오리피스를 고려한 송수관로 수충격 완화방법에 대한 연구

The Study of Pressure Suppression in Transmission Pipelines by Orifice

심규대* · 강용석** · 정준연*** · Mohamed Abdellatif**** · 김동균*****

Shim, Kyudae*, Kang, Yongsuk**, Choung, Joonyeon***, Abdellatif, Mohamed****, and Kim, Dongkyun*****

Abstract

This study investigated the variation of pressure for a pumping station in Azzour Water Distribution Complex, (WDC) II, and attempted to overcome the problem of pressure suppression in pipelines, due to power failure. The transient flow was calculated using the commercial program SURGE, and the resulting value was used in the initial conditions of a pump shutdown. The simulation results show that the maximum pressure was 1.7 times (for Wafra) and 4.2 times (for Mina Abdullah) higher than the normal pressure in the steady state. The surge protection facilities were accordingly designed and surge vessels were constructed with orifice dimensions of $121.4 \text{ m}^3 \times 275 \text{ mm}$ for Mina Abdullah and $43.1 \text{ m}^3 \times 300 \text{ mm}$ for Wafra, respectively. The performance of the surge protection facilities on commission, were verified and the surge pressure remained within the expected allowable pressures considering the occurrence of a water hammer.

Key words : Water Hammer, Surge Vessel, Orifice, Optimization

요 지

본 연구에서는 쿠웨이트 Azzour WDC (Water Distribution Center) II 송수시설 운영 시 정전으로 인하여 발생할 수 있는 관로 내 압력을 검토하고 대비방안을 모색하였다. 이를 위하여 관로 내 흐름을 모의하는 상용소프트웨어 SURGE로 펌프가 급정지되는 경우의 초기조건을 적용하여 관로내 급변류를 모의하였다. 모의 결과, 정상상태 대비 최대 1.7배(Wafra)에서 4.2배(Mina Abdulla)의 수충압이 발생할 수 있음을 확인하였으며, 이에 대비하기 위한 시설로 Mina Abdullah 송수라인은 서지탱크(121.4 m^3)와 오리피스(275 mm)를, Wafra 송수라인은 서지탱크(43.1 m^3)와 오리피스(300 mm)를 설계 후 시공하였다. 시운전을 통하여 수충격 방지 시설의 성능은 검증되었고, 발생한 수충압은 예측한 허용 압력 이내로 확인되었다.

핵심용어 : 수충격, 서지탱크, 오리피스, 최적화

*정회원, ¹ 홍익대학교 토목공학과 박사과정

² GS건설 환경공정설계팀 공정엔지니어(E-mail: shimkd78@gmail.com)

Member, ¹ Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Hongik University

² Process Engineer, GS Engineering and Construction Environment Process Engineering Team

**GS건설 환경공정설계팀 공정엔지니어

Process Engineer, GS Engineering and Construction Environment Process Engineering Team

***GS건설 환경공정설계팀 공정엔지니어

Process Engineer, GS Engineering and Construction Environment Process Engineering Team

****GS건설 Azzour WDC II Project 화공엔지니어

Chemical Specialist, GS Engineering and Construction Azzour WDC II Project Team

*****교신저자, 정회원, 홍익대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-2-320-1613, Fax: +82-2-322-1244, E-mail: deokaykim@gmail.com)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Hongik University

1. 서 론

최근 급격한 도시화 진행으로, 신규로 계획되는 도시 및 기존 도시가 확장됨에 따른 물 공급은 중요한 문제로 부각되고 있으며, 대규모 도시에서 안정적인 물의 공급은 필수적이다. 시설물 운영인력의 부족, 기기 오작동, 지하 공사 사고 및 대규모 정전 등으로 인해 발생하는 문제에 대해 상수도 시설물의 안전성 확보는 더욱 요구되고 있다. 상수도 공급은 안정된 상태로 운전하며, 서서히 운전조건을 변경하여 시스템에 큰 충격을 주지 않는 상태로 운영한다. 그러나 예상치 못한 사고로, 관로 내 급격한 유량변동이 일어나면 수충격(Water hammer) 현상이 발생하며, 시설물의 파손이 발생한다.

