

# 전동차 고속차단기 고장 분석을 위한 FMECA 기법

김성렬<sup>1</sup>, 문용선<sup>2</sup>, 최규형<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>서울과학기술대학교 철도전기신호공학과, <sup>2</sup>(주)메가일렉

## FMECA Procedure for Failure Analysis of Train High-Speed Circuit Breaker

Sung-Ryeol Kim<sup>1</sup>, Yong-Sun Moon<sup>2</sup>, Kyu-Hyoung Choi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Railway Electrical/Signalling Engineering, Seoul National University of Science and Technology

<sup>2</sup>Megaelec Co.

**요약** 전동차는 대용량 교통수단으로서 정시 운행 및 높은 안전성이 요구되기 때문에, 고장 분석을 체계적으로 수행하여 신뢰도를 향상시키기 위한 수단으로서 고장 영향의 심각도 및 치명도를 정량적으로 평가하는 FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) 기법이 적용되고 있다. 그러나, 아직까지 전동차에 특화된 FMECA 규격 및 절차는 정립되어 있지 않고 자동차 산업 등 다른 산업분야의 FMECA 규격을 그대로 적용하고 있기 때문에 전동차의 고유한 운영 및 유지보수 여건을 충분히 반영하지 못하고 있다. 본 논문에서는 산업계 각 분야에서 적용되고 있는 FMECA 규격에 대한 분석을 토대로, 전동차 분야에 적합한 FMECA 기법으로서 고장 영향 분석과 치명도 분석을 단계별로 나누어 수행하고 고장 영향의 심각도에 중점을 두어 치명도를 분석하는 기법을 제시하였다. 제안 기법을 전동차의 핵심 안전 장치인 고속차단기에 적용하여 도시 철도 현장에서의 15년 동안의 전동차 유지보수 데이터를 이용하여 분석한 결과, 고속차단기 부품 중에서 특히 아크 슈트의 절손이 심각도 3등급, 치명도 5등급으로 위험도가 가장 높았으며, 뒤를 이어서 전자변 파손 및 접촉 불량, 실린더 파손 등이 심각도 3등급, 치명도 4등급으로 위험도가 높은 것으로 나타났다. 이상의 분석 결과는 전동차 고속차단기의 설계 및 유지보수 업무의 개선에 활용할 수 있다.

**Abstract** FMECA(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) techniques to make quantitative evaluation of failure effects severity and criticality have been applied to systematic failure analysis for reliability improvement of train which should provide regular service and secure high level of safety as a mass transportation system. These FMECA techniques do not fully reflect the inherent train operation and maintenance circumstances because they are based on the FMECA standards devised for other industries such as automobile industry and FMECA standard dedicated to train industry has not been established yet. This paper analyzes FMECA standards for various industries, and suggests a FMECA technique dedicated to train industry which makes failure effect analysis and criticality analysis step by step and makes criticality analysis placing emphasis on the severity of the failure effect. The proposed technique is applied to FMECA of high-speed current breaker which is a core safety device of train using field failure data for 15 years of train maintenance. The FMECA results show that breakage of arc chute has the highest risk with 3rd severity class and 5th criticality class among all the components of high-speed circuit breaker. Damage and poor contact of electronic valve, and cylinder breakage with 3rd severity class and 4th criticality class are followed by. These results can be applied to improvement of design and maintenance process for high-speed circuit breaker of train.

**Key Words** : Failure Mode, FMECA, High-speed Circuit Breaker(HSCB), Train

본 논문은 국토교통과학기술진흥원에서 시행하는 상태기반 스마트 유지보수 핵심기술 개발 연구(과제번호 : 13RTRP-C068243-01)의 일환으로 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Kyu-Hyoung Choi(Seoul National University of Science and Technology)

Tel: +82-2-970-6873 email: khchoi@seoultech.ac.kr

Received March 19, 2015

Revised (1st May 2, 2015, 2nd May 4, 2015 3rd May 6, 2015)

Accepted May 7, 2015

Published May 31, 2015

## 1. 서론

FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis)는 시스템의 개발 초기 단계에서부터 시스템에서 발생할 수 있는 잠재적 고장모드를 선별하고, 고장모드의 영향과 원인을 분석함으로써, 시스템에 치명적인 영향을 미치는 고장 모드를 선별하여 이들을 완화하거나, 줄이거나 제거하기 위한 의사결정을 수행하는 방법으로 사용되고 있다[1-2]. FMECA는 FMEA (Failure Modes and Effects Analysis)와 CA (Criticality Analysis)로 구성되는데, 이런 FMECA의 내용 및 수행절차에 관한 규격이 미국 국방성에 의해 MIL-STD-1629A로 규격화되어 있으며, 이를 응용한 자동차 산업 분야의 SAE-J1739, 그리고 전자산업분야의 IEC-60812 규격이 제정되어 응용되고 있다[3,4,5].

