유전자 알고리즘을 적용한 댐 운영의 최적화 방안에 관한 연구

○신 홍 준*, 허 준 행**

1. 서론

우리나라는 그 동안 수자원 개발사업의 일환으로 한강수계에 많은 댐을 건설, 운영함으로써 증가된 용수수요를 충당하고 매년 발생되는 집중호우 및 태풍 등으로 인한 홍수피해를 현격하게 경감시켰으며 부수적으로 발생되는 수력발전으로 전기를 생산하여 첨두부하시에 전력을 공급함으로써 전력난을 해소시키는 등 산업발전과 국민경제에 많은 기여를 하고 있다.

그러나 최근 급격한 인구증가와 생활수준의 향상, 도시화, 산업화 등으로 용수수요가 계속 증가하여 지역에 따라 아직도 용수난을 겪고 있으며, 유역별로 수자원 부존량에 상당한 차이가 있어 물 수급에 불균형이 있을 뿐 아니라 신규 댐 건설에 대한 반대로 인해 대규모 수자원 개발은 점차 한계에 부딪히고 있다. 따라서 현재 당면해 있는 상황을 고려해보면 새로운 댐의 건설보다는 기존 댐의 효과적인 운영을 통해서 기 개발된 수자원을 최대한 활용하는 방안을 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서는 현재 한강수계에 있는 댐들을 보다 효과적으로 운영하기 위한 방안의 하나로 최근 부각되고 있는 유전자 알고리즘을 적용한 연계운영방법에 관해 연구하고자 한다.

2. 기본 이론

2.1 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘(genetic algorithms)은 자연선택의 법칙인 자연진화 이론으로부터 나온 탐색기법으로 Darwin의 적자생존이론에 바탕을 둔 진화이론의 한가지 알고리즘이다. 즉 생명체의 자연선택을 기계적인 학습영역에 적용한 탐색 알고리즘으로써 생물체의 유전이나 진화과정을 모방하여 최적화 모형에 적용하는 추계학적인 탐색모형으로 Holland에 의해 1975년에 최초로 제안되었다. 유전자 알고리즘은 초기에 무작위로 초기 모집단을 형성하고 이들을 부모세대로 하여 선택, 교배, 돌연변이 등의 연산과정을 거쳐 부모세대보다 진화한 새로운 자식세대를 생성하게 된다. 그 후 목적함수에 대한 적합도를 평가하여 선별된 우수한 개체들의 결합을 통해 보다 적합한 개체를 생성시킨다. 이것은 보다 우수한 자식을 생산하기 위해서 부모역할을 하는 개체의 가장 좋은 특성들이 결합되기 때문에 가능한 것인데 이러한 결합과정을 교배(crossover)라 한다. 교배를 통한 재결합에 비트 내 문자들의 무작위 변형을 허용하기도 하는데, 이러한 과정을 돌연변이(mutation)라고 하는데, 이 연산자는 유전자 알고리즘이 보다 좋은 해를 찾도록 하는 역할을 한다.

---

* 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정
** 연세대학교 사회환경·건축공학부 토목공학과 부교수

2.2 유입량 예측기법

시계열 모형이 구성되면 이때 구한 매개변수를 이용해서 여러 단계를 앞선 예측값을 구할 수 있다. 시간 t에서 관측된 시계열 값을 z_t라고 하면 AR(1) 모형은 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$z_t - \mu = \phi(z_{t-1} - \mu) + \varepsilon_t \tag{1}$$

여기서, ϕ는 AR계수, μ는 평균값, ε_t는 white noise이다.

