

대도시 복합유역의 지표 및 지표하 유출해석기법 개발 (II) - 분석 및 적용 -

A Development of Method for Surface and Subsurface Runoff Analysis in Urban Composite Watershed (II) - Analysis and Application -

곽 창 재* / 이 재 준**

Kwak, Chang Jae / Lee, Jae Joon

Abstract

In this study (II), the module developed in the previous study (I) has been tested on application and numerical stability. The runoff module was compared the result of analysis with two different models (FFC2Q and VfloTM) considering characteristic of infiltration. To examine the application and stability of developed module, runoff aspect was simulated under the variety case of rainfall intensity, effective soil depth, elapsed time. The development module was presented typical type of infiltration process looking physically, the different of saturation point on soil type, and characteristic of soil type. Also, the module was reflected in the runoff feature about rainfall intensity and time distribution. Finally, this paper drew a conclusion that result of rainfall-runoff analysis as compared with difference models (FFC2Q and VfloTM) has a high accuracy.

Keywords : surface runoff, subsurface runoff, soil layer, application, stability

요 지

본 연구 (II)에서는 앞선 연구 (I)에서 개발된 지표 및 지표하 유출해석 모듈의 적용성과 수치해석적인 안정성에 대한 분석하였다. 개발 모듈의 유출해석에서 기존 강우-유출해석 모형에 비해 특징적인 침투해석에 관한 모의를 위해 침투해석 방식이 서로 다른 FFC2Q모형과 VfloTM을 비교대상으로 선정하여 동일한 투수층 유역에 적용하여 모의 결과를 비교분석해 보았으며, 강우의 크기와 토양의 유효토심 및 강우발생시점부터 강우종료 후 경과시간에 대한 모의조건을 설정하여 개발모듈의 적용성과 해석결과의 안정성을 검토해 보았다. 이상의 테스트에서 본 연구의 개발 모듈은 침투과정을 물리적으로 나타내는 전형적인 형태를 잘 나타내었으며, 토양조건 별 포화시점도 상이하였고, 수두가 증가되는 기울기도 다르게 구현함으로써 토양별 특성치를 비교적 잘 보여주었다. 또한, 강우강도가 유출에 미치는 영향과 시간분포에 대한 모의결과도 잘 반영하였으며, 마지막으로 타 모형과의 비교결과에서도 강우-유출해석에 대한 정확도가 높게 평가될 만한 결과를 도출하였다.

핵심용어 : 지표 유출, 지표하 유출, 토양층, 적용성, 안정성

* 금오공과대학교 대학원 토목공학과 박사수료 (e-mail: water@kumoh.ac.kr)

ABD / School. of Civil Engrg., Kumoh National Institute of Technology, Daehak-ro 61, Gumi, Gyeongbuk 730-701, Korea

** 교신저자, 금오공과대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사 (e-mail: jhb365@kumoh.ac.kr)

Corresponding Author, Professor / Ph.D., School. of Civil and Environmental Engrg., Kumoh National Institute of Technology, Daehak-ro 61, Gumi, Gyeongbuk 730-701, Korea

1. 서론

도시에서 발생하는 유출은 도시를 관류하는 하천 또는 유역의 외곽에 흐르는 하천이 출구점이 되는 경우가 일반적이다. 이러한 유출현상은 지표면에서 직접적으로 발생하는 지표 유출과 유역내 투수층 토양을 통해 침투되어 지하수로 유입되거나 토양내의 공극을 따라 흐름이 형성되는 지표하 유출로 구분된다. 지표 유출의 경우 유역내의 토지이용상황에 따라 불투수유역에서는 강우의 거의 모두가 유출로 이어지지만, 투수유역은 일단 토양층 내부로 침투되게 되며, 토양층이 포화상태에 이르러서야 비로소 지표 유출이 발생하게 된다. 대개 지표 유출량이 하천에 이르는 속도에 비해 지표하 유출은 상당히 느리게 발생하므로 도시유역의 유출해석 시에는 지표하 유출을 거의 고려하지 않고 있다. 지표하 유출을 배제한 채 지표 유출만을 산정하기 위해서는 유역내의 투수유역에 해당하는 토양층의 유효토심, 투수성, 침투율, 습윤도와 같은 특성을 고려하여 투수층 토양의 침투량을 정량적으로 산정해야 하지만 대부분의 유출해석에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 지표 유출에 직접적으로 기여하는 강우를 유효강우라고 정의하고, 유효강우 산정에 관한 여러 가지 형태로 제시된 경험식과 실험식에 의존하고 있다.

도시와 같이 투수유역과 불투수유역이 혼재된 복합유역을 대상으로 강우-유출모의에 적합한 모듈을 개발하고자 앞선 연구(I)에서 국내외의 다양한 연구자들에 의한 강우-유출모형에 관한 연구동향을 살펴보았으며, 본 논문(II)에서는 개발 모듈의 적용성 및 안정성 검토와 침투해석적인 특징을 중점적으로 살펴보고자 기존의 침투해석과 관련된 연구동향을 국내외로 조사해 보았다. Mein and Larson (1973)은 일정강우사상(steady rainfall)에 대하여 적용할 수 있도록 Green-Ampt 경험식을 변형하여 발전시켰고, Chu (1978)는 Mein and Larson(1973)에 의하여 변형된 Green-Ampt 경험식을 부정강우사상(unsteady rainfall)에 대하여 적용할 수 있도록 확대 발전시켰으며, 실무에서 침투과정을 모형화하는데 편리하도록 침투량을 추정하는데 지표이자 지표면에서의 담수유무를 판단할 수 있는 지표면상황지수(surface condition indicator)를 제안하였다. 또한, Chow et al. (1988)은 Green-Ampt 경험식의 계산 방법 및 변수에 관해 정리하였다. Partsch et al. (1993)은 주거지 잔디밭의 표토 제거와 다짐이 침투특성에 미치는 영향을 실험을 통해 확인하였고, 그 값을 Green-Ampt 경험식에 적용하고자 하였으며, Fox et al. (1997)는 실험을 통해 사면의 경사와 중기 침투능에 관해 연구를

실시한 결과 사면의 경사가 급해질수록 중기 침투능은 감소함을 나타나고 있다는 것을 보여주었다. Surendra and Vijay (2004)는 NRCS 유효강우산정 모형을 이용하여 침투량을 산정하였으며, Mein and Larson (1973)이 제공한 4개의 토양군으로 구성된 55개의 침투량 관측자료에 적용하여 분석한 결과 안정적인 값이 산정됨을 밝혔다. 여기서, NRCS 유효강우 산정의 매개변수인 S는 Horton 침투량의 동적거동으로 표현할 수 있었고, λ 는 Horton 매개변수 k와 담수시간을 이용하여 제공하였다. Chen and Young (2006)은 사면에 작용하는 침투량을 Richards식과 Green-Ampt 경험식을 이용하여 사면의 경사와 침투량과의 관계를 사면에 작용하는 강우와 $\cos\theta$ 를 적용하였으며, 계산 결과 사면의 경사가 커질수록 총 침투량은 감소하였고, 유출량은 증가한다고 제시하였다. Lei et al. (2006)은 사면의 표면을 미소하게 분할하여 유출 및 유입으로 구분하고 단위 폭에 대해 총 침투량 및 직접 강우량, 유입량에 대한 식을 개발하였다. Walter et al. (2007)은 토양의 물리적인 성질을 이용해서 침투와 비침투 조건으로 구분하여 점도, 톱과 사질톱 토양에 대해 3가지 침투조건을 대상으로 침투양상을 분석하였다.

