

## 포장 균열 깊이가 공동 관리 등급에 미치는 영향 분석

## Analysis of the Effect of Pavement Crack Depth of the Cavity Management Grade

박정준\*

Jeong Jun Park\*

Research Professor, Incheon Disaster Prevention Research Center, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea

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

## ABSTRACT

**Purpose:** The Seoul Metropolitan Government classifies the cavity risks into emergency, priority, general, and observation grades in consideration of the cavity size, asphalt pavement thickness, and pavement depth based on the cavity management grade criteria of Seoul. In this study, the depth of cracking was measured at 17 cracks identified by checking the pavement condition of the cavity at 265 cavities found in the 2019 cavity investigation service. **Method:** In the first phase, crack width and depth were measured using a vernier caliper, taper gauge, and depth gauge to check the cracks of the identified cavities. In the second phase, the location of the largest crack in the upper road surface was confirmed, and A.C. was drilled to further measure the crack depth. **Results:** As a result, the cavity management level was raised in nine of the 17 test cavity identified. Therefore, in case of emergency and priority recovery, the grade should be adjusted according to the depth of pavement crack and the thickness of residual A.C. pavement. **Conclusion:** In the case of cracks in the upper part of the cavity, the crack progression must be determined through the perforation and the remaining asphalt concrete thickness must be determined to determine the cavity grade.

**Keywords:** Ground Subsidence, Underground Cavity Scale, Pavement Crack Depth, Cavity Management System

## 요약

**연구목적:** 서울시는 공동관리 등급 기준에 따라 공동의 규모, 아스팔트포장 두께, 포장면의 균열깊이를 고려하여 긴급, 우선, 일반, 관찰등급으로 공동의 위험도를 분류하고 있다. 본 연구에서는 2019년 서울시 공동조사용역에서 발견된 265개소의 공동의 상부 포장상태를 확인하여 포장균열이 확인된 17개소에 대하여 균열깊이를 측정하였다. **연구방법:** 1차에서는 확인된 공동의 균열 확인을 위하여 버니어 캘리퍼스, 테이퍼 게이지, 깊이 게이지를 활용하여 균열 폭 및 깊이를 측정하였다. 2차에서는 상부 노면에서 가장 크게 균열이 발생한 위치를 확인하여 아스콘을 천공 후 균열 깊이를 추가로 측정하였다. **연구결과:** 확인된 시험공동 17개소 중 9개소에서 공동 관리 등급이 상향 조정되었다. 따라서, 긴급복구와 우선 복구의 경우에는 포장 균열 깊이와 잔여 아스팔트 콘크리트 포장 두께에 따라 등급 조정이 필요하다. **결론:** 공동 상부에 균열이 발생한 경우는 천공을 통하여 균열 진행 상태를 파악하고 잔여 아스팔트 콘크리트 두께를 확인하여 공동등급을 결정해야한다.

**핵심용어:** 지반침하, 지하공동 크기, 포장 균열 깊이, 공동 관리 시스템

Received | 13 May, 2020

Revised | 3 July, 2020

Accepted | 3 July, 2020

 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 any medium, provided the original work is properly cited.

## 서론

국내에서는 크고 작은 지반함몰이 지속적으로 발생되면서 사회적 이슈가 되고 있다. 특히, 도심지 도로에서 함몰 사고는 도로하부 매설된 상하수관, 통신구, 가스관, 지하철 등과 같은 지중관로의 부적절한 시공과 노후로 인한 손상, 유지관리 소홀에 의해 발생한 공동이 주요원인이다. 5년 동안 서울시에서 발생한 도로하부의 공동을 분석한 결과, 아스팔트 표층에서부터 깊이 0.8m 미만의 포장층에서 81%의 공동이 발생하였다. 또한 0.8~1.5m의 매설물층과 1.5m 이상의 깊은 층에서 각각 17%와 2%의 공동이 발생하였다. 즉, 지하매설물이 지하 1.5m 이내에 분포하는 공동이 전체의 98%였고, 공동규모는 소형이면서 얇은층에서 주로 발생하였다. 이와 같은 공동은 시간경과에 따라 공동의 확대로 인하여 지반함몰 발생 가능성이 높다(Shin et al., 2019). 도로에서 공동에 의해 지반함몰이 발생하는 경우에는 인명피해, 구조물 안정성 감소 및 사회적 간접비용 증가와 같은 다양한 문제가 나타나게 된다. 따라서, 도로가 함몰되기 전에, 도로하부의 공동 탐사 및 복구를 통한 지반함몰 방지가 필요하다(Park et al., 2019a; Park et al., 2019b; Chae, 2017).

