

AMSAA Model을 이용한 최적 LCC에 관한 연구

김 준 홍

수원대학교 산업정보공학과

A Study on the Optimal LCC using AMSAA Model

Jun-Hong Kim

Dept. of Industrial Information Engineering, The university of Suwon

Engineers are always concerned with life cycle costs for making important economic decisions through engineering action like reliability of products. Decisions during the reliability growth development of products involve trade-offs between invested costs and its returns. In order to find minimal LCC containing the reliability improvement cost, production cost, repair and replacement costs, and holding cost of spare parts for failure items we suggest in this paper relationship between development cost and sustaining cost in values of growth parameter β of AMSAA model. This model is applied to the reliability growth program based on AMSAA model during R&D phase, the warranty activities of items and the block replacement policy for maintenance of items in avionic equipment.

Keywords : Reliability growth management, Life cycle cost, Effectiveness factor, Basic reliability tasks effectiveness, AMSAA model, Maintenance cost

1. 서 론

제품신뢰성개선활동은 제품라이프사이클 동안 지속적으로 추진된다. 제품 R&D단계에서는 신뢰성성장관리에 중점을 두고 신뢰성개선활동을 해 나간다. 이 활동은 TAAF process를 통해 목표 신뢰성을 달성하기 위해 신뢰성성장관리를 수행한다. 신뢰성성장관리란 시간 및 다른 자원들을 이용하여 신뢰성을 달성하기 위한 체계적 계획(planning), 그리고 신뢰도(reliability values)의 계획과 평가치를 비교하여 자원의 재할당에 의해 현 달성 비율의 통제(controlling)[9]라고 정의하고 있다.

신뢰성개선활동은 R&D단계를 거쳐 생산단계에서도 지속적인 신뢰성성장관리를 통한 개선활동이 이루어진다. 이 단계에서는 특히 생산 중 발생하는 불량률의 개선에 대한 문제가 주된 활동으로 제시된다. 그리고 제품 출하 후 시장에서 발생하는 제품고장은 A/S 및 보증활동을 통해 수리되고 이들 정보는 설계 및 생산, 품질부문에 feedback되어 재설계되고 신뢰성개선활동은 지속된다.

목표신뢰도 달성을 위해 제품개발초기단계에 소요되는 시간과 비용이 전체에 대해 차지하는 비율은 10~30% 정도로 낮지만, 총 비용의 70~80%는 개념형성의 시점에서 결정되므로 제품이 생산 중이나 생산된 후, 즉 나중 단계에서 변경이 이루어지면, 총비용에 10~20% 정도 밖에 영향을 미치지 못한다. 따라서 개발시점에서 비용의 변경은 매우 적지만 지속적인 생산에 큰 영향을 미칠 수 있다. 그렇지만, 제품개발단계에 달성된 신뢰도수준은 목표보다 낮은 현상은 자주 발생한다.

시스템이 설계, 생산, 사용된 후 낮은 신뢰도가 제기하는 문제는 신뢰도를 개선하는데 드는 비용이 시스템 개발에 드는 비용보다 더 크다는 것이다. 제품이 복잡하거나 새로운 기술이 도입된 제품의 개발일수록 높은 신뢰도를 달성하기 위해 많은 비용이 수반된다. 그러나 고장모드 제거시점이 제품 life cycle에서 더 빠를수록 불신뢰로 인한 비용은 더 저렴함에도 불구하고 부적절한 초기 신뢰도 프로그램이 발생하는 경우가 자주 있다. 여기에는 예측하지 못한 기술적인 문제, 촉박한 개

발일정, 제약된 사업비용, 운영비용을 부담으로 낮은 개발비용을 강조하는 프로그램관리자의 짧은 재임기간 등과 같은 이유를 들 수 있다. 이로 인한 결과는 더 높은 LCC 뿐만 아니라, 더 낮은 시스템 준비성으로 귀결된다. 많은 기업에서 이러한 사실들을 알고 있지만 실현하지 못하고 있다. 문제점을 너무 늦게 찾기 시작하여 너무 많은 시간과 비용을 소비하여 버리는 오류를 자주 범한다. 신뢰성투자의 결과로 총 비용을 언급하기보다 생산비용과 같은 개별비용 요소에 초점을 두는 연구들이 많이 있다[9, 12, 13].

LCC 분석은 제품의 신뢰성, 보전성분석 측면에서 제품의 경제적인 계획 및 설계의 방향을 정하는 방법이다. 또한 경쟁적인 기업들은 고품질을 생산하여 시장의 점유율을 높이기 위해 제품수명동안의 가치를 최대화하는데 주안점을 두고 있다. 제품개발에서 생산, 사용 및 폐기에 이르는 제품의 수명에 관련된 총 비용을 정량화하는 LCC 분석은 고유신뢰성과 사용신뢰성까지 기업활동의 넓은 분야에 관련되어 있고, 이는 신뢰성공학의 범위와도 관련이 있어 비용분석은 신뢰성 관리에 있어서 중요한 과제라 할 수 있다[14].

