

유전알고리즘을 이용한 하천수질관리모형에 관한 연구

A Study on the River Water Quality Management Model using Genetic Algorithm

조재현^{1,*} · 성기석²

Cho, Jae-Heon^{1,*} · Sung, Ki-Seok²

1 관동대학교 SOC공학부

2 강릉대학교 산업공학과

(2004년 3월 18일 접수; 2004년 7월 6일 최종수정논문 채택)

Abstract

The objective of this research is to develop the water quality management model to achieve the water quality goal and the minimization of the waste load abatement cost. Most of existing water quality management model can calculate BOD and DO. In addition to those variables, N and P are included in the management model of this study. With a genetic algorithm, calculation results from the mathematical water quality model can be used directly in this management model. Developed management model using genetic algorithm was applicated for the Youngsan River basin. To verify the management model, water quality and pollution source of the Youngsan River had been investigated. Treatment types and optimum treatment costs of the existing and planned WWTPs in the basin were calculated from the model.

The results of genetic algorithm indicate that Kwangju and Naju WWTP have to do the advanced treatment to achieve the water quality goal about BOD, DO and TP. Total annual treatment cost including the upgrade cost of existing WWTPs in the Youngsan River basin was about 50.3 billion Won.

Key words: Genetic algorithm, Water quality management model, Water quality goal, Wastewater treatment cost, Youngsan River

주제어: 유전알고리즘, 수질관리모형, 수질목표, 하수처리비용, 영산강

1. 서 론

하천수질에 큰 영향을 미치는 오염부하는 생활하수, 가축폐수, 공장폐수, 삼림이나 경작지로부터의

비점원 오염물질 등이다. 이 중에서 하천 오염현상의 주된 요인이 되고 비교적 쉽게 통제할 수 있는 것은 인구밀집지역에서 대량으로 배출되는 생활하수와 공업단지 등에서 배출되는 공장폐수이다. 공장폐수는 개별기업 차원에서 다루어져야 하지만, 생활하수는 수

*Corresponding author Tel: +82-33-670-3354, FAX: +82-33-670-3369, E-mail: jhcho@kwandong.ac.kr (Cho, J.H.)

계 전체적인 통합관리가 가능하다. 오염부하량 삭감에 소요되는 수질관리비용은 그 규모가 엄청나기 때문에 수계 전체 관점에서 오염부하량을 삭감하는 데 소요되는 수질관리비용을 최적화할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 오염부하량 삭감비용과 하천수질 기준을 함께 고려하여 수계 전체적으로 수질관리를 할 수 있는 하천수질관리모형을 개발하고자 한다.

이와 같은 수질관리모형의 최적화문제를 해석하기 위해 선형계획법, 비선형계획법, 동적계획법, 정수계획법 등의 수리계획법(Mathematical programming) (Taha, 1987)이 활용되어 왔다. 이와 같은 과거의 수질관리모형들은 수질기준의 항목이 주로 용존산소(DO)나 BOD에 국한되어 있고, 대부분 Streeter-Phelps식을 이용해서 수질계산을 하고 있다. 수학적 모형을 활용한 경우에도 전달계수라는 개념으로 상류의 오염부하가 하류 기준지점에 미치는 영향을 matrix로 미리 계산하여 최적화문제에서 계산에 활용하였는데 이 경우 최적화문제에 포함되는 수질계산의 정밀도가 떨어진다. 또한 유역의 오염부하량 삭감량을 결정하는데 있어서 수질모형을 반복 적용해서 수질기준에 부합되는 오염부하량 삭감률을 산정하기도 한다 (박성천 등, 1998).

이번 연구에서는 BOD, DO와 같은 수질항목 외에 TN, TP의 수질항목에 대해서도 적용할 수 있고, 수학적 수질모형에서 계산된 수질결과를 정확하게 최적화문제에 활용할 수 있는 수질관리모형을 개발한다. 이때 최적화문제 해석을 위해서 유전알고리즘(Genetic algorithm)을 이용한다. 개발된 수질관리모형을 영산강에 적용해서 유역내 하수처리방안을 모색한다.

