한국압력기기공학회 논문집
제13권 제1호 2017년 6월 pp. 69-74

ISSN 1738-8333
http://dx.doi.org/10.20466/KPVP.2017.13.1.069

펌프 기동 및 정지에 따른 배관 압력상승과 수격작용 영향 고찰

허민웅†·민지호*

Consideration of Pressure-Rise and Water Hammer for Pipe System in Relation to Start-Up and Sudden Stop of the Pump

Min Woong Heo† and Ji Ho Min*

(Received 29 May 2017, Revised 22 June 2017, Accepted 23 June 2017)

ABSTRACT

In the fire protection system or fire fighting water supply system, the jockey pump is generally installed for the prevention of the pressure decrease of pipes, the frequent driving of the fire pump and protection the pipes from the water hammer. In this paper, the pressure-rise in fire fighting water distribution pipes in condition of pipe pressurization by the surge tank at the start-up and the sudden-stop of the fire pump without additional installation of jockey pump is considered by using simple formula calculations and the evaluation of water hammer occurrence in condition of pipe pressurization by the surge tank is included. As a result, the pressure-rise of pipes is less than the pipe design pressure at the condition of pump's start-up and sudden stop, and the possibility of water hammer occurrence is remarkably low due to pressurization of the pipes by the surge tank.

Key Words : Fire Pump (소방펌프), Pressure Rise (압력상승), Pressurization of Pipe (배관가압), Surge Tank(완충탱크), Water Hammer (수격작용)

기호설명

z_1 = Sea Level of Surge Tank (m)
z_2 = Sea Level of Fire Fighting Water Distribution Pipe (m)
z_3 = Sea Level of Fire Hose (m)
v_1, v_2, v_3 = Fire Fighting Water Velocity at Each Location (m/s)
D_2, D_3 = Inner Diameter of Pipe, Hose (m/s)
v_4 = Discharge Velocity of Fire Pump (m/s)
P_1, P_2, P_3 = Pressure at Each Location (bar, Pa)
Q_2, Q_3 = Flow Rate at Each Location (m^3/h, m^3/s)
a = Speed of Sound (m/s)
K = Bulk Modulus of Fire Fighting Water (bar, Pa)
E = Young's Modulus of Pipe (bar, Pa)
t = Thickness of Pipe (m)
c = Calculation Coefficient for Speed of Sound
D_o = Outer Diameter of Pipe (m)
σ_{allow} = Allowable Stress of Pipe (Pa)
q = Pipe Construction Quality Factor
Y = Wall Thickness Coefficient

† 책임저자, 한국수력원자력(주) 중앙연구원
mwheo0403@khnp.co.kr
TEL: (042)870-5527 FAX: (042)870-5569
* 한국수력원자력(주) 중앙연구원

1. 서 론

원자력 발전소에는 다양한 계통에서 여러 종류의 펌프가 설치되어 운전되고 있다. 이들 계통에서는 축압기 및 완충기의 설치나 특정 기기를 이용한 배관 가압 등 계통 특성에 적합한 방법으로 배관 압력을 일정 범위 내에서 유지하여, 펌프 운전 시 배관 내의 수충격을 완화시키고, 계통 운전 중 배관 내

기체 성분의 발생을 억제하고 있다. 특히 화재발생 시 각각의 화재 보호 계통에 위치한 소화전, 스프링클러 등으로 소화수를 지속적으로 보내주는 소화수 공급 계통에는, 소화수 공급 용도의 소방펌프 이외에, 배관 압력 유지 용도로 소방펌프 토출부 인접 배관에 충압펌프(Jockey Pump)의 설치를 고려할 수 있다. 충압펌프가 추가로 설치되는 경우, 배관 압력을 일정 범위 내로 유지함으로써, 화재 발생 시 소방펌프 기동 및 정지 등의 운전 조건에서의 압력 변화로부터 배관을 보호할 수 있다. 또한, 충압펌프의 기동압력을 소방펌프 기동압력보다 약간 높게 설정함으로써, 배관 누수 등 화재 발생 이외의 조건에서 소방펌프의 잦은 기동을 방지할 수 있다. 충압펌프는 계통 배관 내에서 발생할 수 있는 수격작용(Water Hammer)의 방지 용도로도 사용될 수 있다. 소방시설 설계기준 중 하나인 NFPA(National Fire Protection Association)에 의하면, 압력 유지 용도로 사용되는 충압펌프는, 미분무용 용적 펌프나 주 펌프가 아닌 다른 승인된 방법으로 대체될 수 있도록 되어 있다. 현재 일부 발전소의 경우, 소화수 공급 계통 내 소화수 분배 배관의 압력유지를 위해, 충압펌프의 대체 수단으로 별도의 질소가압 완충탱크를 이용하여 배관을 가압하고 있으며, 본 논문에서는 질소가압 완충탱크의 충압펌프 대체 여부를 검증하기 위해, 화재 발생 시 소방펌프 급속 기동 조건 및 완충탱크 수위 변화 조건, 펌프 급속 정지 조건에서 수격작용에 의한 소화수 분배 배관 압력상승 영향을 분석하였고, 정상운전 시 배관 내 수격작용 발생 가능성을 확인하였다.

