

도시화에 따른 중소규모하천의 건천화 평가기법 적용

- 경안천, 왕숙천 -

전상미**, 박재현***, 박창근***

유역의 유출수문특성은 불투수면적 증가, 지하수 사용량의 증가 및 지하수위 저하 등 도시화에 따른 여러 요인들의 변화로 인해 많이 왜곡되었고, 이러한 결과로 하천의 건천화가 점증하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 중소규모 도시지역의 건천화를 정량적으로 평가할 수 있는 평가 기법을 제안하고, 건천화가 진행 중인 경안천, 왕숙천을 연구대상으로 선정하여 제안한 평가기법을 적용하였다. 경안천, 왕숙천 유역에 대하여 SWMM-GE 프로그램을 이용하여 유역의 장기유출을 분석하고, 건천화 평가 기법을 적용하여 건천화 정도를 평가하였으며, 결과는 다음과 같다. 대부분의 소유역에서 불투수율이 증가함에 따라 풍수시 유출량은 증가하고, 갈수시 유출량은 감소하는 특성을 보였으며, 지하수 이용이 증가함에 따라 풍수시, 갈수시 모두 유출량이 일정하게 감소하는 특성을 보였다. 하천 취수, 저수지 운영, 하수처리수 유입 등 하천의 수자원 수지에 직접적으로 영향을 미치는 원인들의 경우 각 요인의 규모에 따라 유출량 변화량과 건천화 영향이 크게 달라지고 있는 것으로 평가되었다. 연구유역의 유출특성을 바탕으로 건천화 기준유량 산정하고 건천화 평가 지표를 적용하여 건천화 심도를 평가하였다. 연구유역 전반적으로 자연상태조건에서의 건천화 심도 평가결과 대부분 3등급 이내로 인위적인 환경변화가 없는 경우 건천화 정도는 크지 않음을 알 수 있다. 불투수율과 지하수 사용량 변화만을 고려했을 때 건천화 심도는 1 ~ 5 등급의 다양한 상태를 보이고 있으나 전반적으로 건천화 등급이 매우 나쁜 상태를 보이고 있다. 그러나 건천화에 직접적으로 영향을 주는 요소를 반영할 경우 저수지, 하수처리장의 위치, 규모 등에 따라 지점별로 그 영향이 다양하게 나타났다

주제어: 도시화, SWMM-GE, 건천화심도

I. 서론

산업화 이후 도시의 인구증가는 도시화를 촉진시켰고, 도시화는 도시유역의 물순환 수문구조를 악화시켜왔다. 불투수면적의 증대, 무분별한 지하수 개발, 대규모 하수처리시설의 건설, 치수위주의 하천 정비 등이 도시화의 산물이며 물순환 악화의 주요원인이 되고 있다. 자연유역에서는 빗물의 침투가

* 본 논문은 1저자의 박사학위논문을 수정 보완한 것임

** 제1저자, *** 교신저자.

용이하여 토양층의 우수저류, 지하수 충전의 증가, 증발산의 증가 효과가 나타나지만 도시지역에서는 불투수층의 증가로 인해 표면유출이 증가하여 빗물침투 및 지하수 충전량이 감소하며, 증발산 감소 현상 등이 나타난다. 이러한 결과로 도시하천의 건천화는 중 소규모 도시하천에서 흔히 발생하는 현상이 되었다. 그 동안 우리나라의 수자원 관리는 치수 위주의 하천정비와 대규모 하수처리장 건설 위주의 수질개선대책 중심으로 이루어졌으나 최근 이상기후현상과 도시화 확대에 의해 현재의 수자원 관리 정책으로는 하천 건천화를 방지할 수 없다는 사실을 알게 되었다. (경기개발연구원, 2010). 최근 들어 도시하천 복원과 더불어 도시지역의 물순환을 과거 자연상태로 되돌리기 위한 여러 가지 방안들의 중요성이 더 커지고 있는 실정이다.

도시개발에 따른 물순환 구조의 단절로 발생하는 지하수고갈과 도시하천의 건천화 문제를 해결하기 위해서는 우선 건천화에 영향을 주는 주요 수문인자를 분석하고 평가한 후 요소별 해결방안 및 방지 대책을 제시하여야 한다. 본 연구에서는 건천화에 영향을 주는 주요 수문인자를 분석하고 이에 따른 건천화 정도를 평가할 수 있는 평가기법 및 평가지표를 제안하였다. 또한 제안된 방법을 건천화가 진행 중인 경안천, 왕숙천 유역에 적용하여 연구유역의 건천화 정도를 평가하고 각 건천화 원인 인자별 유출기여 특성을 분석하였다.

