



다목적 유전자 알고리즘을 이용한 상수관망에서 스프링 서지 완화 밸브의 최적화

Optimum design of direct spring loaded pressure relief valve in water distribution system using multi-objective genetic algorithm

김현준·백다원·김상현*

Hyunjun Kim·Dawon Baek·Sanghyun Kim*

부산대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Pusan National University

pp. 077-087

pp. 089-096

pp. 097-106

pp. 107-113

pp. 115-122

pp. 123-130

pp. 131-143

pp. 145-152

pp. 153-158

pp. 159-168

pp. 169-181

pp. 183-192

pp. 193-200

ABSTRACT

Direct spring loaded pressure relief valve(DSLPRV) is a safety valve to relax surge pressure of the pipeline system. DSLPRV is one of widely used safety valves for its simplicity and efficiency. However, instability of the DSLPRV can be caused by various reasons such as insufficient valve volume, natural vibration of the spring, etc. In order to improve reliability of DSLPRV, proper selection of design factors of DSLPRV is important. In this study, methodology for selecting design factors for DSLPRV was proposed. Dynamics of the DSLPRV disk was integrated into conventional 1D surge pressure analysis. Multi-objective genetic algorithm was also used to search optimum design factors for DSLPRV.

Key words: Direct spring loaded pressure relief valve, Multi-objective genetic algorithm, Surge analysis, Transient flow analysis

주제어: 스프링 서지 완화 밸브, 다목적 유전자 알고리즘, 서지 분석, 부정류 분석

1. 서 론

상수관망에서 펌프의 중단이나 수리적 구조물의 조작에 의해 발생하는 관내 유속의 급격한 변화는 서지압(Surge pressure)이라고 하는 과도 압력 현상을 발생시킨다 (Wylie and Streeter, 1993). 이렇게 발생한 서지압력은 관망 자체의 파괴뿐만 아니라 관내 부속물들을 노후화 시켜서 상수관망 유수율에 영향을 미치고 안전사고로 이어질 수 있어 이에 대한 주요한 관리가 요구된다.

서지압에 의한 관망 내부의 영향을 제어는 크게 두 가지 전략을 통해 이루어진다. 첫 번째는 펌프나 밸브

와 같은 수리적 구조물의 조작을 급격하게 하지 않는 방법이다. 급격한 유량 변화에 의해 발생하는 이상현상은 수리적 구조물의 완속 조작을 통해 방지할 수 있다. 두 번째 방법은 관망에 서지압 완화 장치의 추가적 설치이다. 완속 조작이 가능한 관망이더라도 수격압에 대한 예방 차원에서 서지압 완화 장치는 설치되는 것이 추천된다. 서지압 완화 장치는 자동조절밸브(Automatic control valve), 서지탱크(Surge tank), 에어 챔버(Air chamber) 등이 있다. 이 중 자동 조절 밸브는 서지 릴리프 밸브(Surge relief valve), 유량, 압력 조절 밸브(Regulating valve), 에어밸브(Air valve) 등이 있고 이들은 훌륭한 서지 제어 효과가 있다 (Wylie et al., 1993; Karney and Simpson, 2007).

이들 서지압 완화 장치들 중 서지 릴리프 밸브는 관망

Received 26 January 2018, revised 19 February 2018, accepted 28 February 2018
*Corresponding author: Sang-Hyun Kim (E-mail: kimsangh@pusan.ac.kr)

내부에 설치되어 평소에 닫혀 있다가 밸브에 서지압력이 감지되면 열려서 관망 내부의 압력을 해소시키는 종류의 자동 조절 밸브이다. 서지 완화 밸브의 일반적인 구조는 서지 압력을 감지하는 감지부, 이를 작동하게 하는 구동부, 밸브 몸체로 나눌 수 있다. 시스템의 요구에 따라 다양한 종류의 서지 완화 밸브를 적용할 수 있는데, 이중 스프링 서지 완화 밸브(Direct spring loaded pressure relief valve)는 스프링의 탄성을 이용하여 밸브를 닫아 두고 있다가 스프링의 탄성 이상의 압력이 관망 내부에 발생하면 열리는 원리로 작동된다. 서지 릴리프 밸브의 감지부와 구동부가 합쳐진 형태로 압력 센서, 압력 챔버, 유압기 등의 추가적 구조물이 없어 설치가 용이하고 공간을 적게 차지한다는 장점이 있다. 하지만, 다양한 불안정 동작이 발생한다는 단점이 있다 (API Standard, 2015).

