

## 벨로우즈형 신축관이음의 휨각도 예측 및 이를 이용한 배관계의 안정성 해석

### Prediction of Bending Angle of Bellows and Stability Analysis of Pipeline Using the Prediction

손인수\*

In-Soo Son\*

#### 〈Abstract〉

In this study, the prediction of the bending angle for the 350 A bellows-type expansion joints and the structural stability according to the load were determined. The stability of the 2km piping system was predicted by applying the allowable bending angle of the expansion pipe joint obtained from the analysis. The maximum bending angle was calculated through bending analysis of the bellows-type expansion joints, and the maximum bending angle by numerical calculation was about  $1.8^\circ$ , and the maximum bending angle of the bellows obtained by comparing the allowable strength of the material was about  $0.22^\circ$ . This angle was very stable compared to the allowable bending angle ( $3^\circ$ ) of the expansion pipe joint regulation. By applying the maximum bending angle, the allowable maximum deflection of the 2 km pipe was about 3.8 m. When the seismic load was considered using regression analysis, the maximum deflection of the 2km pipe was about 142.3mm, and it was confirmed that the bellows-type expansion joints and the deflection were stable compared to the allowable maximum deflection of the pipe system. These research results are expected to present design and analysis guidelines for the construction of piping and the development of bellows systems, and to be used as basic data for systematic research.

*Keywords : Bellows-type Expansion Joints, Bending Angle, FEM, Pipeline System, Stability Analysis*

\* 정회원, 교신저자, 동의대학교 기계자동차로봇부품공학부  
E-mail: isson92@deu.ac.kr

\* Corresponding Author, Division of Mechanical, Automobile,  
Robot Component Engineering, Dong-eui University.

### 1. 서론

상하수도 및 플랜트산업에서 흔히 볼 수 있는 배관시스템의 주요 구성품 중 하나인 신축관이음은 밸브와 배관사이 또는 배관과 배관사이에 연결되어 신축작용에 의하여 기계설비 및 배관을 보호하는 역할을 한다. 신축관이음은 일반적으로 수송 유체 및 진동, 지진 등에 의한 이동 및 파손 등의 문제로부터 과도한 응력을 흡수하는 기능을 하기 때문에 구조해석 등을 통한 설계과정에서의 최대 허용 변형(휨)을 예측하고 설계하는 것은 매우 중요한 연구라 할 수 있다.[1]

국내외 인증기관의 벨로우즈 신축관이음 수명평가 시험 및 검사방법으로 내압 검사, 누설 검사, 내구 검사 등 다양한 검사를 실시한다. 하지만 내압 검사와 내구 검사를 결합하여 진행하거나 내구 검사와 누설 검사를 결합하는 등의 구체적 시험 방법에 대한 규정은 아직 없는 실정이다. 배관과 배관사이를 연결하는 벨로우즈형 신축관이음은 내부에 항상 압력이 존재하고 Fig. 1에 보인바와 같이 수축 신장을 반복하게 되면 신축관이음의 내구 피로수명은 현저하게 떨어지게 된다. 따라서 구조 해석 및 수치계산을 통하여 허용 휨각도 및 안정성에 대한 기초 데이터를 확보하고, 적절한 시험 결과를 얻기 위해서는 현장에 맞는 시험 방법을 제시할 필요성이 있다. 신축관이음 내구수명 평가

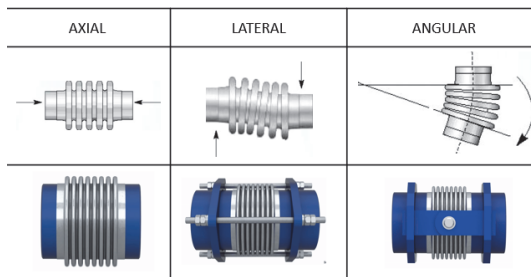


Fig. 1 Bellows movement

의 경우 최근, 국내 한 시험기관이 신축관이음 내부압력에 따른 특정작동 환경 및 조건을 반복적으로 적용하여 실험적인 수명 예측 식을 도출하였다 [2]. Kim 등[3]은 배관시스템에서 밸브의 구조 안정성 평가 및 구조-연성 해석의 타당성을 검토하는 연구를 수행하였다. 최근 단식 및 복식 벨로우즈형 신축관이음에 대한 구조해석, 유동-구조연성 해석 및 지진해석을 통하여 시스템의 안전성 판단을 수행하는 연구도 활발히 진행되고 있다[4,5].

