

도시지역의 옥상녹화에 따른 유출저감효과 분석과 비용 산정

여규동* · 정영훈**

An Analysis of Effect of Green Roofs in Urbanized Areas on Runoff Alleviation and Cost Estimation

Kyudong Yeo* · Younghun Jung**

요약 : 옥상녹화는 도시화로 인한 불투수면이 증가함으로써 발생하는 초과 지표면유출을 저감하는 근본적인 홍수관리 대안 중에 하나이다. 본 연구의 목적은 옥상녹화의 유출저감효과를 분석하고, 분석기간 및 할인율과 같은 경제성분석 기준을 제시하며, 사업비용을 산정하는 것이다. 사례연구로서 불투수율이 매우 높은 청계천 유역을 대상으로 하였다. 강우유출 모의를 위해, XP-SWMM과 Clark 유역추적법이 적용되었다. XP-SWMM으로 분석결과, 옥상녹화 전의 재현기간 80년에 대한 첨두홍수량은 $1,102.84\text{m}^3/\text{sec}$ 이며, S-0~4까지 각각 14.34%, 11.21%, 8.65%, 4.51%, 3.52% 감소하였다. 또한, 시나리오별 비용은 2012년 현재가치화하여 각각 1,142,642백만원, 983,835백만원, 794,730백만원, 530,389백만원, 436,005백만원으로 산정되었다. 본 연구는 옥상녹화 사업에 대한 타당성을 확보하는데 기여할 것으로 기대되며, 이를 통해 도시재해 관리자가 적극적인 옥상녹화 사업을 유도할 수 있을 것이다.

주제어 : 옥상녹화, 불투수면, 도시화, 홍수유출, 비용 산정

ABSTRACT : A green roof is one of the fundamental flood management alternatives used to mitigate an excess runoff by increase of surface runoff caused by urbanization. The object of this study is to assess the excess runoff alleviation effect by green roofs; to present the criteria of economic analysis such as a duration period and a discount rate; and to estimate the project cost. The Chung-Gye watershed in Seoul is selected as a study area because the impervious rate is very high. XP-SWMM and Clark Area Routing method are used for rainfall-runoff simulations. Considering a peak flow of $1,102.84\text{m}^3/\text{sec}$ for the 80 return period before green roofs, the results of XP-SWMM show that green roofs reduce 14.34%, 11.21%, 8.65%, 4.51%, and 3.52% of the peak flow for 5 scenarios(S-0~4). Also, the estimated costs are KRW 1,142,642 million, KRW 983,835 million, KRW 794,730 million, KRW 530,389 million, and KRW 436,005 million for 5 scenarios. It is expected that this study will contribute to secure the validity of green roof projects. Through this, city disaster managers can actively encourage green roof projects.

Key Words : green roofs, impervious area, urbanization, flood runoff, cost estimation

* 인하대학교 수자원시스템연구소 연구교수(Research Professor, Institute of Water Resources System, Inha University), 교신저자(E-mail: yeokd94@gmail.com, Tel: 032-874-0069)

** 인하대학교 수자원시스템연구소 연구교수(Research Professor, Institute of Water Resources System, Inha University)

I. 서론

기후변화와 관련한 많은 연구에서 미래에는 전반적으로 홍수유출량이 증가하는 것으로 분석되고 있으며, 우리나라의 경우 최근에는 집중호우의 양상이 심해지고 있다. 2012년 7월 13일 새벽 3시부터 내린 폭우가 1시간 동안 서대문 지역에 74.5mm가 내린 반면, 서대문과 인접한 은평 지역은 같은 시간 2mm에 불과했다. 이 같은 강우패턴의 변화는 내수침수를 야기하고, 인명과 재산이 집중된 도시지역에 큰 피해를 발생한다. 이와 더불어 도시화에 따른 포장도로, 주차장, 지붕, 보도 등과 같은 불투수면의 증가는 침투홍수량의 증가, 토사 증가, 오염물 증가, 제방 침식, 수생생물 손상, 지하수 함량 감소 등과 같은 수자원 분야에 악영향을 미침을 수많은 연구에서 증명되었다.

불투수면 증가에 따른 홍수와 관련된 부분을 보자면, 이러한 피해의 근본적인 원인은 동일한 양의 강우가 내리더라도 한꺼번에 집중해서 내리는 강우패턴의 변화에 있으나, 이는 불가항력의 상황이므로 피해를 줄이는 대안을 마련할 수밖에 없다. 내수침수의 원인으로 지적되는 하수관거 용량 및 배수능력 부족 등에 대한 1차적인 문제를 해결하는 것도 중요하겠으나, 유입되는 하천의 수위가 높으면 배수기능이 떨어지고, 하류에 부담이 가중되는 풍선효과와 같은 문제점이 있다. 따라서 도시화로 인해 불투수층이 증가하고 이로 인해 침투량이 감소함으로써 발생하는 비정상적인 현재의 물순환체계에 대한 해결책을 찾는 것이 필요하다. 그렇다고 기개발된 도심지 내에 투수면인 녹지를 확보하는 것은 토지보상비가 매우 크고, 도심구역을 녹지로 되돌리는 것은 더욱 불가능하다. 이에 본 연구는 불투수층 문제의

해결책 중 하나인 옥상녹화를 대상으로 하였다. 여기서 옥상녹화는 인공적인 구조물 위에 인위적으로 토양층을 형성하고, 식재를 하여 녹지공간을 조성하는 것을 의미한다.

사실상 옥상녹화 관련 연구는 시공방법, 식재기반 등을 주제로 한 연구가 주이며, 옥상녹화의 주요 영향에 관한 연구도 증가추세에 있다. 본 논문의 연구대상인 옥상녹화 및 홍수와 관련한 주요 연구로는 크게 실제 유역에 유량계를 설치하여 옥상녹화 전과 후의 값을 비교하는 연구, 수리/수문학 적 모델링에 관한 연구, 최적관리기법(BMP: Best Management Practices) 시행에 따른 연구로 나뉜다. 첫 번째 연구와 관련해서 Miller(1998)는 76mm 두께의 옥상녹화 배지(media)에 대하여 연평균 유출량이 각각 38~54%, 38~45%가 감소하고, 침투홍수량(peak flow)은 대략 50% 감소하는 것으로 제시하였다. Moran(2004)은 실제 호우사상을 통해 100mm 두께의 옥상녹화는 대략 13~15mm를 저류하며, 침투홍수량이 약 90% 감소하는 것으로 제시하였다. DeNardo et al.(2005)은 15mm 이하의 강우에 대해서 옥상녹화는 100% 저류하며, 좀 더 큰 강우인 10월 호우에서 25%, 11월 호우에서 43%를 저류하는 것으로 제시하였다. Jarrett et al.(2004)은 central PA에서 5월, 6월, 7월에 발생한 강우사상에 대해 각각 48%, 53%, 78%를 저류하는 것으로 제시하였다.

두 번째 연구로는 Hollander(2007)가 옥상녹화 시행에 따른 영향을 연구하기 위해 수정 Green-Ampt법과 물리적 모형을 사용하였고, She and Pang(2010)은 옥상녹화의 배양지(medium) 내에서 우수의 이동을 모의하는 물리 기반 모형을 개발하였으며, 이는 단일 옥상녹화의 주요 수리/수문학 적 과정을 나타내는 물리학적 모델이다. Carter and Jackson(2007)은 다양한 규모의 유역으로 옥

상녹화의 영향을 시험하기 위해 침투-유출 모형으로서 NRCS(National Resources Conservation Service) 법을 이용하였다. Kasmin et al.(2010)은 단일 호우사상과 장기간 모의기간 모두에 대하여 관측자료를 기반으로 옥상녹화의 수문학적 과정을 모의하는 단순 개념모형을 개발하였다. BMP 시행에 관한 연구로는 Villarreal et al.(2004)이 옥상녹화, 개수로, 저류지 등을 포함하는 BMP의 최선의 대안을 제시하기 위해, 이들을 개별 또는 조합하여 분석하였다. Zhen et al.(2006)은 생태저류지(bio-retention basins), 옥상녹화, 빗물통(rain barrel) 등의 BMP에 의해 합류식 관거의 월류를 최소화하기 위한 가장 비용효과적인 조합을 도출하는 연구를 수행하였다. Christensen(2008)은 다양한 재현기간의 호우를 대상으로 빗물정원(rain garden)의 크기와 저류량, 도시배수구역에서의 분포에 따른 수문학적 효과를 분석하였다. 국내의 경우에는 장수철(2006)이 우이천을 대상으로 옥상녹화의 유출저감효과를 분석한 사례가 있다. 이경섭 외(2009)는 우수 저류 침투시설 중 저류지, 투수성 포장, 옥상녹화를 EPA SWMM으로 모형화하여 침투유출저감효과를 비교하였다.

