

<論 文>

태양열 난방 시설 신뢰도 평가에 관한 연구

장 광 규*·전 문 헌**

(1982년 8월 27일 접수)

Analyses of Reliability for a Typical Solar Heating System

K. K. Chang and M. H. Chun

Abstract

In the present work a time-dependent reliability model for a typical solar domestic hot water and heating system is developed using the method of Fault Tree Analysis and existing mathematical techniques. The reference system used in this analysis is a typical solar heating system. The system reliability structure has been identified with the aid of Fault Tree methods. In addition, a simulation of the solar system reliability has been performed employing the Monte Carlo method. In the computer simulation, failure rate data such as WASH-1400, MIL-HDBK-217B, and Green and Bourne are used as input data. These results show that the developed reliability model is capable of expressing the primary failure phenomena of the solar heating and domestic hot water system.

기 호 설 명

- a : 하나의 상수
- c : 하나의 상수
- F : 대수 정규 분포를 갖는 누적분포 함수
- i : 부품번호
- k : 부품번호
- m : 계수, 또는 수
- n : 부품번호, 또는 부품의 총수
- N : 시스템 수명의 표본의 크기, 또는 모의 시험을 시행한 횟수
- r : 부품의 신뢰도, 또는 신뢰도 함수
- R : 시스템의 신뢰도, 또는 신뢰도 함수
- t : 시간, 또는 부품(또는 시스템)의 수명
- T : 대수 수명
- X : 난수
- λ : 부품(또는 시스템)의 고장율

- μ : 대수 모집단 평균
- σ : 대수 모집단 표준 편차
- 첨 자
- 1 : 부품번호
- 2 : 부품번호
- i : 부품번호, 또는 반복횟수
- k : 부품번호
- n : 부품번호
- s : 시스템

1. 서 론

태양열을 이용한 난방 및 온수 시스템이 보다 널리 보급되고 이용되려면 먼저 태양열 이용 시스템의 부품 가격 및 시설 투자비의 절감은 물론 태양열 에너지 시스템의 신뢰도와 내구성도 급격히 향상 시켜야 한다.

태양 에너지 계통의 신뢰도에 대한 연구는 최근 몇 사람^{1,2,3)}에 의해 수행된 바 있다. 한 연구에 의하면 “가정용 태양열 온수 시스템”이 “재래식 가정용 시스

* 정회원, 한국에너지연구소
** 정회원, 한국과학기술원 핵공학과

템”보다 신뢰도가 낮은 것을 보여주고 있다⁴⁾.

경제성과 신뢰도 사이에 어떤 균형점을 찾기 위해서는 “신뢰도”도 어떤 측정할 수 있는 양으로 정의되어야 하겠다⁵⁾. 다시 말하면, 고장으로부터 야기되는 모든 위험과 손실을 신뢰도의 개선을 통하여 얻게 되는 이익과 직접 비교할 수 있도록 과학적이고 수량적인 어떤 신뢰도 평가 방법이 요구된다.

본 연구의 주목적은 첫째, 전형적 가정용 태양열 난방 및 온수 시스템에 대하여 신뢰도모델(time-dependent reliability model)을 개발하고 둘째, 본 연구에서 개발한 수학적 신뢰도 모델과 몬테카를로(Monte Carlo) 방법으로 모의 실험(simulation)을 하여 얻은 태양열 난방 및 온수시스템에 대한 신뢰도 해석 결과를 제시하는 데에 있다.

2. 신뢰도 모델(Reliability Model)

2.1. 모델 시스템(Reference System)

신뢰도 모델을 연구하기 위하여, 본 연구에서 선택한 “태양열 난방 및 온수 시스템”은 Fig. 1에서 보여주고 있는 바와 같이 가장 전형적인 태양열 난방 및 온수 시스템이며 (1) 기계 시스템과 (2) 전자 시스템으로 구분 하였다. 한편, 기계 시스템은 집열기 시스템