일반적으로 상수관로에서 발생하는 압력변화는 밸브 폐쇄 및 펌프가 정지될 때 발생하며, Axworthy and Karney (2000)는 밸브 폐쇄시간 및 밸브 특성곡선에 따른 수충압을 비교하였고, 밸브 폐쇄속도가 짧을수록 배관 내 압력변동이 크게 나타났다.

Tian et al. (2008)는 병렬로 구성된 펌프시스템에서 기동방법에 대해 검토하고, 고속으로 펌프를 기동하는 경우 최대 50bar까지 상승하는 것으로 검토하였다. Soares et al. (2013)는 포르투갈 IPG (Instituto Politécnico da Guarda) 펌프장의 펌프급정지로 인한 수충격 현상 예측 및 결과를 비교하고, 실제 조건(모멘트, 체크밸브 폐쇄시간, 파속 등)을 고려하여 입력 자료를 보정하였다. Guo and Zhang (2012)는 병렬시스템 펌프운전에 대해 비교하여, 대규모 시설의 경우에는 정전시 펌프가 매우 복잡한 거동을 나타내며, 각 펌프별로 간섭이 있는 것으로 확인하였다.

Karney and Simpson (2007)은 상수관로 중간지점에 체크밸브를 설치하여 수충압을 감소시키는 방법을 조사하였고, Tran (2015)는 펌프정지시 체크밸브(Tilting Swing Check Valve) 특성 등을 고려한 수충격 현상 검토하였다. Delgado et al. (2014)는 수충격 모의한 값과 실험치를 비교하였고, 역류시 체크밸브가 즉시 닫히지 못해 큰 수충압이 발생하며, 역류되는 유량이 많을수록 큰 압력이 발생되는 것으로 나타났다.

Edwards and Collins (2014)는 불확실한 인자에 대해 검토하였고, 수요량이 변동됨에 따라 영향이 수충압에 영향이 있으므로, 실제 수요량 및 관 마찰 등에 대한 고려가 필요한 것으로 나타났다. Kim, Zecchin, et al. (2014)은 모델링의 결과와 실제 측정된 값이 유사한 결과가 나오도록 유전자알고리즘을 이용하여 모델을 보정하였고, Stephens et al. (2011)은 소구경 관내 수요량, 유입된 공기, 부정류 손실, 마찰손실 등의 영향인자에 대해 보정하여 예측된 수충압과 측정된 값을 비교하였다.

수충격 보호시설을 검토할 때, 시설물 용량을 과도하게 산정하면 공사비 및 부지가 많이 소요됨으로 비경제적인

설계가 되고, 수충격이 발생하는 극한조건을 고려하지 않으면, 수충압으로 인해 송수시설이 충분하게 보호되지 않아 파손이 된다. 따라서 수충격 방지시설물의 규모, 방법 및 위치 등을 최적화하기 위해 설계자는 현장의 조건 및 컴퓨터 소프트웨어 등을 이용하여 결과를 모의하고, 이를 바탕으로 서지탱크(Surge Tank), 체크밸브(Check Valve), 수충격 방지밸브 (Anti-surge Protection Valve) 등의 시설물을 검토하게 된다.

본 연구에서는 실제 송수펌프장에서 발생하는 수충격 현상을 예측하기 위해, 최종 적용된 체크밸브의 닫히는 시간을 고려하였고, 변경된 자료(관로종단 등)로 증가된 수충압은 기존에 설계된 수충격 방지시설에 오리피스를 추가하여 완화하였다. 실제 운전시 측정된 압력 값을 모델링을 통하여 예측된 값과 비교하여 정확도를 검증하였다.

2. 대상지역

쿠웨이트는 중동에 위치한 나라로, 연평균 강우량이 세계 평균보다 매우 낮은 89 mm/yr(2007년~2015년, Meteorological Department, Kuwait)이며, 생활에 필요한 용수는 대부분 해수담수화 시설을 통하여 공급하고 있다. Azzour WDC II 송수설비는 쿠웨이트 남부 Azzour 지역에 위치한 약 155만 톤/일 규모의 가압송수시설로, 바닷물을 담수화 공정으로 깨끗한 물로 처리하여 도시지역으로 공급하며, 송수펌프장, 배수지, 약품설비, 수충격 방지설비 및 비상발전설비 등으로 구성된다.

