

압력과 온도 복합가속모형을 적용한 유압호스 조립체 수명특성 연구[§]

이기천* · 김형의* · 조유희* · 김재훈**†

*한국기계연구원, **충남대학교

A Study of Life Characteristic of Hydraulic Hose Assembly by Adopting Complex Accelerated Model with Acceleration Factors of Pressure and Temperature

Gi Chun Lee*, Hyoung Eui Kim*, You Hee Cho*, and Jae Hoon Kim**†

* School of Reliability Assessment Center, Korea Institute of Machinery & Materials,

** BK21 Mechatronics Groups, Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University

(Received June 8, 2010 ; Revised September 9, 2010 ; Accepted September 16, 2010)

Key Words : Hydraulic Hose(유압호스), Life Prediction(수명예측), Impulse Test(충격시험), Calibrated Accelerated Life Test(조절형 가속수명시험)

초록: 유압호스는 건설기계, 자동차, 항공기 등 각종 기계의 유압장치에서 동력을 전달하기 위한 배관으로 사용된다. 산업의 전분야에서 에너지를 전달하기 위한 배관의 한 종류로서 진동이나 충격 등으로부터 시스템을 보호하는 역할을 한다. 여러 가지 외부 환경 조건으로부터 시스템을 유지하기 위해서는 호스 조립체에서 온도와 압력 등의 외부 환경 조건에 대한 내성을 가지고 있어야만 한다. 본 연구에서는 기존에 호스 조립체에 대해 온도 또는 압력 중 한 가지 인자를 고려한 가속모형을 제시한 연구는 있었지만 두 가지 인자를 동시에 고려한 가속모형은 제시하지는 못하였으므로, 호스 조립체의 압력과 온도를 모두 고려한 복합가속 모형식을 제안하는 것을 목적으로 한다.

Abstract: Hydraulic hoses are used as pipelines for transferring power from hydraulic systems in various machineries such as construction equipments, automobiles, and aircraft. Hydraulic hoses protect the system from vibration or impacts, and they are being used to transfer energy in all segments of the industry. In order to protect the system from various external environmental conditions, hydraulic hose assemblies must be able to withstand a wide range of temperatures and pressures, as well as variations in other factors. In previous studies, an acceleration model for the hydraulic hose assembly was developed by taking into account only one of the acceleration factors (temperature or pressure). Therefore, the objective of this study is to develop a comprehensive acceleration model that takes both temperature and pressure into consideration.

- 기호설명 -

T : 절대온도(absolute temperature)
 P : 압력(pressure)
 E_a : 활성화 에너지(activation energy)
 K : 볼츠만 상수(8.617×10^{-5})
 β : 형상모수(shape parameter)
 n : 지수(power index)
 C : 상수(constant)
 t : 수명(cycle)

AF : 가속계수(accelerated factor)
 B₁₀ : 제 10 백분위수
 L : 특성 수명(characteristic life)
 P_{test} : 가속조건에서의 압력
 P_{field} : 사용조건에서의 압력
 T_{test} : 가속조건에서의 온도
 T_{field} : 사용조건에서의 온도

1. 서론

유압호스는 건설기계, 자동차, 항공기, 산업기계, 공작기계 및 기타 선박용 기계 등 각종 기계의 유압장치에서 동력을 전달하거나 유압 회로에서 배

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회 (2010. 5. 27.-28., 전남대 컨벤션홀) 발표논문임.

† Corresponding Author, kimjhoon@cnu.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

관으로 사용된다. 따라서 유압호스는 기계류 장치의 유기적인 연결과 동력전달에 있어 중요한 부품이므로 신뢰성이 매우 중요한 부품이다.⁽¹⁾

호스는 금속 파이프와 금속 튜브에 비해 몇 가지 장점을 가지고 있다. 먼저 호스는 유연하기 때문에 금속 파이프나 튜브에 비해 배관이 간편하여 설치 및 유지 보수가 쉽고 배관 비용과 시간이 절약된다. 금속 파이프나 금속 튜브를 사용하여 배관하는 경우에는 연결할 유압시스템의 컴포넌트들 사이의 거리가 길거나 장애물을 우회하여 배관하는 경우 여러 개의 파이프나 튜브를 연결하여 배관하여야 한다. 하지만 연결부위는 유체가 누유될 가능성이 크기 때문에 연결부위의 개수가 늘어날수록 잠재적인 누출지점이 늘어나게 된다. 그러나 호스는 한 개의 호스로도 배관이 가능하므로 유체의 누유를 최소화 할 수 있다.⁽²⁾

