

# SWMM을 이용한 도시화유역 불투수율 변화에 따른 강우유출특성 분석

오동근 · 정세웅<sup>†</sup> · 류인구 · 강문성<sup>\*</sup>

충북대학교 환경공학과

<sup>\*</sup>서울대학교 지역시스템공학과(농업생명과학연구원)

## Analysis of Rainfall-Runoff Characteristics on Impervious Cover Changes using SWMM in an Urbanized Watershed

Dong Geun Oh · Se Woong Chung<sup>†</sup> · In Gu Ryu · Moon Seong Kang<sup>\*</sup>

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

<sup>\*</sup>Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

(Received 31 August 2009, Revised 12 November 2009, Accepted 25 November 2009)

### Abstract

The increase of impervious cover (IC) in a watershed is known as an important factor causing alteration of water cycle, deterioration of water quality and biological communities of urban streams. The study objective was to assess the impact of IC changes on the surface runoff characteristics of Kap Stream basin located in Geum river basin (Korea) using the Storm Water Management Model (SWMM). SWMM was calibrated and verified using the flow data observed at outlet of the watershed with 8 days interval in 2007 and 2008. According to the analysis of Landsat satellite imagery data every 5 years from 1975 to 2000, the IC of the watershed has linearly increased from 4.9% to 10.5% during last 25 years. The validated model was applied to simulate the runoff flow rates from the watershed with different IC rates every five years using the climate forcing data of 2007 and 2008. The simulation results indicated that the increase of IC area in the watershed has resulted in the increase of peak runoff and reduction of travel time during flood events. The flood flow ( $Q_{95}$ ) and normal flow ( $Q_{180}$ ) rates of Kap Stream increased with the IC rate. However, the low flow ( $Q_{275}$ ) and drought flow ( $Q_{355}$ ) rates showed no significant difference. Thus the subsurface flow simulation algorithm of the model needs to be revisited for better assessment of the impact of impervious cover on the long-term runoff process.

**keywords** : Flow duration analysis, Impervious change, Kap stream basin, Runoff, Storm Water Management Model (SWMM)

## 1. 서론

1970년대 이후 경제성장 단계에서 환경 보전 의식이 결여된 성장위주의 국토개발은 지역불균형과 자연파괴 등 국토환경의 전반에 걸쳐 부정적인 영향을 가져왔다. 무엇보다도 도시하천과 4대강의 건천화와 수질오염은 가장 대표적인 예에 해당한다. 정부에서는 보다 근본적이고 원천적인 수질관리를 위해 수변구역제도, 상수원보호구역제도, 오염총량관리제도 등의 다양한 방법을 간구하고 있지만, 수질에 상당한 영향을 주고 있는 근원인 유역의 토지이용 형태를 조정하기에는 극히 부분적이고 미약하다. 이러한 개발에 따른 급격한 도시화와 산업화에 의한 도시 유역의 무분별한 개발은 주변 투수성 녹지공간을 잠식 하고 강수가 토양 속으로 침투하지 못하는 불투수 포장지역을 증가시킨다. 이러한 포장면을 불투수면(Impervious cover, IC)이라 하는데 일

반적으로 도시화 과정에서 형성된 도로, 주차장, 보도, 건물 지붕 등을 포함한다(한강수계관리위원회, 2007; Schueler, 1994). 이러한 불투수면의 증가는 하천의 수 환경, 유역의 물 순환에 많은 영향을 주는 인자로 평가되며 최근에는 유역 전체면적 중 불투수면 피복 면적이 차지하는 비율을 지표 모델로 개발하여 유역의 특성에 맞는 관리전략을 수립하는 연구가 활발히 진행되고 있다(최지용 등, 2008; 최지용과 장수환, 2003; 한강수계관리위원회, 2007).

유역의 토지이용의 변화는 유역의 수문과 하천 수질, 수 생태계에 직접적인 영향을 준다. 특히, 불투수면 증가는 도시기온 상승, 지하수 함양 감소, 하천의 건천화, 하천 수질 악화, 도시 지역 내 홍수피해 가중, 생태계 서식환경 파괴 등의 피해를 유발할 수 있다. 포장 면적이 넓어지면서 도시표면의 상태 즉, 포장된 도로와 건물과 지붕에 의한 태양과 대기열의 높은 흡수율, 낮은 반사율, 증산작용 감소로 인한 낮은 열 손실과 빠른 열전달에 의한 열섬효과로 도시기온을 증가시킨다. 또한 유출계수가 불투수면적에 비례하여 증가하게 되어 강수의 토양 침투량이 줄어 지하수위는

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
schung@chungbuk.ac.kr

낮아지게 되고 이는 하천의 건천화를 초래하여 자연 상태의 하천 흐름을 차단하고 수생태계에 큰 영향을 준다(Whittaker and Reddish, 1989). 강우시 불투수면에 대기 또는 차량 등으로부터 누적된 오염물질은 일시에 세척되어 수용하천에 부하되므로 도시 오염부하량에도 직접적인 영향을 준다(Schueler, 1987). 또한 유역의 불투수면적에 비례하여 하천의 수온이 증가한다는 보고도 있다(Galli, 1991). 국내의 연구에서도 함광준 등(2006)은 불투수면에 따른 수온변화를 확인하였고, 특히 여름철에 영향이 더 크게 나타남을 확인하였다. 불투수면적 증가에 따른 침투유량 증가와 도달시간 감소, 직접유출량 증가와 기저유출량 감소에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다(김성준 등, 2005; 최지용 등, 2008; 함광준 등, 2006). 불투수면은 무척추동물(Jones and Clark, 1987; Klein, 1979; Shaver et al., 1995)과 어류(Booth and Reinelt, 1993; Klein, 1979) 등 하천 생태계에도 직접적인 영향을 미친다. Klein(1979)은 Maryland 주에 있는 도시 하천에서 저서무척추동물들의 종 다양성이 급격히 줄어드는 것을 처음 발견했고 대부분의 연구에서 유역의 불투수면적이 10~15%를 초과할 경우, 일관성 있게 종 다양성이 나쁜 상태로 되었다. 최지용 등(2008)의 연구에서도 불투수면적 비율이 낮은 상류에서 불투수면적 비율이 높은 하류로 갈수록 생물 출현종수가 감소하는 것을 확인한 바 있다.

하천수질관리 측면에서 미국 등 선진국의 많은 연구결과들을 종합해 보면, 유역의 개발로 인해 불투수면적이 10~15%를 초과하게 될 때 개발이전 상태의 하천수질상태를 유지하기란 매우 어렵다는 공통된 결과를 보여준다. 국내 연구에서도 불투수면 비율이 25%를 초과할 경우 하천복원사업의 노력에도 불구하고 목표수질 기준 달성이 어려움을 보고한 바 있다(한강수계관리위원회, 2007). 그러므로 유역과 하천의 수질 및 수생태계 관리를 위해서는 유역의 토지이용 특성을 고려하여 불투수면에 대한 관리 목표와 실행 전략을 세우는 것이 필수적이다. 즉, 실현가능하고 효과적인 유역관리를 위해 해당 유역의 불투수면 현황을 조사하고, 불투수면과 물환경과의 상호관계를 일반화할 수 있는 지표 개발하며, 불투수면을 고려한 유역의 물 순환 변화를 해석할 수 있는 물 순환 관리시스템을 구축할 필요가 있다. 아울러 사전 예방적 유역관리를 위해서는 유역 내 불투수면의 영향을 저감하기 위한 침투 및 저류시설과 같은 구조적 관리방안을 모색할 필요가 있다. 선진국의 경우 이미 이러한 관리방안으로 BMP(Best Management Practices)를 설치하여 유출 후 처리에 초점을 맞춘 비점오염원 관리를 위한 방안을 도입하거나 국가 정책으로 오염원의 발생 단계에서부터 처리에 초점을 둔 LID(Low Impact Development)를 대안으로 제시하기도 하였다. LID는 다양한 기법을 유출 발생원 단계의 설계 안에 포함하여 유출수의 분산식 관리를 통하여 토양의 수문학적 특성을 유지하여 토양의 투수면을 최대한 확보하여 침투유량, 홍수 도달시간, 직접유출 등을 개발 전상태의 특성으로 하는 자연친화적 도시설계를 말한다(박준호 등, 2008).

