

상수관로 압력계 최적 위치선정을 위한 데이터기반 시험분석

이호현¹ · 홍성택^{2*}

Data-based Analysis for Pressure Gauge Optimal Positioning in Water Supply Pipeline

Hohyun Lee¹ · Sungtaek Hong^{2*}

¹Senior Researcher, K-water Research Institute, K-water, Daejeon, 34045 Korea

^{2*}Principal Researcher, K-water Research Institute, K-water, Daejeon, 34045 Korea

요 약

먹는 물을 생산하여 공급하는 상수도 관로에 있어서 압력계에 대한 설치와 관리 방안이 미비함에 따라 압력데이터 신뢰성의 확보 및 운영관리의 어려움을 겪고 있는 실정이다. 관망 및 펌프 등 운영관리 효율화 및 SWM(Smart Water Management)을 구현하기 위해서는 하부 계측 센서의 정확한 데이터 취득을 통하여 의사결정이 이루어져야 한다. 따라서, 본 연구에서는 게이트 밸브와 버터플라이 밸브를 중심으로 관로의 직경(D)을 기준으로 전단 - 3D에서부터 후단 7D까지 압력계를 설치하여 밸브의 개도율을 조절하며 데이터를 취득하는 직관 거리 시험을 실시하였으며, 관로에 수직으로 상단(180°)부터 하단(0°)까지 45° 각도 간격으로 압력계를 설치한 후 수직 위치 시험을 실시하였으며, 이 결과들을 바탕으로 압력계의 최적 위치선정 방안을 제시하고자 한다.

ABSTRACT

The management and installation methods of pressure gauges in water supply pipeline are not efficiently regulated and their installations are different in each site. In this paper, various domestic and overseas documents are examined about the pressure gauge. In order to improve the efficiency of operation management such as pipeline network and pump operation, water pressure needs to be measured as accurate as possible, by which decision making for optimal pipe network can be achieved. To get the goal, the installation of pressure gauge should be reviewed about where and how to install. In this study, an optimal horizontal distance test is conducted, in which pressure value variation is monitored and analyzed according to up and down stream distances and valve flow control, and a optimal vertical position test is also analyzed by installing the pressure gauges vertically from the up(180°) to the bottom (0°) of the pipeline.

키워드 : 관로, 밸브, 상수도, 압력계, 유량

Key word : Flow rate, Pipeline, Pressure gauge, Valve, Water supply

Received 3 May 2021, Revised 6 May 2021, Accepted 13 May 2021

* **Corresponding Author** Sungtaek Hong (E-mail:sthong@kwater.or.kr, Tel:+82-42-870-7681)

Principal Researcher, K-water Research Institute, K-water, Daejeon, 34045 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2021.25.6.834>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

오늘날 세계는 지속적인 인구증가와 고도산업의 발전으로 인하여 물 수요증가는 늘어나고 있으나, 물 부족 현상 및 수질 악화로 인한 수원확보가 어려워지고 있다. 이런 상황에서 도시에 매설된 수도관로의 누수로 인하여 막대한 경제적 손실을 초래하고 있다. 특히 지방 도시에서는 30% 이상의 누수율로 선진국보다 높은 수준이고 UN에서 지정한 물 부족 국가이기도 하다[1-4].

압력계는 관로 파손사고, 수도분야 누수관리 및 감지, 에너지 관리, 관 세척, 관망해석, 수충격 해석 등 중요한 관리지표의 요소로 활용되고 있으며, 정수 및 송수공정에서 유량계, 수위계를 제치고 가장 많이 설치된 계측기이다[5]. 그럼에도 불구하고 압력계의 관리 및 설치방안 제시가 미약하고 설치위치, 설치방법 등이 현장마다 상이함에 따라 압력계 데이터 신뢰성의 확보 및 운영관리의 어려움을 겪고 있다. 또한 관망 및 펌프 등 운영관리 효율화 및 SWM 구현을 위해서는 하부 계측 센서의 정확한 자료취득을 통한 의사결정으로써의 활용이 필요하다. 이에 따라 압력 데이터를 활용한 설비 운영관리 효율화 및 재난 안전 예방강화 솔루션 개발을 통한 SWG 기반기술 확보 등 고부가가치형 상용기술 확보가 필요하다[6-7].

