

# 피스톤 조립체의 수명예측을 위한 가속실험모델에 관한연구

이용범, 김형의, 송규조, 김태석  
한국기계연구원, 기계시스템신뢰성연구센터

## A study on the accelerated life test model for life prediction of piston assemblies

Yong-bum Lee, Hyoung-eui Kim, Kyu-joe Song and Tae-suk Kim  
Mechanical Systems Reliability Research Center  
Korea Institute of Machinery & Materials, Korea

### Abstract

Piston assemblies, which are key components of hydraulic high pressure pumps & motors, are major failure products operating at high pressure and high speed, and the main failure mode is wearout of the shoe surface. To predict the actual life of piston assemblies, we require to find out the most sensitive parameters and establish related empirical formula. In this study, we analyzed the life of piston and shoe assemblies in accordance with variation of speed, pressure, and temperature to reduce the life test time, then analyzed the result of combined accelerated life test which is applied by high speed, speed pressure, and high temperature simultaneously, and finally developed combined accelerated life test model.

**Key words :** Hydraulic pump & motor, Accelerated life test, Force balanced Wearout, Piston and shoe assembly

### 기호 설명

$E_A$ : Activation energy of the reaction [eV]	$t_f$ : Test time to failure [hr]
$k$ : Boltzmann's constant [ $8.6171 \times 10^{-5}$ eV/°C]	$v_s$ : Stress ratio by speed [%]
$n_p$ : Power index of pressure	$\alpha$ : Tilting angle of swash plate [deg.]
$n_v$ : Power index of speed	$\beta$ : Shape parameter
$p_s$ : Stress ratio by pressure [%]	$\eta$ : Weibull scale parameter
$t_s$ : Stress ratio by temperature [%]	$\omega$ : Ratio of wearout [%]

### 1. 서론

유압피스톤 펌프 및 모터는 출력밀도가 높아 건설기계, 산업기계, 자동차, 군사무기 및 농기계 등에 광범위하게 사용되고 있다. 최근 고압화, 고속화, 소형경량화 및 고기능화 등으로

침단화되고 있으며, 이로 인해 제품의 구조 및 고장 메커니즘(failure mechanism)은 점점 복잡하고 다양해지고 있어 많은 내구수명실험을 통하여 신뢰성 입증에 요구된다<sup>1)</sup>. 유압피스톤 펌프 및 모터의 주 고장 제품은 피스톤 및 슈 조립체이고, 주 고장모드는 슈 표면의 마모이며, 수명에 가장 민감한 파라미터는 압력, 속도, 온도 및 오염 등이다<sup>2)</sup>.

유압피스톤 펌프 및 모터의 가속시험에 대한 연구는 과부하(over load)를 가하는 실험을 통하여 수명 가속화가 가능하지만, 현재까지는 초과압력에 의한 가속 이론식만 Monika<sup>3)</sup>에 의하여 계략적으로 정립되어있을 뿐 압력, 속도 및 온도에 의한 복합 가속모델은 개발되지 못하고 있다. 본 연구는 피스톤 조립체의 내구수명을 신속하게 예측하기 위하여, 실험 장치를 개발하고, 각 가속수명 파라미터별로 수명실험을 통하여 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 제원은 Fig. 1 및 Table 1과 같다.

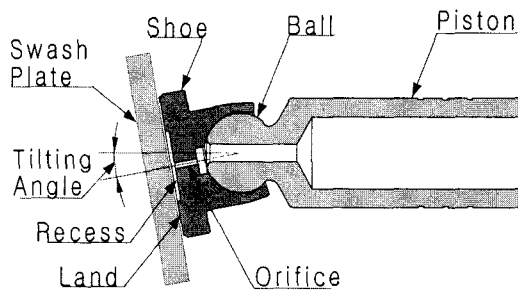


Fig. 1 Structure of Piston Assembly

Table 1 Specification of Piston Assembly

Items	Specification
Power	15 [kw]
Displacement	0~25 [cc/rev]
Tilting angle	0~±16.3 [deg.]
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]

### 2.2 가속이론

#### 2.2.1 압력-속도 효과

HST에서 피스톤조립체의 마모율( $\dot{\omega}$ )은 정압베어링에 가해지는 압력·속도(PV)계수의 함수로서 식(1)과 같이 표현 할 수 있고, 고장시간( $t_f$ )은 마모율에 반비례하며, 고장시간에 대한 표현을 다음 식(2)과 같고,  $h_c$ 는 HST의 고장 혹은 피스톤의 교체가 요구되는 최대 허용 마모율  $L_{wr}$ 이라고 하면 식(3)과 같이 표현 할 수 있다.

