

## 플라스틱 호스 조립체의 가속수명시험 방법에 대한 연구

이용범\* · 김형의\*\* · 김종기\*\*\* · 박종호\*\*\*\*

### A Study on Procedures of the Accelerated Life Testing for Hose Assemblies

Yong-Bum Lee\* · Hyoung-Eui Kim\*\* · Jong-Ki Kim\*\*\* and Jong-Ho Park\*\*\*\*

#### ABSTRACT

There are several types of life test method for hose assemblies. The two major tests used for hose assemblies are impulse test and burst test. And magnification adjustment of impulse pressure, heating of testing oil and repetitive motions of bending and straightening of testing hose are also performed for accelerating the life. According to the manufacture process of hose and swaging process of fitting, there is a difference in the life of hose assemblies from minimum 7 times to maximum 40 times during the life test in the same functioning condition. Like this, the life test of hose which has a wide scope of life distribution gives a problem that observation should take a long time to find out the existence of the bursting from the beginning of the test to the completion of bursting of hose assemblies. Therefore, this research proposes a process of concentrating on the defective section of hose assemblies and maximizing the life acceleration by giving '**Knockdown stress**' to hose assemblies just until before the hose assemblies get out of order.

Key Words : Hose assemblies(호스조립체), Cumulative damage(누적피로), Impulse Test (충격압력시험)  
Accelerated Life(가속 수명), Weibull distribution(와이블분포)

- 
- \* 한국기계연구원 신뢰성평가센터 선임연구원
  - \*\* 한국기계연구원 신뢰성평가센터 책임연구원
  - \*\*\* 한국기계연구원 신뢰성평가센터 선임연구원
  - \*\*\*\* 충남대학교 기계공학과 교수

기호 설명

- $P_a$  : 압력주기의 최대진폭
- $N$  : 고장에 이르는 압력 사이클 수
- $P_b$  : 파열압력( 1 사이클)
- $s$  : log-log 좌표에서 곡선의 기울기
- $\beta$  : 형상모수
- $\eta$  : 척도모수
- $f(t)$  : 확률밀도함수
- $F(t)$  : 분포함수
- $R(t)$  : 신뢰성함수
- $\lambda(t)$  : 고장률함수
- $L(v)$  : V 스트레스 수준에서의 수명
- $V$  : 스트레스 수준(압력)
- $a, n$  : 상수이며 결정해야 할 모델의 모수
- $P_{test}$  : 가속수명시험 조건에서의 시험압력
- $P_{Ks}$  : Knockdown Stress를 가하기 위한 시험 압력
- $P_{field}$  : 사용수준의 압력 (최고 사용압력의 100%)
- $n$  : Power index
- $Kn$  : Knockdown Stress Ratio

1. 서 론

플라스틱 호스 조립체는 페인트, 가솔린, 화학약품 등의 압력관로에서 유연성이 요구되는 곳에 사용되며 그 구조는 호스와 이음쇠로 이루어져 있다. 최근 시스템의 소형 콤팩트 화를 위하여 사용압력은 높아지고 있으며, 고기능을 위하여 더 많은 유연성이 요구되고 있다. 그러나 고압화와 굽힘과 퍼짐의 반복되는 유연성이 커지면 호스의 고장은 비례적으로 증가하게 된다.

호스의 고장은 시스템 전체의 고장뿐만 아니라 누출된 유체가 환경 공해를 유발하게 된다. 그러

므로 시스템의 안전관리를 위해 호스 조립체의 고장 발생하기 전에 교체해야 한다. 따라서 고장 전에 교체하기 위해 호스의 수명을 정확하게 파악하는 것이 매우 중요하다.

Raymond와 Henry는 누적손상 이론을 발표하였고<sup>[1]</sup>, Evans와 Manley는 압력, 온도, Flexing 등을 변화시켜 시험조건에 따라 고장영향을 실험적으로 연구했다<sup>[2]</sup>. SAE는 SAE100 R1~R17로 플라스틱 호스와 고무호스로 분류 했고 호스 조립체에 대한 수명 시험 방법으로 충격 시험(impulse test)을 채택했다<sup>[3]</sup>.

그러나 이 시험방법은 시험 중 유연성 작동을 하지 않았기 때문에 실제 사용 조건을 완전히 반영하지 못했고, 더욱이 작은 수량(4개)의 시료를 사용했기 때문에 호스 조립체의 수명 분포를 정확하게 파악 할 수 없었고, 광범위한 고장 분포를 확인하기 위해서는 많은 시험 시간이 요구되었다.