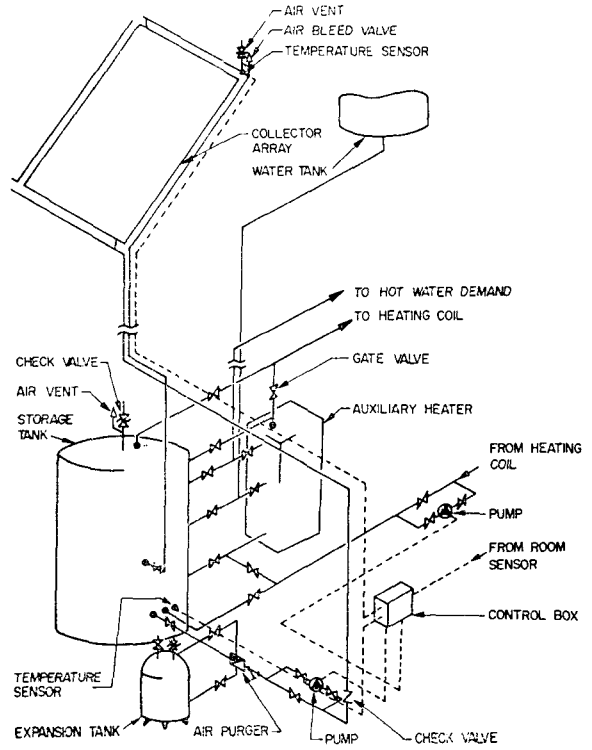


Fig. 1 Schematic diagram of the reference system

Table 1 Classification of mechanical system

Subsystem	Component	Identification number	Total number of components
Collector system	Collector	01	12
	Pressure relief valve	04	1
	Air bleed valve	05	1
	Pipe joint	11	24
Heat transport system	Check valve	02	1
	Gate valve	03	13
	Pressure relief valve	04	1
	Air bleed valve	05	1
	Air purger	06	1
	Strainer	07	1
	Expansion tank	08	1
	Pipe (length in meter)	10	48
	Pipe joint	11	28
	Collector pump	12	1
Heat storage system	Storage tank	09	1
	Pressure relief valve	04	1
	Air bleed valve	05	1

Table 2 Classification of electronic system

Subsystem	Component	Identification number	Total number of components
Power supply circuit	Zener diode (voltage regulator)	20	1
	Fixed composition resistor (C)	13	1
	Capacitor	15	1
Driver circuit	Transistor	17	2
	Thyristor (S.C.R.)	18	1
	Relay	22	1
	General diode	19	2
Differential amplifier circuit	Integrated circuit	16	1
	Capacitor	15	2
D.C. Amplifier circuit	Zener diode (voltage reference)	21	1
	Fixed composition resistor (C)	13	5
	Capacitor	15	5
Bridge circuit	Fixed composition resistor (C)	13	2
	Fixed composition resistor (Mn)	13	2
	Variable wire-wound resistor	14	1
	Sensor	23	1

(collector system), 급열 시스템(heat transport system) 및 축열 시스템(heat storage system) 등 세개의 하부 시스템으로 구분 하였다. 기계 시스템의 하부 시스템과 그 속에 들어 있는 주요부품 이름 및 전체 부품의 수등은 Table 1에 있는 바와 같다. 그리고, 전자 시스템은 다섯개의 하부시스템으로 구분 하였는데 그 주요 내용은 Table 2와 같다.

2.2. 고장 분석 및 Fault Tree 구성

Fault tree 분석이란 부품의 고장 형태(component failure mode)와 그의 원인을 찾기 위해 시스템(또는 부품)을 검사하는 하나의 조직적인 방법이라고 할 수 있다⁶⁾.

Fault tree 분석절차는 시스템이나 부품의 고장 상태 또는 바라지 않는 사고가 어떤 것인가를 먼저 정의한 뒤에 시작한다. 본 연구의 목적을 위해 “하부 부품의 고장”이란 그 부품의 주어진 정상 기능을 수행할 수 없는 하부 부품의 상태라고 정의한다.

고장율을 평가하기 위해서 각 부품의 고장을 정의하여야 하는데, 시스템의 고장은 시스템이 제 기능을 발휘하지 못하게 되는 것이므로 시스템 각 부품의 올바른 기능을 정의하고, 이 올바른 기능이 불가능하게 되는 사건을 고장으로 간주할 수 있다. 이러한 고장의 정

의에 따른 현장 경험자료^{4,7)}를 토대로 Fig. 1과 같은 모델 시스템의 각 주요 부품의 고장 형태와 고장 원인을 분석하여 그 결과를 Table 3에 요약하여 놓았다.

고장을 좀 더 분석하여 보면 다음과 같이 구분할 수 있다.

