

## 지진 하중을 고려한 배관시스템의 지지 스펠 최적화에 관한 연구

### Study on Support Span Optimization of Pipeline System Considering Seismic Load

허관도<sup>1</sup>, 손인수<sup>1\*</sup>

Kwan-Do Hur<sup>1</sup>, In-Soo Son<sup>1\*</sup>

#### 〈Abstract〉

In this study, the optimal support span determination of pipeline system was carried out in consideration of the effects of seismic loads. The theoretical support and structural analysis were used to determine the optimal support span of piping system according to pipe diameter using theoretical and structural deflection criteria. The reliability of the analysis results was secured by comparing the structural and theoretical results. In particular, the optimum support span of piping system was obtained by considering the effects of seismic load, and the optimal support span of pipe diameter and piping system tended to be proportional to each other.

When considering the effects of earthquakes on different pipe diameters(300~2,500mm), the span length is reduced by up to 48% at the allowable stress criterion, and the pipe span length is reduced by up to 5.9% at the deflection criterion. It can be seen that the effect of the seismic load on the determination of the piping span length has a greater effect on the stress than the displacement.

*Keywords : Seismic Loads, FEM(Finite Elements Method), Optimal Span, Pipeline System*

---

1\* 정희원, 교신저자, 동의대학교 기계자동차로봇부품공학부 1\* Corresponding Author, Division of Mechanical, Automobile, Robot Component Engineering, Dong-eui University.  
E-mail: isson92@deu.ac.kr

1 동의대학교 기계자동차로봇부품공학부

1 Division of Mechanical, Automobile, Robot Component Engineering, Dong-eui University.

## 1. 서론

배관시스템은 상하수도 및 플랜트산업의 근간을 이루고 있으며, 수직수평 하중, 유체 및 지진의 영향을 효과적으로 대응할 수 있는 배관시스템의 연구가 필요하다. 특히, 배관시스템의 중요 구성품 중 하나인 신축관이음은 밸브와 배관사이 또는 배관과 배관사이에 연결되어 신축작용에 의하여 기계설비 및 배관을 보호하는 역할을 한다. 신축관이음은 일반적으로 수송유체 및 진동, 지진 등에 의한 이동 및 파손 등의 문제로부터 과도한 응력을 흡수하는 기능을 하기 때문에 일반적으로 파이프라인 시스템의 지지점에 설치되어 진다. 따라서 파이프라인의 구조적 안정성을 담보할 수 있는 최적의 지지 스패(span)를 결정하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 특히 지진과 같은 외부 환경적 요인을 고려하여 파이프라인 시스템의 최적 지지 스패를 결정할 필요가 있다.

발전플랜트 분야에서 사용되고 있는 배관계에 대하여 내진 안전성 검증에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있으며[1] 유한요소해석을 통해 기존에 사용 중인 밸브지지대의 내진성능을 검증하고 내진성능을 향상시키기 위한 밸브지지대의 최적형상을 제안하기도 하였다[2,3]. 신축관이음 내구수명 평가의 경우 최근, 국내 한 시험기관이 신축관이음 내부압력에 따른 특정작동 환경 및 조건을 반복적으로 적용하여 실험적인 수명 예측 식을 도출한 사례가 보고된 바 있다[4]. 벨로우즈형 신축관이음의 동적특성에 미치는 설계 파라미터에 대한 연구들도 진행되었으며[5,6], 단식 및 복식 벨로우즈형 신축관이음에 대한 연구는 내부 압력과 지진의 영향 등에 의한 동적 거동해석 등에 대한 연구가 활발하게 진행되어 지고 있다[7,8].

신축관이음을 갖는 파이프라인의 진동해석 및 동특성 분석에 대한 연구도 발표되어지고 있으며

[9] 여러 형상의 신축관이음과 파이프라인 시스템의 성능평가 및 동적거동에 대한 연구도 지속적으로 행해지고 있다[10,11].