호스의 구조는 수송 역할을 하는 내피와 강도를 강화하기 위한 강화층, 그리고 보호용 외피로 구성된다. 세 가지 각 구성재료에 대한 선택은 수송 물질, 작동압력, 사용환경에 의해 정해진다. 유압장치에서 사용되는 호스는 기본적으로 저압용의 경우에는 직물(textile), 고압용은 강철섬유로 강화된 것을 사용한다.^(3,4) 생산 과정은 내피 중앙에 주축을 삽입하고 내피 둘레에 강선이나 섬유를 편조하여 만든 강화층을 접착제와 함께 덮는다. 전체를 천으로 둘러싸고 경화시킨 후 천과 주축을 제거한다. 천으로 싸는 것 대신에 납에서 경화시키기도 하는데 이는 길이가 긴 호스제품을 얻을 때 많이 사용된다. 강철의 주축 대신 주물이 사용되기도 한다.

Fig. 1 은 산업용 및 가정용 등에서 사용하는 호스를 압력, 재질, 및 사용유체에 따라서 종류를 분류하고 각 분야에 맞게 호스를 선정할 수 있는 분류 체계를 제시한 것이다.

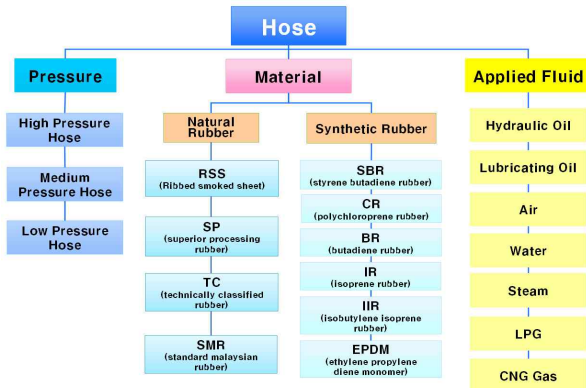


Fig. 1 Hose classification system

본 연구의 목적은 SAE 517 에서 규정하는 유압 호스 조립체의 시험방법을 기준으로 압력과 온도를 스트레스 인자로 고려하여 시험계획을 통한 가속수명시험을 진행한 후 각 스트레스에 대한 영향을 분석하고, 온도와 압력의 복합가속모형을 적용하여 실제 사용조건에서의 수명을 예측하는 것이다.⁽⁵⁾

2. 실험장치 및 고장분석

2.1 반복 가압 압력 파형

SAE J 343⁽⁶⁾ 등에서는 유압호스의 반복 가압 압력 파형을 사각파형으로 정의하고 있으며, 충격 주기는 0.5~1.25 Hz 로 규정하고 있다. 실제 시스템에서 충격압력의 발생은 굴삭기 작업시 버킷을 통하여 작업물을 들어올리고 내릴 경우에 붐대의 동작을 위해 조작할 때 유압시스템에 충격압력을 발생시키는 것을 관찰할 수 있으며, 이러한 쇼크의 발생으로 인하여 시스템 전체에 누적되는 손상으로 누유⁽⁷⁾가 발생된다. 본 연구에서는 누유의 원인들 중 주요한 영향을 미치는 압력과 온도를 가속 스트레스로 선정하여 반복가압 파형을 Fig. 2 와 같이 시험을 수행한다.

2.2 실험 장치

반복 가압 압력에 대한 파형을 재현하기 위해서는 Fig. 3 과 같이 유압동력발생장치(hydraulic power unit)로부터 유압동력을 공급받아 유압 서보밸브가 장착된 압력 증폭기에 동력을 공급하여 실험압력을 생성하게 된다. 온도제어를 하기 위해서는 별도의 가열 탱크를 장착하여 실험온도까지 가열된 유압 작동유를 고압시스템 배관과 연결하여 고온의 실험온도를 150 ℃까지 재현할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 110 ℃까지 가열을 하였다.

