

# 지표면 유출 특성을 고려한 지하수위 변화가 지하차도 구조물 안정성에 미치는 영향

조선아<sup>1</sup> · 홍은수<sup>2</sup> · 조계춘<sup>3\*</sup> · 진규남<sup>4</sup> · 이정민<sup>5</sup> · 한신인<sup>6</sup>

<sup>1</sup>학생회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정

<sup>2</sup>정회원, 한국과학기술원, 건설 및 환경공학과 연구부교수

<sup>3</sup>정회원, 한국과학기술원, 건설 및 환경공학과 교수

<sup>4</sup>정회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 도시환경연구실, 연구위원

<sup>5</sup>비회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 도시환경연구실, 수석연구원

<sup>6</sup>정회원, 서영엔지니어링 기술연구소, 상무

## Effects of the ground water level on the stability of an underpass structure considering the degree of surface imperviousness

Seon-Ah Jo<sup>1</sup>, Eun-Soo Hong<sup>2</sup>, Gye-Chun Cho<sup>3\*</sup>, Kyu-Nam Jin<sup>4</sup>, Jung-Min Lee<sup>5</sup>, Shin-In, Han<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

<sup>2</sup>Member, Research Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

<sup>3</sup>Member, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

<sup>4</sup>Member, Senior research fellow, Land and Housing Institute, Korea Land and Housing Corporation

<sup>5</sup>Research fellow, Land and Housing Institute, Korea Land and Housing Corporation

<sup>6</sup>Member, Managing director, R&D Center, Seoyeong Engineering Co., Ltd.

**ABSTRACT:** Ground water is one of important parameters in the designs of underpass structures because urban areas are characterized by soil ground which is relatively permeable than rock ground and a high level of ground water due to low elevation. Therefore, it is important properly to predict variations of the ground water when they can affect underpass structures. In this study, a series of numerical analyses are performed to predict the variations of ground water levels considering the degree of surface imperviousness and LID(Low Impact Development) application. In turn the stability of underground structure is assessed using predicted ground water level. The results show that an increase in the impervious surface area decreases the ground water level. The application of permeable pavement as a LID facility increases the ground water level, improving the infiltration capacity of rainfall into the ground. Seasonal variations of the ground water level are also verified in numerical simulation. The results of this study suggest that reasonable designs of underpass structures can be obtained with the suitable prediction and application of the ground water level considering the surface characteristics.

**Keywords:** Underpass structure, Ground water, Buoyant force, Low impact development, Impervious surface

**초 록:** 도시지역에 시공되는 지하차도 구조물은 지리적 특성상 지하수위의 영향을 받기 쉽다. 그러나 지하차도 구조물 설계 시에는 일괄적인 지하수위를 적용하여 설계를 수행하는 경우가 많으며 이는 과소 또는 과다 설계를 초래할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 보다 신뢰도 높은 지하수위 예측을 통해 지하차도 구조물의 합리적인 부력설계 방향을 제시하고자한다. 특히, 최근 친환경적인 개발 개념인 LID 기법을 도입한 투수 포장 적용에 따른 물순환 특성 변화가 지하차도 구조물에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 검토하였다. 이를 위해 개발 전, 개발 후, 투수포장 적용에 의한 지표면 불투수 특성 변화가 침투량 및 지하수위 변화에 미치는 영향 분석과 지하차도 안정성을 검토하는 일련의 수치해석을 수행하였다. 해석결과 지표면의 변화가 지하수위 변화를 유발하고 지하 구조물 안정성에 영향을 줄 수 있음을 확인하였다. 따라서 지하차도 및 지하구조물의 최적 설계를 위해서는 지표면 유출 특성을 고려한 적절한 지하수위 예측 및 적용이 필요할 것으로 판단된다.

**주요어:** 지하차도, 지하수위, 부력, LID 기법, 지표면의 불투수율

\*Corresponding author: Gye-Chun Cho

E-mail: gyechun@kaist.ac.kr

Received January 8, 2016; Revised January 21, 2016;

Accepted January 26, 2016

Copyright ©2016, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

도시의 발전은 수리적 순환 체계에 많은 영향을 미쳤다. 과거 대부분 녹지였던 공간이 도로, 아파트, 건물 등으로 바뀌면서 침투가 불가능한 불투수면이 증가하였다. 또한 운동장, 공원 잔디밭 등 지표면의 인위적 변화는 다짐 및 압밀 등에 의해 결국 투수성을 감소시켜 지하수위를 저하시키고 빗물 유출을 증가시켰다(Slonecker et al., 2001; Otto et al., 2002). 지하수위 저하는 사회 및 환경적으로 지반침하, 도시홍수, 지하수 고갈 등 다양한 문제를 야기하고 있다.

불투수면 증가로 발생하는 문제를 해결하고자 국내 외에서는 이미 다양한 인식 변화 및 조치가 이루어지고 있다. 그 중에서도 2000년대에 들어 자연 물 순환 체계에 영향을 최소화하고 자연적인 수문특성(침투, 저류, 여과 등)을 이용하여 도시화 이전의 물순환 상태로 보존·유지하고자 하는 저영향개발(low impact development, LID)개념이 도입되었다(EPA, 2000). LID 기법을 활용한 기술은 다양하게 개발되고 있으며 가장 일반적인 기술로 옥상녹화, 빗물통, 생태저류지, 투수포장 등이 있다. 지금까지 LID 기법에 관한 연구는 저류, 침투, 여과 등을 고려한 수리수문학적 지식을 바탕으로 기술적용에 따른 유출특성 및 효과를 분석하거나 오염원의 처리 또는 저감 효과에 대한 내용이 주를 이루고 있다(Yi et al., 2001; Lee et al., 2006; Back et al., 2011). 반면 공학적 측면에서 지하수 함양에 따른 변화가 지하수위 및 지하구조물에 미치는 영향에 대한 연구는 간간히 이루어지거나 간과되는 경우가 많았다. 최근 들어 지표수와 지하수를 연계한 해석모델 개발이 수행되고 있기는 하나(DHI, 1999; Sophocleous et al., 2000; Kjelds and Storm, 2001; Kim et al., 2006; Kim et al., 2008) 여전히 수리수문학적 측면에서 고려되는 부분이 크다.

도시지역의 공간적 제약성을 고려할 때 지하구조물이 점차 증가하는 추세이며 얇은 지반의 경우 토사 및 절리가 많은 암반으로 구성되어 지하수에 의한

영향이 클 수밖에 없다. 지하수위 변화는 지하구조물의 안정성과 밀접한 연관이 있다. 즉, 지하수위 변화는 구조물에 작용하는 수압의 변화를 야기하여 구조물의 전도, 부상, 균열 등의 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 안정성 측면에서 LID 기술의 적용은 지하수위 변화를 고려한 계획 및 설계가 이루어져야하며 적절한 지하수 변화 예측을 통해 지하구조물의 설계가 수행되어야 한다.