이 연구에서는 상하수도 및 플랜트용 배관계의 최적 지지 스패(span)를 이론적 수치해석으로 구하고 구조해석을 통하여 결과를 검증하고자 한다. 지진하중이 존재하는 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 각각 연구를 진행하였으며, 배관계의 재질은 현재 현장에서 직접 사용하고 있는 구조용 강인 SS400(structural steel, yield strength 250MPa)으로 하였다. 내부 하중조건은 일반적으로 상하수도 배관계의 실험에 사용하는 설계 압력 하중인 16 bar(약 1.6 MPa)를 사용하였다. 이 연구의 목적은 배관계 설계 및 시공 시 최적 지지 스패 결정에 대한 간편 계산식을 도출하고, 도출된 이론 계산식 및 결과에 대한 근거를 제시함에 있다.

또한 지진 하중 유무에 대한 파이프라인의 최적 지지 스패 길이의 변화를 도출하고 지진하중의 크기에 따른 최적의 파이프 지지 스패를 결정하고자 한다.

## 2. 최적 지지 스패 계산을 위한 이론식

Fig. 1은 이 연구에서 사용한 배관계의 모델링을 도시한 것이다. 최적 배관계 지지 스패는 크게 두 가지 방법으로 결과를 도출하였으며, 그 첫 번째 방법은 파이프 재질의 허용응력을 기준으로 결과를 얻었으며 두 번째 방법은 허용처짐을 기준으로 스패 위치(길이)를 결정하였다. 또한 파이프 직경은 300, 500, 1,000, 2,000, 그리고 2,500 mm의 5가지 직경에 대하여 연구를 수행하였다.

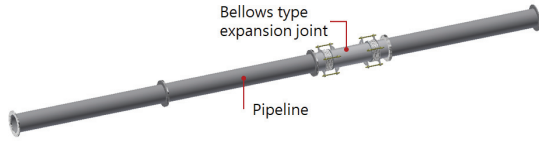


Fig. 1 Modeling of pipeline system

배관계 최적 지지 위치는 일반적으로 배관응력 평가기준[12]에 근거하여 결정할 수 있다. 하지만 평가기준에는 식 (1)의 파라미터에 대하여 정확한 정의와 결과를 제시하지 않고 있다. 따라서 이 연구에서는 식 (1)의 정확한 파라미터를 정의하고 그 결과를 바탕으로 최적 스펠 길이를 결정하고자 한다.

$$\frac{PD_o}{4t} + \frac{1000(0.75i)M_A}{Z} \leq 1.0S_h \quad (1)$$

여기서,

$P$  : 배관계 내부의 유체압력(설계 압력)

$D_o$  : 배관의 외경,  $t$  : 배관의 두께

$Z$  : 배관 단면계수

$i$  : 배관 응력 집중계수 (직선 배관인 경우  $0.75i = 1$ )

$M_A$  : 지속하중에 의한 모멘트

$M_A = \frac{wl^2}{12}$  ( $w$ :단위길이당 무게,  $l$ :파이프 span)

$S_h$  : 배관재질에 따른 허용응력

을 의미한다. 따라서 최대 지지 스펠( $L_{max}$ )에 대한 식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_{max} = \sqrt{\left(S_h - \frac{PD_o}{4t}\right) \frac{12}{1000w} \left(\frac{\pi[D^4 - (D-2t)^4]}{32D}\right)} \quad (2)$$

지진하중을 적용하는 경우 배관계 지지 스펠은 다음 식 (3)과 같이 결정할 수 있다.

$$\frac{PD_o}{4t} + \frac{1000(0.75i)M_A}{Z} + \frac{1000(0.75i)M_B}{Z} \leq kS_h$$

$$M_B = \frac{Cwl^2}{12}$$

(3)

여기서, 지진하중에 대한 horizontal load factor  $C$  ;  $0.3 \leq C \leq 0.9$ 이고,  $M_B$  는 임시(지진) 하중에 의한 모멘트이다. 또  $w$ 는 단위길이당 무게,  $l$ 은 파이프의 지지 스펠을 각각 나타낸다. 따라서 지진하중에 대한 파이프의 최대 스펠  $L_{max}$ 에 대한 식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_{max} = \quad (4)$$

$$\sqrt{\left(1.2S_h - \frac{PD_o}{4t}\right) \frac{12}{(1+C)1000w} \left(\frac{\pi[D^4 - (D-2t)^4]}{32D}\right)}$$

