

물 순환 개선 및 생물다양성 증진을 위한 우수저류 및 침투연못 시스템에 관한 연구¹⁾

김귀곤²⁾ · 김혜주³⁾ · 이재철⁴⁾ · 김종섭⁵⁾ · 장혜영³⁾ · 손삼기⁶⁾

²⁾서울대학교 조경학과 · ³⁾삼성에버랜드(주) 환경개발사업부 · ⁴⁾청양대학 토목과

⁵⁾대전산업대학교 토목환경도시공학부 · ⁶⁾서울대학교 대학원 생태조경학과

A Study on Stormwater Retention and Infiltration Ponds System for Improvement of Water Circulation and Increase of Bio-diversity¹⁾

Kim, Kwi-Gon²⁾, Kim, Hyea-Ju³⁾, Lee, Jae-Chul⁴⁾, Kim, Jong-Sub⁵⁾,
Jang, Hey-Young³⁾ and Son, Sam-Gi⁶⁾

²⁾Dept. of Landscape Architecture, Seoul National University

³⁾Samsung Everland INC.

⁴⁾Dept. of Civil Engineering, Chongyang Provincial College

⁵⁾School of Civil · Environmental · Urban Engineering, Taejon National University of Technology

⁶⁾Graduate School, Dept. of Landscape Architecture, Seoul National University

ABSTRACT

The objectives of this study are to develop a stormwater management system that would contribute to improving water circulation, recycling stormwater and promoting biodiversity in urban areas, to apply the system in an actual site, and to verify its effectiveness in order to generate a stormwater management system applicable in Korea.

This study reviewed former researches and case studies, categorized stormwater management system into pre-treatment, retention and infiltration phases, and analyzed the strength and weakness of the techniques by synthesizing unit techniques of each stage. As a result, the process of the stormwater management system includes the following phases : 1) a rubble filtration layer; 2) a retention pond; 3) a infiltration pond; and 4) a stormwater retention pool (recirculation and recycling). Then, an empirical study to design and create the generated system according to the features of a site and to verify its effectiveness was conducted.

The future study direction is to verify the effectiveness of the developed stormwater retention and infiltration ponds. To this end, it is planned to perform hydrological monitoring using automatic measuring equipment and monitoring on habitat bases and the biota living on the base. Based on its outcome, the applied model would be refined and improved to develop an alternative stormwater management system that would allow to achieve the improvement of urban water circulation, increase of biodiversity and efficient use of water resources.

Key Words : Stormwater Management, Retention, Infiltration, Water Circulation, Biodiversity

1) 본 연구는 환경부 G7과제 "효율적인 생물서식공간 조성기술 개발"의 연구비로 수행되었음.

I. 서론

우리 나라는 연간 1200mm 이상의 비교적 많은 강우가 내리지만, 그 대부분이 일부시기에 집중되는 독특한 강우현상으로 인하여 수자원의 효율적인 이용과 관리에 많은 어려움이 있다.

특히, 도시지역의 경우 고밀도 토지이용이 증가하게 되는데, 이러한 토지이용의 변화는 유출량과 도달시간에 영향을 미쳐 침투 유출특성, 총유출량, 수질, 자연경관 등을 변화시킨다(이재철 등, 1997). 또한 자연상태의 물 순환체계를 지지하는 투수성 표면이 급격히 줄어들게 되는데, 이에 따른 불투수성 지표면의 확대는 강우 시 우수의 급속한 유출을 증대시키고 지하로의 침투를 억제시킨다.

그에 따라 침투유량 증가로 인한 도시홍수 야기, 지하수 함양 저해, 토양환경 및 도시의 사막화 초래, 생물서식 기반의 파괴, 도시하천의 건천화, 하천수질의 악화(김두하 등, 1997; 조원철·서규우, 1998) 등을 초래하여 결국 도시 물 순환체계를 변형시키게 되었다.

도시 물 순환체계의 변형은 대기오염으로 인해 나타나는 온실효과, 열섬현상 등과 결합하여 자연상태와는 상당히 차별성을 갖는 도시기후를 형성하게 된다. 이와 같은 도시기후는 승온효과, 건조화, 대기오염 등 심각한 기후문제를 야기하며, 도시홍수, 토양침식, 수질오염, 서식처 파괴 등의 결과를 초래하고 있다.

한편, '생물다양성 협약'의 체결과 함께 생물다양성의 중요성에 대한 인식의 확대로 도심내 생물서식공간 조성에 관한 연구와 사업이 활발하게 이루어지고 있으며, 기후변화협약의 발효에 따라 녹지의 보존과 물 순환체계 개선이 갖는 중요성이 날로 부각되고 있다.

따라서 도심 내에서의 생물다양성 증진과 물 순환체계의 개선에 기여할 수 있는 효율적인 우수관리 시스템에 관한 연구의 필요성이 크게 대두되고 있다.

하지만 우수관리 시스템에 관한 국내의 기존 연구들은 주로 침투유량 감소를 통한 도시홍수 예방, 지하수 함양과 물 순환체계 개선을 통한

도시 기후 및 생활환경의 향상을 목적으로 하고 있다. 또한 대부분의 연구들이 우수관리 시스템의 각 하부단계에 적용할 수 있는 단위공법들을 문헌을 통해 종합하여 상호 비교하는 정도의 수준에 머물러 왔다. 좀더 발전적인 몇몇 연구들에서도 유출억제 및 지하수 함양 등의 효과를 시뮬레이션을 통해 예측하거나 적용가능성을 검토해 보는데 그쳐 실제 사례적용을 통해 우수관리 시스템의 조성효과를 검증한 연구는 제대로 수행되지 못하였다.

또한, 유출억제와 침투증대를 통한 물 순환체계의 개선 뿐만 아니라, 생물서식기반 및 서식처 조성을 통한 생물 다양성 보존 및 증진, 우수의 재활용을 통한 수자원의 효율적 이용 등을 다각적으로 모색하는 종합적인 접근은 국내에서는 아직 이루어지지 못하였다.

이 연구의 목적은 도시 내에서 물 순환체계 및 생물서식기반을 개선시키기 위한 우수관리 및 활용 방안을 모색하는 것이다. 즉, 도시 내에서 기능이 저하된 물 순환체계를 개선시키고, 파괴된 생물서식기반을 향상시키며, 하나의 생물서식공간으로 기능할 수 있는 생태적 우수관리 시스템을 도출하는 것이다. 이렇게 도출된 시스템을 시험적용 대상지에 대한 현황분석 결과를 바탕으로 설계 및 조성하여 그 적용가능성을 검토해 보고자 한다.

