

고장원인 확률을 이용한 FMEA와 고장진단 순서의 최적화
A Study for FMEA and Optimization of Failure Diagnosis Sequence Using
Probability of Failure Cause

송기태* 김민호** 백영구** 이기서*** 김수명****
Song, Kee-Tae Kim, Min-Ho Back, Young-Gu Lee, Key-Seo Kim, Soo-Myong

ABSTRACT

Recently, with increasing interested in improvement of operational reliability and the systematic maintenance activities, the RCM analysis has been applied and tried to lots of applicable industries.

This study covers applying the probability of failure cause to FMEA, and proposes an analytical method for this. Also, the measures of quantitative classification for the result of failure cause probability are addressed. Based on the field data, this thesis presents an identification for causes and characteristics of failure, and reviews them periodically from the above methodologies.

As using FMEA applied the probability of failure cause, we in the future can look forward to improvement of efficiency for failure diagnosis & inspection, and reliability.

1. 서 론

최근 철도 시스템의 운영과 유지보수 측면에서 시스템 및 장치의 안전성과 경제적인 운영 및 지원을 보증하고 운영 신뢰성을 유지하기 위하여, 적절하고 효과적인 유지보수 활동 및 체계구축에 대한 필요성이 증대되고 있다. 따라서 국내외에서는 이전부터 Reliability Centered Maintenance(RCM)에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있으며 이미 안전성과 운영에 있어서 그 중요성이 큰 원자력 발전소, 항공기 산업, 군 무기관련 산업 및 철도 산업 등에서 부분적으로 적용되어 졌다. 또한 일반 기관 시설 및 설비관리 에서도 적용되어지고 있으며 RCM 적용으로 인한 유지보수 비용의 절감 및 시스템 가용도의 향상에 대한 효과를 부분적으로 얻고 있다. 하지만 현실적으로 국내에서의 RCM에 대한 연구와 적용의 활동은 타 선진국에 비해 부분적으로 미흡한 수준에 있으며, 그 원인은 실제 RCM을 적용하기 위해 존재해야 하는 신뢰성 기반의 데이터가 부족 하다는 점에 있다. 현재의 철도 차량시스템의 유지보수 활동에서 고장의 진단 및 검사 활동은 고장 징후나 고장유형발생 시 진단이나 검사에 있어서 신뢰성에 근거한 데이터를 바탕으로 이루어지지 않고 유지보수 담당자의 경험이나 주관적인 판단에 따라서 고장의 원인을 찾아내는 방법으로 실시되는 경우가 대부분이다. 이것은 유지보수 담당자 개인이 아주 많은 경험과 지식을 가지고 있다면 어느 정도 효과를 거둘 수 있을지 모르나 현실적으로 현장에서 기지별로 주기적인 순환근무를 하는 실정에서 특정 사양을 가진 시스템에 대하여 충분한 경험과 지식을 가진 유지보수 담당자는 드물 것이다. 결국 기지에서 유지보수 담당자는 고장발생시 고장의 원인을 찾기 위해 예상되는 다수의 원인들을 하나씩 진단 및 검사할 것이며, 그 진단 및 검사 시의 순서에 있어서 유지보수 담당자가 첫 번째로 예측, 판단하여 진단하는 원인이 맞았을 경우에는 시간 및 비용의 소모가 최저가 되지만 그렇지 않을 경우에는 그 고장원인이 확인되기 전까지는 가장 많은 양의 유지보수비용과 시간을 소비하게 될 것이다.

* (주)마이크로트랙, RAMS 팀, 비회원

E-mail : keetae@microtrack.co.kr

TEL : (02)2249-2382 FAX : (02)2249-2386

** (주)마이크로트랙, RAMS 팀

*** 광운대학교 정보제어 공학과, 교수

**** 서울특별시도시철도공사, 정비지원팀

이와 같은 고장 진단 및 검사 시의 고장징후에 따른 고장원인을 신뢰성에 근거한 데이터를 통하여 예측하고 진단 또는 검사 순서를 정하게 된다면 고장진단 및 검사 시의 효율성을 확보하고, 이를 통하여 유지보수 비용 및 시간을 감소시킬 수 있을 것이다. 따라서, 본 연구에서는 현 서울시철도공사의 2006년도 1년간의 5호선 차량 인버터 시스템의 고장유형 중 감지센서 불량에 대한 고장데이터를 기반으로 각 고장유형에 따른 고장원인의 확률을 산출하는 방법을 제시하고, 그에 따른 수준을 분류하기 위한 대안과 FMEA에 적용하는 절차를 제시하였다. 또한, 고장원인 확률과 수준분류를 FMEA에 적용하여 차후 유지보수 활동에서의 고장진단 및 검사 시에 활용할 수 있는 방안을 제시하였다.

