

철도차량의 고장모드 영향분석(FMEA)

A Study on FMEA for Railway Vehicle

박병노* 주해진** 이창환*** 임성수****
Park, Byoung-Noh Joo, Hae-Jin Lee, Chang-Hwan Lim, Sung-Soo

ABSTRACT

FMEA(Failure Mode and Effect Analysis) is a failure analysis method for the system to identify the potential failure modes, and their effects and causes to reduce or mitigate the critical effects of the system. FMEA for railway was introduced with reliability of railway system, and this was used for identifying and analysing the possible hazards qualitatively to meet the requirements in early stage of business. In general, the overall failure data of system could be managed from design stage by FMEA, and also the countermeasures to prevent many predicted failures could be established by identification of failure modes and assesment of failure effects by FMEA. Using these advantages of FMEA, the effectiveness of reliability improvement could be expected if FMEA is applied continuously in operation stage.

It is essential that railway vehicles are maintained with high level of safety and reliability not to happen any failures in operation. This paper is proposed the proper FMEA for maintenance of railway vehicles compared with existing FMEA.

1. 서 론

FMEA(Failure Mode and Effects Analysis)는 제품의 개발 초기 단계에서부터 제품에서 발생할 수 있는 잠재적 고장모드들을 선별하고, 고장모드의 영향과 원인을 분석함으로써, 이를 줄이거나 없애기 위한 권고조치 등을 수행하는 정성적 고장분석 기법이다. FMEA는 1950년대 초 미 항공우주국에서 로켓발사의 실패에 따른 원인규명을 체계적으로 정리할 목적으로 창안되었다. 이후 여러 분야에서 제품개발, 공정설계 시 활용되어 신뢰성 보증과 안전성 평가에 많은 성과를 얻었다. 철도분야의 FMEA는 철도시스템에 대한 신뢰성 개념을 도입 하면서부터이며, 각 시스템의 안전 목표를 만족하기 위해 발생 가능한 위험요인과 고장을 제거하기 위한 분석기법으로 활용되어 왔다.

철도차량은 사용기간이 매우 긴 편이며 운영기간 중 고장이 발생하지 않도록 높은 안전성과 신뢰성이 필수적이다. 따라서 제품의 초기 개발 단계인 설계·제작단계에서부터 보다 정확한 고장모드 파악과 고장영향 평가를 위한 FMEA 실시가 중요하며, 예방정비를 위주로 하는 운영단계에서도 고장형태, 고장원인 그리고 고장영향 등을 기록 관리하고 이를 분석하여 개선대책을 수립하는 등 지속적인 FMEA이 필요하다.

그 동안 FMEA가 효과적으로 수행될 수 있도록, 여러 종류의 FMEA 양식을 비롯한 방법들이 제안되었다. 장중순은 FMEA 실시 목적들을 보다 구체적으로 나누어 분류하고 그 목적에 적합한 FMEA 양식을

* 책임저자, 회원, 공항철도(주), 기술관리팀, 차장
E-mail : nopark@arex.or.kr
TEL : (032)745-7203 FAX : (032)745-7905

** 비회원, 공항철도(주), 차량팀, 과장

*** 회원, 공항철도(주), 기술관리팀, 과장

**** 회원, 공항철도(주), 기술관리팀, 부장

제안하였고, 정현용 등은 MIL-1629a, IEC-60812, SAE-J1739 규격의 특징들을 분석한 것을 바탕으로 철도 시스템에 특화된 FMEA 기법을 제안하였으며, 백영구 등은 기존의 FMEA 분류 외에 시스템 수명주기에 해당하는 단계별 FMEA를 적용하는 방안을 제시하였다.

본 논문에서는 기존에 제안된 FMEA 실시 방법들을 이용하여 철도차량의 설계·제작단계의 FMEA와 운영단계의 유지관리에 적합한 FMEA(Maintenance FMEA) 실시절차와 방법을 제안하고자 한다.

2. FMEA 실시목적 및 종류

2.1 FMEA 실시목적

FMEA를 시행하는 원래 목적은 시스템의 운용과정에서 발생할 수 있는 위험요소를 설계단계에서 체계적으로 정리하고 분석하여 안전을 확보하는데 있다. FMEA는 안전성 해석이라는 영역까지 확대하여, 안전성 분석 절차의 한 과정으로 볼 수 있으며 실시목적은 포괄적으로 요약하면 다음과 같다.

