

신뢰성 설계 프로세스에 관한 사례연구¹⁾

윤원영* · 김현식**

*부산대학교 산업공학과 · **LG전자

A Case Study on a Process of Design for Reliability

W. Y. Yun* · H. S. Kim**

* Department of Industrial Engineering, Pusan National University · ** LG Electronics

Abstract

In this paper, we consider a process for design for reliability(DFR) in design and development phases. The procedure of GE for DFR is applied to develop and analyze a washing machine with required reliability and the detailed procedure is proposed.

1) 본 논문은 2004년도 대한산업공학회 추계학술대회에서 발표된 논문임

1. 서 론

오늘날 생산되는 시스템이 점점 더 복잡해지고 대형화되면서 품질과 신뢰성은 가격과 성능과 마찬가지로 제품의 중요한 전략적 변수로서 기업의 이미지에도 상당한 영향을 미치고 있고 이에 대한 중요성도 증가하고 있다. 신뢰성 향상을 위한 지금까지의 연구가 공학적 관점에서 신뢰성을 향상시키는 여러 방법 중 일부분만을 적용한 것이었고 제품의 개발단계 전체에서 체계적으로 사용할 수 있는 프로세스에 관한 연구가 부족하였다. 제품의 개발단계부터 신뢰성을 확보하기 위한 프로세스(DFR; Design For Reliability)는 BS(British Standard) 5760에 '정의 - 디자인 및 개발 - 생산 - 설치 및 시운전 - 사용'의 5단계 구분하여 각 단계에서 실행해야 할 내용이 정리된 것이 가장 일반적인 절차이다(참고 [3]).

최근에 GE에 의해 10단계의 DFR 프로세스가 제안되었다. 하지만 실제 적용된 사례는 아주 적은 상태이다. 따라서 본 논문은 현장 제품 개발단계에서 GE의 DFR 프로세스를 적용한 사례 및 절차[참고[5]]를 소개하며 이를 바탕으로 몇가지 문제점과 구체적인 해결 방법을 제시함을 목적으로 한다.

2. GE 의 DFR 10단계

GE의 DFR 10단계 프로세스를 살펴보면 다음과 같다.

- (1) 신뢰성 목표 설정 : 고객의 요구, 시장 환경의 분석 및 상품 전략으로부터 신뢰성 목표를 설정한다.
- (2) 기능블록도(FBD : Functional Block Diagram) 전개 : 시스템에 대하여 기능별 서브 시스템으로 분류하고 블록도를 작성하는 단계이며, 이를 근거로 시스템 및 서브 시스템의 신뢰성 블록도(RBD : Reliability Block Diagram)를 작성한다.
- (3) 현수준 설계 불량률(SCR : Service Claim Rate) 산출 : 개발하고자 하는 상품과 유사한 상품의 시장품질 Data를 근거로 현 수준의 신뢰성을 산출한다.
- (4) 핵심 서브시스템 선정 : 서브시스템별 신뢰성 데이터를 근거로 신뢰성을 중점적으로 확보해야 할 서브시스템을 선정하고 하위부품(Components)을 정한다.
- (5) 불량률 목표 할당 : 서브시스템 및 하위부품별로 신뢰성 목표를 할당하며, 신규 개발 부품을 중점적으로 개선할 수 있도록 목표를 할당한다.
- (6) FMEA(Failure Mode and Effect Analysis) 실시 : 각 부품별로 FMEA를 실시하여 바람직하지 않는 고장 모드를 줄이거나 시스템에 대한 영향을 줄여 주는 설계적인

대책을 수립한다.

