녹다운 스트레스에 의한 유압호스 조립체의 가속수명시험에 대한 연구

고재명, 이용범, 한성건, 유영철, 김형의
한국기계연구원, 기계시스템신뢰성연구센터

A study on the accelerated life test method of hose assemblies by applying Knockdown stress

Jae-myoung Ko, Yong-bum Lee and Sung-geon Han, Young-chul Yoo, Hyoung-eui Kim
Mechanical Systems Reliability Research Center
Korea Institute of Machinery & Materials, Korea

Abstract

The failure of hydraulic hose assemblies is caused by the impulse pressure and repetitive motions of bending and stretching (flexing) used at high pressure pipe in the form of bursting. Since it takes long time to observe the bursting for life analysis, we can reduce test time by the method of applying the Knockdown stress which is equivalent to 70 % of initial bursting pressure on rubber hose assemblies with maintaining the failure mode equally. In this study, after scale parameter, shape parameter, and acceleration factor by preforming the impulse pressure test until the hose bursts, and finally analyzed the accelerated life.

Key words : Rubber hose assemblies, Accelerated life test, Flexing Impulse test, Knockdown stress

기호 설명

a, n : 결정해야 할 모델의 모수 (상수)
AF : 가속 계수
AF_{Kn} : Knockdown stress 가한 후 가속계수
Kn : Knockdown stress ratio
(5분 가압압력/최소 파열압력)
$L(v)$: 압력주기의 최대진폭
P_{field} : 사용수준의 압력
P_{Ks} : Knockdown stress 가하기 위한 압력
P_{test} : 가속수명 시험 조건에서의 시험 압력
V : 스트레스 수준(압력)

1. 서론

유압을 사용하는 현대 장비들이 자동화와 소형화를 추구하게 되고 동작의 다양성이 요구되는 시점에서 기계부품도 변화가 요구되고 있다. 특히 유압호스 조립체는 고압을 유지하면서 유연성이 요구되는 부분에 사용되므로 더 많은 호스의 특성을 알아볼 필요가 있다.

사용압력의 증가와 굽힘과 펴짐의 반복동작으로 인해 호스조립체의 누유(leakage)와 파열(burst) 등의 고장이 비례적으로 증가하고 있으며, 호스 고장은 전체 시스템의 작동을 불가능하게 하는 요인이 되고 있다.

호스의 고장으로 인한 전체 시스템의 정지는 산업현장에서 생산 및 작업의 비효율성을 가져올 수 있고, 환경오염에도 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 시스템을 안정적으로 운영하기 위해서는 호스조립체의 교체시기에 대한 정확한 정보가 필요하고, 이를 위해서 호스의 수명 예측이 절대적으로 필요하다.

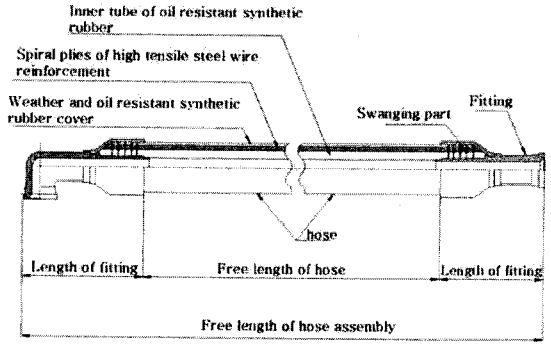
Raymond [8], Evans [7,9] 등이 압력을 주기적으로 가하면서 누적된 손상을 연구하였고, 미국 자동차협회(SAE)의 경우 고무호스류에 대한 분류와 호스조립체의 수명시험 방법을 채택하여 규격으로 발표하였다. [2,3] 그리고 한국기계연구원에서 충격압력과 굽힘동작을 가하여 플라스틱 호스조립체와 고압용 유압호스 조립체의 고장 형태와 수명을 연구하였다. [1] 그러나 위의 방법들은 압력 변화에 따른 고장 형태를 알 수는 있지만 넓게 퍼진 고장 분포로 인하여 수명 시험에 많은 시간이 요구되어 부담감이 크다.

본 연구는 새로운 가속수명 모델을 알아보기 위해 호스 조립체가 고장 직전 상태까지의 Knockdown stress(최소 파열압력의 70 %이상을 5분 동안 유지)를 가한 후 수명시험을 실시하여, 기존의 누적 피로에 의한 수명결과와 비교 분석을 통해 가속 특성을 연구하였다.

