# 굴삭기용 메인펌프의 신뢰성 평가 기술
# Reliability Evaluation Technique for the Main Pump of a Excavator

정동수 · 김도식 · 이용범
D. S. Jung, D. S. Kim and Y. B. Lee

## 1. 서 론

신뢰성은 기계장비에서 요구하는 보증수명 동안 작업현장에서 고장이 발생하지 않고 유압펌프의 성능과 기능을 유지하는 것이므로 작업환경을 부여한 시험장비에서 시험평가를 통하여 입증이 된다. 작업조건에 따라 용량이 가변되는 굴삭기의 메인펌프인 경우는 유량, 압력, 동력 등 여러 개의 제어기능들을 내장하고 있기 때문에 시험항목 및 시험방법들이 일반 유압펌프와는 다소 차별화 된다. 신뢰성 시험평가는 현장고장 및 고장모드 분석을 통하여 고장에 영향을 미치거나 평가에 필요한 시험항목들로 선정되며 크게 성능시험, 수명시험, 그리고 환경시험으로 구분된다. 신뢰성 시험평가는 작업환경을 반영한 시험방법과 사용자의 입장에서 신뢰할 수 있는 평가기준을 제시하고 있다. 그리고 고장재현을 통하여 고장개선이 가능하기 때문에 제품의 신뢰성을 향상시키는 효과도 있다. 수명시험은 제품의 신뢰도를 평가하는 하나의 시험기술로 사용되지만 많은 시간과 비용이 필요하다. 가속시험은 제품의 신뢰도가 증가할수록 늘어나는 시험시간 문제를 해결하기 위해 인위적으로 제품의 수명을 단축시키는 시험방식이다. 즉, 사용조건보다 가혹한 조건에서 시험하여 짧은 시간에 제품의 고장을 발생시켜 얻은 수명데이터를 가지고 신뢰성을 평가한다. 본 연구에서는 그림. 1과 같은 굴삭기용 메인펌프에 대한 국내외 국제시험규격, 수요업체들의 사내시험규격, 그리고 현장 사용조건들을 고려하여 9개 시험항목으로 구성된 신뢰성 평가기준을 제시하고 신뢰성 시험평가의 주요기술로 활용되고 있는 가속시험에 대한 전반적인 기술절차를 소개한다.

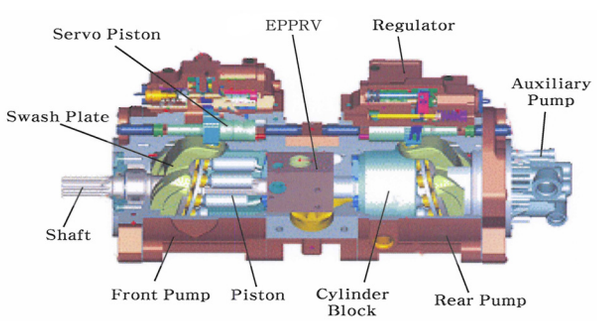



그림. 1 굴삭기용 메인펌프

## 2. 시험평가 기준개발 방법

### 2.1 고장 영향 분석

시험항목들을 결정하기에 앞서, 제품의 고장 영향과 고장 모드를 조사하고 잠재적인 고장을 확인한다. 이는 제품의 설계, 제작, 조립, 운용 등에서 제품의 불완전으로 인한 잠재적 결함을 찾아내기 위하여 구성요소들의 고장 형태와 그 상위 제품에 미치는 영향을 해석하여 설계개선으로 연결시키기 위한 중요한 부분이다. 표. 1은 굴삭기용 메인펌프에서 분석된 고장모드 및 메커니즘이며 주요 고장형태는 피스톤, 슬리퍼 패드 등 상대운동이 진행되는 습동부에서의 마모 및 고착 등으로 나타난다.

### 2.2 품질기능 분석

고장 심각과 발생 빈도로부터 치명적인 심각성을 도출하고 1단계 품질기능 전개를 수행하여 2단계 품질기능 전개에 이용되는 중요도의 점수를 구한다. 표. 3은 굴삭기용 메인펌프에 대하여 구성품의 고장모드와 시험항목들 간의 관계를 정리한 2단계 품질기능 전개의 결과를 보여주고 있다(여기서, ◎ : 5, ● : 3, ▲ : 1). 2단계 품질기능 전개는 시험항목들을 선정하고 각 시험항목들의 중요성을 판단하기 위하여 수행된다. 표. 3에 정리된 시험 유효성 점수로 판단할 때 수명시험이 가장 중요하다.

### 2.3 시험항목

시험항목들은 표. 4와 같이 KS 규격과 ISO, JIS, SAE, NFPA, MIL등 국제규격을 참고하고 수집된 현장고장으로부터 고장분석, 고장모드 및 메카니즘 분석 및 품질기능전개를 통하여 선정된다. 시험평가 기준을 작성하는 기본방침은 다음과 같다. a) 가능한 국제성이 있는 것으로 한다. b) 신뢰성을 충분히

