

3차원 수치해석기법을 이용한 우수배수시스템 배수층의 체적공극과 투수도 결정

염성일, 박성원*, 안정규
인천대학교 건설환경공학부

Determination of Volume Porosity and Permeability of Drainage Layer in Rainwater Drainage System Using 3-D Numerical Method

Seong Il Yeom, Sung Won Park*, Jungkyu Ahn
Dept. of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University

요약 최근 도시화로 인한 불투수면의 증가는 지표 유출수를 집수하여 배수하는 기존의 배수시스템의 부담을 증가시킨다. 이러한 방식의 우수배수시스템은 표면유출수와 함께 이송되는 각종 쓰레기, 낙엽, 등의 부유물질에 의해 배수면적이 감소하는 구조적 한계를 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 최근 새로운 형태의 배수시스템이 개발 및 적용되고 있다. 본 연구는 3차원 전산 유체역학 프로그램 중 하나인 ANSYS CFX를 이용하여 투수성 포장 하부에 위치한 배수층의 체적 공극과 투수도 결정을 위한 모의를 각각 수행하였다. 모의결과 35% 체적공극을 가진 배수층의 배수구 유속이 20%, 50%에 해당하는 배수층보다 큰 값을 보여 체적공극과 배수성능 사이의 상관관계는 없는 것으로 파악되었다. 투수도는 구성물질의 입경에 따라 결정되며, 5가지 조건을 모의하여 배수구 유속을 분석한 결과 입경 2 mm의 사질토가 사용성과 시공성 측면에서 가장 적절하다고 분석되었다. 본 연구는 배수층의 적절한 체적 공극과 구성물질의 입경을 제시하였고 이러한 조건을 갖는 배수층이 침수피해를 저감 및 방지의 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

Abstract The increase in impermeable pavement from recent urbanization has resulted in an increase in surface runoff. The surface runoff has also increased the burden of the existing drainage system. This drainage system has structural limitations in that the catchment area is reduced by the waste particles transported with the surface runoff. In addition, the efficiency of the drainage system is decreased. To overcome these limitations, a new type of drainage system with a drainage layer was developed and applied. In this study, various volume porosity and permeability of the lower drainage layer were simulated using ANSYS CFX, which is a three dimensional computational fluid dynamics program. The results showed that the outlet velocity of the 35% volume porosity was faster than that of the 20% and 50% cases, and there was no relationship between the volume porosity and drainage performance. The permeability of the drainage layer can be determined from the particle size of the material, and a simulation of five conditions showed that 2 mm sand grains are most suitable for workability and usability. This study suggests appropriate values of the volume porosity and particle size of the drainage layer. This consideration can be advantageous for reducing and preventing flood damage.

Keywords : Surface Runoff, Drainage System, ANSYS CFX, Volume Porosity, Permeability

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2019R1F1A1062727).

*Corresponding Author : Sung Won Park(Incheon Natl. Univ.)
email: billy1006@gmail.com

Received May 30, 2019
Accepted August 2, 2019

Revised July 15, 2019
Published August 31, 2019

1. 서론

현대사회의 도시화로 인한 불투수면 증가로 도시 유출 특성이 변화하고 있다. 이러한 유출특성의 변화는 홍수 지체시간의 감소, 지하 저류능력 감소, 침투유량 및 표면 유출의 증가로 이어지며, 이는 침수피해 및 하천 범람을 유발한다[1]. 불투수면의 표면 유출을 흡수하여 배수하는 기존의 우수배수시스템은 표면 유출에 의해 이송되는 부유물질과 함께 상업지역의 덮개 사용으로 인해 흡수능력을 더욱 상실하게 되어 배수성능도 감소하는 구조적 한계점을 가지고 있다. 따라서 기존 우수배수 시스템의 한계를 극복하고자 최근 투수성 포장을 이용, 침투수를 흡수하여 이를 배수하는 침투형 우수배수시스템이 활발히 연구되고 있다[2,3]. 투수성 포장의 구성물질은 다짐 흙, 아스팔트, 초지, 투수 콘크리트 등이 사용되며 배수층 구성물질에 관한 기존 연구사례는 콘크리트와 아스팔트, 다짐 흙 등의 침투율은 시간에 따라 감소하지만 투수성 포장의 경우 일정하게 유지된다는 연구 사례가 있다[2]. 임장혁 등(2007)은 투수성 포장의 누적 침투량 분석을 통해 침투 및 저류 시스템을 제안하였다[3].