일반적으로 특정 관망 체제에서 서지 완화 장치의 선택 및 세부사항에 대한 결정은 기술자의 결정(Engineering decision)에 의존한다. 기존의 경험을 바탕으로 한 선택의 한계를 극복하기 위해 이들의 결정을 위한 방법론을 개발하려는 시도가 여러 번 있어왔다. Jung and Karney(2006)는 유전자 알고리즘(Genetic algorithm)과 PSO(Particle swarm optimization)을 이용하여 시스템에 발생하는 서지압력의 최적 제어를 위한 방법론을 제안했다. 서지 탱크, 서지 완화밸브의 최적 조합을 도출하고, 이들의 상세요소를 결정하기 위한 방법론을 제안하였으나, 성능 외에 안정성과 관련한 고려를 하지 못한 한계점이 있다. Jang and Kang(2017)은 파일럿 타입의 서지 완화 밸브의 효과적인 설계 범위를 제안하였고, 서지 완화 밸브가 안정적으로 열리고 닫히기 위한 설계요소를 제안하기 위해 3차원 유동 해석 프로그램을 이용을 했다. 3차원 모형의 경우 모형의 계산 비용이 높기 때문에 최적의 해를 찾는 경우 지역해(Local optimum)에 고립될 가능성이 높다는 한계점이 있다.

하나의 목적에 대한 최적해를 검색하는 단목적 최적화(Single-objective optimization)은 하나의 목적 함수만을 만족시킬 수 있다는 한계점이 있다. 하지만, 상수관망의 설계 및 운영에는 안정성-비용과 같은 두 가지 이상의 항목이 상충되는 경우들이 존재한다. 안정성과 비용을 동시에 만족시킬 수 있는 설계 및 운영 요소 결정을 위해서 다목적 최적화(Multi-objective optimization)방법이 제안되어왔다 (Savic, 2002; Prasad et al., 2003; Fararmani et al., 2004; Creaco and Franchini, 2012).

본 연구에서는 상수관망 시스템에서 스프링 서지 완

화 밸브의 설계 요소를 최적화 하는 방법론을 제안하였다. 스프링 서지 완화 밸브의 첫 번째 목적인 1)서지 완화 성능의 최대화와 서지 완화 기능이 동작하는 동안 발생할수 있는 2)불안정 동작의 최소화를 설계 목표로 하였다. 이를 위해서 스프링 서지 완화 밸브의 동적 응답 특성을 수식화 하였고, 이를 1차원 서지 해석 방법에 적용하였다. 두 가지 이상의 목적을 동시에 달성해야 하는 연구의 목적에 따라 기존 단목적 최적화 알고리즘의 한계를 극복한 다목적 최적화 알고리즘(Multi-objective optimization algorithm)을 이용하였다. 이들 방법론에 대한 검증을 위해서 모의 관망을 대상으로 한 스프링 서지 완화 밸브의 최적 설계를 수행했다.

2. 연구방법

2.1 스프링 서지 완화 밸브의 동적 응답 특성

Fig. 1은 스프링 서지 완화 밸브의 자유물체도이다. F_{inlet} 과 F_{outlet} 는 각각 스프링 서지 완화 밸브의 주입구(Inlet)과 토출구(Outlet)를 통해 흐르는 유체에 의한 힘(Force), F_{spring} 과 $F_{precompression}$ 는 각각 스프링의 탄성과 가압(Precompression)에 의해서 발생하는 힘 그리고 F_{ma} 과 F_{mg} 는 각각 밸브의 디스크의 가속도와 중력에 의해서 발생하는 하는 힘이다. 이들 힘들 간의 균형에 의해서 밸브의 동적 특성을 설명할 수 있다.

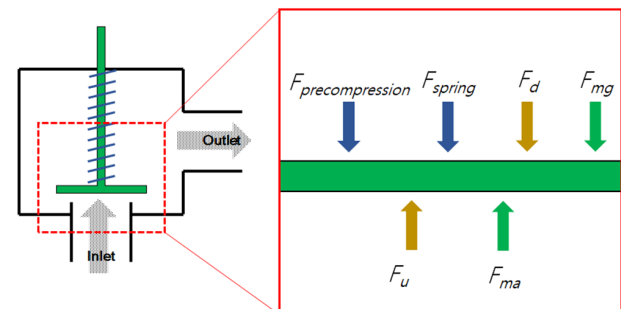


Fig. 1. Free body diagram of direct spring loaded pressure relief valve.

2.2 1차원 서지압 해석 방법

일차원 서지압 해석(One-dimensional surge pressure analysis) 방법은 관망 내부를 1차원으로 가정하여 하나의 지점에서의 압력과 유속은 모두 동일하다고 보는 해석 방법이다. 식(1)과 식(2)은 나비에-스톡스 방



정식(Navier-Stokes equation)의 간략한 형태로서 각각 연속방정식(Continuity equation)과 운동량 방정식(Momentum equation)이다 (Wylie and Streeter, 1993).

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

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

여기서, h 는 압력 수두, Q 는 유량, c 는 압력파속도, g 는 중력 가속도, A 는 관의 단면적, D 는 관경, f 는 Darcy-Weisbach 마찰계수를 나타낸다.