Azzour WDC II 송수펌프장은 Mina Abdullah, Wafra, Khiran 및 Lalli Al-Khiran 지역으로 물을 공급하고 있고, 이 중 Mina Abdullah 계열은 4개의 송수관(D1600 mm), Wafra 계열은 1개의 송수관(D1200 mm)으로 이루어지며, 각 관로 당 2개의 펌프가 설치되어 있다.

Fig. 1은 송수가압장(Azzour WDC II) 및 배수지(Mina Abdullah, Wafra)의 위치, Mina Abdullah 및 Wafra 송수라인의 노선을 나타낸다. 송수펌프장의 계통도는 Fig. 2와 같고, 유입, 혼합, 가압 및 유출공정으로 구분되며, 유입된 증류수를 기수와 적정한 농도로 희석시켜 담수로 만들어, 이를 저장했다가 각 배수지로 가압하여 보내고 있다.

Fig. 3은 Azzour WDC II에 실제 설치된 시설물(펌프 및 수충격 방지시설)을 나타내고 있다.

3. 수충격 해석

3.1 수충격 방지시설 설계

수충격 시설물은 KYPIPE사의 SURGE (Kentucky University, USA)를 이용하여 계산하였고, Ebacher et al. (2011)은 이 프로그램으로 대규모 관망시설의 예측된 수충압과 실제 측정된 값을 검토한 사례가 있다. 수충격 현상을 방지하기 위한

Fig. 1. Location Map and Transmission Pipeline Route

Fig. 2. Configuration for Pump Station

Fig. 3. Pumps and Surge Protection Facilities

최적의 서지탱크의 용량 및 오리피스 크기를 산정하기 위한 계산 흐름도는 Fig. 4와 같으며, Trial & Error 방식으로 구한다.

Fig. 4. Flowchart on Surge Analysis

3.2 기본방정식 및 입력자료

수충격 해석에 적용되는 기본방정식은 Eqs. (1), (2)과 같이 연속방정식과 운동량방정식으로 나타낼 수 있다(Watters, 1984; Chaudhry, 1987; Wylie et al., 1993).

$$V_t + gH_x + \frac{f_P V |V|}{2D_P} = 0 \quad (1)$$

$$H_t + \frac{a^2}{g} V_x = 0 \quad (2)$$

여기서 H: 수두 (m), V: 유체속도 (m/s)
D: 관경 (m), a: 파속 (m/s)
f: 마찰계수, g: 중력가속도 (m/s²)
첨자 P: 관로, t 와 x: 편미분

상수관망의 부정류는 주로 특성법(Method of Characteristics)으로 Eqs. (1), (2)를 해석할 수 있으며, Eq. (3)과 같이, 유량(Q)과 수두(H)의 상미분방정식으로 유도된다.

$$dH \pm B dQ \pm \frac{R}{\Delta x} Q |Q| dx = 0 \quad (3)$$

여기서 B: a/gA_P , A_P : 관의 단면적 (m²)

R: $f_P \Delta x / 2g D_P A_P^2$, a: 파속 (m/s)

여기서, Eq. (3)은 $dx/dt = \pm a$ 로 정의되는 C⁺ 및 C⁻ 특성선 (Characteristic Line)에서만 유효하며, 방정식을 만족하기 위하여 $\Delta x = \pm a \Delta t$ 의 공간·시간 격자가 선택된다. 초기조건 및 격자가 주어지면 Eq. (3)은 C⁺ 및 C⁻ 특성선을 따라 적분되고, 각 격자점에서 수두(H)와 유량(Q)을 결정할 수 있다.

펌프 및 배관의 입력자료는 Tables 1, 2와 같다.

