

투수성 포장에 의한 비점오염원 저감 효과 분석

Analysis of Non-point Pollution Source Reduction by Permeable Pavement

구 영 민* / 김 영 도** / 박 재 현***

Koo, Young Min / Kim, Young Do / Park, Jae Hyeon

Abstract

As the Urban area grows and more land is developed both within the city and in surrounding areas, hydrologic functions of the natural water cycle are altered. Urbanization creates impervious areas that negatively impact stormwater runoff characteristics. these changes to the natural hydrologic cycle result in the increased flooding, decreased groundwater recharge, increased urban heat island effects. Finally, the land use and other activities result in accumulation and washoff of pollutants from surface, resulting in water quality degradation. Therefore, in this study, evaluating and quantitative analysis of the percolation effect through infiltration experiment of permeable pavement, which is one of the ways that can reduce the problem of the dry stream. Also the SWMM model is used to study the effect of the hydrologic cycle for permeable pavement block contribution.

Keywords : permeable pavement, non-point pollution source, permeation facility, SWMM

요 지

최근에 불투수층의 증가로 인하여 표면의 저류량이 감소하고 침투유출과 전체 유출량은 증가한다. 침투유출과 침투유출 도달시간이 빨라지게 되면 홍수 발생률이 증가하여 도시지역의 피해를 증가시키며, 토양으로 침투되는 우수량이 감소하여 지하수위가 하강하게 되고 도시하천이 마르는 건천화가 진행되어 지역의 물 순환이 악화된다. 또한 하천 수질 오염의 원인은 점오염원과 비점오염원 등이 있는데, 비점오염원에 의한 오염이 점점 커져가는 양상이다. 이러한 이유는 도시지역이 지속적인 개발로 인해 불투수율이 증가하게 되어 초기강우에 오염물질이 하천으로 유입되고 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 도시지역의 물순환 회복을 위한 투수성 포장 효과를 분석하며, 투수성 포장의 비점저감 효과 및 침투유량 감소 효과를 분석하고자 한다. 도시지역 유출 모델인 SWMM을 이용하여 단기 유출 모의를 통하여 투수성 포장의 효과를 분석하였다.

핵심용어 : 투수성 포장, 비점오염원, 침투시설, SWMM

1. 서 론

도시화되면서 가장 큰 변화는 불투수층 증가하면서 강

우가 하천으로 곧바로 직접유출로 이어진다는 것이다. 이에 따른 구체적인 변화는 유출량의 총 부피가 증가하고, 도시지역의 유량곡선에서 상승곡선 부분이 급경사 양상

* 한국수자원공사 K-water연구원 연구원 (e-mail: greatkym@nate.com)

Researcher, Korea Institute of Water and Environment, K-water

** 교신저자, 인제대학교 환경공학과(낙동강유역환경연구소) 조교수 (e-mail: ydkim@inje.ac.kr, Tel: 055-320-3252)

Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Environmental Science and Engineering, Inje University

*** 인제대학교 토목도시공학부 부교수 (e-mail: jh-park@inje.ac.kr)

Associate Professor, Department of Civil and Urban Engineering, Inje University

을 보이며 침투유량 도달 시간이 단축되므로 강우 시 홍수의 위험이 증가한다. 또한 불투수층의 증가로 인해 지하수층의 재충전이 늦어지므로 하천 유량이 적을 시에는 유출이 감소한다(Shaw, 1993). 도시구역의 불투수층에 떨어지는 강우는 노면에 쌓인 오염물질을 하천에 유입시킨다. 특히 초기우수에 의한 관거 내 퇴적물 및 지표면에 축적된 오염물질의 많은 양이 일시적으로 유입되는 초기세척 현상으로 오염이 심화된다(Deletic, 1998). 도시지역에서는 소규모 강우에도 초기강우현상이 쉽게 발생하는데 이는 불투수성 지표면적의 증가, 강우강도, 선행건기일수 등의 영향에 의한 것이다. 초기강우 시 유출되는 오염부하량은 단시간에 막대한 오염물질을 도시하천 등 공공수역에 배출되어 환경오염피해가 가중되고 있다(Jo, 2004).

EPA에서는 도시구역에서 유출되는 오염물질 및 농지, 영업, 광산, 건축, 매립지 등에서 강우에 의해 유출되는 오염물질을 비점오염물질이라고 정의하였다. 미국에서는 각 도시마다 비점오염 저감 및 강우유출수를 관리하기 위하여 BMP (Best Management Practices) 및 LID (Low Impact Development) 시설을 설치하고 있으며, 또한 가이드라인을 제시하고 있다. 각 도시마다 BMP, LID 시설을 설치할 경우 인센티브를 제공하고 있다. LID는 현재 세계적인 관심사이며, 특히 물 관리와 관련된 도시 환경문제를 해결할 수 있는 촉망받는 관리 방법이다(Haan-Fawn Chau, 2009). LID란 기존의 집중식 우수 관리처럼 유출 발생 후에 처리를 다루는 방식의 기법이 아닌 발생원 단계에서의 처리에 초점을 맞춘 기법이다. 즉, LID란 다양한 전략과 요소를 유출수 발생원 단계의 설계 안에 포함시킴으로서 유출수를 분산식으로 관리하는 접근방법이다(GRI, 2007).

최근에 들어서 LID는 지역의 개발과 건설과정에서 야기되는 수질악화를 감소시키기 위해 더욱 필요성이 대두되고 있으며 성공적인 LID 적용을 위해서 실제 미국의 도시 구역 등에서 많은 모니터링 연구가 활발히 진행 중에 있다(Dalziel and Cloak, 2006). 현재까지 국내에서의 도시구역의 유량 및 수질 특성에 관한 연구는 SWMM을 이용하여 김해시의 해반천 유역을 대상으로 강우 유출특성과 비점오염부하량 분석하였으며(Lee et al., 2005), 월평균 비점오염원 부하량을 분석결과 4월과 7, 8월에 비점오염부하량이 높게 나타나는 경향을 보였다. 대표적인 불투수층인 주차장 및 교량지역, 철로 역사와 고속도로에서 발생하는 비점오염물질의 특성과 유출경향을 모니터링 하고 분석하였으며(Kim et al., 2006), 유출 오염물질 부하량의 바람직한 정량화를 위해서는 많은 모니터링의 수행결

과로 얻어진 자료의 세밀한 분석이 필요하다고 언급하였다. 도시지역의 비점오염원 관리 방안을 정리하였으며(Paik et al., 2005), 그 이후 BMPS (Best Management Practices)와 LID 기법을 이용한 분석들이 진행되었다. 도시 지역의 주거지, 상업지역, 소규모의 주차장과 공원 등 소규모 배수지역에 적합한 침투도랑을 설치하는 방법인 Structure BMPS를 이용하여 비점오염원 분석을 하였으며(Lee et al., 2008), LID 기법 개념을 적용하여 SWMM을 통하여 유출 감소 특성을 분석하였다(Park et al., 2008). 또한 하수처리장을 고려한 SWMM을 이용하여 장기간 유출 및 수질모의를 하였다(Lee, 2008).

국토해양부도 2009년부터 “저탄소 녹색도시 조성을 위한 도시계획 수립지침”과 “지속가능한 신도시 계획기준”에서 도시와 신도시에 규모가 비교적 작은 다수의 침투, 저류 및 이용 등의 빗물관리시설을 분산형으로 설치할 것을 권장하고 있으나, 빗물 관리에 대한 계획 차원을 넘어 서지는 못하고 있다. 이에 물순환 도시 조성에 필요한 각 토지이용형태별 설계 가이드라인에 대한 개발 연구가 요구되고 있다. 특히, 신도시 개발의 경우, 물순환 도시로 조성하기 위하여 기본 설계 가이드라인을 도출하고, 그 적용 방안 등을 검토함으로써 새로운 신도시 전형을 마련할 필요가 있다(Lee et al., 2010).