II. 연구의 범위 및 방법

1. 연구의 범위

이 연구는 도시 물 순환의 특징을 고찰하고, 현재까지 국내·외에서 연구 개발된 우수관리 시스템 단위공법의 유형 및 장·단점을 분석하여 국내에 폭넓게 적용할 수 있는 생태적 우수관리 시스템을 도출하고, 이렇게 도출된 시스템을 실제 대상지에 시험 적용해 보는 것을 내용적 범위로 한다.

2. 연구의 방법

본 연구의 전반적인 진행과정 및 방법을 도식화해 보면 그림 1과 같다.

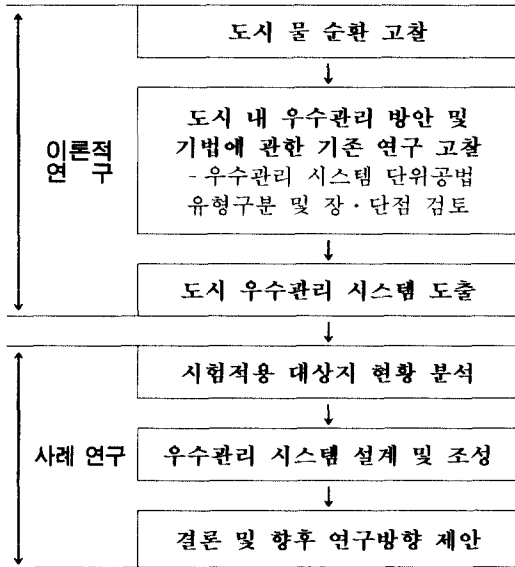


그림 1. 연구의 과정 및 방법

이론적 연구에서는 우선 도시 물 순환의 특성을 고찰하였다. 또한 기존 국내·외 연구 및 적용사례를 고찰하여 우수관리 시스템을 전처리, 저류, 침투단계로 구분하고, 각 단계 단위 공법들을 종합하여 장·단점을 분석하였다.

이때 전처리 단계의 검토기준으로는 우수 정화효과와 요구되는 시설면적을 이용하였고, 저류단계는 유출억제 효과와 서식처로서의 기능 가능성을 고려하였다. 끝으로 침투단계는 생물 서식공간으로의 기능, 침투능, 시공의 편이성 등을 기준으로 장·단점을 분석하였다. 이러한 분석에 기반하여 전처리, 저류, 침투, 2차 저류(재순환 및 이용) 등의 단계로 구성된 도심에 적용 가능한 생태적 우수관리 시스템을 도출하였다.

사례연구에서는 시험적용 대상지의 토지이용, 기상, 우수 배수체계, 서식하는 생물상 등 현황분석을 수행하였다. 토지이용 및 우수 배수체계는 현장조사를 통해 고찰하였으며, 기상 분석은 기상청의 강우 데이터를 활용하였다. 그리고, 대상지 및 인접한 산림의 생물상은 분야별 전문가의 참여로 조성 전 생태조사를 수행하였다.

이와 같은 현황분석 결과를 바탕으로 생태적 우수관리 시스템(우수저류 및 침투연못)을 설계하여 대상지에 실제 조성해 보았다.

Ⅲ. 기존연구에 대한 이론적 고찰

1. 개념의 정립

우수관리 시스템(stormwater management system)이란 도시 하수처리 시설의 부담을 덜어 주고 유출억제 및 침투증대를 통하여 도시 홍수의 억제, 물 순환체계의 향상, 토양환경의 개선 등을 목적으로 우수를 종합적으로 관리하는 시스템을 말한다. 일반적으로 우수관리 시스템은 전처리, 저류, 침투, 활용 등의 하부시스템으로 구성되며, 각각의 개념을 살펴보면 다음과 같다.

전처리(pre-treatment)는 대기오염이나 오염된 불투수면으로 인하여 수질이 나빠진 우수가 지하수로 유입되기 전에 정화하는 것을 말한다(환경부, 1999). 우수 저류(detention)란 토지이용의 변화에 따라 증가하는 우수의 유출을 일시적인 저류에 의해 조절하는 것으로 일차적으로 우수의 유출억제를 목적으로 한다.

우수 침투(infiltration)는 우수를 지하로 침투 시킴으로써 유출을 억제하고, 지하수를 함양하는 것을 말한다. 우수침투를 고려할 때에는 주변환경을 악화시키거나 사면 및 지반안정을 저해하지 않도록 신중히 검토해야 한다(시정개발연구원, 1998). 끝으로 우수의 활용은 미래 물 부족문제 해결과 수자원의 효율적인 이용을 위해 우수를 저장하여 필요한 시기에 관수, 세차, 화장실 용수 등으로 사용하는 것을 의미한다.

이러한 하부시스템으로 구성된 우수관리 시스템은 재해방지 및 생태복원의 두 측면을 동시에 고려하여 도시홍수 예방 및 생태계 복원의 대안기술로 이용될 수 있어야 한다(환경부, 1998). 이 논문에서 사용하고 있는 개념인 생태적 우수관리란 이수 및 치수 중심의 기존 연구들과는 달리 생태복원이라는 측면에서 도시 우수관리에 접근하는 것을 나타내기 위한 용어이다.

2. 도시 물 순환의 특징

자연상태와는 상당한 차이를 갖는 도시기후의 특징으로는 토지이용 변화에 따른 열섬현상, 수문환경 변화에 따른 건조화, 산업 및 교통발달에 따른 대기오염 심화 등을 생각할 수 있다(이현영, 1997). 또한 빠르고 심각한 토지이용 변화는 하천 흐름의 감소에 있어서 주요한 영향인자이며, 증발산률과 토양의 수분 저장능력을 변화시킴으로써 도시 미기후를 변화시킨다(Mander et al., 1998).

불투수성 표면이 많은 도시지역에서는 많은 양의 표면 유출수가 강우 시 하천으로 직접 전달되어 홍수량을 증가시키며, 저면 저류(subsurface storage)가 일어나지 않게 되어 지하수위 및 토양 수분함량 저하, 하천의 평수량 감소 등이 야기된다. 결국 불투수면의 증가는 침투, 저장, 연속적 순환으로 구성된 자연적인 물 순환체계를 교란시키는 역할을 한다(Ferguson and Debo, 1990).

지표면의 봉합화 현상¹⁾과 토지이용의 급격한 변화로 인해 도시지역에서 나타나는 변형된 물 순환체계는 그림 2와 같이 불투수면의 증가에 따른 빠른 유출과 적은 유보(유출지연), 감소된 녹지면적으로 인한 증발산량의 감소, 지하침투 감소 등의 특징을 갖는다.

