

지표투과레이더와 공동형상화 장비를 이용한 공동채움량 산정 연구

A Study on the Calculation of Cavity Filling Amount Using Ground Penetrating Radar and Cavity Shaping Equipment

홍기권¹ · 김상목² · 박정준^{3*}Gigwon Hong¹, Sang Mok Kim², Jeong Jun Park^{3*}¹Assistant Professor, Dept. of Civil and Disaster Prevention Engineering, Halla University, Wonju, Republic of Korea²Executive Manager, Geotechnical Group, Geotechnical Korea Engineering Co., Ltd., Anyang, Republic of Korea³Research Professor, Incheon Disaster Prevention Research Center, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea

*Corresponding author: Jeong Jun Park, smearjun@hanmail.net

ABSTRACT

Purpose: In the case of cavity discovered by ground penetrating radar exploration, it is necessary to accurately predict the filling amount in the cavity in advance, fill the cavity sufficiently and exert strength to ensure stability and prevent ground subsidence. **Method:** The cavity waveform analysis method by GPR exploration and the method using the cavity shape imaging equipment were performed to measure the cavity shape with irregular size and shape of the actual cavity, and the amount of cavity filling of the injection material was calculated during rapid restoration. **Results:** The expected filling amount was presented by analyzing the correlation between the cavity size and the filling amount of injection material according to the cavity scale and soil depth through the method by GPR exploration and the cavity scale calculation using the cavity shaping equipment. **Conclusion:** The cavity scale measured by the cavity imaging equipment was found to be in the range of 20% to 40% of the cavity scale by GPR exploration. In addition, the filling amount of injection material compared to the cavity scale predicted by GPR exploration was in the range of about 60% to 140%, and the filling amount of the injection material compared to the cavity size by the cavity shaping equipment was confirmed to be about 260% to 320%.

Keywords: Ground Penetration Radar Exploration, Cavity Shape Imaging Equipment, Cavity Scale, Filling Amount, Volume Change, Soil Depth

요약

연구목적: 지표투과레이더 탐사에 의해 발견된 공동의 경우, 정확히 예측된 공동의 체적에 상응하도록 주입재를 충분히 채우고 강도를 발휘하게 함으로써 안정성을 확보하여 지반함몰을 예방하여야 한다. **연구방법:** 지표투과레이더 탐사에 의한 공동파형 분석 방법과 공동형상 촬영장비를 이용한 방법을 바탕으로, 공동의 규모와 형상이 불규칙한 실제 공동을 실측하여 긴급복구시 주입재의 공동채움량을 산정하였다. **연구결과:** 지표투과레이더 탐사에 의한 방법과 공동형상화 장비를 활용한 공동 규모 산정을 통하여 공동규모 및 토피에 따른 주입재 채움량과의 상관관계를 분석하여 예상 채움량을 제시하였다. **결론:** 공동형상화 장비에 의해 실측된 공동체적은 지표투과레이더 탐사에 의한 공동 체적의 20% ~ 40% 범위로 나타났다. 또한, GPR탐사에 의해 예측된 공동규모 대비 주입재 채움량은 약 60% ~ 140% 범위였으며, 공동 형상화 장비에 의한 공동규모 대비 주입재 채움량은 약 260% ~ 320%로 확인되었다.

핵심용어: 지표투과레이더 탐사, 공동 형상화 장비, 공동규모, 공동채움량, 토피

Received | 14 February, 2022

Revised | 2 March, 2022

Accepted | 4 March, 2022

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.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

서론

최근 국내에서는 도로하부에 매설된 상하수관, 통신관, 가스관 등 지하매설물의 부적절한 시공 및 노후화로 인하여 공동 발생에 따른 도로함몰 사고가 지속적으로 발생하고 있다. 이는 인명피해 및 교통장애 등 사회 전반적인 안전에 위협이 되므로 도로함몰이 발생되기 전 단계에서 지표투과레이더에 의한 공동탐사를 통하여 사전에 피해를 예방하는 노력이 필요하다(Park et al., 2020; Kim et al., 2020; Chae, 2017).