남선우와 최은호(1990)는 시간에 따라 강우강도가 변화하는 부정강우사상에 수정 Green-Ampt 경험식을 적용하여 침투율과 초과우량을 산정하였고, 정성원과 김승(1991)은 시험유역의 유출해석을 위해서 Green-Ampt 경험식의 매개변수 추정치를 제시하였다. 김태철 등(1997)은 국내 유역의 특성을 고려한 NRCS 유효우량 산정법의 유출 곡선번호에 대응되는 유효우량을 추정하였으며, 안태진 등(2000)은 유역의 단위도와 침투율을 결정하기 위해서 선형계획 모형을 적용하고 Kostiacov, Philip, Horton 공식의 매개변수를 연동시켜서 계산하였다. 박해님과 조원철(2002)은 침투 과정에서 초기 함수량을 추가적으로 고려하여 기존의 개념적 침투모형을 개선하였고, 다양한 초기 함수량 조건에 대해 침투능 곡선의 변화를 분석하여 합리적인 침투 과정에 접근하였으며, 다양한 토양형에 대해 호우사상과 시간의 관계를 고려하여 모형의 적용성에 대한 분석을 시행하였다. 신사철 등(2002)은 신속한 유출의 예측이 가능한 기법에 NRCS 유효우량 산정법의 유출 곡선번호에 의한 방법을 이용하였다. 김용호와 배상근(2003)은 초지, 산지, 밭·과수원으로 지표 상태를 구분하여 침투실험을 실시하여 침투특성을 검토하였다. 이병주 등(2003)은 유역평균 CN 별로 계산한 유효우량과 관측 유효우량을 비교하여 약 30% 이내의 오차를 나타냄을 제시하였다. 박종영 등(2004)은 다양한 크기의 유역에 대해

수문분석을 실시하는데 NRCS 유효유량 산정법을 적용하였으며, 유주환(2006)은 유역내에서 Horton 침투모형내 매개변수를 결정한 사례를 제시하였고, 김태균과 윤강훈(2007)은 낙동강의 위천 유역에 저류함수법을 적용하기 위해서 NRCS 유효강우 산정법을 이용하였다.

국내에서 사용하고 있는 대다수의 모형은 침투관련 경험식 또는 이론식을 이용하여 지표의 직접유출량을 산정하고 있으며, 특정 분야에서는 필요에 따라 토양의 침투과정을 고려한 지표하 유출과 지하수 유출을 해석하기도 하지만 지표 유출과정과 연계하여 해석하는 경우는 드물다. 본 연구에서는 도시유역을 구성하고 있는 투수유역과 불투수유역에 대한 지표 및 지표하 유출해석이 가능하게 개발된 해석모형을 적용한 결과를 기존의 경험적이거나 이론적인 침투해석 방식을 사용하고 있는 유출해석 모형인 FFC2Q(이종태, 2008)와 VfloTM(Vieux, 2002)의 적용결과와 상호 비교해 보았으며, 강우와 유효토심의 크기 및 강우발생부터 종료 후 경과시간에 대한 모의조건을 설정하여 개발 모듈에 대한 적용성과 해석결과의 안정성을 파악해 보았다.

2. 기존 유출모형의 유출해석 문제점

현재, 국내에서 강우-유출해석을 위해 사용하고 있는 해석모형은 국외에서 개발된 모형이 대부분이며, 이러한 유출모형은 유역에서 유출현상을 물리적으로 표현하는 수학적 모형으로서 매개변수의 공간적인 변화의 고려 유무에 따라 집중형 모형(lumped model)과 분포형 모형(distributed model)으로 구분된다. 하지만, 다양한 모형이 존재하는 만큼 적용분야와 모형별 구동방식 및 해석결과의 신뢰성이 모든 유역에서 동일하게 나타나지는 않는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 분포형 모형 중 비교적 구동이 간편하며 입력자료의 구성방식이 유사한 HyGIS-GRM과 VfloTM을 IHP시험유역인 위천유역을 대상으로 선정하여 모의하고 결과를 비교해 보았다.

Table 1에서 보는바와 같이 유역경계를 먼저 지정한 VfloTM은 DEM, 흐름방향의 분포 및 흐름 누적망도를 출력하는 과정에서 HyGIS-GRM보다 가시적으로 뚜렷한 결과를 보였으나, 결과치에 대한 구분이 색상으로도 명확한 점에서는 HyGIS-GRM이 상대적으로 VfloTM보다 우수하다고 할 수 있었다. 유역경계와 유출구 지점의 선정 부분에서는 유역내 하천망의 구성에 대한 정밀도의 차이는 있었지만, 두 모형 모두 주요 하천의 형상을 잘 나타내었으며, 유출해석을 위한 그리드 격자의 구성에서도 큰

차이점이 보이지 않았다. 이상의 결과와 같이 지형의 구축방식 등 각 항목별 산출과정은 결과를 도시하는 형태만 달랐을 뿐 결과치는 유사하였으며, 유출구 지점에 대한 유출수문곡선의 침투유량 역시 유사한 값을 나타내었다. 하지만, 유출수문곡선의 초기손실부와 하강부는 다소 오차가 발생하는 것을 알 수 있었다. 이러한 사항은 침투해석에 대한 방식과 기저유출의 분리법의 차이에 따른 결과라고 볼 수 있지만, 두 모형 모두 강우의 침투해석 시 Green-Ampt 이론식을 채택하고 있으며, 기저유출은 고려하지 않고 모의를 시행하였음에도 불구하고 위와 같은 결과를 나타내었다.

따라서 침투량 산정 혹은 유효유량 분리를 통하여 유출량을 산정하는 종래의 방법 보다는 본 연구에서 다루고자 하는 지표 유출과 지표하 유출을 각각 고려하여 유출구에서의 유출량을 산출하는 기법의 필요성이 확인된다.