Table 1은 식 (2)를 이용하여 지진하중이 존재하지 않는 경우 배관계의 최적지지 스펠을 구한 결과를 나타낸 것이다. 여기서 허용응력 기준 스펠은 재료의 허용강도인 250 MPa을 식 (2)에 입력하여 얻은 결과이다. 최대처짐 기준에 대한 스펠은 다음 식 (5)를 이용하여 최대 처짐  $y_d$  가 설계 허용 처짐인 2.54 mm가 되는 스펠  $L_{max}$ 를 구한 값이다. 예를 들어, 파이프 직경이 350 mm인 경우 식 (5)의 최대 처짐( $y_d$ )이 2.54 mm가 되기 위해서는  $L_{max}$ 의 값이 16.5426 m가 되며 이때 허용강도는 원래 재료의 허용강도인  $S_h$ 의 36.89 %에 해당하는 값을 가진다. 즉, 식 (2)의  $S_h$  대신  $S_h \times 0.3689$ 의 값을 대입하면 허용처짐 기준의 파이프 스펠을 구할 수 있다[13].

$$y_d = \frac{w_e L_{max}^4}{384EI} \times 10^9 \quad (5)$$

**Table 1. Theory analysis result without seismic load**

Pipe diameter (mm)	Pipe thickness (mm)	Pipe span(m)	
		Under allowable stress	Under allowable deflection
350	6	30.006	16.5426
500	6	31.056	19.8219
1000	8	36.1598	28.0879
2000	15	49.411	39.7326
2500	18	54.0271	44.4291

여기서,

$y_d$  : Deflection at mid span(mm)

$E$  : Elastic modulus(MPa)

$w_e$  : Unit weight of the pipe without contents (N/m)

$I$  : Pipe moment of inertia(mm<sup>4</sup>)

이다.

Table 2는 지진크기(진도)와 지진하중 및 지진 계수와의 상관관계를 도시한 것으로 진도 7은 2018년 신고리 1, 2호기부터 상향조정된 지진규모를 나타낸다. 이들 상관관계는 가속도 적용 후 구조해석을 통한 응력 값과 지진계수  $C$  를 조정하여 이론식의 응력 값과 상관관계분석을 수행하여 관계식을 유도한 것이다.

**Table 2. Acceleration vs. earthquake coefficient**

Magnitude (Richter scale)	6.5	6.7	7.0	7.5	8.0
Max. acceleration	0.2g	0.25g	0.3g	0.4g	0.5g
C(earthquake coefficient)	0.35	0.4	0.47	0.58	0.7

Table 3과 Table 4는 파이프의 허용응력과 최대처짐을 기준으로 최적 지지 스패를 지진규모

6.5와 7.0에 대하여 얻은 결과를 각각 도시한 것이다. Table 3의 허용응력 기준에 대한 결과를 살펴보면, 파이프의 직경이 증가할수록 스패는 길어지며, 지진하중과 스패는 서로 반비례하는 경향을 보인다는 것을 알 수 있다. 파이프 직경이 350 mm인 경우 규모 7.0 지진하중에 대한 스패는 약 27.3m이며 2,500 mm 파이프에 대하여 스패는 약 50 m이다. Table 4의 최대처짐 기준에 대한 스패는 파이프 직경이 350mm인 경우 규모 7.0 지진하중에 대하여 약 15.5mm로 전반적으로 최대처짐 기준으로 한 경우 허용응력 기준으로 구한 지지 스패에 비하여 매우 짧은 지지 스패를 가진다는 것을 알 수 있다.

