

## 하이브리드 굴삭기용 선회감속기의 가속수명시험에 관한 연구<sup>§</sup>

박종원\*<sup>†</sup> · 최병오\* · 김경근\*\*

\* 한국기계연구원 신뢰성평가센터 , \*\* (주)두산인프라코어 기술원

### Study on Accelerated Life Testing of Swing Reduction Gear Box for Hybrid Excavator

Jong Won Park\*<sup>†</sup>, Byung Oh Choi\* and Kyeong Keun Kim\*\*

\* Reliability Assessment Center, Korea Institute of Machinery & Materials,

\*\* Doosan Institute of Technology

(Received December 28, 2012 ; Revised September 16, 2013 ; Accepted September 25, 2013)

**Key Words:** Hybrid Excavator(하이브리드 굴삭기), Swing Reduction Gear Box(선회감속기), Failure Mode (고장 모드), Accelerated Life Test(가속 수명 시험)

**초록:** 하이브리드 굴삭기는 기존 굴삭기와 달리 선회구동계에 유압모터를 대신하여 선회전동기를 사용하고 있다. 하이브리드 굴삭기의 신뢰성을 평가하고 보증하기 위해서는 기계와 전기적인 고장모드가 조합되어 고려되어야 한다. 특히, 하이브리드 굴삭기용 선회감속기는 가혹한 실외환경에서 운용되므로 시제품에 대한 현장작동조건을 고려한 가속수명시험이 수행되어야 한다. 본 연구에서는 선회구동계 중 선회감속기에 대한 가속수명시험 기법의 개발을 위하여 FMMA, FMAECA, FTA 및 QFD와 같은 정성적 신뢰성기법을 활용하였고, 개발된 가속조건에 의한 수명시험결과를 유분석 기법 등을 활용 분석하여 평가대상 시료가 목표 신뢰도를 만족함을 확인하였다.

**Abstract:** The swing motion drive unit of a hybrid excavator is composed of an electrical motor instead of a hydraulic motor that is used in hydraulic excavators. The method to assess and guarantee the reliability of a hybrid excavator should consider combining the mechanical and the electrical failure mode effects. In particular, the swing reduction gear set of a hybrid excavator is operated under severe outdoor conditions; therefore, an accelerated life test, which is based on field operating condition, should be conducted for the newly developed reduction gear set. In this study, various qualitative methods for reliability engineering, such as FMMA, FMECA, FTA, and QFD, were used to develop the accelerated life test method for the swing drive reduction gear set for the hybrid excavator.

- 기호설명 -

$t_n$  : 무고장 시험 시간  
 $B_{100p}$  : 보증 수명  
 $CL$  : 신뢰 수준(Confidence Level)  
 $p$  : 불 신뢰도( $B_{10}$  수명이면  $p = 0.1$ )  
 $n$  : 시료 수  
 $\beta$  : 형상 모수  
 $AF$  : 가속 계수

$Torque_{test}$  : 가속조건 토크  
 $Torque_{field}$  : 필드 등가 토크  
 $T_{test}$  : 가속조건 온도(K)  
 $T_{field}$  : 정상조건 온도(K)  
 $E_a$  : 활성화 에너지( $E_a = 0.5eV$ )  
 $k$  : 볼츠만 상수( $8.617 \times 10^{-5}(eV/K)$ )  
 $m$  : 가속 지수  
 $t_{na}$  : 가속 수명 시험 시간

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012.

11. 7.-9., CECO) 발표논문임

† Corresponding Author, [jwpark@kimm.re.kr](mailto:jwpark@kimm.re.kr)

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

## 1. 서론

### 1.1 연구 목적 및 범위

하이브리드 굴삭기는 기존 굴삭기와 달리 선회

구동계에 유압모터를 대신하여 선회전동기를 사용하고 있다. 하이브리드 굴삭기의 선회구동계는 선회전동기와 선회감속기 그리고 선회전동기의 구동을 위한 전력변환기 및 Ultra capacitor로 구성되며, 전력변환기는 선회감속시에 회생 발전으로 발생하는 전류에 의한 Ultra capacitor의 충전 및 선회모터 구동시 방전 제어를 위한 제어기를 포함한다.

