

도시화에 따른 중소규모하천의 건천화 평가기법 개발*

전상미**, 박재현***, 박창근***

최근 중소규모 도시하천은 하천수 및 하천변 지하수 이용의 증가와 토지이용변화 등 유역 내 수문인자의 특성 변화로 인해 하천의 건천화가 점증하고 있어 하천의 건전한 환경이 악화되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 도시화에 따라 건천화에 영향을 주는 주요 수문인자를 분석하여 하천의 건천화 정도를 간단하게 평가할 수 있는 정량화된 건천화 평가지표를 제시하였다. 그리고 도시화에 따라 불투수율 증가, 지하수 사용량 증가 등으로 건천화가 급격히 진행 중인 남천 유역을 연구 대상유역으로 선정하고 건천화 평가기법을 적용하여 유역의 건천화 정도를 평가하였다. 남천 유역의 건천화 정도를 평가하기 위하여 수문조사자료와 최근 10년간 강우자료를 활용하여 지하수위와 하천수위를 연동한 장기유출프로그램인 SWMM-GE을 이용한 소유역별 유출유황곡선을 분석하였다. 또한 건천화 원인별 영향을 평가하기 위하여 수문인자별 유출변화특성을 분석하였고, 현재 하천의 건천화 정도를 평가하기 위하여 도시화 이전 평균갈수량을 기준으로 하는 정량적인 건천화 평가지표를 제시하였다. 이 지표를 연구 유역에 적용한 결과 건천화 등급이 자연상태 조건일 때는 1~3등급, 현재상태조건일 때는 5등급인 것으로 평가되었다. 본 연구에서 제안하는 건천화 하천의 평가방법 및 지표는 도시하천의 하천유지유량, 물건전화 정책 분석에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주제어: 도시화, 건천화 평가기법, SWMM-GE

I. 서론

최근 도시하천의 경우 도시화에 따른 불투수 면적 및 취수량의 증가, 기후변화, 하천개수 등의 영향으로 기존의 정상적인 유역의 물 순환 체계가 파괴되어 지하수위는 낮아지고 하천 유량이 감소되어 하천의 정상적인 기능을 하지 못하고 있다. 건천화에 따른 하천유지유량의 부족은 하천을 중심으로 한 수질오염원의 증가 등과 함께 하천의 정상적인 기능을 저해하는 문제를 초래하고 있다(이상호 등 2006). 우리나라의 경우에 일부 하천에서 이러한 건천화 현상이 심각하게 나타나고 있으며 이를 해결

* 본 논문은 1저자의 박사학위논문을 수정 보완한 것임

** 제1저자, *** 교신저자.

하기 위해 계획, 재원의 반영, 유량회복 시설의 설치 및 관리 등 여러 단계별 사업이 추진되어야 한다. 뿐만 아니라 향후 도시개발 및 계획 시에도 하천의 건전화 현상을 고려한 수자원 정책이 반영되어야 한다. 이러한 계획 단계의 과업에서 필요한 사항은 여러 가지 건전화 원인을 파악하고 건전화 현황을 정량적으로 평가하는 것이다. 하천 건전화를 정량적으로 정의하고 평가할 수 있다면 건전화 지표를 국가 하천관리의 정책지표로 활용하여 지속적으로 관리가 가능하며, 건전화된 하천의 유량을 확보하기 위한 다양한 사업 추진이 가능할 것이다. 아울러 법과 제도의 개선을 통해 하천주변 및 유역의 과도한 물이용을 방지하고 유역 통합관리를 주도할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 도시화에 따라 건전화에 영향을 주는 주요 수문인자를 분석하여 하천의 건전화 정도를 간단하게 평가할 수 있는 정량화된 건전화 평가지표를 제시하였고, 제안된 건전화 평가 방법을 남천유역에 적용하여 연구유역의 건전화 현황과 건전화 원인별 유출 특성을 분석하였다.

II. 연구동향 및 건전화 평가기법 개발

1. 연구동향

1) 건전화 정의 및 기준유량 산정방법

하천 건전화 평가와 건전화에 대한 연구는 유역개발과 지하수 사용량 증가와 더불어 비교적 최근에 관심을 갖기 시작한 과제로 정성적인 연구가 주를 이루어 왔고 정량적인 연구는 미흡한 실정이다. 대표적인 연구 사례로는 지속가능한 하천수 개발 기술(과학기술부, 2003), 경기도내 하천의 건전화 방지에 관한 연구(경기개발연구원, 2003), 안양천 유역의 물순환 건전화 기술개발(과학기술부, 2007), 하천 건전화 평가 및 개선방안(국토해양부, 2009) 등의 연구보고서와 관련 논문 등이 있으며, 선행 연구과제에서 언급한 건전화 하천의 정의관련 내용은 다음과 같다.

지속가능한 하천수 개발 기술(과학기술부, 2003)에서는 건전화의 정의를 수문학적 요소기준으로는 갈수량 기준 이하이고, 하천수 활용 요소의 기준으로는 하천으로부터 필요 수량을 지속적으로 제공할 수 없는 하천으로 정의하였다. 경기도내 하천의 건전화 방지에 관한 연구(경기개발연구원, 2003)에서는 하천이 바닥이 보일 정도로 거의 메말라 있는 현상을 통상적인 건전화로 정의하였으며, 세부적으로는 지속가능한 하천수 개발 기술에서 정의한 내용을 인용하였다. 안양천 유역의 물순환 건전화 기술개발(과학기술부, 2007)에서는 건전화 평가가 아닌 하천유지유량의 산정 필요성을 바탕으로 평균갈수량을 최소 기준으로 수질, 생태, 경관 등의 필요유량을 고려한 유량을 산정하여 큰 값을 하천유지유량으로 설정하였다. 하천건전화 평가 및 개선방안(국토해양부, 2009)에서는 총 유량변동에서 자연환경 변화에 따른 변동을 구분하여 인위적 요인에 의한 유의한 유량감소를 건전화로 정의하였다.

