

FMECA를 통한 전차선로 가선시스템의 신뢰도 분석에 관한 연구

A Study on Reliability Analysis of Electric Railway Catenary System using FMECA

윤 응 규* · 최 규 형†
(Eung-Kyu Youn · Kyu-Hyoung Choi)

Abstract - The reliability of catenary system is very important for uninterrupted train operation as it supplies electric power to train without redundant facilities. This paper provides a systematic approach to the reliability analysis of the catenary system based on FMECA procedures defined by global standards such as MIL Std 1692a and IEC 60812. Field failure data collected from the operation and maintenance of high-speed railway catenary system for 9 years are used to derive critical failure modes and to evaluate the criticality of the failure modes. Evaluation of the criticality are carried out by quantitative procedures defined by MIL Std 1692a and by criticality matrix defined by IEC 60812. FMECA results suggests that three critical failure modes should be checked carefully during maintenance work, which include strand break of dropper and voltage equalizing wire, power supply failure of feeder. Maintenance procedure of catenary system in order of importance is suggested too. These results can be applied to maintenance planning and design of catenary system to improve the reliability of electric railway system.

Key Words : Catenary system, Criticality, FMECA, Reliability

1. 서 론

전차선로 가선시스템은 전차선과 조가선 및 애자, 금구류로 구성되어 고속으로 주행하는 철도차량에 전력을 공급해주는 전기철도의 핵심시스템이다. 전차선로 가선시스템은 특성상 이중화가 불가능해 시스템을 구성하는 요소들에 고장이 발생할 시 열차의 운행에 직접적인 영향을 미치게 되므로, 가선시스템의 설계 및 운영, 유지보수 단계에서 신뢰도를 향상시키기 위한 노력이 요구된다. 이를 위해, 시스템의 고장에 영향을 미치는 중요인자와 고장모드 등을 도출하여 신뢰도를 정확하게 분석하고 신뢰도를 향상시키기 위한 체계적인 접근방법이 요구되고 있다[1].

FMECA(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)는 많은 분야에서 제품의 설계와 운영단계의 신뢰도를 분석하는데 사용되고 있는 방법으로서, 시스템에 속하는 모든 구성요소들을 고장 가능한 인자로 사용하고, 각 인자들의 고장상태 별로 고장모드를 정하며, 각 고장모드에 따르는 고장레벨과 치명도 등을 종합적으로 분류하고 분석하는 방법이다[2]. FMECA는 고장유형

및 영향분석(FMEA: Failure Mode Effects Analysis)와 치명도 분석(CA: Criticality Analysis)의 두 부분으로 나누어지며, FMEA와 CA를 차례로 적용하는 것이 일반적이거나 FMEA만 따로 적용할 수도 있다. FMEA는 1950년대부터 미국 전투기의 시스템 설계/분석에 활용되었으며, 이후 항공 및 우주산업, 무기, 자동차산업 등과 같은 폭 넓은 분야에 응용되어 왔다. 1980년대 초부터 CA를 포함하여 FMECA의 개념이 도입되었고, 국방산업을 포함한 많은 분야에서 시스템의 신뢰성을 분석하는 방법으로 널리 사용되고 있으며 산업분야별로 규격도 제정되어 있다[3-5].

철도시스템은 고속, 대량수송수단으로서 특히 높은 신뢰도 및 안전성이 요구되고 있기 때문에 FMECA 기법을 적용하기 위한 연구가 수행되고 있다. 철도시스템 차원에서의 FMECA 프로세스와 분석의 발전방안이 제안되어 있고[6], 철도차량분야의 경우에는 대차, 출입문제어장치, 제동장치, 차상 신호장치 등의 신뢰성 및 유지보수주기 분석에 활용되고 있다[7-9], 또한, 철도신호분야에서의 자동열차제어장치 안전성 향상과 철도시설물의 고장분석 및 안전성 분석 등에도 활용되고 있다[10, 11]. 전차선로 가선시스템에서도 신뢰도 및 안전성이 특히 중요하기 때문에, 고장 영향 분석과 함께 치명도 분석이 필수적인 분석도구라고 할 수 있다. 이를 위해, 가선시스템의 부품 고장률, 부품이 특정 고장유형으로 고장나는 비율, 고장유형의 고장영향확률로부터 치명도를 산정할 필요가 있다[12]. 그러나 전차선로 가선시스템은 철도선로를 따라 장거리에 걸쳐 가선되어 있어 고장발생개소가 넓은 범위에 걸쳐 분포되어 있으며, 고장유형도 다양하게 발생하고 있다. 이에 따라, 운영과정에서 발생하는 고장현황데이터를 입수하기 곤란하다는 문제점이 있으며, FMECA 기반의 현장데이터를 이용

