

지하수위 변화에 따른 지반함몰 영향연구

Influence Ground Sinking with Variation of Ground Water Level

김숙자^{a,1}, 정관수^{a,2,*}

Suk-Ja Kim^{a,1}, Kwan-Sue Jung^{a,2,*}

^aDept. of Civil Engineering, College of Eng., Chungnam National Univ, Daejeon 34134, Republic of Korea

ABSTRACT

Purpose: Recently, the ground subsidence has caused social problem, because it occurred life and economic damage.

Method: Ground subsidence is different from a sink hole. Ground subsidence occurred cavities from loss of by groundwater flow, surface layer is collapsed due to relaxation and expansion.

Results: According to the survey, the caused of ground subsidence are classified as ground cavities, surrounding ground relaxation and pipe joint failure.

Conclusion: Cavities of ground is mainly caused by cavities formed by rainfall induced infiltration of the heavy rainfall, loss of soil due to rise and fall of ground water level and repeated sewage runoff.

KEYWORDS

Ground collapse,
Variation of Ground water level,
Groundwater flow by numerical analysis

연구목적: 최근 들어 도심지를 중심으로 빈번하게 발생하는 지반함몰은 인명 및 경제적 피해를 야기하여 사회적으로 큰 이슈가 되고 있다. 지반함몰 또는 도로함몰은 일반적으로 불리는 싱크홀과는 다른 원인으로 작용하고 있다. 석회암 지반이 용해되어 침식이 일어나는 싱크홀과는 달리 지반함몰 및 도로함몰은 지하수가 흙 사이로 빠져나가게 되면서 공동이 발생하게 되고 이완 및 확장이 진행되어 상부지반이 붕괴되는 현상을 말한다. 지반의 공동화는 집중호우시 침입수에 의한 공동 형성, 지하수위 상승 및 하강에 의한 토사유실 및 하수 유출반복에 의한 공동 형성이 주된 원인이다.

연구방법: 본 연구에서는 지하수 모델링을 통하여 지하구조물 공사시 지하수 흐름을 검토하였다.

연구결과: 지하수 모델링결과 지하수는 하천방향으로 흐르는 것으로 분석되었으며, 이에 따른 지반함몰의 영향은 미미한 것으로 확인되었다.

결론: 지하수위 저하 및 흐름방향에 따른 지반함몰보다는 지층을 구성하는 입자의 구성에 영향을 받는 것으로 분석되었다.

지반함몰,
지하수위 변화,
지하수유동 해석

© 2018 Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-10-5427-6888. Email. sherikim315@naver.com
1 Tel. 82-10-5427-6888. Email. sherikim315@naver.com

ARTICLE HISTORY

Received Sep. 4, 2018
Revised Sep. 5, 2018
Accepted Nov. 30, 2018

1. 서 론

최근 우리나라에서도 싱크홀(sinkhole) 등 지반함몰 및 침하현상이 심각한 사회문제로 등장하고 있다. 실제 인천광역시 서구 왕길동 인천 도시철도 2호선 공사현장에서 무려 가로 11m 세로 12m에 달하는 싱크홀이 발생하였다. 2014년 8월에는 서울특별시 석촌호수 부근 도로 주변에서 7개 이상의 싱크홀, 공동이 무더기로 발생하는 등 피해가 급증하고 있다. 더욱이 상하수도 시설 등이 매립된 도로면에서 지반함몰이 자주 발생한다는 점에서 물적 피해뿐만 아니라 인적 피해 사례도 증가하고 있다(Kim, 2015). 김창룡(2012)에 따르면 도심지내 지반함몰 발생건수가 2010년도에는 435건, 2012년도에는 689건, 2013년도에는 845건으로 매년 증가하고 있으며, 이러한 추세는 더욱 증가할 것으로 예상되고 있다. 지반함몰과 침하는 다양한 원인으로 발생하고 있으나 크게 토사지반의 터널 굴진, 상·하수도관로 등 지하시설물 손상에 의한 발생, 굴착에 따른 흙막이 가시설 배면 토사 유실에 의한 발생 등 세 가지 경우가 가장 많이 발생하는 것으로 알려져 있다(Jung et al., 1999).

석촌호수 주변과 인천 도시철도 2호선 공사 현장 싱크홀은 지하철 건설 등 토사지반의 터널 굴진으로 인한 지하수 배출로 지반함몰이 발생하여 지하수위 저하의 위험성을 보여주었고, 도심지내에서 자주 발생하는 도로함몰은 주로 상하수도관 파열에 의한 토사유출에 의해 발생하고 있으며, 굴착에 따른 흙막이 벽체 배면에서의 지하수 배출과 토사유실로 인하여 인접 대지에 지반침하가 발생, 건축물의 안정성이 심각히 훼손, 안전문제와 재산권 분쟁을 유발하고 있다. 포장이 되지 않은 교외 지역에서는 지하시설물이 적고, 강우시 우수가 땅속으로 스며들어 지하수위가 유지되는 반면, 높은 포장율을 보이는 도심지에서는 강우의 유출과 지하시설물이 많아 상대적으로 더 많이 지하수위 저하에 따른 위험요인에 노출되어 있다.

