

# 유전자 알고리즘을 이용한 서변 가압장 수리구조물의 최적설계

## Optimal Design of Hydraulic Device at the Seobyun Pumping Station using Genetic Algorithm

정 봉 석\* / 김 주 인\* / 김 상 현\*\* / 박 남 식\*\*\*

Jung, Bong Seog / Kim, Chu In / Kim, Sang Hyun / Park, Nam Sik

### Abstract

In order to minimize the impact of water hammer in a pipeline, a determination of optimum position of hydraulic structures with best operation of pressure relief valve was explored at the Seobyun pumping station. Method of characteristics is used to simulate a surge impact originating from abrupt stop of pumping operation in a pipeline. Genetic algorithm shows a powerful capability in searching a global solution, especially for a nonlinear problem. The application results suggests that the maximum positive pressure can be relaxed by decreasing the opening time of pressure relief valve, meanwhile the maximum negative pressure can be relaxed by increasing the opening time of pressure relief valve. This study shows that the integration of a genetic algorithm with a transient analysis technique such as method of characteristic can improve the design of hydraulic structure in a pipe network.

*Keywords* : water hammer, genetic algorithms, method of characteristic, optimal design, hydraulic structure

### 요 지

본 연구에서는 대구광역시에 위치하고 있는 서변 펌프가압장에서 발생하는 수격압을 최소화하기 위해 사용되는 감압밸브와 공기밸브의 최적 위치결정과 감압밸브의 최적 열림정도를 도모하였다. 가압장에서 발생하는 펌프의 급정지에 기인한 수격현상은 특성선방법을 이용하여 모의를 하였다. 최적화 방법은 강력한 탐색능력을 가지고 있으며 특히 비선형 문제를 해결하는데 탁월한 성능을 가지고 있는 유전자 알고리즘을 이용하여 실시하였다. 유전자 알고리즘의 계산결과는 감압밸브의 열림시간을 적게 할수록 최고 압력수두의 완화에 효과적이고, 열림시간을 크게 할수록 최대부압의 완화에 효과적임을 알 수 있었다. 본 연구는 특성선방법을 기반으로 하는 관망부속물들의 해석이 유전자 알고리즘과 결합되어 관로내 관로부속물의 최적설계에 도움을 줄 수 있음을 보여준다.

**핵심용어** : 수격압, 유전자 알고리즘, 특성선방법, 최적설계, 관로부속물

† 부산대학교 환경공학과 석사과정

Graduate Student, Dept. of Environmental Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

\* 부산대학교 환경공학과 조교수

Assistant Professor, Dept. of Environmental Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

\*\* 동아대학교 토목공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Dong-a University, Pusan, 604-714, Korea

## 1. 서 론

천이현상시 관내에서 발생하는 수격압은 정상류에서 고려되는 압력에 비해 상당히 큰 압력을 발생하여 큰 피해를 발생할 우려가 있다. 그러한 수격압의 피해를 감소하기 위해 관로내 감압밸브, 공기밸브, 조압수조 같은 수리구조물이 설치된다. 그러나 상당수 경우, 관로내 부속물의 설계를 위한 의사결정과정에서 부정류의 해석과 함께 검토되어야 할 관로부속물의 배치양상이나 운전조건 등이 충분히 검토되지 못하고 있는 실정이다. 이는 비교적 난해한 부정류 해석과 더불어 실시되어야 할 각종 관로 부속물의 위치나 운전조건에 관한 분석의 양이 파다하고 관련 요소에 의한 상호 간섭으로 비선형성이 높기 때문이다.

관련 연구로는 Karney 등(1992)은 감압밸브, 조압수조, 유량조절밸브같은 수리구조물의 효율적인 표현을 위해 간단한 통합알고리즘을 제시하였고, Lee 등(1996)은 공기실(air chamber)의 수치모형을 제시하여 수격압의 완화 정도에 관해 연구를 하였으며, McInnis 등(1995)은 관로내의 수격압현상을 현장 실험하였다. Karney 등(1997)은 밸브나 오리피스를 효과적으로 표현할 수 있는 경계조건을 제시하였다. 김상현 등(1999)은 가압장의 펌프정지에 의한 수격현상을 특성선 방법을 이용하여 각 밸브의 유무에 따라 수격압의 형상을 수치모의를 하였다. 한편, 박영수 등(1999)은 유전자 알고리즘을 이용하여 관망내의 관경과 펌프용량을 최적화하여 관망시스템의 최적비용 설계를 하였다. Simpson 등(1999)은 관망에서의 누수탐사나 마찰계수측정을 유전자 알고리즘을 이용하여 구하고 각각 민감도 분석을 실시하였다. Castillo 등(1998)은 유전자 알고리즘을 이용하여 가장 경제적인 관망최적화를 연구하였다.

본 연구에서는 대구광역시에 위치하는 서면 펌프가압장에서 펌프정지로 인해 발생하는 수격압을 최소화하기 위해 설치된 감압밸브와 공기밸브의 위치, 그리고 감압밸브의 열림시간과 닫힘시간의 최적화를 유전자 알고리즘으로 시도하였다. 유전자 알고리즘은 매우 강력한 탐색능력을 가지고 있으며 특히 비선형 문제를 해결하는데 탁월한 성능을 가진다고 알려져 있다. 두 밸브의 위치와 감압밸브의 열림정도를 유전자 알고리즘의 매개변수로 설정하여 최소의 수격압의 도출을 유도하였다.

