



강우량과 강우강도에 따른 지반함몰 상관관계 분석

Ground Subsidence Risk Analysis on Correlation between Rainfall and Rainfall intensity

최창호^a · 김진영^{b,†} · 강재모^b · 이성열^c · 백원진^d

Choi, Chang-Ho · Kim, Jin-Young · Kang, Jae-Mo · Lee, Sung-Yeol · Baek, Won-Jin

ABSTRACT

Recent settlements and sinkhole openings in urban areas have caused social problems such as damage to roads and structures, fear of the public, and loss of property. Several studies have demonstrated that surface subsidence and sinkhole opening are greatly affected by rainfall and rainfall intensity in urban areas. In this paper, we analyzed the relationship with the characteristics of recorded rainfall data using the ground subsidence database reported in major cities. The correlations were found using sedimentation and precipitation data from 2010 to 2014. The duration and intensity of a given precipitation have evolved to obtain an effect on ground sedimentation rate (SR). The results show that the relationship between SR and precipitation is asymptotic and can be modeled by a hyperbolic equation. Through this study, it is possible to predict the occurrence of ground subsidence due to precipitation in advance.

Keywords: Ground subsidence; risk analysis; intensity and duration of rainfall

I. 서론

최근 조사에 의하면 서울시 곳곳에 지반함몰이 자주 발생하고 있으며, 조사 기간 동안 지반함몰 발생 건수는 지속적으로 증가하고 있는 실정이다. 이는 1970년대부터 지속적으로 이어진 우리나라의 도시화 과정에서 초기에 구축되었던 하수관로와 같은 지하매설물들이 노후화되면서 그 영향이 나타났기 때문이라고 볼 수 있다. 그간 이러한 시설물 노후화에 대한 관리 방안이 미흡한 실정임에도 지하공간 개발은 이에 대해 충분한 고려 없이 계속되었기 때문에 지반함몰 발생이 더욱 가속화되고 있다 (Jeong, 2015).

지반함몰은 주변 건물의 기울기 등에 영향을 끼칠 뿐만 아니라, 이동 중인 사람 혹은 차량의 안전을 위협할 수 있기 때문에 시민들이 이에 심대한 불안감을 가질 수 있으므로 신속한 발견과 그에 따른 효율적인 조치가 필수적이라고 할 수

있다. 더불어, 지반함몰에 대한 사후 대처도 물론 중요하지만 이를 사전에 감지하여 예측할 수 있다면 더욱 효과적으로 시민들의 안전을 도모할 수 있다. 현재의 지반함몰 발생에 대한 대처는 지반함몰 사고의 사전 예측과 상세한 원인규명에 대한 조사보다는 도심지 중심에서 발생하는 특성상 사고 발생 후의 대책 및 신속한 복구에 지나치게 편중되어 있는 실정이다. 그렇기 때문에 지반함몰에 영향을 줄 수 있는 환경적 요인들을 정확하게 파악할 수 있다면 지반함몰 사고 예방을 위한 조치들이 가장 시급한 지역에 우선적으로 실시되는 등 효율적인 안전관리가 가능할 수 있을 것이다.

일반적으로 지반함몰의 가장 큰 원인은 상하수도 손상이지만 상하수도 손상 이외에도 강우, 지열 등 자연 환경에 의해서도 지반함몰 위험도가 높아질 것으로 판단된다. 따라서, 본 논문은 도심지에서 일어나는 지반함몰 발생 위험지역을 사전에 선정하여 그에 따른 예방조치를 마련할 수 있도록 하기 위해 여러 가지 인자중 하나로 지반함몰 발생에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 누적강수량 (Seoul Institute, 2017)과 지반함몰 발생건수를 중점으로 분석하였다.

II. 지반함몰에 관한 원인조사 및 분석

1. 지반함몰 발생 요인

가. 국내의 지반함몰 관련 발생원인

지반함몰은 자연발생적 (석회암 지대에서의 싱크홀), 인공

^a Research Fellow, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology.

^b Senior Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology.

^c Postdoctoral Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology.

^d Professor, Department of Rural and Biosystems Engineering, Chonnam National University.

† Corresponding author

Tel.: +81-31-910-0550, Fax: +81-31-910-0031

E-mail: goldcamp@kict.re.kr

Received: October 19, 2021

Revised: April 21, 2022

Accepted: May 8, 2022

적 지반함몰로 분류되며, Park & Park (2014)은 인공적 지반함몰은 보통 상하수도, 전력구, 통신구 등의 지중매설관의 노후, 접합 불량으로 인한 누수에 의해 일어나거나, 터널굴착 및 지하구조물 시공 시 잘못된 공법의 선택 또는 관리 부실로 인한 지하수의 유입과 유출에 의한 토사유실로 지중 공동이 발생된다고 하였다. 국내에서의 지반함몰과 관련된 실험적 연구는 미미한 실정이며, 지반함몰이 발생하기 전에 이를 발견할 수 있다면 붕괴를 예방할 수 있는 보강대책을 수립할 수 있으므로 지반함몰 발생 여부를 사전에 예측할 수 있는 여러 가지 방법 (관로 건전도, 강수량의 영향으로 지하수위 상승 등)이 필요하다. 국토부에서 2015년 상반기 (1월~6월) 동안 전국 지자체를 대상으로 지반침하 발생현황을 조사한 결과 총 551건의 지반침하가 전국적으로 발생한 것으로 조사되었다. 지반침하 발생현황을 보면, 서울시에서 414건으로 가장 많이 나타났다. 다음으로 경기도, 울산광역시, 충청북도 지역에서 10건 이상의 지반침하가 발생한 것으로 나타났다.

