

Original article

기후변화의 적응과 연계한 영산강 수질개선대책 개발

이용운 · 양원모¹ · 송광덕¹ · 류용욱² · 이학영^{3,*}

전남대학교 환경에너지공학과, ¹(주)가온에스엔티, ²전남대학교 토목공학과, ³전남대학교 생물학과

Development of Strategies to Improve Water Quality of the Yeongsan River in Connection with Adaptation to Climate Change. Yong Woon Lee (0009-0002-9224-9825), Won Mo Yang¹ (0009-0004-1851-3389), Gwang Duck Song¹ (0000-0002-6339-4487), Yong Uk Ryu² (0000-0003-2566-7891) and Hak Young Lee^{3,*} (0009-0001-8561-7568) (Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea; ¹Gaon S&T, Co., Ltd., Naju 58233, Republic of Korea; ²Department of Civil Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea; ³Department of Biology, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)

Abstract Almost all of the water from agricultural dams located to the upper of the Yeongsan river is supplied as irrigation water for farmland and thus is not discharged to the main stream of the river. Also, most of the irrigation water does not return to the river after use, adding to the lack of flow in the main stream. As a result, the water quality and aquatic health of the river have become the poorest among the four major rivers in Korea. Therefore, in this study, several strategies for water quality improvement of the river were developed considering pollution reduction and flow rate increase, and their effect analysis was performed using a water quality model. The results of this study showed that the target water quality of the Yeongsan river could be achieved if flow increase strategies (FISs) are intensively pursued in parallel with pollution reduction. The reason is because the water quality of the river has been steadily improved through pollution reduction but this method is now nearing the limit. In addition, rainfall-related FISs such as dam construction and water distribution adjustment may be less effective or lost if a megadrought continues due to climate change and then rainfall does not occur for a long time. Therefore, in the future, if the application conditions for the FISs are similar, the seawater desalination facility, which is independent of rainfall, should be considered as the priority installation target among the FISs. The reason is that seawater desalination facilities can replace the water supply function of dams, which are difficult to newly build in Korea, and can be useful as a climate change adaptation facility by preventing water-related disasters in the event of a long-term megadrought.

Key words: water quality, pollution reduction, flow increase, climate change, seawater desalination

서 론

Manuscript received 2 May 2023, revised 31 July 2023,
revision accepted 1 August 2023

* Corresponding author: Tel: +82-62-530-3401, Fax: +82-62-530-3409
E-mail: haklee@jnu.ac.kr

우리나라 남한의 4대강 중 하나인 영산강의 유역은 주요 곡창지대이며 주요 용수원은 상류에 축조되어 있는 4개의 농업용 댐들인 광주댐, 나주댐, 담양댐, 장성댐이며 각각의 유

효저수량(백만 m³)은 19.7, 106.5, 76.7, 99.7이다. 이 댐들의 수질은 양호한 편이나 본류 방류보다 경작지 관개용수 측으로 공급이 많아 영산강 본류의 유량이 부족할 수밖에 없는 구조이다. 또한, 관개용수의 대부분이 사용 후에 영산강으로 회귀하지 않고 격리된 상태의 별도 용수간선을 통하여 영산강 하류까지 흘러가고 있기 때문에 경작지 사용 후 회귀수가 영산강 중·상류로 유입되지 않아 영산강 본류의 유량 부족 문제를 가중시키고 있다(Lee et al., 2019).

영산강 수계의 대표지점인 나주를 기준으로 영산강 총 유량 중에서 2019년 현재 자연수량은 29.0%이다(Ministry of Environment, 2021a). 이처럼 자연수량이 매우 적은 주요 원인은 영산강 상류 수량의 거의 모두가 경작지로 보내지고 그 나머지에 도시하수처리 방류수가 총 유량의 71%만큼 채워지고 있기 때문이다. 총 유량 중 하수처리수는 광주광역시 67%이며 나주시, 담양군, 장성군, 화순군 등이 그 나머지 4%를 차지하고 있다. “자연과 인간의 균형점을 지향”하는 국가물관리기본계획의 비전(Collaboration of Related Ministries, 2021)과 물관리기본법 제2조(기본이념)을 실현하기 위해서라도 영산강에 흐르는 자연수량의 증대가 필요하다. 또한, 현재 진행되고 있는 기후변화는 막을 수 없는 것이 현실이기 때문에 그 변화의 증가속도를 늦추기 위한 노력도 중요하겠으나 앞으로의 기후변화가 되돌리기 어려운 상황을 인식하고, 이로 인해 발생할 수 있는 대가물에 적응할 수 있는 수량확보 방안도 영산강의 자연수량 증대 전략과 함께 검토될 필요성이 있다.

이와 같은 영산강의 유량증대는 기후변화(대가물)의 적응뿐 아니라 수질개선으로도 이어질 수 있기 때문에 유량확보 방안의 도출은 중요한 사안이라 할 수 있다. 그러나 영산강은 우리나라 4대강 중에서 단위면적당 강우량이 제일 많음에도 불구하고 구조적 특성 때문에 유역면적 대비 본류 유량이 가장 적으며 수질(나주)도 2021년 BOD를 기준으로 한강(노량진), 낙동강(물금), 금강(연기)에 비해 각각 3.3배, 2.8배, 1.7배로 가장 나쁜 수준이다(Ministry of Environment, 2021a). 따라서 타 수계와 비슷한 수질수준을 달성할 수 있는 수질개선방안뿐 아니라 유량증대방안도 함께 도출하여 물관리기본법 제11조 「유역별 관리 원칙」을 준수하고 수계 균형 물 복지를 실현할 필요성이 있다.