최근에는 LID 기법을 적용하여 도시구역의 물순환 회복 및 비점오염원 저감 방안에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 하지만 수리 실험의 결과를 바탕으로 수치모형에 적용하는 연구가 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 도시구역의 하천 수질관리를 위해 강우시 유역에서의 유입되는 유량과 수질변화와 LID의 요소기술 중에서 투수성 포장의 효과를 도시구역에 분석하고자 한다. 투수성 포장의 효과 분석을 위하여 대형 토조를 이용하여 투수계수를 산정하였으며, 또한 강우 유출수와 오염물질의 거동을 평가하기 위하여, 정밀한 시간 간격으로 모의가 가능한 SWMM 5.0을 사용하여 실측자료와의 검·보정을 통해 비점오염 저감효과를 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 투수성 포장 실험

본 연구에서 사용된 투수성 평가 실험장치는 2×4×2m (가로×세로×높이) 크기의 실험토조에 표층(다공성 투수블록), 기층(쇄석), 원지반(사질토), 배수 및 지하수위 조절을 위한 배수층을 설치하였다. 실험 토조의 전체적인 개념도는 Fig. 2와 같으며 현장 사진은 Fig. 3과 같으며, 바람

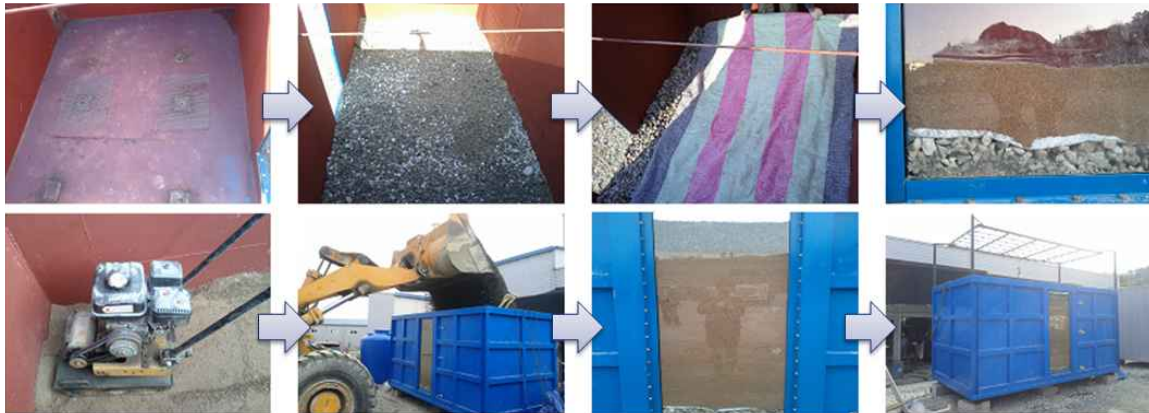


Fig. 1. Installation Process of the Experimental Apparatus

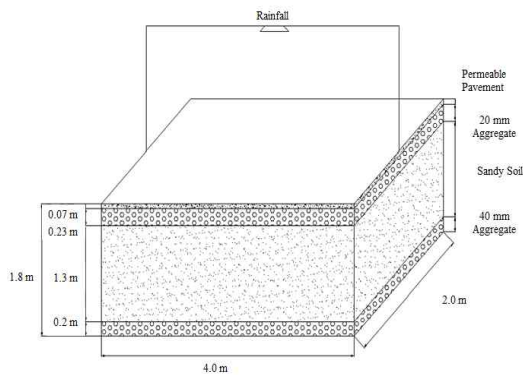


Fig. 2. Conceptual Diagram of Experimental Apparatus (Koo et al., 2013)



Fig. 3. Front View of Experimental Apparatus (Koo et al., 2013)

등 외부영향을 적게 받기 위하여 천막을 설치하였다(Koo et al., 2013).

본 연구에서 필요로 하는 강우를 발생시키기 위하여 강우 장치를 설치하였으며, 강우장치는 유량조절밸브 및 펌프, 유량계, 노즐장치 등으로 구성된다. 초기 토양의 함수량과 인공강우의 침투율에 따른 함수량 변화를 측정하기 위하여 함수량계를 설치하였다. 함수량계는 좌측 4개, 우측 4개로 높이별로 총 8개 설치하였으며, 설치 위치는 토조 바닥으로부터 40 cm, 80 cm, 120 cm, 160 cm 지점이며, 설치된 함수량계는 데이터 로거를 통해 실시간으로 토양의 함수량을 측정하였다. 지하수 유출을 측정하기 위하여

외부 배수 장치에 호스를 연결한 후, 유출을 수집하기 위한 집수통(0.5×0.5×0.5 m, 가로×세로×높이)을 설치하였으며, 집수관의 높이는 지하수의 높이 조절을 위하여 조정이 가능하도록 설치하였다.

Table 1과 같이 실험 조건은 크게 강우강도와 지하수위 2가지를 고려하였다. 강우강도는 50 mm/hr, 100 mm/hr 두 가지 경우, 지하수위는 토조바닥 기준으로 0.0 m, 0.5 m, 1.0 m 3가지 경우이며, 강우강도 조건과 지하수위 조건을 교차 적용하여 총 6가지 경우에 대한 실험을 수행하였다. 기저유출의 시간적 변화를 충분히 측정하기 위하여 강우 중단 후 6시간 동안 지하수위, 함수비, 유출량 변

Table 1. Experimental Conditions (Koo et al., 2013)

Case No.	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Rainfall Intensity (mm/hr)	50	100	50	100	50	100
Rainfall Duration (hr)	3	3	3	3	3	3
Total Rainfall (mm)	150	300	150	300	150	300
Groundwater Level (m)	0	0	0.5	0.5	1.0	1.0

동 등을 관측하였다. 각 유출량 측정은 기 언급한 유출 측정 장치를 이용하여 10분 단위로 목측하였으며, 함수비는 설치된 함수량계를 이용하여 5분 단위로 측정하였다(Koo et al., 2013).

지하유출 초기 발생시간과 강우의 토조내 이동거리를 이용하여 간접적으로 토조내 지반의 투수계수를 산정해 보았다. Table 2에서 볼 수 있듯이 토조내 지반(투수블록 + 원지반)의 투수계수는 0.021~0.044 cm/sec으로 평가되었다. 다공성 투수성 포장인 일반 투수블록의 투수율인 0.01 cm/sec보다 높은 값으로 평가되었다(Koo et al., 2013).

2.2 비점오염 실험

강우시 비점오염원의 수질을 분석하기 위하여 김해시

인제대학교의 인도 및 주차장 그리고 설치한 투수성 포장에서의 강우유출수에 대한 수질 조사를 실시하였다. 2012년 9월 18일 제16호 태풍 산바(SANBA) 시 초기 강우유출에 의한 비점오염원 실험을 하였다. 강우가 시작하고 초기 지표 유출이 발생할 때 채수를 하였으며, 수질분석은 시료를 실험실로 운반한 다음 즉시 보관하거나 냉장보관하면서 분석하였다. 수질조사는 수질오염공정시험법에 의해 분석하였다. 포장에 따른 강우유출수의 비점오염 수질은 Fig. 4에서 나타내었다.

실험 결과 BOD의 최대 농도 저감 효율은 60% 였으며, TN은 87.73%, TP는 26.84%, TSS는 60.43%로 나타났다.

실험 결과 초기 지표유출수에 수질은 인도가 가장 높게 나타났으며, 인도의 지표유출수는 많은 토사가 포함되어 있었다. 주차장에서 발생하는 지표유출수에는 검은색의

Table 2. Experimental Results about the Permeability Coefficient (Koo et al., 2013)

Case No.	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Travel Distance (m) (Permeable pavement + Foundation)	1.8	1.8	1.3	1.3	0.8	0.8
Groundwater Initial Outflow Time (min)	140	70	60	60	40	30
Hydraulic Conductivity (cm/sec)	0.021	0.043	0.036	0.036	0.033	0.044