그리고 선행시간(lead time) L이 지난 후의 실제 관측값을 z_{t+L}, 시간 t+L에서 예측된 값을 $z_t(L)$이라고 하고 각 항의 조건부 기대값을 취하면 다음 식 (2)와 같이 선행시간 L일 때의 예측값을 구할 수 있다.

$$z_t(L) = \mu + \phi^L(z_t - \mu) \tag{2}$$

일반적으로 자료를 예측하는 것은 실제 관측과 병행되는 것이므로, 일정한 시간마다 관측되는 실측값을 이용해서 다음 식 (3)과 같이 예측된 값을 수정할 수 있다.

$$\begin{aligned} z_{t+1}(L) &= z_t(L+1) + \psi_L \varepsilon_{t+1} \\ &= z_t(L+1) + \psi_L[z_{t+1} - z_t(1)] \end{aligned} \tag{3}$$

3. 모형의 적용

3.1 유입량 예측 모형

앞 절에서 구한 매개변수를 이용해서 유입량 예측모형을 구성한다. 최적화 모형에서 최적화를 수행할 연도의 전년도 12월 달의 실제 유입량 자료를 이용하여 24개월을 예측한후 한달 간격으로 실제 자료가 추가되면 현재 달까지는 실제 유입량 자료를 사용하고 나머지 기간은 갱신(updating)을 한다. 따라서 한 달이 지날 때마다 관측된 자료와 갱신된 자료를 이용하여 최적화 모형을 수행한 후 최적화 모형의 수행결과 첫 번째 달의 운영결과를 그 해당 월의 운영목표로 사용한다.

3.2 유전자 알고리즘 모형

본 연구에서는 유전자 알고리즘을 코드화한 University of Illinois의 Carroll(1998)에 의해 개발된 genetic algorithm driver 1.7을 사용하였다. 이 코드는 유전자 알고리즘 접근방법을 사용하여 각각 다른 매개변수들을 임의로 초기화한다. 여기서 사용한 선택 연산자는 토너먼트 선택방법(tournament selection)이고, 교배 연산자는 일점 교배(single point crossover), 돌연변이 연산자는 균등 돌연변이(uniform mutation)를 사용하였다.

4. 결과

4.1 유입량 예측 결과

본 연구에서 이용한 유입량 예측기법은 AR(1) 모형이므로, 지체수 1인 경우가 가장 잘 예측된 값이라고 할 수 있다. 아래의 표 1은 화천, 소양강, 충주댐의 각 월별, 연도별 예측값과 실제값, 그리고 그 차이를 나타낸 표이다. 유입량 예측 결과 화천, 소양강, 충주댐의 경우 모두 유입량 예측값의 합계가 실제보다 크게 산정되었다. 또한 3개 댐 모두 홍수기인 6월~9월의 유입량 예측값이 다른 달보다 상대적으로 차이가 큰데, 이러한 결과는 본 연구에서 사용한 AR(1) 모형의 특성으로 지체수가 커질수록 평균값에 가까워지기 때문이다. 즉 홍수기의 유입량은 편차가 크기 때문에 평

균에 가까워지는 모형의 특성상 홍수기의 유입량 예측은 상대적으로 정확도가 떨어지기 마련이다.

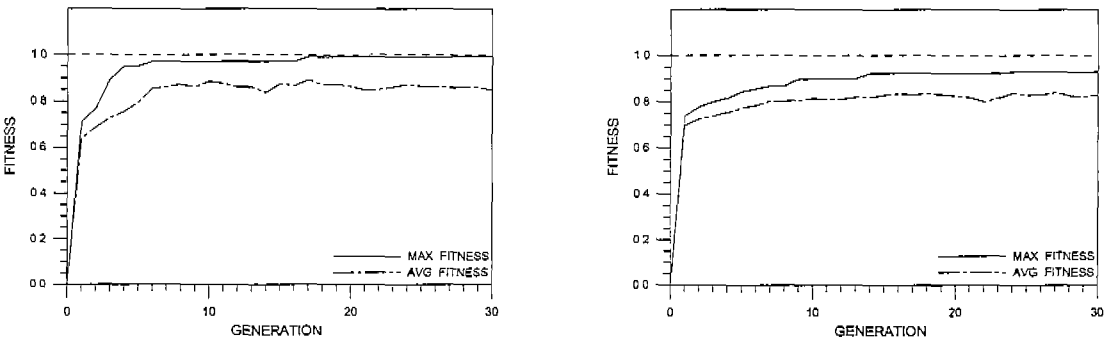
표 1. 유입량 예측결과 (단위 : cms)