II. 압력계

압력은 단위면적당 작용하는 수직으로 받는 힘의 세기를 말한다. $P = \frac{F}{A}$ (P : 압력, F : 힘, A : 면적)로 나타낼 수 있고, 압력은 시간적 변화의 유무에 따라 정압, 변동압, 맥동압 등으로 나눌 수 있으며, 기준점 “0”을 어떻게 정하느냐에 따라 절대압, 상대압, 차압 등으로 분류되며 유체량의 계측에 관계된 양으로 온도도 더불어 프로세스에서 중요한 변수이다. 이러한 압력의 단위에는 여러 종류가 있으며, 상호관계는 표 1과 같다.

Table. 1 Pressure Gauge Unit

CGS Unit	<ul style="list-style-type: none"> · $1 \mu\text{bar} = 1 \text{dyne}/\text{cm}^2$ · $1 \text{bar} = 105 \mu\text{bar} = 750.06 \text{mmHg}$ · $= 1.01972 \text{kg}/\text{cm}^2 = 0.9869 \text{atm}$ · $= 105 \text{Pa}$
----------	--

	<ul style="list-style-type: none"> · $1 \text{atm} = 1.01325 \text{bar} = 760 \text{mmHg} = 1.03323 \text{kg}/\text{cm}^2$ · $= 14.6958 \text{Psi} = 0.101325 \text{MPa}$ · $1 \text{kg}/\text{cm}^2 = 0.980665 \text{bar} = 0.967841 \text{atm}$ · $= 73.56 \text{mmHg} = 14.2231 \text{Psi}$ · $1 \text{mmH}_2\text{O} = 1 \text{kg}/\text{cm}^2 = 98.0665 \mu\text{bar} = 9.80665 \text{Pa}$
SI Unit	<ul style="list-style-type: none"> · $1 \text{Pa} = 1 \text{N}/\text{m}^2 = 0.10197 \text{mmH}_2\text{O} = 0.9975006 \text{mmHg}$ · $1 \text{KPa} = 7.50 \text{mmHg}$

압력에 관한 정의는 시간적 변화에 따라 정압, 변동압, 맥동압으로 구분하며, 정압은 변화가 없는 압력 또는 초당 압력계의 최대 압력의 1%를 넘지 않는 변화의 순시속도를 가지는 압력이거나 분당 최대 압력의 5%를 넘지 않는 압력이다. 변동압은 1초당 시간적 변화가 정압의 한계를 넘거나, 압력계의 최대압력의 1~10%사이에서 변동하는 압력으로 주기성이 없이 불연속적으로 증감되는 압력이며, 맥동압은 1초당 시간적 변화가 정압한계를 넘는 것으로 압력계의 최대 압력의 1~10%사이에서 변동하는 압력으로 주기성 있는 압력을 말한다.

압력계는 크게 탄성압력계와 액주압력계, 전기식 압력계로 나뉘며, Kwater에서 많이 쓰는 압력계 형식인 탄성압력계는 압력의 변화에 따라 금속 등의 탄성변화를 이용하여 압력을 측정하는 압력계를 말하며, 부르동관식(Bourdon tube), 격막식(Diaphragm seal), 벨로우즈식(Bellows) 및 캡슐식(Capsule) 등이 있으며, 일반적인 측정 범위 및 정확도는 표 2와 같다[8-9].

