

시스템의 가상 가속수명시험을 위한 소프트웨어 개발

강보식 · 장무성

한국기계연구원 신뢰성평가센터

Software Development for System Virtual Accelerated Life Testing

Kang, Bo Sik · Chang, Mu Seong

Reliability Assessment Center, Korea Institute of Machinery & Materials

Abstract

In general, accelerated life testing is performed to reduce testing time. But it is difficult to apply accelerated life testing to a system besides components. This paper developed a software which estimates reliability measures of the system from results of accelerated life testing of components building the system. This software can handle the system with a large number of components and complex topology. Multiple failure modes of a component were also considered in this software. Based on the software, reliability measures of a gearbox example at several conditions were estimated from the accelerated life testing results of three components of the gearbox.

Keywords : virtual testing(가상 시험), system accelerated life testing(시스템 가속수명시험), accelerated model(가속 모형), monte carlo simulation(몬테카를로 시뮬레이션), system life estimation(시스템 수명 추정)

1. 서론

일반적으로 시스템을 대상으로 직접 시험을 실시하여 신뢰도를 얻기는 매우 어려우며, 대신 시스템을 구성하는 부품에 대해 시험을 실시하여 시스템의 신뢰도를 추정한다. 그 외 시스템의 신뢰도를 추정 혹은 평가하는 방법으로는 필드 데이터분석이나 신뢰성 데이터베이스를 활용한다. 대표적으로 활용하는 신뢰성 데이터베이스로는 EPRD(electronic parts reliability data), NPRD(nonelectronic parts reliability data), MIL-HDBK-217, OREDA(offshore reliability data handbook), NSWC(naval surface warfare center), PRISM이 있다.

국내에서 수행하고 있는 많은 기계류 품목들에 대한 신뢰성 시험은 주로 하위 단계(모듈, 부품)에서 실시하고 있다. 또한 하위 부품들은 다수의 고장모드를 가질 수 있으며, 단기간에 신뢰성 정보를 획득하기 위해 가속수명시험을 적용하고 있다. 만약 시스템을 구성하는 부품들에 대한 가속수명시험 결과(가속모형, 가속지수, 수명분포의 모수 등)로부터 시스템의 수명분포와 신뢰도를 추정할 수 있는 소프트웨어가 있다면 아래와 같은 다양한 혜택을 얻을 수 있다.

- 시스템에 대한 시험장비가 필요 없으며, 시간과 비용을 줄일 수 있다.
- 부품들의 가속수명시험 결과를 이용하여 다양한 시스템에 적용할 수 있다.
- 여러 가지 시험(가속) 조건에서 시스템의 신뢰도를 추정할 수 있다.

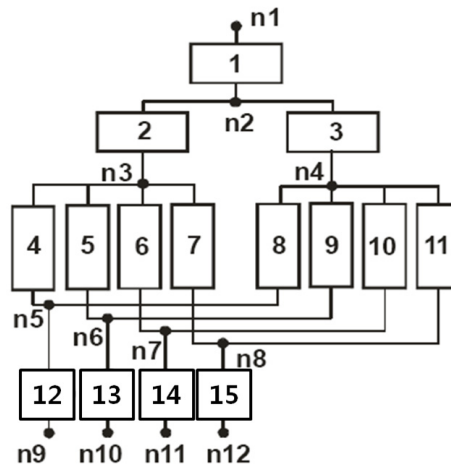
시스템이 복잡한 경우에 시스템의 신뢰도를 정확하게 추정하는 것은 어렵거나 불가능할 수 있으며, 이러한 경우에 시뮬레이션 방법이 유용할 수 있다. Faulin et al.(2005)는 복잡한 시스템의 신뢰도와 가용도를 결정하고 설계단계와 시스템 운영단계에서 이러한 값들의 향상을 위해 컴퓨터 시뮬레이션 기반의 기법과 알고리즘을 설명한다. Alidrisi(1987)는 시스템의 신뢰도 계산을 위해 스트레스 및 강도 분포에 대한 랜덤데이터 생성과 역변환 방법을 이용하는 컴퓨터 시뮬레이션 방법을 소개한다. Yang과 Younis(2005)는 시스템의 구성품은 분석적으로 평가하고, 세미-분석적 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 이용하여 구성품들간의 상호작용과 손상 누적을 고려하여 시스템의 신뢰도를 평가할 수 있는 방법을 제시한다. Zhaohong과 Xifan(2002)는 복잡한 시스템의 신뢰도 평가를 위해 시뮬레이션 계산을 빨리하면서 분산을 줄이는 접근법에 제안하였으며, 손영탁 외(2009)는 시스템의 분석적 방법으로 복잡한 시스템의 신뢰도 평가를 어려운 경우에 몬테카를로 기법을 이용하여 해를 추정하는 알고리즘을 제안하고 있다. 하지만 시스템 부품들의 가속수명시험 정보를 이용하여 시스템 수명을 추정하는 연구는 이루어지지 않았다.

