

도시우수 저류·침투시설에 대한 비용대비 유출저감효과 비교 분석

이경섭*, 김환석*, 박기정*, 김덕우*, 윤재영*

*고려대학교 환경공학과

e-mail:jyyoon@korea.ac.kr

Cost-Effectiveness Analysis of Storage and Infiltration Facilities in Urban Basins

Kyung-Sub Lee*, Hwan-Suk Kim*, Gi-Jung Pak*, Deok-Woo Kim*,
Jae-Young Yoon*

*Dept. of Environmental Engineering, Korea University

요 약

최근 도시화로 인한 유역 내 불투수 면적의 증가로 인해 침투홍수량이 증가하고 있으며 이 문제를 해소하기 위해 종래에는 인공적으로 하천폭을 증가시키고 제방을 높이는 대책 등이 시행되었으나 많은 문제점이 발생되어 대책의 단순적용에 어려움이 있다. 이러한 문제의 해결방안으로 강우유출수 저감 목적 최적관리기법(BMP)이 대두되었으며, 실제로 이러한 빗물을 저장하고, 침투시키는 우수·저류 침투시설에 대한 관심이 급증하여 정부 및 일부 지자체를 중심으로 우수·저류 침투시설의 도입이 점차 확산되고 있다. 본 연구에서는 우수·저류 침투시설중 저류지, 투수성포장, 옥상녹화를 EPA SWMM으로 모형화 하여 설치비용에 따른 침투유출량 저감효과를 비교하였으며, 그 결과 투수성 포장의 비용 대비 침투유출량의 저감효과가 가장 뛰어난 것으로 나타났다.

1. 서론

개발에 따른 도시화의 진행은 건물이나 도로의 포장에 의한 불투수면적의 증가와 배수시설의 발달로 이어져 급격한 유출변화 및 수생태계(Aquatic ecosystem)의 파괴를 초래하였다(Miltner 등, 2004). 또한 근래 들어 자주 일어나는 홍수피해의 유형을 살펴보면 배수로, 하수도, 빗물펌프장, 유수지의 내수배제능력 부족이 주된 원인이며 도시빗물 배수관 압력수, 월류 또는 표면체수로 인한 피해가 증가하는 추세이다. 이는 도시화의 진행으로 유역 내 하수 관거를 통해 하천으로 유입되는 홍수 유출량이 이전보다 증대되고, 유역 출구점까지의 도달시간은 단축됨으로서 일어나는 현상이다(김윤환, 2007). 이와 같은 유출량 증가 및 침투유량 증가에 대응하기 위하여 종래에는 인공적으로 하천폭을 증가시키고 제방을 높이는 대책 등이 시행되었으나 엄청난 공사비 문제, 평시 하천 유지유량의 부족, 하천수의 오염 심화 등의 문제점이 발생되어 대책의 단순적용에 어려움이 있다.

이러한 문제점의 대책으로 미국에서는 개발 사업에 따라 증가하는 유출량의 저감방안으로서 저류 및 지체시설 뿐만 아니라 지하침투 유도시설 등에 대한 연구가 이루어지고 있다. 또한 일본에서는 급격한

도시화에 의한 도시하천 유역 홍수피해를 경감하기 위해 하천과 유역분담 방식을 구분하여 유역분담에 대한 우수유출저감시설을 적극 활용하는 유역종합치수대책을 시행중이다.

국내에서도 서울시정개발연구원(1995)에서 연구한 “우수유출을 저감대책”을 시작으로 우수유출 저감시설 및 설치기법에 관하여 연구중이지만 선진국에 비하여 다양한 방안의 검토가 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 다양한 BMP(저류지, Green roof, 투수성 포장)에 대해 SWMM을 이용한 모형화 방안을 제시하고 대상유역인 군자배수구역에 적용하여 재현기간 별 비용대비 침투유출량 저감효과를 모의하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 도시유출 모형

