

최적화 알고리즘을 이용한 농업용 관수로 최적설계기법

황 일 환

(ilhwan@ekr.or.kr)

한국농어촌공사 기반정비처

김 병 규

(bingo@ekr.or.kr)

한국농어촌공사 기술본부 설계팀

■ 서 론

최근에는 개수로식 용수로를 이용한 급수시설을 점차 관수로화 함으로써 용수의 효율적인 이용을 모색하고 있다. 그러나 농업용 저압관수로는 오랜 경험과 기술을 축적한 생활용수 위주의 상수관망과 달리 계획과 설계 및 시공에 관련된 기술의 부족으로 접합부분의 누수와 상류구간에서의 부압문제 및 통수량의 부족 등에 대한 기술적인 문제들이 제기 되어 왔다.

특히 용수로의 설계요령 및 기준이 개수로 설계방식 위주로 작성되어 있어 관수로로 설계시 관망해석을 하여야함에도 불구하고 관수로 마찰손실 공식에 의한 수두손실만을 고려하고 있는 경우가 많아 시공 후 많은 문제점이 발생하고 있는 실정이다.

본고에서는 최신 최적화 기법을 적용한 관수로 최적설계 기법을 소개하여 실무자들이 보다 편리하고 쉽게 관수로 설계를 수행할 수 있는 방안을 소개하고자 한다.

■ 최적화 기법의 소개

▶ 최적화 기법

가) 최적화기법의 종류

LP, NLP, DP와 같은 전통적인 최적화기법들은 많은 분야에서 최적화문제를 해결하는데 기여를 해왔으나 비선형적인 자연현상을 선형으로 가정하거나, 최적해의 부분탐색으로 인해 지역해에서 빠져나오기 힘든 것과 같은 많은 단점들로 인하여 발견적 탐색법과 같은 새로운 알고리즘의 필요성이 대두되었다. 1970년대 이후 자연현상에 기초한 알고리즘들이 개발되기 시작하여, 컴퓨터의 발달로 새롭게 개발된 알고리즘의 실무응용이 가능하게 되었다. 이런 종류의 발견적 탐색법 중에서 널리 알려진 것으로는 유전알고리즘(Genetic Algorithm), 개미군집 최적화알고리즘(Ant Colony Optimization Algorithm), 탐금질모의(Simulated Annealing), 화음탐색법(Harmony Search) 등이 있다. 이 중 화음탐색법은 많은 매개변수를 가지는 다양한 비선형 문제를

해결할 수 있는 기법으로 각광받고 있다.

나) 화음탐색법(Harmony Search, HS)

화음탐색법은 2000년에 처음 제안되었으며 기존의 최적화기법에 비해 최적해 탐색에 있어서 우수한 결과를 나타내는 것으로 알려져 있으며, 국내를 중심으로 연구가 진행 중인 최적화 기법이다.

김종우(2000)는 음악의 최적화음이 공학의 최적해에 해당한다는 새로운 개념으로 발견적 탐색법(Heuristic Algorithm)인 화음탐색법(Harmony Search, HS)을 제안하였다.

대부분의 발견적 탐색법이 자연현상을 모방하여 만들어졌지만 HS는 화음이라는 인공적인 현상에서 영감을 얻어 만들어진 알고리즘이다. 여러 가지 악기가 소리를 내 한 화음을 만들 때 각 악기에서 나오는 여러 소리는 하나의 화음을 생성하게 된다. 이렇게 만들어지는 화음 중에는 잘 어울리는 화음이 있고 불협화음을 내는 경우도 있으며 훈련과정을 통해 불협화음은 점차 사라지게 되고, 적합한 화음 중에서도 미적으로 가장 아름다운 화음이 있을 것이며 많은 훈련을 통해 구성할 수 있을 것이다. HS는 훈련과정(반복계산)을 통해 찾아지는 최적화음이 찾고자하는 최적해라 보는 기법이다.

