

PCSWMM 모형의 수량 및 수질 측면의 효과분석 결과를 이용한 대안의 우선순위 산정

Prioritizing Alternatives by Quantifying the Effect on Water Quantity and Quality Using PCSWMM

정은성*, 이길성**, 홍원표***, 박경신****

Eun-Sung Chung, Kil Seong Lee, Won-pyo Hong, Hyung-Shin Park

Abstract

This study establishes management plan for water quantity and quality using PCSWMM and alternative evaluation index (AEI). PCSWMM can consider combined sewer overflows (CSOs) and simulate not only the flowrate but also the pollutant of BOD, SS, TN and TP for the effectiveness analysis of alternatives. Indicators of AEI are selected using sustainability evaluation concept, driver-pressure-state-impact-response (DPSIR) model and calculated by weighted summation method. These were applied for the Mokgancheon watershed which has many combined sewers. This result will be effective to the integrated watershed management for sustainability.

key words: AEI, DPSIR, Effectiveness analysis, Mokgancheon, PCSWMM,

1. 서론

다양한 대안 중 어떤 대안을 선택하느냐 하는 것은 의사결정자와 상황에 따라 달라질 수 있는 문제이다. 예를 들어 건기의 수량확보를 위한 대안 중 효과를 평가하기 위한 기준으로 갈수량(drought flow, Q_{355})과 저수량(low flow, Q_{275}) 또는 건기의 총 유출량 등이 다양하게 선택될 수 있다. 또 같은 유역 내의 대안끼리 비교하는 경우와 다른 유역에 적용하는 대안끼리 비교하는 경우는 접근 방법이 전혀 다르다. 전자의 경우에는 단순히 가격대비 효과를 비교하면 되지만 후자의 경우는 유역의 위험도를 감안한 평가가 이루어져야 하기 때문이다. 또한 대안들은 각각의 목적에 따라 전혀 다른 효과를 나타내게 된다. 예를 들어 지하수 용출수의 활용은 건기 시 수량확보에만 효과가 있는데 반해 소규모 저수지 건설은 건기 시 수량확보 뿐만 아니라 홍수 시 홍수분담량의 저감효과까지 있으므로 서로 다른 효과를 정량적으로 비교하는 것은 쉽지 않다.

최근 대안의 효과분석 및 우선순위 제시를 위해 다양한 연속유출 모의모형을 이용하여 적용한 연구는 있지만(정은성 등, 2007), 도시유역에 대해 하수관거 월류수(Combined Sewer Overflows, CSOs)를 반영하여 수질과 수량에 대해 모두 분석한 연구는 거의 없다. 따라서 본 연구는 이를 PCSWMM(James and Huber, 2003)을 이용하여 수행하였으며 더 나아가 대안의 우선순위를 객관적으로 제시하기 위해 정은성 등(2008)이 제안한 지속가능성 평가모형인 Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR)를 이용한 대안평가지수(alternative evaluation index, AEI)를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 모형은 PCSWMM이며 홍원표(2008)가 CSOs를 고려하여 목감천 유역에 구축한 것을 사용하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 지속가능성 평가지수: DPSIR