이 연구에서는 350A 단식 벨로우즈형 신축관이음에 대한 휨 각도 예측 및 하중에 따른 구조적 안정성을 판단하고자 한다. 먼저 신축관이음의 허용 휨 각도를 예측하고, 얻어진 최대 휨각도를 지진하중 유무에 대하여 벨로우즈 시스템의 안정성을 확인하기 위한 연구이다. 또한 배관설치에서 일반적으로 많이 사용하는 2km 배관길이에 대하여 최대 휨 각도에 대한 배관계 시스템의 안정성을 예측하도록 한다.

### 2. 신축관이음의 휨각도 해석

일반적으로 관이음의 시험은 크게 접합수밀 성능시험, 이탈방지 성능시험, 굴곡 수밀 성능시험, 그리고 반복 진동성능시험으로 나누어 실험을 수

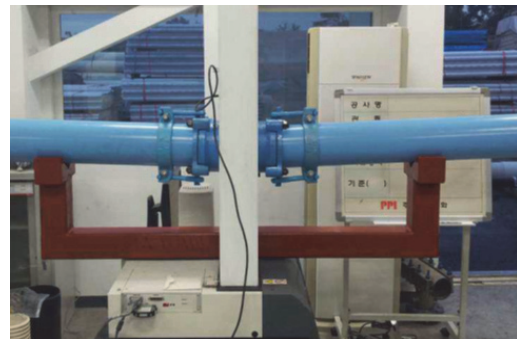


Fig. 2 Three-point bending test

행한다. 여기서 굴곡 수밀 성능시험은 구경별 허용 굴곡각도로 조인트 접합부를 굴곡한 후 굴곡시험 수압을 가압한 상태에서 5분간 유지하여 누수나 그 밖의 결함 여부를 판단하는 시험방법으로 간략히 Fig. 2와 같이 3점 굽힘시험으로 대체하여 시험하기도 한다. 따라서 신축관이음의 최대 휨각도 해석은 3점 굽힘시험을 참고로 벨로우즈 신축관이음의 허용응력 기준으로 각도를 예측하도록 한다. 벨로우즈 시스템의 구조 해석 결과 최대 응력은 bellows 부분에서 발생하며[6], 따라서 Fig. 3과 같이 벨로우즈 중앙부를 고정하고 양쪽 플랜지에 하중을 부여하여 해석을 수행하였다.

