

소형 굴삭기의 주행구동유니트 시험평가에 관한 연구

이기천 · 이용범[†] · 최병오

한국기계연구원 신뢰성평가센터

A Study on Track Drive Unit Test and Evaluation for Mini Excavators

Gi-Chun Lee · Young-Bum Lee[†] · Byung Oh Choi

Reliability Assessment Center, Korea Institute of machinery & Materials

Track drive unit adopted in the small sized excavator generally have been used in the construction equipment under the 10 tons as the driving device with forwarding and reversing of excavator. It is required to study the accelerated life test applied by over torque and speed to test the durability life test reflected the many driving modes of small sized excavator and also need to equip the comprehensive performance and life test equipments to do the various performance tests. This study had analyzed the failure modes of the components, and calculated the equivalent loads investigated the used loads in the real field conditions and elicits the acceleration factor adopted in the inverse power model. Also, this study have considered the changes of the acceleration factor and the durability test time in the case of the rotary group and the bearing through analyzing the main failure modes. It was calculated the no failure test time about 2 samples and confidence level 90% and elicited the accelerated life time 720 hours.

Keywords: Track Drive Unit, Mini Excavator, Test and Evaluation, Accelerated Life Test, Rated Pressure

1. 서론

굴삭기는 무한궤도식 차량으로 땅을 파거나 깎을 때 주로 사용되는 건설기계로 토목, 건축, 건설 현장에서 땅을 파는 굴삭작업, 토사를 운반하는 적재작업, 건물을 해체하는 파쇄작업, 지면을 정리하는 정지작업 등의 작업을 하는데 사용된다. 소형 무한궤도식 건설차량은 5톤(ton)미만의 건설차량을 말하는 것으로, 특히 3톤 이하의 무한궤도식 건설차량에는 궤도가 고무로 되어 있는 것도 많이 있으며, 이러한 건설차량의 궤도를 전진과 후진을 시켜주는 유압의 원리를 이용한 동력 전달장치가 사용된다.

굴삭기의 구성요소로 장비의 이동 역할을 하는 주행체와 굴삭기에 탑재되어 360도 회전하는 상부 선회체 및 작업장치로 구성되어 있다. 이용범 · 박종호(2005)는 굴삭기 주행체의 주행방식에 따라 무한궤도식과 타이어식으로 구분되며 무한궤도식은 타이어식 건설차량에 비해 작업이 안정적이며, 작

업 생산성이 높기 때문에 장비중량 1톤(ton)에서 100톤(ton) 이상의 초대형에 이르기까지 각 작업 현장에 폭 넓게 사용되며, 타이어식 건설차량은 무한궤도식 건설차량에 비해 타이어 지지방식으로 인해 작업시 안전성은 떨어지나 도로 주행이 가능하며 운반 트레일러 없이 작업장 이동이 가능하기 때문에 작업과 이동을 빈번하게 요구하는 작업현장에 주로 사용되고 있다고 하였다. 지난 몇 년간 국내외 대중소 플랜트사업이 활발해지면서, 필요한 건설기계의 수요가 급증하고 있다. 그렇지만 국내 건설기계용 차량은 장비중량이 5톤(ton)~40톤(ton) 이하의 것을 주로 생산하고 있었으나, 비좁은 공간이나 좁은 도로 등에서 작업을 수행 할 경우 소형 굴삭기의 사용이 증대되고 있다.

이용범과 김광민(2012)는 굴삭기용 주행구동유니트는 전진 및 후진 주행을 하는 핵심부품으로서 유압카운터 밸런스 밸브, 양방향작동 릴리프밸브, 주차브레이크장치, 2속 제어장치, 유압모터와 고 강성 유성기어감속기가 매우 콤팩트한 구조로

[†] 교신저자 lyb662@kimm.re.kr.

2015년 5월 12일 접수; 2015년 7월 2일 수정본 접수; 2015년 7월 11일 게재 확정.

