

## Fuzzy-FMEA를 활용한 지반함몰 위험도 평가

## Risk Assessment of Subsidence which utilized Fuzzy-FMEA

김대천<sup>1\*</sup> · 정영민<sup>2</sup> · 신동일<sup>3</sup>Deacheon Kim<sup>1\*</sup>, YoungMin Jung<sup>2</sup>, Dongil Shin<sup>3</sup><sup>1</sup>Ph.D. Student, Department of Disaster and Safety, Myongji University, Yongin, Republic of Korea<sup>2</sup>Graduate Student, Department of Disaster and Safety, Myongji University, Yongin, Republic of Korea<sup>3</sup>Professor, Department of Disaster and Safety, Myongji University, Yongin, Republic of Korea

\*Corresponding author: Deacheon Kim, kdc5825@naver.com

## ABSTRACT

**Purpose:** According to the recent occurrence statistics of ground accidents, ground subsidence and subsidence have become social problems as the frequency has increased centering around the downtown areas. This study tried to clarify risk of detailed factors which have an effect on subsidence. **Method:** For the study, detailed risk factors of 28 foundations were mainly drawn through the materials, precedent studies, and research reports shown by analyzing JIS' accident cases from 2016 to September 6, 2022 and by taking advice from an excavation expert. And risk was assessed by conducting a survey on 12 subsidence experts from the universities, research institutes, and industries and applying Fuzzy-FMEA to it. **Result:** It has found that damage of sewer pipes is 24.99% of overall risk, followed by excavation work (17.34%), water pipes (14.84%), and poor compaction (refill) (13.93%). And it has found that risk of damaging utilities (water pipes, sewer pipes, and other utilities) is highest, followed by poor construction works (excavation work, damage of sewer and water pipes, and other utility work) and poor compaction (refill). **Conclusion:** This shows that risk of subsidence factors judged by experts is similar with JIS' cases of ground subsidence.

**Keywords:** Subsidence Hazard, Subsidence, Ground Subsidence, Fuzzy-FMEA, Risk Assessment

## 요약

**연구목적:** 지반사고 발생통계에 따르면 최근 도심지를 중심으로 침하발생 및 지반함몰 빈도가 매년 증가하고 있어 사회적으로 문제로 대두되고 있다. 이 연구는 지반침하에 영향을 미치는 세부요인들의 위험도를 규명하고자 하였다. **연구방법:** 연구를 위해 지하안전정보시스템의 2016년도부터 2022년 9월 6일까지의 사고사례 분석을 통해 나타난 자료와 선행연구, 연구보고서 그리고 굴착 전문가의 자문을 받아 28개의 지반침하 세부위험요인을 도출 주요하였고, 산·학·연 지반침하 전문가 12명을 대상으로 설문문을 실시하여 Fuzzy-FMEA기법을 적용하여 위험도를 산정하였다. **연구결과:** 하수관로의 손상이 전체 위험도의 24.99%로 그 다음으로 굴착공사 17.34%, 상수관로 14.84%, 다짐(되메우기) 불량 13.93% 순으로 나타났으며, 매설물 손상(상수관로, 하수관로, 기타매설물)위 위험도가 높게 나타났으며, 다음으로 공사부실(굴착공사, 상하수관 손상, 기타매설물공사), 그리고 다짐(되메우기)불량 순으로 위험도가 높게 나타났다. **결론:** 이는 전문가 입장에서 판단하는 지반침하 요인에 대한 위험도가 지하안전정보시스템의 지반침하사례와 비슷한 결과를 확인하였다.

**핵심용어:** 지반침하 위험도, 지반침하 세부요인, 지반함몰, Fuzzy-FMEA, 위험도 산정

Received | 27 April, 2023

Revised | 15 May, 2023

Accepted | 23 May, 2023

 OPEN ACCESS


This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

## 서론

최근 도심지를 중심으로 지반침하의 발생빈도가 더욱더 증가하고 있다. 1970년대 이후부터 산업화에 따른 도시들의 성장으로 인해 지하수 개발과 사용량이 매년 증가하는 추세로, 자주 나타나는 침하의 원인으로는 교통해결을 위해 시공되는 상·하수관 노후화에 따른 파손, 지하철과 같은 터널공사, 대규모 굴착공사에 의한 지하수위 저하 등이 주요한 원인이 되고 있다. 도심지 굴착공사는 다양한 구조물과 도로 등이 인접하여 시공이 이루어지므로 시공기술의 미흡이나 시공 부주의로 인해 지반침하가 발생하였다.

지반침하 발생원인을 살펴보면 Jeong(2018)은 규모가 작은 지반함몰은 상수도 및 하수도관 등의 시설물 유지와 관리가 주요한 원인이지만, 대규모 지반침하는 굴착공사로 인하여 많이 발생하고 있음을 주장했다. Lee et al.(2014)는 도심지역 싱크홀 원인과 대책에 관한 연구에서 최근 싱크홀 규모가 커지게 되는 이유는 지하수 이용 증가에 따른 지하수위의 저하와 밀접한 관련이 있다고 하였다. Chung et al.(2015)은 지하수위의 저하로 인한 지하철구조물의 안정성 영향연구에서 굴착공사가 지하수위 저하 및 구조물의 안정성에 영향을 미칠 수 있다고 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 지반침하를 유발하는 위험요소 규명 및 분류, 위험도에 대한 평가 등을 통해 발생 가능한 지반함몰을 예측 및 평가할 수 있는 기법을 도출하고자 한다. 그리고 이를 통해 위험요소를 고려한 위험경로의 집중관리, 위험등급에 따른 유지관리에 대한 준수사항 및 지반 안정화 대응 방안을 제시하고자 한다.

