

와이블 분포의 형상모수와 정비비용을 고려한 Hard Time 예방정비업무의 효용성에 관한 연구

김만수*, 지웅기¹
¹LIG넥스원 ILS 연구센터

The Usefulness of Hard Time Task for Weapon System in Considering Shape Parameter of Weibull Life Time Distribution and Maintenance Cost

Mansoo Kim^{*}, Woong Ki Ji¹

¹ILS(Integrated Logistics Support) R&D Lab, LIG Nex1

요약 본 논문은 복잡해지는 군수분야에서 효율적이고 효과적인 예방정비업무 할당을 위해 Hard Time 업무의 최적 주기산정 및 이를 통한 경제적 효용성을 분석하는데 연구 목적이 있다. 본 연구는 기존 연구에서 제시하는 예방정비 주기 선정 방법의 한계점을 분석하였다. 또한 일반적인 Wearout 고장 특성을 설명하는 와이블 수명분포에서 다양한 형상모수 조건과 예방정비비용과 고장정비비용 조건을 가정한 시뮬레이션을 통해 가상의 시스템에 대한 정비활동을 모의하여 총 정비비용의 추이를 분석하였다.

Abstract The study of maintenance planning is important in military weapon systems because it can improve their availability and reduce the operational and maintenance cost during the total life cycle. In maintenance planning, it is important to determine the preventive maintenance task and its optimal interval. This paper focuses on the hard time task, which is one of the preventive maintenance tasks. A hard time task removes an item or restorative action before some specified maximum age limit to prevent functional failure. The Monte-Carlo simulation model was proposed to help understand the cost effectiveness of a hard time task. In the simulation, various shape parameters of the Weibull distribution and cost ratio of corrective maintenance to preventive maintenance were assumed. Using a Monte-Carlo simulation, a quantified cost saving effect and optimal preventive maintenance interval were suggested.

Keywords : Hard Time Task, Maintenance Cost, Preventive Maintenance, Weibull Distribution

1. 서론

정비는 고장의 영향을 회피하거나 완화하기 위하여 실시하는 활동으로, 일반적으로 고장이 발생된 후 다시 작동할 수 있도록 하는 고장정비(Corrective maintenance)와 장비의 고장이 발생하지 않도록 사전에 조치를 하는 예방정비(Preventive Maintenance)로 구분된다.

과거의 단순했던 시스템에서는 고장이 발생하면 수리

하는 고장정비 위주로 수행되었으나 시스템의 규모와 복잡성이 증대되고 이에 따라 개발/생산 단계에 비해 운용/유지 단계에서 더 많은 비용이 발생하게 되면서, 고장의 발생을 예방하는 예방정비가 중요하게 되었다. 더 나아가 현재에는 안전이나 환경에 대한 영향이 중요해지고 시스템을 개발하는 공정과 기술이 고도화되어 이전보다 더 효과적이고 효율적인 예방정비 방법이 무엇인지가 활발히 연구되고 있다.

*Corresponding Author : Mansoo Kim(ILS R&D Lab, LIG Nex1)
Tel: +82-31-8026-4911 email: mansoo.kim@lignex1.com

1.1 초기 예방정비의 문제점

예방정비가 도입된 초기에는 규정된 시간에 따라 획일적으로 부분적인 또는 시스템 전체의 분해수리(Overhaul)가 효과적인 방법으로 인식이 되었다. 그러나 분해수리는 부품의 수명이 아직 남아있는 채로 교환되거나 사용시간과 고장의 상관관계가 없는 부품까지도 교환될 수 있어 비경제적인 부분이 발생할 수 있으며, 화력발전소의 설비고장이 분해수리 후 집중하여 발생한 사례나 [1] 국내 철도차량의 정비관련 자료 분석결과 분해수리 후 고장이 많이 발생한 사례[2]와 같이 분해수리 작업 중 인적 실수(Human Error)나 결함부품의 유입으로 고장이 더 발생되기도 한다.

1.2 신뢰성 중심 정비(RCM)와 Hard time 예방정비

앞서 이야기한 바와 같이 분해수리를 중심으로 한 예방정비는 경험적으로 여러 가지 정비상의 불합리점이 발견되었으며, 이를 개선하고자 도입된 것이 신뢰성 중심 정비(RCM; Reliability Centered Maintenance. 이하 RCM)이다.

RCM은 시스템의 예방정비 프로그램을 최적화 하거나 새로운 프로그램을 수립하기 위한 체계적인 접근방법으로, 시스템을 구성품 단위로 구분하여, 각 구성품의 기능을 파악하고, 주요한 구성품의 고장유형과 그 원인을 식별하는 절차로 이루어진다. 그리고 각 고장유형별로 고장발생시 시스템에 미치는 영향을 고려하여 예방정비 방법이 선정된다.

미군의 RCM 업무 규정인 MIL-STD-2173에서 제시하는 예방정비 방법의 종류는 다음과 같다.[3]

- Servicing: 정상적인 운용상의 소모되는 품목(연료, 오일, 질소 등)의 재보충
- Lubrication: 윤활이 필요한 부품의 주기적 윤활제 보충. 윤활제의 수명에 따라서 보충이 되며, 보통은 제조사의 권고에 따라 주기를 선정한다.
- On Condition (OC): 고장이 발생하기 전에 고장을 유발할 수 있는 잠재적인 고장(Potential failure)을 탐지하기 위하여 주기적으로 확인하는 업무. 잠재적인 고장이 관측된 후로 실제 고장이 발생하기 전까지 부품의 수명을 최대한으로 사용할 수 있도록 하는 것을 목적으로 하며, 이를 위하여 OC업무를 수행하는 주기를 적절하게 수립하는 것이 중요

하다.