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

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

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

여기서  $\phi = f(L_{wr})$

### 2.2.2 온도 효과

아래니우스 관계식에 따라 일정한 실험온도에서의 열화율은  $R_A(T)$ 이고 식(4)과 같고, 이때  $E_A$ 는 활성화 에너지이고 정압베어링 물질의 형태 함수이다.  $k$ 는 볼츠만 상수이고  $T$ 는 정압베어링의 절대온도이다. 고장시간에 대한 온도의 효과를 포함하면, 식(5)과 같다.

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

$$t_f = \phi P_f^{-np} V_m^{-nv} \exp(E_A/kT) \dots\dots\dots(5)$$

$\phi = f(L_{wr})$ 일 때,  $P_f$ 는 실험압력이고,  $V_m$ 는 접촉(mating) 표면의 상대 속도이고,  $n_p, n_v$ 은 가속모델의 모수(parameter)이다.

### 2.2.3 가속계수

일반적으로 실험에 의한 가속계수 AF(acceleration factor)는 식(6)과 같고, 가속계수에 대하여 고장시간을 대입하면 다시 정리면 식(7)과 같고, 이를 다시 대수학적인 표현으로 사용하면 피스톤 조립체의 가속모델에 대해 다음과 같은 식(8)을 얻는다.

$$AF = \frac{t_f(field)}{t_f(test)} \dots\dots\dots(6)$$

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

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

## 2.3 실험장치

실험장치는 피스톤 조립체에 압력, 속도, 온도를 변화 시키면서 가속수명실험을 할 수 있도록 지그 중앙부분에 2개의 피스톤 블록을 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 측정하기 위해, 실험장치의 구동축과 서보모터 사이에는 토크와 회전수를 측정할 수 있는 센서를 장착 하였다.

정압베어링부와 피스톤 블록 틈새의 누유량을 측정하기 위해 실험지그와 가장 근접한 유압 공급 관로에 기어 형 정밀 유량센서를 장착하였다. 또한 실험부의 온도와 시스템의 온도를

측정하기 위하여 고압오일 공급관로와 오일저장 탱크에 온도센서(thermo couple)를 설치하였고, 실험압력을 측정하여 기계효율을 연산하기 위해, 밸브매니폴드와 고압 관로에 동일한 사양의 압력센서를 설치하였다. 실험장치에 사용된 압력, 회전속도, 토크 및 유량 등 계측센서의 사양은 Table 2와 같다.