시험용 시료를 장착하기 위한 지그(jig)는 10 개를 동시에 장착할 수 있도록 하였으며, 시험주파

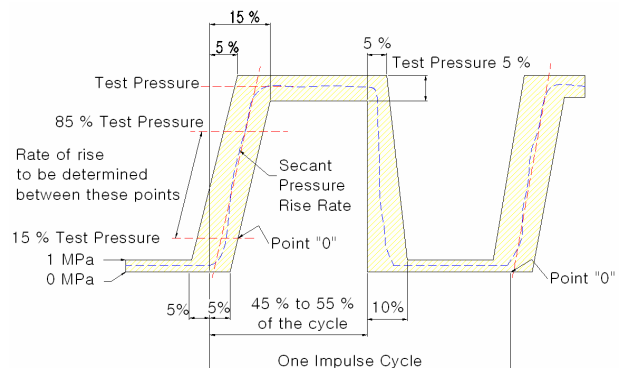


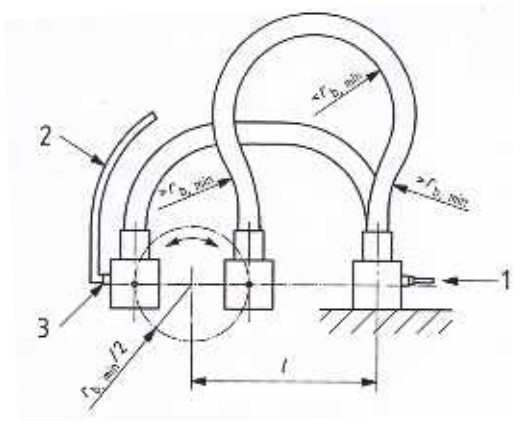
Fig. 2 Impulse wave for high pressure hose

수 범위를 제어하기 위해서는 10 개의 호스에 유압유가 채워지는 시간이 짧아야 되므로 온도제어가 가능한 가열탱크로부터 유압원을 공급받아 미리 가압에 들어가기 전에 충유가 된 상태에서 증압기(intensifier)를 이용하여 압력을 증압시키도록 하였다.

Fig. 4 는 시험의 가속인자 가운데 본 연구에서는 포함되지 않았지만 굴삭기와 같은 건설중장비 부분에서 주요 인자인 굽힘 응력을 재현할 수 있는 메커니즘을 나타내고 있다. 호스 조립체를 길이 L 로 설정을 하고 반경인 $r_{b, min}$ 의 인자를 고려하여 굽힘을 호스 조립체에 가하게 되는데 본 연구에서는 $r_{b, min}$ 을 360mm 로 일정하게 유지한 상태에서 시험을 수행하였다.^(8,9)



Fig. 3 Test equipment for high pressure hose



- 1 Test pressure inlet
- 2 Fluid circulation line
- 3 Check valve

Fig. 4 Apparatus for hydraulic impulse test with flexing using a revolving manifold⁽⁸⁾

2.3 고장 메커니즘 및 고장모드

실제 시스템에서는 충격 압력 뿐만 아니라 주변 환경인 온도 조건의 변화, 진동의 전달 등으로 인

Table 1 Failure mode for high pressure hose

Primary components	Function	Failure modes	Failure mechanism
Sleeve part	Coupling and keeping pressure	Leakage	1-1 Fracture by over pressure
			1-2 Outside corrosion
			1-3 Crack by impulse pressure
High pressure hose	Keep pressure and delivery flow	Leakage	2-1 Bursting by over pressure
			2-2 Degradation and crack
			2-3 Decrease chemical components by oil contamination
			2-4 Decrease lubrication characteristic
			2-5 Fatigue by vibration
			2-6 Damage reinforced ply
			2-7 Fatigue crack by impulse pressure



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 (a) Test samples with a revolving manifold
(b) Bursting part in the hose assembly
(c) Bursting of a hose assembly

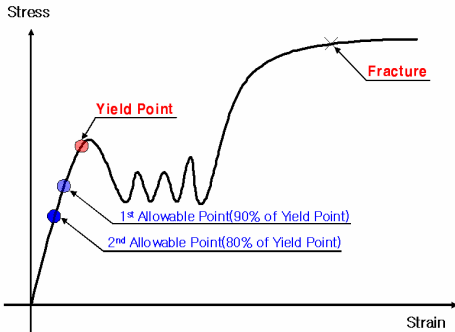


Fig. 6 Allowable limit at Stress-Strain curve

하여 Fig. 5 와 같은 현상이 발생하며 고장모드를 Table 1 에서 확인할 수 있다. 또한 고장에 이르는 메커니즘을 확인함으로써 보다 개선된 제품을 얻고자 하는데 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

2.4 CALT(calibrated accelerated life test) 방법

CALT 방법^(10,11)을 적용하기 위해 먼저 예비 시험을 통해 각 가속 스트레스에 대한 작동한계(operating limit)를 설정한다. 단일 가속 스트레스에 대한 CALT 방법은 다음과 같은 순서대로 적용되며 이를 Fig. 7 에 도시하였다.