표. 1 고장모드 및 메커니즘 분석(Failure Modes and Mechanisms Analysis; FMMA)

| 주요구성품 (primary components) | 기능 (function) | 고 장 모 드 (failure modes) | 고장 메커니즘 (failure mechanism) |
|---|---|---|---|
| 레귤레이터 | 압력/유량 제어 | 파손 | 이물질, 피로 |
| | | 변형 | 이물질, 피로 |
| | | 마모 | 과부하, 피로 |
| 실린더 배럴 | 피스톤 왕복운동 | 마모 | 이물질, 피로 |
| | | 파손 | 과부하, 피로 |
| 사판 | 토출유량 제어 | 휨 | 과부하, 이물질 |
| | | 마모 | 이물질, 피로 |
| 피스톤 | 작동유체 흡입/토출 | 고착 | 이물질, 미 급유 |
| | | 마모 | 이물질, 미 급유 |
| 밸브 플레이트 | 작동유채 유로 형성 | 변형 | 과부하, 피로 |
| | | 마모 | 과부하, 미 급유 |
| 슬리퍼 패드 | 피스톤 배럴 지지 | 마모 | 피로 |
| | | 파손 | 과부하 |
| 홀드 스프링 | 실린더 장력유지 | 파손 | 이물질, 미 급유 |
| | | 마모 | 이물질, 피로 |
| 오링/씰 | 오일 누설방지 | 파손 | 과부하, 피로 |
| | | 마모 | 과부하, 피로 |
| 샤프트 | 동력전달 | 마모 | 과부하, 피로 |
| | | 변형 | 과진동, 피로 |
| 베어링 | 회전지지 | 파손 | 과부하, 피로 |

표. 2 품질 기능 전개 단계 1(Quality Function Deployment level 1; QFD level 1)

| 주요구성품 | 레귤레이터 | | | 실린더 배럴 | | 사판 | | 피스톤 | | 밸브 플레이트 | | 슬리퍼 패드 | | 홀드 스프링 | | 오링 및 씰 | | 샤프트 | | 베어링 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 고장모드 / 요구사항 | 파손 | 변형 | 마모 | 마모 | 파손 | 휨 | 마모 | 고착 | 마모 | 변형 | 파손 | 마모 | 파손 | 파손 | 마모 | 파손 | 마모 | 마모 | 변형 | 파손 |
| 효율 | ● | ● | ▲ | ● | ● | ◎ | ● | ● | ● | ● | ◎ | ▲ | ▲ | ● | ● | | | | | ◎ |
| 응답성 | ◎ | ● | ▲ | ● | ● | ● | ▲ | ● | ● | ● | ● | | | ● | ● | | | | | |
| 정밀제어 | ● | ◎ | ● | ● | ● | ● | ▲ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | | | | | ● | ● |
| 저온작동 | ● | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ● | ● | ● | ● | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | | | ▲ | ▲ | |
| 소음 | ▲ | ● | ● | ● | ● | ▲ | ▲ | ◎ | ● | ● | ● | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | | | ▲ | ▲ | ◎ |
| 오염도 | ▲ | ● | ▲ | ▲ | ▲ | | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | | ● | ● | | | |
| 수명 | ▲ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ◎ | ◎ | ▲ | ▲ | ▲ | ● | ▲ | ▲ | ● | ● | ▲ |
| 중요도점수 | 17 | 21 | 13 | 17 | 17 | 18 | 12 | 23 | 21 | 21 | 23 | 10 | 10 | 9 | 11 | 4 | 4 | 5 | 8 | 14 |

표. 3 품질 기능 전개 단계 2(Quality Function Deployment level 2; QFD level 2)

| 주요 구성품 | 고장 모드 | 중요도 점수 | 시험항목 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 부압 시험 | 효율 시험 | 부하 특성 시험 | 맥동 시험 | Negative 시험 | 정마력 시험 | 전마력 시험 | 동력 전환 시험 | 수명 시험 |
| 레귤레이터 | 파손 | 17 | ● | ◎ | ● | ◎ | ● | ◎ | ◎ | ● | ◎ |
| | 변형 | 21 | ● | ◎ | ◎ | ● | ● | ◎ | ◎ | ● | ◎ |
| | 마모 | 13 | ● | ● | ● | ● | ◎ | ● | ● | ● | ◎ |
| 실린더 배럴 | 마모 | 17 | ● | ◎ | ● | ● | ◎ | ◎ | ◎ | ● | ◎ |
| | 파손 | 17 | ● | ◎ | ● | ◎ | ● | ◎ | ● | ● | ◎ |
| 사판 | 휨 | 18 | ● | ◎ | ● | ● | ● | ◎ | ● | ● | ◎ |
| | 마모 | 12 | ● | ◎ | ● | ● | ● | ● | ◎ | ● | ◎ |
| 피스톤 | 고착 | 23 | ● | ◎ | ◎ | ● | ● | ● | ● | ● | ◎ |
| | 마모 | 21 | ● | ◎ | ● | ● | ● | ◎ | ◎ | ● | ◎ |
| 밸브 플레이트 | 변형 | 21 | ● | ◎ | ◎ | ● | ● | ● | ● | ● | ◎ |
| | 마모 | 23 | ● | ◎ | ● | ◎ | ● | ● | ◎ | ● | ◎ |
| 슬리퍼 패드 | 마모 | 10 | ● | ◎ | ● | ● | ● | ● | ◎ | ● | ◎ |
| | 파손 | 10 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ◎ |
| 홀드 스프링 | 파손 | 9 | ▲ | ● | ● | ▲ | ● | ▲ | ▲ | ▲ | ◎ |
| | 마모 | 11 | ▲ | ◎ | ● | ▲ | ● | ▲ | ▲ | ▲ | ◎ |
| 오링/씰 | 파손 | 4 | ▲ | ● | ● | ● | ● | ▲ | ▲ | ▲ | ● |
| | 마모 | 4 | ▲ | ● | ▲ | ● | ● | ▲ | ▲ | ▲ | ● |
| 샤프트 | 마모 | 5 | ▲ | ● | ● | ● | ● | ● | ▲ | ● | ◎ |
| | 변형 | 8 | ▲ | ◎ | ● | ● | ▲ | ● | ▲ | ▲ | ◎ |
| 베어링 | 파손 | 14 | ▲ | ◎ | ● | ◎ | ● | ● | ▲ | ● | ◎ |
| 시험 유효성 점수 및 순위 (test effectiveness score and rank) | | | 724 | 1300 | 956 | 936 | 878 | 1000 | 966 | 762 | 1372 |
| | | | 9 | 2 | 5 | 6 | 7 | 3 | 4 | 8 | 1 |

