

유압펌프의 무고장 가속시험 전략

정동수, 이용범, 성백주 | 한국기계연구원

[요약문]

현장 운용조건하에서 사용자들이 요구하는 보증수명을 시험평가하기 위해서는 많은 시간과 비용이 소요된다. 이를 해결하기 위한 시험기술로서 흔히 가속시험이 운용되며 가속방법에는 연속적으로 사용하지 않는 제품을 연속적으로 가동시킴으로써 고장시간을 단축시키는 사용을 가속과 사용조건보다 높은 스트레스를 부과하여 제품의 수명을 단축시키는 고 스트레스 가속이 있다. 기계류 부품들에서 대부분 채택하고 있는 고 스트레스 가속방법을 적용한 무고장 가속시험의 전략은 크게 현장 운영조건하에서의 등가부하를 산출, 시험 운영조건하에서의 등가부하를 산출 그리고 보증수명에 의한 무고장 시험시간을 산출하는 3가지의 기술로 운영된다. 이러한 가속시험 전략은 기계류에 관련된 대부분의 부품 및 시스템에 적용 및 활용이 가능하다.

1. 서론

제품의 개발주기가 점점 단축되는 시대적 상황에 대응하고 글로벌 시장에서 제품의 경쟁력을 확보하기 위하여 기업들은 단기간에 높은 신뢰도를 갖춘 제품을 개발하는데 노력하고 있다. 수명시험 혹은 내구시험은 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.

가속시험은 개발단계 또는 양산단계에 있는 제품에 적용 가능하며 개발기간 단축, 시험비용 절감 그리고 현장고장을 예측하고 개선하여 제품의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 효과가 있다. 가속시험에 이용되는 모형에는 고장을 유발시키는 주요 스트레스에 따라 아레니우스(Arrhenius) 모형, 역승(Inverse Power Law) 모형, 온도-비열(Temperature Nonthermal) 복합모형 등이 있다¹⁾. 유압펌프의 경우 주요 스트레스가 압력과 속도이며 예측되는 고장 메커니즘이 피로 또는 마모이므로 역승모형을 많이 적용하고 있다.

본 논문에서는 신뢰성 평가의 주요기술로 활용되고 있는 무고장 가속시험에 대한 전반적인 기술절차를 소개하고자 한다.

2. 무고장 가속시험 절차

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 1은 현장 운용조건, 시험 운영조건, 신뢰성 목표 등에 의하여 무고장 가속시험 시간을 산출하는 전반적인 절차를 보여주고 있다. 현장 운용조건은 제품의 고장이 발생되기 전까지 현장에서 인가되



고 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.

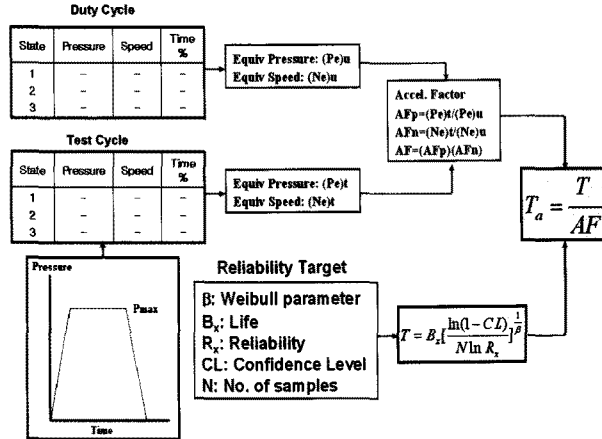


그림 1. 무고장 가속시험 절차

2.1 현장 운용조건에서의 등가부하

등가부하는 현장 운용조건으로부터 그림2와 같은 스트레스-수명분포를 정리하고 Palmgren-Miner's Rule을 이용하여 산출한다. 식(2)로 표현된 변동부하와 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. 여기서 P는 일정한 스트레스, L은 수명, D는 고장을 의미한다. 수명은 시간 또는 사이클로 정의된다.

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

그림 2는 손상이 발생하여 수명이 다한 제품의 다양한 스트레스-수명 분포를 보여주고 있으며 식(2)로 표현될 수 있다. 유압펌프인 경우는 중 스트레스가 압력과 속도이므로 수식에서 기호를 각각 P와 n을 사용한다.

