

유압시스템 구성품의 수명시험을 위한 무고장 시험시간의 산출 Determination of No-Failure Test Times for the Life Test of Hydraulic System Components

이성래 · 김형의
S. R. Lee and H. E. Kim

Key Words : No-Failure Test Time(무고장시험시간), Life Test(수명시험), Reliability(신뢰성), Hydraulic System Component(유압시스템 구성품)

Abstract : It is very important for the manufacturers to predict the life of hydraulic system components according to the results of life tests. Since it takes too much time to test the hydraulic system components until failure, the no-failure test method is applied for the life test of them. If the shape parameter of Weibull distribution, the number of samples, the confidence level, and the assurance life are given, the no-failure test times of hydraulic system components can be calculated by given equations. Here, the procedures to obtain the no-failure test times of the hydraulic system components such as hydraulic motors and pumps, hydraulic cylinders, hydraulic valves, hydraulic accumulators, hydraulic hoses, and hydraulic filters are described briefly.

기호 설명

<p>B_{10} 수명 : 아이템의 누적고장확률이 10%가 되는 시점. 또는 아이템의 90% 이상이 B_{10} 수명시간 이상 고장없이 사용 가능함.</p> <p>B_{100p} 수명 : 아이템의 누적고장확률이 100p%가 되는 시점.</p> <p>C_L : 신뢰수준</p> <p>$f(t)$: 수명밀도함수, 고장밀도함수, 고장확률 밀도함수</p> <p>$MTBF$: 수리가능 제품의 평균 고장간격 시간</p> <p>$MTTF$: 수리불가 제품의 평균수명</p> <p>n : 샘플수</p> <p>p : percentile 지표</p> <p>t_{nftt} : 무고장 시험시간</p> <p>t_p : 아이템의 누적고장확률이 100p %가 되는 시점.</p> <p>β : 와이블 분포의 형상모수. 기계류부품인 경우 $\beta = 1.0 \sim 3.0$</p>	<p>Γ : 감마함수</p> <p>θ : 와이블 분포의 척도모수.</p> <p>avg. : average</p> <p>equi. : equivalent</p> <p>acc. : accelerated</p>
--	--

1. 서 론

신뢰성이란 어떤 부품, 구성품, 제품 등이 주어진 사용조건이나 환경조건하에서 고장 없이 일정기간 동안 최초의 품질 및 성능을 유지하는 특성을 말한다. 생산자는 제품의 신뢰성을 향상시키기 위해 끊임 없이 노력하며 주기적으로 제품에 대한 신뢰성을 수치적으로 파악하기 위해 신뢰성시험을 실시한다.

신뢰성시험 중에는 성능시험, 환경시험, 수명시험 등이 있으며 실질적으로 부품, 구성품, 제품 등의 신뢰성을 결정하는 시험은 수명시험이다. 수명시험 전, 수명시험기간의 도중, 수명시험 후에 성능시험을 실시하여 각각 평가기준을 만족해야 한다. 수명시험에서 부품, 구성품, 제품 등이 고장날 때까지 시험하는 것은 시험시간이 너무 오래 걸리므로 무고장 시험방법을 주로 사용하며 무고장 시험방법은 어떤 일정시간까지 시험하여 고장이 하나도 없으면 제품이 신뢰성 요구조건을 만족하는 것으로 판정하는 시험방법

접수일 : 2006년 7월 14일
이성래(책임저자) : 건양대학교 기계공학과
E-mail : srlee@konyang.ac.kr, Tel : 041-730-5191
김형의 : 한국기계연구원 기계류부품 신뢰성평가센터

이다.

본 논문은 한국기계연구원의 기계류부품 신뢰성평가센터에서 작성하고 기술표준원에서 확정한 유압시스템 구성품에 대한 신뢰성 평가기준¹⁻¹⁹⁾을 참고하여 유압펌프 및 유압모터 유압실린더, 유압밸브, 축압기, 유압호스, 유압필터의 수명시험에서 무고장 시험시간을 산출하는 과정을 기술하였다.

2. 무고장 시험시간

2.1 무고장 시험시간의 계산식²⁰⁾

제품개발이 끝나거나 제품을 수락하는 단계에서 제품의 신뢰성 인증 또는 입증에 하기 위한 판정기준을 다음과 같이 표현한다.