우수관리에 있어 최근에 각광받고 있는 강우유출수 총량을 저감시킬 목적으로 소위 BMP 개념이 사용되고 있으며 여기에는 침투트렌치(infiltration trench), 투수성포장(pervious pavement), 옥상녹화(green roof), 습지(grass swale), 완충지(buffer strip), 저류지(retention basin), 생태저류시설(bioretenion basin) 등이 있다. 이러한 BMP를 모의

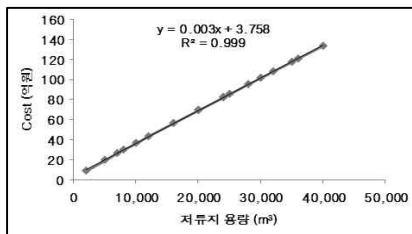
하는 모형은 단기 강우 사상과 연속 강우 모두 적용 가능 하여야 하며 강우와 증발산, 토양으로의 침투 등 물리적인 과정과 사유지에서 도로, 도로에서 관거 시스템, 최종적으로는 배수분구의 말단부로 이어지는 지표수 유출 과정을 모의해야 한다. 본 연구에 사용된 모형은 US EPA에서 개발한 Storm Water Management Model(SWMM)로 도시유역을 모의하기 위해 다양한 수리·수문학적 개념을 사용하며 (Roesner 등, 1998), 현재까지 개발된 모형 중 최적의 도시유출모형 중 하나로 알려져 있다. 또한 보다는 강우유출수 제어 대책, 특히 BMP 모의가 용이한 모형 구조를 제공하고 있다.

2.2 BMP 별 모형 입력자료

2.2.1 저류지

저류지의 높이는 토사에 의한 안정성이 고려되어야 하며 Zhen 등(2004)은 저류지의 높이를 2~3.5m로 제안하였고 본 연구에서는 높이를 3.5m로 하였다. 방류구의 제원은 설계강우 빈도별로 Flooding이 일어나지 않게 산정하였으며 바닥표고는 저류지 바닥표고와 동일하게 하였다.

서울시정개발연구원(2004)에서는 비용에 따른 저류지의 용량을 제시(그림 1)하고 있으며 이를 이용하여 저류지 면적을 산정하였다.



[그림 1] 저류지의 용량별 Cost(서울시정개발연구원, 2004)

2.2.2 Green roof

Green roof 설치에 의한 유출량 저감을 모의하는데 있어 그 매개변수가 되는 값은 CN이며 Green roof의 CN값은 2003년부터 2004년까지 미국 University of Georgia에서 31개의 강우사상을 통하여 실험한 결과를 토대로 추정된 86을(Carter와 Rasmussen, 2006) 적용하였다.

English Nature(2003)는 여러 나라의 Green roof 설치비용을 비교하였으며 미국은 \$14~\$19/ft², 영국은 \$16~\$24/ft²라고 제시하였다. 본 연구에서는 Paladino(2004)에서 제시한 Green roof 설치비용인 \$12.5/ft²을 사용하였다. 현재 국내에서는 건물 옥상

에 쾌적한 녹지휴식공간 조성을 위하여 옥상녹화 사업을 추진 중이고 설치비용은 75,000원/m²~90,000원/m² (50%보조금 제외)이다. 본 연구에서 사용된 Green roof 설치비용을 환산하면 약 168,000원(\$1를 1,250원으로 계산)이며 보조금을 고려하면 국내 설치비용범위에 포함된다는 것을 알 수 있다.

2.2.3 투수성 포장

SWMM에서 투수성 포장을 모의하기 위한 방안으로 기존의 Subcatchment 이외에 투수면 만으로 구성된 Porous Pavement Subcatchment를 추가하였다. James 등(2001)은 투수성 포장에 대하여 Green-Ampt 공식에 사용가능한 매개변수로 아래 [표 1]과 같은 값을 제안하였다.

본 연구에서는 Heaney와 Lee(2006)에서 제안된 \$65,000/acre를 투수성 포장의 설치비용으로 사용하였으며 이를 환산하면 약 20,000원(\$1를 1,250원으로 계산)이다. 환산된 설치비용은 국내에서 사용되는 설치비용범위(13,700원/m² ~ 26,478원/m²)에 포함된다는 것을 알 수 있다.

