Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 29, No. 5, pp. 1-6, October 2014
Copyright@2014 by The Korean Society of Safety (pISSN 1738-3803) *All right reserved.*
http://dx.doi.org/10.14346/JKOSOS.2014.29.5.001

급수용 급속공기밸브의 성능특성에 관한 실험적 연구

이선곤 · 강세호* · 양철수* · 우창기†*

인하대학교 기계공학과 · *인천대학교 기계공학과

(2013. 7. 24. 접수 / 2014. 9. 2. 수정 / 2014. 9. 19. 채택)

Experimental Study on Performance Characteristics of High Speed Air Valve for Water Works

Sun Kon Lee · Sae Ho Kaong* · Yang Cheol Soo* · Chang Ki Woo†*

Department of Mechanical Engineering, Inha University

*Department of Mechanical Engineering Incheon National University

(Received July 24, 2013 / Revised September 2, 2014 / Accepted September 19, 2014)

Abstract : When the fluid energy convert into kinetic energy due to water hammer, the propagation velocity of pressure wave appear. The propagation velocity of pressure wave(1050 m/s) of very fast could be damage to the pipeline system. If the occurrence of water hammer is due to down-pressure, the faster the air exhaust or supply device is needed. it is high Speed Air Valve. In this paper, Each 3.12, 3.13, 3.72, 3.74 kg/㎠ pipeline pressure were setting, and then executed pressure rapid drop for obtaining a high Speed Air Valve Operating time and pressure change data. the result was that pipe line pressure stabilization time were each 0.98, 1, 1.22, 1.25 sec. In other words, that pressure drop experimental results pipe line pressure was equal to atmospheric pressure without negative pressure After about one second. The study result would be useful to pipe line system stability design because this data could be foresee pressure stabilization time.

Key Words : water hammer, high speed air valve, propagation velocity of pressure wave

1. 서 론

정지하고 있는 펌프를 기동시키거나 정상운전 중인 펌프의 동력이 비정상적인 원인으로 갑자기 정지될 때 또는 밸브의 개도(open/close)를 빠르게 변화시킬 경우, 그 순간 송수관로내에는 급격한 유속의 변화와 압력의 상승과 하강이 발생하여 유체는 부정류(unsteady flow) 상태가 된다. 이때 유체의 운동에너지는 압력에너지로 변하여 압력파(pressure wave)를 발생시키며, 송수관로내의 압력은 관로형상(pipe line profile)에 따라 물의 포화증기압(saturation vapor pressure) 이하로 떨어져 증기공동(vapor cavity)이 형성되어 수주분리(column separation)를 발생시킨다. 또한 관로내의 압력이 대기압보다 낮아지면 관로에 좌굴(collapse)이 일어날 수 있으며, 증기공동으로 분리되었던 수주(water column)가 재결합할 때 높은 압력이 유발되어 기기의 허용압력 이상일 경우 송수관로는 물론 펌프, 밸브 등의 각종 시설물을 파손시킬 수 있다. 따라서 이와 같은 수격작용(water-hammer)의 완화 및 방지에 대한 다양한 검토가 필요하다[1-2].

펌프관로계의 중요한 수격작용 중 하나는 갑작스러운 동력 차단으로 인하여 펌프의 운전이 멈춘 경우이다. 이 경우 송수관내 액체는 관성력(inertial force)에 의하여 흐름방향으로 운동성을 가지지만 펌프 송출부의 액체는 흐름이 약해져서 멈추려 하기 때문에 펌프 와류실에는 압력강하가 발생하게된다, 그리고 펌프 송출구로 부터 와류실에 역류가 발생하여 급격한 압력강하와 상승이 반복하여 발생된다. 즉, 유체의 운동에너지가 압력에너지로 변하여 "압력파의 전파속도(propagation velocity of pressure wave)"로 전달되는 수격작용이 발생하게 된다. 압력파의 전파속도는 강관의 경우 약 1,050 m/sec 내외로 매우 빨라 순간적으로 관로계의 파손을 가져올 수 있다[3-5].