구성되어 있으며, 우리나라에서는 당사를 비롯한 두산모트
를, 선진정공 등에서 건설차량용 동력전달장치를 생산하고
있으나, 5톤(ton)미만의 미니급은 일본 Kayaba사, Kawasaki사,
독일 Rexroth사 및 이태리 Trasmital사 들로부터 전량수입에
의존하고 있으며, 국내생산 건설기계의 대외경쟁력 강화 및
수입대체를 위한 기술 개선이 꾸준히 요구되고 있다고 하였다

소형 굴삭기의 다양한 주행 모드를 반영한 내구 수명 시
험을 위해서는 과부하(과토크 & 과속도)에 의한 가속 수명 시
험연구가 요구되며, 다양한 성능 시험을 실시하기 위해서는
종합성능 및 수명시험 장비 구축이 요구된다본 연구에서는
소형 굴삭기의 각 부품별 고장모드를 분석하였고, 현장 실사
용 조건에서 사용되는 부하를 조사하여 등가부하를 계산하
였고, 역송모형에 적용하여 가속계수를 도출하였다. 또한 본
연구는 주고장 모드의 분석을 통해 로터리 그룹인 경우와 베
어링인 경우에 대해서 가속계수와 수명시험시간의 변화를
고찰하였다. 신뢰수준 90%, 시료수 2개인 경우에 대해서 무
고장 시험시간을 계산하였으며, 이를 통하여 가속시험시간
720시간을 도출하였다.

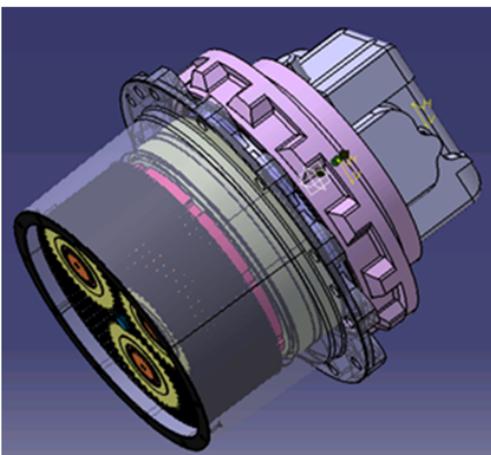
2. 고장모드 분석 및 가속수명시험

2.1 주행구동유니트 소개

주행구동유니트는 무한궤도형 굴삭기의 차체에 장착되어
굴삭기의 전후진 주행과 주차 및 작업중 정지 기능이 있다.
<그림 1>과 <그림 2>의 주행구동유니트는 양방향 카운터벨
런스 밸브, 액셀 피스톤형 2속 유압모터, 3단 유성기어와 주
차 브레이크 등으로 구성되어 있다.

2.2 고장모드 분석

주행구동유니트의 고장모드 분석을 위해 주요 구성품으로

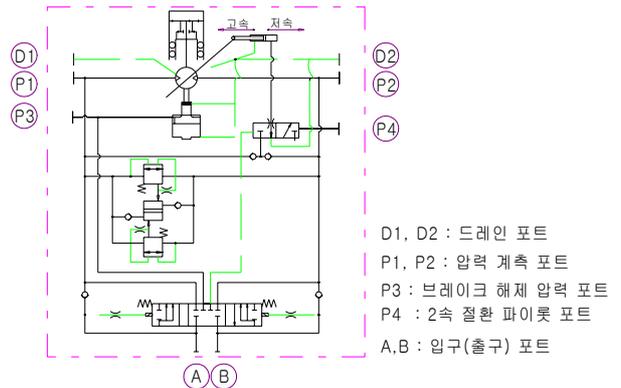


<그림 1> 굴삭기용 소형 주행구동유니트

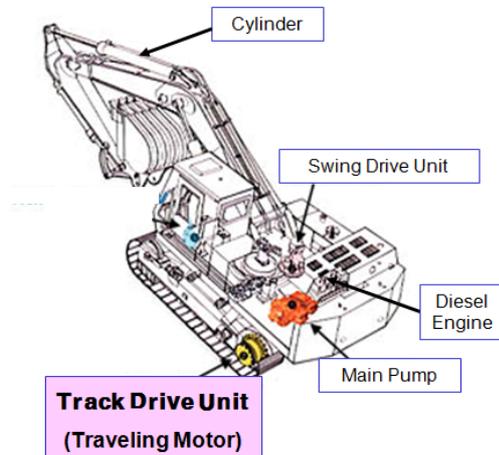
는 피스톤 슈, 실린더 베럴, 축, 쉘, 베어링, 제어밸브, 기어박
스, 하우징 및 커버로 구분하여 고장모드 분석을 실시하였다.