Table. 2 Measurement Range and Accuracy by Pressure Gauge Type

Type	Measurement Range(kg/cm ²)	Accuracy
Bourdon	0.1~5000	±0.5~2%
Bellow	0.01~500	±1~2%
Diaphragm	0.01~500	±0.25~2%

2.1. 부르동관 압력계

부르동관은 1852년 프랑스 부르동에 의해 발명된 것

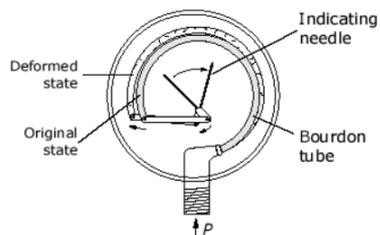


Fig. 1 Bourdon Pressure Gauge

으로 그림 1과 같이 타원형 및 평원형을 갖는 튜브를 한 쪽에 고정시킨 다음 개방시켜 압력을 가하고, 다른 쪽은 밀폐 자유단으로 하여 압력에 따라 변위를 발생시키도록 한 것이다[10].

2.2. 다이어프램 압력계

다이어프램 압력계는 고정시킨 환산형 주위단과 동일 평면을 이루고 있는 얇은막의 형태로써, 가해진 미소 압력의 변화에 대응되는 수직방향으로 팽창 수축하는 압력 소자이다. 또한 그 압체를 분리하는 역할 및 가압체를 용기로 부터 외부로 밀봉시켜 주는 역할을 한다. 다이어프램은 그림 2와 같으며, 자신의 압력 변형 특성을 이용하는 금속 다이어프램과 스프링 같은 탄성요소에 의해 지지되는 비금속 다이어프램으로 크게 구분된다[10].

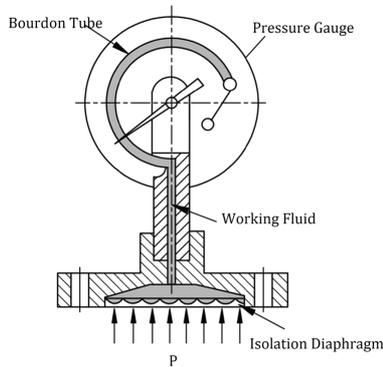


Fig. 2 Diaphragm Pressure Gauge

2.3. 벨로우즈식 압력계

벨로우즈는 그림 3과 같이 그 외주에 주름상자형의 주름을 갖고 있는 금속박판 원통형으로, 그 내부 또는 외부에 압력을 받으면 중심축 방향으로 팽창 및 수축을 일으키는 압력계의 일종이다. 벨로우즈는 압력에 따른 길이의 변화가 부르동관이나 다이어프램보다 커서 보통 저압측정에 많이 사용된다. 벨로우즈의 사용 한도는 내압에 의해서 결정되며, 내압 증가를 위해 벨로우즈의 벽 두께를 증가시켜야 하나, 이것은 강성도의 증가를 가져와 선형도가 나빠지므로 보통 10kg/cm^2 가 한도이나 선형도가 문제가 되지 않는 경우에는 내압을 200kg/cm^2 까지 사용이 가능하다. 벨로우즈는 주름, 깊이, 끝 모양이 서로 다른 다양한 종류가 있으며, S형과 C형은 주로

고압에 사용하고, U형은 저압에 쓰인다. 벨로우즈의 내경과 외경의 비는 1.3~1.5 정도이나 1.6~1.9 정도의 깊은 주름도 있다[10].

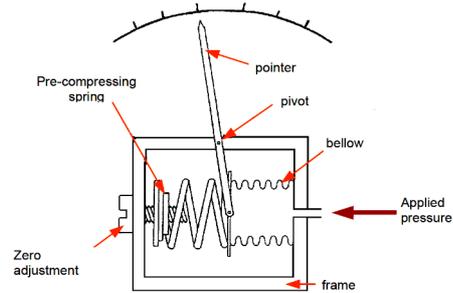


Fig. 3 Bellows Pressure Gauge

III. 수평 및 수직 위치 시험

3.1. 수평(직관) 시험

국내의 압력계 설치 수평(직관)거리 기준은 KS B 2101 '밸브의 성능시험을 위한 직관거리'에서 직관의 밸브 전단 2D, 후단 6D를 만족해야 한다고 기술되어 있다 [11]. 이를 확인하기 위한 시험을 K사의 유량계 성능시험센터에서 수행하였으며, 이를 바탕으로 K사의 현장 압력계 설치기준을 제시하고자 하였다.