또한 침투유출을 이용한 배수시스템은 하천의 건천화를 완화 및 방지한다고 알려진 바 있으며[4], 구조적 최소조건이 만족된다면 저수층 수위 분석을 통해 투수성 포장의 감당해야하는 저수량을 설계할 수 있다[5]. 우수 유출수의 도시하천 유지유량을 활용한 지하 저류시스템을 개발하는 연구가 수행되고 있다[6].

실험 및 모의에 의한 연구 사례는 침투실험을 통한 도시의 유출변화 연구를 통해 투수성 포장의 설치 면적이 전체면적 대비 1%에서 15%로 증가할 경우 표면 관심영역의 유출 저감효과가 약 2.7~8.6%로 나타났다[7]. SWIMM 모형을 이용한 단순 해석 모델링 결과 관심영역의 불투수 포장을 투수성 포장으로 교체하여 37.6%의 침투유출 저감 효과를 보였다[8].

이와 같이 최근 침투형 우수배수시스템 관련 연구들은 투수성 포장의 유출유량 감소와 구성물질 및 유출에 의한 영향 평가에 집중되어 있다. 다공성 물질의 체적공극과 투수도의 특별한 연관 관계가 없다는 연구사례가 존재한다[9]. 본 연구는 우수배수시스템의 유출부 배수에 유리한 체적공극과 투수도를 결정하여 최적의 배수층 설계 조건을 제시하는데 그 목적이 있다.

본 연구에서는 도심지 내 침수피해 방지를 위해 적용되고 있는 투수성 포장덮개를 포함하는 침투형 우수배수시스템의 구조(Fig. 1)를 단순화하여 체적공극과 투수도

변화에 따른 수치해석모의를 수행하였다. 이를 통해 배수층 배수구의 배수량 및 유속을 비교하여 배수성능을 파악하고, 이를 바탕으로 배수층의 설계 조건을 제시하였다.

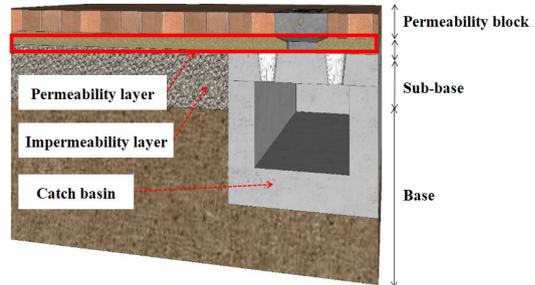


Fig. 1. Diagram of study object

2. 방법론

2.1 CFX 모델의 적용

ANSYS 사의 CFX 모델은 고급 전처리 및 후처리가 용이한 범용적인 전산유체역학 프로그램으로서 운동량 및 물질 전달과정 전반에 걸쳐 Navier-Stokes 방정식을 이용하며, 이산화를 통해 모의한다. 또한 유한 체적법을 사용하며 유한 체적법의 관심체적은 제어체적이라는 작은 영역으로 나뉘게 된다. 관심체적에서 방정식은 이산화되어 각 제어체적에 대하여 반복적으로 계산을 수행한다. 반복계산을 통해 도메인 전체의 특정 지점(node)의 각 변수의 근사값을 얻을 수 있으며 흐름에 대한 해를 얻을 수 있다.

2.2 난류 모형

본 연구에서는 난류 모형 중 흐름의 평균적인 특징을 예측하는데 가장 널리 사용되고 있는 $k-\epsilon$ 모형을 사용하였다[10]. $k-\epsilon$ 는 2식 모형(two-equation)이며, 난류운동에너지(turbulent kinetic energy, k)와 난류 에너지 소산율(turbulent energy dissipation rate, ϵ)에 대한 2개의 편미분 방정식을 통해 흐름 및 난류 특성을 예측하는데 가장 널리 사용되는 모형이다.

