

# 비탈끝 배수공이 설치된 균질제방의 침투특성에 대한 해석적 연구

이승현, 김응석\*

선문대학교 건설시스템안전공학과

## An Analytical Study on Seepage Characteristics of Homogeneous Embankment Controlled by Toe Drain

Seung-Hyun Lee, Eung-Seok Kim\*

Department of Civil Infrastructure Systems and Safety Engineering, Sunmoon University

**요약** 제방의 파괴원인 중 하나인 침투에 의한 파괴는 국내외적으로 지속적으로 발생하는 문제로서 많은 인적, 물질적 피해를 야기하고 있다. 안전한 제방설계를 위해서는 제방내부로의 침투특성에 대한 이해가 선행되어야 하며 이를 위해 본 연구에서는 비탈끝 배수공이 설치된 균질제방의 침투특성을 살펴보기 위해 제방고와 비탈끝 배수공의 폭을 달리하여 침투해석을 수행하였다. 해석을 위해 가정한 제방단면에 대한 침투해석결과를 통해 침윤선 위쪽의 모관현상 발생영역에서도 물의 흐름이 발생됨을 알 수 있었다. 침윤선 위로의 물의 침투속도는 상당히 느려짐을 알 수 있었는데 이는 침윤선으로부터 연직상향으로 거리가 떨어질수록 흡인력의 증가에 의해 수리전도도가 감소된 결과 때문으로 설명될 수 있다. 비탈끝 배수공의 폭이 커짐에 따라 침윤선으로부터 하류측사면까지의 최소연직거리도 증가하게 되는데 동일한 비탈끝 배수공의 폭에 대하여 제방고가 증가할수록 침윤선으로부터 하류측사면까지의 최소연직거리는 작아짐을 알 수 있었다. 또한, 제방고가 낮을수록 비탈끝 배수공이 없는 경우에 대한 비탈끝 배수공을 적용한 경우의 침투유량의 비는 커짐을 알 수 있었다. 비탈끝 배수공을 적용하지 않은 경우에 있어서 제방바닥으로부터 유출면 상단까지의 높이는 제방고가 커짐에 따라 선형적으로 증가됨을 알 수 있었는데 얻어진 선형회귀분석식을 통해 유출면의 범위를 예측할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구를 통해 비탈끝 배수공의 폭을 결정하기 위해서는 침투해석을 통해 얻은 침윤선으로부터 하류측사면까지의 최소연직거리와 제방재료의 모관상승고 그리고 침투해석을 통해 구한 제체내부로의 침투유량을 종합적으로 고려해야 함을 알 수 있었다.

**Abstract** Seepage analysis with varying embankment height and toe drain width was conducted to find the seepage characteristics of a homogeneous embankment controlled by a toe drain. The seepage analysis results for the assumed embankment sections indicate that water flow occurs at a capillary zone above the phreatic line. The minimum vertical distance between the phreatic line and the downstream slope increases as the toe drain width increases. In addition, the minimum vertical distance decreases for certain toe drain width as the embankment height increases. The ratio of water rate computed from the water rates with and without toe drain increases as the embankment height decreases. Results of the analysis also show that the distance between the bottom line of the embankment and the horizontal line which passes through the top point of the seepage face increases linearly as the embankment height increases. Finally, this study concludes that the minimum distance between the phreatic line and the downstream slope, the capillary rise of the embankment material, and the magnitude of water rate through the embankment should be considered to determine the size of the toe drain.

**Keywords** : Seepage Characteristics, Toe Drain, Homogeneous Embankment, Capillary Zone, Water Rate

\*Corresponding Author : Eung-Seok Kim(Sunmoon Univ.)

email: hydrokes@sunmoon.ac.kr

Received January 26, 2022

Accepted April 1, 2022

Revised February 22, 2022

Published April 30, 2022

## 1. 서론

제방은 홍수조절, 상수원 저류지, 농업용수 공급 등 다양한 목적의 토공구조물로서 오랫동안 존재되어 오고 있다. 균질제방의 대략적인 구조 및 각부의 명칭은 Fig. 1과 같은데 Fig. 1에서 제체의 정상부를 독마루(crest)라 하고 물을 저류하는 측의 사면을 상류측사면(upstream slope)이라 하며 그 반대쪽 사면을 하류측사면(downstream slope)이라 한다. 그리고 상류측 계획홍수위와 독마루 사이의 높이차를 여유고(freeboard)라 하며 침투에 의한 사면의 안정성을 향상시킬 목적으로 하류측 사면의 끝단부에 설치하는 투수성 배수재를 비탈끝 배수공(toe drain)이라 한다.