II. 건천화 평가 기법

하천 건천화 평가와 건천화에 대한 연구는 비교적 최근에 관심을 갖기 시작한 과제로 정성적인 연구가 주를 이루어 왔지만 정량적인 연구는 미흡한 실정이다. 대표적인 연구 사례로는 지속가능한 하천수 개발 기술(과학기술부, 2003), 경기도내 하천의 건천화 방지에 관한 연구(경기개발연구원, 2003), 안양천 유역의 물순환 건천화 기술개발(과학기술부, 2007), 하천건천화 평가 및 개선방안(국토해양부, 2009) 등의 연구보고서와 관련 논문 등이 있으며, 본 연구에서는 선행 연구사례들을 바탕으로 건천화 정의, 기준유량, 평가기법 등을 결정하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

건천화의 정의에 앞서 본 연구에서는 건천화에 영향을 주는 건천화의 원인을 분석하여 크게 자연적 요소와 인위적 요소 2가지로 나누고, 인위적 요소 중 하천수 이용, 하천시설물 운영방법, 지하수 이용 및 토지이용 요소가 건천화에 정량적으로 어떠한 영향을 주는지 평가 하는 방안을 제시하였다. 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 정의하고, 기준유량은 건천화의 정의에 따라 인위적인 개발 또는 수변환경의 변화가 이루어지지 않은 자연상태 평균갈수량으로 결정하였다.

하천이 어느 정도 건천화 되었는지를 판단하기 위해서는 평가지표가 필요하다. 하천건천화 평가 및 개선방안(국토해양부, 2009)에서는 건천화 기준유량을 설정하고 이 유량 이하 발생일수를 기준으로 건

천화를 판정하는 방법을 제시하였다. 본 연구에서는 하천건천화 평가 및 개선방안(국토해양부, 2009) 연구 내용을 활용하여 건천화 등급을 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.

이러한 건천화의 정의, 기준유량, 평가지표 등을 바탕으로 본 연구에서 제안하는 건천화 평가과정은 <그림 1>과 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 기준 유량인 자연평균 갈수량은 유역내의 인위적인 물이용이 없는 자연상태 평균 갈수량으로 중소하천의 경우 장기유량관측자료가 부족하거나 관측자료가 없는 경우가 대부분으로 관측값을 이용하여 결정하기는 어려운 상황이다. 이에 본 연구에서는 건천화의 주 대상인 지방 및 도시하천의 현장 측정유량 보유여건과 하천수 및 지하수 이용, 도시화 등 건천화 영향 평가가 가능한 실용적인 모형으로 21세기 프론티어사업 수자원의 지속적 확보기술개발사업을 통해 도시유출 연속모의 및 침투시설 효과분석 기술을 위해 도입한 SWMM-GE (Storm Water Management Model - Groundwater Enhanced) 모형을 활용하여 경안천, 왕숙천의 건천화 심도를 평가하였다.

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). SWMM-GE는 이정민 등(2007)이 SWMM 모형 내 지하수 흐름 모의 한계를 분석하고 개선하여 지하수 사용을 고려할 수 있도록 프로그램을 수정 보완한 모형이다.



<그림 1> 건천화 평가 과정

III. 유역현황 및 장기유출 연속모의 입력자료 구축

1. 연구유역 특성인자 입력자료 구축

본 연구에서는 건천화 원인을 자연적 요소와 인위적 요소 2가지로 나누었으며, 이 중 제어가 가능한 요소인 인위적 요소에 대한 건천화 기여특성을 분석하였으며, 이를 위하여 문헌 수집 등을 통해 하천 건천화에 직·간접적으로 영향을 주는 항목들의 적용성이 높은 유역을 선정하였다. 선정된 유역은 광주 경안천, 남양주 왕숙천이며, 해당 유역들은 농경지 하천으로 농업용 지하수 이용이 많고, 토지피복 변화가 큰 지역으로 농업용 하천수 이용 및 토지이용변화에 대한 건천화 평가를 수행할 수 있는 지역으로 평가된다.

1) 경안천

경안천은 문수봉 남서쪽의 용해곡 상봉의 해발고도 410m 지점에서 발원하여 용인시 중심부를 남쪽에서 북쪽으로 관통하여 흐르다 초월읍 지월리에서 곤지암천과 합류하여 서하리에서 한강수계인 팔당호로 유입되는 길이 22.5km, 유역면적 575.32km²의 국가하천이다.

본 연구대상지역은 경안수위관측소를 기준으로 한 상류유역(288.54 km²)으로 연 평균 강우량은 1200.5mm이고, 연평균 기온은 10.9 °C, 연평균 상대습도는 72%, 우리나라의 평균적인 기후특성을 나타내고 있다. 본 연구에서는 강우관측소 자료로 장기 유출분석 및 유역의 평형 상태를 고려할 수 있도록 관측년도가 충분하고(10년 이상), 시간단위자료를 가지고 있는 기상청 자료를 활용하였다.