이 논문은 제품 LCC를 최소화하는 신뢰도성장 프로그램에서 목표 MTBF를 달성하기 위해 투입된 개발단계비용을 고려하고, 달성된 목표신뢰도를 갖는 제품의 생산, 출하 후 시장에서 고객사용 기간 중 일정 보증기간을 거쳐, 제품 고장에 따른 수리 및 교체비용, 그리고 고장을 고려한 예비품 보유비용을 고려한 총비용의 관점에서 목표신뢰도와 LCC간의 관계를 조사하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 LCC는 RDT&E cost, Production cost, O&S cost와 Spare part holding cost로 구분하였다.

RDT&E cost에 대해 신뢰성 성장프로그램에서 I test phase에서 II test phase로 전개될 때, test items의 고장에 대해 실제적인 개발환경에서 기술적 및 비용적 상황을 고려하여 완전수정, 불완전수정, 수정지연, 수정없음과 같은 경영적인 의사결정에 의한 수정조치 상황을 적용한 수정프로그램을 사용하여 수정효율과 성장률을 적용하고, 수치 예를 이용하여 그 결과를 분석하였다.

2. 신뢰도 성장모델과 LCC 분석

고신뢰도를 달성하기 위해 개발단계에서 많은 비용이 소요된다. 특히 제품이 복잡하거나 비교적 해보지 않은 기술을 포함할 때는 더욱 그렇다. 개발프로그램 동안 목표신뢰도를 달성하기 위해 얼마의 비용을 지불할 수 있는가 하는 경영상의 한계가 보통 있게 마련이다. 이들은 Cost/Benefit의 trade-off를 통해 달성된다. 다음 2.1절

에는 Duane의 성장모델과 AMSAA모델의 연관성을 언급하고, 2.2절에서 LCC분석을 위해 아이টে에 대한 RDT&E의 결과에 따른 개발비용, 보증비용을 포함한 생산비용, 그리고 sustaining cost들을 계산하기 위한 수리적 방법을 제시한다.

2.1 신뢰도 성장모델

2.1.1 신뢰도 성장률분석

신뢰도 성장률분석은 일반적으로 신뢰성 성장계획에 사용된 Duane model의 확률적 해석을 갖는 AMSAA model을 사용하여 추적된다. 개발시험동안 수행된 신뢰성성장 프로그램에서 Duane은 누적고장률 θ_C 대 누적작동시간 t 는 $\theta_C = bt^\alpha$ 의 관계를 갖고, log-log 그래프 상에 직선으로 plot된다는 것을 밝혀내었다, 즉 $\ln\theta_C = \ln b + \alpha \ln t$. Learning curve growth pattern을 얻기 위해 누적시험시간의 power function으로 고장률을 공식화하였다[4]. $N(t)$ 를 작동시간 t 동안 발생한 고장수라하면, 누적고장률은 $\theta_C = \frac{t}{N(t)}$. 이 관계에서

$$N(t) = \frac{1}{b} t^{1-\alpha} .$$

이 관측에 근거하여 시간 t에서 순간고장률 λ_t 는

$$\lambda_t = \frac{d}{dt} N(t) = \frac{1}{b} (1-\alpha)t^{-\alpha}, \dots \dots \dots (1)$$

여기서 지수 α 를 성장률이라 한다. 식 (1)에서 θ_C 와 θ_t 와의 관계는 $\theta_C = (1-\alpha)\theta_t$.

Duane의 공식은 신뢰성성장에 대한 예상패턴을 제시하지만, 데이터와 관련된 다양성을 지적하지 않는다는 점에서 deterministic이라 말할 수 있다.

AMSAA model[1]은 동일한 power function을 이용하지만 고장은 개발시험단계 내에서 nonHomogeneous Poisson process(NHPP)로 발생한다고 가정하고 있고, 고장에 대한 현 확률적 모델이 평균치 함수

$$E[N(t)] = \lambda t^\beta \dots \dots \dots (2)$$

와 intensity function

$$h(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} \dots \dots \dots (3)$$

를 갖는 NHPP로 공식화 될 수 있다. 여기서 $\lambda = \eta^{1/\beta}$, $\alpha = 1-\beta$ 라 두면, 식 (1)과 식 (3)은 같다. 그러나 이들 모수는 데이터 분석 시 어떻게 정의되는가에 따라 달라진다.

2.1.2 수정효율을 고려한 신뢰성 성장모델

개발시험단계 동안 고장모드가 발견되었을 때 발생한 고장모드를 모두수정, 일부수정, 또, 시험단계 후에 모두수정, 또는 전혀 무수정하는 방안이 있다. 이 중 시험단계 중 수정하는 방법은 비현실적이고, 따라서 설계엔지니어가 제안한 개선사항에 대해 개발자원, 기술적 내용, 과거경험 등을 고려하여 개발책임자는 경제적, 기술적 혹은 다른 이유로 인하여 개선조치를 하지 않는 방안, 소위 A모드 고장과 시험 중 고장이 발견되면 설계 개선을 포함한 개선조치가 수행되는 B모드 고장으로 구분하여 관리하는 방법을 사용한다[2].

