

## 지반입도조건에 따른 지반함몰 가능성 평가 및 수치해석적 검증

이종현<sup>1\*</sup> · 진현식<sup>2</sup> · 백 용<sup>1</sup> · 윤형석<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 복합재난대응연구단

<sup>2</sup>(주)HNG건설턴트 지반사업부

<sup>3</sup>인하공업전문대학 토목환경과

## Evaluation of Land Subsidence Risk Depending on Grain Size and Verification using Numerical Analysis

Jong-Hyun Lee<sup>1\*</sup>, Hyun-Sik Jin<sup>2</sup>, Yong Baek<sup>1</sup>, and Hyeong-Suk Yoon<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Multi Disaster Countermeasures Organization, Korea Institute of Construction and Technology, Korea

<sup>2</sup>HNG Consultants Co., Ltd., Korea

<sup>3</sup>Dept. of Civil & Environmental Eng., Inha College, Korea

Received 8 May 2017; received in revised form 19 June 2017; accepted 23 June 2017

본 연구에서는 지반함몰의 실질적 원인인 토립자 유실에 의한 함몰 가능성을 판단하기 위해 댐설계 시 활용되고 있는 코어재와 필터재의 입도 차이에 의한 필터조건을 굴착공사 주변의 지반조건에 대한 평가 조건으로 응용하였다. 이를 위해 여러 제안자들이 실험 등을 통해 제안한 필터 기준을 확인하였으며, 이 중 미공병단에서 제안한 필터조건을 이용하여 지반입도 조건에 따른 지반함몰 가능성을 판단해 보았다. 이를 통해 사용자가 지반조사 정보로부터 획득한 지반입도조건을 이용하여 빠르게 지반함몰 가능성을 판단할 수 있는 평가도표를 작성하였으며, 다양한 굴착 주변의 지층 변화에 따른 지반함몰 가능성을 쉽게 평가해 볼 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 입자유동 과정을 모사하기 위해 PFC3D 프로그램을 활용하였으며, 이것은 단순 지하수위 저하에 의한 지반침하 경향을 판단하는 것이 아니라 실질적인 토립자 유실에 의한 지반함몰 예측 및 평가가 지반입도조건을 통해 이루어질 수 있고 이를 수치해석 적으로 검증할 수 있음을 나타낸다.

**주요어:** 지반입도, 지반함몰, 필터조건, 입자유동, 개별요소법

In this study, filter conditions by difference in grading between core material and filter material used for dam construction was applied as evaluation condition for surrounding ground conditions near excavation site in a bid to identify the risk of land subsidence resulting from the erosion of soil particles. To that end, filter conditions proposed for the test was evaluated and the risk of land subsidence depending on grain size conditions was also evaluated using the filter conditions developed by COE. Consequently, evaluation diagram that can be used to determine the risk of land subsidence using grain size conditions obtained from ground investigation data was developed, which is expected to help evaluate the possibility of land subsidence depending on changes to the stratum. To simulate the particle flow process, PFC3D program was used. It's not only intended to determine the land subsidence pattern caused by falling ground water level but also predict and evaluate the land subsidence caused by soil erosion using grain size condition which can be verified by numerical analysis approach.

**Key words:** grain size, land subsidence, filter conditions, particle flow, distinct element method

\*Corresponding author: jhrhee@kict.re.kr

© 2017, The Korean Society of Engineering Geology

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.

서 론

2014년 서울 도심에서 발생한 지반함몰 이후 다수의 도심지 지반함몰(주로 도로 및 주택가 등에서 발생)이 발생되면서 이에 대한 사회적 관심이 높아지고 있다. 특히, 서울시의 도로함몰 발생자료를 통해 최근 도심지에서의 지반함몰은 상하수관 손상 약 85%, 인접 굴착공사 등의 원인 약 15% 등에 의해 발생하는 것으로 밝혀졌다(The hankyoreh, 2014). 이러한 발생원인은 지중의 물의 흐름과 관련되며, 오래된 상하수도관의 누출, 굴착공사장의 지하수 유출 등 지하수위 저하 등에 따른 토립자의 유출로 유추할 수 있다. 초기 토립자 유출로 지반내 작은 공동이 발생하고 이는 지반함몰로 이어지지는 않겠지만, 이러한 지하수 유출에 따른 토립자 유출이 장기적으로 발생할 경우에는 갑작스런 지반함몰로 이어져 인명 및 재산상의 피해로 발생할 수 있을 것이다.

구조물 시공중 또는 시공후에 언제든 발생할 수 있는 도심지내 지반함몰을 억제하기 위해서는 흙막이 공사, 상하수도 공사 설계시 시추조사를 통한 정확한 지층 지질구조를 파악하고, 각 지층별 물리적 특성(입도특성 등), 역학특성(투수특성 등) 파악이 매우 중요하다. 물리적 특성파악이 중요한 이유는 지층별 입도특성에 따라 토립자의 이동 가능성을 예측할 수 있기 때문이다. 예를 들어, 지중 내 2개의 층이 존재한다고 가정하고, 첫 번째 층은 입도가 매우 작은 모래질 실트층이 존재하고, 그 아래층에는 입도가 큰 자갈질 모래층이 존재한다면 상부 모래질 실트층의 입자는 하부 자갈질 모래층내로 이동할 가능성이 매우 크다. 또한 하부 자갈질 모래층의 두께가 두껍고, 그 범위가 광범위하며 투수계수 및 유속이 매우 크다면 상부 모래질 실트층의 입자 유출은 가속화되어 갑작스런 지반함몰을 발생시킬 수 있을 것이다.

