

## 온도·비열 가속모형을 적용한 유압호스조립체 수명특성 연구

이기천\* · 김형의\* · 조유희\* · 심성보\* · 김재훈\*\*

한국기계연구원 신뢰성평가센터\* · 충남대학교 기계설계공학과\*\*

### A Study of the Life Characteristic of Hydraulic Hose Assembly by Adopting Temperature-Nonthermal Acceleration Model

Gi-Chun Lee\* · Hyoung-Eui Kim\* · You Hee Cho\* · Sung-Bo Sim\* · Jae-Hoon, Kim\*\*

Reliability Assessment Center, Korea Institute of machinery & Materials\* ·  
BK21 Mechatronics Groups, Dept. of Mechanical Design Engineering, Chunnam National University\*\*

#### Abstract

Hydraulic hose assemblies deliver a fluid power in various oil pressure equipment such as construction machinery, automobile, aircraft, industrial machinery, machine tools and machinery for ships. Also, they are widely used as pipes in oil pressure circuit. When we estimate their lifetime, it is essential to conduct an accelerated life test by choosing the factor that suits the usage condition of the test object since traditional test method for estimating lifetime under the influence of various external factors incurs hardship in terms of time and expenses. The objective of this study is to propose an acceleration model that takes both temperature and pressure without flexing condition into consideration. The lifetime is estimated by applying the proposed temperature-nonthermal acceleration model to the test data. And we compare the proposed temperature-nonthermal acceleration model and the accelerated life equation suggested by John(1994).

Keywords : Hydraulic hose(유압호스), Temperature-nonthermal model(온도-비열 모델), Accelerated life test(가속수명시험), Intensifier(증폭기)

## 1. 서론

건설기계, 자동차, 항공기, 산업기계, 공작기계 및 기타 선박용 기계 등에 사용되는 유압호스는 유압장치에서 동력을 전달하거나 유압 회로에서 배관으로 사용된다. 따라서 유압호스는 기계류 장치의 유기적인 연결과 동력전달에 있어 중요한 부품이므로 신뢰성이 매우 중요한 부품이라고 Evans(1980)와 Evans와 Manley(1981)는 언급하고 있다.

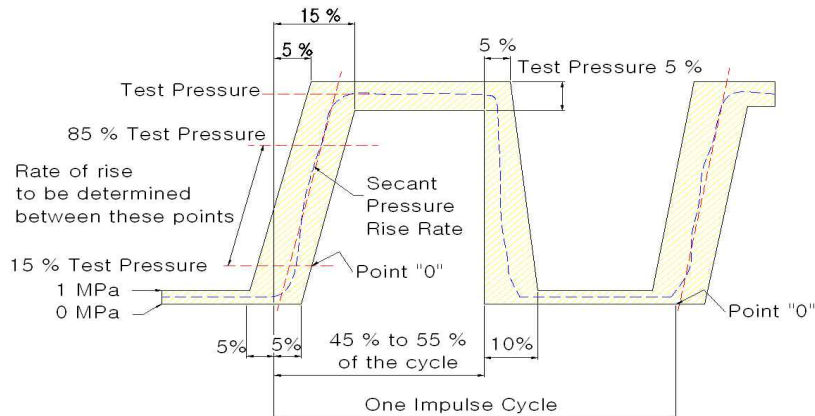
Entwistle(1981)는 호스 조립체의 구조는 수송 역할을 하는 내피와 강도를 강화하기 위한 강화층, 그리고 보호용 외피로 구성된다. 세 가지 각 구성 재료에 대한 선택은 수송물질, 작동압력, 사용환경에 의해 정해진다. 유압장치에서 사용되는 호스는 기본적으로 저압용의 경우에는 직물(textile), 고압용은 강철섬유로 강화된 것을 사용한다.

본 연구의 목적은 SAE J517(2008)에서 규정하는 유압호스 조립체의 시험방법을 기준으로 반복 굽힘이 발생하지 않는 경우의 압력과 온도를 스트레스 인자로 고려하여 시험계획을 통한 가속수명시험을 진행한 후 각 스트레스에 대한 영향을 분석한다. 온도와 압력의 가속인자를 고려한 시험 결과를 온도-비열(temperature-nonthermal) 가속 모형에 적용하여 실제 사용조건에서의 수명을 예측하는 것으로 하며, 이를 John(1994)에 정의된 수명 식과 본 연구에서 제시된 온도-비열 가속 모형식을 비교하고자 한다.

