새만금유역의 수질을 고려한 환경유지용수의 시나리오 분석 Analysis of Scenarios for Environmental Instream Flow Considering Water Quality in Saemangeum Watershed

김세민 · 박영기[†] · 원찬희* · 김민환**

Se-Min Kim · Young-Ki Park[†] · Chan-Hee Won* · Min-Hwan Kim**

전북대학교 토목공학과 · *전북대학교 환경공학과 · **호남대학교 토목환경공학과

Department of Civil Engineering, Chonbuk National University

*Department of Environmental Engineering, Chonbuk National University

**Department of Civil & Environmental Engineering, Honam University

(Received December 30, 2015; Revised January 11, 2016; Accepted March 4, 2016)

Abstract : In this study, analyzed scenarios of the environmental instream flow for water quality improvement in Saemangeum watershed. In order to get an environmental instream flow, Methodology is selected for Retention-Basin, reservoir expansion, new dam construction, Modification of water intake and drainage system, Rearrangement of plan for system which Yongdam and Seomjin river dam have been used water supply. The study composed of diverse scenario of Environmental instream flow increase-ment and analyzed the effect of improving the water quality by the QUAL2K model and calculation of runoff for saemangeum watershed by SWAT model. The following water quality indicators have been simulated in irrigation and non-irrigation period for BOD and T-P. When scenarios applied to water quality model, Improvement rate in the water quality for Total Maximum Daily loads of Mankyung B unit watershed during irrigation and non-irrigation period is BOD (28.70%), T-P (17.09%) and BOD (28.51%), T-P (28.68%) respectively. Dongjin A unit watershed during irrigation and non-irrigation period is BOD (14.39%), T-P (14.59%) and BOD (15.54%), T-P (19.46%) similar. Simulation results is to quantify the contribution of the improvement in the water quality. In particular, It was demonstrative that improving effect for water quality was evaluated to be great in non-irrigation period.

Key Words : Saemangeum Basin, Environmental Instream Flow, QUAL2K, SWAT, Water Quality Improvement

요약 : 새만금유역을 대상으로 수질개선을 위한 다양한 방법을 검토하고 환경유지용수 확보에 따른 수질개선 효과를 평가하였다. 만경강과 동진강의 환경유지용수 확보를 위해 강변저류지설치, 저수지증고, 신규댐 건설, 용수 취배수체계 조정, 용담댐, 섬진강댐 물 이용체계를 조정하는 방안을 선정하였다. 환경유지용수 확보 가능한 방안에 따른 시나리오 구성을 통해 수질개선효과를 예측하기 위하여 유역모형 SWAT과 수질모델 QUAL2K를 연계하여 BOD와 T-P항목에 대해 수질변화를 모의하였다. 시나리오 적용을 통한 모의 결과 총량관리단위유역말단인 만경B 지점의 경우 관개기 BOD 수질개선율은 28.70%, T-P의 수질개선율은 17.09%로 나타났고, 비관개기BOD 수질개선율은 28.51%, T-P의 수질개선율은 28.68%로 나타났다. 동진A 지점의 경우 관개기 BOD 수질개선율은 14.39%, T-P 수질개선율은 14.59%, 비관개기 BOD 수질개선율은 15.54%, T-P 수질개선율은 19.46 %로 나타나 환경유지용수가 수질개선에 효과가 있는 것으로 분석되었고 특히, 비관개기 수질개선에 효과가 크다는 것을 알 수 있었다.

주제어 : 새만금유역, 환경유지용수, QUAL2K, SWAT, 수질개선

1. 서론

최근 우리나라는 환경 친화적인 도시 공간 마련, 생태공원 및 친수환경 조성에 대한 기대가 높아지는 등 하천에서의 자연환경 및 생활환경 개선을 위한 용수, 즉 환경유지용수 도입에 대한 필요성이 제기되고 있다. 따라서 물 관리 측면에서는 기존의 양적인 조절에 부가하여 질적인 물 관리에도 주목하여야 할 단계에 이르렀다.¹⁾ 질적인 물 관리는 하천에 방류되는 배출수의 처리시설을 확충하는 방법과 하천의 유량을 증대시켜 하천수의 자정능력을 높이는 방법이 있는데, 갈수기 동안 하천의 환경유지유량의 증대를 의미한다. 환경유지용수²⁾는 하천생태계 보전을 위한 최소한의 하천기능유지는 물론 수질개선 등의 환경개선 의미를

포함하고 있어 환경과 하천유지용수를 동시에 만족시키는 용수를 의미하는 반면, 하천법에서 정의하고 있는 하천유지유량은 유수의 정상적인 기능과 상태를 유지하기 위하여 필요한 최소한의 유량을 하천유지유량으로 정의하고 있다. 하천유지유량의 산정은 하천고유의 수리, 수문학적 하도유지가 가능할 수 있는 갈수량을 기준으로 산정하되 자연적, 사회적 여건과 유량공급가능성 등을 고려하여 하천수질보전 등을 위한 기능 8가지 항목을 감안하여 산정하도록 고시하고 있다.³⁾

이러한 하천유지용수의 정의는 인간 위주의 용수이용기능을 중점적으로 고려한 것으로 순수한 환경유량의 의미로서 환경생태적 관점에서 정의되고 강조되지 못한다. 또한 하천유지용수는 용수산정에는 포함되어 있으나 실제적인 공급

[†] Corresponding author E-mail: parkyk@jbnu.ac.kr Tel: 063-270-4790 Fax: 063-270-4056

방안이 없는 등 환경적인 측면에서 효율적인 관리가 안되고 있다고 할 수 있다.¹⁾ 이러한 문제점을 극복하기 위하여 새만금유역에서 환경유지용수 확보방안을 산정하고 시나리오를 구성하여 수질개선효과를 분석하고자 한다.

