

## 퍼지 리스크 그래프를 적용한 신호 기능 SIL 할당에 관한 연구

### A Study on SIL Allocation for Signaling Function with Fuzzy Risk Graph

양희갑 · 이종우\*

Heekap Yang · Jongwoo Lee

**Abstract** This paper introduces a risk graph which is one method for determining the SIL as a measure of the effectiveness of signaling system. The purpose of this research is to make up for the weakness of the qualitative determination, which has input value ambiguity and a boundary problem in the SIL range. The fuzzy input valuable consists of consequence, exposure, avoidance and demand rate. The fuzzy inference produces forty eight fuzzy rule by adapting the calibrated risk graph in the IEC 61511. The Max-min composition is utilized for the fuzzy inference. The result of the fuzzy inference is the fuzzy value. Therefore, using the de-fuzzification method, the result should be converted to a crisp value that can be utilized for real projects. Ultimately, the safety requirement for hazard is identified by proposing a SIL result with a tolerable hazard rate. For the validation the results of the proposed method, the fuzzy risk graph model is compared with the safety analysis of the signaling system in CENELEC SC 9XA WG A10 report.

**Keywords** : Risk graph, SIL(Safety Integrity Level), Fuzzification, Fuzzy inference, Defuzzification

**초 록** 철도 신호 시스템의 안전 확보 기준으로 사용되는 안전무결성수준(SIL, Safety Integrity Level) 할당에 사용되는 기존 정성적 평가방법인 리스크 그래프에 대하여 소개하고, 정성적 평가의 문제점인 입력 변수의 모호성 및 안전무결성수준간 경계성 문제에 대하여 퍼지 이론 적용을 통해 문제점을 보완하는 것을 목적으로 한다. 본 모델의 퍼지 입력변수는 4가지인 심각도, 노출도, 회피도, 요구율로 구성되며, 퍼지추론(Fuzzy Inference)은 IEC 61511의 계량적 리스크 그래프를 적용하여 48개의 퍼지 규칙을 생성한다. 퍼지추론은 최대 최소 합성(Max-Min Composition)의 퍼지관계 합성연산을 적용한다. 추론 모델을 통해 도출된 최종적인 추론 결과는 퍼지 값이므로 실제 상황에 적용 가능하도록 다시 실수 값으로 변환하는 역 퍼지화 과정을 통해 최종 출력값인 안전무결성수준과 그에 해당하는 허용 해저드율을 생성하여, 최종적인 해당 해저드에 대한 안전성 요구사항을 도출한다. 마지막으로 본 평가모델 검증에 위해 CENELEC SC 9XA WG A10 보고서에 소개된 단선구간에서의 신호시스템을 대상으로 한 안전성 평가 결과와 비교한다.

**주요어** : 리스크 그래프, SIL(안전성 무결성 수준), 퍼지화, 퍼지추론, 역퍼지화

## 1. 서 론

안전관련 시스템의 안전무결성수준(SIL, Safety Integrity Level) 할당을 위한 리스크 평가 방법은 기본적으로 심각도와 발생빈도 두 가지를 기반으로 산정하며, 응용분야마다 추가적인 리스크 변수를 도입하여 리스크 평가를 수행한다[1]. 철도분야 안전성 평가는 정성적인 방법과 정량적인 방식으로 구분되며 서로 완전히 독립된 방법으로 취급 할 수 없고 두 가지 평가 방법은 상호 보완적인 관계로 사용된다. 정성적 평가는 시스템으로 인해 발생할 수 있는 사고들을 규명하고, 전문가들의 경험에 의존하여 심각도와 발생빈도를 추론하여 리스크를 평가한다. 이러한 방법은 정량적 심각도와 발생빈도를 예측하기 힘들 때 사용하며, 추론과정이 주관적이기 때문에 심각도와 발생빈도를 과대 혹은 과소평가 할 수 있다. 과소평가는 안전대책이 미흡하게 되고, 과대평가는 과대비용을 수반한다[2]. 정량적인 평가는 기존에 사용하는 안전 시스템을 개량할 때 유용하며, 운용기간 동안에 발생하는 부품 및 서비스시스템의 객관적인 고장 확률 정보와 사고로 이어질 수 있는 확률 정보를 활용함으로써 가능하다.

신설 철도 시스템 구축시 안전성 평가는 사업 초기 단계에서 정성적인 방법론을 적용하여 안전성 평가를 수행하며, 상세 설계 단계 시 정량적인 방법론을 사용하여 안전성을 분석한다. 사업 초기 단계에서 발주처는 대상 시스템 구성과 운영조건을 확

\*Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6874, E-mail: saganlee@seoultech.ac.kr.

© 2016 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2016.19.2.145>

인하여, 잠재적으로 사고에 영향을 미칠 수 있는 모든 위험요소를 고려하여 위험원(Hazard)을 식별하고 사고시나리오를 전개한다. 신설 철도시스템 구축 특성 상 사고 장애 이력 및 시스템 구성품에 대한 객관적 고장률 정보가 없으므로 식별된 위험원은 리스크 매트릭스와 리스크 그래프와 같은 도식적인 정성적 방법을 활용하여 위험원에 우선순위 등급(Ranking)을 할당한다. 즉, 정량적 수치로 목표수립이 곤란하므로 위험원별 우선순위 등급을 할당하여 정성적인 목표를 수립한다[3]. 상세설계 단계에서 시스템 공급사는 객관적인 데이터인 부품 고장율 정보를 기반으로 고장목 분석(Fault tree analysis) 및 사건목 분석(Event tree analysis)과정을 통해 해당 위험원을 분석하여 위험도를 수치로써 예측한다.

특히, 사업 초기 안전성 요구사항을 수립하는 단계에서는 제한된 운영 개념 및 구축 할 시스템 정보만으로는 위험원에 대한 정량적 위험도 평가방법을 적용할 수 없으므로, 리스크 평가 방법이 주관적임에도 불구하고 정성적인 방법을 많이 적용하고 있다.

본 논문에서는 정성적 평가 방법 중 가장 많이 사용되는 리스크 그래프 방법론에 관하여 주관적 평가로 인해 내재되어 있는 리스크 평가 입력 변수의 모호성, SIL 등급 간 수직적 경계성 문제 및 SIL 등급 내 범위 문제를 보완하기 위해 퍼지 이론을 적용하여 반 정량적인 리스크 그래프를 모델링 하였고 사례 비교를 통해 모델을 검증하였다.

## 2. 리스크 평가

### 2.1 리스크 그래프

SIL을 평가하는 정성적인 방법으로써 EN 61508에서는 Fig. 1 및 Table 1과 같은 리스크 그래프를 제안한다. 리스크 평가를 위한 입력변수는 사고 발생 결과에 따른 심각도(C, Consequence), 승객 및 직원에 대한 위험 노출도(F, Exposure), 사고 회피도(P, Avoidance) 및 위험 상황 발생 빈도에 해당하는 요구율(W, Demand rate)로 구성 된다. 식별된 위험원은 Table 1의 입력변수

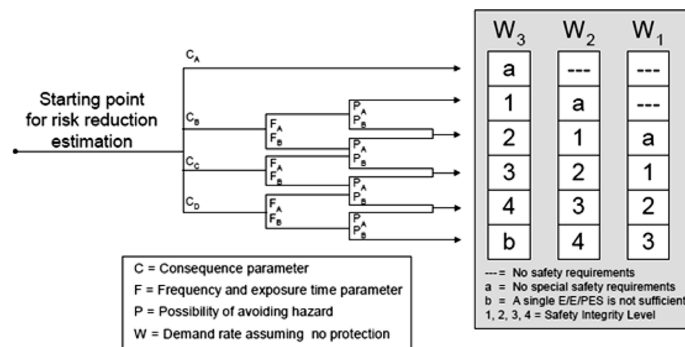


Fig. 1. Risk graph structure.

Table 1. Risk graph input values.

