

# 델파이기법을 이용한 싱크홀 발생 위험요인 도출

## Analysis of Risk Factor for Sinkhole Formation by using Delphi

이경수\*, 김태형\*\*, 김태훈\*, 박상혁\*\*\*  
국민안전처 국립재난안전연구원\*, ANOVA(주)\*\*, 한국건설기술연구원\*\*\*

Kyung-Su Lee(39lks@korea.kr)\*, Tae-Hyeong Kim(rucachi@naver.com)\*\*,  
Tai-Hoon Kim(ddahoon@korea.kr)\*, Sang-Hyuk Park(karasin811@kict.re.kr)\*\*\*

### 요약

본 연구에서는 잠재적으로 발생 가능한 싱크홀(지반침하)의 위험도 평가를 위한 싱크홀 발생 위험요인을 도출하였다. 위험요인은 자연적 환경, 인위적 환경 그리고 사회적 환경을 구분하고 요인선정을 위하여 전문가를 대상으로 총 2번의 브레인스토밍 과정과 3번의 델파이 분석을 실시하였다. 분석결과 '자연적 환경'은 지상과 지하 환경으로 나누었고, '인위적 환경'은 지하 구조물, 지중 구조물, 지표 특성으로 구분하였다. 그리고 '사회적 환경'은 관리·제도적 환경과 지역개발로 구분하였다. 본 연구결과는 수자원 관리 및 지반관리 등 각 분야 전문가들의 의견이 반영된 결과로써, 싱크홀의 발생 위험도를 산정하기 위한 평가지표를 개발하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

■ 중심어 : | 델파이기법 | 브레인스토밍 | 싱크홀 | 위험요인 | 지반침하 | 평가지표 |

### Abstract

This research was started in order to recognize the necessity of systematic and scientific approach to sinkholes, and to imply from an empirical point of view that a detailed evaluation method and measure for technique should be devised. As the result drew the risk factors that cause sinkholes by reflecting the opinions of water resources and ground experts, this research is expected to contribute to the development of a more systematic and pre-preventive evaluation index by preparing a countermeasure against sinkholes. In the future, it is necessary to develop an evaluation index toward the risk factors of sinkholes, in order to establish a scientific basis and objectivity that can determine priority, by subdividing the decision-making process that is required for preparing a countermeasure against sinkholes. In addition, a detailed methodology and related technique to measure each evaluation index should be continued to be discussed, in order to review the applicability of evaluation indices on actual sites.

■ keyword : | Brainstorming | Delphi Method | Evaluation Index | Ground Subsidence | Sinkhole | Risk Factor |

## 1. 서론

국내 도심지에서는 도로가 갑자기 땅속으로 가라앉는 이상 현상이 계속해서 발생되고 있다. 최근 들어 이

와 관련한 사고가 언론을 통해서 계속해서 보도되고 있으며, 국민들의 불안과 공포는 더욱 심해지고 있다. 수도권(서울, 경기, 인천)에 거주하는 성인 1,000명을 대상으로 최근 보도된 싱크홀과 관련하여 얼마나 불안감을

접수일자 : 2015년 11월 04일  
수정일자 : 2015년 12월 30일

심사완료일 : 2016년 01월 16일  
교신저자 : 박상혁, e-mail : karasin811@kict.re.kr

느끼는지에 대한 설문조사 결과 95.2%(오차범위 ± 3.10%)가 불안감을 느끼고 있는 것으로 나타났으며, 폭염 및 가뭄, 황산, 산사태보다 더 위협적인 재난으로 인식하고 있는 것으로 나타났다[16].

‘싱크홀(Sinkhole)’은 땅의 지반이 내려앉아 지면에 커다란 구멍이 생기는 현상으로 주로 석회암지반 등에서 용해, 침식에 의해 발생하는 대규모 지반붕괴 현상이다. 주로 지하수가 석회암 지반층을 녹여 발생하는 자연적인 현상이며, 국내의 경우 석회암층이 많지 않기 때문에 강원도 일부 지역을 제외하고 그 발생 가능성이 높지 않은 것으로 알려져 왔다[10]. 그러나 2005년 1월 발생한 전남 무안군 무안읍의 싱크홀은 13년간 19번 발생하였으며, 그 원인은 석회암 지반을 가진 무안지역에서 과도한 지하수 개발 및 사용으로 인하여 지반이 약화되어 발생한 것으로 보고하였다[11]. 충북 음성군에서도 이와 같은 이유로 싱크홀이 발생되었으며, 2007년과 2012년 사이에 충북 청원군 광산(鑛山) 지역 논과 저수지에서 싱크홀이 발생되었다.

반면, 이와는 대조적으로 인천시에서는 2012년도에 깊이 20 m의 도로가 침하되어 오토바이 운전자가 추락하여 사망하는 사고가 발생되었으며, 서울시에서는 2010년 영등포구에서 2건을 시작으로 2014년 8월에는 서울 송파구 석촌 지하차도에 폭 2.5 m, 길이 8 m, 깊이

5 m의 대규모 구멍이 발생되었다. 수도권에서 발생한 이와 같은 사고는 전남과 충북 등과 같은 석회암지대가 아닌 곳에서 발생되었다는 점에서 큰 의미를 가질 수 있을 것이다. 서울시는 이러한 사고의 원인으로 지하매설물이나 굴착복구 공사로 소규모의 흠이 유실되어 발생하는 것으로 보고하였다[2]. 이러한 현상을 학계에서는 주로 ‘지반침하’ 또는 ‘도로함몰’ 등으로 사용하고 있으며, 국내 및 해외 언론 등에서는 ‘싱크홀(Sinkhole)’이라는 용어를 사용하고 있어 아직까지 정확한 용어 구분이 어려운 것으로 판단되므로 본 연구에서는 다소 자극적이지만 사회적 이슈가 되고 있는 ‘싱크홀’이라는 용어로 통일하여 기술하고자 한다.

