

## 최소절단집합과 퍼지이론을 이용한 FMECA 전문가 시스템 Expert System for FMECA Using Minimal Cut Set and Fuzzy Theory

김동진<sup>†</sup> · 김진오\* · 김형철\*\*  
Dong-Jin Kim · Jin-O Kim · Hyung-Chul Kim

**Abstract** Failure Mode Effects and Criticality Analysis (FMECA) is one of most widely used methods in modern engineering system to investigate potential failure modes and its severity upon the system. While performing FMECA, the experts evaluates criticality and severity of each failure mode and visualize the risk level matrix putting those indices to column and row variable respectably. Which results uncertainty in the result. In order to handle the uncertainty and conclude risk level matrix, this paper proposes a new FMECA procedure using minimal cut set (MCS) and fuzzy theory. Severity is calculated by proposed structural importance while criticality is determined by typical equipment failure rate data from IEEE Std 493. Finally, the risk level is compounded of these indices.

**Keywords** : FMECA, MCS, Structural Importance, Fuzzy Expert System

**요** 지 고장모드, 영향 및 임계분석(FMECA)은 시스템의 구성요소가 갖는 잠재적인 고장모드와 각 고장모드가 시스템에 미치는 영향을 평가하는 도구로 활용된다. 일반적으로 FMECA는 관련 전문가들의 의견에 따라 고장모드의 심각도와 치명도를 평가하여 이를 위험도 매트릭스의 양축으로 나타냄으로써 중요한 고장모드에 대한 분석을 수행한다. 그러나 이러한 절차는 평가가 전문가의 주관에 의해 이루어져 결과에 불확실성이 포함될 수밖에 없다. 따라서 본 논문에서는 최소절단집합(MCS)과 퍼지이론을 이용한 새로운 FMECA 절차를 제안한다. 심각도 평가에 있어서는 MCS를 이용함으로써 객관적인 구조적 중요도를 평가할 수 있게 하였고, 치명도의 평가에서는 설비의 대표적인 고장률을 이용하였다. 그리고 두 지수를 종합하기위해 퍼지 전문가 시스템을 구성하여 종합적인 위험도를 평가하였다.

**주요어** : 고장모드 영향 및 임계분석, 최소 절단 집합, 구조적 중요도, 퍼지 전문가 시스템

### 1. 서론

최근 설비 신뢰성 중심의 유지보수 방법으로서 각 설비의 특성 파악과 운용환경에 따른 설비의 고장모드, 영향 및 임계분석(FMECA: Failure Mode, Effect and Criticality Analysis)을 통해 목표한 신뢰도를 유지하기 위한 효율적이고 경제적인 유지보수 방식인 신뢰도 기반 유지보수(RCM: Reliability Centered Maintenance)에 대한 관심이 증대되고 있다[1]. RCM은 시스템의 초기 설계단계에서부터 FMECA를 통하여 서브 시스템내의 설비들에 대한 기능, 고장모드

및 고장의 파급 효과 등을 분석하고 시스템의 기능 유지에 영향을 미치는 정도인 심각도(Severity)와 고장 발생의 빈도의 정도인 치명도(Criticality)를 평가하여 위험도 매트릭스(Risk Level Matrix)를 구성함으로써 효율적인 시스템 구성을 위한 참고 자료를 제공하는 한편, 설비의 특성을 고려하여 기존에 수행되어 오던 유지보수방식을 개선함으로써 시스템의 설계, 운영 및 관리에 있어서 경제성을 확보한다 [2,3].

이처럼 FMECA는 RCM에 있어 핵심적인 단계라 할 수 있으며, 보통 미국방성에서 규정한 MIL-STD-1629A[4]에 기초하여 평가를 수행하고 있다. 그러나 정성적인 평가의 경우 고장모드의 각 지수들의 평가기준이 모호하고 평가자의 주관에 의해 평가가 이루어지기 때문에 해당 시스템에 대한 정확한 평가가 이루어지고 있다고 볼 수 없는 실정이다.