건천화 기준유량을 정량적으로 산정하는 방법을 구체적으로 제시한 기존연구는 거의 없으며, 전술한 건천화 하천의 정의들에 따라서 기준유량을 산정해야 함을 간접적으로 언급하였다. 다만, 하천건천화 평가 및 개선방안(국토해양부, 2009)에서 건천화 현상의 연구대상으로 대하천과 소하천은 의미가 적은 것으로 판단하고 지방2급(현행 지방하천)의 중규모 하천을 대상으로 건천화 기준유량을 결정하기 위해서 세 가지 방법을 검토하였으며, 기준유량은 건천화의 정의에 따라 인위적인 개발 또는 수변환경의 변화가 이루어지지 않은 자연상태 평균갈수량으로 결정하였다.

2) 건천화 평가지표 및 평가기법

하천이 어느 정도 건천화 되었는지를 판단하기 위해서는 평가지표가 필요하다. 기존 연구에서 제시된 건천화 평가지표는 다양한 수문 및 인문사회 인자들을 고려하였으나, 평가기법은 원인별로 구분하지 않고 평가지표와 건천화를 포괄적으로 연계하는 기법을 제시하였고 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

지속가능한 하천수 개발 기술(과학기술부, 2003)에서는 하천건천화 정도를 파악하기 위한 객관적인 평가기준을 마련하기 위해서 적성평가지표를 작성하여 제시하였다. 건천화 하천의 객관적 주요인자를 간접적인 인자와 직접적인 인자로 구분하였으며, 현지조사로부터의 주요인자들에 대해서도 건천화 정도를 판단하는데 지표가 될 수 있는 사항들을 제시하였다. 또한 제시한 주요인자들을 기준으로 영향 인자가 많을수록 건천화의 잠재성이 큰 것으로 판단하여 4단계로 건천화 등급을 분류하였다. 유역관리지표 적용을 위한 기초조사(한강수계관리위원회, 2003)에서는 유역관리지표의 인위적인 인자로 불투수면, 인구밀도, 주택밀도를 선정하였으며, 3개의 인자 중 유역 내 불투수면 관리 및 축소가 토지이용 계획, 각종 개발사업에서 유역 내 친환경적인 공간조성과 결합되어 추진될 수 있다고 평가하였다. 안양천 유역의 물순환 건천화 기술개발(과학기술부, 2007)에서는 건천화 방지를 위한 하천관리를 위해서 제도적으로 정해진 지역별 위험도를 산정하기 위해서 건천잠재능(Potential Streamflow Depletion, PSD)을 산정하였다. 건천화 잠재능이란 건천화에 기여하는 인자들에 가중치를 두어 일종의 건천화 잠재수치를 산정하는 것이었다. 그러나 이러한 방법은 건천화 영향인자들의 정량적인 건천화 기여도를 반영하기 어렵고 범용적인 활용이 쉽지 않은 문제점이 있다.

2. 건천화 평가기법

1) 건천화 원인 및 평가기법

건천화의 원인은 크게 자연적 요소와 인위적 요소 2가지로 나눌 수 있다(표 1). 본 연구에서는 건천화에 영향을 주는 인자 중 하천수 이용, 하천시설물 운영방법, 지하수 이용 및 토지이용 요소가 건천화에 정량적으로 어떠한 영향을 주는지 평가 하는 방안을 제시하였다.

(1) 하천수 이용 및 하수처리에 대한 평가기법

하천 취수장 및 하수처리장의 경우 그 위치에 따라 건천화 영향이 달라 질 수 있다. <표 2>는 하수처리장 및 생·공용수 취수장 위치에 대한 건천화 가능성을 구분한 것이며, 본 연구에서는 구조물 위치에 따라 식 (1)과 같이 유역의 유출량을 평가하였다.

▷ 하수처리장 및 생·공용수 취수장 하류부 유출량

$$= \text{유역 유출량} - \text{생·공용수 취수량(유역내 위치)} + \text{하수처리 유입량(유역내 위치)} \quad (1)$$

<표 1> 건천화 원인 항목

구 분		항 목
자연적 요 소	유역특성 관련	유역 면적, 유역 형상, 평균경사 등
	하도특성 관련	하도의 깊이, 폭, 경사 등
	수문기상 관련	강수특성, 증발산
	지하수 관련	침투, 함양 및 유출특성 등
인위적 요 소	하천유량 직접교란	취수(유출), 상류 저수지(댐) 운영 및 하수처리(유입)
	하천유량 간접교란	지하수 이용 토지이용 (불투수율, 산림 등)

<표 2> 하천 취수량 및 하수처리장 위치에 따른 건천화 가능성

구분	생공용수 취수장		하수처리장		건천화 가능성
	위치	건천화	위치	건천화	
Case 1	유역내	증가요소	유역내	감소요소	증가 ()
Case 2	유역내	증가요소	유역외	증가요소	증가 (大)
Case 3	유역외	영향 無	유역내	감소요소	감소

(2) 하천 시설물(저수지)에 대한 영향 평가기법

유역내 저수지 시설은 하천의 건천화 증감 양상에 따라 하천유지용수를 공급하는 저수지, 농업용수 용 저수지, 유역외 물공급을 위한 저수지 등으로 구분하여 건천화 영향평가에 반영할 수 있다. 하천유지용수를 공급하는 저수지는 건천화 저감요소로써, 유역의 건천화를 해결할 수 있는 한 방안으로 평가되고 있다. 이에 유역내 하천유지용수를 공급하는 저수지가 존재할 경우 저수지 위치를 반영하고, 저수지 운영 자료를 이용하여 평상시 또는 갈수시 하천으로 방류되는 유량을 저수지 하류부 하천의

유입유량으로 평가하였다.