이에 본 연구에서는 시스템을 구성하는 부품들의 가속수명시험 결과로부터 시스템의 수명을 추정하는 소프트웨어를 개발하고자 한다. 개발 소프트웨어는 다수의 부품과 복잡한 구조를 가지는 시스템을 다룰 수 있으며, 각 부품들은 다양한 고장모드를 고려할 수 있다. 2장에서는 개발 소프트웨어의 전체적인 구성을 설명하며, 3장에서는 개발 소프트웨어를 이용하여 가속 및 사용조건에서 기어박스 예제의 수명을 추정하였다. 마지막으로 4장에서 결론을 내린다.

2. 개발 소프트웨어의 구성

2.1 신뢰성 네트워크

신뢰성 네트워크(reliability network)는 신뢰성 블록도(reliability block diagram)와 형식적으로 큰 차이를 가지지 않는다. 오히려 신뢰성 네트워크는 좀 더 복잡한 구조를 가지는 거의 모든 시스템을 그래프로 표현하는데 어려움이 없다. 신뢰성 네트워크는 하나의 시작노드(start node)와 하나 이상의 종결노드(end node)에 의해 정의되며, 노드와 노드를 연결하는 부품으로 이루어진다. <그림 1>은 듀얼로 제어되는 시스템을 신뢰성 네트워크로 표현한 예이다.



<그림 1> 듀얼 제어시스템의 신뢰성 네트워크

<그림 1>의 n1에서 n12까지 번호가 있는 검은 점으로 표현된 것이 노드이고, 1, 2, 3, ..., 15로 되어 있는 사각형이 부품이다. 또한 시작노드 n1과 종결노드 n9, n10, n11, n12 사이에 작동하는 부품들의 경로가 존재하면 시스템은 작동한다.

2.2 개발 소프트웨어의 입력 파일

개발 소프트웨어를 작동하기 위해서는 4가지 입력 파일이 필요하다. 4가지 입력 파일에는 전반적인 시스템 정보를 포함하는 general_system_data, 가속 스트레스 수준을 포함하고 있는 acceleration_stress_levels, 시스템 구조를 포함하고 있는 system_structure, 각 부품에 대한 고장모드 수, 수명분포의 모수, 그리고 가속시험 정보를 포함한 failure_modes로 구성된다. 이러한 입력 파일은 모두 텍스트(TXT) 파일 형식을 가진다.

2.2.1 시스템 정보에 대한 입력 파일(general_system_data)

첫 번째 입력 파일은 시스템에 대한 일반적인 정보가 포함된 general_system_data 파일로 <표 1>과 같다.

<표 1> 시스템 정보에 대한 입력 파일

BX% life	Specified time interval	Number components	Number nodes	Number end nodes	Number accel. stresses
10	200	20	9	1	2

<표 1>의 첫 번째 행의 좌측에서부터 백분위수 수명(BX% life 열), 시스템 신뢰도 계산에 필요한 시간(specified time interval 열), 시스템을 구성하는 총 부품 수(number components 열), 총 노드 수(number nodes 열), 종결 노드 수(number end nodes 열), 가속 스트레스 수(number accel. stresses 열)를 나타내며, 해당 값은 두 번째 행에 입력한다. 만약 시스템의 10%가 고장 날 시점(B₁₀ 수명)을 산출하고자 한다면 BX% life 열에 10을 입력하고, 시스템의 신뢰도 함수 R(t=200)을 구하고자 할 경우에는 Specified time interval 열에 200이라고 입력하면 된다. 여기서 수명 단위는 소프트웨어의 4가지 입력 파일에서 모두 일치해야 한다. 예를 들어, 부품 정보 입력 파일에서 부품의 척도모수(η) 수명 단위가 시간(hour)이라면, 여기서 200이라는 값도 200시간이라는 의미이다. 그 외 부품 수, 노드 수, 스트레스 수준 수를 입력한다.

