

진동대 실험을 통한 밸브실 시스템의 내진성능 평가

정영수^{1*}, 이경석², 유진석³, 정형채⁴

Evaluation of Seismic Performance of Valve Chamber System by Shaking Table Tests

Young-Soo Jeong^{1*}, Kyeong-Seok Lee², Jin-Seok Yu³, Hyung-Chae Jeong⁴

Abstract: The structural safety of expansion joints for piping systems has been drawing attention owing to ruptures and leaks of water pipes caused by earthquakes and road subsidence at soft ground. In general, metal bellows are installed as expansion joints to prevent various damages in the piping system. In this study, the seismic performance of a valve chamber system was evaluated by performing earthquake shaking table tests. To validate the benefits to structural safety of metal bellows in connecting steel pipes to valve chambers, the seismic tests were conducted on expansion joints (bellows) and general piping, and the results were compared for durability. Strain gauges were attached to measure the effects of the input motion. As a result of the shaking table test, it was confirmed that the strain of the valve chamber structure and inflow or outflow steel pipes were decreased in 1/100, 1/20 by applied to the expansion joints.

Keywords: Valve chamber, Bellows, Seismic performance, Shaking table test

1. 서 론

최근 전세계적으로 기후변화로 인한 이상강우로 홍수가 빈발하고, 가뭄 지속시간이 장기화 되고 있으며, 국부적인 지진도 자주 발생하고 있다. 상수도 시설물이 반복적인 침수피해 및 가뭄, 지진 등 자연재해에 효과적으로 대응하여 재해방지 대책이 요구되고 있다. 특히 경주 및 포항지진시 수도관 파열 및 누수가 보고됨에 따라 배수관망시스템의 피해를 최소화하기 위하여 지진안전성 평가는 필요하다(Ministry of Public Safety and Security, 2017; Ministry of the Interior and Safety, 2018).

급수기능 확보를 위하여 지진 발생 시 피해 위험이 높은 관로와 구조물의 접속부(밸브실), 관로의 이음부는 내진성능이 확보될 수 있도록 내진설계를 적용하고 있다(KDS 57 17 00, 2022). 특히 연약지반이나 구조물과의 접합부(tie-in point) 등 부등침하의 우려가 있는 장소에는 변형성능이 확보된 신축이

음관을 설치한다(KDS 57 50 00, 2022).

도·송수관로의 운영 및 유지관리를 원활히 하고 기능성 및 안전성의 확보를 위하여 밸브실을 설치하고 있으며, 국내 유역별로 설치된 밸브실은 약 18,300 여개가 설치되어 있다(K-water, 2022). 00시 도·송수관로 콘크리트 밸브실의 약 36%가 철근노출, 0.3mm 이상의 균열이 발생하여 지표면의 노면수가 유입되어 침수되고 있으며(Koo et al., 2019), Fig. 1



(a) Damaged pipeline at valve chamber



(b) Installed expansion bellows

Fig. 1 Collapse and damage at joint of valve chamber

¹정희원, 부산대학교 지진방재연구센터 연구교수, 교신저자

²정희원, 부산대학교 지진방재연구센터 주임연구원

³정희원, 태성후렉시블 기술연구소 소장

⁴정희원, (주)삼영기술 기술연구소 부장

*Corresponding author: ysjung@pusan.ac.kr

Seismic Research and Test Center (SESTEC), Pusan National University, Yansan, 50612, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2024년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2024년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

과 같이 밸브실과 연결된 관로의 손상이 발생한다. 최근 콘크리트 밸브실의 단점을 보완하기 위하여 강재 및 FRP를 활용한 밸브실이 설치되고 있다. 하지만 구조해석을 통하여 밸브실의 설계를 실시하고 있으나, 지진 및 지반침하에 따른 밸브실의 유입·유출관에 직접적으로 결합되는 관로 변형의 영향으로 밸브실 구조체 및 내부 밸브의 손상을 유발할 수 있다.

경과연수 20년 이상이 경과한 밸브실은 도시개발 및 도로 확장 등의 매설환경 변화 및 증가추세인 지진발생 현황에 따라 추가적인 재하 하중 발생과 노후화 진행으로 발생한 구조물 결합으로 붕괴 등의 사고 발생 가능성에 대한 밸브실 시스템의 안전성 확보가 절실한 실정이다. 주기적으로 정밀안전진단이 실시되는 상수도 시설은 내구성 증진을 통하여 안전성을 확보하지만 콘크리트 밸브실에 집중되어 있는 실정이다. 최근 복합밸브실의 설치가 증가되고 있으나, 단순 구조해석을 통하여 구조 건전성을 평가하고 있다.