## 2. 실험장치

### 2.1 반복 가압 압력 시험

SAE J 343(2004) 및 ISO 8032(1997) 등에서는 <그림 1>과 같이, 유압호스의 반복 가압 압력 파형을 사각파형으로 정의하고 있으며, 충격 주기는 0.5~1.25 Hz로 규정하고 있다. 실제 시스템에서 예를 들면, 자동차가 저속 운전 시와 정지 시 방향 전환을 하기 위해서 핸들을 조작할 때 유압시스템에 충격압력을 발생하는 것을 관찰할 수 있으며, 굴삭기 작업을 할 때 버킷(bucket)을 통하여 중량물을 들어 올리고 내릴 경우에 붐대(boom)의 동작을 위해 조작할 때 유압시스템에 충격압력이 발생하는 것을 확인할 수 있다.



<그림 1> Impulse wave for high pressure hose

## 2.2 실험장치

반복 가압 압력에 대한 파형을 재현하기 위해서는 <그림 2>와 같이 유압동력발생장치(hydraulic power unit)로부터 유압동력을 공급받아 유압 서보밸브가 장착된 증압기(intensifier)에 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 가열하여 시험을 진행하였다. 시험용 시료를 장착하기 위한 지그(jig)는 10개를 동시에 장착할 수 있도록 하였으며, 시험 주파수 범위를 제어하기 위해서는 10개의 호스에 유압유가 채워지는 시간이 짧아야 되므로 온도제어가 가능한 가열탱크로부터 유압원을 공급받아 미리 가압하기 전에 충유가 된 상태에서 증압기(intensifier)를 이용하여 압력을 증폭시키도록 하였다.



① Intensifier ② Test stand ③ Servo valve ④ Flexing equipment

<그림 2> Life test equipment for high pressure hose

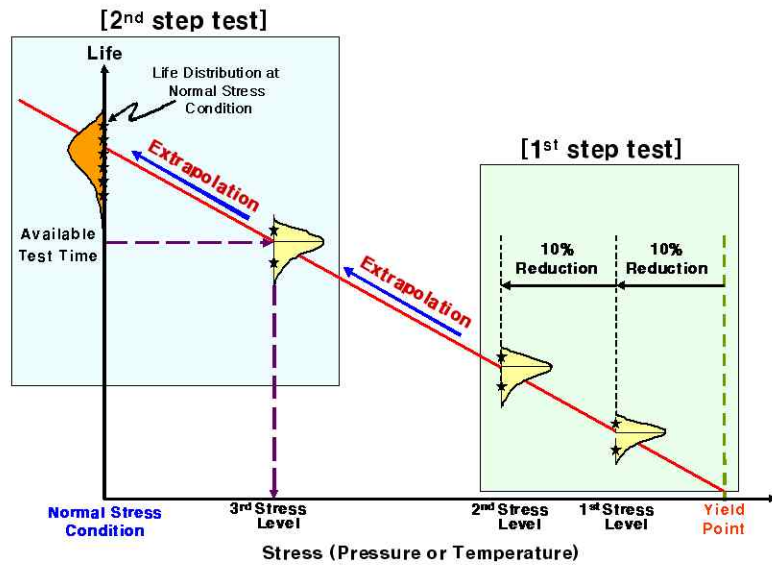
## 2.3 가속 수명시험 계획

유압 호스는 충격 압력 뿐만 아니라 주변 환경인 온도 조건의 변화, 진동의 전달 등으로 인한 누유가 발생하여 고장이 주로 발생하고 있음을 <표 1>에서와 같이 파악할 수 있다.

<표 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                 |

유압호스의 주요 고장모드인 누설에 영향을 미치는 온도와 압력을 가속 스트레스 인자로 선정하여 각 인자에 대해 <그림 3>과 같이 Kang(2008)과 Lee(2010) 및 Paschkewitz(2009)이 사용한 CALT (calibrated accelerated life test) 방법을 적용하여 시험을 진행하였다.