2. 고장원인 확률 산출 및 분류

2.1 고장원인 확률

고장원인 확률은 어떠한 기능고장현상에 따른 고장 유형 및 고장징후, 고장검지장치의 고장상태 표시 등과 같이, 시스템기능의 고장을 일으킬 수 있는 원인의 일정 기간 동안의 발생 비율에 의한 경험적 확률로써 하나의 고장유형 및 징후에는 보통 최소 2개 이상의 원인을 갖는다.

표1. 인버터 장치 관련 고장데이터

No	System	FM #	FM	FCE #	FCE
1	인버터	FM1.1	감지센서 불량	FCE1.1.1	LCU
				FCE1.1.2	와고 커넥터
				FCE1.1.3	플러그(10P)
				FCE1.1.4	속도측정보드
				FCE1.1.5	에어플로센서
				FCE1.1.6	전류센서
				FCE1.1.7	전압센서(OVC)
				FCE1.1.8	표면온도센서

위 표는 현 도시철도공사의 5호선 차량에 대한 1년간의 고장 기록을 바탕으로 인버터 장치에 대한 고장유형 중 감지센서 불량에 대한 원인이 되는 장치(FCE)에 대하여 나타낸 표이다. 여기에서 고장유형으로써 FM1.1의 감지센서 고장유형시의 원인이 되는 장치로 FCE1.1.1~FCE1.1.8의 8가지가 존재하는 것을 보여준다. 본래 설계 및 유지보수의 예방정비 측면에서 정확한 고장 분석을 위한 FMEA는 위의 FCE 수준에서의 고장유형 및 원인을 가능한 한 최하위의 Root Cause를 확인하여 기록하고 분석해야 하지만, 현 고장데이터의 기록 수준과 설계 시 적용 또는 예방정비 측면의 목적 보다는 고장 징후 및 고장의 유형이 발생 시 이를 효과적으로 진단 및 검사하여 유지보수 하고자 하는 본 연구의 목적에 맞추어 위의 수준을 적용하였다. 이와 같은 이유로 고장원인을 고장원인 장치(FCE)로 표기하여 구별하고자 한다. 이처럼 고장 및 기능 고장의 수준에 따라 고장원인의 수준은 달라지며, 이것은 차후 고장 진단 및 검사 시의 확인되어지는 고장 현상의 수준에 따라 고장원인의 수준 또한 달리 적용되어야 할 것이다.

다수의 고장원인은 각각의 발생 비율을 가지고 발생하며 그것이 다수의 고장이 연관되어 발생하는 복합고장이라 할지라도 최초 원인 또는 그 복합원인 중에서도 고장 발생의 핵심이 되는 고장도 존재하게 되어있다. 이러한 고장에 대한 분석은 위의 표1에서와 같이 RCM의 주요 분석 절차인 고장 유형 및 영향분석(FMEA)을 이용하여 확인되어 질 수 있다. 하지만 기존의 FMEA는 정성적으로 잠재적인 고장을 확인하고 유형에 따른 원인 및 영향을 분석하여 고장의 발생을 최소화 하기위한 목적과는 상대적으로 운영상의 유지 보수 측면에서 적용하기 위한 정량적인 부분은 부족하다.

2.2 고장원인 확률 산출

고장 원인 확률 산출을 위해서는 운영상에서 일정기간 수집된 고장 데이터에 따른 FMEA상의 수준별 고장원인들에 대한 발생율을 이용하여 표1의 철도 차량 인버터 시스템의 고장유형 중 감지센서 불량에

대한 원인의 경험적 확률을 산출 하도록 한다.

여기서, 인버터 시스템의 감지센서 불량률의 고장을 일으킬 수 있는 고장원인을 FCE_i , $i = 1, 2, 3, \dots, m$ 이라 하고, 원인의 발생확률을 $P(FC_i)$ 라 하면 아래와 같은 방법으로 고장원인에 대한 발생 확률을 산출할 수 있다.

$$P(FC_i) = \frac{FCE_i}{FM} = \frac{\text{고장원인 장치의 발생건수}}{\text{감지센서 불량 발생건수}}$$

위의 방법으로 아래 표2와 같은 도시철도 차량 인버터 시스템 1년간 고장 데이터의 감지센서 불량 현상의 고장원인 확률에 대한 데이터를 얻을 수 있다.

