



상수관망에서 서지 릴리프밸브의 최적 설계 방법론

Methodology for optimum design of surge relief valve in water distribution system

김현준·허지성·김건지·백다원·김상현*

Hyunjun Kim·Jisung Hur·Geonji Kim·Dawon Baek·Sanghyun Kim*

부산대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Pusan National University

ABSTRACT

Surge pressure is created by rapid change of flow rate due to operation of hydraulic component or accident of pipeline. Proper control of surge pressure in distribution system is important because it can damage pipeline and may have the potential to degrade water quality by pipe leakage due to surge pressure. Surge relief valve(SRV) is one of the most widely used devices and it is important to determine proper parameters for SRV's installation and operation. In this research, determining optimum parameters affecting performance of the SRV were investigated. We proposed the methodology for finding combination of parameters for best performance of the SRV. Therefore, the objective function for evaluate fitness of candidate parameters and surge pressure simulation software was developed to validate proposed parameters for SRV. The developed software was integrated into genetic algorithm(GA) to find best combination of parameters.

Key words: Genetic Algorithm, Optimization, Surge Relief Valve, Transient Flow Analysis, Water Hammer

주제어: 유전자알고리즘, 최적화, 서지릴리프밸브, 부정류 해석, 수격압

1. 서 론

현대사회에서는 상수도 유지관리는 수요자의 삶의 질 및 보건 문제에 밀접한 영향을 끼치는 중요한 요소이고, 이에 대한 사회적인 관심 역시 증대되고 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위해 수도 공급자는 관망 유지 관리상의 정보를 정확히 수집 해석하여 이를 통해 운영의 최적화를 하거나 문제점이 나타난다면 이를 해결하려는 노력이 요구 되고 있다. 상수 관망의 수격현상은 다양한 수리학적 조작에 의해 관로의 유속이 급격하게 변함에 따라 관로에 발생하는 압력변

화를 의미한다. 이러한 수격현상은 관로 및 관로부속물에 손상에 영향을 끼쳐 상수관망의 유수율에 치명적인 영향을 끼칠 수 있는 요소이다. 노후화된 상수도관이 전체에 30%에 달하는 우리나라의 경우 수격압에 의한 영향은 상수관망의 파괴로 이루어지기 용이하며 이는 싱크홀과 같은 2차적인 문제로 이어질 수 있어 그 중요성이 더하다고 할 수 있다.

이러한 수격현상을 줄이기 위한 방법은 다양하게 있지만 효과와 경제성을 이유로 서지 릴리프 밸브(Surge Relief Valve)는 가장 많이 쓰이는 방법중 하나이다(Chaudhry, 1987; Ruus and Karney, 1997). 서지 릴리프 밸브는 평소에는 닫혀 있다가 설정압 이상의 압력이 감지되었을 때 자동으로 밸브를 열어 초과 압력을 해소 시켜주는 원리로 작동된다(Kim et al., 2006;

Received 30 November 2016, revised 16 January 2017, accepted 24 January 2017

*Corresponding author: Sanghyun Kim (E-mail: kimsangh@pusan.ac.kr)

pp. 001-006

pp. 007-012

pp. 013-019

pp. 021-028

pp. 029-037

pp. 039-050

pp. 051-062

pp. 063-072

pp. 073-081

pp. 083-091

pp. 093-101

pp. 103-114

Yoon and Choi, 2003). 서지 릴리프 밸브의 성능에 영향을 주는 요소는 밸브의 설치위치, 사이즈, 설정압(Set Pressure), 열림시간(Opening Time), 닫힘시간(Closing Time) 등 매우 다양하다. Zhang et al.(2008)은 서지 릴리프밸브의 성능에 영향을 주는 영향 인자들에 대한 민감도 분석(Sensitivity Analysis)을 수행하였다. 저자는 연구를 통해서 과도하게 높거나 또는 낮은 수준의 설정압을 밸브에 설정할 경우 관망의 수격압을 적정하게 제어 할 수 없고, 너무 빠르거나 느리게 설정한 밸브 조작 속도는 반대로 수격압을 잘 제어할 수 없을 뿐만 아니라 밸브 조작에 의해 추가적 수격압 발생을 일으킬 수 있다는 결과를 얻었다. 하지만 해당 연구가 간단한 시스템을 대상으로만 수행되어, 복잡관망에서 밸브 설계에 대한 지침으로 활용하기 위한 적정성에는 의문이 남아있다. 이를 보완하기 위해서는 어떤 시스템에도 적용하여 최적의 설계 요소를 도출해낼 수 있는 방법론을 만들어 기술자의 경험적 결정을 도울 수 있는 방법론을 개발해야 한다.