† Corresponding Author : Dept. of Railway Electrical and Signaling Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Korea

E-mail: khchoi@seoultech.ac.kr

* Dept. of Railway Electrical and Signaling Engineering, Graduate School of Railway, Seoul National University of Science & Technology, Korea

Received : July 21, 2015; Accepted : October 27, 2015

한 체계적인 신뢰도 분석 기법이 적용되지 못하고 있다.

본 논문에서는 전차선로 가선시스템을 대상으로 FMECA 기법을 적용하여, 운영 및 유지보수현장에서 발생한 장애현황데이터를 이용하여 고장영향 및 치명도 분석을 수행하였다. 가선시스템에 대한 FMECA 절차로서, 미국방성규격으로 제시된 MIL STd 1629a에 따라 고장유형 및 영향분석(FMEA)을 수행하였다. 또한, 치명도분석(CA) 과정에서는 운영 및 유지보수과정에서 발생한 가선시스템 고장현황데이터의 분석결과로부터 도출된 부품별 고장율과 고장모드별 고장을 및 고장영향발생 확률값을 이용하여 치명도를 현장상황에 맞게 산정하였다. 특히, 대부분 전문가의 주관적 판단에 의존하여 추정해왔던 고장영향발생 확률값을 고장현황데이터로부터 통계적으로 산정함으로써 치명도분석의 정확성을 높였다. 또한, 최종적인 치명도 평가단계에서 IEC 60812에 의한 치명도 매트릭스를 적용함으로써 고장모드별 위험도 수준에 대한 비교평가를 직관적으로 수행할 수 있도록 하였다. 이상의 FMECA 적용결과로부터, 고장영향 및 고장발생률이 높은 중요인자들을 도출하고 고장모드들을 도출하였으며 고장모드 별로 치명도를 정량적으로 산정하여 분석함으로써, 전차선로 가선시스템의 설계 및 운영, 유지보수 자료로 활용될 수 있도록 하였다.

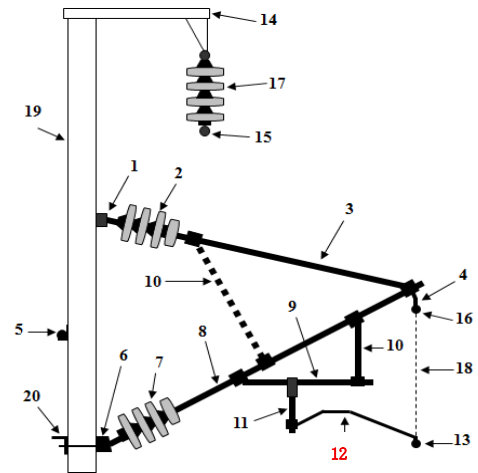
2. 전차선로 가선시스템 고장 분석

2.1 전차선로 가선시스템의 구조

전차선로 가선시스템은 그림 1에 보이는 것처럼, 철도차량의 팬터그래프와 기계적인 접촉을 통해 철도차량에 전원을 공급해주는 전차선, 전차선의 지상고를 일정하게 유지하고 전류를 분담하는 조가선, 전차선과 조가선을 연결하는 드로퍼 및 전차선의 편위를 조정하는 곡선당김금구 등으로 구성된다. 이와 같이 전차선로 가선시스템은 많은 구성품으로 구성되어 하나의 시스템을 이루며, 전차선의 장력, 전차선과 팬터그래프 간의 기계적 접촉력 및 파동전파속도 등에 영향을 받는다. 따라서 전차선로를 구성하는 어느 하나의 구성품에 장애가 발생하면 주행 중인 철도차량에 전력을 공급할 수 없게 되어 열차의 운행에 직접적인 영향을 미칠 수 있으며, 전차선로의 구조상 이중화하여 설치할 수가 없기 때문에 전차선로 가선시스템의 신뢰도 분석은 매우 중요하다.

