

에어챔버 설치에 따른 펌프관로계의 수격현상

이선곤[†] · 양철수^{*}

인하대학교 기계공학과 · ^{*}(주) SM TECH

(2009. 7. 20. 접수 / 2011. 2. 10. 채택)

Water-hammer in the Pump Pipeline System with and without an Air-Chamber

Sun Kon Lee[†] · Cheol Soo Yang^{*}

Department of Mechanical Engineering, Inha University

^{*}SM TECH Corporation

(Received July 20, 2009 / Accepted February 10, 2011)

Abstract : When the pumps stopped in the operation by the power failure, the hydraulic transients take place in the sudden change of a velocity of pipe line. Each and every water hammer problem shows the critical stage to be greatly affected the facts of safety and reliability in case of power failure. The field tests of the water hammer executed at Cheong-Yang booster pump station having an air chamber. The effects were studied by both the practical experiments and the CFD(Computational Fluid Dynamics : Surge 2008). The result states that the system with water hammering protection equipment was much safer when power failure happens. The following data by a computational fluid dynamic analysis are to be shown below, securing the system stability and integrity. (1) With water hammering protection equipment. ① Change of pressure : Up to 15.5 kg/cm² in contrary to estimating 16.88 kg/cm². ② Change rate of water level : 52~33% in contrary to estimating 55~27%. ③ Note that the operational pressure of pump runs approx. 145 m, lowering 155 m of the regularity head of pump. ④ Note that the cycle of water hammering delays from 80 second to 100 second, together with easing the function of air value at the pneumatic lines. (2) Change of pressure without water hammering protection equipment : Approximate 22.86 kg/cm². The comprehensive result says that the computational fluid dynamics analysis would match well with the practical field-test. It was able to predict Max. or Min. water hammering time in a piping system. This study aims effectively to alleviate water hammering in a pipe line to be installed with air chamber at the pumping station and results in making the stability of pump system in the end.

Key Words : water hammer, air chamber, surge, field test

1. 서론

정지하고 있는 펌프를 기동시키거나 정상운전 중인 펌프의 이상으로 갑자기 정지될 때 또는 밸브의 개도를 빠르게 변화시킬 경우 그 순간 송수관로내의 유속이 급격히 변하고 압력도 크게 상승 또는 하강하게 되어 유체는 부정류 상태가 되며 압력파(pressure wave)가 배관 사이를 왕복할 때 송수관로내의 압력은 관로형상(pipeline profile)에 따라 물의 포화증기압 이하로 떨어져 증기공동(vapor cavity)이 형성되어 수주분리(column separation) 현상이 발생하고 관로내의 압력이 대기압보다 낮아지면 관

로에 좌굴(collapse)이 일어날 수 있으며, 증기공동으로 분리되었던 수주가 재결합할 때 높은 압력이 유발되어 기기의 허용압력 이상일 경우 송수관로는 물론 펌프, 밸브 등의 시설물이 파손될 염려가 있다¹⁻⁵⁾.

이와 같은 수격작용(water-hammer)으로 인하여 펌프 동력이 갑자기 차단될 때 송수유량의 역류로 펌프 모터가 역회전으로 가속되어 사고 발생 우려가 있으며 또한 압력상승으로 펌프, 밸브, 관로 및 부대시설이 파손되는 손상을 입기도 하고, 관로내의 압력 상승 및 강하로 관로가 붕괴되거나 수주분리가 발생하여 관로가 파열되기도 한다. 이러한 수충격에 의한 사고는 펌프장 침수 등의 문제를 야기할 수 있다. 따라서 이러한 수격작용을 완화시키

[†] To whom correspondence should be addressed.
sun643@chol.com.Z

거나 시스템을 보호하기 위한 수격완화설비(surge control system)에 대한 검토가 필요하다⁴⁾. 따라서 본 연구에서 가압 펌프장에서의 에어챔버 설치 유·무에 따른 펌프-관로계의 수격현상을 컴퓨터 수치해석 및 현장 실험을 하여 비교·분석 하였다. 이는 추후 건설될 펌프장의 신뢰성과 안정성 확보를 위한 기본 및 상세설계에 매우 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

2. 수격현상 실험

2.1. 전산해석(surge 2008)

2.1.1. 시스템 구성

본 연구의 대상은 청양가압장과 2개의 배수지인 청양 및 청라 가압장을 대상으로 하여 청양가압장에서 송수량을 7,200 m³/day로 설정하고 청양가압장에서 청양배수지 및 청라배수지까지 펌프-관로계에 대한 수격현상을 수치해석 하였다.

