

유압펌프 및 모터 피스톤 조립체의 수명예측을 위한 가속실험 모델 Accelerated Life Test Model for Life Prediction of Piston Assemblies in Hydraulic Pump and Motor

이용범 · 김형의 · 유영철 · 박종호

Y. B. Lee, H. E. Kim, Y. C. Yoo and J. H. Park

Key Words : Hydraulic Pump(유압펌프), Hydraulic Motor(유압모터), Accelerated Life Test(가속수명시험), Piston and Shoe Assembly(피스톤 및 슈 조립체), Wearout(마모)

Abstract: The safety factor of hydraulic piston pumps & motors due to high pressurization, high speedization and low weight/volume realization to enhance the output density shows a tendency to decrease. Therefore more effective test methods are necessary to predict the exact life. The failure of hydraulic pumps & motors operating in high pressure and high speed mainly occurs in piston-shoe assemblies, and the major failure mode is wearout of the shoe surface. The sensitive parameters in the endurance life test are speed, pressure and temperature, and the failure production increases in proportion to the operating time. In this research, the authors propose the combined accelerated life test model using the analysis method of the combined accelerated life test results of piston-shoe assemblies by applying simultaneously high speed, high pressure and high temperature in accordance with variation of speed, pressure and temperature to reduce the life test time.

기호 설명

1. 서론

- E_A : 활성화 에너지 [eV]
- k : 볼츠만상수 [8.6171×10^{-5} eV/°C]
- n_p : 압력에 의한 역승모델의 모수
- n_v : 속도에 의한 역승모델의 모수
- p_s : 압력에 의한 스트레스 비 [%]
- t_s : 온도에 의한 스트레스 비 [%]
- t_f : 고장이 발생할 때까지의 실험시간 [h]
- v_s : 속도에 의한 스트레스 비 [%]
- α : 사판의 경사각 [°]
- β : 형상모수
- η : 척도모수
- $\dot{\omega}$: 마모율 [%]

유압피스톤 펌프 및 모터는 출력밀도가 높아 건설 기계, 산업기계, 자동차, 군사무기 및 농기계 등에 광범위하게 사용되고 있고, 최근에는 고압화, 고속화, 소형경량화 및 고기능화 등으로 첨단화되고 있다. 이로 인해 제품의 구조 및 고장 메커니즘(failure mechanism)이 점점 복잡하고 다양해지고 있으므로 다양한 내구수명실험을 통한 신뢰성 입증에 요구된다¹⁾.

유압피스톤 펌프 및 모터의 주 고장 부위는 피스톤 및 슈 조립체이고, 주 고장모드는 슈 표면의 마모이며, 수명에 가장 민감한 파라미터는 압력, 속도, 온도 및 오염 등이다²⁾.

유압피스톤 펌프 및 모터의 가속시험에 대한 연구는 과부하(over load)를 가하는 실험을 통하여 수명 가속화가 가능하지만, 현재까지는 초과압력에 의한 가속 이론식만 Ivantysynova³⁾에 의하여 계략적으로 정립되어있을 뿐 압력, 속도 및 온도에 의한 복합 가속모델은 개발되지 못하고 있다.

본 연구에서는 피스톤 조립체의 내구수명을 신속하게 예측하기 위하여, 실험 장치를 개발하고, 각 가

접수일 : 2005년 10월 29일
 이용범 (책임저자) : 한국기계연구원 신뢰성센터
 E-mail : lyb662@kimm.re.kr
 Tel : 042-868-7151
 김형의, 유영철 : 한국기계연구원 신뢰성평가센터
 박종호 : 충남대학교 기계공학과 대학원

속수명 파라미터별로 수명실험을 실시하여 높은 신뢰도를 갖는 복합가속모델 실험식을 도출하였다.

2. 본 론

2.1 시험대상 피스톤 조립체

본 연구에서 사용한 피스톤 조립체는 가변용량형 피스톤 펌프와 고정용량형 유압모터가 일체형인 15 kW급 트랙터의 정유압변속기(HST : Hydro Static Transmission)용으로 그 형상과 재원은 Fig. 1 및 Table 1과 같다.

2.2 가속이론

2.2.1 압력-속도 효과

HST에서 피스톤조립체의 마모율($\dot{\omega}$)은 정압베어링에 가해지는 압력·속도($P_f \cdot V_f$)계수의 함수로서 식(1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\dot{\omega} = C \cdot P_f^{-np} \cdot V_f^{nv} \quad (1)$$

여기서 C는 상수이다.

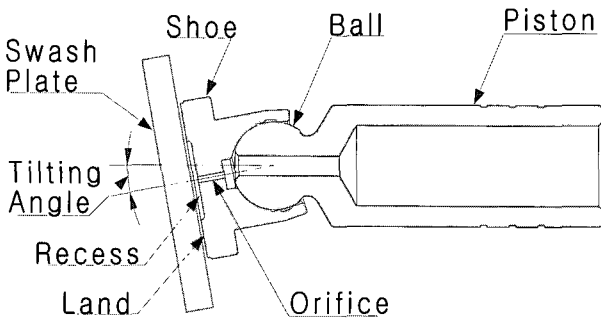


Fig. 1 Structure of Piston Assembly

Table 1 Specification of Piston Assembly

| Items | Specification |
|-------------------|-----------------------------|
| Power | 15 [kW] |
| Displacement | 0~25 [cm ³ /rev] |
| Tilting angle | 0~±16.3 [°] |
| Piston diameter | 14.5 [mm] |
| Shoe diameter | 19.2 [mm] |
| Recess diameter | 9.6 [mm] |
| Rated pressure | 21 [MPa] |
| Casing pressure | 0.1 max. [MPa] |
| Rated speed | 2000 [rpm] |
| Rated Temperature | 50 [°C] |