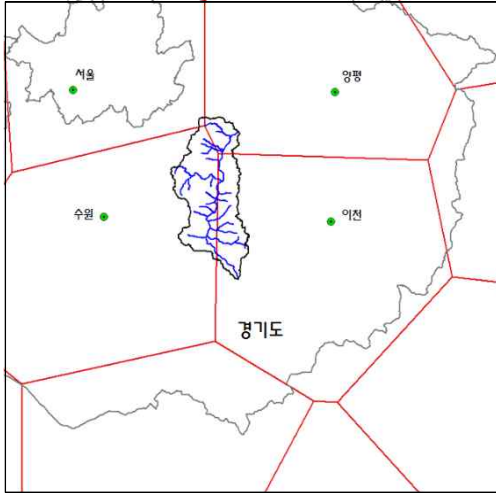
기상관측소를 중심으로 경안천 유역에 티센망을 작성한 후, 경안천 유역에 대하여 면적 강우량으로 산정한 결과 수원기상청이 전체 유역의 52.7%, 이천 기상청 35.3%, 양평 기상청 11.5%, 서울 기상청 0.5%를 포함하고 있다(그림 2). 각 4개의 기상청 강우 자료를 입수하여 면적대비 강우량으로 환산하였으며, 증발량자료의 경우 다른 지점은 증발량 측정을 수행하고 있지 않아, 서울기상청 자료만을 활용하였다. 경안천 유역은 총 36개의 소유역으로 구성되어 있으며, 배수유역도 및 소유역 특성 인자 자료는 <그림 4>와 <표 1>과 같다.

2) 왕숙천

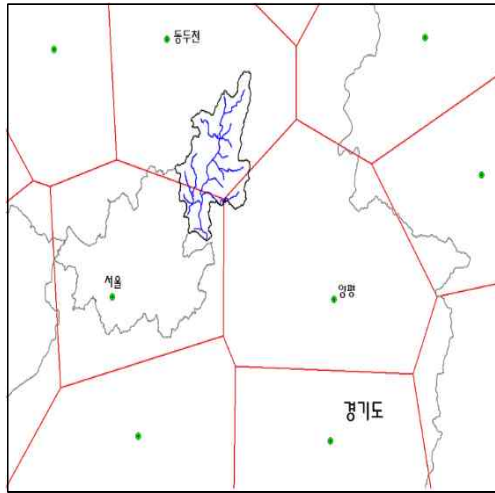
왕숙천은 포천시 내촌면(內村面) 신탄리(薪八里) 수원산 계곡에서 발원하여 남서쪽으로 흘러 남양주시를 지나 구리시에서 한강으로 흘러드는 길이 37.34km, 유역면적 274.29km²인 하천이다.

기상관측소를 중심으로 왕숙천 유역에 티센망을 작성한 후, 왕숙천 유역에 대하여 면적 강우량으로 산정한 결과 동두천기상청이 전체 유역의 75.6%, 서울 기상청 18.4%, 양평기상청이 6%를 포함하고 있다(그림 3). 10년 이상 자료를 활용하여 위하여 티센망을 재 작성한 결과 서울 기상청이 전 유역을

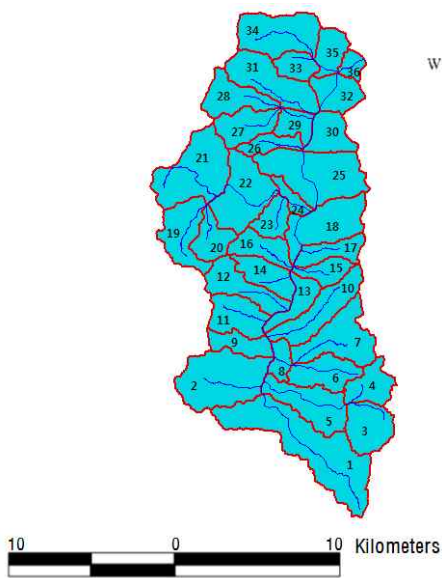
포함하고 있었다. 이에 서울 기상청 강우 자료, 증발량 자료를 입수하여 프로그램 입력자료를 구축하였다. 왕숙천 유역은 총 23개의 소유역으로 구성되어 있으며, 배수유역도 및 소유역 특성 인자 자료는 <그림 5>과 <표 1>과 같다.