파악, 해석 가능한 시험 방법, 안정성을 확보할 수 있는 요구 성능으로 한다. c) 국가 기준으로의 이행을 전제로 하므로 기술적 수준이 높은 것으로 한다. d) 필요성이 높은 것으로부터 취급하여 간다. 그리고 시험항목들에 대한 시험조건 및 평가기준은 제품의 사양 및 작업환경에 의하여 결정된다.

### 2.4 시험평가기준

시험항목들이 결정되면 현장 조건을 부여하여 현장 고장이 재현되고 이를 평가할 수 있는 시험방법과 평가기준을 결정하여야 한다. 표. 5는 굴삭기용 메인펌프의 각 시험항목들에 대하여 시험조건과 평가기준을 보여주고 있다. 수명시험을 제외한 8가지 시험항목들은 수명시험 전에 먼저 수행되며 수명시험이 완료된 후에도 실시된다. 수명시험 후에 각 시험항목들은 다소 열화현상이 발생하더라도 각각의 평가기준들을 만족하여야 한다.

표. 4 세계품질인증 규격 비교

| No | 규격 / 시험항목 | 시험 규격 | | | | | | 신뢰성 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | KS | JIS | SAE | NFPA | ISO | MIL | 평가기준 |
| 1 | 부압 | ○ | ○ | ○ | × | ○ | × | ○ |
| 2 | 효율 | ○ | ○ | ○ | × | ○ | × | ○ |
| 3 | 부하 특성 | × | × | × | ○ | × | △ | ○ |
| 4 | 맥동 | × | × | × | ○ | × | ○ | ○ |
| 5 | Negative | × | ○ | × | × | × | ○ | ○ |
| 6 | 정 마력 | × | × | × | × | × | ○ | ○ |
| 7 | 전 마력 | × | × | × | × | △ | × | ○ |
| 8 | 동력 전환 | × | × | △ | × | × | × | ○ |
| 9 | 수명 | × | × | × | △ | × | × | ○ |

표. 5 굴삭기용 메인펌프의 시험평가기준

| No | 시험 항목 | 시험 조건 및 평가기준 |
|---|---|---|
| 1 | 부압 시험 | 토출유량이 조정유량의 97 %가 되도록 흡입유량을 조절하였을 때 흡입압력은 0.075 MPa(절대압력)이하 |
| 2 | 효율 시험 | 사판 경사각이 변하기 전까지 부하압력을 증가시켰을 때 용적효율 98 %이상, 기계효율90 %이상, 전효율 85 %이상 |
| 3 | 부하 특성 시험 | 부하압력을 무 부하에서 정격압력까지 급작스럽게 변화시킬때 응답이 300 msec 이내 |
| 4 | 맥동 시험 | 최대 부하 및 정격입력속도 유지하였을 때 맥동은 ±6 %이내 |
| 5 | Negative 시험 | Pilot압력을 증가 및 감소 시켰을 때 히스테리시스는 ±10 %이내 |
| 6 | 정마력 시험 | 부하압력을 최소에서 최대로 상승시켰을 때 동력은 제품사양의 ±5 %이내 |
| 7 | 전마력 시험 | 상대펌프의 주어진 압력에서 부하압력을 최소에서 최대로 상승시켰을 때 동력은 제품사양의 ±5 %이내 |
| 8 | 동력 전환 시험 | 비례 감압 밸브에 최대 전류를 인가하였을 때정격 토출유량의 90 % 이하 |
| 9 | 수명시험 | 시료 2개를 수명시험 한 후, 2개 모두 고장 없고 종합 성능 시험의 평가 기준을 만족하여야 한다. |

## 3. 무고장 가속시험 기법

기계류 부품들이 대부분 채택하고 있는 스트레스 가속방법을 적용한 무고장 가속시험의 전략은 현장 운영조건하에서의 등가부하를 산출, 시험 운영조건하에서의 등가부하를 산출, 그리고 보증수명에 의한 무고장 시험시간을 산출하는 3가지의 기술로 운영된다. 그림. 2는 현장 운용조건, 시험 운영조건, 신뢰성 목표 등에 의하여 무고장 가속시험시간을 산출하는 전반적인 절차를 보여주고 있다. 현장 운용조건은 제품이 고장이 발생되기 전까지 현장에서 인가되고 있는 주요 스트레스(예, 압력/속도) 상태에 대한 작동시간 배분을 나타내고 있다. 시험 운용조건은 주요 스트레스에 임의의 상태를 시간별로 배분한다. 신뢰성 목표는 사용자의 요구조건에 의하여 설정된다.

