

보전에 중점을 둔 신뢰성 (Reliability Centered Maintenance)

김환중*

(Kim, Hwanjoong)

요약 보전에 중점을 둔 신뢰성(RCM)은 1960년대 후반 상업용 항공기산업을 위해 개발되었고, 현재는 항공기 이외의 여러 장치에도 적용되고 있다. RCM은 예방보전계획을 수립하기 위한 방법으로 예방보전계획은 장치와 구조물의 안전성과 가동성 수준을 효율적이고 효과적으로 성취하게 한다. RCM은 장치와 구조물에 적용가능하면서 효율적인 예방보전요구를 확인하기 위해 결정논리나무를 사용한다. 결정논리를 통하여 보전작업의 실행 필요성에 대하여 최종적으로 판단한다. 본 연구에서는 IEC 60300-3-11을 중심으로 기기나 장치에 대한 RCM분석방법 및 운용방법에 대한 지침을 제공하고자 한다.

Abstract Reliability Centered Maintenance(RCM) was initially developed for the commercial aviation industry in the late 1960s and now is equally applicable to a variety of equipment other than aircraft. RCM is a method for establishing a preventive maintenance program which will efficiently and effectively allow the achievement of the the required safety and availability levels of equipment and structures. RCM provides for the use of a decision logic tree to identify applicable and effrctive preventive maintenance requirements for equipment and structures. The end result of working through the decision logic is a judgement as to the necessity of performing a maintenance task. In this paper, we provide guiding principles based on IEC 60300-3-11 for RCM analysis methods and operational method of structure and equipment.

1. 서론

국제표준 IEC 60300-3-11은 통합신뢰성 경영(Dependability Management)의 일부인 보전에 중점을 둔 신뢰성(Reliability Centered Maintenance, RCM)분석 기술을 사용하는 장치와 구조물에 대한 초기예방보전계획의 개발을 위한 지침을 제공한다.

RCM분석은 육상운송수단, 선박, 발전소, 항공기, 그리고 장치와 구조물로 이루어진 아이템, 예를 들면, 건물, 비행기 동체 또는 선체 등에 적용된다.

RCM은 예방보전계획을 수립하기 위한 하나의 방법이다. 장치와 구조물의 안전성과 가동성 수준은 예방보전계획에 의해 효율적이고 효과적으로 성취된다. RCM은 결정논리나무(decision logic tree)를 사용하여 안전성, 동일한 고장의 운용 결과와 경제적 결과, 그리고 이러한 고장을 초래하는 열화메커니즘을 따

* 우석대학교 이공대학 전산정보학부 교수

르는 장치와 구조물에 대한 적용가능하면서 효율적인 예방보전의 필요성을 확인한다. RCM분석의 기본 단계는 다음과 같다.

- 시스템 그리고(또는) 부시스템을 정의한다.
- 각 시스템 또는 부시스템의 기능을 정의한다.
- 기능적으로 중요한 아이템(functionally significant items, FSI)을 정의한다.
- 적절한 FSI의 기능적 고장원인을 정의한다.
- 고장의 파급효과와 발생확률을 예측한다.
- 결정논리나무를 이용하여 FSI 고장 효과를 범주화한다.
- 초기의 보전계획을 포함하는 적용가능하며 효과적인 보전작업을 정의한다.
- 적용가능한 작업이 정의될 수 없다면, 장치나 공정을 재설계한다.
- 초기 보전계획과 사용중인 자료의 관측, 수집, 분석에 의해 얻어진 수정판에 대한 통상적이고 체계적인 갱신 등을 통하여 동적 보전계획을 수립한다.

RCM을 성공적으로 적용하려면 장치와 구조물 그리고 관련된 시스템, 부시스템과 장치의 아이템에 대한 충분한 이해가 선행되어야 한다. 또한, 가능한 고장과 그 고장 결과에 대해서도 충분히 이해해야 한다. 또한 제품과 그 제품의 기능에 대해서도 상세한 분석이 요구된다. 따라서 RCM 노동집약적이며 상대적으로 고비용이 요구될 수 있다. 이러한 이유 때문에, RCM은 일반적으로 보전이 제품의 안전성과 효과적 운영에 중요한 곳과 고장이 심각한 안전성과 환경 혹은 운용상의 효과를 갖는 곳에만 적용되는 기술이다.