Input items	Linguistic (EN61508)	Calibrated (IEC 61511)	
Consequence	C <sub>A</sub>	Minor injury	No death/event
	C <sub>B</sub>	Marginal	0.01 to 0.1 probable fatalities/event
	C <sub>C</sub>	Critical	> 0.1 to 1 probable fatalities/ event
	C <sub>D</sub>	Catastrophic	> 1 probable fatalities/ event
Exposure	F <sub>A</sub>	Rare	< 10% of time
	F <sub>B</sub>	Frequent	≥ 10% of time
Avoidance	P <sub>A</sub>	Possible	> 90% probability of avoiding hazard
	P <sub>B</sub>	Not likely	≤ 90% probability of avoiding hazard
Demand rate	W <sub>1</sub>	Very low	< 1 in 30 years
	W <sub>2</sub>	Low	1 in > 3 to 30 years
	W <sub>3</sub>	Relatively high	1 in > 0.3 to 3 years

가중(Weight)에 따라 Fig. 1의 그래프에 사상(Mapping)하여 최종 SIL 등급을 결정하는 비교적 쉬운 방식이다. 결과 도출 시간이 빠르다는 장점이 있으나 입력변수 판단 기준이 Table 1과 같이 언어적 표현(Linguistic value)에 의존하므로 그 정확성이 모호하다는 단점이 있다. 즉, 평가자의 주관적인 관점으로 SIL 등급 차이를 나타낼 수 있다.

이 단점을 보완하기 위해 IEC 61511에서는 Table 1과 같이 계량적 수치(Calibrated value)를 갖는 입력변수를 추가로 제공하고 있다[3]. 그러나 이 방법도 전문가 주관적 판단, SIL 등급 간 수직적 경계성 및 SIL 등급 내 범위 문제는 잔존한다.

## 2.2 리스크 그래프 평가 방법론 단점

### 2.2.1 언어변수(Linguistic parameter) 모호성

리스크 그래프 적용을 위한 입력변수는 Table 1에서와 같이 드문(Rare), 가능한(Possible), 다수 사망(Critical) 등 언어적 입력 변수 용어를 사용하여 애매성과 모호성을 내포하고 있다. 이는 평가자들 사이에서 언어 해석 차이가 발생 할 수 있고, 이로 인해 주관적인 판단으로 안전성 평가의 정확성을 떨어뜨린다. 즉 평가자의 안전성 관련 의사결정에 상당한 제한을 가진 주관적 요소가 포함되어 있다. 그러므로 본 논문에서는 퍼지 특성을 갖는 각 입력 변수 항목에 대해 전문가의 주관적인 평가 데이터(Evaluation value)를 퍼지측도를 사용하여 통합(Aggregation)하는 방법으로 언어적 입력 변수 모호성을 방지한다.

### 2.2.2 안전무결성 레벨 경계성 문제

기존 리스크 그래프는 최종 SIL 등급 결과 값은 수직적인 경계면을 형성한다. 즉 연속형 값을 이산적 형태로 취급하기 때문에 경계면 부근에서의 분류 오류가 발생할 가능성이 커진다. 예를 들어 Table 1에서 입력값이 C<sub>D</sub>, F<sub>B</sub>, P<sub>B</sub>로 식별되고 위험상황 발생 빈도를 나타내는 요구율이 3년인 경우 SIL4로 평가되며, 요구율이 3.1년인 경우는 SIL3로 평가된다. 즉 0.1년의 근소한 요구율 수치 차이로 해당 위험요소의 안전성 평가가 과대평가 될 수 있다. 이러한 결과는 시스템 선정 시 기준보다 과도한 비용이 발생할 수 있으며, 반대로 과소평가되는 경우 기준보다 안전성이 낮은 시스템이 공급되어 운영상 위험한 사고를 초래 할 수 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 연속형 값을 처리 할 때 입력 데이터의 분포에 따른 적절한 기준치를 선정하기 위해 수직적인 경계면을 평활화(Smoothing)할 수 있는 퍼지화(Fuzzification) 및 역퍼지화(Defuzzification) 기법을 적용한다.

### 2.2.3 안전무결성 레벨내 범위 문제

Table 2는 EN 61508에서 정의된 고빈도 안전무결성수준에 대한 정의다. 위험원에 해당하는 4가지 입력변수가 Table 1에 따라 산정되고 Fig. 1의 그래프에 사상되면 안전성 평가는 SIL 등급으로 최종 평가된다.

Table 2. Definition of SILs for high demand.

SIL	Range of $\lambda$ (hour)	Range of MTTF(years)
4	$10^{-9} \leq \lambda < 10^{-8}$	$100,000 \geq \text{MTTF} > 10,000$
3	$10^{-8} \leq \lambda < 10^{-7}$	$10,000 \geq \text{MTTF} > 1,000$
2	$10^{-7} \leq \lambda < 10^{-6}$	$1,000 \geq \text{MTTF} > 100$
1	$10^{-6} \leq \lambda < 10^{-5}$	$100 \geq \text{MTTF} > 10$

평가된 SIL 등급은 고장율( $\lambda$ )의 범위로 표현되며, 고장율( $\lambda$ ) 역수인 평균고장수명(MTTF, Mean Time To Failure)으로 환산 평가 될 수 있다. 예로 평균고장수명이 10,001년인 경우와 100,000년인 경우 동일한 SIL4에 해당한다. 즉, 최악의 경우(Worst case)와 최선의 경우(Best case) 차이가 90,000년임에도 불구하고 시스템 공급사에게 해당 위험원에 대한 안전요구사항을 동일 하게 SIL4를 제시한다. 이는 명확한 정량적인 안전요구사항을 제시할 수 없음과 최종 설계 검증단계에서 명확한 검증 기준을 제시 할 수 없다는 단점을 갖는다. 이런 문제를 보완하기 위해 역 퍼지화(Defuzzification)시 최종 출력 값으로 해당 SIL 등급과 SIL 등급에 해당하는 허용 해저드율(THR, Tolerable hazard rate)을 수치로써 같이 제시함으로써 안전설계 기준과 검증단계에서의 명확한 검증 기준을 제시할 수 있다.

## 2.3 Fuzzy Risk Graph 위험도 평가 모델

### 2.3.1 퍼지 이론

퍼지 이론은 미국 캘리포니아 주 버클리 대학의 L.A Zadeh 교수에 의해 제안되었으며, 하나의 뜻만 갖고 있음에도 그 적용 범위가 확실히 결정되어 있지 않는 개념의 불확실성(모호한; Vagueness)과 두 가지 이상의 의미를 갖고 있어 그 구분이 분명치 않는 개념의 불확실성(애매한; Ambiguity)을 다룬다. 퍼지이론의 강점은 언어적 변수(Linguistic Variable)를 정량화할 수 있다.

퍼지이론은 기존에 참과 거짓이라는 두 개의 진리치만 갖는 이진논리와 반대되는 참과 거짓 사이에 중간의 진리치를 인정하는 다치 논리에 퍼지이론을 도입한 것이다. 따라서 이진논리로는 다룰 수 없는 연속적인 속성을 가진 자연현상과 인간의 사고, 언어를 논리적으로 다룰 수 있게 만들었다. 퍼지이론의 기본적인 아이디어는 0 또는 1의 이산적인 두 개의 값을 취하는 특성함수에 의해 규정되는 크리스프 집합(Crisp Set)을 0과 1사이의 연속 실수치를 취하는 멤버십 함수(Membership Function)에 의해 규정되는 퍼지집합(Fuzzy Set)으로 확장한 점에 있다[4].

### 2.3.2 퍼지 리스크 그래프 모델

Fig. 2는 본 논문에서 제안하는 퍼지 리스크 그래프 모델을 나타낸다. 본 모델의 입력변수 4가지는 사고 발생 결과인 심각도(Consequence), 승객이나 직원이 현장 위험에 노출된 정도를 나타내는 노출도(Exposure), 위험이 사고로 연결될 경우 사고를 회피 할 수 있는 정도를 나타내는 회피도(Avoidance), 위험 상황이 발생 될 수 있는 주기를 나타내는 요구율(Demand Rate)로 구성되며, 4가지 변수가 퍼지 리스크 그래프 모델 입력변수로 사용된다. 각 퍼지 입력변수별 멤버십 함수의 X 논의영역 범위는 모델 객관성을 위해 Table 1과 같은 IEC 61511의 계량적 리스크 그래프에서 제안한 범위를 따른다. 4가지 입력변수의 크리스프(Crisp)한 표현은 각 퍼지 입력변수로 가공되며, 퍼지추론(Fuzzy Inference)을 위해 필요한 48개의 퍼지규칙(Fuzzy Rule)은 Fig. 1의 그래프의 계층구조를 적용하여 생성한다. 퍼지추론은 퍼지집합간에 퍼지 멤버십 함수의 중복도를 판정하는 것이 가장 중요하며 최대 최소 합성(Max-Min Composition)의 퍼지관계 합성연산을 적용한다.