지반의 입자특성에 따른 토립자 이동 가능성 평가는 국내 댐설계기준(KWRA, 2011) 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐에서 “차수벽 지지존의 입도보다 필터존의 입도가 충분히 작아야 차수벽 지지존의 입자가 필터재로 이동을 억제할 수 있다” 라고 제시되어 있다. 즉, 지반 입도특성을 이용하면 지반내 토립자 이동가능성 평가기준을 도심지내 지반함몰 가능성 평가방법으로 활용할 수 있으며 그 적용성을 연구하고자 한다. 그리고, 입도 크기를 고려할 수 있는 수치해석 기법인 개별요소법(PFC3D)을 통해 입도기준에 의한 지반함몰 평가방법을 검증하고자 한다.

토립자 유동 가능성 평가방법

지반내 침투압 발생시 입자유동 가능성 평가방법은 지반의 입도분포특성을 이용할 수 있다. 일반적으로 침투압 발생

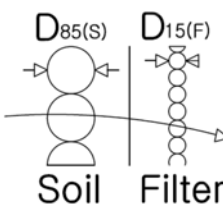
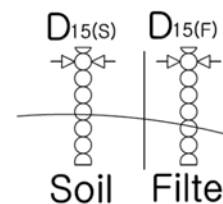
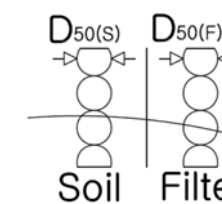
Table 1. Filter standards

Proposer	Filter standards
Bertram (1940)	$\frac{D_{15(f)}}{D_{85(s)}} < 6, \frac{D_{15(f)}}{D_{85(s)}} < 9$
U.S. Corps of Engineers (1948)	$\frac{D_{15(f)}}{D_{85(s)}} < 5, \frac{D_{15(f)}}{D_{15(s)}} < 20, \frac{D_{50(f)}}{D_{50(s)}} < 25$
Sherman (1953)	For $C_{u(s)} < 1.5$ : $\frac{D_{15(f)}}{D_{15(s)}} < 6, \frac{D_{15(f)}}{D_{15(s)}} < 20, \frac{D_{50(f)}}{D_{50(s)}} < 25$ For : $1.5 < C_{u(s)} < 4.0$ : $\frac{D_{15(f)}}{D_{85(s)}} < 5, \frac{D_{15(f)}}{D_{15(s)}} < 20, \frac{D_{50(f)}}{D_{50(s)}} < 25$ For : $C_{u(s)} > 4.0$ : $\frac{D_{15(f)}}{D_{85(s)}} < 5, \frac{D_{15(f)}}{D_{85(s)}} < 40, \frac{D_{50(f)}}{D_{50(s)}} < 25$
Leatherwood and Peterson (1954)	$\frac{D_{15(f)}}{D_{85(s)}} < 4.1, \frac{D_{50(f)}}{D_{50(s)}} < 5.3$
Karpoff (1955)	Uniform filter : $5 < \frac{D_{50(f)}}{D_{50(s)}} < 10$ Well-graded filter $12 < \frac{D_{50(f)}}{D_{50(s)}} < 58,$ $12 < \frac{D_{15(f)}}{D_{15(s)}} < 40,$ and Parallel grain-size curves
Zweck and Davidenkoff (1957)	medium and coarse uniform sand : $5 < \frac{D_{50(f)}}{D_{50(s)}} < 10$ fine uniform sand : $5 < \frac{D_{50(f)}}{D_{50(s)}} < 15$ well-graded fine sand : $5 < \frac{D_{50(f)}}{D_{50(s)}} < 25$

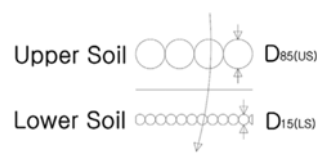
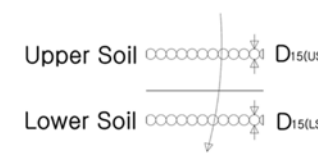
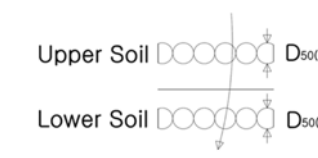
$D_{15(f)}$  : Grain size equivalent to 15% of passing weight (%) of filter  
 $D_{50(f)}$  : Grain size equivalent to 50% of passing weight (%) of filter  
 $D_{15(s)}$  : Grain size equivalent to 15% of passing weight (%) of foundation  
 $D_{50(s)}$  : Grain size equivalent to 50% of passing weight (%) of foundation  
 $D_{85(s)}$  : Grain size equivalent to 85% of passing weight (%) of foundation

시 지반내 입자유동 가능성 즉, 파이핑이 발생할 수 있으며, 파이핑 방지를 위해 필터 재료를 설치한다. 이때 설치될 필터의 입도와 인접된 지반의 입도차를 이용하여 지반내 입자유동 가능성을 평가할 수 있다. Table 1은 수많은 실내시험을 통해 여러 제안자들이 제안한 필터 기준을 보여주고 있다.