이를 바탕으로 지반굴착 공사의 설계 및 시공 중 발생될 수 있는 위험요소와 위험경로를 분석하여 계획 및 설계의 적정성과 신뢰성을 검토할 필요가 있으며, 지반함몰의 위험도를 평가하여 평가결과로부터 집중적인 관리방안과 방지대책에 대한 계획 수립이 필요하다. 본 연구는 지반침하에 영향을 주는 요인들을 파악하고 이러한 요인들은 전문가의 의견을 통해 세부요인들에 대한 지반침하 위험도를 산정하여 발생 가능한 지반함몰을 사전에 예측 및 평가하여 지반함몰 위험을 배제할 수 있는 지반 안정화 확보를 위한 방법론을 제시를 하고자 한다.

본 연구의 범위 및 방법으로는 지하안전정보시스템의 2016년도부터 2022년 9월 6일까지의 자료를 토대 조사된 사고사례 분석을 통해 나타난 지반침하의 주요 위험요인을 분석하면 하수관 손상이 466건으로 가장 많았고, 기타(가스, 전기, 난방)가 248건, 다짐(퇴메우기)불량이 143건, 상수관 손상이 64건, 굴착공사 부실이 38건, 상하수관 공사부실이 25건, 기타매설공사 부실이 22건으로 나타났다. 지반함몰 사고사례를 결과를 근거로 선행연구와 연구보고서 그리고 굴착 전문가의 자문을 받아 28개의 지반침하 세부위험요인들을 도출하였고, 도출된 세부위험요인의 위험도를 평가하기 위해 국내 전문가들을 대상으로 설문조사를 실시하였다. 설문조사는 산·학·연 지반침하 전문가 12명을 대상으로 실시하여 Fuzzy-FMEA 기법을 적용하여 위험도를 산정하였으며 연구방법은 다음과 같다.

- 1) 국내 지반침하 관련 사고사례와 연구고찰 및 전문가 의견을 통해 위험 요인을 파악하고 선정된 위험요인을 바탕으로 결과를 분석한다.
- 2) 선정된 위험요인들의 발생도, 심각도, 영향도를 조사 분석하여 위험순위를 도출한다.
- 3) 도출된 Fuzzy-RPN값에 따른 중점관리항목 리스트를 정리한다.

## 이론적 고찰

### 지반침하의 개념

도심지가 고도화 되고 지상 공간이 포화됨에 따라 지하 공간 개발은 필수적이거나 지반함몰 현상 등으로 국민의 안전이 심각히 우려되고 있으며, 전국에 지반침하 발생이 우려되는 의심지역이 상당한 수에 달하는 등 주민불안이 가중되고 있다.

최근 지반 함몰 및 안전성에 관련하여 국가적인 이슈로 대두가 되고 있으나 지반 내부적인 변화 요소(지하수위 변화, 지하매설물 파손 등)부터 외부적인 변화요소(차량하중, 지진, 지반굴착 등)에 의한 지반거동 해석 및 지반함몰 평가기술이 정립되어 있지 않고 있으며, 국내 도심지에서 최근 들어 자주 발생하는 지반함몰은 지반 굴착공사 시 잘못된 공법의 선택 또는 관리 부실에 의한 것이며, 굴착공사를 진행하면서 굴착구간 배면 지반의 토사가 지하수와 함께 공사장 내부로 유입되거나 토류벽이 자립을 못하는 경우에 지반침하가 주로 발생한다. 이는 주로 굴착공사 시 차수대책, 지반보강, 되메우기 등의 부실과 과다굴착 등이 원인이며, 지하철 개착구간, 맨홀 박스 구조물 기초 부설 등에서 주로 발생한다.

상·하수도관 누수에 의한 지반함몰은 도심지 지반함몰 발생원인 중 가장 큰 비율을 차지한다. 여러 원인에 의해 상·하수도관에서 배출된 상·하수가 지하매설물 주변에 유입하게 되면서 그 주변의 다짐도를 떨어뜨려 토사가 유실되고, 주변에 공극이 발생한다. 그 결과 침하한 지하매설물로 인해 지표침하 및 지반함몰이 야기된다.

Yoon et al.(2016)지하수 대량 양수 등으로 인한 지하수 교란, 상·하수도관 부실이음 및 부식, 누수 등이 주요한 원인으로 파악된다. 2016년부터 2022년까지 발생한 지반침하 사례만 봐도 지중매설관의 손상이 지반함몰 발생빈도와 매우 밀접한 연관성을 가진다는 것을 알 수 있다. Bray and Brown(1985)는 지반 내 존재하는 공동이 지반함몰과괴로 이어지는 함몰파괴 메커니즘을 분석하였다. Min et al.(2014)은 광산지역 지반침하의 사례조사를 하였으며, Park(2020)은 포장 균열 깊이가 공동관리 등급에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. Kim(2022)은 중부지방 평야지역의 연약지반에 대한 특성 분석을 실시하였다. 인위적인 지반함몰은 주로 지하구조물 시공을 하기 위한 굴착공사 중 암반의 내에서 과다한 지하수 양수 공의 발생에서 비롯된다. 도심지역의 지하매설물 중에서 상·하수도관 접합부 부실이음 및 노후화 등으로도 인위적 지반함몰이 발생한다. 상·하수도관으로 배출된 물은 지하매설물의 주변 다짐도 약화를 야기시키며, 물과 함께 토사가 유실되므로 주변에 공극이 발생한다. 지하로 흐르는 물로 인한 공극의 부피가 확장되면 지반 침하 및 지반함몰을 야기한다. 인위적 지반함몰은 보통 두 가지 이상의 요인이 복합하게 작용하여 발생한다. 지하수위가 높은 지반에서 토사에 대한 비 개착식 굴착공법 공사 시에 상수도관 등의 누수가 발생한다면 대규모 지반함몰로 이어지는 경우가 있다. 이렇듯 다양한 환경특성에서의 지반침하에 대한 원인 분석, 지하수 변화 및 토립자 유실로 인한 지반함몰의 발생 메커니즘 규명이 이루어지지 않은 상황에서 본 연구는 지반침하에 영향을 주는 세부 요인들을 파악하고 이러한 요인들은 전문가의 의견을 통해 요인들에 대한 지반침하 위험도를 산정하는 데 있다.

