

퍼지이론과 전문가 시스템을 이용한 철도 전력 설비의 고장률 평가와 유지보수 우선순위의 결정

Estimation for Failure Rate of Railway Power Facility and Determination of Maintenance Priority Order using Fuzzy Theory and Expert System

이윤성* 권기량* 김진오† 김형철**
Lee, Yun-Seong Kwon, Ki-Ryang Kim, Jin-O Kim, Hyung-Chul

ABSTRACT

As the Reliability Centered Maintenance(RCM) is being studied, maintenance tasks can be performed effectively through the Risk Priority Number(RPN) evaluation about the components in the system. The RPN is usually calculated through arithmetical operations of three values, Severity, Occurrence, and Detection for each facility. This RPN provides information that includes risk level of the facility and the priority order of maintenance tasks for facility. However, if there is no sufficient historical failure data, it is difficult to calculate the RPN. In this case, historical failure data from other sources can be used and apply this data to korean railway system. In this paper, it is proposed that a new methodology to model the failure rate as a fuzzy membership function. This method is based on failure data from other sources by means of the fuzzy theory and the expert opinion system. And considering assessment tendency of each expert, distortions that happened when the failure rate of facilities is estimated were minimized. This results determine Occurrence values of facilities. Taking advantage of this result, the RPN can be calculated with Severity and Detection of facilities by using the fuzzy operation. The proposed method is applied the rail-way power substation.

1. 서 론

신뢰도 기반 유지보수(Reliability Centered Maintenance)의 연구가 진행됨에 따라 설비의 신뢰도를 바탕으로 한 효율적인 유지보수 업무가 가능하게 되었다[1]. Risk Priority Number(RPN)는 시스템을 구성하고 있는 설비에 대한 Severity(S), Occurrence(O), Detection(D)을 각각 평가하고 이를 하나의 통합된 수치로 표현함으로써 설비간의 유지보수 우선순위에 관한 정보를 제공한다[2]. 여기서 Severity는 고장의 심각도를 의미하고, Occurrence는 고장의 빈도수, Detection은 고장의 탐지 가능성을 의미한다. 하지만 철도 전력 설비와 같이 통계적인 고장 데이터가 부족하거나 신뢰성이 떨어지는 경우에는 이들의 평가가 객관적으로 이루어지기 어렵다. 그리고 기존의 RPN의 계산은 주로 1~10 사이의 수치로 각각 평가된 S, O, D 값들을 단순히 산술적으로 곱하는 것이다. 하지만 이러한 방법은 S, O, D가 각각 5, 4, 4로 평가된 설비와 7, 10, 1로 평가된 설비의 RPN이 각각 80과 70으로 계산되어 전자의 설비의 유지보수 우선순위가 후자의 설비보다 높다는 데서 문제가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 설비의 Occurrence를 평가하

† 책임저자 : 정회원, 한양대학교, 전기제어생체공학부, 교수
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0347 FAX : (02)2220-1856

* 정회원, 한양대학교 대학원, 전기공학과

** 정회원, 철도기술연구원

기 위해 퍼지 이론을 이용한 고장률 평가 방법을 제시하고, 객관적인 Severity와 Detection 평가를 이용하여 Risk Priority Number를 계산하는 새로운 방법을 제시한다.

2. Risk Priority Number

Risk Priority Number(RPN)는 설비의 유지보수 우선순위를 결정하기 위해 평가하는 수치로써 1~10사이의 값으로 설비의 Severity, Occurrence, Detection에 관한 평가를 함으로써 이루어진다.

2.1 Severity 평가

본 논문에서의 철도 전력 시스템의 각 설비에 대한 Severity는 고장수목도(Fault Tree)를 이용하여 설비의 구조적 중요도를 분석하여 평가하였다. 철도 전력 시스템의 각 구성요소를 고장수목으로 나타내고 최소절단집합(Minimal Cut set)을 구하여 각 설비가 전체 시스템에 미치는 영향을 평가하는 것이다[3]. Severity는 식 (1)과 같이 계산한다.