이러한 점을 고려하고자 본 연구에서는 지표면의 유출특성(불투수율, 경사, 침투 특성) 및 LID 적용유무가 빗물침투에 미치는 영향을 파악하고 지하수위에 어떤 영향을 미치는지에 대해 수치 해석적으로 분석하였다. LID 기법으로 침투 및 저류기능을 가지는 투수포장을 고려하였으며 투수포장이 침투율 변화 및 지하수 흐름에 미치는 영향을 분석하였다. 지하구조물은 도시지역에 많은 지하차도 구조물중 일반적으로 부력에 취약한 것으로 알려진 U-type 구간에 대해 검토하였다(Jo et al., 2013). 최종적으로 지표면의 유출특성 및 LID 특성을 고려한 지하수위를 적용하여 수리-역학적 해석을 수행하고 지하차도 구조물의 안정성 측면에서 분석하였다.

## 2. 도시 유출모형과 지하수 유동 모델 및 역학모델의 연계해석

지표면 변화에 의한 침투량 예측 및 이로 인한 지하수 증가 또는 감소가 지하차도 구조물에 미치는 영향을 파악하기 위해 SWMM 5.0과 Visual MODFLOW, FLAC2D를 이용한 수치해석을 Fig. 1의 해석절차에 따라 수행하였다.

지표 특성 및 LID 적용에 따른 유출특성을 분석하기 위해 국내외적으로 도시지역 유출해석에 많이 적용되는 EPA의 SWMM 5.0을 이용하였다. SWMM 5.0 모형은 미국 EPA (environmental protection agency) 지원 하에 개발되어진 모형으로 도시유역 내 강우에 의해 발생하는 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및

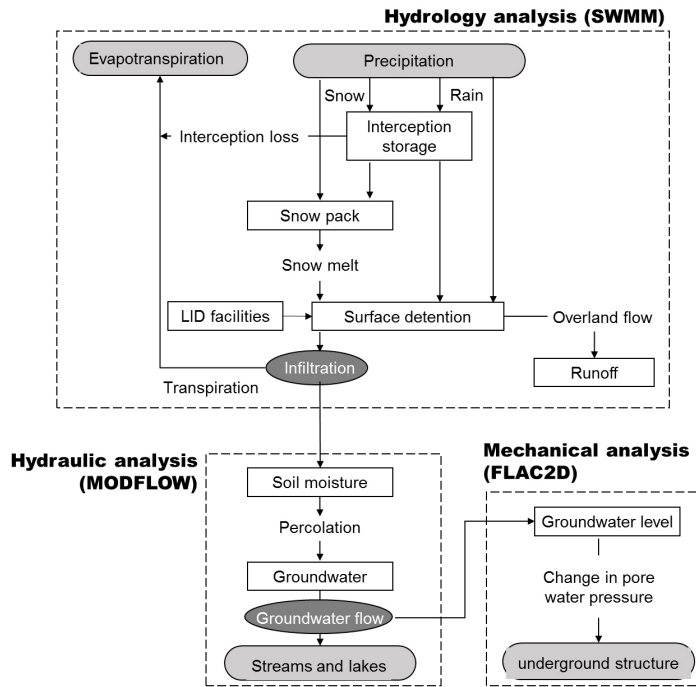


Fig. 1. Methodology of hydrologic-hydraulic-mechanical analysis

지표하 흐름, 배수관망에서의 유출량추적, 저류량 산정 등을 모의할 수 있는 모형이다. SWMM 모형에서 침투량 산정은 Horton방법, Green-Ampt 방법, SCS-CN방법으로 산정되며 본 연구에서는 SCS-CN방법을 이용하여 침투량을 예측하였다.

SWMM으로부터 도출된 침투량은 대상유역에 대해 시간단위로 분석가능하며 유역에 대해 평균값으로 나타난다. 이를 지하수 유동해석 모델인 Visual MODFLOW에 적용하여 부정류 해석을 통해 계절별 지하수의 변화를 분석하였다. MODFLOW는 가장 오래된 3차원 유한차분 지하수 유동 모형으로 여러 가지 수리지질학적 구조를 손쉽게 구현하여 지하수계를 모의하고 결과를 해석할 수 있어 널리 이용되고 있다.

유한차분모델인 FLAC2D를 이용하여 지하수위가 지하차도 구조물 안정성에 미치는 영향을 분석하였다. FLAC2D는 수리-역학적 흐름 해석이 가능하고 interface 기능이 있어 지반과 구조물의 거동분석에 용이한 특성을 가지고 있다.

### 3. 대상유역 및 해석 방법

#### 3.1 대상유역 현황

대상유역은 세종시에 위치한 ○○지하차도를 포함하는 주변 지역으로 수치지도의 등고선을 이용하여 능선(분수령)을 따라 Fig. 2와 같이 2개의 소유역으로 구분하였다. 지하차도는 소유역 B에 위치하나 유출해석 모형(SWMM)의 검토정 시 비교 검토할 실측 유량을 측정할 수 있는 하천이 없기 때문에 용호천을 포함하는 소유역 A를 해석유역으로 포함시켰다. 용호천은 소유역 A의 중심부에서 동서방향으로 흐르고 있으며 유역의 남쪽으로는 미호천이 위치하고 있다.

소유역 B에 위치한 지하차도는 Fig. 3과 같으며 256 m의 Box-type과 344 m의 U-type으로 구성되어 있다. 종방향 위치별 지하수위를 검토하기 위해 몇 개의 구간으로 구분하였으며, 16번 위치에서 지하차도의 구조적 안정성 해석을 수행하였다.

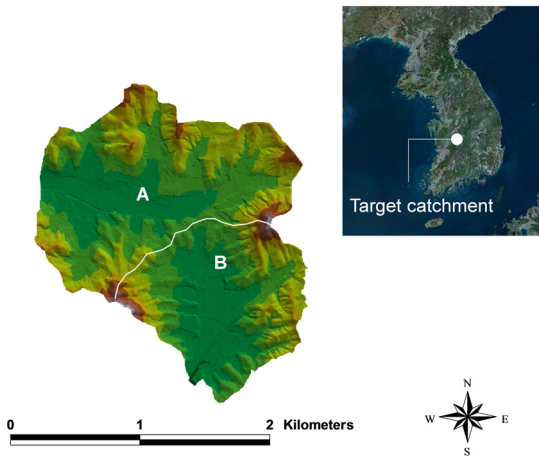


Fig. 2. Subbasins in target catchment

### 3.2 수문기상자료

SWMM 및 MODFLOW 해석 시 모의 결과의 안정화를 위해 충분한 모의기간이 필요하다. 따라서 수문기상자료는 대상유역과 가장 근거리에서 있고 비교적 관측개시일이 오래된 청주기상청의 1967년부터 2014년까지의 자료를 이용하였다. 해석에 적용된 자료는 강우량과 증발량이며 시계열 자료로 입력하여 유출모의를 하였다.

