

FWD 처짐량 기반 도로 공동 및 함몰 위험도 평가 기초 연구

Preliminary Evaluation of Subsurface Cavity and Road Cave-in Potentials Based on FWD Deflections

김 태 우	Kim, Tae-Woo	정회원 · 서울특별시 품질시험소 도로포장연구센터 주무관 (E-mail : 77twkim@seoul.go.kr)
윤 진 성	Yoon, Jin-Sung	정회원 · 서울특별시 품질시험소 도로포장연구센터 주무관 (E-mail : jsyoon94@seoul.go.kr)
이 창 민	Lee, Chang Min	정회원 · 서울특별시 품질시험소 도로포장연구센터 주무관 (E-mail : min7872@seoul.go.kr)
백 종 은	Baek, Jongeun	정회원 · 서울특별시 품질시험소 도로포장연구센터 센터장 · 교신저자 (E-mail : jbaek@seoul.go.kr)
최 연 우	Choi, Yeon-Woo	서울특별시 도로관리과 도로관리팀장 (E-mail : cywem@seoul.go.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The objective of this study is to evaluate the potential risk level of road cave-ins due to subsurface cavities based on the deflection basin measured with falling weight deflectometer (FWD) tests.

METHODS : Ground penetrating radar (GPR) tests were conducted to detect road cavities. Then FWD tests were conducted on 13 pavement test sections with and without a cavity. FWD deflections and a deflection ratio was used to evaluate the effect of geometry of the cavity and pavement for road cave-in potentials.

RESULTS : FWD deflection of cavity sections measured at 60 cm or a closer offset distance to a loading center were 50% greater than more robust sections. The average deflection ratio of the cavity sections to robust sections were 1.78 for high risk level cavities, 1.51 for medium risk level cavities, and 1.16 for low risk level cavities. The relative remaining service life of pavement with a cavity evaluated with an surface curvature index (SCI) was 8.1% for the high level, 21.8% for the medium level, and 89.8% compared to pavement without a cavity.

CONCLUSIONS : FWD tests can be applied to detect a subsurface cavity by comparing FWD deflections with and without a cavity measured at 60 cm or a closer offset distance to loading center. In addition, the relative remaining service life of cavity sections based on the SCI can used to evaluate road cave-in potentials.

Keywords

Falling Weight Deflectometer, Deflection Basin, Subsurface Cavity, Road Cave-in, Remaining Service Life

Corresponding Author : Baek, Jongeun
The Pavement Research Center, Quality Inspection Office Division,
Seoul Metropolitan Government, 131, Taebong-ro, Seocho-gu, Seoul,
06763, Korea
Tel : +82.2.3462.6718 Fax : +82.2.3462.6710
E-mail : jbaek@seoul.go.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Aug. 10, 2017 Revised Sep. 11, 2017 Accepted Sep. 13, 2017

1. 서론

최근 국내에서 자주 발생하는 지반함몰은 대부분 노후 상·하수도의 손상, 느슨하게 다져진 굴착복구 구간, 공사구간 지하수 유출 등으로 인하여 토사가 유출되어

생성된 공동(서울시에는 주로 “동공”으로 표기함)이 무너져서 발생한다(Choi et al. 2015; Kuwano 2015). 이러한 지반함몰을 예방하기 위한 일환으로 발생원인인 공동을 찾기 위하여 전자기파를 이용한 비파괴시험인

GPR(Ground Penetrating Radar) 시험이 활용되고 있다. 이러한 GPR 시험을 통하여 공동의 위치 및 크기에 대한 개략적인 정보를 획득할 수 있다. 일본의 경우 GPR 시험으로 획득한 공동의 크기 및 심도에 따라 공동을 3단계(A, B, C)로 분류하여 관리하는 체계를 사용하고 있다(Kuwano 2015). 이 분류법에 의하면 공동의 크기가 클수록, 심도가 얕을수록 공동의 위험등급이 높아진다. 하지만 이 기준은 일본간선도로의 포장상태를 기준으로 수립되어 국내 도로에 적용하기 위해서는 검증 또는 수정이 필요하다고 볼 수 있다. 특히 공동으로 인한 지반함몰 위험도를 평가하기 위해서는 포장구조체의 역학적 거동 특성에 기반한 안정성을 검토하여야 한다. 하지만 GPR 시험의 경우 도로포장 하부 지반의 물리적 특성 등을 평가할 수 있지만 역학적 거동 특성을 평가하기에는 한계가 있다.

현재 국내에 적용할 수 있는 지반함몰 위험도 평가 방법 및 기준 수립을 위한 연구가 활발하게 진행 중에 있다. 이러한 연구의 일환으로 최근 서울시에서 공동이 발생한 구간에 대한 하중재하시험 및 유한요소해석을 이용하여 공동규모 및 포장상태에 따른 새로운 공동관리기준을 수립하였고(Lee et al, 2016; Seoul Metropolitan Government 2016), 현재 현장 시험을 통한 검증을 진행하고 있다. 또한 실험형 포장가속시험을 통한 도로함몰 위험도 평가 연구가 진행되고 있다(Park et al. 2016).

지반함몰 위험도를 현장에서 간편하게 즉시 평가하기 위해서는 포장구조체의 역학적 거동 특성을 평가할 수 있는 비파괴 시험 방법이 바람직하다. FWD(Falling Weight Deflectometer) 시험은 동적하중에 의한 표면처짐량을 측정하여 포장구조체의 역학적 거동 특성을 평가하기 위하여 널리 활용되는 비파괴 시험이다(Kim et al. 2000). 일반적으로 FWD 시험으로부터 측정된 표면처짐량과 포장층 두께를 이용하여 역해석하여 포장체의 물성을 평가할 수 있다(Choi et al. 1998; Baek et al. 2000; Park et al. 2006). 하지만 역해석 기법을 올바르게 적용하기 위해서는 정해석이 우선되어야 한다. 그러나 공동이 있는 경우에 대한 아스팔트 포장의 일반해가 존재하지 않으므로 보다 많은 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 공동이 발생한 구간과 건전한 구간에서 실시한 FWD 시험으로부터 측정된 표면처짐량을 비교하여 공동으로 인한 지반함몰 위험도를 평가할 수 있는 간편한 방법을 제안하고자 한다. 이를 위하여 먼저 GPR 조사를 실시하여 공동 존재유무를 확인하고, 공동

구간 및 건전 구간에서 FWD 시험을 실시하여 표면처짐량을 측정하였다. 이러한 표면처짐량을 이용하여 도로포장 상태를 비교하고, 이를 바탕으로 도로포장의 잔존수명을 추정하여 공동으로 인한 지반함몰 위험도를 평가하였다.