2. 보전계획

보전계획은 RCM분석에 의해 초래된 일련의 작업으로 초기계획과 진행중인 동적 계획으로 구성된다. 초기고장계획은 공급자와 사용자간의 공동 노력의 성과로서 장치의 운전 이전에 정의되며 RCM방법론에 근거한다. 초기계획의 발전단계인 운용중(on-going)의 보전계획은 일단 운전이 시작되면 신속하게 시작되어야 하며 실제 노화(degradation) 또는 고장자료에 근거하며 생산기술, 원료, 보전기술 그리고 공구의 진보에 근거한다. 초기의 RCM 계획은, 경험 또는 제조자의 권장에 근거한 기존의 보전계획을 갱신, 개선하기 위하여 제품이 운영중일 때 시작될 수 있다.

여기에서는 특정 기간에 보전된 아이템의 초기 보전계획을 개발하기 위한 방법을 중심으로 설명한다. 효율적인 보전계획을 개발하기 위하여, a) 보전계획의 목적, b) 보전계획의 개발 방법, c) 보전계획의 내용 등이 먼저 정의되어야 한다;

2.1 보전계획의 목적

효율적 예방보전계획의 목적은 다음과 같다;

- a) 요구된 안전에 관한 기능의 보전.
- b) 고유안전성과 신뢰성 수준의 보전.
- c) 가동성의 최적화.
- d) 고유신뢰성 측면에서 부적절한 것으로 증명된 아이템의 설계개선에 필요한 정보의 획득.
- e) 보전비용과 잔여고장비용을 포함한, 최소 전수명주기비용 측면에서의 목적 달성.
- f) 기존 보전작업의 유효성을 평가하여, 동적 보전계획 수립을 위한 정보의 획득.

보전계획에 의해 장치와 구조물의 고유안전성 결함과 신뢰성수준이 수정될 수는 없다. 보전계획은 단지 노화를 최소화하고 아이템을 고유 수준으로 복구시킬 수 있다. 고유수준이 만족스럽지 않으면, 설계의 수정, 운전법의 변화 또는 공정의 변화가 필요하다.

2.2 RCM에 기초한 예방보전계획의 개발 방법

예방보전계획은 지침이 있는 논리접근법을 사용하며 보전절차지향보다는 작업지향적이다. 작업지향적 개념을 사용함으로써, 주어진 아이템에 반영된 모든 보전계획을 볼 수 있다. 적용가능한 보전 작업을 확인하기 위하여 결정논리나무를 사용한다.

2.3 보전계획의 내용

보전계획은 예방보전작업과 부정기적 보전작업으로 나눌 수 있다;

- a) 예방보전작업 : 정기적 또는 특정상황에서 예정된 작업이며 고장의 탐지도 포함한다. 이 작업의 목적은 고유안전성 이하로의 퇴화와 신뢰성 수준을 확인, 예방하는 것이다. 예방보전작업으로는 1) 윤활작용(lubrication)/수리(sevicing), 2) 운용상의/육안의/자동화된 점검, 3) 검사/기능검사/상태감시, 4) 복구, 5) 폐기 등이 있다.
- b) 부정기적 보전작업;
 - 1) 특정 기간 또는 특정 사용 구간에서의 정기적

작업에 의해 탐지되는 작업.

2) 기능불량 관측 또는 (자동탐지를 포함한) 발생 직전의 고장 징후

부정기적 보전작업의 목적은 요구된 기능을 수행할 수 있는 수용가능한 상태로 장치를 보전 또는 복구시키는 것이다.

효율적인 계획은 위의 목적을 충족시키기 위해 필요한 작업들만 목록화한 것으로 부적절하거나 불필요한 보전작업이 실행될 때, 신뢰성이 저하된다.

3. 예방보전계획에 근거한 RCM

RCM계획의 주요개발도구는 점진적 논리도표와 작업선정기준이다. 점진적 논리는 기술적으로 이용가능한 자료를 사용하는 FSI에 적용되는 기초적 평가기술이다. RCM 계획의 개발은 a) 기능적 중요아이템(FSI)의 확인과 b) 결정논리나무를 사용하는 적용가능하면서 효율적인 예방보전작업의 확인에 근거하고 있다.

