



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](#)

2016년 2월
박사학위논문

도시기능 복원시 LID적용에 따른 수문특성

조선대학교대학원

토목공학과

전성인

도시기능 복원시 LID적용에 따른 수문특성

The Hydrological Characteristics by LID Application for
Recovery of Urban Function

2016년 2월 25일

조선대학교대학원

토목공학과

전성인

도시기능 복원시 LID적용에 따른 수문특성

지도교수 김 운 중

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함

2015년 10월

조선대학교 대학원

토 목 공 학 과

전 성 인

전성인의 박사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 차 승택 (인)

위 원 전남대학교 교수 이 경 훈 (인)

위 원 조선대학교 교수 金 聖 洪 (인)

위 원 조선대학교 교수 金 大 賢 (인)

위 원 조선대학교 교수 金 雲 中 (인)

2015년 12월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

| | |
|--------------------------|----|
| 제 1 장 서론 | 1 |
| 1.1 연구배경과 목적 | 1 |
| 1.2 국내·외 연구동향 | 2 |
| 1.3 연구내용 및 방법 | 3 |
| | |
| 제 2 장 도시홍수의 이론적 고찰 | 4 |
| 2.1 도시홍수 관리 | 4 |
| 2.1.1 물순환 과정 | 4 |
| 2.1.2 도시화와 홍수의 영향 | 6 |
| 2.1.3 국가적 홍수대응 | 8 |
| 2.2 도시홍수 개념 및 평가 | 8 |
| 2.2.1 전통적 홍수대응 | 8 |
| 2.2.2 저영향 개발의 도입 | 9 |
| | |
| 제 3 장 홍수량 적용모형의 검토 | 13 |
| 3.1 모형의 개요 | 13 |
| 3.2 모형의 구조 및 이론식 | 15 |

| | |
|----------------------------------|-----------|
| 3.2.1 SWMM의 실행블럭 | 15 |
| 3.2.2 SWMM의 보조블럭 | 17 |
| 3.2.3 RUNOFF 블럭 | 18 |
| 3.2.4 TRANSPORT 블럭 | 31 |
| 3.2.5 EXTRAN 블럭 | 35 |
| | |
| 제 4 장 LID 적용 및 결과분석 | 43 |
| 4.1 연구대상지 및 유역 정보 추출 | 43 |
| 4.1.1 연구 대상지 현황 | 43 |
| 4.1.2 유역 정보 추출 | 44 |
| 4.2 SWMM-LID의 적용방법 | 45 |
| 4.3 LID 기술의 적용 | 47 |
| 4.4 LID 적용에 따른 수리학적 평가 | 53 |
| 4.5 LID 기술의 물수지 분석 | 56 |
| 4.6 GI와 LID 기술의 통합시스템 | 58 |
| 4.6.1 SWMM-LID의 옥상녹화 | 58 |
| 4.6.2 옥상녹화의 물수지 및 유출량 | 59 |
| 4.7 SWMM-LID 입력자료의 구성 | 62 |
| 4.7.1 침투모델 | 62 |
| 4.7.2 유역 입력자료 | 64 |
| 4.7.3 강우자료 | 65 |
| 4.7.4 SWMM-LID 모형구축 | 68 |
| 4.8 각 구간별 계산결과 | 74 |
| 4.8.1 총강우 10mm인 경우 유출량 | 74 |
| 4.8.2 총강우 15mm인 경우 유출량 | 76 |

| | |
|------------------------------|----|
| 4.8.3 총강우 20mm인 경우 유출량 | 77 |
| 제 5 장 결론 | 79 |
| 참고문헌 | 80 |
| 부록 | 83 |

표 목 차

| | |
|---|----|
| 표 3.1 SWMM 모형의 특징 | 14 |
| 표 3.2 유출해석 블록의 기능 비교 | 16 |
| 표 3.3 SWMM 모형의 소유역 특성인자 | 19 |
| 표 3.4 Kinematic wave공식의 표면조도계수 값 | 21 |
| 표 3.5 Kinematic wave공식의 표면상태에 따른 조도계수 값 | 22 |
| 표 3.6 표면굴곡으로 인한 저류깊이(표면저류량) | 23 |
| 표 3.7 침투량 계수 | 25 |
| 표 3.8 각 블록의 구성요소 | 27 |
| 표 3.9 EXTRAN 블록에서 LINK와 NODE의 특성 | 37 |
| 표 4.1 투수성 포장의 적용 값 | 48 |
| 표 4.2 각 구간별 LID시설 적용에 따른 유출량 분석 | 52 |
| 표 4.3 식생수로 및 투수포장의 수리학적 체류시간 | 54 |
| 표 4.4 GI설치 전, 후 물수지 변화 | 61 |
| 표 4.5 토양별 침투 매개변수 | 63 |
| 표 4.6 토지이용별 조도계수 | 64 |
| 표 4.7 토지이용별 저류깊이 | 65 |
| 표 4.8 적용강우사상 | 66 |
| 표 4.9 LID 시설 합계표 | 67 |

그림 목 차

| | |
|---|----|
| 그림 2.1 불투수층의 변화와 물수지 | 5 |
| 그림 2.2 토지이용에 따른 온도의 변화 | 5 |
| 그림 2.3 홍수빈도에 따른 도시화의 영향 | 7 |
| 그림 2.4 LID기능의 투수성 포장재 모식도 | 10 |
| 그림 2.5 식생체류지 구성요소 | 11 |
| 그림 2.6 옥상녹화의 LID 표준 구성요소 | 12 |
| 그림 3.1 SWMM 5.0의 구성 | 15 |
| 그림 3.2 격자망의 구성과 가중치 | 32 |
| 그림 3.3 EXTRAN 블록의 격자망 구성 | 40 |
| 그림 4.1 연구대상지 위치 | 43 |
| 그림 4.2 NGIS 자료를 이용한 수문지형정보 추출절차 | 44 |
| 그림 4.3 LID 개념 및 배치도 | 46 |
| 그림 4.4 식생수로의 계획도 | 47 |
| 그림 4.5 식생수로 및 투수성 포장의 LID면적율에 따른 유출 저감율 ... | 49 |
| 그림 4.6 식생수로 및 투수성 포장의 LID 배치 예 | 51 |
| 그림 4.7 식생수로(a) 및 투수포장(b)의 체류시간과 용량과의 관계 | 55 |
| 그림 4.8 LID 기술의 물수지 분석도 | 57 |
| 그림 4.9 옥상녹화의 기본구조 모식도 | 59 |
| 그림 4.10 옥상녹화의 배수체계도 | 59 |
| 그림 4.11 옥상녹화 설치 전, 후의 유출량 비교 | 60 |
| 그림 4.12 연구대상지의 80% 강우 | 66 |
| 그림 4.13 1구간의 우수관망 및 LID적용 전.후의 토지이용 | 68 |
| 그림 4.14 개발후 토지이용 범례 | 69 |

| | |
|--|----|
| 그림 4.15 1구간 1UA 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전.후의 토지이용 | 69 |
| 그림 4.16 2구간의 우수관망 및 LID 적용 전.후의 토지이용 | 70 |
| 그림 4.17 2구간 2UA 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전.후의 토지이용 | 71 |
| 그림 4.18 3구간의 우수관망 및 LID 적용 전.후의 토지이용 | 72 |
| 그림 4.19 3구간 3UA 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전.후의 토지이용 | 73 |
| 그림 4.20 1구간 1UA 지역의 유출량 변화(총강우 10mm) | 74 |
| 그림 4.21 2구간 2UA 지역의 유출량 변화(총강우 10mm) | 75 |
| 그림 4.22 3구간 3UA 지역의 유출량 변화(총강우 10mm) | 75 |
| 그림 4.23 1구간 1UA 지역의 유출량 변화(총강우 15mm) | 76 |
| 그림 4.24 2구간 2UA 지역의 유출량 변화(총강우 15mm) | 76 |
| 그림 4.25 3구간 3UA 지역의 유출량 변화(총강우 15mm) | 77 |
| 그림 4.26 1구간 1UA 지역의 유출량 변화(총강우 20mm) | 77 |
| 그림 4.27 2구간 2UA 지역의 유출량 변화(총강우 20mm) | 78 |
| 그림 4.28 3구간 3UA 지역의 유출량 변화(총강우 20mm) | 78 |

ABSTRACT

The Hydrological Characteristics by LID Application for Recovery of Urban Function

Jeon, Seong In

Advisor : Prof. Kim, Woon Joong, Ph. D.

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

The management of urban stormwater has become increasingly complex over recent decades.

Korea is experiencing a very rapid process of urbanization, which brings adverse impact on the water environment. As a result, urban runoff quantity and quality control has emerged as a key concern for municipal officials. One of the strategies for mitigating the impact of urbanization is the use of LID for urban stormwater runoff quality and quantity control. Before implementing the various BMPs, however, it is important, and necessary, to find the most cost-effective selection, design and placement of BMPs. Consequently, terminology describing the principles and practices of urban drainage has become increasingly diverse, increasing the potential for confusion and miscommunication.

This thesis includes history, scope, application and underlying principles of terms used in urban drainage and provides recommendations for clear communication of these principles.

Urbanization can significantly affect the hydrologic cycle by increasing

flood discharge and heat flux. In order to mitigate these modifications in urban areas, Low Impact Development(LID) technique has been designed and applied in Korea. In order to estimate runoff reduction rate using SWMM LID model, the characteristics of five LID techniques was firstly analyzed for water balance. Vegetated swale and green roof were not reduce flood discharge nor infiltration amount. On the other hand, porous pavement and infiltration trench were captured by infiltration function. The flood reduction rate with LID is substantially affected by their structures and properties, e.g., the percentage of the area installed with LID components and the percentage of the drainage area of the LID components. The objective of this thesis is to let authority and public recognize the fundamental reason of this problem and at the same time realize the benefits of LID.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

현재 도시에서 야기되고 있는 제반 문제는 인간활동의 편리성, 쾌적성의 추구뿐만 아니라 도시 내의 오염원의 증가에 기인된다. 도시화의 진행에 따른 우수의 토양 내 보수력의 감소는 다양한 형태로 생태환경의 변화를 초래한다. 도시화에 의한 지표면의 불투수층의 증가는 우수 유출량을 증가시킨다. 이와 같은 현상에 대해 우수배제기능을 증대시키는 것은 일정 규모의 우수에 대한 침수대책이 될 수 있고 작은 강우시에는 쾌적성을 유지시켜 왔으나 강우유출 시간의 단축, 침투유량의 증가를 초래하여 왔으며 또한 하수도의 유효능력을 초과하는 우수에 대한 수해 리스크를 증대하여 왔다. 또한, 신속한 우수배제는 보수력을 저하시켜 왔으며 용수의 고갈, 간접 유출량, 평상시의 하천유량을 감소시킴으로 생태계를 포함한 건조시 물환경 전반에 부정적인 영향을 초래하여 왔다. 과도한 토지 피복에 의한 보수력의 저하는 도시 내 열수지에도 영향을 미침으로써 열섬의 발생 가능성을 증대시킨다. 이러한 기후변화가 광역적인 지역에 대해서는 돌발성 호우가 빈번한 경우가 동반되며 단기간의 급격한 유출량의 증가는 도시침수를 야기하기도 한다. 종래의 도시 강우문제는 침수대책을 중심으로 한 유효능력의 증대, 저류기능의 확대 등이 주된 대응이었으나 최근에는 소유역 단위의 분산형 보수력의 회복에 그 근본적인 대안을 모색하게 되었다.

우수 및 용설에 따른 유출수는 투수성 지반을 통해 지하로 스며들어 대수층을 채우거나 하천으로 흘러들어 간다. 홍수 유량이 하수도 시스템 및 배수구의 용량을 초과함으로써 하류부에 범람이나 침식을 유발한다. 침식은 동물의 서식지 파괴, 하천의 수문곡선을 변화시키기도 하고 하수도의 범람, 도시 기반시설의 손상, 하천 및 해안을 오염시킨다. 이러한 도시화에 따른 부작용은 서울을 비롯한 대도시에 이미 많은 사례를 기록하고 있으며 종래의 우수배제 체계의 새로운 패러다임의 변환을 구체적으로 강구하게 되었다. 따라서 본 연구는 최근 도시화로 인하여 왜곡된 수문환경을 개선하기 위하여 도입된 저영향 개발(Low Impact Development, LID)의 각 기능에 대한 물수지 분석과 그 효과를 중심으로 평가하였다.

1.2 국내·외 연구동향

LID는 도시의 불투수 면적의 지속적인 증가로 왜곡된 수문환경을 가능한 개발 전의 상태로 복원시키는 개념이다. 이러한 LID에 대한 연구사례를 보면 최지용 등(2009)은 본 기법이 소유역 단위, 분산형 관리기술로의 단지설계와 결합될 수 있다고 하였으며 LID는 빗물관리와 비점 오염원을 저감할 수 있으므로 각종 시설규제, 자원보호, 단지의 제약사항을 보완할 수 있음을 시사하였다. LID 기술은 경관을 바탕으로 지속가능한 개발을 하기 위한 통합적 접근으로 기존 자연시스템과 수문, 생태계를 유지하기 위한 수단이자 적용이 용이한 기술을 통해 저비용의 유용성을 가지는 접근이라 할 수 있다. 물순환 기능 중에서 빗물관리 기술에 초점을 둔 연구는 빗물의 침투, 저류, 저장, 재이용에 이용할 수 있는 구조적 시설물과 관련기술을 주 내용으로 한다(김이호 등, 2007). 공간의 계획적인 측면에서는 주로 도시 및 단지차원의 연구로 우수의 저류 및 침투를 위한 계획요소의 배치 및 연계에 관한 연구가 대부분이다(한영해와 이태구, 2012).

또한, 연중상(2014) 등은 침투트렌치를 이용하여 비점오염물질의 저감 효과에 대해 분석하였고 신동수(2013) 등은 옥상녹화와 투수성 포장재를 이용하여 강우-유출량의 저감 효과에 대해 기술하였으나 LID의 적용이 전체 홍수유출량의 저감에 기여하는 LID 면적대비 홍수 저감량에 대해서는 추가적인 연구가 지속되어야 함을 지적하였다.

LID에 의한 도시기능을 회복하기 위해서는 무엇보다 각 LID 요소의 특성분석과 최적의 배치(Best Management Practices, BMPs)가 중요하다. 선행 연구에서 언급한 바와 같이 LID 개별 요소의 특징에 대한 연구는 많은 진전이 이루어졌으나 모형에서 구현하고자하는 전체 LID 요소의 특징에 대한 분석은 크게 다루어지지 않고 있다.

도시지역에 있어 옥상은 많은 면적을 차지하고 있으므로 옥상의 기능에 대한 연구는 일찍이 연구되어 왔다. Oberndorfer et al.(2007)은 옥상정원의 빗물 및 생태적인 측면에서 접근하여 그 기능과 관리에 대해 체계적으로 기술하였다. Stovin et al.(2007)은 도시의 배수시스템의 부하를 저감할 수 있는 방안으로써 옥상녹화의 빗물저감 효과에 대해 Pilot 실험을 실시하였으며 총 9.2mm의 단일강우에 대해 57%의 침투 유출량 감소효과가 있음을 실증하였다. 투수성 포장은 다공성 포장재질 또는 불투수성 재질에 틈을 두어 빗물을 지중에 침투시키는 방법으로 재질의 종류, 공간적인 여건 등에 따라

다양하게 적용된다. 투수성 포장은 차도 또는 주차공간에 설치하는 것이 일반적이다. Blażejewski과 Murat-Blażejewska(2007)에 의하면 다공성 포장재의 고형물(Total Suspended Solids) 처리효율은 90%이상으로 보고하고 있다.

1.3 연구내용 및 방법

도시개발 계획에 있어 증가되는 우수 유출량과 도시 비점오염물질의 배출량은 입안 단계에서 이들 목표 삭감량을 설정하여 LID 면적과 효과적인 공간 배치를 계획하는 것이 효과적이다(Jia et al., 2012). 그러나 우리나라는 현재 이에 대해 제도적인 정비가 마련되어 있지 않은 실정이다. 따라서 LID 기술에 대한 각각의 수리적인 특징과 모형의 파라미터에 대한 자료가 충분하지 않다.

본 연구에 이용한 SWMM-LID 모형은 기존 도시 우수의 배제시스템에 이용되는 SWMM 모형에 LID 기술을 연결한 것이다. 본 연구에서는 LID 기술이 시범적으로 도입되어 있는 연구대상지를 대상으로 개별 LID기술의 특성, 배치방법, 설치 면적에 따른 효과 분석을 수행하였다. LID 적용 면적과 유출률과의 관계에 대해서는 본 계획 구간 전체를 대상으로 하였으며 LID 기술의 물수지 분석은 이 중 일부 구간을 선정하여 평가하였다. 또한 옥상녹화는 물수지 분석에 이용한 동일한 유역에 대해 기존 저류기능을 우수관망으로 연결하여 유출량 저감 효과를 평가하였다.

제 2 장 도시홍수의 이론적 고찰

2.1 도시홍수 관리

2.1.1 물순환 과정

자연적인 물 순환은 크게 대기, 토지, 그리고 해양을 거쳐 반복 순환과정을 거치며 궁극적으로 임의 관리구역에는 다양한 형태로 유출된다. 이 과정에서 증발, 차단, 유출, 침투, 지하수 함양의 과정이 포함된다. 강우가 지표면에 도달되면 표면을 채우면서 차단되고 지중으로 침투되어 지하수로 함양된다. 이 경우 표면수는 바로 유출되고 지하수로 함양된 우수는 서서히 지표로 유출되어 다시 해양으로 순환된다. 일반적으로 강우의 약 40%는 식생에 의해 차단되어 저류된다. 차단된 강우는 증발산으로 다시 대기로 회귀하게 된다. 강우의 약 25%는 지중으로 침투되고 중간 유출 또는 기저 형태로 하천으로 유출된다. 또한 약 25%는 지중으로 침투되어 지하수로 함양된다. 결국 나머지 약 10%만이 지표면으로 유출되게 된다. 그러나 도시화가 진행되어 시가지가 확대되고 불투수층이 증가되면 강우에 따른 유출, 저류 및 침투의 비율이 바뀌게 된다 (U S EPA, 2015). 그림 2.1은 도시 내 불투수층의 변화에 의해 물순환 구성 성분이 어떻게 변화하는지를 수치로 도식화한 것이다. 홍수관리 측면에서 보면 불투수 층의 감소되는 지하수 함양량과 증발산량은 바람직하지 않다. 즉, 도시화에 따른 불투수 층의 증가는 강우의 표면 유출량을 증가시켜 수량 및 수질의 관리 측면에서 부정적인 영향을 초래한다. 강우에 의한 유출량의 증가는 홍수 문제뿐만 아니라 유역에 분포하는 각종 비점 오염물질을 하천, 호수 또는 해역으로 운송함으로써 궁극적으로 생태계의 심각한 왜곡현상을 유발한다.

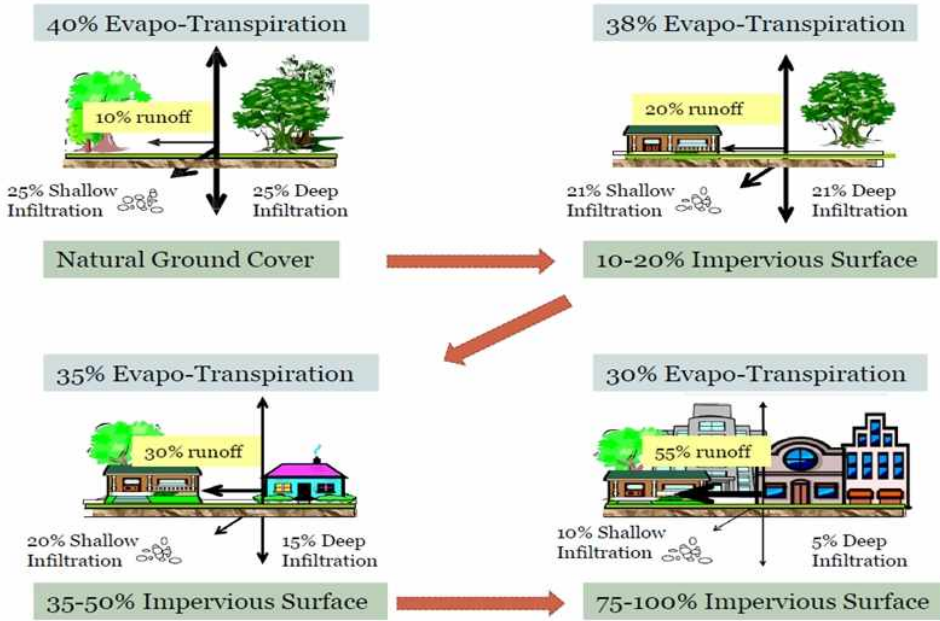


그림 2.1 불투수층의 변화와 물수지(US EPA, 2015, 2008)

도시화에 의한 녹지의 감소는 증발산량을 저하시켜 도시의 쾌적성을 감소시키게 된다. 또한 초지의 감소는 도시의 녹음을 저하시켜 온도 상승을 유발하게 되며 도시의 열섬 또는 열대야가 발생할 가능성을 높인다(Southwest urban hydrology, 2015).

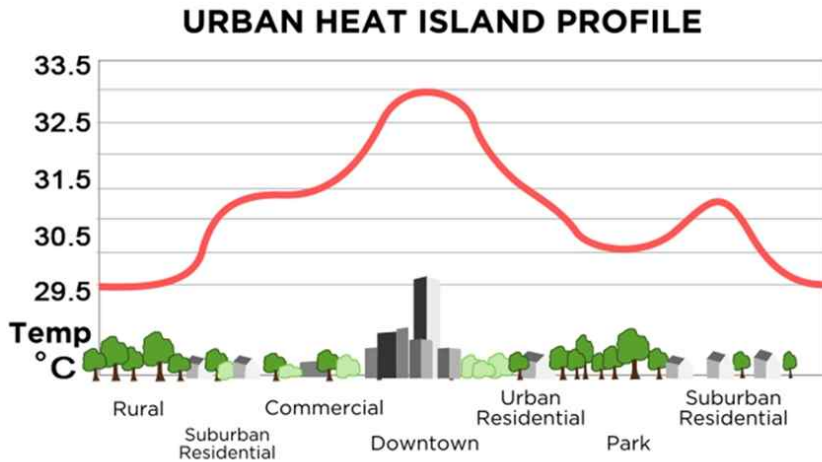


그림 2.2 토지이용에 따른 온도의 변화(Dwivedi and Khire, 2008)

2.1.2 도시화와 홍수의 영향

도시화는 토지이용의 변화를 초래함과 아울러 인간의 생활에 있어 편리함을 추구하게 된다. 도시화는 과거 수년간 지구적인 문제로 부각되어 왔다. 한 예로, 미국의 경우 1982년에서 2001년 사이에 약 $0.14 \times 10^6 \text{km}^2$ 에 달하는 토지가 개발되었으며 그 개발 상황을 보면 약 46%는 산림으로부터이고 20%는 농경지, 16%는 초지로부터 개발되었다 (Bouyer, 2009). 펜실베이니아의 경우 1982년에서 1997년 사이에 나대지, 개활지 및 자연 녹지 등 약 $5,000 \text{km}^2$ 에 달하는 토지가 개발되었다.

가. 도시화에 의한 유출수의 영향

도시화는 강우에 따른 유출에 다음과 같은 영향을 미친다. 첫째로 침투량을 감소시켜 표면수의 전체 양을 증가시킨다. 둘째로 저류 함량을 감소시킨다. 셋째로 초지를 감소시킴으로 증발산량을 감소시킨다. 넷째로 불투수 면적의 상호 연결과 효율적인 우수 배제 시스템의 구축으로 강우의 유하시간을 단축시킨다. 다섯째로 불투수 면적의 증가와 지중 침투량의 감소로 지하수 함량을 감소시킨다. 여섯째로 지중 기저유량의 감소로 하천의 건천화를 유발시킨다. 일곱 번째로 상류로부터 흐름의 연속으로 하천 하류부의 흐름이 단조롭게 된다. 즉, 강우 유출량은 도시의 불투수 면적 비율과 비례 관계가 성립됨을 의미한다.

그림 2.3은 미국 위스콘신 주의 유역 면적 36.7km^2 에 대해 토지이용의 변화에 따른 빈도 홍수량을 분석한 예를 나타내고 있다. 1960년경에는 농경지와 산림이 혼합되어 있으나 1985년에는 20~25%가 도시화되었다. 그리고 1998년경에는 유역의 약 40%가 주거 및 상업지구로 되어 불투수층으로 변하였다. 이와 더불어 개발 전의 100년 빈도 침투 홍수량은 1985년의 10년 빈도 침투 홍수량에 상당하는 것으로 나타났다. 유역이 완전히 개발되었을 경우 개발 전의 100년 빈도 침투 홍수량은 개발 후의 1.5년에 해당하는 침투 유출량으로 증가되었음을 알 수 있다.

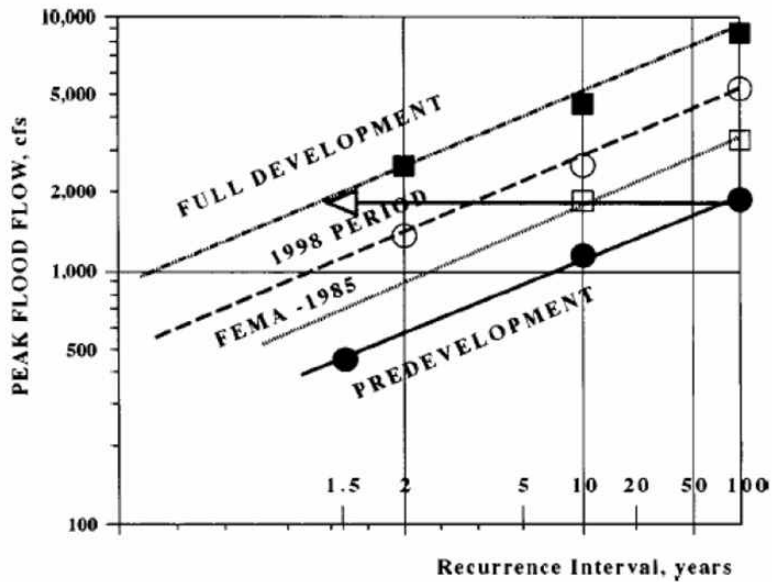


그림 2.3 홍수빈도에 따른 도시화의 영향(Prince George's County, 1999b)

나. 도시화에 의한 오염 유출수의 영향

침투 유출수와 총 유출량의 증가 이외에 도시 강우는 오염물질의 수송에 의해 수질을 악화시킨다. 도시의 개발은 불투수 면적을 감소시킬 뿐만 아니라 침식과 이에 따른 토사의 생산량을 증가시킨다. 도시 유출수는 토사, 독성물질 그리고 다른 오염물질을 포함하게 된다. 미국의 국가 도시 유출수 프로그램(National urban runoff program)에서 도시의 독성물질 유출량을 조사한 바 있다. 그 결과 1978년에서 1983년 사이에 28개 도시 유출수에는 토사유출, 박테리아 그리고 중금속이 다량 포함되어 있음을 발표하였다. 합류식 유출수는 우기시 하천에 있어 또 다른 오염원이 된다. 미국 환경청의 보고에 의하면 도시 유출수는 전체 오염원 중에서 세 번째로 많은 기여율을 보인다고 평가하였다(US EPA, 2009).

2.1.3 국가적 홍수대응

우리나라는 도시 유출에 따른 비점 오염원의 제어에 대해 구체적인 대응이 수립되어 있지 않으므로 여기서는 미국의 예를 통하여 도시홍수 대응 방향에 대해 언급하기로 한다. 미국은 1972년 수역으로 유입되는 점오염원을 규제하는 법안(Federal pollution control act 또는 Clean water act)을 마련하였다. 점오염원은 국가 오염제어시스템(National discharge elimination system)에서 관리하게 되었고 의회는 1987년 관련 법안을 마련하게 되었다. 개발자는 공공수역에 대한 자료수집, 관리계획 그리고 재정적인 부담을 지는 것으로 하였다. 최적관리방안(Best Management Practices, BMPs)에서는 개발 후에 개발 전 단계에 근접하도록 계획을 수립하게 하였다.

2.2 도시홍수 개념 및 평가

2.2.1 전통적 홍수대응

종래의 도시홍수는 유용하지 않은 처리수로서 공공수역으로 배제되어 왔다. 유역 내의 우수는 옥상, 포장 구역, 지하 우수관을 통하여 유역 외로 신속하게 배출되게 하여, 침투유량은 집중식 저류지를 통하여 유출구로 배제하는 시스템을 구축하였다. 전통적 홍수저감 방안은 유출수에 대해 다양한 기술을 적용하여 침투 유량을 효과적으로 줄이는 방식을 채택하여 왔다. 그러나, 발생된 침투 홍수량은 실제 설계 홍수량에 비해 그렇게 심각한 수준에 미치지 못하였다(Prince George' s County, 1999a). 이러한 홍수관리는 오염물질의 처리에도 제한적인 요인이 발생하였으며 실패한 홍수관리에 따른 비용은 막대한 것으로 평가되었다. 예로 애틀랜트 광역지역(Atlanta metropolitan area)의 343km²에 대해 수질 개선대책 비용은 15억 달러에 이른다고 보고한 바 있다(Zeng and Rasmussen, 2005).

2.2.2 저영향 개발의 도입

전통적인 도시홍수 관리 방법에 비해 저영향 개발(Low Impact Development, LID)은 자원으로써 우수를 효과적으로 이용하는 것이다. 매릴랜드 주의 Prince George County 에서 처음 제안된 LID 기술은 자연자원으로써 수문환경과 환경규제 요구를 발생원에서 유지 및 대응하는 것이다(Prince George' s County, 1999b). LID는 다음과 같이 몇가지의 기술을 복합적으로 병용하고 있다.

- 1) 보전계획: 지역계획은 습지, 서식지 및 심미적인 측면을 고려하여 수립한다.
- 2) 최소영향: 산림, 침투성이 높은 토양이나 침식지역과 같은 민감한 지역은 가능한 보호한다.
- 3) 집중시간의 유지: 유출형태 및 개발 전의 집중시간은 유지되도록 설계한다.
- 4) 통합적인 관리계획(Integrated Management Practices, IMPs): 통합관리는 소규모의 분산형으로 하며 발생원에서 인프라 및 경관설계에 포함되도록 한다.
- 5) 오염 발생원의 방지: 오염원은 그 발생원에서 제어한다.

기존의 유역 외 홍수배제 방식과는 달리 LID기법은 발생원에서 저류, 침투 및 증발량을 개발 전 수준으로 회복시키는 것이다. 전형적인 LID 기술로는 식생체류지, 식생수로, 녹색 옥상조성, 침투성 포장, 우수 저류통 및 침투트랜치가 있다.

가. 투수성 포장

투수성 포장재는 다공성 아스팔트, 투수성 콘크리트 그리고 격자형 콘크리트 형태가 있다. 그림 2.4는 LID기술로 응용되고 있는 지중 침투성 포장재의 예를 나타낸다. 기존 포장재의 다공질 비율은 3~5%에 비해 LID기술에 적용되는 다공성 비율은 15~22%로 설계하고 있다(Debo and Reese, 2003). 강우의 침투량을 증진시키기 위해 다공성 포장은 지하수의 함양과 오염원의 제거율을 높인다(US EPA, 2000a). 미국 플로리다 지역의 2cm의 강우를 대상으로 현장 관측한 결과에 의하면, 전통적인 방법보다 투수성 LID기법에 의해 60~80%의 제어 효율을 보이는 것으로 알려져 있다 (US EPA, 2000a). 또한 증금속의 제거 효율을 보면 구리 81%, 철 92%, 납 85%, 망간 92% 그리고 아연은 75%가 제거된다고 하였다(US EPA, 2000a). Penn state visitor's center에 설

치한 다공성 포장재의 모니터링 결과에서는 1.2~6.0cm의 10개의 다양한 강우사상에 대해 유출이 발생하지 않았으며 침투율은 0.012cm/s였다(Swisher, 2002).

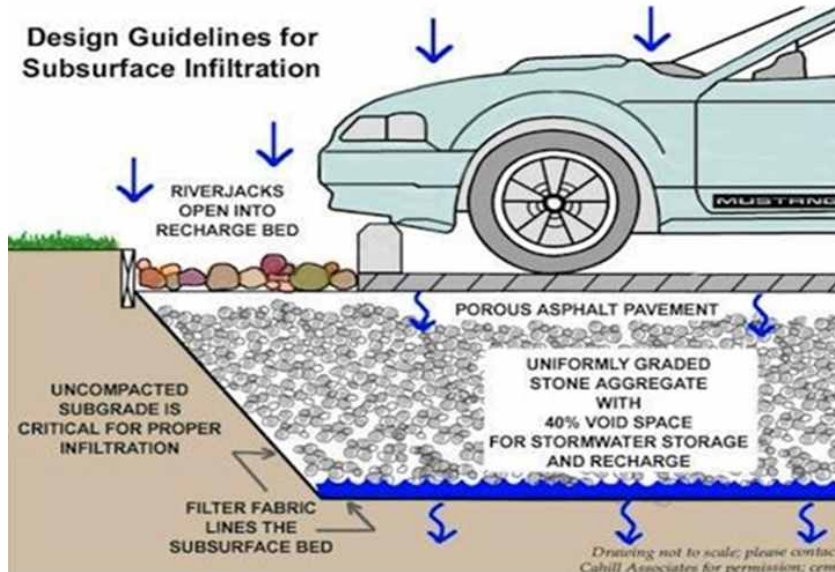


그림 2.4 LID기능의 투수성 포장재 모식도(Pennsylvania's Stormwater Best Management Manual)

나. 생태 체류지

생태 체류지(Bio-retention area)는 강우 유출수를 일시적으로 포집하고 체류시킴으로써 토양과 식생으로 대상구역의 오염물질을 저감시키는 역할을 한다(Debo and Reese, 2003). 본 체류지에서의 반응 기작은 침전, 흡착, 침투, 이온 교환, 분해 및 생물학적인 정화 등이다(Prince George's County, 2001). 생태 체류지 매뉴얼에 의하면 연못의 최대 깊이는 0.15m가 적절하다고 평가하였다. 수목이 식재된다면 식생의 최소 깊이는 0.76m, 전체 깊이는 1.2~1.5m가 적당하다고 하였다. 그림 2.5의 식생체류지의 세부 구성 요소는 다음과 같다. ① 수로 ② 유입부 수로 ③ 유출수 ④ 저류지 표면수 ⑤ 경계 층 ⑥ 체류지 토양 층 ⑦ 복토층.

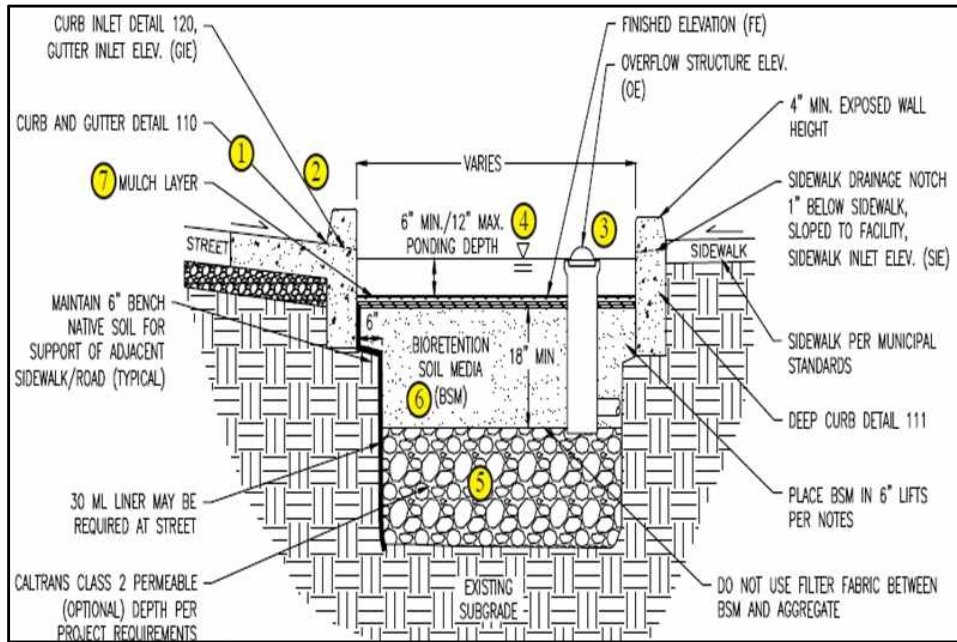


그림 2.5 식생 체류지 구성요소(Debo and Reese, 2003)

다. 옥상 녹화

옥상 녹화는 기본적으로 도시 지역의 불투수 면적을 줄이는데 그 목적이 있다. 이 기술은 고밀도 불투수 면적을 가지는 지역의 합류식 우수 배제시스템에 효과적이다(U S EPA, 2000a). 그림 2.6에 나타낸 바와 같이 옥상녹화 LID는 크게 수목 식생대, 저류 및 배수시스템, 여과 층으로 구성되어 있다. 이러한 옥상 녹화는 대규모 또는 소규모로 설치하는 방법이 있다. 대규모 옥상녹화의 경우 토양 깊이는 0.03~0.13m가 적절하며 하중 부하는 49~244kg/m²가 유효한 것으로 평가되었다(US EPA, 2000b). 대규모 옥상 녹화의 식생은 작고 느린 성장 그리고 얇은 토층에서 활착이 가능한 종류가 적절하다. 관리 측면에서는 연간 1회 정도가 적절하다. 소규모 옥상녹화의 토층 깊이는 0.3m 내외가 적절하며 공공건물 또는 테라스 등에 일반적으로 설치한다. 대규모 옥상녹화에 비해 소규모 옥상녹화는 배수시스템과 구역별 관리가 필요하다(US EPA, 2000a). 0.08m의 기저 층을 가지는 경우 연간 유출수의 약 50%를 저감하는 것으로 조사되었다(US EPA, 2000b).

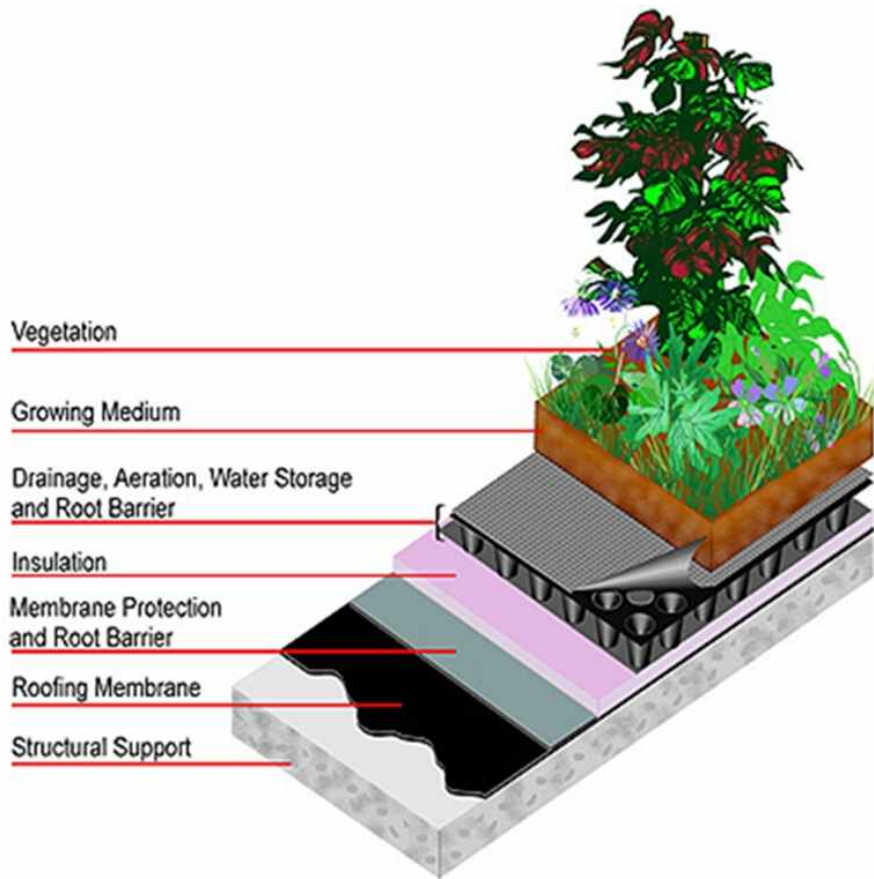


그림 2.6 옥상녹화 LID 표준 구성요소(American Wick Drain Corp.)

제 3 장 홍수량 산정 적용 모형

3.1 모형의 개요

도시구역에서의 강우와 유출에 대한 연구는 주로 외국에서 개발된 기존 유출모형들의 적용성 평가와 우리나라의 강우특성 및 배수구역의 특성치를 도입하는 문제들을 중심으로 활발한 연구가 진행되어 왔으며, 그 성과는 하수도 및 도시하천의 설계 등에 활용되고 있다.

도시구역에서의 설계홍수량 산정을 위하여 국내에서 사용되고 있는 모형들로는 합리식, Road Research Laboratory Simulation Model(RRL), Illinois Urban Drainage Area Simulator(ILLUDAS) 모형 등이 있다. 이 중 합리식과 RRL 모형은 적용이 간편하다는 이점으로 널리 사용되어오고 있으나, 설계자의 주관에 따라 유출량 계산에 큰 차이를 나타낼 수 있다. 한편, ILLUDAS 모형은 지표면의 양상과 배수관로의 계통을 고려하므로, 앞의 두 모형 보다는 정확한 계산결과를 기대할 수 있다. 그러나, 배수관망이 각종 수리구조물을 포함하고 있는 경우에는 정확한 유출량을 산정한다고 보기는 어렵다. 또한, 관로에서의 흐름을 등류로 보고 해석함으로써 관로내 수심의 변화와 배수의 영향을 고려할 수 없는 한계가 있다.

도시구역에서의 강우로 인한 홍수량을 산정하는 모형들 중 Stormwater Management Model(SWMM) 모형은 1971년 미국 EPA의 지원 아래 Metcalf & Eddy 사가 Florida 대학 및 Water Resources Engineers(W.R.E)사와 공동 연구로 도시구역 하수시스템 내의 유량과 수질을 시뮬레이션할 수 있도록 개발하였다. 1981년에는 SWMM 모형내의 TRANSPORT 블록을 확장, 보완하기 위해 수공구조물의 월류, 배수, 압력류 등의 계산이 가능하도록 설계된 EXTRAN 블록을 SWMM 모형에 포함시켜 보완시켰다. SWMM 모형은 도시구역 내에서 강우사상으로 인해 발생하는 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서의 유출량추적, 저류량 산정, 오염물질의 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다.

표 3.1 SWMM 모형의 특징

| 구 분 | 특 징 |
|---------|--|
| 적용 대상유역 | 도시유역 인위적 배수계통을 갖는 소유역 |
| 시간적 특성 | 단일, 연속강우에 의한 계산이 가능(강우간격은 임의 설정 가능) 연산시간 간격은 강우사상에 대해 임의 조절이 가능 |
| 공간적 특성 | 배수구역의 크기에 관계없이 적용이 가능하고, 각 배수유역은 합성, 분리가 가능 배수유역은 최대 200개의 소유역, 수로/관로로 구성 가능 배수유역은 합성, 분리가 가능 |
| 물리적 특성 | 유출은 강우와 용설로 발생 지표면유출은 비선형 저류방정식을 사용 침투량 산정에는 Horton 또는 Green-Ampt식을 사용 수로/관로에 대해 ① RUNOFF - 비선형저류방정식 ② TRANSPORT - Kinematic 방정식 ③ EXTRAN - Dynamic 방정식, 연속방정식 저류추적방법은 수표면이 평행하다고 가정한 수정 Pulse방법을 사용 |
| 호환성 | WASP, DYNHYD, HEC, STORM, QUAL-II 등의 모형 |

3.2 모형의 구조 및 이론식

3.2.1 SWMM의 실행블럭

가. EXECUTIVE 블럭

본 블럭은 실행블럭을 조절하며, 블럭 간 자료를 전송하는 역할을 한다.

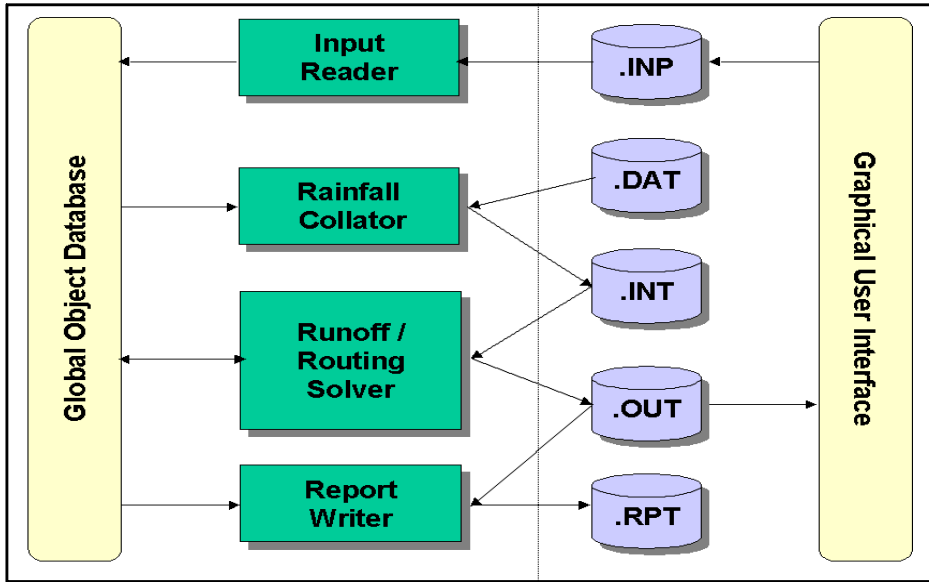


그림 3.1 SWMM 5.0의 구성

나. RUNOFF 블럭

SWMM 모형의 초기연산이 수행되는 부분으로 강우사상에 대해 배수구역에서의 유출현상과 수질변화를 모의한다. RUNOFF 블럭은 임의의 강우우량도, 선행강우조건, 토지이용도, 지형도 등의 자료를 이용하여 지표면, 지표하유출을 추적한다.

다. TRANSPORT 블럭

RUNOFF 블럭에서 연산된 결과를 기본 자료로 사용하며 강우 및 건기시 하수시스템내에서 유량과 오염물질을 추적하고, 하수시스템으로의 침투를 계산한다.