### 3.1 현장 운영조건에서의 등가부하

등가부하는 현장 운영조건으로부터 그림. 3과 같은 스트레스-수명분포를 정리하고 Palmgren -Miner's Rule을 이용하여 산출한다. 식(2)로 표현된 변동부하

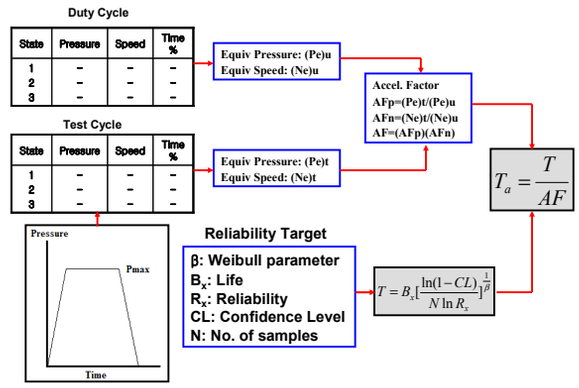



그림 2. 무고장 가속시험 절차

와 사용시간에 의한 전체 누적손상은 식(4)와 식(7)로 표현된 일정한 압력과 속도에 의한 등가손상효과와 동일함을 의미하고 있다.

이러한 의미를 간략하게 수식들로 정리하면 다음과 같다. 스트레스-수명분포에 이용되는 역승모델을 소개하면 식(1)로 표현된다. 여기는 $P$는 일정한 스트레스, $L$은 수명, $D$는 고장을 의미한다. 수명은 시간 또는 사이클로 정의된다.

$$P^{\lambda} L = D \tag{1}$$

그림. 3은 손상이 발생하여 수명이 다한 제품의 다양한 스트레스-수명 분포를 보여주고 있으며 식(2)로 표현될 수 있다. 유압펌프인 경우는 주요 스트레스가 압력과 속도이므로 수식에서 기호를 각각 $P$와 $n$을 사용한다.

$$P_1^{\lambda} L_1 + P_2^{\lambda} L_2 + P_3^{\lambda} L_3 + \cdots\cdots\cdots + P_i^{\lambda} L_i = D \tag{2}$$

일정한 등가압력 $P_e$ 를 가정하면 식(2)로부터 손상효과가 동일한 식(3)이 표현된다.

$$P_e^{\lambda} (L_1 + L_2 + L_3 + \cdots\cdots\cdots\cdots + L_i) = D \tag{3}$$

식(2)과 식(3)을 정리하면 등가압력이 산출된다.

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

그리고 등가속도 $n_e$는 식(4)~식(6)에 의하여 식(7)로 표현된다.

$$L_i = n_i t_i \tag{5}$$

$$L = n_e T \tag{6}$$

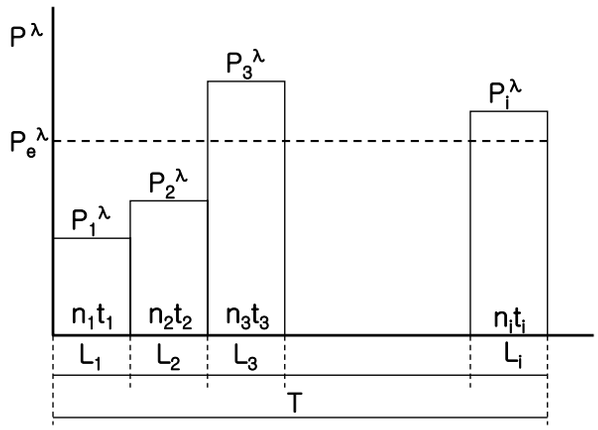



그림. 3 현장 운용조건에 의한 스트레스-수명 분포

표. 6 굴삭기용 메인펌프의 현장 운용조건

| Condition | %Time | Speed[rpm] | Pressure[bar] |
|---|---|---|---|
| 1 | 21 | 2600 | 100 |
| 2 | 16 | 2200 | 140 |
| 3 | 18 | 2100 | 170 |
| 4 | 13 | 1950 | 195 |
| 5 | 15 | 1890 | 240 |
| 6 | 12 | 1750 | 250 |
| 7 | 3 | 1720 | 270 |
| 8 | 2 | 1700 | 280 |
| Sum | 100 | | |

$$n_e = \frac{P_1^{\lambda} n_1 t_1 + P_2^{\lambda} n_2 t_2 + P_3^{\lambda} n_3 t_3 + \ldots\ldots P_i^{\lambda} n_i t_i}{P_e^{\lambda} T} \quad (7)$$

여기서 L : 사이클, n :회전수, t : 시간

표. 6은 굴삭기용 메인펌프의 현장 운용조건을 나타내고 있다. 식(4)와 식(7)에 의하여 등가압력과 등가속도를 산출하면 각각 215bar, 2,108rpm으로 산정된다. 일반적으로, 유압펌프와 같이 내부의 주요부품들이 습동부를 갖는 회전체 그룹에서는 역승모델의 지수인 $\lambda$를 8로 사용한다.