† Corresponding author : Chang Ki Woo, Tel : 82-32-835-8413, Email : wooerwck@incheon.ac.kr
Department of Mechanical Engineering Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 406-772, Korea

관수로계의 수격작용 중 관로가 간단하고 하강압만 문제가 되는 경우에는 관로내에 순간적으로 공기를 배출하거나 공급할 수 있는 수격완화설비(surge control system)가 필요하다. 이러한 목적으로 사용되는 완화설비가 급속공기밸브(high Speed Air Valve for Water Works)이다. 그러나, 갑작스러운 압력변동에 따른 급속공기밸브의 동작 시간에 대한 연구가 체계적으로 수행되어 있지 않아, 관수로계 설계시 급격한 압력 변화에 대한 압력파의 전파속도에 대한 고려 없이 관수로계의 시설이 설치되어 지고 있어 수격작용에 대한 잠재적인 위험성을 내포하고 있다. 따라서 본 논문에서는 갑작스러운 배관내의 압력하강에 의한 급속공기밸브의 작동시간과 압력변동에 대한 연구를 수행하고자 한다. 이는 향후 각종 관수로 설계 초기부터 급속 공기밸브의 작동시간을 예측하여 안정성을 고려한 각종 설계에 매우 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

2. 시스템 구성

관수로계의 경우 시설을 먼저 설치하고 나중에 수격작용에 의한 피해 예방 장치를 설치하는 것은 매우 어렵기 때문에, 시설 설치 전에 미리 위험요소를 예측하고 대비 한 수격방지설비를 설치하여야 한다. 일반적으로 관수로계에서 수격작용이 가장 큰 경우는 갑작스러운 동력 차단으로 인하여 펌프의 운전이 멈춘 경우에 발생하는 압력파의 전파속도이다.

갑작스러운 펌프의 기동 중지로 발생하는 배관내의 압력변동과 급속공기밸브가 작동하여 압력이 안정화를 이루는 시간을 측정하기 위하여 Fig. 1과 같은 시스템을 구성 하였다.