DPSIR 모형은 EEA(1999)가 기존의 OECD(1993)의 Pressure-State-Response (PSR) 모형을 개선하여

* 정회원 · 서울대학교 공학연구소 선임연구원 · E-mail: cool77@snu.ac.kr

** 정회원 · 서울대학교 공과대학 건설·환경공학부 교수 · E-mail: kilselee7@snu.ac.kr

*** (주)대림건설 사원 · E-mail: wonpyo97@hotmail.com

**** 서울대학교 공과대학 건설·환경공학부 석사과정 · E-mail: blackleo83@nate.com

지속가능성(sustainability)을 지표화하기 위해 개발하였다. 기존의 PSR 모형은 복잡한 생태학적 과정과 인간 환경의 인과관계를 설명하지 못한다. 특히 상태의 변화로부터 생기는 영향(impact)을 전혀 설명하지 못하는 단점을 가지고 있을 뿐만 아니라 반응이 시스템에 영향을 미치는 상황을 반영하지 못한다. 즉 PSR 모형은 인간의 활동(pressure)이 환경(state)에 영향을 미치고 환경은 다시 인간으로 하여금 압력을 줄이기 위한 활동(response)을 촉진하게 한다. 그러나 DPSIR 모형은 여기에 두 가지 개념이 추가되었다. 인간의 행복은 환경의 질과 관계가 있고 사회의 활동과 경제적 압력은 환경과 인간의 행복에 영향을 미친다는 것이다. 이러한 개념은 추진력(driving force or drivers)과 영향(impact)에 반영되어 PSR 모형에 추가되었다. 따라서 DPSIR 모형은 사회의 추진력이 인간 사회에 압력을 발생시키고 압력이 상태에 영향을 미침에 따라 상태가 반응을 야기하는 영향을 유발하며 다시 반응은 이상의 네 가지 요소에 각각 다시 영향을 미친다는 관계에 착안한다. 여기서 원동력은 환경에 영향을 미치는 사회-경제적 요소로 일반적으로 인구, 자원의 사용량, 교육수준, 거주자수, 에너지 소비량 등이 있다. 압력은 환경의 상태에 직접적으로 영향을 미치는 자연적인 요소로 오염부하량, CO₂ 배출량 등이 있다. 상태는 환경의 질과 자연자원의 양을 정량적으로 측정하는 것으로 하천수질 농도, 오존의 농도 등이 있다. 영향은 환경의 상태가 인간, 동물, 생화학적 과정에 미치는 영향으로 질병의 정도, 생태계에 환경오염물질 배출량 등이 있다. 반응은 환경의 변화에 대한 사회의 반응으로 환경개선을 위한 다양한 활동 등이 이에 해당된다.

2.2. 대안 평가지수(AEI) 산정 방법

AEI를 산정하는 식은 다기준 의사결정기법의 종류에 따라 다르다. 본 연구에서는 그 중 가장 많이 사용되는 가중합계법(weighted summation method)을 이용하였으며 AEI 산정식은 다음과 같다.

$$f_i = \sum_{j=1}^n \beta_j \cdot w_j \cdot f_{ij} \quad (1)$$

여기서 f_i 는 i 대안이며, n 은 대안 i 가 적용된 중유역이며 f_1 은 치수 측면의 효과지수 ($0 \sim 1$), f_2 는 이수 측면의 효과 지수($0 \sim 1$), f_3 은 수질관리 측면의 효과 지수($0 \sim 1$)를 나타내는 값이며, p_n, q_n, r_n 은 치수, 이수, 수질관리에 대한 가중치이다.

치수, 이수, 수질관리 측면에서 대안의 효과지수인 f_j 는 지속가능성 모형의 요소인 추진력(driver)-압력(pressure)-상태(state)-영향(impact)-반응(response)을 고려하여 다음과 같이 제안하였다.

$$f_j = w_j \cdot DR_{j,i} \cdot PR_{j,i} \cdot ST_{j,i} \cdot IM_{j,i} \cdot RE_{j,i} \quad (2)$$

여기서, i 는 대안명이고, j 는 1인 경우 치수, 2인 경우 이수, 3인 경우는 수질관리를 의미하며, $w_{j,1} \sim w_{j,5}$ 는 추진력, 압력, 상태, 영향, 반응에 대한 가중치이고, $DR_{j,i}$ 은 대안 i 가 j 측면에 미치는 추진력에 대한 지수, $PR_{j,i}$ 은 대안 i 가 j 측면에 미치는 압력에 대한 지수, $ST_{j,i}$ 은 상태에 대한 지수, $IM_{j,i}$ 은 대안 i 가 j 측면에 미치는 영향에 대한 지수, $RE_{j,i}$ 은 반응에 대한 지수를 의미한다.