농작물의 관개에 필요한 물은 하천이나 호소, 지하수를 취수하여 농경지에 도수하여 이용함으로써 수문순환 과정에 일정부분 영향을 미치고 있다. 상류 유역에서의 일정량 이상의 취수는 하류부의 유량 감소를 초래하거나, 한계수량 이상의 지하수 취수는 지하 대수층의 수위강하를 일으키며, 이는 바다로부터 염분 유입을 가져올 수 있다. 우리나라의 물 수요량 중 농업용수가 차지하는 비중은 2008년 기준으로 50%로 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 최근에는 영농방식이 다변화하고 농촌지역의 산업화가 진행되면서 농촌지역의 용수수요가 점점 증가하는 추세이다.⁴⁾ 만경강 유역과 동진강유역은 대규모 관개시스템을 통해 하천수의 대부분을 농업용수로 공급하고 있어 하천의 건천화가 심화되고, 이에 따라 수질관리와 수생태계 보전에 어려움이 있다. 또한 초기강우로 인한 비점오염원, 농업용수의 회귀수, 축산폐수 등으로 인하여 나쁜 수질을 유지하고 있으며 큰 하상계수, 농업용 저수지와 댐 등으로 환경유지용수가 절대적으로 부족한 상태이다. 따라서 새만금 유역의 수질개선과 수생태계 보전을 위해서 용수이용 체계조정 등을 고려하여 유역의 특성에 맞는 환경유지용수를 안정적으로 확보하고 유량, 수질을 통합적으로 관리할 수 있는 방안이 요구된다.

최근 수질관련 연구 동향으로는 김 등⁵⁾은 하천유지유량 결정 방법의 개발 방향을 결정하고 하천의 정상적인 기능유지에 필요한 주요 항목별 필요유량 결정방법을 개발하였다. 또한 이를 대표지점에 적용하여 하천유지유량과 하천유량의 결정 방법을 제시하였다. 김 등⁶⁾은 개발된 산정방법을 금강유역 본류구간에 적용하여 결과를 제시하였다. 최⁷⁾는 지속가능한 하천관리를 위한 환경유량의 산정을 연구하였고 김⁸⁾은 남강댐 하류유역 수질개선을 위해 필요한 유량을 산정하였으며 김 등⁹⁾은 SWAT모형을 개선시킨 SWAT-K 모형을 이용하여 BOD모의를 수행하였다. 장재호 등¹⁰⁾은 점·비점오염원의 삭감시나리오에 따른 저감효과와 수질변화를 분석하였으며 정¹¹⁾은 QUAL2K 모형을 이용하여 수질보전을 위한 하천유지유량 산정을 위한 수질모의를 섬진강 본류를 대상으로 예측하였다. 신 등¹²⁾은 QUAL-NIER 모형의 수질모델 인자를 조사하여 4대강 수계에 적용하였다.

Kannel 등¹³⁾은 QUAL2E 모형을 보완한 QUAL2K를 자동보정할 수 있도록 수정한 QUAL2Kw 모형을 네팔의 하천에 적용하여 수질을 모의하였다. 외국의 경우는 환경유량의 개념으로 생물의 다양성을 유지 복원하기 위한 차원의 생태계의 물 할당을 시도하여 실무에 널리 사용되고 있다.¹⁴⁾

현재 새만금 유역에서는 다양한 형태의 농업이 이루어지고 있고 이로 인한 농업배수와 하천을 통해 유입되는 생활하수 및 주변 공단에서 유출되는 공장폐수의 영향을 지속적으로 받고 있어 수질보전을 위하여 전체적인 수질관리가 필

요한 실정이다.

본 연구의 목적은 새만금 유역의 만경강과 동진강의 수질개선을 위해 필요한 환경유지용수를 확보하기 위한 방안을 모색하였으며 확보방안에 따른 시나리오를 구성하여 유역 내 수문순환 및 비점오염원의 발생 거동을 정량적으로 분석할 수 있는 SWAT모형을 통해 비점오염원으로 인한 유역 내 수질 영향을 파악하고, 이를 바탕으로 1차원 정상상태 수질모델 QUAL2K를 이용하여 시나리오별 수질개선효과를 평가하고자 한다.

2. 연구방법

새만금유역의 수질 개선을 위한 대안을 마련하고자 현실적이고 실현가능하며 우선적으로 수행 가능한 방법을 모색하였다. 환경유지용수 확보를 위해 강변저류지 설치, 저수지증고, 용수 취배수체계 조정, 신규댐건설, 용담댐, 섬진강댐 물이용체계 조정 등의 방법을 검토하였으며, 시나리오를 구성하여 수질개선에 어느 정도 효과가 있는지 모델을 이용하여 분석하였다. 모델은 유역 내 비점오염원을 분석할 수 있는 SWAT모형과, 1차원 수질 예측 모델로서 하천수질 모의에 광범위하게 사용되고 있는 QUAL2K모형을 새만금유역에 적용하였다.

2.1. 대상유역

만경강 유역은 총 길이는 93 km, 유역면적은 1,527 km²이며, 전주, 익산, 김제시 등이 위치하고 있다. 본류에 소양천, 전주천, 익산천, 탑천 등의 지천과 용담댐 방류량이 합류되어 새만금호로 유하하며 주된 외부 유입원으로는 용담댐 방류량이 있다. 용담댐 제1발전소의 발전용수로 사용된 수량의 일부는 정수장을 거쳐 생활용수로 공급되며, 남은 수량이 만경강으로 방류되어 하천의 상류 유량으로 공급된다.¹⁵⁾ 만경강 유역의 농업용수 공급은 대아·경천저수지에서 방류되는 농업용수와 용담댐에서 공급되는 용수가 고산천에서 합류되어 만경강으로 유하하면서 취입보 중심으로 관개용수가 공급되고 있으며 유입되는 주요 하천의 하류부에는 제수문을 설치하여 공급된 농업용수의 회귀수를 저류양수하여 재이용하고 있는 방식으로 운영하고 있다.