**Table 2.** Understanding of filter conditions to prevent soil particle erosion (U.S. Corps of Engineers, 1948).

$\frac{D_{15(f)}}{D_{85(s)}} < 5 \quad \therefore \text{Stable}$	$\frac{D_{15(f)}}{D_{15(s)}} < 20 \quad \therefore \text{Stable}$	$\frac{D_{50(f)}}{D_{50(s)}} < 25 \quad \therefore \text{Stable}$
$\frac{D_{15(f)}}{D_{85(s)}} > 5 \quad \therefore \text{Unstable}$	$\frac{D_{15(f)}}{D_{15(s)}} > 20 \quad \therefore \text{Unstable}$	$\frac{D_{50(f)}}{D_{50(s)}} > 25 \quad \therefore \text{Unstable}$
		
For $D_{85(s)}$ to pass through $D_{15(f)}$ , it shall be $\frac{D_{15(f)}}{5} > D_{85(s)}$ . That is, $D_{15(f)}/5$ grain size at lower layer is larger than $D_{85(s)}$ , soil erosion would possibly occur.	For $D_{15(s)}$ to pass through $D_{15(f)}$ , it shall be $\frac{D_{15(f)}}{20} > D_{15(s)}$ . That is, $D_{15(f)}/20$ grain size at lower layer is larger than $D_{15(s)}$ , soil erosion would possibly occur.	For $D_{50(s)}$ to pass through $D_{50(f)}$ , it shall be $\frac{D_{50(f)}}{25} > D_{50(s)}$ . That is, $D_{50(f)}/25$ grain size at lower layer is larger than $D_{50(s)}$ , soil erosion would possibly occur.

**Table 3.** The conditions that may cause soil erosion (U.S. Corps of Engineers, 1948).

$\frac{D_{15(LS)}}{D_{85(US)}} < 5 \quad \therefore \text{Stable}$	$\frac{D_{15(LS)}}{D_{15(US)}} < 20 \quad \therefore \text{Stable}$	$\frac{D_{50(LS)}}{D_{50(US)}} < 25 \quad \therefore \text{Stable}$
$\frac{D_{15(LS)}}{D_{85(US)}} > 5 \quad \therefore \text{Unstable}$	$\frac{D_{15(LS)}}{D_{15(US)}} > 20 \quad \therefore \text{Unstable}$	$\frac{D_{50(LS)}}{D_{50(US)}} > 25 \quad \therefore \text{Unstable}$
		
For $D_{85(US)}$ to pass through $D_{15(LS)}$ , it shall be $\frac{D_{15(LS)}}{5} > D_{85(US)}$ . That is, $D_{15(LS)}/5$ grain size at lower layer is larger than $D_{85(US)}$ , soil erosion would possibly occur.	For $D_{15(US)}$ to pass through $D_{15(LS)}$ , it shall be $\frac{D_{15(LS)}}{20} > D_{15(US)}$ . That is, $D_{15(LS)}/20$ grain size at lower layer is larger than $D_{15(US)}$ , soil erosion would possibly occur.	For $D_{50(US)}$ to pass through $D_{50(LS)}$ , it shall be $\frac{D_{50(LS)}}{25} > D_{50(US)}$ . That is, $D_{50(LS)}/25$ grain size at lower layer is larger than $D_{50(US)}$ , soil erosion would possibly occur.

Standard grain size > grain size at upper layer  $\Rightarrow$  Soil erosion condition

본 연구에서는 미공병단 필터 기준(1948)을 이해하고 이를 반영한 지반함몰 발생가능성을 판단해 보았다. Table 2는 토사 유실을 방지하기 위한 미공병단 제안식(1948)의 필터 조건이다. Table 2의 그림에서 우측 필터 입도가 좌측 지반입도 보다 충분히 크면 좌측 지반입자가 우측 필터 내로 이동하여 지반 내 토사가 유실될 수 있다. 즉, 필터의  $D_{15(f)}/5$ 한 입경이  $D_{85(s)}$ 보다 크거나, 필터의  $D_{15(f)}/20$ 한 입경이  $D_{15(s)}$ 보다 크거나, 필터의  $D_{50(f)}/25$ 한 입경이  $D_{50(s)}$ 보다 크면 지반 내 입자 이동 가능성이 있다는 것이다.

Table 3은 Table 2의 필터 조건을 응용하여 지반함몰 발생 가능한 지반입도조건을 설명하고 있다. Table 3의 그림에서 하부층의 큰 입도가 상부층의 작은 입도 보다 충분히 크면

상부층 지반입자가 하부 지층 큰 입도 사이내로 이동하여 상부층 입자가 유실될 수 있다. 즉 하부층의  $D_{15(LS)}/5$  한 입경이  $D_{85(US)}$  보다 크거나, 하부층의  $D_{15(LS)}/20$  한 입경이  $D_{15(US)}$  보다 크거나, 하부층의  $D_{50(LS)}/25$  한 입경이  $D_{50(US)}$  보다 크면 상부층 지반내 입자 이동 가능성과 지반함몰 발생 가능성이 있다는 것이다.

본 연구에서는 Table 3을 이용하여 지반함몰 가능성 평가도표를 제안하였다(Fig. 1). 지반함몰 가능성 평가도표에서 실선은 기준입경에 의한 기준입도를 보여주고 있다. 기준입도는  $D_{85}$ (기준입도),  $D_{50}$ (기준입도),  $D_{15}$ (기준입도)에 대해서만 제시하였는데, 하부층의 입경  $D_{15(LS)}$ ,  $D_{15(LS)}$ ,  $D_{50(LS)}$ 을 5, 20, 25로 나눈 기준입도가 상부층의 입경  $D_{85(US)}$ ,  $D_{15(US)}$ ,  $D_{50(US)}$