국내외를 막론하고 기존 연구는 유출분석이 대부분이다. 그러나 옥상녹화 사업의 효과는 해당 건물뿐만 아니라 공공의 이익에 영향을 미치는 공공재로서의 역할을 하며, 서울시는 사업비의 50~70%를, 많게는 90%까지 지원하고 있다. 따라서 중앙정부 또는 지방정부의 예산이 소요되는 사업이므로 옥상녹화 사업의 타당성을 분석하기 위해서는 사업의 효과와 사업의 비용을 명확히 도출하고, 이를 통해 경제성분석을 수행해야 한다. 따라서 본 논문에서는 도시화가 매우 심각한 청계천 유역을 대상으로 옥상녹화 시나리오를 설정하고, 이에 따른 유출저감효과를 분석하였으며,

이에 대한 개략적인 비용 산정과 경제성분석 기준을 제시하였다. 향후에는 피해예상범위, 침수 심 등을 이용하여 옥상녹화 사업의 편익을 산정함으로써 편익비용비를 통한 경제성분석 절차를 완성하고자 한다.

본 연구에서 제시한 방법론은 최근 옥상녹화 사업을 확대하고 있는 지방자치단체의 사업에 대한 타당성을 확보하고, 이를 통해 좀 더 효율적인 옥상녹화 사업을 유도함으로써, 도시화로 인해 발생하는 다양한 문제를 해결하는데 도움을 줄 것으로 판단된다.

II. 연구방법과 옥상녹화 시나리오 설정

1. 옥상녹화의 개요

옥상녹화란 주거, 상업, 공업 등의 다양한 용도로 설치된 건물의 옥상에 식물이 자랄 수 있는 토양층을 형성하고, 식재를 하거나, 수공간을 만들어 녹지공간을 조성하는 것을 말한다. 우리나라는 옥상녹화에 대한 중요성을 크게 인식하지 못하였고, 대부분의 건축주들도 옥상녹화 조성비용에 부담을 가졌기 때문에 해외 선진국에 비하여 옥상녹화 조성률이 높지 않다. 그러나 최근 서울시는 옥상녹화의 걸림돌이 되는 조성비용에 대하여, 2012년부터 지원기준을 기존 옥상면적 99m²에서 65m²로 완화하고, 최대 992m²까지만 지원하던 면적기준도 제한규정을 두지 않는 등 옥상녹화 조성을 장려하고 있다. 또한 경기도, 대구시, 인천시 등 기타 광역자치단체와 더불어 영주시와 같은 시군단위에서도 점차 옥상녹화의 중요성을 인식하고 지원사업을 확대하고 있는 실정이다.

옥상녹화의 시스템 유형은 건축물의 내구성, 생태적 지속성, 경제성 등에 좌우되며, 일반적인

로 저관리·경량형, 관리·중량형, 혼합형 등 세 가지로 나뉜다. 옥상 면적을 기준으로 한 적용방식으로는 전면녹화와 부분녹화로 나뉘며, 녹화의 효율성을 고려한다면 전면녹화가 바람직하다. 기존 건물인지 신축 건물인지에 따라서도 나눌 수 있는데, 기존 건축은 정밀진단이 필요하나, 신축 건물의 경우에는 건축물과 옥상녹화를 일체화 할 수 있다. 옥상의 경사에 따라 평탄형과 경사형으로 나눌 수 있는데, 우리나라 주택의 경우 대부분 평탄형 지붕으로 옥상녹화 조성과 더불어 관리에도 유리하다.

도시화로 인해 투수성이던 지면이 콘크리트나 아스팔트 등 불투수면으로 바뀌면서 침투량이 감소하는 반면에 지표면을 흐르는 직접유출량의 증가로 도시홍수를 발생시킨다. 콘크리트나 아스팔트 지붕은 유출계수가 0.8~0.95인 반면에 잔디와 수목은 0.05~0.25로 우수저감 및 지체효과가 매우 크다. 한국건설기술연구원(1999)은 실험을 통해 두께 12cm의 잔디를 심을 경우 20mm/m² 정도를 저류하는 것으로, 장하경 외(2008)는 150m²의 옥상녹화가 우수유출량의 87%를 저감하는 것으로 보고하였다. 이러한 다양한 효과에도 불구하고 옥상녹화 사업이 잘 이루어지지 않은 이유는 건물주인 시민들이 옥상녹화의 효과를 잘 인식하지 못하고 있으며, 이를 알더라도 비용측면에서 많은 부담을 가지기 때문인 것으로 생각된다.

2. 연구방법

본 논문에서는 서울을 관통하는 중량천 유역 중에서 시가화율이 70%가 넘는 청계천 유역을 분석대상으로 하였다. 청계천 유역은 사무실 및 상업지구가 밀집해 있으며, 이와 더불어 지류인

성북천, 정릉천, 월곡천 유역은 주거지가 밀집해 있어서 녹지가 매우 부족하다. 우선, 홍수유출을 분석하기 위해서는 적절한 유역 및 하도를 분할하고, 강우분석을 수행해야 한다. 본 논문에서는 이 유역의 홍수방어에 대한 실행 계획인 “한강2 권역(중량천 특별권역) 유역종합치수계획(국토해양부, 2009)”을 참고하였다. 옥상녹화는 건물을 대상으로 하기 때문에 가장 최신의 자료인 수치지도 2.0의 건물 레이어를 통해 치수단위구역별로 대상건물을 분류하고, 건물면적을 기준으로 시나리오를 작성하였다. 현재 청계천 유역 내에 있는 건물의 상황을 반영하기 위해서는 건물의 하중 제한, 경사 형태, 연식(내용연수 고려), 옥상에 설치된 각종 설비의 면적 등을 모두 고려해야 하나, 이에 대한 자료는 없는 실정으로 연구의 한계를 밝히는 바이다.

본 연구에서는 수치지도 상의 건물면적을 옥상면적으로, 지붕은 모두 평탄형인 것으로 가정하였다. 또한, 건축물의 구조안전진단에 의해 적용 가능한 종류의 옥상녹화시스템을 구축해야 하나, 본 논문에서는 모든 건축물이 세가지 유형을 적용할 수 있는 것으로 가정하였다.

불투수층인 기존의 건물을 투수층인 옥상녹화로 조성함으로써 발생하는 홍수 유출량 차이를 분석하기 위해 XP-SWMM 모형과 Clark 유역추적법을 이용하였다. 또한 각각의 시나리오별 옥상녹화 사업비용을 산정하기 위해, 기존의 옥상녹화 면적, 옥상녹화 유형, 사업비를 조사하고, 통계분석을 통해 조성면적-사업비용 관계를 도출하였으며, 내구연수, 설치비 및 유지관리비 등을 고려하여 비용을 산정하여 경제성분석 기준을 제시하였다.

3. 대상유역 현황과 옥상녹화 시나리오 작성

1) 청계천 유역 개요

청계천 유역은 강북구, 동대문구, 성동구, 성북구, 종로구, 중구의 총 86개 동을 포함하며, 유역 내 인구는 약 120만명으로, 건물이 매우 밀집한 지역이기 때문에 연구대상으로 선정하였다. 서울시 면적인 605,208km²에서 청계천 유역이 차지하는 비율은 약 8.20%이며, 청계천은 서북쪽에 위치한 북악산의 남쪽기슭에서 발원하여 성북천, 정릉천과 차례로 합류하면서 유하하여 중랑천의 우안으로 유입된다.