동진강유역은 총 길이 44.7 km, 유역면적 1,129 km²으로, 유역 내 농경지의 비율이 매우 높아 자체유역의 유출량으로는 농업용수를 충분히 공급할 수 없어 부족한 농업용수를 공급하기 위해 섬진강댐에서 유역 변경방식으로 운암수강 및 철보발전소를 통해 동진강 유역으로 관개용수를 방류하고 있다.¹⁶⁾

2.2. 비점오염 모의를 위한 SWAT모형의 적용

SWAT모형은 강우·유출모델과 수질모델이 GIS와 연결되어 있는 모형으로써 장기유량과 수질을 모의할 수 있다. 입력 자료로는 강우, 온도, 풍속, 일조량, 상대습도 등의 기

상·수문자료와 DEM (Digital Elevation Model), 토지이용도, 토양도 등의 유역자료로 구성된다.¹⁷⁾ 본 연구에서는 수질오염총량관리제상의 세유역을 중첩시키고 하천망을 표현할 수 있는 최적의 임계값을 시행착오법을 적용하여 하천생성을 위한 최소배수면적을 140 ha로 설정하여 만경강유역 162개, 동진강유역 141개의 소유역으로 분할하였다. 분할된 소유역에서 토지이용과 토양특성 비율을 모두 0%로 할 경우 모든 토지이용과 토양특성이 조합에 고려되어 HRU수가 많아지고, 비율을 높일수록 계산시간 및 효율을 높일 수 있는 장점이 있는 반면, 공간적인 분포특성을 감소시킬 수 있으므로 적정 HRU에 대한 기준을 설정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 HRU Definition 과정 중, Land use와 Soil Class의 면적 비율을 각각 5%와 10%로 설정하여 공간적인 특성을 반영하도록 하였으며, 이에 따라 만경강유역은 1,777개, 동진강유역은 1,222개의 HRU로 구분하였다. 1:25,000 수치지도를 이용하여 시간의 효율성과 모의결과와 정확성을 고려하여 30 m × 30 m 격자의 DEM을 구축하였고 토지이용도는 환경부 환경지리정보서비스에서 제공하는 축척 1:25,000의 중분류 토지피복도를 이용하였다.

토양도는 국립농업과학원에서 제작된 1:25,000 정밀토양도를 이용하였으며 기상자료는 새만금유역 기상관측소(전주, 군산, 정읍, 부안) 및 강우관측소(전주, 고산, 임피, 구이, 용지, 금마, 봉동, 용진, 정읍, 고부, 김제, 태인, 산외, 금구)에서 강수량(mm), 최고·최저온도(°C), 풍속(m/s), 상대습도(%), 일사량(MJ/m²)에 대해 2004년 1월 1일부터 2012년 12월 31일까지의 관측된 일별 자료를 수집 후 각각 .dbf파일을 생성하여 입력하였다.

2.3. 유역모형의 재현성 검토

SWAT모형에 의한 총 모의기간은 5년(2008년~2012년)이고, 안정화기간은 3년(2008~2010)이며 모델의 보정은 2011년, 검증은 2012년이다. SWAT 모형에서 각 HRU별 강우에 따른 유출량 계산은 지표유출의 경우 SCS Curve Number 방법을 이용하였고 지표, 지표하, 기저 유출은 하천구간들 사이의 연계성을 고려하여 Muskingum 방법을 이용하였다. 유출량 보정 절차는 만경, 동진강유역의 최상류인 만경B, 정읍A에 대하여 먼저 실시하였고 하류단으로 내려가며 유출량을 보정하였으며 지표유출(CN, SOL_AWC, ESCO), 기저유출(ALPHA_BF, GWQMN, REVA-PMN, GW_REVAP), 침투유량(CH_N, CH_K) 이후 감쇠곡선 보정 순으로 수행하였다. 모델의 오차평가는 상관계수(R², Correlation coefficient), RMSE (Root Mean Square Error), 차이퍼센트(%Difference)를 이용하였다. R²과 RMSE, %Diff.의 계산식 및 평가방법은 Kim¹⁸⁾에서 찾아 볼 수 있다. 유출량 모의결과 모의값이 실측값을 적정수준 반영하는 것으로 나왔으나, 동진강의 경우 오차율이 다소 높게 산정되었는데 이는 동진강유역 특성상 도수시설이 복잡하게 형성되어있고 주변 농경지에 농업용수를 공급하기 위해 동진강 본류의 흐름을 막고 낙양보를 통해 취수하여 김제용수간선, 정읍용수간선으로의 용수공급에 의한 영향으로 판단된다. Fig. 1, 2는 만경강과 동진강 본류에 대한 유출량 보정 및 검증 결과 그래프이다.

BOD의 경우 20°C에서 CBOD에 의해 소모되는 탈산소계수(RK1), 20°C에서 침전에 의한 CBOD 손실율(RK3), 각 토층의 유기탄소 함유량(SOL_CBN)의 매개변수를 주로 이용하여 보정하였다. T-P의 경우 유기성인(ORG - P)과 무기

Fig. 1. Calibration and Verification of runoff for Mankyung A.

Fig. 2. Calibration and Verification of runoff for Dongjin A.

Fig. 3. Calibration and Verification of BOD and T-P for Mankyung A.

Fig. 4. Calibration and Verification of BOD and T-P for Dongjin A.

성인(MIN - P)의 합으로 부하량을 산정하였고, 산정된 부하량에서 해당일자 유량으로 나누어 일 농도를 구하였다. T-P보정시 20℃에서 용존인의 침전물(RS2), 20℃에서 유기성인의 침전물(RS5), 인 조류 생체량 분율(AI2), 20℃에서 유기인에서 용존인의 광물질 상수비(BC4)를 주요 매개변수로 보정하였다. 모의결과 실측치와 모의치와의 상관성이 높았으며 모의값이 실측값의 경향을 잘 반영하는 것으로 나타났다. Fig. 3, 4에 만경, 동진강의 대표지점에 대한 수질 모의 결과를 그래프로 제시하였다.