도시철도에서 운행되고 있는 전동차의 경우, 수송량 증대를 위하여 운전시격을 최소 3분까지 단축하여 고밀도 열차운행을 실시하고 있으며, 이와 함께 열차지연을 최소화하여 정시운행을 확보할 수 있도록 높은 신뢰성이 요구되고 있다. 이에 따라 15분 이상 전동차 운행이 지연될 경우에는 이를 운행지연사고로 분류하여 철도안전정보시스템에 등록하는 등 특별히 관리하고 있다. 또한, 전동차는 대부분 지하구간에서 대량수송을 수행한다는 특성이 있어서, 장애나 사고발생시 대형사고로 확대될 위험성이 높기 때문에 안전성 확보에 대한 요구도 매우 높다. 이상과 같이 도시철도에서 운행되는 전동차에 대해서는 매우 높은 신뢰성 및 안전성이 요구되고 있기 때문에, 전동차 제작시 도시철도 성능 및 안전기준을 적용하여 충분한 신뢰성 및 안전성을 확보하도록 하고 있다. 또한, 도시철도 운영기관에서는 전동차의 상태를 최적으로 유지하기 위하여 주기적인 점검 및 부품교체 등을 통하여 유지보수를 수행하고 있다.

전동차 제작 및 유지보수를 보다 체계적이고 과학적으로 수행하여 전동차의 신뢰성 및 안전성을 향상시키기 위해서는 FMECA에 의한 분석 방법의 적용이 필요하다 [6]. 그러나 아직까지 철도차량산업에 보편적으로 적용할 수 있는 FMECA 규격은 별도로 제정되어 있지 못하고, 여러 가지 규격들이 필요에 따라 적용되고 있다. 자동차산업분야에 적용되고 있는 SAE-J1739 규격을 적용하여 전동차 벨트식 출입문과 신호장치에 대해 FMECA를 수행한 사례가 발표되어 있다[7,8]. 또한 국방분야의

MIL-STD-1629A 규격을 적용하여 전동차 출입문에 대해서 FMECA를 수행한 사례도 발표되어 있다[9]. 본 논문에서는, 일반산업분야에서 적용되고 있는 FMECA 규격들을 검토하여 전동차 시스템의 특징을 고려한 FMECA절차를 제시하고, 전동차 주회로장치의 고속차단기에 적용하여 FMECA를 수행하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 여러 산업분야에 적용되고 있는 FMECA 규격들을 비교분석하여 전동차 시스템에 적합한 FMECA 절차를 제시하였고, 3장에서는 도시철도 현장으로부터 전동차 고속차단기 유지보수데이터를 수집하여 고장분석을 수행하였다. 4장에서는 제안 기법을 고속차단기에 적용하여 분석한 FMECA 결과를 기술하였으며, 5장은 결론으로 구성하였다.

## 2. FMECA 규격 검토

### 2.1 FMECA 적용 효과

FMECA는 전동차 개발 초기 단계에서부터 시작하여 전동차의 폐기에 이르기까지, 전동차의 부품에서 발생할 수 있는 모든 잠재적인 고장 모드에 의한 영향과 그 원인을 분석함으로써, 전동차 운영에서 시스템 제품의 성능에 치명적인 영향을 줄 수 있는 고장 모드들을 줄이거나 없애는데 그 목적을 두고 있다. 따라서 FMECA의 주요 특징으로서는, 전동차의 개발 초기 단계부터 설계 취약점에 대한 분석과 보안을 수행하기 때문에 제작 단계의 설계변경이 최소화되어 이에 따른 비용과 시간 측면의 절감 효과가 기대되며, 전동차의 안전성과 가용도를 향상 시킬 수 있고, FMEA 결과를 유지보수 측면에서 활용하여, 실제 유지보수를 수행하는 단계에서 기술자가 유지보수를 위해 취해야 하는 행동 혹은 권장 사항 등에 대한 내용으로 참고할 수 있다. 또한, 전동차의 성능 검증 자료로 활용할 수 있으며, 전동차의 운행 안전성 측면에서 치명적인 고장모드를 미리 선별해서 예방할 수 있다. 전동차의 고장 데이터에는 그 전동차의 취약점 및 한계에 관한 중요한 정보들이 담겨있다. FMEA를 활용하게 되면 제품에 대한 고장모드와 고장을 등에 관한 자료가 누락됨으로써 추후 방대한 데이터 베이스를 구축하여 추후 신뢰성 유지보수 분석에 활용할 수 있다.