건설중장비 고객은 매우 보수적이기 때문에 고객들은 제품의 품질문제에 대한 의문을 가지고 있고, 이는 하이브리드 굴삭기의 시장 진입을 가로막는 가장 큰 장애물로 인식되고 있다. 하이브리드 굴삭기의 핵심 성공요인은 일차적으로 신뢰성으로 판단되어 하이브리드 굴삭기의 핵심 부품 및 시스템에 대한 신뢰성 평가기술은 하이브리드 굴삭기의 개발에 있어서 필수적인 기술이라 할 수 있다.<sup>(1)</sup>

본 연구에서는 선회구동계 중 선회감속기에 대한 가속수명시험 기법의 개발을 위하여 FMEA, FTA 및 QFD와 같은 정성적 신뢰성기법을 활용하였고, 개발된 가속조건에 의한 수명시험결과를 유분석 기법 등을 활용 분석하여 평가대상 시료가 목표 신뢰도를 만족함을 확인하였다.<sup>(2)</sup>

## 2. 선회감속기 고장모드 분석

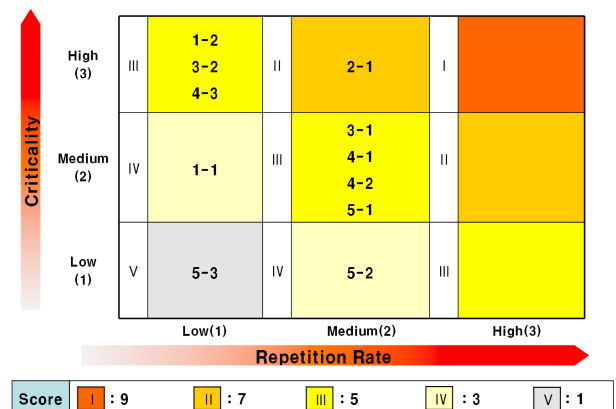
선회감속기의 가속수명시험 조건을 설계하기 위하여 제품의 고장 영향과 고장모드를 조사하고 잠재적인 고장을 확인하여야한다. 이는 제품 설계, 제작, 조립 시스템 장착 운용 등에서 제품의 불완전으로 인한 잠재적 결함을 찾아내기 위하여 구성 요소의 고장 형태와 그 상위 제품에 미치는 영향을 해석하여 설계 개선으로 연결시키기 위한 중요한 부분이다. 이를 위한 주요 고장 모드 분석 기법으로 Table 1에서 Table 4, Fig. 1에서 Fig. 2와 같이 주요부품의 고장모드와 고장메커니즘 분석을 위한FMMA, FMMA에서 도출된 고장모드에 대하여 발생빈도와 심각도를 고려하여 주 고장모드를 결정하기 위한 CMA, FMMA에서 도출된 고장모드에 대하여 고장에 영향을 주는 부하 (Stress) 인자와 이에 대한 설계개선사항을 추천하는 FMECA, 고장모드별로 고장률을 정의하여 시스템의 신뢰도를 정량적으로 추정할 수 있는 FTA, 도출된 고장모드별로 관련된 시험방법과 중요도를 평가할 수 있는 QFD를 수행하여 활용하

였다.

선회감속기의 고장모드 분석 결과 고장 발생빈도가 높고 심각성이 높은 고장모드는 누유로써 하우징 내부 오일을 밀봉하는 씰(Seal)의 손상에 의하여 발생할 수 있으므로 씰 부위의 설계와 씰

**Table 1** Failure Modes and Mechanisms Analysis (FMMA)

Primary Components	Function	Failure Modes	Failure Mechanisms	
Shaft	output torque transmission, cylinder barrel assembly remains	breakage of shaft	1-1	lack of Material strength
		vibration	1-2	deformation
Seal	seal housing internal oil	leakage	2-1	high-speed, scratches
Bearing	rotation axis support, gear support, body and sprocket connection	wear of bearing	3-1	over-speed load, impact
		breakage of bearing	3-2	lateral load, impact
Reduction Gear	increase torque, power transmission, sprocket mounting	wear of gear part	4-1	over-speed load, impact
		deformation of gear part	4-2	faulty of surface treatment
		damage of bearing assembly part	4-3	lateral load, impact
Cover & Housing	keep the internal parts of swing driving unit, lubricating oil filling	breakage of joint part	5-1	over-load, impact
		external corrosion	5-2	faulty of surface treatment
		cracks and pinholes	5-3	external force



