

포장 재료에 따른 지하수 침투량 측정 및 물수지 분석

손진관¹, 권태근², 공민재³, 강태경¹, 임류갑¹, 김남춘⁴, 박민정^{1*}

¹농촌진흥청 국립농업과학원 에너지환경공학과, ²상림원,
³농촌진흥청 국립농업과학원 농산물안전성부 작물보호과, ⁴단국대학교 녹지조경학과

Measurement of Groundwater Penetration and Water Balance Analysis according to Land Use Materials

Jinkwan Son¹, Taekeun Kwon², Minjae Kong³, Taegyong Kang¹,
Ryugap Lim¹, Namchoon Kim⁴, Minjung Park^{1*}

¹Energy & Environmental Engineering Division, National Institute of Agriculture Sciences, RDA,
²Sanglimwon. Co. Ltd.,

³Crop Protection Division, National Institute of Agriculture Sciences, RDA,

⁴Dept. of Landscape Architecture, Dankook University

요약 포장재료에 따른 물수지를 평가하는 것은 제안된 유출계수를 동일하게 적용하는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 포장재료 별 지하수 침투량을 측정하였다. 그리고 이를 개선 할 수 있는 방안을 찾아 보았다. 식생지반의 유출계수는 0.245로 설정할 수 있으며, 투수포장은 0.583로 설정할 수 있다. 반투수포장의 유출계수는 0.963로 설정할 수 있고 불투수포장의 유출계수는 1.000로 설정할 수 있다. 수로 및 습지와 자갈포장을 적용, 침투량과 증발산량을 알아보고자 하였다. 습지와 자갈포장의 유출계수는 0이다. 침투량 회귀식을 바탕으로 연구대상지의 평균 강우자료에 대입해 보면 강우량 1094.4mm 때 습지는 329.9mm 침투, 864.5mm 증발이 이루어지며, 자갈포장은 578.8mm 침투 615.6mm 증발로 계산할 수 있다. 이 자료는 도시 및 농촌지역 지하수함양 개선사항 제시에 활용하고자 하였다. 이러한 연구를 통해 농업생태계의 다양한 생태계서비스 가치가 저하되지 않고 보전, 향상되는데 기여하고자 한다.

Abstract In this study, the degree of impact on groundwater charging of land-use materials in urban and rural areas was analyzed to identify avenues of improvement. The outflow coefficient of vegetation ground can be set to 0.245, and that of the pitcher's block can be set to 0.583. The outflow coefficient of the half pitcher block can be set to 0.963, and the outflow coefficient of non-pitch asphalt can be set to 1.000. Waterways, wetlands, and gravel trunks were studied to determine penetration and evaporation. The outflow coefficient for wetlands and gravel is zero. Based on the penetration regression formula, the average rainfall data at the study site can be calculated as 329.9mm penetration and 864.5mm, evaporation of wetlands at 1094.4mm of rainfall, and gravel can be calculated as 578.8mm penetration, 615.6mm evaporation. This data was intended to be used to present matters to improve the cultivation of groundwater in urban and rural areas. Through these studies, we want to contribute to the preservation and improvement of the value of various ecosystem services in agricultural ecosystems while halting deterioration.

Keywords : Ecosystem Service, Urban, Impervious, Recharge, Rural

본 연구는 2021년도 농촌진흥청 국립농업과학원 연구개발사업(과제번호: PJ01419001)의 지원에 의해 이루어진 것임.

*Corresponding Author : Minjung, Park(NIAS, RDA)

email: mjpark0107@korea.kr

Received June 29, 2021

Revised August 4, 2021

Accepted August 5, 2021

Published August 31, 2021

1. 서론

우리나라 도시 개발은 국민생활 개선을 목표로 복잡한 과정으로 진행되어 왔다[1]. 이러한 도시개발은 환경, 경제 여건 등의 변화와 과밀 등의 문제로 계획이 수정되기도 하며, 자연환경과 도시경관에 대한 다양한 문제가 발생되고 있는 실정이다[1,2]. 도시의 개발에 따른 고도화 및 무분별한 개발은 환경 및 생태 부문에 부정적 영향을 미치고 있으며[3-5], 시민들에 대한 녹지 및 자연환경에 대한 욕구가 충족되지 못한다는 문제점이 거론되고 있다[6,7].

이러한 도시의 문제점은 집약적 토지이용에 따른 불투수층 증가가 가장 큰 원인으로 꼽히고 있으며, 이러한 원인으로 한 물순환 왜곡, 침수, 열섬현상, 생태계 교란 등 다양한 측면에서 피해가 있다고 보고되고 있다[8-10]. 환경부의 조사결과에 의하면, 2013년 기준 서울시의 불투수 면적은 54.37%로 강우의 외부 유출은 약 81%에 달하는 것으로 보고되고 있다[11]. 이와 같이 도시화로 인한 불투수성 지표면의 증가는 일시적으로 강우가 하천으로 유출되면서 초기우수 등으로 인한 하천수질 오염, 우수침투량의 감소에 의한 지하수 고갈, 하천건천화, 수자원확보의 어려움, 도시열섬화, 생태계파괴 등의 문제가 발생하고 있다.

이러한 도시의 물 순환 문제의 해결방안으로 도시관리 계획 수립시 체계적인 빗물 관리를 위하여 주차장·도시공원·종합운동장 및 공공청사 등 국·공유시설을 신축·개축하는 경우에 빗물관리시설을 설치·운용토록 유도하고, 각종 도시개발사업을 추진할 경우에는 개발계획단계에서 체계적인 물관리를 위한 빗물관리시설 설치계획을 반영토록 하고 있다. 또한 지하수관리계획 및 물환경 종합관리계획에서도 지하수의 함량을 통해 수자원을 보전하고자 하고 있다. 하지만 기 개발된 시가지 지역은 이미 지하까지 개발되어 있는 상태여서 인공구조물의 자연지반 토층은 1m 내외 밖에 확보하지 못하고 있는 실정이며 이에 자연지반인 녹지 및 오픈 스페이스 면적을 확보·보전하고자 노력하고 있다.

