

최적화기법의 실무에의 적용 : 가물막이 댐 가배수관의 최적설계

김 중 훈 (고려대학교 토목환경공학과 교수)

정 종 호 (고려대학교 토목환경공학과 박사과정)

1. 서론

공학이란 기존의 시스템을 운영하는 계획을 정하거나 보다 나은 새로운 시스템을 설계하는 일을 의미한다고 할 수 있으며 이러한 운영계획이나 설계에 있어서 보다 경제적인 방안을 찾는 것은 공학자의 사명으로 여겨지고 있다. 이러한 과정에서 가능한 모든 대안에 대해 일일이 계산해 보지 않고도 최선의 대안을 찾아내기 위한 수치계산방법으로서 최적화기법의 중요성은 이미 상당히 인식되어 있다고 할 수 있다. 각 분야에서 최적화기법을 이용하여 보다 나은 결과를 얻기 위한 시도는 꾸준히 계속되고 있으며 최적화기법을 응용한 논문도 많이 발표되고 있는 현실이다.

그러나 아쉽게도 아직까지 설계실무에서 최적화기법을 적극적으로 이용하는 예는 그리 많지 않다고 느껴진다. 이 분야가 수학과 컴퓨터프로그래밍에 많이 의존하는 분야이기 때문에 실무자들이 사용을 꺼린다는 점과 함께 자칫 실무를 무시한 설계가 될 수 있다는 문제점들이 있긴 하나 문제의 정확한 이해와 함께 실무 경험자들의 의견이 반영되는 설계를 한다면 최적화기법이 가져올 설계의 효용성과 공사비 및 운영경비의 절감 잠재력은 매우 크다고 본다. 아울러 실무자가 거부감 없이 사용하도록 유도하기 위해 사용이 편리한 형태로 개발이 되어야 한다는 과제도 남아 있다.

이번 학술기사에서서는 위에서 나열한 문제점들을 극복하여 최적화기법을 실무에서 응용할 수 있도록 시도한 한 예를 소개함으로써 이론적인 최적화기법을 실무에 응용할 수 있도록 접근하는 방법을 보여 주려 한다. 여기서 소개하는 예는 댐을 건설하는 과정에서 임시로 축조하는 가물막이 댐(coffer dam)의 가배수관의 설계문제를 최적화 기법인 Harmony Search를 이용하여 풀 수 있도록 한 것이다. 아울러 이 예에서는 실무에서 편리하게 사용할 수 있도록 Visual Basic을 이용하여 Windows용 프로그램의 형태로 개발되었다.

2. 가물막이 댐과 가배수관

댐을 건설함에 있어서 물이 없는 상태에서 공사를 하기 위해 본댐 예정지의 상류 및 하류측에 가물막이 댐(coffer dam)을 건설하고 가배수터널을 통해 하천을 우회시킨다. 이 때 가물막이 댐은 임시구조물인 관계로 경제적인 면을 고려하여 낮은 빈도(주로 5 ~ 25년)의 홍수량을 대상으로 규모를 결정하게 된다. 따라서 공사기간 중 설계대상홍수량을 초과하는 유입량에 직면할 가능성이 높으며 이와 같이 상류측 가물막이 댐(이하 가물막이)을 월류할 경우, 월류하는 수류는 가물막이와 본 댐 사이 구간의 작업장 및 축조중인 본 댐에 수충작용을 일으켜 파다한 세굴 등의 피해를 초래하게 된다. 이러

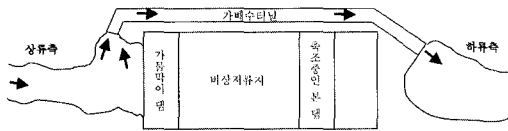


그림 1. 본 댐 건설을 위한 배수계통도

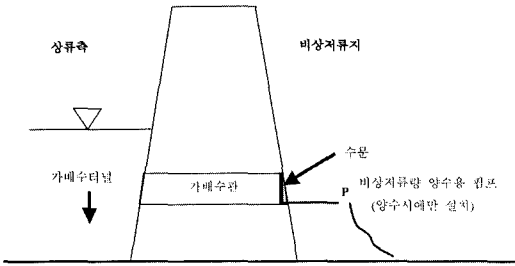


그림 2. 가물막이 댐의 단면도

한 월류수의 영향을 최소화하기 위하여 가물막이에 가배수관을 설치하여 이를 통해 유입량의 일부를 미리 방류함으로써 가물막이와 본 댐사이의 공간에 어느 정도의 물을 저류할 수 있도록 하고 이러한 저류량이 일정수심을 갖게 되면 월류수에 대해 물방석(water cushion) 역할을 하여 월류수를 감세할 수 있도록 설계에서 고려하게 된다(건설교통부 등, 1997). 이상의 본 댐 건설을 위한 배수계통도 및 가물막이 댐의 단면도는 그림 1 및 그림 2와 같다.

그러나 이러한 가배수관의 관경, 개수, 설치표고와 같은 설계제원을 결정하는 데에는 그 동안 적절한 방법이 제시된 바가 없으며 요구되는 사항들을 적절히 만족할 때까지 설계대안별로 검토하여 결정하여 왔으며 이 과정에서 단지 설계실무자의 경험에만 의존하였다. 본 연구에서는 가물막이의 가배수관을 설계하는 과정에 최적화기법을 도입함으로써 기존의 시행착오식 설계과정을 개선하여 가배수관의 기능을 모두 만족시킬 뿐만 아니라 공사비도 최소로 할 수 있는 방법을 제안함으로써 설계실무에서 실용적으로 적용 가능하도록 하였다. 본 설계 과정은 가물막이 가배수관의 기능을 모의하기 위한 홍수추적부분을 고려함으로써 비선형최적화문제라 볼 수 있으며 홍수추적 부분과의 연계문제와 경우

의 수가 과다한 문제를 극복하고 상업용 규격제품을 고려하기위해 기존의 비선형계획법 대신 새로운 heuristic algorithm인 HS(Harmony Search)를 적용하였다.

