

하천 수질관리 시스템에서 최적화를 위한 유전알고리즘의 개발. Development of a Genetic Algorithm for the optimization in River Water Quality Management System

성기석*, 조재현**

*강릉대학교 산업공학과, 강원도 강릉시 지변동, 210-702
sung@knusun.kangnung.ac.kr

**관동대학교 환경공학과, 강원도 양양군 양양읍, 215-800
jhcho@kdccs.kwandong.ac.kr

Abstract

Finding the optimal solution in the river water quality management system is very hard with the non-linearity of the water quality model. Many suggested methods for that using the linear programming, non-linear programming and dynamic programming, are failed to give an optimal solution of sufficient accuracy and satisfaction.

We studied a method to find a solution optimizing the river water quality management in the aspect of the efficiency and the cost of the waste water treatment facilities satisfying the water quality goals. In the suggested method, we use the QUAL2E water quality model and the genetic algorithm.

A brief result of the project to optimize the water quality management in the Youngsan river is presented.

Key Words : Genetic Algorithm, River Water Quality Management, Waste Water Treatment, Water Quality Model, Water Quality Goal, Optimization.

1. 서론

기존에 국내외에서 적용되었던 오염부하량 삭감비용을 고려한 수질관리모델은 대부분 BOD, DO 등의 수질 항목에 국한되어 있다. Revelle 등(1968), Arbabi 과 Elzinga(1975)는 선형계획을 이용하여 하천의 수질을 관리하기 위한 모델을 개발하였고, While Liebman 과 Lynn(1966), Klemetson 과 Grenny(1985) 등은 동적계획을 이용하여 하천 수질관리 모델을 개발하였으며, McNamara(1976) 과 Fujiwara(1990)들은 비선형계획법을 이용하여 확장적 수질관리 모델을 개발하였다. Bishop 과 Grenny(1976), Burn(1989) 등은 정수계획법을 이용하여서, 수질기준을 만족하고 동시에 하수처리 비용을 최소화하는 수질관리 모델을 개발하였다. Lohani 와 Thanh(1979)는 하천의 수량을 랜덤 변수로 설정하고, DO-sag(용존산소 부족량)방정식을 이용하여 확률적 수질관리 모델을 수립하였다. Fujiwara 등.(1987)은 Streeter-Phelps 방정식을

이용하여 수질관리를 최적화하는 선형계획 문제를 수립하였다. 그러나 이 방법에 적용할 수 있는 수질모델에서 다룰 수 있는 수질항목은 BOD와 DO로 제한된다. 그 동안 일반적으로 수질관리를 최적화하기 위한 수리계획(Mathematical Programming) 모델을 세울 때, 하천에서의 수질의 상태를 표현하는 수질모델을 근사적으로 표현하기 위하여, 전이계수(Transfer coefficient : Bishop and Grenny, 1976; Burn, 1989)를 사용하였다. 전이계수는 하천 유역으로부터의 오염 부하에 의한 수질의 영향을 나타내는 근사적으로 구한 계수인데, 이것을 수리계획 모델의 각종 방정식을 세우고, 또 최적해를 찾는 과정에서 사용하였다. 그러나 이러한 전이계수는 하천에서의 오염원의 상호작용과 각종 반응에 의한 영향을 정확하게 반영하지 못한다. 따라서 전이계수를 사용하는 경우에는 계산된 수질의 정확도가 좋지 않고 또 따라서 구해진 최적관리 방안이 실제와 잘 맞지 않았다.

본 연구에서는 QUAL2E라는 수질모델에 의해서 수질을 계산하고, 유전알고리즘을 사용하여 최적의 관리 방안을 찾는 수질관리 모델을 제시한다. 이 모델은, QUAL2E 수질모델을 사용함으로써 BOD, DO, TN 및 TP 등의 여러 가지 수질항목을 동시에 고려하면서도 각 오염원이 수질에 미치는 영향을 정확하게 반영할 수 있는 장점이 있다. 또한 유전알고리즘을 적용함으로써 QUAL2E에 의해서 표현되는 수질모델에 대하여 전혀 변형을 가하지 않고서도 최적의 관리 방안을 계산할 수 있게 하였다.

