeniouk, M. S. 2000, "Online Measurement of Contaminant Level in Lubricating Oil", US Patent No.6151108. G0133/28.