

## 결함수분석법과 퍼지논리를 이용한 FMECA 평가

### FMECA using Fault Tree Analysis (FTA) and Fuzzy Logic

김동진<sup>†</sup> · 신준석\* · 김형준\* · 김진오\* · 김형철\*\*

Dong-Jin Kim · Jun-Seok Shin · Hyung-Jun Kim · Jin-O Kim · Hyung-Chul Kim

#### Abstract

Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMECA) is an extension of FMEA which includes a criticality analysis. The criticality analysis is used to chart the probability of failure modes against the severity of their consequences. The result highlights failure modes with relatively high probability and severity of consequences, allowing remedial effort to be directed where it will produce the greatest value. However, there are several limitations. Measuring severity of failure consequences is subjective and linguistic. Since The result of FMECA only gives qualitative and quantitative informations, it should be re-analysed to prioritize critical units. Fuzzy set theory has been introduced by Lotfi A. Zadeh (1965). It has extended the classical set theory dramatically. Based on fuzzy set theory, fuzzy logic has been developed employing human reasoning process. IF-THEN fuzzy rule based assessment approach can model the expert's decision logic appropriately. Fault tree analysis (FTA) is one of most common fault modeling techniques. It is widely used in many fields practically. In this paper, a simple fault tree analysis is proposed to measure the severity of components. Fuzzy rule based assessment method interprets linguistic variables for determination of critical unit priorities. An rail-way transforming system is analysed to describe the proposed method.

#### 1. 서론

신뢰도 기반 유지보수(Reliability Centered Maintenance)는 설비 신뢰성 중심의 유지 보수 방법으로서 각 설비의 특성 파악과 운용 환경에 따른 설비의 고장모드 분석 및 임계해석(FMECA) 평가를 통해 목표한 신뢰도를 유지하기 위한 가장 효율적이고 경제적인 유지보수계획을 수립하는 것을 목표로 하고 있다[1].

FMECA는 고장내역 및 전문가의 자문을 토대로 고장모드 및 설비에 대한 치명도(Criticality)와 심각도(Severity)에 대한 평가를 한다. FMECA 평가결과를 이용하면 높은 고장률과 심각한 결과를 초래하는 고장모드 혹은 설비에 대

한 확인을 할 수 있으며, 보수/진단을 위한 가치 평가를 할 수 있다[2].

그러나 기존의 FMECA의 평가방법에서는 전문가의 주관적인 판단하에 심각도를 결정하기 때문에 다소 주관적인 요소가 개입되어 평가된다. 따라서 본 논문에서는 철도계통의 변전소의 대표적인 설비에 대한 고장률을 가정하여 각 설비의 치명도를 계산하고 주관에 의해 결정되어지던 설비의 심각도에 대한 평가는 결함 수목도(Fault tree)와 최소 절단집합(Minimal Cut set)을 응용한 지수인 구조적 중요도(Structural Importance)를 제안하고, 이를 이용하여 변전소내의 설비에 대한 심각도를 평가하였다[3].

마지막으로 Fuzzy Expert System을 모델링하여 FMECA의 결과인 치명도와 심각도를 종합적으로 평가하여 각 설비의 유지보수 우선순위를 결정하였다.[4-6]

<sup>†</sup>김동진, 정희원, 한양대학교, 전기공학과  
E-mail : gentlebug@hanyang.ac.kr  
TEL : (02)2220-0347 FAX : (02)2297-1569  
\*한양대학교, 전기공학과  
\*\*철도기술연구원

## 2. FTA를 이용한 심각도 평가

유지보수시 각 설비의 특성 및 기능을 파악해야만 정확한 유지보수가 가능하다. 이에 고장모드 및 임계분석(FMECA)은 신뢰도 기반 유지보수(RCM) 계획수립에 중요한 자료로 사용된다. 일반적인 FMECA 평가절차는 다음과 같다.

- 1) 정의 및 기능블록도
- 2) 고장모드 및 원인분석
- 3) 고장영향 및 심각도 평가
- 4) 치명도 평가

심각도는 각 설비가 시스템 전체에 미치는 영향력을 전문가의 평가에 따라 부여하는 값이며 평가 기준의 예를 표 1에 나타내었다.

표 1. 심각도의 범주와 기준

범주	기준
Minor	임무수행능력에 영향을 미치지 않음 기능적 결함에 무시해도 좋은 영향
Major	임무수행능력에 무시해도 좋은 영향 기능적 결함에 약간의 영향
Critical	임무수행능력의 다소간의 저하 기능적 결함에 심각한 영향
Catastrophic	임무수행능력의 심각한 저하 완전한 기능적 결함

본 논문에서는 심각도를 결정하는 데 있어서 주관적인 요소를 줄이고 객관적인 평가를 위한 지수로 Structural Importance(S.I.)를 제안한다.