- Hard Time (HT): 수명이 정해져 있는 부품을 고장이 발생하기 전에 계획된 시점에 교환하거나 복구하는 업무. 사용되는 시간에 따라 고장율이 증가하는 마모(Wear out) 특성을 가진 품목에 적합하다. HT업무를 수행하는 시점은 와이블(Weibull)분석, 피로도 검사 및 분석 등으로 판단한다.
- Failure Finding (FF): 숨겨진 고장을 주기적으로 확인하는 업무. 숨겨진 고장이 다른 고장을 유발하지 않도록 정비주기가 설정되어야 한다.

1.3 고장을 특성과 HT업무의 관계

미 해군의 연구사례에서 시스템을 구성하는 부품의 고장을 특성을 확인할 수 있다.[4] Fig. 1을 보면 항공기(UAL, Broberg)와 함정(MSP, SUBMEPP)의 고장율 특성별 부품의 비율이 나타난다.[4]

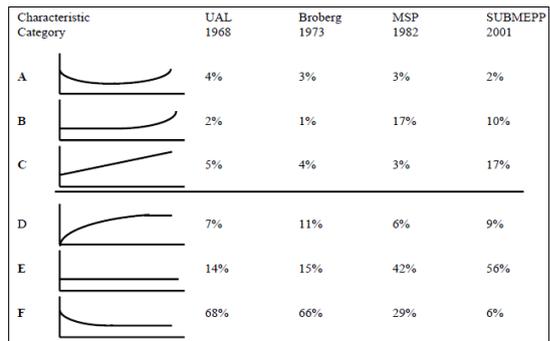


Fig. 1. Age and reliability characteristic categories

Fig. 1. 을 두 그룹으로 분류하면 Table 1과 같이 시간에 따라 고장율이 증가하는 형태(A~C)와 일정시간이 지난 후의 고장율이 일정해 지는 형태(D~F)로 구분할 수 있다.

Table 1. Proportion of the reliability characteristic

| | UAL (1968) | Broberg (1973) | MSP (1982) | SUBMEPP (2001) |
|--------------------|------------|----------------|------------|----------------|
| wear-out (A~C) | 11% | 8% | 23% | 29% |
| Non wear-out (D~F) | 89% | 92% | 77% | 71% |

위의 분류에서 시간에 따라 고장율이 증가하는 구성품에 대해 RCM의 예방정비 종류 중 Hard Time 예방

정비(이하 HT업무)를 수행한다면 한계수명에 가까워진 품목이 교환 또는 복구되어 시스템의 신뢰성 향상을 기대할 수 있다. 특히 특정시간 이후에 고장율이 가파르게 증가하는 고장률 특성을 가진 품목일수록 HT업무가 유용하며, 반대로 고장률 변화가 크지 않다면 HT업무에 따른 신뢰성 향상은 크지 않을 것이다.

본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 고장률 특성과 예방정비 및 고장정비시 발생하는 비용에 따라 총 수명주기 동안의 발생하는 총 정비비용을 비교하여 HT업무 적용이 어느 정도의 경제적 효율성을 갖는지를 제시하고자 한다.

2. 기존연구: HT업무 주기 선정 기준

2.1 고장영향이 인명피해 또는 환경오염과 관련된 경우

HT업무의 정비주기를 선정하는 방법은 두 가지 경우로 구분 된다. 첫째는 특정 품목의 고장의 발생이 인명이나 환경에 영향을 주는 경우이고, 둘째는 시스템의 임무수행에 중대한 영향을 미치는 경우(경제적인 문제 포함)이다. 첫째의 경우에는 정확한 수명예측을 실시하여 정비주기를 선정해야 하며, 둘째의 경우는 경제적인 측면을 고려하여 총 정비비용이 최소화되는 예방정비 주기를 선정해야 한다.

인명과 환경에 영향을 미치는 경우의 HT업무는 경제적인 부분보다는 고장이 발생할 수 있는 확률을 허용고장수준 이하로 관리하는 것을 목적으로 한다. 이 경우에는 정확한 예방정비주기를 산출하기 위하여 와이블분석, 테스트, 피로도 분석 등의 방법등을 사용한다.[5] 와이블 분석은 정확한 고장 예측이 가능한 고장데이터를 이용한 통계적 방법이다. 이 분석은 시간에 대한 함수로 고장 확률을 제공하고 이 분석을 통해 허용고장수준 이하가 되는 예방정비주기를 산출하게 된다. 테스트는 인증시험을 통해 해당품목이 고장없이 사용할 수 있는 기간을 확인하는 방법이고 피로도 분석은 해당 품목에서 크랙이 발생하기 시작하는 수명을 확인하기 위한 분석방법이다.

