FMECA를 활용한 ATC/ATO 시스템 및 운전환경 개선 사례연구

A Case Study on Improving for Operating ATC/ATO System and Driving Environment Using FMECA

김한영* · 이진춘

Hanyoung Kim · Jinchoon Lee

Abstract In general, FMECA is a technique for identifying failure modes and devices which could result in fatal outcomes. Also it can be used in design or in maintenance through establishing priorities. The purpose of this paper is aimed at improving the driving conditions in advance through analyzing the operation failure phenomena quantitatively with FMECA analysis on the onboard signal system equipped with ATC/ATO, and through deriving the risk factors. This paper suggests an alternative solution for improving the performance of ADU by analyzing a case with FMECA.

Keywords : FMECA, ATC/ATO, ADU, Driver's Cab, Electrostatic

초 록 일반적으로 FMECA는 시스템에 치명적인 영향을 줄 수 있는 장치나 고장모드를 파악하고 우선순위를 판단하여 이를 설계나 시스템 유지보수에 반영할 때 사용할 수 있는 기법이다. 본 논문은 도시철도차량의 차상 신호설비인 ATC/ATO 시스템에 FMECA를 이용하여 도시철도차량의 운전장애 현상을 정량적으로 분석하고 위험요소를 도출한 다음 이를 제거하여 도시철도차량의 운전환경을 개선할 수 있도록 하는데 목적을 두었다. 이를 위해 본 연구에서는 FMECA를 활용한 분석을 통해 ADU 개선방안과 사례를 제시하였다.

주요어 : 고장모드 영향 및 치명도 분석, 자동열차운전장치, 열차운행상태표시장치, 운전실, 정전기

1. 서 론

도시철도는 광역도시의 기간 대중교통체계로서 그 역할이 확대되고 중요성이 강조됨에 따라 운영효율성의 개선이 더욱 절실해지고 있다. 도시철도를 구성하고 있는 설비 및 장치를 효율적으로 운영하려면 고도의 기술력과 유지보수 능력이 요구된다. 이러한 기술적 요구를 충족하기 위해 도시철도 분야에서도 군수분야와 항공산업에서 출발하여 원자력 및 전력분야의 설비관리에 중요한 역할을 담당하고 있는 신뢰성기반유지보수(RCM: Reliability Centered Maintenance)에 대한 연구 및 논의가 활발한 상태이다. 신뢰성기반유지보수는 특히 예방정비 관련 활동을 보다 합리적으로 처리하기 위해 논리적 절차를 밟으면서 접근하는 것으로 유지보수 업무가 필요한 설비에 대하여 기존 정비프로그램을 최적화하거나 또는 새로운 정비 프로그램을 수립하는 체계적 접근 방법이라고 할 수 있다. 신뢰성기반유지보수를 위한 한 방법으로 고장모드 영향 및 치명도 분석(FMECA: Failure Modes Effects and Criticality Analysis)을 이용하면 장치, 기능, 고장형태, 고장영향, 고장원인 등의 기본 정보를 식별하고 분석하는 활동을 통해 시스템에 치명적 영향을 주는 고장유형

별 위험도(RPN: Risk Priority Number)를 결정할 수 있으며 위험도를 결정할 수 있다면 신뢰성을 확보하기 위한 유지보수를 효율적으로 실행할 수 있다.

본 연구에서는 MIL-STD-1629A를 기반으로 도시철도차량 차상신호설비인 ATC/ATO(Automatic Train Control/ Automatic Train Operation)시스템의 장애를 발생빈도, 심각도, 검출도 순으로 추출하여 운전 위험요소를 분석하여 대표적 우발고장(Random Failure) 요소인 정전기의 발생과 방전에 대한 개선 방향을 도출하고 그 적용 타당성을 검정하고자 한다.

2. FMECA 문헌고찰

FMECA는 시스템의 설계 혹은 공정으로부터 잠재적 고장을 식별해서 우선순위를 부여하여 제거하는 기법이며 잠재적 고장이 발생하기 전에 해결하려는 기법이다[1]. FMECA는 고장분석에 있어서 최초의 체계적 방법으로서 군사적 지침인 MIL-P-1629로 1949년 미군에 의해 개발되었다. 이후 FMECA는 설계형, 프로세스형, 시스템형으로 나누어지며 처리방식은 최하층 부분에서부터 모든 부분들을 고려하는 Bottom-up방식과 설계단계에서 최상위 단계에서부터 기능별로 설계해 내려가는 Top-down방식이 있다[2]. FMEA의 수행절차는 첫째, FMEA 수행에 필요한 정보를 수집하는 사전단계와 둘째, FMEA를 수행하는 작업표를 작성하고 보고서를 작성하는 단계로 나누어진다. 그러므로 FMEA작업표의 구성내역과 그 내용을 분석하는 것이 핵심이다. MIL-

*Corresponding author.