일반적으로 하천유지유량이 적은 상황에서는 오염물질 삭감을 통한 수질개선이 어려워질 수밖에 없는데 영산강의 경우에도 타 수계와 유사한 수준으로 오염삭감사업들을 그동안 꾸준히 시행해 왔음에도 불구하고 유량부족으로 인해 수질이 타 수계만큼 향상되지 못하고 있다. 이로 인해 유량이 많은 타 수계에 비해 단위처리당 비용이 상대적으로 높은 오염삭감사업들까지 점점 늘려가며 추진해야 하는 문제점이

발생하고 있다. 이러한 영산강의 문제를 타개하기 위해서는 지금까지 주요대책이었던 오염삭감과 더불어 유량증대도 중요하게 고려되어야 할 것이다. 따라서 본 연구의 목적은 오염삭감을 통한 영산강 수질개선의 한계를 분석하고 기후변화의 적응과 연계시켜 그 한계를 벗어나는 데 필요한 유량증대 방안을 마련하는 것이다.

재료 및 방법

1. 연구대상 유역

영산강의 유역면적과 유로연장은 각각 3,455 km²와 129.5 km이며 개략적 유역도는 Fig. 1과 같다. 2002년부터 시행된 수질오염총량관리제에 의해 영산강에는 환경기초시설 신·증설 및 총인 처리시설 등 수질개선을 위해 그동안 많은 투자가 이루어져 왔으며, 그 결과 환경부 물환경측정망의 영산강 대표측정 지점인 나주지점의 2000년 BOD는 6.5 mg L⁻¹

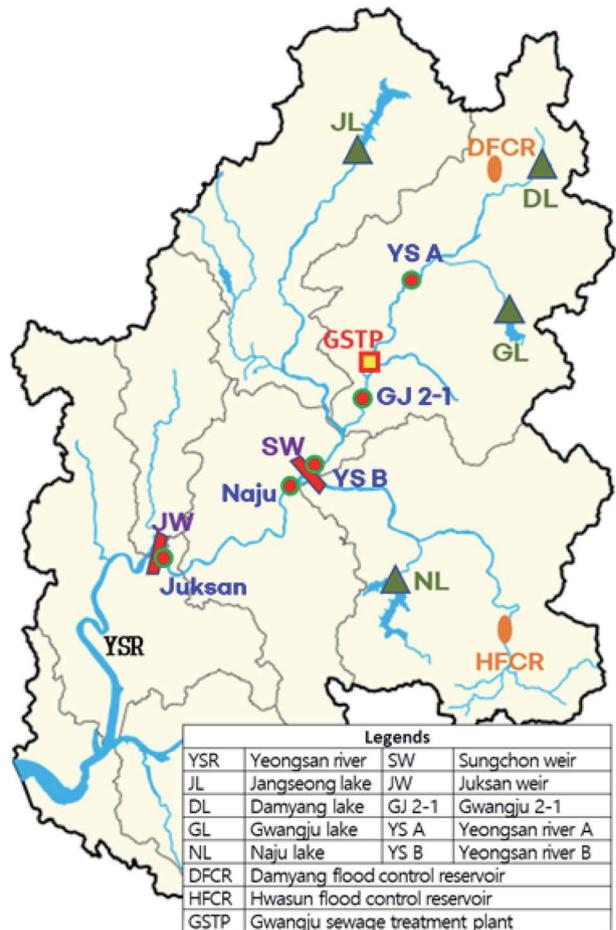


Fig. 1. Status of Yeongsan river system.

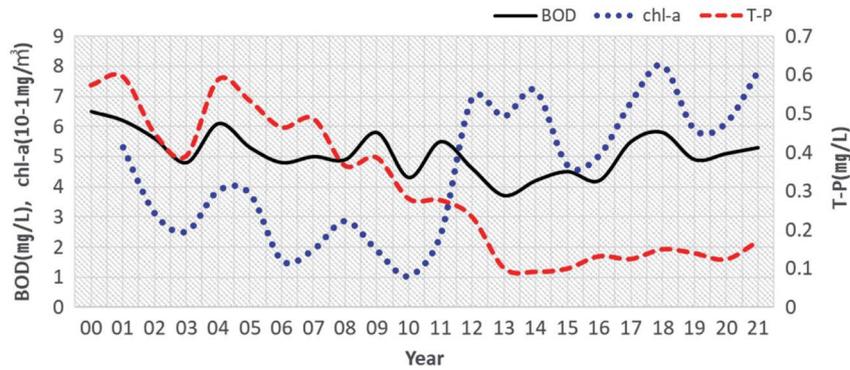


Fig. 2. Changes in water quality by year in the Naju point of Yeongsan river.

Table 1. Pollutant discharge load of each pollutant source.