2. GPR 조사

2.1. GPR을 이용한 공동 탐사 원리

GPR은 전자파 신호를 공중에 방사시킨 후 목표물에 대한 정보를 획득하는 레이더 원리를 지표 하부에 적용시켜 지하매설물과 같은 이질 물질을 탐사할 수 있는 비파괴 조사방법이다. GPR 조사는 송신안테나에서 수 MHz에서 수 GHz 범위의 전자기파를 지표에 방사시킨 후, 전자기적 물성이 다른 반사체(지층경계, 매설물, 공동 등)에서 반사되어 되돌아온 신호를 수신안테나에서 받아 도달시간에 따른 신호의 세기(진폭)를 이용하여 지하매설물의 위치와 특성을 조사한다. 일반적으로 GPR 조사에서는 송·수신 안테나를 수평적으로 이동시키며 연속적으로 얻은 2차원 단면형태의 신호를 분석한다. 지하매설물이 있는 경우 2차원 단면에서 GPR 신호가 측정점의 위치에 따라 도달하는 시간의 차이가 발생하여 Fig. 1과 같은 쌍곡선 형태(사각형 표시)의 신호가 나타나므로 이를 근거로 지하매설물의 유무, 크기, 깊이 등을 추정할 수 있다. GPR 시험은 다양한 물리탐사법 중에 이동성이 용이하고, 조사 시간이 짧고, 상대적으로 높은 정밀도를 가지므로 인해서 도로하부 공동탐사 분야에 적극적으로 활용되고 있다(Yoon et al. 2016).

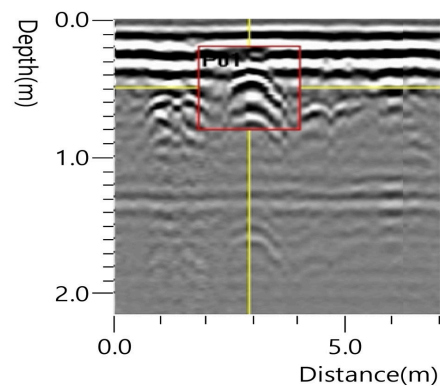


Fig. 1 Parabolic Signature in the GPR Data

2.2. GPR 조사 장비

본 연구에서는 서울시에서 2015년도에 도입한 차량형 공동탐사장비(Fig. 2)를 이용하여 공동의 위치를 파

악하였다. 서울시 공동탐사장비에는 중심주파수 500MHz의 16채널 GPR 안테나를 차량후미에 장착하였다. 아스팔트 포장 두께가 약 20~30cm인 서울시내 도로를 대상으로 평가한 결과 유효투과심도는 약 1.5m로 나타났다. 1회 조사 시 조사 폭은 약 2m이고, 횡방향 간격은 12.5cm이다. 일반적으로 도심지 조사 시 15km/h 속도로 조사할 경우 종방향 간격은 10cm이다. GPR로 파악한 공동의 위치를 정확하게 파악하기 위하여 GPS, DMI(Distance Measurement Instrument) 및 노면/주변영상카메라를 장착하였다.

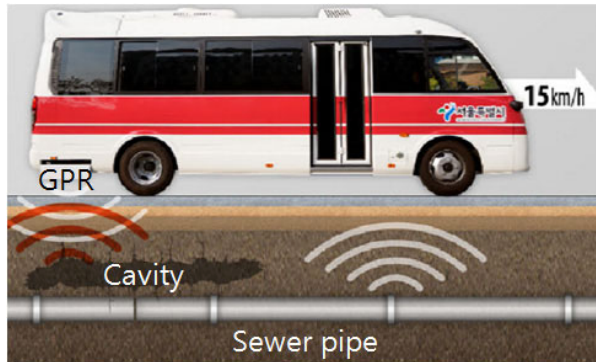


Fig. 2 Vehicle-mounted Multi-channel GPR Surveyor

2.3. 조사대상

서울시에서는 도로함몰 발생확률이 높을 것으로 예상되는 주요도로에 대하여 2015년부터 GPR 조사를 실시하고 있다. 이 중 본 연구에서는 강남구, 서대문구, 송파구, 중구에서 각각 1개 노선을 대상으로 GPR 조사를 실시하였다.

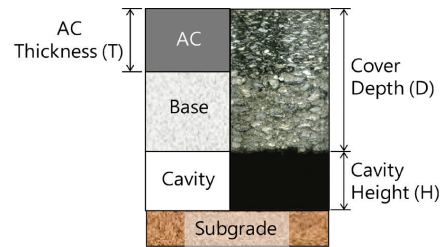
GPR 조사에서 공동신호는 평면상 원형에 가까운 형태, 종·횡단면(측면방향)에서는 찌그러진 쌍곡선 형태가 주로 나타난다. 또한 공동의 빈 공간으로 인하여 GPR 신호의 위상이 역전되는 현상이 나타난다(Yoon et al., 2016). 이러한 결과를 바탕으로 조사대상 구간에서 총 13개소의 공동의심지점을 파악하였다. 이 구간에 대하여 공동의 존재를 확인하기 위하여 천공 및 영상촬영을 실시하였고, 발견한 공동의 출현심도 및 크기에 근거하여 위험등급을 3단계로 분류하였다(Table 1). 조사대상 구간에 공동의 최상부는 대부분 아스팔트 포장층 직하부에서 발견되었다. 공동 상부부터 노면까지의 두께인 토피고(D)는 평균 33.7cm(최소 17cm, 최대 51cm)이고, 공동의 두께(H)는 평균 28.2cm(최소 8cm, 최대 62cm), 종방향 길이(L)는 평균 171.5cm(최소 70cm, 최대 310cm), 횡방향 폭(W)은 평균 95.4cm(최소 60cm, 최대 130cm)로 나타났다. 또한 아스팔트 포장층의 두께(T)는 평균 28.3cm로 나타났다. 일본의 공동관리기준의

적용성을 평가하기 위하여 일본간선도로 기준에 적용한 결과 위험도 A등급이 7개, B등급이 5개, C등급이 1개로 나타났다.