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

여기서, w 는 고장 발생에 대한 효과 수치, $M.O.$ 는 최소절단집합의 최대 차수, N_{ij} 는 설비 i 의 j 차 절단집합에 포함된 개수를 나타낸다.

2.2 Occurrence 평가

설비의 Occurrence는 고장률을 바탕으로 평가할 수 있으므로, 먼저 설비의 고장률에 대한 결정이 이루어져야 한다. 하지만 철도 전력 설비의 고장 데이터가 충분치 않거나 데이터의 신뢰성이 부족한 경우, 외부의 다른 시스템의 고장 데이터를 차용하여 사용해야 한다. 이 때 차용한 시스템과 자 시스템과의 특성 차이, 운행 조건 차이, 또는 고장 데이터의 불확실성 등의 이유로 전문가 의견 시스템을 통한 데이터의 가공 과정을 거쳐야 한다. 전문가의 의견이 고장률에 반영될 경우에는 특정 전문가의 극단적인 평가 성향이 고장률 평가 값에 심한 왜곡을 불러일으킬 수가 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 전문가 성향을 반영하는 전문가 평가 매트릭스를 이용한 고장률 결정 방법을 제시하고, 앞서 언급한 불확실성을 나타내기 위한 고장률의 퍼지 함수 표현 방법을 제시한다.

2.2.1 전문가 평가 매트릭스

철도 전력 설비 전문가들은 시스템을 구성하고 있는 설비들에 대해 실제로 고장이 얼마나 빈번하게 발생할 지를 업무경험이나 설비의 노화상태, 운영 방식, 기술 수준 등을 근거로 하여 고장 데이터를 차용한 해당 외부 설비와의 비교 분석을 통해 자 시스템의 설비의 고장률 예측을 위한 평가 수치를 결정한다. 이 수치를 취합하여 하나로 구성한 것을 전문가 평가 매트릭스, X 라 정의하고, 매트릭스의 행(row)에는 설비의 종류가, 매트릭스의 열(column)에는 각각의 전문가를 나타낸다.

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1j} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2j} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ X_{i1} & X_{i2} & \cdots & X_{ij} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, i 는 설비 종류를, j 는 전문가를 나타낸다. 전문가들은 다른 외부 설비 데이터로부터 획득한 고장 데이터와 비교하여, 수치 5를 기준으로 1~10 사이의 수치로써 철도 전력 설비의 고장률을 평가하게 된다. 외부 데이터와 비교하여 더 높은 고장률이 예상된다면 기준 5보다 높은 수치를, 더 낮은 고장률이 예상된다면 기준보다 낮은 수치를 책정하게 된다.

이 때, 전문가들이 철도 전력 설비에 대해 주관적 견해를 가지고 설비의 고장률에 대한 평가를 하는데, 전문가들의 평가 성향에 따라 평가 결과가 왜곡될 수 있다는 문제점이 있다. 예를 들어, 특정 전문가가 평가를 하려는 모든 전력 설비에 대해 편차가 거의 없도록 평가를 했다면 다른 전문가들에 의해 상대적으로 낮거나 높은 평가를 받은 설비는 특정 전문가에 의해 고장률이 평가절상 또는 평가절하 된다는 것이다. 반대로 평가의 편차를 크게 두는 평가 성향을 가지는 전문가의 의견도 같은 이유로 왜곡을 발생시킨다. 이것은 평가를 하는 전문가의 입장에서 생각해 볼 수 있지만, 평가를 받는 설비의 입장에서 고려해야 한다. 대부분의 낮은 고장률 평가를 받은 설비가 있을 때, 소수의 전문가들의 편차가 낮은 평가 성향으로 인해 평가 결과가 상향 조정될 우려가 있다.

