

# Fuzzy-FMEA을 이용한 건축물의 위험도에 관한 연구

정금호<sup>†</sup>

전남대학교 건축학과

## A Study of Risk for Building using Fuzzy-FMEA

Kum-Ho Chung<sup>†</sup>

*Department of Architecture, Chonnam National University*

### Abstract

The building safety check is basic for safety management of building and that is determined by the checklist such as member force ration, intensity, crack, neutralization, sodium chloride content, reinforcement corrosion, spalling, exfoliation, leakage, reinforcement exposure and settlement. So a safety grade from checklist of members is an equivalent evaluation that do not have a member weighting. There is need to modify the evaluation system of building. In addition safety evaluation system is many problem such as simple process and priority calculation. So this paper contents paper research for Fuzzy-FMEA and sample process for risk of reinforce-concrete building that came from an expert survey.

**Keywords** : Risk, Fuzzy, FMEA, Safety check, Reinforce-concrete

### 1. 서 론

우리나라 시설물 안전관리는 예방차원의 필수적인 관리, 점검이 아닌 사후처리 형태의 보수, 보강을 기본으로 한다. 따라 근본적으로 안전관리에 효율성이 부족하다. 시설물의 안전관리의 기본인 건축물의 안전진단은 건축 부재별 박리, 중성화, 크랙 결함 등에 대한 체크리스트식 계산법에 의해 등급이 결정되고 있다.

따라서 부재별 체크항목별 점수에 의한 안전진단 등급은 기본적으로 부재별 체크항목별 심각도, 검출도, 영향도등의 가중치를 고

려하지 않는 등가평가를 기본으로 한다. 이에 따라 기존 건축물 진단에 대한 평가방법을 수정할 필요가 있다. 이에 기존 안전도 산정방법이 가지는 문제점인 가중치 미산정, 계산의 단순성으로 인한 건축물 등급의 단순성을 개선할 방법을 연구할 필요가 있다. 이를 위해 Fuzzy-FMEA의 방법론을 고찰하고, 철근콘크리트 건축물의 사례로 전문가의 설문응답 분석을 통해 철근콘크리트 건축물의 위험도를 도출하였다.

### 2. Fuzzy-FMEA 방법론 고찰

<sup>†</sup>Corresponding author E-mail: kumho@jnu.ac.kr

## 2.1. 실험 개요

제조업분야에서 널리 활용되고 있는 FMEA기법은 발생가능성이 있는 하자 형태를 파악하고, 고객에게 미칠 고장 발생 요인을 정량적으로 평가하여 이를 우선순위별로 발굴하기 위한 목적으로 활용되고 있다<sup>1)</sup>. 즉 시스템의 구성요소인 프로세스 각각의 요소에서 실패가 발생했을 경우 전체 시스템에 미치는 영향 또는 심각성을 평가하는 기법이다<sup>2)</sup>. 본 연구에서는 재난위험시설 평가에 있어 기존 등급평가를 기본으로 두고 있다. 그러나 평가에 있어 요소간의 중요도와 위험도를 가산하지 않는 문제점으로 인한 안전관리 및 사후 조치에 뚜렷한 방향을 제시 못하고 있다. 따라서 이에 대한 대안으로 평가에 있어 위험도를 평가하여 정량적 평가를 통한 순위를 이끌고자 한다. 그러나 기존 FMEA의 문제

점으로 인해 위험시설 평가에 불합리하여 폐지를 이용하여 방법을 개선하고자 한다. 또한 시설의 종류가 광범위하여 건축(콘크리트구조)의 안전평가에 한정하여 위험도 고찰을 하였다.

국내 재난위험시설 중 건축물(철근콘크리트)에 관한 평가항목 부재력비, 강도, 균열, 중성화, 염화물 함유량, 철근부식, 박리, 박락·충분리, 누수·백태, 철근노출, 기울기·침하 등 11개 항목에 대한 설문과 건축물 부재중 기둥, 내력벽, 큰보, 작은보, 슬라브, 테두리보, 접합부 7개 항목에 대한 설문을 구성하였다. 각 항목에 대한 평가는 FMEA기법에서 가장 보편적으로 채택하는 10점 척도를 사용하였다(Table 1).

설문조사는 안전진단 기업 종사자를 대상으로 2013년 8월 15일부터 8월 23일까지 하였다. 설문 응답자는 27명이며, 이중 불성실

**Table 1.** List of risk factor in building

| Class             | Items                                                                                                                                                                      | Scale                 |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Safety evaluation | Member force ratio, Intensity, Crack, neutralization, sodium chloride content, reinforcement corrosion, spalling, exfoliation, leakage, reinforcement exposure, settlement | Likert 10 point scale |
| Member            | Pier, Proof-stress wall, Girder, Beam, Slab, Spandrel Beam, Junction                                                                                                       |                       |

**Table 2.** Respondents of the survey

| Survey          | Contents           |
|-----------------|--------------------|
| Survey          | 2013. 8. 15- 8.23. |
| Sample          | 27                 |
| average carrier | 12.46 years        |
| sex             | Male 21, Female 3  |

**Table 3.** FMEA scales in the survey

| Scale         | Explanation                          |
|---------------|--------------------------------------|
| Occurrence; O | Frequency of Risk factor in building |
| Detection; D  | Detection degree of risk factor      |
| Severity; S   | Influence deree of risk factor       |

한 응답 자료를 제외한 25명의 자료를 분석하였다. 응답자의 평균 경력은 12.46년이며 평균연령은 41.63세이다. 남자는 21명 여자는 3명이다(Table 2~Table 3).

