



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

SUSTAIN을 이용한 도시배수분구
LID 시설 최적설치방안 연구



2013年 2月

釜慶大學校 大學院

環境工學科

李政勳

工學碩士 學位論文

SUSTAIN을 이용한 도시배수분구
LID 시설 최적설치방안 연구



2013年 2月

釜慶大學校 大學院

環 境 工 學 科

李 政 勳

李政勳의 工學碩士 學位論文을
認准함

2013年 2月



主 審 工學博士 李柄憲



委 員 工學博士 李濟根



委 員 工學博士 姜壬錫



목차

I. 서론	1
1. 연구배경 및 목적	1
2. 연구내용	3
3. 연구동향	4
II. 연구 방법	7
1. SUSTAIN 모형 설명	7
가. Framework Manager	12
나. Simulation Modules	14
다. Optimization Module	15
라. Post-Processor	16
2. SUSTAIN의 스케일에 따른 모의	21
3. 연구 대상 지역	24
4. 모형 입력자료 구축	26
가. 기상자료	25
나. DEM 및 토지이용도	28
다. 비점오염원의 축적과 쓸림 매개변수 산정	30
라. LID 시설 개요	34
마. LID 시설 관련 정보	39
바. 토지이용 별 LID 시설 선정	44
III. 결과 및 고찰	47
1. 총량 토지계 배출 부하량 결과	47
2. LID 시설 최적 설치 방안 결과	50
3. 스케일에 따른 변화 결과	63

IV. 결론 69

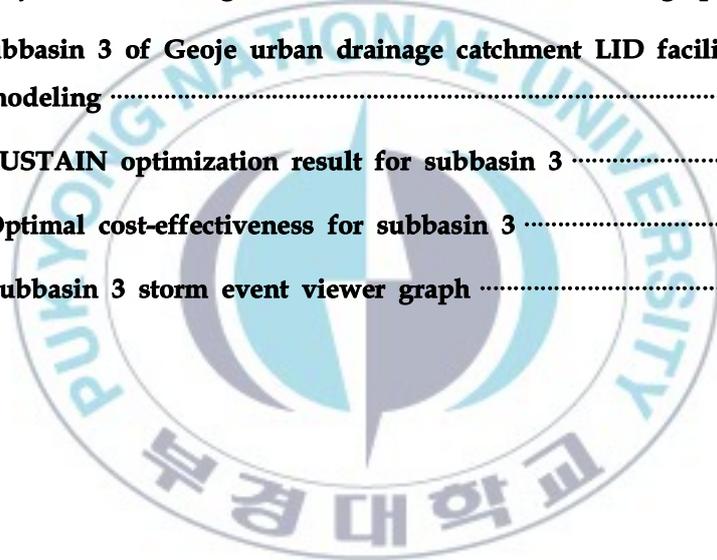
참고문헌 72



List of Figures

Fig. 2.1. SUSTAIN front screen	7
Fig. 2.2. SUSTAIN application process	9
Fig. 2.3. Land module	10
Fig. 2.4. LID module	11
Fig. 2.5. SUSTAIN components and flow chart	12
Fig. 2.6. Example storm event classification graph	17
Fig. 2.7. Example storm event viewer graph	18
Fig. 2.8. Example performance summary report graph	19
Fig. 2.9. Example cost- effectiveness curve	20
Fig. 2.10. SUSTAIN's multiple scales of application	22
Fig. 2.11. Tiered application of SUSTAIN for developing cost-effectiveness curves	23
Fig. 2.12. Geoje urban drainage catchment map	25
Fig. 2.13. Geoje urban drainage catchment DEM and Land Use	28
Fig. 2.14. Bioretention	34
Fig. 2.15. Infiltration Trench	35
Fig. 2.16. Porous Pavement	36
Fig. 2.17. Rain Barrel	37
Fig. 2.18. Green Roof	38
Fig. 2.19. Geoje urban drainage catchment subbains	44
Fig. 3.1. K-TMDL TP load result	48

Fig. 3.2. SUSTAIN flow result	49
Fig. 3.3. SUSTAIN TP load result	49
Fig. 3.4 Geoje urban drainage catchment LID facilities modeling	50
Fig. 3.5. SUSTAIN optimization result	52
Fig. 3.6. Cost-effectiveness for Geoje urban drainage catchment	58
Fig. 3.7. Optimal cost-effectiveness for Geoje urban drainage catchment	59
Fig. 3.8. Geoje urban drainage catchment storm event viewer graph	62
Fig. 3.9. Subbasin 3 of Geoje urban drainage catchment LID facilities modeling	63
Fig. 3.10. SUSTAIN optimization result for subbasin 3	64
Fig. 3.11. Optimal cost-effectiveness for subbasin 3	65
Fig. 3.12. Subbasin 3 storm event viewer graph	67



List of Tables

Table 2.1. Weather component Unit for SUSTAIN	27
Table 2.2 Land Use Group for SUSTAIN	29
Table 2.3. Annual average unit load generation	30
Table 2.4. Typical EMCs in Urban Runoff	32
Table 2.5. Parameters of washoff and buildup	33
Table 2.6. LID facilities Basic Dimensions	39
Table 2.7. Green-Ampt Parameters	40
Table 2.8. LID facilities Substrate properties	41
Table 2.9. LID facilities Water Quality Parameter	42
Table 2.10. LID facilities Cost Factor	43
Table 2.11. Sub basins LID facility for land use	45
Table 3.1. SUSTAIN optimization result	53
Table 3.2. Optimal cost-effectiveness	56
Table 3.3. Top 10 of effectiveness per dollar	59
Table 3.4. Optimal LID facilities basic dimension and cost	61
Table 3.5. SUSTAIN optimization result for subbasin 3	64
Table 3.6. Cost-effectiveness for subbasin 3	65
Table 3.7. Comparison of optimization results	68

Optimal installation method of LID facilities for urban drainage catchment using SUSTAIN



Lee, Jeong Hoon

*Department of Environmental Engineering, Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

Watershed and stormwater managers need modeling tools to evaluate alternative plans for water quality management and flow abatement techniques in urban and developing area. Government and local watershed planning agencies demand a watershed-scale, decision-support framework based on cost optimization to coordinate watershed-scale investments to achieve necessary improvement in water

quality. The U.S. Environmental Protection Agency(EPA) has been working since 2003 to develop such a decision-support system. The resulting modeling framework is called the System for Urban Stormwater Treatment and Analysis INtegration(SUSTAIN). SUSTAIN provides evaluating, selecting, and placing LID(Low Impact Development) facilities in an urban watershed based on user-defined cost and effectiveness criteria.

This paper estimates LID facility scale and number of units in oncheoncheon watershed to evaluate applicability of SUSTAIN. Required data to drive the model reflects the domestic situation, estimated the optimal scale and quantities of LIC facility using cost - effectiveness curve derived from an optimization process. Applied estimations calculates geoje urban drainage catchment, TP load reduction to be 20% costing about 1.1 billion Korean Won. Outlook of LID installation for optimal effectiveness can be bright if observational data is applied in a calibration and verification.

I. 서론

1. 연구배경 및 목적

도시화와 산업화로 인하여 과거 산림지역이나 농지 등이 도시적 토지이용지역으로 전환되어 왔으며, 이러한 현상은 지금도 계속되고 있다. 우리나라의 경우 1970년대 이후 급속한 도시화와 산업화로 인하여 농지, 산림, 하천부지 등 침투 가능지역은 감소하는 반면 건물, 아스팔트 도로, 주차장 등의 불투수면적은 점점 증가하면서 토지 이용 패턴의 변화가 가속화되고 있는 실정이다. 또한 침투량의 감소로 인한 지하수 수위의 저하는 하천 건천화 현상과 토양의 자연정화 능력의 감소 문제를 발생시킨다(Lee and Heany, 2003; Pappas et al., 2007; Farahmand et al., 2007; 이범희, 2006; 박정규와 박영기, 2008).

이러한 불투수면적의 증가는 비점오염원의 증가를 야기하며, 비점오염원은 토지이용 상태에 따라 오염원이 광범위하게 분포해 있기 때문에 오염물질의 발생이 어느 특정지점이 아니라 유역전체에서 일어난다. 그리고 오염물질의 유출은 강우 시에 발생하므로 발생원의 확인이 곤란하며 이동경로 또한 명확치 않기 때문에 관리가 어려운 오염원이다. 도시적 토지이용의 확대는 기존의 점오염원 관리 중심의 정책만으로는 더 이상의 수질 개선이 어려워짐에 따라 선진국에서는 비점오염원의 적극적 규제 및 처리를 시행하고 있으며, 우리나라도 최근에 와서 공공수역의 수질관리를 위해서는 비점오염원의 제어가 중요하다는 사실을 점차 인식하고 있는 추세이다(Kim

and Han, 2010). 이러한 상황에서 비점오염원 관련 전문가들은 부족한 예산, 제한된 자원 그리고 불완전한 정보에 의해 도시개발에 따른 비점오염원의 영향평가 및 비점오염원의 저감방안 수립에 현실적인 제한을 받고 있다. 이러한 측면에서 수학적 모델링은 비점오염원 저감을 위한 여러 가지 의사결정을 위해 필요한 정보를 제공하는데 거의 유일한 대안이 되고 있다. 즉, 도시개발에 따른 비점오염원의 적절한 관리 대안의 효과를 따져보기 위해서 모의 모델의 사용은 정책 결정을 위한 매우 중요한 정보를 생산하게 된다(Perez-Pedini et al., 2005).

대부분의 관리정책들은 유역의 유출 완화와 오염물질 저감을 목표로 한다. 하지만 모든 지역에서 적용 가능한 효율적인 표준 해결책은 아직 존재하지 않는다. 이는 유역의 크기, 인위적인 활동 그리고 자연적 특성과 같은 요소들이 각 유역에 따라 매우 다르기 때문이다. 이러한 상황 속에서 정책 결정권자가 해결해야 할 문제는 이러한 요소들 외에도 대상지역에 예산 대비 효율이 가장 높으며, 실용적인 관리 방안을 고려하여 시설의 최적 조합을 어떻게 선택하느냐이다. 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)에서는 이러한 문제의 해결을 지원하기 위한 시스템의 필요성을 인식하였고, 2003년에 도심 혹은 개발 유역의 강우유출수 LID(Low Impact Development) 시설의 배치와 선택을 위한 의사 결정 지원 시스템 개발의 연구 프로젝트를 시작하였다. 이러한 프로젝트의 산물로 2009년, EPA는 System for Urban Stormwater Treatment and Analysis INtergration(이하 SUSTAIN)을 발표하였다. SUSTAIN은 사용자가 정의한 가격 및 효율을 기반으로 하여 도시유역의 LID 시설의 종류, 최적위치 선정, 가격 평가 등을 가능하게 한다. 본 연구에서는 이러한 SUSTAIN의 국내 적용가능성을 평가해보고자 부산 온천천 유역을 대상으로 가격 대비 최적효율을 나타내는 LID 시설의 규모 및 개소수를 산정해 보고자 한다.

2. 연구내용

LID(Low Impact Development)는 도시화가 이루어진 지역에 생물학적 지류, 습지, 식재된 지붕, 빗물통 및 투수성의 도로와 같은 기법들을 이용해 강우유출과 비점오염원을 저감하는 기법이다(환경부, 2009). 다시 말하면 LID개념의 강우유출수 관리는 가능한 자연 상태의 수문성분을 유지할 수 있도록 도시배수시스템을 설계하는 것을 의미한다. 본 연구에서는 이러한 LID 시설의 종류, 최적위치 선정, 가격 평가를 제공하는 SUSTAIN의 적용가능성을 평가하기 위해 부산 온천천 유역 중 거제 배수분구를 대상으로 가격 대비 최적효율을 나타내는 LID 시설의 규모 및 개소수를 산정해보았다. 그리고 스케일에 따른 LID 시설의 최적 규모 및 개소수의 변화를 알아보기 위해 대상 연구지역(거제 배수분구)을 토지이용에 따른 소유역으로 분할하여 그 중 한 소유역에 대한 가격 대비 최적효율을 나타내는 LID 시설의 규모 및 개소수를 산정해보았다.

모형의 구동을 위해 필요한 기상자료는 기상청 부산지점의 자료를 사용했으며, LID 시설의 설치비용 및 크기와 오염물질 저감효율은 수질오염 총량관리를 위한 개발사업 비점오염원 최적관리지침(국립환경과학원, 2010) 및 도시지역 비점오염원 제로화 사업 타당성 조사보고서(환경관리공단, 2009)를 참고하였다.

대상오염물질은 수계오염총량관리지침을 참고하여 토지계 지목별 연평균 발생부하원단위 표에서 제공하는 오염물질 중에서 TP로 선정하였다. 선정된 도시배수분구에는 관측 자료가 존재하지 않아 이에 대한 대안으로 수계오염총량관리기술지침에 맞추어 모델 매개변수를 검·보정하였다.

3. 연구동향

최근 녹색성장기반 토지개발과 지속가능한 발전에 관한 사회적 관심이 고조되고 있는 가운데 친환경 도시 개발기법 중 하나인 LID기법이 많은 분야에서 각광받고 있다. LID 기법은 미국의 PGDER (Prince George's County, Maryland Department of Environmental Resources)에 의해 개발된 생태저류 셀(bio-retention cell)이 Prince George's County에 적용되면서 시작되었으며, 포트랜드, 오리건 등의 많은 주정부에서 LID 기법을 도시자원보호 프로그램과 통합하여 적용하고 있다(Maine Dept. of Environmental Protection, 1995).

LID 기법이나 유출 및 비점오염 저감에 관련된 모델링 연구 동향은 크게 비점오염원 관리를 위한 저류지 최적용량 산출에 관한 연구, 분산형 비점오염원 저감시설의 최적 설치위치 지정에 관한 연구, 도시 물순환 개선을 위한 수문학적 접근방법에 관한 연구 등으로 구분할 수 있다.

이 중 비점오염원 관리를 위한 저류지 최적용량 산출에 관한 연구를 살펴보면, Guo 등(1996)은 저류형 비점저감시설에 대한 비초과확률을 정의하는 유출포착곡선을 작성하기 위하여 기초적인 강우-유출 분석을 수행하였으며, Behera 등(1999)은 도시 배수시스템에서의 저류량, 방류량, 비점저감시설의 용량 등에 대하여 확률적 해석방법을 적용하여 다양한 유출 제어시설물의 최적규모를 결정할 수 있는 방법을 제안하였다. 전체 강우사상의 통계학적 분석으로부터 비점오염원 관리를 위한 강우유출수 포착곡선이 Guo and Urbonas(2002)에 의해 유도되었으며, 국내에서는 조덕준(2007)에 의해 이에 대한 적용 가능성에 대한 평가가 이루어진 바 있으며, 한수희 등(2008)은 상기 소개된 논문을 바탕으로 강우량의 PDF를 3변수 혼합지수

PDF를 사용하여 도시 강우 유출수의 포착곡선을 작성해 보고 기존 1변수 지수 PDF와 비교해보았다. 최대규 등(2011)은 CN값의 시공간적인 변동성을 반영하여 강우유출수 포착곡선을 유도하고, 이로부터 비점오염원 저감을 위한 저류지의 최적용량을 산정하였다.