관로 형상은 Fig. 1에 나타내었으며 청색은 관로 매설단면형상이며 적색은 동수구배선을 나타낸다.

취수 펌프장에서 방류구까지의 관경은 0.2~0.4 m이며 관로길이는 19,340 m이다. 이 수량을 가압시키기 위해서는 편흡인 형형다단 원심 볼류트펌프 3대(1대 예비)가 청양가압장에서 운전된다. 청양가압장서 병렬로 운전되고 있는 펌프 2대가 갑작스런 정전으로 정지 되었을 때 발생하는 수격작용이 가장 심각하므로, 이에 대한 수격현상을 전용 전산 프로그램인 Surge 2008을 사용하여 수치해석 하였다. 수치계산은 수격완화설비로서 펌프장에 공기밸브와 에어챔버를 설치했을 경우와 없을 경우에 대하여 각각 수행하였다.

수치계산에 사용된 입력 자료 및 에어챔버의 제원은 다음과 같다.

① 펌프자료 : 주펌프

펌프 운전 대수 = 3 sets(예비 1대)

규정 양정 = 155 m

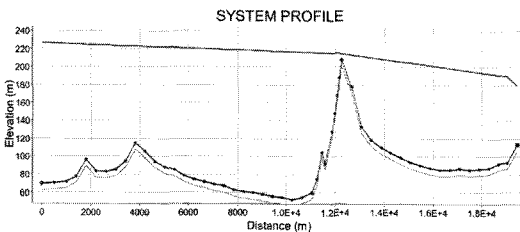


Fig. 1. Longitudinal pipeline profile of Cheong-Yang booster pump-pipeline system.

규정 송출량 = 2.5 m³/min

규정 회전수 = 1,785 rpm

② 저수조 수위 :

흡수정(L.W.L) = 70.10 m

배수지 정수두 = 178.81 m

③ 에어챔버 :

총 체적 = 4.0 m³

초기 압축공기량 = 2.0 m³

초기상태의 공기압력 = 15.7 kg/cm²

연결관의 직경 = 0.15 m

④ 공기밸브/급속공기밸브 : 연결 직경 = 0.10 m

2.1.2 실험 및 고찰

관로상의 수격작용을 제어하는 장치가 없는 경우 수치해석결과 얻어진 관로에서의 최대·최소압력을 Fig. 2에 펌프출구에서의 피에조수두 변동을 Fig. 3에 각각 나타내었다. 이를 통하여 펌프 출구측 관로에서 수충압은 매우 빈번히 작용하며, 압력변동의 폭도 상당히 크며 넓은 구역에 걸쳐 관로내 압력이 물의 포화증기압 이하로 낮아져 증기공동이 형성되어 수주분리현상이 발생함을 알 수 있다.

관로내 압력이 대기압보다 낮아지면 관로에 좌굴이 일어날 수 있으며, 증기공동에 의해 분리되었던 수주가 재결합할 때 높은 압력이 유발되어 심한 수격현상이 일어나 관로에 파손을 입힐 우려가 있

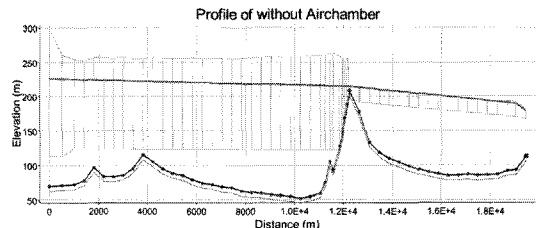


Fig. 2. Analysed max. and min. pressure at pipeline without Anti Surge Device(blue line : pipe line, red line : hydraulic grade, gray line : upsurge and down surge, pink line : pipe line under -7 m).