식(1)과 (2)의 지배방정식(Governing equation)은 편미분 방정식(Partial differential equation)로서 수치 해석적 방법으로 풀이를 해나가야 하는데 가장 널리 이용되는 1차원 서지압 해석의 수치 해석방법은 특성선 방법(Method of characteristic)이다. 특성선 방법의 원리는 Fig. 2을 이용하여 설명할 수 있다. Fig. 2의 시간 n 에서의 정보를 가지고 있는 A와 B 지점의 압력과 유량 정보를 이용하여 A와 B 지점 중간인 C 지점의 다음 시간 단계 $n+1$ 의 압력과 유량을 계산 해내는 과정을 통해서 진행된다. 특성선 방법은 빠른 연산이 가능하다는 장점이 있지만 해석 시간 간격(Time step)이 수치적 안정성(Numerical stability)을 만족시킬 수 있도록 엄격하게 설정해야한다는 단점이 있다.

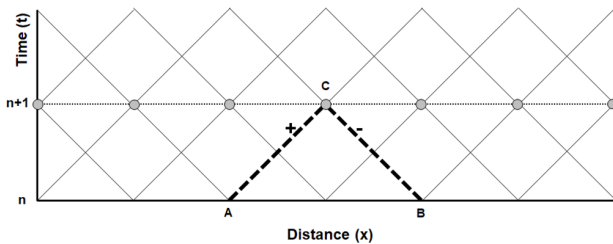


Fig. 2. Method of characteristic.

스프링 서지 완화 밸브의 설계 요소를 1차원 서지 해석 방법론에 적용하기 위해서 Fig. 1에서의 힘균형을 기존 서지 해석 방법론에 적용 하였다. 식(3)은 스프링 서지 완화 밸브의 위상(x_d)을 나타내는 수식이다.

$$x_d = [(P_{Inlet} - P_{Outlet})A_{disk} + m(a_d - g) - kx_{pc}] / k \quad (3)$$

여기서, P_{Inlet} , P_{Outlet} 은 각각 스프링 서지 완화 밸브의 디스크 전후 압력, A_{disk} 는 스프링 서지 완화

밸브의 디스크의 면적, m 은 디스크의 질량, a_d 는 디스크의 가속도, g 는 중력 가속도, k 는 스프링 상수 그리고, x_{pc} 는 압축량을 나타낸다.

P_{Inlet} 과 P_{Outlet} 은 서지 해석 방법론을 이용하여 시간 단계(Time step)에 따라 동적으로 변한다. 볼밸브의 급폐에 따라 동적으로 변하는 P_{Inlet} , P_{Outlet} 의 값이 식(3)에 대입되어진다.

본 연구에서는 위와 같은 서지와 스프링 서지 완화 밸브의 동작에 대한 해석을 Fortran code로 구성하여 연구에 적용하였다.

2.3 다목적 유전자 알고리즘(Multi-objective genetic algorithm)

다목적 함수에 대한 최적화는 크게 두 가지 방법으로 접근할 수 있다. 하나는 단목적 최적화 알고리즘을 그대로 사용하면서 이때의 목적함수를 병합된(Composite) 형태로 구성을 하는 것이다. 목적함수들의 병합에는 가중치(Weighting factor)를 활용을 하게 되고 함수들의 상관관계를 잘 파악 하고 있을 때 적용하는 것이 적당하다. 하지만 본 연구와 같이 최적화를 수행하는 다목적 함수의 상관관계를 잘 알지 못할 때에는 파레토 최적해(Pareto optimum)를 찾는 방법으로 다목적 함수를 다루는 것이 추천된다. 결정권자의 기호에 따라 파레토 최적해들 중에서 선택할 수 있도록 하는 방법으로 해를 제시하는 것이다 (Konak et al., 2006).

선형해석이 불가능한 비선형 문제(Non-linear problem)의 파레토 최적해를 찾기 위해서 널리 사용되는 방법 중 하나는 다목적 유전자 알고리즘이다. 다목적 유전자 알고리즘은 기존의 단목적 최적화에 이용되던 유전자 알고리즘을 다목적 함수의 풀이에 적용한 것으로 자연의 적자생존(Survival of fittest)의 원칙에 따라 최적의 해가 선택(Selection)되고 이들이 교배(Crossover)하여 다음 세대를 만들어 나가는 방법으로 진행된다. 지역해(Local optimum)로의 수렴을 막기 위해서 돌연변이(Mutation)을 세대마다 발생시켜 가는 것이 그 특징이다 (Deb et al., 2000). 다목적 유전자 알고리즘 중 본 연구에서는 NSGA-II(Fast non-dominated sorting genetic algorithm)이 적용 되었다. 이는 기존의 NSGA의 계산 복잡도를 계산한 것으로 복수의 목적 함수에 대한 파레토 최적해를 유전자 알고리즘의 연산순서를 따라 진행하는 것이 그 특징이다.

pp. 077-087
pp. 089-096
pp. 097-106
pp. 107-113
pp. 115-122
pp. 123-130
pp. 131-143
pp. 145-152
pp. 153-158
pp. 159-168
pp. 169-181
pp. 183-192
pp. 193-200