2.2 전차선로 가선시스템 고장 분석

경부고속철도 1단계 구간(서울-동대구)에서 2004년부터 2012년까지 전차선로 가선시스템에서 발생한 고장데이터로부터 고장 분석을 수행하였으며, 그 결과를 표 1에 나타내었다. 가선시스템을 구성하는 구성품인 전차선, 조가선, 급전선, 보호선, 균압선 등 11개의 구성품에 대하여 총 19개의 고장모드가 도출되었다. 2004년부터 2012년까지 9년간 전차선로 가선시스템의 고장은 617회 발생하였다. 이 중에서, 유리애자 관련 고장이 290건으로서 전체 고장 중 47[%]로 가장 많은 부분을 차지했고, 드로퍼의 단선과 가닥 단선 고장이 145건으로 23.5[%]를 차지해 두 번째로 높은 비율로 나타났다.



1. The top pipe support bracket
2. The top pipe steam and insulator
3. The upper pipe
4. Messenger wire suspension bracket
5. Processing protection line bracket
6. The main pipe mounting bracket
7. The main pipe steam and insulator
8. The main pipe
9. Horizontal pipe
10. Reinforcement pipe for the main pipe
11. Curve pull the support pipe
12. Curve push device
13. Trolley wire(Contact Wire)
14. Feeder line support bracket
15. Feeder line
16. Messenger wire
17. Feeder line suspension insulator
18. dropper
19. H shaped steel pillars
20. Main pipe mounting bracket

그림 1 전차선로 가선시스템 구조

Fig. 1 Catenary system structure

3. 전차선로 가선시스템의 FMECA 분석

3.1 고장 레벨

고장레벨은 고장모드가 시스템에 주는 영향의 심각도를 나타내며, FMECA에서는 고장모드별로 고장레벨과 고장발생률로부터 치명도를 분석한다. 이에 따라 FMECA를 위해서는 우선적으로 고장레벨을 정의할 필요가 있는데, 고장레벨은 실제 운영환경에 적합하도록 정의되어야 한다. 일반적인 철도사고에서는 표 2에 보이는 것처럼 사고가 시스템에 미치는 영향의 정도를 4단계로 분류하여 사고등급을 분류하여 평가하고 있다[11]. 전차선로 가선시스템에서의 고장은 차량의 탈선이나 인명 사상 등과 같은 중대사고를 유발하지는 않고, 전력공급 중단에 따른 열차운행 지연 등을 초래하는 것이 대부분이므로, 철도시스템 RAMS 적용 규격(IEC-62278)에서 제시한 4단계 고장등급을 기준으로 하고, 각 등급에 대한 전차선로 가선시스템의 고장레벨을 전문가집단(고속전

표 1 전차선로 가선시스템 고장분석

Table 1 Failure analysis of train line Catenary System

No	Component	Failure Mode	Total failure rate(%)	Proportion of failure mode(%)	No. of failures
1	Trolley Wire	power supply failure	0.32	66	3
2		local wear	0.16	34	
3	Messenger wire	strand break Five or more	0.16	5	19
4		strand break Less than five	2.92	95	
5	Feeder	strand break Less than five	1.46	100	9
6	Protection wire	suspended part breakage	0.65	40	10
7		strand break(Less than five)	0.97	60	
8	Voltage equalizing wire	strand break Less than five	11.02	78	87
9		strand break Five or more	3.08	22	
10	Curve argument bracket	damage	0.81	84	6
11		strand break	0.16	16	
12	Glass insulator	breakage	42.30	99	290
13		lightning damage	4.70	10	
14	Feeder suspension insulator	part break	5.67	87	40
15		lightning damage	0.81	13	
16	Feeder support insulator	lightning damage	0.16	14	7
17		part break	0.81	72	
18		mounting bolts damage	0.16	14	
19	Dropper	strand break Five or more	18.31	78	145
20		strand break Less than five	4.70	20	
21		sleeve wear	0.49	2	
22	Power disconnecter	control failure	0.16	100	1