고장시간(t_f)은 마모율에 반비례하며, 고장시간에 대한 표현은 다음 식(2)와 같다.

$$t_f = \frac{h_c}{\dot{\omega}} \quad (2)$$

h_c 는 HST의 고장 혹은 피스톤의 교체가 요구되는 최대 허용 마모율을 L_{wr} 이라고 하면 식(3)과 같이 표현 할 수 있다.

$$t_f = \frac{h_c}{C} P_f^{-np} V_m^{-nv} \quad \text{혹은} \\ t_f = \Phi P_f^{-np} V_m^{-nv} \quad (3)$$

여기서 $\Phi = f(L_{wr})$

2.2.2 온도 효과

아레니우스 관계식에 따라 일정한 실험온도에서의 열화율은 $R_A(T)$ 이고 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$R_A(T) = A e^{-E_A/kT} \quad (4)$$

E_A 는 활성화 에너지이고 정압베어링 물질의 형태 함수이다. k는 볼츠만 상수이고 T는 정압베어링의 절대온도이다. 고장시간에 대한 온도의 효과를 포함하면, 고장시간을 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$t_f = \Phi P_T^{-np} V_m^{-nv} \exp(E_A/kT) \quad (5)$$

식(5)에서 P_T 는 실험압력, V_m 는 접촉 표면의 상대 속도, n_p , n_v 는 가속모델의 모수(parameter)를 나타낸다.

2.2.3 가속계수

일반적으로 실험에 의한 가속계수 AF(acceleration factor)는 식(6)과 같이 표현된다.

$$AF = \frac{t(f_{field})}{t(f_{test})} \quad (6)$$

가속계수에 대하여 고장시간을 대입하여 다시 정리하면 식(7)과 같고, 이를 다시 대수학적으로 표현하면 피스톤 조립체의 가속모델에 대해 다음과 같은 식(8)을 얻을 수 있다.

$$AF = \frac{\eta_{use}}{\eta_{test}} \\ = \left(\frac{P_{test}}{P_{use}} \right)^{np} \cdot \left(\frac{V_{test}}{V_{use}} \right)^{nv} \cdot e^{\left[\frac{E_A}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{test}} \right) \right]} \quad (7)$$

$$AF = \left(\frac{P_f(test)}{P_f(field)} \right)^{np} \left(\frac{V_f(test)}{V_f(field)} \right)^{nv} \exp \left[\frac{E_A}{K} \left(\frac{1}{T_{field}} - \frac{1}{T_{test}} \right) \right] \quad (8)$$

2.3 실험장치

실험장치는 피스톤 조립체에 가해지는 압력, 속도, 온도를 변화시키면서 가속수명실험을 할 수 있도록 지그 중앙부분에 2개의 피스톤블록을 좌우로 장착하고, 좌우대칭으로 2개의 실험 피스톤을 장착하여 동기(synchronized)적으로 작동되도록 함으로서 압력에 의해 피스톤으로부터 경사판(swash plate)에 발생하는 추력을 상쇄시켰고, 전진하는 1개의 피스톤에서 토출된 오일이 후진하는 다른 1개로 흡입되게 함으로써 연속적으로 동일한 체적이 유지되어 유량 변동이 발생하지 않도록 하였다.

피스톤 조립체의 성능저하와 피스톤 슈와 경사판, 피스톤과 피스톤 블록사이의 마찰 및 누유량을 계측하기 위해, 실험장치의 구동축과 서보모터 사이에는 토크와 회전수를 측정할 수 있는 센서를 장착하였다.