가중합계법의 이수 측면에서의 추진력($DR_{2,n}$), 압력($PR_{2,n}$), 상태($ST_{2,n}$), 영향($IM_{2,n}$), 반응($RE_{2,n}$)에 대한 수식과 수질관리 측면에서의 추진력($DR_{3,n}$), 압력($PR_{3,n}$), 상태($ST_{3,n}$), 영향($IM_{3,n}$), 반응($RE_{3,n}$)에 대한 수식을 제시하면 다음과 같다($DR_{1,n}, PR_{1,n}, ST_{1,n}, IM_{1,n}, RE_{1,n}$ 은 치수 측면에서의 값임).

$$DR_{2,i} = \beta_{2,1} s_{PD,n} + \beta_{2,2} s_{P,n} \quad (3)$$

$$PR_{2,i} = \beta_{2,3} s_{SS,n} + \beta_{2,4} s_{UR,n} + \beta_{2,5} s_{GW,n} + \beta_{2,6} s_{SW,n} \quad (4)$$

$$ST_{2,i} = 1 - \frac{t_1(a_i)}{d(a_i)} \quad (5)$$

$$\max_i \frac{t_1(a_i)}{d(a_i)}$$

$$IM_{2,i} = 1 - \frac{n_1(a_i)}{\max_i n_1(a_i)} \quad (6)$$

$$RE_{2,j} = 1/3 \times \frac{\frac{\Delta d(a_i)}{t_1(a_i)}}{\max_i \frac{\Delta d(a_i)}{t_1(a_i)}} + 1/3 \times \frac{\frac{\Delta l(a_i)}{t_1(a_i)}}{\max_i \frac{\Delta l(a_i)}{t_1(a_i)}} + 1/3 \times \frac{\Delta n_1(a_i)}{\max_i \Delta n_1(a_i)} \quad (7)$$

$$DR_{3,i} = \beta_{3,1} s_{PD,n} + \beta_{3,2} s_{P,n} \quad (8)$$

$$PR_{3,i} = \beta_{3,3} s_{LB,n} + \beta_{3,4} s_{LC,n} + \beta_{3,5} s_{LS,n} + \beta_{3,6} s_{LPN,n} + \beta_{3,7} s_{WL,n} + \beta_{3,8} s_{PD,n} + \beta_{3,9} s_{CSN,n} \quad (9)$$

$$ST_{3,i} = 1 - \frac{\frac{q_1(a_i)}{t_2(a_i)}}{\max_i \frac{q_1(a_i)}{t_2(a_i)}} \quad (10)$$

$$IM_{3,i} = 1 - \frac{n_2(a_i)}{\max_i n_2(a_i)} \quad (11)$$

$$RE_{3,j} = 1/4 \times \frac{\frac{\Delta q_1(a_i)}{t_2(a_i)}}{\max_i \frac{\Delta q_1(a_i)}{t_2(a_i)}} + 1/4 \times \frac{\frac{\Delta q_2(a_i)}{t_3(a_i)}}{\max_i \frac{\Delta q_2(a_i)}{t_3(a_i)}} + 1/4 \times \frac{\Delta n_2(a_i)}{\max_i \Delta n_2(a_i)} + 1/4 \times \frac{\Delta n_3(a_i)}{\max_i \Delta n_3(a_i)} \quad (12)$$

여기서, $d(a_i)$, $l(a_i)$, $q_1(a_i)$, $q_2(a_i)$ 는 대안 a_i 가 적용되는 유역의 갈수량과 저수량, 평균 BOD 농도, 총 BOD 일부하량을 의미하며, $t_1(a_i)$, $t_2(a_i)$, $t_3(a_i)$ 는 대안 a_i 가 적용되는 유역의 수문학적 목표유지유량, 목표수질, 목표 총 일부하량을 의미하며, $n_1(a_i)$, $n_2(a_i)$, $n_3(a_i)$ 은 대안 a_i 가 적용되는 유역의 목표유지유량 만족일수와 목표수질 만족일수, 목표 총일부하량 만족일수를 의미한다. 또 DPSIR 모형의 지속가능성 구성요소의 가중치 $w_{j,1} \sim w_{j,5}$ 는 정은성 등(2008)에서 제시된 결과를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 대안의 구성

목감천 유역 내 물순환 건전화를 위한 구조적 대안(Structural management)들 중 기술적 가능성(technical feasibility), 경제적 효율성(economic feasibility), 환경적 안정성(environmental feasibility) 측면에서 정성적으로 검토하여 실행가능한 대안을 선정하면 Fig. 1과 같다.

