

DR3M-II를 이용한 도시배수유역의 유출해석

Runoff Analysis of Urban Drainage Using DR3M-II

민 상 기* / 이 길 춘**

Min, Sang Gi / Lee, Kil Choon

Abstract

In this study, the U.S. Geological Survey's DR3M-II (Distributed Routing Rainfall-Runoff Model) was applied for small urban drainage. DR3M-II is a watershed model for routing storm runoff through a branched system of pipes and natural channels using rainfall input. The model was calibrated and verified using short term rainfall-runoff data collected from Sanbon basin. Also, the parameters were optimized using Rosenbrock technic. An estimated simulation error for peak discharge was about 7.4 percent and the result was quite acceptable. Results of the sensitivity analysis indicate that the percent of effective impervious area and α defining surface slope and roughness were the most sensitive variables affecting runoff volumes and peak discharge for low and high intensity storm respectively. In most cases, soil moisture accounting and infiltration parameters are the variables that give more effects to runoff volumes than peak discharge. Parameter α showed the opposite result.

keywords : runoff, DR3M-II, parameters, sensitivity analysis

요 지

미국 지질조사국(U.S Geological Survey)의 강우-유출모형 DR3M-II(Distributed Routing Rainfall-Runoff Model)를 이용해 도시배수유역의 유출해석을 수행하였다. DR3M-II는 강우사상을 입력자료로 하여 수지상의 관거 또는 자연수로망으로 구성된 도시유역에서의 유출추적을 위해 개발된 모형이다. 대상유역인 산본신도시에서의 실측유출자료를 이용한 모형의 검정 및 검증을 수행하였으며, Rosenbrock기법을 이용해 최적매개변수를 유도하였다. 검증결과 첨두유출량의 평균오차는 7.4%로 상당히 양호한 결과를 보여주었다. 매개변수에 대한 민감도 분석결과 비교적 작은 강우강도의 비가 내릴 경우는 유효 불투수지역의 면적이 첨두유출량이나 유출체적에 가장 민감한 영향을 미치는 인자였으나, 큰 강우강도에서는 조도계수와 유역경사를 정의하는 운동과방정식의 계수 α 가 가장 민감한 영향을 미치는 인자인 것으로 나타났다. 대체적으로 첨두유출량보다는 유출체적이 침투능이나 토양함수조건을 정의하는 매개변수에 보다 민감한 반응을 보였으며, 매개변수 α 는 첨두유출량에 보다 민감한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 도시유출, DR3M-II모형, 매개변수, 민감도 분석

* 단국대학교 토목환경공학과 박사수료

Ph.D. Student, Dept. of Civil and Envir. Eng., Dankook Univ., Seoul 140-714, Korea
(e-mail: hydrlab@dankook.ac.kr)

** 단국대학교 토목환경공학과 교수

Prof., Dept. of Civil and Envir. Eng., Dankook Univ., Seoul 140-714, Korea

1. 서론

낙후지역 개발과 신도시 건설 등의 이유로 자연유역이 도시화 되어 가면서 이들 지역의 수문현상이 급격히 변화하고 있다. 도시화로 인한 불투수지역 면적의 증가 및 자연하천의 직선화, 복개 등은 침투유출량의 증가 및 도달시간의 단축 등으로 이어져 재해의 위험성을 가중시키고 있다. 특히 도시하천을 횡단하는 암거나 교량이 늘어나고 하천을 복개함으로써 홍수소통에 장애요인이 되고 있는 실정으므로 하도의 정비, 유지관리시 수리 수문학적 검토가 반드시 선행되어야 할 것이다.

도시지역에서의 수문현상은 자연유역과는 달리 수계 내의 다양한 수문시스템과 지형 및 토지이용 현황, 배수시설물 등으로 인해 매우 복잡하게 나타나므로 그 해석에 많은 어려움이 수반된다. 또한 최근 몇 년 사이 지구온난화 등의 환경변화로 인한 갑작스런 폭우로 인해 도시지역에서 침수피해가 빈번히 발생하고 있는 실정이다. 도시 방재의 측면에서 이들 지역에 대한 수문해석은 더욱 중요한 의미를 가지고 있다. 이러한 도시지역의 유출해석을 위해 국내에서도 대학 및 연구기관 등을 중심으로 많은 연구활동이 진행되어 왔다.

수문현상은 물리적인 모형에 의한 해석이 불가능하므로 수치모형을 이용한 해석이 보편적으로 행해지고 있다. 현재 국내에서 도시지역의 유출해석을 위해 사용되는 수치모형은 ILLUDAS(전병호와 원석연, 1994; 한국회와 이길준, 1996), SWMM(이종태와 이상태, 1997) 등이 대표적이라 할 수 있다. 그 이외에 단기간의 국지적인 강우-유출 관계를 해석하기 위한 TR-20, 영국도로시험연구소에서 도시지역의 배수계통 설계를 위해 개발한 RRL 모형, 미 육군공병단의 STORM 모형 등이 있으나 그 적용성에 한계가 있어 실무에서의 사용은 제한적으로 이루어지고 있는 실정이다.

본 연구에서는 미국 지질조사국(U.S Geological Survey)의 강우-유출 모형 DR3M-II를 이용해 소규모 도시유역에 대한 유출해석을 수행하여 그 적용성을 판단

하고자 한다. 국내유역에의 적용을 위한 신뢰성을 확보하기 위해, 실측값을 이용한 모형의 검증 및 검증작업이 이루어 졌다. 또한 최적매개변수를 찾기 위한 최적화 과정과, 모형의 해석결과에 영향을 미칠 수 있는 매개변수들에 대한 민감도 분석을 통해 모형운용시 적정 매개변수 값을 선정하기 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. DR3M-II 모형

2.1 모형의 소개

미국 지질조사국은 1960년대 후반 이래 지속적으로 강우-유출 관계를 해석할 수 있는 모형의 개발을 시도하였다. 이러한 시도의 첫 성과로써 Dawdy et al.(1972)은 작은 규모의 자연유역에 적용할 수 있는 집중형 강우-유출 모형을 개발하였다. 이후 Dawdy et al.(1978)이 이 모형과 Massachusetts Institute of Technology Catchment Model(Leclerc and Schaake, 1973)을 결합하여 분산형 강우-유출 모형인 DR3M을 개발하였다. 1991년 DR3M은 몇 가지 보완을 거쳐 Version II로 업그레이드되었다.

DR3M-II는 강우사상을 입력자료로 하여 수지상의 관거 또는 자연수로망으로 구성된 도시유역의 강우-유출해석을 위해 개발되었다. 모형에서 배수유역은 그 유역의 배수특성을 나타내는 지표유출, 관거, 저류지 부분으로 표현되며, 운동파이론이 하도 및 지표유출추적에 이용된다. 이 모형은 원래 도시유역에의 적용을 위해 개발되었으나 자연유역에의 적용도 가능하다.

DR3M-II는 사상성 호우사상의 유출해석 뿐만이 아니라, 연속적인 호우사상을 이용한 장기유출해석도 가능한 분산형 모형이며, 장기간의 호우사상을 동시에 입력한 후에 사용자가 원하는 기간을 선택하여 유출해석을 할 수 있도록 설계되었다.

