

SWMM-LID를 이용한 저탄소 녹색마을의 LID-분산형 빗물관리 계획에 따른 물순환 효과 분석

Analysis of Water Cycle Effect by Plan of LID-decentralized Rainwater Management Using SWMM-LID Model in a Low-carbon Green Village

이정민¹ · 현경학² · 이윤상³ · 김정곤⁴ · 박용부⁵ · 최중수⁶

Jung-Min Lee¹, Kyoung-Hak Hyun², Yun-Sang Lee³, Jung-Gon Kim⁴, Yong-Boo Park⁵ and Jong-Soo Choi⁶

(Received September 5, 2011 / Revised October 5, 2011 / Accepted October 26, 2011)

요 약

신도시 A에 저탄소 녹색 마을(약 40만²)을 개발하고자 한다. 저탄소 녹색 마을의 조성을 위해서는 수문 순환의 복원 또는 물순환의 복원은 필수적이다. 저탄소 녹색 마을의 자연계 물순환 복원을 위해 LID-분산형 빗물 관리 시설의 설치를 계획하였다. 물순환에 미치는 영향 분석은 저탄소 녹색 마을 개발 이전과 개발 후, 그리고 LID 시설(빗물정원, 인공습지, 빗물이용시설 등)을 설치한 후의 조건에서 EPA에서 개발된 SWMM-LID 모델을 이용하여 수행하였다. 개발 전의 침투 영역의 특성, 개발 후의 상당한 녹지 공간 탓으로, 수문 순환을 복원하기 위한 LID 설치 계획은 뚜렷한 효과를 보여주지 않고 있다. 그러나 LID 시설 설치에 의한 물순환의 가능성을 볼 수는 있었다. 이는 본 연구에서 제시한 LID 시설의 설치 계획이 해당 개발 지역의 물순환을 위해서는 더 확대되어야 함을 의미한다.

주제어 : 물순환 계획, 빗물정원, 인공습지, 빗물이용시설, 침투형 홈통받이

ABSTRACT

There was a plan to develop a low-carbon green village(approximately 400,000²) in A city, a new town. Restoration of water cycle is essential for creation of the low-carbon green village. Therefore, installation plan of LID-decentralized rainwater management facilities for natural water cycle was established for creation of the low-carbon green village. Analyses on effect of the water cycle were performed in conditions of before, after developing the low-carbon green village and after installing the LID facilities(rain garden, constructed wetland, rainwater harvesting facility, etc.) using SWMM-LID model developed by EPA. Due to the characteristic of permeable area before development and significant green spaces after development, installation plan of LID facilities to restore the water cycle did not show an obvious effect. However, potential of the hydrological cycle could be seen by the installation of the LID facilities.

Keywords: Water cycle plan, Rain garden, Constructed wetland, Rainwater harvesting facility, Infiltration splash block

1. 서 론

기후 변화와 급격한 도시화에 따른 유역 내 불투수 면적의 증가는 갈수기 하천유량을 감소시켜 건천화를 유발하고, 건천화에 따른 유지유량의 부족은 수질오염 증가 등의 문제를

초래한다. 또한 2010년과 2011년의 집중강우로 인한 도시지역 침수피해의 주요한 원인이기도 하다.

이러한 문제 해결을 위한 방안으로 개발 이전의 수문 순환 상태에 최대한 근접하도록 개발하여 개발로 인한 영향을 최소화 하는 저영향 개발(LID : Low Impact Development)이 있다. 이

본 연구는 ‘아산탕정 물순환 그린도시 조성방안 연구(2010)’와 ‘LID 기술을 이용한 홍수저감 효과분석’ 연구 결과의 일부임.

1) 토지주택연구원 수석연구원(주저자: andrew4502@lh.or.kr)

2) 토지주택연구원 수석연구원(교신저자: khhyun@lh.or.kr)

3) 토지주택연구원 수석연구원, U-Eco City연구단장

4) 토지주택연구원 수석연구원

5) 토지주택연구원 수석연구원

6) 토지주택연구원 수석연구원

는 개발 이전의 수문학적 체계를 유지하거나 향상시키기 위해 토지 계획을 고려하는 빗물관리 방식이다. 또한, 발생원과 그 가까운 곳에서 빗물을 관리함으로써 지표유출과 오염부하를 줄이는 시설과 그 관리방법이기도 하다(<http://www.lowimpact-development.org>; U. S. EPA, 2007). 즉, 투수성 포장, 침투 트렌치, 빗물통, 식생 수로 등의 시설을 설치하고, 지형을 이용함으로써 자연적인 물순환에 부응하면서 빗물 순환을 복원할 수 있는 방법이다.