라. EXTRAN 블럭

EXTRAN 블럭은 배수관망 시스템내에서 유량과 수심을 계산하기 위해 개수로/관수로 등에서 Dynamic 방정식에 의하여 흐름을 추적하는 블럭이다. 이 블럭은 합류, 분류 시스템으로 구성되는 도시 배수유역에 적용하기 위해 개발되었다. RUNOFF 블럭에서의 계산 결과치를 입력자료로 이용하며, loop형 관로, 웨어, 오리피스, 펌프 등으로 인한 측방류(側方流) 유입과 기존의 유출모형으로는 계산하지 못했던 월류, 배수(背水), 압력류(壓力流) 등의 수리현상을 계산한다.

마. STORAGE/TREATMENT 블럭

유량과 수질에 대한 조절, 처리장치의 영향을 평가하며, 각 단계에서의 비용연산이 가능하다. STORAGE 블럭에서 저류지의 운영조작 기준은 수위와 유량이다.

표 3.2 유출해석 블럭의 기능 비교

| 블럭 | | RUNOFF | TRANSPORT | EXTRAN |
|----|------------------|--------------|-------------------|-----------------------|
| no | 해석 방법 | 비선형 저류방정식 | Kinematic wave | Saint- Vernant eq. |
| 1 | 관망해석 능력 | 작음 | 중간 | 높음 |
| 2 | 수문곡선의 합성 | 가능 | 가능 | 가능 |
| 3 | 수문곡선의 민감도 | 작음 | 높음 | 높음 |
| 4 | 관로 저류 | 가능 | 가능 | 가능 |
| 5 | 배수 효과 | 불가 | 불가 | 가능 |
| 6 | 역류 현상 | 불가 | 불가 | 가능 |
| 7 | surcharge 해석 | 작음 | 작음 | 가능 |
| 8 | 압력류 해석 | 불가 | 불가 | 가능 |
| 9 | tree 관망해석 | 가능 | 가능 | 가능 |
| 10 | loop형 관망해석 | 불가 | 불가 | 가능 |
| 11 | 해석 단면형태의 수 | 3개 | 16개 | 8개 |
| 12 | 수리구조물 해석 | 불가 | 가능 | 가능 |
| 13 | 기저유량 관내 침투 해석 | 불가 | 가능 | 가능 |
| 14 | 오염물질 산정 | 가능 | 가능 | 불가 |

3.2.2 SWMM의 보조블럭

가. GRAPH 블럭

수문곡선과 오염도곡선을 출력장치로 출력시킨다.

나. COMBINE 블럭

선행 결과들을 연속되는 다른 블럭에서의 결과치와 합성하여 보다 큰 배수 영역에 적용할 수 있도록 Interface File을 관리하고, 파일을 American Standard Code for Information Interchange(ASCII) 파일로 변형시킨다. 그리고 Interface 파일내에서 수문/오염도 곡선을 합성하고, SWMM 모형의 메모리를 관리한다.

다. RAIN 블럭

강우자료군을 10개까지 동시에 고려할 수 있고, 서로 다른 시간간격의 강우량 자료를 처리할 수 있으며, 강우의 시간적, 공간적 분포를 고려할 수 있다. EPA의 SYNOP 모형과 유사한 통계기법을 사용한다.

라. TEMP 블럭

기온에 대한 데이터베이스로 RUNOFF 블럭에서 융설량 계산시 중요한 요소이며, 증발산량 계산의 기본자료가 된다.

마. STATISTIC 블럭

강우사상에 대한 영역의 유출체적, 평균유량, 첨두유량, 지속기간 등의 인자들뿐만 아니라 오염물질 인자들에 대하여 Weibul공식을 이용하여 원하는 인자들을 분석한다.

- 1) 연속시물레이션에서 각 출력자료를 검색한다.
- 2) 강우사상들에 대한 출력자료를 분리한다.
- 3) 강우를 지정된 인자(첨두유량, 평균유출량 등)들로 재배열한다.
- 4) 기존의 데이터베이스에 저장되어 있는 자료를 이용하여 유출량과 오염물질 자료를 빈도와 재현기간에 따라 분석한다.

3.2.3 RUNOFF 블록

RUNOFF 블록은 SWMM 모형내에서 초기연산이 수행되는 부분으로 강우사상에 대해 배수구역에서의 유출현상과 수면변화를 모의하여 SWMM 모형내 다른 부(部) 블록들의 기초자료로 사용되는 수문곡선과 오염도곡선을 제공한다.

RUNOFF 블록의 가장 중요한 기능은 선정된 시간과 위치에서 다른 블록의 실행에 필요한 자료(유입수문곡선, 오염도곡선 등)를 제공하는데 있다. 따라서, RUNOFF 블록은 배수유역을 단순화된 배수유역과 관망으로 재구성하여 해석한다.

가. RUNOFF 블록의 구성

RUNOFF 블록은 35개의 부 프로그램으로 이루어져 있으며 기본적인 구성은 다음과 같다.

- 1) RHYDRO - 강우, 구역특성, 배수관망 자료 등의 입력자료 처리
- 2) QHYDRO - 수질자료를 처리
- 3) HYDRO - 주 연산블록으로 각 배수구간 유출량과 오염물질을 계산
- 4) HCURVE - 수문곡선과 오염도곡선을 출력
- 5) PRPOLL - 수질자료를 출력
- 6) PRFLOW - 유출량자료를 출력

나. 소유역의 특성 인자

Ponce(1989)에 의하면 소유역의 특성은 다음과 같이 5가지로 분류될 수 있으며, 구역 분할시 고려해야 할 특성과, SWMM 모형상에서 분할된 소유역의 물리적인 특성은 다음과 같다.

표 3.3 SWMM 모형의 소유역 특성인자

| 구 분 | 특 성 |
|---------|---|
| 소유역 | 강우는 시간에 따라 균등하게 분포한다. 강우는 공간적으로 균등하게 분포한다. 강우지속기간은 도달시간을 초과한다. 유출은 주로 지표면유출로 구성된다. 수로내 저류의 영향은 무시된다. |
| 분할된 소유역 | 각 소유역은 유사한 지표면특성을 갖는다. 지표면 흐름이 집수로에 유입할 때 수직한 방향으로 유입한다. 유출은 집수로에 유입되며 다른 유역으로 흐르지 않는다. 지표면 유로의 길이는 지표면 흐름이 집수로와 만나는 길이이다. |

1) 유역 면적

소유역은 지형도, 항공사진 등을 이용하여 분리된 균등한 경사, 균질한 토양 등의 일정한 특성을 지닌 배수구역으로 볼 수 있다. 소유역 면적에 대한 상한, 하한의 크기는 제한되어 있지 않으나, 측정된 유출체적이 측정된 강우체적을 초과할 경우 주의 깊게 검토되어야 하는 요소이다.

2) 유역 폭

지표면유출은 직사각형 집수유역 수로에 대해 수직하게 흐르는 것으로 가정한다. 여기서 유역의 폭이란 지표면의 물리적인 폭을 나타낸다. 그러나, 실제의 유역은 대칭적이며 균등한 특성을 지닌 직사각형의 형태로 나타낼 수 없으므로 자연상태에 있는 유역의 폭을 결정하는 일반적인 방법이 필요하다. 유역의 경사와 조도계수가 결정되면, 유역의 폭을 조절함으로써 유출수문곡선의 형태를 변화시킬 수 있으므로 유역폭의 결정은 중요하다.

유출에 있어서 유역의 폭이 증가하면 유출은 보다 신속하게 평형상태에 도달하게 되며, 지면저류량을 감소시키게 된다. RUNOFF 블럭에서는 배수유역이 불규칙하고, 수

로가 배수구역의 중심부에 위치하지 않을 경우에는 무차원 왜곡도계수를 이용하여 직사각형 형태의 구역으로 구역 폭은 보정한 후 유출을 계산한다.

가상의 배수구역에서 왜곡도 계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_k = \frac{(A_2 - A_1)}{A} \quad (3.1)$$

여기서, S_k 는 왜곡도계수, A_1 은 분할된 구역의 한쪽 면적, A_2 는 구역의 다른 한쪽 면적, A 는 구역전체의 면적($A_1 + A_2$)를 나타낸다.

$$W = (2 - S_k) \cdot L \quad (3.2)$$

여기서, W 는 구역폭, L 은 주 배수로의 길이이며, $A = W \cdot L$ 이다.

구역 폭에 따라 유출특성이 변화하며 구역 폭이 결정된 후에는 조도계수와 경사를 이용하여 구역의 유출특성을 보정한다.

3) 불투수 면적

분할된 소유역에서 불투수율은 항공사진과 토지이용도를 이용하여 정확하게 측정될 수 있는 요소이다. 실제로, 이러한 작업은 지루하며, 시간의 소모가 많으므로 구역에서 몇 개의 대표 구역을 선정하여 세밀하게 측정한 후 나머지 구역을 외삽법으로 보간하는 방법이 일반적으로 사용된다. SWMM 모형에서 주의해야 할 점은 불투수구역은 수리학적으로 배수시스템에 직접 연결된 구역만을 고려해야 한다는 것이다.

4) 지면 경사

소유역에서의 경사는 표면유출 유로를 따라 상류구역 끝에서 하류 유출부까지의 평균길이를 사용한다. 구역의 형태가 단순한 경우의 경사는 표고차를 유로 길이로 나눈 값이 된다. 그러나, 구역의 형태가 복잡한 경우에는 계산을 단순하게 하기 위해 여러 표면유출 유로를 생략하고 생략된 유로 길이를 가중값으로 사용하여 전체구역의 경사 값을 결정한다.

5) 조도계수

지표면의 상태는 변화가 다양함으로 수로에서와 같이 일반적인 Manning 조도계수 값이 설정되어 있지 않다. 대상구역의 지표면의 n 값은 수심, 유량 또는 Reynolds 수에 의해 영향을 받는다. 소유역을 합성할 경우 조도계수는 다음 식 (3.3)과 같이 조화평균을 사용하여 합성된 값을 사용한다.

$$\frac{1}{n} = \frac{x}{n_1} + \frac{(1-x)}{n_2} \quad (3.3)$$

식 (3.3)에서 x 는 불투수 구역에 대한 면적비, n_1 는 불투수구역 조도계수, n_2 는 투수구역에 대한 조도계수이다. Kinematic wave공식에 있어서 토지이용 및 표면상태에 따른 조도계수 값은 표 3.4 및 표 3.5와 같다.

표 3.4 Kinematic wave공식의 토지이용에 따른 조도계수 값

| 토지이용 | 조도계수 |
|----------|---------------|
| 상업지구 | 0.015 ~ 0.030 |
| 준 상업지구 | 0.020 ~ 0.035 |
| 고밀도 주거지역 | 0.025 ~ 0.040 |
| 저밀도 주거지역 | 0.030 ~ 0.055 |
| 공원 | 0.040 ~ 0.080 |

표 3.5 Kinematic wave공식의 표면상태에 따른 조도계수 값

| 표 면 상 태 | 조도계수 | 표 면 상 태 | 조도계수 |
|-----------|-------|-----------------------------|-------|
| 아스팔트포장지역 | 0.012 | 경작지가 없으며, 수목이 정렬되어 있는 지역 | 0.030 |
| 콘크리트포장지역 | 0.014 | 경작지가 있고, 수목이 정렬되어 있는 지역 | 0.040 |
| 평 지 | 0.020 | 목 초 지 | 0.040 |
| 기복이 심한 평지 | 0.030 | 조밀한 잔디 | 0.060 |
| 수 림 | 0.020 | 관목과 덩불 | 0.080 |
| 잔 디 | 0.030 | | |

6) 지표면저류

투수구역과 불투수구역의 지면에 충분하게 지면저류가 되기 이전에는 지표면유출이 발생하지 않는다고 가정한다. RUNOFF 블록에서는 투수구역에 지면 저류된 물은 침투와 증발로 인해 손실되고, 불투수구역에서는 오로지 증발에 의해서만 손실이 발생한다고 본다. SWMM에서 평균 지표면저류 깊이는 다음의 식 (3.4)와 같이 표현하였다.

$$\text{평균 지면저류 깊이} = x \cdot d_1 + (1-x) \cdot d_2 \quad (3.4)$$

식 (3.4)에서 x 는 불투수 지역의 면적비, d_1 는 불투수구역의 지표면저류 깊이(mm), d_2 는 투수구역의 지표면저류 깊이(mm)를 나타낸다.

SWMM 모형내에서 지면저류는 유출체적을 보정하기 위한 검증인자로 사용되며, 지면저류 값은 여러 강우사상의 강우량에 대한 유출체적(수심)을 나타내므로 불투수 유역에 대한 강우유출자료에서 얻을 수 있다. 유출이 일어나지 않을 경우 강우의 손실, 차단은 지면저류된 것으로 본다.

표 3.6 표면굴곡으로 인한 저류깊이(표면저류량)

| 토양의 표면상태 | | | 저 류 깊 이 |
|----------|--------|----|-------------|
| 불투수구역 | 포장된 구역 | | 0.13 ~ 0.40 |
| | 지 붕 | 수평 | 0.25 ~ 0.80 |
| | | 경사 | 0.13 ~ 0.25 |
| 투수구역 | 잔 디 | | 0.50 ~ 1.25 |
| | 수 립 | | 0.50 ~ 1.50 |

다. 구역의 분할과 합성

1) 구역의 분할

구역의 유출특성을 계산하기 위해서는 먼저 배수구역에 대한 경계를 정한 후 구역 전체를 소유역으로 분할하고, 지표흐름과 수로/관로 흐름으로 분리하게 된다. 구역의 분할은 물리적인 배수시스템을 수치적으로 수식화하는 과정으로 볼 수 있다.

SWMM 모형 개발 초기에 소유역은 균등한 구역특성(경사, 조도 등)을 갖는 직사각형으로, 구역의 형태는 면적, 구역폭, 경사 등의 요소로 설정되었다.

지표면의 형태는 저류깊이, 조도계수, Horton의 침투계수 등으로 구성된다. 소유역은 같은 크기로 구성될 필요는 없으며, 불규칙한 형태의 구역은 평균폭 등을 사용하여 등가의 사각형으로 근사된다.

구역은 먼저 항공사진 또는, 지형도를 이용하여 배수구역의 경계를 설정하고, 배수구역도로 구역의 관로 형태와 설치 위치 등을 구성한 후, 지적도와 토양도 등으로 소유역의 토지 이용 상황과 토양의 특성, 행정구역 등의 자료를 기초로 구역을 분할하게 된다.

2) 구역의 합성

전체 배수구역은 여러 개의 소유역으로 분리되거나, 합성될 수 있으며, 배수구역 출구에서의 수문곡선과 오염도곡선만을 고려하는 경우, 구역을 분할하지 않고 하나의 구역으로 계산하여도 충분하다.

단일 강우사상에 대해 필요한 소유역의 수는 수리학적으로 고려되는 즉, 모델화 되는 성분들(배수, 월류, 추적, 저류 등)의 함수로 볼 수 있다. 유역의 입력자료의 양은 유역의 수가 줄어들면 감소하게 된다. 그러나, 유역의 수를 줄일 경우에 문제가 되는 것은 단순하게 유역의 수를 줄이는 것이 아니라 유역을 세분화하여 시물레이션한 수문곡선과 오염도곡선의 값과 같은 정도의 값을 계산하도록 조정하며 줄여야 한다는데 있다.

유역의 폭을 알맞게 보정하면 여러 소유역을 합성된 하나의 등가 소유역으로 구성할 수 있으며, 소유역을 합성할 경우에는 유역을 합성함으로써 손실되는 저류량을 보정하는 것이 중요하다. RUNOFF에서는 유역의 폭을 변화시킴으로 합성된 유역에서의 유출특성을 보정하며, 유역의 조도계수, 경사 등을 변화시켜도 같은 결과를 얻을 수 있다. 여기서, 조도계수와 경사는 합성시에 조화평균을 이용하여 계산하게 되므로 실제 유역 합성시 보정되어야 하는 인자는 유역폭이다.

유역내에서 유출을 고려할 경우 유역의 폭이 감소하면 도달시간이 길어져 지면저류의 양을 증가시키게 된다. 그러므로 소유역이 합성되어, 배수관망내에서 저류량이 감소하게 되면, 합성된 배수유역의 폭과 소유역에서의 폭을 줄인다. 합성된 유역의 폭은 근사적으로 유출수문곡선 첨두치를 일치시키기 위해 합성된 소유역내 주배수로 길이의 2배 정도가 된다.

라. 침투량 산정

SWMM 모형에서 투수유역으로부터의 침투는 Horton 또는 Green-Ampt 방정식을 선택하여 사용할 수 있으나, 국내에서는 Green-Ampt 방정식에 대한 전반적인 적용성의 검토가 아직 이루어지지 않았으며, 자료 또한 미비하므로 본 연구에서는 Horton 방정식을 사용하였다.

Horton의 침투방정식은 식 (3.5)와 같다.

$$f_p = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-kt} \quad (3.5)$$

여기서, f_p 는 임의 시간에 있어서의 침투능 (mm/hr), f_0 는 초기 침투능 (mm/hr), f_c 는 종기 침투능 (mm/hr), t 는 시간 (hr), k 는 토양의 종류와 식생피복에 따라 결정되는 상수이다. 이 식은 시간에 대한 함수로 폭우시 동안 지수감소 침투율을 나타내고 있다.

식 (3.5)에서 f_c 는 투수성을 나타내며, 포화수리전도도(K_s)와 같다. 프로그램에서는 식 (3.5)를 적분된 형태의 식으로 사용한다.

실제 침투량 계산은 식 (3.5)을 적분한 식 (3.6)을 사용한다.

$$\begin{aligned}
 F(t_p) &= \int f_p dt & (3.6) \\
 &= f_c t + \frac{1}{k}(f_o - f_c)(1 - e^{-kt_p})
 \end{aligned}$$

실제침투량은 t_p 까지 직접 계산될 수 없으므로, 반복법을 사용하여 계산($t_p \leq t$ 범위에서 한다. $t_p \leq t$ 의 범위에서 프로그램화 할 경우 이 관계식은 누가 Horton 곡선에 의 t_p 가 실제 시간과 비교하여 작거나 같다는 것을 나타낸다. 따라서, 식 (3.7)으로 계산된 침투량은 실제 침투량과 같거나 작게 된다.

표 3.7 침투량 계수

| 구 분 | 토 양 피 복 상 태 | | | |
|---------------------|-------------|------|-----|-----|
| | A | B | C | D |
| 중기침투능 f_c (mm/hr) | 25.4 | 12.7 | 6.4 | 2.5 |
| 초기침투능 f_0 (mm/hr) | 254 | 203 | 127 | 76 |
| 감쇠 계수 k | 2 | 2 | 2 | 2 |

마. 도달시간

RUNOFF 블럭에서는 표면유출 도달시간 산정에 Kinematic Wave공식을 사용한다. 그러나, 이 식의 일반적인 특성은 비교적 단순하고 동질성을 갖는 표면 유출에 적용되는 공식이므로 이질성이 높은 복합표면 유출에는 적용하기가 곤란하다. 그러므로, 이 공식은 주차장, 도로, 또는 포장된 노면, 잔디밭, 운동장 등 어느 한가지로 구성된 지역에 가장 적합하고, 넓은 유역에서는 일반적으로 사용하지 않는다. RUNOFF 블럭에서 소유역에서의 유출을 계산하기 위해 유역을 분할해야 할 경우에는 소유역의 특성들을 알맞게 구현할 수 있도록 주의하여 분할, 또는 합성해야 한다.

$$t_c = \left(\frac{L}{a \cdot d^{m-1}} \right)^{1/m} \quad (3.7)$$

식 (3.7)에서 t_c 는 도달시간(sec), L 은 소유역 유로길이, d 는 수심(m), a 와 m 은 Kinematic wave식의 계수이다.

Kinematic wave식은 소유역에서 단위폭당 유출을 다음과 같이 가정한다.

$$q_L = a \cdot d^m \quad (3.8)$$

식 (3.8)에서 q_L 은 단위폭당 유량(m^3/sec), d 는 수심 (m)이며, a 와 m 인자는 등류 흐름으로 가정한 Manning식으로 계산한다.

$$a = \frac{1}{n} \cdot s^{1/2} \quad (3.9)$$

$$m = \frac{5}{3} \quad (3.10)$$

배수유역 길이는 직사각형 형태의 유역으로 가정하여 결정된 폭으로 유역면적을 나눴으로 간단하게 결정될 수 있다. 도달시간은 강우강도에 의해 영향 받는다. 강우강도가 증가하면 도달시간(t_c)이 감소하게 된다. 여기서, 도달시간은 유입량이 유출량과 같아지는 평형상태의 시간을 나타내며, 유역의 가장 먼 지점에서의 유출이 출구점까지 도달하는데 걸리는 시간과 같다.

바. 관로의 구성

RUNOFF 블록에서는 배수유역을 200개의 관로, 집수구로 구성할 수 있으며, 관망구성은 기본적으로 ILLUDAS 모형과 유사하다. 그러나, 이러한 제한사항들은 사용자의 하드웨어 사양이나, 모의(Simulation) 용도에 따라 쉽게 조절될 수 있다. 소유역에서의 유출은 항상 접합부나 수로/관로에 유입되며, 작은 배수관망을 모의하기 위해서는 가지망 하수시스템을 사용한다. 표 3.8은 각 블록의 구성요소를 나타내었다.

표 3.8 각 블록의 구성요소

| 블록 | 입력 | 출력 |
|-----------------------|---------------------|----------------------|
| RUNOFF | - | 200 관망요소 10개 오염물질 |
| TRANSPORT | 200 관망요소 4개 오염물질 | 200 관망요소 |
| EXTRAN | 200개 관망요소 | 200 접합점, 관로 |
| STORAGE/ TREATMENT | 10개 처리장치 3개 오염물질 | 10개 처리효율 3개 오염물질 |

RUNOFF 블록에서 수로/관로의 형태는 (1) 원형 (2) 사다리꼴형 (3) 포물선형 등의 3가지를 기본형으로 하며, 수로/관로 관망구성시 너무 짧은 관로와 긴 관로는 불안정한 값을 산출할 수 있으므로 주의하여야 한다.

관로의 구성시 유역의 집수구에 관로들이 많이 접합되어 있을 경우, 이 관로들 모두를 입력자료로 구성하면 좀더 정확한 값을 얻을 수 있으나 자료의 양이 많아지게 되어, 모의 시간이 길어지게 된다. 이러한 경우 RUNOFF 블록에서는 Dummy수로/관로를 사용하여, 여러개의 수로/관로를 하나의 수로/관로로 합성하여 계산을 단순하게 한다.

사. 지표면유출의 기본방정식

RUNOFF 블록에서 지표면유출에 대한 기본방정식은 마찰경사를 유역경사와 같다고 가정하는 Kinematic wave 근사법인 비선형저류방정식이 사용된다. RUNOFF 블록은 각 소유역에서의 수심과 유량을 결정하기 위해 연속방정식과 Manning방정식을 사용한다.

Kinematic wave 근사법은 배수영향이 큰 경우에는 적합하지 않으며 급경사, 완만한 홍수파의 상승구간에 적용이 가능하다.

계산을 수행하는 데는 상류부 경계조건만이 필요하고, 각 수로요소는 다른요소에 대해 독립적인 계단형 수로로 가정한다. 각 연산구간 dt 에서 두개의 미지수 유량 Q 와

수심 d 가 존재하며 이를 위한 두개의 방정식이 구성된다. 소유역에서의 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = A_s i - Q \quad (3.11)$$

식 (3.11)에서 V 는 물의 체적($= A \cdot d$), d 는 수심(m), t 는 시간 (sec), A_s 는 수표면 면적(m^2), i 는 초과 강우량 (m/sec), Q 는 유출량 (cms)이다. RUNOFF 블록에서 지표면유출은 유역면적을 광폭으로 보아 수리반경이 수심과 같다는 가정아래 Manning방정식을 사용하여 계산한다.

$$Q = W \cdot \frac{1}{n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (3.12)$$

식 (3.12)에서, W 는 유역의 폭(m), n 는 Manning의 조도계수, d_p 는 지면저류 깊이 (m), S 는 소유역 경사(m/m)이다. 미지값 d 를 계산하기 위해 식 (3.12)를 식 (3.11)에 대입하여 정리한 비선형 저류방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta d}{\Delta t} &= i - \frac{W}{A \cdot n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \\ &= i + R \cdot (d - d_p)^{5/3} \end{aligned} \quad (3.13)$$

여기서, $R = -\frac{W \cdot S^{1/2}}{A_s \cdot n}$

R 은 유역폭, 경사, 조도계수 등을 하나로 표현한 변수로서 유역의 특성에 따라 변화하는 유역특성 인자이다. 수공구조물에 관한 특성인자로서는 웨어계수, 웨어길이, Notch 각 등이며, 오리피스는 오리피스 계수와 단면적 등으로 구성될 수 있다. 식 (3.13)은 각 연산 시간구간에서 유한차분법을 사용하여 풀이될 수 있다. 차분법을 적용함에 있어서, 방정식의 오른쪽항에서 유입량과 유출량은 시간에 대한 평균값이다. 그럼에서 d_n 은 t 시간에서의 수심, d_{n+1} 는 $t + \Delta t$ 에서의 수심이다. 초과강우량 i 는 각 연산 시간구간에서 입력자료로 주어지며, 평균유출량은 계산 초기와 종기의 수심을 평균한 값으로 계산된다. 식 (3.13)은 다음의 차분식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{(d_{n+1} - d_n)}{\Delta t} = i + R \cdot \left(d_n + \frac{(d_{n+1} - d_n)}{2} - d_p \right)^{5/3} \quad (3.14)$$

식 (3.14)는 Newton-Raphson 반복법을 이용하여 풀이되며, 미지수심 d_2 가 계산되면 각 연산구간에서 순간유출(WFLOW)을 계산하게 된다. 여기서 계산된 순간 유출값은 유입구나 측구 및 관로 등에 유입되며, 연속되는 SWMM모형내 다른 블록에 전달되는 입력자료(유량자료)가 된다. Newton-Raphson 반복법을 사용하여 식 (3.14)에서 d_n 을 계산하기 위하여, 먼저 식 (3.15)의 Newton 함수를 구성한다.

$$F = \Delta d - \Delta t [i_e + R \cdot d_{ave}]^{5/3} \quad (3.15)$$

여기서, $d_{ave} = d_1 + \frac{\Delta d}{2} - d_p$, $i_e = i - f$ (침투로 인한 손실)

식 (3.15)을 미분하면,

$$\frac{dF}{d(\Delta d)} = 1 - \frac{5}{6} R d_{ave}^{2/3} \Delta t \quad (3.16)$$

Δd_{n+1} 값을 계산하기 위해 Newton-Raphson 반복법을 사용한다.

$$(\Delta d)_{n+1} = (\Delta d)_n - \frac{F_k}{dF_k/d(\Delta d)} \quad (3.17)$$

반복 계산과정에 의해 F_k 가 0에 수렴하는 Δd 값으로 부터 $(k+1)$ 단계에서의 수심 d_{n+1} 이 계산되며, 식 (3.12)으로 부터 지표면 유량, Q 를 계산한다.

아. 관로유출의 기본방정식

RUNOFF 블록에서 관로유출은 비선형 저류방정식으로부터 계산된다. 본 방정식의 해를 구하기 위하여 모형개발 초기에는 수정 Euler방법을 사용하였으나, 후에 보다 안정된 해를 얻기 위해 Newton-Raphson방법으로 대체되었다. Manning식이 각 적분 연

산구간에서 사용되며, 유출현상의 동역학적 거동은 준 정상(Quasi-steady) 상태로 근사 처리하였다. 이 방법은 수심 d 와 단면적 A 가 시간에 따라 급하게 변화하지 않는 경우에 그 적용성이 크다. 관로유출에서 사용되는 연속방정식과 Manning식은 식 (3.18), (3.19)와 같다.

$$\text{저류량} = \Delta V = \Delta t \cdot (Q_i + Q_W + Q_{GW} - Q) \quad (3.18)$$

$$\text{유출량} = A = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (3.19)$$

여기서, Q_W 는 측방 유입량, Q_{GW} 는 지하수 유입량이다. Q 는 d_n 과 d_{n+1} 평균값을 이용하여 Manning공식으로 구한다. 관로에서도 표면유출에서와 같이 비선형방정식인 식 (3.18), (3.19)를 풀이하기 위해 Newton-Raphson 반복법을 사용한다.

$$F = \Delta V + \Delta t \cdot (Q - Q_i - Q_W - Q_{GW}) \quad (3.20)$$

식 (3.20)에서 Q 는 유출량, Q_i 는 유입량이다. ΔV 와 Q 는 d_n 과 d_{n+1} 으로 나타낼 수 있으며 식 (3.20)으로부터 Δd 의 도함수를 구한다. $(\Delta d)_{n+1}$ 값을 얻기 위해 식 (3.17)을 이용하며 Newton-Raphson 반복법을 적용한다. F_n 값이 0으로 수렴하는 $(\Delta d)_{n+1}$ 값을 구하며, $(\Delta d)_{n+1}$ 값을 이용하여 식 (3.19)로 유량 Q 를 구한다. 여기서 구한 Q 값은 다음 단계에서의 유입량이 되며 이러한 연산과정은 하류부 수로의 끝까지 반복된다.

자. 지표면유출의 경계조건

1) RUNOFF 블록의 초기조건

초기시간, $t=0$ 에서 지표면 저류량은 0이다.

2) RUNOFF 블록의 경계조건

유역의 상류 끝 소유역에서는 외부유입이 없으며, 상류유역에서 강우로 인해 발생하는 지표면유출은 수리학적으로 연결된 하류유역에 유입되며, 다른 유역으로는 유출되지 않는다.

3.2.4 TRANSPORT 블록

RUNOFF 블록에서 연산된 결과를 기본자료로 사용하며 강우 및 건기시 하수시스템 내에서 유량과 오염물질을 추적하고, 하수시스템으로의 침투를 계산한다.

가. 블록의 구성

TRANSPORT 블록은 24개의 보조 블록들로 구성되며, 그 주요 블록은 다음과 같다.

- 1) INITIAL - 침투와 건기유량의 조건을 초기화하는 블록.
- 2) FILTH - 상업, 공업지역에서 수질 및 오염물질의 평균량을 산정.
- 3) DWLOAD - 이 블록은 수질을 모의하는 QUAL을 보조하며, 관로에서 오염물질의 침전 누가량을 산정하는 블록.
- 4) ROUTE - 유량에 대하여 추적하는 블록이며, 이때, NEWTON블록을 이용하여 Newton-Raphson법으로 부터 해를 구함.
- 5) DEPTH - 관로에서 유량의 수심을 구하는 블록.
- 6) FINDA - 유량-면적곡선을 이용하여, 유량을 알고 단면적을 계산하는 블록.
- 7) NEWTON - 유량-면적곡선을 이용하여, Newton-Raphson법을 사용하여 연속방정식으로 계수값과 유량과의 적정선을 찾는 블록.
- 8) DPS - 일반적으로 무차원 유량-면적의 곡선에서 함수관계를 읽음.
- 9) RADH - 관로에서 단면적이 주어졌을 때 수리반경을 구하는 블록.
- 10) QUAL - 모형에서 수질을 모의하는 블록.

나. 블록의 기본 방정식

TRANSPORT 블록은 다음의 Manning식과 연속방정식으로 구성된다.

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S_o^{1/2} \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3.22)$$

여기서, S_0 는 관로의 경사이며, 마찰경사 S_f 와 같다고 가정하고, 각 시간간격에서 흐름은 정상류로 간주한다. x 는 관로의 길이, A 는 흐름 단면적, R 은 동수반경, n 은 Manning의 조도계수, Q 는 유량, t 는 시간을 나타내며, g 는 중력가속도이다.

연속방정식은 Kinematic wave식의 형태이며 차분화하여 표현된다. 그림 3.2는 연속방정식에서의 격자망 구성과 가중치

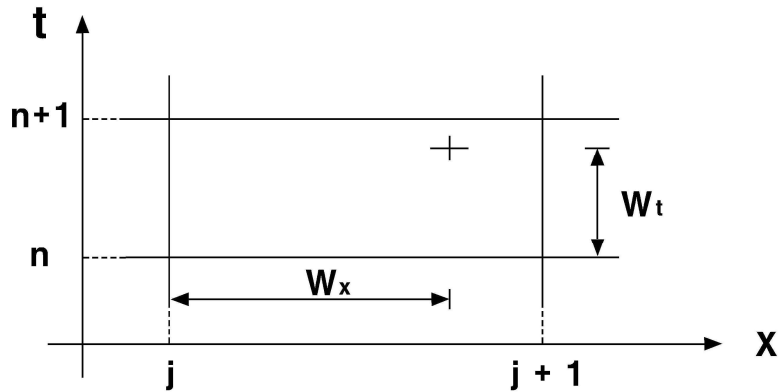


그림 3.2 격자망의 구성과 가중치

그림 3.2에서 기지유량 Q 를 위치 j 에서의 값으로 하고, 단면적 A_j , 그리고 하류방향 위치를 $j+1$ 로 놓는다. 시간차분의 현 기지시간대는 첨자 n 으로 표시하고, $n+1$ 은 다음 단계의 시간대이다. 또한, $j+1$ 위치의 가중치가 W_x 이면, $1 - W_x$ 는 j 에서의 가중치가 된다. 마찬가지로 $n+1$ 의 시간간격의 가중치가 W_t 이면, n 번째 시간대에서 가중치는 $1 - W_t$ 이다. 이를 고려하여 위의 연속방정식을 차분식으로 표현하면 식 (3.23)으로 표시된다.

$$\frac{(1 - W_x)(A_{j,n+1} - A_{j,n}) + W_x(A_{j+1,n+1} - A_{j+1,n})}{\Delta t} + \frac{(1 - W_t)(Q_{j+1,n} - Q_{j,n}) + W_t(Q_{j+1,n+1} - Q_{j,n+1})}{\Delta x} = 0 \quad (3.23)$$

식 (3.23)를 각각의 항에 대하여 $\Delta x/W_t$ 를 곱하여 정리하면

$$\begin{aligned}
 Q_{j+1,n+1} + \frac{\Delta x}{\Delta t} \frac{W_x}{W_t} (A_{j+1,n+1}) + \frac{\Delta x}{\Delta t W_t} [(1 - W_x)(A_{j,n+1} - A_{j,n}) \\
 - W_x A_{j+1,n}] + \frac{(1 - W_t)}{W_t} (Q_{j+1,n} - Q_{j,n}) - Q_{j,n+1} = 0 \quad (3.24)
 \end{aligned}$$

여기서, 미지수 Q , A 를 무차원으로 표현하면, 단면적의 경우 식 (3.25)와 같다. 이때 A_f 는 만관시의 단면적이다.

$$A^* = \frac{A}{A_f} \quad (3.25)$$

또한, 무차원 유량은 식 (3.26)과 같다. Q_f 는 만관시의 유량이다.

$$Q^* = \frac{Q}{Q_f} \quad (3.26)$$

식 (3.25), (3.26)을 이용하여 식 (3.24)의 형태로 변화시키면, 식 (3.27)이 된다.

$$Q_{j+1,n+1}^* + C_1 A_{j+1,n+1}^* + C_2 = 0 \quad (3.27)$$

여기서, C_1 의 계수값은 식 (3.24)의 형태로 나타낼 때 면적과 유량의 함수로 나타내고, 식 (3.24)에서 Q_f 로 나누어 주면, C_1 의 계수값은 다음과 같이 표현된다.

$$C_1 = \frac{\Delta x}{\Delta t} \frac{W_x A_f}{W_t Q_f} \quad (3.28)$$

또한, 계수 C_2 는 A^* 와 Q^* 로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 C_2 = & \frac{\Delta x}{\Delta t} \frac{A_f}{W_t Q_f} [(1 - W_x)(A_{j,n+1}^* - A_{j,n}^*) - W_x A_{j+1,n}^*] \\
 & + \frac{1 - W_t}{W_t} (Q_{j+1,n}^* - Q_{j,n}^*) - Q_{j,n+1}^*
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

여기서, C_1, C_2 는 각 계산시간대에서 기지값이며, 식 (3.27)에서의 미지값은 유량과 면적사이의 관계식을 도입하여 구할 수 있다. 즉, Δx 구간에서의 흐름을 정상동류로 가정하면 Manning공식에서 Q/Q_f 와 A/A_f 간의 1가 함수관계가 성립된다. 따라서 미지수 Q 및 A 는 식 (3.27) 및 무차원 유출량-면적($Q/Q_f - A/A_f$)관계로부터 그 해가 구해진다.

그러나, 이 경우의 해는 하류 경계조건을 사용하지 않으므로 하류로부터의 배수효과(Downstream backwater effect)를 고려하지 못한다. 따라서 이러한 경우의 부정확성을 극복하기 위하여서는 다음의 과정을 도입한다. 즉, Q_f 값을 구할 때 사용되는 마찰경사 S_f 는 St. Venant방정식에서 국부가속도 항을 생략한 다음의 식 (3.30)으로 표현된다.

$$\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0 \tag{3.30}$$

또한, 여기서 S_f 는 식 (3.31)의 차분형태로 표현이 가능하다.

$$S_f = S_o - \frac{h_j - h_{j+1}}{\Delta x} + \frac{V_j^2 - V_{j+1}^2}{2g\Delta x} \tag{3.31}$$

이 식은 마찰경사 S_f 로 표현되는 Quasi-steady dynamic wave의 식이며, 하류의 배수효과를 고려하기 위하여 사용된다.

3.2.5 EXTRAN 블록

EXTRAN(Extended Transport Model)블록은 San Francisco에서 도시유역 유출해석을 위해 개발되었다. 당시에는 San Francisco 모형이라 불리웠으나, 1981년 미국 환경청에서는 기존 SWMM 모형의 TRANSPORT 블록을 보완하기 위해 이를 SWMM 모형에 삽입시켰으며, TRANSPORT 블록과 구분하여 EXTRAN 블록으로 설정하였다. EXTRAN 블록은 기존 도시유출모형들이 계산할 수 없었던 LOOP형 관망형태의 흐름, 배수, 역류, 압력류(Surcharge)계산과 웨어, 오리피스, 저류지, 펌프장 등에서 흐름의 추적계산이 가능하도록 설계된 수리모형이다.

EXTRAN 블록은 배수관망 시스템에서 유량과 수심을 계산하기 위해 개수로/관수로 등으로 유입되는 RUNOFF 블록 또는 타 지표면유출 모형으로부터의 유입수문곡선으로부터 Dynamic 방정식을 사용하여 추적한다. 이 모형은 합류, 분류 시스템으로 구성되는 도시배수유역에서 유출현상을 모의할 수 있으며, 자연수로와 같은 임의 단면의 수로도 사다리꼴로 근사시켜 계산한다. 흐름을 정류로 가정하고 유출해석을 하는 경우 배수곡선을 구할 수 없으므로, 이러한 문제점을 보완하기 위하여 EXTRAN 블록은 흐름을 부정류로 계산하도록 설계되었다.

기본방정식으로 1차원 부정류 점변류 방정식(St. Venant 방정식)인 Dynamic 방정식을 사용하며, 수치 해석적으로 시간에 대해 전진법인 양해법(Explicit method)을 사용한다. 연산 시간간격(Time-step)은 시스템내에서 가장 짧은 수로/관로를 통과하는 파속의 크기를 고려하여 결정되며, 배수시스템을 LINK와 NODE로 구성하여 기존의 유출모형이 관망형태를 수지상 형태로 한정된 점을 보완할 뿐만 아니라, LOOP형 배수관망, 웨어, 오리피스, 펌프 등의 수리구조물로 인한 측방류 유입, 부분적인 압력류 등을 계산할 수 있다.

가. 블록의 구성

EXTRAN 블록은 21개의 부프로그램으로 구성되며 블록의 구성은 다음과 같다.

- | | |
|---------------------------|--|
| 1) EXTRAN | -실행 블록. |
| 2) TRANSX | -주 실행 블록. |
| 3) X,Y,Z ROUTE | -개수로/관수로에 적용되는 흐름방정식에 대한 연산을 수행한다. (수치해는 수정 Euler방법(X, Y-ROUTE)과 반복법(Z-ROUTE)으로 구한다.) |
| 4) INDAT1, INDAT2, INDAT3 | -입력자료를 읽어 들인다. |
| 5) INFLOW | -배수관망내에서 각 입력 Node로의 유입수문 곡선을 계산한다. |
| 6) OUTPUT | -계산된 유출 결과치와 그래프를 출력한다. |

나. 관로의 구성

EXTRAN 블록은 물리적인 배수시스템에 대한 점변부정류 방정식(St, vernant 방정식)의 해를 구하는데 유용하도록 관로 시스템은 NODE(접합점)와 NODE에 연결된 LINK(관로)들로 구성된다.

1) LINK

LINK는 NODE와 NODE 사이를 연결하며, 유량을 전송하는 관로와 같다. LINK에서의 주요 수리특성치들은 조도계수, 길이, 단면적, 동수반경과 수면폭 등이다. 여기서 단면적, 동수반경, 수면폭 등은 수심의 함수로 나타낼 수 있다. LINK내에서 중요한 독립 변수는 유량(Q)이다. 수치적분의 해는 LINK에서의 평균유량을 나타내며, 각 연산 단위시간구간에서는 일정하다고 가정한다. 한편, EXTRAN 블록에서 관로 구성시 관로의 길이는 수치해석의 안정조건에 부합해야 한다.

2) NODE

NODE는 배수시스템에서의 맨홀 또는 접합점 등과 같은 시스템내의 저류요소이다. NODE와 관련된 변수들은 유량, 수심, 수표면적 등이며, 중요한 종속변수는 수위(H)이다. NODE의 체적은 NODE 사이에 연결된 양 관로 길이의 중간까지 저류된 물의 체적과 같다고 가정한다.

다. 기본이론

EXTRAN 블록에서 흐름에 대한 기본방정식은 연속방정식과 개수로에서의 일차원 점변 부정류 방정식으로서 다음의 St.Venant 식을 사용한다.

표 3.9 EXTRAN 블록에서 LINK와 NODE의 특성

| | 제한사항 | $\Sigma Q =$ 저류량의 변화 |
|------|-----------|---------------------------------|
| NODE | 연산구간의 특성치 | 체적, 단면적, 수심 |
| | 상수 | 경사, 지반표고 |
| | 제한사항 | 유입량 = 유출량 |
| LINK | 연산구간의 특성 | 단면적, 동수반경, 수면표고, 유량, 유속 |
| | 상수 | 수리 손실계수, 관로형태, 관로길이, 관로경사, 조도계수 |

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (3.33)$$

EXTRAN 블록은 LINK에서 운동량방정식을 NODE에서는 연속방정식을 사용한다. 수심이 얇은 흐름에 있어서 이송항($\partial(Q^2/A)/\partial x$)은 운동량방정식 계산시 생략하게 되는데, 이 항이 운동량방정식의 여러 항들 중에서 가장 작은 값을 갖는 동시에 결과치에 불안정한 요인을 제공하기 때문이다(Yen, 1981). 따라서, 간편하고, 안정된 해를 구하기 위해 식 (3.34), (3.35)로부터 식 (3.32)를 변형시킨다.

$$\frac{Q^2}{A} = V^2 A \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial(V^2 A)}{\partial x} = 2AV \frac{\partial V}{\partial x} + V^2 \frac{\partial A}{\partial x} \quad (3.35)$$

식 (3.34), (3.35)를 식 (3.33)에 대입하고 정리하면 종속변수 Q, A, V, H 등을 갖는

운동량방정식 식 (3.36)을 얻게 된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2AV\frac{\partial V}{\partial x} + V^2\frac{\partial A}{\partial x} + gA\frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (3.36)$$

식 (3.32)에 $Q = AV$ 를 대입하고 정리하면,

$$\frac{\partial A}{\partial t} + A\frac{\partial V}{\partial x} + V\frac{\partial A}{\partial x} = 0 \quad (3.37)$$

이 식에 V 를 곱하고 정리하면,

$$AV\frac{\partial V}{\partial x} = -V\frac{\partial A}{\partial t} - V^2\frac{\partial A}{\partial x} \quad (3.38)$$

식 (3.38)를 식 (3.36)에 대입하고 정리하면 EXTRAN 블록에서 하수의 흐름추적에 사용되는 다음의 기본방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f - 2V\frac{\partial A}{\partial t} - V^2\frac{\partial A}{\partial x} + gA\frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (3.39)$$

1) LINK에서의 수리

EXTRAN 블록에서는 운동량방정식의 해를 구하기 위해 차분방정식을 사용하는데, 3가지의 각기 다른 연산기법을 이용하여 해를 구할 수 있다. 먼저, Manning식으로 마찰 경사를 나타내면 다음과 같다.

$$S_f = \frac{k}{gAR^{4/3}} Q |V| \quad (3.40)$$

여기서, k 는 gn^2 이며, 속도의 절대값을 사용한 것은 S_f 를 흐름방향으로 설정하여 마찰력이 항상 흐름방향과 반대가 되도록 설정하기 위함이다. 식 (3.40)을 식 (3.39)에 대입하고 유한차분법의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Q_{t+\Delta t} &= Q_t - \frac{k \Delta t}{R^{4/3}} |V_t| Q_{t+\Delta t} + 2\bar{V} \left[\frac{\Delta A}{\Delta t} \right]_t \Delta t \\
 &\quad + \bar{V}^2 \frac{A_2 - A_1}{L} \Delta t - g\bar{A} \frac{H_2 - H_1}{L} \Delta t
 \end{aligned} \tag{3.41}$$

$Q_{t+\Delta t}$ 에 대해 위의 식을 정리한 다음의 유한차분 방정식이 LINK 내에서의 기본방정식이다.

$$\begin{aligned}
 Q_{t+\Delta t} &= \frac{1}{1 + \frac{k \Delta t}{R^{4/3}} |V|} [Q_t + 2\bar{V} \left[\frac{\Delta A}{\Delta t} \right]_t \Delta t \\
 &\quad + \bar{V}^2 \frac{A_2 - A_1}{L} \Delta t - g\bar{A} \frac{H_2 - H_1}{L} \Delta t]
 \end{aligned} \tag{3.42}$$

식 (3.42)에서 \bar{V} , \bar{R} , \bar{A} 는 시간 t 에서, LINK 양단에서의 가중평균 값이다.

