

목감천 유역의 CSOs를 포함한 물순환 모의

Hydrologic Cycle Simulation of Mokgam Watershed including CSOs

이길성*, 홍원표**, 정은성***, 김경태****

Kil Sung Lee, Won Pyo Hong, Eun Sung Chung, Kyung Tae Kim

요 지

도시 유역의 하수관거는 대부분 합류식 하수관거로 되어 있기 때문에 도시하천의 물순환을 모의하기 위해 수량적인 측면이나 수질적인 측면에서 강우시의 합류식 하수관거 월류수 즉, CSOs를 고려한다면 보다 정확한 모의가 가능할 것이다. 목감천 유역은 중·상류 지역의 대부분은 농경 또는 임야로 이용되고 있지만, 하구부에는 밀집된 시가지가 전체유역 면적의 약 35.2 %인 18.66 km² 를 형성하고 있고, 이중 대부분이 합류식 하수관거로 되어 있다. 따라서 목감천 유역을 PCSWMM의 TRANSPORT 블록내의 flow divider를 이용하여 모형을 구성하여 1996년부터 2005년까지 10년 동안의 연속유출모의를 실시하여 물순환 분석을 하였다. 결과를 보면 10년 평균 강수량은 1537.9 mm이며, 직접유출량 비율은 1,263.0 mm, 침투량은 335.7 mm, 증발량은 415.7 mm이다. 또한 10년 평균 상수량은 909.10 mm, 하수량은 736.3 mm(CSOs 355.0 mm), 하천유입하수량은 170.3 mm, 서남 및 역곡하수처리장 이송량은 211.0 mm이다. 부하량 결과를 살펴보면 발생부하량은 10,108,554 kg/year이며 배출부하량은 834,533 kg/year으로, 이는 곧 점오염원을 의미한다. 유역 총 배출량은 1,575,200 kg/year, 비점오염원은 740,667 kg/year, 하수처리장 이송부하량은 1,220,000 kg/year, 목감천 출구지점에서는 355,200 kg/year(CSOs 62,531 kg/year)임을 알 수 있었다.

핵심용어: 목감천 유역, 연속유출모의, PCSWMM, CSOs, 오염부하량

1. 서 론

근래에 들어 산업시설을 발달과 인구의 도시집중 등으로 하천주변 지역의 개발이 이루어지면서 물 수요 증가로 인한 수자원 부족현상이 나타나고 있으며, 점오염원 및 비점오염원 증가에 따라 수질이 악화되고 있다. 특히 도시유역은 대부분이 합류식 하수관거로 되어 있어 강우 초기에 많은 CSOs(Combined Sewer Overflows)가 유출되어 비점오염물과 함께 하천의 오염물 농도가 급격히 증가하여 환경오염을 야기시킨다. 합류식 하수관거 시스템은 건기 시에 발생된 하수(가정하수, 산업폐수 등)는 차집관거로 집수되어 하수처리장으로 유입되지만, 강우시에는 건기하수 3배까지의 유출량은 차집되어 하수처리장으로 유입되고, 차집되지 않은 유량은 월류하여 하천으로 유입된다. 따라서 도시의 물순환을 분석하기 위해서는 CSOs에 대한 고려를 하여야 한다.

본 연구에서는 CSOs를 포함한 목감천 유역의 물순환 분석을 하기 위하여 도시유역의 수량과 수질을 모두 모의 할 수 있도록 개발된 PCSWMM을 사용하여 1996년부터 2005년까지 10년 동안의 연속유출모의를 실시하였다. 특히 CSOs를 고려하기 위하여 TRANSPORT Block의 flow divider를 사용하여 유역에서 발생하는 하수량의 3배까지 차집관거로 이송되고 그 외의 유량은 하천으로 유입되도록 하였다.

* 정희원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수 · E-mail: kilselee@snu.ac.kr

** 서울대학교 건설환경공학부 석사과정 · E-mail: baaaar@snu.ac.kr

*** 정희원 · 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 · E-mail: cool77@snu.ac.kr

**** 서울대학교 건설환경공학부 석사과정 · E-mail: greattae@snu.ac.kr

2. PCSWMM

PCSWMM은 호우에 의한 유출량과 수질을 예측하기 위해 소유역이나 하수관로의 특성을 고려하여 실제 호우사상을 모의한다. 최대 200개의 소유역 및 하도·관로를 구성할 수 있으며, 배수유역은 합성 및 분리가 가능하다. PCSWMM은 도시유역 내에서 강우사상으로 인해 발생하는 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서 유출량 추적, 저류량 산정, 오염물질에 대한 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이며, RUNOFF, TRANSPORT, EXTRAN, STRAGE/TREATMENT, RAIN, TEMPERATURE, COMBINE, STATISTICS Block 등으로 구성되어 있다. PCSWMM은 기존의 SWMM에 GUI(Graphical User Interface) 기능이 추가된 상용 모형이다.