Division	Year	Discharge load by pollution source (kg day ⁻¹)						Point source rate (%)	Non-point source rate (%)
		Domestic	Livestock	Industry	Land	Other sources	Total		
BOD	2019	20,560.7	22,876.8	360.8	13,279.7	954.6	58,032.6	34.5	65.5
	2035	20,567.7	24,586.2	366.7	14,391.2	954.6	60,866.4	33.0	67.0
T-P	2019	885.654	1,402.570	50.267	1,138.308	49.926	3,526.724	28.4	71.6
	2035	886.580	1,496.885	51.213	1,171.367	49.926	3,655.970	27.5	72.5

에서 2016년 4.2 mg L⁻¹, T-P는 0.573 mg L⁻¹에서 0.131 mg L⁻¹로 개선되었으나, 2021년도에는 BOD 5.3 mg L⁻¹, T-P 0.169 mg L⁻¹로 악화되었다(Water Environment Information System, 2022). Fig. 2에 나타난 바와 같이 2000년 이후 전체적으로 수질은 개선되는 경향이던데 최근 5년간은 악화되는 것으로 나타났으며 특히 2012년부터 다기능보(승촌보와 죽산보)가 가동됨에 따라 수리학적 체류시간의 증가 등으로 식물플랑크톤의 지표인 클로로필 a (chl-a)의 농도도 급격히 높아졌다. 또한, 수생태 건강성 지표도 계절적 변화가 더 커진 것으로 나타났다(Water Environment Information System, 2022).

영산강 유역에 대한 오염원별 오염물질 배출부하량의 현황 및 전망은 Table 1과 같다(Ministry of Environment, 2021b). 2019년 현재 BOD 배출부하량은 총 58,032.6 kg day⁻¹로서 축산계, 생활계, 토지계 등의 순서로 부하량이 높았고 점오염원과 비점오염이 차지하는 비율은 각각 34.5%와 65.5%였으며 T-P 배출부하량은 3,526.724 kg day⁻¹로서 축산계, 토지계, 생활계 등의 순서로 부하량이 높았고 점오염원과 비점오염이 차지하는 비율은 각각 28.4%와 71.6%였다. 2035년의 전망을 살펴보면 오염원별 배출부하량의 크기 순서는 변화가 없었으나 BOD 및 T-P 모두의 부하량은 증가하

며 총 배출부하량 중에서 비점오염이 차지하는 비율이 늘어나는 것으로 나타났다. 영산강 유역에서 비점부하량의 비율이 높은 주요 이유는 타 유역에 비해 농업과 축산업의 비중이 크기 때문이지만 또 다른 원인으로는 그동안 오염저감대책이 타 유역과 마찬가지로 점오염원 위주로 수립·추진되어 왔기 때문이다.

2. 목표수질 설정 현황

영산강의 목표수질 설정현황은 Table 2에 나타내었다(Ministry of Environment, 2021a). 영산강 오염총량관리계획과 관련하여 고시된(환경부고시 제2019-155호, 2019) 본류 단위유역 영본A의 BOD와 T-P 목표수질은 각각 2.4 mg L⁻¹ 이하와 0.082 mg L⁻¹ 이하이고 단위유역 영본B의 경우에는 각각 4.6 mg L⁻¹ 이하와 0.145 mg L⁻¹ 이하이다. 영산강 대권역 물환경관리계획과 관련하여 고시된(환경부고시 제2018-6호, 2018) 본류 중권역 광주2-1과 죽산의 목표기준은 모두 III등급이며 오염총량관리계획과 공통 수질항목인 BOD와 T-P로 표현하면 각각 5 mg L⁻¹ 이하와 0.2 mg L⁻¹ 이하이다.

한편 우리나라 4대강의 타 수계인 한강, 낙동강, 금강 본

Table 2. Establishment of water quality target for main points of Yeongsan river.

Target water quality setting items	Mid-watershed plan related points		TMDL plan related points		Yeongsan river representative measuring point
	GJ 2-1	Juksan	YS A	YS B	Naju
BOD (mg L ⁻¹)	5.0	5.0	2.4	4.6	2.9
T-P (mg L ⁻¹)	0.2	0.2	0.082	0.145	0.086

류 수질측정망 대표지점들의 최근 5년간 평균농도 (Water Environment Information System, 2020) 최고치가 BOD는 금강본류(부여1) 2.9 mg L⁻¹, T-P는 한강본류(노량진) 0.086 mg L⁻¹이므로 전국 수계 수질 균형화를 통한 지역간 물복지 격차의 해소화를 위해 영산강 대표지점인 나주의 목표수질을 이와 동일하게 설정하였다(Ministry of Environment, 2021a). 그러나 이러한 목표가 달성되더라도 영산강의 수질은 4대강 중에서 제일 나쁘거나 동일한 수준이라고 할 수 있다.

3. 연구 방법

본 연구에서는 영산강 유역의 오염물질 장래 배출부하량(Table 1)을 바탕으로 영산강 수질목표(Table 2)를 2035년까지 달성하기 위해 오염삭감뿐 아니라 수량증대 시나리오들을 개발하고 각각의 시나리오에 대한 수질개선 효과를 분석하기 위해 사용 경험이 많고 신뢰성이 높은 QUAL-MEV 수질모델을 이용하였다. 이 모델은 수질오염총량제에 최적화를 위해 4대강 사업으로 하천환경 여건의 변화(일부 구간에서 넓은 하폭과 깊은 수심으로 체류시간의 증가)를 반영해야 할 뿐만 아니라 수질모의에서 도출된 결과보다 적용된 모의기준과 이를 바탕으로 생성된 입력 자료의 명확성을 확보해야 한다는 총량제의 요구를 만족시킬 수 있도록 QUAL2E(버전3.0)을 기반으로 개발된 것으로서 지배방정식은 1차원 이류-확산 물질수송 방정식이다(NIER, 2013). 영산강 수계에서도 제3, 4단계 오염총량관리계획 등의 수립에 QUAL-MEV가 많이 적용되어 왔다(Gwangju Metropolitan City, 2015; Ministry of Environment, 2018; Yeongsan River Basin Environmental Office, 2018; Gwangju Metropolitan City, 2021). 본 연구에서는 제4단계 오염총량관리기본계획에서 영산강을 대상으로 구축한 QUAL-MEV 모델을 이용하여 시나리오별 수질모의를 실시하였으며, 그 이유는 QUAL-MEV를 이용하여 수질예측을 실시하였던 기존 연구 결과들과 본 연구의 예측 결과를 일관성 있게 비교 분석하기 위함이다.