이러한 논리를 바탕으로 고장률 예측을 위한 전문가 평가 매트릭스를 보정할 수 있는 새로운 매트릭스, ΔX 가 존재해야 하고, 전문가 성향을 반영한 보정치 매트릭스의 요소, Δx 를 구하는 방법을 다음과 같이 제안한다.

$$\Delta x = \frac{\sigma_j}{\rho_i} \times \frac{x_{ij} - m_{x_i}}{n}$$

(3)

여기서, Δx 는 ΔX 의 구성 요소, σ_j 는 X 의 j 열 요소들 간의 표준 편차, ρ_i 는 X 의 i 행 요소들 간의 표준 편차, x_{ij} 는 X 의 i 행, j 열 구성 요소, m_{x_i} 는 X 의 i 행 요소들의 산술 평균, n 은 전문가 수를 의미한다. 식 (3)에서 σ_j 는 전문가의 성향을 대변하는 표준편차이고, ρ_i 는 평가받는 설비에 대한 평가치의 표준편차이다. σ_j 가 큰 전문가, 즉 평가치의 편차가 큰 전문가의 평가는 상향조정이 된다. 반면 해당 전문가의 평가가 편차가 큰 평가 성향으로 인해 특정 설비에서 다른 전문가에 비해 상대적으로 크거나 작은 평가가 매겨졌다면, ρ_i 로 인해 평가가 다시 하향조정 된다.

표준편차 자체로는 실제적인 평가 수치의 크기를 반영하고 있지 않으므로, 하나의 설비에 대한 각각의 평가 수치와 그 설비에 대한 평가 수치의 산술 평균과의 차이를 곱함으로써 전체적인 보정치의 크기를 결정하게 된다. 그리고 전문가의 수가 많아질수록 특정 전문가의 성향에 따른 결과 값의 왜곡 정도가 감소하게 되므로, 앞서 고려한 보정치의 크기를 전문가의 수로 나누어 줌으로써 최종적인 보정식이 결정된다.

전문가 성향을 반영한 보정치 매트릭스, ΔX 는 각 전문가의 성향에 따라 양수 또는 음수의 값으로 이루어진 매트릭스으로써, 처음의 전문가 평가 매트릭스, X 에 더하여 보정된 전문가 평가 매트릭스, X_{rev} 를 구할 수 있다.

$$X_{rev} = X + \Delta X \quad (4)$$

여기서, 보정된 전문가 평가 매트릭스, X_{rev} 의 요소의 범위는 0~10 사이이므로, 10이상의 수치는 10으로 나타낸다.

2.2.2 전문가 가중치 벡터

전력 설비의 고장률을 평가하는 전문가들은 각기 다른 실무 경험과 평가 대상에 대한 직무 상관성이 다르기 때문에 이들의 평가치를 차등화 하여 반영할 필요가 있다. 따라서 고장률 산정을 위한 전문가 별 가중치 또한 고려하여야 한다. 전문가 별 가중치를 계산하기 위해 전문가들의 직위, 근로년수, 교육수준,

연령 등의 지표를 고려할 수 있고, 이에 따른 차등화된 점수를 나타낼 수 있고[4], 이를 식 (5)과 같은 벡터로 표시한다.

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, n 은 전문가 수, w_n 는 전문가 별 가중치로써 해당 전문가의 점수 합 / 모든 전문가들의 점수 합으로 구한다.

2.2.3 고장률 평가 지수 벡터

전문가의 평가 수치에 해당 전문가의 가중치를 부여하기 위해, 식 (3)에서 적의한 전문가 별 가중치 벡터, W 를 보정된 전문가 평가 매트릭스, X_{rev} 에 곱함으로써 최종적인 고장률 평가 지수 벡터, X_{new} 를 구할 수 있다.

$$X_{new} = X_{rev} \times W \quad (6)$$

고장률 평가 지수 벡터는 평가를 시행한 설비의 수만큼의 행이 존재하는 벡터이다. 벡터를 구성하는 각각의 수치는 외부 출처로부터 얻은 고장률 데이터를 자 철도 전력 설비에 그대로 적용할 수 있는지 혹은 더 높거나 더 낮은 고장률이 예상되는 지를 표현한 것이다. 이 수치는 전문가의 평가 성향을 고려하였을 뿐만 아니라, 평가를 시행한 전문가의 직위, 학력, 연령 등의 분류를 통해 차등화 한 점수로 계산된 전문가 별 가중치도 함께 고려되었다. 즉, 고장률 평가 지수 벡터는 설비의 최종적인 고장률 예측을 위한 평가 수치를 의미한다.