B모드 고장 중에는 일부가 발견되지 않을 수 있으며, 또한 발견되더라도 완전무결하게 바로 개선조치가 이루어지는 것은 아니고, 설계개선이 이루어진 후에도 고장률의 일부가 제거 되지 않고 남아 있는 경우도 있다. B모드에 대한 수정활동을 통해 고장모드가 줄어들고 줄어든 효율을 수정효율(effectiveness factor)이라 하고 일반적으로 이 효율은 70% 정도이다. 따라서 수정효율은 경영자의 경영전략의 한 부분이라 할 수 있다. 개발시험동안 발견된 B모드 고장에 대해 d%의 수정효율을 달성하면, (1-d)%는 제품에 고장으로 남게 된다.

지금, 지연수정에 따른 B모드 고장이 K개이고, λ_i ($i=1, \dots, K$),는 i번째 B모드 고장률이라 하자. 고장모드 발생이 독립적인 지수분포에 따르고 A모드 고장률이 λ_A , B모드 고장률이 λ_B 이면, 초기 시험시작단계에서 시스템고장률은

$$\lambda(0) = \lambda_A + \lambda_B, \dots \dots \dots (4)$$

여기서 $\lambda_B = \sum_{i=1}^K \lambda_i$.

지연수정이 이루어진 후 시각 $t = T_1$ 에서 고장률 $r(t) = r(T_1)$ 은, 시험시간 $[0, T_1]$ 동안 $M(\leq K)$ 개의 B모드 고장 수가 발생하므로,

$$r(T_1) = r_A + \sum_{i=1}^K (1-d_i)\lambda_i + (\lambda_B - \sum_{i=1}^M \lambda_i) \dots \dots \dots (5)$$

식 (5)에서 각 아이템에 대한 B모드 고장에 대한 기대 수정효율로 정리하면,

$$\hat{r}(T_1) = \hat{\lambda}_A + (1-d_1)\hat{\lambda}_B + d_1\hat{h}(T_1), \dots \dots \dots (6)$$

여기서 $\hat{\lambda}_B = \frac{N_B}{T_1}$, $\hat{h}(T_1) = \hat{\lambda}\hat{\beta}T_1^{\hat{\beta}-1} = \hat{\beta}\frac{M}{T_1}$,

$$\text{또 } \hat{\lambda} = \frac{M}{T^{\hat{\beta}}}, \hat{\beta} = \frac{M}{\sum_{i=1}^M \ln(\frac{T_1}{X_i})}$$

$$d_1 = \frac{\sum_{i=1}^M d_{ij}}{M} \text{로 평균수정효율이라 한다.}$$

신뢰성성장 개발계획에서 개발시험시간을 수립하기 위해 식 (6)을 이용한다.

2.1.3 기본신뢰성업무 효율성

신뢰성성장개발계획을 추진하는데 있어 초기 신뢰도의 설정은 중요한 파라미터이다[1]. 이 값은 시스템에 대한 기본신뢰성업무 효율성(basic reliability tasks effectiveness, BRTE)을 기초로 하여 설정된다. BRTE는 최종 MTBF θ_f 에 대한 초기 MTBF θ_0 의 비율로서 기본신뢰성업무(basic reliability tasks, BRT)의 달성정도를 나타낸다. 즉,

$$\text{기본신뢰성업무 효율성(BRTE)} = \frac{\theta_0}{\theta_f} \dots \dots \dots (7)$$

기본신뢰성업무는 MIL-STD 785에 따르면, 신뢰성목표를 달성하기위한 업무는 ① 프로그램 감시 및 관리, ② 설계와 평가, ③ 개발 및 생산시험 업무로 이루어진다. 그 중 항목 ①과 ②는 전반적인 시제품을 만들기 이전에 근본적으로 수행되는 것으로 BRT 후에 곧 바로 시제품의 MTBF가 완성되고 final MTBF라 한다.

BRT의 결과로 시제품을 이용하여 RDGT(개발 및 성장시험)이 수행된다. 이 업무 동안에 발견된 고장모드는 경영전략에 따라 수정행위를 하거나(B모드 고장), 또는 수정행위를 하지 않거나(A모드 고장)하는 수정활동을 하게 된다.

RDGT가 충분하다면 시스템 MTBF는 더 이상의 수정행위가 거의 필요 없는 완성된 MTBF로 성장한다. 이 완성된 MTBF를 growth potential로 소위 목표 MTBF가 된다. 만약 시스템이 RDGT에 따라 시험종료 시 얻어지는 신뢰도를 final MTBF라 한다. MTBF가 성숙되면 growth potential MTBF는 final MTBF와 같다. 따라서 이 비율이 높다는 것은 RDGT에서 기본신뢰성업무의 효율성이 낮음을 의미한다[3]. 이 논문에서 BRTE의 값을 이용하여 신뢰성달성 목표를 설정한다.