2. 유전알고리즘을 이용한 수질관리모형의 개발

2.1. 유전알고리즘의 특징과 구조

유전 알고리즘은 자연계에서 생물이 유전적으로 진화해 가는 방식을 모방하여 최적해를 찾는 해법이다(공성곤 등, 1996; Goldberg, 1989). 유전알고리즘에서는 시스템의 상태나 개별적인 구조들을 이진수열의 염색체(Chromosome)의 형태로 표현하고, 염색체들이 서로 선택(Selection), 교배(Crossover), 복제(Reproduction) 및 돌연변이(Mutation)의 과정을 통

하여 시스템의 상태를 최적화하거나 최적의 개체의 구조를 찾아낸다.

선택의 연산자는 복제를 위하여 개체집단(Population)에서 염색체들을 선택하고, 더 적합한 염색체일수록 더 많이 선택되어 복제되는 경향이 있다. 교배의 연산자는 랜덤하게 교배위치를 선택하고, 두 염색체 사이에 배열의 일부분을 교환하여 두개의 자손을 생성한다. 예를 들어 10000100과 11111111은 각각 세 번째 위치 이후에서 교배되어 두 자손 10011111과 11100100을 생성한다. 교배연산자는 두개의 염색체 유기체간의 생물학적 재결합을 흉내 낸 것이다. 돌연변이의 연산자는 염색체내의 어떤 비트들을 랜덤하게 역전시키는 것이다. 예를 들어 문자열 00000100은 두 번째 위치에서 돌연변이되어 01000100이 될 수 있다. 돌연변이는 보통 매우 작은 확률로 각 비트 위치에서 발생할 수 있다(공성곤 등, 1997).

이러한 생물 집단의 진화를 모방한 수리적 진화 과정에서 개개의 염색체의 집합인 세대(Generation)가 다음 세대로 진화해 간다. 즉 개별 구조의 집합체가 더 나은 개별 구조의 집합체로 진화해 간다. 일반적으로 유전알고리즘을 사용하는 장점은 첫째 유전 알고리즘은 다른 최적화 기법들과는 달리 수학적인 복잡함이나 어려움이 적다는 것과 둘째 효과적으로 전역적 탐색(Global search)을 수행할 수 있다는 것과 셋째 유연성이 아주 좋아서 개별 문제들의 특성에 따라 요구되는 변형과 발견적 기법들과의 결합이 손쉽다는 점 등이다.

2.2. 유전알고리즘을 이용한 하천수질관리모형의 개발

유전알고리즘에서 특히 고안되어야 할 것은 유전염색체 표현, 그에 맞는 유전연산자 그리고 적합도의 평가와 적용방법 등이다. 먼저 각 처리장에서의 처리 등급을 이진수 열로 표현하고 모든 처리장에 대한 표현을 일렬로 결합한 형태로 유전염색체를 디자인하였다. 교배연산은 일점교차 방법을 사용하였고, 돌연변이 연산에서는 확률적으로 선택된 이진수를 반전시킨다.