그 이유는 3점 굽힘 시험과 유사한 방법으로 양단 플랜지를 고정하고 중앙부분에 하중 적용하여 해석을 수행하면 벨로우즈 부분만 변형이 발생

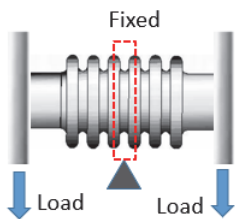


Fig. 3 Boundary conditions for bending analysis

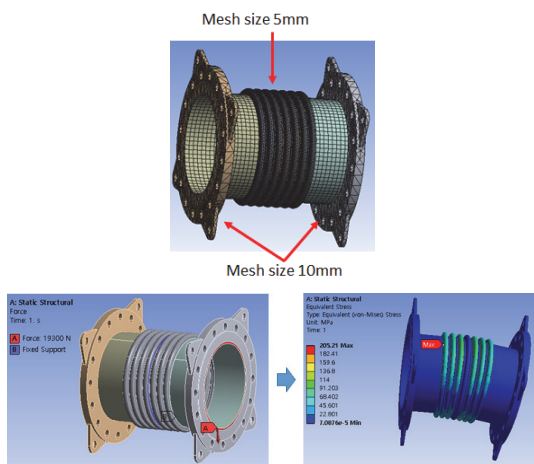


Fig. 4 Boundary conditions and FE modeling

하여 전체적인 휨(굽힘) 각도를 예측할 수 없다. 따라서, Fig. 3과 4에서 보인 경계조건인 중앙 벨로우즈 부분을 고정하고 양단에 하중을 부여하여 최대 처짐을 도출하고 배관계 시스템의 굽힘 각도를 예측하였다. 해석에 사용한 벨로우즈형 신축관이음은 산업현장에서 가장 많이 사용하고 있는 직경 350A에 대하여 상용해석 프로그램인 ANSYS Workbench(V12.0)을 이용하여 해석을 수행하였다.

굽힘 각도 예측 방법은 벨로우즈의 허용응력인 205MPa에서의 변형을 기준으로 휨 각도 도출하였다. 즉, 적용하중을 적절히 조절하여 Table 1에 보인 재질의 허용응력인 205MPa이 되도록 하중을 선택하여 해석에 활용하였으며 이때 계산되어진 하중은 약 19.3 kN 이다. 즉, Fig. 5의 경계조건에서 벨로우즈의 양끝단에 19.3 kN의 하중을 적용하면 벨로우즈 시스템의 최대 응력은 허용강도인 205 MPa을 갖는다.

Table 1. Material property of bellows

Material	Tensile strength(MPa)	Yield strength (MPa)	Poisson's ratio
STS304	520	205	0.33

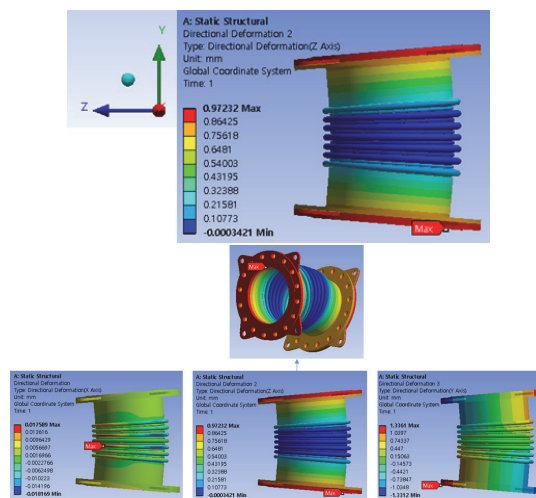


Fig. 5 Deformation result of single bellows

Fig. 5는 하중조건이 19.3kN을 적용한 경우 벨로우즈의 전체 및 각 좌표별 변형 해석결과를 나타내었다. 최대 변위는 약 1.64mm를 나타내었으며, X방향의 최대 변위 0.018mm, Z방향의 최대 변위는 약 0.972mm, 그리고 Y방향의 최대 변위는 약 1.336mm이다. 해석결과 Y방향의 변위가 가장 크게 나타나며 휨 각도 예측 및 해석에서는 Fig. 6에서와 같이 Z축 변형을  $\delta$ 로 하여 벨로우즈의 휨 각도를 예측한다.

$$\tan\theta = \frac{\delta}{r} \quad (1)$$

따라서 휨각도  $\theta$ 는 다음 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\delta}{r}\right) \quad (2)$$