- (7) P-Diagram(Parameter Diagram)전개 및 개선 : 시스템이나 부품에 가해지는 입력에 대한 출력과 이때 가해지는 기타 변수를 명확히 정의하여, 설계단계에서 고장률을 예측하기 위한 기준으로 사용한다. FMEA와 P-Diagram 전개를 통하여 설계단계에서 신규기능이나 부품의 문제점을 개선대책을 수립한다.
- (8) 수명예측 : 부품이나 시스템에 대한 순간 고장률을 예측하는 단계이다.
- (9) 시작품 신뢰성 시험 : 시작품에 대한 신뢰성 시험을 실시하여 시험에 의한 고장률을 추정하고 문제가 있을 시는 개선을 실시한다.
- (10) 신뢰성 평가 시험 : 정규 양산 중에 주기적으로 신뢰성을 평가하여 개발단계에서의 품질수준이 양산단계에서 유지관리 되는지를 확인한다.

3. 사례연구 및 분석

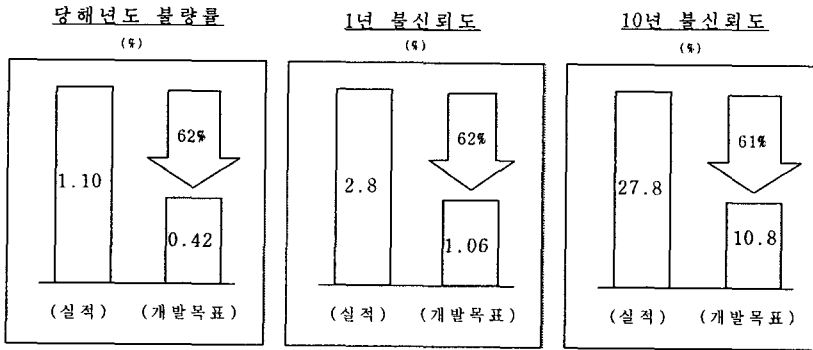
2절에서 제시된 절차를 기준으로 국내 A사의 세탁기개발과정에서 신뢰성확보프로세스를 보다 구체적으로 제시하고자 한다.

3.1 신뢰성목표설정

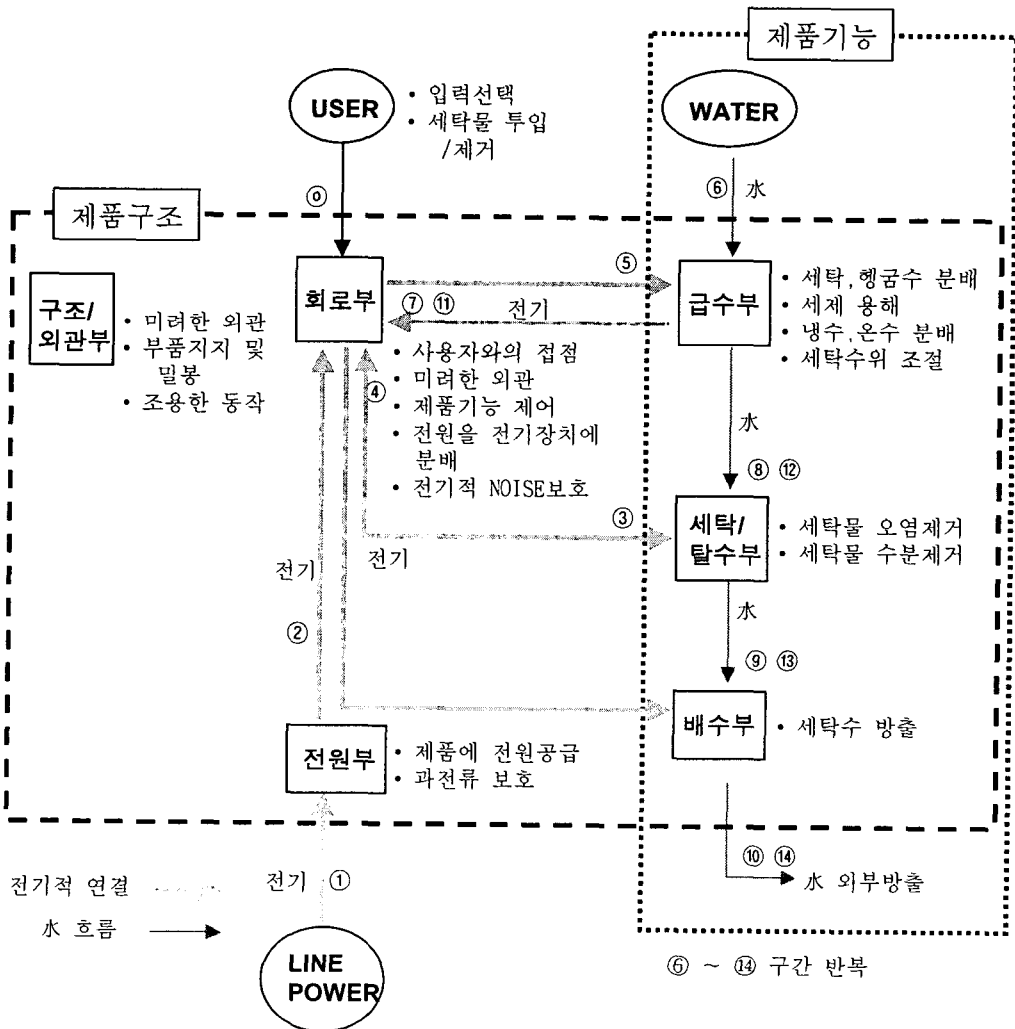
신뢰성 목표는 회사의 품질방침에 따라 다르나 A사는 신규부품의 경우에는 80% 개선, 기존 공용부품의 경우에는 연간 품질개선 목표(30%)를 따랐다. 신뢰성 목표설정 결과는 그림 1에 나타내었다. 여기에서 당해년도 불량률은 같은 해에 생산한 제품이 동일년도에 시장에서 불량률이 발생한 비율(유사 제품의 3년간 서비스데이터 사용)을 나타내며, 1년 불신뢰도(F(1))와 10년 불신뢰도(F(10))의 개선율에 대한 목표를 각각 설정하였다.