지표투과레이더(Ground Penetrating Radar, GPR) 탐사는 주로 광산의 자원 매장량 탐지, 지중구조물 조사 및 지구물리학적 지층 정보를 제공하는 용도로 광범위하게 사용되고 있다(David, 2005; Cassidy et al., 2011; Kang et al., 2013). GPR 탐사는 수십 MHz 이상의 높은 주파수를 가지는 전자기파를 통하여 얇은 깊이의 대상물을 높은 분해능으로 탐사하기 때문에, 도로 하부의 매설관로 및 공동 등에 비파괴 검사방법으로 주로 사용된다(Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, 2011; Han, 2018). 도로하부 공동의 GPR 파형 이미지에 대한 종방향과 횡방향 측정을 통한 각 방향의 규모를 추정하여, 공동규모를 산정하나, 실제 공동의 규모는 복구 작업 시 개착을 통해서만 정확한 확인이 가능하다(Park et al., 2019a).

Lee et al.(2017)는 공동의 파괴를 유발하는 영향인자 분석을 위하여 아스팔트 포장층의 두께, 토피고, 공동 폭과 추가로 공동의 높이를 바탕으로 상부에서 작용하는 하중조건에 따른 상관관계를 분석한 바 있다. 또한 GPR 탐사 원리를 바탕으로 지중의 공동 뿐만 아니라 지하수 흐름과 같은 상태 평가가 가능도록 GPR 탐사 기반의 지하수 흐름 등에 관한 연구가 활발하게 수행된 바 있다(Endres et al., 2000; Hagrey et al., 2000; Park et al., 2018; Pyke et al., 2008; Kuroda et al., 2009; Kim et al., 2013).

공동탐사 및 규모산정은 일반적으로 1차 GPR 탐사와 2차 내시경 조사로 구분된다. 즉, 1차 GPR 탐사는 종방향 및 횡방향 평면의 공동 규모를 추정하고, 2차 조사는 내시경 카메라를 이용하여 공동 내부를 촬영하여 공동두께와 깊이를 확인한다. 이와 같은 1차 탐사와 2차 조사 결과를 바탕으로, 서울시는 자체적으로 기준화한 서울시 공동 관리 기준에 의거하여 공동의 규모(높이, 너비)와 함께 아스팔트포장 두께와 포장면의 균열깊이를 고려하여 4개 등급 체계인 긴급, 우선, 일반, 관찰등급으로 공동의 위험도를 분류하고 있다. 따라서 본 연구에서는 포장 균열 깊이를 반영한 등급분류 및 상관도 분석을 통하여 포장 균열이 공동에 미치는 영향을 파악하고 노후된 포장체의 안정성을 확인하였다.

## 공동관리 등급 및 포장 균열 깊이 측정

### 서울시 공동관리 등급

서울시는 도로 함몰에 관하여 2016년까지 국내 기준이 없어 일본 간선도로의 공동관리 등급을 도입해 적용해 왔지만 Fig.

1과 같이 서울 도로 환경에 적합한 4단계 공동관리 등급제를 도입하였다. 일본식 공동관리 등급은 공동의 두께와 폭만을 고려한 반면 서울시 공동관리 등급은 공동의 두께와 폭, 포장상태 등을 종합적으로 고려하였다. 서울시에서 제안한 공동규모는 교통흐름을 방해하지 않는 속도로 차량형 GPR장비로 공동을 탐지하여 평면상 좁은 폭이 0.5m 이상, 최소면적이 0.5m<sup>2</sup>을 기준으로 등급을 제시하고 있다. 공동관리 등급에 따르면 긴급복구 등급은 함몰 가능조건이 충족된 공동을 의미하며, 탐사 도중에 공동이 확인되면 즉시 복구(4시간 이내 복구)가 필요하다. 우선복구 등급의 경우, 돌발강우 등의 함몰 가능조건이 발생 될 때 함몰되는 공동이며, 신속한 조치계획 수립과 복구가 필요하다. 일반복구 등급은 일정기간 공동 추가 확대로 함몰 가능 조건 충족 시 함몰되는 공동이며, 우기철 이전까지 복구가 필요하다. 관찰대상 등급은 공동 상부 지반 두께가 튼튼하여 함몰될 위험이 없는 공동이지만 일정기간 관찰 후 반복탐사 시작년도의 우기 이전까지 복구가 필요한 공동을 의미한다(Lee et al., 2017).