### 3.2 무고장 시험시간

신뢰성 공학에서 무고장 시험시간($T$)은 보증수명($B_x$), 신뢰수준($CL$), 신뢰도($R_x$), 형상모수($\beta$), 샘플수($N$) 등에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$T = B_x \cdot \left[ \frac{\ln(1-CL)}{N \cdot \ln R_x} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (8)$$

굴삭기용 메인펌프에 대한 무고장 시험시간을 산출하려면 다음과 같은 정보가 요구된다. 굴삭기의 보증수명이 10,000시간이므로 굴삭기의 100% 사용시간을 갖는 메인펌프의 보증수명도 10,000시간이 요구된다. 주요 고장원인이 마모인 유압펌프의 경우는 형상모수($\beta$)가 2.0인 와이블(Weibull) 분포를 따른다. 수명 시험장비에서 동시에 시험이 가능한 시료수를 고려하여 시험용 샘플 수는 2대로 한다. 신뢰성 목표는 신뢰도를 80%와 신뢰수준을 70%로 설정한다.

$$T = 10,000 \cdot \left[ \frac{\ln(1-0.7)}{2 \cdot \ln 0.8} \right]^{\frac{1}{2.0}} \simeq 16,400$$

굴삭기용 메인펌프는 신뢰수준 70%로 $B_{20}$ 10,000시간을 보증하기 위해서는 16,400시간 동안 2대 모두 고장이 없어야 한다.

### 3.3 시험 운영조건에서의 등가부하

시험장비에서는 현장 운용조건에서 야기된 손상효과를 동일하게 부여하면서 스트레스를 크게 부과하여 시험시간을 줄인다. 이때 무리한 스트레스는 현장에서 발생되는 이외의 고장이 야기될 수도 있기 때문에 삼가야 한다. 굴삭기용 유압펌프의 최대 압력은 350bar이므로 스트레스의 최대 수치는 350bar 이내로 결정하는 것이 바람직하다.

메인펌프의 냉각 및 충격을 고려하여 그림. 4와 같은 사이클로 운영되는 시험패턴이 주어지면 식(4)에 의하여 등가 시험압력이 316bar로 산출된다. 이때 시험속도는 2,200rpm으로 일정하게 유지하게 되며 이 수치가 등가 시험속도가 된다.

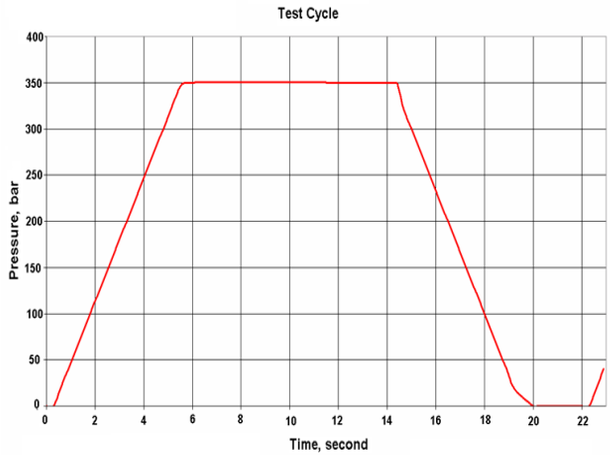



그림. 4 시험 운영조건

3.4 무고장 가속시험 시간

수명시험 혹은 내구시험은 사용조건에서 제품의 신뢰도를 평가하는 하나의 시험기술로 사용되지만 많은 시간과 비용이 필요하다. 가속시험은 제품의 신뢰도가 증가할수록 늘어나는 시험시간 문제를 해결하기 위해 인위적으로 제품의 수명을 단축시키는 시험방식이다. 그림 5와 같이 사용조건보다 가혹한 조건에서 짧은 시간에 제품의 고장을 발생시켜 얻은 수명데이터를 가지고 신뢰성을 평가한다.

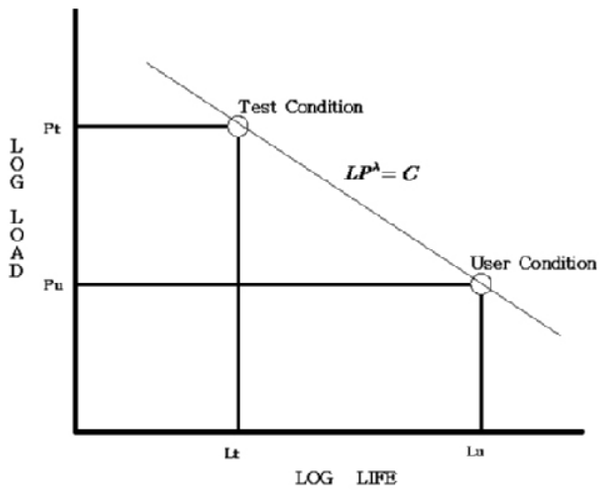



그림. 5 스트레스-수명 곡선

3.4 무고장 가속시험 시간

수명시험 혹은 내구시험은 사용조건에서 제품의 신뢰도를 평가하는 하나의 시험기술로 사용되지만 많은 시간과 비용이 필요하다. 가속시험은 제품의 신뢰도가 증가할수록 늘어나는 시험시간 문제를 해결하기 위해 인위적으로 제품의 수명을 단축시키는 시험방식이다. 그림 5와 같이 사용조건보다 가혹한 조건에서 짧은 시간에 제품의 고장을 발생시켜 얻은 수명데이터를 가지고 신뢰성을 평가한다.

식(9)를 이용하여 시험조건과 사용조건으로부터 굴삭기용 메인펌프의 가속계수(AF)를 산출한다. 앞에서 언급된 바와 같이 $\lambda$는 8이므로 가속계수는 약 22.7로 산출된다.