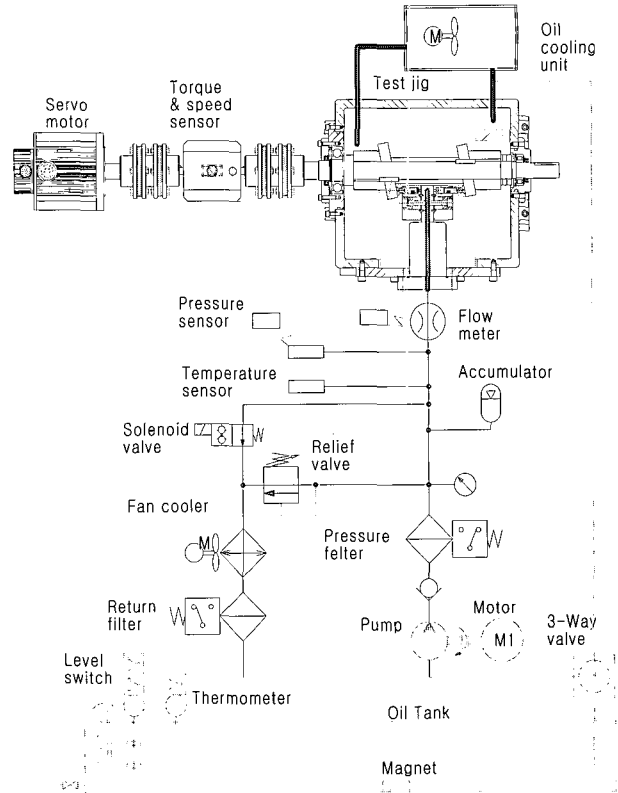


Fig. 4 Hydraulic circuit for the test

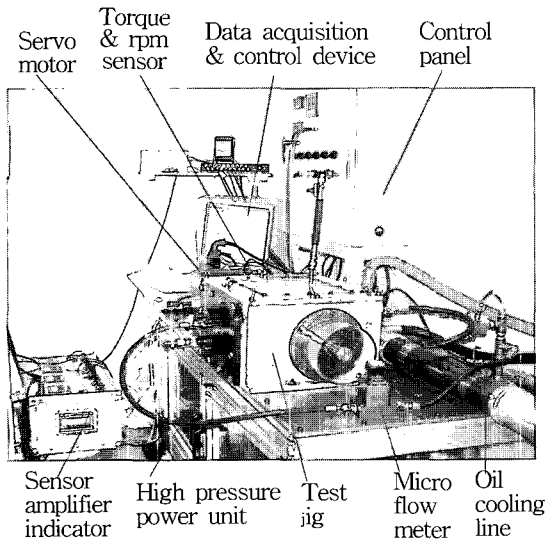


Fig. 2 Photo. of Performance & life test equipment

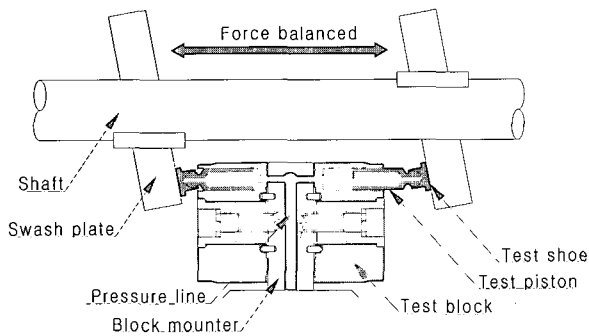


Fig. 3 Force balanced type test jig

Table 2 Specifications of sensors

| Sensor | Item | Specifications |
|--------------------|------------------------------------|-----------------|
| Flow sensor | Sensor type | Gear type |
| | Measuring range | 0.01 ~ 16 l/min |
| | Measuring accuracy | ±0.3% |
| | Linearity | ±1.5% |
| | Max. Pressure | 45 MPa |
| Torque sensor | Measuring range | -100 ~ 100 N.m |
| | Torque signal with limit frequency | 16 khz |
| | Accuracy in measuring | ±0.5% |
| | Non linearity | 0.3% FS |
| | Hysteresis | 0.2% FS |
| | Terminal resistance | 350 Ω ±5% |
| Pressure sensor | Measuring range | 0 ~ 70 MPa |
| | linearity | 0.1% FS |
| | Stability | 0.2% FS max. |
| | Hysteresis | 0.1% FS |
| Temp. sensor | Measuring range | -50 ~ 200 °C |
| | Max. pressure | 70 MPa |
| | Type | Pt 100 Ω |
| Speed (rpm) sensor | Measuring range | 0 ~ 5000 rpm |
| | Number of pulses/ revolutions | 60 |

정압베어링부와 피스톤 블록 틈새의 누유량을 측정하기 위해 실험지그와 가장 근접한 유압공급 관로에 기어 형 정밀 유량센서를 장착하였다. 또한 실험부의 온도와 시스템의 온도를 측정하기 위하여 고압오일 공급관로와 오일저장 탱크에 온도센서(thermocouple)를 설치하였고, 실험압력을 측정하여 기계효율을 연산하기 위해, 밸브메니폴드와 고압 관로에 동일한 사양의 압력센서를 설치하였다. 실험장치에 사용된 압력, 회전속도, 토크 및 유량 등 계측센서의 사양은 Table 2와 같다.

2.4 실험방법

수명 및 가속특성을 확인하기 위해서 피스톤 조립체의 정격조건을 HST의 실제사양을 기준으로 정격압력(P_R) 21 MPa, 정격속도(V_R) 2000 rpm, 정격온도(T_R) 50 °C로 결정하였다. 가속수명실험의 부하수준(stress level)은 정격조건과 각각의 가속실험압력(P_a), 가속실험속도(V_a), 가속실험온도(T_a) 등의 비로서 Table 3과 같이 결정하였다.

Table 3 Test parameter & stress ratio

| Test no | Test parameter | | | Stress ratio (%) | Test time (hr) |
|---------|--|----------|-------|---------------------------------|----------------|
| | Press. | Speed | Temp. | | |
| 1 | 21 MPa | 4000 rpm | 50 °C | $p_s=100, v_s=200$ | 200 |
| 2 | 32 MPa | | | $p_s=150, v_s=200$ | |
| 3 | 37 MPa | | | $p_s=175, v_s=200$ | |
| 4 | 42 MPa | | | $p_s=200, v_s=200$ | |
| 5 | 21 MPa | 2500 rpm | 50 °C | $v_s=125$ | 200 |
| 6 | | 3000 rpm | | $v_s=150$ | |
| (1) | | 4000 rpm | | $v_s=200$ | |
| 7 | 21 MPa | 4000 rpm | 40 °C | $t_s=80, v_s=200$ | 200 |
| (1) | | | 50 °C | $t_s=100, v_s=200$ | |
| 8 | | | 75 °C | $t_s=150, v_s=200$ | |
| 9 | | | 87 °C | $t_s=175, v_s=200$ | |
| 10 | 42 MPa | 4000 rpm | 87 °C | $p_s=200, v_s=200$ $t_s=175$ | 200 |
| 11 | 42 MPa | 4000 rpm | 87 °C | $p_s=200, v_s=200$ $t_s=175$ | 150 |
| 12 | | | 50 °C | $p_s=200, v_s=200$ $t_s=100$ | |
| Note | $P_R : 21.0 \text{ MPa}, V_R: 2000 \text{ rpm}, T_R: 50 \text{ }^\circ\text{C}$ $p_s = \frac{P_a}{P_R} \times 100 \quad v_s = \frac{V_a}{V_R} \times 100, t_s = \frac{T_a}{T_R} \times 100$ | | | | |

