

단위도를 이용한 침투형 우수배수시스템의 유출 특성 연구

이정민¹, 이재룡^{1*}, 안정규¹, 박성원²

¹인천대학교 건설환경공학과, ²한국과학기술정보연구원

Study on Characteristics of Surface Runoff of Permeable Drainage System Using Unit Hydrograph

Jeongmin Lee¹, Jaelyong Lee^{1*}, Jungkyu Ahn¹, Sung Won Park²

¹Division of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University

²Division of Data-centric Problem Solving Research, Korea Institute of Science and Technology Information

요 약 현대사회의 발달과 도시화의 영향으로 불투수 면적은 지속적으로 증가하고 있다. 불투수 면적의 증가는 고강도 강우 발생 시 도시의 홍수를 유발하는 원인이 된다. 이러한 도시 홍수 예방을 위해 다양한 우수 유출 저감시설이 설치되고 있으며, 최근 기존의 우수 유출 저감시설의 구조적 한계를 개선하고자 침투형 우수배수시스템과 관련된 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 3차원 수치모의기법을 이용하여 동일한 강우강도를 가지는 1시간 지속 강우에 대한 침투형 우수배수시스템의 유출 특성을 모의하였다. 이를 바탕으로 직접유출량과 침투량을 분리하기 위하여 강우 및 유출에 관련된 변수들을 차원해석을 통하여 무차원 변수를 유도하였고 이를 바탕으로 1시간 강우지속에 대한 직접 유출 단위도를 직접 유도하였다. 유도된 단위도를 이용하여 임의의 강우에 대한 유출수문곡선을 유도하였고 이를 3차원 수치모의한 결과와 비교하여 수문곡선의 적용성을 검토하였다. 단위도를 이용하여 합성 수문곡선과 3차원 수치모의 결과 중 침투유량의 비는 0.996으로 정확하였으며 총 유출량과 단위도를 이용한 방법의 차이를 수치로 비교하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 방법을 통해 정확도가 높은 유출 수문곡선을 간략히 유도할 수 있어 실제 강우에 대한 유출 특성을 신속하게 산정 가능하여 침투형 우수배수시스템의 유출량 예측을 실시간으로 수행 가능할 것으로 사료된다.

Abstract The impermeable area is continuously increasing due to modern urbanization. The increase of the impermeable area causes urban flooding when high-intensity rainfall occurs. To prevent such flooding, various runoff reduction facilities are installed, and research is also conducted to overcome the limitations in the facilities. In this study, the runoff characteristics of a permeable drainage system for a 1-hour rainfall with a particular rainfall intensity were simulated using a three-dimensional numerical simulation. The surface runoff and infiltration were computed using dimensionless variables derived with dimensional analysis of variables to determine the effective rainfall. A unit hydrograph for the 1-hour duration was derived. Based on the unit hydrograph, a synthesis hydrograph was derived for an arbitrary rainfall, and the applicability of the procedure was evaluated by comparing the discharge hydrograph to the numerical results. The peak discharges of the two methods were very close, with a ratio between them of 0.996, and the total amount of surface runoff difference was evaluated. Thus, it is possible to derive a highly accurate runoff hydrograph immediately with this very simple method. It is expected that the runoff prediction for the permeable drainage system is performed in real time.

Keywords : Permeable Drainage System, Surface Runoff, Unit Hydrograph, CFX, Urban Flooding

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

*Corresponding Author : Jaelyong Lee(Incheon National Univ.)

email: dlwofydsla1@naver.com

Received August 2, 2021

Accepted December 6, 2021

Revised September 1, 2021

Published December 31, 2021

1. 서론

현대사회의 개발과 도시화의 영향으로 불투수 면적은 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 불투수 면적의 증가는 홍수 도달시간 단축, 지하 저류 능력 감소, 침투유출량을 증가시켜 고강도 강우 발생 시 도시 홍수를 유발할 수 있다[1,2]. 또한 환경부의 전국 불투수 면적률 조사에 따르면, 불투수 면적률은 1970년 3 %에서 2012년 7.9 %로 2.63배 증가하여 도시 침수 발생 위험 또한 증가하는 추세이다[3].