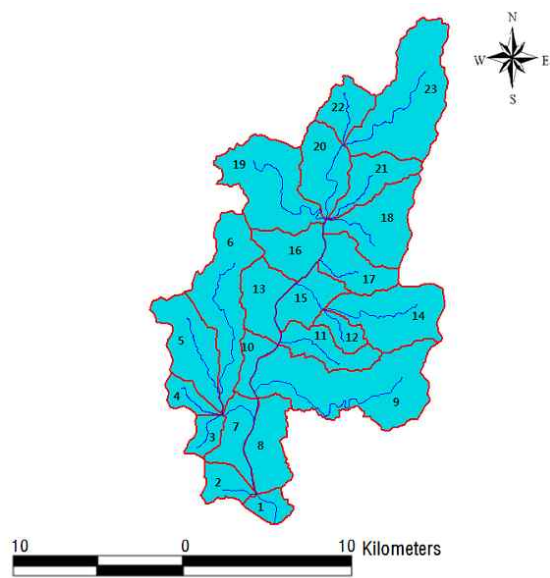
<그림 2> 경안천 유역의 기상 관측소 티센망



<그림 3> 왕숙천 유역의 기상 관측소 티센망



<그림 4> 경안천 SWMM 배수유역도



<그림 5> 왕숙천 SWMM 배수유역도

<표 1> 경안천, 왕숙천 소유역별 유역특성인자

소유역	유역특성 인자									
	경안천					왕숙천				
	유역면적 ()	평균경사 (%)	유역폭 (km)	불투수 면적비 (%)	평균 지하수 이용량 (/년)	유역면적 (km ²)	평균경사 (%)	유역폭 (km)	불투수 면적비 (%)	평균 지하수 이용량 (m ³ /년)
1	25.47	14.70	22.67	4.18	317,274	3.78	4.00	4.82	23.04	188,146
2	16.41	12.00	9.85	16.18	492,603	5.13	8.60	5.62	42.69	250,152
3	7.91	19.50	12.88	3.35	262,346	3.79	6.60	5.26	21.99	507,427
4	5.86	9.90	8.53	9.29	195,046	4.01	12.50	6.30	22.57	57,803
5	10.31	12.50	13.36	10.58	258,986	14.71	16.70	12.82	6.46	212,142
6	7.35	12.70	10.80	5.57	250,578	22.27	14.60	23.36	4.17	321,159
7	11.70	13.30	12.88	1.77	388,824	8.19	6.70	6.68	18.67	376,075
8	2.88	5.10	2.30	22.33	109,921	11.41	5.10	4.30	20.39	585,750
9	4.60	12.90	7.43	13.74	174,534	32.98	13.30	31.48	7.52	537,577
10	9.95	14.20	13.59	8.34	140,974	4.42	11.30	2.18	11.73	74,945
11	7.60	10.00	9.23	5.03	111,594	8.85	13.10	14.77	3.92	102,860
12	7.96	11.60	11.48	13.25	105,409	4.14	12.80	7.23	8.82	45,656
13	4.63	9.10	2.99	26.00	61,227	9.66	14.40	5.15	7.86	99,085
14	6.04	10.10	5.15	20.88	79,812	18.18	21.60	14.69	1.83	200,390
15	4.05	17.50	9.23	7.11	51,829	8.49	8.30	4.49	15.56	90,083
16	5.68	14.10	8.33	5.30	76,775	9.19	14.70	10.29	9.47	94,173
17	5.04	17.00	10.23	6.65	101,713	9.64	17.40	11.73	3.44	98,779
18	11.73	13.70	5.49	7.88	236,901	15.81	17.80	10.38	2.83	162,134
19	8.89	13.50	9.68	4.29	178,462	22.26	13.10	21.04	1.12	917,049
20	5.35	12.30	9.11	2.00	108,462	12.15	16.30	13.15	2.20	194,482
21	15.55	12.60	10.83	7.62	220,221	9.28	15.10	11.87	5.79	156,644
22	12.52	12.70	8.32	11.50	204,780	7.32	14.70	9.25	5.26	134,388
23	4.33	12.20	7.86	6.82	86,976	28.63	19.70	20.90	2.32	525,933
24	2.32	9.70	6.84	23.66	46,668					
25	16.84	10.40	8.51	14.12	263,688					
26	3.59	15.80	7.08	7.37	64,601					
27	6.80	15.40	10.70	5.25	951,468					
28	7.49	16.70	10.48	6.53	1,031,973					
29	3.83	9.40	6.44	24.44	442,077					
30	5.80	12.50	2.42	20.30	85,430					
31	11.33	13.00	7.00	15.99	1,611,188					
32	6.01	9.90	6.47	18.40	856,526					
33	3.88	15.40	2.68	8.98	607,108					
34	11.85	18.20	10.50	3.51	1,709,540					
35	4.79	12.00	6.88	27.33	713,541					
36	2.20	18.00	3.81	2.86	236,285					

2. 장기유출 특성 분석을 위한 시나리오 작성 I

건천화에 미치는 유역의 지하수 이용 및 토지이용변화의 기여특성을 분석하기 위하여 유역의 토지 이용변화 및 지하수 이용에 대한 시나리오를 작성하였다. 2000년 인공위성 사진을 분석하여 2000년 기준 경안천, 왕숙천 유역의 불투수면적을 산정하였다. 위성영상 처리를 위한 프로그램에는 ERDAS Imagine, ER-Mapper, PCI Geomatica 등이 있다. 이들 프로그램을 이용하여 기하학적인 왜곡을 제거하기 위한 정사 및 기하보정을 수행한 후, 영상융합을 통해 공간 해상도를 가지면서 칼라영상을 유지시키고, 영상집성(Image Mosaic)을 통해 여러 장의 영상들을 지상좌표 값을 기준으로 접합하여 최종 영상을 만들게 된다. 이 최종영상을 가지고 화상을 구성하는 각각의 화소를 항목별로 분류, 할당하는 과정 및 기법으로 토지 피복분류(Landcover Classification)를 수행하였다. 분석 결과 경안천의 2000년 토지피복도 기준의 불투수율은 전체 유역의 4.87%, 왕숙천의 경우 7.44%로 조사되었다. 2000년 불투수율을 현 상태의 불투수율(S1.0)로 가정하고, 불투수율이 0일 때(S0.0), 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.