직관거리 시험은 주문 제작한 배관에 밸브 전단 1~3D 그리고 후단 1~7D에 압력계를 설치하여 압력 데이터를 취득하여 분석하였다. 이때 밸브는 K사에서 가장 많이 사용하고 있는 게이트 밸브(Gate Valve)와 버터플라이 밸브(Butterfly Valve)를 사용하였으며, 동일 회사의 정밀급 제품을 선정하여 시험하였다.

전단은 3D부터 1D까지 후단은 1D부터 7D까지 압력계를 설치하였다. 설치 후 유량이 $0\text{m}^3/\text{h}$ 일 때부터 $100\text{m}^3/\text{h}$, $200\text{m}^3/\text{h}$, $300\text{m}^3/\text{h}$, $500\text{m}^3/\text{h}$, $700\text{m}^3/\text{h}$, $1,000\text{m}^3/\text{h}$, $1,500\text{m}^3/\text{h}$ 까지 밸브의 개도율을 서서히 조절해가며 데이터를 취득하였다[12].

데이터 로거로부터 취득된 값이 전단 3D와 후단 7D를 기준으로 하였을 때의 값과 얼마나 오차가 있는지 백분율 오차를 분석하였고, 각 직관 거리별로 유량에 따른 표준편차를 분석하여 값의 변동률이 얼마나 되는지를 확인하였다. 그림 4와 그림 5는 압력계 직관거리별 시험을 위한 개념도 및 현장에 설치된 시험장치이다.

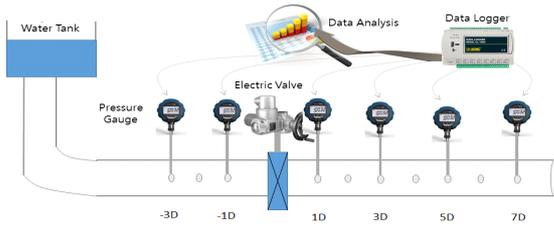


Fig. 4 Accuracy Test Diagram by Horizontal Distance



Fig. 5 Field Accuracy Test by Horizontal Distance

3.2. 게이트 밸브 직관 시험

직관별 백분율 오차는 전단 3D와 후단 7D가 가장 안정적인 압력이라고 생각하였을 때, 두 기준을 중심으로 유량별로 각 직관의 오차가 얼마나 발생하는지 알아보기 위함이며, 그림 6은 유량에 따른 직관거리별 평균 오차 분석 결과를 나타낸 것으로, 가장 낮은 평균 오차 중에서도 최대 편차는 얼마인지를 나타내는 그래프와 실제 데이터값이다. 그림 6에서 전·후단의 각 기준 직관부터 비교 직관 압력계의 오차를 분석한 결과로 전단 1~2D, 후단은 5~6D임을 확인할 수 있었고, 기타 구간에서는 오차가 많이 발생하였다.

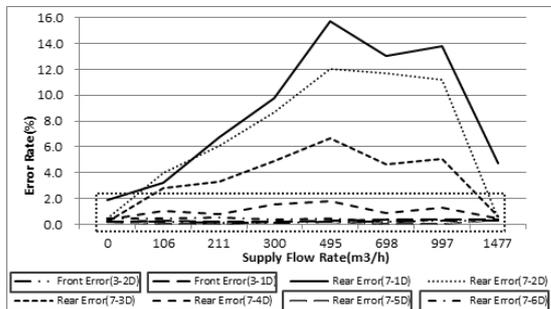


Fig. 6 Average Error by Flow Variation in Gate Value at each Distance of the Straight Line

그림 7은 유량에 따른 직관 거리별 값의 안정도를 판단하기 위하여 전·후단별 표준편차를 분석한 그래프이며, 전단의 표준편차는 유량이 211m³/h일 때 가장 많이 차이가 났다.