농업용수용 저수지는 저수지 하류부 하천의 건천화를 증가시키는 요소로써, 시간적으로 비관개시기(갈수기)와 관개시기로 구분하여 평가할 수 있다. 이에 각 시기에 따라 식 (2)와 같이 유역의 유출량을 평가하였다.

$$\begin{aligned} \text{▷ 농업용수용 저수지 하류부 비관개시기 유출량} &= \text{저수지유역 유출량 (저수율 100\%일 경우)} \\ &= 0 \text{ (저수율 100\% 미만일 경우)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{▷ 농업용수용 저수지 하류부 관개시기 유출량} &= \text{저수지 유역 유출량} - \text{저수지 농업용수 공급량} \\ &\quad + \text{저수지 농업용수 회귀량} \quad (2) \end{aligned}$$

유역외 물공급을 위한 저수지는 농업용수용 저수지와 마찬가지로 하류부 하천의 건천화를 증가시키는 요소로 평가된다. 강우시 발생하는 유량은 저수지 하류부에 유입될 수 있으나, 평상시 또는 갈수시 유량은 대부분 도수되거나, 손실된다고 판단된다. 이에 도수용 저수지 유역면적에서 발생하는 기저유출량은 하류부로 유입되지 않는다고 평가하고, 발생 기저유출량을 전체 유량에서 제외시켰다.

(3) 지하수 이용 및 토지이용에 대한 영향기법 개발

유역내 지하수 이용 및 토지이용에 따른 건천화 영향은 다음의 과정을 통해 평가하였다.

① 건천화의 인위적 원인이 제거된 유역의 장기유출특성 분석 : 과거의 관측자료가 부족하므로 현 관측자료를 바탕으로 자연적 원인과 관련된 매개변수 등을 추정하며, 현 상태의 장기유출특성을 분석한다. 현 상태의 장기유출특성 중 인위적 요인(토지 이용, 지하수 이용 등)을 제거하여 자연상태의 유역의 장기유출특성 분석을 분석한다.

② 시나리오 작성 : 자연상태와 현상태 유역의 지하수 이용량, 토지피복도를 분석하여 각 경우에 대한 총유출량, 기저유출량을 평가한다.

2) 건천화 정의

기존 연구들에서 건천화에 대한 정의가 다양하게 논의되고 있으나 아직까지 공식적인 정의는 설정되어 있지 않다. 건천화 개념을 수자원관리에 활용하기 위해서는 건천화 유량의 정량화가 선행되어야 하므로, 건천화의 정의는 하천의 주수로에 지표수의 존재여부가 아니고 인위적인 개발 또는 수변환경의 변화로 인해 과거 통계와 비교하여 유의한 수준으로 하천유량이 감소하는 것이라 할 수 있다. 본 연구에서는 총 유량변동에서 자연환경변화에 따른 변동을 구분하여 인위적 요인에 의한 유의한 유량 감소를 건천화로 정의하였다. 건천화 하천을 정량적으로 정의하기 위해서는 대상하천들의 유역면적과 강우량 등이 각기 다르므로 과거 자연유량에 대한 유량감소율을 분석하여, 유량감소율별 지속기간 등을 고려할 수 있는 방법이 필요하다. 그러나 중규모 하천에서는 현재의 유출량을 비교 평가할 과거 수문자료의 확보가 어렵기 때문에 여러 방안을 검토하였다.

3) 기준유량 결정

본 연구에서는 건천화 기준유량을 결정하기 위해서 하천건천화 평가 및 개선방안(국토해양부, 2009) 참조하였다. 연구에서는 건천화 기준유량을 결정하기 위해서 세 가지 방법을 검토하였으며, 각 방법별 기준유량 결정방법 및 적용성 검토 결과는 <표 3>과 같으며, 자세한 내용은 보고서를 참조할 수 있다.

<표 3> 기준유량 결정방법 및 적용성

구 분	결 정 방 법	적용성
현장 측정유량 평균차이 신뢰도 분석방법(1)	- 신뢰성 있는 장기 관측자료가 있을 경우, 건천화 현상이 시작되었다고 판단되는 시점을 기준으로 자료기간을 구분 - 각각 분석된 유황특성을 신뢰도를 고려하여 비교, 유량차이 유의성의 한계치를 해당하천의 기준유량으로 결정	- 신뢰성있는 장기관측 자료 확보가 가능한 대규모 유역에 적합 - 건천화 원인별 영향 및 예측 곤란
모의 자연유량과 현장 측정유량 유황특성 비교방법(2)	- 수문모형에 의해 모의된 자연유량과 유역개발 및 용수이용의 결과가 반영되었다 할 수 있는 현장 측정유량의 유황특성을 비교 - 유황차이 특정비율(예: 10 20%) 이상일 때 유량을 건천화 기준유량으로 결정	- 신뢰성있는 관측자료 확보가 가능한 중소하천에 적합 - 유역특성에 적합한 수문 모형 선정이 중요
평균갈수량이 하 유량의 지속기간 평가방법(3)	- 모의 자연유량 또는 현장 측정유량에서 인위적인 개발 또는 수변환경의 변화를 제거한 유황을 분석 - 분석된 일유량의 최저 10일간 평균치로 정의되는 갈수량의 10년 평균을 기준유량으로 결정	- 신뢰성 있는 관측자료 확보가 곤란한 중소하천에도 적용 가능 - PRMS 및 TANK 모형을 포함한 건천화 원인별 영향 및 예측이 가능한 최적 모형 필요

기준유량은 건천화의 정의에 따라 인위적인 개발 또는 수변환경의 변화가 이루어지지 않은 자연상태 평균갈수량으로 결정하였다. 본 연구에서는 건천화의 주 대상인 지방 및 도시하천의 현장 측정유량 보유여건과 하천수 및 지하수 이용, 도시화 등 건천화 영향 평가가 가능한 실용적인 모형을 결정하는 것이 필요하다. 금회 연구에서는 21세기 프론티어사업 수자원의 지속적 확보기술개발사업(세부과제명 : 안양천 유역의 물순환 건천화 기술 적용)을 통해 도시유출 연속모의 및 침투시설 효과분석 기술을 위해 도입한 SWMM-GE (Storm Water Management Model-Groundwater Enhanced) 모형을 활용하였다.