“ []%의 신뢰수준으로 B_{100p} 수명(또는 $MTTF$)이 []시간 이상임을 입증하기 위해서는 []개의 sample로서 []시간 동안 시험하여 고장이 하나도 없어야 한다.”

여기서 무고장 시험시간의 계산식을 구하기 위해서는 먼저 제품의 수명시간분포를 알아야 하며 기계류부품은 Weibull 분포를 따른다. 와이블 분포에서 형상모수 β 를 알고 있다고 가정하면 무고장 시험시간 계산식은 다음과 같다.

1) 보증수명이 $MTTF$ 인 경우

$$t_{nftt} = \frac{MTTF}{\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})} \cdot \left[-\frac{\ln(1 - C_L)}{n} \right]^{1/\beta} \quad (1)$$

2) 보증수명이 B_{100p} 수명인 경우

$$t_{nftt} = B_{100p} \cdot \left[\frac{\ln(1 - C_L)}{n \cdot \ln(1 - p)} \right]^{1/\beta} \quad (2)$$

2.2 β 의 결정

일반적으로 유압 구성품에 대한 형태모수 β 값은 명확히 알려져 있지 않다. 유압구성품의 고장유형은 결국 기계류 구성품의 고장유형에 속하므로 참고문헌²¹⁾에 나타난 표를 참고하여 유압 구성품에 대한 형태모수 β 값의 범위를 추측할 수 있다.

3. 유압시스템 구성품의 무고장 시험시간

3.1 유압펌프

유압펌프의 수명시험은 유압펌프의 정해진 속도에서 부하압력을 펄스 형태로 가해주는 충격연속의 형

태로 시험이 행해진다.

Table 1은 상용차용 파워스티어링 오일펌프, 농기계용 기어펌프, 지게차용 기어펌프, 산업용 초고압 펌프의 고장유형, β 값, 샘플수, 신뢰수준, 보증수명 및 무고장 시험시간을 나타낸다. Table 1에 나타난 펌프의 고장유형은 모두 마모이며 이 경우 표²¹⁾를 참고하면 β 값은 3.0이다. 펌프의 무고장 시험시간은 Table 1에 나타난 값을 식 (2)에 대입하여 다음과 같이 계산된다.

1) 상용차용 파워스티어링 오일펌프

$$1500\text{시간} \cdot \left[\frac{\ln(1 - 0.7)}{8 \cdot \ln(1 - 0.1)} \right]^{1/3.0} = 1700\text{시간}$$

2) 농기계용 기어펌프

$$1900\text{시간} \cdot \left[\frac{\ln(1 - 0.8)}{10 \cdot \ln(1 - 0.1)} \right]^{1/3.0} = 2188\text{시간}$$

3) 지게차용 기어펌프

$$10000\text{시간} \cdot \left[\frac{\ln(1 - 0.8)}{5 \cdot \ln(1 - 0.1)} \right]^{1/3.0} = 14510\text{시간}$$

4) 산업용 초고압펌프

$$600\text{시간} \cdot \left[\frac{\ln(1 - 0.9)}{10 \cdot \ln(1 - 0.1)} \right]^{1/3.0} = 800\text{시간}$$

Table 1 No-failure test times and warranted life times of hydraulic pumps

component reliability item	Power Steering Oil Pumps for Commercial Vehicle ¹⁾	Gear Pumps for Agricultural Machinery ²⁾	Gear Pump for Fork Lift ³⁾	Industrial High Pressure Pump ⁴⁾
failure mode	wear	wear	wear	wear
β	3.0	3.0	3.0	3.0
number of samples	8	10	5	10
confidence level	70%	80%	80%	90%
assurance life	B_{10} life 1500 hr	B_{10} life 1900 hr : avg. 5 yr equi. life	B_{10} life 10000 hr	B_{10} life 600 hr
no-failure test time	1700 hr	2188 hr : acc. test 1000 hr	14510hr : acc. test 1100 hr	800 hr

3.2 유압모터

유압모터의 수명시험은 유압모터의 회전속도와 부하압력을 여러 단계로 변화시키면서 정해진 시간동안 실시한다.