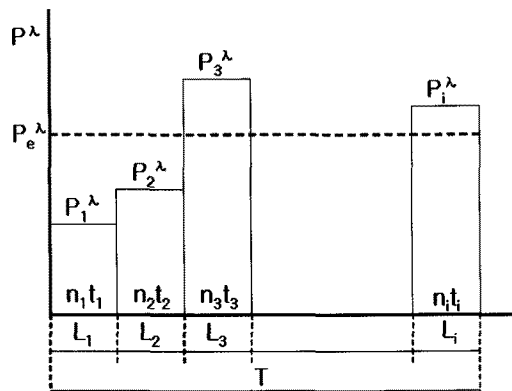


그림 2. 현장 운용조건에 의한 스트레스-수명 분포

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

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

$$P_e' (L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_i) = D \quad (3)$$

식(2)과 식(3)을 정리하면 등가압력이 산출된다.

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

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

$$L_i = n t_i \quad (5)$$

$$L = n_e T \quad (6)$$

$$n_e = \frac{P_1' n t_1 + P_2' n t_2 + P_3' n t_3 + \dots + P_i' n t_i}{P_e' T} \quad (7)$$

여기서 L : 사이클, n : 회전수, t : 시간

표 1은 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 λ 를 8로 사용한다.^[2]

표 1. 굴삭기용 메인펌프의 현장 운용조건

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		

2.2 무고장 시험시간

신뢰성 공학에서 무고장 시험시간(T)은 보증수명(B_x), 신뢰수준(CL), 신뢰도(R_x), 형상상수(β), 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(β)가 2.0인 와이불(Weibull) 분포를 따른다^[3]. 수명 시험장비에서 동시에 시험 가능한 시료수를 고려하여 시험용 샘플 수는 2대로 한다. 신뢰성 목표는 신뢰도를 80%와 신뢰수준을 70%로 설정한다.

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

굴삭기용 메인펌프는 신뢰수준을 70%로 B₂₀ 10,000시간을 보증하기 위해서는 16,400시간 동안 2대 모두 고장이 없어야 한다.

2.3 시험 운영조건에서의 등가부하

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

메인펌프의 냉각 및 충격을 고려하여 그림 3과 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.

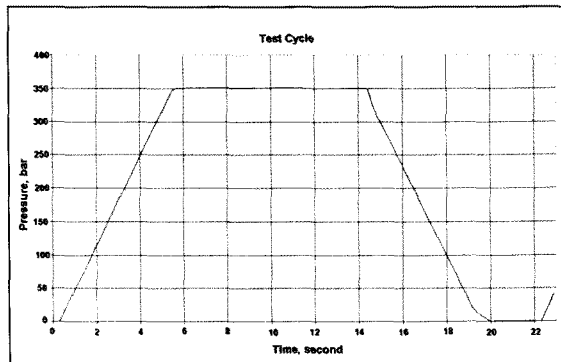


그림 3. 시험 운영조건

2.4 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^[4]. 그림 4와 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 β 는 8이므로 가속계수는 약 22.7로 산출된다.

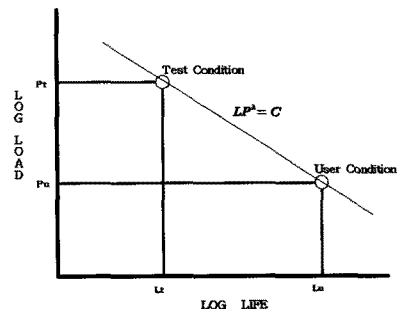


그림 4. 스트레스-수명 곡선

따라서 무고장 가속시험시간은 무고장 시험시간과 가속계수로부터 약 722시간(16,400/22.7) 정도가 된다.

$$AF = \left(\frac{P_{et}}{P_{eu}} \right)^4 \times \left(\frac{N_{et}}{N_{eu}} \right) \tag{9}$$

$$= \left(\frac{316}{215} \right)^4 \times \left(\frac{2,200}{2,108} \right) \approx 22.7$$

여기서 P_{et} : 시험 등가압력 [bar]
 P_{eu} : 사용 등가압력 [bar]
 N_{et} : 시험 등가속도 [rpm]
 N_{eu} : 사용 등가속도 [rpm]

시험시료 2대를 그림 3과 같은 수명 사이클로 722시간 가속시험을 실시하여 2개 모두 고장이 없으면 신뢰 수준 70%에서 B20 보증수명 10,000시간을 보장한다.