매설되는 수도용 강관의 관로부에는 별도의 신축이음관이 필요하지 않으나 제수밸브, 펌프 등 관로의 중간에 자유단이 발생하는 경우에는 밸브실 내에 신축이음관을 설치하도록 규정하고 있다(KDS 57 50 00, 2022). 일반적으로 상수도 도·송수관로에서 신축이음은 변형성능이 우수한 벨로우즈를 적용하고 있다. 벨로우즈용 신축관이음의 성형방법, 설계인자 및 변형 성능에 대한 실험적 및 해석적 연구는 활발히 진행되고 있으나(Gawande and Pagar 2018; Yun et al., 2021; Hao et al., 2021; Jeon et al., 2022; Seo et al., 2023; Kim et al., 2023), 구조물의 접속부(밸브실)의 내진성능평가 연구는 부족한 실정이다.

지하매설 배관시스템의 내진성능을 평가를 위한 실험방법 및 규정 등의 표준으로 규격화된 방법은 제시되지 않고 있다. 2019년 배관연결부의 지진 안전성 시험방법(KS B 1528)이 제정되었으나 구조물 내부의 노출된 입상관을 대상으로 하여 매설관로의 내진성능 평가에 적용하기에 어렵다. 해외의 경우, 매설배관의 내진설계가 수행되나 이 규격에서는 해석 및 시험 등에 의한 성능검증 방법은 제시되어 있지 않다(ISO 16134). 또한 지반-구조물 상호작용해석에 의해 내진성능을 평가할 것을 권고하고 있으나 성능검증을 위한 상세한 방법은 소개되지 않고 있다(American Lifelines Alliance, 2005). 따라서 본 연구에서는 신축이음용 벨로우즈의 유무에 따른 진동대 실험을 통하여 밸브실의 구조체 및 유입·유출관의 변형을 변화 및 내진성능을 평가하였다.

2. 본 론

2.1 밸브실

밸브실은 상수도, 일반용수, 하수도, 농업용수를 공급하기

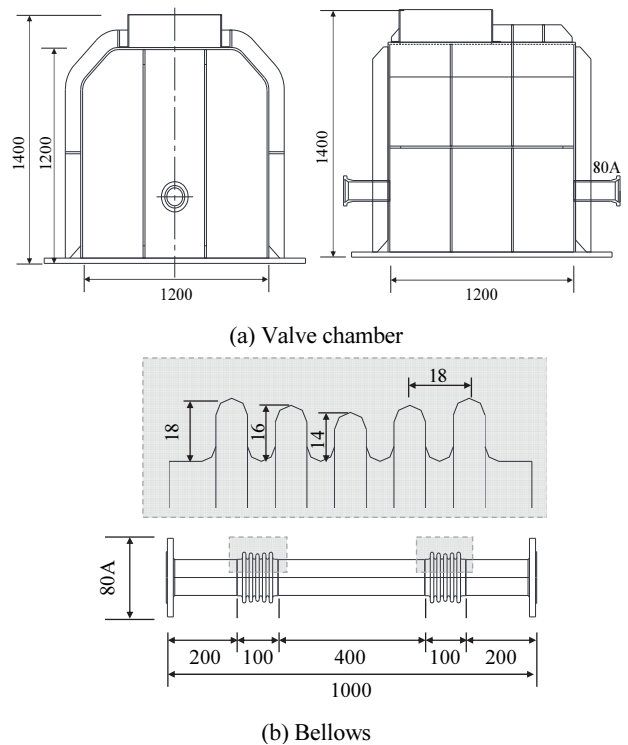


Fig. 2 Shape and dimension of tested specimens (unit: mm)

위한 배수관망중 제수밸브, 공기밸브 및 유량계, 감압밸브 및 부속시설물 등을 보호하며 유지보수 공간 확보를 위하여 인도 및 도로에 설치되는 지하시설물이다. 또한 토압 및 차량하중과 같은 외부 하중으로부터 시설물을 보호하며, 지하수 유입 차단 기능을 한다. 콘크리트 및 FRP 밸브실은 공용기간이 증가할수록 균열 및 변형으로 인하여 밸브실 벽체와 배관부의 수밀성능이 감소하고, 외부로부터 유입된 수분에 의하여 시설물의 부식 및 노화를 촉진시켜 각종 밸브의 오작동이 발생하게 된다. 본 연구에서는 Fig. 2(a)와 같이 지진력에 의한 변형을 최소화, 내구성 및 수밀성능을 향상시킨 정방형 구조를 가지는 밸브실을 적용하였다.

2.2 신축이음용 벨로우즈

유체에 의한 배관의 열 신축, 압력 및 부식에 대한 내식성, 지진 및 지반의 부등침하 등에 충분한 안전성을 확보하여 2차 재해 예방을 위하여 신축이음관을 설치한다. 일반적으로 신축이음용 벨로우즈는 축 방향, 축 직각방향 및 각도 변위를 자유롭게 흡수하며, 고온, 고압, 내식성 등 가혹한 사용 조건에 적합한 구조를 가지는 장점이 있다.