## 2.2. FMEA의 문제점

FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)는 평가항목인 발생빈도(Occurrence; O), 심각도(Severity; S), 검출도(Detectability; D)를 리커트척도를 활용하여 평가한 후 이들 값의 곱인 위험도(RPN-Risk Priority Number)을 구하여 위험순위를 도출한다<sup>3)</sup>. 위험도 값이 클수록 리스크가 크다는 것을 뜻한다.

위험도(RPN)

$$= \text{발생빈도}(O) \times \text{심각도}(S) \times \text{검출도}(D)$$

즉, FMEA는 시스템이나 장치 등의 고장요인 적출기법으로서 시스템을 구성하는 기기 혹은 부품 등에 어떤 고장이 발생하였을 때 그 고장이 상위 시스템에 어떠한 영향을 주는가를 해석하여 큰 영향을 미치는 기기를 적출하는 방법이다. 하지만, 기존 FMEA에서 위험순위 도출을 위해 활용되는 RPN은 다음과 같은 이유로 실제 상황에서 활용하기에 한계점을 가지고 있다.

첫째, FMEA의 평가항목들이 주관적이고 정성적인 자연어로 서술되어 있기 때문에 평가 대상에 대해 객관적이고 정밀한 평가가 어렵다.

둘째, 입력변수인 발생빈도 FMEA, 심각도, 검출도가 같은 중요도로 평가된다. 즉 발생빈도=6, 심각도=2, 검출도=1의 평가와 발생빈도=2, 심각도=3, 검출도=2의 평가는 RPN은 12로 위험도를 나타낸다.

셋째, FMEA는 평가자의 경험과 능력에 따라 결과가 상이하기 때문에 지식기반 시스템이 필요하다.

근본적으로 평가항목의 중요도(가중치)를

고려하지 못하는 점과 대처방법의 불명확성의 문제점을 가지고 있다. 따라서 보다 쉽고 정확하며 대응법이 명확한 방법이 필요하다. 이를 개선한 방법이 Fuzzy-FMEA이며, 특징은 다음과 같다.

첫째, 발생확률, 영향도만을 고려하는 기존의 위험도 평가항목과는 달리 발생빈도, 심각도, 검출도로 세분화된 평가항목을 가질 수 있다.

둘째, 정량적 방법보다는 적은 정보로도 비교적 쉽고 빠르게 결과를 도출할 수 있다.

셋째, 비전문가도 약간의 교육만으로 쉽게 이해하고 활용할 수 있다.

넷째, 활용이 용이하면서도 위험도를 평가하고 대책을 수립하는 일련의 과정을 가지고 있어 타 정성적 방법에 비해 체계적이다.

다섯째, 퍼지이론의 적용으로 평가자의 수준에 따라 주관적인 평가로 치우치기 쉽다는 정성적 평가방법이 가지는 한계점과 기존 FMEA의 위험도(RPN)가 가지는 한계점을 해결할 수 있다.

## 2.3. Fuzzy-FMEA 기대효과

Fuzzy-FMEA는 퍼지 추론 시스템을 구축하여 불확실하고 애매한 상황에서 전문가의 지식과 경험을 활용하여 FMEA를 수행하는 기법으로 발생빈도, 심각도, 검출도 그리고 위험도를 언어변수로 표현하며, 그들 간의 관계는 전문가들의 지식과 경험들로부터 도출하여 퍼지 If-Then규칙으로 표현된다<sup>4)</sup>.

갈등위험도 평가를 위한 FMEA의 수행에 퍼지이론을 적용함으로써 얻을 수 있는 장점은 다음과 같다.

첫째, 퍼지이론은 인간의 사고를 기반으로 하는 방법론으로 전문가의 경험과 지식이 자연어로 기록되어 있는 FMEA의 모든 정보들을 가장 잘 반영하여 최종 평가결과를 도출할 수 있다.

둘째, 위험정도를 언어변수로 현상의 불확

실한 상태를 그대로 표현해 줌으로써 근사적인 평가가 가능하다.

셋째, 기존 FMEA에서 발생할 수 있는 발생빈도, 심각도, 검출도가 다른 조합을 가지고 있어도 같은 위험도(RPN)을 가질 수 있는 한계점을 해결 할 수 있다.

넷째, 근사추론논리인 퍼지 추론을 이용하여 불확실성이 내포된 전문가가 제공한 지식을 언어로 표현하여 퍼지 규칙화 하고 근사해로 전환하여 정량화된 결과를 도출할 수 있다.