3. 적용대상

이번 예에서는 영월댐 실시설계의 자료를 사용하여 영월댐의 가물막이에 적용될 가배수관을 새로 개발한 기법을 이용하여 설계하고 그 결과를 기존의 설계제원과 비교해 보았다. 영월댐의 가물막이와 가배수터널의 조합은 대상홍수량을 5년빈도 홍수량으로 채택하였기 때문에 그 이상의 규모의 홍수가 발생할 경우 가물막이를 월류하게 되며 가물막이를 월류할 가능성이 상당히 크다고 할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 공사기간 등 현실적인 가능성을 고려하여 5년빈도 홍수량을 대상으로 설계된 가물막이에 25년빈도의 홍수량이 발생하는 경우를 적용하였다.

영월댐의 25년빈도의 홍수량을 가배수터널만을 통하여 홍수추적한 결과는 그림 3과 같다. 그림 3을 살펴보면 가배수터널 상류단의 하단표고가 202.0m이어서 추적기간중의 수위가 표고 203.0m 이하로 떨어지지 않고 있음을 알 수 있다. 또한 이 그림에서 가물막이 상류측의 수위가 정점표고인 238.5m에 도달하게 되는 시간은 36시간이며 예기치 못한 과대한 홍수량이 유입되거나 조작상에 문제가 발생하는 위험도가 높으므로 비상시에 조작원이 대처할 수 있는 시간으로 정점표고에 도달하기 전에 최소 6시간을 준다면 홍수발생 약 30시간 후인 가물막이 상류측의 수위가 표고 230.0m에 도달하기 전에 가배수관을 통한 배수가 시작되어야 한다(건설교통부 등, 1997).

가배수관은 수문설치를 포함하고 있으며 이 수문을 조작함으로써 방류를 결정하게 된다.

홍수추적 결과로부터 수위가 상승함에 따라 월류하기 전에 물방석효과를 줄 수 있을 만큼의 일정수심으로 물을 채우기 위해서는 가물막이의 약2/3높이 지점인 수위가 226.0m에 도달했을 때에는 가배수관의 수문을 열어 물을 채우기 시작해야 한다고 판단하여 수문조작시점은 226.0m로 고정하여 적용하였다(건설교통부 등, 1997). 수문조작시점을 높게 잡은 데에는 작은 홍수량에도 수문을 개방하게 되면 불필요하게 하류부에 저류되는 양을 자주 양수해야 하는 번거로움을 덜기 위한 목적도 있다. 이렇게 물방석효과를 줄 수 있는 비상저류량을 확보함으로써 많은 수량이 월류할 경우에도 그 충격을 완화해 주어 본 댐에 미치는 피해를 줄일 수 있는 것이다.

4. 최적화 문제의 구성

본 설계문제에서는 모든 제약조건을 만족시키면서 비용이 가장 적게 드는 가배수관의 관경, 하단표고, 개수를 결정하는 것을 목적함수로 정하는 것이 타당할 것이다. 목적함수는 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } Z = & \\ & [(L_1 C_A + L_2 C_B) \times N_P] + \\ & [PIC \times N_{PP} + N_F \times C_O \times S_L \div w] \end{aligned} \quad (1)$$

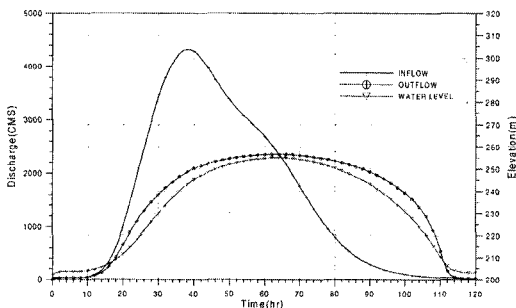


그림 3. 25년빈도 유입수문곡선의 가배수터널을 통한 홍수추적

이 식을 살펴보면 크게 2개의 항의 합으로 구성되어 있는데 앞의 항은 가배수관을 건설하는 데에 소요되는 비용이며 뒤의 항은 흘러 넘친 물을 퍼내기 위한 펌프의 설치 및 운영비용이다. 가물막이와 본 댐사이의 공간을 비상저류지라고 하고 홍수시 가배수관을 통해 이 공간에 임시로 저류된 저류량을 비상저류량이라고 한다면 홍수가 끝난 뒤 역배수되지 않고 남은 비상저류량을 펌프를 이용해 하류로 양수하는데 소요되는 비용이 곧 펌프에 드는 비용이며 관경, 관의 개수, 표고에 따라 다르게 조합된 각각의 경우에 대해 홍수추적을 실시하여 양수해야 할 수량을 계산하여 비용을 산출한다. 이 식에서 각종 변수 및 계수를 살펴보면 다음과 같다.

C_A : 가배수관의 단위길이 1m를 묻기 위한 토공(측구터파기) 비용으로 관경에 따라 터파기 단면적이 달라지므로 관경의 함수이다.

C_B : 가배수관 재료비 및 접합비를 1m 당 단가로 환산한 것이며 관경의 함수이다.

L_1 : 가배수관 1개의 총 길이(m)로 표고(EL)의 함수이다.

L_2 : L_1 을 2.5m 단위로 잘라서 올림한 길이(m)로 표고(EL)의 함수이다. 이렇게 L_1 과 L_2 로 나누어서 고려하는 까닭은 상업용 원심력 철근콘크리트관(흡관)의 경우 길이가 2.5m이므로 관의 개수는 정수임을 고려할 때 재료비와 접합비는 L_2 를 따르는 반면 토공비용은 L_1 을 따르기 때문이다.

N_P : 가배수관의 개수

PIC: 펌프설치 비용

N_F : 건설기간 중 25년빈도의 홍수가 발생하는 회수

C_O : 펌프의 운영비로서 전기료 및 인건비 등으로 구성되며 단위는 (원/시간)이다.