도시 뿐만 아니라 농촌지역에서도 지하수 고갈에 대한 문제가 보고되고 있다. 시설원예단지의 경우 용수를 집약적으로 사용하여 지하수의 지속적 혹은 일시적 고갈이 있지만 비닐피복으로 인해 지하수의 재충전은 어려워지는 문제점이 있다[13-16]. 지하수함양은 기후 및 물을 조절하고 홍수를 방지 등 생태계서비스 기능 중 조절 서비스에 해당되는 중요한 분야로 국제적 기준에 근거하여

국내에서도 환경부에서 분류하여 평가하고 있으며 [17,18], 시설원예단지 이전의 토지이용인 논은 지하수 함양 기능이 탁월하게 평가받았다[19,20]. 하지만 시설원예단지 조성은 비닐피복, 콘크리트 포장 등 불투수 면적을 조성했고 이로인한 지하수함양 기능은 기존의 토지이용인 논에 비해 손실량이 최대 99.9%까지 보고되었다 [21]. 이 뿐만 아니라 겨울철 지하수를 양수하여 비닐하우스 내외벽 사이에 뿌리는 수막시설 재배 시 과다한 지하수 이용에 따른 지하수위 강하와 감소를 가속화시켜 용수 재이용에 어려움을 겪고 있다. 따라서 지속가능한 농촌지역의 경우 지하수의 지속가능한 사용을 위한 재충전 기술이 필요하다고 할 수 있다[22-24].

한편, 도시의 물순환 해석을 위한 합리식 평가모형을 살펴보면 강우량은 증발산, 침투량, 유출량의 합으로 계산되며, 증발산은 온도, 습도, 기압 등의 기상자료를 활용해 복잡하지만 수식으로 해석할 수 있기 때문에 유출량만 정확히 해석해도 침투량을 산출할 수 있는 구조로 이루어져 있다. 유출량은 유출계수, 강우강도, 면적의 곱으로 계산되고 이때 유출계수를 몇으로 넣는지에 따라 값이 크게 달라지는 단점이 있다. 수문학적 물수지 분석에서 사용하는 유출계수는 토성으로 구분하거나 각 토지이용별로 구분을 하여 제시되는 자료를 활용하지만 계수의 폭이 크고 애매한 토지이용 구분으로 연구에 어떤 계수를 사용해야 할지 판단이 어려운 실정이다.

본 연구에서는 지하수 침투량 실험 결과와 증발산 계산 결과를 활용해서 포장 재료에 따른 물수지 해석을 위한 강우 유출계수를 파악 하고자 했다. 실험결과를 활용해서 도시 및 농촌지역의 대표적인 불투수 피복형태에 대한 유출계수와 지하수 함양량, 강우 유출량 등을 분석하고 물수지 해석을 평가하였다.

연구결과를 활용해 친환경적 포장형태의 수자원함양 기여도 가치를 판단 하고 더불어 도시 및 농촌지역의 수자원함양량을 높일 수 방법을 모색하였다. 연구결과를 적용하여 국가 물순환의 문제를 적극 개선할 수 있는 방법의 하나로 불투수 면적 개선을 제안하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

본 연구에서는 도시 및 농촌지역의 지하수 함양 개선 방안 제안을 위하여 다음과 같은 방법으로 연구를 진행하였다.



Fig. 1. The status of study site

먼저 도시 및 농촌지역의 개선 가능한 대표적인 불투수면적을 아스팔트, 콘크리트 포장 등으로 설계하고 이와 비교할 수 있는 포장형태를 식생지반, 투수포장, 반투수포장으로 선정하고 자갈포장, 습지를 개선방안으로 설정하여 6가지 포장형태의 유출계수와 물수지를 분석하였다. 평가의 과정은 실험대상지의 강수량을 측정하고 해당 지역의 증발산을 모형에 따라 평가한 후 지하수 침투량을 실측하여 유출계수를 산정하였다. 이렇게 평가된 포장형태별 유출계수를 적용하여 물수지를 분석하였다.



Fig. 2. Classification of experiments according 6 ground materials

2.1 지하수침투량 측정 시험

유출량 평가를 위한 유출계수 산정과 침투량 평가를 위한 침투방정식 산정을 위한 지하수 침투량 조사는 포장재료 별 지하수 침투량 현장측정을 통해 평가하였다. 먼저 강수량은 Decagon Devices사의 EM50 Digital Data Logger을 활용하여 측정하였으며, 지하수 침투량

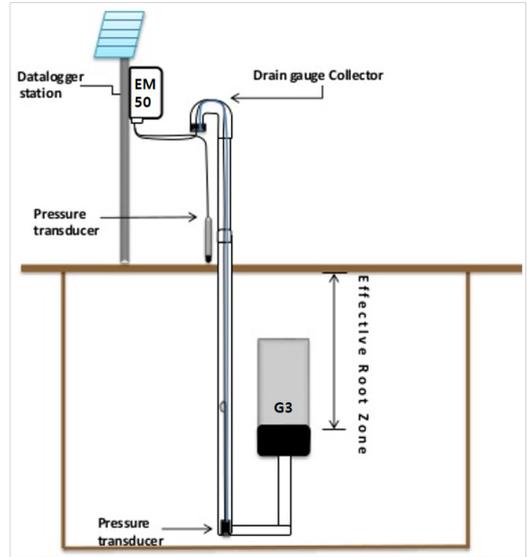


Fig. 3. The schematic diagram of Drain Gauge G3

은 Decagon Devices사의 Gee 라이시미터(Drain Gauge)를 활용하였다(Fig. 3).

Drain Gauge G3는 그림과 같이 일정한 부피를 갖는 원통형 통에 토양을 기존의 지반과 같게 채우고, 강수량 또는 관개용수 등에 의해 침투되는 물을 워(wick) 차집장치를 통해 측정함으로써 일정한 시간동안 침투율을 관측할 수 있는 장비이다[25]. Drain Gauge G3를 통과해 수집된 용수의 양은 기압단위로 실시간으로 측정되어 데이터로거(EM50)에 저장된 후 이를 부피로 환산하여 mm단위로 표시된다. 본 연구에서는 센서에서 측정된 mm단위의 측정값과 더불어 지하수로 침투된 물의 양을 원통형 통의 너비인 506.7cm²를 기준으로 하여 56.7ml를 강우량의 침투 높이 1mm로 계산하였다.