본 연구에서는 유역의 불투수면 비율의 증가가 유역에서

의 강우 유출에 미치는 영향을 파악하기 위하여 SWMM(Storm Water Management Model) 모형을 이용하여 도시하역역의 물 순환 시스템을 구축하고 불투수면적 변화에 따른 강우유출특성을 파악하고자 한다. 시범유역 선정은 유역 환경 변화를 바탕으로 수문 관측, 수질 측정, 생태계 조사 등 환경자료의 축적 수준을 고려하여 대전광역시와 계룡시의 개발과 더불어 불투수면의 변화가 지속적으로 나타나는 지역으로 갑천 유역을 시범 유역으로 선정하였다. 본 연구 결과는 유역의 불투수면 관리를 위한 기초정보를 제공하며, 향후 불투수면 지표모델 개발, 불투수면 증가가 수질과 생태계에 미치는 영향 평가, 도시유역 물 순환시스템 해석을 통한 불투수면 저감방안 수립 등에 활용될 것으로 기대한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 대상유역

본 연구의 대상유역인 갑천 유역은 유역면적 648.97 km<sup>2</sup> 이고, 북쪽은 대청댐 하류의 금강본류 유역과 접해 있으며 동쪽 및 남쪽 일부도 역시 금강본류인 대청댐 상류유역과 접해있으며 총 유로연장은 62.8 km로 그 중 직할하천 구간이 35.6 km이며, 유역의 최남단 지점은 갑천의 유역형상을 전체적으로 장방형을 이루고 있으며 하상경사는 유등천 합류후인 하류부 구간이 약 1/1100 정도이며 대전시 구간인 중류부는 1/650, 1/430로서 비교적 급한 편이다. 갑천은 충청남도와 전라북도의 도경계에 있는 표고 EL. 877.7 m인 대둔산 기슭에서 발원하여 북서쪽으로 유하하여 대전시계로 유입되며 지류인 유등천, 대전천 등과 합류하고 유향을 북쪽으로 바꾸어 대전시 경계를 벗어나 금강과 합류한다.

대상 유역의 특성 자료 및 모델에 필요한 입력 자료의 추출을 위해 ArcGIS 9.2 프로그램을 이용하였다. 데이터 추출에 쓰인 갑천 유역의 DEM(Digital Elevation Model)은 환경부에서 제공하는 해상도 30 m의 자료를 이용하였고, 토양도는 농업과학기술원의 1:25,000 정밀도토양도, 토지이용도는 환경부 중분류 토지피복도를 이용하였다. 갑천 유역의 DEM과 경사도는 Fig. 1과 같다.

### 2.2. SWMM

본 연구에서 사용한 강우-유출 모형은 도시유역의 강우에 의한 유출량을 산정하기 위하여 1971년 미국 EPA의 지원 아래 Metcalf & Eddy사가 개발한 SWMM 모형이다. 이 모형은 유역의 강우-유출해석뿐만 아니라 Florida 대학 및 WRE(Water Resources Engineers)의 공동연구에 의하여 도시유역 하수관거시스템내의 유량과 수질 변화도 모의할 수 있도록 구성되었다(Huber and Dickinson, 1988). 국내에서도 신현석과 윤용남(1993a, 1993b), 이종태 등(1994), 이종태와 강태호(1997)는 국내 도시유역에서의 유출과 오염물질의 이동, 처리, 저류량 산정 등 종합적인 모형으로 SWMM의 적용성을 검토한 바 있다.

SWMM은 호우에 의한 유출 유량과 수질을 예측하기 위해 강우주상도, 기상학적 입력자료, 소유역이나 하수 관로

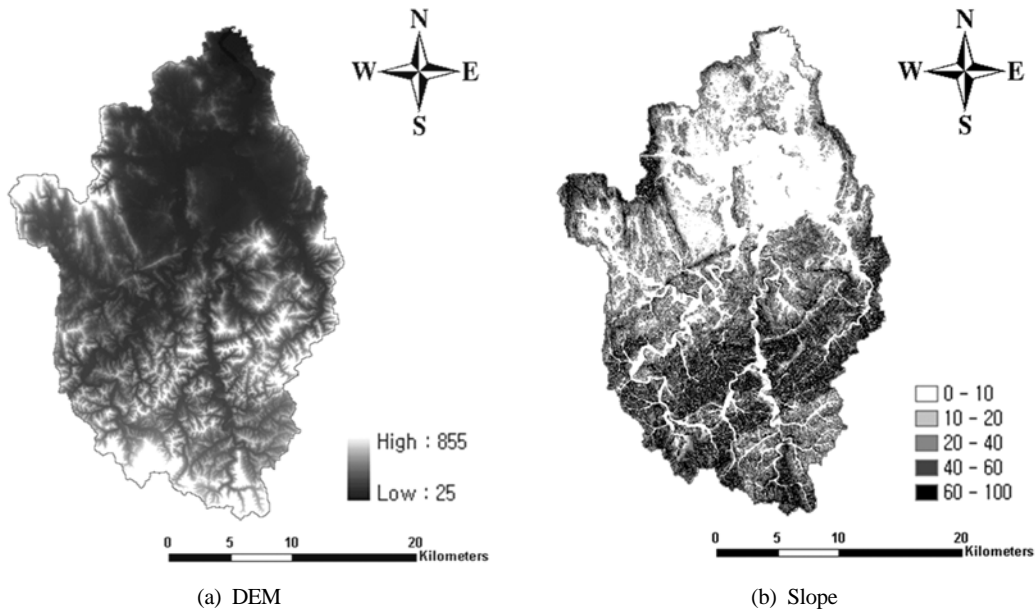


Fig. 1. GIS maps for DEM and slope of Kap Stream basin.

와 같은 시스템의 특성을 고려하여 실제 호우사상을 모의 하도록 되어 있으며, 1981년에는 SWMM 모형내의 TRANSPORT 블록을 확장, 보완하기 위해 수공구조물의 월류, 배수, 압력류 등의 계산이 가능하도록 설계된 EXTRAN 블록을 모형에 포함시켜 보완시켰다. 그러므로 SWMM 모형은 도시유역 내에서 강우사상으로 인해 발생하는 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서의 유출량 추적, 저류량 산정, 오염물질에 대한 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다. 모형의 특징은 Table 1과 같다.

모형의 구조는 5개의 실행블록과 5개의 보조 블록으로 구성되어 있으며, 126개의 부 프로그램을 포함하고 있다 (Fig. 2). 본 연구에서는 강우시 유역에서의 유출현상을 모의하기 위하여 RUNOFF 블록을 이용하였다. RUNOFF 블록은 SWMM 모형의 초기연산이 수행되는 부분으로 강우

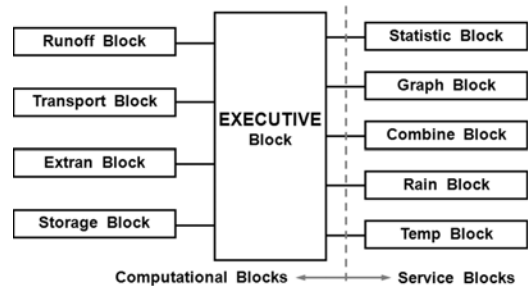


Fig. 2. Configuration of SWMM.