하천의 수계에 하수처리장을 건설할 때, 계획 중인 각 하수처리장에서의 처리방식에 따라 오염원의 제거효율이 달라지고, 건설비용과 운영비용 또한 달라진다. 각 하수처리장으로부터의 배출수는 하천의 본류에 유입되어 하류로 흘러가면서 수질에 영향을 미치게 된다. 이 때, 하천 수계의 각 지점에서의 수질이 기준치 이내로 만족되도록 하여야 한다. 따라서 하천 수계의 모든 검사지점에서 수질기준을 만족하는 범위 내에서 하수처리비용을 최소화하도록 각 하수처리장의 처리방식을 결정하여야 한다.

이러한 수질관리 모델을 영산강유역의 하수처리를 최적화하기 위하여 사용하였다. 영산강유역에는 현재 12개 하수처리장이 가동중인데, 추가의 하수처리장을 신설하고, 기존 처리장들은 그 처리용량과 방식 등을 개선할 계획이다. 본 연구에서는

신설할 하수처리장과, 기존 처리장에서 사용할 처리방식을 정하고자 한다.

2. QUAL2E 수질모델과 수질관리

하천수질모델 QUAL2E 는 지류로부터 일반적 인 오염원이 유입되는 하천과 호수에서, 안정 상태의 수질을 계산하는 수질모델이다. 이 모델은 하천에 유입되는 폐수의 오염 부하에 대한 영향을 연구하거나, 비 점원 폐수의 오염 부하의 정도와 특성을 파악하는데 사용될 수 있다. 이 모델을 이용하면 하루 중의 기상의 변화가 수질에 미치는 효과도 알 수 있다. 따라서 이 모델을 수질을 계획하고 통제, 단속하기 위한 도구로서 사용할 수가 있다. 이 모델은 최대 15가지의 수질항목에 대해서 시뮬레이션할 수 있다.

QUAL2E의 수질모델을 이용하여 하천의 각 지점에서의 수질을 시뮬레이션하기 위해서는 우선 하천을 각 구간으로 나누고, 또 각 구간은 일정한 길이로 나눈 소구간이 연결된 것으로 나타낸다. 그리고 각 구간과 연결점에서 유입되는 유입수의 유량, 유속, 수위, 온도, 그리고 각종 오염원의 오염부하량을 입력 자료로서 주어준다. 그러면 QUAL2E 는 하천에서 각종 오염원의 반응 조건 등을 다루는 공식을 사용하여서 각 소구간에 대해서 수질항목의 수치를 예측하여준다. 따라서 각 소구간에서 QUAL2E에 의해서 예측되는 각종 수질항목의 수치가, 관리 통제하고자 하는 수준 이내에 있도록 각 유입점에서 유입되는 오염부하량을 통제 관리하여야 한다. 이렇게 QUAL2E를 이용하여 수질을 미리 예측함으로써 수질의 통제와 관리가 가능해진다.

각 유입점에서의 오염부하량을 통제 관리한다는 것은 바로 하수처리시설을 이용하여 하수에 포함된 오염원을 일정수준 이상 제거하여 배출함으로써 오염부하량을 줄인다는 것을 의미한다. 현실적으로 모든 유입점에서의 모든 오염부하를 제거하는 것은 상당히 많은 비용을 필요로 한다. 각 하수처리장에서 하수를 처리할 때에는, 여러 가지 처리 방식 중에서 하나 또는 몇 가지 처리 방식의 조합을 사용하여 처리하는데, 그 방법과 처리수준에 따라 각 오염원의 제거 비율이 달라지며, 비용 또한 달라진다. 따라서 각 하수처리장에서의 처리방식을 적절히 결정함으로써, 처리장으로부터 배출되어 하천으로 유입되는 오염원으로 인하여 변화된 하천의 수질이, 관리 통제하고자하는 수질항목의 기준 이내로 만족되도록 하고, 또한 처리비용도 최소화 되도록 하여야 한다.

3. 유전알고리즘을 이용한 수질관리 모델

유전 알고리즘은 자연계에서 생물이 유전적으로 진화해 가는 방식을 모방하여 최적해를 찾는 해법이다[3]. 유전알고리즘에서는 시스템의 상태나 개별적인 구조들을 염색체의 형태로 표현하고, 염색체들이 서로 선택, 교배, 복제 및 돌연변이의 과정을 통하여 시스템의 상태를 최적화하거나 최적인 개체의 구조를 찾아낸다. 이러한 생물 집단의 진화를 모방한 수리적 진화 과정에서 개개의 염색체의 집합인 세대가 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 적고, 둘째, 효과적으로 전역적 탐색을 수행할 수 있으며, 셋째, 유연성이 아주 좋아서 개별 문제들의 특성에 따라 요구되는 변형과 발견적 기법들과의 결합이 손쉽다는 점등이다.