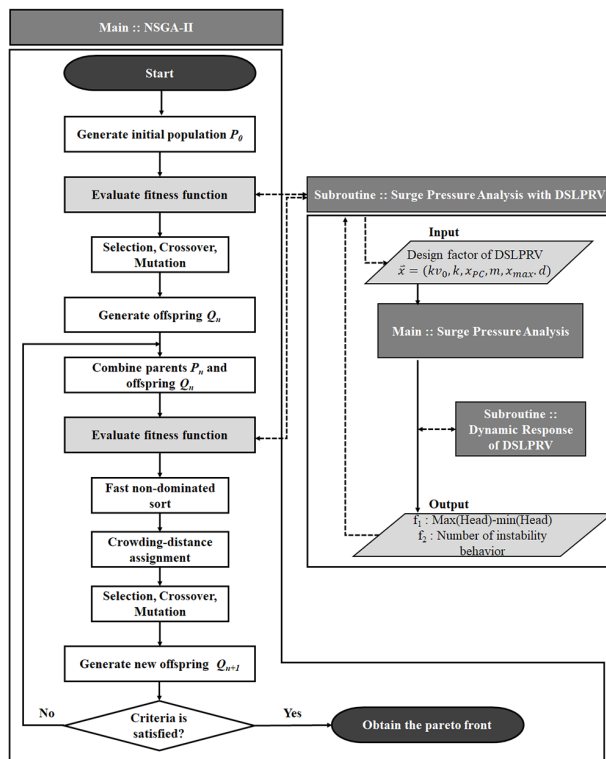


Fig. 3. Flowchart for multi-objective optimization of direct spring loaded pressure relief valve.

본 연구에서의 최적화를 수행할 목적함수는 1)서지 압이 발생한 이후 관망 최고 압력(Max(Head))과 최저 압력(min(Head))의 차이가 최소화 되게 하는 것(f1)과 2)밸브의 불안정 동작의 횟수(Number of instability behavior)가 최소가 되게 하는 것(f2)이다. 식 (4)과 (5)는 각각 앞서 설명한 목적함수의 수식이다.

$$f_1 : \min[Max(Head) - \min(Head)] \quad (4)$$

$$f_2 = \min[Number\ of\ instability\ behaviour] \quad (5)$$

여기서, f_1 은 밸브의 성능을 나타내는 식으로, 관망의 최대 압력값(Max(Head))과 최소 압력값(min(Head))의 차이로 나타낸다. 수격현상이 발생하였을 때 이들의 차이가 가장 작게 되는 것을 목적함수로 하여 서지 완화 밸브의 성능이 최대화 되게 하는 것이다. f_2 는 불안정 동작의 횟수를 최소화하는 것이다. 이때 불안정 동작의 횟수는 서지 완화 밸브의 위상이 급격하게 바뀌는 횟수를 측정하는 것인데 서지 완화 밸브 디스크의 속도 방향이 이전 시간 단계와 달라져 있다면 이것을 불안정 동작으로 인식한다.

Fig. 3는 스프링 서지 완화 밸브의 설계 요소들에 대한 다목적 최적화의 수행 순서도이다. 최적화를 수행할 우선 최초의 세대를 임의로 발생(Generate initial population)시키고 이들에 대한 적합도 여부를 판별(Evaluate fitness function)한다. 이후, 임의 생성 세대에 대한 한 선택, 교배, 돌연변이 과정을 통해 자손(Offspring) 세대를 생성 한다.

3. 결과 및 고찰

스프링 서지 완화 밸브의 최적화 방법론의 검증을 위해서 Fig. 4와 같은 가상의 관망을 구성하였다.

가상 관망은 저수지-관-밸브-관-저수지의 구조를 가지고 있다. 관망 양측에는 각각 100 m, 80 m의 고정수두를 가진 저수지가 설치 되어있다. 관망의 직경과 마찰인자는 각각 1 m, 0.02로 일정하고, 전체 관망의 길이는 100 m이다. 상류로부터 90 m 지점에 선형으로 작동하는 볼 밸브가 설치되어있다. 이때의 볼밸브가 1초에서