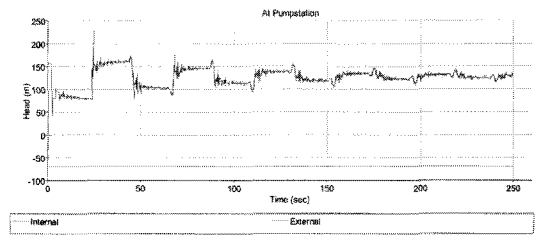


Fig. 3. Analysed piezo head at pump exit without Anti Surge Device.

다. 이러한 수격작용을 완충시켜주기 위하여 펌프 출구에 에어챔버와 공기밸브(급속공기밸브)를 설치하여 이를 비교 분석 하였다.

Fig. 4는 에어챔버와 공기밸브(급속공기밸브)를 설치하였을 경우 펌프 출구에서의 피에조수두 변동을 나타낸다. 펌프장에서 발생한 압력파는 관로 정점부에서 반사되며, 펌프 출구측에 작용하는 최대 압력도 상당히 완화되어 펌프 토출압력과 유사한 정도로 해소되고 있으며 펌프 출구와 관로에서는 증기공동이나 수주분리현상이 발생하지 않음을 알 수 있다.

공기밸브(급속공기밸브)와 에어챔버 설치에 따른 펌프 출구측에서의 과도특성을 Table 1에 나타내었으며, Table 2는 에어챔버내 압축공기의 과도특성을 나타내었다. Fig. 5는 에어챔버를 통한 유량변동을 나타내며, 에어챔버는 총 체적이 4.0 m³가 되도록 설치하고 초기공기체적은 2.0 m³ 정도를 유지

Table 1. Analysed transients at pump exit with and without an Air chamber

| | Without Anti surge Device | With Air chamber (4 m ³)+Air Valve |
|-------------------|---------------------------|--|
| 펌프장에서의 최대압력 | 22.86 kg/cm ² | 16.88 kg/cm ² |
| 펌프장에서의 최소압력 | 4.41 kg/cm ² | 9.63 kg/cm ² |
| 관로에서의 최소압력 | -1.0* kg/cm ² | 5.71 kg/cm ² |
| 수격현상 주기(sec) | 약 42 sec | 약 102 sec |
| 체크밸브 Closing Time | 0.448 sec | 0.374 sec |

주) *관로 중 부압(Negative Pressure)으로 수주분리가 발생함.

Table 2. Analysed compressed air state at Cheong-Yang pump station(Air chamber(4 m³) + Air V/V)

| 초기체적(m ³) | | 초기압력(kg/cm ²) | | | |
|-------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------|
| 2.0 | | 15.72 | | | |
| 최대 체적 (m ³) | 최소 압력 (kg/cm ²) | 발생 시간 (sec) | 최소 체적 (m ³) | 최대 압력 (kg/cm ²) | 발생 시간 (sec) |
| 2.91 | 9.63 | 26.818 | 1.89 | 16.88 | 65.682 |

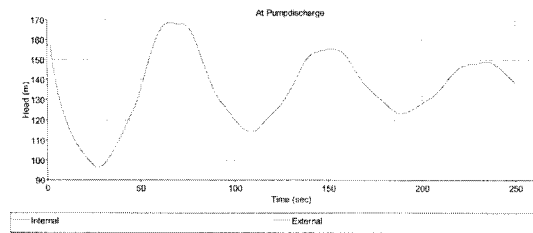


Fig. 4. Analysed piezo head at pump exit with Air Chamber + Air Valve.