2. 소화수 공급 계통 및 배관 가압 방식

소화수 공급 계통은 소방펌프와 질소가압 완충탱크, 소화수 저장탱크 및 소화수 분배 배관과 각종 밸브들로 구성이 되며, 계통 운전 시, 완충탱크에 의해 소화수 분배 배관은 6.0~8.0 bar의 압력을 유지하게 된다. Fig. 1은 소화수 공급 계통의 개략도를 나타낸다. 완충탱크는 충압펌프 대신 소화수 분배 배관을 일정압력으로 가압함과 동시에, 화재발생 초기에는 일정량의 소화수를 공급하는 역할도 겸한다.

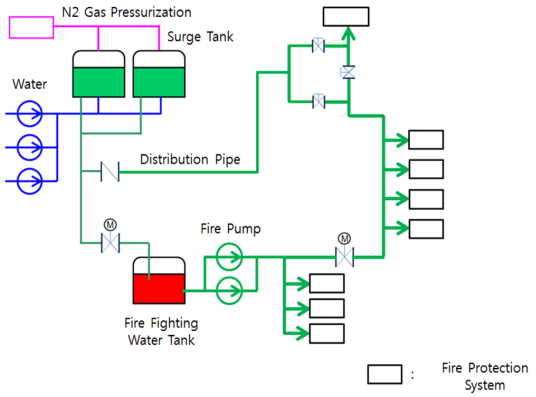

Fig. 1 Schematic diagram of the fire fighting water distribution system

소방펌프는 정격용량 200 m^3/h, 토출압력이 12.0 bar이며, 소화수 분배 배관의 내경은 260.3 mm, 설계 압력은 15.0 bar이다. 이미 언급한 바와 같이, 화재 발생 초기에는 완충탱크에 의해 소화수 분배 배관에 미리 충수되어 있던 소화수가 먼저 화재 보호 계통으로 공급되고, 완충탱크의 수위가 순차적으로 감소하여 설정값에 도달하면 소방펌프가 기동하여 소화수를 계속 공급하도록 설계되어 있다.

3. 배관 압력상승 및 수격작용 발생 가능성 검토

3.1 배관 압력상승 계산 조건

배관 압력상승 값을 보다 정확하게 구하기 위해서 FVM(Finite Volume Method) 기반의 전산유체역학 프로그램의 활용을 고려할 수 있으나, 소화수 공급 계통과 화재 보호 계통에 이르는 계산 영역을 모사하기에는 물리적, 시간적 제약이 분명히 존재하므로, 본 논문에서는 해당 계통 조건의 적절한 설정과 상호 조합을 전제로 하여, 유체역학의 대표적인 수식인 베르누이의 식과 연속의 식으로 소화수 공급 배관의 압력상승을 계산하였다.

Fig. 2는 소방펌프와 소화수 분배 배관 및 완충탱크로 구성된 압력상승 계산을 위한 소화수 공급계통의 개략도로, 소화수 분배 배관의 압력상승 계산을 위해 계통을 단순화하여 계산에 필요한 인자들을 나타내었다. z_1은 완충탱크의 해수면 기준 수위, z_2는 소화수 분배 배관의 해수면 기준 높이, z_3은 소화수가 분출되는 소화호스의 높이로, 계산의 보수성을