2.2.2 가속 수준에 대한 입력 파일(acceleration_stress_levels)

두 번째 입력 파일 acceleration_stress_levels에는 가속 스트레스 인덱스와 수준 값을 입력한다. 가속 스트레스 인덱스는 부품 정보 입력 파일의 관련된 부품과 일치시킨다. 예를 들어, 절대 온도 가속 스트레스를 인덱스 1, 수준은 570 K로 하며, 압력 가속 스트레스를 인덱스 2, 수준은 12 bar로 할 경우(<표 2>), 부품 정보 입력 파일의 Vindx 혹은 Uindx에 1 또는 2를 입력한다. 그리고 하나의 가속 스트레스에는 하나의 가속 수준만 표시할 수 있다.

<표 2> 가속 수준에 대한 입력 파일

Accelerated stress index	Accelerated stress level
1	570
2	12
...	...

2.2.3 시스템 구조에 대한 입력 파일(system_structure)

세 번째 입력 파일 system_structure에는 신뢰성 네트워크의 구조를 정의한다. <표 3>과 같이 시스템 구조에 대한 입력 파일은 3개의 열을 가지고 있으며, 부품 번호(comp. no), 부품에 연결된 전·후 노드(first node, second node)를 입력한다. <표 3>은 <그림 1>의 시스템 구조에 대한 입력 파일을 나타낸다.

<표 3> 그림 1의 시스템 구조에 대한 입력 파일

Comp. No	First node	Second node	Comp. No	First node	Second node
1	1	2	9	4	6
2	2	3	10	4	7
3	2	4	11	4	8
4	3	5	12	5	9
5	3	6	13	6	10
6	3	7	14	7	11
7	3	8	15	8	12
8	4	5			

2.2.4 부품 정보에 대한 입력 파일(failure_modes)

네 번째 입력 파일 failure_modes에는 부품 번호, 각 부품의 고장모드 수, 수명분포, 수명분포의 모수, 가속모형, 가속모형의 상수, 가속지수(활성화 에너지, 비열지수 등)를 입력한다. 먼저 각 부품의 고장모드 수를 결정한 후, 각 고장모드에 대한 수명분포(지수분포/와이블분포(1), 대수정규분포(2))를 선택한 후 해당하는 값을 TTF 열에 입력한다. 지수분포는 와이블분포를 선택한 후 β 값을 1로 입력한다.

만약 시간 T가 지수분포/와이블분포, 대수정규분포를 따르는 경우에 각 분포의 확률밀도함수 $f(t)$ 는 다음과 같다(정해성 외(2005)).

· 지수분포($\beta=1$)/와이블분포 : $f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right)$

· 대수정규분포 : $f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} t\sigma'} \exp\left[-\frac{[\ln(t) - \bar{t}']^2}{2\sigma'^2}\right]$

단, \bar{t}' : $\ln(t)$ 의 평균, σ' : $\ln(t)$ 의 표준편차

가속 스트레스는 온도, 습도, 진동, 압력, 전압, 전류 등을 예로 들 수 있다. 가속 스트레스와 부품 수명사이의 관계식을 가속모형이라 부른다. 지수분포와 와이블분포의 경우에는 척도모수 또는 특성 수명(η), 대수정규분포의 경우 평균(\bar{t}')과 가속 스트레스와의 관계식을 나타낸다. 지수분포의 경우 평균수명(MTTF)과 척도모수는 동일하다. 본 연구의 개발 소프트웨어에서는 아래와 같은 가속 모형을 고려하였다(Reliasoft(2001)).

· 아레니우스 모형 : 아레니우스 모형은 가속 스트레스가 온도인 경우에 적합한 모형으로 수명(L)과 가속 스트레스(V)와의 관계식은 식 (1)과 같다. 여기서, C 와 B 는 모형의 상수이며 V 는 절대온도(K)이다. $B = E_a / k$ 로 나타낼 수 있으며, E_a 는 활성화에너지(activation energy)이며, k 는 볼츠만 상수로 $8.6171 \times 10^{-5} \text{eVK}^{-1}$ 이다.