S_L : 비상저류량 중 자연배수가 되지 못하고 남아서 양수해야 하는 물의 양(m^3)

w : 사용하는 펌프의 양정올로써 (m³/시간)의 단위를 가진다.

N_{PP} : 펌프의 대수

따라서 전체적으로 결정변수는 관경(d), 관의 개수(N_P), 하단부표고(EL.), 펌프의 종류, 및 펌프의 대수(N_{PP})의 5가지가 된다. 또한, 여기서 만족시켜야 하는 제약조건에는 다음과 같은 것들이 있으며 구체적인 수치는 영월댐 실시설계에서 적용한 값들을 사용하였다.

1. 물방석효과를 얻기 위해서 홍수과가 가물막이를 월류하는 시점에서 비상저류지의 수심인 D_p는 최소 5m이상이어야 한다. 또한 월류하는 시점에 이미 비상저류지의 수심이 만수위에 도달해서는 안된다. 가물막이 지점의 바닥표고는 200.0m이므로 비상저류지의 최대수심은 가물막이의 정점표고인 238.5m에서 바닥표고를 뺀 38.5m가 된다.

$$38.5 \geq D_p \geq 5 \quad (2)$$

2. 가배수관의 하단부표고는 수문조작을 시작할 때 orifice흐름이 발생해야 하므로 '수문조작 시점 표고 - 관경' 보다 작거나 같아야 한다. 또한 홍수가 끝난 다음에는 가배수관을 통해 비상저류량을 가물막이 상류로 역배수가 가능하여야 하기에 가배수관의 경사는 수평으로 함은 물론이며 가배수터널만으로 흐름을 처리할 수 있는 비홍수시에는 가물막이 상류측의 수심은 가배수터널 상류단의 하단표고 202.0m를 넘지 못하므로 물이 원활하게 흐르기 위해 각종 저항에 대해 여유를 두어 가배수관의 하단부표고는 203.0m이상이어야 한다.

$$226.0 - d \geq EL. \geq 203.0 \quad (3)$$

3. 가배수관이 막혀서 제대로 기능을 발휘하지 못하는 경우를 대비하여 가배수관의 개수는 최소2개 이상으로 한다.

$$N_p \geq 2 \quad (4)$$

4. 가배수관은 동일한 표고에 설치하므로 전체 가배수관군의 지름의 합은 해당 표고에서의 가물막이의 폭보다 클 수가 없다. 이를 위해 도면상에서 가물막이 폭을 표고의 함수로 구할 필요가 있으며 영월댐의 경우에 대해 도면에서 구한 함수를 적용하면 다음과 같다. 여기서 시공 및 가배수관사이의 방수를 위해 필요한 가배수관 사이의 최소간격은 2d라고 가정하면 다음과 같은 제약조건식이 성립된다.

$$3 N_p \times d \leq (80/23 \times EL. - 586) \quad (5)$$

5. 홍수가 지나간 다음 최대한 빠른 기간 안에 비상저류량을 퍼내고 공사를 진행할 수 있어야 하므로 양수에 소요되는 시간의 제약이 따른다. 본 연구에서 개발된 기법에서는 최대 양수 소요시간을 시간의 단위로 입력할 수 있도록 하였으며 본 연구의 결론에서 유도한 결과는 최대 양수소요시간을 2일(48시간)으로 적용하였는데 통상 이 정도의 양수소요시간이면 공사에 지장을 주는 시간이 짧으면서도 본 댐에 미치는 영향도 적다고 판단된다.

$$\frac{S_L}{W \cdot N_{pp}} \leq 48 \quad (6)$$

상기 제약조건 중 3번째 제약조건의 경우는 결정변수의 정의영역을 설정할 때 하한치를 줌으로써 충족시켰으며 나머지 제약조건의 경우는 벌점(penalty)의 개념을 도입하여 충족시켰는데 다시

말해 제약조건을 위반할 경우 1012원의 벌점을 주어 목적함수 값을 이에 해당하는 만큼 증가시킴으로써 자동적으로 우수한 해의 집단에서 배제되도록 하였다. 이렇게 벌점만큼 목적함수 값을 증가시키는 방법을 식으로 표현하면 다음의 식과 같다.

$$Z = Z + 10^{12} \quad (7)$$

5. Algorithm의 선택

앞에서의 목적함수와 제약조건을 살펴보면 비선형최적화 문제가 됨을 알 수 있다. 특히 목적함수 중의 SL과 제약조건식에 포함된 DP를 구하기 위해서는 가정된 결정변수들의 매 경우마다 홍수추적을 실시하여야 하므로 문제 내에 홍수추적과정이 포함되게 된다. 본 연구에서는 문제를 단순화시키기 위하여 홍수추적을 시행하는 부분은 별개의 부프로그램으로 처리하여 최적화모형과 상호연계시켰다. 이와 같이 비선형최적화 문제의 규모가 너무 커져서 해석이 어려워지는 경우 수리모의모형을 최적화 모형에 연계시킴으로써 문제의 크기를 줄일 수 있는데 이는 최적제어이론(Optimal Control Theory)에 근거하고 있다(Lasdon 등, 1978). 그림 4는 본 연구에서 적용한 최적제어이론에 의한 최적화 모형과 홍수추적모형의 상호연계를 상징적으로 나타내고 있다.

모형에서 결정해야 할 5가지 결정변수인 관경

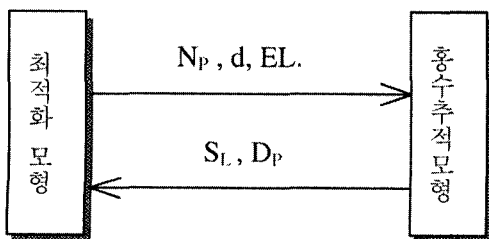


그림 4. 최적제어이론에 의한 상호연계

(d), 관의 개수(NP), 하단부표고(EL.), 펌프의 종류 및 펌프의 대수(NPP)를 각각 살펴보면 본 최적화문제의 성격을 파악할 수 있을 것이다.