Table 1. Selected Cavity Size and Risk Level

ID	Cavity					AC T (cm)
	D (cm)	L (cm)	W (cm)	H (cm)	Risk level	
S1	22	310	100	18	A	20
S2	29	260	120	38	A	20
S3	51	290	130	23	B	22
S4	28	120	80	24	A	28
J1	48	200	90	62	B	45
J2	32	110	100	13	B	32
J3	47	140	130	24	B	41
N1	17	130	100	29	A	17
N2	26	140	110	35	A	26
N3	36	90	100	36	B	20
G1	24	70	60	40	A	20
G2	27	70	60	8	A	27
G3	51	300	60	17	C	50
Ave.	33.7	171.5	95.4	28.2	28.3	28.3

D: Cover depth, L: Longitudinal length, W: Transverse width, H: Height, T: Asphalt Concrete thickness



3. FWD 조사

3.1. FWD 시험을 이용한 포장상태 평가

FWD 시험은 트럭의 주행하중을 모사하기 위하여 일정 크기의 추를 자유 낙하시켜 발생하는 충격하중에 의하여 포장체 표면에 발생하는 표면처짐값을 측정하여 포장상태를 평가할 수 있다. 포장체 상부부터 하부까지의 물성을 평가하기 위하여 하중재하지점부터 다양한 이격거리에서 표면처짐값을 측정한다. 이렇게 측정한 표면처짐값을 역해석하여 포장체의 층별 탄성계수를 추정할 수 있다.

또한 표면처짐값만으로 간편하게 포장상태를 평가할 수 있다(Kim et al., 2000; Son et al., 2006). 대표적인 방법으로 Eq. (1)의 SCI(Surface Curvature Index)

를 이용하여 아스팔트 콘크리트 층의 상태를 파악할 수 있다. 유사한 방법으로 Eq. (2)의 BDI(Base Damage Index)는 기층의 상태, Eq. (3)의 BCI(Base Curvature Index)는 보조기층 또는 노상의 상태를 평가할 수 있다. Son et al.(2006)이 제시한 기준에 의하면 BDI가 0.05mm 미만이면 보조기층의 상태가 “상”, 0.05mm에서 0.15mm 사이면 “중”, 0.15mm 초과이면 “하”로 평가할 수 있다. 또한 노상의 경우 BCI가 0.05mm 미만이면 “상”, 0.05mm 이상이면 “하”로 평가할 수 있다.

$$SCI = d_0 - d_{30} \quad (1)$$

$$BDI = d_{30} - d_{60} \quad (2)$$

$$BCI = d_{60} - d_{90} \quad (3)$$

여기서, d_i 는 이격거리 i (cm)에서의 표면처짐량(μm)이다.

3.2. FWD 시험 방법

도로하부에 공동이 존재하는 경우 포장체의 구조적 지지력이 약화될 수 있으므로 이러한 특성을 이용하면 공동의 존재 유무 및 공동으로 인한 도로함몰 위험도를 평가할 수 있을 것으로 유추할 수 있다. 따라서 GPR 조사로부터 확인한 13개 공동 구간에 대하여 FWD 시험을 실시하였다(Fig. 3). 또한 공동이 없는 구간에서의 지지력 차이를 비교하기 위하여 건전구간에서도 FWD 시험을 실시하였다. 여기서 건전구간은 공동 구간과 포장두께가 동일하고 포장상태도 유사하며 FWD 하중 전달 범위를 고려하여 공동 구간에서 종방향으로 약 6m 떨어진 곳으로 선정하였다. FWD 하중 크기는 총 4단계(20kN에서 75kN)로 적용하였고, 표면처짐량은 9개 지점(이격거리 0cm, 20cm, 30cm, 45cm, 60cm, 90cm, 120cm, 150cm, 180cm)에서 측정하였다.



Fig. 3 FWD Test at a Section with Cavity

3.3. 하중 및 온도 보정

FWD 시험을 동일한 구간에서 실시하더라도 처짐값은 하중크기 및 아스팔트 포장의 온도에 따라 달라진다. 일반적으로 FWD 시험에서 처짐값은 하중크기가 증가함에 따라 선형적으로 증가한다. 하지만 포장체 물성이 불량하거나 공동이 존재하여 하부지지력이 나빠지는 경우 처짐량이 비선형적으로 증가할 수 있다. 따라서 처짐량 분석 이전에 이러한 거동 특성을 확인하기 위하여 하중크기에 따른 처짐값의 변화를 살펴보았다.

FWD 하중 크기를 20kN에서 75kN까지 증가시키면서 공동이 발생한 구간과 발생하지 않는 구간에서의 처짐량을 비교하였다. Fig. 4와 같이 공동의 여부 및 하중재하 위치와 상관없이 하중 크기가 증가함에 따라 처짐값이 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 원점을 통과하는 직선식을 이용하여 회귀분석한 결과 상관계수 결정계수(R^2)가 0.99 이상으로 나타났다. 따라서 공동이 발생하더라도 처짐량은 하중크기에 정비례하여 나타나므로 다양한 하중 크기에서 측정된 처짐값을 40kN의 하중크기로 정규화하여 비교하였다.