- ① Fig. 7 에서 1st stress level 은 가장 높은 스트레스 수준으로 작동한계보다 10% 낮은 수준으로 선정하는데 이는 Fig. 6 과 같이 항복점 아래 수준을 권유하고 있다.
- ② Fig. 7 에서 2nd stress level 인 두 번째 가속 스트레스 수준은 1st stress level 보다 10% 낮은 수준으로 선정한다.
- ③ 1st stress level 과 2nd stress level 에서 각각 최소 2 개의 샘플을 가지고 고장이 발생할 때까지 시험을 수행한다.
- ④ 1st stress level 과 2nd stress level 에서 획득한 고장자료를 기초로 적합한 모형식을 추정하고, 가용한 시험시간(available test time)에 대응되는 수준을 Fig. 7 에서 3rd stress level 로 선정하여 이 수준에서 가속시험을 수행한다.
- ⑤ 상기 과정을 통해 단일 가속 스트레스의 3 수준에서 획득된 자료를 기초로 사용조건(normal stress condition)에서의 평균 수명, B10 수명 등을 추정한다.

2.5 가속수명시험 계획

유압호스의 경우 2 가지 가속 스트레스인 압력과 온도 각각에 대해 2.4 절의 CALT 방법을 적용하여 다음과 같은 시험순서로 수행하였다.

Table 2 Accelerated test condition for high pressure hose

Temperature \ Pressure	90 °C	110 °C
280 bar	-	10 set
350 bar	-	10 set
420 bar	10 set	10 set

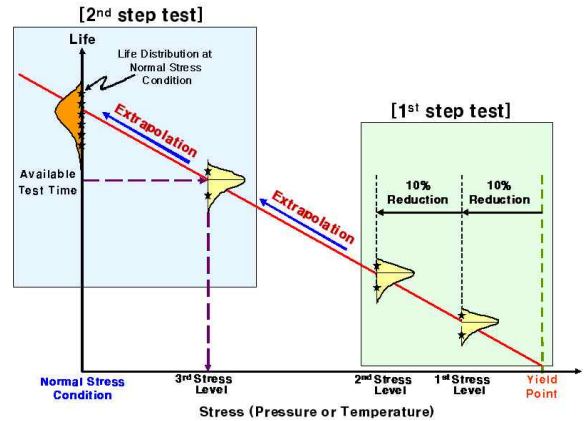


Fig. 7 Explanation for CALT method

- ① 예비 시험을 통해 압력과 온도에 대한 작동한계를 각각 470bar 와 120°C로 설정한다.
- ② 압력과 온도 스트레스의 가장 높은 스트레스 수준은 각각 작동한계보다 약 10% 낮은 수준인 420 bar 와 110°C로 설정하고, 두 번째 스트레스 수준도 2.4 절에 설명한 바와 같이 각각 350 bar 와 90 °C로 설정한다.
- ③ 먼저 온도의 가장 높은 수준을 110°C로 일정하게 유지한 상태에서 압력의 수준을 420 bar 와 350 bar 에서 각각 10 개 시료를 가지고 가속수명시험을 수행하여 압력에 따른 유의성을 확인한다.
- ④ 압력 수준 420 bar 와 350 bar 에서 획득된 가속수명시험 자료를 분석한 결과를 토대로 세 번째 압력 수준을 280 bar 로 선정한다.
- ⑤ 온도에 대한 유의성을 확인하기 위해 압력을 가장 높은 수준인 420 bar 로 일정하게 유지한 상태에서 온도 90 °C에서 10 개 시료를 가지고 시험한다.
- ⑥ 상기 과정을 통해 획득된 가속수명시험 자료를 이용하여 압력과 온도의 사용조건인 140 bar 와 50 °C에서의 평균 수명과 B10 수명을 추정한다.

Table 2 는 압력과 온도 조건에 대한 가속시험조건을 정리한 것이다.