개발로 인한 영향을 최소화하도록 빗물을 관리하는 저영향 개발(LID)은 발생원 관리(Source Control) 또는 분산형 빗물관리(Decentralized Rainwater Management)와 비슷한 개념의 빗물관리이다(현경악과 이정민, 2010). 이러한 LID-빗물관리를 위해 설치되는 침투시설 등의 효과를 분석하는 연구 등이 그동안 국내외에서 진행되었다. 이정민(2007)은 투수성포장과 침투트렌치의 기능이 추가된 SWMM-GE(Storm Water Management Model -Groundwater Enhanced)를 개발하였다. Akan(2002)은 우수유출 저감을 위해 Green-Ampt 침투식을 이용한 침투트렌치의 규모 결정의 절차를 제시하였다. 미국의 몇몇 주 정부에서는 강우-유출 관리를 위한 매뉴얼을 제공하고 있는데, 침투트렌치, 침투저류지 등과 같은 침투중진 시설의 설계에 관한 내용을 포함하고 있다(NC DEM, 1993; NY DEC, 2003). 미국 EPA에서는 여러 빗물관리 시설에 대한 해석이 가능한 SWMM(Stormwater Management Model)-LID 모형을 개발하였다.

본 연구 수행을 위해 신도시 개발 지구 내 저탄소 녹색마을의 물순환을 복원하기 위한 LID-분산형 빗물관리 계획을 수립하였다. 본 연구에서는 이러한 LID-분산형 빗물관리 계획에 의해 LID 시설을 적용하는 경우 물순환에 미치는 영향을 검토하고자 한다. 이를 위해 먼저 저탄소 녹색마을 지구의 개발 전·후 유출 특성을 분석하였으며, 분석에는 SWMM-LID 모형을 사용하였다.

2. SWMM-LID 모형

SWMM-LID 모형은 SWMM 모형에 LID 빗물관리시설의 수문영향 분석이 가능하도록 추가 수정 개발(2010)된 것이다. SWMM-LID 모형은 기존 SWMM 모형에 빗물정원, 인공습지, 침투트렌치, 침투정, 식생도랑 및 투수성포장 등의 LID 빗물관리시설 모의가 가능하도록 개발되었다. 즉, 물순환 및 LID 시설의 설치에 따른 정량적인 수문영향 평가가 가능하다. SWMM-LID 모형의 유출 개념은 그림 1과 같다.

적용이 가능한 대상 유역은 도시유역, 인위적 배수계통을 갖는 소유역 등이다. 시간적 특성은 단일, 연속강우에 의한 계산이 가능하며, 강우간격은 임의로 설정할 수 있다. 연산시간 간격도 강우사상에 대해 임의로 조절이 가능하다. 공간적

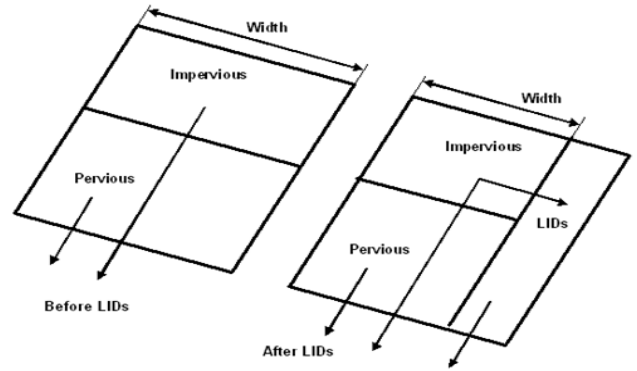


그림 1. SWMM-LID 모형의 지표면 유출 개념도

특성은 소배수유역에서 큰 배수유역까지 적용이 가능하다. 물리적 특성으로 유출은 강우와 유출로 발생하고 지표면 유출은 비선형 저류방정식을 사용한다. SWMM 모형에서 침투량 산정에는 Horton식과 Green-Ampt식을 이용한다. 수로와 관로에 대해 RUNOFF 블록은 비선형 저류방정식, TRANSPORT 블록은 Kinematic 방정식, EXTRAN 블록은 Dynamic 방정식과 연속방정식, 저류추적방법은 수표면이 평형하다고 가정한 수정 Pulse 방법을 사용한다.