## 2.2 전동차 FMECA 규격 검토

철도분야에 FMECA를 적용하는 과정에서 자동차 산업분야의 SAE-J1739 규격이 적용되고 있다. SAE-J1739에서는 심각도를 구하는 FMEA 분석과 치명도를 구하는 CA 분석을 한번에 수행한다. 여기서 치명도를 나타내는 개념인 RPN (Risk Priority Number)은 구성품의 심각도(S), 발생도(O), 검출도(D)로부터 다음 식(1)과 같이 구해진다.

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

철도시스템은 정시성과 안전성 확보 측면에서 고장 발생 빈도보다는 열차운행을 중단시킬 수 있는 심각도가 높은 고장모드에 대해 비중을 둘 필요가 있으나, RPN에서는 심각도와 발생도, 검출도의 비중이 동일하여 이를 반영할 수 없다는 문제점이 있다. 또한, SAE-J1739에서는 각각의 고장원인에 대해 RPN을 결정하게 되는데, 구성품의 고장률을 각 고장모드의 고장률로 나누는 과정 및 고장모드의 고장률을 다시 각 고장원인의 고장률로 나누는 과정에 분석자의 주관이 개입되기 때문에 객관성이 결여될 가능성이 높다.

MIL-STD-1629A와 IEC-60812 규격에서는 FMECA와 CA 단계를 나누어 수행함에 따라, 전동차의 운영을 중단시킬 수 있는 심각한 고장모드들에 비중을 두고 분석을 수행할 수 있다[10]. 또한, FMEA 분석을 통해 심각한 고장모드들을 우선적으로 선별한 후, 이들에 대해서 필요한 경우 추가적으로 CA 분석을 수행함으로써 전동차와 같이 복잡한 시스템에서 효율적인 분석이 가능하다는 장점이 있다. 한편 치명도 평가 방법에 있어서, IEC-60812 규격에서는 치명도를 정성적인 단계로 분류하여 사용한다는 특징이 있다. 즉, 정량적으로 산출된 치명도를 발생확률로 변환하고 이를 다시 정성적인 등급으로 분류한 다음, 발생빈도와 심각도를 기준으로 하는 치명도 행렬을 작성하여 분석한다. 한편 MIL-STD-1629A에서는 고장모드별 치명도를 정량적으로 산출하고, 도출된 치명도 수치를 이용하여 치명도 행렬 다이어그램을 작성하여 고장모드별 심각도에 따른 치명도를 평가하고 있다.

이상으로부터, MIL-STD-1629A 규격을 기반으로 전동차에 FMECA를 적용하기 위한 분석절차를 검토하여, 이를 전동차 고속차단기 FMECA에 적용하여 분석을 수행하였다. 또한, IEC-60812 규격을 기반으로 치명도 분

석을 수행하고, 그 결과를 MIL-STD-1629A에 의한 결과와 비교, 분석함으로써 전동차 적용에 적합한 FMECA 기법 및 절차를 제시한다.

## 3. 고속차단기 고장 분석

### 3.1 고속차단기 구조

고속차단기는 전동차에 과부하나 단락과 같은 전기적 장애가 발생할 경우 회로를 차단하여 전기장치를 보호하는 기능을 수행한다. 전동차 주회로 장치의 일부로서, 전동차 지붕 위에 설치되어 집전장치와 전력변환장치를 접속제어한다. 고속차단기의 구조는 Fig. 1에 보이는 것처럼 주회로를 개폐하는 차단부(전자변, 실린더, 아크 슈트, 조작기구를 포함한 LB Box 등) 외에 지지애자 및 애관 등으로 구성된다. 고속차단기의 투입은 조작공기압력에 의해 이루어지며, 차단은 차단코일이 여자되면 차단 스프링에 의해 차단되는 방식을 취하고 있다.

