

수문학적 유사단위와 우수관망의 공간정밀도가 SWMM모형 성과에 미치는 영향*

하성룡^{1*} · 이강원¹

Effect of a Hydrologic Similarity Unit and Storm Sewer Resolution on the SWMM Model Performance

Sung-Ryong HA^{1*} · Kang-Won LEE¹

요 약

본 연구의 목적은 도시지역에 SWMM 모형에 필요한 적정규모의 배수유역(HSU) 및 관거망 공간정보의 정밀도 수준을 파악하는 데 있다. 공간정밀도 수준의 차이가 지표면 유출유량의 모의결과에 미치는 영향은 매우 미미한 수준에서 억제 가능하였으나, 오염부하량 유출의 모의결과는 토지이용이 서로 다른 다수의 단위소유역들을 재합성하여 새로운 단위소유역을 작성하면 유출 오염부하량이 감소됨이 확인되었다. 한편, 관거의 공간정밀도 차이에 따른 유출량 모의결과는 유출첨두시간에 약간의 차이를 보이지만 전체 모의 기간을 통하여는 유출 패턴과 총유량에 미치는 영향은 매우 낮았다. 관거 유출과정 중에 다소의 유출부하량 계산의 오차가 발생하였으나, 그 규모는 관거 정밀도가 낮은 Case-3을 제외하고는 약 5~10% 정도였다.

주요어: GIS, 수문학적 유사단위, 토지피복, 오염부하량, 공간정밀도, 우수관거, 지표면유출, SWMM

Abstract

The partitioning level of a catchment becomes an issue if the calculated results from different levels show the same performance regardless of the levels. This study aims to identify the proper processing level of spatial resolution for the SWMM model application in an urban area. Using GIS overlaying technique, the division of subcatchments as a hydrologic similarity unit (HSU) is achieved with a comprehensive consideration of surface slope conditions, flow directions of storm sewers, and current land cover situation. Three surface-sewer alternatives are made on the basis of three different levels of surface divisions as well as the number of sewer connections and used as runoff simulation fields for the application of SWMM. As the result, it is found that the effect of a spatial resolution on the surface runoff results is not significant. On the other hand, the accumulated pollution load from an unit subcatchment, which is built by aggregation of several unit subcatchments consisting of various land

2006년 3월 1일 접수 Received on March 1, 2006 / 2006년 5월 10일 심사완료 Accepted on May 10, 2006

* 이 논문은 2004년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by Chungbuk National University Grant in 2004)

¹ 충북대학교 공과대학 도시공학과 Department of Urban Engineering, Chungbuk National University

※ 연락처 E-mail: simplet@chungbuk.ac.kr

cover conditions is reduced through the deterioration of surface spatial resolution. Although overall runoff pattern and accumulated runoff are little affected by spatial resolution, the simulated runoff from sewer outlet shows slight difference at the peak appearance time. The gap between surface pollution load accumulated and it discharged from the sewer outlet in a surface-sewer alternative during runoff period is monitored but the level of error is less than 5-10% except the lowest spatial resolution case.

KEYWORDS: GIS, hydrologic similarity unit (HSU), land cover, pollution load, spatial resolution, storm sewer, surface runoff, SWMM

서 론

도시구역의 강우-유출에 따른 비점오염부하 유출을 모의하기 위해서는 일반적으로, 비점오염원인 도시공간을 충분히 상세하게 소 구역으로 분할한 이후에 강우-유출모형을 적용하는 것이 바람직스러운 것으로 간주되어 왔다. 한편, 분할된 소 구역의 개수가 늘어날수록 모델의 구동에 요구되는 입력자료의 수집 및 전처리를 위한 과정에서 더 많은 작업시간과 노력이 요구된다(이강원, 2005). 국내에도 최근 도시구역에서의 강우-유출 현상에 관한 구체적인 연구(서규우, 1996)가 배수관거를 포함하는 소규모 도시하천구역에 SWMM과 FLOOD 모형 등을 적용하였고, 도시의 지하에 매설된 하수관거를 통하여 배출되는 우수 및 비점오염물질의 유출거동에 대한 연구는 2001년도부터 시작된 하수관거정비사업 추진과 더불어서 차츰 증가되고 있다. 한편, 강우-유출 해석에 있어서 유출공간인 실제의 유역을 얼마나 사실에 가깝게 모형화시키느냐는 유역이 지닌 물리적 특성을 얼마나 사실적으로 묘사할 것인가에 달려있고, 전통적으로 그 수준에 대한 결정은 매우 많은 부분이 해당모형을 이용하고자 하는 연구자의 주관과 개인적 경험에 의존되어왔다(박상영, 2004). Latif 등(2003)은 유출공간의 지형학적인 해상도 즉, 서로 다른 정도를 지닌 하천밀도정보가 유출수문곡선과 유출오염도곡선에 미치는 영향을 분석하였다. 국내에서도 김경탁 등(2003)도 수문유출모의 연구를 통하여 일정수준 이상의 상세한 유역분할의 경우, 유역분할이 유출모의결과에 큰 영향을 미치지 않는다고 보고한 바 있다. 박상영(2004)은 데이터의 수집 및 분석

수준에 따라서도 모형의 적용 수준은 크게 달라질 수 있음을 지적하고, 문제의 복잡함에 따라서 적절한 수준에서 모형을 적용하는 것이 경제적이라 할 수 있지만, 적용 수준이 높은 모형의 모의 결과에 비하여 적용 수준이 낮은 모형의 결과가 동일한 수준을 가질 경우에는 높은 수준의 정보 적용이 합리적일까에 대한 문제를 제기하였다.

본 연구의 목적은 도시지역에 SWMM 모형을 적용하여 도시의 강우-유출 현상을 효과적으로 모의할 때 요구되는 도시우수 배수공간 정보의 수준 즉, 지표면의 배수구역분할 정밀도와 지하의 관거망 공간정보 정밀도의 수준을 파악함에 있다.