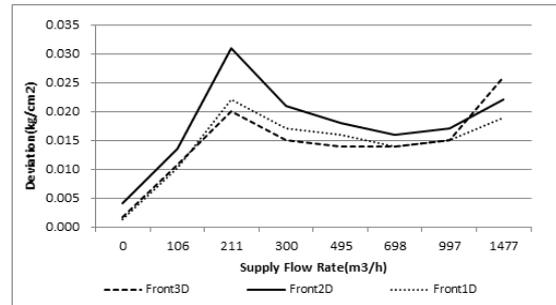


Fig. 7 Standard Deviation by Flow in the Gate Value at each Distance of the Straight Line (Upper Stream)

그림 8은 후단의 유량에 따른 직관거리별 표준편차로 997m³/h에서 가장 차이가 크게 나며, 가장 편차가 심한 구간에도 직관거리 5D, 6D, 7D 구간의 표준편차 차이는 0.004 정도로 미세한 차이를 보인다. 평균 오차 분석 결과와 비슷한 결과가 도출되는 것을 확인할 수 있었다.

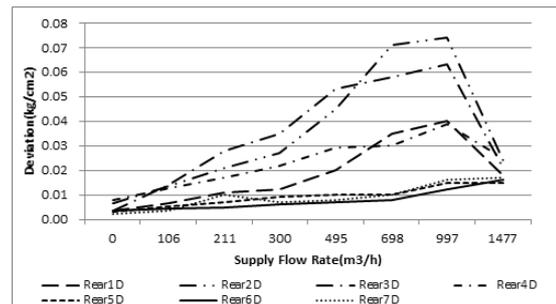


Fig. 8 Standard Deviation by Flow in the Gate Valve at each Distance of the Straight Line (Down Stream)

3.3. 버터플라이 밸브 직관 시험

게이트 밸브와 마찬가지로 그림 9와 같이 버터플라이 밸브의 평균오차 결과도 각 기준 직관인 전단 3D와 후단 7D로부터 비교하였을 때 차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있었다.

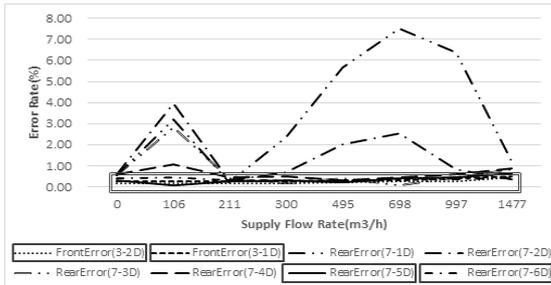


Fig. 9 Average Error by Flow in Butterfly Valve at each Distance of the Straight Line

그림 10은 표준편차 분석도 확실한 구분을 위해 전·후단으로 나누어 분석한 결과이며, 전단의 경우 게이트 밸브와의 시험결과와 비슷하지만 표준편차의 차이가 게이트 밸브보다는 훨씬 적은 것을 알 수 있다. 데이터를 비교하면 표준편차는 0.03으로 확실히 작은 편차를 보이는 것을 확인할 수 있다.

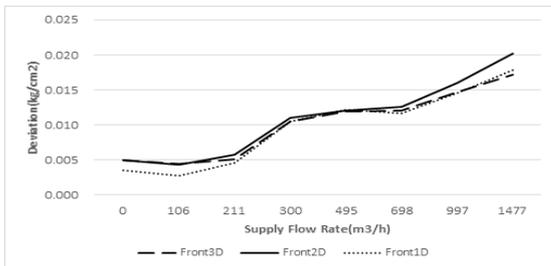


Fig. 10 Standard Deviation by Flow in Butterfly Valve at each Distance of the Straight Line (Upper Stream)

그림 11과 같이 후단의 결과 역시 5D, 6D, 7D의 안정도가 가장 높은 것을 확인할 수 있었으며 데이터 값으로의 최대오차는 0.04정도로 이는 게이트 밸브에서의 시험결과와 비슷한 것을 확인할 수 있었다.