HS는 기존의 발견적 탐색법인 SA(Simulated Annealing)나 TS(Tabu Search)와 달리 군탐색을 한다. 즉, 각 악기(변수)가 어떤 음(값)을 가짐에 따라서 기존의 많은 경험들이 영향을 미치게 되고 이는 바로 이전의 화음만이 영향을 미치는 것이 아니라 과거부터 축적된 상당히 많은 화음집합이 새로 만들어 내는 화음에 영향을 미치는 것이기 때문이다. 따라서 군탐색이라 볼 수 있으며 광대한 영역을 탐색하는 것이라 볼 수 있다. HS에서도 다른 기법과 같이 몇 가지 인자들을 사용하는데 HM(Harmony Memory), HMCR(Harmony Memory Considering Rate), PAR(Pitch Adjust Rate)등이 있다.

HM이란 이제까지 경험했던 화음 중에서 좋았다고 판단되는 화음들을 모은 집합으로 새로이 나타난 화음이 기존의 HM에서 최악의 화음보다 좋으면 이 화음이 HM에 추가되며 최악의 화음은 HM에서 탈락하게 된다.

HS에서는 탐색하고자 하는 각 매개변수를 악기라 하고, 매개변수의 값을 악기의 음조라 하면 HS에서는 가장 잘 어울리는 악기의 소리조합을 탐색하는 것이다. 이때 화음의 어울림 정도는 적합도 함수로 판단하게 된다.

HMCR이란 새로운 화음을 만들어 낼 때 HM에 있는 화음을 바탕으로 만들어 낼 것인지 아니면 전체 정의영역에서 무작위로 만들어 낼 것인지를 확률이다. HM 중 새로운 화음을 추가할 때 발생시킨 난수가 HMCR값보다 크면 전체 정의영역에서 무작위로 새로운 화음을 발생시키고, HMCR보다 작으면 기존 HM에 있는 화음을 바탕으로 새로운 화음을 구성하게 된다. HMCR의 기능은 해가 국지해에 빠지지 않고 더 나은 해로 찾아갈 수 있는 가능성을 부여하는 것으로 유전알고리즘의 돌연변이율과 유사한 기능이라 할 수 있다.

PAR은 좋은 화음을 만들기 위해 각 악기의 음조(Pitch)를 조절하는 것과 같이 우수한 해를 찾기 위해 기존 해와 이웃하는 값을 고려함으로써 HS의 성능을 향상시키는 인자이다.

▶ 관망의 수리해석 모형

관로시스템에서 압력과 유량에 대한 정상류해석은 매우 중요한 문제이다. 그러나 수리해석을 위한 수리방정식은 각 관로에 대한 미지의 유량 항으로 쓰여진 루프방정식, 관망절점에 대한 미지의 수두 항으로 나타난 절점방정식으로 이루어지며 비선형대수방정식의 형태로 직접적 해석이 불가능하다. 특히, 수리계산이 비교적 간단한 분기형 관수로와 달리

폐합회로를 갖는 망형 관수로의 해석은 더욱 어려워지며, 이를 위해 Hardy-Cross법, Newton-Raphson법, 선형화방법 등이 오늘날 많이 사용되고 있다.

최적해 탐색에 있어 중요한 탐색속도를 높이기 위해 필요한 데이터만을 주고받는 연계과정이 필수적이며 이를 위해 소스가 공개된 프로그램이 필요하다. 여기서는 소스가 공개되어 있고 다른 관수로 수리해석모형의 근간이 되고 있는 EPA-NET을 수리해석 프로그램으로 채택하였다.

미국 EPA에서 개발된 절점별, 시간별 수리적 특성인 유량과 압력을 계산, 수리학적 조건에 따른 변화를 모의할 수 있다.