따라서, 이 논문에서는 이러한 문제를 사전에 예방하고 대응하기 위해, 건설공사 시 지하수위 저하로 인해 발생하는 지반함몰을 수리지질학적인 연구를 수행하여 연관성을 규명하고자 한다.

2. 지반함몰의 발생과정

2.1 지반함몰의 정의

지반함몰은 도로부나 차도부 등에서 하부의 인위적인 환경변화에 따라 지반내의 토사가 유실되면서 공동이 발생하고 시간 경과와 함께 주변지반으로 확장 및 전개되어 최종적으로 주변지반이 상부지반을 지지하지 못하여 상부의 지반이 지지력을 상실되어 충격이나 추가 하중의 작용으로 함몰이 발생하는 것을 말한다.

우리나라에서는 초기에 지반함몰이 발생했을 때에 지반함몰 보다는 싱크홀이란 용어로 더 사용되었다. 그러나 도로함몰과 싱크홀은 비슷한 뜻으로 사용되고 있으나 확연한 차이가 있다(Seoul Metropolitan City, 2014, 2015). 발생 원인에 따라 싱크홀과 지반함몰로 나누어진다. 지반함몰은 수도권에서 대부분 발생하고 있다.

수도권은 산업화에 따른 도시가 밀집되어 있는 지역으로 최근 급속히 발전해 왔으며, 근래에 들어 동일 시기에 매설된 지하매설물들이 노후화됨에 따라 현재 도 심지에 지반침하 및 지반함몰이 급격하게 발생하고 있는 추세이다. 다음으로 싱크홀의 발생 원인으로는 석회암지대가 있는 지반에서 지하수로 인하여 석회암지대가 점진적으로 용해되면 지하에 공동이 발생 및 확장되어 지반의 붕괴까지 일어나는 현상이다. 반면에 지반함몰(도로함몰)은 상수도 관로나 하수도 관로, 인접지역의 굴착에 의한 원인으로 지반 내에 토립자들이 유실되어 지하 공동이 발생하고 확장되어 지반이 붕괴되는 현상으로 싱크홀은 자연적 원인에 의하여 발생하는 반면 지반함몰은 인위적으로 발생하는 현상으로 볼 수 있다. 자연적 요인에 의한 싱크홀은 용해형, 침하형, 붕괴형으로 나눌 수 있다. 이와 같은 싱크홀의 경우 주로 해외 사례가 많으며 도심지 도로 대부분을 화강암, 편마암 지반으로 이루어져 있어 싱크홀발생 가능성은 거의 없다. 자연적인 원인으로 발생하는 싱크홀과 인위적인 원인으로 발생하는 도로함몰과는 구별되어야 하며, 지반침하의 형태를 분류하면 다음과 같다. ① 침하(Settlement) : 지반의 하향변위를 말하는 광의적 표현, ② 함몰(Sinking) : 지반이 움푹 패인 형태로 침하된 것, ③ 싱크홀(Sinkhole) : 주로 석회암 지반에서 지반내의 공동이 붕괴된 것으로 지하수 또는 인위적인 영향으로 발생한 공동이 원인, ④ 공동(Cavity) : 지반내의 빈 공간, 싱크홀의 발생 조건 중의 하나로 주로 지하수의 작용에 의해 발생하며, 암반층인 경우에 용식작용, 토사층인 경우에 지하수 흐름에 따른 세립분의 이동(토사 유출)으로 발생한다.

지반함몰(침하)은 지반의 하부가 다양한 요인에 의하여 지내력을 잃어 상부지반이 땅속으로 붕괴되어 내려앉은 현상을

의미한다. 지반침하는 지반이 하부로 가라앉는 현상을 말하는 넓은 범위에서의 용어이고, 지반함몰은 지반이 움푹 파인 형상으로 가라앉는 것을 의미한다.

그 발생원인에 따라 지반함몰은 크게 인공적 지반함몰과 자연발생적 지반함몰(싱크홀)로 구분할 수 있다(윤태국 등, 2015).