1. SWMM 모형의 이론적 배경

1.1 모형의 개념

1971년 미국 EPA의 지원 아래 개발된 SWMM모형은 도시구역 내에서 강우사상으로 인해 발생하는 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표 하 흐름, 배수관망에서의 유출량 추적, 저류량 산정, 오염물질의 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다. 그림 1은 SWMM 모형의 도시우수유출 공간 해석의 개념도로 강우를 받아서 지표면배출을 하는 지표면 유출해석부분과 지표를 통하여 유출된 강우가 지하에 매설된 관거로 유입된 후에 관거를 통한 유출과정을 해석하는 관거 유출해석부분으로 구분된다. 모형은 전체 유역을 수문학적으로 유사한 특성(지표면의 토지이용, 경사, 토양 등의 인자 등)을 가지는 수문학적 유사단위 즉, 소유역 분할의 과정을 거치게 되고, 분할된 소유역에 대하

여는 서로 다른 유출조건을 적용할 수 있다. 즉, 지표면의 유출 유량을 결정하는 침투량과 저류량은 토지의 피복에 따라 달라지며, 강우가 없는 동안 도시지표면에 오염물질이 쌓이는 정도를 부하축적(buildup)계수는 토지이용 및 피복조건에 따라 다르게 적용되고 축적된 오염물질이 강우에 의해 쓸려 나가는 양을 결정하는 부하쓸림(washoff)계수도 지표면의 지형이 갖는 특성에 따라 다르게 적용된다. 따라서 SWMM 모형을 대상도시유출에 성공적으로 적용하기 위하여는 강우-유출공간(소유역)의 분할에 있어 지표의 특성을 얼마만큼 적절히 반영할 것인가는 매우 중요한 관심의 대상이다 (박상영, 2004).

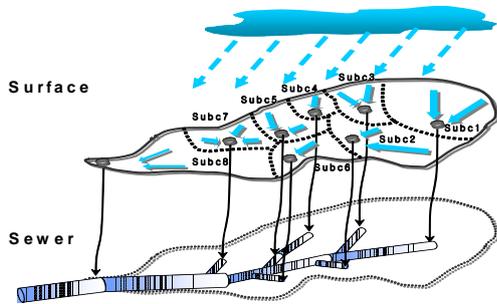


Figure 1. Connection of surface and sewer

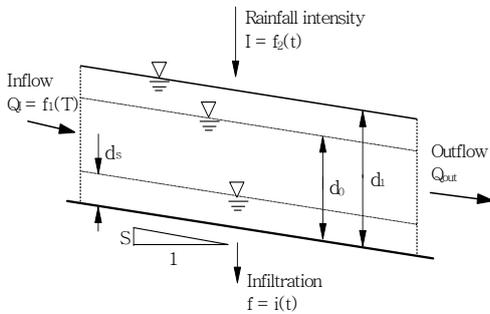


Figure 2. Surface flow of SWMM

1.2 모형의 기본방정식

지표면유출에 대한 기본방정식은 마찰경사를 유역경사와 같다고 가정하는 비정상 강우유출

해석법인 Kinematic wave법을 간략화한 비선형저류방정식을 연속방정식으로 하고 강우에 따른 소유역에서의 수심과 유량변화를 결정하기 위해 Manning방정식을 운동방정식으로 사용한다. 이 근사법은 배수영역이 큰 경우에는 적합하지 않으며 급경사, 완만한 홍수파의 상승구간에 적용이 가능한 특성을 지닌다. 그림 2에서 알 수 있듯이 본 근사법에서는 강우-유출계산을 수행하는 데 있어 상류부 경계조건만을 필요로 하고, 각 수로요소는 다른 요소에 대해 독립적인 계단형 수로로 가정한다. 각 연산구간 dt에서 두 개의 미지수 유량 Q와 수심 d가 존재하며 이를 위한 식(1)의 연속방정식과 식(2)의 운동방정식으로 구성된다.

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = A_s i - Q \quad (1)$$

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

여기서, V는 물의 체적(=A · d), d는 수심(m), t는 시간(sec), A_s는 수표면 면적(m²), i는 초과강우량(m/sec), Q는 유출량(m³/s)이다. W는 유역을 장방형단면으로 가정할 때 유역이 지니는 폭(m)에 해당한다. n은 Manning의 조도계수, d_p는 지면저류 깊이(m), S는 소유역 경사 (m/m)이다.

미지값인 지표유출수심 d를 계산하기 위해, 식(2)를 식(1)에 대입하여 구한 식(3)의 비선형저류방정식을 사용한다.

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

$$R^* = - \frac{W \cdot S^{1/2}}{A_s \cdot n} \quad (4)$$

여기서 R*은 유역폭, 경사, 조도계수 등을 하나로 표현한 변수로서 유역의 특성에 따라 변화하는 유역특성 인자이다.

식(3)의 해는 Newton-Raphon 반복법을 이용하여 구한다. 계산된 순간유출량, Q는 도시지표면유출의 결과이고 이 값이 우수관거의 유입구나 측구 등을 경유하여, 지하에 매설된 관로의 유출량계산을 위한 입력자료(유량자료)로 이용된다.

한편, 관거에서의 유출현상을 모의하기 위한 입력 자료로는 관거의 경사, 관거의 길이, 관경 등이 요구된다. 실제 대상유역에는 다양한 종류의 관거가 매설되어 있고 대상유역의 규모와 관거의 밀도에 따라 모의의 대상이 되는 관거의 수는 급격히 증가할 수 있다. 이러한 다양한 종류의 관거를 모형에 적용함에 있어서 모든 실제 관거를 대상으로 할 것인지, 아니면 특정 관거만을 대상으로 할 것인지에 따라 유출 결과는 다르게 나타날 수 있으므로 모의 대상으로서의 관거를 결정하는 것이 문제라고 할 수 있다. 관거에서의 흐름에 대한 기본방정식은 연속방정식인 식(5)와 개수로의 일차원 점변부정류 방정식인 식(6)으로 된 St. Venant 식을 사용한다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (6)$$

수심이 얇은 흐름에 있어서 이송항 ($\partial(Q^2/A)/\partial x$)은 운동방정식의 여러 항들 중에서 가장 적은 값을 갖지만, 계산결과를 불안정하게 하는 요인이다. 일반적으로 해의 안정성을 돕기 위해 이송항에 포함된 유량을 유속과 유적으로 치환한 식(7)을 사용한다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2AV \frac{\partial V}{\partial x} + V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (7)$$

식(7)의 해는 차분방정식을 사용하며, 마찰경사는 Manning식인 식(8)로 정의된다.

$$S_f = \frac{k}{gAR^{4/3}} Q | V | \quad (8)$$

여기서, k는 gn^2 이며, 속도의 절대값을 사용한 것은 S_f 를 흐름방향으로 설정하여 마찰력이 항상 흐름방향과 반대가 되도록 설정하기 위함이다. 또, SWMM의 증발량 계산은 입력된 월 증발량 자료나 시계열 자료를 사용하여 산정할 수 있으며, 투수지역에 대한 침투량은 Horton등의 모형을 사용한다.

