

# 충격압력을 이용한 고압용 유압호스 조립체의 수명분석

## Life Analysis of High Pressure Hydraulic Hose Assemblies by Impulse Test

이용범 · 김형의 · 유영철 · 박종호 · 고재명

Y. B. Lee, H. E. Kim, Y. C. Yoo, J. H. Park and J. M. Ko

D. H. Kwak and J. K. Lee

**Key Words** : Hydraulic Hose(유압호스), Fitting(이음쇠), Impulse Test(충격압시험), Accelerated Life Test(가속 수명 시험), Weibull Distribution(와이블분포)

**Abstract** : The failures such as leakage and burst stemmed from the repetitive motions of bending and stretching of the assembly of hydraulic hose in construction machines, agriculture machines, vehicles, and industrial heavy machines can induce big troubles. Therefore, the hydraulic hose itself eventually requires an estimation of life to operate the hydraulic system safely. In this research, we have qualitatively selected the efficient test items by the analysis of the life and potential failures of hydraulic hose. We have used more than seven of hydraulic hoses simultaneously for the research. We have applied impulse pressure and half omega flexing motions to the accelerated life testing. Test results have been expressed by employing weibull plot.

### 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

### 1. 서 론

건설 기계, 농업기계, 차량 및 산업기계 등의 유압 관로에서 유연성(flexibility)이 요구되는 부분에 사용

되는 유압호스 조립체는 호스와 이음쇠로 구성되어 있으며, 내압성을 증가시키기 위한 강선 보강제(steel wire)의 감김 층수와 호스 내경에 따라 최고 사용압력을 분류 한다.

최근 유압시스템의 고출력, 고밀도화(kg/kW)와 콤팩트화를 위해서 사용압력이 고압화되는 추세이며, 제어기술의 발전으로 다양한 입체동작이 가능하게 되어 관절부분에 사용되는 유압관로에 더 많은 유연성이 요구되고 있다.

사용압력의 고압화와 굽힘과 꺾임의 반복동작에 의해 유압호스 누유(leakage)와 파열(burst) 등의 고장이 비례적으로 증가하고 있으며, 유압호스 고장은 유압시스템의 전체 작동을 불가능하게 하는 요인이 되고 있다. 유압시스템을 안정적으로 운영하기 위해서는 고장이 발생하기 전에 호스를 교체해야 한다. 따라서 호스의 수명 예측을 통한 적절한 교체시기의 결정이 중요하다.

Raymond와 Henry는 유압호스에 실제 사용조건보다 높은 충격압력(사용압력의 133~200%)을 연속적으로 가하는 시험(impulse test)을 실시하고 이로부터 누적손상분석 이론을 발표하였고, G. B. Randall은 저압용 호스(SAE 100 R2)에 대한 시험방법과 절차를 제시하였다<sup>1)</sup>.

접수일 : 2004년 1월 5일

이용범 (책임저자) : 한국기계연구원

E-mail : lyb662@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7151

김형의, 유영철 : 한국기계연구원

박종호, 고재명 : 충남대학교 대학원 기계공학과

미국 자동차협회(SAE)에서 유압호스를 SAE100 R1~R17로 분류하고, 유압호스의 충격압 시험을 수명시험 방법으로 채택하였다<sup>2)</sup>. 그러나 이 방법은 시험 중 유연성 동작시험을 병행하지 않기 때문에 실제 사용조건을 충분히 반영하지 못하는 문제가 있었다. 또한 4개의 유압호스만을 시험함으로써 유압호스의 수명 분포를 추정하기가 어려웠다.

본 연구에서는 유압호스의 잠재적 고장을 해석하여 효과적인 시험항목을 선정하고, 7개의 유압호스를 사용하여 충격압력과 1/2 오메가( $\Omega$ )형태의 굽힘(half omega flexing)동작시험을 동시에 수행함으로써 실제 사용조건을 반영한 호스의 수명을 평가하였다.