**Table 3. Pipe span due to earthquake coefficient (based on allowable stress)**

Pipe diameter (mm)	Pipe thickness (mm)	Pipe span(m)		
		Without earthquake	Earthquake magnitude 6.5	Earthquake magnitude 7.0
350	6	30.006	28.532	27.343
500	6	31.056	29.653	28.417
1000	8	36.1598	34.795	33.344
2000	15	49.411	47.626	45.641
2500	18	54.0271	52.136	49.963

**Table 4. Pipe span due to earthquake coefficient (based on allowable deflection)**

Pipe diameter (mm)	Thickness (mm)	Pipe span(m)		
		Without earthquake	Earthquake magnitude 6.5	Earthquake magnitude 7.0
350	6	16.5426	15.587	15.523
500	6	19.8219	18.67	18.553
1000	8	28.0879	26.461	26.449
2000	15	39.7326	37.426	37.404
2500	18	44.4291	41.842	41.781

### 3. 구조해석을 통한 이론결과 검증

#### 3.1 지진하중 미적용

이 장에서는 2장에서 수치계산을 통하여 얻은 결과를 검증하기 위하여 수치해석으로 얻어진 파이프 스펠에 대하여 파이프라인의 구조해석을 수행하였다. 즉, 수치계산으로 얻어진 최적 스펠에 대하여 Fig. 2와 같이 양단을 고정하고 파이프 설계압력인 1.6 MPa의 하중조건을 적용하여 파이프 재료의 허용응력 및 허용처짐을 벗어나지 않는지를 검토하였다.

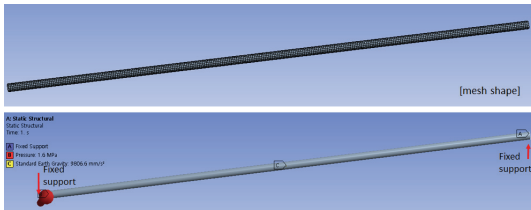
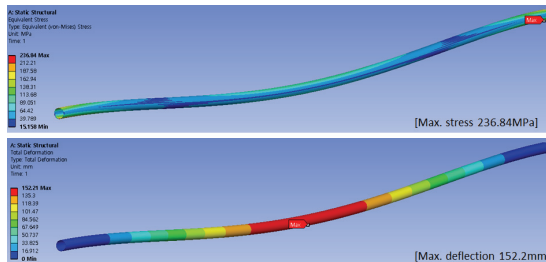


Fig. 2 Finite elements model and boundary conditions

Fig. 3은 파이프 직경이 350 mm인 경우 허용응력 및 최대처짐을 기준으로 안전성을 판단하기 위하여 구조해석을 한 결과를 나타내었다. Fig. 3(a)에서 수치해석에서 구한 최대 스펠 길이는 약 30.0 m이며 따라서 파이프를 30.0 m로 모델링한



(a)based on stress

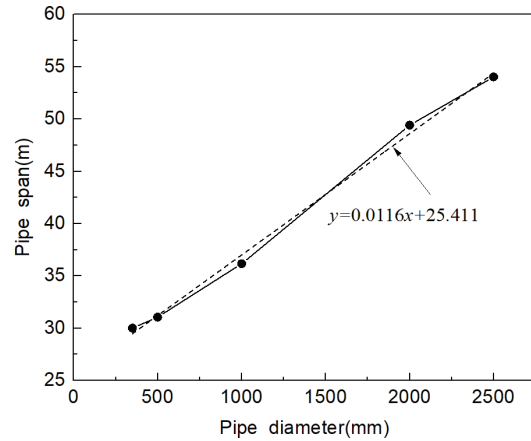
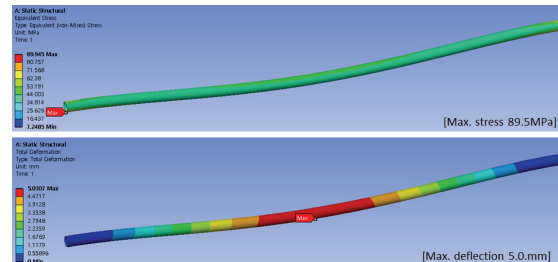


Fig. 4 Structural analysis result for pipe diameter (based on stress)

후 양 끝단을 구속하고 설계하중인 1.6 MPa를 적용하여 해석을 수행한 결과를 도시한 것이다. 해석결과 최대 응력은 약 236.84 MPa를 나타내었으며 이 결과는 파이프 재료 허용응력의 약 94.7%에 해당하는 값으로 수치해석 결과는 비교적 정확하다는 것을 알 수 있다. Fig. 3(b)의 파이프 최대처짐을 기준으로 직경 350 mm 파이프의 구조해석 결과를 나타낸 것이다. 제시된 규정의 2.54 mm를 기준으로 수치해석 결과 도출한 지지 스펠은 약 16.425 m이며, 구속조건과 하중조건을 위와 동일하게 적용하여 해석을 수행하였다. 해석 결과 최대 응력은 약 89.5 MPa로 파이프 재료 허용응력의 약 36.0 %수준에 해당하는 값을 나타