2.2.4 고장률의 퍼지 함수 표현

고장 데이터의 불확실성을 나타내고, 퍼지 연산을 이용한 RPN 계산을 위해 고장률을 퍼지 함수로 표현해야 하고, 이를 위해 그림 1과 같은 퍼지 소속 함수를 구성하였다.

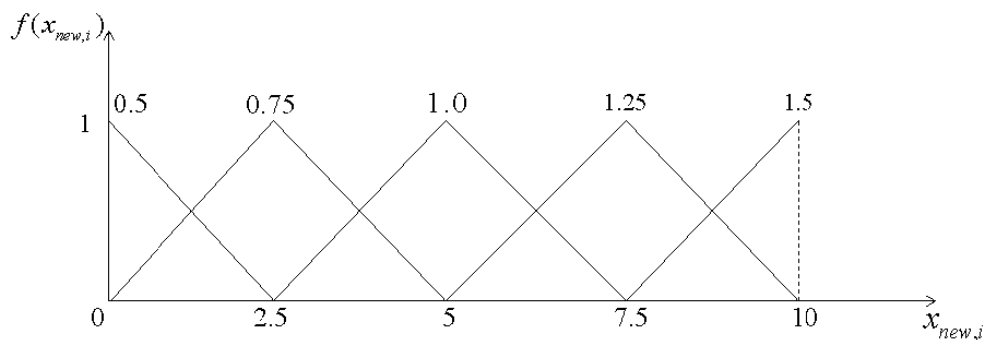


그림 1. 고장률 평가를 위한 퍼지 소속 함수

설비 별 고장률 평가 지수 벡터, X_{new} 를 이용하여 고장률을 퍼지 함수로 표현하는 방법은 식 (7) ~ 식 (9)을 따른다. 고장률을 퍼지 함수로 표현할 때 그 중심 값은 식 (5)에 의해 결정된다.

$$\lambda_c = c_1 f_{c1}(x_{new,i}) + c_2 f_{c2}(x_{new,i}) \quad (7)$$

여기서, λ_c 는 고장률 퍼지 함수의 중심값, $x_{new,i}$ 는 설비 별 고장률 평가 지수, c 는 퍼지 소속 함수 관계식 가중 지수(0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5)이다.

고장률을 퍼지 함수로 표현함에 있어서, lower limit과 upper limit을 결정하기 위해 하나의 고장률 평가 지수에 대해 두 개의 퍼지 소속 함수 값이 나오게 된다. 식 (7)에서의 두 항 $c_1 f_{c1}(x_{new,i})$ 와 $c_2 f_{c2}(x_{new,i})$ 는 각각 고장률 퍼지 함수의 lower limit과 upper limit에 대한 불확실성의 크기를 내포하고 있다. 따라서 이 값을 더함으로써 불확실성을 고려한 예측된 고장률의 크기로써 중심 값을 나타냈다.

그리고 고장률 퍼지 함수의 lower limit과 upper limit은 식 (8)과 식 (9)에 의해 계산한다.

$$l = \lambda_c - \frac{\rho_i \times \min\{c_1, c_2\}}{n'} \quad (8)$$

$$u = \lambda_c + \frac{\rho_i \times \max\{c_1, c_2\}}{n'} \quad (9)$$

여기서, l 은 고장률 퍼지 함수의 lower limit, u 는 고장률 퍼지 함수의 upper limit, ρ_i 는 X 의 i 행 요소들 간의 표준 편차, n' 는 전문가 수에 따른 계수이다.