FSI는 안정성에 영향을 미치는 고장을 갖는 아이탬이나 특정한 경영 또는 보전상황에서 중요한 운용상의 또는 경제적 충격을 유발하는 고장을 갖는 아이탬이다. FSI의 확인 작업은 분석적 접근법과 공학적 판단을 사용하여 고장의 기대 결과에 근거하며 하향식(Top down)접근법을 사용한다,

3.1 정보의 수집

장치에 대한 정보는 평가의 기초를 제공하며 분석 시작 이전에 정리되어야 하며 필요성이 제기될 때 보충되어야 하며 다음 사항이 포함되어야 한다;

- a) 장치 및 그와 관련된 시스템에 대한 요구, 규제요소도 포함;
 - b) 설계와 보전 문서;
 - c) 보전과 고장자료를 포함하는 피드백의 실행.
- 또한, 완벽성을 보장하고 중복을 피하기 위하여, 장치에 대한 적절한 논리적 분석에 근거하여 평가되어야 한다.

3.2 시스템분석

여기에서는 FSI의 확인과 그에 따른 보전작업의 선정과 실행절차가 규정된다.

1. 시스템의 확인

이 작업의 목적은 장치를 ①시스템, ②잘 정의된 기능의 달성에 도움이 되는 부품(component)의 그룹,

③ 시스템의 경계의 확인 및 분할이다. 때로는 시스템 작동에 중대한 기능을 수행하는 부시스템으로 더 세밀하게 분할될 수도 있다.

2. 시스템 기능의 확인

이 작업의 목적은 시스템과 부시스템에 의해 수행되는 주기능과 보조기능의 결정이다. 이 작업에 의해 시스템기능의 목록이 작성된다.

3. 시스템의 선정

이 작업의 목적은 RCM 계획에 포함될 수 있는 시스템을 선정하고 우선 순위를 책정하는데 있다. 시스템을 선정하고 우선 순위를 정하기 위해 다음과 같은 방법이 사용된다;

- a) 과거의 경험에 근거한 정성적 방법과 총괄적인 공학적 판단;
- b) 장치의 안전성에서의 시스템 퇴화/고장, 중대성등급, 안전성 요인, 고장확률, 고장률, 생명주기비용과 같은 정량적 기준에 근거한 정량적 방법;
- c) 정성적 방법과 정량적 방법의 조합.

이 작업 결과로 중대성에 의한 시스템 등급의 목록이 작성된다.

4 시스템 기능고장과 중대성 등급의 확인

이 작업의 목적은 시스템의 기능 퇴화/고장과 이들의 우선 순위를 책정하는 것이다. 각 시스템의 기능 고장은 안전성, 가동성 또는 유지비용에 영향을 끼치므로 이들을 등급화하고 우선 순위를 부여해야 한다. 등급화는 발생확률과 고장 결과를 고려하는데 총괄적인 공학적 판단과 운용경험분석에 기초한 정성적 방법이 사용된다. FMEA 또는 위험도 분석과 같은 정량적 방법도 사용될 수 있다(IEC 60812 와 IEC 60300-3-9 참조).

등급화는 RCM분석에서 가장 중요한 작업 중의 하나이다. 너무 보수적인 등급은 과도한 예방보전계획을, 반대로 너무 낮은 등급은 과도한 고장과 잠재적 안정성에 충격을 초래할 수 있다. 이 작업의 결과는 다음과 같다;

- a) 시스템 기능의 퇴화/고장과 그것들의 특성 목록화
- b) 시스템 기능의 퇴화/고장의 등급 목록화

3.3 기능적 중요아이템의 확인

시스템기능, 기능적 퇴화/고장과 그 영향의 확인 그리고 총괄적인 공학적 판단에 근거하여, 후보FSI의 목록을 확인하고 개발할 수 있다. 아이탬의 고장이 1)안전성에 영향을 주거나 2) 정상운용 중에는 탐지되지 않는 고장, 3) 중대한 운용상의 충격을 주는 고

장, 또는 4) 중대한 경제적 충격을 주는 고장인 경우에 후보FSI로 선정된다.

3.4 기능적 중요아이템의 고장분석

FSI 목록이 작성되면, FMEA 등과 같은 방법을 사용하여 각 FSI의 논리나무평가에 필요한 다음과 같은 정보를 확인한다.