이 논문에서는 최적화 알고리즘을 이용하여 상수관망에서의 서지릴리프 밸브에 대한 설계 고려 요소를 도출하는 방법론을 제안한다. 이를 위해 수격압 모의 프로그램과 알고리즘(Genetic Algorithm)을 결합하는 소프트웨어를 제작하고, 이를 간단한 관망을 대상에 적용해 해당 시스템의 수격압을 제어하는 서지 릴리프 밸브의 영향인자들에 대한 최적화를 수행하고 이를 검증 및 분석하였다. 특히 영향인자들의 경우 기존 연구에서 최적화를 수행하지 않은 변수들을 선정함으로써 해당 인자들의 최적값에 의한 수격압 저감 효과를 확인한다.

2. 연구방법

2.1 관로의 수격압 모의 방법

관망에서의 수격압을 모의하기 위해 가장 널리 사용되는 방법은 연속방정식과 운동량방정식으로 이루어진 지배방정식을 이용하여 수치적으로 관망의 압력 자료를 풀어내는 방법이다(Wylie and Streeter, 1993). 식 (1)과 식(2)는 각각 연속방정식과 운동량 방정식이다.

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (2)$$

여기서, h는 압력 수두, Q는 유량, c는 압력파속도, g는 중력 가속도, A는 관의 단면적, D는 관경, f는 Darcy-Weisbach 마찰계수를 나타낸다. 위와 같은 두 개의 편미분 방정식을 선형 결합하여 식 (3)과 같은 상미분 방정식의 형태로 나타낼 수 있다. 식(3)을 풀이기 위해 dx/dt의 부호에 따라 양의 특성선(C+), 음의 특성선(C-)으로 나타내서 두 특성선(Characteristic Line)을 연결하여 하나의 지점에 대한 압력 수두(h)와 유량(Q)을 해석하는 특성선 방법(Method of Characteristic)을 이용한다.

$$\frac{dQ}{dt} \pm \frac{gA}{c} \frac{dh}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (3)$$

Fig. 1은 특성선(Characteristic Line)의 개념도이다. Fig. 1에서와 같이 현재 시간의 현재 위치(C)의 앞뒤에 위치한 격자(A,B)의 압력 수두와 유량 정보를 이용하여 한 시간간격(Δt) 이후 현재위치(P)의 압력 수두와 유량을 구할 수 있다.

특성선 C+, C-에 따른 압력 수두 특성식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} C+ : H_P &= C_P - B_P Q_P \\ C- : H_P &= C_M + B_M Q_P \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, HP, QP는 각각 점 P에서의 압력 수두와 유량을 나타내고, 적분상수 CP, BP, CM, BM은 식 (5)와 같다.

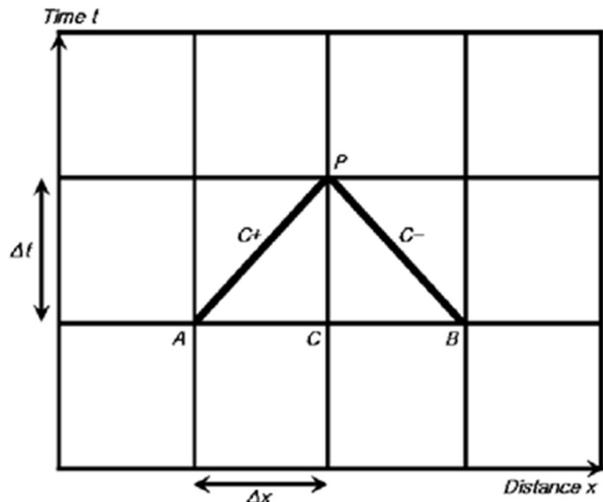


Fig. 1. Schematic diagram of characteristic line.