도로하부에 존재하는 공동은 궁극적으로 도로함몰로 발전할 가능성이 높기 때문에, 도로함몰 예방을 위해서는 공동탐사에서 발견된 공동에 대하여 등급에 관계없이 복구를 실시하여야 한다. 공동의 복구는 천공지점에서 1.0m 이내에 하수관로나 맨홀이 없는 공동에 대하여 실시하며, 그 방법은 핸드형 지표투과레이더탐사에서 산정된 주입재 채움량을 고려하여 복구한다. 이때, 주입재가 공동에 채워지는 상황을 지속적으로 관찰하면서 주입재가 차오르는 경우 복구가 완료된 것으로 보고 있다(Han et al., 2017). 이와 같이, 공동 내의 채움량을 사전에 정확히 예측하여 공동복구에 의한 지반안정성을 확보하여 함몰을 유발하는 지반침하를 예방해야 한다(Park et al., 2020; Kim et al., 2017).

공동복구를 위한 주입재의 채움량은 핸드형 지표투과레이더(Ground Penetrating Radar, 이하 GPR) 탐사를 통해 확인된 종단길이, 횡단길이, 그리고 내시경촬영으로 확인된 공동의 두께를 바탕으로 직육면체 체적의 공동규모를 예측함으로써 추정량을 산정한다. 그러나 주입재를 채우는 경우, 공동의 형상이 불규칙하여 추정량 이상을 주입해도 주입재가 차오르지 않는 경우가 대부분이다. 이는 발생된 공동의 주변지반에 이완영역이 형성되어 있으며, 공동 발생 메커니즘이 복잡하고 다양하여 GPR 탐사에 의한 공동파형 분석 방법으로 불규칙한 공동형상의 체적을 정확하게 산정하기가 매우 어렵기 때문이다(Endres et al., 2000; Hagrey et al., 2000; Pyke et al., 2008; Kim et al., 2013).

따라서 공동형상 촬영장비를 공동내부에 직접 삽입 후, 카메라의 레이저 센서를 이용하여 불규칙한 실제 공동의 형상을 실측하여 공동복구 채움량을 산정하는 방법의 적용성을 검토할 필요가 있다(Lee et al., 2016; Park et al., 2019). 이러한 불규칙한 공동의 체적과 주입재의 채움량을 보다 정확히 산정하게 되면, 공동규모에 따른 주입재 채움량의 예측결과에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 이에 본 연구에서는 GPR 탐사에 의한 방법과 공동형상화 장비를 활용한 공동규모 산정을 통하여, 공동 복구 시에 공동규모 및 토피에 따른 주입재 채움량과의 상관관계를 분석하여 예상 채움량을 제시하였다.

공동 규모 산정 방법

지표투과레이더 탐사에 의한 공동 규모 산정

공동신호를 분석하기 위하여 먼저 평면영상에서 이상신호를 선별하여 급격한 진폭 변화를 보이는 경계부를 따라 일정한 영역을 형성하고 있는 패턴을 공동으로 특정하고 평면, 종단, 횡단영상을 종합하여 공동의 규모 판별한다. 탐사결과 영상의 단면에서 가로방향은 측정거리, 세로방향은 심도를 나타내고 레이더 탐사 결과는 단면도에 나타나는 반사 형태를 분석한다. 종단면 영상에서 공동신호는 포물선 형태로 나타나며 심도는 진폭변화가 시작되는 첨단부와 지표면 사이의 거리로 파악하고 종단의 길이는 포물선 양 끝단의 폭으로 확인한다. 공동파형의 종단 및 횡단의 폭은 양쪽 끝단의 60 ~ 100%의 범위로 산정하며, 필요시 구조보정 처리를 수행한 후에 반사 양상을 분석한다. 그리고 공동 파형의 포물선 형태 및 크기는 공동이 분포하는 지하매질의 유전율 및 분포심도와 깊은 관계가 있기 때문에, 이에 대한 실제 공동 규모와 공동파형의 상관성 연구가 수행된 바 있다(Park et al., 2019).