SWMM_GE의 추가 자료로 활용되는 각 소유역별 년 평균 지하수 이용 자료는 국가지하수정보센터 자료를 이용하였으며, <표 1>은 1997년 ~ 2006년 소유역별 이용 자료를 평균한 자료이다. 각 소유역의 지하수 평균 사용량을 현 상태의 지하수 이용량으로 (P1.0)으로 가정하고, 경안천은 지하수 사용량이 0일 때(P0.0), 현 상태 대비 0.25배 일 때(P0.25), 0.5배 일 때(P0.5), 0.75배 일 때(P0.75), 1.0배 일 때(P1.0)의 장기 유출 특성을 분석하였고, 왕숙천의 경우 지하수 사용량이 0일 때(P0.0), 현 상태 대비 0.5배 일 때(P0.5), 1.5배 일 때(P1.5), 2.0배 일 때(P2.0)의 장기 유출 특성을 분석하였다.

3. 장기유출 특성 분석을 위한 시나리오 작성 II

본 연구에서는 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. 본 연구에서는 국가 수자원관리종합정보 시스템(<http://wamis.go.kr>)등을 이용하여 자료유역의 생공용수 이용현황, 하수처리장에 의한 유입현황, 저수지 및 보를 통한 농업용수 이용현황 등을 분석하고, 분석된 자료를 장기 유출 특성에 반영하였다. 후처리 방법 및 각 유역의 후처리 대상은 다음과 같다(<표 2>, <그림 6>, <그림 7>).

- 후처리 방법

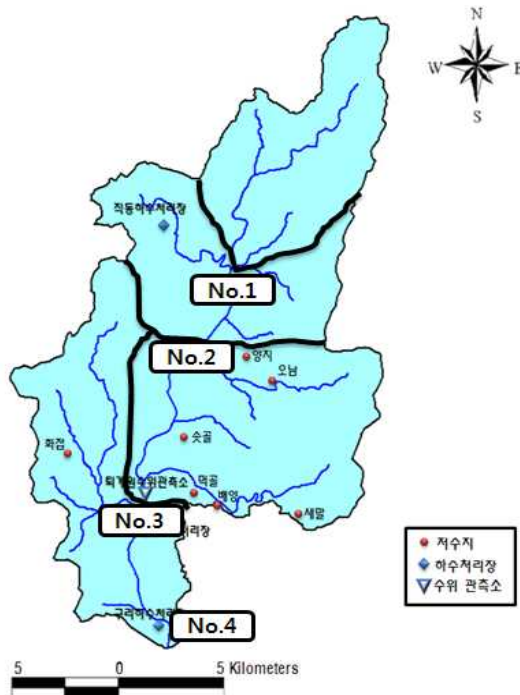
- 관개시기
 $유출량 = SWMM_GE \text{ 유출량} - \text{생·공용수 취수량} + \text{하수처리유입량} - \text{저수지 및 보 농업용수 공급량} + \text{저수지 및 보 농업용수 회귀량}$
- 비관개시기(갈수기)
 - ① 비관개시기 저수지 만수일 경우
 $비관개시기 \text{ 유출량} = SWMM_GE \text{ 유출량} - \text{생·공용수 취수량} + \text{하수처리유입량}$
 - ② 비관개시기 저수지 비만수 경우
 $비관개시기 \text{ 유출량} = SWMM_GE \text{ 유출량} - \text{생·공용수 취수량} + \text{하수처리유입량} - \text{저수지유역 유출량}$

<표 2> 경안천 왕숙천 유역 후처리 대상

유역명	물이용 (취수량)	하수처리장	저수지 및 보		
			관개시기 (4월 ~ 9월)	비관개시기 (11월 ~ 3월)	공급량
경안천	×	0.7263 /s 유역내 유입	관개시기 (4월 ~ 9월)	0.2743 m³/s	0.1254 m³/s
			비관개시기 (11월 ~ 3월)	×	저수지 유출량
왕숙천	×	0.9398m³/s 유역내 유입	관개시기 (4월 ~ 9월)	0.3729m³/s	0.1704m³/s
			비관개시기 (11월 ~ 3월)	×	저수지 유출량



<그림 6> 경안천 소유역 구분 및 후처리 대상 위치도



<그림 7> 왕숙천 소유역 구분 및 후처리 대상 위치도

4. 소유역 평가 시나리오

각 유역별 유출 특성이 다르듯이 같은 유역내에서도 소유역별 여러 가지 요소로 인하여 유출특성을 다르게 나타날 것으로 판단된다. 이에 각 유역의 하단에서의 유출량 평가뿐만 아니라, 소유역별 유출량 특성을 분석해 보기 위하여 하수처리장 및 저수지 위치 등에 따라 소유역을 구분하여 각 소유역별 유출특성을 살펴보았다.