Table 1. Pump Specification

Item	Description	
	Mina Abdullah	Wafra
Maker	Pentair, Nijhuis	Pentair, Nijhuis
Type	Venus 1-600.1200C (Volute Type)	Venus 1-400.1000 (Volute Type)
Rated Flow	1.65 m ³ /s	0.53 m ³ /s
Rated Head	120 m	180 m
Rated Speed	745 rpm	990 rpm
Efficiency	90.6%	85.3%
Nos. of Pumps	10EA (8D/2S)	3EA (2D/1S)
Inertia	458.4 kg · m ²	158 kg · m ²
Size	Suction D800 Discharge D600	Suction D500 Discharge D400
Power	2750 kW	1420 kW

Table 2. Pipe Specification

Item	Description	
	Mina Abdullah	Wafra
Diameter	1600 mm	1200 mm
Internal Diameter	1574 mm	1174 mm
Lining Thickness	13 mm	13 mm
Length	34949 m	35300 m
Pipe Thickness	18 mm	16 mm
Material	Ductile Iron	Ductile Iron
Wave Speed	1018.9 m/s	1065 m/s
Pressure Rating	PN16	PN25
Allowable Pressure	Max. 180 m / Min. -5 m	Max. 230 m / Min. -5 m

3.3 송수관로 정상상태 해석

Fig. 5a는 Mina Abdullah 송수관로의 동수두선(Hydraulic Gradient Line) 및 관로형상(Pipe Profile)을 나타내고 있으며, 펌프장부터 27 km까지는 완만한 경사를 보이고 있고, 이후에는 배수지까지 급경사로 이루어져 있다. Fig. 5b는 Wafra

(a) Mina Abdullah

(b) Wafra

Fig. 5. Hydraulic Gradient Line and Pipe Profile in Mina Abdullah and Wafra

송수관로를 나타내며, 펌프장부터 배수지까지 완만한 경사로 구성되어있다.

3.4 송수관로 말단부 밸브 폐쇄시 수충격 해석

송수관로 말단부 밸브 폐쇄시 관로내부 압력상승에 대한 영향을 Mina Abdullah는 (a)100초, (b)500초 및 (c)1000초로 구분하여 검토하고(Fig. 6), Wafra는 (a)10초, (b)2000초

및 (c)3000초에 대해 비교하였다(Fig. 7). 최소 수충압은 밸브 폐쇄 시간을 Mina Abdullah 1000초(16.8분), Wafra 3000초(50분)로 적용했을 때 나타났으나, 밸브 개폐 시간이 증가하면, 펌프 기동 준비시간이 늘어나 운전에 어려움이 발생하므로, 밸브 폐쇄 시간으로 수충압을 완화하는 방법은 효율적이지 않은 것으로 검토되었다.

(a) 100s

(b) 500s

(c) 1000s

Fig. 6. Surge Pressure by Valve Closing Time in Mina Abdullah

(a) 10s

(b) 2000s

(c) 3000s

Fig. 7. Surge Pressure by Valve Closing Time in Wafra

3.5 펌프정지시 수충격 해석

관로 내 발생하는 최악조건을 가정하여 정전시 펌프 비상 정지가 일어나는 시나리오를 고려할 때, Mina Abdullah 송수관로 계통은 허용압력의 최대 3배(55bar)까지 발생(Fig. 8a) 하였고, 관로의 대부분 구간에서 부압이 발생하였다. 송수펌프장 인근에서 체크밸브가 닫힐 때, 발생하는 높은 스파이크 모양의 수충압이 매우 크게 발생하는 것으로 검토되었다. Fig. 8b는 송수펌프장 인근 A-35 절점의 압력 변화를 나타내며 4개의 송수관로가 한 개의 그룹으로 연결되어 간섭현상이 발생하고, 초기에 약 120 m에서 -5 m로 떨어지고, 초기 압력과 반사 이후 약 150 m까지 올라간다(계산오차 등을 고려하여 수충격 해석시 증기압 발생을 -5 m로 고려). 그러나, 150초 이후 다시 부압이 발생하고 400초에서 약 25bar의 높은 압력이 발생하여 수충격 방지설비가 필요한 것으로 검토되었다.

Fig. 8. Surge Pressure for Mina Abdullah without Surge Protection System

Wafra 송수관로 계통의 허용압력은 23 bar이지만, 최대 1.3배(30 bar)까지 수충압이 발생(Fig. 9a)하고, 20 km 구간부터 부압이 나타났으며, 송수펌프장 인근에서 매우 높은 수충압이 발생하였다. Fig. 9b는 송수펌프장 인근 J-11 절점의 압력 변화를 나타내며, 초기에 약 180 m에서 60 m로 떨어지고, 초기 압력과 반사 이후 약 300 m까지 올라간다. 수충격 발생 초기부터 약 30 bar의 높은 압력이 발생하여 Wafra 송수관로 계통도 효율적인 수충격 방지설비가 필요한 것으로 판단되었다.