2.4. 하천수질모의를 위한 QUAL2K모형의 적용

하천 수질모의를 위한 모형으로 일반적으로 미국 EPA에서 개발된 QUAL2E가 이용되고 있다. 본 연구에서는 QUAL2E 모형을 보완해 개발된 QUAL2K 모형을 이용하여 수질모의를 수행하였다. QUAL2K 모형에 대한 이론은 Chapra¹³⁾에 상세히 기재되어 있다. 수질모델 적용구간은 만경강과 동진강으로 나누어 진행하였다. 만경강은 상류의 수질측정망인 고산지점에서 하류의 만경강하구까지 하천의 수리적인 특성을 고려하여 총 9개의 Reach로 나누었고, 전주천은 3개의 대구간으로 나누었으며 소양천과 탐천은 1개의 대구간으로 구성하여 합류되도록 하였다. 동진강은 상류의 수질측정망인 동진강1지점에서 하류의 동진강하구까지 6개의 Reach로 나누었고, 유입지류인 정음천, 고부천, 원평천은 2개의 대구간으로 나누어 합류되도록 구성하였다. 모델 연계를 위해서 유역 모델을 이용하여 모의한 각 소유역별 유량과 수질값을 QUAL2K에 입력하였다. 만경대교와 동진대교가 해당되는 소유역을 유출구로 설정하고 모의한 유출량과 오염농도를 QUAL2K모델의 각 구간별로 입력하였다. 만경강의 경우 총 14개, 동진강의 경우 총 12개로 나누어진 하천 구간에 유역모델링을 통해 도출된 해당소유역의 결과를 총 구간 수로 나누어 등분포형태로 할당하였다. QUAL2K모형은 수리학적으로는 정상상태인 부동류로 간주하여 모의 기간 동안 시간에 따른 유량 변화는 없는 것으로 보지만, 수질은 낮과 밤의 변화를 모의할 수 있도록 구성되어 있다. 하지만 수질의 시간별 변화를 관측한 자료를 획득하지 못하여 일단위로 모의된 유역 모형의 결과 중, 모형의 보정은 수질관리 관점에서 저수기에 해당하는 2012년 9월 10일 자

Fig. 5. Schematic Diagram of Mankyung river for QUAL2K Model.

Fig. 6. Schematic Diagram of Dongjin river for QUAL2K Model.

료를, 검증은 2012년 10월 25일 자료를 비관개기의 대표시기로 선정하여 수행하였다. 모델의 오차크기와 신뢰도를 평가하기 위한 지표로써 상관계수(R^2 , Correlation coefficient), RMSE (Root Mean Square Error), AME (absolute mean error)를 사용하였다. AME에 대한 계산식 및 평가방법은 Jang⁹⁾에서 찾을 수 있다. Fig. 7~10에 보정 및 검증 그래프를 제시하였고 오차의 크기와 신뢰도를 평가한 결과 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타나 대상수계의 수질을 예측할 수 있는 모델로 평가되었다.

Table 1. Evaluation of model performance through calibration and verification

River	Water quality item	R^2	AME	RMSE
Mankyung Riv.	Calibration BOD	0.98	0.22	0.44
	T-P	0.99	0.0006	0.001
	Verification BOD	0.99	0.08	0.17
	T-P	0.96	0.02	0.04
Dongjin Riv.	Calibration BOD	0.99	0.02	0.03
	T-P	0.99	0.005	0.009
	Verification BOD	0.99	0.06	0.108
	T-P	0.99	0.02	0.03

Fig. 7. Calibrated results of BOD AND T-P for Mankyung River.

Fig. 8. Verified results of BOD AND T-P for Mankyung River.

Fig. 9. Calibrated Results of BOD AND T-P for Dongjin River.

Fig. 10. Verified Results of BOD AND T-P for Dongjin River.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 환경유지용수 확보방안

새만금유역의 자연 생태적 기능강화를 위해서는 추가적인 용수확보가 필수적이며, 가장 현실적이면서 수질개선 효과를 극대화하기 위한 방법을 모색하였다. 새만금유역의 물이용은 주로 금강호, 용담댐, 섬진강댐 등 외부 수자원의 공급에 의해 이루어지고 있어 유역 내에서 자체적으로 환경유지용수를 확보할 수 있는 방안과 유역관리에 의한 강변저류지 설치, 저수지증고, 용수 취배수체계조정, 신규댐 건설 등으로 유역종합치수계획¹⁹⁾을 참고하여 검토 후 선정하였다.

강변저류지 조성을 통한 확보방안은 만경강유역의 삼천, 구만, 전주 강변저류지 조성을 통하여 5.3백만톤(0.17 CMS), 동진강유역의 동진1, 동진2, 정읍1 강변저류지 조성을 통해 3.78백만톤(0.12 CMS)을 확보하는 방안을 강구하였다.

저수지증고를 통한 확보방안은 만경강유역의 동상, 대아, 경천, 구이저수지증고를 통해 49.20백만톤(1.56 CMS)을 확보하고 동진강유역의 용산, 내장, 수청저수지 증고를 통해 64.33백만톤(2.04 CMS)을 추가확보하는 방안이다.

2001~2012년을 기준으로 만경강유역의 경우 어우보 취수량은 154.5백만 m^3 /년(2001~2012)으로 상류의 대아저수지와 경천저수지의 공급량보다 약 40백만 m^3 /년이 많으며, 동진강 유역은 섬진강댐으로부터 공급되는 유량의 약 74%가 농업용수로 공급되고 있다. 이에따른 용수의 취배수체계 조정(0.95 CMS)을 고려하였다. 건산천(0.2 CMS), 노송천(0.08 CMS), 아중천(0.03 CMS), 전주천(3.40 CMS)에 대한 하수처리수를 재이용하는 방안, 또한 정우소수력발전소에서 한교천으로 방류되는 수량(3.60 CMS)을 확보하는 방안을 강구하였다.

앞서 언급 하였던 것처럼 새만금유역은 주로 외부 수자원의 공급에 의해 이루어지고 있어 유역 내에서 환경유지용수를 확보하기에 매우 제한적이므로 새만금 수질개선과 추가 수자원확보를 위해서 신규 수자원 개발이 필요한 실정이다. 환경유지용수 확보를 통한 수질개선 효과가 유역 내 상류지역에서 가장 실현가능한 방법으로 전주천의 상관댐, 소양천의 신촌댐, 신흥천의 신흥댐 건설을 고려하였다. 이에 따라 추가 확보되는 환경유지용수는 0.97 CMS이다.

'02년 용담댐에서 만경강으로 방류가 시작되면서 용담댐 방류량은 만경강의 수질개선에 직접적인 영향을 미치고 있으며 실제로 방류가 시작된 이후 만경B 지점의 수질이 개선되었으나, '04년 이후 방류량이 줄면서 다시 수질이 악화되는 현상을 보였다.²⁰⁾ 용담댐 방류량을 살펴보면 용수공급량 15.6 CMS에서 실제 전북권 방류량 10.8 CMS를 뺀 4.8 CMS를 확보할 수 있다.