Table 1은 도시유역의 유출해석에 널리 사용되어 왔던 SWMM, ILLUDAS 모형과 본 연구에 이용된 DR3M-II 모형의 장단점을 비교한 것이다.

Table 1. Comparison of the rainfall-runoff models

	Strong point	Weak point
ILLUDAS	- 관망 유출해석의 안정성 - 관망의 통수능 평가기능 양호 - 자료입력의 단순성	- 여러종류의 수리구조물로 구성된 관망에 대한 해석기능 미흡 - 압력류해석 불가능
SWMM	- 관로내의 저류 및 초과용량 분석기능 양호 - 수리구조물에 의한 영향 분석기능 양호 - 오염물질 추적 가능	- 자료입력의 복잡성
DR3M-II	- 자료입력의 단순성 - 매개변수의 최적화 기능 포함 - DR3M-QUAL 모형과 연계하여 오염물질 추적 가능	- 압력류해석 불가능

2.2 모형이론

2.2.1 토양함수조건(soil moisture accounting) 및 침투

DR3M-II 모형에서 침투량 계산은 Green-Ampt식을 사용한다. Green-Ampt식은 Darcy의 법칙을 이론적인 근거로 하고 있으며, 다양한 토양조건에서 좋은 결과를 낼 수 있어 최근 들어 관심을 모으고 있다.

Fig. 1에서와 같이 초기에 균일한 함수비 θ_s 를 갖고 깊이가 무한한 균질 토양기둥이 있다고 가정하자. 강우로 인해 습윤전선이 하향 진행함에 따라 함수비는 θ 에서 포화함수비 θ_s 로 증가한다. 여기서 습윤전선은 습윤토양과 건조토양을 구분하는 경계로 정의된다.

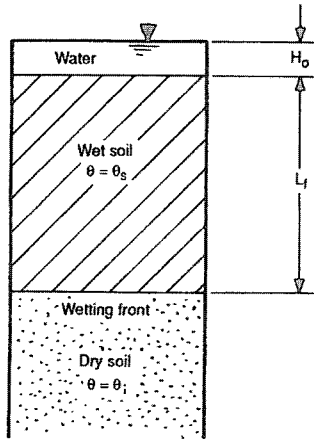


Fig. 1. Green-Ampt Model

지면에 물이 고이는 수심인 담심 H_0 는 매우 작으므로 무시하면 침투율 FR (inch/hr)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$FR = KSAT \left[1 + \frac{PS}{F} \right] \quad (1)$$

$$PS = PSP (\theta_s - \theta_i) \quad (2)$$

여기서 $KSAT$ 는 투수계수(Saturated hydraulic conductivity, in/hr), F 는 습윤토양에서의 누적 침투량(in), θ_s 는 포화함수비, θ_i 는 초기함수비, PSP 는 습윤전선에서의 모관흡인수두(in)이다.

위의 Green-Ampt 공식은 Darcy의 법칙을 응용하여 다음의 가정하에서 얻어졌다.

- (1) 습윤전선이 명확하게 존재한다.
- (2) 습윤전선에서 모관흡인수두는 시간과 공간적으로 일정값을 갖는다.
- (3) 습윤전선 아래에서는 일정한 투수계수를 갖는다.

하지만 실제토양에서는 모관흡인수두가 토양의 함수 상태에 따라 변화한다. DR3M-II는 이러한 문제를 해결하기 위해 Eq. (3)과 같이 RGF와 BMS의 개념을 도입하여 합리적인 PS값을 추적한다. 식에서와 같이 PS는 토양의 함수조건에 따라 함수량 BMS가 0인 wilting point에서를 최고로 하여 BMS의 최대값인 BMSN까지 선형으로 변화한다.

$$PS = PSP \left[RGF - (RGF - 1) \frac{BMS}{BMSN} \right] \quad (3)$$

여기서 RGF는 field capacity에서의 PS에 대한 wilting point에서의 PS의 비, BMS는 토양의 함수량(in), BMSN은 field capacity에서의 토양의 함수량(in)이다.

2.2.2 지표면 유출

DR3M-II는 불투수유역을 유효 불투수지역과 비유효 불투수지역으로 구분한다. 유효 불투수지역이란 강우에 의해 발생하는 지표면유출이 직접적으로 관거나 수로에 유입하는 도로, 주차장 등의 완전포장유역을 의미하며, 비유효 불투수지역이란 불투수 표면에서 발생한 유출이 다시 투수지역으로 유입하는 지역을 의미한다. 예를 들어, 주택의 옥상에서 발생한 유출이 다시 포장되지 않은 마당 등으로 유입하는 경우 등이다. 하지만 실무에서 불투수유역의 면적산정은 지형도, 수치지도 또는 토지이용도 등에 의존할 수 밖에 없는 실정 이므로 유효불투수지역과 비유효 불투수지역을 명확히 구분하여 유출해석에 적용하기는 거의 불가능하다. DR3M-II는 변수의 최적화 과정을 통해 비유효 불투수 지역의 면적을 재산정하고 이를 계산과정에 반영하므로 보다 정확한 유출해석이 가능하다.

2.2.3 하도 및 지표 유출추적

DR3M-II는 하도와 지표흐름추적에 운동과 방정식을 사용한다. 부정부등류인 홍수파의 흐름은 연속방정식과 Saint-Venant 또는 천수방정식으로 불리는 운동량방정식을 이용해 해석할 수 있다. 연속방정식은 질량 보존의 법칙으로부터 유도되며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (4)$$

여기서 Q 는 유출량이며, A 는 흐름단면적, q 는 단위길이 당 측방향유입량(lateral inflow), 그리고 x 와 t 는 공간과 시간을 나타내는 좌표이다. 지표 흐름을 측방향으로 일정하게 흐르는 넓고 수심이 얇은 수로라 가정하면 지표 흐름과 하도흐름은 모두 이 연속방정식의 지배를 받는

다고 할 수 있다.

Newton의 제 2법칙을 하도흐름에 적용하면 운동량 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$S_f = S_0 - \left(\frac{\partial Y}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (5)$$

여기서, Y는 수심이며, V는 평균유속, g는 중력가속도 그리고 S₀와 S_f는 각각 하상경사와 마찰경사를 나타낸다.

운동량방정식은 Eq. (5)의 간략해를 구하기 위해 S_f와 S₀항을 제외한 수면경사와 중력가속도항을 무시함으로써 얻어낼 수 있다.

$$S_f \approx S_0 \quad (6)$$

Eq. (6)의 운동량방정식과 Eq. (4)의 연속방정식을 Manning의 평균유속공식을 이용해 연립하여 풀면 다음 식과 같이 표현된다.

$$Q = \frac{1}{n} A \cdot R^{2/3} S_0^{1/2} \quad (7)$$

여기서, n과 S₀는 상수이므로 윗식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Q = \alpha A^m \quad (8)$$

여기서, α와 m은 경사, 조도계수, 형태 등에 의해 결정되는 상수이다. DR3M-II는 Eq. (8)의 해를 구하기 위해 프로그램내에서 특성법 및 Explicit, Implicit 유한차분법의 3가지 방법을 제공하며 사용자가 선택하여 적용할 수 있다.