### 3.3 대상지역의 수문학적 특성 및 입력자료

SWMM 모형의 입력자료는 크게 물리적 매개변수와 수문학적 매개변수로 구분된다. 물리적 매개변수는 소유역의 면적, 유역의 평균경사, 불투수지역의

면적 등 소유역 관련 매개변수와 하도 및 관망과 관련된 배수체계 매개변수로 세분할 수 있고 대부분 지형도, 항공사진, 관망도 등을 통해 추정 가능하다. 수문학적 매개변수는 투수 및 불투수유역의 Manning 조도계수와 하도 및 관망의 Manning 조도계수, 지표면 저류, 침투관련 매개변수, 유역 폭 등이 포함된다.

물리적 매개변수를 추정하기 위해 GIS (geographic information system) 분석 프로그램인 Arcview 3.3을 이용하였다. 1:25,000 축척의 수치지도를 이용하여 수치표고모델(digital elevation model, DEM)을 10 m 정방형의 격자 크기로 가공하여 표고와 경사도 분석을 수행하였으며 결과는 Fig. 4와 같다. 분석결과 대상유역의 평균고도는 E.L. 50.2 m, 평균경사는 8.8°로 낮고 완만한 경사를 보였다. 수문학적 매개변수로 유출 및 침투 특성을 결정하는 CN값은 토양도와 토지이용도의 분석을 통해 추정 가능하다. Fig. 5(a), (b)는 분석에 이용된 개발전 토양도와 토지이용도이다. 일반적으로 LID 기법 적용에 따른 유출특성을 고려하기 위해서는 개발 후 지표특성을 고려하여 CN값을 산정해야 한다. 그러나 대상유역은 아직 개발계획 단계이며 따라서 개발 후 토지이용도 대신 개발 계획도를 이용하여 개발 후 CN값을 유추하였다. 도출된 개발 후 CN값은 93이다.

그 외 수문학적 매개변수인 유역의 Manning 조도계수 및 저류깊이는 기존문헌을 참조하여 결정하였다 (Tholin and Keifer, 1960; McCuen et al., 1996). 최종적으로 해석에 반영된 매개변수는 Table 1과 같다. 한편, LID 기법 적용에 따른 유출특성을 분석하기

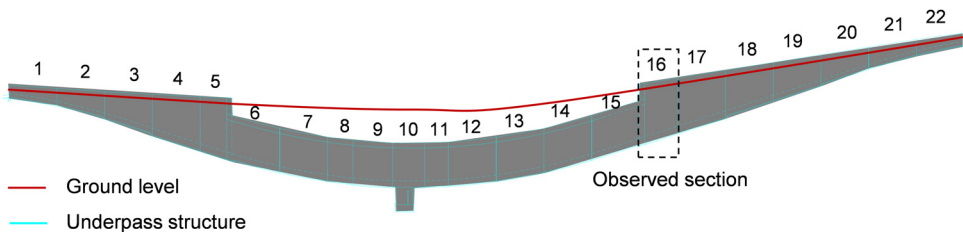


Fig. 3. Underpass structure in longitudinal direction

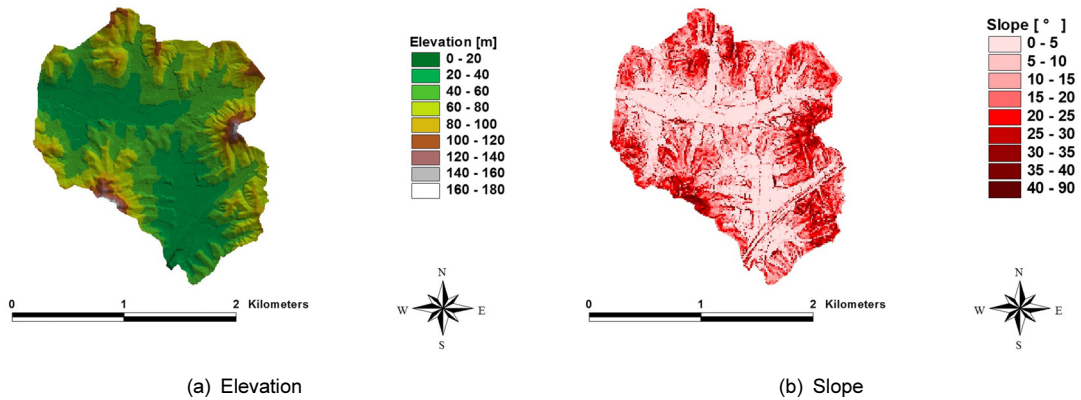


Fig. 4. Results of geological analysis

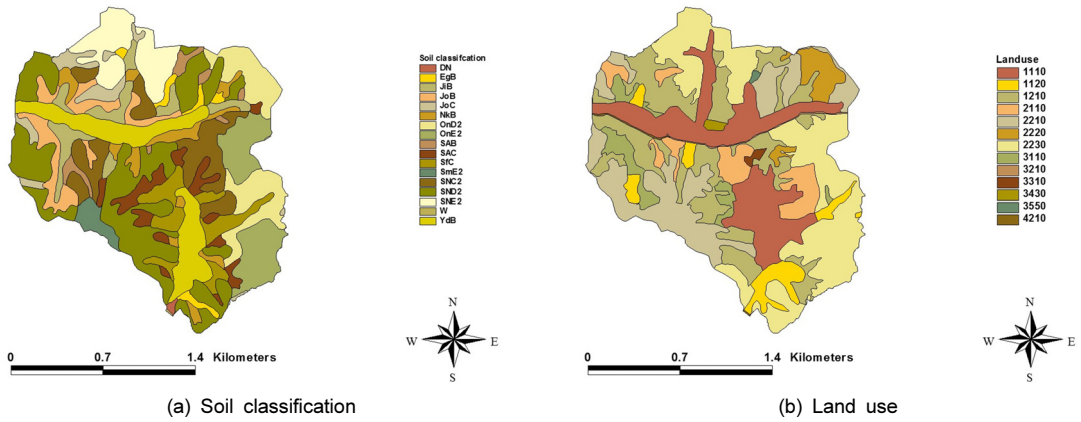


Fig. 5. Soil and land use map of catchment

위해 대상구역 내 투수포장을 적용하였다. 대상구역에서 차지하는 교통시설(보도, 차도, 주차장 등) 면적에 대한 투수포장 비율을 대체율이라고 정의하고 대체율 100%에 대해 해석을 수행하였다.