3. 시험 결과 및 분석

3.1 가속수명시험 결과

Table 2 에서와 같이 온도와 압력의 4 가지 수준에서 각각 10 개의 시료를 가지고 가속수명시험을 수행하였다.

온도 90 °C와 압력 420 bar 에서는 10 개 중 9 개의 시료가 누유로 인한 고장이 발생하였고, 1 개의 시료는 17,945 사이클까지 고장 없이 계속 작동한 관측중단자료로 관측되었다. 이와 마찬가지로 온도 110 °C와 압력 350 bar 에서도 9 개의 시료가 고장나고 1 개의 시료가 관측중단 되었다.

그리고 온도 110°C와 압력 350 bar 에서는 10 개의 시료 중 8 개가 고장이 나고 2 개의 시료가 관측중단 되었으며, 온도 110°C와 압력 280 bar 에서는 6 개의 고장자료와 4 개의 관측중단 자료가 관측되었다.

3.2 가속수명시험 자료 분석

3.2.1 수명분포 및 가속모형 선정

유압 호스의 가속수명자료에 적합한 수명분포로 와이블 분포가 선정되었고, 유압 호스의 고장 메커니즘에 영향을 미치는 가속 스트레스는 온도(T)와 압력(P)으로 온도-비열(temperature-nonthermal) 복합가속모형을 고려한다.

온도-비열 가속모형은 식 (1)과 같다.⁽¹²⁾

$$L = \frac{C}{P^n \cdot e^{-\frac{E_a}{K \cdot T}}} \quad (1)$$

수명이 와이블 분포를 따르고 수명과 스트레스 간의 관계식인 가속모형이 온도-비열 복합모형일 때 이 분포의 확률밀도함수 $f(t)$ 는 식 (2)와 같이 정리된다.⁽¹²⁾

$$f(t, P, T) = \frac{\beta \cdot P^n e^{-\frac{E_a}{K \cdot T}}}{C} \left(\frac{t \cdot P^n e^{-\frac{E_a}{K \cdot T}}}{C} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t \cdot P^n e^{-\frac{E_a}{K \cdot T}}}{C} \right)^\beta} \quad (2)$$

3.1 절에서와 같이 관측된 가속수명시험 자료에 대한 우도 함수를 식 (2)를 이용하여 구성하고 이 함수를 최대화하는 모수를 ReliaSoft 사의 ALTA⁽¹²⁾ 소프트웨어를 이용하여 추정하였다.

ALTA 분석 결과 와이블 분포의 형상 모수 β 는 4.6969, 활성화 에너지 E_a 는 0.0316, 압력 지수 n 는 7.7940, 상수 C 는 1.6167×10^{24} 으로 추정된다.

그리고 압력을 일정하게 유지하고 온도에 따른 수명의 변화를 도시한 것이 Fig. 8 이며, 온도를 일정하게 유지하여 압력에 따른 수명의 관계를 도시한 것이 Fig. 9 이다.

3.2.2 가속성 성립여부 확인

온도와 압력 수준의 4 가지 조합에 따른 가속성이 성립하는지를 판단하기 위해 ALTA 소프트웨어를 이용하여 우도비(likelihood ratio) 검정⁽¹²⁾을 수행하였다.