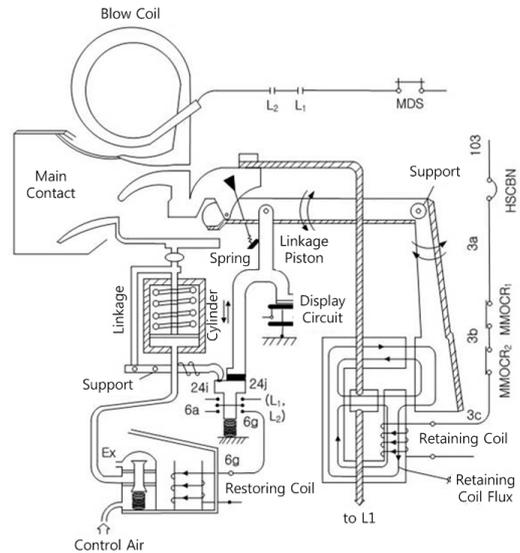


Fig. 1. Structure of train HSCB

### 3.2 고장데이터 분석

도시철도에서 운영되고 있는 전동차 고속차단기의 15 년간에 걸친 운영 및 유지보수과정에서 발생한 고장데이터를 현장으로부터 수집하여 분석하였다. Table 1은 15 년 동안 발생한 고속차단기의 고장발생건수를 주요 구성품 별로 정리한 것이다. 총 고장건수는 179건으로서, 전

자변 고장이 95건으로 전체고장건수의 53.1%로 가장 많으며, 실린더가 66건으로 전체고장건수의 36.9%, LB Box는 8건으로 4.4%, 아크슈트는 10건으로 5.6%를 차지하는 것으로 나타났다. 고속차단기의 경우, 이상의 4가지 구성품 고장이 전체고장의 대부분을 차지하고 있어 고속도차단기의 주요 고장요인으로 작용하고 있으므로, 이에 대하여 상세하게 분석하기로 한다.

**Table 1.** Statistics of HSCB component failures

| Component          | Number of Failures | Percentage (%) |
|--------------------|--------------------|----------------|
| 1 Electronic valve | 95                 | 53.1           |
| 2 Cylinder         | 66                 | 36.9           |
| 3 LB Box           | 8                  | 4.4            |
| 4 Arc chute        | 10                 | 5.6            |
| TOTAL              | 179                | 100            |

## 4. 고속차단기 FMECA 적용 기법

### 4.1 고장모드 도출

고장데이터 분석결과, 고속차단기의 구성품인 전자변, 실린더, LB Box, 아크슈트는 Table 2에 보이는 것처럼 다양한 고장모드가 나타나는 것으로 조사되었다. 전체 179건의 고장 중에서, 고장모드별로 누기 102건, 오동작 18건, 손상 6건, 변형 21건, 부식 1건, 접촉불량 6건, 이물질 5건, 감도부족 5건, 빙결 2건, 단선 2건, 마모 2건, 하드웨어불량 3건, 절연불량 1건, 절손 4건, 아크발생 1건이 발생하였다. 특히 전자변 및 실린더에서의 누기가 전체 고장의 50% 이상을 차지하는 것으로 나타났다.

### 4.2 고장영향 분석(FMEA)

FMECA 분석에서 1차적으로 도출된 고장모드에 대하여 고장영향의 심각도를 평가하는 FMEA를 수행한다. 여기에서는, 각 고장모드에 대하여 잠재적으로 발생할 수 있는 최악의 영향을 상정하여 심각도를 할당한다. MIL-STD-1629A에서는 사망/부상이나 무기체계의 파괴를 기준으로 고장영향의 심각도를 Category I (Catastrophic), II(Critical), III(Marginal), IV(Minor)의 4단계 등급으로 분류하여 평가한다[4].

한편, 전동차에서 고장영향의 심각도는 승객의 안전 위협이나 열차운행중단 또는 지연으로 나타나므로, 이를

기준으로 고장영향의 심각도를 Table 3에 보이는 것처럼 5등급으로 분류하였다. 즉, 승객의 안전위협시에는 I 등급, 열차운행중단 발생시에는 II등급으로 정의하였다. 열차지연은 지연시간의 길이에 따라 영향이 다르게 나타나므로, 장시간 지연은 III등급으로 하고, 짧은 시간 지연은 IV등급으로 구분하여 정의하였다. 그리고, 고장영향이 미미할 때는 V등급으로 정의하였다.

도시철도 운영현장에서의 유지보수실적데이터로부터 각 고장모드별로 고장영향의 파급범위를 조사분석하고, Table 3의 심각도 등급을 기준으로 고장영향의 심각도를 평가하였다. 앞서 도출된 전동차 고속차단기의 고장모드에 대한 고장영향의 심각도 평가 결과를 Table 2에 함께 나타내었다.