3. 가속시험

3.1 시험장비 구성

그림 5와 6은 전기모터의 양측에 2대의 굴삭기용 메인펌프들이 탑재된 굴삭기용 메인펌프의 수명 시험장비를 보여주고 있다. 각각의 메인펌프들은 2개의 메인압력과 1개의 보조압력을 토출하고 있으며 메니폴드 블록은 메인압력과 보조압력을 형성한다. 메인압력은 400bar 이내로 조성 가능하며 보조압력은 40bar 이내로 형성된다. 그리고 오랜 시간동안 작동유의 온도를 일정하게 유지하고 청정도를 관리하기 위하여 냉각장치 및 정제장치가 설치된다.

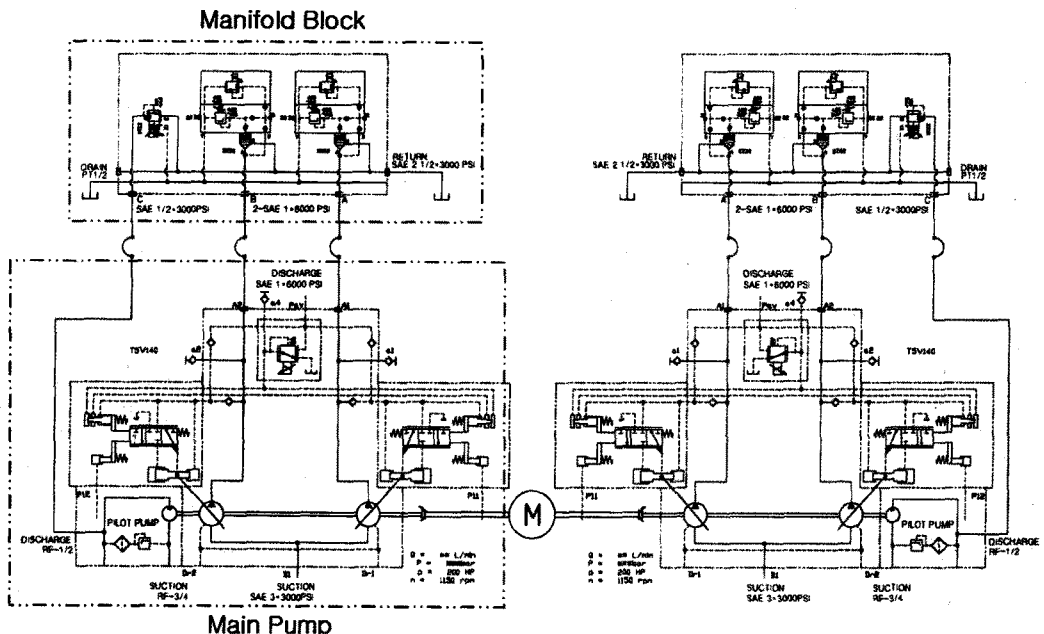


그림 5. 굴삭기용 메인펌프 수명시험장비 유압회로도

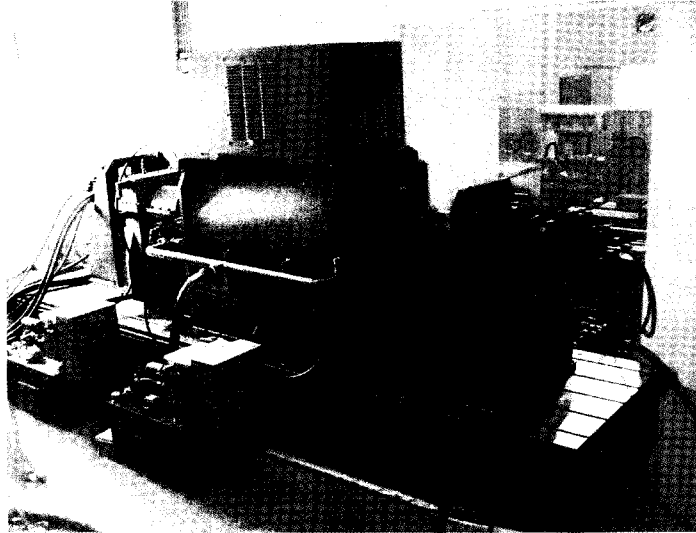


그림 6. 굴삭기용 메인펌프 수명시험장비 사진

3.2 시험장비 환경조건

주변 환경 조건을 달리 규정하지 않으면 모든 시험은 다음의 환경조건 하에서 실시된다.

- 주변온도 : $(23 \pm 10)^\circ\text{C}$
- 상대습도 : $(50 \pm 30)\%$
- 작동유체 온도 : $(55 \pm 5)^\circ\text{C}$

작동유체는 ISO VG32 또는 ISO VG46 상당하여야 하며 작동유 청정도는 100mL 단위당 입자수로 NAS(8~9)등 급이어야 한다.

3.3 가속시험 운영

성능시험장비에서 성능 및 기능이 만족되면 수명시험을 진행하게 된다. 수명시험은 그림 7과 같이 제어하는 시험압력은 사전에 결정된 가속압력의 프로파일을 추종하도록 한다. 기능불량, 작동불량 등과 같은 치명적인 고장이외에도 수명시험 중에 성능 열화 현상이 크게 나타나면 고장으로 간주한다. 수명시험 중 치명적인 성능열화의 추세를 확인하기 위해서 수명시험 25%, 50%, 75%, 100% 지점에서 대표적인 성능인 효율시험을 실시한다. 성능열화가 초기의 10%미만이면 합격으로 평가한다.