정격조건 125%, 150%, 175%, 200%의 부하 비율(stress ratio: p_s, v_s, t_s)로 200시간씩 총 10회 실험하였고, 수명분포를 추정과 통계적 처리를 위해 동일한 실험조건에서 8개씩 2수준으로 16개를 추가 실험하였다.

3. 실험 및 결과분석

피스톤 조립체를 실험한 결과 전반적인 고장형태는 피스톤 슈 표면의 마모였으며, 150시간, 200시간 수명실험 후 마모량 정밀측정 장비(iCAMSCOPE, Model-ICS-305B)를 이용하여 슈 표면의 마모부분을 분석한 결과, 실험부하크기와 속도, 압력, 온도 순으로 마모가 나타났다.

수명실험 후 Fig. 5의 사진과 같이 압력, 속도, 온도의 부하의 크기에 따라서 비례적으로 마모량이 크게 나타나는 경향을 볼 수 있었다.

3.1 가속 파라미터에 따른 실험결과

3.1.1 압력에 의한 마모 특성

압력에 의한 가속수명실험은 속도 4000 rpm, 온도

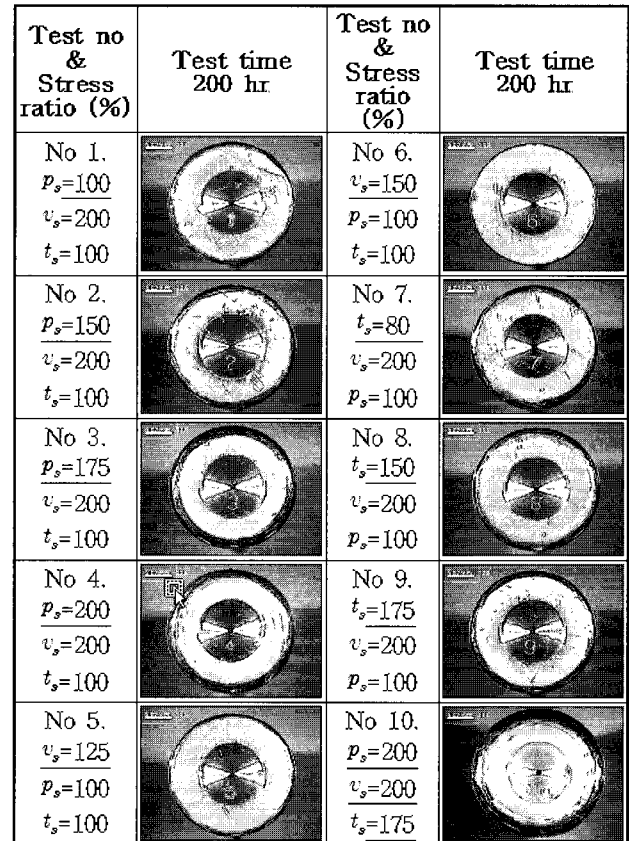


Fig. 5 Wearout photograph of piston shoes after life testing

50℃의 일정한 조건 하에서 21.0 MPa부터 42.0 MPa 까지 압력을 가변시키면서 실시하였으며, 압력을 가속인자로 한 경우 마모량은 실험시간에 따라 증가 되었으며, 부하의 크기에 따라 평균 기울기가 0.0044~0.00815로 Fig. 6과 같이 나타났다.

정격 압력의 100%인 21.0 MPa에서 실험을 한 결과 평균 마모량은 150시간 실험 후 0.69 mm, 200시간 실험 후 0.88 mm이었고, 31.5 MPa에서의 평균 마모량은 150시간 실험 후 0.95 mm, 200시간 실험 후 1.03 mm이었으며, 42 MPa에서는 평균 마모량이 150시간 실험 후 1.49 mm, 200시간 실험 후 1.63 mm 이었다.

3.1.2 속도에 의한 마모 특성

실험압력과 온도를 정격조건인 21.0 MPa, 50 ℃가 되도록 한 후 속도를 2500, 3000, 4000 rpm으로 가변시키면서 수명 실험을 실시하였으며, 속도를 가속인자로 한 경우 마모량은 실험시간에 따라 선형적으로 증가 되었고, 부하의 크기에 따라 평균 기울기가 0.0016~0.0044로 Fig. 7과 같이 나타났다.

정격 속도의 125%인 2500 rpm에서 실험을 한 결과 평균 마모량은 150시간 실험 후 0.29 mm, 200시간 실험 후 0.32 mm이었고, 3000 rpm에서는 평균 마모량은 150시간 후 0.60 mm, 200시간 후 0.83 mm 이었다.

