Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 29(1) : 67~74, 2019
https://doi.org/10.5050/KSNVE.2019.29.1.067

한국소음진동공학회논문집 제 29 권 제 1 호, pp. 67~74, 2019
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

반복가력시험을 이용한 유동식 그루브 조인트로 연결된 입상 배관의 지진거동 연구

A Study for Seismic Behavior of a Riser Pipe with Flexible Groove Joints Using Cyclic Loading Test

김 성 완* · 전 법 규† · 안 성 우** · 위 성 우**
Sung-Wan Kim*, Bub-Gyu Jeon†, Seong-Woo Ahn** and Seong-Woo Wi**

(Received September 30, 2018 ; Revised November 26, 2018 ; Accepted December 4, 2018)

Key Words : Riser Pipe(입상배관), Seismic Behavior(지진거동), Flexible Groove Joint(유동식 그루브 조인트)

ABSTRACT

In this study, seismic simulation testing of a stainless steel riser pipe with a flexible groove joint was carried out using the cyclic loading test. The deformation of the stainless steel riser pipe and the response in terms of the relative displacement between the components were analyzed by an image measurement system that measured the deformation angle between the elbow and tee joint. Neither deformation/destruction nor other external changes to the pipe resulted from the cyclic loading test. As the maximum von Mises stress values measured from the cyclic loading test fell beneath the allowable stress threshold, the results of the cyclic loading test were evaluated as having met the acceptance criteria for allowable stress.

1. 서 론

생활수준의 향상 및 산업의 발전에 따라 공조용 기계, 산업용 기계 및 배관기자재의 중요성이 인식되고 있다. 배관은 기계, 전기, 전자, 섬유, 냉동 공조 및 플랜트 등 모든 산업분야의 응용기기로서 이용되고 있을 뿐만 아니라 소방, 화학 등 안전과 관련된 영역에서도 폭넓게 활용되고 있어 배관 분야의 중요성이 날로 부각되고 있다. 배관은 주요 구조부에 연결되어 있지만 외부하중을 지지하지 않으며 주어진 고유 기능을 수행하는 시설로서 비구조요소로 분류할 수 있다.

자연재해 중 지진의 발생 추이를 보면 세계적으로 규모 5.0 ~ 규모 5.9의 지진이 증가 추세를 보이고 있다. 이러한 경향으로 인하여 지진이 발생하는 국가를 중심으로 비구조요소에 대한 내진안전성을 확보하기 위한 연구가 수행중이다[1,2]. 국내에서도 건축구조기준(2016)의 0306.10절에서 비구조요소에 대한 내진설계를 다루고 있으며 0205절에서 지진하중에 대한 특별검사를 수행하도록 요구하고 있다. 또한 0208절에서 필요할 경우 비구조요소의 내진성능 검증을 수행할 것을 권고하고 있다[3]. 2016년 소방시설의 내진설계기준(국민안전처고시 제2015-138호) 시행에 따라 소방배관에 대한 내진성능 확보가 요구되고 있는 실정이다.

배관 관련 제품의 진동, 굽힘, 내압 등의 기계적인 성능을 평가하기 위한 검증 기준은 제시되어 있다. 그러

† Corresponding Author ; Member, Seismic Research and Test Center, Pusan National University.
E-mail : bkjeon79@pusan.ac.kr
* Seismic Research and Test Center, Pusan National University.
** Korea Testing Certification

‡ Recommended by Editor Hyung Jo Jung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

나 지진하중 발생 시 서로 다른 두 지점의 거동 차에 의해 발생할 수 있는 특성과 반복되는 변위에 의한 저진동수 피로파괴의 손상경향이 나타나는 배관의 특징을 고려한 내진성능평가에 대한 연구가 필요하다. 미국의 경우 NFPA(national fire protection association)13에서 배관을 포함한 소방시설의 내진설계 기준을 제시하고 있다[4]. 국내에서는 2016년 건축구조기준이 개정되고 소방시설의 내진설계기준이 시행됨에 따라 주요 비구조요소인 배관에 대한 내진성능 확보가 요구되고 있다. 그러나 이러한 기준들에서는 특정요소의 적용규정과 지진하중에 대한 설계를 제시하고 있을 뿐 해당 요소의 내진성능검증을 위한 평가 기술이 명확하지 않다.

이 연구에서는 NFPA13과 소방시설의 내진설계기준을 참조하여 배관계통을 구성하였다. 배관의 연결은 최소 변형각이 ±1° 이상이 요구되는 유동식 그루브 조인트를 사용하였으며 정적 반복가력에 의한 지진모사시험을 수행하였다. 지진하중 발생 시 구조물의 변형 또는 구조부재간의 상대변위에 의한 변위지배적인 거동에 따른 시험대상설비의 거동을 분석하였다.