**Table 2.** Statistics of HSCB failure modes

| Failure mode        | Occurrence | Severity Level |
|---------------------|------------|----------------|
| Air leakage         | 102        | V              |
| Malfunction         | 18         | IV             |
| Damage              | 6          | III            |
| Deformation         | 21         | V              |
| Corrosion           | 1          | V              |
| Poor contact        | 6          | III            |
| Foreign objects     | 5          | IV             |
| Lack of sensitivity | 5          | IV             |
| Freezing            | 2          | IV             |
| Disconnection       | 2          | III            |
| Abrasion            | 2          | V              |
| Hardware failure    | 3          | III            |
| Poor insulation     | 1          | III            |
| Breakage            | 4          | III            |
| Arcing              | 1          | III            |
| Total               | 179        |                |

**Table 3.** Severity classification category for train failure mode

| Severity level | Definition  |
|----------------|---|
| I              | The failures threaten passenger/staff safety  |
| II             | The failures break down train power supply, and the train can't move                |
| III            | The failures break down train power supply, but the train can move without the HSCB |
| IV             | The failures can be settled by the driver, but a little delay should occur.         |
| V              | The failures have no impact on train operations, and can be repaired after          |

### 4.3 치명도 분석(CA)

앞서 수행한 고장모드별 심각도 분석결과를 토대로, 각 고장모드의 발생빈도를 고려하여 치명도분석을 수행한다. 고장데이터가 충분치 않을 경우에는 정성적인 기법으로 발생빈도를 분석하여야 하며, MIL-1629A에서는 Level - A (Frequent), B (Reasonably Probable), C (Occasional), D (Remote), E (Extremely Unlikely)의 5 등급으로 분류하여 발생확률을 정성적으로 평가한다.

도시철도 전동차에서와 같이 유지보수를 주기적으로 수행하여 고장률 데이터를 입수할 수 있을 경우에는, 정량적인 기법으로 치명도 분석을 수행한다. 즉, 구성품의 각 고장모드에 대한 치명도 계수를 다음 식(2)로부터 정량적으로 산출하여 분석한다.

$$C_m = \beta\alpha\lambda_p t \quad (2)$$

여기서,  $m$ : 구성품의 고장모드,  $\beta$ : 고장모드의 유효발생률,  $\alpha$ : 고장모드의 발생비율,  $\lambda_p$ : 구성품의 고장률,  $t$ : 구성품의 작동시간

구성품의 치명도는 고장모드들에 대한 치명도의 합산으로부터 다음 식(3)과 같이 구해진다.

$$C_r = \sum_{n=1}^j (\beta\alpha\lambda_p t)_n \quad n = 1, 2, 3, \dots, j \quad (3)$$

여기서,  $n$ : 구성품의 특정 심각도 등급에 속하는 고장모드,  $j$ : 구성품의 특정 심각도 등급에 속하는 고장모드의 총 개수

구성품별 고장률  $\lambda_p$ 은 현장에서의 사용실적데이터로부터 다음 식(4)와 같이 구한다.

$$\lambda_p = \frac{N}{t} \quad (4)$$

여기서,  $N$ : 구성품의 고장발생 건수,  
 $t$ : 구성품의 운영 시간

고장모드의 발생비율  $\alpha$ 는 각 고장모드의 발생빈도로서, 각 고장모드의 발생건수를 구성품 전체 고장모드의

발생건수로 나눈 것이다. 또한, 고장 유효발생율  $\beta$ 는 고장발생 가능성에 따라 다음과 같은 추정치로 정의된다.

- $\beta = 1$ : 고장 발생
- $0.1 \leq \beta \leq 1$ : 고장 발생 가능성이 높음
- $0 \leq \beta \leq 0.1$ : 고장 발생가능성이 있음
- $\beta = 0$ : 고장 발생 가능성 없음

### 4.4 FMECA 결과 분석

#### 4.4.1 치명도 계수

구성품별로 고장모드에 대한 치명도 및 특정 심각도 등급의 치명도 산출 결과를 Table 4에 보인다. 여기서,  $C_i$ 는  $i$ 번째 고장모드의 치명도를 의미하며 식(2)와 같이 고장모드의 유효발생률  $\beta$ , 고장모드의 발생비율  $\alpha$ , 구성품의 고장률  $\lambda_p$  및 구성품의 작동시간  $t$ 로부터 구해진다.  $C_r$ 은 구성품별로 특정 심각도 등급에 속하는 고장모드들의 치명도의 합으로써 식(3)으로부터 구해진다.

