

도시유출 모형을 이용한 도시화 유역의 유출 해석

Urban Watershed Runoff Analysis Using Urban Runoff Models

정 동 국* / 이 범 희**
Jeong, D. G. / Lee, B. H.

Abstract

Urban rainfall-runoff procedures are more complex than the agricultural procedures due to the spreading and development of town. And the applications of these models are more difficult due to the change of real basins. In this study, I applied SWMM and Expert System to get runoff characteristics of an urbanized basin. Noen in Daejeon is selected as a study basin. Real basin data of facilities, rainfall, runoff, and various rainfall intensity equations are used. An Expert System is used to get the parameters of this model. These results can be applied to analyze the reaction tendencies of the urban basin with the time distributions of design rainfall and the urbanization.

Keywords : Rainfall-Runoff Model, Expert System, Daejeon, Noen, SWMM

요 지

시가지의 확장과 개발 등으로 인한 도시에서의 강우-유출현상은 자연하천유역에 비하여 더욱 복잡한 양상을 가지며, 실제 유역의 변화로 인하여 모형의 적용이 매우 어려운 편이다. 본 연구에서는 SWMM 모형과 전문가 시스템을 적용하여 도시화 유역에서의 유출 특성을 파악하였다. 연구 유역으로는 대전광역시에서 노은지역을 선정하였으며, 실제 유역 및 시설자료, 강우, 유출자료와 다양한 강우강도식을 사용하였다. 매개변수의 추정 과정을 위하여 전문가시스템을 사용하였으며, 본 결과들을 통하여 설계 강우의 시간 분포 및 도시화에 따른 도시 유역의 반응 경향을 해석할 수 있었다.

핵심용어 : 강우-유출모형, 전문가시스템, 대전광역시, 노은, SWMM

* 한남대학교 공과대학 토목공학과 교수
Prof., Dept. of Civil Engrg., Hannam Univ., Daejeon 306-791, Korea
(E-mail : dkjeong@hannam.ac.kr)

** 배재대학교 공과대학 토목환경공학과 조교수
Assistant Prof., Dept. of Civil, Environmental Engrg., PaiChai Univ., Daejeon 302-735, Korea
(E-mail : bhlee@mail.pcu.ac.kr)

1. 서론

시가지의 확산과 개발 등으로 인한 도시에서의 강우-유출현상은 자연하천유역에 비하여 더욱 복잡한 양상을 가진다. 즉, 지붕, 도로와 주차장 등의 건설로 불투수 지표면 구성비가 증가하고, 홍수유출용적을 증가시키며 유역 출구점까지의 도달시간을 단축시켜 침투 유출량을 증가시킨다. 또한 우·배수 관기와 콘크리트 등으로 피복된 하도 역시 통수능을 증대시켜 침투유출량의 증대에 기여하게 되므로, 도시유역에서의 수문 해석 시 신속하고도 정확한 유출해석이 필요하다.

도시유출모형은 1850년대에 Mulvaney에 의해 제안된 합리식(rational method)으로부터 RRL(Road Research Laboratory Method), ILLUDAS(Illinois Urban Drainage Area Simulator), SWMM(Storm Water Management Model) 등의 모형으로 발전하여, 최근에는 지리정보체계와 결합한 WMS(Watershed Modeling System) 등을 도시 모형에 적용할 수 있다.

국내에서도 1980년대 후반부터 도시 수문학에 관한 관심이 급증하였으며, 이 때, 실제 유역에 적용하는 경우 매우 많은 문제점을 안게 될 수 있는데, 이는 각 유역마다 유역 특성이 상이하기 때문이다. 따라서 실제 유역에 모형을 적용시킬 때에는 정확한 입력자료의 확보와 다양한 모형에 대한 각각의 강우-유출 응답을 살펴보고 유역의 특성을 제시하는 것이 매우 중요하다. 근래에 이르러서는 유출모형의 입력자료 및 매개변수의 보다 정확한 산정을 위하여 지리정보체계 등을 이용한 연구가 진행되었으며, 이 외에도 전문가시스템을 이용하여 매개변수를 산정하고 모형의 적용과정을 개선한 예(이범희와 이길성, 1998)가 보고 된 바 있어 본 연구에서도 실제 유역에 대한 전문가시스템의 적용부분을 제시하였다.

현재까지 개발되어 있는 많은 도시유출모형들 중에서 적절한 모형을 선정하기 위해서는 수리학 및 수문학적인 이론적 배경, 간편성, 효율성, 그리고 결과의 정확도 등 여러 가지의 요인들을 고려하여야 하며, 연구의 목적에 적합한지 여부도 적절히 판단하는 것이 중요하다(원석연, 1993).

본 연구에서는 시험 유역이 아닌 실제 유역의 도시화에 따른 유출특성을 살펴보고자 하였으며 관측 자료가 빈약한 상태에서 계산되므로 값의 객관성을 상호 보완하기 위하여 전문가 시스템을 함께 적용하여 유출영향 분석을 실시하였다. 연구 유역으로는 대전광역시

서 최근에 계획·개발 중인 도시화유역으로 노은 지역을 선정하였다. 적용 모형으로 SWMM 모형은 최근의 연구를 통해 지표면 유출, 관거의 흐름해석, 우수의 양수 및 처리시설과 수질을 고려하는 강우-유출 순환모형으로서 비교적 양호한 모의를 수행한다고 알려져 있어 선정하였다.

정확한 입력 자료를 필요로 함에 따라 실제 유역 및 시설자료, 최근의 강우-유출자료를 사용하였으며, 최근의 기상 현상을 반영하기 위하여 여러 개의 강우 강도 식과 건설부(1988)의 확률 강우량도를 참고·비교하여 비교적 강우강도 값이 크게 산정되는 Talbot형 강우 강도 식을 택하였다. 추가로 SWMM 모형의 매개변수 조건을 변화하여 개발 전의 유출을 모의하고, 도시 개발 이전과 이후의 유출현상 변화 양상을 살펴보았다.

본 연구에서는 다음과 같은 과정을 통하여 실제 유역의 특성을 살펴보았다.