따라서 도시의 개발에 있어서 지역의 물 순환을 교란시키지 않도록 주의해야 하며, 이는

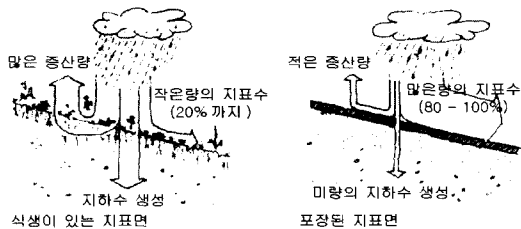


그림 2. 지표면의 특성에 따른 물 수지 비교
(출처 : Dreiseitl and Geiger, 1995)

1) 지표면이 건물, 지하건축물, 도로포장 등으로 마치 봉합된 것처럼 되어 대기로부터 차단되어 원래의 땅으로서의 역할, 즉 빗물을 침투시키고, 동식물들이 생육할 수 있는 공간으로서의 역할을 방해받는 현상. (출처 : 이은희, 1997)

도시, 배수, 교통, 녹지계획 등을 함께 고려하는 통합적인 접근을 통해 가능하다(Ristenpart, 1999).

3. 도시 내 효과적인 우수관리 방안

도시화로 인해 인위적으로 변형된 물 순환체계를 개선할 수 있는 우수관리 방안으로는 우수의 유출을 저지하는 방법(녹지면적 및 수면확대), 지하침투를 증대시키는 방법(투수성 포장, 침투장치 설치), 우수의 이용을 촉진하는 방안 등을 생각할 수 있다(이은희, 1997).

일반적으로 우수의 유출을 억제하기 위한 시설은 새롭게 개발되는 지역에 비해 기존 시가지 지역에 적용하는 것이 더 어렵다. 또한 적용되는 우수관리 시스템 및 그 하부공법들은 침투능, 지하수위, 토양오염, 불투수면의 오염 정도, 확보되는 부지면적, 부지의 경사 및 식생 등 다양한 요소에 의해 결정된다(Sieker and Klein, 1998).

일반적으로 유출억제시설은 우수를 인공적으로 저류시키거나 지하로 침투시켜 하천이나 저지대로의 유출을 억제하여 도시홍수 등 재해예방과 함께 지하수원을 증대시켜 하천의 건천화를 방지하는 시설물을 말한다(방기성, 1998). 이러한 유출억제 시설들 중에서 단지 내에서 급격히 증가되는 우수유출을 효과적으로 제어하는 수단으로는 지역 내 저류(on-site stormwater detention)방법이 가장 적합하다고 보고되고 있다(Phillips, 1995).

4. 우수관리 시스템의 조성 효과

우수관리 시스템의 조성효과로는 지하수 충전, 자연식생의 보전과 향상, 오염물질의 여과, 침투유량 감소로 하류지역의 홍수위험 제거, 하수 처리시설의 부담을 줄여주는 것 등을 고려할 수 있다(Urbonas and Stahre, 1993).

이러한 우수관리 시스템을 폭넓게 활용하고 있는 사례로 독일에서는 MR-System²⁾이 활발히 적용되고 있는데, 이는 침투 증대, 저장, 배수

2) 독일에서 폭넓게 적용되는 시스템으로 "Mulden-Rigolen-System". 잔디도랑과 침투트렌치로 구성된 "Swale-Infiltration Trench System".

등의 목적을 갖는 도랑·침투트렌치 시스템이다. 이것의 특징은 도랑바닥의 토양층에 의하여 우수의 수질이 개선된다는 점이며, 현재 독일에서 새로운 개발지 뿐만 아니라 기존의 도시지역에서도 개조설비로서 활발히 적용되고 있다(Sieker, 1998).

일본에서도 우수관리 시스템의 적용이 활발한데 침투능을 평가하기 위한 실험결과 침투형 시설의 유출억제 효과는 주로 지반이 가지고 있는 투수성과 보수성에 의해서 좌우되는 것으로 나타났다(建設省土木研究所, 1982). 또한 Akagawa et al.(1997)은 테니스장을 포함한 운동장에 4ha 넓이의 유출억제 시설을 조성하여 5년간 조사된 유출억제 효과에 대한 연구를 수행하였다. 유출억제 방법에는 저류와 침투가 있는데, 운동장을 활용하는 것은 이들을 모두 수행하는 것이다.

한편 국내에서는 대부분의 연구들이 실제 사례 적용이 아닌 모의 실험에 의한 것인데, 환경부(1999)는 아파트단지를 대상으로 자연토양층과 인공지반의 지반특성을 구분하여 두 가지 유형의 우수처리 시스템을 설계하여 이들 설계 대안의 유출 저감 및 지연효과와 지하수 함양 효과를 시뮬레이션을 통하여 검토한 바 있다.

5. 우수관리 시스템의 단위공법 유형분류 및 특성 분석

일반적으로 우수관리 시스템은 전처리단계, 저류단계, 침투단계, 이용단계 등으로 구성된다. 현재까지 국내·외에서 개발된 우수관리 시스템 단위공법들을 검토하여 유형을 구분하고, 각 단위공법의 장·단점을 분석하였다.

1) 전처리 단계

우수관리 시스템의 출발점은 전처리단계로 구성되는 것이 보편적이다. 투수가 되지 않는 불투수면을 통과하며 우수는 각종 물질과 접촉하면서 오염되기 때문이다. 또한 강우 시 초기 우수의 경우 대기오염의 심화에 따라 수질이 매우 악화되는 경우가 많으므로 적극적인 정화기법이 요구된다. 따라서, 우수활용을 전제로 하는 우수관리 시스템을 설계할 경우 적절한 전처리 단계의 설정이 필수적이다(환경부, 1998). 전처리 단계에 적용될 수 있는 단위공법의 유형구분과 장·단점 분석결과는 표 1과 같다.