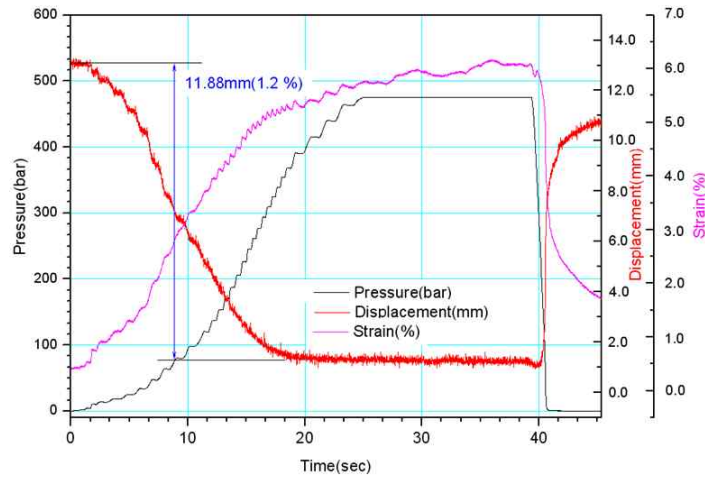
<그림 3> Explanation for CALT method

<표 2>에서와 같이 첫 번째 가속조건인 온도 110 ℃와 압력 420 bar에서 가속수명시험을 수행한 후, 그 다음 온도 110 ℃와 압력 350 bar 그리고 온도 90 ℃와 압력 420 bar에서 두 번째와 세 번째 가속수명시험을 각각 수행한다. 첫 번째 가속조건과 두 번째 가속조건에서 시험한 결과를 토대로 네 번째 가속조건인 온도 110 ℃와 압력 280 bar를 결정하고, 이와 마찬가지로 첫 번째 가속조건과 세 번째 가속조건에서 시험한 결과를 토대로 다섯 번째 가속조건인 온도 60 ℃와 압력 420 bar를 결정하여 각각 시험을 수행한다. 이와 같이 온도와 압력에 대해서 수행한 가속시험 조건을 정리한 것이 <표 2>이다.

<그림 4>는 <그림 5>의 시험 장치를 사용하여 나타낸 결과로 스트레인 게이지를 호스의 외피 부분을 벗겨내고 와이어 부분에 부착하여 시험을 한 결과를 나타내고 있으며, 압력과 변위와 스트레인 값의 변화를 압력의 증가와 함께 나타낸 그래프이다.

<표 2> Accelerated test condition with no flexing for high pressure hose

| Temperature \ Pressure | 60 ℃    | 90 ℃    | 110 ℃   |
|------------------------|---------|---------|---------|
| 280 bar                | -       | -       | ④ 8 set |
| 350 bar                | -       | -       | ② 8 set |
| 420 bar                | ⑤ 8 set | ③ 8 set | ① 8 set |



<그림 4> Displacement & strain depending on pressure level



(a) LVDT & hose assembly



(b) Scene of internal pressure test

<그림 5> Internal pressure test for checking displacement & strain

압력이 증가하면서, 길이 방향의 변위는 줄어드는 현상이 관찰되었으며, 반경 방향으로서는 직경이 증가하는 것을 확인하였다. 길이의 증가는 470 bar에서 11.88 mm가 감소하는 현상을 가져왔는데 이는 전체 호스 조립체 길이 1,000 mm의 1.2 %에 해당하는 길이로 ISO 1436(1991)과 SAE J343(2004) 등에서 규정하는 (2~-4) %의 범위에 들어가므로 호스 조립체의 탄성 영역에 위치해 있음을 알 수 있다. 또한 스트레인 게이지는 기본량의 약 6 %에 해당하는 양이 증가되는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 값은 와이어와 고무의 합성 변형량을 나타내고 있음을 알 수 있다.

### 3. 시험 결과 및 분석

#### 3.1 가속 수명시험 결과

<표 2>에서와 같이 온도와 압력의 5가지 수준에서 각각 8개의 시료를 가지고 가속수명시험을 수행하였다. 온도 60 ℃와 압력 420 bar에서는 8개 중 7개의 시료가 누유로 인한 고장이 발생하였고, 1개의 시료는 26,903사이클까지 고장 없이 계속 작동한 관측중단자료로 관측되었다.