2.2.4 매개변수의 최적화

DR3M-II는 매개변수의 적정값을 추정하기 위해 프로그램내에 자체적으로 최적화기법을 포함하고 있다. 최적화 기법은 수문학 분야에서 보편적으로 많이 쓰이고 있는 Rosenbrock 기법(Rosenbrock, 1960)이며, 이를 이용하여 최적의 매개변수를 결정할 수 있도록 하였다. Rosenbrock 기법은 대표적인 시행오차법이며, 매개변수를 변화시켜가면서 목적함수를 계산하는 과정을 반복하여 최적화된 값을 찾는다. Fig. 2는 최적화과정의 흐름도이다.

3. 모형의 검정 및 검증

3.1 대상유역

모형의 적용을 위한 대상유역은 Fig. 3과 같이 경기

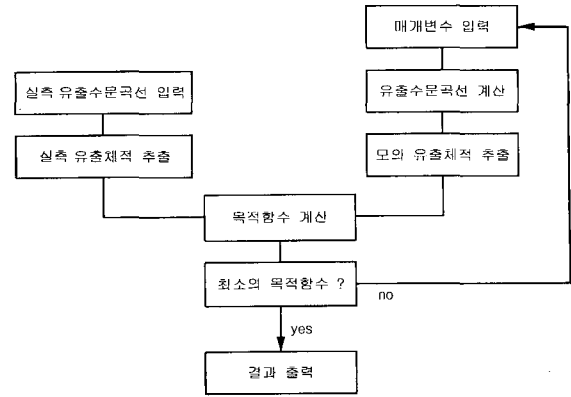


Fig. 2. Flow chart of parameter optimization

도 군포시 오금동일대로써 1990년대초 산본신도시 개발의 일부로써 편입된 지역이다. 안양천의 지류인 산본천 유역의 일부이며, 유역내 최고표고는 189m, 최저표고는 60m이다. 유역의 60% 이상이 산림지역이며, 유역면적은 약 1.302km²이다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 대상유역은 도시화된 지역을 중심으로 분지형태를 띠고 있다. 삼면이 산지유역으로 둘러 싸여 있어 유역의 경사가 가파르며, 강우시 단시간 내에 유출이 발생할 것으로 판단된다.

3.1.1 토지이용 현황

토지이용 현황은 대상유역의 유출특성을 파악하기 위한 중요한 인자 중의 하나이다. 특히 유역의 불투수여부는 유출량 및 도달시간에 절대적인 영향을 미치므로 이를 정확히 파악해야 할 것이다.

Fig. 4는 국립지리원에서 제작 배포한 1/2,5000 토지이용 현황도에서 대상유역만을 추출한 것이다. 유역내에서 토지이용별 점유면적을 산정하기 위해 GIS 소프트웨어인 Arcview를 이용하여 각 용도별 레이어를 추출하고, 면적비를 구하였다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 대상유역은 산림이 60% 이상을 차지하고 있으며, 주거지가 약 22%, 도로가 약 7.5%를 차지하고 있다. 대상유역은 90년대 초에 건설된 신도시 지역으로 거의 대부분의 주거지가 아파트 등의 공동주택으로 되어 있다.

3.1.2 토양 특성

대상유역의 토양분포를 파악하기 위해 농촌진흥청에서 제작한 1/25,000 정밀토양도를 이용하였으며, Table 2는 대상유역에서의 SCS 토양 type별 면적비를 정리한 것이다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 본 대상유역은 비교적 투수상태가 양호한 Type B의 양토와 사양토가 85.7%로 대부분의 면적을 차지하고 있다.

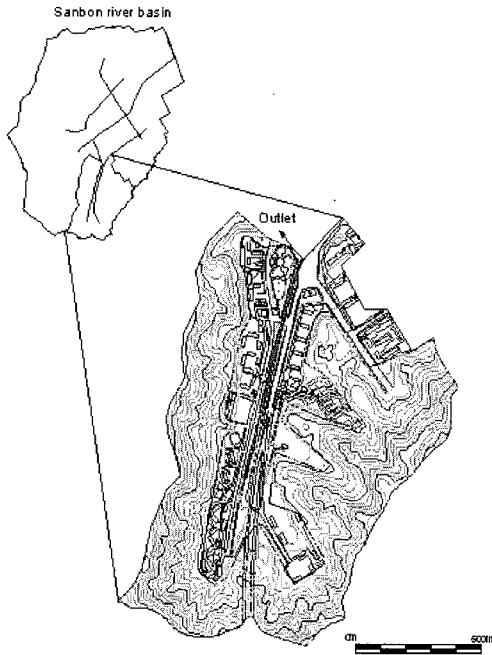


Fig. 3. Sanbon basin

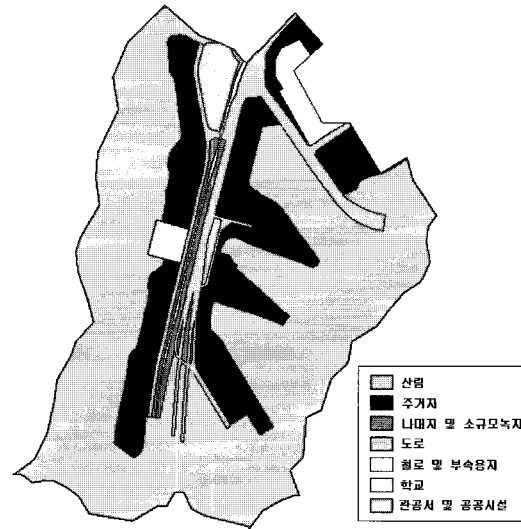


Fig. 4. Land use map of Sanbon basin

Table 2. Ratio of area based on soil type

Soil type	Area (km ²)	Ratio of area (%)
A	0.000	0.0
B	1.116	85.7
C	0.186	14.3
D	0.000	0.0
Total	1.302	100.0

3.1.3 소유역 분할

모형의 입력자료 구성을 위해 대상유역을 Fig. 5와 같이 24개의 소유역으로 구분하였다. 소유역의 구분은 모의결과의 정확도에 영향을 미칠 수 있는 주요한 인자이므로, 유출해석시 지표면의 특성을 잘 반영할 수 있도록 대상유역에 위치한 우수관거의 단면형태 및 크기, 토지이용현황, 등고선 및 지반고에 따른 우수의 흐름방향 등을 종합적으로 고려하여 유역을 분할하였다.

3.1.4 우수관망

대상유역은 1990년대초 신도시 건설시 하천정비를 통해 기존하천을 복개하고 하수관과 우수관을 분리 설치한 지역이다. 관망도의 작성은 산본지구 대지조성사업 실시설계보고서(대한주택공사, 1990)의 우수관망도(축척 1/1200)를 이용하였으며, Fig. 6과 같이 대상유역의 관망은 5개의 합류점을 갖는 수지상의 형태를 보이고 있다. 중앙부를 관통하는 주수로는 복개되어 콘크

리트 Box형태로 되어 있으며, 모형의 입력자료 구성을 위해 수로의 형태 및 직경, 소유역분할, 합류여부에 따라 16개의 수로로 세분하였다. Table 3은 대상유역내의 우수관거 현황을 나타낸 것이다.

3.2 실측 유출자료

모형의 신뢰도를 평가하기 위한 과정은 검정과 검증의 2단계로 구분하는 것이 보통이다. DR3M-II와 같이 국내유역에 대한 적용사례가 전무한 경우에는 매개변수의 선정시 적정범위를 결정하기 위한 검정과검증과 모형결과의 검증과정 등을 통하여 그 신뢰성을 입증할 만한 절차가 선행되어야 할 것이다.