- 1) 대상 유역의 지형, 지리 및 관망시설 자료의 파악과 최근 강우-유출 자료를 확보하였다.
- 2) 실측 강우 및 유출자료에 전문가시스템을 적용하여 최적 매개변수를 추정하였다.
- 3) 강우의 재현기간에 따라 변화하는 유역의 유출 현상을 알아보기 위하여 실제 도시유역의 관거 설계빈도로 일반적으로 사용되는 5년, 10년 빈도의 강우와 이상기후 현상을 반영할 수 있도록 20년 빈도의 강우를 추가로 적용하였다.
- 4) 유역의 도달시간에 따른 유출양상을 살펴보고 도달시간이 40분으로 추정되는 대전광역시 노은 유역을 선정하였다.
- 5) 설계 강우의 시간분포에 따른 유출응답을 살펴기 위해 Huff의 4분위법을 추가로 이용하였으며, 지속시간 60분의 설계 강우를 적용하였다.
- 6) 도시의 발달에 따른 경향을 침투율 및 불투수 지역 비율을 변화시켜 그 경향을 살펴보았다.

2. 모형의 기본 이론

2.1 SWMM

강우로 인한 도시유역의 유출량을 산정하는 모형들 중, SWMM 모형은 1971년 미국 EPA와 Metcalf & Eddy 회사, Florida 대학 및 WRE(Water Resources Engineers)의 공동 연구를 통해 도시유역 하수시스템 내의 유량과 수질을 모의할 수 있도록 개발되었고, 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐

름, 배수관망에서의 유출량 추적, 저류량 산정, 오염물질의 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다(Huber와 Dickinson, 1988). SWMM 모형의 적용 가능 대상유역은 도시유역, 인위적 배수계통을 갖는 소유역 등이며, 시간적 특성은 단일·연속강우에 의한 계산이 가능하고 강우간격은 임의로 설정할 수 있다.

유출 수문곡선의 모의를 위한 매개변수로서는 물리적 매개변수(physical parameters)와 수문학적 매개변수(hydrological parameters)의 두 군으로 구분할 수 있는데, 물리적 매개변수들로서는 소유역의 면적, 평균경사, 불투수지역의 면적 등 소유역 관련 매개변수와 하도 및 관망의 길이, 관경 또는 하도의 폭, 하도의 경사 등 배수체계 관련 매개변수 등으로 지도나 항공사진, 관망도 및 하천도 등을 통하여 추정할 수 있다. 이에 반하여 수문학적 매개변수들로서는 투수 및 불투수유역의 Manning 조도계수(Huber와 Dickinson, 1988), 하도 및 관망의 Manning 조도계수(Chow 등, 1988), 요지저류량(depression storage), 침투관련 매개변수들, 그리고 유역폭(characteristic width)등으로 SCS 토양형에 따른 침투량 계수(한국수자원학회, 1996), SCS의 흙의 분류(SCS, 1972) 등의 자료를 이용할 수 있다. 모형에 대한 자세한 내용은 이종태(1993)의 내용을 참고할 수 있다.

2.2 매개변수 추정을 위한 전문가 시스템의 구성

2.2.1 전문가 시스템의 개요

일반적으로 인공지능에 대한 연구의 시초로는 MIT 대학의 John McCarthy가 최초의 인공지능 언어인 LISP를 만들었던 1960년경으로 본다(김기태 와 김상용, 1987). 인간의 지능을 흉내 내어 생각할 줄 아는 컴퓨터 프로그램을 개발하려고 하였던 인공지능의 연구는 초기 컴퓨터의 용량부족과 접근 방식의 비효율성으로 인하여 진전에 큰 어려움을 겪게 되었으나, 1970년대 말 자연언어의 처리 및 지식의 표현 등 특정분야에서의 많은 성공을 거두게 되었고, 이러한 성공은 세계에서 최초의 상업용 인공지능 프로그램인 MYCIN과 PROSPECTOR 등을 개발할 수 있게 되었다. 이러한 전문가 시스템의 장점으로서의 유용성과 편의성을 들 수 있으나, 전문기술에 대한 일반 대중의 호응이 인간 전문가에 비하여 아직도 상대적으로 낮음을 볼 때, 관련된 문제에 대하여 전문가와 초보자를 돕거나 자문하는 정도의 역할을 담당하는 정도로서 주로 사용되고 있

다.

2.2.2 전문가 시스템의 구성

전문가 시스템의 구조를 살펴보면, 지식베이스(knowledge base), 추론엔진(inference engine), 지식획득 부시스템(knowledge acquisition sub-system), 설명 부시스템(explanation sub-system)과 사용자 인터페이스(user interface) 등으로 구성되어 있다(김기태 와 김상용, 1987).

이중에서 전문가 시스템의 핵을 이루고 있는 부분은 지식베이스와 추론기관을 들 수 있으며, 사용자 인터페이스를 통해 입력된 사용자의 명령에 대하여 전문지식을 이용한 추론과정을 통하여 답을 출력하게 된다. 이에 따라 성기원(1990)은 지하수 오염현상과 처리에 관한 의견을 비전문가에게 조언할 수 있는 전문가 시스템을 구성하였으며, 강관원 등(1992)과 김주환(1993)은 신경망이론의 적용을 통한 하천유출의 예측에 전문가 시스템을 적용하였고, 오남선(1996) 역시 신경망이론과 Kalman Filter모형을 이용하여 강우예측 모형에 적용하였다. 본 연구에서도 위의 연구들을 바탕으로, 대상유역에 대한 수문 및 수질모의를 위한 전문가 시스템을 구성하되 CLIPS(Giarratano, 1993)를 사용하여 구성하였으며, 실제 적용상의 문제점들을 보완하여 수질 및 수량모형의 적용성을 향상시키도록 하였다.

2.2.3 유출모형의 매개변수 추정

유출수문곡선의 모의를 위한 매개변수로서는 물리적 매개변수(physical parameters)와 수문학적 매개변수(hydrological parameters)의 두 군으로 구분할 수 있는데, 물리적 매개변수들로서는 소유역의 면적, 유역의 평균경사, 불투수지역의 면적 등 소유역 관련 매개변수와 하도 및 관망의 길이, 관경 또는 하도의 폭, 하도의 경사 등 배수체계 관련 매개변수 등이다. 이때, 이들의 대부분은 지도나 항공사진, 관망도 및 하천도 등을 통하여 추정할 수 있는 매개변수들이나, 이에 반하여 수문학적 매개변수들로서는 투수 및 불투수유역의 Manning 계수와 하도 및 관망의 Manning 계수, 요지저류량(凹地貯溜量, depression storage), 침투관련 매개변수들, 그리고 유역폭(characteristic width) 등으로 각 소유역 별로 11개의 매개변수에 대한 고려가 필요하며, 이의 변화에 따른 관측값과 모의량의 차이를 최소화하는 과정이 필요하다. 이를 위하여 각 매개변수들에 대한 여러 가지 정보들이 필요하며, 이러한 기초적인 정보들로서는 각 매개변수들의 적용범위, 민감도

등을 들 수 있다.