$$L(V) = C \times \exp(B/V) \quad (1)$$

· 역승 모형 : 역승 모형은 압력, 부하, 전압 등과 같은 비열 가속 스트레스나 온도차에 의해 야기되는 기계 피로의 경우에 적용할 수 있는 모형(Nelson(1990))이다. 부품의 수명(L)과 가속 스트레스(V)와의 관계식은 식 (2)와 같이 정리된다. 여기서, K 와 n 은 모형의 상수이며, V 는 비열 스트레스이다.

$$L(V) = \frac{1}{KV^n} \quad (2)$$

· 아이링 모형 : 아이링 모형은 아레니우스 모형과 같이 가속 스트레스로 온도를 적용하는 경우에 주로 사용되나 습도 등 열 이외의 스트레스에 대해서도 적합한 모형이다. 수명(L)과 가속 스트레스(V)와의 관계식은 식 (3)과 같다. 여기서, A 와 B 는 모형의 상수이다.

$$L(V) = \frac{1}{V} \exp(-[A - B/V]) \quad (3)$$

· 온도-습도 모형 : 온도-습도 모형은 아이링 모형의 변형으로 온도(V)와 습도(U)를 가속 스트레스로 부과할 경우에 적합한 모형이다. 수명(L)과 가속 스트레스(V, U)와의 관계식은 식 (4)와 같다. 여기서, A, b, ϕ 는 모형의 상수이다.

$$L(V, U) = A \exp\left(\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}\right) \quad (4)$$

· 온도-비열 모형 : 온도-비열 모형은 아레니우스 모형과 역승모형을 조합한 것으로 온도 스트레스와 비열 스트레스가 모두 고려되는 경우에 적합하다. 대표적으로 온도-전압 모형과 Black 방정식이라 불리는 온도-전류 모형이 많이 사용된다(Yang(2007)). 수명(L)과 가속 스트레스(V, U)와의 관계식은 식 (5)와 같다. 여기서, C, B, n 은 모형의 상수이다.

$$L(V, U) = \frac{C \times \exp(B/V)}{U^n} \quad (5)$$

각 고장모드에 대한 가속모형(가속시험이 아닌 경우(0), 아레니우스 모형(1), 역승 모형(2),

아이링 모형(3), 온도-습도 모형(4), 온도-비열 모형(5))을 선택하여 S-L 열에 입력한다. 만약 가속시험이 아닌 경우(S-L열의 값이 0인 경우)에는 해당 수명분포에 대한 모수 값만 입력하며, 가속모형의 경우에는 가속 스트레스 인덱스 값을 Vindx와 Uindx 열에 입력하고, 수명분포 및 가속모형의 모수 값들($\beta, \sigma', B, C, K, n, A, b, \phi$)을 그 다음 해당 열에 입력한다. 3가지 수명분포와 6가지 가속모형(가속시험이 아닌 경우 포함)에 대한 failure_modes 파일 구성은 <표 4~9>와 같다.

<표 4> 가속시험이 아닌 경우

TTF	S-L	p1	p2	p3	p4
1	0	β	η		
2	0	\bar{t}'	σ'		