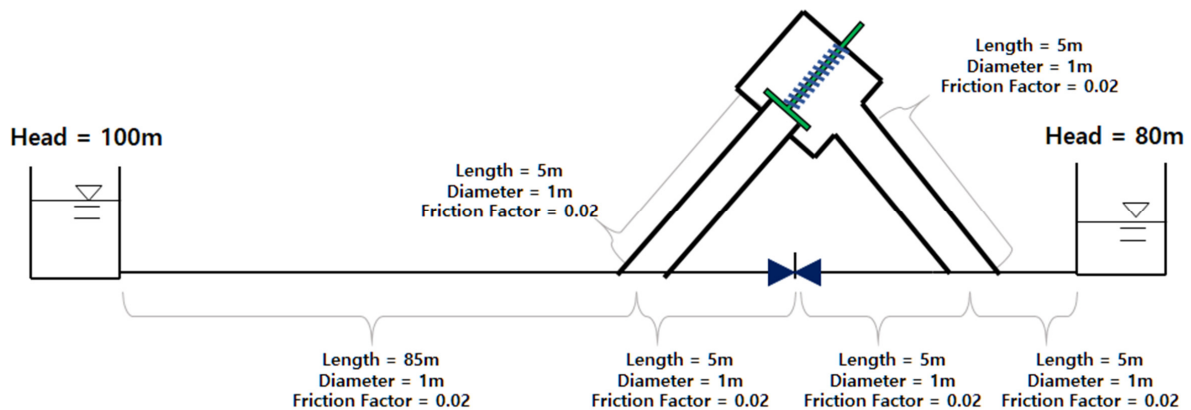


Fig. 4. Schematic hypothetical diagram of experimental system.

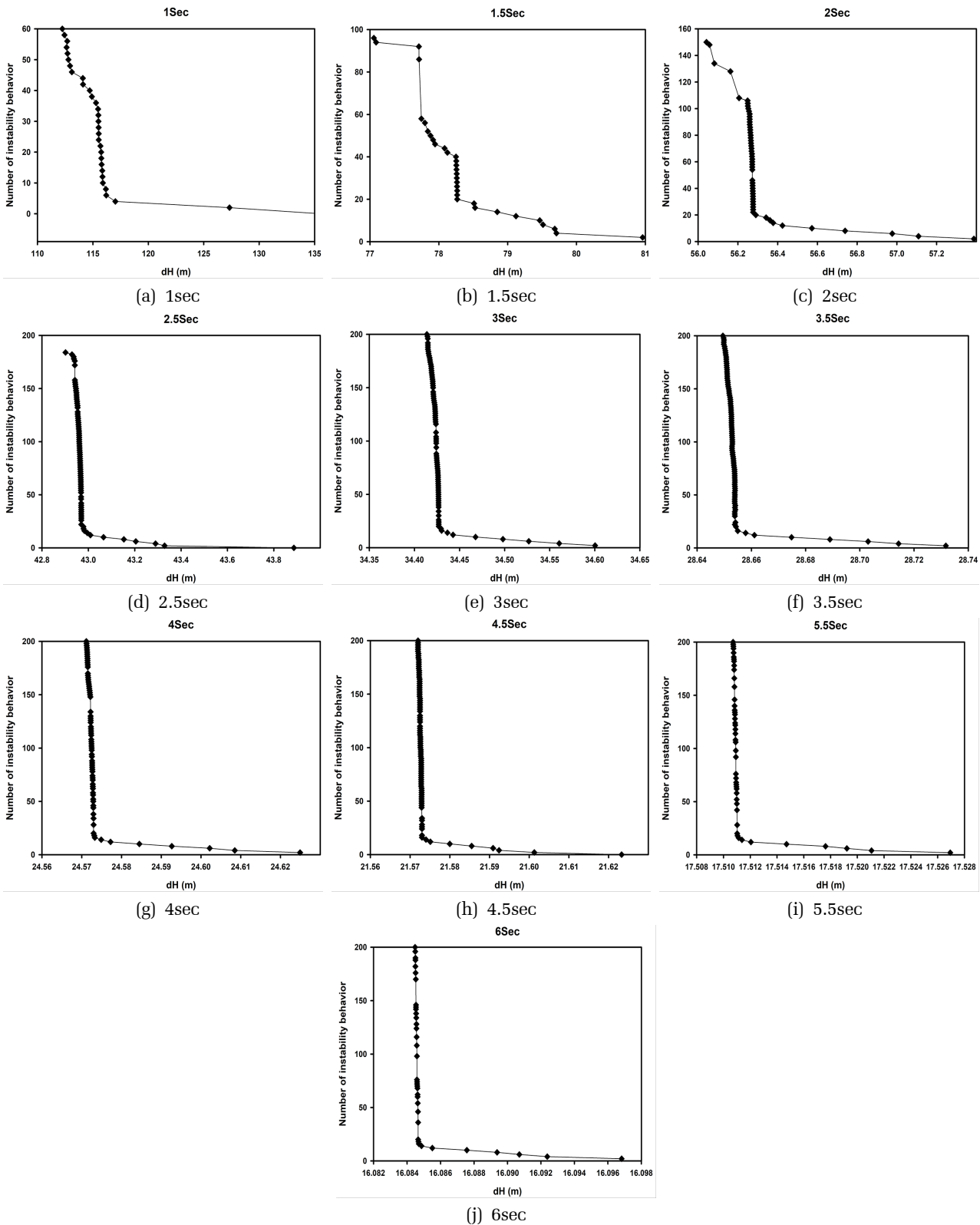


Fig. 5. Pareto optimum of design factors of direct spring loaded pressure relief valve. dH is difference between maximum and minimum head.