유역면적 및 유로연장은 홍수의 크기, 도달시간을 지배하는 가장 큰 요소로서 하천을 이해하고 분석함에 있어서 매우 중요하다. 청계천 유역은 상류부 산지를 제외하고 대부분 주거지역과 상업지역으로 이루어져 있으며, 유역에 대한 세부내용은 <표 1>과 같다.

2) 치수단위 중구역별 옥상녹화 시나리오 작성

수치지도 2.0에서 건물 레이어(B001)를 추출하였다. 건물의 용도로는 크게 공장, 교육연구시설, 근린생활시설, 기타시설, 노인 및 어린이 시설, 동물 및 식물 관련 시설, 문화 및 집회시설, 방송통신시설, 분뇨 및 쓰레기 시설, 숙박시설, 업무시설, 운동시설, 위험물 저장 및 처리시설, 의료시

설, 자동차 관련 시설, 장례시설, 종교시설, 주택, 창고시설, 판매시설로 구분된다. 또한 건물의 종류는 일반주택, 연립주택, 아파트, 주택 외 건물, 무벽건물, 온실, 공사 중 건물, 가건물, 미분류로 나뉜다. 본 논문에서는 건물 용도별 분류 중에서 종교시설, 기타시설, 장례시설, 창고시설, 묘지관련시설을, 종류별 분류에서는 무벽건물, 공사중건물, 가건물, 온실, 미분류를 옥상녹화가 불가능한 것으로 가정하여 이를 제외하였다. <그림 1>은 중구역별 건물 분포도이다.



<그림 1> 중구역별 건물 분포도

<표 2>는 청계천 유역의 중구역별 유역면적과 시나리오별 건물면적 비율을 나타내며, S-1은 서울시의 옥상녹화 조성비 지원기준을 의미한다. 여기서 건물면적은 순수한 건축물만의 면적이다.

<표 1> 청계천 유역의 하도 및 유역 특성

중구역	누가면적(km ²)	유로연장(km)	평균경사	도달시간(hr)	도시화		수문분석을 위한 소구역수
					면적(km ²)	면적비(%)	
청계+[성북+(정릉+월곡)]	23,176+[7,340+(19,104)] = 49,621	14.21	0.0458	1.3	36.0	72.5	52+[24+(68)] = 144
성북	7,340	6.46	0.026	0.603	5.7	77.9	24
정릉+[월곡]	14,272+[4,832] = 19,104	11.13	0.0554	0.963	12.3	64.3	34+[34] = 68
월곡	4,832	4.06	0.0241	0.408	4.5	93.5	34

참조 : 한강2권역(중랑천 특별권역) 유역종합치수계획(국토해양부, 2009)

<표 2> 중구역별 시나리오별 옥상녹화 면적(단위: km²)

중구역	유역 면적 (A)	S-0 (건물전체)		S-1 (65m ² 이상)		S-2 (100m ² 이상)		S-3 (200m ² 이상)		S-4 (300m ² 이상)	
		건물면적 (B)	비율(% (A)/(B)	건물면적 (C)	비율(% (A)/(C)	건물면적 (D)	비율(% (A)/(D)	건물면적 (E)	비율(% (A)/(E)	건물면적 (F)	비율(% (A)/(F)
청계	23,176	6,160	26.58	5,094	21.98	4,169	17.99	2,762	11.92	2,229	9.62
성북	7,340	1,860	25.33	1,423	19.39	1,109	15.11	0,666	9.08	0,478	6.51
정릉	14,272	2,314	16.21	1,891	13.25	1,479	10.36	0,907	6.35	0,749	5.24
월곡	4,832	1,616	33.44	1,250	25.87	0,802	16.60	0,417	8.62	0,339	7.01
청계천 전체	49,621	11,949	24.08	9,658	19.46	7,559	15.23	4,751	9.58	3,794	7.65

주거지역이 밀집한 월곡의 경우 건물이 33.44%나 되며, 청계천 유역 전체를 보더라도 24.08%를 차지하는 등 매우 불투수율이 높음을 알 수 있다.

4. 강우-유출 모형

본 연구에서는 옥상녹화의 유출저감효과를 분석하기 위해 2가지의 유출모형을 이용하였다. 하나는 XP-SWMM 모형이며, 시나리오별 우수저류효과를 반영하기 위해 청계천 중구역 52개, 성북천 중구역 24개, 정릉천 중구역 34개, 월곡천 중구역 34개로 소유역을 나누어 불투수율을 조정하였다. 다른 하나는 Clark 유역추적법이며, 청계천, 성북천, 정릉천, 월곡천 각각의 유역출구점을 기준으로 유출곡선지수(Runoff Curve Number, CN)를 조정하였다.

1) XP-SWMM 모형

강우로 인하여 발생하는 도시유역 하수시스템의 유량과 수질을 산정하는 SWMM 모형은 1971년 미국 EPA(Environmental Protection Agency)와 Metcalf & Eddy 사가 Florida 대학 및 Water Resources Engineers와의 공동연구로 개발하였다(이종태 외, 1996). 이후 1981년에는 모형 내의 TRANSPORT 블록을 확장·보완하기 위해 수공

구조물의 월류, 배수, 압력류 등의 계산이 가능하도록 설계된 EXTRAN 블록을 SWMM 모형에 포함시켜 보완하였다.

XP-SWMM 모형은 기본적으로 도시유역이나 인위적 배수계통을 갖는 유역에 대해 유출모의가 가능한 모형으로 단일 및 연속 강우에 의한 계산이 가능하고, 강우간격은 임의로 설정할 수 있으며, 연산 시간간격은 강우사상에 대해 임의로 조정이 가능하다. 공간적 특성은 작은 배수유역에서 큰 배수유역까지 적용이 가능하고 배수유역은 수백에서 수천개의 소유역 및 관로로 구성할 수 있으며, 도시유역 내에 강우사상으로 인해 발생하는 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서의 유출량 추적, 저류량 산정, 오염물질의 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다. 소유역과 관련한 입력 자료는 면적, 유역 평균경사, 유역 폭, 불투수율, 관망(하도)의 길이, 관경(하도)의 폭, 관(하도) 경사, 투수·불투수 지역의 Manning 조도계수와 관망(하도)의 Manning 조도계수, 지표면 저류, 침투 관련 매개변수 등이 있다.

2) Clark 유역추적법(area routing method)

Clark 유역추적법은 도달시간-유역면적 곡선

을 이용한 방법에 기초하며, 해당 유역은 선형수로와 유역출구에 위치한 선형저수지로 구성된 것으로 가정한다. 선형수로에 의한 유출의 전이효과와 선형저수지에 의한 유역의 저류효과를 고려하는 순간단위도를 작성하는 것이다. 매개변수는 도달시간과 선형저수지에 대한 S-Q함수의 기울기로서 정의되는 저류상수 R이다. T_c 와 R값은 유역특성과 도시화 정도 등과 관계있는 회귀 방정식을 통해서 실측 자료가 없는 유역에서도 평가될 수 있다.

여기서 일정한 강우가 지표면에 내리게 되면 유출량은 증가하게 되어 강우강도와 동일하게 되는 평형상태에 이르게 된다. 이러한 평형상태가 형성되기까지 소요되는 시간은 강우로 인한 유수가 그 유역내의 최상류점에서 최하류점까지 도달하는데 소요되는 시간과 같으며 이를 도달시간(T_c)이라 한다.