분산형 비점오염원 저감시설의 최적 설치위치 지정에 관한 연구를 살펴보면, 먼저 Perez-Pedini 등(2005)은 도시화나 개발된 유역을 투수성 포장이나 생태저류시설, 침투시설 등을 이용하여 개발이전의 수문학적 기능이 복원되도록 토지를 조성하는 LID와 같은 총체적인 기법을 고려하여 우수 유출관리를 위한 침투기반의 최적관리기법을 제시한 바 있다. 장수형 등(2008)은 Perez-Pedini 등(2005)의 연구를 바탕으로 SCS-CN법을 적용하여 유역을 적정 크기의 HRUs(hydrologic response units)로 구분하여 D8 알고리즘을 통한 흐름해석을 수행하고 저감시설의 최적위치 및 개수를 결정하기 위한 침투기반의 수문모형을 개발하여 대상유역에 적용해보았다. 김상단 등(2010)은 우리나라 도시지역(특히, 구시가지)과 같은 복잡한 토지이용패턴의 구현 및 비점오염원의 배출경로가 모형 구조에 반영된 래스터기반의 준분포형 강우-비점오염원 유출 모형을 개발하여 도시배수분구에서 소규모 분산형 비점오염원 저감시설 설치 시의 효과를 알아보았다. 또한 이정훈 등(2012)은 상기 연구들을 바탕으로 비점오염원을 저감하기 위하여 설치되는 저영향기법 시설들의 최적설치위치 결정 및 이러한 시설들의 효율을 정량화하기 위해 적용될 수 있는 분포형 수문모형을 제안하였다.

최치현 등(2011a,b)은 부산광역시 온천천 유역을 대상으로 도시화가 고밀도로 이루어진 지역에 침투기반 저류지와 우수지를 설계하는 복합설계기법을 적용하여 현재의 수문상태를 특정한 과거시점의 수문상태로 재현하기 위한 방안을 제시한바 있으며, 최치현 등(2011c)은 우리나라 기후의 계절성을 반영하기 위하여 비모수적 추계학적 일 강우 발생기를 이용하여 부산광

역시 해운대 신시가지를 대상으로 빗물이용시설의 신뢰도를 평가할 수 있는 방법을 제안한 바 있다.



II. 연구 방법

1. SUSTIAN 모형 설명

전술한 바와 같이 SUSTAIN(System for Urban Stormwater Treatment and Analysis INtergration)은 미국 EPA에서 도심 및 개발지의 강우유출 수 LID 시설의 배치와 선택을 위한 의사 결정 지원 시스템 개발을 위한 연구 프로젝트의 산물이다. 다양한 스케일의 구역에서 종합적인 강우유출 수 관리 분석을 용이하게 해주는 시스템으로 최신 기술 적용 및 실제 문제에 실질적인 해결책을 도출하기 위한 가격 대비 효율분석을 수행하는 프로그램(Fig. 2.1)이다.

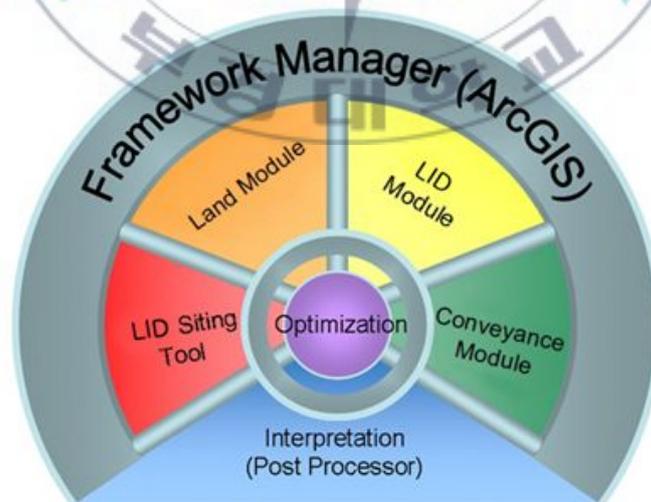


Fig. 2.1 SUSTAIN front screen.

SUSTAIN은 도시 수문구조, 오염물질 부하량 및 처리를 모의하는 다양한 모형에서 기반한 알고리즘 및 자체 알고리즘을 탑재하고 있으며, 사용자의 편의를 위해 그래픽 인터페이스를 사용한다. 이 그래픽 인터페이스는 연구 대상지역과 관리 시설의 위치 선택 및 다양한 토지특성 사이의 연결을 정의하는 것을 시각적으로 표출하는데 이용된다. 수치해석 시스템은 사용자가 가능한 넓은 범위에서 가격-효율 해결책을 찾을 수 있도록 최적화 tool을 제공한다. 도수 수문구조 복원 및 오염물질의 처리 등에 관한 유역의 문제를 해결하기 위해 많은 모형이 개발 및 사용되어왔으며, 그 중 일부 모형은 편리한 모의방법과 신뢰성 있는 결과로 아직까지도 많이 이용되고 있다. SUSTAIN은 이러한 외부 모형의 장점을 이용하기 위해 외부 모형에서 사용되는 입력 자료와 동일한 입력자료 양식을 사용한다. Fig. 2.2는 SUSTAIN의 전반적인 모의 과정을 나타낸다.

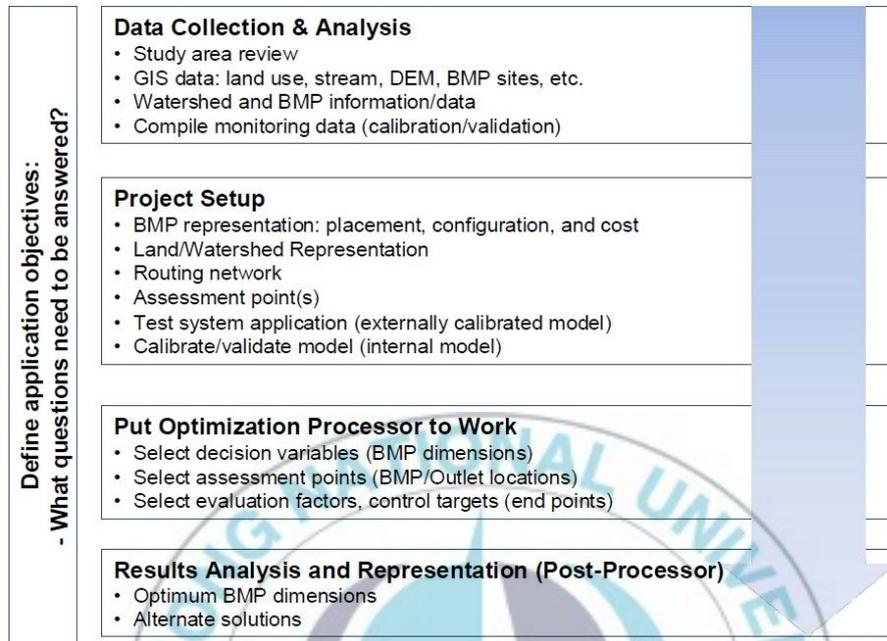


Fig. 2.2 SUSTAIN application process

SUSTAIN은 ArcGIS를 기반으로 하여 여러 가지 모의 모듈이 연결된 종합적이며 다양한 스케일을 가진 유역 및 수질 모델링 프로그램이다. SUSTAIN은 ESRI사의 ArcGIS 9.3과 Spatial Analyst 가 설치되어 있어야 하며, 결과의 분석과 해석을 위해 post-processor로 Microsoft Excel 2003 을 사용하므로 이 또한 설치되어 있어야 한다.

SUSTAIN 에 포함된 모듈은 다음과 같다.

- Framework Manager
- Land module
- LID module

- Conveyance module
- Optimization module.
- Post-Processor

Framework Manager는 SUSTAIN의 명령 모듈로서, 시스템을 이용하기 위해 사용되는 모든 자료를 관리하며 다른 모듈 사이를 연결하는 역할을 한다. 또한 모델링 및 최적화 과정을 진행할 수 있도록 모의 네트워크를 생성한다. Land module은 내부 토지 모의나 외부 시계열 자료를 통해 토지에서 비롯되는 강우유출수와 오염물질 부하량 자료를 생성한다. Fig 2.3은 Land Module에 대한 모식도를 나타낸다.

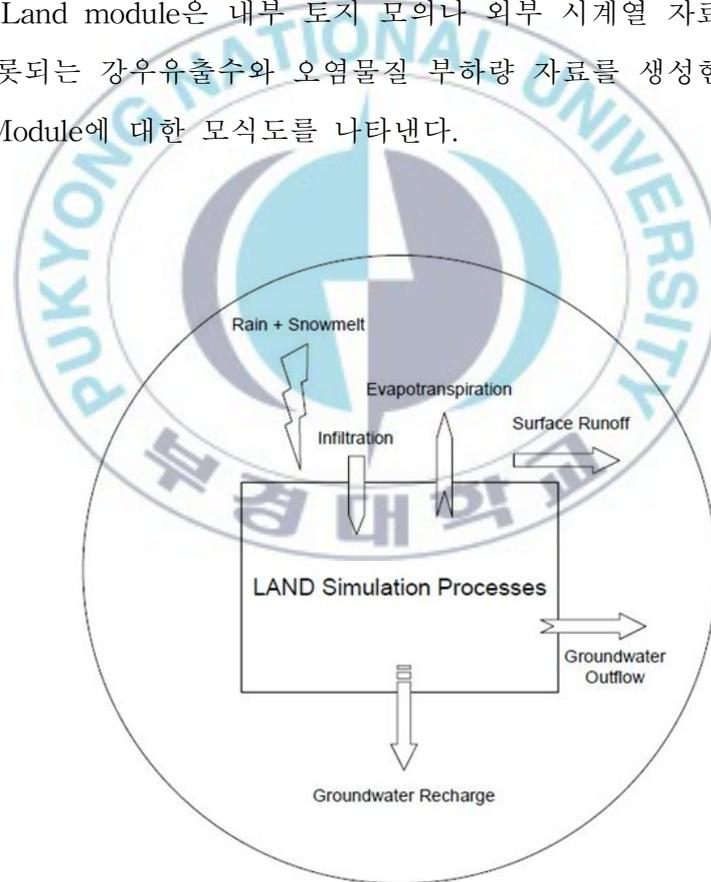


Fig. 2.3 Land module.

LID module은 LID시설을 통과하여 나오는 유량과 수질 자료를 생성한다. Conveyance module은 관거나 개수로에서 유량과 수질의 추적(routing)을 모의한다. Fig. 2.4는 LID module에 대한 모식도를 나타내며, 이때 추적(routing)이란 유량과 수질이 관거나 개수로를 통해 하류로 이동해 감에 따라 어떻게 변화하는가를 분석하는 과정을 뜻한다. Optimization module은 미리 선택된 현장에 이용 가능한 LID시설 종류와 시설 크기의 범위로부터 가격-효율적인 LID 시설의 배치 및 종류를 평가하고 식별한다. Post-Processor는 의사결정을 위해 모의 결과에 대한 분석과 요약을 시행한다.

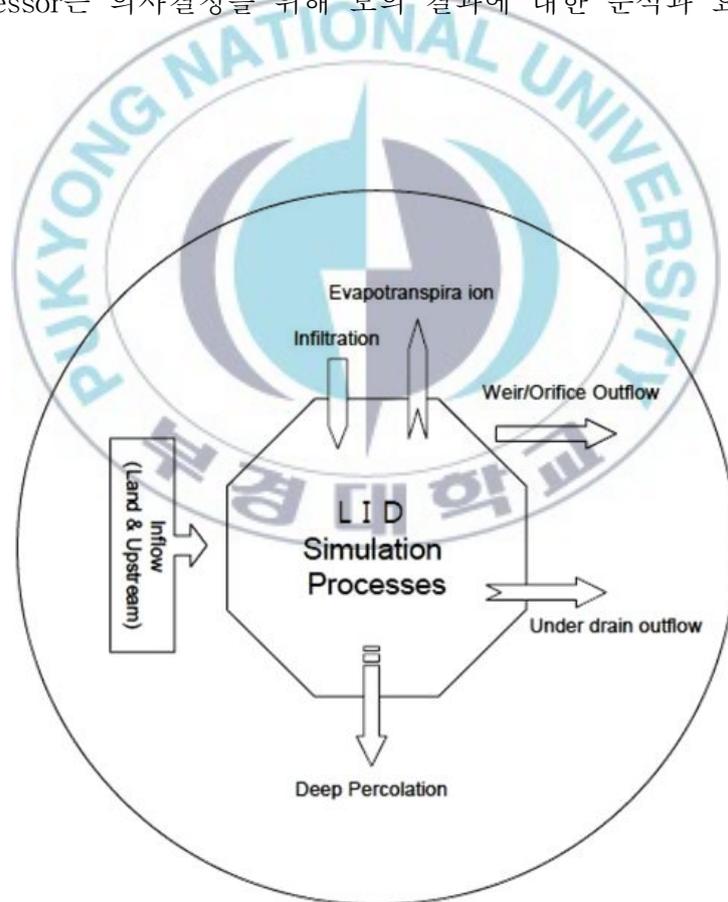


Fig. 2.4 LID module.

가. Framework Manager

Framework Manager(FM)은 자료 관리, 공간적 분석, 네트워크 시각화를 수행하며, GIS 네트워크에서 하천, 관거, 토지이용상태, 관련 모의 모듈과 외부 시계열 자료와 같은 구성요소를 통합하여 관리한다. 그리고 모형의 모의와 최적화 과정을 수행하기 전에 이에 사용되는 자료를 점검한다. 또한 자료가 저장되는 경로를 정의하고 필요한 자료 요소를 식별한다. Fig. 2.5는 SUSTAIN의 구성요소와 각 구성요소에 대한 관계 및 모의 모식도를 나타낸다.

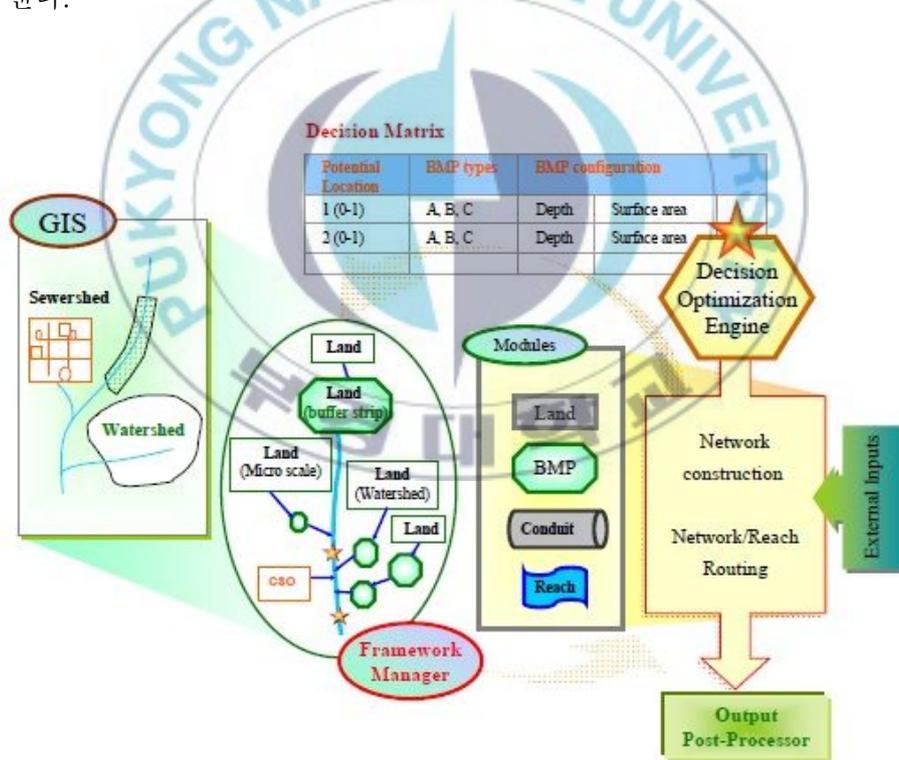


Fig. 2.5 SUSTAIN components and flow chart.

FM 은 다음과 같은 순서로 작업을 수행하도록 설계되었다.