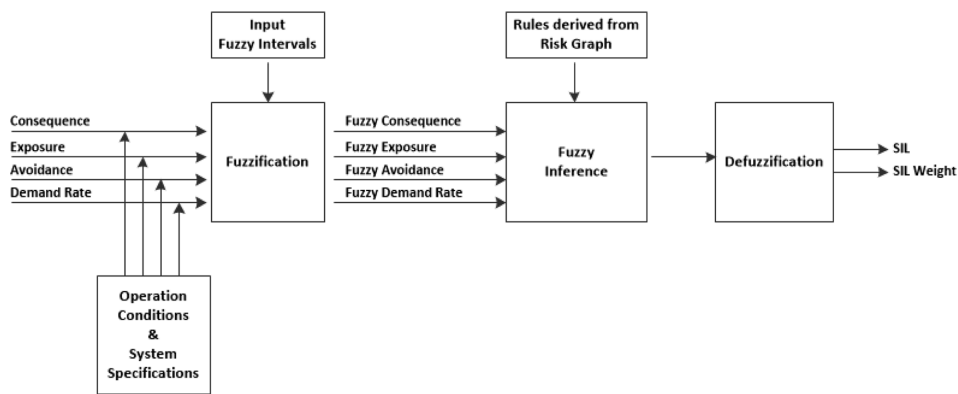


Fig. 2. Risk graph structure.

퍼지 추론(Fuzzy Inference)을 통해 도출된 최종적인 추론 결과는 퍼지 값이므로 실제 상황에 적용 가능하도록 실수 값으로 변환한다. 이를 위해 역 퍼지화(Defuzzification) 과정에서 SIL 등급과 등급에 해당하는 허용 해저드율을 생성 함으로써 해당 위험원에 대한 안전성 요구사항을 도출한다.

퍼지 이론을 적용한 위험도 평가모델에 관한 연구로 퍼지 서비스 FMEA(Failure Mode Effective Analysis)를 이용하여 서비스 시스템 설계 시 고객의 서비스 만족에 나쁜 영향을 미치는 서비스 요소의 잠재적 고장모드 분석에 퍼지 이론이 적용되었으며[5], 최소절단집합과 퍼지이론을 이용한 FMEA 절차를 철도변전소 고장원인 분석 시 퍼지활용이 적용되었다[6]. 퍼지이론을 이용해 철도전력 설비를 대상으로 발생빈도(Occurrence)를 평가하기 위해 퍼지 이론을 적용한 고장률 가공 방법이 제시되었고, 객관적인 심각도(Severity) 평가를 이용하여 리스크 우선순위(Risk Priority Number)를 산정하는 방법이 제시되었다[7].

기존 국내연구는 주로 FMEA를 통한 고장모드 분석 시 퍼지 이론을 적용했으며, SIL 할당을 위한 퍼지 이론 적용 사례는 없다. 해외연구로는 리스크 매트릭스를 통한 리스크 평가 시 퍼지 이론을 활용하여 자연어로 표현된 심각도 및 빈도에 대한 입력 변수를 퍼지화하고 그 결과를 역퍼지화 하여 출력값을 산출한 연구가 있었다[8]. 이와 같이 국내 경우 퍼지 이론을 적용한 리스크 그래프 연구가 되지 않아 본 논문에서는 철도 신호 기능 안전무결성등급 할당시 퍼지 리스크 그래프 모델 적용을 제안한다.

## 3. 퍼지 리스크 그래프 모델

### 3.1 퍼지 멤버십 함수 모델링

퍼지 리스크 그래프 모델링을 위해 첫 번째 단계는 입력변수 퍼지화를 위한 멤버십 함수를 설정하는 것이다.

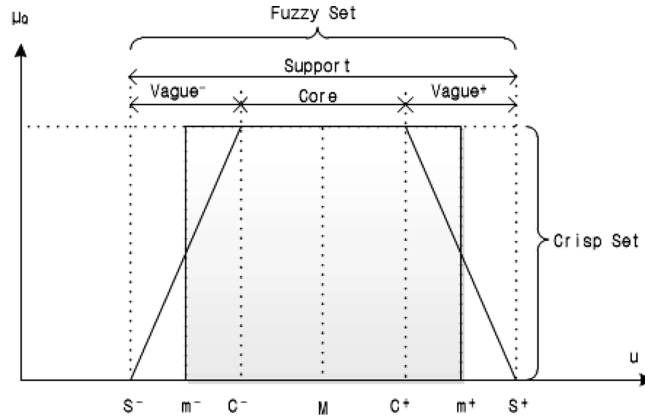


Fig. 3. Transforming crisp to fuzzy value.

본 논문의 퍼지 리스크 그래프 모델에 적용 할 멤버십 함수의 모양(Shape)은 삼각형꼴과 사다리꼴 중 하나로 고려한다. 삼각형 꼴은 X 논의영역에서 언어적 중심이 한 점(Point)을 값으로 취하며, 사다리꼴은 Fig. 3과 같이 한 점을 중심으로 중심구간(Core Interval)을 형성한다. 본 모델에서 최종 SIL 출력변수는 SIL 등급별 범위가 10의 멱승으로 증가하며 등급 내 범위가 넓으므로 어느 한 점을 중심으로 소속도를 1.0으로 정의하는 것 보다 그 범위의 일정구간을 소속도 1.0으로 정의하는 것이 최종 출력 값 판단 시 효율적이므로 본 퍼지 리스크 그래프 모델에서는 사다리꼴 소속함수를 적용한다. Fig. 3에서 음영된 부분은 일반 크리스프 영역에 해당한다. 사다리꼴 멤버십 함수는 볼록형태(Convex Shape)가지며 중심구간(Core interval)은 퍼지집합에서 완전하게 소속되는, 즉 소속도가 1인 집합의 영역을 의미한다.

$$Trapezoid(X: S^-, C^-, C^+, S^+) = \begin{cases} 0 & X < S^- \\ (X - S^-) / (C^- - S^-) & S^- \leq X \leq C^- \\ 1 & C^- \leq X \leq C^+ \\ (S^+ - X) / (S^+ - C^+) & C^+ \leq X \leq S^+ \\ 1 & X \geq S^+ \end{cases} \quad (1)$$

전체구간 또는 지지구간(Support interval)은 소속도가 0이 아닌 집합의 영역을 의미한다. 그리고 경계영역(Vague interval)은 소속정도가 0과 1사이인 집합 구간을 말한다. 중심구간, 지지구간, 경계구간 및 각 구간에 대한 소속도는 식(1)과 같이 정의한다. 멤버십 함수 결정시 각 변수에 대한 멤버십 함수의 X 논의영역 범위와 멤버십함수 간 중복도는 각 데이터의 평균값을 사용한다. 즉, 사다리꼴 멤버십 함수에서 하한 지지구간( $S^- \sim C^-$ )과 상한 지지구간( $C^+ \sim S^+$ )인 모호구간의 기울기 결정은 Dubois와 Prade이 제안한 퍼지구간 평균값 정의를(The mean value of a fuzzy interval) 적용한다[9]. 심각도에 대한 입력변수를 예를 들면, Table 1에 따라 퍼지집합  $RG_C = \{\text{Minor injury, Marginal, Critical, Catastrophic}\}$ 로 표현 된다. 즉,  $RG_C$ 는 심각도의 퍼지 집합이고 Minor injury, Marginal, Critical, Catastrophic의 4개의 멤버십 함수로 구성된다.