3. SWMM-LID 모형 적용

3.1 대상유역 현황

아산 탕정 신도시는 충남 천안시 불당·백석·신방동, 아산시 배방면, 탕정면 일원을 대상으로 하는 택지개발 사업이다. 면적 5,170,487m²로 남북 방향으로 매곡천이 흐르고, 대상지 남쪽에는 곡교천과 천안천이 합류하고 있다. 동서쪽에는 완만한 표고의 산지가 형성되어 있으며, 매곡천 등 하천 주변에 충적층이 넓게 분포하고, 그 주변에 편마암 등의 분포하고 있다(대한주택공사 주택도시연구원, 2008; 국토해양부, 2009).

아산탕정 신도시 개발 지구 내 저탄소 녹색마을 유역은 현재 불투수 면적이 0.8%인 농업지역이다. 저탄소 녹색마을 유역의 현재 토지이용상태는 그림 2와 같다.

이 지역을 저탄소 녹색마을로 조성할 계획이며, 토지이용 계획은 다음과 같다. 공동주택 및 공원복합(분양)의 면적은 전체 면적의 46.73%인 185,792m²이고, 공동주택 및 공원복합(임대)은 49,247m²이다. 단독주택은 20,596m²이고, 학교는 16,534m², 녹지 96,384m², 도로 및 기타는 29,051m²이다.

본 연구대상유역인 아산탕정 저탄소 녹색마을 계획도는 그림 3과 같다. 개발 전·후의 불투수율을 비교하면 개발 전 0.8%에서 개발 후 75.4%로 약 70% 이상 증가하였다.

3.2 개발 전·후 모델링 결과

본 절에서는 대상유역에 대해 SWMM-LID 모형으로 2000



그림 2. 저탄소 녹색마을 개발 전 토지이용



그림 3. 저탄소 녹색마을 개발 계획도

표 1. SWMM 모형 보정 결과

일시	유량(m ³ /s)		상대오차(%)
	Observed	Simulated	
2010. 08.10	0.212	0.213	0.5
2010. 08. 11	0.068	0.059	13.2
2010. 08. 11	0.063	0.067	6.3

표 2. 개발 전·후 지표유출량 물순환 비교

	강우량 mm (%)	침투량 mm (%)	지표증발량 mm (%)	지표 유출량 mm (%)
개발 전	1,233.0 (100)	882.2 (71.5)	95.4 (7.7)	255.2 (20.8)
개발 후	1233.0 (100)	211.6 (17.2)	208.5 (16.9)	812.6 (65.9)

표 3. 개발 전·후 지하수 유출량 물순환 비교

	지하수 침투량 mm (%)	지하수 유출량 mm (%)	저류량 mm (%)	상·하층부 증발산량 mm (%)	대수층 침투량mm (%)
개발 전	882.2 (71.5)	524.0 (42.4)	24.5 (2.0)	332.9 (27.0)	0.8 (0.1)
개발 후	211.6 (17.2)	124.5 (10.1)	19.9 (1.6)	66.9 (5.4)	0.6 (0.1)

부 증발산량은 332.9mm이고, 대수층 침투량은 0.8mm이다. 개발 후 지하수 침투량은 211.6mm, 유출량은 124.5mm이며, 저류량은 19.9mm, 상·하층부 증발산량과 대수층 침투량은 각각 66.9mm, 0.6mm로 나타났다.

토지이용에 따른 유출변화를 살펴보면 지표 유출량은 개발전은 20.8%에서 개발 후 65.9%로 증가하였고, 지하수 유출량은 개발 전 42.4%에 비해 개발 후 10.1%로 감소하였다.

3.3 LID-분산형 빗물관리 계획 적용에 따른 모델링 결과

3.3.1 LID-분산형 빗물관리 계획

저탄소 녹색마을 지구에 LID-분산형 빗물관리 계획을 수립하였다. 본 지구에 적용을 계획한 LID 시설은 도랑, 침투형 홈통받이, 소형 빗물정원, 대형 빗물정원, Bio-retention, Mulden-regolen, 인공습지, 수로 및 빗물이용시설 등이다.