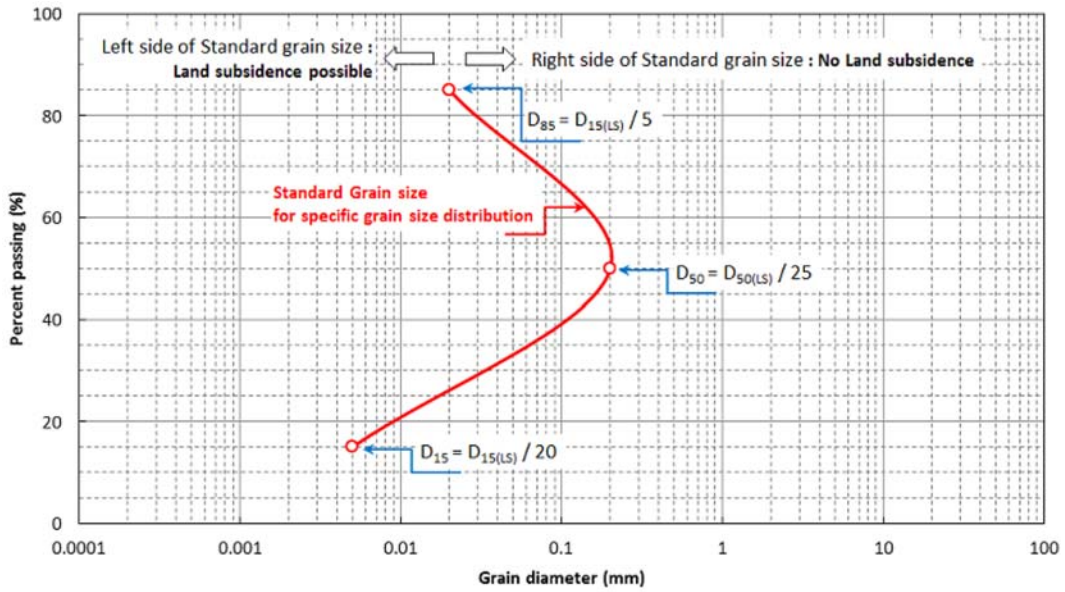


Fig. 1. Diagram of ground condition that would possibly cause land subsidence.

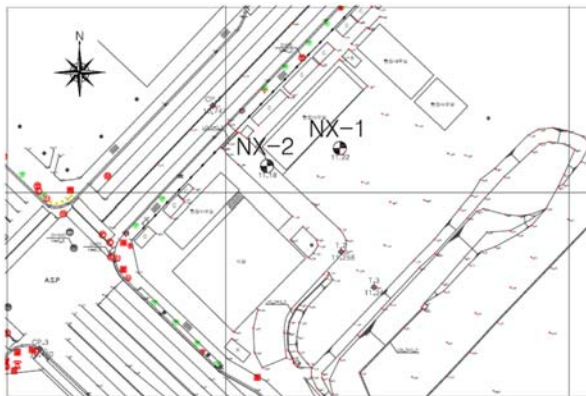


Fig. 2. Site plan of district OO.

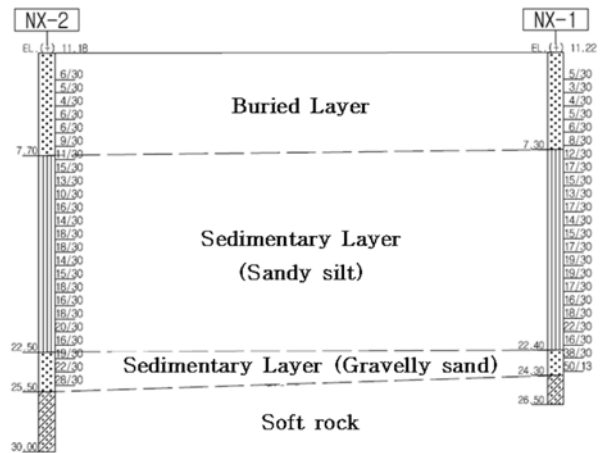


Fig. 3. Longitudinal section of district OO.

보다 크면 지반함몰이 발생 가능한 지반조건이 성립됨을 나타내는 평가도표이다. 특히, 기준입도는 고정적인 것이 아니라 하부층의 특정한 입도분포에 따라 변화된다는 것에 주의해야 한다.

### 지반함몰 가능성 평가도표를 이용한 OO지구 평가

지반함몰 가능성 평가도표를 이용하여 OO지구 토립자 이동 가능성을 평가하였다. 지반함몰 평가대상 지반의 평면도, 지층중단면도 및 입도분포곡선은 Fig. 2-Fig. 4에 나타내었다.

OO지구는 도로와 인접해 있으며, 지층구조는 매립층-모래질 실트층(퇴적층)-자갈질 모래층(퇴적층)-연암층 순서로 구성되어 있고, 지하수위는 평균 GL(-)11.4m에 위치하고

있다. 모래질 실트층(퇴적층)과 자갈질 모래층(퇴적층)과의 입도차이도 크고, 지하수위가 모래질 실트층 내에 존재하므로 지반굴착 시(굴착공법 : 지하연속벽, 굴착심도 : GL(-) 22.45 m) 지하수유출과 동시에 모래질 실트층 내 입자 유동 가능성이 큰 현상으로 판단된다.

Fig. 5는 OO지구 입도특성을 반영한 OO지구 지반함몰 가능성 평가도표 결과이다. Fig. 5에서 통과중량백분율 100(%)~60(%)에서 상부층의 입도가 기준입도보다 크므로 입자유동은 발생하지 않지만, 통과중량백분율 60(%) 이하에서는 상부층의 입도는 기준입도보다 작아 입자유동 가능성이 있는 것으로 나타났다. 따라서, OO지구 모래질 실트층(퇴적층)에서의 입자유동 가능성 및 지반함몰 가능성이 있는 것으로 나타났으며, 실제 시공 중 지반함몰(지반함몰 발생시 지하수위 (-)1.06 m 저하)이 발생한 현장이다.