리스크 그래프의 입력변수 중 심각도(Consequence) 및 요구율(Demand rate)과 최종 출력 변수인 SIL은 Table 2에서 보는바와 같이 X 논의 영역축이 10의 멱승 크기만큼 등비적으로 증가하므로 Dubois와 Prade이 제안한 퍼지구간 평균값 정의에 따라 기하평균을 사용하여 퍼지 멤버십 함수의 평균값(M), 코어구간(C), 지지구간(S)을 식(2)~식(5)와 같이 정의한다[9].

$$M = \sqrt{m^- \cdot m^+} \quad (2)$$

$$C^- = \sqrt{m^- \cdot M} \quad C^+ = \sqrt{m^+ \cdot M} \quad (3)$$

$$V^- = 2 \cdot (C^- - m^-) \quad V^+ = 2 \cdot (m^+ - C^+) \quad (4)$$

$$S^- = C^- - V^- \quad S^+ = C^+ + V^+ \quad (5)$$

두 멤버십 함수가 중첩될 경우, 중첩구간에서 임의 입력값에 대한 두 멤버십 함수의 소속도 합이 1 또는 그 근사치가 될 때 값 선택 시 판단을 명확히 할 수 있다. 이를 위해 i 번째 지지구간의 하한값이 i-1 번째 소속함수 영역의 속한 정도에 따라  $S_{i-1}$

Table 3. Transformed fuzzy value for SIL.

X universe of discourse		SIL			
		SIL4	SIL3	SIL2	SIL1
Mean of lower support	$m^-$	1.00E-09	1.00E-08	1.00E-07	1.00E-06
Mean of upper support	$m^+$	1.00E-08	1.00E-07	1.00E-06	1.00E-05
Mean	$M$	3.16E-09	3.16E-08	3.16E-07	3.16E-06
Boundary of lower core	$C^-$	1.78E-09	1.78E-08	1.78E-07	1.78E-06
Boundary of upper core	$C^+$	5.62E-09	5.62E-08	5.62E-07	5.62E-06
Boundary of lower support	$S^-$	5.62E-10	5.62E-09	5.62E-08	5.62E-07
Boundary of upper support	$S^+$	1.78E-08	1.78E-07	1.78E-06	1.78E-05

$> S_i$ 인 경우,  $S_{i-1} \leq S_i < C_{i-1}$ 인 경우  $C_{i-1} \leq S_i < C^+_{i-1}$ 인 경우  $S^-$ 과  $C^+$ 는 동일하게 구성한다.

Table 3은 식(2)~식(5)에 따라 산정된 SIL 출력변수에 대한 퍼지수 변환치를 나타낸다.

또한, 리스크 그래프의 입력변수 중 노출도(Exposure) 및 회피도(Avoidance)는 Table 1에서와 같이 0에서 100까지 범위에서 10의 크기만큼 등차적으로 증가하므로 Dubois와 Prade이 제안한 퍼지구간 평균값 정의에 따라 산술 평균을 사용하여 퍼지 멤버십 함수의 평균값( $M$ ), 코어구간( $C$ ), 지지구간( $S$ )을 식(6)~식(9)과 같이 정의한다[9].

$$M = \frac{(m^- + m^+)}{2} \tag{6}$$

$$C^- = \frac{m^- + M}{2} \quad C^+ = \frac{M + m^+}{2} \tag{7}$$

$$V^- = 2 \cdot (C^- - m^-) \quad V^+ = 2 \cdot (m^+ - C^+) \tag{8}$$

$$S^- = C^- - V^- \quad S^+ = C^+ + V^+ \tag{9}$$

두 멤버십 함수가 중첩될 경우, 중첩구간에서 임의 입력값에 대한 두 멤버십 함수의 소속도 합이 1 또는 그 근사치가 될 때 값 선택 시 판단을 명확히 할 수 있다. 이를 위해  $i$  번째 지지구간의 하한값이  $i-1$  번째 소속함수 영역의 속한 정도에 따라  $S_{i-1} > S_i$ 인 경우,  $S_{i-1} \leq S_i < C_{i-1}$ 인 경우  $C_{i-1} \leq S_i < C^+_{i-1}$ 인 경우  $S^-$ 과  $C^+$ 는 동일하게 구성한다.

### 3.2 Fuzzy Inference

퍼지 추론은 Mamdani 추론법을 적용한다. Mamdani 추론법은 퍼지 멤버십 함수를 통해 퍼지화 된 입력 값(Fuzzy Inputs)을 토대로 퍼지 규칙 베이스(Fuzzy Rule Base)로 부터 각 규칙의 추론결과를 구한다. 추론결과가 여러 개일 경우 이를 합성하여 최종적인 추론결과인 퍼지 출력 값(Fuzzy Output)을 산출한다.

퍼지 규칙 베이스는 Fig. 1의 IEC 61511에서 권고된 SIL 분류 기준을 따라 Table 4와 같이 48개의 퍼지 규칙(Fuzzy Rule)으로 구성된다.

Mamdani 추론법에 따라 첫 번째, 퍼지 입력 값에 대해 Table 3의 퍼지 규칙 베이스에서 입력 값에 해당하는 퍼지구칙을 추출한다.

$$R_{01} = \text{IF } C \text{ is a and } F \text{ is a and } P \text{ is a and } W \text{ is 1 THEN SIL is -}$$

...

$$R_{44} = \text{IF } C \text{ is d and } F \text{ is b and } P \text{ is a and } W \text{ is 2 THEN SIL is 3}$$

...

$$R_{48} = \text{IF } C \text{ is d and } F \text{ is b and } P \text{ is b and } W \text{ is 3 THEN SIL is b}$$

두 번째, 추출된 각 규칙의 전반수의 소속도에 대한 MIN 연산을 아래와 같이 연산한다.

$$R_{01} : m_{01} = \min\{\mu_{A01}(C_{01}), \mu_{B01}(F_{01}), \mu_{C01}(P_{01}), \mu_{D01}(W_{01})\}$$

...

Table 4. SIL fuzzy rule base.

Rule	IF				THEN
	C	F	P	W	SIL
1	a	a	a	1	-
2	a	a	a	2	-
3	a	a	a	3	a
4	a	a	b	1	-
5	a	a	b	2	-
:	:	:	:	:	:
44	d	b	a	2	3
45	d	b	a	3	4
46	d	b	b	1	3
47	d	b	b	2	4
48	d	b	b	3	b

- : No safety requirements  
 a: No special safety requirements  
 b: No sufficient  
 1,2,3,4: Safety Integrity Level

$$R_{44} : m_{44} = \min \{ \mu_{A44}(C_{44}), \mu_{B44}(F_{44}), \mu_{C44}(P_{44}), \mu_{D44}(W_{44}) \}$$

...

$$R_{48} : m_{48} = \min \{ \mu_{A48}(C_{48}), \mu_{B48}(F_{48}), \mu_{C48}(P_{48}), \mu_{D48}(W_{48}) \}$$

MIN 연산 결과값 중 0이 아닌 퍼지 규칙을 MAX 연산의 통합(Aggregation)과정을 통해 각 SIL 별 소속도를 아래와 같이 구한다.

$$\mu_{SILx}(R) = \max(m_{01}, \dots, m_{44}, \dots, m_{46}), \forall R \in SILx$$

### 3.3 Defuzzification

퍼지 추론 마지막 단계는 역퍼지화(defuzzification) 수행이다. 퍼지 추론의 최종 출력 값은 퍼지 값이므로 실제 상황에 적용할 수 있는 숫자를 도출하기 위해 역퍼지화를 한다. 즉, 역 퍼지화에서 입력은 통합된 출력 퍼지 집합이므로 출력은 하나의 실수 값으로 도출해야 한다. 역퍼지화 방법은 여러 가지가 있으나, 그 중 무게 중심법(CoG, Centre of Gravity)이 가장 많이 사용된다[10]. 이 방법은 X 논의영역의 값에 대한 Y 논의영역인 소속도의 통합된 집합에 대하여 무게 또는 면적이 동일한 두 부분으로 가르는 지점인 X 논의영역 값을 찾는 과정이며, 식(10)에 따라 연산한다.

$$CoG = \left( \frac{\int x \cdot \mu_{SIL_i}(x) dx}{\int \mu_{SIL_i}(x) dx} \right) \tag{10}$$

Fig. 4에서와 보는바와 같이 무게 중심법은 퍼지집합의 무게 중심을 나타내는 점 HR를 X 논의 영역구간에서 찾아낸다. 이론적으로 무게 중심은 통합된 출력 멤버십 함수에 있는 점들의 연속체에 대해 계산되지만 실제로 Fig. 4에서와 같이 점들의 표본을 추출하여 계산함으로써 합리적으로 추정치를 얻는다.

$$CoG = \frac{C_4^- \times \mu_{SIL4}(C_4^-) + C_4^+ \times \mu_{SIL4}(C_4^+) + C_3^- \times \mu_{SIL3}(C_3^-) + C_3^+ \times \mu_{SIL3}(C_3^+) + C_2^- \times \mu_{SIL2}(C_2^-) + C_2^+ \times \mu_{SIL2}(C_2^+)}{\mu_{SIL4}(C_4^-) + \mu_{SIL4}(C_4^+) + \mu_{SIL3}(C_3^-) + \mu_{SIL3}(C_3^+) + \mu_{SIL2}(C_2^-) + \mu_{SIL2}(C_2^+)} = THR \tag{11}$$

본 논문에서 표본 추출을 위한 점은 각 SIL 범위의 하한 중심구간 점(C<sup>-</sup>)과 상한 중심구간 점(C<sup>+</sup>)을 표본으로 한다. Fig. 4에서 최종 SIL 평가는 THR의 허용해저드율을 갖으며 안전무결성은 SIL2에 해당된다.