## 2. 유압호스 시험 관련 배경 지식 및 고장분석

### 2.1 유압호스의 구조 및 명칭

유압호스는 안쪽 고무층, 강선 보강층 및 바깥쪽 고무층으로 이루어진다. 보강층은 호스의 규정된 내압성 및 굽힘성을 갖도록 구성되며, 강선을 편조(steel wire reinforced)하거나 나선상(multiple spiral steel wire reinforced)으로 감는 것이 있다. 유압호스의 양끝 단에는 이음쇠(fitting)가 스웨징(swaging)으로 조립되어 있고, 호스의 구조 및 각부품의 명칭은 Fig. 1과 같다.

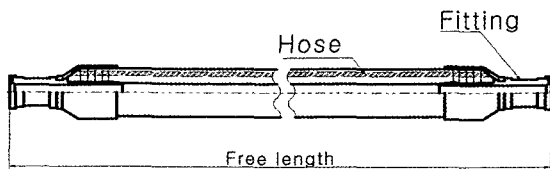


Fig. 1 Hydraulic hose assemblies

### 2.2 충격시험 압력 파형 및 주파수

SAE J 343 및 ISO 8032 등에서는 유압호스의 충격시험 압력 파형을 Fig. 2와 같이 사각 파형으로 정의하고 있으며, 충격주기는 0.5~1.25Hz로 규정하고 있다<sup>3,4)</sup>.

또한 유압호스가 여러 형태로 굽혀짐과 퍼짐이 반복되는 것을 모사하기 위해 Fig. 3과 같은 굽힘 동작을 병행하도록 하고 있다<sup>5,6)</sup>.

### 2.3 유압호스의 시험항목 분석

고장모드 및 고장 메커니즘 분석(FMMA: Failure Mode & Mechanism Analysis)과 치명도 매트릭스 분석(CMA: Criticality Matrix Analysis)을 실시하고,

고장 메커니즘의 영향과 위험도 평가(FMECA: Failure Mode Effects & Criticality Analysis)를 실시하였다. 2단계 품질기능 전개(QFD: Quality Function Deployment Level 1 & 2)를 통해, 주요 시험항목들을 선정하였다<sup>7)</sup>.

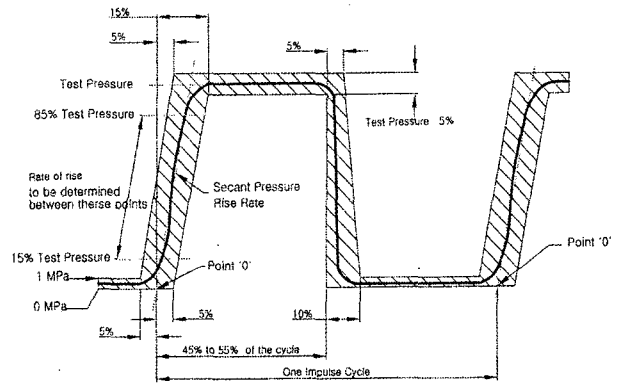


Fig. 2 Impulse pressure wave pattern

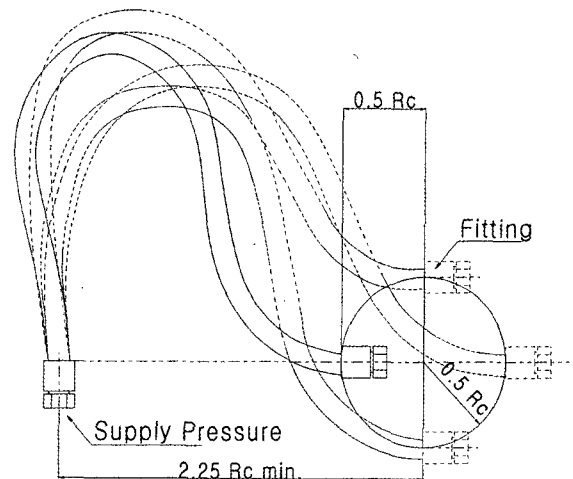


Fig. 3 Half omega flexing

#### 1) 고장모드 및 고장메커니즘 분석

유압호스의 기능은 결합, 압력유지, 유량전달 및 유연성 등이며, 대부분의 고장 형태는 누유로 나타났다. 고장메커니즘은 Table 1과 같다.

#### 2) 고장심각도 및 발생빈도분석

심각도를 세로축으로 발생빈도를 가로축으로 하여 치명도 분석을 수행한 결과가 Table 2와 같다.

