

# 실시간 마모진단에 의한 고출력 반자동 변속기 예측진단 연구

## Feasibility study of Predictive Condition Monitoring for High Power Semi-Automatic Transmission by On-Line Wear Monitoring

정동윤, 구석모, 윤의성\*, 한홍구\*, 공호성\*

D.Y. Chung, S.M. Ku, E.S. Yoon\*, H.G. Han\*, H.S. Kong\*

### ABSTRACT

Condition monitoring technique used in the military is JOAP, for which the spectroscopic analysis is applied. However it is known that the technique has some problems in economical and practical point of view. This study introduces a new technique for measuring wear in real time base and applies the technique to a high power semi-automatic transmission. The results show the feasibility by measuring the concentration of ferrous wear particles from the transmission oil.

Key word : condition monitoring, real time, semi-automatic transmission, wear particles.

## 1. 서 론

우리 군에서 적용하고 있는 정비의 기본 개념은 대상 장비의 운용시간 등을 고려하여 작성된 주기적인 계획표에 의해 정비를 실시하는 예방정비(Preventive Maintenance)기법이다. 이러한 정비기법은 그동안 장비 가동률 유지에 크게 기여해 왔다. 그러나 이제는 장비가 자주화, 기동화 됨에 따라 핵심부품인 엔진과 변속기 등에 대한 정비의 개념이 예견정비(Predictive Maintenance)의 개념으로 발전해야 할 시점에 도달해 있다. 이와같은 현상은 현재 주력 장비로 배치되어 있는 한국형 장갑차의 정비소요 등을 고려할 때<sup>1)</sup> 그 필요성이 더욱 대두되고 있다. 예견정비는 장비의 주요 부품에서 발생할 수 있는 예기치 않은 고장 및 파손에 의한 가동률의 저하와 경제적 손실 그리고 인명피해 등을 줄이는 데 있어서 매우 효과적 방법이다. 이러한 정비기법을 도입하기

위해서는 장비의 운전상태를 지속적으로 감시하며 이상발생을 사전에 검지하여 예방할 수 있는 신기술이 요구된다. 선진국에서는 이미 1980년대 초부터 신기술을 연구개발해 왔으며<sup>2-4)</sup>, 국내에서도 그 필요성의 인식과 더불어 연구가 진행되고 있는 실정이다<sup>5-6)</sup>. 한편 예견 정비기법의 군사적 적용에 대해서도 최근들어 활발한 연구가 이루어지고 있어서 그의 적용이 기대되고 있다<sup>7-8)</sup>.

예견정비에서 가장 필수적인 기술이 실시간 상태진단 기술이다. 현재 국내외에서 가장 많이 활용되고 있는 기술은 진동측정을 통한 동특성 해석방법과 마모입자 분석방법 등이다. 동특성 해석방법은 이론정립 및 측정기기의 개발이 활발한데 비하여 실제 적용에 있어서는 신호의 상호간섭 및 전기적 외란 등의 복합적인 요인들에 의하여 정밀도에 있어서 많은 발전이 요

구되고 있다<sup>3)</sup>. 한편 마모입자 분석방법은 무기체계에서 발생하는 마모량을 측정하고 분석함으로써 핵심 부품의 파손 예측 및 건전성을 판단하게 하는 기법이다. 마모분석을 통한 상태진단기술은 진동특성 해석의 단점을 보완함과 동시에 진동측정을 통해서 얻 수 없는 귀중한 정보를 얻을 수 있는 장점을 지니고 있다. 즉, 동작 상태에 있는 장비의 분해작업이 필요없이 핵심부품들의 마모 및 파손 상태를 수시 혹은 연속적으로 검지할 수 있다는 것이다.

본 연구에서는 이러한 실시간 마모입자 분석을 통한 상태예측진단의 대상으로서 고풍력 반자동 변속기를 선정하였다. 이 변속기는 현재 주력 장비에 장착되어 있으나 운전자의 조작 미숙 등에 의해 연간 많은 정비소요가 발생하고 있다. 마모입자 분석을 이용한 실시간 상태예측진단 기술이 적용될 경우 변속기의 마모상태를 수시로 점검함으로써 가동률의 손실을 막고 효율적인 정비수준을 유지할 수 있음을 제시하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2-1. 대상 시스템

본 연구에서의 대상 시스템은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 피스톤, 제동밴드를 주요 구성으로 하는 반자동 변속기의 일부이며, 상기 시스템의 주요제원은 Table 1과 같다. 대상 시스템의 운전 상태를 파악할 수 있는 정비 이력을 살펴보면, 초기 보급 이후 현재까지 4개월 주기로 예방정비 차원의 정기정비가 시행되었으며 비정상적인 이상발생 및 고장으로 인하여 수 차례에 걸친 수리가 시행된 바 있다.