표2. 인버터 장치의 고장원인 장치와 발생 확률(감지 센서 불량 발생시)

Ref. No.(i)	FCE_i	FCE_i 발생 건수	$P(FC_i)$
1	LCU	67	0.632
2	와고 커넥터	21	0.198
3	플러그(10P)	2	0.018
4	속도측정보드	1	0.009
5	에어플로센서	6	0.057
6	전류센서	4	0.038
7	전압센서(OVC)	4	0.038
8	표면온도센서	1	0.009
FM	감지센서불량	106	0.999

위와 같은 접근법은 현대의학에서 인간의 질병을 진단할 때 많은 시간동안 기록 또는 관찰되어지거나 임의의 임상실험을 통한 데이터의 각 질병의 징후들을 매개변수화하여 발생율에 대한 조건부 확률을 이용한 데이터 베이스 시스템을 활용하여 징후에 따른 질병의 진단 또는 질병의 원인을 찾아내는 것과 같이 철도 차량에 있어서도 고장 징후(Symptom)에 관한 부분과 TCMS Code Number 등과 같은 고장 지표와 같은 요인을 고려하여 조건부 확률 이론을 활용하면 좀 더 정확하고 신뢰성 있는 고장원인 확률에 대한 데이터를 얻을 수 있을 것으로 생각되지만, 현 도시철도 차량의 고장데이터가 그러한 조건부 확률을 직접적으로 적용하기에는 여러 가지 인위적 시험이나 데이터의 분석 및 정리 등과 같은 고장과 관련한 데이터가 적절하지 않은 점을 고려하여 본 논문에서는 고장원인의 발생 비율만을 이용하여 고장원인의 확률을 산출하였다.

2.3 고장원인 수준 분류

산출된 고장원인확률을 FMEA에 적용하여 고장분석을 통한 시스템의 손상과 운영상의 피해를 최소화 하는데 기여 할 수 있을 것이다. 또한, 차후 고장 진단 및 고장 검사 시에 활용하기 위해서는 고장원인을 일정한 기준에 의하여 정량적으로 분류해야 할 필요가 있다. 따라서 다음에서는 고장 원인 확률에 대해서 정량적인 측면에서의 수준을 분류하도록 한다.

FMEA 적용할 고장원인의 수준분류는 고장원인에 대한 치명도와 관련한 부분이 따로 분석되어지기 때문에 고려하지 않으며 고장원인에 대한 정량적인 발생 확률에 관해서만 수준을 분류하기로 한다. 하지만 차후 필요 하다면 고장원인에 대한 개별적인 치명도 또한 고장원인 확률을 검토하여 그 수준의 효과적인 조정이 가능하다.

본 논문에서는 고장유형에 따른 원인의 수준분류를 함에 있어 여러 고장유형의 원인에 대한 확률을 산출하여 본 결과 하나의 고장유형에 대한 여러 원인 중 전체 0.5의 확률을 초과하는 원인은 많아야 하나에서 두 가지였으며 그 외의 원인들은 그 이하의 확률을 가지는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 논문에서는 아래와 같이 위의 표2의 고장원인 확률에 대한 고장원인의 정량적인 수준 분류를 4가지 수준으로 분류 하였다. 그 예는 다음 표3과 같다.

표3. 인버터 시스템 감지센서 불량에 대한 고장원인 수준분류

Level	분류기준	고장원인 장치	고장원인 확률
I	고장원인 확률 0.5이상	LCU	0.632
II	고장원인 확률 0.3이상	-	-
III	고장원인 확률 0.1이상	와고 커넥터	0.198
IV	고장원인 확률 0.1이하	에어플로센서	0.057
		전류센서	0.038
		전압센서(OVC)	0.038
		플러그(10P)	0.018
		속도측정보드	0.009
		표면온도센서	0.009

3. 고장원인 확률을 적용한 FMEA

기존의 FMEA는 잠재된 고장의 유형 및 영향을 예측하여 정성적으로 분석하고 설계 시에 활용하여 차후 발생할 문제를 예방하기 위한 기법으로 쓰이며, 또는 운영 시에 유지보수 측면에서 활용하기 위한 방법으로 실제 유지보수 활동의 측면에서 고장이 발생 시 이에 대한 데이터를 FMEA의 형식으로 기록하여 고장에 대한 원인 규명 및 분석을 통한 예방정비 측면에서 유지보수 활동의 효과를 거두기 위하여 사용된다. 후자의 유지보수 측면의 FMEA의 활용에서 고장의 유형 발생 시 이를 신속하게 진단하고 검사하는 부분이 매우 중요하다고 할 수 있다. 하지만 기존의 FMEA에 있어서는 이러한 부분에서 효과적으로 적용되기에 어려운 점이 있다. 따라서 정성적인 FMEA에 대해 위에서 언급한 고장원인 확률을 적용함으로써 정량적인 부분을 보완하고, 고장의 진단 및 고장 검사 시에 고장의 원인의 확률 및 정량적 수준에 따라 고장의 진단 순서 및 우선순위의 고장원인을 찾아내는데 큰 효과가 있을 것이다. 이를 위하여 FMEA에 고장원인 확률을 적용하기 위해서 일단 FMEA를 실시함에 있어서 고장원인 확률 및 수준도 함께 정의되어 기록 되어져야 한다.

