

지오셀로 보강된 투수성 아스팔트포장의 홍수저감성능 평가

유인균

한국건설기술연구원 도로교통연구본부

Flood reduction performance evaluation of permeable asphalt pavement reinforced with geocell composite

In-Kyoon Yoo

Department of Highway and Transportation Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 도시지역의 불투수 면적이 증가하여 빗물이 침투되지 못하고 일시에 배출되어 도시홍수가 증가하고 하천의 건천화가 심화되는 문제가 반복되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 저영향개발을 지향하면서 투수성포장을 권장하고 있으나 수문학적인 실증자료가 없어 많이 적용되지 못하고 있다. 본 연구는 투수성포장의 지지력을 향상시키기 위하여 제작된 지오셀 투수성포장체를 적용한 투구성포장체의 수문성능을 평가하기 위해서 수행되었다. 이를 위해 콘크리트 격벽으로 분리된 시험포장구간에 투수성포장을 시공하고 기존의 일반 불투수성포장의 수문성능과 비교하였다. 투수성포장은 투수성 표층 5cm, 지오셀 보강층 10cm, 골재기층 20cm, 보조기층 50cm를 설치하고, 기층과 보조기층 사이에 5cm의 모래층을 설치하였다. 강우모사시험을 통해 얻은 지오셀 투수성포장의 수문성능은 다음과 같다. 첫째, 지오셀 투수성포장은 큰 강우강도에서 침투유량의 저감효과가 더 크게 나타났다. 강우강도가 가장 강한 105mm/hr의 강우에서 불투수성포장과 투수성포장의 침투유량 차이가 25%정도 나타났다. 그리고 145mm/2hr와 175mm/3hr의 강도에서는 침투유량의 차이가 거의 나타나지 않았다. 둘째, 지오셀 투수성포장은 침투유량에 이르는 시간을 지체시켜 주는 것으로 나타났다. 불투수성포장에서는 모두 약 10분이었으나 투수성포장에서는 105mm/hr의 강도에서는 25분, 145mm/2hr의 강도에서는 35분 그리고 175mm/3hr의 강도에서는 48분으로 침투유량에 이르는 시간이 지체되는 것으로 나타났다. 셋째, 일반 불투수포장은 강우가 멈추면 바로 유출이 멈추는 반면 지오셀로 보강된 투수성포장은 강우가 멈춰도 지속적으로 유출이 일어나는 것으로 나타났다. 강우 중단 후의 유출양상은 강우강도에 상관없이 유사한 것으로 나타났다.

Abstract When the impervious area of a pavement increases, rainwater cannot penetrate and discharge. Hence, permeable pavements emerged as a solution to this problem, but their hydrological data is not available at present. Hence, this study evaluates the hydrological performance of the geocell composite-reinforced permeable pavement. This technology of the permeable pavement is patented and improves the structural capability of the permeable pavement. For analysis, this study considered a geocell permeable pavement (GPP) and an impervious pavement to study their hydrological performance. The GPP consists of a surface layer of thickness 5 cm, a geocell composite layer of thickness 10 cm, and an aggregate layer of thickness 70 cm. The hydrological performance of GPP obtained through the rainfall simulation test is as follows. First, the GPP showed a high reduction effect of 25% of peak flow at a heavy rainfall intensity of 105 mm/hr. On the other hand, there was little difference in the peak flow at other rainfall intensities. Second, the GPP delays the time to reach the peak flow. For example, the impervious pavement takes about 10 minutes to reach the peak flow, but the GPP needs 25, 35, and 48 minutes, respectively, at different rainfall intensities. Third, the general impervious pavement stopped the runoff as soon as the rain had stopped, whereas the GPP continued to seep out even after the rain had stopped. Finally, the runoff pattern after the rain had stopped was similar between the two pavement types regardless of the rainfall intensity.

Keywords : Urban Flood, Geocell, Porous Pavement, Hydrology, Artificial Rainfall Simulation

*Corresponding Author : In-Kyoon Yoo(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)
email: ikyoo@kict.re.kr

Received September 16, 2021

Revised October 14, 2021

Accepted December 6, 2021

Published December 31, 2021

1. 서론

도시화로 인해 불투수 면적이 증가하여 지반으로의 빗물 침투를 막아 하천 유량을 증가시키고, 기저유량을 감소시키며, 도시오염물의 하천유입을 증가시키는 등 물순환체계에 악영향을 끼치고 있다[1,2]. 이러한 문제를 지속가능한 방법으로 해결하고자 하는 것이 저영향개발(Low Impact Development, LID)기술이고 그 중 하나인 투수성 포장이다[3]. 불투수성인 기존 포장과는 달리, 투수성 포장은 빗물이 포장체의 공극을 통해 지반으로 침투하는 것을 허용하여 유출량 감소, 수자원의 오염방지 효과가 있다[1].