본 연구에서는 호스조립체에 고장이 발생하기 직전까지 녹다운스트레스(Knockdown Stress)를 적용함으로써 조립체호스의 수명시험에서 가속을 극대화하고, 고장시간 집중화 하였다.

2. 호스 조립체의 고장 분석과 시험이론

2.1 플라스틱 호스 조립체의 구조와 명칭

호스 조립체는 안쪽 나일론 층, 섬유 보강층 및 바깥쪽 열경화성 우레탄층으로 이루어진다. 보강층은 호스의 규정된 내압성 및 유연성을 갖도록 구성되며, 폴리에스테르 원사를 편조(polyester wire reinforced)로 감는다. 호스의 양 끝 단에는 이음쇠(fitting)가 스웨징(swaging)으로 조립되고, 호스의 구조 및 각부품의 명칭은 Fig. 1과 같다.

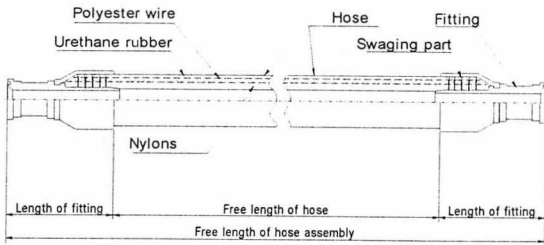


Fig. 1 Hydraulic hose assemblies

## 2.2 호스 조립체의 수명시험 항목선정과

### 누적 손상 이론 및 웨이블 분포의 분석

호스의 시험 항목선정은 고장모드 및 고장메커니즘 분석(FMMA: Failure Mode & Mechanism Analysis)과 치명도 매트릭스분석(CMA: Criticality Matrix Analysis)을 실시하고, 고장 메커니즘의 영향과 위험도 평가(FMECA: Failure Mode Effects & Criticality Analysis)를 실시한 후, 2단계 품질기능 전개(QFD: Quality Function Deployment Level 1 & 2)로 결정한다.

호스 조립체의 기능은 결합, 압력 유지, 유체의 전달 및 유연성이고, 대부분 고장 형태는 유체 누설로 나타나고, 주요 시험항목은 충격시험, 파열 시험과 내 압력시험 순이다<sup>[4]</sup>.

충격압력에 의한 호스조립체의 누적피로 손상과 수명 사이클 선도(P & N curve)는 금속의 스트레스에 대한 수명 사이클 선도(S & N curve)와 유사하고 계산식은 다음과 같고, 신뢰성 분석에서 가장 널리 쓰이는 와이블분포는 형상모수에 따라 분포의 모양이 결정되며, 감소형 고장률, 일정형 고장률, 증가형 고장률을 모두 표현할 수 있다. 와이블분포의 확률밀도함수 계산식은 다음과 같다.

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]$$

$$t > 0, \beta, \eta > 0 \dots\dots\dots (2.1)$$

신뢰성 척도로 와이블분포의 분포(불 신뢰도) 함수, 신뢰도 함수, 고장률 함수를 각각 다음과 같은 계산식으로 나타낸다.<sup>[6]</sup>

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \dots\dots\dots (2.2)$$

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\lambda(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \dots\dots\dots (2.4)$$

## 3. 시험과 결과의 분석

### 3.1 호스 조립체의 파열압력 시험

최대 사용 압력이 21 MPa인 호스 10개를 시험장비에 한개 씩 장착하여, 파열될 때까지 시험을 한 결과, 호스의 파열은 Fig 2와 같이 호스의 중압부분에서 발생하였고, 평균 파열 압력은 Table 1과 같이 최고사용 압력의 약 421.9% 이었다.