2.2 LCC 분석

2.2.1 목표MTBF 달성을 위한 개발비용의 결정

신뢰성성장개발단계에서 신뢰성성장과 수정효율을 고려한 개발시험시간 t_D 는 개발시험비용의 기초자료이다 [9]. 개발시험 시작시각 t_0 에서 MTBF θ_0 라 하면, 성장률 α 를 고려한 목표MTBF θ_f 를 달성하기 위한 개발시험시간 t_D 는 Duane model에서 $\theta_C = bt^\alpha$ 를 이용하여,

$\theta_C = \theta_0 \left(\frac{t_D}{t_0}\right)^\alpha$, 여기서 $\theta_I = \frac{\theta_C}{1-\alpha}$, 을 통해

$$\begin{aligned} t_D &= t_0 \left(\frac{\theta_C}{\theta_0}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \\ &= t_0 \left\{ \frac{(1-\alpha)\theta_I}{\theta_0} \right\}^{\frac{1}{\alpha}} \\ &= t_0 \left\{ \frac{(1-\alpha)}{BRTE} \right\}^{\frac{1}{\alpha}} \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

, 여기서 $BRTE = \frac{\theta_0}{\theta_I}$.

단위시간당 시험비용을 c_D 라 하고, 시간에 따라 선형성을 가정한다면, 개발단계 동안 총 시험비용은

$$C_{TD} = c_D \cdot t_D \dots\dots\dots (9)$$

2.2.2 신뢰도성장률에 따른 생산비용의 결정

LCC에 포함된 아이템의 구매비용은 공급자입장에서 본 생산비용이 되고 이것은 아이템의 생산량에 아이템의 이윤을 제외한 가격을 곱한 값이다. 아이템의 신뢰도는 세 가지 요인으로 그 가격형성에 영향을 미친다.

- ① 제조과정동안 발생하는 아이템의 고장을 수정하기 위해 지출되는 노무비
- ② 아이템의 제조를 위해 사용된 재료비
- ③ 아이템 보증기간동안 발생하는 고장에 따른 보증비용

아이템의 신뢰도가 높고 낮음에 따라 이들 요인들은 아이템 가격에 영향을 미치므로, 이들 각 요인들을 각각 F_1, F_2, F_3 라 하면, 요인 F_1, F_2 는 Prasad[14]에 따라 식 (10), 식 (11)과 같고, F_3 는 Nguyen et al.[10]에 따라 식 (12)로 구해진다.

(1) 노무비 요인 F_1

아이템의 신뢰도향상은 제조동안 발생한 아이템 평균 결함 및 고장수를 상대적으로 저감시키고 따라서 생산 단계에서 고장의 수정 및 수리를 위한 노무비 감소로 이어진다.

$$F_1 = 1 + \text{노무비 비율} \times \left(\frac{\theta_I}{\theta_0} - 1\right) \dots\dots\dots (10)$$

, 여기서 노무비 비율은 수리 아이템에 대한 노무비 부분으로 약 0.03.

θ_I 목표MTBF
 θ_0 표준MTBF.

(2) 재료비 요인 F_2

고신뢰성 아이템에 대한 재료비는 표준아이템에 대한 것 보다 더 비싸다

$$F_2 = 1 + \text{재료비 비율} \times \left[\left(\frac{\theta_0}{\theta_I}\right)^{1.5} - 1\right] \dots\dots\dots (11)$$

, 여기서 재료비 비율은 아이템에 대해 재료비가 차지하는 비율로 약 0.08.

(3) 보증비 요인 F_3

보증기간 w 에 대한 보증비용은 원가에 추가되는 항목으로 생산비용에 포함된다.

출하 후 보증기간 w 기간의 고장은 수선 또는 교체를 실시하는 수명기간 보증을 가질 수 있다. 문제를 단순화하기 위해 일정고장을 가정한 수리가능한 제품에 대한 보증모델을 대상으로 보증기간동안의 부품의 고장은 수리 및 교체로 아이템의 기능이 회복된다. 이 보증모델에 대해 생산된 L 개의 유니트에 대해 보증기간 w 동안 아이템의 고장은 모두 교체하는 것으로 하고, 출하 후 아이템의 고장은 시간에 따라 증가하는 형태를 갖는 형상모수 $\beta > 1$ 를 갖는 와이블분포에 따르는 고장률을 갖는 것으로 가정한다.

유니트의 고장률함수 $h(t)$ 가 와이블분포인 경우, 기대 고장 수는

$$\begin{aligned} M(t=w) &= E[N(t)] \\ &= L \cdot P\{\text{시간 } t=w \text{ 동안 제품의 고장}\} \\ &= L \cdot F(t) = L(1 - e^{-\lambda t^\beta}). \end{aligned}$$

기간 $[t, t+dt]$ 에서 총 고장 수는

$$dE[N(t)] = \frac{\partial E[N(t)]}{\partial t} dt = L \cdot \lambda \beta t^{\beta-1} e^{-\lambda t^\beta} dt.$$

$c(t)$ 를 보증비를 포함하지 않은 아이템의 가격이라 하자.