<표 5> 아레니우스 모형의 경우

TTF	S-L	p1	p2	p3	p4
1	1	Vindx	β	B	C
2	1	Vindx	σ'	B	C

<표 6> 역승 모형의 경우

TTF	S-L	p1	p2	p3	p4
1	2	Vindx	β	K	n
2	2	Vindx	σ'	K	n

<표 7> 아이링 모형의 경우

TTF	S-L	p1	p2	p3	p4
1	3	Vindx	β	A	B
2	3	Vindx	σ'	A	B

<표 8> 온도-습도 모형의 경우

TTF	S-L	p1	p2	p3	p4	p5	p6
1	4	Vindx	Uindx	β	A	b	ϕ
2	4	Vindx	Uindx	σ'	A	b	ϕ

<표 9> 온도-비열 모형의 경우

TTF	S-L	p1	p2	p3	p4	p5	p6
1	5	Vindx	Uindx	β	B	C	n
2	5	Vindx	Uindx	σ'	B	C	n

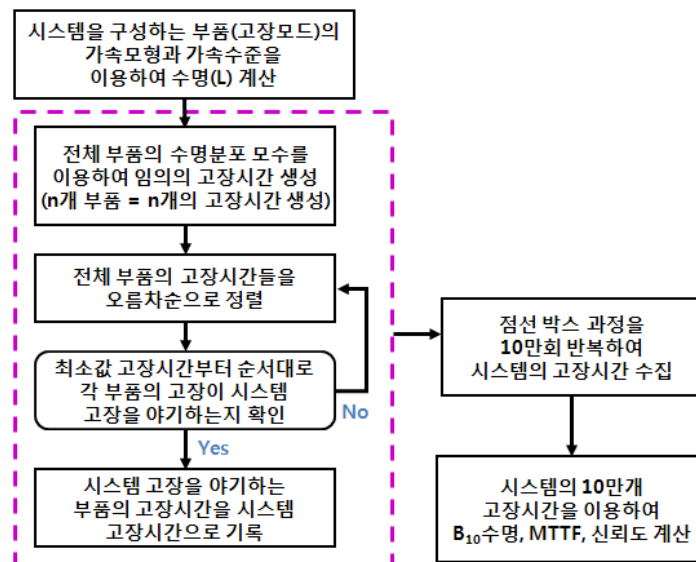
2.3 시스템의 가상 고장시간 데이터 생성 절차

시스템을 구성하는 부품들의 가속수명시험 결과로부터 시스템의 고장시간 데이터(수명 데이터)를 생성하는 것은 몬테카를로 시뮬레이션(monte carlo simulation)을 이용하며, 전체적인 절차는 <그림 2>와 같다.

2.3.1 부품의 고장시간 생성

부품의 고장모드와 관련된 입력 데이터를 이용하여 부품의 해당 고장모드에 대한 랜덤 고장시간을 생성한다. 각 부품은 여러 개의 고장모드를 가질 수 있고, 각 고장모드에 대한 고장시간은 지수분포, 와이블분포, 대수정규분포 중 해당 분포의 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 생성된다. 각 부품의 고장시간은 부품의 모든 고장모드들로부터 랜덤하게 생성된 고장시간 중에 가장 짧은 시간과 일치한다. 본 연구에서 부품의 고장시간이라고 표현하는 것은 해당 부품의 고장모드는 하나라고 가정하는 것이다.

그리고 시스템을 구성하는 모든 부품들의 고장시간들 중 최소 고장시간을 가진 부품을 결정한다.

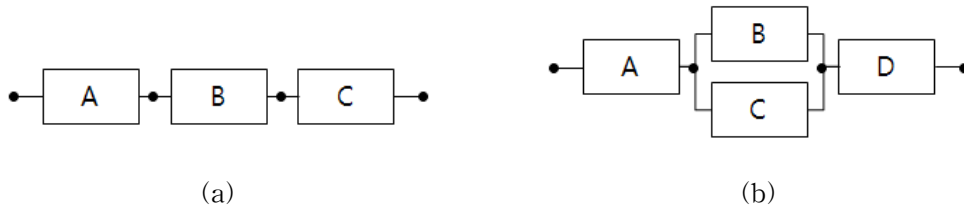


<그림 2> 시스템의 가상 고장시간 데이터 생성 절차

2.3.2 시스템의 고장시간 확인

다음으로, 최소 고장시간을 가진 부품이 시스템 고장을 야기하는지 확인한다. 즉, 신뢰성 네트워크의 시작 노드와 모든 종결 노드 간에 경로가 존재하는지를 검색한다. 만약 시작 노드와 종결 노드 간에 경로가 하나라도 존재하지 않는다면 시스템은 고장으로 판단되며, 시스템 고장 수는 하나씩 증가하고 현재 부품의 고장시간은 시스템의 고장시간이 된다. <그림 3>에서 B 부품이 최소 고장시간을 가진다면, (a) 시스템의 경우 시작 노드에서 종결 노드까지 경로가 존재하지 않기 때문에 (a) 시스템의 고장시간은 B 부품의 고장시간과 동일하다. 반면, (b) 시스템은 B 부품이 고장 나더라도 시작 노드에서 종결 노드까지 경로가 존재하기 때문에 (b) 시스템의 고장시간은 B 부품 고장 이후에 발생하는 A, C, D 부품 중 한 부품의 고장시간과 동일하다. 이와 같이 시스템의 고장시간을 생성하기 위해 부품의 고장시간을 랜덤하게 생성하고, 시스템 고장 확인 프로세스를 통해 시스템 고장시간을 구하기 위해 10만

변을 반복한다.