- ① 시스템 운용의 안전성을 높이는 설계 방법을 선택하는 기준을 제시
- ② 시스템 또는 서브시스템의 안전성에 치명적인 잠재적 고장모드에 대한 영향 및 원인분석
- ③ 잠재적 결함 확인 후 개선조치가 가능할 때 우선 순위 결정
- ④ 결함의 영향 제거 또는 감소를 위한 부문별 대책 수립의 근거
- ⑤ 시스템의 안전성 예측, 평가 또는 기타 안전성 연구에 대해 정성적, 정량적인 데이터 제공

FMEA를 효과적으로 실시하기 위해서는 이러한 목적을 보다 명확하게 정의하여야 한다. 왜냐하면 FMEA 양식의 작성은 그 절차나 필요한 데이터, 정보 등이 실시목적에 따라 달라지기 때문이다.

2.2 FMEA의 종류

FMEA는 어디에 적용하고 활용하느냐에 따라 여러 가지 이름이 붙는다. 또한 분석 수준이나 정도에 따라서도 다양한 이름이 붙을 수 있다. 대표적인 FMEA 기법은 설계 FMEA(Design FMEA), 공정 FMEA(Process FMEA), 시스템 FMEA(System FMEA)로 분류 할 수 있다. FMEA 분석 기법은 동일하며, 단지 적용되는 시점이 언제냐에 따라서 이름과 양식지의 항목이 달라질 수 있다.

2.2.1 설계 FMEA(Design FMEA)

설계 FMEA는 설계시작 단계에서 시작하여 양산도면 출도 이전에 완성되어야 하며, 제품의 구성요소인 부품, 어셈블리, 시스템의 단계별 분석에 사용한다. 제품 개발 초기 단계에서 제품의 잠재 고장모드의 확인이 용이하며, Bottom-up 방식으로 분석하는 방법이다. 설계 FMEA는 잠재적 위험성과 관련 있는 부품과 그 부품의 고장모드를 찾아내고, 각 고장모드의 위험도, 치명도 등을 추정하여 고장모드의 우선순위가 높은 부품을 집중 관리하여 사전에 고장을 방지하려 할 때 효과적이다. 또한 설계 개선 조치들 간의 우선순위를 설정하며, 제품 설계변경 후 그 근거를 문서화하여 향후 제품 설계 개발을 유도한다. 설계 FMEA를 실시할 때에는 주로 설계결함에 기인한 잠재적 고장모드에 중점을 둔다. 전개순서는 다음과 같다.

시스템 및 구성부품의 기능 확인 → 해석 LEVEL 결정 → 신뢰성 BLOCK 작성 → 고장 모드의 예측 → 고장의 영향 추측 → 고장의 원인 추측 → 현재의 설계관리상태 작성 → 정량분석 : 발생도, 심각도, 검출도 → RPN 산출 (Risk Priority Number) → 중요 문제 항목에 대한 대책 수립 → 문제 항목 개선 → 조치 후 2차 RPN 산출 → 요구수준 확인 → 설계적용 및 고객 품질정보와 비교

2.2.2 공정 FMEA

공정 FMEA는 제조·조립공정의 결함에 기인한 제품의 잠재적 고장모드에 중점을 두며, 제품이 고객에게 인도되기 이전에 고장 및 영향을 제거하기 위한 공정 활동을 확인할 수 있다. 엔지니어들이 불량발생을 낮추거나 불량 탐지능력을 증대시킬 수 있는 관리수단 또는 방법에 초점을 맞출 수 있도록 공정결함을 규명하고 있다. 전개순서는 다음과 같다.

공정 기능 분석 LEVEL 결정 → 가공 PROCESS BLOCK 작성 → 고장 모드의 예측 → 고장의 영향 추측 → 고장의 원인 추측 → 현재의 공정관리상태 작성 → 정량분석 : 발생도, 심각도, 검출도 → RPN 산출(Risk Priority Number) → 중요 문제 항목에 대한 대책 수립 → 문제 항목 개선 → 조치 후 2차 RPN 산출 → 요구수준 확인 → 공정적용 및 고객 품질정보와 비교

2.2.3 시스템 FMEA

시스템 FMEA와 설계 FMEA의 구분은 대상 시스템을 보는 관점에 따라 달라질 수 있다. 일반적으로 FMEA 실시 대상 아이템이 전체시스템 구성에서 상위레벨에 있을 경우, 설계 FMEA와 구분하기 위해 시스템 FMEA라는 용어를 사용한다.