Table 2는 굴삭기주행용 사판식액셀피스톤 유압모터와 관성부하제어용 선회모터의 고장유형, β 값, 샘플수, 신뢰수준, 보증수명 및 무고장 시험시간을 나타낸다. Table 2에 나타난 모터의 고장유형은 모두 마모와 누설이며 이 경우 표²¹⁾를 참고하면 마모인 경우 β 값은 3.0 이며 상대운동 중의 누설인 경우 β 값은 1.5 이다. 두가지 사항을 고려하여 모터에 대한 β 값은 2.0으로 선정하였다.

유압모터의 무고장 시험시간은 Table 2에 나타난 값을 식 (1)과 식(2)에 대입하여 다음과 같이 계산된다.

1) 굴삭기주행용 사판식액셀피스톤 유압모터

$$\frac{1408\text{시간}}{\Gamma(1 + \frac{1}{2.0})} \cdot \left[-\frac{\ln(1-0.7)}{2} \right]^{1/2.0} = 1233\text{시간}$$

2) 관성부하제어용 선회모터

$$4000\text{시간} \cdot \left[\frac{\ln(1-0.8)}{2 \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{1/2.0} = 11055\text{시간}$$

Table 2 No-failure test times and warranted life times of hydraulic motors

component reliability item	Swash Plate Type Axial Piston Hydraulic Motors for Track Drive Unit of Excavator ⁵⁾	Swing Motor for Inertia Control ⁶⁾
failure mode	piston & shoe: leakage, wear	piston & shoe: leakage, wear
β	2.0	2.0
number of samples	2	2
confidence level	70%	80%
assurance life	MTBF life 1408 hr	B_{10} life 4000 hr
no-failure test time	1233 hr	11055 hr : acc. test 600 hr

3.3 유압실린더

유압실린더의 수명시험은 유압실린더에 부하를 걸고 즉 유압실린더 내에 부하압력이 걸린 상태에서 서왕복운동을 실시한다.

Table 3은 배수갑문용 대형유압실린더, 항공기 랜딩기어용 액추에이터의 고장유형, β 값, 샘플수, 신뢰수준, 보증수명 및 무고장 시험시간을 나타낸다. Table 3에 나타난 고장유형은 모두 실의 마모와 파손이며 β 값은 2.0으로 선정하였다. 유압실린더의 무고장 시험시간은 Table 3에 나타난 값을 식 (1)과 식 (2)에 대입하여 다음과 같이 계산된다.

1) 배수갑문용 대형유압실린더

$$\frac{288\text{km}}{\Gamma(1 + \frac{1}{2.0})} \cdot \left[-\frac{\ln(1-0.9)}{2} \right]^{1/2.0} = 349\text{km}$$

2) 항공기 랜딩기어용 액추에이터

$$30000\text{회} \cdot \left[\frac{\ln(1-0.95)}{2 \cdot \ln(1-0.001)} \right]^{1/2.0} = 1.16 \times 10^6\text{회}$$

Table 3 No-failure test times and warranted life times of hydraulic cylinders

component reliability item	Hydraulic Cylinder for Sluice Gate ⁷⁾	Hydraulic Actuator for Aircraft Landing Gear ⁸⁾
failure mode	piston seal, rod seal: wear, rupture	piston seal, rod seal: wear, rupture
β	2.0	2.0
number of samples	2	2
confidence level	90%	95%
assurance life	MTBF life 288km	$B_{0.1}$ life 30,000 cycles : avg. 20yr equivalent life
no-failure test time	349 km : acc. test 50km	1.16×10^6 cycles : acc. test 0.11×10^6 cycles

3.4 유압밸브

방향제어밸브의 수명시험은 방향제어밸브에 최대압력과 최대유량을 인가하고 밸브를 절환작동시키며 서보밸브의 수명시험은 서보밸브에 입력신호의 진폭, 파형, 주파수를 여러 단계로 변화시키고 작동유온도 및 오염도를 변화시키면서 서보밸브를 작동시킨다.

Table 4는 방향제어밸브, 노즐-플래퍼형 유량제어 서보밸브, 직구동형 유량제어 서보밸브의 고장유형, β 값, 샘플수, 신뢰수준, 보증수명 및 무고장 시험시간을 나타낸다. Table 4에 나타난 고장유형은 방향제어밸브인 경우 스플, 슬리브의 마모, 손상이며 β 값은

1.1로 선정하였고 서보밸브인 경우 주제어스풀의 마모와 누설이며 β 값은 1.4로 선정하였다.