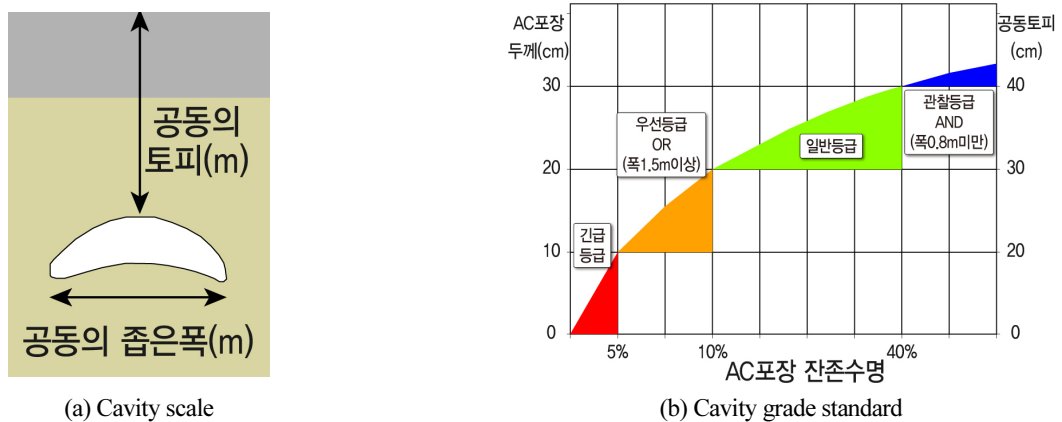


Fig. 1. Cavity management grade of Seoul

### 공동 탐사 및 포장 균열 측정 방법

공동 확인을 위해서 차량형 3D 멀티 GPR 탐사장비를 이용하여 1차 조사를 수행한 후, 천공 및 내시경 촬영에 의한 2차 조사를 통해 공동의 규모를 확인하였다. 차량형 멀티 GPR 탐사장비의 중심 주파수는 400MHz이고, 포장체 도로조건에서의 탐사심도는 2.0m 이내이다. 본 연구에서 사용된 멀티채널 GPR 탐사장비의 경우, 3차원 해석을 수행하기 때문에, 재료의 차이 뿐만 아니라 동일한 재료일지라도 유전율 차이로 인한 이상신호를 감지할 수 있다. GPR 탐사장비는 GPR 안테나, 노면영상 카메라, GPS 측량장비 및 포지셔닝 카메라로 구성되며, 이들은 노면에서 이상신호 위치의 정확히 파악할 수 있다. 또한 멀티채널 GPR 분석프로그램과 포지셔닝 시스템의 통합 프로그램은 탐사결과의 신뢰성을 증가시킨다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 1차 조사에서는 확인된 공동 상부의 포장 균열 확인을 위하여 버니어 캘리퍼스, 테이퍼 게이지, 틸트 게이지, 깊이 게이지를 활용하여 균열 폭 및 깊이를 측정하였다. 2차 조사에서는 공동위치 상부 노면에서 가장 크게 균열이 발생한 위치를 확인하여 아스팔트 콘크리트(A.C.) 천공을 실시한 후 채취된 A.C.을 확인하여 균열 깊이를 추가로 측정하였다.