그러나 빗물이 포장체를 투과하여 지반으로 침투하게 되면 지반이 약화되어 도로포장이 파손될 것이라는 우려 때문에 도로포장의 표층에만 적용하고 지반으로 물이 침투하지 못하게 표층 아래에서 배수처리하는 배수성포장을 적용하고 있다. 도시의 지속가능한 개발을 위해서는 빗물이 지반으로 침투하는 투수성포장의 적용이 필요하다. 그리고 투수성포장을 차도에 적용하기 위해서는 투수성포장에 빗물이 침투 되었을 때 포장체의 지지력과 우수의 유출 특성을 파악할 필요가 있다.

본 연구는 지지력을 보강하기 위해 지오셀을 이용한 투수성포장 보강체[4]의 우수에 대한 유출특성을 평가하기 위해 실시되었다. 고안된 투수성포장의 구조보강체가 부분적으로 투수성과 불투수성을 동시에 가지고 있기 때문에 이를 설계에 반영하기 위해서는 유출특성에 대한 평가를 먼저 수행하고 구조적인 지지력 보강효과에 대한 평가를 수행할 필요가 있다.

2. 관련연구

투수성포장은 수문학자인 미국의 Ferguson[5]에 의해서 투수성포장의 도로공학적인 기능과 수문학적인 기능을 통합하여 투수성포장의 장점을 기술함으로써 본격적으로 활용되기 시작했다고 할 수 있다. 그러나 2016년에 발간된 세계시장의 동향을 분석하는 Marketsandmarkets[6]의 보고서에 따르면 투수성포장의 설계법의 부재가 투수성포장의 활성화에 걸림돌이 되고 있다고 지적하고 있다. 설계법에는 투수성포장의 구조적인 설계와 수문학적인 설계를 모두 포함한다.

우리나라 KMOE[7]에서 발간한 저영향개발 지침에서도 투수성포장에 대한 탁월한 효과를 강조하고 있지만

실제 적용에 대해서는 구조적인 취약성에 대한 우려와 수문학적인 저류특성의 신뢰성으로 인해 실무에서의 적용이 저조한 실정이다.

국내의 관련 연구로는 투수성포장을 고려한 SWMM의 수정 및 하수처리 재이용수와 투수성포장의 효과분석이라는 논문에서 Lee[8] 등은 시험구역인 학의천 불투수면적의 10%를 투수성포장으로 치환할 경우, 하루 비산교 지점의 저수량은 3%, 갈수량은 17%가 증가하는 것으로 평가된다고 보고하였으며 투수성포장은 갈수기의 하천수량을 증가시키는 수단이 될 수 있다고 평가하였다. 또한 Koo[9] 등은 투수성포장에 의한 비점오염원 저감 효과분석이라는 연구에서 강우가 발생할 경우, 인도, 주차장 및 투수성포장의 초기 지표유출이 발생할 때, 유출수를 채수하여 실험한 결과 투수성포장의 유출수가 인도의 유출수에 비해 BOD 60%, T-P는 26.84%, T-N은 87.73%, TSS는 60.43% 낮게 나타났다고 투수성포장의 효과에 대해서 보고하였다.

투수성포장의 구조적인 지지력에 대한 연구는 국내 [10-13] 4편과 해외[14,15] 두 편이 검색되었고 이들은 지오셀 등을 이용하여 빗물의 침투로 인해 약화될 수 있는 포장층을 강화하는 방법 등을 제시하고 있다. 투수성포장에 대한 구조적인 보강방법은 빗물침투로 인해 투수성포장이 갖춰야 하는 최소성능을 제시하기만 하면 된다. 필요한 저수용량에 따라 포장체의 두께는 증가할 수 있기 때문이다.