싱크홀과 관련한 사고가 증가되면서 중앙정부 및 지자체에서는 지반침하의 대응방안을 계획 및 시행하고 있다. 국토교통부는 도시철도, 광역철도, 대형 건축물 등 3개 점검반을 구성해 점검을 실시하고 있으며, 서울시는 건설 중인 지하철 9호선, 수도권 6개 광역 지하철 공사, 수도권의 16층 이상, 연면적 3만㎡ 이상의 대형 건축 공사장 가운데 굴파기·땅파기 공사 중인 7개 현장을 점검하였다. 그리고 지반탐사장비(GPR) 2대를 도입하여, 함몰이 자주 발생하는 지역을 파악할 수 있는 도로함몰지도를 구축하기로 하였다. 그러나 현재 국내에서 운영되고 있는 지하탐사장비들은 대부분 외국산으

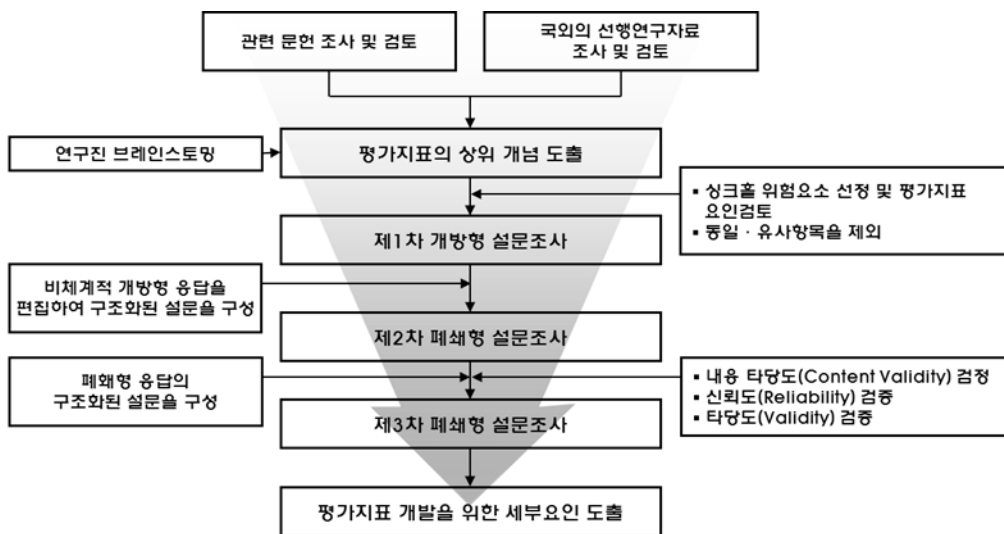


그림 1. 싱크홀 위험 요인 선정을 위한 연구 흐름도

로 국내 도심 지질 특성을 제대로 반영하지 못한다는 것과 탐사신호 처리 분석의 어려움이 있어 국내 도심지 '지하 동공' 탐사에 큰 역할을 못하고 있다. 그러나 이러한 점검과 예비대책 수립에는 많은 시간과 비용이 소요되기 때문에 싱크홀의 위험 요인을 평가할 수 있는 타당한 지표의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

이대영(2014)[9]은 싱크홀을 지표아래 석회질 기반암의 용해로 인해 지표가 침하되는 자연적인 요인과 도로 및 지하철공사, 지하수 과다사용, 지하굴착 및 발파충격, 땅속에 매설된 상·하수도관의 노후화와 외부충격으로 인한 파손 등으로 인한 인위적인 요인으로 구분하였다. 한편, 조응래(2014)[15]는 앞에서 언급된 석촌 지하차도 싱크홀과 지하철 9호선 공사를 관련지어 지속적으로 발생하는 싱크홀 문제에 대한 건설업계의 대응 방안을 모색하고, 건설업계의 싱크홀 경각심, TBM 공법의 유의사항 도출, 이상 징후 신고 체계 구축, 지하 시설물 정보 적극 활용, 과도한 지하공간 활용의 재검토, 부실시공 방지 등을 지적했다. 이병식(2014)[10]은 싱크홀의 주요 원인을 하수관로 손상, 인접 공사 관련문제, 상수관로 손상 등을 지적한 바 있다. 박인준, 박승희(2014)[4]는 싱크홀 발생의 인공적인 원인은 상하수도, 전력통신구 및 가스관로 중 상하수도 지하 매설관로 노후 및 접합부분 누수로 인한 주변지반의 급속한 동공화와, 조립토 지반내 도시개발로 인한 지하수 교란 등을 언급하였으며, 지하수 흐름에 대한 철저한 지반조사, 지반조사 DB화를 통한 통합관리 및 연구센터 구축 등을 제안한 바 있다.