다음 표4는 기존의 FMEA양식지에 고장원인 확률 및 수준에 대한 부분을 적용한 FMEA의 예를 나타낸 것이다.

표4. 고장원인 확률 및 수준적용의 FMEA예시

I.D	System	Function	FM #	FM	FCE #	FCE	Failure Effect			P(FC _i)	Level
							Local	Sub sys	System		
1	Inverter	차량의 추진제어 및 보조전원 공급	FM1.1	감지센서 불량	FCE1.1.1	LCU	각종센서 신호처리 불량	VVVF인버터, OVC제어 및 불량	추진제어 시스템 감시제어 불량	0.632	I
					FCE1.1.2	와고 커넥터	센서신호 케이블 접속불량	각종 신호센서감지 불량	추진제어 시스템 감시제어 불량	0.198	III
					FCE1.1.3	플러그(10P)	센서신호 케이블 접속불량	각종 신호센서감지 불량	추진제어 시스템 감시제어 불량	0.018	IV
					FCE1.1.4	속도측정보드	속도측정 불능	속도측정신호 불능	추진제어시스템 속도불안정	0.009	IV
					FCE1.1.5	에어플로센서	에어플로 측정 불능	인버터 내부 공기흐름감지 불능	추진제어시스템 공기흐름불량	0.057	IV
					FCE1.1.6	전류센서	전류측정 불능	이상전류 감지불능	추진제어시스템 출력 불안정	0.038	IV
					FCE1.1.7	전압센서(OVC)	전압측정 불능	이상전압감지 불능	추진제어시스템 출력 불안정	0.038	IV
					FCE1.1.8	표면온도센서	온도측정 불능	내부과열	추진제어시스템 과열 및 출력 불안정	0.009	IV

위의 FMEA는 고장원인 확률 및 수준을 기입하여 나타낸 것이다. 표4와 같이 정성적인 FMEA에 대하여 고장 유형의 수준에 따른 고장원인의 확률과 정량적인 수준분류를 실시함으로써 차후 제품 설계 시에는 고장원인의 수준에 따라 설계변경 및 고장원인 장치의 대체, 고장의 진단, 검사에 대한 계획 수립 등에 대한 신뢰성 있는 우선순위가 차등 적용되어 결정될 수 있을 것이다. 고장원인에 대한 수준분류는 대상시스템에 대한 고장유형에 따른 고장원인의 전체 수준이 정해지면 각각의 고장원인의 수준별로 전체 분류하여 각각의 수준에 대하여 시스템의 특성을 고려한 적합한 예방 정비 계획 및 조치에 대한 방안을 수립하여야 한다. 이를 위하여 FMEA 양식지에 포함하여 기록하는 방법 외에도 고장의 유형에 따른 고장원인의 수준분류를 위한 고장원인 수준 분류 및 진단순서 양식지를 작성하는 것도 효율적인 방법이 될 수 있을 것이다. 이러한 내용에 관련하여 다음 4장에서 구체적으로 언급하였다.

4. 고장원인 확률을 통한 고장진단 및 검사 시의 활용

4.1 고장진단 및 검사

고장의 유형에 따른 고장의 원인 확률 산출을 통한 수준이 분류되면 이러한 데이터를 활용하기 위한 구체적인 대안이 필요하다. 본 논문의 서두에 언급했던 바와 같이 고장원인 확률과 정량적 수준분류의 가장 주요한 목적은 운영 시 고장의 징후 또는 고장이 발생하면 이에 대한 원인을 최대한 짧은 시간과 최소의 비용으로 찾아내 수리 또는 복구 할 수 있는 신뢰할 만한 데이터를 얻기 위한 한 가지의 방안 및 방법을 제시하는 것이라 할 수 있다.