## 2. 관망내의 부정류 해석

일반적인 관로내의 흐름해석을 위한 미분방정식으로 나타나는 운동량방정식과 질량보존 방정식의 형태는 다음과 같다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + RQQ = 0 \quad (2)$$

여기서,  $R$ 는  $f/(2DA)$ ,  $H$ 는 piezometric 수두,  $Q$ 는 유량,  $D$ 는 내부관경,  $f$ 는 Darcy-Weisbach 마찰계수,  $a$ 는 충격파속도,  $g$ 는 중력가속도,  $A$ 는 관로단면적이다.

식 (1)과 식 (2)를 조합하여 유량  $Q$  와 수두  $H$ 로 이루어진 특성방정식을 얻을 수 있는데 이 식은 천이 상태에서 효율적인 수치 해석적 해를 구하는데 이용된다

$$\frac{dQ}{dt} \pm \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + RQQ = 0 \quad (3)$$

위의 식은  $dx/dt = \pm a$  로 정의되는  $C^+$  와  $C^-$  특성선(characteristic line)상에서만 유효하게 적용된다. 이러한 특성관계를 만족하기 위해서는  $\Delta x = \pm a\Delta t$ 의 관계가 성립되어야 한다. 일단 초기조건과 시간 - 공간 축이 결정되어지면 식 (3)은 그림 1에서 보여주는 AP 와 BP 선을 따라 적분되어진다.

그림 1에서 미지점 P에 대한 2개의 방정식은 다음과 같다.

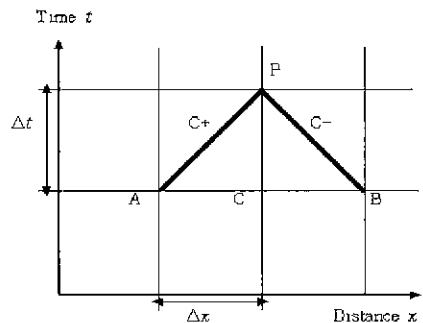


그림 1. 관망을 해석하는 축

$$Q_p = C_p - C_a H_p \quad (4)$$

$$Q_p = C_n + C_a H_p \quad (5)$$

여기서 적분상수는 다음과 같다.

$$C_p = Q_A + C_a H_A - RQ_A |Q_A| \Delta t \quad (6)$$

$$C_n = Q_B - C_a H_B - RQ_B |Q_B| \Delta t \quad (7)$$

$$C_a = \frac{gA}{a} \quad (8)$$

여기서, 수두와 유량의 아래첨자는 그 지점의 수두와 유량을 의미한다(즉 P는  $t + \Delta t$ 의 지점, A와 B는  $t$ 의 지점). 특성값( $t + \Delta t$  지점값)을 구하기 위해서는 초기조건 A점과 B점이 알려져야 하는데, 임의의 관망에 위의 관련 식을 적용하는 과정은 정류상태의 마지막 값들을 부정류상태의 초기값으로 취함으로써 부정류상태의 계산이 진행될 수 있다. 따라서 관망내부의 P점에서의 수두는 식 (4)와 식 (5)로부터 다음과 같이 나타난다.

$$H_p = \frac{C_p - C_n}{2C_a} \quad (9)$$

### 3. 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm:GA)

유전자 알고리즘은 진화론의 적자생존과 자연도태의 유전학에 근거한 적응탐색기법으로, 여러 가지 어려운 조합문제에 대한 효율적인 탐색을 수행하고 최적해에 근사한 해를 구할 수 있는 방법이다. 세대(generation)를 거듭함에 따라 최적의 해에 수렴하고, 전체대의 생존자(우수개체)로부터 새로운 개체들의 집합이 형성된다. 유전자 알고리즘은 비선형, 불연속 매개변수, 복잡한 목적함수의 전역역에 대해 최적해를 찾아간다. 본 연구에서는 Carroll(1996)이 제시한 유전자알고리즘을 이용하여 실행하였다.

#### 3.1 유전 연산자(Genetic Operator)

유전연산자란 다음 세 가지 기능에 의해 진화와 도태의 과정을 반복하는데, 첫째는 재생(Reproduction)으로써 잘 적응한 해들은 살아남고, 잘 적응하지 못한

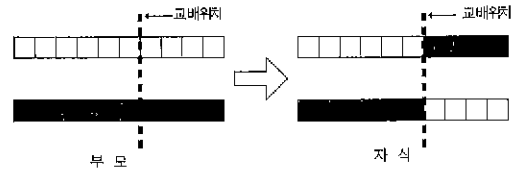


그림 2. 교배의 모식도

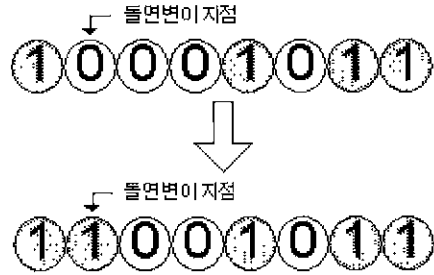


그림 3. 돌연변이의 모식도

해들은 도태되도록 유도하는 조작법이다. 본 연구에서는 개체군 중에서 일정한 개수의 개체를 임의로 선택하여 그 중에 최고의 적합도를 가지는 개체를 다음 세대에 남기는 토너먼트 선택법(tournament selection)을 이용하였다(Carroll, 1996). 둘째는 교배(Crossover)로써 그림 2와 같이 두 부모해의 유전 정보를 임의의 위치에서 부분적으로 교환함으로써 새로운 자손해를 생성한다. 본 연구에서는 각 유전자가 독립적으로 교환할 수 있는 균등교배(uniform crossover)를 이용하였다(Carroll, 1996). 셋째는 돌연변이(Mutation)로써 그림 3과 같이 부모해로부터 자손해로 전달되는 특정한 유전정보에 대하여 무작위적인 변형을 시도함으로써 전체 해 집단에서 배제된 새로운 개체를 발생시키거나 진화 과정에서 상실한 특정 유전정보의 재현을 시도하는 조작방법이다.