이수곤(2014)[12]은 싱크홀의 원인조사결과가 제대로 나올 수 없는 관행을 타파해야 한다고 지적한 바 있다. 싱크홀 발생과 관련된 요인들은 너무 방대하며 정확히 어떠한 요인들이 영향을 주는지 명확히 밝혀진 바 없는 실정으로 정확한 평가지표 개발을 위한 위험요인의 선정이 선행되어야 할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 싱크홀의 위험 요인을 평가할 수 있는 타당한 지표를 개발하기 위하여 의사결정 방법론 중 하나인 델파이(Delphi)기법을 이용하여 관련 전문가들을 대상으로 싱크홀 관련 위험 요인을 선정하고자 하였다.

## II. 연구절차 및 방법

### 1. 연구절차

델파이 기법은 잠재적 발생 가능한 싱크홀 위험 평가를 위한 요인선정을 하여 델파이 기법은 전문가를 대상으로 설문조사로 시작된다. 델파이 분석은 한 요소에 대해 얼마나 동의하는 지를 물어보는 방식으로 기본적으로 리커트(Likert scales) 척도로 구성된 3개 설문 문항을 반복적으로 질문하여 응답자의 내적일관성(Reliability)을 파악한다. 중요 정도는 5점 만점으로 평가하고, 전체 응답자의 인원 대비 중요하다고 응답한 4점 이상의 인원수의 비율을 통해 내용타당도(Content Validity)값과 수렴도(Convergence)를 계산해 요인을 선정하게 된다. 본 연구를 위한 연구절차는 [그림 1]과 같다. 델파이 기법은 최근까지도 경제, 경영, 국방, 정치 등 인문 사회과학 분야에서 주로 사용되어 왔으며, 재난·재해 등 방재 분야에서는 매우 드물다[13]. 성례아(2013)[5]는 델파이 기법을 이용하여 애니메이션의 재미에 필요한 요소를 도출하였다. 이승희와 임지영(2013)[7]는 재가간호서비스의 연계방안을 도출하기 위하여 델파이 기법을 이용하였다. 이오복(2014)[8]은 여성결혼이민자의 취업향상에 필요한 서비스, 프로그램, 정책·제도의 중요도 분석을 위하여 델파이 기법을 이용하였다.

본 연구는 싱크홀 위험 요인의 선정을 통한 효과적인 싱크홀 재난 예방을 목적으로 한다. 그러나 싱크홀의 발생 원인과 그 유형에 대해서는 많은 학자들의 논쟁이 있어 왔음에도 분명하게 정립된 바가 없다. 본 연구에서 싱크홀의 위험 요인은 임종철(2014)[14], 최우용(2013)[17], 이대영(2014)[9] 등에서 구분한 ① 자연적 환경과 ② 인위적 환경, 그리고 인구와 각종 인프라가 밀집된 도심지에서 빈번하게 발생함에 따라서 국민의 불안감 등 사회 전반적인 영향이 있을 것으로 판단하여 ③ 사회적 환경으로 구분하였다. 기본적으로 문헌조사와 연구를 통해 요인을 선출하고 직접적으로 연구를 진행하는 실무자 중심으로 브레인스토밍(Brainstorming) 단계를 거쳐 개방형 조사를 위한 설문도구를 제작하였다. 그 이후 해당 분야 전문가 집단을 대상으로 개방형

설문조사를 실시하고 그 의견을 바탕으로 폐쇄형 설문지를 제작하여 델파이 방법론에 의해 조사 및 분석을 실시하였다.

## 2. 델파이 기법

델파이는 미래를 예측하는 경우에 일반화 혹은 표준화된 자료 및 데이터가 없을 경우 전문가들의 직관을 통해 합의점을 도출하는 방법으로 두 사람의 의견이 한 사람의 의견보다 정확하다는 논리의 패널식 조사 연구 방법이다. 이 방법은 위원회나 전문가 토론, 또는 다른 형태의 집단토론에서 나타나는 여러 가지 왜곡된 의사 전달의 원천을 제거하기 위하여 고안되었다. 즉, 소수인사에 의하여 토론과정이 지배되는 현상, 동료집단의 견해에 따라야 한다는 압력, 개성 차이와 참여자들간의 갈등 등 여러 가지 문제를 해결하기 위하여 사용된다. 델파이 기법은 익명성(Anonymity), 피드백을 통한 반복설문의 실시(Iteration with controlled feedback), 참가자 응답에 대한 통계적 처리(Statistical group response)라는 유용성을 지닌다[19]. 기술과 산업예측에서 가장 많이 적용되는 방법이며, 기술예측의 90%가 델파이에 기초한다[18].

델파이 기법을 통한 연구에서 원하는 목적을 달성하기 위하여 가장 중요한 점은 전문가의 선정과 라운드 횟수의 결정이다[3]. 우선, 델파이 기법은 전문가의 주관적·직관적 판단에 의존하여 합리적인 결과를 도출하는 것을 목적으로 하고 있기 때문에 전문가의 선정이 매우 중요하다. 따라서 조사대상은 연구 분야에 종사하는 전문가를 선택하여 구성하는 것이 가장 적절한 접근이라 할 수 있다. 이때 조사대상은 참여자의 대표성, 적절성, 전문적 지식능력, 참여의 성실성, 참가자의 수 등을 신중히 고려해야 한다. 또한 전문가의 수뿐만 아니라 몇 단계로 설문조사를 실시할 것인가를 결정하는 것도 중요하다. 즉, 델파이 기법의 목표인 합의도출을 위

하여 몇 차례의 라운드를 수행하는 것이 가장 합리적인지를 결정하는 것이 중요하다. 델파이 라운드의 수는 패널들이 합의점을 찾는 정도에 의해 결정되는 것이므로 원칙을 고수하기보다는 3에서 5라운드 사이에서 융통성 있게 진행된다[1].