2. 이미지 상관법을 이용한 변형각 측정

이미지 상관법을 이용한 계측 방법은 구조물 표면의 명암 값을 이용하여 상관관계를 비교하는 방법이다[5,6]. 이 연구에서는 두 이미지 간의 상관관계 비교를 위한 방법으로 식 (1)의 NSSD(normalized sum of squared differences) 방법을 이용하여 구조물의 변위를 측정하였다. 식 (1)에서 $f(x_i,y_i)$는 참조 이미지에서 분리한 정사각형의 명암의 패턴을 참조 윈도우라고 하며, $g(x_i',y_j')$는 외력에 의한 물체의 변형된 이미지에서 분리한 정사각형의 명암의 패턴을 변형된 윈도우라고 한다. 윈도우의 크기는 $(2M+1)\times(2M+1)$의 정사각형 사이즈의 부분 이미지를 나타내며, 참조 윈도우와 변형된 윈도우의 상관관계를 분석하여 가장 상관관계가 높은 좌표를 검출함으로써 변형의 측정이 가능하다.

단위 픽셀 이하를 계산하기 위해서는 각각의 지점에서 측정된 변위를 바탕으로 주변 지점에 대한 변형의 예측을 위해 형상함수를 이용한다. 외력에 의한 물체의 굽힘 및 비선형적인 거동의 영향을 고려하기 위하여 식 (3)의 2차 형상함수를 적용하여 단위픽셀이하를 계산하였다. 식 (3)에서 $\xi_2(x_i,y_j)$는 x좌표의 2차 형상함수, $\eta_2(x_i,y_j)$는 y좌표의 2차 형상함수, $\Delta x = x_i - x_0$, $\Delta y = y_j - y_0$이며, u, v는 참조 윈도우 중심에 대한 x, y방향의 변위 성분을 나타낸다. u_x, u_y, v_x, v_y는 참조 윈도우의 1차 변위 구배를 u_{xx}, u_{xy}, u_{yy}, v_{xx}, v_{xy}, v_{yy}는 2차 변위 구배를 나타낸다. M은 변형 전 이미지에서 변위를 측정하고자 하는 격자점의 크기를 나타낸다.

$$C_{NSSD}=\sum_{i=-M}^{M}\sum_{j=-M}^{M}\left[\frac{f(x_i,y_j)}{\bar{f}}-\frac{g(x_i',y_j')}{\bar{g}}\right]^2 \quad (1)$$

$$\bar{f}=\sqrt{\sum_{i=-M}^{M}\sum_{j=-M}^{M}[f(x_i,y_j)]^2},\qquad \bar{g}=\sqrt{\sum_{i=-M}^{M}\sum_{j=-M}^{M}[g(x'_i,y'_j)]^2} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}\xi_2(x_i,y_j)&=u+u_x\Delta x+u_y\Delta y\\&\quad+\frac{1}{2}u_{xx}\Delta x^2+\frac{1}{2}u_{yy}\Delta y^2\\&\quad+u_{xy}\Delta y^2+u_{xy}\Delta x\Delta y\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta_2(x_i,y_j)&=v+v_x\Delta x+v_y\Delta y\\&\quad+\frac{1}{2}v_{xx}\Delta x^2+\frac{1}{2}v_{yy}\Delta y^2\\&\quad+v_{xy}\Delta y^2+v_{xy}\Delta x\Delta y\end{aligned} \quad (3)$$