<sup>†</sup> 책임저자 : 정회원, 한양대학교, 전기공학과, 석사과정  
E-mail : gentlebug@hanyang.ac.kr

\* 교신저자 : 정회원, 한양대학교, 전기공학과, 정교수  
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr

\*\* 정회원, 철도기술연구원, 전력연구팀  
E-mail : hckim@krti.re.kr

따라서 본 논문에서는 RCM의 핵심적인 단계라고 할 수 있는 FMECA에서 정의하고 있는 평가 지수들에 대한 실질적인 평가를 위한 방법론을 제안하였다. 심각도의 객관적인 평가를 위해 전체 시스템의 최소절단집합(MCS: Minimal Cut Set)[5,6]을 유도하고 서브시스템이 속해있는 절단집합(Cut Set)의 개수와 차수를 이용하여 전체 시스템 내의 서브시스템이 위치에 따른 구조적 중요도를 계산하는 방법을 제안하였으며, IEEE Std 493의 신뢰도 데이터를 토대로 대표적인 설비의 고장률을 활용하여 치명도를 평가하였다[7]. 또한 기존의 위험도 매트릭스 표현방법에서 탈피하여 두 지수를 운영자의 판단기준에 근거하여 종합적으로 평가하기 위해 퍼지논리를 이용한 전문가 시스템[8,9]을 구성하였다.

사례연구에서는 제안된 FMECA 전문가 시스템을 이용하여 군북 154kV 철도변전소의 설비에 대한 평가를 수행하여 각 설비의 심각도와 치명도를 평가하고 위험도를 결정함으로써 유지보수를 위한 우선순위를 판별하였다.

## 2. 제안된 고장모드, 영향 및 임계분석 방법

### 2.1 심각도 평가(구조적 중요도)

전체 시스템의 구성에 따라 특정 설비는 다른 설비에 비해 시스템의 임무를 수행에 있어 더 중요한 위치에 있게 된다. 즉, 설비의 위치에 따라서 해당 설비의 고장이 시스템 전체의 기능수행에 미치는 정도가 다르다는 것을 의미하는데 이는 FMECA에서의 심각도의 의미와 유사하다.

본 논문에서는 이를 구조적 중요도라 정의하고 식 (1)과 같이 MCS를 활용한 계산방법을 제안한다. MCS는 시스템 전체의 고장을 야기하는 설비들의 최소의 집합을 의미하며 그 수가 많다는 것은 시스템의 취약한 부분이 다수 존재함을 의미하며, 하나의 최소절단집합에 속한 설비의 수가 적을수록 시스템은 불안정하다고 할 수 있다[6].

$$PSI_i = \frac{\sum_{k=1}^{MO} \sqrt{w} \times n_{ik}}{\sum_{k=1}^{MO} n_{ik}} \quad (1)$$

여기서,  $w$ 는 시스템의 고장상태 발생에 대한 효과를 나타내는 수치,  $MO$ 는 시스템의 최소절단집합의 최대 차수,  $n_{ik}$ 는 설비  $i$ 의  $k$ 차 절단집합에 포함된 개수,  $n_k$ 는  $k$ 차에 속해있는 설비의 총 개수,  $PSI_i$ 는 설비  $i$ 의 구조적 중요도를 의미한다.

제안된 방법은 설비가 속해있는 MCS의 차수와 절단집합의 개수에 따라 평가를 수행하며, 설비가 속한 절단집합

의 개수가 많을수록 차수가 작을수록 높은 구조적 중요도를 갖는다. 이 구조적 중요도는 0~10 사이의 값을 갖도록  $w$ 를 설정하여 위치별로 계산된 결과를 설비별로 산술적 평균을 구하여 본 논문에서 제안하는 FMECA 전문가 시스템의 심각도로 활용된다.

### 2.2 치명도 평가

치명도는 설비의 고장이 얼마나 자주 일어나는 가에 대한 평가지표가 되며, 고장빈도 혹은 고장률에 기초하여 평가할 수 있다. 본 논문에서는 IEEE Std 493에 수록되어 있는 설비의 고장률 대표값을 활용하였으며 표 1의 기준에 따라 0~10사이의 값으로 치명도를 평가하였다[4].