온도 90 ℃와 압력 420 bar에서는 8개 중 7개의 시료가 누유로 인한 고장이 발생하였고, 1개의 시료는 18,431사이클까지 고장 없이 계속 작동한 관측중단자료로 관측되었다. 이와 마찬가지로 온도 110 ℃와 압력 420 bar에서도 8개의 시료가 누유로 인해 고장나고 1개의 시료가 관측중단 되었다.

그리고 온도 110℃와 압력 350 bar에서는 8개의 시료 중 7개가 누유로 인해 고장이 나고 1개의 시료가 관측중단 되었으며, 온도 110℃와 압력 280 bar에서도 누유로 고장이 발생한 7개의 고장자료와 1개의 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.

$$L = \frac{C}{P^n \times \text{Exp}\left(-\frac{E_a}{K \cdot T}\right)} \quad (1)$$

단,  $L$  : 수명(와이블 분포일 경우 척도 모수( $\eta$ ))  
 $E_a$  : 활성화 에너지  
 $n$  : 압력 지수  
 $K$  : 볼츠만 상수  
 $C$  : 상수

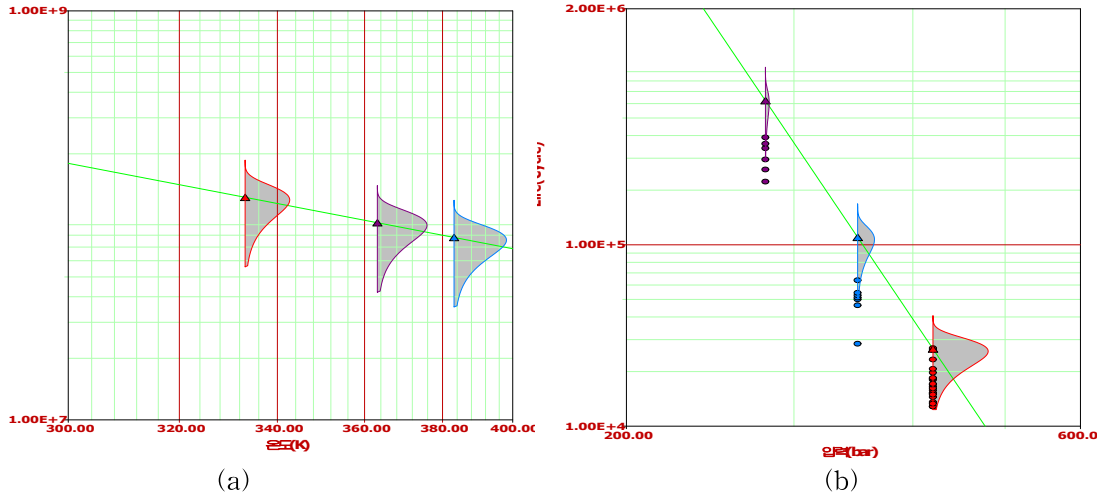
수명이 와이블 분포를 따르고 수명과 스트레스간의 관계식인 가속모형이 온도-비열 복합모형일 때 이 분포의 확률밀도함수  $f(t)$ 는 식 (2)와 같이 정리된다.

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

3.1절에서와 같이 관측된 가속수명시험 자료에 대한 우도 함수를 식 (2)를 이용하여 구성하고 이 함수를 최대화하는 모수를 Reliasoft(2001)의 ALTA 소프트웨어를 이용하여 추정하였다. ALTA 분석 결과 와이블 분포의 형상 모수  $\beta$ 는 6.03, 활성화 에너지  $E_a$ 는 0.0994 eV, 압력 지수  $n$ 는 7.77, 상수  $C$ 는  $1.8496 \times 10^{23}$ 으로 추정된다.