표 2 철도사고 등급분류체계

Table 2 Railway accident classification

Classification	Severity level	Definition
Light	1	One wheel withdrawal, property loss of more than 100 million won, damage to the system such as main line trouble within 20 minutes
Limited	2	Property loss of more than 10 million won, serious system damage such as main line trouble within 6 hours
Serious	3	A large number of serious injuries, including death of one person, loss of property more than one billion, loss of key system including vehicle derailment and significant impact on the environment
Fatal	4	Serious injuries occurred, including a large number of casualties, the derailment, loss of property more than 10 billion won, significant damage to the environment such as fire

기철도 현장에 근무하는 10년 이상 경력자 10명)의 의견수렴을 거쳐 표 3과 같이 구분하여 정의하였다[12]. 이로부터, 2004년부터 2012년까지 발생한 고장이 시스템에 미치는 영향을 표 3의 고장레벨에 따라 분류하여 FMECA 분석을 수행하였다.

3.2 치명도 분석 기법

치명도 계산은 MIL-1629a를 기본지침으로 이용하여 분석하였다. 여기서, 고장모드의 치명도 C_i 는 단일 고장모드가 시스템에

표 3 전차선로 가선시스템 고장 레벨

Table 3 Failure level definition for catenary system

Failure level		IEC-62278	Catenary system	
			Criteria	Definition
I	Catastrophic	A failure which may cause death or weapon system loss.	Break down of the whole system	Critical threat to passenger safety and train operation
II	Critical	A failure which may cause severe injury, major property damage, or major system damage which will result in mission loss.	Break down of key part	Temporary interruption of train operation, and temporary measures against failure should be done
III	Marginal	A failure which may cause minor injury, minor property damage, or minor system damage which will result in delay or loss of availability or mission degradation.	Break down of non-critical part	No interruption of train operation but train speed should slow down for safety
IV	Minor	A failure not serious enough to cause injury, property damage, or system damage, but which will result in unscheduled maintenance or repair.	No effect	No interruption of train operation and the failure may be recovered at night

미치는 영향을 평가한 것으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_i = \lambda \alpha \beta t \tag{1}$$

여기서, λ 는 구성요소의 고장률, α 는 구성요소가 특정 고장 모드로 고장이 발생하는 비율, β 는 고장모드의 고장영향확률을 나타내며, t 는 구성요소의 동작시간을 나타낸다.

구성요소의 치명도 C_c 는 구성요소에서 나타날 수 있는 고장 모드의 치명도 합산으로부터 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$C_c = \sum_{i=1}^n C_i \tag{2}$$

여기서, n 은 구성요소에서 나타나는 모든 고장모드의 합계이다.

구성요소의 고장률 λ 은 식 (3)과 같이 평균 고장률 계산에 의해 구할 수 있다.

$$\lambda = N/t \tag{3}$$

여기서, N 은 주어진 기간 동안 구성요소에서 발생한 고장 수, t 는 구성요소의 동작시간을 나타낸다.

고장모드의 고장영향확률 β 는 특정 고장모드가 발생하였다는 조건 하에 이 고장으로 인한 고장영향이 특정 고장레벨에 속하게 되는 조건부 확률을 의미한다. 여기서, A 를 특정 고장모드라고 하고, 고장모드 A 에 따른 고장영향을 $B_j, j = 1, \dots, k$ 라고 하면, 각 고장영향 B_j 에 대한 고장영향확률 β_j 는 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_j = P(B_j|A) = P(A \cap B_j)/P(A) \tag{4}$$

여기서, $P(A)$ 는 특정 고장모드 A 가 발생할 확률이며, $P(A \cap B_j)$ 는 특정 고장모드 A 가 발생하고 동시에 B_j 의 고장영향이 발생할 확률을 나타낸다.