한편, SWMM의 오염물 축적과정 모의는 식(9)의 Power-Linear 형식을 포함한 3가지 발식으로 계산될 수 있다. 오염물의 축적량 PSBED (t_n) ($kg/km^2/day$)를 식(9)와 같이 선행 무강우일수 t_n (day)의 지수함수로 표현한다. 이때, 승수는 QPACT(2)로 정의되는 값을 사용하고, 식(10)과 같은 토지피복(이용)상태에 따라서 서로 상이한 오염물의 축적한계량 QFACT(1) (kg/km^2)이 존재하는 개념을 도입하고 있다.

$$PSBED(t_n) = QFACT(1) * t_n^{QPACT(2)} \quad (9)$$

$$PSBED(t_n) \leq QFACT(1) \quad (10)$$

축적된 오염물의 쓸림에 의한 유출과정은 강우로 인한 소유역 지표로부터의 오염물 침식(erosion), 또는 용해(solution)과정을 통해 이루어지며, Sartor와 Boyd 등의 연구를 통하여 각 유출발생 후 경과시간 (runoff duration) t에서의 오염물질의 누적 쓸림량 POFF(t)(mg)는 강우시작 시간의 오염물 축적량 PSBED ($t=0$)과 오염물 쓸림율 감소계수 k에 의하여 식(11)과 같이 표현되었다.

$$PSBED(t) = PSBED(0) * (1 - e^{-k \cdot t}) \quad (11)$$

반대로 따른 지표의 잔류 오염물질의 양적 변화율은 Huber와 Dickinson에 의하여 식(12)로 정의되었고, k는 비례상수 RCOEF를 쓸림계수로 유출율 r에 비례(즉, $k = RCOEF \cdot r$)한다.

$$dPSBED/dt = -k \cdot PSBED \quad (12)$$

그러나 식(12)은 지표면 오염축적량 PSHEd 은 강우유출시간 경과와 더불어 계속 감소되고 결국 유출농도도 항상 감소하는 것으로 모의되는 한계를 지닌다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 SWMM에서는 각 시간단계에서의 쓸림 부하량 POFF(t)를 유출율 r의 WASHPO 승에 비례하는 양으로 가정하여, 대신 식(13)과 식(14)를 채택하고 있다.

$$PSHEd(t + \Delta t) = PSHEd(t) \cdot \frac{e^{-RCOEF \cdot r(t)^{WASHPO} + r(t + \Delta t)^{WASHPO}}}{2} \cdot \Delta t \quad (13)$$

$$C(t + \Delta t) = const \cdot \frac{RCOEFX \cdot r(t + \Delta t)^{WASHPO-1} \cdot PSHEd(t + \Delta t)}{A} \quad (14)$$

결국, 오염물의 쓸림현상을 모의하기 위해서는 RCOEF와 WASHPO, 두 개의 매개변수를 결정하여야 하며, 유출의 경우 각각 1.0-10과 1.0-5.0 사이의 값을 보이나, WASHPO의 경우 적절한 초기치로서 1.5-2.5의 값이 제안되고 있다 (Huber 등, 1992). SWMM이 채택하고 있는 관거유출 기본 방정식의 해는 유한차분법 중 음해법(Implicit)을 이용하고 있고, 음해법은 비교적 간단한 대수식으로 구성되나, 그 해가 상대적으로 불안정하기 때문에 비교적 조밀한 시간간격의 연산이 요구된다. Huber 등(1992)에 의하면 관거유출량을 모의할 때, 계산 시간간격이 2~30 분 사이의 경우 모의결과에 계산 시간간격이 미치는 영향은 거의 없는 것으로 알려져 있다.

2. 연구방법

2.1 시험배수구역의 공간정보취득 및 강우-유출곡선의 작성

지표면 경사는 유효강우가 우수관거까지 도달하는 시간과 지표면에 축적된 오염물의 강우에 의한 쓸림 정도를 좌우하는 변수이다. 청주시가 작성한 수치지도의 등고선 정보를 기반으

로 상용GIS프로그램을 이용하여 TIN (삼각망 공간해석)을 형성하였다. TIN자료를 2차원 평면상에 격자형태의 정보로 변환시킨 후에 경사 분석을 실시하여 모든 격자의 평균 경사도를 산정하였다. 대상유역에 SWMM모형을 적용시키기 위해서는 지표면의 조건 등을 고려하여 동일한 속성을 지니는 수문학적 유사단위인 단위소유역을 구분하여야 한다. 특히 유역 폭은 지표면을 통한 우수유출의 도달시간 및 지표면 저류량을 좌우하는 변수이다. SWMM 모형에서는 대상 소유역을 직사각형의 형태로 간주하고 흐름방향의 수직 방향의 길이를 폭으로 정의하나, 배수유역이 불규칙하고 수로가 배수유역의 중심부에 위치하지 않을 경우, 무차원 왜곡도 계수를 이용하여 산정하였다. 불투수율은 강우에 의한 지표면 유출을 발생시키는 유효강우량을 선정하는 변수로써 유출량에 직접적인 영향을 미치는 중요한 인자이므로, 지표면을 투수지역과 불투수지역으로 분류하여 각각에 대한 침투량 및 저류량 관련 매개변수를 적용하였다. 투수지역과 불투수지역의 구분은 대상 유역의 위성영상을 이용한 피복분류결과를 토대로 하였다. 영상자료를 이용한 피복분류는 기하보정 및 1:5,000수치지도를 가지고 영상 대지도 (image to map) 방법을 통하여 실세계 좌표로 변환하였다. 영상의 분광특성에 따른 분류를 위하여 참조지역 (region of interest, ROI)으로부터 취득한 지상관측자료를 토대로 토지피복상태(투수지역과 불투수지역)를 분류하였다. SWMM모형의 지표면 조도계수 및 오염물 축적량을 결정하는 데 기준이 되는 토지 이용정보는 2003년 작성된 토지이용도(고밀도 주거지, 중밀도 주거지, 저밀도 주거지, 교육 시설지, 상업지역, 나대지로 구분)를 기준으로 하여, 주거지, 상업지역, 교육 시설지, 나대지의 네 가지 유형으로 구분하여 사용하였다.