표면으로 유출된 우수를 집수하여 배수하는 원형수로, U형 측구 등의 수로형 우수배수시스템은 일반적으로 적용할 수 있는 우수 유출 저감시설 중 하나이다. 그러나 기존 우수배수시스템의 경우 대부분의 유량을 표면의 배수구를 통해 배수해야 하는 구조적 한계가 존재한다. 따라서 기존 우수배수시스템의 성능을 개선하고자 최근 투수성 포장을 이용하여 침투수를 배수할 수 있는 침투형 우수배수시스템 및 관련 시설에 관한 연구가 수행되고 있다[4,5]. 임장혁 등(2009)은 침투-저류 시스템을 제안하였으며, 수리모형실험을 통한 침투-저류 시스템의 우수 유출 저감 효과를 입증한 바 있다[4]. 또한 염성일 등(2019)은 CFX를 활용한 수치해석 결과를 이용해 투수층의 가장 효율적인 공극률과 투수도를 제안하였다[5].

투수성 포장의 우수 배수 성능을 평가한 연구로 수리 모형실험을 통해 표면 재료에 따른 침투 효과 및 특성을 분석하여 다른 포장재료의 침투율은 시간에 따라 감소하는 반면 투수성 포장은 일정하게 유지되는 것을 확인한 연구가 수행 된 바 있다[6]. SWMM (Storm Water Management Model)모형을 이용하여 투수성 포장 비율에 따른 침투유량 감소 비율을 예측한 연구가 수행되었으며, 그 결과 투수성 포장 비율이 증가함에 따라 표면 유출량 감소를 확인하였다[7]. 또한 SWMM모형을 이용하여 불투수성 포장을 투수성 포장으로 바꿀 경우 침투 유량과 총 유출량 모두 저감 효과를 입증한 연구가 수행된 바 있다[8].

침투형 우수배수시스템은 저빈도 강우일 때 강우의 저류 및 집수를 통한 우수 활용과 고빈도 강우일 때 침투로 인한 침투유량 감소를 이용하여 방재를 목적으로 한다. 따라서 효율적인 침투형 우수배수시스템의 설계를 위한 적절한 유출 특성 파악과 일관된 적용성 평가가 필요하다. 그러나 강우의 특성은 항상 일정하지 않으며, 이로 인한 유출 특성 또한 매번 변화하기 때문에 모든 강우에 대한 유출 특성 모의를 수행하는 것은 비효율적이다.

Sherman (1932)은 강우, 유출량 데이터 관측값이 존재하는 유역의 유출 수문곡선을 추정하기 위해 단위도 개념을 제안하였으며, 실제 유역에 단위도를 적용하여 유출 수문곡선을 합성하고 실제 유출수문곡선과 비교하여 그 적용성을 입증한 연구가 수행된 바 있다[9-11]. 이는 현재까지도 유역 유출 수문곡선을 추정하는데 널리 사용되고 있다. 따라서 본 연구는 강우강도에 따른 침투형 우수배수시스템의 유출특성을 3차원 수치모의 기법을 통해 모의하여 단위유효우량에 의한 표면 유출 수문곡선을 산정하고, 임의의 강우 발생 시 예상되는 침투형 우수배수시스템의 표면 유출 수문곡선 산정 방법을 제안하는 것이 목적이다. Fig. 1은 침투형 우수배수시스템의 단면을 나타낸 것이다.