3. 철도차량의 FMEA

철도차량은 운행 중 고장이 발생하지 않도록 안전성과 신뢰성을 확보해야 한다. 이를 위해 설계에 내재되어 있는 고장요인 등을 찾아내어 이를 제거 또는 감소시키기 위한 설계·제작단계의 FMEA 실시가 필수적이며, 설계·제작단계의 FMEA를 바탕으로 운영단계에서는 유지보수 중심의 FMEA가 필요하다. 철도차량의 FMEA는 운행 중 발생할 수 있는 위험요인, 위험상황 등을 포함하는 안전성 분석 활동의 하나로 폭넓게 실시하기도 하며, 분석에 참여하는 인원은 설계자, 제작자 뿐만 아니라 과거 다양한 고장형태를 경험한 정비·운영경험자, 신뢰성 업무 담당자 까지를 포함시켜 브레인스토밍을 통하여 분석을 실시할 필요가 있다. 성공적인 FMEA 실시를 위해서는 차량 제작사와 운영사 그리고 장치 또는 부품을 납품한 협력업체 사이의 원활한 의사소통이 있어야 한다. 이런 의사소통은 차량의 개념설계 단계에서부터 시작되어 차량의 사용내구연한 동안 전 생애에 걸쳐 계속되어야 한다. FMEA를 통해 도출된 고장원인은 할당된 각 장치의 신뢰성 목표에 부합하도록 감소방안을 제시하고, 고장을 줄이기 위한 방안을 제시하여야 한다.

3.1 설계·제작단계의 FMEA

설계·제작단계의 FMEA는 차량제작 초기에 차량 제작사에서 실시하며 차량의 안전성을 보장하기 위하여 설계에 내재되어 있는 고장요인 등을 설계단계 초기에 찾아내어 이를 제거 또는 감소시키기 위하여 실시한다. 설계 초기단계에서 이루어지지만 프로젝트가 완료되더라도 꾸준한 업데이트가 이루어져야 한다. 또한, 차량의 안전성을 보장하기 위해, 공학적인 측면에서 고장요인 분석을 위한 방법을 제시하고 공정단계별로 분석을 실시해야 한다. 설계·제작단계의 FMEA 양식은 표 1.과 같으며, 위험도 평가표는 표 2, 3, 4에 따른다. 설계·제작단계의 FMEA 실시절차와 양식 작성방법을 정리하면 다음과 같다.

[Step 1] 차량 시스템의 하위 시스템(Sub-system)을 구분하고 분류 수준을 결정한다.

차량 시스템은 하위시스템, 구성요소, 조립품, 부품으로 구성된다. FMEA의 첫 단계는 이들 구성요소를 구분하는 것이다. 차량 시스템 내의 장치에 대한 고장정보를 분석하기 위해서는 이를 분류하고 분류레벨 결정이 필요하다. 하위 시스템을 구분할 때는 제작적인 측면과 유지보수 측면을 고려하여야 하며, 유지관리 단계까지의 일관된 기준을 적용하기 위하여 합리적인 결정이 필요하다. "시스템(차량) > 서브시스템 > 장치 > 부품 등의 단계로 분류할 수 있다.

[Step 2] 장치의 기능을 확인한다.

철도차량은 하드웨어를 기준으로 장치별로 구분하는 경우와 고압계통, 저압계통, 제어계통, 제동계통 등 기능별 블록으로 구분하는 방법이 있으나, 하드웨어를 기준으로 하는 방법이 기능을 명확히 구분할

수 있다.

[Step 3] 신뢰성 불력도를 작성한다.

장치 또는 기능별 구분 후에는 구분된 구성요소를 정리하여 신뢰성 불력도를 작성한다. 이는 발주자의 신뢰성 요구조건에 부합하도록 만들어야 한다. FMEA 양식지에는 고장율의 항목에 기입한다.

[Step 4] 고장모드를 열거한다.

서브시스템, 장치별로 발생가능한 모든 고장모드를 열거한다. 과거에 이와 유사한 차량 시스템이 있으면 그의 고장기록이나 사용자의 요구사항 등을 포함시켜 고장모드를 검토한다. 그리고 전혀 새로운 제품인 경우에는 Brain Storming 을 거쳐 고장모드를 찾아낸다.

[Step 5] FMEA에 효과적인 고장모드를 선정한다.

위에서 찾아낸 고장모드 중에서 FMEA 실시에 효과적인 고장모드를 선정한다. FMEA에 유효한 고장모드의 선정 시에는 과거의 경험이나 유사 차량에 대한 고장실적을 정확히 파악하고 적절한 고장모드를 선정하는 것이 중요하다.