III. 옥상녹화에 의한 홍수유출저감효과 분석

시나리오는 현재 발생하지 않은 미래의 사건이기 때문에 옥상녹화의 유출저감효과를 분석하기 위해서는 적절한 설계홍수량을 산정하는 것이 필요하다. 그러나 설계홍수량을 추정하기 위해서는 실제 청계천 유역의 수문분석지점에서의 실측 유출량 자료가 필요하나, 대부분의 소유역과 마찬가지로 청계천 유역 또한 미계측유역이다. 이를 해결하기 위해 일반적으로 해당 유역에서 강우가 홍수량에 어떻게 반응하는지 모의가능하다는 가정 하에서 설계강우-유출 관계를 도출한다. 강우에 의한 유출량을 산정하기 위한 방법은 크게 두 가지로 분류할 수 있는데 첫 번째는, 기 발표된 확률강우강도식에 유역면적과 유출계수 등의 인자를 고려하여 최대 유출량을 산정하는 방법이

며, 두 번째는 과거 강우자료를 수집하고 이에 대한 확률분석을 실시한 후에 각종 계획에 필요한 확률빈도에 해당하는 최대 유출량을 직접 산정하는 방법이 있다. 본 논문에서는 전자의 방법을 이용하여 도출한 “한강2권역(중랑천 특별권역) 유역종합치수계획(국토해양부, 2009)”의 확률강우량을 이용하였다.

1. 옥상녹화의 우수저류효과 반영을 위한 방안

1) XP-SWMM의 불투수율 변경

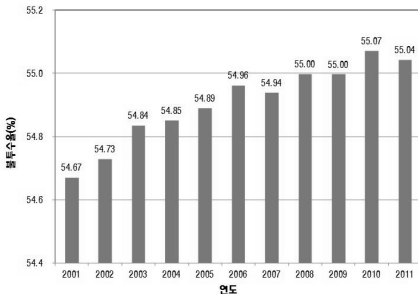
청계천 유역은 전체 면적으로 볼 때 불투수율이 59.70%에 달하는 도시화된 지역이며, 중구역 중 월곡의 경우 불투수율이 무려 67.27%에 달한다. 정릉천 유역의 상류지역에는 북한산의 동쪽면이 접하고 있기 때문에 상대적으로 불투수율이 42.86%이나, 중하류지역에 건물이 매우 밀집해 있다. <그림 1>에서 보는 바와 같이, 불투수면적에서 건물이 차지하는 비중이 높기 때문에 쾌적한 도시환경과 더불어 유출저감을 위해서는 옥상녹화를 통해 불투수면적을 낮추는 방안이 적합할 것으로 생각된다.

“한강2권역(중랑천 특별권역) 유역종합치수계획(국토해양부, 2009)”은 “서울시 비오탁현황조사 및 생태도시조성 지침수립-1차년도(서울특별시, 2000)”에서 제시한 불투수율을 적용하였으며, <표 3>은 중구역별 불투수율과 옥상녹화 시나리오에 따른 불투수율 변화값을 나타내고 있다. 시나리오 설정 과정에서 밝힌 바와 같이, S-0는 건물 전체를 옥상녹화하는 것으로 가정하였다. S-1은 서울시가 옥상녹화 지원사업을 하는 최소 면적인 $65m^2$ 이상을 대상으로 하였으며, 나머지 시나리오는 단계적으로 옥상녹화 건물의 면적을 확대하면서 불투수율을 산정하였다. “서울시 비오

통합조사 및 생태도시조성 지침수립-1차년도(서울특별시, 2000)”의 불투수율은 1998~1999년의 현장조사 자료이기 때문에 2012년 현재의 불투수율을 적용한다면 홍수유출저감효과는 더욱 클 것으로 상정할 수 있으나, 청계천 유역에 포함된 행정구역의 지목별 토지이용현황자료를 이용하여 분석한 결과, <그림 2>와 같으며, 2001년부터 2011년까지 약 0.31% 정도만 불투수율이 증가하였음을 알 수 있다. 따라서 유역의 불투수율을 산정함에 있어서 서울특별시(2000)의 자료를 이용해도 무리가 없을 것으로 판단된다. 여기서 투수면은 전, 답, 임야, 학교용지, 하천, 제방, 구거, 유지, 수도용지, 공원, 체육용지, 유원지, 종교용지, 사적지, 묘지, 잡종지 등으로, 불투수면은 대지, 공장용지, 주차장, 주유소용지, 창고용지, 도로, 철도용지 등으로 구성되어 있다.

<표 3> 중구역 불투수율-서울시(2000) 기준

중구역	면적 (km ²)	불투수 면 (km ²)	불투수율(%)					
			기준	S-0	S-1	S-2	S-3	S-4
청계	23.176	15.437	66.61	40.03	44.63	48.62	54.69	56.99
성북	7.340	4.508	61.41	36.08	42.02	46.30	52.33	54.90
정릉	14.272	6.117	42.86	26.65	29.61	32.50	36.51	37.62
월곡	4.832	3.250	67.27	33.83	41.40	50.67	58.65	60.26
청계천 전체	49.621	29.312	59.07	34.99	39.61	43.84	49.50	51.43



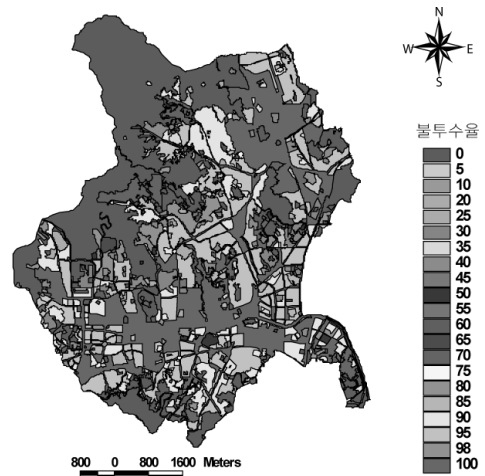
<그림 2> 청계천 유역 지목별 토지이용현황을 이용한 연도별 불투수율

<표 4>는 중구역별 중분류 토지피복도에 의한 불투수면적을 이용한 시나리오별 불투수율을 나타내고 있으며, 서울특별시(2000)의 자료보다 불투수율이 더 크게 산정됨을 알 수 있다. 이는 토지피복도의 정밀도가 상대적으로 낮기 때문이다.

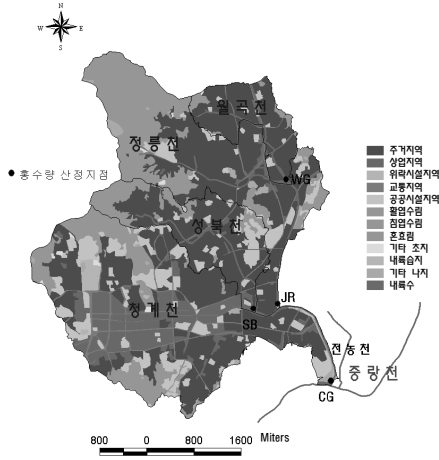
<표 4> 중구역 불투수율-중분류 토지피복도 기준

중구역	면적 (km ²)	불투수 면 (km ²)	불투수율(%)					
			기준	S-0	S-1	S-2	S-3	S-4
청계	23.176	19.321	83.36	56.79	61.39	65.38	71.45	73.75
성북	7.340	5.81	79.15	53.82	59.76	64.04	70.08	72.64
정릉	14.272	8.771	61.45	45.24	48.21	51.09	55.10	56.21
월곡	4.832	3.84	79.47	46.04	53.60	62.88	70.85	72.46
청계천 전체	49.621	37.742	76.06	51.98	56.60	60.83	66.49	68.41

<그림 3>과 <그림 4>는 “서울시 비오탁현황조사 및 생태도시조성 지침수립-1차년도(서울특별시, 2000)”에서 제시된 청계천유역의 불투수면도와 환경부의 중분류 토지피복도이다.



<그림 3> 청계천유역 불투수율(국토해양부, 2009)



〈그림 4〉 청계천유역 토지피복도

2) Clark 유역추적법에서 유출곡선지수(CN) 변경 지상에 도달한 강우의 일부가 지하로 침투하고 나머지 초과분은 지표면을 흘러 유출하는데, 강우량 중 침투나 차단 등의 손실을 제외한 값을 유효강우량이라 한다. 본 연구에서는 실무에서 가장 많이 사용되어지고 있고, 토양 및 토지피복 상태를 고려하여 유효우량을 산정할 수 있는 NRCS 방법을 채택하여 적용하였다. NRCS 방법은 유출량자료가 없는 경우에도 유역의 토양특성과 식생피복상태 등에 대한 자료만으로 유효우량을 산정할 수 있도록 개발한 방법이며, 유역의 유출특성 조건에 따른 강우량과 유출량의 관계를 미리 설정하여 사용하는 방법으로 미계측유역의 유효우량 산정에 널리 사용되고 있다. 청계천 전체 유

역에서 볼 때 수문학적 토양형별 면적은 상대적으로 침투능이 큰 A와 B가 약 94%나 차지하나, 토지피복/토지이용 측면에서 불투수면이 매우 크기 때문에 유출에 불리한 유역임을 알 수 있다.