[표 1] 투수성 포장의 Green-Ampt 매개변수(James 등, 2001)

Manning's n	Suction head (mm)	Conductivity (mm/hr)	Initial deficit
0.03	10	430	0.5

3. 모의결과

3.1. 대상 배수구역

본 연구에서는 서울시 군자동의 군자배수분구를 대상구역으로 선택하였다. 군자배수구역은 중랑천 좌안의 하류(군자교)에 위치하고 있으며 구역면적이 96.4ha이며, 행정구역상 군자동, 능동, 중곡 1동, 중곡 2동, 중곡 4동에 위치해 있다.

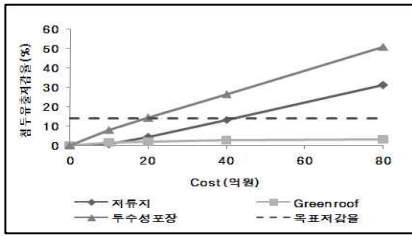
3.2. 강우량 산정

본 연구에서는 국내외 적으로 많이 사용되는 24시간을 설계강우지속시간으로 결정하였으며 서울관측소 지점에 대한 Huff 4분위법 연구결과(도시홍수재해관리기술사업단, 2006)를 참고하여 빈도가 가장 높은 1분위를 호우설계분위로 결정하여 2년, 10년, 50년, 100년의 설계강우에 대하여 연구를 수행하였다.

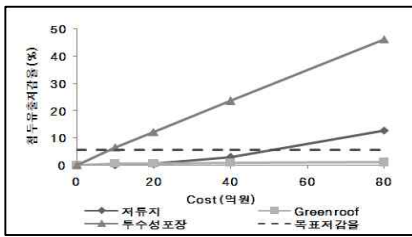
3.3. BMP 설치규모에 따른 유출저감효과 비교

본 연구에서는 BMP 설치규모에 따른 침투유출 저

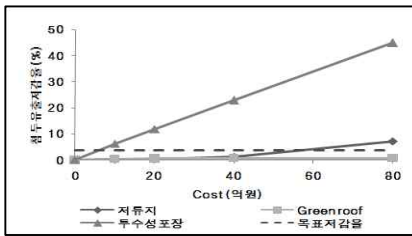
감효과를 재현기간 별로 모의하였다. 목표저감율은 대상 배수유역의 재현기간 별 개발 전 침투유출량 수준으로 낮추는데 필요한 저감율을 의미한다.



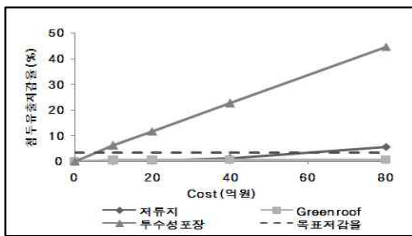
[그림 2] BMP 설치규모에 따른 유출저감효과 비교(2년)



[그림 3] BMP 설치규모에 따른 유출저감효과 비교(10년)



[그림 4] BMP 설치규모에 따른 유출저감효과 비교(50년)



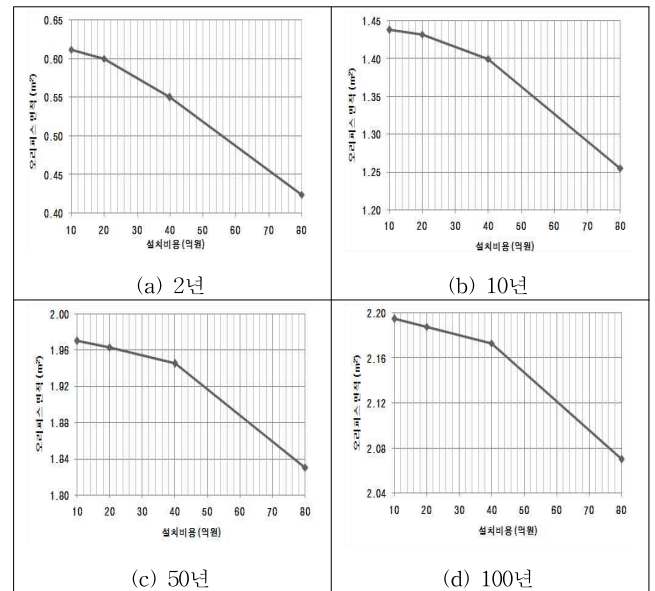
[그림 5] BMP 설치규모에 따른 유출저감효과 비교(100년)