자연발생적 지반함몰은 우리가 최근까지 지반함몰(인위적 함몰)의 잘못으로 사용해온 ‘싱크홀’을 말하며 용해(Dissolution)되기 쉬운 부드러운 광물로 이루어진 석회암 지반에서 주로 발생한다. 오랜 시간동안 석회암층이 지하수에 용해되어 지반 내에 공동(Underground Cavity)이 형성된 후, 공동에 채워져 있던 지하수가 유출됨에 따라 함몰이 발생하거나 화산재 지반에서 강우 시 빗물이 지반에 침투하여 일시에 세굴이 발생하면서 함몰이 발생하는 형태를 보인다. 지하수로 인해 지반에 공동이 생성되면 상부지반과 지하수가 공동을 메워 지반의 초기변형에는 대응하지만, 시간이 지남에 따라 지하수위 변화로 인해 상부하중을 견디지 못하고 붕괴 된다 싱크홀(Sinkhole)은 표층의 지반특성에 따라 지표 용해형, 지표 침하형, 지표 붕괴형으로 구분된다. 지표 용해형은 가시적인 함몰 또는 침하가 관찰되지 않는 경우가 대부분이며 지하수 및 빗물로 인한 얇은 지표층의 용해가 급속도로 진행되어 기반암까지 그 영향이 미쳐 발생한다. 지표 침하형은 표층이 사질토인 경우가 대다수이며 주로 작은 규모 발생한다. 이 경우의 싱크홀은 지표의 침하가 점진적으로 발생하는 것이 특징이며 주택 내 정원 등에서 발생한다. 표층이 점토와 같은 부드러운 지반일 경우 발생하는 지반 붕괴형은 다른 대규모 싱크홀이 오랜 기간에 걸쳐 발생하는 것에 비하여 갑작스럽게 일어나기 때문에 그 피해가 크다.



Fig. 1. Case of sinkhole occurrence(Kim, 2016)

2.2 도심지역의 지반함몰 발생

우리나라의 지반함몰의 발생 사례는 많지 않았으나 지하수 과다 사용과 상·하수도의 누수 등의 이유로 크고 작은 지반침하가 빈번히 발생하고 있다. 2014년 서울 서초구 교대역과 서초역 사이에서 발생한 지반함몰은 하수관의 파손에 의한 것으로서 관로 주변 토립자 유실로 발생한 빈 공간이 성장되면서 상재 토압을 견디지 못하고 지반이 붕괴된 사고이다. 2008년 충북 음성 꽃동네에서 발생한 지반함몰은 폐광의 갱도로 지하수가 흐르는 과정에서 토립자가 유실되면서 붕괴된 사고이다.

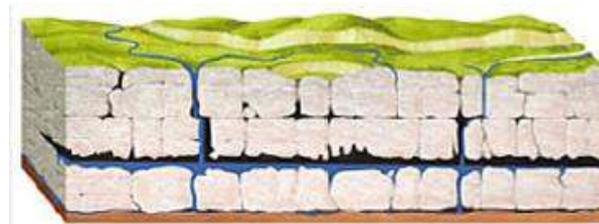
최근 수도권 지역인 서울시, 인천시, 경기도 의정부시 등에서 지반함몰이 계속해서 발생하고 있다. 서울에서만 2010년 하반기부터 2014년 까지 가로와 세로가 2m 이상인 대형 지반함몰 14개가 발생했다. 2014년 지반함몰 발생 지역은 강서구, 영등포구, 송파구 등이며, 8월까지 총 5건이나 발생했다. 발생 원인은 지반의 연약화, 성토부 침하, 상·하수도의 누수 등이며 정확한 원인 파악이 어려운 곳도 다수 존재한다. 경기도 의정부시에서 7월 24일 신곡동 한 아파트 단지 앞 보도가 갑자기 2m 깊이로 내려앉아 행인 한명이 추락 사고를 당했다. 원인은 정화조와 오수 연결관의 누수로 인한 지반의 침하였다. 인천시

에서도 2012년 깊이 20m 대형 지반함몰이 발생하여 주행 중이던 오토바이 운전자가 추락해 사망하는 사고가 발생했다.

송파구 잠실에서만 최근에 여러 건의 지반함몰이 발생했다. 제2롯데월드 공사, 지하철 9호선 공사 등 대규모 공사가 진행 중인 송파구에서 지반함몰이 집중적으로 발생했다. 송파구 오금로, 방산초등학교 입구, 잠실경기장 등의 지반함몰은 직경 0.5~0.6m, 깊이 0.05~1.0m 정도로 비교적 작은 규모이다. 2014년 8월 5일 석촌지하차도 종점부에서 발생한 지반함몰은 폭 2.5m, 길이 8.0m, 깊이 5.0m로 비교적 큰 규모의 지반함몰이다. 석촌지하차도 싱크홀 발생 위치 인근 주변 지역에 폭 5.0~8.0m, 깊이 4.0~5.0m, 연장 80m의 공동을 비롯한 다수의 공동이 추가로 발견되었다.