$$(i,j=-M:M)$$

Fig. 1은 영상계측시스템을 이용한 변형각 측정 알

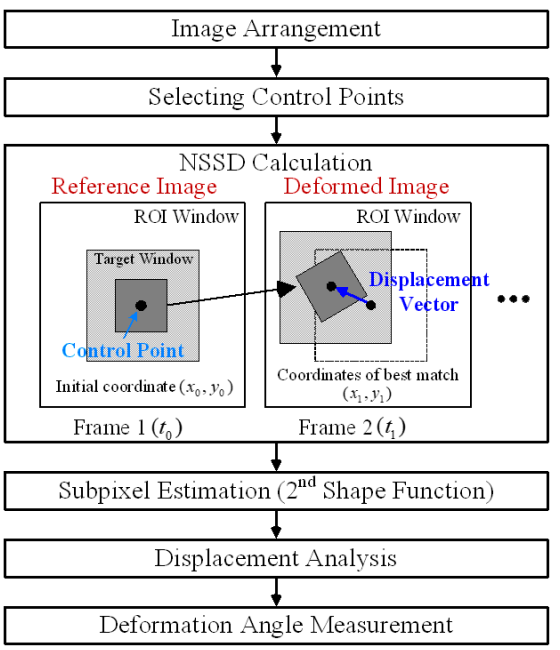


Fig. 1 Algorithm for measuring deformation angle

고리듬을 나타내었으며, 총 6단계로 분류된다. 획득된 이미지를 시간순서대로 배열하며, 참조 이미지에서 변위를 알고 싶은 지점인 기준점들을 지정한다. 변위를 알고 싶은 지역에서 참조 윈도우와 변형된 윈도우의 상관관계를 분석하기 위하여 NSSD를 계산하여 좌표를 나타낸다. NSSD로 계산된 좌표는 정수이며 단위 픽셀 이하는 2차 형상함수를 이용하여 단위픽셀 이하를 계산한다. 마지막으로 각 지점에서 해석된 변위응답을 이용하여 변형각을 측정하게 된다.

3. 시험조건 및 방법

이 연구에서는 수직배관계통을 시험대상설비로 선정하고, 구조부재간의 상대변위를 이용한 층간변위를 구현할 수 있도록 Fig. 2와 같이 강재프레임을 설계 및 제작하였다. 시험대상설비인 수직배관계통은 NFPA13을 참조하여 2개의 90° 엘보와 1개의 티 조인트가 적용되었으며, 지진분리이음뿐만 아니라 배관의 연결은 모두 유동식 그루브 조인트를 이용하여 연결되었다.

대한민국의 원자력 설계기준인 운전기준지진 하중배제에 따른 대체설계 고려사항에서 지진에 대한 피로해석을 수행하고자 할 경우, 안전정지지진을 기준으로 지진 사건 1회당 10회의 최대 응력 사이클을 고려할 것을 요구하고 있다[7]. 또한 배관을 지지하는 지지구조물들의 서로 다른 거동에 의한 상대변위로부터 야기될 수 있는 피해를 검토하기 위하여 지진 정착부 운동을 고려할 것을 요구하고 있다. 따라서 반복가력 횟수는 최소 10회 이상으로 하는 것이 타당할 것으로 판단하였다.

이 연구에서는 실제 운용조건을 최대한 고려하기 위하여 배관내부에 물을 채우고 부스터를 이용하여 2 MPa의 내압을 가압하였다. 또한 Table 1의 건축구조기준에서 제시하고 있는 최대허용층간변위에 대하여 정형파로 10회 정적 반복가력시험을 수행하였으며 h는 해당 층의 층고로서 3000 mm이다. 액추에이터는 변위제어로 분당 20 mm로 가력하였다.

Fig. 3은 영상계측시스템을 이용하여 획득된 유동식 그루브 조인트가 적용된 입상 배관을 나타내었다. Table 2는 시험대상설비의 주요 구성품과 하위부품들을 나타내었다. 시험대상설비의 높이는 3000 mm이고 로드셀과 연결을 위한 플레이트를 포함하면 3040 mm이다.