2.2 지하수침투량 및 유출계수 산정 방법

도시공원의 물수지 해석을 위한 평가는 물순환 평가에 가장 널리 알려진 합리식 방법에 의해 진행되었으며[26, 식1)에 제시한 바와 같이 기본적으로 해당지역에 내린 연간 총강수량은 연간 외부유출량, 연간 토양 내 침투량, 그리고 연간 증발량으로 이루어진다는 기본 가정으로 진행되었다.

$$\text{식 1 : 강수량}(P) = \text{잠재증발산}(PET) + \text{유출량}(Q) + \text{지하침투량}(I)$$

* P는 연간 총강수량(mm), C는 유출계수(0<C<1), PET (Potential Evapotranspiration, PET)는 연간 잠재증발산량(mm), I는 연간 총 침투량(mm)임

합리식 방법에 의한 물수지 해석은 해당지역 유출 총량을 나타내는 개념으로 'Q=0.2278×C×I×A'로 계산되며, 이 때 투입되는 유출계수에 따라 해당지역 유출 총량이 달라지게 되므로 유출계수 설정은 매우 중요하다. 하지만 대부분의 연구에서 유출계수는 일반화 된 값을 투입해 평가결과를 도출하므로 그 값은 매우 주관적이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 연구지역의 토지이용별 물수지를 산정하기 위해 식2)와 같이 합리식을 수정하여 사용하였다. 물수지에서는 측방유출, 회귀수량 등 정량화하기 어려운 수문변수들을 제외하고 지표유출, 침투량, 증발산량 그리고 강수량을 통해 물수지를 산정하였다. 본 연구에서 사용한 수정-합리식은 합리식과 합리식에 적용되는 유출계수를 기반으로 산정하며, 유출계수는 Mulvaney[26], 미국토목학회[27] 등이 제안한 개념을 그대로 도입하였다.

$$\text{식 2 : } P - (C \times P) - \{(1 - C) \times PET\} - I = 0$$

* P는 연간 총강수량(mm), C는 유출계수(0<C<1), PET (Potential Evapotranspiration, PET)는 연간 잠재증발산량(mm), I는 연간 총 침투량(mm)임

기본적인 개념은 유출이 발생하지 않았을 때(100% 투수 토지피복), 연구지역에서는 증발산량과 침투량만 발생하며, 침투량은 강수량과 증발산량의 차로 산정한다. 반대로, 유출이 강수량만큼 모두 발생하였을 때(100% 불투수 토지피복), 연구지역에서는 유출량과 강수량이 같은 양만큼 발생하며, 침투량과 증발산량은 발생하지 않는 것으로 본다. 수정-합리식을 통해 연구지역의 각 토지이용별 수문성분들을 산정할 수 있으며, 전체 연구지역 범위의 수문성분들은 토지이용면적별 가중방법을 통해 산정할 수 있다. 이러한 일련의 과정을 설명하기 위해서는 평가 대상지역의 강우자료(P)를 확보해야 하며, PET (잠재증발산량)을 평가하기 위해서는 식3)와 같이 습도, 온도, 기압 등의 다양한 기상조건 및 자료를 파악하고 연구 기간 동안의 합으로 평가한다[28].

$$\text{식 3 : } \lambda E = \frac{\Delta (H_{nr} - G) + P_{air} \cdot c_p \cdot [e_s^o - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma(a + r_c / r_a)}$$

* λE는 잠열강도(MJ/m²·d), E는 증발율의 깊이(mm/d), Δ는 포화수증기압 온도곡선의 기울기(de/dT, kPa/°C), H_{nr}는 순복사량(NET radiation, MJ/m²·d), G는 지열플럭스(Heat flux density to the ground, MJ/m²·d), P_{air}는 공기밀도(kg/m³), c_p는 일정 압력에서의 비열(MJ/m²·d), e_{0z}는 높이 z에서의 포화수증기압(kPa), e_z는 높이 z에서의 수증기압(kPa), γ는 습도상수(The psychrometric constant) (kPa/°C), r_c는 식물 차단 저항(Plant canopy resistance, s/m), r_a는 공기층의 확산저항(Aerodynamic resistance, s/m).

위의 1), 2), 3) 식을 미루어 봤을 때 유출계수를 산정하는 것은 무엇보다 중요한 물수지해석 요건이 되며, 강수량 조사와 증발산량 산출이 가능하다는 가정하에 지하수 침투량(S)을 해석하는 것은 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 식 4)와 같이 포장 재료 별 침투량을 먼저 측정 한 다음 수정된 합리식에 대입하여 그에 맞는 유출계수(C)를 찾아내 포장재료에 따른 물순환 해석에 사용하고자 하였다.

$$\text{식 4 : } I1 = P - (C \times P) - \{(1 - C) \times PET\}$$

* P는 연간 총강수량(mm), C는 유출계수(0<C<1), PET (Potential Evapotranspiration, PET)는 연간 잠재증발산량(mm), I는 연간 총 침투량(mm)임

따라서 연구에서 도출 된 포장재료 별 유출계수는 연구대상 도시공원에 적용하여 유출량(Q1)을 평가할 수 있다. 위 식 1), 2), 3), 4)를 고려한다면 유출계수 산정을 통해 침투량과 증발산량을 평가할 수 있지만 식에서 사용된 증발산량은 연간 증발된 총량으로 실제 침투량과의 관계는 불명확실성을 내재하고 있다. 따라서 본 연구에서는 침투량 측정을 통해 유출계수 산정은 식 4)를 활용해 도출하고 실제 침투량은 실측 자료를 정리한 결과를 활용해 통계적 처리에 의해 식 5)와 같이 알아보고자 한다.

$$\text{식 5 : } \text{침투량}(I1) = \text{비례상수}(a) \times \text{강우량}(P) + \text{일반상수}(b)$$

$$\text{식 6 : } \text{강수량}(P) - \text{유출량}(Q1) - \text{침투량}(I1) - \text{증발산}(E) = 0$$

따라서 최종적으로 본 연구에서 사용된 도시공원 및 농촌지역의 토지이용 형태에 따른 물수지 분석식은 식 6)과 같이 Q1에 해당하는 유출량, I1에 해당하는 침투량을 도출해서 해당지역의 강수량 대비 물수지 분석을 평가하고자 하였다.