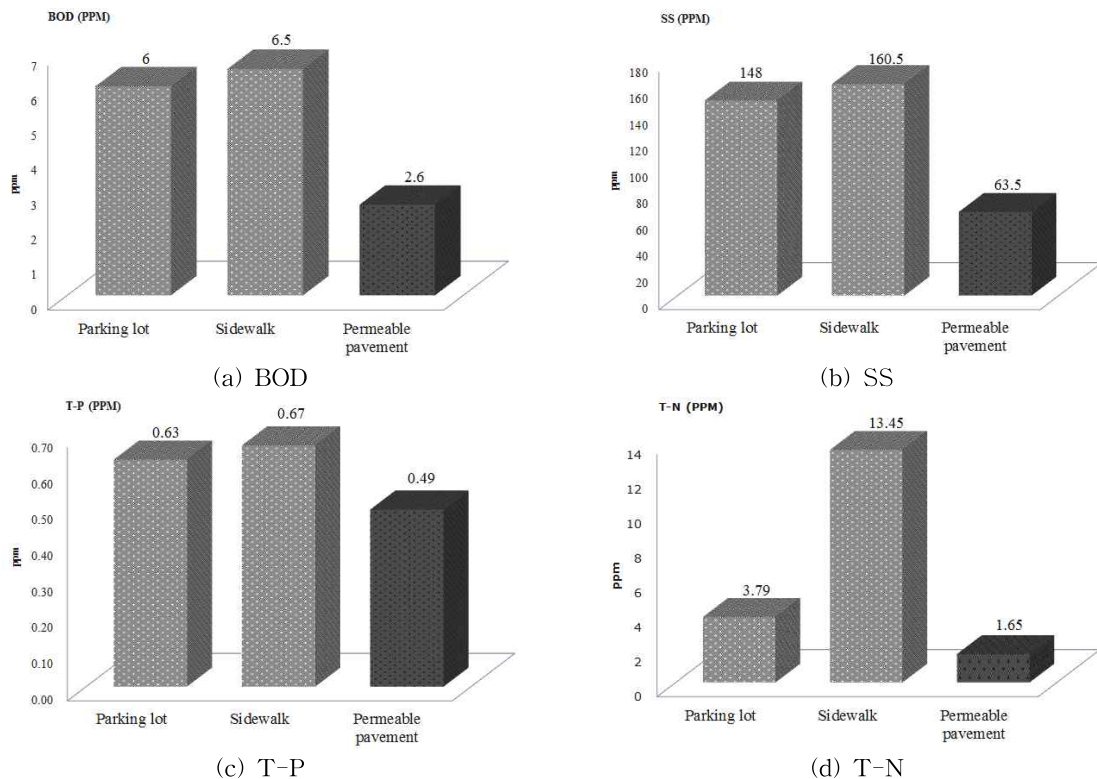


Fig. 4. Comparison of Runoff Water Quality (Parking lot, Sidewalk, Permeable pavement)

중금속으로 보이는 이물질이 많이 포함되어 있었다. 투수성 포장에서 발생한 유출수의 수질이 양호했던 이유는 불투수층에 비하여 초기 지표 유출수가 늦게 발생하며, 초기 오염물질이 저류 및 침투되어 오염농도가 낮은 것으로 판단된다.

2.3 도시유출 모형 개요

본 연구에서는 도시유출모형인 SWMM 모형을 이용하였다. 미국 EPA에서 개발한 SWMM 모형은 도시구역 및 인위적인 배수체계에 적용될 수 있을 뿐만 아니라, 소규모 배수구역에서 대규모 배수구역까지 적용될 수 있다. 그리고 각 배수구역에 대한 합성 및 분리와 함께 배수구역 내의 각종 수리시설물을 동시에 고려할 수 있다. 또한, 유역의 유량 및 물 순환에 대한 모의가 가능하고, 1차원적인 지하수 계산 및 장기 유출 해석이 가능하다. SWMM은 강우주상도, 기상자료, 소유역의 자료, 하수관거 자료를 입력하여 유역의 유출 유량과 수질을 예측하고, 오염물질에 대한 처리를 모의할 수 있다. SWMM 버전간의 프로그램 구성은 차이가 있지만, 모형 내의 계산 과정과 이론은 동일하다.

SWMM은 네 가지 층으로 구분하여 유출을 모의한다. 이와 같은 유출모의를 위한 SWMM의 입력자료는 크게 세 가지로 분류된다. 이들은 수문기상 자료군, 매개변수 자료군, 입/출력 제어 자료군이다. 수문기상 자료군은 강우, 강설 및 증발산과 관련된 자료들이다. 매개변수 자료군은 물리적 매개변수(physical parameters)와 수문학적 매개변수(hydrological parameters)로 구분할 수 있다. 물리적 매개변수들로서는 소유역의 면적, 유역의 평균경사, 불투수지역의 면적 등 소유역 관련 매개변수와 하도 및 관망의 길이, 관경 또는 하도의 폭, 하도의 경사 등 배수체계 관련 매개변수 등이며 이들의 대부분은 지형도나 항공사진, 관망도 및 하천도 등을 통하여 추정할 수 있는 매개변수들이다. 수문학적 매개변수들로서는 투수 및 불투수구역의 Manning 계수와 하도 및 관망의 Manning 계수, 지표면 저류(depression storage), 침투관련 매개변수, 그리고 유역 폭(characteristic width) 등이다. 입/출력 제어 자료군은 프로그램의 수행과 결과의 출력형태를 결정하는 자료들로서 사용자의 목적에 따라 결정되는 자료들이다(Lee et al., 1998).

SWMM 모형은 도시 및 비도시 지역에 적용하여 유출량 및 수질을 예측 모의하는 모형으로 강우사상별 모의 및 연속모의가 가능하다(Baffaut et al., 1990). SWMM에서 유역의 오염물질은 비강우시 도시 표면에 축적(build up)되고 강우시에 씻겨나가는(wash off) 현상에 의해 하천에 전달되는 양을 산정할 수 있게 되어 있다. 오염물질

의 축적량과 유출량은 유역의 오염물질이 하천에 전달되는 효과를 산정함에 있어서 가장 중요한 두 가지 인자이다(Park and Park, 2004). 본 연구에서는 축적량을 나타내는 경험식 중 멱함수를 사용하였고, 유출량 식은 지수함수를 사용하였다.

Power Function:

$$B = \text{Min}(C_1, C_2 t C_3) \quad (1)$$

여기서, B=pollutant buildup (a mass per unit of subcatchment area), C_1 =maximum buildup possible (mass per unit of area or curb length), C_2 =buildup rate constant, C_3 =time exponent이다.

Exponential Function:

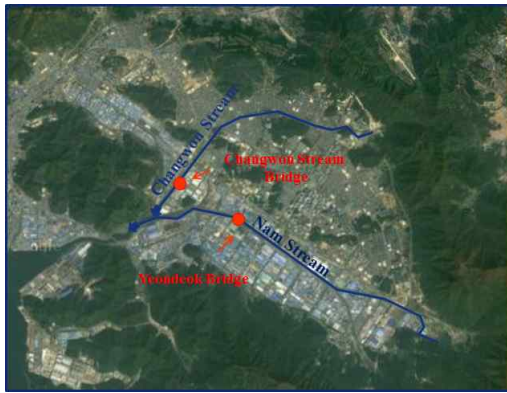
$$W = C_1 q^{C_2} \cdot B \quad (2)$$

여기서, W=washoff load (mass per hour), C_1 =washoff coefficient, C_2 =washoff exponent, q=runoff rate per unit area (inches/hour or mm/hour), B=pollutant buildup (total mass)이다.

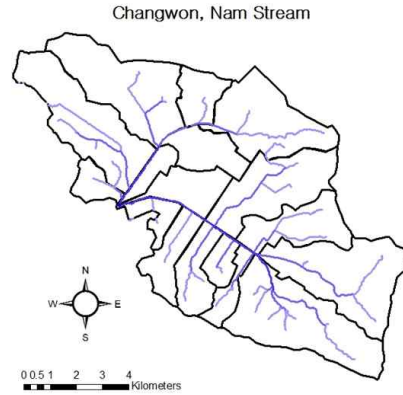
3 모형의 적용

3.1 대상유역 개요

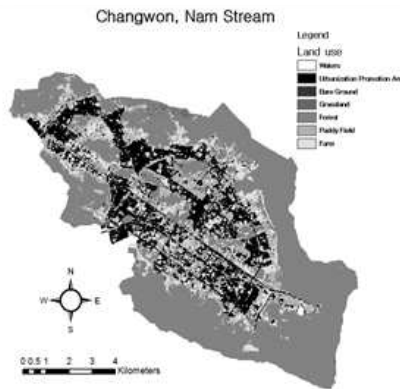
본 연구에서는 SWMM 모형과 실험에서 얻은 투수성 포장의 효율을 이용하여 도시유역의 홍수예방 및 물 순환 회복 방안을 검토하였다. 대상유역은 최근 도시화가 진행된 창원지역을 선정하였고, 이 지역은 마산만 연안오염 총량관리제를 실시하여 오염물질 관리를 강화하고 있으며, 특히 창원천과 남천은 마산만 연안으로 유출되고 있어 수질 개선이 필요하다. 지리적 위치는 동경 128° 45' 51"인 대산면 유등리 유등에서 서쪽으로는 동경 128° 33' 43"인 북면 내곡리 도태에 걸쳐있고, 북면 외산리 벌등에 위치하고 있으며, 동서간 경도차는 0° 12' 8"이고 남북 간의 위도차는 0° 15' 28"이다. 1995년 도농통합으로 동읍, 대산면, 북면 3개 읍·면이 창원지역에 통합되어 기존 시가지의 12개 동과 함께 총 면적 292.72 km²로 경상남도의 2.8%이며, 인구는 510,120명으로 경상남도 전체인구의 15.74%를 차지하고 있다. 이중 남천유역은 103.94 km²이며, 유로연장 15.37 km, 유역 평균경사는 1/1150~1/51로 중·하류부는 대체적으로 완만한 편이나 상류부는 급한 유역이다. Fig. 5에서 (a)는 위성사진이며, 창원천은 남천의 지류로서 수위계는 창원천교에 설치되어 있으며, 남천에는 연덕교에 설치되어 있다. 수위계 자료는 SWMM 모형을 보정하는데 이용하였다.