매개변수의 추정을 위한 첫 번째 과업으로서는 각 매개변수들의 의미와 적용가능범위 및 추정이 어려운 여러 매개변수(depression storage와 침투계수 등)들에 대한 연구를 SWMM의 매뉴얼 및 각종 문헌 등을 통하여 정리하여야 한다. 또한, 이러한 매개변수들의 추정에 관한 신뢰도를 부여할 수 있는데, 불투수지역의 면적에 관한 매개변수의 추정시 상업지역 등에서는 거의 100%정도의 신뢰성을 갖고 추정할 수 있는데 반하여, 저밀도 거주지역에서는 거리, 지붕들의 비연결성 등으로 인하여 매개변수 추정결과가 상대적으로 낮은 신뢰도를 갖게 되는 경우를 들 수 있다. 이후의 과정으로는 앞에서 결정된 각 변수들을 적용범위 내에서 변화시키면서 관측값과 모의값을 근사시키기 위한 시도를 반복적으로 시행할 수 있는데, 이 경우 민감도가 높은 매개변수로부터 민감도가 낮은 매개변수의 순으로 추정해 나가는 방법이 가장 효율적인 매개변수 추정방법이다. 그러나, 이러한 매개변수들의 민감도는 적용하는 대상과 매개변수 추정과정에 따라 변화하는 것으로 알려져 있어 일반적인 민감도 순위를 제시하기는 어렵다 (Baffaut 등, 1987).

매개변수 추정과정은 모의된 수문곡선과 관측 치와의 차이가 일정한 범위 내로 접근한 경우 종결하도록 하는데 이러한 한계값(criteria)들로서는 다음과 같은 값들을 사용하도록 한다. 즉, N개의 강우사상을 사용하여 추정하는 경우,

- (1) 부피의 비교: 관측 유출량 V_m 과 모의 유출량 V_s 의 부피를 비교

$$\text{Volume difference} = \frac{1}{N} \sum \frac{(V_m - V_s)}{V_m} \quad (1)$$

- (2) 첨두값의 비교: 관측 첨두량 P_m 과 모의 첨두량 P_s 의 첨두값을 비교

$$\text{Peak difference} = \frac{1}{N} \sum \frac{(P_m - P_s)}{P_m} \quad (2)$$

- (3) 첨두시간의 비교: 관측 첨두량 P_m 과 모의 첨두량 P_s 의 첨두 발생 시간 T_m, T_s 를 비교

$$\text{Time difference} = \frac{1}{N} \sum (T_m - T_s) \quad (3)$$

- (4) 측정 유출량과 모의 유출량의 차이를 부피의 비와 가중오차로 비교

$$\text{Weighted error} = \frac{1}{N} \sum \left(a \frac{\frac{1}{n} \sqrt{\sum_{j=1}^n (m_j - p_j)^2}}{m_i} + b \frac{V_m - V_s}{V_m} \right) \quad (4)$$

여기서, 사건 i에서의 자료 수를 n_i , i번째 수문곡선에 대한 측정 및 모의 유출값 ($j=1, n_i$) 을 m_j, p_j 로, m_i 를 사건 i에서의 평균유출량을 의미하며, 이러한 수치비교를 통하여 추정과정의 진행 및 매개변수들의 민감도를 검토하는 기준으로 사용하였다.

그 동안의 여러 연구 및 문헌들을 살펴보면, 모형의 각종 매개변수들의 변화에 따라 모의결과에 어떠한 영향을 미치는가를 살펴봄으로써 도시구역의 거동을 검토한 예들을 제시하고 있는데(Nix, 1994), 본 연구에서는 반대로 모의된 결과를 통하여 매개변수의 변화방향을 결정하고자 하였다. 이에 따라 유출양상에 영향을 미치는 것으로 알려져 있는 불투수면적비, 유역폭, 지표저류, 지표 및 하도조도계수 등과 지면경사 및 침투계수들을

표 1. 수문 거동에서의 매개변수 개선 규칙들

Parameters Appearance	Impervious Area Percentage	Char- Width	Basin Slope	Channe l Slope	Dep. Storage Impervious	Dep. Storage Pervious	Impervious -n	Pervious -n	Max. Infiltration Capacity	Min. Infiltration Capacity
Volumes are too big	▼	▼	▼	-	△	-	-	△	-	▼
Volumes are too small	△	△	△	-	▼	-	-	▼	-	△
Peaks are too high	▼	▼	▼	-	-	-	-	△	-	▼
Peaks are too low	△	△	△	-	-	-	-	▼	-	△
Peaks are too soon	-	▼	▼	▼	-	-	△	△	-	-
Peaks are too late	-	△	△	△	-	-	▼	▼	-	-

△ : Increase ▼ : Decrease - : No effect
 Char-width : characteristic width Dep. Storage Impervious : Depression Storage in Impervious Area
 Dep. Storage Pervious : Depression Storage in Pervious Area
 Impervious-n : Manning's n in Pervious Area Pervious-n : Manning's n in Pervious Area

앞에서 제시한 한계기준들과의 관계로 정리하면 표1과 같은 결과를 제시할 수 있었다. 즉, 측정된 유출양상과 모의결과를 비교하여 새로운 매개변수 값들을 유추해 낼 수 있는 결정규칙들을 구성해 낼 수 있었으며, 한 예로 모의된 유출체적이 측정값보다 큰 경우(volumes are too big), 이를 조정하기 위해서는 불투수 영역의 면적(impervious area percentage) 또는 유역폭(char-width)을 감소시켜보거나, 불투수 지역에서의 지표 저류량을 증가시킴으로서 모의결과를 개선시킬 수 있었다. 결국, 이러한 관계들을 이용하면 수문현상에 따른 매개변수들의 개선전략을 설정할 수 있으며, 이와 함께 이들 관계를 규칙화하면 전문가 시스템의 구성을 위한 지식베이스의 구축기반으로 이용할 수 있을 것이다.

3. 모형의 적용 및 결과분석

3.1 대상유역의 현황 및 특성

각 유역들은 유역마다의 특성이 틀리므로 시험 유역에서 산출된 값을 가지고 실제 유역에 적용한다는 것은 매우 많은 문제들을 안고 있으며, 실제 유역으로의 적용을 위해서는 그 유역의 특성을 살펴보는 일이 매우 중요하므로 유출의 특성을 좌우하는 입력자료들을 여러 측면에서 접근해야한다.

본 연구에서 선정한 대상유역은 노은유역으로 도달 시간은 약 40분(3.2.1절)으로 추정하였다.