#### 3.2 적합도 함수(Fitness Function)

개체가 환경에 적응하여 도태되지 않고 살아남을 수 있는 능력을 적합도 함수 즉, 목적함수라고 한다. 목적함수 즉, 최적화 하고자 하는 함수는 각 개체의 적합도를 평가하는 기반이 된다. 다시 말해서 본 연구에서는 관로내에서의 발생하는 최고수두를 최소화시키는 것이 목적이므로, 목적함수값이 작을수록 적합도가 좋은 것이다.

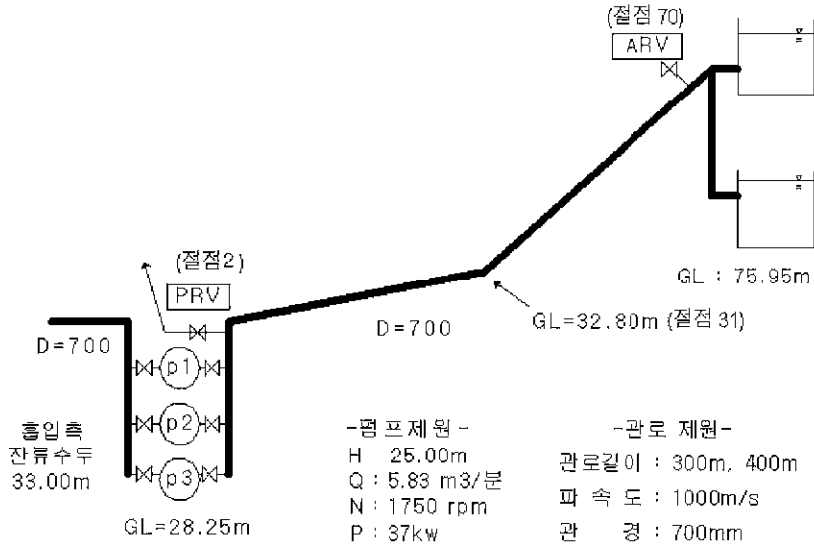


그림 4. 서변 펌프가압장

### 3.3 유전자 알고리즘의 적용과정

유전자 알고리즘의 공학문제에 대한 적용은 다음과 같은 과정에 따라 진행된다(Simpson와 Goldberg, 1994). 첫째, 최적화할 결정변수를 나타내는 염색체를 기호화한다. 둘째, 초기 집단을 발생시킨다. 셋째, 각각의 염색체를 분석해서, 거동을 평가하고 기록한다. 넷째, 염색체의 적합도를 계산한다. 다섯째, 유전연산자를 활용하여 새로운 세대를 발생시킨다. 여섯째, 연속적으로 세대를 만들어간다. 집단발생은 통상적으로 균등분포 난수발생기에 의해 만들어지고, 집단의 크기는 일정 크기 이상이 해의 정확도를 향상시키지 못하는 크기를 시행착오 법을 통해 결정한다.

## 4. 유전자 알고리즘을 이용한 펌프가압장의 최적설계와 고찰

### 4.1 서변 펌프 가압장

그림 4는 대구광역시에 위치하고 있는 서변 가압장의 수리학적 구조물의 배치양상을 보여주고 있다. 700m의 관로길이, 관경 700mm의 관망과 3기의 병렬펌프 체크밸브, 감압밸브, 공기밸브로 구성된 수리구조물은 전형적인 펌프 가압장의 형태를 가지고 있다. 이 가압장은 초기 흡입측 잔류압력수두 33.00m와 펌프지점의 지반고 28.25m에 펌프에 의한 수두상승 25m을

더한 86.25m의 동수 경사를 가지고 상류부 저수조로 흐름이 형성되도록 설계되었다. 정류상태에서, 정전 등의 사고로 인한 펌프정지에 의한 수두감소(86.25m → 61.25m)는 흐름의 역류를 발생시키는데 역류로부터 펌프를 보호하기 위해 펌프 앞에 체크 밸브가 설치되어 있고, 발생될 수격작용을 완화하기 위해 펌프 앞 10m지점에 감압밸브(pressure relief valve)가 설치되어있고, 저수조 앞 10m지점에 부압을 방지하기 위해 공기밸브가 설치되어 있다. 각각의 밸브 거동에 관련하여, 체크밸브의 경우에는 유량의 방향이 변하는 순간에서 valve가 닫힌다고 설정했고, 감압 밸브의 경우 밸브가 있는 지점의 압력수두가 60m를 넘는 경우, 밸브가 3초 동안 열리고 60초 동안 닫힌다고 설정했다. 공기 밸브는 저수조 쪽에 생기는 부압의 발생을 방지하기 위해 밸브설치 지점에서 부압발생시, 공기밸브의 열림으로 부압이 없어지도록 설정했다. 특성선 방법을 적용하기 위해 총 전장 700m의 길이를 10m간격으로 분리해 절점 1부터 71까지 설정되어 있다. 즉 0m지점은 절점 1, 10m지점은 절점 2이 된다 감압밸브는 Karney 등(1992)이 제시한 수치모형을 이용하였고, 공기밸브는 부압발생시 관로의 압력수두가 0이 되도록 경계조건을 형성하였다.