2) NODE에서의 수리

위 식 (3.42)에서 미지 값은 $Q_{t+\Delta t}$ 와 H_2, H_1 이며, 변수 \bar{V} , \bar{R} , \bar{A} 는 Q 와 H 로 구성된다. 그러므로, 이 방정식을 풀이하기 위해서는 Q 와 H 에 대한 하나의 방정식이 더 필요하며, NODE에서의 연속방정식이 사용된다. 즉,

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\sum Q_t \Delta t}{A_s} \tag{3.43}$$

위 식 (3.43)을 수심에 대해 차분화하게 되면

$$H_{t+\Delta t} = H_t + \frac{\sum Q \Delta t}{A_s} \tag{3.44}$$

식 (3.44)에서 A_s 는 NODE에서의 수표면적이다.

식 (3.42)와 식 (3.44)는 각 연산시간구간 Δt 에서 NODE 수심과 LINK내 유량을 연산하기 위해 사용된다. 이 두 방정식의 수치적분 과정에서는 기본적으로 2차 Runge-Kutta방법과 같은 수정 Euler방법을 사용한다.

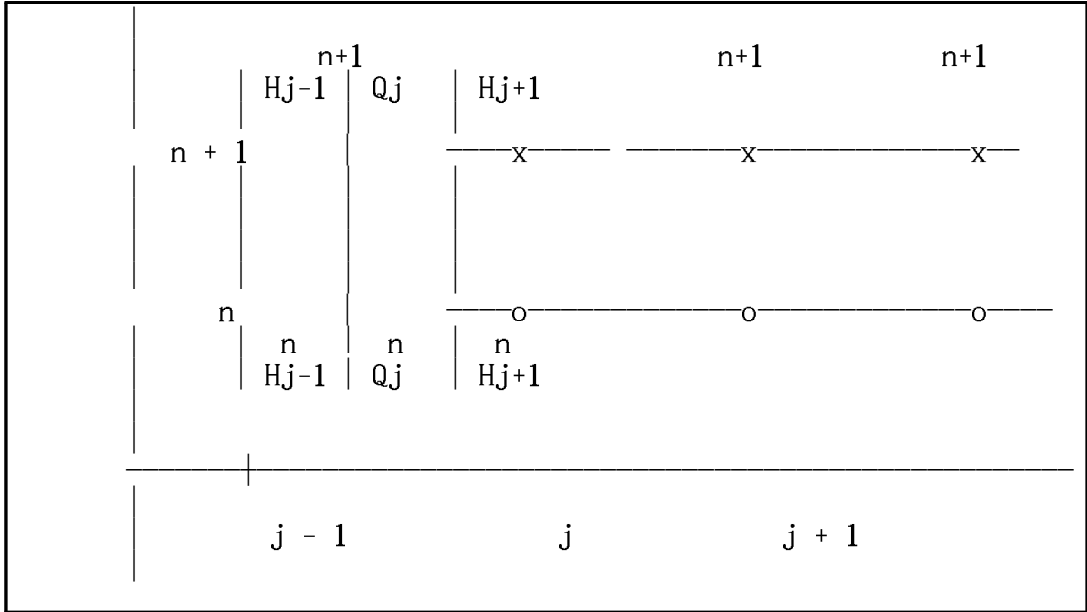


그림 3.3 EXTRAN 블록의 격자망 구성

3) 해의 안정성

EXTRAN 블록에서는 Dynamic 방정식을 수치적으로 풀이하는데 Explicit 유한차분법을 사용하므로 연산된 유량과 수심 값이 불안정할 수 있다. 따라서 양해법을 사용할 경우에는 배수관망 내에서 관로의 급속한 경사, 짧은 관로, 월류가 발생하는 맨홀 등이 포함되어 있을 경우에는 주의해야 한다.

양해법은 음해법과 비교하여 요구되는 하드웨어의 용량이 적으며 간단한 대수식으로 구성되나, 해가 불안정하고 비교적 짧은 연산시간구간이 필요하다. 연산 단위시간(Δt)이 필요한 제약된 연산 단위시간 보다 긴 경우에는 수치적으로 해가 불안정하게 된다. EXTRAN 블록은 일반적으로 다음의 조건을 만족할 경우에 수치적으로 안정된 해를 얻는다.

① LINK

$$\Delta t \leq \frac{L}{(gD)^{1/2}} \quad (3.45)$$

여기서, Δt : 연산시간구간(sec), L : 관망내 가장 짧은 관로길이(m), g : 중력가속도 (m/sec^2), D : 관로 최대깊이(m)이다.

② NODE

$$\Delta t \leq C' A_s \frac{\Delta H_{\max}}{\Sigma Q} \quad (3.46)$$

식 (3.46)에서, C' 는 무차원 상수로 일반적으로 0.1의 값을 갖는다. ΔH_{\max} 는 Δt 구간에서 최대 수위 상승높이, A_s 는 Node 표면적, ΣQ 는 Node로 유입되는 순 유입량이다. 식 (3.45)와 (3.46)에서 가능한 최대 연산 단위시간, Δt 는 배수관망내에서 가장 짧은 관로 길이로, 위의 두 안정조건을 만족하는 최대의 Δt 를 결정한다. 여러 연구결과에 의하면 EXTRAN 블럭에 알맞은 연산 단위시간으로 제안된 값은 10초이며, 이 값은 월류 등 유출특성의 급격한 변동이 발생하지 않을 경우에는 유출수문곡선을 추적하기에 충분하다.

라. EXTRAN 블럭의 경계조건

1) 초기조건

EXTRAN 블럭뿐만 아니라 다른 블럭(모형)의 적용에 있어서 공통적인 초기조건은 건기시의 배수량(하수량)과 이때의 수위이다.

2) 경계조건

앞에서 언급한 차분방정식의 해를 구하기 위해서는 2개의 경계조건이 필요하다. 대부분의 경우 상류부의 경계조건은 소유역으로부터의 지표면유출량이 되며, 하류부의 경계조건은 유량 또는 수심이 된다.

3) 흐름조건에 따른 초기, 경계조건의 변화

가) 흐름이 상류인 경우

하류부에서 흐름의 영향이 상류로 전달되기 때문에 상하류의 초기조건과 경계조건이 주어진다. 여기에서, 하류부 경계조건은 관거내의 물리적인 조건을 고려하여 결정한다.

나) 흐름이 하류인 경우

초기조건과 더불어 상류관거에서 2개의 경계조건이 주어지며 하류방향으로 계산이 수행된다. 이것은 흐름이 하류인 경우에는 하류부에서의 영향이 상류로 전달되지 않기 때문이다. 이때 상류에서의 경계조건은 유량과 수심, 수심과 유속 등이 된다.

마. EXTRAN 블럭의 제한사항

EXTRAN을 사용하여 유출해석을 실시하기 전에 다음의 제한사항과 문제점에 대하여 유의하여야 한다.

- 1) 맨홀, 확장/수축부, 만곡부 등에서의 수두손실 계산이 명확하지 않다. 따라서, 이러한 손실은 손실이 발생하는 수로/관로 등에 적용되는 Manning의 조도계수 n 값으로 보정한다.
- 2) 급속한 확장/수축으로 인한 손실은 일반적으로 무시되나, 수축부에서의 손실은 심각한 문제를 일으킬 수 있다.
- 3) 연산오차는 대개 관망내 흐름이 압력류가 되는 동안에 발생한다.
- 4) 접합부에서 압력류가 발생하는 경우나, 하류부 수심이 상류부 수심과 같거나 초과하여 웨어가 침수되는 경우 오차가 발생할 수 있다.
- 5) 배수관망내에 역사이폰이 설치되어 있는 경우에는 수치적으로 해가 불안정하며, 이러한 경우에는 역사이폰 구간을 오리피스로 간주하고 해석하면 해의 불안정을 제거할 수 있다.
- 6) 수질에 대한 영향을 평가할 수 없으며, 유량만을 고려한다.

제 4 장 LID적용 및 결과 분석

4.1 연구 대상지 및 유역 정보 추출

4.1.1 연구 대상지 현황

본 연구의 대상지는 친수구역 활용 특별법에 따라 11.7km²에 대해 계획이 진행되고 있다(강태욱 등, 2015). 대상지역은 그림 4.1과 같으며 대부분 논, 밭과 같은 농경지로 구성되어 있다. 본 연구대상지에 대해 개발 후에는 대부분 주거지역, 상업지역 등으로 불투수층으로 토지이용이 변하게 된다.

이의 같이 도시의 불투수 층의 증가는 표면 유출량의 증가, 지하수 함양의 부족, 도시 생태계의 변화, 도시 열수지의 지속적인 변화 등 도시환경 전반에 걸쳐 바람직하지 않는 영향을 미칠 것이다. 본 지역은 향후 기후변동에 따른 집중호우의 증가 경향 및 저지대인 점을 고려하여 기존의 빈도 강수량보다 많은 30년 빈도의 강우를 대상으로 우수관로가 설계되었다. 또한 이 지역은 배수가 원활하지 않은 점을 고려하여 식생수로, 투수성 포장 등과 같은 LID기술을 적용하여 강우에 따른 유출량을 발생원에서 저류시키거나 침투시키도록 계획하였다.

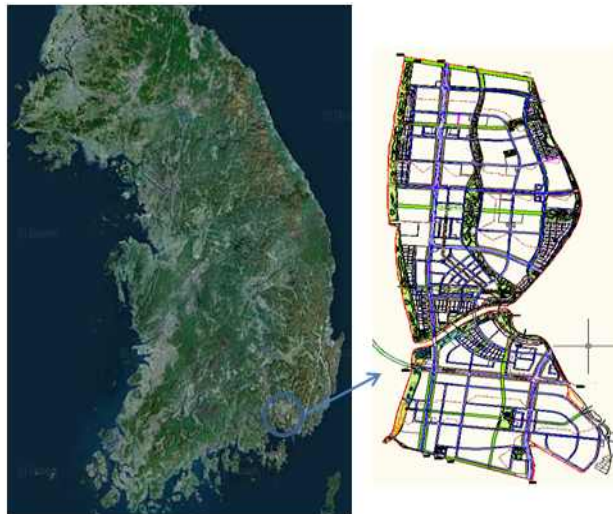


그림 4.1 연구 대상지 위치

4.1.2 유역 정보 추출

소유역별 분포형 모형을 구축하기 위해서는 각 소유역별 표고, 토지이용과 같은 속성 자료가 필요하다. 유역자료를 습득하기 위해 국립지리원에서 제공하는 수치지도를 이용하였다. 이를 위해 1:25,000 수치지도 2도엽으로부터 수계망(2112), 표고점(7127), 등고선(7111, 7114)을 추출하여 ArcGIS 9.0의 GRID 모듈을 이용하여 30 x 30m 수치표고모델(DEM)을 생성하였다. 생성된 DEM으로부터 수계망 유역을 추출하기 위한 전처리로서 Sink & Peak 보정을 실시하고 흐름방향과 흐름누적 격자(Cell)수에 근거하여 소유역을 구획하였으며 전반적인 수문정보의 추출과정은 그림 4.2와 같다.

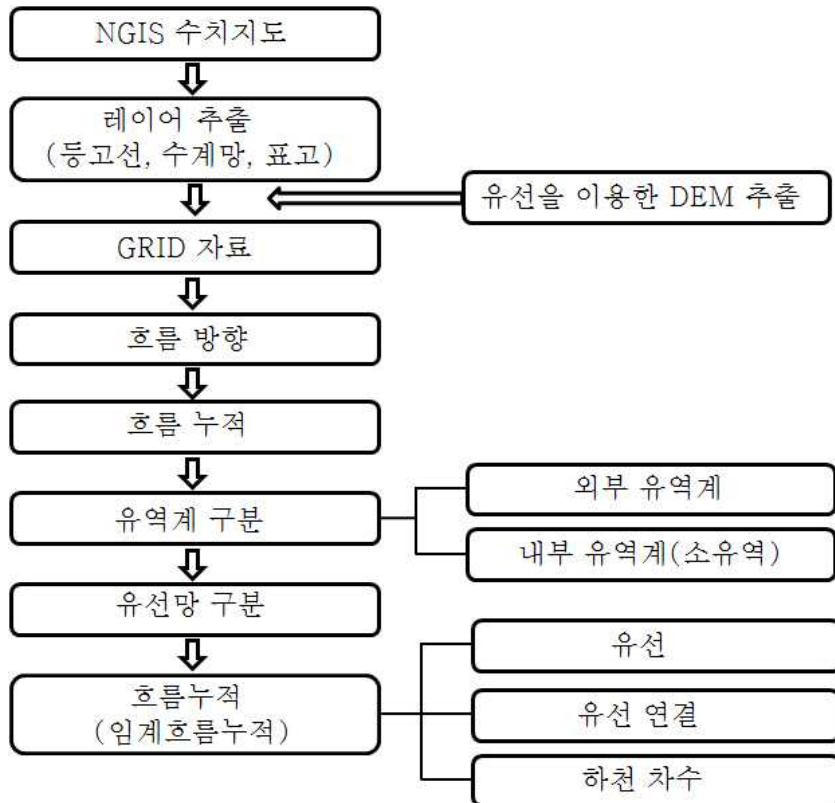


그림 4.2 NGIS 자료를 이용한 수문지형정보 추출 절차

4.2 SWMM-LID의 적용방법

LID요소의 기능은 크게 침투, 여과, 저류역할로 나눌 수 있다. 이러한 LID기능에 대해 환경부에서는 식생체류지(Bioretention), 옥상녹화(Breen roof), 나무여과상자(Treebox filter), 식물재배화분(Planter box), 식생수로(Bioswale), 식생여과대(Bioslope), 침투도랑(Infiltration trench), 침투통(Dry wells), 투수성포장(Porous pavement), 모래여과장치(Sand filter), 빗물통(Rain barrel) 등 9개로 분류하여 그 기능과 특성을 제시하고 있다. 이들 LID요소기술은 빗물 또는 비점 오염물질의 저감량에 따라 기능을 변형하여 적용할 수 있다(Zare 등, 2012).

실제 SWMM(ver.5.0)모형에서 모의할 수 있는 LID요소로는 식생체류지(Bio-retention), 빗물정원(Rain garden), 녹색 옥상(Green roof), 침투트렌치(Infiltration trench), 투수성 포장(Porous pavement), 빗물통(Rain barrel), 식생수로(Vegetative swale) 등의 7개 기술이다(전성인과 김운중, 2015).

시가지에 있어서 기존 우수배제는 그림 4.3(a)와 같이 투수지역(Pervious) 또는 불투수지역(Impervious)에 관계없이 우수관거로 유입시키는 시스템이다. 그러나 LID로 설계할 경우 다음의 2가지로 크게 나눌 수 있다. 첫째로는 그림 4.3(b)와 같이 불투수 또는 투수지역과 같이 2개의 소유역에서 LID 기술을 적용한 후 우수배제 시설로 빗물을 유입시키는 시스템이다. 둘째로는 그림 4.3(c)와 같이 불투수 또는 투수지역의 일부에 LID를 적용한 후 우수관망으로 빗물을 배제하는 설계방식이다. 어떤 LID 요소를 적용할지는 주변 경관, 지형조건, 목표관리 수량 또는 수질에 따라 결정한다. SWMM모형의 LID 요소는 소유역에 적용되는 면적비율로 고려된다. 즉, LID 요소의 유입수는 LID 영역에 내린 강우와 LID에서 처리하고자하는 불투수 영역에서 발생한 유출수의 비율을 고려하여 결정한다. 이 비율은 사용자가 입력한다. 불투수 지역에 계획하는 LID는 단일 또는 서로 다른 기술을 적용할 수 있으며 어떤 LID 요소를 적용할지는 주변 경관, 지형조건, 목표관리 수량 또는 수질에 따라 결정한다. 단, 이들 LID 전체 면적이 적용되는 불투수 면적을 초과할 경우 에러 메시지가 뜨게 된다. SWMM모형의 흐름은 Steady state, Kinematic wave 및 Dynamic wave법 등의 3가지를 적용할 수 있으나 실제 적용은 Kinematic wave과 Dynamic wave을 채택한다(Daubney, 2014; Rossman, 2010). Kinematic wave법은 사면구배가 비교적 급할 경우 마찰구배를 사면구배와 같다고 가정하고 하류단의 조건이 상류에 미치지 않음을 전제로 한다. Kinematic wave

법은 큰 시간 계산 간격을 가지므로 장기적이 예측에 일반적으로 적용한다. 이에 비해 Dynamic wave법은 완전 혼합류를 가정할 경우를 가정한다. 강우초기에는 자유수면을 가지는 개수로의 흐름에서 지속적인 강우가 발생하면 관로의 수위가 상승하여 압력차에 의한 흐름으로 전환되는 것을 고려할 때 적용한다. Dynamic wave법은 저류, Back water등을 적절히 구현할 수 있으므로 연구에서는 완전 혼합류를 가정한 Dynamic wave법을 선택하였다.

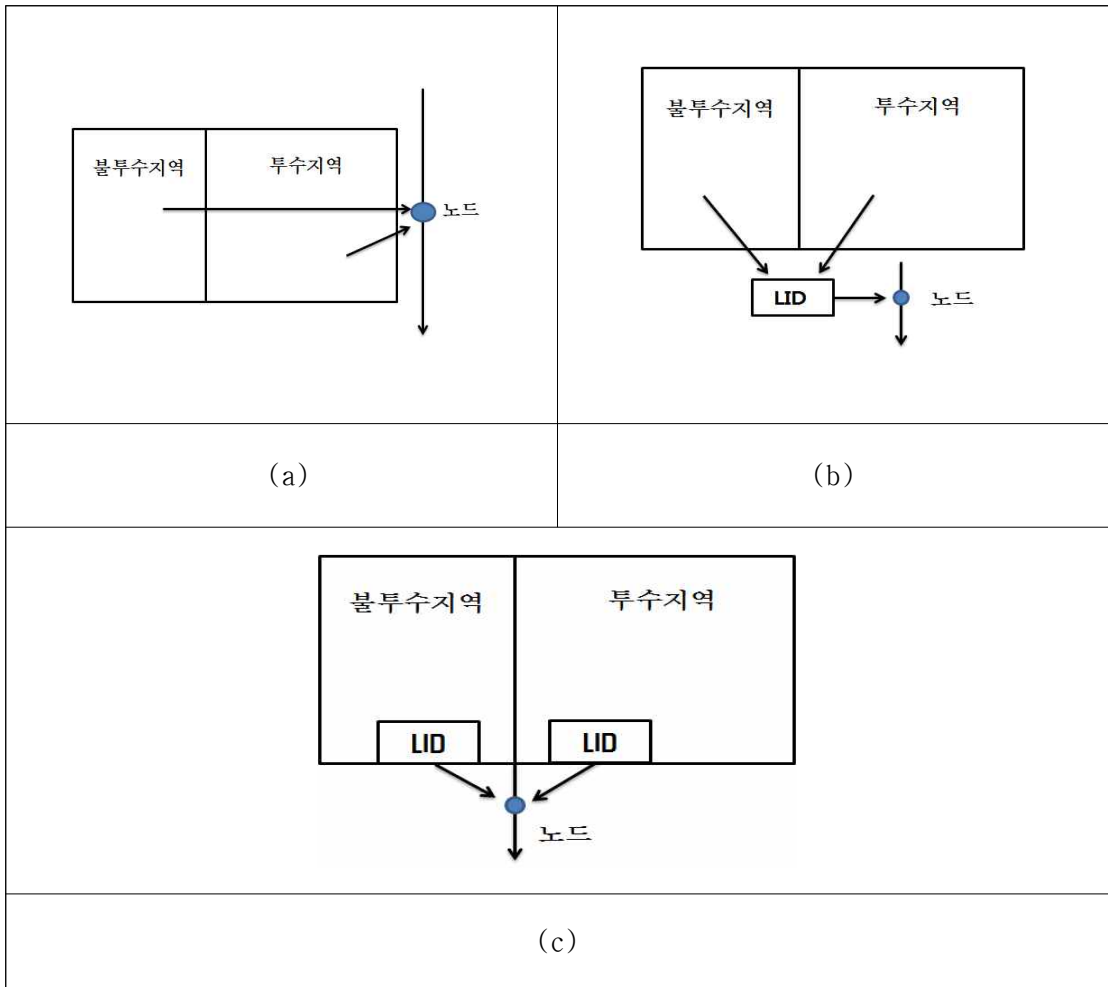


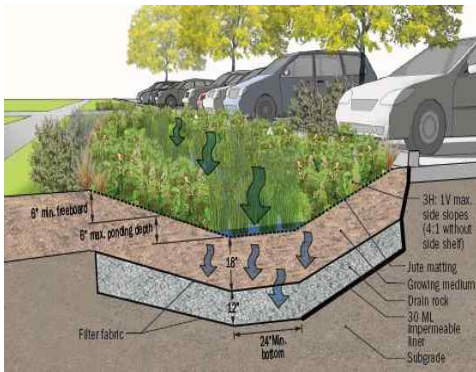
그림 4.3 LID개념 및 배치도

4.3 LID 기술의 적용

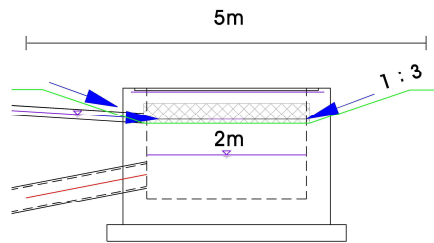
본 연구지구에 적용한 LID 기술은 그림 4.4 및 표 4.1에 제시한 바와 같이 식생수로와 투수성 포장재를 주로 응용하였으며 토심지의 토지이용 형태를 고려하여 식생수로와 투수성 포장과 같은 단일 LID 기술 또는 2가지 기술을 병합한 LID 기술을 적용하였다.

식생수로는 바닥 폭 2m, 상단 폭 5m, 높이 0.5m이며, SWMM의 식생수로 도구를 이용하여 구현하였다. SWMM의 표준 식생 Tool에서는 Surface층만 구현 할 수 있으므로 식생수로 하부의 지하 저류 용량은 고려하지 않았다.

투수성 포장은 SWMM-LID에 있는 Porous pavement를 이용하여 구현하였다. Surface, Pavement, Storage의 값은 SWMM을 이용한 신도시 LID 기법 적용에 따른 유출 저감효과 분석(Yeon 등, 2014)에서 참고하였다.



(a) 식생수로
(Clean Water Services, 2009).



(b) 연구대상지의 식생수로

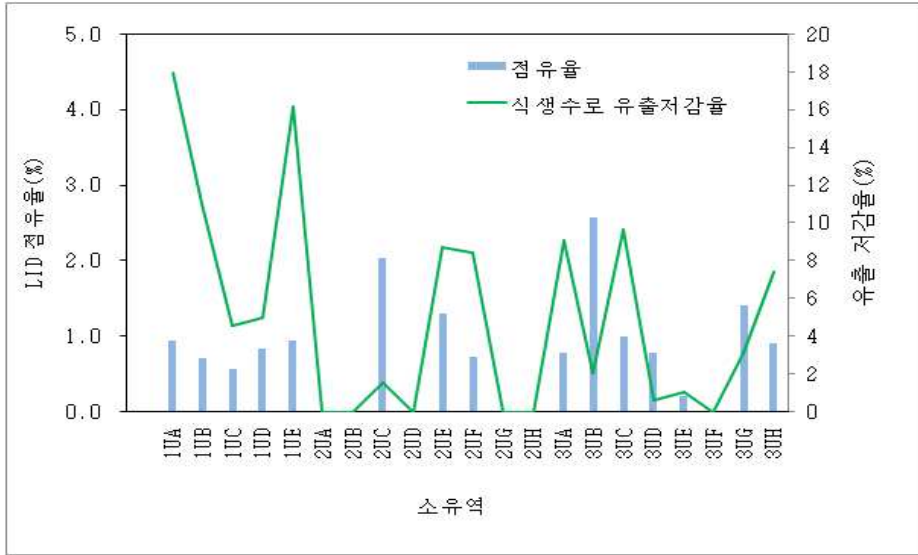
그림 4.4 식생수로의 계획도

표 4.1 투수성 포장의 적용 값

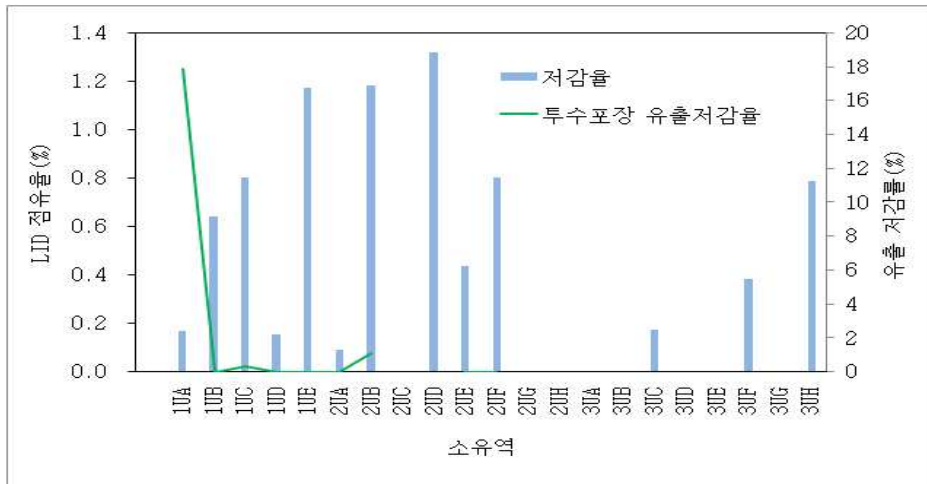
| 구 분 | 항 목 | 설 정 값 |
|------|-----------------|-------|
| 표층 | 저류깊이(mm) | 2 |
| | 식생체적값 | 0 |
| | 조도계수(Manning n) | 0.013 |
| | 표면경사e(%) | 1 |
| 포장 | 두께(mm) | 125 |
| | 공극율 | 0.2 |
| | 블투수성 포장 값 | 0 |
| | 투수성(mm/hr) | 360 |
| | 막힘계수 | 0 |
| | 높이(mm) | 300 |
| 저장 | 공극율 | 0.6 |
| | 투수계수(mm/hr) | 10 |
| | 막힘계수 | 0 |
| 암거배수 | 배수계수(mm/hr) | 0 |
| | 배수지수 | 0.5 |
| | 배수상최높이 | 0 |

그림 4.5는 각각의 LID기술의 효과를 분석하기 위해 각 기술의 점유율에 따른 침투 유출량을 나타낸 것이다. 선행연구(신동수 등, 2013)에 의하면 LID기술의 적용면적이 많을수록 홍수 저감율은 증가하지만 본 연구의 적용지역은 다른 경향을 나타내고 있다. 그림 4.6에 나타난 바와 같이 식생수로와 투수성 포장재의 점유율이 증가해도 이에 따른 홍수량은 각각 증가하지 않은 경향을 나타내었다. 그림 4.5(a)의 식생수로의 경우 2UC, 3UB 등은 다른 소유역에 비해 LID면적이 차지하는 비율이 많음에도 불구하고 홍수 저감율은 이에 비례하여 크지 않았다. 오히려 LID점유율이 이 보다 적은 1UA, 1UE등이 홍수 저감율이 큰 것으로 분석되었다. 그림 4.5(b)의 투수성 포장재의 경우에 있어서는 LID기술의 점유율과 홍수 저감율과의 관계는 별도의 유의성이 없는 것으로 나타났다. 이와 같이 LID기술의 점유율의 증가에도 불구하고 홍수 저감량이 동시에 증가하는 추세를 보이지 않는 주요 원인은 LID기술을 적용하는 구역의 설정에 있다. 식생수로는 일반적으로 녹지에 선형으로 설치하게 된다(Zimmer, 2007). 따라서 제어하고

자 하는 홍수 유량은 그림 4.6(a)와 같이 LID기술을 적용하고자하는 구역과 불투수층 으로부터 설정된 일부 배수구역의 강우를 처리하게 된다.



(a) 식생수로



(b) 투수포장

그림 4.5 식생수로 및 투수성 포장의 LID면적율에 따른 유출 저감율

LID기술의 점유율은 녹지 내에 차지하는 비율에 의해 정해지며 그 한계는 녹지의 면적을 초과할 수 없다. 식생수로는 자연 배수되도록 경사를 조절하고 수질관리, 조경,

일시적인 우수 유출수의 유속 저감 등의 목적으로 조성한다. 투수성 포장재의 LID 점 유율은 그림 4.6(b)에 제시한 바와 같이 LID 기술을 적용하고자 하는 면적 전체를 대상으로 하거나 또는 그 일부분을 적용할 수 있다. 그림 4.6(c)는 실제 연구 대상지 조성사업의 LID 설치 모식도의 일부를 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 식생수로와 투수성 포장 목적의 LID 기술은 그 유입 배수구역이 제한적이다. 이는 LID 기술의 적용 면적이 증가되어도 유입되는 배수면적이 크지 않다면 전체 소유역으로 설정된 우수 유출구(Outlet)로 배제되는 우수 저감효과는 작게 계산됨을 의미한다. 앞 절에서 분석한 바와 같이 투수성 포장은 침투의 효과로 빗물을 억제시키는 효과는 탁월하지만 실제 그 기여율에 있어서는 LID 기술의 적용면적과 LID 기술이 적용된 배수구역에 의해 크게 좌우됨을 알 수 있다.

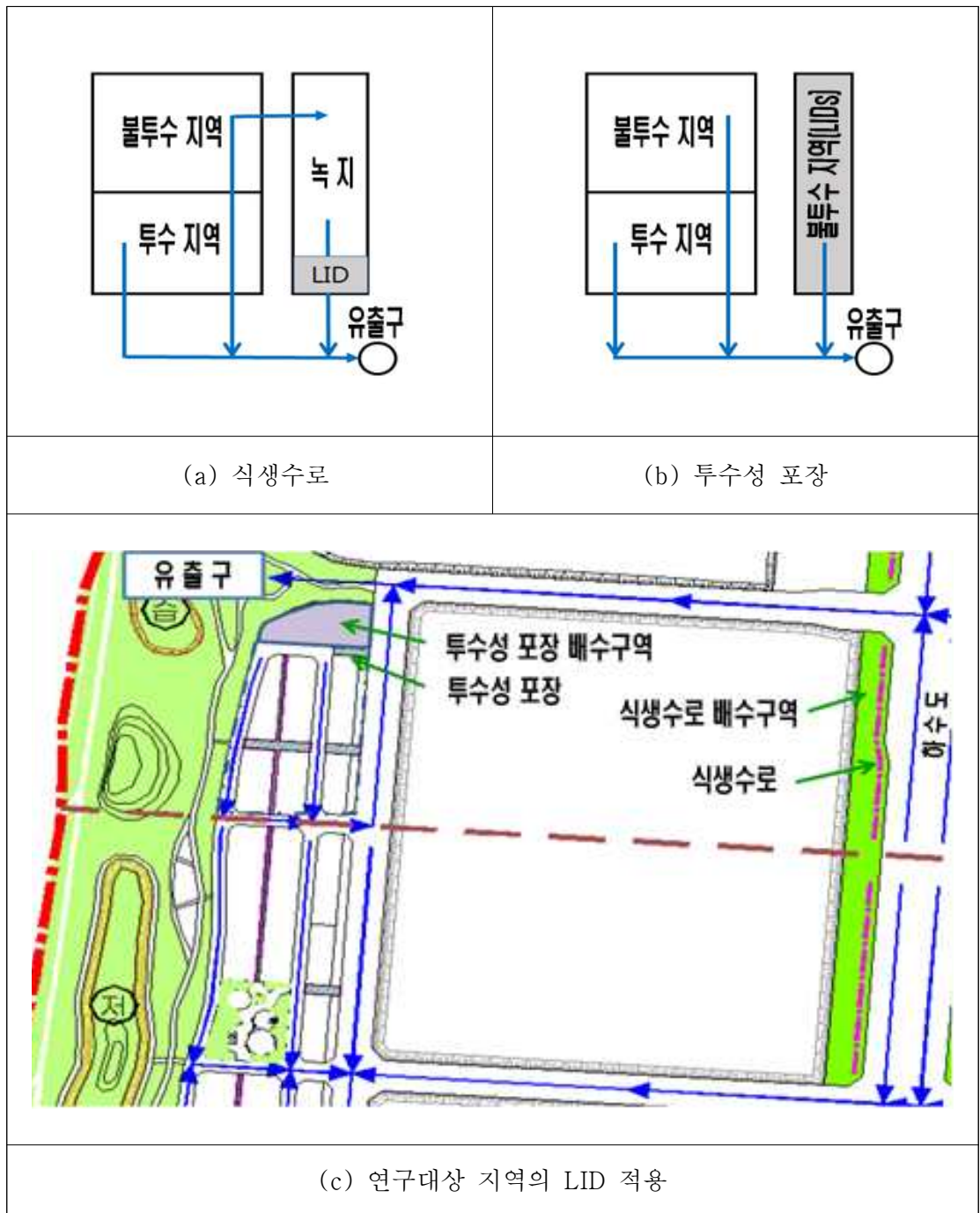


그림 4.6 식생수로 및 투수성 포장의 LID 배치 예

표 4.2 각 구간별 LID시설 적용에 따른 유출량 분석

| 구간 | 유출구 | 침투 유출량(m ³ /s) | | | | 총 유출량(m ³) | | | |
|---------|-----|---------------------------|------------|------------|-------------------|------------------------|------------|------------|-------------------|
| | | 개발전 | 개발후 | | LID 저감률 (%) | 개발전 | 개발후 | | LID 저감률 (%) |
| | | | LID 적용전 | LID 적용후 | | | LID 적용전 | LID 적용후 | |
| 1 구간 | 1UA | 0.132 | 0.216 | 0.212 | 1.9 | 1,464 | 2,985 | 2,846 | 4.7 |
| | 1UB | 0.139 | 0.278 | 0.276 | 0.7 | 1,617 | 3,351 | 3,250 | 3.0 |
| | 1UC | 0.144 | 0.259 | 0.253 | 2.3 | 1,664 | 4,973 | 4,866 | 2.2 |
| | 1UD | 0.370 | 0.769 | 0.763 | 0.8 | 5,412 | 9,885 | 9,734 | 1.5 |
| | 1UE | 0.261 | 0.185 | 0.151 | 18.4 | 3,605 | 2,854 | 2,486 | 12.9 |
| 2 구간 | 2UA | 0.146 | 0.237 | 0.237 | 0 | 1,597 | 3,155 | 3,149 | 0.2 |
| | 2UB | 0.162 | 0.440 | 0.435 | 1.1 | 1,761 | 6,387 | 6,322 | 1.0 |
| | 2UC | 0.141 | 0.318 | 0.313 | 1.6 | 1,678 | 3,808 | 3,617 | 5.0 |
| | 2UD | 0.161 | 0.389 | 0.380 | 2.3 | 1,742 | 5,527 | 5,423 | 1.9 |
| | 2UE | 0.120 | 0.346 | 0.338 | 2.3 | 1,626 | 3,397 | 3,249 | 4.4 |
| | 2UF | 0.138 | 0.185 | 0.164 | 11.4 | 1,667 | 1,908 | 1,694 | 11.2 |
| | 2UG | 0.050 | 0.006 | 0.006 | 0 | 487 | 65 | 65 | 0 |
| | 2UH | 0.041 | 0.017 | 0.017 | 0 | 395 | 173 | 173 | 0 |
| 3 구간 | 3UA | 0.030 | 0.033 | 0.030 | 9.0 | 302 | 335 | 226 | 2.0 |
| | 3UB | 0.095 | 0.298 | 0.292 | 2.0 | 1,039 | 3,056 | 2,920 | 4.5 |
| | 3UC | 0.073 | 0.325 | 0.309 | 4.9 | 921 | 4,461 | 4,050 | 9.2 |
| | 3UD | 0.182 | 0.476 | 0.473 | 0.6 | 2,480 | 5,657 | 5,555 | 1.8 |
| | 3UE | 0.198 | 0.488 | 0.483 | 1.0 | 2,624 | 6,290 | 6,236 | 0.9 |
| | 3UF | 0.057 | 0.296 | 0.290 | 2.0 | 809 | 3,880 | 3,809 | 1.8 |
| | 3UG | 0.164 | 0.351 | 0.340 | 3.1 | 2,448 | 4,669 | 4,571 | 2.1 |
| | 3UH | 0.269 | 0.356 | 0.339 | 4.8 | 3,821 | 5,231 | 4,962 | 5.1 |

4.4 LID 적용에 따른 수리학적 평가

도시화는 유역 내 침투 유출량, 총 유출량을 증대시킬 뿐만 아니라 홍수류의 지체시간을 감소시킨다. 도시화가 진행되면 불투수층의 포장화, 토양의 압밀화 그리고 강우에 따른 흐름의 수로화가 진행된다. 이러한 과정은 강우의 지중 침투량을 줄이고 표면 유출량을 증대시키는 요인이 된다. 도시 내 홍수유량을 발생원(On site)에서 저류시키기 위해서는 LID 기술의 수문응답 특성을 추적할 필요가 있다. 수리학적 체류시간(Hydraulic Retention Time, HRT)은 강우 유출수가 LID 적용 대상지를 통과할 때까지 소요되는 시간으로 결국 HRT에 의해 침투 유량의 저감량이 결정된다. 유효 저류용량이 변하지 않고 유입과 유출유량이 같다면 HRT는 식 (4.1)과 같이 구할 수 있다(Vörosmarty et al., 1997). 그러나 저류용량은 항상 채워진 상태가 아니므로 본 연구에서는 침투 수심을 구함으로써 유효유량을 결정하였다. 연구 대상지의 LID 기술은 식생수로와 투수성 포장 그리고 이 두 가지를 병용한 기술이 적용되었으나 본 연구의 HRT는 식생수로와 투수성 포장의 개별 기술이 적용된 소유역을 대상으로 구하였다. 각 소유역별 적용기술의 HRT 결과는 표 4.1에 제시하였다.

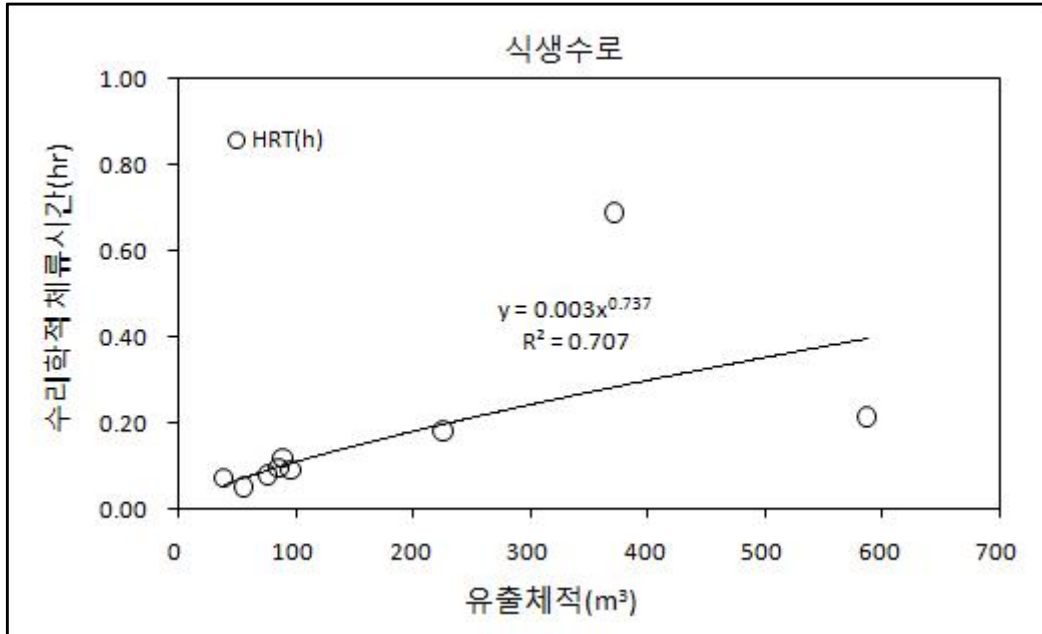
$$HRT = \frac{V}{Q} \quad (4.1)$$

여기서, V : 저류량(m^3) Q : 유출량(m^3/s) 이다.

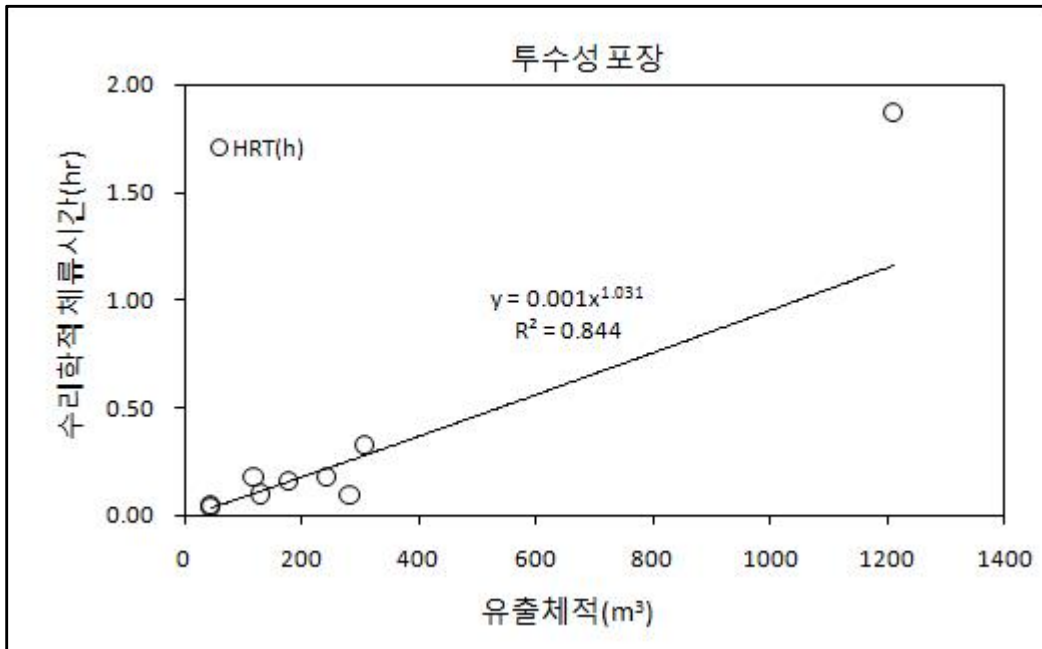
식생수로의 HRT는 표 4.3에 제시한 바와 같이 작게는 0.05시간에서 길게는 0.69시간으로 계산되었고 투수성 포장의 HRT는 0.04시간에서 1.87시간으로 나타났다. 이 두 가지 LID 기술의 적용된 체적과의 관계를 보면 그림 4.3과 같이 식생수로와 투수성 포장 은 지수 함수적으로 식생수로는 R^2 은 0.707, 투수성 포장은 0.844로 유의한 관계가 있음을 알 수 있었다.

표 4.3 식생수로 및 투수포장의 수리학적 체류시간

| 지 점 | 식 생 수 로 | | | 투 수 성 포 장 | | |
|-----|--------------------|----------------------------|--------|--------------------|----------------------------|--------|
| | V(m ³) | Runoff (m ³ /h) | HRT(h) | V(m ³) | Runoff (m ³ /h) | HRT(h) |
| 1UA | 90 | 759.6 | 0.12 | 47 | 925.2 | 0.05 |
| 1UB | 77 | 993.6 | 0.08 | 179 | 1,116.0 | 0.16 |
| 1UC | 87 | 910.8 | 0.10 | 309 | 950.4 | 0.33 |
| 1UD | 587 | 2,768.4 | 0.21 | 282 | 2,912.4 | 0.10 |
| 1UE | 373 | 543.6 | 0.69 | 1,209 | 648.0 | 1.87 |
| 2UE | 227 | 1249.2 | 0.18 | 243 | 1,368.0 | 0.18 |
| 2UF | 40 | 590.4 | 0.07 | 119 | 644.4 | 0.18 |
| 3UA | 19 | 79.2 | 0.24 | - | - | - |
| 3UC | 97 | 1,112.4 | 0.09 | 46 | 1,231.2 | 0.04 |
| 3UH | 57 | 1,220.4 | 0.05 | 131 | 1,317.6 | 0.10 |



(a)



(b)

그림 4.7 식생수로(a) 및 투수포장(b)의 체류시간과 용량과의 관계

4.5 LID 기술의 물수지 분석

적정 LID 기술을 배치하기 위해서는 먼저 각 LID 기술에서 구현할 수 있는 수리 및 수문학적 특성을 파악할 필요가 있다. SWMM 모형에서 구현할 수 있는 LID 기술 중에서 서로 중복되는 기술을 제외한 나머지 5개의 LID 기술(빗물정원, 식생수로, 투수 포장, 옥상정원 및 침투트렌치)에 대해 증발, 침투 및 유출량 등 도시 물순환에 관한 수문량을 구하였다. 이 지역은 상업지구이므로 불투수면적은 90%로 설정하였다. 식생수로와 옥상정원은 LID 기술을 적용해도 개발 후에 비해 유출량의 차이가 크지 않았다. 식생수로는 다른 LID 기술에 비해 침투량은 많으나 저류나 침투기능보다 수송의 기능이 지배적이다. 옥상정원은 불투수층에 식생 여재를 덮는 구조이므로 유출량의 억제보다는 수질을 정화하는 역할에 더 효율적이다. 반면에 투수성 포장 및 침투트렌치는 지중 침투량이 표면 유출량보다 많은 것으로 계산되었고 빗물정원은 침투기능과 저류기능을 동시에 가지는 것으로 나타났다. 투수성 포장은 지중으로 우수를 침투시켜 지표수를 일시적으로 저장하도록 설계된다. 투수성 포장은 우수와 오염물질을 동시에 저장할 수 있도록 다양한 장소에서 적용된다. 침투트렌치는 소규모 지하저류 공간에 자갈을 채워 우수를 침투시키는 얇은 시설을 통칭한다. 트렌치에 의한 우수의 지중 함양은 토양, 지하수위에 의해 결정된다(Newcomer 등, 2014). 이와 같이 침투량이 시간적, 공간적으로 변하므로 LID 기술에 대한 물수지는 다음의 식 (4.2)으로 표현할 수 있다(Mitchell 등, 2007).

$$P + I = E + D + \Delta S \quad (4.2)$$

여기서, P 는 강우량이고 I 는 도수된 상수, E 는 증발산량, D 는 배수량 그리고 ΔS 는 저류 변화량을 나타낸다.