3.2 대안의 효과 분석 (Step 7)

기 보정 및 검증(홍원표, 2008)된 PCSWMM 모형을 이용하여 적용 가능한 대안에 대한 효과분석을

실시하였다.

3.3. 대안의 평가지수(AEI) 산정

대안의 평가지수를 산정하기 위해서 정은성 등 (2008)과 같은 방법으로 DPSIR (driver-pressure-state-impact-response) 모형을 이용하였다. 즉, 물순환에 가장 많은 영향을 미치는 근본적인 요인 (D)을 인구와 인구밀도로 가정하였고 인간의 활동 중 물순환에 압력(P)을 미치는 요소로 이수 측면에서는 하천수 누수 여부, 도시지역 비율, 지하수 취수량, 유역경사를, 수질관리 측면에서는 BOD, COD, SS, TN & TP 부하량, 미처리 하수 유입여부, 인구밀도, 복개구간 비율을 가정하였다. 이러한 압력으로 인해 영향(S)을 받는 자연상태 요소는 이수 측면에서는 유황곡선에서 평균 갈수량(Q_{355})과 목표 수문학적 갈수량에 대한 비율로 가정하였고, 수질관리 측면에서는 목표수질 대비 BOD, SS 평균 농도로 하였다. 물순환의 악화로 인해 인간에게 나타나는 직접적인 영향(I)은 이수측면에서 목표유지유량 만족일수, 수질측면에서는 목표 BOD 농도, BOD TMDL, 목표 SS 농도, SS TMDL 만족일수로 정하였으며, 여기서 TMDL은 목표 수량과 목표 수질의 곱으로 가정하였다. 이러한 영향을 회복하기 위해 국가, 사회, 관리부처 등에서 시도하는 여러 대안들을 반응(R)이라고 하며 반응으로 인한 효과를 정량화하기 위해 선택된 각각의 기준들은 대안에 대한 효과 분석 결과 값을 사용하였다.

여기서 기존의 연구와는 달리 SS 대한 항목을 추가하였는데, 이는 목표 수질 중 SS 항목을 추가한 결과이며, 가중치는 BOD 관련항목과 같게 설정하였다. 각 항목들의 가중치는 정은성 등(2008)이 제안한 값을 사용하였고, 이수 측면과 수질관리 측면에서 추진-압력-상태-영향-반응 요소 구하기 위하여 정은성 등(2008)이 제시한 수식을 사용하여, 각 대안별 효과지수(AEI)를 구하여 등수 및 등급을 제시하면 Table 1과 같다.

