

마모입자 분석기술을 이용한 초음속 항공기 엔진의 상태 예측에 관한 연구

정병학 · 정동윤*

군사과학대학원, 육군사관학교

A Study on the Prediction of Engine Condition of Supersonic Aircraft through the Wear Debris Monitoring Technique

Byung-Hak Chung and Dong-Yoon Chung*

Advanced Institute of Military Science and Technology

*Korea Military Academy

Abstract—This paper describes an empirical equation which can be used to predict the engine condition of supersonic aircraft. The equation, which is derived from the trend analysis of JOAP data, represents the concentration of Fe particles in the engine oil. The result of the trend analysis shows that the concentration of Fe particles is a function of running time of engine oil. Meanwhile the slope of Fe concentration is a function of running time of engine. Therefore, the empirical equation was derived as $w=a(t_r) \cdot t_r+b$. However, the equation could not enough to diagnose the damaged part of engine quantitatively. To make up for the weak points of the equation, qualitative analysis was carried out. For that purpose wear debris were collected from the abnormal engine and analyzed by EDS to detect the damaged parts of engine.

Key words—Fe concentrating, wear debris, empirical equation, JOAP.

1. 서 론

Condition monitoring 기법이란 기계류의 주기적인 검지를 통하여 기계의 상태를 사전에 예측함으로써 갑작스런 파괴로 인한 더 큰 손실을 미연에 방지할 수 있는 기술이다[1,2,3]. 현재 항공기에 일반적으로 적용하고 있는 condition monitoring 기법은 JOAP (Joint Oil Analysis Program)이다. 이 방법은 사용 오일내 마모입자를 정량적으로 분석하여 항공기 엔진의 상태를 판단하는 것으로서, 원리는 오일내 마모입자를 Arc열로 태워 이때 방출되는 금속 성분별 파장의 세기로 성분의 양을 측정한다. 그러나 분석 가능한 마모입자의 크기가 1~8 μm 정도로 제한되는 한계와 정성분석이 불가하다는 단점을 가지고 있다. 때문에 외국의 경우

JOAP에 의한 점검방법을 보완하기 위하여 페로그래피에 의한 정성분석을 병행하여 수행하고 있다. 그러나 우리나라는 1960년대 말에 미국으로부터 JOAP 분석 방법을 도입한 이래로 페로그래피를 이용한 부분적인 연구 결과가 발표되기는 했으나[4,5] 현재까지 초음속 항공기에도 JOAP만을 그대로 사용하고 있다. 더욱이 JOAP 검사 결과를 이용하여 검출된 특정 금속원소의 마모입자 농도만으로 안전여부만을 판단함으로써 condition monitoring 본래의 목적인 예측의 기능이 활용되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 항공기 엔진의 상태 예측을 위하여 엔진 사용 주기 동안의 마모 경향을 분석하였다. 그리고 엔진요소의 마모량에 근거하여 엔진의 상태를 예측할 수 있는 엔진 및 오일 사용시간의 함수로된 경험식을 유도

함으로써 엔진 상태의 정상여부를 판단할 수 있는 기준을 설정하였다. 또한 정성분석을 통하여 JOAP의 단점을 보완하고자 하였다.

2. 실험 방법

2-1. 대상 항공기 선정

본 연구를 위하여 가동중인 초음속 항공기(F-4)의 엔진 중에서 정상 상태에 있는 엔진 7대와 비정상 상태가 발생한 엔진 3대 등, 총 10대를 선정하였다. 여기서 정상 상태란 오일의 사용주기 동안 JOAP에 의한 오일분석 결과 마모입자의 농도가 정상적인 경우를 말하며, 비정상 상태는 마모입자의 농도가 비정상적으로 증가하여 경도가 발생한 경우를 말한다[6]. 정상 상태의 엔진 선정은 일반적인 경향을 알아보기 위하여 엔진 사용시간이 500시간 미만, 500~1,000시간 그리고 1,000~1,500시간인 엔진들로 선정하였으며, 비정상 상태가 발생한 엔진의 경우도 가능한 한 엔진 사용시간을 고려하여 선정하였다.