현재 대상 시스템에 설치 운영되고 있는 상태진단기술은 회전기에 적용되고 있는 대표적인 기술인 진동량 측정 및 온도 측정 방법으로 실시간으로 하고 있다. 진동량은 축의 변위 및 위상 변화, 진동가속도, 축방향 변위를 측

정하고 있으며, 온도는 각 베어링부 표면에 센서를 부착하여 측정하고 있다. 또한 사용 윤활유의 주요 물성치인 동점도, 점도지수, 수분가, 전산가 및 불용물 등의 변화를 분기에 1회씩 수집하여 분석하고 있다.

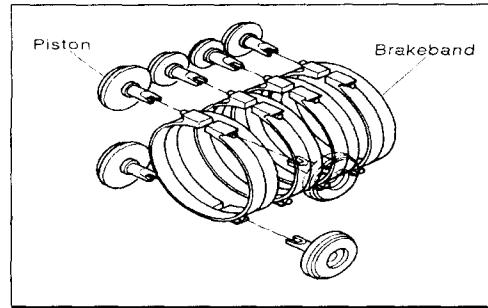


Fig 1. Brakebands and pistons of the transmission

Table 1. Specification of the transmission system

Transmisson System
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Main Component</li> <li>- Centrifugal Clutch</li> <li>- Directional Gear</li> <li>- Running Gear</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Main Machine Elements</li> <li>- Free Wheel (Centrifugal Clutch)</li> <li>- Spiral Bevel Gear (Directional Gear)</li> <li>- Planet Gear (Running Gear)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lubrication System</li> <li>- Operating Temperature : about normal</li> <li>- Oil Tank Capacity : about 11 L</li> <li>- Oil : 10W/30</li> </ul>

### 2-2. 파손 발생사례

Fig. 2는 반자동 변속기의 핵심 부품인 제동밴드로서 내면에 약 1mm의 두께로 부착된 마찰재가 비정상적으로 마모되고 심지어 밴드 자체가 심하게 파손된 상태를 나타내고 있다.

이 부품의 파손은 장비의 기동을 불가능하게 할 뿐만 아니라 수리를 위해서는 엔진과 변속기를 모두 들어내고 작업해야 하는 등 많은 시간이 소요되므로 가동률의 유지에 큰 장애가 된다. 그럼에도 현실적으로는 가장 고장이 잦은 부품에 해당되고 있는 실정이다. 이 부품의 파손원인은 다음과 같다. 즉, Fig. 1에 나타난 피스톤에 유압이 가해지면 피스톤이 제동밴드에 압력을 가하게 되고, 제동밴드는 가단 링기어(Annulus)를 제동하게 된다. 이때 반자동 변속기 임을 고려하여 조종수가 지형과 차량속도에 따라 적당한 엔진회전속도(2000~2500 rpm)를 유지하여야 하는데 그렇지 못할 경우 제동밴드와 링기어의 무리한 마찰로 인하여 파손이 일어난다. 그러나 현재 시스템에 장착된 진동 센서와 온도 센서가 이러한 고장을 사전에 감지하여 예방한 기록은 아직 없다. 따라서 사전 검지가 가능한 상태진단시스템의 개발이 절실히 요구되는 시점이라고 하겠다.