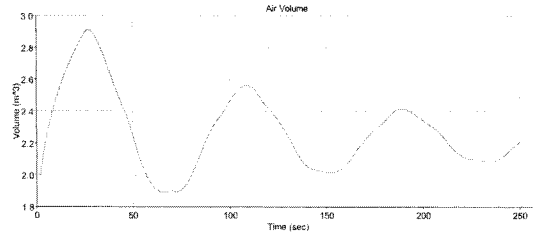


Fig. 5. Variations of Analysed air volume at Air Chamber.

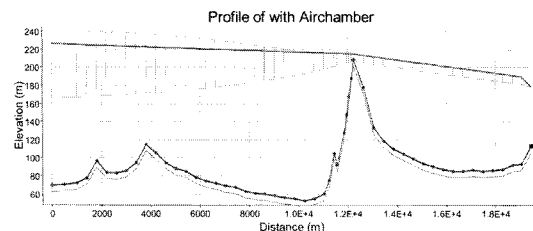


Fig. 6. Analysed max. and min. pressure at pipeline with Air Chamber + Air Valve(blue line : pipe line, red line : hydraulic grade, gray line : upsurge and down surge, pink line : pipe line under -7 m).

할 수 있도록 Compressor로 압축공기를 공급하여 주었다. Fig. 6은 전체관로에 대한 압력 분포를 나타낸다. 분홍색은 관로에서 7 m 아래에 선을 나타낸 것이며 상·하수도 시설기준⁶⁾에 의해 부압이 분홍색 압력선 보다 낮아서는 안된다.

2.2. 현장시험(Field test)

청양가압장에서의 송수량을 7,200 m³/day로 설정하고 청양가압장에서 청양배수지 및 청라배수지까지 펌프-관로계에 대한 수격현상을 현장시험 하였다. 가압을 위하여 편홍인 황형다단 원심 볼류트펌프 3대(1대 예비)가 청양가압장에서 운전된다. 용수공급은 3대의 펌프 중 2대가 가동되고, 나머지 1대는 예비용으로 구성되어 있다.

각 펌프의 토출은 펌프, 체크밸브, 제수밸브가 배관으로 이루어지고 역류방지를 위한 체크밸브가 각 펌프에 장착된다. 또한 급작스런 기계의 조작이나 정전등 유량의 변화로 인하여 발생하는 수격을 완화시키기 위하여 강관 원통 입형의 구조를 가지는 용량 4 m³의 에어챔버를 설치하였다.

에어챔버는 운전시 내부에 공기와 물을 50%씩 보유하고 있으며, 수격이 발생하여 하강압이 발생하면 내부의 물을 방출하여 부압의 발생을 억제하고 반대로 시간이 경과한 후 상승압이 발생하면 내부에 물을 저장하고 공기의 압축으로 압력상승을 억제하게 된다.

2.2.1. 시스템 구성

Table 3. Gauge position

| 측정기기 | 설치위치 | 비고 |
|---------------------------|--------|----------------|
| PT (Pressure Transmitter) | 에어챔버 ⑬ | 에어챔버내의 압력변동 전송 |
| LT(Level Transmitter) | 에어챔버 ⑥ | 에어챔버내의 수위변동 전송 |
| FT(Flowrate Transmitter) | 토출배관 | 토출배관을 통한 유량 전송 |

Table 3과 같이 에어챔버에 장착한 기기를 통하여 압력 및 수위값을 저장하도록 하였다.

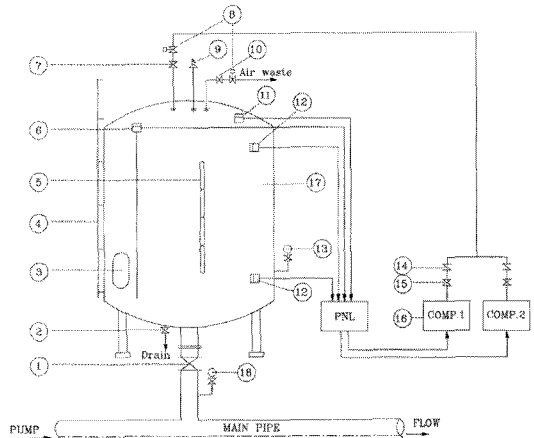
주배관과 $\Phi 150$ mm의 파이프로 연결되어 배관의 압력이 직접 에어챔버로 전달된다. 배관의 압력은 수두차이가 1.0 m 정도 발생하나 압력계의 수치는 0.1 kg/cm^2 의 수치로 큰 차이가 없다.