결과 및 고찰

1. 수질개선 시나리오 개발

평균 갈수량을 집수유역면적으로 나눈 단위면적당 유량 (cms 10⁻³ km⁻²)은 한강, 낙동강, 금강, 영산강이 각각 2.758, 4.701, 2.055, 1.221로서 영산강 유역은 연평균 갈수량이 제일 많음에도 불구하고 유량이 가장 낮은 이유는 앞에서 언급한 바와 같이 영산강 상류의 농업용 댐들에 의해 경작지 관개용수로 공급 후 회귀수가 영산강 중·상류로 거의 유입되지 않기 때문이다. 그러나 앞으로도 현재와 같이 많은 양의 농업용수 공급이 지속되어야 함으로 영산강의 구조를 인위적으로 변화시키기 어려운 상황이라 할 수 있다. 영산강 유역의 이러한 구조적 취약성으로 인해 타 수계와 유사한 수준으로 오염삭감사업을 진행하더라도 영산강은 유량이 적어 타 수계에 비해 수질농도가 높게 나타날 수밖에 없다. 또한 영산강의 수리학적 평균 체류시간은 다기능보들의 건설 전과 후에 각각 190.91일과 246.55일로서(Yeongsan River Basin Environmental Office, 2013) 영산강의 유지유량 부족에 더하여 체류시간의 증가도 수질 및 수생태계의 관리를 더욱 어렵게 하고 있다.

본 연구에서는 오염 배출부하량(Table 1) 삭감과 더불어 유량증대도 함께 고려하여 영산강 수질개선 시나리오들을 다음과 같이 개발하였으며, 유량증대는 강우 유관형 사업과 강우 무관형 사업으로 구분하여 기후변화로 인한 대가뭄의 지속에 따른 생공용수 고갈 등과 같은 재해방지대책과도 연계될 수 있도록 하였다.

1) 개선효과의 분석을 위한 기준 시나리오

수질개선 시나리오들의 효과를 상호 비교하기 위하여 시나리오 1 (S-1)과 시나리오 2 (S-2)를 마련하였다. S-1은 무삭감 방안으로서 2035년까지 오염부하량의 자연증감만을 반영하였고(Table 1), S-2는 비용측면을 고려함 없이 기술적으로 최대 삭감 가능한 오염삭감량을 산정하여 적용하였다. S-2에 의한 BOD 및 T-P의 최대삭감계획량은 각각 12,952.7 kg

day⁻¹(점오염 39.6%, 비점오염 60.4%)과 T-P 496.7 kg day⁻¹(점오염 31.7%, 비점오염 68.3%)이며 이와 같은 최대 오염 삭감량은 「수질오염총량제 삭감수단별 최적관리수준 마련 연구(NIER, 2017)」에서 제시한 방법을 준용하여 구하였다. S-1과 S-2는 실제로 적용할 수 없는 대책들이다. 그러나 S-1은 아무 대책도 시행하지 않을 때 나타날 수 있는 수질농도의 최고값 그리고 S-2는 오염삭감사업을 비용의 고려함 없이 앞으로 계속해서 이어 갔을 때 나타날 수 있는 수질개선의 최대 한계농도를 확인하여 시나리오들 간의 상호 비교 시에 기준들로 활용하기 위하여 설정하였다.

2) 기후변화의 적응이 낮은 시나리오

영산강의 수질과 수생태계 건강성을 향상시킬 수 있는 방법으로 적용 가능한 오염삭감사업과 유량증대사업을 각각 시나리오 3 (S-3)과 시나리오 4 (S-4)로 설정하였다. S-3는 기존의 중권역물환경관리계획, 오염총량관리계획, 하수도 정비기본계획 등에서 2035년까지 시행될 사업들로 제시되었던 것으로서 환경기초시설 신·증설 및 개량 59건, 하수관로 정비 및 확대 23건, 대전천 생태하천 복원사업이다. 이러한 사업들에 의한 총 오염삭감량은 BOD 2,501 kg day⁻¹, T-P 46.877 kg day⁻¹이며 이는 S-2에 의한 최대 오염삭감계획량에도 포함된 부분이다.

오염삭감사업에 의해 수질개선이 이룩되더라도 4대강 중 가장 낮은 단위면적당 유량 부족 문제를 해결하기 위해 S-4에서는 농업용수 여유량을 하천유지유량으로 전환하는 사업 4건, 홍수조절지의 다기능화 사업 2건, 담양호 간접유역(치천) 복원화 사업 1건, 기타 사업 2건 등을 통해 신규 유량을 확보하고 12개월 상시 방류가 아니라 식물플랑크톤 대량증식과 같은 수질악화 시기에만 일시적으로 방류하는 운영방법을 통해 일시적 유량이 4.587 m³ s⁻¹ (396,316.8 m³ day⁻¹) 만큼 최대로 추가될 수 있도록 계획하였다. 이는 2019년 영산강(나주) 유량의 갈수기(11.05 CMS) 및 저수기(15.37 CMS) (Ministry of Environment, 2021a) 대비 각각 41.54%와 29.86%에 해당하는 양이라고 할 수 있다.