(b)based on deflection)

Fig. 3 Structural analysis result for 350mm

내었으며, 최대 변위는 약 5.03 mm를 나타내었다. 처짐 허용 값의 약 2배 정도의 처짐을 보였으나 허용응력과 비교할 때 파이프 시스템은 매우 안전하다는 것을 알 수 있다.

Table 5는 허용응력 기준으로 구한 구조해석 결과와 지지 스패를 정리한 것이다. 이론해석에서 파이프 재질의 허용응력에 대하여 얻은 스패에 대하여 구조해석을 수행하고 그 신뢰성을 검토한 결과이다. 해석결과 최대오차가 5.3% 이내로 매우 정확한 값을 가지며, 따라서 이론적 수치해석과 구조해석은 매우 신뢰성이 높다고 판단할 수 있다.

Fig. 4는 지진하중이 존재하지 않는 경우 허용강도 기준을 적용하여 파이프 직경에 따른 스패 변화를 도시한 것이다. 복잡한 계산식을 사용할 필요 없이 파이프 직경과 스패( $L_{span}$ ) 사이의 선형 상관관계식을 도출하였으며 결과 식은 다음과 같다.

$$L_{span} = 0.0116 \times P_d + 25.411 \quad (6)$$

여기서,  $P_d$ 는 파이프 직경을 의미한다.

Table 6은 허용처짐(2.54mm)을 기준으로 얻은 구조해석 결과와 스패를 비교한 것이다. 여기서 최대처짐 기준에 대한 스패는 식 (5)를 이용하여 최대처짐  $y_d$  가 설계 허용 처짐인 2.54 mm가 되는 스패  $L_{max}$ 를 구한 값이다. 파이프 직경과 스패 ( $L_{span}$ ) 사이의 선형 상관관계식을 도출하면 다음 식 (7)과 같다.

$$L_{span} = 0.0128 \times P_d + 13.451 \quad (7)$$

### 3.2 지진하중 적용

이 절에서는 지진하중을 고려한 경우 파이프의 최적 스패에 대한 신뢰성을 확인하고자 한다. 즉, 식 (4)를 이용하여 구한 스패를 적용하여 구조해석을 수행하고 그 결과를 이용하여 지진하중을 고

Table 5. Structural analysis results(based on stress)

Pipe diameter (mm)	Pipe thickness (mm)	span(m)	Def. (mm)	Density (with fluid, kg/m <sup>3</sup> )	Stress (MPa)	Error (%)
350	6	30.006	137.52	21698	236.84	5.264
500	6	31.056	76.527	27946	238.21	4.716
1000	8	36.1598	34.88	38362	250.8	0.32
2000	15	49.411	30.375	40445	253.03	1.212
2500	18	54.0271	27.77	41834	241.71	3.316

Table 6. Structural analysis results(based on deflection)

Pipe diameter (mm)	thickness (mm)	Span (m)	Allowable stress ratio(%)	Stress(MPa)		Theory deflection (mm)	Theory stress ratio	Error (%)
				Theory	Analysis			
350	6	16.54	36.89	91.25	89.95	5.03	0.36	1.42
500	6	19.82	48.64	120.75	119.99	5.142	0.48	0.63
1000	8	28.09	68.27	169.5	174.59	5.3835	0.70	3.00
2000	15	39.73	72.20	179.25	173.57	5.8773	0.69	3.17
2500	18	44.43	74.82	186	185.13	6.0808	0.74	0.48

려한 경우 수치해석 결과의 타당성을 확보하고자 한다.

