

## 공동발생시 도시철도 노반 위험도 평가

### Risk Assessment of Urban Railway Roadbed induced by Underground Cavities

김명재\*, 이성진\*\*, 박영곤\*\*, 이상승\*, 전상수\*†

Myung-Jae Kim\*, Sung-Jin Lee\*\*, Young-Kon Park\*\*, Sang-Seung Lee\*, Sang-Soo Jeon\*†

**Abstract** In recent days, a leakage of aged water and sewage pipelines in urban areas have induced ground loss frequently resulting in underground cavities. Change of groundwater levels by undiscerned development of urban areas induces critical problems of ground stability. Especially, underground cavities in adjacent to urban railway result in roadbed settlements and even derailment by exceeding an allowable settlement. A location and size of the cavity in adjacent to roadbed and groundwater level should be figured out. In this study, the commercial program, FLAC3D, which is a three-dimensional finite-difference numerical code is used to do stability analysis and assessment of risk level for roadbed associated with various groundwater levels and the geometric characteristics of the cavities in adjacent to urban railways. In addition, optimum strategy for the installation of measuring instrument has been suggested for real-time monitoring. Numerical results show that, since the roadbed settlement has been highly influenced by groundwater, groundwater should be in consideration of the assessment of risk level.

**Keywords** : Urban railway, Underground cavity, Groundwater, Roadbed, Risk level, Measuring instrument

**초 록** 최근 국내 도심지역의 대규모 공사 및 노후관 누수 등으로 인한 지반 토사 유실은 크고 작은 공동발생의 직접적인 원인이 되고 있다. 또한 광범위한 도시개발로 인한 지하수위 변화는 지반 안정성에 심각한 문제를 야기시키고 있다. 특히, 도시철도 인접지반에서 발생하는 공동은 노반 침하를 유발시키며, 허용 침하량을 초과할 경우 열차 탈선으로 인한 인명피해가 발생할 수 있으므로 도시철도 인접지반의 공동 위치 및 크기, 지하수위 파악은 매우 중요하다. 본 연구에서는 삼차원 유한차분해석 프로그램 FLAC3D를 이용하여 도시철도 인접지반에 발생한 공동의 기하학적 특성과 지하수위에 따른 노반 안정해석과 위험도 등급 산정 그리고 실시간 모니터링을 위한 최적의 계측기 설치 방안을 제시하였다. 수치해석 결과 지하수로 인한 노반 침하량은 매우 크게 발생하므로 반드시 지하수위에 따른 위험도 등급 산정이 필요하다.

**주요어** : 도시철도, 지하공동, 지하수, 노반, 위험도 등급, 계측기

## 1. 서론

최근 도심지역의 지속적인 지하시설 개발 및 기존의 지하 매설시설의 노후화에 따른 지하수위 변화는 지반 안정성 훼손과 급증하는 공동발생의 직접적인 원인이 되고 있다. 특히,

† 교신저자: 인제대학교 공과대학 토목도시공학부(ssj@inje.ac.kr)

\* 인제대학교 공과대학 토목도시공학부

\*\* 한국철도기술연구원

도심지를 관통하는 철도 노선 하부 주변에 다수의 공동이 분포되어 있어 도시철도를 이용하는 대다수 시민들이 불안감을 느끼고 있다. 도시철도 인접지반 공동발생은 노반 침하, 열차 탈선으로 인한 인명 및 경제적 피해를 야기시키므로 도시철도 주위의 공동 위치 및 크기, 지하수위 파악이 매우 중요하다.

본 연구에서는 유한차분해석 프로그램 FLAC3D를 이용하여 도시철도 인접지반에 발생한 공동 위치 및 크기, 지하수위에 따른 철도 노반 위험도 등급 산정과 더불어 실시간 모니터링을 위한 최적의 계측 방안을 제시하였다.