S-3와 S-4에 대한 사업 건별 개략사업비, 오염삭감량, 확보유량 및 방류월수 등에 관한 구체적 내용은 「영산강·섬진강유역 통합물관리방안 마련 연구(Ministry of Environment, 2021b)」에 기술되어 있으며, 본 연구에서는 S-3와 S-4를 묶어 시나리오 5 (S-5)로 설정하였다. 그러나 S-5는 강우 유관형 시나리오로서 영산강 유역에 강우가 발생하여 평상시와 같이 강에 물이 흐르고 있는 상태를 대상으로 수립한 일반적 계획이며, 향후 기후변화로 인해 대가뭄 상황의 지속에 따라 강의 물이 고갈되어가는 특수한 상황에서는 S-5 적용의 효용성이 떨어질 수 있다.

3) 기후변화의 적응이 높은 시나리오

가뭄은 홍수와 같이 짧은 기간에 발생하였다가 사라지는 것이 아니라 오랜 기간 계속되며 큰 피해를 초래할 수 있다. 기후변화로 인해 2050년에는 우리나라에서 현재보다 물 부족이 최대 3.3배까지 증가하며 연간 열대야와 폭염의 일수는 각각 6배와 3배 정도로 늘어날 것으로 전망되고 있다(Lee and Jung, 2015). 기후변화로 인해 대가뭄이 장기간 지속될 경우에는 하천이나 댐의 물, 심지어 지하수까지 동시에 사라지거나 줄어드는 현상이 함께 발생하기 때문에 강우 무관형인 해수담수화시설을 설치하는 방안을 S-5에 추가하여 시나리오 6 (S-6)으로 설정하였다.

우리나라에서는 댐의 적지부족과 환경훼손에 따른 이해관계자들 간의 갈등으로 인해 댐을 새로 건설하는 것은 현실적으로 어려운 형편이기 때문에 바다와 근거리에 위치한 지역을 대상으로 해수담수화시설을 설치한다면 댐의 역할을 대체토록 할 수 있을 것이다. 또한, 이러한 시설은 영산강의 실제 유량을 늘릴 수 있어 수질개선효과를 높일 수 있을 뿐 아니라 우리세대 또는 미래세대가 기후변화로 인해 대가뭄이 지속되는 상황에 놓이게 되더라도 유용한 재해방지시설의 역할도 할 수 있을 것이다.

해수담수화 생산단가는 대규모일수록 낮아지고 100,000 m³ day⁻¹ 이상에서 1,023~1,070 won m⁻³이며(Choi *et al.*, 2019) 수돗물의 경우는 944.6 won m⁻³이나(Ministry of Environment, 2019), 해수담수화는 에너지 절감 등 기술이 발전함에 따라 그 생산단가가 수돗물의 경우와 점점 유사해져가고 있다. 해수담수화시설의 가장 큰 장점은 댐과 달리 극심한 대가뭄 상황이 아무리 오래 지속되더라도 강우와 전혀 관계 없이 담수를 확보할 수 있다는 것이다. 광주·전남 지역에 주요 상수원인 동북댐의 저수율은 2023년 3월 11일 19.97% (Daum news1, 2023. 3. 11) 그리고 주암댐의 경우는 2023년 3월 6일 19.76%까지 떨어졌다(Kukmin newspaper, 2023. 3. 6).

상수원 댐 방류량의 완전차단과 농업용수 제한공급계획으로도 이어지고 있는 현재의 물부족은 최근 1년간 누적강수량이 광주 785.9 mm로 예년의 56.9%, 전남 954.4 mm로 평년의 66%이기 때문이다(Joongang newspaper, 2023. 3. 13). 이와 같은 가뭄 기간이 약 1년 정도인데도 대처가 어려워 일부에서 우려하는 바와 같이 만약 2년 연속으로 가뭄이 발생한다면 대처는 더욱 어려워지고 그 피해는 상당히 커질 수 있다. 우리나라에서 대가뭄이 발생한 대표적인 연도는 1967~1968년, 1976~1977년, 1981~1982년, 1994~1995년, 2001년이며 가뭄 발생주기도 점차 짧아지고 있는 추세이다(Lee and Jung, 2015).

본 연구에서는 수질모델링의 피드백 작업을 통해 S-6에서

영산강 수질목표 달성에 필요한 해수담수화시설의 생산용량을 90,000 m³ day⁻¹로 책정하였으며, 이 시설의 생산수는 비상 생공용수의 역할뿐 아니라 하천유지용수, 농업용수 등 다양한 용도의 부족수량에 대한 보충수로 사용하되 그 생산수량은 시기별·용도별 필요수량에 맞춰 가변적으로 증감시킬 필요성이 있다. 대가품이 아닌 평년이라도 1년 중 갈수량 또는 수질악화가 가장 크게 나타나는 시기는 보통 2월부터 5월까지 약 4개월 동안이므로 이때 해수담수화시설을 최대 생산수량이 되게 가변가동하여 하천유지유량을 높인다면 수질개선뿐 아니라 갈수량 해소에 효과적일 수 있다.