적합도평가방법은, 수질모형에 의하여 수질을 예측하고, 그 예측 결과를 평가한 평가치를 기준으로

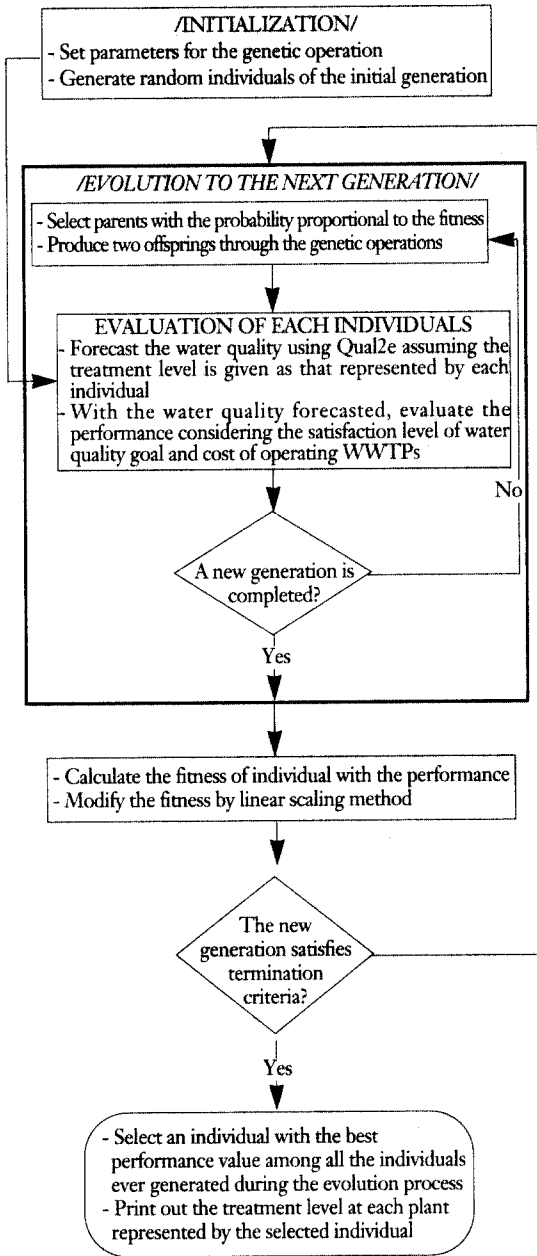


Fig. 1. Flowchart of the water quality management model.

각 개체의 적합도를 구한다. 각 하수처리장의 처리방식에 따라서 계산된 수질이 수질목표를 달성하는 경우에 평가치는 각 하수처리장 처리비용의 총합이 되고, 한편 수질기준을 벗어나는 결과를 보여주는 처리방식에 대하여서는 큰 값의 패널티를 비용으로 추가

한다. 적합도는 이 총하수처리비용과 패널티의 합의 역수로 표현한다. 다음에 선형비례척도 방법에 의하여 적합도를 수정하고, 그 값을 다음 세대의 개체를 생성하는 부모를 선택하는 기준으로 삼았다.

이 유전알고리즘과 Qual2e 하천수질모형을 통합해서 수질관리모형을 개발하였다. 개발된 수질관리모형의 흐름도는 Fig. 1과 같고, 영산강 유역에 적용해서 최적 하천수질관리를 위한 하수처리 방안을 도출하였다. 유전알고리즘과 하천수질모형의 통합을 위해서 Fortran 언어로 연결 프로그램을 작성하였고, 이 프로그램들은 한 개의 실행파일로 통합하여 실행된다. 이 연결 프로그램에는 유역 내 하수처리장의 처리방식과 유출수질, 처리방식별 하수처리장 건설비와 유지관리비의 자료가 입력되어 있다.

하수처리장의 처리비용은 각 하수처리장의 처리방식에 따라서 결정되는 각 하수처리장 처리비용의 총합으로 한다. 각 하수처리장의 처리비용은 처리장 건설비용의 연차 증가액과 유지관리비의 합이다. 이때, 건설비용 중 기존에 완공된 비용은 계산하지 않고 용량을 증설하거나 처리방식 고도화에 따른 추가적인 건설비용을 계산하여 연차 증가액을 구하였다.

유전알고리즘에서 수정된 적합도에 비례하는 확률로 각 처리장의 하수처리방식을 나타내는 두개의 부모개체를 선택하고, 교배와 돌연변이 연산을 실시하여 자손 개체를 생성한다. 여기서 결정된 처리방식에 따라 처리장의 유출수질이 계산되고, 하수처리장 유출수의 영향을 받으면서 영산강 본류에 유입되는 점오염원의 수질과 유량을 계산한다. 이와 같은 처리방식 변화에 의해 수질관리모형 내에서 변경된 점오염원 정보에 따라 Qual2e 수질모형이 실행된다.