### 2.3.1. 퍼지집합(Fuzzy Set)

퍼지 집합은 다양한 소속정도를 가지는 원소들로 이루어진 집합으로서, 어떤 원소가 퍼지 집합에 소속될 정도는 크리스프(crisp) 집합에서 요구하는 0또는 1이 아닌  $[0,1]$ 의 범위에서 임의의 값을 가질 수 있다. 퍼지 집합에서 전체집합  $X$ 에 속하는 어떤 원소  $x$ 가 퍼지 집합에 소속될 가능성은  $\mu_A(x)$ 로 표시하고,  $\mu_A(x)$ 는 0과 1사이의 값을 가진다. 이를 수식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1], 0 \leq \mu_A(x) \leq 1 \quad (1)$$

퍼지 집합  $A$ 를 집합형식으로 표현하면 다음과 같다.

$$A = (x, \mu_A(x)) | x \in X \quad (2)$$

퍼지 집합을 퍼지집합집합의 형태로 표현하면 원소들이 이산적일 때는 다음과 같다.

$$A = \sum_{i=1} \frac{\mu_A(x)}{x_i} \quad (3)$$

또한 원소들이 연속적일 때는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$A = \int \frac{\mu_A(x)}{x} \quad (4)$$

전체집합의 원소 중에서 퍼지 집합에 조금이라도 포함되어 있는 원소들로 이루어진 집합을 퍼지 집합의 지지(support)라고 부르며 아래의 식으로 표현한다.

$$Su(A) = x | \mu_A(x) > 0, x \in X \quad (5)$$

퍼지 집합의 소속 함수값 중에서 최대값을 퍼지 집합의 높이라고 하며, 높이가 1인 퍼지 집합은 정규화(normalize) 되었다고 한다. 퍼지 집합의 원소들 중에서 일정한 소속 함수값 이상의 원소로 된 집합을  $\alpha$ -수준집합( $\alpha$ -cut set)이라고 부른다.  $\alpha$ -수준집합은 소속 함수의 값이  $\alpha$  이상인 원소들로 이루어진 보통집합이 되며 이는 식 (6)과 같다.

$$A_\alpha = x | \mu_A(x) \geq \alpha, x \in X \quad (6)$$

퍼지 집합의 소속 함수 값을 나타내는  $\alpha$ 로 이루어진 집합을 퍼지 집합의 레벨집합(level set)이라고 부르며, 식 (7)로 나타낸다.

$$A_\alpha = \{x | \mu_A(x) = \alpha, \alpha \geq 0, x \in X\} \quad (7)$$

퍼지 집합의 기본연산에는 합집합(MAX), 교집합(MIN), 여집합이 있다. 전체집합 내에 퍼지 집합  $A, B, C$ 가 존재할 때, 퍼지 집합  $A, B$ 의 합집합은  $A \cup B$ 로 표시하고, 원소  $x$ 의 소속함수 값은  $A$ 와  $B$ 에 포함될 가능성 중에서 큰 것을 취한다.

$$\mu_{A \cup B} = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)], \forall x \in X$$

– MAX 연산

퍼지 집합  $A, B$ 의 교집합은  $A \cap B$ 로 표시하고,  $A$ 와  $B$ 에 포함될 가능성 중에서 작은 것을 취한다. 원소  $x$ 의 소속 함수 값은 식은 다음과 같다.

$$\mu_{A \cap B} = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)], \forall x \in X$$

– MIN 연산

### 3. Fuzzy-FMEA를 활용한 위험도 평가 모델

#### 3.1. 위험도 평가항목

퍼지 FMEA는 FMEA와 유사하게 발생빈도, 심각도, 영향도의 입력변수로 이뤄진다. 입력 변수에 해당하는 설문을 통한 위험도 평가항목의 상세한 정의는 다음과 같다.

- 발생빈도(Occurrence; O)는 건축물 위험 발생 가능성
- 심각도(Severity; S)는 건축물 위험 발생 시 해결의 난이도
- 검출도(Detection; D)는 안전검사에 의해 검출할 수 있는 정도

입력변수인 발생빈도, 심각도, 검출도는 매우 낮음, 낮음, 중간, 높음, 매우 높음의 5개의 언어변수로 평가가 이루어지며 출력변수인 위험도는 1~10의 값으로 표현된다. 즉 언어적인 입력변수를 이용하여 위험도를 산출한다. 이는 기존의 FMEA의 수량 입력값과 가장 큰 차이점이다.

갈등위험도 평가를 위한 퍼지추론 방법은 이용이 쉽고 계산이 편리한 Mamdani 추론법(MAX-MIN 방법)을 이용하였다.

본 연구에서 제안하는 Fuzzy-FMEA가 활용된 위험도 평가모델의 구성도이며 크게 3 단계로 이루어져 있다.

- 단계 1 (퍼지화): 실수 값(crisp value)으로 입력된 발생빈도(Occurrence), 심각도(Severity), 검출도(Detection)의 입력변수 값(Input)을 퍼지추론에 적용하기 위해 퍼지화(Fuzzification)하여 퍼지 입력 값(Fuzzy Inputs)을 구한다. 즉 언어 변수를 퍼지 집합변수로 만드는 과정이다.
- 단계 2 (퍼지 규칙 기반 추론): 단계 1에서 도출한 퍼지 입력 값(Fuzzy Inputs)을 토대로 퍼지 규칙 베이스(Fuzzy Rule

Base)로부터 각 규칙의 추론결과를 구하고 추론결과가 여러 개일 경우 이를 합성하여 최종적인 추론결과인 퍼지 출력 값(Fuzzy Output)을 구한다.