**Fig. 1** Criticality Matrix Analysis(CMA)

**Table 2** Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA)

Primary Components	Failure Modes	Failure Effects	Failure Mechanisms	Criticality			Related Stress	Optimum Design Considerations
				failure frequency	failure severity	Criticality		
Shaft	breakage of shaft	unable to torque transmission	lack of Material strength	low	middle	3	torque	-
	vibration	efficiency & life degradation	deformation	low	high	5	vibration	bearing capacity & support the position
Seal	leakage	life degradation	high-speed, scratches	middle	high	7	temperature & pressure	cooling capacity
Bearing	wear of bearing	performance degradation	over-speed load, impact	middle	middle	5	torque, load	bearing capacity & support the position
	breakage of bearing	life degradation	lateral load, impact	low	high	5	torque, impact	bearing capacity & support the position
Reduction Gear	wear of gear part	performance degradation	over-speed load, impact	middle	middle	5	torque, load	heat treatment & surface roughness
	deformation of gear part	life degradation	faulty of surface treatment	middle	middle	5	torque, load	gear material and shape
	damage of bearing assembly part	life degradation	lateral load, impact	low	high	5	load, impact	bearing capacity & support the position
Cover & Housing	breakage of joint part	life degradation	over-load, impact	middle	middle	5	impact	enhanced vibration-proof, consider strength of Fastening Parts
	external corrosion	life degradation	faulty of surface treatment	middle	low	3	temperature & humidity	-
	cracks and pinholes	external leakage	external force	low	low	1	fatigue, load	-

**Table 3** Quality Function Deployment Level I (QFD I)

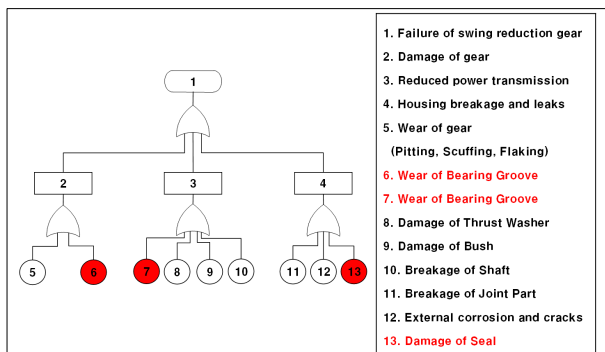
Requirement	leakage, Pressure reduction	breakage of shoe, wear of piston	increased friction,	wear and deformation of cylinder barrel	damage of control valve	damage of seal	damage of bearing	damage of gear and spline
torque generation	◎	◎	◎	◎	●	◎	●	●
sliding for low-friction	◎	◎	◎	◎	▲	●	●	▲
over pressure control	◎	▲	▲	●	●	●		●
speed control	◎	▲	●	▲	◎	▲	●	●
oil seal	◎	◎	◎	●	◎	◎	▲	▲
increase torque	◎	◎	◎	●	▲	▲	▲	◎
foreign objects blocking	◎	●	●	●	●	◎	◎	▲
body and frame support							◎	▲
importance scores	35	25	27	23	20	28	21	18

※ The most important : ◎(5), important : ●(3), average : ▲(1)

**Table 4** Quality Function Deployment Level II (QFD II)

Failure Mode	Importance Scores	vibration test	high & low temperature, humidity test,	braking torque test	over rotational speed	total efficiency Test	life test
leakage, Pressure reduction	35	◎	◎	◎	●	◎	◎
breakage of shoe, wear of piston	25		●		◎	◎	◎
increased friction	27	▲	●	▲	◎	◎	◎
wear and deformation of cylinder barrel	23	●	○	●	●	◎	◎
damage of control valve	20	●	●	●	▲	●	◎
damage of seal	28	◎	◎	◎	●	◎	◎
damage of bearing	21	◎	●	◎	◎	▲	◎
damage of gear and spline	18	◎	▲	●	◎	●	◎
Test Effectiveness Score and Rank		666 5	681 4	630 6	733 3	825 2	

※ The most important : ◎(5), important : ●(3), average : ▲(1)



**Fig. 2** Fault tree analysis(FTA)

의 선정시 각별한 주위가 요구된다. 또한, 베어링 조립부의 마모와 파손시 심각한 영향을 미칠 수 있으므로 베어링에 가해지는 하중을 현장 작동조건을 최대한 반영하여 산출하고<sup>(3)</sup> 이를 기반으로 전략적인 안전계수가 가미된 선정 절차를 거쳐 베어링이 결정되어져야 할 것으로 사료된다.