2.3 다공성 물질 내부 유체거동 해석

CFX를 이용한 다공성 물질 내부의 유동해석은 운동량 손실모형과 완전 다공성 손실모형이 있으며 전자는 완전흐름영역에서 후자는 다공성 영역에서 각각 적용가

능하다. 완전 다공성 모형은 Navier-Stokes 방정식과 Darcy의 법칙이 동시에 적용된다. 여기서 체적공극률은 관심 지점을 둘러싸고 있는 미소 제어영역에서 유동 체적과 관심 지점을 둘러싸고 있는 물리 체적의 비율이다 (Eq. 1), [11].

$$V' = \gamma V \tag{1}$$

where V' is void space, γ is volume porosity ratio, V is physical volume

3. 연구결과

3.1 체적공극 결정 모의

본 모의는 체적공극에 따른 배수구 평균 유속과 최대 유속을 모의하여 체적공극과 배수량의 관계를 알아보고 배수량이 최대로 발생하는 체적공극을 결정하기 위한 모의이다. Fig. 2에는 적용대상의 제원과 경계면을 표기하였으며, Table 1에는 각 경계면의 세부 경계조건을 표기하였다.

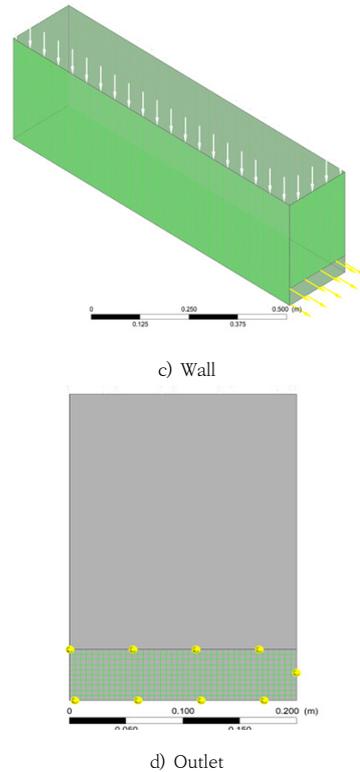
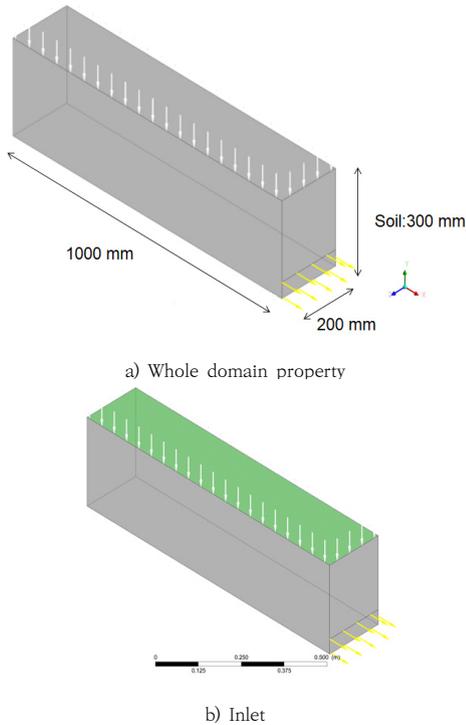


Fig. 2. Boundary conditions for volume porosity

Table 1. Boundary properties

Boundary	Properties
Inlet	Normal speed: 0.005 m/s Fluid: water & air
Outlet	Static pressure: 0 Pa
Wall	No slip wall

본 연구는 실제 침투형 우수배수시스템에 적용되는 배수층의 체적공극 35%와 투수성 포장의 종류 중 하나인 투수성 콘크리트의 체적공극 20%를 사용하였다. 또한 체적공극과 배출성능의 관계를 파악을 위해 체적공극 50%에 해당하는 경우를 선택하였다.

본 모의는 정상상태 해석(steady state analysis)을 하였으며, 모의 결과 각 체적공극에 따른 배수구 평균 유속과 최대 유속은 다음과 같다(Fig. 3).

배수구 최대 유속은 각각 0.15 m/s, 0.13 m/s, 0.2 m/s 로 나타났고 평균 유속은 각각 0.12 m/s, 0.144 m/s, 0.1m/s 로 나타났다.