### 3.4 수리·지질 입력 자료

지하수 유동 해석을 위해서는 지층구조, 수리전도도, 저류계수 등의 수리특성 자료가 필요하다. 토질조사 결과로부터 대상구역의 지층분포는 Table 2와 같

Table 1. Input parameters of catchment for hydrology analysis

Catchment No.	Area (ha)	Width (m)	Impervious area (%)	Slope (%)	Manning roughness coefficient		Detention depth (mm)		Curve Number		
					Impervious	Pervious	Impervious	Pervious	AMC-II	AMC-I	AMC-III
A	152.4	1235	6.46	15.8	0.012	0.30	1.6	6.4	62.15	40.81	79.06
B (Pre-development)	107.9	1039	3.23	15.1	0.012	0.30	1.6	6.4	65.64	44.52	81.46
B (Post-development)	107.9	1039	49.9	15.1	0.012	0.3	1.6	6.4	84.6	70.22	93.06

**Table 2.** Soil strata of target catchment

No.	Surface soil (earth fill) (m)			Sedimentary soil (m)			Weathered soil (m)	Total depth (m)
	Clay (or silt)	Sand	Gravel	Clay (or silt)	Sand	Gravel		
SB2-4	-	0.4	-	1.5	1.1	-	6.0	9.0
SB2-5	-	0.4	-	-	2.7	-	4.5	7.6
SB2-6	-	0.3	-	-	1.2	-	4.5	6.0
SB2-7	-	0.3	-	-	-	-	4.7	5.0
UB51-11	-	-	-	-	4.3	-	3.7	8.0
UB51-12	-	-	-	-	1.8	-	3.2	5.0
UB52-01	0.7	-	-	0.7	1.5	-	4.1	7.0
UB52-02	-	-	-	-	2.8	-	7.2	10.0

다. 표토 및 매립층이 조사지점에서 약 0.3~0.7 m, 퇴적층이 1.2~4.3 m, 풍화토층이 3.2~7.2 m의 분포를 보이며 그 이하는 기반암이 위치한 것으로 조사되었다. 지하수 유동 모델의 영역은 가로 1,800 m, 세로 1,800 m로 지하수 분수령이 유역의 경계와 같다고 가정하였다. 모델 격자 한 개의 크기는 5 m × 5 m~10 m × 10 m이며 주요 관측위치인 지하차도 주변은 조밀하게 격자를 구성하였다.

수리전도도와 대수층의 저류계수는 충청남도 연기 지역 지하수 기초조사자료 및 문헌자료를 참고하여 공간 분포시켰다. 모델에 입력된 수리전도도는 지층에 따라  $1 \times 10^{-4} \sim 5.4 \times 10^{-6}$  cm/sec로 분포시켰다. Table 3은 지하수 유동 모델에 적용된 입력자료이다.

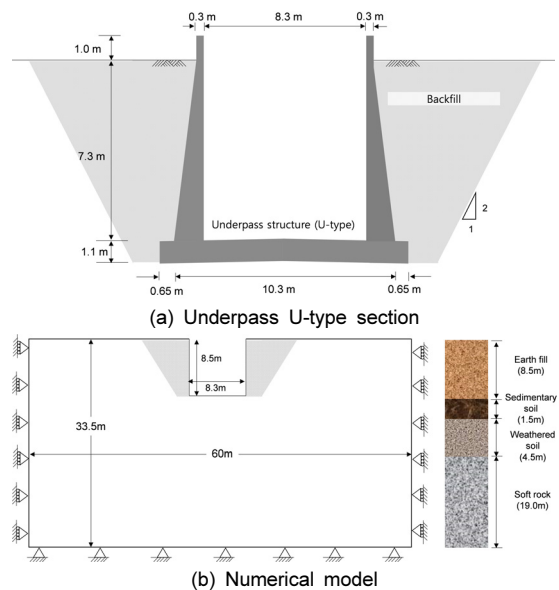
### 3.5 수리-역학적 해석 자료

지표면 특성에 따른 지하수위 변화가 지하차도에 미치는 영향을 분석하기 위해 FLAC2D를 이용하여

**Table 3.** Input parameters for ground water flow model (MODFLOW)

Parameters	Values
Hydraulic conductivity (cm/s)	$1.0 \times 10^{-4} \sim 5.4 \times 10^{-6}$
Specific yield ( $m^{-1}$ )	$0.0009 \sim 3.3 \times 10^{-6}$
Specific storage	0.001 ~ 0.16
effective porosity	0.02 ~ 0.15
Total porosity	0.2 ~ 0.3

수리-역학적 해석을 수행하였다. 해석 대상 지하차도 단면은 Box-type 구간과 접하는 U-type B 구간이다 (Fig. 3의 16번 위치). 검토단면은 Fig. 6(a)와 같으며 지하차도 옹벽의 높이는 약 9.3 m, 폭은 8.3 m이다. 모델 영역은 Fig. 6(b)와 같고 경계부분의 영향을 줄이기 위해 가로, 세로 모두 지하차도 폭과 높이의 3배 크기로 모델링하였다. 좌우 경계는 x방향 변위를 구속하고 모델바닥에서 y방향 변위를 구속하여 반무한 영역으로 가정하고 해석을 수행하였다. 이때, 지하차



**Fig. 6.** Schematic diagram of an underpass structure for mechanical analysis

**Table 4.** Input parameters for hydraulic-mechanical analysis (FLAC2D)

Ground properties	Earth fill	Sedimentary soil	Weathered soil	Hard rock	Backfill	Concrete
Model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Elastic
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1700	1700	1710	2500	1700	2548
Young's modulus (MPa)	10.0	8.3	20.8	4000.0	10.0	266,810
Poisson's ratio	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.2
Cohesion (kN/m <sup>2</sup> )	20.0	0.0	0.0	1500.0	20.0	-
Friction (°)	35.0	25.0	30.0	40.0	35.0	-
Porosity	0.3	0.4	0.4	0.2	0.3	-
Permeability (m/s)	1.0 × 10 <sup>-7</sup>	5.0 × 10 <sup>-6</sup>	5.0 × 10 <sup>-6</sup>	1.0 × 10 <sup>-10</sup>	1.0 × 10 <sup>-7</sup>	1.0 × 10 <sup>-12</sup>

도와 지반사이에 interface 요소를 도입하여 실제 지반과 구조물사이의 특성을 반영하고자 하였으며 interface 요소의 물성은 Lee (2000)의 연구를 참고하여 결정하였다. 해석모델에서 지반은 모어쿨롱 모델 (Mohr-Coulomb model)을 적용하였으며 지하차도 구조물은 탄성모델(elastic model)로 가정하였다. Table 4는 수리-역학 해석 모델에 적용된 입력자료이다.