본 연구에서는 Fig. 2(b)와 같이 사전연구를 통하여 변형성능이 우수한 두께 0.6 mm인 박판을 세 겹으로 중첩된 다층 벨로우즈를 적용하였다(Seo et al., 2023).

내부식성과 내열성이 뛰어난 스테인리스강을 적용하였으며,

변형률의 급격한 변화 및 응력집중현상을 피하기 위하여 액압성형을 통하여 벨로우즈를 제작하였다. 일반적으로 배수관 내의 동수압은 0.2 MPa~0.4 MPa를 적용하고 있으며, 내진성능평가는 동수압 0.4 MPa 상태에서 벨로우즈의 주름관에서 누수가 발생하는 상태를 파괴로 정의 하였다.

3. 벨브실 시스템의 진동대 실험

3.1 측정시스템 및 측정방법

벨브실과 강관연결부의 구조적 안전성 평가와 벨로우즈 적용 및 일반배관의 변형율을 평가하기 위하여 Fig. 3과 같이 게이지를 설치하였다. Fig. 3(a)와 같이 벨브실의 유입관에 직접적으로 결합되는 신축이음관의 유무에 의한 벨브실 외벽의 손상 평가를 위하여 원주방향으로 등분하여 3축 게이지를 설치하였다.

또한, Fig. 3(b)와 같이 벨로우즈와 일반배관에 미치는 영향을 평가하기 위하여 1축 게이지를 설치하였다. 진동대 실험은 두 개의 진동대를 활용하여 2방향 동시 가진하여 Fig. 4와 같이 벨로우즈 유무에 따른 실험을 실시하였다. 배관 및 신축이음부에서 누수 또는 파괴발생시 까지 실험이 진행되었다.

3.2 진동대 실험을 위한 실험 프로토콜

상수도 내진설계(KDS 57 17 00) 기준에 따르면, 설계 응답스펙트럼 생성에 사용되는 지반 분류를 전단파속도와 기반암까지의 깊이에 따라서 분류하고 있다. 본 연구에서는 국내 지진

환경을 고려하여 상수도관이 실제로 매설되는 지반분류 S2 ~ S5와 상수도시설의 I등급의 붕괴방지 조건에 따라서 재현주기 1,000년을 가지는 Fig. 5와 같이 4가지의 설계 응답스펙트럼을 포괄하는 응답스펙트럼을 생성하였다. 각 방향 응답스펙트럼을 만족하는 지진파를 Fig. 6과 같이 가속도 이력을 생성하였으며, 인공지진파의 총 지속시간은 30초로 벨브실 시스템의 내진성능 실험을 실시하였다. 공진 주파수 탐색실험의 입력파는 Random wave를 이용하여 벨브실 시스템의 구조적 손상을 발생 시키지 않는 크기(Root Mean Square 0.1 g, RMS)로 하였으며, 주파수 범위는 진동대 및 입력파형의 특성을 고려하여 0.5 Hz~50.0 Hz로 진동지속시간은 60초 이상으