$$\begin{aligned} C_P &= H_A + BQ_A, & B_P &= B + R|Q_A| \\ C_M &= H_B - BQ_B, & B_P &= B + R|Q_B| \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, HA, HB는 각각 점 A, B에서의 압력 수두를 QA, QB는 각각 점 A, B에서의 유량을 나타내고, B와 R은 각각 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} B &= \frac{a}{gA} \\ R &= \frac{f \Delta x}{2gDA^2} \end{aligned} \quad (6)$$

2.2. 서지릴리프 밸브의 모의

일반적으로 수격압 모의에 활용되는 경계조건들은 이미 알려진 유량-수두의 관계를 특성선 방정식에 적용하는 방법으로 관망에서 연산시킨다(Wylie and Streeter, 1993). 서지릴리프밸브는 관망내부 밸브를 수정하여 표현할 수 있다. 서지릴리프밸브에서의 수두를 기준으로 밸브의 열림계수를 조정하는 방식으로 나타내면 되는데 이때 서지릴리프 밸브의 작동을 결정하는 알고리즘은 Fig. 2과 같다. 우선 서지릴리프 밸브의 수두를

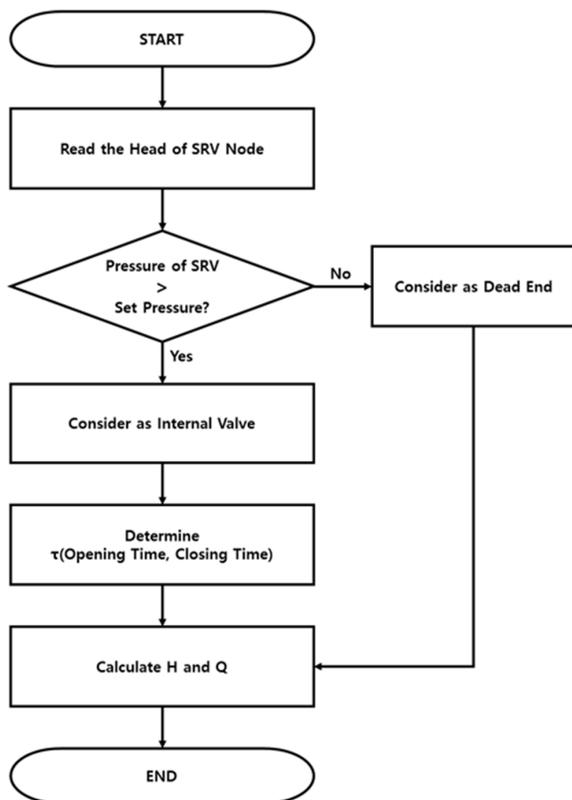


Fig. 2. Flowchart for surge relief valve calculation.

읽고 해당수두를 설정압과 비교하여 밸브의 작동 여부에 대한 판단을 한다. 이때 밸브의 수두가 설정압을 넘어가지 않는다면 밸브를 사수부(Dead-end)로 처리하여 해당 수두와 유량을 연산해주면 된다. 만약 수두가 설정압 이상이라면 서지릴리프 밸브를 작동 시키기 시작하는데 이때 열림시간, 닫힘시간을 기준으로 열림계수(τ)를 산정해주는 과정을 선행해야 한다. 설정값 이상의 수두가 감지될 때는 내부밸브(Internal Valve)와 같이 고려해주며 되므로 연산된 열림계수를 바탕으로 해당 지점의 수두와 유량을 연산시켜주면 된다.