섬진강댐은 댐 정상화 사업으로 댐 운영이 만수위 191.5 m에서 196.5 m로 상향조정됨으로써 확보된 65백만 m^3 /년(2.06 CMS)을 만경강수계 상류로 전환하여 공급하는 방안

이다. 이로 인해 총 19.98 CMS의 환경유지용수를 확보가능하며 이를 수질개선에 활용하는 방안을 검토하였다.

3.2. 추가확보 가능한 환경유지용수에 대한 시나리오

새만금유역의 환경유지용수 증대를 위한 방안을 검토하여 만경강유역 8개, 동진강유역 4개, 총 12개의 시나리오를 구성하였으며 시나리오별구성은 Table 2와 같다.

3.2.1. 만경강유역 시나리오

만경강유역의 Scenario 1은 강변저류지(삼천, 구만, 전주)를 설치하여 연간 5.3백만톤의 물을 확보하여 0.17 CMS를 확보하는 방안, Scenario 2는 저수지증고(동상, 대아, 경천, 구이)를 통해 확보된 1.56 CMS 수량을 환경유지용수로 활용하여 수질개선에 기여 하도록 하는 방안, Scenario 3은 어우보 및 삼례취입보의 취배수체계조정을 통해 0.95 CMS를 확보하는 방안이다. Scenario 4는 하수처리수 재이용(노송천, 건산천, 아중천, 전주천)에 따라 3.71 CMS를 추가 확보하는 방안, Scenario 5는 신규댐건설(신흥댐, 신촌댐, 상관댐)을 통해 0.97 CMS를 확보하는 방안, Scenario 6은 용담댐 물이용체계 조정을 통해 4.80 CMS를 추가 확보하는 방안, Scenario 7은 섬진강댐 물이용체계 조정을 통해 2.06 CMS의 환경유지용수를 추가 확보하는 방안, Scenario 8은 Scenario 1~Scenario 7을 모두 합한 방안이다.

3.2.2. 동진강유역 시나리오

동진강유역의 Scenario 1은 동진1저류지, 동진2저류지 정읍1 저류지를 조성하여 연간 17.22백만톤, 0.12 CMS의 환경유지용수를 확보하는 방안, Scenario 2는 용산, 내장, 수청저수지 증고를 통해 2.04 CMS를 추가 확보하는 방안, Scenario 3은 정우 소수력발전소에서 한교천으로 방류되는 3.60 CMS를 추가 확보하는 방안이다. 정우소수력발전소에서 비관개기 시 한교천으로 방류되는 수량은 2001년~2012년 평균 3.60 CMS로, 환경유지용수가 지속적으로 방류될 경우 정읍천의 수질개선 뿐만 아니라 동진강 중하류의 수질개선에 크게 기여할 것으로 판단된다. Scenario 4는 Scenario 1~4를 모두 합한 안이다.

3.3. 시나리오별 수질개선 효과

환경유지용수 확보에 따른 시나리오 구성은 총량관리단 위유역말단인 만경B, 동진A지점에 대해 수질오염총량관리 3단계에서 고시하고 있는 목표수질을 만족하기 위한 조건으로 최소한의 유량을 확보하도록 하였다. 또한, 관개기(4월에서 9월)동안 5월 말에서 6월 초에 해당하는 시기는 하천의 유량이 가장 적은 반면, 농업용수 사용량이 가장 많은 시기로서 하천의 수질관리 관점에서는 최악의 시기에 해당하므로 6월을 대표시기로 선정하였고, 12월을 비관개기의 대표시기로 선정하여 수질개선 효과를 비교하였다. 만경B, 동진A지점에 대한 목표수질은 Table 3과 같다.

Table 2. Scenarios of Mankyung, Dongjin Basin

Scenario	Diagnosis	Environmental instream flow (CMS)	Remarks
Mankyung Basin	1 Sam-cheon retention-basin	0.13	• Storage flow for Sam-cheon retention basin, water quality applied wetland efficiency
	Guman retention-basin	0.01	• Point source (retention-basin applied wetland efficiency)
	Jeonju retention-basin	0.03	• Storage flow for Jeonju-cheon retention basin, water quality applied wetland efficiency
	2 Dongsang reservoir	0.18	
	Daea reservoir	0.29	• Inflow increase in Mankyung River upstream
	Gyeong-cheon reservoir	0.87	
	Gui reservoir	0.22	• Inflow increase in Sam-cheon upstream
	3 Eou-weir and Samrye weir	0.95	• Intaking water volume of Eou-weir : 38.9% applies to existing intaking water volume (except 0.95 CMS) • Intaking water volume of Samrye : 61.1% applies to existing intaking water volume (except 0.95 CMS) • Non-irrigation period : Eou-weir and Samrye weir applied Zero CMS
	4 Nosong-cheon	0.08	
	Geonsan-cheon	0.20	• Point source (Application of Jeonju terminal disposal plant of sewage)
	Ajung-cheon	0.03	• Inflow increase in Soyang-cheon upstream, water quality Mixing jeonju terminal disposal plant of sewage
	Jeonju-cheon	3.40	• Application of existing water quality Jeonju terminal disposal plant of sewage
	5 Shinhung dam	0.12	• Inflow increase in Mankyung river upstream
	Shinchon dam	0.15	• Inflow increase in Sam-cheon inflow
	Sangkwan dam	0.70	• Inflow increase in Jeonju-cheon upstream
	6 Yongdam dam	4.80	• Inflow increase in Mankyung river upstream
	7 Seomjin river dam	2.06	• Inflow increase in Sam-cheon inflow
	8 Scenario 1~7	14.22	• Applied to all scenarios
Dongjin Basin	1 Dongjin1 retention-basin	0.02	• Application of retention-basin for flow and water quality on efficiency in Dongjin main stream
	Dongjin2 retention-basin	0.09	
	Jeongeup1 retention-basin	0.01	• Application of retention-basin for flow and water quality on efficiency in Jeongeup-cheon
	2 Yongsan reservoir	0.45	• Yongsan reservoir flow and water quality mixed Jeongeup-cheon flow
	Naejang reservoir	1.24	• Naejang reservoir flow and water quality mixed Jeongeup-cheon flow
	Sucheong reservoir	0.35	• Sucheong reservoir flow and water quality mixed Dongjin river flow
	3 Jungwoo hydro power plant	3.60	• Average flow of Chilbo hydroelectric power plant applied Non-irrigation period (2001~2012)
	4 Scenario 1~3	5.76	• Applied to all scenarios