기간 $[t, t+dt]$ 에서 고장에 따른 보증비용은

$$d(R) = c(t) \cdot L \cdot \lambda \beta t^{\beta-1} e^{-\lambda t^\beta} dt.$$

따라서 기간 $[0, w]$ 에서 발생하는 고장에 대한 총 비용은

$$\begin{aligned} R &= \int_0^w d(R) dt \\ &= c(t) \cdot L \cdot \lambda \beta \int_0^w t^{\beta-1} e^{-\lambda t^\beta} dt \\ &= c(t) \cdot L \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{\lambda w^\beta}}\right). \end{aligned}$$

단위당 보증비용

$$r = \frac{R}{L} = c(t) \left(1 - \frac{1}{e^{\lambda w^3}}\right).$$

보증비용이 포함되지 않은 유니트 가격을 $c'(t)$ 라 하면, $c(t) = c'(t) + r$. 정리하면,

$$c'(t) = c(t) \left[1 - \frac{r}{c(t)}\right].$$

보증에 의한 유니트 가격요인 F_3 은 따라서

$$F_3 = \frac{c(t)}{c'(t)} = \frac{1}{1 - \frac{r}{c(t)}} = e^{\lambda w^3} \dots \dots \dots (12)$$

가 된다.

이들 요인들을 결합한 아이템의 생산가격은

$$c_p = c \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot F_3$$

이 되고, 아이템 생산량 L 에 대한 총 생산비용은

$$C_{TP} = L \cdot c_p. \dots \dots \dots (13)$$

2.2.3 신뢰도성장률에 따른 보전비용의 결정

(1) 보전비용의 결정

많은 구성품으로 이루어진 복잡한 시스템에서 개별 구성품의 고장으로 인한 수리 및 교체를 통해 시스템의 가동상태가 환원된다. 여러 가지 보전방식 중 아이템의 수리 및 교체가 시스템의 신뢰도에 영향을 주지 않는 imperfect repair model을 생각한다. LCC 분석에서 아이템의 보전비용 부분은 그 개발단계에서 의사결정의 trade-offs에 중요한 부분을 차지하고 있다. 보전비용분석을 위한 가정은 다음과 같다.

- ① 보전비용에 있어서 고장 후 시스템을 수리하기 위해 드는 비용은 고장 전 아이템의 교체와 같은 예방보전 행위와 관련된 비용보다 일반적으로 더 크다.
- ② 시스템의 고장률에 대해서 시스템의 고장률 함수는 시간과 함께 증가한다. 일정고장률이나 감소하는 고장률을 갖는 시스템의 보전행위는 자원의 낭비가 될 수 있다.
- ③ 아이템의 수리 및 교체는 시스템의 고장률에 변화를 주지 않는다.
- ④ 아이템의 보전관리는 일정간격 교체정책에 따른다.

우선, 일정간격 교체정책에 따른 최적 교체주기를 결정하고, 시스템의 수명기간동안에 대한 총 교체회수를

통해, 생산된 아이템의 보전관리를 위한 총 보전비용을 구한다. 지금,

- 시스템의 수리비용 c_f ,
- 예방교체비용 c_r ,
- 최적 교체주기 t_r ,
- 시스템의 수명을 t_s ,
- 교체 주기당 기대 고장 수 $M(t_r)$,
- 생산량 L 라 하자.

그러면 한 아이템에 대해 주기 t_r 동안의 총 기대비용 $c(t_r)$ 은

$$c(t_r) = \frac{c_f M(t_r) + c_r}{t_r} \dots \dots \dots (14)$$

교체간격 동안 예비품재고의 과부족으로 인한 손실비용을 고려하자. 이를 고려한 단위 주기당 총비용 $tc(t_r)$ 은 식 (14)에 손실비용을 포함하여 다음과 같이 표현된다[5].

$$tc(t_r) = c(t_r) + \alpha D(L, t_r), \dots \dots \dots (15)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } D(L, t_r) &= E\{[S - (N(t_r) + 1)]^2\} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \{S - (N(t_r) + 1)\}^2 P\{N(t_r) = n\} \end{aligned}$$

여기서, α 는 penalty cost factor.

이들을 정리하면, 식 (15)는

$$\begin{aligned} tc(t_r) &= \frac{c_f M(t_r) + c_r}{t_r} \\ &+ \alpha \{[S - M(t_r) + 1]^2 + Var[N(t_r)]\}. \dots \dots \dots (16) \end{aligned}$$

식 (16)를 t_r 에 대해 편미분하여 0으로 하여 최적 교체주기 t_r^* 를 구한다. 즉

$$\frac{\partial tc(t_r)}{\partial t_r} + \alpha \frac{\partial V(t_r)}{\partial t_r} = 0$$

, 여기서 $V(t_r) = Var[N(t_r)]$.