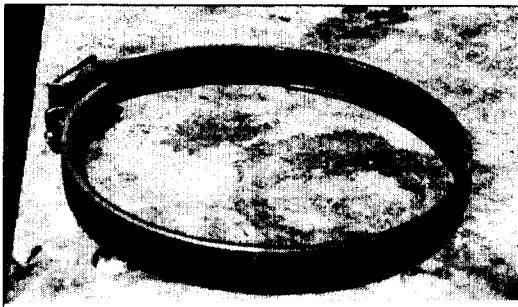


Fig. 2 Photograph of a worn brakeband

### 2-3. 기존 오일분석 상태진단시스템의 분석결과

기존의 오일분석방법은 우리 군에서 가장 보편적으로 사용하고 있는 기법으로서 공군에서는 JOAP(Joint Oil Analysis Program)이라고 알려져 있다. 이 방법은 분광분석기(Spectroscopy)를 이용하여 대상 시스템에서 추출한 샘플 오일을 아크로 태울 때 방출하는 빛의 파장을 이용하여 마모입자의 성분을 찾아내는 정밀한 측정방법이다. 이러한 장점에도

불구하고 이 방법은 다음과 같은 현실적 및 기술적 단점을 지니고 있다. 첫째, 현실적인 문제로써 장비가 매우 비싸고 유지비용 또한 높다고 할 수 있다. 따라서 육군의 경우 야전 정비부대에 보급하기가 어려워 현재는 기갑부대에서 주기적으로 샘플오일을 채취하여 전문부대에 분석을 의뢰하고 있는 실정이다. 그러나 분석결과를 통보받는데 일정기간이 소요되므로 무기체계 부품의 파손이 돌발적으로 발생할 경우에는 이를 사전에 감지할 수 없다. 둘째, 기술적인 문제로써 이 방법은 대상 시스템의 상태를 진단하는데 주요 단서를 제공해 주는 마모입자의 형상을 전혀 관찰할 수 없다는 점이다. 셋째, 10  $\mu\text{m}$  이상의 크기를 지닌 마모입자는 정확한 측정이 불가능하므로 실제로 중요한 정보를 획득할 수 없다는 점이다. 더욱이 시스템 내에서 작용하는 오일은 극압조건을 견디기 위한 각종 첨가제를 함유하고 있는데, 오일을 태울 경우 이온형태로 들어 있는 첨가제 성분들의 농도가 마모입자의 농도인 것으로 오인될 위험성이 있다. 이러한 현상은 Table 2에서도 잘 드러나고 있다. Table 2는 변속기 내의 오일을 채취한 후 주요 성분에 대해서 기존의 분광분석기를 이용하여 분석한 결과와 기공성 흑연 디스크로 제작된 필터를 이용하여 샘플의 오일성분을 모두 제거한 후 남은 마모입자만을 태운 결과를 비교한 것이다. 새 오일에는 역시 Fe의 성분이 하나도 나타나지 않고 있으나 일반적인 방법에 의한 분광분석 결과는 55.0 ppm을 보이고 있는 반면, 필터를 사용하여 측정된 결과는 19.1 ppm으로 농도의 차이를 나타내고 있다. 이러한 현상은 Cu, Al 등의 금속 성분에서도 똑같이 나타나고 있다. 방법상의 차이로 볼 때 필터에 의한 결과가 더 높은 농도 값을 보여야 함에도 불구하고 오히려 더 낮은 농도를 보이고 있다. 이것은 변속기를 구성하고 있는 부품에 고온의 상태에서 첨가제 성분이 작용할 경우 비록 소량이지만 부품의 금속성분들이 용해되어 이온형

태로 존재하는 것으로 보인다. 이와같이 이온화된 성분에 의하여 높은 농도를 나타내고 있는 성분이 Mg, Ca, Zn 등이다. 여기서 Mg와 Ca는 오일 첨가제의 일종인 청정분산제의 구성 성분이다. 또한 P는 Zn과 함께 ZnDTP로서 오일내에 함유된 극압첨가제로 사용되므로 이들은 필터에 의한 방법으로는 검출되지 않으나 일반적인 분광분석법에 의해서는 새 오일과 유사한 수준의 농도를 나타내고 있다.

#### 2-4. 실시간 마모측정시스템의 적용

본 연구에서는 실시간 마모측정시스템을 구현하기 위하여 최근에 본 연구진에 의하여 개발된 OMD(Opto Magnetic Detector)를 사용하였다.