계산된 지점별 수질이 수질목표를 달성하는 지를 검토하고 수질목표를 달성할 때 유역 내 전체 하수처리비용과 유전알고리즘의 적합도를 평가한다. 이렇게 계산된 유역 전체 하수처리비용이 비용최적화가 되도록 수질관리모형 내에서 반복계산을 수행한다. 최소비용이 계산되면 처리장별 처리방식과 하수처리비용, 유역전체 처리비용을 출력하고, 최적조건 수질계산 결과를 출력한다.

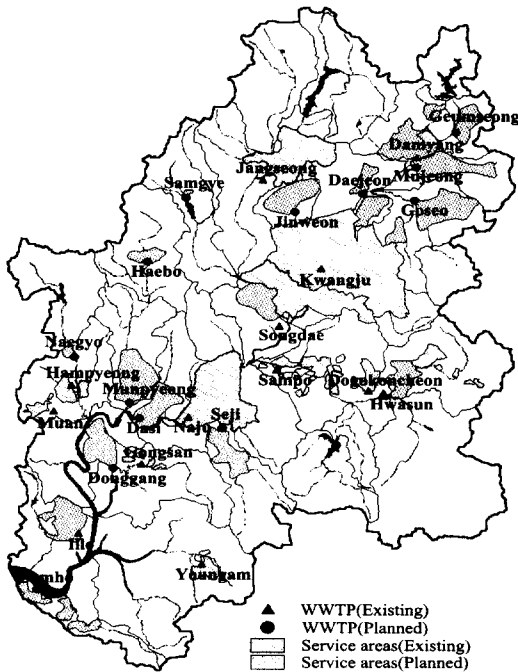


Fig. 2. Service areas of existing and planned WWTPs.

Table 1. Delivery ratios of tributaries in the Youngsan River basin

Point loads	BOD(%)	TN(%)	TP(%)
Jeungam-river	6.0	50.7	21.0
Pungyoungjeongcheon	20.3	135.0	81.8
Hwangyong-river	12.6	58.8	21.8
Oryecheon	17.1	155.6	49.2
Gaecheon	2.8	25.5	9.4
Gomagweoncheon	9.9	90.4	37.0
Hampyeongcheon	3.3	21.8	3.5
Sampocheon	3.8	37.8	12.9
Youngamcheon	4.2	21.5	17.5
Jiseogcheon	6.8	37.5	19.2
Chuiamcheon	6.1	43.5	12.2
Pyeongrimcheon	5.7	25.1	27.2
Jangseongcheon	8.1	78.0	39.3
Manbongcheon	19.7	93.7	33.4
Mangweolcheon	11.8	41.6	9.6
Daechocheon	1.6	5.3	4.5
Munpyeongcheon	14.5	40.8	19.6
Hwasuncheon	7.7	28.3	14.7
Mean	9.0	55.1	24.1

3. 수질관리모형의 적용

3.1. 유역현황

본 연구에서 개발하는 하천수질관리모형을 영산강을 대상으로 적용하였다. 우리나라 4대강의 하나인 영산강 중하류부는 현재 수질이 심각하게 오염되어 있다. 이 지역 하천수의 유기물질농도가 높고, 특히 영양물질의 농도가 높아서 수중조류가 과다 증식하고 있다. 이렇게 영산강 수질이 악화된 주된 원인은 광주시와 나주시를 비롯한 중하류부 도시지역의 생활하수가 과다하게 유입되었기 때문이다.

영산강유역에는 광주, 나주, 송대 등 13개 하수종말처리장이 가동 중이다. Arc/View GIS상에서 유역 내 비하수처리구역의 인구분포와 고도정보를 분석해서 추가적인 하수처리장이 필요하다고 판단되는 13개 지역에 대해서 하수처리시설의 신설을 계획하였다. 기존 및 계획 하수처리장의 처리구역은 Fig. 2와 같다. 공경별 하수처리비용함수식은 국내외의 문헌을 이용해서 작성하였다(건설부, 1988; Metcalf & Eddy, 1991; 조재현 등, 2002). 영산강의 소유역까지 고려

한 종합적 수질관리를 위해 영산강을 36개 소유역으로 분할하였다(조재현 등, 2002).