## 2. 노반 위험도 등급 산정 및 계측 방안 제시

### 2.1 수치해석

#### 2.1.1 수치해석 모식도

본 연구에서는 삼차원 유한차분해석 프로그램인 FLAC3D를 이용, 도시철도 인접지반에 발생한 공동 위치 및 크기, 지하수위에 따른 철도 노반 위험도 평가를 하였다. Fig. 1은 수치해석에 사용된 도시철도 및 지반 모식도를 나타낸 것이며, Fig. 2는 도시철도 궤도 중심에서 공동까지의 이격거리, 공동의 크기 등을 상세히 나타내었다.

#### 2.1.2 지반 물성치

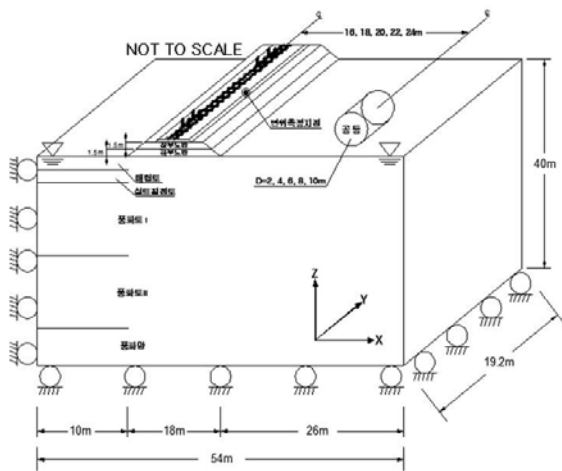


Fig. 1 Configuration of railway roadbed and cavity

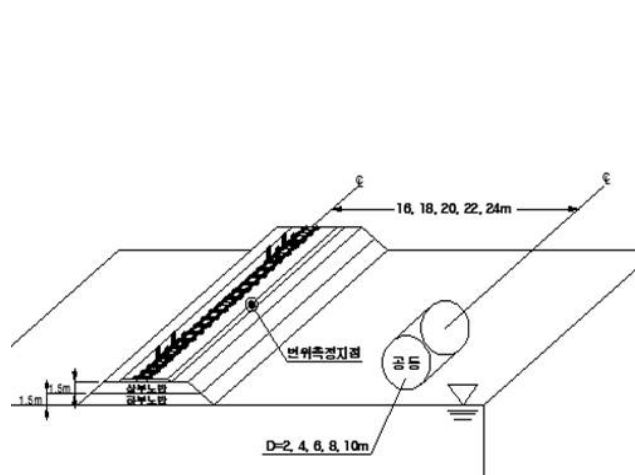


Fig. 2 Magnified configuration of railway roadbed and cavity

삼차원 수치해석에 사용된 지반 물성치는 Table 1과 같다. 성토지반은 자갈도상, 상부노반, 하부노반으로 구성되어 있으며, 원지반은 매립토, 실트질점토, 풍화토 I, 풍화토 II, 풍화암 으로 이루어져있다. 성토지반의 자갈도상은 시공기면폭 8.0m, 도상아래폭 5.1m, 도상윗 폭 3.3m, 도상두께 0.3m, 비탈기울기 1:1.8의 2급선 기준을 적용하였다[1].

**Table 1** Physical properties of soil

	Height (m)	Unit weight (t/m <sup>3</sup> )	Elastic modulus (t/m <sup>2</sup> )	Poisson's ratio (ν)	Cohesion (t/m <sup>2</sup> )	Friction angle (°)	Permeability coefficient (m/sec)
Ballast stone	0.3	1.9	13,390	0.30	-	35	-
Upper roadbed	1.5	1.8	8,160	0.20	0.3	32	-
Lower roadbed	1.5	1.8	5,100	0.30	1.0	30	-
Land fill	1.5	1.7	3,000	0.35	0.5	24	1.0x10 <sup>-5</sup>
Silty clay	1.5	1.7	2,000	0.35	0.5	25	5.0x10 <sup>-6</sup>
Weathered soil I	15.0	1.9	7,500	0.33	1.0	30	1.0x10 <sup>-6</sup>
Weathered soil II	15.0	1.9	7,500	0.33	1.0	33	1.0x10 <sup>-6</sup>
Weathered rock	7.0	2.0	11,000	0.31	6.0	42	1.0x10 <sup>-7</sup>