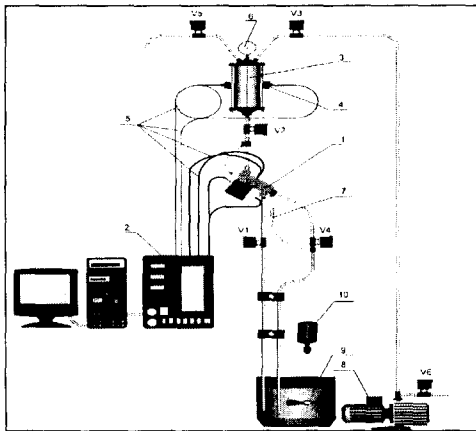


Fig 3. OMD system

Fig 3의 개략도에 나타난 바와 같이 OMD는 마모량 정량 측정기기로서 기존의 마모입자량을 측정하는 기기들의 단점이 보완된 것이다. 즉, 오일내의 상자성 입자와 비상자성 입자를 구별하여 측정할 수 있도록 고안된 기기이며, 특히 본 연구에서 사용한 측정 시스템은 마모입자의 크기에 따른 상대적인 오염도를 측정할 수 있다. 이 기기는 측정오일에 입사광을 투과시킨 후 투과되는 빛의 양 즉, 광학밀도를 측정함으로써 오일 내에 함유되어 있는 총마모입자량을 정량적으로 측정한다. OMD에 의하여

Table 2. Spectroscopy result of the sample oil.

	(ppm)						
구 분	Fe	Cu	Al	Mg	Ca	Zn	P
분광분석 (일반)	55.0	62.4	39.3	371.0	1168.0	932.5	833.0
분광분석 (필터)	19.1	5.7	20.0	25.9	39.3	13.4	8.1
새 오일	0.05	76.2	0.0	616.0	516.5	851.0	714.5

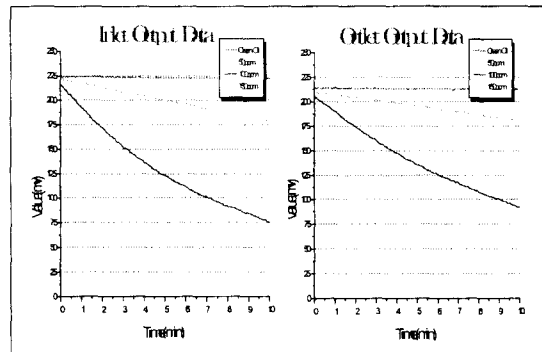
측정되는 광학밀도의 변화는 윤활유의 종류 및 자력장의 유무에 따라서 다음과 같이 표시된다.

$$D_1 = \ln\left(\frac{J_1}{J_2}\right),$$

여기서,  $D_1$  : 광학 밀도의 변화량

$J_1$  : 새 오일의 광학밀도

$J_2$  : 자력장을 가했을 때 측정 대상 오일의 광학밀도



(a)

(b)

Fig 4. Inlet and Outlet outputs from OMD with the carbonyl iron powder contamination

한편 Fig. 4은 OMD의 농도별 calibration 결과를 나타낸 것이다. 즉, 표준시료로 사용되고 있는 carbonyl iron powder를 150 ppm 까지 차례대로 오일에 섞어 넣은 후 10분동안 누적되는 마모입자량에 의한 광학밀도의 차이를 측정하는 것이다. 그 결과 수 ppm 단위의 저농도에서도 신뢰할만한 측정 정밀도를 나타내고 있음을 보여주고 있다. Fig. 4(a)는 측