그림 5는 절점 2에서 감압밸브와 공기밸브의 유무에 따른 수두의 변화를 보여주고 있다. 절점 2에서 수격압발생으로 인한 감압밸브의 열림으로 물이 외부로 유

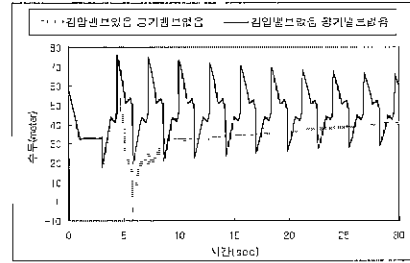
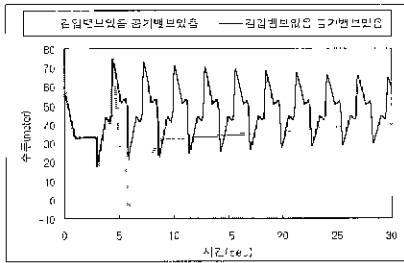


그림 5. 절점 2에서의 밸브 유무에 따른 수위의 변화

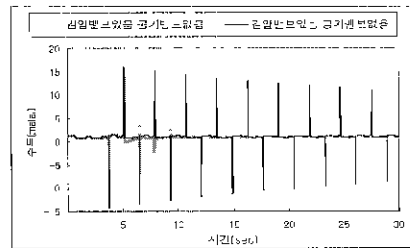
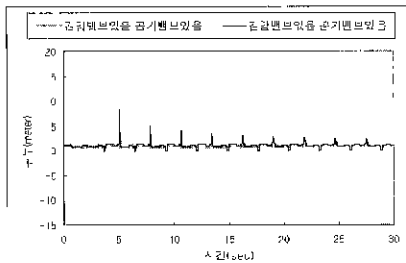


그림 6. 절점 70에서의 밸브 유무에 따른 수위의 변화

출되어 수격압이 급격하게 감소되는 것을 볼 수 있다. 절점 70에 위치한 공기밸브의 작동 역시 약간의 수격압의 감소를 보여주고 있다. 그림 6는 절점 70에서 감압밸브와 공기밸브의 유무에 따른 수위의 변화를 보여주고 있다. 절점 70에서는 공기밸브의 작동으로 인한 부압이 많이 감소함을 알 수 있다.

표 1은 감압밸브와 공기밸브의 유무에 따른 관로 모 든영역에서 최대 압력수두와 최대 부압과 발생시간, 발생절점에 대해 나타내었다. 감압밸브나 공기밸브는 수격압이 발생한 이후에 작동하므로 최대 압력수두나 최대 부압은 크게 감소를 시키지 못하지만 그 이후 수격압을 크게 완화시키는 것을 볼 수 있다.

표 1. 서변가압장의 밸브의 유무에 의한 최대 압력수두와 최대 부압

밸브 유무		최고 압력수두	최대 부압
감압밸브 없음 공기밸브 없음	발생시간	4.41초	3.7초
	발생절점	1	70
	수두	76.68244m	-14.29922m
감압밸브 없음 공기밸브 있음	발생시간	4.47초	3.69초
	발생절점	1	69
	수두	74.97053m	-13.51537m
감압밸브 있음 공기밸브 없음	발생시간	4.41초	3.70초
	발생절점	1	70
	수두	76.68244m	-14.29922m
감압밸브 있음 공기밸브 있음	발생시간	4.470초	3.69초
	발생절점	1	69
	수두	72.31395m	-13.51537m

**표 2. 유전자 알고리즘에 사용되는 중요 연산자**

유전 연산자	유전 연산자 값
염색체의 길이	30
개체집단의 크기	50
최대 발생 회수(Generation)	100
교배율	0.5
돌연변이율	0.02

**4.2 유전자 알고리즘을 이용한 최적화**

관망의 최적설계를 위하여 유전자 알고리즘을 적용하였다. 유전자 알고리즘은 수치원 공학의 다양한 분야에 적용되는데, 특히 관로설계, 계획, 운영, 수리구조물의 규모 같은 관망에서 많은 적용예(박영수 등, 1999; Castillo 등, 1998; Simpson 등, 1999)를 볼 수 있다. 본 모형에서는 감압밸브와 공기밸브의 위치, 그리고 감압밸브의 열림시간을 변수화하여 최적화를 실행한다. 표 2에서는 유전자 알고리즘에서 중요하게 사용되는 매개변수인 염색체의 길이와 개체집단의 크기, 최대 발생횟수, 교배율, 그리고 돌연변이율의 확률값의 범위를 나타내었다. 염색체의 길이와 개체집단의 크기, 최대 발생횟수는 시행착오를 거쳐 표 2의 수치 이상의 값은 해의 수렴에 도움을 주지 못함을 알 수 있었고, 교배율과 돌연변이율은 문헌에서 제시된 값(David, 1997; Simpson 등, 1994; Castillo 등, 1998)을 이용하였다.