Table 1. Criticality Table

CATEGORY	RANK	FAILURE RATE
Extremely Unlikely	0 - 2	$0.0001 < \lambda < 0.001$
Remote	2 - 4	$0.001 < \lambda < 0.01$
Occasional	4 - 6	$0.01 < \lambda < 0.1$
Reasonably Probable	6 - 8	$0.1 < \lambda < 1.0$
Frequent	8 - 10	$1.0 < \lambda$

### 2.3 퍼지 FMECA 전문가 시스템

퍼지집합 이론에 기반으로 퍼지 논리는 인간의 추론 방식을 모델링하는 기법으로서 발전되어 왔다. 퍼지 전문가 시스템은 IF-THEN 규칙을 이용한 시스템으로서 전문가의 판단 논리 구현에 용이한 강점이 있다. 본 논문에서 제안하는 FMECA 전문가 시스템의 기본적인 구성을 그림 1에 나타내었다[9].

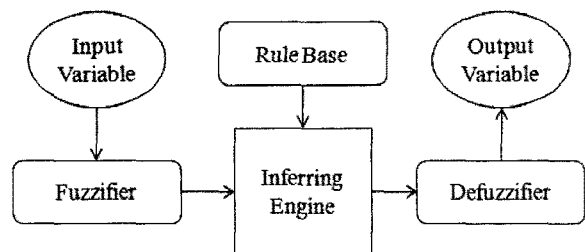


Fig. 1. Fuzzy Expert System

본 논문에서는 FMECA의 평가지수인 심각도와 치명도를 입력변수로 하여 운영자의 판단논리에 따라 설비의 위험도를 판단하는 퍼지 전문가 시스템을 구성하여 FMECA 평가를 위한 전문가 시스템을 구성하고자 한다. 따라서 두 입력변수인 심각도와 치명도의 퍼지공간을 MIL-STD-1629A에서 규정하고 있는 범주에 맞추어 Fig. 2와 3과 같이 설정하였으며, 둘의 조합의 개수인 20개의 위험도 판단

을 규칙기반을 Table 2와 같이 설정하였으며 위험도의 퍼지 변수 공간을 Fig. 4와 같이 설정하였다.

Table 2. Rule Base

	IV	III	II	I
E	Ng	Ng	Lo	Av
D	Ng	Lo	Av	Hi
C	Lo	Av	Hi	Sv
B	Av	Hi	Sv	Dg
A	Hi	Sv	Dg	Dg

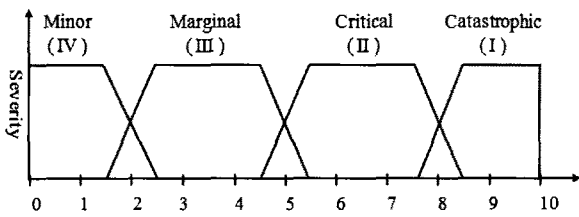


Fig. 2. Membership function for Severity

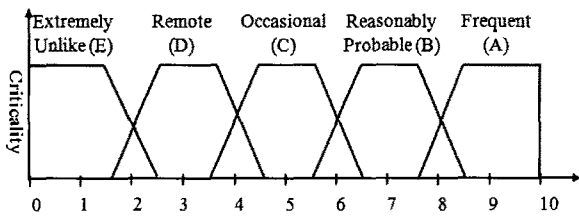


Fig. 3. Membership function for Criticality

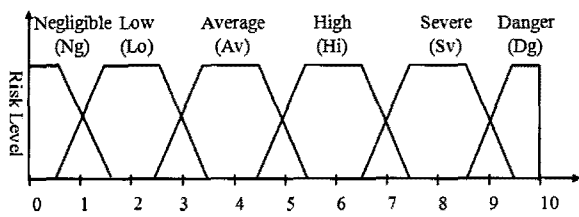


Fig. 4. Membership function for Risk Level

본 논문에서 제안하는 FMECA 절차는 Fig. 5와 같이 요약할 수 있다. 이때, 설비의 위험도를 결정하기 위해 식 (2)와 같이 정의되는 무게중심법을 이용하여 비퍼지화를 수행하게 된다. Fig. 6은 무게중심법의 개념도를 나타내고 있으며, Fig. 6의 음영부분은  $i$ 번째 설비가 속해있는 범주와 그 소속정도를 나타낸다.