### 2.1 내용타당도(Content Validity) 검증

내용타당도는 Lawshe(1975)[20]가 제시한 내용타당도 비율(Content validity ratio)로 분석한다. CVR은 응답자 수에 따라 최소 임계치가 제시된다. 최소 임계치 이상이 되었을 때 그 해당 문항에 대해 응답자의 내용타당도가 존재한다고 할 수 있다.

$$CVR = (n_e - N/2) / (N/2) \tag{1}$$

여기서,  $n_e$ 는 중요하다고 응답한 사례수로 각 응답자의 수에 따른 CVR 최소 값은 [표 1]과 같다.

### 2.2 신뢰도(Reliability) 검증

델파이 조사의 신뢰도 계수는 일반화 가능도 계수로 추정할 수 있는데, 이는 Cronbach  $\alpha$  계수와 동일하다 [6].

$$Ep^2 = \sigma^2(p) / [\sigma^2(p) + \sigma^2(\delta)] \tag{2}$$

여기서,  $Ep^2$ 는 신뢰도 계수,  $\sigma^2(p)$ 는 해당 점수 분산,  $\sigma^2(\delta)$ 는 해당 점수 상대오차분산이다.

### 2.3 타당도(Validity) 검증

델파이 기법의 타당도는 전문가의 의견수렴과 합의 정도를 분석함으로써 제시할 수 있다[6]. 수렴도는 의견이 한 점에서 모두 수렴하였을 때, 0의 값을 가지며, 의

표 1. 응답자 수에 따른 내용타당도 비율(CVR)의 최소값 (Lawshe, 1975)[15]

응답자의 수	10	11	12	13	14	15	20	25	30	35	40
CVR최소값	0.62	0.59	0.56	0.54	0.51	0.49	0.42	0.37	0.33	0.31	0.29

p(0.05)

견의 편차가 클 경우 그 값이 커진다. 합의도는  $Q_1$  과  $Q_3$ 가 일치하여 완전 합의했을 때 1의 값을 가지며, 의견의 편차가 클 경우 수치가 감소한다. 즉, 수렴도는 0에 가까울수록, 합의도는 1에 가까울수록 문항이 타당함을 의미하는 것이다.

$$\text{수렴도} = (Q_3 - Q_1) / 2, \text{ 합의도} = 1 - (Q_3 - Q_1) / \text{Mdn} \quad (3)$$

여기서, Mdn=중앙값,  $Q_1$ ,  $Q_3$ 는 각각 제1사분위와 제3사분위 계수로서 전체 25%, 75%의 값을 각각 의미한다.

### III. 적용

#### 1. 연구의 대상

싱크홀 위험 요인을 선정하기 전 연구에 참여하는 연구위원을 대상으로 2차례의 브레인스토밍을 진행하였다. 브레인스토밍은 특정한 주제 또는 문제에 대해 떠오르는 아이디어를 논의 없이 자유롭게 기재하는 방식을 말한다. 기본적으로 싱크홀 위험 요인은 너무 방대하여 모든 요인들을 대상으로 델파이 기법을 적용하기에는 무리가 있기 때문이다. 브레인스토밍을 진행한 연구 위원은 6명을 선정하였다. 6명의 연구위원은 박사 2명, 석사 4명으로 구성되어 있으며, 평균 경력은 11.4년이다. 설문에 응답하는 전문가 집단은 싱크홀 발생원인과 관련 있는 토목공학(수공학, 지반공학)과 건축공학을 전공한 석사 이상의 실무자 30명을 선정하여 연구를 진행하였다. 여기서 수공학과 건축공학 전공자를 선정한 이유는 싱크홀의 주요원인 중 집중호우로 인한 경우, 지하수 등으로 인한 원인과, 고층건물, 지하철, 상-

하수도, 가스관 등 각종 인프라가 밀집되어 있는 도심지에서 주로 발생하고 있기 때문이다. 설문은 2015년 1월부터 4월까지 3차례 진행을 하였으며, 그 중 남자가 22명이며, 여자가 8명이고 20대가 5명, 30대가 3명, 40대가 12명, 50대 이상이 10명으로 나타났다. 학력에서는 석사가 21명, 박사가 9명으로 나타났다. 평균 경력은 15.2년이다[표 2]. 본래 델파이 기법은 통계적 확률에 근거한 모수적 방법론이 아니기에 대규모 표본이 필요 없지만 본 연구에서는 중심극한 정리에 의해 최소의 정규분포를 가정할 수 있는 표본 수인 30명을 그 기준으로 삼았다.