2.3 최적화 알고리즘을 이용한 서지릴리프밸브의 최적화

서지릴리프밸브의 성능을 최적화한다는 것은 관망에서 서지가 발생했을 때에 서지릴리프밸브를 통해 가장 높은 저감효과를 가진다는 것이다. 서지릴리프 밸브에 영향을 주는 요소는 밸브의 크기(Size), 설정압(Set Pressure), 열림시간(Opening Time), 닫힘시간(Closing Time)등을 들 수 있다(Zhang et al., 2008). 이러한 영향을 최적화 한다는 것은 특정 상황에서 관망에 발생하는 수격압의 크기를 가장 낮게 만드는 영향인자의 조합을 찾는 과정으로 해석할 수 있다. 수격압의 크기는 수격압을 통해서 발생하는 최대 수격압(Max(h))와 최소 수격압(min(h))의 차이를 통해 산정할 수 있는데 이를 수식적으로 표현하면 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} f_{obs} &= \min \{ \text{Max} [h(k_v, SP, OT, CT)] \\ &\quad - \min [h(k_v, SP, OT, CT)] \} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 k_v 는 서지릴리프밸브의 밸브계수, SP는 설정압, OP는 열림시간, CT는 닫힘시간을 의미한다.

위와 같은 비선형적 수식에 대한 최적 영향인자 도출은 기존의 선형적 문제를 해결을 위한 선형 알고리즘을 통해서 어렵다. 이와 같이 복잡한 비선형적 방정식을 해결하기 위한 방법 중 가장 널리 사용되는 방법은 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)이다 (Goldberg, 1989). 이는 적자생존의 자연의 법칙을 흉내 내어 만들어진 알고리즘으로 형질에 대한 정보를 가지고 있는 유전자를 이진코드로 표현하여, 좋은 결과를 생산하는 유전자를 선택하고 이를 교배해서 다음세대를 만들며 동시에 지역해에 빠지지 않도록 돌연 변이를 연속적으로 생산하는 방식으로 세대를 거듭하며 최적의 해

pp. 001-006

pp. 007-012

pp. 013-019

pp. 021-028

pp. 029-037

pp. 039-050

pp. 051-062

pp. 063-072

pp. 073-081

pp. 083-091

pp. 093-101

pp. 103-114

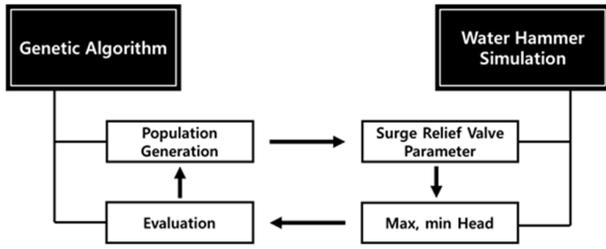


Fig. 3. Schematic of parameter optimization.

조합을 만들어내는 알고리즘이다(Goldberg, 1989). 본 연구에서는 수격압 모의 소프트웨어를 유전자 알고리즘과 결합하여 식 (7)에 대한 최적 매개변수 조합을 도출하도록 프로그램을 구성했다. 이렇게 설계한 서지 릴리프 밸브 최적 설계방법에 대한 개념도는 Fig. 3과 같다.

3. 결과 및 고찰

서지릴리프 밸브의 최적화를 검증하기 위해서 가상의 관망을 구성하고 이를 대상으로 하여 서지릴리프 밸브의 최적화를 수행하였다. Fig. 4는 최적화를 수행한 가상의 관망의 모식도이다.

대상 관망은 저수지-관-밸브-저수지 의 일반적인 관망의 구조를 가지고 있다. 상류측 저수지는 80m의 수두를, 하류측 저수지는 60m의 수두로 상류 측으로부터 하류 측으로 물이 흘러가는 구조이다. 관망에 설치된 관은 관경 = 1m, 길이 = 250m, 마찰계수 = 0.012이다. 정상상태에서 관을 따라 이동하는 유량은 3.49m³/s이다. 하류측 저수지 앞에는 유량 조절 밸브가 조절되어 있고, 이 밸브는 최초 열려 있는 상태에서 5.00초 동안 닫혀 5.00초 후에는 완폐된다. Fig. 5은 밸브가 닫히기 시작할 때부터의 하류측 밸브 전단에서의 압력 변화이다. 0초부터 5초동안의 밸브가 닫히면서 밸브 전단의 압력이 서서히 상승하고 완전히 밸브가 닫힌