유전알고리즘에서 특히 고안되어야 할 것은 유전염색체 표현, 그에 맞는 유전연산자 그리고 적합도의 평가와 적용방법 등이다. 본 연구에서는 각 하수처리장에서의 처리방식과 수준을 나타내는 염색체의 표현을 디자인하고, 또한 그에 맞는 유전연산자들을 설계하여 사용하였다.

유전염색체 : 각 처리장에서의 처리방식과 수준을 이진수 열로 표현하고 모든 처리장에 대한 표현을 일렬로 결합한 형태로 디자인하였다.

1 0 1 | 0 1 1 | 1 1 0 | 1 0 0 | 0 1 1
 처리장 1 | 처리장 2 | 처리장 3 | 처리장 4 | 처리장 5

교배연산자 : 일점교차 방법을 사용하였다.

부모1 : 1 0 1 0 1 1 1 | 1 0 1 0 0
 교차점

부모2 : 0 1 1 0 1 0 1 | 0 1 1 1 0

↓

자손1 : 1 0 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0

자손2 : 0 1 1 0 1 0 1 1 0 1 0 0

돌연변이 연산자 : 확률적으로 선택된 이진수를 반전시킨다.

돌연변이 전 : 1 0 1 0 1 1 1 1 0 1 0 0
 ^ ^ ^ ^ ^
 변이 인자

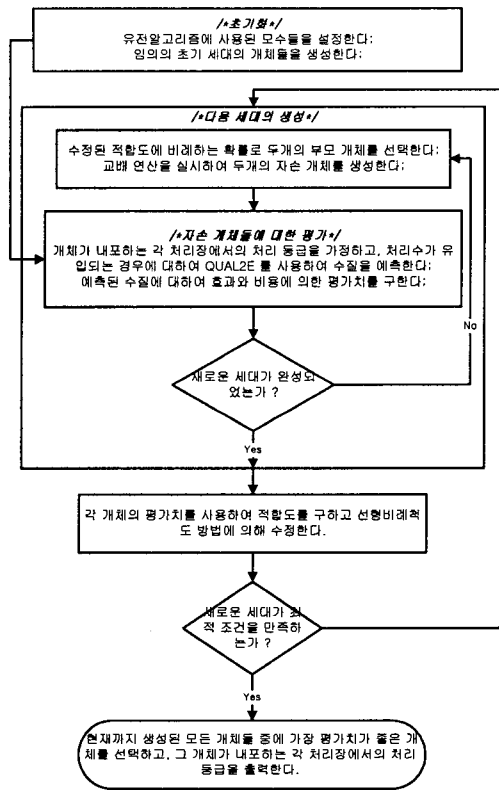
↓

돌연변이 후 : 1 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 0

적합도 평가방법 : QUAL2E 수질모델에 의하여 각 소구간에서의 수질을 예측하고, 그 예측 결과를 평가하여 얻은 평가치를 기준으로 각 개체의 적합도를 구한다. 평가치는 각 하수처리장의 처리방식에 따라서 결정되는 각 하수처리장에성의 하수처리비용의 총합으로 한다. 각 하수처리장의 하수처리비용은 처리장 건설비용의 년차등가액과 유지관리비의 합이다. 이 때, 건설비용 중 기준에 완공된 비용은 계산하지 않고 용량을 증설하거나 처리방식 고도화에 따른 추가적인 건설비용을 계산하여 년차등가액을 구한다. 한편 QUAL2E 에의하여 예측된 수질이 각 소구간에서 수질항목 중에 기준을 벗어나는 결과를 보여주는 처리방식에 대하여서는 큰 값의 패널티를 비용으로 추가한다.

적합도 비례척도 : 선형비례척도 방법에 의하여 적합도를 수정하고, 그 값을 다음 세대의 개체를 생

성하는 부모를 선택하는 기준으로 삼았다.