현장에서 발생하는 주요 고장모드로는 로터리 그룹에 해
당하는 피스톤과 슈, 실린더 베럴의 고장에 의한 효율저하로
약 40%의 현장에서의 고장비를 가지고 있으며 실린더 베럴
과 축 등을 지지 및 회전할 수 있도록 하는 베어링에서의 마
모 및 파손으로 40%의 고장비를 가지고 있다. 또한 쉘, 스플
라인, 기어 손상 등에서 나머지 20%의 고장이 발생하는 것으
로 조사되었다.

아래의 <표 1>은 주요 구성품들에 대한 주요 고장모드, 고
장 메커니즘 등을 나타낸 것이다. 주행구동유니트의 주고장
모드는 크게 2가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 유압모터의
로터리 그룹에 대한 것으로 주행구동유니트에서 유압동력을
공급받아 회전을 시켜주는 부분으로 고속회전으로 인한 불
안정성이 증가와 밸런싱의 불균형으로 인한 윤활막 감소등
으로 말미암아 로터리 그룹의 고장이 발생한다. 두 번째 주
고장모드로는 회전하는 축 등을 지지해야 하는 베어링에서
의 고장이다. 마모와 파손 등으로 인한 고장발생은 제품의 상
태에 치명적인 영향을 주게 된다. 이러한 부분은 가속수명시
험의 적용에서 가속인자에 영향을 주게 된다.



<그림 2> 굴삭기용 소형 주행구동유니트 시험장치 회로도



〈표 1〉 주행구동유니트의 고장모드 분석

| Primary components | Function | Failure modes | Failure mechanisms |
|--------------------|--|--|--|
| Piston & shoe | Generating the rotational force applied by the pressure and flow and sealing the cylinder barrel | Leakage | Scratch |
| | | Increasing the friction | Clogging the orifice, Changing the temperature |
| | | Breakage of the shoe | Solid contact wear |
| Cylinder barrel | Distribution and supply the hydraulic fluid, piston guide and keeping the pressure, transmit the output torque | Leakage | Scratch |
| | | Increasing the friction | Damage the bearing |
| | | Not available maintaining the pressure | Scratch |
| | | Breakage of the spline | Insufficient material strength |
| Shaft | Transmit the output torque, Stateful the cylinder barrel assembly | Breakage of the shaft | Insufficient material strength |
| Seal | Sealing the internal oil of a housing | Vibration | Deformation |
| Bearing | Support the rotational shaft and gear, Connecting the housing and sprocket | Leakage | High speed, Scratch |
| | | Wear of bearing | High speed, Over load, Impact |
| Control valve | Defensing the weight falling, Releasing the over pressure, Switching 2-speeds, Controlling the parking brake | Breakage the bearing | Lateral force, Impact |
| | | Adhesive the spool | Thermal load, Contamination |
| | | Wear of spool | Poor surface treatment |
| Gear box | Increasing the torque, Transmitting the power, Installing the sprocket | Deformation of the spool | Generating an external force |
| | | Wear of gear part | High speed, Over load, Impact |
| | | Deformation of the gear part | Poor surface treatment |
| Housing and cover | Keeping the internal parts, Filling the lubrication oil | Impairment of bearing assembly part | Lateral force, Impact |
| | | Damaged coupling part | Over load, Impact |
| | | External corrosion | Poor surface treatment |
| | | Crack and pin hole | Generating an external force |

2.3 가속수명시험 계산

2.3.1 보증수명 계산

무고장 시험을 수행하기 위해서는 보증수명을 결정하기 위해 굴삭기의 사용시간을 산업에서 평균적으로 작업하는 시간은 주당 50시간으로 1년을 50주로 하여 계산하면 연간 2,500시간이 된다. 연간 휴일 및 휴가를 평균적으로 70일로 하면 연간 500시간의 시간이 총 작업시간에서 제외된다. 그러므로 연간 굴삭기의 가동시간은 2,000시간으로 계산하였다. 굴삭기의 설계수명은 약 5년으로 연간 가동시간 2,000시간을 계산하면 10,000시간이 된다. 아래의 <표 2>에서 나타낸 바와 같이 굴삭기의 주요 구성품에서 작동률을 비교하면 주행구동유니트의 경우 굴삭기 전체 가동률의 10%인 1,000시간이 작동되는 것을 알 수 있다.