경안천의 경우는 그 유역이 넓고 유로연장이 길기 때문에 하천의 횡방향 보다는 종방향 지점 선정이 유리하다고 판단하였다. 또한 종방향을 따라 하수의 유입 및 처리수 방류 위치, 용량 등을 고려하여 건천화 평가에 적절한 곳을 5개소 선정하였다. 왕숙천의 경우, 하수처리장과 저수지의 위치를 분석하여 상·중·하류 3곳에 평가지점을 선정하였다. 소유역별 유출량 산정방법은 각 유역의 산정방법과 같으며, <그림 6>, <그림 7>, <표 3>, <표 4>는 경안천, 왕숙천 소유역 면적 및 후처리 대상 현황을 보여주고 있다.

<표 3> 경안천 소유역별 후처리 대상 현황

소유역	소유역 면적 ()	보 관개면적 (ha)	저수지명	저수지 관개면적 (ha)	저수지 유역면적 (km ²)	하수처리장
no.1	65.96	0	관곡	3.9	0.39	-
			남곡	11.4	2.03	
			역동	1.9	0.5	
			동진	1.9	0.64	
			신기	9.8	0.8	
			장재미	1	0.3	
no.2	56.67	0	대대	6	3.06	대대리 하수처리장 죽부리 하수처리장
			정수	9.5	0.2	
			마가	3	0.71	
			성지	15	1.18	
no.3	32.54	0	갈담	18	1.35	레스피아
			소운	1	0.14	
			신원	10	1.94	
			유실	6	2.09	
no.4	93.31	78.6	동산	7.9	0.6	오포 하수처리장 매산 하수처리장
			매산	12	1.72	
			양촌	2	1.28	
no.5	40.06	90.9	홍중	97	7.1	-
			목동	1	0.65	
total	288.54	169.5		218.3	26.68	

<표 4> 왕숙천 소유역별 후처리 대상 현황

소유역	소유역 면적 ()	보 관개 면적 (ha)	저수지명	저수지 관개면적 (ha)	저수지 유역면적 (km ²)	하수처리장
no.1	73.28		-	-	-	-
no.2	86.73	104	새말1	4	0.6	직동 하수처리장
no.3	56.89	29.5	양지 오남	1.6 347	0.32 15.52	-
no.4	57.39	15.2	먹골 새말2 숫골 배양 화접	4 7 2 7.8 0	0.4 0.3 0.52 0.84 0.51	진건하수처리장
total	274.29	153.85		373.3	19.01	

IV. 연구유역 연속유출모의 및 건천화 평가

1. 연구유역 연속유출모의 결과 분석

<표 5>와 <표 6>은 경안천, 왕숙천 유역의 지하수 이용량 및 토지 피복 변화에 대한 10년 평균 유황곡선 변화를 보여주고 있다.

<표 5> 경안천 왕숙천 10년 평균 유황곡선 변화

구분	토지피복 변화에 대한 유황곡선 변화_(P1.0일 경우)					지하수 이용 변화에 대한 유황곡선 변화_(S1.0일 경우)					처리 전, 후 유황곡선 변화_(P1.0일 경우)		
	구분	Q ₉₅	Q ₁₈₅	Q ₂₇₅	Q ₃₅₅	구분	Q ₉₅	Q ₁₈₅	Q ₂₇₅	Q ₃₅₅	구분	후처리 전	후처리 후
경안천	S0.0	1.59	0.78	0.64	0.40	P0.0	3.12	1.30	1.13	0.76	Q ₉₅	2.38	3.03
	S0.5	2.03	0.78	0.64	0.37	P0.25	2.68	1.08	0.92	0.58	Q ₁₈₅	2.09	1.48
	S1.0	2.38	0.79	0.63	0.35	P0.5	2.57	0.98	0.82	0.50	Q ₂₇₅	0.63	1.29
	S1.5	2.78	0.79	0.60	0.33	P0.75	2.46	0.87	0.71	0.41	Q ₃₅₅	0.35	0.93
	S2.0	3.23	0.79	0.57	0.30	P1.0	2.38	0.79	0.63	0.35			
왕숙천	S0.0	1.23	0.97	0.79	0.52	P0.0	1.74	1.04	0.86	0.53	구분	후처리 전	후처리 후
	S0.5	1.43	0.99	0.82	0.51	P0.5	1.61	0.96	0.79	0.48	Q ₉₅	1.56	2.36
	S1.0	1.65	1.00	0.82	0.51	P1.0	1.56	0.91	0.74	0.43	Q ₁₈₅	0.91	1.77
	S1.5	1.85	0.99	0.82	0.49	P1.5	1.52	0.86	0.69	0.40	Q ₂₇₅	0.74	1.57
	S2.0	2.07	0.99	0.80	0.47	P2.0	1.47	0.82	0.65	0.37	Q ₃₅₅	0.43	1.17

두 유역 모두 불투수율이 증가함에 따라 풍수시 유출량은 증가하고, 갈수시 유출량은 감소하는 특성을 보여주고 있으며, 지하수 이용 변화에 따라 풍수시, 갈수시 모두 유출량이 일정하게 감소하는 특성을 나타내고 있다. 또한 불투수율 변화에 비하여 지하수 이용량 변화가 건천화에 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있으며, 직접요소는 각 요인의 규모에 따라 유출량 변화량과 건천화 영향이 크게 달라질 수 있을 것으로 판단된다. 후처리 전 후 비교 시 두 유역 모두 총유출량은 계절에 관계없이 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 계절에 관계없이 저수지 운영에 따라 소모되는 유량에 비하여 하수처리장에 의하여 유입되는 유량이 더 많다는 것을 나타내며, 하수처리장이 유역의 건천화 감소에 큰 영향을 주는 요인임을 알 수 있다.