2.2 고장영향이 임무수행 또는 경제적 문제와 관련된 경우

시스템의 임무수행에 중대한 영향을 미치는 경우의

HT업무는 정비활동에 따른 비용을 고려하여 정비주기를 선정한다. 이 경우의 정비주기는 HT업무를 수행할 때의 단위 시간당 정비비용(C_{PM})과 예방정비활동을 안 하고 고장 발생에 따른 고장정비만 수행할 경우의 단위 시간당 정비비용(C_{NPM})을 비교한 비용 편익 비율(cost benefit ratio, CBR)을 기준으로 선정 할 수 있다. CBR은 아래 식(1)와 같다.

$$CBR = \frac{C_{PM}}{C_{NPM}} \quad (1)$$

- C_{PM} = 예방정비활동을 할 경우의 단위 시간당 소요 비용
- C_{NPM} = 예방정비활동을 안 할 경우의 단위 시간당 소요 비용

MIL-STD-2173에서 제시하는 HT업무의 정비주기 선정을 위한 CBR_{HT} 의 계산은 아래 식(2)와 같다.

$$CBR_{HT} = \frac{N_S C_{HTB} + (1 - N_S) C_{HTA}}{\frac{T}{C_{HTA} + C_{OPC}} \cdot MTBF} \quad (2)$$

- CBR_{HT} = 비용 편익 비율(cost benefit ratio)
- C_{HTA} = 고장 발생 후 재작업/폐기 비용
- C_{HTB} = 고장 발생 전 재작업/폐기 비용
- C_{OPC} = 고장 발생으로 인한 비가동 손해 비용
- T = 제안된 HT업무 주기
- N_S = T 시간까지 고장이 발생하지 않은 품목의 비율
- $MTBF$ = 평균 고장 시간 간격

위의 수식에 따라 주기(T)에 대하여 CBR_{HT} 의 값이 1보다 작을 경우 주기 T로 HT업무를 수행하는 것이 경제적이고 1보다 큰 경우는 HT업무가 경제적이지 않다고 판단한다.

MIL-STD-2173 은 1999년 취소되었으며 미 해군의 NAVAIR 00-25-403[5]로 대체되었다. 00-25-403의 HT 업무의 정비주기 선정 방법은 아래 식(3)와 같다.

$$CBR_{HT} = \frac{N_S C_{BF} + (1 - N_S) C_{AF}}{N_S T + (1 - N_S) MTTF_P} \cdot \frac{C_{AF}}{MTBF} \quad (3)$$

- CBR_{HT} = 비용 편익 비율(cost benefit ratio)
- C_{BF} = 고장 발생 전 재작업/폐기 비용
- C_{AF} = 고장 발생 후 재작업/폐기 비용 및 부수적 피해 비용
- T = 제안된 HT업무 주기
- N_S = T 시간까지 고장이 발생하지 않은 품목의 비율
- $MTBF$ = 평균 고장 시간 간격(예방정비 활동이 없을 경우)
- $MTTF_P$ = 제안된 HT업무 주기 이전에 고장이 발생하는 품목의 평균 고장 시간

이 수식 역시 특정 주기 T 에 대한 CBR_{HT} 이 1보다 작을 경우 제안된 HT업무가 비용대비 효과적이고 1보다 클 경우 비경제적이라고 판단한다.

(2)와 (3)을 비교해 보면, $0 < N_S < 1$ 이고 $MTTF_P < T$ 이므로 (3)의 C_{PM} 항의 $N_S T + (1 - N_S) MTTF_P$ 는 항상 (2)의 C_{PM} 항의 T 보다 작고 $C_{HTA} < C_{AF}$ 이다. 따라서 (2)에 의한 CBR 계산값은 (3)에 의한 값보다 항상 작으므로 같은 주기에 대하여 MIL-STD-2173의 기준에 의해 판단할 경우 NAVAIR 00-25-403보다 항상 더 비용대비 효과적이라는 판단을 하게 된다.

또한, C_{PM} 항의 분모는 주기 T 이전에 고장이 날 경우를 함께 고려한 (3)의 CBR 이 더 적절하지만 $MTTF_P$ 를 산출하기 어렵다는 단점이 있다. NAVAIR 00-25-403에서는 $MTTF_P$ 를 주어진 주기 T 와 T 시간 동안 고장이 발생할 비율인 K 의 곱으로 추정하는 것을 제안한다. 초기 고장률이 점차 낮아질 경우에는 K 값이 작고 초기 고장률이 주기 T 이전까지 일정하다면 K 값을 0.5로 가정하여 $MTTF_P$ 값을 산정하게 된다. 하지만 K 값 역시 주관적인 판단이 들어갈 수밖에 없는 단점이 있다.

3. 시뮬레이션 및 결과 분석

3.1 고장율 모델

본 연구에서는 시간에 따라 고장율이 증가하는 품목에 대하여 와이블 분포(Weibull Distribution)로 가정하였다. 와이블 분포는 금속 및 복합재료의 강도, 전자 및 기계부품의 수명분포를 나타내는데 적합한 확률분포로, 감소형(Decreasing), 일정형(Continuous), 증가형(Increasing)을 모두 표현할 수 있어 수명분석에 많이 사용된다. 와이블 분포의 확률밀도 함수(pdf)와 그 그래프는 아래 Fig. 2와 같다.

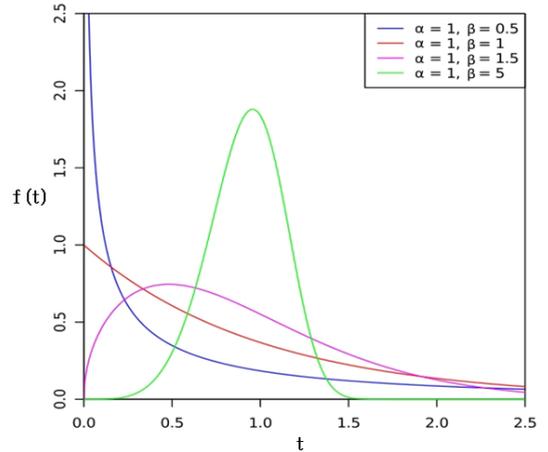


Fig. 2. Probability density function of Weibull Dist.