#### 3) 고장모드의 영향과 위험도 분석

Table 3은 고장모드 별 치명도 평가결과를 나타낸다.

4) 2-단계 품질기능 전개

유압호스의 시험항목을 선정하기 위해서는 먼저 사용자의 요구조건 또는 사양과 주요 구성품별 고장 모드와의 관계를 평가하여 Table 4와 같은 1단계 품질기능 전개표를 작성한다.

또한 주요 구성품별 고장 메커니즘과 시험항목들과의 관계를 평가하여 Table 5와 같은 2단계 품질기능 전개표를 작성한다.

이 분석결과로부터 도출된 주요 시험항목들은 충격압력시험(impulse test), 파열압력시험(burst test) 그리고 내압시험등의 순서로 나타났다.

Table 1 Analysis of failure mode and failure mechanism

| Components | Functions   | Failure Mode | Failure mechanism and Causes                   |
|------------|---|--------------|--|
| Fitting    | Connection and Pressure durability                        | Leakage      | 1-1 over-stress fracture                       |
|            |   |              | 1-2 external corrosion                         |
|            |   |              | 1-3 fatigue cracking due to cyclic pressure    |
| Hose       | Pressure durability, hydraulic oil transfer & flexibility | Leakage      | 2-1 burst due to excessive pressure            |
|            |   |              | 2-2 thermal aging and cracking                 |
|            |   |              | 2-3 chemical degradation from contamination    |
|            |   |              | 2-4 degradation from lubricant incompatibility |
|            |   |              | 2-5 fatigue due to vibration                   |
|            |   |              | 2-6 external damage of braiding wire layer     |
|            |   |              | 2-7 fatigue cracking due to cyclic pressure    |

Table 2 Criticality matrix analysis

|                   |        |     |        |                           |     |     |
|-------------------|--------|-----|--------|---------------------------|-----|-----|
| severity          | High   | III | II     | 1-1, 2-1, 2-3<br>2-5, 2-7 | I   |     |
|                   | Medium | IV  | III    | 1-2, 1-3<br>2-2, 2-4      | II  | 2-6 |
|                   | Low    | V   | IV     |                           | III |     |
|                   |        | Low | Medium | High                      |     |     |
| failure frequency |        |     |        |                           |     |     |

Table 3 Failure mode effects & criticality analysis

| Components     | Failure Mode | Causes | Effects                                     | Evaluation |          |             |
|----------------|--------------|--------|---|------------|----------|-------------|
|                |              |        |   | Frequency  | Severity | Criticality |
| Fitting        | Leakage      | A      | Pressure loss and system damage             | 2          | 3        | 7           |
|                |              | B      | Leakage and inability to couple or uncouple | 2          | 2        | 5           |
|                |              | C      | Pressure loss                               | 2          | 2        | 5           |
| Hydraulic Hose | Leakage      | D      | Pressure loss and system damage             | 2          | 3        | 7           |
|                |              | E      | Pressure loss and system damage             | 2          | 2        | 5           |
|                |              | F      | Leakage and pressure loss                   | 2          | 3        | 7           |
|                |              | G      | Leakage and pressure loss                   | 2          | 2        | 5           |
|                |              | H      | Leakage and pressure loss                   | 2          | 3        | 7           |
|                |              | I      | Leakage and pressure loss                   | 3          | 2        | 7           |
|                |              | J      | Pressure loss and system damage             | 2          | 3        | 7           |

- A : over-stress fracture
- B : external corrosion
- C : fatigue cracking due to cyclic pressure
- D : burst due to excessive pressure
- E : chemical degradation from contamination
- F : thermal aging and cracking
- G : degradation from lubricant incompatibility
- H : fatigue due to vibration
- I : external damage of braiding wire layer
- J : fatigue cracking due to cyclic pressure

2.4 유압 호스의 누적손상 이론 및 와이בל 분포

유압 호스의 누적손상을 확인하기 위해서는 시험 호스에 일정한 충격압력을 주되 반복 사이클을 만들어 사이클 수를 증가시킴으로서 가능하다.