검정 및 검증을 위한 호우사상 및 유출수문곡선은 자기수위계 및 유속계를 설치하여 실측한 자료를 이용하였으며, 측정일시 및 현황은 Table 4와 같다.

이들 자료중 모형의 검정에 사용할 호우사상을 선정하기 위해 각 호우사상 전·후의 강우자료를 획득하여 검토하였으며, 선행강우의 영향을 비교적 덜 받은 것으로 판단되는 8월 23일 자료를 선정하였다.

Table 4에서와 같이 8월 8일 호우는 3개의 첨두유출량을, 8월 23일의 호우는 2개의 첨두유출량을 갖는 복합 호우사상이며, 이들 5개의 첨두유출량을 이용하여 모형의 검증작업을 실시하였다.

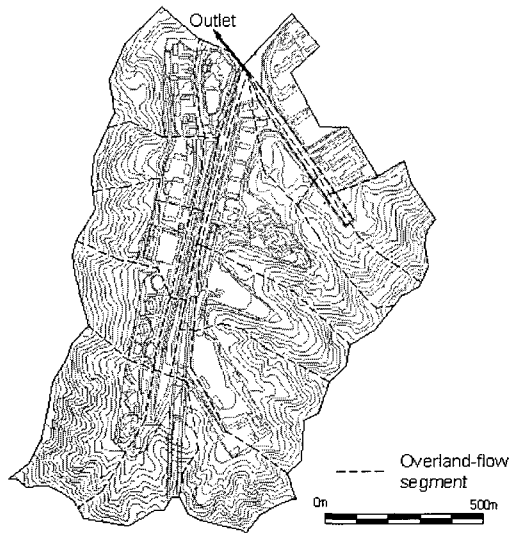


Fig. 5. Overland flow segments

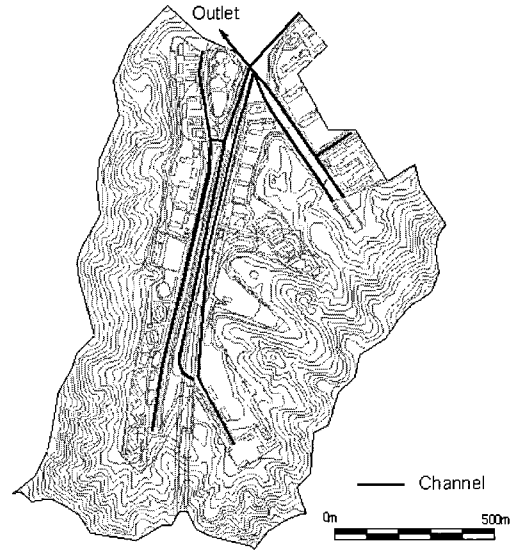


Fig. 6. System of pipes and channels

Table 3. Physical characteristics of Channel segments

box		Pipe	
Size(m×m)	Length(m)	Diameter(m)	Length(m)
1.5×1.5	1000.0	0.8	220.0
2.0×1.5	280.0	0.9	205.0
2.0×2.0	1070.0	1.0	1017.0
3.0×2.0	19.0	1.1	582.0
2×2.5×2.0	35.0	1.2	264.0
Total	2404.0	Total	2288.0

Table 4. Precipitation and peak discharges measured at Sanbon basin

Storm date and time	Total rainfall (mm)	Duration (min)	Peak discharge (m ³ /sec)
8th Aug. 1995 19:50 ~ 23:20	67	210	Q _{p1} = 8.10 Q _{p2} = 3.24 Q _{p3} = 3.57
23rd Aug. 1995 15:00 ~ 17:10	36	130	Q _{p1} = 8.10 Q _{p2} = 5.40

3.3 모형의 검정

검정은 모의결과와 실측자료와의 비교분석을 통해 적정 매개변수를 추정하는 과정이다. 본 연구에서도 실측 자료를 이용하여 매개변수에 대한 최적화를 수행하였으며, 이를 통해 최적의 매개변수 값을 결정하였다. 최적화 과정은 Fig. 2에서와 같이 두 단계로 나누어 볼 수 있다. 첫 단계로, 실측된 유출수문곡선을 이용하여 유출체적을 계산하고, 두 번째로 이를 기준으로 반복적인 시행오차

법을 통해 최적화된 매개변수 값을 찾아내는 것이다.

3.3.1 변수의 초기값 선정

Table 5는 DR3M-II 모형의 주요 매개변수들과 그 정의의 나타낸 것이다. 표에서와 같이 투수지역에서의 토양함수조건과 침투능을 계산하기 위해 각각 매개변수 BMSN, EVC, RR과 KSAT, PSP, RGF를 사용한다. 또한 EAC, RAT 그리고 IMP를 사용해 각각 유효 불투수지역의 면적 및 저류깊이를 정의한다. DR3M-II에서

Table 5. Definitions of parameters used in DR3M-II

Parameter	Definition
Soil moisture accounting	
BMSN	field capacity에서의 토양의 함수량(in)
EVC	실측 접시증발량을 잠재적인 증발산량으로 환산하기 위한 계수
RR	토양으로 침투하는 일강우량의 비율
Infiltration	
KSAT	Green-Ampt공식에서의 투수계수(in/hour)
PSP	습윤전선에서의 모관흡인수두(in)
RGF	field capacity와 wilting point에서의 모관흡인수두에 의한 침투량(PS)의 비
Effective impervious area	
EAC	유효 불투수지역 면적 보정계수
RAT	투수지역면적에 대한 투수지역과 비유효 불투수지역면적의 합 의 비
ALPADJ	유출추적계수 의 보정계수

Table 6. Initial values and typical ranges of parameters

Parameter	Initial value	Typical range	Unit
BMSN	3.50	2.00 ~ 6.00	in
EVC	0.70	0.50 ~ 1.00	-
RR	0.90	0.70 ~ 0.95	-
KSAT	0.35	0.05 ~ 1.20	in/hr
PSP	5.00	0.50 ~ 8.00	in
RGF	10.00	5.00 ~ 20.00	-
EAC	1.00	0.85 ~ 1.15	-
RAT	1.044	-	-
ALPADJ	1.00	0.70 ~ 1.50	-

는 증발 뿐 만이 아니라 ponding, wetting 등으로 인한 지표면 저류에 의한 손실까지도 고려하므로 유효 불투수지역에서의 표면저류깊이가 유출체적에 영향을 미치는 중요한 인자가 되며, 보다 정확한 유효우량의 산정이 가능하다. IMP의 초기값은 0.05inch(약 1.3mm)로 선정하였다.

수치지도와 지형도, 토지이용도 등을 이용하여 대상구역에서의 불투수지역 면적을 산정하였으며, 전체면적에 대한 불투수지역 면적비는 35.4%, RAT는 1.044이다. EAC의 초기입력값은 1.00을 선택하였다.

변수 ALPADJ는 Eq. (8)에서 운동과 방정식의 계수의 보정에 사용되며 구역의 조도, 경사 및 형상에 복합적으로 관련되는 계수이다. 본 연구에서는 Eq. (8)의 해를 구하기 위해 explicit 유한차분법을 이용하였으며, 시간간격은 60초로 하였다.