실험장치는 16 bit의 분해능을 가지고 있는 NI 6015 모델을 사용하여 Data Logging 장치로 구성하였으며 압력은 최대 0.129%의 오차를 가질 수 있는 압력센서를 이용하여 전체 시스템을 제어하고 그 값이 출력되도록 하였다. 현장에 적용된 압력센서의 정도는 0.06%의 정도를 가진다. 장치의 구성과 함께 각각의 센서는 시스템의 정확도를 위하여 전류값으로 출력되며 전류값으로 출력되는 자료는 정밀저항(250Ω , 0.1%)을 이용하여 전압값으로 표시될 수 있도록 장치를 구성하였다.

2.2.2. Data Logging Equipment에 의한 실험 결과

Fig. 8(a)-(d)는 에어챔버에서 측정한 압력과 수위결과를 나타낸 것이고 Fig. 8(e)는 수충격시험 결과와 전산해석결과를 동시에 나타낸 것이다.

Fig. 8(a), (b)는 3대의 펌프 중 1대씩 펌프를 정지하였을 때 결과이고, Fig. 8(c), (d)는 3대의 펌프 중 2대씩 펌프를 정지하였을 때 결과이다.



① connection V/V ② Drain V/V ③ Manhole ④ Ladder ⑤ Level indicator ⑥ Level sensor ⑦ Gate V/V(Ball V/V) ⑧ Solenoid V/V ⑨ Safety V/V ⑩ Ball V/V ⑪ Pressure sensor ⑫ Float level S/W ⑬ Pressure gauge ⑭ Check V/V ⑮ Gate V/V ⑯ Compressor ⑰ Air-Chamber ⑱ Pressure gauge
Fig. 7. Schematic of data logging system.

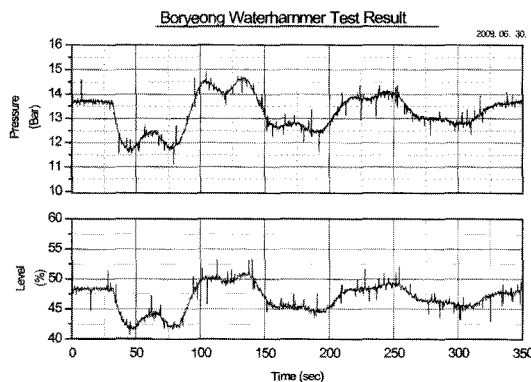
3. 수격현상 수치해석과 시험결과의 비교

3.1. 긴급정지에 따른 수격현상 및 실험결과

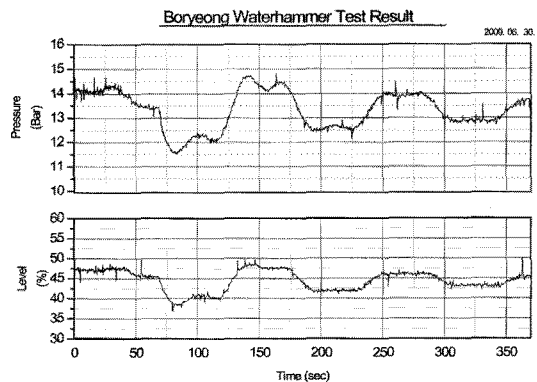
긴급정지에 의해 펌프가 정지하면 흐르던 유체는 관성에 의해 계속 흐르려고 하기 때문에 펌프 토출측(에어챔버 연결부)의 압력은 급격히 낮아진다. 이 때 발생하는 압력파가 하류 측으로 전달되고 이 압력파가 되돌아 올 때는 상승파가 되어 펌프상의 각 기기에 영향을 미치게 되는 것이다.