Table 3. Water quality targets of TMDL in Mankyung B, Dongjin

Site	BOD (mg/L)	T-P (mg/L)
Mankyung B	4.2	0.180
Dongjin	3.1	0.126

3.3.1. 만경강 유역

만경강 유역에서 추가확보 가능한 환경유지용수를 고려하여 구성된 총 8가지 시나리오를 이용하여 관개기(6월)와 비관개기(12월)로 나누어 수질모형을 수행하였다.

관개기에 만경B 지점에서 모의된 BOD 농도는 4.53 mg/L를 보였고, 모든 시나리오를 적용한 C8의 개선효과가 28.70%로 가장 높은 것으로 나타났으며, 만경B 지점의 BOD 개선효과에 대한 순위는 다음과 같다.

모든 시나리오 적용(28.70%) > 용담댐 방류량 증가(23.18%) > 어우보 운영개선(10.38%) > 저수지 증고(9.49%) > 신규댐

건설(6.62%) > 섬진강댐 삼천방류(6.18%) > 강변저류지(1.10%) > 하수처리수 재이용(0.00%)이다.

비관개기에 만경B 지점에서 모의된 BOD 농도는 4.49 mg/L를 보였고, 모든 시나리오를 적용한 C8의 개선효과가 28.51%로 가장 높은 것으로 나타났으며, 만경B 지점의 BOD 개선효과에 대한 순위는 다음과 같다.

모든 시나리오 적용(28.51%) > 용담댐 방류량 증가(22.27%) > 어우보 운영개선(10.24%) > 신규댐 건설(9.13%) > 저수지 증고(6.01%) > 섬진강댐 삼천 방류(6.68%) > 강변저류지(1.11%) > 하수처리수 재이용(0.00%)이다.

모델 결과 모든 시나리오를 적용했을 때 개선율이 가장 높았고, 그 다음으로는 용담댐 방류량 증가와 어우보 운영개선 방안이 높은 것으로 나타났으며 전반적으로 관개기와 비관개기의 개선율이 비슷하게 산정되었다. 강변저류지와 하수처리수 재이용 방안은 BOD 개선효과가 거의 없는 것으로 나

Table 4. Forecasting of BOD concentration and improvement rate in Mankyung B unit watershed

Time	Diagnosis	Scenario								
		Simulated	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Irrigation period	Concentration (mg/L)	4.53	4.48	4.10	4.06	4.53	4.23	3.48	4.25	3.23
	Improvement rate (%)		1.10	9.49	10.38	0.00	6.62	23.18	6.18	28.70
Non-irrigation period	Concentration (mg/L)	4.49	4.44	4.22	4.03	4.49	4.08	3.49	4.19	3.21
	Improvement rate (%)		1.11	6.01	10.24	0.00	9.13	22.27	6.68	28.51

* C1 : Retention-basin, C2 : Heightening reservoir, C3 : Improving Eou-weir management, C4 : Reuse treated waste water, C5 : New dam construction, C6 : Increasement discharge of Yongdam dam, C7 : Seomjin river dam discharged into the sam-cheon, C8 : C1~C7

Table 5. Forecasting of T-P concentration and improvement rate in Mankyung B unit watershed

Time	Diagnosis	Scenario								
		Simulated	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Irrigation period	Concentration (mg/L)	0.2165	0.2102	0.2105	0.2071	0.1970	0.2137	0.2010	0.2057	0.1795
	Improvement rate (%)		2.91	2.77	4.34	9.01	1.29	7.16	4.99	17.09
Non-irrigation period	Concentration (mg/L)	0.2270	0.2178	0.2120	0.2043	0.1946	0.2187	0.1982	0.2068	0.1619
	Improvement rate (%)		4.05	6.61	10.00	14.27	3.66	12.69	8.90	28.68

* C1 : Retention-basin, C2 : Heightening reservoir, C3 : Improving Eou-weir management, C4 : Reuse treated waste water, C5 : New dam construction, C6 : Increasement discharge of Yongdam dam, C7 : Seomjin river dam discharged into the sam-cheon, C8 : C1~C7

Fig. 11. Simulated water quality for the scenario in Mankyung River during Irrigation period.

Fig. 12. Simulated water quality for the scenario in Mankyung River during non-Irrigation period.

타났다. 비관개기에 하수처리수 재이용시 BOD 개선효과가 없는 것은 아중천에서 방류되는 하수처리수의 BOD 부하량이 소양천의 BOD 부하량보다 높기 때문에 파악된다.

관개기에 만경B 지점에서 모의된 T-P 농도는 0.2165 mg/L를 보였고, 모든 시나리오를 적용한 C8의 개선효과가 17.09%로 가장 높은 것으로 나타났으며, 만경B 지점의 T-P 개선효과에 대한순위는 다음과 같다.

모든 시나리오 적용(17.09%) > 하수처리수 재이용(9.01%) > 용담댐 방류량 증가(7.16%) > 섬진강댐 삼천 방류(7.99%) > 어우보 운영개선(4.34%) > 강변저류지(2.91%) > 저수지증고(2.77%) > 신규댐건설(1.29%)이다.

비관개기에 만경B 지점에서 모의된 T-P 농도는 0.2270 mg/L를 보였고, 모든 시나리오를 적용한 C8의 개선효과가 28.68%로 가장 높은 것으로 나타났으며, 만경B 지점의 T-P

개선효과에 대한 순위는 다음과 같다.

모든 시나리오 적용(26.68%) > 하수처리수재이용(14.27%) > 용담댐 방류량 증가(12.69%) > 어우보 운영개선(10.00) > 섬진강댐 삼천 방류(8.90%) > 저수지 증고(6.61) > 강변저류지(4.05%) > 신규댐 건설(3.66%)이다.