충격압력에 의한 유압호스의 누적피로 손상과 수명 사이클 선도(P&N curve)가 금속의 스트레스에 대한 수명 사이클 선도(S&N curve)와 유사하고, 계산식은 다음과 같다.<sup>1)</sup>

$$P_a = P_b(N)^s \tag{1}$$

식(1)을  $N$ 에 관한 식으로 나타낼 수 있다.

$$N = \left( \frac{P_a}{P_b} \right)^{\frac{1}{s}} \tag{2}$$

시험호스가  $P_b$ 가 400%일 때 1 cycle에서 파열되고,  $P_a$ 가 125%일 때  $5 \times 10^5$  cycle에서 파열된다면, 식(2)에서  $s$ 의 값을 구하면  $s$ 는 -0.08863이다. 구하여진  $s$ 를 식(1)에 대입하여  $P_a$ 가 100%, 133%,

200%일 때의 cycle을 구하면, 각각  $6.2 \times 10^6$ ,  $2.5 \times 10^5$ ,  $2.5 \times 10^3$  cycle이 되며,  $P_a$ 가 100%인 사용조건을 기준으로 가속조건에 대한 가속계수를 산출하면  $P_a$ 가 133%일 때 25,  $P_a$ 가 200%일 때 2,500이 된다.

Table 4 Quality function deployment level 1

| Component                        | Fitting |    |    | Hose |    |    |    |    |    |    |   |
|----------------------------------|---------|----|----|------|----|----|----|----|----|----|---|
|                                  | Causes  | A  | B  | C    | D  | E  | F  | G  | H  | I  | J |
| cyclic pressure durability       | ○       |    | ◎  | ○    |    |    |    |    |    |    | ◎ |
| dimensional stability            |         |    |    | ◎    |    | △  | △  |    |    |    |   |
| tight bending radius             |         |    |    | ○    |    |    |    |    |    |    | ○ |
| oil compatibility                |         |    |    | △    |    | ◎  | ◎  |    |    |    |   |
| extended operational life        | △       | ○  | ◎  | △    | ◎  | △  | △  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎ |
| severe environmental durability  |         | ◎  | ○  | ○    | ◎  | △  | △  | ◎  |    |    | ○ |
| high strength tubing             |         |    |    | ◎    | ◎  | ○  | ○  | ○  |    |    | ◎ |
| wear resistance of wire braiding |         |    |    |      |    |    |    |    |    | ◎  |   |
| corrosion durability             |         | ◎  |    |      |    |    |    |    |    |    |   |
| Minimum leakage                  | ◎       | ○  | ◎  | ◎    | ◎  | ○  | ○  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎ |
| Scores                           | 17      | 28 | 32 | 48   | 36 | 28 | 28 | 32 | 27 | 46 |   |

Most important ◎(9), Important ○(5), common △(3)  
A~J: defined in Table 3

따라서  $P_a$ 를 133%, 200%로 가속수명시험 (accelerated life test)을 실시하면 사용조건에서의 시험보다 시험회수가 각각 25배, 2,500배 감소하며, 이에 따른 시험시간과 시험비용을 절감할 수 있다.

신뢰성 분석에서 가장 널리 쓰이는 와이블 분포는 형상모수에 따라 분포의 모양이 결정되며, 감소형 고장률, 일정형 고장률, 증가형 고장률을 모두 표현할 수 있다. 와이블분포의 확률밀도함수 계산식은 다음과 같다<sup>8,9)</sup>.

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (3)$$

$t \geq 0, \beta, \eta > 0$

신뢰성 척도로 와이블분포의 분포(불신뢰도)함수, 신뢰도 함수, 고장률 함수를 각각 다음과 같은 계산식으로 나타낸다.