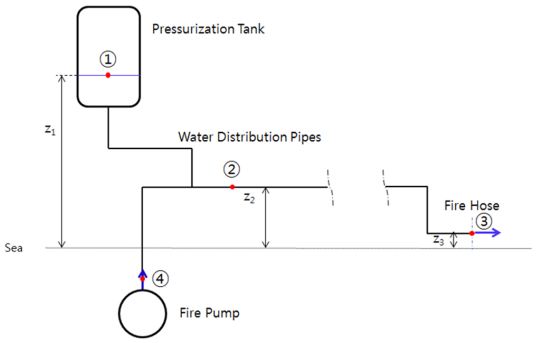

Fig. 2 Boundary condition of pressure-rise calculation for water distribution pipes

Table 1. Pressure and water level of the pressurization tank

Tank Pressure		Water Level	Remarks
[bar]	[MPa]	level [m]	
9.8	0.98	13.30	-
8.0	0.80	12.93	-
7.2	0.72	12.74	-
6.7	0.67	12.59	-
6.4	0.64	12.49	Fire Pump Start-Up
6.0	0.60	12.33	-

위해 소화수 분출 시 소화호스의 높이는 1.0 m로 가정하였다. 소화호스의 내경은 40 mm이고 분출구 주변의 압력은 대기압이다. 4번 위치에서의 유속은 소방펌프로부터 토출되는 소화수의 유속이다.

완충탱크의 수위와 그에 따른 압력은 Table 1에 나타내었다. 발전소 현장에 명시되어 있는 완충탱크 압력은 6.0~9.8 bar 이며, 탱크 수위가 해수면 기준 12.49 m, 해당 압력이 6.4 bar가 되는 시점에서, 신호 발생에 의해 소방펌프가 최초로 기동하게 된다.

계통 배관의 건전성을 확인하기 위해서는, 계통에 설치된 펌프의 운전 상황에 대한 고려가 필요하다. 소화수 공급 계통의 경우, 소방펌프의 과도운전 상태로 펌프 최초 기동 상황과 완충탱크 수위 변화 조건 및 펌프 급속 정지 조건을 고려할 수 있으며, 각 조건에서 수격작용이 발생하였을 때 생기는 압력상승을 계산하여 소화수 분배 배관의 건전성을 평가하였다.

3.2 펌프 기동시 수격작용에 의한 배관 압력상승 검토

소방펌프의 최초 기동 조건에서, 완충탱크의 압력과 수위는 Table 1에 보인 바와 같이, P_1이 6.4 bar, z_1이 12.49 m이며, 이 조건에서 완충탱크에 의해 이미 소화수 분배 배관에 공급되고 있던 소화수와 소방펌프 토출부로부터 배관에 유입되는 소화수 간의 유속 차와 완충탱크에 의한 배관 가압 압력[1]은 베르누이의 식과 연속의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\frac{P_1}{\rho g}+\frac{v_1^2}{2g}+z_1=\frac{P_3}{\rho g}+\frac{v_3^2}{2g}+z_3 \quad (1)$$

$$Q_3=v_3 \cdot A_3 \quad (2)$$

$$Q_2=Q_3, \quad v_2=\frac{Q_2}{A_2} \quad (3)$$

$$\frac{P_2}{\rho g}+\frac{v_2^2}{2g}+z_2=\frac{P_1}{\rho g}+\frac{v_1^2}{2g}+z_1 \quad (4)$$

$$v_4=\frac{Q_4}{A_4} \quad (5)$$

여기서, P_1 = 6.4 bar, v_1 = 0 m/s, z_1 = 12.49 m,
P_3 = 0.0 bar, z_3 = 1.0 m,
$A_3 = \pi D_3^2 / 4$; (D_3 = 40 mm)
$A_2 = \pi D_2^2 / 4$; (D_2 = 260.3 mm),
z_2 = 3.4 m
Q4 = 200 m^3/h = 0.0556 m3/s
$A_4 = \pi D_4^2 / 4$; (D_4 = 260.3 mm)

(1)~(3) 식들에 의해 소화수 분배 배관에서 미리 유동하고 있던 소화수의 초기 유속 v_2는 0.91 m/s, 소방호스 분출 유속 v_3는 38.82 m/s로 계산되고 (4)식을 이용하여 완충탱크에 의해 가압된 배관 압력 P_2는 7.29 bar로 계산된다. 관계식 (5)에 의해 소방펌프 토출 유속 v_4은 1.04 m/s이다. 압력손실 고려를 위해 보수적으로 유속을 1.04 m/s로 산정하였을 때, 관로 마찰 손실은 배관 총길이 45.8m, 마찰손실계수 0.02, 260.3 mm 직경의 배관에서 약 0.19 m이다. 손실계수 0.98의 엘보우 6개에서의 손실이 0.33 m, 손실계수 각각 2.0과 0.06의 체크 밸브 1개, 게이트밸브 5개에 대한 압력 손실은 각각 0.11 m, 0.02 m로, 총 압력손실이 0.65m로 압력단위로 환산하면 0.064 bar이므로 유속계산에 큰 영향을 미치지 않아 본 계산에서는 고려하지 않았다.