대상지역의 관거매설의 공간분포와 그 속성에 관한 정보는 청주시가 보유하고 있는 CAD 형식의 관거 자료를 활용하여 취득하였고, 관거

경사는 상위관거와 하위관거의 관저고 또는 관저고 자료와 관거의 길이를 이용하여 산정하였다. 관거의 형태는 사각형관과 원형관으로 구분하였다. 유량 및 수질 실측지점은 대상 우수관거망의 최하류단에 1개소를 선정하였으며 2004년 4월 1일과 2004년 4월 19일 2회에 걸친 강우-유출 시 강우시작부터 강우종료 후 평상시 유출상태에 이르는 시점까지 실측하였다. 유량은 유량 측정장비인 PCM3를 사용하여 20분 단위로 실측하였고 수질은 등간격(30~60분)을 침두 시간에는 10~15분 간격으로 샘플링하여 BOD, SS 항목에 대하여 분석한 자료를 사용하였다.

2.2 공간정밀도를 고려한 지표면-관거망 대안 작성 및 모의결과 평가

유역의 공간정밀도는 지표면에서의 강우-유출모의에 영향을 미치는 소유역 지표면 정보의 정도와 지하에 매설된 하수관거망의 정도로 구분하였다. 먼저 지하에 매설된 관거망은 수지상의 선으로 연결되어 있고 관거 내에서 흐르는 유출유량은 관망의 하류 쪽으로 갈수록 지표면에서 유입된 우수가 차츰 집중되어 증가하게 된다. 따라서 하수관거 상류로부터 하류로 이동하면서 그 관거의 직경(관경)이 증가된다. 본 연구에서는 연구대상 우수배수구역의 매설된 모든 관거의 직경분포를 빈도분석하여 그 결과를 기반으로 3개의 상이한 공간정밀도를 지닌 관거망 대안들을 작성하였다. Sewer-case 1은 취득한 관거망 전체를 포함하는 관거정밀도가 가장 높은 경우이고, Sewer-case 2는 전체 관경의 최빈값에 해당하는 직경을 기준으로 그 직경 이하의 모든 관거를 배제한 관거망의 경우, 그리고 Sewer-case 3는 Sewer-case 2에서 포함된 관거들의 관경 중앙값 이상에 해당하는 관거들을 포함시킴으로써 관거망의 공간정밀도는 가장 낮은 대안에 해당한다. 한편, 지표면의 분할정밀도, 즉 수문학적 유사단위인 소유역은 토지이용, 지표상태, 그리고 지표경사를 지표면 특성으로 하여 유사한 수준을 지닌 공간으로

구분되는 것이 일반적이지만, 본 연구의 대상유역이 도시지역이고 SWMM 모형의 유출해석 체계가 지표면에서의 유출과 지하에서의 관거 내 흐름으로 이루어져 있기 때문에, 대상유역의 토지이용, 지표면 경사도, 지하 관거망의 공간정밀도(전술의 3가지 Sewer-case 대안)를 기초 자료로 하여 GIS중첩기능을 적용 작성하였다. 가장 높은 공간정밀도, 즉 최대의 소유역 개수를 지닌 대안 Surface case-1을 작성하였다. 이 대안에 포함된 소유역의 개수는 최대 관거정밀도를 지닌 Sewer-case 1의 각 관거 최상위 지점, 단위관거와 다른 단위관거의 접합지점, 그리고 관경이 변하는 지점에서 단위소유역이 분할됨으로 그 분할된 개소 수에 따라서 결정되었다. 또 Surface case-2는 Sewer-case 2가 지닌 관거망정밀도의 수준에 따라서, 소유역 내에 포함되는 관거가 존재하지 않는 소유역이 발생하게 된다. 이런 소유역은 인접해있는 다른 소유역, 즉 해당 소유역 내에 관거가 존재하는 것과 통합되어 새로운 소유역으로 구분하였다. 따라서 관거망 정밀도가 가장 낮은 수준의 Sewer-case 3을 기반으로 소유역이 결정되는 Surface case-3은 타 경우에 비하여 소유역의 개수가 상대적으로 적어짐은 물론이고 단위 소유역 면적이 증가됨으로써 지표면 속성의 공간분포 상세성이 현격히 떨어진다. 이들 3개의 상이한 관거정밀도의 관거망 대안들과 3개의 상이한 유역정밀도의 소유역 대안들을 상호 조합하여 최종적인 3가지 대안 Surface-Sewer 1, 2, 3을 작성하였다. 이하, 최종대안 3가지는 각각 case1, case2, case3으로 칭한다.

소유역 합성 과정에서 생성되는 새로운 단위 소유역은 합성되기 전 각각의 기존 단위소유역이 가졌던 토지이용 특성을 새로운 단위소유역으로 적용시키는 경우, 각 기존의 단위소유역의 토지이용 면적을 합산하고 합성된 단위소유역의 전체 면적대비 합산된 토지이용 비율을 적용하였다. 예로, 면적이 각각 10ha인 기존의 두 단위소유역 A와 B를 면적 20ha 인 하나의 새로

운 단위소유역 C로 합성하는 경우, 소유역 A는 면적은 10ha, 토지이용은, 주거면적8ha(80%), 상업면적2ha(20%)의 특성을 가진다. 소유역 B의 면적은 10ha, 토지이용은, 공지10ha(100%)이다. 이들 두 소기존의 단위소유역을 합성한 새로운 단위소유역 C 면적은 20ha, 토지이용은 상업 2ha, 주거 8ha, 공지10ha가 된다. SWMM 모형에서는 토지이용을 소유역 면적 대비로 입력하므로 소유역 C의 토지이용에 따른 실제 입력 자료는 상업 10%, 주거 40%, 공지 50%로 입력한다. 소유역 합성 과정에서 합성되는 각 소유역의 경사를 하나의 소유역으로 합성 후 적용치를 산정하기 위하여 합산되는 각 소유역의 면적 가중치를 사용하였다. 예로 면적 1.2ha와 경사 0.5%를 지닌 소유역 A와 면적

3ha, 경사 1.2%를 지닌 소유역 B로 합성된 소유역 C의 경사는 각 소유역별 면적이중이 고려된 경사, A의 0.6과 B의 3.6을 합한 4.2를 A 소유역과 B 소유역의 면적을 합산한 C 소유역의 면적 4.2ha로 나누어 경사 1.0%를 산정하였다.