(1) 부품내의 교유의 결함으로 말미암은 고장을 1차 고장으로 하고, (2) 부품이 시스템에 투입되어 운영되다가 설계치 이상의 부하를 만나 발생하는 것을 2차고장, 그리고, (3) 연결 부품의 고장으로 제기능을 발휘하지 못하게 되는 고장(예, 밸브가 막힘으로 인해 펌프에 물이 공급되지 않고 이로 말미암아 펌프가 송수를 못하게 되는 경우)을 종속 고장으로 분류할 수 있는데, 본 연구에서는 1차 및 2차 고장만을 부품의 고장으로 간주하여 분석 하였다. 종속 고장을 고장 분석의 대상에서 제외한 것은 한 부품의 고장이 다른 부품에 영향을 미치지 않는다는 가정을 암시하는 것으로 이는 각 부품의 고장 사건을 독립 사건으로 취급함을 의미하는 것이다. 즉, 본 연구의 고장 분석에서는 각 부품의 고장 현상을 서로 독립적인 사건이라고 가정하였다.

모델 시스템(reference system)에 대한 고장 분석 결과를 토대로 간략하게 한 fault tree를 작성 하였는데 그 결과는 Fig. 2에 제시한 바와 같다. 이 fault tree

Table 3 Component failure modes and causes

Component	Failure modes	Causes	
1. Collector: Absorber plate	Heat transfer	(1) Selective coating deteriorates: (molecular movement, temperature change, humidity, chemical change, crystallization, high temperature)	
	Rate decreases	(2) Buildup of deposits on inside of plate (3) Deterioration of plate, separation of tube from sheet	
	Cover glass	Breakage and moisture deposit	(1) Thermal shock (2) Damage due to storm, hail and wind (3) Human error (4) Leakage of heat transfer fluid
			Insulation
Collector box	Leaks	(1) Rust	
2. Check valve	Flow reversal failure to open	valve wear	
3. Gate valve	Plugging	Accumulation of dust; rust	
4. Pressure relief valve	Failure to open	Rust	
	Failure to close	Spring rupture	
5. Expansion tank	Leak	Rust, failure of welded-joint (due to thermal shock, vibration)	
6. Pipe	Plugging	Scale	
	Rupture	Shock	
7. Pipe joints	Leak	Poor fabrication; rust	
8. Collector pump	Won't start	Motor burned out; pump bearings seized; Air leak on suction side; cavitation (hot fluid)	
	Won't pump		
9. Storage tank	Loss of fluid	Tank leaks; leak elsewhere in system; Evaporation; Insulation failure; cold water added (malfunction of heat-exchanger loop); Evaporation	
10. Controller	Component failure	Environment (temperature, humidity) Shock (excessive current)	
	Soldered joints failure		

의 (Fig. 2) 원(circle) 안에 있는 숫자는 부품의 분류 번호(부품명과 부품분류 번호는 Table 1, 2에 열거하였다)를 나타내며 원 밑의 괄호 속에 있는 숫자는 모델 시스템에 들어 있는 그 부품의 전체수를 나타낸다.

이 fault tree를 통해 부품의 고장 형태는 물론 "AND"와 "OR"라고 하는 조합논리(combinatorial logic)를 통해서 시스템 전체의 고장을 초래할 할 모든 부품의 고장 사건을 나타내는 논리적 도표(logic diagram)를 얻을 수 있다는 점이다.

주요한 부품의 고장 확률은 그 부품의 fault tree 상에 나타난 각 원인에 대하여 그 발생 확률을 대입함으로써 구할 수 있다.

즉 fault tree 상의 "OR" 게이트(gate)일 경우는 각 확률(또는 신뢰도)을 서로 곱하고(πr_i), "AND" 게이트일 때에는 어느 event가 발생하여도 되므로 $1 - \pi$ 가 전체에 대한 확률(또는 신뢰도)을 나타내게 된다.