또한, 영산강에는 상수원이 없어 현재 섬진강에 의존하고 있는데 우리나라 물관리기본법 제11조(유역별 관리)에는 “물은 지속가능한 개발·이용과 보전을 도모하고 가뭄·홍수 등으로 인하여 발생하는 재해를 예방하기 위하여 유역 단위로 관리되어야 함을 원칙으로...”라고 규정하여 각 유역의 모든 용수는 해당유역이 자체적으로 해결(자립)토록 하고 있으므로 영산강에 해수담수화시설의 설치는 이 유역별 관리 원칙을 준수하는 데도 기여할 수 있을 것이다.

2. 시나리오별 수질개선 효과 분석

본 연구에서 제시한 영산강 수질개선 시나리오별 효과는 QUAL-MEV 수질모델을 이용하여 정량적으로 산정하였으며 그 결과는 Table 3에 나타내었다. 무대책 시나리오인 S-1은 모든 지점에서 수질목표(Table 2)가 초과됨을 보이고 있

으므로 목표 달성을 위해서는 수질개선대책을 개발하여 적용할 필요성이 있다. S-2는 영본A를 제외한 나머지 모든 지점의 수질목표를 만족시킬 수 있는 것으로 나타났지만, 이는 비용측면이 전혀 고려되지 않고 기술적인 측면만 고려하여 얻은 결과로서 S-2는 실제 적용을 위한 것이 아니라 오염사감을 통한 최대 수질개선의 한계 분석을 위한 것이었다.

공공기관들의 기존 오염사감계획들로 이루어진 S-3는 영본A, 영본B (T-P), 나주에서 수질목표의 절반이 초과될 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 S-2에서처럼 비용을 고려하지 않은 대책들도 추가로 시행해야 함을 의미하기 때문에 오염사감만을 통한 영산강 수질개선 수단은 이제 한계에 다다르고 있다고 할 수 있다. Fig. 2에 나타내었던 영산강의 BOD, T-P 및 chl-a 농도의 연도별 변화에서 최근 5년 전까지는 농도가 감소하다가 그 이후부터는 악화되고 있는 추세를 보이고 있다. 이러한 추세는 강우의 연도별 증감뿐 아니라 다기능보들의 건설에 따른 영산강의 구조적 변화에 따른 영향도 있겠으나 시간이 갈수록 오염사감사업의 투자비당 효과가 저하되고 있기 때문으로도 추정된다. 일반적으로 오염사감사업들은 오염원 관리가 용이하고 투자비당 사업효과가 높은 순서로 적용되기 때문에 2000년대 초반에는 수질개선 효과가 높았으나 최근에는 그 효과가 떨어져가고 있다고 할 수 있다. 따라서 앞으로는 영산강의 수질개선을 위해 오염사감만이 아닌 유량증대 수단도 중점적으로 함께 추진될 필요성이 있다.

Table 3. Water quality prediction results for each water quality improvement scenario.

Scenarios	Prediction items	Water quality concentration (mg L ⁻¹)				
		YS A	GJ 2-1	YS B	Naju	Juksan
S-1	BOD	3.6	5.5	5.0	4.8	5.3
	T-P	0.140	0.184	0.163	0.093	0.138
S-2	BOD	2.7	3.3	2.9	2.9	3.1
	T-P	0.117	0.178	0.153	0.082	0.123
S-3	BOD	3.1	3.7	3.3	3.3	3.5
	T-P	0.129	0.182	0.161	0.090	0.135
S-4	BOD	2.8	5.2	4.6	4.3	4.9
	T-P	0.102	0.174	0.150	0.086	0.123
S-5	BOD	2.4	3.4	3.0	3.0	3.3
	T-P	0.081	0.165	0.143	0.080	0.118
S-6	BOD	2.4	3.4	2.9	2.9	3.2
	T-P	0.081	0.164	0.138	0.078	0.115

Table 4. Comparison of contribution to water quality improvement through pollution reduction and flow increase in S-5.

Division		YS A	YS B	GJ 2-1	Juksan	Naju
BOD	Pollution reduction (%)	38.5	81.0	85.7	81.8	75.0
	Flow increase (%)	61.5	19.0	14.3	18.2	25.0
T-P	Pollution reduction (%)	22.4	13.3	16.7	16.7	30.0
	Flow increase (%)	77.6	86.7	83.3	83.3	70.0

영산강의 신규 유지유량의 증대를 위해서 설정한 S-4는 영본A, 광주2-1 (BOD), 영본B (T-P), 나주 (BOD)에서 수질목표의 절반이 초과될 것으로 나타났다. 유량증대는 오염삭감과 목표 달성률이 비슷하지만 그 비용이 약 1/10도 되지 않을 것으로 추산되고 있다(Ministry of Environment, 2021b). 그러나 S-4의 적용을 위해서는 기존의 용수 이해관계자들 간에 형성되어 있는 이해갈등의 해소가 선행될 필요성이 있다. 한편 S-3과 S-4를 묶은 S-5의 경우에는 나주지점의 BOD 목표만 약간 상회하고 나머지 모두가 만족될 것으로 나타났다.