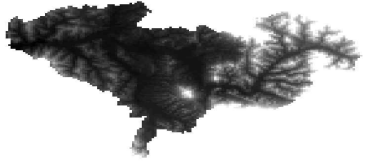
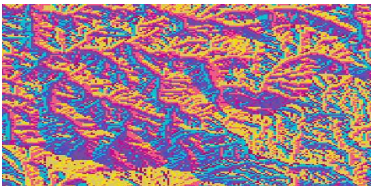

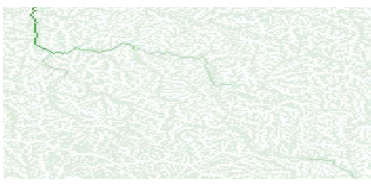

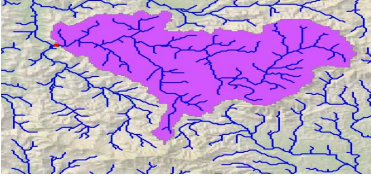

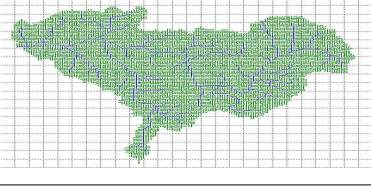
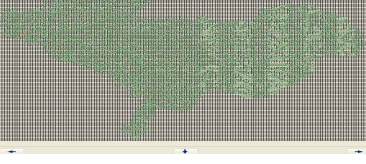
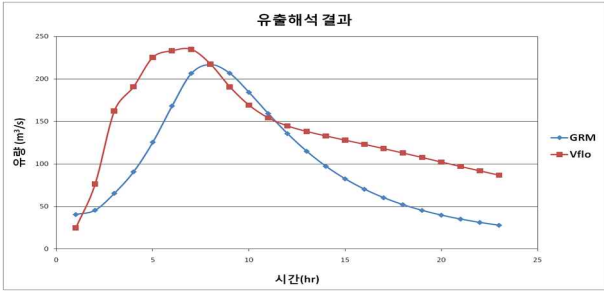
3. 개발모듈의 비교분석 및 적용

지표 및 지표하를 구성하고 있는 토양은 이용조건과 수분함량 및 종류 등 여러 가지 특성치에 따라 다양하게 구분된다. 일반적인 유출해석 시 지표층의 토지이용상태는 피복도계수를 사용하여 처리하고 있으며, 지표하를 구성하고 있는 토양층에 대해서는 강우 발생 후 침투에 의한 손실량을 제외시키고 기저유출로 분리하는 방식을 채택하고 있다. 여기서, 침투에 의한 손실량 산정은 다양한 방법이 이용되고 있으나, 대표적으로 Horton의 경험식과 Green-Ampt 이론식에 의한 경우가 대부분이다. 본 연구에서는 Horton 경험식을 이용하고 있는 집중형 유출모형인 FFC2Q모형과 Green-Ampt 이론식을 적용하고 있는 분포형 유출해석 모형인 VfloTM을 비교대상 모형으로 선정하고 본 연구에서 개발한 토양의 특성치를 고려하여 침투량이 산정되는 복합유역 유출해석 모듈의 결과와 상호 비교해 보았다. 또한, 개발 모듈의 적용성과 해석결과의 안정성을 파악하기 위해 강우와 유효토심의 크기 및 강우 발생시점부터 종료 후 시간의 경과에 대한 모의조건을 설정하여 분석해 보았다.

3.1 대상유역의 설정 및 입력자료의 구성

개발 모듈의 적용성과 유출해석 결과의 안정성 분석이라는 초점에 맞추어 모의를 수행하기 위하여 대상유역을 형상계수가 1이고 1 km²의 면적을 가진 비교적 단순한 형태의 단위면적을 가상유역으로 설정하였고, 흐름방향을 일정하게 하기 위하여 유역의 경사를 북서쪽에서 남동쪽

Table 1. Comparison with Method and Results of Runoff Analysis

Models Detail Process	HyGIS-GRM	Vflo TM
DEM (200m by 200m)		
Flow Direction		
Flow Accumulation		
Watershed and Outlet Point		
Grid of Runoff Analysis		
Results of Runoff Analysis		

방향으로 10%씩 부여하여 유출구 지점이 일치되도록 설정하였다. 개발모듈에서 가장 중요한 요소인 투수층 토양의 모의를 위해 NRCS에서 구분하고 있는 토양의 4가지 분류에 따라 토양형을 A, B, C, D형으로 나누어 각각의 토양에 대한 모형 입력치를 Table 2~4와 같이 기 발표된

연구결과를 이용하여 구성하였다.

3.2 침투모의 방법별 기존 모형과 개발모듈의 유출해석 결과 비교

설정된 가상유역에 대해 유출해석을 실시하기 위하여

Table 2. The Input Parameters of Empirical Horton's Equation for Soil Type (FFC2Q 모형)

Parameters	Soil Type	NRCS Soil Type			
		A	B	C	D
Ultimate Infiltration Capacity F_c (mm/hr)		25.4	12.7	6.4	2.5
Initial Infiltration Capacity F_o (mm/hr)		254.0	203.0	127.0	76.0

Source : The Illinois Urban Drainage Area Simulator (1974)

Table 3. The Input Parameters of Theoretical Green-Ampt's Equation for Soil Type (Vflo™ 모형)

Parameters	Soil Type	NRCS Soil Type			
		A	B	C	D
Hydraulic Conductivity (cm/hr)		11.78	0.34	0.10	0.03
Wetting Front (cm)		4.95	8.89	20.88	31.63
Effective Porosity		0.417	0.434	0.309	0.385
Soil Depth (cm)		100	40	35	25
Initial Saturation		0.08	0.12	0.17	0.21

Source : Rawls, Brakensiek, and Miller (1983)

Table 4. The Input Parameters of Developed Module for Test of Accuracy this Study

Parameters	Soil Type	NRCS Soil Type			
		A	B	C	D
Hydraulic Conductivity (cm/hr)		11.78	0.34	0.10	0.03
Soil Depth (cm)		100	40	35	25
Effective Porosity		0.417	0.434	0.309	0.385
Initial Depth (cm)		8.0	4.8	5.95	5.25

Source : Rawls, Brakensiek, and Miller (1983)

지리적 위치로 서울지역이라고 가정하고 먼저 설계강우량을 결정하였다. 서울지점의 1971~2009년까지의 연최대 강우량 자료를 이용하여 빈도분석을 실시하고, 도시구역의 일반적인 배수시스템 배수구역의 도달시간을 고려하여 강우지속시간을 180분으로 설정하였다. 토양층의 침투에 의한 지표하 유출뿐만 아니라 지표 유출상황도 분석하기 위하여 비교적 큰 재현기간 100년에 해당하는 강우 189.2mm를 각각 모의 입력강우로 사용하였다. 또한 강우의 시간적인 변화로는 강우발생 패턴 중 발생빈도가 높은 Huff 2분위로 적용하였다. Figs. 1 and 2는 Horton 경험식으로 침투해석을 실시하는 FFC2Q 모형의 강우-유출분석 결과를 Horton의 침투해석에 의해 산정된 침투량과 유출구 지점의 유출수문곡선으로 각각 도시한 것이다.

Horton 경험식의 초기 침투능의 특징상 강우초기에 대

한 침투량이 크게 나타났으며, 점차 지수적으로 감소하는 추세를 Fig. 1과 같이 잘 나타내고 있고, 침투량의 크기는 A형, B형, C형, D형으로 크기가 작아지는 전형적인 추세를 보였다. 침투량에 따라 분리된 유효강우에 의한 강우-유출 분석결과인 Fig. 2의 유출구 지점의 유출수문곡선을 보면 곡선의 형태는 가상구역의 4가지 토양형에 대해 일정하게 나타났으며, 침투유출량이 침투량 크기의 역순인 D형, C형, B형, A형 순으로 일정한 폭을 가지며 나타남을 알 수 있다.