Tel.: +82-53-640-2770, E-mail : seebysee@naver.com

©The Korean Society for Railway 2012

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.6.550>

STD-1629A에 따르면 분석하고자 하는 항목에 대한 치명도의 수준을 위험도 우선순위로 정의하여 위험도(RPN) = 발생도(OCC)×심각도(SEV)×검출도(DET)로 나타낸다.

2.1 일반산업분야의 FMECA

FMECA의 내용 및 수행절차에 관한 규격은 미국방성에 의해 MIL-STD-1629A[3]에 규격화되어 있고 이어서 이를 응용한 자동차 산업분야의 SAE-J1739, SAE-ARP5580[4], 전기전자분야의 IEC 60812[5]에 규격이 제정되어 있으며 이를 바탕으로 각 산업분야별 특성에 맞는 FMECA규격을 제정하여 활용하고 있다. FMEA 또는 FMECA를 각 산업분야에 적용하기 위해서는 산업의 특성에 따라 상이한 작업표를 가질 수밖에 없고 이를 기초로 하여 각 산업분야에서는 자체의 환경에 적합한 FMECA규격을 활용하여 분석한 사례가 다수 있으며[6,7] 이들은 중점 관리대상 설비를 선정하는 절차에 관한 제안에 중점을 두었다.

2.2 철도산업분야의 FMECA

철도 산업의 경우 MIL-1629A혹은 IEC-60812규격과 같이 하나의 고장모드에 대해 치명도를 결정하는 방법을 택하여 객관적인 분석을 수행할 수 있으며 계산된 치명도는 IEC-60812규격과 같이 정량적인 값을 정성적인 기준으로 나누어 적용할 수 있다[8]. 이러한 가운데 장중순 등[9]은 FMEA 실시목적을 보다 구체적으로 나누어 분류하고 그 목적에 따라 적합한 FMEA양식을 제안하였고 박권식 등[10]은 MIL-1629A, IEC-60812, SAE-J1739 규격의 특징들을 분석한 것을 바탕으로 철도시스템에 특화된 FMECA기법을 제시하였다. 또한 백영구 등[11]은 기존의 FMEA 분류 이외에 시스템 수명주기에 해당하는 단계별 FMEA를 적용하는 방안을 제안하였으며 박병노 등[12]은 철도차량의 운영단계에 있어

서 적용 가능한 FMEA 양식을 제시하였다. 또 선행연구에서 제시한 양식과 SAE-J1739 FMEA 양식을 바탕으로 안전현 등[13]은 자동차산업에 특화되어 있는 양식을 전동차 운용조건과 비슷한 항목을 조합한 FMECA양식도 제시 하였다. 신규로 도입한 설비나 시스템은 고장데이터를 확보하고 있지 못하여 고장발생빈도를 매개변수로 사용하는 치명도분석이 불가능하므로 FMEA를 사용하는 것이 타당하고, 이미 고장데이터를 확보하고 있는 운영 중 시스템에는 FMEA의 확장된 기법인 치명도분석(CA: Criticality Analysis)을 수행하는 FMECA를 적용할 수 있다. 그러므로 FMECA기법은 운영 중인 도시철도차량에 있어서 신뢰성기반 예방보전(RCM)의 중요한 절차가 될 수 있을 것으로 판단한다.

3. ATC/ATO시스템의 FMECA 설계

3.1 FMECA 분석

MIL-STD-1629A에서의 FMECA 수행 절차는 (1) 준비단계-적용대상과 대상의 범위를 결정 (2) 기능분석단계-고장 메카니즘과 고장 모드 분석 및 고장 데이터 분석을 통한 고

Fig. 1 Functional block diagram of ATC/ATO device

Table 1 Configuration and functionality of ATC/ATO

Equipment	Subsystem	Function
Car borne ATC System	ATP1 Module	Train detection, Train interval control, Route assignment, Over speed protection, Track condition detection
	ATP2 Module	
	ATO Module	Fixed speed running control, Acceleration & deceleration control, Precision stop control, Door control, Train departure control
	ALS Module	Train operation planning, Route calling, Train operation monitoring, Recording data keeping
	DC/DC Converter	Input DC100V, Output DC 10V & 24V
	Vital & Non-Vital Relays	Relay block of vital & non-vital condition circuit
	BAU(Brake Assurance Unit)	Brake assurance deceleration sensor
Indicator · Display Unit	ADU(Aspect Display Unit)	Interface between driver and ATC. Display ATC information to driver
	Speed meter	Train speed display (0km/h ~ 120km/h)
Transmitting · Receiving equipment	ATP/TWC receiving coil	Receiving TWC message & ATP speed code from wayside
	TWC transmitting antenna	Transmitting TWC data from cab to wayside
	Cab marker coil	Detection wayside markers
	(AA : Alignment Antenna)	Cab antenna for precision stop, Detection 8M marker & alignment on the wayside
Speed generator	Axle Generator	Generating speed & distance signal

장률 산출 (3) 심각도와 치명도 평가 (4) 우선순위결정 (5) 결과 분석단계로 크게 구분할 수 있다.