〈표 2〉 굴삭기 구성부품의 5년간 작동률 및 작업시간

| No. | Components | Percentage of the operating | Operating time for 5 years |
|-----|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1 | Engine | 100% | 10,000 |
| 2 | Main pump | 100% | 10,000 |
| 3 | Hydraulic cylinder | 70% | 7,000 |
| 4 | Rotational driving unit | 40% | 4,000 |
| 5 | Track drive unit | 10% | 1,000 |

2.3.2 무고장 시험시간 계산

“Machinery Failure Analysis and Troubleshooting”에 의하면 구성 부품의 재질 열화에 따른 성능저하와 관련하여, 주행구동 유니트의 수명은 형상모수β가 2.0인 Weibull 분포를 따른다.

〈표 3〉 굴삭기 현장사용조건

| Division | Control | Loading | Speed | Ratio of the operating time(%) |
|----------------------|----------|---------|-------|--------------------------------|
| Marsh | Driving | 0.7 | 0.57 | 68 |
| | Steering | | 0.4 | 6 |
| | Stop | - | - | 6 |
| Solid clay or Gravel | Driving | 0.4 | | 7 |
| | Driving | 0.4 | | 7 |
| | Steering | 0.85 | 0.47 | 3 |
| Gravel | Steering | 0.85 | 0.47 | 1.5 |
| | Stop | - | - | 1.5 |
| Total | | | | 100% |

인증조건으로는 시료는 2개를 대상으로 하며, 수명분포는 형상모수(β)가 2.0인 와이블(Weibull) 분포이며, 보증수명은 B₁₀ 수명 1,000시간이며, 신뢰수준은 90%로 결정하여 무고장 시험 시간을 결정하였다. 무고장 시험 시간(t_n) 산출 식 (1)에

서 3,310시간으로 평가되어야 함을 알 수 있다. 그렇지만 3만 시간 이상의 시간은 오래 동안 시험을 수행하여야 하므로 이를 가속 수명하도록 등가부하에 대한 값을 근거로 가속시험을 수행할 수 있도록 하였다.

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

$$= 1000 \cdot \left[\frac{\ln(1-0.9)}{2 \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{\frac{1}{2.0}} = 3305.6 \approx 3310 \text{ 시간}$$

여기에서 t_n 은 무고장 시험 시간이며, B_{100p} 는 보증 수명, CL 은 신뢰 수준(confidence level)을 나타내며, n 은 시험 중인 전체 아이템의 개수(시료수), p 는 불신뢰도(B_{10} 수명이면 $p=0.1$), β 는 형상 모수를 나타낸다.

2.3.4 등가부하

어떤 부품에 작용하는 동작 사이클(duty cycle)이 <그림 3>에서와 같이 부하의 크기와 작용 회전수가 각각 $P_1, P_2, P_3, \dots, L_1, L_2, L_3, \dots, L_i$ 인 주기적인 변동 부하일 때 각 부하에 의한 부분 손상의 합D는 다음과 같이 표현할 수 있다.

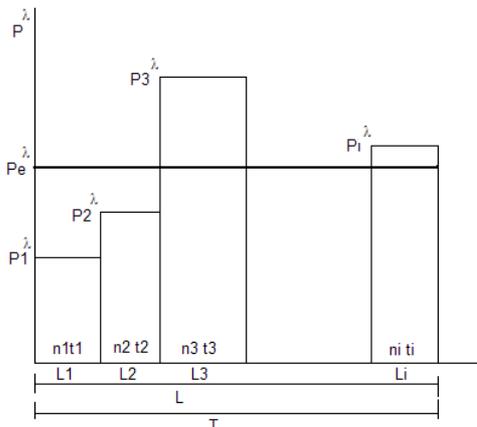
$$P_1^\lambda L_1 + P_2^\lambda L_2 + P_3^\lambda L_3 + \dots + P_i^\lambda L_i = D \quad (2)$$

등가부하가, 다수의 부하가 수명에 미치는 영향과 동일한 영향을 수명에 미치기 위해서는 등가부하에 의한 부분 손상이 다수의 부하에 의한 부분 손상의 합이 같아야 한다. 즉, 등가부하 P_e 에 의한 부분 손상은 D가 되어야 한다.

$$P_e^\lambda (L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_i) = L \quad (3)$$