2-2. 마모입자의 정량 분석

샘플 오일의 채취는 매일 첫 비행을 마친 후 엔진이 정지된 시각으로부터 30분내에 채취하였다. JOAP 정량분석 장비는 A/E 35U-3를 이용하였으며, 분석한 JOAP 자료는 '93 부터 '96 1/4분기까지의 결과이다. 시험 결과는 먼저 정상과 비정상 상태로 구분한 후 엔진 및 오일 사용시간에 대한 Fe 마모입자의 농도를 분석하였다. 이때 Fe외에 다른 원소는 극히 미량이어서 분석에서 제외하였다. JOAP 자료에 근거한 엔진 상태를 판단하는 기준은 현재 사용되고 있는 기술지시서를 따랐다[6].

2-3. 마모입자의 정성 분석

오일내 마모입자에 대한 정성분석은 RPD (Rotary Particle Depositor)로 프로그램을 만들고, 이것을 광학현미경, 주사전자현미경과 EDS 그리고 상분석기(Image analyzer)를 이용하여 마모입자의 형상과 성분 그리고 입도분포를 관찰하였다. RPD는 원심력과 자장에 의해 마모입자를 크기별로 분리하는 장비로서 가장 최근에 개발되었으며, 현재 정성분석을 위하여 많이 이용되고 있다. 이 방법의 장점은 미국에서 사용하고 있는 페로그래피방법에서 문제점으로 대두되었던 Re-

grinding, Barrier effect 등과 같은 단점이 보완되었으며, 마모입자가 중첩되지 않고 크기별로 명확하게 구분되어 퇴적되므로 정성분석이 용이하다는 것이다 [7]. 마모입자의 입도분포는 정상 상태에 있는 엔진 오일과 비정상 상태가 발생한 엔진의 오일을 약 3 cc 정도씩 채취하여 핵산으로 희석시킨후 RPD로 만든 페로그램을 상분석기를 이용하여 측정하였다. 또한 광학현미경을 이용하여 마모입자의 크기 및 형상을 관찰하였다. 마모입자의 성분 분석을 위하여 시험엔진 S/N 418-672에서 두번째 비정상 상태가 발생했을 때 엔진의 필터로부터 채취한 마모입자들을 형상별로 주사전자현미경 사진 촬영과 함께 EDS로 합금 성분을 분석하였다. 이러한 분석 결과는 동일 엔진에서 세번째 비정상 상태가 발생한 후 분해한 엔진에서 발견된 파손 부분품의 성분과 비교되었다. 또한 JOAP 분석 자료로 마모가 심하게 일어나는 구성품을 판단하는 기준과도 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 마모입자의 정량 분석

엔진 사용주기 동안의 Fe 검출량에 대한 경향 분석을 통하여 엔진의 상태를 판단할 수 있는 수식을 엔진 및 오일 사용시간의 함수로 유도하고자 하였다. 엔진 사용시간이란 새 엔진오일을 장착한 이후의 사용시간을 말하며, 오일 사용시간이란 주기적으로 새 오일을 주입한 후 다음 교환시기까지의 사용시간을 뜻한다.

3-1-1. 정상 상태 엔진의 JOAP 경향

Fig. 1~Fig. 3은 정상 상태의 엔진을 사용시간대별

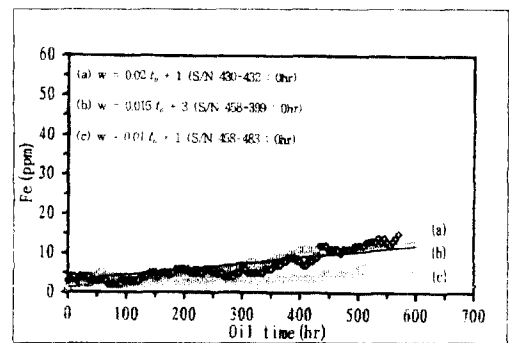


Fig. 1. Concentration of Fe wear particle vs. oil running time (Normal trends, engine running time: under 500 hours).