따라서, 무고장 가속시험시간은 무고장 시험시간과 가속계수로부터 약 722시간(16,400/22,7)정도가 된다.

$$AF=\left(\frac{P_{et}}{P_{eu}}\right)^{\lambda}\times\left(\frac{N_{et}}{N_{eu}}\right) \quad (9)$$

$$=\left(\frac{316}{215}\right)^{8}\times\left(\frac{2,200}{2,108}\right)\simeq 22.7$$

여기서 $P_{et}$ : 시험 등가압력 [bar]

$P_{eu}$ : 사용 등가압력 [bar]

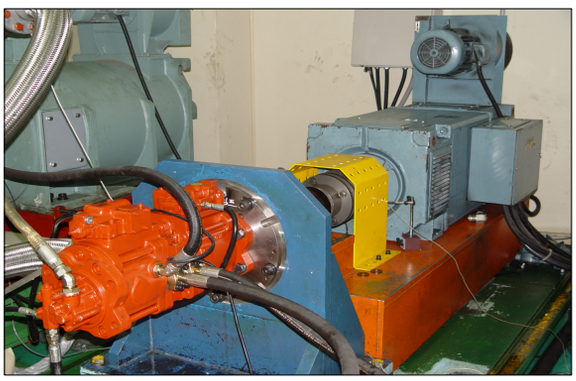
$N_{et}$ : 시험 등가속도 [rpm]

$N_{eu}$ : 사용 등가속도 [rpm]

## 4. 장비구성 및 결과분석

4.1 시험장비 구성

성능 시험장비는 유압펌프에 동력을 공급하는 가변형 전기모터, 전달토크를 측정하는 토크센서 및 속도센서, 흡입부의 압력과 온도를 측정할 수 있는 압력센서 및 온도센서, 토출부의 압력과 온도를 측정할 수 있는 압력센서와 온도센서로 구성되어 지며, 펌프에 일정부하를 인가할 수 있는 릴리프밸브와 유량을 측정할 수 있는 유량센서로 구성이 되어있다. 그리고 오랜 시간동안 작동유의 온도를 일정하게 유지하고 청정도를 관리하기 위하여 냉각장치 및 정제장치가 설치된다. 수명 시험장비는 유압펌프 2대를 동시에 시험할 수 있는 장비로서 구조적으로 성능 시험장비와 유사하다. 단지, 유압펌프들의 설치된 거리를 고려하여 HPU는 각각 배치된다. 수명 시험장비는 오랜 시간 시험이 수행되기 때문에 정밀계측장비의 파손이 우려되어 압력게이지만을 탑재하고 있다.



a. 성능 시험장비

b. 수명 시험장비

그림. 6 굴삭기용 메인펌프 신뢰성 시험평가 장비

4.2 시험결과 분석

신뢰성 시험평가는 굴삭기용 메인펌프 2대를 가지고 성능시험 8개 항목들을 수명시험 전·후로 진행하였다. 본 시료는 전단펌프와 후단펌프로 구성되어 있어 각각 신뢰성 시험평가를 진행하였다. 그림. 7~그림. 16은 시료 1의 전단펌프에 대한 시험결과를 보여주고 있다. 부압 및 효율 시험에서는 평가기준을 근사하게 만족하고 있으며, 부하 특성 및 맥동 시험은 기준치 300msec, ±6%에 여유롭게 만족하게 그리고 Negative, 정마력, 전마력 및 동력 전환 시험들도 평가기준을 충족하고 있다. 표 7은 시료 2대의 전단펌프에 대한 수명시험 전·후의 시험결과를 보여주고 있다. 각 시험항목들은 약간의 열화가 보이긴 하지만 전반적으로 신뢰성이 충족됨을 확인할 수 있었다.