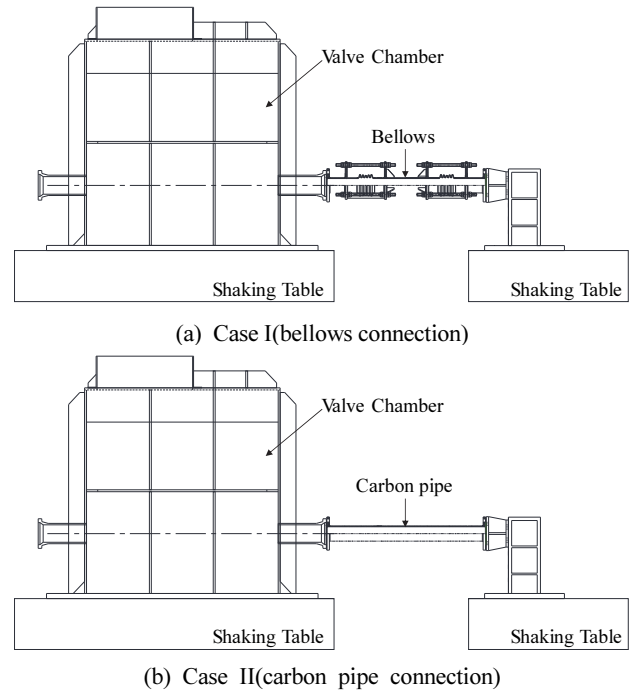


Fig. 4 Set-up of shaking table test

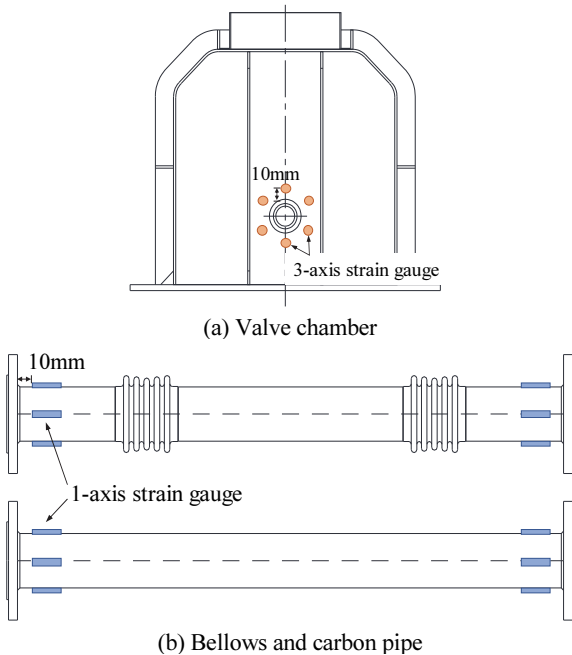


Fig. 3 Strain measurement location

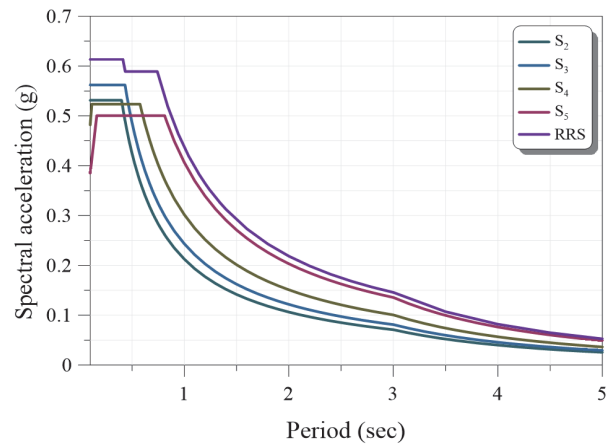


Fig. 5 Response spectrum by artificial time history

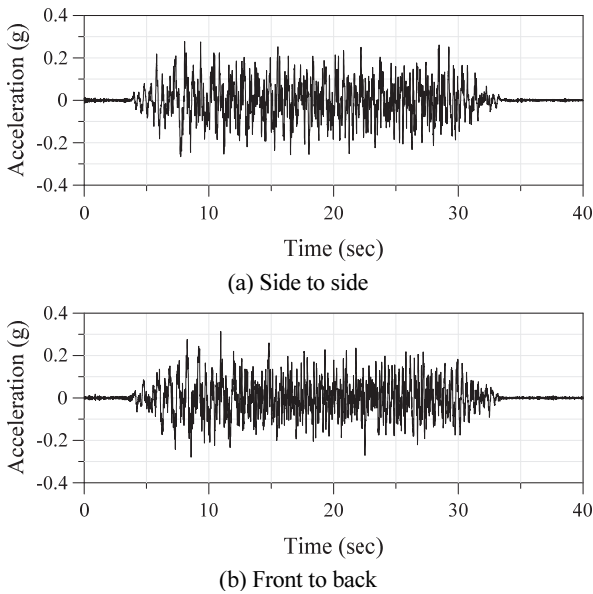


Fig. 6 Artificial time history at EQ 100%

Table 1 Test sequence

No.	Earthquake motion	Remarks
1	Modal test	Resonant frequency check
2	EQ 20%	Valve chamber with bellows
3	EQ 40%	Valve chamber with bellows
4	EQ 100%	Valve chamber with bellows
5	EQ 150%	Valve chamber with bellows
6	Modal test	Resonant frequency check
7	EQ 10%	Valve chamber with carbon pipeline
8	EQ 20%	Valve chamber with carbon pipeline
9	EQ 30%	Valve chamber with carbon pipeline
10	EQ 40%	Valve chamber with carbon pipeline

로 하였다. 밸브실 시스템의 내진성능 실험순서를 Table 1에 정리하였다. 밸브실 시스템의 한계상태를 평가하기 위하여 입력지진과의 변수로는 스펙트럼을 각각 20%씩 증폭시켰으며, 100% 이상에서는 50%씩 증폭하여 수행하였다.

4. 내진성능 평가 결과

본 연구에서는 벨로우즈 및 일반배관이 설치된 밸브실을 대상으로 상수도 내진설계기준에서 제시된 지반을 포괄하는 응답스펙트럼에 대하여 진동대 실험을 통하여 그 결과를 분석하였다.