월	화천댐			소양강댐			충주댐		
	예측값	실제값	차이	예측값	실제값	차이	예측값	실제값	차이
1	14.4	10.8	3.6	6.4	4.9	1.5	18.4	13.3	5.1
2	15.4	10.4	5.0	7.7	3.3	4.4	25.5	11.2	14.3
3	28.6	16.7	11.9	17.9	15.7	2.2	71.7	67.1	4.6
4	64.3	26.8	37.5	66.1	32.4	33.7	173.9	104.0	69.9
5	62.7	37.5	25.2	55.0	30.7	24.3	111.8	61.1	50.7
6	71.9	69.2	2.7	56.1	57.7	-1.6	132.1	163.6	-31.5
7	237.7	651.9	-414.2	174.6	320.7	-146.1	440.0	351.2	88.8
8	320.6	78.2	242.4	181.3	44.3	137.0	379.1	116.5	262.6
9	183.5	23.5	160.0	122.6	14.1	108.5	263.6	51.5	212.1
10	40.6	17.5	23.1	29.3	7.2	22.1	88.9	29.3	59.6
11	37.3	11.7	25.6	22.1	8.7	13.4	61.6	40.4	21.2
12	20.8	10.3	10.5	10.6	5.8	4.8	41.1	26.2	14.9
합계	1,097.8	964.5	133.3	749.7	545.5	204.2	1,807.7	1,035.4	772.3

4.2 최적화 운영 결과

4.2.1 기왕의 자료를 이용한 최적화 운영 결과

모형의 검증을 위해 기왕의 사상과 동일한 조건 하에서 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화를 수행하여 보았다. 각 댐의 초기 저수위와 말기저수위는 기왕의 실측치, 즉 87년부터 96년까지 10년 간의 자료와 동일하게 설정하고 용수공급은 각 연도의 광역상수도 취수 실적을 그대로 적용하였으며, 하류의 용수는 팔당댐에서 최소 의무 방류량 이상만을 방류한다고 가정하였을 경우, 말기저수위가 기왕의 말기저수위에 맞추어 지는 모형을 구성하였다. 또한 상류 3개댐의 10년 간의 저수율 변화를 각각 실측치와 비교하여 모형의 적합성을 검증하였다. 검토 결과 각 년도별로 평수년이나 풍수년인 87, 90, 91, 93, 95, 96년의 경우 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 운영의 결과가 비교적 양호한 것으로 나타났다. 하지만 갈수년인 88, 89, 92, 94년의 경우 최적화를 실시했을 때 최적값으로의 수렴속도가 평수년이나 풍수년보다 훨씬 느린 것으로 나타났으며, 본 연구에서의 목적인 말기저수위에 대한 결과도 평수년이나 풍수년 때의 결과에 비해 안 좋은 결과가 나타났다. 다음의 그림 1은 각각 90년, 94년 경우 최적해로의 진화과정을 보여주는 것이다.