3.2. 수질조사 및 유달률조사

영산강 본류와 지천을 대상으로 1999년 10월부터 2002년 8월까지 분기 1회씩 수질과 유달률조사를 하였다. 영산강 본류의 수질조사지점은 담양, 우치, 광주1 등의 12개 지점이다. 그 외 지천과 하수처리장 방류수의 33개 지점에 대해서도 조사하였다. 각 지천에서의 3년간 실측결과를 바탕으로 BOD, TN, TP에 관한 소유역의 평균유달률을 산출하였다. Table 1은 영산강 유역 내 각 지천의 평균 유달률을 나타내고 있다.

3.3. 유전알고리즘을 이용한 하천수질관리모형의 적용

본 연구에서는 하천수질모형으로 Qual2e 모형을 사용하였고, 영산강 상류인 담양군 금월교부터 하구 언까지의 114km와 황룡강, 지석천, 광주천을 대상으로 모델링하였다(조재현 등, 2002).

수질관리모형 적용시의 유량은 평균저수량을 기준으로 하였다. 영산강 유역의 나주수위관측소에서

1963년부터 1999년까지 자료 중 결측자료가 많은 년도를 제외한 31년 동안의 일별 수위자료를 이용해서 년도별 Q275를 도출하였고, 이를 바탕으로 평균저수량을 산출하여 수질관리계획에 적용하였다. 계산된 평균저수량은 $11.327\text{m}^3/\text{sec}$ 이다. 수질모형의 적용시 오염부하량은 인구, 토지, 가축별로 원단위에 의해 산출되었다(조재현, 2002).

영산강유역에 기존에 가동 중인 총 13개 하수종말처리장의 성능개선(upgrade)을 고려하고, 현재 미처리구역인 지역에 13개의 하수종말처리장을 신설 운영하는 것으로 계획했을 때 수질목표를 달성하기 위해 전체 26개 하수종말처리장에서 어떤 처리방식으로 처리해 주는 것이 가장 경제적인가를 결정하였다. 계획 하수처리장에 대해서는 처리장을 건설하지 않는 것도 한 가지 대안이 된다.

기존의 혹은 계획된 하수처리장이 영산강 지천의 상류부에 위치한 경우와 지천의 하류부에 위치한 경우, 또 뚜렷한 지천이 없고 비점원부하만 있는 배수구역에 처리장이 설치되어 방류수가 직접 본류로 흘러드는 세 가지 경우의 수질계산을 고려하였다. 세 가지 경우 모두 하수처리장의 건설과 성능개선이 하천수질에 미치는 영향을 감안해야 하기 때문에 처리방식의 선택여하에 따른 방류수질의 변화를 수질모형내의 점오염부하의 수질변화로 고려하였다.

하수처리장의 처리방식이 유전자연산을 통해서 선택되면 본류로부터 처리장이 멀리 떨어진 경우에는 해당 지천의 상류로부터의 유하 중 수질변화를 감안하여 지천 하류부에 도달시의 방류수질을 계산하고, 같은 배수구역내지만 처리구역의 지역의 오염부하 앞서 계산된 유달률에 따라 지천 하류부의 유달 수질을 계산하고, 처리장방류수와 지천의 두 줄기 물이 지천 하류부에서 합쳐서 본류로 흘러드는 것으로 가정하고 유입 점 오염부하를 계산하였다. 지천의 하류부에 위치한 경우에는 유전자연산에서 선택한 처리방식에 따라 방류수의 수질이 결정되면 이 방류수와 지천물이 하류부에서 합쳐서 영산강 본류에 흘러드는 것으로 유입 점 오염부하를 계산하였다. 세 번째 경우는 하수처리장이 바로 하나의 점오염원이 되는 것으로 간주하였다. 이와 같은 상황을 처리장 입지에 따라 수질관리모형의 프로그램으로 작성하였다.