- a) 기능 : 아이템의 정상적인 특성 작용
- b) 기능고장 : 아이템의 기능 수행 상의 실패 형태
- c) 고장요인 : 기능고장이 발생한 이유
- d) 고장영향 : 각 기능고장의 즉각적인 영향과 더 폭 넓은 결과

FSI고장분석의 목적은 기능고장과 고장요인의 파악이다. 탐지되지 않은 제조상의 실수, 불가능한 고장메카니즘 또는 외부 충격에 의해 초래된 믿기 어려운 고장 등이 고려되어야 하며 믿을 수 없는 것으로 평가되도록 한 요인도 언급되어야 한다.

FSI에 결정논리나무분석을 적용 이전에, FSI, FSI의 기능, 기능고장, 고장요인, 고장영향과 FSI와 관련된 부가적인 자료(예: 제조자의 부품번호, 아이템에 대한 간단한 설명, 예측 또는 측정된 고장률, 숨겨진 기능, 리던던시 등)를 정의하기 위해, 예비작업계획서가 필요하다. 예비작업계획서는 사용자의 요구를 충족시키기 위해 설계되어야 하며 이 분석에 의해, 중요 FSI가 파악된다.

3.4 보전작업의 선정(결정논리나무분석)

적용가능하면서 효율적인 예방보전작업을 확인하는데 사용되는 접근법은 각 FSI의 기능고장을 제거하기 위한 논리경로를 제공한다. 결정논리나무는 각 기능고장을 분류하고 그 특성을 부여하기 위해 일련의 "YES/NO" 질문을 사용한다. 이 질문에 대한 답변은 분석흐름을 결정하고 각 고장요인마다 다른 FSI기능고장 결과를 결정하는데 도움을 준다. 향후 분석에 의해 적용가능하고 효율적이며 예방, 완화시킬 수 있는 보전작업이 있는지를 확인한다. 이 작업의 결과와 관련된 기간은 초기에 계획된 보전계획을 형성한다. 부적절하고 불완전한 FSI 고장정보에 의한 논리나무분석은 부적절하고, 불필요한 보전 때문에 안정성에 치명적인 고장을 발생시킬 수 있고 불필요하게 계획된 보전활동으로 인한 경비의 증가를 초래할 수 있다.

1. 분석 수준

결정논리에는 두 개의 수준이 있다.;

- a) 수준1(질문 1,2,3,4)은 최종적 영향범주, 즉 명백한

안전성, 명백한 운용상의 안전성, 확실한 직접경비, 숨겨진 안전성, 숨겨진 불안전성 또는 등급의 등을 결정하기 위해 각 기능의 퇴화/고장에 대한 평가를 요구한다.

- b) 수준2(질문 5,6,7,8,9,A,B,C,D,E,F 중 적용가능한 것)는 특정한 종류의 작업을 선정하기 위하여 각 기능의 퇴화/고장에 대한 고장요인을 고려한다.

2. 수준1의 분석(영향의 결정)

고장(퇴화를 포함)의 결과는 4개의 기본 질문을 사용하는 수준1에서 평가된다. 특정한 기능고장에 대한 완전하고 완벽한 이해가 없다면 수준1을 통하여 분석이 진행되어야 한다.

- 질문 1 - 명백한 또는 숨겨진 기능고장이 있는가?
- 질문 2 - 운용 안전성에 직접적 악영향을 끼치는가?
- 질문 3 - 숨겨진 기능고장이 안전성에 영향을 미치는가?
- 질문 4 - 운용능력에 직접적 악영향을 끼치는가?

3. 수준2의 분석(영향 범주)

수준1의 질문에 대한 결정논리를 각 기능고장에 적용하면 다음 5개의 영향범주 중 하나로 유도된다.

- 명백한 안전성 영향 - 질문5A~5E
이 범주의 작업은 안전 운용을 보증하기 위하여 요구된다. 이 범주의 분석에 의해서도 적용가능하고 효율적인 작업이 초래되지 않는다면, 반드시 재설계를 실시해야 한다.
- 명백한 운용상의 영향 - 질문6A~6D

고장 위험이 수용 가능한 수준으로 감소되면, 이 작업은 바람직할 것이다. 모든 답변이 "NO"이면, 예방보전작업은 없다. 운용 불이익이 심하면, 재설계가 바람직하다.