Figs. 3 and 4는 Green-Ampt 이론식으로 침투해석을 실시하는 Vflo™모형의 강우-유출분석 결과로 나타나는 유역내 평균 유출고와 유출구 지점의 유출수문곡선을 각각 도시한 것이다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 A형 토양의 경우 다른 토양

형에 비해 상대적으로 침투량이 큰 물리적 특성을 나타내어 유역내 평균 유출고가 전혀 발생하지 않았고, 특히하게도 토양형 B형, C형, D형에 대해서는 시간에 따른 평균 유출고의 크기와 형태가 유사하게 나타났다. 또한, Fig. 4에 보는 바와 같이 유출구 지점의 유출수문곡선 중거 형태도 토양형 A형을 제외하고는 유사하였으며, 그 크기도 비슷하게 나타났다. 즉, Figs. 3 and 4의 결과로부터 Vflo™ 모형은 토양형 B, C, D에 대해서는 구별이 어려울 정도로 유출상황이 거의 같았으며, 토양형 A에 대해서는 유출이 발생하지 않아 일반적인 유출해석시의 적용성에 문제가 있을 수 있음을 보여주고 있다. Vflo™ 모형의 경우 침투 해석 관련 매개변수 중 투수계수에 상당히 의존적인 특징이 있으며, Table 3의 모의조건과 같이 토양형 A의 투수계수에 비해 토양형 B, C, D는 상당히 작은 것으로 보아 이러한 결과가 나타난 것으로 사료된다.

Figs. 5 and 6은 본 연구의 개발 모듈을 가상유역에 적

용하여 나타난 유역내 발생된 최대수두와 유출구 지점의 유출수문곡선에 대한 결과를 도시한 것이다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 토양형의 종류별로 지표까지 수두가 선형으로 증가하다가 완전 포화 후 일정하게 유지되는 현상을 보여주고 있었다. 이러한 과정을 미루어 볼 때, 본 연구의 개발 모듈은 강우발생 후 강우량이 토양의 공극내에서 서서히 포화가 진행되 완전포화에 이르는 토양층 내부에서 발생하는 일련의 포화과정을 나타내고 있었다. 또한, 수두가 증가되는 기울기도 다른 것으로 미루어 짐작할 때 토양별 특성치를 비교적 잘 표현한다고 할 수 있다. Fig. 6의 토양형 A형의 경우 다른 토양형에 비해 유효토심이 100 cm로 비교적 크며 투수계수가 큰 특성으로 인해 발생강우 전량이 침투되어 육안으로는 유출이 발생하지 않는 것처럼 보이지만, 토양층의 약 52 cm가량 침투가 발생하여 토양층의 공극을 따라 0.002 m³/s의 지표하 유출량이 발생되고 있었다. 전반적으로 개발 모듈

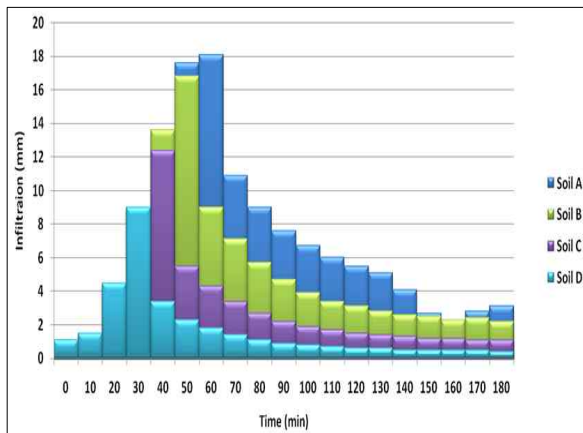


Fig. 1. Infiltration of Empirical Horton's Equation (FFC2Q)

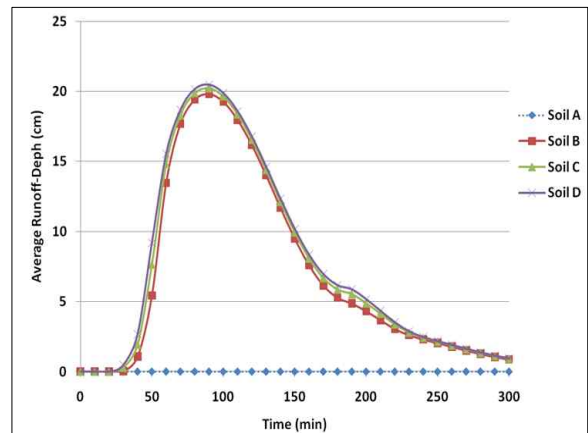


Fig. 3. Average Runoff-Depth on Theoretical Green-Ampt's Equation (Vflo™)

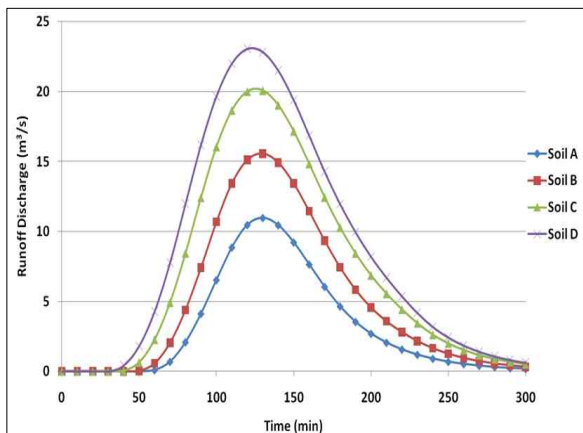


Fig. 2. Runoff Hydrograph on the Fictitious Basin (FFC2Q)

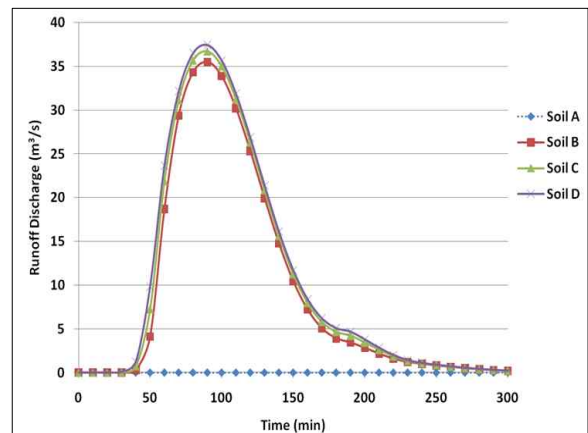


Fig. 4. Runoff Hydrograph on the Fictitious Basin (Vflo™)

에서는 침투유량의 발생시점과 침투유량의 크기 및 유출 수문곡선의 형태가 토양형 별로 다양하게 나타났으며, 그 크기와 발생시점도 토양의 특성치를 잘 보여주었다.