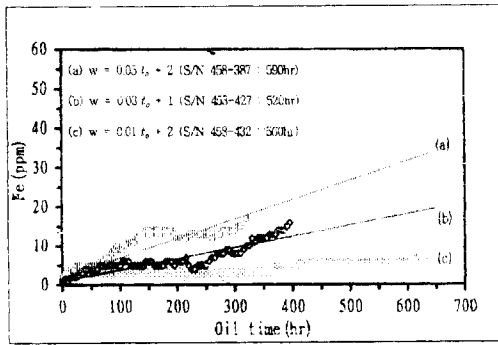


Fig. 2. Concentration of Fe wear Particle vs. oil running time (normal trends, engine running time : 500~1000 hours).

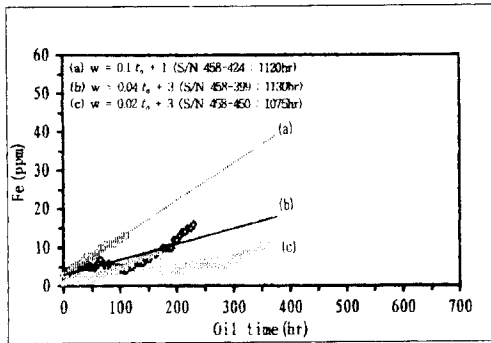


Fig. 3. Concentration of Fe wear Particle vs. oil running time (normal trends, engine running time : over 1000 hours).

로 구분한 후 오일 사용시간에 대한 Fe 마모입자 농도의 증가 경향을 나타낸 것이다. Fig. 1은 엔진 사용시간이 500시간 미만인 경우로서 마모량 증가 기울기가 0.02 이하이다. Fig. 2는 엔진 사용시간이 500~1000시간대의 경우로서 기울기가 0.05 이하이며, Fig. 3은 엔진 사용시간이 1000시간 이상의 경우로서 기울기가 0.1 이하로 나타났다. 이상의 그림에서 나타난 바와 같이 Fe 마모입자 농도는 오일 사용시간에 대하여 선형적으로 증가했다. 또한 정상 상태의 엔진일지라도 마모입자 농도의 증가 기울기가 엔진 사용시간에 따라 점차 증가하고 있음을 알 수 있다.

3-1-2. 비정상 상태 엔진의 JOAP 경향

Fig. 4은 비정상 상태가 발생한 엔진의 JOAP자료를 오일 사용시간에 대한 Fe 마모입자 농도의 증가 경향을 나타낸 것이다. Fe 마모입자 농도의 증가는 정상 상태에서와 마찬가지로 오일 사용시간에 따라 선형함

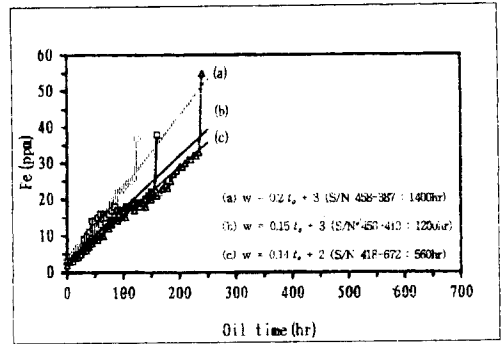


Fig. 4. Concentration of Fe wear Particle vs. oil running time (abnormal trends).

수로 나타났다. 그 기울기는 정상 상태의 경우에 비하여 상대적으로 급하게 나타났으며 엔진 사용시간에 따라 증가하는 경향을 보였다.

3-1-3. 마모 경향 예측을 위한 실험식 유도

이상의 JOAP 자료분석 결과에서 나타난 바와 같이 Fe 마모입자 농도(w)는 식 (1)과 같이 오일 사용시간 (t_o)에 대하여 선형함수로 표시할 수 있다.

$$w = at_o + b \tag{1}$$

여기서 w는 Fe 마모입자의 농도이고, a는 증가 기울기이며, t_o 는 오일 사용시간이다. 그리고 b는 오일 교환(flushing)직후 오일에서 검지된 Fe 마모입자의 농도이다. 또한 Fig. 5는 엔진 사용시간과 Fe 마모입자 농도의 증가 기울기와의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 (a)는 비정상 상태의 경우이고, (b)는 정상 상태의 경우이다.