펌프 최초 기동 시 소화수 유속상승에 의한 수격작용으로 발생하는 압력상승은 Joukowsky, N[(2),(3)]의 식에 의해 구할 수 있는데, 이는 배관 내에서의 유체 운동량, 질량 보존 법칙에 기초한 식으로써, 압력상승 값이 유체의 유속 차와 비례 관계에 있다.

$$\Delta P = \rho \cdot a \cdot \Delta v \quad (6)$$

a는 음속으로, 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho}} / \sqrt{1 + (\frac{K}{E} + \frac{D}{t}) \cdot c} \quad (7)$$

여기서, K = 2.15×10^9 Pa
E = 2.10×10^{11} Pa
D = 260.3 mm
t = 6.35 mm
c = 0.85 ~ 1.0, 0.91 Generally

Δv는 앞서 계산한 v_4와 v_2의 차이로 0.13 m/s 이다. 또한 펌프 최초 기동 조건 하에서, 완충탱크로부터 배관 내에 먼저 공급되고 있던 소화수와 소방펌프로부터 토출되는 소화수의 유속 차에 의해 생기는 압력상승 ΔP는 (6) 식에 의해 1.59 bar로 계산된다. 따라서 펌프 최초 기동 조건에서 소화수 분배배관에 작용하는 총 압력은 P_2와 ΔP의 합으로 8.88 bar가 되며, 이는 배관 설계 압력(Design Pressure)인 15.0 bar 보다 낮으며, 다음 식으로 계산되는 배관 최대 작동압력[(5)](Pipe Maximum Operating Pressure) 65.37 bar 보다 현저히 낮다.

$$P_{op.\max} = \frac{2t \times \sigma_{allow} \times q}{D_o - 2t \times Y} \quad (8)$$

여기서, D_o = 273 mm
σ_{allow} = 137.89 MPa
q = 1.0
Y = 0.4

따라서, 펌프 최초 기동 조건에서 추가적인 충압펌프 없이 질소가압 완충탱크를 이용한 가압 방식으로도 소화수 분배 배관 건전성은 충분히 확보됨을 확인할 수 있다.

3.3 펌프 기동 후 완충탱크 수위 변화에 따른 배관압력상승 검토

소방펌프가 기동이 된 후에도, 질소가압 완충탱크의 수위가 최저 수위가 될 때까지는 탱크로부터의 소화수 공급이 계속 된다. 따라서 소방펌프가 기동되고 있는 조건에서, 탱크로부터 소화수 분배 배관으로 공급되는 소화수의 유속 v_2와 배관 가압 압력 P_2는 탱크의 수위 변화에 따라 변하게 되고, 소방펌프의 토출부로부터 소화수 분배 배관으로 유입되는 소화수와의 유속 차이도 고려를 해야 한다. 완충탱크 수위에 따른 소화수의 유속과 압력은 (1) ~ (4) 식을 이용하여 구할 수 있으며, 이 때의 소화수 유속과 소방펌프 토출 소화수 유속의 차이에 의한 압력 상승 또한 (6), (7) 식으로 계산할 수 있다. 완충탱크 주요 수위에 따른 소화수 공급 배관의 압력과 유속, 소화수 유속 차에 의한 배관 작용 압력 등은 Table 2와 Fig 3, 4에 나타내었다.

Fig 3의 가로축은 배관 압력상승, 세로축은 유속 변화로, 탱크 수위가 낮아짐에 따라 배관 가압 압력은 낮아지고 소화수 유속 또한 느려지므로 소방펌프 토출 소화수와의 유속차와 압력상승은 점점 커지게 된다.

Fig 4의 가로축은 완충탱크의 수위, 세로축은 그에 따른 압력으로, 압력상승은 청색, 배관 작용 총 압력은 적색으로 나타내었다. 또한 배관 설계압력과 배관 최대 작동압력은 흑색 점선으로 표시하였다. 완충탱크의 배관 가압압력을 고려한 소화수 분배 배관에 작용하는 총 압력은, 탱크 주요 수위에서 배관 설계 압력과 배관 최대 작동 압력보다 낮아 배관 건전성이 확보됨을 확인하였다.