2. 호스조립체 시험 이론 및 고장분석

2.1 호스조립체의 구조 및 명칭

호스조립체는 내·외부의 합성고무층, 강선 보강층으로 이루어진다. 합성고무층은 오일 및 환경적 요인에 견딜 수 있는 재질을 선택하고, 강선 보강층은 4개 내지 6개의 강선을 나선으로 겹쳐 내압성 및 굽힘성을 갖도록 구성된다. 호스의 양끝 단에는 이음쇠(fitting)가 스웨징(swaging)으로 조립되고, 호스의 구조 및 각 부품의 명칭은 [그림 1]과 같다.



[그림 1] hydraulic hose assemblies

2.2 호스조립체의 수명-압력의 관계 및 가속계수 이론

사용조건에서의 수명을 예측하고 동일한 형상모수를 이용하여 수명-압력의 관계를 역승모델로 분석하기 위한 식은 다음과 같다.

$$L(V) = \frac{a}{V^n} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

위의 식을 이용하여 사용수준에 대한 각 스트레스 수준별 가속계수를 산출하기 위한 식은 다음과 같다.

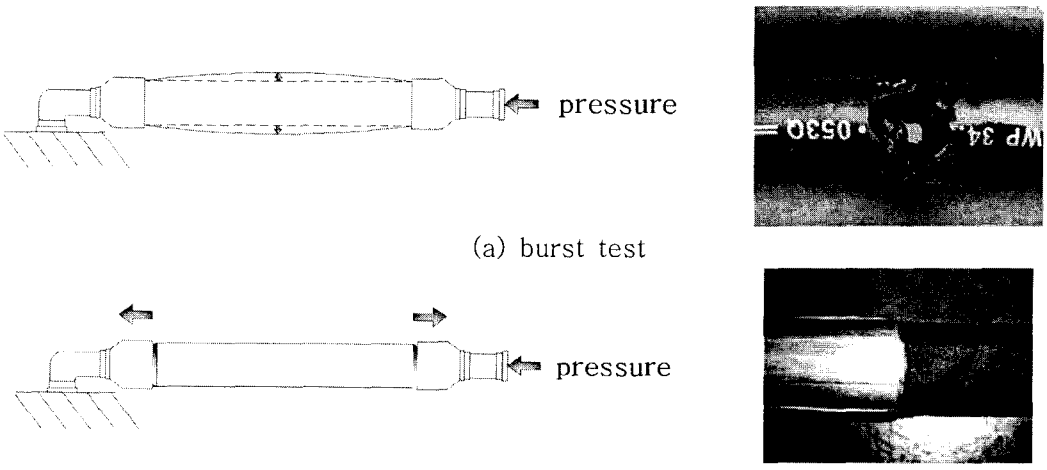
$$AF = \left[\frac{P_{test}}{P_{field}}\right]^n \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

$$AF_{Kn} = Kn\left[\frac{P_{test}}{P_{field}}\right]^n \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

3. 시험 및 결과 분석

3.1 Knockdown Stress 적용

호스조립체를 파열시험을 하는 경우 내부에 형성된 압력이 호스가 견딜 수 있는 최소 파열압력 이상에서 호스는 [그림 2]의 (a)와 같이 팽창하여 압력에 가장 취약한 부분에서 파열하게 된다. Knockdown stress를 주기 위한 경우는 내부 압력이 정해진 시간동안 유지되면서 호스를 팽창시키지 못하고, 이음쇠를 밀어내게 되어 [그림 2]의 (b)와 같은 형태가 되고 호스가 이음쇠에서 이탈하는 형태는 충격 압력 시험을 통해 나온 호스 파열 형태와 유사함을 시험을 통해 확인하였다.