Table 5는 각 비교 대상모형에서 적용하고 있는 침투 해석 방식을 이용하여 산출된 유출구 지점의 유출수문곡

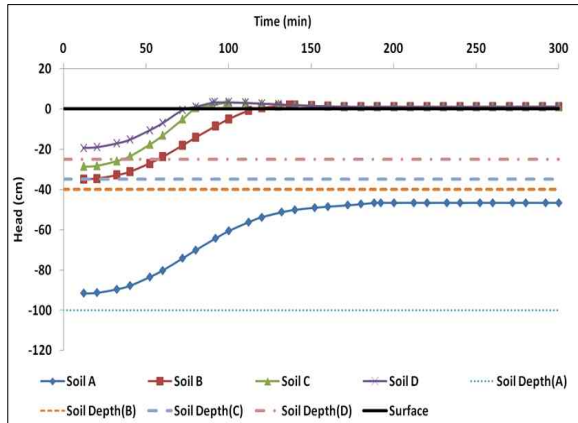


Fig. 5. Head on the Developed Module (this study)

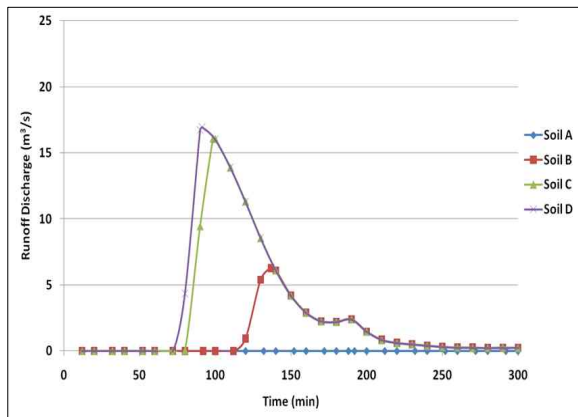


Fig. 6. Runoff Hydrograph on the Fictitious Basin (Developed Module)

선의 침투유출량을 상호비교한 것이다. 침투유출량의 크기는 Figs. 2, 4 and 6에서와 보는 바와 같이 전반적으로 VfloTM이 가장 크게 나타났으며, FFC2Q, 개발 모듈의 순으로 나타났다. Fig. 7은 Table 5의 결과를 토양형 별로 정리하여 도시한 것이다.

토양형 A형의 경우 개발 모듈에서는 지표하 유출량만으로 산정되는 반면, 직접유출량만을 산정하는 VfloTM모형에서는 유출량이 발생하지 않는 것으로 나타났고, FFC2Q모형의 경우 타 모형에 비해 과도한 유출량이 산정됨을 알 수 있다. 전술한 바와 같이 토양형 B, C, D형에 대해서 VfloTM모형의 경우 토양형 별 특성치가 다름에도 불구하고 거의 유사한 값을 나타내었으며, 타 모형들에 비해 비교적 과도한 유출량이 산정됨을 알 수 있다. 침투발생시간을 살펴보면, FFC2Q모형은 모든 토양형에서 130분으로 일정하게 나타났으며, VfloTM모형의 경우 유출량이 나타나지 않는 A형을 제외하고는 90분으로 일정하여 토양형 별 침투능 차이에 따른 특성을 보여주지 못하고 있는 반면, 개발 모듈에 해석결과로 나타난 침투발생시간은 D형 < C형 < B형 < A형 순으로 토양형 별 특성치를 잘 나타냄을 알 수 있었다.

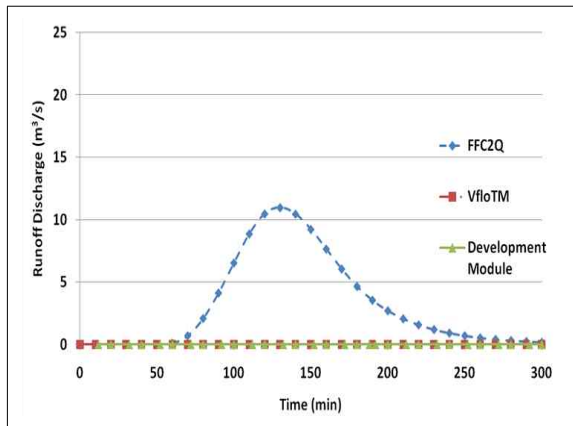
이러한 결과는 본 연구의 개발 모듈을 제외한 타 모형들의 경우-유출해석에 대한 문제점 보다는 모형내에 내장되어 있는 침투량 산정공식으로 인한 유출해석의 부정확도에 비중이 큰 것으로 보여진다. 따라서 본 연구의 개발 모듈은 토양형에 따른 포화형태와 해석결과의 타당성 부분에서 비교대상 모형들에 비해 강우-유출해석에 대한 정확도를 높게 평가할 수 있을 것이다.

3.3 개발모듈의 적용성 및 해석결과의 안정성 분석

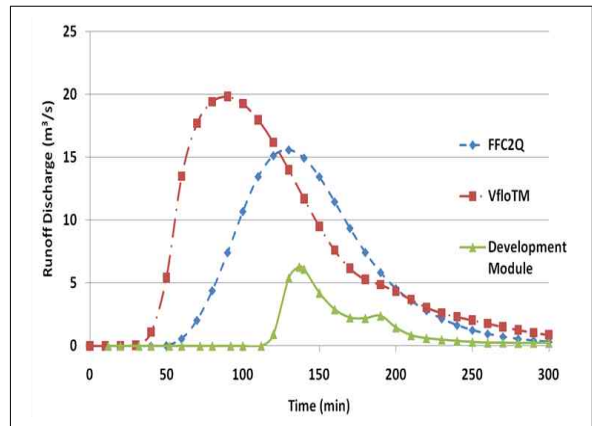
본 절에서는 개발된 모듈을 실유역에 적용하기에 앞서 개발모듈의 적용성과 해석결과의 안정성을 분석하고자

Table 5. Comparison with Peak Runoff Discharge and Peak Time

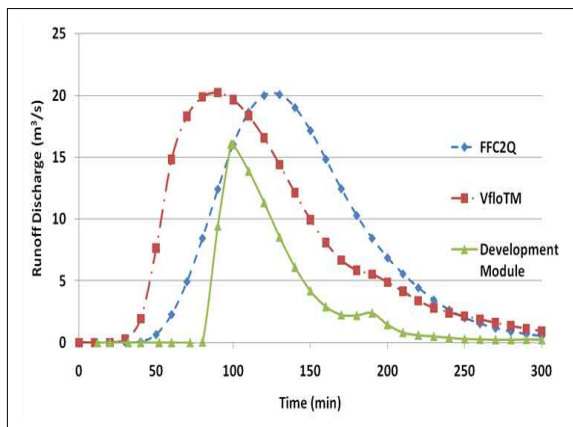
Classification	Peak Runoff Discharge (m ³ /s)			
	Peak Time of Runoff Discharge (min)			
	Soil Type A	Soil Type B	Soil Type C	Soil Type D
FFC2Q	10.966	15.571	20.075	23.062
	130	130	130	130
Vflo TM	0.000	35.490	36.730	37.450
	0	90	90	90
Developed Module(this study)	0.002	6.269	16.074	16.957
	188.0	136.8	98.5	91.3