Fig. 4는 수직배관계통의 층간변위 시험을 위해 설치

Table 1 Allowable side sway

Level		
Special	I	II
0.010 h	0.015h	0.020 h

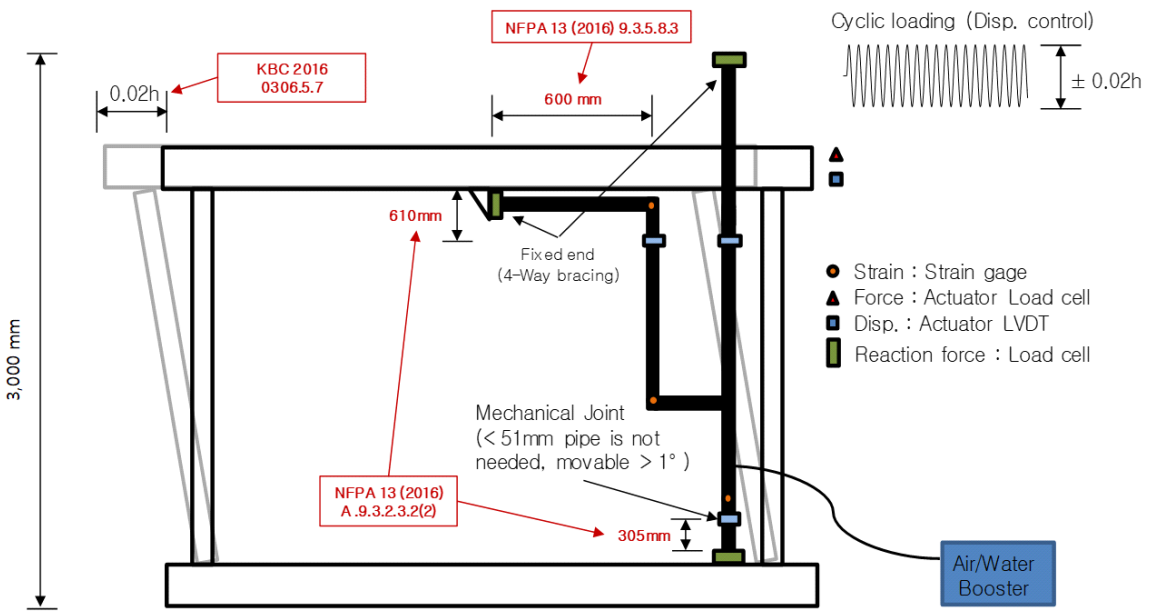


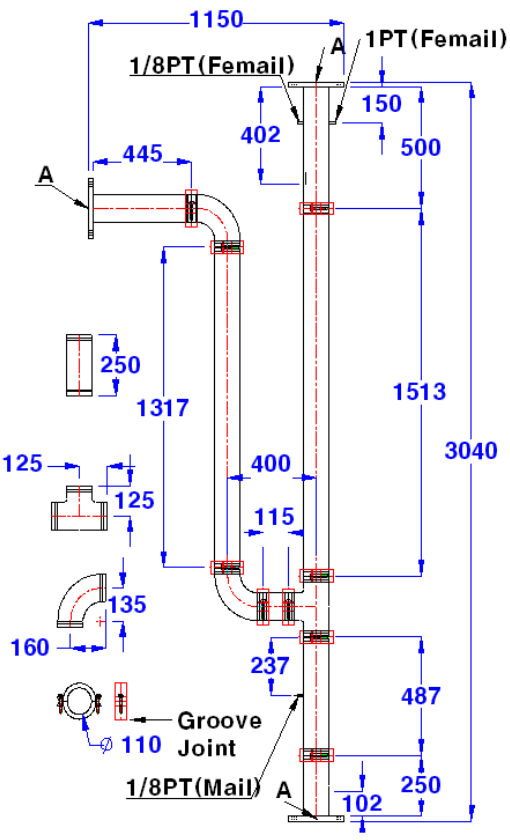
Fig. 2 Test schematic for seismic behavior of riser pipe with flexible groove joint

된 시험대상설비이며 센서의 설치 위치를 나타내었다. 센서는 입상배관에 모든 끝단은 3축 로드셀(MC63-3A, Dacell)로 연결되며 볼트로 결합하여 인발력을 계측하였다. 선행연구에서 지진에 의해 발생하는 배관의 파손은 저진동수 피로파괴로서, 비선형 거동이 집중되는 엘보와 티 조인트 등의 피팅에서 변위지배

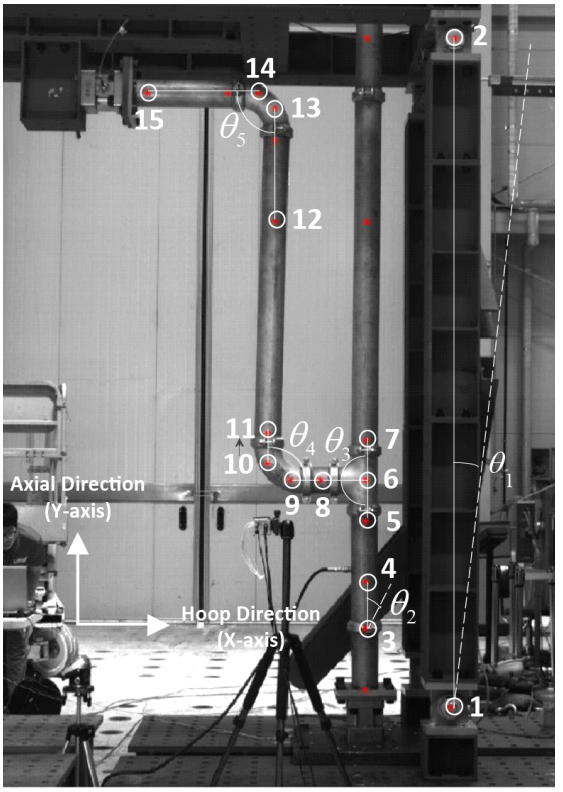
Table 2 Major component and subassembly list