신속한 공동 복구 시, 주입재 채움량 예측을 위한 GPR 탐사에 의한 공동규모 예상 체적은 Fig. 2(a)와 같이 산정한다. 먼저, 공동파형 전폭에 대한 공동규모 산정기준의 일정비율로 평면상 종단과 횡단(장축과 단축) 폭으로 면적(m^2)을 산정하고, 천공에 의한 공동 중심 두께(m)를 확인하여 평면적(m^2)과 두께(m)의 곱으로 공동체적(m^3)을 산정한다.

공동 형상화 장비에 의한 공동 규모 산정

지하공동형상화 장비를 시추공에 삽입하여 카메라의 레이저 센서를 이용한 공동 형상 실측방법은 공동의 정밀한 수치정보와 영상정보를 얻을 수 있다. Fig. 1은 장비의 측정개념도와 데이터분석 및 공동정보 획득 모식도를 나타낸 것이며, 주요 장비 구성은 지하공동 형상화장비($\Phi 41 \times 449.5mm$), 시추공 카메라, 제어박스, 윈치, 연결 커넥터, 태블릿 PC, 운영 소프트웨어 등으로 구성된다.

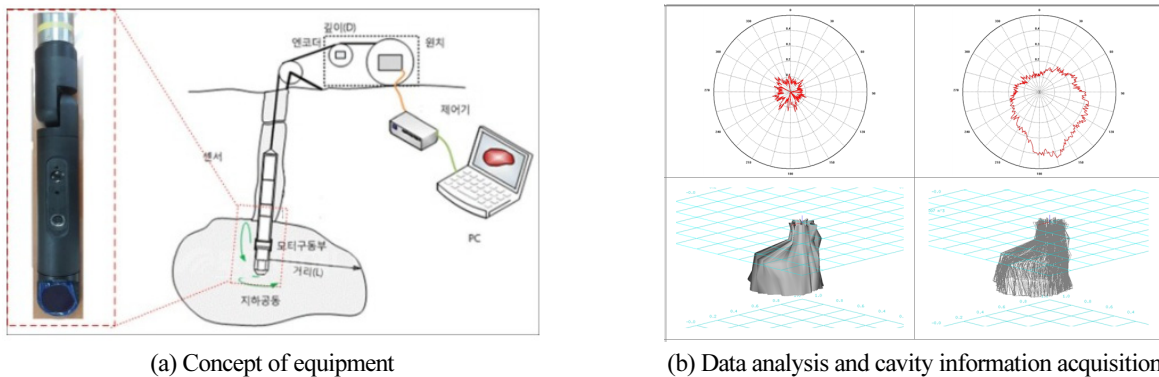


Fig. 1. Conceptual diagram of cavity shaping equipment and cavity information acquisition

공동형상화 장비의 측정 센서는 공동 바닥면에서 0.1m 상부에 위치한 지점(최하면 위치 센서에서 수평으로 고정되어 360° 회전(20초/1회전)하는 레이저 센서로 실측)부터 상부로 이동하면서 상부구간의 공동 형상을 스캔한다.

따라서 공동 바닥면 0.1m 하부 구간에 대한 공동형상은 형상화 장비에 의하여 측정이 어려워 GPR 탐사에 의한 계산값을 반영한다. 그러므로 공동 전체의 체적(V)은 장비의 상부 실측체적(V_1)과 GPR 탐사에 의한 하부체적(V_2)값의 합으로 구한다.