4) 건천화 평가지표 개발

하천이 어느 정도 건천화 되었는지를 판단하기 위해서는 평가지표가 필요하다. 기존 연구사례를 통해서 볼 때 실제 하천의 건천화에 기여를 하는 영향인자들의 수와 상호관계는 매우 복잡하고 그 양 또한 파악하기 어렵기 때문에 이러한 인자들을 직접적으로 이용하여 건천화 등급을 분류하거나 건천 잠재능을 평가하는 것은 현실적으로 어려우며 신뢰성에 문제가 있을 것으로 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 특정한 몇 개의 지표를 선정하고 이들 지표에 대한 정량적인 기준을 제시하는 접근방법 대신에 건천화 기준유량을 설정하고 이 유량 이하 발생일수를 기준으로 건천화를 판정하는 방법을 제시하였다. 발생일수에 대한 판정기준은 건천화 평가 및 개선방안 연구 보고서(국토해양부, 2009)에서 실시한 지방자치단체 하천관리 실무자를 대상으로 실시한 하천건천화에 대한 설문조사 결과를 참고하였다. 건천화 등급은 기준유량이하 발생일수를 기준으로 5단계로 분류하고 각 등급의 상태를 양호, 보통, 약간나쁨, 나쁨, 매우나쁨으로 구분하였다(표 4). 건천화 등급 판정 절차는 자연갈수량 산정, 평균 갈수량 산정, 건천화 평가순이다.

<표 4> 건천화 평가지표

건천화 등급	판정기준 (D:기준유량 이하 일수)	상태	대책	비고
1	$D \leq 10$	양호	현재 상태 관리	※ 건천화 인식에 대한 설문조사 결과 (172개 지자체중 61개 지자체 회신) · 60일이상 물이 말라있을 때(관찰일수) · 하폭대비 수면폭 30%이하일 때 · 과거유량대비 30%이하일 때
2	$10 < D \leq 30$	보통		
3	$30 < D \leq 60$	약간 나쁨	중장기 개선 대책 추진 (지하수 취수 제한, 유역 관리 등)	
4	$60 < D \leq 90$	나쁨	건천화 개선유량 직접 확보 (상류 댐 공급 등)	
5	$90 < D$	매우 나쁨		

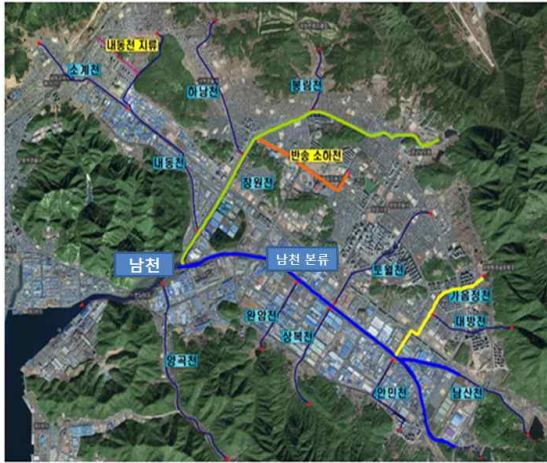
III. 연구유역현황 및 연속유출모의

1. 유역현황

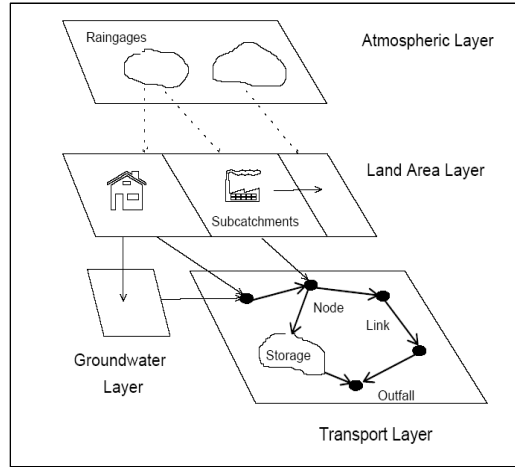
창원시 남천 유역은 최근 도시화의 진행으로 공업용 지하수 이용량이 많고, 토지피복 변화가 큰 하천으로 급격한 도시화에 대한 건천화 평가를 수행할 수 있다. 지방하천인 남천은 경상남도 창원시 천선동 태산(해발 EL.706m)에서 발원하여 서북측으로 유하하다, 남산동에서 우안으로부터 유입되고 있는 남산천과 합류하여 창원시 중앙대로 좌측의 공업지역 중심부를 동·서방향으로 유하하면서, 좌·우안에서 유입되고 있는 지류들과 합류하여 직연속 동·서방향으로 유하하다, 신촌에서 우안으로부터 유입되고 있는 창원천과 합류하여 마산항으로 유입하고 있다. 위도상으로는 동경 128°42'43" ~ 128°46'44" , 북위 35°12'34" ~ 35°10'43" 에 위치하고, 행정구역으로는 경상남도 창원시 천선동 외

22개동을 포함하고 있다. 유역면적은 103.04 km², 유로연장 15.37 km, 유역의 평균경사가 1/1150 ~1/51로서 중하류부는 대체적으로 완만한 편이나 상류부는 급한 편이다.