나. 국외의 지반함몰 관련 발생원인

국외의 실험적 연구로는 매설관의 파손부 등으로부터 관내부에 토사 유출에 따른 주변 지반내의 공동 발생 과정에 대해서 Kuwano 등 (2012)은 지반함몰을 미연에 방지하기 위한 지반내 공동과 이완의 탐지를 위한 기초적 점토로 일본의 표준사를 이용하여 실내모형실험을 수행한 바 있으며, 또한 Sato & Kuwano (2010)는 하수관의 균열부를 통한 우수의 상향침투와 수위 저하에 따른 하향침투의 재현 실험을 통해 지반내 공동의 형성과 확장과정에 대한 평가를 위한 모형실험을 수행한 바 있다. 이를 통해 모래의 모델지반 중에 상향 침투 후 하향침투 시 균열부를 통한 토사유실이 반복적으로 진행되어 공동이 확장되고 주변지반이 이완되어 지반함몰이 발생한다고 하였다. Renuka와 Kuwano (2011)은 표준사를 이용한 공동상부의 이완영역의 형성과 평가를 위한 실내모형실험을 수행하고 지하수위 변화에 따른 반복적인 토사유실이 주변지반의 이완을 촉진하여 공동이 확장되어 감을 나타내바 있다.

이상과 같이 물의 침투에 의한 국소적인 지반의 취약화에 관한 견지는 다양한 각도에서 축적되고 있지만 매설 관거의 파손에 원인이 되는 지반 함몰의 계통적인 조사 연구는 거의 실시된 예가 없다. 예를 들어 관거의 파손 정도와 함몰 규모의 관계나 기존 공동의 위험도 판정이나 성장 속도 평가 등 아직 불분명한 점이 많은 것이 실정이다.

Sato 등 (2013)은 지중 구조물이 존재할 때 모형지반 하부 개구부를 통해 물과 토사를 유출시키며 지반함몰 메커니즘을 관찰했다. 이 실험은 모형지반 상부에 일정 수량의 물을 주입하여 모형강우를 발생시켜서 모형지반 내부에 지중 구조물이

존재할 때 개구부를 통해 토사와 물을 유출시키는 실험이다. 이 실험은 지중 구조물이 존재하지 않는 경우, 지중 구조물이 개구부 상단에 존재하는 경우, 지중 구조물이 개구부 상단 좌측에 존재하는 경우에 대해 수행되었다. 일본에서는 우리나라보다 앞서 지반함몰에 대한 실증 조사 및 모형실험이 이루어지고 있다. 그 결과를 요약하면 노면 아래의 공동은 크게 직접적 (지하매설물 및 호안의 파손 등), 간접적 (우수, 지하수, 지질, 지반, 조석, 지진 등) 및 외적인 요인 (시공불량, 교통하중, 진동 등)에 의해 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 지반함몰은 노상 혹은 노반의 토립자가 유출되거나 압밀침하로 인하여 공극이 확대되는 현상이며, 하나의 요인이 아닌 직접적 또는 간접적인 요인이나 외적요인이 복합적인 요인이 되어 발생되고 확대되어 최종적으로 포장의 내력한계를 초과한 조건에서 함몰에 이른다고 발표하였다. 또한 구체적으로는 도로별 포장 구성, 연도 특성, 매설물 상황 등이 다르기 때문에 공동 발생 조건은 복잡하며, 크게 구조적 요인인 점용 매설물 주변의 토사의 유출, 주변 지반의 압밀, 대형 지하구조물과 환경적 요인인 우수 및 지하수의 영향, 지진의 영향, 호안으로부터의 토사 유출로 구분하였다.

2. 서울시 지반함몰 발생 현황 분석

서울시에서 보고된 지반함몰 발생은 2010년 430건, 2011년 572건, 2012년 688건, 2013년 848건, 2014년 778건으로 나타났다. 그 중 서울시의 25개구 중 송파구가 907건으로 가장 많았고, 200건이 넘는 지역은 6개구로 나타났다. 지반함몰이 발생한 원인으로는, 상수도관로 75건, 하수관로 3218건, 기타 772건으로 하수관로가 79%, 기타 및 원인 미상이 19%, 상수도관로 2%로 하수관로에 의한 지반함몰이 가장 많은 것으로 나타났다. 하수관로에 의한 공동 발생을 살펴보면, 대부분의 도심지는 노면이 포장되어 있기 때문에 강우 시 빗물이 즉시 땅속으로 흡수되지 않고 노면을 따라 하수관로를 통해 흐르게 된다. 이때, 하수관로에 균열이나 단차가 존재한다면 물과 토사가 함께 유출되어 지하 공동이 생성되고 확대되어 외부 하중 등에 의해 결국 지반 함몰이 발생하는 것으로 판단된다.

3. 월별 강수량과 지반함몰 발생건수의 비교 분석

기존 실험 연구에서 지반함몰 원인에 지하수위 변화가 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 강수량이 지반함몰 발생에 영향을 미치는지 분석하기 위한 연구를 수행하였다. Fig. 1은 월별 강수량과 지반함몰 발생횟수를 비교하여 제시하였다. 좌측은 월별 누적강수량 값을 나타내며, 우측은 월별 지반함몰 건수를 나타낸다. 그림에서의 지반함몰