진동대 실험결과 일반배관이 적용된 경우에는 EQ 40% 상태에서 Fig. 7과 같이 밸브실 유입·유출관의 용접부의 파괴가

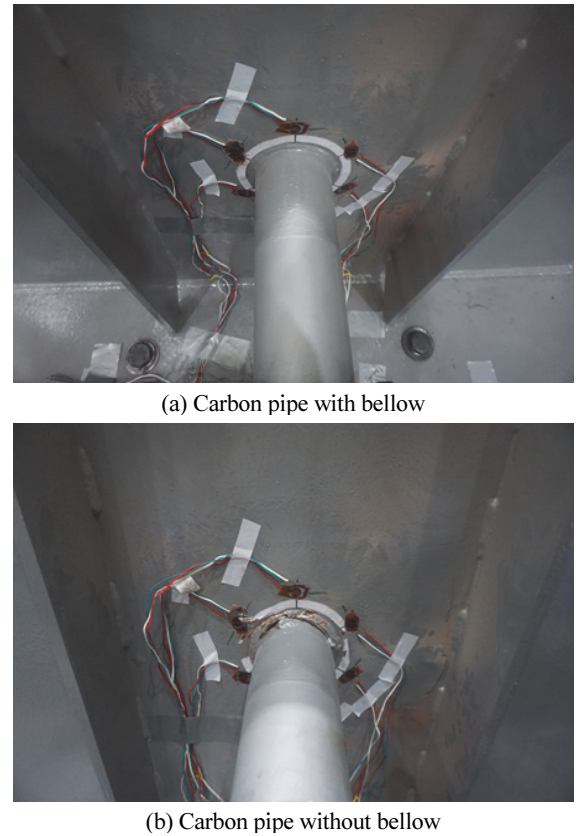
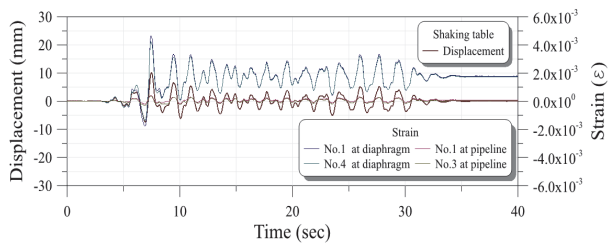


Fig. 7 Damaged valve chamber depending on bellows

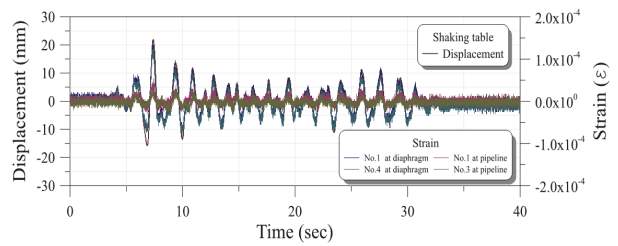
발생하였으며, 벨로우즈가 적용된 경우에는 손상은 발생하지 않았다. 하지만, 응답이 증가함에 따라 EQ 100% 상태에서 벨로우즈의 누수가 관찰되었으며, EQ 150%에서 파괴가 발생하였다. 사전 연구에서 정적 휨 변형의 한계상태는 138 mm로 평가되었으며(Seo et al., 2023), EQ 100% 최대변위 111.7 mm로서 누수가 발생하기까지의 동적 휨 변형 한계상태는 정적 한계상태의 약 85.2% 성능을 나타내었다.

밸브실 시스템의 안전성 평가는 측정된 변형률을 이용하여 분석하였으며, 밸브실 다이어프램과 유입·유출관에 연결된 변형률 게이지 및 좌우방향 변위응답을 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 또한 최대변위 상태에서의 변형률을 비교하여 Fig. 9과 Fig. 10에 나타내었다.

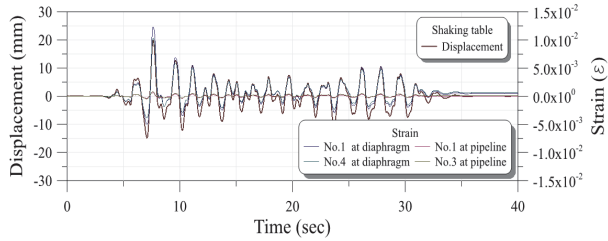
일반배관이 적용된 경우의 좌우방향 변위응답과 다이어프램의 변형률 응답의 경향은 유사하게 나타났으나, 위치에 따라 편차가 발생하였으며 최대 변형률 발생위치는 연결부 최상단으로 평가되었다. 하지만 횡방향 가진 실험의 경우에는 위치별 및 입력지진별 경향은 나타나지 않았다. Fig. 9(a)와 같이 일반배관이 연결된 밸브실 유입·유출관의 변형률은 입력 하중이 증가할수록 증가 하였으며, 입력하중이 10%씩 증가할수록 변형률은 약 1.3 ~ 2.6배 증가 이후 EQ 40%에서 파괴되었다. Fig. 9(b)와 같이 벨로우즈가 적용된 경우에는 각 위