남천 유역을 크게 남천 본류 유역과 남천에서 가장 큰 지류인 창원천 유역 2개 유역으로 나누어지며 본 연구에서는 남천 본류 유역을 중심으로 연구를 수행하였다(그림 1).



<그림 1> 남천 유역 하천 현황도



<그림 2> 배수유역에 대한 SWMM의 개념도

2. 연속유출모의 입력자료 구축

1) 연속유출모의 모형의 개요

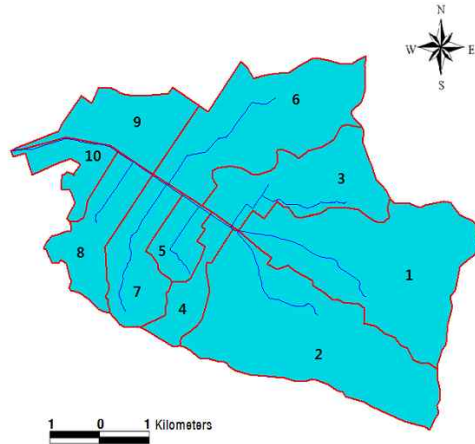
SWMM 모형은 강우 시 발생하는 유출량과 이와 연계한 하수관거 체계, 저류, 오염원의 처리 및 비용계산 등을 동시에 처리할 수 있는 도시 강우 유출모형이다. 특히 입력자료를 조정하여 강우사상 또는 장기유출 사상을 모의할 수 있는 프로그램이며, 모형내에서 다루는 수문요소로 강수, 지표저류, 증발산, 침투, 지표면 유출, 침투, 하도흐름, 지하수 저류, 양수 등의 성분을 포함하고 있다(Huber and Dickinson, 1992). 기저유출의 경우 지하수가 하천으로 흐르는 이득하천 형태의 경우는 모의를 하지만, 반대의 경우 즉 지하수의 수위가 하강하여 하천수가 지하수로 함양되는 경우에 대한 묘사는 하지 못하는 실정이었다. 따라서 엄밀한 의미에서의 지표, 지하수 연계 분석은 불가능하였다. 이러한 약점을 극복하기 위해 이정민 등(2007)은 모형 내 지하수 흐름 모의의 한계를 분석하고 개선하여 지하수 사용을 고려할 수 있도록 프로그램을 수정 보완하였다. 본 연구에서는 이정민 등(2007)에 의해 개발된 SWMM_GE를 이용하여 연구를 추진하였다.

SWMM은 <그림 2>와 같이 배수유역의 구조를 4가지 기상층, 유역층, 지하수층, 연결층으로 구분하여 유출을 모의한다. 이와 같은 유출모의를 위한 SWMM의 입력자료는 크게 세 가지로 분류되며, 이들은 수문기상 자료군, 매개변수 자료군, 입/출력 제어 자료군이다. 수문기상 자료군은 강우, 강설

및 증발산과 관련된 자료들이며, 매개변수 자료군은 물리적 매개변수와 수문학적 매개변수로 구분할 수 있다. 물리적 매개변수들로서는 소유역 관련 매개변수, 지하수 표고 관련 매개변수와 배수체계 관련 매개변수 등이며 이들의 대부분은 지도나 항공사진, 관망도 및 하천도 등을 통하여 추정할 수 있는 매개변수들이다. 수문학적 매개변수들로서는 Manning계수 관련 매개변수, 저지저류량 관련 매개변수, 침투관련 매개변수, 지하수 흐름관련 매개변수 등이다. 입/출력 제어 자료군은 프로그램의 수행과 결과의 출력형태를 결정하는 자료들로서 사용자의 목적에 따라 결정되는 자료들이다(표 5).

<표 5> SWMM의 입력자료군

구분	내용	
수문기상 자료군	강우, 강설, 증발산	
매개변수 자료군	물리적 매개변수	소유역 관련 매개변수 지하수 표고 관련 매개변수 배수체계 관련 매개변수
	수문학적 매개변수	Manning계수 관련 매개변수 저지저류량 관련 매개변수 침투관련 매개변수 지하수 흐름관련 매개변수 소유역 토양수분 관련 매개변수
입/출력 제어 자료군	프로그램 수행과 결과의 출력 형태 결정	



<그림 3> 남천 SWMM 배수유역도

2) 연속유출모의 입력자료 구축

(1) 장기유출 연속모의 입력 자료 구축

본 연구에서는 강우관측소 자료로 장기 유출분석 및 유역의 평형 상태를 고려할 수 있도록 관측년도가 충분하고(10년 이상), 시간단위자료를 가지고 있는 기상청 자료를 활용하였다. 기상관측소를 중심으로 남천 유역에 티센망을 작성한 결과, 마산기상청이 전 유역을 포함하고 있었다. 강우량은 마산 기상청 자료를 활용하였으며, 증발량자료의 경우 마산 지점은 증발량 측정을 수행하고 있지 않아 유역과 가장 근접한 부산기상청 자료를 활용하였다. 소유역과 관련된 입력 자료들을 구축하기 위하여 남천 수치지형도, 토지이용도, 토양도 등을 수집하였으며, 배수 유역도 등 소유역별 특성 자료들은 남천 생태하천 복원사업 실시실제 보고서(창원시, 2007), 국가 수자원관리종합정보 시스템 자료등을 사용하여 구성하였다. 남천 유역은 총 10개의 소유역으로 구성되어 있으며, 배수 유역도 및 소유역 특성 인자 자료는 <그림 3>, <표 6>과 같다. SWMM_GE의 추가 자료로 활용되는 각 소유역별 년 평균 지하수 이용 자료는 국가지하수정보센터 자료를 이용하였으며, <표 6>은 1997년 ~ 2006년 소유역별 이용 자료를 평균한 자료이다.