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (4)$$

Table 5 Quality function deployment level 2

| Component                | Causes | Test | I       | II  | III  | IV  | V   | VI   |
|--------------------------|--------|------|---------|-----|------|-----|-----|------|
|                          |        |      | Fitting | A   | 17   | ◎   |     | ◎    |
|                          | B      | 28   |         |     |      |     | △   |      |
|                          | C      | 35   | ○       |     | ○    |     |     | ◎    |
| Hydraulic Hose           | D      | 48   | ◎       | ○   | ◎    | ◎   |     | △    |
|                          | E      | 36   | △       | △   | △    | △   |     | ○    |
|                          | F      | 28   |         | △   |      |     | ○   |      |
|                          | G      | 28   | △       | △   | △    | △   | ○   | △    |
|                          | H      | 32   |         | △   | △    | △   |     | ○    |
|                          | I      | 27   |         |     |      |     |     | ○    |
|                          | J      | 46   | ○       | △   | ○    | △   |     | ◎    |
| Test Effectiveness Score |        |      | 1182    | 750 | 1278 | 858 | 364 | 1585 |
|                          |        |      | 3       | 5   | 2    | 4   | 6   | 1    |

Most important ◎(9), Important ○(5), common △(3)  
A~J: defined in Table 3

- I. Proof test
- II. Change in length test
- III. Burst test
- IV. Cold bend test
- V. Ozone resistance test
- VI. Impulse test

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (5)$$

$$\lambda(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (6)$$

### 3. 시험 및 결과 분석

#### 3.1 유압호스의 파열압력시험

유압호스의 파열압력은 400% 이상으로 규격화 (SAE J 517)되어 있어, 본 연구에서는 Fig. 4와 같은 300 MPa 이상 토출이 가능한 더블 로드(double rod)형 초고압 증압시스템(intensifier)을 사용하였다.

압력 상승속도가 호스파열과 압력계측에 많은 영향을 미치게 됨으로, 400%까지 압력이 가해지는 시간을 60초로 설정하였고, 파열되는 순간의 압력을 계측하기 위하여, NTS사의 압력변환기(정격압력 : 400 MPa)와 Parker전자의 데이터 취득 지원 소프트웨어를 이용하였다.

#### 3.2 유압호스의 파열압력시험 결과

최고 사용압력이 35 MPa, 내경 25mm 길이가

600mm인 시험호스 4개를 시험장비에 1개씩 설치하여, 각각 파열될 때까지 Fig. 5와 같이 압력을 가하여 최소 파열압력 시험을 실시하였다.

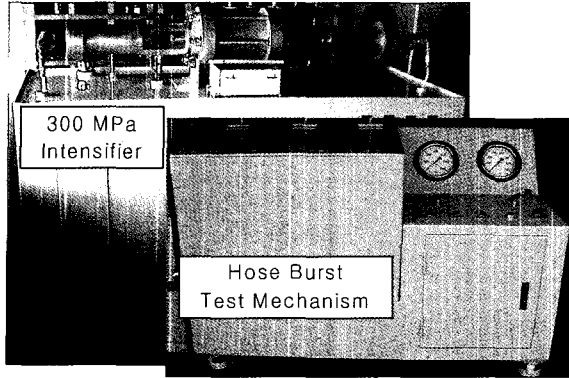


Fig. 4 Hose burst tester

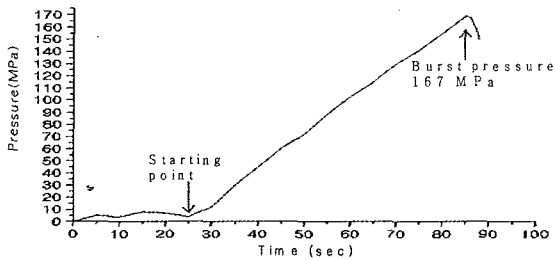


Fig. 5 Pressure variation during burst test

유압호스의 파열 부분을 분석한 결과 4개 모두 Fig. 6과 같이 이음쇠(fitting)에서 파열이 일어났고, 파열압력과 최고 사용압력에 대한 파열압력의 비는 Table 6과 같으며, 평균 파열압력의 비는 471.5%가 되었다.