우도비 검정은 다양한 스트레스 수준에서 획득된 자료의 형상모수가 동일한지를 평가하는데 유용한 방법이다. 본 연구에서는 와이블 분포가 적

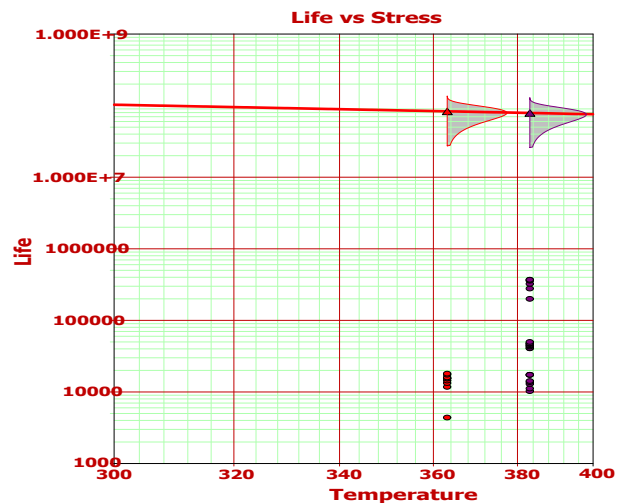


Fig. 8 Life vs. Temperature plot

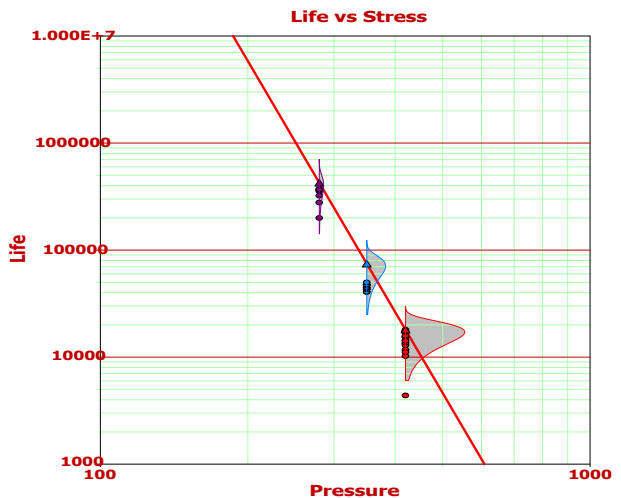


Fig. 9 Life vs. Pressure plot

합분포로 사용되므로 Fig. 10 에서와 같이 형상모수 $\beta=4.6969$ 가 다른 스트레스 수준에서 일정하다고 가정한다.

먼저 우도비 검정통계량 T 를 다음 식과 같이 계산한다.

$$T = 2(\hat{\Lambda}_1 + \Lambda + \hat{\Lambda}_n - \hat{\Lambda}_0)$$

만약 형상모수가 동일하다면 T 의 분포는 자유도가 $n-1$ 인 카이제곱 분포에 근사한다. 여기서 n 은 둘 또는 그 이상의 고장자료를 가지는 스트레스 수준수로 4 이고, $\hat{\Lambda}_1, \Lambda, \hat{\Lambda}_n$ 은 4 개의 각 스트레스 수준의 자료에 적합된 분포에 의해 획득된 우도값이다. 우도값 $\hat{\Lambda}_0$ 은 각각의 4 개 스트레스 수준에서 추정된 척도 모수와 동일하게 추정된 형상모수에 적합된 모형에 의해 산출된다.

상기와 같이 우도비 통계량을 유압 호스의 가속 수명시험 자료를 기초로 계산하면 $T=8.6525$ 로 산출된다.

- 만약 $T \leq \chi^2(\alpha; n-1)$ 이면 n 개의 형상모수 추정치는 $100\alpha\%$ 수준에서 통계적으로 유의한 차이가 없다.

- 만약 $T > \chi^2(\alpha; n-1)$ 이면 n 개의 형상모수 추정치는 $100\alpha\%$ 수준에서 통계적으로 유의한 차이가 있다.

$\chi^2(\alpha; n-1)$ 은 자유도가 $n-1$ 를 가지는 카이제곱 분포의 100α 백분위수이다. 여기서, α 는 유의수준으로 1%로 가정하며, $n-1$ 은 3 이 되므로 $\chi^2(0.01; 3) = 11.3448$ 이 된다.

따라서 $T = 8.6525 < \chi^2(0.01; 3) = 11.3448$ 로 4 개의 스트레스 수준에 대한 공통형상모수 추정치

는 유의수준 1 %에서 통계적으로 유의한 차이가 없으므로 가속성이 성립함을 알 수 있다.

3.2.3 사용조건에서의 신뢰성 척도 산출

유압 호스의 가속조건에서 수행한 40 개의 시험 자료를 기초로 가속조건과 사용조건인 온도 50 °C 와 압력 140 bar 에 대한 가속계수를 이용하여 사용조건에서의 수명자료를 추정할 수 있고 이 값들을 도시한 것이 Fig. 11 이다.