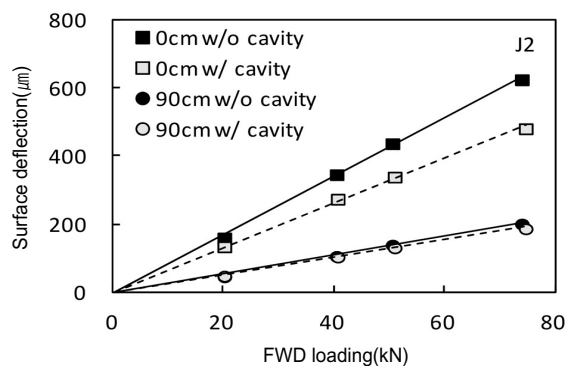


Fig. 4 Surface Deflection at Various FWD Loading Levels

FWD 시험을 실시하는 동안 노면온도가 일정하지 않았으므로 Eq. (4)와 같이 Kim et al.(1995)이 제시한 방법을 이용하여 처짐값을 20℃로 보정하였다. 이 때 아스팔트 콘크리트 층 두께는 공동 구간에서 천공할 때 측정된 값을 적용하였다. Eq. (4)에 적용되는 온도는 포장체 중간 깊이에서의 온도이나 측정이 어려운 관계로 노면 온도로 대체하여 사용하였다. 또한 본 연구에서 대상으로 하는 공동이 대부분 차륜이 통과하는 위치에 있기 때문에 온도보정계수(α)는 차륜 통과 구간에 적용되는 식을 적용하였다.

$$D_{20} = D_T [10^{\alpha(36 - 1.8T)}] \quad (4)$$

여기서, D_{20} 은 20°C에서의 처짐량, D_T 는 측정온도(T)에서의 처짐량, α 는 온도보정계수로 다음 식과 같다.

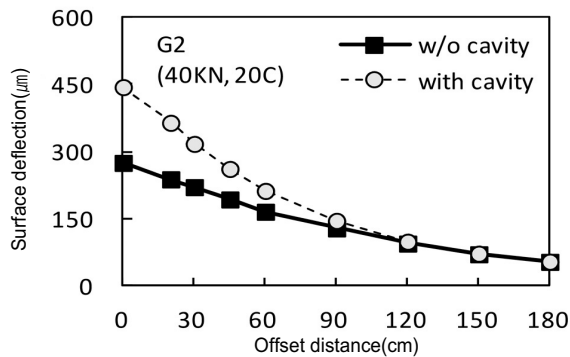
$$\alpha = 3.67 \times 10^{-4} \times \left(\frac{t}{2.54} \right)^{1.4635} \quad (\text{차륜 통과 부}) \quad (5)$$

여기서, t 는 아스팔트 콘크리트 층 두께(cm)이다.

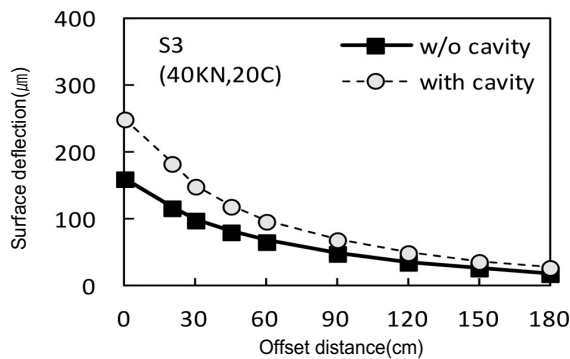
4. FWD 시험 결과 분석

4.1. 처짐곡선 비교

공동이 발생한 구간과 인접한 건전 구간에서 측정된 FWD 처짐량을 이격거리별로 비교하였다. 대부분의 구간에서 하중재하지점에 가까울수록 공동이 발생한 구간에서의 처짐량이 상대적으로 크게 나타나고, 멀어질수록 처짐량이 유사하게 나타났다(Fig. 5(a)). 이는 하중재하지점에서 먼 곳에서 측정된 처짐량(예를 들어 d_{150} , d_{180})은 포장체 하부의 물성에 영향을 많이 받는데 공동의 몸통(가장 큰 부분)이 보조기층과 노상상부에 위치하여 포장하부에 미치는 영향이 작기 때문으로 추정된다. G2 구간의 경우 토피고 27cm, 공동높이 8cm, 종·횡방향 크기 70cm, 60cm, 아스팔트 층두께 27cm로 공동의 크기가 매우 작고 보조기층에 존재하여 노상의 지지력



(a)



(b)

Fig. 5 FWD Deflections at Various Offset Distances

은 크게 차이가 없다고 볼 수 있다. 반면 일부 구간에서는 하중재하지점에서 먼 곳에서도 공동 발생 지점의 처짐량이 건전구간보다 크게 나타나는 경우도 있었다(Fig. 5(b)). 이러한 경우는 공동이 상대적으로 포장체 하부 깊은 곳에 존재하거나 FWD 시험방향과 동일하게 종방향으로 큰 경우이므로 처짐량 전체에 영향을 미친 것으로 판단된다. S3 구간의 경우 토피고 51cm, 공동높이 23cm, 종·횡방향 크기 190cm, 130cm, 아스팔트 층두께 22cm로 공동의 크기가 평균에 비해서 크고, 노상상부까지 공동이 존재하여 공동 구간에서의 처짐량이 건전 구간에 비해 전체적으로 크게 발생하였다.

전체 조사 구간에 대하여 공동 구간과 건전 구간의 처짐량을 비교하였다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 하중재하지점에 가까울수록 공동 구간의 처짐량이 크게 나타나는 것으로 나타났다. 예를 들어 건전 구간 대비 공동 구간의 처짐량이 하중재하지점에서 이격거리가 0cm인 곳에서는 평균 1.77배, 이격거리가 60cm인 곳에서는 1.38배 크게 나타났다. 반면에 이격거리가 180cm에서는 평균 1.04배로 공동이 발생하더라도 처짐량은 유사한 것으로 나타났다.

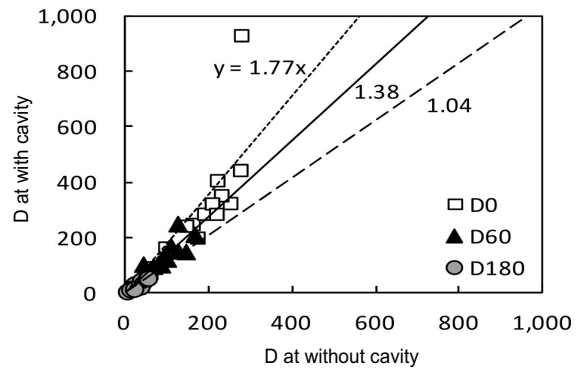


Fig. 6 Comparison of FWD Deflections at Three Offset Distances with and without Cavity