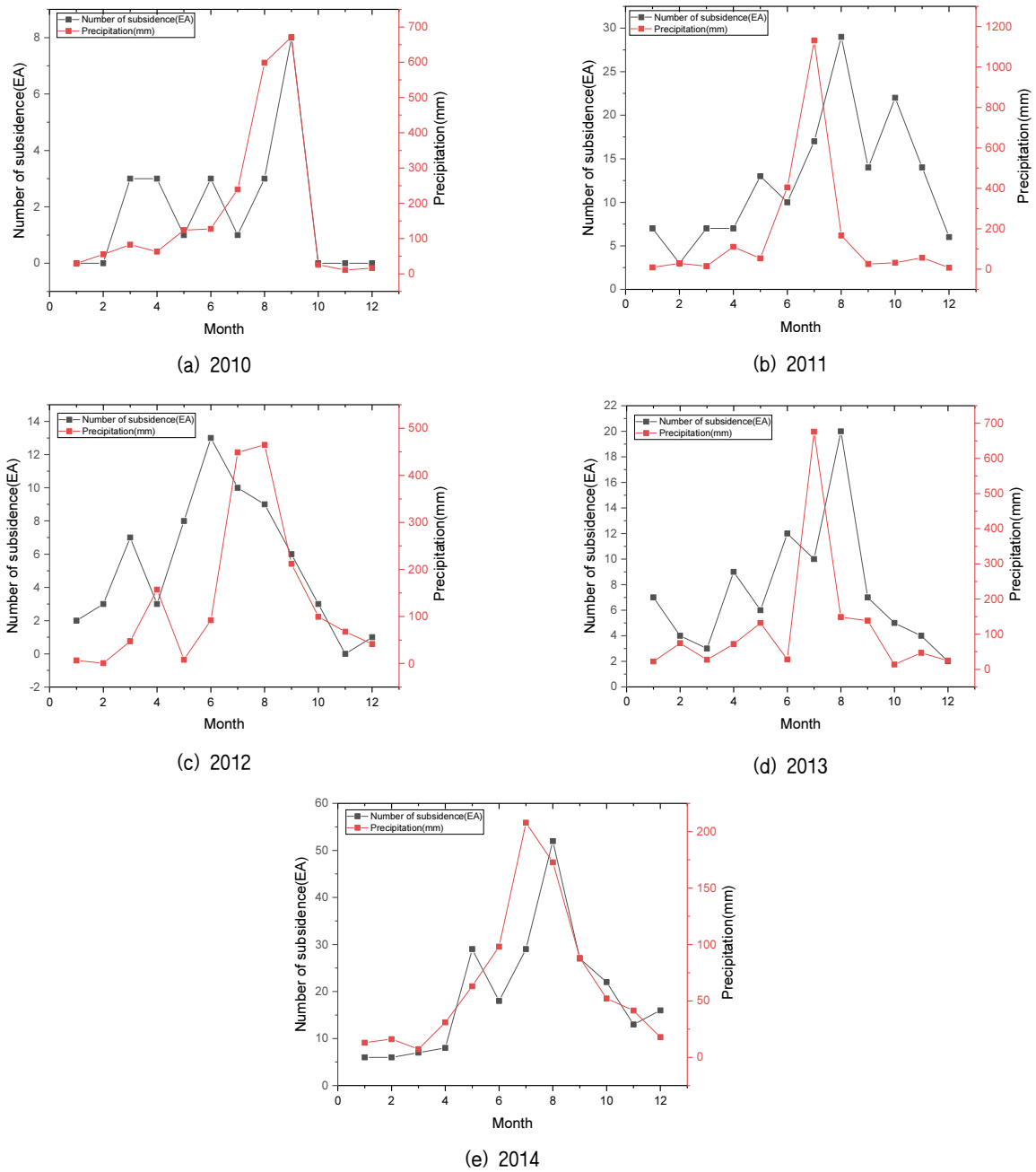


Fig. 1 Comparison between monthly precipitation and number of subsidence from year 2010–2014

발생 건수는 지반함몰의 크기, 형태, 발생 원인을 구별하지 않고 월별 총 발생 건수를 나타낸다. 그래프를 살펴보면, 강수량이 많은 여름에 지반함몰이 많이 발생하고, 지반함몰과 월별 누적강수량이 상관성이 있는 것을 확인할 수 있다.

강수량과 지반함몰 발생 횟수의 상관관계를 정량적으로 분석하기 위하여, 피어슨 (Pearson) 상관 계수를 산정하였다. 피어슨 상관 계수는 두 변수 간 선형 관계를 나타내는 정량적

척도로서, 각 변수 (A와 B)에 N개 스칼라 관측 값이 있으면 식 (1)에 따라 산정할 수 있다 (Kim, 2016).

$$\rho(A, B) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i - \mu_A}{\sigma_A} \right) \left(\frac{B_i - \mu_B}{\sigma_B} \right) \quad \text{식 (1)}$$

여기서, μ_A 와 σ_A 는 각각 A의 평균값과 표준편차이며, μ_B

와 σ_B 는 각각 B의 평균값과 표준편차를 나타낸다. 식 (1)을 적용하여 산정된 피어슨 상관 계수는 2개 변수의 상관도를 정량적으로 제시할 수 있으며, 상관계수 $\rho(A, B)$ 는 -1.00~1.00의 범위에 있으며 상관성이 낮아질수록 0에 가까운 값을 나타낸다 (Song, 2012). Fig. 1에 제시된 월별 누적강수량과 지반함몰 발생 횟수의 상관관계를 식 (1)에 적용하여 Pearson 상관도를 분석하였다. 상관도 분석결과, 2010년 $\rho=0.5885$, 2011년 $\rho=0.2226$, 2012년 $\rho=0.8350$, 2013년 $\rho=0.6850$, 2014년 $\rho=0.6297$, 2011년을 제외하고 지반함몰과 강수량과의 상관계수가 높게 나타났다. 이로부터 누적 강수량 (강수 (비, 눈 포함)와 강우 (비)를 뜻하며, 지하수위의 상승요인으로 강수를 의미함)과 지반함몰 발생 간의 상관성은 높은 것으로 나타났다. 또한 특히 지반함몰이 20건 이상 발생된 2011년, 2013년, 2014년도의 경우 강우가 많은 달의 다음 달에 지반함몰이 많이 발생한 경향을 확인 할 수 있다.