2.3 강우-유출공간모형의 정밀도의 영향

먼저 SWMM모형을 적용할 강우-유출공간모형 대안을 전술의 case1, case2, case3중 하나를 선정하고, 선정된 공간정밀도 대안에 포함되어 있는 단위소유역들 각각에 대한 유출모의를 실시하여 모든 단위소유역별 지표면 유출량(유량 및 배출부하량)을 산정한다. 또 모든 단위 소유역들의 유출량을 합산함으로써 해당 case의 총 지표면 유출량(유량: QA, 배

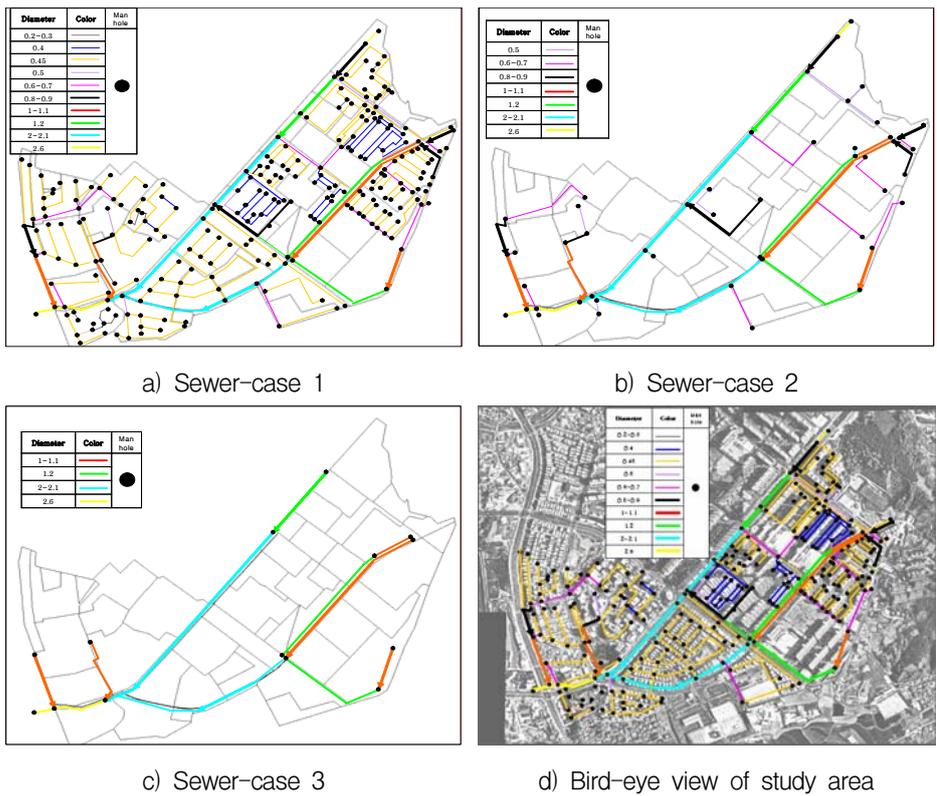


Figure 3. Spatial distribution of sewer in Yong-am drainage basin

출부하량: PA)이 산출된다. 모든 단위소유역의 지표면에서 생성된 유출량들은 각각의 단위소유역에 연결되어 있는 지하의 관거망에 유입된 후, 관거계통의 최말단관거를 통해 유출된다. 이 유출량이 총 관거유출량(유량: QB, 배출부하량: PB)이다. 이들 총 지표면 유출량과 총 관거유출량을 비교함으로써, 3가지 경우-유출 공간정밀도 대안 (case 1, 2, 3)이 모의결과에 미친 영향을 고찰하였다. 본 연구에 있어서 관거 유출모의의 계산 시간간격은 5분으로 고정하였다.

3. 공간정밀도를 고려한 SWMM모형적용 대안의 작성결과

본 연구의 대상유역은 전형적인 도시지역의 토지이용 특성, 상업, 고층다세대 주거, 학교, 공원 등을 보이고 있다. 토지이용도와 항공사진을 이용하여 분석한 결과, 대부분의 관거가 주거 밀집지역에 집중적으로 분포되어 있고 나대지와 학교에 일부 관거가 분포되어 있다. 관경을 기준으로 보면 각 필지 내에 0.2~0.9m의 관거가 분포하고 있고 도로를 따라 1.0m 이상의 차집관거가 분포하고 있다. 특히 높은 빈도는 0.45m로, 이는 대상유역에 분포된 관거의 대부분이 0.4m와 0.45m로 이루어져있기 때문이다. 본 연구에서는 관경 0.2m~2.6m까지 모든 관로를 포함하는 경우를 Sewer-case 1로 하고 최빈값에 해당하는 0.45m를 기준으로 0.5m 이상의 모든 관의 경우를 Sewer-case 2, 그리고 Sewer-case 2에 속하는 관경의 중앙값에 해당하는 1.0m이상의 관들을 포함하는 경우를 Sewer-case 3 하였다. Sewer-case 1 관거망에서 고려되는 단위 관거의 수는 총 390개이고, 관 경사는 20.2%~0.1%(평균 2.4%)로 대체로 완만한 경사를 이루고, 대상배수유역 차집관거(직경 1m 이상)에서 각 필지 내 지선 관거까지 모두 포함한다. Sewer-case 2의 단위관거 수는 총 115개이고 관 경사는 20.2%~0.1%(평균 2.3%)로 대체로 완

만한 경사를 이루고 있다. Sewer-case 3의 단위관거 수는 총 47개이고 관 경사는 10.2%~0.1%(평균 1.9%)로 3개의 대안 중 가장 완만한 경사를 이루고 있다. 단위관거 길이는 197m~6.4m(평균 84.5m)이다.