모델 결과 BOD와 마찬가지로 모든 시나리오를 적용했을 때 개선율이 가장 높았으며, 그 다음으로는 하수처리수 재이용, 용담댐 방류량 증가, 어우보 운영개선 방안 등이 높은 것으로 나타났다. 전반적으로 관개기보다 비관개기에 개선율이 더 높았다. BOD와는 다르게 T-P에서 하수처리수 재이용 방안이 개선효과가 높게 나타난 것은 T-P에 대한 고도처리 효과를 적용했기 때문으로 판단된다.

3.3.2. 동진강 유역

관개기에 동진A지점에서 모의된 BOD 농도는 2.71 mg/L를 보였고, 시나리오 적용시 강변저류지방안은 2.21%, 저수지 증고 방안은 10.33% 개선효과가 있는 것으로 나타났으며 모든 시나리오 적용시에는 14.39%의 개선효과를 보였다.

비관개기에 동진A지점에서 모의된 BOD 농도는 3.41 mg/L를 보였고, 모든 시나리오를 적용한 C4의 개선효과가 15.54%로 가장 높은 것으로 나타났다. 나머지 확보 방안별로 한교천 방류량 확보 방안이 13.49%, 저수지 증고 방안이 12.02%, 강변저류지 방안이 3.23%의 개선효과를 보였다. 모델 결과 관개기에는 저수지 증고 방안이 높게 나타났으며, 비관개기에는 정우소수력발전소에서 한교천으로 방류되는 수량을 확보하는 방안이 높게 나타났다.

Table 6. Forecasting of BOD concentration and improvement rate in Dongjin A unit watershed

Time	Diagnosis	Scenario				
		Simulated	C1	C2	C3	C4
Irrigation period	Concentration (mg/L)	2,71	2,65	2,43	-	2,32
	Improvement rate (%)		2,21	10,33	-	14,39
Non-irrigation period	Concentration (mg/L)	3,41	3,30	3,00	2,95	2,88
	Improvement rate (%)		3,23	12,02	13,49	15,54

* C1 : Retention-basin, C2 : Heightening reservoir, C3 : Improving Eou-weir management, C4 : C1~C3

Table 7. Forecasting of T-P concentration and improvement rate in Dongjin A unit watershed

Time	Diagnosis	Scenario				
		Simulated	C1	C2	C3	C4
Irrigation period	Concentration (mg/L)	0,1001	0,0980	0,0867	-	0,0855
	Improvement rate (%)		2,10	13,39	-	14,59
Non-irrigation period	Concentration (mg/L)	0,1038	0,1010	0,0893	0,0878	0,0836
	Improvement rate (%)		2,70	13,97	15,41	19,46

*C1 : Retention-basin, C2 : Heightening reservoir, C3 : Improving Eou-weir management, C4 : C1~C3

(a) BOD

(b) T-P

Fig. 13. Simulated water quality for the scenario in Dongjin River during Irrigation period.

(a) BOD

(b) T-P

Fig. 14. Simulated water quality for the scenario in Dongjin Riv during non-Irrigation period.

관개기에 동진A지점에서 모의된 T-P 농도는 0.08 mg/L를 보였고, 시나리오 적용시 강변저류지 방안은 2.04%, 저수지 증고 방안은 13.31%의 개선효과를 보였고 모든 시나리오 적용 시에는 14.59% 개선효과를 보였다.

비관개기에 동진A지점에서 모의된 T-P 농도는 0.1001 mg/L를 보였고, 모든 시나리오를 적용한 C4의 개선효과가 19.46%로 가장 높은 것으로 나타났다. 나머지 확보 방안별로 정우소수력발전소에서 한교천으로 방류되는 수량을 확보하는 방안이 15.41%, 저수지 증고 방안이 13.97%로 나타났으며, 강변저류지 방안은 2.70%의 개선효과를 보였다. 모델결과 관개기에 비해 비관개기의 개선효과가 더 뚜렷하게 나타났으며, 비관개기에는 한교천으로 방류되는 수량을 확보하는 방안과 저수지 증고 방안이 개선효과가 큰 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 새만금유역의 만경강과 동진강을 대상으로 필수적으로 수행되어야 할 수질개선을 위해 환경유지유량 확보방안을 모색하였으며 확보된 환경유지유량에 대한 시나리오를 구성하여 수질개선 효과를 분석하였다. 이에 대한 결과는 아래와 같다.

1) 만경강유역의 추가확보된 환경유지유량은 13.6 CMS 이고, 동진강유역은 5.76 CMS를 확보할 수 있는 것으로 평가되었다.

2) 시나리오별 모델 구동 결과 수질오염 총량관리 목표 수질 지점인 만경B, 동진A 지점 모두 BOD, T-P항목에 대해 모든 시나리오를 합한 안이 개선효과가 높은 것으로 나타났으며 관개기보다 비관개기에 개선율이 더 높은 경향을 보였다. 다음으로 개선율이 높은 시나리오는 관개기, 비관개기 모두 동일하게 만경강 만경B 지점에서 BOD에 대해 용담댐 방류량증가 안이 높았고 T-P에 대해 하수처리수 재이용 안이 높은 것으로 나타났다.

3) 비관개기에 하수처리수 재이용시 BOD개선효과가 없는 것을 보여 환경유지유량 증가뿐만 아니라 오염부하량 삭감이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

4) 동진A 지점에서 수질개선율이 높은 시나리오는 관개기 BOD, T-P에 대해 저수지증고 안이 높았고 비관개기의 경우 BOD, T-P에 대해 한교천 방류량 확보 안이 높은 것으로 나타났다.

5) 관개기에는 정우소수력발전소에서 발전 후 동진강 도수로로 방류를 하여 농업용수로 공급을 하지만 비관개기 발전 후 용수가 한교천으로 지속적으로 방류 될 경우 정읍천의 수질개선 뿐만 아니라 동진강 중하류의 수질개선에 크게 기여할 것으로 판단된다.