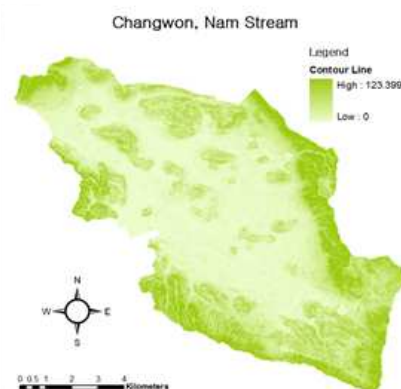
(a) Satellite Picture



(b) Stream Map



(c) Land Use Map (Koo et al., 2013)



(d) Contour Line Map (Koo et al., 2013)

Fig. 5. The Study Area (Changwon Stream and Nam Stream Watershed)

3.2 입력자료 구축

본 연구에서는 강우량 자료는 창원 기상청 자료를 이용하여 2011년 1월부터 2011년 12까지 시간 단위로 입력을 하였다. SWMM의 유역에 관련한 입력 자료들은 물리적 매개변수와 수문학적 매개변수로 구분되어있다. 소유역의 면적, 유역의 평균경사, 불투수 지역의 면적비 등의 물리적 매개변수는 GIS (Geographic Information System) 를 이용하여 추정하였으며, 수문학적 매개변수는 유역의 조도계수와 지면 저류 깊이가 있으며, 이 값들은 홍수유출 모의를 수행한 후, 홍수유출 모의 결과와 관측값을 비교하여 추정하지만 일반적으로 정확한 산정이 어려우므로 기존 연구에서 제시된 값을 일괄적으로 적용하였다. 유역의 조도계수는 Engman (1986)의 조도계수 추정값을 이용하여 투수 지역에는 0.4, 불투수 지역에는 0.013를 적용하였다. 지면 저류 깊이는 Tholin Keifer (1960)의 추정값을 이용하여 투수지역에는 6.4 mm, 불투수 지역에는 1.6mm를 입력을 하였다. SWMM 모형의 침투모형으로는 Horton, Green-Ampt, Curve Number가 있으며 본 연

구에서는 Green-Ampt를 이용하였다. Green-Ampt 식은 Darcy의 법칙을 기초로 하고 있으며, 간단하면서도 연직 침투과정의 기본적인 특성을 잘 나타내며 매개변수들은 측정 가능한 흙의 물리적 특성들로 구성된다. 이 모형은 불포화 흐름을 고려한 보다 엄밀한 방법과 비교해도 매우 합리적인 예측 결과를 주는 것으로 알려져 있다(Wallace and Leonardi, 1975).

Fig. 6은 창원천과 남천 유역의 SWMM 모형 구축 현황을 나타낸 것이다. 창원천 유역을 분할하여 7개의 소유역으로 구축하였으며, 남천 유역은 창원천을 제외하고 10개의 소유역으로 구축하였다. 11개의 하천 자료는 창원시에서 구한 CAD 자료와 하천기본계획보고서를 바탕으로 구축하였다(MLTM, 1993, 1994a, 1994b, 1994c, 1995, 1996, 2000, 2005, 2010a, 2010b).

SWMM 모형의 5.0 버전에 포함되어 있는 LID 모형은 다양한 빗물관리시설의 수문영향분석이 가능하도록 미국 EPA에서 기존 SWMM 모형에 빗물정원, 습지, 침투트렌치, 침투정, 식생도랑, 투수성 포장 등의 LID 시설 모의가 가능하도록 개발된 모형이다. 침투·저류시설 및 LID 계획

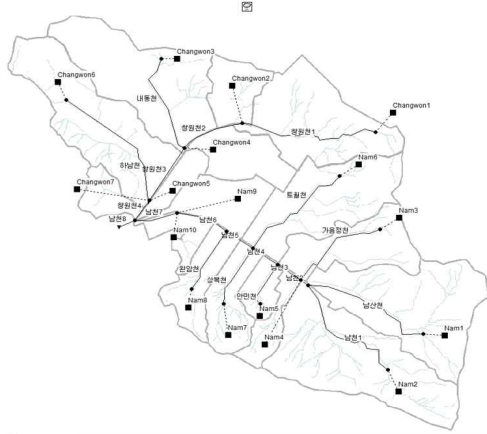


Fig. 6. SWMM Model Layout

요소의 정량적인 수문영향평가가 가능하다. Fig. 13은 LID 모형에서 침투·저류시설 여부에 따른 유출개념도를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 LID 모형의 투수성 포장을 적용하였으며, 토조실험에서 구한 투수계수를 평균(0.035 cm/sec)하여 입력하였고, 토조실험에서 사용한 표층(0.23 m)과 저장층(1.3 m)의 높이를 입력하였다. 그 밖의 매개변수는 모형에서 추천하는 기본 값을 이용하였다(LH, 2011).

4. 결과 및 분석

4.1 모형 적용성 평가-유량

SWMM 모형의 유출량 보정에 이용한 자료는 수위계 자료를 이용하였으며, 창원천에는 창원천교에 설치되어 있는 수위계 자료와 남천에는 연덕교에 설치되어 있는 수위계 자료를 이용하였다. 수위계는 5분 간격으로 하천의 수위를 측정한다. 2008년 6월 27일~2008년 6월 29일까지 자료를 이용하였으며, 한 번의 강우 이벤트에 대하여 보정을 하였다. 남천 유역과 창원천 유역 각각 보정을 하였다. Green-Ampt의 침투량을 이용하여 기존 연구에서 나온 범위를 벗어나지 않는 범위 내에서 보정을 수행하였다. 모의 결과와 실측값의 비교분석을 위하여 선형회귀 관계를 판단하는 결정계수(coefficient of determination, R^2)를 이용하여 오차 분석을 하였다. Chung et al. (2002)는 R^2 값이 0.5, Green (1997)는 R^2 값이 0.6 이상이면 모형이 자연현상 모의에 적합하다고 제안한 바가 있다. Fig. 7은 창원천 유량을 보정한 그래프이며, Fig. 9는 남천 유량을 보정한 그래프이다. 모형의 보정 결과, 창원천의 R^2 값은 0.9441 (Fig. 8), 남천의 R^2 값은 0.9247 (Fig. 10)로 나타났다. 선행연구에서 제안한 적합도 이상으로 SWMM 모형을 이용하여 창원천과 남천 유역에서의 유출해석은 적합

하다고 판단된다.

4.2 모형 적용성 평가-수질

2008년 5월 7일 창원천과 남천에서 비점오염원 모니터링을 하였으며, 비점오염원 모니터링 위치는 수위계가 설

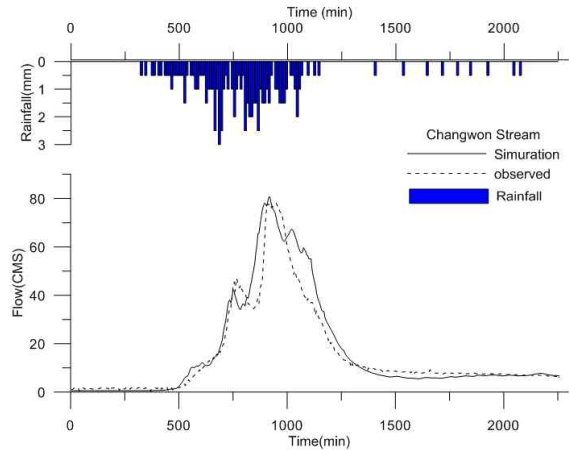


Fig. 7. Result of Calibration in Changwon Stream

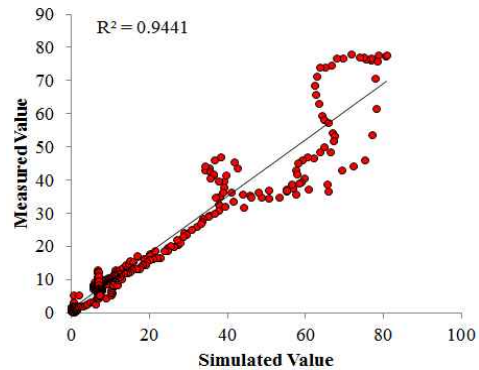


Fig. 8. Relationships between Observed and Simulated Runoff in Changwon Stream

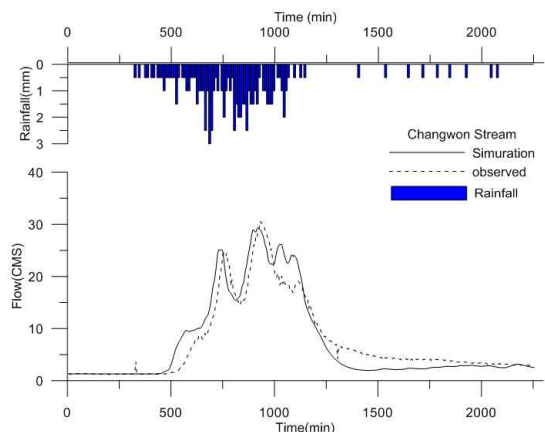


Fig. 9. Result of Calibration in Nam Stream

치되어 있는 곳에서 실시하였다. 창원천(Fig. 12)은 12개의 수질 측정값을 이용하여 보정을 하였으며, 남천(Fig. 11)의 경우 10개의 수질 측정값을 이용하여 수질 보정을 하였다. 창원천에서 TN의 관측값과 모의값이 상관관계가 낮게 나타났으며, 남천에서 TP의 관측값과 모의값의 상관관계가 낮게 나타났다. 이러한 이유는 실험에서 잘못된