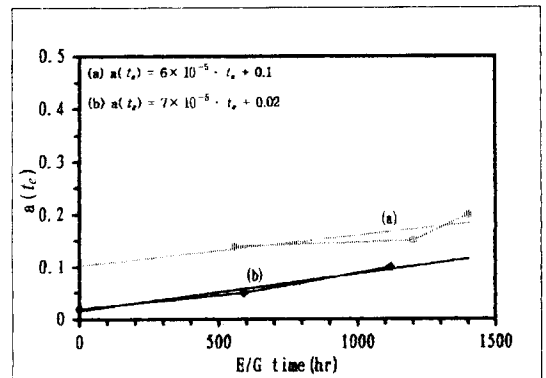


Fig. 5. Slope of the wear trends vs. engine running time.

Fig. 5에서 나타난 바와 같이 Fe 마모입자 농도의 기울기도 정상 및 비정상 상태에서 모두 엔진 사용시간에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 Fe 마모입자 농도의 증가 기울기는 비정상 상태가 발생한 엔진의 경우 $a(t_e)=6 \times 10^{-5} \cdot t_e + 0.1$ 로 나타났으며, 정상 상태 엔진의 경우 $a(t_e)=7 \times 10^{-5} \cdot t_e + 0.02$ 로 나타났다. 그러므로 식 (1)의 기울기를 엔진 사용시간의 함수로 표시하여 엔진의 상태를 판단하고 예측할 수 있는 경험식을 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$w = a(t_e) \cdot t_o + b \quad (2)$$

여기서 t_e 는 엔진 사용시간이다. 식 (2)로부터 임의의 엔진이 정상 또는 비정상 상태에 있는지에 대한 판단은 엔진 사용시간에 대한 Fe 마모입자 농도의 증가 기울기에 의해 지배된다.

3-2. 마모입자의 정성 분석

마모입자의 정성 분석은 입도 분포, 마모입자의 형상 및 마모입자의 합금 성분 등을 분석하였다. 또한 실제로 파손된 부품이 마모입자의 성분 분석 결과와 일치하는지를 확인하였다.

3-2-1. 마모입자의 입도분포

마모입자의 입도분포는 Table 1과 같이 정상과 비정상 상태의 엔진 오일을 채취하여 측정하였다. JOAP으로서 분석할 수 있는 마모입자 크기의 한계는 $8 \mu\text{m}$ 이하이고, 엔진오일 필터 망의 크기가 $40 \mu\text{m}$ 이므로 입자 크기가 $8 \sim 40 \mu\text{m}$ 사이의 입자들은 JOAP로 분석이 되지 않을뿐 아니라 [8] 계통을 돌면서 2차적인 마모에 의한 부품의 손상을 초래할 수 있기 때문에 초음속 항공기와 같은 정밀 엔진에서는 오일 탱크내에 마모입자의 존재 정도가 중요한 의미를 갖는다. 따라서 Fig. 6에 정상 및 비정상 상태의 경우 $8 \mu\text{m}$ 이상의 마모입자들에 대한 입도분포를 나타내었다. 그 결과 엔진 및 오일 사용시간이 상대적으로 긴 정상 상태의 경우 $8 \mu\text{m}$ 이상의 마모입자수는 약 10%정도의 분

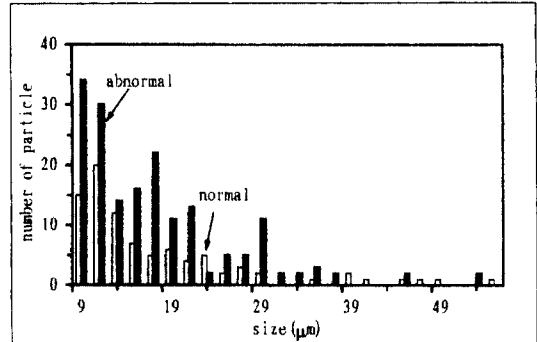


Fig. 6. Distribution of wear particles collected from normal and abnormal engine.

포를 나타내었으며, 비정상 상태의 경우는 오일 사용시간이 훨씬 짧음에도 불구하고 정상 상태에 비해 2배 정도에 달하는 약 19.6%가 존재하고 있는 것으로 나타났다.