<표 6> 남천 소유역별 유역특성인자

소유역	유역특성 인자				
	유역면적()	평균 경사(%)	유역폭(km)	불투수면적비(%)	평균 지하수 이용량(㎥/년)
1	12.01	4.17	2.87	8.44	1,441,752
2	13.04	11.28	10.24	9.32	1,564,824
3	2.25	16.20	11.18	23.00	67,533
4	5.95	17.51	13.47	13.82	535,500
5	1.87	17.49	12.44	20.26	18,651
6	9.35	19.63	6.76	26.26	1,121,808
7	3.88	7.26	3.91	10.97	232,830
8	3.68	15.90	7.43	12.42	220,710
9	4.17	17.54	8.06	35.03	124,962
10	1.91	13.25	3.93	47.61	19,114

(2) 장기유출 특성 분석을 위한 시나리오 작성 I (지하수, 토지이용)

하천 건천화에 미치는 유역의 토지이용변화 및 지하수 이용의 기여특성을 분석하기 위해 각각의 변화에 대한 시나리오를 작성하였다. 2000년 인공위성 사진을 분석하여 2000년 기준 남천유역의 불투수 면적을 산정하였다. 분석 결과 남천의 2000년 토지피복도 기준의 불투수율은 전체 유역의 16.61%로 조사되었다. 2000년 불투수율을 현 상태의 불투수율(S1.0)로 가정하고, 불투수율이 0 일 때(S0.0), 현 상태 대비 0.2배 일 때(S0.2), 현 상태 대비 0.5배 일 때(S0.5), 1.5배 일 때(S1.5), 2.0배 일 때(S2.0)의 장기 유출 특성을 분석하였다. 지하수 이용량은 1997~2006년 각 소유역의 지하수 평균 사용량을 현 상태의 지하수 이용량으로 (P1.0)으로 가정하고, 지하수 사용량이 0일 때(P0.0), 현 상태 대비 0.1배 일 때(P0.1), 현 상태 대비 0.2배 일 때(P0.2), 0.4배 일 때(P0.4), 0.8배 일때(P0.8)의 장기 유출 특성을 분석하였다.

(3) 장기유출 특성 분석을 위한 시나리오 작성 II (하수처리장, 저수지 등)

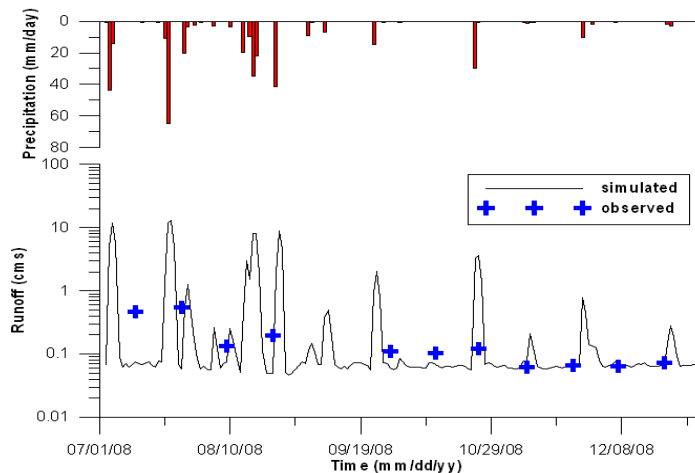
SWMM_GE 프로그램으로 평가할 수 없는 하수처리장 및 저수지 등의 물이용 영향을 분석하기 위하여 SWMM_GE 장기유출 결과에 각 요소들을 후처리하여 유역의 최종 장기유출 특성을 분석하였다. 유역의 물이용은 생공용수 취수, 하수처리장, 저수지 및 보를 통한 농업용수 이용량 등을 고려할 수 있다. 남천 유역에서 사용하는 상수도는 모두 유역 외에 위치한 취수장에서 공급되고 있으며, 남천 유역 하수량 역시 전부 유역 외에 위치하고 있는 마산 창원 하수처리장에서 처리되고 있으므로 두가지 요소 모두 후처리에 반영되지 않는 요소로 평가되었다. 남천유역의 저수지는 3개소로 조사되었다. 3개 저수지 중 불모산, 사과정1의 경우 운영되지 않고 있으며, 성주 저수지의 경우 저수량 전부 진해시 생활용으로 공급되고 있다. 불모산, 사과정1의 경우 사용하지 않는 저수지로 후처리 대상에서 제외하였다. 성주 저수지의 경우 매일 일정량을 사용하는 것이 아니라 강우발생에 따라 적정용수를 사용

하고 있으므로 일정한 유량 사용 시나리오가 없는 상황이므로, SWMM_GE 프로그램 수행 시 성주 저수지 유역면적에서 발생하는 기저유출량을 전체 유량에서 제외 시켰다.