### Fuzzy-FMEA

FMEA기법은 위험 가능성이 있는 요인을 파악하고, 재해에 미칠 고장 발생 요인을 정량적으로 평가하여 이를 우선순위로 파악하기 위한 목적으로 활용되고 있다. 이로 인하여 대응 방안을 미리 마련함으로써 안전사고의 예방 가능성을 높일 수 있다.

본 연구에서 Fuzzy-FMEA기법을 연구방법론으로 채택한 이유는 기존에 위험 분석에 활용되고 있는 확률분석, 시뮬레이션 분석 등의 기법들은 계량화 가능한 정량적 위험 요인들만 고려하기 때문이다. 재난 사고에는 고려해야 할 요인이나 관리되

어야 할 요인들은 객관적인 자료도 부족하고 확률적 판단도 불가능한 경우가 많아 이러한 기법들을 적용하기에는 한계점이 있다고 판단된다. 따라서 위험을 분석할 시 전문가의 주관적인 판단이 개입될 수밖에 없는데, FMEA 기법은 현장 엔지니어들의 직접적인 경험을 체계적으로 반영할 수 있을 뿐만 아니라 기존의 발생확률, 영향도만을 고려하는 위험 평가항목과는 다르게 요인의 위험을 발생도, 심각도, 검출도로 세분화하여 정량적으로 평가하는 것이 가능하다. 본 연구에 사용되는 발생도 (Occurrence)는 잠재된 위험요인이 발생하는 정도이며, 심각도(Severity)는 실패가 발생했을 경우 결과의 영향도이며, 영향도(Influence)는 위험요인이 검출될 수 있는 정도를 나타낸다. FMEA에서는 발생도, 심각도, 영향도가 서로 다른 값을 갖어도 RPN 값이 같다면 동일한 위험도로 판단하였다. 하지만 이러한 요인들은 각 평가항목에 대한 RPN 점수가 다르므로 RPN 값이 같다고 동일한 위험도로 판단하기 어렵다. 따라서 FMEA 분석방법의 한계점을 보완하기 위해 FMEA 기법에 퍼지이론을 적용한 Fuzzy-FMEA 방법을 사용하였다. 이를 통해 여러 가지 지반침하 유형에 내재되어 있는 위험 요인을 우선순위에 따라 개선대책을 마련한다면 지반침하에 대한 위험 감소가 가능 할 것으로 기대된다.

## 지반함몰 식별 및 도출

### 지반함몰 위험요인 도출

Kuwano et al.(2010)은 도심지의 지반함몰 원인 중 하나인 하수관의 파손이 상부하중과 지반이완 등에 의해 하수관의 미세균열이 발생하여 관로 내부에 물과 흙이 반복적으로 침투하여 발생한다고 하였다. 하수관로의 파손으로 인한 관로의 내부 토사유입은 관로의 주변에 공동을 유발시켜서 지반함몰의 주요한 원인으로 작용하는 것으로 알려지고있으며, Lee et al. (2018)는 서울특별시 도로에 대한 하부 공동 원인의 조사를 통해 하수관로 접속부위 손상에 인한 관로 내부 토사유입이 발생한 경우는 주변지반 내부에 공동이 있는 것을 확인하였다. Kim et al.(2017)은 실내에서 행한 모형실험을 통한 상수도관로 파손으로 인해 발생한 지반함몰 메카니즘에 대한 연구를 수행하였으며, 지반 세립분 함유율 및 상대밀도에 따른 공동발생에 대한 범위와 지반파괴의 모드 변화를 고찰하였다. Lee et al.(2018)은 도로하부에 대한 공동발생 지역 긴급복구공법에 대하여 수치해석연구 및 실내실험을 통한 팽창재료를 이용한 비개착 복구공법 적용방안에 대해 연구하였다. 이러한 연구를 바탕으로 한 지반침하 세부원인을 정리하면 Table 1과 같다.

**Table 1.** Detailed causes of subsidence

발생원인		세부발생원인
다짐(되메우기) 불량		공사 후 흙 되메우기 불량
		불충분한 되메우기에 의한 침하로 인한 파손
관손상	상수관로	다짐부족 및 관로 시공오차
		상수관 접합부 손상
	하수관로	부식, 손상 및 노후화에 의한 파손
		부등침하에 의한 상수관 파손 및 이음부분 손상
	수압에 의한 상수관로의 파열	
	하수관 이음부와 맨홀 접속부에서 발생하는 접합결함	
	부등침하에 의한 하수관 파손 및 이음부분 손상	

Table 1. Detailed causes of subsidence(Continue)

발생원인		세부발생원인
관손상	하수관로	하수관 노후화, 노후 폐관 이음부 부식 및 결함 악성하수(강산성 등)에 기인하는 부식에 의한 파손
	기타 매설물	도로공사 등의 굴착공사 영향으로 인한 기타매설물 손상 굴삭기나 보링기 등에 의한 기타매설물 파손 시설물의 손상부나 폐자재 등으로 복구된 지반의 빈공간 함몰
	굴착공사	과다 배수에 따른 지하수위의 지하/지반이완 사질 지반의 침투수에 의한 boiling 현상 발생 흙막이 벽체의 부실에 따른 Piping 현상 발생 흙막이 배면의 뒷채움 불량 흙막이 벽체 상부의 과하중 pile 인발후의 채움 및 다짐 불량
공사 부실	상하수관 굴착공사	매설불량, 외부충격에 의한 파손 굴삭기나 보링기 등에 의한 관 파손 및 변형 상·하수관 매립 시 폐자재 매립
	기타매설물 굴착공사	타시설의 굴착공사 영향 굴삭기나 보링기 등에 의한 파손 시설물의 손상부나 불량재(폐자재, 목재, 쓰레기 등)의 매립 하부 기초나 다발관 사이의 빈공간 미조치

설문조사 및 위험 요인산정

본 연구에서 도출한 지반침하 위험요인의 평가를 위한 설문조사를 하였다. 설문조사는 이메일 및 방문조사를 통해 실시하였으며, 건설사 12명의 지반침하 전문가를 대상으로 조사를 하였다. 본 연구에서는 각 위험도 평가항목으로 발생빈도, 심각도, 영향도의 값을 곱으로 RPN값을 산출하였다. 일반적으로 FMEA 기법은 매우 낮음(1점), 낮음(2~3점), 보통(4~6점), 높음(7~8점), 매우 높음(9~10점)의 척도를 사용한다.