일단 관경과 펌프의 종류는 현실적으로 쉽게 구할 수 있는 상업용 규격품 중에서 선택하도록 하여야 하며 이러한 면을 고려하면 변수 d와 펌프의 종류는 이산적인 값을 가지게 되며 이에 따른 건설비와 펌프의 설치비, 양정율, 운영비 등은 함수의 형태로 주어질 수 없고 각 경우마다 따로 계산이 되어야 한다. 각 관경별 토공비용과 관의 재료비 및 접합비는 물가자료(한국물가조사기관협의회, 2000)와 건설표준품셈(전인식, 1999)을 참고하여 계산하였다. 한편 하단부표고는 원래 연속적인 값이지만 실제 시공도면에서 사용하는 최소단위를 고려하여 0.1m단위로 나누어서 이산적인 문제로 다루었으며 관과 펌프의 개수는 정수값이 되어야 하므로 적절한 범위에서 이산적인 값을 가진다.

한편 이 문제에서 시도될 수 있는 총 경우의 수를 따져보면 다음과 같다. 우선 상업용 관경으로는 0.25m ~ 1.65m의 16가지 종류를 사용하였으며 하단부표고(EL.)의 경우 203.0 ~ (226.0 - d)의 범위에서 관경(d)이 최소인 0.25m를 적용하면 203.0m ~ 225.75m가 되며 이 사이를 0.1m 간격으로 구분하면 203.0m ~ 225.7m의 228가지 경우를 가진다. 그리고 가배수관의 개수도 가능한 모든 경우를 고려한다면 앞의 제약조건에서와 같이 최대한 $3 NP \times d \leq (80/23 \times EL. - 586)$ 를 만족시켜야 한다. 가배수관의 개수가 최대가 되는 경우는 가배수관이 설치되는 하단부표고(EL.)의 범위 중에서 가장 가물막이의 폭이 넓으면서 가배수관의 관경은 가장 작은 경우이다. 가배수관이 설치되는 하단부표고(EL.) 중 가장 폭이 넓은 곳은 최상단인 $EL. = 225.7m$ 인 경우이며 최소 관경인 0.25m를 적용하면 식(5)에서 NP의 최대값은 265가 된다. 따라서 NP값의 범위는 2 ~ 265의 264개

의 경우를 가지게 된다.

비상저류량을 펴내는 경우에는 공사배수용 수중 펌프를 이용하여 가배수관까지 물을 퍼올려서 역배수하도록 하는데 이때 최대양정고가 발생하는 경우는 가배수관이 최상단인 225.75m에 놓일 경우이며 이때 최하단과의 표고차는 25.875m(가배수관 중심까지)가 된다. 공사배수용 수중펌프의 규격별 추천 양정고를 따져보면 20마력의 경우 20m ~ 40m인 반면 이 보다 한 급 위인 30마력의 경우는 35m ~ 60m로써 최대양정고를 벗어나게 된다. 따라서 본 최적화 문제에서는 가능한 펌프의 종류로 2, 3, 5, 7.5, 10, 15, 20마력의 7가지를 고려하였다. 마지막으로 펌프의 대수를 1 ~ 20 의 20가지 경우를 고려한다면 총 경우의 수는 다음과 같이 매우 커지게 된다.

총 경우의 수:

$$16 \times 228 \times 264 \times 7 \times 20 = 134,830,080$$

결과적으로 가물막이 가배수관의 최적설계문제에 기존의 NLP(Nonlinear Programming)모형을 적용하는 데에는 전술한 바와 같은 어려움이 따르게 되는데 이를 다시 정리하면 홍수추적모형과의 상호연계성의 어려움, 상업용 규격품을 고려함으로써 수학적인 함수로 주어지지 않는 이산적인 변량을 다루게 됨으로 인해 목적함수를 완전한 수학적 NLP모형으로 구성할 수 없는 문제, 그리고 과도하게 많은 경우의 수이다. 결국 본 최적화 문제는 기존 NLP모형을 사용해서 풀기에는 무리가 있으며 이와 같은 문제점을 극복하는 데에 적합하게 개발된 heuristic algorithm을 사용하고 여기에 홍수추적모형을 부프로그램으로 접목한 도구를 개발하는 것이 적합할 것으로 판단되었다.

heuristic algorithm으로서는 최근에 개발된 HS(Harmony Search)를 적용하였는데 HS는 여

러 가지 문제에 있어서 GA(Genetic Algorithm)를 비롯한 다른 algorithm에 비해 상대적으로 우수함이 판명되어 왔다(Geem, Z. W. , 2000; Kim, J. H. 등, 2001; Paik, K. R. , 2001).

6. Harmony Search

본 프로그램에서 고려되는 최적화방법은 기존 최적화방법의 단점을 보완한 소위 heuristic방법이다. 기존의 최적화방법과 heuristic방법의 차이점은 무엇보다도 계산의 효율성이라 볼 수 있다. 기존의 방법인 LP(Linear Programming), DP(Dynamic Programming) 등에서는 가능성을 모두 열거하기 때문에 문제의 크기가 증가하게 되면 그에 따르는 계산 시간과 계산기의 공간이 기하급수적으로 늘어나게 된다. 그리고 경우에 따라서는 계산이 불가능한 일도 생기지만 heuristic방법에서는 문제의 크기가 증가해도 시간과 공간이 적절히 증가하기 때문에 계산이 가능하게 되며 또한 전체 최적해(Global Optimum)에 가까운 해를 제시한다. 또한 여러 대안 해를 제시하여 설계자의 선택 폭을 넓혀줄 수도 있다. heuristic방법의 대표적인 것으로는 SA(Simulated Annealing), TA(Taboo Search), GA 등이 있다. 이 방법들은 각기 자연의 현상을 모사하여 최적의 해를 찾아가고 있다. SA는 고체 물리학에서 에너지 수준이 가장 낮은 상태의 결정을 얻기 위해 이용하는 담금질 과정을 모사하고 있으며, TS는 인간의 기억과정을 이용하여 이미 왔던 길을 피해서 최적의 지점을 찾아가는 것이고(김여근 등, 1997), GA는 인간의 진화과정을 본떠 자연 선택 과정에 의해 우리가 원하는 해를 찾아가는 방법이다.