압력이 급격히 낮아지면 주 배관으로 에어챔버에 있는 고압의 공기를 이용하여 배관에 물이 공급 되어 배관의 급격한 압력변화를 억제하게 된다.

Fig. 8(a)에서 보는바와 같이 실험을 준비하고 약 5초 후 펌프가 긴급정지한 후 급격한 압력저하가



(a) Variations of measured pressure-air volume when no. 1 pump emergency stop



(b) Variations of measured pressure-air volume when no. 3 pump emergency stop

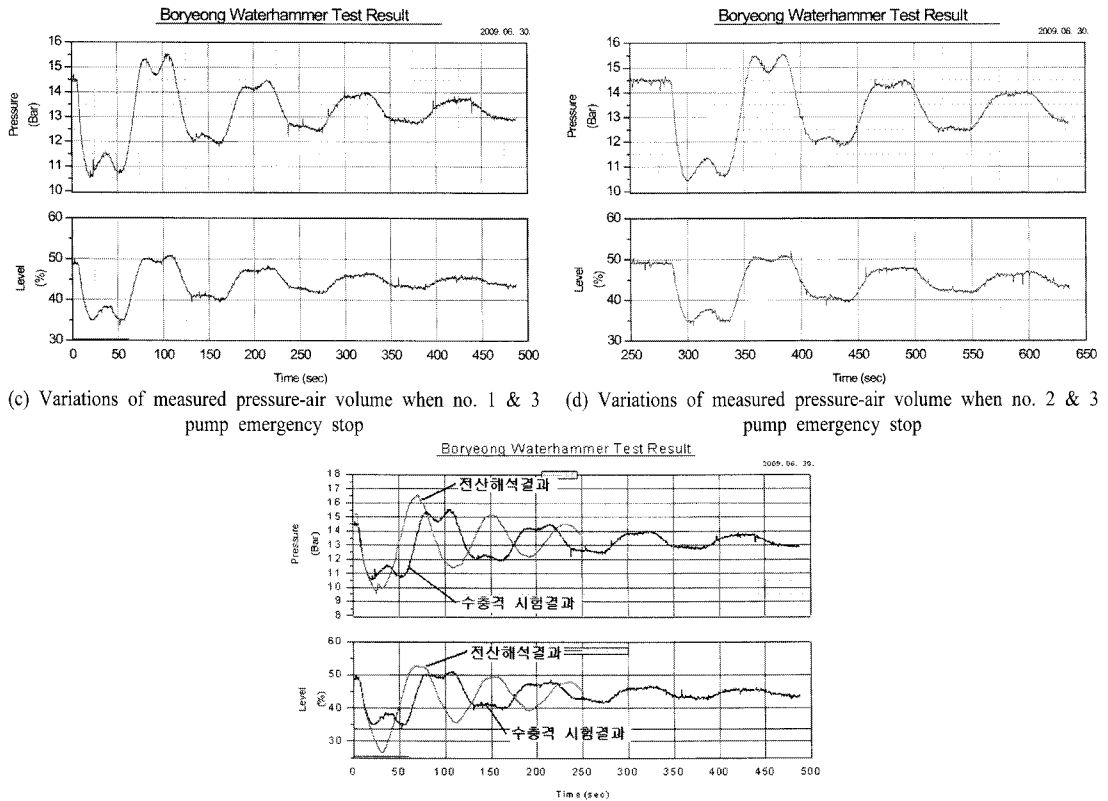


Fig. 8. Variations of measured pressure–water level when pump emergency stop.

생기는 것을 볼 수가 있다. 압력이 급격하게 낮아지다가 챔버의 수위가 낮아짐(배관에 물이 공급됨)에 따라 압력이 회복되어 급격하게 낮아지던 것이 정상적인 흐름의 형태로 되는 것을 알 수 있다. 급격하게 압력이 변동이 생기는 것은 비압축성 유체인 물이 약간의 유량변화만으로도 압력의 변화가 크게 되기 때문이다.