Fig. 9. Surge Pressure for Wafra without Surge Protection System

기 검토된 수충격 방지설비를 고려하여 송수관로에서 발생하는 압력은, Mina Abdullah 송수관로 계통의 경우, 각 관로마다 1개의 서지탱크($121.4 \text{ m}^3 \times 1\text{EA}$)를 적용하고, 실제 발생하는 압력의 변화를 예측하기 위하여 송수관로에 설치된 32개소의 공기 밸브(D200 mm)를 고려한 결과는 최대 수충압이 상당히 감소하고 부압 조건이 부분적으로 제거되었다. 그러나 여러 구간에 걸쳐서 최대 및 최소 압력이 허용 기준을 초과했으며, Fig. 10a는 서지탱크(121.4 m^3) 4개 및 공기밸브(D200 mm) 32개소를 적용한 압력변화를 보여준다. Wafra 송수관로 계통의 경우, 1개 관로에 1개의

서지탱크($43.1 \text{ m}^3 \times 1\text{EA}$)를 적용하고, 실제 발생하는 압력의 변화를 예측하기 위하여 송수관로에 설치된 26개소의 공기밸브(D200 mm)를 고려한 결과는 최대압력은 허용기준 이내로 나타났지만, 관로 25 km 이후에서 부압이 발생하는 것으로 검토되었다. Fig. 10b는 서지탱크(43.1 m^3) 1개 및 공기밸브(D200 mm) 26개소를 적용한 압력변화를 보여주고 있다.

Fig. 10. Surge Pressure with Surge Vessels and Air Valves

4. 오리피스 검토

4.1 검토배경

초기 수충격 검토시 적용했던 펌프입력자료(관성모멘트 및 배치), 관로형상 및 체크밸브 폐쇄시간(0.3초) 등은 최종 자료를 접수하면서 변경이 되어, Mina Abdullah 송수관로 계통의 경우에는 최대 및 최소 허용압력을 초과하였고, Wafra 송수관로 계통은 최소 허용압력을 넘었다. 따라서 기존 설비로는 충분히 수충격 현상을 방지할 수 없으므로, 추가적인

보호설비를 검토하게 되었다. 단순히 서지탱크의 용량을 증가시키는 방법은, 부지면적이 좁아 서지탱크의 단면적을 확대하기가 어렵고, 서지탱크 상부에 운전에 필요한 자료를 측정하기 위한 각종 계기류 관리로 인해 서지탱크 높이가 제한되어 불가능한 것으로 검토되었다. 그러므로 기존 시스템에 최소한의 영향을 주면서 효과적으로 수충격 현상을 해소할 수 있는 방법인 오리피스가 추가로 고려되었다.

오리피스는 1) 유량측정, 2) Fluid Mixing, 3) 펌프 유량 제어, 4) 압력감소 등의 목적으로 사용되고 있으며, 특히, 압력감소는 유화 플랜트 및 발전 등에서 1) 높은 압력으로 후속 공정에 영향을 주는 경우, 2) 잔류 Gas 등을 대기 중에 방출할 때 압력이 높은 경우에 오리피스를 적용하고 있다.

Jeong et al. (2014)은 오리피스를 이용한 유체 무동력 혼합장치에 대하여 연구하였고, Kim, Lee et al. (2014)은 소규모 상수도 배관에서 서지탱크 및 배관에 오리피스를 설치하여 수충격을 완화하는 방법에 대해 검토하였다. 그러나, By-Pass 배관 및 체크밸브 등의 구성이 추가 되어 금회 프로젝트에는 적용이 어려우며, 특히 이번엔 적용된 오리피스는 1) 서지탱크 하단 유입부에 설치하여 탱크 자중(98톤) 및 채워진 물(121.4톤)의 무게로 진동 및 노이즈의 영향이 적고, 2) 서지탱크 스커트(서지탱크와 콘크리트 구조물 연결부)가 구조물에 지지되어 별도의 Trust Block이 필요 없는 장점이 있다.