- 단계 3 (비퍼지화): 단계 2에서 도출한 퍼지 출력 값(Fuzzy Output)은 퍼지 값(Fuzzy Value)이므로 실제 상황에 적용할 수 있도록 비퍼지화(Defuzzification)하여 실수 값(Crisp Value)형태의 출력변수 값(Input)인 위험도(Risk Score)를 출력한다.

#### 3.2. 퍼지화 모델(Fuzzification Model)

위험도 평가 모델의 첫 단계인 퍼지화(Fuzzification)는 퍼지이론을 응용하기 위해 실수 값(Crisp Value)으로 입력된 평가 값을 적절한 퍼지 값으로 바꾸어주는 과정이다. 퍼지화를 하기 위해서는 입력변수인 발생빈도(Occurrence), 심각도(Severity), 검출도(Detection)의 특성에 맞게 미리 정의된 언어변수와 소속 함수가 필요하다.

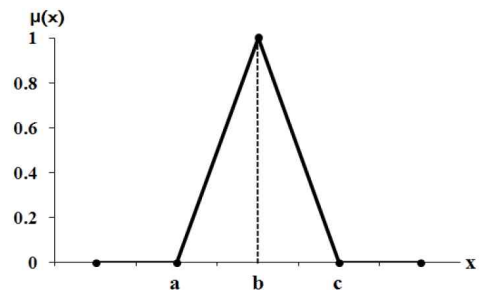


Fig. 1. Membership function.

본 연구에서는 입력변수(발생빈도, 심각도, 검출도)는 10점 척도로 평가되며, 매우낮음(Re), 낮음(L), 중간(M), 높음(H), 매우높음(VH) 5개의 언어변수로 표현된다. 퍼지화를 위한 소속 함수는 1에서 10점까지의 평가점수가 가로축인 x값이 되며 평가점수가 5개의 언어변수에 해당하는 퍼지집합에 속하는 정

도는 세로축인  $\mu(x)$ 가 된다.

Table. 4에 입력변수인 발생빈도, 심각도, 검출도 각각의 언어변수에 대한 정의를 나타내었다.

### 3.3. 추론 모델(Inference Model)

추론 모델(Inference Model)은 퍼지화를 위한 언어변수와 소속 함수를 통해 도출된 퍼지 입력 값(Fuzzy Inputs)을 토대로 퍼지 규칙 베이스(Fuzzy Rule Base)로부터 추론결과를 구하고, 추론결과가 여러 개일 경우 이를 퍼지합성 방법을 활용하여 최종적인 추론결과인 퍼지 출력 값(Fuzzy Output)을 구한다.

이를 위해 필요한 구성요소로는 퍼지규칙을 도출하기 위한 퍼지 규칙 베이스(Fuzzy Rule Base)와 여러 개의 퍼지규칙을 하나의 결과 값으로 합성하기 위한 퍼지 합성연산이다.

#### 3.3.1. 퍼지 규칙 베이스(Fuzzy Rule Base)

퍼지 규칙 베이스(Fuzzy Rule Base)는 수치 변수 대신 언어적인 평가를 사용하여 애매모

함을 다루기 위해 만들어진 것이다. 전반부와 결론부가 언어변수로 구성된 퍼지 If-Then 규칙을 사용하여 정확하고 정량적인 분석 없이도 인간의 지식과 추론프로세스의 정성적인 측면들을 다룰 수 있다.

If-Then규칙에서 전반부(If part)는 퍼지 입력변수에 해당되며, 후반부(Then part)는 퍼지 출력변수에 해당 되며 다음과 같이 표현된다.

“ IF 발생빈도 is Low and 심각도 is Low and 검출도 is Low THEN 위험도 is Very Low ”

이와 같은 퍼지규칙을 정립하는 방법들은 다음과 같다.

- 전문가의 경험적인 지식의 언어적 형태의 규칙화를 통한 방법.
- 조작자의 조작행위를 모델링하는 방법.
- 대상의 기존의 퍼지모델에 의거한 방법.

본 연구에서는 연구자의 판단으로 퍼지규

Table 4. Linguistic variables

| Language      | Explanation                                    | Evaluation items |
|---------------|------------------------------------------------|------------------|
| Extremely low | Risk potential is extremely low                | O                |
|               | Difficult to solve is extremely low            | S                |
|               | Influence to the other factor is extremely low | I                |
| Low           | Risk potential is low                          | O                |
|               | Difficult to solve is low                      | S                |
|               | Influence to the other factor is low           | I                |
| Middle        | Risk potential is middle                       | O                |
|               | Difficult to solve is middle                   | S                |
|               | Influence to the other factor is middle        | I                |
| High          | Risk potential is high                         | O                |
|               | Difficult to solve is high                     | S                |
|               | Influence to the other factor is high          | I                |
| Very high     | Risk potential is very high                    | O                |
|               | Difficult to solve is very high                | S                |
|               | Influence to the other factor is very high     | I                |

칙을 구성한 후, 전문가들의 경험과 의견을 반영하여 최종 If-Then 규칙을 도출하였다.