기존의 철도 차량 유지보수 체계는 차량이 본선에서 TCMS Fault Code 또는 승무원이 고장발생에 따른 상황을 인지할 경우 이를 승무원 및 차량 분소, 종합사령실 등에서 고장 발생의 상태에 따라 조치를 취하게 된다. 이러한 경우에 승무원은 제작사에서 제공되었거나 오래전 단순 유지보수 경험과 이론적인 내용을 바탕으로 만들어진 자체 고장조치법등의 지시에 따라 장치의 리셋 등의 단순조치만이 가능하며, 차량의 고장발생으로 인한 기지 입고 시 또한 정비 담당자의 개인적인 기술지식의 수준, 이전의 경험 등에 따라 고장 발생현상에 따른 원인을 찾아내기 위한 방법, 절차, 진단 및 검사의 순서가 상이할 수 밖에 없을 것이다. 이러한 문제가 계속 되는 이유는 유지보수 담당자의 순환근무, 각 정비기지에 따라 운행 중인 철도차량의 사양의 다양성 및 검사기기 등의 시설현황도 다르기 때문에 경험에 비해서 상대적으로 고장진단 및 정비능력은 충분히 향상되기 어려운 점에 있다. 또한, 이러한 부분의 문제와 더불어 기존의 고장데이터 수집의 체계는 특정 고장의 발생 시 단순 고장의 발생현상에 따른 조치내용 및 결과와 같은 실적위주의 유지보수 기록이 대부분이며, 신뢰성에 근거하여 고장의 유형과 원인을 정성적 및 정량적으로 분석하여 예방정비 계획수립과 고장 징후 및 상태 발생 시 이를 빠른 시간 내에 효율적으로 수리, 복구 하기위한 데이터의 수집 및 관리가 적절히 이루어 지지 못하고 있는 실정 또한 주요한 원인 중에 하나이다.

4.2 고장원인 확률을 이용한 고장 진단 및 검사 순서의 최적화

고장원인 확률 및 수준에 따른 데이터를 고장 진단 및 검사 시에 적용하는 방법은 단순히 고장원인 확률의 정량적인 순위에 따라서 진단 및 검사를 실시하는 방법과 비용적인 부분을 함께 고려하여 진단 및 검사 시의 순서를 정하는 방법이 적용되어질 수 있다. 물론, 전자보다는 후자의 방법이 더 정확하며 효과적인 방법이다. 하지만 후자의 방법을 적용하기 위해서는 사전에 해당 고장원인의 진단에 소요되는 시간과 해당 고장원인의 수리 및 복구 등의 조치 등에 필요한 시간 및 비용에 관한 데이터가 존재할 때만이 적용가능하다. 다음에서는 두 가지의 방법을 적용하는 것에 대해 위의 표4의 데이터를 가지고 예를 들어 설명하기로 한다. 첫 번째로, 철도차량 인버터 시스템의 감지센서 불량 고장 유형이 발생하였을 때의 고장원인 확률에 따른 고장진단 및 검사 시의 효과적인 순서는 아래 그림1과 같다.

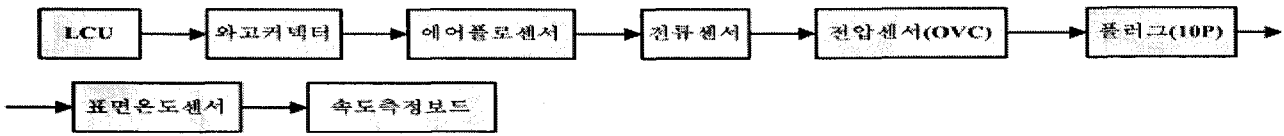


그림1. 인버터시스템 감지센서 불량에 따른 고장원인 진단 및 검사순서(비용고려하지 않음)

위의 순서에서 전류센서와 전압센서(OVC), 그리고 속도측정보드와 표면온도센서는 동일한 확률을 가지고 있으므로 고장 진단 및 검사 시의 편의성을 고려하여 순서를 변경할 수 있다. 두 번째로, 비용적인 부분을 고려한 고장 진단 및 검사 시의 순서의 최적화하는 방법은 고장원인 확률과 개별적인 고장원인의 진단 및 검사 비용을 고려하여 정확한 고장원인을 발견해 낼 때까지의 진단, 검사 비용을 최소화하는 탐색순서를 결정하는 것이며 이를 위하여 진단 시간, 소요인원, 조치시간, 장치교환 비용 및 기타 부대 소요 비용 등의 여러 가지 종합적인 요소들을 가지고 정량화 하여야 신뢰성 있고 효과적으로 최적화 순서의 결정이 가능하다. 하지만 본 장에서는 현재의 여건 및 복잡성을 고려하여 진단 소요비용(M/H)을 임의로 아래의 표5와 같이 가정하여 비용을 고려한 고장원인 진단 및 검사 순서의 최적화의 방법을 설명하기로 한다. 단, 여기서의 개별적인 고장원인의 검사자체의 신뢰도는 100%라 가정하도록 한다.