따라서 시스템의 수명동안 아이템의 총 교체회수는 $N_{tr} = \frac{t_s}{t_r}$. 그리고 생산량 L 에 대해, 시스템 수명기간동안의 총 보전비용 C_{TM} 은

$$C_{TM} = L \cdot N_{tr} \cdot tc(t_r). \dots \dots \dots (17)$$

(2) 보유예비품 비용의 결정

시스템의 수명기간 동안 아이템의 고장에 대비하기

위한 보유예비품은 1주기에 해당하는 예비품만을 보유 하는 것으로 한다. 이를 위해 최적 보유예비품 수량 S 는 식 (16)의 S 에 대해 편미분방정식을 0으로 두어 구 한다[5]. 그 결과는 다음과 같다:

$$S = 1 + M(t_r) \dots\dots\dots (18)$$

여기서 $M(t_r) = E[N(t_r)]$

$$\begin{aligned} &= \sum_{r=0}^{\infty} r P[N(t) = r] \\ &= \sum_{r=0}^{\infty} r [F_r(t) - F_{r+1}(t)] \\ &= \sum_{r=1}^{\infty} F_r(t) \\ &= F(t) + \sum_{r=1}^{\infty} F_{r+1}(t) \end{aligned}$$

, 여기서 $F_{r+1}(t)$ 는 $F_r(t)$ 과 $F(t)$ 와의 convolution.

즉, 최적 예비품 수는 예방보전 주기 동안 기대고장 수와 같다.

제품의 사용기간 (0, t]에서 기대 고장 수 $M(t_r)$ 는 선택된 보증정책에 따른 보증비용을 결정하거나, 수리시스템에 대해 최적 보전교체기간을 구하는데 있어 중요한 역할을 한다. 그리고 또 제조자가 보증비용, 최적 예방보전 일정계획, 또 신뢰성합격시험기준 등을 결정하는데 있어도 중요한 자료로 사용된다.

대수적으로 $M(t_r)$ 를 구하는 것은 일정고장률인 경우 간단하지만, 복잡한 고장률함수인 경우 어려우므로 다음 근사식을 이용 기대 고장수와 기대 고장수의 분산을 사용한다:

$$\begin{aligned} M(t_r) &= \frac{t_r}{\mu} + \frac{\sigma^2 - \mu^2}{2\mu^2}, \\ Var[M(t_r)] &= \frac{\sigma^2}{\mu^3} t_r, \end{aligned}$$

여기서, μ 는 와이블 분포의 평균

$$= \left(\frac{1}{\lambda}\right)^\beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right),$$

σ^2 는 와이블 분포의 분산

$$= \left(\frac{1}{\lambda}\right)^\beta \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right]^2 \right\}.$$

식 (18)을 이용한 교체주기 동안 고장에 대비한 보유 예비품 비용 C_{TS} 은

$$C_{TS} = c_p \cdot L \cdot S \dots\dots\dots (19)$$

따라서 시스템 수명기간동안의 LCC는

$$LCC = C_{TD} + C_{TP} + C_{TM} + C_{TS} \dots\dots\dots (20)$$

로 구할 수 있다.

3. 수치 예

항공기에 장착되는 Cabin air-conditioning unit의 신뢰 성장개발 프로그램 사례를 중심으로 LCC모형을 분석한다. 계획된 항공기 배치는 400대이고 각 비행기에 유니트 1대가 장착된다. 과거의 경험에 따르면 유니트의 고장률은 비행시간 1,000시간에 10대로 나타났고, 항공기의 연평균비행시간은 대당 350시간이다.

I단계 개발시험은 초기 MTBF 100시간으로 시작하였고, 1,500시간의 개발시험결과 고장 아이টে에 대해 수정 효율을 갖는 delayed fixes를 수행하였다. 총 15대의 고장 중 A모드 고장은 3대, B모드 고장은 총 12대 중 9대는 서로 다른 고장 종류였다. I단계 개발시험 동안 관측된 B모드 고장에 대해 지연수정의 기술적 평가 및 미발견 B모드 고장의 출현비율에 대한 수정인수를 사용하여 각 고장에 대한 수정효율을 사용하였다. 이 모델에서 평균수정효율 0.7을 고려하였고, 결과로 성장률 0.22를 얻었다. 이 시험으로 달성된 MTBF는 167시간. 해당 BRTE=0.60으로 높지 않은 신뢰성업무 효율성을 갖고 있다.

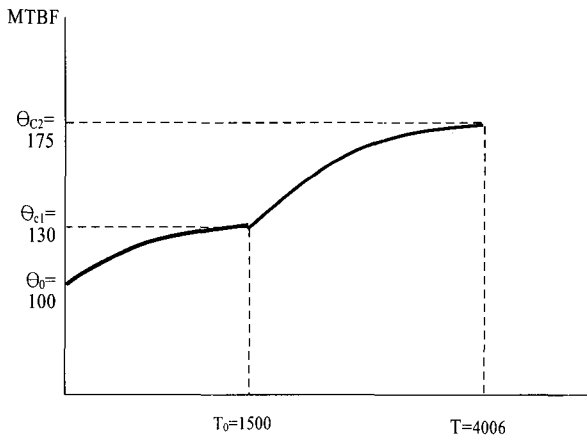
이 자료를 토대로 유니트에 대해 II단계 Reliability growth program은 goal MTBF 250시간, 성장률 0.3을 목표로 goal MTBF 250시간을 달성하기 위한 개발시험으로 진행한다. 이에 대한 총 시험시간을 4,006시간이고, BRTE는 0.52이었다.