S.I.를 계산하기 위해 결합 수목도의 구성과 최소 절단집합의 유도가 요구된다. 결합 수목도는 복잡한 구성의 시스템의 고장과정 및 고장의 파급 효과에 대한 질적/양적 평가를 위하여 구성하는 다이어그램으로 오늘날에도 신뢰도연구에 있어서 많이 쓰이는 기법중의 하나이다. 결합수목도의 구성의 예를 그림 1에 나타내었다.

절단집합(Cut Set)은 고장났을 때 시스템 전체의 고장을 야기하는 설비들의 집합이다. 최소 절단집합을 토대로 시스템 구성에 따른 각 설비의 구조적 중요도를 정의하며 이는 식 (1)과 같이 계산한다.

$$SI_j = \frac{\sum_{i=1}^{M.O.} i\sqrt{w} \times N_{ij}}{\sum_{i=1}^{M.O.} N_{ij}} \quad (1)$$

여기서,  $w$ 는 Top Event의 발생에 대한 효과의 수치,  $M.O.$ 는 최소절단집합의 최대 차수,  $N_{ij}$ 는 설비  $j$ 의  $i$ 차 절단집합에 포함된 개수,  $SI_j$ 는 설비  $j$ 의 구조적 중요도를 의미한다.

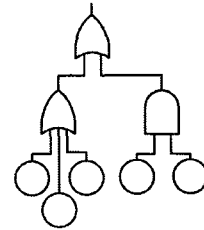


그림 1. 결합 수목도의 개념

## 3. 퍼지논리를 이용한 우선 순위 결정

설비 종류 별 치명도와 심각도의 종합적인 평가를 통한 우선순위 결정을 위하여 Fuzzy Expert System을 모델링한다. 이는 전문가의 판단논리에 따라 발전된 퍼지이론의 한 갈래로 입력 데이터를 경험적 사고에 의한 퍼지-룰에 적용하여 판단한 결과를 보여준다. 그림 2에 Fuzzy Expert System의 개념도를 나타내었다.

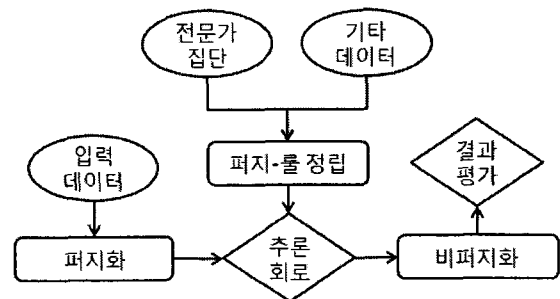


그림 2. Fuzzy Expert System

Expert System의 모델링에 있어 퍼지화는 합성에 의한 직접법을 사용하였으며 비퍼지화는 'Weighted Mean of Maximum'기법을 사용하였

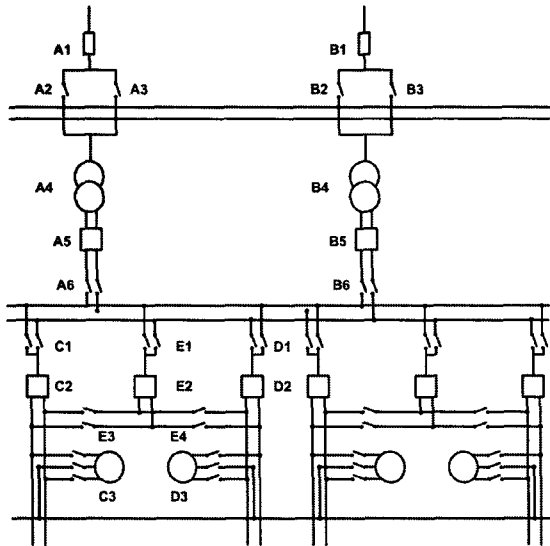
으며 식 (2)에 이를 나타내었다.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

여기서, Z는 비퍼지화 된 단일값, n은 결과가 속한 범주의 개수, w는 각 범주에 해당하는 멤버십 함수값, x는 각 범주의 최대값을 의미한다.

#### 4. 사례 연구

사례연구에 이용된 철도 변전소의 간소화된 모델을 그림 3에 나타내었다. 각 설비의 치명도는 가정된 고장률 λ를 토대로 계산되었으며 심각도는 앞서 제안한 S.I.로 대신하였다. 치명도의 평가에 대한 기준은 표 2에 나타내었다.



차단기 A1, A5, B1, B5, C2, D2, E2  
 단로기 A2, A3, A6, B2, B3, B6, C1, D1, E1, E3, E4  
 스코트변압기 A4, B4  
 단권변압기 C3, D3

그림 3. 변전소 모델

가정된 고장률에 따라 평가된 치명도와 제안된 방법에 따라 S.I.를 계산하여 결정한 심각도를 설비의 종류별로 표 3에 나타내었다.