강우량 자료 처리 시에는 RAIN, 증발산량 자료처리에는 TEMPERATURE, 지표수 및 지하수유출 모의 시에는 RUNOFF, 하도 및 하수유출 모의 시에는 TRANSPORT Block을 사용하였다. RUNOFF Block에서 지표수유출 모의시에는 비선형저수지 방정식을, 지하수유출모의 시에는 포화지역과 비포화지역으로 나누어 질량보존식을, 침투량 산정식에는 Green-Ampt 방정식을 사용한다. 그리고 TRANSPORT Block에서 하도 및 하수유출 모의 시에는 Kinematic Wave 방정식을 사용한다.

3. 대상유역 현황

목감천은 유역면적이 52.95 km², 유로연장 15.0 km인 안양천의 제1지류로 중·상류 지역의 대부분은 농경 또는 임야로 이용되고 있지만, 하구부에는 밀집된 시가지가 전체유역 면적의 약 35.2%인 18.66 km²을 형성하고 있다. 행정구역상으로는 중·상류지역의 좌안은 시흥시, 하류지역의 좌안은 서울시, 그리고 우안은 광명시에 속하고 있다. 또한 중·상류지역은 하수 처리시설이 미비하여 단독정화 후 하천으로 방류를 하며, 하류지역은 대부분 합류식 하수관거로 되어있다. 목감천 유역내에는 칠리제저수지와 과림저수지가 있는데, 여수로에 수문이 없는 자연 월류형식으로 되어 있어 홍수조절능력은 없다. 농업기반공사에서 관할하며, 저수면적은 과림저수지는 13.3 ha, 칠리제저수지는 7.0 ha이다.

그림 1은 안양천 유역내의 목감천 유역을 나타내며, 그림 2는 목감천 유역내의 행정구역을 나타낸다.

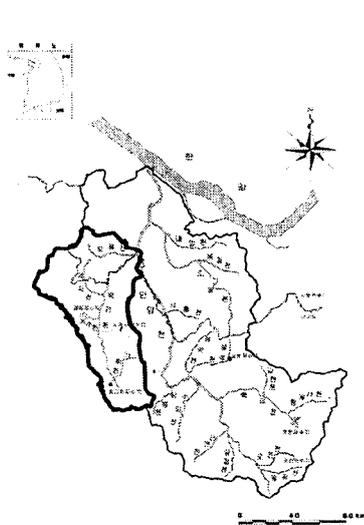


Fig. 1 Map of Mokgamcheon watershed in Anyangcheon

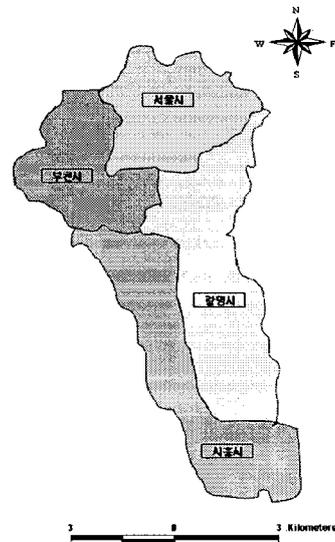
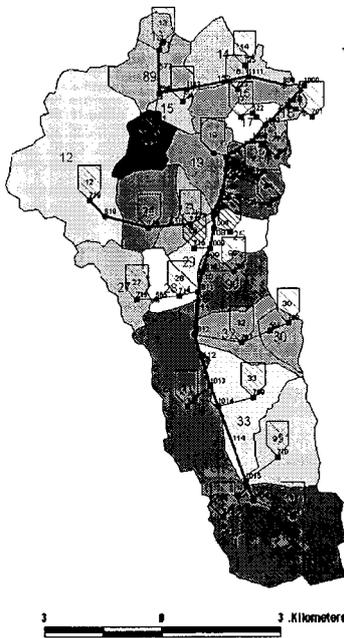