사상에 대해 배수유역에서의 유출현상과 수질변화를 모의한다. RUNOFF 블록은 임의의 강우우량도, 선행강우조건, 토지이용도, 지형도 등의 자료를 이용하여 지표면과 지표하 유출을 추적한다. RUNOFF 블록의 가장 중요한 기능은 선정된 시간과 위치에서 다른 블록의 실행에 필요한 자료(유

Table 1. Characteristics of SWMM

| Section                  | Characteristics   |
|--------------------------|---|
| Application watershed    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Urban watershed</li> <li>• Watershed having artificial drainage system</li> </ul>  |
| Temporal characteristics | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Possible to calculate at single event rainfall, continuous rainfall</li> <li>• Computing time interval is able to control about rainfall event.</li> </ul>   |
| Spatial characteristics  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Possible to apply on random drainage area</li> <li>• Each drainage area is able to be synthesized/separated.</li> <li>• Drainage basin is able to compose of 200 subbasin, channel and conduit.</li> </ul>   |
| Physical characteristics | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Runoff is occurred by rainfall and snow-melting</li> <li>• Surface runoff is calculated by nonlinear storage equation</li> <li>• Using Horton or Green-Ampt equation at calculation of infiltration</li> <li>• Channel / conduit</li> <li>① RUNOFF - Nonlinear storage equation</li> <li>② TRANSPORT - Kinematic equation</li> <li>③ EXTRAN - Dynamic equation, continuity equation</li> <li>• Using Modified-Pulse method ; assumes parallel surface</li> </ul> |
| Interoperability         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• WASP, DYNHYD, HEC, STORM, QUAL-II etc.</li> </ul>  |

입수문곡선, 오염도곡선 등)를 제공하는데 있다. 따라서 RUNOFF 블록은 배수유역을 단순화된 배수유역과 관망으로 재구성하여 해석한다.

2.3. 입력 자료 구성

2.3.1. 갑천 소유역 분할

소유역 분할은 토지이용, 토양특성, 수리 특성값 등의 균일성이 보장되고, 모델 매개변수의 추정이 용이할 수 있도록 고려되어야 한다. 연구에서는 모형의 비교평가를 위하여 갑천 유역의 수질측정망을 고려하여 GIS(Geographic Information System)와 SWAT(Soil and water assessment Tool) 모형의 유역자동분할(watershed delineation) 기능을 이용하여 전체유역을 36개의 소유역(subcatchment)으로 나누고 물순환 시스템을 구성하였다(Fig. 3).

2.3.2. 입력 자료 구성

SWMM 유출 모형의 입력 자료 구성을 위해서는 기상자료, 지형 특성자료, 하천 및 관로 자료가 필요하다. 기상자료는 갑천 유역 주변 대전과 금산 기상대에서 관측한 매시강우자료를 사용하였다. 지형 자료와 하천 및 관로자료는 GIS를 이용하여 각 소유역의 면적, 기울기, 너비, 하천길이 등의 정보를 추출하여 모형에 적용하였다(Table 2). 유역의 불투수면적은 토지이용분류를 활용하여 지적통계상의 28가지 지목분류(전, 답, 과수원, 종교용지, 사적지, 묘지, 잡종지, 수도용지, 공원, 운동장, 유원지, 철도용지, 하천, 제방, 구거, 유지, 대지, 공장용지, 학교용지, 도로, 목장용지, 임야, 광천지, 염전, 주차장, 주유소용지, 창고용지, 양어장)

중 불투수면적이 높은 대지, 학교용지, 공장용지, 도로, 주유소용지, 주차장을 불투수면으로 간주하여 각 소유역에서의 면적을 산정하였다(최지용과 장수환, 2003). 유역에서의 침투는 Horton 식, Green-Ampt 식, 미국 토양보존국(U.S. Soil Conservation Service, SCS)의 유출곡선지수법(Curve Number, CN)의 사용이 가능하나 국내유역의 경우에는 Horton 식과 Green-Ampt 식을 적용하기 위한 자료가 충분하지 않고 적용성이 미흡하여 유출곡선지수법을 이용하였다. 유출곡선지수법을 적용하기 위하여 환경부 중분류 토지피복도와 수문학적 토양군을 이용하여 소유역에서의 개별 토지피복에 대한 수문학적 토양군의 비율을 나누어 위성영상 피복분류항목에 대한 CN값 산정표(배덕호 등, 2003)를 토대로 CN값을 산정하였다.

유역 공통 매개변수로 투수지역 조도계수 (n), 불투수지역 조도계수, 투수지역 저류깊이, 불투수지역 저류깊이, 관거의 조도계수 값이 입력되어진다. 투수지역의 조도계수와 불투수지역의 조도계수는 McCuen 등(1996)이 제시한 Overland Flow의 Manning 조도계수 값을 이용하여 불투수지역은 0.015, 투수지역은 0.15로 입력하여 주었다. 저류깊이는 SWMM 사용자 지침서(Rossman, 2008)에서 제시한 범위 내에서 불투수지역의 저류깊이는 1.27 mm, 투수지역의 저류깊이는 5.1 mm로 모델에 적용하였다(Table 3).

갑천 유역 내 계룡하수종말처리장과 대전하수종말처리장의 방류량은 지류하천 유입으로 입력하였다. 또한 갑천 상류 유역의 경계조건 유량 자료는 수질오염총량 조사를 위한 8일 간격의 유량자료가 있는 경우(3 지점)는 실측 유량을 입력하고, 나머지는 유역 유출 모의 결과 값을 입력하여 주었다.

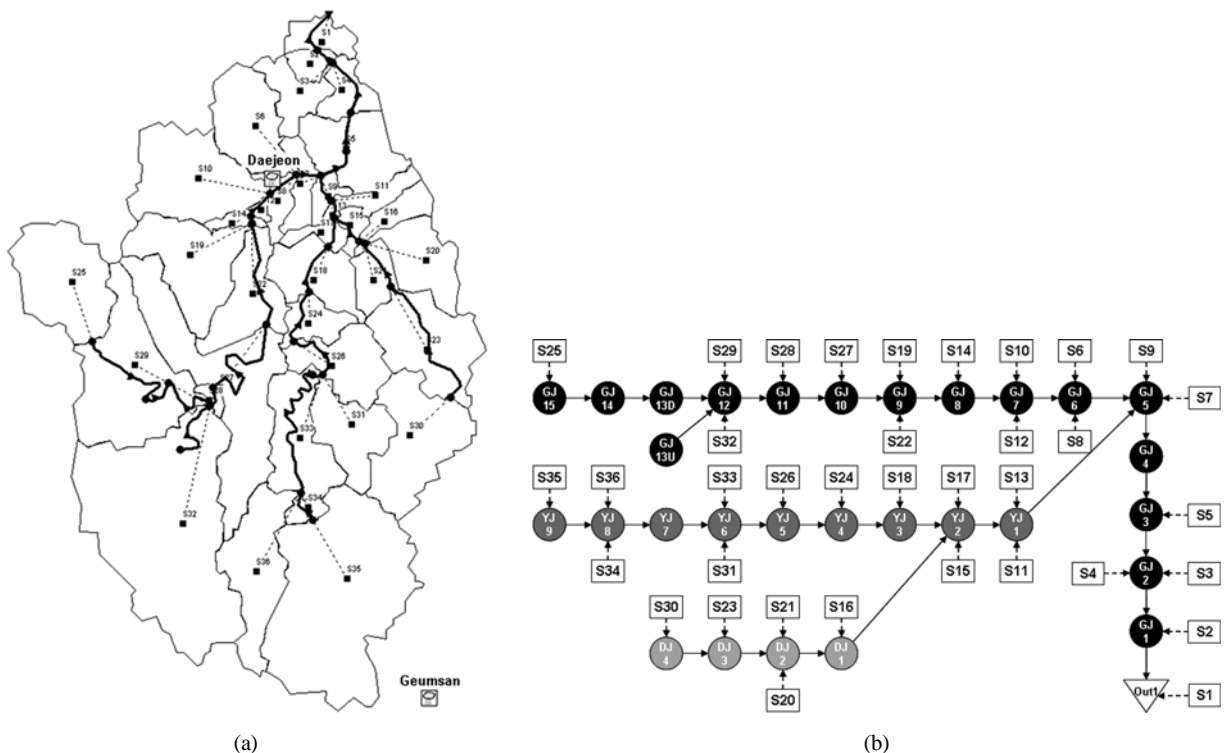


Fig. 3. (a) Division of sub-basins and (b) system network used for SWMM application.