S-1을 기준으로 S-5에서 오염삭감과 유량증대 각각에 의한 목표지점별 수질개선의 기여율은 Table 4에 나타내었다. 오염삭감(S-3)에 의한 BOD와 T-P 개선의 평균 기여율은 각각 72.4%와 19.8%로서 BOD가 약 3.7배 크며 유량증대(S-4)의 경우는 각각 27.6%와 80.2%로서 T-P가 반대로 약 2.9배 크게 나타났다. 이러한 결과는 영산강의 수질목표를 달성함에 있어서 오염삭감과 더불어 유량증대가 함께 도입된다면 그 둘의 시너지 효과가 크게 작용할 수 있음을 의미한다. 그동안 영산강의 수질개선은 유량부족에도 불구하고 오염삭감에만 의존해 왔기 때문에 타 수계와 유사한 오염삭감사업들을 이미 많이 시행했음에도 수질은 4대강 중 제일 나쁜 상태를 유지하고 있다. 그러나 앞으로 영산강 유역에 적용하기 위해 남아있는 오염삭감사업들은 삭감단가가 높은 것 위주일 수밖에 없으므로 오염삭감을 통한 수질개선은 과거의 투자비용에 비해 그 효과가 점차 떨어질 것이다. 따라서 앞으로는 오염삭감사업의 발굴보다 지금까지 상대적으로 소홀히 다루었던 유량증대사업의 추진에 초점을 맞춰야 하며, 이를 위해 이에 대한 투자비용을 늘리고 기존의 용수 이해관계자들의 참여·소통·협력을 바탕으로 합리적인 협의안을 마련해야 할 것이다.

유량증대가 강우 유관형으로만 이루어진 S-5에 강우 무관형인 해수담수화시설을 설치하는 방안을 추가하여 설정한 S-6는 수질목표를 모두 만족할 수 있을 뿐 아니라(Fig. 3) 이에 따라 수계 균형 물 복지도 실현 가능한 시나리오인 것으로 나타났다. 그러나 S-5도 나주의 BOD 목표에서만 약간 상회하고 있어 S-5의 사업들만 도입해도 무방한 듯이

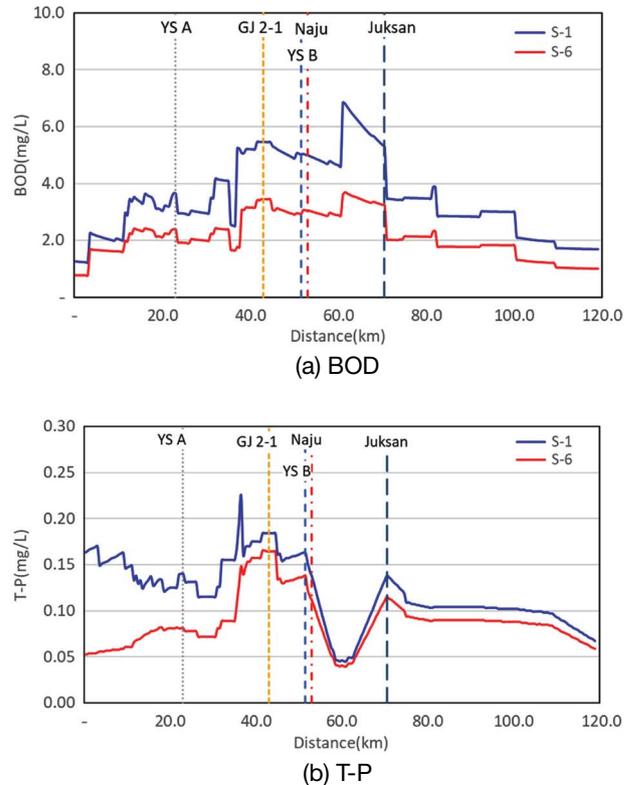


Fig. 3. Changes in water quality for S-1 and S-6 by flow distance of Yeongsan river.

보이지만 이는 단지 시나리오의 설정에 따른 순서일 뿐이지 해수담수화시설의 설치가 S-5의 경우들보다 후순위임을 의미하지 않는다. 즉, S-5를 구성하는 오염삭감 및 유량증대 사업들 각각이 모두 추진되어 완료되기는 어려울 수 있으므로 해수담수화시설의 설치도 이들과 함께 동 기간에 추진되어야 할 것이다. 특히 해수담수화시설은 수질개선효과뿐 아니라 대가물이 오랫동안 길어지더라도 강우와 무관하게 재해 방지효과도 얻을 수 있기 때문에 기후변화로 인해 언제 극심한 대가물이 발생할지 모르는 현 상황을 감안한다면 시급히 설치될 필요성이 있다.