#### 2. 설문도구 구성

설문도구 구성을 위한 기초요인 선정은 1차 브레인스토밍을 통해 전문가의 의견을 자유롭게 개진할 수 있도록 주관식 설문을 진행하였다. 또한 연구위원 즉, 총괄 수행자가 이를 정리하여 수렴도와 합의도 분석을 수행하게 된다. 1차 브레인스토밍 결과 전술한 바와 같이 싱크홀 위험 요인 선정을 위해 거시적으로 자연적 환경, 인위적 환경 그리고 사회적 환경으로 구분하였다. 그리고 자연적 환경은 지하와 지상으로 구분되며, 인위적 환경은 지하구조물과 지중 매설물 그리고 지표 특성으로, 사회적 환경은 지역개발과 인공로 세분화시켰다. 세부요인은 침투성 지반과 불침투성 지반의 차이, 지표수의 흐름과 그에 대한 관리, 지구온난화로 인한 토층의 유효응력의 변화, 지하시설물의 영향에 따른 지하수 흐름의 왜곡과 시공법에 따른 문제점, 철도와 교통량으로 발생하는 진동, 구조물 굴착공법의 유형과 흙막이 가시 설 공법의 유형에 따른 영향, 상하수도관의 노후 정도 등 고려해야 한다는 다양한 의견들을 반영하여 2차 브레인스토밍을 진행하여 최종 연구 요인들을 선정하였다. 2차 브레인스토밍을 위한 설문은 [표 3]과 같이 5점

표 2. 설문조사 대상 및 내용

항목별 구분	내용	비고
연구위원	6명, 토목공학(수공학, 지반공학), 건축공학 전공자	석사학위 이상, 실무 경력 10년 이상
설문대상	30명, 토목공학(수공학, 지반공학), 건축공학 전공자	석사학위 이상, 실무 경력 5년 이상
설문내용	싱크홀 위험요인 선정을 위한 직·간접 요인도출	-
기간	2015.1~2015.4(총 4개월)	-

리커트(Liket) 척도로 하여 진행하였다.

2차 브레인스토밍 결과 거시적 항목은 변함없지만 세부 유형에서 사회적 환경을 관리/제도적 환경과 지역개발로 다시 분류를 하였다. 그리고 세부 항목에서도 중복되는 요인들을 합쳐 새로운 항목으로 정리하였다. 각 세부 항목은 [표 4]와 같다.

#### IV. 분석결과

1, 2차 델파이 분석은 정성적 평가를 목표로 진행하였다. 각 항목에 대해서 주요한 원인 또는 원인이 되지 않는 이유를 정리하면 다음과 같고 분석결과는 [표 5]와 같다.

지하 요인 중 ‘강우량(강우빈도)’은 흙의 습윤 상태를 유지시키며, 흙 입자의 마찰력, 응력 등을 저하시키는 요인으로 작용한다. 또한 강우로 인한 지하수위 상승 및 지하로 강우량은 싱크홀과 지반침하의 원인이 될 수 있다. ‘지하수위의 저하’는 지표면 온도 상승으로 이어지고(하천의 건천화), 또한 표면 건조 상태가 유지되면서 지반침하의 원인이 될 수 있다. 그러나 하지만 지하수위가 상승할 경우 흙 입자의 교란이 일어날 수 있고

강해질 경우 흙을 더욱 단단하게 만들어 줄 수 있다. 따라서 지하에 빈 공간이 없다면 싱크홀 생성에 직접적인 원인은 아니다. 또한 ‘지하수의 변동’이 일정하게 변동이 된다면 싱크홀의 원인이 될 수 없다.

‘배수상태’는 배수가 불량한 상태면 흙의 응력에 영향을 미치게 되고 또는 과도한 배수는 미세입자의 손실로 지반침하의 원인이 될 수 있다. ‘토양 함수율’은 토양 속에 수분의 함량으로 함수율의 변화는 응력을 약화시킬 수 있다. 토양의 함수비가 일정하고 연약지반 개량을 통한 안정화 작업이 되어 있다면, 주요건물이 지어지는 곳의 지반상태는 양호할 것으로 영향요인이 아니다. ‘지진에 의한 액상화’는 흙 속에 과잉 간극 수압이 발생하여 초기 유효응력과 같게 되기 때문에 전단 저항을 잃는 현상을 말한다. 따라서 강도가 약한 지진일지라도 지속적으로 발생할 경우 액상화를 심화시켜 흙의 응력을 약화시키게 된다.

지상 요인 중 ‘지구온난화’는 지나친 강우와 건기의 반복으로 인해 지반상태를 악화시킬 수 있다. 또한 ‘집중호우’와 ‘게릴라성 폭우’는 지반의 상태를 악화시킨다. ‘토사 투수계수’에서는 일정 단위의 단면적을 단위 시간에 통과하는 수량으로 기후, 지반상태, 주변여건 등에 의해 지배되기 때문에 지반침하와 관련이 없다. 하

표 3. 2차 브레인스토밍 설문항(예시)

구분	매우아니다	아니다	보통이다	그렇다	매우그렇다
강우량(강우빈도)는 싱크홀 발생에 영향을 주지 않는다.	①	②	③	④	⑤
강우량(강우빈도)는 지반침하(침식)에 영향을 준다.	①	②	③	④	⑤
강우량(강우빈도)는 싱크홀 발생의 원인이 될 수 있다.	①	②	③	④	⑤

의견 : 영향 요인이 아닌 이유를 적어 주세요.