- pp. 077-087
- pp. 089-096
- pp. 097-106
- pp. 107-113
- pp. 115-122
- pp. 123-130
- pp. 131-143
- pp. 145-152
- pp. 153-158
- pp. 159-168
- pp. 169-181
- pp. 183-192
- pp. 193-200

6.0초까지의 다양한 속도로 닫히며 이를 통해서 여러 가지 크기의 서지압 발생을 유도한다. 상류로부터 85 m 지점에서부터 95 m 까지는 우회관(Bypass)가 설치되어 있다. 바이패스의 총 연장은 10 m이고, 그 가운데는 스프링 서지 완화 밸브가 설치되어 있다. 바이패스에 설치된 스프링 서지 완화 밸브의 설계 요소인 밸브 계수(kv_0), 스프링상수, 압축량, 밸브의 동작파트의 질량, 밸브의 최대 이동 거리(x_{max}), 디스크의 직경(d)은 최적화를 수행하면서 다양하게 적용되어 이때의 서지압 저감 성능 및 불안정성에 대한 평가를 반복하게 된다.

최적의 스프링 서지 완화 밸브의 설계 요소 도출을 위해서 Fig. 3의 최적화 과정을 수행하였다. 이때 한 세대는 1,000개의 개체를 생성하였고 5,000세대를 반복하여 다양한 볼밸브 조작 시간에 대한 파레토 최적을 검색하였다. Fig. 5는 관내 볼밸브의 조작 시간에 따른 스프링 서지 완화 밸브의 파레토 최적을 도출한 결과이다.

밸브의 닫힘 시간이 증가하면서 최대 최소 압력 차이의 범위가 줄어드는 경향을 보이면서도 불안정 동작은 넓은 범위를 유지하는 것으로 보아 스프링서지 완화 밸브의 설계 요소의 작은 차이에 불안정 동작은 민감하게 반응 한다는 것을 알 수 있다. 파레토 최적 세트의 최대와 최소 성능의 차이가 크지 않기 때문에 불안정 동작의 횟수가 최소화가 될 때의 압력 차이

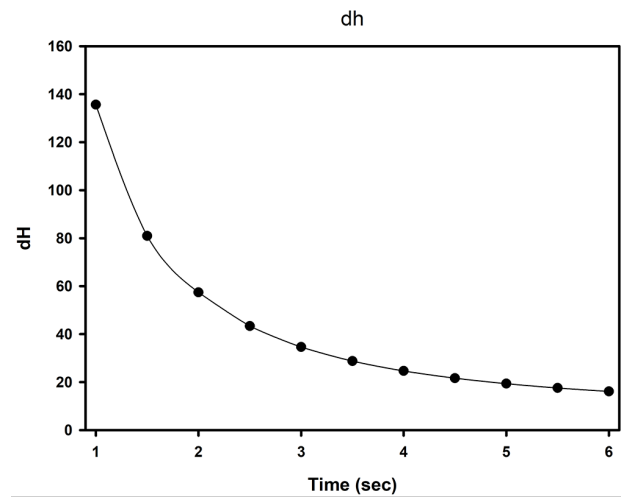


Fig. 6. Optimum performance of direct spring loaded pressure relief valve.

및 설계 요소의 경향을 비교해 보는 것이 의미가 있다. Fig. 6은 불안정 동작이 최소로 발생할 때의 각 밸브 조작 시간에 따른 스프링 서지 완화 밸브의 성능을 비교한 그래프이다.

급폐에서 완폐로 밸브의 닫힘 시간이 증가함에 따라 최대와 최소의 압력 차이는 줄어드는 경향이 나타난다. 각 최적화의 결과를 나타내는 설계 요소들의 값을 비교해보면 Table 1, Fig. 7과 같다.

발생 서지의 크기 즉, 밸브의 닫힘 속도와 각 설계 요소들의 상관관계를 찾아보기가 어려웠다. 이것은

Table 1. Optimum design factors of direct spring loaded pressure relief valve

Closing Time	dH (m)	NIB	Valve Coefficient ($m^3/h/bar^{0.5}$)	Spring Constant (N/m)	Precompression (m)	Mass of moving part (kg)	Maximum moving range (m)	Diameter (m)
1	135.63	0	9.53E+04	8.46E+06	0.050	11.04	9.76	0.61
1.5	80.96	2	6.41E+04	5.39E+06	0.045	24.99	8.81	0.61
2	57.39	2	2.04E+04	8.05E+06	0.035	38.55	3.72	0.77
2.5	43.33	2	4.14E+04	3.98E+06	0.035	20.14	8.52	0.60
3	34.60	2	1.63E+05	9.23E+06	0.006	50.05	7.57	0.43
3.5	28.73	2	2.40E+04	7.02E+06	0.041	37.10	7.51	0.97
4	24.62	2	7.82E+04	8.80E+06	0.009	55.19	5.77	0.53
4.5	21.62	0	1.99E+04	5.43E+06	0.035	34.93	5.88	0.81
5	19.34	0	4.41E+04	9.77E+06	0.012	62.75	6.60	0.67
5.5	17.53	2	3.67E+04	8.13E+06	0.013	49.38	4.64	0.67
6	16.10	2	2.09E+04	6.82E+06	0.021	43.02	4.55	0.79