서울시에서 지반함몰 발생 원인을 조사하고, 국토교통부에서도 지반함몰 대응방안 마련 중이다. 서울시는 지반함몰 원인 분석을 위해 제2롯데월드 공사, 지하철 9호선 공사, 상·하수도관 누수 등과의 연관성 조사를 실시하였다.

지반함몰은 땅속에서 지하수가 빠져나가면서 생긴다. 땅속에는 복잡한 지하수 네트워크가 있고, 이러한 지하수 네트워크가 용기와 침강, 단층과 습곡, 지진 등 지각변동과 기후변화로 인해서 자연 상태에서의 지반함몰이 발생한다. 도심지에서 지반함몰이 생기는 이유도 또한 지하수의 과잉 배출로 인하여 생기는 것이 그 원인이라고 할 수 있다. 일본 도쿄 오차노미즈역의 갈매기 모양의 것과, 2005년 6월 전남무안과 2008년 5월 충북음성에서 발생한 지반함몰도 유사 원인으로 발생했다. 지하수를 많이 이용하면 지하수위가 낮아지면서, 지하수위가 감당하던 압력을 계속해서 빈공간이 존재하는 지반토가 받다가 갑자기 지표가 무너져 지반함몰이 발생되는 것은 지하수위의 변동이 주된 원인임을 알 수 있다.



(a) Inlet of surface water



(b) Flow formation of groundwater and soil particle



(c) Collapse of ground

Fig. 2. Process of sinkhole generation

(<http://ncc.phinf.naver.net/ncc01/2012/6/20/143/8.jpg?type=w320>)

Table 1. List of sinkhole occurrence in Seoul(Kim, 2016)

Occurrence year	Place of occurrence	Cause of occurrence	Case No.
2010	영등포구 (한강대교,여의하류)	지반연약화에 의한 공동 발생, 성토부 침하	2
2011	동대문구(서울시립대), 강남구(일원지하차도), 구로구(안양철교), 중랑구(망우선철교)	원인불명(장기압밀로 추정)	12
2012	강동구(천호역),안암동5가	상수도 파열	23
2013	서초구(강남역), 강서구(방화대교)	원인불명 (지하철 공사 원인 추정) 도로횡단 배수관 공사로 침하	4
2014	강서구(강서구청, 중미역 교차로, 방화동), 영등포구(국회의사당), 송파구(석촌지하차도)	상·하수도 누수	5
2015	용산, 서대문, 강남, 동대문, 노원	상·하수도 파열, 누수	11

3. 지반침하의 원인분석을 위한 현황분석

3.1 대상지역의 지층현황

연구지역에 지층자료를 분석해보면 지층은 매립층, 퇴적층(점토, 모래, 자갈), 풍화토, 풍화암, 기반암 순으로 분포하는 것으로 확인되었다. 매립층은 자갈섞인 실트질 내지 세립(조립)질 모래가 주 구성성분이고, 평균 층후는 약 4.6m이다. 퇴적층은 점토, 모래와 자갈층으로 구성되어있다. Fig. 3은 지층구성 현황을 요약한 것이다. 연구지역의 실내토질시험 결과 자연 함수비는 6.0~43.9%, 비중은 2.627~2.730을 나타내며, 통일분류법에 의한 흙의 분류시 주요 구성성분은 SP-SM, GW-GM으로 분류되었다. 삼축투수시험 결과 1.78×10^{-2} cm/sec 값을 보였다. 매립토층은 약 3m의 두께를 보이고 있으며 실트 및 자갈이 섞여 있는 모래지반으로 통일분류법에 의해 SP-SM(입도가 불량한 모래)로 나타났다. 매립층 하부에 퇴적층은 약 12.6m의 두께이며 SP-SM, SP, GP(실트섞인 모래, 중립모래, 모래섞인 자갈)로 이루어져 있으며 균질한 입도불량상태로 모래-자갈 층적층을 이루고 있다. 풍화토층은 SM(실트질 세립, 조립 모래)로 구성된다. 풍화토층의 하부에는 풍화암반이 나타나며 수평면으로부터 각도 20~75°의 범위에 있거나 부분적으로 수직인 균열들로 구성된 절리가 있는 암반파쇄대층이 약 9m 두께로 형성되어 있다. 파쇄대 하부에는 운모편암과 호상편암으로 구성된 변성암이 나타나며 경도는 강한 연암 및 경암의 기반암층을 이룬다. 또한 대상지역의 연중 평균 지하수위는 EL 107.7m와 바닥부 EL 102.7m인 동호가 위치하고 있으며 대상지역을 통과하는 지하철 2호선과 8호선의 바닥은 EL 93m 부근(지표하 GL 22m)에 위치하고 있다.