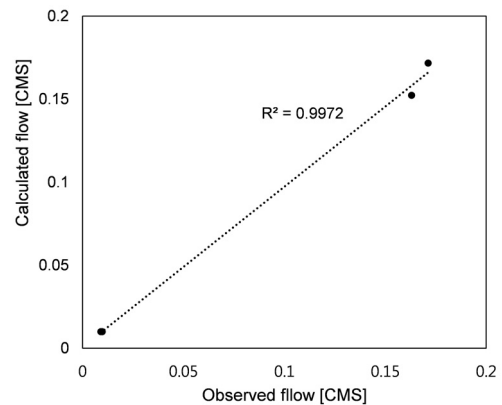
## 4. 해석 결과

### 4.1 지하수 함양량 결정을 위한 유출모의 결과 분석

유출모의를 통해 지하수 유동해석에 필요한 침투량을 예측하기 위해서는 먼저 모형의 검보정이 필요하다. 보정은 소유역 A에 위치한 용호천에서 2014년 10월 16~20일 동안 총 4번에 걸쳐 계측한 유량을 이용하여 수행하였으며, Fig. 7은 이를 이용한 보정 결과이다. 측정된 유량과 예측된 유량의 오차는 -6.6%~10.0%정도로 모형 보정이 비교적 양호하게 되었음을 확인하였다.

보정된 모형을 이용하여 모의기간 동안 장기유출모의를 수행하였다. 장기유출모의는 지표면 특성에 따라 개발 전, 개발 후, 투수포장 적용 등 3가지 조건을 적용하여 수행하였다. 분석결과는 시계열 단위로 도출되며 Fig. 8는 연강우량이 가장 큰 2011년도 강우량

에 대한 개발 전 유출모의 결과이다. 1967년부터 2014년 모의기간 동안 도출된 결과를 계절별로 평균하여 분석하였으며 이 결과는 Table 5와 같다. 개발 전 유출모의 결과를 계절별로 비교하였을 때 여름철인 3분기에 강우량이 가장 크게 나타났으며 침투 및 유출량도 많았다. 한편, 강우에 대한 침투 비율을 비교했을 때 건기에 가까운 1, 4분기가 가장 크게 나타났다. 그러나 침투된 빗물이 지하수에 함양되는 양은 여름철인 3분기에 77.8%로 가장 많았으며 이러한 결과는 토양의 불포화 특성에 의한 영향으로 토양이 완전히 포화되어 지하수에 도달하기까지는 충분한 양의 침투가 필요함을 의미한다. 개발 후 유출모의 결과 강우 침투량이 개발 전에 비해 약 절반가량 감소한 반면 유출량은 최대 5배(1분기) 증가하였다. 이러한 결과는



**Fig. 7.** Calibration of SWMM

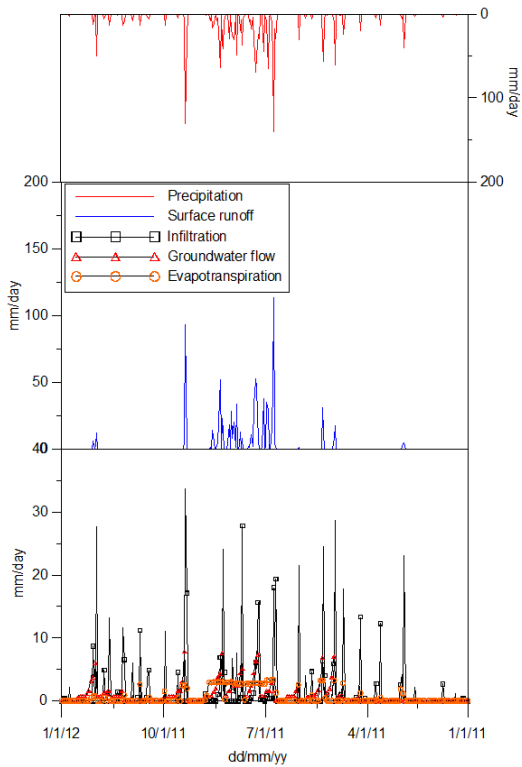


Fig. 8. SWMM results (2011)

개발 전 대부분 침투되던 낮은 강도의 강우가 개발 후 불투수면 증가에 따라 유출되기 때문으로 보인다. 한편, 투수포장의 적용으로 침투량이 개발 후 보다

약 22%정도 증가하였으며 유출량은 7% 감소하는 것으로 나타나 LID 기법 적용에 따른 지하수위 변화 가능성을 확인하였다.

SWMM을 이용한 유출모의 결과에서 도출된 침투량을 지하수 유동 모델의 함양량 입력 자료로 활용하였다. 침투량은 월단위로 분석하여 12개의 값으로 정리하였다.

#### 4.2 지표면 특성을 고려한 지하수 흐름 해석

지표 특성을 고려한 지하수 유동 해석을 수행하였다. 지하수 유동 모델의 보정은 불확실한 입력치에 대해 실측 지하수위와 모델에서 계산한 지하수위를 비교분석하는 것으로 계산수위가 관측수위에 합리적으로 접근할 때까지 시행착오법에 의해 대수성 수리 특성 값들을 변화시키면서 수행한다. 보정에 활용된 관측 지하수위는 대상구역의 지하차도 주변에서 수행된 기초조사 자료를 이용하였으며 이는 Table 6과 같다. Fig. 9는 모형보정 결과이며 보정결과에 대한 상관계수는 0.996으로 비교적 합리적으로 이루어졌다고 판단된다. Fig. 10은 정류보정 후 지하수위 분포를 나타낸 것이다. 지하수위는 대상구역의 등고선과 유사한 형태를 보였다. 즉, 산지부에서는 지하수위가

Table 5. Seasonal results of hydrology

(Unit: mm<sup>3</sup>/month)