RCM이 달성하고자 하는 중요한 요소는 시스템의 신뢰성 및 안전성이다. 시스템의 신뢰성은 고유신뢰도와 운영신뢰도로 구분되어 정량적인 분석이 가능하지만 안전성의 경우는 정성적인 의미를 많이 가지고 있다.

3.2 ATC/ATO 시스템구성과 기능

도시철도시스템 RCM의 적용대상 선정을 위해 시스템을 구성하는 장치를 물리적 단위체의 구분 및 기능상의 구분이 이 단계에서 수행되어 고장 분석이 이루어지고 유지보수 업무 대상이 정의되므로 전체 전개과정 중에서 매우 중요한 단계이다. 시스템의 물리적 속성(Physical Attributes)에 의해 적용하고자 하는 시스템에 대한 구체적인 상세분류가 실시된다. 분류 하고자 하는 최소단위는 물품분류상 단품으로 되어있는 것으로 한다. 또 기능적 속성(Functional Attributes)에 따라 고유 작동 기능별로 분류한다. 차상 ATC/ATO시스템은 자동열차제어시스템으로서 대표적인 3개의 하위 시스템, (1) 자동열차 보호 시스템(ATP: Automatic Train Protection) (2)자

동열차운행 시스템(ATO: Automatic Train Operation) (3)자동열차감시 시스템(ALS: Automatic Line Supervision)으로 구성되어 있다. 시스템의 물리적 기능적 분류는 Table 1과 같이 시스템을 구성하는 하부시스템이나 그 하위의 구성품에 대한 정확한 기능 정의를 통해 분류한다. 본 논문에서는 연구의 편의를 위해 장치의 분류를 1차 서브시스템까지로 한정하고 세밀한 기능별 고장모드와 영향분석의 결과를 얻기 위하여 장치단위로 자세히 분류하였다.

3.3 ATC/ATO시스템의 FMEA 분석

본 논문에서는 개선대상 장치를 식별하여 도출하기 위해 운영측면에서 기능 중심의 FMEA를 수행하고 그 대상으로 정전기에 의한 ADU Down을 도출한 후 상세 분석을 수행하였다. FMEA 분석 순서와 절차는 우선 Table 1과 같이 장치와 서브시스템 구성을 구분하고 그 기능구성을 조사 분류하였다. 장치와 서브시스템의 분석레벨을 1차 서브시스템까지로 한정하였으며 서브시스템 별로 다수의 고장모드를 가지고 있지만 여기서는 주요한 고장모드만 나타내었다. 또, 합당한 FMEA 분석을 위해 고장모드 중에서 효과적이고 중요

Table 2 Results of ATC/ATO FMEA (Failure Modes and Effects Analysis)

Equipment	Subsystem	Function	Failure mode	Failure effect	Cause
Car borne ATC System	ATP1 Module	Train detection	Wayside system failure	No code, Train stop	Two trains occupied a track circuit, Track insulation error
		Train interval control	Information not received from wayside to cab	No receive speed code	Entrance front block section
		Route assignment	Schedule data receiving error	Operation schedule not receiving	TWC communication error
		Over speed protection	ATP emergency braking	Train stop	OVS card & speed generator error
		Track condition detection	Track data receiving error	No service	TWC communication error
	ATP2 Module	ATP1 Back-up	Automatic changing error	Independent function disable	Module converter & select switch error
	ATO Module	Fixed speed running control	Impossible automatic speed control	Emergency braking, Auto running impossible	No RV signal, No speed code
		Acceleration & deceleration control			
		Precision stop control	No detection markers	Over speed	Markers error & interface card error
		Door control	No door open signal	Door open error	TWC modem board error
		Train departure control	Auto departure impossible	Auto running impossible	No input signal of powering & braking, No speed code
	ALS Module	Train operation planning	Train number, time, date	Auto running mode impossible	TWC modem board, ITCSS2 error
		Route calling	Destination, this station, next station, route calling disable	Not confirm route, ATO function error	
		Train operation monitoring	Speed code	Auto running function disable	
		Recording data keeping	Not keeping operation data	No recording data	Memory error
	DC/DC Converter	Supply power to ATC/O	No input power	System start up error	Module converter error
	Vital&Non-Vital Relays	Control vital relay	Relay on/off error	Relay error	Coil error
		Control non-vital relay	Relay on/off error	Relay error	Coil error
	BAU(Brake Assurance Unit)	Confirm reduced speed 2.45km/h/s	Deceleration lack	Brake power not verified	BAU sensor error