저탄소 녹색마을 물순환 복원을 위한 LID-분산형 빗물관리 계획의 적용 기본 방향은 다음과 같다.

- ① 기본적으로 시각적인 빗물관리시스템(빗물정원, 도랑, 물덴리골렌 등)을 적용한다.
- ② overflow 방지, 안전을 위해 우수관으로 연결을 확보한다.

년에서 2009년까지 10년 동안의 장기유출 연속모의를 수행하였다.

모형의 보정은 실측한 유량자료를 사용하였으며, 측정된 유량과 모형의 보정을 통한 유량은 표 1과 같다(현경학 외, 2010). 오차의 범위는 0.5~13.2 %로 보정은 적절하다고 판단된다.

SWMM-LID 모형을 이용하여 대상유역에 대한 개발 전과 후의 유출특성을 분석하였다. 개발 후 유출특성 분석은 개발 전과 변경된 토지이용계획의 불투수율을 이용하였다.

본 시범지구 대상유역인 저탄소 녹색마을 유역의 개발 전·후 지표수, 지하수유출 및 수문순환인자에 대한 변화를 살펴보고자 물순환 분석을 수행하였다. 모든 값은 10년 평균치로 나타내었다. 표 2와 표 3에 그 결과를 나타내었다.

먼저 개발 전 지표유출량을 살펴보면, 강우량 1,233.0mm에 침투량은 전체 강우량의 71.5%인 882.2mm, 지표증발량은 95.4mm, 지표 유출량은 255.2mm이다. 개발 후의 침투량은 전체 강우량의 17.2%인 211.6mm이며, 지표증발량은 208.5mm, 지표 유출량은 812.6mm이다.

지하수 유출량을 살펴보면, 개발 전 지하수 침투량과 유출량은 각각 882.2mm, 524.0mm, 저류량은 24.5mm, 상·하층

- ③ 불투수면의 빗물은 일단 빗물관리시설을 거친 후 우수관으로 유입되도록 한다.
- ④ 공동주택단지 옥상우수를 1차적으로 받는 홈통받이는 침투형 홈통받이로 함을 원칙으로 한다.
- ⑤ 침투형 홈통받이에서 단지 내 지선관으로 유출되는 빗물의 경로는 식생도랑의 설치를 원칙으로 한다. 또한, 판상형 단지 외의 단지에는 소형 빗물정원과 연계하여 설치함을 원칙으로 한다.
- ⑥ 완충녹지대에는 물덴리골덴의 설치를 추진한다.
- ⑦ 판상형 단지 중앙부에는 대형 빗물정원 설치를 원칙으로 한다. 단, 빗물정원의 흠탕물 방지를 위해 빗물정원 주변에 자갈과 잔디 식재 필요로 한다.
- ⑧ 3개의 진입로 끝부분의 round about에는 각각 bio-retention을 설치함을 검토하도록 한다.
- ⑨ 녹색마을 중앙부에 매곡천 쪽으로 수로를 조성(누수차단막 설치)하고, 양쪽에서 빗물을 받아서 흘러갈 수 있도록 고저차를 조성한다. 매곡천 유입 직전에는 우기에는 물이 고이고, 건기에는 물이 빠지는 인공습지를 거쳐 매곡천으로 유입되도록 한다.

- ⑩ 빗물이용시설은 저탄소 녹색도시 조성 시행지침의 “미기후 향상을 위한 빗물관리계획”의 기준에 의해 단지에는 10개를 설치하고, 학교에는 1개씩 주로 지붕우수를 받는 것으로 한다. 이들 저장 빗물을 중앙부의 수로용수로 공급하도록 계획한다.

저탄소 녹색마을 물순환 복원을 위한 LID-분산형 빗물관리계획에 의한 시설의 규모는 표 4와 같이 산정하였다.

3.3.2 LID-분산형 빗물관리 계획에 따른 LID 시설 적용 전후 유출특성 비교

저탄소 녹색마을 유역 개발 후의 LID 빗물관리시설 설치 전후에 대한 지표수, 지하수유출 및 수문순환인자에 대한 변화를 살펴보고자 물순환 분석을 수행하였다. 계획에 따른 LID-분산형 빗물관리시설 적용 후 유출 특성을 모델링한 대상 유역의 모식도, 지표 유출과 지하수 유출 수문곡선을 그림 4~ 6에 나타내었다.