<그림 3> 2가지 유형의 시스템 구조

2.3.3 특정 시험조건에서의 시스템 수명 추정

2.3.2절에서 결정된 시스템의 고장시간들은 누적하여 기록된다. 시뮬레이션이 종료되는 시점에 누적된 10만 개의 고장시간들을 오름차순으로 정렬한 후 시스템의 Bx 수명과 MTTF를 산출한다. Bx(B₁₀) 수명은 오름차순으로 정렬된 시스템의 고장시간에서 Bx% 시점(10%)에 해당되는 고장시간으로 추정되며, MTTF는 전체 시스템의 고장시간들의 산술 평균값으로 추정된다. 또한 특정 시간에서의 신뢰도는 전체 시뮬레이션 횟수와 특정 시간 이후에 시스템 고장으로 판단된 시뮬레이션 횟수의 비율로 계산한다.

Bx 수명과 MTTF 추정은 위의 방법이외에도 2.4절에서 언급되는 출력파일에 포함된 시스템의 가상 고장시간 데이터와 통계 프로그램을 이용하여 추정할 수 있다. 이러한 방법을 이용할 경우 개발 소프트웨어에서 제공되는 신뢰성 척도 이외에 추가적인 분석을 할 수 있다.

2.4 개발 소프트웨어의 출력 파일

개발 소프트웨어의 4가지 입력 파일에 해당 정보를 입력한 후 소프트웨어를 실행하면 아래와 같은 5가지의 출력 파일을 얻을 수 있다. 출력 파일 역시 모두 텍스트 파일 형식을 가진다.

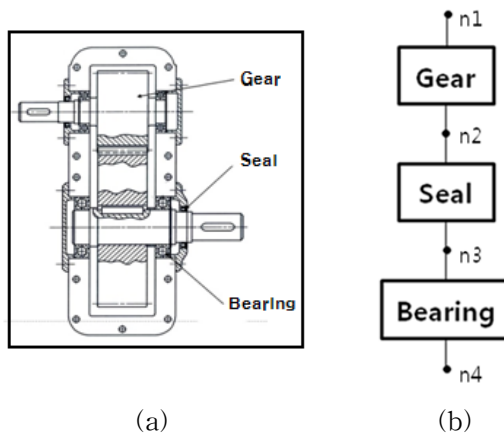
- ① output_full_system_probab_rank_estimates
- ② output_full_system_times_to_failure
- ③ output_short_system_probab_rank_estimates
- ④ output_short_system_times_to_failure
- ⑤ output_system_reliability_results

상기 파일에서 ‘full’은 실제 10만 번의 시뮬레이션을 실행한 후 얻은 전체 데이터 파일이며, ‘short’는 10만 개의 데이터 중 1, 101, 201, ... , 99901번째 데이터로 축소된 1000개의 데이터 파일이다. ‘probab_rank_estimates’는 확률지에 플롯하기 위한 플롯 위치(plotting position) 값을 포함한다. 플롯 위치 결정은 Nelson(1990)의 midpoint plotting position(=(i-0.5)/n) 방법을 이용하였다. 여기서, i는 고장시간 데이터를 오름차순으로 정렬했을 때 고장 순서이며,

n은 전체 고장시간 데이터 수이다. 'times_to_failure'는 시스템의 가상 고장시간을 포함한다. 이러한 고장시간을 통계 프로그램에 포함하여 추가적인 분석을 할 수 있다. 마지막으로, ⑤번 output_system_reliability_results는 시스템 정보에 대한 입력과일에서 명시한 Bx 수명, R(t), 시스템의 평균수명인 MTTF, 그리고 소프트웨어의 실행시간을 포함한다.

3. 개발 소프트웨어를 활용한 예제

2장에서 서술한 개발 소프트웨어가 구현되는 프로세스에 대해서 <그림 4 (a)>와 같이 기어, 씰, 베어링으로 구성된 기어 박스를 예로 들어 설명하고자 한다. 먼저 기어 박스의 구조를 신뢰성 네트워크로 표현하면 <그림 4 (b)>와 같이 표현할 수 있다.



<그림 4> 기어 박스 구조와 신뢰성 네트워크

그 다음 기어 박스를 구성하고 있는 3가지 부품에 대한 수명분포, 수명분포의 모수, 가속 스트레스, 가속조건 및 사용조건 수준, 그리고 가속모형의 모수들은 <표 10>과 같이 가정한다.