연구대상 구간 내 0.151km²의 소유역을 샘플로 각 LID 기술별 물수지 분포를 모의실험한 결과는 그림 4.5와 같다. 본 대상은 현재(Pre-developed) 농경지로 되어 있으나 개발이 되면 일부 녹지 부분을 제외하면 대부분 불투수 면으로 바뀌게 된다. 개발 전 단계에서 개발 후 LID 기술을 적용하기 전과 여러 종류의 LID 기술을 적용 후의 물수지를 분석하였다. 계산 조건으로는 소유역의 90%는 불투수층으로 보았고 각각의 LID 기술은 소유역 면적의 10%를 적용하는 것으로 가정하였다.

대상지역의 개발 전의 토지이용은 대부분 농경지이므로 유출량은 개발 후에 비해 많지 않으나 LID 기술을 적용하기 전인 개발 후의 강우 유출량은 급격히 증가하게 된다. 각 LID 기술의 물수지 계산 결과를 보면 투수성 포장재와 침투트렌치를 적용했을 경우는 유출량이 급격히 줄어들었지만 식생수로와 옥상정원의 경우는 유출량의 저감효과가 미미하였다. 빗물정원은 침투량과 유출량이 비슷하게 분포하는 것으로 계산되었다. 강우 유출량의 저감효과가 미미한 식생수로와 옥상정원의 경우 침투량도 크지 않은 것으로 나타나 홍수 저감에 있어 큰 기여가 없는 것으로 보인다. 그러나 침투트렌치와 투수성 포장은 유출량의 감소량이 침투량의 증가로 수문량이 전환되었음을 알 수 있었다.

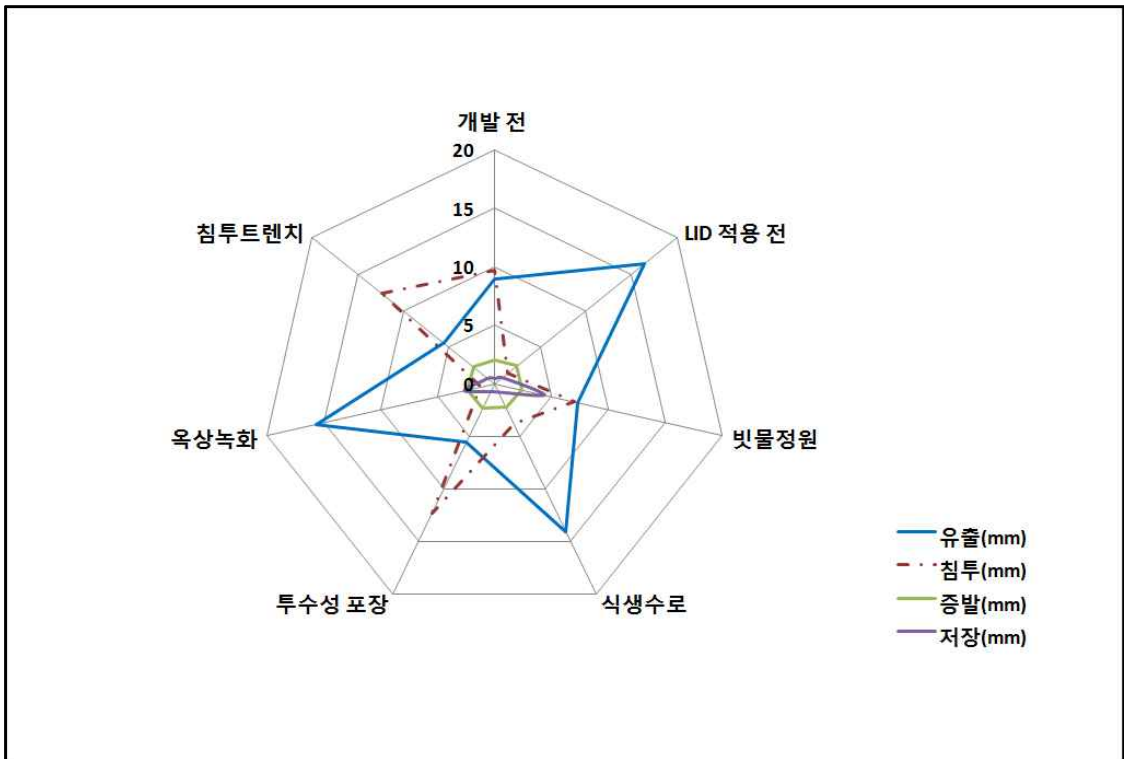


그림 4.8 LID기술의 물수지 분석도

4.6 GI와 LID 기술의 통합시스템

녹색시설(Green Infrastructure, 이하 GI)은 도시의 열섬(Heat island)의 완화와 강우 유출을 토양침투, 녹지로부터의 증발, 보수기능을 복합적으로 계획하여 하수 및 도시하천으로의 우수유출량을 관리함으로써 환경부담을 경감하고자하는 일련의 시도이다. GI의 물순환에 대한 정량화된 평가를 통한 도시계획은 유럽이나 미국, 일본과 같은 국가에서는 이미 오래 전부터 일반화되어 왔다. 그러나 우리나라는 현재 경관 또는 도시 디자인의 측면에서 녹색도시의 구현이라는 인식으로 도입하는 단계에 있다. 이러한 GI는 기존 시가지에서는 도시의 특성 특히 공간 확보의 제한으로 인해 옥상녹화가 일반적이나 현장 적용에 이르기까지의 기술적, 계획기법에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 장에서는 옥상녹화를 대상으로 GI시설의 구조, 경계조건 및 물수지식을 수립하여 그 적용효과를 검토한다. 본 GI와 LID의 연계 시스템구축은 연구대상지가 계획된 일부 1.13km²을 대상으로 하였으며 옥상녹화의 면적은 이 중 7.34%인 0.954ha이다.

4.6.1 SWMM-LID의 옥상녹화

SWMM모형에서 옥상녹화에 따른 수문학적 응답은 침투와 저류의 배치방법에 따라 결정된다. 옥상 녹화의 경계구역 내 강우가 식생대와 토양층에서 포화 상태에 도달하기 전에는 유출이 발생하지 않는다. 그러나 이들 층에 대해 지속적인 강우가 진행되면 침투와 유출이 일어나게 된다. 이를 토대로 유출 물수지식을 수립하면 다음과 같다.

$$\text{강우량} < \text{LID 용량} = \text{유출 미발생}$$

$$\text{강우량} > \text{LID 용량} = \text{유출 발생}$$

그림 4.9는 전형적인 옥상녹화의 구조인 식생대, 토양층, 배수 매트, 그리고 옥상의 방수층을 나타내는 모식도이다.

배수매트에 포화상태 이상의 강우가 지속되면 유출된 우수는 그림 4.10에 제시한 바와 같이 빗물통 또는 관망의 맨홀로 배수된다. 본 연구에서는 맨홀로 유출되는 옥상녹화의 GI시스템을 고려하여 물수지 분석을 행하고자 한다.

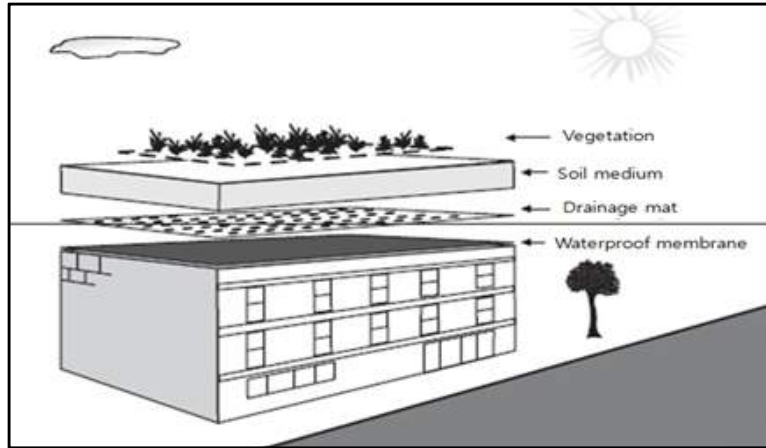


그림 4.9 옥상녹화의 기본구조 모식도(Rosenzweig et al., 2006)

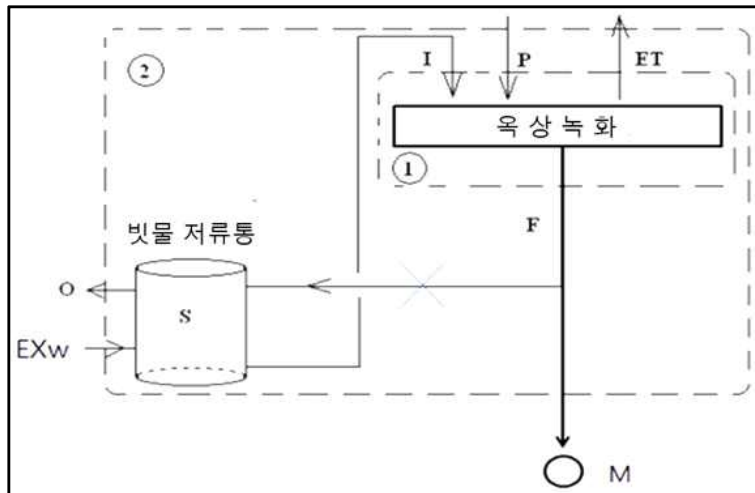


그림 4.10 옥상녹화의 배수체계도

4.6.2 옥상녹화의 물수지 및 유출량

그림 4.10에서 ①은 옥상녹화 구역경계 ②는 GI시설 외부의 경계를 나타내고 있다. 또한 각 기호에 대한 제 물리량을 정리하면 I 는 관개용수, P 는 강수량, ET 는 증발산량, GIs 는 GI내 저류량, F 는 침투량, S 는 빗물 저류통의 저류량, O 는 유출량, EX_w 는

외부로부터의 유입량, M은 맨홀을 나타낸다.

GI시설 경계내의 물수지식은 다음 식 (4.3)과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{dG R_S}{dt} = P - Q_{out} - ET - F \quad (4.3)$$

모형의 입력조건은 단일 연속강우, 일단위 증발산량 그리고 식생대 및 토양층으로의 침투량이다. 상기 식 (4.3)을 차분식으로 다시 정리하면,

$$\frac{\Delta G R_S}{\Delta t} = P - Q_{out} - ET - F \quad (4.4)$$

식 (4.4)은 개별 GI시설의 물수지를 나타내는 것으로 GI의 배치는 비선형으로 하여 전체 영역의 유출구에서 강우에 따른 유출량을 계산하도록 구성하였다.

그림 4.11은 GI의 일종인 옥상녹화에 의한 수문응답 결과를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 옥상녹화 설치 전에는 저류 기능없이 일부 토양침투와 증발산만 발생되므로 현저한 손실량 없이 누적유출량은 강우량과 큰 차이가 발생하지 않는다.

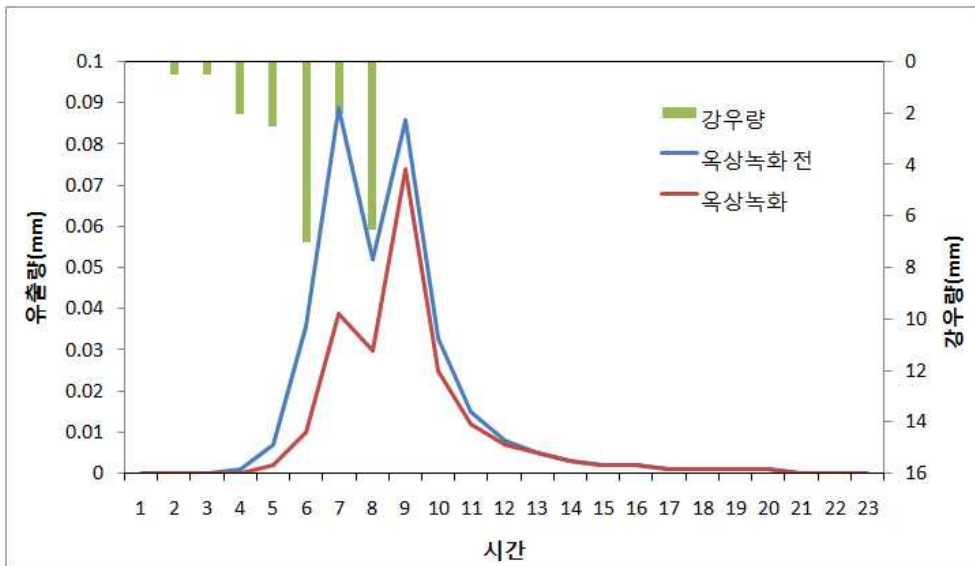


그림 4.11 옥상녹화 설치 전, 후의 유출량 변화

그러나 표 4.4에 제시한 바와 같이 GI설치 후에는 침투량과 저류량의 증가로 인해 전체 표면 유출량은 감소됨을 알 수 있다. GI에 의한 침투량의 증가는 표면 유출량의 감소뿐만 아니라 지중 보수량을 증가, 건물의 방사열을 감소시켜 결국 도시의 열섬현상을 완화시키는 역할을 한다(Liu, 2003).

표 4.4 GI설치 전, 후 물수지 변화

| 항 목 | 그린 인프라 설치 전 | 빗물정원 |
|-----------|-------------|-------|
| 강 우 량(mm) | 21 | 21 |
| 증발산량(mm) | 2.356 | 2.393 |
| 침 투 량(mm) | 1.406 | 7.002 |
| 표면유출량(mm) | 16.440 | 7.333 |
| 저 류 량(mm) | 0.812 | 4.334 |

본 연구에 적용한 LID기술은 식생수로와 투수성 포장에 대부분이며 이에 대한 파라미터 값은 EPA메뉴얼의 설정값과 국내 문헌을 참조하였다.

4.7 SWMM-LID 입력자료의 구성

4.7.1 침투모델

SWMM에서 투수지역에 대한 침투량을 모의하는 방법으로 Horton식과 Green-Ampt 식 중에서 선택하여 적용할 수 있다. Horton식은 경험적인 곡식임에 반해, Green-Ampt식은 침투과정의 기술이 물리적 의미를 갖는 특징이 있다(Huber and Dickinson, 1988). Green-Ampt모델의 경우에는 오직 지표면의 잉여수(Excess water)양에 의하여 결정되는 것으로 가정하였으나, 이 후 Chu(1978) 등에 의하여 다양한 연구가 진행되어 비정상적인 침투모의가 가능토록 모듈이 개선되었다. 따라서 본 모의에서는 물리적 개념을 바탕으로 하는 Green-Ampt식을 사용하였다.

연구 대상지가 개발 전 토지이용은 대부분 논·밭으로 이루어져 있으므로 침투효과가 낮은 토양특성을 가지고 있다. 모의 적용시 개발 전 토양별 침투 매개변수는 침투가 잘 되지 않는 점토(Clay)군을 적용하였다.

개발 후 연구대상지는 모래(Sand)로 성토되는 것으로 계획되어 있지만 다짐에 의해 일부 토양 특성이 다소 변화 될 수 있다. 따라서 토양별 침투 매개변수는 양토(Loam)를 적용하였고, 흡인수두(Suction head)와 투수계수(Conductivity)는 각각 88.90mm와 3.3mm/hr를 적용하였다. 추후 정밀한 유출 및 침투 모의를 위해 상세한 토양 특성 반영이 요구된다. 표 4.5는 각 토양별 침투매개변수 값을 나타내었다.

표 4.5 토양별 침투 매개변수

| 토양별 | 공극율 (η) | 유효공극율 | 흡인수두 ϕ (cm) | 투수계수 K(cm/hr) |
|---------|-------------------|-------|---------------------|------------------|
| 사토 | 0.437 | 0.417 | 4.95 | 11.78 |
| 양질 사토 | 0.437 | 0.401 | 6.13 | 2.99 |
| 모래질 사토 | 0.453 | 0.412 | 11.01 | 1.09 |
| 양토(채택) | 0.463 | 0.434 | 8.89 | 0.34 |
| 실트질 양토 | 0.501 | 0.486 | 16.68 | 0.65 |
| 사질식 양토 | 0.398 | 0.330 | 21.85 | 0.15 |
| 점질 양토 | 0.464 | 0.309 | 20.88 | 0.10 |
| 미사질식 양토 | 0.471 | 0.432 | 27.30 | 0.10 |
| 모래질 점토 | 0.430 | 0.321 | 23.90 | 0.06 |
| 실트질 점토 | 0.479 | 0.423 | 29.22 | 0.05 |
| 점토(채택) | 0.475 | 0.385 | 31.63 | 0.03 |

자료 : Rawls, W.J. et. al.(1982)

4.7.2 유역 입력자료

본 모의에 적용한 물리적 매개변수(소유역 면적, 유역의 평균경사, 불투수지역의 면적 등)와 하도 및 관망의 길이, 관경 또는 하도의 폭, 하도의 경사 등 배수체계 관련 매개변수는 설계에 반영된 자료를 바탕으로 적용되었으며, 수문학적 매개변수는 합리적인 결과를 모의하기 위해 기존에 연구된 성과를 바탕으로 구축하였다.

연구대상지의 관거 모의를 위해 Routing Model은 Dynamic Water 방정식을 사용하였고, 계획된 우수관거의 관저고와 제원을 바탕으로 모형에 구축하였다. 또한 불투수율은 각 토지이용계획별로 차등화 하여 적용하였다. 이때 도시 토지이용별 불투수면 구성 특성 및 관리방안에 관한 연구(최지용)자료를 인용하여 각각의 인자 값을 적용하였다. 수문학적 매개변수인 유역의 조도계수(Roughness)는 표 4.6의 토지이용별 조도계수를 이용하였으며, 투수지역은 0.25, 불투수 지역은 0.015를 적용하였다. 개발전의 조도계수는 투수지역 0.3, 불투수 지역 0.015를 이용하였다.

표 4.6 토지이용별 조도계수

| 토지 이용별 | 불투수성 N | 투수성 N |
|--------------|--------|-------|
| 공원 | 0.015 | 0.400 |
| 농지/골프장 (채택) | 0.015 | 0.300 |
| 저밀도 주거지 | 0.015 | 0.250 |
| 중밀도 주거지 | 0.015 | 0.250 |
| 고밀도 주거지 (채택) | 0.015 | 0.250 |
| 경공업/상업지구 | 0.015 | 0.250 |
| 중공업지구 | 0.015 | 0.250 |
| 습지 | 0.100 | 0.400 |
| 물 | 0.024 | N/A |

자료 : Florida, City of Pompano Beach Stormwater Master Plan(USEPA, 2015)

지면 저류는 유출이 발생되기 전에 투수영역과 불투수영역에 채워져야 하는 부피(mm)이다. Viessman 등(1977)에 의하면, 이는 표면 고임, 표면 젖음, 차단, 증발과 같은 현상에 의해 발생하는 손실량이나 “초기차단(Initial abstraction)”을 나타낸다. RUNOFF 블록에서, 투수영역의 지면 저류 물은 침투되거나 증발된다. 불투수영역에서는 증발에 의해서만 고갈된다. 불투수면의 지면 저류는 강우 깊이에 대한 유출 깊이를 도시하여 얻을 수 있다. 즉 유출에 대응하는 강우의 차단 양이 지면 저류 깊이가 된다. 본 연구에서는 투수지역의 경우 5.08mm, 불투수 지역은 2.54mm으로 설정하였다.(표 4.7)

표 4.7 토지이용별 저류깊이

| 토지이용별 | 저류깊이(mm) |
|-----------|-------------|
| 불투수표면(채택) | 1.27 ~ 2.54 |
| 잔디(채택) | 2.54 ~ 5.08 |
| 목초지 | 5.08 |
| 삼림 | 7.62 |

자료 : ASCE, Design&Construction Urban Stormwater Management Systems, New York(1992)

4.7.3 강우자료

본 연구의 적용지역에 대한 강우자료는 기상청의 최근 10년의 강우자료를 수집하여 분석하였다. 대상지역의 연평균강우량은 1,574mm, 일최대 강우량 310mm이며 여름철에 집중적으로 내리는 계절성 강우사상을 가지고 있다.

EPA의 기준에 따르면 LID의 목표 강우설계는 95%에 대한 일강우 유출저감 효과를 평가하고 있으나 이 값은 우리나라의 경우와 비교해 볼 때 큰 범위의 강우 스펙트럼이므로 본 연구지구의 경우 80%의 일 강우량을 적용하였다. 본 연구대상지의 최근 10년 강우의 80%에 해당되는 강우량은 그림 4.12와 같이 22.5mm/d이며 실제 모형에 입력한 강우는 2009년 7월 21일 발생한 20mm/d를 대상으로 하였다. LID 기술에 대한 강

우 유출의 저감효과를 평가하기 위해 이보다 작은 10mm/d, 15mm/d의 2개 강우사상을 추가적으로 적용하였다. 본 연구에 적용한 강우 사상은 표 4.8과 같다.

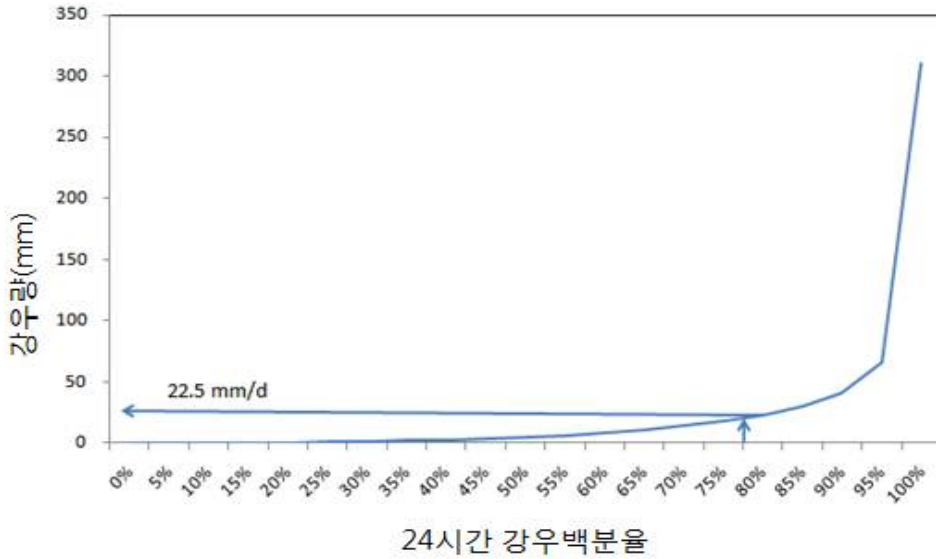


그림 4.12 연구대상지의 80% 강우

표 4.8 적용 강우사상

| 시간 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 10mm/h | 2.5 | 4.0 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 15mm/h | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 2.5 | 1.0 | 2.0 | 2.5 | 1.0 | 3.0 | 2.0 |
| 20mm/h | 0.0 | 0.5 | 0.2 | 2.0 | 2.2 | 7.0 | 2.0 | 6.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 시간 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 10mm/h | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 15mm/h | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 20mm/h | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

본 연구에서는 LID시설을 3개 구간, 총 21개 소구역으로 구분하였으며 이를 표 4.9에 나타내었다. 연구지역에는 인공습지와 저류지도 계획되어 있으나 이는 빈도 개념의 재해시설이므로 작은 규모의 강우 유출량을 저류시키는 LID효과 분석에는 제외하였다.

표 4.9 LID 시설 합계표

| 유역 | | 면적 (km ²) | 기반시설 | | | | |
|-----|-------|--------------------------|-------------|----------------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|
| | | | LID 시설 | | | 재해시설 | |
| | | | 식생수로 (m) | 투수성포장 (m ²) | 통로화분 (개소) | 인공습지 (m ²) | 저류지 (m ²) |
| 1구간 | 1UA | 0.384 | 718 | 646 | - | 1,390 | 13,264 |
| | 1UB | 0.344 | 482 | 2,206 | - | - | 5,575 |
| | 1UC | 0.482 | 548 | 3,868 | - | 1,811 | 33,504 |
| | 1UD | 1.01 | 1,688 | 1,560 | - | - | - |
| | 1UE | 0.733 | 1,382 | 8,578 | - | 2,516 | 17,522 |
| | 소계 | 2.755 | 4818 | 16,858 | - | 5,717 | 69,865 |
| 2구간 | 2UA | 0.344 | - | 318 | - | - | 3,502 |
| | 2UB | 0.430 | - | 5,081 | - | - | 18,454 |
| | 2UC | 0.362 | 1,468 | - | - | - | 8,284 |
| | 2UD | 0.525 | - | 6,928 | - | - | 32,112 |
| | 2UE | 0.323 | 839 | 1,419 | - | - | 4,447 |
| | 2UF | 0.161 | 231 | 1,292 | - | - | - |
| | 2UG | 0.019 | - | - | - | - | - |
| | 2UH | 0.032 | - | - | - | - | - |
| 소계 | 2.414 | 2,538 | 15,038 | - | - | 66,799 | |
| 3구간 | 3UA | 0.701 | 108 | - | - | - | - |
| | 3UB | 0.218 | 1,123 | - | - | - | - |
| | 3UC | 0.301 | 600 | 525 | - | - | 26,530 |
| | 3UD | 0.393 | 608 | - | - | - | - |
| | 3UE | 0.546 | 232 | - | - | - | 21,484 |
| | 3UF | 0.411 | - | 1,575 | - | - | - |
| | 3UG | 0.458 | 1,294 | - | - | - | - |
| | 3UH | 0.537 | 980 | 4,223 | - | 931 | - |
| 소계 | 2.949 | 4,945 | 6,323 | - | 931 | 48,104 | |
| 총계 | | 11.885 | 16,440.9 | 42,853 | - | 6,648 | 276,249 |

4.7.4 SWMM-LID 모형구축

대상유역에 대한 강우-유출량 모의를 위해 분할된 소유역, 하도에 대한 입력자료, 수집된 기상자료를 이용하여 유출모의 체계를 구축하였다. 적용 대상 구간의 우수 유출도 및 토지이용 현황은 그림 4.13~19과 같다.

가. 1구간 SWMM 구축

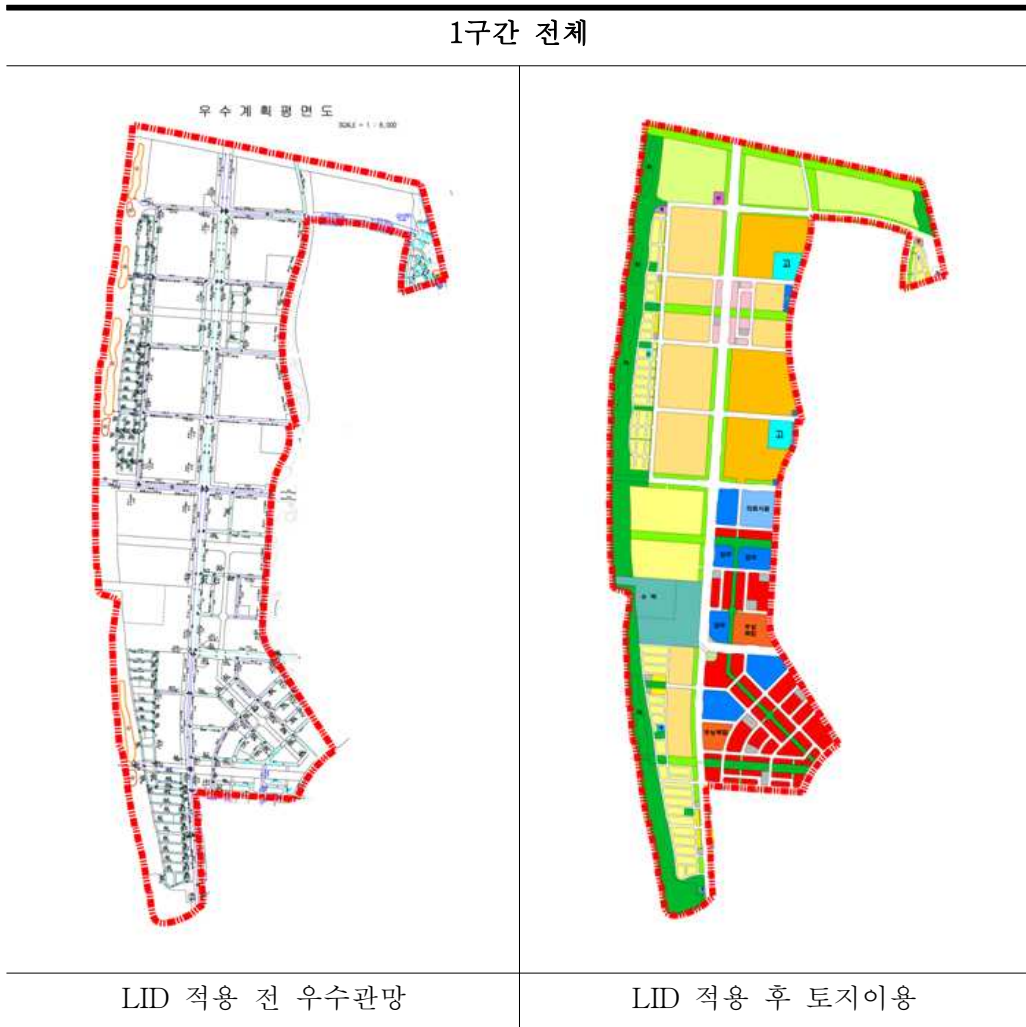


그림 4.13 1구간의 우수관망 및 LID 적용 전·후의 토지이용

개발 후 토지이용 범례는 그림 4.14와 같다.

| | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------|--|--------|--|--------|--|--------|--|----------|--|---------|--|-------------|
| | 친수구역조성사업용지 | | 경계 | | 산업시설 | | 유조종교 | | 유치원 및 학교 | | 집 | | 집단에너지시설 |
| | 훼손지역구사업용지 | | 경계 | | 물류시설 | | 영 | | 영유아보육시설 | | 광 장 | | 유보지 |
| | 단독주택 | | 산업지원시설 | | 주유소 | | 공원 | | 녹지 | | 하 천 | | 철새생태복원용지 |
| | 공동주택 중저밀형 | | R&D 시설 | | 공공청사 | | 저류시설 | | 양수장 | | 하 천 | | 철새생태복원용지 하천 |
| | 공동주택 중고밀형 | | 공공청사 | | 문화복지시설 | | 양수장 | | 양수장 | | 보행자전용도로 | | 보행자전용도로 |
| | 근린생활시설 | | 도시지원시설 | | 유통판매시설 | | 아수처리시설 | | 오수중계펌프장 | | 일반도로 | | 일반도로 |
| | 주상복합 | | 의료시설 | | 종교 | | 변전소 | | 변전소 | | 일반도로 | | 일반도로 |
| | 일반상업 | | 업무시설 | | 변전소 | | 변전소 | | 변전소 | | 일반도로 | | 일반도로 |
| | 근린상업 | | 변전소 | | 변전소 | | 변전소 | | 변전소 | | 일반도로 | | 일반도로 |
| | 업무시설 | | 변전소 | | 변전소 | | 변전소 | | 변전소 | | 일반도로 | | 일반도로 |

그림 4.14 개발후 토지이용 범례

SWMM의 LID 모형구축은 개발 전의 강우 유출량을 평가하기 위해 개발 전 단계의 토지이용 계획도에 각 소유역별 우수 유입전 LID를 배치하여 관망으로 유입되도록 하여 개별 소유역에서 유출량 저감 효과를 분석하였다. 본 절에서는 대표 소유역 그림만을 수록하였고 1구간 1UB에서 3구간 3UH까지의 소유역의 유출점 및 토지 이용도는 부록에 첨부하였다.

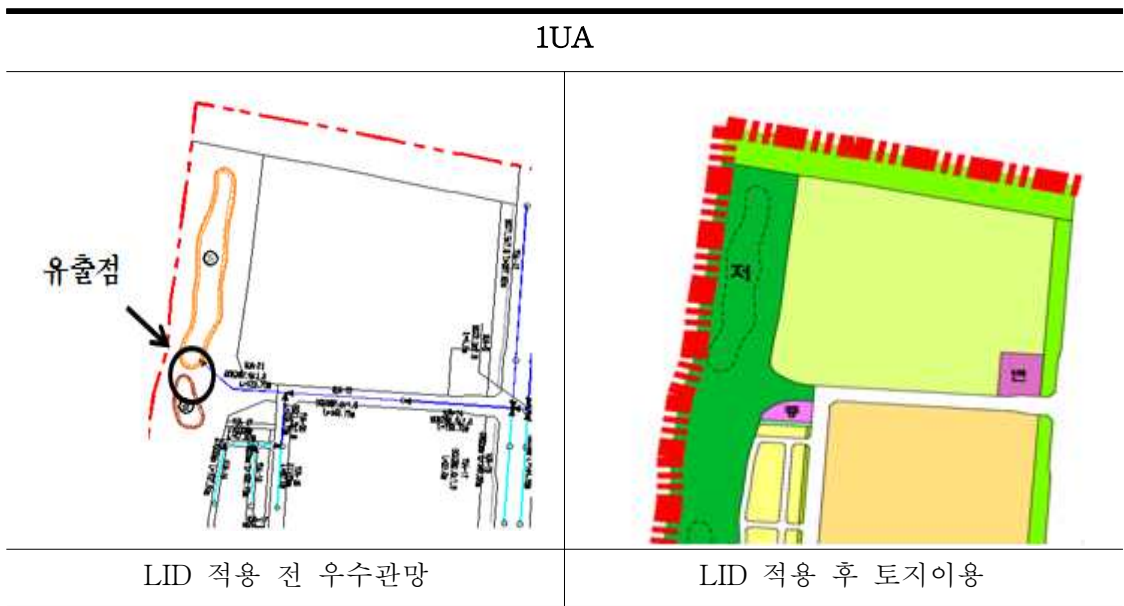
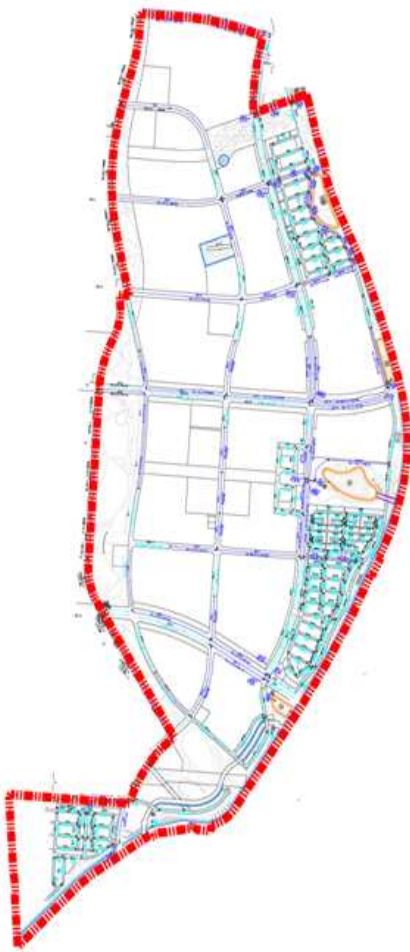


그림 4.15 1구간 1UA 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

나. 2구간 SWMM 구축

2구간 전체



LID 적용 전 우수관망



LID 적용 후 토지이용

그림 4.16 2구간의 우수관망 및 LID 적용 전·후의 토지이용

2UA

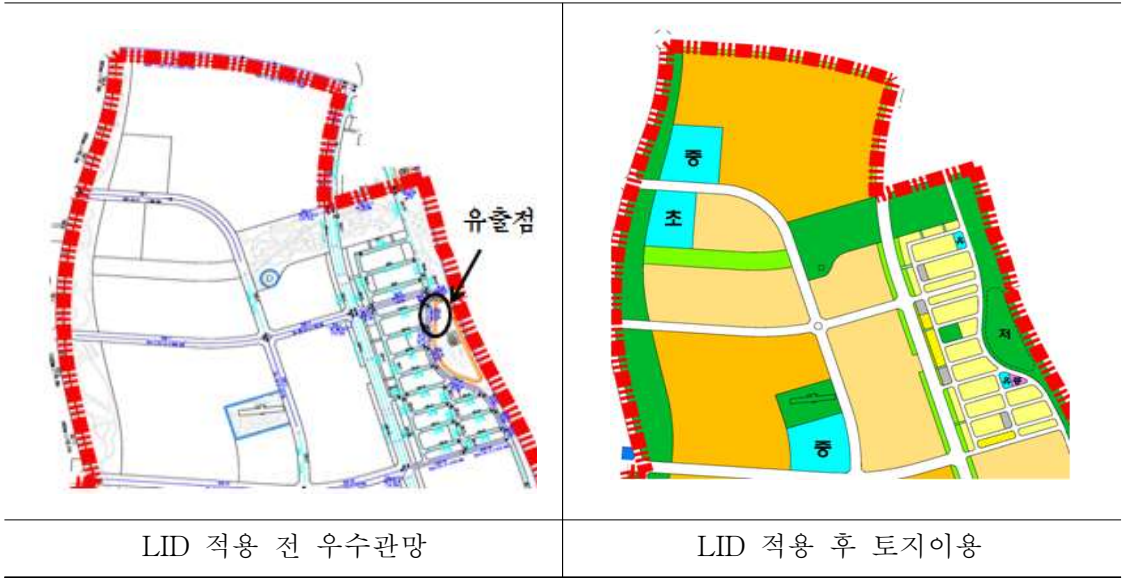


그림 4.17 2구간 2UA 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

다. 3구간 SWMM 구축

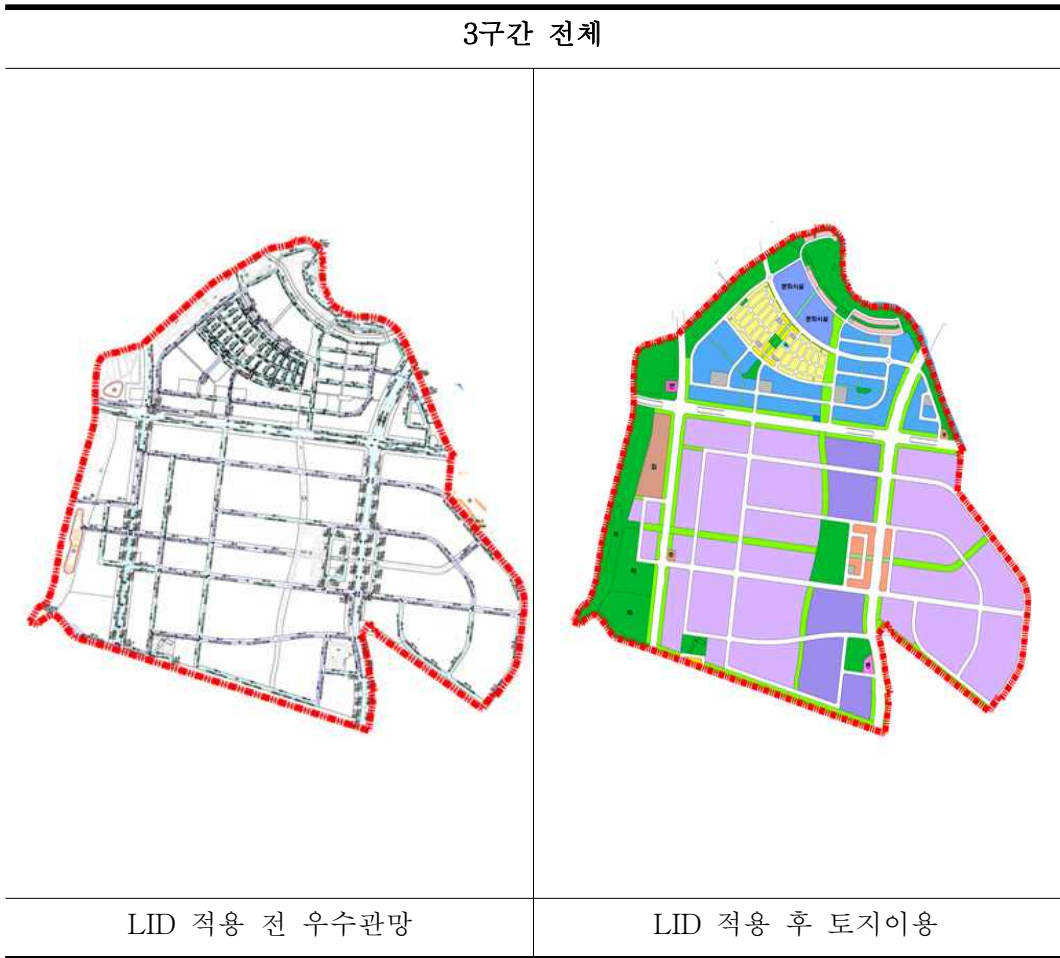
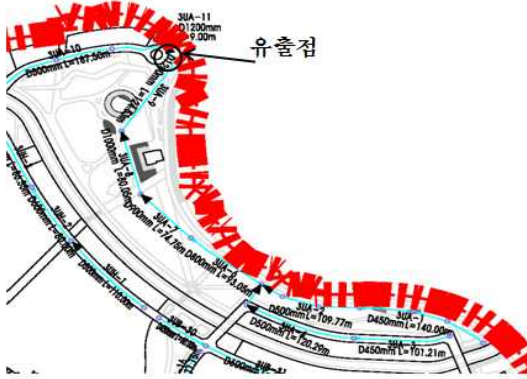


그림 4.18 3구간의 우수관망 및 LID 적용 전·후의 토지이용

3UA



LID 적용 전 우수관망



LID 적용 후 토지이용

그림 4.19 3구간 3UA 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

4.8 각 구간별 계산결과

대상유역의 각 구간별 LID에 대한 효과분석은 표 4.7에 제시한 일 강우 3개 사항(10 mm/d, 15mm/d, 20mm/d)에 대해 적용지역의 개발 전, LID적용 전, 후에 대해 유출량 평가를 하였다. 개발 전의 토지이용 상태는 농경지가 대부분이므로 유출량은 작으나 개발 후 LID가 설치되기 전에는 불투수 지역으로 토지이용이 전환되므로 강우 유출량은 증가하게 된다. 이 개발 후의 토지이용에 대해 LID를 적용하면 유출량은 저감되게 된다. 본 연구지역에 적용한 LID는 주로 유출수의 수송 기능이 높은 식생수로와 지중 침투성이 탁월한 투수성 포장을 대상으로 그 유출 효과를 분석하였다. 유출 효과는 각 LID의 이송, 저류 및 침투 기능에 따라 좌우된다. 본 절에서는 각 강우량의 대표지역의 유출량 그림만을 수록하였고 1구간 1UB에서 3구간 3UH까지의 소유역의 유출량은 부록에 첨부하였다.