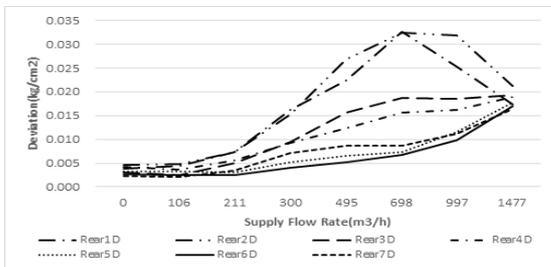


Fig. 11 Standard Deviation by Flow in Butterfly Valve at each Distance of the Straight Line

3.4. 수직 시험

관로의 어떤 지점에서 압력을 샘플링하여야 가장 신뢰성 있는 값을 얻을 수 있는지를 시험하기 위해 그림 12와 같이 주문·제작한 관로에 수직으로 상단(180°), 수평(90°), 하단(0°), 45°, 135°의 수직 지점에 압력계를 연결하여 데이터를 취득하였고, 이 값들을 90°를 기준으로 얼마나 오차가 발생하는지 확인하였다.

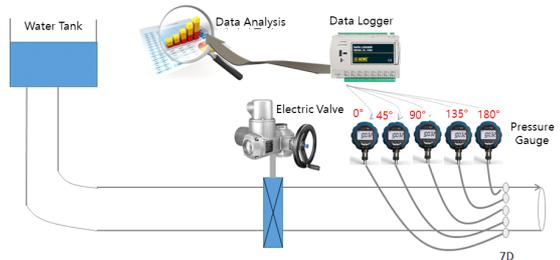


Fig. 12 Diagram of Test Methods by Vertical Angles

그림 13 및 그림 14에서는 전후단 설치각도별 평균값을 결과로, 기준점 90°으로부터 오차가 얼마나 발생하는지 확인해 보았으며, 전단과 후단 모두 관로 중단부를 기준으로 하단 0°가 오차가 많이 발생하였다.

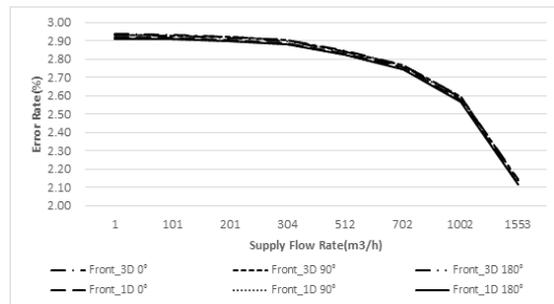


Fig. 13 Average Values by Angles (Upper Stream)

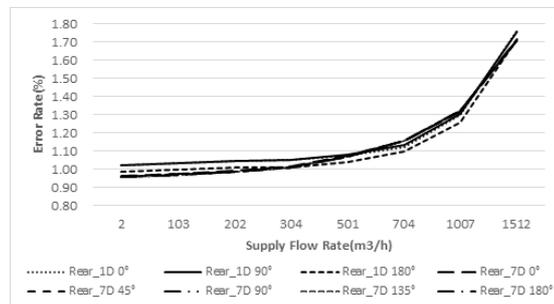


Fig. 14 Average Values by Angles (Down Stream)

그림 15에서는 이를 세부적으로 확인하기 위하여 전단 1D 자료를 확인하였으며, 기준점인 90°와 상단180°의 오차가 가장 적었으며, 하단 0도와 비교한 결과 오차가 커짐을 확인할 수 있었다. 이를 통해 설치위치는 바닥면일수록 정확도가 저하되고 관 중단부로부터 상단으로 설치되는 것이 바람직하다고 판단된다.