개발시험비용 산출을 위해 시험비용은 시험에 따른 고정비 및 변동비를 고려하여 시간당 800(단위)이다. 현가의 시점은 제품 출하 시점을 기준으로 개발비용은 미래가, 보전비용은 이자율 5%의 현가를 적용하여 분석한다.

신뢰성 개발을 거쳐 출하된 아이টে은 증가하는 고장률로 와이블분포의 형상모수 β 는 1.5와 2.5에 대해 적용하였다. 아이টে 출하 후에는 신뢰도성장은 없으며, 사용시간으로 20시간의 보증 수리기간 동안의 아이টে의 고장은 모두 교체되고, 그 이후의 사용상 고장은 정기 교체 방식을 이용한 보전관리를 수행한다. 항공기의 수명은 20년으로 하고, 연간 350시간을 사용한다. LCC 분석에서 적정 보전주기를 구하기 위해 유니트 가격은 6,000(단위), 유니트 교체비용은 1000(단위), 유니트 수리비용은 2000(단위)로 하였다.

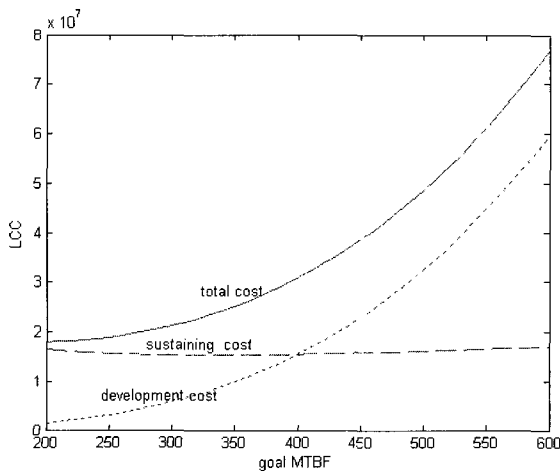
<표 1> B모드에 따른 고장시간

B 모드	고장시간
1	26
2	36
3	212, 697
4	856, 1174
5	858
6	1120
7	1288, 1322
8	1343
9	1402



<그림 1> 신뢰성 성장 개발 프로그램

이들 자료를 토대로 goal MTBF가 200~600인 경우에 대해 신뢰성성장 프로그램에 대한 비용효율성에 대해 분석한 결과, 총 LCC의 그래프는 <그림 2>와 같다. 여



(경우 1) $\beta=1.5$

기서 비용단위는 단위원을 사용하였다.

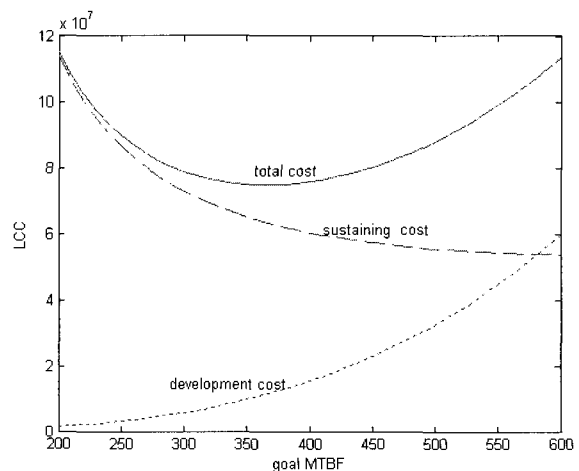
4. 결 론

I단계 개발시험 결과를 토대로, 평균지연수정효율 70%, 성장률 30%를 고려하여, II단계 개발시험을 진행하였다. 그 결과, LCC분석 <그림 2>에서 형상모수 β 의 값에 따라 development cost 및 sustaining cost에 큰 영향을 미치고 있음을 보여준다.

$\beta=1.5$ 의 경우 goal MTBF=340에서 minimal sustaining cost을 제시하고 있고, 이 goal MTBF를 달성하기 위해 계획성장률은 0.3보다 큰 0.37을 목표로 개발시험을 실시하여야 한다. 그리고 goal MTBF가 커짐에 따라 development cost도 상대적으로 상당히 크게 증가하고 있어, 제품고장률을 낮은 제품에 대해 LCC에서 보전비용에 대한 부분은 상대적으로 적다고 할 수 있다. <그림 3>은 $\beta=1.5$ 에 대한 sustaining cost를 상세하게 구분하여 표시하였다.