Table 2 Continued

Equipment	Subsystem	Function	Failure mode	Failure effect	Cause
Indicator · Display Unit	ADU(Aspect display unit)	Display information from ATC	Display error	Information delivery error	Displayer & related part failure
			ADU down	Fixed speed, Fixed indicator lamp, Fixed ADU	Electrostatic
		Train identity manual check	Display situation error	Data input disable	Key pad error
	Speed meter	Display ATP speed code · train speed	Speed & speed code display error	Information delivery error	Speed meter error
Transmitting · Receiving equipment	ATP/TWC receiving coil	Receiving track TWC message · ATP speed code	No receive speed code & TWC message	Using FMC mode	Coil disconnection or short
	TWC transmitting antenna	Transmitting TWC data to cab	Information delivery error	No confirm operating mode, PDT, Train number, precision stop	Disconnection or short
	Cab marker coil	Detection wayside markers	3.6, 4.7, 25m detection error	Precision stop error	Coil error, disconnection or short
	(AA : Alignment Antenna)	Precision stop detection, 8M marker detection	8m, AA detection error	Precision stop error	Coil error, disconnection or short
Speed generator	Axle generator	Generating speed & distance signal ATP / ATO	No speed signal	Speed information error	Sensor error

한 것을 선별하였다. 선정된 고장모드에 대한 추정원인은 우선 정비지침서를 참고하여 작성하였으며 또 전동차 운행에서 실제 발생한 고장기록을 조사하여 분류하였다. 실제로 각 고장모드에는 다수의 추정원인이 있을 수 있으나 그 중에서 주요하다고 판단되는 원인을 기입하였다.

특히 지시·표시장치의 ADU는 ATC장치의 정보처리결과를 기관사에게 제공하는 중요한 인터페이스 역할을 담당하고 있음을 알 수 있으며 Table 2의 FMEA분석결과를 보면 ADU장치의 주요 장애원인은 정전기임을 알 수 있었다.

3.4 발생빈도 · 심각도 · 검출도 분석

2000년부터 2009년까지 10년동안 전동차 34개편성의 전체 ATC/ATO 고장 자료를 분석한 결과 고장모드 별로 각각 최소 7회에서 최대 1,500회 정도로 고장발생빈도범위가 광범위하였다. 분석 대상 시스템의 특성에따라 빈도정의는 임의 설정 가능한 것으로 판단되므로 고장발생빈도 정의를 본 논문의 고장 유형에 적합 하도록 Table 3과 같이 재설정하였다.

도시철도 차량은 운전자가 운전실에 상주하며 직접 제어

하는 인간-기계 인터페이스(Man-machine interface) 시스템으로 ATC/ATO의 고장이나 결함 발생으로 인한 운전자가 받는 영향의 정도는 안전운행에 대단히 중요한 요소이므로 Table 4와 같이 운전환경 손상을 심각도 수준정의에 포함하였다. 검출도의 판단 기준은 사용자 즉, 운전자에게 차량이 인제되기 전에 현재 프로세스에서 고장 및 결함이 발견될 수 있는 정도를 Table 5와 같이 나타내었다.

3.5 RPN 분석

위험도에 대한 기본정의는 위험도(RPN) = 발생도(OCC) × 심각도(SEV) × 검출도(DET)로 이뤄진다.

Table 4 Classification of severity

Score	Severity level	Definition
4	Catastrophic	System loss & serious driving damage
3	Critical	Major system damage & driving damage
2	Marginal	System severe damage & driving damage
1	Negligible	System minor damage & driving damage

Table 3 Classification of occurrence

Occurrence level	Score	Definition
Frequent	6	More than 1500 times /34 trains /10 years
Probable	5	More than 1 000 times /34 trains /10 years
Occasional	4	More than 500 times /34 trains /10 years
Remote	3	More than 100 times /34 trains /10 years
Improbable	2	More than 50 times /34 trains /10 years
incredible	1	More than 10 times /34 trains /10 years

Table 5 Classification of detection

Score	Definition(Method of detection)
6	Impossible pre-detection
5	Fault detection by disassembly & detail inspection
4	Fault detection by test & measurement
3	Fault detection by operation or check function
2	Fault detection by visual inspection
1	Fault display on the monitor