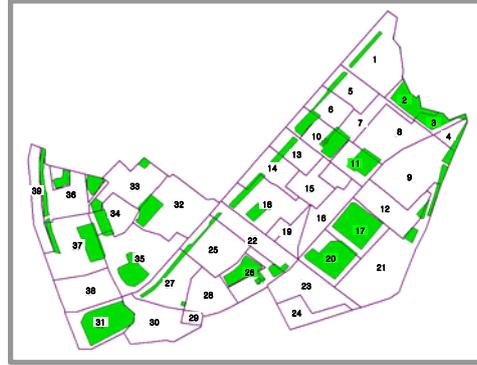


Figure 4. Division of surface case-1

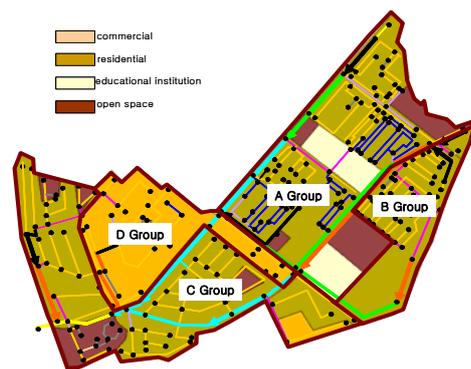


Figure 5. Groups of landuse division

한편, 그림 4에서 볼 수 있듯이 지표면 정밀도가 가장 높은, Surface case-1은 총 39개의 소유역이 분할되었고, 소유역 10, 19, 26, 36번을 제외한 모든 소유역들은 단일한 토지이용을 가지고 있다. 소유역 10번의 토지이용구성은 공지 31%, 학교 69%이었고, 소유역 19는 주거72%, 공지 28%, 소유역 26번은 주거62%, 공지38%, 그리고 소유역 36은 주거 76%, 공지24%로 형성되었다. 분할된 소유역의 면적은 4.13ha~0.25ha, 평균 1.88ha이고 총 면적은

73.45ha, 소유역 경사는 24.94%~0.26%, 평균 3.7%로 비교적 완만한 경사이고, 불투수율은 평균86%로 나타났다. Surface case-2의 경우, 분할된 단위 소유역의 개수는 38개이었고, 지표면 정밀도가 가장 낮은 Surface case-3의 경우에는 Surface case-1의 소유역을 방법에서 전술한 바와 같은 소유역의 합성과정을 거쳐 총 23개의 단위 소유역으로 구성되었다.

이들 3개의 지표면 공간정밀도 대안들은 전체유역이 포함하는 토지이용구분 별 면적비는 같지만 각단위소유역이 지니는 토지이용구분별 면적비는 서로 상이하게 분포한다. 그림 6은 Surface case-1과 Surface case-3에 각각 포함된 단위 소유역별 토지이용구분 면적분포를 나타낸다. 한편, 분할된 단위소유역에서 생성(buildup)되고 강우-유출에 따라 쓸림(washoff)이 발생하는 정도를 토지이용분포

를 반영하여 구분하였다. 그림 5와 같이 대상 배수유역을 4개의 그룹(A, B, C, D)으로 구분하여 지표면 오염부하 축적과 쓸림현상을 지배하는 모형상수를 정량화하였다. 그룹별 토지이용면적 분포는 A 그룹은 공지가 16%, 주거지가 68%, 학교부지가 16%, B그룹은 주거 100%, C그룹은 공지 13%, 주거75%, 상업 12%, D 그룹은 상업 100%로 구성되었다. 단위 면적당 한계축적량은 선행강우일수 6일이 경과하면 모든 토지이용그룹들 간의 차이가 없는 것으로 가정하였다.

4. SWMM모형의 검보정

소유역 및 관거 공간정밀도가 SWMM모형의 모의결과에 미치는 영향을 비교하는 것이 목적이므로 보정과 검정은 모의결과가 관측치와 유사한 유출패턴을 가질 수 있는

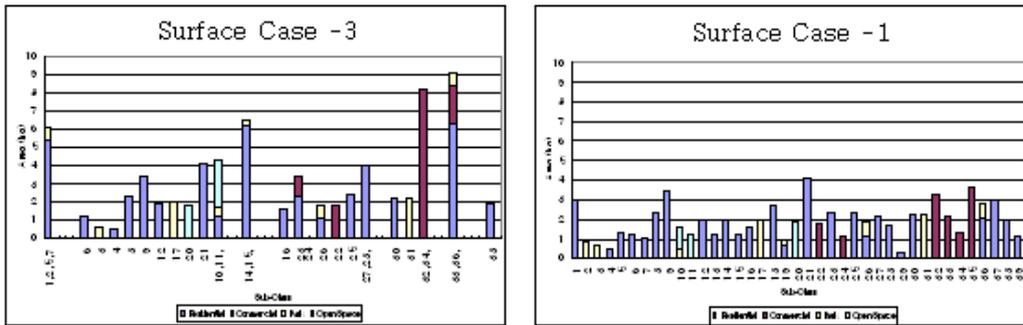


Figure 6. Landuse area distribution of subcatchments as hydrologic similarity units