설계 운전압력이 155 m인 펌프가 실제 운전은 145 m로 운전될 때 펌프가 갑작스런 조작이나 정전에 의해 긴급 정지시 수격의 폭은 계산과 오차가 생길 수 있으나 Fig. 8(e)에서 보는 바와 같이 압력저하는 계산치가 펌프의 긴급 정지값 보다 약간 작게 나타내는 것을 알 수 있다.

배관의 영향에 따른 계산은 펌프의 토출측에서 발생하는 압력의 변화를 계산하였으나 실제로 이러한 배관들이 분기되기 전에 수격을 완화시키는 것이 효율적이므로 실제 실험은 분기관 전에 그 값을 측정하였다.

Fig. 8(e)의 적색라인처럼 수격방지설비가 있는 경우 전산유체역학(CFD) 프로그램을 이용한 결과

16.88 kg/cm²까지 압력이 상승할 것으로 예상되었으나 실제 시험결과 검은색라인과 같이 15.5 kg/cm²까지 압력이 상승된 것을 알 수 있다.

수격이 현저하게 완화되어 최대 유량변화가 있는 경우에도 압력변동은 최고치와 최저치가 5.0 kg/cm² (+1.0 kg/cm², 4.0 kg/cm²)의 변화를 가질 정도로 기기의 안전성을 확보할 수 있다.

수충격 방지설비가 없는 경우의 압력분포는 Fig. 9, 펌프장에서의 압력변동은 Fig. 10에 나타내었으

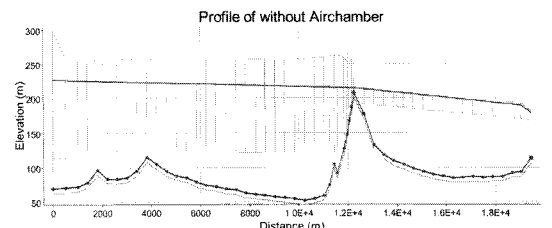


Fig. 9. Measured max. and min. pressure at pipeline without Anti Surge Device(blue line : pipe line, red line : hydraulic grade, gray line : upsurge and down surge, pink line : pipe line under -7 m).

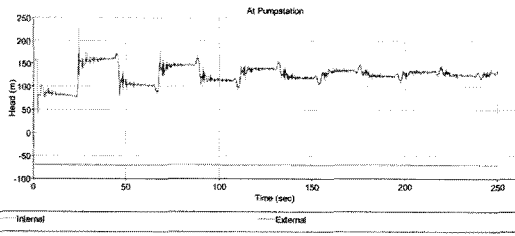


Fig. 10. Measured piezo head at pump exit without Anti Surge Device.

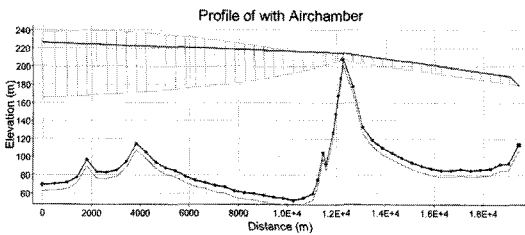


Fig. 11. Measured max. and min. pressure at pipeline with Anti Surge Device(blue line : pipe line, red line : hydraulic grade, gray line : upsurge and down surge, pink line : pipe line under -7 m).

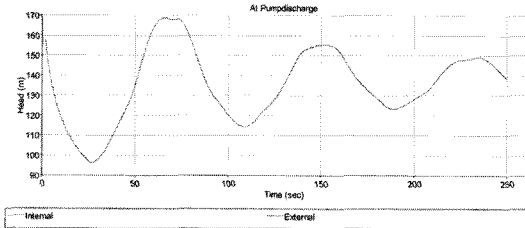


Fig. 12. Measured pressure head at pump exit with Anti Surge Device.