- 구역의 면적, LID 시설 및 하천 사이의 관계를 정의하기 위한 모의 네트 워크를 설정한다.
- 모의를 위해 필요한 모듈을 선정하고 각 모듈에 입력할 입력 자료를 준비한다.
- 모듈을 통해 수행된 출력 자료를 Post-Processor 에 전송한다.
- Post-Processor 는 전송받은 자료를 최적화 모듈을 사용하여 최적화를 진행한다.
- 최적화 모듈은 사용자가 정의한 여러 가지 기준과 제약조건을 고려하여 정의한 조건이 충족 될 때 까지 반복하여 수많은 작업을 반복하여 수행한다.
- 사용자가 정의한 조건이 충족 될 때까지 수많은 작업을 반복하여 수행한다.
- 이러한 과정을 통해 Post-Processor 는 다양한 관점에서 여러 가지 대안을 제시해 주며, 사용자는 자신이 정의한 기준과 제약조건에 맞는 최적의 해결책을 선택할 수 있게 된다.

나. Simulation Modules

SUSTAIN의 모의 모듈은 세 가지로 구성되어있다. 효율적이고 합리적인 결과를 제공하기 위해, SUSTAIN은 세계적으로 널리 사용되는 유역, 수문 모형의 모의 과정을 선택하여 이를 탑재하였다. 이때 탑재된 모형은 도시 지역 우수유출 해석을 위한 SWMM (Huber and Dickinson 1988), 하천유역모형인 HSPF (Bicknell 2001), 그리고 유역 모델링 시스템인 LSPC>Loading Simulation Program-C++) (Tetra Tech and USEPA 2002)이다.

다음은 탑재된 모형이 어느 요소를 모의하기 위해 사용되는지를 나타낸다.

- Watershed/landscape models
: SWMM의 기상, 지표면, 지하수 모의
- Conveyance and pollutant routing
: HSPF/LSPC RCHRES와 SWMM 이송 모의
- LID simulation models
: Prince George's County BMP module (Tetra Tech, 2001) 과 VFSSMOD (Munoz-Carpena and Parsons, 2003) 의 버퍼 영역 모의

다. Optimization Module

SUSTAIN의 최적화 모듈은 사용자가 정의한 기준에서 가격 대비 가장 효율적인 LID시설 종류와 배치를 식별하기 위해 최적화 진화 기술을 사용한다. 최적화 모듈은 모의 모듈과 가격 정보로부터 성능 자료를 바탕으로, 사용자가 설정한 기준에 도달할 때 까지 여러 가지 변수를 조절해가며 체계적으로 가격 및 성능 자료를 비교한다.

SUSTAIN은 Scatter Search(분산 검색) 기법과 비지배 기반의 정렬 유전자 알고리즘 기법(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II), 총 두 가지의 최적화 기법을 지원한다.

분산 검색 기법은 메타휴리스틱(metaheuristic) 검색 기술이며 복잡한 시스템을 최적화 하는데 이용된다(Glover et al. 2000; Laguna and Marti 2002; Zhen et al. 2004). 이때, 메타휴리스틱이란 어떠한 조합을 구성하는 문제와 같이 계산 시간이 많이 소모되는 문제를 사용자가 주어진 제약조건을 기반으로 문제를 해결하는 휴리스틱 방법이다. 휴리스틱 방법은 경험에 기반 하여 문제를 해결하거나 학습하거나 발견해 내는 방법을 말하며, 보통 최적의 해를 찾는 알려진 방법이 없을 때 사용된다.

NSGA-II는 파레토 지배(Pareto dominance)를 기반으로한 고급 유전 알고리즘으로, 최적 해를 구하기 위해 비지배를 사용하며, 적합치(fitness value) 대신에 분포치를 사용한다(Deb et al. 2002). 이때, 파레토 지배란 자원배분상태에서 다른 사람에게 손해가 가도록 하지 않고서는 어떤 한 사람에게 이득이 되는 변화를 만들어내는 것이 불가능할 때를 뜻한다. 최적화 알고리즘에 대한 자세한 내용은 위의 참고 문헌이나 SUSTAIN 메뉴얼을 참고 할 수 있다.

라. Post-Processor

시계열 자료의 분석은 다양한 시나리오(예를 들면, LID 시설의 유무, 개발 전 조건), 그리고 관심 변수(예를 들면, 유입, 유출 유량, 오염물질 부하량 그리고 농도)와 분석 위치(예를 들면, 유역의 말단부)를 고려해야 하므로 상당히 까다로운 작업이다. 뿐만 아니라 관측된 강우의 강도, 지속시간, 처리 오염물질의 양과 시설의 오염물질 제거 효율에 따라 여러 가지 다양한 변수들을 생기게 된다. 따라서 SUSTAIN은 모델링 결과로부터 관리 전략의 효율을 특성화 할 수 있는 의미 있는 자료를 뽑아내는 것을 주요 목적으로 Post-Processor를 개발하였다. Post-Processor는 Microsoft Excel 2003을 기반으로 설계되었으며, 출력자료에 대해 다음과 같이 4가지 분석 요소를 보여준다.



- 강우사상 정의 (Storm Event Classification)

: 미리 지정한 지속시간이나 선행 토양 수분 조건에 따라 강우사상을 분리한다. 이는 강우사상에 따른 LID 시설의 성능 평가를 하기 위해 필요하다(Fig. 2.6).

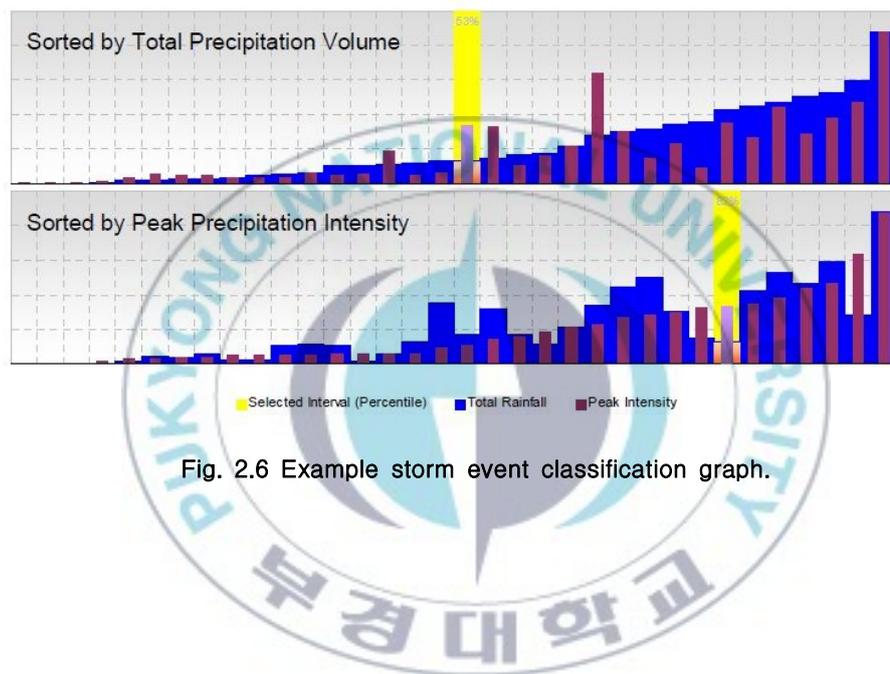


Fig. 2.6 Example storm event classification graph.

- 강우사상 보기 (Storm Event Viewer)

: 특정 강우사상에서의 수문그래프와 오염물질 그래프를 시각화하는데 사용된다. 지정된 강우 사상에서의 시설 성능을 시각적으로 평가할 수 있다 (Fig. 2.7).

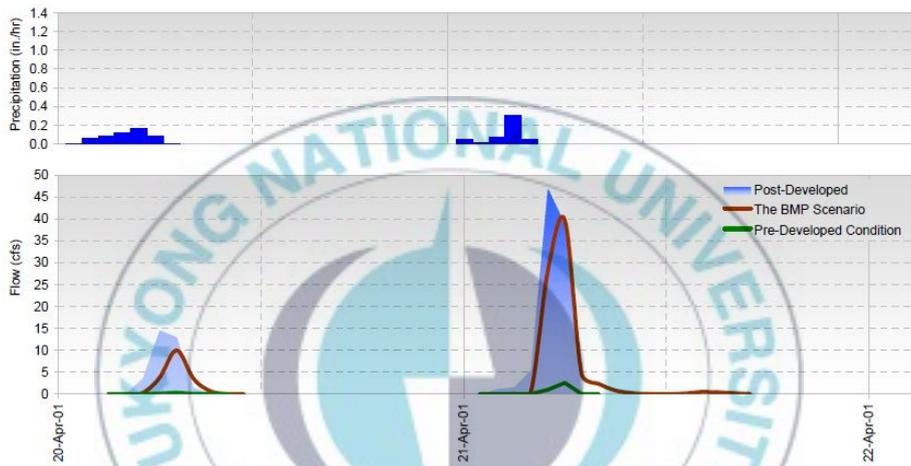


Fig. 2.7 Example storm event viewer graph.

- 요약 보고서 (Performance Summary Report)

: 정의한 모든 강우사상에 대한 모델링 관리 전략을 평가한다. 선택한 평가 지점 뿐만 아니라 처리되지 않거나 바이패스(bypass)되는 강우유출수를 포함하여 평가한다(Fig. 2.8).

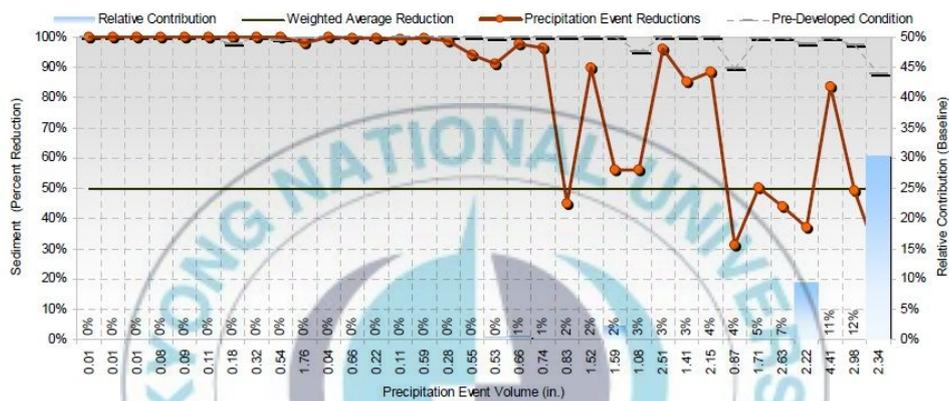


Fig. 2.8 Example performance summary report graph.

- 가격-효율 보고서 (Cost-Effectiveness Report)

: 사용자가 선택한 평가 지점에 대한 가격-효율 곡선을 생성하여 보여 준다. 또한, LID 시설 표면 저류량, 면적 및 토양 저류량 등과 같은 지표와 연관된 가격-효율 곡선을 제공한다. 이러한 여러 지점에서 지표를 변경하여 생성한 가격-효율 곡선은 효율적인 정책을 수립하는데 도움을 줄 수 있다(Fig. 2.9). 최적화 모듈을 거쳐 나온 모든 solution 을 보여주며, 그 중 최적 solution은 주황색으로 표시된다.

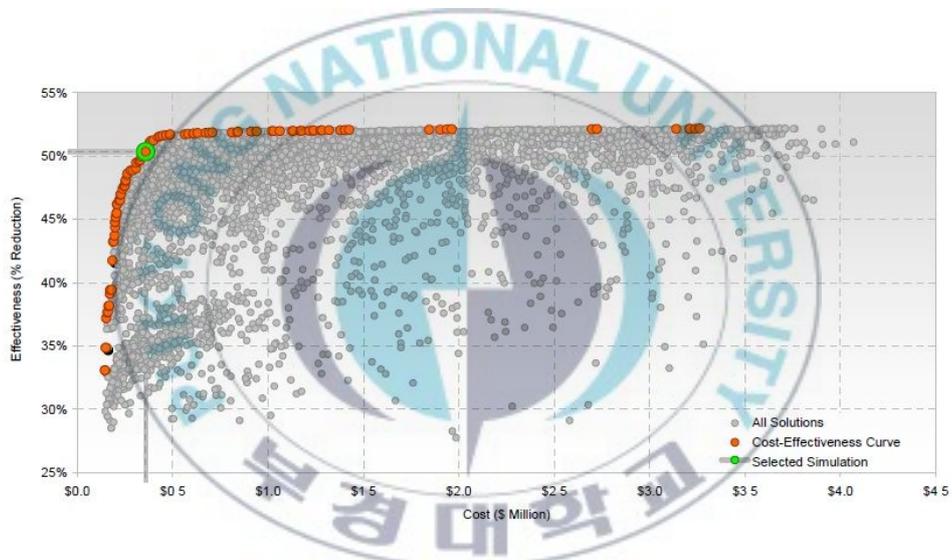


Fig. 2.9 Example cost-effectiveness curve.

2. SUSTAIN의 스케일에 따른 모의

실무자는 국소지역에서 지역 단위 유역까지 다양한 스케일에서 관리 방법을 평가할 수 있는 시스템을 필요로 하고 있으나, 이러한 스케일 평가는 개별 LID 시설 또는 LID 시설 조합에 대한 자세한 평가가 필요하다. 평방 100 마일 이상의 대규모 유역에서 원하는 저감량을 달성하기 위해서는 수백 또는 수천 개의 관리시설이 필요할 수도 있다. 이러한 유역에 각각의 LID 시설에 대한 가격 비교를 수행하려면, 모형의 정확성과 모의 시간에 상당한 영향을 줄 수밖에 없다. 따라서 이러한 스케일 문제를 해결하기 위해서 SUSTAIN은 2가지의 접근법을 이용한다.

통합(aggregation) 분석 그리고 단계적(tiered) 분석 방법으로, 이러한 방법은 Fig. 2.10과 같이 다양한 스케일에서 SUSTAIN의 사용을 용이하게 한다.

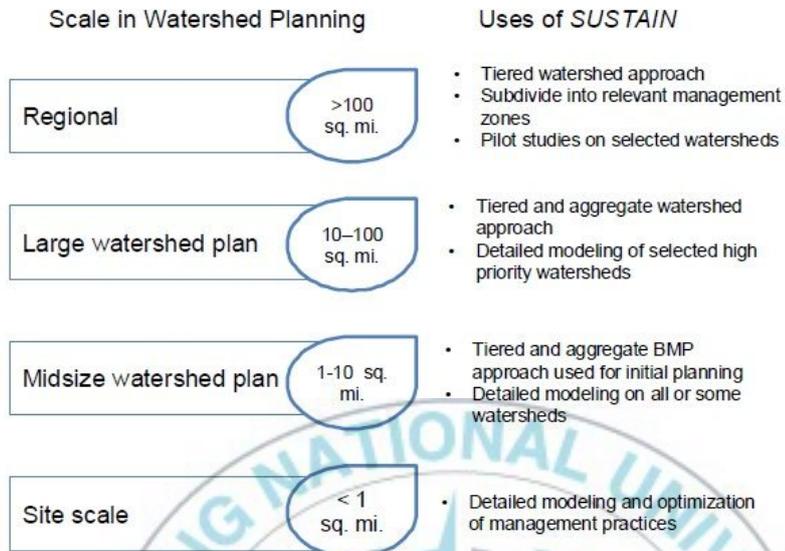


Fig. 2.10 *SUSTAIN*'s multiple scales of application.

- 통합적 방법은 여러 분산된 LID 시설의 명시적 표현 및 추적방법에 대한 대안으로, 유역 내에 유사한 기능을 하는 LID 시설들을 대표할 수 있는 하나의 가상의 LID 시설을 만든다. 이러한 방법은 계산 과정을 상당히 감소시키며, 분산된 LID 시설이 결정 변수로서 최적화 과정에 포함되어 있을 때 효율적이다. 통합적 방법은 다음과 같은 LID 시설의 오염물질에 대한 일반적인 4가지 기능을 사용하여 여러 유사한 LID 시설을 대신한다.