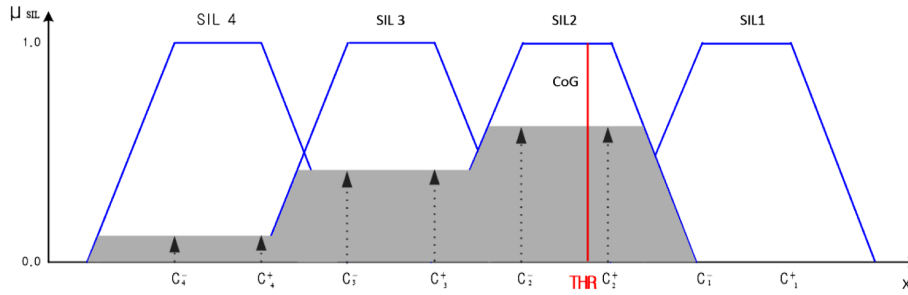


Fig. 4. Defuzzification result of SIL.

### 4. 퍼지 리스크 그래프 모델 시뮬레이션

#### 4.1 신호기능 위험도 평가 사례

본 논문에서 제시하는 퍼지 리스크 그래프 모델 검증을 위해 CLC/TR 50451의 안전성 평가 사례를 소개하며, 그 대상 신호 시스템 구성도는 Fig. 5와 같다. 본 사례는 시스템 사양 및 고장 데이터가 가용한 상황에서 리스크 평가를 위해 하향식(Bottom Up)분석 접근법에 의한 정량적 SIL 평가 방법론을 사용했다. 즉, 시스템 정의 및 시스템 요구사항 분석을 통해 위험원(Hazard)을 식별하고 고장목분석(Fault Tree Analysis) 및 사건목 분석(Event Tree Analysis)을 수행하여 정량적인 심각도와 발생빈도를 분석했다. 최종적으로 사망자에 대한 개별 리스크 분석을 통해 허용해저드율(THR, Tolerable Hazard Rate)를 산정하여 해당 SIL 등급을 결정하는 정량적 안전성 평가를 수행 하였다[11].

CLC/TR 50451 사례에서 식별된 최상위 위험원은 검증되지 않는 궤도구간에 열차 진입이며, 하위 위험원은 열차가 점유된 궤도구간에 다른 열차 진입, 장애물이 존재하는 궤도구간에 열차 진입 및 건널목 장애로 식별하였다. 식별된 위험원에 대한 정량적 심각도 분석 결과 사상자수는 Table 5와 같이 산정 하였다[11].

사례에서는 SIL 등급을 결정하기 위해 개별 리스크(IRF, Individual risk of fatality)를 식(12)를 적용하여 계산하였다[12].

$$IRF_i = \sum_{\text{all hazards } H_j} N_i \left[ HR_j \times (D_j + E_{ij}) \sum_{\text{accidents } A_k} C_j^k \times F_i^k \right] \tag{12}$$

식(12)에서 매개변수  $k$ 는 모든 사건유형,  $j$ 는 위험원,  $i$ 는 각각의 개별 리스크를 나타낸다. 여기서,  $HR$ 은 보호 시스템의 위험원 비율,  $N$ 은 사람이 시스템을 사용하는 빈도,  $D$ 는 위험원의 지속시간,  $E$ 는 사람이 시스템에 노출되는 지속시간,  $C_j^k$ 는 사고 발생 확률,  $F_i^k$ 는 한 사람의 치사율을 의미한다.

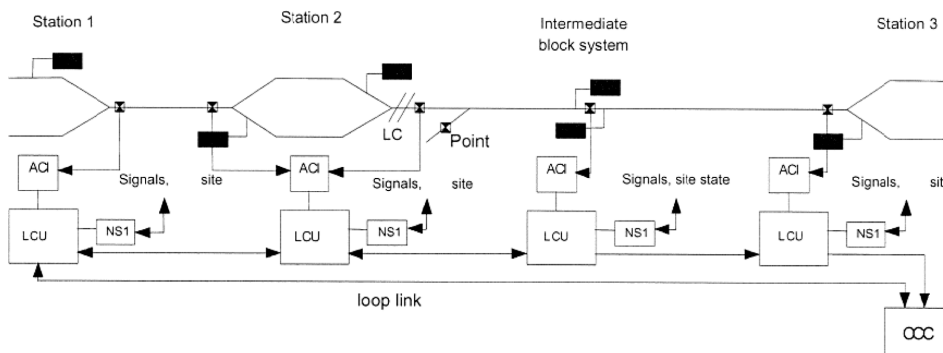


Fig. 5. Configuration of signalling system.

Table 5. SIL fuzzy rule base.

Item	Probability of death	Fatality
Passanger	1.80E-5	15.7
Worker	1.37E-4	0.3



사례에서는 정량적 위험도 분석 틀인 고장목 분석(Fault tree analysis)을 통해 사고 발생빈도를 산정하고 사건목 분석(Event tree analysis)을 통해 사고 심각도를 산정하였다. 최종적으로 승객 및 직원에 대한 사망자 개별 리스크(IRF, Individual Risk Fatality)를 평가하여 허용해저드율(THR, Tolerable Hazard Rate)을 도출하였으며, 산술과정은 식(13)~식(19)와 같다.

$$IRF_{1/pax} = 2,500 \times HR_1 \times (1/5 + 1/5) \times ((1.81 \times 10^{-5} \times 15.7) + (1.37 \times 10^{-4} \times 0.3) + (7 \times 10^{-6} \times 15.7)) / 100 \quad (13)$$

$$IRF_{1/pax} = 0.005 \times HR_{1/pax} \quad (14)$$

$$THR_{1/pax} = 2 \times 10^{-8} / h \quad (15)$$

$$IRF_{1/wk} = 4,000 \times HR_1 \times (1/10 + 1/5) \times ((1.81 \times 10^{-5} \times 0.03) + (1.37 \times 10^{-4} \times 0.4) + (7 \times 10^{-6} \times 0.03)) / 10 \quad (16)$$

$$IRF_{1/wk} = 0.007 \times HR_{1/wk} \quad (17)$$

$$THR_{1/wk} = 2 \times 10^{-7} / h \quad (18)$$

$$THR_1 = 2 \times 10^{-8} / h \quad (19)$$

위 식의 결과 최상위 위험원인 검증되지 않는 궤도구간의 열차 진입에 대한 SIL 등급은 최악의 상황을 고려해  $THR_{1/pax} = 2 \times 10^{-8} / h$ 로 평가되고 해당 하는 안전무결성수준은 SIL 3로 평가된다.

본 시뮬레이션에서는 4.1에 소개된 사례의 상향식(Bottom up) 정량적 위험도 평가 결과와 본 퍼지 리스크 그래프 모델을 적용한 하향식(Top down) 반 정량적 위험도 평가 결과를 비교 검증코자 한다. 본 퍼지 리스크 그래프 모델은 시뮬레이션의 유연성을 위해 Visual Basic로 구현하였다.