우수 전처리 단계와 관련된 연구들을 살펴보면, Perniel et al.(1998)은 우수 저류연못에서 다른 여러 종류의 개구리밥을 재배하며, 영양분의 흡수능력을 조사하였다. 그리고 Walker(1998)

표 1. 우수 전처리시설 단위공법의 장·단점

유형 분류	장 점	단 점
쇄석여과층	<ul style="list-style-type: none"> · 시공이 간단하고, 초기 용존산소를 높여줌 · 요구하는 시설면적이 적고, 관리가 간단 	<ul style="list-style-type: none"> · 부유물질로 쇄석의 공극이 막히면 효과가 감소됨
침전연못	<ul style="list-style-type: none"> · 용해·고형물질 정화 모두에 효과적임 · 주변경관과 조화, 생물서식공간으로 기능 	<ul style="list-style-type: none"> · 넓은 시설면적과 높은 관리요구
수질정화식생대	<ul style="list-style-type: none"> · 주변경관과 조화, 생물서식공간으로 기능 · 유기물이 많고 수량이 안정적인 물의 정화에 적합 	<ul style="list-style-type: none"> · 지속적으로 수량이 유입되어야 최대 정수효과
침전정	<ul style="list-style-type: none"> · 좁은 시설면적을 요구해 토지이용에 장애가 없음 · 유량이 적고 침전물이 많은 우수에 효과적임 	<ul style="list-style-type: none"> · 침전 가능한 물질만 정수되고, 와류에 의해 침전이 방해되는 경우가 많음
오니제거 침투정	<ul style="list-style-type: none"> · 지표면에 가까운 불투수층에도 적용 가능 · 오니가 많이 섞인 우수에 적용 가능, 적은 시설면적 	<ul style="list-style-type: none"> · 침전이 가능한 물질만 정수 · 관리상 제약이 많음
원심분리정	<ul style="list-style-type: none"> · 적은 시설면적에 설치가 용이하고 정수기능이 뛰어남 	<ul style="list-style-type: none"> · 상승 및 하강속도가 낮으면 SS 분리율이 낮음 · 많은 시설비 필요, 관리요구도가 높음

(출처 : 서울시정개발연구원, 1995; 한국토지공사, 1997a; 환경부, 1998; 한국건설기술연구원, 1998; 환경부, 1999 등을 참조하여 분석 및 종합 함)

는 우수정화를 위한 연못, 저류지, 습지 등에서 대부분의 오염물질 정화는 체류시간에 의존된다고 주장하였으며, 이에 영향을 미치는 인자들을 분석하였다. Tilley and Brown(1998)은 우수를 정화하고 이용을 극대화시키기 위해 습지의 규모, 위치를 결정하기 위한 방법에 대해 연구하였다.

2) 우수저류 단계

우수저류 단계는 전처리 단계를 거친 우수를 침투시키지 않고 저장하여 처리하는 방안으로 주로 현장에서 우수의 저장이 가능한 경우에 적용되고, 그 외의 경우에는 대규모 중앙집중식 처리방안이 강구되어야 한다. 대부분의 저류시스템은 예비정수 기능을 가지고 있다(환경부, 1998).

저류시설은 강우 시 급격하게 늘어난 침투유량을 저류하여 유출을 억제하는 시설이며, 이때 침투유량은 순간적으로 저류된 후 천천히 유출되어 하천의 부담을 덜어주는 효과가 있다.

또한 저류연못의 설계에 있어서 영향을 미치는 주요한 요인으로는 대상지의 자연적인 고도 및 경사, 토지의 이용 가능성, 요구되는 우수의 수용용량 등이 있다(Merritt, 1994).

우수저류 단계에 적용될 수 있는 단위공법의 유형구분과 장·단점 분석결과는 표 2와 같다. 저류시설을 계획·설계할 때는 저류용량, 수심 및 저류면적, 조절방식 등을 고려하여 시설규모를 결정해야 하고 갈수기의 조건을 이겨낼 수 있도록 물을 지속적으로 공급해 주어야 한다. 일정한 수원을 확보하는 것은 계절에 따라 안정적인 생물 다양성을 유지하는데 있어서 가장 좋은 대안이다(Koob et al, 1999).

3) 우수침투 단계

우수침투 단계는 우수를 지하 침투시켜 지하수를 함양하고 토양환경을 개선하여 식물 생육환경을 비롯한 생물서식기반을 개선시켜 주는 단계이다. 침투량에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 토양의 유효공극률이며, 그 이외에 식생, 토양 유형 및 조건, 지하수 조건, 우수의 수질 등의 요인에 달려 있다(Urbonas and Stahre, 1993).

우수침투는 물을 다른 공간으로 보내기 때문에 우수의 운반이나 저류와는 질적으로 차이가 난다. 또한 토양층이 부유물질을 걸러주고 화학물질들을 흡착할 수 있기 때문에 침투는 수질을 개선시켜 줄 수 있다(Ferguson and Debo, 1990).

표 2. 우수 저류시설 단위공법 장·단점

유형 분류	장 점	단 점
주차장저류	• 저류효과 우수	• 이용자들에게 불편을 줄 수 있음
동간(지하)저류	• 저류된 우수의 장기간 지속적인 이용 가능 • 생물서식공간의 조성에서 수원 제공	• 지하에 공사를 해야 하므로 막대한 공사비 소요 • 저류조 관리상 애로(저류조 내 병원성세균 발생)
저류연못	• 저류효과가 우수하여 유출 지연효과가 높음 • 주변경관과 조화를 이루고 생물서식공간으로 기능	• 넓은 시설면적과 관리(어린아기사 등)가 요구됨
공원저류	• 별도의 시설이나 인공적인 조성이 불필요함	• 공원이용의 제한과 이용자 안전대책 요구
옥상저류(녹화옥상)	• 대기 중 오염물질의 제거. 옥상층의 온도 조절 • 도시 내 녹지공간 확대, 생물서식공간 기능	• 중량형 녹화일 경우 관리요구도가 높아짐
유수녹지(건식연못)	• 빠른 시간 내에 최대유량을 효과적으로 저류	• 우기에만 저류, 전기 시 토지이용전략 필요 • 이용자의 안전대책 필요

(출처 : 建設省土木研究所, 1982; 김귀곤, 1993; 서울시정개발연구원, 1995; 한국토지공사, 1997a; 환경부, 1998; 한국건설기술연구원, 1998; 환경부, 1999 등을 참조하여 분석 및 종합 함)

침투형 유출억제시설에 있어서 침투면의 공극이 감소해서 투수성이 떨어지는 경우가 많은데, 그 원인으로는 유입수에 포함된 현탁물, 대수층 내의 미생물 발생, 유입수 속의 공기방울, 유입수 침투 시 일어나는 흙 입자배열 변화, 침투정의 산화와 부식 등을 들 수 있다(建設省土木研究所, 1982).