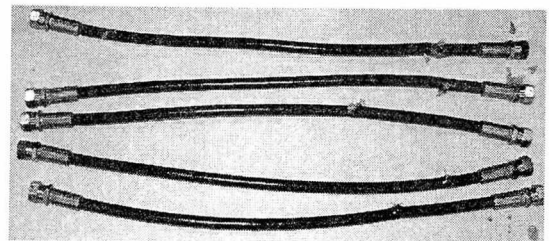


Fig. 2 Bursted hose in burst test

Table 1. Burst test results and pressure ratio

No.	Burst pressure (MPa)	$\frac{\text{burst press.}}{\text{max press. (21MPa)}} \times 10$
1	88	419 %
2	85.2	406 %
3	89.5	426 %
4	89.8	427 %
5	90.4	430 %
6	86.1	410 %
7	90	429 %
8	87.4	416 %
9	89	423 %
10	81	433 %
mean pressure ratio		421.9 %

### 3.2 호스 조립체의 충격압력 시험

Fig 3의 Hose impulse testing system에서 Fig. 4와 같이 시료가 모두 과열될 때까지의 최고 사용압력의 125%, 200% 및 300%로 충격압력 실험을 하였고, 300%로 5분 동안 Knockdown Stress를 가한 후 125% 및 200% 충격압력 실험을 하였다. 호스의 시험결과는 Table 2와 같다.



Fig. 3 Hose impulse testing system

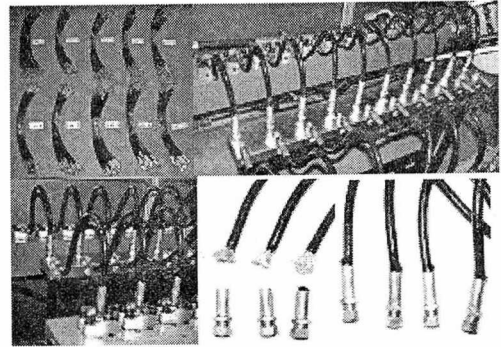


Fig. 4 Hose impulse test

Table 2. Impulse test result

No	Pressure ratio of impulse test				
	125%	200%	300%	Applied Knockdown Stress	
				125%	200%
1	419214	13800	1446	30836	884
2	420825	17698	1615	38720	903
3	472735	18820	1707	41373	1050
4	520170	19640	2734	72150	1355
5	536817	20640	2752	80945	1825
6	810687	24158	3293	95837	2400
7	1018506	28981	4012	125379	2994
8	1046967	30960	4387	130945	3166
9	1321553	42942	5009	163475	3680
10	1425194	46930	5483	172700	4120
mean cycle	799266	26456	3243	95236	2237
Test time	100	3.3	0.4	12.1	0.3

### 3.3 플라스틱 호스의 시험 결과 분석

Fig 5는 통계적 신뢰성분석 소프트웨어를 이용하여 대표적인 4가지 수명분포의 적합도를 분석한 결과 가속수준(125%, 200%, 250%)에서 Anderson -Darling 값이 제일 적은 와이블분포가 가장 적합한 수명분포임을 확인할 수 있다.<sup>[7]</sup> Fig 6은 와이블분포의 형상모수( $\beta$ )를 분석한 결과 충격압력이 125%일 때  $\beta=1.55361$ 이었고, 200%일 때  $\beta=1.24463$ , 250%일 때  $\beta= 2.20035$ ,

300%일 때 1.61850이었다. 또한 4개의 스트레스 수준에 대하여 가속성이 성립하는지 확인하기 위하여 각 형상모수의 동일성 검정을 한 결과 Table 3의 값을 얻었으며 신뢰수준(CL) 95%에서 P-Value 값이 1-CL=0.05 보다 큰 값을 가지므로 형상모수가 서로 다른 4개의 스트레스 수준에서 동일하다고 할 수 있고, 최대사용 압력비에 대한 가속이 성립함을 확인하였다.