와이블 분포에서 형상모수 β 가 1일 경우에는 고장률이 시간의 흐름에 상관없이 일정하며, 1보다 작은 경우에는 시간이 지날수록 고장율이 점점 작아지게 되고, 1보다 클 경우에는 시간이 지날수록 고장율이 점점 커지는 형태이다. 따라서 기본적으로 형상모수 β 가 1보다 큰 경우에만 HT업무를 수행하는 것이 적합하다.

아래 Table 2는 Bloch & Geitner의 연구에서 제공한 기계장치류의 와이블 분포 데이터베이스이다[6].

표에서 제시된 것처럼 형상모수 β 의 Typical 값은 대체로 1과 2사이의 값을 갖으며 경우에 따라서는 1보다 작거나 2보다 큰 형상모수를 갖는 등 품목의 특성에 따라 다양한 것으로 나타났다. 따라서 실제 예방정비 계획을 수립할 때에 분석대상 품목의 고장률이 어떠한 고장 분포의 형태를 갖고 있는 것인지를 파악하는 것이 중요하다. 하지만 실제 HT업무를 수행할 대상 품목의 정확한 형상모수 β 를 파악하는 것은 한계가 있으며, 시뮬레이션에서는 아래의 표를 고려하여 다양한 형상모수 β 에 대한 분석을 실시하였다.

Table 2. Weibull database

| ITEM | Beta Values | | | Alpha Values | | |
|------------------------------|--------------|---------|------|---------------------|-----------|-------------|
| | Shape Factor | | | Characteristic Life | | |
| | Low | Typical | High | Low | Typical | High |
| Machinery Equipment | | | | | | |
| Circuit breakers | 0.5 | 1.5 | 3 | 67,000 | 100,000 | 1,400,000 |
| Compressors, centrifugal | 0.5 | 1.9 | 3 | 20,000 | 60,000 | 120,000 |
| Compressor blades | 0.5 | 2.5 | 3 | 400,000 | 800,000 | 1,500,000 |
| Compressor vanes | 0.5 | 3 | 4 | 500,000 | 1,000,000 | 2,000,000 |
| Diaphragm couplings | 0.5 | 2 | 4 | 125,000 | 300,000 | 600,000 |
| Gas turb. comp. blades/vanes | 1.2 | 2.5 | 6.6 | 10,000 | 250,000 | 300,000 |
| Gas turb. blades/vanes | 0.9 | 1.6 | 2.7 | 10,000 | 125,000 | 160,000 |
| Motors, AC | 0.5 | 1.2 | 3 | 1,000 | 100,000 | 200,000 |
| Motors, DC | 0.5 | 1.2 | 3 | 100 | 50,000 | 100,000 |
| Pumps, centrifugal | 0.5 | 1.2 | 3 | 1,000 | 35,000 | 125,000 |
| Steam turbines | 0.5 | 1.7 | 3 | 11,000 | 65,000 | 170,000 |
| Steam turbine blades | 0.5 | 2.5 | 3 | 400,000 | 800,000 | 1,500,000 |
| Steam turbine vanes | 0.5 | 3 | 3 | 500,000 | 900,000 | 1,800,000 |
| Transformers | 0.5 | 1.1 | 3 | 14,000 | 200,000 | 14,200,000 |
| Instrumentation | | | | | | |
| Controllers, pneumatic | 0.5 | 1.1 | 2 | 1,000 | 25,000 | 1,000,000 |
| Controllers, solid state | 0.5 | 0.7 | 1.1 | 20,000 | 100,000 | 200,000 |
| Control valves | 0.5 | 1 | 2 | 14,000 | 100,000 | 333,000 |
| Motorized valves | 0.5 | 1.1 | 3 | 17,000 | 25,000 | 1,000,000 |
| Solenoid valves | 0.5 | 1.1 | 3 | 50,000 | 75,000 | 1,000,000 |
| Transducers | 0.5 | 1 | 3 | 11,000 | 20,000 | 90,000 |
| Transmitters | 0.5 | 1 | 2 | 100,000 | 150,000 | 1,100,000 |
| Temperature indicators | 0.5 | 1 | 2 | 140,000 | 150,000 | 3,300,000 |
| Pressure indicators | 0.5 | 1.2 | 3 | 110,000 | 125,000 | 3,300,000 |
| Flow instrumentation | 0.5 | 1 | 3 | 100,000 | 125,000 | 10,000,000 |
| Level instrumentation | 0.5 | 1 | 3 | 14,000 | 25,000 | 500,000 |
| Electro-mechanical parts | 0.5 | 1 | 3 | 13,000 | 25,000 | 1,000,000 |
| Static Equipment | | | | | | |
| Boilers, condensers | 0.5 | 1.2 | 3 | 11,000 | 50,000 | 3,300,000 |
| Pressure vessels | 0.5 | 1.5 | 6 | 1,250,000 | 2,000,000 | 33,000,000 |
| Filters, strainers | 0.5 | 1 | 3 | 5,000,000 | 5,000,000 | 200,000,000 |
| Check valves | 0.5 | 1 | 3 | 100,000 | 100,000 | 1,250,000 |
| Relief valves | 0.5 | 1 | 3 | 100,000 | 100,000 | 1,000,000 |

3.2 시뮬레이션 방법

기존연구의 수식 (3)의 경우 $MTTF_p$ 에 대한 가정이 필요한 문제가 있기 때문에 이 연구에서는 $MTTF_p$ 에 대한 가정이 필요없는 몬테카를로 시뮬레이션을 반복 수행하여 각 고장정비 대 예방정비 비용과 형상모수에 따른 최적의 예방정비주기와 경향을 분석하였다. 이 연구에서 적용한 시뮬레이션 방법은 Fig. 3과 같다.