권경호와 안동만(2000)은 강우를 일정 용량 저류시키고 그 이상은 배출하는 가상적인 저류 발생장치를 만들어 저류된 유출수가 토양층으로 완전히 침투하기까지 걸리는 시간을 토성별, 저류 수심별로 침투방정식을 이용해 계산하였다. 그 결과 침투소요 시간은 저류수심과 거의 정비례하는 것을 알 수 있었으며, 일정 수심으로 저류했을 때 저류 초기에는 많은 양이 침투하다가 점차 완만해지는 경향이 있음이 밝혀졌다.

각 침투공법에 대한 유형구분과 장·단점을 분석해 보면 표 3과 같다.

IV. 결과 및 고찰

1. 도시 우수관리 시스템 도출

생태적 우수관리 시스템을 이루는 각 단위공법은 “유출억제 및 침투증대를 통한 도시 물 순환체계의 개선”, “생물서식기반 복원 및 서식처 제공을 통한 도시 내 생물다양성 증진”, “우수의 재활용을 통한 수자원의 효율적 이용” 등 세 가지 효과를 극대화 할 수 있어야 한다.

또한 생태적 우수관리 시스템을 구성하는 각 단위공법들을 선정하는데 있어서 기존 우수관리 시스템과의 연계, 비오톱 네트워크, 적용 대상지의 토지이용, 기상, 배수체계, 생물상 등의

표 3. 우수 침투시설 단위공법의 장·단점

유형 분류	장 점	단 점
토양표면침투 (투수성포장)	<ul style="list-style-type: none"> • 유지관리 용이 • 시공이 간편하고 기술적 장애가 없음 	<ul style="list-style-type: none"> • 넓은 시공면적 요구
침투구덩이	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 저류효과, 용이한 유지관리 • 녹지와 연계되면 생물서식공간으로 기능 	<ul style="list-style-type: none"> • 유역면적 10-20% 정도의 넓은 면적 소요 • 과밀지역은 쓰레기 투기 및 어린이 익사 위험
침투연못	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 정수효과와 저류용량 • 주위 경관과 결합되어 생물서식공간으로 기능 	<ul style="list-style-type: none"> • 관리부재 시 침투층의 공극이 막힘
원형침투정	<ul style="list-style-type: none"> • 적은 시설면적 요구, 제어 용이 • 지표면 부근 불투수층에 적용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 정수기능이 없고 관리상 제한이 많음 • 부유물질의 경우 처리가 어려움
유공관	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 저류용량, 적은 시설면적 요구 • 지표면 부근 불투수층에 적용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 물에 부유물질이 있으면 안되고, 유지관리 방안이 없음
침투관거	<ul style="list-style-type: none"> • 점적으로 유입되는 우수 신속처리 • 높은 저류용량, 적은 시설면적 요구 	<ul style="list-style-type: none"> • 정수기능이 없고, 유지관리가 어려움
침투트렌치	<ul style="list-style-type: none"> • 우수를 신속하게 침투시킴 • 접근이 쉬워 유지관리 용이 	<ul style="list-style-type: none"> • 유사가 축적될 우려가 있음
잔디형수로	<ul style="list-style-type: none"> • 주변 경관과 잘 조화, 생물서식공간으로 기능 • 시공 간편, 충분한 폭확보시 저류, 침투 동시수행 	<ul style="list-style-type: none"> • 식생 피복 및 일정정도의 통수능 확보 필요
침투측구	<ul style="list-style-type: none"> • 집수한 우수를 저면 불포화대 및 포화대로 신속하게 분산시킴 	<ul style="list-style-type: none"> • 부유물질 제거를 위해 따로 침전정 등의 전 처리 시설이 필요
침투통	<ul style="list-style-type: none"> • 집수한 우수를 불포화대로 분산, 침투시킴 • 공장, 공공시설, 주거단지에 적합 	<ul style="list-style-type: none"> • 토사 및 부유물질의 부착 상황을 확인하기 위한 정기적인 관리 필요

(출처 : 建設省土木研究所, 1982; Urbonas and Stahre, 1993; 김귀곤, 1993; 서울시정개발연구원, 1995; 한국토지공사, 1997a; 환경부, 1998; 한국건설기술연구원, 1998; 환경부, 1999 등을 분석 종합 함)

현황조건에 대한 검토는 필수적인 전제조건이다.

도시지역의 경우 넓은 시설면적을 확보하는 것이 매우 어렵고 전반적인 생물부양능력이 매우 낮기 때문에 좁은 면적으로 다양한 생물서식공간을 창출할 수 있는 연못의 도입이 필수적이다. 또한 침투단계 역시 인공적인 구조물을 활용하는 것보다는 녹지공간 및 서식처로서 기능할 수 있는 단위공법을 고려해야 한다. 끝으로 전처리 단계의 경우 집수되는 우수의 수질이 비교적 양호한 경우에는 간단한 여과만으로도 충분한 효과를 얻을 수 있다.

이러한 고려를 바탕으로 우수관리의 각 단계 단위공법들을 검토한 결과, 도시 물 순환체계의 개선과 생물서식기반 조성에 기여할 수 있는 생태적 우수관리 시스템을 도출하였다. 전체 시스템은 **쇄석여과층 - 저류연못 - 침투연못 - 2차 저류시설**로 구성되며, 각 단계 단위공법의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- **쇄석여과층** : 대기 중이나 불투수면의 각종 오염물질로 인하여 수질이 나빠진 초기우수를 효과적으로 정화할 수 있고 시공이 간단함.
- **저류연못** : 저류효과가 높아 일차적으로 유출을 억제하고, 주변환경과 조화를 이루어 다양한 생물서식환경을 제공할 수 있음.
- **침투연못** : 일정량 저류가 가능하고 정수효과가 높을 뿐만 아니라 주변환경과 연계되어 생물서식공간으로 기능할 수 있음.
- **2차 저류시설** : 우수재활용과 유출저감을 목적으로 쇄석 공극저류나 우수저류조를 지하에 조성. 우수를 저장하여 화장실, 정원에의 관수, 세차, 연못 등에 효과적으로 이용함 (Fujita, 1994).

이상의 단위공법들로 구성된 생태적 우수관리 시스템의 개념도를 그려보면 그림 3과 같다. 도출된 우수관리 시스템에서 전체적인 우수의 흐름은 강우 → 집수 → 정화(전처리) → 저류(저류연못) → 침투(침투연못) → 2차 저류(저류연못으로 피드백 및 관수용으로 재활용) → 배수 등의 과정을 거친다.