것으로 판단된다. 본 연구에서 축적량을 나타내는 경험식 중 멱함수(power function)를 사용하였고, 유출량 식은 지수함수(exponential function)를 사용하였다.

4.3 투수성 포장에 따른 남천의 유량 변화

창원천 및 남천 유역의 불투수층에 투수성 포장으로 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% 교체한다고 가정하여 모의를 수행하였다. 도시유역의 불투수면적 30%에 투수성 포장을 설치하기는 현실적으로 어렵지만, 투수성 포장의 효과를 분석하기 위하여 30%까지 가정을 하였다. 모의 수행한 날은 모델 적용성 평가를 하기 위해 보정한 2008년 6월 27일~2008년 6월 29일 강우를 이용하여 투수성 포장의 효과를 분석하였다. Fig. 13은 창원천이 합류하는 남천의 유량 변화를 모의한 결과이다. 투수성 포장이 0%의 경우 첨두유량은 117.76 CMS였으며, 투수성 포장의 교체 면적이 증가할수록 첨두유량은 감소하였다. 투수성 포장을 5% 교체하였을 경우 9.72 CMS 감소하였으며, 10%의 경우 14.83 CMS, 15%의 경우 22.47 CMS, 20%의 경우 31.02 CMS, 25%의 경우 36.16 CMS, 30%의 경우 41.64 CMS 감소하였다.