본 연구에서는 시스템의 고장을 초래할 모든 원인을

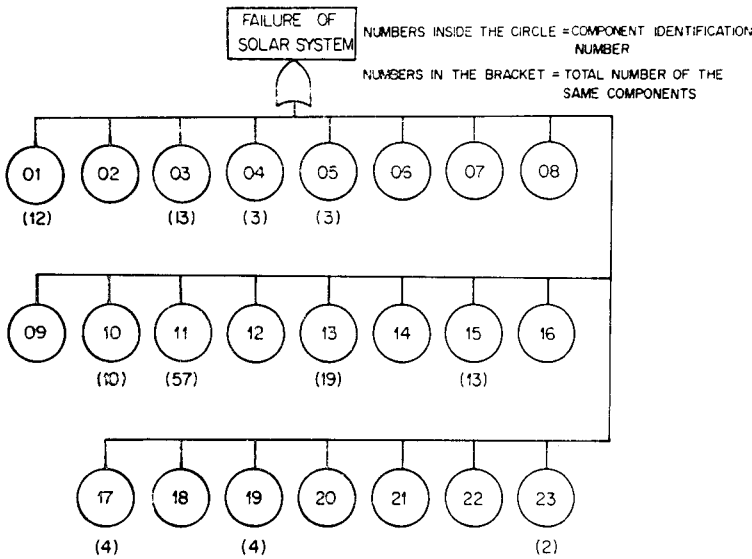


Fig. 2 Simplified fault tree for the reference solar system

전부 망라 하였다기 보다는 주요한 원인에 대하여서만 수량화하여 fault tree 분석을 하였다.

2.3. 수학적 신뢰도 모델

$i=1\sim k$ 의 부품들이 지수 분포의 고장 분포(exponential failure distribution)를 갖고, 나머지 $i=k+1\sim n$ 의 부품들이 대수 정규 분포의 고장 분포(log-normal failure distribution)를 가질 경우에 대한 수학적 신뢰도 모델(mathematical expression)을 다음과 같이 구할 수 있다.

만일 부품의 고장 분포가 지수 분포를 가지고 고장율이 상수라고 하면, 신뢰도 r_i 는 다음과 같이 시간의 함수로 표시할 수 있다.⁵⁾

$$r_i(t) = \exp(-\lambda_i t) \quad (1)$$

(1) 식에서 λ_i 는 부품의 고장율(component failure rate)이고 t 는 시간이다. 모든 부품의 고장 원인이 노후에 의한 것이기 보다는 우발적인 사건의 의한 것이 지배적이라고 가정하면 모든 부품의 순간 고장율은 시간에 따라 변하지 않는 고유의 고장율을 갖는다고 할 수 있다. 수명이 반영구적인 전자 부품과 가동 초기의 기계 부품의 경우에는 고장율을 상수로 취급하는 것이 합리적이라고 할 수 있다. 이런 경우 시스템의 신뢰도(system reliability) R_s 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_s = r_1 \cdot r_2 \cdot \dots \cdot r_k = \exp\left[-\left(\sum_{i=1}^k \lambda_i t\right)\right] \quad (2)$$

한편 고장 분포를 대수 정규 분포로 가정하면 그 신뢰도 함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.⁵⁾

$$r_i(t) = 1 - F_i(t) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{x_i} \exp\left[-\frac{(\ln x_i - \mu_i)^2}{(2\sigma_i^2)}\right] dx \quad (3)$$

윗 식에서 $F_i(t)$ 는 대수 정규 분포의 누적 분포 함수(cumulative distribution function of log-normal distribution)이고, μ 는 대수 모집단 평균(log population mean), σ 는 대수 모집단 표준 편차(log population standard deviation)이다.

만일 $i=1\sim k$ 의 부품들이 지수 분포의 고장분포를 가지고 나머지 $i=k+1\sim n$ 의 부품들이 대수 정규분포의 고장분포를 가지는 경우 그 시스템의 신뢰도는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$R_s(t) = \exp\left[-\left(\sum_{i=1}^k \lambda_i t\right)\right] r_{k+1} r_{k+2} \dots r_n \quad (4)$$

식 (4)에서 지수 함수는 식 (2)로부터 얻은 것이고, $r_{k+1}\sim r_n$ 은 식 (3)으로부터 얻을 수 있다.

3. 시스템 신뢰도 모델에 대한 모의 실험 (Simulation)

앞에서 수립한 각 신뢰도 모델(식 2, 3 및 4)에 대하여 몬테 카를로(Monte Carlo)의 방법을 써서 각 부품의 수명 분포가 가정한 것과 같은 분포를 갖도록 하는 일련의 우발 과정(stochastic process)을 수립하고, 이 과정에 따른 신뢰도 모형의 거동을 관찰 할 수 있다.

3.1. 몬테칼로(Monte Carlo) 모의 실험 절차

몬테칼로 모의 실험 절차는 다음과 같다.