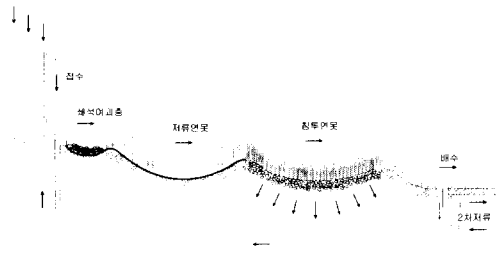


그림 3. 우수관리 시스템의 개념도

2. 시험적용 사례연구 및 결과

1) 대상지 개요

시험적용 대상지는 경기도 용인시 포곡면 전대리에 위치한 삼성에버랜드 서비스 아카데미 사옥의 외부 녹지공간으로 그 면적은 272㎡이다.

대상지는 건물에 바로 인접하고 있지만 대부분 지역이 1일 6시간 이상의 일조가 확보되고 주변 산림과 인접하고 있어 우수저류 및 침투연못이 조성되면 다양한 생물종의 유입이 예상되었다.

2) 현황 분석

(1) 토지이용

대상지는 건물의 자투리공간으로 폭 5m의 보도를 중심으로 배롱나무, 낙상홍, 맥문동, 잔디가 식재된 휴먼공간(면적 62.7㎡)과 주변 산림과 연계된 공간으로 되어 있다.

(2) 기상 현황

기상현황은 강수량과 증발량에 대하여 고찰하였으며 기상청에서 제공하는 대상지의 강우데이터³⁾를 활용하여 기상을 분석하였다.

이 지역의 연평균 강우량(30년 간)은 1,307.0mm였으며, 최근 강우량이 증가하여 지난 10년간의 연평균 강우량은 1,388.5mm로 나타났다. 실제로 시험적용이 이루어진 1999년의 경우 평년에 비해 강우량이 상당히 많아 연간 강우량이 1,556.1mm에 달했으며 그 70% 가량이 7~9월에 집중된 것으로 나타났다.

3) 용인지역에 대해서는 지금까지 정확한 강우데이터가 확보되어 있지 않으므로 비슷한 강우 패턴을 나타내는 인근 수원지역의 강우데이터를 수원기상대를 통해 얻어서 분석하였다.

그리고, 저류연못의 수위를 유지하는데 있어서 중요한 인자라 할 수 있는 증발량의 경우 직경 20cm인 용기를 이용한 소형증발량이 연간 1,105.2mm에 달하는 것으로 나타났다.

(3) 우배수처리

대상지의 기존 우배수 시스템은 건물지붕과 옥상에 떨어지는 빗물이 우수관이 홈통을 거쳐 집수정으로 모이게 되고 이들은 다시 우수관을 거쳐 인근 가설천으로 배수되었다.

(4) 생물상

우수저류 및 침투연못 조성 전인 1999년 6월에 각 분류군 별로 1회씩 생태조사를 수행하였으며, 직접관찰 및 채집방법을 통하여 대상지 및 인접해 있는 산림에서 조사된 곤충류, 양서류, 조류 등은 다음과 같다.

곤충상 조사 결과 총 5목 14종이 출현하였고, 사향제비나비, 네발나비 등 나비목이 우점하였다(표 4). 대상지가 상당한 규모의 녹지와 직접 연결되어 있어 곤충류를 유도할 수 있는 생태적 식재가 이루어진다면 상당히 다양한 곤충류를 유인할 수 있을 것으로 판단되었다.

표 4. 조성 전 대상지 및 인접 산림의 곤충상

목 명	종 명
잠자리목	밀잠자리
매미목	끝검은말매미충
딱정벌레목	노란줄점하늘소, 무당벌레, 거위벌레
벌목	꿀벌, 등검정쌍살벌, 애호리병벌
나비목	사향제비나비, 큰줄흰나비, 노랑나비, 작은주홍나비, 세줄나비, 네발나비

대상지에 대한 양서류와 조류 조사 결과, 양서류는 4종이, 조류는 12종이 조사되었다(표 5).

표 5. 조사된 양서류 및 조류상

분류	생물종
양서류	참개구리, 옴개구리, 청개구리, 산개구리
조류	까치, 알락할미새, 삿꾸기, 피꼬리, 멧비둘기, 어치, 참새, 박새, 노랑턱멧새, 붉은머리오목눈이, 찌르레기, 제비

대상지 주변에는 녹지와 산림이 인접하고 있기 때문에 우수저류 및 침투연못이 조성될 경우 습한 서식환경을 선호하는 종과 물을 공급받기 위하여 모여드는 야생동물로 인하여 생물부양능력은 높아질 것으로 예상되었다.

3) 우수관리 시스템의 설계

(1) 적용할 생태적 우수관리 시스템

도출된 생태적 우수관리 시스템을 바탕으로 하여 대상지 현황분석을 고려해 시스템을 설계하였다. 시험적용을 위해 설계된 우수관리 시스템은 “우수저류 및 침투연못 시스템”으로 세부적인 구성은 『쇄석여과층 - 저류연못 - 침투연못 - 지하 저류탱크』로 이루어지며 그 모식도는 그림 4와 같다.

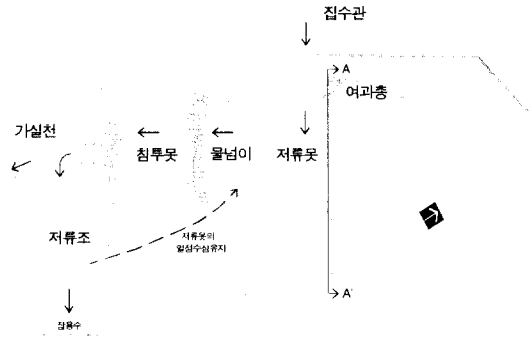


그림 4. 우수저류 및 침투연못의 모식도

(2) 부문별 설계

① 집수시설

기존의 빗물받이 홈통에 집수관을 연결하여 건물 지붕과 옥상에 떨어지는 우수를 집수하였다. 집수관의 직경은 대상지의 강우자료를 바탕으로 20년 빈도의 강우에 준하여 직경 200mm의 관을 사용하였다.

② 여과층

집수된 우수가 자갈, 모래, 자연석으로 이루어진 여과층을 통과하도록 하여 대기 중이나 지붕에서 오염물질을 포함해 수질이 나쁜 초기 우수를 효과적으로 정화하여 저류연못으로 유입시키는 우수의 전처리단계이다.