(a) burst test

(b) knockdown stress

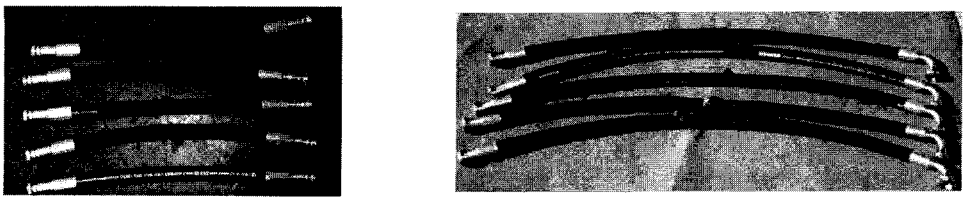
[그림 2] Failure mode of hose

3.2 호스조립체의 파열압력 시험

내경이 19 mm이고 최고 사용 압력이 34.7 MPa인 자유 길이가 600 mm인 호스조립체와 충격압력시험을 위한 시료 길이인 1260 mm인 호스조립체를 시험 장비에 1개씩 설치하여 각각 파열될 때까지 시험한 결과 [그림 3]과 같이 호스 중앙부분에서 파열이 일어났고 파열압력과 최고 사용압력에 대한 파열압력의 비는 [표 1]과 같으며 평균 파열압력의 비는 460 %가 되었다.

[표 1] Burst test results and pressure ratio

No	burst pressure (MPa)		$\frac{\text{burst pressure}}{\text{max operating pressure(34.7MPa)}} \times 100(\%)$
1	600 mm	160	461 %
2		159	458 %
3		161	463 %
4		160	461 %
5		158	455 %
6	1260 mm	161	463 %
7		162	466 %
8		157	452 %
9		160	461 %
10		158	455 %
mean pressure ratio			460 %



(a) 600 mm (b) 1260 mm

[그림 3] Bursted hose for burst test

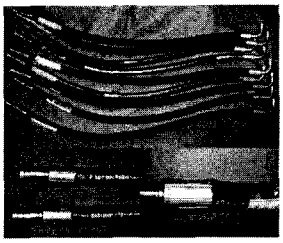
3.3 호스조립체의 충격압력 시험

Knockdown Stress를 파열압력의 65 %, 80 %로 5분간 가한 시료 각각 10개를 최고 사용압력의 133 %로 충격압력 시험을 하였고 Knockdown stress를 가하지 않은 시료를 최고 사용압력의 150 %, 175 %로 각각 10개씩 [그림 4]와 같이 장착하고 시료가 모두 파열될 때까지 충격압력 시험을 하였다. 호스의 파열 결과는 [표 2]와 같다.

Knockdown stress를 가한 호스의 파열 형태는 [그림 5]와 같이 호스가 연속적으로 half omega flexing[5]을 가하면서 호스가 이음쇠에서 이탈하게 되고 [그림 5]와 같이 이탈된 면에서 파열하게 된다.

[표 2] Impulse test result

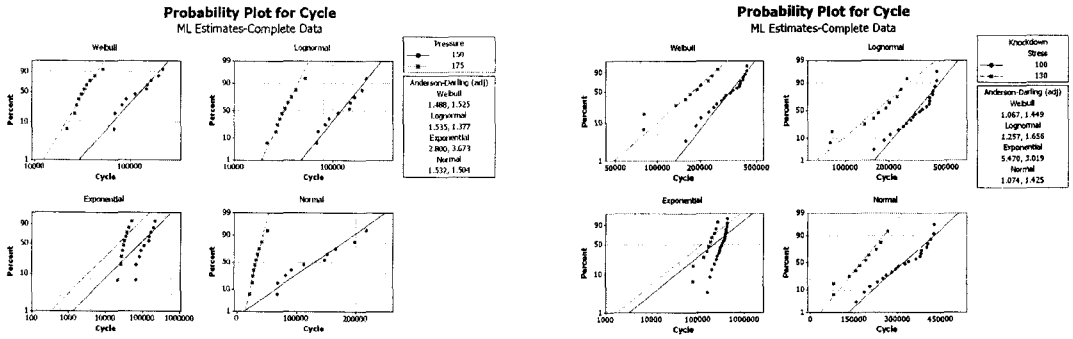
No	Pressure ratio of impulse test			
	133 %		150 %	175 %
	Kn = 0.6	Kn = 0.8		
1	157741	78661	67920	21673
2	203634	80432	69684	26559
3	249663	134813	82789	27617
4	282449	157456	91598	29153
5	304430	170339	112829	30881
6	339480	174171	147608	32915
7	379778	201403	151664	35245
8	383534	228226	166125	37955
9	404728	242226	198231	42350
10	426437	266226	217424	42742
mean cycle	313,187	157,632.16	118,729	29,751



[그림 4] Impulse test with half omega flexing [그림 5] Bursted hose for impulse test

3.4 유압호스의 시험 결과 분석

[그림 6]은 통계적 신뢰성분석 소프트웨어를 이용하여 대표적인 4가지 수명분포의 적합도를 분석한 결과 가속수준(150 %, 175 %, Kn = 0.6, 0.8)에서 Anderson-Darling 값이 제일 적은 와이블분포가 가장 적합한 수명분포임을 확인할 수 있다. 와이블값은 1.488, 1.525, 1.067, 1.449가 나왔다.