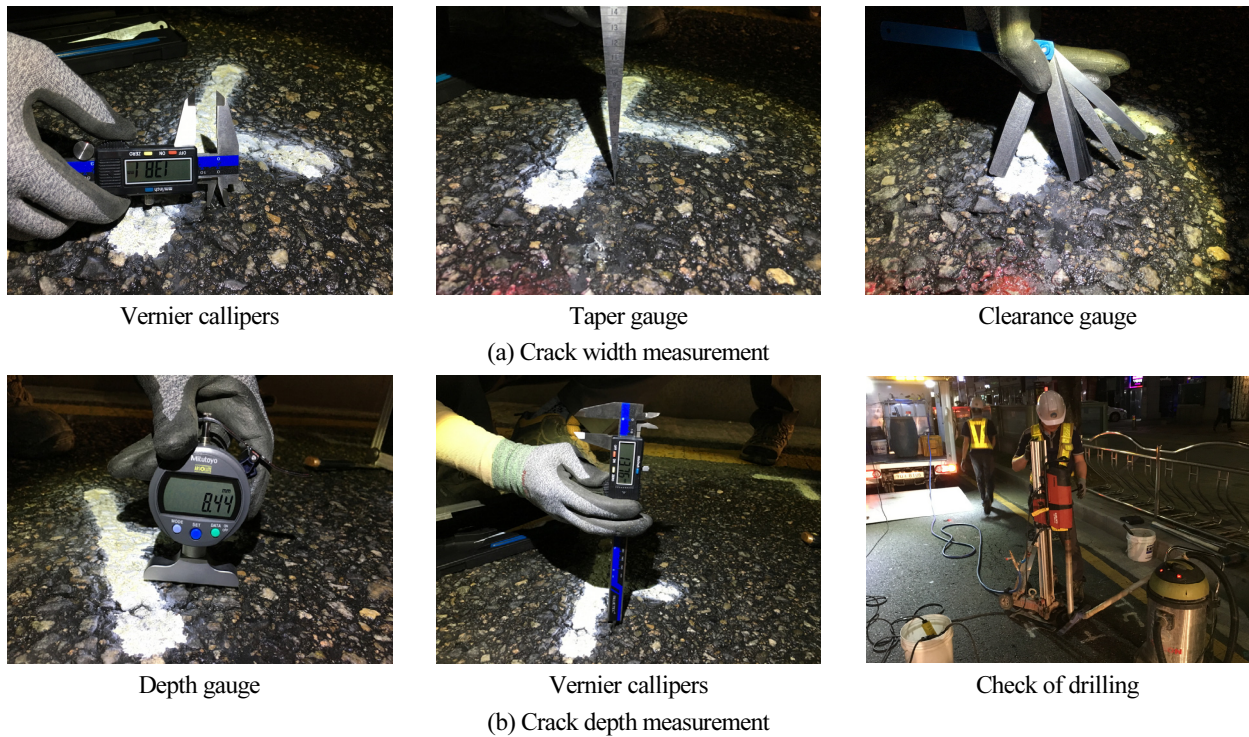


Fig. 2. Crack measurement of A.C. pavement

## 포장 균열 측정에 의한 공동 관리 등급 변화

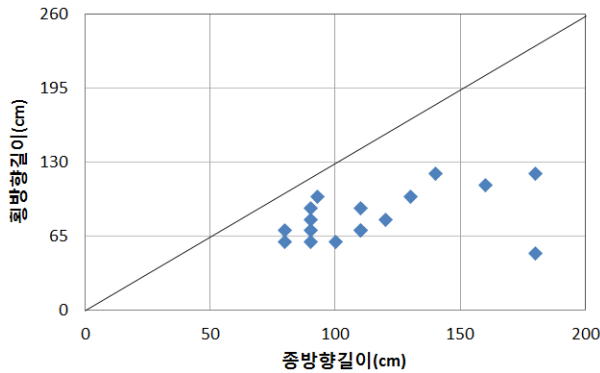
### 포장 균열이 확인된 시험 공동의 관리 등급 산정

공동으로 확인된 265개소 중 포장의 상부 균열 상태를 확인하여 확보된 17개소에 대한 공동관리 등급 현황은 Table 1과 같다. 균열이 확인된 공동(이하, 시험 공동)은 강남구 10개소, 서초구 7개소로 조사 되었다. 균열이 확인된 공동의 관리 등급은 긴급 1개소, 우선 2개소, 일반 13개소, 관찰 1개소로 확인 되었으며, 2차 상세조사를 실시하여 정확한 규모를 확인하였다. Fig. 3은 시험공동의 규모 측정 결과로서 대체로 종방향 길이는 80~180cm (평균 115cm), 횡방향 길이는 50~120cm (평균 82cm)로 나타났으며, 공동토피는 30cm이상 높이의 공동이 82.4%, 30cm 미만의 공동은 17.6%로 확인되었고, 크기 측정 결과 17~57cm (평균 36cm)로 나타났다. 또한, 긴급복구 등급이 5.9%, 우선복구 등급이 11.7%, 일반복구 등급이 76.5%, 관찰 등급이 5.9%로 산정 되었다. 서울형 공동관리 등급에 따라 일반복구 등급이 76.5%로 다른 등급에 비하여 많은 것으로 나타났다.