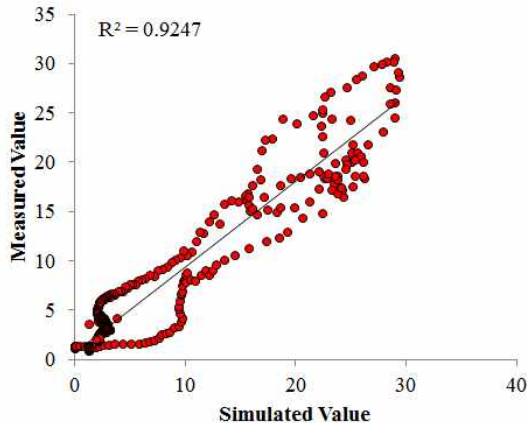


Fig. 10. Relationships Between Observed and Simulated Runoff Nam Stream

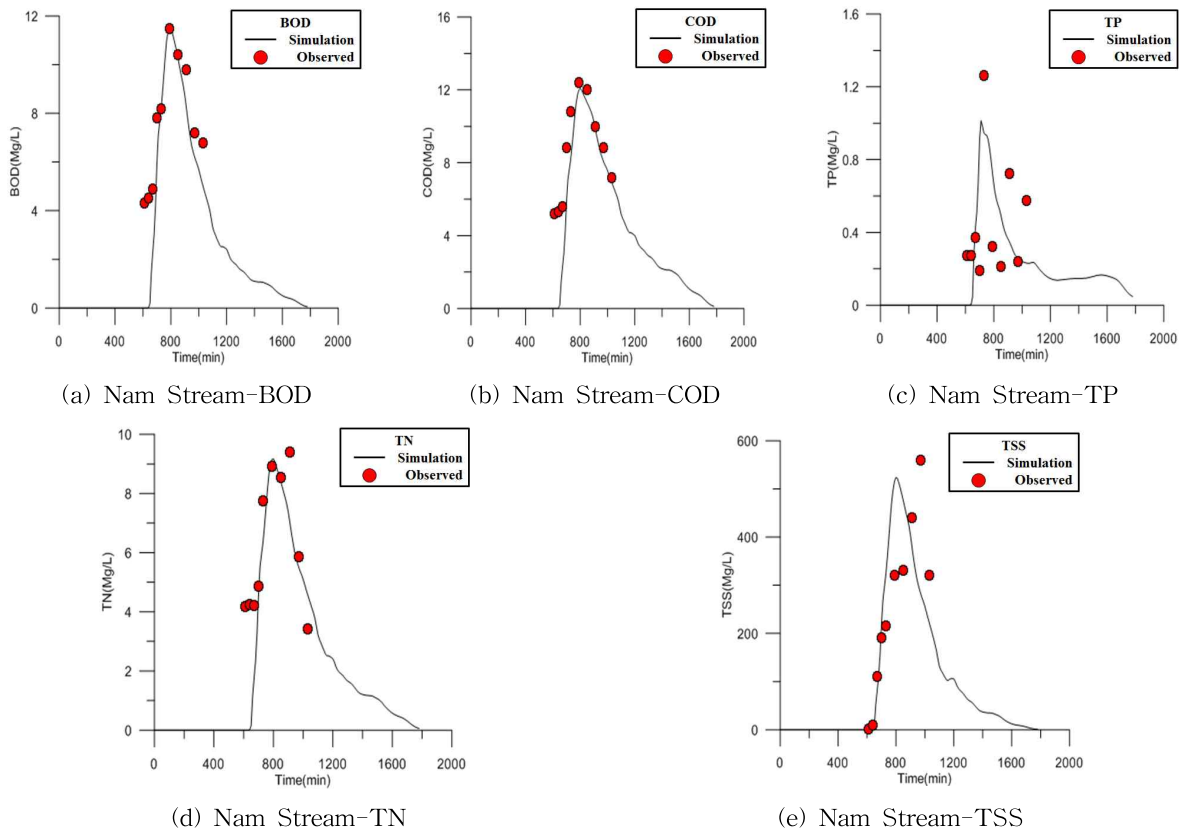


Fig. 11. Results of Water Quality Calibration in Nam Stream

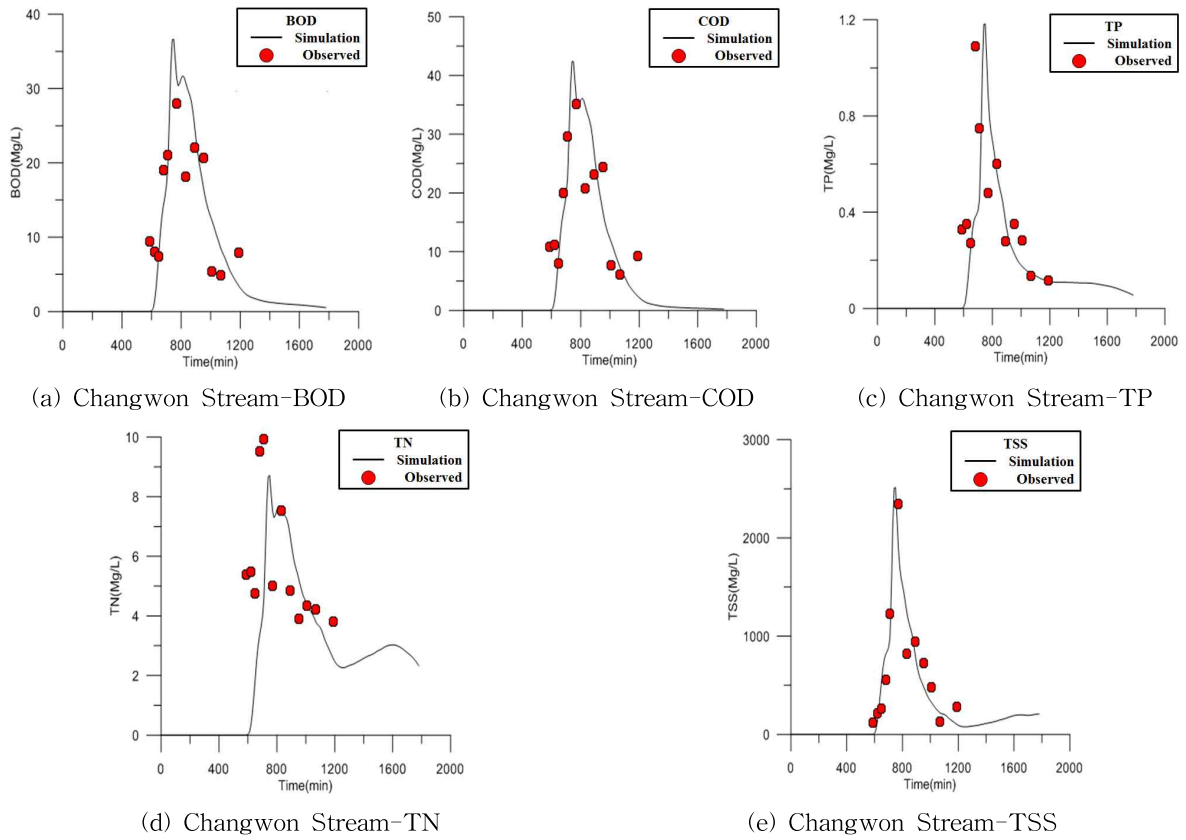


Fig. 12. Results of Water Quality Calibration in Changwon Stream

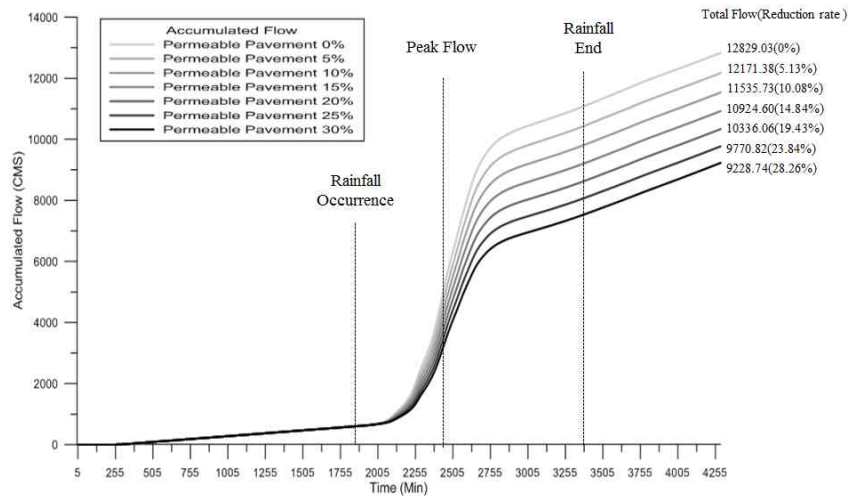


Fig. 13. Changes in Accumulated Flowrate by Permeable Pavement

투수성 포장이 0%의 경우 총 유량은 12,829.03 CMS이며, 투수성 포장에 증가하면서 총 유량은 감소하였다. 투수성 포장을 5% 교체하였을 경우 총 유량은 12,171.38 CMS로 5.13% 감소하였으며, 10%의 경우 총 유량은 11,535.73 CMS로 10.08%, 15%의 경우 총 유량은 10,624.60 CMS로 14.84%, 20%의 경우 총 유량은 10,336.06 CMS로 19.43%,

25%의 경우 총 유량은 9,770.82 CMS로 23.84%, 30%의 경우 총 유량은 9,228.743 CMS로 28.26% 감소하였다.

모형의 보정에서 사용한 2008년 6월 27일~2008년 6월 29일 강우에 대하여 창원천 및 남천 유역 전체 불투수면적 중 투수성 포장을 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% 교체하였을 경우 지표유출 변화를 비교하였다. Fig. 14는

창원천 및 남천 유역 전체의 지표유출량을 합하여 나타낸 그래프이다. 투수성 포장의 교체 면적이 증가할수록 지표유출량은 감소하였다. 투수성 포장을 5% 교체하였을 경우 5.60 CMS (감소율, 6.06%) 감소하였으며, 10%의 경우 11.06 CMS (감소율, 11.99%), 15%의 경우 16.37 CMS (감소율, 17.75%), 20%의 경우 21.54 CMS (감소율, 23.37%), 25%의 경우 26.58 CMS (감소율, 28.84%), 30%의 경우 31.62 CMS (감소율, 34.17%) 감소하였다.

투수성 포장이 0%의 경우 총 유출량은 9,369.16 CMS이며, 투수성 포장이 증가하면서 총 유출량은 감소하였다. 투수성 포장을 5% 교체하였을 경우 총 유출량은 8,694.62 CMS로 7.20% 감소하였으며, 10%의 경우 총 유출량은 8,043.76 CMS로 14.15%, 15%의 경우 총 유출량은 7,416.43 CMS로 20.84%, 20%의 경우 총 유출량은 6,812.48 CMS로 27.29%, 25%의 경우 총 유출량은 6,231.79 CMS로 33.48%, 30%의

경우 총 유출량은 5,674.17 CMS로 39.44% 감소하였다.

모형의 보정에서 사용한 2008년 6월 27일~2008년 6월 29일 경우에 대하여 창원천 및 남천 유역 전체 불투수면적 중 투수성 포장을 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% 교체하였을 경우 지하수 유량 변화를 비교하였다. Fig. 15는 창원천 및 남천 유역 전체의 지하수 유량을 합하여 나타낸 그래프이다.

투수성 포장이 0%의 경우 총 지하수 유량은 1853.45 CMS였으며, 투수성 포장의 교체 면적이 증가할수록 지하수 유량은 증가하였다. 투수성 포장을 5% 교체하였을 경우 16.28 CMS (증가율, 0.87%) 증가하였으며, 10%의 경우 32.37 CMS (증가율, 1.72%), 15%의 경우 48.19 CMS (증가율, 2.53%), 20%의 경우 63.81 CMS (증가율, 3.33%), 25%의 경우 79.22 CMS (증가율, 4.10%), 30%의 경우 97.46 CMS (증가율, 4.45%) 증가하였다. 도시유역 지하수의 흐름을 정확하게 모의하기위해서 많은 자료가 있어야

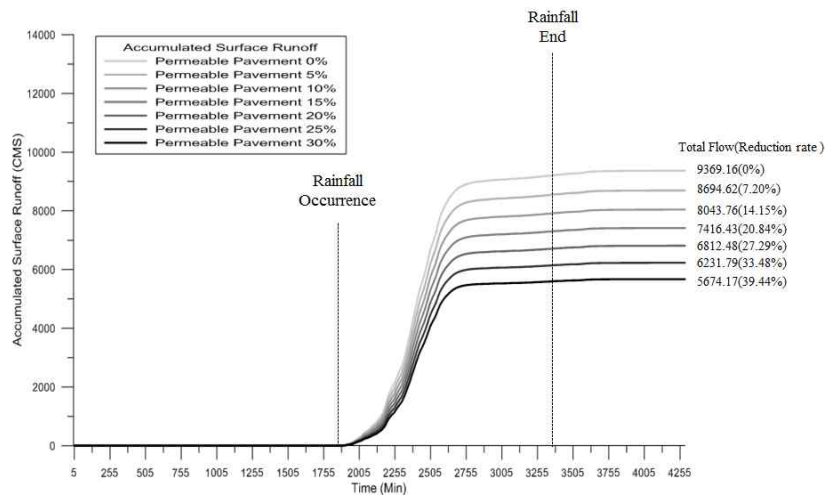


Fig. 14. Changes in Accumulated Surface Runoff by Permeable Pavement

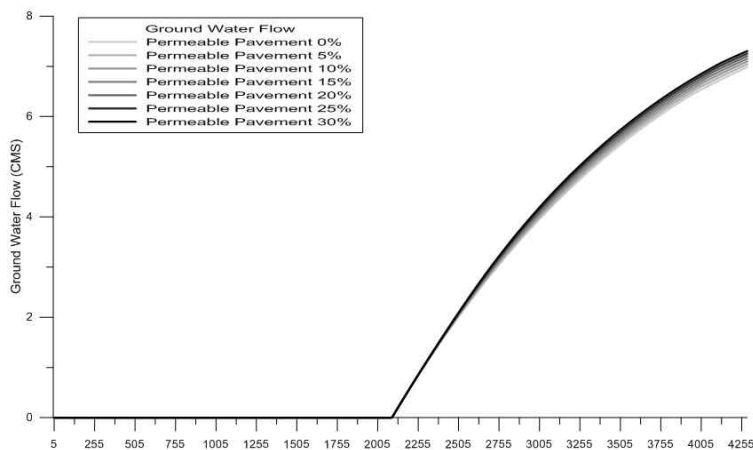


Fig. 15. Changes in Groundwater Flow by Permeable Pavement

하며, 실측값을 이용하여 보정이 필요하며, 본 연구에서는 지하수의 실측값 부족으로 모의결과를 보정하지는 못하였다. 투수성 포장의 증가할수록 하천의 유량과 지표면 유출 유량은 감소하였으며, 투수성 포장으로 강우가 침투되어 지하수 유량은 증가하였다.