EPA-NET은 상수관로 시스템의 정상류에 대한 수리 및 수질 모의해석 결과를 그래픽으로 출력해 주며 또한 수질변화를 모의하기 위해 수질예측 함수식의 매개변수를 구하고 이를 이용하여 대상 관로 말단지점에서의 오염물 농도를 추적할 수 있다. 수질예측에 필요한 매개변수 추정을 위해 보존성 물질과 비보존성 물질을 이용, 관내 수리 및 수질을 추적할 수 있어 상수관망에서의 수리 및 수질변화를 모의한다.

외부에서 제어할 수 있는 함수를 제공하고 있어 수많은 상용 관망해석 프로그램에서 기본적인 수리해석엔진으로 활용되고 있다.

▶ 관수로 최적화 모형 구축

가. 모형의 기본 알고리즘

관수로 최적설계 모형은 그림. 1과 같이 관망 입력 자료는 EPA-NET을 이용하여 구축하고 최적화 프로그램을 연동하여 관수로최적화 모형을 구축하였다.

1) HM의 구성(1단계)

유량, 압력, 유속 및 경제성의 네가지 방법으로 관수로의 환경정보를 HM(Harmony Memory)에 구성한다.

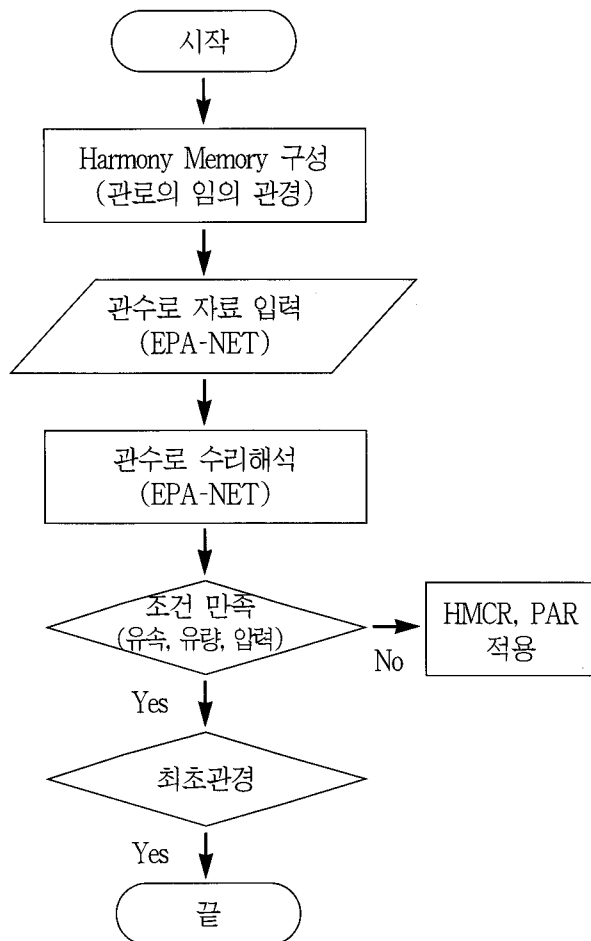


그림 1. 최적화 모형의 기본 구조

2) 수리학적 타당성 검토(2단계)

수리학적 타당성 검토에는 수리학적으로 만족을 시키게 되면 이때의 환경정보가 수리학적으로 적합한 값으로 HM에 남게 된다. 수리학적으로 타당성을 갖지 않게 되면 벌점을 부여한다. 수리학적으로 문제가 없는 화음을 찾을 때 까지 다음의 최적관경을 갖는 화음에 대하여 수리학적 타당성 여부를 검토하고 전체 HM가 수리학적으로 부적당하게 되면 새롭게 화음을 구성하여 과정을 반복하게 된다.

3) 최적관경 판단(3단계)

수리학적 타당성 검토가 끝나면 계산된 관경 중에서

최소의 관경 조건을 만족하는가에 대한 판단을 내리고 최소의 관경이라 판단되면 각 관로의 관경을 적용, 수리해석을 수행하여 결과를 출력하고 모형을 종료한다. 최소관경이 아닌 경우 다음 단계4로 넘어간다.