## 4.2 퍼지 리스크 그래프 모델 검증

본 논문의 퍼지 리스크 그래프 방법론은 제한된 객관화된 정보만을 활용해서 식별된 위험원을 분석하고, 4가지 퍼지 리스크 그래프 입력변수를 퍼지화하며, 퍼지화 결과를 퍼지규칙 베이스를 통해 추론 및 역퍼지화 함으로써 SIL 등급을 도출하고 해당 허용해저드율을 산정한다.

### 4.2.1 퍼지화

퍼지 리스크 그래프의 4가지 입력 변수 중 심각도와 요구율은 안전성 평가의 객관성을 확보하기 위해 국토교통부 철도안전 정보종합관리시스템 통계자료인 위험사건 및 위험영역 위험도 현황[12]을 활용하였다. 노출도는 4.1 사례의 운영조건을 분석하

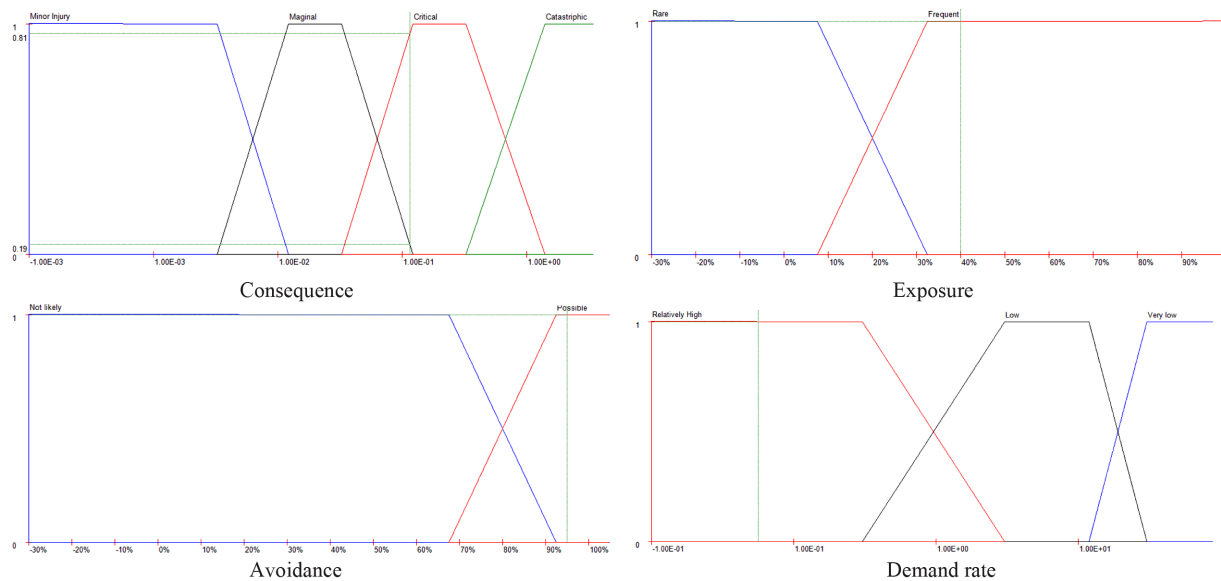


Fig. 6. Membership function for passenger.

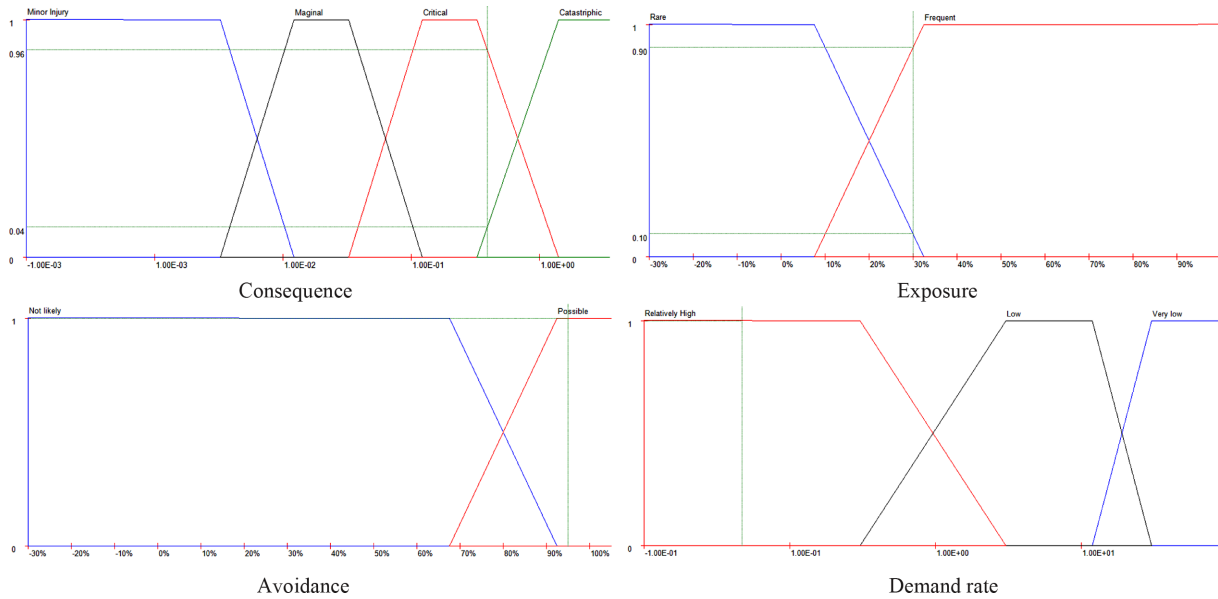


Fig. 7. Membership function for worker.

여 산정하였으며, 회피도는 4.1 사례의 시스템 분석을 통해 예측하였다.

Fig. 6은 승객에 대한 4가지 변수의 퍼지화 결과이며, Fig. 7은 궤도 작업자 직원에 대한 4가지 변수의 퍼지화 결과이다.

(1) 심각도(Consequence) 변수 정의

4.1사례에서 최상위 위험원은 검증되지 않는 궤도구간에 열차 진입이며, 하위 해저드는 열차가 점유된 궤도구간에 다른 열차 진입, 장애물이 존재하는 궤도구간에 열차 진입, 건널목 장애로 식별된다.

본 논문에서는 검증되지 않는 열차가 궤도구간에 진입함으로써 다른 열차와 충돌 또는 선로 내 장애물과 열차 충돌 및 급정지로 인한 열차내 승객의 넘어짐이나 장비와 충격과 같은 2차적인 위험 사건을 추가로 고려하여 심각도를 선정하였다.

Table 6과 Table 7의 심각도는 위험사건마다 발생한 등가사망자수를 의미한다. 본 데이터는 객관적 정보 활용을 위해 2007년부터 2011년 기준 위험 사건별 위험도 산정 기준 자료에서 발췌하였다[12]. 식(20)에서  $C_i$ 는 각각의 식별되는 위험사건이며  $C$ 는 이에 해당하는 심각도를 나타낸다.

식(20)은 승객 경우, 심각도는 식별한 각 위험사건의 심각도 합으로 산정된다. 식(21)은 현장 궤도 작업자에 대한 심각도를 나타낸다. 식(21)의 결과는 1년에 직원이 선로변 작업 중 0.634655명이 사망함을 의미한다.

$$Consequence_{pass} = \sum C_i = 0.019375 + 0.0525 + 0.05 + 0.008333 + 0.02 + 0.005 = 0.155208 \tag{20}$$

$$Consequence_{wk} = \sum C_i = 0.634655 \tag{21}$$

Table 6. Safety information for passenger.

Class	Accident	Frequency	Fatality
Passenger	Slip, trip, and falls in the train	8	0.019375
Passenger	Struck by train door	2	0.0525
Collision	Train collision by signaling	2	0.05
Collision	Train collision by obstacle	3	0.008333
Collision	Train collision by routing failure	1	0.02
Passenger	Struck by fallen object in the train	4	0.005

Table 7. Safety information for worker.