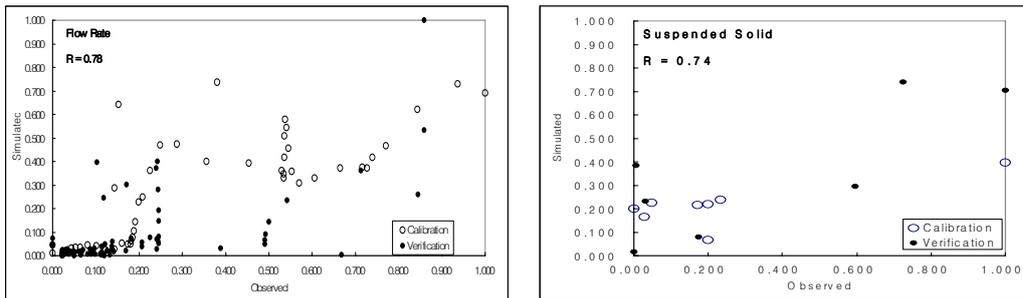
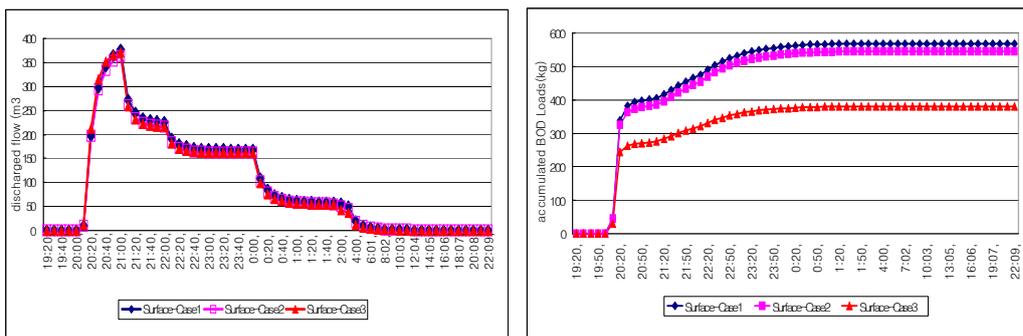


Figure 7. Consistency of calibration and verification results with observations

수준으로 하였다. 유출수문곡선의 모의와 관련된 모형 매개변수들 중 물리학적 것은 GIS자료, 항공사진, CAD 자료 등을 통해 산정된 것이므로 보정의 대상에서 제외하였고, 침투능, 조도계수, 손실 저류깊이에 관한 정보와 오염도곡선 모의와 관련된 매개변수 중 오염물의 축적에 대한 매개변수인 단위면적당의 한계부하량과 축적계수는 박상영(2004)의 결과를 인용하였다. 한편, 쓸림에 대한 매개변수인 WASHPO와 RCOEF는 Huber 등(1988)이 제안한 값을 적용하였다. case 1대안에 2004년 4월 1일 강우와 2004년 4월 19일 강우를 적용, 모형매개변수의 보정과 검정과정을 통하여 계산된 값과 관측된 값간의 상관분석을 실시한 결과가 그림 7이다. 좌측 그림은 유량에 관한 상관성을 분석한 것으로 통계적 상관성이 $R=0.78$ 이었고, 우측 그림은 수질항목 중 SS의 상관성을 분석한 것으로 $R=0.74$ 이었다. 보정과 검정을 마친 후, SWMM모형의 매개변수 등을 고정시키고, 기 도출된 3가지 공간정밀도 대안들을 2004년 4월 1일에 관측된 강우조건 하에서 각각 적용하여 공간정밀도의 수준과 계산시간간격의 정도가 SWMM모의 결과에 미치는 영향을 분석하였다.

5. 소유역 분할의 공간정밀도와 유출변화

수문학적 유사단위인 소유역의 공간정밀도 차이를 반영한 3가지 Surface case 대안들의 유출모의 결과를 비교한 것이 그림 8이다. 3가지 대안별로 모의된 총 유출유량의 수문곡선인 그림 8(a)에서 알 수 있듯이 모든 대안들의 침투시간과 침투유량 등 유출패턴이 거의 동일하였다. 따라서 소유역 분할 및 합성시 불투수율, 지표면 경사, 유역폭을 면적 가중치에 따라 적용할 경우, 유출유량은 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 유역폭의 경우는 분할과 합성 시에 그 값을 새로이 산정하는 것이 원칙이라고 할 수 있지만 실제 다수의 소유역으로 분할될 경우 각 소유역의 유역폭을 산정하는 것은 많은 시간과 노력이 필요하다. 그러나 면적 가중치를 적용함으로써 바람직한 모의결과(총 유출량 및 침투유량)를 얻을 수 있음이 확인하였다. 한편, 그림 8(b)는 3가지 대안별 유출오염부하의 BOD 누적오염도곡선을 나타낸 것으로, Surface case-3 즉, 지표면의 공간정밀도가 가장 낮은 대안의 총 누적 유출부하량의 경우 현격히 낮은 부하량이 모의되었음을 알 수 있다. 결과적으로 소유역의 분할 개수가 늘어날수록 (공간정밀도가 높



a) Flow rate

b) Accumulated BOD loads

Figure 8. Runoff results from different spatial resolutions, surface cases

을수록) 총 유출부하량이 증가되었다. 이러한 결과는 부유물질인 SS 유출부하량의 경우에서도 확인되었다. 특히 오염물의 유출 패턴을 나타내는 오염도곡선에서는 첨두시간에 소유역 분할의 수준에 따라서 유출량의 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다.

Surface case-3(23개 단위소유역)을 기준으로 분할된 단위소유역의 경우와 공간 정밀도가 가장 높은 Surface case-1(39개 단위소유역)의 경우의 단위 소유역으로부터 유출되는 결과를 비교하였다. 그 결과 유량의 경우 유사한 결과를 보이는 반면 부하량은 서로 다른 토지이용을 가지는 Surface

case-1의 단위소유역 1, 2, 5, 7이 합쳐져서 Surface case-3의 단위소유역 1로 합성된 경우 오염부하량 감소가 확인되었다. 이런 현상은 case-1의 단위소유역 14,15,18,19가 합성되어 case3의 12번 단위소유역이 된 경우 등 상이한 토지이용 특성을 지닌 단위소유역들이 수문학적 유사단위의 공간정밀도가 떨어지는 단위소유역으로 전환되는 모든 경우에서 동일하게 확인되었다. 반면, 동일한 토지이용특성을 case-1의 단위소유역, 27,28,29가 합성된 case3의 21번 단위소유역 등의 경우에는 유출부하량의 모의결과가 동일하였다.