따라서 식(2)와 식(3)으로부터 등가부하는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_e = \left(\frac{P_1 L_1 + P_2 L_2 + P_3 L_3 + \dots + P_i L_i}{L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_i} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (4)$$



<그림 4> 등가부하

동작 사이클(duty cycle)의 총 회전수 L 에 대한 각 부하의 회전수 L_i 의 비를 f_i 라고 하면, 각 부하의 수명비 f_i 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_i = \frac{L_i}{L} = \frac{L_i}{L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_i} \quad (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입하면 등가부하는 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$P_e = (\sum f_i P_i^\lambda)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (6)$$

각 부하의 회전수 L_i 는 부하의 작용 시간 t_i 와 시간당 회전수 n_i 의 곱과 같으므로,

$$L_i = t_i n_i \quad (7)$$

가 된다. 동작 사이클(duty cycle)의 총 회전수 L 은 동작 사이클(duty cycle)의 총시간을 T 라고 하면 등가시간당 회전수 즉, 등가속도 n_e 와 T 의 곱이 되므로 즉,

$$L = T n_e \quad (8)$$

가 된다. 식(7)과 식(8)을 식(4)에 대입하면

$$P_e = \left(\frac{P_1^\lambda t_1 n_1 + P_2^\lambda t_2 n_2 + P_3^\lambda t_3 n_3 + \dots + P_i^\lambda t_i n_i}{T n_e} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (9)$$

가 된다. 위의 식에서 등가속도 n_e 를 구하면

$$n_e = \left(\frac{P_1^\lambda t_1 n_1 + P_2^\lambda t_2 n_2 + P_3^\lambda t_3 n_3 + \dots + P_i^\lambda t_i n_i}{T P_e^\lambda} \right) \quad (10)$$

가 된다. 동작 사이클(duty cycle)의 총시간 T 에 대한 각 부하의 작용 시간 t_i 의 시간비를 h_i 라고 하면 등가속도는 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$n_e = \frac{1}{P_e^\lambda} \sum h_i n_i P_i^\lambda \quad (11)$$

$$h_i = \frac{t_i}{T} \quad (12)$$

<표 3>으로부터 등가부하와 등가속도를 구하기 위하여 <표 4>에서와 같이 필요한 부분을 계산한다.

〈표 4〉 굴삭기용 주행구동 유니트의 등가부하

| Division | Control | Pressure(P_i) MPa | Speed(n_i) r/min | Ratio of the operating time(h_i) % | L_i | f_i |
|-------------------------|----------|--------------------------|-------------------------|--|--------|-------|
| Marsh | Driving | 14.7 | 12.9 | 68 | 8.772 | 0.608 |
| | Steering | 21 | 9 | 6 | 0.54 | 0.037 |
| | Stop | - | - | 6 | - | - |
| Solid clay or Gravel | Driving | 8.4 | 22.7 | 7 | 1.589 | 0.110 |
| | Driving | 8.4 | 43.5 | 7 | 3.045 | 0.211 |
| | Steering | 17.85 | 10.67 | 3 | 0.320 | 0.022 |
| | Steering | 17.85 | 10.67 | 1.5 | 0.160 | 0.011 |
| | Stop | - | - | 1.5 | - | - |
| Total | | | | 100 | 14.426 | |

따라서 등가부하와 등가속도는 다음과 같다. 주 고장모드가 유압모터의 로터리 그룹이라고 가정할 경우 $\lambda = 8$ 로 한다.

$$P_e = (\sum f_i P_i^\lambda)^{\frac{1}{\lambda}} = 15.34 \text{ MPa} \quad (13)$$

$$n_e = \frac{1}{P_e^\lambda} \sum h_i n_i P_i^\lambda = 14.55 \text{ r/min} \quad (14)$$

따라서 시험조건이 압력은 21MPa, 회전속도는 20r/min일 때 압력과 회전속도에 대한 각각의 가속계수는 다음과 같다. 압력에 의한 가속계수는 식(15)와 같으며, 속도에 의한 가속계수는 식(16)와 같이 구할 수 있다.

$$AF_P = \left(\frac{21}{15.34}\right)^8 = 12.33 \quad (15)$$

$$AF_N = \left(\frac{20}{14.55}\right) = 1.37 \quad (16)$$

식(15)와 식(16)을 곱하면 식(17)과 같이 전체 가속계수를 구할 수 있다.