이상으로부터, 고장모드별로 β 값을 정확하게 구하기 위해서는 식 (4)의 두 가지 확률값을 구해서 계산하여야 한다. 현실적으로는, 대부분의 경우 고장데이터가 충분치 못하여 정확한 확률값을 구하지 못하기 때문에, 표 4에 보이는 MIL Std 1692a에서 제시한 β 값의 가이드를 활용하여 추정값을 사용하고 있다. 그러나 이 경우 분석자의 주관적인 판단에 의존하여 β 값을 추정하기 때문에 객관성 및 정확성이 결여된다는 문제가 있다. 또한, MIL Std 1692a에서는 하나의 고장모드에서 여러 개의 고장영향이 나타나는 경우에 대한 지침이 없기 때문에, 이 경우 β 값 추정에 오류가 발생할 여지가 있다.

표 4 전형적인 고장영향확률

Table 4 Typical probability of failure impact

β	Failure impact
1.0	Actual loss
> 0.1 to < 1	Probable loss
> 0 to < 0.1	Possible loss
0	No loss

본 논문에서는 운영 및 유지보수현장에서 각 고장모드별로 고장영향(고장레벨) 발생데이터를 수집, 분석하여 고장모드별 β 값을 표 5와 같이 산정하였다. 표 5에서 하나의 고장모드에서 여러 개의 고장영향이 나타나는 경우의 β 값을 산정한 사례로서, 조가선과 균압선 및 드로퍼의 가단단선과 같은 고장모드가 있다. 조

표 5 전차선로 가선시스템 고장모드별 β 산정

Table 5 Calculation of β for catenary system failure mode

Component	Failure Mode	Cause	Failure impact	Failure level	β
Trolley wire	power supply failure	Disconnection	Power supply stop	II	1
	Local wear	Arcing	Trolley wire burnout	IV	1
Messenger wire	disconnection	Contact of foreign matter	Power supply interruption	II	0
	strand break	Contact of foreign matter	Five or more	II	0.0625
			Less than five	III	0.9375
Feeder wire	disconnection	Insulation separation failure	Power supply interruption	II	0
	strand break	Contact of foreign matter	Five or more	II	0
			Less than five	III	1
Protection wire	Withdrawal	Suspended part breakage	No effect	IV	1
	strand break	Insulation separation failure, Bad connection	No effect	IV	1
Voltage equalizing wire	disconnection	circulating current	Power supply interruption	II	0
			No effect	II	0
	strand break	Bad connection	Five or more	II	0
			Less than five	III	1
		circulating current	Five or more	II	1
			Less than five	III	1
Curve argument bracket	Abuse	Construction defect, material defect	Pantograph damage	II	0
			No effect	III	1
	corruption	Construction defect, material defect	Pantograph trouble	II	0
			No effect	III	1
Glass insulator	breakage	Contact of foreign matter	No effect	IV	1
			Power supply interruption	II	0
	lightning damage	Natural disaster	Flash overs	III	1
			Partial damage	IV	0
Suspension Insulator	breakage	External influences	No effect	IV	1
			Power supply interruption	II	0
	lightning damage	Natural disaster	Flash overs	III	1
			Partial damage	IV	1
Support insulators	breakage	External influences	No effect	IV	1
			Power supply interruption	II	0
	lightning damage	External influences	Flash overs	III	0
			Partial damage	IV	1
	Bolt damage	Construction defect, material defect	No effect	IV	1
			Power supply interruption	II	0
Dropper	Disconnection	circulating current	Intercession operation	III	0
			No effect	IV	1
	strand break	Mechanical wave, circulating current	Five or more	II	0.795
Less than five			III	0.205	
Power disconnecter	Control is bad	Production failure	No effect	IV	1

가선의 가닥 단선의 경우, 전선류 유지보수 지침에 의해 5가닥 이상의 단선은 즉각적인 보수(중보수)가 필요하여 고장레벨 II이며, 5가닥 미만의 단선은 임시보강 또는 열차운행이 없는 시간에 보수함으로써 고장레벨 III에 해당하는데, 5가닥 이상의 단선은 1건이 발생하고 5가닥 미만은 15건이 발생함에 따라 β 값은 각각 고장레벨 II에서 0.0625, 고장레벨 III에서 0.9375로 산정되었다. 드로퍼의 경우는, 고장레벨 II에 해당하는 5가닥 이상의 단선은 113건이 발생하고, 고장레벨 III에 해당하는 5가닥 미만 단선은

29건이 발생함에 따라, β 값은 각각 고장레벨 II에서 0.795, 고장레벨 III에서 0.205로 산정되었다. 조가선과 드로퍼의 가닥 단선에 대해서도 고장영향별로 β 값을 산정하였다.