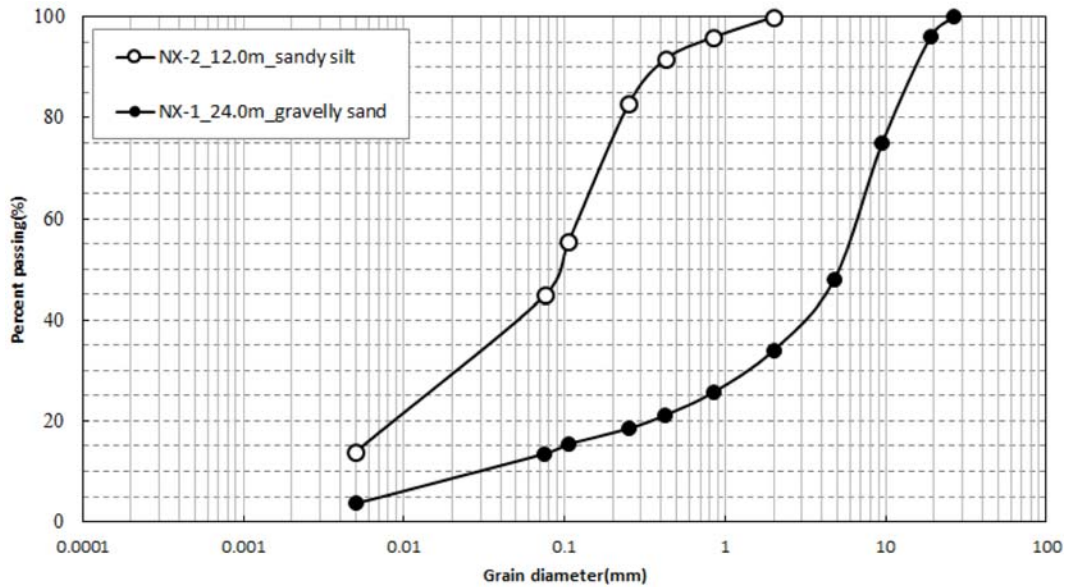


Fig. 4. Grain size distribution curve of district OO.

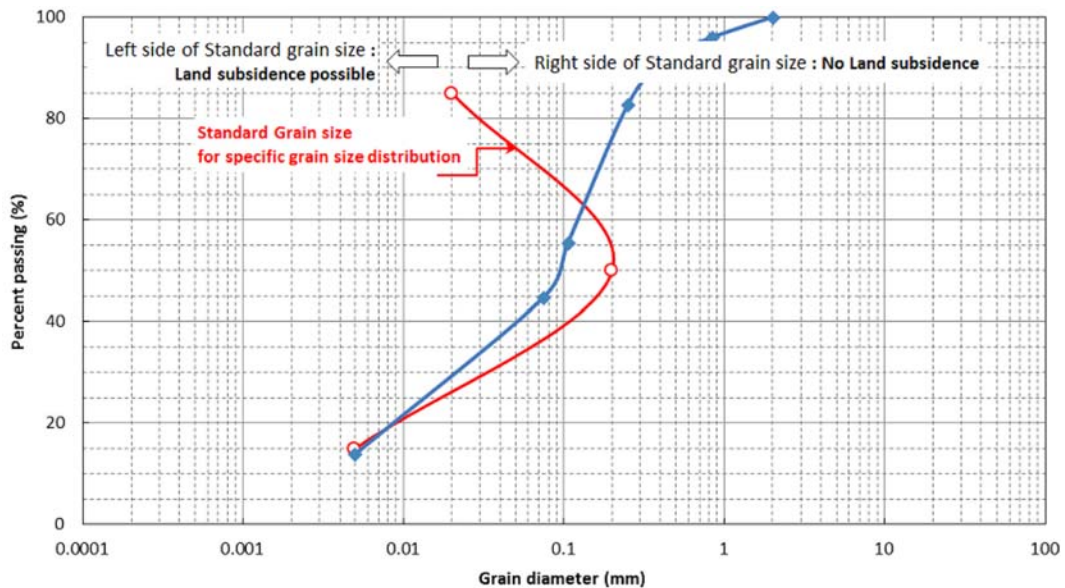


Fig 5. The result from the evaluation diagram at district OO.

### 수치해석적 검증

지반함몰 가능성 평가는 수치해석적 방법(개별요소법)을 이용하여 평가할 수 있다. 이러한 개별요소법은 지반입자의 개별적 거동 및 불연속적 거동을 모델링 할 수 있는 방법으로 많은 학자(Skinner, 1969; Ting and Corkum, 1988; Ting et al., 1989; Cundall and Strack, 1979; Cundall et al., 1982; Cundall, 2001)들에 의해 연구가 진행되어 왔으며 현재도 계속 연구 중에 있다.

지반공학 분야에 있어 개별요소법은 조립재 및 락필재 거

동분석을 위해 그 적용성이 점차 증가하고 있다. Cundall and Strack (1979)와 Cundall (2001)은 지반공학분야 개별요소법 응용방안을 제시하였으며, Ting and Corkum (1988)와 Ting et al. (1989)는 조립재 미시적 강도특성 분석, Thomas and Bray (1999)의 조립재료 형상 모델링 기법, Hainbüchner et al. (2002)의 실내시험 모델링을 통한 기초 지지력 연구, Jeon et al. (2006)의 대규모 락필 재료에 대한 입도분포 생성 및 실내시험 모델링 등이 그 대표적 예이다.