FMECA 분석 결과, 전차변에서는 고장모드 발생비율이 누기: 43.16%, 오동작: 13.68%, 변형: 16.84%, 접촉 불량: 5.26% 등으로 나타났으며, 각 고장모드별 치명도를 합산한 결과 심각도등급 III의 치명도는 10.5, 심각도등급 IV의 치명도는 24.15, 심각도등급 V의 치명도는 37.65로 나타났다. 실린더에서는 고장모드 발생비율이 누기: 92.42%, 손상: 3.03%, 변형: 3.03%, 마모: 1.52% 등으로 나타났으며, 고장모드별 치명도를 합산한 결과 심각도등급 III의 치명도는 1.95, 심각도등급 V의 치명도는 33.45로 나타났다. 한편 LB Box에서는 고장모드 발생비율이 오동작: 62.5%, 접촉불량: 12.5%, 이물질: 12.5%, 감도부족: 12.5%로 나타났으며, 고장모드별로 합산한 결과 심각도등급 III의 치명도는 0.45, 심각도등급 IV의 치명도는 7.05로 나타났다. 아크슈트의 고장모드 발생비율은 손상: 20%, 변형: 30%, 절손: 40%, 아크 발생: 10%로서, 고장모드별 합산한 결과 심각도등급 III의 치명도는 7.05이고 심각도등급 V의 치명도는 3.0로 나타났다.

#### 4.4.2 MIL-STD-1692A에 의한 치명도 분석

Table 4의 치명도 산출결과로부터 도출된 치명도 행렬 다이어그램을 Fig. 2에 보인다. 25개의 고장모드에 대하여, 심각도 등급과 치명도계수를 기준으로 그 위치를 고장모드 번호로 표시하였다. 각 고장모드의 위치에

Table 4. FMECA results of HSCB

| No | Component        | Failure mode        | Severity level | $\lambda_p$ | $\alpha$ | $\beta$ | $C_i$  | $C_r$       |
|----|------------------|---------------------|----------------|-------------|----------|---------|--------|-------------|
| 1  | Electronic valve | Air leakage         | V              | 6.33        | 43.16    | 0.5     | 20.55  | III<br>10.5 |
| 2  |                  | Malfunction         | IV             |             | 13.68    | 1       | 13.05  |             |
| 3  |                  | Damage              | III            |             | 2.11     | 1       | 1.95   |             |
| 4  |                  | Deformation         | V              |             | 16.84    | 1       | 16.05  |             |
| 5  |                  | Corrosion           | V              |             | 1.05     | 1       | 1.05   |             |
| 6  |                  | Poor contact        | III            |             | 5.26     | 1       | 2.55   |             |
| 7  |                  | Foreign objects     | IV             |             | 4.21     | 1       | 4.05   |             |
| 8  |                  | Lack of sensitivity | IV             |             | 4.21     | 1       | 4.05   |             |
| 9  |                  | Freezing            | IV             |             | 2.11     | 1       | 1.95   |             |
| 10 |                  | Disconnection       | III            |             | 2.11     | 1       | 1.95   |             |
| 11 |                  | Abrasion            | IV             |             | 1.05     | 1       | 1.05   |             |
| 12 |                  | Hardware failure    | III            |             | 3.16     | 1       | 3.0    |             |
| 13 |                  | Poor insulation     | III            |             | 1.05     | 1       | 1.05   |             |
| 14 | Cylinder         | Air leakage         | V              | 4.40        | 92.42    | 0.5     | 30.945 | III<br>1.95 |
| 15 |                  | Damage              | III            |             | 3.03     | 1       | 1.95   |             |
| 16 |                  | Deformation         | V              |             | 3.03     | 1       | 1.95   |             |
| 17 |                  | Abrasion            | V              |             | 1.52     | 1       | 1.05   |             |
| 18 | LB Box           | Malfunction         | IV             | 0.53        | 62.50    | 1       | 4.95   | III<br>0.45 |
| 19 |                  | Poor contact        | III            |             | 12.50    | 1       | 0.45   |             |
| 20 |                  | Foreign objects     | IV             |             | 12.50    | 1       | 1.05   |             |
| 21 |                  | Lack of sensitivity | IV             |             | 12.50    | 1       | 1.05   |             |
| 22 | Arc chute        | Damage              | III            | 0.67        | 20       | 1       | 1.95   | III<br>7.05 |
| 23 |                  | Deformation         | V              |             | 30       | 1       | 3      |             |
| 24 |                  | Breakage            | III            |             | 40       | 1       | 4.05   |             |
| 25 |                  | Arcing              | III            |             | 10       | 1       | 1.05   |             |