표 4. 브레인스토밍을 통한 위험 요인 도출 결과

1차 브레인스토밍		2차 브레인스토밍
구분	유형	항목
자연적 환경	지하	강우량(강우빈도), 지하수위, 배수 상태, 함수율, 지진에 의한 액상화
	지상	지구온난화 정도, 토사 투수계수, 산림율, 흙의 성질, 암석 종류, 흙의 두께
인위적 환경	지하 구조물	과도한 지하공간 활용, 지하수 흐름교란, 지하 정화조 및 저류조, 상하수도 매설깊이(지하수위 보다 상·하부 위치여부)
	지중 매설물	상하수도관로의 누수 및 노후 정도, 지하매설관로 노후 등 영향(상하수도, 가스, 전력관등), 토립자의 유실, 지반자중
	지표 특성	고층건물, 철도 및 도로, 도로 포장재료, 다짐불량(진동), 지하수 및 강우 침투시 체적감소)
사회적 환경	관리/제도적 환경	시공관리 미흡, 사후 관리 미흡, 담당공무원의 전문성 미흡, 미흡한 법적근거 부족(지하개발 사전 안정성 분석 특별법 등)
	지역개발	지하수 과다 이용, 하천과의 연결성, 주변지역 개발정도, 인구밀도, 교통량(차량진동)



와, 시공관리 그리고 사후 어떻게 관리할 것인가 지반침하의 간접적 원인이 될 수 있다. 따라서 싱크홀에 따른 원인 제고를 사전에 예방하기 위한 법적 근거를 마련하는 것은 다른 영향 요인보다 중요한 사항이며, 지하개발로 인해 나타나는 싱크홀의 발생이 증가하는 추세여서 지속적인 관리가 필요하다.

‘지표 특성’을 보면 도로 포장재료의 침투 가능여부에 따라 지반의 상태가 달라질 수는 있으나 일반적으로 도로는 비 침투 포장 재료를 사용하기 때문에 영향을 미치지 않을 것이다. ‘다짐불량’은 흙 입자들의 공극 존재이며, 이러한 공간을 매워지면서 지반의 침하가 생길 수 있다. 초기 지반조사, 지반다짐, 관거의 부식 등 여러 요인들을 적절히 관리하면 지반의 침하를 줄일 수 있을 것이다. ‘담당 공무원의 전문성 강화’로 초기 설계부터 시공, 사후관리까지 모두 가능하기에 중요한 관리 요인이다. 하지만 현재 싱크홀의 발생빈도는 및 감독하는 공무원들의 전문성이 낮아 증가하는 것이 아니라 기타 환경적 영향요인에 의해 나타는 점이 크기 때문에 담당 공무원의 전문성을 향상시킨다고 할지라도 싱크홀의 발생과 관련성은 없을 것이다. ‘지하수 과다 사용’은 지하수 수위 하강을 의미하고 지하수위 하강은 지반을 침식 시킬 수 있다. ‘인구밀도의 증가’는 사회 기반시설물의 수요를 증가시키고 이는 차량의 이동을 증가시켜 이동하중 증가와 진동량의 원인이 될 수 있다.

델파이 3차 분석 결과를 보면 평균 4점 이상 즉, ‘주요한 영향 요인이다’라고 응답한 항목들을 보면 지하에서는 지하수위와, 배수상태가 각각 4.15점, 4.08점으로 나타났다. 지상에서는 흙의 성질이 4.00점으로 나타났으며, 지하 구조물에서는 과도한 지하 공간 활용이 4.56점

으로 나타났다. 지중 매설물에서는 상하수도 관로의 누수 및 노후 정도가 4.08점, 토립자의 유실이 4.25점으로 나타났으며, 지표 특성에서는 다짐 불량량이 4.01점으로 나타났다. 관리·제도 환경에서는 부적절한 시공관리가 4.46점, 부실한 사후관리가 4.23점으로 나타났다. 지역 개발에서는 지하수 과다 이용이 4.05점, 주변지역 개발정도가 4.03점으로 나타났다. 결과적으로 위의 항목들이 CVR과 수렴도, 합의도 그리고 신뢰도 계수를 충족시키면서 가장 높은 평균값을 나타내는 중요 항목으로 도출이 되었다. 본 결과를 확대하여 소수점 둘째자리에서 올림 하여 평균 4점 이상이 되는 항목들을 살펴보면 다음과 같다. 지하에서는 강수량이 3.95점, 지진에 의한 액상화가 3.95점으로 나타났다. 지하 구조물에서는 지하수 흐름 교란이 3.98점으로 나타났으며, 지표 특성에서는 철도 및 도로가 3.91점으로 나타났다. 관리/제도 환경에서는 법적 근거 마련이 3.90점으로 나타났다.

이상의 요인들을 정리하면 지하에서는 강수량, 지하수위, 배수상태, 지진에 의한 액상화 요인이 선정되었으며, 지상의 요인들에서는 흙의 성질과, 흙의 두께가 선정되었다. 지하 구조물에서는 과도한 지하 공간 활용과 지하수 흐름교란이 선정되었으며, 지중 매설물에서는 상하수도 관로의 누수 및 노후 정도와 토립자의 유실이 선정되었으며, 지표 특성에서는 고층건물과 철도 및 도로 그리고 다짐불량이 선정되었다. 관리/제도 환경에서는 부적절한 시공관리와 부실한 사후 관리 그리고 법적 근거가 마련이 선정되었다. 마지막 지역개발에서는 지하수 과다 이용과 하천과의 연결성 그리고 주변지역 개발 정도가 선정되었다[그림 2].