Part	Specification	Quantity
Pipe	SUS 304(KS D 3576), 100A 3.0T	-
Elbow	SUS 304(KS D 3576), 100A 3.0T, 90° elbow	2
Tee	SUS 304(KS D 3576), 100A 3.0T	1
Joint	Flexible groove joint, Stainless steel	9

적인 거동에 의한 파손이 발생할 수 있는 것으로 나타났다[8]. 또한 소방시설의 내진설계 기준 해설의 3절 소방시설 지진 피해 사례에서 조인트, 플렌지 등의 배관 연결부는 지진으로 인한 손상이 나타날 수 있음을 확인하였다. 이 연구에서는 배관연결부 특히 유동식 그루브 조인트는 형상과 구조적인 특징으로 인하여 변형률을 계측하기 어려우므로 육안검사를 통하여 누수 또는 파손을 점검하였다. 그리고 배관에서 비선형 거동이 집중될 것으로 예상되는 주요 지진취약요소인 엘보에 변형률 센서를 부착하여 지진거동에 의한 특성을 확인하였다. Fig. 5와 같이 엘보의 crown 지점에서 3축 변형률 센서(FRA-5-11-5L, Tokyo Sokki)를 3SG-1 및 3SG-2 지점에 설치하였으며, 배관 연결재가 주변 배관에 미치는 영향을 파악하기 위하여 조인트에서 가까운 하부의 1SG-1 지점에 1축 변형률 센서(FLA-3-11, Tokyo Sokki)를 설치하였다. 반복가력을 위해 2기의 액추에이터를 강재프레임의 상부 슬래브



(a) Specimen drawing



(b) Measurement points of deformation angle

Fig. 3 Riser pipe with flexible groove joint

에 연결하였으며 힌지로 연결된 프레임을 이용하여 반복가력 수행 시 배관시스템에만 하중이 발생하도록 구성하였다. 가력 변위 및 하중은 액추에이터의 로드셀과 LVDT(SDP-300D, Tokyo Sokki)로 측정하였다. 실험은 영상계측시스템(IMB-7050G)을 이용하여 2448 × 2048의 image를 초당 2프레임으로 획득하였으며, UTM(universal testing machine) 및 액추에이터는 데이터 취득속도 1 Hz, 변형률 센서는 0.25 Hz로 계측하였다.

유동식 그루브 조인트는 지진발생시 최소 ± 1° 이상의 변형이 가능하여야 하며, 선행 연구결과에 따르면 그루브 조인트가 적용된 티는 점진 증폭되는 반복가력에 의해 변형각의 크기가 1.15° 이하에서 누수가 발생할 수 있음을 확인하였다[9]. 그러므로 배관의 주요 지진취약요소인 배관연결재에 대한 지진안전성 평가를 수행하고자 한다면, 배관 주요요소의 변형각에