**Table 2.** Geophysical and hydrological characteristics of each sub-basin used for SWMM

| Subcat-<br>chment | Outlet | Area<br>(ha) | Width<br>(m) | Slope<br>(%) | Impervious<br>(%) | CN<br>Value | Subcat-<br>chment | Outlet | Area<br>(ha) | Width<br>(m) | Slope<br>(%) | Impervious<br>(%) | CN<br>Value |
|-------------------|--------|--------------|--------------|--------------|-------------------|-------------|-------------------|--------|--------------|--------------|--------------|-------------------|-------------|
| S1                | Out1   | 666.2        | 1383.7       | 12.3         | 39.82             | 72          | S19               | GJ_9   | 2615.0       | 2671.7       | 18.8         | 16.70             | 66          |
| S2                | GJ_1   | 383.7        | 1277.8       | 9.4          | 49.17             | 73          | S20               | DJ_2   | 1573.6       | 1662.5       | 18.4         | 43.51             | 63          |
| S3                | GJ_2   | 959.9        | 1378.9       | 17.8         | 20.17             | 59          | S21               | DJ_2   | 791.7        | 1459.2       | 11.1         | 63.46             | 74          |
| S4                | GJ_2   | 777.8        | 1284.5       | 9.5          | 27.94             | 71          | S22               | GJ_9   | 1832.9       | 1739.4       | 14.2         | 23.10             | 65          |
| S5                | GJ_3   | 1992.6       | 2454.7       | 15.3         | 36.30             | 67          | S23               | DJ_3   | 2706.9       | 2623.1       | 31.7         | 15.14             | 60          |
| S6                | GJ_6   | 2065.8       | 2182.3       | 14.3         | 24.64             | 64          | S24               | YJ_4   | 784.4        | 1461.5       | 19.9         | 29.07             | 66          |
| S7                | GJ_5   | 661.3        | 1177.2       | 6.6          | 65.64             | 75          | S25               | GJ_15  | 2935.3       | 2907.7       | 30.1         | 3.04              | 60          |
| S8                | GJ_6   | 475.7        | 847.6        | 5.9          | 70.76             | 73          | S26               | YJ_5   | 1669.4       | 2189.3       | 29.2         | 5.63              | 55          |
| S9                | GJ_5   | 372.0        | 1023.7       | 3.5          | 63.83             | 75          | S27               | GJ_10  | 4711.9       | 2418.4       | 30.5         | 3.51              | 60          |
| S10               | GJ_7   | 3096.8       | 2813.6       | 19.0         | 27.43             | 67          | S28               | GJ_11  | 153.7        | 741.0        | 24.6         | 1.38              | 58          |
| S11               | YJ_1   | 499.5        | 811.7        | 13.8         | 60.50             | 67          | S29               | GJ_12  | 4127.2       | 2385.1       | 22.2         | 7.83              | 68          |
| S12               | GJ_7   | 133.2        | 557.3        | 5.8          | 51.55             | 78          | S30               | DJ_4   | 2919.2       | 2570.6       | 44.6         | 2.82              | 59          |
| S13               | YJ_1   | 64.9         | 399.0        | 1.9          | 59.24             | 84          | S31               | YJ_6   | 1734.2       | 1859.5       | 38.5         | 2.43              | 55          |
| S14               | GJ_8   | 218.4        | 613.6        | 5.5          | 39.36             | 74          | S32               | GJ_12  | 8664.4       | 2931.6       | 38.7         | 3.13              | 65          |
| S15               | YJ_2   | 297.1        | 886.5        | 2.2          | 81.38             | 77          | S33               | YJ_6   | 2146.6       | 1512.6       | 41.5         | 2.41              | 56          |
| S16               | DJ_1   | 627.2        | 1021.8       | 12.9         | 67.48             | 69          | S34               | YJ_8   | 271.6        | 932.6        | 38.4         | 5.71              | 59          |
| S17               | YJ_2   | 363.1        | 666.7        | 3.9          | 72.46             | 72          | S35               | YJ_9   | 7504.9       | 3706.1       | 38.7         | 3.90              | 61          |
| S18               | YJ_3   | 1618.6       | 2667.3       | 7.3          | 76.03             | 70          | S36               | YJ_8   | 2511.7       | 1709.6       | 43.8         | 3.44              | 53          |

**Table 3.** Global model parameters used for SWMM application to Kap Stream basin

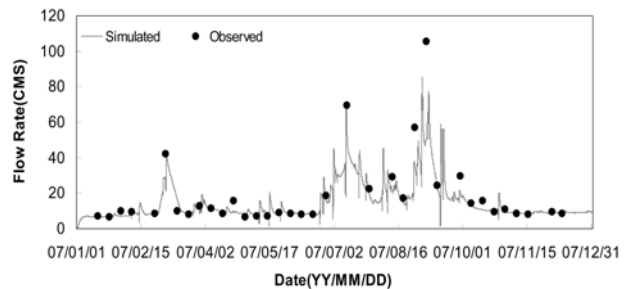
| Manning's n for<br>impervious area | Manning's n for<br>pervious area | Depression storage for<br>impervious area (mm) | Depression storage for<br>pervious area (mm) | Manning's n for<br>open channels |
|------------------------------------|----------------------------------|--|--|----------------------------------|
| 0.015                              | 0.15                             | 1.27   | 5.1  | 0.03                             |

### 3. 결과 및 고찰

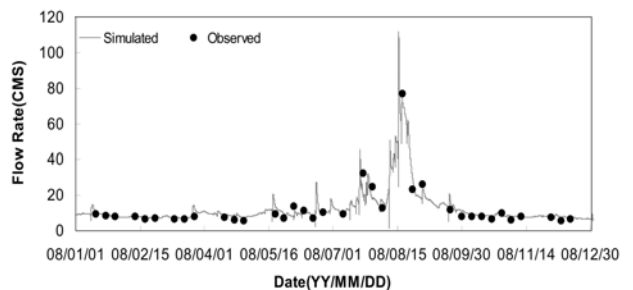
#### 3.1. 모형 적용성 평가

모형의 유출량 보정과 검증은 각각 2007년과 2008년에 잡천 하루 말단 수질오염총량관리지점(잡천 A)에서 실측한 8일 자료와 시간별 모의결과를 비교하여 이루어졌으며 Fig. 4, 5에 나타내었다. 모의값과 실측값의 선형회귀 관계를 판단하는 결정계수(coefficient of determination,  $R^2$ )와 모의값과 실측값의 제곱오차로부터 평균제곱오차를 구하여 제곱근을 구한 것으로 모의결과의 평균오차를 나타내는 예측오차(root mean square error, RMSE), Nash and Sutcliffe (1970)에 의해 제안된 모형효율성 지수(Efficient Index, EI)를 이용하여 모형의 오차와 신뢰성을 평가하였다.  $R^2$ 는 피어슨 상관계수의 제곱으로 표현되고, 관측과 모의유량의 분산정도를 설명할 수 있다(Legate and McCabe, 1999). RMSE는 모의결과가 평균적으로 실측값과 어느 정도의 오차를 갖는지를 나타내는 지표로 0에 가까울수록 모형이 우수한 성능을 가짐을 확인할 수 있다. 선행 연구에서 Chung 등(1999, 2002)은  $R^2$  0.5 이상과 EI 0.3 이상, Green 등(2006)은  $R^2$  0.5 이상이고 EI 0.4 이상, Ramanarayanan 등(1997)과 Santhi 등(2001a, 2001b)은  $R^2$  값이 0.6 이상이고 EI 0.5 이상이면 모형이 자연현상 모의에 적합하다고 제안한 바가 있다.