Table 2. Profile of ground in research area(KSCE, 2015)

Item	Depth (m)	Composition status	N (TCR/RQD)
Deposit soil	0.7~9.8	모래, 자갈섞인 실트질모래, 세립 및 조립질모래 느슨~매우조밀	3/30~50/1
Clay	1.6~10.8	실트질점토, 모래질실트 매우느슨~보통조밀	2/30~19/30
Sand	1.3~10.6	실트질모래, 세립(조립)모래, 자갈섞인 모래 매우느슨~매우조밀	3/30~50/22
Gravel	0.7~15.5	실트 및 모래섞인 자갈 느슨~매우조밀	5/30~50/2
Weathered soil	1.0~7.5	암편을 함유한 실트질 모래로 구성 보통조밀~매우조밀	28/30~50/3
Weathered rock	0.2~7.7	실트질 모래 및 암편으로 구성, 매우조밀함	50/12~50/1
Bed rock	0.9~71.0이상	보통풍화~심한풍화, 보통강함~약함, 보통균열~매우심한균열	(0~100)/(0~100)

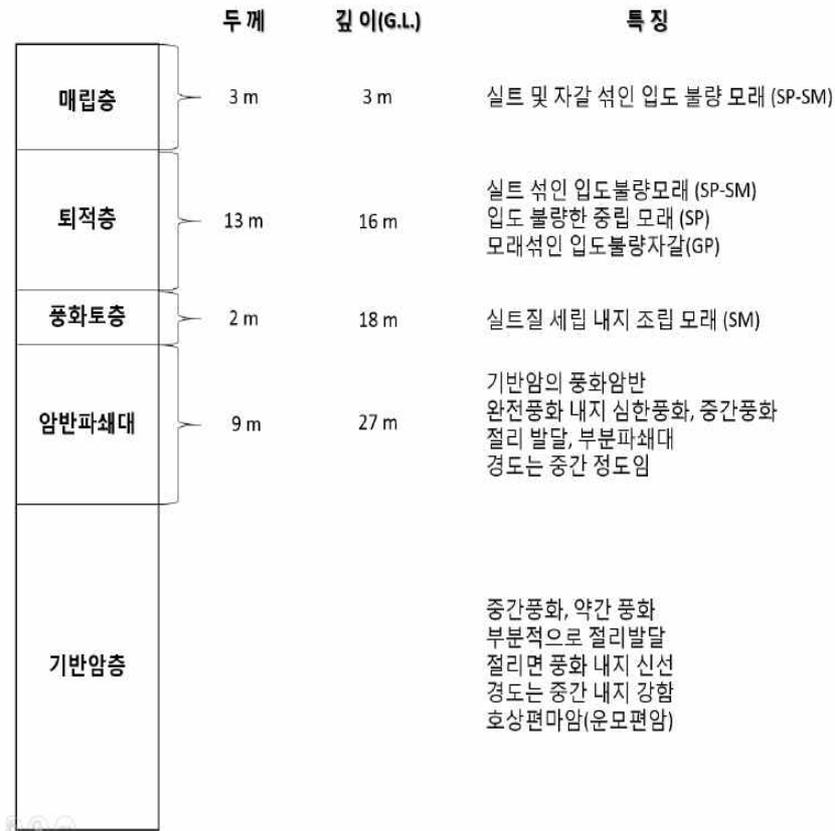


Fig. 3. Soil profile in research area

3.2 지하수 유동해석을 위한 모델링분석방법

지하수 모델링의 유형은 크게 3가지가 있다. 미분방정식의 해석해를 이용하는 해석적 모델링과 전기적 아날로그, 멤브레인 아날로그 등을 이용한 아날로그 모델링, 그리고 유한차분법, 유한요소법, 경계요소법 등 수치해석 방법을 이용한 수치해석적 모델링이다. 해석적 방법은 복잡한 유동계에 대한 모델링에서는 사용할 수 없으며, 아날로그 방법은 여러 가지 장점이 있으나 아날로그-디지털 전환장치의 복잡성과 비경제성으로 요즘에는 거의 사용되지 않는다. 실제적인 면에서 수치해석적 모델은 큰 규모의 복잡한 지하수 유동계를 시뮬레이션 할 수 있어 실제 현장을 더 간편하게 분석할 수 있는 장점이 있다.

일반적으로 지하수 유동현상을 해석하는데 이용되는 대표적인 수치해석적 방법으로는 유한차분법(FDM), 유한요소법(FEM), 경계요소법(BEM), 해석요소법(AEM) 등이 있는데, 이 중에서 유한차분법이 가장 오래되었으면서도 보편적으로 쓰이고 있는 해석방법이다.