온도와 압력의 사용조건에 대한 최대 가속 스트레스인 온도 110°C와 압력 280 bar 에서의 가속계수(AF)는 식 (3)과 같이 265 배로 추정된다.

$$AF = \left(\frac{P_{test}}{P_{field}} \right)^n \cdot e^{\left(\frac{E_a}{K} \left(\frac{1}{T_{field}} - \frac{1}{T_{test}} \right) \right)}$$

$$= \left(\frac{280}{140} \right)^{7.7940} \cdot e^{\left(\frac{0.0316}{8.617 \times 10^{-5}} \times \left(\frac{1}{323.15} - \frac{1}{383.15} \right) \right)}$$

$$= 265$$

이 경우 온도 110°C와 압력 280 bar 에서 획득된 가속수명시험 자료 중 198,886 cycle 에서 고장이 난 자료는 사용조건에 대해 265 배 가속되었으므로 사용조건의 수명으로 추정하면 $198,886 \text{ cycle} \times 265 = 5.2705 \times 10^7 \text{ cycle}$ 로 산출된다. Fig. 11 은 이와 같은 방식으로 가속조건에서 40 개 시험 중 고장이 발생한 32 개 자료에 대해 사용조건에서의 수명으로 변환하여 와이블 확률지에 도시한 것이다.

Fig. 11 에서 점선으로 표시된 선들은 와이블 분포의 형상모수(β)와 척도모수(η)를 추정하기 위한

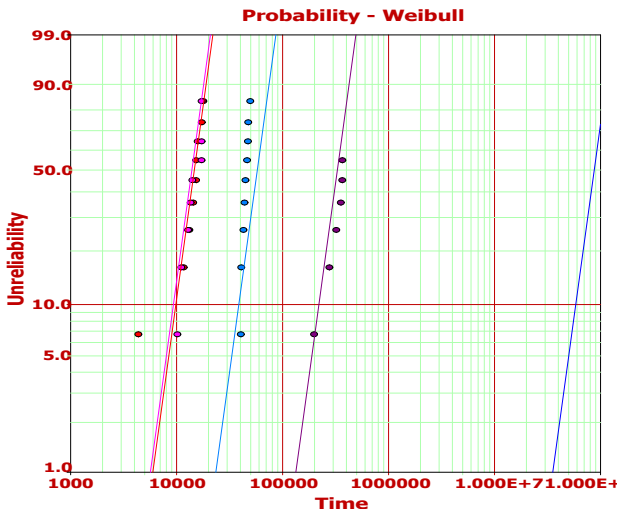


Fig. 10 Common shape parameter likelihood ratio test

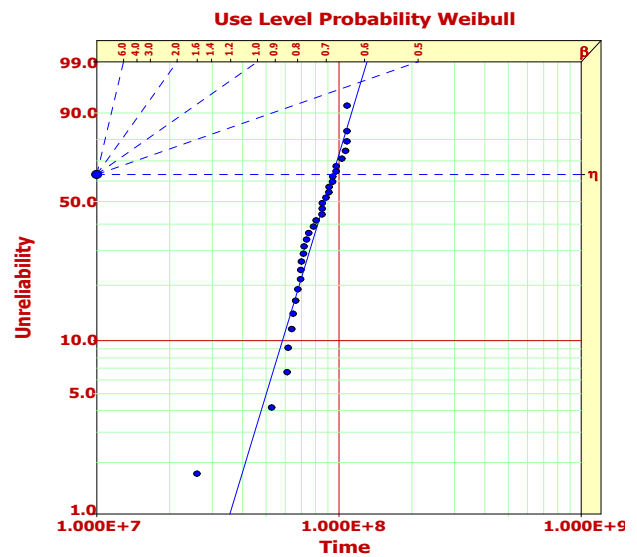


Fig. 11 Weibull probability at use level

보조선이다. Unreliability가 63.2%에 찍혀 있는 추정점에서 시험자료에 적합한 직선과 평행한 직선을 그어 Fig. 11 상단에 β 로 표기된 부분의 값과 대응되는 값이 형상모수(β)이며, 추정점에서 수평으로 그은 점선과 적합한 직선에 대응되는 수명이 척도모수(η)가 된다.

따라서 유압 호스의 사용 조건에서 특성 수명은 식 (1)에 추정된 모수값을 대입하여 식 (4)와 같이 9.4309×10^7 cycle 로 산출된다.

$$L = \frac{1.6167 \times 10^{24}}{140^{7.7940} \cdot e^{-\frac{0.0316}{8.617 \times 10^{-5} \cdot 323.15}}} = 9.4309 \times 10^7 \quad (4)$$

1 cycle 은 1 초가 소요되므로 사용조건에서 특성 수명을 시간 단위로 변환하면 26,197 시간으로 대략 3 년이 된다. 그리고 유압 호스의 사용 조건에서의 평균 수명은 8.6224×10^7 cycle 로 약 2.7 년이며, 제 10 백분위수인 B_{10} 수명은 5.8372×10^7 cycle 로 약 1.9 년으로 추정된다. 평균 수명에 대한 90% 신뢰구간은 (4.1793×10^7 cycle, 1.7789×10^8 cycle), B_{10} 수명에 대한 90% 신뢰구간은 (2.8235×10^7 cycle, 1.2067×10^8 cycle)로 추정된다.