III. 지반함몰 발생건수와 누적 강수량 상관관계 분석

1. 서울시 권역 구분

본 연구에서는 지역별로 다른 환경을 보이는 서울시를 4개의 수계망도 (Seoul Metropolitan Government, 2011)를 중심으로 지질정보, 강수량 등을 고려하여 25개의 구를 4개의 권역으로 구분하였다.

첫 번째 지역인 Zone A는 탄천 물환경 권역으로 평균 기온이 가장 높은 지역이며, 대부분 층적층으로 이루어져 있다. 지질구성상 사양토 지역이 많아 상대적으로 배수가 좋지 않은 환경이며, 이에 해당되는 행정구역은 강동구, 송파구, 강남구, 서초구이다. Zone B는 안양천 물환경 권역으로 평균 기온이 두 번째로 높은 지역이며 대부분 변성암으로 구성되어 있다. 한강변 일대에 미사질 토양과 같은 입자가 작은 토양토성이 일부 존재하여 Zone A와 마찬가지로 배수 환경이 비교적 좋지 않은 지역이다. 이에 해당하는 행정구역은 강서구, 양천구, 구로구, 영등포구, 동작구, 금천구, 관악구이다. Zone C는 홍제천 물환경 권역으로 평균 기온이 가장 낮았으며 Zone B와 마찬가지로 대부분 변성암으로 구성되어 있다. 또한 사양토 지역이 넓게 분포되어 다른 지역에 비해 배수가 양호한 편이라는 특징이 있다. 행정구역상으로는 은평구, 서대문구, 마포구, 용산구가 해당한다. Zone D는 중랑 물환경 권역으로, 평균기온은 세 번째로 낮았으며 연강수량이 가장 많은 지역으로 대부분 화강암으로 구성되어 있으며, 지역 내 토양에 굵은 입자의 지질형태가 많이 존재하여 Zone C와 마찬가지로

Table 1 Soil class by water environment regional

Zone	Regional	Soil class
A	Tancheon (stream)	Sandy soil
B	Anyangcheon (stream)	Snady loam soil
C	Hongjecheon (stream)	Sandy soil
D	Jungnangcheon (stream)	Sandy soil

배수가 양호한 지역이 대부분을 차지한다. 행정구역상 도봉구 강북구, 노원구, 성북구, 종로구, 중구, 동대문구, 중랑구가 해당한다. Table 1은 지역에 따른 지반특성을 정리한 표이다.

2. 권역별 지반함몰 발생건수와 누적 강수량 상관관계 분석

본 절에서는 Fig. 2와 같이 서울시 4개 수계망도를 중심으로 구분한 Zone에서의 지반함몰 발생건수와 누적 강수량과의 상관성을 분석하고자 상관관계 계수를 산정하였다. Table 2는 권역별로 2010년부터 2014년까지의 지반함몰 발생건수를 정리한 것으로 Zone A는 1523건, Zone B는 611건, Zone C는 632건, Zone D는 941건이 발생했다.



Fig. 2 Map of the current state of Seoul's drainage network (Seoul Metropolitan Government, 2011)

Table 2 Number of ground subsidence occurrences by region from 2010 to 2014

Zone	2010	2011	2012	2013	2014	Total
A	267	276	257	370	145	1,315
B	32	38	162	157	222	611
C	54	54	119	143	131	501
D	63	108	118	150	256	695

Table 3은 2010년부터 2015년까지의 존 별 평균 강수량을 정리한 것으로(KMA, 2016) Zone D 지역이 다른 지역에 비해 강수량이 많은 것으로 나타났다. Table 4는 각 지점별로 월별 지반함몰 발생건수와 권역에 따른 월별 강수량의 상관계수가

Table 3 Accumulated precipitation by each zone from 2010 to 2015

Zone	Accumulated precipitation (mm)
A	8487.9
B	7818.3
C	8023.9
D	8620.6

Table 4 Pearson Correlation between Monthly Cumulative Precipitation and Monthly Cumulative Ground Subsidence by Region

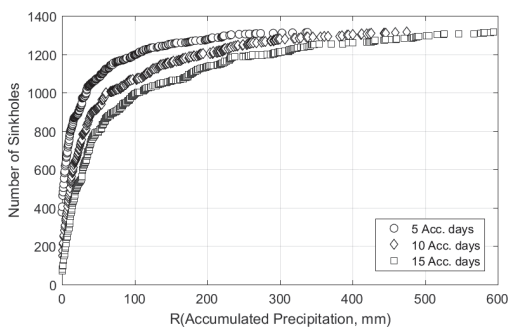
Zone	Person Correlation Coefficient	Strength of Relationship
A	0.426	Moderate
B	0.656	Moderate
C	0.568	Moderate
D	0.598	Moderate

며, 지점 평균 상관계수가 0.4이상으로 누적강수량과 지반함몰이 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

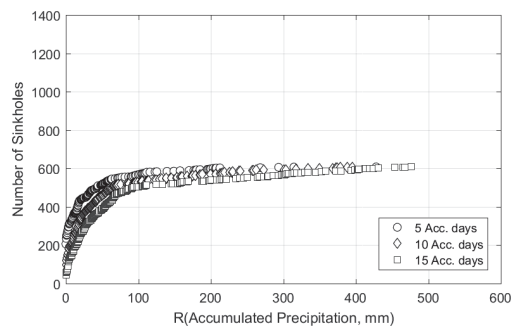
3. 누적강수량을 활용한 지반함몰 발생 예측 모델 개발

본 절에서는 권역별 지반함몰 발생 일을 기점으로 5일, 10일, 15일 간의 누적 강수량을 확인하여, 임계 누적강수량 (threshold precipitation)을 확인하고, 공학적으로 널리 사용되는 curve fitting 방법을 활용한 누적 강수량 별 지반함몰 발생 예측 모델을 개발하고자 한다. 여기서, 임계 강수량은 Hyperbolic curve의 곡률반경이 가장 작은 지점에서의 강수량으로 정의한다.