퍼지추론을 위해 필요한 규칙의 개수는 입력변수의 공간을 몇 개로 분할했느냐에 따라서 결정되는데 입력변수인 발생빈도, 심각도, 검출도가 각각 5개의 언어변수로 평가되므로 총 125개( $5 \times 5 \times 5$ )의 규칙이 발생한다. 이에 대한 연구자의 퍼지 규칙은 Table 5와 같다.

### 3.3.2. 퍼지관계 합성 연산

이렇게 퍼지화된 입력 변수 값을 토대로 퍼지 규칙 베이스(Fuzzy Rule Base)로 부터 추론결과를 도출한다. 도출된 추론결과가 여

러 개일 경우 이에 대한 합성으로 최종적인 추론결과를 도출한다. 퍼지관계에 대한 일반적인 합성연산의 종류는 다음과 같다.

- 최대 최소 합성(MAX-MIN Composition)
- 최대 곱 합성(MAX-Product Composition)
- 최대 평균 합성(MAX-Average Composition)

합성연산들 중 MAX-MIN 합성연산은 퍼지 교집합의 최대소속정도를 구하는 연산방법으로 다수의 평가자에 의해 리스크 인자의 확인이 이루어지는 경우에 다수의 평가결과 중 가장 위험한 값을 선택함으로써 리스크 인자

Table 5. Fuzzy role

| Rule | IF  |     |     | THEN |
|------|-----|-----|-----|------|
|      | O   | S   | I   | R    |
| R1   | Re  | Re  | Re  | AU   |
| R2   | VH  | H   | VH  | AN   |
| R3   | H   | VH  | VH  | AN   |
| R4   | VH  | VH  | H   | AN   |
| R5   | VH  | VH  | VH  | AN   |
| R6   | Re  | L   | Re  | AU   |
| R7   | Re  | Re  | L   | AU   |
| R8   | L   | Re  | Re  | AU   |
| R9   | H   | H   | M   | H    |
| R10  | M   | H   | H   | H    |
| R11  | VH  | H   | L   | H    |
| R12  | L   | H   | VH  | H    |
| R13  | M   | L   | VH  | H    |
| ...  | ... | ... | ... | ...  |
| R111 | H   | M   | VH  | VH   |
| R112 | H   | VH  | M   | VH   |
| R113 | M   | VH  | H   | VH   |
| R114 | L   | VH  | VH  | VH   |
| R115 | VH  | VH  | L   | VH   |
| R116 | Re  | H   | Re  | VL   |
| R117 | L   | L   | L   | VL   |
| R118 | Re  | L   | M   | VL   |
| R119 | M   | L   | Re  | VL   |
| R120 | Re  | M   | L   | VL   |
| R121 | L   | M   | Re  | VL   |
| R122 | Re  | Re  | H   | VL   |
| R123 | H   | Re  | Re  | VL   |
| R124 | L   | Re  | M   | VL   |
| R125 | M   | Re  | L   | VL   |

의 위험도를 최대한 반영할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 퍼지관계 합성연산으로 MAX-MIN 합성연산을 사용하였다.

MAX-MIN 합성연산을 통해 사실과 조건에 일치하는 정도를 도출하는 순서는 다음과 같다.

- A와 A'의 퍼지 교집합을 구한다.(MIN 연산)
- 이 퍼지교집합에서 가장 높은 소속정도 a(퍼지 교집합의 최대소속정도)를 구한다. (MAX연산) : 조건의 일치 정도는 'a'
- 결론 B'는 퍼지집합 B를 a 높이로 절단하여 그 이하에 해당하는 퍼지집합으로 출력된다. 이것을 절단연산이라 하며 MIN 연산의 일종이다. 소속정도의 높이가 일정하게 a인 퍼지 집합과 퍼지집합 B의 교집합이 B'가 된다.

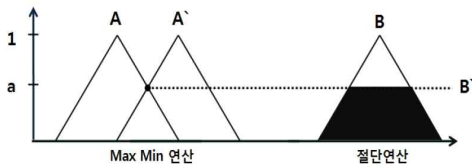


Fig. 2. Concept of approximate reasoning.

### 3.3.3. 비퍼지화 모델(Defuzzification Model)

추론 모델(Inference Model)을 통해 도출된 최종적인 추론결과는 퍼지 값이므로 실제 상황에 적용 가능하도록 다시 실수 값으로 변환하는 비퍼지화 과정이 필요하다. 이를 위해서는 퍼지화 모델(Fuzzification Model)에서와 마찬가지로 출력변수인 갈등 위험도의 특성에 맞게 미리 정의한 언어변수와 소속 함수가 필요하다.

본 연구에서는 위험도를 10단계의 Almost Unnecessary (AU), Minor (M), Very Low (VL), Low (L), Moderate (M), High (H), Moderately High (MH), Very High (VH),

Necessary (N), Absolute Necessary (AN) 10개 언어변수로 나타내며 이에 대응하는 비퍼지화를 위한 소속 함수의 도출방법은 퍼지화를 위한 소속 함수 도출 방법과 동일하다.

## 3.4. 위험도 평가 모델 적용 예시

### 3.4.1. 퍼지화 모델(Fuzzification Model)

요인이 발생빈도=2, 심각도=4, 검출도=6로 평가 되었다면, 위에서 도출한 소속 함수를 통해 퍼지화한 각 평가결과의 퍼지 입력 값(Fuzzy Inputs)은 Table 7과 같다.