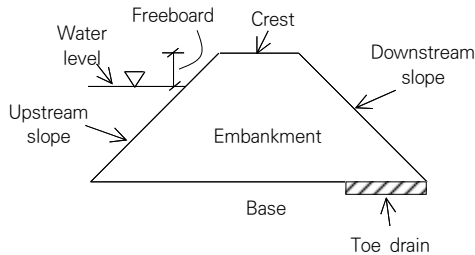


Fig. 1. Embankment and its terminologies

제방단면의 구체적인 형상은 다양한 인자를 고려하여 결정되는데 계획홍수량과 하도특성을 반영하는 하천상황, 제내지 이용상태, 사회경제적 여건, 하천환경 그리고 제방의 공학적 특성을 고려하여야 한다[1,2]. 최근 들어 이상기온의 현상으로 제방 붕괴 사례가 꾸준히 발생되고 있는데 제방붕괴원인으로는 크게 월류, 침식, 체체불안정, 구조물에 의한 파괴를 들 수 있다[3]. 그중에서 체체불안정에 의한 제방붕괴는 지반공학적 요소와 밀접한 관련이 있으며 제체의 침하, 제체를 관통하는 침투 그리고 사면파괴에 의한 붕괴가 그 원인이라 할 수 있다. 제체를 관통하는 침투는 제방 내부에 발생하는 문제로서 최근에도 침투에 의한 사면붕괴가 꾸준히 관찰되고 있으며 이러한 피해를 막기 위해서는 제방내 침투특성의 이해가 선행되어야 한다[4-6]. 본 연구에서는 체체불안정에 의한 제방붕괴를 유발하는 제체를 통한 침투의 영향을 살펴보고자 침투해석 전용 프로그램인 SEEP/W[7]를 이용하여 균질제방에 대한 침투해석을 수행하고 침투특성을 알아보았다. 또한 비탈끝 배수공의 존재 유무와 그 시공범위가 제체내부로의 침투특성에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다.

## 2. 침투해석

### 2.1 해석조건

하천설계기준에 따르면 일반하천의 경우 홍수량에 따라 여유고는 0.6m 이상, 독마루폭은 4.0m 이상으로 하고 있고 소하천의 경우 여유고는 0.6m 이상, 독마루폭은 2.5m 이상으로 하고 있다. 본 연구에서는 침투해석을 위해 여유고는 1m, 독마루폭은 4m로 가정하였으며 상,하류측 사면의 경사는 1:2로 가정하였다. 제방높이에 따른 침투특성을 살펴보고자 제방의 높이는 6m, 8m, 10m, 12m로 가정하였으며 비탈끝 배수공의 설치폭에 따른 침투특성을 살펴보고자 비탈끝 배수공의 폭은 하류측 사면의 비탈끝으로부터 상류측으로 4m에서 10m까지 1m씩 증가하는 것으로 가정하였다. 따라서 해석은 비탈끝 배수공이 없는 경우에 대하여 4회, 비탈끝 배수공이 있는 경우에 대하여 28회 수행하게 된다. 제방은 실트(silt) 재료의 균질 제방으로서 투수계수(permeability)는  $10^{-6}$  m/s 로 가정하였다. 해석에 적용한 침투해석 전용 프로그램인 SEEP/W의 중요 입력함수는 체적함수비 함수(volumetric water content function)와 투수계수 함수(permeability function)이다. 체적함수비 함수로는 SEEP/W에 구축되어 있는 함수(sample function)를 사용하였는데 포화 체적함수비값은 0.5로 가정하였다. 흡인력(matric suction)에 대한 체적함수비의 관계는 Fig. 2와 같고 흡인력에 대한 투수계수의 관계는 Fig. 3과 같다. Fig. 3은 Van Genuchten 함수를 통해 유도된 결과이다[8].