4.4 투수성 포장에 따른 비점오염원 저감효과 분석

모형에서 수질 보정을 위해 사용한 2008년 5월 27일 강우에 대하여 창원천 및 남천 유역 전체 불투수면적 중 투수성 포장을 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% 교체하

였을 경우 수질 변화를 비교하였다. 지표유출수 실험을 통해 얻은 투수성 포장의 비점오염원 저감효율을 이용하여 모의하였다. Fig. 16은 투수성 포장의 증가에 의하여 창원천이 합류된 남천의 유량 변화 및 수질 변화를 나타내고 있다. 투수성 포장의 면적이 증가하면 초기강우에 비점오염원 농도가 감소하는 것을 알 수 있었지만, 그 이후 비점오염원이 같거나 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 이유는 초기 지표유출이 발생하면서 증가하는 비점오염원이 투수성 포장에 의해 침투 및 저류되어 감소하는 것으로 판단

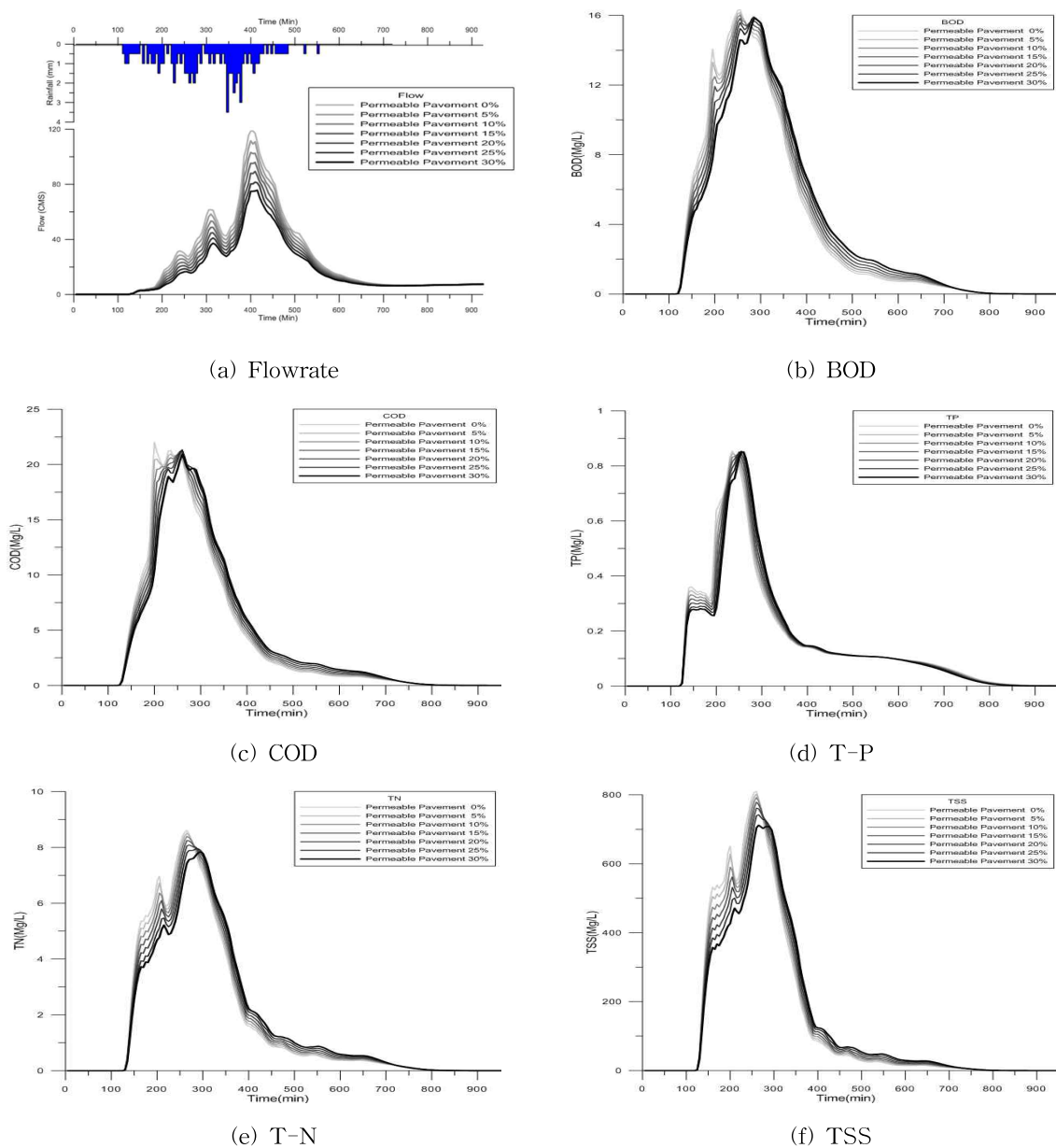


Fig. 16. Changes in Non-point Pollutant Source by Permeable Pavement

Table 3. Changes in Pollutant Load by Permeable Pavement

Permeable Pavement	Pollution Load (kg)					
	Flowrate	BOD	COD	T-P	T-N	TSS
0%	4,657.05	4,042.98	4,928.11	182.11	1,605.74	184,521.82
5%	4,364.16 (6.29%)	3,840.87 (5.00%)	4,682.74 (4.98%)	170.31 (6.48%)	1,517.94 (5.47%)	175,149.35 (5.08%)
10%	4,085.65 (12.27%)	3,646.76 (9.80%)	4,446.99 (9.76%)	159.15 (12.61%)	1,434.06 (10.69%)	166,322.36 (9.86%)
15%	3,815.21 (18.08%)	3,453.67 (14.58%)	4,212.57 (14.52%)	148.19 (18.63%)	1,350.73 (15.88%)	157,539.94 (14.62%)
20%	3,553.60 (23.69%)	3,262.70 (19.30%)	3,980.66 (19.23%)	137.55 (24.47%)	1,268.88 (20.98%)	148,957.46 (19.27%)
25%	3,306.34 (29.00%)	3,080.50 (23.71%)	3,759.49 (23.71%)	127.47 (30.00%)	1,190.90 (25.83%)	140,971.27 (23.60%)
30%	3,067.18 (34.14%)	2,872.42 (28.95%)	3,512.54 (28.72%)	91.15 (49.95%)	1,087.02 (32.30%)	132,949.96 (27.95%)

된다. 시간이 지날수록 투수성 포장을 교체하였을 경우의 농도가 높아졌으며, 침투 및 저류효과가 감소되면서 투수성 포장에서 유출이 일어나면서 농도는 높아지는 것으로 판단된다.

Table 3는 투수성 포장 적용에 따른 오염부하량의 감소를 나타낸 것이다. Fig. 16에서 나타난 비점오염원 농도에서는 큰 변화가 나타나지 않았지만, 불투수면적을 투수성 포장으로 30% 교체시켰을 경우 오염부하량 BOD, COD, T-P, T-N, SS는 각각 28.95%, 28.72%, 49.95%, 32.30%, 27.95% 감소하는 것으로 나타났다. 실험에서 측정된 비점오염원 저감효율이 비점오염원 모의에 적용되었지만 남천 및 창원천의 유역 면적에 비하면 매우 작은 면적에 적용되어 비점오염원 농도 감소의 큰 효과는 없는 것으로 나타났다. 본 모의의 한계점으로 토지이용에 따른 비점오염원 Build-up 및 Wash-off의 매개변수를 보정하지 못하였으며, 유역전체에 동일한 매개변수를 이용하여 모의하였다. 이러한 이유로 비점오염원의 농도 변화가 정확하게 구현하지는 못하였으며, 이러한 이유로 농도 변화가 낮게 나타난 것으로 판단된다. 하지만 본 모의를 통해 투수성 포장 면적의 증가에 따른 농도감소 변화 및 비점오염부하량 감소 효과를 알 수 있었다. 추후 강우 발생시 토지이용별 지표면 유출수의 비점오염원 발생에 따른 매개변수의 연구가 필요하다. 최근 들어 비점오염원관리를 중요시되고 있으며, 위의 모의에서 보여 지듯이 도시 유역에서의 비점 오염부하량을 감소시키기 위하여 투수성포장의 적용이 필요한 것으로 판단된다.