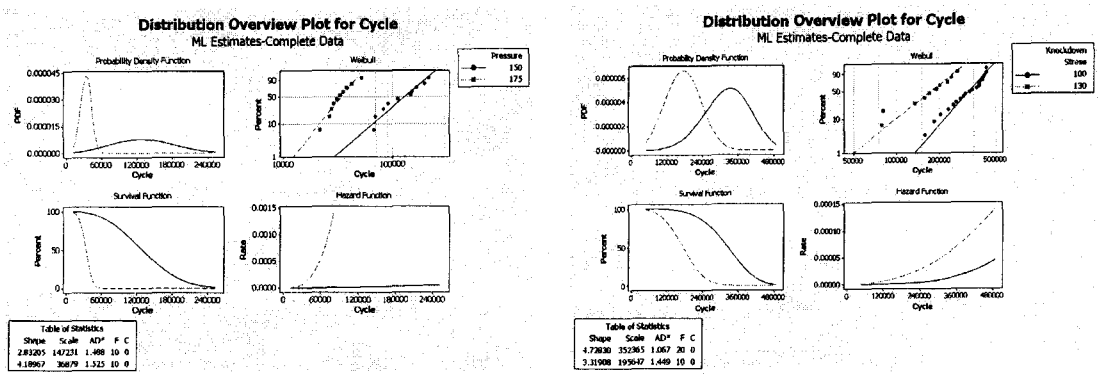


(a) 150 %, 175 % (b) Kn = 0.6, 0.8

[그림 6] Suitability analysis of life distribution

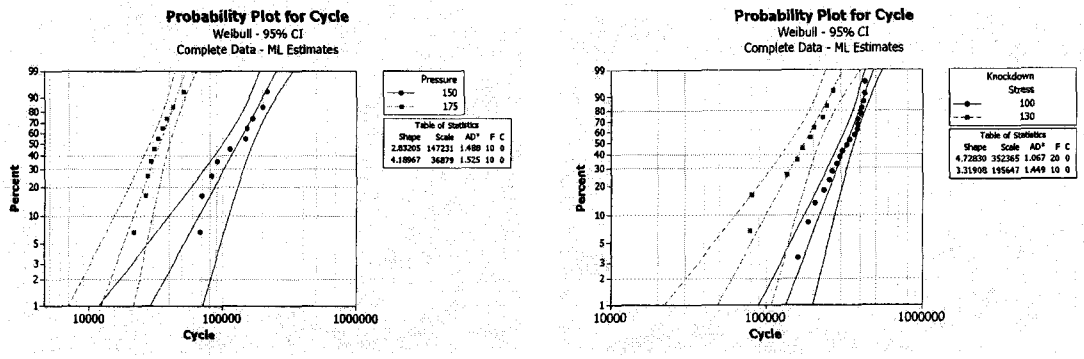
[그림 7]은 와이블분포의 형상모수(β)를 분석한 결과 충격압력이 150 %일 때 β=2.832이였고, 175 %일 때 β=4.189, Kn=0.6일 때 β= 4.728, Kn=0.8일 때 β= 3.319이였다.

또한 [그림 8]은 4개의 스트레스 수준에 대하여 가속성이 성립하는지 확인하기 위하여 각각의 형상모수의 동일성 검정을 한 결과 신뢰수준(CL) 95 %에서 P-Value 값이 0.25, 0.624가 나와 1-CL=0.05 보다 큰 값을 가지므로 형상모수가 서로 다른 4개의 스트레스 수준에서 동일하다고 통계적으로 판단할 수 있고, 최대사용 압력비율에 대한 가속이 성립함을 확인하였다.