3.6 RPN 평가 결과 분석

RPN 평가결과에서 위험우선순위평가는 Table 6에서 나타난 바와 같이 정전기로 인한 고장영향이 속도계 고정현시, 지시등 계속 점등, ADU 고정 등의 지시표시장치의 ADU가 우선순위 1위인 것으로 도출 되었고 고장영향이 정위치 실패인 송·수신장치의 우선순위가 2위로 도출 되었으며 다

음은 no code, 열차정지와 속도코드 미수신 또 과주가 3위로 나타났다. 이 중에서 정위치 정차실패와 과주는 고장 발생건수 대부분이 서로 중복 되는 것으로 다른 고장 원인이 얼마간 있다 해도 대부분 동일한 장애현상을 보이므로 사실상 동종의 고장으로 분류하는 것이 옳다. FMECA 결과에서도 증명되듯이 우선순위 1위인 지시표시장치의 고장은 Table

Table 6 Results of the RPN of ATC/ATO system

Equipment	Subsystem	Failure effect	Failure cause	Severity	Detection	Occurrence	RPN	Score
Car borne ATC System	ATP1 Module	No code, Train stop	Two trains occupied a track circuit, Track insulation error	2	5	3	30	3
		No receive speed code	Entrance front block section	2	5	3	30	3
		Operation schedule not receiving	TWC communication error	1	2	3	6	
		Train stop	OVS card & speed generator error	2	2	3	12	
		No service	TWC communication error	3	3	3	27	5
	ATP2 Module	Independent function disable	Module converter & select switch error	3	3	1	9	
	ATO Module	Emergency braking, Auto running impossible	No RV signal, No speed code	2	4	3	24	
		Over speed	Markers error & interface card error	2	3	5	30	3
		Door open error	TWC modem board error	2	2	1	4	
		Auto running impossible	No input signal of powering & braking, No speed code	2	2	3	12	
	ALS Module	Auto running mode impossible	TWC modem board, ITCS2 error	1	2	3	6	
		Not confirm route, ATO function error		1	2	3	6	
		Auto running function disable		2	2	3	12	
		No recording data	Memory error	1	4	1	4	
	DC/DC Converter	System start up error	Module converter error	2	3	3	18	
	Vital & Non-Vital Relays	Relay error	Coil error	2	3	3	18	
		Relay error	Coil error	2	3	3	18	
	BAU (Brake Assurance Unit)	Brake power not verified	BAU sensor error	2	4	2	16	
Indicator · Display Unit	ADU (Aspect Display Unit)	Information delivery error	Displayer & related part failure	1	4	3	12	
		Fixed speed, Fixed indicator lamp, Fixed ADU	Electrostatic	2	4	6	48	1
		Data input disable	Key pad error	2	4	3	24	6
	Speed meter	Information delivery error	Speed meter error	2	3	3	18	
Transmitting · Receiving equipment	ATP/TWC receiving coil	Using FMC mode	Coil disconnection or short	2	3	3	18	
	TWC transmitting antenna	No confirm Operating mode, PDT, Train number, precision stop	Disconnection or short	3	3	1	9	
	Cab marker coil	Precision stop error	Coil error, disconnection or short	2	4	5	40	2
	Alignment Antenna)	Precision stop error	Coil error, disconnection or short	2	4	2	16	
Speed generator	Axle Generator	Speed information error	Sensor error	2	4	1	8	

6의 발생빈도수준에서 분류6에 해당하는 대표적 장애로서 기관사들의 안전운행을 방해하는 문제가 심각하므로 개선 연구가 필요하다.

3.7 FMECA 분석결과에 따른 개선 연구

대구도시철도공사에서 운영하고 있는 1호선 전동차 운전실의 ADU 작동정지 현상이 1997년 개통 이후, 특히 동절기에 계속 발생하여 왔으며 2009년에는 91건이 발생하였다. ADU 작동정지는 전동차운행 중 발생하는 속도계의 고정현시, 지시등 계속 점등, ADU고정 등의 현상으로 이 장애는 순간장애 후 자동복귀 되는 경우와 차량정차 후 기관사가 ATC/ATO장치의 전원을 OFF/ON하여야 정상으로 복귀 되는 경우 등이 있다.