Fuzzy-FMEA를 활용한 위험 요인 산정은 다음과 같다.

본 연구에서 제시하는 지반침하 위험도의 평가 체계는 다음 Fig. 1과 같다.

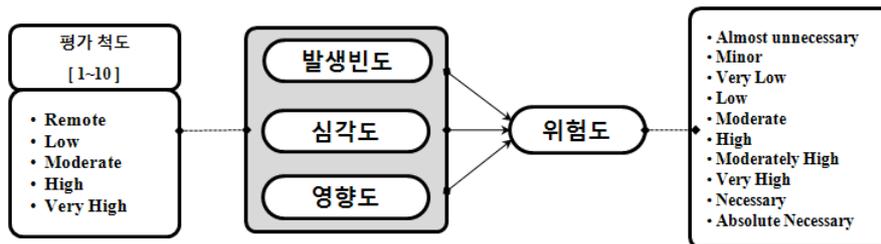


Fig. 1. Risk assesment system

Remote(R)~Very High(VH)를 이용하여 입력변수 5개의 언어변수에 대한 평가가 이루어지며 이를 종합하여 출력 변수에 대한 위험도는 Almost Unnecessary(AU)~Absolute Necessary(AN)의 10개의 언어변수로 표현된다. 두 번째로 위험도 평가 추론을 위한 퍼지추론 방법이 있다.

퍼지추론 모델은 프로세스와 구성요소에 대하여 어떠한 퍼지추론 방법을 선택하느냐에 따라서 결정된다. 본 연구에서는 추론속도가 빠른 직접법 중 Mamdani 추론법을 선택하였다. Mamdani 추론법은 퍼지추론 방법 중 가장 먼저 제안된 방법이며 구조도 간단해 일반적으로 널리 쓰이고 있다. 다음 Fig. 2는 Fuzzy-FMEA가 활용된 위험도 평가 모델의 구성도로 3단계로 이루어져 있다.

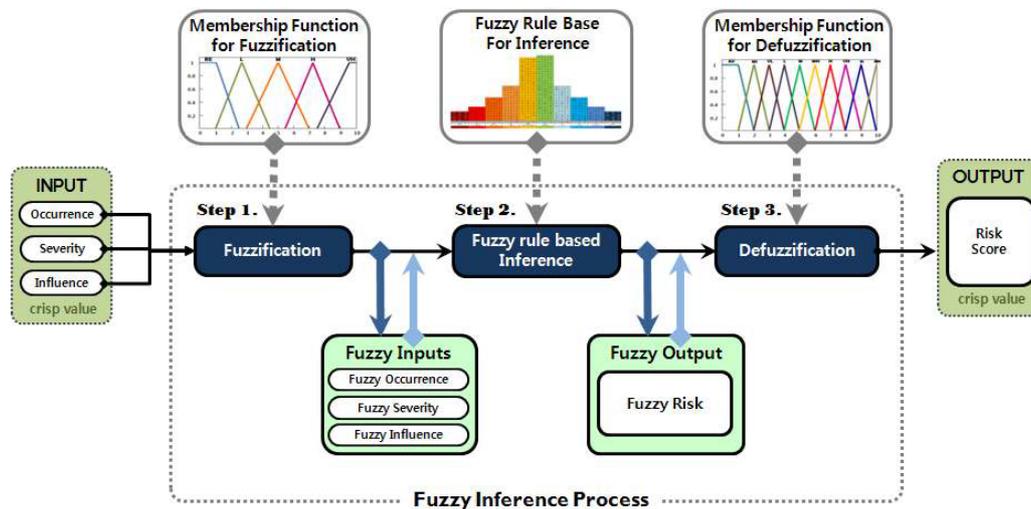


Fig. 2. Risk assesment model of subsidence

## 지반침하 Fuzzy-FMEA 위험도 평가

### 퍼지화 모델(Fuzzification Model)

본 연구에서는 각 언어변수인(Remote, Low, Moderate, High, Very High) 5가지의 삼각 퍼지수를 구하기 위해 5명의 전문가를 대상으로 입력변수에 대한 설문을 실시하였다. 전문가는 근속년수 20년 이상, 지반공사 수행 경험이 20건 이상의 전문가들로, 지반침하에 대한 이해와 전문성이 높다고 판단하였기 때문에 삼각 퍼지수 결정을 위한 대상자로 선정하였다. 설문 에 앞서 퍼지추론에 대한 이해가 부족하였기 때문에 해당 전문가들은 퍼지논리에 대한 설명과 삼각 소속 함수에 대한 설명을 진행한 후에 설문을 진행하였다. “입력변수인 발생빈도, 심각도, 영향도의 평가척도인 1에서 10점 중에서 Remote(Re), Low(L), Moderate(M), High(H), Very High(VH) 언어변수의 퍼지집합을 나타내는 소속 함수에 속하는 정도가  $\mu(a)=0$ ,  $\mu(b)=1$ ,  $\mu(c)=0$ 인 삼각 퍼지수 a, b, c에 대한 질문을 통해 5명의 전문가들 의견이 반영된 a, b, c 입력변수에 대한 삼각 퍼지수는 Table 2와 같다.