Condition	season	Rainfall	Infiltration	Evaporation	Ground water flow	Runoff
Pre-development	1st quarter	70.9	54.2	8.8	23.0	5.8
	2nd quarter	313.7	178.2	38.8	63.1	84.9
	3rd quarter	694.7	262.9	76.0	204.7	342.0
	4th quarter	104.1	73.1	11.9	33.9	16.8
Post-development	1st quarter	70.9	26.6	11.1	13.3	33.5
	2nd quarter	313.7	84.2	37.9	27.4	186.2
	3rd quarter	694.7	119.9	64.2	89.4	508.6
	4th quarter	104.1	35.1	14.4	19.9	54.3
LID application	1st quarter	70.9	29.8	10.6	12.8	30.8
	2nd quarter	313.7	99.2	36.2	30.6	172.5
	3rd quarter	694.7	156.5	61.3	91.3	474.6
	4th quarter	104.1	39.9	13.8	21.0	50.2



**Table 6.** Observed ground water level

No.	Ground elevation E.L.(+m)	Ground water level G.L.(-)m	Ground water elevation E.L.(+m)
SB2-4	25.24	4.40	20.84
SB2-5	25.37	1.10	24.27
SB2-6	30.82	1.00	29.82
SB2-7	39.18	0.50	38.68
UB51-11	38.00	3.1	34.90
UB51-12	30.30	1.10	29.20
UB52-01	25.31	0.9	24.41
UB52-02	25.75	0.7	25.05

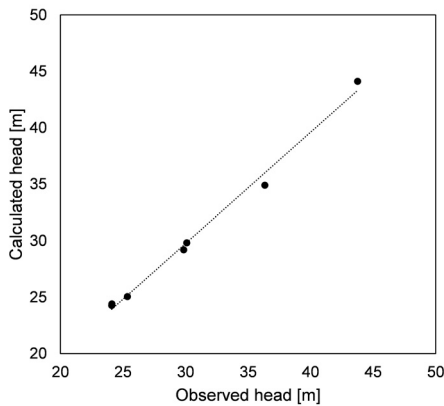
높고 평지 및 하천 주변에서는 하천 수위에 수렴하는 양상을 보였다.

지하수위의 계절적 변화를 분석하기 위해 부정류 (Transient flow) 해석을 수행하였다. 지하수위는 Fig. 3을 고려하여 지하차도 종방향 위치별로 분석하였다. Fig. 11은 개발 전 조건에 대한 해석 결과로 1분기(1~3월)와 3분기(7~9월) 결과를 비교한 것이다. 유역의 평지부에 위치하는 지하차도 U-type A구간과 Box-type 구간은 계절적인 변화가 크지 않았다. 반면, 산지부에 위치하는 U-type B 구간에서는 1분기와 3분기에 최대 7 m의 지하수위 차이를 보이는 것을 확인하였다. 이는 농경지와 산지의 침투성 차이에서 기인한 것으로 USDA(1986)에 의하면 산지의 유출계수가 농경지

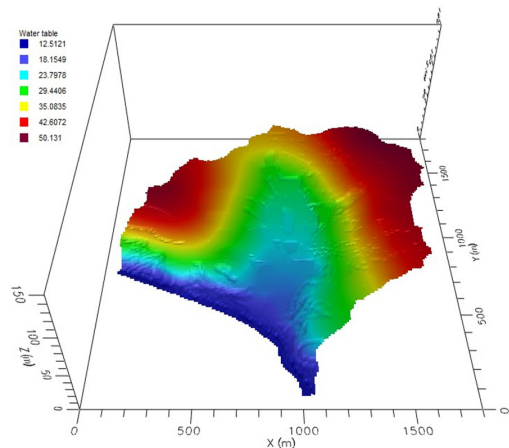
유출계수보다 낮다고 보고된다. 그러므로 산지에 비해 침투성이 낮은 농경지의 경우 계절적 영향이 더 적을 것으로 유추할 수 있다. 3분기에 지하차도 U-type B 구간과 Box-type 구간의 지하차도 바닥은 지하수위 보다 낮은 것으로 나타났다.

Fig. 12는 여름철 지하차도 주변 지하수위 분포를 지표면 특성에 따라 비교 도시한 결과이다. 개발 후 지표면의 불투수율이 증가함에 따라 U-type B 구간에서 지하수위가 크게 감소하는 것으로 나타났다. 또한 LID 투수포장을 적용할 경우 지하수위가 최대 1.0 m정도 증가하는 것을 확인하였다.

지하수 유동 해석 결과를 바탕으로 지하차도에 영향이 가장 클 것으로 보이는 개발 전 여름철 지하수위



**Fig. 9.** Calibration of the ground water model for the target catchment



**Fig. 10.** Distribution of the ground water table at steady-state flow conditions

를 적용하여 부력에 가장 취약할 것으로 보이는 지하차도 U-type B 구간에 대해 부력 안정성 평가를 수행하였다. 지하차도 Box-type 구간도 지하수위보다 낮은 것으로 나타났으나 일반적으로 자중 및 토피에 의한 부력 저항성이 커 안정성 해석에서는 제외하였다.

나타낸 것이다. 해석 결과 극한 지하수위 조건인 G.L. -1 m를 적용할 경우 지하차도 하부 양 끝단부분에서 소성영역이 확인되었다. 이는 부력에 의한 지하차도 부상이 원인으로 판단된다. 그러나 설계 및 해석 지하수위 조건에서는 지반굴착 시 발생한 소성변형을 제

### 4.3 지하수에 의한 부력 안정성 해석 결과

지하수위 변화에 따른 지하차도와 주변지반의 거동 및 지하차도 구조물의 안정성을 분석하였다. 이때 지하수위는 대상 지하차도 설계 시 설계 지하수위인 G.L. -4.0 m와 해석에서 도출된 지하수위 G.L. -5.0 m를 적용하였다. 또한 극한 지하수위 조건을 고려하여 G.L. -1 m에 대해서도 해석을 수행하였다.