<표 6> 경안천 왕숙천 10년 평균 유황곡선 변화

경안천	왕숙천
토지피복 변화에 대한 유황곡선 변화_(P1.0일 경우)	
지하수 이용 변화에 대한 유황곡선 변화_(S1.0일 경우)	
	시간(일)
처리 전, 후 유황곡선 변화_(P1.0일 경우)	

2. 연구유역 건천화 평가

1) 건천화 기준유량 산정

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 적합도 검정 결과가 가장 좋은 GEV(Generalized Extreme)분포의 재현기간 2.33년의 확률갈수량을 자연상태 평균갈수량으로 산정하였다. 유역별 건천화 기준유량 산정결과는 <표 7>과 같다.

<표 7> 유역별 건천화 기준유량 산정결과

경안천 유역						왕숙천 유역				
지점	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	지점	No.1	No.2	No.3	No.4
기준유량 (/s)	0.184	0.344	0.431	0.685	0.786	기준유량 (m ³ /s)	0.101	0.246	0.378	0.524

2) 건천화 심도 평가

본 연구에서 제안하는 건천화 심도는 건천화 기준유량(수량기준) 이하로 흐르는 일수를 기준으로 판정하는 것으로, 시범유역별로 자연상태(불투수율과 지하수 사용량 “0”)조건에서의 건천화 심도를 평가해보고 현재상태(불투수율과 지하수 사용량 고려)조건에서의 건천화 심도를 평가하였다. 또한 현재상태조건에서 유역내 물이동(하수처리장, 저수지 영향 등)을 반영하여 비교하였다. 시범유역 전반적으로 자연상태조건에서의 건천화 심도 평가결과 1~5등급으로 다양하게 나타났으며 대부분 3등급 이내의 결과를 보이고 있다. 이는 자연환경변화에 따른 결과이며 인위적인 환경변화가 없는 경우 건천화 정도는 크지 않음을 알 수 있다.

현재상태조건에서의 물이동 반영전과 후의 시범유역별로 평가한 결과는 다음과 같다. 경안천 유역은, 자연상태조건에서는 건천화 1~5등급의 다양한 상태를 보이고 있으나 현재상태조건에서는 불투수율과 지하수 사용량을 고려했을 때 전반적으로 건천화 5등급인 매우 나쁜 상태를 보이고 있다. 그러나 물이동 반영전과 후의 변화가 뚜렷하게 나타났다. 물이동 반영후에도 상류지점인 No.1과 No.2는 건천하천이나 중류 이후로는 건천일수가 거의 없어 양호한 상태로 나타난다. 이는 비교적 규모가 큰 용인, 오폐, 매산하수처리장의 하수처리수가 유입되어 나타난 결과이다. 왕숙천 유역은, 자연상태조건에서는 건천화 1~3등급의 상태를 보이고 있다. 현재상태조건에서는 불투수율과 지하수 사용량을 고려했을 때 자연상태조건 대비 건천일수는 약간 증가한 정도로 나타났다. 물이동을 고려했을 경우 지점별로 그 영향이 뚜렷하게 구분되었다. 상류 No.2~No.3 지점은 저수지 영향으로 건천일수가 증가한 것을 볼 수 있으며 하류 No.4 지점은 하수처리수 유입으로 양호한 상태를 보이고 있다.

<표 8> 경안천의 건천일수

년도	경안천													왕숙천																
	자연상태조건				현재상태조건 물이동 반영전					현재상태조건 물이동 반영후				자연상태조건				현재상태조건 물이동 반영전					현재상태조건 물이동 반영후							
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.1	No.2	No.3	No.4	No.1	No.2	No.3	No.4	No.1	No.2	No.3	No.4	No.1	No.2	No.3
1999	8	11	9	11	10	111	116	106	96	148	113	121	0	0	0	3	3	6	5	9	11	10	28	9	44	70	0			
2000	33	27	24	25	24	119	201	172	180	207	129	195	0	0	0	10	11	12	13	20	21	24	28	20	41	92	0			
2001	57	48	42	45	43	255	272	259	248	255	258	273	0	0	0	16	17	16	16	39	43	42	69	39	75	119	0			
2002	103	79	73	64	62	258	236	220	205	207	258	236	0	0	4	30	38	31	34	50	50	45	42	50	62	90	0			
2003	20	21	20	19	18	142	140	124	129	154	146	144	0	0	0	14	20	13	16	29	38	27	39	29	51	61	0			
2004	1	3	3	4	4	98	150	142	132	194	109	152	0	0	0	4	2	3	4	10	8	7	19	10	19	59	0			
2005	7	6	7	9	9	103	130	109	119	184	112	128	0	0	0	2	2	2	2	5	6	9	19	5	19	67	0			
2006	0	0	0	0	0	71	145	122	135	193	89	150	0	0	0	1	2	1	3	10	13	10	16	10	23	81	0			
2007	5	5	5	5	6	80	101	80	78	128	85	104	0	0	0	11	13	11	11	20	22	18	23	20	36	71	0			
2008	0	0	0	0	0	85	144	115	130	175	104	143	0	0	0	15	14	13	12	29	30	26	36	29	45	84	0			