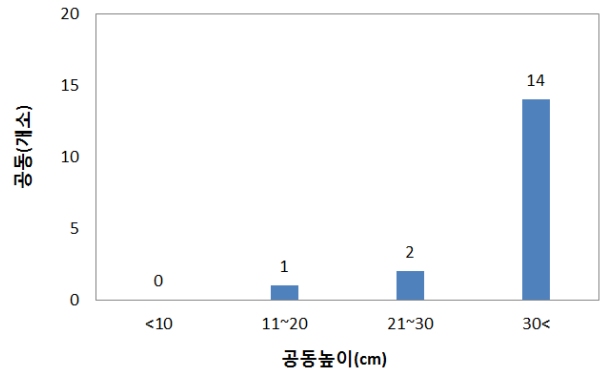


**Table 1.** Status of identified cavity grade through 1st investigation

Item	District	Identified cavity				Item	District	Identified cavity			
		Soil depth (cm)	Longitudinal (cm)	Cross (cm)	Grade			Soil depth (cm)	Longitudinal (cm)	Cross (cm)	Grade
1	Seocho-gu	34	110	70	General	10	Gangnam-gu	25	90	90	Priority
2	Seocho-gu	40	120	80	General	11	Gangnam-gu	36	100	60	General
3	Seocho-gu	40	130	100	General	12	Gangnam-gu	26	90	60	Priority
4	Seocho-gu	31	93	100	General	13	Gangnam-gu	44	160	110	General
5	Gangnam-gu	35	110	90	General	14	Seocho-gu	45	90	80	General
6	Gangnam-gu	17	180	50	Emergency	15	Gangnam-gu	32	180	120	General
7	Gangnam-gu	41	90	70	General	16	Seocho-gu	36	140	120	General
8	Gangnam-gu	45	110	70	General	17	Seocho-gu	32	80	70	General
9	Gangnam-gu	57	80	60	Observation						



(a) Cross length to longitudinal length



(b) Distribution of soil depth

**Fig. 3.** Analysis of identified cavity scale

### 시험 공동의 2차 조사 및 균열 측정 결과

균열이 확인된 17개소의 시험 공동에 대하여 2차 상세조사를 실시한 결과를 Fig. 4와 Fig. 5와 같이 공동 관리 등급을 확인할 수 있었다. 공동 규모를 확인한 결과, 긴급등급은 없었으며, 우선등급 7개소, 일반등급 8개소, 관찰등급 2개소로 확인 되었다.

Fig. 4에서와 같이 2차 상세조사에 의한 공동 확인 결과, 확인된 공동의 토피 평균이 36cm에서 2차 조사 시 28cm로 확인 되었으며 크기가 작아지는 경향을 보였다. 시험공동의 규모를 보면 대체로 종방향 길이는 60~130cm (평균 96cm), 횡방향 길이는 50~100cm (평균 81cm)로 확인되었다. 공동 토피는 30cm미만 높이의 공동이 70.6%로 확인되었다.

Fig. 5는 2차 상세조사를 통해 분석된 공동으로서 우선 등급이 41.2%, 일반 등급이 47.0%, 관찰등급이 11.8%로 확인되었 다. 일반 등급이 76.5%로 다른 등급에 비하여 많은 것으로 확인되었으나 조사결과 일반등급은 47.0%, 우선등급은 41.2%로 확인되었고 관찰등급이 11.8%로 다른 등급에 비해 작은 확인되었다. 즉, 균열이 발생한 부분에 대한 조사를 통하여 균열깊 이를 확인하고 잔여 아스팔트 두께를 파악하여 최종 등급 결정이 필요하다.