3. 연구결과

3.1 실험 대상지역 일반환경 분석

2018년 실험 대상지역의 강수량은 총 1194.4mm로 우리나라 연평균 강수량과 비슷한 수치로 분석되었다. 실험대상지역에서 측정 된 강우 일 수는 총 122일 이었으며, 월간 누적 강수량은 7월에 252.4mm로 가장 많았다.

도시 및 농촌지역의 대표적인 포장재료 별 지하수 침투량 측정실험에 앞서 해당지역의 일별 증발산을 전주기 상대의 자료를 수집하여 월별로 취합하였다.

Table 1. Analysis of the weather conditions in the study site

구분	강우일수 (일)	최저강우 (mm/일)	최대강우 (mm/일)	총강우량 (mm/월)	증발산 (mm/월)
1월	7	0.8	8.3	25.2	22.74
2월	10	0.3	11.6	31.5	35.51
3월	4	0.1	54.3	67.1	61.66
4월	14	0.5	27.3	144.2	88.55
5월	8	0.2	22.9	84.3	106.1
6월	9	0.2	38.0	95.2	118.1
7월	14	0.1	57.4	252.4	145.5
8월	10	0.1	16.5	34.6	134.7
9월	10	0.2	95.2	135.6	83.59
10월	11	0.6	47.5	163.3	57.27
11월	13	0.3	26.2	102.8	32.91
12월	12	0.1	17.2	58.2	23.67
Total	122			1194.4	910.3

* 증발산은 실험지역인 전라북도 전주시 지역으로 기압자료를 활용하여 분석하였다.

3.2 대표 포장재료의 지하수 침투량 분석

실험대상지에서 대표적인 포장 피복재료 별 지하수 침투량 측정실험 결과는 Table 2에 제시 하였다.

식생지반인 잔디 총 강수량 1194.4mm 대비 연간 17.96%인 214.51mm가 침투되었으며, 월별로는 7월에 44.69mm로 가장 많은 양이 침투되었다. 일별로는 7월 2일 약 50mm의 강우에 5.875mm가 침투되어 가장 큰 침투일로 분석되었다. 투수포장인 투수블럭은 연간 총 118.45mm가 침투되어 강수량 대비 9.92%가 침투되었는데, 식생지반과 동일하게 7월에 가장 많은 22.70mm

가 침투되었다. 반투수포장으로 대표되는 점토블럭은 연간 총 10.43mm가 침투되어 강수량 대비 0.87%로 평가 될 수 있고 투수포장과 비교했을 때 10%도 미치지 못하는 수준으로 분석되었다. 불투수포장으로 대표한 콘크리트는 침투량이 없는 것으로 분석되었다.

연구방법에서 제시 한 수정 합리식인 $I1 = P - (C * P) - \{(1 - C) * PET\}$ 에 해당 자료를 투입 해 보면 $I1 = 1194.4 - (C * 1194.4) - \{(1 - C) * 910.3\}$ 으로 설정 할 수 있고, 이때 수로 및 습지와 자갈포장 등의 침투량을 I1에 기입하면 유출계수 인 C값은 증발산과 침투량의 합이 강수량보

Table 2. Amount analysis of monthly groundwater penetration

구분	불투수포장		투수포장		반투수포장		식생지반		수로 및 습지		자갈포장	
	침투량 (mm)	비율 (%)										
1월	0	0	2.85	11.33	0.34	1.34	5.63	22.33	11.51	45.67	12.31	48.85
2월	0	0	3.83	12.16	0.12	0.39	6.99	22.20	14.85	47.14	16.81	53.37
3월	0	0	9.12	13.59	0.50	0.74	14.90	22.21	27.11	40.40	30.12	44.89
4월	0	0	14.45	10.02	1.38	0.95	25.09	17.40	37.15	25.76	48.77	33.82
5월	0	0	10.53	12.49	0.67	0.79	18.38	21.81	38.33	45.47	68.95	81.79
6월	0	0	10.05	10.56	0.67	0.70	17.83	18.73	43.28	45.46	56.33	59.17
7월	0	0	22.70	9.00	2.91	1.15	44.69	17.71	80.45	31.87	139.74	55.36
8월	0	0	4.50	13.02	0.28	0.82	9.11	26.32	18.15	52.46	24.45	70.66
9월	0	0	11.76	8.68	0.71	0.52	25.60	18.88	36.74	27.09	55.64	41.03
10월	0	0	14.60	8.94	1.83	1.12	23.44	14.35	40.64	24.89	69.65	42.65
11월	0	0	9.08	8.83	0.69	0.67	15.61	15.19	21.81	21.22	32.61	31.72
12월	0	0	4.97	8.54	0.35	0.59	7.24	12.44	14.31	24.59	20.42	35.09
Total	0	0	118.45	9.92	10.43	0.87	214.51	17.96	384.33	32.18	575.80	48.21

* 비율은 월별 강수량 대비 침투량의 비율임

다 많을 때 산정 할 수 있다. 따라서 수로 및 습지와 자갈 트렌치의 경우 유출이 없다는 가정으로 평가할 수 있다고 판단된다. 국내 하수도시설기준[29], ASCE[27], USGS[30], SCWA[31] 등에서 사용하는 합리식 평가에서 유출계수는 습지가 최대 1.0 인 경우가 있으나 해당 계수는 포화된 상태에서 유출구가 있다는 가정으로 만들어진 계수이다. 본 연구에서는 독립된 트렌치와 습지가 유역과 연결되지 않았다는 가정으로 평가하여 유출량을 0으로 설정할 수 있다.