이상 모든 매개변수들의 초기값은 문헌고찰 및 미국 내 여러 지역에서의 적용예(Timothy, 1999), 대상구역에서의 토양의 분포 및 선행 토양함수조건 등을 분석하여 선정되었으며, 다음의 Table 6와 같이 User's

manual(Alley and Smith, 1982)에서 제안하는 적용범위 내에서 선택되었다.

3.3.2 검증결과

Rosenbrock기법을 이용한 최적화과정을 통해 매개변수의 최적값을 유도하였다. Table 7은 최적화과정 전·후의 매개변수 값을 나타낸 것이다. 매개변수중 EVC와 RR 그리고 KSAT와 PSP는 상호 연관성이 크므로 EVC와 KSAT는 초기값에 고정시키고 RR과 PSP에 대한 최적화만을 수행하였다.

Table 7의 최적값을 이용하여 대상구역의 유출해석을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 보정전은 변수의 초기선정값을 이용한 유출수문곡선이며, 보정후는 최적값을 이용한 유출수문곡선이다. 대상호우사상은 2개의 침투유출량을 갖는 복합호우사상이므로 이중 큰 값인 Q_{p2} 를 침투유출량으로 가정하고 보정을 실시하였다. Fig. 7에서 보이는 바와 같이 보정후의 침투유출량 및 수문곡선의 변화양상은 실측값과 전체적으로 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Table 7. Initial and optimized values of parameters

Parameter	Initial value	Optimized value	Unit
BMSN	3.50	2.69	in
EVC	0.70	0.70	-
RR	0.90	0.73	-
KSAT	0.35	0.35	in/hour
PSP	5.00	6.10	in
RGF	10.00	15.74	-
EAC	1.00	1.00	-
RAT	1.044	1.075	-
ALPADJ	1.00	1.00	-

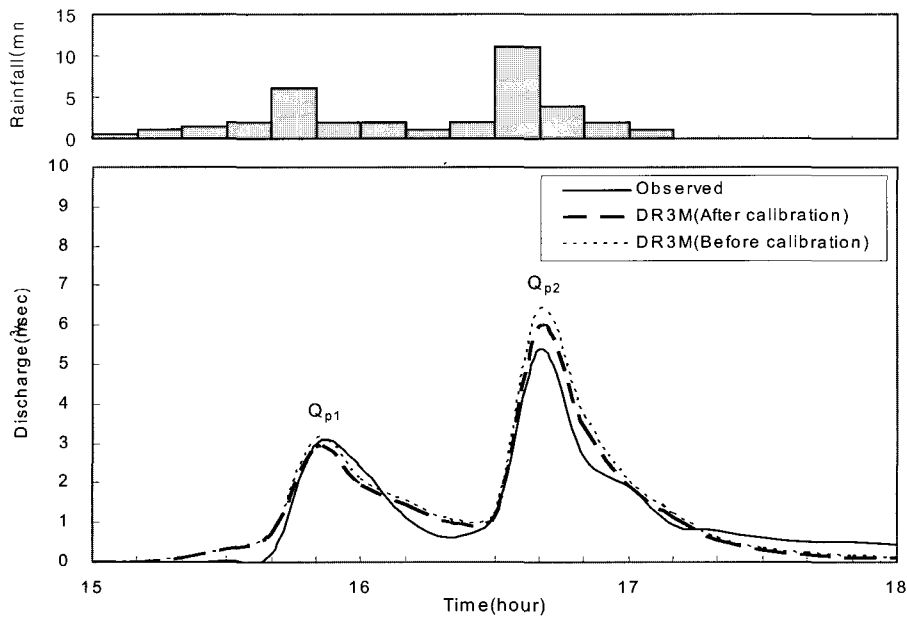


Fig. 7. Comparison of observed and simulated discharges on 23rd August

Table 8은 보정 전·후의 유출양상을 비교한 것이다. 보정전과 비교할 때 보정후의 유출체적은 11.6mm에서 10.8mm로 약 7.5%, Q_{p2} 는 $6.39\text{m}^3/\text{sec}$ 에서 $5.98\text{m}^3/\text{sec}$ 로 약 7.1% 감소되었다. 이로 인해 보정전의 유출체적은 실측값과 비교할 때 10.4%의 오차를 보였으나 보정후 2.4%로 오차가 줄어들었다. Q_{p2} 의 경우는 18.3%에서 10.7%로 오차가 감소하였다. 비유효 불투수지역의 면적

은 전체유역면적의 2.8%에서 4.8%로 보정 후 약 2%의 증가를 보였으며, 같은 양 만큼의 유효 불투수지역 면적이 감소하였다.

이상의 결과로 불 때 매개변수의 최적값을 이용한 유출체적의 보정은 상당히 만족스러운 결과를 보였으며, 신뢰할 만한 유출수문곡선을 유도하였다고 판단된다.

Table 8. Summary of calibration results

		Ratio of noneffective impervious area (%)	Ratio of effective impervious area (%)	Ratio of pervious area (%)	Runoff volume (mm)	Q_{p2} (m^3/sec)
Observed value		2.8	32.6	64.6	10.5	5.40
Simulated value	Before calibration	2.8	32.6	64.6	11.6	6.39
	After calibration	4.8	30.6	64.6	10.8	5.98

3.4 모형의 검증

검정과정을 통한 모의 결과의 신뢰성을 검증하기 위한 작업을 수행하였다. 적정매개변수를 유도하였는지를 검토하기 위해 최적화과정을 통해 계산된 매개변수 값을 이용하여 검정과정에 포함되지 않은 8월 8일 호우사상에 대한 모의를 수행하였다. Fig. 8은 8월 8일 호우사상에 대한 실측과 모형의 유출수문곡선을 나타낸 것이다. Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이 수문곡선의 형태와 첨두유출량의 발생시각은 실측값과 잘 일치하는 결과를 보여주었다. 하지만 유출발생의 초기부분인 20시에서 21시 사이에서는 첨두유출량과 유출체적 모두 어느 정도 오차를 보였다.

모의결과의 분석을 위해 다음 Eq. (11)과 같은 중앙절대편차(MAD)값을 이용하였으며, 이를 통해 첨두유출량과 유출체적의 모의오차를 계산하였다.

$$MAD = 100 \times \text{median} |e_i|$$

$$e_i = \frac{(x_{oi} - x_{mi})}{x_{oi}} \quad (11)$$

여기서 x_{oi} 와 x_{mi} 는 각각 i 번째 실측과 모형값을 의미한다. MAD분석을 통해 모의결과의 신뢰성을 파악하였으며, 결과는 Table 9과 같다. 첨두유출량의 오차는 최소 2.0%에서 최고 14.7%의 값을 나타내었으며, MAD는 7.4%로 상당히 양호한 결과를 보여주었다. 유출체적의 경우 8월 8일 호우사상에 대한 모의결과 실측값과 15.9%의 오차를 보였다.