3-2-2. 마모입자의 형상

Fig. 7~Fig. 9는 정상 상태의 엔진(엔진 사용시간:

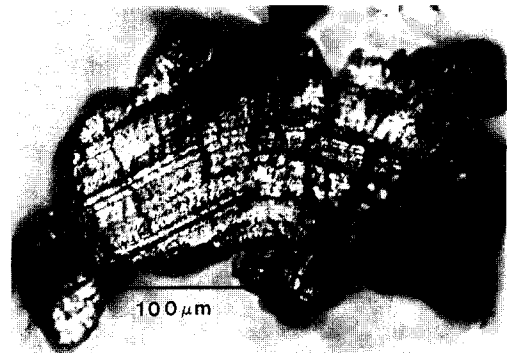


Fig. 7. Sever wear particle.

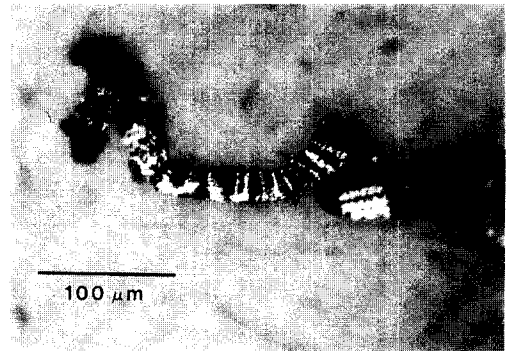


Fig. 8. Cutting wear particle.

Table 1. Comparison of number of wear particles according to engine and oil running time.

상 태	Eng/Oil time (hr)	전체입자수 (개)	>8 μm 입자수 (개)
normal	1425/126	897	89
abnormal	886/28	899	176

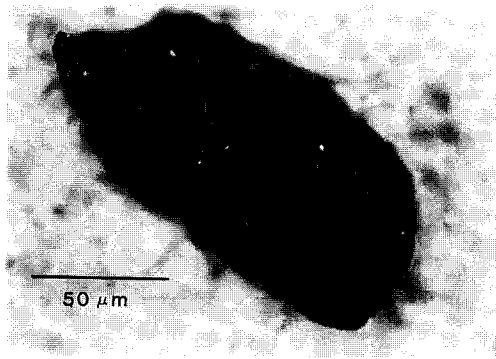


Fig. 9. Oxidational wear particle.

1105시간, 오일 사용시간: 531시간)과 비정상 상태 엔진(엔진 사용시간: 886시간, 오일 사용시간: 28시간)의 오일과 필터에서 수집된 마모입자들의 크기와 형상을 광학현미경을 통하여 관찰하였다. 그 결과 마모입자의 크기와 형상은 엔진의 정상 또는 비정상 상태에 관계없이 유사한 경향을 보여주었으며, 주로 가혹 마모입자, 절삭마모입자, 산화마모입자들이 관찰되었

다. 이러한 마모입자들이 많이 관찰되는 것으로 보아 마찰 구성품의 마모 표면에 과도한 응력의 부과와 오염물질, 수분 그리고 가스 등이 윤활계통내에 침투하여 존재하고 있음을 알 수 있었다.

3-2-3. 마모입자의 성분 분석

Table 1에서 나타난 비정상 상태의 엔진에서 2차 경고가 발생한 후 엔진 필터에서 채취한 중마모입자들을 형상별로 EDS 분석을 수행하였다. 또한 분석된 합금 성분으로 마모가 심하게 진행된 엔진의 구성품을 확인하였으며, 그 결과가 Fig. 10~Fig. 12에 나타나 있다. Fig. 10은 Ag가 지배적인 것으로, 마모입자가 평평하고 매끄러운 표면을 가진 관상박리마모입자들에서 나타난 것이다. 이것은 엔진 구성품중 main bearing cages의 합금성분과 일치하는 것으로 나타났다. Fig. 11은 Ni이 지배적인 성분으로서, 길고 날카롭게 생긴 절삭마모입자들에서 나타났다. 이것은 엔진 구성품중 main bearing housings의 합금성분과 일치하는 것으로 나타났다. Fig. 12는 Fe가 지배적인 것으로, 마모입자의 형태가 무질서하고, 표면이 거친 피로마모