Fig. 5는 지진하중을 고려한 파이프 구조해석을 위한 경계조건 및 하중조건을 나타낸 것이다. 자중의 영향을 고려하였으며, 내부 압력하중은 설계 하중인 1.6 MPa, 내부유체에 대한 밀도 및 유체의 질량, 그리고 지진하중을 적용하여 해석을 수행하였다. 지진하중은 뉴턴 2법칙  $F = ma$ 에 의하여 구할 수 있으며 지진 계수에 따라 계산되어진 지진하중 및 내부유체를 고려한 파이프 질량을 Table 7에 각각 도시하였다.

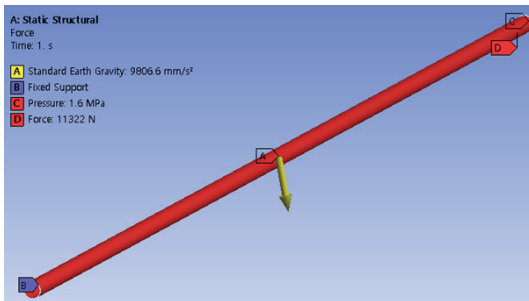


Fig. 5 Boundary conditions with seismic load

Table 7. Seismic load according to earthquake coefficient

	350 mm		500 mm	
	Mass(kg)	Load(kN)	Mass(kg)	Load(kN)
0.35	3846.9	11.32	7394	21.76
0.4	3942	9.67	7577	18.58
0.47	4014.3	7.88	7716.4	15.14

Table 8. Structural analysis results with seismic effect (based on stress)

C	Span(m)	Stress(MPa)	Stress ratio
0.47	27.3425	250.32	1.00
0.4	28.0178	250.07	1.00
0.35	28.5319	252.50	1.01

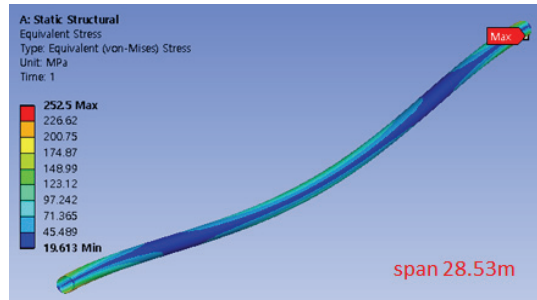


Fig. 6 Structural analysis result for 350mm pipe with seismic effect (based on stress; C=0.35)

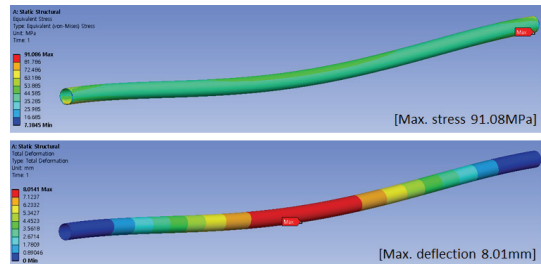


Fig. 7 Structural analysis result for 350mm pipe (based on deflection)

Table 8과 Fig. 6은 파이프의 직경이 350mm 인 경우 앞 절의 Table 3에서 응력기준으로 수치 해석으로 구한 스펠 길이에 대하여 파이프의 구조 해석 결과를 나타내었다. 구조해석 결과 얻어진 파이프의 최대 응력과 재료의 허용강도를 비교한 응력비는 거의 1이며 따라서 이론해석 및 구조해석 결과가 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 직경 350 mm 파이프에 대하여 이론 해석으로 구한 허용처짐 기준의 스펠을 적용하여 얻은 구조해석 결과를 나타낸 것이다. 여기서 스펠은 15.59 m, 지진 계수는 0.35를 적용하여 구한 값이다. 지진하중 적용 시 최대 처짐 기준이 아직 결정되지 않았기 때문에 지진하중이 없는 경우 허용처짐인 2.54 mm의 약 80%에 해당하는 값(2.54×0.8)인 2.0 mm를 허용처짐으로 가정하여 결과를 도출하였다. 수치이론에서 구한 응력은

약 88.25 MPa이며, 구조해석 결과 91.08 MPa을 얻었으며 응력비는 1.03으로 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 특히, 지진하중 없는 경우와 비교하여 35.3 %의 응력으로 비교적 비율이 잘 일치한다는 것을 알 수 있다. 또한 구조해석 결과 최대 처짐은 약 8 mm를 보이고 있으며 허용처짐에 대하여 약 4배에 해당하는 값이다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 지진하중의 영향을 고려하여 배관계의 최적 지지 스펜 결정 방법에 대한 연구를 수행하였다.