노은유역을 살펴보면 행정구역상 대전광역시의 유성구 서북방향에 속해 있으며, 향후 20년간을 계획기간으로 21세기를 대비하는 대전시 발전의 진보적인 미래상을 제시할 목적으로 1997년에 수립한 「2016년 대전도시기본계획(대전광역시, 1997)」에 따라 대규모 택지개발 및 구획정리사업 등이 이루어질 유역이며 불투수율이 약 50.6%에 달할 전망이다. 이 유역은 면적이 약 2.87 km²이며 급강 제 1 지류인 갑천 유역의 한 배수분구이다. 서쪽방향은 계룡산의 한줄기인 갑불산이 위치해 있어 경사가 급한 양상을 보이며, 불투수 지역의 경사도는 대체로 완만한 편이고 유역내의 표고는 최고 EL. 216.3 m 에서 최저 EL. 54.1 m 이다. 1/1200의 노은 1 지구 우수계획평면도(한국토지공사, 1997)에 의하면 우수 관거에 의한 유출은 유역의 상·좌 방향으로부터 주로 하·우 방향으로 이루어진다. 이렇게 이루어진 유출은 급강 제 3지류인 반석천으로 배출되어 갑천으로 흘러 들어가게 된다. 배수 관망도를 살펴보면

주로 유출은 북쪽과 서쪽에서 이루어져 남쪽으로 내려오다가 남쪽에서 발생한 유출과 더불어 동쪽으로 빠져나가게 설계되었는데, 이 중 A, B, C점은 총유출이 이루어지기 이전의 관거에서의 유출을, D점은 이들이 모두 합류된 총 유출을 계산할 수 있는 곳으로 선정하고, 27개의 소유역으로 구분하였다(그림 1).

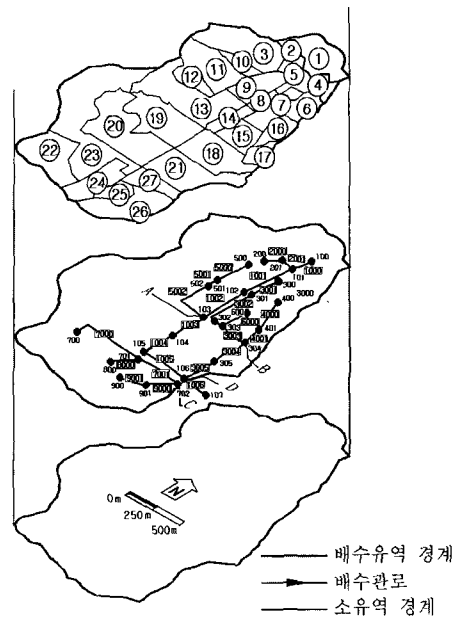


그림 1. 노은 1 유역의 위치 및 유역분할·관로도

3.2 도시유출 모형에의 입력자료

SWMM 모형의 입력 자료들은 크게 강우, 소유역 및 관로/개거 자료들로 구성된다.

3.2.1 강우자료

대전의 연평균 강수량은 1,286.1 mm로 전국 평균값(1,283 mm)을 상회하며 6~9월 사이의 집중호우로 이 기간의 강수량이 연 강수량의 68%에 달하고 있다(대전광역시, 1997).

일반적으로 수공 구조물의 설계·평가 또는 도시화 유역에서의 유출해석 시, 첫 번째 단계는 설계강우의 사상을 결정하는 것이다. 이때 가장 널리 적용되는 접근 방법은 설계호우(design storm)나 강우강도-지속기간-빈도(rainfall intensity-storm duration-frequency, IDF)관계로부터 직접 얻어진 사상을 이용

하는 것인데, 이 방법은 특히 단시간 강우자료가 필요한 도시지역 우수 관거 설계에 유용하게 이용된다. IDF관계는 전대수지에 재현기간별로 곡선군으로 표시하거나 강우강도 공식의 형태로 나타낼 수 있으며, 이러한 강우강도 공식의 형태에는 Talbot형, Sherman형, Japanese형의 3가지로 표현된다. 대전광역시 하수도정비 기본계획(대전광역시, 1999)에서 적용된 강우강도공식과 한국건설기술연구원에서 과거 47년(1941 ~ 1987)간의 강우자료를 통계적으로 분석·작성한 「한국 확률강우량도(건설부, 1988)」의 대전광역시 IDF 곡선을 비교하여 적절한 빈도별 강우강도를 결정하도록 하였다. 이에 따르면 5년, 10년 그리고 20년 빈도 모두에서 Talbot형 강우강도공식의 값이 대체적으로 가장 크게 나타난 것을 볼 수 있으며, 그 다음으로 Sherman형, Japanese형 그리고 IDF 곡선의 순으로 나타났다. 누가강우강도 값에서도 5년 및 10년 빈도에서 지속기간 80분 정도까지는 Talbot형 강우강도공식의 값이 가장 크게 나타났고 그 이후로는 Sherman형, Japanese형 강우강도공식이 Talbot형 보다 큰 값을 보여주었다. 반면 IDF 곡선에 의한 강우강도 값은 여타의 다른 강우강도공식 값들에 비하여 작게 나타났으나, 빈도가 커질수록 그 차이는 줄어들었다.

대전광역시(1992)는 「대전광역시 하수도정비 기본계획」에서 방재적인 측면으로 강우강도가 가장 높게 나타난 Talbot형 강우강도공식을 채택하여 사용하고 있으며, 본 연구에서도 국지적 집중호우에 대한 고려와 자료의 일관성을 유지하기 위하여 마찬가지로 Talbot형 강우강도공식을 선정하였다.

도달시간(t_c)은 강우에 의하여 발생된 지표수가 하수 관거로 유입되는 유입시간(t_o)과 하수관거를 유하하는데 소요되는 유하시간(t_d)을 합한 것으로 유역내의 가장 먼 지점으로부터 유역출구까지 도달하는 데 걸리는 시간을 의미한다. 유입시간은 정확한 배수로가 없는 상태에서 산이나 계곡의 지표면을 따라 배수로까지 도달하는데

걸리는 시간이며, 강우점과 관거까지의 거리, 주택, 공장 등의 밀집도, 지질 및 지형에 따라 다르기 때문에 정확한 산출이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 우리나라에서 일반적으로 많이 사용되고 있는 표 2의 하수도 시설기준의 유입시간(환경부, 1998)을 참고로 하였다.