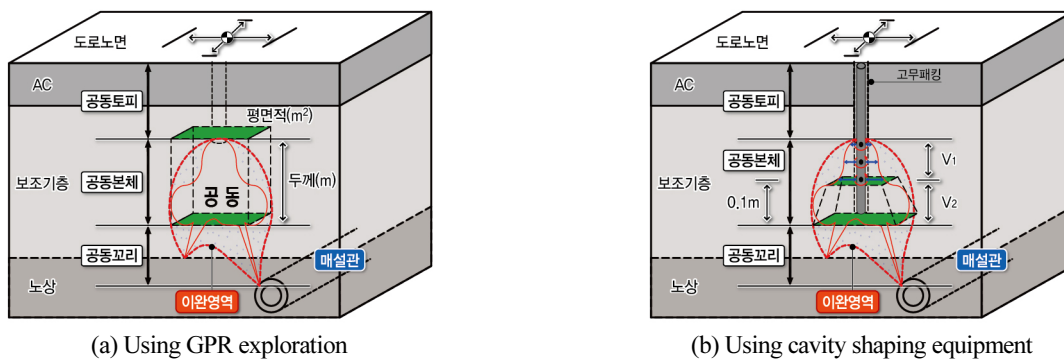


Fig. 2. Cavity scale calculation method

공동 규모 체적 산정은 Fig. 2(b)와 같으며, 상부체적(V_1)은 상부구간 형상화장비의 실측량(m^3), 하부체적(V_2)는 $\frac{h}{3}(A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \times A_2})$ 이다. 여기서, A_1 은 형상화장비 0.1m 지점 실측평면적(m^2)이고, A_2 는 GPR 탐사의 계산값 평면적(m^2)이다.

공동별 공동 규모와 공동 채움량 확인 결과

본 연구를 위하여 서울지역의 GPR 탐사를 통해 발견된 공동 30개소에 대하여 공동체적별로 GPR 탐사방법과 공동 형상화 장비에 의한 방법을 이용하여 공동규모와 공동 내 주입재 채움량의 상관관계를 분석하였다. 공동규모에 따라 공동규모 산정방식에 의한 공동체적과 주입재 채움량은 Table 1과 같다.

Table 1. Comparison of cavity volume and cavity filling amount according to cavity scale

Item	Cavity volume(m^3)		Filling amount (m^3)	Item	Cavity volume(m^3)		Filling amount (m^3)		
	GPR exploration	Shaping image equipment			GPR exploration	Shaping image equipment			
1	0.129	0.03098	0.096	14	0.288	0.07635	0.320		
2	0.146	0.04699	0.096	15	0.288	0.06983	0.096		
3	0.15m ³ below	0.140	0.04581	0.112	16	0.21 ~ 0.30m ³	0.230	0.07784	0.336
4		0.129	0.03388	0.264	17		0.306	0.06451	0.480
5	0.146	0.02968	0.096	18	0.292		0.08028	0.128	
6	0.139	0.03285	0.112	19	0.224		0.04465	0.192	
7	0.174	0.06540	0.144	20	0.235	0.10255	0.144		
8	0.173	0.06984	0.288	21	0.31 ~ 0.40m ³	0.384	0.27995	0.480	
9	0.16 ~ 0.20m ³	0.173	0.06273	0.112		22	0.384	0.10070	0.224
10		0.157	0.04634	0.192		23	0.354	0.09415	0.288
11	0.180	0.05029	0.336	24		0.326	0.14634	0.384	
12	0.184	0.04391	0.240	25		0.330	0.08760	0.160	
13	0.179	0.04897	0.192	26		0.390	0.07101	0.096	
				27		0.392	0.06695	0.096	
				28	0.41m ³ more than	0.560	0.57027	0.832	
				29		0.432	0.08787	0.672	
				30		0.441	0.12022	0.432	

공동 토피와 공동 규모의 상관관계

GPR 탐사에 의해 예상되는 공동 위치 심도인 공동의 토피와 공동의 규모 파악은 공동 관리를 위한 위험등급 등을 산정하는 매우 중요한 과정이다. 따라서 발견된 공동 30개소에 대한 공동토피와 규모와의 상관성 분석은 공동토피와 GPR 탐사에 의한 공동규모의 관계, 공동형상화 장비에 의한 공동 형상 및 규모와 토피의 관계, 그리고 복구 시, 공동의 토피와 주입재 채움량의 관계로 수행되었다.