3.1.3 온도에 의한 마모 특성

압력을 정격인 21.0 MPa로 하고, 속도는 정격의 200%인 4000 rpm이 되도록 한 후 가속인자인 온도를 40 ℃부터 88 ℃ 까지 가변시키면서 수명 실험을 실시하였으며, 온도를 가속인자로 한 경우 마모량은 실험시간 비례하여 선형적으로 증가 되었으며, 부하의 크기에 따라 평균 기울기가 0.0026~0.0075로 Fig. 8과 같이 나타내었다.

오일 냉각기의 연속 최대 사용온도는 95 ℃ 이고, 시스템 열손실 등의 영향 때문에 정격 온도의 175%인 88 ℃까지만 실험이 가능하기 때문에 통계적 분석을 위해 정격온도의 80%인 40 ℃에서 추가 실험을 하였다. 40 ℃에서 실험을 한 결과 평균 마모량은 150시간 실험 후 0.43 mm, 200시간 실험 후 0.52 mm이었고, 75 ℃에서 실험을 한 결과 평균 마모량은 150시간 실험 후 1.03 mm, 200시간 실험 후 1.10 mm이었으며, 88 ℃에서 실험을 한 결과 평균 마모량은 150시간 실험 후 1.13 mm, 200시간 실험 후 1.25 mm이었다.

3.1.4 복합스트레스 조건에서의 마모 특성

복합스트레스 조건 하에서 실험을 한 결과는 Fig. 9와 같다.

가속을 극대화하기 위해 수명에 민감한 압력, 속도 및 온도를 동시에 높게 가하는 복합스트레스 조건으로 150시간동안 실험하였다. 복합스트레스 조건은 실험압력과 속도를 정격의 200%인 42 MPa와 4000 rpm으로 설정했고, 온도는 정격조건인 175%인 88 ℃로 설정하고, 마모량을 분석 한 결과 50시간 실험 후 평균마모길이는 1.245 mm 이고, 100시간 복합 가속수명실험 후 평균 마모길이는 1.478 mm, 150시간 실험 후는 1.735 mm 이었다.