목적함수는 유전자 집합에서 각각의 유전자가 문제의 환경에 얼마나 잘 적응하는가를 나타내는 척도로서 적합도(Fitness)를 산정한다. 서번가압장의 최적화에 사용되어지는 목적함수의 형태는 다음과 같다.

$$\text{Minimize}(\alpha \times \text{Max}(\text{Head}(i, j)) + (1 - \alpha) \times |\text{Min}(\text{Head}(i, j))|) \quad (10)$$

여기서,  $i$ =서번가압장의 10m간격으로 처음 0m부터 마지막 700m까지의 절점이고,  $j$ =서번가압장 수치모의 시 0.01초 간격으로 처음 0초부터 마지막 30초까지의 값이고,  $\alpha$ 는 0에서 1까지의 값으로 가중치를 나타낸다. Head는 동수경사에서 위치수두를 제외한 압력수두만을 고려하여 적용하였다.  $\alpha=1$ 인 경우는 30초 동안 발생되어질 수 있는 최대 압력수두의 최소화를 나타내는 목적함수 이고,  $\alpha=0$ 인 경우는 30초 동안 발생되어

질 수 있는 최대 부압의 절대치의 최소화를 나타내는 목적함수이다.  $\alpha$ 가 0에서 1사이의 값은 최대 압력수두와 최대 부압의 기중치를 고려한 목적함수이다. 유전자 알고리즘은 감압밸브의 위치, 공기밸브의 위치, 감압밸브의 열림시간, 감압밸브의 닫힘시간을 매개변수로 하고, 관내에서 발생하는 최대압력수두 또는 최대 부압을 가장 최소화하는 매개변수의 값을 결정한다.

**4.3 계산결과 및 분석**

매개변수의 포괄적인 영향을 체계적으로 고찰하기 위해 계산을 3단계로 분류하여 진행시켰다. 첫째는 운전조건의 변화를 고정시키고 밸브의 위치변화가 수직현상에 줄 수 있는 영향평가를 위해 매개변수를 각 밸브의 위치로 설정하였다. 둘째는 고정된 밸브위치들에 운전조건을 변화시킴으로 최적운전조건을 도출하고자 매개변수를 감압밸브의 열림시간과 닫힘시간만을 고려하였다. 셋째는 분석가능한 모든 매개변수를 최적화함으로써 설계 시부터 반영할 수 있는 최적밸브위치와 운전조건의 도출을 도모하였다. 본 연구에서는 Window98의 운영체제와 중앙처리장치로 PentiumII 350MHz을 사용하였고 각 경우마다 약 14분 46초의 같은 수행시간을 보여주었다.

**4.3.1 매개변수를 감압밸브의 위치, 공기밸브의 위치로 한 경우**

감압밸브의 열림시간은 3초, 감압밸브의 닫힘시간은 60초로하고 매개변수로 감압밸브의 위치와 공기밸브의 위치로만 하여 수치모의 하였다. 표 3은 두 밸브의 위치에 의한 최적화 결과를 나타낸다.

$\alpha=1$ 인 경우는 최대 압력수두만 고려된 경우로 감압밸브의 위치를 절점 2에 설치하고 공기밸브를 절점 65에 설치하면 최소의 최대 압력수두 68.84282m을 얻을

**표 3. 감압밸브와 공기밸브의 위치를 매개변수화한 최적화 결과**

가중치	감압밸브 위치	공기밸브 위치	Fitness
$\alpha=1.0$	2	65	68.84282m
$\alpha=0.8$	2	65	56.98782m
$\alpha=0.6$	2	65	45.13283m
$\alpha=0.4$	2	65	33.27783m
$\alpha=0.2$	2	64	21.41801m
$\alpha=0.0$	관계없음	64	9.52254m