(제 1 단계) : 다음과 같은 반복 관계(recursion relation)를 갖는 congruential method을 사용하여 가난수(pseudo-random number)를 발생 할 수 있다.^{8,9)}

$$x_{i+1} = ax_i + c \pmod{m}, \quad 0 \leq x_i \leq m \quad (5)$$

이 관계식은 $ax_i + c$ 의 합계를 m 으로 나눈 다음 그

나머지를 x_{i+1} 와 같게 한다는 것을 뜻한다. 식 (5)에서 x_i 는 i 번째 난수이고, m 은 가난수의 반복주기, a 는 0과 m 사이의 정수이고 c 는 상수이다.

(제 2 단계) : 이 단계에서는 가정한 지수 분포 또는 대수 정규 분포를 갖는 확률 변수를 추출한다. 먼저, 지수분포의 고장 분포를 갖는 부품 수명 t_i 는 주어진 x_i 에 대하여 다음의 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$t_i = -\frac{1}{\lambda} \ln x_i \quad (6)$$

한편 대수 정규 분포의 고장 분포를 갖는 부품 수명 t_i 는 다음과 같이 구할 수 있다. 만일 t_i 가 대수 정규 분포를 갖는다면 부품 i 의 대수 수명 (long-life time) T_i 는

$$T_i = \ln t_i \quad (7)$$

이며, T_i 는 정규 분포를 갖게 된다. 즉, 주어진 x_i 에 대하여 다음 관계식을 만족하는 T_i 를 시행 착오법을 사용하여 구할 수 있다¹⁰⁾.

$$x_i = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{T_i - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) \quad (8)$$

부품의 수명 t_i 는 식 (7)으로부터

$$t_i = e^{T_i} \quad (9)$$

가 되며, 따라서 t_i 를 구할 수 있다.

(제 3 단계) : 시스템의 수명 t_s 는 t_i 의 값중 최소값을 택한 것이다. 즉,

$$t_s = \min \{t_1, t_2, \dots, t_i\} \quad (10)$$

(제 4 단계) : 만일 원하는 시스템 수명의 표본(sample) 수가 N_s 라고 한다면, 위에 기술한 제 1 단계로부터 제 3 단계까지의 절차를 N_s 회만큼 반복하여, N_s 개의 시스템 수명 t_s 를 구한다.

(제 5 단계) : 끝으로 시스템의 신뢰도는 다음 식을 사용하여 구할 수 있다.

$$R(t) = \frac{N(t)}{N_s} \quad (11)$$

식 (11)에서 N_s 는 모의 실험 횟수이며 표본의 수

(sample size)와 같고, $N(t)$ 는 시스템 수명 t_s 가 t 보다 큰 것의 갯수이며 시간 t 까지 고장나지 않는 시스템의 수라고 할 수 있다.

3.2. 모의 실험(Simulation)

주요 부품의 신뢰도 향상이 전체 태양열 난방 및 온수 시스템의 신뢰도 향상에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 앞에서 기술한 몬테카를로 모의 실험 방법으로 여러 가지 경우에 대한 시스템의 신뢰도 변화를 추정 하였다.

Fig. 3은 4가지 경우에 대한 모의 실험 결과이다. 즉, (1) 주요 부품의 신뢰도 개선이 전혀 없을 때의 시스템의 신뢰도와 (2) 집열기의 고장율을 90% 감소시켰을 때와 (3) 온도 감지기(sensor)의 고장율을 90% 감소시켰을 때, 그리고, (4) 집열기와 온도 감지기의 고장율을 각각 90%씩 감소시켰을 때에 개선된 시스템의 신뢰도를 보여준다.

Fig. 3은 기계 부품의 고장 분포를 대수 정규 분포로 가정하고, 전자 부품의 고장 분포는 지수 분포로 가정하였을 경우에 얻은 결과이다.

대수 정규 분포를 갖는 부품의 고장율 (λ_i), 대수 모집단 평균 (μ) 및 대수 모집단 표준 편차(σ) 등은 참고 문헌 [10]의 자료로부터 산출한 것이다. 집열기의 고장율은 국내 집열기 제조 업체의 보수 기록을 기초로 해서 산출한 것이다. 주요 부품의 λ_i , μ 및 σ 값은 Table 4에 요약하여 놓았다.