기존 하수처리장의 성능개선과 계획하수처리장의

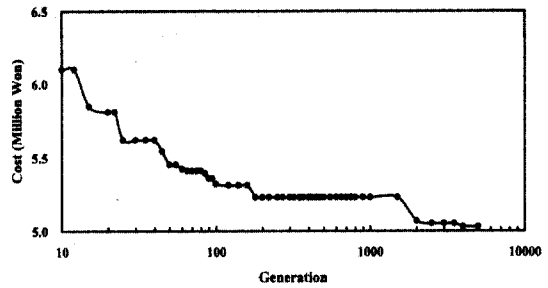


Fig. 3. Wastewater treatment cost variation according to the Generation No.

신설을 고려했을 때 본 수질관리모형을 적용하여 목표수질 달성시의 처리방식과 비용 그리고 그때의 하천수질을 계산하였다. 본 연구에서 수질목표를 설정하는 대상인 수질항목은 BOD, DO, TP로 하였다.

4. 결과 및 토의

유전알고리즘을 이용한 하천수질관리모형의 실행 결과 세대수 200까지의 연산결과로부터 교배확률 0.7, 돌연변이확률 0.01, 개체군수 125가 최적인 것으로 계산되었다. 처리비용최적화를 위해 세대수를 증가시킨 결과 세대수 4000에서 최적인 것으로 계산되었다. 세대수가 커지면 연산시간이 대폭 증가되므로 세대수 5000까지 계산을 수행하였다. 세대수 변화에 따른 유역전체의 최적하수처리비용의 변화는 Fig. 3과 같다. 수질관리모형의 적용 결과 영산강의 현실적인 수질목표를 영산강 상류부에서 하천수질환경기준 2등급인 BOD 3mg/L , 나머지 하천구간에는 하천수질환경기준 3등급인 BOD 6mg/L 으로 설정하고, DO는 전 구간에서 7.5mg/L 이상으로 또한 영산강 최하류부의 영산호에서 TP 농도를 호소수질환경기준 2등급인 0.03mg/L 으로 설정하였다. 유전알고리즘을 이용한 수질관리모형을 영산강유역에 적용한 결과 이와 같은 수질목표를 만족하면서 유역 전체 하수처리비용을 최소화하는 각 하수처리장의 처리방식과 처리비용은 Table 2와 같다. 앞서의 수질목표를 달성하기 위해서는 기존에 가동 중인 광주 및 나주하수처리장에서 2차 처리 이상의 고도처리를 해야 되고, 일부 계획하수처리장에서 2차 처리를 해야 하는 것으로 계산되었다. 이 경우에 영산강 유역 전체 연간 하수처리비

Table 2. Treatment type and annual treatment cost for each WWTP of the Youngsan River basin as calculated by GA

WWTP	Existing / Planned	Capacity (10 ³ m ³ /day)	Treatment type	Annual Cost (Million Won)
Damyang	Existing	7	Oxidation ditch	2,243
Mujeong	Planned	1.1	-	-
Goseo	Planned	1.7	-	-
Daejeon	Planned	0.9	-	-
Jinweon	Planned	1.1	A.S.	530
Kwangju	Existing	600	A.S. + coagulation + filtration	40,112
Jangseong	Existing	11	RBC	701
Samgye	Planned	1.1	-	-
Songdae	Existing	60	A.S.	1,387
Hwasun	Existing	11	RBC	701
Dogokoncheon	Existing	6	Contact stabilization	77
Sanpo	Existing	3.5	RBC	444
Seji	Planned	1.2	-	-
Naju	Existing	22.5	A/O	1,024
Dasi	Planned	1.1	-	-
Haebo	Planned	0.6	A.S.	375
Munpyeong	Planned	0.9	-	-
Muan	Existing	4.5	RBC	491
Hampyeong	Existing	9	Oxidation ditch	648
Naegyo	Planned	0.7	-	-
Donggang	Planned	0.7	-	-
Gongsan	Existing	3.5	RBC + coagulant addition	631
Illo	Existing	3	RBC	418
Youngam	Existing	5.5	Oxidation ditch	532
Samho	Planned	1.5	-	-
Geumseong	Planned	0.65	-	-
Total				50,314