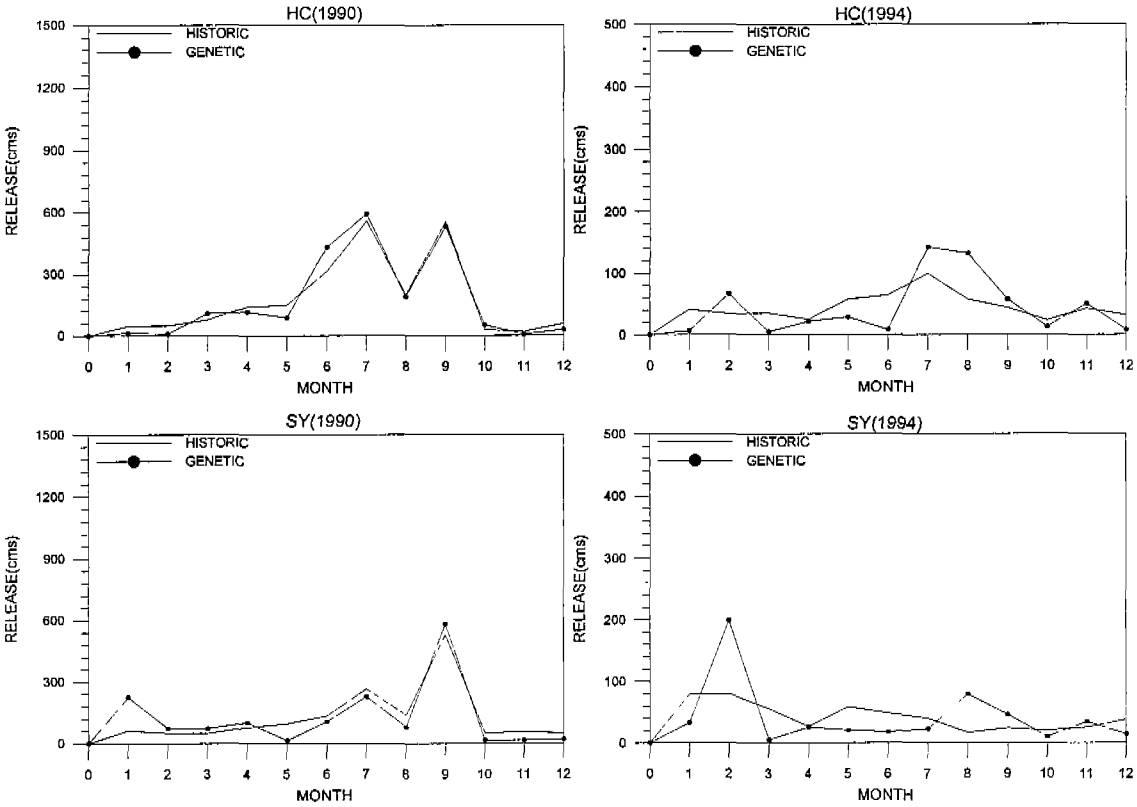
(a) 90년(풍수년)의 경우 (b) 94년(갈수년)의 경우

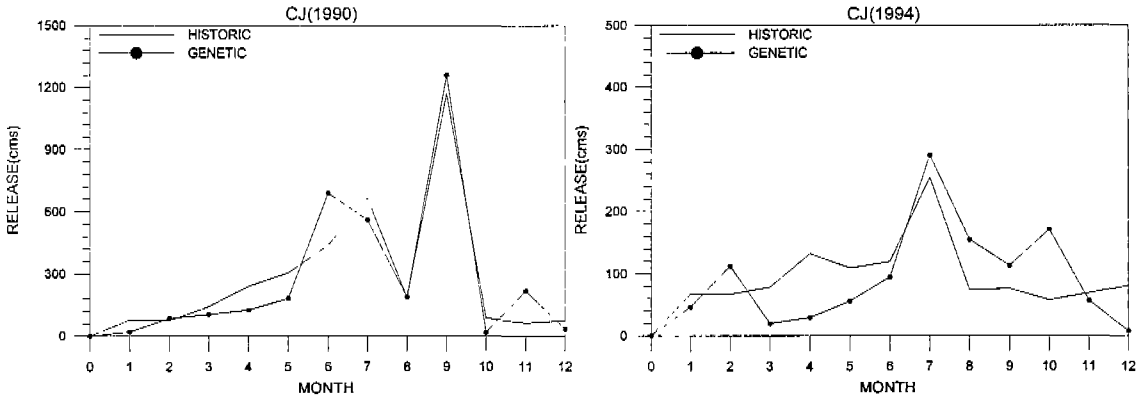
그림 1. 목적함수 최적해로의 진화과정

다음의 표 2는 각 연도별로 방류량의 예측값과 실제값과의 차이를 나타낸 것으로, 이 결과를 보면 대부분의 예측값이 실제값보다 작은 것을 알 수 있다. 방류량 예측값이 실제값보다 작다는 것은 각 댐별로 저류량이 더 많아졌다는 것을 의미하는데, 본 연구에서는 발전량, 즉 방류량이 큰 것보다는 저류량에 중점을 두었기 때문에 목적함수에 부합한다고 볼 수 있다. 다음의 그림 2는 90년과 94년의 각 댐별 예측 방류량을 실제 방류량과 함께 도시한 것이다.