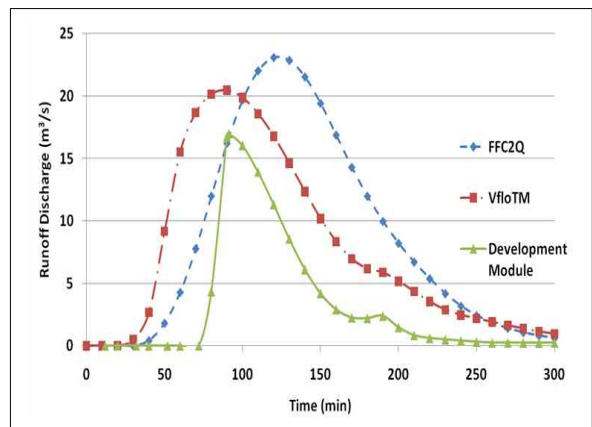
(a) Soil Type A



(b) Soil Type B



(c) Soil Type C



(d) Soil Type D

Fig. 7. Runoff Hydrograph on Soil Type

강우-유출해석의 입력데이터 중 유역내에서 직접적으로 유출량을 발생시키는 요인인 강우조건을 강우량의 크기를 나타내는 강우강도와 강우의 시간적인 발생패턴에 대한 모의로 나누어 수행해 보았다. 또한, 초기 강우에 의한 지표하 유출의 발생과 강우가 지속될 경우 토양의 포화 및 지표 유출의 발생에 대한 분석을 위하여 토양층의 유효토심을 다르게 적용해 보았으며, 토양층은 토양의 구성상태와 분포형태에 따라 방대한 종류로 구분되기 때문에 본 연구에서는 심도에 따른 층의 변화를 고려하지 않고 비교적 배수능력이 뛰어난 사질토를 대상으로 유효토심의 범위만을 변화시켜 침투되는 과정과 포화과정을 살펴 보았다. 마지막으로 침투되어 발생하는 지표하 유출은 토양층내부의 투수계수에 의해 흐름이 발생되므로 강우발생 중의 유출상황과 강우종료 후 모의시간의 경과에 따른 수두의 분포를 파악하여 주어진 경사에 의한 흐름양상을 파악해 보았다. 강우의 강도를 구분하기 위하여 강우량의 크기를 대표하는 재현기간을 달리하여 적용하였으며, 전술한 바와 같이 강우지속시간 180분을 설정하고, 도시유

역 우수관거 설계빈도 및 중규모 하천의 설계빈도를 고려하여 재현기간 10년, 100년에 해당하는 강우 136.5mm와 189.2mm를 각각 모의 입력강우로 사용하였다. 또한 강우의 시간적인 변화를 Huff 2분위뿐만 아니라 발생강우 시간패턴에 대한 유역내 침투유출량의 크기가 가장 크게 발생하는 Huff 4분위도 더불어 적용하고, 지표하 유출뿐만 아니라 지표 유출의 양상을 파악하기 위하여 점토 형태인 토양형 D형을 모의대상으로 설정하였다.

3.3.1 강우조건에 대한 적용성

Figs. 8 and 9는 강우빈도 및 분포별 침투심과 유출수 문곡선을 도시한 것이고, Table 6은 Figs. 8 and 9의 침투 유출량, 침투발생시간, 발생된 최대수두, 최대수두 발생시간을 정리한 것이다.

Fig. 9를 통해 알 수 있듯이 재현기간이 클수록 강우강도의 세기가 강해지므로 침투유출량은 크게 나타나야하는 특징을 잘 반영하고 있으며, 시간분포의 형태에 따른 침투유출량 발생시간 역시 호우의 중심이 비교적 후반에

치우친 Huff 4분위가 Huff 2분위 보다 늦게 발생하는 특징을 잘 보여주고 있다. 전반적으로 강우강도와 시간분포에 대한 모의가 잘 이루어졌으며, 이러한 사항은 발생된 최대수두에서도 뚜렷이 나타남을 Fig. 8과 Table 6에서도 알 수 있다.

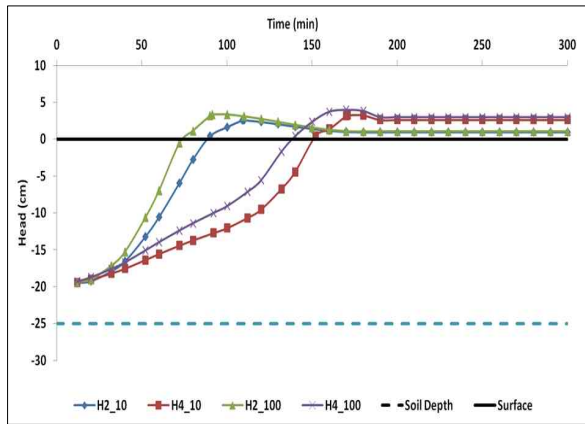


Fig. 8. Head on Frequency and Temporal Distribution of Design Rainfall (Soil Type D)

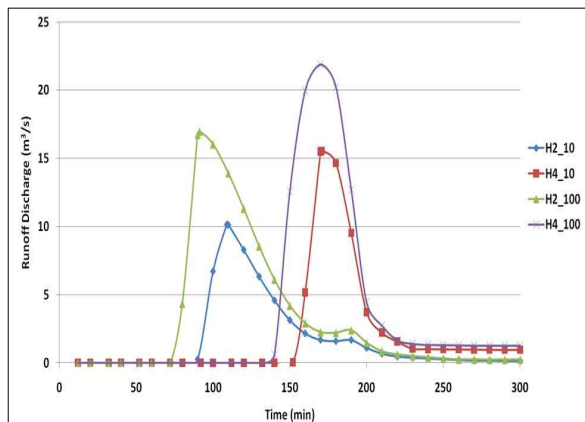


Fig. 9. Hydrograph of Frequency and Temporal Distribution of Design Rainfall (Soil Type D)

Table. 6 Runoff Results for Design Rainfall Case

Frequency and Temporal Distribution Runoff Results	10 year		100 year	
	Huff-2	Huff-4	Huff-2	Huff-4
Peak Runoff Discharge (m ³ /s)	10.157	15.561	16.957	21.867
Peak Time of Runoff Discharge (min)	109.0	170.8	91.3	170.0
Maximum Head (cm)	2.61	3.26	3.33	3.98
Time of Maximum Head (min)	110.0	172.8	93.2	170.0

3.3.2 유효토심 조건에 대한 적용성

토양층의 유효토심에 따른 적용성 알아보기 위하여 100년 빈도의 180분 지속기간 강우를 Huff 2분위로 분포시키고, 다른 토양형에 비해 비교적 유효토심이 큰 사질토 형태의 토양형 A형을 대상으로 유효토심을 100 cm, 80 cm, 60 cm, 40 cm, 20 cm로 달리 설정하여 모의해보았다. Figs. 10 and 11은 유효토심 조건별 침투심과 유출수문곡선을 도시한 것이고, Table 7은 Figs. 10 and 11의 침투유출량, 침투발생시간, 발생된 최대수두를 정리한 것이다.

Fig. 11에서 보듯이 유효토심이 40 cm를 초과한 모의 조건에서는 지표 유출이 거의 발생하지 않았고, 지표하 유출만이 일어남을 알 수 있으며, Fig. 10을 볼 때 강우종료 후 유효토심 50 cm까지만 포화가 이루어져 토양층 내에서 지표하 유출이 발생됨을 유추할 수 있다.