Fig. 2 Map of a administrative divisions in Anyangcheon

4. 모형입력자료의 구성

4.1 수문 및 유역 특성자료 입력



수문순환과정의 해석을 위한 기본 자료로서 소유역폭, 면적, 하도길이, 경사(소유역, 하도) 등의 지형학적 요소들은 필수적이며, 특히 도시 지역에서와 같이 강우와 유출의 관계가 토지이용현황 등과 복잡하게 연관되어지는 수문현상의 해석을 위해서 보다 정밀한 지형요소의 추출이 필수적이다. 그래서 자료입력요소들을 GIS기법을 이용하여 산정하였다.

목감천 유역의 특성인자를 추출해내기 위해 소유역 분할을 실시하였는데, 먼저 전체유역의 경계를 정한 후 지형도(1:5000)와 광명, 시흥, 서울시, 부천시의 하수관망도 및 행정구역도를 이용하여 배수구역 경계를 설정하였다. 이 배수구역도로부터 관로형태와 설치 위치 등을 구성한 27개 소유역으로 분할하였고, 모형 입력값을 구축하기 위해 목감천 유역의 수치지형도(1:5000), 토지이용도, 토양도, 하도 중·횡단면도, 하수간선 관망도 등을 수집하여 GIS를 이용하여 분석하였다. (도화종합기술공사, 2002; 삼안건설기술공사, 2001; 경기개발연구원, 2002; 도화종합기술공사, 2001)

목감천 상류지역(25, 90, 30, 32, 33, 35, 34, 31, 117 번 소유역)은 하수가 단독처리 후 하천에 방류되며, 하류의 광명시 지역(24, 23, 22, 18번 소유역)과 서울시의 20번 소유역을 제외한 지역은 합류식 하수관거 지역으로 건기시에는 전량 차집되어 서남하수처리장으로 이송된다. 부천시 지역은(12, 21번 소유역) 건기에는 역곡하수처리장으로 전량 차집되며, 하수량과 부하량은 수계오염총량관리기술지침(환경부, 2006)에 따라 산정하였고, 하도 및 하수관망 모식도는 그림 3과 같다.

Fig. 3 Subwatersheds, stream and pipe network of the Mokgamcheon

4.2 모형의 구성

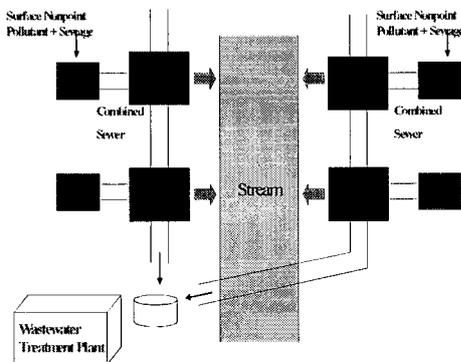


Fig. 4 Flow network diverted by flow divider (J.H. Jang, 2005)

SWMM모형에서 합류식 하수관거의 월류수가 발생하였을 경우 하수관거 용량을 초과하는 유량이 도시하천으로 월류하도록 그림 4와 같이 flow divider를 통하여 구성하였다. 합류식 하수관거를 통하여 각각의 flow divider로 유입된 유량(Q_i)은 차집관거 최대용량($GEOM_1$)보다 적을 경우 아래의 Eq. 1, 차집관거의 용량을 초과할 경우에는 Eq. 2와 같은 방식으로 배분된다.

$$0 \leq Q_1 \leq GEOM_1 : \begin{aligned} Q_{01} &= Q_i \\ Q_{02} &= 0 \end{aligned} \quad (Eq. 1)$$

$$GEOM_1 \leq Q_i : \begin{aligned} Q_{01} &= GEOM_1 \\ Q_{02} &= Q_i - GEOM_1 \end{aligned} \quad (Eq. 2)$$

여기서 Q_{01} 은 차집관거를 통하여 하수처리장으로 유입되는 유량, Q_{02} 는 하천으로 월류하는 유량이다.