측정된 대표적 포장재료 별 지하수 침투량은 실험 지역 월별 강수량에 근거하여 회귀식을 도출 하였다. 먼저 식생지반의 월별 강수량 대비 침투량 자료 12개와 0를 포함하여 총 13개 데이터를 그래프화 한 후 1차 회귀식을 도출하였다. 결과로 식생지반은 $y(\text{침투량})=0.1648 \cdot x(\text{강수량})+1.3598$ 로 도출되고 통계적 유의성을 나타내는 R^2 값은 0.9547로 매우 높게 형성되었다. 동일한 방법으로 투수포장은 $y(\text{침투량})=0.0862 \cdot x(\text{강수량})+1.1899$ $R^2=0.9637$ 로 도출되었고 반투수포장인 점토블럭은 $y(\text{침투량})=0.0111 \cdot x(\text{강수량})+0.2157$, $R^2=0.9063$ 으로 산정되었다.

3.3 토지피복 형태에 따른 유출계수 산정

실험대상지에서 측정된 콘크리트, 잔디포장, 투수블럭, 점토블럭, 자갈트렌치, 습지 포장의 지하수 침투시험 결과와 수문학적 합리식 유출량 평가 결과를 분석해서 해당 포장 환경의 유출계수를 산정하였다. 산정된 유출계수를 활용하여 도시 및 농촌지역에 적용하여 유출-침투량을 산정하는 근거로 활용하고자 하였다. 앞서 연구 방법에서 제시 한 수정 된 합리식(식4)인 $\text{침투량}=\text{강수량}-(\text{유출계수} \cdot \text{강수량})-(1-\text{유출계수}) \cdot \text{증발산량}$ 으로 평가할 수 있다. 이 때 강수량과 침투량의 값은 측정된 값을 적용하면 되므로 해당지역의 연간 증발산량을 구하면 유출계수의 값을 산정해 낼 수 있게 된다.

2018년 실험 대상지역인 전주의 강수량은 총 1194.4mm이며, 유출이 없는 상태의 가정 하에 증발산은 총 910.3mm로 분석되었다. 월별 증발산량은 Table 1에 제시 한 바와 같다.

연구방법에서 제시 한 수정 합리식인 $I1 = P - (C \cdot P) - ((1-C) \cdot PET)$ 에 해당 자료를 투입 해 보면 $I1 = 1194.4 - (C \cdot 1194.4) - ((1-C) \cdot 910.3)$ 으로 설정 할 수 있고 이 때 잔디, 투수포장 등의 침투량을 I1에 기입하면 유출계수인 C값을 산정할 수 있다.

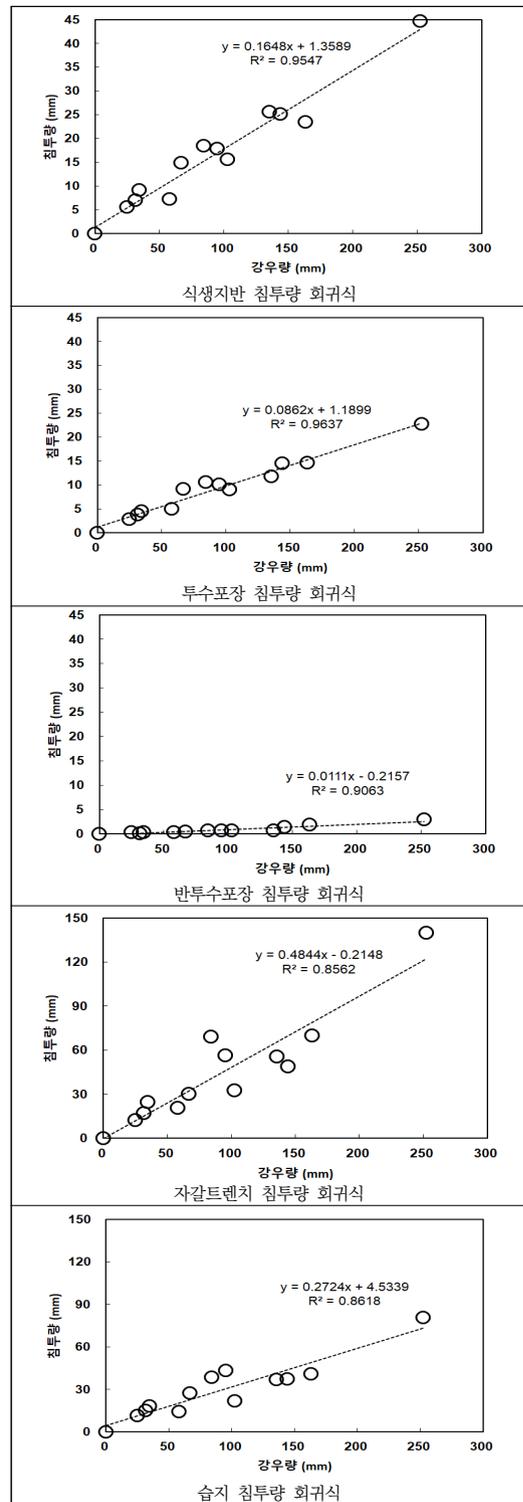


Fig. 4. Amount of groundwater Penetration compared to monthly rainfall by 6 ground materials

산정 된 유출계수(C)는 유출량(Q1)=유출계수(C)*강수량(P)에 대입 해 유출량을 해석 할 수 있고 침투량(I1)과 유출량(Q1)의 평가자료를 근거해 증발산(E)=강수량(P)-침투량(I1)-유출량(Q1)으로 해석해서 물수지를 완성 할 수 있다.