3.3.3 시간경과에 따른 수두의 변화

강우가 토양내부로 침투되어 포화되는 현상은 시간의 경과에 따라 달라지므로 본 연구의 개발모듈이 이러한 특징을 나타낼 수 있는지에 대한 적용성을 파악하기 위하여 10년 빈도 Huff 2분위의 180분 지속기간 강우조건과 다른 토양형에 비해 투수조건이 아주 큰 토양형 A형을 대상으로 모의시간 2시간, 3시간, 4시간, 6시간 경과후의 수두 변화를 살펴보았다. Fig. 12는 모의시간 경과에 따른 수두의 분포를 격자망으로 도시한 것이다.

시간경과에 따른 수두의 분포는 강우가 지속되는 2시간, 3시간 경과 후의 경우 유출구지점으로 흐름이 발생함을 알 수 있고, 강우가 끝난 후 시점인 4시간, 6시간 경과 후에는 유출구지점의 수두가 점차 낮아지고 유역의 중심부가 서서히 포화됨을 알 수 있다. 또한, 6시간 이상 경과 후에는 시작지점과 북쪽, 서쪽 경계지점을 제외하고는 거

의 일정해졌다. 이러한 사항을 미루어 볼 때, 개발모듈은 유역의 경사에 따라 흐름방향에 대한 유출이 정확하게 표현되며, 토양의 포화정도도 명확하게 나타냄을 알 수 있다.

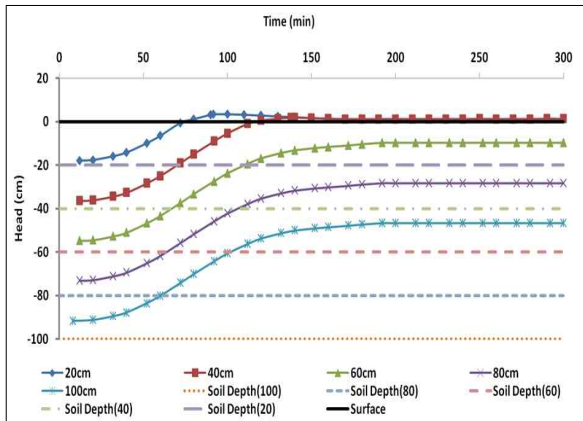


Fig. 10. Infiltration Depth on Effective Soil Depth (Soil Type A)

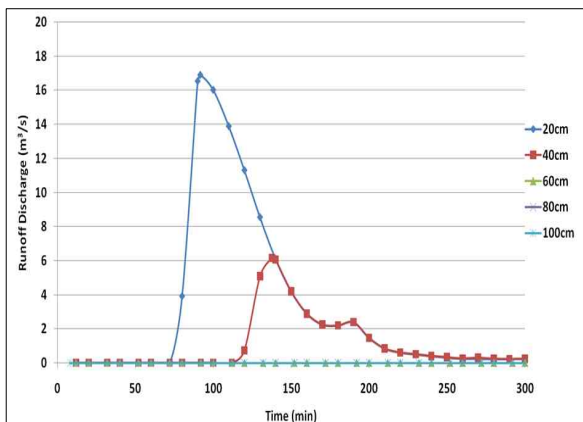


Fig. 11. Runoff Hydrograph on Effective Soil Depth (Soil Type A)

Table. 7 Runoff Results for Effective Soil Depth

Effective Soil Depth	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm
Runoff Results					
Peak Runoff Discharge (m ³ /s)	16.89200	6.15400	0.00165	0.00171	0.00176
Peak Time of Runoff Discharge (min)	91.7	137.7	188.0	192.0	188.0
Maximum Head (cm)	3.33	1.85	-9.88	-28.28	-46.68
Time of Maximum Head (min)	93.5	140.0	192.0	192.0	192.0

4. 결론 및 향후 연구계획

본 연구에서는 대다수 도시유역의 특징인 투수유역과 불투수유역이 혼재되어 있는 복합유역을 대상으로 개발한 유출해석 모듈을 가상의 유역을 대상으로 적용하여 유출모형으로서의 기능을 확인하였고, 기존의 침투해석 방식 및 유효강우 분리방법을 채택하고 있는 FFC2Q모형과 Vflo™모형을 대상으로 토양을 4종류로 구분하여 모의하고 해석결과를 상호 비교해 보았으며, 개발모듈의 적용성 및 해석결과에 대한 안정성을 분석하고자 다양한 강우조건과 유효토심조건 및 시간경과조건을 설정된 가상유역에 적용해보았으며, 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 개발 모듈은 강우발생 후 토양의 공극으로 서서히 침투되어 포화에 이르는 토양층 내부에서 발생하는 일련의 침투과정을 물리적으로 나타내는 전형적인 형태를 잘 나타내었으며, 토양조건 별 포화시점도 상이하였고, 수두가 증가되는 기울기도 다르게 구현함으로써 토양별 특성치를 비교적 잘 보여주었다.
- 2) 입력강우의 설계빈도가 클수록 강우강도의 세기가 강해지므로 침투유출량은 크게 나타나야하는 특징을 개발모듈은 잘 반영하고 있으며, 시간분포의 형태에 따른 침투발생시간 역시 Huff 4분위가 Huff 2분위보다 늦게 발생하는 특징을 유출수문곡선을 통해 알 수 있고, 최대수두 곡선에서도 이러한 특징이 잘 나타났다. 또한, 개발모듈은 유역의 경사에 따라 흐름방향에 대한 유출이 정확하게 표현되며, 토양의 포화정도도 명확하게 나타냄을 알 수 있다.
- 3) 침투해석 방식 별 유출해석 모형의 분석결과 본 연구의 개발 모듈을 제외한 타 모형들의 강우-유출해석에 대한 문제점 보다는 모형내에 내장되어 있는 침투량 산정공식으로 인한 유출해석의 부정확도에 비