Lee[4] 등이 고안한 투수성포장의 지오셀 보강체가 투수성포장의 기층으로 사용되었을 경우, 지오셀 보강체가 부분적으로 투수성능을 갖기 때문에 수문설계에 활용하기 위해서는 수문학적인 유출특성을 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 현장 실험을 통해 이들 지오셀 보강체가 포함된 투수성포장의 수문유출특성을 검증하고자 한다.

3. 시험포장과 계측

3.1 지오셀 투수 보강체

지오셀을 이용한 투수성보강체는 투수성포장의 표층 하부에 건설되는 투수층으로 규칙적인 충전 공간을 갖는 3차원 지오셀에 각각의 충전공간을 중앙으로 관통하는 철근과 같은 보강철선을 설치하고 일부 충전공간에는 몰타르나 콘크리트가 타설되어 이루어진다(Fig. 1).

지오셀 투수보강체는 충전공간을 하나씩 건너뛰어서 구성되며, 충전공간의 흡수열과 짝수열에 구성된 보강블럭은 서로 엇갈리게 배치된다.

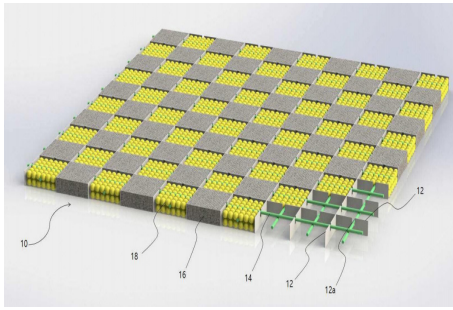


Fig. 1. Reinforcement composite using geocell(Lee[14])

3.2 시험포장 및 방법

본 시험포장은 Geocell을 이용한 하부기층 구조 보강재를 포함한 투수아스팔트 포장체의 우수유출 성능시험을 수행하였으며, 일반 불투수포장을 대조군으로 하여 비교분석을 수행하였다. 투수 아스팔트 포장체의 특사항은 표층 50mm 투수성 아스팔트포장을 시공하고 시멘트 콘크리트가 채워진 지오셀 복합 구조보강재 10mm, 그리고 골재기층 200mm와 보조기층 500mm로 구축되었다.

본 시험포장은 각각 2.3m x 10.9m 크기의 콘크리트 벽체로 구성된 LID 국가공인시험장에서 실시되었다. 투수성아스팔트표층의 아스팔트 바인더는 규격에 맞는 PG76-22를 사용하였으며 공극률은 20%를 목표로 설계되었다. 골재기층의 입도는 미국 ASCE 개립도 골재규격에 따라 수행되었다. 사용된 지오셀 보강체는 지오셀과 철근 그리고 콘크리트로 구성되었다. 지오셀은 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)로 제작되었으며 높이 10cm, 폭 30cm, 두께 0.8mm인 지오셀과 직경 10mm철근을 사용하였으며(Fig. 2) 콘크리트는 압축강도 21MPa인 콘크리트를 사용하였다.



Fig. 2. Geocells reinforced with rebar

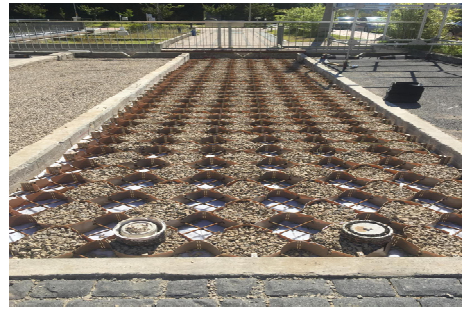


Fig. 3. Geocells filled with aggregates



Fig. 4. Geocells filled with cement and aggregates

3.3 강우의 모사

시험포장에 강우를 모사하기 위하여 실외 인공강우 모사장치를 이용하였으며 이 모사장치는 강우를 공급하기 위한 수조, 펌프, 유량계 그리고 노즐 및 오실레이터 등으로 구성되어 있다(Fig. 6).

강우량은 2017년에 행정안전부에서 제시한 지역별 방재성능목표 강우량 중 부산지역의 방재성능목표 강우량을 분사하여 각 강우량별로 표면 유출량, 표면 유출고, 발생시간, 배수유량, 배수유량 유출고, 발생시간 등을 측정하였다.