유하시간은 관거의 구간거리와 유출량에 대응하는 유속으로 산출한 구간별 유하시간을 합하여 산출한다. 본 연구에서는 유속을 관거의 최적유속인 1.0~1.5 m/sec로 가정하고(대전광역시, 1999), 이 유속을 관거 구간거리로 나누어 유하시간을 산출하였다. 따라서 노은 1 유역의 도달시간(t_c)은 관거의 최장연장이 2283 m 이므로,

$$t_c = t_o + t_d = t_o + \frac{L}{V} \times \frac{1}{60} \quad (5)$$

$$= 7 + \frac{2283}{1.0} \times \frac{1}{60} = 45.1 \text{ min}$$

$$t_c = 7 + \frac{2283}{1.5} \times \frac{1}{60} = 32.4 \text{ min} \quad (6)$$

즉, 노은유역의 도달시간은 평균 38분으로서 40분에 약간 못 미치는 값이 제시되었다.

강우강도는 강우지속시간이 증가함에 따라 감소하나, 지속시간이 유역의 도달시간보다 짧으면 배수면적의 일부만만이 유출에 기여하게 되므로 배수면적 전체가 유출에 기여하기 위해서는 가장 짧은 지속시간이 도달시간과 같아야한다(한국수문학회, 1993).

본 연구에서는 실제 유역의 유출응답을 살펴보기 위하여 60분의 설계 강우 지속시간을 갖는 강우에 대하여 유출해석을 실시하였다. 우수 유출량 산정을 위한 확률년수로는 건설부제정 “하수도 시설기준”(건설부, 1988)에 따라 간선 하수관거는 10년, 지선 하수관거는 5년의 확률빈도를 적용하였고, 이상 수문현상으로 인한 국지적 호우 집중현상을 고려하여 20년의 확률빈도를 추가로 적용하였다.

표 2. 유입시간의 기준치(환경부, 1998)(단위: 분)

우리나라에서 일반적으로 사용되고 있는 유입시간		미 국 토 목 학 회	
인구밀도가 큰 지역	5	완전포장 및 하수도가 완비된 밀집지구	5
인구밀도가 적은 지역	10		
간선우수관거	5	비교적 경사도가 적은 발전지구	10~15
지선우수관거	7~10		
평 균	7	평지의 주택지구	20~30

본 모형의 매개변수 추정과 검정을 위하여 실측한 강우 자료는 노은 농수산 시장에 설치된 강우량기를 통해 2002년 8월 6일 08시부터 7일 18시까지(34시간, 강우 1)와 13일 02시부터 15시까지(13시간, 강우 2) 측정된 두 집단의 시간 강우들을 사용하였다. 노은 관측소는 94년에 설치되어 2001년에 교체 설치되었다.

3.2.2. 강우 자료의 생성

국내에서는 일반적으로 IDF 곡선으로부터 총강우량을 계산한 후, 이를 시간 분포시켜 우량주상도로 사용하고 있다. 이러한 강우를 시간 분포시키는 방법에는 Mononobe 공식, 중앙집중형 강우 분포법, 그리고 Huff의 4분위법 등이 있다. Mononobe 공식은 도달시간이 큰 자연하천유역에 대하여 개발된 방법이므로 짧은 강우지속기간을 가지는 도시유역에는 적합지 않다(원석연, 1993). 따라서 본 연구에서는 중앙 집중형 강우분포법과 Huff의 4분위법을 적용하였다.

빈도별 강우로부터 지속시간별 강우량을 구하기 위하여 대전지방의 5, 10, 20년 빈도 강우강도 공식(대전광역시, 1999)을 Talbot 식으로 선정하고, 강우 강도 공식으로부터 지속시간별 누가강우량을 구한 후 이를 시간 강우량으로 환산하여 크기 순서로 시간별 강우량을 구하며, 중앙 집중 형태로 분포시킴으로써 설계 강우주상도를 작성하는 중앙 집중형 설계 강우를 지속시간이 60 분에 대하여 구하였다.

1967년 Huff는 통계학 분석에 의하여 강우량의 시간적 분포를 나타내는 무차원 시간분포곡선을 제시하였는데, 우량의 최대부위가 위치하는 구간에 따라 4개의 그룹으로 정의된 강우를 시간적으로 무차원화 시키기 위하여 개개 강우의 누가지속기간과 이에 따른 강우량

을 각각 백분율로 표시하고 이를 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$PT(i) = \frac{T(i)}{T_0} \times 100\% \quad (7a)$$

$$PR(i) = \frac{R(i)}{R_0} \times 100\% \quad (7b)$$

여기서,

PT(i) = 임의시간 T(i) 에서의 강우 지속 간 비,

T(i) = 강우시간 후 i 번째 시각의 경과시간

T0 = 총 강우 지속기간,

i = 단위증분회수

PR(i) = 임의시간 T(i) 에서의 강우량 비

R(i) = 임의시간 T(i) 까지의 누가우량

R0 = 지속기간 T0 의 총 우량

대전지방 설계 강우량의 시간적 분포형을 구하기 위하여 IDF곡선으로부터 지속시간 60분에 해당하는 빈도별 강우 깊이를 구하면 다음의 표 3과 같고, 실측 강우 자료를 이용하여 누가우량곡선의 종거를 각 분위별로 나타내면 다음의 표4와 같다.

표 3. 대전지방의 빈도별 강우 깊이 (건설부, 1988)

빈 도	강 우 깊 이 (mm)
5년	54.0
10년	65.0
20년	71.0

표 4. 대전지방의 분위별 누가우량곡선의 종거 (서병하와 김남원, 1989)

분 위	누가비율											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
제1분위	0.0	21.6	46.7	64.0	75.0	79.1	84.1	87.8	91.9	96.4	100.0	
제2분위	0.0	9.0	19.2	36.0	55.3	74.5	83.1	90.0	94.0	97.5	100.0	
제3분위	0.0	3.3	8.8	14.9	22.3	33.3	50.0	74.0	89.4	96.4	100.0	
제4분위	0.0	6.4	13.0	20.0	26.4	33.3	40.0	49.1	66.2	86.8	100.0	

표 5. 지속시간 60분의 빈도별 설계우량주상도

지속시간(분)		0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
강우량 (mm)	5년	0	4.9	5.5	9.1	10.4	10.4	4.6	3.7	2.2	1.9	1.4
	10년	0	5.9	6.6	10.9	12.5	12.5	5.6	4.5	2.6	2.3	1.6
	20년	0	6.4	7.2	11.9	13.7	13.6	6.1	4.9	2.8	2.5	1.8

기존 연구에 따르면 지속시간 6 hr 이하에서는 대전 지방을 포함한 우리나라 대부분 지역에서 제2구간 호우가 제일 많은 빈도를 나타내고 있으며(서병하와 김남원, 1989), 따라서 본 연구에서도 Huff의 제2구간 호우를 대상호우로 선정하고, 지속시간 60분의 빈도별 설계 우량주상도를 다음의 표 5와 같이 결정하였다.