모형의 보정기간과 검증기간 동안의 유역 유출 모의 결과에 대한 결정계수와 오차 통계값을 Table 4에 제시하였다. 보정과 검증 기간에 대한  $R^2$  값은 각각 0.902, 0.934가



**Fig. 4.** Comparisons of observed and simulated runoff in calibration period (2007).



**Fig. 5.** Comparisons of observed and simulated runoff in verification period (2008).

**Table 4.**  $R^2$ , RMSE, and EI values between simulated and observed runoff flows.

| Contents | Period              | $R^2$ | RMSE   | EI    |
|----------|---------------------|-------|--------|-------|
| Runoff   | Calibration (2007)  | 0.902 | 10.834 | 0.712 |
|          | Verification (2008) | 0.934 | 3.469  | 0.923 |

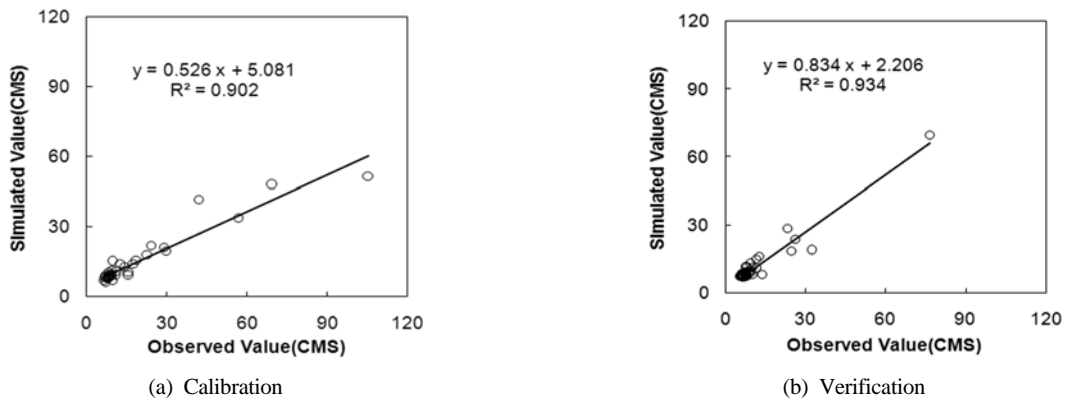


Fig. 6. Linear relationships between observed and simulated runoff flows during (a) calibration (2007) and (b) verification (2008).

나왔고(Fig. 6), RMSE 값은 각각 10.834, 3.469 CMS로 나타났다. 또한 보정 및 검증 기간의 EI 값은 각각 0.712와 0.923으로 나타나 모델은 갑천 유역의 유출 해석에 적합한 것으로 판단된다. 모델 보정에 사용한 출구지점 유량자료가 8일간격의 측정 자료이므로 강우시 첨두유량 모의값과 실측값에 다소 오차가 발생하였다(Fig. 5).

3.2. 불투수율 변화에 따른 유출특성 변화

현재 갑천 유역의 각 소유역별 투수면적을 10%, 20%, 30%, 40%, 50%씩 감소시키면서 유역의 불투수면적을 증가시켰을 때의 유출량 변화를 비교하여 보았다. 2007년도의 강우 사상에서 투수면적이 50%로 감소함에 따라 유역의 최종 유출구에서의 첨두유량은 87.39 CMS에서 194.88 CMS로 123% 증가하였으며, 2008년도에는 92.26 CMS에서 190.5 CMS로 104.9% 증가함을 확인할 수 있었다. 불투수면 비율의 증가(또는 투수면 감소)에 따른 첨두유량의 변화량을 Table 5에 나타내었다.

Fig. 7은 가장 많은 비가 내렸던 2007년 9월 1일의 강우 사상에서의 불투수면 변화에 따른 유출 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 강우 사상이 발생하였을 때 하천에서의 첨두유량 도달 시간을 비교한 결과 불투수면적을 증가시켰을 때 도달 시간이 빨라지는 것을 확인할 수 있다. 또한 시간별 모의결과에서 투수면적의 변화를 주지 않았을 때의 첨두유량 도달시간보다 투수면적이 10%에서 40% 감소할 때 도달시간이 한 시간 정도 빠르게 나타났고, 50% 감소시켰을 때는 두 시간 빨리 다다름을 확인할 수 있었다.

반면에 비강우시 장기유출에서는 불투수면적을 증가시켰을 때의 유역 유출량이 더 작아지는 것으로 나타났다(Fig 8). 이는 불투수면의 증가에 따라 표면 유출은 증가하지만 지하 침투와 기저 유출량은 상대적으로 감소하게 되어 평갈수기 동안에는 유량이 작아진 것으로 판단된다. 이러한 결과를 바탕으로 유역의 불투수면적의 증가는 갈수기 동안

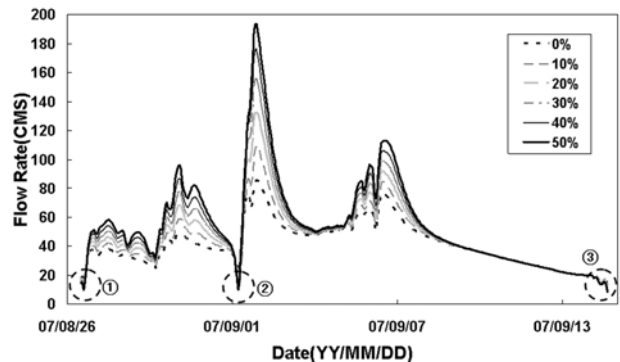


Fig. 7. Variations of runoff hydrograph according to the reduction of pervious area in Kap Stream basin during the flood event of September 1, 2007.

하천의 건천화를 일으키는 주요한 원인으로 작용함을 할 수 있다. 그러나 불투수면적의 증가에 따른 유역의 유출량 변화는 강우시에 지배적으로 나타난 반면, 비강우시에는 그 영향이 상대적으로 작게 반영되고 있다. 때문에 모델의 장기유출 모의 성능 평가를 위해서는 모델의 지하수모의 성능에 대한 추가 검토가 필요하다.

3.3. 갑천 유역의 불투수면 변화에 따른 유황분석

국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 Landsat 위성영상 자료를 이용하여 시범유역에 대한 과거 1975년부터 2000년까지의 5년 단위 토지피복 변화를 모형에 적용하였다. 영상자료는 연도별 센서의 차이로 인하여 1975년도와 1980년도의 자료는 해상도가 60 m × 60 m, 그 이후는 30 m × 30 m의 자료이기 때문에 많은 오차가 예상되지만 전체적인 유역의 토지이용 변화의 개략적인 확인에는 이용 가능할 것으로 판단된다. 영상 자료상의 수역, 시가지지역, 나지, 습지, 초지, 산림, 농경지, 밭의 8가지 항목으로 나누어 분석한 유역주제도상 속성 정보(Table 6)를 이용

Table 5. Comparison of runoff with pervious area change

| Pervious area decrease |       | 0%    | 10%    | 20%    | 30%    | 40%    | 50%    |
|------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Peak runoff (CMS)      | 2007s | 87.39 | 111.00 | 134.72 | 157.46 | 177.16 | 194.88 |
|                        | 2008s | 92.26 | 122.12 | 134.51 | 153.78 | 172.56 | 190.50 |

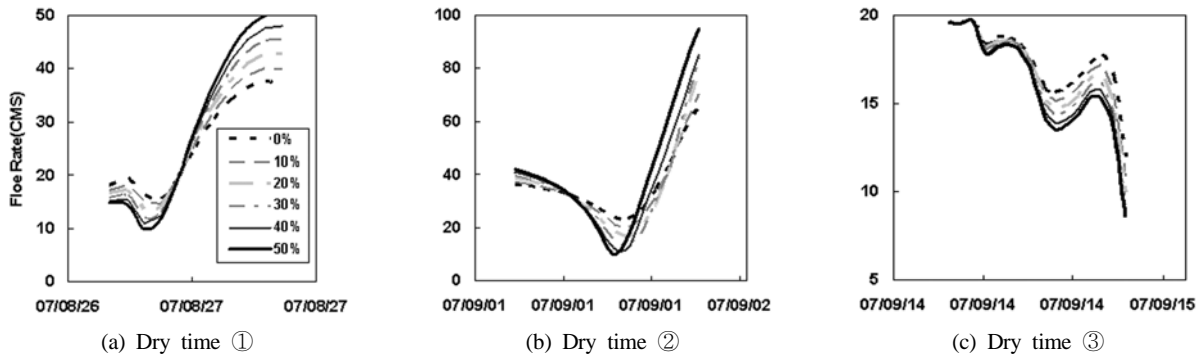


Fig. 8. Variations of runoff hydrograph according to the reduction of pervious area in Kap Stream basin during the dry day.