dH : Difference between maximum and minimum head

NIB ; Number instability behavior

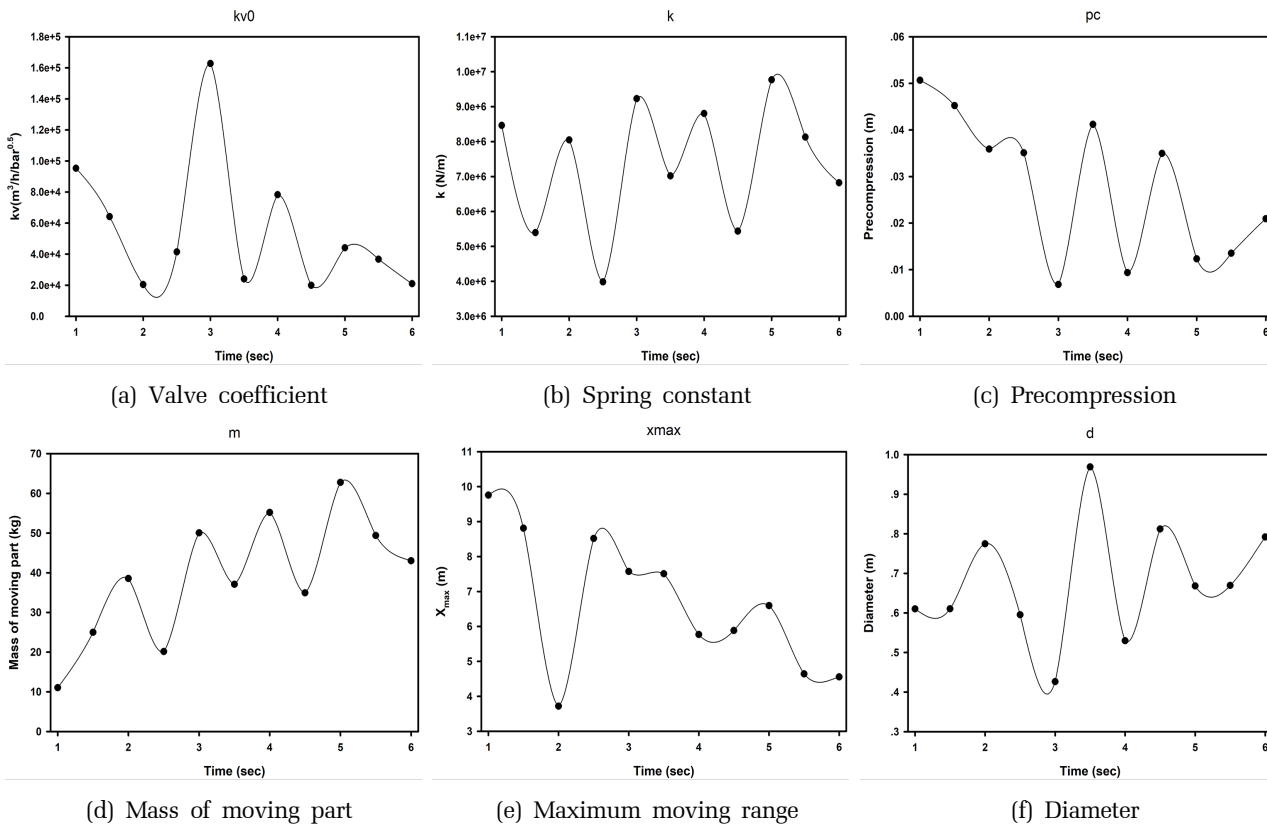


Fig. 7. Optimum design factors of direct spring loaded pressure relief valve.

설계 요소들 중에는 실제 설계에 반영하기 어려운 동작파트의 질량, 직경, 밸브 상수 등의 요소까지 포함하여 최적화를 진행하였기 때문에 생각할 수 있다. 만약 실제 설계 반영이 가능한 인자들에 대한 최적화만을 진행한다면 현재와 상이한 결과를 기대할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 스프링 서지 완화 밸브의 설계 요소 최적화를 위해 다목적 최적화를 수행해 보았다. 이를 스프링 서지 완화 밸브의 수치적 계산을 위한 동적 응답 해석법을 제안하였고 이를 기존의 1차원 서지 해석 방법에 적용 하였다. 이를 다목적 함수를 이용하여 두 가지 목적함수인 1)성능 최적화와 2)안정성 최적화를 수행하였다. 최적화 결과 성능과 안정성이 최적으로 되어 질수 있는 최적 파레토해가 검색됨을 확인하였다.