Fig. 7은 FWD 처짐곡선 중 상·하위 95%에 해당하는 처짐곡선의 범위를 나타낸 것이다. 전체적으로 하중재하지점에서 이격거리가 120cm 이상인 구간에서는 처짐량이 공동 구간과 건전 구간에서 대부분 유사하게 나타났다. 반면에 이격거리가 60cm 이하 구간에서는 하중재하지점에 가까울수록 처짐량이 급격하게 증가하여 건전 구간과의 차이가 커지는 것으로 나타났다. 하지만 공동 구간과 건전 구간의 처짐곡선이 겹치는 구간이 많이 존재함에 따라 처짐량 자체만으로 공동 여부를 반영하는 것은 다소 어려울 것으로 판단된다. 따라서 이격거리 60cm 이하에서 건전 구간 대비 공동 구간 처짐량의 비를 이용하여 공동발생 여부를 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

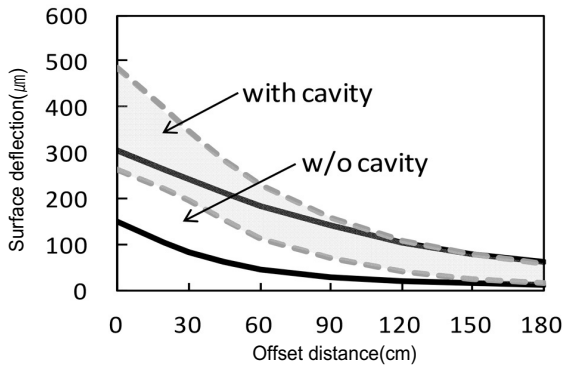


Fig. 7 Comparison of FWD Deflection Basins with and without Cavity

4.2. 처짐량비 비교

전체 조사 구간에 대하여 건전 구간 대비 공동 구간의 처짐량비를 이격거리에 따라 살펴보았다(Fig. 8). 공동 구간의 평균 처짐량비가 이격거리 0cm에서 1.65로 가장 크게 나타났고, 60cm에서는 1.46, 120cm에서는 1.28, 180cm에서는 1.13으로 이격거리에 따라 점차 감소하는 것으로 나타났다. 특히 이격거리 30cm 이내에서는 공동 구간에서의 처짐량이 평균 60% 이상 크게 나타났다. 따라서 본 연구에서 대상으로 하는 얇은 심도, 즉 보조기층과 노상 상부에 발생한 공동을 탐지하기 위해서는 이격거리가 60cm 이내의 FWD 측정값만으로도 가능하다고 판단된다.

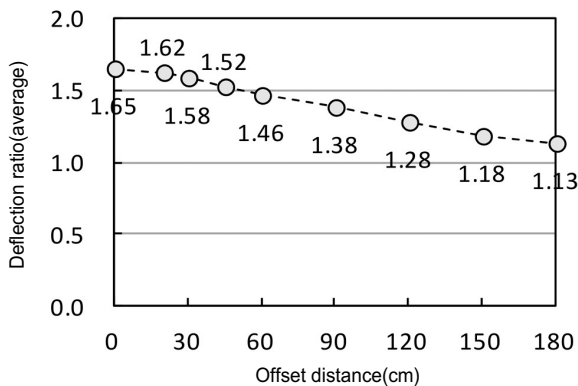


Fig. 8 FWD Deflection Ratio of Pavement without Cavity to with Cavity with Respect to Offset Distance

4.3. 처짐지수 비교

FWD 처짐곡선으로부터 포장상태를 추정할 수 있는 다양한 처짐지수 중 Talvik and Aavik(2009)가 제시한 아스팔트층 상태, 보조기층, 노상의 상태를 나타내는 SCI, BDI, BCI를 이용하여 공동 유무에 따른 변화를 비교하였다. Table 2와 같이 전체 조사 구간에서 건전

구간과 공동 구간의 평균 SCI는 각각 56.7 μ m과 112.7 μ m로 공동 구간에서 평균 1.90배 크게 나타났다. BDI의 경우 건전 구간에서는 38.3 μ m, 공동 구간에서는 76.1 μ m로 1.89배 크게 나타났다. BCI의 경우 건전 구간에서는 23.5 μ m, 공동 구간에서는 40.6 μ m로 1.68배 크게 나타났다. 따라서 공동으로 인해서 SCI, BDI, BCI가 평균 70~90% 정도 크게 나타났다.

Son et al.(2006)이 제시한 BDI와 BCI 기준에 따르면 건전 구간의 보조기층과 노상의 상태는 “상”, “중” 등급으로 나타났다. 공동이 존재하는 경우 BDI 기준 보조기층의 상태가 “하” 등급인 구간은 1개소(N2), BCI 기준으로 노상의 상태가 “하” 등급인 구간은 3개소(N2, N3, G2)로 나타났다. 나머지 구간에서는 공동이 존재 하더라도 보조기층과 노상의 상태가 “상” 또는 “중” 등급으로 나타났다. 따라서 단순히 BDI와 BCI 기준으로 공동의 발생여부를 판단하기에는 신뢰성이 높지 않은 것으로 판단된다.

Table 2. FWD Deflection index(SCI, BDI, and BCI) of Pavements with and without Cavity

ID	SCI(μ m)			BDI(μ m)			BCI(μ m)		
	w/o	w/	Ratio	w/o	w/	Ratio	w/o	w/	Ratio
S1	84.5	200.4	2.37	43.9	73.9	1.68	24.1	37.1	1.54
S2	98.9	127.1	1.28	52.1	74.3	1.43	29.8	38.3	1.28
S3	61.9	100.4	1.62	32.1	52.5	1.63	17.6	27.5	1.56
S4	72.7	120.6	1.66	37.8	58.6	1.55	20.7	29.9	1.44
J1	22.6	32.7	1.45	8.2	19.2	2.34	6.5	10.6	1.65
J2	26.0	52.6	2.02	18.6	44.0	2.37	14.2	25.2	1.77
J3	29.7	33.9	1.14	14.2	17.1	1.20	5.1	7.0	1.38
N1	38.1	113.5	2.98	46.5	89.3	1.92	36.4	46.7	1.28
N2	83.5	401.7	4.81	68.4	277.5	4.06	39.5	116.5	2.95
N3	56.0	75.3	1.34	42.8	77.0	1.80	30.1	54.7	1.82
G1	52.2	79.9	1.53	40.0	53.5	1.34	23.8	34.1	1.43
G2	54.1	126.7	2.34	55.1	104.9	1.91	37.2	66.8	1.80
G3	65.1	63.3	0.97	37.3	75.1	2.01	17.1	39.8	2.32
G4	48.0	49.1	1.02	38.8	48.7	1.25	27.4	34.4	1.26
Ave.	56.7	112.7	1.90	38.3	76.1	1.89	23.5	40.6	1.68
Std.	23.1	94.9	1.0	16.2	62.9	0.7	10.8	26.8	0.5