Fig. 9은 실측치와 모의치간의 편차를 나타낸 것으로 중앙 부분의 사선은 실측한 첨두유출량 Q_{po} 와 모의된 첨두유출량 Q_{pm} 이 일치할 경우를 의미한다. 자료분포점이 사선보다 아래 부분에 위치해 있을 경우는 실측값이 모의값보다 클 때이고 윗부분에 위치해 있을 경우는 모의값보다 작을 때이다. Fig. 9에서 나타난 바와 같이 대부분의 값이 사선의 주위에 분포하여, 모의결과가 상당히 양호함을 알 수 있다.

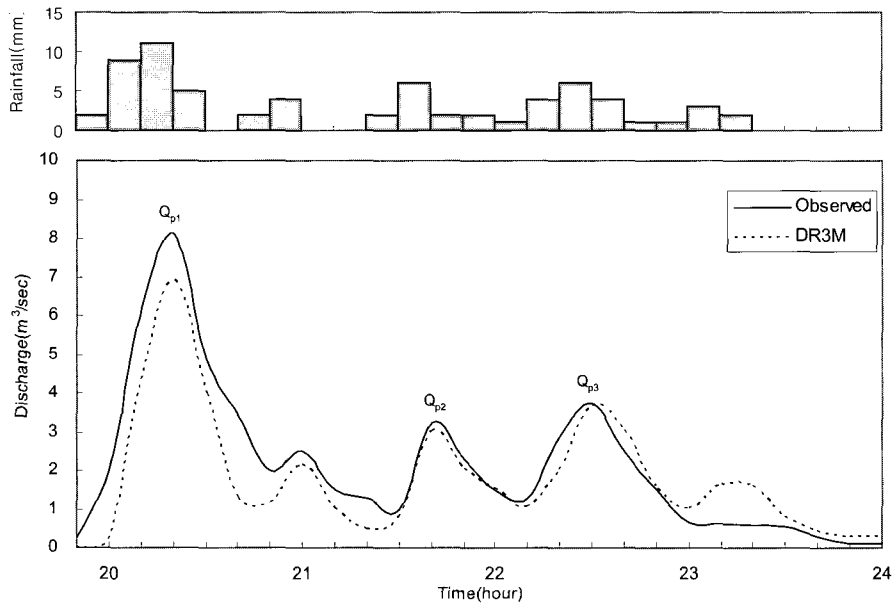


Fig. 8. Comparison of observed and simulated discharges on 8th August

Table 9. Summary of verification results

Storm Date	Peak discharge(m ³ /sec)		$\frac{ Q_{po} - Q_{pm} }{Q_{po}}$ (%)
	Q_{po}	Q_{pm}	
8th August			
Q_{p1}	8.10	6.91	14.7
Q_{p2}	3.24	3.01	7.0
Q_{p3}	3.75	3.67	2.0
23rd August			
Q_{p1}	3.00	2.93	2.5
Q_{p2}	5.40	5.98	10.7
MAD			7.4

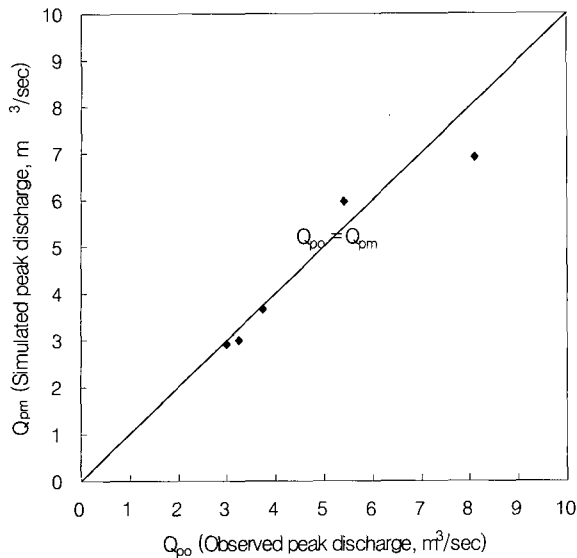


Fig. 9. Relation between observed and simulated peak discharges

4. 민감도 분석

민감도분석은 매개변수의 변화에 따라 모형결과에 대한 상대적인 변화의 척도를 검토하는 과정으로 정의할 수 있으며, 결과의 확실성 또는 불확실성 수준에 대한 정보를 제공하는 점에서 필요한 사항이다. 민감도분석은 단일 매개변수의 영향을 고립시켜 해석하는 것을 원칙으로 하였으며, 변수값의 변화는 $\pm 30\%$ 범위 안에서 실시하였다.

4.1 대상 호우사상

강우의 지속시간은 60분으로 하였으며, 강우강도는 3가지를 선정하였다. Table 10과 같이 강우강도의 변화에 따른 변수의 민감도를 분석하기 위해 강우강도를 비교적 작은 강우강도(low intensity)와 재현 기간 2~3년의 중간정도의 강우강도(mid intensity), 그리고 재현기간 약 30~50년에 해당하는 큰 강우강도(high intensity)로 구분하였다.

모형의 입력자료 구성을 위해 지속시간동안 내린 총 강우량을 Huff의 방법을 통하여 시간적으로 분포시켰다. 대상유역의 인근에 위치한 강우관측소 중 가장 신뢰할 만한 강우자료를 확보하고 있는 강우관측소는 서

울관측소이다. 건설교통부(2000)에서는 과거 71년간의 서울지역 강우자료를 분석하여 Huff가 제안한 강우량의 시간적분포를 나타내는 무차원 시간분포곡선을 10% 확률간격으로 제시하였다. 제시된 연구결과에서 중기간의 호우에서는 Huff의 제 2구간 호우가 지배적인 것으로 나타났으며, 본 연구에서도 이를 이용하였다. 강우의 시간간격은 5분으로 하였으며, Fig. 10은 각 강우강도별 시간분포이다.

4.2 민감도 분석결과

민감도 분석시 매개변수는 기준값을 중심으로 $\pm 30\%$ 까지 변화시켜 가며 적용하였다. 기준이 되는 값은 3장의 최적화 과정시 도출된 값이며 이를 기준으로 10%씩 증가 또는 감소시켜 나갔다. 분석에 이용된 매개변수는 BMSN, EVC, KSAT, PSP, RGF, 유효 불투수지역 면적, ALPADJ, IMP이다. 이들 중 BMSN, EVC는 토양의 함수조건 그리고 KSAT, PSP, RGF는 침투능, ALPADJ는 조도계수와 유역경사, IMP는 불투수유역에서의 지류깊이를 정의하는 변수이다. Fig. 11은 각 강우강도별 민감도 분석 결과로써, Fig. 11에서 x축은 매개변수의 변화율이며, y축은 이에 따른 침투유출량 또는 유출체적의 변화를 나타낸다. 각 매개변수별 민감도 분석결과는 다음과 같다.

1) BMSN

Fig. 11 (d)에서와 같이 중간 강우강도의 비가 올 경우 -30% 의 변수변화율에서 약 $+6\%$ 의 유출체적 변화를 보였다. 이때의 침투유출량 변화는 약 $+2\%$ 로 유출체적이 더 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 하지만 이외의 호우사상에서는 전체적으로 1~2%의 낮은 민감성을 나타내 유출양상에는 큰 영향을 미치지 못하는 인자인 것으로 나타났다.