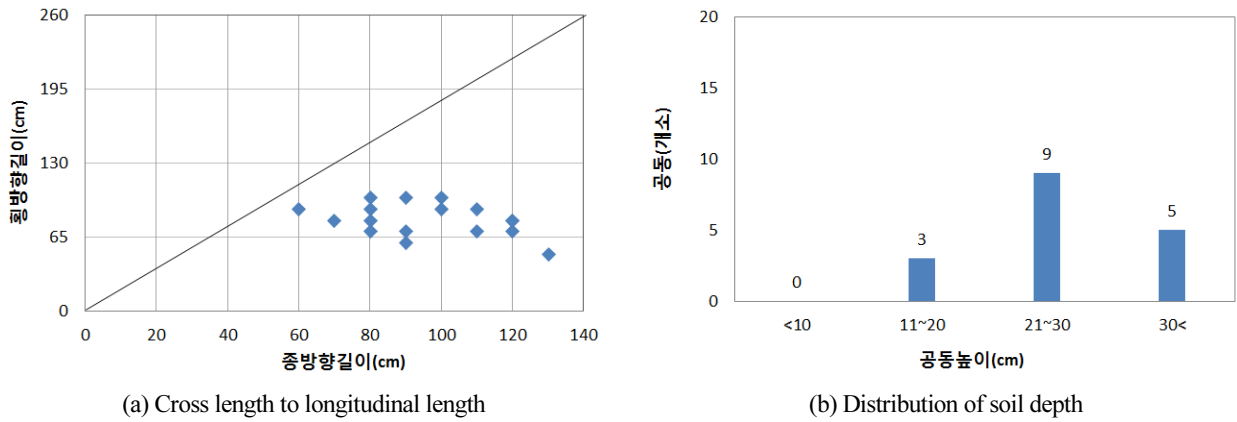


Fig. 4. Cavity scale based on the results of the second survey

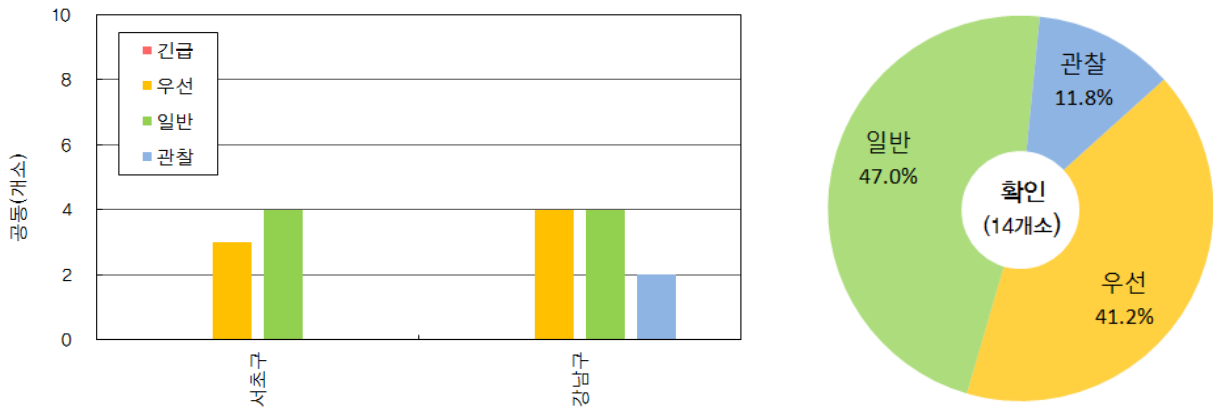


Fig. 5. Cavity management grade of based on the results of the second survey

2차 조사를 통해 확인된 시험공동에 대하여 균열 크기를 확인하였다. 균열 폭은 버니어 캘리퍼스, 테이퍼 게이지, 틈새 게이지를 사용하였으며, 균열 깊이는 깊이 게이지, 버니어 캘리퍼스, 천공 등의 조사 방법을 통하여 현장 확인을 실시하여 Table 2와 같이 최종 공동관리 등급을 결정하였다. 현장 확인 결과 균열 폭은 0.01~2.0cm, 균열 깊이는 0.2~13.0cm로 확인되었고 균열 깊이 진행은 14.3~65.0%, 잔여 AC 두께는 7.0~36.0cm로 확인되었다. 균열 폭 최대는 2.0cm, 균열 깊이 최대는 13.0cm로 확인되었고 균열깊이 진행은 최대 30.5%까지 진행되었다. 잔여 아스팔트는 균열깊이를 제외하고 7~36cm (평균 17cm)로 확인되었다. 분석 결과, 긴급 등급이 5.9%, 우선 등급이 82.3%, 일반 등급이 11.8%로 확인 되었다. 서울시 공동 관리 등급기준에 따라 균열 깊이 진행 및 잔여 A.C. 두께를 확인한 결과 최종 등급은 긴급 1개소, 우선 14개소, 일반 2개소로 확인 되었다.