4.8.1 총 강우 10 mm인 경우 유출량 가. 1구간

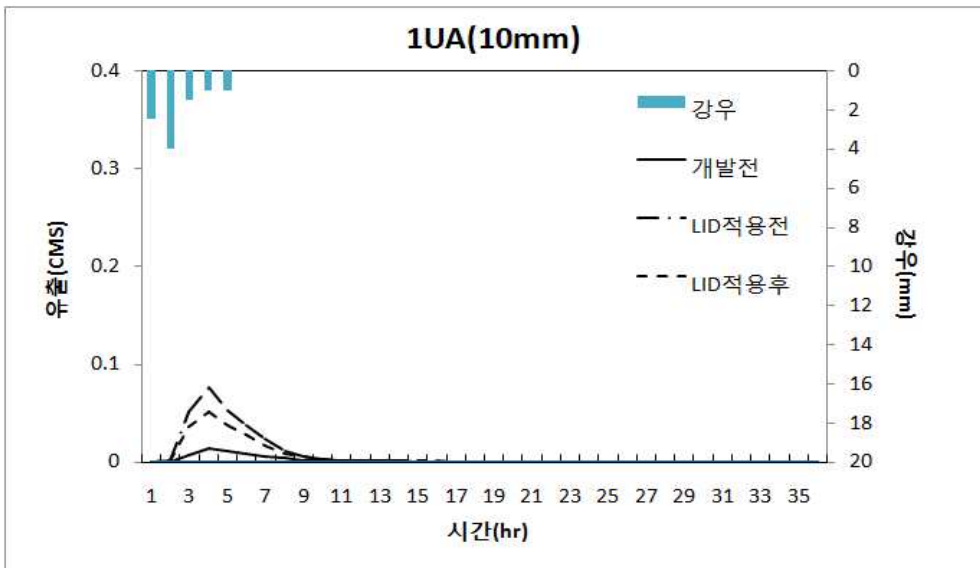


그림 4.20 1구간 1UA 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

나. 2구간

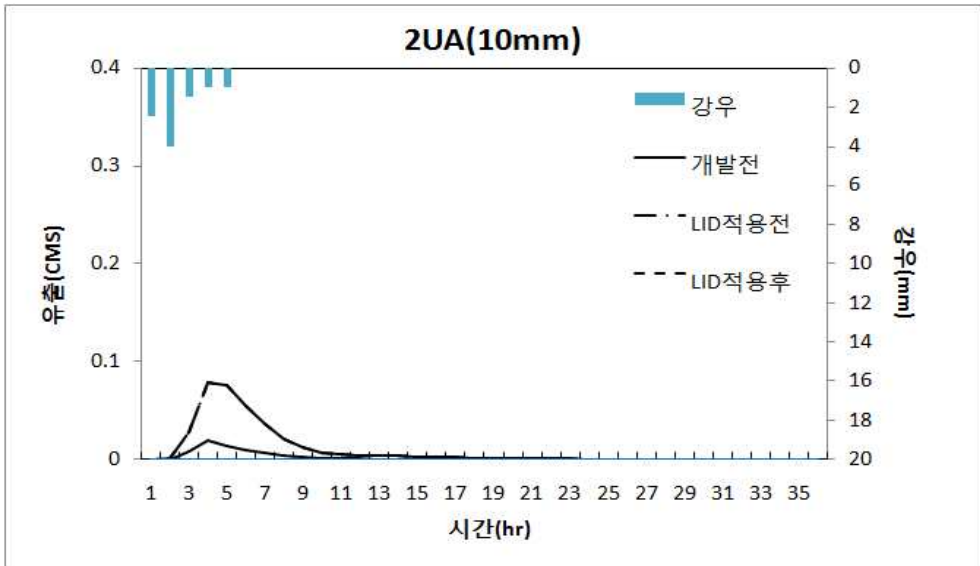


그림 4.21 2구간 2UA 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

다. 3구간

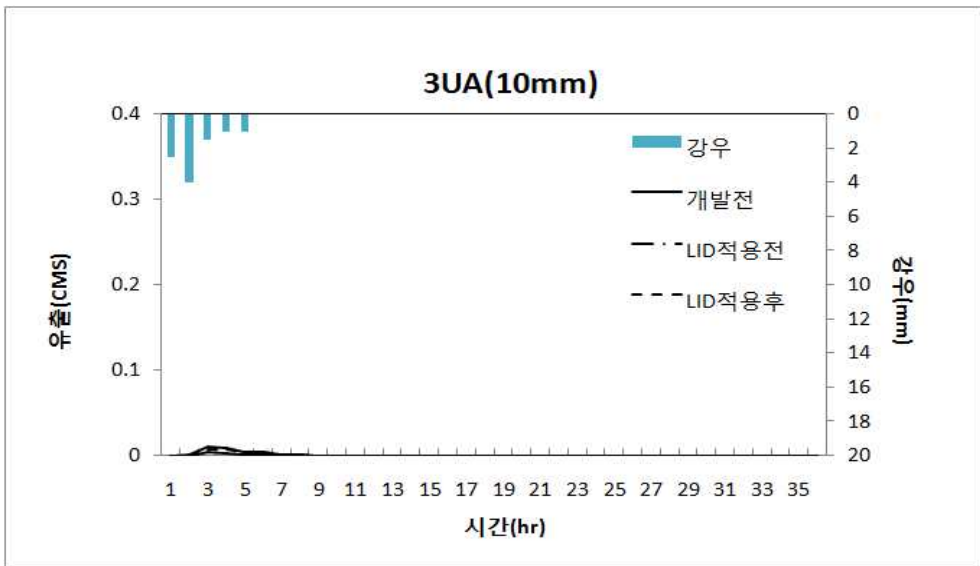


그림 4.22 3구간 3UA 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

4.8.2 총 강우 15 mm인 경우 유출량
가. 1구간

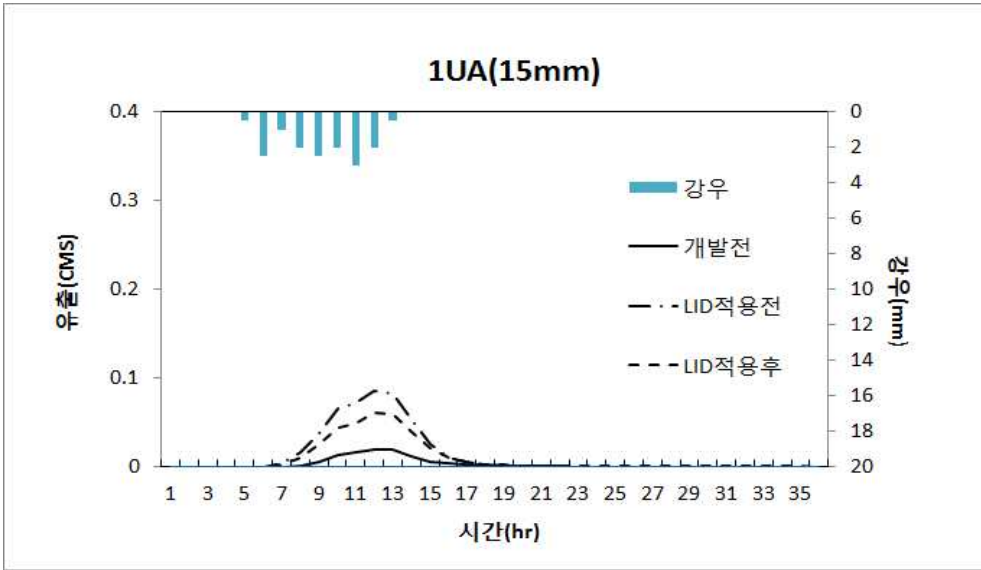


그림 4.23 1구간 1UA 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

나. 2구간

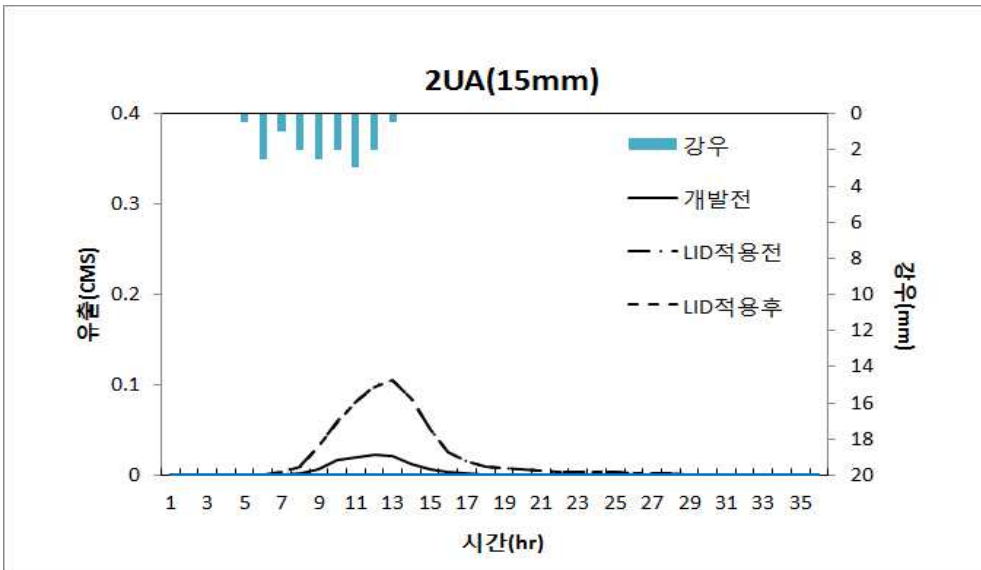


그림 4.24 2구간 2UA 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

다. 3구간

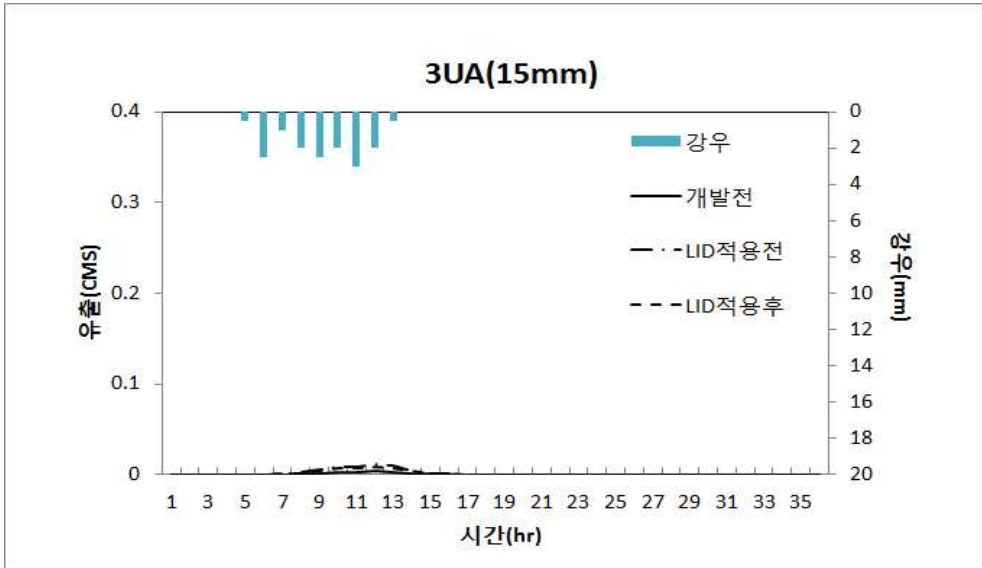


그림 4.25 3구간 3UA 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

4.8.3. 총 강우 20 mm인 경우 유출량

가. 1구간

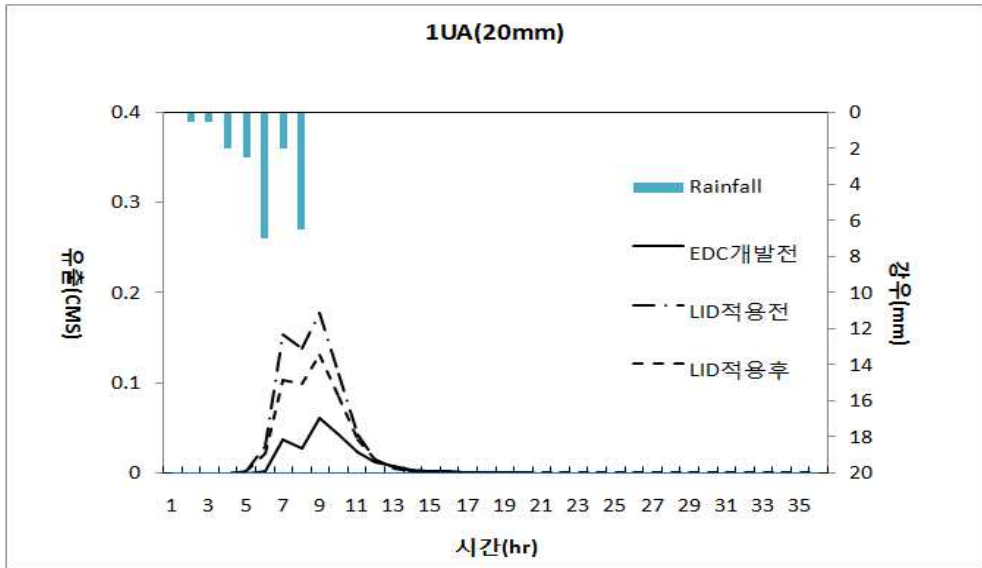


그림 4.26 1구간 1UA 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

나. 2구간

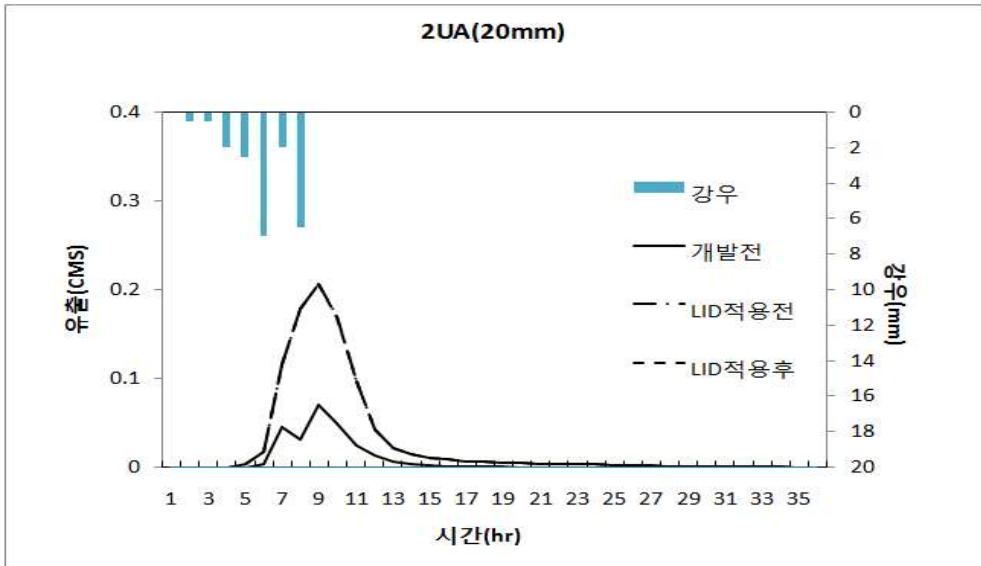


그림 4.27 2구간 2UA 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

다. 3구간

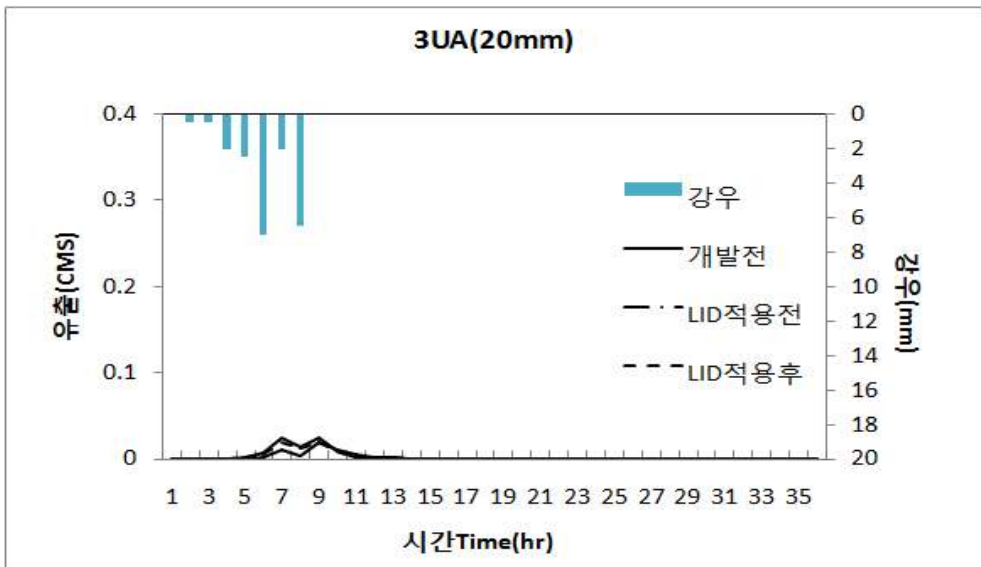


그림 4.28 3구간 3UA 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

제 5 장 결 론

시가지의 확대에 따른 토지이용의 변화는 도시홍수 뿐만 아니라 도시의 열섬현상을 가속화시킴으로써 이에 대한 근본적인 대책을 요구하게 되었다. 최근 도시홍수에 대한 대응은 기존 재해적인 대책과 도시의 열섬완화 그리고 심미적인 경관도 고려하게 이르렀다. 우리나라는 현재 중앙 집중식 수방 대책에서 탈피하여 분산형 대응으로 전환하게 되었으나 아직 법적, 제도적인 정비는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 이와 같은 분산형 LID 계획에 따른 수문학적 특성에 대해 분석하여 도출된 사항을 요약하면 다음과 같다.

1. 개별 LID 기술의 적용결과를 보면 침투트렌치, 빗물 정원 그리고 투수성 포장의 유출량은 줄어드는 효과가 있었고 그에 따른 침투량은 증가하였다. 그러나 식생수로와 옥상녹화의 유출량은 저감되지 않았으며 침투량 또한 미미하였다.
2. 연구 대상지에 계획된 식생수로와 투수성 포장 기술의 HRT를 살펴보면 식생수로의 HRT는 0.05~0.69시간, 투수성 포장의 HRT는 0.04~1.87시간으로 산정되었다. HRT와 유출수 체적과의 관계에 있어서는 식생수로와 투수성 포장 기술 모두 체적이 증가하면 HRT도 증가하는 비례관계가 성립되었다.
3. LID 기술의 적용 면적별 유출저감 효과분석에 있어서는 적용된 식생수로와 투수성 포장 모두 적용 면적이 증가해도 우수 유출저감 효과는 유의할 만한 관계가 없는 것으로 분석되었다. 이에 대한 주된 원인은 LID 기술이 설치된 배수 구역으로 유입되는 우수 유출수량이 LID 설치 면적율과 비례관계에 있지 않기 때문이다. 이에 대해서는 향후 우수 저감율과 LID 기술의 배치형태, 배수구역의 토지이용 그리고 LID 적용면적 등을 고려한 평가가 수행되어야 할 것으로 보인다.
4. 녹색시설인 옥상녹화에 대한 물수지식을 수립하여 개발 전, 후의 유출량을 평가한 결과 옥상녹화 후의 표면 유출량이 현저하게 감소됨을 알 수 있었다. 이러한 물수지의 변화는 각종 개발에 따라 왜곡된 수문현상을 개선하는데 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 강태욱, 구영민, 이상진(2015), 식생수로의 우수 이송 기능을 고려한 우수관거의 계획, J. Korean Soc. Hazard Mitig., 15(1), pp.335~343.
2. 김이호, 이정훈, 이상호, 김영민(2007), 학교 우수저류침투시설의 원격제어를 통한 빗물관리 방안연구, 대한상하수도학회 추계 학술발표회 논문집, pp.913~918.
3. 방상원, 김애선, 전승훈, 이형숙, 채수권(2010), 미래녹색도시 구현을 위한 복합기능 도시습지의 복원 및 조성방안 연구 II, 한국환경정책평가연구원.
4. 신동수, 박재법, 강두기, 조덕준(2013), SWMM~LID를 이용한 상습침수구역 내 유출저감효과 분석, 한국방재학회논문집, 13(4), pp.303~309.
5. 연종상, 장영수, 이재혁, 신현석, 김응석(2014), SWMM모형을 이용한 LID요소기술의 공간적 분포에 따른 우수유출 분석, 한국산학기술학회논문지, 15(6), pp.3983~3989.
6. 전성인, 김운중(2015), 도시기능 복원시 LID기술에 따른 수문응답 특성, 조선대학교 공학기술연구원 공학기술논문지, 8(3), pp.223~229.
7. 최지용(2009), 오염총량관리를 위한 개발사업 및 사업장 비점오염원 최적관리방안 연구, 국립환경과학원.
8. 한영해, 이태구(2012), 화단형 침투시설의 단위설계침투량 산정 및 효과분석, 한국조경학회지, 40(5), pp.140~147.
9. Blazejewski R. and Murat~Blazejewska, S.(1997), Soil clogging phenomena in constructed wetlands with subsurface flow. *Wat. Sci. Tech.*, 35(5), pp.183~188.
10. Bouyer H., Musy M., Huang Y., and Athamena K.(2009), Mitigating urban heat island effect by urban design:forms and materials, Fifth Urban Research Symposium, pp.1~15.
11. Debo N., and Reese A.(2003), Municipal stormwater management: Second Edition, CRC Press.
12. Hesieh C. H., and Davis A. P.(2005), Multiple-event study of bioretention for treatment of urban storm water runoff, *Water Science & Technology*, 51(3~4), pp.177~181.
13. House L. B.(1984), Effects of urbanization on three ponds in middleton,

- Wisconsin, USGS.
14. Jia H., Lu Y., Yu S. L., Chen Y.(2012), Planning of LID-BMPs for urban runoff control: The case of Beijing Olympic Village, Separation and Purification Technology, 84, pp.112~119.
 15. Liu K.(2003), Engineering performance of rooftop gardens through field evaluation, International Convention and Trade Show, Tampa, Florida, USA.
 16. Mitchell, V. G., Cleugh, H. A., Grimmond, C. S. B., Xu, J.(2007), Linking urban water balance and energy balance models to analyse urban design options, Hydrological Processes, published online in Wiley Inter Science(DOI: 10.1002/hyp 6868).
 17. Newcomer, M. E., Gurdak, J. J., Sklar, L. S., Nanus, L.(2014), Urban recharge beneath low impact development and effects of climate variability and change, Water Resources Research, 50, pp.1~16.
 18. Oberndorfer E, Lundholm J., Bass B., Coffman R. R., Doshi H., Dunnett N., Gaffin S., Kohler M., Liu K. Y., Rowe B.,(2006) Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, function, and services, BioScience, 57(10), pp.823~833.
 19. Ponce, V.M.(1986). Diffusion wave modeling of catchment dynamics, Journal of Hydraulic Engineering, 112(8), pp.716~727
 20. Prince George' s County.(1999a), Low impact development : An integrated design approach. Largo, MD : department of environmental resources, Programs and Planning Division.
 21. Prince George' s County.(1999b), Low impact development hydrologic analysis. Largo, MD: Department of environmental resources, Programs and Planning Division.
 22. Rawls W. J., Brakensiek D. L., Saxton K. E. 1982, Estimation of soil water properties, Transactions of the ASAE, 25(5), 1316~1320.
 23. Rosenzweig C., Stuart G., Lily P.(2006), Green Roofs in the New York Metropolitan Region Report to Columbia University Center for Climate Systems Research NASA Goddard Institute for Space Studies: New York.
 24. Southwest urban hydrology (<http://www.southwesturbanhydrology.com>)
 25. Stovin V., Dunnett N., and Hallam A.(2007), Green roofs getting sustainable dra

- inage off the ground, NOVATECH, pp.1~8.
26. Swisher, D.(2002), Chemical and Hydraulic Performance of a Porous Pavement Parking Lot with Infiltration to Ground Water, Masters Thesis, The Pennsylvania State University.
 27. US EPA.(1999), Preliminary data summary of urban stormwater best management practices. EPA-821-R-99-012. Washington, D.C.: Office of Water.
 28. US EPA.(2000a), Low Impact Development (LID): A literature summary. EPA-841-B-00-005. Washington, D.C.: Office of Water.
 29. US EPA.(2000b), Water quality conditions in the United States. EPA-841-F-00-006. Washington, D.C.: Office of Water.
 30. US EPA.(2001), Fight or Flight: Metropolitan Philadelphia and Its Future. Available at: <http://www.epa.gov/waters/data/downloads.html>, Accessed on December 18, 2005.
 31. US EPA.(2002a), National management measures to control nonpoint source pollution from urban areas-Draft. EPA-842-B-02-003. Washington, D.C.: Office of Water.
 32. US EPA.(2015), Protecting water quality urban runoff.
 33. Vörösmarty C.J., Sharma K. P., Fekete B. M., Copeland A. H., Holden J., Marble J., Lough J. A.,(1997), The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world, *AMBIO*, 26(4), pp.210~219.
 34. Yeon, J. S., Jang, Y. S., Shin, H. S., Kim, E. S. (2014), Analysis of infiltration trench facility for runoff reduction effect, *J. of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 15(9), pp.5813~5819.
 35. Zare, S. O., Saghafian, B., Shamsai, A.(2012), Multi-objective optimization for combined quality-quantity urban runoff control, *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, pp.4531~4542.
 36. Zeng X. and Rasmussen T. C.(2005), Multivariate statistical characterization of water quality in Lake Lanier, Georgia, USA, *J. Environ. Qual.*, 34, pp.1980~1991.
 37. Zimmer, C. A., Heathcote, I. W., Whiteley, H. R., Schroeter, H. (2007), Low impact development practices for storm-water: implication for urban hydrology, *Canadian Water Resources J.*, 32(3), pp.193~212.

부 록
Appendix

부록 1. 1구간 소유역별 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

1UA

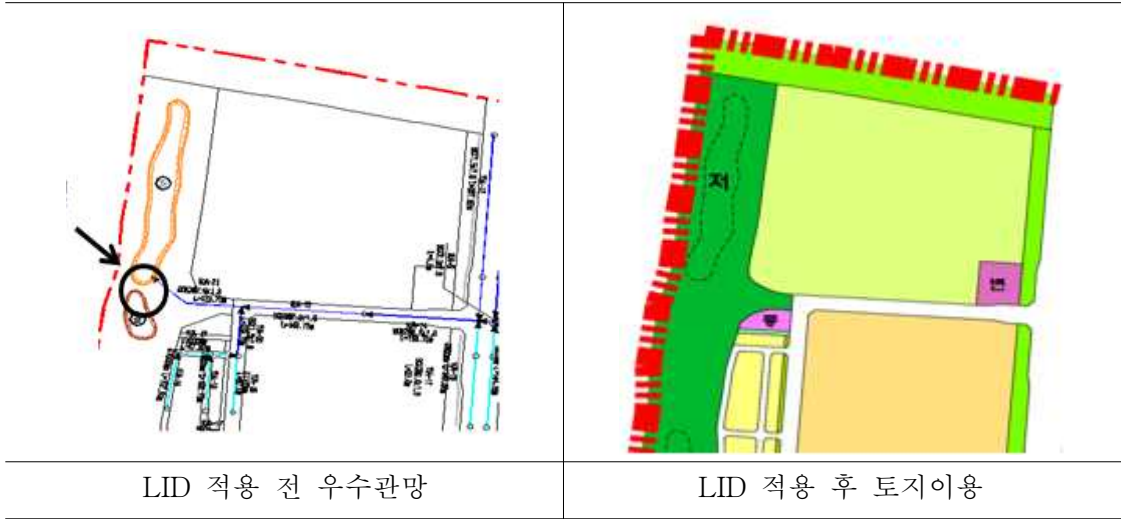


그림 1. 1구간 1UA 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

1UB

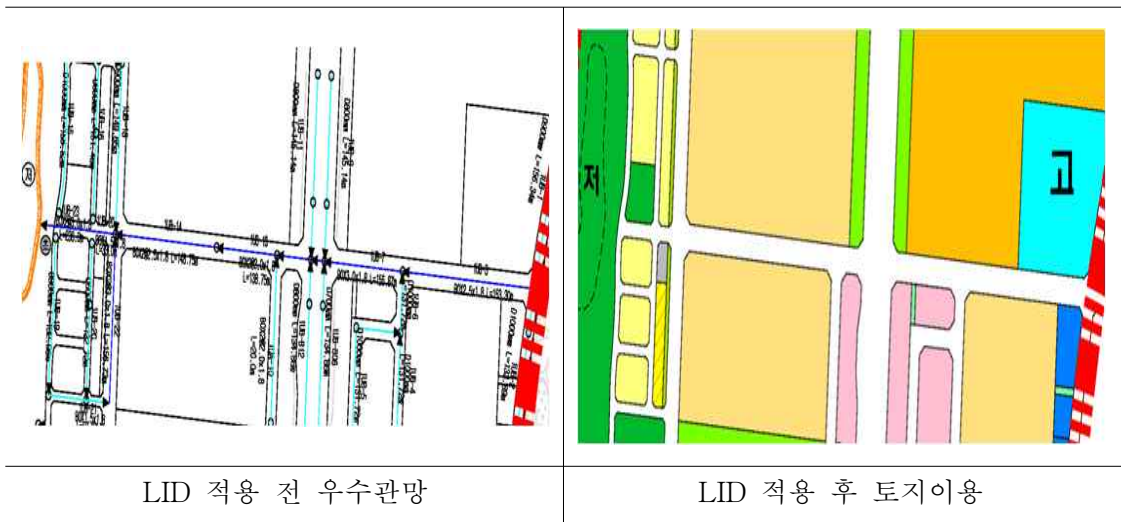


그림 2. 1구간 1UB 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

1UC

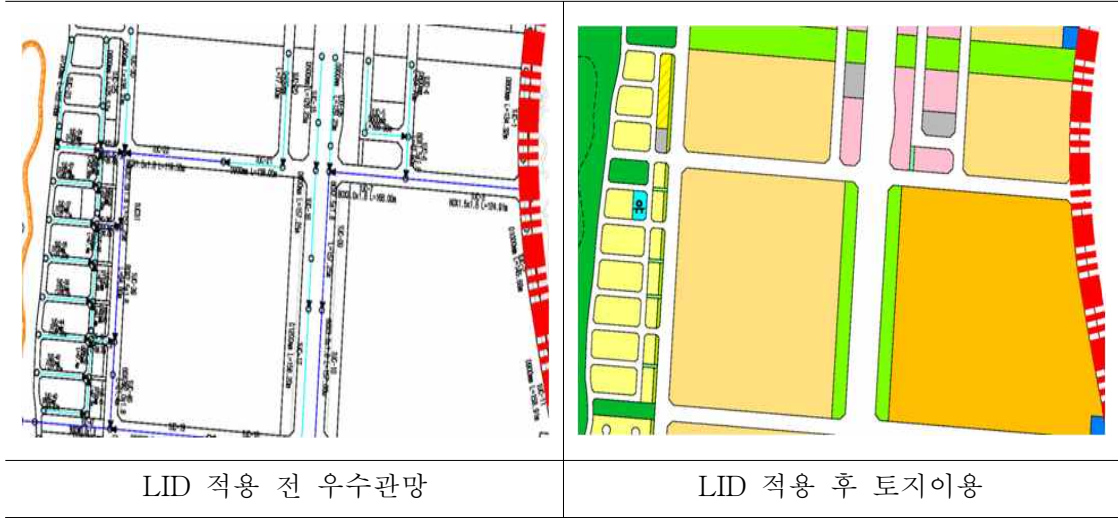


그림 3. 1구간 1UC 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

1UD

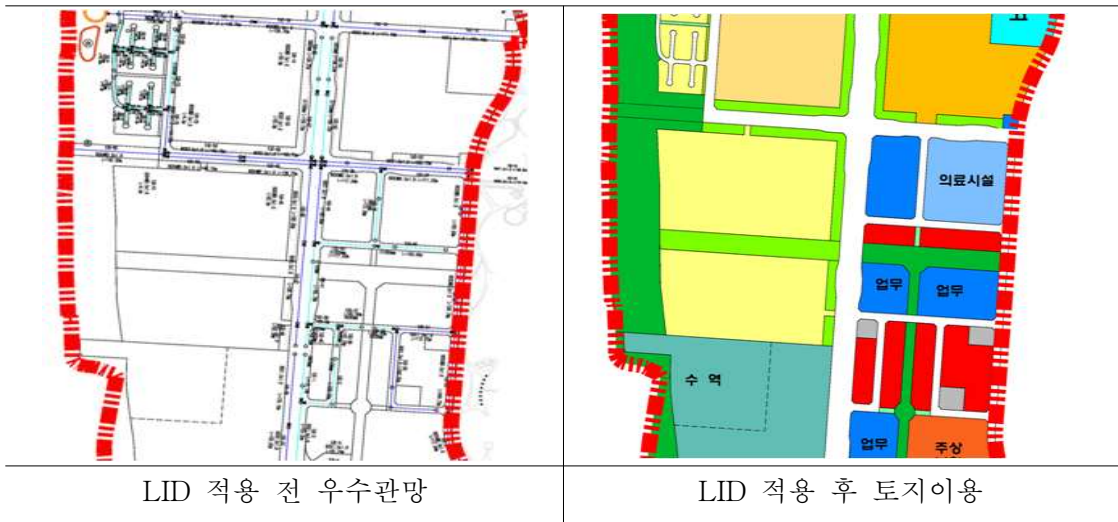


그림 4. 1구간 1UD 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

1UE

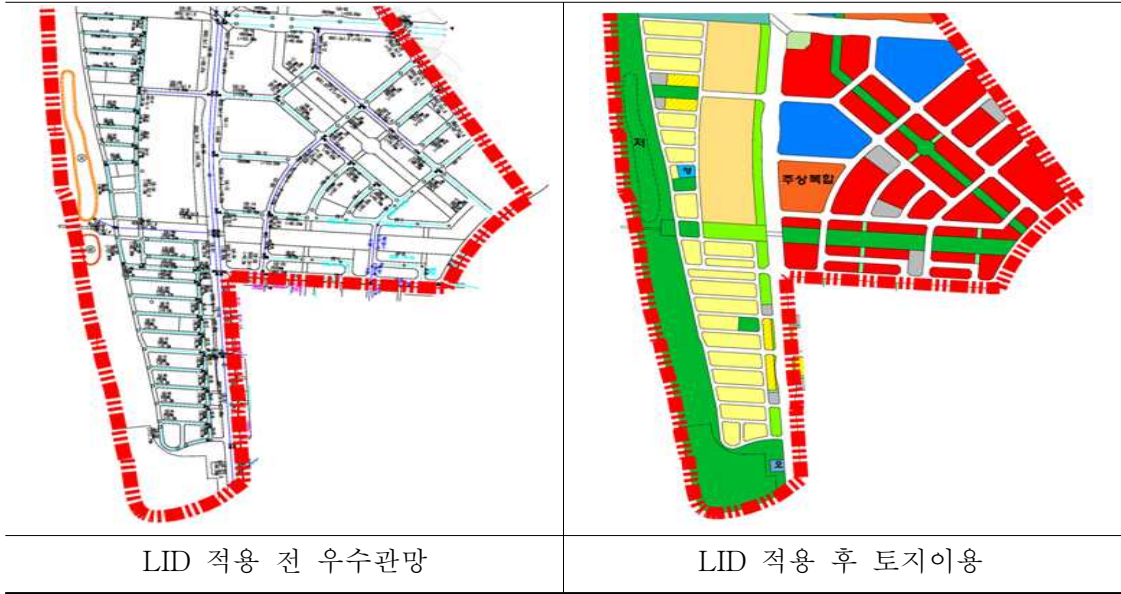


그림 5. 1구간 1UE 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

부록 2. 2구간 소유역별 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

2UA

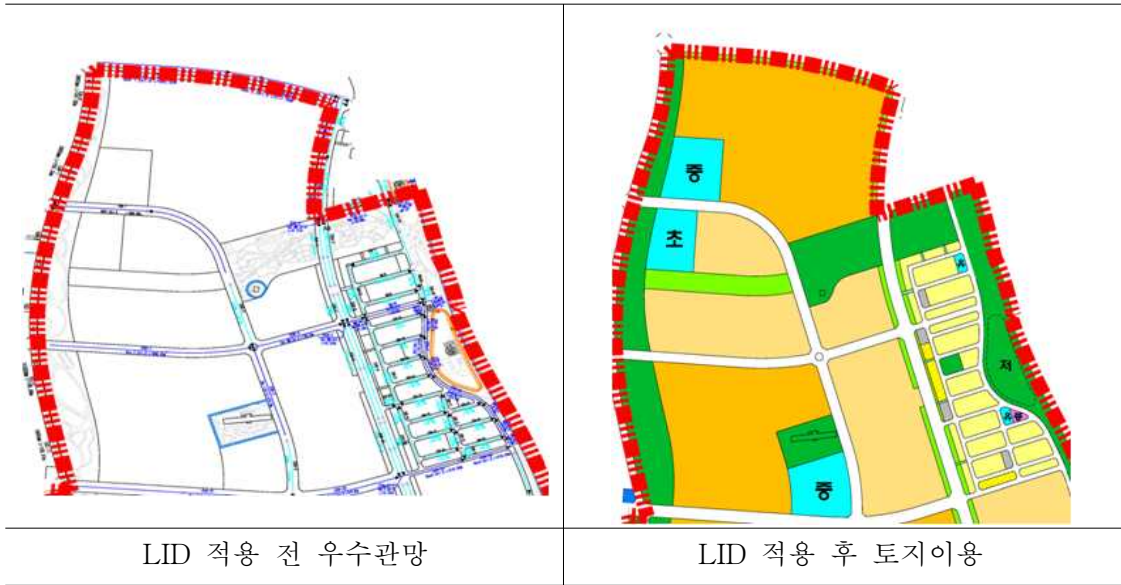


그림 6. 2구간 2UA 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

2UB

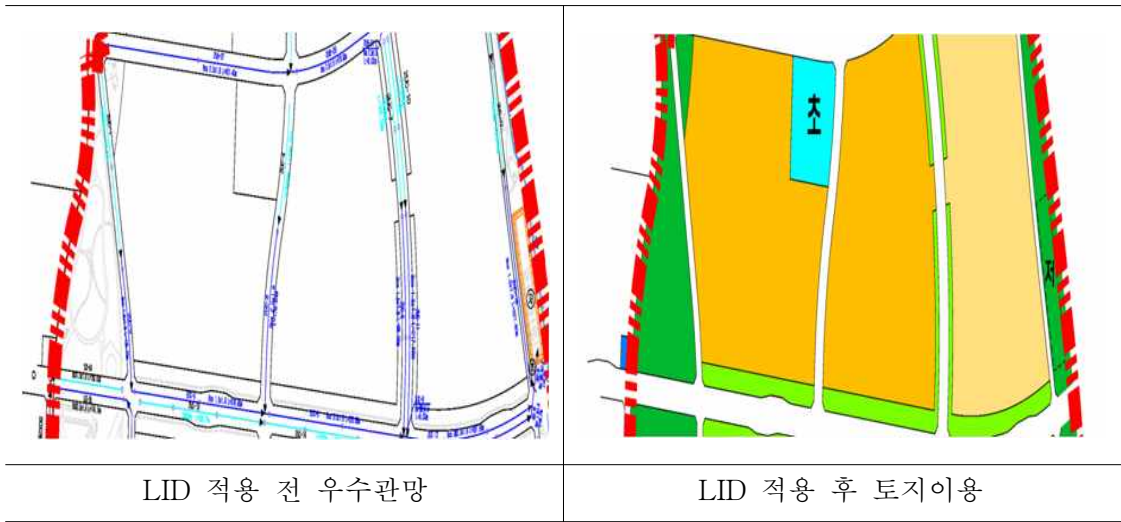


그림 7. 2구간 2UB 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

2UC

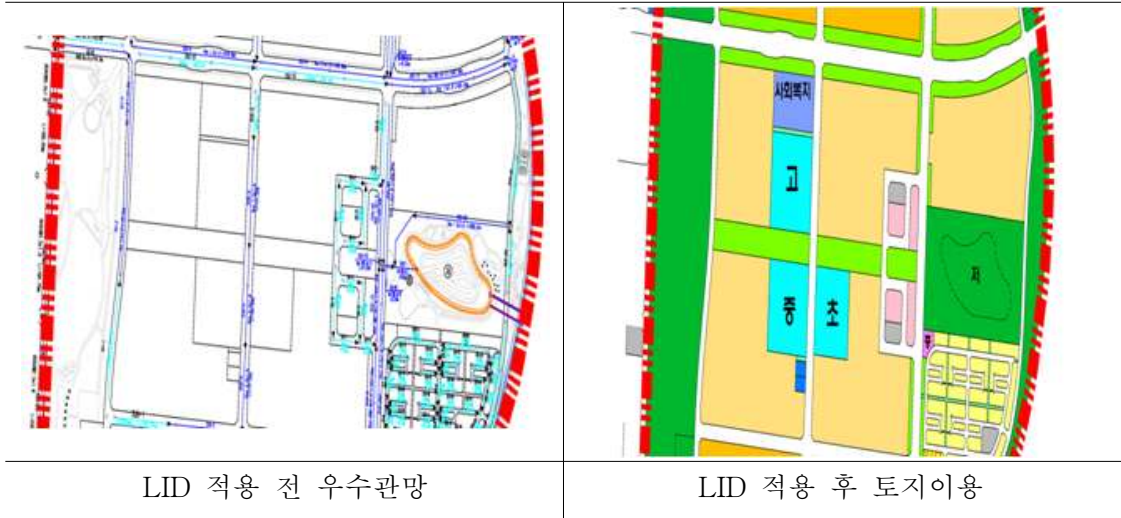


그림 8. 2구간 2UC 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

2UD

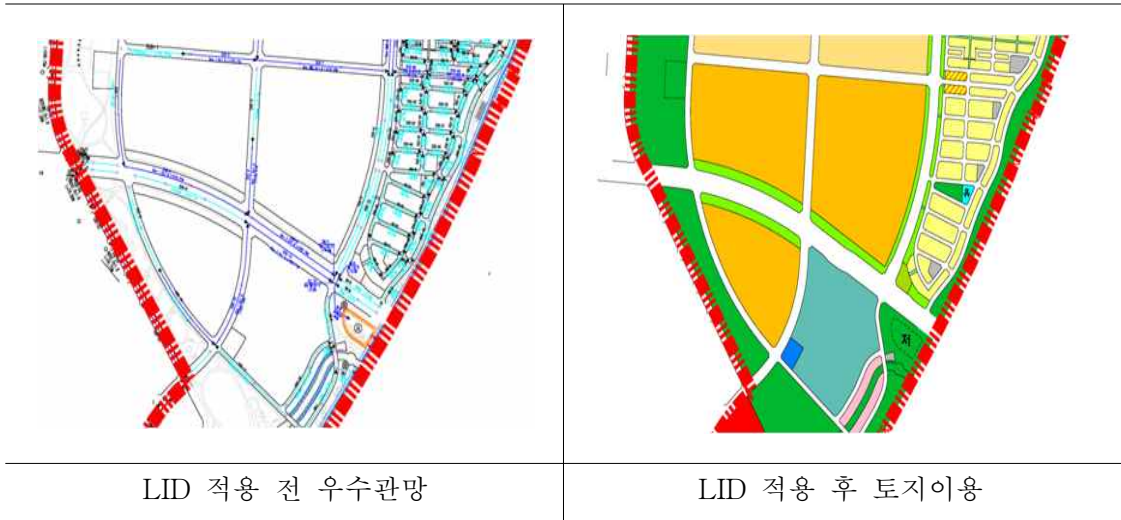
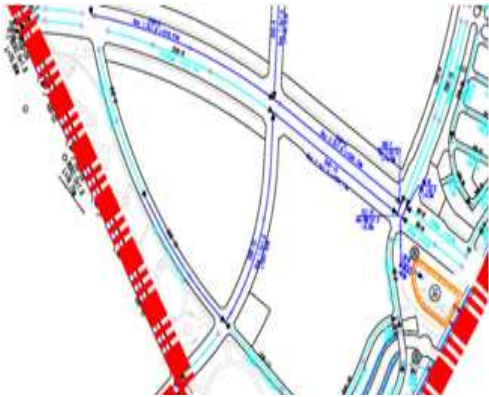