모의 관망을 대상으로 본 연구에서 제안하는 스프

링 서지 완화 밸브 설계 방법론을 적용하여 보았다. 다양한 서지 압력의 크기를 불밸브의 작동 간격을 이용하여 조작하고, 이를 제어하는 설계 요소 및 최적화 성능의 경향을 살펴 보았다. 다목적 최적화 방법론은 스프링 서지 완화 밸브의 성능과 안정성을 최적화 하는 결과를 도출하였고, 이는 서지압의 크기에 따라 상이했다. 서지압 완화 성능의 분포 범위는 작으나 불안정 요소는 넓게 분포되어 있어서 서지 완화 성능에 비해 불안정 요소가 더욱 민감하게 반응함을 확인할 수 있었다. 또한, 최적 스프링 서지 완화 밸브의 설계 요소와 발생 서지의 크기 사이에서 분명한 상관관계를 발견할 수 없었다.

본 연구에서는 고려 가능한 모든 종류의 스프링 서지 완화 밸브의 설계 요소를 고려하여 최적화를 진행 하였다. 하지만 이 중에서 실제 사용자가 반영 가능한 운전 요소는 제한적이다. 실제 반영 가능한 운전 요소들에 대한 최적화만 진행하는 경우에는 사용자가 사용하기 용이한 운영 가이드라인을 제안할 수 있을 것 이라 기대한다.

- pp. 077-087
- pp. 089-096
- pp. 097-106
- pp. 107-113
- pp. 115-122
- pp. 123-130
- pp. 131-143
- pp. 145-152
- pp. 153-158
- pp. 159-168
- pp. 169-181
- pp. 183-192
- pp. 193-200

기호설명

h	= Pressure head.
Q	= Flow rate.
c	= Wave speed.
g	= Gravitational acceleration.
A	= Cross-sectional area.
D	= Diameter.
f	= Darcy-Weisbach friction factor.
F_{inlet}	= Force at direct spring loaded pressure relief valve inlet.
F_{outlet}	= Force at direct spring loaded pressure relief valve outlet.
F_{spring}	= Force by the spring.
$F_{precompression}$	= Force by the precompression of the spring.
F_{ma}	= Force by acceleration of the disk.
F_{mg}	= Force by the gravitational acceleration.
P_{inlet}	= Pressure at direct spring loaded pressure relief valve inlet.
P_{outlet}	= Pressure at direct spring loaded pressure relief valve outlet.
m	= Mass of the moving part of direct spring loaded pressure relief valve.
a_d	= Acceleration of moving part of direct spring loaded pressure relief valve.
A_{disk}	= Cross-sectional area of direct spring loaded pressure relief valve.
k	= Stiffness of spring.
x_{pc}	= Amount of precompression.
x_{max}	= Maximum distance of moving part at direct spring loaded pressure relief valve.
kv_0	= Valve coefficient

사 사

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업 (RE201606133)”으로 지원 받은 과제입니다. 또한, 한국연구재단 “이공분야기초연구사업 (NRF-2017R1A6A3A01075847)”의 지원에도 감사드립니다.

References

- American Petroleum Institute. (2015). *Sizing, Selection, and Installation of Pressure-relieving Devices Part II – Installation*, API Standard 520 (6th ed.).
- Creaco, E. and Franchini, M. (2012). Fast network multi-objective design algorithm combined with an a posteriori procedure for reliability evaluation under various operational scenarios, *Urban Water J.*, 9, 385-399.
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A. and Meyarivan, T. (2000). "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II." *In. Proceedings of sixth international conference on parallel problem solving from nature*, 18-20 September, 2000. Paris, France, Springer.
- Farmani, R., Savic, D. and Walters, G. (2004). "The simultaneous multi-objective optimization of anytown pipe rehabilitation, tank sizing, tank siting, and pump operation schedules", *World Water and Environmental Resources Congress*, Salt Lake City, Utah, United States.
- Jang, S.C. and Kang, J.H. (2017). Orifice Design of a Pilot-Operated Pressure Relief Valve, *J. Press. Vessel. Technol.*, 139, 031601-1-10.
- Jung, B.S. and Karney, B.W. (2006). Hydraulic Optimization of Transient Protection Devices Using GA and PSO Approaches, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 132, 44-52.
- Karney, B.W. and Simpson, A.R. (2007). In-line Check Valves for Water Hammer Control, *J. Hydraul. Res., IAHR*, 45:4:547.
- Konak, A., Coit, D.W. and Smith, A.E. (2006). Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial, *Reliab. Eng. Syst. Safe.*, 91(9), 992-1007.
- Prasad, T.D., Hong, S.H., and Park, N. (2003). Reliability based design of water distribution networks using multi-objective genetic algorithms, *KSCE J. Civ. Eng.*, 7, 351-362.
- Savic, D. (2002). Single-objective vs. multiobjective optimisation for integrated decision support. In: *Integr. Assess. Decis. Support*, 7-12.
- Wylie, E.B., Streeter V.L. and Suo, L. (1993). *Fluid Transients in Systems*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J.