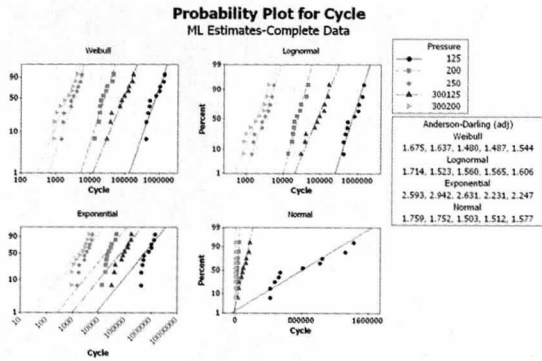


Fig 5. Suitability analysis of life distribution

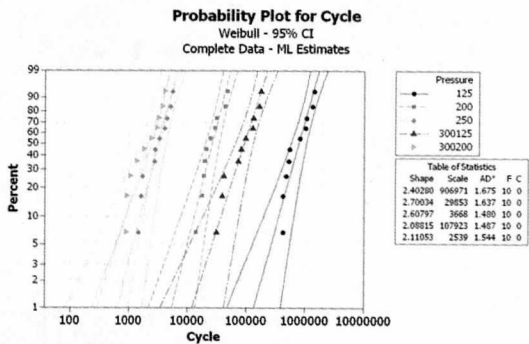


Fig 6. Probability plot for cycle

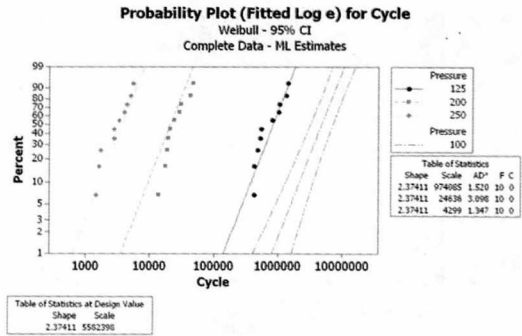


Fig 7. Life prediction analysis for usage condition

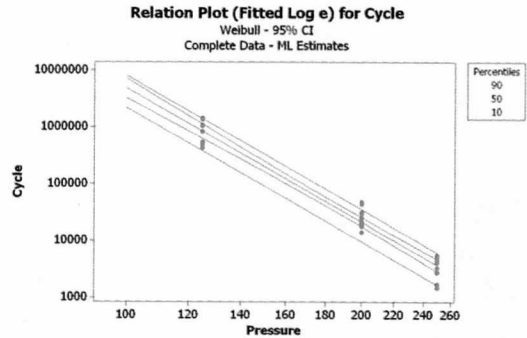


Fig 8. Relation between pressure and life (n=7.82)

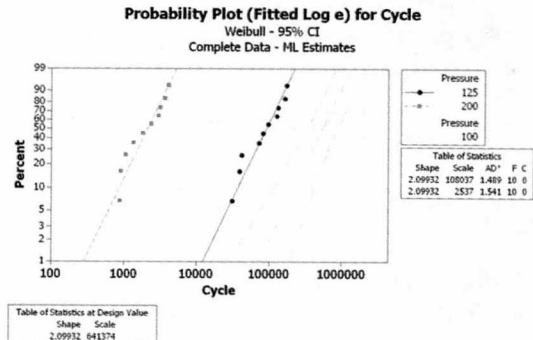


Fig 9. Life prediction analysis for using condition

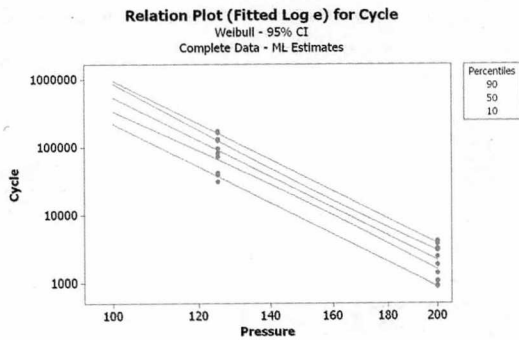


Fig 10. Relation between pressure and life (n=7.98)

Table 3. Test for equal shape parameters

$\xi^2$	Degree of Freedom	P- Value
0.895756	4	0.925

Fig 7은 기존의 시험방식으로 충격압력 시험 결과를 사용조건에서의 수명을 예측하고 동일한 형상모수( $\beta$ )로 확률지에 도시해 모수를 추정하는 것으로 형상모수  $\beta = 2.37$  이고, 스트레스 수준별 척도모수( $\theta$ )는 충격압력이 최고사용 압력의 125%일 때 974,085이며 200%일 때 24,636 및 300%일 때 4,299이었고, 최고사용압력의 100%인 사용조건에서 모수를 추정하면 척도모수는 5,582,398이고,  $B_{10}$  수명은 2,163,529 cycle이다.

Fig 9는 Knockdown Stress를 가한 후 충격압력 시험결과는 형상모수  $\beta = 2.10$ 이고, 스트레스 수준별 척도모수( $\theta$ )는 125%일 때 108,037이었으며 200% 일 때 2,537이었고, 사용조건에서 척도모수 641,374이고,  $B_{10}$  수명은 219,568 cycle 이었다.