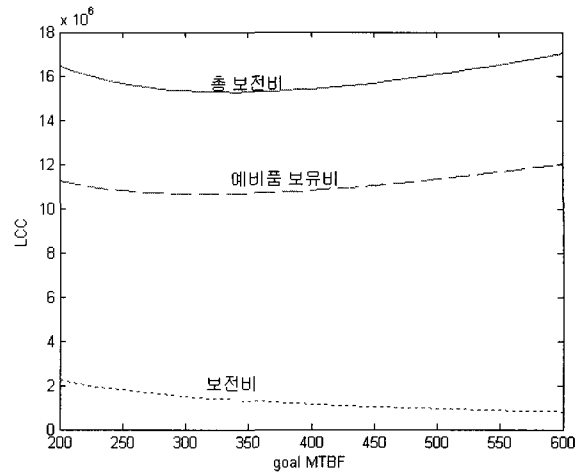
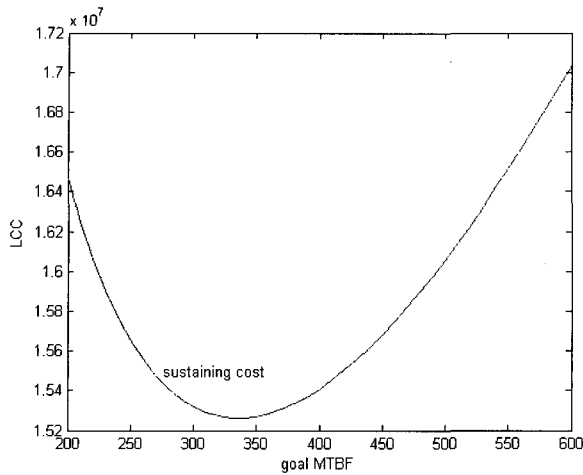
$\beta=2.5$ 의 경우 goal MTBF가 370에서 최소 보전관련 비용을 제시하고 있고, 이 목표를 달성하기 위해 계획성장률 0.3보다 높은 0.39을 목표로 개발시험을 실시하여야 한다. 시간 증가에 따라 상대적으로 높은 고장률을 보이는 경우에 속하는 신뢰도를 갖는 아이템이므로 초기고장발생률이 높아 LCC에서 보전비용에 대한 부분은 상대적으로 높다.

LCC에 대해 일반적으로 생각하는 개발비용과 보전비용의 관계는 $\beta=2.5$ 로 시간에 따른 유니트의 고장률이 상당히 높은 경우가 된다. <그림 2>의 (경우 2)에서와 같은 모양으로 잘 나타나고 있고, 이것은 개념적으로



(경우 2) $\beta=2.5$

<그림 2> 목표 MTBF에 대한 LCC 그래프



〈그림 3〉 $\beta=1.5$ 의 경우 보전관련 비용

제시된 신뢰성과 비용간의 관계와 유사하는 결과를 얻게 되었다. 그러한 경우는 LCC를 최소화하는 최적 goal MTBF를 달성하는 방안을 설정하는데 어려움이 없다. 그러나 고장률이 낮은 경우는 sustaining cost가 아이템 개발비용에 비해 상대적으로 적어 goal MTBF의 달성은 개발비용의 계획에 많은 부분을 차지하고 있어 RDT&E를 실행에 대한 필요성을 제시하고 있음을 알 수 있다. Cost-benefit 측면에서 최적 제품개발기간의 설정은 여러 측면에서 고려되어야 함을 알 수 있다.

참고문헌

[1] Crow, L. H.; "Reliability Analysis for Complex Repairable Systems in Reliability and Biometry", *SIAM*, pp. 370-410, 1974.
 [2] Crow, L. H.; "Reliability growth projection from delayed fixes", *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 84-89, 1983.
 [3] Crow, L. H.; "Studies and methods for improving the effectiveness of reliability tasks", *Proc Annual Reliability and Maintainability Symp*, pp. 14-19, 2005.
 [4] Duane, J. T.; "Learning Curve Approach to Reliability Monitoring", *IEEE Transactions on Aerospace*, 2 : 563-566, 1964.
 [5] Elsayed, E. L.; *Engineering reliability*, Addison Wesley,

1996.
 [6] Hevesh, A. H.; "Cost of reliability improvement", *Proc. Ann. Reliability Symp.*, pp. 54-61, Jan. 1969.
 [7] Jung, W.; "Practical Application of Reliability Growth in Automotive New Product Cycle", *IE Interfaces*, 12(1) : 158-165, 1999.
 [8] Mercurio, S. P. and Skaggs, C. W.; "Reliability acquisition cost study", Rome Air Development Center, Report TR-73-334, Nov. 1973.
 [9] MIL-HDBK-189; *Reliability Growth Management*, Department of Defense Washington, DC : 1981.
 [10] Nguyen, D. G. and Murthy, D. N. P.; "A General model for estimating warranty costs for repairable products", *IIE Transactions*, pp. 379-386, Dec. 1984.
 [11] P. D. T. O'connor; *Practical reliability engineering 3rd*, John wiley and sons, 1991.
 [12] Prasad, B.; "A Model for optimizing performance based on reliability, life-cycle cost and other measurements", *Production planning & Control*, 10(3) : 286-300, 1999.
 [13] Quiley, J. and Walls, L.; "Cost-benefit modeling for reliability growth", *Journal of the Operations Research Society*, 54(12) : 1234-1241, 2003.
 [14] Seger, J. K.; "Reliability investment and life-cycle cost", *IEEE Transactions on Reliability*, R-32(3) : 259-263, 1983.