4) HMCR, PAR 적용(4단계)

HMCR 및 PAR은 기존 HM에서 선택된 대상 관로의 관경 계획을 구성하여 보다 나은 계획을 탐색하기 위해 적용하게 된다. HMCR을 적용할 때 새로운 화음을 구성하는 방법으로는 기존의 HM에 있는 관경정보를 이용하여 만들어 내는 방법과 기존의 HM과는 전혀 상관없이 새로운 화음을 구성하는 방법이 있다. 이때에는 난수를 발생시켜 HMCR값과 비교하여 방법을 선택하게 된다. 마찬가지로 PAR을 적용시킬 때에도 난수를 발생시켜 기존의 화음에 변화를 주게 된다. HMCR과 PAR 적용이 끝나면 단계2의 과정을 실시한다. 즉 새롭게 구성된 HM에 대하여 수리학적으로 타당한지를 검토하고 단계3, 단계4의 과정을 반복하여 수행한다.

나. 목적함수 설정

기존의 최적화 기법에서는 목적함수를 설정한 후 도함수(미분함수)를 구하여 0으로 수렴할 때까지 반복계산을 수행하게 된다. 하지만 발견적 최적화 기법인 HS에서는 목적함수의 도함수를 구할 필요가 없으며 매개변수의 조합만으로 반복계산을 수행하여 최적해를 찾게 된다. 농업용관수로의 최적관경을 찾기 위하여 4가지 조건의 목적함수를 설정하였다.

1) 유량조건

수위경계조건인 경우 관수로의 말단 급수전에 지정된 필요한 용수량을 기초로 관망 수리해석을 수행하게 되며 공급 가능한 유량의 각 관로의 관경변화에 의해 필요수량보다 많거나 혹은 적게 계산될 수 있다. 따라서 각 수위경계조건으로 지정된 급수전의 공급량이 필요수량보다 항상 크도록 함수를

설정할 필요가 있다. 다음 식의 조건에 의하여 공급수량이 항상 필요수량보다 크면서 유량의 편차가 가장 작도록 HS기법에서 매개변수(각 관로의 관경)를 변경하게 된다. 만일 어느 하나의 급수전에서 공급량이 필요수량보다 적을 경우는 벌점을 부여하여 최적해에서 제외되도록 프로그램을 구현하였다.

$$F(q) = \sqrt{\frac{\sum_{node=1}^n (Qd_{node} - Qp_{node})^2}{n}} \quad (1)$$

여기서, Qd_{node} : 임의 절점에서 계산된 공급유량 (수리해석 후)

Qp_{node} : 임의 절점에서의 계획유량(입력 값)

n : 관수로에서 절점의 개수

2) 압력조건

구성된 관수로의 모든 절점에서 부압이 발생하지 않도록 설정하여 관로에 무리가 가지 않도록 설계함이 목적으로, 만일 어느 한곳의 절점에서라도 부압이 발생하면 벌점을 부여하여 새로운 관경이 적용될 수 있도록 하였다. 즉 부압을 허용하지 않는 것으로 모형을 개발하였다.

3) 유속조건

관수로에서는 개수로와 마찬가지로 부유물의 침전 등을 방지하기 위하여 관내 적정유속을 유지하여야 한다. 송수방식, 관체의 재질, 관로의 관경에 따라 적정유속의 범위가 제시되어 있으나 모형 구축의 편의성을 위하여 모든 조건에서 기준유속을 1개로 설정하여 구현되도록 하였다. 즉, 관망 수리해석 후 각 관로에서 발생하는 유속과 1개의 기준유속과 차이를 최소로 할 수 있는 관경을 찾도록 구현되었다. 향후 실용화 단계에서는 다양한 기준유속을 적용할 수 있도록 구현되어야 할 것이다.

$$\min \left(F(v) = \sqrt{\frac{\sum_{pipe=1}^n (V_{pipe} - V_{base})^2}{n}} \right) \quad (2)$$