식 (8)과 식 (9)에서의 l 과 u 는 각각 고장률 퍼지 함수의 lower limit과 upper limit를 나타낸다. 이것은 고장률의 불확실성을 표현하기 위해 설정되는 값으로 고장률 퍼지 함수의 중심 값으로부터의 거리를 의미한다. 예측 고장률 값이 클수록 그 값이 수반하는 불확실성도 커지고, 반대로 예측 고장률 값이 작을수록 수반하는 불확실성이 작으므로, lower limit은 퍼지 소속 함수 관계식 가중 지수 값 중에서 작은 값에 의해 결정되며 마찬가지로 upper limit은 퍼지 소속 함수 관계식 가중 지수 값 중에서 큰 값에 의해 결정된다. ρ_i 는 전문가 평가 매트릭스, X 의 i 행 요소들 간의 표준편차로써 하나의 설비에 대한 전문가들의 평가의 분산 정도를 나타내는 값으로 퍼지 소속 함수 관계식 가중 지수 값에 곱해짐으로써 그 정도를 반영하게 된다. 하나의 설비에 대한 전문가들의 평가의 편차가 크다면 해당 설비에 대한 고장률의 불확실성도 크다는 것을 의미하므로, 이것이 고장률 퍼지 함수의 lower limit과 upper limit을 결정하는 데 ρ_i 를 고려해야 하는 근거가 된다. n' 는 전문가 수에 따른 계수로써 전문가의 수가 많을수록 불확실성은 감소하게 되므로, 계산 과정에서 이를 반영하였다. n' 는 표 1에 따라 결정된다.

표 1. 전문가 수에 따른 계수 결정표

전문가의 수(n)	n'
1~3명	1.5
4~6명	2
7~10명	2.5
10명 이상	3

식 (7) ~ 식 (9)로부터 λ_c , l , u 를 구하면, 그림 2와 같이 고장률을 불확실성을 반영한 퍼지 함수로 표현할 수 있다. 외부 출처로부터 얻은 설비의 고장률이 λ 라고 할 때, 예측 고장률은 $\lambda_c \cdot \lambda$ 라는 것에 대한 소속 함수 값이 1이고, 그 주위로 $\pm \frac{1-f(\lambda_A)}{\lambda_c - \lambda_A}$ 의 기울기를 가지며 분포한다는 것을 의미한다.

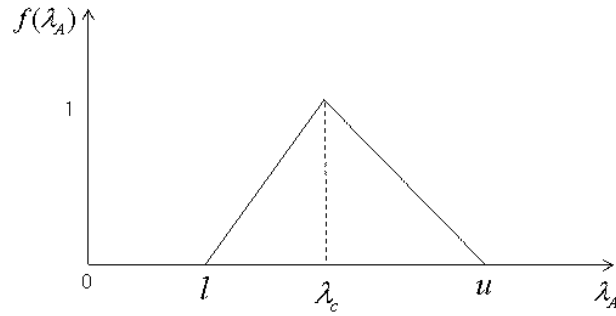


그림 2. 고장률의 퍼지 함수 표현

본 논문에서 설비의 유지보수 우선순위 산정을 위한 RPN 계산에 필요한 Occurrence 평가를 위하여 예측 고장률, $\lambda_c \cdot \lambda$ 를 표준화 하는 과정을 거친다.

$$Occurrence_i = 5 + \frac{\lambda_{c,i} \cdot \lambda_i - m_o}{\sigma_o} \quad (10)$$

여기서, $\lambda_{c,i} \cdot \lambda_i$ 는 설비 i 의 예측 고장률, m_o 는 평가 대상 설비의 예측 고장률의 산술평균, σ_o 는 평가 대상 설비의 예측 고장률의 표준편차이다.