또한, 최근 들어 기존 개발요소법과 수리 연동해석 기법

이 개발되어 이를 통해 개별요소법에 수리학적 특성을 접목시키는 연구가 시도되고 있다(Kawaguchi et al., 1992; Kawaguchi, 2003; Shimizu, 2004). 본 연구에서는 기존 개별요소방법에 수리연동 기법을 적용하여 현장 수압조건 및 지층별 입도조건을 고려하여 지층의 입자유동 가능성을 평가하였다.

입자유동 과정을 수치적으로 모사하기 위해 PFC3D (Particle Flow Code in 3 Dimension, Itasca Consulting Group, 2013)를 이용하였다. 개별요소법인 PFC3D 프로그램은 각각의 입자를 구(ball) 형태의 개별요소들로 구성하고 있다. 각각의 개별요소들은 탄성계수, 마찰특성 등의 개별요소특성(micro properties)을 가지고 있으며, 평면 또는 곡면의 벽 요소(wall element)에 의해 주어지는 경계조건상에서 벽-입자, 입자-입자간의 상호작용에 따른 변위를 갖게 된다.

개별요소방법에 대한 수리연동 해석을 위해서는 기본적으로 일정 해석영역을 설정하고 그 영역안에 임의 직경범위에 대한 개별요소를 생성하여야 하며, 이들에 대한 미시 물성치를 부여하는 과정이 선행되어야 한다. 본 연구에 이용된 PFC3D 프로그램은 각각의 독립적인 입자들로 전체 모델을 생성하게 되며, 각 입자간 접촉면에서의 하중-변위관계로 표현되는 접촉면 구성모델에 의해 입자 개개의 미시적 거동 및 전체적인 거동에 대한 해석을 수행하게 된다. 해석영역 외곽에는 경계조건 구현을 위한 4개의 경계면(wall)을 생성하였으며, 그 길이는 구속응력 재현시의 서보 제어를 위해

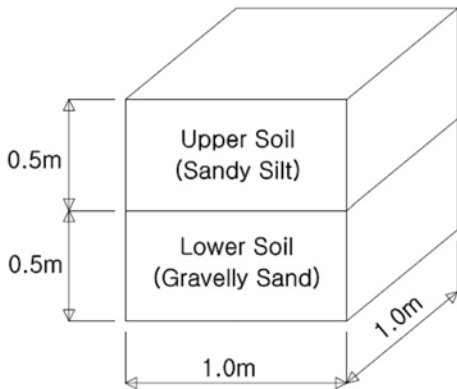


Fig. 6. Sample size for numerical analysis.

약간의 여유를 두었다.

상부 모래질 실트층이 입도 차이 및 침투압에 의해 하부 자갈질 모래층으로 이동하게 되는데, 본 연구에서는 이를 수치해석적으로 검증하는 작업을 시도하였다. 입자가 작은 상부 지층의 모래질 실트층의 미세입자들의 이동을 해석하기 위하여 Fig. 6과 같은 요소를 구성하였다. 상부층은 입자가 작은 모래질 실트층을, 하부층은 자갈질 모래층으로 구성하였으며, 이때 적용한 상하부 지층의 입도분포는 Fig. 4와 같으며, 이를 이용하여 상하부 지층의 입자들이 만들어졌다.

Fig. 6의 수치해석용 시료 규모(size)는 가로, 세로, 높이를 각각 1.0m로 하였으며, 각 지층별 두께는 0.5 m로 적용하였다. 상부 모래질 실트층 요소안의 평균 입자크기는 0.090 mm이며, 가우스 입자분포 특성(평균: 0.53 mm, 표준편차: 0.71 mm)을 갖는 201,586개로 토층이 만들어졌다. 또한, 하부 자갈질 모래층 요소안의 평균 입자크기는 5.50 mm이며, 가우스 입자분포 특성(평균: 5.80 mm, 표준편차: 9.01 mm)을 갖는 1,568개로 토층이 만들어졌다. 또한, 상하부 지층 개별요소들의 물성은 Table 4와 같다.

Fig. 7은 수리지반연동해석 알고리즘을 보여주고 있다. 지반 내 간극수압 및 침투압은 FLAC3D로 산정하여 이를 PFC3D에 반영하여 입자유동해석을 실시한다. 지반입자는 침투압에 의해 입자유동이 발생하고, 이로 인해 간극수압 및 침투압 크기는 변화된다. 입자유동으로 변화된 간극수압 및

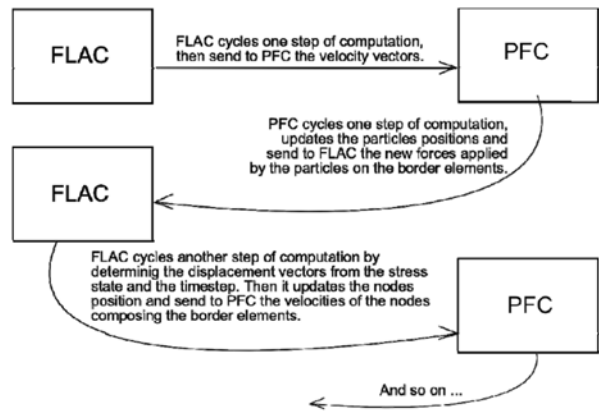


Fig. 7. Hydraulic interface analysis using osmotic pressure (Itasca, 2016).