[그림 1] 유전알고리즘의 흐름도

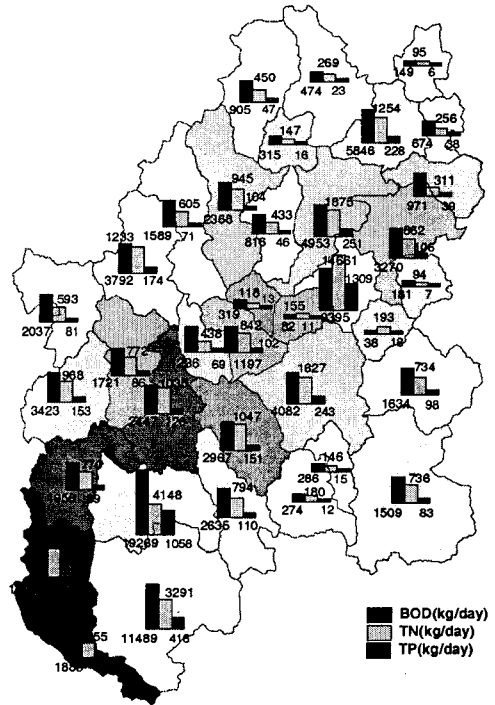
이 유전알고리즘의 계산 흐름도를 나타내면 [그림 1]과 같다. 이와 같은 계산흐름에 따라 Fortran으로 프로그램을 작성하였다. 작성된 유전알고리즘 부분은 테스트를 거쳐 또 다른 Fortran 프로그램인 QUAL2E 부분과 통합하였다.

완성된 프로그램을 간단한 예제를 이용한 테스트 과정을 거친 후, 영산강 지역의 실제 자료를 이용하여 최적의 수질관리를 위한 폐수처리 방안을 구하였다.

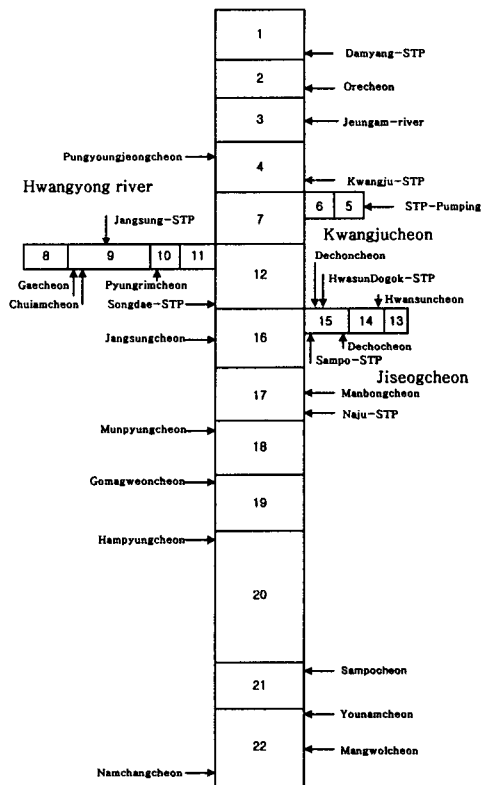
4. 영산강 유역의 최적하수처리방안

총 3374 km² 에 달하는 영산강 유역은 약 1/3 에 해당하는 지역이 경작지이며, 1/2 이상 되는 지역은 산림이다. 영산강 유역의 총 거주 인구는 174 만 명이다.

영산강 유역을 GIS 패키지인 Arc/View Spatial analyst 와 1:50000 수치지도를 이용해서 유역의 경계를 설정하고, 36개의 배수구역으로 분할하였다. 영산강 유역의 오염원 등 수질환경정보는 현지조사와 환경부의 오염원 현황자료를 사용하였다. 오염원에 관한 자료와 원단위 부하로부터 100m x 100m 의 격자에 대한 오염원 데이터베이스를 구축하고, 이 오염원 데이터베이스로부터 수질관리 시나리오에 따라 점 오염원과 분산 오염원의 오염부하량을 계산하여 QUAL2E의 수질모델의 입력자료로서 사용하였다. [그림 2]는 영산강유역의 배수구역별 오염부하량을 나타낸다.



[그림 2] 배수구역별 오염부하량



[그림 3] 영산강 수계의 구간분할

[표 1] 하수처리 방식에 따른 효율과 비용

처리방식		처리효율(%)			건설비용 (백만원)	운영비용 (백만원)
		BOD	TN	TP		
1	A	87.5	20.0	33.3	3596.4Q ^{0.622}	43.08Q ^{0.848}
2	A+B	87.5	20.0	80.0	4172.2Q ^{0.609}	56.42Q ^{0.886}
3	A+B+D	90.0	44.0	87.0	5370.62Q ^{0.595}	59.37Q ^{0.886}
4	A+B+D+E	96.0	52.4	89.7	7201.3Q ^{0.649} - type5 + type3	156.32Q ^{0.942} - type5 + type3
5	A+C+D	95.0	58.0	91.3	5916.34Q ^{0.621}	63.85Q ^{0.886}
6	A+C+D+E	98.0	64.3	93.1	7201.3Q ^{0.649}	156.32Q ^{0.942}
7	F	87.5	20.0	80.0	3776.22Q ^{0.622}	58.45Q ^{0.866}
8	G	86.6	67.0	5.7	6444.6Q ^{0.598}	269.7Q ^{0.396}
9	G+C+D+E	97.9	85.3	90.2	6444.6Q ^{0.598} + type6 - type1	269.7Q ^{0.396} + type6 - type1
10	H	87.8	31.4	45.9	1925.6Q ^{0.823}	269.7Q ^{0.396}
11	H+C+D+E	98.1	69.4	94.4	1925.6Q ^{0.823} + type6 - type1	269.7Q ^{0.396} + type6 - type1