2.3 Detection 평가

Detection은 설비 고장의 탐지 가능성을 평가하는 것으로, 고장이 발생하고 나서 수리가 이루어지기 까지 경과되는 평균 지연 시간으로써 구할 수 있다. 이 때 식 (11)과 같이 표준화 하는 과정을 거친다.

$$Detection_i = 5 + \frac{T_i - m_d}{\sigma_d} \quad (11)$$

여기서, T_i 는 설비 i 의 평균 지연 시간, m_d 는 평가 대상 설비의 평균 지연 시간의 산술평균, σ_d 는 평가 대상 설비의 평균 지연 시간의 표준편차이다.

2.4 Risk Priority Number의 계산

퍼지 연산을 이용한 RPN 계산을 위해, 먼저 Severity와 Detection 평가치를 결합하여 퍼지 함수로 나타낸다. 이 과정을 식 (12)에 나타내었다.

$$C_{S,D} = \frac{Severity + Detection}{2} \quad (12)$$

$$l_{S,D} = \min[Severity, Detection]$$

$$u_{S,D} = \max[Severity, Detection]$$

여기서, $C_{S,D}$ 는 Severity와 Detection 평가를 결합한 퍼지 함수의 중심 값, $l_{S,D}$ 과 $u_{S,D}$ 는 Severity와 Detection 평가를 결합한 퍼지 함수의 각각 lower limit과 upper limit을 나타낸다.

2.2에서 구한 Occurrence 평가 퍼지 함수와 식 (12)에서 구한 Severity와 Detection 평가를 결합한 퍼지 함수를 통합하는 과정은 α -cut 연산을 이용하고[5], 통합된 퍼지 함수의 무게 중심의 가로축 좌표 값을 해당 설비의 RPN으로 결정하였다.

3. 사례연구

본 논문에서 제안하는 철도 전력 설비의 고장률 평가와 유지보수 우선순위의 결정을 위해 그림 3과 같은 철도 변전소 모의 계통을 구성하였다. 그림 3의 철도 변전소 모의 계통에 대한 고장 수목도는 그림 4와 같다.