Table 4. Input parameters

	Upper Layer	Lower Layer
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1,750	1,900
Normal Stiffness (N/m)	2.0×10 <sup>8</sup>	1.5×10 <sup>9</sup>
Shear Stiffness (N/m)	1.0×10 <sup>8</sup>	0.75×10 <sup>9</sup>
Ball friction	0.45	0.80
Contact-bond normal stiffness (Pa/m)	3.0×10 <sup>8</sup>	5.0×10 <sup>7</sup>
Contact-bond shear stiffness (Pa/m)	2.0×10 <sup>8</sup>	3.2×10 <sup>7</sup>

침투압은 FLAC3D으로 재산정한 후 입자유동해석을 재실시하여 한다. 이러한 과정은 간극수압의 크기가 수렴할 때까지 반복 해석된다. 즉, 입자유동에 따른 간극수압의 변화를 고려한 변수위해석과 입자유동해석을 동시에 고려할 수 있기 때문에 가장 합리적인 방법으로 판단된다. 하지만 이러한 해석과정은 지나치게 많은 해석시간을 필요로 하기 때문에, 본 연구에서는 수위조건이 일정한 정수두 조건에서의 침투해석을 실시하여 침투압을 산정하였으며, 이렇게 산정된 침투압을 입자모델에 적용하여 PFC3D 입자유동해석을 실시하였다.

본 연구대상 지구에서의 지하수위와 굴착심도와의 수위차는 약 10.0 m 정도이며, 이로 인해 굴착배면 지반입자는 약 100 kPa의 침투압영향을 받을 것으로 판단되어, 수치해석용 시료상부 간극수압은 200 kPa, 시료하부 간극수압은 100 kPa을 적용하여 하향 침투압 조건을 형성하였다. Fig. 8은 FLAC3D에 의해 산정된 수치해석용 시료 내 간극수압 분포도를 보여주고 있다.

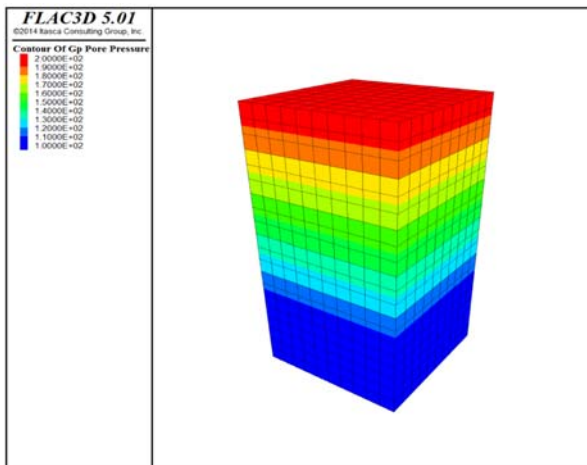


Fig. 8. Pore Pressure contour in sample.

Fig. 9은 수리연동해석을 통해 상부 모래질 실트층의 입자가 하부 자갈질 모래층으로 유입되는 입자 이동 가능성에 대한 수치해석 결과를 보여주고 있으며, 침투압 발생 전(연동해석 초기)에는 상부 모래질 실트층(Sandy Silt)의 미세입자 유동은 발생하지 않지만 해석이 진행될수록 상부 모래질 실트층의 미세입자의 유동 점점 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5의 지반함몰 가능성 평가도표에서 지반입자 유동 가능성에 대해 수치해석적으로도 모래질 실트층의 지반입자 유동 가능성이 있는 것을 확인할 수 있었다.

### 결론

본 연구에서는 댐설계 시 필터재 설계기준을 응용하여 지반입도특성을 고려한 지반함몰 가능성을 평가해 보았으며, 이를 실제 현장의 지반입도조건을 적용한 평가 및 수치해석적 검토를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 댐설계기준으로 활용되는 필터재 설계기준을 응용함으로써 지반입도 차이로부터 발생하는 토립자 유실에 의한 지반함몰 여부를 예측하는데 활용될 수 있음을 확인하였다.
- (2) 지반입도정보를 통해 굴착 공사시 주변 지반의 지반함몰 가능성을 쉽게 평가할 수 있는 지반함몰 가능성 평가도표를 제안하고자 하며, 공사현장 주변의 지하수위를 고려한다면, 지반함몰 가능성 예측의 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 제안된 지반함몰 평가도표를 이용하여 지반함몰이 발생한 OO지구 현장에 대해 지반함몰 평가를 실시한 결과, 지반함몰 가능성이 있는 것으로 평가되어 현장과 일치하는 결론을 얻을 수 있었다.
- (4) 지반함몰 평가도표에 이용된 입도특성을 반영한 3차원 수치해석적 방법으로 지반함몰 안정성 평가를 실시한 결과, 상부층의 입도가 하부층의 입도사이로 유입되어 상부층의 모래질 실트층 입도가 하부로 유출되는 것을 확인할 수

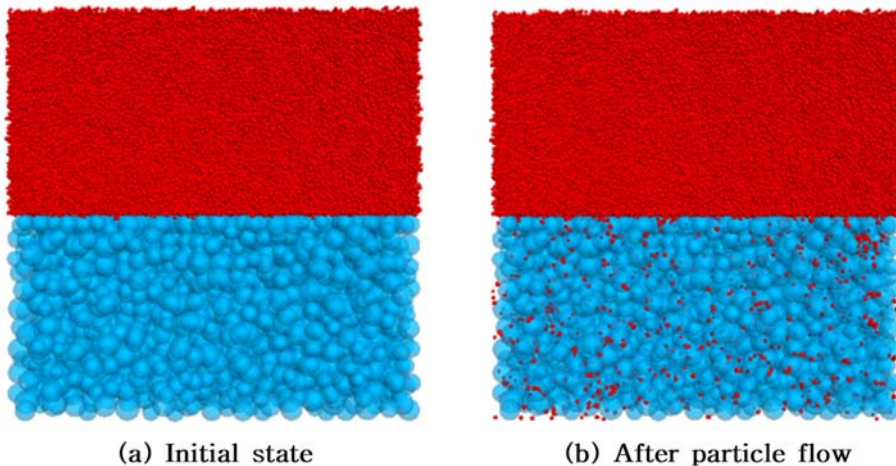


Fig. 9. Particle flow analysis result.