최근에 새로운 heuristic방법으로 개발된 HS는 음악의 3요소인 멜로디, 리듬, 화음에서 화음하나를 놓고 봤을 때 그 조화를 이루는 과정을 모사한 것이

다(Geem, Z. W. 등, 2001; Kim, J. H. 등, 2001). 피아노, 더블베이스, 트럼펫으로 구성된 재즈 트리오가 있다고 가정하고 이들이 악보가 존재하지 않는 즉흥연주를 한다고 해보자. 이들의 화음은 시간과 횟수를 거듭할수록 향상되며 그 이유는 경험이 축적되기 때문이다.

음악에서 화음에 해당하는 것이 공학에서는 최적해라고 볼 수 있다. 즉, 음악에서는 개개의 음표들이 모여서 그 어울림인 화음을 이루듯 공학에서는 개개의 변수값이 모여서 그 어울림인 최적해를 이루는 것이다. 따라서 공학적으로는 해벡터가 최적에 가까울수록 화음이 좋다고 할 수 있으며 음악에 있어서 거친 화음들이 점점 세련된 화음으로 수렴되어 가듯이 공학에 있어서도 거친 해벡터들이 점점 향상된 해벡터로 수렴해가는 것이다.

HS는 기존의 방법인 SA나 TS와 달리 해를 군탐색하고 있다. 즉 SA나 TS가 점탐색에 그치는데 반하여 HS는 각 악기(각 변수)가 어떤 음(어떤 값)을 가짐에 있어서 기존의 많은 경험들이 영향을 미치게 된다. 이는 바로 이전의 화음만이 영향을 미치는 것이 아니라 과거부터 축적된 상당량의 화음집합이 새로이 만들어 내는 화음에 영향을 미치는 것이기 때문에 군탐색이라 볼 수 있고 광대한 영역을 탐색하는 것이라고 볼 수 있다. 그러면서도 과거의 경험을 축적하고 있다는 측면에서 TS의 특징을 지닌 것이고 또한 해가 꼭 최적이지 아니라도 어느 정도 좋은 범위에 들면 경험의 집합에 추가한다는 점에서 SA의 특징도 지니고 있는 것이다. 같은 군탐색의 특징을 가지고 있는 GA와 비교해보면, GA의 경우 2진수로 변환된 해집합을 다루는 데에 비해 HS는 10진수로 표현된 원래의 해를 그대로 다루고 이로 인해 각 결정변수를 완전히 독립적으로 고려할 수 있으며 새로운 화음을 형성함에 있어서 HM내부의 모든 화음을 바탕으로 하는데 비해 GA는 새로운 해를 만들어 냄에 있어서 양 부모의 두 유전자를 바탕으

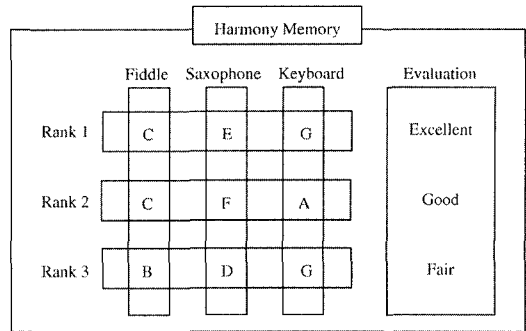


그림 5. Harmony Memory의 구조

로 한다는 차이가 있다(Paik, K. R. , 2001).

HS에서도 다른 heuristic algorithm과 같이 몇 가지의 인자들을 사용하는데 이러한 인자로는 HM(harmony memory)의 크기, HMCR(Harmony Memory Considering Rate), PAR(Pitch Adjusting Rate) 등이 있다.

HM이란 이제까지 경험했던 화음 중에서 좋다고 생각되는 화음을 모은 집합으로 새로이 나타난 화음이 기존의 HM에서의 최악의 화음보다 좋다면 이 화음이 HM에 추가되고 기존의 화음 중 최악의 것은 HM에서 탈락하게 되는 것이다. 이러한 집합방식을 이용하면 새로 만들어진 어떤 해가 꼭 지금까지의 최상의 해가 아니더라도 하나의 가능해로서 고려될 수 있는 것이고 또 이후의 해를 만들어 낼 경우에 이용될 수 있는 것이다. HM의 구조는 그림 5와 같다.

HMCR이란, 새로운 화음을 만들어 냄에 있어서 HM에 있는 화음을 바탕으로 만들어 낼 것인가 아니면 전체 정의영역에서 무작위로 만들어 낼 것인가 하는 확률이다. HMCR의 기능은 해가 국지해에 빠지지 않고 더 나은 곳으로 찾아갈 수 있는 가능성을 부여하는 것으로 마치 GA의 돌연변이율과 같은 기능이라고 할 수 있을 것이다.

PAR은 마치 좋은 화음을 만들기 위해 각 악기의 음조(pitch)를 조절하는 것과 같이 더 나은 해를 찾

기 위해 기존 해와 이웃하는 값을 고려함으로써 HS의 성능을 향상시키는 인자이다(Geem, Z. W., 2000).