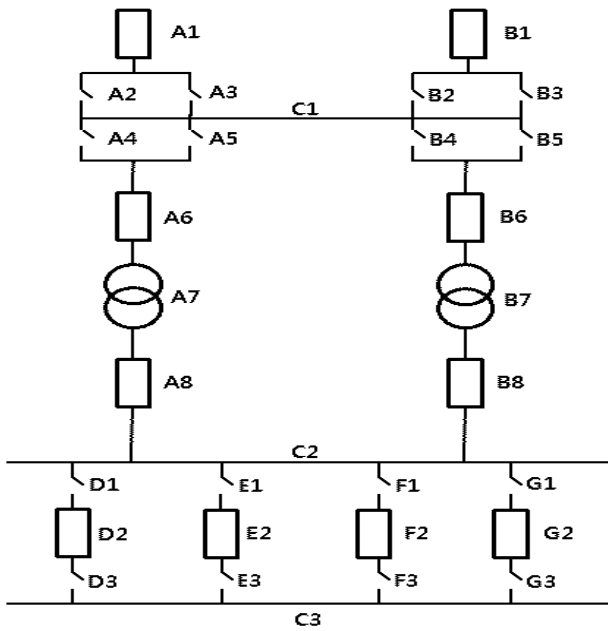


그림 3. 철도 변전소 모의 계통

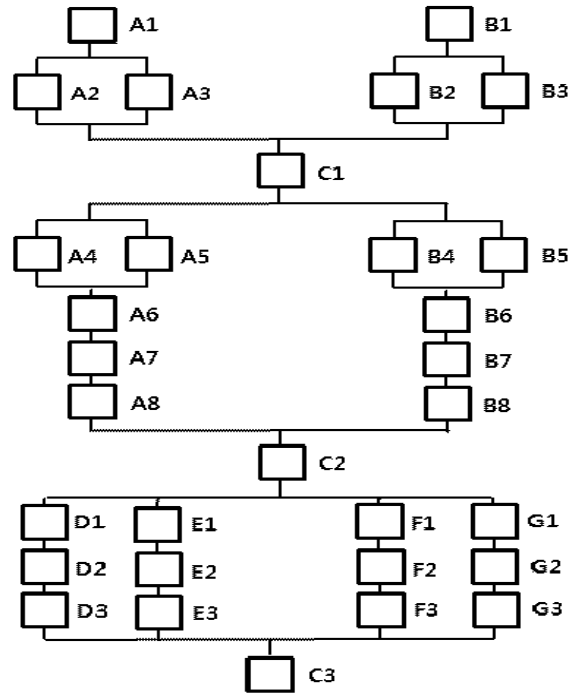


그림 4. 고장 수목도

그림 4의 고장 수목도를 바탕으로 최소 절단 집합을 구하고, 식 (1)을 이용하여 설비 별 Severity를 계산하였으며, 표 2에 나타내었다.

표 2. 설비 별 Severity 평가

설비	설비코드	Severity
가스차단기	A1, A6, A8, B1, B6, B8, D2, B2, F2, G2	4.09
스코트변압기	A7, B7	4.95
단로기	A2, A3, A4, A5, B2, B3, B4, B5, D1, D3, B1, B3, F1, F3, G1, G3	2.73
Bus	C1, C2, C3	10.0

설비의 Occurrence 평가를 위한 전문가 평가는 표 3과 같이 가정하였으며, 본 논문에서 제안한 전문가 평가 성향을 반영한 결과 값도 같이 나타내었다.

표 3. 설비 별 고장률 평가 데이터

설비	전문가 평가					산술평균	보정값	고장률
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5			
가스차단기	8	7	6	6	7	6.80	7.05	1.2715×10^{-5}
스코트변압기	9	6	7	4	5	6.20	6.18	8.3405×10^{-6}
단로기	2	2	5	3	4	3.20	2.60	2.2896×10^{-6}
Bus	1	2	5	4	4	3.20	2.65	3.999×10^{-6}

표 3에서 산술평균은 전문가 평가를 산술평균한 값이고, 보정값은 본 논문에서 제안한 전문가 성향을 반영한 평가치이다. 그림 5는 가스차단기에 대한 고장률의 퍼지 표현이며, 그림 6은 가스차단기의 Occurrence 평가이다.

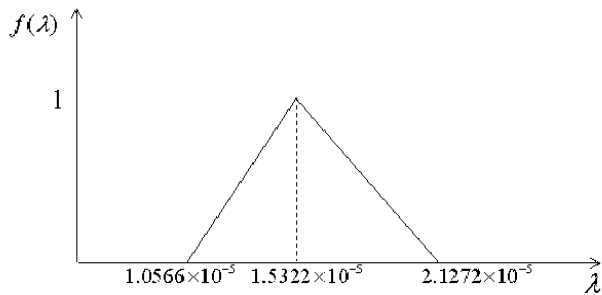


그림 5. 가스차단기에 대한 고장률의 퍼지 표현

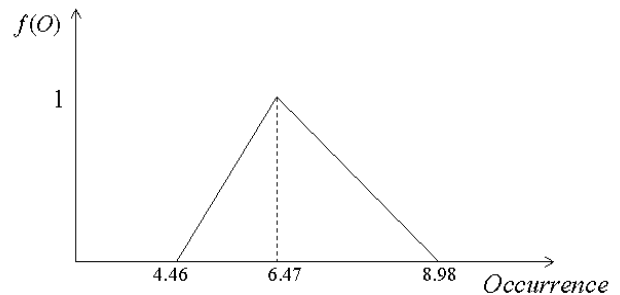


그림 6. 가스차단기의 Occurrence 평가

그리고 표 4는 설비 별 Occurrence 평가를 정리한 것이다.

표 4. 설비 별 Occurrence 평가

설비	Occurrence		
	lower limit	center value	upper limit
가스차단기	4.46	6.47	8.98
스코트변압기	1.24	5.36	10.00
단로기	1.68	3.96	7.00
Bus	1.18	4.21	8.25

설비의 Detection 평가는 평균 지연 시간을 이용하여 계산하지만 본 논문에서는 표 5와 같이 가정하였다.