3.2 기능블록도(FBD : Functional Block Diagram) 전개

그림 2에 나타난 기능블록도는 사례연구대상인 세탁기 제품의 블록도이다. 기능블록도에서 다른 부분과의 연결이 많은 세탁, 행굼, 탈수로서 세탁/탈수부가 가장 중요한 블록이며 또 각 기능을 제어하는 회로부도 중요한 블록으로 선정하였다.



<그림 1> 신뢰성 목표설정 사례



<그림 2> 세탁기 기능블록도 작성 사례

3.5 불량률(Service Claim Rate)목표 할당

핵심 서브시스템으로 선정된 신규개발품은 개선목표 80%를 부여하고, 기타 공용품은 연간 품질개선목표인 30%개선 목표를 부여하여 각 서브시스템 및 부품별 목표를 부여하였다. 표 1 의 목표 부분에 기입한다.

3.6 FMEA

표 2은 신규 개발품인 베어링하우징의 FMEA 실시 사례를 나타내었다. 베어링하우징의 FMEA결과 베어링의 편마모 발생시 소음이 발생하게 된다. 이경우 베어링 내경과 축의 외경치수 및 표면조도가 중요한 인자로 나타났었다. 이 부위는 가공하는 부위로서 설계적인 대책이 어려우므로 제조에서 산포를 관리하도록 한다.

3.7 P-Diagram 전개 및 개선

그림 3에 콘트롤러의 구성품인 LCD 부품에 대한 P-Diagram결과를 나타내었다. 고장모드로는 전원무, 글자LCD 점등 안됨, 배경LCD 점등 안됨등이 있다. LCD 부품의 가속시험 팩터(Factor)로는 온도, 습도, 열충격, 진동, 자외선 등이 고려될 수 있다.