A : 활성슬러지법(A.S.)
 B : 응집제투입(Coagulant addition)
 C : 응집침전(Coagulation)
 D : 급속사여과(Filter)
 E : 활성탄흡착(Absorb)
 F : A/O
 G : 산화구법(Oxidation ditch)
 H : 회전원판법(Rotating biological contactor)
 *Q : 처리용량(천톤)

QUAL2E의 수질모델을 세우기 위해서, 금월교부터 시작하여 하구까지의 영산강 본류를 13개의 구간으로 나누고, 각 구간은 1 킬로미터 길이의 요소구간으로 구분하였다. [그림 3]은 QUAL2E모형의 구간분할을 나타내고 있다.

그리고 수질조사지점은 본류에 12개, 지천과 하수처리장 방류구에 33개의 지점을 정했다. 조사대상 수질항목은 BOD, DO, pH, 수온, SS, COD, NH3-N, NO3-N, Org-N, PO4-P, Org-P, Chl-a 등이다.

각 하수처리장에서는 수집되는 하수를 여러 가지의 처리방식들 중에서 하나 또는 여러 가지를 조합하여 처리한다. 각 처리방식의 조합에 대한 처리효율과 비용을 [표 1]에 나타내었다. 각 하수처리방식의 처리효율에 따라 하수처리장으로부터의 배출되는 배출수에 남아있는 오염원의 양을 계산하여 QUAL2E의 입력자료로 사용하였다.

이와 같이 QUAL2E 수질모델과 유전알고리즘을 결합한 수질관리 모델을 이용하여 구한 영산강 유역의 하수처리장에서의 최적처리방식은 [표 2]에 나타내었다.

[표 2] 하수처리장에서의 최적처리방식

하수처리장	용량 (천톤/일)	처리방식	연간비용 (백만원)
Damyang	7	G+C+D+E	5,409
Mujeong	1.1	A+B+D	785
Goseo	1.7	-	-
Daejeon	0.9	A+C+D	760
Jinweon	1.1	A+B+D	785
Kwangju	600	A+C+D	40,112
Jangseong	11	H	701
Samgye	1.1	A+B	621
Songdae	60	A	1,387
Hwasun	11	H	701
Dogokoncheon	6	Contact stabilization	77
Sanpo	3.5	H+C+D	1,152
Seji	1.2	F	604
Naju	22.5	A	604
Dasi	1.1	F	571
Haeb0	0.6	-	-
Munpyeong	0.9	F	501
Muan	4.5	H	491
Hampyeong	9	G+B	993
Naegyo	0.7	A+B+D	593
Donggang	0.7	A+C+D	623
Gongsan	3.5	H+B+D	940
Illo	3	H	418
Youngam	5.5	G+B+D	1,179
Samho	1.5	-	-
Geumseong	0.65	A+C+D	617
Total			60,624

References

- [1]. 박지혁, 성기석, "프로세서의 수가 한정되어 있는 병렬계산모델에서 유전알고리즘을 이용한 스케줄링해법", 한국경영과학회지 23권 2호, 1998.6, 15-27.
- [2]. Goldberg, D. E. *Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley, Massachusetts, 1989
- [3]. Sung, K., J. Anderson and M. G. H. Bell, "A Genetic Algorithm to Optimize Signal Phasing in Area Traffic Control", *IEE Conference Publication Number 446*, Second International Conference on GALEZIA(1997), pp404~408.
- [4]. Sung, K, "A Genetic Algorithm for University Weekly Courses Timetabling", *The 15th Triennial Conference IFORS Final Program*, 1999.8, Beijing.
- [5]. Sung, K, "A Genetic Algorithm for the Optimal Signal Timing in Area Traffic Control", *Proceedings of EURO XVII*, July 16-19, 2000, Budapest, Hungary.