<표 10> 기어박스 부품들에 대한 입력 정보

부품	수명분포 및 모수	가속 스트레스	가속조건 수준	사용조건 수준	가속 모형
기어	와이블분포 ($\beta=2$)	압력	12 bar	6.3 bar	역승 모형 ($K=0.192 \times 10^{-8}, n=2.683$)
씰	와이블분포 ($\beta=3$)	온도	373.15 K	296.15 K	아레니우스 모형 ($B=3757.6, C=0.0695$)
베어링	와이블분포 ($\beta=1.2$)	하중	1,000 N	500 N	역승 모형 ($K=0.2143 \times 10^{-13}, n=3$)

<표 10>의 정보를 기준으로 가속조건과 사용조건에서 기어 박스의 B_{10} 수명, MTTF, 그리고 $R(t=1,000\text{시간})$ 을 추정하였으며, 2가지 조건에서의 평균수명을 이용하여 가속계수도 구하였다. 가속조건에서의 분석을 위한 4개의 입력 파일은 <그림 5 (a)~(d)>와 같다. 사용조건에서의 분석은 <그림 5 (b)>의 가속 수준에 대한 입력파일만 사용조건 수준 값으로 변경하고 나머지는 가속조건의 입력파일을 동일하게 사용할 수 있다.

BX% life	Specified time interval	Number of components	Number of nodes	Number of end nodes	Number of accel. stresses
10	1000	3	4	1	3

(a) 시스템 정보에 대한 입력 파일

Accelerating stress index	Accelerating stress level
1	12
2	373.15
3	1000

(b) 가속 수준에 대한 입력 파일

Comp No	First node	Second node
1	1	2
2	2	3
3	3	4

(c) 시스템 구조에 대한 입력 파일

Comp. No	Num. of f. nodes	TTF	SL	p1	p2	p3	p4	p5	p6
1	1								
	1	2	1	2		0.00000000192		2.683	
2	1								
	1	1	2	3		3757.6		0.0695	
3	1								
	1	2	3	1.2		0.000000000002143		3	

(d) 부품정보에 대한 입력 파일

<그림 5> 기어 박스 예제의 가속조건에 대한 4가지 입력 파일

사용조건과 가속조건에서 기어박스의 B_{10} 수명, MTTF, $R(t=1,000\text{시간})$, 2가지 조건에서 MTTF을 이용한 가속 계수는 <표 11>과 같다. 여기서, 수명 단위는 시간(hour)이다. 특히, 개발 소프트웨어에서는 스트레스 수준을 임의로 정할 수 있으며, 해당 수준에서의 수명을 쉽게 추정할 수 있다.

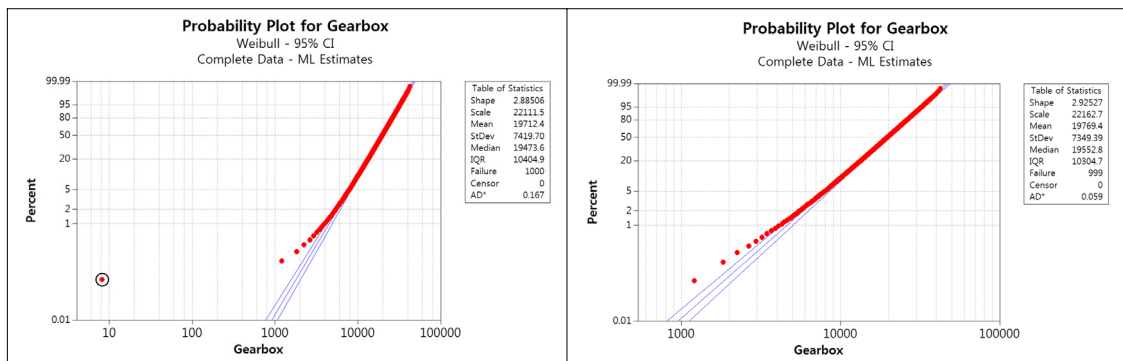
기어박스 예제에 대한 분석 결과를 살펴보면, 사용조건인 압력 6.3bar, 온도 23℃, 하중 500N에서 B_{10} 수명은 10,192시간, MTTF는 19,780시간, $R(t=1000\text{시간})$ 은 99.93%이다. 반면, 가속조건인 압력 12bar, 온도 100℃, 하중 1,000N에서 B_{10} 수명은 759시간, MTTF는 1,453시간, $R(t=1000\text{시간})$ 은 79.12%이다. 사용조건과 가속조건을 이용하여 가속계수를 구

하면 $13.6 (= 19,780 / 1,453)$ 이 된다.