서 원점으로부터의 대각선에 수직선을 그려서 대각선에서의 점점 위치를 기준으로 고장모드의 유지보수 우선순위를 결정한다. 대각선에서의 점점 위치가 원점으로부터 멀수록 유지보수의 우선순위가 높아진다는 것을 의미한다. Fig. 2의 치명도 다이어그램으로부터, 고장모드#14(실린더 누기), 고장모드#1(전자변 누기), 고장모드#2(전자변 오동작), 고장모드#4(전자변 변형), 고장모드#24(아크슈트 절손), 고장모드 #12(전자변 하드웨어불량) 순으로 원점에서 멀게 나타났으며, 치명도가 높고 중점 관리되어야 할 고장모드라는 것을 알 수 있다.

4.4.3 IEC-60812에 의한 치명도 분석

IEC-60812에서는 치명도계수를 다음 식(5)에 대입하여 발생확률로 변환하고, 이를 다시 Table 5에 따라 정성적인 치명도 등급으로 할당하여 치명도를 분석한다.

$$P_i = 1 - e^{-C_m} \tag{5}$$

여기서,  $C_m$  : 고장모드의 치명도계수

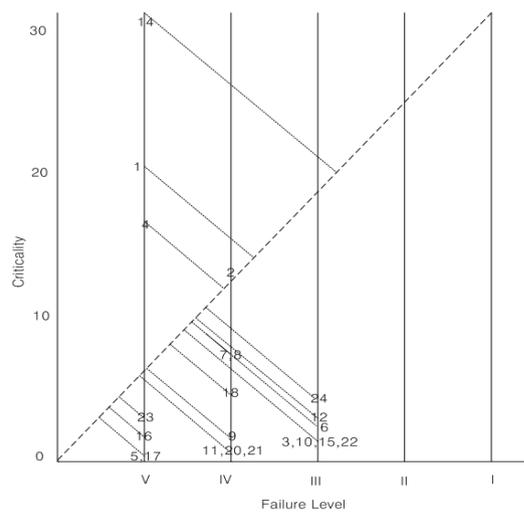


Fig. 2. Criticality matrix diagram by MIL-1629A

Table 4의 치명도 산출결과와 Table 5의 치명도 등급으로부터 구해진 치명도 행렬을 Fig. 3에 보인다. 25개의 고장모드에 대하여, 심각도 등급과 치명도 등급을 기준으로 그 위치를 고장모드 번호로 표시하였다. 고장모드#24(아크슈트의 절손)이 치명도가 가장 높으며, 뒤를 이어서 고장모드#3(전자변 파손), 고장모드#6(전자변 접촉불량), 고장모드#10(전자변 분리), 고장모드#12(전자변 하드웨어불량), 고장모드#15(실린더 파손), 고장모드#25(아크슈트 아킹)의 치명도가 높게 나타났다.

Table 5. Criticality class by IEC-60812

| Criticality class | Probability of occurrence |
|-------------------|---------------------------|
| 1 or E            | $0 \leq P_i < 0.001$      |
| 2 or D            | $0.001 \leq P_i < 0.01$   |
| 3 or C            | $0.01 \leq P_i < 0.1$     |
| 4 or B            | $0.1 \leq P_i < 0.2$      |
| 5 or A            | $P_i \geq 0.2$            |

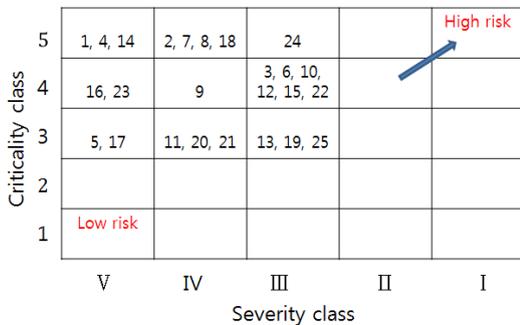


Fig. 3. Criticality matrix by IEC-60812

4.4.4 치명도 분석 결과 검토

MIL-STD-1692A 기반의 치명도 분석 결과에서 심각도는 낮으나 발생빈도가 높은 고장모드#14(실린더 누기), 고장모드#1(전자변 누기)의 치명도가 가장 높게 나타났다. 이는 치명도행렬 다이어그램에서 심각도와 발생빈도를 동일한 비중으로 두고 치명도를 평가하기 때문인 것으로 분석된다. 한편, IEC-60812에 의한 치명도 분석 결과에서는 심각도가 높고 사고로 이어질 개연성이 높은 고장모드 #24(아크슈트의 절손) 등의 치명도가 높게 나타났다.