7. 홍수추적

가배수관을 포함한 가물막이를 통한 홍수추적은 기본적으로 수정 Puls방법을 선택하였다. 수정Puls방법은 Q 와 $S + 1/2Q\Delta t$ 곡선을 사용하는 대신 Q 와 $Q + 2S/\Delta t$ 형태의 곡선을 사용하며 저류량의 단위가 아니라 유량의 단위에서 추적계산이 수행된다는 점에서 저류지시법(storage-indication method)과 구분된다(윤태훈, 1997). 수정Puls방법을 이용하기 위해서는 저수지의 수위-용량 관계 뿐만 아니라 수위-방류량 관계도 수립하여야 한다. 가물막이의 방류경로는 가배수터널, 가배수관, 가물막이월류 등 3가지 경우가 있다. 따라서 각 방류경로별로 수위-방류량 관계를 구한 다음 이들의 합으로 전체 수위-방류량 관계를 구해야 한다.

평상시 가물막이 상류의 흐름이 본 댐 공사장을 우회하도록 가물막이 상류 표고 202.0m 위치에 직경 9m인 2개의 원형 가배수터널이 설치된다. 가배수터널에서의 수위-방류량 관계는 2개의 가배수터널 각각에 대하여 작성한 후 합성하는 방법을 채택하였다. 구체적인 수리계산은 암거 수리계산을 위한 프로그램인 CAP(Culvert Analysis Program)을 이용하였다(USGS, 1995).

가배수관을 통한 방류량은 orifice흐름으로 간주하여 계산이 가능하다. Brater 등(1996)에 따르면 Reynolds수가 증가함에 따라 orifice계수는 0.6으로 수렴하는 것으로 알려져 있으며 가물막이와 가배수관의 규모와 일반적인 상황에서의 수두차를 고려해 볼 때 orifice계수가 0.6으로 수렴하는 범위에 속한다고 보아 0.6을 적용하였다. 또한 유목, 검불 및 부유물질 등으로 인해 배수관의 통수효율이 상당히 저하될 수 있는 점을 고려하여 통수단면적은 실제 관의

단면적의 70%로 가정하였다. 가배수관을 통한 방류는 홍수에 의해 수위가 상승하여 수문조작 시점인 EL. 226.0m에 도달하여야 시작된다. 하지만 유입수량이 감소함에 따라 가물막이 상류측 수위가 내려가서 수문조작시점 이하로 떨어지면 굳이 수문을 닫아 저류할 필요가 없이 상류쪽으로 역배수가 가능하도록 더 이상 물의 흐름이 없을 때까지 수문을 열어 두게 된다. 이렇게 함으로써 가물막이와 본 댐사이에 저장된 비상저류량 중 양수해야 하는 물의 양을 최소화할 수 있을 것이다. 이렇게 홍수가 지나가면 다시 가물막이 상류로 역배수할 수 있도록 가배수관의 경사는 수평경사로 한다.

가물막이의 설계홍수량을 초과하는 유입량에 직면하면 가물막이를 월류하게 되는데 가물막이에는 따로 여수로가 있는 것은 아니고 가물막이의 전폭(245m)에 걸쳐서 동시에 월류하게 된다. 이 때의 월류유량은 weir공식에 의해 계산이 가능하며 weir계수는 USBR(1987)의 방법에 따라 1.5로 적용하였다.

8. 가물막이 가배수관 최적설계도구

본 프로그램은 가배수관의 설계제원을 결정하는데 그 동안 적절한 방법이 제시된 바가 없어서 실무에서 혼란을 겪고 있는 점을 개선하기 위하여 개인용 컴퓨터로도 쉽게 설계작업을 실시할 수 있는 최적설계기법을 개발하기에 이르렀다. 또한 본 설계도구는 강력한 최적화기법인 HS를 도입함으로써 기존의 시행착오식 설계과정을 개선하여 설계작업의 효율성을 극대화하였을 뿐만 아니라 공사비 및 운영비도 최소로 할 수 있는 최적설계가 가능하도록 구성하였다.

그림 6과 그림 7은 본 연구에서 개발된 가배수관 최적설계도구의 실행화면을 보여주는 것으로서 각각 입력자료 구성화면과 설계결과 출력화면을 보여주고 있다.

구분	단위	최적값	기준값	최대값	최소값
최적화하는 설계변수 총개수	개	16			
최적설계도구 실행시간 (min)	분	2000			
가배수관의 수평배관폭 (mm)	mm	203	210.0	200	200
가배수관의 수평배관깊이 (mm)	mm	225	210.0	200	200
가배수관의 수직배관깊이 (mm)	mm	0.1	0.0	0.0	0.0
가배수관의 최소 굴기각도	도	2	0.0	0.0	0.0
가배수관의 최대 굴기각도	도	285	0.0	0.0	0.0
가배수관의 굴기각도 간격	도	0.5	0.0	0.0	0.0
펌프 PUMP의 최소 굴기각도	도	0.0	0.0	0.0	0.0
펌프 PUMP의 최대 굴기각도	도	35	0.0	0.0	0.0
가배수관의 굴기각도 간격	도	0.5	0.0	0.0	0.0
공시간당 물수량 (L/min)	L/min	10	10	10	10
최초차분 물수량 (L/min)	L/min	20	20	20	20

그림 6. 가배수관 최적설계도구의 입력자료 구성화면

9. 적용결과

각 관경 및 펌프의 종류에 따른 토공비, 관의 재료비 및 접합비, 양정율, 운영비, 설치비 등은 2000년도 단가를 기준으로 하여 물가자료(한국물가조사기관협의회, 2000)와 건설표준품셈(전인식, 1999)을 참고로 하여 구하였다. 이렇게 구해진 입력자료를 이용해 최적설계도구를 실행하였는데 HS의 HMCR과 PAR을 바꿔가면서 각 경우마다 20,000회 연산하였고 그 중 최적의 결과를 표 1과 같이 채택하였다. 최종적으로 적용한 입력자료는 그림 4에 표시된 바와 같다.