[Step 6] 선정된 고장모드에 대한 고장원인을 열거한다.

각 고장모드별로 설계, 제작, 사용, 환경 등을 고려하여 종합적으로 검토하여 그 원인을 추정한다.

[Step 7] 선정된 고장모드에 대한 고장영향을 열거한다.

고장모드가 서브시스템 및 장치 또는 운영상에 미치는 영향을 기록한다.

[Step 8] 치명도, 발생빈도, 위험도지표를 평가한다.

중요도, 발생도, 고장 등급 등을 아래 표 2, 3, 4.의 기준에 따라 평가한다. 많은 고장모드 중 어떤 것부터 관리하여야하는가 우선순위를 결정하는데 사용된다.

[Step 9] 고장 검지법, 권고대책을 기술한다.

고장모드 발생시 발견할 수 있는 방법을 서술하고, 권고대책을 기술한다. 이는 설계·제작단계 뿐만 아니라 운영 단계에서도 참고할 내용을 언급한다.

[Step 10] 평가된 고장 등급 등 결과를 정리한다.

설계조건과 고장의 중요성을 대조하면서 정해진 기준에 따라 고장 등급을 매긴다. FMEA의 가장 중요한 작업이며 신뢰성 검증을 위한 대책을 정하는 중요한 과정이다.

[Step 11] 고장 등급이 높은 것에 대한 개선 제안을 한다.

고장 등급이 높은 장치에 대하여 어떻게 대처할 것인가를 결정한다. 그리고 이러한 대책의 내용으로는 설계변경, 고 신뢰성 부품의 교체 사용, 품질관리 절차변경, 시험 및 검사 등의 절차변경 등의 방법을 모색한다.

표 1. 설계·제작단계의 FMEA 양식

구분			기능	고장모드	고장원인	고장영향			치명도	발생빈도	위험도지표	고장율	고장검지법	권고·대책	기타
시스템	서브시스템	장치				부분영향	상위수준영향	최종영향							

표 2. 치명도 평가표

치명도	분 류	사람 혹은 환경에 대한 결과
재앙적	I	치명, 대중적으로 심각한 부상, 아주 중대한 환경훼손(예, 집단사고)
치명적	II	개인적으로 치명, 심각한 부상, 중대한 환경훼손(예, 개인사고)
영향없음	III	경미한 부상 혹은 환경에 심각한 위협
영향거의없음	IV	경미한 부상 가능 (발생가능성이 적음)

표 3. 발생빈도 평가표

가능수위	분 류	사람 혹은 환경에 대한 결과
빈번	A	일(day)기준. 계속적 발생
자주	B	월(Month)기준, 자주 발생
가끔	C	연(Year)기준, 가끔 발생
가능	D	수명주기 기준, 발생예상가능
거의 불가능	E	발생염려는 없어 보이나 가능성은 있음. 예외적으로 발생가능
극히 불가능	F	발생가능성이 극히 드물며, 발생하지 않을 수도 있음

표 4. 위험도 지표

빈 도	치 명 도			
	재앙적	치명적	영향있음	영향거의없음
빈 번	불허용	불허용	불허용	허 용
자 주	불허용	조건부 허용	조건부 허용	허 용
가 끔	불허용	조건부 허용	허 용	무 시
가 능	조건부 허용	허 용	무 시	무 시
거의 불가능	조건부 허용	허 용	무 시	무 시
극히 불가능	허 용	무 시	무 시	무 시

3.2 유지관리(운영) 단계의 FMEA

설계-제작단계에서 잠재적 고장 모드를 선별하여 고장을 줄이거나 없애기 위한 FMEA를 수행하였다 하더라도 철도 운영여건에 따라 차량은 여러 가지 형태의 고장을 유발한다. 따라서 설계-제작단계의 FMEA 내용을 바탕으로 운영단계의 고장내용을 기록하고 이를 분석하며, 문서화된 교정 조치 시행을 위한 유지관리 단계의 FMEA가 필요하다. FMEA는 분석적 유지관리기법의 하나라고 볼 수 있으며, 이는 발생한 고장에 대한 정확한 분석을 통하여 향후 유지보수의 방향을 정하는데 반영할 수 있다. 유지관리 단계의 FMEA 양식은 표 5와 같으며, 설계-제작단계의 양식과 절차는 유사하나 세부항목 작성방법은 상이하다. 양식 작성방법을 정리하면 다음과 같다.