3.3 FMECA 분석

경부고속철도 1단계 구간(서울-동대구)에서 2004년부터 2012년까지 전차선로 가선시스템에서 발생한 고장데이터로부터 도출

표 6 전차선로 가선시스템 고장모드의 치명도 산정

Table 6 Criticality evaluation of catenary system failure modes

NO	Component	Failure Mode	Proportion (%)	Failure number	Failure level	λ	α	β	C_i	P_i	Criticality class	C_c
1	Trolley Wire	power supply failure	66	3	II	0.49	0.66	1	0.32	0.27	A	II: 0.32
2		local wear	34		IV		0.34	1	0.17	0.16	B	IV: 0.17
3	Messenger wire	strand break Five or more	100	19	II	3.08	0.05	0.0625	0.01	0.01	C	II: 0.01 III: 2.74
4		strand break Less than five			III		0.95	0.9375	2.74	0.94	A	
5	Feeder	strand break Less than five	100	9	III	1.46	1	1	1.46	0.77	A	III: 1.46
6	Protection wire	suspended part breakage	40	10	IV	1.62	0.4	1	0.65	0.48	A	IV: 1.62
7	Protection wire	strand break Less than five	60		IV		0.6	1	0.97	0.62	A	
8	Voltage equalizing wire	strand break Less than five	100	87	III	14.1	0.78	1	11.00	1.00	A	II: 3.10 III: 11.0
9		strand break Five or more			II		0.22	1	3.10	0.95	A	
10	Curve argument bracket	damage	84	6	III	0.97	0.84	1	0.81	0.56	A	III: 0.97
11		strand break	16		III		0.16	1	0.16	0.15	B	
12	Glass insulator	breakage	99	290	IV	47	0.99	1	46.53	1.00	A	III: 0.47 IV: 46.53
13		lightning damage	1		III		0.01	1	0.47	0.37	A	
14	Feeder suspension insulator	part break	87	40	IV	6.48	0.87	1	5.64	1.00	A	III: 0.84 IV: 5.64
15		lightning damage	13		III		0.13	1	0.84	0.57	A	
16	Feeder support insulator	lightning damage	14	7	IV	1.13	0.14	1	0.16	0.15	B	IV: 1.13
17		part break	72		IV		0.72	1	0.62	0.46	A	
18		mounting bolts damage	14		IV		0.14	1	0.16	0.15	B	
19	Dropper	strand break Five or more	98	145	II	23.5	0.78	0.795	14.57	1.00	A	II: 14.57 III: 0.96 IV: 0.47
20		strand break Less than five			III		0.2	0.205	0.96	0.62	A	
21		sleeve wear			2		IV	0.02	1	0.47	0.37	
22	Power disconnecter	control failure	100	1	IV	0.16	1	1	0.16	0.48	A	IV: 0.16

된 표 1의 고장분석결과와, 표 3에서 제시한 고장레벨기준, 그리고 표 5의 고장모드별 고장영향 확률값을 토대로, 식 (2)의 치명도 계산식을 이용하여 고장모드별 및 구성요소별 치명도를 분석하였다. 표 6은 분석결과를 정리한 것으로써, 여기서 구성요소별 치명도 C_c 는 고장레벨 별로 집계하여 나타내었다.

표 6에서, P_i 는 IEC-60812 규격에서 치명도를 분석하기 위하여 사용하는 발생확률로서 식 (4)와 같이 정의되며, 치명도 등급은 표 7과 같이 정의되어 있다[5].

$$P_i = 1 - e^{-C_i} \quad (4)$$

표 7 IEC-60812 치명도 등급

Table 7 Criticality class classification in 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	$P_i \geq 0.2$