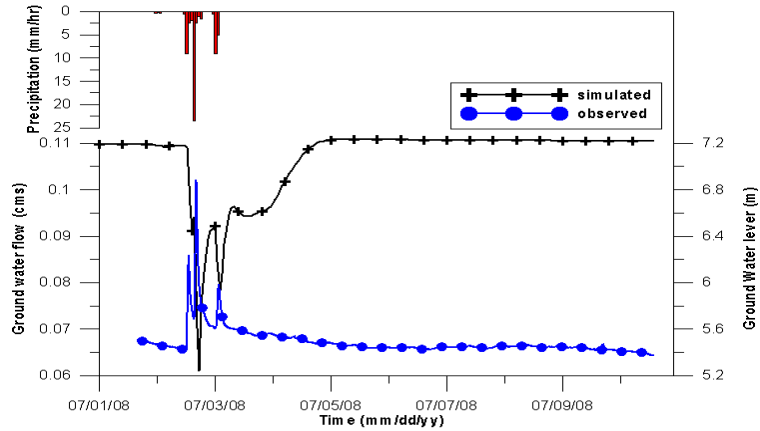
IV. 건천화 평가 결과

1. 연구유역 유출특성

유역 내에는 유출감소에 영향을 주는 여러 다양한 원인들이 상호 복합적인 관계를 맺으며 종합적으로 작용하는데, 이들의 복합적인 작용에 대한 결과로 나타나는 유역의 유출반응이 하천의 건천화이다. 이러한 다양한 원인을 분석하기 위해서는 다양한 수문요소를 측정하고 각 요소별 유역에 대한 영향도를 분리하여 분석할 필요가 있다. 이를 위해서는 강우와 이에 따른 유출량으로 대변되는 일반적인 유역의 수문조사 수준을 벗어나 침투특성, 기저유출특성 등의 요소별 특성을 분석하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 건천화 평가 및 개선방안 연구 보고서(국토해양부, 2009)에서 수행한 남천 유역의 모니터링 자료를 활용하여 모형분석에 필요한 매개변수를 추정하였다. 연구에서 수행한 모니터링 항목은 남천 유역의 유출량, 지하수위 함수량 등이며 측정기간은 2008년 7월 ~ 2009년 4월(10개월)이며, 측정 결과는 <그림 4, 5>와 같다. 당시 남천의 자연형 하천설계정비로 인하여 원활한 유량측정이 수행되지 않았으나, 정비 후(8월~10월) 실측유량과 모의 유량을 비교하였을 경우 비슷한 경향을 나타내었으며, 지하수위 변화 및 함수량 변화 측정자료를 활용하여 모형의 지하수 흐름관련 매개변수들을 추정하였다. 자세한 내용은 보고서를 참조할 수 있다.



<그림 4> 남천 관측유량 값과 프로그램 유출량 비교(SITE A지점)

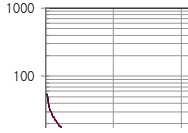


<그림 5> 하천수위 관측값과 기저유출 변화(SITE A지점)

<그림 4, 5>은 남천 유역의 지하수 이용량 및 토지 피복 변화별 10년 평균 유황곡선 변화를 보여주고 있는데, 불투수율이 증가함에 따라 풍수시 유출량은 증가하고, 갈수시 유출량은 감소하는 특성을 보여주고 있으며, 지하수 이용 변화에 따라 풍수시, 갈수시 모두 유출량이 일정하게 감소하는 특성을 보여주고 있다. 현 지하수 이용량을 기준으로 불투수율이 자연상태에서 현상태로 변화할 경우 10년 평균 갈수기 유출량은 0.13 m³/s에서 0.08 m³/s로 0.05 m³/s 감소하는 반면 현 불투수율 기준으로 지하수 이용량이 자연상태에서 현상태로 변화할 경우 10년 평균 갈수기 유출량은 0.28 m³/s에서 0.08 m³/s로 0.20 m³/s 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 남천 유역의 경우 불투수율 변화에 비하여 지하수 이용량 변화가 건천화에 더 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

구 분	Q95	Q185	Q275	Q355
S0.0	0.28	0.17	0.15	0.13
S0.2	0.32	0.16	0.14	0.12
S0.5	0.38	0.13	0.11	0.09
S1.0	0.49	0.12	0.10	0.08
S1.5	0.59	0.09	0.07	0.06
S2.0	0.69	0.07	0.06	0.05

<그림 6> 남천 유역 토지피복 변화에 대한 유황곡선 변화_(P1.0일 경우)



구분	Q95	Q185	Q275	Q355
P0.0	0.74	0.34	0.31	0.28
P0.1	0.69	0.33	0.30	0.27
P0.2	0.67	0.31	0.28	0.25
P0.4	0.63	0.27	0.24	0.21
P0.8	0.52	0.15	0.13	0.11
P1.0	0.49	0.12	0.1	0.08

<그림 7> 남천 유역 지하수 이용 변화에 대한 유황곡선 변화_(S1.0일 경우)

2. 건천화 심도 평가

본 연구에서 제안하는 건천화 평가 과정은 다음과 같다. 대상유역의 과거와 현재의 유출특성을 평가하여 건천화 기준유량(자연평균 갈수량)을 결정한 후, 현 상태유량과 비교하여 기준유량 이하 일수를 분석하여 일수에 따라 건천화 심도를 1~5등급으로 구분한다. 건천화 기준유량은 유역내의 인위적인 물이용이 없는 자연상태 평균갈수량으로, 본 연구에서는 이를 산정하기 위해서 SWMM_GE 프로그램을 이용하여 분석한 결과 중 불투수율과 지하수 사용량이 “0”일 때의 결과를 자연상태 유출량으로 가정하고 갈수빈도분석을 통해 GEV(Generalized Extreme)분포의 재현기간 2.33년의 확률갈수량을 자연상태 평균갈수량으로 산정하였다. 산정 결과 남천 유역 건천화 기준유량 0.290 m³/s로 평가되었다.

건천화 심도는 건천화 기준유량 이하로 흐르는 일수를 기준으로 판정하는 것으로, 연구유역 자연상태(불투수율과 지하수 사용량 “0”)조건에서의 건천화 심도를 평가해보고 현재상태(불투수율과 지하수 사용량 고려)조건에서의 건천화 심도를 평가하였다. 남천유역은, 자연상태조건에서는 건천화 3등급 이내로 전반적으로 보통이거나 양호한 상태이다. 그러나 현재상태조건에서는 건천화 5등급으로 매우 나쁜 상태이다. 이는 도시화로 인한 불투수율의 증가와 공업용 지하수 사용량이 크게 증가한 것이 주원인으로 판단된다. 저수지를 운영 중에 있지 않아 물이동 반영전과 후의 차이는 없으며, 개선유량공급이 필요한 5단계로 건천화가 심각하다.