3.2.3 소유역 및 관거자료

유역은 먼저 지형도를 이용하여 배수구역의 경계를 설정하고, 관로 형태와 설치위치, 지적도와 토양도 등 토지 이용상황과 토양의 특성, 행정구역 등의 자료를 기초로 유역을 분할하였다. 본 연구에서는 소유역 자료를 산출하기 위하여 지형도(1/5000)와 우수계획평면도(1/1200, 대한주택공사, 1993; 한국토지공사, 1997) 등을 이용하여 노은 유역(27개 소유역)을 분할하였으며, SWMM 모형을 위한 소유역 입력자료는 다음 표 6과

같다.

본 연구의 관거 자료는 「대전 노은지구 택지개발사업 기본계획 및 기본설계(한국토지공사, 1997)」의 우수계획평면도(1/1200)를 참고하였으며, 관거의 제원은 다음의 표 7과 같다.

3.3 적용결과

SWMM 모형의 RUNOFF 블록을 적용하여 개발 후의 유출 양상을 모의하였다. 강우 1에 대하여 A, B, C, D 점에서 (1) ~ (4) 식을 통하여 매개변수를 추정하고(그림 2), 강우 2에 대하여 검정한 결과는 그림 3과 같으며, 노은지역(20년 빈도, 60분 지속)의 유출수문 곡선 및 첨두 유출량 모의 결과는 그림 4와 같다.

표 6. 노은 유역의 소유역 자료

유역 번호	면적 (ha)	유역폭 (m)	불투수면적 (%)	불투수 n	투수 n	경사 (m/m)
1	10.07	241	50	0.014	0.06	0.031
2	5.32	159	10	0.014	0.06	0.092
3	4.70	181	5	0.014	0.06	0.122
4	7.08	366	75	0.014	0.06	0.019
5	1.91	458	80	0.014	0.06	0.083
6	4.51	422	20	0.014	0.06	0.036
7	15.21	1043	80	0.014	0.06	0.021
8	0.96	442	80	0.014	0.06	0.011
9	10.23	531	80	0.014	0.06	0.030
10	1.54	97	5	0.014	0.06	0.046
11	4.70	350	10	0.014	0.06	0.010
12	3.16	109	5	0.014	0.06	0.105
13	11.38	1331	65	0.014	0.06	0.052
14	6.53	764	80	0.014	0.06	0.003
15	7.02	845	80	0.014	0.06	0.018
16	3.23	470	20	0.014	0.06	0.035
17	1.21	201	20	0.014	0.06	0.006
18	15.30	238	80	0.014	0.06	0.044
19	15.37	308	50	0.014	0.06	0.123
20	16.46	382	70	0.014	0.06	0.071
21	18.01	1200	75	0.014	0.06	0.030
22	7.15	346	10	0.014	0.06	0.071
23	10.93	951	75	0.014	0.06	0.031
24	10.53	261	65	0.014	0.06	0.114
25	3.79	271	60	0.014	0.06	0.035
26	5.19	345	15	0.014	0.06	0.019
27	13.68	760	75	0.014	0.06	0.024

표 7. 노은 유역의 관거자료

관번호 /Point	연결관로/ 유입구	관 형태	직경/ 바닥(m)	높이 (m)	길이 (m)	경사 (m/m)	n
1000	1001	Circle	1.0		135	0.0085	0.013
2000	2001	Circle	1.2		150	0.0075	0.013
2001	1001	Box	1.5	1.5	141	0.0032	0.013
1001	1002	Box	2.0	1.5	428	0.0021	0.013
1002	1003	Box	2.0	2.0	410	0.0029	0.013
5000	5001	Circle	1.0		300	0.0102	0.013
5001	5002	Circle	1.1		650	0.0104	0.013
5002	1003	Box	2.0	1.5	410	0.0076	0.013
1003/A	1004	Box	2.5	2.5	295	0.0049	0.013
1004	1005	Box	3.0	2.5	331	0.0031	0.013
1005	1006	Box	3.5	2.5	459	0.0029	0.013
3000	3001	Circle	1.1		272	0.0042	0.013
3001	3002	Circle	1.2		538	0.0039	0.013
3002	3003	Box	1.5	1.5	114	0.0048	0.013
6000	3003	Box	1.5	1.5	242	0.0035	0.013
3003	3004	Box	2.0	2.0	253	0.0036	0.013
4000	4001	Circle	1.0		372	0.0027	0.013
4001	3004	Circle	1.1		153	0.0130	0.013
3004/B	3005	Box	2.5	2.0	195	0.0026	0.013
3005	1006	Box	2.5	2.5	270	0.0018	0.013
7000	7001	Box	2.0	1.5	640	0.0045	0.013
8000	7001	Circle	1.2		135	0.0184	0.013
7001	7002	Box	2.0	2.0	468	0.0078	0.013
9000	9001	Circle	1.1		290	0.0089	0.013
9001	7002	Circle	1.2		140	0.0186	0.013
7002/C	1006	Box	2.5	2.0	38	0.0100	0.013
1006/D	107	Box	6.0	3.0	70	0.0050	0.013

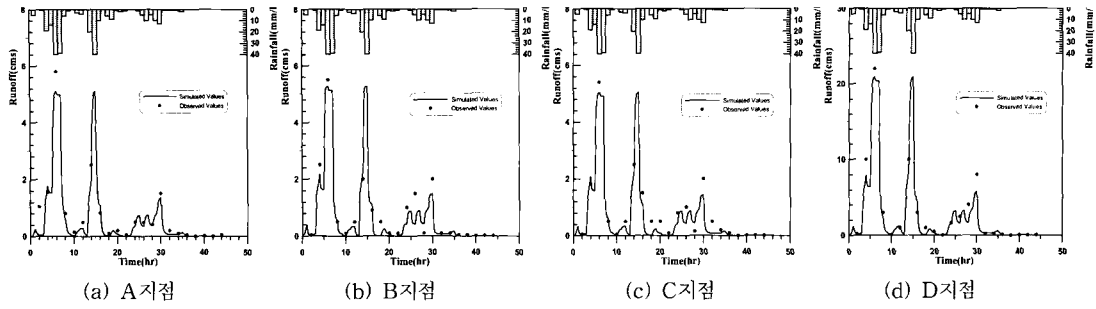


그림 2. 강우 1 에 대한 A, B, C, D 지점에서의 유출 (모의치와 관측치)