치명도와 심각도의 결과를 Fuzzy Expert

System을 이용하여 종합적으로 평가한다. 추론에서 사용될 심각도에 대한 범주를 표 1의 기준에 맞추어 4개로 구분하였으며 치명도에 대한 범주는 표 2를 기준으로 구분하였다. 그리고 각 변수에 대한 멤버십함수는 그림 4와 같이 사다리꼴로 가정하였다. 여기서 Unit Imperativeness(U.I.)는 치명도와 심각도를 통해 판단한 결과를 위한 퍼지 변수이다. 추론을 위해서는 총 16개의 퍼지-룰이 요구되며 다음과 퍼지-룰을 가정하여 진행하였다.

- Rule01: if Cr=Poor, Sev=Minor then UI=Low
- Rule02: if Cr=Poor, Sev=Major then UI=Low
- Rule03: if Cr=Poor, Sev=Critical then UI=Possible
- Rule04: if Cr=Poor, Sev=Catastrophic then UI=Possible
- Rule05: if Cr=Remote, Sev=Minor then UI=low
- Rule06: if Cr=Remote, Sev=Major then UI=Possible
- Rule07: if Cr=Remote, Sev=Critical then UI=Possible
- Rule08: if Cr=Remote, Sev=Catastrophic then UI=Substantial
- Rule09: if Cr=Average, Sev=Minor then UI=Possible
- Rule10: if Cr=Average, Sev=Major then UI=Possible
- Rule11: if Cr=Average, Sev=Critical then UI=Substantial
- Rule12: if Cr=Average, Sev=Catastrophic then UI=Substantial
- Rule13: if Cr=Frequent, Sev=Minor then UI=Possible
- Rule14: if Cr=Frequent, Sev=Major then UI=Substantial
- Rule15: if Cr=Frequent, Sev=Critical then UI=Substantial
- Rule16: if Cr=Frequent, Sev=Catastrophic then UI=High

Fuzzy Expert System의 추론 결과(U.I.)를 설비 종류별로 표 4에 나타내었다. 또한 표 4에서처럼 U.I.를 통하여 설비별 우선순위를 결정할 수 있다.

표 2 치명도 범주와 기준

범주	기준
Poor	$\lambda < 10^{-8}$
Remote	$10^{-7} < \lambda < 10^{-5}$
Average	$10^{-4} < \lambda < 10^{-2}$
Frequent	$\lambda < 10^{-1}$

표 3. 설비별 치명도(Cr) 와 심각도(Sev)

	Cr	Sev
차단기	9.780	2.656
단로기	4.213	2.961
스코트변압기	3.480	2.422
단권변압기	8.247	10.000

표 4. Unit Imperativeness 와 우선순위

Rule	UI	Rank
차단기	5.656	2
단로기	2.807	3
스코트변압기	2.422	4
단권변압기	7.449	1

## 참고 문헌

1. J, Moubra. (1995). "Reliability-Centered Maintenance", Butterworth-Hinemann.
2. MIL-STD 1629A, Reliability-Centered Maintenance, US Department of Defense, Washington DC 20301.
3. Roy Billinton. "Reliability Evaluation of Engineering Systems", Springer.
4. Moti Schneider. (1996). "Fuzzy expert system tools", Wiley
5. John B. Bowles, C. Enrique Pela'ez. (1995). "Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis" Reliability Engineering and System Safety, Vol. 50, Issue 2, pp.203-213.
6. Zadeh L.A. (1992). "The calculus of fuzzy if/then rules." AI Expert, vol 7, pp.23-27.

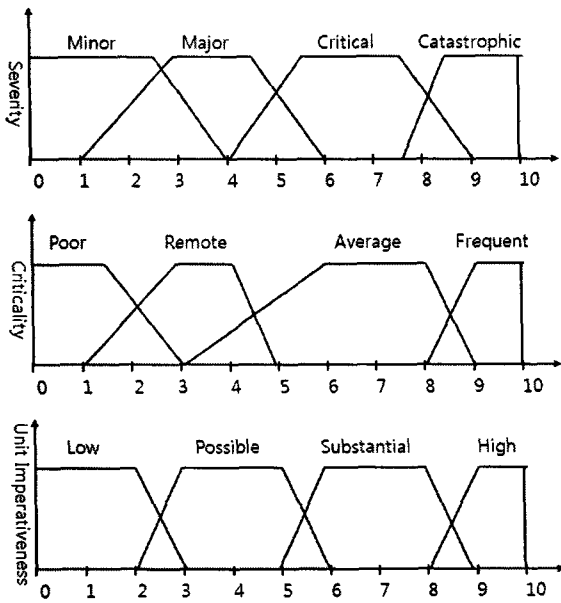


그림 4. 각 변수의 멤버십함수

## 4. 결론

본 논문에서는 신뢰도기반 유지보수를 위한 FMECA평가에 있어서 시스템 구조적인 측면에 대한 평가방법을 제안하여 심각도를 계산하고, 치명도와 심각도의 결과를 퍼지추론을 이용하여 각 설비의 유지/보수 우선순위를 결정하였다.

제안된 방법을 사용하면 FMECA의 심각도 평가에 있어서 포함될 수 있는 주관적인 요소를 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 해당 설비의 심각도와 치명도를 비교적 간단하게 종합적으로 평가할 수 있다.