Table 3. Total wastewater treatment cost for each scenario

Scenario	1	2	3	4	5	GA
Annual cost (Million Won)	19,552	22,157	51,407	120,939	25,648	50,314

용이 약 503억원이 소요되는 것으로 추산되었다. 이와 같은 방식으로 유역내 하수처리를 할 때 영산강의 수질분포는 Fig. 4와 같다.

유전알고리즘을 이용하지 않고 Qual2e만으로 5가지의 시나리오를 구성해서 영산강 수질관리방안을 검토한 선행연구(조재현 등, 2002)와 비교하면, 광주하수처리장에서 현재와 같이 활성슬러지공법의 2차 처리를 하는 시나리오 1과 시나리오 2에서는 유역 전체 하수처리비용은 적게 들지만 광주처리장 방류직후 구간인 본류 수질이 하천수질기준상의 등급외의 수질을 보이게 된다. 광주하수처리장에서 활성슬러지법과 응

집침전, 급속사여과 그리고 활성탄흡착의 조합공정으로 성능개선을 하는 시나리오 4에서는 본류 전구간에서 BOD 3mg/L를 달성할 수 있지만 유역전체 연간하수처리비용이 1200억에 달해서 현실성이 떨어진다. 광주하수처리장에서 활성슬러지법과 응집침전, 급속사여과의 조합공정으로 성능개선하는 시나리오 3의 경우는 유전알고리즘을 이용한 본 연구의 결과와 같이 영산강 상류부에서 하천수질환경기준 2등급인 BOD 3mg/L 이하를 유지하고, 나머지 하천구간에는 하천수질환경기준 3등급인 BOD 6mg/L 이하를 유지할 수가 있다. 비슷한 수질분포를 보이는 시나리오 3

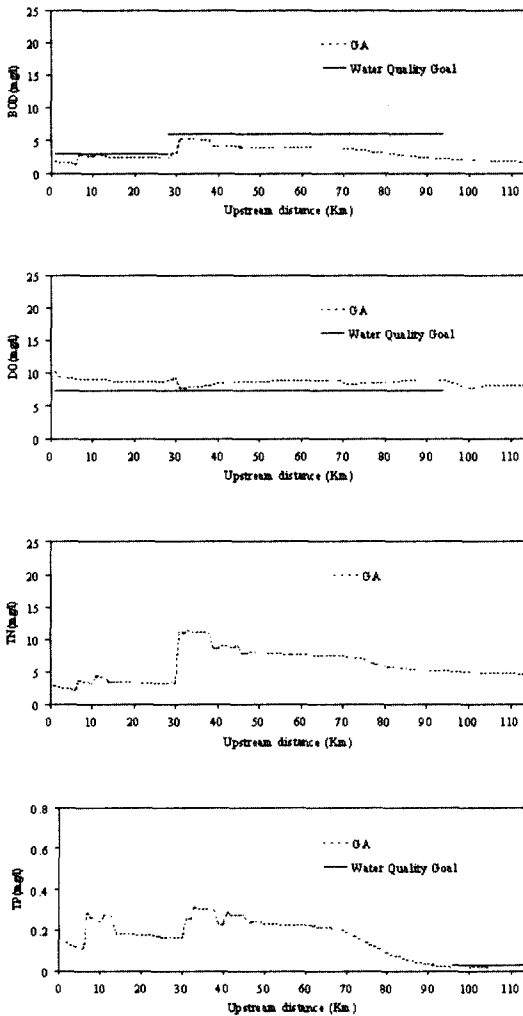


Fig. 4. Water quality distribution calculated by GA.