배관계의 허용강도 및 허용처짐 기준을 이용하여 이론해석 및 구조해석을 통하여 파이프 직경에 따른 배관계의 최적 지지 스펜을 결정하였으며, 구조해석과 이론해석 결과를 비교 검토하여 해석 결과에 대한 신뢰성을 확보하였다. 특히, 지진하중의 영향을 고려하여 배관계 최적 지지 스펜을 구하였으며, 파이프 직경과 배관계의 최적 지지 스펜은 서로 비례하는 경향을 보인다.

서로 다른 파이프 직경(300~2,500 mm)에 대하여 지진의 영향을 고려하는 경우 허용응력 기준일 때 최대 48 %정도 스펜 길이가 감소하며, 허용처짐 기준인 경우 최대 5.9 %정도 파이프 스펜이 감소한다. 연구결과를 통하여 배관계 지지 스펜에 미치는 지진하중은 변위보다 응력에 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

#### 사 사

이 논문은 2019학년도 동의대학교 연구년 지원에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

- [1] Kim, H. J., Park, J. H, Kim, H. S., Kim, H. G. and Lee, J. S., "Design plan for U-type bellows life improvement", KSME, Spring Conference, pp. 43-46, (2006).
- [2] Kim, H. E., Keum, D. Y., Kim, D. J., Kim, J. H. and Hong, S. K., "Design Optimization of Valve Support with Enhanced Seismic Performance", J. KSPE, Vol. 32(11), pp. 997-1005, (2015).
- [3] Smith, P. R., "Piping and Pipe Support Systems", McGraw-Hill Book Company, pp. 121-127, (1987).
- [4] Oh, J. S. and Cho, S. H., "A Study for Lifetime Prediction of Expansion Joint Using HILS", J. of the Korea Academia- Industrial Cooperation Society Vol. 19(4), pp. 138~142, (2018).
- [5] Vinoth, A., Vignesh, B., Khurana, L. and Aditya Rai, "A Review on Application of Bellows Expansion Joints and Effect of Design Parameters on System Characteristics", Indian J. of Science and Technology, Vol 9(32), pp. 2-8, (2016).
- [6] Zhu, Y. Z., Wang, H. F. and Sang, Z. F., "The effect of Environmental Medium on Fatigue Life for U-shaped Bellows Expansion Joints", Int. J. of Fatigue, Vol. 28(1), pp. 28-32, (2006).
- [7] Li, T. X., "Effect of the elliptic degree of  $\Omega$ -shaped bellows toroid on its stresses", Int. J. of Pressure Vessels and Piping Vol. 75(13), pp. 951-954, (1998).
- [8] Son, I. S., "Fluid-structural Interaction Analysis and Seismic Evaluation of Bellows Type Expansion Joints", J. of KSPSE., Vol. 23(6), pp. 11-18, (2019).
- [9] Merino, B., "Stress and strain analysis of an axial bellow" Engineering and Review Vol. 29(1), pp. 61-70, (2009).
- [10] Veiga, J., Medeiros, J. and Veiga, J.C.,



- “Analysis of Expansion Joints Movement Test in FCC Unit”, J. Press. Vessel. Technol., Vol. 136, pp. 1-7, (2009).
- [11] Narasimham, S. V., Paliwal, D. N. and Upadhyaya, A. P., “Stress Analysis of V-shaped Expansion Joints under Internal Pressure”, Int. J. of Pressure Vessels and Piping, Vol. 71(1), pp. 35-45, (1997).
- [12] KOSHA CODE, 배관응력 해석에 관한 기술 지침, 한국산업안전공단.
- [13] Koorey, K., “Determination of the Optimal Pipe Support Spans for Geothermal Pipelines”, Proceedings W. G. Congress, pp. 1361-1364, (2000).
- 
- (접수: 2020.05.26. 수정: 2020.06.29. 게재확정: 2020.07.08.)