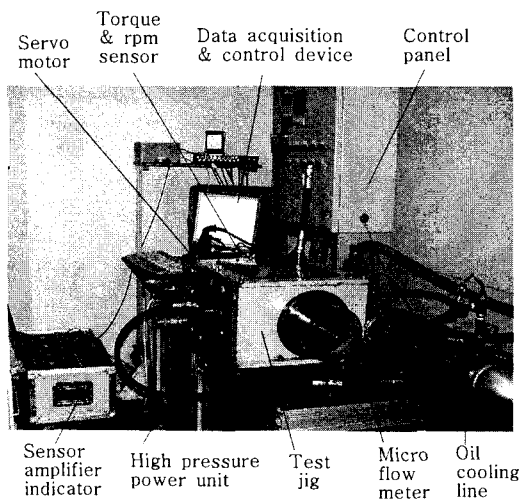


Fig. 2 Photo of life test equipment

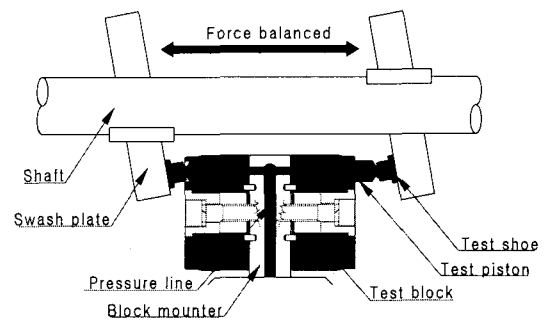


Fig. 3 Force balanced type test jig

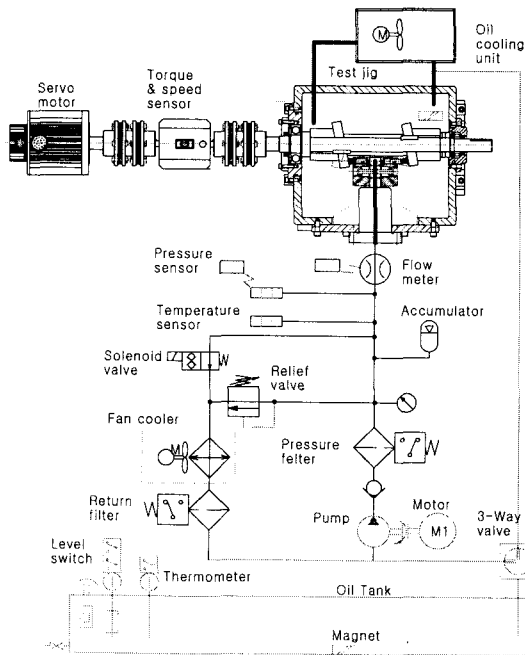


Fig. 4 Hydraulic circuit for the test

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%
Torque sensor	Max. Pressure	45 MPa
	Measuring range	-100 ~ 100 N·m
	Torque signal with limit frequency	16 khz
	Accuracy in measuring	±0.5%
	Non linearity	0.3% FS
Pressure sensor	Hysteresis	0.2% FS
	Terminal resistance	350 Ω ±5%
	Measuring range	0 ~ 70 MPa
	linearity	0.1% FS
Temp. sensor	Stability	0.2% FS max.
	Hysteresis	0.1% FS
	Measuring range	-50 ~ 200 °C
Speed sensor	Max. pressure	70 MPa
	Type	Pt 100 Ω
	Measuring range	0 ~ 5000 rpm
	Number of pulses/revolutions	60

## 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 ℃로 결정하였다. 가속수명시험의 부하수준(stress level)은 정격조건과 각각의 가속시험압력( $P_a$ ), 가속시험속도( $V_a$ ), 가속시험온도( $T_a$ )등의 비로서 Table 3과 같이 결정하였다. 정격조건 125%, 150%, 175%, 200%의 부하 비율(stress ratio:  $p_s, v_s, t_s$ )로 200시간씩 총 10회 시험하였고, 수명분포를 추정과 통계적 처리를 위해 동일한 실험조건에서 8개씩 2수준으로 16개를 추가 시험하였다.

Table 3 Test parameter & stress ratio

Test no	Test parameter			Stress ratio (%)	Test time (hr)
	Pressure	Speed	Temperature		
1	21 MPa	4000 rpm	50 ℃	$p_s=100, v_s=200$	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 ℃	$v_s=125$	200
6		3000 rpm		$v_s=150$	
(1)		4000 rpm		$v_s=200$	
7	21 MPa	4000 rpm	40 ℃	$t_s=80, v_s=200$	200
(1)			50 ℃	$t_s=100, v_s=200$	
8			75 ℃	$t_s=150, v_s=200$	
9			87 ℃	$t_s=175, v_s=200$	
10	42 MPa	4000 rpm	87 ℃	$p_s=200, v_s=200, t_s=175$	200

\*\*  $P_R$  : 21.0 MPa,  $V_R$ : 2000 rpm,  $T_R$ : 50 ℃,  $p_s = \frac{P_a}{P_R} \times 100$   $v_s = \frac{V_a}{V_R} \times 100$ ,  $t_s = \frac{T_a}{T_R} \times 100$