Fig. 3은 GPR 탐사에 의한 공동의 장축 폭과 단축 폭에 대한 예상 면적과 천공에 의한 공동 두께와 공동 토피와의 상관성을 분석한 것이다. 발견된 30개소 공동의 위치 심도인 토피는 최소 및 최대가 각각 0.14m와 0.49m로 분포하였으며, 최소 토피 공동은 두께 0.23m, 단면적 0.56m²로 확인되었고, 최대 토피 공동은 두께 0.34m, 단면적 1.04m²로 나타났다. 또한 일반적으로 토피가 증가할수록 공동 두께와 단면적이 약간 증가하는 경향을 보였으며, 일부 공동 4개소(약 13%)는 토피와 무관하게 공동 두께와 단면적이 증가하는 것으로 분석되었다. 그리고 전체 공동 중 14개소(47%)에 해당하는 토피가 얇은 경우는 상부 아스콘 포장층(0.14m ~ 0.33m)에 직접 위치한 반면에, 공동 두께 및 단면적이 큰 경우에는 아스콘 포장층 경계부 하부 0.07m ~ 0.34m의 모래 및 자갈층인 보조기층 내에 위치하는 것으로 분석되었다.

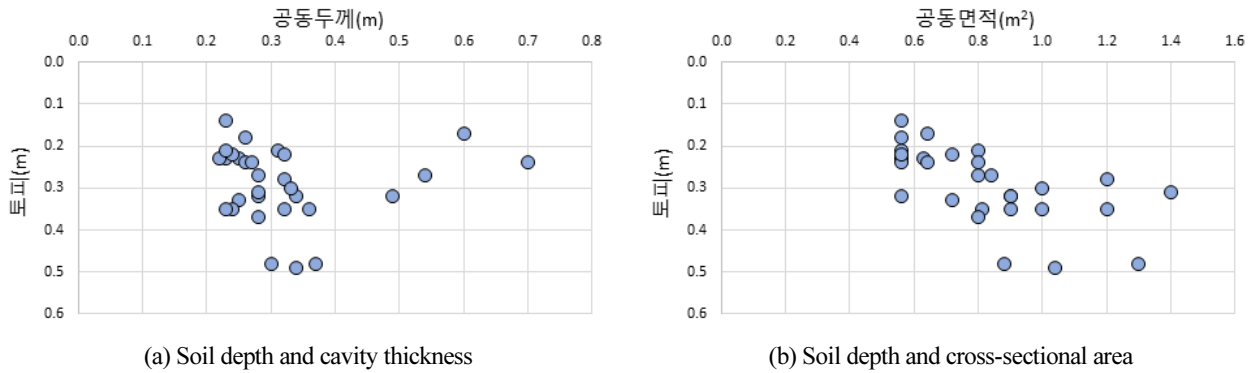


Fig. 3. Correlation between soil depth and cavity thickness and cavity cross-sectional area

전술한 바와 같이, GPR 탐사에 의한 공동규모 산정은 공동파형 분석이론에 의한 간접적인 분석으로 불규칙한 공동형상을 정확히 예측하기가 어렵다. 이를 해결하기 위하여 공동형상을 직접적으로 실측하여 규모를 산정하는 공동형상화 장비에 의한 방법을 통해 공동 형상 및 규모와 토피의 상관성을 분석하였으며, 그 결과를 Fig. 4와 같이 나타내었다.