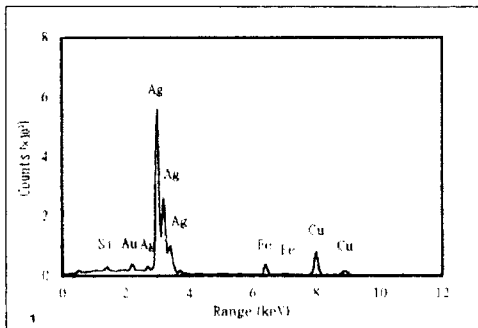
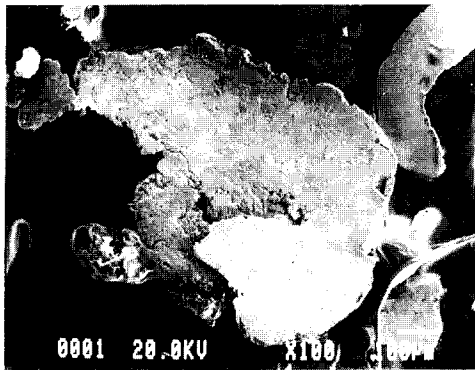


Fig. 10. Morphology of delamination wear particle and its compositions.

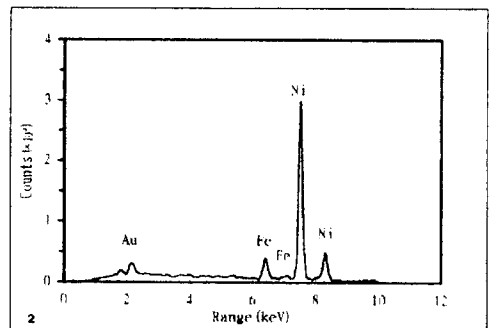
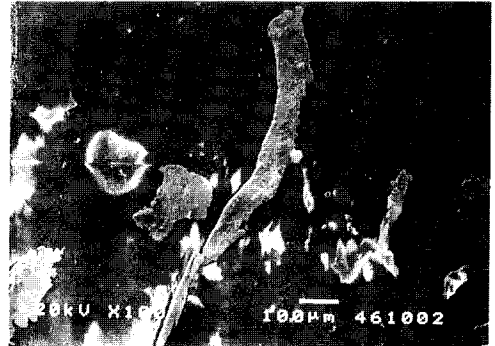


Fig. 11. Morphology of cutting wear particle and its compositions.

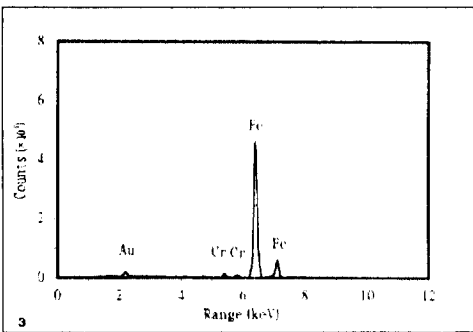
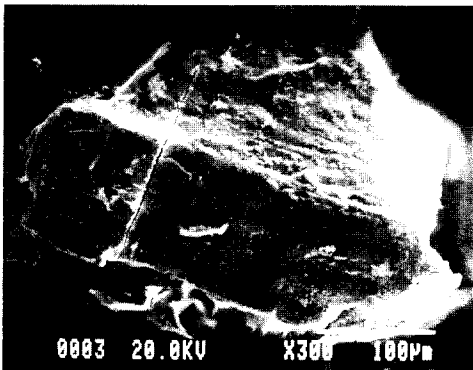


Fig. 12. Morphology of fatigue wear particle and its compositions.

입자들에서 나타났다. 이러한 합금성분의 엔진 구성품을 조사해 본 결과 No. 2 베어링의 볼과 레이스의 합금성분과 일치하였다. 따라서 엔진의 각 구성품으로부터 떨어져 나온 마모입자들은 그 형상을 달리하고 있었으며, 이는 각 구성품 재료의 기계적 특성에 따른 마모기구의 차이에 기인된 것으로 분석되었다.