옥상녹화 적용 전의 유출곡선지수는 Arcview 3.2의 map calculator를 통해 토양도와 토지피복도를 이용하여 구한 값이다. ‘금강 유역의 불투수율 조사 및 저감방안 연구(금강수계관리위원회, 2010)’에 따르면, 기존 불투수면인 지붕에 옥상녹화를 적용하면 모든 수문학적 토양군에서 CN값이 98에서 85로 바뀌므로 본 연구에서도 옥상녹화에 의한 우수저류효과를 CN값에 적용하였다. 〈표 5〉는 유출분석지점에서의 시나리오별 유출곡선지수를 나타내고 있다.

2. 시나리오별 유출저감효과 분석

옥상녹화의 우수저류효과를 반영하기 위해, XP-SWMM 모형에 시나리오별 불투수율과 Clark 유역추적법에 유출곡선지수를 적용하였다. 시나리오별 침투유량 저감효과는 각각 〈표 6〉 및 〈표 7〉과 같다. 〈표 6〉에서 보는 바와 같이, 유역 내의 전체 건물을 옥상녹화하는 S-0는 현실적으로 불가능하나, 청계천 유역의 출구점에서 설계홍수인 80년 빈도의 경우 158.09m³/sec(14.34%)를, 월곡천 유역은 설계홍수인 50년 빈도의 경우

〈표 5〉 유출분석지점에서의 시나리오별 유출곡선지수

유역구분	유역면적 (km ²)	기존 CN	S-0		S-1		S-2		S-3		S-4	
			건물 전체	CN	65m ² 이상	CN	100m ² 이상	CN	200m ² 이상	CN	300m ² 이상	CN
청계천 전체	49.621	83.87	11,949	80.74	9,658	81.34	7,559	81.89	4,751	82.63	3,794	82.88
성북	7.340	80.91	1,860	77.62	1,423	78.39	1,109	78.95	0,666	79.73	0,478	80.06
정릉+월곡	19.104	78.41	3,929	75.74	3,141	76.27	2,281	76.86	1,323	77.51	1,087	77.67
월곡	4.832	81.43	1,616	77.08	1,250	78.07	0,802	79.27	0,417	80.31	0,339	80.52

〈표 6〉 XP-SWMM을 이용한 홍수량 산정지점의 침투유량 저감효과-불투수율 적용

구분	50년				80년				100년				
	녹화 전	녹화 후	저감량	저감률	녹화 전	녹화 후	저감량	저감률	녹화 전	녹화 후	저감량	저감률	
S-0	청계(CG)	1,004.23	842.84	161.39	-16.07%	1,102.84	944.74	158.09	-14.34%	1,144.81	998.01	146.80	-12.82%
	성북(SB)	164.77	139.40	25.37	-15.40%	184.63	159.62	25.02	-13.55%	194.29	170.80	23.50	-12.09%
	정릉(JR)	329.20	271.29	57.91	-17.59%	369.10	313.07	56.03	-15.18%	388.71	332.25	56.46	-14.52%
	월곡(WG)	128.52	106.29	22.23	-17.30%	142.25	123.89	18.36	-12.91%	148.59	130.98	17.62	-11.86%
S-1	청계(CG)	1,004.23	873.86	130.37	-12.98%	1,102.84	979.24	123.60	-11.21%	1,144.81	1,034.99	109.82	-9.59%
	성북(SB)	164.77	144.23	20.54	-12.46%	184.63	166.57	18.06	-9.78%	194.29	177.02	17.27	-8.89%
	정릉(JR)	329.20	283.27	45.93	-13.95%	369.10	323.83	45.27	-12.27%	388.71	342.98	45.73	-11.76%
	월곡(WG)	128.52	110.94	17.58	-13.68%	142.25	128.32	13.93	-9.79%	148.59	135.13	13.46	-9.06%
S-2	청계(CG)	1,004.23	895.44	108.79	-10.83%	1,102.84	1,007.42	95.42	-8.65%	1,144.81	1,058.92	85.89	-7.50%
	성북(SB)	164.77	147.45	17.32	-10.51%	184.63	171.34	13.29	-7.20%	194.29	180.49	13.80	-7.10%
	정릉(JR)	329.20	294.52	34.68	-10.53%	369.10	336.48	32.62	-8.84%	388.71	355.40	33.31	-8.57%
	월곡(WG)	128.52	119.01	9.51	-7.40%	142.25	134.12	8.13	-5.71%	148.59	140.32	8.28	-5.57%
S-3	청계(CG)	1,004.23	940.51	63.73	-6.35%	1,102.84	1,053.10	49.74	-4.51%	1,144.81	1,099.65	45.16	-3.95%
	성북(SB)	164.77	154.54	10.23	-6.21%	184.63	177.06	7.57	-4.10%	194.29	185.91	8.38	-4.31%
	정릉(JR)	329.20	307.84	21.36	-6.49%	369.10	351.35	17.75	-4.81%	388.71	369.40	19.31	-4.97%
	월곡(WG)	128.52	123.99	4.53	-3.53%	142.25	138.21	4.04	-2.84%	148.59	144.22	4.37	-2.94%
S-4	청계(CG)	1,004.23	955.03	49.21	-4.90%	1,102.84	1,064.06	38.78	-3.52%	1,144.81	1,110.07	34.74	-3.03%
	성북(SB)	164.77	157.56	7.21	-4.38%	184.63	178.99	5.64	-3.05%	194.29	188.31	5.99	-3.08%
	정릉(JR)	329.20	311.06	18.14	-5.51%	369.10	354.03	15.07	-4.08%	388.71	373.00	15.71	-4.04%
	월곡(WG)	128.52	124.86	3.66	-2.85%	142.25	138.96	3.29	-2.31%	148.59	144.98	3.61	-2.43%

22.23m³/sec(17.30%)를 저감하는 것으로 분석되었다. 300m² 이상인 건물을 옥상녹화하는 S-4는 청계천 유역의 출구점에서 설계홍수인 80년 빈도의 경우 38.78m³/sec(3.52%)를, 월곡천 유역은 설계홍수인 50년 빈도의 경우 3.66m³/sec(2.85%)를 저감하는 것으로 분석되었다.

〈표 6〉과 〈표 7〉을 비교해 보면, 유출분석 결과에 많은 차이를 보이고 있다. 이는 불투수율만

으로 옥상녹화를 고려한다면, 옥상에 떨어진 강우 전량이 유출에 기여할 수 없고, 이로 인해 저감효과는 과대산정이 되기 때문이다. 〈표 8〉은 XP-SWMM 모형으로 분석한 청계천 유역 전체 소구역 144개 중에 시나리오별 월류구간 개수와 월류량을 나타낸다.