표 5. 설비 별 Detection 평가

설비	Detection
가스차단기	5
스코트변압기	5.5
단로기	4
Bus	3

표 2, 표 4, 표 5의 S, O, D 평가를 이용하여 본 논문에서 제안하는 퍼지 연산을 이용한 가스차단기의 RPN의 퍼지 표현을 그림 7에 나타내고, 다른 설비의 RPN 계산 결과를 표 6에 정리하였다. 세 평가치를 하나로 통합하는 과정에는 α -cut 연산 방법을 이용하였다.

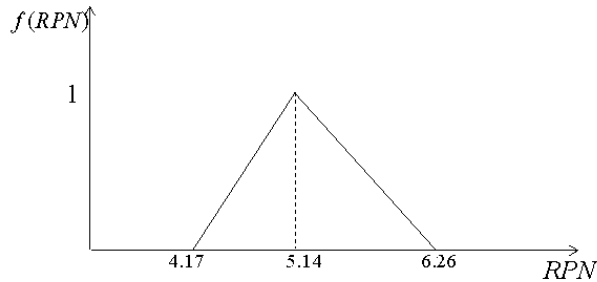


그림 7. 가스차단기의 RPN 퍼지 함수

표 6. 설비 별 RPN과 유지보수 우선순위

설비	lower limit	center value	upper limit	RPN	우선순위
가스차단기	4.17	5.14	6.26	5.19	3
스코트변압기	3.68	5.23	6.93	5.28	2
단로기	2.36	3.53	4.95	3.61	4
Bus	2.37	5.68	9.32	5.79	1

기존의 RPN 계산 방법과 본 논문에서 제안한 RPN 계산 방법을 통한 결과 값을 표 7에 비교하였다.

표 7. RPN 계산 방법에 따른 결과 비교

설비	S	O	D	기존 방법에 의한 RPN	우선 순위	본 논문에 의한 RPN	우선 순위
가스차단기	4.09	6.47	5.00	132	2	5.19	3
스코트변압기	4.95	5.36	5.50	146	1	5.28	2
단로기	2.73	3.96	4.00	43	4	3.61	4
Bus	10.00	4.21	3.00	126	3	5.79	1

4. 결론

철도 전력 설비의 유지보수 우선순위를 결정하는 방법으로 퍼지 이론을 이용한 Risk Priority Number를 계산하는 새로운 방법을 제안하였다. 그리고 RPN의 Occurrence 평가를 위한 고장률의 퍼지 표현 방법을 제시하였다. 외부 출처로부터 얻을 수 있는 고장 데이터를 바탕으로 전문가 의견 시스템을 통해 철도 전력 설비의 고장률을 평가한 뒤, 전문가의 평가 성향을 고려함으로써 전문가 의견 시스템에서 발생할 수 있는 결과치의 왜곡을 최소화하였다. 또한 Severity, Occurrence, Detection 등 세 수치를 단순히 산술적으로 계산하는 기존의 방법에서 벗어나 퍼지 연산을 통해 RPN을 산출함으로써 합리적인 결과를 얻을 수 있었다.

5. 참고문헌

1. J. Moubra (1995), "Reliability-Centered Maintenance", Butterworth-Hinemann.
2. John B. Bowles (2003), "An Assessment of RPN Prioritization in a Failure Modes Effects and Criticality Analysis", Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium.
3. 김동진, 신준석, 김형준, 김진오, 김형철 (2009), "결함수분석법과 퍼지논리를 이용한 FMECA 평가", 한국철도학회.
4. Dong Yuhua, Yu Datao (2005), "Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis", Journal of Loss Prevention in the Process Industries No.18 p83-88
5. 이광형, 오길록 (1991), "퍼지 이론 및 응용", 홍릉과학출판사.