$$x_i^{COG} = \frac{\int x \cdot \mu_i(x) dx}{\int \mu_i(x) dx} \quad (2)$$

여기서,  $\mu_i$ 는  $i$ 번째 설비의 도출된 결론의 다각형 형태의 영역을 의미하며  $x$ 는 가로축을 의미한다. 한편  $COG_i$ 는  $i$ 번째 설비의 무게중심을  $x_i^{COG}$ 는  $i$ 번째 설비의 비퍼지화 결과를 의미하는 무게중심의  $x$ 좌표가 된다[10].

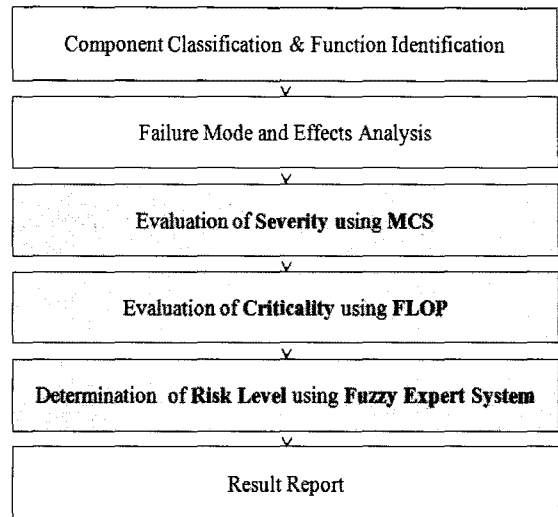


Fig. 5. Proposed FMECA Procedure

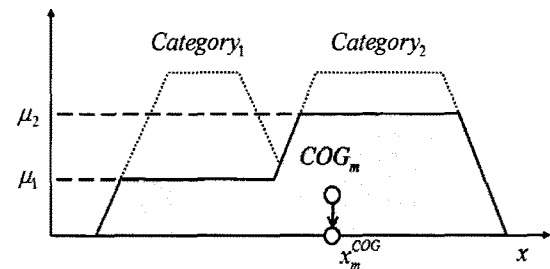


Fig. 6. Concept of Center of Gravity

### 3. 사례 연구

제안된 평가절차의 간략한 기술을 위해 Fig. 7의 군북 154kV 철도변전소의 5가지 주요설비인 주변압기(MT), 단권변압기(AT), 차단기(CB), 단로기(DS), 계전기(PR)에 대해 각 설비는 완벽한 고장에 해당하는 한 가지 고장모드만을 갖는다고 가정하였다. Fig. 7에서 보는바와 같이 MCS유도 및 구조적 중요도의 평가에 용이하도록 인접한 설비를 그룹으로 묶어 A~H의 코드를 부여하였으며, 설비의 심각도를 계산하기 위한 첫 단계로 변전소의 고장을 발생시키는 MCS를 유도하고, 식 (1)을 이용하여 모든 그룹의 위치에 따른 구조적 중요도를 계산하여 Table 3에 나타내었다. 이때  $w$ 는 100으로 설정하였으며 변전소의 26개의 MCS는 다음과 같다.

- {A1, B1}, {A1, B2, B3}, {A1, B4}
- {A2, A3, B1}, {A2, A3, B2, B3}, {A2, A3, B4}
- {A4, B1}, {A4, B2, B3}, {A4, B4}
- {C1, G1}, {C2, G2}, {C1, G2, H1}, {C2, G1, H1}
- {D1, G1}, {D2, G2}, {D1, G2, H2}, {D2, G1, H2}
- {E1, G1}, {E2, G2}, {E1, G2, H3}, {E2, G1, H3}
- {F1, G1}, {F2, G2}, {F1, G2, H4}, {F2, G1, H4}