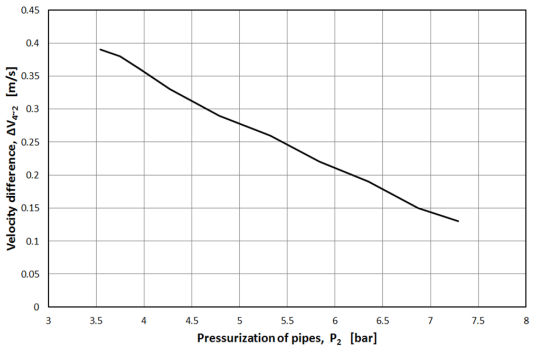

Fig. 3 Pressurization of distribution pipe and velocity difference

Table 2. Pressure-rise according to water level of the pressurization tank at the fire pump driving

Tank Level z1,[m]	Pressurization of pipe P_2,[bar]	water velocity v_2,[m/s]	velocity difference Δv,[m/s]	pressure-rise ΔP,[bar]	Total pressure $P_2+\Delta P$,[bar]
12.93	7.29	0.92	0.13	1.59	8.87
12.74	6.87	0.89	0.15	1.91	8.78
12.59	6.35	0.86	0.19	2.32	8.67
12.49	5.84	0.82	0.22	2.75	8.58
12.33	5.32	0.79	0.26	3.20	8.51
12.16	4.79	0.75	0.29	3.67	8.47
11.96	4.27	0.71	0.33	4.17	8.44
11.75	3.96	0.68	0.36	4.49	8.44
11.52	3.75	0.67	0.38	4.70	8.45
11.28	3.54	0.65	0.39	4.92	8.46

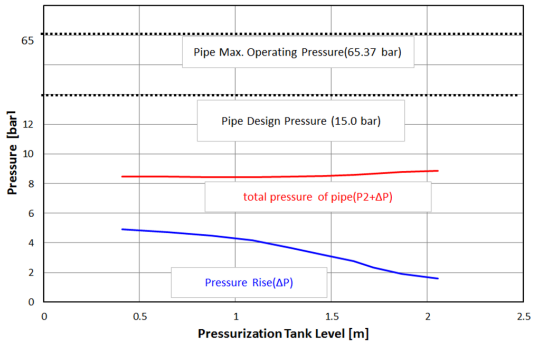

Fig. 4 Total Pressure of distribution pipe in accordance with the tank level

3.4 펌프 급속 정지 시 수격작용에 의한 배관 압력변화 검토

소방펌프 운전 중, 예기치 못한 상황으로 펌프가 급속하게 정지될 경우, 펌프로부터 공급되던 소화수의 유속 급감으로 수격작용이 발생하여 소화수 분배 배관 작용 압력의 변화[(1),(4)]가 생길 수 있다. 소방펌프 급속 정지 시에는 펌프 토출 유속 1.04 m/s가 0 m/s로 떨어지게 되므로, 유속 차는 1.04 m/s이고, 이에 따른 압력변화는 (6)식에 의해 13.02 bar로 계산되며, 이는 배관 설계 압력 15.0 bar 보다 낮으므로, 펌프 급속 정지 시 수격작용이 발생하여 나타나는 압력 변화에도 배관 건전성은 확보가 되는 것을 확인할 수 있다.

3.5 정상운전 조건시 배관 내 수격작용 발생 가능성 검토

수배관 시스템에서 배관 가압의 일반적인 목적은 배관 내 유체압력을 포화증기압 이상으로 유지시키는 것이다. 특정 조건에서 배관 내 유체압력이 포화증기압 이하로 감소하게 되면, 유로 내에 기포가 발생하여 유체 흐름에 따라 흐르다가 배관의 엘보우나 밸브, 확대관, 축소관 등의 유동 저항 지점에서의 기포 터짐, Water Slug의 급속 결합과 같은 유체 과도현상으로 인하여 수격작용[(4)]이 발생할 수 있다. 수격작용으로 인해 발생하는 수격 압력파는 배관에 심각한 타격을 줄 수 있는 위험요소가 될 수 있다. Fig 5에서 배관 시스템 내 엘보우에서 발생할 수 있는 수격작용을 나타내었다.