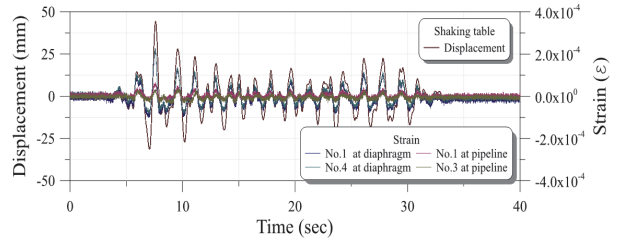
(i) EQ 10%



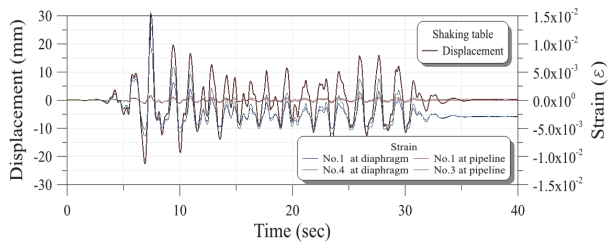
(i) EQ 20%



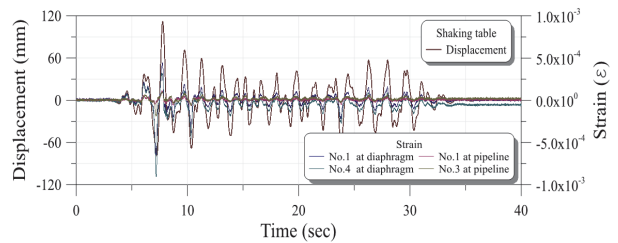
(ii) EQ 20%



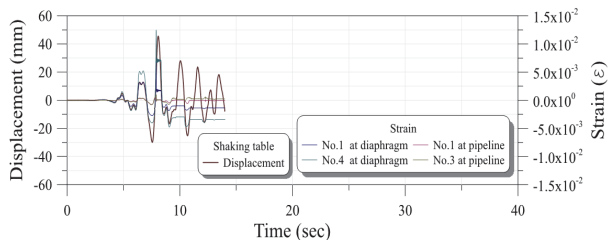
(ii) EQ 40%



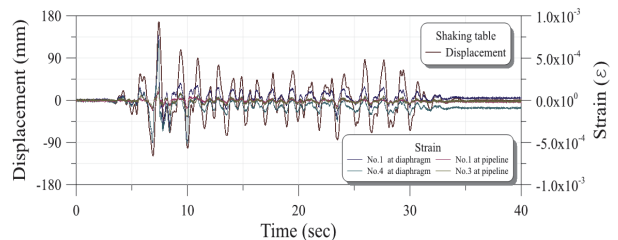
(iii) EQ 30%



(iii) EQ 100%



(iv) EQ 40%

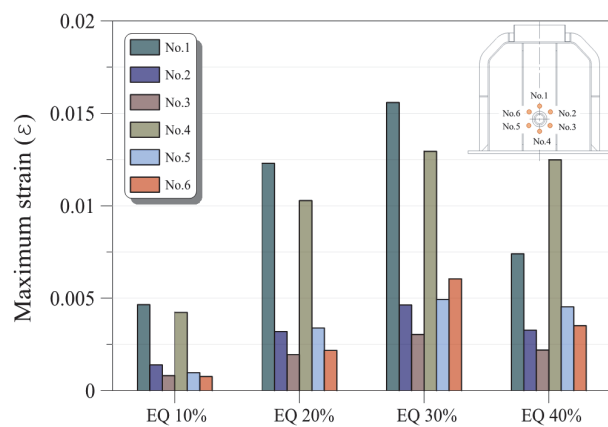


(iv) EQ 150%

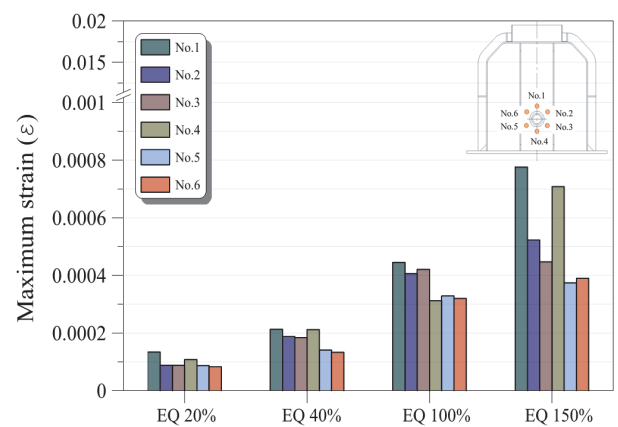
(a) Valve chamber with carbon pipe

(b) Valve chamber with bellows

Fig. 8 Displacement-strain by input motion

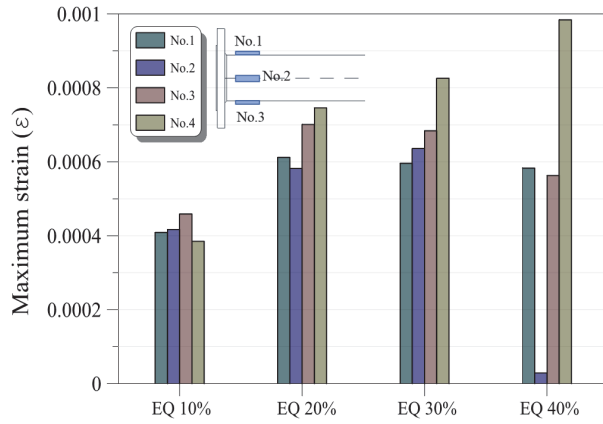


(a) Valve chamber with carbon pipe

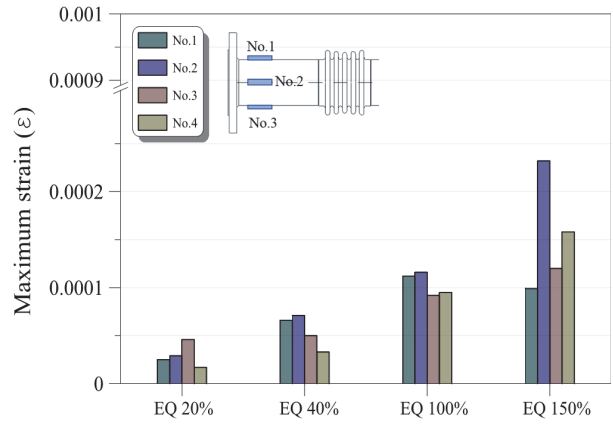


(b) Valve chamber with bellows

Fig. 9 Comparison of strain for valve chamber under maximum displacement depending on input motion

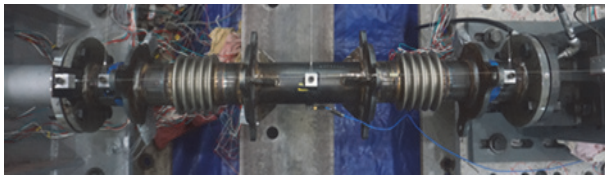


(a) Valve chamber with carbon pipe

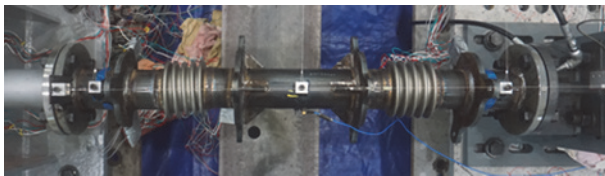


(b) Valve chamber with bellows

Fig. 10 Comparison of strain for pipeline under maximum displacement depending on input motion



(a) EQ 20%



(b) EQ 40%



(c) EQ 100%



(d) EQ 150%

Fig. 11 Deformation and failure of bellow by seismic test