Table 3. PSI of Group

	2ND	3RD	4TH	PSI		2ND	3RD	4TH	PSI
A1	2	1	0	8.2139	B1	2	1	0	8.2139
A2	0	2	1	4.1485	B2	0	2	1	4.1485
A3	0	2	1	4.1485	B3	0	2	1	4.1485
A4	2	1	0	8.2139	B4	2	1	0	8.2139
C1	1	1	0	7.3208	D1	1	1	0	7.3208
C2	1	1	0	7.3208	D2	1	1	0	7.3208
E1	1	1	0	7.3208	F1	1	1	0	7.3208
E2	1	1	0	7.3208	F2	1	1	0	7.3208
G1	4	4	0	7.3208	G2	4	4	0	7.3208
G2	0	2	0	7.3208	H2	0	2	0	7.3208
H3	0	2	0	4.6159	H4	0	2	0	4.6159

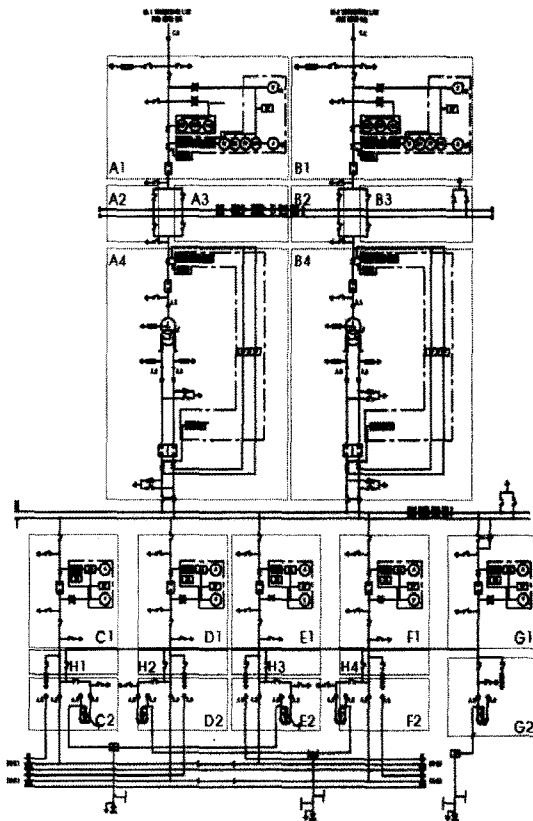


Fig. 7. Gunbuk 154 kV Transformer Substation

또한 Table 3의 결과를 각 그룹에 속해있는 설비의 종류에 따라서 선택적으로 산술평균을 계산하여 설비의 심각도를 결정하였다. 예를 들어 주변압기의 경우, A4, B4의 그룹에 한대씩 속해있으므로 식 (3)에 의해 (8.2139+8.2139)/2=8.2139로 결정된다. 다른 설비에 대해서도 동일한 과정에 의해 심각도를 결정할 수 있으며 이 결과는 표 6에 나타내었다.

$$Severity_i = \sum_{k \in G_i} PSI_k / N_i \quad (3)$$

여기서,  $Severity_i$ 는  $i$ 번째 설비의 심각도를,  $G_i$ 는  $i$ 번째 설비를 포함하는 그룹의 집합을,  $PSI_k$ 는  $k$ 번째 집합의  $PSI$ 를,  $N_i$ 는  $i$ 번째 설비의 총 개수를 의미한다.

치명도의 평가를 위하여 사용된 변전소 설비의 대표적인 고장률과 이 값을 Table 1의 기준에 따라 계산된 치명도 값을 Table 4에 나타내었다. 일부 설비의 경우 고장률이 주어지지 않아 유사한 설비에 맞추어 적절히 가정하여 사용하였다. 해당 범주의 RANK내에서 선형적으로 치명도를 계산한 방식을 Fig. 8과 수식 (4)로 나타내었다.