본 문제에서 사용한 HM의 크기는 200이었는데 HM의 크기를 비교적 크게 잡은 것은 5개의 결정변수 중 2개가 200개를 넘는 경우의 수를 가지기 때문이다. 목적함수는 총비용을 최소화 하는 것과 순

표 1. 최적화 연구결과와 기존설계의 비교

	가배수관				펌프		예상효과 및 비용			
	지름 d (m)	개수 Np (개)	표고 EL. (m)	길이 L ₂ (m)	종류 (마력)	대수 Npp (대)	월류순간 비상저류지 수심 Dp (m)	총비용 (천원)	순 공사비 (천원)	순 공사비 절감율 (%)
기준안	1.0	2	210.0	125.0			17.4		38,666.8	0
결과1안	0.5	2	203.2	152.5	20	7	6.05	28,635.9	14,914.3	61.43
결과2안	0.6	2	222.4	75.0			5.01		9,642.8	75.06

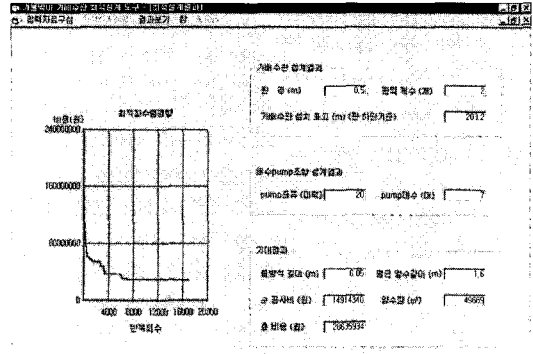


그림 7. 가배수관 최적설계도구의 설계결과 출력화면

공사비만을 최소로 하는 경우로 나누어 따로 수행하였다. 이렇게 따로 수행한 이유는 기존안의 경우 펌프에 대한 설계가 되어 있지 않은 관계로 직접 비교를 위해서는 펌핑에 관한 비용을 제외한 순 공사비만 따질 필요가 있기 때문이다.

총비용을 최소화 하는 경우의 결과는 표 1의 결과 1안으로 주어져 있으며 이 때 순 공사비는 결과 2안보다 더 크게 나오는 것을 알 수 있다. 이 결과는 HMCR이 0.8, PAR은 0.0일 때 얻어진 값이며, 순 공사비만 따진 경우에 얻어진 결과 2안은 HMCR이 0.6, PAR은 0.0일 때 얻어진 값이다.

여기서 기존안을 포함한 3개 안을 비교해보면 월류 전의 수심은 기존설계와 본 연구결과에서 구한 대안이 모두 물방석효과를 얻는데 필요한 5m 이상을 확보하고 있음을 알 수 있다. 또한 3개 안 모두 물방석효과를 얻는데 필요한 수심 이외에도 문제에

서 제기된 모든 제약조건을 만족시키고 있으며 이는 목적함수 값인 총비용 또는 순 공사비에 별점이 전혀 포함되지 않은 것을 보아도 알 수 있다.

그러나 순 공사비만을 갖고 비교해 볼 때 결과1안과 2안이 모두 기존설계의 1/3 ~ 1/4정도로 줄어들어서 획기적인 비용절감이 가능함을 알 수 있다. 경우의 수가 매우 많은 문제이므로 20,000번의 연산으로 구한 대안들이 전체 최적해라고 할 수는 없지만 설계차원에서는 이런 정도의 연산만으로도 매우 만족스러운 결과를 보여준다고 할 수 있다. 그림 8은 결과1안을 도출할 때 연산회수에 대한 목적함수 값의 변화를 나타낸 것으로 20,000번의 연산만으로도 거의 전체 최적해에 수렴하여 더 이상의 발전이 거의 이루어지지 않음을 보여주고 있다.

결과1안과 2안을 비교해 보면 관경은 2안의 것이 더 크지만 설치표고가 더 높음으로 인해서 가배수관의 길이가 짧은 이유로 순 공사비는 1안의 경우보다 더 적게 나오고 있음을 알 수 있다. 목적함수를 순 공사비로 택한 2안의 경우는 월류하는 순간의 비상저류지의 수심을 최소수심만 만족하는 조건 하에서 가배수관의 규모를 최대한 적게 하는 것이 순 공사비를 줄이는 방법이므로 DP값이 최소 요구 조건인 5m에 거의 근사한 값으로 결정됨을 알 수 있다. 하지만 목적함수가 총비용인 1안의 경우는 DP값이 2안의 경우와는 사뭇 다르게 결정된 대신 가배수관의 표고는 최소치인 203.0m에 가깝게 결정되었다. 가배수관의 표고가 낮아수록 길이가 늘어나 순 공사비는 증가하지만 대신 자연배수가 안되고 남아서 양수해야 하는 수량이 줄어들므로 인해 펌프의 설치 및 운영비용이 줄어들기 때문에 총비용을 이루는 이 두 가지 항목은 상반되는 증감모습을 보여주고 있다. 따라서 1안에서 결정된 값은 이러한 상반되는 비용의 증감을 적정선에서 결정한 결과로 볼 수 있으며 만약 전가료를 포함한 펌프의 운영비, 또는 설치비의 단가가 증가한다면 총비용에서 펌프

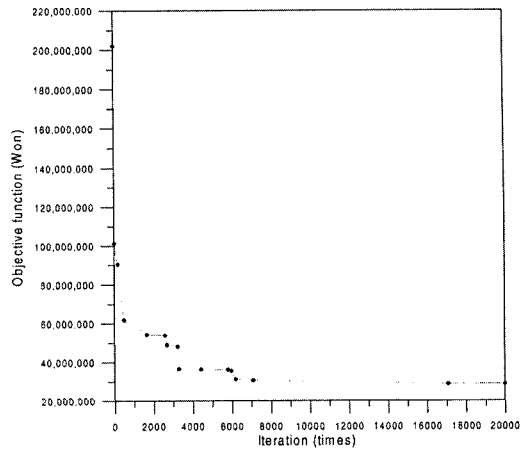


그림 8. 연산회수에 따른 최적해로의 수렴경향

에 드는 비용의 비중이 커지므로 양수해야 하는 양을 줄이기 위해 점점 가배수관의 표고가 낮은 쪽으로 수렴할 것이고 가배수관의 시공비용에 관련되는 단가가 늘어난다면 총비용에서 순 공사비의 비중이 커질 것이므로 점점 최소의 DP값을 만족시키는 쪽으로 최적해가 결정될 것이다.