하여 수역 및 시가화지역을 제외한 나머지 6가지 피복을 투수지역으로 나누고 수역과 시가화지역은 불투수지역으로 간주하여 갑천 유역의 불투수면 변화를 Table 7에 나타내었다.

갑천 유역의 불투수면적 비율은 1975년 31.95 km<sup>2</sup>(유역면적의 4.9%)에서 시간에 따라 선형함수(Fig. 9)로 증가하였으며, 25년 후인 2000년에는 67.83 km<sup>2</sup>(유역면적의 10.5%)까지 약 2배 이상 증가하였다. 이는 대덕연구단지, 정부청사가 이전한 둔산 신도시, 노은 택지개발 지구, 그리고 계룡시 등 유역 내에서 지속적이고 활발한 토지이용 변화가 주요한 원인으로 판단된다.

갑천 유역의 도시화에 따른 유출량 규모와 변동성을 평가하기 위하여 Searcy(1959)에 의해 처음 제안된 유황곡선(flow duration curves)을 통한 분석을 실시하였다. 1975년부터 2000년까지의 연속적인 불투수면 변화를 SWMM 모형에 적용하여 보정기간과 검증기간을 재현기간으로 하여 강우-유출 모의를 실시하고 각각에 대한 유황분석을 하였다. 도시화 과정에 나타난 유출 변화 특성 분석은 유황분석의 기준이 되는 하천유량으로 풍수량(Q<sub>95</sub>), 평수량(Q<sub>185</sub>), 저수량(Q<sub>275</sub>), 갈수량(Q<sub>355</sub>)의 변화를 비교하여 이루어졌다(Fig. 10, 11).

Table 6. Historical changes of land use in Kap Stream basin from 1975 to 2000 (Unit : km<sup>2</sup>)

| Land use         | 1975              | 1980              | 1985              | 1990              | 1995              | 2000              |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1. Waters        | 1.41<br>(0.2%)    | 0.77<br>(0.1%)    | 1.98<br>(0.3%)    | 1.01<br>(0.2%)    | 2.15<br>(0.3%)    | 1.45<br>(0.2%)    |
| 2. Built-up area | 31.95<br>(4.9%)   | 35.76<br>(5.5%)   | 40.72<br>(6.3%)   | 59.44<br>(9.2%)   | 65.72<br>(10.1%)  | 67.83<br>(10.5%)  |
| 3. Bare field    | 13.30<br>(2.0%)   | 23.97<br>(3.7%)   | 16.84<br>(2.6%)   | 18.23<br>(2.8%)   | 16.68<br>(2.6%)   | 7.78<br>(1.2%)    |
| 4. Wetland       | 3.58<br>(0.6%)    | 0.95<br>(0.1%)    | 0.04<br>(0.0%)    | 0<br>(0.0%)       | 0.85<br>(0.1%)    | 0.02<br>(0.0%)    |
| 5. Grassland     | 17.35<br>(2.7%)   | 13.60<br>(2.1%)   | 12.04<br>(1.9%)   | 36.46<br>(5.6%)   | 21.12<br>(3.3%)   | 25.71<br>(4.0%)   |
| 6. Forest        | 448.70<br>(69.1%) | 461.50<br>(71.1%) | 439.33<br>(67.7%) | 409.32<br>(63.1%) | 400.10<br>(61.7%) | 388.30<br>(59.8%) |
| 7. Paddy field   | 132.68<br>(20.4%) | 112.43<br>(17.3%) | 127.07<br>(19.6%) | 66.57<br>(10.3%)  | 90.55<br>(14.0%)  | 101.65<br>(15.7%) |
| 8. Upland crop   |                   |                   | 10.95<br>(1.7%)   | 57.94<br>(8.9%)   | 51.81<br>(8.0%)   | 56.24<br>(8.7%)   |
| 9. Total         | 648.97            | 648.97            | 648.97            | 648.97            | 648.97            | 648.97            |

Table 7. Historical changes of impervious area in Kap Stream basin from 1975 to 2000 (Unit : km<sup>2</sup>)

| Land cover         | 1975              | 1980              | 1985              | 1990              | 1995              | 2000              |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1. Waters          | 1.41<br>(0.2%)    | 0.77<br>(0.1%)    | 1.98<br>(0.3%)    | 1.01<br>(0.2%)    | 2.15<br>(0.3%)    | 1.45<br>(0.2%)    |
| 2. Impervious area | 31.95<br>(4.9%)   | 35.76<br>(5.5%)   | 40.72<br>(6.3%)   | 59.44<br>(9.2%)   | 65.72<br>(10.1%)  | 67.83<br>(10.5%)  |
| 3. Pervious area   | 615.62<br>(94.9%) | 612.45<br>(94.4%) | 606.27<br>(93.4%) | 588.52<br>(90.7%) | 581.10<br>(89.5%) | 579.70<br>(89.3%) |
| 4. Total           | 648.97            | 648.97            | 648.97            | 648.97            | 648.97            | 648.97            |

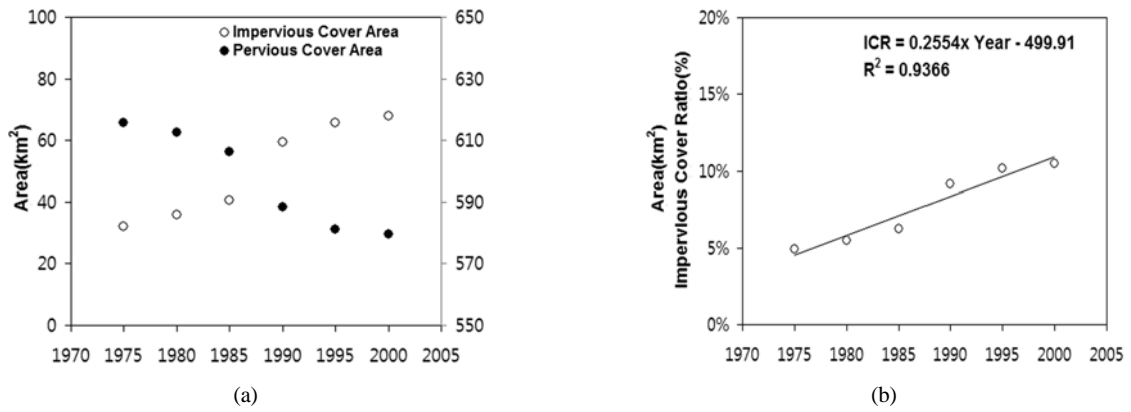


Fig. 9. (a) Historical changes of pervious and impervious areas and (b) variation trend with time.