공동 형상화 장비를 이용하여 실측한 공동의 형상은 대부분 불규칙하게 나타났지만, 공동상부와 하부의 단면 형상이 유사한 원통형, 공동상부의 단면적은 적으나 하부로 갈수록 단면적이 커지는 원뿔형, 그리고 형상을 가늠할 수 없는 매우 불규칙한 형상(불규칙형)으로 구분되었다. 특히, 30개소 중 불규칙형이 47%로 절반을 차지하였으며, 원통형과 원뿔형이 각각 40%

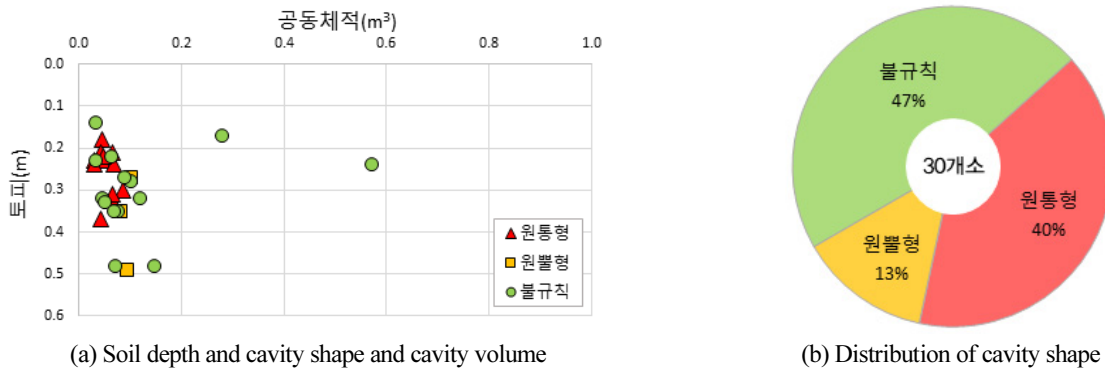


Fig. 4. Cavity shape, volume and soil depth relationship using shaping image equipment

와 13%인 것으로 분석되었고, 이를 통해 분석대상 공동 중에서 대부분은 불규칙형 또는 원통형임을 알 수 있었다.

공동 형상 및 규모와 토피의 상관성을 분석한 결과, 원통형 공동은 체적이 0.02m³ ~ 0.10m³, 토피가 0.15m ~ 0.40m의 범위를 보였으며, 원뿔형 공동의 체적과 토피 범위는 각각 0.10m³ 내외 및 0.25m ~ 0.50m인 것으로 분석되었다. 그리고 불규칙형 공동은 다양한 범위의 체적과 토피의 분포를 나타내었다.

공동 규모와 주입재 채움량과의 상관관계

공동복구시, 예측된 공동의 체적량보다 과도한 주입재 채움량에 기인해 공동 인근에 위치한 매설관 등으로 주입재가 유입되는 것을 방지하기 위하여, 정확한 공동체적의 산정을 통한 주입재 채움량을 적용하는 것이 매우 중요하다. 따라서, 공동형상화 장비에 의한 공동의 형상 및 규모를 산정하여 GPR탐사에 의한 공동체적을 비교하고, 공동복구 주입재 채움량과의 상관성을 분석하였다.

GPR 탐사에 의해 예측된 공동규모와 공동형상화 장비에 의해 실측된 공동규모의 상관성 분석 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 대부분의 공동은 공동형상화 장비에 의해 실측된 규모가 GPR 탐사에 의해 예측된 규모의 약 20% ~ 40% 범위에 분포하는 것으로 분석되었으며, GPR 탐사에 의해 예측된 공동규모가 0.31m³ 이상인 경우에는 상관관계가 불규칙한 것으로 확인되었다.

GPR 탐사에 의한 공동규모 산정은 공동파형에 의한 최대 공동단면적을 기준으로 한 직육면체로 산정하여 공동 주변 이완 지역까지 포함한 결과이기 때문에, 공동형상화 장비에 의해 실측된 공동규모는 GPR 탐사에 의한 공동규모에 비하여 작은 것을 알 수 있었다.