1. 현장 차단(on-site interception)
2. 현장 처리(on-site treatment)
3. 추적/감소(routing/attenuation)
4. 그리고 지역적 저류와 처리(regional storage/treatment).

- 자세한 분석을 필요로 하는 유역에서, *SUSTAIN*은 단계적 분석 방법

론을 추천한다. Fig. 2.11 에 도시 된 바와 같이, 비교적 큰 구역에서는 자 세한 분석을 위해서 영역을 세분화하여 최소의 비용으로 대상 부하량 감소 를 가능하게 하는 LID 시설의 최적의 조합을 고려하여 Tier-1 가격-효율 곡선을 도출할 수 있다. 도출된 Fig. 2.11 내의 Tier-1 곡선으로부터 Tier-2 효율 곡선이 유도된다.

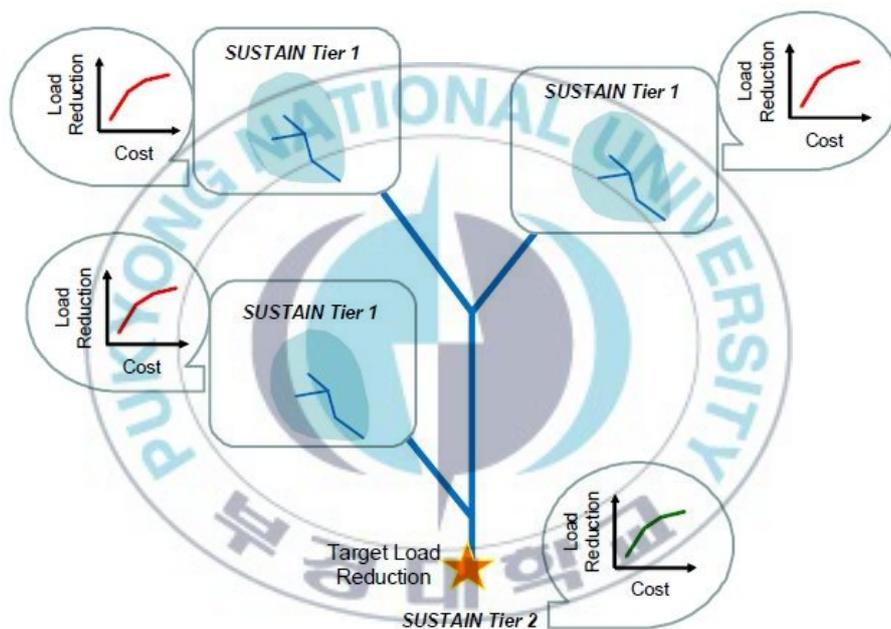


Fig. 2.11 Tiered application of SUSTAIN for developing cost-effectiveness curves.

3. 연구 대상 지역

온천천은 남한의 동남단에 위치하고 있는 수영강의 제1지류로서 수영강 하구로부터 약 3.1km 상류지점에서 수영강의 우안 측으로 유입하는 지방2급 하천이다. 유역의 위치는 동경 129°02'40"~129°07'00", 북위 35°09'20"~35°17'30" 사이에 위치하는 바 북으로는 양산시와 경계를 하면서 양산천 유역과 접하고 있고, 서로는 부산광역시 북구 및 부산진구와 경계를 하면서 덕천천 및 동천유역과 접해 있으며 동으로는 수영강 본류 유역과 접하고 있다. 또한 유역의 최북단부에는 금정산(EL. 801.5m) 및 계오봉(EL. 601.5m)이 위치하며 이곳을 정점으로 하여 서측으로 내리 뺀 능선은 금정산성을 따라 금정봉(EL. 387m), 금용산(EL. 152.3m), 황령산(EL. 427.9m), 금연산(EL. 400m), 배산(EL. 254.9m)로 연결되어 있고 동측으로 내리 뺀 능선은 구월산(EL. 317.4m)으로 연결되어 있다.

본 연구에서는 온천천 유역 중 불투수율이 가장 높고 토지이용상태가 대부분 대지라 비점오염원의 유출량이 많을 것이라고 판단되는 거제 배수분구를 연구 대상으로 선정하였다. 거제 배수분구는 대부분이 아파트와 일반주택으로 구성되어 있으며, 도로, 상업지역, 공업지역이 존재한다. Fig. 2.12는 거제 배수분구를 나타낸다.



Fig. 2.12 Geoje urban drainage catchment.

4. 모형 입력자료 구축

SUSTAIN을 구동하기 위해서는 대상 지역의 기상자료와 DEM, 토지이용도 등을 포함하는 GIS 데이터 및 비점오염원을 모의하기 위한 축적과 쓸림 관련 매개변수가 포함되는 지역에 대한 정보가 필요하다. 또한 LID 시설에 대한 너비, 길이, 그리고 토양 깊이와 같은 시설 정보 및 그에 따르는 설치비용 정보가 필요하다.

SUSTAIN은 미국 EPA에서 만든 프로그램이기 때문에 국제 단위계 기본 단위(SI단위)가 아닌 US 단위계를 사용한다.

가. 기상자료

기상자료는 강수량, 평균 풍속, 최저 및 최고 온도, 잠재증발량, 상대습도가 필요하다. 기상청 관할 기상관측소 중 강우기록 관측연도, 시간강우자료 보유여부 및 설치대상지와 위치상 인접여부 등을 고려하여 부산지점 기상관측소의 자료를 사용했으며 최근 10년(2002년 1월 1일 ~ 2011년 12월 31일)간의 자료를 사용하였다. 이때 강수량 자료는 1시간 단위 자료를 사용했으며, 그 외 자료는 일 단위 자료를 사용하였다. 잠재증발량은 penman 법을 이용하여 산정하였다. Table 2.1은 사용되는 기상자료에 대한 입력 단위를 나타낸다.

Table 2.1 Weather component Unit for SUSTAIN

Weather Component	Unit
Temperature	degree F
Potential evaporation	in./day
Wind speed	mi./hr
Precipitation	in
Relative humidity	friction



나. DEM 및 토지이용도

수치지형자료(Digital Elevation Model, DEM)는 국토지리정보원에서 제공하는 30m × 30m 해상도를 가지는 DEM을 사용하였다. 토지이용도는 환경부에서 제공하는 중분류 토지피복도를 사용하였다. 이때 토지이용도는 SUSTAIN에서 요구하는 토지이용 그룹에 맞게 분배하여 토지이용상태별로 비점오염원 축적과 쓸림을 모의하게 된다. Fig 2.13은 모형 입력에 사용한 DEM과 토지이용도를 나타내며, Table 2.2는 SUSTAIN 내에서 적용되는 토지이용 그룹을 나타낸다.

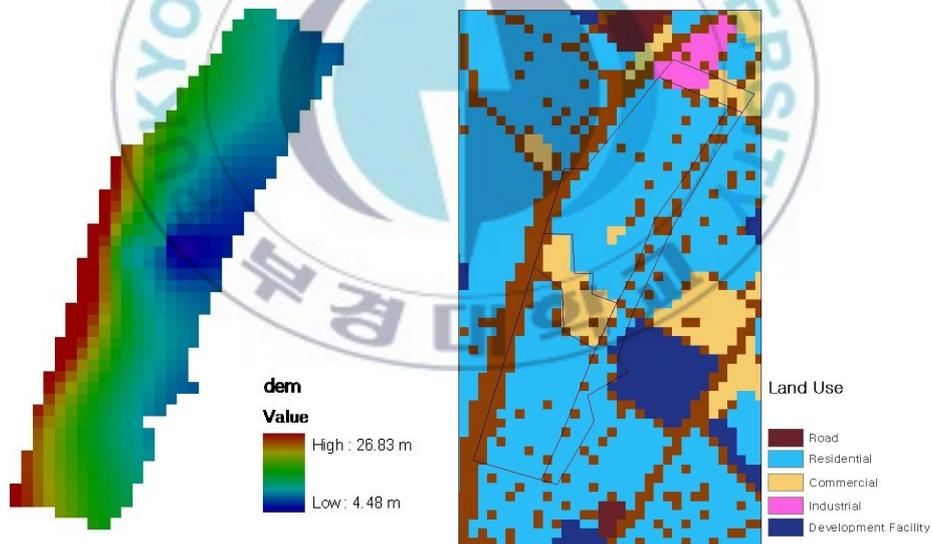


Fig. 2.13 Geoje urban drainage catchment DEM and Land Use.

Table 2.2 Land Use Group for SUSTIAN

Land Use Group
Forest
Agriculture
High-Density-Residential
High-Density-Residential-Pervious
High-Density-Residential-Impervious
Medium-Density-Residential
Medium-Density-Residential-Pervious
Medium-Density-Residential-Impervious
Low-Density-Residential
Low-Density-Residential-Pervious
Low-Density-Residential-Impervious
Commercial
Commercial-Pervious
Commercial-Impervious
Road
Rooftop



다. 비점오염원의 축적과 쓸림 매개변수 산정

수계오염총량관리기술지침(국립환경과학원, 2008)을 참고하면 토지계 발생부하량에 대한 실측조사가 어려울 경우에는 각 지목별 면적과 지목별 연평균 발생부하원단위(Table 2.3) 및 강우배출비를 적용하여 다음의 산식으로 월별 발생부하량을 개략적으로 산정하는 것을 추천하고 있다.

- 토지계발생부하량

$$= \sum (\text{지목별면적} \times \text{지목별연평균발생부하원단위} \times \text{강우배출비}) \quad (2.1)$$

- 강우배출비

$$= 0.1 + 0.9 \frac{\text{연간일수}(= 365, 366) \times \text{월유효강우량비}}{\text{월간일수}(= 28, 29, 30, 31)} \quad (2.2)$$

- 월유효강우량비

$$= \frac{10\text{mm/일 이상 강우고의 강우량 월합계}}{10\text{mm/일 이상 강우고의 강우량 연합계}} \quad (2.3)$$

Table 2.3 Annual average unit load generation(kg/km²/day)

Land Use	BOD	TN	TP
Fields	1.59	9.44	0.24
Paddies	2.30	6.56	0.61
Forest land	0.93	2.20	0.14
Site	85.9	13.69	2.10
Etc.	0.96	0.759	0.027

여기서 '전'은 지목별 면적 중 전과 과수원을 포함하며 '대지'는 대지, 공장용지, 학교용지, 도로, 철도용지, 체육용지(골프장 제외), 유원지, 종교용지,

사적지를 포함한다. '기타'는 광천지, 염전, 제방, 구거, 유지, 수도용지, 공원, 묘지, 잡종지를 포함한다.

대상 유역의 경우는 모든 토지이용패턴이 '대지'에 속한다. 따라서 수계오염총량관리기술지침에 따른 연평균 발생부하량 원단위(kg/km²/day)를 참고(Table 2.3)하여 연평균 발생부하량을 산정한 결과 TP는 연평균 12.1952 kg이 발생하는 것으로 나타났으며, 이에 대한 연평균 배출부하량은 12.1952 kg으로 전량 배출되는 것으로 계산되었다.

이를 바탕으로 SUSTAIN을 이용하여 대상 배수분구의 비점오염원 배출부하량을 재현하기 위해서는 비점오염원 축적과 쓸림에 관한 매개변수 입력이 필요하다. 이때의 매개변수는 총 3개로 C_1 (최대가능축적량), C_2 (축적률 계수), EMC(평균유출농도)이다. 따라서 본 연구에서는 수계오염총량관리기술지침에 의거하여 산정된 토지계 배출부하량이 모두 배출된다고 가정하여 3개의 매개변수를 추정하였다. 다음은 SUSTAIN에서 구동하는 오염물질 축적과 쓸림의 지배방정식이다. 본 연구에서는 축적에 관련된 지배방정식은 exponential function을 쓸림에 관련된 함수는 EMC 개념을 사용했으며 이는 강우유출수의 농도가 항상 일정하다고 가정했음을 의미한다. Table 2.4은 도시유역에서 EMC 범위를 나타낸다(USEPA, 1983).

- Pollutant Buildup (exponential function)

$$B = C_1 \times (1 - e^{-C_2 \times \Delta t}) \quad (2.4)$$

B = pollutant buildup (mass per unit area, e.g., lbs/acre)

C_1 = maximum buildup possible(mass per unit area. e.g., lbs(acre)

C_2 = buildup rate constant (per time, e.g., per day)

Δt = time, e.g., number of days

Table 2.4 Typical EMCs in Urban Runoff

Pollutant(mg/L)	EMC
TSS	180-548
BOD	12-19
COD	82-178
Total P	0.42-0.88
TKN	1.90-4.18
NO_2/NO_3-N	0.86-2.2
Total Cu(μ g/L)	43-118
Total Pb(μ g/L)	182-443
Total Zn(μ g/L)	202-633

비점오염원 유출모의를 위해 최종적으로 적용한 매개변수는 Table 2.5와 같다.

Table 2.5 Parameters of washoff and buildup

Land Use	C_1	C_2	EMC
Paddies	0.0069	0.024	0.1525
Forest land	0.0016	0.024	0.0350
Site	0.0230	0.024	0.5250
Etc.	0.0003	0.024	0.0068



라. LID 시설 개요

본 연구에서 사용한 LID 시설은 총 5가지로, 식생저류지(Bio-retention), 침투도랑(Infiltration Trench), 투수성 포장(Porous Pavement), 빗물통(Rain Barrel), 식생지붕(Green Roof)이다.

- Bio-retention

식생저류지(Bio-retention)(Fig. 2.14)는 강우 유출수로부터 오염물질과 퇴적물을 제거하기 위한 공정이다. 유출수는 우선 모래층을 통과하게 되면서 유출 속도가 느려지며, 담수 지역(ponding area)의 길이에 따라 균등하게 분산된다. 이때 표면층은 유기물 층이나 지표식물 그리고 그 밑의 토양으로 이루어져있다. 담수 지역 마다 차이가 있지만, 우수는 보통 중심으로 모여 침전된다. 물은 약 15cm의 깊이로 모이고, 서서히 식생저류지로 침투하거나 증발산 된다. 식생저류지 내에서 초과된 유출수가 흘러가는 것은 지역에 따라 차이가 있다. 식생저류지 내 저류된 물은 식물이 심어진 토양에서 수일에 걸쳐 천천히 하부 토양층으로 침투된다.



Fig. 2.14 Bioretention.

- 침투도랑

침투 도랑(Infiltration trench)(Fig. 2.15)은 강우의 유출수를 관리하고, 홍수와 토양 침식을 방지하며 인접한 강, 지류, 호수 등의 수질을 향상 할 수 있는 최적영농관리방안 중 하나이다. 이 도랑은 투과성 있는 토양이지만 더 쉽게 지하수 대수층으로 강우를 침투시키기 위하여 자갈 또는 부서진 돌로 이뤄진다. 자갈로 이루어진 일반적인 배수구멍과 비슷하다.



Fig. 2.15 Infiltration Trench.

- 투수성 포장(Porous Pavement)

투수성 포장(Fig. 2.16)은 지표면을 통하여 강우가 침투될 수 있게 하는 다공성 포장들로 구성된다. 유출수를 감소시키고, 효과적으로 부유물질을 걸러내어 물로부터 오염물질들을 걸러준다. 도로, 길, 잔디밭, 그리고 주차장, 자전거도로 또는 긴급차량이 지나가는 갓길, 비행기 활주로, 거주지역의 인도와 차도와 같이 차량교통이 적은 곳들에 주로 설치된다.



Fig. 2.16 Porous Pavement.

- 빗물통(Rain Barrel)

빗물통((Fig. 2.17)은 일반적으로 옥상으로부터 배수로를 거쳐 강우 유출수를 저장 또는 모으기 위해 사용되는 물탱크의 한 종류이다. 수도물의 대체용수와 추후 빗물을 재이용하기 위하여 설치되며, 이는 자급자족적인 활동을 돕는 등 경제적, 환경적으로 도움이 되는 시설이다.