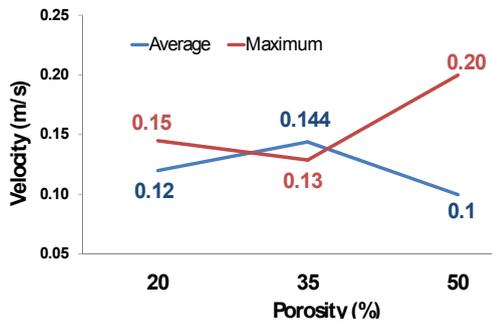


Fig. 3. Cross-sectional flow velocity at outlet

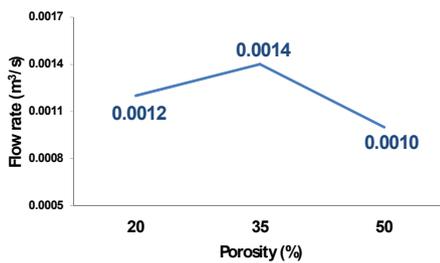


Fig. 4. Cross-sectional flow rate at outlet

배수구의 단위 시간당 배출 유량은 체적공극의 증가함에 따라 각각 0.12 m³/s, 0.0014 m³/s, 0.001 m³/s 이며, 체적공극이 35%일 때, 배출유량이 최대로 발생하며 이는 배수층 내부 압력, 모세관압력, 구속압력 등에 의한 것으로 판단된다.

3.2 투수도 결정 모의

CFX를 이용하여 다공성 물질 내부의 유동해석을 수행하는 경우, 모든 형상을 반영하여 계산을 수행하게 되면 너무 많은 격자가 필요하기 때문에 계산시간의 불필요한 증가를 유발한다. 따라서 형상을 직접 재현하지 않으면서 적절한 해석하고자 하는 경우 손실모형을 사용한 다. 본 모의에 사용된 손실모형은 투과계수를 이용한 모형이며 투과계수는 다음과 같다(Eq. 2), [11].

$$\frac{-dP}{dX} = \frac{\mu}{K_{perm}} U + K_{loss} \frac{\rho}{2} U^2 \quad (2)$$

where, P is pressure, μ is dynamic viscosity γ is volume porosity ratio, K_{perm} is hydraulic conductivity, K_{loss} is empirical loss coefficient.

본 모의에서 손실모형의 적용을 위하여 사용자가 입력하는 값은 투수도이다. 투수도는 다공성 물질에 가해지는 압력에 대한 배출유속과 유체의 물리적 성질을 나타내는 Darcy의 법칙에서 사용되며 투수도와 투과계수의 관계는 다음과 같다(Eq. 3), [11].

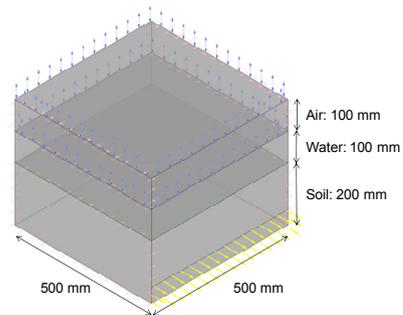
$$k = K \frac{\mu}{\rho g} \quad (3)$$

where, k is permeability, K is hydraulic conductivity, μ is kinematic viscosity, ρ is density, g is gravitational acceleration.

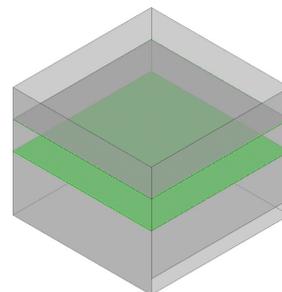
경계조건은 Table 2와 같으며, Fig. 5에 적용대상의 제원과 경계면을 표기하였다.

Table 2. Domain Properties

Domain	Properties
Air	Fluid: water & air
Water	Fluid: water & air Heat transfer: none
Soil	Fluid: water & air Heat transfer: none
Interface	Conservative interface flux