있었으며, 이는 지하수위 저하에 의한 지반침하 경향을 판단하는 것이 아니라 토립자 유실에 의한 지반함몰 예측 및 평가가 실제 지반입도조건을 통해 이루어질 수 있으며 수치 해석적인 검증이 가능함을 나타낸다.

(5) 또한, 향후에는 토립자 거동에 영향을 주는 주변 지반 특성(지하수위 변동, 지하수 유속 변화, 지반진동 등)에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(지반함몰 발생 및 피해저감을 위한 지반 안정성 평가 및 굴착보강 기술개발, 15SCIP-B108153-01)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## References

- Bertram, G. E., 1940, An Experimental Investigation of Protective Filters, Harvard Soil Mechanics Series No 7, Publication No. 267, Harvard University, Cambridge, Mass., 1-21.
- Cundall, P. A., Drescher, A., and Strack, O. D. L., 1982, Numerical experiments on granular assemblies; Measurements and observation, in Deformation and failure of granular materials, Rotterdam : A.A. Balkema, 355-370.
- Cundall, P. A. and Strack, O. D. L., 1979, A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, 29(1), 47-65.
- Cundall, P. A., 2001, A discontinuous future for numerical modelling in geomechanics, *Proceedings of the institution of Civil Engineers, Geotechnical engineering*, 149(1), 41-48.
- Hainbüchner, E., Potthoff, S., Konietzky, H., and Kamp, L., 2003, Particle based modeling of shear box tests and stability problems for shallow foundations in sand, *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods*, Lisse, 151-156.
- Itasca Consulting Group, Inc., 2013, *FLAC3D User's Guide*, Minneapolis, Minnesota.
- Itasca Consulting Group, Inc., 2008, *PFC3D User's Guide & Fish in PFC3D*, Minneapolis, Minnesota.
- Jeon, J. S., Kim, K. Y., and Shin, D. H., 2006, Modelling of large triaxial test with rockfill materials by distinct element method, *Journal of the Korean Geotechnical Engineering*, 22(10), 111-120 (in Korean with English abstract).
- Karpoff, K. P., 1955, The use of laboratory tests to develop design criteria for protective filters, *Proceedings of the American Society for Testing and Materials*, 55(4), 1183-1198.
- Kawaguchi, T., Tanata, T., and Tsuji, Y., 1992, Numerical simulation of fluidized bed using the discrete element method, *JSME*, 58(551), 79-85.
- Kawaguchi, T., 2003, *Discrete particle simulations of gas-fluidized bed*, Ph.D. Thesis, Osaka University.
- KWRA, 2011, "Dam Design Criteria", Korean Water-Resources Research Association, 109.
- Leatherwood, F. N. and Peterson, D. F. Jr., 1954, Hydraulic head loss at the interface between uniform sands of different sizes, *Transactions, American Geophysical Union*, 35(4), 588-594.
- Sherman, W. C., 1953, *Filter Experiment and Design Criteria*, U.S. Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, NTIS AD 771076.
- Shimizu, Y., 2004, Fluid coupling in PFC<sup>2D</sup> and PFC<sup>3D</sup>, in *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods-2004: Proceeding of the 2nd international PFC symposium*, Kyoto, Japan, Y. Shimizu, R.D. Hart and P.A. Cundall, Eds. A.A. Balkema, Lisse, 3-12.
- Skinner, A. E., 1969, A note on the influence of interparticle friction on the shearing strength of a random assembly of spherical particle, *Geotechnique*, 19(1), 150-157.
- Ting, J. M. and Corkum, B. T., 1988, Strength behavior of granular materials using discrete numerical modelling, *Numerical method in geomechanics*, Innsbruck, 305-310.
- Ting, J. M., Corkum, B. T., Kauffman, C. R., and Greco, C., 1989, Discrete numerical model for soil mechanics, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 115(3), 379-398.
- The hankyoreh, 2014, It was 14% more than the excavation design, Retrieved from <http://www.hani.co.kr/arti/society/area/653280.html>.
- Thomas, P. A. and Bray, J. D., 1999, Capturing nonspherical shape of granular media with disk clusters, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(3), 169-178.
- U.S. Corps of Engineers., 1948, *Laboratory Investigation of Filters for Enid and Grenada Dam*, U. S. Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., Technical Memorandum 3-245.
- Zweck, H. and Davidenkoff, R., 1957, *Etude experimentale des filtres de granulometrie uniforme*, *Proceedings, Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, 2(1), 410-413.



**이종현**

한국건설기술연구원 복합재난대응연구단  
10223 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283(대화동)  
Tel: 031-910-0227  
E-mail: jhrhee@kict.re.kr

**진현식**

(주)HNG 컨설턴트 지반사업부  
14287 경기도 광명시 광명로 877 한진상가 A동 1208-1호  
Tel: 02-2611-0910  
E-mail: hsjin90@hanmail.net

**백 용**

한국건설기술연구원 복합재난대응연구단  
10223 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283(대화동)  
Tel: 031-910-0228  
E-mail: baek44@kict.re.kr

**윤형석**

인하공업전문대학 토목환경과  
22212 인천광역시 남구 인하로 100번지  
Tel: 032-870-2230  
E-mail: suk@inhac.ac.kr