철도시스템의 특성상 높은 가용성과 안전성이 요구되는 점을 감안하면, 사고를 유발할 수 있는 심각도가 높은 고장모드에 대해 비중을 둘 필요가 있으며, 이에 따라 전

동차 FMECA 적용과정에서 IEC-60812에 따른 치명도 분석을 수행하는 것이 효과적이다.

5. 결론

도시철도 전동차에 FMECA 적용을 위하여, 규격 분석을 통하여 전동차에 적합한 FMECA 절차를 제시하고, 현장에서 수집한 고장데이터를 이용하여 전동차 고속차단기에 적용함으로써 다음 결론을 얻었다.

전동차는 높은 가용성과 안전성이 요구되기 때문에 MIL-STD-1629A와 같이 고장영향 분석과 치명도 분석을 단계별로 수행하는 것이 바람직하다. 또한, 치명도 분석은 IEC-60812에 의한 절차가 고장영향의 심각도에 비중을 두고 분석할 수 있다는 점에서 전동차 FMECA에 보다 적합하다.

전동차 고속차단기에 대한 FMECA 적용 결과, 고속차단기 구성품 중에서 특히 아크슈트의 절손이 치명도가 높으며, 뒤를 이어서 전자변의 파손 및 접촉불량, 실린더 파손 등이 치명도가 높고 중점관리가 필요한 것으로 나타났다.

이상의 분석결과는 전동차 고속차단기의 설계 및 유지보수에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] D. H. Stamatics, *Failure Mode Effect Analysis : FMEA from Theory to Execution*, ASQ, Milwaukee, 2003.
- [2] J. H. Park, "Maintenance Method of Mail Sorting Machine Based on FMEA", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 11, No. 5, pp. 1601-1607, 2010.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.5.1601>
- [3] SAE-J1739, *Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design(Design FMEA) and Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Process(Process FMEA), and Potential Failure Mode and Effects Analysis for Machinery*, SAE, 2000.
- [4] MIL-STD-1629A, "Procedures for Performing a Failure Mode and Effects and Criticality Analysis", DOD, 1980.
- [5] IEC-60812 *Analysis techniques for system reliability -Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA)*, IEC, 2001.

- [6] B. N. Park, H. J. Joo, C. H. Lee, S. S. Lim, "A Study on FMEA for Railway Vehicle, *Proceedings of Annual Spring Conference of the Korean Society for Railway*, pp. 162-168, May, 2009.
- [7] H. Y. Kim, J. C. Lee, "A Case Study on Improving for Operating ATC/ATO System and Driving Environment Using FMECA", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 15, No. 6, pp. 550-557, 2012
- [8] C. An, D. Lee, Y. Son, H. Lee, "A Study for Reliability Improvement of Belt Type Door System using FMECA", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 13, No. 1, pp. 58-64, 2010.
- [9] X. Cheng, Z. Xing, et. al, "Reliability Analysis of Metro Door System Based on FMECA", *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*, Vol. 5, pp. 216-220, 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/jilsa.2013.54024>
- [10] J. H. Kim, H. Y. Jeong, J. S. Park, "Development of the FMECA Process and Analysis Methodology for the Railroad Systems", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 10, No. 6, pp. 753-759, 2009.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12239-009-0088-z>

**김 성 렬(Sung-Ryeol Kim)**

[정회원]



- 1995년 2월 : 광운대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 2012년 8월 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 박사과정 수료
- 2015년 5월 현재 : 서울메트로 설비부장

<관심분야>

철도정보통신, 철도전기설비

**문 용 선(Yong-sun Moon)**

[정회원]



- 2007년 2월 : 서울과학기술대학교 전기공학과(공학석사)
- 2015년 2월 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과(공학석사)
- 2005년 5월 ~ 현재 : 메가일렉(주) 대표이사

<관심분야>

전기철도, 전력계통

**최 규 형(Kyu-Hyoung Choi)**

[정회원]



- 1989년 3월 : 무로란공업대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1992년 3월 : 호카이도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1996년 8월 ~ 2005년 2월 : 한국철도기술연구원 수석연구원
- 2005년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 철도전기신호공학과 교수

<관심분야>

전기철도, 철도신호통신