### 3. 가속수명시험 설계

하이브리드 굴삭기용 선회감속기의 신뢰성을

제한된 시간내에 기존 굴삭기용 부품들과 동등한 수준에 도달하였는지 평가하기 위해서는 가속수명시험방법의 개발 및 적용이 요구된다. 이에 실사용 조건보다 가혹한 조건(가속 조건)에서 수명시험하여 고장을 촉진시키고, 가속 조건에서 관측된 데이터로부터 수명-스트레스 관계를 추정하고, 이를 사용 조건으로 외삽(Extrapolation)하여 사용 조건에서의 수명을 빨리 추정하기 위한 가속수명시험모델을 개발하였다.

### 3.1 무고장 시험시간 산출

일반적으로 신뢰성 목표가 정해지면 무고장 시험시간의 계산은 식 (1)과 같이 계산될 수 있다.

$$t_n = B_{100p} \cdot \left[ \frac{\ln(1-CL)}{n \cdot \ln(1-p)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (1)$$

무고장 시험은 시험대상 시료가 신뢰성목표를 만족하는 시험시간까지 고장 없이 작동하여야 목표한 신뢰성을 보장하는 것으로 개발기간이 제한되어 있는 경우에는 시험시간의 제약으로 시험시간의 단축을 위하여 가속수명모델을 개발하고 가속계수를 산출하여 시험시간을 단축하게 된다. 이때 복합하중인자에 대한 가속모델의 가속계수 계산 예는 식 (2)와 같다.<sup>(4,5)</sup>

$$AF = \left( \frac{Torque_{test}}{Torque_{field}} \right)^m \exp \left( \frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_{field}} - \frac{1}{T_{test}} \right) \right) \quad (2)$$

### 3.2 가속수명시험 시간 산출

식 (2)에서 산출된 가속계수를 이용하여 가속수명시험 시간의 계산은 식 (3)에 따른다.

$$t_{na} = \frac{t_n}{AF} \quad (3)$$

### 3.3 선회감속기 가속수명시험모델 개발

하이브리드 굴삭기용 선회감속기의 필드고장 데이터를 활용하여, 수명 분포 및 모수를 추정할 결과 선회감속기의 수명은 Weibull 분포를 따르고, 고장모드 분석결과 고장 발생빈도가 높은 유성기어의 마모 고장에 의한 형태모수 3.0을 적용하였다.

하이브리드 굴삭기용 선회감속기의 가속수명시

험을 위한 가속조건으로는 필드에서의 등가부하에 대한 가속시험시의 부하 토크를 적용하여 기어의 마모 고장에 따른 역승 모델(Inverse Power Law model)과 기어 윤활유의 온도 상승에 따른 아레니우스 모델(Ahrenius model)을 복합한 형태로 가속계수를 산출하였고,<sup>(6)</sup> 선회감속기의 B<sub>10</sub> 10,000시간 수명을 신뢰수준 90%로 보증하기 위한 가속수명시험 시간은 1,136시간으로 도출되었다.

하이브리드 굴삭기용 선회감속기의 가속수명시험 합격기준은 발체시료 1개를 1,136시간까지 가속수명 시험한 후, 고장이 없고 성능시험(대표성능구간시험을 실시하여 성능의 저하가 10 % 이내)의 평가기준을 만족하면, 신뢰수준 90 %에서 작동시간 10,000시간(B<sub>10</sub> 수명)을 보장하는 것으로 하였다.