Fig. 6 Hoses for burst test

Table 6 Burst test results and pressure ratio

| No | Burst pressure (MPa) | burst press.                    |
|----|----------------------|---------------------------------|
|    |                      | max press. (35MPa) $\times 100$ |
| 1  | 167                  | 481 %                           |
| 2  | 170                  | 486 %                           |
| 3  | 163                  | 465 %                           |
| 4  | 159                  | 454 %                           |

### 3.3 유압호스의 충격압력시험

최고 사용압력이 35 MPa, 내경 25mm인 시험호스를 1회에 7개씩 장착하여, Fig. 7의 시스템에 사각 충격압력 파형과 1/2  $\Omega$ 형 굽힘을 가하면서, 최고 사용압력의 200% (70 MPa)조건으로 7개 모두 파열될 때까지 실험을 실시하였으며, 168% (58.8 MPa)로 7개 모두 파열될 때까지의 실험을 하였고, 133% (46 MPa)로 시험압력을 설정하고, 압력주기는 0.75Hz, 굽힘 주기는 0.5Hz로 한 후 시료를 7개씩 2회 시험하였다.

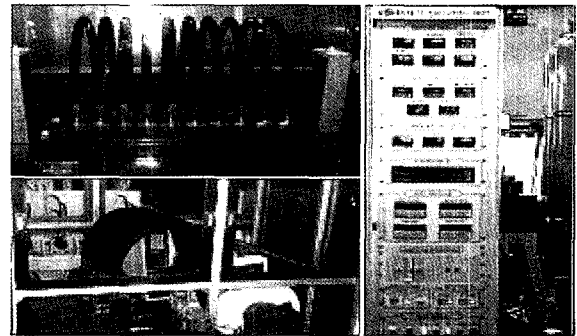


Fig. 7 Hydraulic impulse testing system

Table 7 Impulse test result

| No   | 200% press | 168% press | 133%(1) press | 133%(2) press |
|------|------------|------------|---------------|---------------|
| 1    | 11,330     | 16,500     | 54,500        | 169,800       |
| 2    | 11,520     | 51,000     | 115,400       | 260,200       |
| 3    | 12,060     | 55,000     | 115,400       | 264,080       |
| 4    | 12,380     | 57,000     | 235,000       | 288,100       |
| 5    | 13,040     | 59,000     | 276,800       | 407,990       |
| 6    | 14,670     | 63,500     | 381,640       | 414,090       |
| 7    | 14,720     | 63,500     | 438,400       | 447,200       |
| mean | 12,817     | 52,214     | 231,020       | 321,637       |

### 3.4 유압호스의 시험 결과

유압호스의 가속 수명시험을 위하여 충격압력을 최고사용압력의 200%로 한 후 충격압력 시험을 한 결과 11,330 cycle 이상에서 Table 7과 같이 파열되었으며, 평균 12,817 cycle이었다. 168%로 2차 시험을 실시한 결과 16,500 cycle 이상에서 파열되었으며, 평균은 52,214 cycle이었다. 파열된 호스는 Fig. 8과 같다.

최고사용압력의 133%로 3차 시험을 실시한 결과 54,500 cycle에서 첫번째 호스가 파열되었으며, 이 때

의 평균 231,020 cycle이 되었으며, 주 고장이 호스와의 이음쇠 조립(호스 표면 grinding & swaging)부분으로 파악되어, 이 부분을 보완한 시료를 추가로 확보하여, 4차 시험을 실시한 결과 169,800 cycle에서 첫 번째 호스가 파열되었으며, 이 때의 평균 321,637 cycle로 향상되었다.

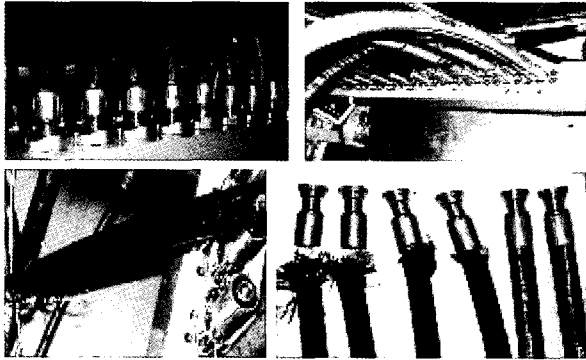


Fig. 8 Bursted hoses from impulse tests

### 3.5 유압호스의 시험 결과 분석

Fig. 9는 통계적 신뢰성분석 소프트웨어를 이용하여, 유압호스 고장데이터에 대한 대표적인 4가지 수명분포(와이블분포, 대수정규분포, 지수분포, 정규분포)의 적합도를 분석한 것으로서, 유압호스의 고장은 와이블분포에 가장 적합함을 확인할 수 있었다.