3.7.1 운전실의 구조적·전기적·환경적 특성

1호선 전동차 운전실의 구조적·전기적 특성으로 제어대 자체의 소재는 완전 부도체인 유리섬유 강화 프라스틱(FRP: Glass Fiber Reinforced Plastic)재질로 제작되어 있으며 Table 7과 같이 열차제어정보관리장치(TIS: Train Information System)장치 전면 판넬은 절연, 노출된 취부볼트는 접지, 열차무선 장치와 차내안내표시기(PIB: Passenger Information Board)는 전면판넬과 취부볼트 모두 비접지 상태, 마스크 장치의 판넬 표면과 핸들은 절연도장 처리되어 비접지 상태이나 취부볼트는 접지상태이다. 이는 장치의 전면 소재에 대한 기준과 도장 혹은 코팅에 관한 기준이 없기 때문이다. 또 접지방식에 있어서도 단독접지와 공통접지 방식이 혼용되어 있다. 2006년에 개통된 2호선 전동차 역시 유사하였다.

접지방식 자체가 정전기 장애와 직접적인 관계는 없으나 두 가지 접지방식은 서로 공유할 수 없는 방식이고 특히 단독접지 방식은 장치간의 전위차이가 발생할 우려가 있으며 기기 오동작시 고장 원인 판단에도 혼란을 줄 우려가 있으므로 단독접지 방식을 지양하고 공통접지방식으로 통일해야 한다[14]. ADU장치에 사용된 대표적 ESD(Electrostatic Discharge) 부품은 정비지침서[15]를 기준으로 Table 8과 같이 분류하였다. 또, 운전실의 환경적 특성으로서 동절기 난방용 전기히터의 가동으로 운전실내는 약 20% 이하의 낮은 상대

Table 8 Representative ESDS parts in ADU

Device type in ADU		ESD breakdown voltage range	
		(Volts)	(Energy)
MOSFET	IRFD09120(3EA)	100-200	0.5μJ-2.0μJ
EPROM	AM27C64(1EA)	100	0.5μJ
OP-AMP	LM124(1EA)	190-2500	1.62μJ-312.5μJ
CMOS	54HC00(1EA), 54HC139(1EA), LMC7660(1EA)	250-3000	3.13μJ-450μJ
FILM REGISTER	7EA	300-3000	4.5μJ-450μJ
BIPOLAR TRANSISTOR	2N4403(5EA)	300-7000	4.5μJ-2.45μJ

* ESDS: Electrostatic Discharge sensitive

습도를 보이고 있어 기관사는 상시 정전기가 빈번하게 발생할 수 있는 환경에 노출되어 있음을 알 수 있었다.

3.7.2 기관사 개인별 특성

2009년 12월19일부터 약 3개월의 조사기간 동안 대구 도시철도 1호선 본선 승무 기관사 전체 115명 중에서 42%에 해당하는 48명이 1회 이상 ADU장치 장애를 경험하였다. ADU 장애 총 발생 96건에서 기관사 3인이 각각 10회, 7회, 6회를 경험하는 등 8명의 기관사가 전체 장애발생의 46%를 차지하고 있어 ADU 장애발생이 기관사 개인의 정전기 특성과 뚜렷한 연관성이 있음을 알 수 있었다.

3.7.3 기관사 설문결과

2010년 1월, 기관사 45명에 대하여 설문 조사한 결과 정전기를 경험하는 시기는 총 58회 경험 중에서 12월2월(3개월) 사이에 36회로 가장 많이 경험하며 운행 중 ADU장애 발생은 총 48회 경험 중에서 출입문 스위치 수동 취급 직후와 ATOS(ATO-Start) 스위치 취급에서 각각 21회, 9회로 가장 많이 발생하는 것으로 나타나고 있다. 이런 결과에 따라 장애 현상이 동절기에 주로 발생한다는 점을 알 수 있으며 또 기관사가 스위치 등의 장치조작이라는 직접적인 동작을 취하는 가운데 특정한 지점과 접촉하여 방전되면서 발생하는 것으로 판단된다.

Table 7 Electrical characteristics of driver's cab

Major device on Console		Front panel	Mounting bolt
Master controller		Isolation	Grounding
TIS monitor		Isolation	Grounding
PIC		Isolation	Ungrounded
Fire detector monitor		Isolation	grounding
Train radio		Isolation	Ungrounded
DOOR S/W	Front panel	Isolation	Ungrounded
	Switch	Isolation	Ungrounded
ATC/O s/w	ADU	Isolation	Ungrounded
	ATC/O S/W	Isolation	Ungrounded
	KEY PAD	Isolation	Ungrounded

Table 9 The frequency of ADU failure by driver

Driver (Total 115drivers)	Experience times	Occurrences times (Total 96times)
1	10	10
1	7	7
1	6	6
5	4	20
1	3	3
11	2	22
28	1	28
68	0	0

3.7.4 개선 방안 및 적용 결과

도시철도차량에 있어 운전 중 문제가 되는 정전기 방전모델은 CDM(Charged Device Model), MM(Machine Model)이 아니고 HBM(Human Body Model)이라고 할 수 있다.