-명백한 직접 비용의 영향 - 질문7A~7D

이 작업비용이 수리비용보다 작다면, 이 작업은 바람직하다. 모든 답변이 "NO"이면, 예방보전작업은 일어나지 않는다. 비용불이익이 심하다면, 재설계가 바람직하다.

-숨겨진 기능 안전성 영향 - 질문8A~8F

이 영향은 여러 고장의 안전성 영향을 피하기 위해 필요한 가동성을 보증하기 위한 작업을 요구한다. 적용가능하고 효율적인 작업이 발견되지 않으면, 반드시 재설계를 해야 한다.

- 숨겨진 기능 불안전성 영향 - 질문9A~9E

이 범주는 작업이 여러 고장의 직접비용영향을 피하기 위해 가동성을 보증하는 것이 바람직하다는 것을 암시한다. 모든 답변이 "NO"이면, 예방보전작업

은 없다. 경제적 불이익이 심하면, 재설계가 바람직하다.

3.5 작업결정

작업결정은 5개의 영향범주에 대해 비슷한 방법으로 이루어진다. 작업결정을 위하여, 기능고장에 대한 고장요인을 논리도표의 수준2까지 적용해 볼 필요가 있다.

1. 병행 및 default 논리

병행 및 default 논리는 수준2에서 필수적인 역할을 한다. “유효작용/수리”에 관한 첫 번째 질문에 대한 답변과 무관하게, 다음 작업 선정 질문이 행해진다. 숨은 또는 명백한 안전성 영향 경로를 따를 때, 모든 후속 질문이 행해진다. 나머지 범주에서, 첫 번째 질문을 뒤따르는, “YES”답변에 의해 논리절차가 끝난다.

-Default 논리

Default 논리는 작업선정논리에 의해 안전성영향 분야 외의 경로에 반영된다. 수준2의 질문에 대한 답변에 대한 적절한 정보가 없으면, Default 논리는 “NO”답변이 주어지고 후속 질문이 행해진다. “NO”답변이 나오면, 후속 질문이 뒤따른다. 대부분 후속 질문은 보다 더 보수적이고, 엄격한 그리고/혹은 고비용 방법을 제공한다.

- 재설계

재설계는 안전영향범주(명백하거나 또는 숨겨진)에 속하는 고장과 적용가능하고 효율적인 작업이 없는 고장에 대해 강제적으로 요구된다.

2. 보전작업

a) 유효작용/수리(Lubrication/servicing) (모든 범주)

이것은 고유설계능력을 유지하기 위해 기름칠 또는 수리와 같은 모든 행위를 포함한다.

b) 운용상/육안의/자동화된 점검(숨은 기능고장범주에서만)

운용상의 점검은 아이템이 의도된 목적을 수행하고 있는 지를 결정하는 작업이다. 자동화된 점검은 고장자료를 저장하는 전기장치의 점검도 포함할 수 있다.

c) 검사/기능 점검/상태감시 (모든 범주)

기능점검은 아이템의 여러 기능이 명시된 한계 내에서 실행되고 있는가를 결정하는 정량적인 점검이다. 상태감시는 기존의 설정된 파라미터에 대하여 아이템의 상태를 연속적 또는 주기적으로 감시하는 것이다.

d) 복구 (모든 범주)

복구는 아이템을 특정표준으로 되돌리기 위한 작업으로 간단한 부품의 청소나 교체부터 완벽한 정비까지 포함하므로, 각기 할당된 복구작업의 범위가 명기되어야 한다.

e) 폐기 (모든 범주)

f) 결함 (안전 범주)

이것은 안전범주에 대한 질문으로 필수적인 작업이기 때문에, 모든 가능한 방법이 분석되어야 한다. 이를 위하여, 적용가능한 작업을 재검토해야 하며 이를 통하여 가장 효율적인 작업이 선정되어야 한다.

g) 무작업 (모든 범주)

위에 정의된 가능한 작업 각각은 그 자신의 적용가능성과 효율성에 근거하고 있다.

3.6 작업빈도/기간

작업빈도 또는 기간을 설정하기 위해, 작업성취를 위한 효율적인 기간을 제시하는 적용가능한 운용경험자료가 요구된다. 다음 항목으로부터 적절한 정보가 얻어진다.;

a) 유사한 장치로부터의 사전지식;

b) 예정된 보전작업이 평가될 아이템에 적용가능하면서 효율적임을 나타내는 제조자/공급자의 시험자료;

c) 신뢰성 자료와 예측.