표 6의 치명도 분석결과로부터, 고장레벨의 등급별로 치명도를 정리하여 표 8에 나타내었다. 표 8의 치명도 순위로부터, 드로퍼 가닥 단선과 균압선 가닥 단선이 고장레벨 II에 해당하여 고장영향이 크고 치명도 및 발생확률도 높게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 또한 고장레벨 III에서도 균압선과 조가선, 급전선, 드로퍼의 가닥 단선이 발생확률이 높게 나타나고 있다. 이로부터 전차선로 가선시스템에서는 전선류의 가닥 단선이 주요 고장요인으로 작용한다는 것을 알 수 있다. 한편, 유리애자, 지지애자, 현수애자 등과 같은 애자류의 고장이 고장레벨은 IV로 낮지만, 발생

표 8 고장레벨별 치명도 순위

Table 8 Ranking of criticality according to failure level

	Failure level II			Failure level III			Failure level IV		
	Failure Modes	C_i	P_i	Failure Modes	C_i	P_i	Failure Modes	C_i	P_i
1	Dropper strand break (Five or more)	14.57	1.0	Voltage equalizing wire: strand break (Less than five)	11.0	1.0	Glass insulator breakage	46.53	1.0
2	Voltage equalizing wire: strand break (Five or more)	3.10	0.95	Messenger wire strand break (Less than five)	2.74	0.94	Feeder suspension insulator: part break	5.64	1.0
3	Trolley wire power supply failure	0.32	0.27	Feeder strand break (Less than five)	1.46	0.77	Protection line strand break (Less than five)	0.97	0.62
4	Messenger wire strand break (Five or more)	0.01	0.01	Dropper strand break (Less than five)	0.96	0.62	Feeder support insulator: part break	0.62	0.46

빈도는 높다는 것을 알 수 있다.

이상과 같은 정량적인 치명도 분석결과와 함께, 치명도 평가를 가시적이고 직관적으로 수행하기 위하여 IEC-60812에서 제시한 치명도 평가기법을 적용하였다. IEC-60812에서는 치명도를 식 (4)와 같이 발생확률로 변환한 후, 이를 표 7에 보이는 것처럼 치명도 등급으로 변환하고 치명도 매트릭스를 작성하여 치명도 분석을 수행한다.

표 6에서 작성된 전차선로 가선시스템의 고장모드에 대한 치명도 매트릭스를 그림 2에 보인다. 여기서 치명도가 가장 높은 High risk순으로 정리한 표 8에서 드로퍼 단선(5가닥 이상), 균압선 단선(5가닥 이상), 전차선 급전실패의 3가지 고장모드가 포함되며 전차선로 가선시스템의 운영에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 나

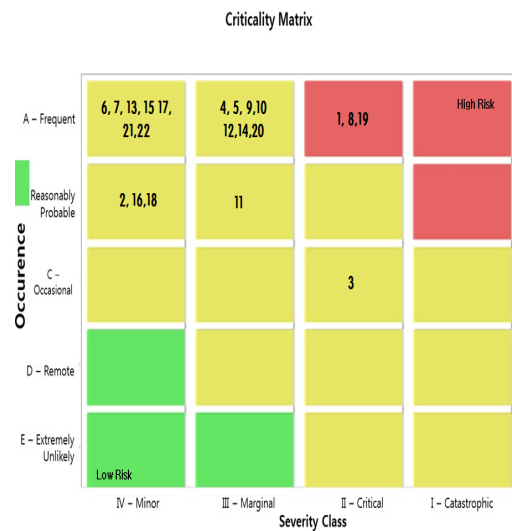


그림 2 치명도 매트릭스 다이어그램

Fig. 2 Criticality Matrix diagram

타고 있다. 이상의 분석결과를 토대로, 설비별 유지보수의 우선 순위를 드로퍼 → 균압선 → 전차선 → 조가선 → 급전선 순으로 정할 수 있으며, 점검주기별(일일/주간/월/분기/반기/년) 점검설비 목록을 작성할 때 위에서 정한 우선순위를 고려할 수 있다.

4. 결 론

전차선로 가선시스템을 대상으로 FMECA 기법을 적용하기 위한 절차를 제시하고, 고속철도 전차선로 현장에서 9년간에 걸친 고장데이터를 수집, 분석하여 FMECA를 수행하였다. 특히, 그동안 치명도 분석과정에서 분석자의 주관적 판단에 따라 추정하던 고장모드별 고장영향 확률값(β)을 현장으로부터의 고장현황데이터로부터 정확하게 산정하여 적용하는 방법을 제시하였다. 전차선로 가선시스템에 대한 FMECA 분석 결과는 다음과 같다.