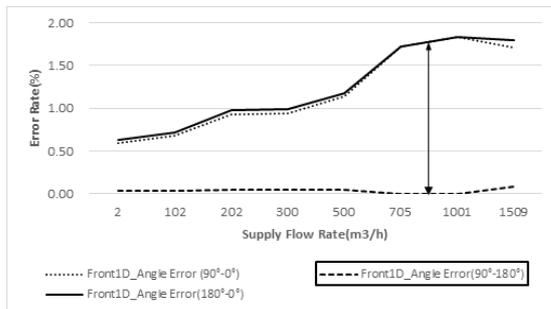


Fig. 15 Error Rate by Standard Angle (1D/Upper Stream)

그림 16에서는 후단 설치 각도별 정확도 분석결과로, 하단 0도 부근의 오차가 많았으며, 이를 통해 상수도 시설공사 기준처럼 관 수평부 또는 45° 이내로 설치하는 것이 바람직하다고 사료된다.

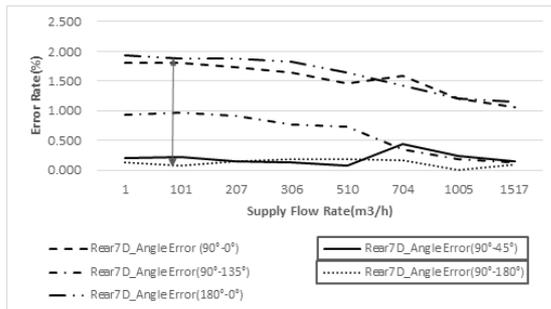


Fig. 16 Error Rate by Standard Angle (7D/Down Stream)

IV. 압력계 설치 방안

압력계 설치시 직관거리는 곡관, 확대관, 축소관에 크게 영향을 받지 않을 것으로 사료되나, 밸브실에서는 압력손실이 발생하므로 표 3과 같이 직관거리를 고려하여 설치하는 방안을 제시한다.

Table. 3 Installation Guideline for the Valves Considering Distances of Straight Line

Type	Installation Condition	Recommended Length
Front(D)	Flow control valve (Gate, B/F, Decompress)	1D
Rear(D)	Flow control valve (Gate, B/F, Decompress)	5D

도압배관의 구성은 그림 17과 같이 이물질 및 공기 제거용 밸브를 추가하여 구성하고, 관의 중심부에서 1m 이내로 설치 높이를 제한하며, 압력계 케이블 인입부에 침수방지용 소켓을 설치하는 것을 권장한다.

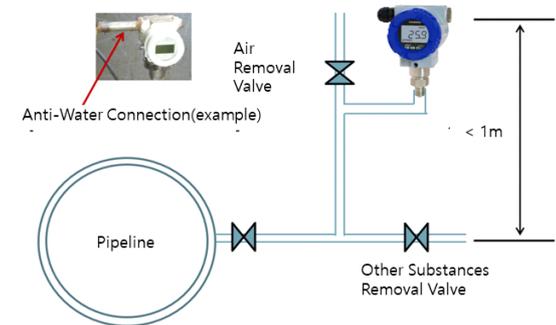


Fig. 17 Diagram of Sampling Pipeline Installation

압력계의 설치 위치는 그림 18과 같이 펌프장의 유입 압력 및 메인관로 유출지점, 관로상의 분기 지점(유량조절이 빈번한 경우 밸브의 전·후단), 관로 유량조절 및 감압 밸브 설치 지점(차압감시 필요시 밸브 전·후단 설치), 구간별 관로 종단도 상향 돌출부 중 수리적 임계지점(통수능 감시), 구간별 관로 종단도 하향 돌출부 중 최

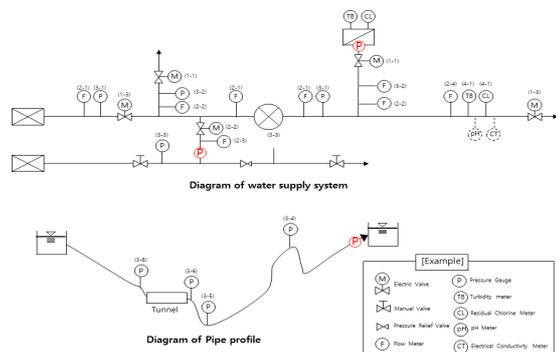


Fig. 18 Positions Proposed for Installation of the Pressure Gauges

대 압력작용 지점, 수압 터널의 유입·유출 지점과 관로 누수, 현장여건 또는 운영관리상 필요한 지점 및 TM/TC 가 설치된 지점에 설치하는 것을 제안한다.