보전기간의 설정 시 안전성과 비용을 고려해야 한다. 예정된 검사와 교체기간은 가급적 일치하여야 하며, 작업은 운용상의 충격을 줄이기 위해 그룹화한다. 고장이 안전성을 위협하지는 않으나 가동성의 손실을 초래하는 경우, 교체기간은 교체 비용, 고장 비용과 장치에 요구된 가동성을 포함하는 trade-off에 의해 결정된다.

작업빈도와 기간을 결정하는 수학적 모형은 적절한 자료의 유용성에 좌우된다. 신뢰성자료가 불충분하거나 유사 장치로부터의 사전지식이 없다면, 또는 과거의 시스템과 현재의 시스템간의 유사성이 불충분하다면, 작업기간과 빈도는 초기에는 이용 가능한 운용자료, 적절한 비용자료, 그리고 경험이 풍부한 운용자의 판단과 운용 경험에 의해 설정될 수밖에 없다.

4. 보전계획

4.1 초기보전계획

초기보전계획은 장치의 운용 이전에 이용가능한 모든 정보에 근거한다. 이 계획에 의해 발생하는 보

전요구는 각 사용자 고유의 독자적인 것이며 해당 기관의 승인을 요구한다.

4.2 운용중(In-service) 보전계획

장치가 사용중이므로 초기보전계획은 운용중 보전계획으로 발전된다. 운용중인 장치에서 획득한 운용중 고장과 경험에 근거하여 수정된다. 장치의 수명기간 내내 수정하기 위하여, 운용조직은 운용중 고장 기록자료를 수집한다. 이 자료는 고장시간, 고장요인, 보전 횟수 등을 포함한다.

4.3 문서화

RCM분석결과와 운용중의 수정결과를 전자 문서로 작성하기 위해 보전계획의 개발 초창기에 모든 노력이 주어져야 한다. 특히 통합병참지원분야에서, 장치의 수명기간 내내 결정수립절차에 사용되는 중요배경정보를 문서화하기 위해 상업용 소프트웨어의 이용이 가능하다. 결정수립절차란, 작업의 타당성 또는 나중에 수정된 이유를 결정하는데 도움을 주는 절차다.

4.4 노화조사계획

노화조사계획의 목적은 운용중인 장치의 퇴화 징후를 탐지하는 것이다. 노화조사는 신뢰성과 실제경험에 근거한 보전문제를 확인하기 위한 고장자료의 수집을 포함한다. 노화조사는 선정된 보전작업의 적용가능성, 효율성과 보전작업 빈도의 측면에서, 새 보전작업의 필요성 측면에서, 보전계획의 효율성을 평가하기 위한 피드백(feedback)을 제공한다. 노화조사계획을 위한 자료를 생성하기 위해 두 가지 보편적인 방법이 사용될 수 있다.

- a) 선도개념(lead concept) : 조립라인으로부터 생산된 장치의 첫 번째 소수의 아이টে이 널리 사용될 수 있다. 이를 통하여 주요 고장모드와 마모패턴을 초기에 확인할 수 있다. 또한 설계문제를 신속하게 확인할 수 있다.
- b) 표본자료수집(sample data collection) : 전체 시스템 중의 표본은 자세하게 감시된다.

4.5 구역검사계획

구역검사계획은 장치시스템의 각 구역에 대한 요약적인 재조사를 요구한다. 이는 부시스템과 구조물의 RCM분석이 결정되었을 때 발생한다.

5. 결론

본 연구에서는 IEC 60300-3-11에서 규정한 보전에 중점을 둔 신뢰성분석방법 및 운용방법에 대한 지침을 설명하였다. 국제적으로 승인, 합의된 신뢰성 분석방법이 우리 나라의 실제 산업 현장에서 적용된다면, 우리 제품의 국제적 경쟁력 확보에 커다란 도움이 될 것이라고 판단된다.

참고문헌

- [1] 김종걸, 이낙영, 권영일, 홍연웅, 전영록, 나명환, 2001, 한국신뢰성학회 2001년 정기학술대회 발표문집, pp219-222.
- [2] International Standard IEC 60300-3-11 International Electrotechnical Commission.