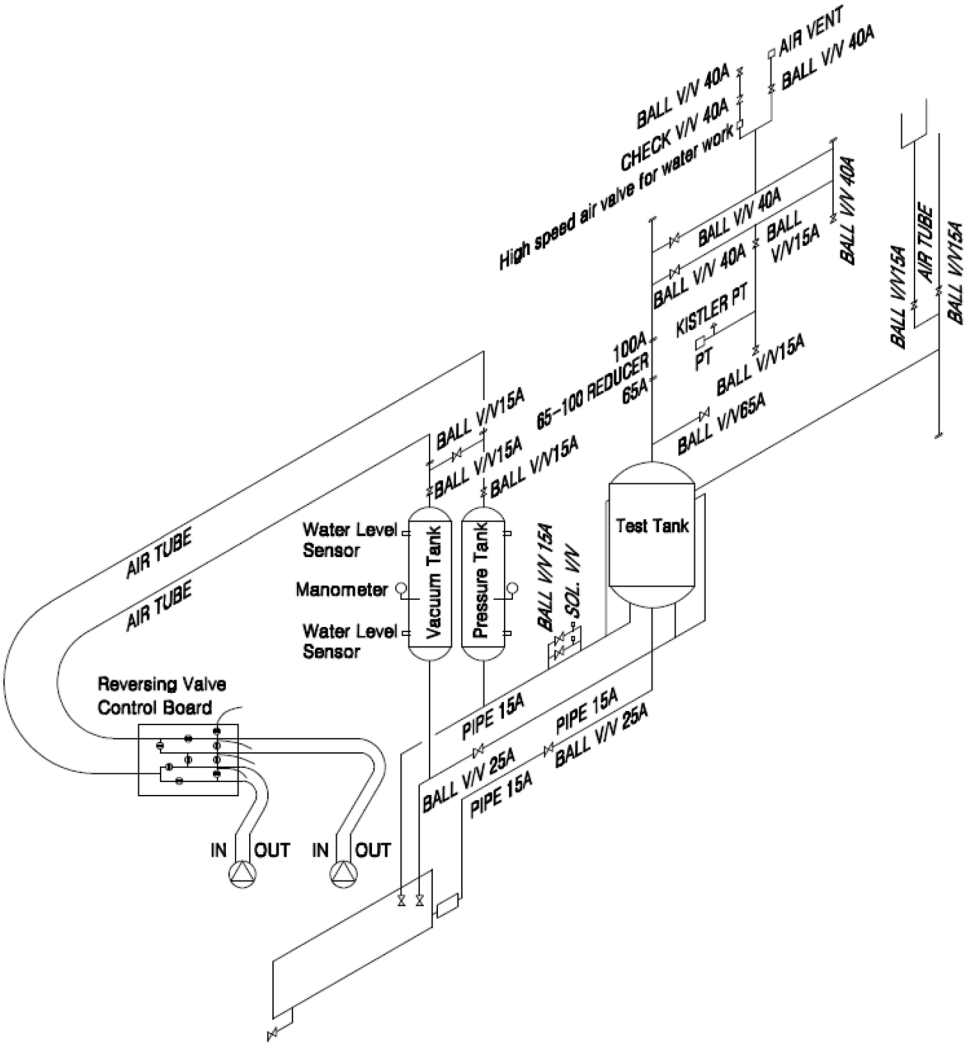


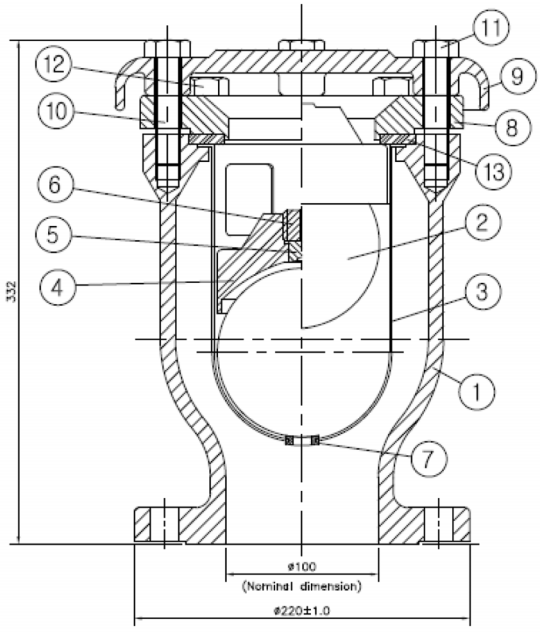
Fig. 1. Schematic diagram for stability and characteristics evaluation in high speed air valve for water works.

2.1. 급속 공기 밸브

펌프 관수로계에 흐르는 물이 순간적으로 차단되면 물의 운동에너지는 압력에너지로 변하여 배관내에서 급격한 압력 상승과 하강이 발생하게 된다. 이러한 압력의 변동은 압력파가 되어 닫힌 지점 사이를 일정시간 반복하다가 점차 소멸되어 압력의 안정을 유지하게 된다. 물은 압축되지 않는 비압축성 유체(incompressible fluid)로 충격을 흡수할 수 없기 때문에, 밸브, 배관등의 시설물이 파손되는 위험성을 내포하게 된다. 이러한 갑작스러운 압력변동에 의한 수격작용을 완화 시킬 수 있는 수격완화설비 중 하강압을 보완할 수 있는 장치가 급속공기밸브이다.

급속공기밸브는 배관내 존재하는 공기를 배출하거나 진공상태의 배관으로 공기를 공급하는 수격완화설비로, 설계 및 제작은 한국상하수도표준 규격인 KWWA B 100에 따르며, 관련 성능은 KWWA B 100 부속서(다량 배출 시험방법)에 규정 되어 있으나, 작동시간에 대한 별도의 실험 및 규정은 명시되어 있지 않다[6].

본 연구에서는 갑작스러운 압력변동에 의한 급속공기밸브의 작동시간과 밸브내의 압력변동을 측정하기 위하여 호칭치수(배관의 연결 관경) 100A의 급속 공기밸브를 사용하였으며, 그 형상을 Fig. 2에 나타내었다.



① Body ② Float Valve ③ Flow Valve Guide ④ Flow Valve ⑤ Valve Seat ⑥ Valve Seat gland ⑦ Valve Cushion ⑧ Cover ⑨ Body Cover ⑩ Cover Bolt/Nut ⑪ Body Cover Bolt/Nut ⑫ Gasket