그리고 압력을 사용조건인 140 bar로 일정하게 유지하고 온도에 따른 수명의 변화를 도시한 것이 <그림 6>(a)이며, 온도를 사용조건인 50 ℃로 일정하게 유지하여 압력에 따른 수명의

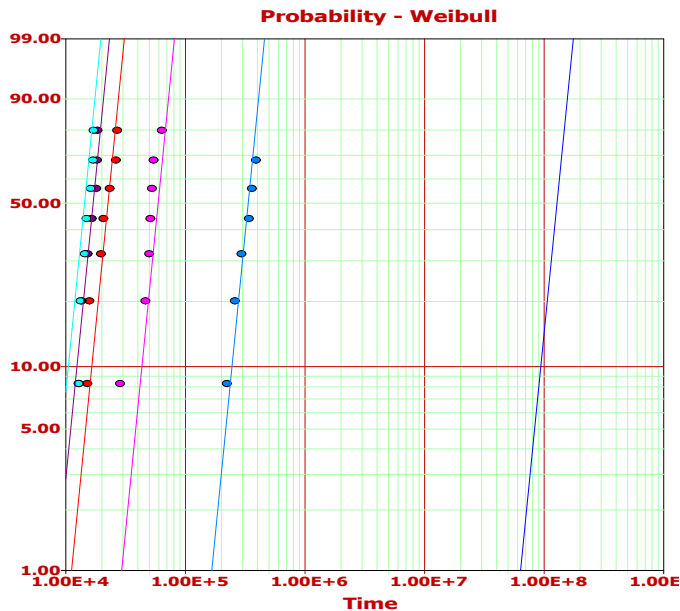
관계를 도시한 것이 <그림 6>(b)이다.



<그림 6> (a) Life vs. Temperature plot and (b) Life vs. Pressure plot

### 3.2.2 사용 조건에서의 수명 추정

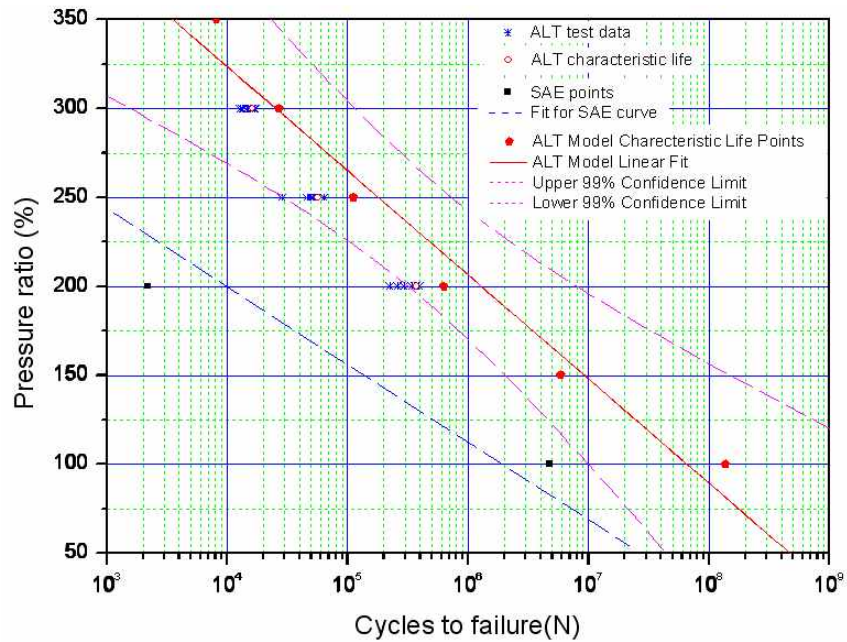
유압 호스 조립체의 사용조건에서의 수명을 추정하기 전에 먼저 5가지 가속 스트레스 수준에서 획득한 시험자료를 기초로 가속성이 성립하는지를 판단한다. 수명이 와이블 분포를 따를 경우 시험자료에 적합한 직선의 기울기가 서로 평행하면 가속성이 성립한다고 판정한다. 따라서 유압 호스의 5가지 가속 스트레스 수준에 대한 자료를 와이블 확률지에 도시한 결과 <그림 7>과 같이 기울기가 서로 유사한 것으로 보이므로 가속성이 성립함을 알 수 있다.