콘크리트의 지하수 침투량 분석결과 0mm로 측정되어 유출계수는 1.000로 설정할 수 있으며, 이를 합리식으로 해석하면 증발산량 0mm, 유출량 1194.4mm로 해석할 수 있다. 식생지반인 잔디의 지하수 침투량 분석결과 214.5mm로 측정되어 유출계수는 0.245로 설정할 수 있으며, 이를 수정 합리식으로 해석하면 증발산량 687.3mm, 유출량 292.6mm로 해석할 수 있다. 투수포장의 지하수 침투량 분석결과와 118.45mm로 측정되어 유출계수는 0.583로 설정할 수 있으며, 이를 합리식으로 해석하면 증발산량 379.6mm, 유출량 696.3mm로 해석할 수 있다. 보도블럭의 지하수 침투량 분석결과 10.43mm로 측정되어 유출계수는 0.963로 설정할 수 있으며, 이를 합리식으로 해석하면 증발산량 33.7mm, 유출량 1150.2mm로 해석할 수 있다. 자갈포장과 습지는 유출이 없는 0로 측정되어 유출계수는 0으로 설정할 수 있으며, 강수량 1194.4mm 대비 습지는 침투량 329.9mm, 증발산 864.5mm, 자갈포장은 침투량 578.8mm, 증발산 615.6mm로 평가할 수 있다. 본 연구결과인 식생지반의 유출계수 0.245는 국내 하수도시설기준 [29]의 Park with lawn의 계수인 0.05~0.250의 최대값이며, 대표적 유출계수 관련 선행연구인 Mulvaney에 의해 제안된 개념인 합리식 평가모형에서 사용되는 계수인 잔디 평탄지(사질토 2% 경사)의 0.05~0.10에 비해 매우 높은 유출계수로 평가되었다[26]. 더불어 벽돌블럭 또한 선행연구에서는 0.70~0.85로 설정하였지만 본 연구에서는 그보다 높은 0.963으로 평가된 만큼 추가적인 실험을 통해 유출계수의 보완은 계속 연구할 필요가 있다고 판단된다[32-36].

다음과 같은 실험방법을 통한 유출계수 산정은 사용자의 주관에 따라 차이가 발생한다는 선행연구의 단점을 보완할 수 있는 자료가 될 수 있다[36].

평가된 6종류의 포장재료별 유출계수와 물수지 방정식을 활용하여 도시 및 농촌지역의 지하수함양 개선사업으로 활용할 수 있다고 판단된다.

4. 결론

우리나라의 토지이용형태는 다양한 환경생태적 문제점이 보고되고 있어 발생 원인인 물순환 개선이 필요하다.

다. 따라서 포장형태별 지하수함양 기여도를 평가하고 도시 및 농촌지역의 물순환 문제를 적극 개선할 수 있는 포장형태로 개선을 제안하기 위해 연구를 추진하였으며 주요 결론은 다음과 같다.

연구는 대표적 토지피복 포장재료인 잔디, 투수블럭, 점토블럭, 콘크리트에 대해 지하수 침투량을 측정하였다. 그리고 기능 개선방안으로 자갈트렌지와 습지를 측정하였다. 지하수 침투 분석결과 식생지반인 잔디가 총 강수량 1194.4mm 대비 연간 17.96%인 214.51mm가 침투되었으며, 투수포장인 투수블럭은 연간 총 118.45mm가 침투, 반투수포장인 점토블럭은 연간 총 10.43mm가 침투, 불투수포장으로 대표한 콘크리트는 침투량이 없는 것으로 분석되었다. 측정된 도시공원의 대표적 포장재료별 지하수 침투량은 해당 실험 지역의 월별 강수량에 근거하여 1차 회귀식을 도출 하였다. 침투량(y) 강수량(x)의 관계는 식생지반은 $y=0.1648*x+1.3598$, 투수포장은 $y=0.0862*x+1.1899$, 반투수포장은 $y=0.0111*x+0.2157$ 로 산정되었다. 실험대상지에서 측정 된 잔디포장, 투수블럭, 보도블럭, 콘크리트 포장의 지하수 침투시험 결과와 수문학적 합리식 유출량 평가 결과를 분석해서 해당 포장 환경의 유출계수를 산정하였다. 식생지반의 유출계수는 0.245로 설정할 수 있으며, 이를 수정 합리식으로 해석하면 증발산량 687.3mm, 유출량 292.6mm로 해석할 수 있다. 투수포장의 유출계수는 0.583로 설정할 수 있으며, 이를 합리식으로 해석하면 증발산량 379.6mm, 유출량 696.3mm로 해석 할 수 있다. 반투수포장의 유출계수는 0.963로 설정할 수 있으며, 이를 합리식으로 해석하면 증발산량 33.7mm, 유출량 1150.2mm로 해석 할 수 있다. 불투수포장의 유출계수는 1.000로 설정할 수 있으며, 이를 합리식으로 해석하면 증발산량 0mm, 유출량 1194.4mm로 해석할 수 있다. 수로 및 습지와 자갈포장을 적용, 침투량과 증발산량을 알아보려고 하였다. 산정 한 습지와 자갈포장의 침투량 회귀식을 바탕으로 연구대상지의 평균 강우자료에 대입해 보면 강우량 1094.4mm 때 습지는 329.9mm 침투, 864.5mm 증발이 이루어지며, 자갈포장은 578.8mm 침투 615.6mm 증발로 계산할 수 있다. 이 자료는 도시 및 농촌지역 지하수함양 개선사항 제시에 활용하고자 하였다.

이상의 결과로 미루어 봤을 때 도시의 및 농촌지역의 지하수함양과 대기질을 위해 투수가능한 포장형태는 지속적으로 늘려나갈 필요가 있다고 판단된다. 더불어 현재 포장을 보다 저영향 개발 방법인 습지와 자갈포장을 늘리면 수자원함양에 더 기여도가 높은 국토환경을 조성시킬 필요가 있다고 제안할 수 있다.