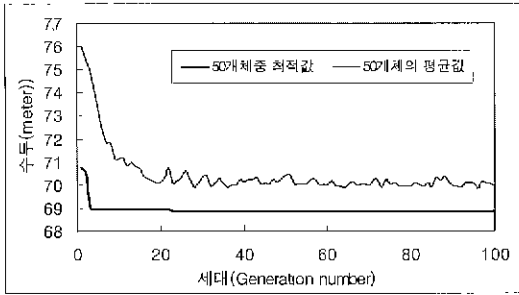


그림 7. 최소의 최대 압력수두를 찾기 위한 진화과정

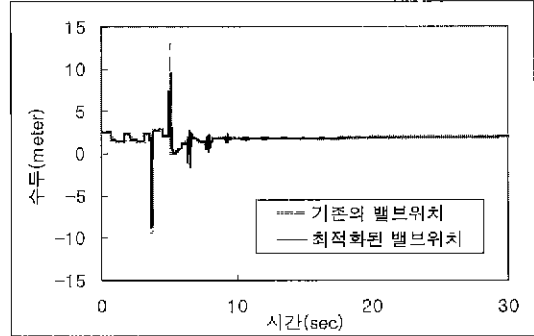


그림 9. 절점 69에서의 압력수두

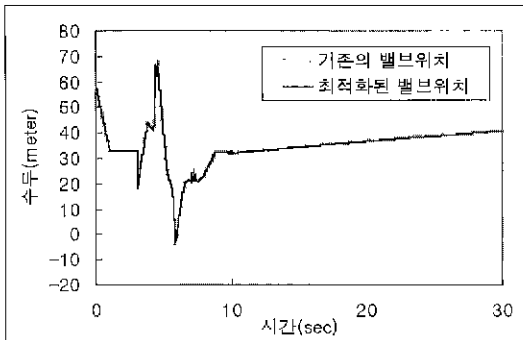


그림 8. 절점 1에서의 압력수두

수 있다. 이 값은 초기 감압밸브를 절점 2에 설치하고, 공기밸브를 절점 70에 설치한 최대압력수두 72.31395 m보다 약 3.5m 정도의 최대 수격압을 완화시킨 것이다. 그림 7은  $\alpha=1$ 인 경우, 각 개체가 세대를 거듭함에 따라 진화하는 양상을 보여주는 것으로써, 50개체 중 최적값 즉 최소의 최대수격압과 50개체의 평균값을 보여주고 있다. 초기 임의의 값에서 출발한 개체의 최적값은 세대가 지나감에 따라 최적값인 약 69m에 수렴함을 볼 수 있고, 50개체의 평균값은 돌연변이에 의한 외동을 볼 수 있다. 그림 8은 초기 감압밸브를 절점 2에 설치하고, 공기밸브를 절점 70에 설정했을 때 최고 압력수두가 발생했던 절점 1에서, 초기 설정치와 최적화 결과인 감압밸브를 절점 2에 설치하고 공기밸브를 절점 65에 설치한 값을 비교한 것이다. 초기 설정치에 비해 최적화 시킨 것이 완화된 최고 압력수두를 보여주고 있다.

$\alpha=0.0$ 인 경우는 최대 부압만 고려된 경우로 공기밸브의 위치를 절점 64에 설치하면 최소의 최대 부압인 9.52254m을 얻을 수 있다. 이 경우 감압밸브는 부압

의 감압에 효과를 미치지 못함을 알 수 있다. 이 값은 초기 감압밸브를 절점 2에 설치하고, 공기밸브를 절점 70에 설치한 최대부압 13.51537m보다 약 4m 정도의 수격압을 완화시킨 것이다. 그림 9는 초기 설정치에서 최고 부압이 발생했던 절점 69에서, 초기 설정치와 최적화 결과인 공기밸브를 절점 64에 설치한 값을 비교한 것이다. 초기 설정치에 비해 완화된 최대 부압을 볼 수 있다.

$\alpha$ 가 0.0에서 1.0사이의 값은 최대 압력수두와 최대 부압의 목적함수에 가중치  $\alpha$ 를 고려하여 최적의 감압 밸브 위치와 공기밸브 위치를 산출하고 그에 따른 목적함수값(Fitness)을 나타내었다

#### 4.3.2 매개변수를 감압밸브의 열림시간, 닫힘시간으로 한 경우

감압밸브의 위치는 절점 2, 공기밸브의 위치는 절점 70으로 설정하고, 감압밸브의 열림시간은 0.01초에서 10초사이로, 감압밸브의 닫힘시간은 0.01초에서 100초사이의 범위를 주어 수치 모의하였다. 표 4는 감압밸브의 열림시간과 닫힘시간을 매개변수 화한 최적화 결

표 4. 감압밸브의 열림시간과 닫힘시간을 매개변수 화한 최적화 결과

가중치	열림시간	닫힘시간	Fitness
$\alpha=1.0$	0.46초 이내	5.2초 이후	68.44115m
$\alpha=0.8$	1.81초	4.91초 이후	59.62360m
$\alpha=0.6$	1.81초	4.78초 이후	48.09663m
$\alpha=0.4$	1.81초	4.60초 이후	36.56965m
$\alpha=0.2$	1.81초	4.60초 이후	25.04251m
$\alpha=0.0$	1.81초 이후	2.73초 이후	13.51537m

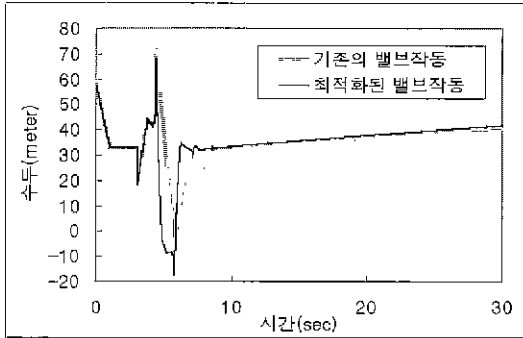


그림 10. 절점 1에서의 압력수두

과이다.

$\alpha=1$ 인 경우는 최대 압력수두만을 고려한 경우로, 감압밸브의 열림시간은 0.46초 이내로 하고, 닫힘시간은 5.2초 이후로 하면 최소의 최대 압력수두 68.44115m을 얻을 수 있다. 이 값은 초기 감압밸브의 열림시간을 3초로 하고, 닫힘시간을 60초로 설정한 최대 압력수두 72.31395m보다 약 4m정도의 최대수격압을 완화시킨 것이다. 그림 10은 초기 감압밸브의 닫힘시간을 3초로 설정하고, 열림시간을 60초로 설정했을 때 최고 압력수두가 발생했던 절점 1에서, 초기설정치와 최적화결과인 감압밸브의 열림시간을 0.46초와 닫힘시간을 60초로 설정한 값을 비교 한 것이다. 초기 설정치에 비해 최적화 시킨 것이 완료된 최고 압력수두를 보여주고 있다.