여기서, V_{pipe} : 임의 관로에서 계산된 유속(m/s)

V_{base} : 임의 관로에서 기준 유속(m/s)

n : 관로의 개수

4) 경제성 조건

위에 열거한 3가지 조건을 사용자가 선택적으로 지정하여 관망수리해석을 수행한 후 조건을 만족하는 최소의 관경을 찾게 되며 이는 곧 최소의 비용을 의미한다. 식은 다음과 같다.

$$\min \left(F(e) = \sqrt{\frac{\sum_{pipe=1}^n (D_{pipe} \times L_{pipe})}{\sum_{pipe=1}^n L_{pipe}}} \right) \quad (3)$$

여기서, D_{pipe} : 임의 관로의 관경(mm)

L_{pipe} : 임의 관로의 길이(m)

n : 관로의 갯수

■ 시범지구의 적용 결과

최적화기법인 HS의 적용성 검토를 위해 비주열베 이직 개발언어를 이용하여 관경최적화 프로그램을 개발하여 가상의 관망 및 실제 관수로 시공지구의 자료를 이용하여 관수로 최적화를 실시하였다.

시범지구는 공사에서 주로 사용되는 형식인 수지형 관수로 1개 지구를 선정하여 관망수리해석을 수행

하였다. 전체 관로의 길이는 약 9.4km로 각 말단의 급수전 경계조건은 수위경계조건으로 지정하였으며 그림 3은 최적화 전의 관망수리해석 결과이다.

11번과 13번 관로(붉은색 원으로 표시)에서 유량이 송수방향의 역으로 발생하고 있어 이는 곧 필요수량이 공급되지 못함을 의미한다. 표 1에서 알 수 있듯이 10번 관로에서의 유속은 28.71m/s, 11번 관로에서 0.09m/s로 최대와 최소유속의 차이가 무려 28.62m/s 달한다.

표 2에서 공급량의 값이 음(-)의 값이 표시된 것은 수위경계 조건을 지정하여 수리해석을 했기 때문이며 이는 필요수량을 공급하지 못하는 것을 의미한다. 13번과 24번 급수전에서 각각 필요수량 대 공급수량의 비율은 3.233%, 22%로 13번 급수전에서 과잉공급 24번 급수전에서 과소공급됨을 알 수 있다. 전체적으로 용수 수요공급의 불균형 상태로 최적화를 통한 관수로 설계가 필요함을 알 수 있다.

그림 3은 최적화를 수행한 후의 관망해석 결과이다. 최적화의 조건은 모든 절점에서 부압이 발생하지 않도록 하였고 관내 기준유속은 1.0m/s로 설정하고 공급량이 수요량보다 반드시 크도록 설정하였다.

그림 3에서 각 관로의 유량은 모두 송수방향으로 제대로 공급되고 있음을 알 수 있으며 표 1에서 12번 관로에서 최대유속 2.52m/s, 6번 관로에서 0.29m/s로 최대최소 유속차이는 2.23m/s로 최적화 전과 비교하여 매우 양호한 결과를 보여주고 있다. 전체