4.3 하수량 및 오염 부하량 산정

4.3.1 하수량 산정

각 소유역의 하수량 산정을 위해 개별 행정구역이 소유역에 포함된 비율과 소유역 내에 포함된 행정구역들의 면적을 산정하였다. 한 개의 소유역에 포함된 각각의 해당 행정구역들의 면적에 그 행정구역들의 인구밀도를 곱하면 그 소유역 내에 포함된 해당 행정구역들의 인구가 산정된다. 소유역 내에 포함된 여러 행정구역의 인구를 더하면, 그 소유역의 인구를 추정할 수 있다. 각 행정구역들의 인구수는 통계청 홈페이지(www.nso.go.kr)을 참고하였으며, 생활하수 원단위는 각 시,구의 하수도 정비 기본계획 변경보고서에 기술된 자료를 참고하였다. (도화종합기술공사, 2002; 삼안건설기술공사, 2001; 경기개발연구원, 2002; 도화종합기술공사, 2001)

4.3.2 점원 오염 부하량 산정

PCSWMM 모형의 TRANSPORT Block의 건기 하수의 오염부하량을 산정하기 위하여 행정도별 점오염원 발생부하량과 배출부하량을 환경부(2006)의 수계오염총량관리기술지침에 의거하여 산정하였다.

수계오염총량관리기술지침에 의한 점오염원 발생부하량 산정항목은 생활계, 축산계, 산업계, 양식계와 매립계가 있다. 그러나 목감천 유역내에서 축산계, 양식계, 매립계에 의한 발생부하량은 생활계와 산업계에 의한 발생부하량에 비해서 매우 작은 것으로 판단되어 축산계, 양식계와 매립계에 의한 발생부하량은 제외하고 생활계와 산업계에 의한 발생부하량을 산정하였다.

배출부하량은 발생부하량에서 처리효율을 고려하여 산정하는데, 목감천 유역은 합류식, 분류식, 하수미처리 지역의 세 구간으로 나뉘기 때문에 세가지 경우를 모두 고려하여야 한다. 합류식 지역의 처리효율은 BOD 50%를 적용하였고(환경부, 2006), 분류식 지역은 하수가 분류식 하수관거로 배출되기 때문에 하수발생량을 0으로 하였다. 하수미처리구역에서는 기초현황조사를 실시하여 단독정화, 직접이송, 수거식 등의 특성에 따라 처리효율을 구하여 산정하여야 하지만 기초현황조사가 이루어지지 않았기 때문에 각 유역에서 배출되는 실측값을 측정하여 그 측정값으로부터 유역의 배출부하량을 산정하였다.

4.4 물순환 분석

목감천 유역의 SWMM 모형을 구축 후 1996년 1월 1일부터 2005년 12월 31일까지 10년 동안의 강우사상으로 연속유출모의(1시간 간격)를 수행한 후, 목감천 하구 지점을 유역 출구점으로 하여 물순환 분석을 실시하였다. 물순환 분석의 각 성분은 10년간의 평균 값으로 상수(water supply) 및 하수량을 고려하여 분석을 실시하였다. Water supply와 Consumed Loss는 유효수율과 하수전환율이 각각 0.9%임을 이용하여 하수량으로부터 산정하였고, CSOs의 경우는 각 Flow divider에 출구점을 설치하여 그 유량을 측정하였다. 또한 Consumed Loss는 상수량에서 소비되는 유량으로 모의유역 밖으로 배출된다고 가정하였다. 따라서 다음과 같은 식이 성립된다.

- Precipitation = Infiltration + Evaporation + Surface Runoff
- Infiltration = Upper Zone ET + Lower Zone ET + Groundwater Flow + Deep Percolation + Subsurface Storage
- Water Supply = Sewage + Consumed Loss
- Sewage = CSOs + Diffused Sewage + Transported Sewage

목감천 유역의 발생부하량은 인구수에 의해 계산되며, 배출부하량은 오염총량관리계획수립지침(환경부, 2006)과 실측값에 의해 계산되었으며, 다음과 같은 식이 성립된다.

$$\begin{aligned} \text{·유역 배출 총 부하량} &= \text{하천 출구점에서의 부하량} + \text{서남 및 역곡하수처리장 이송 부하량} \\ &= \text{점오염원} + \text{비점오염원} \end{aligned}$$

물순환 모의 결과는 표 1, 그림 5에 나타나 있으며, 오염물순환 결과는 표 2에 나타나 있다.