References

- [1] K. S. Kim, "Problems and Policy Direction in National Land Development", *ARCHITECTURAL RESEARCH*, Vol.37, No.5, pp. 18~22, 1993.
<https://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NODE00352248>
- [2] H. Y. Lee, "The Construction and Application of Planning Support System for the Sustainable Urban Development", *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol.42, No.1, pp. 133~155, 2007.
<https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=JAKO200714539188228&oCn=JAKO200714539188228&dbt=JAKO&journal=NJOU00290632>
- [3] H. J. Lee, *Impact of Urbanization on Environment : Focusing on CO₂Emissions*, Master's thesis, Graduate School of Urban Engineering University of Seoul, Korea, 2013.
http://dcollection.uos.ac.kr/public_resource/pdf/000000019475_20210628155833.pdf
- [4] H. J. Soon, H. J. Kim, "A Research on the Application of Eco City Model for Sustainable City Development - Focusing on the Comparison Analysis of Cases between Domestic and Overseas Eco Cities -", *Korea Real Estate Academy*, Vol.59, pp. 217~230, 2014.
http://www.reacademy.org/rboard/data/krea2_new/59_17.pdf
- [5] J. M. Lee, Y. S. Lee, J. S. Choi, "Analysis of Water Cycle Effect according to Application of LID Techniques", *Journal of wetlands research*, Vol.16, No.3, pp. 411~421, 2014.
<https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=JAKO201428162228200&oCn=JAKO201428162228200&dbt=JAKO&journal=NJOU00294876>
- [6] Kim, H, Kim, YS·Lee, DS·Kim, JY. Evaluation of Supply Adequacy of Park Service in Suwon-si by Urban Park Catchment Area Analysis. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 43(2): 114-124. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.9715/KILA.2015.43.2.114>
- [7] Kim, HJ, Jang, CH·Noh, SJ. Development and Application of the Catchment Hydrologic Cycle Assessment Tool Considering Urbanization (I) - Model Development -. *Journal of Korea Water Resources Association* 45(2):203-215. 2012.
DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2012.45.2.203>
- [8] Kim, H, ·Kang, EJ·Cho, JH. An evaluation on management types by characteristics of urban parks. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 38(5): 21-30. 2010.
<https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO201015037860763.pdf>
- [9] S. H. Kim, A study on the stormwater green infrastructure strategy for the sound hydrological cycle management in urban areas, The Graduate School, Doctor's thesis, Seoul National University, 2014.
https://dcollection.snu.ac.kr/public_resource/pdf/000000018392_20210628161647.pdf
- [10] Schueler, T.R, The Importance of Imperviousness. *WatershedProtection Techniques* 1(3):100-111. 1994.
https://www.fws.gov/southwest/es/Documents/R2ES/LitCited/4TX_Sal/Schueler_1994_Imperviousness.pdf
- [11] Seoul Metropolitan Government. Seoul Report : Environment of Seoul. 2012.
http://news.seoul.go.kr/snap/doc.html?fn=5274b11d0b4b13.76553084.pdf&rs=wp-content/blogs.dir/25/file_s/2013/11/
- [12] J. H. Jeoung, S. K. Park, "Calculation of Pumping Rate Considering the Change of Groundwater Level", *Korean National Committee on Irrigation and Drainage*, Vol.10, No.1, pp. 64~72, 2003.
<https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200373606655493.pdf>
- [13] J. S. Kim, S. Y. Park, "A Prediction and Analysis for Functional Change of Ecosystem in South Korea", *J. of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol.16, No.2, pp. 114-128, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.11108/kagis.2013.16.2.114>
- [14] M. E. Palmer, E. Bernhardt, S. Chornesky, A. P. Collins, C. Dobson, B. Duke, R. Gold, S. Jacobson, R. Kingsland, M. Kranz, M. L. Mappin, F. Martinez, J. Micheli, M. Morse, M. Pace, S. Pascual, O. J. Palumbi, A. Reichman, A. Simons, Townsend, M. Turner, "Ecology for a crowded planet", *Science*, Vol.304, pp. 1251~1252, 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1095780>
- [15] J. K. Son, M. J. Kong, D. H. Kang, S. Y. Lee, "A study on the improvement of Ecosystem Service Function for the Protected Horticulture Complex in Agricultural Landscape", *J. of the Korean Society of Rural Planning*, Vol.21, No.4, pp. 45-53, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.7851/ksrp.2015.21.4.045>
- [16] J. K. Son, M. J. Kong, D. H. Kang, B. H. Kang, S. W. Yun, S. Y. Lee, "The Comparative Studies on the Terrestrial Insect Diversity in Protected Horticulture Complex and Paddy Wetland", *J. of Wetlands Research*, Vol.18, No.4, pp. 395~402, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.17663/JWR.2016.18.4.386>
- [17] MA (Millenium ecosystem Assessment), *Ecosystems and human well-being: synthesis*, Island Press, Washington DC, 2005.
<https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- [18] EY Kim, Kim, JY·Jung, HJ·Song, WK. Development and Feasibility of Indicators for Ecosystem Service Evaluation of Urban Park. *Journal of Environmental Impact Assessment* 26(4): 227-241. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.14249/eia.2017.26.4.227>
- [19] Ramsar Convention Secretariat, *Ramsar Convention Manual*, 2014.
<https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents>