**Table 2.** Results of the survey of triangular membership functions of occurrence, severity, and effects of input variables

	Rule	Remote			Low			Moderate			High			Very High		
		a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
발생도	전문가 1	0	0.7	1.5	1	3	4.5	3	4.7	7.3	5	7	8.5	7	8.2	10
	전문가 2	0	0.5	2.5	0.8	2.5	4.2	2.5	5.2	7.2	5	7.5	9.2	7.5	8.5	10
	전문가 3	0	1.5	3	1	3.5	4.5	3.2	5	7	6.5	7.7	9	7.5	9	10
	전문가 4	0	1	3	0.8	2.5	4	3.2	5	7.2	6	7.3	9	7.2	8.7	10
	전문가 5	0	1	3	0.7	3	4.7	3.2	5.2	7.5	5.5	7.5	9.2	7.3	8.7	10
	평균	<b>0</b>	<b>0.9</b>	<b>2.6</b>	<b>0.8</b>	<b>2.9</b>	<b>4.3</b>	<b>3.0</b>	<b>5.0</b>	<b>7.2</b>	<b>5.6</b>	<b>7.4</b>	<b>8.9</b>	<b>7.3</b>	<b>8.6</b>	<b>10</b>
심각도	전문가 1	0	1	2	1	3	4.5	3	4.7	7.3	5	6.7	9	7	8	10
	전문가 2	0	0.5	2.5	1	2.5	4.2	2.5	5.2	6.5	6	7.3	9	8	9	10
	전문가 3	0	1.5	3	1	3.5	4.5	3.5	5	7.2	6.5	7.7	9	7.5	8.5	10
	전문가 4	0	0.8	1.5	0.8	2.5	4	3	4.5	6	4.5	6	8.5	6.5	8	10
	전문가 5	0	1.2	2.5	1.2	2.5	3.8	3	4.6	6.5	4.5	7.5	8.5	7	9	10
	평균	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2.3</b>	<b>1</b>	<b>2.8</b>	<b>4.2</b>	<b>3</b>	<b>4.8</b>	<b>6.7</b>	<b>5.3</b>	<b>7.0</b>	<b>8.8</b>	<b>7.2</b>	<b>8.5</b>	<b>10</b>
영향도	전문가 1	0	1	2	1	3	4.5	3	4.7	6.8	5	6.7	9	8	9	10
	전문가 2	0	1.5	2.5	0.8	2.5	3.8	2.5	5.2	6.5	5	7.3	9	8	9	10
	전문가 3	0	1.3	2.2	1	3.5	4.5	3.5	5	7.2	6	7.5	9	7.5	8.7	10
	전문가 4	0	1	1.8	1	2.7	4	2.7	4.7	7	5.5	7	8	7.2	8.5	10
	전문가 5	0	1.2	2	1.2	3.3	4.2	2.8	4.5	7	4.8	7	8.5	7.3	8.3	10
	평균	<b>0</b>	<b>1.2</b>	<b>2.1</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>4.2</b>	<b>2.9</b>	<b>4.8</b>	<b>6.9</b>	<b>5.2</b>	<b>7.1</b>	<b>8.7</b>	<b>7.6</b>	<b>8.7</b>	<b>10</b>

단,  $b_i$  = 해당 언어변수에 속할 가능성이 가장 높다고 판단되는 값 [ $u(b_i) = 1$ ]

·  $a_i, c_i$  = 해당 언어변수에 속할 가능성이 가장 낮다고 판단되는 값 [ $u(a_i, c_i) = 0$ ]

이렇게 도출된 최종 삼각 퍼지수값은 다음 식(1)에 대입하여 소속 함수를 도출한다.

$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{if } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{if } a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{if } b \leq x \leq c \\ 0, & \text{if } x > c \end{cases} \quad (1)$$

단,  $x$  = 발생빈도, 심각도, 영향도의 평가 값(1~10)

이러한 과정을 통해 얻어진 퍼지화를 위한 발생빈도, 심각도, 영향도 중 발생도에 대한 소속 함수는 다음 Fig. 3과 같다.

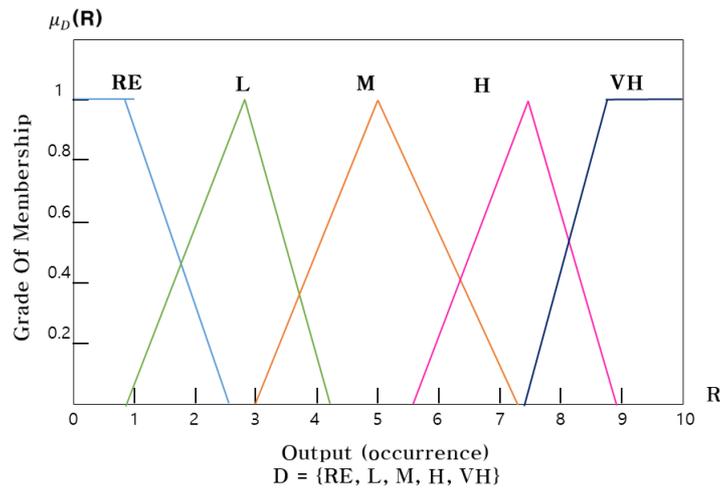


Fig. 3. Triangular membership functions for fuzzifying input variables

설문결과 위험도요인이 발생빈도=7, 심각도=5, 영향도=6로 평가 되었다면, 위에서 도출한 입력변수 5가지를 이용한 소속 함수를 통해 퍼지화한 평가결과에 대한 퍼지 입력 값(Fuzzy Inputs)은 다음 Table 3와 같다.