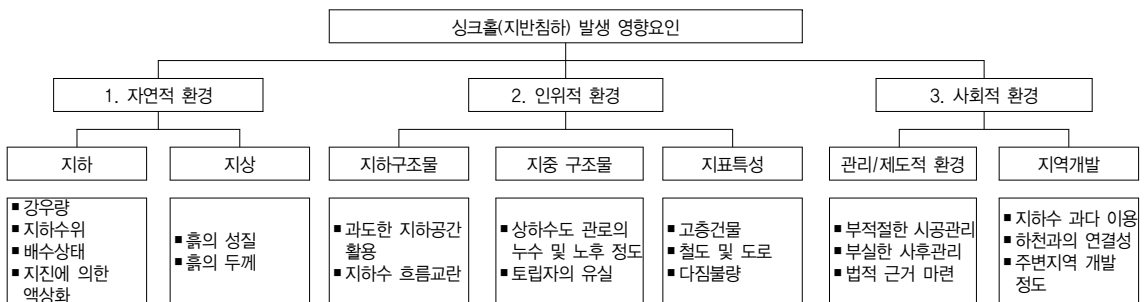


그림 2. 델파이 기법을 활용한 싱크홀(지반침하) 발생 위험 요인 선정



## VI. 결론

최근 들어 도심에서 발생한 다수의 싱크홀은 시민의 불안감을 증폭시키고 있다. 또한 도시 기반시설의 노후와 온난화 등으로 인해 자연 환경은 급변하고 있다. 도시의 규모가 커진다는 것은 초고층 건물 등이 건설이 되고 지상으로 많은 차량과 화물이 운반되고 지하 시설 및 매설물 등이 복잡해지는 것이다. 이는 결과적으로 지하에 대한 하중을 강화시키고 있다. 그리고 케틸라성 집중호우 등은 지반의 응력을 약화시키고 이런 응력의 약화는 결과적으로 싱크홀을 발생시키고 있다. 하지만 이런 싱크홀을 발생시키는 요인들은 너무나 복잡한 상관관계로 엮여 있어 정확한 인과관계를 규명하기 어렵다. 그리고 싱크홀, 지반함몰, 지반침하 등 그 용어도 통일 되어있지 않아 발생 원인에 대해서도 광의에 따라 다양한 의견이 제시되고 있는 상태이다.

본 연구에서는 잠재적 발생 가능한 싱크홀 위험평가를 위해서 싱크홀 발생의 요인을 자연적 환경, 인위적 환경 그리고 사회적 환경을 나누고 델파이 기법을 이용하여 싱크홀 발생 위험요인을 선정하였다. 여기서, 객관성을 확보하기 위해 최대한 다양한 전공의 전문가들이 참여할 수 있도록 하였으며, 주관적 의견 개진을 독려하였다. 총 2번의 브레인스토밍 과정과 3번의 델파이 설문 라운드를 통하여 '자연적 환경'은 지상과 지하 환경으로 나누었고, '인위적 환경'은 지하 구조물, 지중 구조물, 지표 특성으로 구분하였다. 그리고 '사회적 환경'은 관리·제도적 환경과 지역 개발로 나누었다.

연구 결과 자연적 환경은 다시 지하와 지상의 환경을 나누었고 지하에서는 강우량, 지하수위, 배수상태, 지진에 의한 액상화가 주요 요인으로 응답하였다. 지상에서는 흙의 성질과 흙의 두께가 나타났으며, 인위적 환경을 지하 구조물과 지중 구조물 그리고 지표 특성을 나누었고 다시 지하 구조물은 과도한 지하 공간 활용과 지하수 흐름 교란으로 나타났다. 지중 구조물은 상하수도 관로의 누수 및 노후 정도, 토립자의 유실로 나타났고, 지표 특성은 고층건물, 철도 및 도로, 다짐불량으로 나타났다. 사회적 환경은 관리/제도적 환경과 지역 개발로 나누었고, 관리·제도적 환경은 부적절한 시공관

리와 부실한 사후 관리 그리고 법적 근거 마련으로 나타났다으며, 지역 개발은 지하수 과다 이용과 하천과의 연결성 그리고 주변지역 개발정도로 나타났다.

본 연구는 싱크홀에 대한 체계적이고 과학적인 접근 방법에 대한 필요성을 인식하고, 실증적인 측면에서 구체적인 평가방법과 기법에 대한 대책이 강구되어야 함을 시사하고자 하는데서 비롯되었다. 연구 결과 수자원, 지반 등 전문가 의견을 반영한 싱크홀 발생에 대한 위험요인을 도출한 것으로 싱크홀 발생 대책 마련을 통하여 더욱 체계적이고 사전예방적인 평가지표를 개발하는데 기여할 수 있는 기초자료가 될 것으로 기대한다. 향후, 싱크홀 대책 마련시 요구되는 의사결정과정을 보다 세분화하여 우선순위를 산정할 수 있는 과학적 근거와 객관성 마련을 위한 싱크홀의 위험요인에 대한 평가지표 개발이 필요하다. 또한 실제 현장에서의 적용 가능성 측면에 있어서 각각의 평가지표들을 측정할 수 있는 구체적인 방법론과 기법에 대한 관련 논의가 지속되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김진아, “마을만들기에 대한 공동체주의 이론적 해석: 델파이 방법을 통한 적용가능성 탐색,” 국토연구, 제83권, pp.113-127, 2014.
- [2] 국토교통부, 국토부, 싱크홀 예방을 위한 지반침하 예방대책 발표, 보도자료, 2014.
- [3] 노승용, *델파이 기법: 전문적 통찰로 미래예측하기*, 국토연구원, 2006.
- [4] 박인준, 박승희, “싱크홀 원인분석 및 대처방안,” 한국방재학회지, 제14호, 제5권, pp.12-17, 2014.
- [5] 성례아, “델파이 기법을 이용한 애니메이션의 재미요소 도출,” 한국콘텐츠학회논문지, 제13호, 제11권, pp.96-105, 2013.
- [6] 이종성, *연구방법 21: 델파이 방법*, 서울: 교육과학사, 2001.
- [7] 이승희, 임지영, “델파이 기법을 이용한 우리나라 재가간호서비스 연계방안,” 한국콘텐츠학회논문