<그림 7> Weibull probability plot at accelerated stress levels

따라서 유압 호스의 가속조건에서 수행한 40개의 시험자료를 기초로 사용조건인 온도 50 ℃와 압력 140 bar에서의 수명은 3.2.1절에서 추정된 모수를 식 (1)에 대입하여 구하면 식 (3)과 같이  $1.3671 \times 10^8$  cycle로 산출된다. 그리고 사용조건에서의 수명에 대한 95% 신뢰구간을 구하면  $(2.1604 \times 10^8, 8.6072 \times 10^7)$  cycle이다.

$$L = \frac{1.85 \times 10^{23}}{140^{7.77} \times \text{Exp}\left(\frac{0.0994}{8.617 \times 10^{-5} \times 323.15}\right)} = 1.3671 \times 10^8 \text{ cycle} \quad (3)$$



<그림 8> Comparison of test data vs ALT model curve with no flexing condition

<그림 8>은 실제 시험 데이터를 압력의 3가지 조건에서 그래프에 도시한 후 이를 온도-비열 모델을 사용하여 수명에 대한 값을 얻어 그래프에 표시한 후 이를 선형화하여 나타낸 것이다. 이는 시험 결과 값들과 유사한 기울기를 가짐을 확인할 수 있다. 또한 SAE J517(2008) 규격에서 정의하는 압력 인자만을 가속인자로 하는 값과 비교하여 나타내었다. 그림에서와 같이 SAE 규격에서 얻은 이론 값은 실제 온도-비열 모델보다 아래에 위치하고 있으므로 이는 현재 시험을 진행한 유압호스 조립체가 내구 성능이 우수한 것을 알 수 있다.



## 4. 결 론

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

따라서 유압 호스에 반복 굽힘 동작을 적용하지 않은 조건에서 온도와 압력을 가속 스트레스로 인가하여 획득한 시험자료를 기초로 온도-비열 가속 모형을 적용한 후 사용조건에서의 수명과 수명에 대한 95% 신뢰구간을 추정하였다. 또한 유압 호스 조립체의 경우 안전율이 SAE J343(2001)에서 400 % 이상을 안전율로 제작시 가져갈 수 있도록 권장하고 있기 때문에 실제 사용조건에서 시험을 진행할 경우 오랜 시간이 소요되므로 가속수명시험 절차와 가속 모형을 적용하여 빠른 시간 내에 부품의 신뢰성 정보를 획득할 수 있으므로 제품 개발기간 단축 및 비용 감소 효과를 기대할 수 있다.

추후 연구로 유압 호스에 반복 굽힘을 적용한 경우 수명에 영향을 미치는지 확인하고 이를 가속 스트레스 인자로 고려하여 가속수명시험을 수행하고자 한다.

## 참고문헌

- [1] Evans, C. W. (1980), "Testing Requirements for Hydraulic Hose," Polymer Testing, Vol. 1, No. 1, pp. 39-49.
- [2] 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.
- [3] K. M. Entwistle (1981), "The Behaviour of Braided Hydraulic Hose Reinforced with Steel Wires," Int. J. Mech. Sci., Vol. 23, pp. 229~241.
- [4] SAE standard (2001), "Test and Test Procedures for SAE100R Series Hydraulic Hose and Hose Assemblies SAE J343," SAE Standard REV Jul 2001.
- [5] John D. Towle (1994), "Using a Hose Life Prediction Program", SAE Technical Paper Series, 941707.
- [6] International Standard ISO (1991) "Rubber Hose and Hose Assemblies-Wire-Reinforced Hydraulic Type-Specification," International Standard ISO 1436.
- [7] International Standard ISO (1997), "Rubber and Plastics Hose Assemblies Flexing Combined Hydraulic Impulse Test Half-Omega Test," International Standard ISO 8032.
- [8] Society of Automotive Engineers SAE(2008), "Hydraulic Hose," SAE J517.
- [9] 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.

- [10] Lee, G. C., Kim, H. E., Cho, Y. H., Kim, J. H.(2010), "A Study of Life Characteristic of Hydraulic Hose Assembly by Adopting Complex Accelerated Model with Acceleration Factors of Pressure and Temperature," KSME Part A, Vol. 34, No. 11, pp1697~1703
- [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.