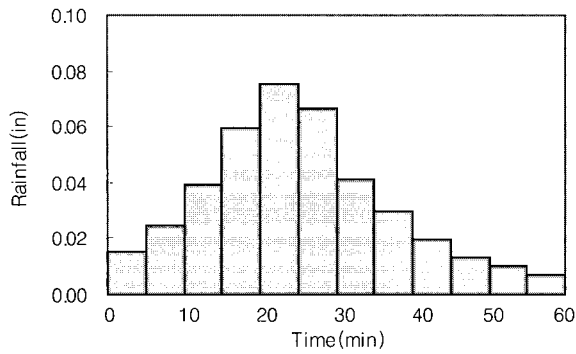
2) EVC

EVC는 유출양상에 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 중간의 강우강도에서 약 1~2% 정도의 유출체적 및 침투유출량의 변화를 보였으나, 그 이외의 강우강도에서는 유출양상의 변화가 거의 없었다. EVC 값이 작을 수록 유출값은 크게 나타났다.

Table 10. Hypothetical rainfall intensities for sensitivity analysis

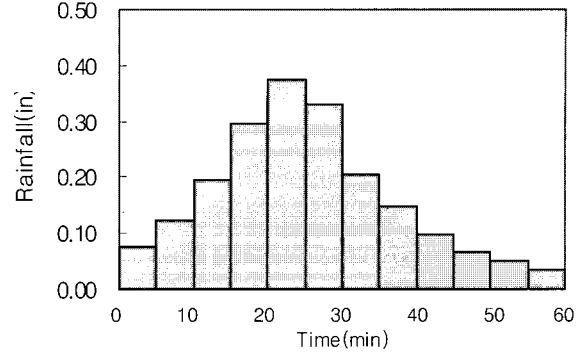
Duration (min)	Hypothetical rainfall Intensity(in/hour)		
	low	mid	high
60	0.4	2.0	4.0

Duration=60min, Intensity=0.4in/hr



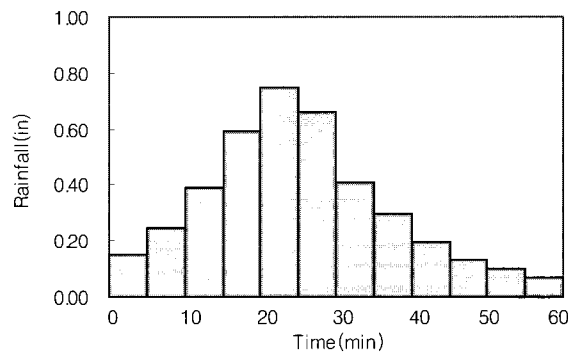
(a) low intensity

Duration=60min, Intensity=2.0in/hr



(b) mid intensity

Duration=60min, Intensity=4.0in/hr



(c) high intensity

Fig. 10. Hyetographs of hypothetical storms

3) KSAT, PSP

KSAT와 PSP는 거의 유사한 반응을 보였으며, 변수 값이 커질수록 유출체적 및 첨두유출량은 감소하는 것으로 나타났다. 작은 강우강도에서는 첨두유출량이나 유출체적에 거의 영향을 미치지 못하였으나, Figs. 11(e) and (f)에서와 같이 큰 강우강도에서는 최고 약 6%의 반응을 보여 유출양상에 영향을 미치는 중요한 인자들인 것으로 나타났다.

4) RGF

Fig. 11(d)에서와 같이 중간 강우강도의 비가 올 경우 -30%의 변수변화율에서 약 +4%의 유출체적 변화를 보였다. 이때의 첨두유출량 변화는 약 -2%로 유출체적이 더 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 하지만 이외의 호우사상에서는 유출양상에는 큰 영향을 미치지 못하는 인자인 것으로 나타났다. RGF 값이 커질 수록 유출은 감소하는 것으로 나타났다.

5) 유효 불투수지역 면적

Figs. 11(a) ~ (d)에서와 같이 작은 강우강도 및 중

간 강우강도의 호우사상에서는 변수의 변화에 따라 최고 약 40%의 변화율을 보여 유효 불투수지역의 면적비가 첨두유출량 또는 유출체적에 가장 큰 영향을 주는 인자로 나타났다. 하지만 Fig. 11(e) and (f)에서와 같이 큰 강우강도에서는 약 5%정도의 변화를 보여 유출양상에 그다지 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 작은 강우강도일수록 유출체적보다는 첨두유출량의 변화에 더 민감한 영향을 미치는 것으로 나타났으나 큰 강우강도에서는 유출체적이 더 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

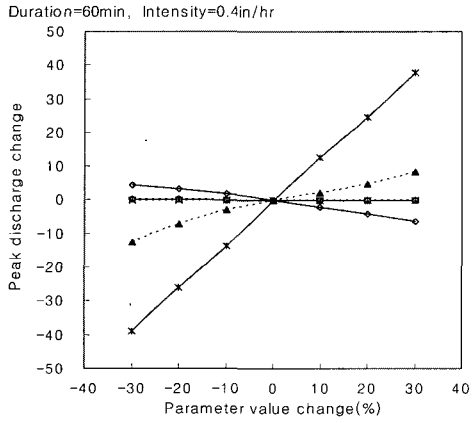
6) ALPADJ

전체적으로 ALPADJ는 유출체적 보다는 첨두유출량의 변화에 더 민감한 영향을 주는 것으로 나타났다. Figs. 11(a) and (e)에서와 같이 강우강도가 작거나 클 경우는 ALPADJ가 첨두유출량의 변화에 영향을 미치는 중요한 인자중 하나로 나타났으며, Fig. 11 (e)에서와 같이 큰 강우강도의 호우사상에서는 -30%의 변수변화율에서 약 -14%의 변화를 보여 첨두유출량에 가장 중요한 영향을 미치는 인자인 것으로 나타났다.

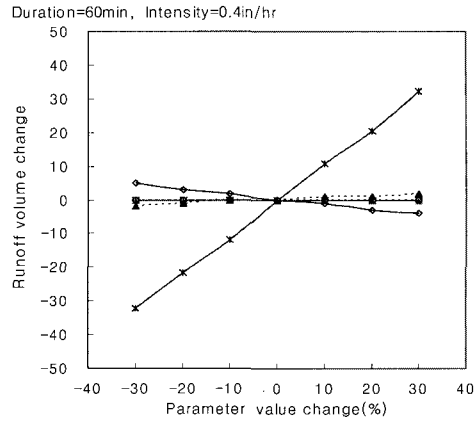
7) IMP

IMP의 변화는 작은 강우강도의 비가 내릴 경우에는 Figs. 11(a) and (b)에서와 같이 유출양상에 비교적 민감한 영향을 주는 인자로 나타났으나, 강우강도가 커질

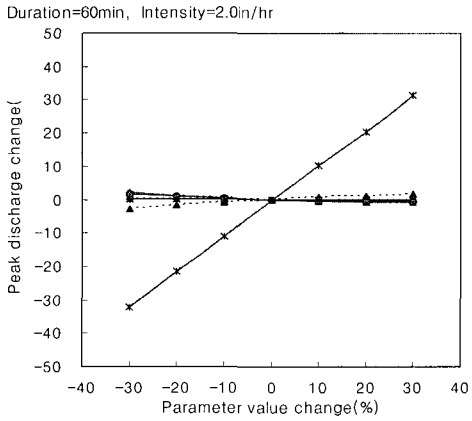
수록 둔감해지는 것으로 나타났다. 유출체적보다는 첨두유출량이 더 민감하게 반응하는 것으로 나타났으나 그 차이는 크지 않았다.