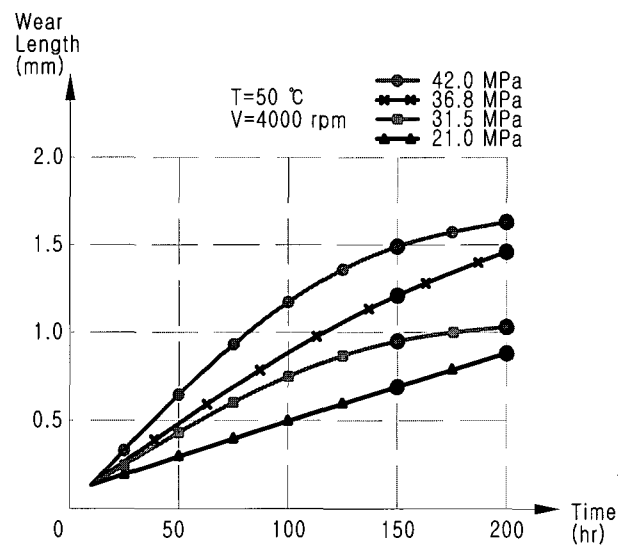


Fig. 6 Wearout amount of piston shoes due to pressure variations

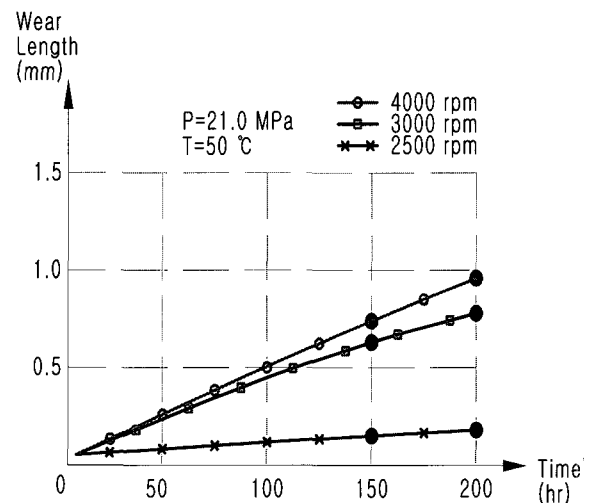


Fig. 7 Wearout amount of piston shoes due to speed variations

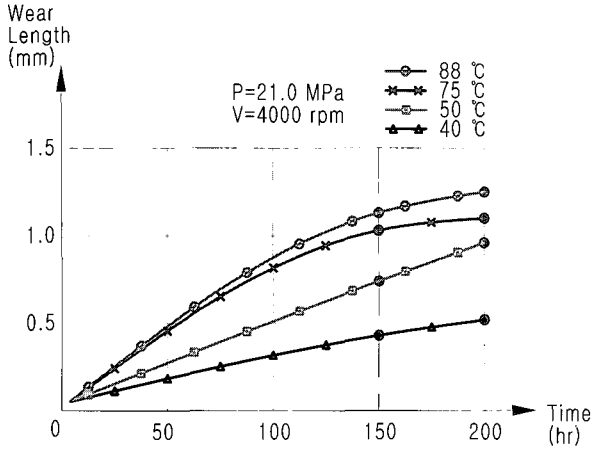


Fig. 8 Wearout amount of piston shoes due to temperature variations

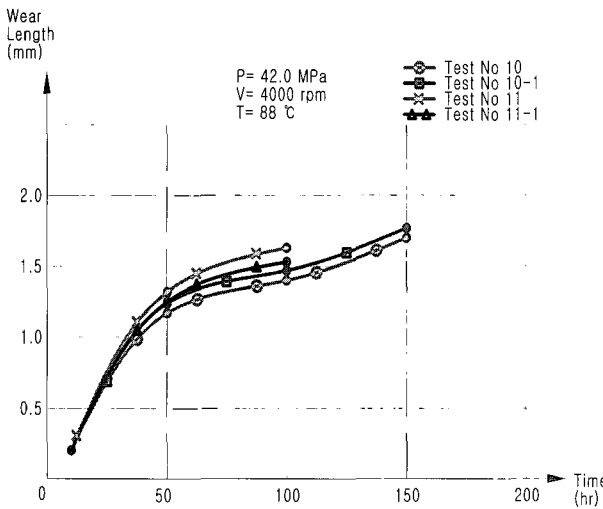


Fig. 9 Wearout amount of piston shoes due to pressure-speed-temperature variations

복합스트레스 조건 하에서 실험을 실시한 결과 50 시간까지는 급속하게 마모가 증가하여 평균기울기가 0.01245였으며, 50~100시간까지는 기울기가 0.00466으로 완만하게 증가하였고, 100시간이후부터는 마모 기울기가 0.00514로 증가량이 높아졌다.

결과적으로 42 MPa에 의한 마모길이 보다는 약 3%가 증가하였고, 4000 rpm에 의한 마모길이 보다는 약 221%가 증가하였으며, 88°C에 의한 마모길이 보다는 약 135%가 증가하였다.

3.2 수명실험 결과 분석

3.2.1 압력에 대한 수명-스트레스 관계

Fig. 10은 온도와 속도는 정격조건인 2000 rpm 및 50°C의 부하상태로 고정시키고, 압력만 가속한 경우의 수명-스트레스(life-stress relationship)를 나타내

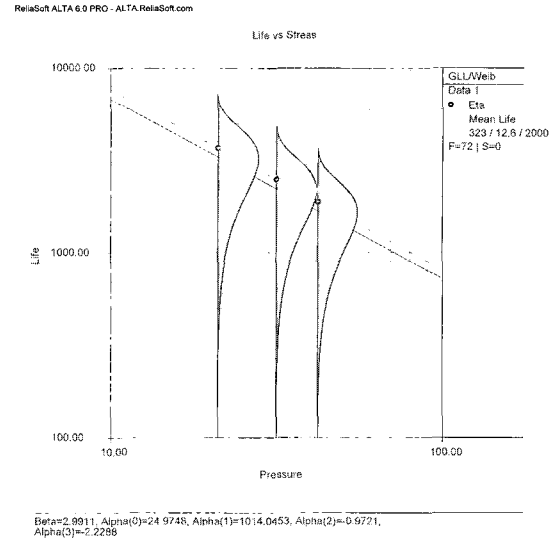


Fig. 10 Analysis of life-stress relationship by pressure

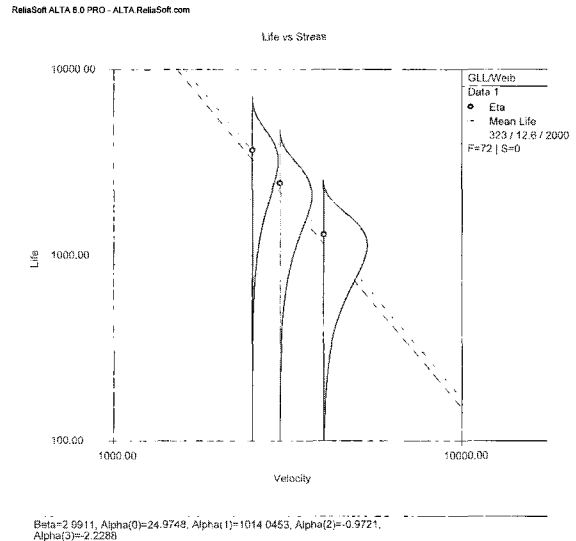


Fig. 11 Analysis of life-stress relationship by speed

는 분석 결과로서 세로축은 수명을 나타내고, 가로축은 실험압력을 나타낸다. 압력 사용조건(12.6 MPa)과 가속실험압력을 21.0 MPa, 31.5 MPa, 42.0 MPa로 하고 실험 데이터의 분포를 분석한 결과 형상모수는 2.9911이고, 역승모델의 모수는 0.9721이었다.

3.2.3 속도에 대한 수명 실험 부하 관계

Fig. 11은 압력 및 온도는 정격조건인 21 MPa 및 50°C의 부하상태로 고정시키고, 속도만 가속한 경우의 수명-스트레스를 나타내는 분석 결과로서 세로축은 수명을 나타내고, 가로축은 실험속도를 나타낸다. 가속실험속도를 2000, 3000, 4000 rpm으로 하고 실험

데이터의 분포를 분석한 결과 형상모수는 2.9911이고, 역승모델의 모수는 2.2288이었다.

3.2.3 온도에 대한 수명 실험 부하 관계

Fig. 12는 압력 및 속도는 정격조건인 21 MPa 및 2000 rpm의 부하상태로 고정시키고, 온도만 가속한 경우의 수명-스트레스를 나타내는 분석 결과로서 세로축은 수명을 나타내고, 가로축은 실험온도를 나타낸다. 가속실험온도를 50, 75, 87.5 °C로 하고 실험 데이터의 분포를 분석한 결과 형상모수는 2.9911이고, 아레니우스모델의 모수는 1014.0453이었다.