Table 1 Hydrology components for 10 years average (unit: mm, %)

| | Hydrological components | 1996 - 2005 | |
|--------------------|-------------------------|-------------|------|
| | | mm | % |
| Surface Water | Precipitation | 1537.9 | 100 |
| | Infiltration | 409.0 | 26.6 |
| | Evaporation | 300.3 | 21.6 |
| | Surface Runoff | 798.6 | 51.9 |
| Subsurface Water | Infiltration | 409.0 | 27.0 |
| | Upper Zone ET | 44.9 | 3.0 |
| | Lower Zone ET | 36.5 | 2.4 |
| | Groundwater Flow | 249.5 | 16.5 |
| | Deep Percolation | 11.5 | 0.8 |
| Subsurface Storage | | 67.0 | 4.4 |
| | | | |
| Water Supply | Water Supply | 909.0 | 100 |
| | Sewage | 736.3 | 81.0 |
| | Consumed Loss | 172.7 | 19.0 |
| Sewage | Sewage | 736.3 | 81.0 |
| | Diffused Sewage | 170.3 | 18.7 |
| | CSOs | 355.0 | 39.1 |
| | Transported Sewage | 211.0 | 23.2 |

Table 2 Pollution load in Mokgamcheon (unit: kg/year, %)

| Components | 1996 - 2005 | |
|---|------------------|------------|
| | kg/year | % |
| Total emitted pollution load | 1,575,200 | 100 |
| Point pollutant source | 834,533 | 53.0 |
| Non-point pollutant source | 740,667 | 47.0 |
| Pollutant load at exit point (CSOs) | 355,200 (62,531) | 22.5 (4.0) |
| Pollutant load transported to a treatment plant | 1,220,000 | 77.5 |

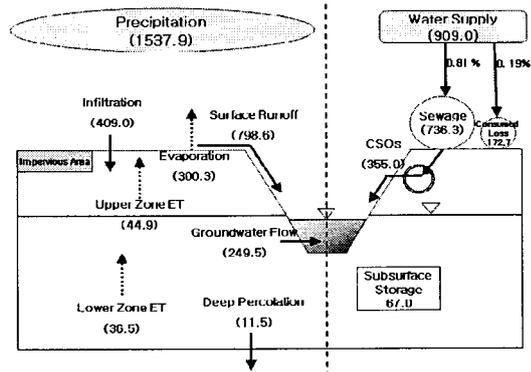


Fig. 5 Hydrologic cycle diagram of Mokgamcheon

5. 결론

본 연구에서는 PCSWMM을 이용하여 목감천 지역의 물순환 파악을 하였다. 모의 결과를 살펴보면, 목감천 지역의 10년 평균 강수량은 1537.9 mm이며, 강수량 대비 직접유출량은 1263.0 mm(52.8%), 침투량은 335.7 mm(21.8%), 증발량은 415.7 mm(27.0%)이다. 또한 10년 평균 상수량은 909.10 mm이며, 상수량 대비 하수량은 736.3 mm(81.0%), 이 중 CSOs는 355.0 mm(39.1%), 하천유입하수량(diffused sewage)은 172.7 mm(18.7%), 서남하수처리장 이송량(Transporting Sewage)은 211.0 mm(23.2%)이다.

목감천 발생부하량은 10,108,554 kg/year이며 배출부하량은 834,533 kg/year으로, 이는 곧 점오염원(53%)을 의미한다. 유역총배출량은 1,575,200 kg/year, 비점오염원량은 704,667 kg/year(47%) 비율을 보였으며, 하수처리장 이송 부하량은 총 부하량중 77.5%를, 목감천 출구지점에서는 22.5%였다. 또한 목감천 출구지점에서의 부하량 중 약 17.6%(유역총배출량 대비 4%)가 CSOs에 의한 부하량임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(과제번호 1-7-3)의 서울대학교 공학연구소를 통한 연구비 지원과 Safe and Sustainable Infrastructure Research의 연구비 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

- 경기개발연구원(2002). 광명시 하수도정비기본계획 변경보고서, 광명시.
- 도화종합기술공사(2001). 시흥시 하수도정비기본계획 변경보고서, 시흥시.
- 도화종합기술공사(2002). 서울시 하수도정비기본계획 변경보고서, 서울특별시.
- 삼안건설기술공사(2002). 부천시 하수도정비기본계획 변경보고서, 부천시.
- 장주형 (2005). GIS 기반의 SWMM 모형을 이용한 도시하천의 수질관리, 박사학위논문, 부경대학교.
- 환경부 (2006). 한강수계 오염총량 관리계획 수립지침.