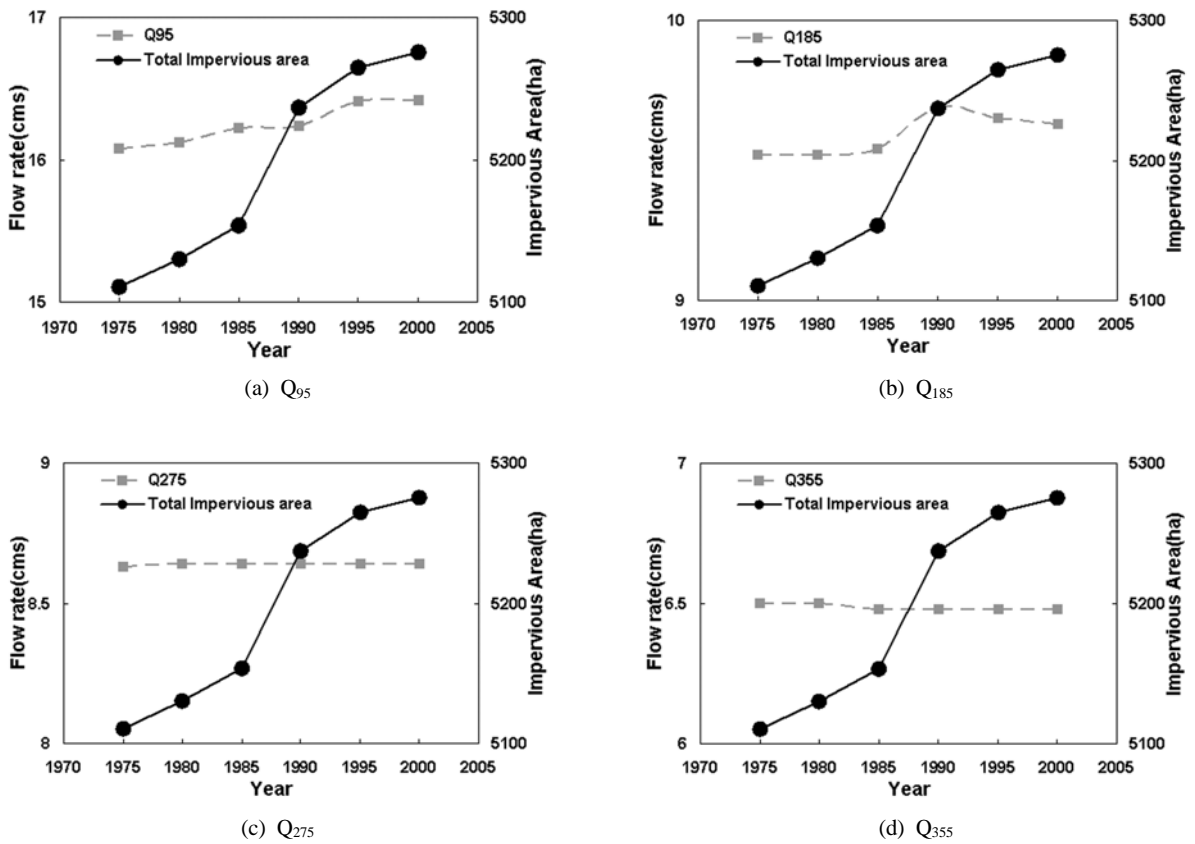


Fig. 10. Variations of flow regimes (Q<sub>95</sub>, Q<sub>185</sub>, Q<sub>275</sub>, Q<sub>355</sub>) with the changes of total impervious area in 2007.

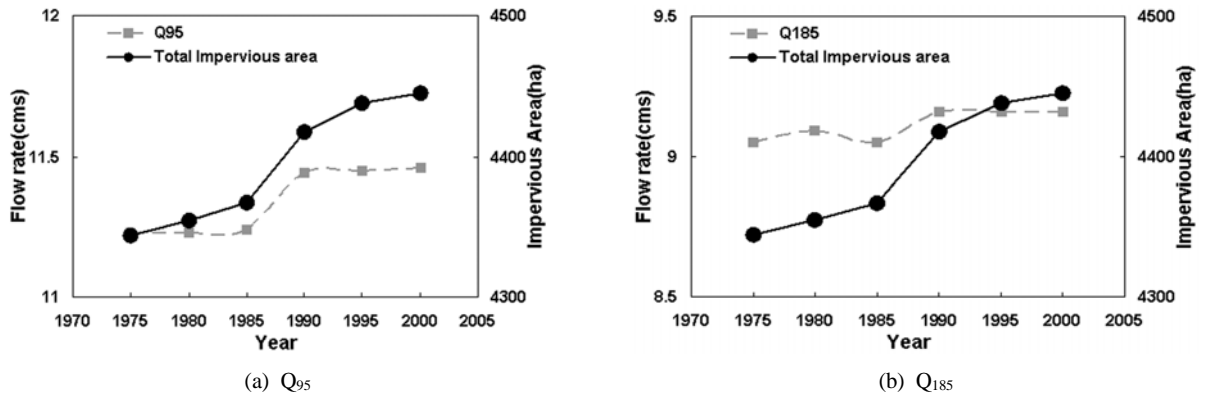


Fig. 11. Variations of flow regimes (Q<sub>95</sub>, Q<sub>185</sub>, Q<sub>275</sub>, Q<sub>355</sub>) with the changes of total impervious area in 2008.



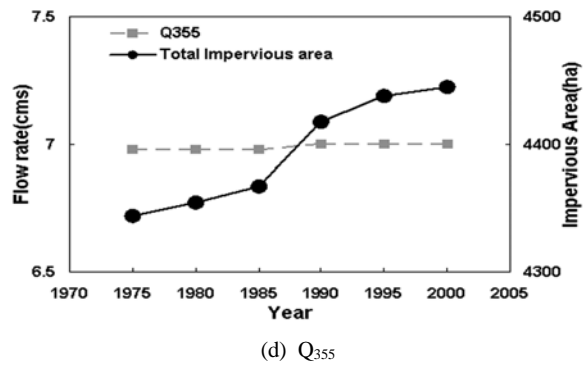
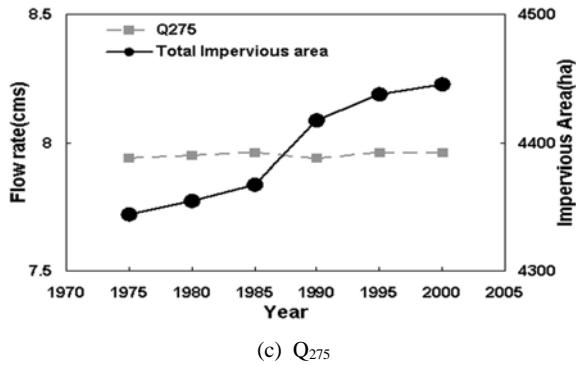


Fig. 11. Variations of flow regimes (Q<sub>95</sub>, Q<sub>185</sub>, Q<sub>275</sub>, Q<sub>355</sub>) with the changes of total impervious area in 2008. (continued)

분석 결과 불투수면적이 1975년부터 2000년까지 점차 증가하면서 풍수량과 평수량은 불투수면의 증가에 맞춰 증가하는 추세를 보였고, 저수량과 갈수량은 거의 변화가 없거나 오히려 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 불투수면적의 증가와 더불어 강우시에 유역의 유출이 지배적으로 증가하고 비강우시에는 그 영향이 상대적으로 작게 반영되는 것으로 나타난 3.2절의 결과와 상응한다. 이러한 결과는 SWMM 모델의 지하수 유출 해석 알고리즘에 대한 재검토가 필요함을 시사하며, 불투수면 증가에 따른 갈수기 도시하천 건천화를 해석하기 위해서는 모델의 장기유출 모의 기능의 수정이 불가피하다고 판단된다.

량은 변화가 거의 나타나지 않았다. 이러한 결과는 SWMM 모델의 지하수 유출 해석 알고리즘에 대한 재검토가 필요함을 시사한다.