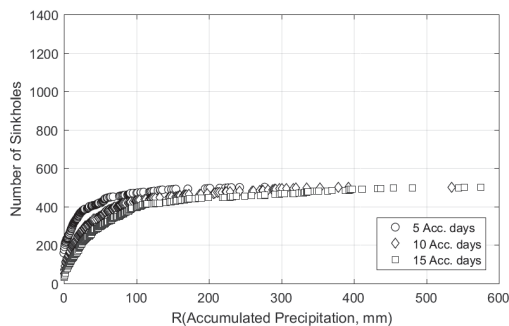
Fig. 3(a)~(d)는 2010년부터 2014년의 기간 동안 권역 A, B, C, D에서 발생한 지반 함몰 사고의 누적 횟수와 누적 강수량의 상관관계를 나타낸 것이다. 여기서, 종축의 지반함몰 발생 횟수는 누적 발생 건이고, 횡축인 R (Accumulated Precipitation)은 Zone의 누적 강수량을 나타낸 것이다. 예를 들어 Zone A의 경우 5일 누적 강수량 100 mm의 경우 약 1200 건 이상의 지반함몰이 발생하였는데, 이는 5일간 누적 강수량 0~100 mm 사이에 발생한 지반함몰 횟수를 나타낸다. 그림과 같이 누적 강수량이 '0'인 경우에도 다수의 지반함몰이 발생



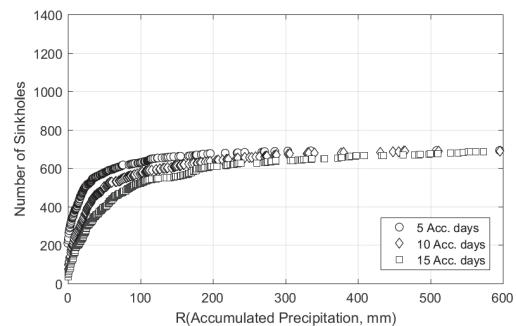
(a) Zone A



(b) Zone B



(c) Zone C



(d) Zone D

Fig. 3 Comparison of number of subsidence and accumulated precipitation for 5, 10, 15 day duration from year 2010 to 2014

함을 알 수 있다.

Fig. 4는 Zone A, B, C, D의 10일간의 누적 강수량에 따른 지반함몰 발생 건수를 도식화하여 보여주고 있는데, 범례의 ‘delay days’는 지반함몰 발생 일자를 기준으로 강수와 발생 기간과의 지연 일수 (days)를 나타낸다. 즉 5 delay days를 예제로 보면, 15일에 지반함몰이 발생하였다고 가정할 경우 1~10일까지의 누적 강수량에 따른 지반함몰 발생 횟수를 나타내게 된다.

Fig. 5에서는 Zone 별 종축의 지반함몰 발생 건수를 총 발생 건수로 도식화하였으며, 지연일수는 0일이며, 강수 누적일 (5일, 10일, 15일)의 결과를 보여준다. 2010~2014년간 Zone A 1315건, Zone B 611건, Zone C 501건, Zone D 695건의 지반함몰이 발생하였으며, 이를 활용하여 정규화하였다. 2010~2014년간의 정규화 된 지반함몰 발생건수와 누적 강수량의 상관관계를 식 (2)의 Hyperbolic curve를 활용하여 curve fitting을 수행 하였다. 여기서 SR은 Subsidence rate, R은 Accumulated precipitation을 뜻한다.

$$SR = \frac{R}{a+bR} + c \quad \text{식 (2)}$$

여기서, a, b, c는 Hyperbolic curve를 결정하는 계수이며, 특히 c의 경우 강수와 관계없이 발생하는 지반함몰 사고의 비율을 나타낸다. a와 b의 물리적/공학적 의미는 향후 연구를 통해 밝혀야할 계수이다. 그림에 나타난 것처럼 Hyperbolic curve를 이용한 curve fitting 기법에 의해 누적강수량과 지반함몰 발생 건수와의 상관성을 표현할 수 있으며, Hyperbolic curve의 계수를 찾아내기 위하여 식 (2)를 식 (3)과 같이 ERROR 함수로 표현한 후 에러를 최소화하는 계수를 분석하였다. 또한, Fig. 5에서 누적 강수량별로 식 (1)을 적용하여 Fitting된 곡선과 관측된 데이터의 상관관계의 정도를 ρ 값으로 제시하였다. 5, 10, 15일간의 누적 강수량 별로 3개 관측값에 대한 Hyperbolic curve의 ρ 값은 각각 0.99 이상으로 매우 높게 나타나 Hyperbolic curve를 활용한 누적 강수량별 지반함몰 발생 위험도 평가가 가능할 것으로 판단된다.

$$f(ERR) = \frac{R}{a+bR} + c - SR(\text{관측값}) \quad \text{식 (3)}$$

Fig. 6은 강수 누적일 10일에 대한 결과를 지연일수 (0일, 20일 40일)에 따라 분석한 내용과 식 (3)을 적용하여 curve fitting한 결과를 보여준다. 그래프의 모양만으로는 자세한 형