Fig. 13은 지하차도 주변 지반의 소성변형 양상을

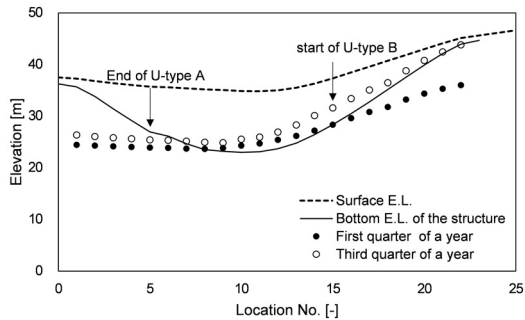


Fig. 11. Seasonal ground water variations along the longitudinal positions of the underpass structure (pre-development condition)

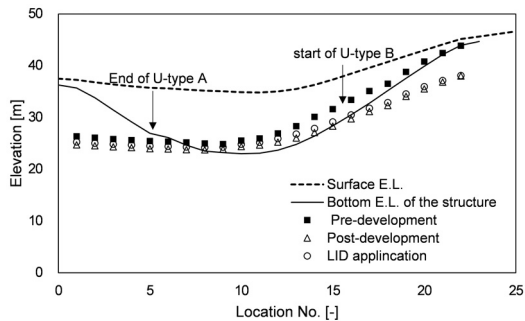


Fig. 12. Ground water variations along the longitudinal positions of the underpass structure with surface conditions

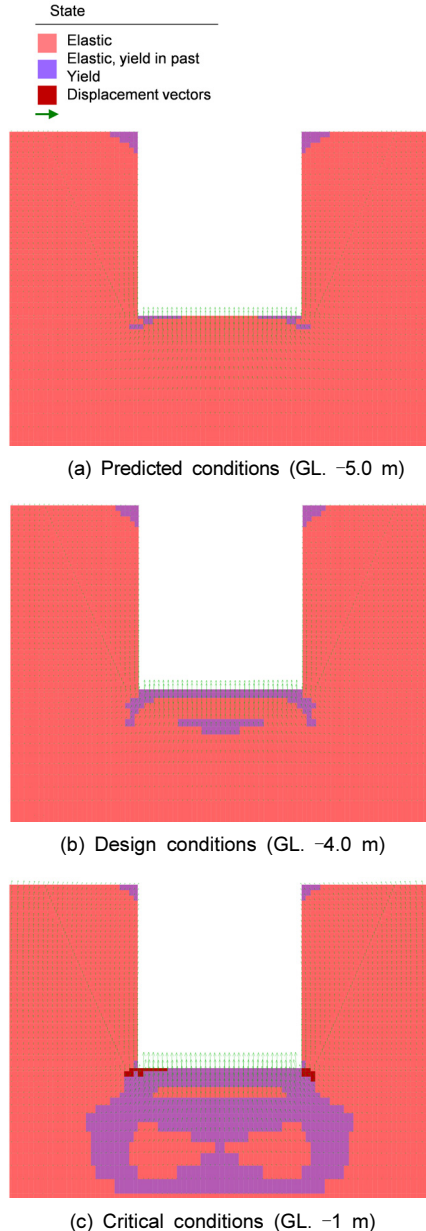


Fig. 13. Yield state of ground with groundwater level conditions

외하고 지하차도 시공 후 지반 변형은 없는 것으로 나타났다.

지반의 변형과 간극수압의 변화는 구조물에 작용하는 응력 변화를 가져와 구조물 안정성에 영향을 미치게 된다. 따라서 지하수위 변화에 따른 응력변화를 반영한 구조물의 안정성을 휨 모멘트 및 전단력 측면에서 설계 및 해석결과를 비교 분석하였다. Fig. 14는 극한 지하수위 조건(G.L. -1 m)에서 지하차도에 작용하는 휨모멘트 및 전단력 분포이다. 지하차도 바닥 및 벽체 하부에서 약 1,262 kN·m의 모멘트가 발생하였으나 설계 모멘트인 1,688.13 kN·m보다 작았으며 전단력 역시 설계 전단력인 990.6 kN(벽체 하부)보다 작은 464.3 kN으로 안정한 것으로 나타났다.

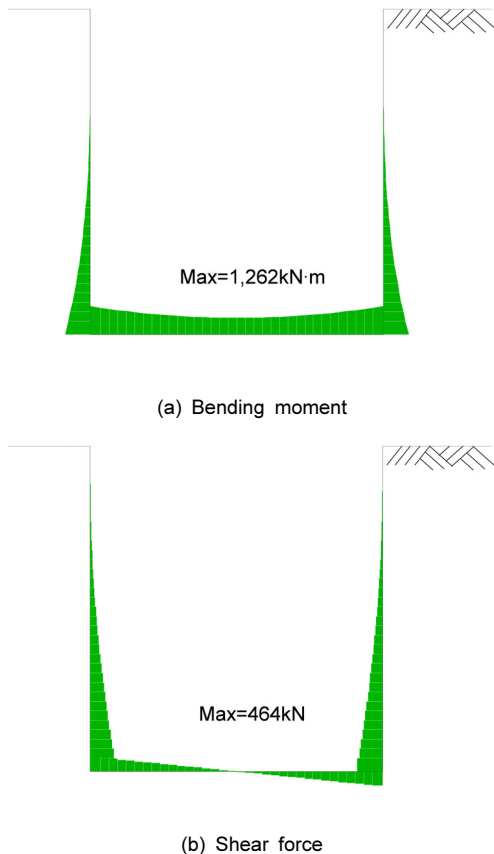


Fig. 14. Moment and shear force along the structure

## 5. 분석 및 고찰

도시지역에 시공되는 지하차도 구조물은 토질 및 지리적 특성상 지하수위의 영향을 받기 쉽다. 그러나 지하차도 구조물 설계 시에는 이러한 특성 고려 없이 일반적인 기준에 의해 설계를 수행하는 경우가 많으며 이는 지나치게 안전측 설계라는 비판이 나오기도 한다.

본 연구에서 수행한 일련의 해석과정으로부터 도출된 연구결과는 지표면의 변화가 지하수위 변화를 유발하고 지하 구조물 안정성에 영향을 줄 수 있음을 시사하고 있다. 즉, 개발 전과 개발 후의 지표면의 불투수 특성(포장면 증가 또는 LID 시설 적용 등)의 차이가 지하수위의 변화에 큰 영향을 미치며 일반적인 설계에서 적용되는 지하수위 기준을 적용할 경우 보수적인 설계가 될 수 있음을 확인하였다. 따라서 지하차도의 최적 설계를 위해서는 지표특성을 고려한 적절한 지하수위 예측 및 적용이 필요할 것으로 판단된다.

그러나 본 연구는 매우 제한적이고 단순화된 해석 조건에서 수행된 해석결과이며 이를 모든 지하차도 대상에 일반화시키기에는 무리가 있다. 특히, 각각의 해석과정에서 적용된 가정이나 모델링의 단순화에서 오는 해석 결과의 불확실성은 앞으로 극복해야 할 한계이다. 따라서 설계에 적용을 위해서는 다양한 매개 변수들에 대한 민감도 분석을 통해 주요 매개변수를 도출하고 수문-수리역학 통합모델의 개발을 통해 결과의 신뢰도를 높이는 연구가 필수적으로 수행되어야 한다. 특히, 본 연구에서 간과되고 있는 강우특성(강우 강도, 강우지속시간), 불포화 특성을 고려한 침투 및 습윤대(wetting zone)가 지하 구조물에 미치는 영향 등 향후, 보다 면밀한 연구가 필요할 것으로 보인다.