즉, 축전된 장치의 인체 접촉을 통한 방전이나 축전된 장치에서 타 장치로의 방전이 아니고 대전된 인체가 방전을 일으키는 것이다. 일상생활에서 인체의 정전기 발생은 원천적으로 억제하기 어렵고 또, 동절기 운전실의 낮은 습도로 인해 인체에 대전된 정전기가 공기 중으로 자연 방전하지 못하므로 가장 안정되고 확실한 방법으로서 인위적 방전통로를 확대하여 자연스럽게 방전하는 것이 필요하다. 이를 위해 기관사가 상시 접촉하는 기기의 표면 전도성을 높이고 접지를 통하여 축전된 전하의 방출이 쉽게 되도록 차체와 영(0)전위 본딩을 하여 차체와 같은 전위가 되도록 하여야 한다. 전동차 운전실 제어대와 장착된 장치들의 소재 및 노출된 표면은 절연체와 도체가 혼재되어 있는 상태로서 도체는 적절히 접지하는 것으로 정전기 대책이 가능하고 절연체는 금속 또는 도전성 물질로 덮어 대전물체를 차폐하는 방법이 있다. 이에 따라 차체와 절연되어 있는 비전도체인 운전실 제어대의 표면에 도전성테이프나 도전성 필름을 시험 적용하여 수시접촉으로 자연방전을 통한 대전물체의 전위 상승 억제 효과를 알 수 있었다. 그러므로 전기적 전도성이 높은 동판넬을 기관사가 항상 접촉하는 동선을 따라 영구 설치하여 정전기가 상시 방전토록 유도하고 ESDS를 차폐 보호할 수 있도록 Fig. 2와 같이 적용하였다. 그 결과 ADU장애는 개선 전 2009년에 91건 발생하던 장애가 전동차 34개 편성

Table 10 ADU failure status after improvement application

Division	2009 year (before improving)	2010 year (during the period of improving)	2011 year (after improving)
Number of occurrences	91	13	4

*34 trains

을 대상으로 개선대책이 순차적으로 적용된 2010년에는 13건으로 감소되었으며, 전편성에 모두 적용된 2011년에는 Table 10에서와 같이 ADU장애가 4회만 발생하는 뚜렷한 장애감소 효과를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 도시철도 차량시스템의 신뢰성 및 안정성을 확보하기 위하여 FMECA 절차를 도입하여 운전 위험요소를 분석하고 그 대책을 찾아 문제점을 개선하는 의미 있는 성과를 도출하였다. 그 절차는 우선 시스템의 기능적 속성과 물리적 속성을 나누어 분석하고 발생 가능한 고장 유형과 예상되는 빈도수를 정의하고 고장원인과 그 결과가 시스템에 미치는 결과를 치명도로 나타내었으며 최종적으로 위험 우선순위를 계산 하였다. 이러한 작업의 결과로서 우리는 시스템의 고위험 부분이나 가장 약한 고리 즉, 취약링크를 손쉽게 판단 할 수 있었다. 지금까지는 고장 이력과 같은 수평적이고 정량적인 데이터를 중심으로 한 차량 시스템 자체의 물리적 고장만 주요 대상으로 연구 되었으나 본 연구에서는 정성적인 항목들도 분석할 수 있는 FMECA기법을 활용하여 종전 보다 입체적인 유용한 결과를 얻었다. 이를 도시철도 전동차의 차상신호장치인 ATC/ATO에 적용해 본 결과 가장 높은 치명도를 가진 부분이 ADU 장애인 것으로 나타났다. ADU의 장애는 심각도 측면에서는 본선 운행에 결정적 피해를 주지 않으면서도 발생빈도 면에서는 높은 횟수를 보였음을 FMECA분석을 통해 알 수 있었다. 이에 따라 도시철도에서 RCM적 관리대상으로 ADU장치를 선정하고 그 개선방안으로 도시철도차량 운전실의 정전기 상시 방전 방안을 마련하여 실제 적용하였다. 그 결과로서 실질적인 개선된 효과를 확인하였으며 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 기존의 MIL-STD-1629A를 기반으로 도시철도차량의 차상신호설비인 ATC/ATO시스템을 기능적, 물리적으로 분류하였으며 시스템 장애의 발생빈도, 심각도, 검출도를 ATC/ATO시스템에 적합하도록 기준을 다시 정리하였다.