## 3. 실험 및 결과분석

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

### 3.1 가속 파라미터에 따른 실험결과

압력에 의한 가속수명시험은 속도 4000 rpm, 온도 50 ℃의 일정한 조건 하에서 21.0 MPa 부터 42.0 MPa까지 압력을 가변시키면서 실시하였으며, 압력을 가속인자로 한 경우 마모량은 실험시간에 따라 증가 되었으며, 부하의 크기에 따라 평균 기울기가 0.0044 ~ 0.00815로 Fig. 5과 같이 나타났다. 정격 압력의 100%인 21.0 MPa에서 시험을 한 결과 평균 마모량은 150시간 시험 후 0.69 mm, 200시간 시험 후 0.88 mm이었고, 31.5 MPa에서의 평균 마모량은 150시간 시험 후 0.95 mm, 200시간 시험 후 1.03 mm이였으며, 42 MPa에서는 평균 마모량이 150시간 시험 후 1.49 mm, 200시간 시험 후 1.63 mm 이었다.

실험압력과 온도를 정격조건인 21.0 MPa, 50 °C가 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. 6과 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 mm이었다.

압력을 정격인 21.0 MPa로 하고, 속도는 정격의 200%인 4000 rpm이 되도록 한 후 가속 인자인 온도를 40 °C부터 88 °C 까지 가변시키면서 수명 실험을 실시하였으며, 온도를 가속 인자로 한 경우 마모량은 실험시간 비례하여 선형적으로 증가 되었으며, 부하의 크기에 따라 평균 기울기가 0.0026 ~ 0.0075로 Fig. 7과 같이 나타내었다.