Table 1의 비정상 상태로 나타났던 동일 엔진에서 3차 경고가 발생했을 때의 JOAP분석 결과가 Fe (170)와 Cu(363) 및 Si(46)로 나타났다. 이때 엔진을 분해한 결과 파손된 엔진 부품은 Fig. 13에서 보는 바와 같이 No. 2 베어링이었다. 베어링강의 조성은 표 2와 같으며, Fig. 12에서와 같은 피로마모입자가 No. 2 베어링의 합금성분과 일치하므로 이 부품에서 떨어져 나온 것임을 알 수 있었다. 그러나 기술지시서와는 달리

Table 2. Compositions of M50 bearing steel.

성분	C	Cr	Mo	Be	Fe
조성(wt%)	0.85	4.1	4.25	1.0	Bal.



Fig. 13. Fractured balls and race of No. 2 bearing.

JOAP분석 결과에서는 Cr이 전혀 검출되지 않았다. 따라서 JOAP 분석 결과만으로는 마모가 심하게 진행되고 있는 구성품을 판단하기가 매우 어렵다는 것이 입증되었다. 또한 Fig. 10, Fig. 11에서 나타난 것과 같이 Ag와 Ni의 성분이 분석되었음에도 불구하고 JOAP 분석에서는 전혀 검출되지 않았다. 이는 Ag와 Ni이 많이 함유된 마모입자들의 크기가 JOAP 분석한계를 초과하여 검지되지 않은 것으로 판단되며, 따라서 엔진의 상태 판단을 위하여 JOAP 분석만으로는 한계가 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 JOAP의 정량적인 분석방법으로 엔진 및 오일 사용시간에 따른 엔진의 상태를 예측할 수 있는 수식을 유도하였으며, JOAP의 단점을 보완하기 위하여 정성분석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 엔진오일에서 검출된 Fe 마모입자의 농도(ppm)는 오일 사용시간의 함수, $w=a(t) \cdot t_0 + b$ 로 일반화할 수 있었다. 이때 농도의 증가 기울기는 엔진 사용시간의 함수로 나타났다. 따라서 엔진 사용시간(t)과 오일 사용시간(t_0)을 알면 엔진이 정상 또는 비정상 상태에 있는지를 판단하고, 예측할 수 있다.
2. 비정상 상태가 발생한 엔진의 마모입자를 정성 분석한 결과 심하게 마모가 일어나고 있는 구성품을 알 수 있었다.
3. 정상 및 비정상 상태에서 모두 JOAP 분석한계를 초과하는 8 μm 이상의 입자들이 오일내에 상 당수가 존재하고 있음을 알 수 있었다.
4. 모든 엔진에 대하여 정량 및 정성분석을 수행하는

것은 현실적으로나 경제적으로 비효율적이므로 정량적인 분석 경향이 비정상 상태와 유사한 경향, 즉 엔진 사용시간에 따른 Fe 마모입자 농도의 증가 기울기가 정상 상태에서의 기울기 허용범위를 초과하는 엔진에 대하여만 별도의 정성 분석을 수행한다면 condition monitoring 본래의 목적을 달성할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Williams, Davies and Drake, "Condition-based Maintenance and Machine Diagnostics," CHAPMAN & HALL, 1994.
2. D. Scott and V. C. Westcott, "Predictive Maintenance by Ferrography," Wear, 44(1977), pp.173-182.
3. Malte X. Lukas & Daniel P. Anderson, "Machine Condition Monitoring Through Oil Analysis," 1992. 6.
4. 김해원, 이기영, 강석춘, "항공기 엔진의 상태 점검을 위한 페로그래피의 이용," 공사논문집, 제28집 1990. 5.
5. 강석춘, "마멸입자 분석에 의한 기계의 예방정비에 관하여," 대한기계학회지, 제27권 6호, 1987, pp.489-495.
6. "Technical Order 33-1-37"
7. 권오관, 오박균, 김창호, 공호성, 송응석, "Machine Health Monitoring 기술 개발(1차년도)," 과학기술처, 1986.
8. 공군군수사령부 항공기술연구소, "오일 분광 분석," 1993, pp.11-46.
9. Daniel P. Anderson, "Wear Particle Atlas," 1991, Report NAEC-92-163.