LID 빗물관리시설 설치에 따른 수문순환 효과비교는 표 5, 표 6에 나타내었다. 전반적으로 LID 빗물관리시설 설치에 따른 효과는 크게 나타나지 않았다.

그러나 개발 전 유역전체가 투수지역이며, 개발 후 LID 빗물관리시설 설치 전의 토지이용계획에 이미 녹지 등의 투수

표 4. LID-분산형 빗물관리시설 규모

시설	규모	용량산정
도랑	폭 0.5m, 수위 0.15m, 도랑 단면적 0.075m ² , 총길이 2,112m	총 저류량 = 158m ³
침투형 홈통받이	소유역 A 156개, B 159개, C 111개	총 저류량 ≒ 6m ³
Small Rain Garden	12개 반지름 5m, 깊이 0.2m 총면적 ≒ 940m ²	총 저류량 = 200m ³
Large Rain Garden	4개 반지름 10m, 깊이 0.2m 총면적 ≒ 1,256m ²	총 저류량 ≒ 250m ³
Bio-retention	3개 지름 10m, 깊이 0.3m 총면적 ≒ 236m ²	총 저류량 ≒ 71m ³
Mulden-regollen	3개(각각 90m, 90m, 235m) 총길이 약 320m, 폭 1m, 깊이 0.2m	총 저류량 = 38.4m ³
인공습지	면적 500m ² , 깊이 0.3m 우기에는 물이 고이고, 건기에는 물이 없는 지표면하 인공습지가 기본	총 저류량 = 150m ³
수로	(전체길이 720m, 평균 폭 0.8m) 폭 0.6~1m, 높이 0.15~0.3m 경사는 자연흐름 유지 경사, 0.1m/sec 유속경사 → 실제 흐름로 구성 (폭 0.2 × 깊이 0.1m)	
빗물이용시설	빗물이용시설 각 235m ³ , 학교 640m ³	

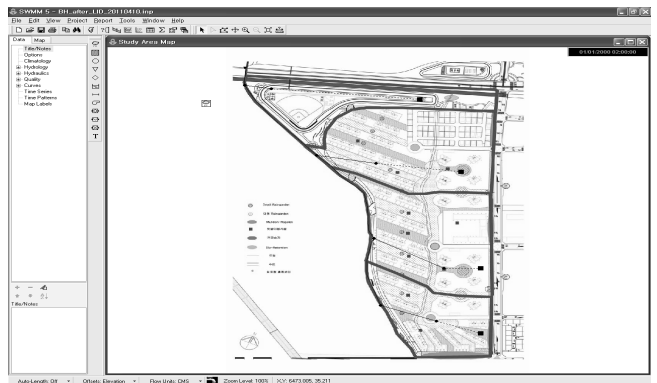


그림 4. SWMM_LID 모형을 이용한 대상 유역의 개발후 LID시설 적용 유출 모형

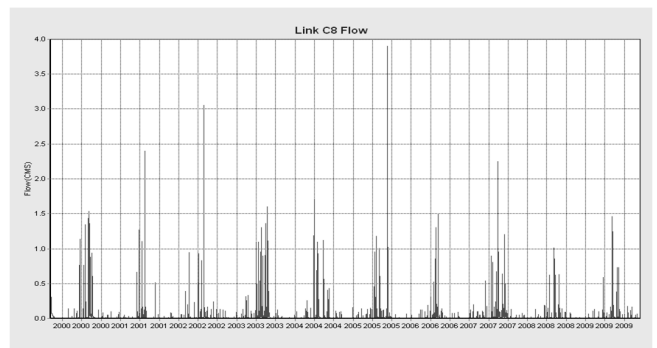


그림 5. 개발 후 LID시설 적용 지표 유출량(2000~2009)

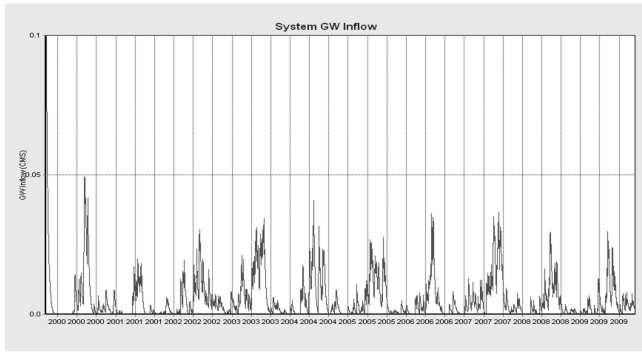


그림 6. 개발 후 LID시설 적용 지하수 유출량(2000~2009)