본 연구에서 사용된 Visual MODFLOW Flex 프로그램은 이러한 수치해석적 방법 중에서도 유한차분법을 사용하는 3차원 모델이며 Darcy법칙을 기본이론으로 한다(Yoon, 2010). 지하수 유동을 파악하기 위해 미국 지질 조사국(United States Geological Survey, USGS)에서 개발한 Visual MODFLOW Flex를 사용하였다(Leake and Lilly, 1997). 이 프로그램은 지하수흐름, 오염물이동 등의 해석과 시뮬레이션 등을 제공하는 3차원 지하수 유동 해석프로그램으로, 지하수 흐름에 대한 편미분 방정식을 유한차분법을 사용하여 해석하였으며, 자유수면 지하수는 물론 피압지하수의 유동 또한 해석 가능하다. 또한, 이 모형은 모듈형식으로 구성되어 있어 필요한 부분만 선택적으로 사용할 수도 있다(Chung, 1994).

정류해석을 위한 입력정수로서 지층별 투수계수가 있다. 해석 대상구간 지층의 투수계수는 고층빌딩A의 지질조사보고서 및 고층빌딩A 초고층부 정밀지반조사보고서, 잠실길 지하차도 지반조사, 호수B 수위변화의 원인규명을 위한 지반조사 내용 중 토층 및 암반 투수계수 시험결과를 토대로 하였다. 해석영역인 잠실 일대는 과거 한강의 구하도가 있었던 지역으로, 모래-

자갈로 이루어진 충적층이 발달해있고, 암반 내 열극(fissures), 균열(crack) 또는 불연속면으로 인한 파쇄대층이 깊게 분포하고 있다. 앞서 언급한 지반조사보고서와 고층빌딩A 바닥지반에서의 평균 유출량을 참고하여 투수계수의 보정(calibration)을 실시하였다. 지반조사 검토결과에서 대상지역의 지층별 투수계수는 퇴적토층과 풍화토층 $1.32 \times 10^{-4} \sim 7.18 \times 10^{-3} \text{cm/s}$, 풍화암 및 암반파쇄대층 $1.09 \times 10^{-5} \sim 9.62 \times 10^{-4} \text{cm/s}$, 기반암층 $3.96 \times 10^{-5} \sim 5.71 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 로 나타났다. 모델검증을 통하여, 본 해석에서는 Layer 1에 경우 $1.04 \times 10^{-3} \text{cm/s}$, Layer 2는 $2.37 \times 10^{-4} \text{cm/s}$, Layer 3은 $1.23 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 로 결정하였다(Table 3).

Table 3. hydraulic conductivity (unit : cm/s)

Item	Sedimented soil	Weathered soil	Weathered rock	Rock fracture	Bed rock
Max.	7.18×10^{-3}	5.53×10^{-4}	9.62×10^{-4}	3.93×10^{-4}	5.71×10^{-5}
Min.	1.32×10^{-4}	4.85×10^{-4}	1.78×10^{-5}	1.09×10^{-6}	3.96×10^{-6}
Applied	1.04×10^{-3}		2.37×10^{-4}		1.23×10^{-5}
Remark	Layer 1		Layer 2		Layer 3

4. 지하수 유동현황 및 주변지반 침하원인 분석

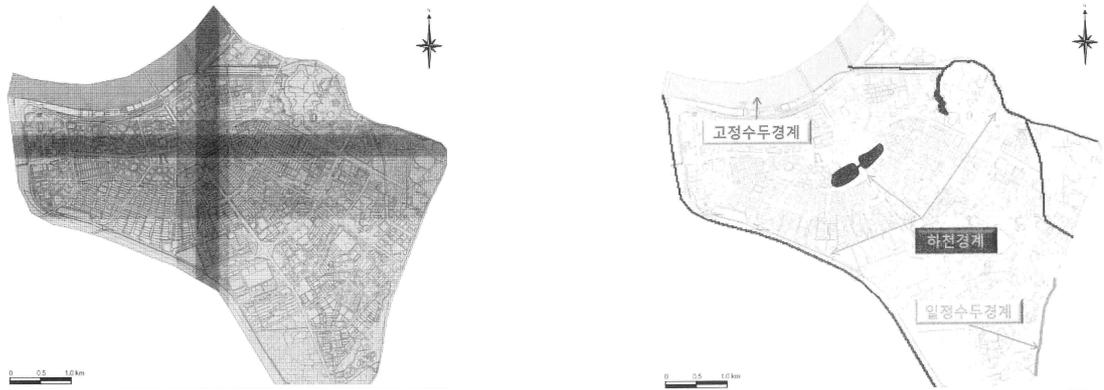
4.1 지하수 거동 예측 및 분석결과

지하수 모델링은 연구지역에서 실제로 흐르는 지하수의 특성을 파악하기 위하여 사용된다. 일반적으로 이러한 수치해석 방법은 주어진 경계조건에 따라 지하수의 유동이 결정되므로 경계조건으로 인하여 지하위의 흐름이 왜곡되는 현상을 확인해야 한다. 따라서 최대한 현실적인 지하수 흐름을 파악하기 위하여 광역 지하수 유동 모델링을 수행하였다. 지하수 유역은 지표수의 유역과 관련이 있으므로 Fig. 4와 같이 국가수자원관리종합정보시스템의 지표수 유역을 참조하여 적용하였다(Minister of Land, Infrastructure and Transport, 2014).