분석대상 품목의 고장간평균시간(MTBF)이 μ , 척도모수 α , 형상모수가 β 인 아래 식(4)의 와이블분포를 따른다고 가정하였을 때 각 예방정비주기(T)일 경우 시뮬레이션기간(T_{SIM}) 동안 발생하는 총비용(C_{SUM})을 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 모의하였다.

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-(t/\alpha)^\beta} \quad (4)$$

μ 와 β 가 주어졌을 때 척도모수 α 는 다음과 같이 계산된다.

$$\alpha = \frac{\mu}{\Gamma(1+1/\beta)} \quad (5)$$

시뮬레이션에 적용한 시행 길이, 횟수, μ , β , C_{AF}/C_{BF} 등은 Table 3과 같이 가정하였다.

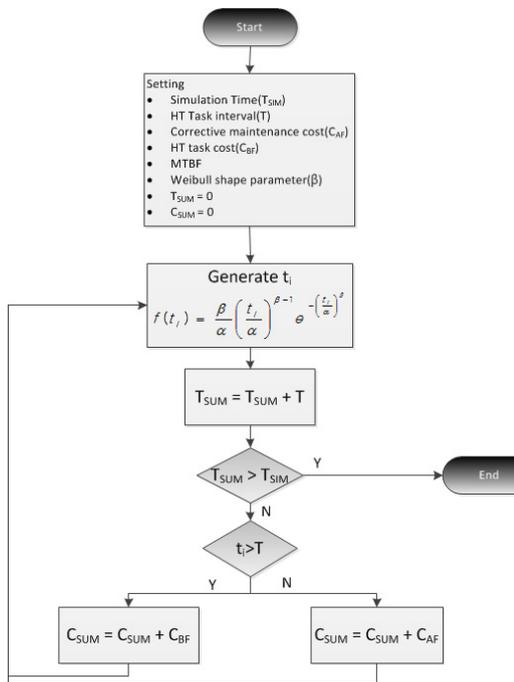


Fig. 3. Simulation flowchart

Table 3. Simulation parameters

| Parameters | |
|------------------------------------|--|
| Simulation time | 30 years |
| number of Iteration | 100 |
| $\mu(MTBF)$ | 4,380 hours(0.5 years) |
| Weibull shape parameter(β) | 0.5, 1, 1.05, 1.10, 1.20, 1.50, 2.00, 2.50, 3.00, 5.00 |
| C_{AF}/C_{BF} | 1.5, 2, 3, 5, 10, 20, 50, 100 |
| candidates of HT task interval | 87.6, 175.2, 262.8, 350.4, ..., 8760 hours |

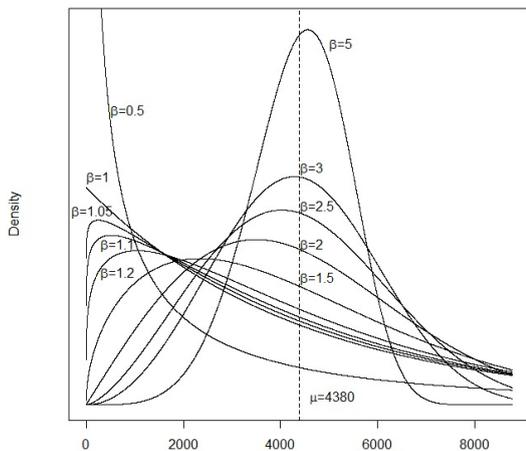


Fig. 4. Weibull dist. with shape parameters($\mu = 4380$)

시뮬레이션에 적용한 평균이 4380시간인 와이블분포에서 형상모수에 따른 고장밀도함수는 아래의 Fig. 4와 같다.

3.3 시뮬레이션 결과

아래 Fig. 5 ~ 12는 각 형상모수 β 와 C_{AF}/C_{BF} 를 고려한 30년간의 총 정비비용 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그래프의 가로축은 시뮬레이션 시 가정한 예방정비주기(T)를 나타내고 세로축은 해당 주기에 따라 HT업무를 수행한다고 가정했을 경우의 총 정비비용을 나타낸다.

예방정비주기를 MTBF보다 훨씬 짧게 설정한 경우 불필요한 예방정비로 인해 총 정비비용이 증가할 것이라는 것을 예상할 수 있고 시뮬레이션 결과에서도 예방정비주기가 짧은 시간으로 설정할 경우에는 비용이 매우 큰 것을 확인할 수 있다.

MTBF를 4,380시간으로 설정한 이 시뮬레이션에서는 공통적으로 정비주기가 약 500시간보다 짧게 할수록 총 정비비용이 급격하게 증가하는 경향을 보였다.