표5. 인버터 장치의 고장원인 장치 발생 확률 및 진단소요시간의 예(감지센서 불량 발생시)

Ref. No(<i>i</i>)	FCE_i	$P(FC_i)$	C_i (M/H)
1	LCU	0.632	2
2	와고 커넥터	0.198	0.5
3	플러그(10P)	0.018	0.3
4	속도측정보드	0.009	1.5
5	에어플로센서	0.057	1
6	전류센서	0.038	1
7	전압센서(OVC)	0.038	1.2
8	표면온도센서	0.009	0.6

위 표5에서 만약 와고 커넥터가 고장 원인일 경우 탐색순서가 $FCE_1, FCE_4, FCE_5, FCE_6, FCE_7, FCE_3, FCE_2, FCE_8$ 이었다면 8시간 6분의 진단시간과 인건비가 소요되고, 탐색순서가 $FCE_2, FCE_1, FCE_4, FCE_5, FCE_6, FCE_7, FCE_3, FCE_8$ 이었다면 단30분의 진단시간과 인건비만 지출될 것이다. 이처럼 고장의 발생 시 그 고장의 원인의 진단 및 검사에 관련된 탐색순서의 최적화가 유지보수 비용적인 측면에서 얼마나 큰 영향을 미칠 수 있는지 알 수 있다.

비용을 고려한 고장원인 및 진단 시의 탐색 순서의 최적화의 방법은 고장의 징후 및 유형 발생시, $P(FC_i)$ 와 개별적인 고장원인의 진단소요비용(M/H) $C_i, i = 1, 2, \dots, m$ 이 주어졌을 때 특정한 탐색순서가 탐색비용을 최소화 하는 최적탐색순서가 되기 위한 필요충분조건은 $\frac{P(FC_i)}{C_i}$ 의 비가 큰 원인에서부터 시작하여 감소하는 순서대로 진단 및 검사를 실시하는 것이다.

이를 증명하기 위하여 $P(FC_i) = P_i$ 라 하고 고장원인의 진단순서를 나열하여 $[x]$ 로 표시한다. $[3]=7$ 이라면 FCE_7 을 세 번째에 검사한다는 의미이다. 탐색순서를 벡터로 표현하면 임의의 탐색순서 $\pi = ([1], [2], \dots, [m])$ 에 대한 탐색 비용의 기대치는

$$\bar{C} = C_{[1]} + C_{[2]}(1 - P_{[1]}) + C_{[3]}(1 - P_{[1]} - P_{[2]}) + \dots + C_{[m]}(1 - \sum_{i=1}^{m-1} P_{[i]})$$

이며, 이것은 고장원인 $FCE_{[1]}$ 에 대한 검사비용, 만약 검사결과 $FCE_{[1]}$ 은 정상이라는 것을 알았을 때 $FCE_{[2]}$ 에 대한 검사비용, 또한 $FCE_{[2]}$ 도 정상이라는 것을 알았을 때 $FCE_{[3]}$ 에 대한 검사비용, 등의 총

합을 의미한다. 먼저 필요조건이라는 것을 증명하기 위해서는 순서 $\pi^* = (\dots [i] = \alpha, [i+1] = \beta, \dots)$ 가 최적일 때에는 $\frac{P_\alpha}{C_\alpha} > \frac{P_\beta}{C_\beta}$ 를 증명해야 한다. 최적순서에서 임의의 고장원인 α 와 β 의 검사 순서를 바꾼 후 탐색순서 $\pi_i = (\dots \beta, \alpha, \dots)$ 를 가정하도록 한다. π^* 는 최적순서이므로 $\bar{C}(\pi^*) - \bar{C}(\pi_i) < 0$ 이며,

$$\begin{aligned} \bar{C}(\pi^*) - \bar{C}(\pi_i) &= (1 - \sum_{t=1}^{i-1} P_{[t]})C_\alpha + (1 - \sum_{t=1}^i P_{[t]})C_\beta \\ &\quad - (1 - \sum_{t=1}^{i-1} P_{[t]})C_\beta - (1 - P_{[i]} - P_\beta)C_\alpha < 0 \end{aligned}$$