Class	Accident	Frequency	Fatality
Worker	Be hit by a train on the field	29	0.634655

(2) 위험 노출도(Exposure) 변수 정의

위험노출도는 승객의 경우 열차 사용 빈도 및 편도 운행시간을 고려한다. 직원인 경우 궤도 작업 투입 빈도와 현장 궤도작업 시간을 고려한다. 또한, 승객 및 직원에 대해 위험에 노출될 경우 위험원 지속시간을 노출도에 반영해야 한다[12]. 즉, 위험노출도는 위험원의 지속시간과 승객이나 직원이 시스템에 노출되는 지속시간의 합으로 산정한다. 4.1 사례의 가정과 동일하게 승객은 편도 운행시간의 1/5시간 동안 위험지역에 노출되며 위험원 지속시간은 1/5시간으로 가정하여 40%의 노출도로 산정되며, 직원은 작업시간 중 1/5시간 동안 현장 선로변이라는 위험지역에 노출되며 위험원 지속시간은 1/10시간으로 가정하여 30%의 노출도로 산정한다.

$$Exposure_{pax} = \frac{\text{위험지역 통과시간}}{\text{열차이용시간}} + \text{위험원 지속시간} = \frac{1}{5} + \frac{1}{5} = 40\% \quad (22)$$

$$Exposure_{wk} = \frac{\text{위험지역 작업시간}}{\text{1일 작업시간}} + \text{위험원 지속시간} = \frac{1}{5} + \frac{1}{10} = 30\% \quad (23)$$

(3) 위험 회피도(Avoidance) 변수 정의

회피도는 위험원이 사고로 진행되는 것을 방지하는 방호장치 유무에 따라 결정된다. 4.1 사례의 단선 신호 시스템 분석결과 장애물검지 장치, 열차검지, 비상제동 등 위험발생 시 사고를 회피 또는 방호 할 수 있는 방호장치가 다수 존재하므로 회피도는 승객 및 직원의 경우 동일하게 95%로 예측한다.

$$Avoidance_{pax} = 95\% \quad (24)$$

$$Avoidance_{wk} = 95\% \quad (25)$$

(4) 요구율(Demand Rate) 변수 정의

요구율(Demand Rate)은 발생빈도로서 1년 동안 발생된 위험사건수로 산정한다. Table 5와 Table 6에서 발생빈도는 국토교통부 철도안전정보종합관리시스템 통계자료인 위험사건 및 위험영역 위험도 현황을 근거로 한 Table 5와 Table 6의 발생빈도 데이터를 이용해 승객과 궤도작업자의 요구율을 산정한다. 식(26)에서  $\sum W_i$ 는 각각의 식별되는 요구율이며  $W_i$ 는 예 해당하는 요구율을 나타낸다. 식(26)은 승객의 요구율을 나타내며, 식(27)은 현장 궤도 작업자의 요구율을 나타낸다.

$$DemandRate_{pax} = \frac{1}{\sum W_i} = \frac{1}{8+2+2+3+1+4} = 0.05 \quad (26)$$

$$DemandRate_{wk} = \frac{1}{\sum W_i} = \frac{1}{29} = 0.034483 \quad (27)$$

4.2.2 퍼지추론

Fig. 8은 4.2.1에서 산정된 4개의 퍼지화에 따른 퍼지 추론 결과 값이다. 승객의 경우, 32번째 퍼지 규칙에서 소속도 0.81에 해당하는 SIL 3와 20번째 퍼지 규칙에서 소속도 0.19에 해당하는 SIL 2를 갖는 2개의 MIN값이 도출 되었다.

직원의 경우, 32번째, 25번째, 38번째, 44번째 퍼지 규칙에서 각각 소속도 0.9의 SIL 3, 소속도 0.1의 SIL 2, 소속도 0.04의 SIL 3 그리고 소속도 0.04의 SIL 4 등급을 갖는 4개의 MIN 값이 도출 되었다. 승객과 직원에 대한 퍼지 추론 결과는 역 퍼지화 단계에서 MAX 연산을 통해 최종 SIL 등급 및 해당 해저드율을 도출 한다.

4.2.3 역퍼지화

역퍼지화(defuzzification)과정에서 출력은 허용해저드율에 해당하는 하나의 숫자로 산출되어야 하므로 식(10)을 적용한 무계

No	Consequence	Value[C]	Exposure	Value[F]	Avoidance	Value[P]	Demand Rate	Value[W]	MIN	SIL	No	Consequence	Value[C]	Exposure	Value[F]	Avoidance	Value[P]	Demand Rate	Value[W]	MIN	SIL
32	Critical	0.81	Frequent	1.00	Possible	1.00	Relative_High	1.00	0.81	3	32	Critical	0.95	Frequent	0.90	Possible	1.00	Relative_High	1.00	0.9	3
20	Maginal	0.19	Frequent	1.00	Possible	1.00	Relative_High	1.00	0.19	2	25	Critical	0.95	Rare	0.10	Possible	1.00	Relative_High	1.00	0.1	2
2	Minor_Injury	0.00	Rare	0.00	Possible	1.00	Relative_High	1.00	0	a	38	Catastrophic	0.05	Rare	0.10	Possible	1.00	Relative_High	1.00	0.05	3
3	Minor_Injury	0.00	Rare	0.00	Not_Likely	0.00	Very_Low	0.00	0	a	44	Catastrophic	0.05	Frequent	0.90	Possible	1.00	Relative_High	1.00	0.05	4
4	Minor_Injury	0.00	Rare	0.00	Not_Likely	0.00	Low	0.00	0	a	4	Minor_Injury	0.00	Rare	0.10	Not_Likely	0.00	Low	0.00	0	a
5	Minor_Injury	0.00	Rare	0.00	Not_Likely	0.00	Relative_High	1.00	0	a	5	Minor_Injury	0.00	Rare	0.10	Not_Likely	0.00	Relative_High	1.00	0	a
6	Minor_Injury	0.00	Frequent	1.00	Possible	1.00	Very_Low	0.00	0	a	6	Minor_Injury	0.00	Frequent	0.90	Possible	1.00	Very_Low	0.00	0	a

Passenger

Worker

Fig. 8. Fuzzy inference results.

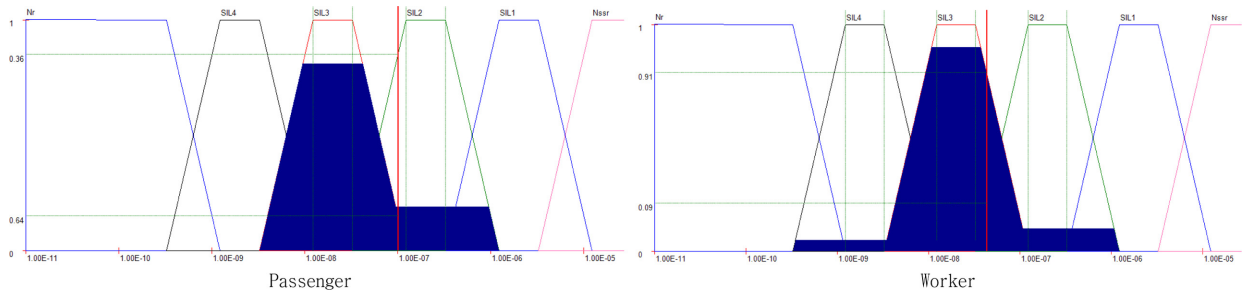


Fig. 9. Membership function for SIL result.

Table 8. Determined SIL for passenger.

Passenger	Fuzzy SIL	Grade	THR
1 <sup>st</sup> SIL	SIL 3	0.64	1.00E-07(1,138yrs)
2 <sup>nd</sup> SIL	SIL 2	0.36	

Table 9. Determined SIL for worker.

Worker	Fuzzy SIL	Grade	THR
1 <sup>st</sup> SIL	SIL 3	0.91	6.71E-08(1,701yrs)
2 <sup>nd</sup> SIL	SIL 2	0.09	

중심법(CoG, Centre of Gravity) 적용했다. Fig. 9와 같이 점선으로 표기된 수직선을 통합하고, 통합한 집합의 무게가 같은 두 부분으로 가르는 지점을 실선과 같이 선정 했다. 선정 방법은 각 SIL 범위의 하한 중심구간 점(C<sup>-</sup>)과 상한 중심구간 점(C<sup>+</sup>)을 표본으로 했다.