<표 7> Clark 유역추적법을 이용한 홍수량 산정지점의 침투유량 저감효과-유출곡선지수 적용

구분		50년				80년				100년			
		녹화 전	녹화 후	저감량	저감률	녹화 전	녹화 후	저감량	저감률	녹화 전	녹화 후	저감량	저감률
S-0	청계(CG)	660.76	622.09	38.67	-5.85%	710.05	671.72	38.33	-5.40%	735.71	696.95	38.76	-5.27%
	성북(SB)	143.90	134.14	9.76	-6.78%	157.55	147.3	10.25	-6.51%	164.05	153.63	10.42	-6.35%
	정릉(JR)	273.98	258.74	15.24	-5.56%	300.56	284.77	15.79	-5.25%	313.25	297.18	16.07	-5.13%
	월곡(WG)	116.66	106.68	9.98	-8.55%	127.62	117.23	10.39	-8.14%	132.86	122.25	10.61	-7.99%
S-1	청계(CG)	660.76	629.35	31.41	-4.75%	710.05	678.8	31.25	-4.40%	735.71	704.12	31.59	-4.29%
	성북(SB)	143.90	136.45	7.45	-5.18%	157.55	149.73	7.82	-4.96%	164.05	156.15	7.9	-4.82%
	정릉(JR)	273.98	262.15	11.83	-4.32%	300.56	288.26	12.3	-4.09%	313.25	300.71	12.54	-4.00%
	월곡(WG)	116.66	109.01	7.65	-6.56%	127.62	119.59	8.03	-6.29%	132.86	124.63	8.23	-6.19%
S-2	청계(CG)	660.76	636.57	24.19	-3.66%	710.05	686.05	24	-3.38%	735.71	711.47	24.24	-3.29%
	성북(SB)	143.90	137.88	6.02	-4.18%	157.55	151.28	6.27	-3.98%	164.05	157.72	6.33	-3.86%
	정릉(JR)	273.98	265.54	8.44	-3.08%	300.56	291.74	8.82	-2.93%	313.25	304.22	9.03	-2.88%
	월곡(WG)	116.66	111.76	4.9	-4.20%	127.62	122.39	5.23	-4.10%	132.86	127.56	5.3	-3.99%
S-3	청계(CG)	660.76	644.94	15.82	-2.39%	710.05	694.51	15.54	-2.19%	735.71	719.98	15.73	-2.14%
	성북(SB)	143.90	140.25	3.65	-2.54%	157.55	153.77	3.78	-2.40%	164.05	160.24	3.81	-2.32%
	정릉(JR)	273.98	268.93	5.05	-1.84%	300.56	295.21	5.35	-1.78%	313.25	307.83	5.42	-1.73%
	월곡(WG)	116.66	114.03	2.63	-2.25%	127.62	124.87	2.75	-2.15%	132.86	130.1	2.76	-2.08%
S-4	청계(CG)	660.76	648.51	12.25	-1.85%	710.05	698.12	11.93	-1.68%	735.71	723.6	12.11	-1.65%
	성북(SB)	143.90	141.46	2.44	-1.70%	157.55	155.03	2.52	-1.60%	164.05	161.51	2.54	-1.55%
	정릉(JR)	273.98	270.05	3.93	-1.43%	300.56	296.39	4.17	-1.39%	313.25	309.04	4.21	-1.34%
	월곡(WG)	116.66	114.47	2.19	-1.88%	127.62	125.37	2.25	-1.76%	132.86	130.61	2.25	-1.69%

<표 8> 시나리오별 옥상녹화에 따른 월류구간수와 월류량 변화

구분		50년		80년		100년		구분		50년		80년		100년	
		월류 구간수	월류량 (m³)	월류 구간수	월류량 (m³)	월류 구간수	월류량 (m³)			월류 구간수	월류량 (m³)	월류 구간수	월류량 (m³)	월류 구간수	월류량 (m³)
녹화 전	CG	11	200,503	12	267,368	14	304,225	S-2	CG	10	153,546	12	213,366	12	245,973
	SB	2	11,401	2	15,977	2	18,264		SB	2	6,032	2	10,707	2	12,831
	JR	1	1,030	1	2,683	1	4,093		JR	1	253	1	1,377	1	2,060
	WG	9	28,204	10	58,775	10	75,005		WG	6	11,415	9	31,510	10	43,630
	전체	23	241,138	25	344,803	27	401,588		전체	19	171,246	24	256,960	25	304,493
S-0	CG	8	127,049	12	188,355	12	219,554	S-3	CG	11	172,766	12	233,821	13	267,659
	SB	1	4,095	2	7,888	2	9,976		SB	2	8,225	2	12,729	2	14,946
	JR	1	13	1	958	1	1,555		JR	1	494	1	1,745	1	2,548
	WG	2	1,813	6	15,731	7	24,759		WG	6	18,356	10	41,693	10	58,306
	전체	12	132,969	21	212,932	22	255,844		전체	20	199,841	25	289,988	26	343,459
S-1	CG	9	138,699	12	201,118	12	233,682	S-4	CG	11	176,291	12	238,231	13	272,813
	SB	1	5,096	2	9,431	2	11,499		SB	2	9,159	2	13,630	2	15,862
	JR	1	123	1	1,156	1	1,795		JR	1	576	1	1,866	1	2,710
	WG	4	5,228	7	22,157	9	32,435		WG	7	19,894	10	44,051	10	61,243
	전체	15	149,147	22	233,861	24	279,410		전체	21	205,919	25	297,778	26	352,628

IV. 비용 산정

옥상녹화의 추진주체는 민간이나, 그 다양한 효과들은 공공재의 역할을 하며, 지방정부에서 예산의 많은 부분을 지원하므로, 공공사업으로 가정하였다. 공공사업의 경제성분석은 국민경제 전체의 입장에서 사업의 타당성을 경제적 측면에서 분석하는 것이다. 이를 위해 사업 시행시 예상되는 각종 편익과 비용을 추정한 후, 순현재가치(net present value), 내부수익률(internal rate of return), 편익비용비(benefit/cost ratio) 등의 경제성 평가지표를 활용하여 경제성을 평가한다. 본 논문에서는 옥상녹화 조성의 다양한 효과들 중에 유출저감효과 분석만을 대상으로 하였기 때문에 편익산정은 불가능하나, 경제성분석의 한 축인 비용을 산정하였다. 시나리오별로 개략적인 총사업비를 추정하기 위해서는 옥상녹화 시설구축을 위한 초기 투자비용과 유지관리비, 시설개발비 등 운영에 따르는 비용을 추정해야 하며, 할인율(discount rate), 구조물의 내용연수(service life) 및 잔존가치 등을 고려하였다.

1. 비용 산정 분석기간과 할인율

분석기간은 내용연수를 얼마 동안으로 적용할 것인가에 대한 가정이며, 분석기간의 가정에는 건축물과 더불어 옥상녹화의 수명을 고려할 필요가 있다. 건축물 및 건물부품의 수명에는 물리적 수명(물리적인 노후화에 의해 결정되는 수명), 기능적 수명(원래의 기능을 충분히 달성하지 못함으로서 결정되는 수명), 사회적 수명(기술의 발달로 사용가치가 현저히 떨어지는 것에 의해 결정되는 수명), 경제적 수명(지가의 상승, 기술의 발달 등으로 인해 경제성이 현저히 떨어지는

것에 의해 결정되는 수명), 법적 수명(공공의 안전 등을 위해 법으로 정해 놓은 수명) 등이 있으며, 본 연구에서는 이를 고려하는 것이 어렵기 때문에 물리적 수명을 대상으로 분석기간을 정하고자 하였다.

법인세법 시행규칙(개정 2011.2.28.) '건축물 등의 기준내용연수 및 내용연수범위표(제15조제3항관련)'에서는 연와조, 블록조, 콘크리트조, 토벽조, 목조 등의 모든 건물(부속설비 포함)과 건축물은 20년(15년~25년), 철골·철근콘크리트조, 철근콘크리트조, 석조, 철골조의 모든 건물(부속설비 포함)과 건축물은 40년(30년~50년)을 기준내용연수 및 내용연수범위(하한-상한)로 정하고 있다. 본 논문에 적용된 청계천 유역 내의 건물에 대한 건축물 형식과 준공연도 등에 대한 자료가 없기 때문에 분석기간을 30년으로 하며, 옥상녹화의 수명 또한 건축물과 동일한 것으로 가정하였다.

옥상녹화 사업의 경제적 타당성을 분석하기 위해서는 편익과 비용을 산정하여 비교하게 된다. 그러나 장기간 역할을 하는 사업의 경우 비용이 동시에 발생하지 않고 조성비용은 주로 사업초기에, 유지관리비용은 장기간에 걸쳐 발생한다. 이때 미래의 가치나 비용을 어떤 할인율로 할인할 것인가는 대단히 중요하다. 왜냐하면 할인율의 선택에 따라 사업이 타당하다고 평가될 수도 있고 그렇지 않을 수도 있기 때문이다. 이러한 적용 할인율에 있어서 그 규정이 미약해서 사업의 타당성을 저해하는 요인이 되고 있으므로 적정 할인율을 정하는 것이 필요하다. 옥상녹화 사업의 할인율 등에 대한 공식적인 지침은 없기 때문에 본 논문에서는 '예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정·보완 연구(제5판)(한국개발연구원, 2008)'의 것을 이용하였으며, 5.5%를 적용하였다.