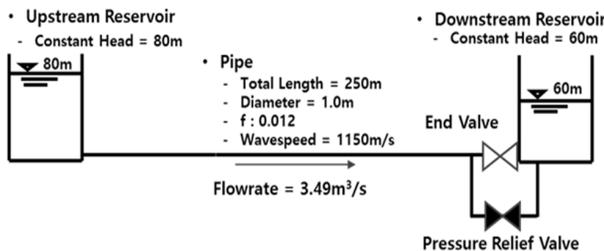


Fig. 4. Schematic diagram of experimental system.

5.00초의 압력 수두는 151.93m로 최대의 수두가 발생하였고, 5.50초의 압력 수두는 8.12m의 최소 수두가 발생하여서, 최대와 최소 수두의 차이는 143.82m이다.

앞서 기술한 바와 같이 관망에서 발생하는 수격압을 제어하기 위해 하류측 밸브의 전단부로부터 1m 앞 부분에 밸브를 설치하는 시나리오를 바탕으로 설정압, 열림시간, 닫힘시간에 대한 최적화를 수행하였다. Table 1은 최적화를 수행한 입력인자들이다. 식 (7)을 목적함수로 하여 밸브 폐쇄가 시작한 이후 20초간의 최대와 최소의 수두 차이가 최소가 되게 하는 서지릴리프밸브의 매개변수를 탐색하였다.

Fig. 6은 최적화 과정에서 세대의 진행에 따른 목적함수의 평균값과 최소값의 변화를 나타내었다. 첫 번째 세대에서의 목적함수의 평균값과 최소값은 54.312m과 34.123m를 나타내고, 이는 세대가 진행됨에 따라 값이 감소하는 추세를 보여 최적화가 진행되고 있음을 확인할 수 있다. 총 20세대가 진행된 후 평균값은 20.294m,

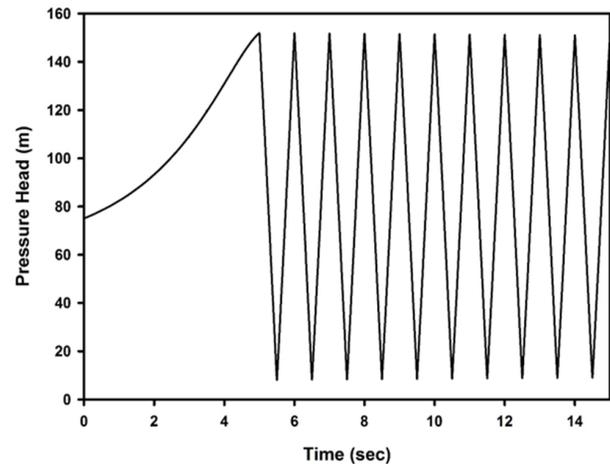


Fig. 5. Temporal variation of pressure head after valve closure.

Table 1. Input parameters for optimization

Parameter		Value	
Generation		20	
Population		50	
Number of Parameters		3	
Range	Parameter	min	Max
	Valve Coefficient	1,000	100,000
	Set Pressure	80	140
	Open Time	0.001	10
	Closure Time	0.001	10



최소값은 20.225m로 수렴했고, 최소값을 나타낸 매개 변수의 값은 밸브계수=15197.24m^{2.5}/sec, 설정압=80m, 열림시간=1.01초, 닫힘시간 = 9.98초. Fig. 7은 최적화를 통해 구해낸 최적 매개변수를 이용하여 최적의 서지릴리프밸브를 설치했을 때 하류측 밸브에서의 압력 변화이다.