<표 2> 베어링하우징 FMEA 실시 사례

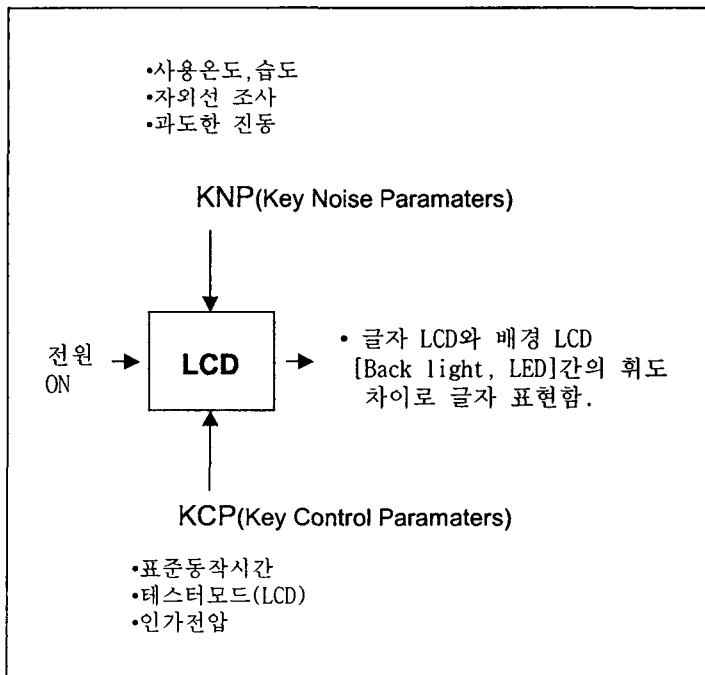
Failure Mode and Effect Analysis											
블록 & 부품명	D부 베어링하우징	모델명	X 제품	PJT명	YY-프로젝트	실시목적	잠재 고장 모드 도출 및 대책수립				
작성일	'00. 4. 11	작성자	○○○	참석자	○○○ 선임/○○○ 주임(품질센터), ○○○ 선임(연구실), ○○○ 주임(6σ), ○○○(QA)						
Block NO.	부품명	기능	변경사항	고장모드	고장추정원인	영향	발생도	중요도	총점	대 책	담당 일정
4000 4200	세탁, 탈수부 베어링 하우징 1.하우징 -A 1)하우징 2)베어링	★ 베어링하우징 -A 1.베어링 지지 2.스테이터체결 3.하우징-B -세탁통 동시 체결 (축하중 지지)	λ-기능 * 베어링 편마모 우려(성,하중) * 베어링 하중 증가(%) * 연구수업시서 * 시험용 편마모 (아니)	1-1) 소음 (베어링 압입력 대) 흔들림 (베어링 압입력 소)	1-1) -베어링외경↓ -하우징외경↑ -하우징 직각도 불량 -압입부 표면조도 불량(↑:압입력小, ↓:압입력大) -하우징 동심도 불량 -평탄도 -진원도 -압입높이 -압입력	소음	5	5	25	1-1) -금형제작시 가공유 일정량 도포가능한 구조일것. -신뢰성 시험 확인 (프로그램연속/탈수단속/세탁연속) ★ 확인 사항 ; 소음 베어링 편마모, 세탁통 보스부 파손/백화 CIC : 3차/4차/KCC/직각도/표면조도/진원도/압입높이/압입력	

LCD 부품의 P-Diagram 전개와 동일한 방법으로 회로부의 신뢰성 시험을 기획한 결과를 표 4에 나타내었으며, 이 시험 기준은 A사의 신뢰성기준을 적용하였다.

3.8 수명 예측

사례는 Relex 소프트웨어를 이용하여 Bellcore(전자, 통신부품) 예측모델을 적용 하였다. 이 방법에 의해 신규 개발부품인 콘트롤러의 고장율을 예측한 결과는 '표 4' 과 같다. 예측 결과 부하 구동부와 마이콤부의 고장율이 높게 나오므로 설계적인 개선이 필요함을 알 수 있다.

소프트웨어에 의해 예측된 고장률을 근거로 하여 제품 사용시간을 감안한 고장률을 계산한 결과는 다음과 같다.