4.2 오리피스 계산 및 최적화

일반적으로 오리피스는 전/후단의 압력변화를 측정하여 유량을 계산(Orifice Plate)하거나, 단순 압력감소 (Restrict Orifice)를 목적으로 이용된다. 형상에 따라 Edge (Concentric / Eccentric / Segmental) 및 Quadrant Type으로 구분되고, 유체에 적용되는 오리피스 내경은 관경의 15~75%로 적용되며, 필요한 차압에 따라 계산해 오리피스 내경이 결정된다. 오리피스의 위치는 배관 또는 서지탱크 유입부에 설치가 가능하지만, Fig. 11a와 같이 배관설치는 상류부 20D, 하류부 5D의 이격거리가 필요하고 진동이 발생할 수 있어, Fig. 11b와 같이 기존 시스템에 영향을 최소화할 수 있는 서지탱크 유입부에 오리피스를 설치하는 것으로 고려하였다(API, 1986).

Fig. 11. Straight Run for Orifice Plate and Orifice Location

오리피스에의 차압은 충분히 느린 아음속상태(유속<마하 수 0.3 이하)에서 베르누이 방정식(Bernoulli's Eq.)을 이용하여 계산할 수 있으며, 방정식은 Eq. (4)와 같다.

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho V_2^2 - \frac{1}{2} \rho V_1^2 \quad (4)$$

여기서 p1: 유입압력 (Pa)
p2: 유출압력 (Pa)
 ρ : 유체밀도 (kg/m³)
V1: 유입유속 (m/s)
V2: 유출유속 (m/s)

유입/유출을 유속이 균일한 등류로 가정하면, 연속방정식으로 표현할 수 있으며, Eq. (5)와 같다.

$$q = V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (5)$$

여기서 q: 유량 (m³/s)
A1: 유입단면적 (m²)
A2: 유출단면적 (m²)

Eqs. (4)와 (5)를 이용하면 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = A_2 \left[\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Eq. (6)은 이론적인 값이며, 실제로는 실험 등으로 구해진 보정계수를 고려해야 하며, 수정된 식은 Eqs. (7a) 또는 (7b)와 같이 표현된다.

$$q = C_d A_2 \left[\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7a)$$

여기서 C_d : 유출계수

$$C_f A_o = C_d \frac{A_2}{\left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$q = C_f A_o \left(\frac{2 \Delta p}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7b)$$

여기서 C_f : 유량계수 (일반적으로 0.6~0.9)

오리피스를 이용한 필요한 차압은 Table 3과 같으며, 송수관로에서 서지탱크로 유/출입되는 유량 및 압력은 다음과 같다.

송수관로는 최고 및 최저 압력을 견딜 수 있도록 설계되므로, 오리피스는 급격한 유량변동을 고려하여 유/출입이 원활할 수 있도록 크기를 선정하여야 한다. Figs. 12a와 12b는 오리피스 크기에 따른 민감도를 분석한 그래프이며, 평가된 자료에 따라 Table 4와 같이 비교하여 최적화된 값을 평가하였다. 평가 방법은 오리피스 크기별 유입/유출 손실수두를 계산하여, 크기가 얼마나 적절한지 값으로 평가하였고, 최종적으로는 유입/유출에 대한 값을 지수화 하였다(Index = 0.6 × 값IN + 0.4 × 값OUT). Mina Abdullah는 오리피스 성능에 영향을 크게 미치지 않는 범위 내에서 가공성을 고려해 275 mm 크기로 결정하였고, Wafra에 설치되는 오리피스는 300 mm로 선정되었다.

Table 3. Pressure Variation (P1: Surge Vessel, P2: Pipeline) by Orifice Plate

Direction	Description		
	Item	Mina Abdullah	Wafra
P1 → P2	Flow	1.50 (m ³ /s)	0.85 (m ³ /s)
	P1	90 (m)	160 (m)
	P2	25 (m)	140 (m)
	Difference	65 (m)	20 (m)
P2 → P1	Flow	1.60 (m ³ /s)	0.65 (m ³ /s)
	P1	25 (m)	150 (m)
	P2	110 (m)	160 (m)
	Difference	85 (m)	10 (m)