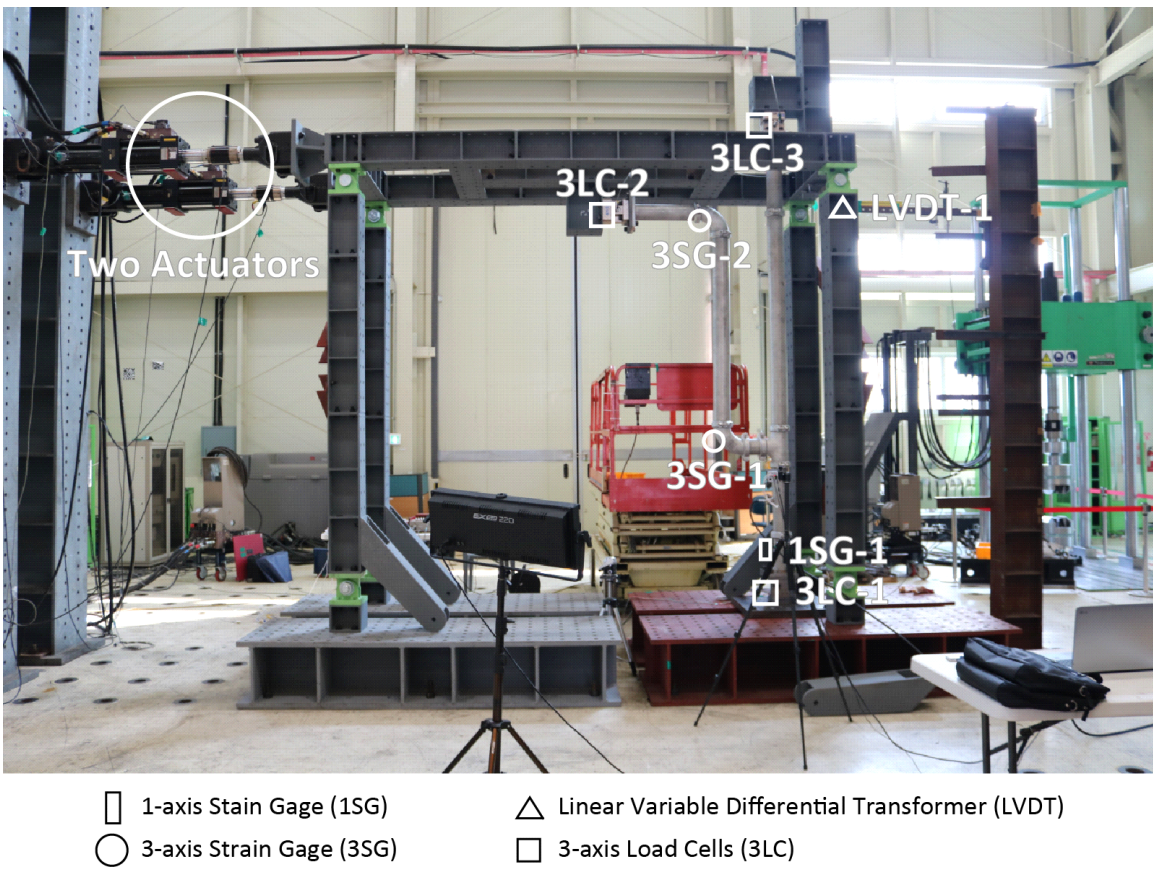


Fig. 4 Sensor location

(a) 1SG-1 (b) 3SG-1 (c) 3SG-2

Fig. 5 Installed strain gage

대한 고려가 필요하다. 변형각은 영상계측시스템을 이용하여 Fig. 1에서 제시된 알고리듬을 이용하여 측정하였다. 시험대상설비의 변형각($\theta_1 \sim \theta_5$)은 Fig. 3의 표시된 원 내부의 마크된 각 지점의 변위응답을 선형적인 직선으로 가정하여 측정하였다. 시험은 Table 3의 순서와 방법으로 수행하였다.

4. 시험결과 및 분석

이 시험은 건축구조기준에서 제시하고 있는 최대 허용층간변위(0.02 h, ± 60 mm)에 대하여 10회 반복가력시험을 수행하였다. 시험결과 시험대상설비의 변형, 누수, 균열, 부품의 탈락 및 파손 등은 발생하지 않았다. 이 연구에서는 영상계측시스템을 이용하여 입상배관의 지진취약요소인 엘보, 티 조인트 및 강재프레임 상부–하부의 층간 변형각을 측정하였으며, 최대 및 최소 변형각은 Table 4에 나타내었다. 시험대상설비의 최대 변형각은 상부 엘보에서 나타났다.

Fig. 6(a)에서 상부 엘보에서 발생한 최대 변형각의 폭은 3.59°이며, 하부 엘보에서 발생한 최대 변형각의 폭은 3.26°이다. 따라서 층고 3000 mm 구조물에 대하여 0.02 h로 가력하였을 경우, 입상배관의 엘보에 가해지는 최대 변형각은 ± 1.5° 이상이며 지진발생시 유동식 그루브 조인트의 최소 변형 기준인 ± 1° 이상의 변형각이 나타났다. 단방향 층간 변형각의 범위는 2.64°로 측정되었으나, 직관과 직관을 연결하는 하부 조인트에서 발생하는 변형각의 폭은 1.52°로서 층간 변위각도보다 작은 경향이 확인되었다.

Fig. 6(b)는 시험대상설비의 엘보에서 3축 변형률 센서에 의해 계측된 응답을 나타내었다. Table 5는 계측된 최대 및 최소 변형률 값을 나타내었으며 시험대상설비에서 계측된 변형률은 비교적 작은 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

배관 재료인 SUS 304 스테레인스의 강의 최소 인장강도(0.2 % off set)는 205 MPa이며 허용응력은 재료의 인장강도의 2/3이므로 137 MPa이다[10]. Fig. 6(c)는 시험대상설비의 상부 및 하부 엘보에서 계측된 3축 변형률 응답을 이용하여 측정된 von Mises 응력을 나타내었다. Table 6에서 엘보에서 측정된 von Mises 응력은 허용응력(S_m) 기준 이하로 나타났다. Fig. 6(c)와 Table 6에서 NFPA13에서 제시하고 있는 방법을 따라 시공할 경우, 유동식 그루브 조인트가 적용된 배관 부재에 발생하는 변형률과 von Mises 응력은 낮게 나타났으며 허용응력 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