$$AF = AF_P \times AF_N = 16.8 \quad (17)$$

주 고장모드가 베어링이라고 가정할 경우, 볼베어링의 $\lambda = 3$ 은

$$P_e = (\sum f_i P_i^\lambda)^{\frac{1}{\lambda}} = 13.84 \text{ MPa} \quad (18)$$

$$n_e = \frac{1}{P_e^\lambda} \sum h_i n_i P_i^\lambda = 15.04 \text{ r/min} \quad (19)$$

따라서 시험조건이 압력은 21MPa, 회전속도는 20r/min 일 때 압력과 회전속도에 대한 각각의 가속계수는 다음과 같다. 압력에 의한 가속계수는 식(14)와 같으며, 속도에 의한 가속계수는 식(15)와 같이 구할 수 있다.

$$AF_P = \left(\frac{21}{13.84}\right)^3 = 3.49 \quad (20)$$

$$AF_N = \left(\frac{20}{15.04}\right) = 1.33 \quad (21)$$

식(20)과 식(21)을 곱하면 식(22)와 같이 전체 가속계수를 구할 수 있다.

$$AF = AF_P \times AF_N = 4.64 \quad (22)$$

따라서 주행구동유니트의 주고장모드가 유압모터의 로터리 그룹인지 아니면 베어링 부분인지에 따라 가속계수 값이 크게 달라짐을 알 수 있다. 두 가속계수 값 중에서 작은 값을 사용하면, 가속시험시간이 길어지는 단점이 있으나 완벽한 신뢰성 검증하기 위해서 작은 값을 사용하는 것이 바람직하므로 가속계수 값 $AF = 4.64$ 를 사용하기로 한다. 이 가속계수 값을 사용하여 실제 가속시험시간을 산출하면 식(23)과 같이 720시간의 가속수명시험 시간이 도출된다.

$$t_a = \frac{t_n}{AF} = \frac{3310}{4.64} = 713.3 \approx 720 \text{ 시간} \quad (23)$$

3. 결 론

소형 굴삭기용 주행구동유니트는 굴삭기의 전진 및 후진 주행을 하는 장치로서 일반적으로 10톤 미만의 건설기계에 사용된다. 이 동력전달장치는 주행 및 주차 시 운행의 정숙성과 주행 효율을 높이기 위한 2단 제어밸브를 사용하며, 소형 굴삭기의 다양한 주행모드를 반영한 내구 수명 시험을 위해서는 과부하(과토크 & 과속도)에 의한 가속 수명 시험연구가 요구되며, 다양한 성능 시험을 실시하기 위해서는 종합성능 및 수명시험 장비 구축이 요구된다. 본 연구에서는 소형 굴삭기

의 각 부품별 고장모드를 분석하였고, 현장 실사용 조건에서 사용되는 부하를 조사하여 등가부하를 계산하였고, 역송모형에 적용하여 가속계수를 도출하였다. 또한 본 연구는 주고장 모드의 분석을 통해 로터리 그룹인 경우와 베어링인 경우에 대해서 가속계수와 수명시험시간의 변화를 고찰하였다. 신뢰수준 90%, 시료수가 2개인 경우에 대해서 무고장 시험시간을 계산하였으며, 이를 통하여 가속시험시간 720시간을 도출하였다. 이를 통하여 유사한 제품에 대한 수명시험시간 도출에 활용이 가능하고, 보다 가혹한 조건에서 사용되는 제품의 경우에는 이를 활용하여 시험시간 및 시험내용을 개선할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Lee, Y. B. and Park, J. H. (2005), Accelerated Life Test and Analysis of Track Drive Unit for an Excavator, *Journal of fluid power system*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-7.
- [2] Lee, Y. B. and Kim, K. M. (2012), Analysis of the Friction Characteristics of Parking Brake for Large Size Excavator, *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 5-10.
- [3] Lei, Y., Lin, J., Zuo, M. J., and He, Z. (2014), Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Planetary Gearboxes, *Measurement*, Vol. 48, pp. 292-305.
- [4] Lee, G. C., Lee, Y. B., and Choi, B. O. (2015), A study of the reliability assessment of the small track drive unit for excavator, *Spring conference of KSME Reliability part*, p. 37.
- [5] Bloch, H. P. and Geitner, F. K. (1994), *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*, 2nd Edition, Gulf Publishing Company.