표 5. 개발 후 LID시설 적용 전·후 지표유출량 물순환 비교

	강우량 mm (%)	침투량 mm (%)	지표증발량 mm (%)	지표 유출량 mm (%)
개발 후 LID 적용 전	1233.0 (100)	211.6 (17.2)	208.5 (16.9)	812.6 (65.9)
개발 후 LID 적용 후	1233.0 (100)	225.7 (18.3)	213.2 (17.3)	794.1 (64.4)

표 6. 개발 후 LID시설 적용 전·후 지하수 유출량 물순환 비교

	지하수 침투량 mm (%)	지하수 유출량 mm (%)	저류량 mm (%)	상·하층부 증발산량 mm (%)	대수층 침투량mm (%)
개발 후 LID 적용 전	211.6 (17.2)	124.5 (10.1)	19.9 (1.6)	66.9 (5.4)	0.6 (0.1)
개발 후 LID 적용 후	225.7 (18.3)	164.0 (13.3)	24.8 (2.0)	35.8 (2.9)	0.8 (0.1)

지역이 상당한 면적을 차지하는 것을 감안하면, 비교적 LID 적용에 의한 수문순환 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 추후 불투수 면적이 상당히 넓은 구역에 대해 적용할 경우 보다 가시적으로 LID 적용에 의한 수문순환 개선효과를 확인할 수 있을 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 아산신도시 저탄소 녹색마을 시범지구에 대하여 개발 전·후 그리고 개발 후 LID 빗물관리시설 설치 계획에 따른 효과에 대해 SWMM-LID 모형을 사용하여 수문

학적인 분석을 수행하였다. 이를 통하여 토지이용계획과 연계한 LID 빗물관리시설이 물순환에 미치는 효과와 적용 가능성을 확인하였다.

개발 후 토지이용 변화에 따른 불투수 면적의 증가에 의한 유출변화를 살펴보면 지표 유출량은 개발 전에 비해 개발 후에 약 45% 증가하였다. 또한, 지하수 유출량은 개발 전에 비해 개발 후에 약 32% 감소하여 물순환에 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

LID-분산형 빗물관리 계획에 따라 LID 시설을 적용한 결과, 전반적으로 수문학적인 물순환이 회복되는 것으로 나타났다. 그 효과가 크지는 않았으나, 이는 개발 후 녹지 조성 계획의 영향이기도 하다. 이러한 모형 분석결과를 보면, 저탄소 녹색마을에 설치할 LID-분산형 빗물관리시설의 계획을 확대하여야 할 것으로 보인다. 즉, SWMM-LID 모형에 의한 물순환 영향 분석 결과를 분석하여 계획단계에서 LID-분산형 빗물관리 계획 규모를 조절할 수도 있을 것으로 보인다.

또한, 향후 정량적인 LID 빗물관리시설의 물순환 개선효과에 대한 개개 시설별 수문학적인 분석연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 국토해양부(2009), 「아산탕정지구 택지개발사업 실시계획(1단계) 승인서」.
2. 대한주택공사 주택도시연구원(2008), 「아산신도시 물순환 도시 조성을 위한 우수관리 및 인공습지 시스템 적용 연구」.
3. 이정민(2007), 「투수성 포장과 침투 트렌치를 고려한 수정 SWMM의 개발 및 적용」, 박사학위 논문, 부경대학교.
4. 환경학, 이정민(2010), “토지이용 변화가 물순환에 미치는 영향과 침투트렌치 설치 효과 분석”, 「상하수도학회지」, 24(6): 691~701.
5. Akan, A. O. (2002), “Sizing stormwater infiltration structures”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(5): 534~537.
6. New York Department of Environmental Conservation (NY DEC) (2003), *Stormwater Management Design Manual*, Albany, NY.
7. North Carolina Division of Environmental Management (NC DEM) (1993), *Stormwater Management Guidance Manual*, Raleigh, NC.
8. U.S. Environmental Protection Agency (2007), *Reducing Stormwater Costs through Low Impact Development (LID) Strategies and Practices*, Available at: <http://www.epa.gov/nps/lid>
9. <http://www.lowimpactdevelopment.org>