**Table 2.** Determination of cavity management grade through crack size measurement

Item	Crack size of identified cavity				Crack depth progression (%)	Residual A.C. thickness (cm)	Grade
	Crack width (cm)		Crack depth (cm)				
	Min.	Max.	Min.	Max.			
1	0.04	0.7	0.8	6.0	21.4	22	General
2	0.05	1.8	0.5	7.0	28.0	18	Priority
3	0.02	0.9	0.9	5.0	25.0	15	Priority
4	0.03	1.6	0.6	10.0	45.0	12	Priority
5	0.01	1.0	0.6	3.0	15.0	17	Priority
6	0.03	1.4	0.5	2.0	15.4	11	Priority
7	0.06	1.7	0.2	4.0	25.0	12	Priority
8	0.01	0.8	0.3	3.0	15.0	17	Priority
9	0.05	1.0	0.3	3.0	16.7	15	Priority
10	0.02	1.1	0.2	5.0	29.4	12	Priority
11	0.02	1.0	0.3	8.0	30.8	18	Priority
12	0.01	1.2	0.2	4.0	18.2	18	Priority
13	0.01	0.6	0.3	4.0	19.0	17	Priority
14	0.03	0.9	0.2	6.0	14.3	36	General
15	0.02	2.0	0.8	4.0	14.3	24	Priority
16	0.03	1.3	0.5	13.0	65.0	7	Emergency
17	0.02	0.8	0.2	3.0	15.0	17	Priority

## 고찰

총 17개소에 대하여 균열깊이 확인 조사를 실시한 결과는 Table 3에 나타내었다. 조사결과 긴급복구 1개소, 우선복구 14개소, 일반복구 2개소로 결정되었다. 2019년 공동조사용역(2단계)인 5개구, 16개 노선, 818.11km에 대하여 공동 확인조사를 실시한 결과 총 265개소의 공동을 확인하였다. 확인된 공동 265개소 중 상부 포장상태를 확인하여 균열이 확인된 17개소에 대하여 균열깊이를 확인하였다. 조사결과 시험공동 17개소 중 9개소에서 균열 깊이 진행 정도 및 잔여 아스팔트 두께 확인으로 등급이 상향 조정되었다. 1개소는 우선복구가 긴급복구로, 6개소가 일반복구에서 우선복구로, 2개소는 관찰대상에서 우선복구로 조정되었다.

도로함몰의 개연성 정도에 따라 서울시는 긴급복구, 우선복구, 일반복구, 관찰대상 4개 등급으로 나누어 관리하고 있다. 이중 긴급복구, 우선복구의 경우 포장 균열 깊이와 잔여 A.C. 포장 두께 정도에 따라 등급을 조정하여야 한다. 즉, 공동관리 등급이 긴급복구의 경우에는 포장 균열 깊이가 50% 이상 진행된 모든 공동(잔여 A.C. 포장 두께가 10cm 이내), 우선복구의 경우에는 포장 균열 깊이가 10~50% 진행된 모든 공동(잔여 A.C. 포장 두께가 10~20cm 이내)을 고려하여 공동관리 등급 조정이 필요하다.