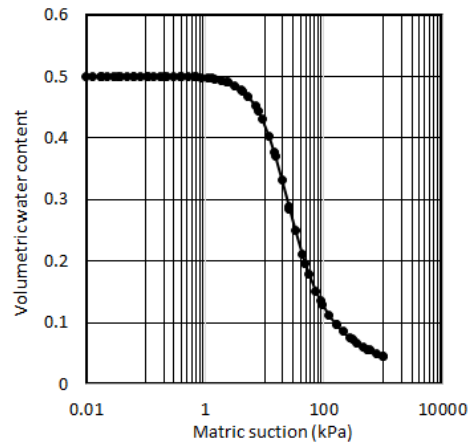


Fig. 2. Graph of volumetric water content

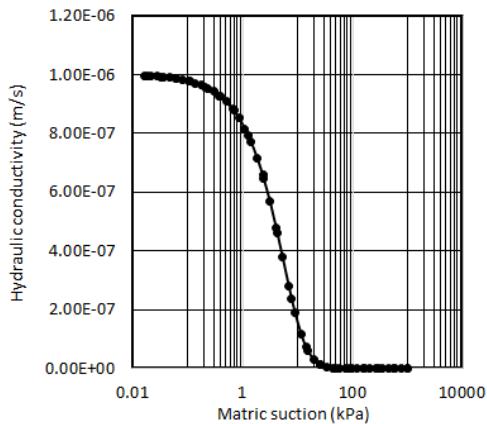


Fig. 3. Graph of hydraulic conductivity function

## 2.2 해석결과 및 분석

제방 높이가 6m 이고 비탈끝 배수공이 없는 경우의 해석결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4에는 제방 내부에 발생되는 흐름벡터(flux vector)와 점선으로 표시되어 있고 침윤선 그리고 대략적인 유선망이 나타나 있는데 흐름벡터의 길이는 유속의 크기를 의미한다.

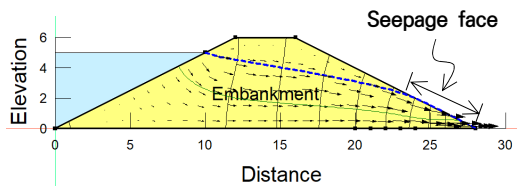


Fig. 4. Analysis results without toe drain

Fig. 4을 통해 제체를 통과하는 유속은 하류측으로 갈수록 빨라지고 상류측 사면 아래 부분 근처에서의 유속은 상당히 느림을 알 수 있다. 또한 침윤선 위쪽의 모관현상 발생영역에서도 물의 흐름이 발생됨을 알 수 있다. 제방 상단부 근처에서는 침투가 거의 발생되지 않음을 알 수 있다. 이러한 이유는 불포화영역에서는 부(-) 간극수압의 절대값의 크기가 침윤선으로부터 연직상향으로의 거리에 비례하므로 그에 따라 흡인력도 증가하게 되어 Fig. 3에 나타나 있는 바와 같이 투수계수가 감소되기 때문으로 설명될 수 있다. 유출면(seepage face)이라 함은 Fig. 4의 해석결과로부터 침윤선과 하류사면의 교차점으로부터 아래부분의 사면부를 의미하는데 유출면은 비탈끝 배수공을 적용하지 않은 경우에 발생되며 유출면에서의 간극수압은 0 이 된다. Fig. 4의 해석결과에 의하면

제체 내부로의 침투유량(water rate)  $7.43 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  로 계산되었다. SEEP/W의 해석을 통해 정확한 유선을 얻을 수는 없고 그림에 나타나 있는 바와 같이 상류측 경사면에서 시작되는 유선은 그릴 수 있는데 Fig. 4에 나타나 있는 유선망에 의해 계산되는 침투유량은  $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  이다. 침윤선의 위치는 제방의 안정성에 영향을 미치는데 과도한 유출 동수경사(exit gradient)에 의해 파이핑이 유발될 수 있고 침윤선이 제방의 하류측 사면과 만나는 경우에는 침투가 발생하는 하류측 사면부가 연약화되어 붕괴가 발생될 수 있다. 제방이 균질토로 만들어지거나 하류측 사면부의 투수성이 문제가 되는 경우 제체의 침투 안정성을 확보하기 위한 방법으로 비탈끝 배수공(toe drain)을 많이 적용하는데 비탈끝 배수공으로 인해 침윤선이 제체 내부에 존재하게 되어 파이핑의 가능성이 배제되는 것이다. 제체는 세립토로 구성되어 침윤선 위로 모관 포화대가 생성되므로 비탈끝 배수공의 설치폭을 결정할 때에는 모관상승고(capillary rise)를 고려해야 한다. 비록 침윤선 위의 모관 영향영역은 부(-)의 간극수압으로 인해 제체의 안정성을 향상시킨다고 볼 수 있지만 모관 포화권(capillary fringe)이 제방 하류측 사면과 만나게 되면 간극수압이 대기압으로 바뀌게 되는 유출면(seepage face)이 형성되어 제방의 파괴를 야기할 수 있다. 따라서 침윤선은 하류측 사면으로부터 모관상승고 보다 먼 거리만큼 떨어져 있어야 한다. Fig. 5에는 제방의 높이가 6m이고 비탈끝 배수공의 설치폭(w)이 4m 인 경우와 10m 인 경우에 대한 침투해석결과가 나타나 있다.