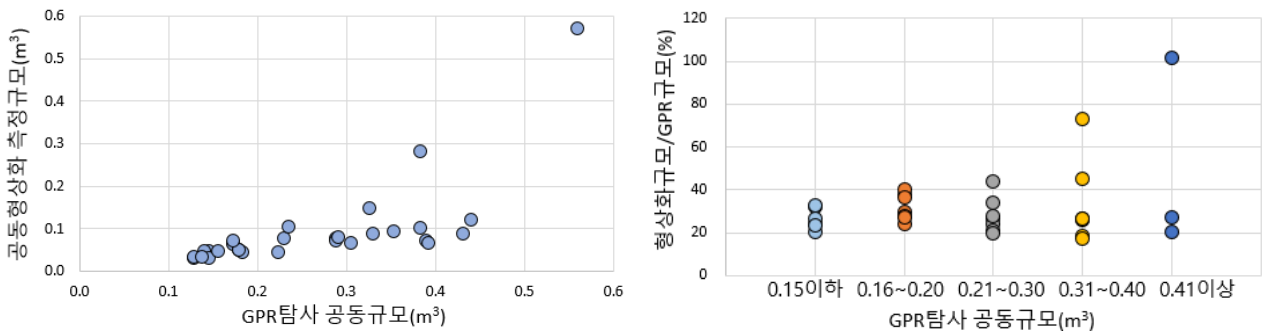


Fig. 5. Correlation between GPR exploration and cavity scale by shaping image equipment

GPR 탐사 및 공동형상화 장비에 의해 예측 및 실측된 공동규모에 따른 주입재 채움량과의 상관관계 분석결과를 Fig. 6에 나타내었다. 먼저, GPR 탐사에 의해 예측된 공동규모와 주입재 채움량의 관계를 분석한 결과, 미복구 공동을 제외하면 주입재 채움량은 공동규모 대비 약 60% ~ 140% 범위인 것으로 분석되었다. 주입재 채움량이 에서 공동규모의 크기 증가에 대한 유동성 채움재의 주입량은 거의 동등한 상관성을 보여주는 것으로 분석되었다. 그리고 공동형상화 장비에 의해 실측된 공동 규모 대비 주입재 채움량은 약 260% ~ 320% 수준인 것을 알 수 있었다.

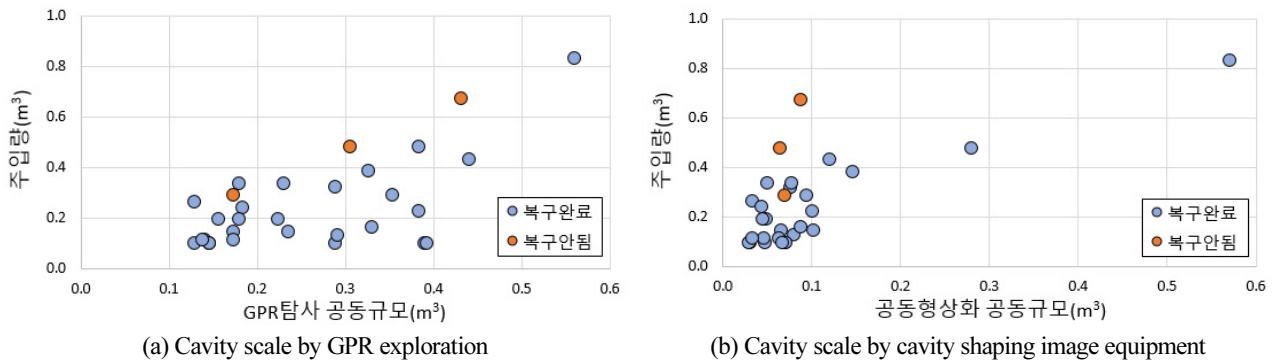


Fig. 6. Correlation between cavity scale and injection volume

결론

본 연구는 GPR탐사 및 공동형상화 장비에 의해 예측 및 실측된 공동규모 산정결과를 바탕으로 공동규모 및 토피에 따른 공동복구용 주입재 채움량과의 상관관계를 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

먼저, GPR 탐사에 의한 공동 토피와 규모의 상관관계를 분석한 결과, 토피가 증가할수록 공동 두께와 단면적이 다소 증가하는 경향을 확인하였다. 그리고 공동형상화 장비에 의해 실측된 공동의 형상에 따른 규모와 토피의 상관관계를 분석한 결과, 원통형 공동은 체적이 $0.02\text{m}^3 \sim 0.10\text{m}^3$, 토피가 $0.15\text{m} \sim 0.40\text{m}$ 의 범위였으며, 원뿔형 공동의 체적과 토피 범위는 각각 0.10m^3 내외 및 $0.25\text{m} \sim 0.50\text{m}$ 인 것으로 분석되었다.