(a) Mina Abdullah

(b) Wafra

Fig. 12. Sensitive Analysis for Orifice Sizing in Mina Abdullah and Wafra

Table 4. Orifice Sizing Comparison

Item	Value					
	Diameter (mm)	IN		OUT		INDEX
		HL(m)	V	HL(m)	V	
Mina Abdullah	250	12.57	0	11.05	0	0
	255	11.62	5	10.21	5	10
	260	10.58	13	9.45	10	23.6
	265	9.96	27	8.75	15	44.4
	270	9.24	38	8.12	20	61.6
	275	8.59	49	7.55	27	80.4
	280	7.99	42	7.02	39	81.6
	285	7.44	33	6.54	50	79.6
	290	6.94	25	6.10	42	63.6
	295	6.49	17	5.70	33	46.8
	300	6.06	9	5.33	24	30
Wafra	275	1.42	0	2.42	19	15.2
	280	1.32	5	2.26	32	31.6
	285	1.23	15	2.10	43	52.4
	290	1.15	28	1.96	48	72
	295	1.07	40	1.83	38	78.4
	300	1.00	50	1.71	29	83.2
	305	0.94	41	1.60	21	66
	310	0.88	32	1.50	15	50.4
	315	0.82	24	1.41	10	36.8
	320	0.77	16	1.32	5	23.2
	325	0.73	8	1.24	0	9.6

오리피스를 추가한 Mina Abdullah 송수관로 계통의 수충격 해석결과는 Figs. 13a, 13b와 같이, 전체관로 구간에서 최대(180 m) 및 최소(-5 m) 허용압력을 만족하였고, 서지탱크는 초기에 공기 20 m³ 및 물 101.4 m³가 충전 된 상태에서 운전된다.

Wafra 송수관로 계통의 수충격 해석결과는 Figs. 14a, 14b와 같이, 전체관로 구간에서 최대(230 m) 및 최소(-5 m) 허용압력을 만족하고, 서지탱크는 초기에 공기 15 m³ 및 물 28.1 m³가 충전 된 상태에서 운전되며, 펌프 정지시 수압변동으로부터 충분히 보호가 되는 것으로 검토되었다.

4.3 실측 자료를 통한 계산결과 검증

Fig. 15는 펌프 비상 정지시 측정된 최대 수압으로 Mina Abdullah 88 m (Surge Vessels: 121.4 m³ × 5EA (4D/1S), Orifice: 275 mm) 및 Wafra 221 m (Surge Vessels: 43.1 m³ × 2EA (1D/1S), Orifice: 300 mm)로 나타나 허용 범위 내에 안정적으로 운전되는 것으로 나타났다. Wafra 송수관로 계통은 최대압력 예측치와 실측된 값의 차이가 4% 이내로 유사한 결과를 얻었지만, Mina Abdullah 송수관로 계통은 예측치와 실측된 값의 차이가 25%로 다소 높게 나타났으며,

서지탱크의 경판 공간이 추가로 확보됨에 따라 실측치와 차이가 발생한 것으로 검토되었다.

(a) Transmission Pipeline

(b) Junction A-35

Fig. 13. Surge Pressure with Full Protection in Mina Abdullah

(a) Transmission Pipeline

(b) Junction A-35

Fig. 14. Surge Pressure with Full Protection in Wafra

5. 결 론

본 연구에서는 Azzour WDC II 송수펌프장의 수충격 보호 설비에 대해 검토하였다. 제한된 부지 내에서 펌프 정지시 발생하는 수충압을 효율적으로 보호할 할 수 있도록 설비를 구성하였고, 기존에 검토된 시설에 오리피스를 추가하여 검토하였다. 오리피스는 수충격 현상을 완화할 수 있는 최적화된 크기로 선정되었다. 수충격 보호시설은 최적의 용량을 찾도록 해석을 진행하였고, Mina Abdullah는 121.4 m³ 서지탱크 및 오리피스(275 mm, 연결관 D1000) 5개가 설치하였고, Wafra는 43.1 m³ 서지탱크 및 오리피스(300 mm, 연결관 D600) 2개가 적용되었다.