$\alpha=0.0$ 인 경우는 최대 부압만 고려된 경우로 감압밸브의 열림시간을 1.81초 이후로 하고 닫힘시간을 2.73초 이후로 하면 최소의 최대 부압인 13.51537m을 얻을 수 있다. 이 값은 초기 열림시간을 3초로 하고, 닫힘시간을 60초로 한 값과 같다 즉 열림시간을 3초로

하고 닫힘시간을 60초로 한 것이 최소의 최대부압을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그림 11는 초기 설정치에서 최고 부압이 발생했던 절점 69에서, 초기설정치와 최적화 결과인 감압밸브의 열림시간을 2초로 하고 닫힘시간을 10초로 설정한 값을 비교 한 것이다. 최대 부압은 초기 설정치와 같음을 알 수가 있는데, 이는 초기 설정치가 최적조건을 만족하는 값이므로 같은 최대 부압이 나타났다

$\alpha$ 가 0.0에서 1.0사이의 값은 최대 압력수두와 최대 부압의 목적함수에 가중치  $\alpha$ 을 고려하여 최적의 감압밸브 열림시간과 닫힘시간을 산출하고 그에 따른 목적함수값(Fitness)을 나타내었다

#### 4.3.3 매개변수를 감압밸브와 공기밸브의 위치, 감압밸브의 열림시간, 닫힘시간을 고려한 경우

앞에서 고려되어진 매개변수를 동시에 고려하고 감압밸브 열림시간을 0.01초에서 10초로 설정하고, 닫힘시간을 0.01초에서 100초로 설정하여 수치모의를 하였다.

최대 압력수두만을 고려하는  $\alpha=1.0$ 인 경우는 감압밸브의 위치를 절점 5와 공기밸브의 위치를 절점 67, 그리고 감압밸브의 닫힘시간에 상관없이 열림시간을 0.06초 이내로 하면 최소의 최대 압력수두 65.59637m을 얻을 수 있다. 이 값은 초기 감압밸브 위치를 절점 2에, 공기밸브의 위치를 절점 70에 하고, 감압밸브의 열림시간을 3초, 닫힘시간을 60초에 한 설정치의 최대 압력수두 72.31395m, 감압밸브와 공기밸브의 위치만을 매개변수 화하여 얻은 최소의 최대 압력수두 68.84282m, 감압밸브의 열림시간과 닫힘시간만을 매개변수 화하여 얻은 최소의 최대 압력수두 68.44115m

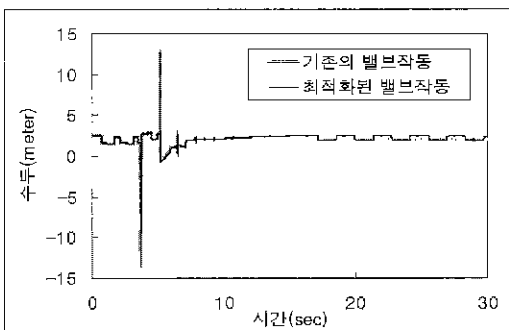


그림 11. 절점 69에서의 압력수두

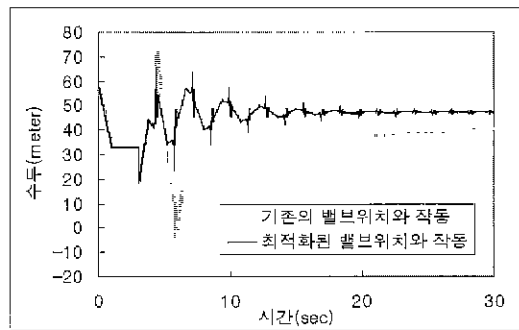


그림 12. 절점 1에서의 압력수두



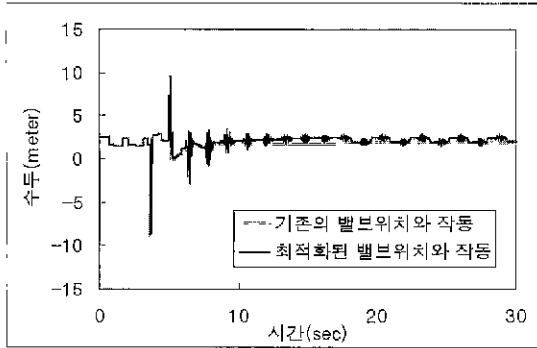


그림 13. 절점 69에서의 압력수두

보다 수직압이 완화된 값이다. 그림 12는 초기 감압밸브의 위치를 절점 2, 공기밸브의 위치를 절점 70, 감압밸브의 닫힘시간을 3초, 열림시간을 60초로 설정했을 때 최고 압력수두가 발생했던 절점 1에서, 초기설정치와 최적화결과인 감압밸브의 열림시간을 0.06초로 설정하고 감압밸브의 위치를 절점 5, 공기밸브의 위치를 절점 67에 설정한 값을 비교 한 것이다. 초기 설정치에 비해 최적화 시킨 것이 완화된 최고 압력수두를 보여주고 있다.