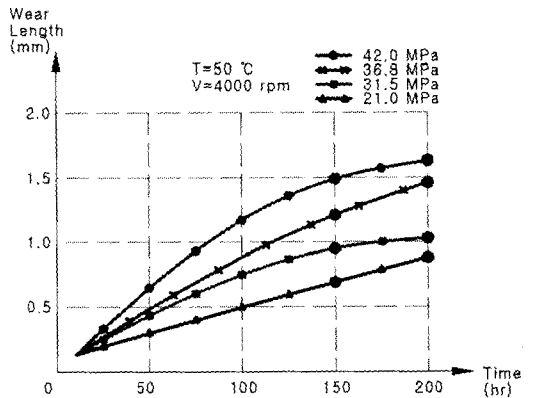


Fig. 5 Wearout amount of piston shoes due to pressure variations

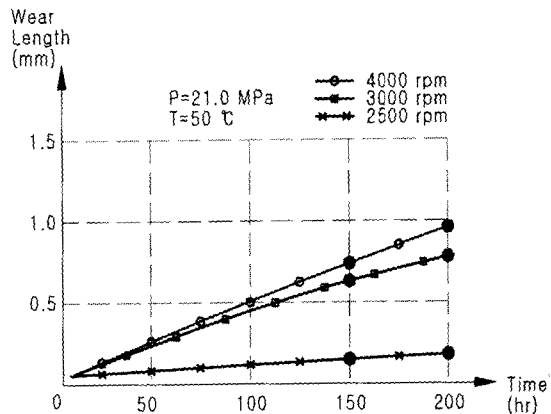


Fig. 6 Wearout amount of piston shoes due to speed variations

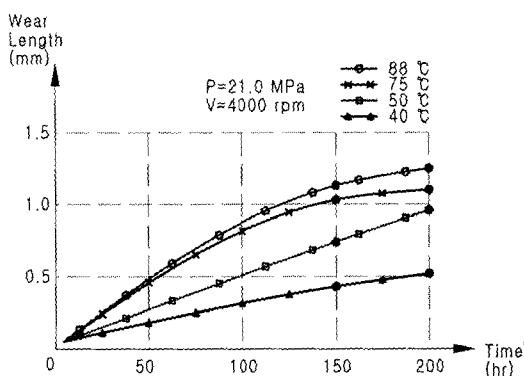


Fig. 7 Wearout amount of piston shoes due to temperature variations

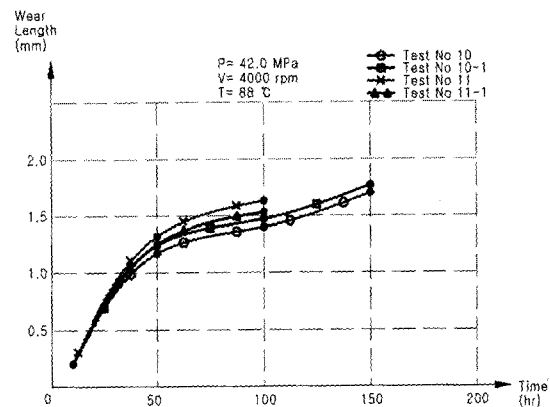


Fig. 8 Wearout amount of piston shoes due to pressure-speed-temperature variations

오일 냉각기의 연속 최대 사용온도는 95 °C 이고, 시스템 열손실 등의 영향 때문에 정격 온도의 175%인 88 °C까지만 실험이 가능하기 때문에 통계적 분석을 위해 정격온도의 80%인

40 °C에서 추가 실험을 하였다. 40 °C에서 실험을 한 결과 평균 마모량은 150시간 실험 후 0.43 mm, 200시간 실험 후 0.52 mm이었고, 75 °C에서 실험을 한 결과 평균 마모량은 150시간 실험 후 1.03 mm, 200시간 실험 후 1.10 mm이었으며, 88 °C에서 실험을 한 결과 평균 마모량은 150시간 실험 후 1.13 mm, 200시간 실험 후 1.25 mm이었다

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 °C로 설정하고, 마모량을 Fig. 7와 같이 분석 한 결과 50시간 실험 후 평균마모길이는 1.245 mm 이고, 100시간 복합 가속수명실험 후 평균 마모길이는 1.478 mm이고, 150시간 실험 후 1.735 mm 이었다. 복합스트레스 조건 하에서 실험을 한 결과는 Fig. 8과 같다. 50시간 까지는 급속하게 마모가 증가 하여 평균기울기가 0.01245였으며, 50~100시간 까지는 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 보다 약 135% 가 증가하였다.

### 3.2 수명실험 결과 분석

Fig. 9는 온도와 속도는 정격조건인 2000 rpm 및 50 °C의 부하상태로 고정시키고, 압력만 가속한 경우의 수명-스트레스(life-stress relationship)를 나타내는 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.

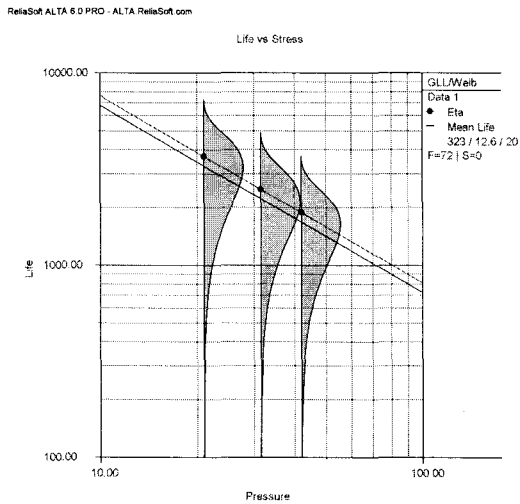
Fig. 10은 압력 및 온도는 정격조건인 21 MPa 및 50 °C의 부하상태로 고정시키고, 속도만 가속한 경우의 수명-스트레스를 나타내는 분석 결과로서 세로축은 수명을 나타내고, 가로축 실험속도를 나타낸다. 가속실험속도를 2000, 3000, 4000 rpm으로 하고 실험 데이터의 분포를 분석한 결과 형상모수는 2.9911이고, 역승모델의 모수는 2.2288이었다.

Fig. 11는 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.