그림 9. 2구간 2UD 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

2UE



LID 적용 전 우수관망



LID 적용 후 토지이용

그림 10. 2구간 2UE 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

2UF



LID 적용 전 우수관망



LID 적용 후 토지이용

그림 11. 2구간 2UF 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

2UG

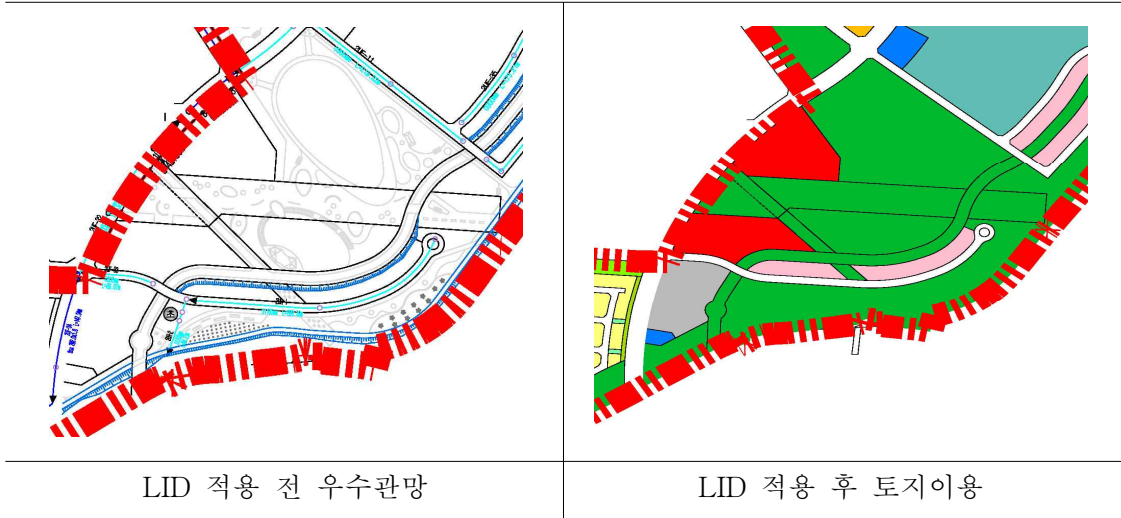


그림 12. 2구간 2UG 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

2UH

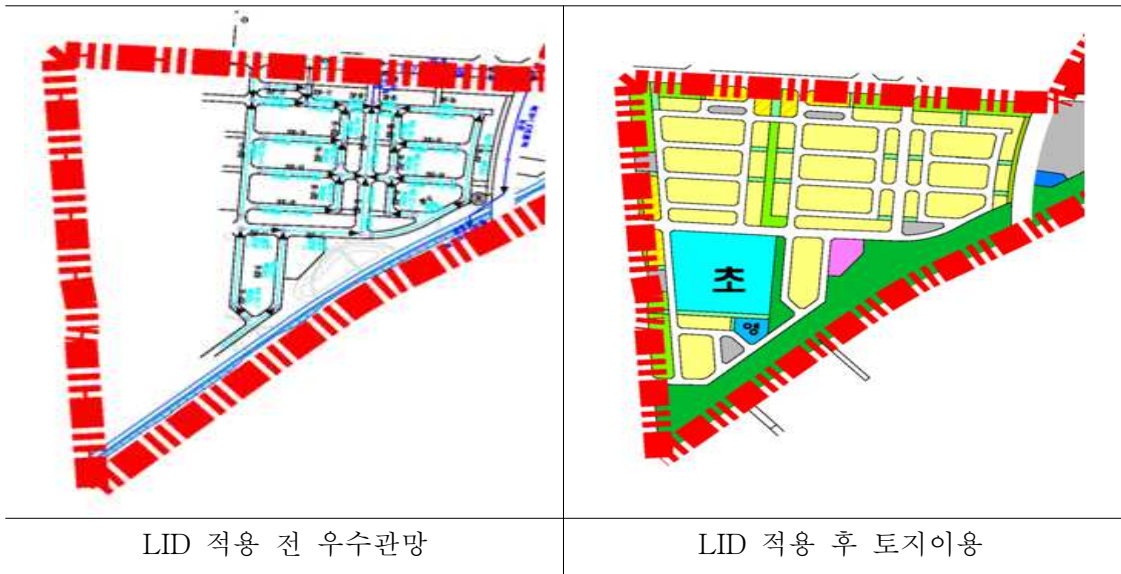


그림 13. 2구간 2UH 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

부록 3. 3구간 소유역별 유출점 및 LID적용 전·후의 토지이용

3UA

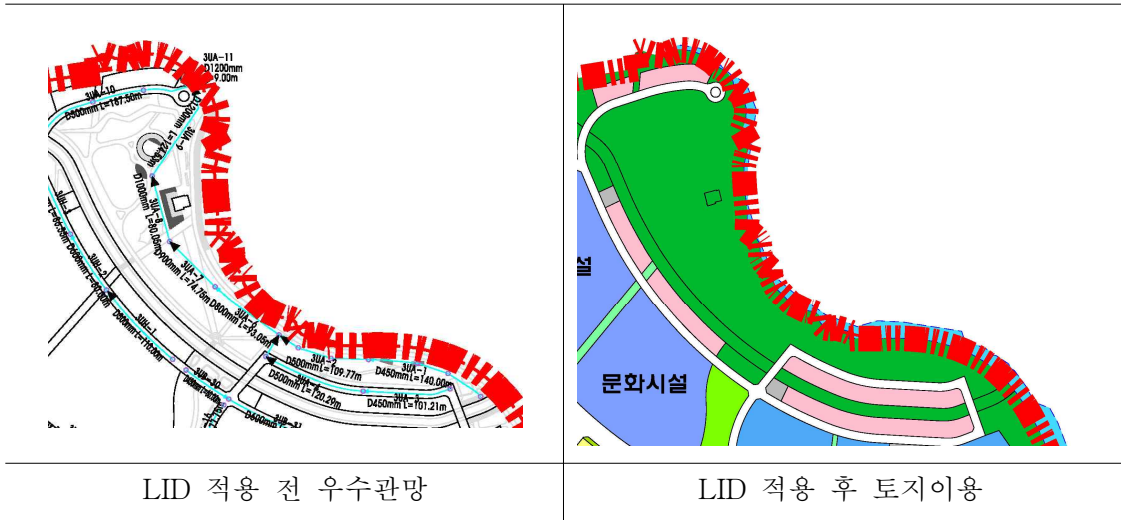


그림 14 3구간 3UA 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

3UB

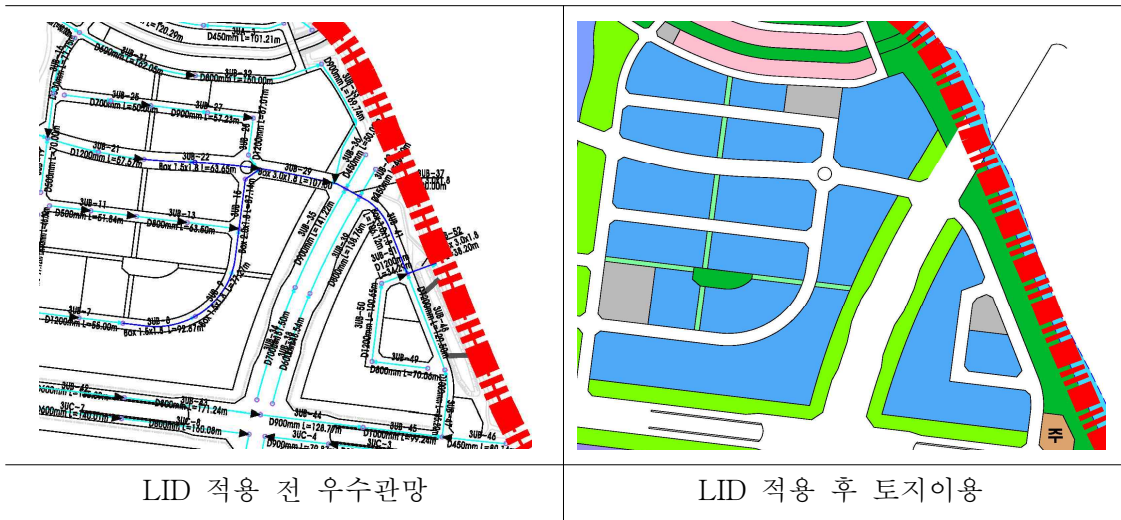


그림 15. 3구간 3UB 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

3UC

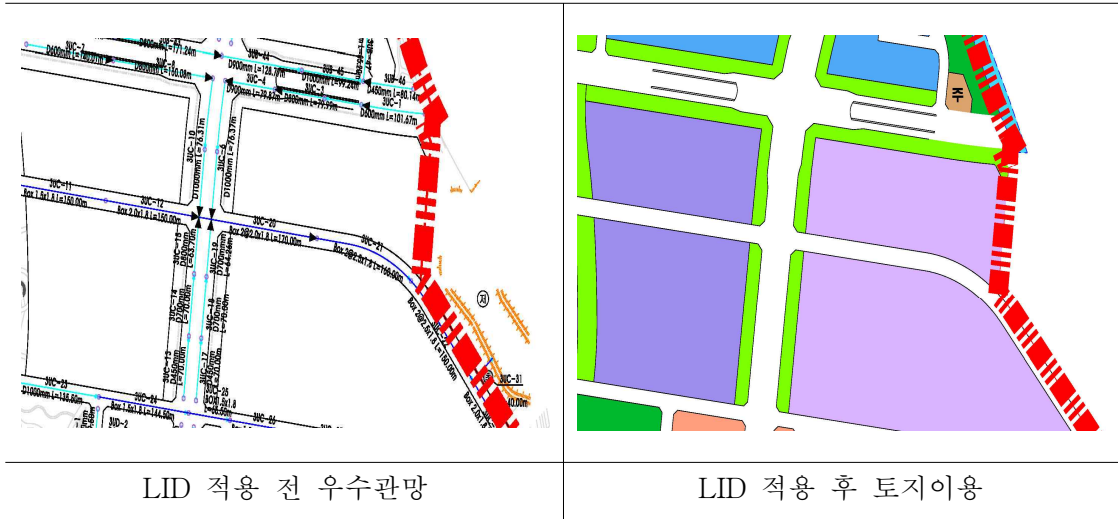


그림 16. 3구간 3UC 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

3UD

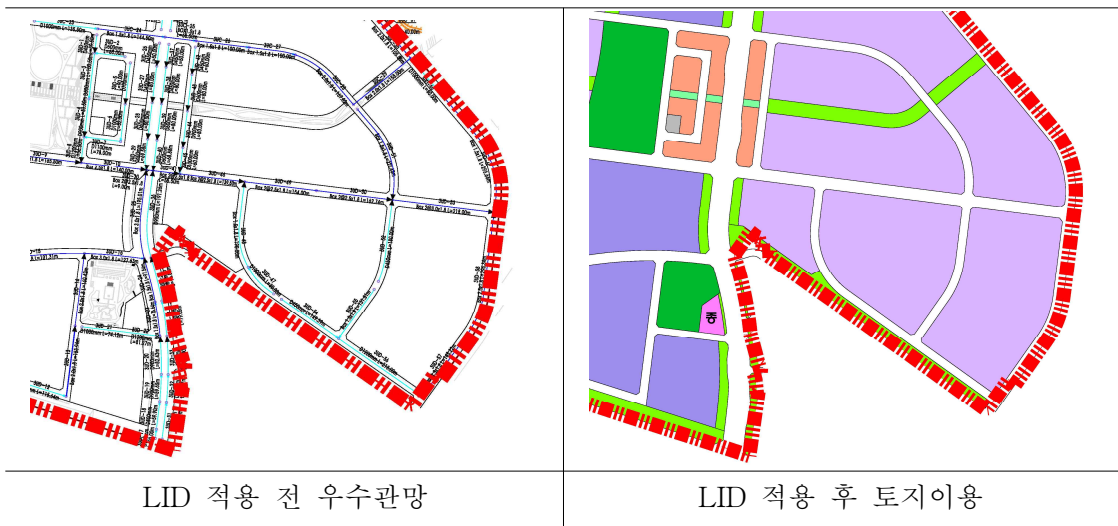


그림 17. 3구간 3UD 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

3UE

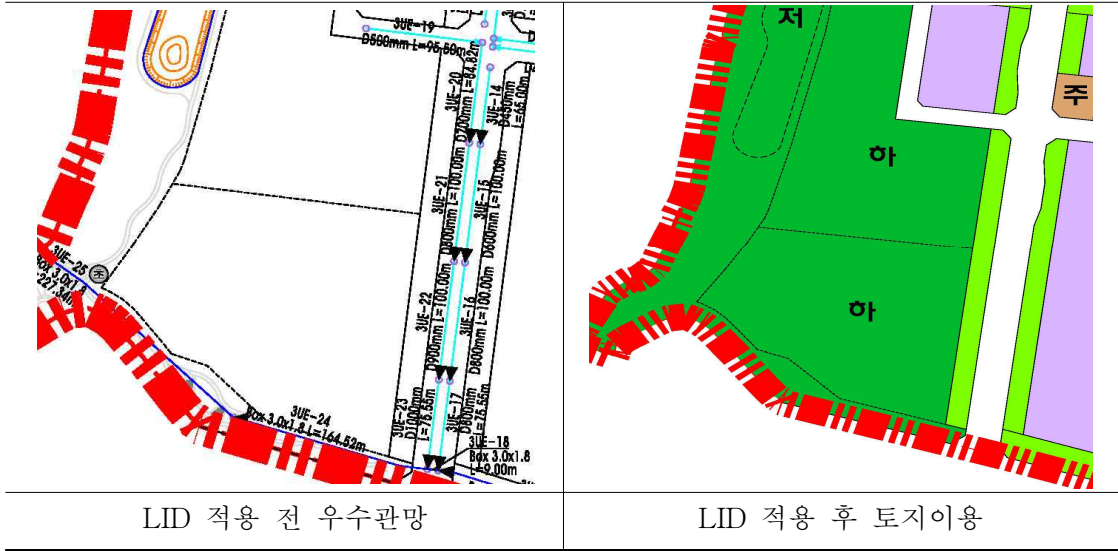


그림 18. 3구간 3UE 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

3UF

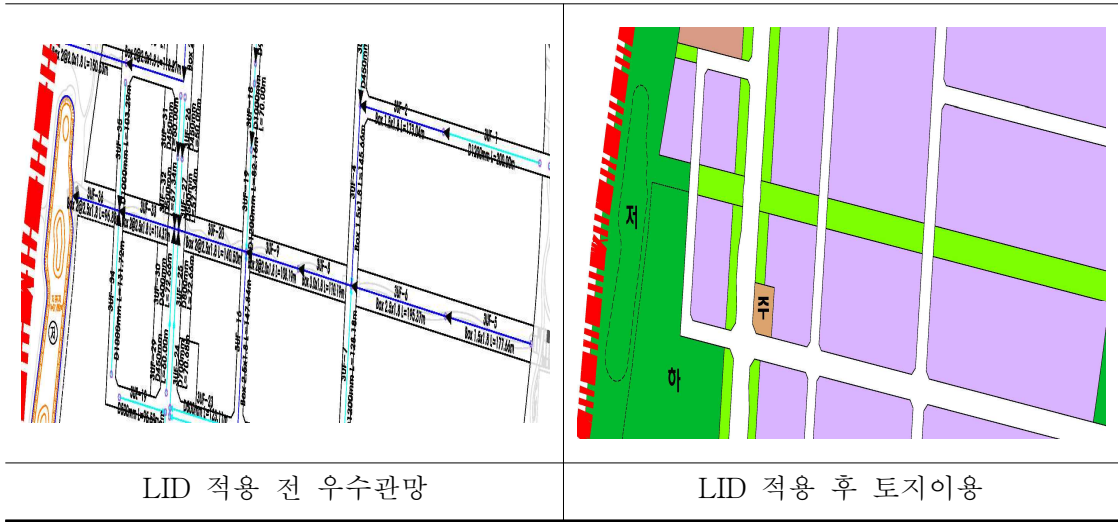


그림 19. 3구간 3UF 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

3UG

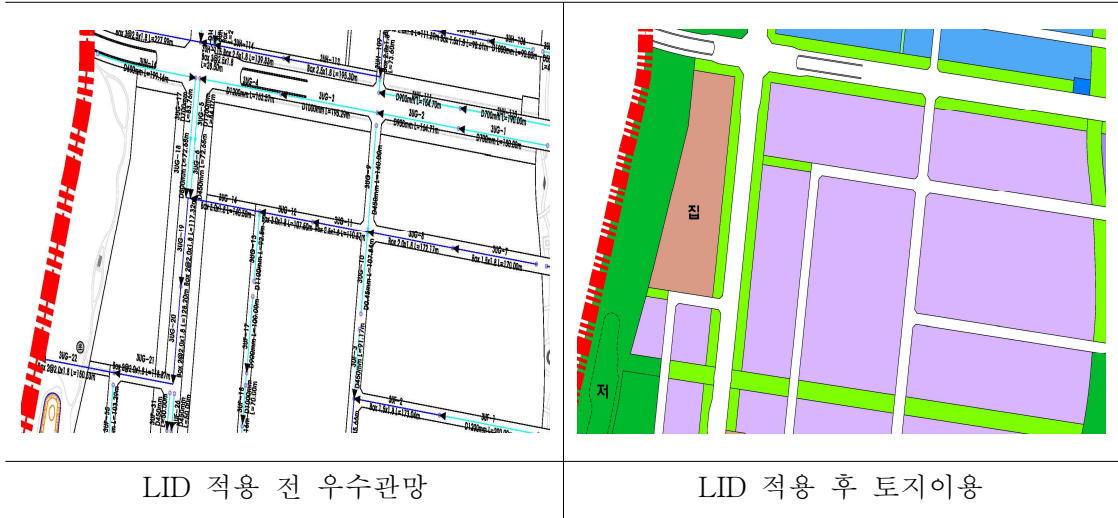


그림 20. 3구간 3UG 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

3UH

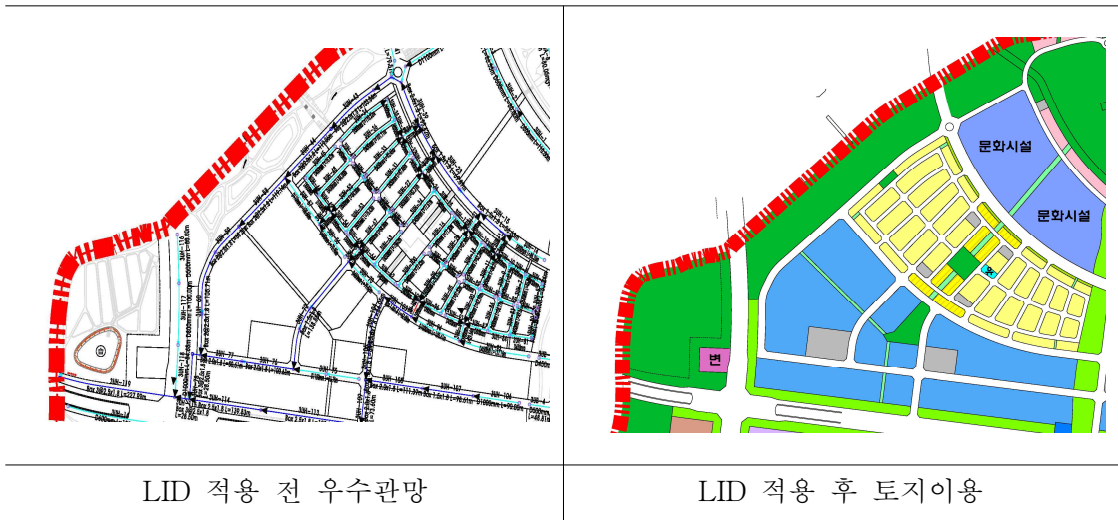


그림 21. 3구간 3UH 지역의 소유역 유출점 및 LID 적용 전·후의 토지이용

부록 4. 총 강우 10 mm인 경우 유출량
가. 1구간

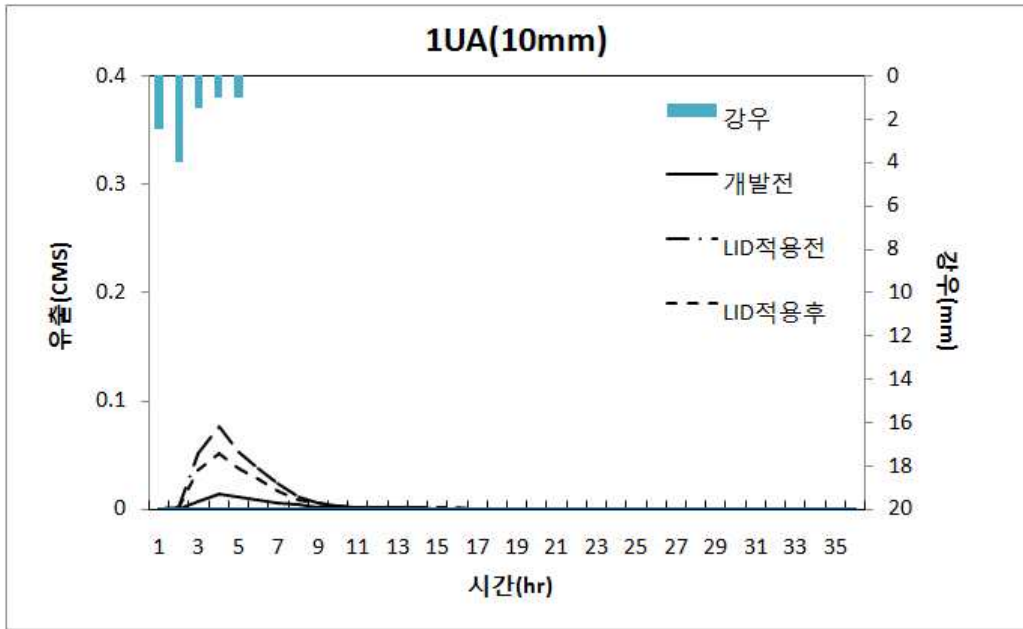


그림 22. 1구간 1UA 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

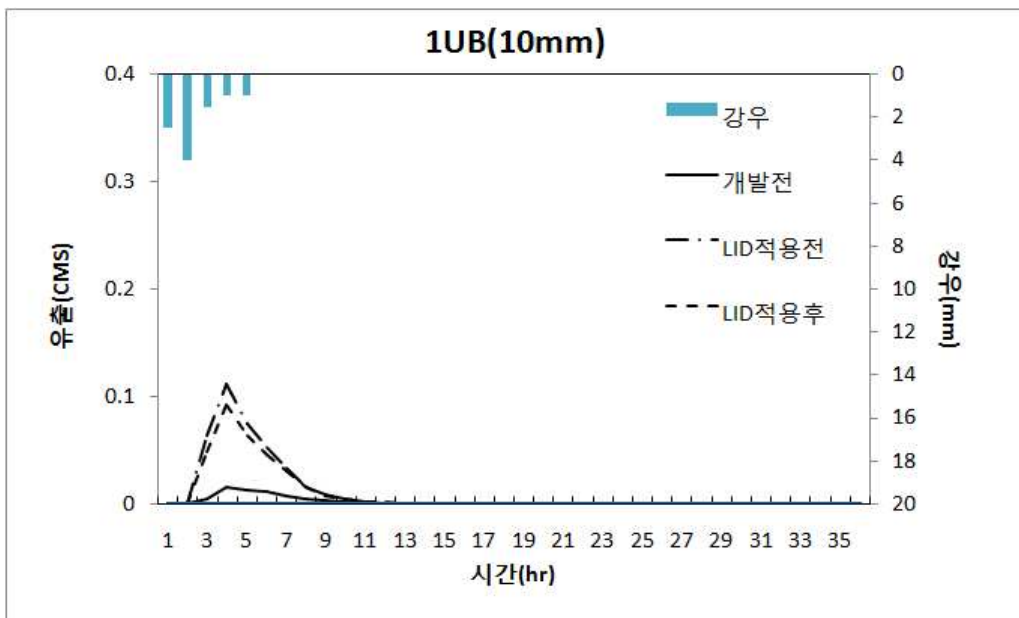


그림 23. 1구간 1UB 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

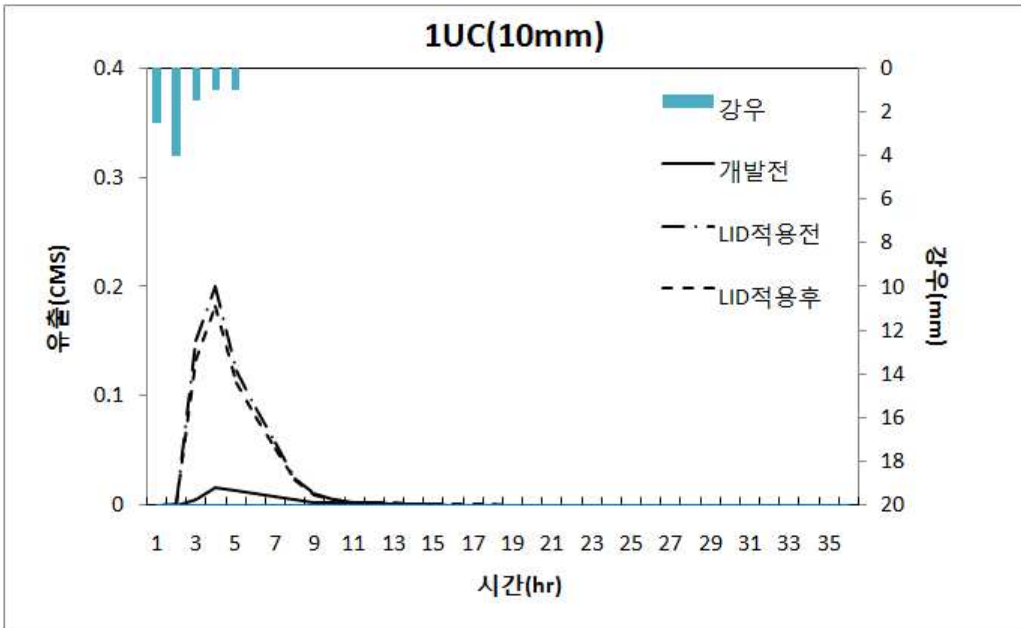


그림 24. 1구간 1UC 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

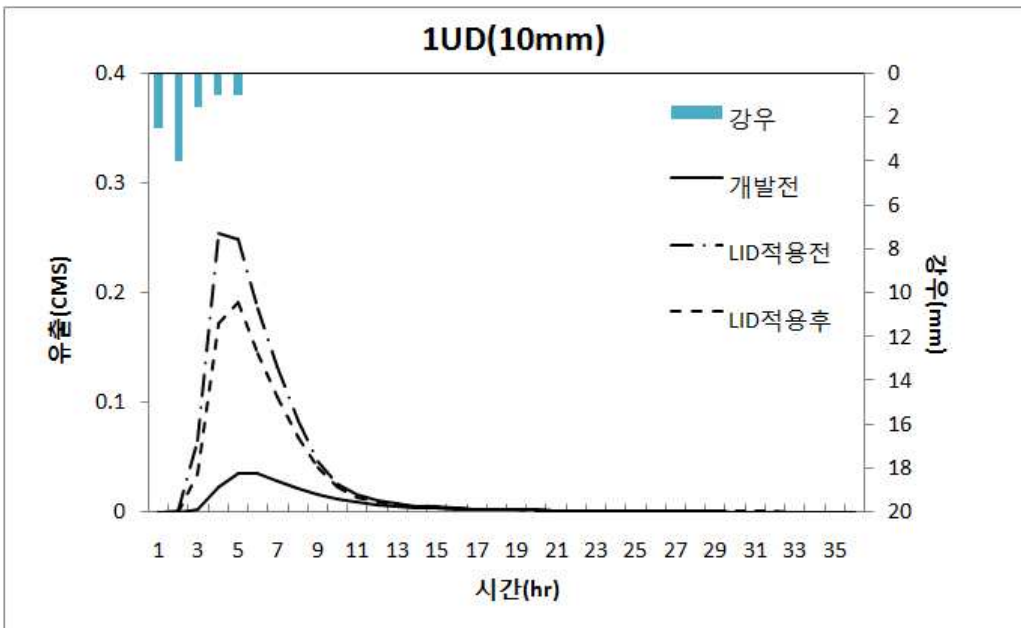


그림 25. 1구간 1UD 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

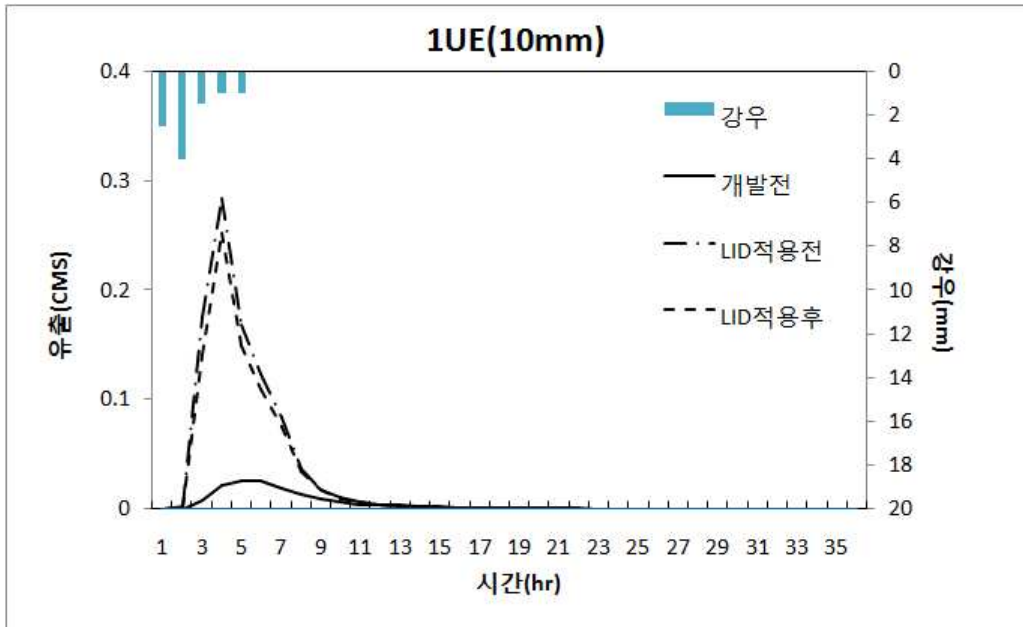


그림 26. 1구간 1UE 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

나. 2구간

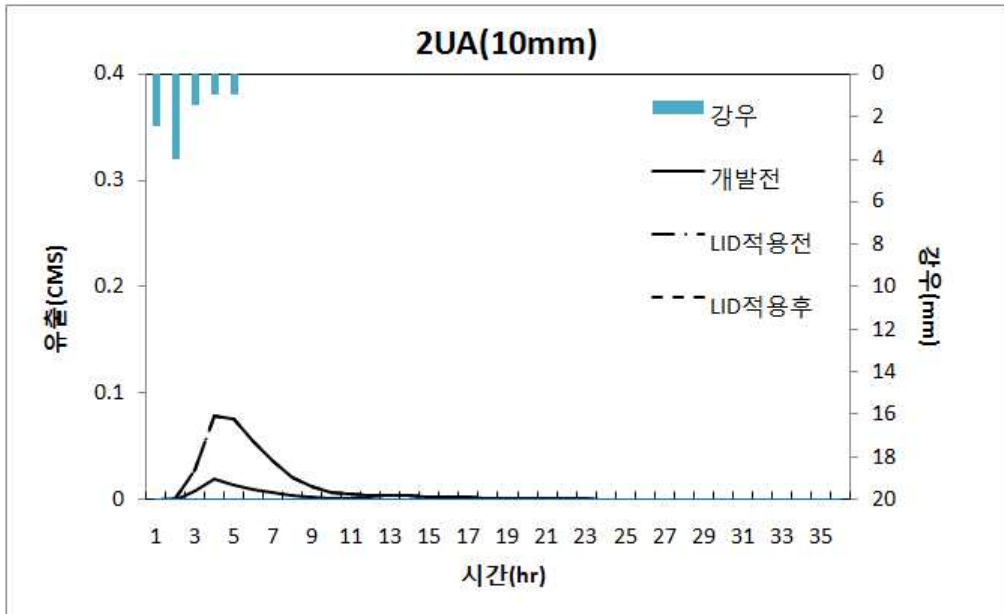


그림 27. 2구간 2UA 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

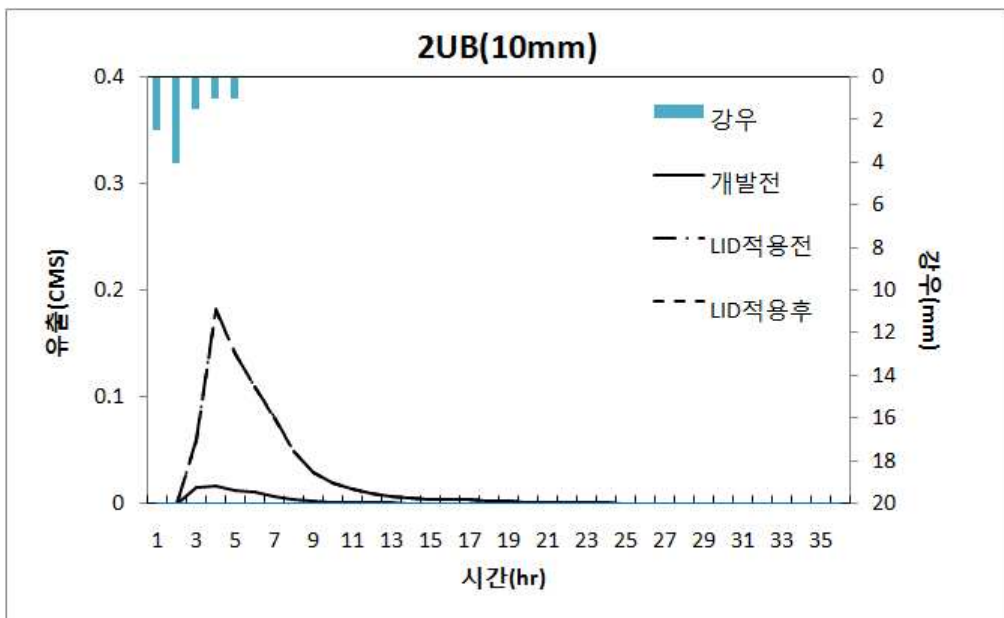


그림 28. 2구간 2UB 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

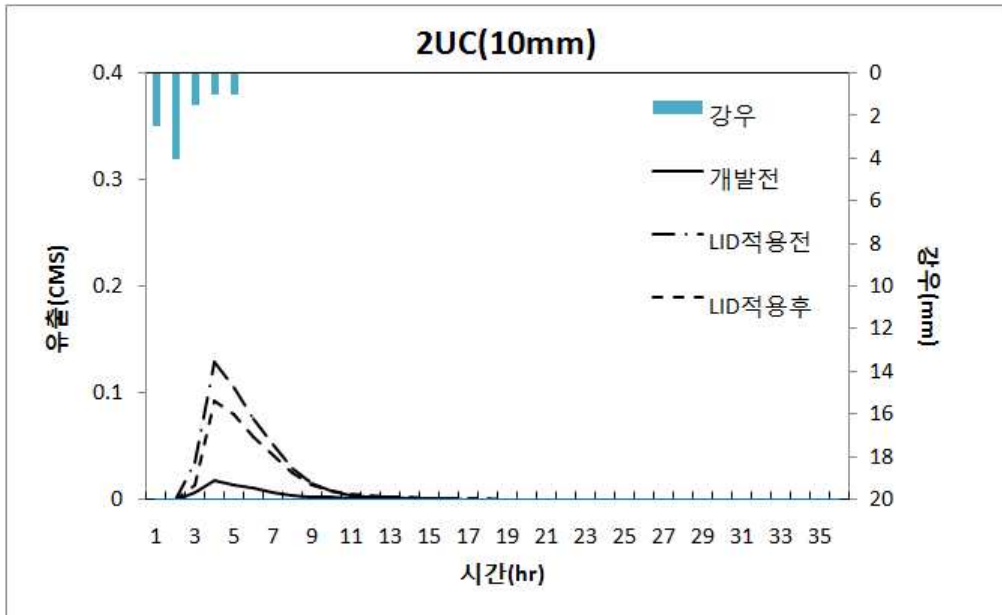


그림 29. 2구간 2UC 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

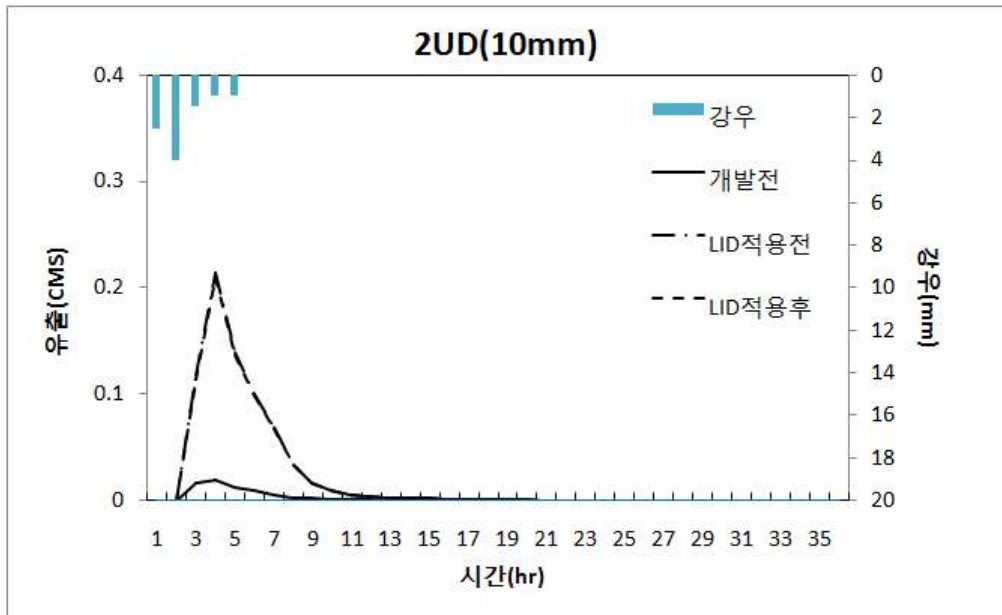


그림 30. 2구간 2UD 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

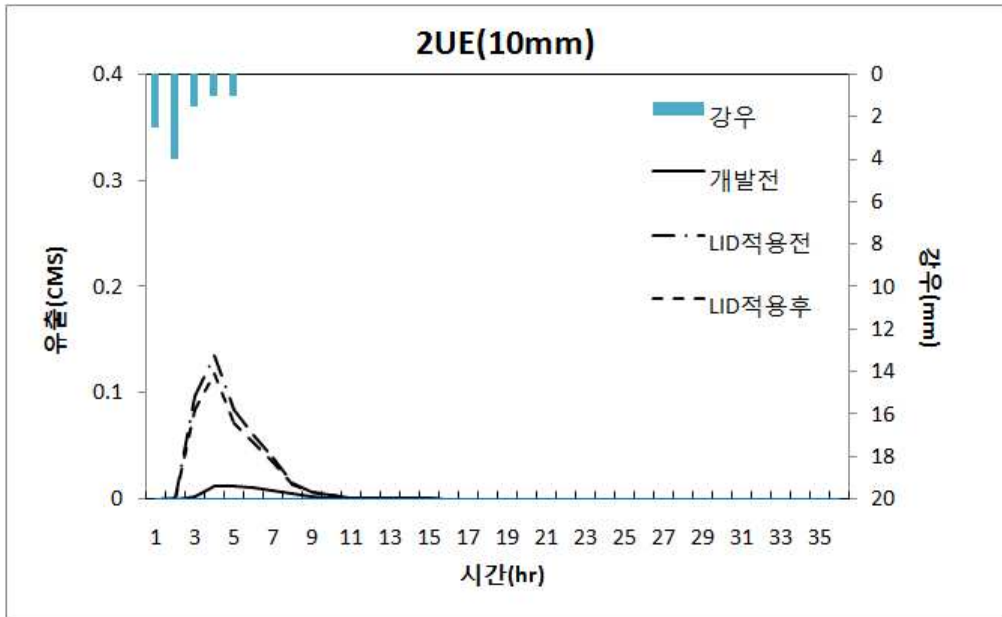


그림 31. 2구간 2UE 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

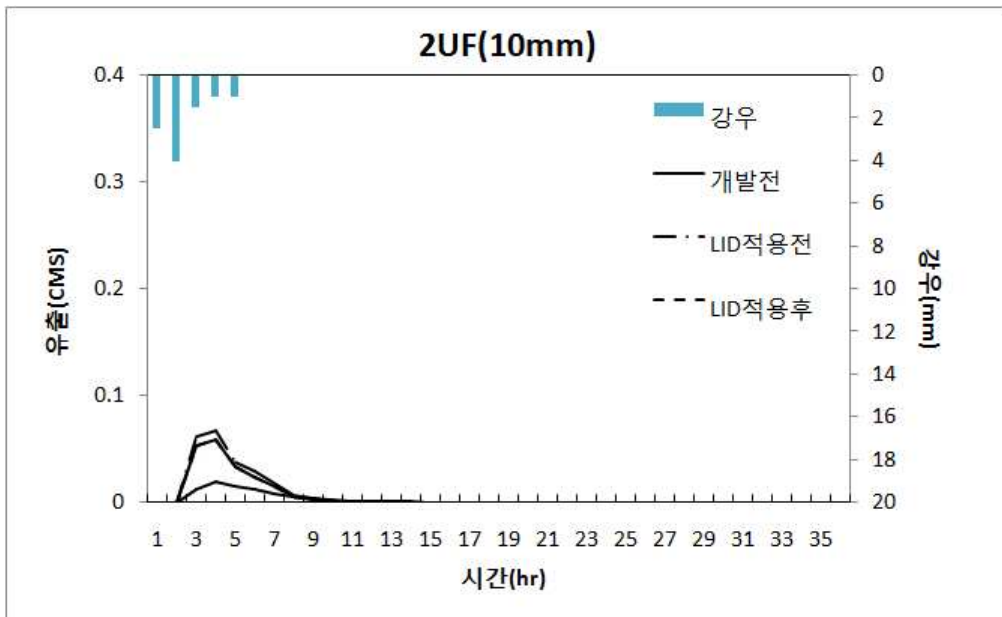


그림 32. 2구간 2UF 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

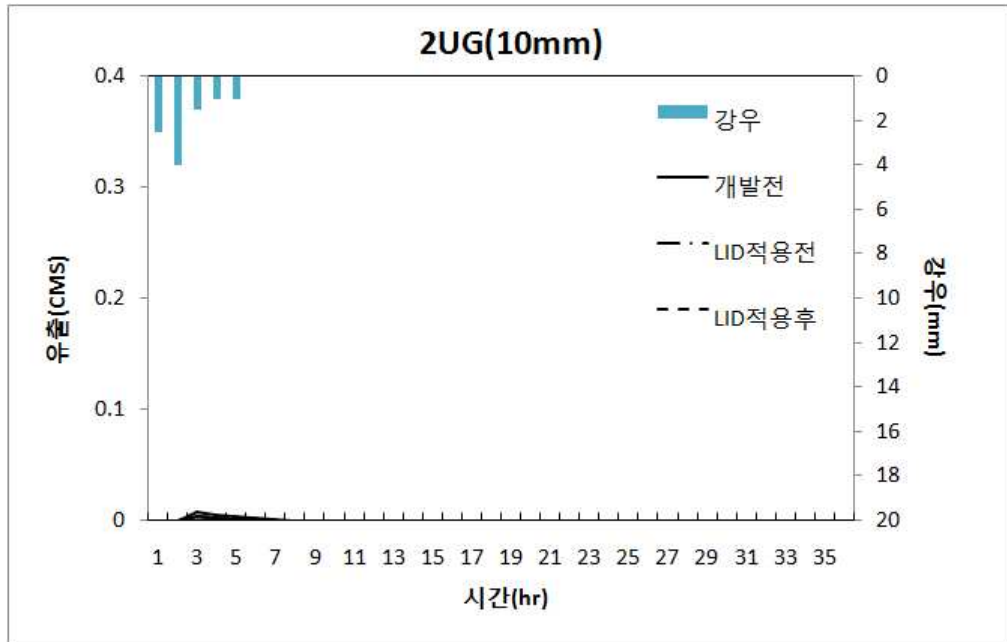


그림 33. 2구간 2UG 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

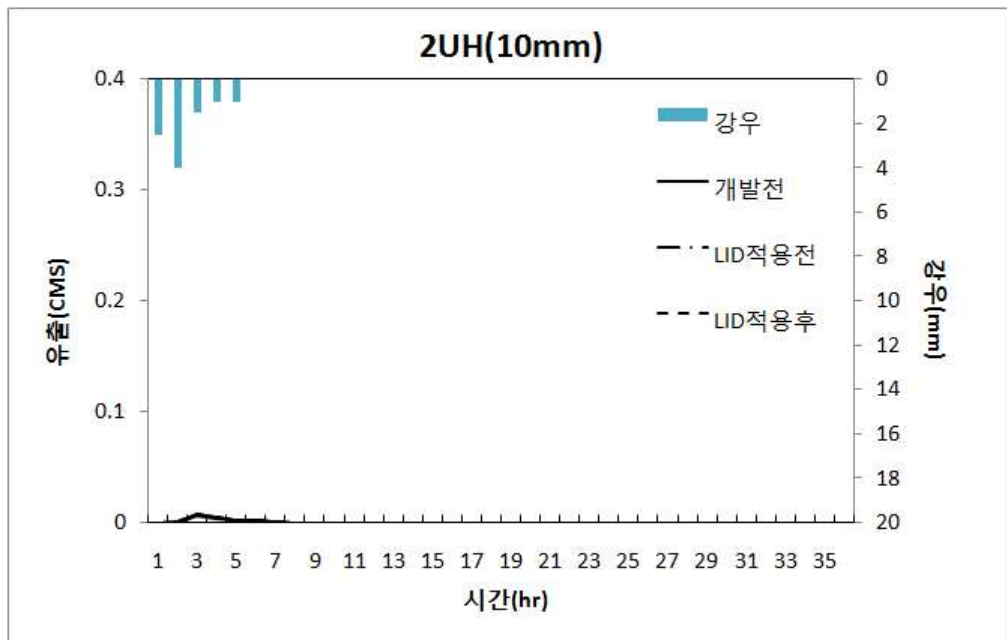


그림 34. 2구간 2UH 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