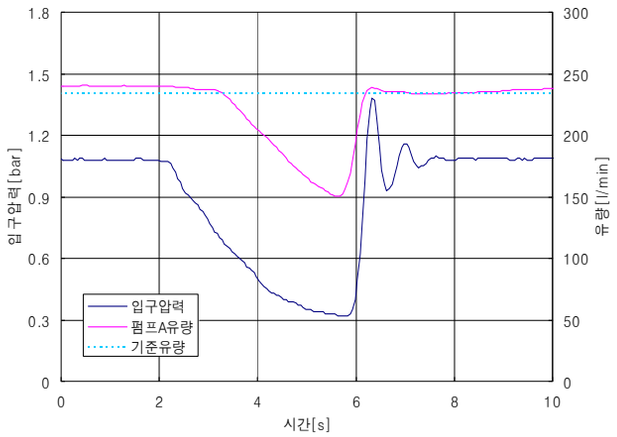



그림. 7 부압 시험 결과

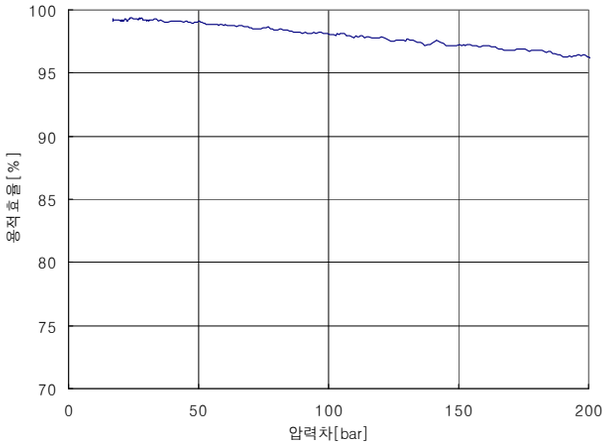



그림. 8 용적효율 시험 결과

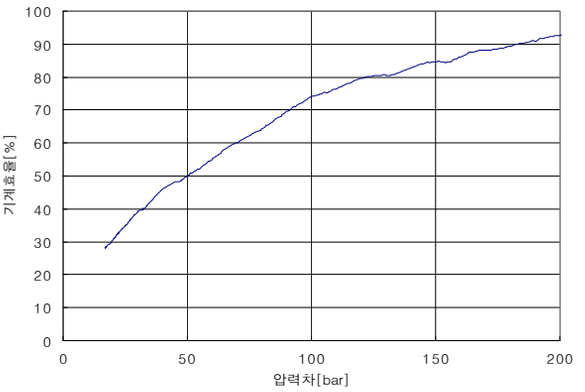



그림. 9 기계효율 시험 결과

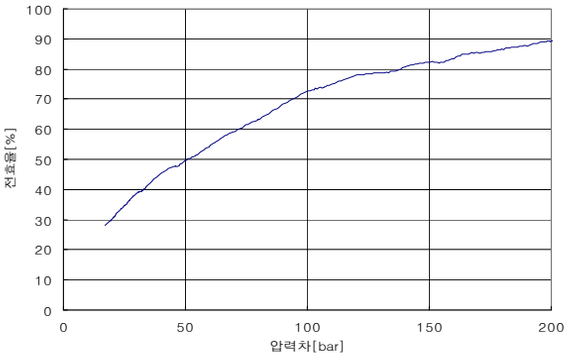



그림. 10 전효율 시험 결과

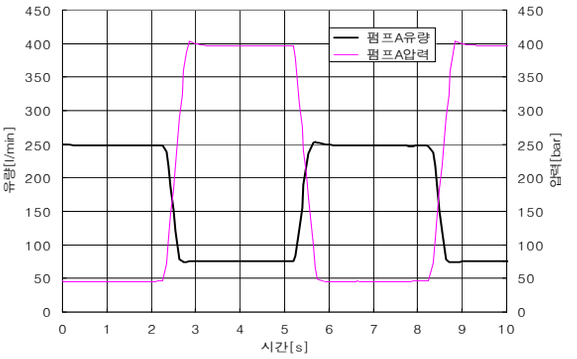



그림. 11 부하 특성 시험 결과

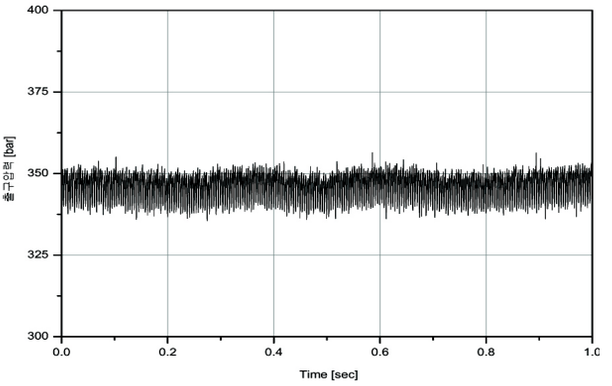



그림. 12 맥동 시험 결과

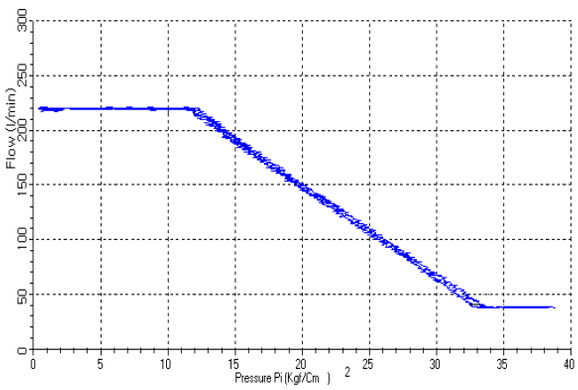



그림. 13 Negative 시험 결과

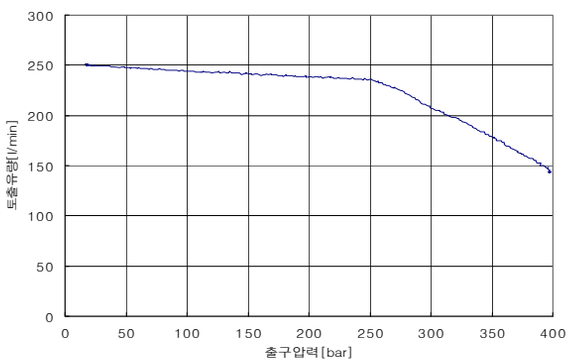



그림. 14 정마력 시험 결과

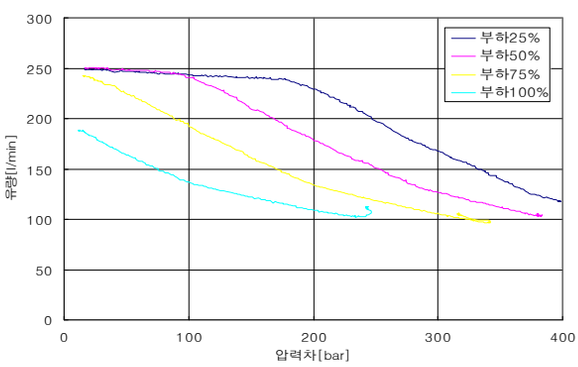



그림. 15 전마력 시험 결과

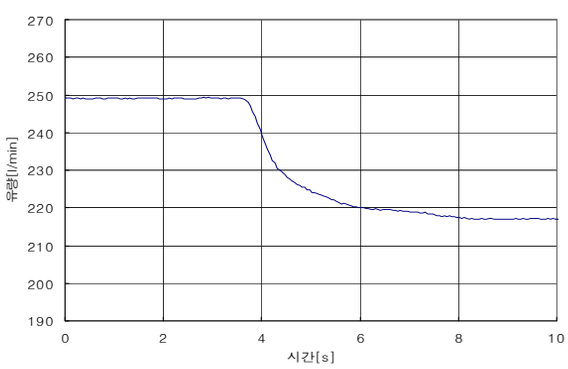



그림. 16 동력 전환 시험 결과

표. 7 수명시험 전·후 시험 결과 비교

| 시험 항목 | | 단위 | 수명시험 전 | | 수명시험 후 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 시료1 | 시료2 | 시료1 | 시료2 |
| 부압 | | MPa | 0.066 | 0.065 | 0.068 | 0.068 |
| 효율 | 용적 | % | 98.2 | 98.3 | 98.1 | 98.1 |
| | 기계 | | 92.6 | 92.4 | 92.3 | 92.2 |
| | 전 | | 89.4 | 89.3 | 89.2 | 89.1 |
| 부하 특성 | | msec | 210 | 220 | 220 | 240 |
| 맥동 | | % | ±2.1 | ±2.3 | ±2.2 | ±2.3 |
| Negative | | % | ±7.4 | ±7.5 | ±7.6 | ±7.6 |
| 정마력 | | % | ±4.3 | ±4.2 | ±4.7 | ±4.6 |
| 전마력 | | % | ±4.4 | ±4.2 | ±4.8 | ±4.6 |
| 동력 전환 | | % | 88 | 87 | 86 | 84 |

## 5. 결 론

본 연구에서는 신뢰성 시험항목을 선정하고 시험시간을 단축하기 위한 가속시험법을 도출하는 방법과 전반적인 절차를 소개하였다. 신뢰성 시험평가는 현장고장 및 고장모드 분석을 통하여 작업환경을 반영한 사용자의 입장에서 신뢰할 수 있는 평가기준을 개발하려면 환경시험도 포함하여야 하지만 본 연구에서는 성능과 수명 시험만을 고려하였다. 무고장 가속시험 기법은 시험평가에 소요되는 시간과 경비를 절감함과 아울러 제품의 개발주기가 점점 단축되는 시대적 요구에 부합하는 중요한 기술이다.

한 사례로 굴삭기용 메인펌프의 무고장 가속시험시간를 도출하였다. 신뢰 수준 70%에서 $B_{20}$ 보증수명 10,000시간을 보장하기 위하여 722시간의 무고장 가속시험시간을 산출하였으며 이때 가속계수는 22.7임을 확인하였다.