저류지의 경우 설치비용이 증가함에 따라 저류용량이 증대되며 우수를 저류시킬 수 있는 공간을 확보할 수 있으므로 오리피스의 면적을 감소시킬 수 있다. 재현기간에 따른 오리피스의 면적변화는 [그림 6]과 같이 비선형적으로 감소한다는 것을 확인하였으며 이로 인하여 동일 재현기간에 대한 침투유출저감율이 비선형적으로 증가되는 것으로 판단된다.

Green roof의 경우 동일한 재현기간의 경우에 대하여 설치비용 10억까지는 침투유출저감율이 증가하였지만 그 이후는 저감율이 일정하다는 것을 알 수 있다. 이는 Green roof를 설치하면 유역 내 불투수면적은 감소하지만 해당CN 값이 기존 투수지역 CN

값 보다 커서 투수지역의 평균 CN을 증가시키게 되고 이로 인해 발생하는 유출량의 증가가 불투수면적의 감소로 인한 유출저감효과를 상쇄시키기 때문인 것으로 판단된다.

투수성 포장의 경우 설치비용이 증가함에 따라 동일 재현기간의 경우에 대한 침투유출저감율이 선형적으로 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 이는 투수성 포장의 면적이 증가함에 따라 불투수면적비가 감소하게 되고 또한 투수성포장의 높은 수리포화전도계수(Conductivity)의 영향으로 투수성포장면에 떨어진 경우는 전량 침투되고 유출은 없기 때문이다.



[그림 6] 재현기간에 따른 오리피스의 면적

저류시설과 침투시설의 경제적인 효율을 비교하기 위하여 개발로 인해 증가된 침투유출을 개발전 수준으로 낮추기 위해 필요한 비용을 산정하여 비교하였으며 그 결과는 [표 2]와 같다.

[표 2] 목표저감율 달성을 위한 BMP 별 소요비용 비교

재현기간 (년)	목표저감율 (%)	소요비용(억원)			저류지 대비 비용절감율 (%)
		저류지	Green roof	투수성 포장	
2	14.0	42.1	-	19.7	53.3
10	5.6	50.7	-	8.5	83.2
50	3.6	55.7	-	5.8	89.6
100	3.3	57.0	-	5.4	90.5

- : 달성불가

Green roof의 경우 설치단가가 투수성 포장에 비해 4배 정도 비싸기 때문에 설치면적이 적고 그로 인해 본 연구에서 검토한 비용범위 내에서는 목표저감율에 도달할 수 없는 것으로 분석되었다.

재현기간이 증가함에 따라 투수성포장은 목표 저감을 달성을 위해 소요되는 비용이 감소하는 경향을 보였다. 이는 투수성 포장의 설치면적이 증가함에 따라 침투유출 저감율이 선형적으로 증가하는 반면 목표 저감율은 재현기간이 증가함에 따라 감소하기 때문이라고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 미국환경청(EPA)에서 개발된 SWMM 모형을 이용하여 우수 저류시설 및 침투시설의 설치에 따른 도시유역의 유출저감효과를 모의하였으며 각 BMP 별 설치비용은 문헌을 참고하여 산정 비교하였다. BMP를 대상유역에 설치하여 모의한 결과는 다음과 같다.