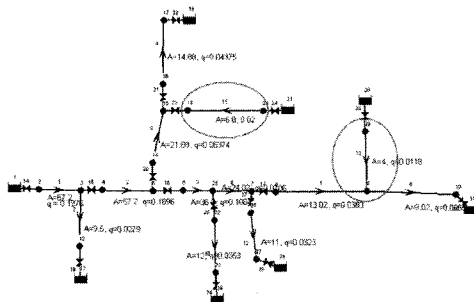


그림 2. 수지(분기)형 관수로 최적화 전 수리해석 결과

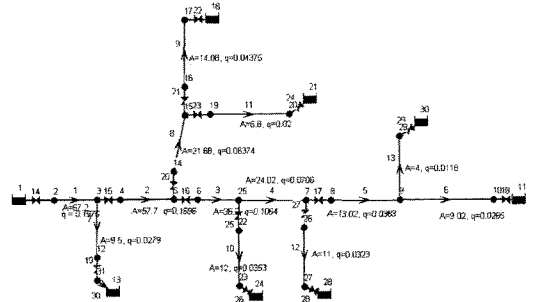


그림 3. 수지(분기)형 관수로 최적화 후 수리해석 결과

관로에 대한 평균유속 또한 최적화 전 3.83m/s, 최적화 후 0.99m/s로 최적화 후의 유속이 기준유속으로 설정한 1.0m/s와 거의 동일하게 산출되었다.

표 1에서 노선의 길이를 고려한 전체 관수로의 평균관경은 식3에 의해 구할 수 있으며 최적화 전 443mm, 최적화 후 408mm로 약 8%의 관경 절감 효과를 보여 최적화 기법을 이용하여 관수로설계를 하면 공사비 절감에 기여도가 높을 것으로 판단된다.

표 2에서 수요량과 공급량의 비율도 최적화 전 597%, 최적화 후 118%로 목표로한 수요량에 맞춰 거의 비슷하게 계산되었음을 알 수 있으며 최적화 후의 결과가 전체 급수전에 고른 분포를 보이고 있음을 확연히 알 수 있다.

■ 결 론

본고에서는 최적화 알고리즘의 일종인 회음탐색법을

표 1. 수지형 관수로 링크(파이프) 요소 유속 및 관경 비교

파이프 정보		최적화 전		최적화 후	
ID	길이	직경	유속	직경	유속
1	1,510	800	2.35	700	0.61
2	1,596	700	0.72	700	0.53
3	724	700	0.63	500	0.61
4	384	600	0.83	400	0.67
5	411	300	1.00	300	0.56
6	405	250	3.12	350	0.29
7	10	200	28.71	200	0.95
8	630	200	1.09	300	1.18
9	979	200	1.18	200	1.95
10	1,518	200	0.25	200	1.13
11	975	200	0.09	150	1.24
12	230	200	5.22	150	2.52
13	10	150	4.64	150	0.68
계/평균	9,382	443	3.83	408	0.99

표 2. 수지형 관수로 절점요소 수요/공급량 비교

구분	최적화 전			최적화 후		
	수요량	공급량	비율 (%)	수요량	공급량	비율 (%)
13	27.90	902.04	3,233	27.90	30.00	108
18	43.75	37.19	85	43.75	61.29	140
21	20.00	-2.95	-15	20.00	21.88	109
24	35.30	7.86	22	35.30	35.56	101
28	32.30	164.12	508	32.30	44.53	138
30	11.80	-81.98	-695	11.80	12.00	102
11	26.50	152.96	577	26.50	27.73	105
계/평균	197.55	1179.24	597	197.55	232.99	118

이용하여 농업용관수로 최적화 모형을 구축하였으며 기존 관망에 적용해본 결과 최적해 탐색에 있어 우수한 것으로 나타났다. 농업용 관수로 설계에서 관로의 수가 많아질수록 보다 효율적인 최적화 기법이 필요하며 향후 설계업무에 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

또한, 최적화 기법을 이용하여 관수로 설계를 할 경우 부실설계 방지, 물관리 민원 사전 예방, 선진 설계 기법 적용으로 공사 기술력 향상, 유관기관 및 대농민 공사 신뢰도 향상 기여 등을 할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 관두계 산정 프로그램 연구보고서, 1991, 한국수자원공사.
2. 농업용관수로 설계·시공·유지관리 지침, 2001, 농업기반공사.
3. 상수도시설기준, 1992, 건설부.
4. 유전자 연산과 Hydraulic-Connectivity를 이용한 상수관망의 신뢰최적 설계에 관한 연구, 1999, KAIST.
5. ReHS를 이용한 상수관망 최적개량 의사결정 시스템의 개발, 2002, 고려대학교.