방향제어밸브 및 서보밸브의 무고장 시험시간은 Table 4에 나타난 값을 식 (2)에 대입하여 다음과 같이 계산된다.

1) 유압방향제어밸브

$$1.0 \times 10^6 \text{회} \cdot \left[\frac{\ln(1-0.7)}{10 \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{1/1.1} = 1.13 \times 10^6 \text{회}$$

2) 노즐-플래퍼형 유량제어 서보밸브와 직구동형 유량제어 서보밸브

$$2.0 \times 10^6 \text{회} \cdot \left[\frac{\ln(1-0.8)}{3 \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{1/1.4} = 6.4 \times 10^6 \text{회}$$

산업용초고압릴리프밸브의 수명시험은 시험대상밸브 입구측에 최대압력을 1초간 가하고 바로 압력을 해제하여 1초간 유지하는 것을 반복한다. 파워스티어링용 비례릴리프밸브는 5초 주기로 삼각파 형태의 제어신호를 0에서 100% 범위로 밸브에 인가한다. 비례감압밸브는 최대제어압력신호의 50%를 중심으로 5Hz, $\pm 25\%$ 진폭의 정현파 입력신호를 인가한다.

Table 5는 유압릴리프밸브, 산업용초고압릴리프밸브, 파워스티어링용 비례릴리프밸브, 비례감압밸브의 고장유형, β 값, 샘플수, 신뢰수준, 보증수명 및 무고장 시험시간을 나타낸다.

Table 5에 나타난 고장유형은 유압릴리프밸브인 경우 포켓의 마모, 손상, 소착이며 β 값은 1.1로 선정하였고 산업용초고압릴리프밸브인 경우 포켓의 마모, 손상, 소착이며 β 값은 1.3으로 선정하였다. 파워스티어링용 비례릴리프밸브와 비례감압밸브인 경우 스푼 소착, 플런저고착이며 β 값은 1.4로 선정하였다. 압력제어밸브의 무고장 시험시간은 Table 5에 나타난 값을 식 (2)에 대입하여 다음과 같이 계산된다.

1) 유압릴리프밸브

$$1.0 \times 10^6 \text{회} \cdot \left[\frac{\ln(1-0.7)}{10 \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{1/1.1} = 1.13 \times 10^6 \text{회}$$

2) 산업용 초고압 릴리프밸브

$$1.0 \times 10^6 \text{회} \cdot \left[\frac{\ln(1-0.8)}{10 \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{1/1.3} = 1.39 \times 10^6 \text{회}$$

3) 파워스티어링용 비례릴리프밸브

$$4000 \text{회} \cdot \left[\frac{\ln(1-0.8)}{10 \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{1/1.4} = 5414 \text{회}$$

4) 비례감압밸브

$$3.0 \times 10^6 \text{회} \cdot \left[\frac{\ln(1-0.9)}{10 \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{1/1.4} = 5.24 \times 10^6 \text{회}$$

Table 4 No-failure test times and warranted life times of directional control valves and servovalves

component reliability item	Hydraulic Directional Control Valves ⁹⁾	Nozzle- Flapper Type Electro- Hydraulic Servo Valves ¹⁰⁾	Direct Drive Type Electro- Hydraulic Servo Valves ¹¹⁾
failure mode	spool, sleeve: wear, damage	main control spool: wear, leakage	main control spool: wear, leakage
β	1.1	1.4	1.4
number of samples	10	3	3
confidence level	70%	80%	80%
assurance life	B_{10} life 1×10^6 cycles	B_{10} life 2×10^6 cycles	B_{10} life 2×10^6 cycles
no-failure test time	1.13×10^6 cycles	6.4×10^6 cycles	6.4×10^6 cycles