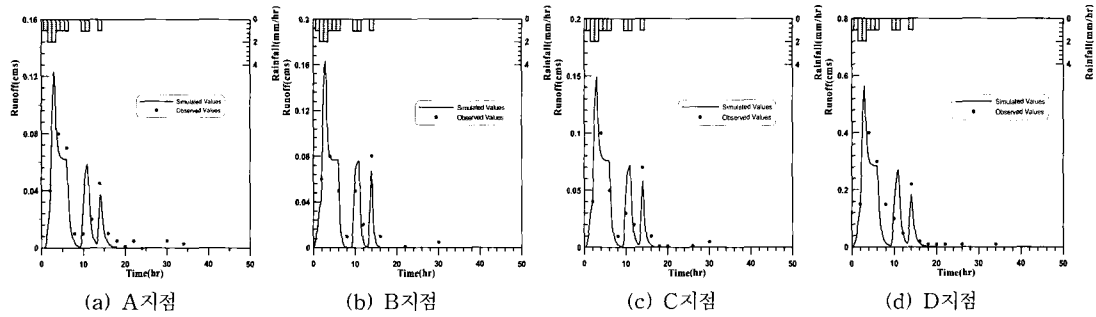


그림 3. 강우 2 에 대한 A, B, C, D 지점에서의 유출 (모의치와 관측치)

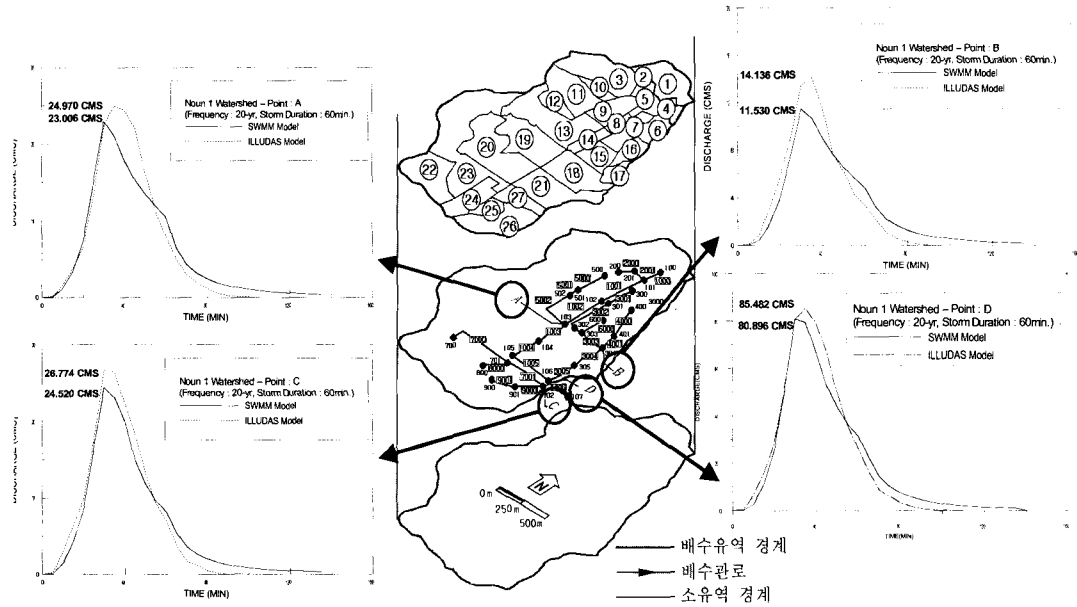


그림 4. 노은 1 배수구역의 유출 수문곡선 및 첨두유출량 (20년 빈도, 60분 지속기간)

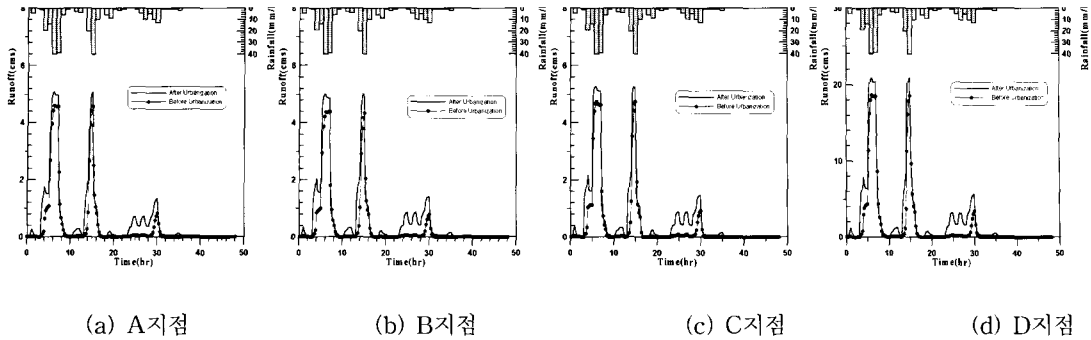


그림 5. 강우 1 에 대한 A, B, C, D 지점에서의 유출 (도시 개발 전/후 비교)

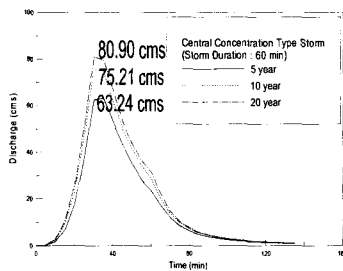


그림 6. 중앙집중형 강우분포에 따른 유출 수문곡선

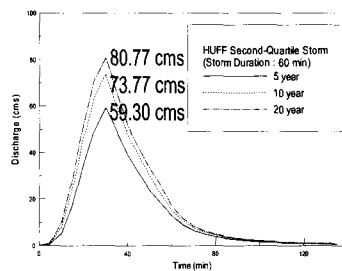


그림 7. Huff 제2분위 분포에 따른 유출 수문곡선

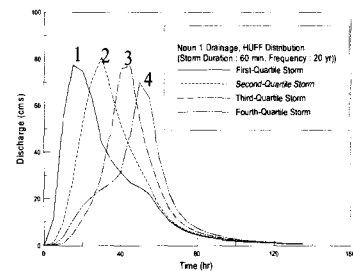


그림 8. Huff 분위별 유출 수문곡선

SWMM모형에 강우 1, 현재의 유역 조건과 개발 전 유역 조건을 가정하여(불투수 면적 5%, 침투율 85%) 도시 개발 전·후 유출 상황을 비교하였다(그림 5). 이에 따르면, 도시화 이후 침투 유출량이 약 20% 정도 증가하고, 침투시간이 25분 정도 빨라지는 형태를 보여주었으나, 전체적으로는 그 형태에 변화가 없었으며, 다만 강우가 반복되는 과정에서 25~30 시간에 해당하는 유출의 모의가 도시 개발 전에 비하여 이후의 유출이 크게 나타나고 있는 것은 침투율 및 불투수 면적의 변화에 따른 유출량의 증가로 인한 현상으로 보인다.