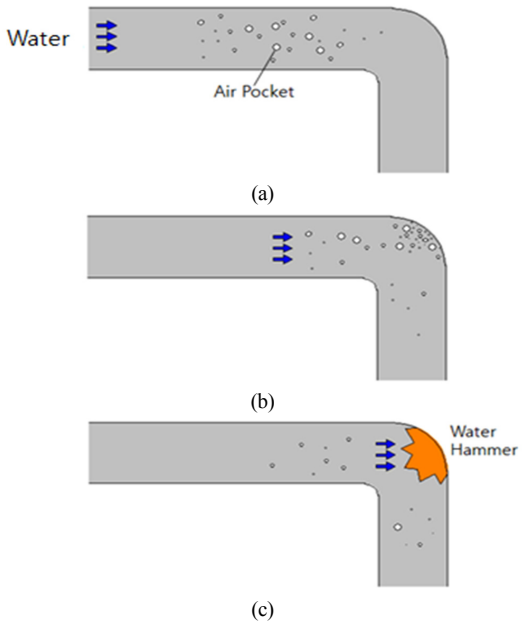

Fig. 5 Water hammer at the elbow of the pipe system

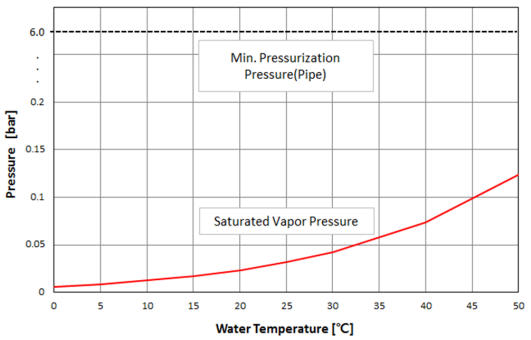

Fig. 6 Saturated vapor pressure in accordance with water temperature

소화수 분배 배관 내 유체 온도를 0 ~ 50 ℃ 로 가정 할 수 있으므로, 각 유체 온도에 대한 포화 증기압은 Fig. 6과 같으며, 완충탱크에 의해 6.0 ~ 8.0 bar로 가압되는 소화수 분배 배관 내 압력은 각 온도의 포화증기압보다 충분히 높고, 소화수의 온도가 낮을수록 배관 가압 압력과 포화 증기압의 차이는 더 크다. 또한 동압이 커짐에 따라서 배관 유지 압력인 정압이 상대적으로 작아지는데, 배관 내 유체 최대 속도인 소방펌프 토출유속 1.04 m/s 일 때의 배관 동압 $\rho v^2/2$인 0.0054bar를 고려할 때, 배관 작용 정압의 최소값은 5.95 bar로, 포화 증기압 이상을 유지할 수 있다. 따라서 정상운전 조건에서 질소가압 완충탱크를 이용한 배관 가압 방식으로도 수격작용 발생을 방지할 수 있다.

4. 결 론

소화수 공급 계통에 충압펌프의 추가적인 설치 없이, 질소가압 완충탱크를 이용한 소화수 분배 배관 가압 조건에서, 배관 내부 압력상승과 수격작용 발생 가능성을 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

소방펌프 기동 중, 완충탱크 수위에 변화에 따른 소화수 분배 배관 총 작용압력은 배관 설계 압력보다 낮으므로 수격작용 발생 시에 배관 건전성이 확보된다.

소방펌프 급속 정지 시, 소화수 분배 배관 내 압력변화를 포함한 배관 총 작용압력은 배관 설계 압력보다 낮으므로 수격작용 발생 시에 배관 건전성이 확보된다.

완충탱크에 의해 가압되는 소화수 분배 배관 내 압력은 소화수 온도 0 ~ 50 ℃에서의 포화 증기압보다 충분히 높아, 정상운전 조건에서 수격작용 발생 가능성은 없다.

참고문헌

(1) Sharp, B. B. and Sharp, D. B., 1996, *Water Hammer : Practical Solutions,* Americas Halsted Press, pp. 9~14
(2) Joukowsky, N., 1904, "The Hydraulic Hammer in Water Supply Pipes," *Proc. American Water Works Association*, Vol. 24, pp. 341~424
(3) EPRI, 1996, “Water Hammer Handbook for Nuclear Plant Engineers and Operators,“ *EPRI TR-106438s*.
(4) Hanif Chaudhry, M., 2014, *Applied Hydraulic Transients,* Springer New York, pp. 1 ~ 58
(5) ASME, 2002, *ASME Code for Pressure Piping, B31*