Table 5 No-failure test times and warranted life times of relief valves and pressure reducing valve

compo- nent reliability item	Hydraulic Relief Valve ¹²⁾	Industrial High Pressure Relief Valve ¹³⁾	Electro- Hydraulic Propor- tional Pressure Relief Valves for Power Steering ¹⁴⁾	Electro- Hydraulic Proportional Pressure Reducing Valves ¹⁵⁾
failure mode	poppet wear, damage, seizure	poppet wear, damage, seizure	spool seizure, plunger seizure	spool seizure, plunger seizure
β	1.1	1.3	1.4	1.4
number of samples	10	10	10	10
confidence level	70%	80%	80%	90%
assurance life	B_{10} life 1×10^6 cycles	B_{10} life 1×10^6 cycles	B_{10} life 4000 cycles : avg.10yr equi. life	B_{10} life 3×10^6 cycles : avg. 5yr equi. life
no-failure test time	1.13×10^6 cycles	1.39×10^6 cycles	5414 cycles :acc. test 800 cycles	5.24×10^6 cycles

3.5 축압기

축압기의 수명시험은 축압기에 최고사용압력의 10%에서 최고사용압력까지 주기적으로 압력을 인가한다.

Table 6은 축압기의 고장유형, β 값, 샘플수, 신뢰수준, 보증수명 및 무고장 시험시간을 나타낸다. 축압기의 고장유형은 블래더의 파손이며 β 값은 1.4로 선정하였다. 축압기의 무고장 시험시간은 Table 6에 나타난 값을 식 (2)에 대입하여 다음과 같이 계산된다.

$$1.0 \times 10^6 \text{회} \cdot \left[\frac{\ln(1-0.9)}{6 \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{1/1.4} = 2.52 \times 10^6 \text{회}$$

Table 6 No-failure test times and warranted life times of accumulator

component reliability item	Oil Hydraulic System - Bladder Type Accumulator ¹⁶⁾
failure mode	bladder rupture
β	1.4
number of samples	6
confidence level	90%
assurance life	B_{10} life 1×10^6 cycles
no-failure test time	2.52×10^6 cycles: acc. test 0.24×10^6 cycles

3.6 유압호스

유압호스의 수명시험은 유압호스에 최고사용압력보다 큰 충격압력을 반복적으로 인가한다.

Table 7은 건설중장비용 유압호스조립체 플라스틱 호스 조립체의 고장유형, β 값, 샘플수, 신뢰수준, 보증수명 및 무고장 시험시간을 나타낸다. 호스조립체의 고장유형은 피로균열이며 건설중장비용 유압호스조립체의 β 값은 1.4로 선정하였고 플라스틱 호스조립체의 β 값은 1.1로 선정하였다. 호스조립체의 무고장 시험시간은 Table 7에 나타난 값을 식 (2)에 대입하여 다음과 같이 계산된다.

1) 건설중장비용 유압호스조립체

$$2.5 \times 10^6 \text{회} \cdot \left[\frac{\ln(1-0.95)}{4 \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{1/1.4} = 1.0 \times 10^7 \text{회}$$

2) 플라스틱 호스 조립체

$$1.0 \times 10^6 \text{회} \cdot \left[\frac{\ln(1-0.95)}{20 \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{1/1.1} = 1.38 \times 10^6 \text{회}$$

3.7 유압필터

유압필터의 수명시험은 필터 엘리먼트가 허용하는 최종차압에 도달할 때까지 오염물을 주입한 후 유압필터에 0에서 정격유량 이하로 유량 사이클을 인가한다.

Table 7 No-failure test times and warranted life times of hydraulic hoses

component reliability item	Hydraulic Hose Assemblies for Construction Machinery ¹⁷⁾	Plastics Hose Assemblies ¹⁸⁾
failure mode	fatigue crack	fatigue crack, over pressure rupture
β	1.4	1.1
number of samples	4	20
confidence level	95%	95%
assurance life	B_{10} life 2.5×10^6 cycles : avg. 10 yr equi. life	B_{10} life 1×10^6 cycles : avg. 3 yr equi. life
no-failure test time	10.15×10^6 cycles : acc. test 0.35×10^6 cycles	1.38×10^6 cycles : acc. test 0.15×10^6 cycles

Table 8 No-failure test time and warranted life time of hydraulic filter

component reliability item	Filter for Hydraulic Circulation ¹⁹⁾
failure mode	filter media crack, fatigue fracture
β	1.1
number of samples	3
confidence level	90%
assurance life	B_{10} life: 10,000 cycles
no-failure test time	60,000 cycles