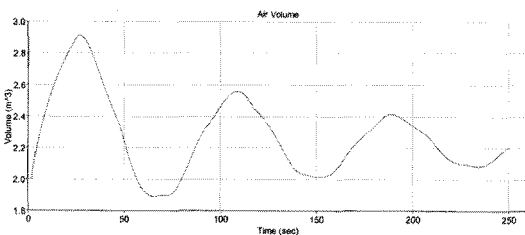


Fig. 13. Variations of measured air volume in Air-Chamber.

며, 수충격 방지설비가 있는 경우의 압력분포는 Fig. 11, 펌프장에서의 압력변동은 Fig. 12, 에어챔버의 수위는 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 8(e)는 Fig. 12와 13을 실제 시험결과와 비교한 것이다.

4. 결론

가압 펌프장에 에어챔버를 설치했을 경우와 설

치하지 않았을 경우 대한 수격현상을 Surge 2008 및 Field Test를 이용하여 구현하여본 결과 다음과 같은 설계 방안을 얻을 수 있었다.

실제운전에서는 밸브의 동작이 이루어진 후 펌프의 정지가 이루어지므로 수격이 발생할 가능성이 적고 또한 그 진폭이 작아 에어챔버의 작용이 어느 정도 인지 파악하기 어려워 강제로 전기를 차단하여 긴급정지가 되도록 하여 실험하였다.

설계유량과 실제 운전과의 압력, 유량의 차이로 인해 발생하는 수격의 크기는 오차를 가질 수 있으며, 수격의 억제와 관련된 주배관과 에어챔버의 연결관을 통한 물의 흐름을 볼 때 충분한 장비보호의 역할을 하는 것을 알 수 있다.

1) 전산해석결과 수격방지설비가 없는 경우 압력이 22.86 kg/cm²이나 수격방지설비가 있는 경우 16.88 kg/cm²까지 압력이 상승할 것으로 예상되었으나 15.5 kg/cm²까지만 압력이 상승되므로 시스템은 안전함을 알 수 있다.

2) 수위의 변화폭도 전산해석결과 55~27%의 변동을 예측하였으나 실제로는 예상보다 적게 52~33% 정도로 나타났는데 시스템이 정상동작 하여 안전함을 알 수 있다.

3) 위의 “1” 또는 “2”와 같은 결과가 나타나는 이유는 펌프의 운전압력이 펌프의 정격인 155 m 보다 낮은 145 m로 운전되므로 실제 예측한 압력변동보다 작게 운전되므로 안전하다.

4) 당초 예측한 수충격의 주기 또한 80초에서 100초로 늘어나 시스템의 안정성이 확보됨을 알 수 있으며, 압송라인의 정점부에 있는 공기밸브의 기능도 원활함을 알 수 있다.

수치해석 결과는 현장시험결과와 잘 일치 하였으며, 관로의 최대, 최소 시간도 예측할 수 있었다. 본 연구를 통하여 가압 펌프장에 설치된 에어챔버는 도수관로에서 발생하는 수격작용을 효과적으로 완화시키고 있음을 확인할 수 있어 시스템의 안정성에 크게 기여할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 김경엽, “에어챔버가 설치된 송수관로에서의 수격현상”, 대한기계학회 논문집 B권, 제26권, 제2호, pp. 177~183, 2002.
- 2) 김상균, 이동근, 이계복, 김경엽, “가압펌프장의

- 수격완화설비에 대한 보수·보강 사례”, 유체기계저널, 제8권, 제4호, pp. 20~26, 2005.
- 3) 김상균, 이계복, 김경업, “직결식 펌프의 수격현상”, 유체기계저널, 제8권, 제6호, pp. 208~216, 2005.
 - 4) 김상균, 이계복, “에어챔버가 설치된 가압펌프 계통에서의 수격현상”, 에너지공학회, 제16권, 제4호, pp. 187~193, 2007.
 - 5) Wylie, E. B., Streeter, V. L., “Fluid Transients in Systems”, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993.
 - 6) 한국 상하수도협회, “환경부 제정 상수도 시설기준”, pp. 787, 2004.