중앙 집중형으로 설계 우량주상도를 작성한 노은유역의 유출 수문곡선과 Huff의 제 2 분위법에 의한 유출 수문곡선은 그림 6과 7에 나타났으며, Huff의 각 분위별 유출 수문곡선은 그림 8과 같다.

중앙 집중형 강우 분포법에 비하여 Huff 2분위에 의한 침투 유출 값은 다소 적은 값을 보여주었고, 침투 유출량 발생시각은 중앙 집중형 강우분포에서는 30~35분 사이에 이루어졌으며 Huff 2분위에 의한 방법에서는 강우가 시작한지 30분 정도에 이루어졌다. 분위 별

유출도 강우의 시간분포에 의하여 매우 상이한 양상을 보이는 등 설계 강우의 시간분포 방법에 따라 침투 유출량 발생 시각이 매우 민감하게 반응함을 알 수 있었다.

4. 종합 결론 및 향후 연구 과제

본 연구에서는 대전광역시에서 최근에 계획·개발한 노은유역을 선정하여 도시화로 인한 유출현상의 변화를 분석하였다. 실제의 유역자료와 관거 자료에 적용하였으며, 강우는 실제 및 설계 강우를 고려하였다. SWMM 모형을 적용한 결과들을 종합하면 다음과 같다.

1. SWMM 모형에서 침투유량, 유출용적, 침투 도달시각 등이 모두 근사하게 산출됨으로써 유역의 반응 경향을 해석하는데 큰 무리가 없는 것으로 보였다.
2. 도시의 개발 전·후의 유출양상을 살펴보면 침투 유출량은 약 20% 정도의 증가율을 보였으며, 침투 유량 발생시각은 25분이 단축됨으로서 침투 유량 발생시각의 감소와 침투 유출량적의 증

가가 뚜렷하여 개발 전·후의 유출양상이 크게 변화됨을 볼 수 있었다.

3. 높은 강우강도를 가지는 강우강도식(Talbot형)과 배수관망 설계빈도인 5년, 10년 빈도 외에 20년 빈도를 가지는 강우에도 대체적으로 발생된 유출량을 무리 없이 배출하는 것으로 보아, 대상 유역의 배수관망의 설계는 양호하게 이루어진 것으로 판단되었다.

시험 유역과는 유역의 특성이 다른 실제 유역에 모형을 적용할 경우, 정확한 입력 자료가 필요하다는 관점과 모형의 효율적인 적용이라는 관점에서 다음과 같은 향후 연구과제를 생각해 볼 수 있다. 모형의 입력자료 중 관자자료는 정확하게 산출할 수 있으나 유역면적, 불투수율, 유역폭, 불투수지역과 투수지역의 침투량, 저류량, 조도계수, 경사 등의 소유역 자료들을 추출하는데 많은 어려움이 있으므로, 지리정보기법 및 전문가 시스템 등을 적극적으로 이용하고, 실제 유역의 관측 자료를 많이 확보하여 각 매개변수(parameters)들의 상관계수에 관한 연구가 충실히 이루어져야 할 것이다.

이 논문은 2001년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었습니다. 자료를 제공해 준 대전광역시 건설교통국에 감사드립니다.

참 고 문 헌

강관원, 박찬영, 김주환(1992). “폐턴 인식 방법을 적용한 하천유출의 비선형 예측.” 한국수문학회지, 한국수문학회, 25(3), pp. 105~113.

건설부(1988). **수자원 관리기법 기술개발 연구조사 제 2권**, 한국환경강우량도.

김기태, 김상용(1987). **인공지능-컴퓨터 비전, 자연언어 이해, 전문가 시스템**, 안국출판사.

김주환(1993). **신경회로망을 이용한 하천유출량의 수문학적 예측에 관한 연구**, 박사학위 논문, 인하대학교.

대전광역시(1992). **대전광역시 하수도정비 기본계획**.

대전광역시(1997). **2016년 대전도시기본계획**.

대전광역시(1999). **대전광역시 하수도정비 기본계획 변경보고서**.

대한주택공사(1993). **대전 관저지구 택지개발 상세설계**.

서병하, 김남원(1989). **지역별 설계강우의 시간적 분포**, 건기연 89-WR-111, 연구보고서, 한국건설기술연구원.

성기원(1990). **오염된 지하수 처리와 추적을 위한 액**

스퍼트 시스템의 개발, 석사학위 논문, 서울대학교.

오남선(1996). **신경망 이론과 Kalman Filter 강우예측 모형의 비교연구**, 박사학위 논문, 서울대학교.

원석연(1993). **유역 및 하도홍수추적 방법을 결합시킨 도시하천의 유출해석모형**, 고려대학교 대학원 박사학위논문.

이범희, 이길성(1998). “매개변수 추정방법의 개선을 위한 전문가시스템의 개발.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 31(6), pp. 641~655.

이종태(1993). “유수지 설계를 위한 계획강우의 임계지속기간 - 서울 지역을 중심으로”, **한국수문학회지**, 한국수문학회, 26(3), pp. 115~124.

한국수문학회(1993). “2. ILLUDAS모형”, **제1회 수공학 워크샵**, pp. 1~41.

한국수자원학회(1996). “2. 도시유역에서의 배수시스템의 설계를 위한 SWMM모형”, **제4회 수공학 워크샵**, pp. 97~204.

한국토지공사(1997). **대전노은지구 택지개발사업 기본계획 및 기본설계**.

환경부(1998). **하수도 시설기준**.

Baffaut, C., Benabdallah, S., Wood, D., Delleur, J., Houck, M., and Wright, J.(1989). *Development of an expert system for the analysis of urban drainage using SWMM*. Water Resources Research Center Technical Report No. 180, Purdue University.

Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W.(1988). *Applied hydrology*, McGraw-Hill.

Giarratano, J.C.(1993). *CLIPS user's guide, software technology branch*, Lyndon B. Johnson Space Center.

Huber, W.C. and Dickinson, R.E.(1988). *Storm water management models; version 4, part A: User's manual*, EPA/600/3-88/Q01a, Environmental Protection Agency.

Nix, S.J.(1994). *Urban stormwater modeling and simulation*. Lewis Publishers. pp. 92~109.

Soil Conservation Service(SCS)(1972). *National engineering handbook*, section 4, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.

(논문번호:02-38/접수:2002.06.10/심사완료:2002.01.11)