다. 3구간

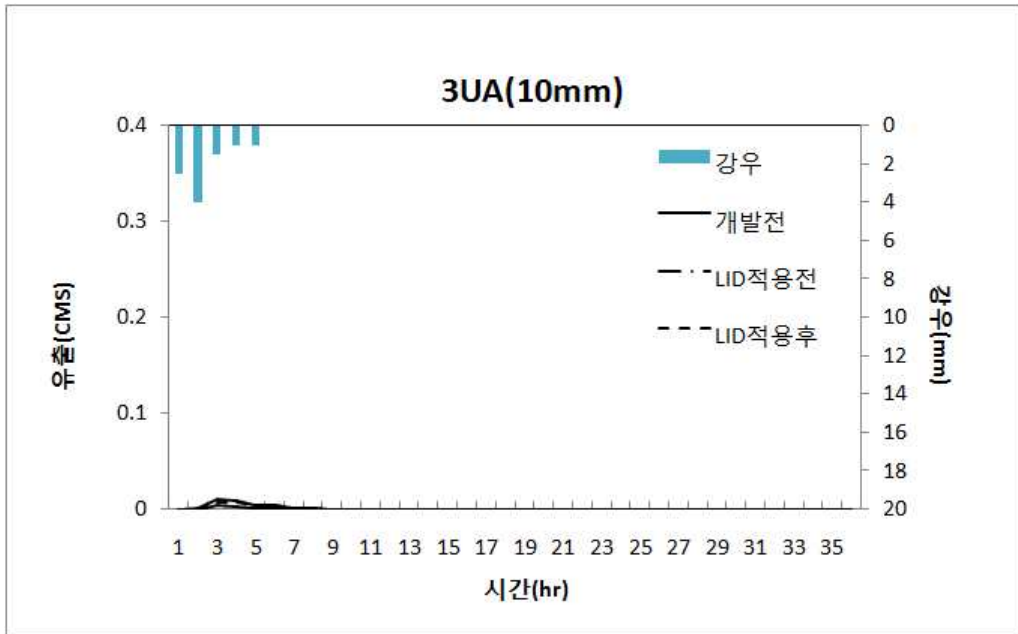


그림 35. 3구간 3UA 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

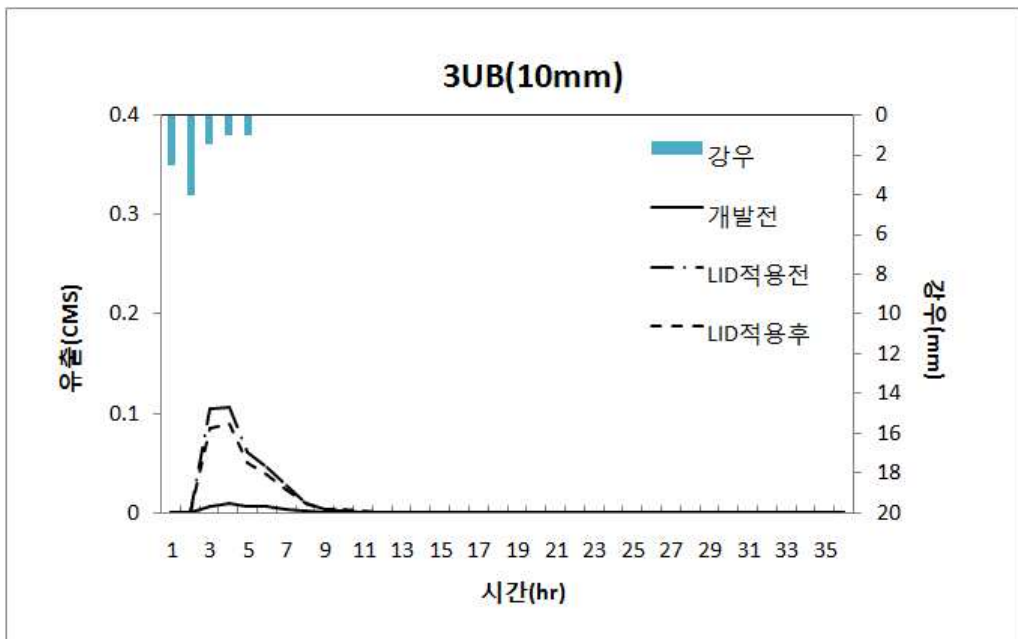


그림 36. 3구간 3UB 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

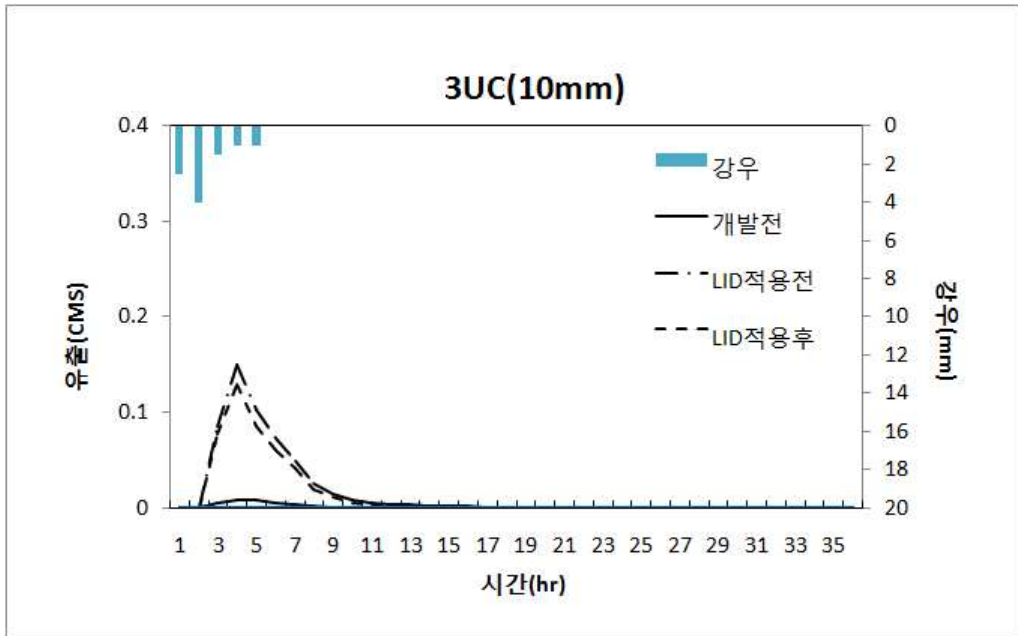


그림 37. 3구간 3UC 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

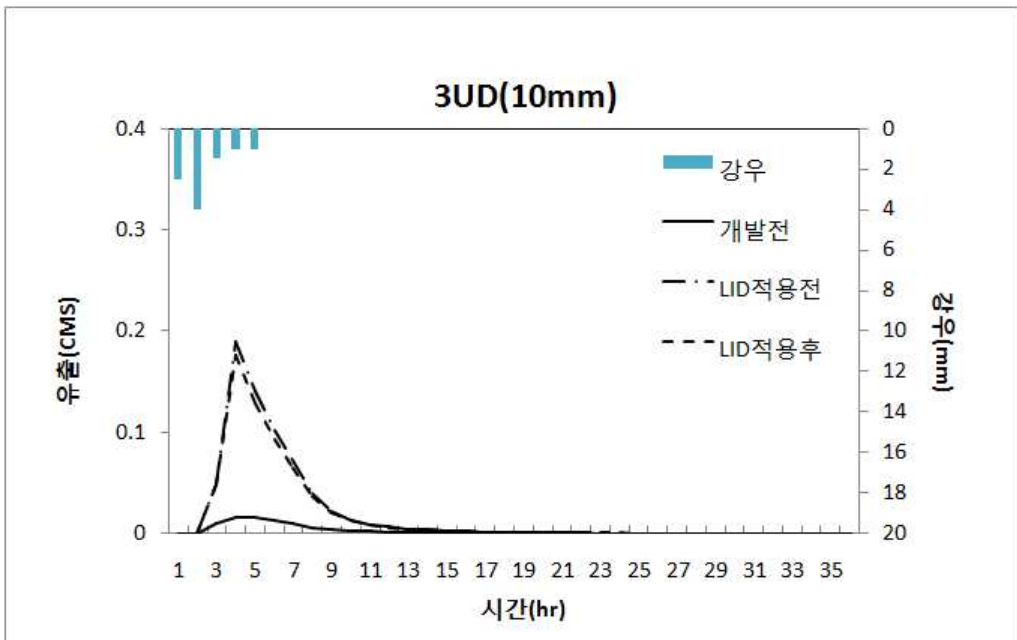


그림 38. 3구간 3UD 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

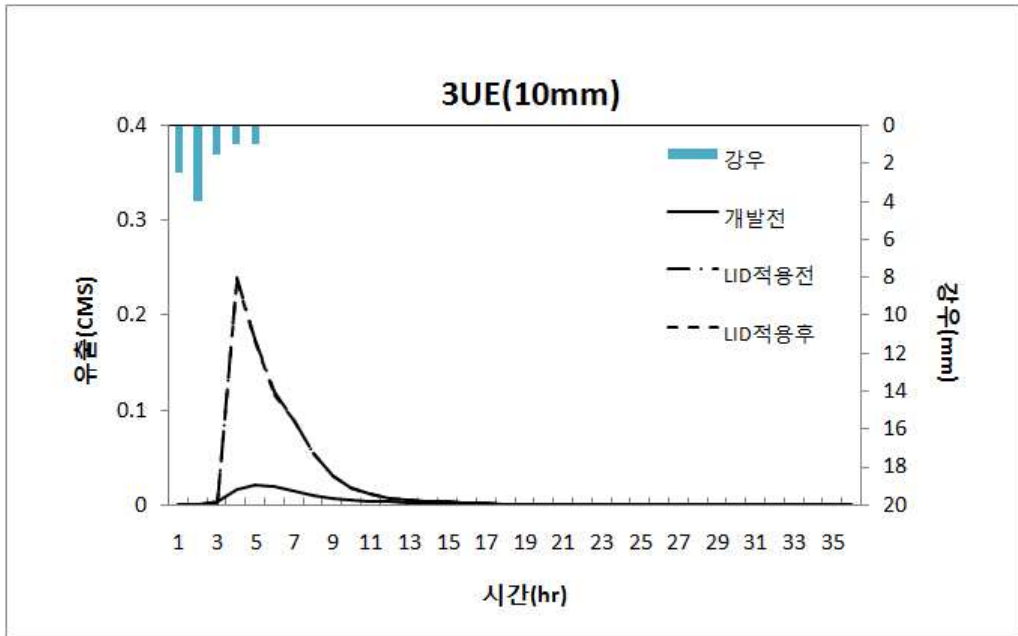


그림 39. 3구간 3UE 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

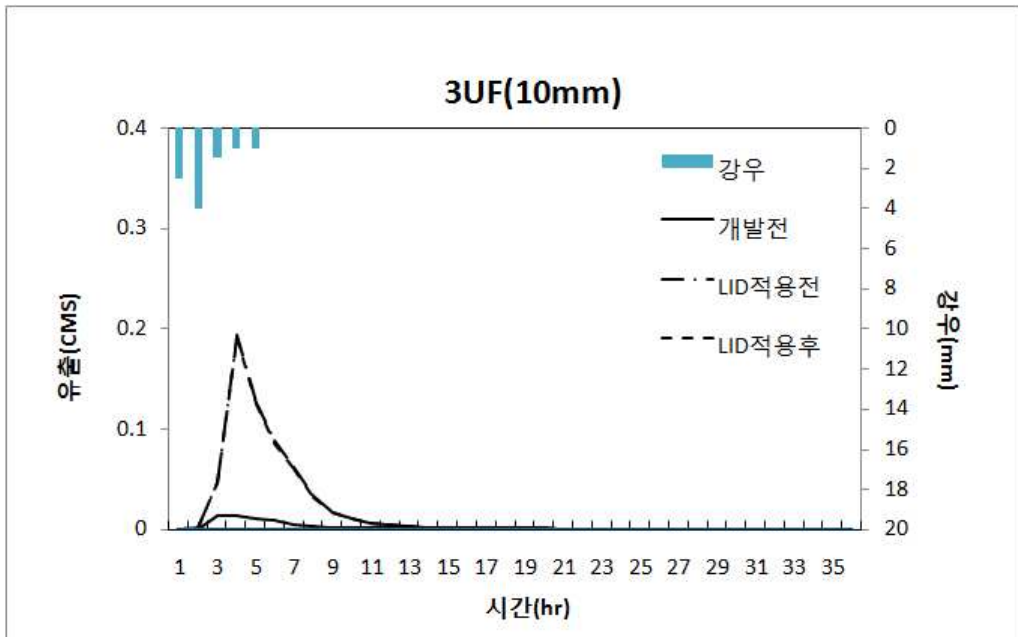


그림 40. 3구간 3UF 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

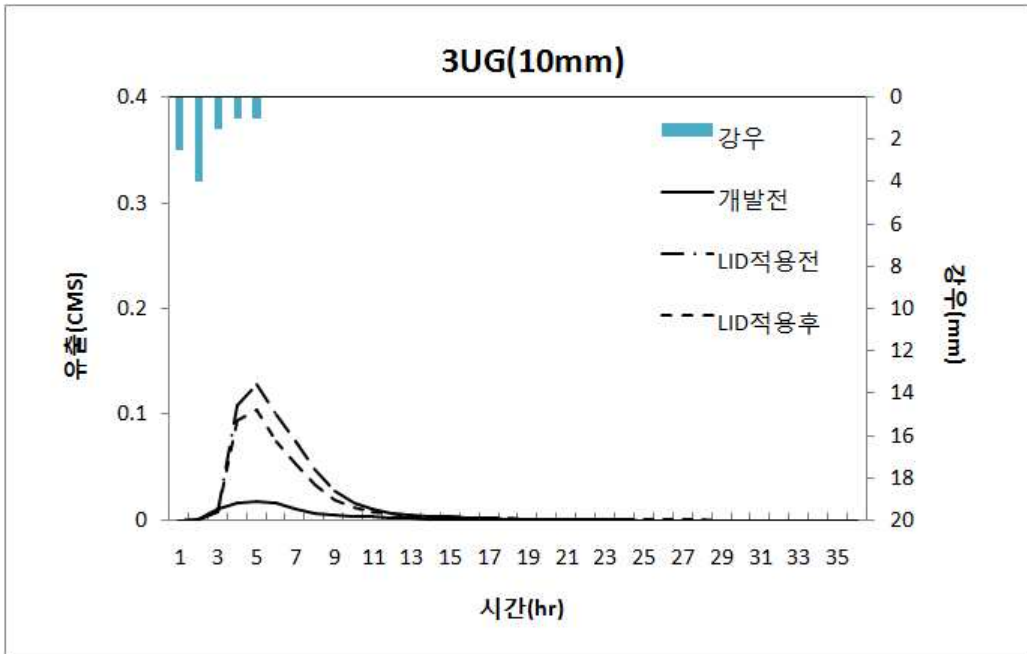


그림 41. 3구간 3UG 지역의 유출량 변화(총강우 10mm)

부록 5. 총 강우 15 mm인 경우 유출량
가. 1구간

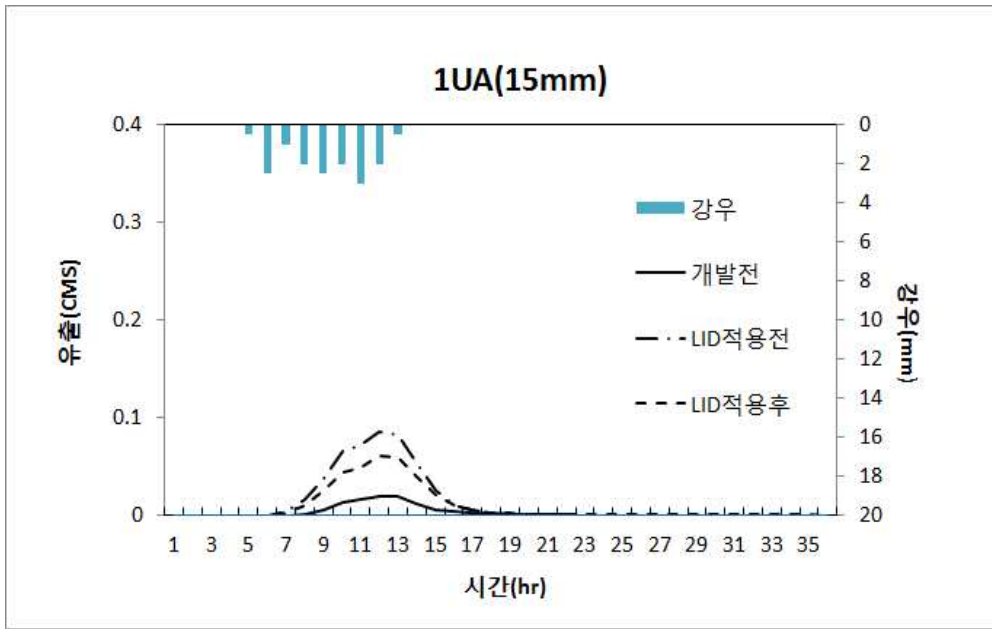


그림 42. 1구간 1UA 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

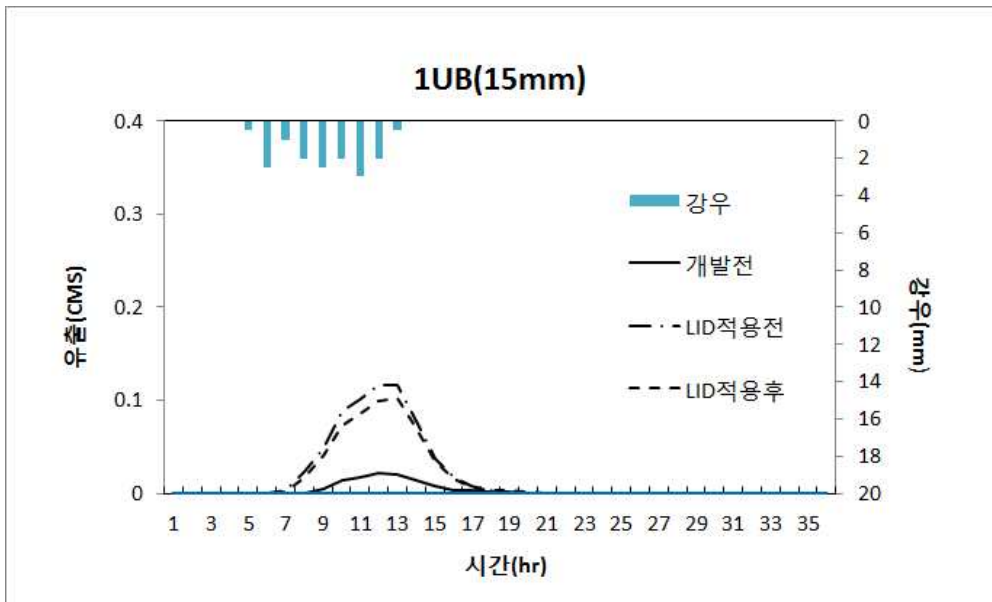


그림 43. 1구간 1UB 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

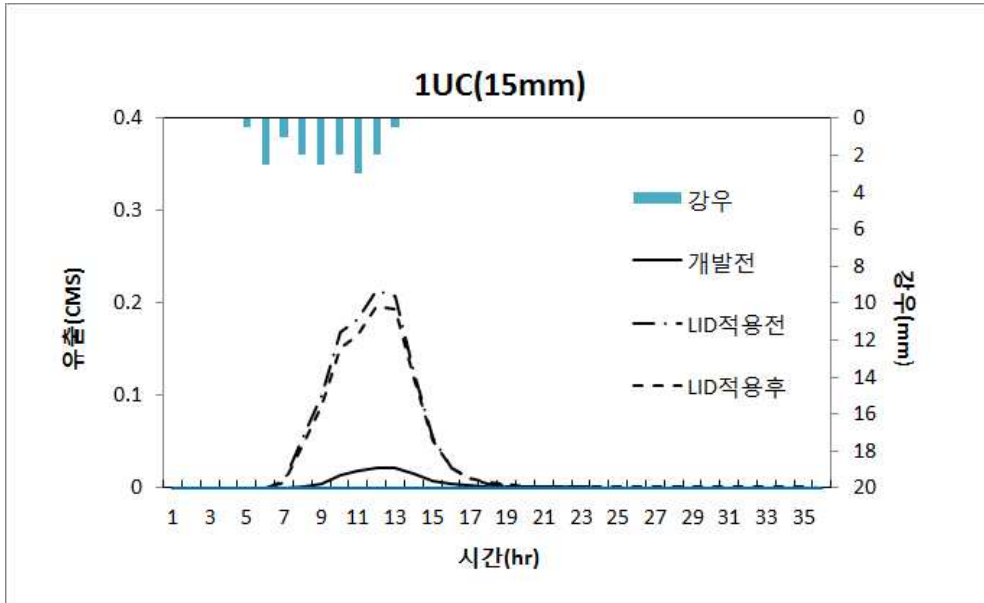


그림 44. 1구간 1UC 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

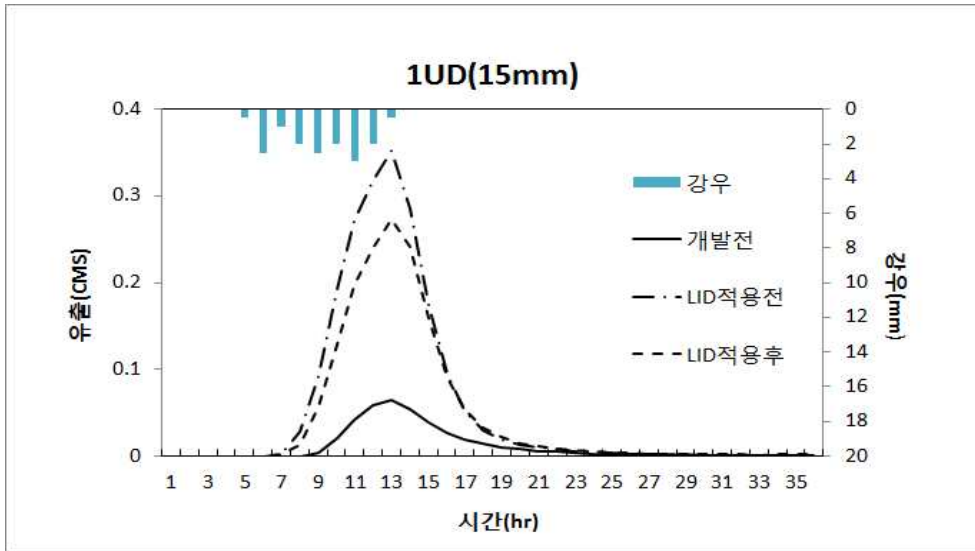


그림 45. 1구간 1UD 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

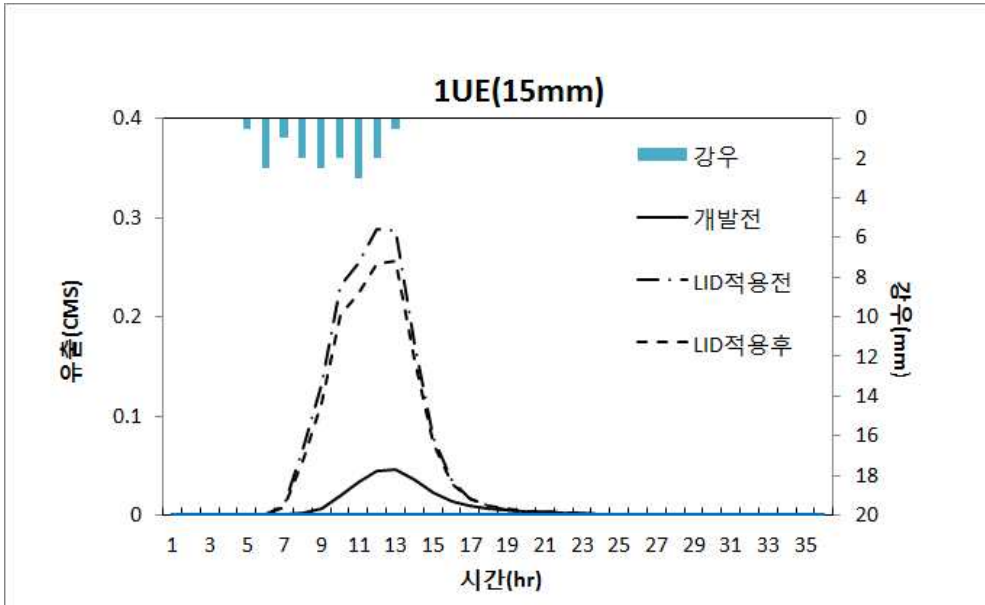


그림 46. 1구간 1UE 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

나. 2구간

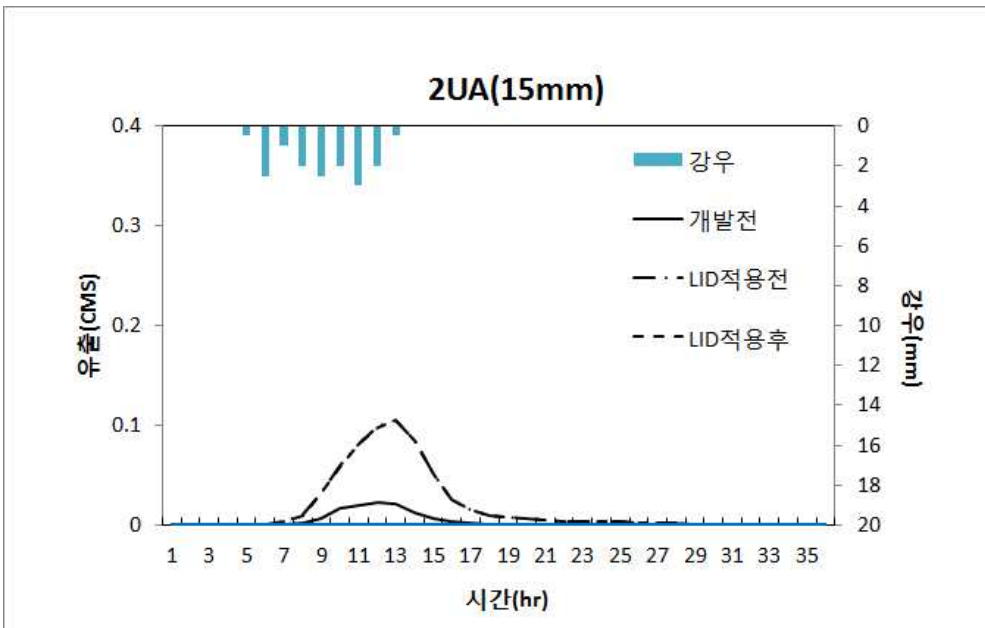


그림 47. 2구간 2UA 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

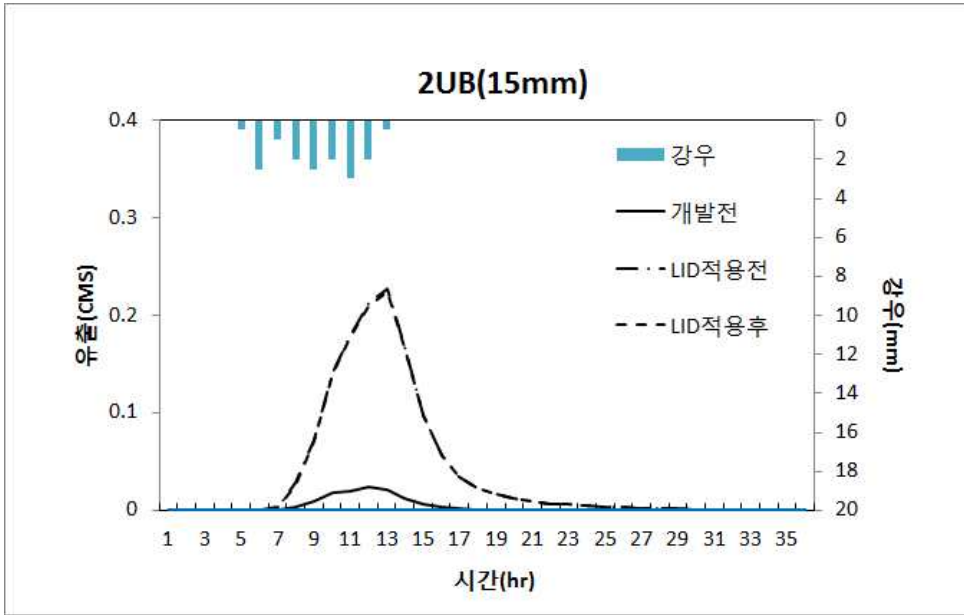


그림 48. 2구간 2UB 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

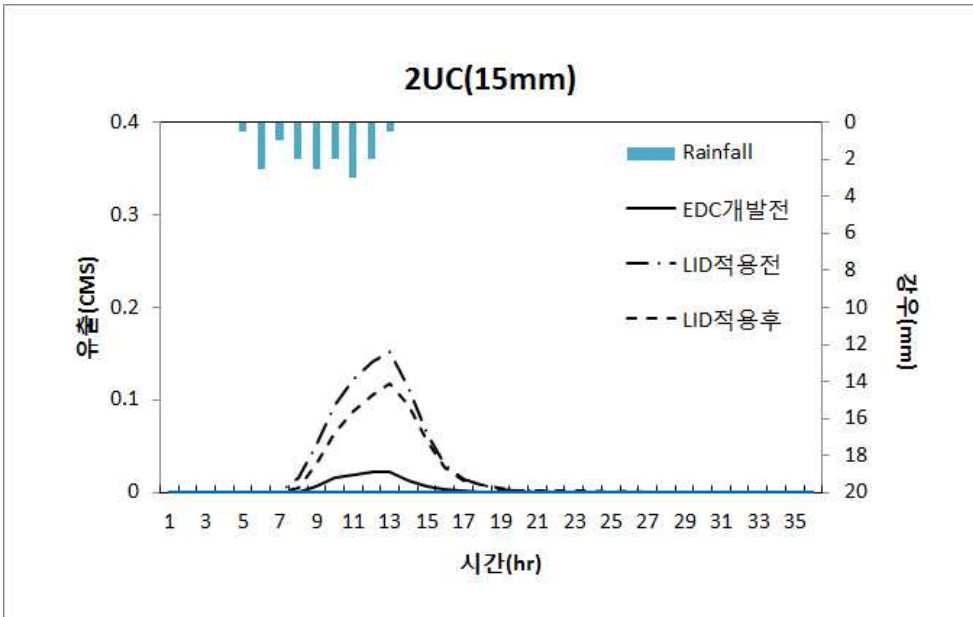


그림 49. 2구간 2UC 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

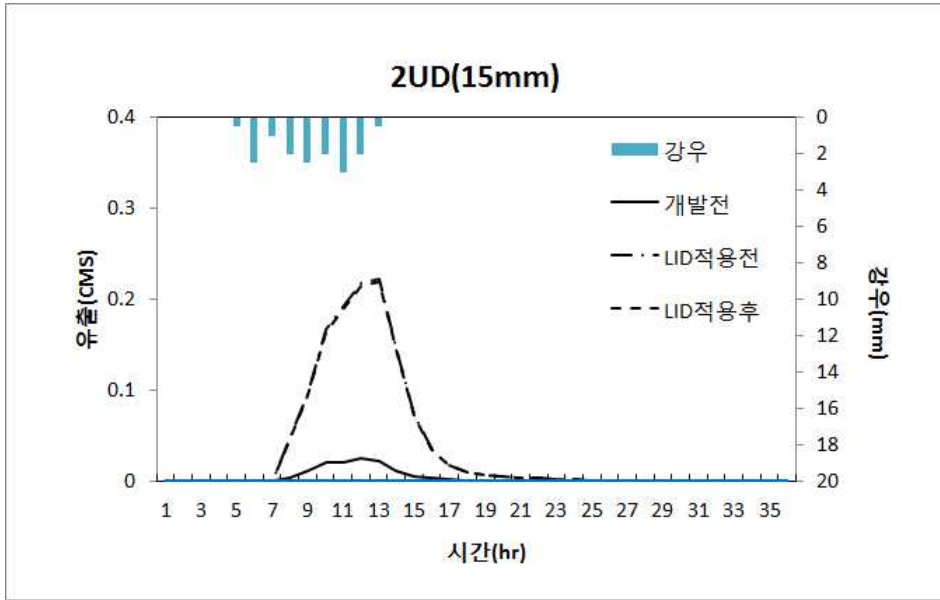


그림 50. 2구간 2UD 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

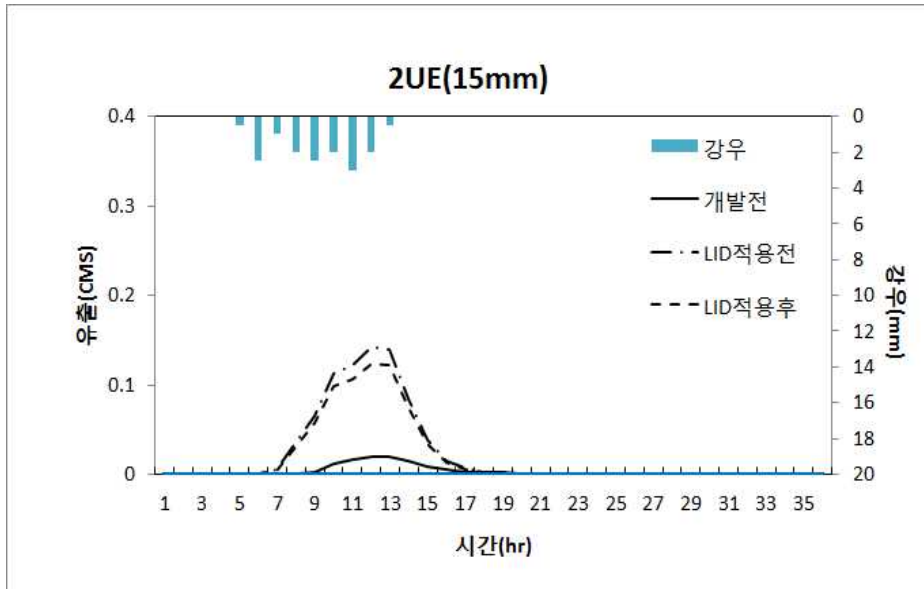


그림 51. 2구간 2UE 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

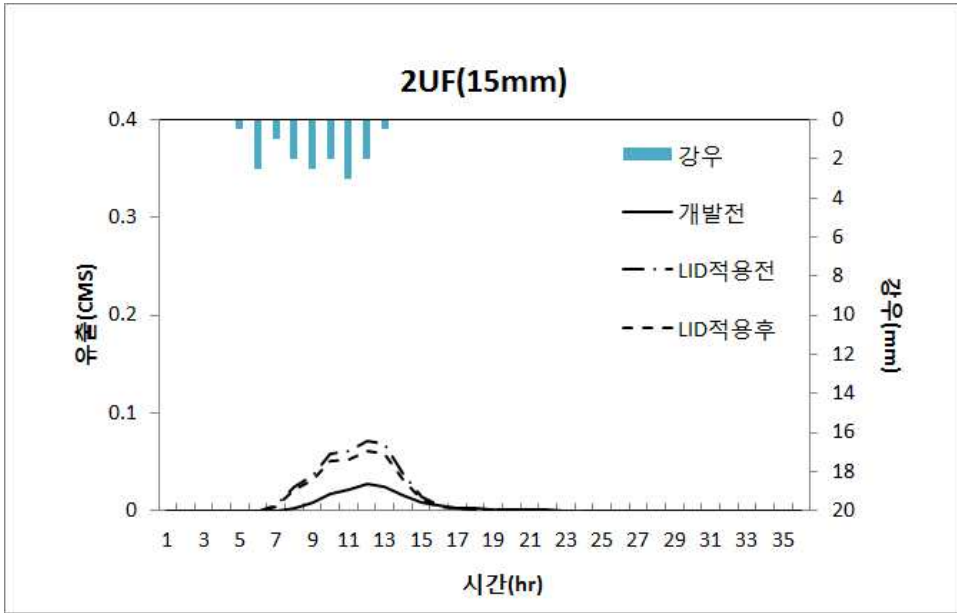


그림 52. 2구간 2UF 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

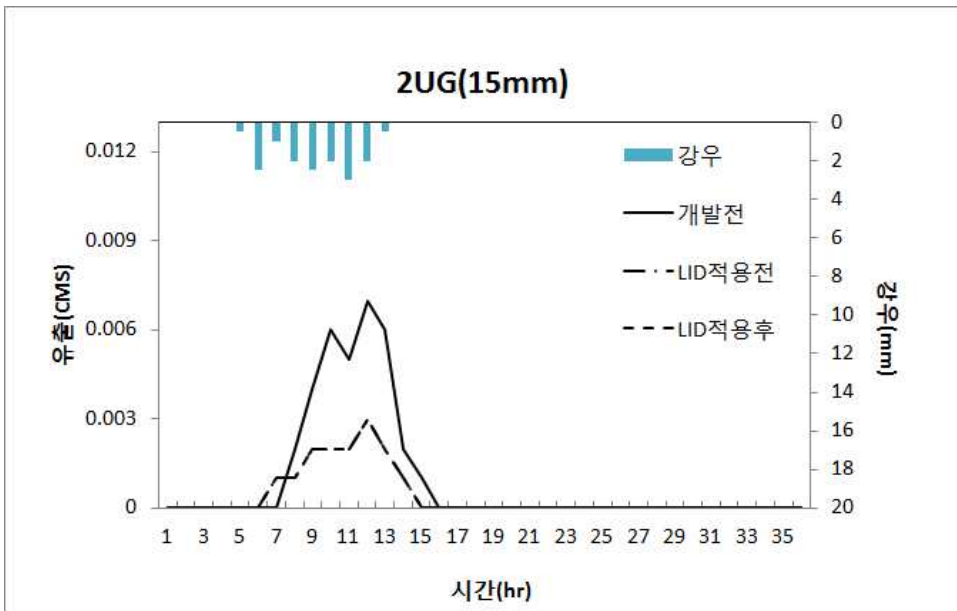


그림 53. 2구간 2UG 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

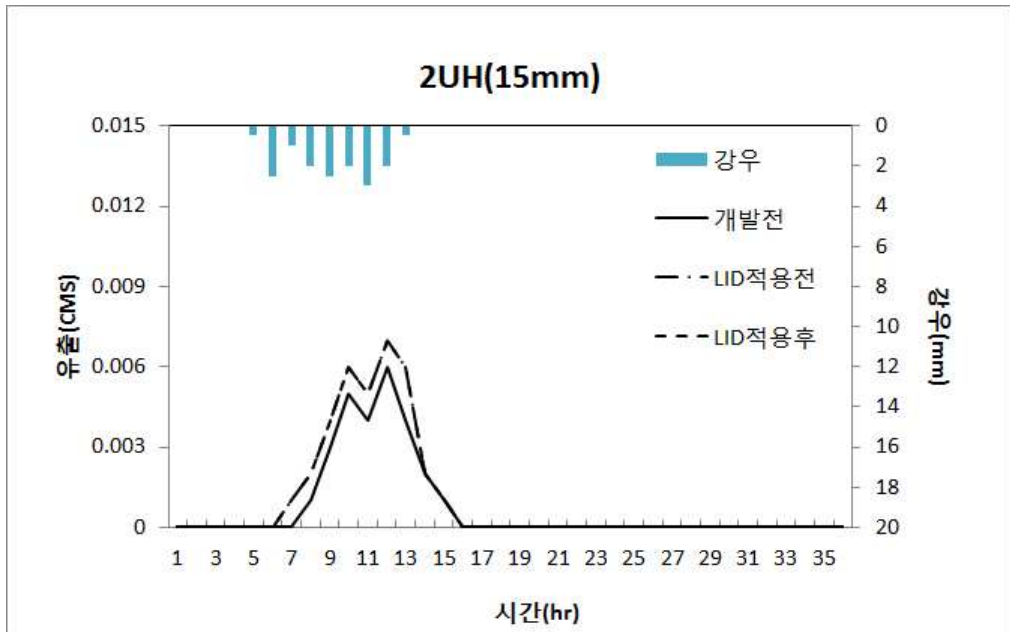


그림 54. 2구간 2UH 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

다. 3구간

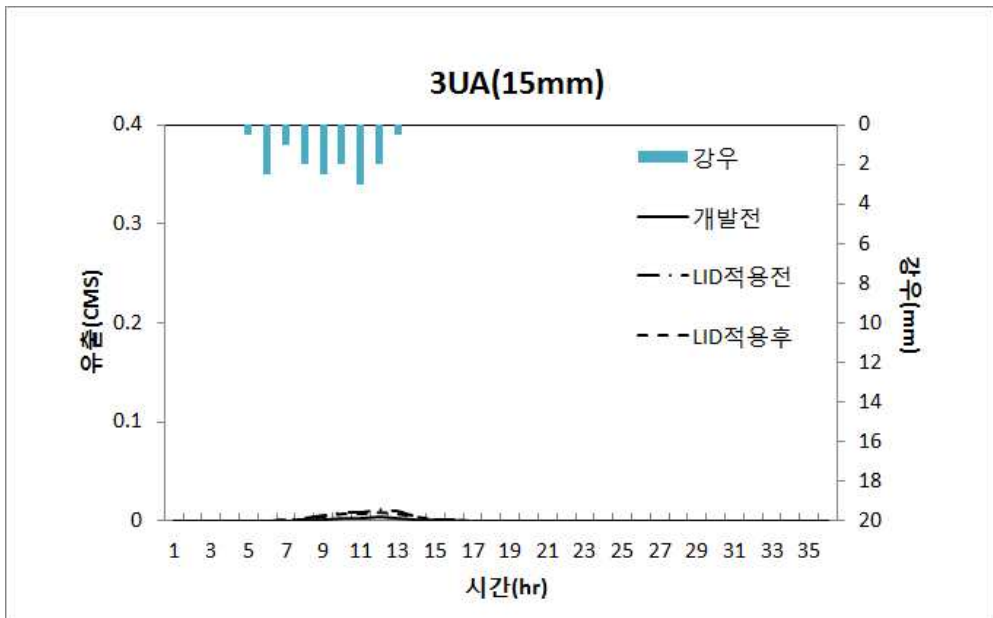


그림 55. 3구간 3UA 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

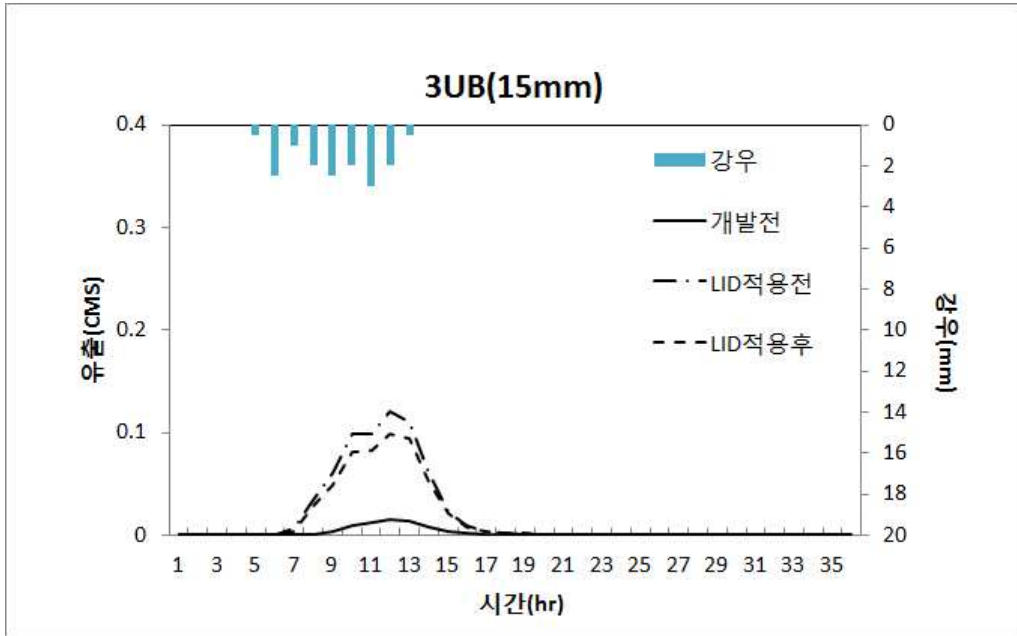


그림 56. 3구간 3UB 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

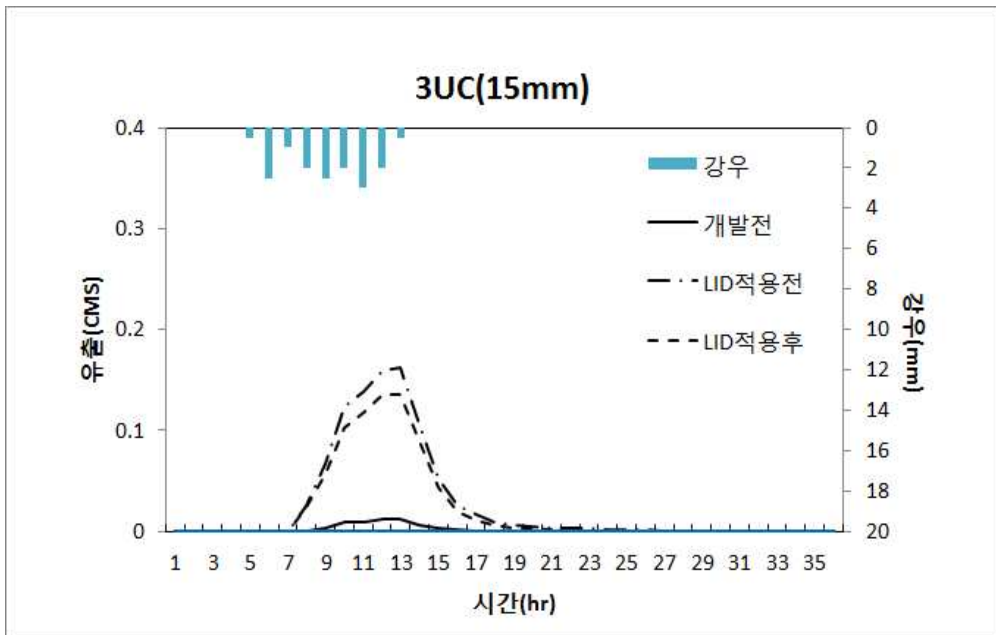


그림 57. 3구간 3UC 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

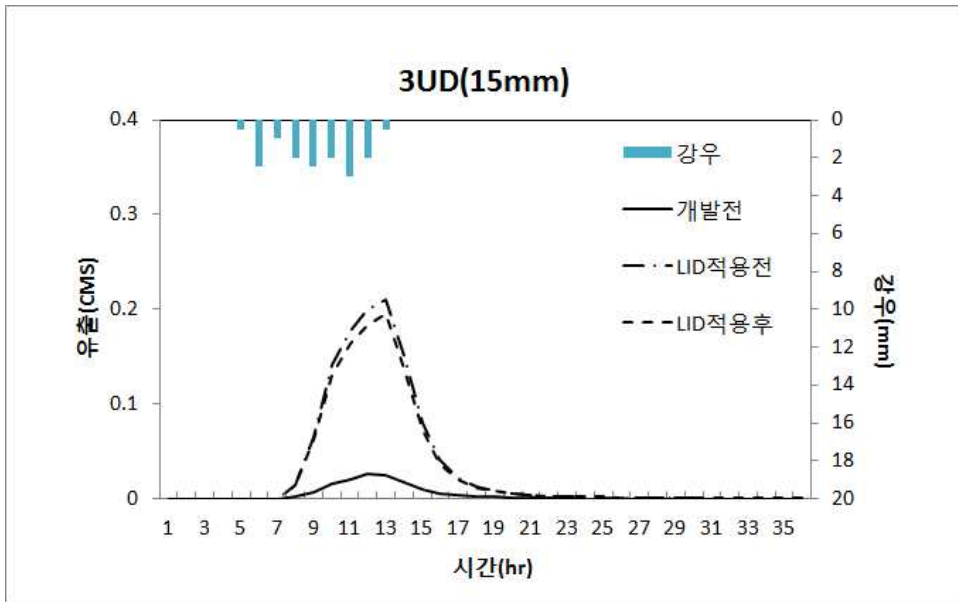


그림 58. 3구간 3UD 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

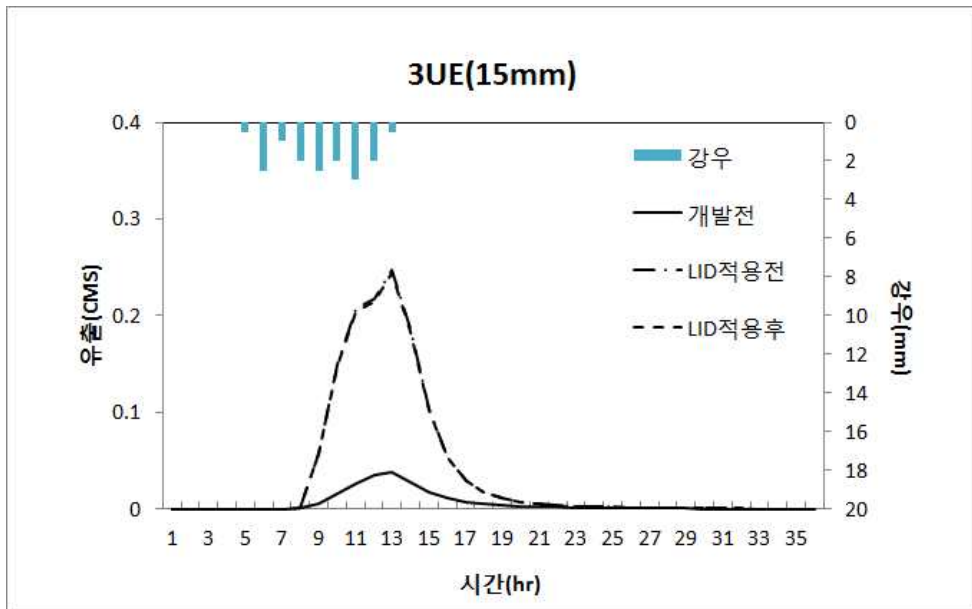


그림 59. 3구간 3UE 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

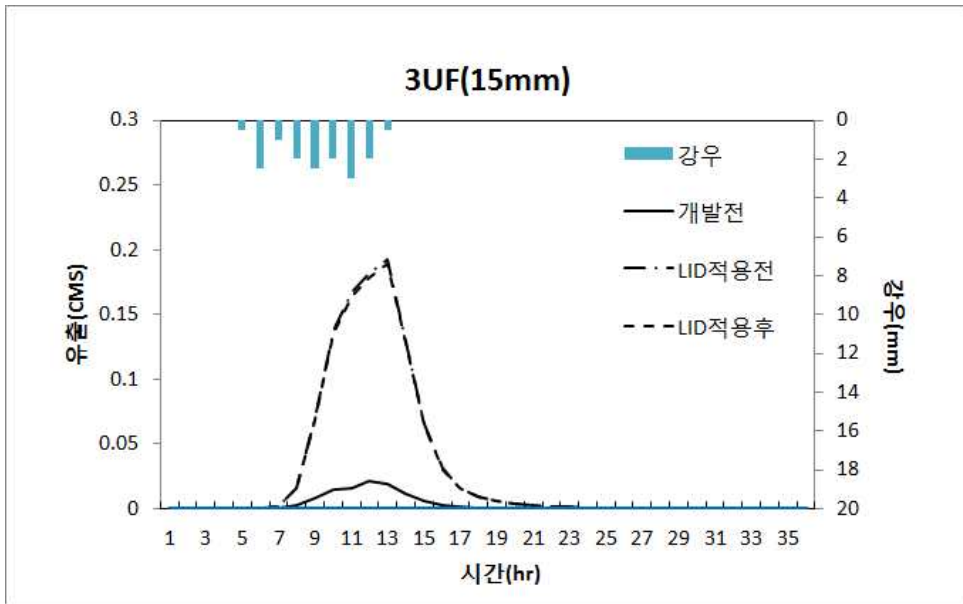


그림 60. 3구간 3UF 지역의 유출량 변화(총강우 15mm)