- [/library/manual6-2013-e.pdf](#)
- [20] M. J. Kong, B. M. Lee, N. C. Kim, J. K. Son, "The Analysis of Function and Factors for the Value Assessment of Ecosystem Service at Rice Paddy Wetland", *Journal of Wetlands Research*, Vol.16, No.2, pp. 251~259, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.17663/JWR.2014.16.2.251>
- [21] J. K. Son, D. G. Choi, S. Y. Lee, D. H. Kang, M. J. Park, S. W. Yun, N. C. Kim, M. J. Kong, "Comparative Analysis of Groundwater-Ecosystem Service Value of Protected Horticulture Complex and Paddy Fields", *Journal Of The Korean Society Of Rural Planning*, Vol. 24, No. 2, pp. 047~058, 2018.
DOI: <http://doi.org/10.7851/Ksrp.2018.24.2.047>
- [22] S. W. Chang, I. M. Chung, "Analysis of Groundwater Variations using the Relationship Between Groundwater use and Daily Minimum Temperature in a Water Curtain Cultivation Site", *J. of Engineering Geology*, Vol.24, No.2, pp. 217~225, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.9720/kseg.2014.2.217>
- [23] N. W. Kim, J. W. Lee, I. M. Chung, C. H. Kim, "Change of Groundwater-streamflow interaction according to groundwater abstraction in a green house land", *J. of Korea water resources association*, Vol.45, No.10, pp. 1051~1067, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2012.45.10.1051>
- [24] J. Y. Ko, J. S. Lee, M. T. Kim, C. S. Kim, U. G. Kang, H. W. Kang, "Effects of Farming Practice and NO₃-N Contents of Groundwater with Different locations under Intensive Greenhouse Area", *J. of Environmental Agriculture*, Vol.24, No.3, pp. 261~269, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.5338/KJEA.2005.24.3.261>
- [25] K. C. Ha, Y. C. Kim, S. Y. Kim, "Monitoring of soil water content and infiltration rate by rainfall in a water curtain cultivation area", *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol.52, No.3, pp. 221~236, 2016.
http://jgsk.or.kr/_PR/view/?aidx=6687&bidx=538
- [26] T. J. Mulvaney, "On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of rainfall and flood discharges in a given catchment". *Proc. Inst. Civ. Eng. Ireland*, Vol.4, pp. 18~31, 1850.
http://sources.nli.ie/Record/PS_UR_072021
- [27] American Society of Civil Engineers(ASCE), "Design and Construction of Sanitary and Storm Sewers", *Manuals and Reports on Engineering Practice*, No.37, USA, 1970.
<https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0139396>
- [28] H. I. Penman, "Estimating evaporation trans", *American Geophysical Union*, Vol.37, No.1, pp. 43~50, 1956.
DOI: <https://doi.org/10.1029/TR037i001p00043>
- [29] Korea Water and Wastewater Works Association(KWWA), *Drainage Sewer Design Guideline(DSDG)*, 2011.
<https://www.law.go.kr/LSW/lsInfoP.do?lsiSeq=180440&viewCls=lsPtnThdCmp&urlMode=lsEfInfoR&lsId=001815&chrClsCd=010202#0000>
- [30] S. E. Rantz, *Suggested Criteria for Hydrologic Design of Storm-Drainage Facilities in the San Francisco Bay Region California*, U.S. Geological Survey(USGS), USA, 1971.
<https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr71341>
- [31] Solano County Water Agency(SCWA), *Hydrology and Drainage Design Procedure prepared by Water Resources Engineering*, USA, 1985.
<https://www.scwa2.com/>
- [32] Y. R. Kim, S. H. Hwang, "Estimation of runoff coefficient through impervious covers analysis using long-term outflow simulation", *The Korean Society of Water and Wastewater*, Vol.28, No.6, pp. 635~645, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.11001/jksww.2014.28.6.635>
- [33] T. G. Kim, T. J. Kim, B. R. Lee, "Estimation of Runoff Coefficient according to Revision of Design Criteria, in case of Park", *Journal of Wetlands Research*, Vol.18, No.3 pp. 209~217, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.17663/JWR.2016.18.3.209>
- [34] J. H. Kim, *A study on runoff Coefficient Estimation of Rational Method in Natural Basin*, Ph. D. Thesis. Hongik University, Seoul, Rep. of Korea, 2003.
<https://dl.nanet.go.kr/file/fileDownload.do?linkSystemId=NADL&controlNo=KDMT1200353638>
- [35] J. H. Kim, Y. J. Park, H. H. Choi, J. W. Song, "A study on runoff Coefficient Estimation of Rational Method in Natural Basin", *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference* pp.173~177, 2004.
<https://www.koreascience.or.kr/article/CFKO200411722769768.pdf>
- [36] Y.D. Lee, J. S. Kim, Y. T. Kim, "Study on Improved Method for Calculating Runoff Coefficient of Rational Method", *Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.7, No.4, pp.67~74, 2007.
<https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200735822328501.pdf>

손진관(Jinkwan Son)

[정회원]



- 2013년 8월 : 단국대학교 녹지조경학 습지생태전공(농학박사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 농촌진흥청 국립농업과학원 에너지환경공학과 박사후연구원

〈관심분야〉

농업환경, 시설원예, 습지생태

권 태 근(Taekeun Kwon)

[정회원]



- 2020년 2월 : 단국대학교 녹지조경학 (공학박사)
- 2005년 1월 ~ 현재 : (주) 상림원 대표이사

<관심분야>

조경설계, 환경계획, 공원녹지, 도시환경

임 류 갑(Ryugap Lim)

[정회원]



- 2015년 2월 : 성균관대학교 바이오메카트로닉스과(공학석사)
- 2020년 1월 ~ 현재 : 농촌진흥청 국립농업과학원 에너지환경공학과 책임연구원

<관심분야>

농업시설, 신재생에너지

공 민 재(Minjae Kong)

[정회원]



- 2018년 8월 : 단국대학교 녹지조경학 습지생태전공(농학박사)
- 2018년 8월 ~ 현재 : 농촌진흥청 국립농업과학원 작물보호과 박사후연구원

<관심분야>

농업환경, 곤충생태, 습지생태

김 남 춘(Namchoon Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 서울대학교 입학과 생태복원공학 전공 (농학박사)
- 1986년 3월 ~ 현재 : 단국대학교 생명자원과학대학 녹지조경학과 교수

<관심분야>

생태복원, 녹지생태, 환경계획, 도시환경

강 태 경(Taegyong Kang)

[정회원]



- 1999년 2월 : 충북대학교 대학원 농업기계학과 (농업기계학 석사)
- 2004년 2월 : 충북대학교 대학원 농업기계학과 (농업기계학 박사)
- 1992년 7월 : 농촌진흥청 국립농업과학원 연구사
- 2019년 1월 ~ 현재 : 농촌진흥청 국립농업과학원 연구관

<관심분야>

농업시설, 환경공학, 시설원예

박 민 정(Minjung Park)

[정회원]



- 2015년 2월 : 부산대학교 바이오산업기계공학과(공학석사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 농촌진흥청 국립농업과학원 에너지환경공학과 농업연구사

<관심분야>

농업시설, 시설현대화, 시설원예