Fig. 4. Watershed of surface water in modeling region(MOLIT, 2014)

설정된 지하수 유역을 중심으로 모델링에 적용할 격자망을 Fig. 5와 같이 설정하였다. 전체적으로 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 의 격자부터 시작하여, $10\text{m} \times 10\text{m}$ 의 격자로 더욱 세분하여 설정하였다. 모델링 영역의 북쪽은 수위와 지형고도를 고려하여 일정수도경계로 입력하였고, 모델링 영역의 남서쪽과 북동쪽은 하천경계로 하천이 위치하고 있어 하천경계로 입력하였다. 지하구조물이 위치한 지역은 지하구조물의 깊이와 투수성을 고려하여 배수경계로 입력하였다. 경계조건 밖의 영역은 모델링의 효율성을 위하여 비활성격자로 입력하였다.



(a) Wide area groundwater flow modeling grid network (b) Wide area groundwater flow modeling boundary conditions

Fig. 5. Setup of wide area groundwater flow modeling

광역 지하수 유동 모델링을 위하여 설정한 경계조건과 대수층의 수리지질학적 특성을 바탕으로 수치해석을 수행한 결과는 Fig 6에 나타내었다. 모델링 검증을 위하여 물수지 분석을 수행하였다. 전체적인 지하수 유동방향은 하천경계방향으로 나타났다. 지하구조물이 있는 배수경계를 따라서 지하수의 유동방향이 국지적으로 바뀌는 현상이 나타났다. 광역 지하수 유동 모델링의 목적이 연구지역의 지하수 유동에 대한 개략적인 경향을 파악하고 모델링에 대한 최적 규모를 파악하는 것이므로, Fig. 7과 같은 지역을 지하수 유동의 최적규모로 설정하였다. 광역 지하수 유동 모델링의 결과를 바탕으로 왜곡되지 않는 최소 규모의 지하수의 유동 모델링을 실시하였으며, Fig. 8에 결과를 나타내었다. 광역 모델링의 경우와 같이 모델링의 검증을 위하여 물수지 분석을 수행하였다. 전체적인 지하수 유동방향은 광역 지하수 유동모델링의 결과와 동일한 결과를 나타낸 것으로 확인되었다.

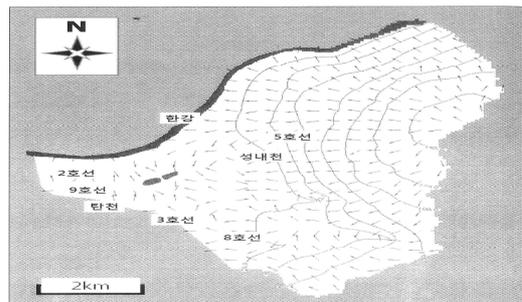


Fig. 6. Result of wide area groundwater flow modeling



Fig. 7. Optimum scale ground flow modeling

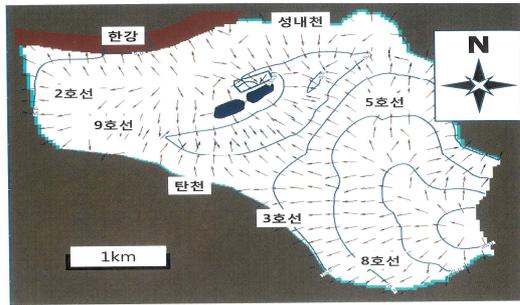


Fig. 8. Result of optimum scale ground flow

4.2 지하수위 변동에 따른 지반함몰 영향

지하수위 변화는 지하수 배수량과 직접 관련이 있다. 지하수가 적절히 함양되지 못하면 지하수위는 지속적으로 하강할 것이며 이는 지반침하를 유발할 수 있는 하나의 원인이 된다. 충적층의 대부분이 모래와 자갈과 같이 사질토로 구성된 지반에서 지하수가 하강하면 간극수가 소멸된다. 자연상태에서의 모래는 간극비가 0.5~0.8정도이나, 포화도가 0%가 되면 지층에서는 38~44%의 체적감소 요인이 발생하게 된다. 연구대상 지역의 지층은 상부로부터 세립분, 모래, 자갈 순으로 구성되는 것이 일반적이다. 간혹 퇴적환경에 따라 압축성이 큰 세립분이 함유될 때는 사질토와는 달리 장기적인 침하가 발생하기도 한다. 연구지역의 지반조사 결과 세립분의 함유정도는 미약해서 장기적인 침하가 발생할 가능성은 적다. 이는 지하수위 변동에 의해 침하가 발생되면 즉시적이고 단기간 내에 종료됨을 의미한다.