## 4. 선회구동계 수명시험장비 개발

하이브리드 굴삭기용 선회구동계에 대한 수명시험장비를 Fig. 3과 같이 개발하였고, 주요 작동부의 유압회로도도 Fig. 4와 같다. 기존 유압굴삭기의 선회감속기에 대한 수명시험장비는 선회감속기의 구동을 위하여 선회용 유압모터를 사용하나 개발된 시험장비에서는 선회전동기를 사용하여 선회감속기를 구동한다. 또한, 기존 시험장비의 부하부에는 관성부하용 Fly Wheel을 사용하기 때문에 수명시험 중 변동부하의 구현이 불가능하나 개발된 시험장비는 부하부에 유압식굴삭기의 선회구동계(선회용 유압모터 및 감속기 결합체)를 적용함으로써 수명시험 중 자유롭게 부하의 변동이 가능하게 한 점이 특징이다.

개발된 시험장비의 수명시험 시 시료부의 선회전동기는 속도제어를 하게 되며 부하부의 유압모터는 비례 압력제어밸브(Fig. 4의 ①)에 의하여 설정된 부하만큼 시료부의 전동기에 부하 토크가 가해지도록 작동하게 된다.

부하용 유압모터의 작동시 캐비테이션의 방지를 위하여 작동유 충전용 펌프(Fig. 4의 ③)에서 유량을 계속 보충하여 주며 이때의 충전압력은 릴리프밸브(Fig. 4의 ②)에 의해서 조절되게 된다.

수명시험시의 등가 부하토크는 비례 압력제어밸브(Fig. 4의 ①)에 의하여 가변 될 수 있고, 시료부의 선회전동기는 토크제어가 아닌 속도제어만을 하게 되며, 부하부의 유압모터는 설정압력에 의한 토크 즉, 부하제어만을 수행하게 된다.<sup>(4)</sup>



Fig. 3 Equipment of reliability assessment

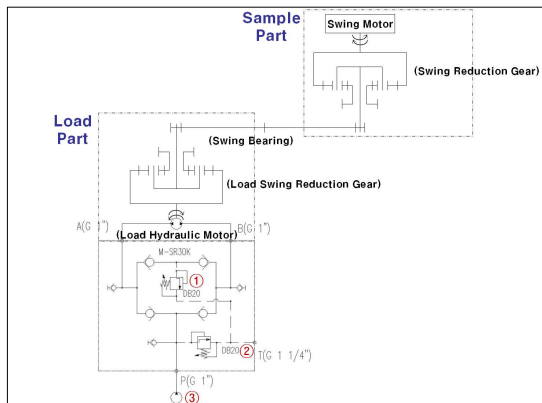


Fig. 4 Hydraulic circuit diagram

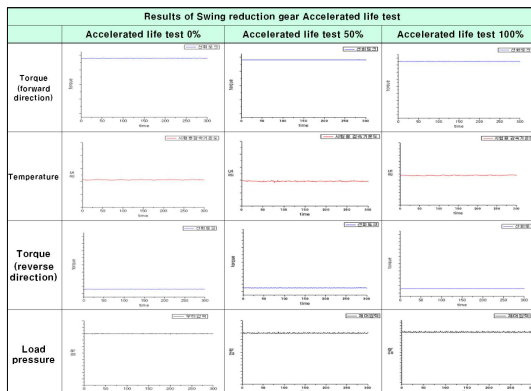


Fig. 5 Performance data graph of ALT

### 5. 가속수명시험 결과 분석

#### 5.1 가속수명시험

본 연구에서는 하이브리드 굴삭기용 선회감속기의 시료 1개를 3.3절에서 구한 가속수명시간인 1,136시간까지 가속수명시험 한 결과 고장이 없고 성능시험의 평가기준(가속수명시험 전 초기성능대비 성능저하 10 % 이내)을 만족하여 신뢰수

Table 5 Results of measuring the number of particles pollution and ISO 4406; pollution grade code

ISO 4406 : 1999 Pollution Grade Code		
ISO 4406 Range Number	Greater Than	Less Than
28	1,300,000	2,500,000
27	640,000	1,300,000
26	320,000	640,000
25	160,000	320,000
24	80,000	260,000
23	40,000	80,000
22	20,000	40,000
21	10,000	20,000
20	5,000	10,000
19	2,500	5,000
18	2,300	2,500
17	640	2,300
16	320	640
15	160	320
14	80	160
13	40	80
12	20	40
11	10	20
10	5	10
9	3	5
8	1	2.5
7	1	1.3
6	0	0.64
5	0	0.32
4	0	0.16
3	0	0.08
2	0	0.04
1	0	0.02
0	0	0.01

Results of measuring the number of particles pollution

Sample	Gear Oil of Swing Reduction Gear	
	Particle Number	Pollution Grade
Particle Size > 4 μm	105,797	24
> 6 μm	19,291	21
> 14 μm	569	16

준 90 % 에서 작동시간 10,000시간(B<sub>10</sub>)을 보장함을 확인하였으며, 고장과 시료의 열화 정도에 대한 상세분석을 위하여 가속수명시험시 실시시간으로 성능측정데이터를 저장하였다.