<그림 3> LCD 부품 P-Diagram

(1) 세탁기 평균사용시간 계산

1회 동작시간은 평균 1.2 시간이며, 1일 1회 사용을 가정하면 개략적으로 연평균 사용횟수는 400회이고 연평균 사용시간은 480시간이다.

<표 3> 회로부 신뢰성 시험 기획

NO	부품명	변경내용	우려내용	중요항목	검증방법					확인단계				
					시험,검사 방법	시험항목	n	H	인요기준	담당	E/S	금형	PLOT	P,P
部信 3	컨트롤러	컨트롤러 신작	온도변화에 의한 단펄부 파손	동작불량	- 40℃(30분)~80℃(30분) 500Hz	열충격시험	5	500	파손 없을것	부품신뢰성 시험	●			
部信 4	컨트롤러	컨트롤러 신작	온도에 의한 동작 불량/오동작	동작불량	70±3℃ 240Hz 방치 엘시디 시험용	고온 동작	5	240	정상동작 할것	부품신뢰성 시험	●			
部信 5	컨트롤러	컨트롤러 신작	온도 변화에 의한 엘시디 특성 변화	동작불량	-20±3℃ 240Hz 방치 엘시디 시험용	저온 동작	5	240	정상동작 할것	부품신뢰성 시험	●			
部信 6	컨트롤러	컨트롤러+ 컨트롤러 패널	컨트롤러에 엘시디 추가에 따른 무게중가로 패널 보스부 파손	보스부 파손	주파수 5~100Hz,가속도 2G조건하에 X,Y,Z축으로 가 1H씩 인가	진동시험	5	1	파손 없을것	부품신뢰성 시험		●		
部信 17	컨트롤러	컨트롤러 신작	전원부/습기침투/오동작/부품불량	전원부	60℃ 85% Bias(정격) 500Hz	THB시험-1	10	500	동작이상 없을것	부품신뢰성 시험			●	
部信 18	컨트롤러	컨트롤러 신작	전원부/습기침투/오동작/부품불량	전원부	70℃ 85% Bias(정격) 500Hz	THB시험-2	10	500	동작이상 없을것	부품신뢰성 시험			●	
部信 19	컨트롤러	컨트롤러 신작	전원부/습기침투/오동작/부품불량	전원부	70℃ 50% Bias(정격) 500Hz	THB시험-3	10	500	동작이상 없을것	부품신뢰성 시험			●	
部信 20	엘시디	신부품 적용	습기 침투/오동작	동작불량	40±3℃ 95% 두부하 240Hz Coating미실시	내습성	5	240	정상동작 할것	부품신뢰성 시험	●			
部信 21	엘시디	신부품 적용	자외선 조사에 의한 변색 및 백/축점 발생	변색/축점/백점	광량 0.35W/m ² , 63℃ 조건하에 '102분 Light→18분Light+Spray'를 Total 150hr 조사.	내후성	3	150	감성평가	부품신뢰성 시험	●			

<표 4> 콘트롤러 고장을 예측 결과

F(t)	콘트롤러 SYSTEM	전원부 SUB-A	센스부 SUB-B	부하구동부 SUB-C	마이콤부 SUB-D	엘이디구동부 SUB-E	스위치입력부 SUB-F
0 hr	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
1000 hr	1.77%	0.35%	0.13%	0.47%	0.15%	0.06%	0.22%
2000 hr	3.53%	0.69%	0.25%	0.94%	0.30%	0.11%	0.44%
3000 hr	5.29%	1.04%	0.38%	1.41%	0.45%	0.17%	0.65%
4000 hr	7.04%	1.38%	0.50%	1.87%	0.61%	0.22%	0.87%
5000 hr	8.79%	1.73%	0.63%	2.33%	0.76%	0.28%	1.09%
6000 hr	10.53%	2.07%	0.76%	2.79%	0.91%	0.33%	1.30%
7000 hr	12.26%	2.41%	0.88%	3.25%	1.06%	0.39%	1.52%
8000 hr	13.99%	2.75%	1.01%	3.71%	1.21%	0.45%	1.73%
9000 hr	15.72%	3.09%	1.13%	4.16%	1.36%	0.50%	1.94%
10000 hr	17.73%	3.46%	1.30%	4.61%	1.61%	0.56%	2.26%

소프트웨어에 의해 예측된 고장률을 근거로 하여 제품 사용시간을 감안한 고장률을 계산한 결과는 다음과 같다.