부록 6. 총 강우 20mm인 경우 유출량
가. 1구간

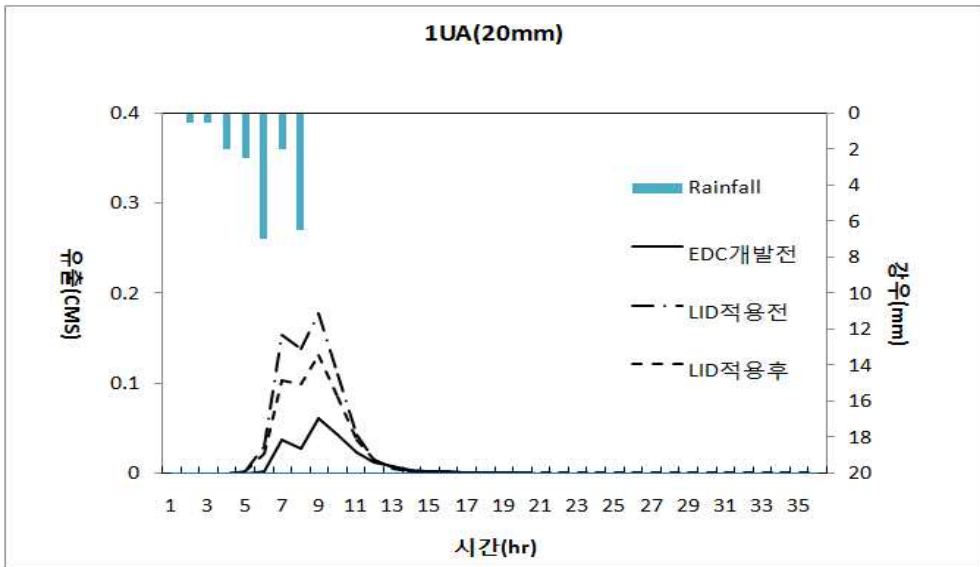


그림 61 1구간 1UA 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

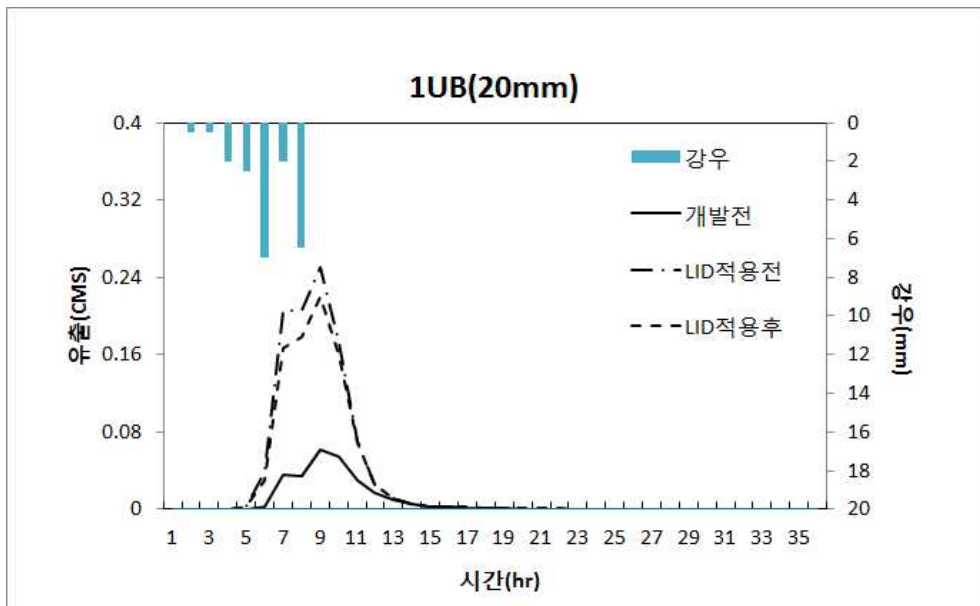


그림 62. 1구간 1UB 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

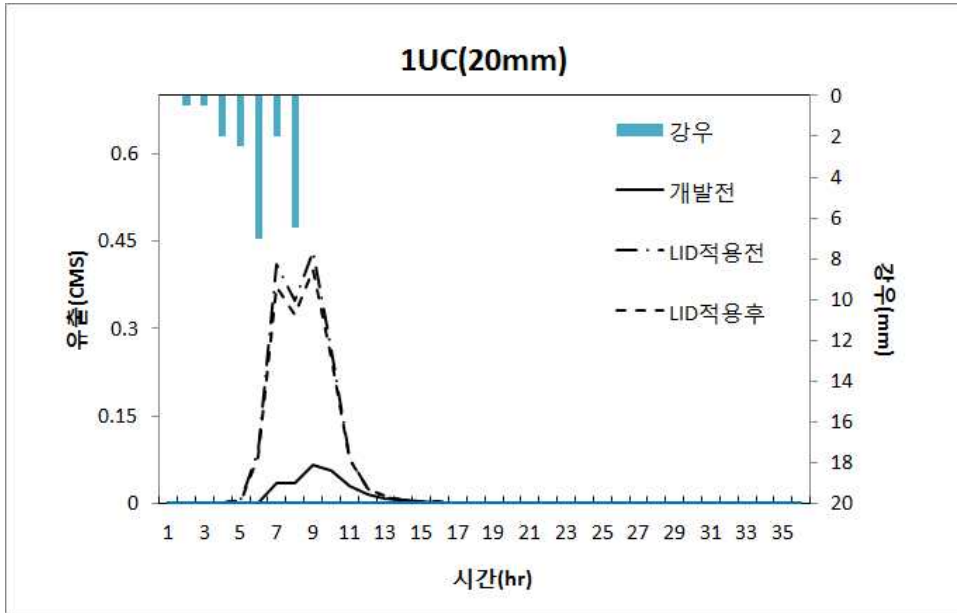


그림 63. 1구간 1UC 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

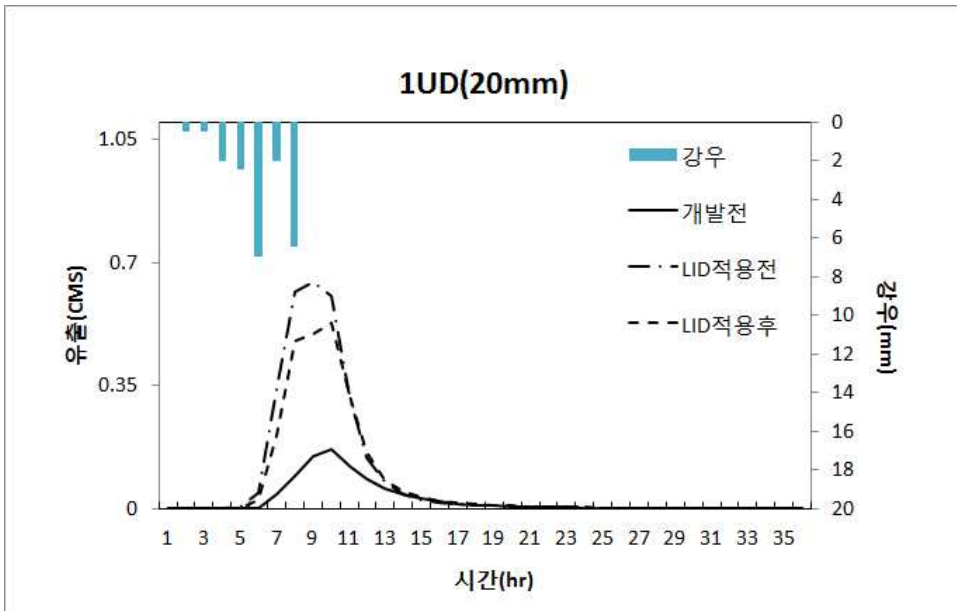


그림 64. 1구간 1UD 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

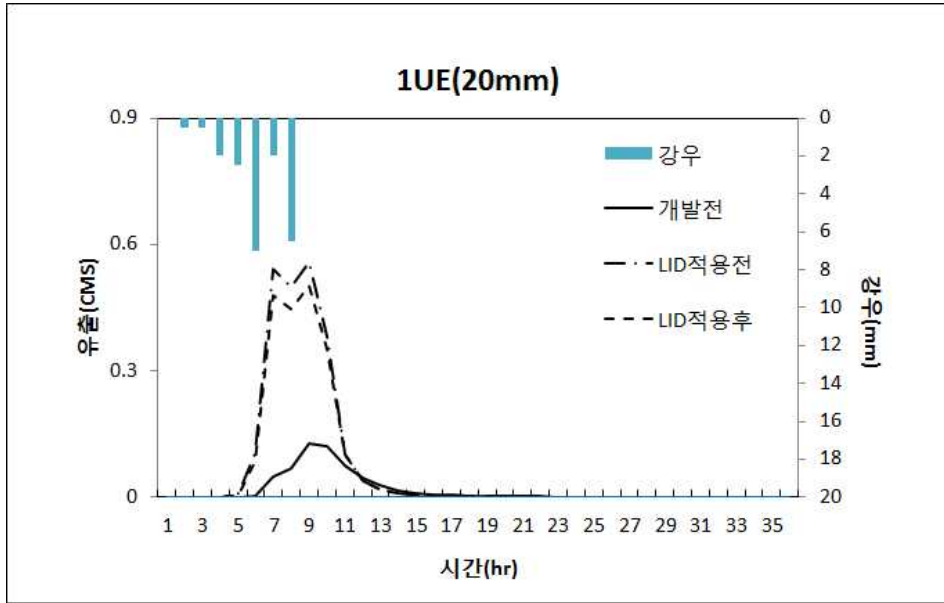


그림 65. 1구간 1UE 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

나. 2구간

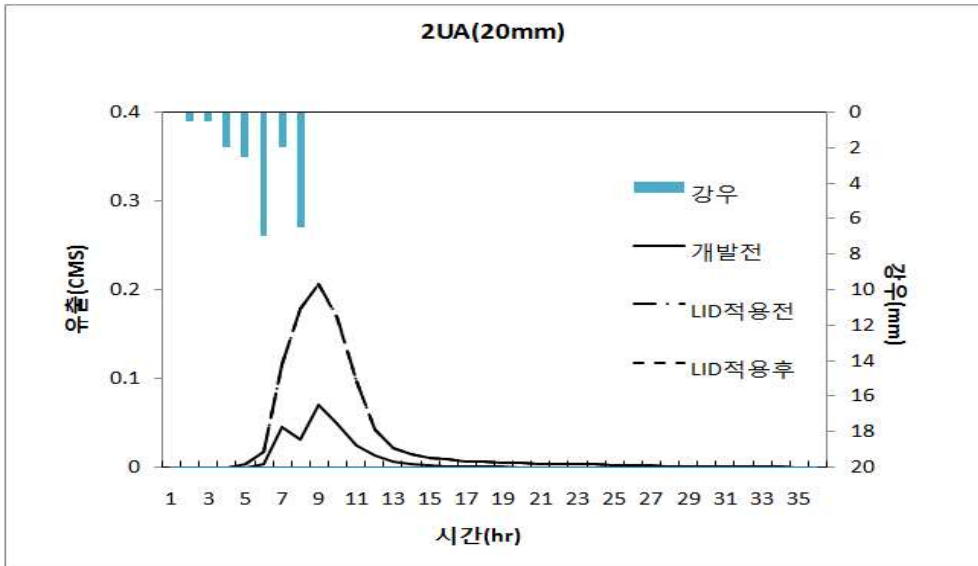


그림 4.66 2구간 2UA 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

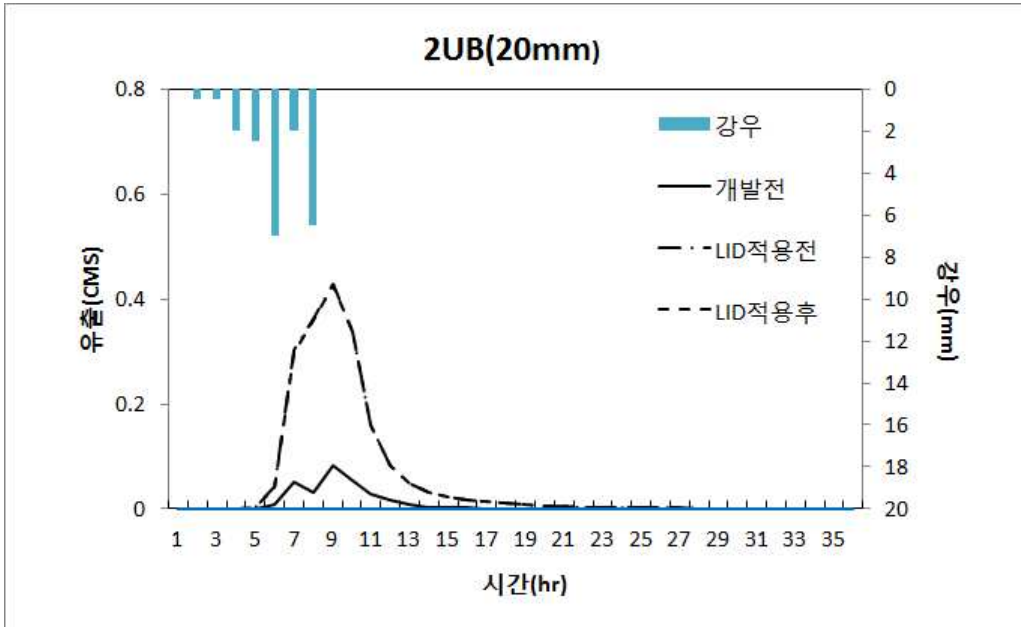


그림 67. 2구간 2UB 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

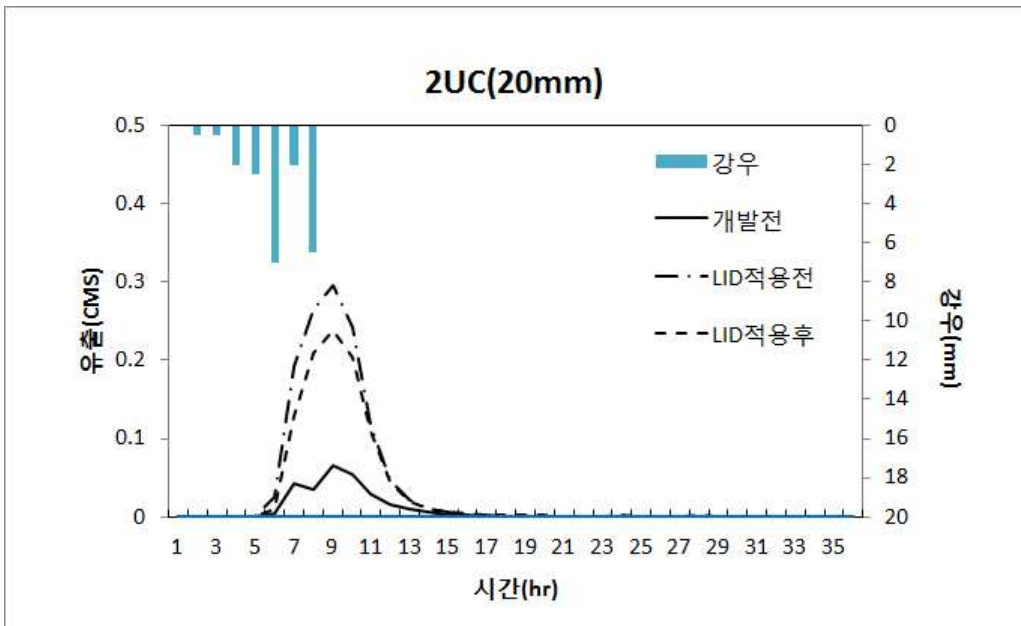


그림 68. 2구간 2UC 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

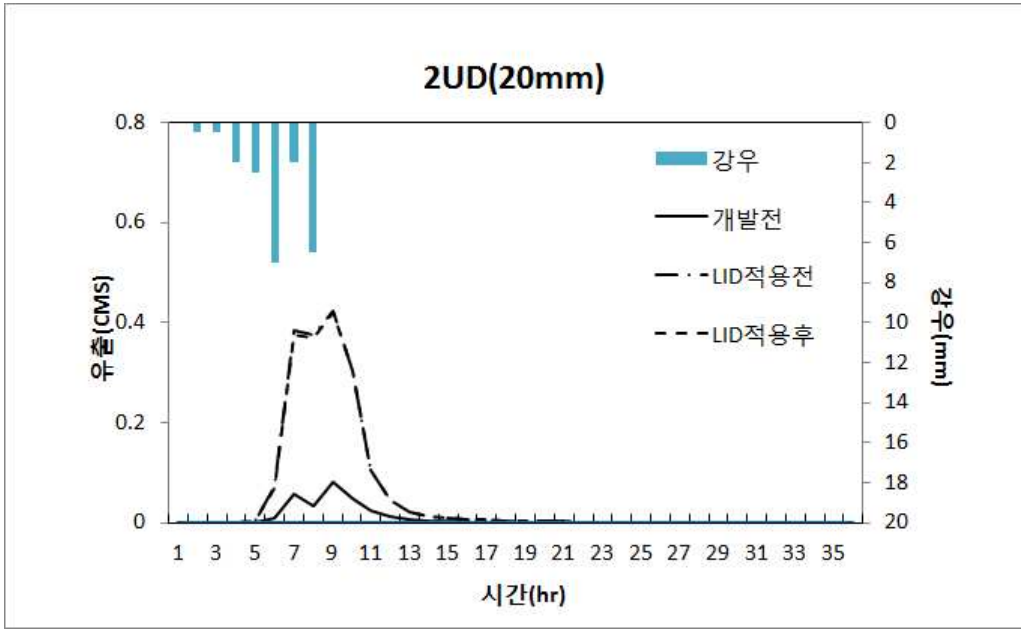


그림 69. 2구간 2UD 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

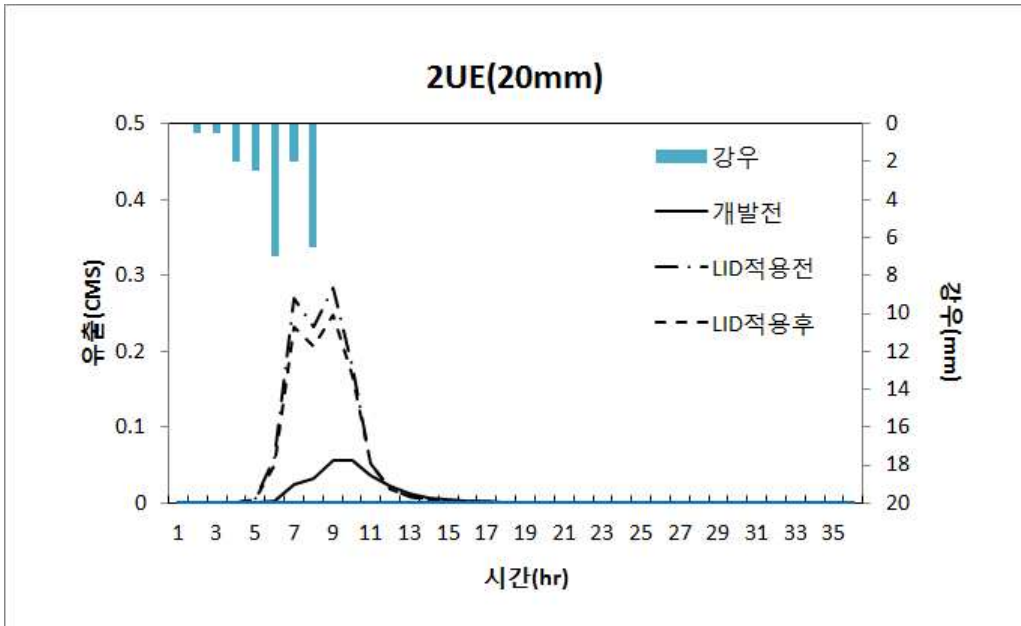


그림 70. 2구간 2UE 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

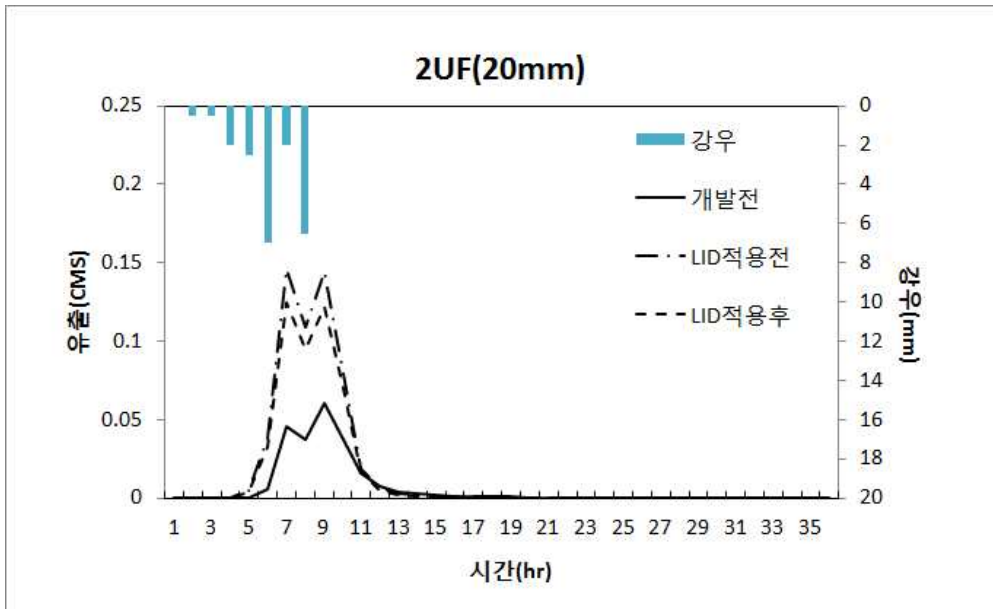


그림 71. 2구간 2UF 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

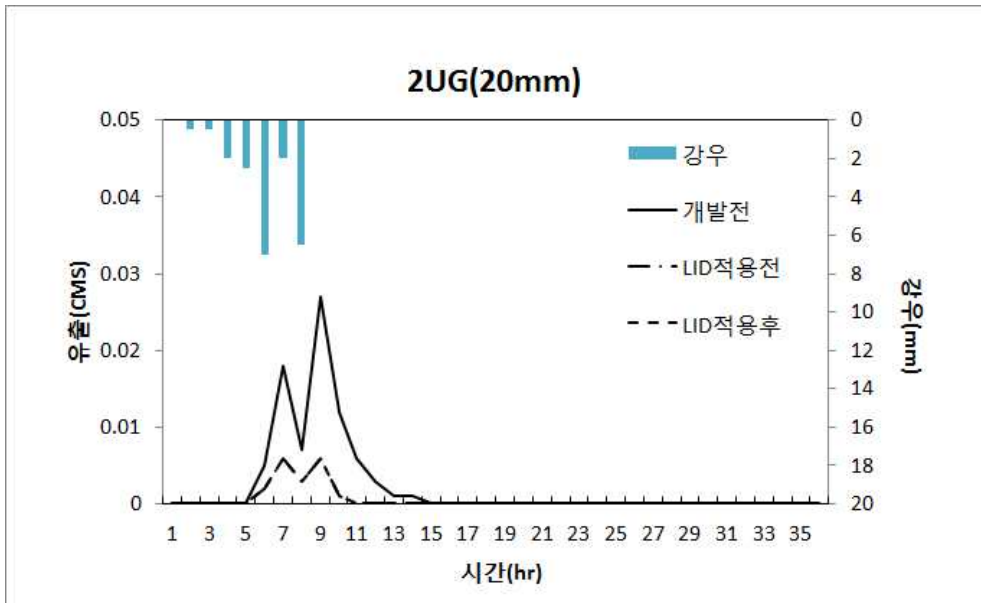


그림 72. 2구간 2UG 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

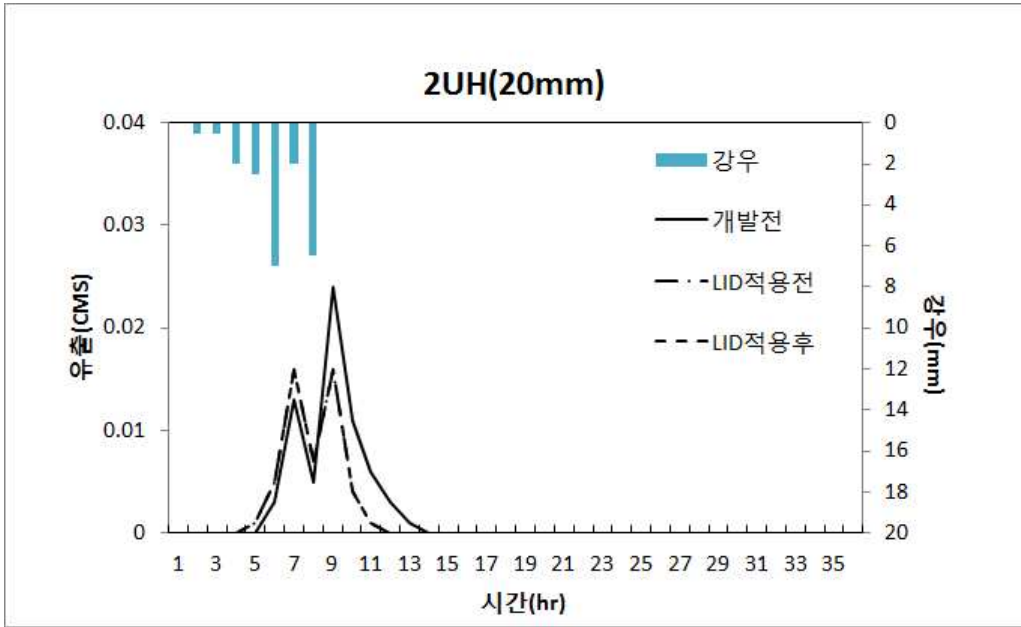


그림 73. 2구간 2UH 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

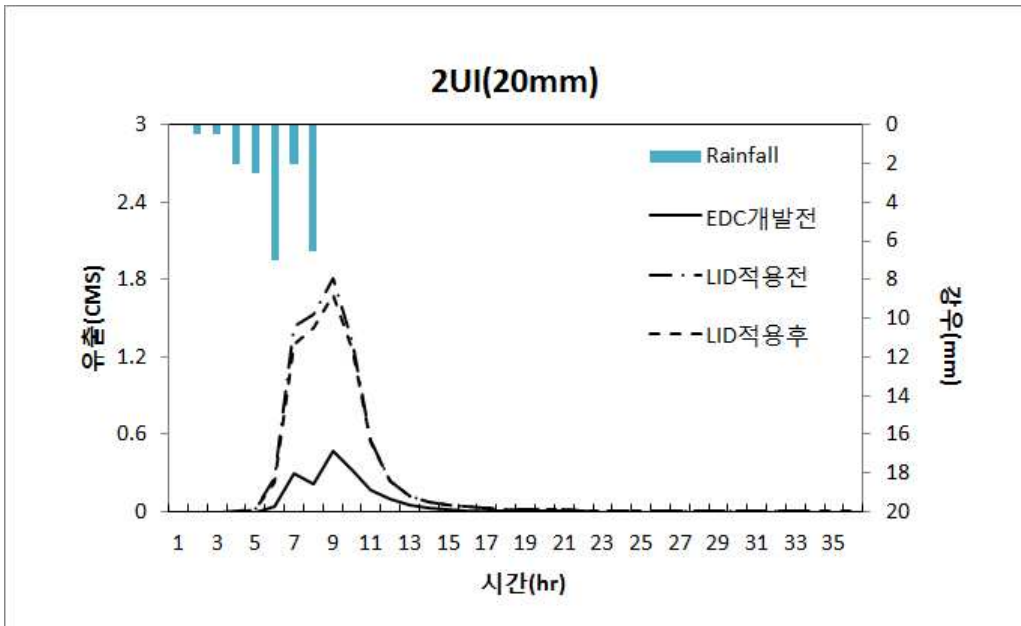


그림 74. 2구간 2UI 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

다. 3구간

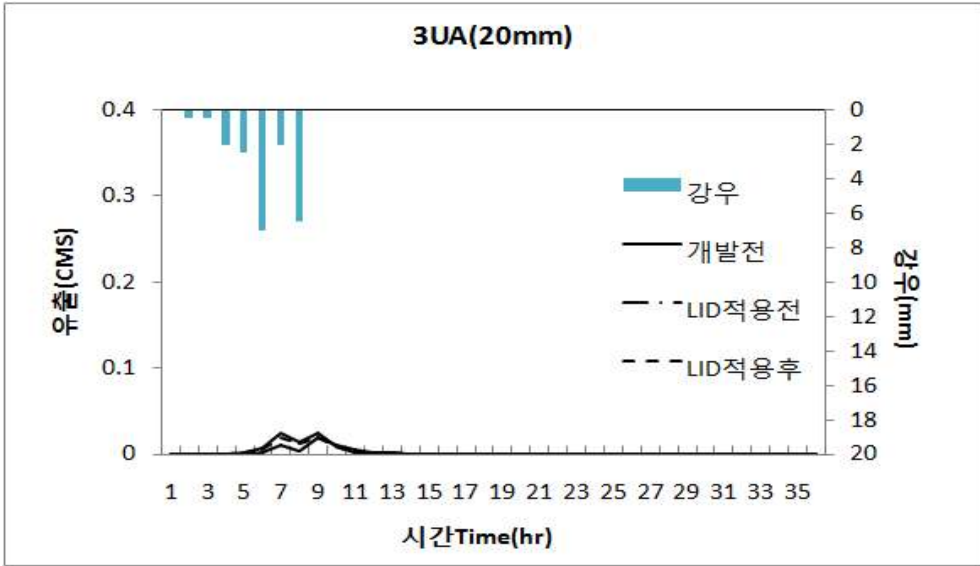


그림 75 3구간 3UA 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

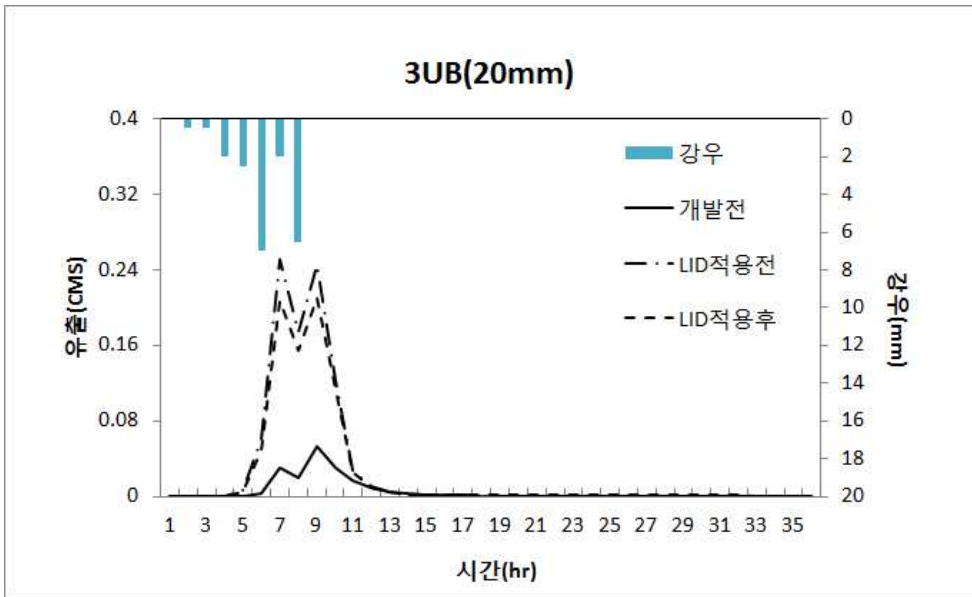


그림 76. 3구간 3UB 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

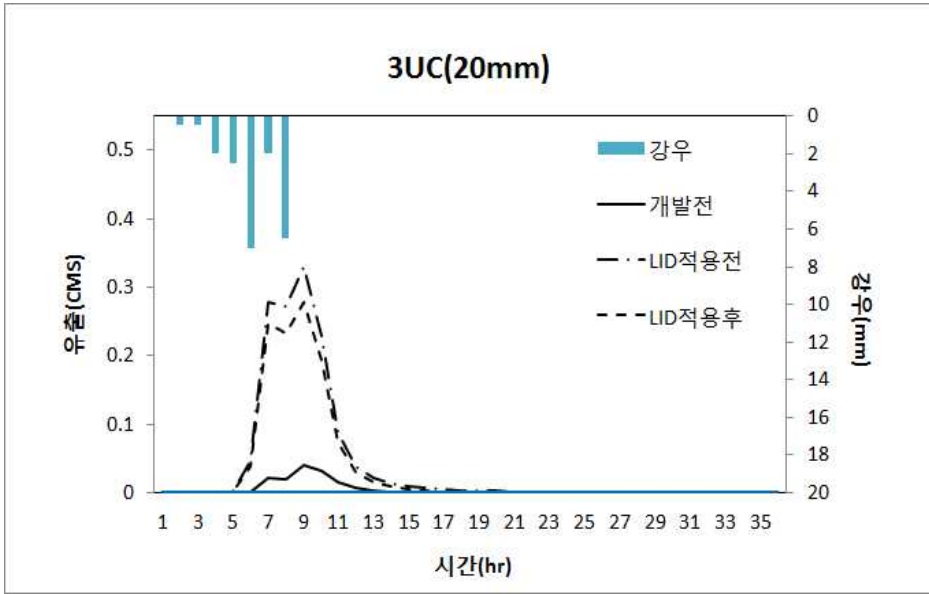


그림 77. 3구간 3UC 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

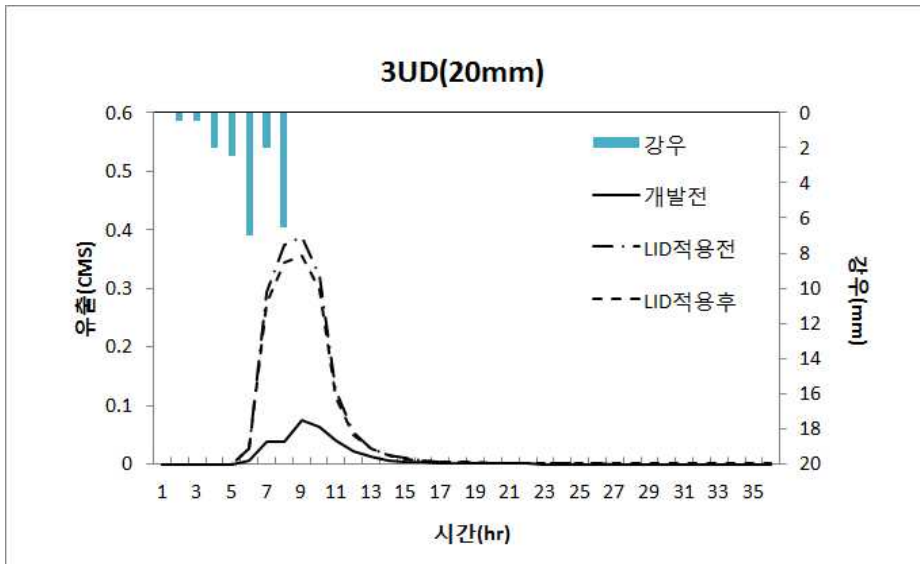


그림 78. 3구간 3UD 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

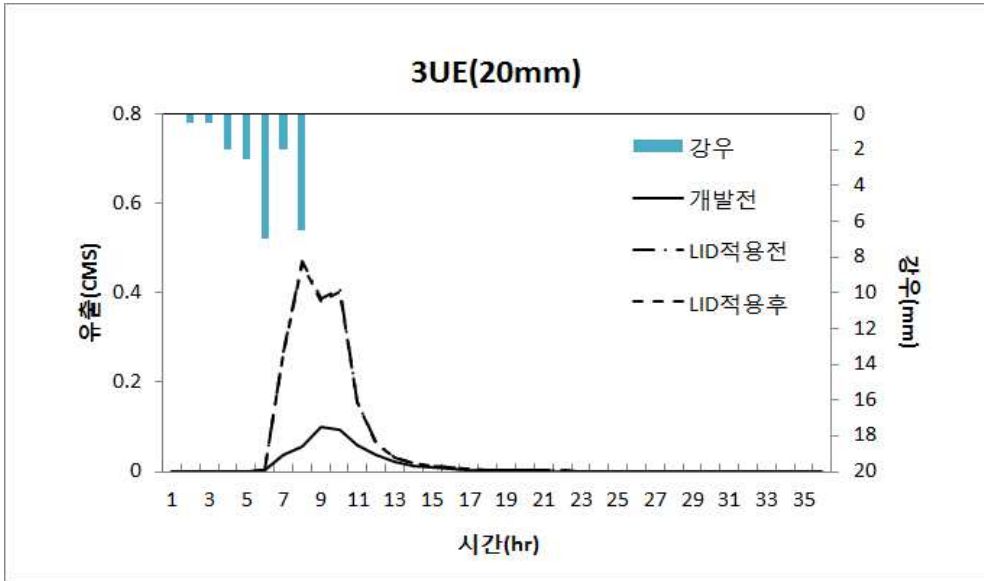


그림 79. 3구간 3UE 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

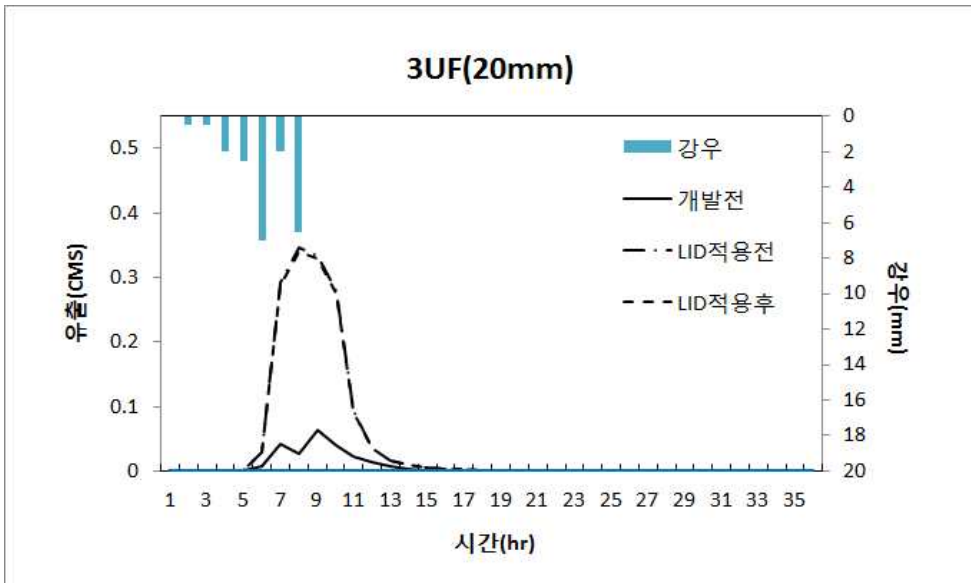


그림 80. 3구간 3UF 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

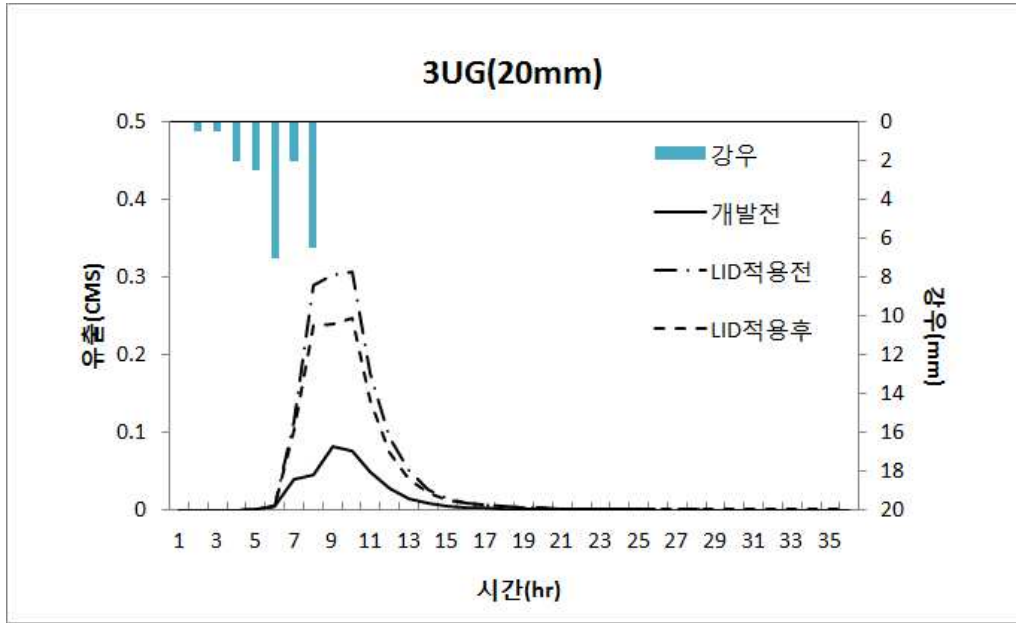


그림 81. 3구간 3UG 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

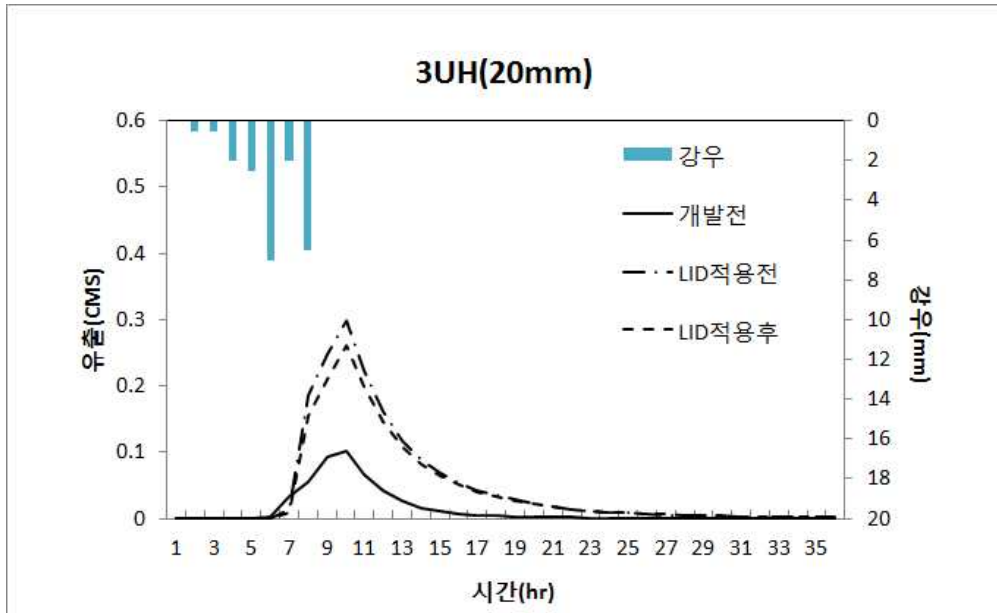


그림 82. 3구간 3UH 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

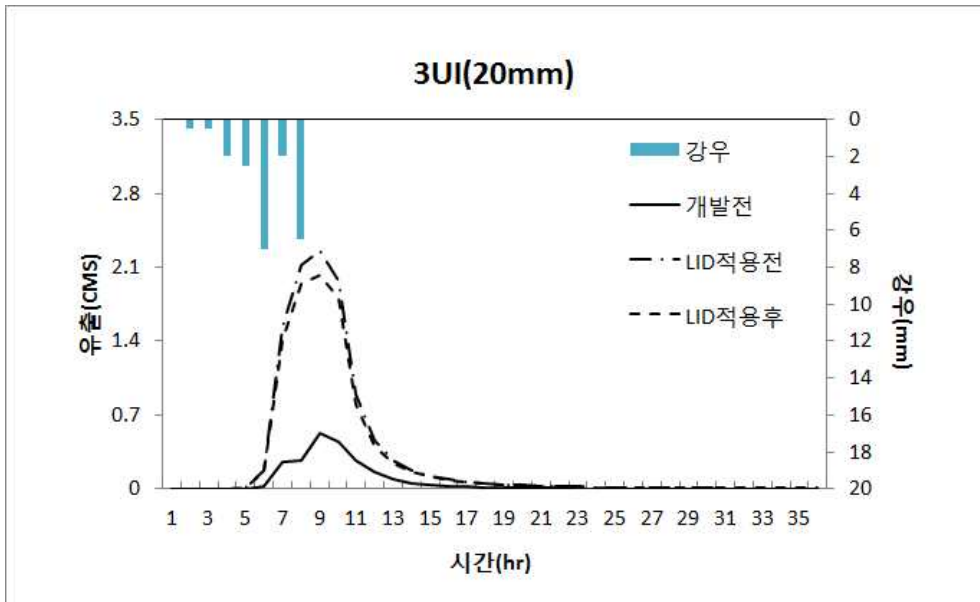


그림 83. 3구간 3UI 지역의 유출량 변화(총강우 20mm)

감사의 글

논문을 완성하고 감사의 글을 올리고자하니 지난 세월들이 파노라마처럼 떠오릅니다.

부족함이 많은 저를 부단히 노력하고 연구하도록 지도와 격려를 아끼지 않으셨던 여러 지인들과 더불어 고마운 마음 가득히, 뜻 깊은 2015년을 마감하게 되었습니다.

본 논문이 완성되도록 그 동안 세심한 지도와 편달을 하여주신 김운중 지도교수님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다.

그리고 귀중한 시간을 할애하여 본 논문을 세심하게 검토하고 보완하여 완성되도록 심사하여주신 모교의 박길현 교수님, 김성홍 교수님 김대현 교수님과 전남대학교 이경훈 교수님께 진심으로 감사드리며, 사회인으로서 빠듯했던 대학원 학사일정을 무사히 마무리 할 수 있도록 전 과정을 진심으로 지도하여 주신 토목공학과 박정웅 교수님, 박상준 교수님께 머리 숙여 감사를 드립니다.

또한, 논문이 완성되기까지 많은 도움을 주신 박진형 박사와, 곁에서 항상 힘이 되어준 친구들과 선.후배님, 회사 임직원님들에게도 고마운 마음으로 감사를 전합니다.

끝으로 논문이 완성되고 졸업을 할 때까지 항상 곁에서 무한한 사랑과 후원을 보내주신 부모님과 형제들, 그리고 아내와 소중하고 사랑스러운 딸 가운, 아들 재운이와 함께 이 기쁨을 함께 나누고 싶습니다.

학위 논문을 새로운 시작으로 가슴에 새기며, 도와주신 모든 분들께 기쁨드릴 수 있도록 더욱 겸손하고 품위 있게 살아가는 사회인이 되겠습니다.

다시 한 번 모든 분들께 사랑하는 마음으로 감사드립니다.

2015년 12월 28일

전 성 인