5. 결론

건설공사 시 지하수위 저하로 인해 발생하는 지반함몰을 수리지질학적인 연구를 수행하여 연관성을 규명하고자 하였다.

(1) 대형구조물과 인근 지반의 지하수 거동에 대한 정류해석을 실시하고 저부 지하수유출이 지반함몰의 발생의 연관성을 분석한 결과 안정적인 것으로 나타났다. Visual MODFLOW 정류상태 수치해석에 있어서 수치오차 또는 수렴치에 따른 물수지 오차(Discrepancy)에 대하여 해석검증을 실시한 결과 1% 이내인 것을 확인하였다. Visual MODFLOW 평면단면의 정류해석 결과, 퇴적토층·암반파쇄대층·기반암층의 전반적인 흐름양상이 호수B에서 주변부로 물이 유출되고 있는 것으로 해석되었다. 퇴적토층에서는 호수B 동호의 하부 유출수가 고층빌딩A와 동호의 남쪽 방향으로 유출되는 것으로 나타났으며 암반파쇄대층에서는 퇴적토층과 비교했을 때 고층빌딩A 지하 4층 유출부를 향한 수두저하가 크게 나타났다. 기반암층 또한 암반파쇄대층과 비교했을 때 고층빌딩A 저면부와 인접하여 수두저하가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 고층빌딩A 굴착공사 중 발생한 유출수가 호수B에서 비롯되는 것으로 분석되었으며, 유출수와 함께 토사가 유실되어 지반함몰이 발생했을 것이라 분석되었다.

(2) 3차원 광역지하수 분석에서는 전체적인 지하수 유동방향은 하천경계방향으로 나타났다. 지하구조물이 있는 배수경계를 따라서 지하수의 유동방향이 국지적으로 바뀌는 현상이 나타났다. 광역 지하수 유동 모델링 결과 지하수 유동방향은 광역 지하수 유동모델링의 결과와 동일한 결과를 나타낸 것으로 확인되었다.

(3) 지하수위 변동에 따른 지반의 영향이 증가하고 지하수위 변화와 지반함몰과의 관련성은 세립분이 함유된 사질토로 구성된 지층과 밀접한 관련성이 있음을 확인하였다.

References

[1] 김창룡(2012), 대심도 지하도로 설계기준 제정 연구, Report, Korea Institute of Construction Technology.
 [2] Chung, S. O. (1994), Optimal Management and Quality Protection of Groundwater Resources, Journal of Korean

- National Committee on Irrigation and Drainage, Vo. 1, No. 2, pp. 60~70 (In Korean).
- [3] Kim, Chang Hee(2016), A Study on the Cause Analysis and Countermeasures of the Urban Sinkhole, MS. Thesis, Kyonggi University(In Korean).
- [4] Leake, S.A., Lilly, M.R., (1997), Documentation of a program FHBI for assignment of transient specified-flow and specified-head boundaries in applications of the modular finite-difference groundwater flow model(MODFLOW). US Geological Survey Open-File Report 97~571, pp.50.
- [5] Jung, S. K., Jeon, J. S., Lee, S. and Shim, T. S. (1999), A Confidence Analysis on the Control Value of Braced Excavation Walls Used In Korea, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 19, No. 3-3, pp. 479~487 (In Korean).
- [6] Kim, S. Y. (2015), Environmental Impact Assessment and Prevention of Urban "Sinkholes", Working Paper 2015-01, Korea Environment Institute, pp. 1~68 (In Korean).
- [7] Seoul Metropolitan City(2014), 석촌지하차도 공동 발생원인과 도로함몰 특별관리대책.
- [8] Seoul Metropolitan City(2015), 도로함몰 예방을 위한 공동발생 메커니즘과 대응방안.
- [9] Yoon, H. K. (2010), Environmental Impact Assessment of Deep Cement Mixing(DCM) Method using Visual Modflow, Master's thesis, Myongji University (In Korean).
- [10] <http://ncc.phinf.naver.net/ncc01/2012/6/20/143/8.jpg?type=w320>
- [11] Kores Society Civil Engineering(2015), ○○지하수 영향분석 보고서
- [12] Minister of Land, Infrastructure and Transport(2014), 국가수자원관리정보시스템, <http://www.wamis.go.kr/>

Note : 본 논문은 제 1저자가 학위논문 준비중에 있으며, 연구결과 일부에 해당하는 내용을 포함하고 있습니다.