Fig. 7에서 보이는 것과 같이 조작밸브의 폐쇄로 인해 압력이 상승하고, 압력이 설정압인 80m가 될때까지 서지릴리프밸브는 작동하지 않고 닫힌상태로 유지가 된다. 밸브가 닫히기 시작한 이후 0.715초에 서지릴리프 밸브에서 감지한 압력이 80m가 넘어섰고, 이때부터 밸브가 열리기 시작했다. 조절밸브의 폐쇄가 진행되는 동안 계속 압력이 높아지던 Fig. 5에서의 서지릴리프 밸브 미설치 시스템과 달리 최적화된 서지릴리프밸브의

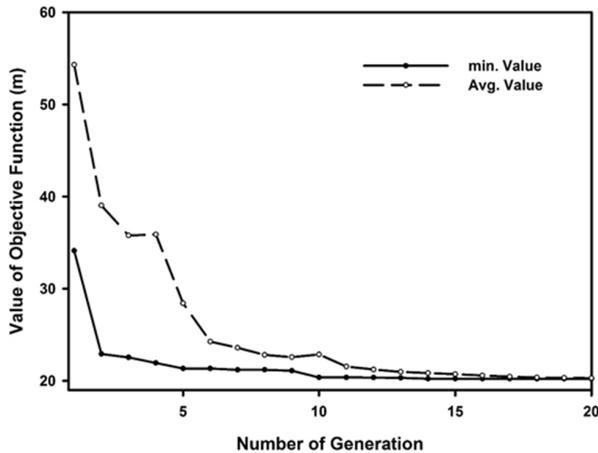


Fig. 6. Evolution procedure for SRV.

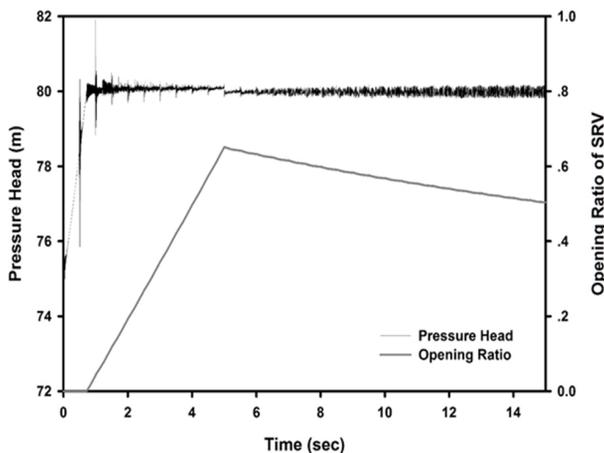


Fig. 7. Temporal variation of pressure head with optimum installation of SRV.

설치로 인해 Fig. 7과 같이 설정압의 주변압이 유지되었고, 이 과정에서 최대 압력인 81.91m의 수두가 발생했다. 5.00초 이후 조절밸브의 조작이 중단되고, 밸브는 완폐된 이후에는 압력이 줄어들기 시작함에 따라 서지릴리프 밸브는 서서히 닫힘을 확인 할 수 있다. 최적화의 결과 서지릴리프밸브를 설치하지 않은 시스템의 최대압력 값과는 70.02m, 최소값과는 64.23m의 수두 차이가 발생했다. 본 연구에서 모의된 시스템의 경우는 해당되지 않지만, 최소값의 경우 증기압 이하로 감소할 경우 발생하는 공동 현상에 따른 문제 및 최대압 및 최소압 발생에 따른 상수 관망의 파괴를 생각하면 서지릴리프최적화의 필요성이 매우 중요해 보인다. 기존 Jung et al.,(2000) 및 Jung and Karney(2006)에서 포함시키지 않았던 서지릴리프밸브의 영향인자인 설정압과 밸브 계수에 대한 영향 역시 본 연구를 통해서 확인할 수 있었다. 설정압의 경우 낮아수록 즉각적인 반응이 가능하여 전체의 수격압 제어를 신속하게 할 수 있었지만, 전체의 유량 및 수압 조절을 고려하여, 적정의 범위를 설정하여 최적 계수를 도출할 필요가 있다.