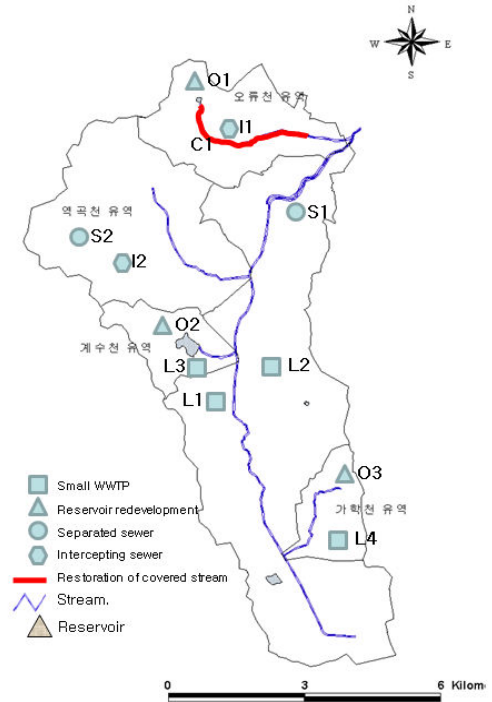


Fig. 1. Feasible Alternatives

Table 1. AEIs, Ranks, and Grade Using Composite Programming

Name of Alternative	AEI	Rank	Grade*
I1+O1(OR)	0.737	1	G
O3(GH)	0.624	2	G
L3+O2(GS)	0.584	3	A
I2+S2(YG)	0.316	11	A
I1+O1(MG)	0.503	9	A
O3(MG)	0.535	7	A
L3+O2(MG)	0.541	5	A
I2+S2(MG)	0.496	10	A
O2+L1	0.542	4	A
O2+L1+L2	0.539	6	A
O2+L1+L2+S1	0.525	8	A

* Poor: 0 ~ 0.3, Acceptable: 0.3 ~ 0.6, Good: 0.6 ~

4. 결론

본 연구는 도시유역의 물순환 건전화를 위한 대안들을 제시하고 CSOs를 반영하여 수질과 수량에 대해 PCSWMM을 이용하여 분석한 후 우선순위 및 등급을 제시하였다. 이때 대안의 우선순위를 객관적으로 제시하기 위해 정은성 등(2008)이 제안한 지속가능성 평가모형인 DPSIR를 이용한 대안평가지수, AEI를 사용하였다.

본 연구에서는 이길성(2007)이 안양천 유역 내 물순환 건전화를 위해 제시한 대안 중 현실적으로 적용이 가능하며, PCSWMM을 이용하여 효과분석이 가능한 대안을 선택하여 수량 및 수질(BOD, SS, TN, TP) 측면에서 효과를 분석하였다. 적용한 대안은 구조적 대안으로서 합류식 하수관거를 분류식 하수관거로 교체, 소규모 하수처리장 건설, 차집관거 설치 등이며, 비구조적 대안으로서 기존 저수지의 적정운영이다.

분석 결과 수량적인 측면에서 저수지 재개발 및 운영 대안은 비교적 우수한 결과를 보이고 있고, 수질적인 측면에서는 미차집 지역에 차집관거를 설치하는 대안이 상대적으로 우수한 결과를 보이고 있다. 또한 SS의 효율(Efficiency)이 BOD보다 적게 나타나는 것은 비점오염원의 영향 때문이라 생각되며, 현재 계획 중인 과립하수처리장 건설은 목감천 유역과 계수천 유역에 비교적 높은 효율의 결과를 나타낼 것으로 보인다.

이러한 연구는 향후 대안의 적용 후의 수량 및 수질적 변화 분석이나 대안의 우선순위를 결정할 때 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(과제번호 1-7-3)의 서울대학교 공학연구소를 통한 연구비 지원(80%)과 Safe and Sustainable Infrastructure Research의 연구비 지원(20%)에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- 정은성, 이길성, 박경신(2008). “다기준 의사결정기법을 이용한 대안평가지수 개발.” **한국수자원학회논문집**, 제41권, 제1호, pp. 87-100.
- 정은성, 이준석, 이길성, 김상욱, 김경태(2007). HSPF 모형을 이용한 안양천 유역의 물순환 건전화 대안기술 효과분석. **한국물환경학회지**, 제23권, 제6호, pp. 973-984.
- 홍원표(2008). PCSWMM모형을 이용한 목감천 유역의 유역통합관리계획 수립. 서울대학교 석사학위논문.
- European Environment Agency (1999). *Environmental Indicators: Typology and Overview*. Copenhagen, Denmark.
- James, W. and Huber, W. C. (2003). *User's Guide to PCSWMM*. CHI.
- OECD(1993). OECD core set of indicators for environmental performance reviews, *OECD Environment Monographs*, No. 83, OECD, Paris.