저장된 물은 생활용수가 비싸거나 용수의 공급이 불가능할 때, 적절한 여과를 거쳐 조경용수, 농업용수, 화장실 용수, 설거지 용수, 세차용수뿐만 아니라 오염되지 않은 경우 음용수로도 사용 될 수 있다.



Fig. 2.17 Rain Barrel.

- 식생지붕(Green roof)

식생지붕(Fig. 2.18)은 식생이나 성장배지들로 부분적으로 또는 완전히 뒤덮인 건물의 지붕을 뜻한다. 뿌리 장벽과 배수시설과 관개 시스템 등이 추가적으로 포함할 수 있다. 가정폐수를 처리하기 위해 사용되는 옥상연못은 식생지붕의 한 형태라고 볼 수 있으며, 논쟁이 되고 있는 식물이 심겨진 컨테이너 정원은 일반적으로 식생지붕이라고 간주하지 않는다.



Fig. 2.18 Green Roof.

마. LID 시설 관련 정보

LID 시설의 설치비용 및 크기와 오염물질 저감효율은 수질오염 총량관리를 위한 개발사업 비점오염원 최적관리지침(국립환경과학원, 2010) 및 도시지역 비점오염원 제로화 사업 타당성 조사보고서(환경관리공단, 2009)를 참고하였다. 가격에 대한 정보는 각 보고서 별로 상이하였기에 때문에 도시지역 비점오염원 제로화 사업 타당성 조사보고서를 기준으로 입력하였다. 도시지역 비점오염원 제로화 사업 타당성 조사보고서에서는 LID 시설 면적이 80 m²이고, 처리 불투수 면적이 2000 m²을 기준으로 가격을 조사하였기에, 본 연구에서도 LID 시설 면적과 처리 불투수 면적을 동일하게 입력하여 모의하였다. 단, 빗물통은 소규모 장치이기에 시설면적은 2 m², 처리 불투수면적은 200 m²로 설정하였다. Table 2.6은 SUSTAIN에 입력한 LID 시설 기본 정보를 나타낸다.

Table 2.6 LID facilities Basic Dimensions

LID facility	Width (ft)	Length (ft)	Number of Units	Design Drainage Area(ac)	Weir Height (ft)
Infiltration Trench	20	40~70	1~30	0.5	0.5
Green Roof	40	60~80	1~10	0.5	0.5
Porous Pavement	33	60~80	1~15	0.5	0.5
Bio-retention	20	40~60	1~10	0.5	0.5
Rain Barrel	0.8 in (Orifice Diameter)	5.25 (Diameter)	10~100	0.05	3

모의 시 침투 기법은 Green-Ampt 법을 선택했으며, Table 2.7 (Rawls

et al., 1983) 을 참조하여 매개변수를 입력하였다. 모든 LID 시설은 Loamy Sand 를 기반으로 설치된다고 가정하였다. 입력에 사용한 기질 특성은 Table 2.8 과 같다.

Table 2.7 Green-Ampt Parameters

Soil Texture class	Saturated Hydraulic Conductivity (in./hr)	Suction Head (in.)	Porosity (fraction)	Field Capacity (Fraction)	Wilting Point (Fraction)
Sand	4.74	1.93	0.437	0.062	0.024
Loamy Sand	1.18	2.40	0.437	0.105	0.047
Sandy Loam	0.43	4.33	0.453	0.190	0.085
Loam	0.13	3.50	0.463	0.232	0.116
Silt Loam	0.26	6.69	0.501	0.284	0.135
Sandy Clay Loam	0.06	8.66	0.398	0.244	0.136
Clay Loam	0.04	8.27	0.464	0.310	0.187
Silty Clay Loam	0.04	10.63	0.471	0.342	0.210
Sandy Clay	0.02	9.45	0.430	0.321	0.221
Silty Clay	0.02	11.42	0.479	0.371	0.251
Clay	0.01	12.60	0.475	0.378	0.265

Table 2.8 LID facilities Substrate properties

LID facility	Depth of soil (ft)	Soil Porosity	Soil Field Capacity	Soil Wilting Point	Initial Surface Water Depth	Initial Moisture Content	Saturated Soil Infiltration (in/hr)
Infiltration Trench	3	0.437	0.105	0.047	0	0.15	1.18
Green Roof	2.8	0.437	0.105	0.047	0	0.15	1.18
Porous Pavement	3	0.437	0.105	0.047	0	0.15	1.18
Bio-retention	2.5	0.437	0.105	0.047	0	0.15	1.18
Rain Barrel	-	-	-	-	-	-	-

수질 관련 매개변수는 수계오염총량관리기술지침(국립환경과학원, 2008)에서 제시하는 비점오염저감시설 TP 저감효율을 참고하여 산정하였다. 수질오염총량관리를 위한 개발사업 비점오염원 최적관리지침(국립환경과학원, 2010)에서는 시설 별 배수시간으로 48시간을 추천하므로 다음 식을 사용하여 k (decay factor)를 산정하였다. 오염물질 저감은 1차 반응에 따라 감소한다고 가정(SUSTAIN 메뉴얼 추천 항목)하였으므로

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (2.5)$$

$$C = C_0 e^{-k \cdot t}$$

이때 침투도랑의 경우 저감효율이 70%이므로 남아 있는 오염물질의 비율 $\frac{C}{C_0}$ 는 0.3 이다.

따라서,

$$0.3 = e^{-k \cdot t} \text{ 이고,}$$

여기서 배수시간 t 는 48시간이므로, 정리 하면 다음과 같은 식이 된다.

$$k = \frac{\ln(1-E)}{-48} \quad (2.6)$$

- 여기서 E 는 LID 시설별 저감효율이다.

Table 2.9은 모형에 입력된 최종 수질 매개변수를 나타낸다.

Table 2.9 LID facilities Water Quality Parameter

LID facility	Decay Factor (1/hr)	Reduction Efficiency(%)
Infiltration Trench	0.022	70
Green Roof	0.020	62
Porous Pavement	0.022	65
Bio-retention	0.022	65
Rain Barrel	0.125	95

LID 시설 설치비용은 도시지역 비점오염원 제로화 사업 타당성 조사보고서(환경관리공단, 2009)를 참고하여 시설별로 ft^3 당 비용을 산정하여 SUSTAIN에 입력하였다. 이는 최적화 과정에서 개소 당 설치비용을 입력하게 되면 시설의 길이나 너비 등의 최적화가 무시되기 때문이다. Table 2.10은 입력한 가격 매개변수를 나타낸다.

Table 2.10 LID facilities Cost Factors

LID facility	\$ (dollar)
Infiltration Trench	20
Green Roof	20
Porous Pavement	24
Bio-retention	20
Rain Barrel	25



바. 토지이용 별 LID 시설 선정

상기 위성사진 및 토지이용도를 검토하여 연구 대상 지역(거제 배수분구) 토지이용상태 별로 소유역을 나누어 LID 시설을 선정하였다. 1번 소유역은 아파트 단지 및 주차장으로 이루어져 있으므로, 식생지붕 및 투수성 포장을 설치하였다. 2번 유역은 산업 및 상업지역으로 생태 저류지를 설치하였고, 3번 유역은 도로로 침투도량을 설치하였다. 4번은 일반 주택지역으로 빗물통을, 5번은 상업 및 업무지역으로 투수성 포장을 설치하였다. 이에 대한 과정 및 결과를 Fig. 2.19와 Table 2.11에 정리하였다.



Fig. 2.19 Geoje urban drainage catchment subbains.

Table 2.11 Sub basins LID facility for land use

Sub_basin	Land Use	LID facility
1	Apartment and Parking lot	Green Roof and Porous Pavement
2	Commercial and Industrial	Bio-retention
3	Road	Infiltration Trench
4	Residential	Rain Barrel
5	Commercial	Porous Pavement





Ⅲ. 결과 및 고찰

온천천 유역 내에 포함되어 있는 거제 배수분구에 LID 시설 설치 시 가격 대비 효율이 가장 높은 조합 및 설치시의 연간 TP 저감효율을 SUSTAIN 을 이용하여 산정해보았다. 그리고 스케일에 따른 변화를 살펴보기 위해 토지이용상태가 도로인 3번 소유역을 대상으로 최적 LID 규모와 개소수 및 그에 따른 연간 TP 저감효율을 산정해 보았다. 입력 기상자료의 기간은 2002~2011년이며, 출력 결과는 2002~2011년까지의 유입 및 유출유량과 유출농도에 대한 시계열 자료로 세 가지의 시나리오 대해 각각 출력된다. 이때 세 가지 시나리오는 각 현재 조건, 자연 상태 조건, LID 시설 설치 후 조건으로 이를 SUSTAIN 에서는 각각 Post-Developed, Pre-Developed, BMP scenario 로 표현한다.

1. 총량 토지계 배출 부하량 결과

최근 10년(2002~2010년)동안의 수계오염총량관리기술지침을 기반으로 총량 토지계 배출 부하량의 결과는 TP 의 경우 연평균 12.195 kg 로, 관측자료를 바탕으로 계산한 월 유효 강우 배출비 및 월 강우 배출비와 그에 대한 월별 TP 부하량은 Fig. 3.1과 같다.

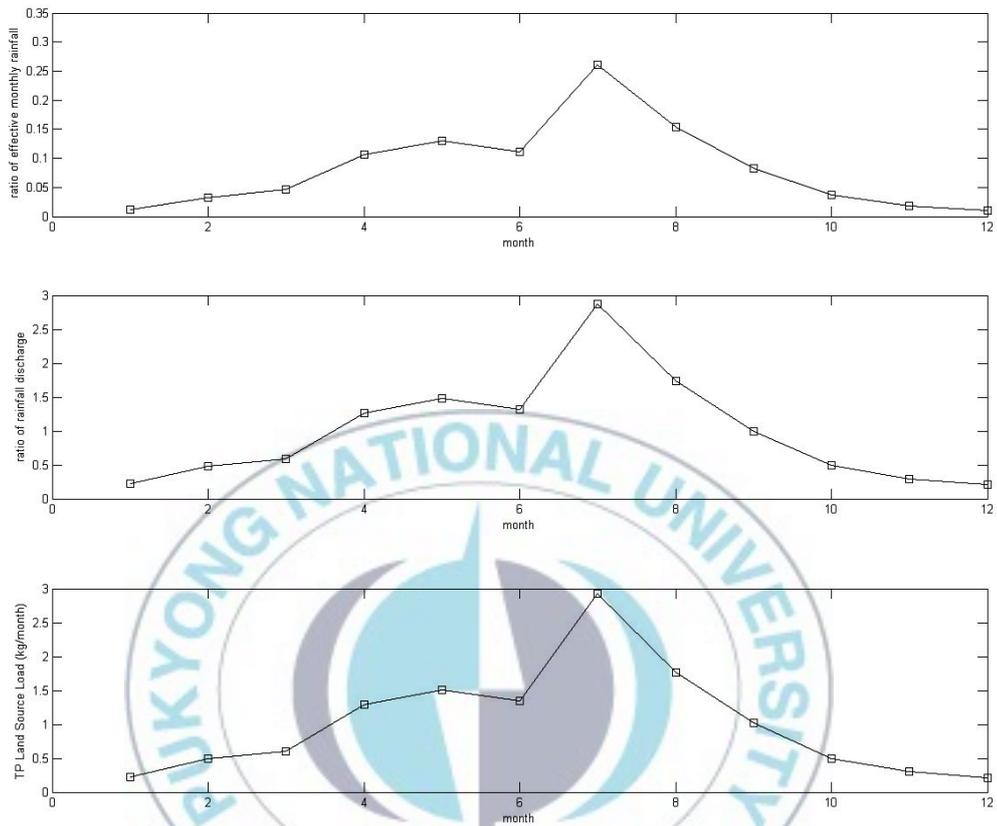


Fig. 3.1 K-TMDL TP load result.

SUSTAIN의 Land module을 사용하여 계산한 연평균 TP 배출 부하량은 12.12774 kg으로 수계오염총량관리기술지침을 기반으로 산정한 총량 토지계 배출 부하량 결과를 잘 재현하였다. Fig 3.2와 Fig 3.2는 각각 SUSTAIN으로 모의한 월 평균 유출량 및 월 평균 TP 배출 부하량을 나타낸다.

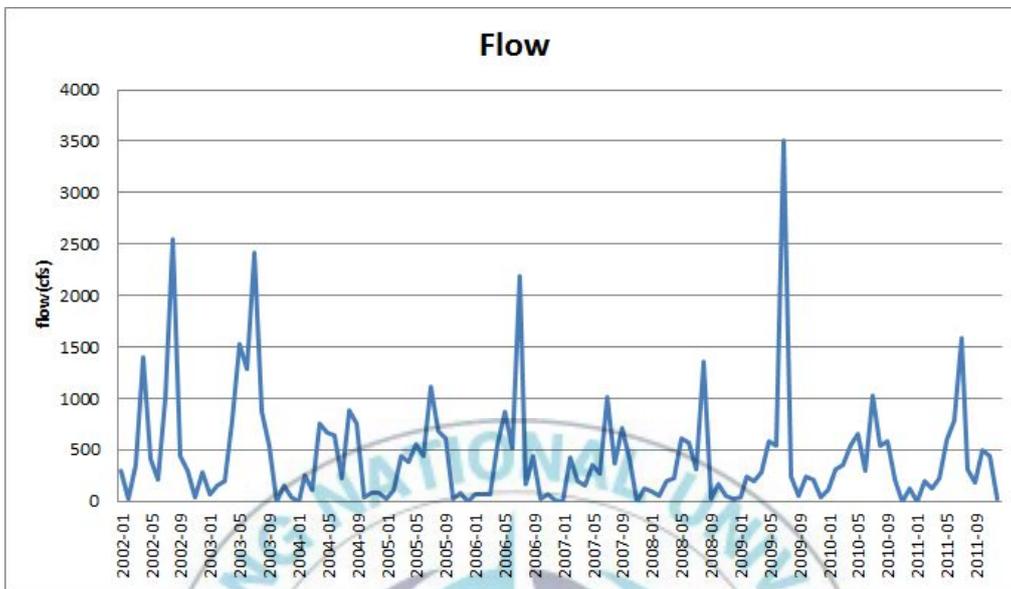


Fig. 3.2 SUSTAIN flow result.

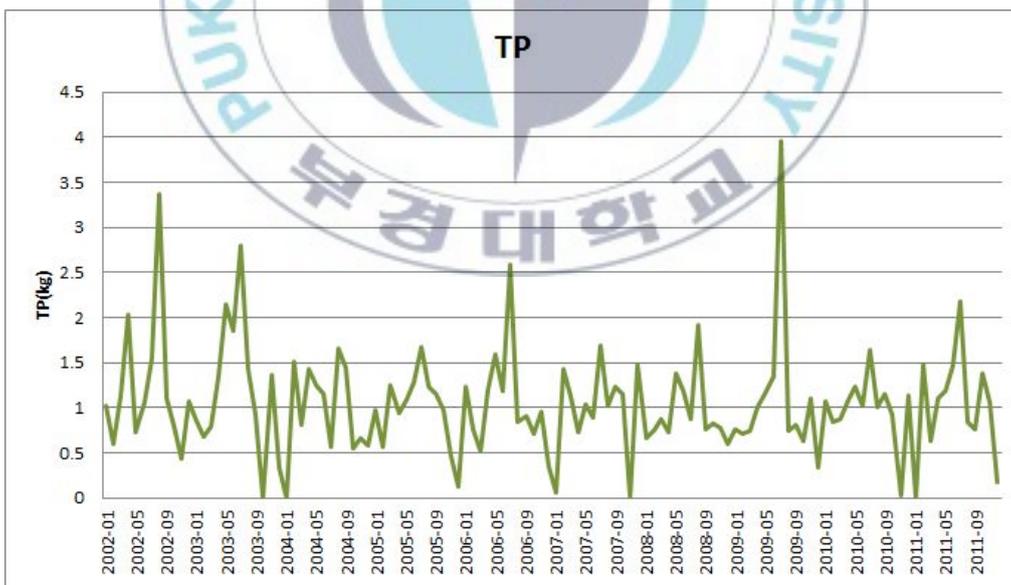


Fig. 3.3 SUSTAIN TP load result.