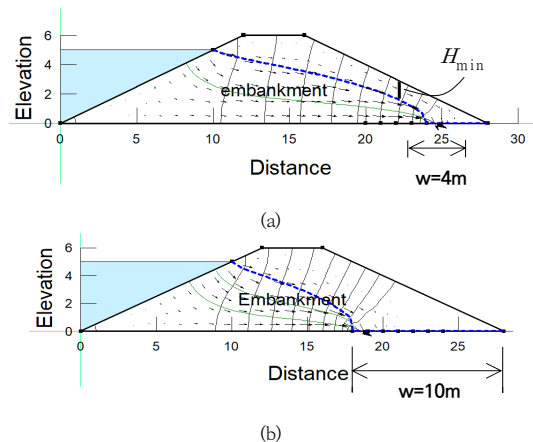


Fig. 5. Analysis results with toe drains  
(a) w=4m (b) w=10m

Fig. 5를 통해 비탈끝 배수공을 설치함으로써 침윤선이 제체 내에 발생되도록 하여 제체의 안정성을 도모할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 5(a)에는 침윤선으로부터 하류측사면까지의 최소연직거리( $H_{min}$ )의 의미가 굵은 실선으로 표시되어 있다. Fig. 5를 통해 비탈끝 배수공의 설치폭에 따른 침투특성을 비교해 볼 수 있는데 비탈끝 배수공의 설치폭이 클수록 침윤선은 하류경사면과 멀어짐을 알 수 있으며 그에 따라 하류경사면에 근접한 부분에서는 물의 흐름이 상대적으로 거의 발생되지 않음을 알 수 있다. 그리고 비탈끝 배수공의 설치폭이 클수록 등수두선의 간격이 좁아져 결과적으로 유속이 증가하게 된다. 비탈끝 배수공의 폭이 10m인 경우 상류측 사면으로부터 침투되는 유량은  $1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  이다. 해석결과를 통해 얻은 비탈끝 배수공의 폭에 따른 침윤선으로부터 하류측사면까지의 최소연직거리( $H_{min}$ )와 제체를 통해 흐르는 유량(water rate) 그리고 제방고(H)에 따른 제방바닥에서부터 유출면까지의 높이(h)는 각각 Fig. 6 및 Fig. 7 그리고 Fig. 8에 나타나 있다.