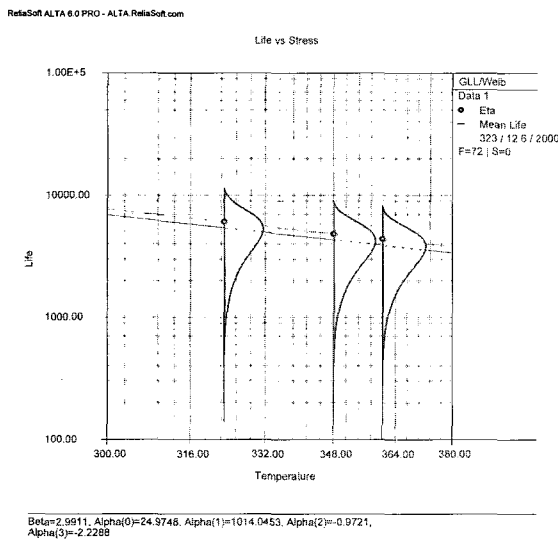


Fig. 12 Analysis of life-stress relationship by temperature

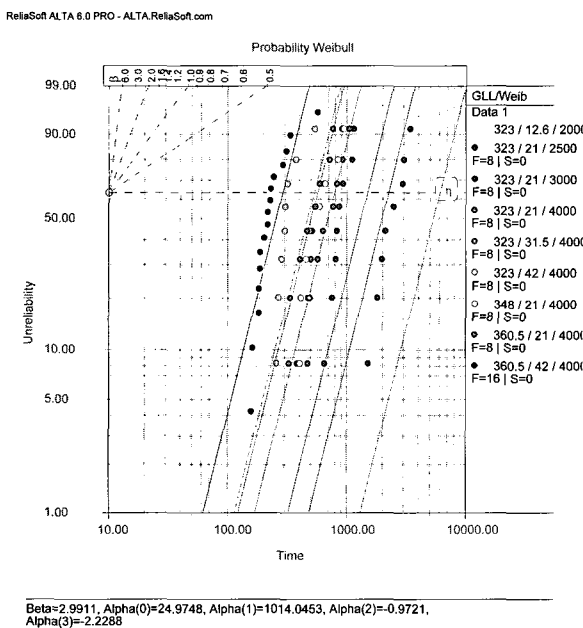


Fig. 13 Analysis of equivalence shape parameter

Table 5 Analysis of accelerated life data

| Test parameter (P, V, T) | | | η | β | Life stress parameter | AF |
|--------------------------|-------------|------------|---------|---------|-------------------------------|-------|
| Pressure (MPa) | Speed (rpm) | Temp. (°C) | | | | |
| 12.6 | 2000 | 50 | 6063.39 | 2.99 | Use Level | 1.00 |
| 21.0 | 2000 | 50 | 3690.20 | 2.99 | 0.9721 (np) | 1.64 |
| 31.5 | | | 2488.09 | | | 2.44 |
| 42.0 | | | 1881.09 | | | 3.22 |
| 21.0 | 2500 | 50 | 2244.16 | 2.99 | 2.2288 (nv) | 2.70 |
| | 3000 | | 1494.76 | | | 4.06 |
| | 4000 | | 787.23 | | | 7.70 |
| 21.0 | 2000 | 50 | 3690.20 | 2.99 | 1014.0453 ($\frac{E_A}{k}$) | 1.64 |
| | | 75 | 2945.11 | | | 2.06 |
| | | 87.5 | 2662.08 | | | 2.28 |
| 42.0 | 4000 | 87.5 | 289.49 | 2.99 | Combined | 20.95 |

3.2.4 수명데이터의 공통형상모수 도출

와이블분포⁴⁾는 부하를 변화시키면서 실험한 수명 데이터이다. 각 수준별 고장 데이터의 형상모수가 동일하다는 것은 고장분포가 일치한다는 것으로서 이에 따라 가속관계가 성립한다⁵⁾.

Fig. 13은 가속파라미터(압력, 속도, 온도 및 복합 가속)의 변화에 따른 수명실험 결과를 분석하여 공통의 형상모수($\beta=2.991$)와 역승모델⁶⁾의 모수 (np:Alpha(2)=0.972, nv:Alpha(3)=2.229) 및 아레니우스모델⁷⁻⁸⁾의 모수(E_A/k : Alpha(1) = 1014.05)를 ALTA 6.0 PRO를 이용하여 도출한 결과이다.

3.2.5 가속수명 실험파라미터별 데이터 분석

속도, 압력, 온도 및 복합 가속수명실험파라미터별 수명데이터를 분석하여 Table 5와 같은 모수를 구하였으며, 평균 사용조건을 정격압력의 60 %인 126 MPa, 정격속도, 정격온도로 하고 복합가속모델 (multi variable relationship; General log-linear model : GLL model⁹⁻¹⁰⁾을 이용하여 가속계수(AF)를 구한 결과, 200% 압력비에 의한 가속계수는 3.22이었으며, 200% 속도비에 의한 가속계수는 7.7이었으며, 87.5 °C로 실험한 가속계수는 2.28이었으며, 복합스트레스에 의한 가속계수는 20.95였다.