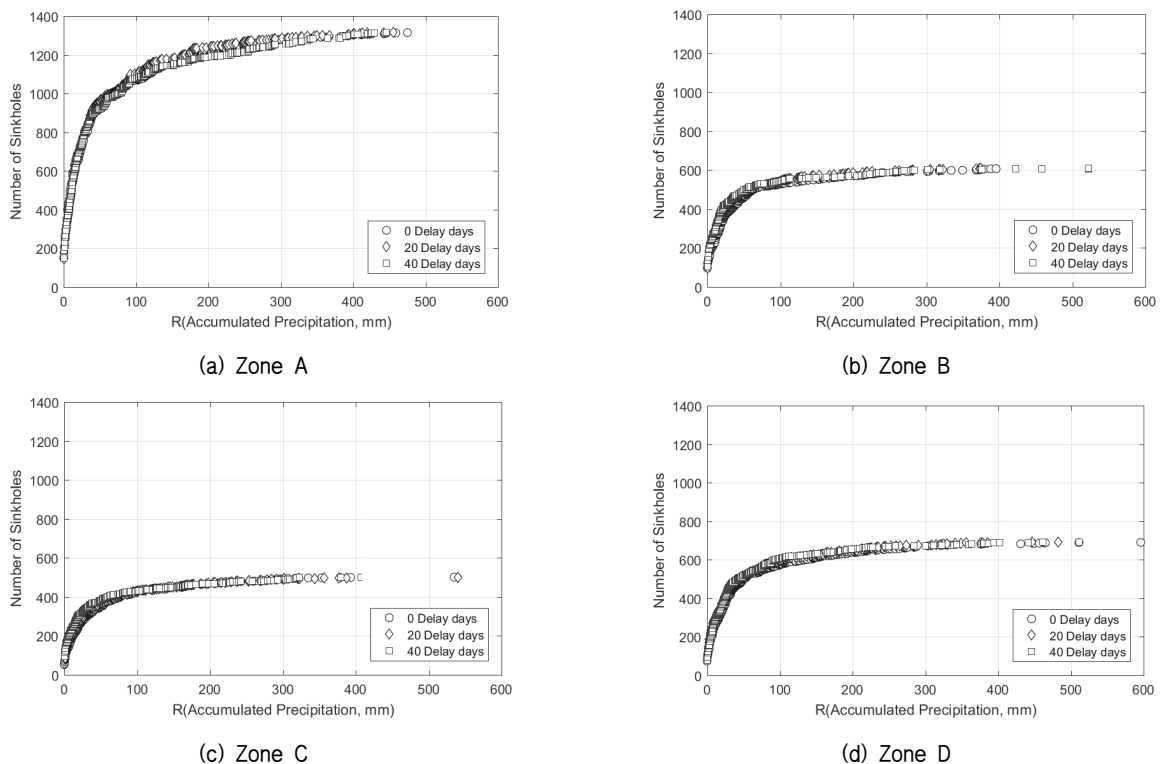


Fig. 4 Comparison of number of subsidence and accumulated precipitation for 10 day duration from year 2010 to 2014

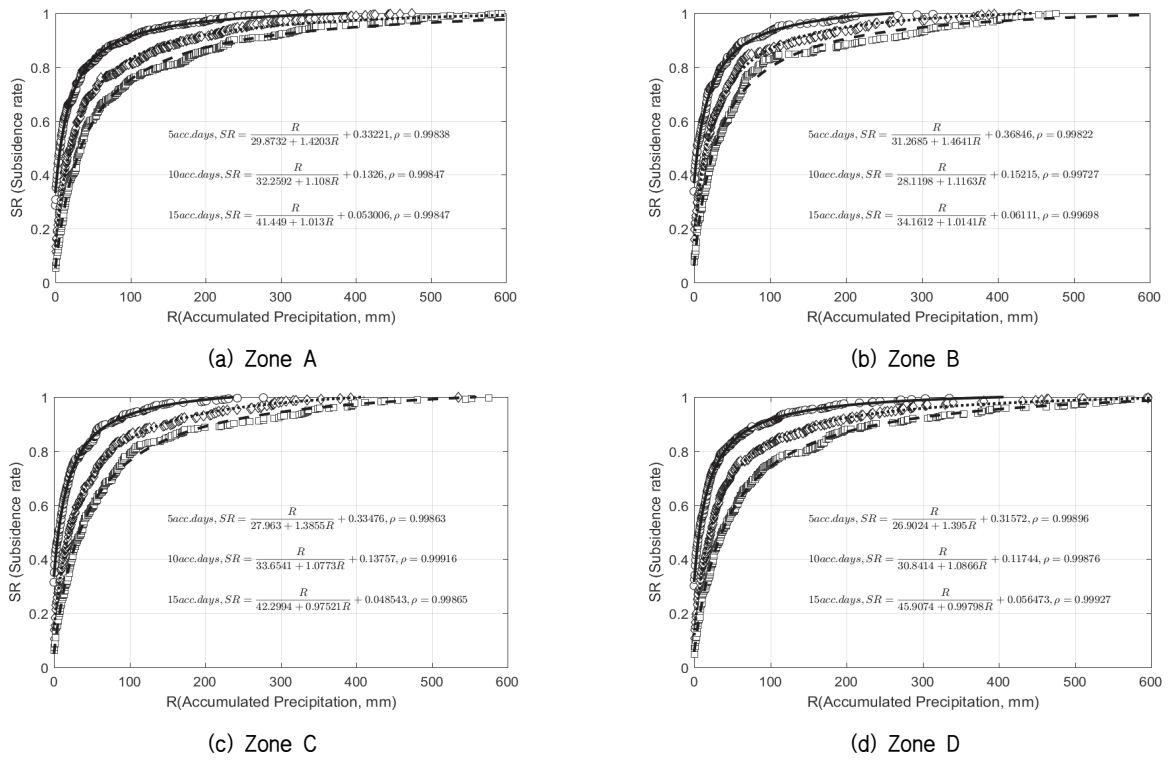


Fig. 5 Comparison of SR and accumulated precipitation for 5, 10, 15 day periods from year 2010 to 2014