Fig. 5. Placement of porous asphalt mixture



Fig. 6. Simulator of artificial rainfalls for porous pavement

방재성능목표 강우량은 홍수, 호우 등에 의한 재해를 예방하기 위해 방재 정책 등에 적용할 강우량의 목표로 정의하고 있으며, 지역별로 재현기간 30년 빈도 상당의 확률 강우량에 미래 기후변화 시나리오로 예측되는 강우 증가율을 고려하여 할증률을 적용한 예측 강우량이다. 할증률을 적용한 후 값의 단위를 5mm 기준으로 상향 적용하여 기준을 제시하고 있다. 본 연구에서 적용한 부산 지역의 방재성능목표 강우량은 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Disaster prevention performance target rainfall(Busan Metropolitan)

Rainfall Duration	30 years Frequency Probability Rainfall (mm)	Disaster Prevention Performance Target Rainfall (mm)	Conversion Rainfall (mm/hr)
1hr	98.7	105	105.00
2hr	136.4	145	72.50
3hr	162.7	175	58.33

해당 강우량이 적용된 부산지역은 미래강우 증가율이 기준인 5%를 초과할 것으로 예측되는 관심지역으로 8% 까지 할증률 상향 여부를 검토할수 있도록 권고하고 있지만, 본 연구에서는 고시된 부산지역의 방재성능목표 강우량을 수정 없이 적용하였다.

3.4 유출의 모니터링

박스형 LID 시험시설별 2개의 독립적인 모니터링박스에서는 표면유출수와 침투 유출수에 대한 수량과 수질을 측정할 수 있다. 유량은 LID 시설의 지표 유출수(surface flow) 및 침투수(base flow)를 측정할 수 있으며 실시간으로 온도, pH, 전기전도도 등을 측정할 수 있으며 실시간은 아니지만 환경적인 요소인 BOD, COD,

TSS, TN, TP, NO₃-N, NH₃-N, 중금속 등을 측정할 수 있다.

모니터링 장비는 개별 시설블록의 유량을 미터링하는 티핑버킷 유량계, 실시간 수질항목을 모니터링하는 수질 센서, 자료를 변환하고 전송하는 데이터로거박스 그리고 센서 케이블 및 보호관, 전원모듈, 통신모듈, 샘플링 박스 등으로 구성되어 있다.

해당 강우량의 분사 및 유출량의 계측은 분 단위로 측정하고, 우수유출수가 충분히 배수되었다고 판단한 시점에서 시험을 종료하고 이를 시험결과의 산정에 이용하였다.

4. 시험결과 및 통계적 분석

모니터링된 시험결과를 그래프로 표현한 Fig. 7은 강우강도 105mm/hr에 대한 유출곡선을 보여주고 있다. Fig. 8과 Fig. 9는 각각 강우강도 145mm/2hr과 175mm/3hr에 대한 그래프를 보여주고 있다.

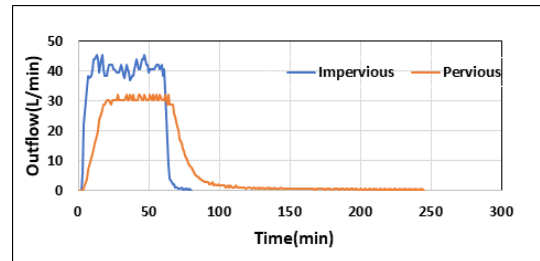


Fig. 7. Outflow hydrograph for target rainfall of 105mm/1hr

Fig. 7을 보면 불투수포장에서의 침투유량이 41.17L/min으로 크고 11분 만에 갑자기 발생하는 반면 투수성포장에서의 침투유량은 불투수성포장보다 30.78L/min으로 상대적으로 작고, 발생하는 시간도 20분으로 지연되는 것을 알 수 있다. 그리고 강우가 멈춘 후에도 지속적으로 유출되고 있는 것을 볼 수 있다. 반면에 강우강도가 상대적으로 작은 Fig. 8과 Fig. 9에서는 침투유출에 도달하는 시간이 지연되고 있는 것을 알 수 있으며 두 포장 사이의 침투유량은 차이가 없는 것으로 나타났다.

세 가지 강우강도에 대한 실험결과를 정리한 것이 Table 2과 Table 3이다. 불투수성포장에 서는 배수유출이 전혀 없이 표면유출만 이루어졌으며 투수성포장에서는 표면유출 전혀 없이 침투유출만 이루어 졌다.