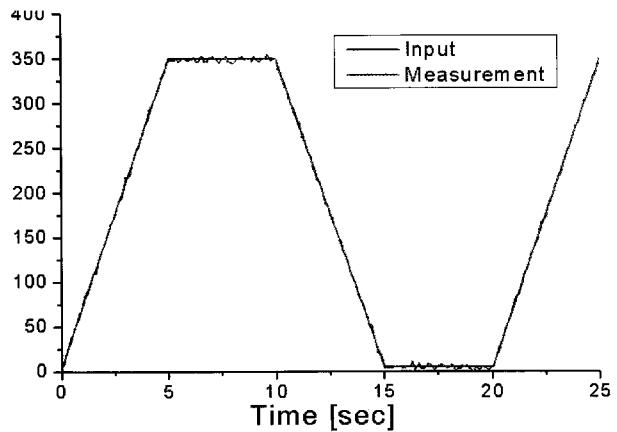


그림 7. 수명시험 프로파일

4. 결 론

무고장 가속시험 기법은 시험평가에 소요되는 시간과 경비를 절감함과 아울러 제품의 개발주기가 점점 단축되는 시대적 요구에 부합하는 중요한 기술이다. 본 논문에서는 가속시험 전략에 필요한 전반적인 기술적인 내용들을 제시하였다.

한 사례로 굴삭기용 메인펌프의 무고장 가속시험시간을 도출하였다. 신뢰 수준 70%에서 B20 보증수명 10,000시간을 보장하기 위하여 722시간의 무고장 가속시험시간을 산출하였으며 이때 가소계수는 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.

✽ 참고 문헌

- [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 Instrn 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.



정 동 수

· 한국기계연구원 시스템신뢰성연구실 책임연구원
· 관심분야 : 유압시스템, 신뢰성평가
· E-mail : jds667@kimm.re.kr



이 용 범

· 한국기계연구원 시스템신뢰성연구실 책임연구원
· 관심분야 : 유압시스템, 해양에너지
· E-mail : lyb662@kimm.re.kr



성 백 주

· 한국기계연구원 시스템신뢰성연구실 선임연구원
· 관심분야 : 유압 액추에이터, 신뢰성 평가
· E-mail : sbj662@kimm.re.kr