최종 역 퍼지화 결과로써 승객 및 직원의 허용 해저드율은 식(28) 및 식(29)와 같으며, 최종 승객 및 직원의 SIL 평가 결과는 Table 8, Table 9와 같다.

$$CoG_{pass} = \frac{1.78E-08 \times 0.81 + 5.62E-08 \times 0.81 + 1.78E-07 \times 0.19 + 5.62E-07 \times 0.19}{0.81 + 0.81 + 0.19 + 0.19} = 1.00E-07 \quad (28)$$

$$CoG_{wk} = \frac{1.78E-09 \times 0.05 + 5.62E-09 \times 0.05 + 1.78E-08 \times 0.9 + 5.62E-08 \times 0.9 + 1.78E-07 \times 0.1 + 5.62E-07 \times 0.1}{0.05 + 0.05 + 0.9 + 0.9 + 0.1 + 0.1} = 6.71E-08 \quad (29)$$

#### 4.4 검증 결과

본 시뮬레이션 결과 검증되지 않는 궤도구간에 열차가 진입하는 해저드관련, 승객 경우 첫 번째 리스크 평가는 소속도 0.64을 갖는 SIL3가 제시되며, 두 번째는 소속도 0.36을 갖는 SIL2가 제시된다. 안전성을 고려하여 소속도가 높은 SIL3를 선택하고, 해당 해저드율은 1.00E-07이며 9,973,073 시간에 해당하는 1,138년이다. 직원 경우 첫 번째 리스크 평가는 소속도 0.91을 갖는 SIL3가 제시되며, 두 번째는 소속도 0.09을 갖는 SIL2가 제시된다. 안전성을 고려하여 소속도가 높은 SIL3를 선택하고, 해당 해저드율은 6.71E-08이며 14,896,787 시간에 해당하는 1,701년이다. 최종적으로 궤도구간에 열차가 진입하는 해저드에 대해서 최악의 경우를 고려 할 때 최종 안전요구사항은 가장 엄격한 SIL 3와 허용 해저드율인 6.71E-08를 제안하며 이는 약 1,701년에 한 번의 사고를 허용하는 것에 해당한다.

본 시뮬레이션 결과 값은 고장 데이터를 사용한 하향식(Bottom Up) 정량적 접근법으로 평가된 4.1 사례의 허용해저드율 2.00E-08 값과 유사하며 평가된 안전무결성 등급은 SIL 3로 동일함을 확인 할 수 있다.

그러므로, 본 퍼지 리스크 그래프 평가방법은 사업초기 개념설계 단계에서 고장율과 같은 세부 시스템 상세 정보가 부재한 상황이라도 객관적 통계 자료 및 운영조건 분석을 통해 신호 위험 기능의 반정량적인 안전성 평가도구로써 활용 될 수 있음을 검증하였다.

## 5. 결 론

기존 리스크 그래프는 언어적 표현으로 입력 변수의 평가 기준을 제시함으로써, 평가자에 따라 주관적 언어 해석의 차이로 의사결정에 상당한 제한을 가지게 했다. 본 퍼지 리스크 그래프 모델은 각 입력변수를 구성하는 멤버십 함수의 입력변수 소속도 표현으로 주관적 언어적 표현에 대한 모호성을 배제할 수 있었다. 그리고 멤버십 함수의 소속도 중 가장 작은 값을 선택함으로써 가장 안전하고 보수적인 수치를 선택함으로써 주관적 판단의 오차에 대한 범위를 최소화하여 언어변수 입력에 따른 모호성을 해결할 수 있다.

또한, 리스크 그래프 입력변수는 이산적 형태로 범위 간에 수직적인 경계면 형상으로 최종 안전성 평가가 과대 또는 과소평가가 될 수 있었으나 본 퍼지 리스크 그래프 모델은 멤버십 함수의 모호 구간을 허용함으로써 수직적인 경계면을 평활화 하여 근소한 입력변수의 차이로 인한 안전무결성 등급이 극단적으로 평가되는 것을 방지할 수 있다. 즉 기존 이산적인 범위 경계를 연속형으로 처리하여 입력 데이터 분포에 따라 적절한 기준치를 선정하여 안전성 평가시 분류 오류에 따르는 안전성 기준 미달의 시스템 공급 또는 초과 비용 발생을 방지할 수 있었다.

끝으로, 기존 리스크 그래프는 SIL1에서 SIL4 범위 내에서 정성적인 등급(Ranking)으로만 안전성 요구사항을 도출함으로써 신호 안전기능에 대한 설계 기준 및 검증기준을 수립할 수 없었으나 본 퍼지 리스크 그래프 모델은 역 퍼지화를 통해 SIL과 해당 등급에 상응하는 허용 해저드율(THR, Tolerable failure rate)을 도출함으로써 정성 및 정량적 요구사항을 동시에 제안할 수 있었다.

결론적으로 본 논문에서는 프로젝트 초기단계 운영조건 및 시스템 구성 분석을 통해 식별된 위험원에 대하여 정성적인 SIL 등급과 정량적인 허용 해저드율로써 안전성 요구사항을 정의할 수 있는 퍼지 리스크 그래프를 제안하였다. 이는 2.2에서 기술한 기존 정성적 방법론의 단점을 보완할 수 있었으며 위험원에 대해 과대평가 또는 과소평가에 따른 비용의 증가 또는 안전성 결여를 방지할 수 있다. 본 연구와 관련하여 향후 추진되어야 할 연구 내용은 리스크 그래프의 입력변수 중 노출도, 회피도 결정시 전문가의 의견을 세분화하여 객관화할 수 있는 모델이 추가적으로 요구된다. 또한, 멤버십 함수 선정 시 멤버십 함수의 기울기 및 멤버십 함수간의 중복도가 SIL등급 및 허용 해저드율 결과 값에 미치는 영향 분석을 통해 최적의 퍼지 멤버십 함수(Fuzzy Membership Function)를 결정할 수 있는 알고리즘 추가 연구가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 2016년도 서울과학기술대학교 산학협력단 “퍼지 리스크 그래프를 적용한 신호 기능 SIL 할당에 관한 연구”관련 과제 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

## References

- [1] IEC (1997) 61508-5, *Functional safety of electrical/electronic programmable electronic safety-related systems Part5*, pp. 21-30.
- [2] PD CLC/TR (2007) 50451 *Railway applications Systematic allocation of safety integrity requirements, Annex A*, pp. 32.
- [3] IEC (2003) 61511-3 *Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector- Part3: Guidance for the determination of the required safety integrity levels*, pp. 33-35.
- [4] H. Jung, J. Yeo (1994) *Neuro Fuzzy Chaos*, Daekwang Publisher, pp. 137-179.
- [5] J. Kim, J. Yoo (2008) Service system desing using fuzzy service FMEA, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 31(4), pp. 162-167.
- [6] D.-J. Kim, J.-O. Kim, H.-C. Kim (2009) Expert system for FMECA using minimal cut set and fuzzy theory, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(3), pp. 342-347.
- [7] J.-O. Kim, H.-C. Kim, D.-J. Kim, J.-S. Shin, H.-J Kim (2007) FMECA using fault tree analysis and fuzzy logic, *Journal of the Korean Society for Railway*, pp. 1523-1526.
- [8] Ossama Y. Abul-Haggag, Walied Barakat (2013) Application of fuzzy logic for risk assessment using risk matrix, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(1), pp. 49-54.
- [9] Didier Dubois and Henri Prade (1987) The mean value of fuzzy number, *Fuzzy Sets and Systems*, 24(3), pp. 79-300.
- [10] Oscar Castillo, Patricia Melin (2007) *Type-2 Fuzzy Logic: Theory and Application*, Springer, pp. 16-19.

- [11] PD CLC/TR (2007) 50451 *Railway applications Systematic allocation of safety integrity requirements, Annex A*, pp. 52-66.  
[12] Korea Transportation Safety Authority (2014) *The estimated standard of risk and application plan*, Rail Safety Information System, Seoul, pp. 8.

(Received 29 January 2016; Revised 29 February 2016; Accepted 8 March 2016)

---

**Heekap Yang** : hkyang@hyundai-rotem.co.kr

Department of Electric Traction and Signalling System, Graduate School of Railway, Seoul National University of Science and Technology, Nowongu, Gongreung 2 Dong 72, Seoul, Korea

**Jongwoo Lee** : saganlee@seoultech.ac.kr

Department of Electric Traction and Signalling System, Graduate School of Railway, Seoul National University of Science and Technology, Nowongu, Gongreung 2 Dong 72, Seoul, Korea