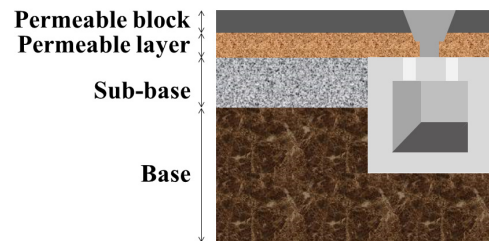


Fig. 1. Cross-sectional diagram of study object

2. 방법론

2.1 CFX 모델의 적용

본 연구에서는 유한 체적법을 이용한 ANSYS 사의 CFX 모델을 사용하여 3차원 비정상류 해석을 수행하였다. CFX 모델은 모델링의 고급 전처리 및 후처리가 용이한 3차원 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 프로그램 중 하나로서 유체 흐름, 열 및 물질 전달, 화학 반응 및 이와 관련된 현상을 수학적 계산을 통해 예측하는 프로그램이며, 표면 유출과 침투 유출을 동시에 해석할 수 있는 결합 모델로서 각각 해석하는 모델보다 효율성이 높다. CFX 모델은 기본적으로 방정식은 질량, 운동량, 에너지 보존 법칙을 만족하며, Navier-Stokes 방정식의 이산화를 통해 운동량 및 물질 전달과정을 해석한다. 수치모의 기법은 연속적인 흐름을 이산화 한 후 반복적인 계산을 통해 근사값을 얻어 흐름에 대한 해를 얻어 낼 수 있으며, 실험 및 데이터 수집에 소요되는 시간과 비용의 절감이 가능해 최근의 유체 해석에 많이 이용되고 있다[5,12].

2.2 다공성 매질 내의 유체 거동

다공성 매질 내의 유체 거동 해석 시 내부의 형상을 모두 격자로 재현하는 경우 형상 구현에 많은 수의 격자가 필요하며, 이는 계산 시간의 증가로 이어져 계산의 효율을 저해한다[5]. 이러한 경우 손실 모형을 적용하여 유체가 지나는 다공성 매질의 효과를 적용해 해석할 수 있다. 본 연구에서는 투과성과 손실 계수를 통해 손실모형을 적용하였으며, 기본 수식은 Eq. (1)과 같다[12].

$$\frac{-dP}{dx} = \frac{\mu}{K_{perm}} U + K_{loss} \frac{\rho}{2} U^2 \quad (1)$$

where P is pressure, x is length, μ is kinematic viscosity, U is water velocity, ρ is density, K_{perm} is hydraulic conductivity, and K_{loss} is empirical loss coefficient

3. 연구결과

3.1 단위도 유도

본 연구의 목적은 단위도를 이용하여 효율적인 침투형 우수배수시스템의 유출특성 파악 방법을 제안하는 것이다. 침투형 우수배수시스템의 유출 특성을 파악하기 위해 10 mm/hr, 45 mm/hr, 65 mm/hr 지속시간 1시간의 단일 강우를 3차원 수치모의에 적용하여 각각의 표면 유출량을 산정하였다. 추후 현장실험 결과와 모의 결과의 비교를 위해 실제 침투형 우수배수시스템이 설치되어 있는 인천 강우 관측소의 확률 강우량인 45 mm/hr (2년 빈도), 65 mm/hr (10년 빈도)의 강우를 적용하여 유출을 모의하였다. 극단적 강우가 아닌 일반적인 강우의 유출 특성을 파악하고자 최소 확률강우량인 2년 빈도를 적용하였으며, 단위도 유도 시 편의성을 위하여 10 mm/hr 강우에 대한 모의를 추가로 실시하였다. 또한, 투수성 포장 설계 지침 기준에 따라 10년 빈도 확률 강우량을 적용하였다[13].

CFX 모의를 통해 계산된 표면 유출량을 각각의 유효우량으로 나눈 값을 평균하여 침투형 우수배수시스템의 단위도로 사용하였다. 여기서 유효우량은 각 CFX 모의 시 유입된 총 우량에서 침투된 우량을 제외한 나머지 우량을 말한다. 또한 단위도를 이용하여 유출 수문곡선을 산정하기 위해서는 강우의 지속시간이 동일해야 하므로 위에서 유도한 단위도의 평형 유출을 이용하여 지속시간을 10분으로 변경하였다. 위와 같은 방법으로 산정한 침투형 우수배수시스템의 표면 유출량과 단위도는 Fig. 2와 같다.