신뢰성 평가기술은 제품의 고장원인을 규명하고 개선내용을 보완설계에 반영함으로써 제품의 신뢰성을 향상시킨다. 더 나아가 시장경쟁력을 강화하여 수입대체 및 수출증대의 기반을 확보하며 유사 분야의 제품개발에도 폭넓게 응용되는 등 기술적인 파급효과가 매우 클 것으로 기대된다.

## 참고문헌


1) J. W. Evans and J. Y. Evans, "Product Integrity and Reliability In Design", 2001.
2) W. Nelson, "Accelerated Testing; Statistical models, test plans, and data analysis", Wiley, 1990.
3) W. Nelson, "Weibull Analysis of Reliability Data with Few or No Failures", Journal of Quality Technology, Vol. 17, No. 3, pp. 140～146, 1985.
4) G. K. Hobbs, "Accelerated Reliability Engineering HALT and HASS", John Wiley & Sons Ltd., 2000.
5) S. D. Kim, H. S. Cho and C. O. Lee, "Stability Analysis of a Load Sensing Hydraulic System", Proc Instn Mech Engrs, Vol. 202, No. A2, pp. 79～88, 1988.
6) A. YAMAGUCHI and T. ISHIKAWA, "Characteristics of Displacement Control Mechanisms in Axial Piston Pumps", Bulletin of the JSME, Vol. 22, No. 165, pp. 356～361, 1979.



### [저자 소개]

정동수(책임저자)
Email : jds667@kimm.re.kr
Tel : 042-868-7154
1962년 6월 14일생.
2007년 충남대학교 기계설계공학과 박사 과정 졸업. 1990년 한국기계연구원 입사, 유압펌프/모터 R&D, 기계류부품 신뢰성 평가에 종사. 유공압시스템학회, 대한기계학회 등의 회원, 공학박사. - 2002～2003년 정보통신부 기획예산담당관

이용범
E-mail : lyb@kimm.re.kr
Tel : 042-868-7151
1959년 4월 3일생
2006년 충남대학교 기계공학과 박사 과정 졸업. 1987년 한국기계연구원 입사, 유압기기 개발, 시험장비 개발 및 신뢰성 평가 연구. 대한기계학회, 유공압건설기계학회, 한국동력공학회 등의 정회원. 2008년부터 충남대학교 기계공학과 겸임교수, 공학박사.

김도식
E-mail : dohsik@kimm.re.kr
Tel : 042-868-7153
1967년 5월 5일생.
2007년 충남대학교 기계설계공학과 박사과정수료. 1992년 한국기계연구원 입사. 시스템신뢰성연구실에서 변속기설계 기술 및 관련 신뢰성평가기술연구. 대한기계학회, 유공압시스템학회 정회원.