5. 도로함몰 위험도 평가

5.1. 처짐량비

도로함몰 위험등급과 FWD 처짐량의 상관관계를 살펴보기 위하여 등급별 D_0 , D_{30} , D_{60} , D_{180} 의 처짐량비(건전/공동) 분포를 Fig. 9에 나타내었다. D_0 의 경우 A등

급 공동에서 평균 1.78, B등급에서 평균 1.51, C등급에서는 평균 1.16으로 등급이 높아짐에 따라 처짐량비가 증가하는 경향을 나타냈다. 하지만 D₀가 가장 크게 나타난 한 지점을 제외하면 A, B등급의 처짐량비 분포는 거의 유사하게 나타났다. 이러한 경향은 D₃₀과 D₆₀에서도 나타났고, D₁₈₀의 경우에는 심지어 A, B등급에서 역전되는 것으로 나타났다. 따라서 하나의 FWD 처짐량비와 위험도의 상관성은 크지 않은 것으로 판단된다.

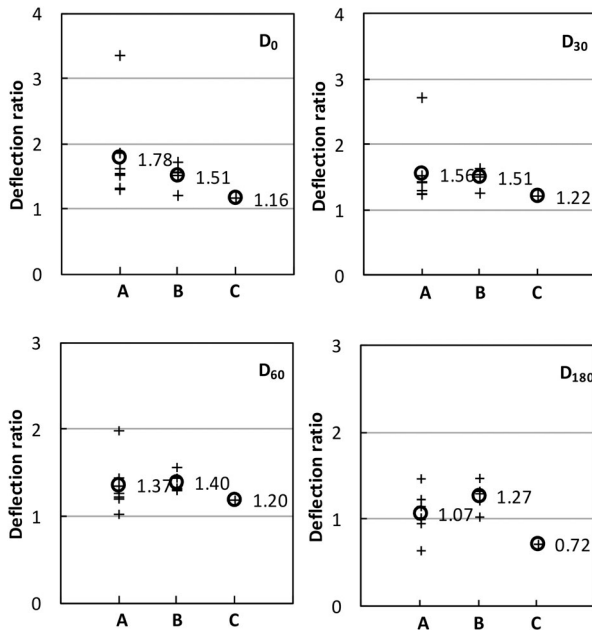


Fig. 9 Distribution of FWD Deflection ratio with Respect to Cavity Risk Level

5.2. 잔존수명

Molennar(1983)는 아스팔트 포장에 대하여 FWD 시험으로부터 측정된 SCI와 설계반복하중(N_f)과의 상관성을 Eq. (6)과 같이 제안하였다. 여기서 설계반복하중은 향후 도로포장이 일정한 수준의 구조적 또는 서비스능력을 발휘할 수 있는 기간의 교통량이므로 공용중인 도로의 경우에는 잔존수명으로 평가할 수 있다.

$$N_f = 9 \times 10^{17} (SCI)^{-4.787} \quad (6)$$

이러한 잔존수명은 교통량, 단면두께, 지지력 등의 영향을 받는다. 공동이 발생한 경우 특히 단면두께의 변화는 없지만 포장하부 지지력이 약화되어 잔존수명이 줄어들 수 있다. 따라서 건전구간과 동일한 교통량과 단면두께를 가지고 있는 공동구간의 잔존수명의 비, 즉 상대잔존수명(RRSL, Relative remaining service life)은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$RRSL = \frac{N_f(\text{with cavity})}{N_f(\text{w/o cavity})} = \left\{ \frac{SCI(\text{w/o cavity})}{SCI(\text{with cavity})} \right\}^{4.787} \quad (7)$$

여기서, 잔존수명은 도로포장이 구조적/기능적으로 파손되어 보수가 필요한 수준으로 파손되는 것을 의미하는 것으로 도로함몰과 같은 심각한 수준의 파손이 발생된다는 것을 의미하지 않는다. 하지만 공동의 영향으로 지지력이 비정상적으로 약화되어 상대잔존수명이 낮아지면 도로함몰 위험도 가능성이 높아질 것으로 판단할 수 있다.

조사 대상 구간 13개소에 대한 잔존수명과 상대잔존수명은 Table 3과 같다. 위치에 따라 상대잔존수명은 평균 19.5%(최소 0.1%, 최대 89.7%)로 공동으로 인하여 잔존수명이 약 1/5로 줄어든 것을 알 수 있다. 특히 5개소(S1, J2, N1, N2, G2)의 상대잔존수명은 5% 이하이고 2개소(S3, S4)의 상대잔존수명은 5~10%로 공동으로 인한 도로포장 하부 지지력 약화로 도로함몰 발생 위험도가 높은 것으로 나타났다. 반면에 1개 구간(G3)은 상대잔존수명이 89.7%로 공동으로 인한 도로함몰 발생 위험도가 크지 않은 것으로 나타났다.