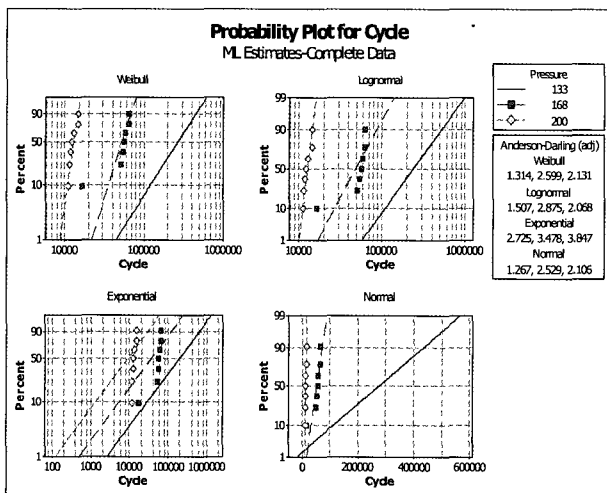


Fig. 9 Suitability analysis of life distribution

Fig. 10은 와이블분포의 확률밀도함수, 신뢰도함수, 고장률 함수를 도시한 것으로서, 호스의 고장데이터를 이용하여 와이블분포의 형상모수( $\beta$ )를 분석한 결과 충격압력이 133%일 때  $\beta=2.3904$ 이었고, 168%일 때  $\beta=4.8470$ , 200%일 때는  $\beta=10.4203$ 이었다.

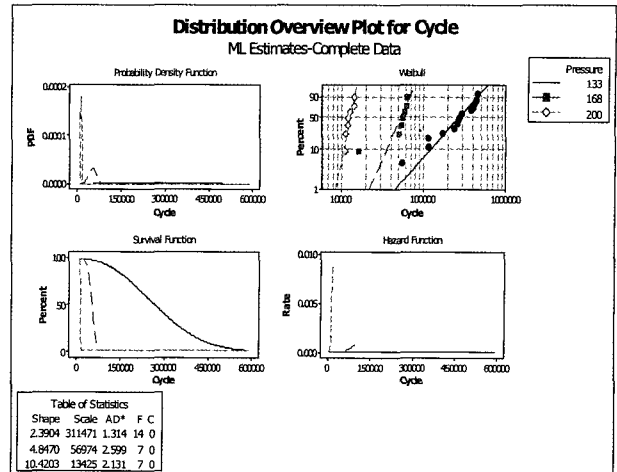


Fig. 10 Distribution overview plot for cycle (probability density function, Weibull, survival function, hazard function)