위의 수식을 간략히 하면, $\bar{C}(\pi^*) - \bar{C}(\pi_i) = P_\beta C_\alpha - P_\alpha C_\beta < 0$ 이다. 그러므로 π^* 가 최적이면 $\frac{P_\alpha}{C_\alpha} > \frac{P_\beta}{C_\beta}$ 이다. 또한, 충분조건이라는 것을 증명하기 위해서는 특정한 탐색순서 $\pi^* = (\dots [i] = \alpha, [i+1] = \beta, \dots)$ 에서 임의의 고장원인에 대하여 $\frac{P_\alpha}{C_\alpha} > \frac{P_\beta}{C_\beta}$ 가 성립하면 그 순서는 최적이라는 것을 증명해야 하는데, 우선 증명을 간단히 하기 위하여 α 와 β 이외의 고장원인의 검사 순서가 이와 같이 배열되었다고 가정하기로 한다. $\frac{P_\alpha}{C_\alpha} > \frac{P_\beta}{C_\beta}$ 이면 $P_\alpha C_\beta > P_\beta C_\alpha$ 이다. 위의 필요조건을 증명할 때의 과정과 같이 $\pi_i = (\dots \beta, \alpha, \dots)$ 라 하면 간략화 되어 $\bar{C}(\pi^*) - \bar{C}(\pi_i) = P_\beta C_\alpha - P_\alpha C_\beta < 0$ 이므로 이것은 $\bar{C}(\pi^*) - \bar{C}(\pi_i)$ 가 되어 π^* 가 최적임을 나타낸다[참고1]. 또한, π_i 와는 다른 어떤 순서라도 $P_\alpha C_\beta > P_\beta C_\alpha$ 의 조건을 계속 만족시키면서 인접한 두 고장원인을 축차적으로 바꾸어 줌으로써 얻을 수 있으며, 이 경우 α 와 β 이외의 고장원인간의 배열이 필요조건을 위반하게 되므로 $\bar{C}(\pi^*) < \bar{C}(\pi_i) < \bar{C}(\pi)$ 가 된다. 이와 같은 증명을 전제로 표5의 데이터를 $\frac{P(FC_i)}{C_i}$ 의 수식에 대입하여 고장진단 및 검사의 최적 순서를 구해보면 다음 표6과 같은 데이터를 얻을 수 있다.

표6. 인버터장치의 고장원인 장치의 비용(시간)을 고려한 진단 및 검사 순서표(감지센서 불량 발생시)

Ref. No(i)	FCE_i	$P(FC_i)$	$C_i(M/H)$	$\frac{P(FC_i)}{C_i}$	탐색순서
1	LCU	0.632	2	0.316	2
2	와고 커넥터	0.198	0.5	0.396	1
3	플러그(10P)	0.018	0.3	0.060	3
4	속도측정보드	0.009	1.5	0.006	8
5	에어플로센서	0.057	1	0.057	4
6	전류센서	0.038	1	0.038	5
7	전압센서(OVC)	0.038	1.2	0.032	6
8	표면온도센서	0.009	0.6	0.015	7

따라서, 비용을 고려한 인버터 시스템의 감지센서 불량에 대한 고장현상에 대한 고장원인 진단 및 검사 순서는 아래 그림2와 같다.

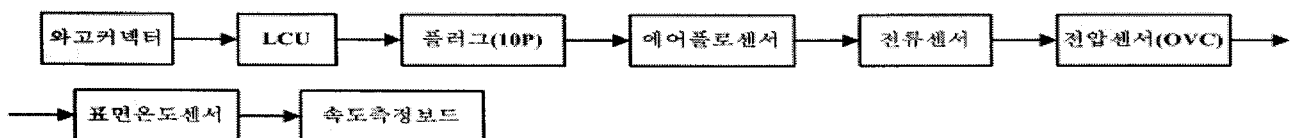


그림2. 인버터시스템 감지센서 불량에 따른 고장원인 진단 및 검사순서(비용측면 고려)

위의 내용과 같이 첫 번째의 비용을 고려하지 않은 고장원인의 발생 확률만으로 고장진단 및 검사순

서를 결정했을 경우와 비용적인 측면을 고려했을 경우는 그 결과에 있어서 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 효과적인 고장진단 및 검사순서의 결정에 있어서 비용적인 부분이 미치는 영향이 중요함을 알 수 있다. 따라서 실제 신뢰성 있는 고장진단 및 검사순서를 결정하기 위해서는 가능한 비용 관련 데이터를 고려하여야 한다.