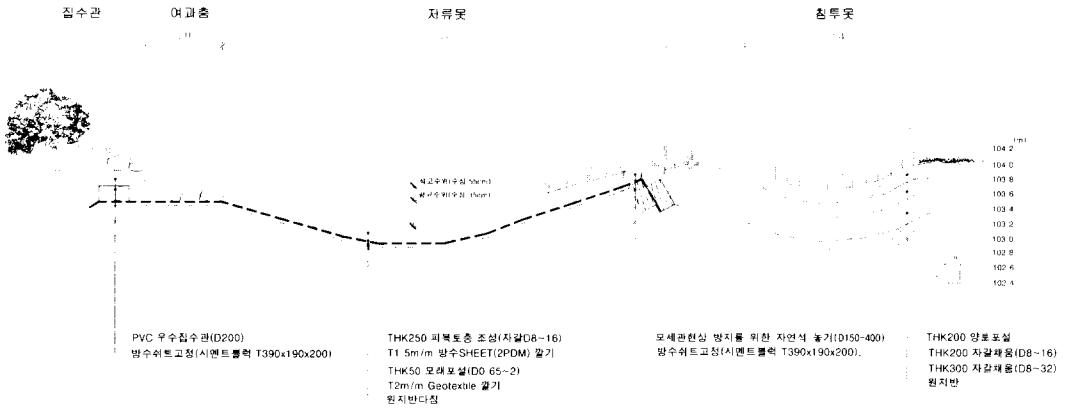


그림 5. 우수저류 및 침투연못의 상세 설계 단면

③ 저류연못

우수의 유출저감과 생물서식공간의 기능을 지니는 단계로 집수면적에 따른 총유출량⁴⁾, 다양한 생물서식조건, 대상부지 여건 등을 고려하여 강수조절계산에 따라 연못의 규모를 산정하였다.

그 결과 면적이 53m²이고 최대 수심이 55cm인 저류연못이 계획 및 설계되었으며, 이 때 최대 저류용량은 15m³로 계산되었다. 저류연못은 우수의 저류를 위한 방수층, 연못의 부영양화를 막고 식재기반이 되는 피복토층, 고무쉬트를 고정하고 모세관 현상에 의한 누수를 방지하기 위한 자연석층 등으로 이루어졌다.

방수층은 부직포와 모래, 고무쉬트로 구성되며, 피복토층은 자갈(D 8~32)과 모래로 조성하였고 자연석층은 시멘트 블럭과 자연석(D 150~400)으로 구성하였다. 또한 곤충, 양서·파충

4) 건물의 지붕면적은 1,400m²이나 집수되어 유출에 영향을 미치는 유역면적은 542m²이다. 지붕의 유출계수는 0.9로 하였고, 수원지역의 강우자료를 바탕으로 집수 가능한 유출량은 14.9m³로 산정(V=i×t×A×C) 하였다. 이때 강우강도는 수원지방의 2년 빈도 강우로 하였으며, 강우기간은 일반적인 하수도 시설 기준 상의 일반적인 유수지 강우기간의 1/2인 1시간을 적용했다.

· 강우강도식 : $i_t = \frac{372}{p - 0.50} t$: 분, i : mm/hr
 · $V = i \times t \times A \times C$ (V : 유출량, I : 강우강도, t : 분, A : 집수면적, C : 유출계수)

표 6. 우수저류 및 침투연못의 식재종

구분	식재종
수생 식물	수련, 보풀, 울방개, 줄, 창포, 골풀, 매자기, 흑삼릉, 세모고랭이, 부들 등 15종
다년생 초본류	동의나물, 가락지나물, 노루오줌, 까치수영, 머위, 털부처꽃, 비비추, 빈카마이어나 등 20종
관·교목	벗나무, 국수나무, 황매화, 산수국, 명식달기, 조팝나무, 갯버들, 흰말채 등 10종

류 등 다양한 동물을 유인할 수 있는 식물들을 식재하였다(표 6).

④ 침투연못

저류연못에서 월류한 물이 지하로 침투되어 지하수위 상승과 생물서식기반 조성 기능을 지니는 공간으로 집수면적의 유출량, 저류연못 규모, 부지여건에 준하여 결정하였다. 그 결과 전체 침투연못의 면적은 40m²로 산정되었으며, 수심은 20~60cm로 계획되었다.

침투층은 물의 침투를 최대화하기 위해서 직경이 큰 자갈층(D 8~32)에 공극을 유지시키기 위한 직경이 작은 자갈층(D 8~16), 식재기반 조성을 위한 양토층으로 구성하였다. 침투연못은 건조하고 습한 환경이 반복적으로 형성되므로 이러한 특성에 견딜 수 있는 달뿌리풀을 식재하였다.

⑤ 모니터링 계측시스템

우수 저류연못과 침투연못의 유입 및 유출량 모니터링을 위하여 저류연못의 유입부와 유출부, 침투연못 유출부 등의 무덤이에 음파식 수위계를 설치하였다. 또한 지하 저류탱크에 저류되는 유량을 분석하기 위하여 저류조 내부에 자동수위계를 설치하였고, 대상지역의 정확한 강우자료를 얻기 위하여 자동우량계를 설치하였다.

⑥ 지하 저류조(2차 저류시설)

침투연못을 율류하여 배수되는 물은 지하저류조에 저장되고 용량이 초과되면 가실천으로 배수되도록 하였다.

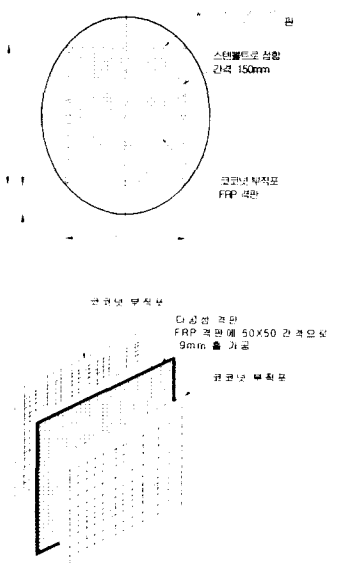


그림 6. 지하저류조의 다단계 필터층 상세

저류조 규모는 Bose의 저류량 산정공식⁵⁾과 유출 저감효과를 고려하여 10ton으로 하였고, 단순한 저류 뿐만 아니라 다단계 필터층에 의해 오염물질을 침전시키고 걸러주는 기능을 지닌 특수 제작된 FRP 저류조이다. 저장된 물은 저류연못의 일정 수심을 유지시키고, 주변수목의 관수 및 실외 청소용수로 재활용할 수 있도록 하였다.

5) 저류조의 규모산정은 Bose의 공식을 따랐다.
· 저류조의 규모 = 연간 우수사용량 · 저장일 / 365

V. 결론

이 연구는 도시 물 순환체계를 개선시키고 생물서식기반 향상 및 생물다양성 증진에 기여할 수 있는 우수관리 시스템 도출을 목적으로 하였다. 따라서 도시 물 순환의 특징과 기존연구에 대한 고찰을 통해 우수관리 시스템의 단위공법 유형구분 및 장 · 단점 검토를 수행하였다.