형상모수에 따른 총 정비비용을 보면 형상모수 β 가 0.5인 경우에는 시간이 지남에 따라 고장률이 낮아지는 특성을 갖기 때문에 예방정비주기를 길게 할수록 총 정비비용이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 형상모수 β 가 1인 경우에도 정도의 차이는 작지만 예방정비주기를 크게 설정 할수록 총 정비비용이 작아지는 경향을 보였다. 결과적으로 형상모수 β 가 1이하인 경우 예방정비주기가 길어질수록 총 정비비용이 줄어들었으며, 이것은 형상모수 β 가 1이하인 경우에는 예방정비를 수행하지 않는 것이 더 경제적이라는 것을 시뮬레이션을 통해서 확인하였다.

형상모수 β 가 1보다 큰 경우에는 형상모수 β 가 커질수록 총 정비비용이 최소가 되는 최적예방정비주기(그래프상 최저점)가 명확하게 드러난다. 형상모수 β 가 1에 근사한 값이거나 예방정비비용과 고장정비비용의 비율인 C_{AF}/C_{BF} 이 작을 경우에는 특정한 예방정비주기 이상에서는 총 정비비용의 차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 반대로 β 가 비교적 커서 시간에 따른 고장률의 증가율이 크거나 예방정비비용과 고장정비비용의 차이가 클 경우에는 예방정비주기가 길수록 예방정비주기 전에 고장 발생 빈도가 증가하여 총 비용이 증가하게 된다.