<표 7> 남천의 건천일수 및 건천화 등급

년도	자연상태 조건		현재상태조건 (물이동 반영전)		현재상태조건 (물이동 반영후)	
	건천일수	등급	건천일수	등급	건천일수	등급
1999	21	2	243	5	243	5
2000	5	1	271	5	271	5

2001	31	3	280	5	280	5
2002	49	3	263	5	263	5
2003	0	1	230	5	230	5
2004	0	1	263	5	263	5
2005	0	1	268	5	268	5
2006	0	1	253	5	253	5
2007	7	1	252	5	252	5
2008	55	3	284	5	284	5

V. 결론

본 연구에서는 하천의 건천화 정도를 간단하게 평가할 수 있는 정량화된 건천화 평가지표를 제시하였고, 제안된 건천화 평가 방법을 남천유역에 적용하여 연구유역의 건천화 현황과 건천화 원인별 유출 특성을 분석하였다. 본 연구결과는 다음과 같다.

1. 건천화의 원인은 크게 자연적 요소와 인위적 요소 2가지로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 건천화에 영향을 주는 인위적 요소 중 하천수 이용, 하천시설물 운영방법, 지하수 이용 및 토지이용 요소가 건천화에 정량적으로 어떠한 영향을 주는지 평가 하는 방안을 제시하였다.

2. 기존 연구들에서 건천화에 대한 정의가 다양하게 논의되고 있으나 아직까지 공식적인 정의는 설정되어 있지 않다. 본 연구에서는 총 유량변동에서 자연환경변화에 따른 변동을 구분하여 인위적 요인에 의한 유의한 유량감소를 건천화로 정의하였다. 기준유량은 건천화의 정의에 따라 인위적인 개발 또는 수변환경의 변화가 이루어지지 않은 자연상태 평균갈수량으로 결정하였다.

3. 하천이 어느 정도 건천화 되었는지를 판단하기 위해서는 평가지표가 필요하다. 본 연구에서는 건천화 기준유량을 설정하고 이 유량 이하 발생일수를 기준으로 건천화를 판정하는 방법을 제시하였다. 건천화 등급은 기준유량이하 발생일수를 기준으로 5단계(10일 이하, 30일 이하, 60일 이하, 90 이하, 90일 이상)로 분류하고 각 등급의 상태를 양호, 보통, 약간나쁨, 나쁨, 매우나쁨으로 구분하였다.

4. 본 연구에서 제안한 건천화 평가 기법을 적용하기 위하여 남천유역 선정 후, SWMM_GE 프로그램을 이용하여 인위적 요소 중 지하수 이용 및 토지이용변화 등의 간접적 건천화 원인들의 기여특성을 분석하였다. 분석 결과 남천의 건천화 기준유량 0.290 m³/s로 평가되었으며, 자연상태조건에서는 건천화 3등급 이내로 전반적으로 보통이거나 양호한 상태이나 현재상태조건에서는 건천화 5등급으로 매우 나쁜 상태로 평가 되었다. 또한 남천 유역의 경우 불투수율 변화에 비하여 지하수 이용량 변화가 건천화에 더 큰 영향을 주는 것으로 분석되었다.

참고문헌

- 경기개발연구원. 2003. 경기도내 하천의 건천화 방지에 관한 연구.
- 국토해양부. 2009. 하천건천화 평가 및 개선방안 연구 보고서.
- 과학기술부. 2003. 지속가능한 하천수 개발 기술 보고서.
- 과학기술부. 2007. 안양천 유역의 물순환 건천화 기술개발 보고서.
- 이상호. 2006. 물환경 건천화를 위한 도시하천의 물 순환 모의(II). 한국물환경학회.22(5): 815-523.
- 이정민. 2007. 지하수 양수 모의를 위한 SWMM의 수정. 한국물환경학회. 23(5): 628-635.
- 창원시. 2007. 남천 생태하천 복원사업 실시설계 보고서.
- 한강수계관기위원회. 2003 유역관리지표 적용을 위한 기초조사
- Huber, W. C., and R. E. Dickinson. 1992. *Storm Water Management Model Version 4: User's Manual*. U.S. Environmental Protection Agency.
- 국가 수자원관리 종합정보 시스템. <http://www.waims.go.kr>
- 국가 지하수 정보 센터. <http://www.gims.go.kr>
- 기상청. <http://www.kma.go.kr/>

全相美: 인제대학교 공학박사 학위 (논문제목 : Development of Technique for Evaluating Streamflow Depletion in the Urbanized Small and Midium Watershed, 2012년 8월)를 취득하고 현재 인제대학교 건설기술연구소 연구원으로 재직하고 있다. 수문분석, 지하수 흐름 분야에 관심을 두고 연구 중이다.

朴宰賢: 서울대학교 공학박사 학위를 취득하고(논문제목 : 비포화 영역에서 용존 오염물질 거동에 관한 실험적 연구, 1998년 2월), 현재 인제대학교 토목공학과 부교수로 재직하고 있다. 주요논문으로는 “준설용 커터헤드 주변의 수리특성에 관한 실험적 연구(2011)”, “선형 성층수조에서의 선택취수에 관한 실험적 연구(2011)”, “고수호안 식생매트공법의 수리적 안정성에 관한연구(2010)” 등이 있다(jh-park@inje.ac.kr).

朴昌根: 서울대학교 공학박사 학위를 취득하고(논문제목 : 비균질 다공성매질에서 이력현상 모형의 개발과 적용, 1993년 2월), 현재 관동대학교 토목공학과 교수로 재직하고 있다. 주요논문으로는 “The changes in potential usable water resources by increasing the amount of groundwater use(2010)”, “Damage process of intact granite under uniaxial compression(2006)” 등이 있다(ckpark@kd.ac.kr).

투 고 일: 2012년 11월 21일

수 정 일: 2012년 12월 17일

게재확정일: 2012년 12월 24일