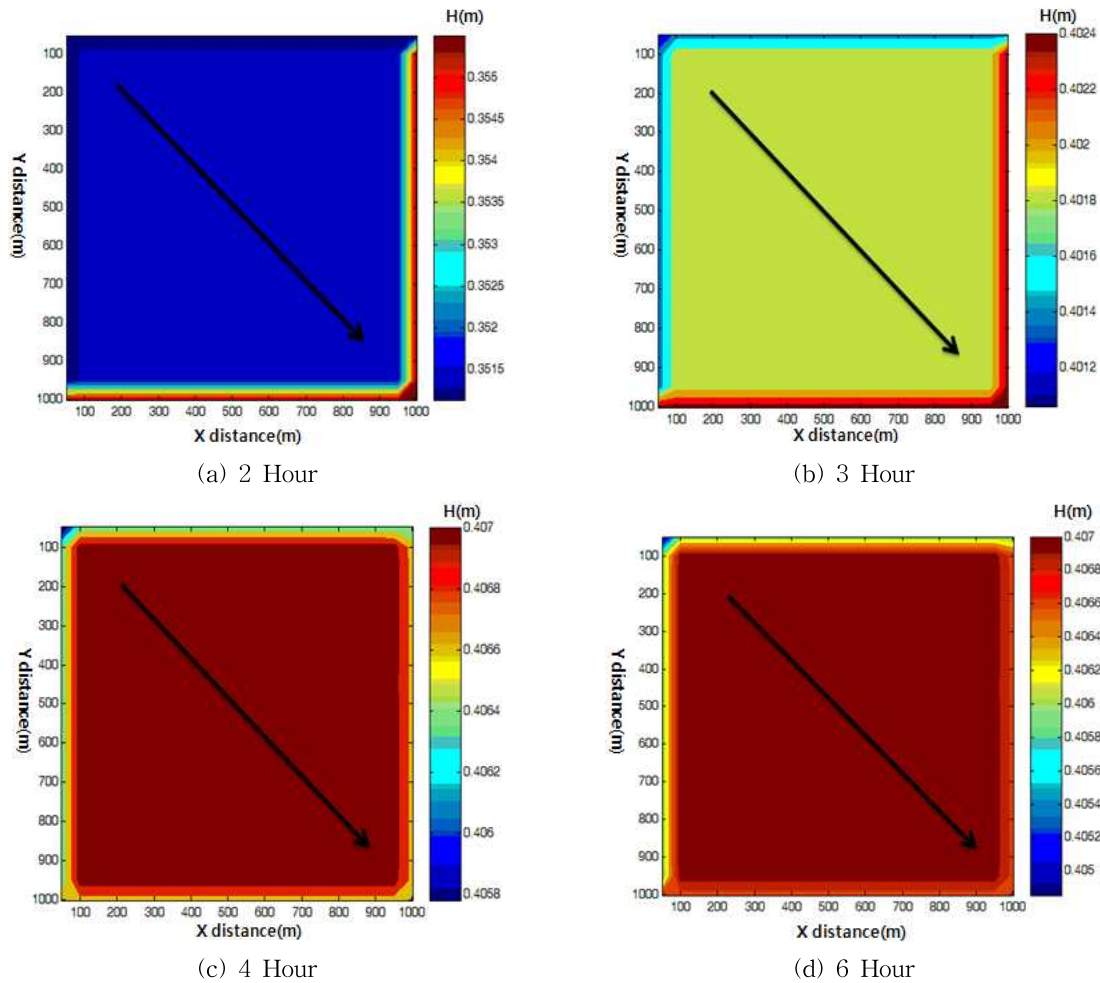


Fig. 12. Head on Processing Time

중이 큰 것으로 보여지며, 본 연구의 개발 모듈이 토양형에 따른 침투형태와 해석결과의 타당성 부분에서 비교대상 모형들에 비해 강우-유출해석에 대한 정확도를 높게 평가할 수 있을 것이라고 사료된다.

주어진 조건 및 설정된 가상유역에 대한 연구결과에 대한 일반화를 위하여 향후 연구계획에서는 토양층의 침투해석 실험자료를 수집하여 검증을 실시하는 한편, 개발모듈을 확장하여 다양한 실유역에 적용시켜 실적자료와 비교검증을 실시하고, 도시유역의 하수관망과 연계하여 도시유역 유출해석 모형으로 발전시킬 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2008년도 건설핵심기술연구개발사업 (03산학연C01-01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연

구단의 연구성과입니다.

참고문헌

- 김용호, 배상근 (2003). “지표상태별 강우 침투특성의 검토.” **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 105-108.
- 김태균, 윤강훈 (2007). “SCS 초과우량산정방법을 이용한 저류함수법 적용.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제7호, pp. 523-532.
- 김태철, 박승기, 문종필 (1997). “DAWAST 모형을 이용한 유출곡선번호 추정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 423-430.
- 남선우, 최은호 (1990). “산지유역의 초과우량 추정 모형.” **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제23권, 제3호, pp. 351-361.

- 박종영, 신창동, 이정식 (2004). “중규모 하천유역에서 설 계강우의 임계지속시간에 관한 연구.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제9호, pp. 695-706.
- 박햇님, 조원철 (2002). “초기 함수량을 고려한 침투 모형 의 유도.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제 35권, 제3호, pp. 285-294.
- 신사철, 권기량, 김성준 (2002). “Landsat TM 자료를 이용 한 토지피복분류와 유효우량도 작성.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제4호, pp. 411-423.
- 안태진, 류희정, 정광근, 심명필 (2000). “단순 강우-유출 사상으로부터 최적단위도와 침투율의 결정.” **한국수자 원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제3호, pp. 365- 374.
- 유주환 (2006). “유역을 대표하는 horton 침투 모형내 매개 변수의 최적 결정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자 원학회, 제39권, 제11호, pp. 977-984.
- 이병주, 배덕호, 정창삼 (2003). “위성영상 피복분류에 대 한 CN값 산정 (II):-적용 및 검증-.” **한국수자원학회논 문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제6호, pp. 999-1012.
- 이종태 (2008). 도시유역 유출-수질해석모형: FFC2Q (Ver. 2007) 사용자 설명서. 국토해양부, 한국건설교통 기술평가원, 도시홍수재해관리기술연구단.
- 정성원, 김승 (1991). “Green-Ampt 방법에 의한 강우침투 모형.” **한국수문학회 1991년 수공학논총**, 한국수문학 회, 제33권, pp. 144-155.
- Chen, Li, and Young, M.H. (2006). “Green-Ampt Infiltration Model for Sloping Surfaces.” *Water Resources Research*, Vol. 42, W07420.
- Chow. V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw Hill, New York, pp. 101- 123.
- Chu, S.T. (1978). “Infiltration during an Unsteady Rain.” *Water Resources Research*, Vol. 14, No. 3, pp. 461- 466.
- Fox, D.M., Bryan, R.B., and Price, A.G. (1997). “The Infiltration of Slope Angle on Final Infiltration Rate for Interrill Coditions.” *GEODERMA* 80, pp. 181-194.
- Lei, Tingwu, Yinghua, Pa, Han, Lu, Weihua, Za, and Jianping, Y. (2006). “A Run off-on-Ponding of Sloped Soil Surface under Rainfall and Erosion Impacts.” *Journal of Hydrology*, Vol. 319, pp. 216-226.
- Mein, R.G., and Larson, C.L. (1973). “Modeling Infiltration during a Steady Rain.” *Water Resources Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 384-394.
- Partsch, C.M., Jan-ett, A.R., and Watschke, T.L. (1993). “Infiltration Characteristics of Residential Lawns.” *Transactons of the ASAE*, Vol. 36, No. 6, pp. 1695- 1701.
- Surendra, K.M., and Vijay, P.S. (2004), “Validity and Extension of SCS-CN Method for Computing In- filtration and Rainfall-Excess Rates.” *Hydro. Process*, 18, pp. 3323-3345.
- Vieux, B.E., (2002) Predictability of Flash Floods Using Distributed Parameter Physics-Based Models, Appendix B in: Report of a Workshop on Predictability and Limits to prediction in Hydrologic Systems. Committee on Hydrologic Science, National Research Council, National Academy Press, ISBN 0-309- 08347-8, pp. 77-82.
- Walter, M.T., Gao, B., and Parlange, J.Y. (2007), “Modeling Soil Solute Release into Runoff with Infiltration.” *Journal of Hydrology*, Vol. 347, pp. 430-437.

논문번호: 11-086	접수: 2011.07.27
수정일자: 2011.10.12/11.16	심사완료: 2011.11.16