① Green roof의 경우 다른 BMP와 비교하여 유출저감효과가 작은 것으로 분석 되었으며 비용이 증가하여도 거의 일정한 유출저감효과를 보였다. 이는 유역의 불투수면이 감소하여 유출이 줄어들지만 Green roof를 포함한 투수지역에 대해 산정한 평균 CN값은 높아지기 때문인 것으로 판단된다.

② 투수성포장의 경우 설치비용이 증가함에 따라 침투유출 저감효과가 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이는 투수성 포장의 높은 포화수리전도계수의 영향으로 투수성 포장면에 떨어진 강우는 전량 침투되기 때문이라고 판단된다.

③ 재현기간 별 목표저감율을 설정하여 BMP 별로 이를 충족시키는데 소요되는 비용을 산정하여 비교하였으며, 그 결과 투수성 포장이 가장 경제적인 것으로 분석되었고 저류지 설치시보다 최대 90.5%까지 설치비용을 절약할 수 있다. 이는 투수성포장 설치초기상태가 유지된다고 가정했을 경우이나, SWMM 모형은 투수성 포장의 공극막힘현상을 고려하지 못하기 때문에 실제 유출저감율은 본 연구결과보다는 떨어질 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 BMP 별 모의방법과 저감효과를 제시하고 그 결과를 비교·분석하였으나 이의 실질적인 검증은 위해서는 우수유출저감시설이 적용된 지역의 모니터링을 실시하여 수문모형에 의해 예측된 저감효과와의 비교·분석이 필요하다고 생각된다. 이를 토대로 BMP 별 적정 매개변수의 산정에 관한 연구가 이루어진다면 우수유출저감시설의 적용에 따른 유출특성 변화를 예측하고 이를 토대로 적정 시설규모 및 위치를 산정하는데에 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해경감사업단(NEMA-06-NH-03) 중 내배수 침수피해 저감기술개발 과제에 의해 지원되었습니다. 더불어 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원('09지역기술혁신 B-01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 김윤환 “SWMM 모형을 이용한 도시화 유역에서의 유출 특성 분석”, 석사학위논문, 호남대학교, 2007.

[2] 도시홍수재해관리기술연구사업단, “도시강우의 시·공간적 분포”, 2006.

[3] 서울시정개발연구원, “서울우수시설적용방안”, 2004.

[4] 서울시정개발연구원, “우수유출을 저감대책”, 1995.

[5] Carter, T.L., Rasmussen, T.C., “Hydrologic behavior of vegetated roof” Journal of The American Water Resources Association(JAWRA), Volume 42, Issues 5, pp. 1261-1274, 2006.

[6] English Nature, “Green Roofs: their existing status and potential for conserving biodiversity in urban areas”, English Nature, Northminster House, Peterborough PE1 1UA, 2003.

[7] Heaney, J.P., Lee, J.G., “Methods for Optimizing Urban Wet-Weather Control System”, EPA/600/R-06/034, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH, 2006.

[8] James, W.R.C., James, W., von Langsdorff, H., “Stormwater Management Model for Environmental Design of Permeable Pavement”, Chapter 26 in Models and Applications to Urban Water Systems, Proc. Conference on Stormwater and Urban Water Systems Modeling, W. James, ed., Computational Hydraulics International, Guelph, Ontario, pp. 423-445, 2001.

[9] Miltner, R.J., White, D., Yoder, C., “The biotic integrity of streams in urban and suburbanizing landscapes”, Landscape Urban Planning, Volume 69, pp. 87-100, 2004.

[10] Paladino & company, Inc., “Green Roof Feasibility Review”, Paladino & Company, Inc., 2004.

[11] Roesner, L.A., Aldrich, J.A., Dickinson, R.E. “Stormwater Management Model User’s Manual, Version 4: Extran Addendum”, EPA/600/3-88/110b (NTIS PB88-236658), Environmental Protection Agency, Athens, GA, 1988.

[12] Zhen, X.Y., Yu, S.L., Lin, J.Y., “Optimal Location and Sizing of Stormwater Basins at Watershed Scale”, Journal of Water Resources Planning and Management, Volume 130, Issue 4, pp. 339-347, 2004.