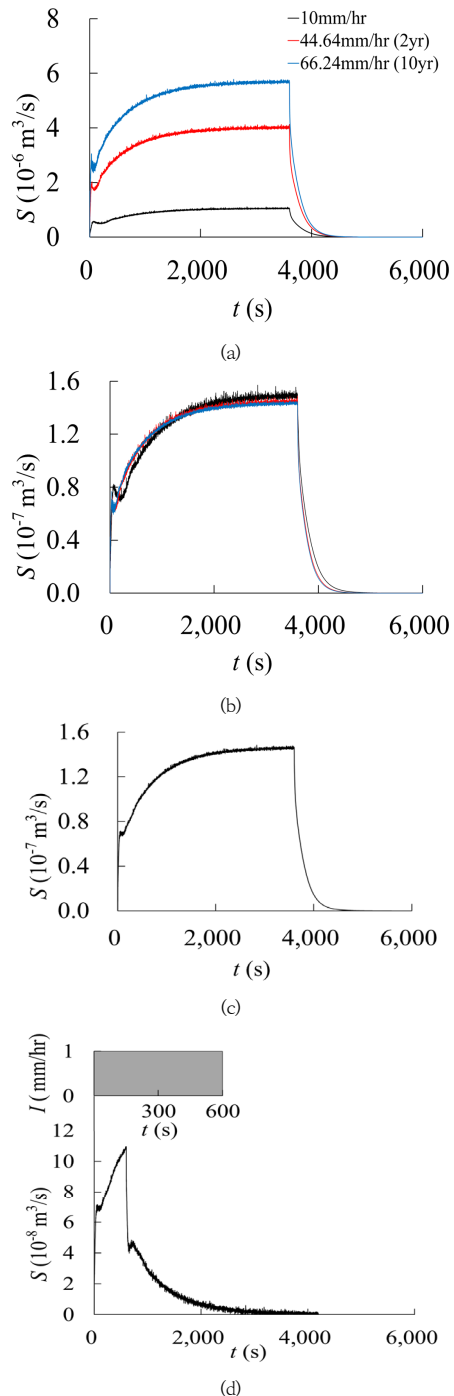


Fig. 2. Deriving of 10 minutes unit hydrograph of permeable drainage system

(a) Surface runoff (b) Surface runoff over effective rainfall (c) 1 hour unit hydrograph (d) 10 minutes unit hydrograph

3.2 유효우량 산정 및 수문곡선 합성

CFX 모의를 통해 산정한 표면 유출량을 이용하여 표면 유출량과 표면 유출량 영향 인자 간 차원해석을 통해 관계식을 Fig. 3과 같이 유도하였다. 유출량 영향 인자는 Table 1에 정리한 바와 같이 표면유출량(S), 투수계수(K), 강우지속시간(D), 강우강도(I)로 총 4개이다. 차원해석 결과 무차원 변수를 유도하여 Eq. (2)와 같이 산정하였다. 이후 회귀분석과 상관분석을 통해 관계식의 계수를 결정하였다.

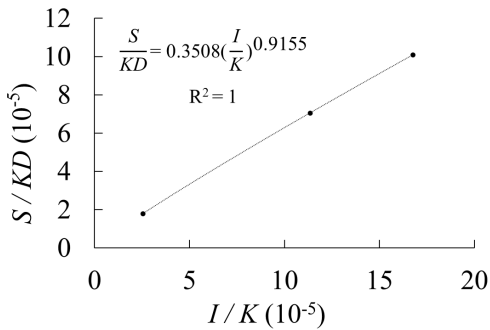


Fig. 3. Dimensionless expression of relation

$$\frac{S}{KD} = f\left(\frac{I}{K}\right) \quad (2)$$

where S is surface runoff, K is permeability, D is rainfall duration, and I is rainfall intensity

Eq. (2)를 사용하여 임의로 설정한 강우주상도의 유출량을 산정하고, 이를 강우 지속시간으로 나눈 표면 유출량을 유효우량으로 사용하였다. Fig. 4는 무차원 관계식을 적용해 산정한 유효우량을 나타낸다.

단위도의 3대 가정인 동일 기저시간 가정, 비례가정 및 중첩가정을 적용하여 위의 방법으로 산정한 침투형 우수배수시스템의 단위도와 유효우량을 이용해 임의의 강우 주상도에 의한 표면 유출량 수문곡선을 합성하였다.