**Table 3.** Determination of the grade of the identified cavity through crack measurement

Item	Analysis grade	Confirmed grade	Crack depth progression (%)	Residual A.C. thickness (cm)	Determined grade
1	General	General	21.4	22	General
2	General	General	28.0	18	Priority
3	General	Priority	25.0	15	Priority
4	General	General	45.0	12	Priority
5	General	Priority	15.0	17	Priority
6	Emergency	Priority	15.4	11	Priority
7	General	Priority	25.0	12	Priority
8	General	Observation	15.0	17	Priority
9	Observation	Observation	16.7	15	Priority
10	Priority	Priority	29.4	12	Priority
11	General	General	30.8	18	Priority
12	Priority	General	18.2	18	Priority
13	General	General	19.0	17	Priority
14	General	General	14.3	36	General
15	General	General	14.3	24	Priority
16	General	Priority	65.0	7	Emergency
17	General	Priority	15.0	17	Priority

## 결론

본 연구에서는 2019년 서울시 공동조사구역에서 실시한 265개소의 공동의 포장균열 깊이와 공동관리등급의 상관성을 분석하기 위하여 포장균열이 확인된 17개소에 대하여 포장 균열 깊이를 측정하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

확인된 시험공동 17개소 중 9개소에서 포장 균열 깊이가 더 진행되었고, 잔여 아스팔트 두께가 감소되어 공동 관리 등급이 상향 조정된 것으로 분석되었으며, 긴급복구와 우선복구의 경우에는 포장 균열 깊이와 잔여 아스팔트 콘크리트 포장 두께 정도에 따라 관리등급을 조정하여야 한다.

균열 깊이를 측정할 때, 깊이 게이지, 버니어 캘리퍼스, 천공확인 등의 3가지 방법으로 조사하였으며 결과적으로 깊이 게이지, 버니어 캘리퍼스는 측정 게이지 부분의 룯드 두께로 인하여 측정하는데 한계가 있었다. 가장 확실하며 정확한 방법은 균열위치를 천공하여 A.C. 코어를 확인하는 방법이며, A.C. 균열확인을 통하여 잔여 A.C. 두께확인도 가능하였다. 따라서, 공동상부에 균열이 발생한 경우는 천공을 통하여 균열 진행상태를 파악하고 잔여 A.C. 두께를 확인하여 공동등급을 결정해야 한다.

## References

- [1] Cassidy, N.J., Eddies, R., Dods, S. (2011). "Void detection beneath reinforced concrete sections: The practical application of ground penetrating radar and ultrasonic techniques." *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 74, pp. 263-273.



- [2] 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.
- [3] David, J.D. (2005). *Ground Penetrating Radar*. Encyclopedia of RF and Microwave Engineering. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- [4] 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, No. 4, pp. 566-576.
- [5] Han, Y.S. (2018). "Numerical analysis and exploring of ground condition during groundwater drawdown environment in open-cut type excavation." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 34, No. 11, pp.93-105.
- [6] Hagrey, S.A., Müller, C. (2000). "GPR study of pore water content and salinity in sand." *Geophysical Prospecting*, Vol. 48, No. 1, pp. 63-85.
- [7] Kang, Y.V., Hsu, H.C. (2013). "Application of ground penetrating radar to identify shallow cavities in a coastal dyke." *Journal of Applied Science and Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 23-28.
- [8] Kim, B.W., Kim, H.S., Choi, D.H., Koh, Y.K. (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, No. 3, pp. 201-216.
- [9] Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists (2011). *Practical Guidelines for Geophysical Exploration*, Hanrimwon, p. 397.
- [10] Kuroda, S., Jang, H. and Kim, H. J. (2009). "Time-laps borehole data monitoring of an infiltration experiment in the vadose zone." *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 67, No. 4, pp. 361-366.
- [11] Lee, K., Kim, D., Park, J.J. (2017). "Study on management system of ground sinking based on underground cavity grade." *Journal of Geosynthetics Society*, Vol. 16, No. 2, pp.23-33.
- [12] Park, J.J., Chung, Y., Hong, G. (2019a). "A Method for cavity scale estimation based on ground-penetration radar explorations: An experimental study." *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2019, p. 13.
- [13] Park, J.J., Shin, E.C., Kim, I.D. (2019b). "Field application of RFID for the cavity maintenance of under pavement." *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 15, No. 4, pp. 459-468.
- [14] Park, J.J., Shin, E.C., Park, K.S., Shin, H.S., Hong, G. (2018). "An experimental study on detecting materials of GPR for maintenance of restored cavities." *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 14, No. 4, pp. 430-439.
- [15] 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, No. 4, pp. 335-342.
- [16] Shin, E.C., Park, K.S., Park, J.J. (2019). "A fundamental experiment for field application of the under pavement cavity management system using RFID." *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 15, No. 3, pp. 391-401.