추가확보된 환경유지유량을 시나리오별로 적용시켜 본 결과 만경강과 동진강의 수질개선에 영향을 크게 미치는 것

으로 평가되었다. 따라서 새만금유역의 환경유지용수 확보를 위해 경제성평가 및 현실적 조건을 반영한 다양한 실현 가능한 방법을 고려하여 환경유지용수를 확보하여야 할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 환경부 새만금 유역 환경유지용수 확보 및 관리방안 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

KSEE

References

1. Jung, J. S., Park, Y. K. and Lee J. C., "Water Budget Analysis concerned with Environmental Maintenance Flow," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **20**(8), 1051~1060(1998).
2. Jeonbuk Development Institute, "Report of Environmental Instream flow security and management of the saemangeum Basin," Ministry of Environment(2014).
3. Kim, Y. G., Park, S. G. and Pyo, Y. P., "The Study of Determination of Required Discharge in Tamjin River for Water Quality Preservation," *J. Korean Soc. Water and Waste Water Treatment*, **9**(4), 19~28(2001).
4. Nam, W. H., Choi, J. Y., Hong, E. M. and Kim, J. T., "Assessment of Irrigation Efficiencies using Smarter Water Management," *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, **55**(4), 45~53(2013).
5. Kim, G. H. and Lee, J. W., "Development of a Method for Determining the Instream Flow and Its Application: I. Estimation Method," *J. Korean Soc. Water Resour. Assoc.*, **29**(4), 161~176(1996).
6. Kim, G. H. and Kim, S. M., "Development of a Method for Determining the Instream Flow and Its Application: II. Application and Result," *J. Korean Soc. Water Resour. Assoc.*, **29**(5), 185~202(1996).
7. Choi, J. Y., "Function of Environmental Flows for Sustainable Water Resources Management," *KEI Res. Brief*, **6**(2), 48~70(2007).
8. Kim, G. H., "A study on instream flow for water quality improvement in lower watershed of Nam River Dam," *J. Korean Soc. Water Environ.*, **30**(1), 44~59(2014).
9. Kim, N. W. and K. C. G., "Derivation of Continuous Pollutant Loadograph using Distributed Model with 80Day Measured Flow and Water Quality Data of MOE," *J. Korean Soc. Water Qual.*, **25**(1), 125~135(2009).
10. Jang, J. H., Yoon, C. G., Jung, K. W. and Lee, S. B., "Characteristics of Pollution Loading from Kyongan Stream Watershed by BASINS/SWAT," *J. Korean Limnol.*, **42**(2), 200~201(2009).
11. Jung, H., Park, S. C., Roh, K. B. and Moon, B. S., "Study on Water Quality prediction using Qual2K in Seomjin Basin," Civil Engineers Research Conference, pp. 912~916(2010).

12. Shin, C. M., Na, E. H., Park, J. D., Lee, S. W., Jeong, J. H., Rhew, D. H. and Jeong, D. I., "Report of Application of parameters and coefficients of river water quality model for TMDL plan in Korea," National institute of environmental research(2008).
13. Kannel, P. R., Lee, S., Lee, Y. S., Kanel, S. R. and Pelletier, G. J., "Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal," *J. Ecol. Model.*, **202**, 503~517(2007).
14. Chapra, S. C., Pelletier, G. J. and Tao, H., Qual2K : A modeling Framework for simulating River and Stream Water Quality., Version 2.11: Documentation and User Manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA, USA(2009).
15. Hyundai Engineering and Isan Corp. "Report of Comprehensive Flood Management Plan in Mankyung Basin," Iksan Regional Construction Management Administration(2009).
16. Korea Engineering Consultants Corp. and Kunhwa Engineering, "Report of Comprehensive Flood Management Plan in Dongjin Basin," Iksan Regional Construction Management Administration(2009).
17. Mengistu, G. and John, E., "Effect of soil data resolution on SWAT model streamflow and water quality predictions," *J. Environ. Manage.*, **88**(3), 393~406(2007).
18. Kim, T. Y. and Yoon, H. S., "Skill Assessments for Evaluating the Performance of the hydrodynamic Model," *J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng.*, **14**(2), 107~113(2011).
19. Jeollabuk-do, "Report of Water Resources Plan in Jeollabuk-do,"(2011).
20. Kim, Y. J., Lee, J. H., Hwang, D. H., Song, J. Y. and Jang, P. H., "Report of A Study to Improve the Water Quality of the Saemangeum Using the Discharge of the Yongdam Dam," Korea Environment Institute(2013).
21. Ning, S. K., Chang, N. B., Yang, L., Chen, H. W. and Hsu, H. Y., "Assessing pollution prevention program by QUAL2E simulation analysis for the Kao-Ping River Basin, Taiwan," *J. Environ. Manage.*, **61**(1), 61~76(2001).
22. Beck, M. B., "Water Quality Modeling: A Review of the Analysis of Uncertainty," *J. Water Resour. Res.*, **23**(3), 1393~1442(1987).
23. No, J. K., "A system for estimating daily paddy irrigation water requirements in simulating daily streamflow," *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, **26**(7), 71~80(2004).
24. Ahn, S. J., Kim, J. G., Yoon, S. H. and Kim, H. K., "River Water Quality Management Considering Instream flow," J. Korean Soc. Civil Engineers Research Conference, pp. 2580~2583(2005).
25. No, J. K., "Planning for Securing Instreamflow of Gapcheon Stream in Daejeon," *J. Korean Soc. Agric. Sci.*, **36**(1), 87~98(2009).
26. Berton, L. L. and Nicholas, P. L., "Strategic Use of Technical Information in Urban Instream Flow Plans," *J. Water Resour. Plann. Manage.*, **113**(1), 42~52(1987).
27. Momblanch, A., Arquiola, J. P., Munne, A., Manzano, A., Arnau, J. and Andreu, J., "Managing water quality under drought conditions in the Liobregat River Basin," *Sci. Total Environ.*, **503-504**, 300~318(2015).
28. Lai, Y. C., Tu, Y. T., Yang, C. P., Surampalli, R. Y. and Kao, C. M., "Development of a water quality modeling system for river pollution index and suspended solid loading evaluation," *J. Hydrol.*, **478**(25), 89~101(2013).
29. Cude, C. G., "Oregon water quality index: a tool for evaluating water quality management," *J. Am. Water Resour. Assoc.*, **37**(1), 315~318(2002).