와이블 분포<sup>4)</sup>는 부하를 변화시키면서 실험한 수명데이터이다. 각 수준별 고장 데이터의 형상모수가 동일하다는 것은 고장분포가 일치한다는 것으로서 이에 따라 가속관계가 성립한다<sup>5)</sup>. Fig. 12은 가속파라미터(압력, 속도, 온도 및 복합가속)의 변화에 따른 수명실험 결과를 분석하여 공통의 형상모수( $\beta=2.991$ )와 역승모델<sup>6)</sup>의 모수( $np:\text{Alpha}(2)=0.972$ ,  $nv:\text{Alpha}(3) = 2.229$ ) 및 아레니우스모델<sup>7~8)</sup>의 모수( $E_A/k : \text{Alpha}(1) = 1014.05$ )는 ALTA 6.0 PRO를 이용하여 도출한 결과이다.

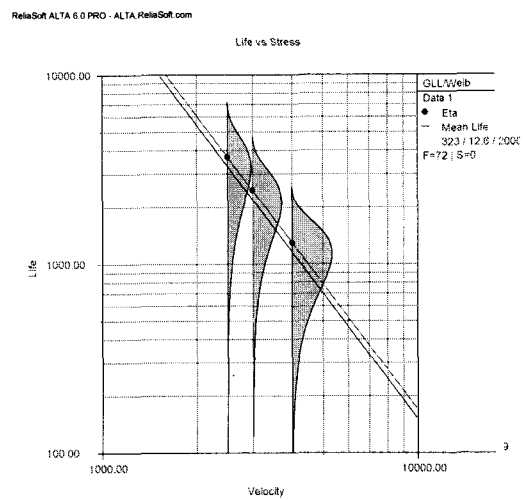
속도, 압력, 온도 및 복합 가속수명실험파라미터별 수명데이터를 분석하여 Table 4와 같은 모수를 구하였으며, 평균 사용조건을 정격압력의 60 %인 126 MPa, 정격속도, 정격온도로 하고 복합가속모델 (multi variable relationship; General log-linear model:GLL model<sup>9~10)</sup>

을 이용하여 가속계수( $AF$ )를 구한 결과, 200% 압력비에 의한 가속계수는 3.22이었으며, 200% 속도비에 의한 가속계수는 7.7이었고, 87.5 °C로 실험한 가속계수는 2.28이었으며, 복합스트레스에 의한 가속계수 20.95이었다.



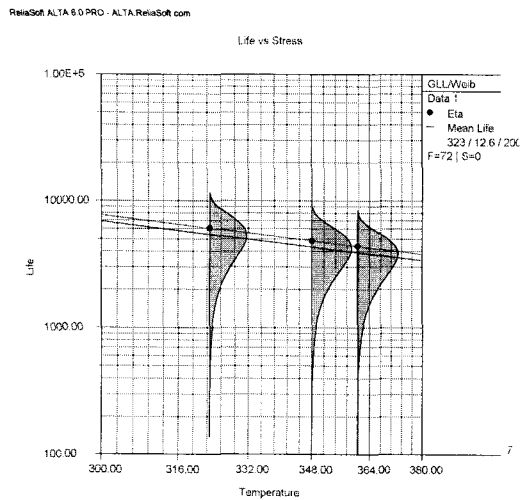
Beta=2.9911, Alpha(0)=24.9748, Alpha(1)=1014.0453, Alpha(2)=-0.9721, Alpha(3)=-2.2286

Fig. 9 Analysis of life-stress relationship by pressure



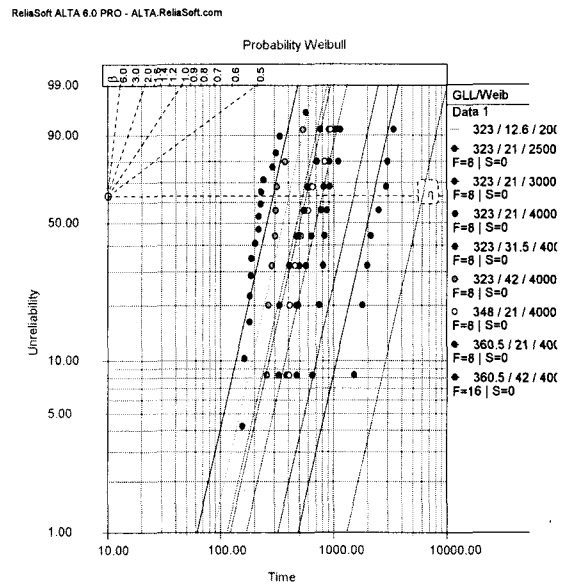
Beta=2.9911, Alpha(0)=24.9748, Alpha(1)=1014.0453, Alpha(2)=-0.9721, Alpha(3)=-2.2286