**2.1.3 레일 및 PC침목 물성치**

수치해석에 적용한 레일의 물성은 Table 2와 같이 일반철도 주요 본선의 레일 중량화 이후 사용된 KS60 레일을 사용하였으며, Table 3에 나타나듯이 우레탄 재질의 TPU(Thermoplastic Poly Urethane) 레일패드 물성을 사용하였다. Table 4는 수치해석에 사용된 가장 일반적으로 사용되는 PC(Prestressed Concrete) 침목의 물성치를 나타내었다.

**Table 2** Physical properties of rail

	Area (mm <sup>2</sup> )	Unit weight (t/m <sup>3</sup> )	Elastic modulus (t/m <sup>2</sup> )	Moment of inertia(m <sup>4</sup> )	
				I <sub>XX</sub>	I <sub>YY</sub>
KS60 rail	7,741	7.75	21,000 × 10 <sup>3</sup>	30,820 × 10 <sup>-9</sup>	5,120 × 10 <sup>-9</sup>

**Table 3** Physical properties of rail pad

	Thickness (mm)	Unit weight (t/m <sup>3</sup> )	Vertical spring coefficient of rail pad (t/m <sup>2</sup> )
Rail pad	5	1.15	15.3 × 10 <sup>6</sup>

**Table 4** Physical properties of prestressed concrete sleeper

	Length (m)	Width (m)	Height (m)	Interval between sleepers (m)
PC sleeper	2.45	0.28	0.20	0.58

**2.1.4 도시철도 차량하중**

도시철도 차량하중을 Fig. 3과 같이 나타내었다. 차량하중은 도시철도 차량안전기준에 관한 규칙 제8조의 전동차 축중(P)인 16ton을 적용하였으며[2], 설계하중(Q)은 P/2이고 캔트부족에 따른 운중 증가율 20%를 고려한 유효하중(Q<sub>eff</sub>)은 설계하중의 1.2배로 산정하였다. 또한, 동적 충격률(i)을 고려한 동적하중(Q<sub>dyn</sub>)은 유효하중의 1.2배로 하여 수치해석을 수행하였다[3].



Fig. 3 Configuration of train load

## 2.2 노반 위험도 등급 산정 및 계측 방안 제시

### 2.2.1 노반 위험도 등급 산정

도시철도 인접지역에 발생한 공동 위치 및 크기, 지하수위에 따른 철도 노반 위험도 평가를 위하여 공동 직경은 2m에서 10m까지 2m씩 증가, 노반 중심과 공동 중심 간 이격거리는 16m에서 24m까지 2m씩 증가시켜 수치해석 모델링을 수행하였다. 지하수위는 지표면에서부터 하강, 노반 허용침하량을 만족할 때까지 수치해석을 수행하였다. 이격거리별 지하수위에 따른 노반 침하량과 위험도 등급을 Tables 5~9에 나타내었다. 위험도 등급은 노반 침하량이 2.5mm 이하(승차감 및 궤도 보수상 문제없음)의 경우는 안전, 노반 침하량이 2.5mm 초과 4.0mm 이하(궤도 보수상 문제없음)인 경우 주의, 4.0mm 초과 9.0mm 이하(안전성 한도의 노반 침하량)인 경우 경계, 침하량이 9.0mm 초과한 경우는 위험 등급으로 산정하였다[4]. 노반 중심과 공동 중심 간 이격거리가 가깝고, 공동의 직경이 커질수록 지하수위의 영향을 크게 받으며, 지하수위가 하강함에 따라 노반 침하량이 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다.