Table 4. Failure Rate and Criticality

	FAILURE RATE	CRITICALITY
MT	0.0153	4.1178
AT	(0.0153)	4.1178
CB	0.0036	2.5778
DS	0.0061	3.1333
PR	(0.00216)	2.2578

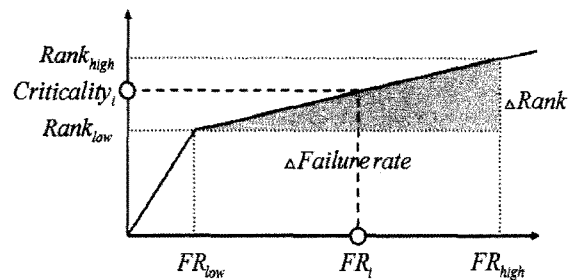


Fig. 8. Proposed FMECA Procedure

$$\frac{Criticality_i - Rank_{low}}{FR_i - FR_{low}} = \frac{\Delta Rank}{\Delta Failure rate} \quad (4)$$

여기서,  $Criticality_i$ 는  $i$ 번째 설비의 치명도를,  $FR_i$ 는  $i$ 번째 설비의 고장률을,  $FR_{high}$ 와  $FR_{low}$ 는 해당 범주의 FR범위의 최댓값과 최솟값을,  $Rank_{high}$ 와  $Rank_{low}$ 는 해당 범주의 RANK의 최댓값과 최솟값을 나타낸다.

다음 단계로 제안된 퍼지 전문가 시스템을 이용하여 앞서 결정된 설비의 치명도와 심각도를 종합적으로 평가한 위험도를 결정한다. 이해를 돕기 위해 주변압기(Severity 8.2139, Criticality 4.1178)에 대한 위험도 결정과정의 논리적인 흐름을 Table 5에 정리하였다.

Table 5에 정리되어 있는 것처럼, 주변압기의 심각도와 치명도는 각각 Critical과 Catastrophic, Remote와 Occasion의 범주에 해당하며, 네 가지 경우에 대한 규칙기반을 적용

하여 위험도의 범주를 결정한다. 이때 위험도의 멤버십 함수 값은 심각도와 치명도의 멤버십 함수 값의 퍼지논리의 최소연산자에 의해 결정된다.

결정된 위험도의 범주를 보면 Average~Severe에 걸쳐있는 것을 확인할 수 있다. 이 결과를 위험도 레벨에 따라 퍼지논리의 최대연산자를 이용하여 모아주게 되면 Table 5의 마지막 열의 결과를 얻을 수 있으며, 끝으로 여기에 비퍼지화를 수행함으로써 주변압기의 위험도를 결정한다. 동일한 과정을 반복하여 다른 설비의 위험도 역시 결정할 수 있으며 Table 6에 결과를 나타내었다. Fig. 9는 주변압기의 위험도 결정과정을 나타낸다.

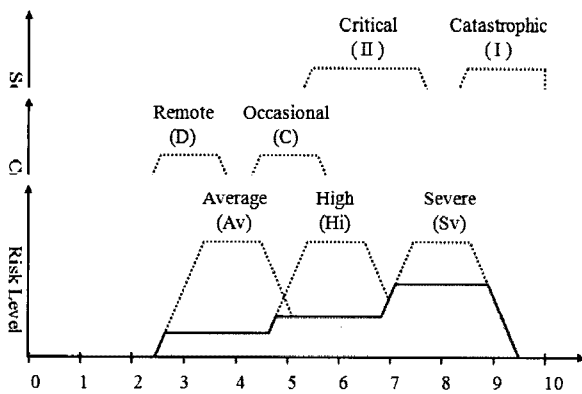


Fig. 9 Fuzzified Conclusion for Risk level (PR)

Table 5. Logical Process for Risk level (MT)

Severity		Criticality		Risk Level		Aggregate	
level	grade	level	grade	level	grade	level	grade
II	0.2861	D	0.3822	Av	0.2861	Av	0.2861
II	0.2861	C	0.6178	Hi	0.2861	Hi	0.3822
I	0.7139	D	0.3822	Hi	0.3822	Sv	0.6178
I	0.7139	C	0.6178	Sv	0.6178		