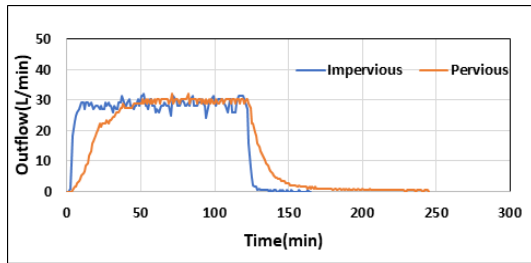


Fig. 8 Outflow hydrograph for target rainfall of 145mm/2hr

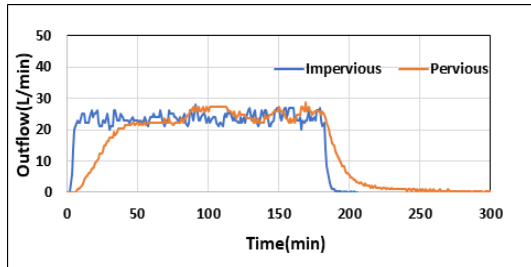


Fig. 9 Outflow hydrograph for target rainfall of 175mm/3hr

Table 2. Volume and occurrence time of outflow and equilibrium outflow for impervious pavement

Rain fall (mm)	Surface Flow		Equilibrium		Drain (mm)
	Flow (%)	Time (min)	Equi. (L/min)	Time (min)	
105	92.46	3	41.17	11	97.1
145	94.94	2	28.65	10	137.7
175	98.06	2	23.81	10	171.6

Table 3. Volume and occurrence time of outflow and equilibrium outflow for pervious pavement

Rain fall (mm)	Drainage Flow		Equilibrium		Drain (mm)
	Drain (%)	Time (min)	Equi. (L/min)	Time (min)	
105	82.74	4	30.78	20	86.9
145	98.33	4	29.51	36	142.6
175	99.00	7	24.50	48	173.2

평형유출에 이르는 시간이 불투성포장에서는 약 10분 인데 반하여 투수성포장에서는 20분, 36분, 48분으로 강우강도가 약하고 길어질수록 더 지연되는 것을 알 수 있다. 강한 강우강도인 105mm/hr 강우강도에서 평형

유출량은 투수성포장에서 약 25% 저감하는 것으로 나타났다 나머지 저장도 강우에서는 평형유출량이 거의 유사한 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 투수성포장의 지지력을 향상시키기 위하여 개발된 지오셀 보강체의 홍수피해를 저감시키는 수문성능을 평가하기 위해 수행되었다. 지오셀 보강체가 투입된 투수성포장과 불투수성포장에 대해서 강우모사실험과 모니터링을 실시하였다. 이를 통해 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 지오셀 투수성포장은 큰 강우강도에서 첨두유량의 저감효과가 더 크게 나타났다. 강우강도가 가장 강한 105mm/hr의 강우에서 불투수성포장과 투수성포장의 첨두유량 차이가 25%정도 나타났다. 그리고 145mm/2hr와 175mm/3hr의 강도에서는 첨두유량의 차이가 거의 나타나지 않았다. 돌발홍수로 인한 도시침수 등에 첨두유량을 줄이는 데 효과적일 것으로 판단된다.

둘째, 지오셀 투수성포장은 첨두유량에 이르는 시간을 지체시켜 주는 것으로 나타났다. 강우강도가 작을수록 첨두유량에 이르는 시간은 더 길어지는 것으로 나타났다. 불투수성포장에서는 모든 강우에 대해 약 10분 만에 첨두유량에 이르렀으나 투수성포장에서는 105mm/hr의 강도에서는 25분, 145mm/2hr의 강도에서는 35분 그리고 175mm/3hr의 강도에서는 48분으로 첨두유량에 이르는 시간이 지체되는 것으로 나타났다.

셋째, 일반 불투수포장은 강우가 멈추면 바로 유출이 멈추는 반면 지오셀로 보강된 투수성포장은 강우가 멈춰도 지속적으로 유출이 일어나는 것으로 나타났다. 강우 중단 후의 유출양상은 강우강도에 상관없이 유사한 것으로 나타났다. 투수성포장이 도시하천의 건천화를 줄이는 역할을 할 것으로 판단된다.