적 요

영산강의 상류에는 4개의 농업용 댐들이 축조되어 있으며 각 댐의 물은 경작지 관개용수로 거의 모두 공급되고 영산강 본류로 방류되지 않고 있다. 또한, 관개용수의 대부분도 사용 후에 영산강으로 회귀하지 않고 격리된 상태의 별도 용수간 선을 통하여 영산강 하류까지 흘러가기 때문에 영산강 본류의 유량 부족 문제를 가중시키고 있다. 이러한 원인으로 영산강 유량의 71%가 하수처리수로 채워지는 결과를 초래하였으며 이에 따라 수질뿐 아니라 수생태 건강성도 우리나라 4대강 중 가장 열악한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 영산강 수질개선을 위한 여러 가지 시나리오들을 오염삭감과 유량증대를 함께 고려하여 개발하였고 QUAL-MEV를 이용하여 각 시나리오의 장래수질을 예측·분석하였으며, 이러한 연구 결과로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 영산강의 수질개선은 오염삭감을 통해 그동안 꾸준히 시행되어 왔으나 이제 한계에 다다르고 있어 앞으로는 오염삭감만이 아니라 유량증대(해수담수화 포함) 방법이 함께 중점 추진되어야 하며, 이러한 경우에는 영산강 수질목표의 달성도 가능하다.
2. BOD는 오염삭감 그리고 T-P는 유량증대의 방법을 통해 크게 개선될 수 있다고 예측되었으므로 수질목표의 달성을 위해 오염삭감과 더불어 유량증대가 함께 도입된다면 이들 상호 간에는 시너지 효과가 크게 작용할 수 있을 것이다.
3. 그러나 유량증대사업의 원활한 추진을 위해서는 투자비용을 늘리는 것도 중요하겠으나 기존의 용수 이해관계자들 간에 형성되어 있는 갈등 문제를 협의·해소키 위한 꾸준한 노력이 선행되어야 할 것이다.
4. 댐의 건설, 용수배분 조정 등 강우 무관형 유량증대 방법은 기후변화로 인해 강우가 오랜 기간 발생하지 않으면서 대가뭄이 지속될 경우에 적용의 효용성이 떨어지거나 상실될 수 있으므로 앞으로 비슷한 조건이라면 강우 무관형인 해수담수화시설을 유량증대사업 중 우선 설치대상으로 고려해야 할 것이다. 그 이유는 이러한 시설이 우리나라에서 새로 건설하기 어려운 댐의 용수확보 기능을 대체할 수 있고 대가뭄이 장기간 지속될 경우에 물관련 재해방지도 가능하여 기후변화의 적응시설로서 유용할 수 있기 때문이다.

저자정보 이용운(전남대학교 환경에너지공학과 교수), 양원모((주)가온에스앤티 상무이사), 송광덕((주)가온에스앤티 이사), 류용욱(전남대학교 토목공학과 교수), 이학영(전남대학교 생물학과 교수)

저자기여도 연구설계: 이용운, 이학영, 류용욱, 자료 수집 및 분석: 양원모, 이학영, 류용욱, 이용운, 수질모델링: 송광덕, 원고 초안작성: 이용운, 원고초안 검토 및 수정: 모든 저자

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없습니다.

연구비 본 연구는 2020년 환경부 「영산강·섬진강유역 통합물관리방안 마련 연구」를 위한 연구비의 일부 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Choi, C.K., C.M. Kim, J.H. Lim, D.H. Kim and I.S. Kim. 2019. Economic assessment based on energy consumption on the copacities in seawater reverse osmosis (SWRO) plant in Kora. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **41**(7): 389-398.
- Collaboration of Related Ministries. 2021. The 1st national water management basic plan 2021-2030. Publication registration number 11-1480000-001756-14.
- Daum news1. 2023. 3. 11. Gwangju drinking water source Dongbok dam's water storage rate collapsed by 20% again after 14 years due to drought. <https://www.news1.kr>.
- Gwangju Metropolitan City. 2015. Basic plan for the 3rd TMDL management in Yeongsan river. Publication registration number 55-6290000-000391-13.
- Gwangju Metropolitan City. 2021. Basic plan for the 4th TMDL management in Yeongsan river. Publication registration number 55-6290000-000391-13.
- Joongang newspaper. 2023. 3. 13. Even in long awaited rain, the water storage rate of Dongbok Dam is below 20%... limited water supply is inevitable in Gwangju. <https://www.joongang.co.kr>.
- Kukmin newspaper. 2023. 3. 6. 'Should Indians pray for rain?'... Juam Dam water storage rate collapsed in 14 years by 20%. <https://www.kmib.co.kr>.
- Lee, Y.W. and J.S. Jung. 2015. Development of water integration management system in Yeongsan and Sumjin river basins to counteract megadrought by climate change. *Journal of the Korean Society of Urban Environment* **15**(3): 167-175.
- Lee, Y.W., W.M. Yang and K.S. Yoon. 2019. A study on the enhancement method of Yeongsan river maintenance flow. *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, **19**(1): 13-20.
- Ministry of Environment. 2018. Water environment management plans for large watersheds of Yeongsan and Sumjin river basins. Publication registration number 11-1480356-000102-01.
- Ministry of Environment. 2019. Overview of water supply statistics. www.waternow.go.kr.
- Ministry of Environment. 2021a. A study on the development of

- integrated water management strategies for Yeongsan and Sumjin river basins. Publication registration number 11-1480000-001774-01.
- Ministry of Environment. 2021b. A study on the development of integrated water management strategies for Yeongsan and Sumjin river basins. Reference report.
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2013. A study of water quality model optimization with an application of TMDL reflected on the change of stream Environment. Text pp. 1-107. Appendix pp. 1-48.
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2017. A study on deciding the optimal management level of each pollution reduction method in the TMDL System. Publication registration number 11-1480523-003369-01.
- Water Environment Information System. 2020. <https://water.nier.go.kr:9443/web>.
- Water Environment Information System. 2022. <https://water.nier.go.kr:9443/web>.
- Yeongsan River Basin Environmental Office. 2013. Insurance method of instream water in Yeongsan·Seomjin river system. pp. 295-276.
- Yeongsan River Basin Environmental Office. 2018. Water environment management plans for mid-watersheds, Publication registration number 11-1480356-000063-01.