(1) 세탁기 평균사용시간 계산

1회 동작시간은 평균 1.2 시간이며, 1일 1회 사용을 가정하면 개략적으로 연평균 사용횟수는 400회이고 연평균 사용시간은 480시간이다.

(2) 세탁기 콘트롤러 예측 고장률로부터 1년, 10년 불신뢰도는

$$F(1\text{year}) = 1 - \exp\left(-\frac{17.725424}{1000000 \text{ hours}} \times 480 \text{ hours}\right) = 0.847\%$$

$$F(10\text{years}) = 1 - \exp\left(-\frac{17.725424}{1000000 \text{ hours}} \times 4800 \text{ hours}\right) = 8.156\%$$

3.9 시작품 신뢰성 시험

제품 신뢰성 시험은 지수 분포를 가정하여 평가하였으며, 부품 신뢰성 시험은 각 부품에 적합한 작동조건을 적용하였다. 각 부품에 대한 최종 신뢰도 예측은 제품과 부품시험의 MTBF(하한치)합을 활용하였으며, 고장률 계산시 시험중 고장이 발생한 경우는 점 추정치를 적용하고, 고장이 발생하지 않은 경우에는 지수분포를 가정하여 신뢰수준 50%인 MTBF 하한치를 추정하였다. 또한 일부 시험항목에는 가속계수를 반영하였다. 계수치 평가의 절차는 다음과 같다.

- (1) 제품동작분석 : 세탁기 1회 운전 시 배수모터의 동작 회수는 4회이므로 배수모터의 1년 사용회수는 1600회이다.
- (2) 시험가속성과약 : 제품시험과 부품시험은 다음과 같이 실시하였다.

제품시험 :

- 프로그램 연속(상온상습) : 4000회
- 프로그램 연속(고온고습) : 2000회 (Af=2배)
- 탈수단속 (상온상습) : 1200시간
- 탈수단속 (고온고습) : 600시간 (Af=2배)
- 탈수단속 (저온) : 300시간 (Af=4배)
- 세탁연속 (상온상습) : 1200시간
- 세탁연속 (고온고습) : 600시간 (Af=2배)
- 부품시험 : 고온고습 신뢰성시험 : N=9, t=20000회 (Af=2배)
- 상온상습 신뢰성 시험 : N=20, t=50000회
- 연속동작 내구성 시험 : N=5, t=80640회

- (3) Total 제품시험=696년(278465회 / (4000회/10년))
- Total 부품시험 =1102년(176320회 / (1600회/1년))
- 총시험시간 =1798년

- (4) 고장 판정기준은 흡인동작 안됨, 복귀 안됨, 소음 발생시를 고장으로 정의되며 총 운전시간 동안 고장 발생은 없었다. 고장 발생 이력 : 제품시험 0건, 부품시험 0건
- (5) MTBF(하한치) = 1798년/0.6931 = 2594년 (신뢰수준 : 50% 경우, $-\log(0.5) = 0.6931$)

(6) 신뢰성 시험 결과 1년 불신뢰도(상한치)는 0.0385%로 계산되었으며, 10년 불신뢰도(상한치)는 0.3847%로 계산 되었다.

정리하면 다음페이지의 그림 4 와 같다.

개발이 완료된 후 신규 개발 제품이 개발 단계의 신뢰성을 유지하는지 정규 양산 중에 주기적으로 시료를 뽑아서 신뢰성 시험을 실시하여 그 결과를 평가하는 신뢰성 평가시험을 주기적으로 실시한다.