(a) 150 %, 175 % (b) Kn = 0.6, 08

[그림 7] Distribution overview plot for cycle



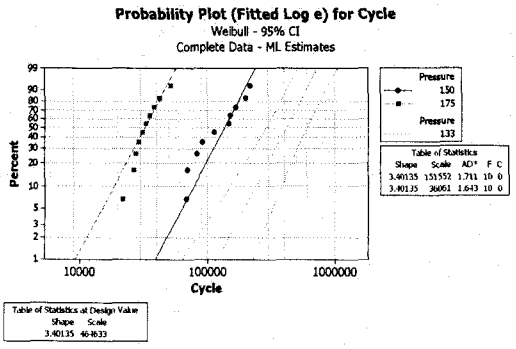
(a) 150 %, 175 % (b) Kn = 0.6, 08

[그림 8] Probability plot for cycle

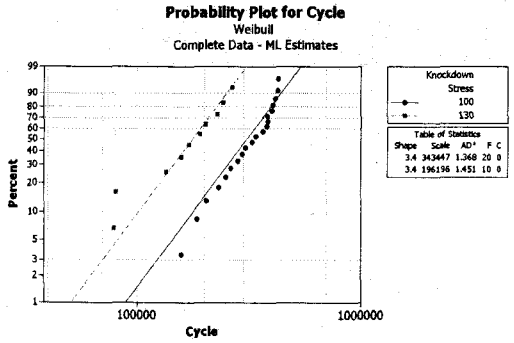
식 (1)에 대수를 취하면 ln(L(V))= ln(a)-n ln(V)의 선형 식으로 표현되며 [그림 9]와 같이 시험결과를 분석한 결과 n = 9.31376이며, 식 (2)로부터 P_{field}을 34.7 MPa로 할 때 사용수준에 대한 각 스트레스 수준별 가속계수를 산출하면 150 %일 때 약 47배, 175 %일 때 약 169배의 값은 얻고, 133 %일 때 약 15배의 값을 얻을 수 있다.

[그림 9]는 133 % 사용조건에서의 수명을 예측하고 동일한 형상모수(β)로 확률지에 도시하여 모수를 추정한 것으로 형상모수 β = 3.4이고, 스트레스 수준별 척도모수(Θ)는 150 %

일 때 151,552 cycle, 175 %일 때 36,061 cycle이다. 133 %에서의 모수를 추정하면 척도모수는 164,633 cycle이 된다. 추정된 척도모수를 이용하여 Kn = 0.6, 0.8일 때와 비교하기 위해 133 %에서의 형상모수를 동일하게 적용하면 [그림 10]과 같은 결과가 나온다. 구해진 각각의 척도모수는 Kn = 0.6일 때 343,447 cycle, Kn = 0.8일 때 196,196 cycle이 나온다.



[그림 9] Probability plot for cycle (133 %, 150 %, 175 %)



[그림 10] Probability plot for cycle (Kn = 0.6, 0.8)

4. 결 론

본 연구에서는 호스조립체의 가속수명 시험을 위해 "Knockdown stress 방법"을 제안 하였다.

호스조립체의 고장은 기존의 충격압력 수명시험방법과 Knockdown stress를 가한 후 수명시험에서 거의 동일하게 호스와 이음쇠의 스웨징 부분에서 파열과 이탈이 되었다.

유압호스의 가속 수명시험에서 최소 파열압력의 60 %, 80 %를 5분 동안 Knockdown stress를 가할 경우 기존의 충격압력 시험 방법에 비하여 약 1.35 배, 2.37 배 더 가속이 가능함을 확인 하였다.

참고문헌

[1] Y. B. Lee, H. E. Kim and J. H. Park, J. M. Ko. "Life analysis of high pressure hydraulic assemblies by the impulse test", KFPS, vol 1, p. 10~16, 2004.

[2] "Hydraulic Hose SAE J517", SAE Standard, rev Feb 2003.

[3] "Test and Test Procedure for SAE100R Series J343", SAE Standard, rev Jul 2001.

[4] John W. Evans, Jillian Y. Evans. "Product Integrity and Reliability In Design", Springer, p. 288~337, 2001.

[5] "Rubber and Plastics Hose Assemblies Flexing combined with Hydraulic ImpulseTest half-omega test", International Standard ISO 8032, 1997.

[6] D. Kececioglu. "Reliability Engineering Handbook", Vol. 2, p. 473~503, 1991.

[7] C. W. Evans. "Testing and Application of Wire-Reinforced Hydraulic Hose, UK, Polymer Testing, Vol. 7, p. 309-315, 1987

[8] Henry D. Berns, Raymond J. Lobmeyer. "Cumulative Damage Analysis for Hydraulic Hose", SAE Technical Paper Series, p. 47~69, 1986.

[9] C. W. Evans, T. R. Manley. "Factor Affecting the Impulse Testing of Hydraulic Hose", Polymer Testing 6, p. 135-149, 1986.