표 3. 각 연도별 방류량 합계 (단위 : cms)

연도	화천댐			소양강댐			충주댐		
	예측값	실제값	차이	예측값	실제값	차이	예측값	실제값	차이
87년	1913.7	2415.1	-501.4	1205.5	1131.7	73.8	3132.9	3148.6	-15.7
88년	588.1	648.5	-60.4	609.0	627.2	-18.2	1589.7	1585.6	4.1
89년	737.3	757.0	-19.7	634.3	616.1	18.2	1804.3	1797.5	6.8
90년	2162.2	2190.0	-27.8	1522.5	1559.4	-36.9	3490.3	3522.6	-32.3
91년	687.2	707.0	-19.8	766.7	786.0	-19.3	1755.8	1771.8	-16.0
92년	755.9	780.0	-24.1	714.4	813.2	-98.8	1268.6	1306.2	-37.6
93년	1030.6	1043.9	-13.3	852.6	891.6	-39.0	2188.5	2220.2	-31.7
94년	527.6	559.2	-31.6	590.6	513.6	77.0	1144.6	1183.9	-39.3
95년	1596.4	1642.4	-46.0	1028.0	1059.2	-31.2	1561.6	2134.6	-573.0
96년	946.6	964.1	-17.5	714.7	733.1	-18.4	1185.5	1229.5	-44.0





(a) 90년(풍수년)의 경우 (b) 94년(갈수년)의 경우

그림 2. 댐별 방류량의 예측값 및 실제값

4.2.2 유입량 예측자료를 이용한 최적화 운영 결과

유입량 예측자료는 실제자료와는 차이가 있기 때문에 최적화 결과가 더 나빠질 수도 더 좋아질 수도 있는 것이다. 또한 미래의 값에 대해 최적화를 수행한 것이고 목적함수에서 기준으로 정한 말기저수위가 실제자료가 아니라 71년부터 95년까지의 평균값을 사용하였기 때문에, 이 값이 실제 저수위보다 낮게 되면 방류량이 늘어날 것이고, 높게 되면 방류량이 줄어드는 결과가 나타날 것이다. 표 3은 각 댐별로 각 달의 방류량을 실제값과 동적계획법을 이용했을 때의 값과 유전자 알고리즘을 이용했을 때의 값을 나타낸 표이다. 동적계획법의 결과는 김태순(1999)의 결과를 참고하였다. 최적화 운영결과가 실제값과 차이가 나는 이유는 앞서도 언급했지만 유입량의 예측결과의 영향을 받은 것인데, 앞 절의 표 1에서 볼 수 있듯이 홍수기인 7월은 화천댐, 소양강댐이 각각 실제값보다 414.2, 146.1cms가 적으며 충주댐의 경우는 실제값보다 88.8cms가 더 많게 예측되었다. 또한 8월의 경우는 각각 242.2, 137.0, 262.6cms가 더 많게 예측되었으며, 9월의 경우도 각각 160.0, 108.5, 212.1cms가 더 많게 예측되었다. 즉, 최적화 운영결과 홍수기 때의 방류량 예측값과 실제값의 차이는 유입량 예측값에 많은 영향을 받고 있기 때문에 방류량의 차이가 나타난 것으로 판단된다.