Fig 8과 Fig 10은 수명-스트레스의 관계를 역승모형을 적용하여 분석한 그래프이며 수학식은 다음과 같다.

$$L(V) = \frac{a}{V^n} \dots\dots\dots(3.1)$$

위의 식에 대수를 취하면  $\ln(L(V)) = \ln(a) - n \ln(V)$ 의 선형 식으로 표현되며, 시험결과를 분석한 결과  $n = 11.0719$ 이며,  $\ln(a) = 67.4018$ 이다. 이로부터 아래의 가속계수 산출 공식을 이용하여 사용수준(최고사용 압력인 100%)에 대한 각 스트레스 수준별 가속계수를 산출한 결과 기존 방식은 125%일 때 약 5.7배, 200%일 때 약 225배, 300%일 때 약 1300배 이었으며, Knockdown Stress를 가한 후 각 스트레스 수준별 가속계수를 산출한 결과는 125%일 때 약 58배, 200%일 때 약 2492배의 값을 얻었다.

가속계수 ( $AF$ )와 Knockdown Stress를 가한 후 가속계수 ( $AF_{Kn}$ ) 산출 공식은 다음과 같다.

$$AF = \left[ \frac{P_{test}}{P_{field}} \right]^n \dots\dots\dots(3.2)$$

$$AF_{Kn} = Kn \left[ \frac{P_{test}}{P_{field}} \right]^n \dots\dots\dots(3.3)$$

플라스틱 호스조립체에 대해서 기존의 시험방식으로 충격압력 시험결과와 Knockdown Stress를 가한 후 충격압력 시험결과 Table 4와 Fig 11과 같다.

Table 4. Analysis of test result

	Accelerated life test				Applied knockdown Stress		
	100%	125%	200%	300%	100%	125%	200%
Shape parameter	2.37	2.37	2.37	2.37	2.10	2.10	2.10
Scale parameter	5,582,398	974,085	24,636	4,299	641,374	108,037	2,537
$B_{10}$ life	2,163,529	377,519	9,548	1,666	219,568	36,985	868

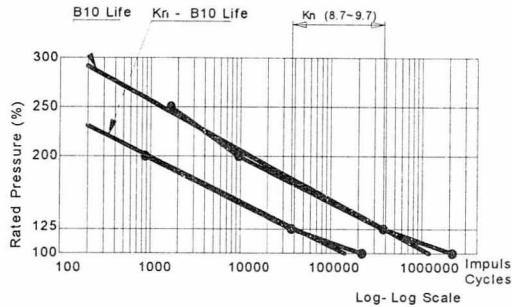


Fig. 11 Hose Impulse Test P-N Curve

#### 4. 결론

본 연구에서는 플라스틱 조립체의 가속수명 시험을 위해 “닉 다운 스트레스 방법”을 제안 하였으며, 호스조립체의 주고장은 기존의 충격압력 수명시험방법과 Knockdown Stress를 가한 후 수명시험에서 거의 동일하게 호스와 이음쇠의 웨이징 부분에서 파열과 이탈이 발생 되었다.

기존이론에 의한 형상 모수와 수명-스트레스 그래프의 기울기는 7.82이었고, Knockdown Stress를 가한 후 수명-스트레스 그래프의 기울기가 7.98로 형상 모수와 수명-스트레스 그래프의 기울기와 거의 동일하였다.

플라스틱호스의 가속 수명시험에서 최소 파열 압 75%를 5분 동안 Knockdown Stress로 가할 경우 기존의 충격압력 시험방법에 비해 약 8.7 ~ 9.7배 더 가속이 이루어짐을 확인 하였다.

#### 참 고 문 헌

1. Henry D. Berns and Raymond J. Lobmeyer, Cumulative Damage Analysis for Hydraulic Hose, SAE Technical Paper Series (1986), pp. 47~69
2. C. W. Evans and T. R. Manley, Factor Affecting the Impulse Testing of Hydraulic

Hose, Polymer Testing Vol. 6 (1986), pp. 135~149

3. SAE Standard, Hydraulic Hose SAE J517 (Semperflex, 2003)
4. Y. B. Lee, H. E. Kim, J. H. Park and J. M. Ko, Life Analysis of High Pressure Hydraulic Hose Assemblies by Impulse Test, KFPS Vol. 1 (2004), pp.10~16
5. D. Kececioglu: Reliability Engineering Handbook Vol. 2 (1991), pp. 473~503
6. J. W. Evans and J. Y. Evans: Product Integrity and Reliability In Design (Springer, 2001) pp. 288~337
7. S. K. Seo: MINITAB Reliability Analysis (2002) pp. 219~282