4. 결론

본 연구에서는 유압 호스 조립체에 대한 고장 모드와 고장 메커니즘을 분석하고 주요 고장모드인 누유에 가장 큰 영향을 미치는 온도와 압력을 가속 스트레스로 선정하여 이 인자를 동시에 고려한 가속수명시험을 수행하였다.

가속수명시험을 통해 획득된 자료를 이용하여 유압 호스 조립체에 대한 사용 조건에서의 평균 수명과 B_{10} 수명을 2.7 년과 1.9 년으로 예측할 수 있었다. 건설장비와 일반 산업용에 적용되는 유압 호스의 경우 현장에서 3 년 ~ 5 년 정도의 수명으로 관측되므로 가속수명시험을 통해 나온 자료를 이용하여 실제 사용 조건에서의 수명을 예측하는데 어느 정도 타당성이 있는 것으로 판단된다.

또한 유압 호스 조립체에 대한 가속수명시험 절차와 가속 모형을 적용하여 빠른 시간 내에 부품의 신뢰성 정보를 획득할 수 있으므로 제품 개발 기간 단축 및 비용 감소 효과를 기대할 수 있다.

향후 연구에서는 온도의 가속 스트레스 수준을

한 수준 추가 및 굽힘 응력을 가속인자로 고려하여 가속수명시험을 수행하고, 교호 작용을 고려할 수 있을 경우 이를 고려한 가속모형을 제시하고자 하며 사용 조건에서의 시험을 통해 가속수명시험 결과의 타당성을 검증하고자 한다.

참고문헌

- (1) Evans, C. W., 1980, "Testing Requirements for Hydraulic Hose," *Polymer Testing*, Vol. 1, No. 1, pp. 39~49.
- (2) Kim, Y. S and Kim, J. J., 2005, "Design for Hydraulic Hose Routing Pathes and Fitting Angles," *Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 10, No. 1, pp. 40~48.
- (3) Roh, G. T., Jeon, D. H. and Cho, J. R., 2004, "Finite Element Analysis of Swaging Process for Power Steering Hose," *KSME*, Vol. 28, No. 6, pp. 747~754.
- (4) Entwistle, K. M., 1981, "The Behaviour of Braided Hydraulic Hose Reinforced with Steel Wires," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 23, pp. 229~241.
- (5) Evans, C. W. and Manley, T. R., 1986, "Factors Affecting the Impulse Testing of Hydraulic Hose," *Polymer Testing*, Vol. 6, No. 2, pp. 135~149.
- (6) SAE standard, 2001, "Test and Test Procedures for SAE100R Series Hydraulic Hose and Hose Assemblies SAE J343," *SAE Standard REV Jul 2001*.
- (7) Lee, G. C., Park, J. W., Kim, H. E., Lee, J. H., Jeong, W. W. and Kim, J. H., 2008, "Life Prediction for High Pressure Hose of Power Steering System by Impulse Pressure Test," *Proceeding of KSME 2008 Spring Meeting*, pp. 44~46.
- (8) International Standard ISO, 1997, "Rubber and Plastics Hose Assemblies with Wire Reinforcements-Hydraulic Impulse Test with Flexing," *International Standard ISO 6802*.
- (9) International Standard ISO, 1997, "Rubber and Plastics Hose Assemblies Flexing Combined Hydraulic Impulse Test Half-Omega Test," *International Standard ISO 8032*.
- (10) Kang, B. S., Kim, H. E., Park, J. W. and Yoo, Y. C., 2008, "Development of Accelerated Life Test Method for Pneumatic Cylinder," *Proceedings of the 51st National Conference on Fluid Power*, Las Vegas, Nevada, USA.
- (11) Paschkewitz, J. J., 2009, "Calibrated Accelerated Life Testing(CALT) with Time Varying Stress Profiles," *Reliability EDGE*, ReliaSoft, Vol. 10, No. 1, pp.16~19.
- (12) Reliasoft, 2001, *Accelerated life testing reference*, ALTA Ver. 6.