표 3. 각 댐별 방류량 (단위 : cms)

월	화천댐			소양강댐			충주댐		
	실제값	DP	GA	실제값	DP	GA	실제값	DP	GA
1	24.9	10.1	24.6	63.4	47.4	14.6	62.7	95.6	16.1
2	23.3	24.8	18.4	64.9	47.5	34.8	64.7	93.0	69.1
3	14.7	9.3	53.8	53.2	48.5	23.4	47.2	95.9	35.6
4	24.6	9.6	62.9	39.3	49.0	46.1	102.7	104.6	12.1
5	73.0	13.1	112.8	38.1	46.3	113.7	149.2	120.2	237.0
6	56.8	53.6	50.0	100.9	44.8	61.9	260.0	122.7	104.4
7	519.9	172.1	100.4	71.5	47.4	24.6	214.9	116.5	504.1
8	110.1	421.9	174.9	104.1	48.5	181.6	115.5	114.6	118.7
9	45.4	10.4	203.0	49.2	46.3	108.5	41.0	74.8	120.9
10	27.5	9.7	46.4	63.7	46.3	51.9	41.7	68.3	89.2
11	19.4	13.5	56.2	39.4	46.3	102.3	66.9	59.8	23.0
12	24.5	14.9	74.8	45.4	45.2	27.0	63.0	69.4	45.4
합계	964.15	763.0	978.2	733.1	563.5	790.4	1,229.5	1,135.4	1,375.6

5. 결론

한강수계 댐 운영의 최적화 방안의 하나로서 유전자 알고리즘을 도입하고, 87년부터 97년까지의 기왕의 유입량 자료를 이용하여 화천댐, 소양강댐, 충주댐, 팔당댐의 4차원 모형을 구성해서 최적화를 실시하여 모형의 검증을 하였고, 또한 71년부터 95년까지의 유입량 자료를 이용하여 유입량을 예측하여 최적화를 실시하였다. 유전자 알고리즘의 수행결과 실제 연말 말기저수위인 최적해의 95%로의 접근은 갈수년을 제외하고는 반복횟수 10번 내외에서 이루어져 빠른 수렴속도를 보이나, 각 연도마다 특정 값으로의 접근은 갈수년을 포함해서 반복횟수 30번 내에서 이루어졌다. 유입량 예측값을 이용하여 최적화 운영 결과 방류량이 실제값과 차이가 나타났는데, 이것은 최적화 모형 자체보다는 유입량 예측값이 실제 자료와 차이가 발생하기 때문에 나타난 현상이다.

본 연구 결과 유전자 알고리즘으로 최적화를 실시하였을 때 현재 최적화 방안으로 많이 이용되고 있는 기법들의 비선형성이나 동적계획법 같은 모형의 초기궤적문제, 차원문제 등의 단점을 극복할 수 있다. 따라서 유입량 예측기법과 유전자 알고리즘을 결합하여 새로운 최적화 기법으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

김태순 (1999). 유입량 예측기법과 확정론적 최적화기법을 적용한 댐 연계운영에 관한 연구, 토목공학과 석사학위논문, 연세대학교.

정창삼 (1998). 동적계획법을 이용한 한강수계 댐 군의 장기 최적화 연계운영, 토목공학과 석사학위논문, 연세대학교.

한국전력공사 (1998). 수력발전소 운용자료집(1971~1997 실적).

Esat, V., and Hall, M.J. (1994). "Water resources system optimization using genetic algorithm", *1st International Conference on Hydro Informatics*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 225-231.

Goldberg, D. E. (1987). "Genetic algorithm in pipeline optimization", *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 128-141.

Hipel, K. W. and McLeod, A. I. (1994). "Time Series Modeling of Water Resources and Environmental Systems", Elsevier Science., Amsterdam, Netherlands.

Oliveira, R., and Loucks, D. P. (1997). "Operating rules for multireservoir systems", *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 839-852.

Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V., and Lane, W. L. (1995). "Applied Modeling of Hydrologic Time Series", Water Resources Publication. Littleton, Colorado.

Wardlaw, R., and Sharif, M. (1999). "Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 125, No. 1, pp. 25-33.