둘째, 지금까지 도시철도 차량 분야에서 시행되어온 경험이나 주관적 판단 등에 의한 단편적인 시스템장애에 대한 분류를 RPN 결과에 입각하여 보다 정량적 기준으로 판단할 수 있도록 하였다.

셋째, RPN 결과 순위 1위의 서브시스템은 ADU 장치이며 2위 차상마커코일, 3위는 ATP1 Module과 ATO Module로 분석되었으며 ADU 장치 장애에 대한 개선이 가장 우선

: 전도성 동테이프 시험 부착위치

Fig. 2 Improvement application

임을 도출하였다.

넷째, ADU 장애의 주원인으로 정전기 방전현상임을 도출하였고 정전기와 관련한 도시철도차량 운전실의 구조적·전기적·환경적 문제점과 특성을 파악하였다.

다섯째, 자연적으로 발생하는 인체의 정전기를 상시 방전 가능하도록 개선하면 ADU 장애를 제거하고 방전 쇼크로부터 기관사를 보호할 수 있음을 알 수 있었다.

그러나 적용기간 1년의 성과만으로는 개선효과에 대한 정확한 판단이 곤란하므로 향후에도 지속적인 전동차 운행기록 관리와 장애 데이터 분석을 실시하여 개선효과의 실제적인 검증 결과를 제시할 필요가 있다.

끝으로 본 연구가 도시철도차량분야에 RCM체계가 정착되고 필요 시 FMECA를 활용한 보다 체계적 유지보수체계가 구축되기를 바라며 기관사 운전업무환경 개선에 일조하기를 기대한다.

참고문헌

- [1] Rausand, Marvin (2005) *System Reliability Theory*, 2nd Ed., Wiley, p. 2.
- [2] Rausand, op. cit., pp. 10-46.
- [3] MIL-STD 1629A, Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis.
- [4] SAE (2009) Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA) and Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA) and Effects Analysis for Machinery (Machinery FMEA), SAE-J1739.
- [5] International Electrotechnical Commission (2006) Analysis technique for system reliability: Procedures for failure mode and effect analysis (FMEA), IEC 60812.
- [6] O.W. Kwon (2000) *Failure analysis techniques as FMEA, FMECA Utilization*, Korea TPM Institute. PP. 1-6.
- [7] J.S. Jang (1999) A Study on Performing FMEA Effectively, *Journal of the Korean Institute of Plant Engineering*, 4(4), pp. 69-77.
- [8] K.S. Park, T.W. Kim, H.Y. Jeong, J.S. Park (2006) Development of the FMECA Process and Analysis Methodology for the Railroad System, *Autumn Conference of The Korean Society for Railway*, Busan, Korea, pp. 284-289.
- [9] J.S. Janf (1999) A Study on Performing FMEA Effectively, *Journal of the Korean Institute of Plant Engineering*, 4(4), pp. 69-77.
- [10] K.S. Park, T.W. Kim, H.Y. Jeong, J.S. Park (2006) Development of the FMECA Process and Analysis Methodology for the Railroad System, *Autumn Conference of The Korean Society for Railway*, Busan, Korea, pp. 284-289.
- [11] Y.G. Baek, S.M. Yun, J.H. Lee, M.G. Park, et al. (2002) A Study on FMEA Improvement for Reliability and Safety Enhancement, *Spring Conference of The Korean Society for Railway*, Seoul, Korea, pp. 446-452.
- [12] B.N. Park, H.J. Joo, C.H. Lee, S.S. Lim (2009) A Study on FMEA for Railway Vehicle, *Autumn Conference of The Korean Society for Railway*, Jeju, Korea, pp. 162-168.
- [13] C. An, D. Lee, Y. Son, H.S. Lee (2010) A Study for Reliability Improvement of Belt Type Door System using FMECA, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(1), pp. 58-64.
- [14] B.H. Min, G.S. Kim, Y.K. Chung (2006) A Study on the Unification of The Grounding System of Seoul Metro due to Ageing, *Journal of the Korean Society for Railway*, 9(4), pp. 394-400.
- [15] Electric vehicle maintenance guidelines for Line 1 (1995). Daegu Metropolitan Transit Corporation.

접수일(2012년 7월 16일), 수정일(2012년 9월 2일),
게재확정일(2012년 11월 7일)

Hanyoung Kim : seebysee@naver.com

Doctoral Candidate, Graduate School, Kyungil University, 50 Gamasilgil, Hayang-Eup, Gyeongsan-Si, Gyeongbuk, 712-701, Korea

Jinchoon Lee : jinclee@kiu.ac.kr

Professor, School of Business, Kyungil University, 50 Gamasilgil, Hayang-Eup, Gyeongsan-Si, Gyeongbuk, 712-701, Korea