4. 결 론

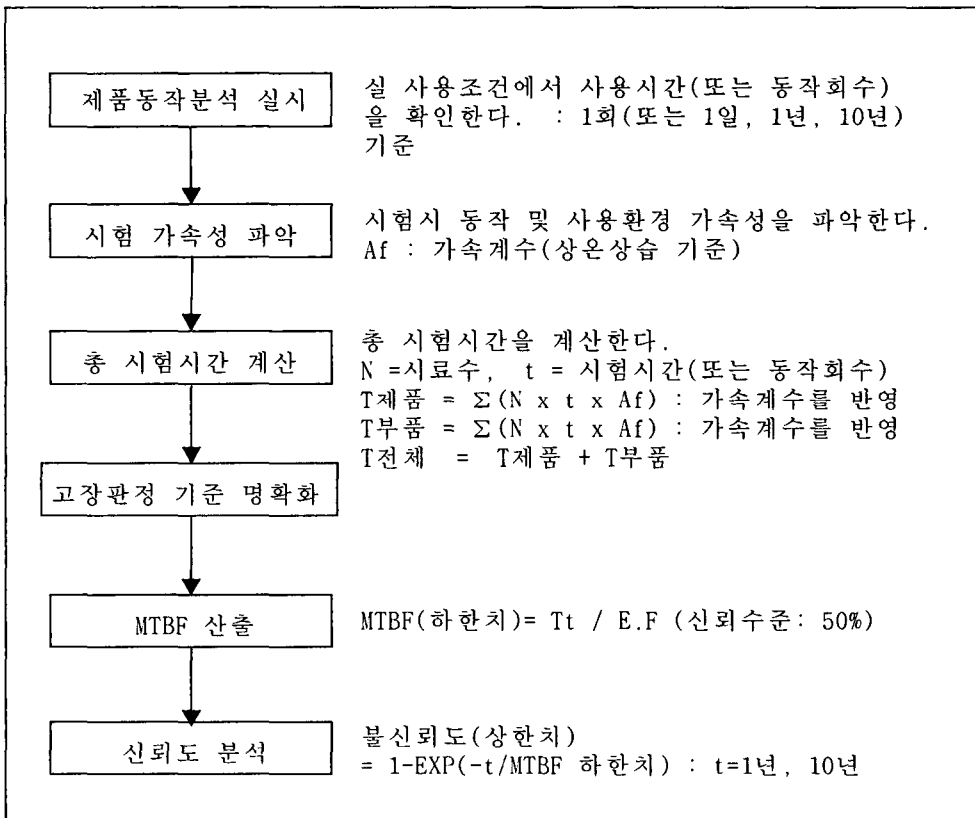
본 논문은 제품 개발단계에서 신뢰성을 확보하기 위해 GE에서 제안한 DFR 프로세스를 적용하여 실시된 사례연구의 분석을 통해 현시점에서 현장에서 적용되는 방법들의 한계 및 제약을 설명하고 앞으로의 연구방향에 대한 개별 단계에서 주안점에 대해 언급하였다.

앞으로 고려되어야 할 점으로는 단계1,3에서 현장의 데이터분석에서 일반적으로 무상보 증기간이후의 서비스자료는 전체고장을 포함하지 않는 문제 그리고 각 제품의 사용빈도 및 환경이 다르다는 문제가 있다. 그리고 사례분석은 지수분포를 가정하므로 1년과 10년의 목표를 구분하기보다 고장율(failure rate)목표를 사용할 수 있을 것이다.[참고 [1],[2],[6],[7)] 그리고 사례의 경우 서비스데이터는 제품단위로 사용되고 고장나면 수리가 이루어지는 경우로서 수리의 효과를 어떻게 모형화하는가 매우 중요한 문제이다. 다부품 시스템을 어떻게 분석할 것인가는 시스템분석문제로서 목적에 따라 다양할 수 있다. 사례에서의 분석은 흐름 중심의 분석이다. 일반적으로 신뢰도에서는 신뢰성블록도, FTA, Petri-Net 등이 사용가능한데 이 분야는 앞으로 보다 체계적으로 정립되어야 할 것으로 여겨진다.[참고[4)] 단계 4에서는 기준으로서는 신뢰도가 낮은 부품을 선정하고 있다. 핵심부품을 선정하는 문제는 신뢰성이론에서 Impotance measure를 결정하는 문제로 중요성 평가 기준이 문제이다. 예를 들어 Birnbaum 중요도는 부품신뢰성향상이 시스템 신뢰성향상에 대한 기여도를 기준으로 하는 것으로 직렬구조이며 고장이 독립인 경우 고장률이 높은 것이 중요하다.[참고[4)]