Fig. 4는 모든 부품의 고장 분포를 지수 분포로 가정했을 때, 주요 부품의 신뢰도 개선이 전체 시스템 신뢰도에 미치는 영향을 조사한 것이다. 이 경우, 부품의 고장율 (λ_i)은 참고문헌 [5]로부터 얻은 것이다.

Fig. 5는 태양열 난방 및 온수 시스템의 신뢰도를 식 (2)를 사용해서 추정한 경우(즉 부품의 고장 분포를 지수 분포로 가정한 경우)와 식 (4)를 사용해서 추정한

Table 4 λ_i , μ and σ values of the main components

Component	Total number of components (n_i)	Ref. [5] 10^{-6} /hr		Ref. [6] 10^{-6} /hr		μ	σ
		λ_i	$n_i \lambda_i$	λ_i	$n_i \lambda_i$		
Collector	12	20.92*	241.08*	—	—	—	—
Pipe joint	57	0.5	28.5	3	171	9.90	3.22
Pump	1	27.0	27.0	11.33	11.33	10.59	1.51
Sensor	2	24.66*	48.12*	—	—	—	—

* Data obtained from the maintenance records of domestic manufacturers

경우(즉 고장 분포를 지수 및 대수 정규분포로 가정할 경우)를 비교한 것이다.

4. 결과 및 토의

Figs. 3, 4, 5로부터 다음과 같은 사실을 관찰할 수 있다. 즉 집열기, 온도 감지기, 펌프, 파이프 연결부 등 네가지 부품중 전체시스템의 신뢰도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 집열기이다. 그 주요 원인은 Table 4에서 볼 수 있는 바와 같이 주요 부품중 집열기의 $n_i \lambda_i$ (시스템에 포함되어 있는 부품의 총수 n_i 와 부품의 고

장률 λ_i 의 적)의 값이 가장 크기 때문이라고 할 수 있다.

집열기를 제외한 나머지 부품들이 전체 시스템의 신뢰도에 미치는 개별적인 영향은 거의 같으며 그리 크지 않으나, 이들 부품 모두의 신뢰도를 향상시켰을 때는 전체 시스템의 신뢰도 향상에 현저한 공헌을 하는 것을 알 수 있다. 특히, Fig. 5를 보면 지수 분포와 대수 정규 분포의 복합으로 된 신뢰도 모델(5식)은 지수 분포 신뢰도 모델(2식)보다 다소 높은 신뢰도 값을 준다는 사실을 알 수 있다.

5. 결론

지수 분포와 대수 정규 분포의 고장 분포를 가진 복합적 시스템 신뢰도 모델(time dependent system reliability model of combined exponential and log-normal failure distributions)을 유도하였다. 이 신뢰도 모델을 전형적 태양열 난방 및 온수 시스템의 신뢰도 분석에 사용하여 그 결과를 제시 하였다.

각 부품의 신뢰도 개선이 전체 시스템의 신뢰도 향상에 미치는 영향을 고려할 때 신뢰도를 개선해야 할 부품의 우선 순위는 집열기, 온도감지기, 파이프 연결부, 펌프의 순이라고 할 수 있으며, 그 중에도 특히, 태양열 집열기의 고장을 감소에 최우선을 두어야 하겠다.

본 연구에서 수립한 신뢰도 모델은 시스템의 초기 고장 특성을 설명 하는데에 합리적인 모델이라고 할 수 있으며, 하부 시스템(subsystem)이나 부품(component)이 두 가지 다른 형태의 고장분포를 갖는(즉 지수 분포의 고장 분포를 갖는 부품과 대수 정규 분포를 갖는 부품) 다른 엔지니어링 시스템(engineering system)의 신뢰도 분석에도 응용하도록 제의하는 바이다.

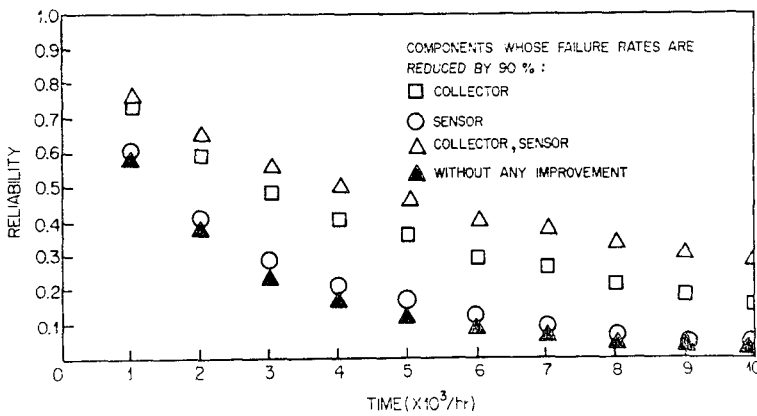


Fig. 3 Effect of improvement of main components on the solar system reliability when the failure distributions of mechanical components are log-normal whereas that of electronic components are exponential.