의 유역전체 연간처리비용이 514억인데 반해 본 연구의 유전알고리즘을 이용한 결과는 503억원으로 비용 최적화가 된 것을 알 수 있다. 이것은 시나리오 3에서는 영산강 상류부 5개소의 계획하수처리장에서 활성슬러지공법으로 처리하는 것으로 가정했지만 유전알고리즘의 결과는 상류부의 계획하수처리장 중 진원 1개소만 가동하고 나머지는 건설하지 않아도 되는 것으로 계산되었기 때문이다. 시나리오 5는 VIP법으로 성능개선을 하는 경우이다. Qual2e만으로 수질관리방안을 구성한 5가지의 시나리오와 본 연구의 유전알고리즘을 이용한 처리비용 최적화 결과를 비교한 것은

Table 3과 같다.

5. 결 론

1) 저수량의 유량조건하에서 기존 하수처리장의 성능개선과 계획하수처리장의 신설을 통해서 영산강 상류부에서 하천수질환경기준 2등급인 BOD 3mg/L 이하를 유지하고, 나머지 하천구간에는 하천수질환경기준 3등급인 BOD 6mg/L 이하를 유지하고, DO는 전구간에서 7.5mg/L 이상이 되고, 영산강 최하류부의 영산호에서 TP 농도를 호소수질환경기준 2등급인 0.03mg/L 이하로 유지하기 위해서는 광주 및 나주 하수처리장에서 고도처리를 하고 기존 하수처리장과 일부 계획하수처리장에서 2차처리를 해야 하는 것으로 계산되었다. 이때 연차 등가액으로 계산한 유역전체 연간하수처리비용은 약 503억원이 소요될 것으로 계산되었다.

2) 본 연구와 같은 최적화기법을 사용하면 수질모형만으로 지역하수처리 방안을 수립하는 것보다 경제성면에서 유리하다.

3) 유전알고리즘을 이용해서 수질관리모형을 작성하면 수질모형의 수질계산 결과를 정확하게 반영하면서 비용 최적화를 할 수 있어서 다른 계획법보다 정밀한 계산을 할 수 있다.

4) 유전알고리즘을 이용한 본 연구의 하천수질관리모형은 중규모 이상의 국내의 하천에 적용되어서 수질목표를 달성하면서 수질관리비용을 최소화할 수 있는 수질관리 계획 수립에 효과적으로 활용될 수 있다. 일부 프로그램의 수정을 통해 하수처리비용 최적화 뿐만 아니라 지역적 형평성을 고려한 유역내 삭감 오염부하량의 최적화문제에도 적용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R01-1999-00296)지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

건설부 (1988) 하수도정책방향연구, pp. 141-159.

- 공성곤 외 (1996) 유전자 알고리즘, pp. 3-61, 그린.
- 공성곤 외 (1997) 유전자알고리즘 입문, p. 15, 진영사.
- 박성천, 전진, 문병석 (1998) 하천수의 수질보전을 위한 오염부하량삭감률 산정에 관한 연구, *대한환경공학회지*, **20**(3), pp. 327-338.
- 조재현, 유태종 (2002) 하수처리비용을 감안하고 7Q10과 저수량에 기초한 영산강수질관리방안 연구, *상하수도학회지*, **16**(6), pp. 700-709.
- 조재현 (2002) 유전알고리즘을 이용해서 오염부하량 삭감비용을 최적화하는 하천수질관리모형의 개발과 적용, 한국과학기술원 특정기초연구 최종보고서, pp. 21-23.
- Goldberg, D. E. (1989) *Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning*, p. 412, Addison-Wesley, Massachusetts.
- Metcalf & Eddy (1991) *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*, 3rd ed., pp. 166-170, McGraw-Hill, New York.
- Taha, H.A. (1987) *Operation Research*, pp.25-384, Macmillan Publishing Company, New York.