$\alpha=0.0$ 인 경우는 공기밸브의 위치를 절점 64에 설정하고, 감압밸브의 열림시간을 2.5초이후로 하고 닫힘시간을 3.7초 이후로 하면 감압밸브의 위치에 관계없이 최소의 최대 부압 9.52254m을 얻을 수 있음을 알 수 있다 이 값은 감압밸브와 공기밸브의 위치만을 고려한 최적화 결과와 같은 결과로 초기 설정의 열림시간 3초와 닫힘시간 60초가 최적조건에 만족하므로 이와 같은 결과가 나오게 되었다. 그림 13은 초기 설정치에서 최고 부압이 발생했던 절점 69에서, 초기설정치와 최적화 결과인 감압밸브의 열림시간을 3초, 닫힘시간을 10초로 설정하고 공기밸브의 위치를 절점 64로

설정한 값을 비교 한 것이다. 초기 설정치에 비해 완화된 최대 부압을 볼 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 대구시에 위치한 서변가압장에서 펌프정지에 의한 수격현상을 감압밸브와 공기밸브의 위치, 감압밸브의 열림시간, 닫힘시간에 따라 생성되는 최대압력수두나 최대부압을 최소화시킬 수 있는 각 밸브의 위치와 열림정도 그리고 그때의 압력수두를 산출하였다. 최적화기법으로 유전자 알고리즘을 도입하여 기존의 최적화방법이나 경험적이고 시행착오적인 설계 방법보다 일관성있고 효율적인 설계를 위한 최적설계에 관하여 연구하였다. 목적함수로 최소의 최대압력수두와 최소의 최대부압을 고려하였고, 가중치를 적용하여 두 목적을 동시에 고려하였다. 감압밸브의 위치는 하류부 펌프쪽에, 공기밸브의 위치는 상류부 저수지쪽에 설치하는 것이 효과적이고, 감압밸브의 열림시간을 적게 할수록 최고 압력수두의 완화에 효과적이고, 열림시간을 크게 할수록 최대 부압의 완화에 효과적임을 알 수가 있었다. 가압장내의 최대 부압 완화에 공기밸브가 큰 작용을 하는 것을 알 수가 있었고, 최대 압력수두 완화에 감압밸브가 큰 작용을 하는 것을 알 수가 있었다. 본 연구에서 제시된 가압장의 경우는 일반 복합관방의 경우에서 발생되어지는 수격압을 감소하기 위해 설치하는 수리구조물들의 위치결정과 운영 조건에 관해서도 적용하여 관망 내 수리구조물들의 최적화 설계에 효과적으로 쓰일 수 있을 것으로 판단된다.

## 6. 감사의 글

본 논문은 한국과학기술원 지정 환경기술·산업개발연구센터(RRC-IETI)의 지원(과제번호 : 99-10-02-99-A-3)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

표 5. 감압밸브와 공기밸브의 위치, 그리고 감압밸브의 여닫힘시간을 매개변수 화한 최적화 결과

가중치	감압밸브위치	공기밸브위치	열림시간	닫힘시간	Fitness
$\alpha=1.0$	5	67	0.06초 이내	관계없음	65.59637m
$\alpha=0.8$	2	64	2.71초-4.13초	5.25초 이후	57.10442m
$\alpha=0.6$	3	66	2.07초	5.41초 이후	45.41276m
$\alpha=0.4$	3	64	2.87초-4.13초	5.25초 이후	33.31348m
$\alpha=0.2$	2,3	64	2.55초-4.13초	5.65초 이후	21.41801m
$\alpha=0.0$	관계없음	64	2.5초 이후	3.7초 이후	9.52254m

## 참 고 문 헌

- 김상현, 박남식, 정봉석, 이동훈 (1999). “서변가압장에서 수격현상 완화에 대한 연구.” 대한상하수도학회논문집, 대한상수도학회, 제13권, 제2호, pp. 95~104.
- 박영수, 김종우, 김태균, 김중훈 (1999). “유전자 알고리즘을 이용한 관망시스템의 최적비용 설계.” 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제32권, 제1호, pp. 71-81.
- Castillo, L., and Gonzalez, A. (1998). “Distribution network optimization: Finding the most economic solution by using genetic algorithm.” *European Journal of Operational research*, Vol. 108, pp. 527~537.
- Carroll, D. L. (1996) “Genetic Algorithms and Optimizing Chemical Oxygen-Iodine Lasers.” *Developments in Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 18, pp.411~424.
- David. E.G. (1997). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. The University of Alabama.
- Lee. J.S., Yoon. Y.N., and Kim, J.H. (1996). “An analysis of attenuation effect of pressure head using an air chamber” *Korean Journal of Hydrosiences*, Vol. 7, pp. 77~86.
- Karney. B. and McInnis, D. (1992). “Efficient calculation of transient flow in single pipe network.” *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, Vol. 118, No. 7, pp. 1014~1030.
- Karney, B. and McInnis, D. (1997). “Efficient valve representation in fixed-grid characteristics method.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 8, pp. 709~718.
- McInnis, D. and Karney. B. (1995). “Transients in distribution networks : field tests and demands modASCE, Vol. 121, No. 3, pp. 218~231.
- Roberson, J., Cassidy J., and Chaudhry M.H. (1993). *Hydraulic engineering*. Boston Graphics, Inc.
- Simpson, A.R., and Goldberg, D.E. (1994) “Pipeline Optimization via Genetic Algorithms : from Theory to Practice” *Proceedings 2nd International Conference on Water Pipeline Systems*, Edinburgh, Scotland, May, pp. 309~320.
- Simpson, A.R., Vitkovsky, J.P., and Lambert, M.F. (1999). “Leak detection and calibration of water distribution systems using transients and genetic algorithms.” *Water Distribution Systems Conference*, Division of Water Resources Planning and Management, American Society of Civil Engineers, Tempe, Arizona, 7~9 June.
- Wylie, E.B., and Streeter, V.L. (1982). *Fluid transients*. FEB Press, Ann Arbor, Mich.

(논문번호:99-087/접수:1999.11.01/심사완료:2000.02.24)