치별 변형률 편차는 감소하였으며, 벨로우즈가 설치된 밸브실 시스템의 내진성능 향상효과를 직접적으로 비교가 가능한 EQ 20%에서 일반배관이 적용된 경우보다 변형률은 1/100 수준으로 평가되었다.

또한 밸브실에 결합된 일반배관과 벨로우즈의 동일한 위치

에서 둘레방향으로 4곳에서 측정된 변형률을 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10(a)와 같이 일반배관이 연결된 경우에는 지속적인 변형률이 증가하고 있으며, 둘레방향으로의 변형률 편차는 발생하지 않고 있다. 하지만, 벨로우즈가 연결된 Fig. 10(b)와 같이 벨로우즈 주름관의 변형으로 지반변형에 의한 손상을 감소시킬 수 있음을 확인하였으며, EQ 20%에서 변형률은 1/20 수준으로 감소하였다.

진동대 시험이 종료된 이후의 벨로우즈의 변형상태를 Fig. 11에 나타내었다. 벨로우즈의 변형이 증가함에 따라 소성변형이 누적되고 있으며, Fig. 10(c) 및 (d)와 같이 산에서 소성변형이 축적되면 벨로우즈는 변형의 과도한 집중으로 인하여 변형경화(strain hardening)가 발생으로 누수현상이 발생된 것으로 판단된다. 또한 벨로우즈의 변형이 크게 발생하는 경우에 벨로우즈가 수축하는 방향으로 산과 산이 밀착되는 자기 접촉(self contact) 현상에 의하여 변형이 제한된 것으로 판단된다. 상기와 같이 상수도 설비의 제어를 위한 다양한 밸브의 보호 및 유지보수 등의 공간 제공을 위하여 지하에 매설되는 밸브실은 토압 및 상부 하중 등의 압력 작용시 밸브실의 취약부에 대한 평가 및 안정성 확보가 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 신축이음용 벨로우즈의 유무에 따른 밸브실 및 유입·유출관의 변형률 변화 및 내진성능을 평가하였다. 본 시험에서 얻어진 주요한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 지진응답이 증가함에 따라 EQ 100% 상태에서 벨로우즈의 누수가 관찰되었으며, EQ 150%에서 파괴가 발생하였다.
- (2) 일반배관이 연결된 밸브실 유입·유출관의 변형률은 입력하중이 10%씩 증가할수록 변형률은 약 1.3 ~ 2.6배 증가 하였다.