3.3 복합가속 실험모델의 검정

복합가속 실험모델에 의한 가속계수를 산출하여, 가속파라미터를 42.0 MPa, 4000 rpm 및 87.5 °C로 결정하고, 사용수준 12.6 MPa, 2000 rpm 및 50 °C

에 대하여 실험한 결과 식 (7)에 역승모델의 모수 ($n_p = 0.9721$, $n_v = 2.2288$)와 아레니우스모델 모수 ($\frac{E_A}{k} = 1014.0453$)를 대입하여 산출한 가속계수는 20.943782이었다.

$$AF = \frac{n_{use}}{n_{test}} = \left(\frac{P_{test}}{P_{use}}\right)^{n_p} \cdot \left(\frac{V_{test}}{V_{use}}\right)^{n_v} \cdot e^{\left[\left(\frac{E_A}{k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{test}}\right)\right]}$$

$$= \left(\frac{42}{12.6}\right)^{0.9721} \cdot \left(\frac{4000}{2000}\right)^{2.2288} \cdot e^{\left[1014.0453 \cdot \left(\frac{1}{323} - \frac{1}{360.5}\right)\right]}$$

$$= 20.943782$$

또한 사용수준인 12.6 MPa, 2000 rpm, 50 °C에 대하여 해석한 척도모수 6063.39와 복합가속 조건으로 수명 실험하여 산출된 척도모수 289.4899를 계산한 가속계수는 20.94083이었다.

$$AF = \frac{n_{use}}{n_{test}} = \frac{6063.39}{289.4899} = 20.945083$$

복합가속 실험모델에 의한 가속계수 산출결과는 20.943782이고 척도모수를 이용한 가속계수 산출결과는 20.945083으로 거의 동일하여 본 연구를 통하여 개발된 복합가속 실험모델을 신뢰할 수 있었다.

4. 결 론

정유압변속기용 유압피스톤 펌프 · 모터의 피스톤 조립체에 대하여 가속수명실험에 의한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) HST의 주 고장부품은 피스톤 조립체이고, 주 고장모드는 슈 표면의 마모이며, 수명에 가장 민감한 가속파라미터는 속도, 압력 및 온도 순이다.
- 2) 속도, 압력의 가속모델은 역승모델이며, 온도 에 의한 가속은 아레니우스모델에 일치 하였다. 선형 모형을 이용하여 얻은 수명 데이터는 와이블분포를 따르고 형상모수(β)는 2.99 이다.
- 3) 압력을 가속파라미터로 하고 200 %의 부하를 가했을 때 가속계수(AF)는 3.22이고, 역승모델의 모수(n_p)는 0.97이다. 속도를 가속파라미터로 하고 200 %의 부하를 가했을 때 가속계수는 7.70이고, 역승모델의 모수(n_v)는 2.23이다. 또한 온도를 가속파라미터로 하고 87.5 °C로 했을 때 아레니우

스모델의 활성화 에너지(E_A)는 0.0874 이고 가속 계수는 2.28이다.

- 4) 복합가속 수명실험결과를 분석하여, 압력(P), 속도(V) 및 온도(T)의 복합가속모델 실험식을 구하였다.

$$AF = \left(\frac{P_{test}}{P_{field}}\right)^{0.9721} \left(\frac{V_{test}}{V_{field}}\right)^{2.2288} \exp\left[\frac{0.08738}{k} \left(\frac{1}{T_{field}} - \frac{1}{T_{test}}\right)\right]$$

- 5) 도출된 가속실험방법은 신뢰성 실험에 활용될 수 있고, 약 20배의 가속 실험이 가능하기 때문에 실험시간 단축에 의해 시험비용을 절감 시킬 수 있다.
- 6) 본 연구를 통하여 설계 고안된 축 방향 힘 균형 실험지그와 고압, 고속 피스톤실험장치는 HST, 유압피스톤펌프와 모터의 고압화, 고속화 및 고효율화를 위한 정압베어링 연구와 내구 수명실험을 통한 신뢰성평가에 응용될 수 있다.

후 기

이 연구는 2005년도 산업자원부 부품 · 소재 기술 개발사업(과제번호 : PMI 1110)의 일환으로 수행되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- 1) J. A. McLinn, "Assuring Hydraulic Component Reliability", NCFP 105, pp. 67~73, 2005.
- 2) J. Ivantysyn and M. Ivantysynova, "Hydrostatic Pumps and Motors", First English Edition, pp. 210~390, 2000.
- 3) M. Ivantysynova, "Accelerated Life Test General Approach for Hydrostatic Units", pp. 5~25, 2003.
- 4) W. Weibull, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability", ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 18, pp. 293~297, 1951.
- 5) G. S. Wasserman, "Reliability Verification, Testing and Analysis in Engineering Design Handbook", Marcel Dekker, Inc. pp. 25~377, 2003.
- 6) MIL-STD 721C, "Definitions of Terms for Reliability and Maintainability", pp. 2~13, 1966.
- 7) V. R. Lalli and H. A. Malec, "Reliability

- Training", NASA Reference Publication 1253, pp. 105~126, 1992.
- 8) 김윤광 외 13인, "신뢰성용어 해설서", 산업자원부 기술표준원, pp. 46~53, 2003.
- 9) 이레테크 미니태사업부, "Minitab 실무완성", 이레테크, pp. 30~130, 2001.
- 10) ReliaSoft, "Accelerated Life Testing Reference" ALTA Version 6, pp. 5~295, 2001.