Table 3. Fuzzified input variables(Fuzzy Inputs)

	Remote(Re)	Low(L)	Moderate(M)	High(H)	Very High(VH)
발생빈도 = 7	0	0	0.108	0.778	0
심각도 = 5	0	0	0.895	0	0
영향도 = 6	0	0	0.433	0.402	0

### 추론 모델 (Inference Model)

퍼지화를 통해 퍼지 입력 값을 도출한 후 그 값에 해당하는 퍼지 규칙을 퍼지 규칙 베이스(Fuzzy Rule Base)로 추출하면 다음과 같다.

- R51= IF O is M and S is M and I is M THEN Risk is M
- R76= IF O is M and S is M and I is H THEN Risk is H
- R78= IF O is H and S is M and I is M THEN Risk is H
- R98= IF O is H and S is M and I is H THEN Risk is MH

이렇게 구해진 규칙의 전반부의 소속도에 대한 MIN 연산을 수행하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 R51: m51 &= \min(\mu_{A51}(O51), \mu_{B51}(S51), \mu_{C51}(I51)) \\
 &= \min(\mu_M(7), \mu_M(5), \mu_M(6)) = \min(0.108, 0.895, 0.433) = 0.108
 \end{aligned}$$

$$R76: m76 = \min(\mu M(7), \mu M(5), \mu M(6)) = \min(0.108, 0.895, 0.402) = 0.108$$

$$R77: m78 = \min(\mu M(7), \mu M(5), \mu M(6)) = \min(0.778, 0.895, 0.433) = 0.433$$

$$R99: m98 = \min(\mu M(7), \mu M(5), \mu M(6)) = \min(0.778, 0.895, 0.402) = 0.402$$

이렇게 구해진 소속도를 기초로 후반부(the THEN Part)의 소속도를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Conclusion of R51: } \mu D51(R) &= \min(m51, \mu D51(R)) = \min(m51, \mu L(R)) \quad \forall R \in DM \\ &= 0.108 \wedge [0/4.04, 0.5/4.47, 1/4.9, 0.5/5.33, 0/5.76] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Conclusion of R76: } \mu D76(R) &= \min(m76, \mu D76(R)) = \min(m76, \mu M(R)) \quad \forall R \in DH \\ &= 0.108 \wedge [0/4.9, 0.5/5.47, 1/6.04, 0.5/6.52, 0/7] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Conclusion of R78: } \mu D78(R) &= \min(m78, \mu D78(R)) = \min(m78, \mu M(R)) \quad \forall R \in DH \\ &= 0.433 \wedge [0/4.9, 0.5/5.47, 1/6.04, 0.5/6.52, 0/7] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Conclusion of R98: } \mu D98(R) &= \min(m98, \mu D98(R)) = \min(m98, \mu M(R)) \quad \forall R \in DMH \\ &= 0.402 \wedge [0/6.04, 0.5/6.5, 1/6.96, 0.5/7.45, 0/7.94] \end{aligned}$$

Min 연산을 통하여 도출된 각각의 규칙에 대한 소속도를 Max 연산을 이용하여 최종적으로 하나의 값으로 합성하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mu D(R) &= \max(\mu D51(R), \mu D76(R), \dots, \mu D98(R)) = \mu D51(R) \vee \mu D76(R) \vee \mu D78(R) \vee \mu D98(R) \\ &= [0.1/4.47, 0.1/4.9, 0.1/5.33, 0.43/5.47, 0.43/6.04, 0.43/6.52, 0.4/6.5, 0.4/6.96, 0.4/7.45] \end{aligned}$$

### Defuzzification Model:비퍼지화 모델

퍼지추론의 마지막단계인 비퍼지화는 앞에서 도출된 퍼지 추론의 결과를 실제 상황에 맞게 적용할 수 있도록 실수 값으로 바꿔주는 과정을 의미한다. 출력변수를 위한 위험도를 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) 10개의 언어변

**Table 4.** Results of the survey for membership functions of output variables(Risk)

Rule	AU			MI			VL			L			M			H			MH			VH			N			AN		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
전문가1	0	0.8	1.5	1	1.5	2	1.5	3.2	4.2	3	4	5	4.2	5	5.8	5.2	6.2	7.2	6.2	7.2	8.2	6.5	8	8.7	8.2	9	10	9	10	10
전문가2	0	1	2	1	1.5	2	2	3	4	3	4	5	4	5	6	5	6	7	6	6.8	7.5	7	7.8	9	8	8.7	10	9.2	10	10
전문가3	0	0.5	1	0.8	2	2.5	1.5	2.5	3.5	2.5	3	4	3.5	4.5	5.5	4.5	6	7.5	6	7	8.5	6.7	8	9.5	7.5	9	10	8.5	10	10
전문가4	0	0.7	1.5	1	1.7	2.5	1.7	3	4.5	3	3.7	4.5	4.5	5	5.5	5	6	6.5	6.5	7	7.5	7.5	8	9	8.5	9	10	9.5	10	10
전문가5	0	1	2	1	1.5	2	2	3	4	3	4	5	4	5	6	4.8	6	6.8	5.5	6.8	8	7.2	8.2	9	8	8.5	10	8.7	10	10
평균	0	0.8	1.6	0.96	1.64	2.2	1.74	2.94	4.04	2.9	3.74	4.7	4.04	4.9	5.76	4.9	6.04	7	6.04	6.96	7.94	6.98	8	9.04	8.04	8.84	10	8.98	10	10

수로 차용하여 이에 대응하는 비퍼지화를 위한 소속 함수의 도출방법은 3.1.1에서 설명한 퍼지화를 위한 소속 함수도출 방법과 동일하다. 5명의 전문가를 대상으로 비퍼지화를 위한 삼각 퍼지수(a, b, c)에 대응하는 삼각 소속함수 10가지는 입력변수의 5개 삼각 소속함수 도출방법과 동일한 방법으로 진행하였다. Table 4는 5명의 전문가들의 의견을 통해 도출한 출력변수의 삼각 퍼지수 값을 나타낸 것이다.