그 결과 유출억제 측면만을 고려했던 다른 연구들과는 차별성을 갖는 생물서식기반 향상과 생물다양성 증진에 기여할 수 있는 생태적 우수관리 시스템을 도출하였다.

도출된 시스템을 실제 시험적용을 통해 검증하기 위하여 대상지 현황분석에 기반하여 시스템을 설계 및 조성하였다. 1999년 8월 저류연못과 침투연못 조성공사가 1차로 완료되었고, 2000년 4월에 계측기와 지하저류조 설치공사가 마무리되었다.

현재까지 조성 후 생물상에 대한 조사를 비롯하여 유출억제와 침투 증대를 통한 도시 물 순환체계 개선 및 생물서식기반 향상 등의 조성효과를 검증하기 위한 수리 · 수문 모니터링과 토양환경조사를 지속적으로 진행해 나가고 있다.

향후 연구에서는 이러한 지속적인 모니터링 결과를 바탕으로 하여 대상지에 적용된 우수저류 및 침투연못 시스템의 조성효과를 분석해 나가도록 하겠다. 이러한 과정을 통하여 수정 · 보완된 우수저류 및 침투연못 시스템은 도시의 물 순환 개선을 통한 도시 미기후 개선, 환경친화적인 단지조성, 자연과 인간이 공존하는 도시 건설, 지구환경문제 완화 등에 기여함으로써 21세기 인간의 삶의 질을 개선하는데 매우 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

끝으로 이 연구에 참여하셔서 많은 도움을 주신 G7과제 참여연구원 조류분야 우한정박사, 곤충분야 우건석교수, 양서 · 파충류분야 심재한박사, 식물분야 조강현교수께 감사드립니다.

인 용 문 헌

권경호 · 안동만. 2000. 토성별 특정 수심의 저류

- 된 유출수의 지하침투 소요시간 산정에 관한 연구 - Green-Ampt 방정식 적용을 중심으로. 한국조경학회지 27(5) : 170~180.
- 김두하 · 박원규 · 안동만. 1997. 단지개발에 있어 강수량 지하침투 증대를 위한 침투시설의 도입가능성 연구. 한국조경학회지 25(1) : 62~72.
- 방기성. 1998. 도시형 재해예방 기능 강화를 위한 정책과제 - 우수유출 저감대책을 중심으로. 한국수자원학회지 31(5) : 47~50.
- 서울시정개발연구원. 1995. 우수유출물 저감대책. pp. 55~222.
- 서울시정개발연구원. 1998. 우수유출 저감시설 기준연구. pp. 13~96.
- 이은희. 1997. 생태학적 측면에서 고찰한 빗물 순환체계와 도시화의 관계. 한국조경학회지 24(4) : 123~131.
- 이재철 · 박공춘 · 한형근. 1997. 도시 내 우수관 경결정을 위한 합리식의 유출계수에 관한 조사연구. '96 분과위원회 연구과업 보고서(수문분과). pp. 1~38.
- 이현영. 1997. 도시기후와 도시생태. 환경생태학회 심포지움 : 도시생태계의 현황과 관리 자료집. pp. 1~25.
- 조원철 · 서유구. 1998. 도시수문학. pp. 45~72.
- 한국건설기술연구원. 1998. Green Town 개발사업Ⅲ (환경부분). pp. 9~57.
- 한국토지공사. 1997a. 생태도시 개념을 도입한 친수형 단지계획기법에 관한 연구. pp. 43~60.
- 환경부. 1998. 생태도시 조성 기반기술 개발사업 (Ⅱ). 연구기관 한국건설기술연구원. pp. 103~127.
- 환경부. 1999. 생태도시 조성 기반기술 개발사업 (Ⅲ). 연구기관 한국건설기술연구원. pp. 81~144.
- Akagawa, Y., Matsumoto, Y. and M. Zaizen. 1997. The inspection of actual runoff control facilities five years after construction. Water Science and Technology 36(8-9) : 373~377.
- Base, K. H. 1998. Regenwasser für Garten und Haus. Freiburg.
- Dreiseitl, H. and W. Geiger. 1995. Neue Wege für das Regenwasser, Handbuch zum Rückhalt und zur Versickerung von Regenwasser in Baugebieten. München.
- Ferguson, B. K. and T. N. Debo. 1990. On-Site Stormwater Management - Application for landscape and engineering. 2th ed. Van Nostrand Reinhold. pp. 14~152.
- Koob, T., Barber, M. E. and W. E. Hathhorn. 1999. Hydrologic design considerations of constructed wetlands for urban stormwater runoff. Journal of the American Water Resources Association 35(2) : 323~331.
- Merritt, A. 1994. Wetlands, Industry & Wildlife - a manual of principles and practices. The Wildfowl & Wetlands Trust. pp. 113~121.
- Perniel, M., Ruan, R. and B. Martinez. 1998. Nutrient removal from a stormwater detention pond using duckweed. Applied Engineering in Agriculture 14(6) : 605-609.
- Phillips, D. L. 1995. Generic method of design of on-site stormwater detention storages. Water Science and Technology 32(1) : 93~99.
- Ristenpart, E. 1999. Planning of stormwater management with a new model for drainage best management practices. Water Science and Technology 39(9) : 253~260.
- Sieker, F. 1998. On-site stormwater management as an alternative to conventional sewer systems : a new concept spreading in Germany. Water Science and Technology 38(10) : 65~71.
- Sieker, H. and M. Klein. 1998. Best management practices for stormwater-runoff with alternative methods in a large urban catchment in berlin, Germany. Water Science and Technology 38(10) : 91~97.
- Tilley, D. R. and M. T. Brown. 1998. Wetland networks for stormwater management in subtropical urban watersheds. Ecological

- Engineering 10 : 131~158.
- Urbonas, B. and P. Stahre. 1993. STORMWATER - Best management practices and detention for water quality, drainage, and CSO management. pp. 7~30, 39~92.
- Walker, D. J. 1998. Modelling residence time in stormwater ponds. Ecological Engineering 10 : 247~262.
- 建設省土木研究所(건설성토목연구소). 1982. 地下浸透を考慮しに流出抑制法の開發實驗に關する報告書(지하침투를 고려한 유출억제법 개발실험에 관한 보고서). pp. 1~7, 18~38.

接受 2000年 5月 25日