수명시험장비의 제어부에서는 실시시간으로 측정



Fig. 6 Metal check, wear check analyzer

되는 성능측정값 및 구동부의 작동 조건(온도, 압력, 가속도, 전류, 전압 등) 측정 값이 초기 설정 값을 초과하는 경우 시험이 자동으로 정지되고 경고 메시지가 발생되도록 프로그래밍이 되었다. 수명시험 전과 후의 대표적인 성능측정결과 그래프를 Fig. 5에 나타내었다.

5.2 기어유 마모 성분 분석

하이브리드 굴삭기용 선회감속기 가속수명시험 완료 후, 선회감속기 가속수명시험에 사용된 기어유를 샘플링 도구와 청결한 샘플병으로 샘플링하여 기어유 속에 포함된 오일의 마모 성분을 샘플링 즉시 분석한 결과 시험 전에 비해 철, 구리, 규소, 실리콘의 성분이 증가하였으나, 심각한 수준이 아닌 정상적인 수치로 판단된다. 기어유 성분분석에 사용된 분석기를 Fig. 6에 나타내었다.

5.3 오염도 분석을 통한 기어유 열화상태 확인

선회감속기 기어유에서 측정된 ISO 4406에 의한 이물질 등급은 내구시험 완료 후 24/ 21/ 16 등급이다.

이는 Table 5와 같이 일반적인 변속기의 내구 시험 완료 후 관찰되는 오염등급과 비교하여 매우 양호한 등급 상태이며, 선회감속기에서 검출된 마모 입자는 Fig. 7과 같이 피로와 슬라이딩마모가 주마모로 관찰되었지만, 이는 선회감속기의 고장을 유발하기에는 아주 미미한 정도로 사료된다.<sup>(7,8)</sup>

선회감속기를 분해하여 각 부품을 육안 확인한 결과 주로 윤활부인 황동계열의 저널 베어링에서 스크래치 등의 손상이 발생된것을 확인하였다.

Table 6에서 알 수 있듯이 마모입자의 주성분은 철, 황동, 실리콘 계열이었는데 실리콘은 쉘링부 열화 및 이물질 유입에 의해 발생한 것으로 사료된다. 비금속 계열의 원소 성분 증가는 작동

Table 6 Metal check, wear check analysis

Wear Metals In Parts Per Million(PPM)(10 <sup>6</sup> mg/kg)										
Component Time	Wear metal elemental composition									
	Fe	Cr	Pb	Cu	Sn	Ai	Ni	Mo	Ti	Si
Accelerated life test 0%	<2	<2	<2	<2	3	5	0	2	0	8
Accelerated life test 100%	51	5	<2	17	10	6	0	<2	0	39
Component Time	Elemental composition contained gear oil									
	Mn	V	B	Mg	Ca	Ba	P	Zn	Na	K
Accelerated life test 0%	5	0	1	1	42	0	718	48	2	<2
Accelerated life test 100%	3	3	0	1	30	0	675	45	<2	<2