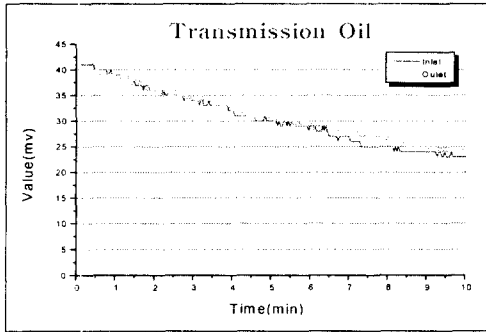


Fig 5. Optical density change of the sample oil

정센서의 입구부위의, 그리고 Fig. 4(b)는 출구부위의 광학밀도의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 입구에서는 상대적으로 오일속에 함유된 큰 입자들에 의한 오염정도를 나타내며, 출구에서는 작은 입자들에 의한 오염정도를 나타내는 것이다. 이러한 결과를 사용유에 적용하면 현재 무기체계에서 추출된 사용중인 오일의 오염정도 및 마모발생 수준을 정량 및 정성적으로 평가분석할 수 있게 된다. Fig. 5는 본 연구의 대상 시스템으로 고출력 반자동 변속기 오일을 측정된 결과이다. 이 사용중인 오일은 신유로 교환후 약 200 km를 주행한 후에 채취한 것이다. Fig. 5에 나타난 바와같이 수직축의 초기값이 약 40mV로서 Fig. 4에 비하여 약 170 mV 정도가 떨어진 것을 알수 있는데 이는 사용유의 전반적인 오염정도를 말하는 것이다. 또한 시간에 따라 측정값이 감소하고 있는데 이 결과는 철 성분 마모입자의 발생정도를 나타내고 있다. 즉, 10분의 누적시간동안에 약 15mV 정도의 광학밀도 차이를 보이고 있는데 이 값을 Fig. 4의 calibration 결과와 비교해 보면 약 50 ppm 정도의 철 성분 입자가 함유되어 있는 것임을 알 수 있다. 한편 이 결과를 Table 2과 비교해 볼 때, 일반적인 분광분석법에 의해 검출된 철 성분의 입자농도와도 잘 일치하고 있다.

### 3. 결론

현재 군에서는 기동장비의 상태진단 및 예방정비를 분광분석법에 의존하고 있다. 그러나 상기 측정방법이 지니고 있는 현실적, 경제적 및 기술적인 문제점으로 인하여 효과적으로 활용함에 있어서 많은 제한을 받고있는 실정이다. 따라서 보다 경제적이며 간단, 간편하고 신뢰성있는 실시간 마모측정장비의 개발 및 적용이 절실히 요구되고 있다. 이에따라 본 연구에서는 새로운 마모량 측정방법을 개발하고 고출력 반자동 변속기에 적용함으로써 타당성에 관한 우수한 결과를 획득하였다. 본 연구에서 제시된 새로운 상태진단 기법을 대상 시스템의 핵심부품에 적용할 경우 관심 성분의 마모량을 실시간으로 확인할 수 있을 뿐만 아니라 고장을 조기에 예방할 수 있을 것으로 기대된다. 더욱이 본 연구에서 사용한 측정기기인 OMD는 그 정밀도 면에서 기존의 성능을 능가할 뿐만 아니라 오일 속에 함유된 철계 마모입자와 비철계 마모입자의 농도를 분리하여 나타냄으로써 정비소요가 많은 장비에 적용할 경우 활용가치가 매우 높다고 하겠다. 아울러 이와같은 기기를 더욱 소형화하여 탑재형으로 개발하는 연구가 지속적으로 이루어질 경우 기동장비의 고장예측 및 수명연장의 효과를 더욱 증진할 수 있을 것이다.

### 참고문헌

1. 정동윤, '98 무기체계 특화연구 중간발표, 군사과학대학원 특화연구센터, 1998.
2. Williams, Davies and Drakes, "Condition-based Maintenance and Machine Diagnostics," Chapman & Hall, 1994.
3. Trevor M. Hunt, "Handbook of Wear Debris Analysis and Particle Detection

- in Liquids," Elsevier Applied Science, 1992.
4. Trevor M. Hunt, "Condition Monitoring of Mechanical and Plant," Chapman & Hall, 1996.
  5. 윤의성, 장래혁, 공호성, 한홍구, 권오관, 송재수, 김재덕, 엄형섭, "마모발생의 통합 분석을 통한 대형 기계 윤활 시스템의 상태진단 기술 적용," 한국윤활학회지 제14권 제2호, pp. 75-81, 1998.
  6. 장래혁, 윤의성, 공호성, A.Y. Grigoriev, "입자유형별 형상추출에 의한 마모입자 자동 인식에 관한 연구," 한국윤활학회 제27회 춘계학술대회, pp. 314-320, 1998.
  7. 정동윤, "오일분석법을 이용한 한국형 전차의 마모기구 분석," 육사논문집 제51집, pp. 805-826, 1996.
  8. 정동윤, 윤민호, "해군 함정 기관의 On-Line 상태진단기술의 적용을 위한 기초 연구," 한국군사과학기술학회 추계학술대회, pp. 270-278, 1997.