GPR탐사에 의해 예측된 공동규모와 공동형상화 장비에 의해 실측된 공동규모를 비교한 결과, 공동형상화에 의해 실측된 공동규모가 GPR탐사에 의해 예측된 공동규모의 20% ~ 40% 범위인 것을 알 수 있었고, GPR탐사에 의해 예측된 공동규모가 0.31m^3 이상인 경우에는 상관성이 없는 것으로 분석되었다.

마지막으로, GPR 탐사와 공동형상화 장비에 의해 예측 및 실측된 공동규모에 상응하는 주입재 채움량은 각각 60% ~ 140%와 약 260% ~ 320%이 요구되는 것을 알 수 있었다.

공동형상화 장비의 효과적인 활용 방안으로 현재 바닥부 일정구간을 실측하지 못하는 단점을 개선하여 공동 전구간을 공동형상화 장비로 실측하여 활용하면 보다 효과적인 채움량 추정과 공동발생 원인을 파악 할 수 있으므로 이에 대한 개선 방안과 연구가 필요하다.

References

- [1] Chae, H.Y. (2017). "Study on subsurface collapse of road surface and cavity search in urban area." Tunnel & Underground Space, Vol. 27, No. 6, pp. 387-392.
- [2] Endres, A.L., Clement, W.P., Rudolph, D.L. (2000). "Ground penetrating radar imaging of an aquifer during a pumping test." Ground Water, Vol. 38, pp. 566-576.
- [3] Hagrey, S.A., Müller, C. (2000). "GPR study of pore water content and salinity in sand." Geophysical Prospecting, Vol. 48, pp. 63-85.
- [4] Han, J.G., Ryu, Y.S., Kim, D., Park, J.J., Hong, G. (2017). "A study on expansion and strength characteristics of

material for emergency restoration in ground cavity.” Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol. 16, No. 2, pp. 131-138.

- [5] Kim, B.W., Kim, H.S. (2013). “Estimation of Ground water Table using Ground Penetration Radar (GPR) in a sand tank model and at an alluvial field site.” The Journal of Engineering Geology, Vol. 23, pp. 201-216.
- [6] Kim, S.M., Choi, H., Yoon, J.S., Park, J.J. (2020). “A study on the change of cavity area through groundwater injection test under pavement cavity.” Journal of the Society of Disaster Information, Vol. 16, No. 2, pp. 267-275.
- [7] Kim, Y., Kim, H., Kim, Y., You, S.K., Han, J.G. (2017). “Experimental Study for confirmation of relaxation zone in the underground cavity expansion.” Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol. 16, No. 4, pp. 231-240.
- [8] Lee, D.Y, Cho, N.G. (2016). “Understanding of subsurface cavity mechanism due to the deterioration of buried pipe.” Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 32, No.12, pp. 33-43.
- [9] Park, J.J., Chung, Y., Hong, G. (2019). “A method for cavity scale estimation based on ground-penetration radar(GPR) explorations: An experimental study.” Advances in Civil Engineering, Vol. 2019, 1365759.
- [10] Park, J.J., Kim, I.D. (2020). “Analysis of the under pavement cavity growth rate using multi-channel GPR equipment.” Journal of the Society of Disaster Information, Vol. 16, No. 1, pp. 60-69.
- [11] Pyke, K., Eyuboglu, S., Daniels, J.J., Vendl, M. (2008). “A controlled experiment to determine the water table response using ground penetration radar.” Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Vol. 13, pp. 335-342.