Fig. 10 Analysis of life-stress relationship by speed



Beta=2.9911, Alpha(0)=24.9748, Alpha(1)=1014.0453, Alpha(2)=-0.9721, Alpha(3)=-2.2286

Fig. 11 Analysis of life-stress relationship by temperature



Beta=2.9911, Alpha(0)=24.9748, Alpha(1)=1014.0453, Alpha(2)=-0.9721, Alpha(3)=-2.2286

Fig. 12 Analysis of equivalence shape parameter



Table 4 Analysis of accelerated life data

Test parameter (P, V, T)			$\eta$	$\beta$	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 ( $n_p$ )	1.64
31.5			2488.09			2.44
42.0			1881.09			3.22
21.0			2244.16			2.70
21.0	2500	50	1494.76	2.99	2.2288 ( $n_v$ )	4.06
	3000		787.23			7.70
	4000		3690.20			1.64
21.0	2000	50	2945.11	2.99	1014.0453 ( $\frac{E_A}{k}$ )	2.06
		75	2662.08			2.28
		87.5	289.49			20.95
42.0	4000	87.5	289.49	2.99	Combined	20.95

### 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 °C에 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 가속계수가 20.943782이었다.

$$\begin{aligned}
 AF &= \frac{\eta_{use}}{\eta_{test}} \\
 &= \left( \frac{P_{test}}{P_{use}} \right)^{n_p} \cdot \left( \frac{V_{test}}{V_{use}} \right)^{n_v} \cdot e^{\left[ \left( \frac{E_A}{k} \right) \cdot \left( \frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{test}} \right) \right]} \\
 &= \left( \frac{42}{12.6} \right)^{0.9721} \cdot \left( \frac{4000}{2000} \right)^{2.2288} \cdot e^{\left[ (1014.0453) \cdot \left( \frac{1}{323} - \frac{1}{360.5} \right) \right]} \\
 &= 20.943782
 \end{aligned}$$

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.

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

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. 결론

- 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, 온도에 의한 가속은 아레니우스모델에 일치 하였고, 선형 모델을 이용하여 얻은 수명 데이터는 와이블분포를 따르고 형상모수( $\beta$ )는 2.99 이다.
- 3) 압력을 가속파라미터로 하고 200 %의 부하를 가했을 때 가속계수( $AF$ )는 3.22이고, 역승모델의 모수( $np$ )는 0.97이다. 속도를 가속파라미터로 하고 200 %의 부하를 가했을 때 가속계수는 7.70이고, 역승모델의 모수( $nv$ )는 2.23이다. 또한 온도를 가속파라미터로 하고 87.5 °C로 했을 때 아레니우스모델의 활성화 에너지( $E_A$ )는 0.0874 이고 가속계수는 2.28이다.
- 4) 복합가속 수명시험결과를 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 가속시험방법은 신뢰성 시험에 활용될 수 있고, 약 20배의 가속 실험이 가능하기 때문에 시험시간 단축에 의해 시험비용을 절감 시킬 수 있다.
- 6) 본 연구를 통하여 설계 고안된 축 방향 힘 균형 실험지그와 고압, 고속 피스톤 실험장치는 HST, 유압피스톤펌프와 모터의 고압화, 고속화 및 고 효율화를 위한 정압베어링 연구와 내구 수명시험을 통한 신뢰성평가에 응용될 수 있다.

#### 참 고 문 헌

1. James A. McLinn, "Assuring hydraulic component reliability", NCFP 105, pp. 67 ~ 73, 2005.
2. Jaroslav Ivantysyn and Monika Ivanthynova, "Hydrostatic pumps and motors", First English Edition, pp. 210 ~ 390, 2000.
3. Monika Ivanthynova, "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. Gary 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. Vincent R. Lalli, Henry 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.