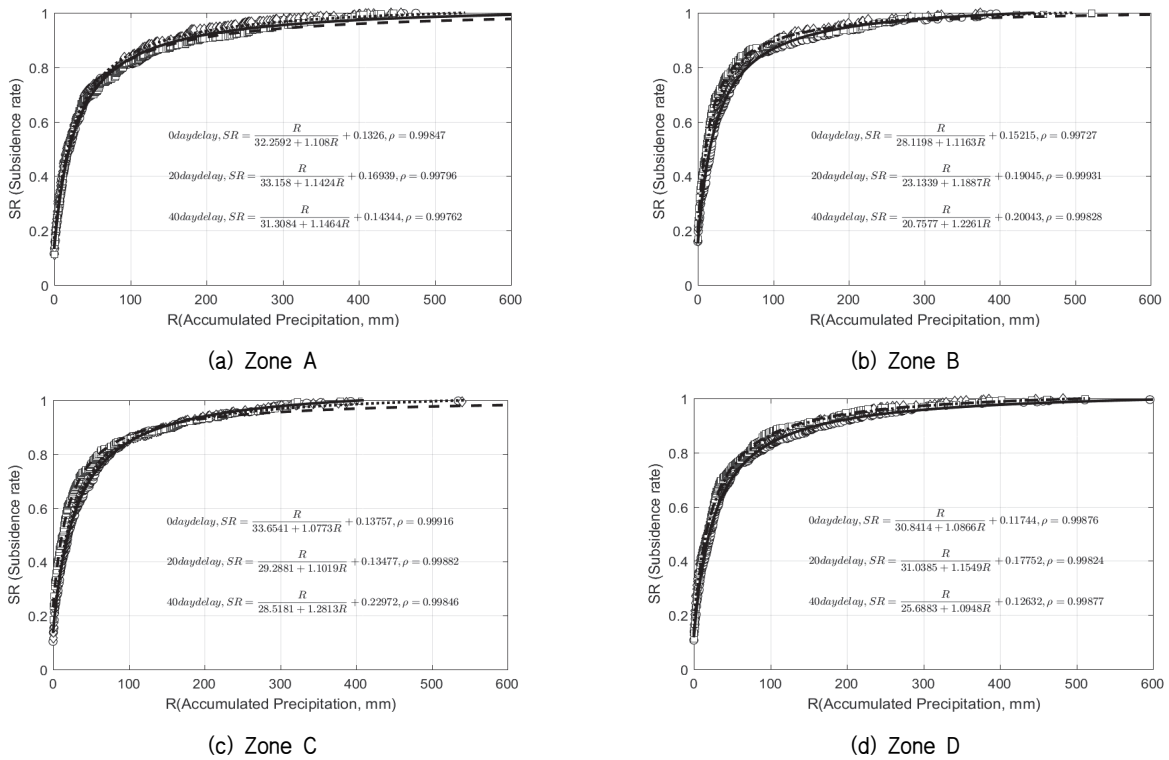


Fig. 6 Comparison of SR and accumulated precipitation for 10 day period with 0, 20, 40 delayed days from year 2010 to 2014

태의 구분이 어렵지만, 수치를 자세히 분석한 결과 지연일수 0일, 20일의 경우 상부 2개 Hyperbolic curve가 유사하게 나타났고, 지연일수 40일의 경우 하부 점선으로 Hyperbolic curve가 제시되었다. 즉, 지연일수가 길어질수록 지반함몰 누적 발생 횟수가 감소되는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 강수 후 지연일수가 '0'인 경우에 대하여 강수 누적 일수에 따른 임계 강수량을 분석한 결과이다. 해석에 적용된 강수 누적일수는 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50일이며, 강수 누적일이 증가할수록 즉, 강우강도가 감소함에 따라 지반함몰 위험도 증가율이 작아지는 임계 강수량이 증가하는 것으로 나타났다.

그림에 나타난 1 day 임계 강수량을 파악한 결과, Zone A~C는 비슷한 수치를 나타냈다. Zone D는 강우가 가장 많이 오는 지역임에도 타 지역에 비해서 수치가 높게 나타나는 경향이 있는데, 이 지역은, 배수특성이 다른 지역에 비해 양호하며, 굽은 입자의 흙으로 이루어진 지질 특성을 가지고 있기 때문이라고 판단된다. 네 지역 모두 지연일수가 많아질수록 임계 강수량이 일정한 방향으로 감소한다는 분석 결과를 공통적으로 관찰할 수 있다.

2010~2014년간 누적 강수별 지반함몰 발생 비율로부터 산정된 임계 강수량을 산정한 결과 모든 경우에 대하여 Pearson 상관 계수 값이 $\rho > 0.99$ 으로 나타났으며, 이로부터

강수량과 지반함몰 발생횟수의 상관관계를 통해 지반함몰 위험도 분석이 타당함을 알 수 있다. 특히, 강수량을 Hyperbolic curve 모델에 적용하기 위해 강수 누적일 수를 모델 정수로 활용하여 지반함몰 위험도를 분석하는 것이 적절한 것으로 분석되었다.