Table 3 Test procedure

No.	Item	Method
1	Pre-inspection	Visual inspection
2	Internal pressurization	Water filling Internal pressured by air/water booster: 2 MPa
3	Cyclic loading test	Loading control: displace control Loading cycles: Sinusoidal, 10 cycles Loading displacement: ± 60 mm, Loading velocity: 20 mm/min
4	Post-inspection	Visual inspection

Table 4 Deformation angle at critical component

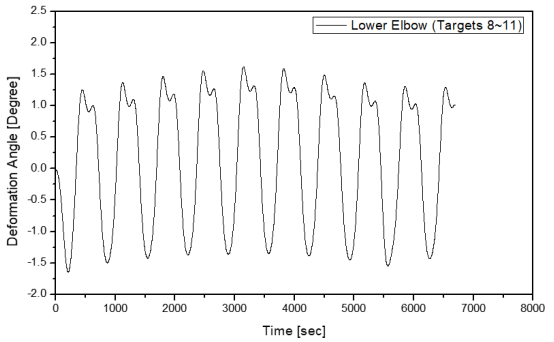
Position	Target	θ	Max. deformation angle		
			+	-	Max. range
Drift angle	1~2	1	1.34	-1.30	2.64
Lower joint	3~4	2	1.11	-0.41	1.52
Tee	5~8	3	0.27	-0.39	0.66
Lower elbow	8~11	4	1.62	-1.65	3.26
Upper elbow	12~15	5	1.90	-1.69	3.59

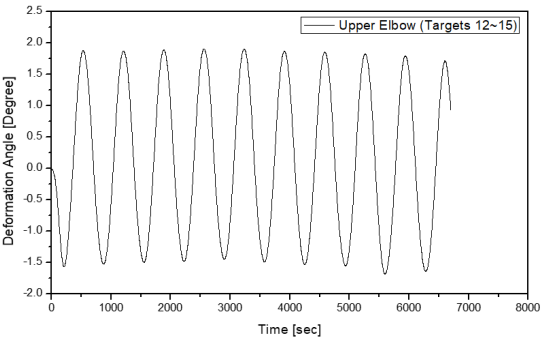
Table 5 Max. strain

Location	Orientation	Measured strain (μm/m)	
		Max.	Min.
Lower joint	Axial	83.6	-47.0
Lower elbow	Axial	169.7	-38.9
	Cross	225.6	-59.7
	Hoop	282.5	-57.8
Upper elbow	Axial	203.8	-19.0
	Cross	232.2	-20.9
	Hoop	215.2	-23.7

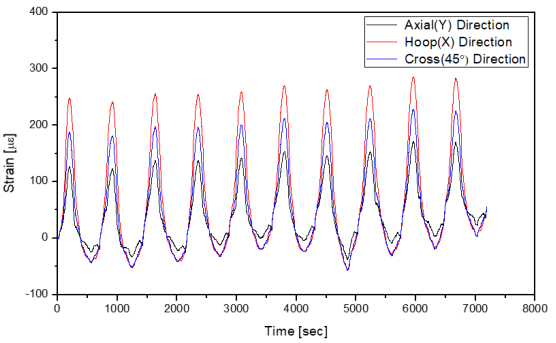
Table 6 Comparison of measured stress and allowable stress

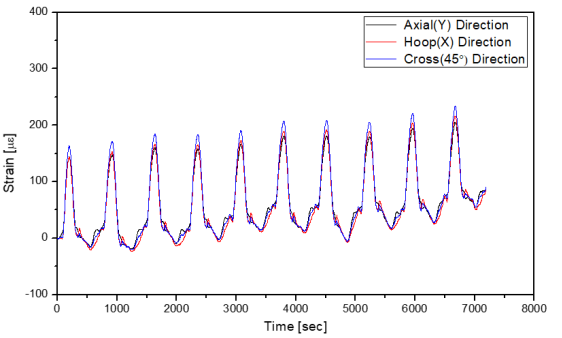
Location	Max. von Mises stress (S, MPa)	Allowable stress (S_m)
Lower elbow	66.92	137
Upper elbow	65.22	