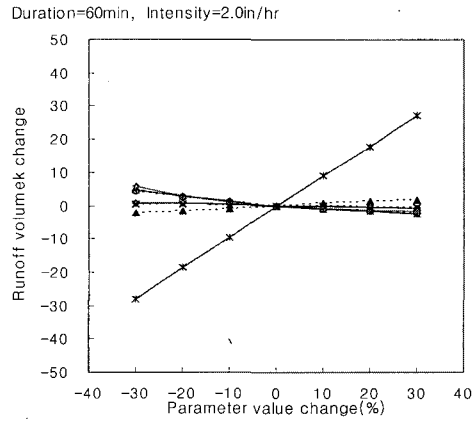
(a) Peak discharge sensitivity(low intensity)



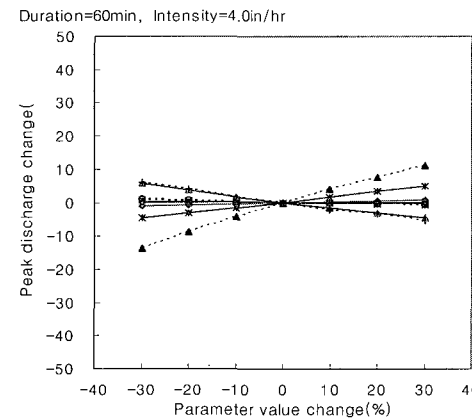
(b) Runoff volume sensitivity(low intensity)



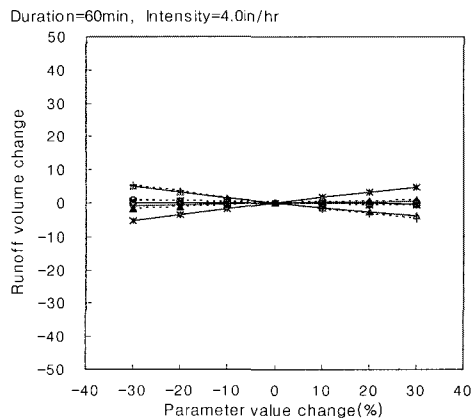
(c) Peak discharge sensitivity(mid intensity)



(d) Runoff volume sensitivity(mid intensity)



(e) Peak discharge sensitivity(high intensity)



(f) Runoff volume sensitivity(high intensity)

—○— B M S N
 - - - + - - - K S A T
 - - - ● - - - R G F
 - - - ▲ - - - A L P A D J

- - - × - - - E V C
 - - - ▲ - - - P S P
 - - - * - - - E f f e c t i v e i m p e r v i o u s a r e a
 - - - ○ - - - I M P

Fig. 11. Sensitivity analysis results for hypothetical storms of varying intensity for selected parameter values

5. 결론

본 연구에서는 미국 지질조사국의 강우-유출 모형 DR3M-II를 이용해 소규모 도시유역에 대한 유출해석을 수행하여 국내유역에서의 적용성을 검증하였다.

실측값을 이용해 최적 매개변수를 유도하였으며, 매개변수들에 대한 침투유출량 및 유출체적의 민감도 해석을 통해, 도시유역의 유출특성을 규명하고, 모형운용 시 적정 매개변수 값을 선정하기 위한 기초자료를 제시하였다.

- 1) 매개변수에 대한 최적화과정을 통해 대상유역에서의 최적 매개변수 값을 유도하였으며, 이를 이용한 유출해석으로 해석결과의 정확도를 제고하였다. 모의된 유출체적은 실측값과 비교할 때 2.4%, 침투유출량은 10.7%의 오차를 보였으며, 신뢰할 만한 유출수문곡선을 유도하였다.
- 2) 모형의 검증을 위해 모형과 실측 침투유출량간의 모의오차를 계산하였으며, 평균 7.4%의 오차를 보였다.
- 3) 민감도 분석결과 비교적 작은 강우강도의 비가 내릴 경우는 유효 불투수지역의 면적이 침투유출량이나 유출체적에 가장 민감한 영향을 미치는 인자였으나, 30~50년 빈도의 큰 강우강도에서는 매개변수 ALPADJ로 정의되는 조도계수나 유역경사가 가장 민감한 영향을 미치는 인자인 것으로 나타났다. KSAT(침투계수)와 PSP(모관흡인수)등으로 정의되는 침투능은 1~2년 빈도의 비교적 작은 강우강도의 비가 내릴 경우는 유출양상에 거의 영향을 미치지 못하였으나, 30~50년 빈도의 큰 강우강도에서는 유출양상에 영향을 미치는 주요한 인자들 중의 하나인 것으로 나타났다. 대체적으로 유출체적은 침투능이나 토양함수조건을 정의하는 매개변수에 보다 민감한 반응을 보였으며, 침투유출량은 조도계수나 유역경사를 정의하는 매개변수에 보다 민감한 반응을 보였다.

본 연구결과는 도시화된 소규모 배수유역에서 강우로 인한 유출양상의 분석 및 최근 관심을 끌고 있는 신도시나 기업도시 등의 소규모 도시개발 계획시 선행되어야 할 수문해석의 신뢰성을 높이기 위해 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 건설교통부 (2000). 1999년도 수자원관리기법개발 연구조사 보고서, pp. 53~58.
- 대한주택공사 (1990). 산본지구 대지조성사업 실시계획 보고서, pp. 50~53.
- 이종태, 이상태 (1997). “도시유역에서의 강우 공간분포 및 소유역분할이 유출특성에 미치는 영향.” 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제30권, 제2호, pp. 177~191.
- 전병호, 원석연 (1994). 택지개발지구의 수리해석 기법 연구 : 도시유출모형에 관한 연구, 대한주택공사, pp. 78~123.
- 한국회, 이길춘 (1996). “도시화 유역에서의 홍수 유출 특성.” 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제29권, 제3호, pp. 153~161.
- Alley, W.M., and Smith, P.E. (1982). *Distributed routing rainfall runoff model-version II*, U.S. Geological Survey Open-File Report, 82-344, 201 p.
- Dawdy, D.R., Lichty, R.W., and Bergman, J.M. (1972). *A rainfall-runoff simulation model for estimation of flood peaks for small drainage basins*, U.S. Geological Survey Professional Paper, 506-B, 28 p.
- Dawdy, D.R., Schaake, J.C., Jr., and Alley, W.M. (1978). *User's guide for distributed routing rainfall-runoff model*, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigation Report, 78-90, 146 p.
- Leclerc, Guy, and Schaake, J.C. (1973). *Methodology for assessing the potential impact of urban development on urban runoff and the relative efficiency of runoff control alternatives*, Ralph M. Parsons Laboratory Report. No. 167, Massachusetts Institute of Technology, 257 p.
- Rosenbrock, H.H. (1960). “An automatic method of finding the greatest or least value of a function.” *Computer Jour.*, Vol. 3, pp. 175~184.
- Timothy P. Brabets. (1999). *Precipitation-runoff, suspended-sediment, and flood-frequency characteristics for urbanized areas of Elmendorf air force base, Alaska*, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 98-4265, 34 p.

(논문번호:05-76/접수:2005.06.03/심사완료:2005.07.13)