### 3.4.2. 추론 모델(Inference Model)

퍼지화를 통해 퍼지 입력 값(Fuzzy Inputs)을 도출한 후 그에 해당하는 퍼지 규칙을 퍼지 규칙 베이스(Fuzzy Rule Base)로부터 추출하면 Table 8과 같다.

### 3.4.3. 비퍼지화 모델(Defuzzification Model)

퍼지 입력 값(Fuzzy Inputs)은 앞 절에서 설명한 퍼지 규칙 기반 추론 과정을 통해서 퍼지 출력 값(Fuzzy Output)으로 도출되며, 요약하면 다음과 같다.

이 값들을 무게 중심법을 활용하여 비퍼지화 하면 실수 값인 최종 위험도가 출력된다.

$$Defuzzification = \frac{0.33 \times 5 + 0.50 \times 7}{0.33 + 0.50} = 6.2$$

즉, 발생빈도 =5, 심각도=4, 검출도=7로 평가된 갈등요인의 최종 위험도는 6.2가 된다.

## 4. FUZZY-FMEA을 이용한 건축물 위험도 분석 결과

### 4.1. 안전진단 항목에 대한 위험도

국내 재난위험시설 중 건축물(철근콘크리트)에 관한 평가항목 부재력비, 강도, 균열, 중성화, 염화물 함유량, 철근부식, 박리, 박락·



**Table 6.** Define of linguistic variables

| Linguistic variable | Priorities Subsequent work |
|---------------------|----------------------------|
| AU                  | Almost Unnecessary         |
| MI                  | Minor                      |
| VL                  | Very Low                   |
| L                   | Low                        |
| M                   | Moderate                   |
| H                   | High                       |
| MH                  | Moderately High            |
| VH                  | Very High                  |
| N                   | Necessary                  |
| AN                  | Absolute Necessary         |

**Table 7.** Example of fuzzy input

| Evaluation item | Input | Re   | L    | M    | H    | VH   |
|-----------------|-------|------|------|------|------|------|
| Occurrence:O    | 5     | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| Severity:S      | 4     | 0.00 | 0.33 | 0.50 | 0.00 | 0.00 |
| Detection:I     | 7     | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.89 | 0.00 |

**Table 8.** Fuzzy rule base inference

| Rule N. | Occurrence |      | Severity |      | Detection |      | Center | Risk          |      |
|---------|------------|------|----------|------|-----------|------|--------|---------------|------|
| R54     | Moderate   | 1.00 | Low      | 0.33 | High      | 0.89 | 5      | Moderate      | 0.33 |
| R76     | Moderate   | 1.00 | Moderate | 0.50 | High      | 0.89 | 7      | Moderate High | 0.50 |

충분리, 누수·백태, 철근노출, 기울기·침하 등 11개 항목과 부재중 기둥, 내력벽, 큰보, 작은보 슬라브, 테두리보, 접합부 7개 항목에 대한 설문응답을 바탕으로 앞서 기술된 방법을 통하여 얻은 위험도는 다음과 같다.

Member force ratio, Intensity, Crack, neutralization, sodium chloride content, reinforcement corrosion, spalling, exfoliation, leakage, reinforcement exposure, settlement

Table 9에서 보는 바와 같이 철근콘크리트 건물의 위험도 순위는 균열, 철근노출, 누수 백태, 철근부식, 박락·충분리, 중화, 기울기 침하, 부재력비 및 강도, 박리, 염화물 함유의 순이었다. 언어적인 애매모호성을 기반으로

안전진단 요소의 위험도는 각각의 요소에 대한 중요도(가중치)가 반영되어 나타났다. 따라서 콘크리트조의 위험도는 균열이 가장 위험하며 철근노출에 의한 인장강도 약화 이에 따른 누수·백태의 위험도가 높게 나타났다. 이 결과를 바탕으로 향후 콘크리트 안전도 혹은 위험도 검사시 검사항목의 우선순위를 결정할 수 있다. 더나가 철근콘크리트구조의 안전을 향상을 위한 시공, 설계 단계에서 주요 점검항목의 우선순위를 결정할 수 있다.