Table 6. Final Result

	MT	AT	CB	DS	PR
Severity	8.2139	7.3208	7.8080	6.3044	7.7177
Criticality	4.1178	4.1178	4.1689	3.1333	2.2578
Risk Level	6.4838	5.2107	4.6530	4.0000	3.9575

Table 6의 결과를 보면 변전소의 가장 핵심적인 기능을 수행하는 주변압기와 단권변압기가 높은 위험도를 가지는 것으로 평가되고 있는 것을 확인할 수 있다. 다음으로는 고장발생시 설비를 보호하고 부하측으로 고장이 확대되는 것을 방지하는 차단기, 설비의 점검을 혹은 연결 선로를

변경하는데 사용되는 단로기, 전로의 이상전압과 전류를 측정하는 보호계전기 순으로 평가되고 있다. 이렇게 결정된 위험도는 유지보수 업무선정에 참고자료로 활용될 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 기존의 미국방성의 MIL-STD-1629A의 절차에 따라 주관적으로 평가되어 오던 FMECA 각 절차에 대하여, MCS에 기초하여 새롭게 정의한 PSI지수를 심각도 평가에 활용하고, IEEE의 고장률 규격을 활용하여 치명도를 결정하고, 위 두 지수를 종합적으로 평가하기 위한 퍼지 전문가 시스템을 구성하여 군북 154kV 철도변전소에 제안된 FMECA 시스템을 적용하여 유지보수 우선순위를 판별하는 과정을 기술하였다.

본 논문에서 제안한 심각도는 철도변전소의 20여개의 MCS에 대한 분석을 통하여 설비의 위치에 따른 구조적 중요도를 객관적으로 반영하였으며, IEEE Std 493의 대표적인 고장률 값을 이용하여 심각도를 간단하게 평가할 수 있는 방법을 소개하였다. 또한 퍼지이론을 효과적으로 응용하여 전문가 시스템을 구성함으로써 심각도와 치명도를 종합적으로 평가하는 전문가 시스템이 의사 결정자의 관심사에 따라 적절히 대응할 수 있도록 하고 있다.

비록 설비가 한 가지 고장모드만을 갖는다고 가정하여 개개의 고장모드에 대한 분석을 수행하지는 않았으나 이후 고장모드의 데이터가 확보되고, 상세한 고장 메커니즘에 대한연구가 진행된다면 더욱 자세한 고장모드별 평가가 가능하여 질 것이며, 더욱 정확한 설비의 위험도평가가 이루어질 수 있을 것이다.

본 논문에서 제안한 FMECA 평가 시스템은 철도변전소와 같은 전력설비에 특화되어 있는 제한적인 방법론이 아닌 다양한 분야에 적용가능하다는 넓은 활용가능성을 갖고 있다.

#### 참고 문헌

1. John Moubray(1999), "Reliability-Centered Maintenance," 2nd Edition, Butterworth-Heinemann.
2. Neil Bloom(2005), "Reliability-Centered Maintenance (RCM)," McGraw-Hill.
3. Lewis, E.E.(1995), "Introduction to Reliability Engineering," 2nd Edition, Wiley.
4. MIL-STD 1629A, "Reliability-Centered Maintenance," US Dept. of Defense, Washington DC 20301.
5. Marvin Rausand, Arnljot Hoyland(2004), "System Reliability

- Theory : Models, Statistical Methods, and Applications,” 2nd Edition, Wiley.
6. Billinton, R. and Allen, R.N.(1983), “Reliability Evaluation of Engineering Systems : Concepts and Techniques,” 2nd Edition, Longman Scientific & Technical.
  7. IEEE Std 493.(1997), “IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems”.
  8. Zadeh, L.A.(1992), “The calculus of fuzzy if/then rules,” AI Expert, Vol 7, pp. 23-27.
  9. Moti Schneider(1996), “Fuzzy expert system tools,” Wiley.
  10. David J. McGill(1985), “Engineering Mechanics : An Introduction to Statics and Dynamics,” PWS Engineering.
- 접수일(2008년 8월 29일), 수정일(2009년 3월 30일),  
게재확정일(2009년 4월 30일)