a) Whole domain property



b) Fluid-porous interface

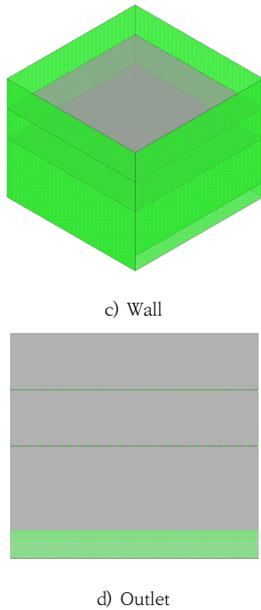


Fig. 5. Boundary condition for permeability model

본 모의는 시간에 따른 수위 변화와 배수구의 유속을 관찰을 위해 비정상상태 해석(transient state analysis)을 하였으며, 정확한 해석을 위한 주요 지표로 사용되며 유속, 격자크기, 계산간격간의 관계를 나타내는 C_r (Courant number)를 케이스에 따라 각각 설정하였다. 배수층 구성물질의 입경에 따라 달라지는 투수도와 배수 성능의 관계를 알아보기 위하여 손실 모형을 사용하였다. 기존 연구에서 제시된 입경 2 mm 사질토의 투수도인 10^{-9} m^2 을 중앙값으로 설정하였다[14]. 이를 기준으로 $10^{-7} \sim 10^{-11} \text{ m}^2$ 의 범위에 해당하는 투수도를 결정하였으며 투수도에 따라 배수층의 유속조건이 변화하였다. 따라서 C_r 를 모의 시에 적정 범위로 설정하기 위한 경계 조건을 Table 3.에 표기하였다. 또한 투수도 결정을 위한 모의결과 중에서 유출부 평균 유속은 다음과 같다 (Fig. 6).

Table 3. Numerical condition for permeability analysis

Case No.	Mesh size (mm)	Total time (min)	Time step (s)	Permeability (m^2)
1	20	3	0.1	10^{-7}
2	20	10	0.5	10^{-8}
3	20	60	5	10^{-9}
4	10	720	5	10^{-10}
5	10	1,440	10	10^{-11}

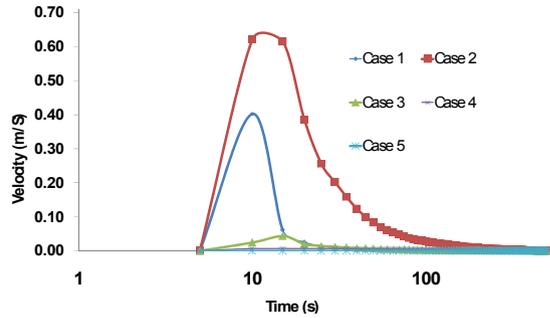


Fig. 6. Cross-sectional flow velocity at outlet

투수도의 변화에 의한 배수구 최대 유속값은 $0.621 \sim 4.49 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 로 모의되었으며 Case 1, Case 2의 배수구의 최대유속은 각각 0.4 m/s, 0.621 m/s로 모의되었다. 이에 해당하는 투수도를 갖도록 배수층 시공할 경우에는 극도로 빠른 유속으로 인한 토사 유실 발생 가능성이 클 것으로 예상되며, 또한 시공성 및 사용성 측면에서도 부적절하다고 판단된다. 결과적으로 Case 3에 해당하는 투수도, 즉 10^{-9} m^2 가 가장 배수에 적절한 투수도인 것으로 제시하고자 한다.

3. 결론

본 연구는 배수층의 다양한 체적공극과 투수도에 따른 배수성능을 비교하고 이를 통해 가장 적절한 배수층의 설치조건을 제시하고자 하였다. 모의 결과는 다음과 같다. 첫째, 체적공극 모의를 통하여 배수층에 유체가 지속적으로 공급되는 경우 Case 3이 Case 2보다 배수구 평균 유속값이 작게 모의되었다. 이는 체적공극의 증가에 의한 구속 압력, 공극 압력, 모세관 압력 등의 변화에 의한 것으로 판단된다. 둘째, 투수도 모의를 통하여 배수구 평균유속을 비교하였고, 그 결과 투수도가 증가할수록 배수구 평균 유속이 증가하는 결과를 확인 하였으나, Case 1의 유속이 Case 2의 유속보다 낮게 나타나 극단적으로 큰 투수도 역시 배수성능 저하의 원인이 될 수 있음을 알 수 있었다. 또한 Case 1과 Case 2 에 해당하는 배수층 구성물질 입경이 사질토의 입경 범위인 0.002 ~ 0.2 mm를 초과하여 포장면 하부에 위치한 배수층의 특성을 고려하고자할 때 시공성 및 사용성의 측면에서 부적절하다고 판단된다. 따라서 본 모의결과 구성물질의 입경이 2 mm 인 Case 3이 배수에 가장 유리한 조건으로 제안하였다.