2. LID 시설 최적 설치 방안 결과

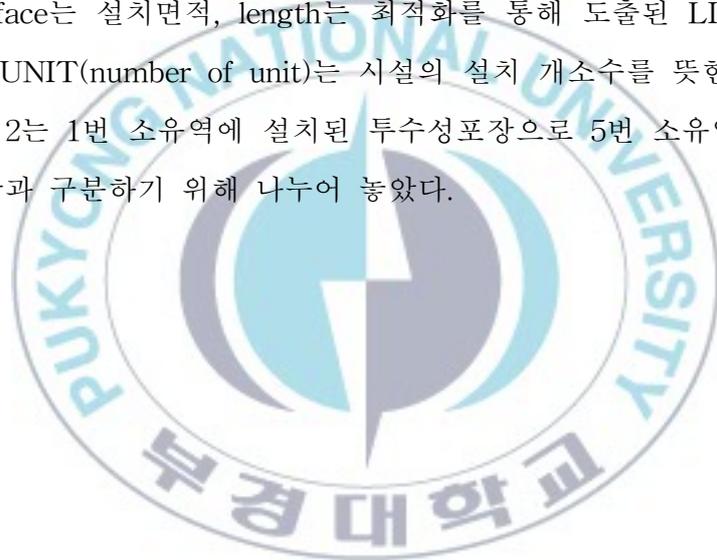
토지이용 상태 별로 나눈 소유역에 각각의 LID 시설을 설치한다고 가정했을 때 거제 배수분구에 대한 최적 가격 대비 효율을 구해보았다. 이때 최적화 결정변수는 시설의 길이와 개소 수만을 설정하였다. Fig. 3.4는 거제 배수분구에 구축한 모델링 현황을 나타낸다. 각 LID 시설에서 배출되는 오염물질 부하량을 한 곳으로 모으기 위한 가상의 junction(J1, 별 표시 부분)을 설치하였으며, 이 지점에서 저감효율의 변화를 살펴보았다.



Fig. 3.4 Geoje urban drainage catchment LID facilities modeling.

SUSTAIN의 최적화 모듈을 사용하여 나온 전체 결과 중 상위 88가지

조합에 대한 저감효율 및 LID 시설 비율을 볼 수 있는 Post-Processor 결과 창을 Fig. 3.5 에 나타내었다. Fig. 3.5의 첫 번째 창에서 나타난 점들은 SUSTAIN에서 제공하는 모든 solution을 나타내며, 그 중 굵은 점들은 최적화 모듈에서 판단 최적 solution을 뜻한다. 두 번째 창은 그 각각의 solution에 따라 달라지는 LID 시설의 비율을 살펴 볼 수 있다. Table 3.1 에는 최적화 모듈에서 Best Solution으로 선택한 44개의 결과, 즉 굵은 점들에 대해 나타내었다. Total Cost(\$는 LID 시설 설치에 들어가는 비용, Total Surface는 설치면적, length는 최적화를 통해 도출된 LID시설의 길이, NUM UNIT(number of unit)는 시설의 설치 개소수를 뜻한다. Porous Pavement 2는 1번 소유역에 설치된 투수성포장으로 5번 소유역에 설치된 투수성포장과 구분하기 위해 나누어 놓았다.



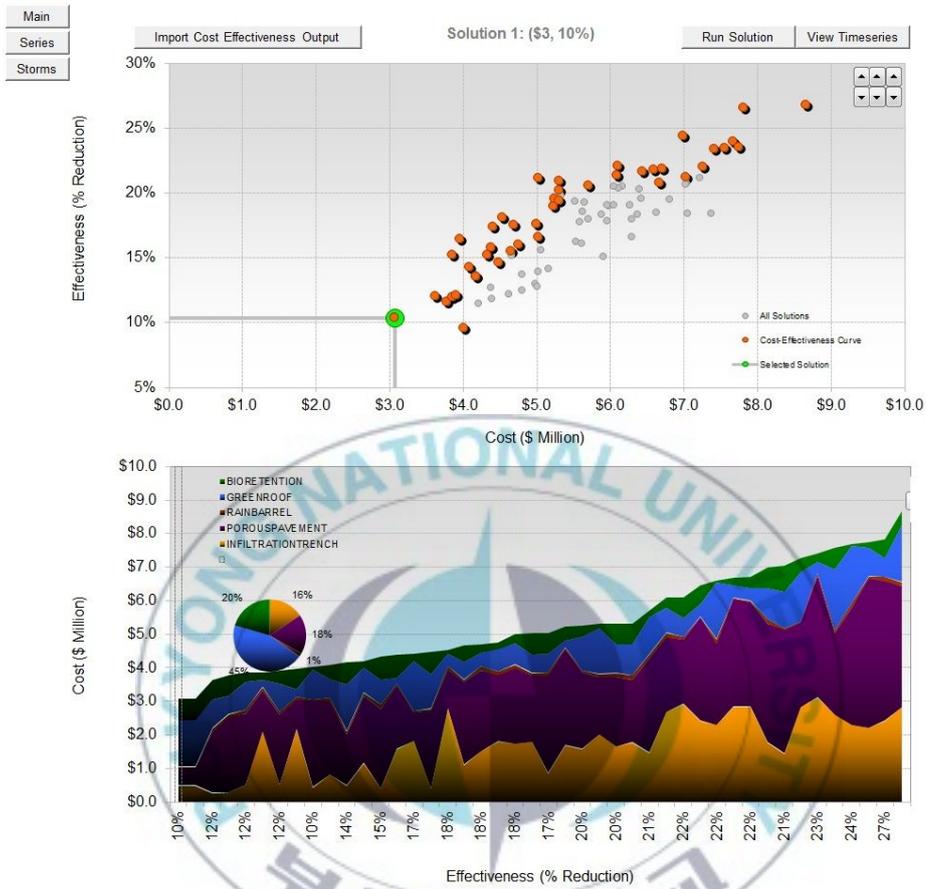


Fig. 3.5 SUSTAIN optimization result.

Table 3.1 SUSTAIN optimization result

NSGA-II - Best population			Green Roof		Bio-retention		Infiltration Trench		Rain barrel	Porous Pavement		Porous Pavement 2	
NO.	TotalCost (\$)	Total Surface Area(ac)	Length	NUM UNIT	Length	NUM UNIT	Length	NUM UNIT	NUM UNIT	Length	NUM UNIT	Length	NUM UNIT
1	7,556,711	2.237315	65	10	45	10	65	25	50	75	1	80	10
2	5,515,753	1.570113	60	3	45	8	67	3	60	70	9	65	13
3	5,014,949	1.461455	65	3	50	9	40	28	40	65	4	65	7
4	6,376,067	1.817823	70	2	55	4	60	27	30	65	7	80	8
5	5,596,929	1.682644	75	10	40	9	49	8	40	65	2	70	10
6	4,652,469	1.3795	70	8	45	1	45	17	40	60	5	65	5
7	5,975,469	1.691252	65	2	50	5	41	19	40	75	7	75	12
8	4,330,840	1.271438	65	4	55	9	41	6	90	65	7	80	5
9	6,590,420	1.932478	75	8	45	1	53	27	90	80	6	65	6
10	5,302,233	1.56093	80	6	50	2	45	28	60	75	3	65	6
11	5,939,660	1.699696	60	3	60	6	54	14	90	80	3	70	15
12	7,017,673	2.019147	65	6	45	8	45	11	60	65	9	75	14
13	5,320,375	1.563032	60	5	50	9	60	19	70	60	8	70	3
14	3,071,267	0.956945	70	7	50	9	60	5	30	65	1	65	2
15	6,361,055	1.861929	70	8	45	5	55	14	70	80	1	75	14
16	4,997,015	1.442738	75	3	50	4	54	20	70	80	2	65	10
17	7,745,447	2.204759	60	5	45	3	53	26	30	70	9	70	14

18	4,689,577	1.34165	70	2	60	3	47	20	80	60	4	70	9
19	3,953,973	1.158613	75	1	55	8	59	23	60	75	2	80	2
20	4,374,687	1.275011	80	4	50	6	54	5	30	80	9	70	3
21	7,813,137	2.23306	65	3	50	8	54	28	80	80	9	65	12
22	3,905,271	1.144114	75	4	40	7	52	6	50	65	3	80	7
23	4,404,969	1.323371	75	7	40	4	42	27	40	75	1	75	3
24	6,150,689	1.808906	75	7	45	8	41	20	40	75	10	65	4
25	5,003,173	1.476793	75	6	50	9	45	3	60	65	2	80	11
26	3,623,773	1.07528	60	5	60	7	56	3	60	65	9	75	1
27	7,035,527	2.032813	65	8	55	2	55	17	30	70	4	80	14
28	3,771,731	1.100841	65	3	55	8	59	3	50	70	3	75	8
29	5,638,689	1.634435	65	6	50	3	40	23	40	60	4	70	11
30	6,401,384	1.812163	65	2	40	1	61	29	20	75	8	75	7
31	7,204,844	2.101533	80	6	50	10	53	17	20	70	6	70	13
32	4,171,893	1.209347	65	4	45	3	66	11	60	60	8	80	3
33	6,100,771	1.776917	60	6	45	5	66	24	50	60	8	75	4
34	5,307,437	1.563068	65	5	45	10	48	23	80	75	4	75	5
35	4,972,264	1.411338	80	2	50	6	45	4	20	65	6	75	13
36	7,251,162	2.124109	75	7	60	5	63	28	10	65	8	65	6
37	5,507,137	1.588664	75	2	55	3	69	29	80	60	1	70	7
38	5,686,169	1.628466	60	1	55	9	68	17	40	75	8	75	6
39	5,895,993	1.713822	75	7	55	4	48	2	60	70	6	65	15

40	4,607,329	1.330487	75	3	60	7	60	2	40	80	8	70	7
41	5,577,613	1.592495	65	3	45	7	56	9	60	70	7	60	14
42	4,526,457	1.305378	65	2	40	2	60	29	80	75	2	65	4
43	5,230,487	1.488968	70	1	45	7	44	24	30	65	2	75	12
44	7,026,364	2.006492	75	3	55	4	62	25	20	75	6	70	12



SUSTAIN에서는 최적 LID 시설에 대해 뚜렷한 답이 아닌 여러 가지 대안을 동시에 제안하므로, 최종적으로는 사용자의 선택이 중요하다. 이때 사용자는 유역의 현실적인 제반사항을 고려하여 최적은 조합을 선택하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 최적화 모듈에서 나온 Best Solution을 바탕으로 최적의 LID시설 규모 및 개소수를 산정하기 위해서 우선 천만달러당 저감효율을 계산하여 천만달러당 저감효율이 가장 높은 조합을 찾아보고자 하였다. 이때 달러 당 효율이 아닌 천만 달러 당 저감효율을 구한 이유는 달러 당 효율을 구할 시 거의 0으로 값이 수렴하기에 시각적인 표현을 위하여 임의로 천만 달러 당 저감효율을 구해보았다. Table 3.2는 각 solution에 대한 천만 달러 당 저감효율을 나타내고 Fig. 3.6은 이를 그림으로 나타내었다.

Table 3.2 Optimal cost-effectiveness

Solution NO.	TotalCost(\$)	Effectiveness	Effectiveness/\$
1	7,556,711	0.234285	0.310036049
2	5,515,753	0.162926	0.295383199
3	5,014,949	0.211365	0.421469731
4	6,376,067	0.203561	0.319257615
5	5,596,929	0.161475	0.28850671
6	4,652,469	0.152578	0.327950639
7	5,975,469	0.190549	0.318886029
8	4,330,840	0.152242	0.351529036
9	6,590,420	0.217657	0.33026264
10	5,302,233	0.194113	0.366097332
11	5,939,660	0.191203	0.321908409
12	7,017,673	0.207205	0.29526153
13	5,320,375	0.198499	0.373092157
14	3,071,267	0.103826	0.338054864
15	6,361,055	0.183789	0.288927939
16	4,997,015	0.17641	0.353030678
17	7,745,447	0.235318	0.303814555
18	4,689,577	0.175659	0.374573147

19	3,953,973	0.164174	0.415213571
20	4,374,687	0.119251	0.272593861
21	7,813,137	0.265404	0.339689901
22	3,905,271	0.121426	0.310927928
23	4,404,969	0.17392	0.394826456
24	6,150,689	0.205522	0.334144758
25	5,003,173	0.139668	0.279158
26	3,623,773	0.120675	0.333009672
27	7,035,527	0.184587	0.26236457
28	3,771,731	0.115801	0.30702434
29	5,638,689	0.193646	0.343423371
30	6,401,384	0.196512	0.306983909
31	7,204,844	0.212065	0.294337253
32	4,171,893	0.135809	0.32553334
33	6,100,771	0.204049	0.334464254
34	5,307,437	0.209598	0.394912856
35	4,972,264	0.130708	0.262873653
36	7,251,162	0.220493	0.304079614
37	5,507,137	0.194391	0.352979802
38	5,686,169	0.180552	0.317528652
39	5,895,993	0.151517	0.256983034
40	4,607,329	0.122965	0.266889204
41	5,577,613	0.178061	0.319243153
42	4,526,457	0.180898	0.399644844
43	5,230,487	0.19015	0.363541609
44	7,026,364	0.207628	0.295497798

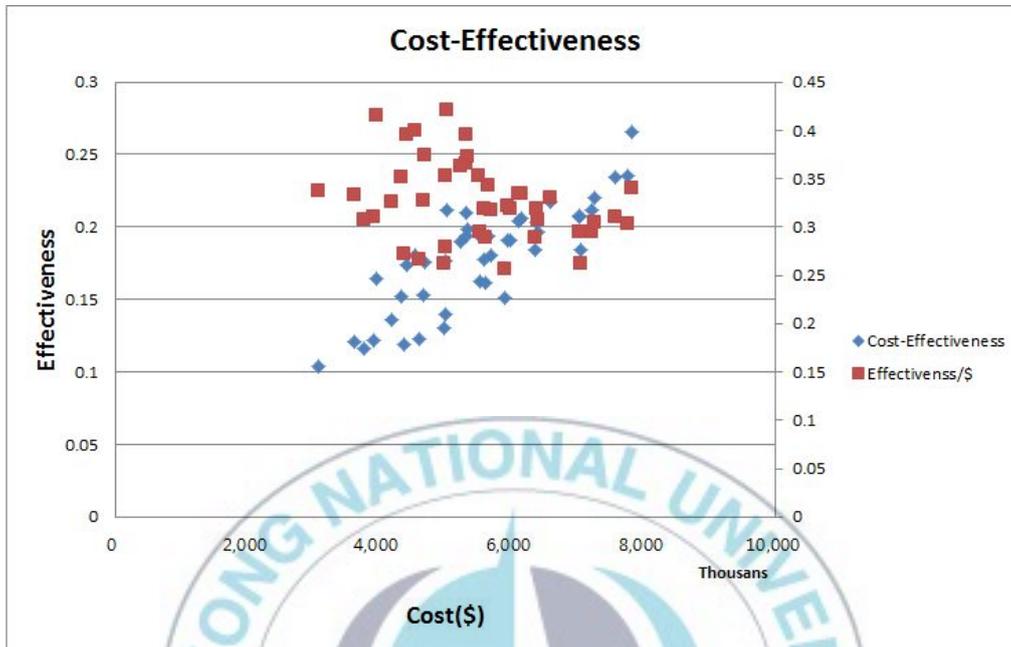


Fig. 3.6 Cost-effectiveness for Geoje urban drainage catchment.