#### 4.2. 부재에 따른 위험도

Table 10은 콘크리트 주요부재에 대한 위험도를 퍼지FMEA와 전문가 설문을 통하여

Table 9. 안전진단 항목에 대한 위험도

| id          | Member<br>force<br>ratio | Intensity | Crack | Neutral<br>ization | Sodium<br>chloride<br>content | Reinforce<br>ment<br>corrosion | spalling | exfoliation | leakage | reinforce<br>ment<br>exposure | settle<br>ment |
|-------------|--------------------------|-----------|-------|--------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------|-------------|---------|-------------------------------|----------------|
| 1           | 5.86                     | 8.00      | 8.47  | 7.00               | 4.60                          | 3.60                           | 5.96     | 6.20        | 5.96    | 7.55                          | 5.00           |
| 2           | 6.00                     | 6.82      | 9.41  | 8.88               | 3.00                          | 8.88                           | 6.00     | 8.88        | 8.00    | 9.41                          | 6.00           |
| 3           | 6.14                     | 2.14      | 5.00  | 6.92               | 4.60                          | 7.20                           | 6.59     | 5.00        | 5.96    | 8.00                          | 3.14           |
| 4           | 3.14                     | 4.87      | 6.94  | 1.00               | 5.43                          | 9.41                           | 3.14     | 6.97        | 4.60    | 6.53                          | 10.00          |
| 5           | 5.96                     | 2.60      | 5.00  | 8.00               | 5.00                          | 8.00                           | 6.59     | 5.00        | 5.86    | 8.47                          | 2.14           |
| 6           | 7.78                     | 6.59      | 8.93  | 6.00               | 4.60                          | 7.00                           | 6.00     | 6.20        | 6.00    | 6.94                          | 8.00           |
| 7           | 8.60                     | 8.41      | 9.00  | 5.94               | 5.94                          | 7.00                           | 9.00     | 5.00        | 4.60    | 8.41                          | 6.20           |
| 8           | 5.00                     | 4.05      | 4.14  | 3.41               | 3.00                          | 3.66                           | 3.60     | 3.14        | 4.60    | 5.00                          | 3.60           |
| 9           | 6.00                     | 5.96      | 8.93  | 6.94               | 5.94                          | 7.55                           | 8.00     | 6.82        | 7.46    | 6.97                          | 7.00           |
| 10          | 5.00                     | 1.00      | 5.94  | 4.60               | 1.60                          | 2.60                           | 5.00     | 4.14        | 2.14    | 3.60                          | 1.60           |
| 11          | 6.00                     | 6.59      | 7.46  | 5.82               | 5.00                          | 5.00                           | 6.82     | 7.55        | 8.41    | 8.41                          | 6.40           |
| 12          | 6.92                     | 6.00      | 10.00 | 10.00              | 10.00                         | 8.88                           | 8.41     | 8.11        | 8.47    | 10.00                         | 2.14           |
| 13          | 6.92                     | 8.47      | 9.41  | 6.94               | 6.82                          | 8.47                           | 6.40     | 5.96        | 6.94    | 6.94                          | 6.92           |
| 14          | 8.00                     | 8.93      | 9.47  | 5.00               | 6.92                          | 6.82                           | 6.94     | 6.94        | 6.94    | 8.88                          | 6.00           |
| 15          | 6.92                     | 7.46      | 9.41  | 6.53               | 6.00                          | 7.46                           | 6.40     | 7.45        | 8.41    | 8.41                          | 6.00           |
| 16          | 8.00                     | 8.00      | 9.41  | 6.94               | 6.20                          | 6.97                           | 6.00     | 7.55        | 7.55    | 8.41                          | 8.00           |
| 17          | 6.82                     | 6.40      | 8.47  | 6.40               | 4.09                          | 6.00                           | 6.00     | 6.94        | 9.47    | 10.00                         | 6.40           |
| 18          | 7.20                     | 8.00      | 10.00 | 5.96               | 4.47                          | 5.00                           | 6.40     | 6.97        | 8.88    | 7.45                          | 8.00           |
| 19          | 3.00                     | 6.40      | 9.41  | 7.00               | 6.13                          | 6.00                           | 4.47     | 5.96        | 8.00    | 6.53                          | 5.94           |
| 20          | 6.40                     | 7.20      | 9.41  | 10.00              | 8.00                          | 10.00                          | 7.20     | 9.41        | 10.00   | 10.00                         | 7.00           |
| 21          | 10.00                    | 8.47      | 10.00 | 7.60               | 7.00                          | 7.60                           | 9.00     | 6.53        | 10.00   | 8.11                          | 10.00          |
| 22          | 6.13                     | 5.41      | 7.55  | 6.58               | 6.82                          | 5.00                           | 6.20     | 8.60        | 8.93    | 6.00                          | 7.43           |
| 23          | 5.86                     | 7.46      | 8.88  | 7.46               | 7.46                          | 5.41                           | 5.86     | 7.46        | 7.46    | 7.46                          | 7.46           |
| 24          | 6.82                     | 9.47      | 10.00 | 9.00               | 7.00                          | 6.59                           | 7.00     | 6.45        | 7.20    | 7.20                          | 8.00           |
| Mean        | 6.44                     | 6.45      | 8.36  | 6.66               | 5.65                          | 6.67                           | 6.37     | 6.64        | 7.16    | 7.70                          | 6.18           |
| Rank<br>ing | 8                        | 7         | 1     | 5                  | 11                            | 9                              | 10       | 6           | 3       | 2                             | 11             |

얼은 값이다. 표에서 보는 바와 같이 슬라브, 큰보, 접합부, 작은보, 내력벽, 기둥의 순서였다. 슬라브, 큰보, 접합부에 대한 위험도가 높아 이에 대한 관리 감독과 보다 정밀한 검사가 요구된다 하겠다.

## 5. 결 론

부재별 체크항목별 점수에 의한 안전진단

등급은 기본적으로 부재별 체크항목별 가중치를 고려하지 않는 등가평가를 기본으로 한다. 기존 안전도 산정방법이 가지는 문제점인 가중치 미산정, 계산의 단순성으로 인한 건축물 등급의 단순성을 개선할 목적으로, Fuzzy-FMEA의 방법론을 고찰, 철근콘크리트 건축물의 사례로 전문가의 설문응답 분석을 통해 철근콘크리트 건축물의 위험도를 도출하였다.