<표 11> 가속 및 사용조건에서의 기어박스의 신뢰성 척도 값

	B ₁₀ 수명	MTTF	가속계수	R(t=1,000시간)
사용조건	10,192 시간	19,780 시간	$\frac{19,780}{1,453} = 13.6$	99.93 %
가속조건	759 시간	1,453 시간		79.12 %

추가적으로 output_short_system_times_to_failure 파일에서 얻은 기어박스의 고장시간 데이터 1,000개를 미니탭 통계 프로그램에 적용하였다. 사용조건에서 얻은 고장시간을 이용하여 <그림 6>과 같이 와이블 확률 플롯을 작성하였다. <그림 6>의 우측 그래프는 좌측 그래프에서 이상치로 볼 수 있는 한 점(그래프에 원으로 표시)을 제외한 그래프이다. 분석 결과 형상모수 $\beta = 2.9$ 이며, 척도모수는 22,163 시간이며, 평균수명 MTTF는 19,769시간이다. 개발 소프트웨어의 MTTF 결과(19,780시간)와 큰 차이는 없는 것을 알 수 있다.



<그림 6> 기어박스 사용조건 데이터의 와이블 플롯

4. 결론

일반적으로 시스템에 대해 직접 시험을 수행하여 얻은 결과로부터 시스템의 신뢰도를 추정하기는 쉽지 않다. 따라서 시스템을 구성하는 부품에 대해 시험을 실시하고 있으며, 또한 시험시간을 단축하기 위해 가속수명시험을 실시하고 있다. 만약 시스템을 구성하는 부품들에 대한 가속수명시험 결과가 존재한다면, 이러한 결과를 바탕으로 시스템에 대한 수명도 추정할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 시스템을 구성하는 부품들의 가속수명시험 결과로부터 시스템의 수명을 추정하는 소프트웨어를 개발하였다. 개발 소프트웨어는 각 부품에 대해 여러 개의 고장모드를 고려할 수 있으며, 다수의 부품, 그리고 복잡한 구조를 다룰 수 있다. 개발 소프트웨어는 시

스텝 정보, 가속 수준, 시스템 구조, 그리고 부품정보에 대한 4가지 입력 파일을 작성해야 하며, 이로부터 시스템의 Bx 수명, $R(t)$, 시스템의 MTTF, 소프트웨어 실행시간, 그리고 시스템의 고장시간을 얻는다. 개발 소프트웨어를 이용하여 기어박스 예제에 대한 가속 및 사용조건에서의 수명을 쉽게 추정할 수 있었다.

본 연구에서 개발한 소프트웨어는 4개의 텍스트 입력 파일을 작성해야 하는 약간의 번거로움이 있으나, 이를 활용하여 다양한 스트레스 조건에서 시스템의 수명 추정과 가속시험 정보를 알고 있는 부품들이 포함된 다양한 시스템들의 수명 추정을 간단히 구할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 손영탁, 김현준, 서명원(2009), 몬테카를로 기법을 이용한 복합 시스템의 신뢰도 평가 알고리즘 개발에 관한 기초 연구, 한국자동차공학회 2009년도 부문종합 학술대회, pp. 1306-1310.
- [2] 정해성, 권영일, 박동호(2005), 신뢰성 시험 분석 평가, 영지문화사.
- [3] Alidrisi, M.M.(1987), A Simulation Approach for Computing Systems Reliability, *Microelectronics Reliability*, Volume 27, Issue 3, pp. 463-467.
- [4] Faulin, J., Juan, A.A., Martorell, S., and Ramirez-Marquez, J.(2010), *Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems*, Springer.
- [5] Nelson, W.(1990), *Accelerated Testing-Statistical Models, Test Plans and Data Analyses*, John Wiley & Sons.
- [6] Reliasoft(2001), *Accelerated Life Testing Reference*, Reliasoft Publishing.
- [7] Yang, G.(2007), *Life Cycle Reliability Engineering*, John Wiley & Sons.
- [8] Yang, K. and Younis, H.(2005), A Semi-Analytical Monte Carlo Simulation Method for System's Reliability with Load Sharing and Damage Accumulation, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 87, pp. 191-200.
- [9] Zhaohong, B. and Xifan, W.(2002), Studies on Variance Reduction Technique of Monte Carlo Simulation in Composite System Reliability Evaluation, *Electric Power Systems Research*, 63, pp. 59-64.