Table 3.2 을 참고하면 천만 달러 당 저감효율은 Table. 3.2의 3번 solution이 가장 높은 것을 알 수 있다. 이를 환산해보면 약 55억 원의 예산으로 연 TP 배출 부하량의 21 %정도를 저감 할 수 있다는 결론이 나온다. 하지만 이러한 단순 계산방법은 달러당 저감효율은 비슷하나 저감효율이 더 높은 solution을 무시 할 수 있다.

따라서 최적 LID 시설 규모 및 개소수 선정을 위해 천만달러당 저감효율이 높은 상위 10개의 solution에 대하여 Table 3.3에 다시 정리하여 보았으며, Fig 3.7은 이를 도시하였다.

Table 3.3 Top 10 of effectiveness per dollar

$E/\$$ NO.	Solution NO.	TotalCost(\$)	Effectiveness	Effectiveness/\$
1	3	5,014,949	0.21136491	0.421470
2	19	3,953,973	0.16417433	0.415214
3	42	4,526,457	0.18089754	0.399645
4	34	5,307,437	0.20959753	0.394913
5	23	4,404,969	0.17391982	0.394826
6	18	4,689,577	0.17565898	0.374573
7	13	5,320,375	0.19849903	0.373092
8	10	5,302,233	0.19411334	0.366097
9	43	5,230,487	0.19014995	0.363542
10	16	4,997,015	0.17640997	0.353031

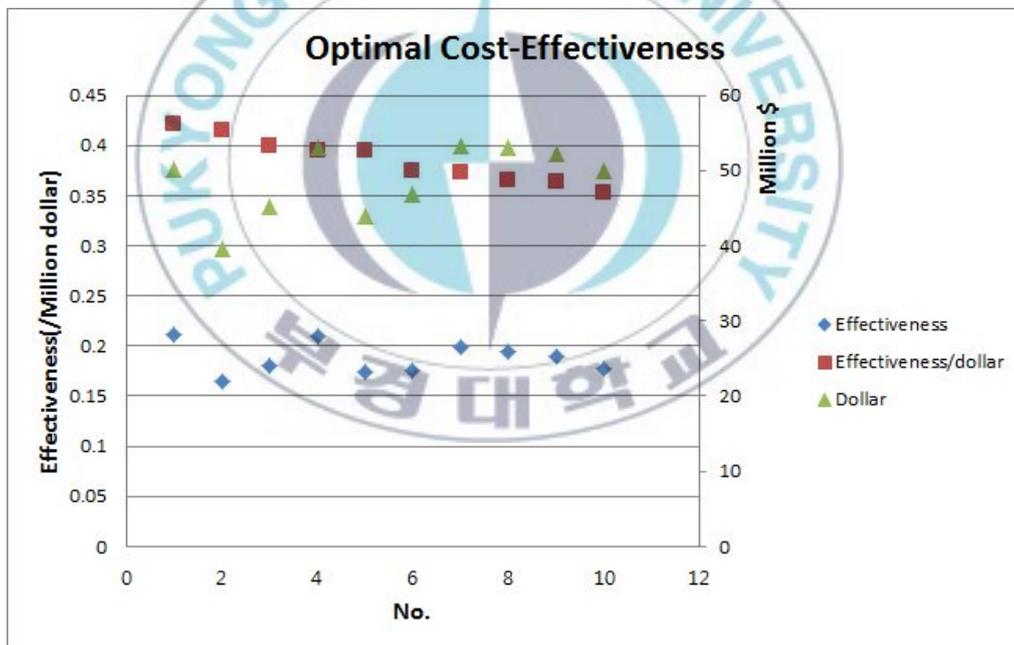


Fig. 3.7 Optimal cost-effectiveness for Geoje urban drainage catchment.

Fig. 3.7을 살펴보면 천만달러당 저감효율이 제일 좋은 3번 solution이 가격대비 효율이 확실히 높은 것을 알 수 있다. 물론 이 또한 예산이라는 변수가 존재하지만, 정책을 결정하는 최종단계에서는 식을 통해 나온 정량적으로 나온 결과를 바로 사용하기도 하지만 대부분 여러 현실적인 제반사항을 고려하여 최종안을 결정하기 마련이다.

따라서 본 연구에서는 절대적인 기준이 아니라 현재 조건에서 가장 가격-효율적이며 가장 높은 저감효율을 갖는 방법을 찾는 것을 최우선 목표로 하여 3번 solution에서 사용되는 LID 시설 조합이 현재 거제 배수분구에 가장 적합한 LID 시설 조합이라고 결정하였다. 결정된 조합 및 그에 대한 비용을 Table 3.4에 나타내었다.

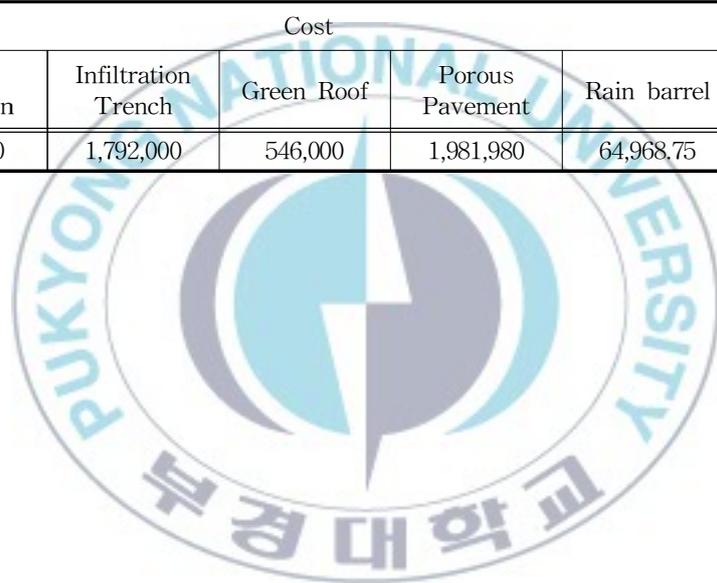
Fig 3.8은 3번 solution을 거제 배수분구에 적용 했을 때 유량 저감효과를 시각적으로 보여준다. 그림 내 제일 상단 창은 2002년부터 2011년 사이의 강우사상을 나타내며, 2번째는 지정한 강우사상의 강우량 변화를 보여준다. 3번째 창은 지정한 강우사상이 발생 시 유량 저감효과를 보여주며, Post developed는 LID 시설 설치 전, 즉 현재의 유량 변화를 보여주며, BMP Scenario는 LID 시설 설치 시의 유량 변화를 보여준다. Pre-Developed condition은 도시화 이전의 산림 지역일 때의 유량 변화를 나타낸다. 그림 내에 Pre-Developed condition의 곡선이 나타나지 않는 것은 소규모 강우사상의 경우 토지이용생태가 산림지역이라면 강수량을 모두 침투시키기 때문이다.

Table 3.4 Optimal LID facilities basic dimension and cost

Green Roof		Bio-retention		Infiltration Trench	
Length	NUMUNIT	2_Length	NUMUNIT	Length	NUMUNIT
65	3	50	9	40	28

Rain barrel	Porous Pavement		Porous Pavement2	
NUMUNIT	Length	NUMUNIT	Length	NUMUNIT
40	65	4	65	7

Cost					TotalCost(\$)
Bio retention	Infiltration Trench	Green Roof	Porous Pavement	Rain barrel	
630,000	1,792,000	546,000	1,981,980	64,968.75	5,014,949



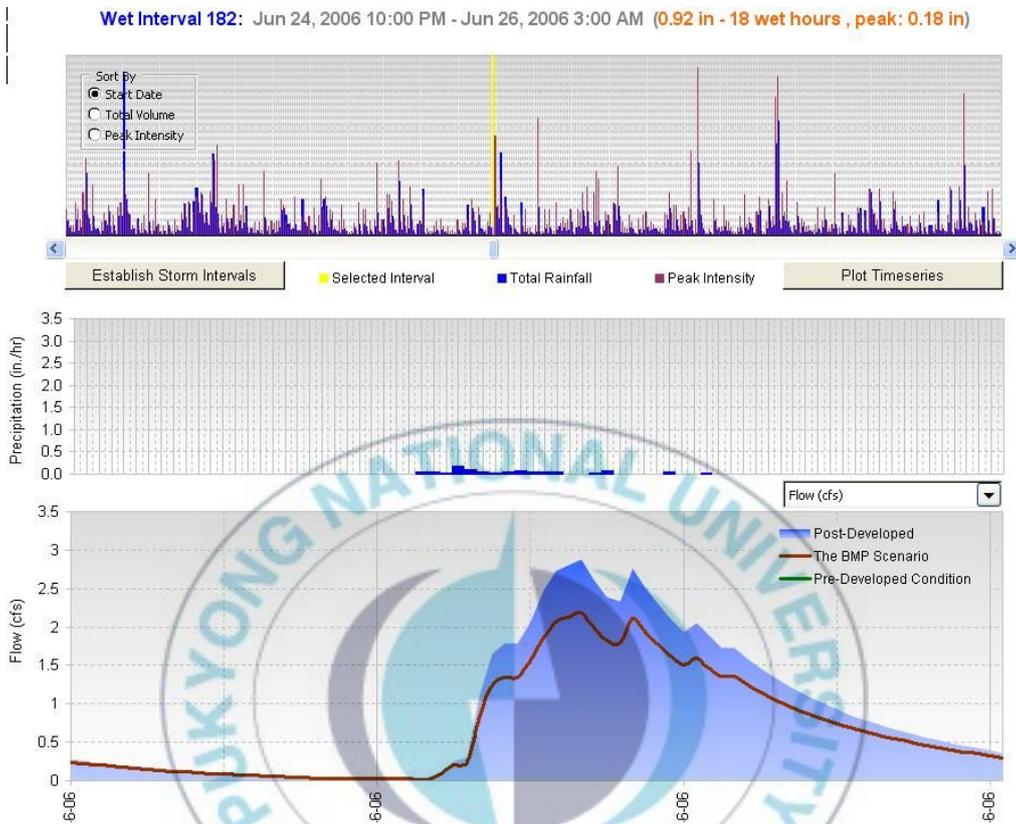


Fig. 3.8 Geoje urban drainage catchment storm event viewer graph.

3. 스케일에 따른 변화 결과

상기 3.2절에서 사용한 매개변수를 그대로 사용하여 3번 소유역만을 따로 최적 LID 시설의 규모 및 개소수를 산정해 보았다. 이때 LID 시설은 침투도랑으로 시설의 길이와 개소수를 결정변수로 하여 최적화를 진행하였다. Fig. 3.9는 3번 소유역에 대한 모델링 현황을 나타낸다.



Fig. 3.9 Subbasin 3 of Geoje urban drainage catchment's LID facilities modeling.

SUSTAIN의 최적화 모듈을 사용하여 나온 전체 결과 중 상위 33가지 조합에 대한 저감효율을 볼 수 있는 Post-Processor 결과 창을 Fig. 3.10에 나타내었다. Table 3.5에는 그 중 최적화 모듈에서 Best Solution으로 선택한 8개의 결과를 나타내었다.



Fig. 3.10 SUSTAIN optimization result for subbasin 3.

Table 3.5 SUSTAIN optimization result for subbasin 3

NO.	NSGA-II - Best population		Infiltration Trench	
	TotalCost(\$)	TotalSurfaceArea(ac)	Length	NUMUNIT
1	64,000	0.022256	40	1
2	179,200	0.046734	56	2
3	448,000	0.116835	56	5
4	448,000	0.116835	56	5
5	640,000	0.116835	40	10
6	852,800	0.290382	41	13
7	1,102,400	0.301663	53	13
8	1,164,800	0.303771	56	13

침투 도랑의 규모 및 개소수를 산정하기 위해 우선 3,2절과 같은 과정을 거쳐 달러당 저감효율을 계산하여 보았다. 이에 대한 결과는 Table 3.6을 나타내었으며 Fig. 3.11은 이 결과를 달러 당 저감효율이 높은 순으로 도시하였다.

Table 3.6 Cost-effectiveness for subbasin 3

$E/\$$ NO.	Solution NO.	TotalCost(\$)	Effectiveness	Effectiveness/\$
1	1	64,000	0.022256	0.347757188
2	6	852,800	0.290382	0.340503799
3	7	1,102,400	0.301663	0.273642271
4	8	1,164,800	0.303771	0.260792591
5	2	179,200	0.046734	0.260792578
6	3	448,000	0.116835	0.260792411
7	4	448,000	0.116835	0.260792411
8	5	640,000	0.116835	0.182554813

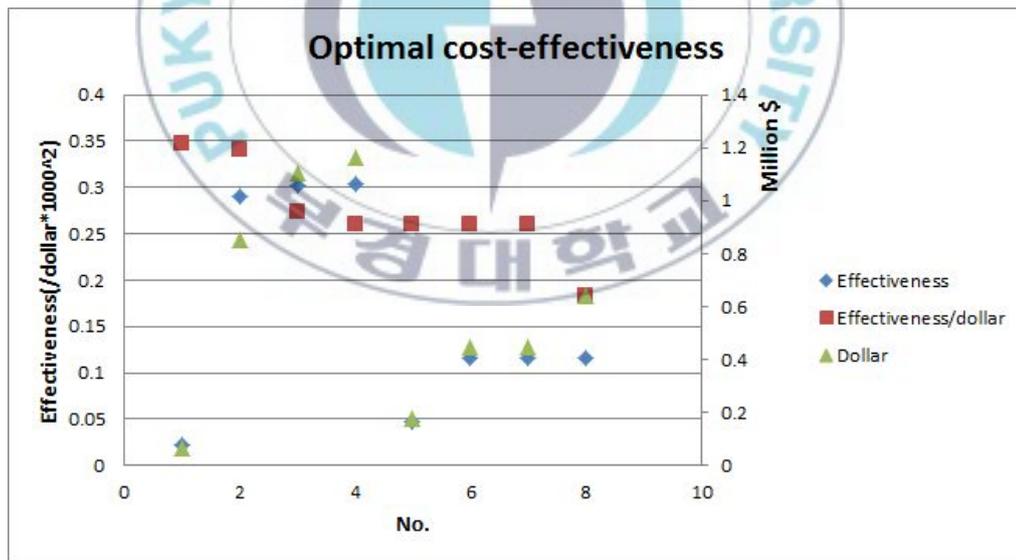


Fig. 3.11 Optimal cost-effectiveness for subbasin 3.

Fig. 3. 11을 살펴보면 첫 번째와 두 번째는 달러당 효율이 거의 비슷하다는 것을 알 수 있으며, 저감효율은 2번째가 즉 6번 solution 가장 높다는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 3번 소유역에 대한 침투도랑의 최적 규모 및 개소수는 6번 solution으로 결정하였다.

Fig 3.8은 6번 solution을 3번 소유역에 적용 했을 때 TP 저감효과를 시각적으로 보여준다. 그림 내 제일 상단 창은 2002년부터 2011년 사이의 강우사상을 나타내며, 2번째는 지정한 강우사상의 강수량 변화를 보여준다. 3번째 창은 지정한 강우사상이 발생시 TP 저감효과를 보여주며, Post developed는 LID 시설 설치 전, 즉 현재의 TP 변화를 보여주며, BMP Scenario는 LID 시설 설치 시의 TP 변화를 보여준다. Pre-Developed condition은 도시화 이전의 산림 지역일 때의 TP 변화를 나타낸다. 그림 내에 Pre-Developed condition의 곡선이 나타나지 않는 것은 소규모 강우사상의 경우 토지이용생태가 산림지역이라면 강수량을 모두 침투 시키기 때문에 강우유출수가 발생하지 않기 때문이다.