V. 결 론

압력계는 관파손사고, 수도분야 누수관리 및 감지, 에너지 관리, 관 세척, 관망해석, 수충격해석 등 중요한 관리지표의 요소로 활용되고 있으나, 압력계의 관리 및 설치방안 제시가 미약하고 설치위치, 설치방법 등이 현장마다 상이함에 따라 압력계 데이터 신뢰성의 확보 및 운영관리의 어려움을 겪고 있다.

따라서 본 연구에서는 주문·제작한 배관에 밸브 전단 1~3D 그리고 후단 1~7D에 압력계를 설치하여 압력 데이터를 취득하여 분석하여 직관 거리 시험을 실시한 결과, 밸브 전단에서는 1D, 후단에서는 5D를 최소 확보하여야 하는 것으로 나타났다. 상단(180°), 수평(90°), 하단(0°), 45°, 135°의 지점에 압력계를 연결하여 데이터를 취득하여 위치 실험을 실시한 결과, 관로 수평부 또는 45° 이내가 최적인 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 압력계의 최적 설치방안을 제시하였다.

REFERENCES

[1] Ministry of Environment, *2017 Constant water statistics*, pp. 17-18, 2017.

[2] Ministry of Environment, *Description of the 2018 Water Supply Standards revised research*, Jan. 2019.

[3] Korea Occupational Safety & Health Agency, *Technical specification for the installation of pressure measuring devices*, pp. 1-6, Dec. 2017.

[4] Korea Occupational Safety & Health Agency, *Technical specification for application of pressure system*, pp. 1-9, Jun. 2017.

[5] K. M. Choi, H. H. Lee, G. W. Shin, and S. T. Hong, "Analysis of Elastic Wave Based Leakage Detection Technology Using Accel," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 24, no. 9, pp. 1121-1130, Sept. 2020.

[6] Korea Occupational Safety and Health Agency, *Technical Guidelines for the Installation of Pressure Measuring Devices*, pp. 1-6, 2011.

[7] Korea Association of Standards & Testing Organizations, *Pressure precision Measurement Technology*, pp. 39-96, 2017.

[8] K-water, *Criteria for installing and managing flow meters*, pp. 1-35, 2015.

[9] K-water, *Standard for installation of valves and instrumentation facilities on a conduit*, pp. 1-8, 2018.

[10] Y. T. Jung, *Fundamentals of Pressure Sensor, Flow Sensor and Level Sensor*, Gonggambooks, 2015.

[11] KS B 2101, *How to Test the Capacity Factor of Valves*, pp. 1-2, 2003.

[12] Y. J. Heo, H. H. Lee, and S. T. Hong, "Calibration System and Data Analysis for improving the Reliability of Pressure Sensor," in *Proceeding of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, Jeju, pp. 806-807, 2017.



이호현(Hohyun Lee)

1998년 ~ 현재 한국수자원공사
1998년 원광대학교 전자공학 학사
2010년 KAIST 로봇학제 석사
2017년 충북대학교 제어로봇공학 박사
※관심분야 : AI, 퍼지, 머신러닝, 최적화



홍성택(Sungtaek Hong)

1996년 ~ 현재 한국수자원공사
1993년 한밭대학교 전자공학과 학사
1995년 한밭대학교 전자공학과 석사
2020년 배재대학교 컴퓨터공학과 박사
※관심분야 : 컴퓨터공학, 위성통신, 계측제어, USN, IoT, 원격감시제어 및 센서응용 기술