IV. 결론

지반함몰은 상하수도의 손상, 다짐 불량, 지하수위 등의 여러 가지 복합적으로 발생한다. 본 연구에서는 여러 가지 인자 중 하나인 강수량을 대상으로 지반함몰과의 상관관계를 분석하였다. 서울시의 2010~2014년도 지반함몰 현황 및 강수량 데이터를 분석하여 상관관계를 분석하였으며, 분석 결과로부터 권역별로 뚜렷한 차이를 나타내지 않았지만 모든 권역에서 지반 함몰은 누적강수량과 매우 밀접한 연관성이 있음을 도출하였다. 손상 지반함몰과 누적강수량의 상관관계를 모델화하기 위해, 강수 누적일별 지반함몰 발생 위험도를 분석하여 Hyperbolic model의 계수를 분석하였다. 분석을 통해 개발된 Hyperbolic model은 강수량을 실시간으로 취득하여 강우량에 대한 지반함몰 위험도 (SR)를 1차적으로 사전에 예측하는데 활용 할 수 있을 것으로 판단된다. 이처럼 모델 정수 DB

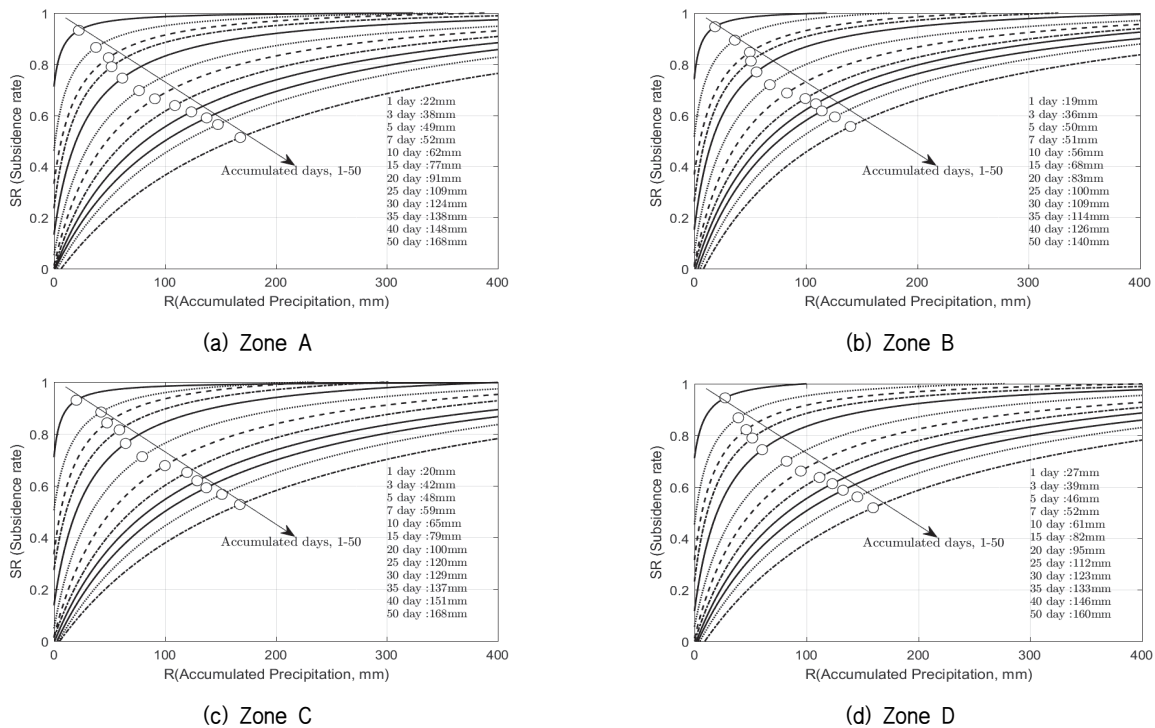


Fig. 7 Threshold precipitation for various precipitation periods with "0" delay day from 2010 to 2014

를 구축하여 향후 각 지자체에 적용한다면 여러 가지 인자 중 하나인 강수량에 의한 지반함몰 발생을 사전에 예측하여 대책 방안 마련에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 추가 연구를 통하여 강우 외에 지반함몰에 영향을 미치는 여러 가지 인자들의 복합 분석이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 (22주요-대1-임무) 지하공간 정보 정확도 개선 및 매설관 안전관리 기술개발 (3/3) 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

1. Bae, Y. S., S. Y. Shin, J. S. Won, and D. H. Lee, 2016. The road subsidence conditions and safety improvement plans in seoul. *Report on Policy Assignment Research*. (in Korean).
2. Jeong, C. G., 2015. *Water Journal*, Ground subsidence-Settlement status and countermeasures against natural disasters. (in Korean).
3. Song, J. J., 2012. SPSS/AMOS Statistical Analysis Method, 21st Century. (in Korean).
4. Kim, J. Y., J. M. Kang, C. H. Choi, and D. H. Park, 2017. Correlation Analysis of Sewer Integrity and Ground Subsidence. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society* 18(6): 31-37. (in Korean).
4. Kim, J. Y., C. H. Choi, J. M. Kang, W. J. Baek, and J. H. Yang, 2016. Comparison analysis with monthly rainfall and ground subsidence. *Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineers Conference*, 2016(2016): 167. (in Korean).
5. KMA, 2016. Korea meteorological administration weather information, available online at: <http://web.kma.go.kr>.
6. Kuwano, R., Y. Kohata, and M. Sato, 2012. Case study of ground cave-in due to subsurface erosion in old land fill. *Proc. 6th International Conference on Scour and Erosion* 56-62, Paris, France.
7. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2014. Study on sinkhole prevention measures and system improvement plan.
8. Sato, M., and R. Kuwano, 2010. Model tests for the evaluation of formation and expansion of a cavity in the ground. *Proc. 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics* 581-586, Zurich, Switzerland.
9. Sato, M., and R. Kuwano, 2013. Effects of buried structures on the formation of underground cavity. *Proceedings on the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 1769-1772.
10. Park, I. J., and S. H. Park, 2014. Cause analysis and counterplan for sinkhole. *Magazine of Korean Society of Hazard Mitigation* 14(5): 12-17.
11. Renuka, S., and R. Kuwano, 2011. Formation and evaluation of loosened ground above a cavity by laboratory model test with uniform sand. *Proc. 13th International Summer Symposium, Uji, Japan*, 211-214.
12. Seoul Metropolitan Government, 2010-2015. Cause and Status Survey of Road Subsidence.
13. Seoul Metropolitan Government, 2011. Report on Soil Conservation Plan.