Table 5 Roadbed settlement and risk level associated with groundwater levels(mm) - 16m distance from the center of roadbed

		G.W.L							
		13m	12m	10m	8m	6m	4m	2m	Surface
Cavity width and depth	2m	-	-	2.4	3.7	7.2	16.2	131.0	153.0
	4m	-	2.2	3.1	5.6	16.5	39.0	143.0	161.0
	6m	2.2	3.0	5.3	24.1	58.9	121.0	160.0	168.0

※ **Safety** (Settlement ≤ 2.5), **Caution** (2.5 < Settlement ≤ 4.0), **Warning** (4.0 < Settlement ≤ 9.0), **Danger** (9.0 < Settlement)

Table 6 Roadbed settlement and risk level associated with groundwater levels(mm) - 18m distance from the center of roadbed

		G.W.L							
		13m	12m	11m	10m	8m	6m	4m	Surface
Cavity width and depth	4m	-	2.1	2.6	2.9	5.3	16.3	37.9	153.0
	6m	2.1	2.7	3.4	4.4	14.0	55.5	108.0	166.0

※ **Safety** (Settlement ≤ 2.5), **Caution** (2.5 < Settlement ≤ 4.0), **Warning** (4.0 < Settlement ≤ 9.0), **Danger** (9.0 < Settlement)

**Table 7** Roadbed settlement and risk level associated with groundwater levels(mm) - 20m distance from the center of roadbed

		G.W.L							Surface
		18m	14m	13m	11m	10m	8m	6m	
Cavity width and depth	4m	-	-	-	2.4	2.9	5.3	14.6	149.0
	6m	-	1.7	2.0	3.0	4.1	13.4	51.5	163.0
	8m	2.3	3.1	4.4	16.0	32.5	76.3	82.5	171.0

※ **Safety** (Settlement ≤ 2.5), **Caution** (2.5 < Settlement ≤ 4.0), **Warning** (4.0 < Settlement ≤ 9.0), **Danger** (9.0 < Settlement)

**Table 8** Roadbed settlement and risk level associated with groundwater levels(mm) - 22m distance from the center of roadbed

		G.W.L							Surface
		21m	20m	16m	14m	12m	10m	8m	
Cavity width and depth	8m	-	-	2.4	2.9	6.6	31.2	57.1	170.0
	10m	2.4	2.8	4.6	7.4	86.6	150.0	156.0	177.0

※ **Safety** (Settlement ≤ 2.5), **Caution** (2.5 < Settlement ≤ 4.0), **Warning** (4.0 < Settlement ≤ 9.0), **Danger** (9.0 < Settlement)

**Table 9** Roadbed settlement and risk level associated with groundwater levels(mm) - 24m distance from the center of roadbed

		G.W.L							Surface
		21m	20m	16m	14m	12m	10m	8m	
Cavity width and depth	8m	-	-	2.2	2.8	6.4	21.0	35.9	168.0
	10m	2.3	2.7	4.3	7.2	76.2	115.0	140.0	173.0

※ **Safety** (Settlement ≤ 2.5), **Caution** (2.5 < Settlement ≤ 4.0), **Warning** (4.0 < Settlement ≤ 9.0), **Danger** (9.0 < Settlement)

### 2.2.2 실시간 모니터링을 위한 최적의 계측 방안 제시

Fig. 4는 도시철도 인접지반에 발생한 공동 위치 및 크기, 지하수위에 따른 철도 노반 위험도 평가를 위한 수치해석 모델링을 나타낸 것이며, 이를 바탕으로 도시철도 인접지반의 공동 및 지하수위 변화를 고려하여 주변 지반에 설치되어야 할 계측기를 Fig. 5에 나타내었다. 계측기 개수 및 간격은 도시철도 인접지반 조건에 따라 유동적이다. 먼저, 공동 위치를 중심으로 광섬유 지표침하계를 노반 상부 중앙 및 좌·우측 끝지점에 설치하여 노반의 침하량을 측정, 허용 침하량과 비교·검토하며, 광섬유 지중경사계를 노반 하부 중앙 및 좌·우측 끝지점에 설치하여 주변 지반의 변형과 이완 영역을 파악한다. 또한, 지반 내 간극수압의 증감을 측정하기 위한 광섬유 간극수압계와 지하수위 변화를 측정하기 위한 지하수위계를 노반의 영향을 받지 않도록 노반 중심으로부터 충분한 이격거리의 원지반 상부에 설치한다.