가물막이에서 또 한가지 생각해 볼 수 있는 것은 비상저류량을 최대한 자연배수하기 위하여 가물막이의 최하단에 역배수용 관을 추가로 설치하는 방안이다. 본 문제의 경우 가배수터널 상류단의 표고를 고려하면 추가로 가배수관을 설치할 수 있는 최저표고는 203.0m이고 이 추가되는 관에는 수문을 달아서 역배수할 경우에만 열어서 배수함으로써 펌프에 드는 비용을 아낄 수도 있을 것이다. 그러나 가물막이의 아래쪽으로 갈수록 두께가 매우 커져서 이렇게 관을 추가하는 데에도 상당한 비용이 소요된다. 수계산해 본 결과 최소의 관경인 0.25m짜리 관을 1개만 추가하더라도 400여 만원이 소요되며 이렇게 관을 설치한다고 하더라도 추가되는 관의 표고 이하(200.0m ~ 203.0m) 부분은 어차피 펌프를 이용하여 양수해야만 한다.

결과1안의 경우 가배수관의 설치표고가 거의 최하단인 203.2m이므로 이렇게 관을 추가하는 경우

의 이익이 거의 없을 것이지만 결과2안의 경우는 가배수관의 설치표고가 높아서 관을 추가하는 것도 고려할 수 있을 것이다. 결과2안의 순공사비에 개략적인 역배수용 관의 추가비용을 더해보면 결과1안의 총비용과 비슷할 것으로 보인다. 그러나 본 연구에서는 공사기간 중 홍수가 1회 발생함을 기준으로 하였으나 이 이상으로 자주 홍수가 발생할 경우는 역배수용 관을 설치하는 것이 더 저렴한 결과를 얻을 수도 있고 비상저류량의 배수시간을 줄일 수도 있어서 공사에 유리한 측면도 있으므로 여러 가지 현장의 여건에 따라 의사결정이 바뀔 수도 있다고 본다. 본 연구에서는 그와 같은 의사결정까지는 직접 관여하지 않고 이 정도로 의사결정에 필요한 충분한 자료를 제공하는 것으로 결과수행을 마치도록 하였다.

아울러 본 적용예에서는 HS가 아직까지 새로운 algorithm이므로 HMCR과 PAR의 변화에 따른 algorithm자체의 어떠한 특성변화를 찾으려고 시도하였으나 본 문제의 경우 Kim, J. H. 등(2001) 및 Paik, K. R. (2001)의 경우와는 달리 HMCR과 PAR의 변화와 HS의 성능사이의 특정한 관계는 찾을 수 없었다. 이러한 사실은 앞으로도 이 새로운 algorithm의 성격에 대한 더 많은 연구가 이루어질 여지가 있음을 말해주고 있다.

10. 결론

가물막이의 가배수관을 설계하는 문제에 있어서 종래에는 수리학적 제약조건만을 만족시키는 데에도 많은 시간과 노력을 소모하여 시행착오적으로 설계하던 방법을 사용하여 왔다. 본 적용예에서 개발한 설계기법을 사용하면 수리학적 제약조건도 만족시키면서 동시에 비용의 개념도 도입하여 경제적인 설계를 할 수 있음을 알 수 있다. 본 연구의 결과로 얻어지는 공사비용의 절감비율은 획기적이라고 할 수 있으나, 그 실제 절감비(3,000만원 이하)는 공사현장에서는 큰 비중을 차지한다 할 수 없으므로 본 적용예의 더 큰 의의는 댐 설계 실무자들이 실무에 바로 사용할 수 있는 설계도구를 개발하였다는데 있다고 사료된다. 또한 본 적용예를 통해서 최적화기법도 실무자들이 더 적극적으로 활용할 수 있음을 보여주었으며 이로 인해 더 많은 설계분야에서 최적화기법을 도입하여 합리적인 설계가 가능하도록 하는 계기가 되었으면 한다.

〈참고문헌〉

1. 건설교통부, 한국수자원공사 (1997) 영월다목적댐건설사업 실시설계보고서(부록).
2. 김여근, 윤복식, 이상복 (1997) 메타휴리스틱. 영지문화사.
3. 윤태훈 (1997) 응용수문학. 청문각
4. 전인식 (1999) 건설표준품셈. 건설연구사.
5. 한국물가조사기관협의회 (2000) 물가자료.
6. Brater, E. F., King, H. W., Lindell, J. E., and Wei, C. Y. (1996) Handbook of hydraulics. McGraw-Hill. pp. 4.1-4.13.
7. Geem, Zong-Woo (2000) Optimal Design of Water Distribution Networks using Harmony Search. Ph.D. dissertation, Korea University.
8. Geem, Zong-Woo, Kim, Joong-Hoon, and Loganathan, G. V. (2001) A new heuristic optimization algorithm : Harmony Search. SIMULATION, Vol. 76, No. 2.
9. Kim, Joong-Hoon, Geem, Zong-Woo, and Eung-Seok Kim (2001) Parameter estimation of the nonlinear muskingum model using harmony search. accepted to be published in J. of AWRA, Vol. 37.
10. Lasdon, L. S. and Mantell, J. (1978) A GRG algorithm for econometric control problems. Annals of Economics and Social Management, Vol. 6, No. 5.
11. Paik, Kyung-Rock (2001) Development of Seasonal Tank Model and Comparison of Optimization Algorithms for Parameter Calibration. Master's thesis, Korea University.
12. USBR (1987) Design of Small Dams. A Water Resources Technical Publication. pp. 365-376.
13. USGS (1995) User's guide to the culvert analysis program.