결국 지오셀 투수성포장은 일반적으로 투수성포장이 갖는 특성을 사실적으로 보여 주고 있다. 즉, 초기 첨두유량을 저감하는 기능과 첨두유량에 도달하는 시간을 줄임으로써 도시홍수를 예방할 수 있고 유출을 지연시킴으로써 도시하천의 건천화를 예방한다는 사실을 실증적으로 그리고 정량적으로 보여주었다. 투수성포장에 대한 이러한 실증적 연구를 기반으로 도시에서의 적용이 확대되어 투수성포장의 다양한 기능이 제공될 수 있기를 기대한다.

References

- [1] B. O. Brattebo, D. B. Booth, Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems, *Water Research*, Volume 37, Issue 18, November 2003, Pages 4369-4376
DOI : [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00410-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00410-X)
- [2] M. D. Smith, The ecological role of climate extremes: current understanding and future prospects, *Journal of Ecology*, Vol. 99, Issue 3, pp. 651-655, 15 April 2011
DOI : <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01833.x>
- [3] R. Kumar, J. L. Musuza, A. F. Van Loon, A. J. Teuling, R. Barthel, Ten Broek J., J. Mai, L. Samaniego, S. Attinger, *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 20, Issue 3, pp. 1117, 1 March 2016
- [4] K. S. Lee, I. K. Yoo, S. H. Lee, Reinforcement structure of roads, Korea Patent Office, Registered Number 10-1934884, Dec. 27 in 2018 (in Korean)
DOI : <https://doi.org/10.8080/1020160125775>
- [5] B. K. Ferguson(2005), POROUS PAVEMENT, Taylor and Francis, 2005 pp. 1-10
- [6] Markets and Markets, PERVIOUS PAVEMENT MARKET GLOBAL FORECAST TO 2026, Markets and Markets, pp. 40-44, 2016
- [7] KMOE(2013), Low-impact development technology element guidelines for establishing a healthy water circulation system, Korea Ministry of Environment, Korea Environment Corporation, pp. 91-93, Apr. 2013
- [8] J. M. Lee, S. H. Lee, K. S. Lee(2006), A modification of SWMM to simulate permeable pavement, and the effect analysis on a release of treated wastewater and the permeable pavement, *Journal of the Korean Water Resources Association*, Vol. 39, No. 2, pp. 109-120(in Korean)
- [9] Y. M. Koo, Y. D. Kim, J. H. Park(2014), Analysis of Non-point Pollution Source Reduction by Permeable Pavement, *Journal of the Korean Water Resources Association*, Vol. 47, No. 1, pp. 49-62(in Korean)
DOI : <http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2014.47.1.49>
- [10] S. H. Lee, I. K. Yoo, J. W. Kim(2011), A Study on the Structure Design of Permeable Asphalt Pavement, *Journal of the Korean Society of Highway Engineers*, Vol. 13, No. 3, pp. 39-49(in Korean)
- [11] H. W. Yoo, J. H. Oh, J. Y. Jung, S. I. Han(2018), Establishment of design Factors and Procedure for Permeable Asphalt Pavements Structural Design, *International Journal of Pavement Engineering*, Jan. 2017
DOI : <http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2018.38.1.0113>
- [12] S. H. Lee, I. K. Yoo, D. Y. Lee(2012), Evaluation of Bearing Capacity for Permeable Pavement using Geocell, *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 11, No. 3, pp. 11-17(in Korean)
- [13] H. S. Oh, Y. K. Hong(2007), A Study on Enhancement of the Durability of Permeable Pavement Material, *Journal of Elastomer*, Vol. 42, No. 2, pp. 93-101(in Korean)
- [14] D. C. Saha, J. N. Mandal(2018), Performance of reclaimed asphalt pavement reinforced with Bamboo geogrid and Bamboo geocell, *International Journal of Pavement Engineering*, Aug. 2018
DOI : <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1502432>
- [15] A. M. George, A. Banerjee, A. J. Puppala, M. Saladhi (2019), Performance evaluation of geocell-reinforced reclaimed asphalt pavement(RAP) bases in flexible pavements, *International Journal of Pavement Engineering*, Mar. 2019
DOI : <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1587437>

유 인 균(In-Kyoon Yoo)

[정회원]



- 1986년 2월 : 고려대학교 공대대 학원 토목공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : 고려대학교 공대대 학원 토목공학과 (공학박사)
- 1995년 10월 : 도로 및 공항 기술사, 한국산업인력공단

• 1987년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 도로교통연구 본부 선임연구위원

〈관심분야〉

도로공학, 포장공학, 교통환경