## 6. 결론

본 연구는 지하차도를 포함한 지하구조물의 최적

설계를 지향하는 연구의 일환으로 지표면의 불투수 특성이 지하수위에 미치는 영향과 이에 따른 지하차도 구조물의 부력설계 방향을 제시하고자 수행하였다. 특히, 최근 친환경적인 개발 개념인 LID 기법 도입으로 물순환 특성이 바뀌고 있으며 이러한 변화가 지하차도 구조물에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서도 검토하였다. 본 연구를 통해 최종적으로 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 개발 전, 개발 후, 그리고 LID 기법 도입에 따른 지표면 변화가 지하침투에 미치는 영향을 도시유출모형인 SWMM 5.0을 이용하여 분석하였다. 개발 전과 개발 후의 해석결과를 비교하였을 때, 개발 후 지표면의 유출 증가 및 침투 저하 경향이 뚜렷하게 나타났다. 반면, LID 기법인 투수포장을 적용할 경우 지표 유출이 감소하고 침투량이 증가하는 결과를 확인하였다. 이를 반영한 지하수 유동 해석을 위해 입력 자료로 침투량을 적용하였다.
2. Visual MODFLOW를 이용하여 지하수 유동 해석을 수행하고 이로부터 대상 지하차도 주변 지하수위 변화를 관찰하였다. 강우 침투량이 높은 개발 전 조건일 때 지하수위가 가장 높게 형성되는 것을 확인하였으며 계절적으로 뚜렷한 지하수위 변화를 관찰하였다. 반면, 개발 후 조건에서는 전반적으로 지하수위가 개발 전에 비해 감소하였으며 계절적 변화도 크지 않았다. 이는 대상유역에 불투수면이 증가하면서 침투를 저해하여 여름철 강우의 많은 부분이 유출되기 때문으로 해석할 수 있다.
3. 지하수위 변화가 구조적 안정성에 미치는 영향을 FLAC2D를 이용하여 분석하였다. 지하차도의 안정성 측면에서 가장 불리한 조건인 개발 전 여름철 지하수위를 적용하여 해석을 수행하여 본 결과, 극한 지하수위 조건(GL, -1 m)을 제외하고 안정성에 영향이 없는 것을 확인하였다. LID 적용에 따른 지하수 상승을 고려하더라도 본 대상 지하차도는 매우 안전측 설계가 된 것으로 볼 수 있다.

4. 본 연구를 통해 지표면의 불투수 특성 변화가 지하수위 및 지하차도 안정성에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 그러나 본 연구는 매우 제한적인 해석 조건에서 수행된 것으로 결과를 일반화시키기에는 한계가 있으며 이는 보다 다양한 조건을 고려한 결과 비교 및 해석의 보완을 통해 해결해야 할 것으로 보인다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 물관리연구사업인 ‘건전한 도시물순환인프라의 저영향개발(LID) 및 구축운영 기술’ 과제(12기술혁신C04)와 토지주택연구원의 지원 하에 이루어졌습니다. 이에 도움을 주신 관계자분들께 심심한 감사를 드립니다.

## References

1. Back, R.S., Ha, K.C., Lee, Y.U., Hong, S.C., Kim, M.H., Kim, M.M., Pack, D.H. (2011), “Determine capacity of the nonpoint source pollution storage facilities in urban areas by SWMM”, Journal of Korean Society of Urban Environment, Vol. 11, No. 1, pp. 73-80.
2. Danish Hydraulic Institute (1999), “MIKE SHE water movement user manual”. DHI software, Copenhagen.
3. Environmental Protection Agency (2000), Low impact development (LID)-A literature review, EPA-841-B-00-005, Washington DC.
4. Jo, S.A., Jin, K.N., Sim, Y.J., Cho, G.C. (2013), “Applicability examinations of induced drainage system for reduction of uplift pressure in underpass structures: Numerical study”, Journal of Korean Tunnelling Underground Space Association, Vol. 15, No. 20, pp. 123-134.
5. Kim, N.W., Chung, I.M., Won, Y.S. (2006), “An integrated surface water-groundwater modeling by using fully combined SWAT-MODFLOW

- model”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26. No. 5B, pp. 481-488.
6. Kim, N.W., Chung, I.M., Won, Y.S., Arnold, J.G. (2008), “Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model”, *Journal of Hydrology*, Vol. 356, No. 1-2, pp. 1-16.
  7. Kjelds, J. and Storm, B. (2001), “Integrated water resources modeling, water use, and water quality simulation”, *Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress, ASCE*, pp. 10.
  8. Lee, J.M., Lee, S.H., Lee, K.S. (2006), “A modification of SWMM to simulate permeable pavement, and the effect analysis on a release of treated wastewater and the permeable pavement”, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 2, pp. 109-120.
  9. Lee, S.D. (2000), “Earth pressure on the underground box structure”, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 16, No. 1, pp. 243-250.
  10. McCuen, R.H., Johnson, P.A., Ragan, R.M. (1996), *Hydrology, FHWA-SA-96-067, Federal Highway Administration, Washington, DC*.
  11. Otto, B., Ransel, K., Todd, J., Lovaas, D., Stutzman, H., Bailey, J. (2002), “Paving our way to water shortages: how sprawl aggravates the effects of drought”, *American Rivers, Natural Resources Defense Council, Smart Growth America, Washington, D.C.*
  12. Slonecker, E.T., Jennings, D.B., Garofalo, D. (2001), “Remote sensing of impervious surfaces: a review”, *Remote Sensing Reviews*, Vol. 20, No. 3, pp. 227-255.
  13. Sophocleous, M. S., Perkins, S.P. (2000), “Methodology and application of combined watershed and ground-water models in Kansas”, *Journal of Hydrology*, Vol. 236, pp. 185-201.
  14. Tholin, A.L., Keifer, C.J. (1960), “Hydrology of urban runoff”, *Transactions, American Society of Civil Engineers*, Vol. 123, pp. 1308-1379.
  15. United States Department of Agriculture (1968), *Urban hydrology for small watershed, Technical Release 55 (TR-55) (Second ed.)*. Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division.
  16. Yi, J.Y., Yeo, W.G., Shim, J.H., Kang, T.H. (2001), “Analysis of stormwater runoff reduction effects by using porous pavement”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 21, No. 6A, pp. 645-654.