단계 5 문제는 신뢰성할당문제로서 제품 목표신뢰성을 확보하기 위한 부품신뢰도의 목표를 정하는 문제이다. 사례에서는 개별 부품의 목표를 일률적인 기준으로 정하고 있으나 이는 신뢰성 최적화문제이다. [참고[3)] 단계 6에서 각 부품의 신뢰성시험방법을 결정하고 있으나 고장판정기준, 시험샘플수, 시험시간등을 어떻게 결정할 것인가가 대단히 중요한 문제이다. 특히 가속시험의 경우 이 부분에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 단계 8에서 제품단위의 시험과 부품단위 시험 그리고 정상상태와 가속상태의 시험들이 다양하게 실시된 경우에 대한 신뢰도추정문제로서 이분야에 대한 보다 이론적인 검토가 필요한 것으로 판단된다. 가속계수를 사용하여 동작시간을 그대로 늘리는 방법이 지수분포가정하

에서 이론적으로 타당한지 검토가 필요할 것이다. [참고[2]]

지금까지 신뢰성에서 개별문제(고장데이터분석, 신뢰성할당, 신뢰성예측등)에서의 다양한 연구결과들이 이용가능하기도 하고 앞으로 이 분야의 연구주제를 찾는데도 도움이 되리라 기대한다.



<그림 4> MTTF 추정절차

다부품으로 구성된 제품의 신뢰성분석은 아직은 많은 연구주제를 가진 분야로 판단되며 이론적인 연구, 현장연구 그리고 전반적인 프로세스개발의 문제가 해결되어야 할 것으로 여겨진다. 마지막으로 DFR 프로세스에서 첫단계를 현재상황분석이 이루어져야 한다고 본다면 (1) 현수준 설계불량률 산출 (2) 신뢰성 목표설정 (3) 기능블록도 전개 (4) 핵심서브시스템 선정 (5) 불량률 목표 할당 (6)FMEA실시 (7) P-Diagram분석 및 개선 (8) 수명예측 (9) 시작품 신뢰성 시험 (10) 신뢰성 평가시험 의 10단계가 타당하다고 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] Krim, M.R.and K. Suzuki(2004), Analysis of Warranty Claim Data : A Literature Review, The Proceedings of AIWARM 2004,229-236.
- [2] Meeker, W.Q. and L.A. Escobar(1998), Statistical Methods for Reliability Data, Wiley.
- [3] O'connor, Patric. D. T.(1991), Practical Reliability Engineering(3rd. ed.), John Wiley & Sons.
- [4] Rausand, M. and A. Hoyland(2004), System Reliability Theory, Wiley.
- [5] 김현식(2003), 신뢰성 확보를 위한 제품개발 프로세스에 관한 연구, 석사학위논문, 부산대학교.
- [6] 윤원영, 성문현, 정석주(1999), 에어컨 서비스데이터 신뢰도분석, 대한산업공학회지, 12권, 1호, 1-9.
- [7] 윤원영, 정석주, 정일한, 김종운, 정상욱(2000), BMS 수리모형하에서 시스템의 수리효과 및 고장강도함수의 모수추정, 한국경영과학회지, 25권, 4호, 45-54.