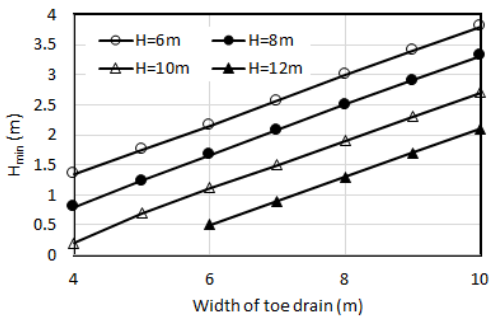


Fig. 6.  $H_{min}$  vs width of toe drain

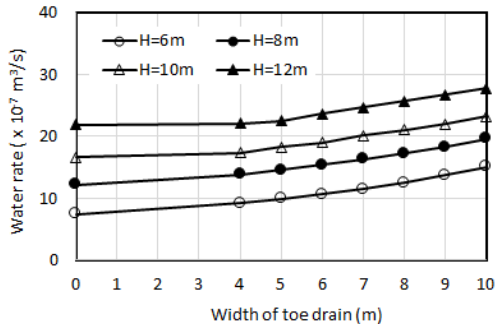


Fig. 7. Water rate vs width of toe drain

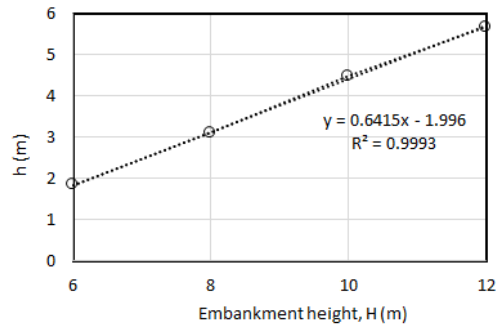


Fig. 8. h vs embankment height

Fig. 6을 통해 비탈끝 배수공의 폭이 커짐에 따라 침윤선으로부터 하류측사면까지의 최소연직거리( $H_{min}$ )도 증가함을 알 수 있는데 제방고가 12m 인 경우 비탈끝 배수공의 폭이 4m 및 5m인 경우에는 침윤선이 하류측 경사면과 교차하는 결과를 보여주었으므로 관련 데이터는 그림에 나타나 있지 않다. 동일한 비탈끝 배수공의 폭에 대하여 제방고가 커질수록 침윤선으로부터 하류측사면까지의 최소연직거리는 작아짐을 알 수 있는데 제방고가 2배 커질 때  $H_{min}$ 은 0.2배~0.5배로 감소되게 된다. 실험의 모관상승고는 최소한 310 cm로 알려져 있으며[9] Table 1에는 몇몇 연구자들에 의해 제시된 실험의 모관상승고가 나타나 있다.

Table 1. Capillary rise in silts

| Sediments                    |                    | Fine silt | Coarse silt |
|------------------------------|--------------------|-----------|-------------|
| Average Grain Diameter (cm)  |                    | 0.0008    | 0.0025      |
| Representative $d_{10}$ (cm) |                    | 0.0002    | 0.00063     |
| Capillary Rise (cm)          | Fetter[10]         | 750       | 300         |
|                              | Adamski et al.[11] | 3750      | 1154        |

Table 1의 내용을 Fig. 5의 침투해석결과와 비교해 볼 때 비탈끝 배수공의 폭을 결정함에 있어 침투해석결과 뿐만 아니라 그에 선행하여 적절한 필터재료의 선정 및 그에 따른 모관상승고의 고려가 필요함을 알 수 있다. 즉, 침투해석결과에 의한 모관현상 발생영역과 제체 재료의 모관상승고에 차이가 있으므로 이를 고려한 합리적인 설계가 필요하다. Fig. 7을 통해 제체내부로 침투되는 유량(water rate)은 제방고에 무관하게 비탈끝 배수공의 폭이 커짐에 따라 증가됨을 알 수 있다. 또한, 비탈끝 배

수공의 폭이 10m인 경우에 있어서 제방고가 6m 및 12m일 때의 침투유량은 비탈끝 배수공이 없는 경우에 비해 각각 2.0배 및 1.3배 큰 값을 보여주었다. 이로부터 제방고가 낮을수록 비탈끝 배수공이 없는 경우에 대한 비탈끝 배수공을 적용한 경우의 침투유량의 비는 증가된다고 볼 수 있다. 비탈끝 배수공 폭의 증가에 의한 침투유량 증가의 이유는 비탈끝 배수공의 설치폭이 커질수록 제체 내부를 통해 흐르는 유로가 짧아지기 때문이다. 이상의 해석결과를 고려해 볼 때 비탈끝 배수공의 폭을 결정하기 위해서는 침투해석을 통해 얻은 침윤선으로부터 하류측사면까지의 최소연직거리와 제방재료의 모관상승고 그리고 침투해석을 통해 구한 제체내부로의 침투유량을 종합적으로 고려해야 할 것으로 판단된다. Fig. 8 통해 알 수 있듯이 비탈끝 배수공이 없는 균질 제방의 경우 제방바닥으로부터 유출면 상단까지의 높이(h)는 제방고가 증가함에 따라 선형적으로 커짐을 알 수 있으며 그래프에 제시된 선형식에 대한 선형회귀 결정계수( $R^2$ ) 값은 거의 1에 가깝다.