여기에서 예방정비 활동의 횟수를 효율적으로 하면서

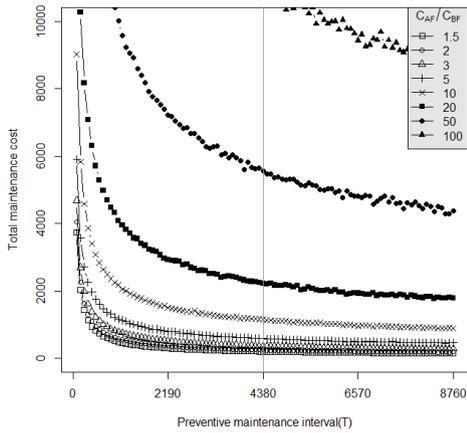


Fig. 5. Total maintenance cost with $\beta=0.5$

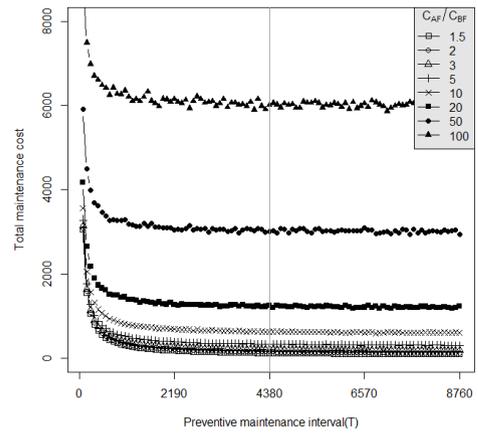


Fig. 6. Total maintenance cost with $\beta=1$

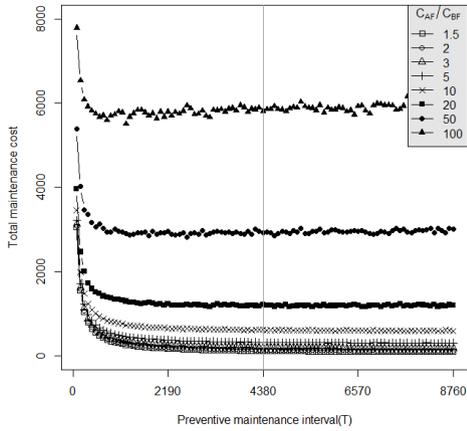


Fig. 7. Total maintenance cost with $\beta=1.05$

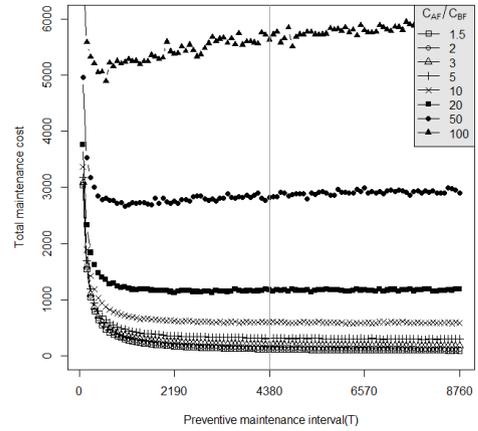


Fig. 8. Total maintenance cost with $\beta=1.1$

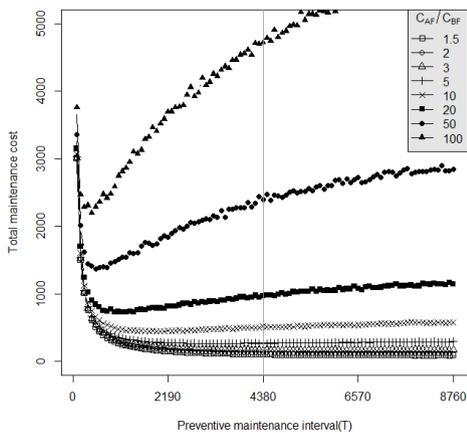


Fig. 9. Total maintenance cost with $\beta=1.5$

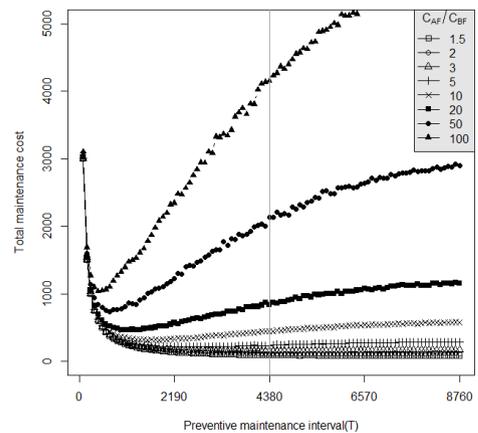


Fig. 10. Total maintenance cost with $\beta=2$

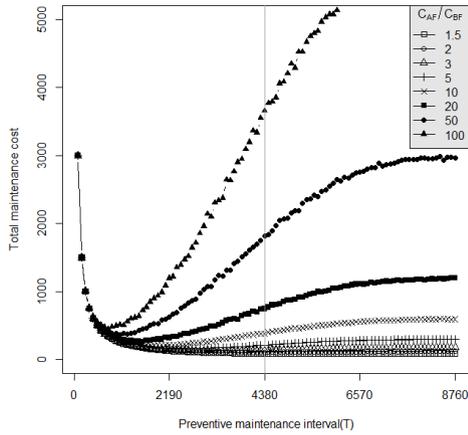


Fig. 11. Total maintenance cost with $\beta=3$

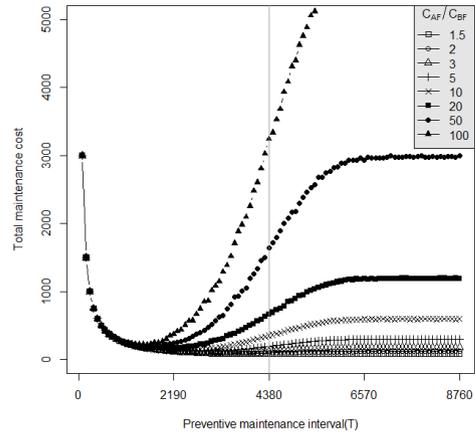


Fig. 12. Total maintenance cost with $\beta=5$

실제 고장이 발생하기 전에 예방정비를 수행하여 총 정비비용이 최소가 되는 주기 T*가 최적 예방정비주기가 된다.

Table 4과 Table 5는 각각 HT업무를 통한 비용감소 효과와 최적 예방정비주기 산정 결과를 비교한 자료이다. Table 4의 예방정비를 통한 비용감소 효과는 (6)의

식을 통해 계산하였다. Table 5의 최적 예방정비주기는 Table 4의 비용절감 효과가 5% 이상인 경우에 한해서 제시하였다.

$$\frac{\left(\frac{\text{고장정비 적용시}}{\text{총정비비용}}\right) - \left(\frac{\text{예방정비 적용시}}{\text{최적총정비비용}}\right)}{\text{고장정비 적용시 총정비비용}} \times 100(\%) \quad (6)$$

Table 4. HT task cost efficiency with Weibull shape parameter and maintenance cost ratio

| β | C_{AF}/C_{BF} | | | | | | | |
|---------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1.5 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 |
| 0.5 | -49.9% | -50.2% | -50.3% | -43.4% | -43.6% | -37.3% | -35.2% | -44.2% |
| 1 | -11.6% | -3.5% | -2.1% | -0.7% | 1.5% | 2.6% | -0.2% | 2.6% |
| 1.05 | -7.1% | -6.0% | 1.6% | 3.9% | 0.0% | 3.2% | 6.0% | 7.5% |
| 1.1 | -6.1% | -7.3% | -0.7% | 1.3% | 5.6% | 4.9% | 9.3% | 16.7% |
| 1.2 | -3.5% | -0.9% | -0.7% | 3.6% | 8.2% | 15.2% | 24.0% | 32.0% |
| 1.5 | 0.6% | 1.2% | 4.5% | 13.5% | 26.7% | 40.4% | 54.3% | 63.3% |
| 2.0 | 1.5% | 3.8% | 14.0% | 27.8% | 46.7% | 60.8% | 75.5% | 82.6% |
| 2.5 | 3.0% | 8.4% | 20.7% | 39.2% | 57.4% | 71.7% | 83.4% | 89.1% |
| 3.0 | 4.4% | 12.6% | 27.9% | 46.0% | 65.1% | 78.2% | 87.7% | 92.5% |
| 5.0 | 9.6% | 24.1% | 41.9% | 60.1% | 76.8% | 86.4% | 93.4% | 96.3% |

Table 5. Optimum HT task interval(T*) with Weibull shape parameter and maintenance cost ratio(Unit: Hours)

| β | C_{AF}/C_{BF} | | | | | | | |
|---------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1.5 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 |
| 0.5 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1.05 | - | - | - | - | - | - | 2,628 | 1,226 |
| 1.1 | - | - | - | - | 6,132 | 2,190 | 1,051 | 613 |
| 1.2 | - | - | - | - | 3,329 | 1,314 | 876 | 350 |
| 1.5 | - | - | 5,431 | 3,154 | 2,540 | 1,139 | 526 | 438 |
| 2.0 | - | - | 3,504 | 2,978 | 1,840 | 964 | 701 | 438 |
| 2.5 | - | 4,555 | 3,241 | 2,540 | 1,664 | 1,314 | 876 | 613 |
| 3.0 | - | 4,205 | 2,978 | 2,278 | 1,840 | 1,577 | 1,051 | 788 |
| 5.0 | 4,205 | 3,679 | 3,241 | 2,716 | 2,278 | 2,102 | 1,664 | 1,577 |