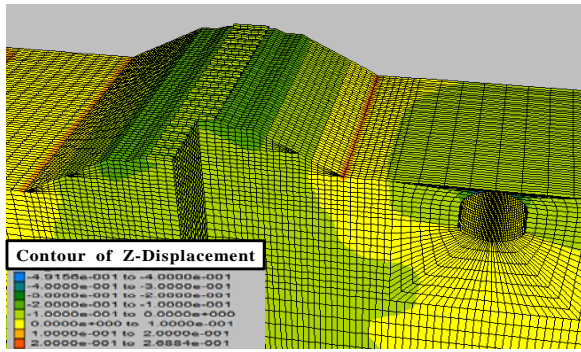


Fig. 4 Contour of railway roadbed and cavity

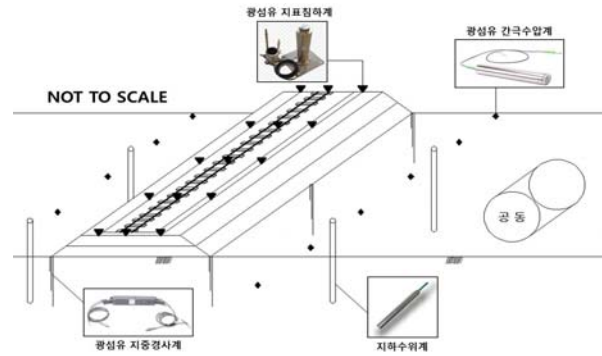


Fig. 5 Configuration of installation measuring instrument

### 3. 결론

본 연구에서는 삼차원 유한차분해석 프로그램인 FLAC3D를 이용하여 도시철도 인접지반 공동발생시 위치 및 크기, 지하수위에 따른 철도 노반 침하량을 산정하여 노반 위험도 등급 산정과 실시간 모니터링을 위한 도시철도 주변 최적의 계측 방안을 제시하였다. 지하수로 인한 노반 침하량이 매우 크게 발생하므로 위험 등급(노반 안전성 한도 침하량인 9.0mm 초과)으로 판정된 경우 열차 탈선 등 사고 발생이 우려되므로 즉시 도시철도 운영을 중지하고 적절한 보수 및 보강이 반드시 필요하다. 안전·주의·경계 등급으로 판정된 경우 노반 안전성 한도 침하량을 초과하지는 않았지만, 공동 위치 및 크기, 지하수위를 주기적으로 파악하는 등 관리를 소홀히 해서는 안 될 것으로 판단된다. 또한, 도시철도 주변 지반 실시간 계측 및 관리시스템 구축이 필요하며, 이를 통한 주변 지반의 안정성을 평가하고 사고 예방 또는 피해 발생시 적절한 대책 수립이 필요할 것이다.

### 후 기

본 연구는 미래창조과학부 및 국가과학기술연구회의 융합연구사업의 일환으로 수행하였음. [융합연구단-14-2-ETRI, 사물인터넷(IoT) 기반 도시 지하매설물 모니터링 및 관리시스템 기술 개발]

### 참고문헌

- [1] Suwon facility management office (2014) *Railway Ballast*, Suwon facility management office, KORAIL, pp. 1-12.
- [2] <http://www.law.go.kr/LSW/lsInfoP.do?lsiSeq=137691#0000> (Accessed 29 August 2016)
- [3] Department of urban infrastructure at Seoul metropolitan government (2012) Second stage working design service of track for Seoul subway line No.9, Seoul, Korea, pp. 99-188.
- [4] S.-S. Jeon, G.-Y. Eum, J.-M. Kim (2007) Evaluation of the Roadbed Behavior During Tilting-train Operation in Curved Track Using Numerical Analysis, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 23(6), pp. 115-126.