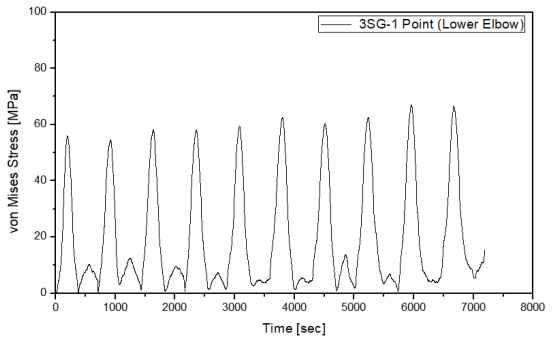


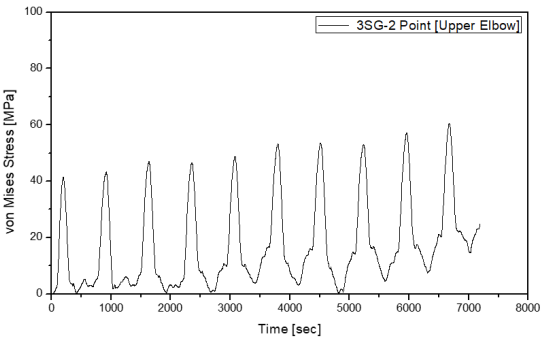
(a) Deformation angle measured at elbow





(b) Strain response measured at elbow





(c) Von Mises stress measured at elbow

Fig. 6 Results measured at the tee joint and elbows

5. 결 론

이 연구에서는 유동식 그루브 조인트가 적용된 입상배관의 내진성능을 NFPA13에서 제시하는 배관 설치방법과 건축구조기준의 최대허용층간변위에 대해 반복가력시험을 수행하였다. 시험을 수행 종료 후 육안검사 결과 시험대상설비의 외부 변형 및 누수, 균열, 부품의 탈락 및 파손 등은 발견되지 않았으며, 구성요소의 미소변형 역시 확인되지 않았다. 또한 입상배관의 취약 부위이며 최대 변형각이 발생한 지점인 엘보에서의 von Mises 응력은 허용응력 이하로 나타났으며 시험대상설비는 내진성능을 만족하는 것을 확인하였다.

추후 배관 연결부의 내진성능을 평가할 수 있는 시험 방법을 제시하기 위하여 다양한 형식의 배관 계통과 배관 연결재에 대한 시험적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 2017년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구(10078266)

이며 해당기관의 지원에 감사드립니다.

References

(1) Oh, S. H. and Shin, S. H., 2016, Correlation Analysis of Gyeongju Earthquake Waveform and Structural Damage Scale, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 32, No. 12, pp. 33~44.

(2) Yoon, B. I., 2018, Nonstructural Elements Resulting from Pohang Earthquake and Direction of Future Seismic Design Nonstructural Elements, Review of Architecture and Building Science, Vol. 62, No. 4, pp. 23~28.

(3) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016, Korea Building Code.

(4) National Fire Protection Association, 2013, NFPA 13 Standard for the Installation of Sprinkler Systems.

(5) Kim, S. W., Choi, H. S., Jeon, B. G., Hahm, D. G. and Kim, M. G., 2018, Strain and Deformation Angle for a Steel Pipe Elbow Using Image Measurement System under In-plane Cyclic Loading, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 50, No. 1, pp. 183~195.

(6) Kim, S. W., Choi, H. S., Park, D. U., Baek, E. R. and Kim, J. M., 2018, Water Level Response Measurement in a Steel Cylindrical Liquid Storage Tank Using Image Filter Processing under Seismic Excitation, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 101, pp. 274~291.

(7) Korea Institute of Nuclear Safety, 2015, KINS/RG-N04.29.

(8) Bursi, O. S., Reza, M. S., Abbiati, G. and Paolacci, F., 2015, Performance-based Earthquake Evaluation of a Full-scale Petrochemical Piping System, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 33, pp. 10~22.

(9) Soroushian, S., Zaghi, A. E., Maragakis, E., "Manos" Echevarria, A., Tian, Y. and Filiatrault, A., 2015, Seismic Fragility Study of Fire Sprinkler Piping Systems with Grooved Fit Joints, Journal of Structural Engineering, Vol. 141, No. 6, p. 04014157, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001122.

(10) ASME Section II, Part D.

Sung-Wan Kim received his Ph. D. degree from Pusan National University with the topic health monitoring of civil structures using image measurement system. He is currently the senior researcher in Seismic Research and Test Center. His research interests include structural health monitoring and ambient vibration tests of civil infrastructures.

Bub-Gyu Jeon received his Ph. D. degree from Pusan National University with the topic related with seismic fragility evaluation of base isolated nuclear power plant piping system. He is currently the technical laboratory manager in Seismic Research and Test Center. His research interests include seismic evaluation of nonstructural elements and seismic behavior of internal pressured piping system.