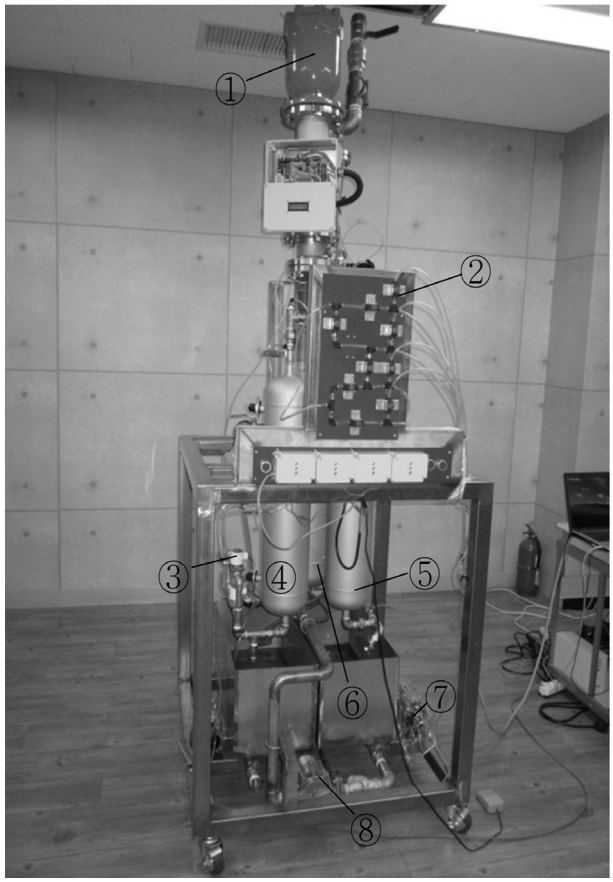
Fig. 2. Schematic of high speed air valve for water works (nominal dimension 100).

2.2 급속공기밸브 성능평가 장치

2.2.1 실험장치 구성

급속공기밸브 성능 평가 장치를 Fig. 3과 같이 구성하였다. 장치의 주요 구성품은 급속 공기밸브(호칭치수 100A), 압력전송기(Pressure Transmitter, PTCHCO, SMCIA / 측정범위 -0.1~0.5 MPa), 절환조작판(Reversing Valve Control Board), 순환펌프(Circulating Pump), 공기압축기(Air Compressor), 진공 펌프(Vacuum Pump), 그리고 진공탱크 (Vacuum Tank), 가압탱크(Pressure Tank), 실험용 급수 탱크로 구성하였다. 진공탱크와 실험용 급수 탱크의 연결 배관은 전자밸브(Solenoid Valve)에 의하여 제어 된다. 또한 각 탱크의 상단과 하단에는 탱크내의 수위를 측정 할 수 있도록 각 2개의 수위센서(Water Level Sensor)를 장착 하였다.

급속공기밸브와 실험용 탱크와의 수두차이는 1.0 m로 압력계 수치로는 0.1 kgf/㎠이나 본 실험의도에 영향을 미치지 않아 이를 무시하였다.



① high Speed Air Valve for Water Works ② Reversing Valve Control Board ③ Solenoid Valve ④ Vacuum Tank ⑤ Pressure Tank ⑥ Test Tank ⑦ Air Compressor/Vacuum Pump Cushion ⑧ Circulating Pump

Fig. 3. Performance evaluation machine for stability and characteristics in high speed air valve for water works.

2.2.2 데이터 수집장치

압력전송기에서 측정된 전기적 신호값은 NI(National Instruments) USB-6251의 아날로그-디지털 변환장치(Analog to Digital convert)로 전송되고 수집된 데이터는 노트북 컴퓨터에 설치된 LabView를 사용하여 실시간으로 확인 · 분석 후 저장된다. 압력전송기에서는 전류값이 출력되며, 전류값으로 출력되는 자료는 정밀저항(250 Ω, 0.1%)을 이용하여 전압값으로 표시한 뒤 이를 다시 압력값으로 변환 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

순환펌프를 이용하여 실험용 급수 탱크에 물이 공급되면 이 물은 급속공기밸브와 연결된 배관을 채우게 된다. 배관내의 물 공급으로 인하여 급속공기밸브내의 플로우트 밸브 위치가 상승하여 급속 공기밸브가 닫히게 된다.

산업현장에서와 유사한 배관내의 압력조건을 맞추기 위하여 공기압축기를 가동하여 가압탱크내의 압력을 상승시켜 급속공기밸브와 연결된 배관 압력을 3~4 kgf/㎠로 맞추었다. 그리고 진공펌프를 이용하여 진공탱크내의 압력을 대기압 이하인 0.8 kgf/㎠로 설정하여 상하수도시설기준에 적합한지 확인할 수 있도록 하였다.