Fig. 15. Actual Surge Pressure Trend in Transmission Pipelines

금회 수충격 방지시설은 서지탱크의 용량을 증가시키기 어려운 상황에서 유화 및 발전 플랜트 분야에서 일반적으로 적용되는 오리피스를 고려해 배관 내 압력을 저하시키는 방법을 제시하였으며, 대규모 시설(150만톤/일)에 적용되어 실제 운전을 통하여 검증하였다. 특히, 배관이 아닌 서지탱크 유입부 하단에 오리피스를 설치하여 진동 및 소음을 최소화 하면서 수충압을 낮출 수 있었으며, 예측된 수충압과 실제 발생하는 압력은 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 오리피스를 적용할 경우 최대 압력을 매우 효과적으로 조절하는 것으로 검토되었으나, 부압에 대해서는 부정적인 영향이 발생할

수 있으므로, 오리피스를 수충격 방지설비로 고려할 때에는 신중한 검토가 필요하다.

감사의 글

심도있는 데이터 분석 및 조언을 해주신 Nihon Suido Consultants(일본)의 Arai, Takahashi, Watabe, Isigaki 및 Fluid Hammer Consultancy Services(인도)의 Mokhtar, Srinivasa 박사님께 감사드립니다. 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제 번호 18AWMP-B127555-02).

References

- API (American Petroleum Institute). (1986). *Manual on installation of refinery Instruments and Control Systems*. API publications/API RP 550 Part-1, pp. 7-9.
- Axworthy, D.H., and Karney, B.W. (2000). Valve closure in graph-theoretical models for slow transient network analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 126, No. 4, pp. 304-309.
- Chaudhry, M.H. (1987). *Applied hydraulic transients* (pp. 27-88). Van Nostrand Reinhold Company.
- Delgado, J.N., Martins, N.M.C., and Covas, D.I.C. (2014). Uncertainties in hydraulic transient modelling in raising pipe systems: Laboratory case studies. *Procedia Engineering*, Vol. 70, pp. 487-496.
- Ebacher, G., Besner, M.C., Lavoie, J., Jung, B.S., Karney, B.W., and Prévost, M. (2011). Transient modeling of a full-scale distribution system: Comparison with field data. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 137, No. 2, pp. 173-182.
- Edwards, J., and Collins, R. (2014). The effect of demand uncertainty on transient propagation in water distribution system. *Procedia Engineering*, Vol. 70, pp. 592-601.
- Guo, J., and Zhang, L. (2012). Tripping transients in a complex pumping system with multi pumps in Parallel. *Procedia Engineering*, Vol. 31, pp. 428-434.
- Jeong, S.Y., Lee, K.B., and Rhi, S.H. (2014). Flow characteristics of the in-line non-consuming power mixer with orifice. *Journal of Industrial Science and Technology Institute*, Vol. 28, No. 2, pp. 67-70.
- Karney, B.W., and Simpson, A.R. (2007). In-line check valves for water hammer control. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45, pp. 547-554.

- Kim, S.H., Zecchin, A., and Choi, L. (2014) Diagnosis of a pipeline system for transient flow in low reynolds number with impedance method. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 140, No. 12, 04014063.
- Kim, S.G, Lee, K.B., and Kim, K.Y. (2015). Water hammer in the pump-rising pipeline system with an air chamber. *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 26, No. 6, pp. 960-964.
- Soares, A.K., Covas, D.I.C., and Ramos, H.M. (2013). Damping analysis of hydraulic transients in pump-rising main systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 139, No. 2, pp. 233-243.
- Stephens, M.L., Lambert, M.F., Simpson, A.R., Vitkovsky, J.P. (2011). Calibrating the water-hammer response of a field pipe network by using a mechanical damping model. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 137, No. 10, pp. 1225-1237.
- Tian, W., Su, G.H., Wang, G., Qui, S., Xiao, Z. (2008). Numerical simulation and optimization on valve-induced water hammer characteristics for parallel pump feedwater system. *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 35, No. 12, pp. 2280-2287.
- Tran, P.D. (2015). Pressure transients caused by tilting-disk check-valve closure. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 141, No. 3, 04014081.
- Watters, G.Z. (1984). *Analysis and control of unsteady flow in pipelines*. Butterworth-Heinemann Publishing. pp. 111-149.
- Wylie, E.B., Streeter, V.L., and Suo, L. (1993). *Fluid transients in system* (pp. 37-39). Prentice Hall.

Received	October 4, 2018
Revised	October 5, 2018
Accepted	October 18, 2018