Table 1. Variable of dimensionless expression of relation about surface runoff

Variable	Dimension
S (Surface runoff)	[L]
K (Permeability)	[LT ⁻¹]
D (Duration)	[T]
I (Rainfall intensity)	[LT ⁻¹]

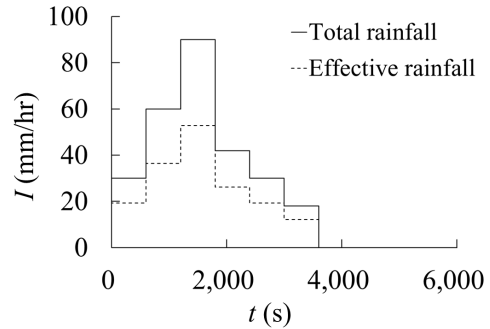
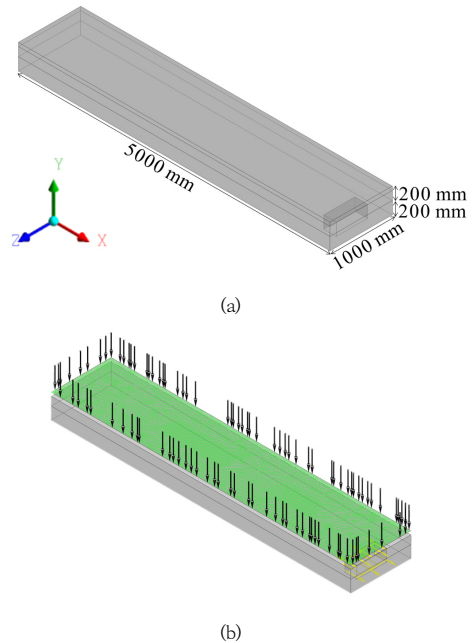


Fig. 4. Effective rainfall hyetograph

3.3 CFX를 이용한 유출 모의

본 모의는 임의의 강우로 인한 표면 유출량을 모의하여 합성 수문곡선 산정을 목적으로 유도된 침투형 우수배수시스템 단위도의 적용성을 평가하기 위한 모의이다. Fig. 5는 도메인의 제원과 경계를 표기하였으며, Table 2, Table 3에는 각각 침투형 우수배수시스템의 특성과 경계조건을 표기하였다. 총 9,000초(2시간 30분)에 대한 모의를 수행하여 대부분의 유출은 1시간 40분에 종료되었으며, 이후에는 토양층 내의 일부 저류 및 물의 이동이 이뤄진 것을 모의하였다.



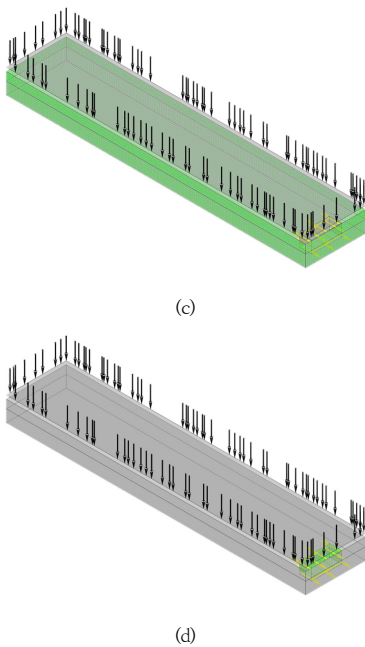


Fig. 5. Domain properties and Boundary for simulation
(a) Whole domain properties (b) Inlet (c) Wall
(d) Outlet

Table 2. Domain properties

Domain	Properties	
Fluid domain	Fluid	water and air
	Fluid	water and air
Porous domain	Permeability	10^{-9} m^2
	Porosity	0.35

Table 3. Boundary condition

Boundary	Properties
Inlet	Effective rainfall hyetograph
Outlet	Static pressure: 0 Pa
Wall	No slip wall

3.4 유출 수문곡선의 비교

다음 Fig. 6은 각각 침투형 우수배수시스템 단위도를 이용한 합성 수문곡선과 CFX 모의를 이용하여 산정한 표면 유출량 수문곡선을 나타낸 것이며, Table 4는 종합적인 수문곡선 분석 결과를 나타내었다.

Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)와 Root mean squared error (RMSE)를 이용한 수문곡선의 적합도 분석 결과 두 수문곡선이 상당히 유사하게 산정된 것을 알 수 있었으며, 침투유량 또한 유사하게 나타나 적절한 수문곡선이 산정된 것으로 판단된다.

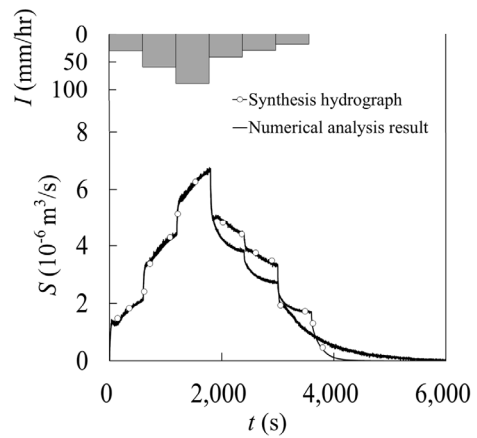


Fig. 6. Comparison of surface runoff hydrograph

Table 4. Comprehensive study result

	Synthesis hydrograph	Numerical analysis result	
Peak flow discharge	$6.728 \times 10^{-6} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$6.755 \times 10^{-6} \text{ (m}^3/\text{s)}$	0.996
Total surface runoff	0.135	0.125	0.070
NSE	0.978		
RMSE (m^3)	2.873×10^{-6}		

총 표면 유출량의 경우 침투형 우수배수시스템의 단위도를 이용한 합성 수문곡선의 유출량이 주어진 강우 주상도를 3차원 수치모의 결과보다 7% 높게 나타났다. 이는 단위도 유도 시 단일 강우를 이용하므로 복합적인 강우 주상도를 적용할 경우 강우에 의해 변화된 토양의 함수비가 조금 다르기 때문이나 침투형 우수배수시스템의 집중 강우 시 주요 목적은 침투 유출량을 줄이는 것이므로 집중의 침투 저감효과 분석에 충분히 적용이 가능할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 침투형 우수배수시스템의 단위도를 이용하여 합성 수문곡선을 산정하고 CFX를 이용한 표면 유출 모의와 비교한 뒤 침투형 우수배수시스템 단위도의 적용성을 검토하고 이를 바탕으로 효율적인 표면 유출량 산정 방법을 제안하였다. 연구결과는 다음과 같다.

첫째, 합성 수문곡선과 수치해석 결과를 비교했을 때

침투유량의 비는 0.996으로 유사하게 나타났다. 침투유량은 하수 및 우수 관거 설계 시 중요한 고려 요소이므로, 이를 정확하게 예측하는 것은 우수처리시설 설계에 있어 매우 중요하다.

둘째, 수문곡선의 적합도 분석 결과 NSE와 RMSE는 각각 0.978, 2.873×10^{-6} 으로 단위도를 이용한 합성 수문곡선이 침투형 우수배수시스템의 유출 특성을 잘 표현한 것으로 판단된다.

셋째, 총 표면 유출량은 단위도를 이용한 합성 수문곡선의 유출량이 7% 높게 산정되었다. 이는 단위도 유도 시 단일 강우를 이용하여 유출량을 산정하므로 임의의 강우 주상도에 적용할 경우 선행 강우에 의해 변화된 토양의 초기 침투능을 적절히 반영하지 못했기 때문으로 판단된다. 따라서 선행 강우에 의한 토양의 함수비 및 초기 침투능에 관한 추가적인 연구가 필요하며, 이를 통해 정확성을 확보할 수 있다.