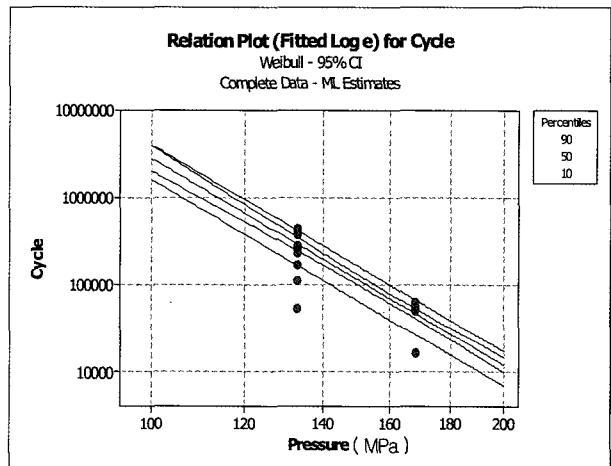


Fig. 11 Relation between pressure and life

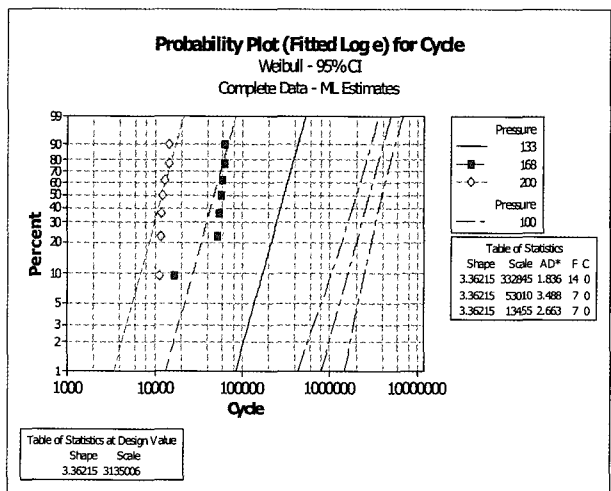


Fig. 12 Life prediction analysis for usage condition of 100%

Fig. 11은 수명-압력의 관계 분석이고, Fig. 12는 사용조건(100%)에서의 수명을 예측 분석한 것으로 사용조건일 때의 MTTF(Mean Time To Failure)의 추정값은 신뢰수준 95%에서  $2.0 \times 10^6$  cycle에서  $3.9 \times 10^6$  cycle이었고, 누적손상 이론의 결과인  $6.2 \times 10^6$  cycle에서는 거의 모든 호스가 파열됨을 확인할 수 있었다. 또한 유압호스 조립체의 최종 추정  $\beta$ 는 3.36215이었다<sup>10,11)</sup>.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 유압호스의 잠재적 고장을 해석하기 위한 방법으로 고장모드 및 메커니즘 분석, 고장심각도 및 발생빈도분석, 고장모드의 영향과 위험도 분석한 후, 2단계 품질기능 전개(2-stage QFD)를 수행하여, 시험항목의 우선순위를 정량적으로 결정하였다.

가속수명 시험 중 유압호스의 파손은 호스와 이음쇠를 결합한(swaging)부분에서 파열과 이탈(분리)이 모두 발생하여, 주 고장(failure)이 호스와 이음쇠 조립부분임을 확인하였다.

유압호스의 고장은 와이בל분포를 따르지만, 충격압력비율에 따라 형상모수  $\beta$ 는 2.3904, 4.8470, 10.4203 등으로 각각 다르게 나타났으며, 최종 추정  $\beta$ 는 3.36215이었다.

신뢰수준 95%에서 사용조건(100%)일 때의 MTTF의 추정값은  $2.0 \times 10^6$ 에서  $3.9 \times 10^6$  cycle이었고, 누적손상 이론의 결과인  $6.2 \times 10^6$  cycle에서는 거의 모든 호스가 파열됨을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

이 연구는 2003년도 산업자원부 부품소재 신뢰성 평가 기반구축사업의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) H. D. Berns and R. J. Lobmeyer, "Cumulative Damage Analysis for Hydraulic Hose", SAE Technical Paper Series, pp. 47~69, 1986.
- 2) Society of Automotive Engineers, "Hydraulic Hose SAE J517", SAE Standard REV, May 1997.
- 3) Society of Automotive Engineers, "Test and Test Procedure for SAE100R Series Hydraulic Hose and Hose Assemblies SAE J343", SAE Standard REV, Jul. 2001.
- 4) International Organization for Standardization, "Rubber and Plastics Hose Assemblies Flexing combined with Hydraulic Impulse Test half-omega test", International Standard ISO 8032, 1997.
- 5) C. W. Evans and T. R. Manley, "Factor Affecting the Impulse Testing of Hydraulic Hose", Polymer Testing, Vol. 6, pp. 135~149, 1986.
- 6) C. W. Evans, "Testing and Application of Wire-Reinforced Hydraulic Hose", Polymer Testing, Vol. 7, pp. 309~315, 1987.
- 7) D. Kececioglu, "Reliability Engineering Handbook", Handbook, Vol. 2, pp. 473~503, 1991.
- 8) 이치우 외 3인, "신뢰성 공학", 원창출판사, pp. 58~64, 1993.
- 9) 김윤광 외 13인, "신뢰성용어 해설서", 산업자원부 기술표준원, pp. 46~53, 2003.
- 10) 서순근, "MINITAB 신뢰성 분석", 이레테크, pp. 219~282, 2002.
- 11) J. W. Evans and J. Y. Evans, "Product Integrity and Reliability In Design", Springer, pp. 288~337, 2001.