Table 3. Relative Remaining Service Life of Pavements with Cavity

ID	Risk level	Remaining service life(×10 ⁶)		RRSL (%)
		w/o cavity	with cavity	
S1	A	538	9	1.6
S2	A	253	76	30.1
S3	B	2,388	235	9.9
S4	A	1,101	98	8.9
J1	B	296,938	50,745	17.1
J2	B	152,448	5,205	3.4
J3	B	80,799	42,717	52.9
N1	A	24,298	131	0.5
N2	A	568	0.3	0.1
N3	B	3,853	935	24.3
G1	A	5,414	701	13.0
G2	A	4,536	77	1.7
G3	C	8,068	7,238	89.7
Ave.	-	44,708	8321	19.5

공동의 크기와 토피고를 기준으로 A등급 공동(7개소, G1, G2, N1, N2, S1, S2, S4)의 상대잔존수명은 평균 8.1%, B등급(5개소, J1, J2, J3, N3, S3)은 21.8%, C등급(1개소, G4)은 89.8%로 나타나 일부 구간을 제외하고 전체적으로 도로함몰 위험도가 높을수록 상대잔존

수명이 작은 것으로 나타났다(Fig. 10). 예외인 경우인 S2 구간을 살펴보면 위험도가 A등급으로 분류되었으나 상대잔존수명은 30.5%로 높게 나타났고, J2 구간의 경우 B등급으로 분류되었으나 상대잔존수명은 3.5%로 매우 낮게 나타났다. 이러한 차이는 상대잔존수명이 공동 구간과 인접한 건진구간의 잔존수명의 영향을 많이 받기 때문으로 추정된다. S2 구간의 경우 공동이 발생한 구간의 잔존수명이 76×10^6 대로 작게 나타났으나 상대적으로 건진 구간의 잔존수명도 253×10^6 대로 타 건진 구간에 비해서 작게 나타나 상대잔존수명이 비교적 크게 나타났다. 하지만 공동구간의 잔존수명이 매우 작으므로 이 구간의 도로함몰 위험도는 크다고 볼 수 있다. 반대로 J2 구간의 경우 공동 구간에서의 잔존수명이 $5,205 \times 10^6$ 대로 양호한 수준이나 건진 구간의 잔존수명이 $152,448 \times 10^6$ 대로 매우 커서 상대잔존수명이 매우 작게 나타났다. 이러한 차이는 건진 구간의 포장체가 공동 구간과 동일하다는 가정에 일부 오류가 있기 때문으로 판단된다.

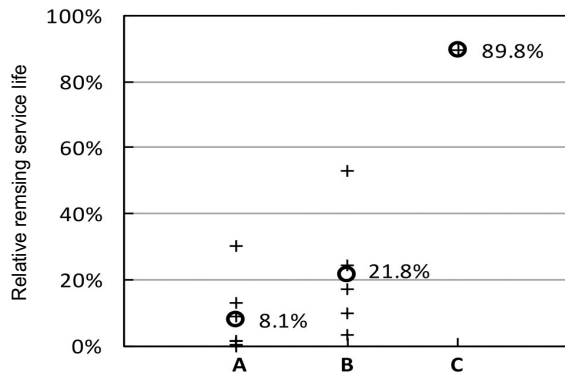


Fig. 10 RRSL with Respect to Road Collapse Level

도로함몰 위험도에 영향을 줄 수 있는 다양한 요소 중 공동의 토피고(공동 상단부터 노면까지의 두께), 공동의 체적, 아스팔트층 두께가 상대잔존수명에 미치는 영향을 살펴보았다(Fig. 11).

토피고와 아스팔트층 두께와 상대잔존수명의 상관계수(Coefficient of Correlation)는 각각 0.65와 0.68로 뚜렷한 양적 선형관계로 볼 수 있다. 반면에 공동의 체적은 0.05로 거의 무시될 수 있는 선형관계로 볼 수 있다. 하지만 현재 공동탐사기법 수준을 고려하면 공동의 체적을 정확하게 측정하기는 어렵다. 따라서 이러한 분석결과로 공동의 체적이 위험도에 미치는 영향에 대해서는 향후 연구에서 평가하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

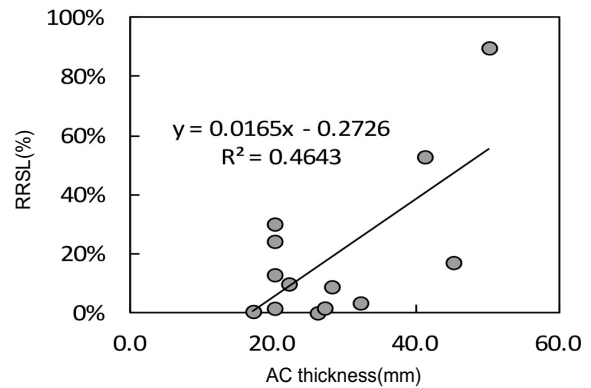
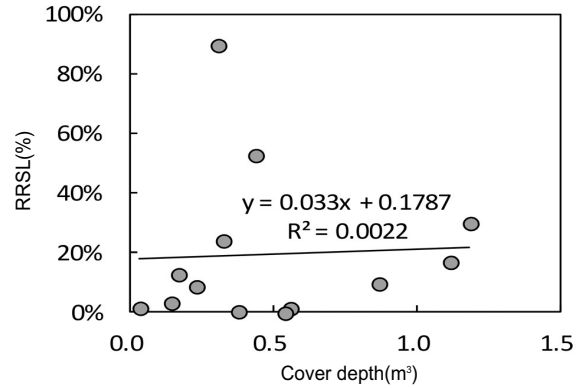
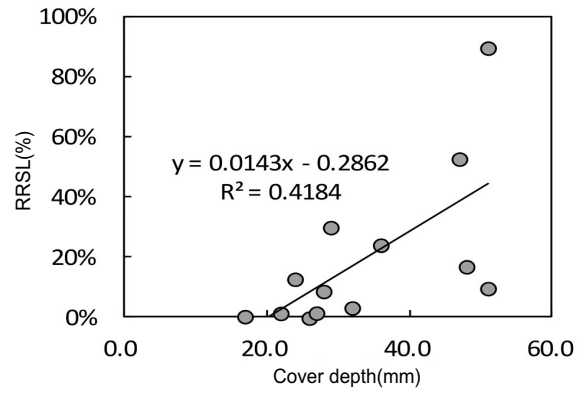


Fig. 11 RRSL with Respect to Geometer of Cavity and Pavement

6. 결론

본 연구에서는 공동이 발생한 구간에 대해서 FWD 시험을 실시하여 공동 발생 유무 및 도로함몰 위험도를 평가하였다. 도로포장의 다양한 조건(포장층 두께, 지지력, 교통량 등)과 공동의 형상(크기, 깊이, 체적 등) 등 변수가 많으므로 공동이 없는 건진구간 대비 공동구간의 처짐량을 상대 비교하였다. 이를 통하여 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 서울시 도로함몰 개연성이 높은 주요도로의 13개소에 대한 GPR 조사결과 일본 간선도로 기준 위험도 A등