V. 결론

최근 도시화로 인한 도시지역의 물순환구조는 악화되고 있는 실정이다. 이러한 물순환구조의 악화는 도시하천의 건천화를 강화시켰다. 이러한 하천의 건천화 증가를 감소하기 위한 초기 단계에서 필요한 사항은 여러 가지 건천화 원인을 파악하고 건천화 현황을 정량적으로 평가하는 것이다. 본 연구에서는 하천 건천화의 원인을 분석하여 정량화된 건천화 평가 방법을 제시하고 연구유역에 적용하여 연구유역의 건천화 현황과 건천화 원인별 유출 기여 특성을 분석하였다. 본 연구결과는 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 건천화에 영향을 주는 원인을 자연적 요소와 인위적 요소 2가지로 나누고, 인위적 요소 중 하천수 이용, 하천시설물 운영방법, 지하수 이용 및 토지이용 요소가 건천화에 정량적으로 어떠한 영향을 주는지 평가하는 방안을 제시하였다. 문헌 연구등을 통하여 건천화를 총 유량변동에서 자연환경변화에 따른 변동을 구분하여 인위적 요인에 의한 유의한 유량감소로 정의하고, 기준유량은 인위적인 개발 또는 수변환경의 변화가 이루어지지 않은 자연상태 평균갈수량으로 결정하였다. 또한 기준유량이하 발생일수를 기준으로 5단계(10일 이하, 30일 이하, 60일 이하, 90 이하, 90일 이상)로 분류하고 각 등급의 상태를 양호, 보통, 약간나쁨, 나쁨, 매우나쁨으로 구분하는 건천화 평가지표를 제안하였다.

2. 경안천 왕숙천 유역에 대하여 본 연구에서 제안한 건천화 평가 기법을 적용하였다. SWMM_GE 프로그램을 이용하여 인위적 요소 중 지하수 이용 및 토지이용변화 등의 간접적 건천화 원인들의 기여특성을 분석하고, 후처리 시나리오를 이용하여 하천 취수, 저수지 운영, 하수처리 등의 직접적 건천화 원인들의 기여특성을 분석하였다. 분석 결과 대부분의 유역에서 불투수율이 증가함에 따라 풍수시

유출량은 증가하고, 갈수시 유출량은 감소하는 특성을 보여주고 있으며, 지하수 이용 변화에 따라서는 풍수시, 갈수시 모두 유출량이 일정하게 감소하는 특성을 보여주었다. 하천 취수, 저수지 운영, 하수처리 등의 직접적 건천화 원인들의 경우 각 요인의 규모에 따라 유출량 변화량과 건천화 영향이 크게 달라질 수 있는 것으로 평가되었다.

3. 연구유역의 유출특성을 바탕으로 건천화 기준유량 산정하고 건천화 평가 지표를 적용하여 건천화 심도를 평가하였다. 연구유역 전반적으로 자연상태조건에서의 건천화 심도 평가결과 1 ~ 5등급으로 다양하게 나타났으나 대부분 3등급 이내의 결과를 보이고 있다. 이는 자연환경변화에 따른 결과이며 인위적인 환경변화가 없는 경우 건천화 정도는 크지 않음을 알 수 있다. 불투수율과 지하수 사용량 변화만을 고려했을 때 건천화 심도는 1 ~ 5등급의 다양한 상태를 보이고 있으나 전반적으로 건천화 등급이 매우 나쁜 상태를 보이고 있다. 그러나 건천화 직접적 원인을 반영할 경우 저수지, 하수처리장의 위치, 규모 등에 따라 지점별로 그 영향이 다양하게 나타났다.

참고문헌

- 김종구. 2010. 도시하천 유지유량 확보방안 개선에 대한 고찰. 한국수자원학회논문집. 43(11): 102-105.
- 경기개발연구원. 2003. 경기도내 하천의 건천화 방지에 관한 연구.
- 경기개발연구원. 2010. 도시하천 건천화 방지를 위한 하천유지용수 확보방안에 관한 사례 연구.
- 국토해양부. 2009. 하천건천화 평가 및 개선방안 연구 보고서.
- 과학기술부. 2003. 지속가능한 하천수 개발 기술 보고서.
- 과학기술부. 2007. 안양천 유역의 물순환 건천화 기술개발 보고서.
- 이정민. 2007. 지하수 양수 모의를 위한 SWMM의 수정. 한국물환경학회.23(5):628-635.
- 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.wamis.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