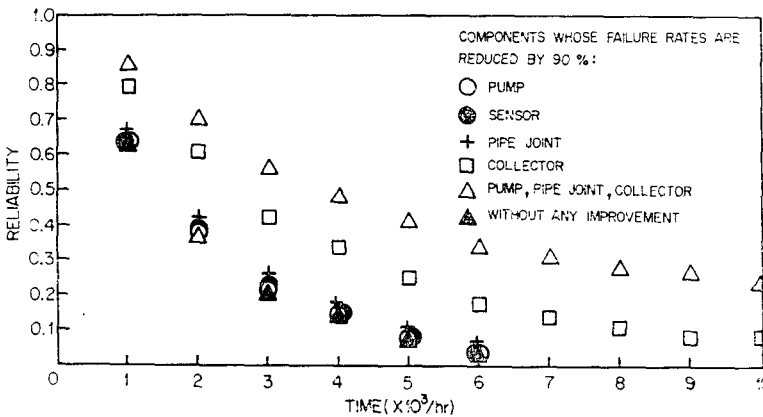


Fig. 4 Effect of improvement of main components on the solar system reliability when the failure distributions of all the components are exponential.

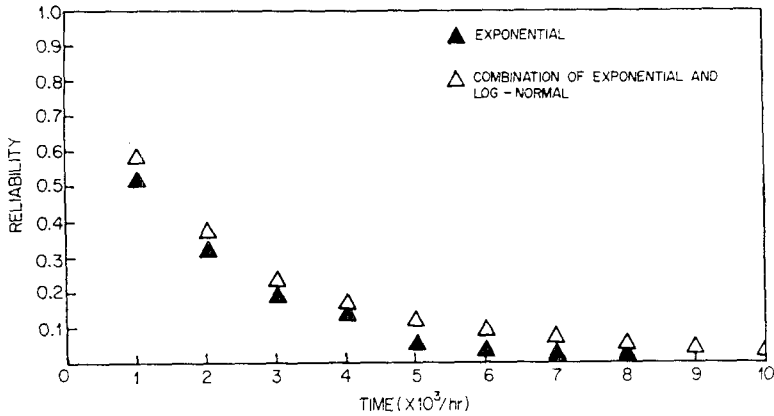


Fig. 5 Comparison of solar system reliability when the failure distributions are exponential and combination of exponential and log-normal

Reference

1. Streed, E.R., and Waksman, "The NBS Solar Collector Durability/Reliability Program," Internal Report, Center for Building Technology, National Bureau of Standards, 1978.
2. Chun, M.H., "Use of Event Trees in Solar Heating system Reliability Assesment," Report Prepared for NBS Research Program, 1978.
3. Chopra, P.S., and Wolosewicz, R.M., "Application of Reliability, Maintainability, and Availability Engineering to Solar Heating and Cooling Systems," IEEE Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium," 1980.
4. Chopra, P.S., "Why Do Solar System Fail?," Solar Engineering, Oct. 1980, pp.14-21.
5. Green, A.E., and Bourne, A.J., "Reliability Technology," Wiley-Interscience, 1972.
6. "Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants," WASH-1400(NUREG-75/014) Appendix II, 1975, pp.II-1.
7. "Review of Safety Standards for Solar Energy Systems," Final Report, Inter Technology/Solar Corporation, ITC/S Report No. 06078, 1978.
8. Schmidt, J.W., and Taylor, R.E., "Simulation and Analysis of Industrial Systems," Richard D. Irwin, Inc., 1970, pp.226-227.
9. Hemmerle, W.J., "Statistical Computation on a Digital Computer," Blaisdell Publishing Co., 1967, pp.38-43.
10. "Standard Mathematical Tables," The Chemical Rubber Co., 1965.
11. "Reliability Stress and Failure Rate Data," MIL-HDBK-217B, Government Printing Office, Washington, D.C., 1974.