지, 제12권, 제12호, pp.282-290, 2012.

- [8] 이오복, “여성결혼이민자 취업향상을 위한 지원 방안에 관한 델파이 분석,” 한국콘텐츠학회논문지, 제14권, 제8호, pp.197-206, 2014.
- [9] 이대영, “도심지 지반침하 싱크홀(Sinkhole),” 월간 서울기술이야기, 통권 제225호, pp.2-36, 2014.
- [10] 이병식, “싱크홀의 교훈,” 한국방재학회지, 제14권, 제5호, pp.6-11, 2014.
- [11] 이기영, 강상준, “도시를 삼키는 싱크홀, 원인과 대책,” 경기발전연구원, 이슈&진단, 제156권, 2014.
- [12] 이수곤, “현재 싱크홀 대형 참사 전조 가능: 싱크홀 원인 1차 지하수, 2차 상수도관망일수도,” 한국방재학회지, 제14권, 제5호, pp.18-23, 2015.
- [13] 이경수, 김태형, 강현구, 정재광, “델파이기법과 AHP를 이용한 대전시의 도시재난 위험요소 선정에 관한 연구,” 한국위기관리논집, 제11권, 제4호, pp.69-84, 2015.
- [14] 임종철, “싱크홀 가슴앓이,” 대한토목학회지, 제63권, 제4호, pp.6-8, 2015.
- [15] 조응래, “빈번해지는 싱크홀-근본적 해결 방안 모색해야,” 한국건설산업연구원, CERIK저널, pp.11-13, 2014.
- [16] 허예라, *우리나라 의학 전문 직업성의 핵심요소 규명과 교육과정*, 연세대학교, 박사학위논문, 2006.
- [17] 최우용, “싱크홀에 대한 개인적 고찰,” 한국지반공학회논문집, 제29권, 제12호, pp.36-38, 2013.
- [18] U. G. Gupta and R. E. Clarke, “Theory and Applications of the Delphi Technique: A bibliography(1975-1994),” *Technological Forecasting and Social Change*, Vol.53, No.2, pp.185-211, 1996.
- [19] J. P. Martino, *Technological Forecasting for Decision Making*, Book and Disk (Mcgraw Hill Engineering and Technology Management Series), 1992.
- [20] C. H. Lawshe, “A quantitative approach to content validity,” *Personnel psychology*, Vol.28, pp.563-575, 1975.

저자 소개

이 경 수(Kyung-Su Lee)

정회원



- 2010년 2월 : 한국교통대학교 토목공학과(공학사)
- 2012년 2월 : 한국교통대학교 토목공학과(공학석사)
- 2016년 2월 : 한국교통대학교 토목공학과(박사수료)

- 2015년 4월 ~ 현재 : 국민안전처 국립재난안전연구원 시설연구사
- 2014년 1월 ~ 현재 : (사)한국환경영향평가학회 이사  
<관심분야> : Water Resource, River and Hydraulics Engineering, and Scientific Disaster Investigation

김 태 형(Tae-Hyeong Kim)

정회원



- 2005년 8월 : 한남대학교 경영학과(경영학사)
- 2013년 8월 : 목원대학교 경영정보학과(경영학석사)
- 2010년 1월 ~ 현재 : (주)아노바 이사

- <관심분야> : Business Statistics, Disaster Planning and Management

김 태 훈(Tai-Hoon Kim)

정회원



- 1999년 2월 : 한양대학교 토목환경공학과(공학사)
- 2001년 2월 : 한양대학교 토목환경공학과(공학석사)
- 2012년 6월 : 알버타 주립대 토목환경공학과(공학박사)

- 2005년 8월 ~ 현재 : 국민안전처 국립재난안전연구원 시설연구관
- <관심분야> : Landslides, Slope stability, Geomorphology, Complex system, and Self Organized Criticality

박 상 혁(Sang-Hyuk Park)

정회원



- 2006년 2월 : 중부대학교 환경보건학과(공학사)
- 2008년 2월 : 서울시립대학교 환경공학과(공학석사)
- 2014년 2월 : 서울시립대학교 환경공학과(공학박사)

- 2014년 9월 ~ 12월 : 서울시립대학교 시간강사
- 2015년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원  
<관심분야> : Water Science and Technology, Water Supply System, Water Leak Detection, Statistic Analysis, Land Subsidence, Signal Processing and Random Process