(1) 치명도 및 고장레벨에 따라 드로퍼 가닥 단선, 균압선 가닥 단선, 전차선 급전장애투를 포함하는 3개의 중요 고장모드를 선정하였다.

(2) 유지보수 효율성을 위하여 유지보수 우선순위를 드로퍼 → 균압선 → 전차선 → 조가선 → 급전선 순으로 제시하였다.

(3) 유지보수 시 다른 고장모드들에 비해 보다 중점적으로 점검이 필요한 대상 및 고장모드를 순위별로 제시하였다.

이상과 같은 중요 고장모드들을 유지보수 점검 주기 중 최소 점검 주기인 일일 또는 주간 점검에 포함하도록 계획한다면, 보다 안전성이 높은 시스템을 유지할 수 있을 뿐만 아니라 보다 효율적인 유지보수를 수행할 수 있다.

이상의 연구 성과는 전차선로 가선시스템의 유지보수업무 및 계획수립에 중요자료가 될 수 있을 뿐만 아니라, 가선시스템 설계에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 국토교통부의 철도 특성화대학원 지원사업으로 지원되었습니다

References

[1] R. J. Hill, "Electric Railway Traction Part 3 Traction Power Supplies", Power Engineering Journal, pp. 275-286, 1994.
 [2] Failure Mode Effect and Critically Analysis "FMECA" Reliability Analysis Center, pp.11-33, 1993
 [3] J. H. Kim, I. R. Lee, S. H. Kim, C. K. Park, K. C. Choi, "The Scientific Method of Risk Identification using FMECA", Spring Conference of The Korean Operations Research and Management Science Society & Korean Industrial Engineers, pp.266-269, 2011, 5
 [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] J. H. Kim, H. Y. Jeong, J. S. Park, "Development of the FMECA process and analysis methodology for railroad system" International Journal of Automotive Technology, Vol 10, No.6, pp 754-756, 2009
 [7] Q. Zhang, Y.-Z. Song, X.-L. Guo, et al., "Failure Mode Analysis of Bogie Frame Based on FMECA", Railway Locomotive Vehicle, Vol. 27, No. 3, pp. 35-37, 2007
 [8] F. Geng, M.-Z. Chang and J. Mao, "RAMS Study on High Speed EMU Brake System Based on FMECA" Railway Vehicle, Vol. 50, No. 5, pp. 31-33, 2012
 [9] Xiaoqing Cheng, Zongyi Xing, Yong Qin1, Yuan Zhang, Shaohuang Pang, Jun Xia "Reliability Analysis of Metro Door System Based on FMECA" Journal of Intelligent Learning Systems and Applications, pp. 217-219 2013, 5.
 [10] 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
 [11] J. S. Yun, Y. G. Park, J. H. Eom " Analysis the Railway Accident·Failure through FMEA Technique and Present the Priority Safety Management Items", Autumn Conference of the Korean Society for Railway, pp.619-620, 2013, 11
 [12] K. S. Byeon, S. B. Kim, J. K. Kim, S. Y. Choo, "An alternative method for estimating β -value based on conditional probability", Spring Conference of Korea industrial and System Engineering pp.330-331, 2008, 5.

저 자 소 개



윤 응 규 (Eung-Kyu Youn)

2000년 : 서울과학기술대학교 전기공학과 졸업, 2012년 : 서울과학기술대학교 철도전기신호공학과(박사수료). 1984년~현재 : 철도인재개발원 기술아카데미센터 교수
 Phone : 031-461-4266
 E-mail : ykkek@hanmail.net



최 규 형 (Kyu-Hyoung Choi)

1981년 : 서울대학교 전기공학과 졸업, 1982년 : 홋카이도(北海道)대학 전기공학과 박사과정 졸업(공학박사). 2005년~현재 : 서울과학기술대학교 철도전기신호공학과 교수
 Phone : 02-970-6873
 E-mail : khchoi@seoultech.ac.kr