2. 옥상녹화 사업비용 산정

옥상녹화의 조정면적과 사업비(설계비+시공비)의 관계를 도출하기 위해 64건의 시공사례를 수집하였다. 이 자료를 이용하여 다양한 형태로 회귀분석을 실시하여 비교한 결과, 식 (1)의 형태가 가장 적합하였고, 그 결과는 <표 9> 및 <그림 5>와 같다.

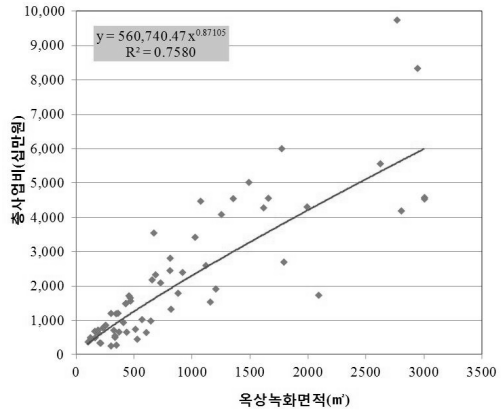
$$\ln C_{GR} = 13.23667 + 0.87105 \ln A_{GR} \quad (1)$$

여기서, C_{GR} (원)는 옥상녹화 총사업비(설계비+시공비), A_{GR} 은 옥상녹화 면적(m^2)이며, 이를 다시 정리하면 식 (2)와 같다.

$$C_{GR} = 560,546.40 A_{GR}^{0.87105} \quad (2)$$

식 (2)의 결정계수(R^2)는 0.7580, 조정결정계수(Adj R^2)는 0.7541로 나와, 종속변수 A_{GR} 이 가지고 있는 정보 중 75.41%는 설명변수 R의 변동으로 설명할 수 있는 것으로 나왔다. F값은 194.198로 매우 큰 값을 나타내고 있으며, 유의확률을 역시 1% 유의수준보다 작게 나와 통계적으로 의미가 있다고 볼 수 있다. 회귀계수의 통계적 유의성은 1% 유의수준보다 작게 나와 회귀계수가 0이라는 귀무가설을 기각하였다. t-value는 1차항과 상수항 각각 32.891, 13.935이며, 확률표시인

유의확률(significance probability)이 0.000와 0.000로 상당히 강한 양의 상관관계를 가지며, 회귀식(regression equation)은 의미가 있는 것으로 분석되었다.



<그림 5> 옥상녹화면적-사업비 관계

옥상녹화를 조성한 후에 식재관리와 구조물 안전을 위해서 유지관리비용이 소요된다. 따라서 설치비뿐만 아니라 유지관리비도 고려해야 한다. 건물에서의 열섬 대책 기술 도입(日本 環境省, 2012)에 따르면, 옥상 녹화의 설치비용은 기술 혁신이 진행됨에 따라, 대략 5~6만엔/ m^2 (617,520~741,024원/ m^2 , 2012년 JYP 100 = KRW 1235.04 적용)이며, 유지관리 비용은 대략 연간 1,500엔/ m^2 (18,525.60원)으로 조사되었다. 이에 본 논문에서는 연간 유지관리비용은 설치비용 대비 유지관리비용의 비율인 2.727%를 적용하였다. <표

<표 9> 옥상녹화 조성면적과 사업비 관계의 회귀분석

Classification	Num. of obs.	Adj. R^2	F-Statistics	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t-value	p-value
				B	Std. Error	Beta		
Constant	64	0.7541	194.198	13.23667	0.40244		32.891	0.000
lnA				0.87105	0.06251	0.87063	13.935	0.000

Note: ***significant at 0.01 significance, **significant at 0.05 significance, *significant at 0.10 significance

<표 10> 옥상녹화 조성을 위한 비용 산정(단위: 백만원)

구분	조성면적(m ²)	사업비(a)	유지관리비 (b)		30년간 총사업비 (a)+(b)	
			연유지관리비	30년 총유지관리비		
S-0	청계천 전체	11,931,212	818,291	22,317	324,350	1,142,642
	성북천	1,856,684	161,862	4,414	64,158	226,021
	정릉천 전체	3,929,062	310,969	8,481	123,260	434,229
	월곡천	1,615,522	143,388	3,911	56,835	200,223
S-1	청계천 전체	9,657,696	680,669	18,564	269,800	950,469
	성북천	1,423,132	128,394	3,502	50,892	179,287
	정릉천 전체	3,140,790	255,863	6,978	101,418	357,281
	월곡천	1,249,940	114,672	3,127	45,453	160,125
S-2	청계천 전체	7,558,696	549,836	14,996	217,941	767,777
	성북천	1,109,328	103,350	2,819	40,965	144,316
	정릉천 전체	2,280,835	193,633	5,281	76,751	270,384
	월곡천	801,950	77,906	2,125	30,880	108,786
S-3	청계천 전체	4,751,406	366,951	10,008	145,450	512,401
	성북천	666,135	66,279	1,808	26,271	92,550
	정릉천 전체	1,323,433	120,523	3,287	47,772	168,295
	월곡천	416,601	44,037	1,201	17,455	61,492
S-4	청계천 전체	3,794,203	301,651	8,227	119,567	421,218
	성북천	478,048	49,644	1,354	19,678	69,321
	정릉천 전체	1,087,302	101,561	2,770	40,256	141,817
	월곡천	338,768	36,778	1,003	14,578	51,355

10>은 시나리오별 옥상녹화 조성을 위한 사업비용을 산정한 결과이다.

XP-SWMM 모형으로 분석한 재현기간 100년에 대한 청계천 하구의 유출량이 1,144.8m³/sec에서 옥상녹화 시나리오별 100년 빈도 홍수에 대한 저감량은 S-0부터 S-4까지 각각 146.80m³/sec, 109.82m³/sec, 85.89m³/sec, 45.16m³/sec, 34.74m³/sec이며, 옥상녹화 내용연수인 30년간 총비용은 S-0부터 S-4까지 각각 1,142,642백만원, 950,469백만원, 767,777백만원, 512,401백만원, 421,218백만원으로 산정되었다.

<표 11>은 유출분석 방법에 따른 시나리오별 첨두홍수의 저감효과를 비교한 것으로, 원칙적으로 정확한 비교를 위해서 편익비용분석을 수행해

야 하나, 본 논문에서는 편익산정을 수행하지 않았기 때문에 1m³/sec 당 비용으로 비교하였다. 표에서 보는 바와 같이, 분석방법에 따라 매우 큰 차이가 남을 알 수 있으며, 이를 해결하기 위해서는 옥상녹화시 실측 유출저감 자료와 주요 지점의 실측유량 자료가 필요하다.

시나리오별로 1m³/sec 당 비용에서 차이가 발생하는 이유는 지표면유출에서 토지피복상태에 따라 단순 증가 또는 감소하지 않기 때문이다. 즉, 유역 내에서 옥상녹화 면적이 증가할수록 1차선형방정식과 같은 형태로 유출량이 저감하지 않고, 시너지효과를 발휘함을 알 수 있다.