### 3. 결론

균질제방의 침투특성을 살펴보기 위해 제방고와 비탈끝 배수공의 폭을 달리하여 침투해석을 수행하였는데 해석결과를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 가정한 제방단면에 대한 침투해석결과를 통해 침윤선 위쪽의 모관현상 발생영역에서도 물의 흐름이 발생됨을 알 수 있었다. 그러나 침윤선 위로의 물의 침투속도는 상당히 느려짐을 알 수 있었는데 이는 침윤선으로부터 연직상향으로 거리가 떨어질수록 흡인력의 증가에 의해 투수계수가 감소된 결과 때문으로 설명될 수 있다.
- 2) 해석결과에 따르면 비탈끝 배수공의 폭이 커짐에 따라 침윤선으로부터 하류측사면까지의 최소연직거리도 증가함을 알 수 있었으며 동일한 비탈끝 배수공의 폭에 대하여 제방고가 커질수록 침윤선으로부터 하류측사면까지의 최소연직거리는 작아짐을 알 수 있었다.
- 3) 제방고가 낮을수록 비탈끝 배수공이 없는 경우에 대한 비탈끝 배수공을 적용한 경우의 침투유량의 비는 커짐을 알 수 있었다.
- 4) 해석결과에 따르면 비탈끝 배수공을 적용하지 않는

경우에 대하여 제방바닥으로부터 유출면 상단(seepage face)까지의 높이는 제방고가 커짐에 따라 선형적으로 증가됨을 알 수 있었으며 관련 관계를 나타내는 선형회귀분석식을 제시하였다. 그러나 제시된 선형회귀분석식은 흙의 종류 및 다짐도에 영향을 받을 수 있으므로 대략적인 유출면의 범위 예측 적용에 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

- 5) 본 연구를 통해 비탈끝 배수공의 폭을 결정하기 위해서는 침투해석을 통해 얻은 침윤선으로부터 하류측사면까지의 최소연직거리와 제방재료의 모관상승고 그리고 침투해석을 통해 구한 제체내부로의 침투유량을 종합적으로 고려해야 함을 알 수 있었다.

### References

- [1] Korea Water Resources Association, River Design Criteria, 2009.
- [2] KWRA, Rivers Design Criteria & Commentary, 2009. DOI: <https://doi.org/10.978.8985149/754>
- [3] Singh, B and Varshney, R. S., Engineering for Embankment Dams, Brookfield: A.A. Balkema Publishers, 1995.
- [4] Cedergren, H.R., (1989) Seepage, Drainage, and Flow Nets, John Wiley & Sons, New York, 1989.
- [5] Fell, R., Wan, C. F., Cyganiewicz, J. and Foster, M., "Time for development of internal erosion and piping in embankment dams," ASCE Journal of Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering, Vol. 129, No.4, pp. 307-314, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:4\(307\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:4(307))
- [6] Fredlund, D. G., Xing, A. and Huang, S. "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve," Can. Geotech. J., 31, pp. 533-546, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1139/t94-062>
- [7] SEEP/W, GeoStudio 2019 R2, 2019
- [8] Van Genuchten, M.T. "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils," Soil Sci. Soc. Am. J. No. 44, pp. 892-898, 1980. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssai1980.03615995004400050002x>
- [9] Rachel Salim, Extent of capillary rise in sands and silts, A thesis submitted to the Graduate College in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science Geosciences, Western Michigan University, April, 2016.
- [10] Fetter, C. W., Applied Hydrogeology. 3rd ed. New

York: Macmillan, 1994..

- [11] Adamski, M., Kremesec, V., Kolhatkar, R., Pearson, C., and Rowan, B., LNAPL in fine-grained soils: Conceptualization of saturation, distribution, recovery, and their modeling, Ground Water Monitoring & Remediation, Vol. 25, Issue 1, pp. 100-112, 2005.  
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.2005.0005.x>

---

이 승 현(Seung-Hyun Lee)

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 토목공학  
학과 (공학사)
- 1991년 8월 : 서울대학교 토목공학  
학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학  
학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 2000년 2월 : 현대  
건설기술연구소 선임연구원
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 건설시스템안전공학과  
교수

<관심분야>

토질역학, 기초공학

---

김 응 석(Eung-Seok Kim)

[정회원]



- 1997년 2월 : 고려대학교 토목환  
경공학 (수공학석사)
- 2002년 2월 : 고려대학교 토목환  
경공학 (수공학박사)
- 2002년 3월 ~ 2004년 2월 : 고려  
대학교 부설 방재과학연구센터  
선임연구원
- 2004년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 건설시스템안전공학과  
교수

<관심분야>

수자원시스템, 상하수도 관망시스템