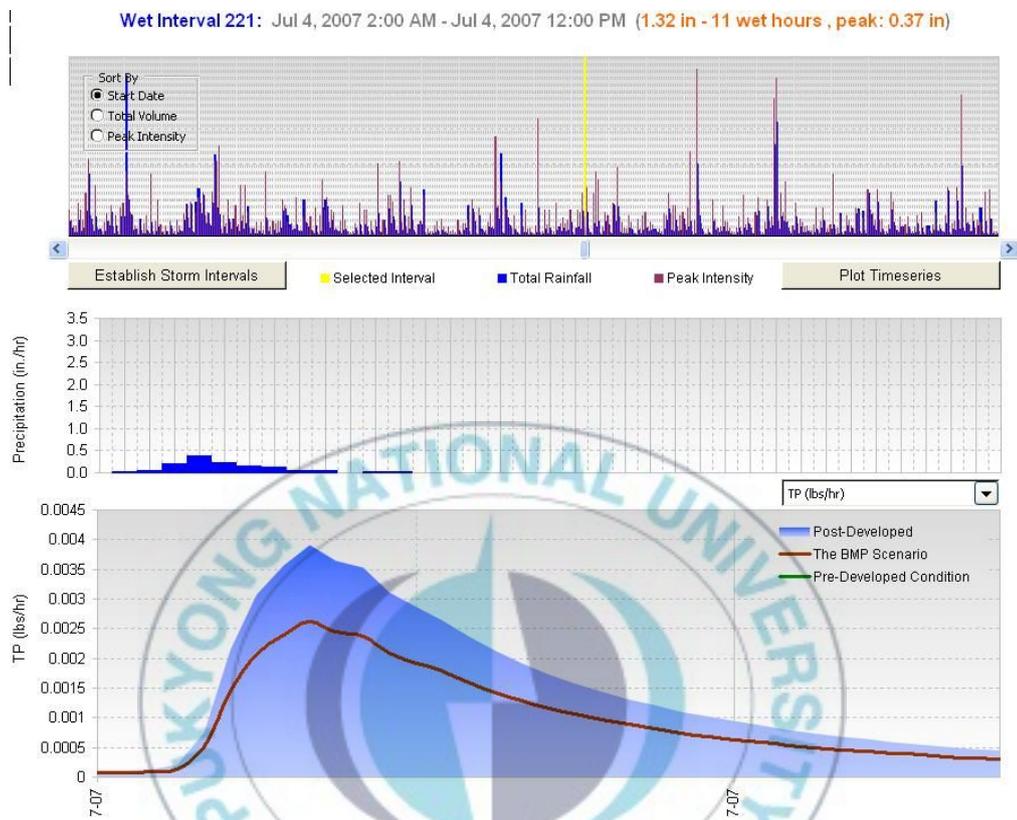


Fig. 3.12 Subbasin 3 storm event viewer graph.

다음 Table 3.7은 거제 배수분구에 대하여 최적화를 했을 경우의 3번 소유역의 침투도랑의 규모 및 개소수와 3번 소유역만 대상으로 최적화를 했을 때의 침투도랑의 규모 및 개소수를 비교해 보았다. 침투도랑의 길이는 각각 40, 41ft로 크게 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다. 하지만 거제 배수분구를 대상으로 했을 때의 최적 개소수는 28개로 3번 소유역만을 대상으로 했을 때의 13개소에 비해 2배 이상 높은 수치를 나타내었다. 이는 거제 배수분구의 TP 저감효율을 높이기 위해서는 가격 대비 효율이 3번 소유역 즉, 도로 쪽에 침투도랑을 많이 설치하는 것이 효율적이지만, 3번

소유역만을 대상으로 했을 때는 비효율적이라는 것을 시사한다. 또한 3번 소유역의 저감효율을 29%에서 43%까지 올리는데 드는 비용이 거의 2배라는 것을 알 수 있다. 이는 오염물질을 저감할 때 일정 수준 이상부터는 저감효율을 높이기 위해 막대한 비용이 소모되는 일반적인 상식에 부합한다고 볼 수 있다.

Table 3.7 Comparison of optimization results

Optimization of subbasin 3 in Geoje urban drainage catchment			
Length	NUMUNIT	Effectiveness	cost(\$)
40	28	43%	1,792,000
Optimization of subbasin 3			
Length	NUMUNIT	Effectiveness	cost
41	13	29%	852,800

IV. 결론

오염원 배출량 및 배출위치, 오염원 배출시기가 상대적으로 명확하여 시설 용량 및 처리방식의 결정 등이 비교적 용이한 점오염원과는 달리, 비점오염원의 경우 오염원 배출위치가 배수분구 전체에 걸쳐 있으며 추계학적 특성이 강한 강우 시에 주로 배출되기 때문에 오염원 배출량의 시간적 공간적 변동성이 매우 큰 특징을 가지고 있다. 즉, 비점오염원은 인위적으로 예측 또는 제어가 불가능한 기상조건과 복잡한 토지이용패턴 등에 많은 영향을 받기 때문에 이를 정량화하는 것에는 매우 큰 어려움이 따르며, 따라서 비점오염원 저감시설의 적절한 크기 및 그 설치 개소수를 결정하는 것에도 매우 큰 어려움이 따르는 실정이다.

이러한 실정을 고려하여 본 연구에서는 LID 시설의 종류, 최적위치 선정, 가격 평가를 제공하는 SUSTAIN이 그에 대한 한 가지 대안으로 제시되었으며, 국내 적용 가능성을 평가하기 위하여 부산 온천천 유역 중 거제 배수분구를 대상으로 가격 대비 최적효율을 나타내는 LID 시설의 규모 및 개소수를 산정해보았다. 뿐만 아니라 스케일에 따른 최적화의 변화를 보기 위해 토지이용상태가 도로인 3번 소유역에 대해서 LID 시설의 규모 및 개소수를 산정해보았다. 기상자료는 기상청 부산지점의 자료를 사용했으며 최대한 국내 실정을 반영하기 위해서 국내에서 작성된 LID 관련 보고서 및 정부에서 제시하는 관리지침을 참고 및 적용하였다. 부족한 정보는 최대한 관련 문헌 등을 참고하여 현실적인 값을 넣었으며, 몇몇 부족한 정보에 대해서는 SUSTAIN 매뉴얼에서 추천하는 값을 입력하였다.

SUSTAIN의 최적화 모듈을 통해 산정된 가격 대비 최적 효율을 나타내

는 LID 시설의 규모 및 개소수를 산정해 보았으며, 이를 적용했을 때 거제 배수분구에 약 55억의 예산을 투자하여 거제 배수분구의 연간 TP 부하량의 21%를 저감할 수 있었다. 또한 토지이용상태가 도로인 3번 소유역에 대해 최적화 모듈을 통해 산정된 결과를 적용했을 때는 약 9억 4천만원의 비용을 투자하면 3번 소유역의 연간 TP 부하량의 29%가 저감된다는 결과가 도출 되었다.

스케일에 따른 변화 결과를 알아보기 위해 거제 배수분구에 대하여 최적화를 했을 경우와 3번 소유역만을 대상으로 최적화를 했을 때의 결과, 최적 침투도랑의 길이는 각각 40, 41 ft로 침투도랑의 최적 길이는 40.5 ft 정도라는 것을 확인할 수 있었다. 최적 개소수의 경우 각각 28개소와 13개소로 거제 배수분구의 TP 저감효율을 높이기 위해서는 3번 소유역에 LID 시설을 많이 설치하는 것이 효율적이지만, 소유역 3번만을 대상으로 했을 때는 비효율적이라는 것을 알 수 있었다.

이러한 SUSTAIN의 적용 가능성 분석결과는 주어진 예산에 따라 최적의 효과를 기대할 수 있는 LID 시설의 설치에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 또한 LID 개념을 도입하여 도시지역의 수문순환구조를 자연 상태의 수문순환구조로 복원하려는 여러 가지 시도가 일어나고 있는 시점에서, 앞으로 장기 유출 및 장기간 유역 오염원 유출 분야 뿐만 아니라 도시 수문 및 비점, LID 분야에서 한 가지 대안이 될 수 있을 것이라 기대된다.

하지만 아무리 좋은 모형이라도 해도 잘못된 정보가 입력되면 잘못된 결과가 도출되기 마련이다. 현재 우리나라의 경우 LID 시설에 대한 정보가 각 보고서 별로 상이하며, 관련 정책 또한 아직 명확히 확립되지 못한 실정이다. 또한 LID 시설과 비점오염원에 대한 모니터링 자료 역시 전무한 실정이다. 본 연구에서 선정한 배수분구 또한 관측자료가 존재하지 않기에 이에 대한 대안으로 총량 토지계 배출 부하량에 맞추어 모델 매개변수를

검·보정하였다. 이는 추후 각종 모니터링 자료 등을 통하여 토지이용상태 별로 적절한 매개변수 범위 등이 도출되어야 할 것이며, 하루 빨리 국내 실정에 맞는 LID 시설 기본정보 및 비점오염원 관리 정책이 확립되어야 할 것이라 판단된다.

마지막으로 본 연구에서는 최적 LID시설의 개소수 및 규모를 결정하기 위해서 SUSTAIN에서 제공하는 여러 개의 Best solution 중에서 가장 달러당 효율이 높은 solution을 선택하여 대상 지역에 적용하여 보았다. 하지만 이러한 달러당 효율은 단순한 수치값으로 현장의 여러 가지 제반사항을 고려하지 못했다는 단점을 내재하고 있다. 따라서 이에 대해 누구나 공감할 수 있으며, 여러 가지 현장의 다양성 및 제약조건을 반영한 방법에 대한 추후 연구도 필요할 것이라 판단된다.



참고문헌

- 국립환경과학원. (2008). 제2단계 수계오염총량관리기술지침.
- 국립환경과학원. (2010). 수질오염 총량관리를 위한 개발사업 비점오염원 최적관리지침.
- 김상단, 임용균, 김진관, 강두기, 서성철, 이재관. (2010). “도시유역에서 공간적으로 분포된 소규모 강우 유출수 관리시설의 최적설치위치선정.”, 수질보전 한국물환경학회지, 26권, pp. 986-993.
- 박정규, 박영기. (2008). “도시화의 영향에 따른 유출변화특성에 관한 연구.” 환경관리학회지, 제 14권, 제 1호, pp.9-16.
- 이범희. (2006). “유전자알고리즘을 이용한 도시화 유역에서의 유출 관리 방안 연구.” 한국지구물리학회지, 제 9권, 4호, pp. 321-331.
- 이정훈, 조선주, 김진관, 서성철, 김상단. (2012). “비점오염원 저감 LID 시설의 최적설치위치 결정 및 효율 정량화를 위한 분포형 수문모형의 개발.” 한국방재학회논문집, 제 12권, 4호, pp. 215-223.
- 장수형, 이지호, 유철상, 한수희, 김상단. (2008). “우수유출저감 시설의 최적위치 결정.” 수질보전 한국물환경학회지, 24권, pp. 180-184.

조덕준. (2007). “위험도 기반 지역별 정규 CSOs 곡선 설계에 관한 연구.”
한국수자원학회 논문집, **39**, pp. 575-581.

최대규, 김진관, 이재관, 김상단. (2011). “지표면의 시공간적 변화를 고려한
비점오염원 저감저류지 최적용량산정.” 수질보전 한국물환경학회지, **27**
권, pp.9-18.

최치현, 김응석, 김진관, 김상단. (2011a). “유수지 및 침투기반 저류지 복합
설계기법의 온천천 유역 적용.” 대한토목학회논문집, **31**권, pp.99-108.

최치현, 최대규, 이재관, 김상단. (2011b). “도시 물 순환 건전성을 위한 유
수지와 침투기반 저류지의 복합설계기법.” 대한환경공학회논문집, **33**권,
pp.1-8.

최치현, 박무중, 백천우, 김상단. (2011c). “비모수적 추계학적 일 강우 발생
기 기반의 빗물이용시설 신뢰도 평가모형의 부산광역시 해운대 신시가
지 적용.” 수질보전 한국물환경학회지, **27**권, pp.634-645.

한수희, 박무중, 김상단. (2008). “3변수 혼합 지수 확률밀도함수를 이용한
도시 강우유출수 포착곡선의 작성.” 수질보전 한국물환경학회지, **24**(4),
pp. 430-435.

환경관리공단. (2009). 도시지역 비점오염원 제로화 사업 타당성 조사보고
서.

환경부. (2009). LID 기법을 활용한 자연형 비점오염원 관리방안 마련.

Behera, P. K., Papa, F. and Adams, B.J., (1999). "Optimization of regional storm water management system." *Journal of Water Resources Planning and management*, **125**, pp. 107-144.

Bicknell, B.R., J.C. Imhoff, J.L. Kittle, Jr., T.H. Jobes, and A.S. Donigian, Jr. (2001). "Hydrological Simulation Program-FORTRAN, Version 12, User's Manual." U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, GA., in cooperation with U.S. Geological Survey, Water Resources Division, Reston, VA.

Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan. (2002). "A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA II." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **6**(2):182-197

Farahmand, T., Sean, W.F., and Quilty E.J. (2007). "Detention and visualization of storm hydrograph changes under urbanizaion : An impulse response approach." *Journal of Environmental Management*, Vol. **85**, pp. 93-100.

Glover, F., M. Laguna, and R. Marti. (2000). "Fundamentals of Scatter Search and Path Relinking. Control and Cyvernetics." **29**(3):653-684

Guo, J. C. Y. and Urbonas, R. B., (1996). "Maximized detention volume

- determined by runoff capture ratio.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122, pp. 33-39.
- Guo, J. C. Y. and Urbonas, R. B., (2002). “Runoff Capture and Delivery Curves for Storm-Water Quality Control Designs.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, **128**, pp. 208-215.
- Huber, W.C., and R.E. Dickinson. (1988). “Storm Water Management Model Version 4, User’s Manual.” EPA 600/388/001a (NTIS PB88-236641/AS). U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
- Kim, S. and Han, S. (2010). “Urban Stormwater Capture Curve Using Three-Parameter Mixed Exponential Probability Density Function and NRCS Runoff Curve Number Method.” *Water Environment Research*, **82**, pp. 43-50.
- Laguna and Marti. (2002). “The OptQuest Callable Library to Appear in Optimization Software Class Libraries. eds. S. Voss and D.L.” Woodruff, pp. 193-218. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA.
- Lee, J.G and Heany, J.P. (2003). “Estimation of urban imperviousness and its impacts on storm water system.” *Journal of water resource*, American Society of Civil Engineering, Vol. **129**, No. 5, pp. 419-426.

Maine Dept. of Environmental Protection. (1995). "Stormwater management for Maine: best Management practices." Maine Dept. of Environmental Protection Nonpoint Source Training and Resource Center.

Pappas, E.A., Smith, D.R., Huang, C., Shuster, W.D., and Bonta, J.V. (2007). "Impervious surface impacts to runoff and sediment discharge under laboratory rainfall simulation" *Catena*, Vol. **72**, pp. 146-152.

Perez-Pedini, C., Limbrunner, J. and Vogel, R. (2005). "Optimal location of infiltration-based best management practices for storm water management." *Journal of Water Resources Planning and Management*, **131**, pp. 441-448.

Rawls, W.J., D.L. Brakensiek, and N. Miller. (1983). "Green-Ampt infiltration parameters from soils data." *Journal of Hydraulic Engineering*, **109**(1), pp.62-70.

Tetra Tech and USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). (2002). "The Loading Simulation Program – C++(LSPC) Watershed Modeling System – User's Manual."

USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). (1983). "Results of the Nationwide Urban Runoff Program (NURP)." Vol. 1, NTIS PB 84-185552), U.S. Environmental Protection Agency, Water Planning

Division, Washington, DC.

Zhen, X., and S.L. Yu. (2004). "Optimal location and sizing of stormwater basins at watershed scale." *Journal of Water Resources Planning and Management*, **130**(4), pp.339-347.