[Step 1] 차량 시스템의 하위시스템(Sub-system)을 구분하고 분류 수준을 결정한다.

[Step 2] 장치의 기능을 확인한다.

[Step 3] 고장장치를 분류체계에 따라 분류한다.

고장이 발생한 장치를 정해진 분류체계에 따라 분류한다. 예를 들면, 차량(시스템)-객실출입문(서비스

스텝)–도어모터(장치)로 분류할 수 있다.

[Step 4] 고장모드를 결정한다.

분류된 고장장치에서의 고장 발생으로 인하여 나타나는 현상, 즉 고장모드를 선정한다. 만약 기존에 발생되지 않고 신규로 발견된 고장모드는 추가한다.

[Step 5] 고장원인을 결정한다.

고장모드를 유발시킨 고장원인을 구체적으로 기술한다. 만약 기존에 식별되지 않은 고장원인은 추가한다.

[Step 6] 고장으로 인한 결과를 구분한다.

고장으로 인한 결과 구분은 열차운행 상에 영향을 기준으로 하며, 운행지연, 기능고장, 단순고장으로 구분할 수 있다.

[Step 7] 고장영향에 대한 치명도를 결정한다.

고장영향에 대한 치명도를 정량적으로 결정한다. 예를 들면, 치명성이 높을수록 높은 가중치를 부여할 수 있다. 이에 대한 산출식 예는 아래와 같다.

[Step 8] 장치별 고장율을 산출한다.

산출된 고장율은 제작사에서 제시한 데이터와 비교하며, 제작사에 feed-back 한다. 산출은 고장횟수와 운영시간 또는 운행거리 등을 기준으로 산출할 수 있다.

[Step 9] 위험도지표를 산출한다.

고장의 치명도와 발생빈도를 조합하여 위험지표를 산출하며, 설계 FMEA에서 제시된 위험도 평가 매트릭스와 유사한 형태의 평가표를 통하여 위험도를 평가할 수 있다.

[Step 10] 고장 검지법을 기록한다.

운영 중 발생한 고장에 대한 검지방법을 기록하며, 적절한 예방정비를 결정하는데 도움을 줄 수 있다.

[Step 11] 고장예방을 위한 정비 대책을 기록한다.

고장을 예방 및 저감키 위한 대책을 기록하며, 주로 고장원인을 방지하기 위한 근본대책 또는 빈도를 줄이기 위한 예방정비 사항이 기술된다.

표 5. 유지관리 단계의 FMEA 양식

구분			기능	고장모드	고장원인	고장영향(구분)				치명도	발생빈도	위험도지표	고장율	고장검지법	고장예방대책	기타
시스템	서브시스템	장치				위험고장	운행지연	기능고장	단순고장							

4. 결론

본 논문에서는 고장분석 기법으로 신뢰성 분야에서 널리 사용되고 있는 FMEA를 철도차량분야에 효과적으로 적용하기 위하여 설계·제작단계와 유지관리 단계로 분할하여 실시하는 방법을 제안하였다.

각 단계의 양식과 절차는 유사하나 세부항목 작성방법은 목적에 맞게 달리할 필요가 있으며, 설계·제작 단계에서는 설계자 뿐만 아니라 정비·운영경험자, 신뢰성 업무담당자 까지를 포함시켜 브레인스토밍을 통하여 분석을 실시하는 것이 효과를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 유지관리 단계에서 고장에 대한 구분은 열차운행에 영향을 기준으로 할 필요가 있다.

이러한 내용을 바탕으로 설계·제작단계 뿐만 아니라 유지관리 단계에서도 FMEA을 지속적으로 실시한다면 고장을 미연에 방지하고, 신뢰성 향상에 크게 기여할 수 있을 것이라고 사료된다.

참고문헌

1. MIL-1629a (1980), Procedures for Performing a Failure Mode and, Effects and Criticality Analysis, DOD
2. 정현용, (2006), “철도시스템 FMEA 수행절차 및 분석기법 개발에 관한 연구”, 한국철도학회 2006 추계학술대회논문집
3. 백영구 외, (2002), “시스템의 신뢰성과 안전성 향상을 위한 FMEA 개선에 관한 연구”, 한국철도학회 2002 추계학술대회논문집
4. 장중순 (1997), “효과적인 FMEA 실시”, 품질경영학회지 제25권 제1호
5. 김정식 (1997), “FMEA를 통한 보전대상 선정”, 산업과학기술연구소 논문집, 제5편