3.1 급속 공기 밸브의 성능 평가

갑작스러운 압력하강으로 인한 배관내의 압력변화 및 관내 압력이 안정화를 이루는 시간을 측정하기 위하여 진공탱크와 연결된 실험용 급수 탱크의 배관을 전자밸브를 이용하여 순간적으로 열면 실험용 급수 탱크와 급속공기 밸브가 장착된 배관의 압력이 하강하여 급속공기밸브내의 플로우트 밸브 위치가 내려가면서 급속공기밸브내로 공기가 공급되게 된다. 이러한 실험으로 갑작스러운 압력하강으로 인한 배관내의 압력변동과 압력이 안정화되기까지의 시간을 다음과 같이 측정할 수 있었다.

Fig. 4와 Table 1은 실험용 급수탱크와 이와 연결된 급속공기밸브가 장착된 배관의 압력을 공기압축기를 이용하여 약 3.12 kg/㎠에 맞추고 실험용 급수탱크와 연결된 진공탱크의 배관을 전자 밸브를 이용하여 열어 급속공기밸브가 장착된 배관의 압력을 순간적으로 떨어뜨렸을 때 관내의 압력 변화와 급속공기밸브로의 공기 유입 시간을 측정 한 것이다.

Valve On/Off 그래프 곡선의 값이 0인 경우는 급속공기밸브가 닫혀있는 상태이고 1인 경우는 열려있는 상태이다.

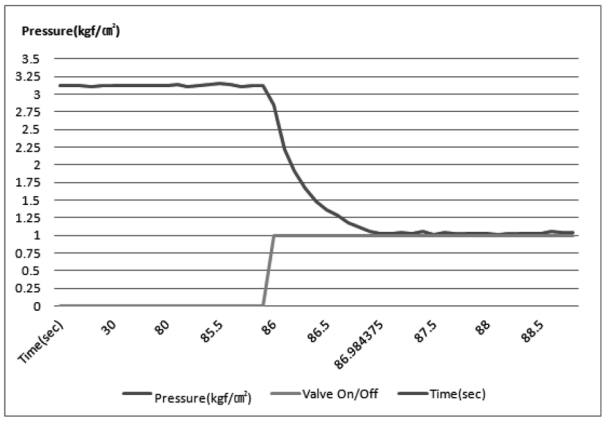


Fig. 4. Performance evaluation in high speed air valve for water works caused by pressure rapid drop(Variation of about 3.12 kg/㎠ pressure until atmospheric pressure).

Table 1. Measurement of high Speed Air Valve Operating time and pressure change caused by pressure rapid drop (Variation of about 3.12 kg/㎠ pressure until atmospheric pressure)

Time (s)	Pressure (kgf/㎠)	High Speed Air Valve for Water Works On/Off
0	3.124791	0
⋮	⋮	⋮
86	3.121375	0
86.09375	2.8404	1
⋮	⋮	1
86.984375	1.051483	1
⋮	⋮	⋮

갑작스러운 펌프의 기동중단으로 배관내의 압력이 급 하강하는 경우를 가정한 실험 결과 배관내 압력 하강으로 급속 공기밸브가 열리고 공기가 공급되어 배관내의 압력이 대기압과 같아져 안정적인 상태로 도달하는데 0.984375초의 시간이 소요되었으며, 이 사이 압력변동은 2.069892 kgf/㎠인 것을 알 수 있었다. 배관내의 압력이 안정적인 상태가 되기까지의 지연시간 0.984375초는 압력파의 전파시간으로 해당 시간만큼 압력파의 영향을 받았으나 부압(Negative Pressure)이 발생하지 않았음을 알 수 있다.

지연시간이 발생하는 이유는 급속공기밸브가 설치된 실험 장치에서 부압이 발생할 경우 급속 공기밸브의 플로우트 밸브와 유동밸브가 부압을 이기고 아래로 내려가야만, 공기가 유입되어 부압을 해소할 수 있으나, 실험장치의 배관 및 공기밸브는 물로 가득 채워진 상태이므로 대기압과 공기밸브 내부 압력차이로 부력을 이겨 공기가 밸브내로 유입되기 때문에 발생하는 시간의 지연이다.