이렇게 도출된 출력변수에 대한 삼각퍼지수를 퍼지화 모델에서 설명한 소속 함수의 수식을 적용하면 다음 Fig. 4와 같은 삼각 소속 함수를 도출한다.

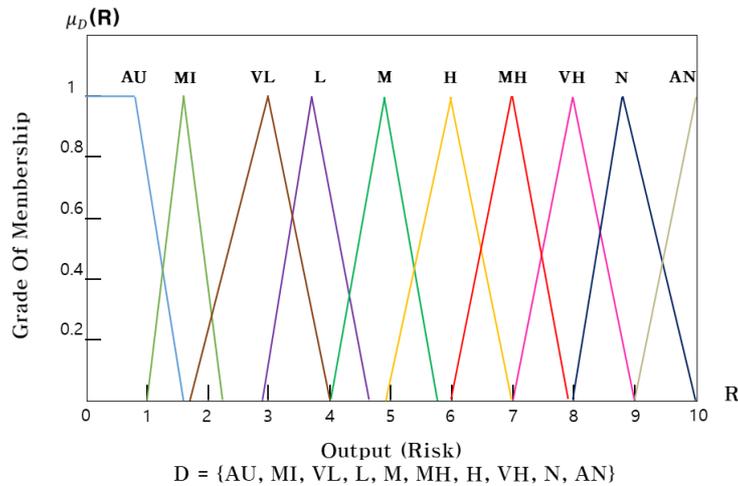


Fig. 4. Triangular membership functions for fuzzifying input variables

퍼지 입력 값은 앞에서 설명한 퍼지 규칙 기반 추론 과정을 통해서 퍼지 출력값으로 도출되며, 요약하면 다음 Table 5와 같다.

Table 5. Inference results based on the fuzzy rule(Fuzzy Output)

Rule N.	발생빈도 (Occurrence)	심각도 (Severity)	영향도 (Influence)	위험도 (Risk)	Center
<b>R51</b>	Moderate(M):0.10	Moderate(M):0.89	Moderate(M):0.43	<b>Moderate(M):0.108</b>	<b>4.9</b>
<b>R76</b>	Moderate(M):0.10	Moderate(M):0.89	High(H):0.40	High(H):0.108	6.04
<b>R78</b>	High(H):0.78	Moderate(M):0.89	Moderate(M):0.43	<b>High(H):0.433</b>	<b>6.04</b>
<b>R98</b>	High(H):0.78	Moderate(M):0.89	High(H):0.40	<b>Moderately High (MH):0.402</b>	<b>6.96</b>

이 값을 식(2)의 무게 중심법을 활용하여 비퍼지화 하면 실수 값인 최종 위험도가 출력된다.

$$Defuzzification = \frac{0.108 \times 4.9 + 0.433 \times 6.04 + 0.402 \times 6.96}{0.108 + 0.433 + 0.402} = 6.302 \tag{2}$$

즉, 지반침하 위험요인 발생빈도=7, 심각도=5, 영향도=6으로 평가된 위험요인의 최종 위험도는 6.302가 된다.

## 지반침하 위험도 검증 결과

다음은 출력된 Fuzzy-FMEA 평균값을 바탕으로 도출된 지반침하 위험 요인에 대한 퍼지출력 값과 순위는 다음 Table 6과 같다. 전문가들의 입장에서 하수관로 위험도는 전체 위험도의 25%로 부등침하에 의한 하수관 파손 및 이음부분 손상과 하수관 이음부와 맨홀 접속부에서 발생하는 접합결합의 위험도가 높게 나타났다.

**Table 6.** Comparison of risk ranking of subsidence factors

발생원인	세부 발생원인	퍼지 출력	퍼지 순위	RPN 순위
다짐(되메우기) 불량	공사 후 흙 되메우기 불량	7.645	6	13.93%
	불충분한 되메우기에 의한 침하로 인한 파손	6.816	8	
	다짐부족 및 관로 시공오차	8.099	4	
상수관로	상수관 접합부 손상	5.414	15	14.84%
	부식, 손상 및 노후화에 의한 파손	6.998	7	
	부등침하에 의한 상수관 파손 및 이음부분 손상	6.153	10	
	수압에 의한 상수관로의 파열	5.459	14	
하수관로	하수관 이음부와 맨홀 접속부에서 발생하는 접합결합	8.692	2	24.99%
	부등침하에 의한 하수관 파손 및 이음부분 손상	8.848	1	
	하수관 노후화, 노후 폐관	8.547	3	
	이음부 부식 및 결합	7.695	5	
기타 매설물	악성하수(강산성 등)에 기인하는 부식에 의한 파손	6.671	9	9.53%
	도로공사 등의 굴착공사 영향으로 인한 기타매설물 손상	5.151	17	
	굴삭기나 보링기 등에 의한 기타매설물 파손	5.574	13	
굴착공사	시설물의 손상부나 폐자재 등으로 복구된 지반의 빈공간 함몰	4.703	20	17.34%
	과다 배수에 따른 지하수위의 지하/지반이완	4.802	19	
	사질 지반의 침투수에 의한 boiling 현상 발생	4.32	25	
	흙막이 벽체의 부실에 따른 piping 현상 발생	5.592	12	
	흙막이 배면의 뒷채움 불량	4.813	18	
	흙막이 벽체 상부의 과하중	4.426	22	
상하수관 손상	pile 인발후의 채움 및 다짐 불량	4.127	27	9.26%
	매설불량, 외부충격에 의한 파손	5.266	16	
	굴삭기나 보링기 등에 의한 파손 및 변형	5.598	11	
기타매설 공사	상·하수관 매립 시 폐자재 매립	4.129	26	10.11%
	타시설의 굴착공사 영향	4.433	21	
	굴삭기나 보링기 등에 의한 파손	4.411	23	
	시설물의 손상부나 불량재(폐자재, 목재, 쓰레기 등)의 매립	3.185	28	
	하부 기초나 다발관 사이의 빈공간 미초치	4.331	24	

Table 6의 결과를 보면 굴착공사의 위험도는 17.34%로 흙막이 벽체의 부실에 따른 piping 현상 발생의 위험도가 높게 나타났다. 상수관로의 위험도는 전체 위험도 중 14.84%, 다짐(되메우기)불량은 13.93%, 기타매설공사 10.11%, 기타매설물 9.53% 상하수관 손상이 9.26%로 나타났다. 이는 전문가 입장에서 판단하는 지반침하 요인에 대한 위험도가 지하안전정보 시스템의 지반침하사례 비율과 비슷한 결과를 확인하였다.