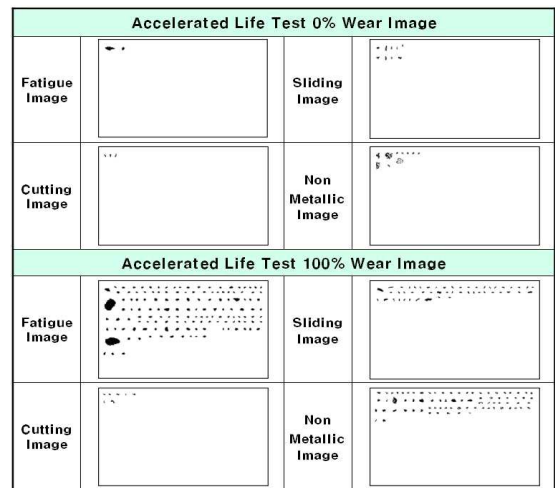


Fig. 7 Wear mode for particles larger than 20 μm particle shape analysis

유에 첨가되는 윤활제의 성분에 의하여 많이 좌우되며 작동유의 고온에서의 산화 및 윤활제와의 화학반응에 의하여 비금속계열의 원소 성분이 생성될 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 하이브리드 굴삭기의 선회구동계 중 선회감속기에 대한 가속수명시험 기법의 개발을 위하여 FMMA, FMECA, FTA 및 QFD 등의 정성적 신뢰성기법을 활용한 고장모드 분석을 수행하였고, 무고장 수명시험시간을 단축하기 위

한 가속수명시험을 설계하고 하이브리드 굴삭기용 선회감속기에 대한 가속수명시험을 수행하였다.

하이브리드 굴삭기용 선회감속기의 가속수명시험 완료 후 시료 분해를 통한 각부의 마모나 변형, 파손 등을 육안 확인한 결과 미세한 수준의 마찰흔, 기어 물림 자국 등이 나타났으나, 심각한 수준의 표면 피팅 손상 및 변형, 파손은 없음을 확인하였고, 가속수명시험 전의 기어유 신유와 가속수명시험 완료 후 기어유의 마모 성분을 분석한 결과 시험 전에 비해 철, 구리, 규소, 실리콘의 성분이 증가하였는데, 이는 윤활부의 저널 베어링과 씰링부의 열화 및 이물질 유입에 의해 발생한 성분으로 판단된다.

또한, 선회감속기에서 검출된 마모 입자는 피로와 슬라이딩 마모가 주 마모모드로 관찰되었지만, 이는 선회감속기의 고장을 유발하기에는 아주 미미한 정도이며 감속기의 고장모드 분석결과와 같이 베어링과 기어치의 피로마모가 주 고장모드임을 확인하였다.

전술한 과정들을 통하여 개발된 하이브리드 굴삭기용 선회감속기에 대한 가속수명모델 및 신뢰성평가장비는 선회전동기, 전력변환기 및 Ultra Capacitor 등과 같은 하이브리드 굴삭기 동력전달계의 핵심부품 신뢰성평가에도 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 논문은 산업통상자원부 산업원천기술개발사업의 하이브리드 굴삭기 핵심기술개발 과제로 수행된 연구결과의 일부로 지원을 아끼지 않으신 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Park, J. W., Lee, K. W. and Kim, H. E., 2011, "Development of Reliability Test Method for Hybrid Excavator," *KSME Spring Conference in Jeju*, pp. 95~96.
- (2) Dimitri Kececioglu, Ph. D., P. E., 1993, *Reliability and Life Testing handbook*, Vol. 1, Prentice Hall PTR. New Jersey, pp. 1~104.
- (3) Tyrone, L. J., 2007, *Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment*, Naval Surface Warfare Center, West Bethesda, pp. 14-1~22-14.
- (4) Verhoeve, C. W. G. and Frumau, C. F. A., 1997, *Reliability Testing of Ac-module Inverters*, European Photovoltaic Solar Energy Conference.
- (5) Sawyer, E. and Kampen, T. V., 2008, *Reliability Consideration Inverters/DC Link Capacitor Using PP Film and 105°C Engine Coolant*, IMAPS.
- (6) Li, Y., Billington, S., Zhang, C., Kurfess, T., Danyluk, S., and Liang, S., 1999, "Dynamic Prognostic Prediction of Defect Propagation on Rolling Element Bearings," *Trans. Journal of Tribology*, Vol. 42, No. 2, pp. 385~392.
- (7) Jones, A. B., 1960, "A General Theory for Elastically Constrained Ball and Radial Roller Bearings Under Arbitrary Load and Speed Conditions," *Trans. of ASME.*, 82, pp. 309~320.
- (8) Filetti, E. G. and Rumbarger, J. H., 1970, "A General Method for Predicting the Influence of Structural Support Upon Rolling Bearing Performance," *Trans. of ASME.*, 921, pp. 121~128.