- 급 7개소, B등급 5개소, C등급 1개소가 발견되었다.
- 이 구간에 대한 다양한 하중에 대하여 FWD 시험을 실시한 결과 표면처짐량이 공동 여부와 상관없이 하중 크기에 정비례하게 나타났다.
 - 공동이 존재하는 구간과 건전 구간의 처짐량을 비교한 결과 이격거리 60cm 이내에서는 공동 구간에서의 처짐량이 건전 구간 대비 약 50% 이상 크게 나타나 아스팔트 포장 층 직하부에 존재하는 얇은 심도의 공동은 FWD 이격거리 60cm 이내의 처짐값으로 존재 여부를 확인할 수 있을 것으로 판단된다.
 - FWD 처짐지수 중 SCI(아스팔트층), BDI(보조기층), BCI(노상)를 비교한 결과 공동으로 인해서 평균 70~90% 정도 증가하는 것으로 나타났으나, Son et al.(2006)이 제시한 상태평가 등급에서는 공동이 존재하더라도 보조기층과 노상의 상태가 “상”, “중” 등급으로 나타나 단순하게 BDI와 BCI로 판단하기에는 신뢰성이 높지 않았다.
 - 도로함몰 위험도 평가를 위한 처짐량비(건전/공동)는 D_0 에서 A등급 공동에서는 평균 1.78, B등급 1.51, C등급 1.16으로 등급이 높을수록 처짐량비가 증가하는 경향을 나타냈으나, 다른 위치(D_{30} , D_{60} , D_{180})에서 A, B등급의 처짐량비 분포가 유사하여 위험도와 상관성이 크지 않은 것으로 판단된다.
 - SCI를 기반으로 공동 구간의 상대잔존수명을 비교한 결과 A등급 8.1%, B등급 21.8%, C등급 89.8%로 나타나 일부구간을 제외하고 도로함몰 위험도가 높을수록 상대잔존수명이 작은 것으로 나타났다.
 - 도로함몰 위험도에 영향을 주는 다양한 요소 중 토피고와 아스팔트 두께의 상대잔존수명 상관계수는 0.65와 0.68로 양적 선형관계로 볼 수 있는 반면 공동의 체적은 0.05로 거의 무시되는 수준이다. 하지만 현재 공동의 체적을 정확하게 측정하기 어려운 한계로 인하여 향후 연구를 통해 평가하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 서울시 공동탐사기술 향상을 위한 연구의 일환으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다. 또한 국토교통부/교통물류연구사업의 연구비지원(과제번호 15TLRP-C099511-01, 도로함몰 위험도 평가 및 분석기술 개발)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

REFERENCES

Back, J., Choi, J. S., and Kim, S. I. (2001). "Development of

estimation procedure of bedrock depth for flexible pavement through numerical simulation of FWD test," *J. Korean Soc. of Civil Eng.*, Vol.21, No.5, pp.643-654.

Choi, J. S., Lee, S. H., Kim, S. I., and Yoo, J. H. (1998). "A study on the evaluation of layer properties of flexible pavement with respect to dynamic effects of falling weight deflectometer 1: Development Backanalysis Procedure," *J. Korean Soc. of Civil Eng.*, Vol.18, No.2-5, pp.623-634.

Choi, Y. W., Choi, H., and Kim, J. M. (2015). "Cause of road cavity and action plan for road collapse prevention," *Proc. of 2015 Korea Soc. of Road Eng. Conf.*, October 2015, Seoul, Korea.

Kim, Y. R., Hibbs, B. O., and Lee, Y. C. (1995). "Temperature correction of deflections and backcalculated asphalt concrete moduli," *Trans. Res. Rec.*, No. 1473, pp.55-62.

Kim, Y. R., Lee, Y. C., and Ranjithan, S. R. (2000). *Flexible pavement condition evaluation using deflection basin parameters and dynamic finite element analysis implemented by artificial neural networks*, ASTM STP 1375.

Kuwano, R. (2015). "Ground depression/cave-in caused by subsurface cavities," *Presented in 2015 Korea Soc. of Earth and Expl. Geophy. Conf.*, May 14 2015, Seoul, Korea.

Lee, J. K., Lee, S. Y., and Mun, S. H. (2016). "A study on voided-area analysis and remaining life prediction using the finite element method for pavement structures," *Int. J. High. Eng.*, Vol. 18, No. 6. pp.131-136.

Molenaar, A. A. A. (1983). *Structural Performance and Design of Flexible Road Constructions and Asphalt Concrete Overlays*, Ph. D. Dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.

Mun, S. and Kim, Y. R. (2009). "Backcalculation of subgrade stiffness under rubblised PCC slabs using multilevel FWD loads," *Int. J. High. Eng.*, Vol.10, No.1, pp.9-18.

Park, H. M., Kim, Y. T., Choi, J. Y., and Kim, K. H. (2016). "A preliminary study for assessing the risk of road collapse using accelerated pavement testing," *Int. J. High. Eng.*, Vol. 18, No. 5, pp.57-62.

Park, S. W., Hwang, J. J., Hwang, K. Y., and Park, H. M. (2006). "Development of a model for predicting modulus on asphalt pavements using FWD deflection basins," *J. Korean Soc. of Civil Eng.*, Vol.26, No.5D, pp.797-804.

Seoul Metropolitan Government (2016). "First introduction of four-stage road cavity management levels for Seoul roads" *News Release*, November 23, 2016 (in Korean).

Son, J. C., Rhee, S. K., An, D. S., and Park, H. M. (2006). "Development of the structural condition evaluation technique for asphalt pavements using falling weight deflectometer deflections," *Int. J. High. Eng.*, Vol. 8, No. 4. pp.115-124.

Talvik, O. and Aavik, A. (2009). "Use of FWD deflection basin parameters (SCI, BDI, BCI) for pavement condition

assessment," *The Baltic J. of Road and Bridge Eng.*, Vol. 4, No. 4, pp.196-202.

Yoon, J. S., Baek, J., Choi, Y. W., Choi, H., and Lee, C. M. (2016).

"Signal pattern analysis of ground penetrating radar for detecting road cavities," *Int. J. High. Eng.*, Vol. 18, No. 6, pp.61-67.