Table 8은 유압유 순환용 필터의 고장유형, β 값, 샘플수, 신뢰수준, 보증수명 및 무고장 시험시간을 나타낸다. 필터의 고장유형은 필터매질의 균열, 피로 파괴이며 β 값은 1.1로 선정하였다. 유압필터의 무고장 시험시간은 Table 8에 나타난 값을 식 (2)에 대입하여 다음과 같이 계산된다.

$$10000 \text{회} \cdot \left[\frac{\ln(1-0.9)}{3 \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{1/1.1} = 60000 \text{회}$$

4. 결 론

신뢰성 평가시험은 크게 성능시험, 안전성시험, 내환경성시험, 수명시험으로 분류되는데 그 중에서 수명시험은 제품의 수명을 평가하는데 반드시 필요한 시험이다.

한국기계연구원의 기계류부품 신뢰성평가센터에서 작성하고 기술표준원에서 확정한 유압시스템 구성품에 대한 신뢰성 평가기준을 참고하여 유압시스템의 핵심적인 구성품인 유압펌프 및 유압모터 유압실린더, 유압서보밸브, 축압기, 유압호스, 유압필터의 여러 제품에 대해 고장유형, β 값, 샘플수, 신뢰수준, 보증수명이 주어진 경우 무고장 시험시간을 계산하는 과정을 기술하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) RS B 0010:2001, "Power Steering Oil Pumps for Commercial Vehicle", Korean Agency for Technology and Standards.
- 2) RS B 0063:2004, "Gear Pumps for Agricultural Machinery", Korean Agency for Technology and Standards.
- 3) RS B 0064:2004, "Gear Pump for Fork Lift", Korean Agency for Technology and Standards.
- 4) RS B 0035:2003, "Industrial High Pressure Pump", Korean Agency for Technology and Standards.
- 5) RS B 0011, "Swash Plate Type Axial Piston Hydraulic Motors for Track Drive Unit of Excavator", Korean Agency for Technology and Standards.
- 6) RS B 0066:2004, "Swing Motor for Inertia Control", Korean Agency for Technology and Standards.
- 7) RS B 0001, "Hydraulic Cylinder for Sluice Gate", Korean Agency for Technology and Standards.
- 8) RS B 0053, "Hydraulic Actuator for Aircraft Landing Gear", Korean Agency for Technology and Standards.
- 9) RS B 0005:2001, "Hydraulic Directional Control Valves", Korean Agency for Technology and Standards.
- 10) RS B 0039:2003, "Nozzle-Flapper Type Electro-Hydraulic Servo Valves", Flow Control, Korean Agency for Technology and Standards..
- 11) RS B 0040:2003, "Direct Drive Type Electro-Hydraulic Servo Valves", Flow Control, Korean Agency for Technology and Standards.
- 12) RS B 0004:2001, "Hydraulic Relief Valve", Korean Agency for Technology and Standards.
- 13) RS B 0036:2003, "Industrial High Pressure Relief Valve", Korean Agency for Technology and Standards.
- 14) RS B 0021, "Electro-Hydraulic Proportional Pressure Relief Valves for Power Steering", Korean Agency for Technology and Standards.
- 15) RS B 0058, "Electro-Hydraulic Proportional Pressure Reducing Valves", Korean Agency for Technology and Standards.
- 16) RS B 0041:2003, "Oil Hydraulic System - Bladder Type Accumulator", Korean Agency for Technology and Standards.
- 17) RS B 0023:2002, "Hydraulic Hose Assemblies for Construction Machinery", Korean Agency for Technology and Standards.
- 18) RS B 0037:2003, "Plastics Hose Assemblies", Korean Agency for Technology and Standards.
- 19) RS B 0046:2003, "Filter for Hydraulic Circulation", Korean Agency for Technology and Standards.
- 20) C. Kim, "What is MTBF?", Imun Publishing Co., pp. 157~162, 2003.
- 21) H. P. Bloch and F. K. Geitner, "Practical Machinery Management for Process Plants, Vol. 2: Machinery Failure Analysis and Troubleshooting, 3rd Edition", Gulf Publishing Co, Houston Texas, pp. 490~493, 1994.