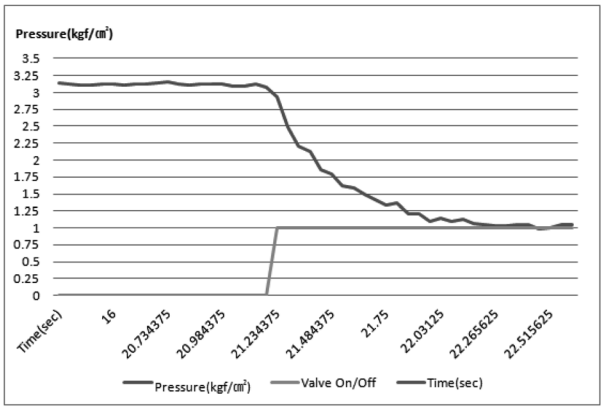


Fig. 5. Performance evaluation in high speed air valve for water works caused by pressure rapid drop(Variation of about 3.14 kg/㎠ pressure until atmospheric pressure).

Table 2. Measurement of high Speed Air Valve Operating time and pressure change caused by pressure rapid drop.(Variation of about 3.14 kg/㎠ pressure until atmospheric pressure)

Time (s)	Pressure (kgf/㎠)	High Speed Air Valve for Water Works On/Off
0	3.136536	0
⋮	⋮	0
21.234375	3.076535	0
21.28125	2.929434	1
⋮	⋮	1
22.234375	1.066484	1
⋮	⋮	1

Fig. 5과 Table 2는 약 3.14 kgf/㎠의 압력을 재 설정하여 실험한 결과를 나타낸 것이다.

실험결과 배관내 약 3.1 kgf/㎠ 압력이 순간적인 압력하강으로 급속공기밸브가 열리고 공기가 공급되어 배관내 압력이 안정화를 이루는 시간은 1초였으며, 이 사이 압력의 변동은 2.01 kgf/㎠ 이다.

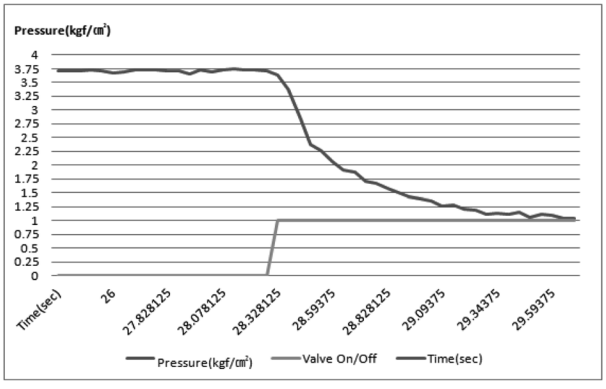


Fig. 6. Performance evaluation in high speed air valve for water works caused by pressure rapid drop(Variation of about 3.72 kg/㎠ pressure until atmospheric pressure).

Table 3. Measurement of high Speed Air Valve Operating time and pressure change caused by pressure rapid drop.(Variation of about 3.72 kg/㎠ pressure until atmospheric pressure)

Time (s)	Pressure (kgf/㎠)	High Speed Air Valve for Water Works On/Off
0	3.719132	0
⋮	⋮	⋮
28.328125	3.716229	0
28.375	3.644614	1
⋮	⋮	1
29.546875	1.063096	1
⋮	⋮	⋮

Fig. 6과 Table 3은 배관내의 압력을 약 3.72 kgf/㎠에 맞추고 순간적으로 배관의 압력을 떨어뜨려 관내의 압력 변화와 압력이 안정화를 이루는 시간을 측정 한 결과를 나타낸 것이다.

측정결과 순간적인 압력강하 후 배관내 압력이 안정에 도달하는 압력파 발생시간은 1.21875초, 이 시간동안 압력 변화는 2.653133 kgf/㎠ 이었다.

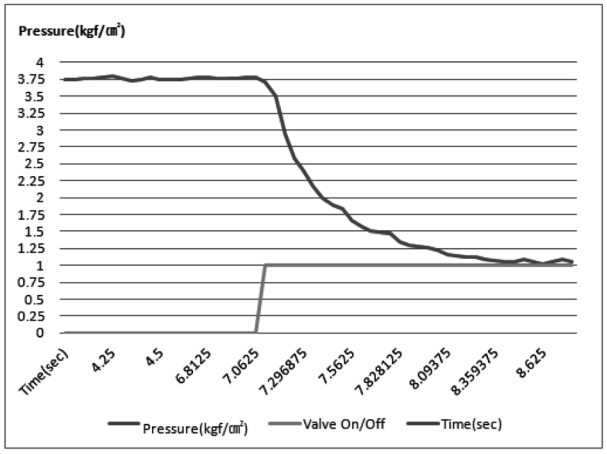


Fig. 7. Performance evaluation in high speed air valve for water works caused by pressure rapid drop(Variation of about 3.75 kg/㎠ pressure until atmospheric pressure).