- 본 연구의 결과는 유역의 불투수면 관리를 위한 기초정보를 제공하며, 불투수면 지표 모델 연구를 통하여 불투수면 저감방안 수립 및 유역관리 등에 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 기대한다. 추후 연구에서 불투수면 증가가 수질과 생태계에 미치는 영향을 분석하고 불투수면 지표모델 개발을 통한 효과적인 유역관리 방안을 제시할 계획이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 금강 수계 갑천 유역을 대상으로 SWMM 모델을 구축하고 각 소유역의 불투수면적 증가에 따른 변화를 분석하였다. 또한 실제 1975년부터 2000년까지의 갑천 유역의 Landsat 위성영상 자료 분석을 통한 토지이용 변화를 적용하여 도시화에 따른 유황변화 분석을 실시하였으며 연구 결과를 요약하자면 다음과 같다.

- 갑천 유역의 물 순환 해석을 위해 SWMM 모형을 구축하고 2007년과 2008년 수문사상을 대상으로 모델을 보정 및 검증한 결과, 모델은 갑천 말단에서 실측한 유황의 시계열 변화를 적절히 모의하는 것으로 판단된다.
- 검증된 모델을 이용하여 갑천 유역의 투수면적을 10%에서 50%까지 감소시켜 유역의 불투수면적 증가에 따른 유출량 변화를 모의한 결과, 강우시에 침투유량은 비례적으로 증가하였으며, 비강우시 기저유량은 감소하였으나 그 영향은 미미하게 나타났다. 이를 보완하기 위해 모델에서의 지하수 모의에 대한 검토가 필요하다.
- Landsat 위성영상 자료로부터 추출한 1975년에서 2000년까지 5년 단위의 갑천 유역 토지이용 변화를 분석한 결과 유역의 불투수면 비율은 1975년 4.9%에서 2000년 10.5%까지 약 2배 이상 증가하였다.
- 1975년부터 2000년까지의 불투수면 변화 추세를 반영하여 2007년과 2008년 수문사상에 대한 강우-유출 해석을 수행하고 유황분석을 실시한 결과, 풍수량과 평수량은 불투수면적의 증가에 따라 증가한 반면 저수량과 갈수

#### 참고문헌

김성준, 박근애, 전무갑(2005). 토지이용의 변화가 홍수유출에 미치는 영향분석. *한국수자원학회논문집*, **38**(4), pp. 301-311.

박준호, 유용규, 박영근, 윤희택, 김종진, 박윤식, 진지홍, 임경재(2008). SWMM을 이용한 춘천 거두 1지구의 LID 개념 적용으로 인한 유출 감소 특성 분석. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(6), pp. 806-816.

배덕효, 이병주, 정일원(2003). 위성영상피복분류에 대한 CN 값 산정(I). *한국수자원학회논문집*, **36**(6), pp. 985-997.

신현석, 윤용남(1993a). SWMM 모형을 이용한 도시 유역의 유출 및 NPS 오염물 배출 모의. *한국수문학회지*, **26**(3), pp. 125-135.

신현석, 윤용남(1993b). 도시소유역에서의 유출과 비점오염원 배출량 산정. *한국수문학회지*, **26**(4), pp. 85-95.

이종태, 강태호(1997). 도시 배수유역의 유출-수질 특성인자의 민감도 분석. *한국수자원학회논문집*, **30**(1), pp. 83-93.

이종태, 윤세의, 김정환(1994). 지표면유출 해석방법이 도시 유역의 홍수량 산정에 미치는 영향. *대한토목학회지*, **14**(5), pp. 1167-1175.

최지용, 김병익, 박백수, 정은성(2008). 물 환경관리를 위한 불투수면 지표의 적용성 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(6), pp. 767-772.

최지용, 장수환(2003). *유역관리 효율화를 위한 불투수면 지표 개발과 적용 I*. 한국환경정책·평가연구원.

한강수계관리위원회(2007). *수계별 유역의 불투수율조사 및 저감방안 연구(1차년 최종보고서)*.

함광준, 김준현, 허범녕, 최지용, 김영진(2006). 유역의 불투수성에 따른 강우유출특성 비교. *환경영향평가학회지*, **15**(2), pp. 157-163.

- Booth, D. B. and Reinelt, L. E. (1993). Consequences of urbanization on aquatic system : Measured Effect, Degradation Thresholds, and Corrective Strategies. *Watershed '93 A National Conference on Watershed Management*. U. S. Environmental Protection Agency, Alexandria, Virginia, March 21-24, pp. 545-550.
- Chung, S. W., Gassman, P. W., Gu, R., and Kanwar, R. S. (2002). Evaluation of EPIC for assessing tile flow and nitrogen losses for alternative agricultural management systems. *Transactions of the ASAE*, **45**(4), pp. 113-122.
- Chung, S. W., Gassman, P. W., Kramer, L. A., Williams, J. R., and Gu, R. (1999). Validation of Epic for two watersheds in southwest Iowa. *Journal of Environmental Quality*, **28**(3), pp. 971-979.
- Galli, J. (1991). *Thermal Impacts Associated With Urbanization and Stormwater Management Best Management Practices*, Metropolitan Washington Council of Governments, Maryland Department of Environment, Washington, D.C.
- Green, C. H., Tomer, M. D., Di Luzio, M., and Arnold, J. G. (2006). Hydrologic evaluation of the soil and water assessment tool for a large tile-drained watershed in Iowa. *Transactions of the ASAE*, **49**(2), pp. 413-422.
- Huber, W. C. and Dickinson, R. E. (1988). *Storm Water Management Model version 4; User's Manual*. University of Florida, Gainesville, USA, Department of Environmental Engineering Sciences.
- Jones, R. and Clark, C. (1987). Impact of watershed urbanization on stream insect communities. *Water Resource Bulletin*, American Water Resources Association, **23**(6), pp. 1047-1056.
- Klein, R. D. (1979). Urbanization and stream quality impairment. *Water Resources Bulletin*, American Water Resources Association, **15**, pp. 948-963.
- Legates, D. R. and McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of "goodness of fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resource Research*, **35**(1), pp. 233-241.
- McCuen, R., Johnson, P., and Ragan, R. (1996). *Hydrology*. FHWA-SA-96-067, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual model; Part1 - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, **10**(3), pp. 398-409.
- Ramanarayanan, T. S., Williams, J. R., Dugas, W. A., Hauck, L. M., and McFarland, A. M. S. (1997). Using APEC to identify alternative practiced for animal waste management. *ASAE Paper*, 97-2209, St. Joseph, Mich.
- Rossman, L. A. (2008). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0*. EPA.
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., and Hauck, L. (2001a). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*, **37**(5), pp. 1169-1188.
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Hauck, L., and Dugas, W. A. (2001b). Application of a watershed model to evaluate management effects on point and nonpoint source pollution. *Transactions of the ASAE*, **44**(6), pp. 1559-1570.
- Schueler, T. (1987). Controlling Urban Runoff- A Practical Manual for Planning and Designing Urban Best Management Practices. Metropolitan Washington Council of Governments, Washington, D.C.
- Schueler, T. (1994). The importance of imperviousness. *Watershed Protection Techniques*, Center for Watershed Protection, **1**(3), pp. 100-111.
- Searcy, J. C. (1959). Flow-duration Curves. *Water Supply Paper*, United States Geological Survey, Washington, D.C., 1542A.
- Shaver, E., Maxted, J., Curtis, G., and Carter, D. (1995). Watershed protection using an integrated approach. *In Stormwater NPDES Related Monitoring Needs*. Engineering Foundation. America Society of Civil Engineers, Crested Butte, Colorado, August 7-12, 1994.
- Whittaker, B. N. and Reddish, D. J. (1989). Subsidence occurrence, prediction and control. *Elsevier*, Amsterdam, *Developments in Geotechnical Engineering*, **56**, pp. 528.