## 결론

지반침하 세부 요인별 퍼지 출력값이 상위인 항목으로는 하수관로의 손상이 전체 위험도의 24.99%로 다음으로 굴착공사 17.34%, 상수관로 14.84%, 다짐(되메우기) 불량 13.93% 순으로 나타났으며, 매설물 손상(상수관로, 하수관로, 기타매설물)위 위험도가 높게 나타났으며, 다음으로 공사부실(굴착공사, 상하수관 손상, 기타매설물공사), 그리고 다짐(되메우기)불량 순으로 위험도가 높게 나타났다. 이는 전문가 입장에서 판단하는 지반침하 요인에 대한 위험도가 지하안전정보시스템의 지반침하사례와 비슷한 결과를 확인하였다. 또한 사례연구를 통해 최종 도출된 위험도 평가결과를 토대로 본 연구에서 제안하는 Fuzzy-FMEA 방법과 기존 FMEA를 비교·분석 하였다.

본 사례연구 결과를 통해 제안하는 방법론이 기존 FMEA 방법에서 각 평가 항목의 조합이 다름에도 동일한 RPN을 갖기 때문에 구별할 수 없었던 위험도와 다른 RPN을 가지기 때문에 구별이 되었던 위험도까지도 구별 할 수 있음을 알 수 있었다. 이는 기존의 위험도 평가기법보다 정밀함을 의미하며, 제안된 Fuzzy-FMEA 방법이 지반침하의 위험도를 효과적으로 다룰 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

도심지 지반함몰 위험성 예측 및 평가와 관련된 요소 기술의 개발 뿐 만 아니라 해당 기술이 적절히 활용되고 국민의 안정이 확보되기 위해서는 관련 기준의 법제화가 반드시 동시에 수반되어야 하며 따라서 정책기반의 기술의 적용, 이행 및 관리 방안 설정에 대한 연구가 필요한 실정이다. 이에 따라 도심지 지반굴착으로 인한 지반함몰 피해 저감을 위하여 지반함몰 위험성을 예측 및 평가를 위한 요소 기술의 개발과 이의 실행을 위한 연구가 필요한 실정이다.

## Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부 스마트 디지털 엔지니어링 전문인력양성사업(P0008475-G02P04570001901)의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## References

- [1] Brady, B.-H., Brown, E.-T. (1985). Rock Mechanics for Underground Mining. Allen & Unwin, Crows Nest.
- [2] Chung, J.-S., Lee, S.-G., Lee, G.-Y., Jung, H.-W., Kim, H.-J. (2015). "A case study on the effects on underground structure due to changes in the groundwater level and ground stress." Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 16, No. 9, pp. 13-21 (In Korean).
- [3] Jeong, H.-J. (2018). Analysis of Ground Subsidence Characteristics by Influence Factor through Laboratory Model Test. Ph. D. Thesis, Chonnam National University (In Korean).
- [4] Jeong, H.-S. (2018). Detection of Cavities Under Pavements using 2D Full Seismic Waveform Inversion Method.

Ph. D. Thesis, Incheon National University.

- [5] Kim, J.-S. (2022). "A study on the characteristics of consolidation settlement of soft ground in the plains of the central region." *Journal of The Korean Society of Disaster Information*, Vol. 18, No. 4, pp. 706-712.
- [6] Kim, Y.-H., Kim, J.-B., Kim, D.-W., Han, J.-G. (2017). "Experimental study on generating mechanism of the ground subsidence of due to damaged waters supply pipe." *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 16, No. 2, pp. 139-148.
- [7] Kuwano, K., Mari, S., Ryoko, S. (2010). "Study on the detection of underground cavity and ground loosening for the prevention of ground cave-in accident." *Journal of Japan Geotechnical Society*, Vol. 5, No. 2, pp. 219-229.
- [8] Lee, J.-J., Kim, K.-D., Lee, H.-J. (2017). "Development of evaluation and analysis technologies for road sinkhole." *Korean Society of Road Engineers*, Vol. 2016, No. 6, pp. 5-6.
- [9] Lee, K.-C., Choi, B.-H., Park, J.-H., Kim, D.-W. (2018). "Numerical analysis and laboratory experiment of rapid restoration of underground cavity using expansive material without excavation." *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 17, No. 1, pp. 55-64.
- [10] Lee, K.Y., Kang, S.J. (2014). *Sinkhole Swallowing A Town - Cause and Counter measure*. Gyeonggi Research Institute, Suwon (In Korean)
- [11] Min, K.-N., Lee, D.-W., Kwon, Y.-K., Hong, C.-D. (2014). "A case study of the ground subsidence by mining area goaf." *Journal of The Korean Society of Disaster Information*, Vol. 2016, No. 6, pp. 5-6.
- [12] Park, J.-J. (2020). "Analysis of the effect of pavement crack depth of the cavity management grade." *Journal of The Korean Society of Disaster Information*, Vol. 16, No. 3, pp. 449-457.
- [13] Seoul Special City (2014). *Special Management Measures for Road Sinking*.
- [14] Yoon, T.-K., Shin, C.-G., Lee, J.-H., Ko, M.-H. (2016). "Case studies for ground settlement prevention." *Journal of Civil Engineering*, Vol. 2016, No. 10, pp. 17-18.