방수로와 같은 기존의 홍수조절 대안은 주로

〈표 11〉 유출분석 방법에 따른 침투홍수 저감효과 비교

분석방법	100년 빈도 홍수량 (m ³ /sec)	대안	침투홍수 저감량 (m ³ /sec)	저감율 (%)	비용 (백만원)	1m ³ /sec 당 비용 (백만원)	비고
XP-SWMM	1,144.8	청계천 S-0	146.80	-12.82	1,142,642	7,784	분석기간 : 30년 할인율 : 5.5%
		청계천 S-1	109.82	-9.59	950,469	8,655	
		청계천 S-2	85.89	-7.50	767,777	8,939	
		청계천 S-3	45.16	-3.94	512,401	11,346	
		청계천 S-4	34.74	-3.03	421,218	12,125	
Clark 유역추적법	735.71	청계천 S-0	38.76	-5.27	1,142,642	29,480	
		청계천 S-1	31.59	-4.29	950,469	30,088	
		청계천 S-2	24.24	-3.29	767,777	31,674	
		청계천 S-3	15.73	-2.14	512,401	32,575	
		청계천 S-4	12.11	-1.65	421,218	34,783	

하류하천에 그대로 홍수량을 전가하여 하류에 주는 홍수량 부담은 가중되며, 사업의 효과는 홍수 조절효과만이 유일하다. 그러나 옥상녹화의 경우 우수저류효과에 의해 하류하천에 부담을 주지 않는 근본적인 홍수조절이 되며, 앞서 언급한 다양한 효과들을 편익화한다면 옥상녹화 사업의 타당성이 클 것으로 판단된다.

V. 결론

옥상녹화는 조경측면에서 경관개선을 목적으로 1980년대부터 시작되었고, 1990년대 설치기술의 발전과정을 거쳐, 2000년대에는 경관개선 이외에 건축물 가치 증대, 도시생태계 서식공간 확대, 냉난방 에너지 절감, 산성비 및 자외선 차단에 의한 건물 내구성 향상, 빗물의 저류효과 등 다양한 경제·사회·환경적 효과를 인식함으로써 점점 관심이 증대되고 있다. 서울시, 경기도, 인천시, 대구시 등의 경우 사업비의 50~70%를 지원하며, 많게는 90%까지 지원하는 지역도 있다. 그러나 중앙정부 또는 지방정부의 예산이 소요되

는 사업이므로 사업의 타당성 분석과정을 거쳐야 하나, 막연히 좋을 것이라는 기대감으로 사업을 추진하고 있는 실정이다. 이를 해결하기 위해서는 사업의 편익과 비용을 명확히 도출하고, 이를 통해 경제성분석을 수행해야 한다. 본 논문에서는 다양한 효과들 중에 유출저감효과를 대상으로 서울을 관통하는 중랑천 유역 중에서도 시가화율이 70%가 넘는 청계천 유역에 옥상녹화 시나리오를 설정하고, 이에 따른 빗물 저류에 의한 유출저감효과를 XP-SWMM 모형과 Clark 유역추적법을 통해 분석하였으며, 이에 대한 개략적인 비용을 산정하였다.

시나리오별 옥상녹화 사업비용을 산정하기 위해, 옥상녹화 사업의 분석기간을 내용연수로 간주하여 30년으로 가정하였으며, 할인율은 5.5%를 적용하였다. 그 결과, S-0~4까지 시나리오별 비용은 2012년 현재가치화하여 각각 1,142,642백만원, 983,835백만원, 794,730백만원, 530,389백만원, 436,005백만원으로 산정되었다.

본 연구에서 제시한 방법론은 최근 옥상녹화 사업을 확대하고 있는 지방자치단체의 사업에 대

한 타당성을 확보하고, 이를 통해 좀 더 효율적인 옥상녹화 사업을 유도함으로써, 도시화로 인해 발생하는 다양한 문제를 해결하는데 도움을 줄 것으로 판단된다.

사실상 사업의 타당성 평가를 위한 경제성분석은 해당 사업을 통해 얻을 수 있는 일련의 모든 효과를 편익으로 산정해야 하나, 본 논문에서는 유출저감효과만을 대상으로 하기 때문에 향후에는 경관개선, 에너지 절감, 생태계 개선, 소음감소, 건물내구연수 증가 등 모든 효과에 대한 편익을 산정하여 경제성분석을 실시하는 것이 필요하다. 또한, 옥상녹화는 그 유형에 따라 비용과 효과는 다르게 나타난다. 따라서 구역 내의 건물에 대한 옥상녹화의 효과를 좀 더 정확하게 분석하기 위해서는 준공년도, 지붕경사 등 좀 더 정확한 건물 정보를 고려하여 그 효과를 반영할 수 있는 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

국토해양부, 2009, 『한강2권역(중랑천 특별권역) 유역종합치수계획』.

금강수계관리위원회, 2010, 『금강 유역의 불투수율 조사 및 저감방안 연구』.

기획재정부령 제298호, “법인세법 시행규칙[개정 2011.2.28.], 건축물 등의 기준내용연수 및 내용연수범위표(제15조제3항관련).

서울특별시, 2000, 『서울시 비오톱 현황조사 및 생태도시 조성지침 수립연구-1차년도』.

이경섭 · 김환석 · 박기정 · 김덕우 · 윤재영, 2009, “도시 우수 저류 · 침투시설에 대한 비용대비 유출저감효과 비교 분석”, 『한국산학기술학회 학술발표논문집』, 한국산학기술학회.

이종태 · 강태호 · 김정환, 1996, 『제4회 수공학익습 교재-도시유역에서의 배수계통 설계를 위한 SWMM』,

한국수자원학회.

장수철, 2006, “옥상녹화시스템의 우수유출효과분석 : 우이천 사례를 중심으로”, 서울시립대학교 석사학위논문.

장하경 · 안근영 · 이은희, 2008, “저심토 옥상녹화 조성지의 빗물 유출량 저감 및 지연 효과”, 『한국생태학회 학술발표회 논문집』, 103~105. 한국생태학회.

한국건설기술연구원, 1999, 『Green Town III』.

한국개발연구원, 2008, 『예비타당성조사 수행을 위한 일 반지침 수정 · 보완 연구(제5판)』.

日本 環境省, 2012, 『建物に對するヒートアイランド對策技術の導入』.

Carter, T. L. and Jackson, C. R., 2007. “Vegetated Roofs for Stormwater Management at Multiple Spatial Scales”, *Landscape and Urban Planning*, 80: 84~94.

Christensen, D. R., 2008, “Hydrologic Distributed Modeling Approach for Quantifying the Hydrologic Impacts of Rain Gardens in Urban Catchments,” Master’s Thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign.

DeNardo, J. C., Jarret, A. R., Manbeck, H. B., Beattie, D. J., and Berghage, R. D., 2005, “Stormwater Mitigation and Surface Temperature Reduction by Green Roofs”, *Transactions of the ASAE*, 48(4): 1491~1496.

Hollander, D. A., 2007, “Mathematical Rainfall/Runoff Modeling Methods for Green Roofs and Their Applications,” Master’s Thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign.

Jarrett, A. R., DeNardo, J. C., Manbeck, H. B., Hamlett, J. M., Beattie, D. J. and Berghage, R. D., 2004, “Green Roofs: A Stormwater LID”. *ASAE Paper No. NABEC 04-0015*.

Kasmin, H., Stovein, V. R., and Hathway, E. A., 2010, *Towards a Generic Rainfall-runoff Model for Green Roof*.

Miller, C., 1998, “Vegetated Roof Covers: A New

- Method for Controlling Runoff in Urbanized Area”, in *Proc. of Pennsylvania Stormwater Management Symposium*, Villanova University, Villanova, PA.
- Moran, A. C., 2004, “A North Carolina Field Study to Evaluate Green Roof Runoff Quantity, Runoff Quality, and Plant Growth” Master’s thesis, Raleigh, N.C.: North Carolina State University, Department of Biological and Agricultural Engineering.
- She, N. and Pang, J., 2010, “Physically Based Green Roof Model”, *Journal of Hydrological Engineering*, 15(6): 458~464.
- Villarreal, E. L., Semadeni-Davies, A., and Bengtsson, L., 2004, “Inner City Stormwater Control Using a Combination of Best Management Practices”, *Ecological Engineering*, 22: 279~298.
- Zhen, J., Shoemaker, L., Riverson, J., Alvi, K., and Cheng, M. S., 2006, “BMP Analysis System for Watershed-based Stormwater Management”, *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 41: 1391~1403.
- 원 고 접 수 일 : 2013년 1월 10일
1 차 심 사 완 료 일 : 2013년 2월 4일
2 차 심 사 완 료 일 : 2013년 3월 8일
최 종 원 고 채 택 일 : 2013년 3월 20일