결론

본 연구에서는 상수관망에서 수격압 제어에 효과적으로 적용 가능한 서지릴리프 밸브의 설치 시 수격압 제어 효율을 최대화하는 서지릴리프밸브의 설계인자들을 도출하기 위한 방법론을 제안했다. 이를 위해서 우선 서지릴리프밸브의 성능에 영향을 주는 영향인자들에 대한 논의가 이루어졌고, 밸브계수, 설정압, 열림 시간, 닫힘시간을 독립변수로하는 최적화의 목적함수를 구성하였다. 최적화를 수행하기에 앞서 수격압을 모의하기 위해 연속방정식과 운동량 방정식으로 이루어진 지배방정식을 수치적으로 해석하였고, 경계 조건으로 서지릴리프밸브를 수치화 하여 추가하였다. 유전자 알고리즘을 수격압 모의의 수치코드와 결합하여 목적함수의 최적화를 수행하였고, 그 결과 세대수의 반복에 따라 최적값으로 수렴함을 확인했다. 최적화의 결과 도출한 최적 매개변수의 값을 이용하여 수격압의 최대값이 46% 저감되는것을 확인했다. 기존 유사한 연구에서 활용된 영향인자들 외에도 본 연구에서는 설정압과 밸브계수를 포함하여 최적화를 수행했는데, 이들 역시 중요한 영향인자임을 확인했다.

pp. 001-006

pp. 007-012

pp. 013-019

pp. 021-028

pp. 029-037

pp. 039-050

pp. 051-062

pp. 063-072

pp. 073-081

pp. 083-091

pp. 093-101

pp. 103-114

본 제안 방법론에 대한 검증을 위해서는 서지릴리프 밸브가 좀 더 복잡한 관망을 대상으로 설치되거나, 펌프가 설치된 관망을 대상으로 했을 때의 적용성을 확인해볼 필요가 있고, 서지릴리프밸브의 형상(Geometry)에 관련한 인자들에 대한 영향의 관계식을 정립하고 이를 최적화 하는 연구를 통해 최적화를 더 구체화할 필요가 있다.

기호설명

SRV = Surge Relief Valve
 GA = Genetic Algorithm
 h = Pressure head
 Q = Flow rate
 c = Wave speed
 g = Gravitational Acceleration
 A = Cross-sectional area
 D = Diameter
 f = Darcy-Weisbach Friction factor
 k_v = Valve Coefficient
 SP = Set Pressure
 OP = Opening Time
 CT = Closing Time

사 사

본 연구는 환경부 “글로벌 환경기술개발사업(RE 201606133)”으로 지원 받은 과제입니다.

References

- Chaudhry, M.H., 1987. Applied Hydraulic Transients, Van Nostrand Reinhold, Newyork..
- Goldberg, D. E. 1989. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, Addison-Wesley, Reading, Mass.
- Jung, B.S., Kim, J.I., Kim, S.H., Park, N.S., 2000, Optimal Design of Hydraulic Device at the Seobyun Pumping Station using Genetic Algorithm, J. Korea Water Resour. Assoc. 33(3), 289-298.
- Jung, B.S., Karney, B.W., 2006. Hydraulic Optimization of Transient Protection Devices Using GA and PSO Approaches. J. Water Res. PL. ASCE Journal, 142(1), 44-52.
- Karney, B.W., Simpson, A.R., 2007. In-line Check Valves for Water Hammer Control. Jour. Hydr. Res., IAHR, 45:4:547.
- Kim, S.G., Kim, Y.H., Kim, K.P., Koo, J.Y., 2006. Leakage Control and Application Using the Pressure Reducing Valve. J. Korean Soc. Water Wastewater, 20(2), 197-206.
- Ruus, E., Karney, B.W., 1997. Applied Hydraulic Transients, Ruus Consulting Ltd., Ken French, British Columbia, Canada.
- Wylie, E.B., Streeter V.L. and Suo, L., 1993. Fluid Transients in Systems. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J.
- Yoon, J.H., Choi, D.Y., 2003. Design Procedures of Water-hammer Prevention in the Water Transmission System with Pressure Reducing Valves. J. Korean Soc. Water Wastewater, 17(3), 361-371.
- Zhang, K.Q., Karney, B.W., McPherson, D.L., 2008, Pressure-relief Valve Selection and Transient Pressure Control. J. Am. Water Works Ass., 100(8), 62-69.