기존 침투형 우수배수시스템의 임의의 강우에 대한 침투량 및 유출량 산정을 위하여 주어진 강우에 대한 현장 또는 모형 실험, 수치모의 기법을 적용하여 각 강우 사상별로 각각 결과를 도출하여야 하는 방안을 활용하였다. 그러나 본 연구에서 제한한 단위도 유도 및 단위도를 이용한 유출수문곡선 산정을 통해 침투형 우수배수시스템의 유출 특성을 기존의 현장실험 혹은 수치모의를 통한 유출과 침투량 모의에 비해 신속하고 정확하게 파악이 가능하므로 침투형 우수배수시스템 운영에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 유출량 산정 시 현장실험을 병행하여 수치모의 결과와 비교하여 정확도 향상이 가능할 것으로 기대되며, 수치모의 기법을 이용하여 유도된 단위도의 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Ministry of Environment, Research on Impermeable Area Ratio Nationwide and Improvement Plan, Research Report, Ministry of Environment, Korea, pp.52-61
- [2] Y. I. Moon, S. K. Yoon, J. S. Kim, J. H. Ahn, "A Study on the Change of Runoff Characteristics due to the Urbanization", Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference, Korea Water Resources Association, Jeju, Korea, pp.730-734, May, 2006
- [3] H. W. Lee, "A study on Watershed Model for Predicting the Runoff Characteristics of Urban Area", Journal of Korean Society of Environmental Engineers, Vol.31, No.12, pp.1089-1094, Sept. 2009.
- [4] J. H. Im, J. W. Song, Y. J. Park, "An Experimental Study on Improvement of the Effect for Runoff Reducing Facilities Using Infiltration", Journal of Korean Geo-Environmental Society, Vol.10, No.4, pp.5-13, Jun. 2009.
- [5] S. I. Yeom, S. W. Park, J. K. Ahn, "Determination of Volume Porosity and Permeability of Drainage Layer in Rainwater Drainage System Using 3-D Numerical Method", Journal of the Korea Academia Industrial Cooperation Society, Vol.20, No.8, pp.449-455, Aug. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.8.449>
- [6] 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 Korean Geo-Environmental Society, Vol. 8, No.5, pp.47-55, Oct. 2007.
- [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, Mar. 2013.
DOI: <https://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", International Journal of Highway Engineering, Vol.17, No.4, pp.11-18, Aug. 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7855/IJHE.2015.17.4.011>
- [9] L. K. Sherman, "Streamflow from rainfall by the unit hydrograph method", Engineering News-Record, Vol. 108, pp. 501-505, 1932
- [10] P. K. Bhunya, S. N. Panda and M. K. Goel, "Synthetic Unit Hydrograph Methods: A Critical Review", The Open Hydrology Journal, Vol.5, No.1, pp.1-8, 2011
- [11] U. Agirre, M. Goni, J. J. Lopez, F. N. Gimena, "Application of a unit hydrograph based on subwatershed division and comparison with Nash's instantaneous unit hydrograph", Catena, Vol.64, No.1-2, pp.321-332, 2005
- [12] ANSYS, ANSYS CFX Solver Theory guide, ANSYS Incorporated, Pennsylvania, USA, Dec. 2006
- [13] Kim et al., "Application Method of Infiltration Facilities for Urban Flood Protection", Research report, National Disaster Management Research Institute, Korea, pp. 36-74, Dec. 2009

이 정 민(Jeongmin Lee)

[준회원]



- 2020년 2월 : 인천대학교 건설환경공학부 공학사
- 2002년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 건설환경공학부 석사과정 중

〈관심분야〉

우수배제시스템, 수치해석, 하천수리학

박 성 원(Sung Won Park)

[정회원]



- 2016년 2월 : 서울대학교 건설환경공학부 공학박사
- 2016년 2월 ~ 2017년 4월 : 한국건설기술연구원 박사후연구원
- 2017년 5월 ~ 2019년 8월 : 인천대학교 인천방재연구센터 책임연구원
- 2019년 9월 ~ 현재 : 한국과학기술정보연구원 위촉연구원

〈관심분야〉

하천수리학, 유사이송론, 오염확산이론

이 재 룡(Jaelyong Lee)

[준회원]



- 2018년 2월 : 인천대학교 건설환경공학부 공학사
- 2018년 3월 ~ 2020년 2월 : 인천대학교 건설환경공학부 공학석사
- 2020년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 인천방재연구센터 연구원

〈관심분야〉

하천수리학, 3차원 유동해석

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