5. 고장원인 확률 및 수준분류 적용을 위한 절차

고장원인 확률 산출 및 수준분류를 통한 정량적인 데이터를 이용하여 효과적으로 유지보수 측면의 예방정비 계획 수립과 고장발생시 신속하고 정확한 원인의 진단을 위하여 고장데이터 수집의 단계에서 부터 최종 결과 적용 후의 주기적 모니터를 통한 지속적인 관리가 가능하도록 절차에 따라 수행되어야 할 것이다. 아래의 그림3은 고장원인 확률 및 수준분류를 적용하기 위한 전체적인 절차의 흐름을 나타낸 것이다.

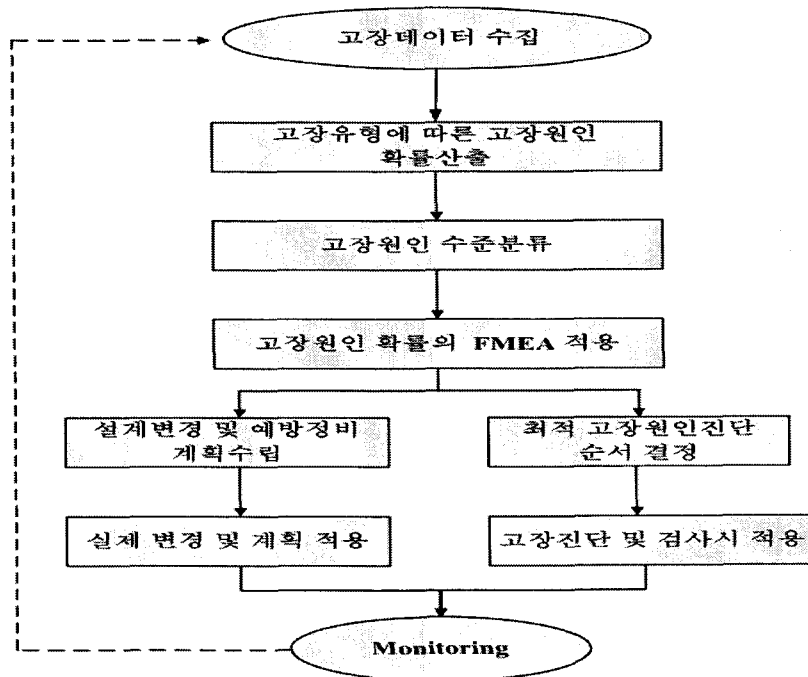


그림3. 고장원인 확률 및 수준분류 적용을 위한 절차 흐름도

위 그림3과 같이 고장원인 확률과 수준을 분류하여 작성한 FMEA의 단계에서 해당 시스템의 고장유형들을 개별적으로 그 기능, 치명도, 영향, 비용적인 부분 등을 고려하여 예방정비 계획의 수립이 효과적인지, 아니면 고장의 징후 및 유형이 발생 시에 적절하게 조치 및 대처하는 것이 효과적인지를 신중하게 결정하여야 성공적인 적용이 될 것이다.

6. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 운영상의 고장데이터 또는 FMEA상에서 확인되어지는 고장유형에 따른 원인의 발생 확률을 이용하여 그 수준을 4가지로 분류하고, 또한 이를 FMEA에 적용시켜 차후 예방정비 계획수립과 고장진단 및 검사 시에 활용할 수 있는 방법을 제시하기 위하여 서울시철도 차량시스템에 포함된 인버터의 감지센서불량의 고장현상에 대한 데이터를 적용하여 고장원인의 확률을 산출하고 원인의 정량적인 수준을 분류하였다. 이러한 결과를 차후 고장 진단 및 검사순서의 최적화 할 수 있는 결정 방법을 수학적 증명을 통하여 예로써 제시하였으며, 이를 통해 유지보수 측면에서 FMEA에 정량적인 고장원인 확률과 수준분류를 적용함으로써 신뢰성 있고 효과적인 고장분석이 가능할 수 있다.

고장 진단 및 검사순서의 결정에 있어서 비용적인 부분을 고려하여야만 실제 유지보수 측면에서 비용 감소에 효과적이 될 수 있다는 사실을 확인 할 수 있었다. 또한, 좀 더 신뢰성 있는 고장원인 확률 산출을 위하여 향후 현장에서의 고장데이터의 기록 및 관리의 방법과 체계가 개선되어야 할 것으로 사료되며, 그러한 데이터를 정확하고 실제 활용할 수 있도록 분석하기 위한 많은 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 박경수(2006), “신뢰도 및 보전공학” , 영지문화사 .
2. Reliability Analysis Center (RAC) (1993), “Failure Mode, Effects and Criticality Analysis" (FMECA)
3. Anthony Mac. Smith (2002), "RCM-Gateway to World Class Maintenance"