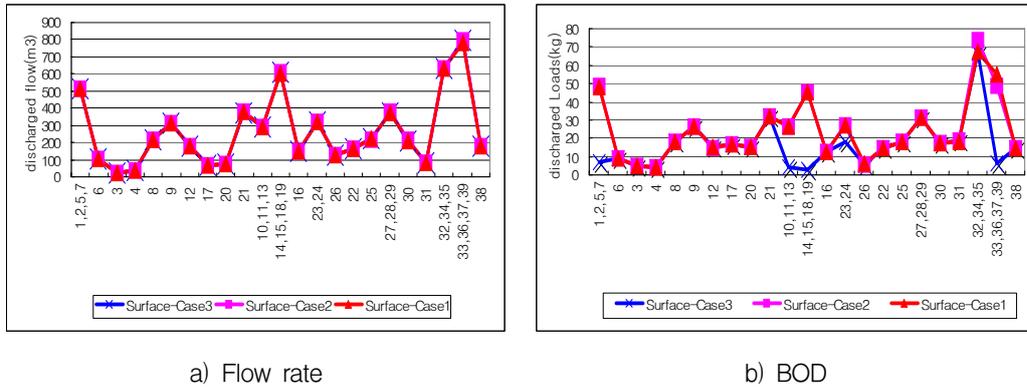


Figure 9. Effect of spatial resolution on the pollution discharge simulation

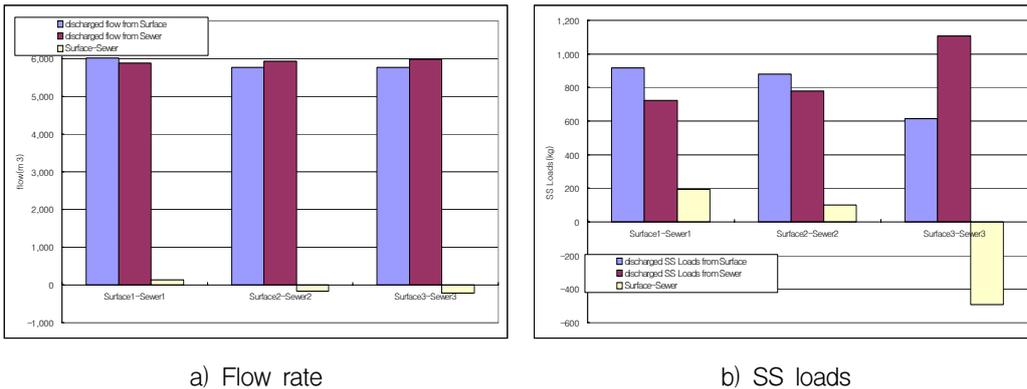


Figure 10. Calculation error by surface-sewer cases with $\Delta t=5$ min

한편, 지표면에서 발생한 유출과 관거로 유입되어 관거를 통해 관거유출모의 계산시간간격 Δt 가 5분에서 산정된 유출결과를 비교하였을 때 발생하는 오차를 비교한 결과, 지표면 유출량이 관거 유출량 보다 약간 작은 것으로 계산되었고 유출된 오염부하량의 경우도 동일한 경향을 보였다 (그림 10). 지표면 유출의 경우, Surface case의 모든 대안들에서 총유출유량의 차이가 없었던 것에 비하면, 지표유출수가 지하의 관거를 통과하는 관거 유출부하량 모의를 한 이후에는 다소의 차이가 발생하였으나, 관거 정밀도가 낮은 Case-3을 제외하고는 그 수준이 약 5~10% 정도였다.

결론

본 연구의 목적은 도시지역에 SWMM 모형을 적용하여 도시의 강우-유출 현상을 효과적으로 모의할 때 요구되는 도시우수 지표면의 배수유역분할 정밀도와 지하의 관거망 공간정보 정밀도의 수준을 파악하는 것이다. 공간정밀도 수준의 차이가 지표면 유출유량의 모의결과에 미치는 영향은 매우 미미한 수준에서 억제 가능하였으나, 오염부하량 유출의 모의결과는 토지이용이 서로 다른 다수의 단위소유역들을 재합성하여 새로운 단위소유역을 작성(결국, 단위소유역의 공간정밀도가 낮아질 경우)하면 유출 오염부하량이 감소됨이 확인되었다. 이는 지표면에 축적된 오염량과 쓸려내려오는 양과의 사이에서의 손실량이 소유역의 합성 후 더 크게 발생하기 때문인 것으로 밝혀졌다.

따라서 소유역의 합성에 따른 오차를 줄이기

위해서는 각 소유역이 단일한 토지이용을 가지는 수준에서 이루어지도록 하는 것이 중요하다. 한편, 관거의 공간정밀도 차이에 따른 유출량 모의결과는 유출침투시간에 약간의 차이를 보이지만, 전체 모의 기간을 통해서는 유출 패턴과 총유량에 미치는 영향은 매우 낮았다. 관거 유출과정 중에 다소의 유출부하량 계산의 오차가 발생하였으나, 그 규모는 관거 정밀도가 낮은 Case-3을 제외하고는 약 5~10% 정도였다. **KAGIS**

참고 문헌

- 김경탁, 최윤석 (2003), 유역분할에 따른 유출 응답에 관한 연구. 한국수자원학회 논문집 36(6):911-924
- 박상영 (2004), GIS기반 도시 하수관망 및 배수 구역 공간해상도가 오염부하 모델링에 미치는 영향, 충북대학교 대학원 공학박사학위논문. 143쪽.
- 서규우, 배덕효, 심재현, 이재준 (1996), 유역개발에 따른 도시하천에서의 유출량 및 도달시간 변화에 관한 연구, 한국수자원학회지, 제29권 제3호, 한국수자원학회, pp. 201-216.
- 이강원 (2005), 하수도 배수유역과 관거의 모형화 수준이 SWMM의 재현력에 미치는 영향, 충북대학교 대학원 공학석사학위논문. 112쪽.
- Huber Wayne C. and Robert E. Dickinson.(1992). Storm Water Management Model, Version 4 : User's Manual, EPA. pp. 226-227.
- Latif Kalin, Rao S. Govindaraju and Mohamed M. Hantush (2003). Effect of geomorphologic resolution on modeling of runoff hydrograph and sedimentograph over small watersheds, Journal of Hydrology: 276, 89-111. **KAGIS**