Table 4. Measurement of high Speed Air Valve Operating time and pressure change caused by pressure rapid drop.(Variation of about 3.75 kg/㎠ pressure until atmospheric pressure)

Time (s)	Pressure (kgf/㎠)	High Speed Air Valve for Water Works On/Off
0	3.748649	0
⋮	⋮	0
7.109375	3.776715	0
7.15625	3.709455	1
⋮	⋮	⋮
8.359375	1.091162	1
⋮	⋮	1

Fig. 7과 Table 4는 배관내의 압력을 약 3.75 kg/㎠에 맞추고 측정한 결과를 나타내었다.

압력파 발생시간은 1.25초, 이 시간동안의 압력 변화는 2.685553 kgf/㎠이다.

3.2 성능 평가 및 고찰

압력파의 전파속도는 유체의 체적탄성계수, 유체의 밀도, 관재질의 종탄성계수, 관의 내경, 관벽의 두께 그리고 관로의 구속계수에 대한 식으로 표시된다. 일반적으로 관의 내경이 클수록 관 두께에 대한 내경의 비가 커지므로 압력파의 전파속도는 늦어진다. 이론식으로 얻어진 압력파의 전파속도는 1050 m/s 이다.[2-3)]

압력파의 전파속도 $a = \dfrac{1,425}{\sqrt{1+\dfrac{k}{E}\dfrac{D}{t}}}$

a : 압력파 전파속도 (m/sec)

물의 체적 탄성율 $k = 2.07 \times 10^8$ kgf/㎡

강관의 종탄성 계수 $E = 2.1 \times 10^{10}$ kgf/㎡

관 내경 D, 관 두께 t

4가지 실험의 결과를 종합하여 압력파 발생시간과 이론적 압력파의 전파거리를 구하면 Table 5와 같은 결과를 얻을 수 있다.

Table 5. Measurement of each pressure stabilisation time and propagation distance of pressure wave caused by pressure rapid drop

Set Pressure	Pipe line pressure stabilisation time	Propagation distance of pressure wave
About 3.12 kgf/㎠	0.984375s	1,033.6m
About 3.14 kgf/㎠	1s	1,050.0m
About 3.72 kgf/㎠	1.21875s	1,279.7m
About 3.75 kgf/㎠	1.25s	1,312.5m

앞선 4가지 실험 결과 압력의 급강하 후 관로의 압력이 대기압과 같아져 안정화를 이루기까지는 약 1초 내외의 시간이 소요되었으며, 이때 압력파는 약 1,050 m 길이의 관로에 여향을 미쳤으나, 부압이 발생하지 않아 시스템이 안정하게 유지되고 있음을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

펌프 관로계의 갑작스러운 동력차단으로 인한 압력 급강하는 관로의 파손을 유발할 수 있는 위험성을 가지고 있으나, 실험결과 급속공기 밸브가 설치된 경우 급격한 압력 강하가 발생 하여도 부압의 발생 없이 약 1초 정도의 지연시간 후 대기압과 같은 압력으로 안정화를 이루는 것을 확인 할 수 있었다. 이론상 관로에서 압력파가 전파 속도는 약 1,050 m/s 이므로 이러한 지연시간과 압력파의 전파속도는 배관 설계 시 중요한 설계인자로 이를 고려 시 관수로계의 중요한 위험요소를 예방하고 효율을 증대시키며 시스템을 안전하게 유지할 수 있는데 많은 도움을 줄 것이다.

References

1) K. -Y. Kim, “Waterhammer in the Transmission Pipeline with an Air Chamfer” The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 26, Issue. 2, pp. 177-183, 2002.
2) S. K. Lee and Cheol Soo Yang, “Water-hammer in the Pump Pipeline System with and without an Air-Chamber” Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 26. No. 1, pp. 1~7, 2011.
3) J. E. Hodgson, “Pipeline Celerities”, M.S. Thesis, University of Alberta, 1983.
4) S. -G. Kim and K. B. Lee “Water Hammer in the Pump Pipeline System with an Air Chamber”, Journal of Energy Engineering, Vol. 16, No. 4, pp. 187~193, 2007.
5) E. B. Wylie and V. L. Streeter, “Fluid Transients in Systems”, Prentice Hall; 1 Edition, pp. 464, 1993.