- (3) 벨로우즈 설치를 통하여 일반배관의 경우보다 벨브실 및 배관의 변형률은 약 1/100 및 1/20 수준으로 평가되었다.
- (4) 벨로우즈가 수축하는 방향으로 산과 산이 밀착되는 자기접촉(self contact)에 의하여 변형이 제한되었으며, 변형이 큰 첫 번째 산에서 누수가 발생되었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2022-00143468). 이에 감사드립니다.

References

1. American Lifelines Alliance. (2005), Seismic Guidelines for Water Pipelines.
2. Gawande, S. G., and Pagar, N. D. (2018), A Combined Numerical and Experimental Investigation on the Effect of Dynamics Characteristics of Metal Expansion Bellows, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 6, 401-416.
3. Hao, Z., Luo, J., Chen, L., Cai, Y., Chen, Y., and Cheng, M. (2021), Failure Mechanism of Unequal Parameters Metal Bellows under Repeated Bending Process, *Engineering Failure Analysis*, 129, 105671.
4. ISO 16134. (2020), Earthquake Resistant and Subsidence Resistant Design of Ductile Iron Pipelines, International Organization for Standardization, Switzerland.
5. Jeon, B. G., Kim, S. W., Yun, D. W., Ju, B. S., and Yu, J. S. (2022), Seismic Performance Test of Multi-ply Metal Bellow-Type Expansion Joints, *Journal of Korean Society for Advanced Composite Structures*, 13(4), 9-17 (in Korean, with English abstract).
6. Kim, S.W., Chang, S. J., Park, D. U., and Jeon, B.G. (2023), Seismic Performance Evaluation on Bending Deformation of 2-Ply and 3-Ply Bellows Expansion Pipe Joints, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 27(2), 33-41 (in Korean, with English abstract).
7. Korean Design Standard (KDS 57 17 00) (2022), Waterworks Seismic Design Criteria, Ministry of Environment (in Korean).
8. Korean Design Standard (KDS 57 50 00) (2022), Conveyance Water Design Criteria, Ministry of Environment (in Korean).
9. K-water. (2022), Water Management Annual Report.
10. Koo, M. S., Cha, M. L., Lee, S. H., and Shin, C. G. (2019), A Case Study on the Differential Settlement of the Valve Chamber in Water Supply, *Proceedings of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(2), 147-148 (in Korean, with English abstract).
11. Ministry of Public Safety and Security. (2017), 9.12 Earthquake White Paper, Central Disaster and Safety Countermeasures Headquarters (in Korean).
12. Ministry of the Interior and Safety. (2018), 2017 Pohang Earthquake White Paper, Central Disaster and Safety Countermeasures Headquarters (in Korean).
13. Seo, Y. D., Lee, K. S., Yu, J. S., and Jeong, Y. S. (2023), Ultimate Bending Performance and Fatigue Life of Single-layer and Multi-layer Bellows, *Journal of Korean Society for Advanced Composite Structures*, 14(1), 9-16 (in Korean, with English abstract).
14. Yun, D. W., Jeon, B. G., Kim, S. W., Yu, J. S., and Ju, B. S. (2021), Low Cycle Fatigue Reliability Tests for Earthquake and Subsidence-resistant Performance Evaluation for Bellows Joint System, *Journal of Korean Society for Advanced Composite Structures*, 12(6), 64-70 (in Korean, with English abstract).

Received : 12/04/2023
 Revised : 12/21/2023
 Accepted : 12/28/2023

요 지 : 연약지반에서의 도로 침하 및 지진에 의한 누수 및 수도관의 파열에 따라 배관시스템용 신축이음장치의 구조적 안전성이 강조되고 있다. 일반적으로 배관 시스템의 다양한 손상을 방지하기 위해 신축이음에 금속 벨로우즈 사용하고 있다. 본 연구에서는 벨브실 시스템의 내진 성능을 평가하기 위해 진동대를 이용하여 내진시험을 수행하였다. 벨브실과 강관연결부의 구조적 안전성 평가를 위하여 신축이음(벨로우즈) 및 일반배관을 적용하였으며, 변형률 게이지를 부착하여 지진동에 의한 영향을 분석하였다. 진동대 실험결과, 일반배관이 적용된 경우보다 신축이음(벨로우즈)을 설치한 경우에 벨브실 구조체 및 유입·유출관의 변형률 1/100 및 1/20 수준으로 감소를 확인하였다.

핵심용어 : 벨브실, 벨로우즈, 내진성능, 진동대 실험