5. 결 론

최근 도시화로 인해 불투수층의 증가로 우수의 유출 특성 변화 및 비점오염원의 하천 유입이 증가하고 있다. 도시화로 강우가 발생하였을 경우 홍수지체시간의 감소, 침투유량 및 지표유출량의 증가, 침투능 및 기저유출의 감소, 증발량의 감소 등 물순환이 변화되고 있다. 최근 들어 비점오염원관리가 중요시되고 있으며, 비점오염원을 감소시키기 위한 많은 노력을 하고 있다. 본 연구에서는 도시 유역의 물순환을 회복 및 비점오염원 저감을 위하여 LID (Low Impact Development)의 효과를 실험 및 도시 유출모델인 SWMM을 이용하여 분석하였다.

- 1) 강우가 발생할 경우 인도, 주차장 및 투수성 포장의 초기 지표 유출이 발생할 때 유출수를 채수하여 실험을 하였으며, 투수성 포장의 유출수가 인도에 비하여 BOD는 60%, T-P는 26.84%, T-N는 87.73%, TSS는 60.43% 낮게 나타났다.
- 2) 경상남도 창원시 남천 및 창원천 유역의 물 순환 해석을 위하여 SWMM 모형을 구축하고 수위계자료를 이용하여 보정하였으며, 모의 유량과 실측 유량을 비교한 결과 구축된 모형은 대상유역의 유출현상을 적절히 모의되는 것으로 판단되며, 비점모니터링 자료를 이용하여 오염물을 보정하였다. 토조의 침투 시험 결과를 바탕으로 SWMM 모형의 LID 관련 매개변수를 입력하였으며, 투수성 포장의 정량적 효과를 분석하였다.

- 3) SWMM 모의 결과 투수성 포장을 설치할 경우 침투 및 저류효과를 통하여 침투유량이 감소되어 홍수에 방이 효과가 있을 것으로 판단된다. 비점오염원 분석에서는 오염물의 농도에서 큰 차이가 나지 않았지만, 오염부하량을 감소시키는 효과가 있는 것으로 나타났다.
- 4) 본 연구의 결과는 도시유역의 물 순환 회복에 있어 투수성 포장의 효과를 제공하며, 연구 결과를 통하여 도시유역의 홍수예방 및 비점오염원 관리에 활용되는 기초자료가 되길 기대한다. LID 공법을 비교하여 도시유역에 미치는 효과를 분석할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(중소기업청)의 재원으로 산학연 공동기술개발사업 지원을 받아 수행된 것임(과제명: 다기능 친환경 투수블럭 개발, 참여기업: ㈜SBB).

References

- Baffaut, C., and Delleur, J. (1990). "Calibration of SWMM runoff quality model with expert system." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 116, No. 2, pp. 247-261.
- Chau, H.F. (2009). *Green Infrastructure for Los Angeles: Addressing Urban Runoff and Water Supply Through Low Impact Development*, Research Report, Los Angeles and the state of California.
- Chung, W.C., Hui, K.Y., and Cheng, S.C. (2002) "Sensitive method for the determination of 1,3-dichloropropan-2-ol and 3-chloropropane-1,2-diol in soy sauce by capillary gas chromatography with mass spectrometric detection." *J Chrom A*, Vol. 952, No. 2, pp. 185-192.
- Dalziel, T., and Cloak, D. (2006). *Simplified Low Impact Development Design for Compliance with Stormwater Treatment Requirements*. California Association of Stormwater Quality Agencies-Annual Conference. October 3-5.
- Deletic, A. (1998). "The first flush load of urban surface runoff." *Water Research*, Vol. 34, No. 8, pp. 2463-2470.
- Engman, E.T. (1986). "Roughness coefficients for routing surface runoff." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 112-1, pp. 39-53.
- Green, S.I. (1997). "Analytical and computational modeling of twin-wire blade forming." *J. Pulp and Paper Sci.*, Vol. 23, No. 7, pp. 353-357.
- Gyeonggi Research Institute. (2007). *Water Circulation Improving Urban Green Function*, Research Report.
- Hyun, K.H., and Lee, J.M. (2010). "Impacts on water-cycle by land use change and effects of infiltration trenches in a new town." *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 24, No. 6, pp. 691-701. (in Korea).
- Jo, Y.J. (2004). *Analysis of Runoff Characteristics of the Rainfall Initial about Surface Characteristics*. Research Report, Chungbuk Green Environment Center (in Korea).
- Kim, L.H., Lee, E.J., Ko, S.O., and Kang, H.M. (2006). "Characteristics of pollutant washed-off from highways with storm runoff duration." *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 8, No. 1, pp. 99-106.
- Koo, Y.M., Jo, J.A., Kim, Y.D., and Park, J.H. (2013). "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
- Lee, B.H., and Lee, K.S. (1998). "Development of an expert system to improve the methods of parameter estimation." *Journal of Korean Water Resources Association*, KSCE, Vol. 31, No. 6, pp. 641-655.
- Lee, D.Y. (2008). *Water Quantity and Quality Simulation of Jomangang Using SWMM5*, M.S Thesis, Pukyong National University.
- Lee, E.J., Kang, D.K., Sgin, H.S., and Cho, K.J. (2005). "Runoff characteristics and nonpoint source pollution loads in an urban watershed using SWMM model." *Conference of Korea Water Resources Association, Single issues*, pp. 91-97.
- Lee, G.Y., Jang, S.H., and Park, J.S. (2008). "Application of SWMM for management of the non-point source in urban area -case study on the pohang city-." *Journal of the Environmental Health Sciences*, Vol. 34, No. 3, pp. 247-254.
- Lee, H.M., Yun, J.R., Kim, Y.J., Jin K.N., and Han, H.G.

- (2010). "A study on a reasonable choice of simulation model for rainfall-runoff in the prior review system on disaster effect." *LHI Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 75-82.
- LH (Korea Land & Housing Corporation). (2011). *Analysis of Flooding Reduction Effect Using LID*, Research Report.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (1993). *Stream Maintenance Master Plan, Nam Stream, Namsan Stream*, Technical Report (in Korea).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (1994a). *Stream Maintenance Master Plan, Naedong Stream, Sogye Stream*, Technical Report (in Korea).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (1994b). *Stream Maintenance Master Plan, Towol Stream*, Technical Report (in Korea).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (1994c). *Stream Maintenance Master Plan, Yanggok Stream, Gaeumjeong Stream*, Technical Report (in Korea).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (1995). *Stream Maintenance Master Plan, Sin Stream, Negok Stream, Mugok Stream, Wolchon Stream, Changwon Stream*, Technical Report (in Korea).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (1996). *Stream Maintenance Master Plan, Hanam Stream*, Technical Report (in Korea).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (2000). *Stream Maintenance Master Plan, Changwon Stream*, Technical Report (in Korea).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (2005). *Stream Maintenance Master Plan, Sangbok Stream*, Technical Report (in Korea).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (2010a). *Stream Master Plan, Anmin Stream*, Technical Report (in Korea).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (2010b). *Stream Master Plan, Wanam Stream*, Technical Report (in Korea).
- Paik, D.H., Lim, Y.H., Choi, J.K., Jung, P.G., and Kwak, D.H. (2005). "Study on the runoff characteristics of non-point source pollution in municipal area using SWMM model -a casce study in Jeonyu city-." *Journal of the Environmental Society*, Vol. 14, No. 12, pp. 1185-1194.
- Park, J., Yoo, Y., Park, Y., Yoon, H., Kim, J., Park, Y., Jeon, J.H., and Lim, K.J. (2008). "Analysis of runoff reduction with LID adoption using the SWMM, journal of Korean society on water quality." *Korean Society Water Environment*, Vol. 24, No. 6, pp. 805-815.
- Park, Y.H., and Park, S.S. (2004). "Development of non-point source pollution loading function based on rainfall intensity and land use type." *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 26, No. 10, pp. 1070-1078.
- Shaw, E.M. (1993). *Hydrology in Practice*. Chapman & Hall.
- Tholin, A.L., and Keifer, C.J. (1960). "Hydrology of urban runoff." *Trans, ASCE*, Vol. 125, pp. 1308-1379.
- Wallace, K., and Leonardi, F. (1975). "Theoretical analyses of pavement edge infiltration and drainage." *ARRB External Project 176 Report No AIR 176-5*.

논문번호: 13-028	접수: 2013.03.05
수정일자: 2013.04.23/12.05	심사완료: 2013.12.05