Table 4의 결과와 같이 형상모수 β 가 0.5인 경우에는 앞의 Fig. 5에서 확인했던 것과 같이 HT업무를 할당하므로써 고장정비만 진행 했을 경우보다 더 많은 비용이 소모되는 것으로 나타났다. 형상모수 β 가 1인 경우에는 HT업무를 할당하는 것이 의미가 없는 것으로 나타났다. Table 4에서와 같이 실제 기계품목의 와이블 고장분포에서 형상모수 β 가 5보다 작은 경우가 대부분인 상황이 기 때문에 고장정비에 의한 비용이 예방정비 보다 1.5배 이상 더 크지 않다면 HT업무 통해서 얻을 수 있는 경제적인 이익은 형상모수 β 가 5일 경우에도 최대 10%를 넘지 않는다. β 가 1.1 일 경우에는 C_{AF}/C_{BF} 가 50배 차이가 날 경우 약 10% 수준의 총 정비비용감소효과를 보이는 것으로 나타났다. 형상모수 β 가 2인 경우에는 C_{AF}/C_{BF} 가 3배이면 14.0%의 경제적인 이익이 있고, 100배이면 82.6%의 경제적 이익 효과가 있는 것으로 나타났다. 형상모수 β 가 5인 경우에는 C_{AF}/C_{BF} 가 3배이면 41.90%의 경제적인 이익이 있고, 100배이면 96.3%의 경제적 이익 효과가 있는 것으로 나타났다.

최적예방정비주기는 동일한 형상모수 β 에서 C_{AF}/C_{BF} 가 클수록 더 짧은 최적예방정비주기를 갖는 것으로 나타났고 C_{AF}/C_{BF} 가 3배 이상의 경우에는 β 가 1.05보다 더 클 경우 최적예방정비주기가 짧아지다가 β 가 특정 값 보다 커질 경우 다시 최적예방정비주기가 길어지는 경향을 보이는 것으로 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서는 예방정비 활동 중 주기 교체품목에 대한 HT업무를 정비주기를 할당하는데 있어서 품목의 고장분포와 정비 비용을 고려하였을 때 효과를 가지는 기준을 제공하고자 하였다.

시뮬레이션을 통해 분석한 결과 고장분포의 형태(형상모수 β)와 예방정비비용과 고장정비비용의 비율(C_{AF}/C_{BF})에 따라 총정비비용의 변화하는 경향이 달라짐을 확인할 수 있었다. 품목의 평균 수명이 4380시간으로 가정한 분석에서 공통적으로 예방정비주기가 약 500시간보다 작은 경우는 잦은 예방정비에 의해 총정비비용이 높아지는 경향이 나타났다. 형상모수 β 가 1이하인 경우는 예방정비주기가 길수록 총정비비용이 감소하여 예방정비를 수행하지 않는 것이 더 경제적이고, 형상모수

β 가 1보다 커지면 예방정비주기가 길수록 총정비비용이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 예방정비비용과 고장정비비용의 비율(C_{AF}/C_{BF})이 커질수록 예방정비의 효과가 좋아져, 예방정비주기가 길어지면 총정비비용이 커지고, 최적의 예방정비주기가 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

그리고, 시뮬레이션 결과를 비교하여 HT업무를 통한 비용감소효과와 최적의 예방정비주기를 산출할 수 있었다. 고장정비비용이 예방정비비용보다 1.5배 이상 크지 않을 경우에는 HT업무를 수행하였을 때 총 정비비용에서 10%이내의 경제적 효과를 얻는다는 것을 확인하였다. 또한, 고장정비비용이 예방정비비용보다 2배 이상 차이가 있을 경우에는 형상모수 값에 의해서 그 경제적인 효용성이 결정됨을 보았다.

본 연구결과를 통해 HT업무를 적용하려는 대상품목의 형상모수와 정비비용을 가정할 경우 HT업무를 통한 경제적인 효용에 대한 의사결정에 도움이 될 수 있을 것이다.

References

- [1] KORAIL, A Study on Maintenance System Change in the Device on Vehicle-based, KORAIL R&D Institute, 2010
- [2] John Moubray, "Reliability-centered Maintenance", p. 12-13, Industrial Press Inc., 1997.
- [3] MIL-STD-2173, "Reliability-centered maintenance requirements for NAVAL aircraft, weapons systems and support equipment", p25-26, 66, Department of Defense, 1986.
- [4] Timothy M. Allen, "U.S. Navy Analysis of Submarine Maintenance Data and the Development of Age and Reliability Profiles", p.3, Department of the Navy.
- [5] NAVAIR 00-25-403, "Guidelines for the Naval Aviation Reliability-Centered Maintenance Process", p.B-7, Naval Air System Command, 2005.
- [6] Bloch, Heinz P. and Fred K. Geitner, "Practical Machinery Management for Process Plants, Volume 2: Machinery Failure Analysis and Troubleshooting, 2nd Edition", p.Appendix A, Gulf Publishing Company, 1994.

김 만 수(Mansoo Kim)

[정회원]



- 2006년 2월 : 한양대학교 산업공학과 (공학학사)
- 2009년 2월 : 한양대학교 대학원 산업공학과 (공학석사)
- 2013년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 선임연구원

<관심분야>

중합군수지원, 신뢰성분석

지 응 기(Woong Ki Ji)

[정회원]



- 2006년 2월 : 경희대학교 전자공학과 (공학학사)
- 2005년 12월 ~ 현재 : LIG넥스원 선임연구원

<관심분야>

중합군수지원, 신뢰성분석