References

- [1] Y. W. Kim, Y. I. Kim, C. H. Kim, Y. J. Gong, H. Lee, J. S. Yang, "Evaluation of Rain-water Collection Volume in Rain-water Collecting System for LID", *Proceedings of 20th KSCE 2017 convention, Korean Society of Civil Engineers*, Busan, South Korea, pp. 153-154, Oct. 2017.
URL: <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07297126>
- [2] J. H. Im, J. W. Song, S. S. Park, H. S. Park, "An Experimental Study on Infiltration Characteristics of Facilities for Reducing Runoff Considering Surface Materials According to Housing Lot Developments", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 8, No. 5, pp. 47-55, Oct. 2007.
UCI: G704-SER00001652.2007.8.5.001
- [3] J. H. Im, J. W. Song, Y. J. Park, "Experimental Study on improvement of the Effect for Runoff Reducing Facilities Using Infiltration", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 10, No. 4, pp. 5-13, May 2009.
UCI: G704-SER00001652.2009.10.4.007
- [4] B. J. Jang, W. K. Yeo, "Field study on Effects of Runoff Reduction in the infiltration Collector well", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 35, No. 5, pp. 661-618, Oct. 2002.
DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2002.35.5.611>
- [5] I. K. Yoo, S. H. Lee, D. S. Han, S. H. Lee, "Worries and Reality Regarding Porous Asphalt Pavements: Structural Integrity, Flood Mitigation and Non-Point Pollution Reduction", *Ecology and Resilient Infrastructure*, Vol. 3, No. 4, pp. 272-278, December 2016.
DOI: <https://doi.org/10.17820/eri.2016.3.4.272>
- [6] G. W. Choi, J. Y. Choi, S. B. Kim, "Development of the Sub-soil Storage System for Utilization Urban Instream Flow of Rainfall Runoff", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 17, No. 4, Aug. 2015.
DOI : <http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2004.37.2.163>
- [7] Y. M. Koo, J. A. Jo, Y. D. Kim, J. H. Park, "A Study on Runoff Analysis of Urban Watershed by Hydrologic Infiltration Experiment of Permeable Pavement", *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 2, pp. 559-571, March. 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2013.33.2.559>
- [8] W. G. Lin, S. W. Ryu, D. G. Park, J. H. Lee, Y. H. Cho, "Performance Evaluation of the Runoff Reduction with Permeable Pavements using the SWMM Model", *Journal of Korean Society of Road Engineers*, Vol. 17, No. 4, pp. 11-18, Aug. 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7855/IJHE.2015.17.4.011>
- [9] A. M. Wilson, M. Huettel, S. Kleinc, "Grain size and depositional environment as predictors of permeability in coastal marine sands", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.80, Issue 1, pp. 193-199, Oct. 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.06.011>
- [10] B. E. Launder, D. B. Spalding, "The numerical computation of turbulent flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 269-289, March 1974.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
- [11] ANSYS Incorporated, *ANSYS ICFM CFD User's manual*, Oct. 2012.
URL: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>
- [12] Y. Bernabé, U. Mok, B. Evans, "Permeability-porosity Relationships in Rocks Subjected to Various Evolution Processes", *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 160, pp. 937-960, May 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1007/PL00012574>

염 성 일(Seong Il Yeom)

[준(학생)회원]



- 2018년 6월 : 인천대학교 건설환경공학부 공학사
- 2018년 9월 ~ 현재 : 인천대학교 건설환경공학부 석사과정 중

<관심분야>

수치해석연구, 빗물배제시스템

박 성 원(Sung Won Park)

[정회원]



- 2016년 2월 : 서울대학교 건설환경공학부 공학박사
- 2016년 2월 ~ 2017년 4월 : 한국건설기술연구원 박사후연구원
- 2017년 5월 ~ 현재 : 인천대학교 인천방재연구센터 책임연구원
- 2018년 3월 ~ 현재 : 환경대학교 건설환경공학부 강의전담교원

<관심분야>

하천수리학, 유사이송론, 오염확산이론

안 정 규(Jungkyu Ahn)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 건설환경공학부 공학석사
- 2004년 4월 ~ 2005년 7월 : 한국수자원공사 운하건설부 근무
- 2007년 8월 ~ 2011년 12월 : Colorado State University 공학박사
- 2012년 3월 ~ 2015년 8월 : 서울대학교 공학연구소 책임연구원
- 2015년 8월 ~ 현재 : 인천대학교 건설환경공학부 교수

〈관심분야〉

우수배제시스템, 유사이송론, 하천수리학, 수치해석