Table 10. Risk of reinforce-concrete members

| id      | Pier  | Proof-stress wall | Girder | Beam  | Slab  | Splende Beam | Junction |
|---------|-------|-------------------|--------|-------|-------|--------------|----------|
| 1       | 5.38  | 5.38              | 5.38   | 5.00  | 6.45  | 4.00         | 5.96     |
| 2       | 6.00  | 10.00             | 8.11   | 8.11  | 7.55  | 5.96         | 6.53     |
| 3       | 6.13  | 6.82              | 5.00   | 6.20  | 6.92  | 4.60         | 6.59     |
| 4       | 5.43  | 3.14              | 5.94   | 3.00  | 4.60  | 3.00         | 4.60     |
| 5       | 6.82  | 7.20              | 5.00   | 6.20  | 6.13  | 5.00         | 5.96     |
| 6       | 6.20  | 6.20              | 6.00   | 5.38  | 6.40  | 4.60         | 6.40     |
| 7       | 5.57  | 5.57              | 5.94   | 5.94  | 5.94  | 5.00         | 7.00     |
| 8       | 1.00  | 1.00              | 3.14   | 3.14  | 4.14  | 5.00         | 3.60     |
| 9       | 6.59  | 6.59              | 7.55   | 5.96  | 7.55  | 6.14         | 7.45     |
| 10      | 1.00  | 4.14              | 3.60   | 2.60  | 5.00  | 3.60         | 2.14     |
| 11      | 6.40  | 9.41              | 8.47   | 8.47  | 9.00  | 6.00         | 4.60     |
| 12      | 10.00 | 10.00             | 8.11   | 5.94  | 10.00 | 3.60         | 10.00    |
| 13      | 8.00  | 8.00              | 9.00   | 9.00  | 9.00  | 9.00         | 8.47     |
| 14      | 9.00  | 9.00              | 10.00  | 10.00 | 9.41  | 9.41         | 7.00     |
| 15      | 6.00  | 6.00              | 10.00  | 8.93  | 9.00  | 8.41         | 8.41     |
| 16      | 7.78  | 6.00              | 9.41   | 9.41  | 9.00  | 8.00         | 7.45     |
| 17      | 6.00  | 6.00              | 7.60   | 7.60  | 6.59  | 6.53         | 6.00     |
| 18      | 7.78  | 6.40              | 9.41   | 9.41  | 9.41  | 7.00         | 6.97     |
| 19      | 5.94  | 5.94              | 8.00   | 5.00  | 8.00  | 5.96         | 5.94     |
| 20      | 8.41  | 6.94              | 7.00   | 8.41  | 8.88  | 8.88         | 10.00    |
| 21      | 10.00 | 10.00             | 8.41   | 5.94  | 9.41  | 7.00         | 8.88     |
| 22      | 6.00  | 5.00              | 6.53   | 7.00  | 6.82  | 5.00         | 6.40     |
| 23      | 6.82  | 6.59              | 6.82   | 6.82  | 7.00  | 5.00         | 6.82     |
| 24      | 6.00  | 6.00              | 7.46   | 6.00  | 6.00  | 4.47         | 8.88     |
| Mean    | 6.43  | 6.56              | 7.16   | 6.64  | 7.43  | 5.88         | 6.75     |
| Ranking | 6     | 5                 | 2      | 4     | 1     | 7            | 3        |

설문과 Fuzzy-FMEA를 통해 얻은 값을 기준으로 향후 안전 및 재난 위험시설 관리의 검사항목의 우선순위를 결정하여 집중적 관리 검사의 순위를 얻을 수 있다. 또한 이를 바탕으로 각각의 위험도에 따라 대처방법에 대한 룰에 대한 다양한 해결 접근법이 생겨날 수 있다. 마지막으로 퍼지이론을 이용한 건축물의 위험도 평가는 그간의 위험도 평가가 가지고 있는 평가 요소간의 중요도를 가산하여 평가할 수 있어 건축물의 위험도 평

가에 보다 분석적이고 효율적으로 대처할 시스템으로 사료된다.

## References

1. 이상옥, 전채휘(2009), 친환경건축의 디자인구성요소와 계획특성에 관한 연구, 한국생태환경건축학회 논문집, 2(3), pp. 47-54.
2. D.H. Stamatis(1997), Failure Mode and

Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution.

3. McDermott, R., R. Mikulak and M. Beauregard(1996), The Basics of FMEA. Portland.
4. J.B. Bowles, and C.E. Pelaez.(1995), FuzzyLogic Prioritisation of Failure in a SystemFailure Mode, Effects and CriticalityAnalysis, Reliability Engineering and system safety, 50, pp. 203-213.
5. 이슬기(2009), Fuzzy-FMEA를 활용한 도  
시재생사업에서의 갈등 위험도 평가모  
델, 광운대학교 대학원 석사학위논문.
6. 이광형, 오길목(1997), 퍼지이론 및 응용,  
홍릉과학출판사.
7. 김도현, 권기호, 이홍규, 정종대, 이강웅,  
이정문, 홍연찬(1998), 퍼지시스템, 에드텍.
8. 전인홍, 이광로(1982), 퍼지이론과 응용,  
교학사.