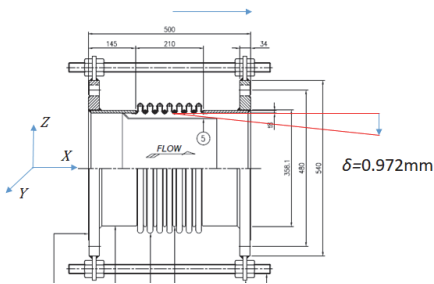


Fig. 6 Coordinate system and deflection

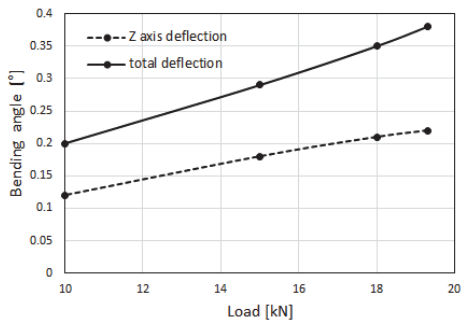


Fig. 7 Bending angle according to load

식 (1), (2) 및 신축관이음의 Z방향 변위를 이용하여 구한 벨로우즈의 최대 휨 각도는 약 0.22°이다. 참고로 CAD 도면을 이용하여 벨로우즈가 접힘 가능한 수치를 이용하여 최대 휨 각도를 계산하면 약 1.8°가 나온다. 상하수도 주요시설물의 내진설계기준 개선 기초연구에서 제시한 벨로우즈의 허용 휨 각도는 3°를 넘지 않아야 하며, 신축관이음의 휨 해석을 이용하여 얻은 0.22°는 이 허용조건을 매우 만족한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7과 Table 2는 적용하중 변화에 따른 벨로우즈의 휨 각도변화를 나타낸 것이다. 굽힘(휨) 해석을 통하여 얻은 최대 각도(허용응력 기준)는 약 0.22도이며, 전체 변형각도는 약 0.38도이다.

Fig. 8은 벨로우즈의 허용강도를 고려하지 않고 최대 변위를 구하기 위한 해석 결과를 나타내었다. 해석을 통하여 최대 변위를 구하여 그 변위

Table 2. Bending angle of bellows according to load

Load(kN)	Bending angle(°)	
	Z axis deflection	Total deflection
19.3	0.22	0.38
18	0.21	0.35
15	0.18	0.29
10	0.12	0.2

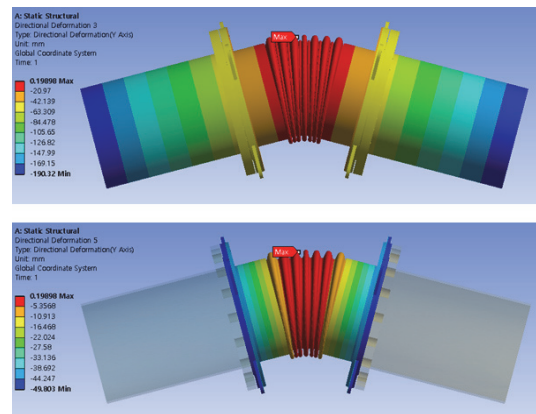


Fig. 8 Maximum bending angle of bellows

값을 식 (2)에 대입하여 최대 휨 각도를 구한 결과 휨 각도는 약 11.3°가 계산되었으며, 이 각도는 향후 벨로우즈형 신축관이음의 내구성 및 내진시험에 참고자료로 활용할 수 있을 것이다.

### 3. 휨각도를 이용한 배관계의 안정성 판단

이 절에서는 앞에서 구한 최대 휨 각도를 이용하여 2 km 배관계의 안정성 판단을 수행하고자 한다. 배관계의 길이를 2km로 선정한 이유는 일반 상하수도 배관계에서 설치하는 밸브실의 거리를 선택한 것이다. 앞에서 구한 최대 휨 각도를 식 (2)에 대입하여 2km 배관계의 허용 최대 처짐 ( $\delta$ )을 계산하면 다음 식 (3)과 같이 약 3.8m의 허용 변위를 얻을 수 있다. 즉, 지반 매립 혹은 노출과 관계없이 파이프의 최대 처짐이 3.8 m 이내이면 신축관이음은 안전하다고 판단할 수 있다.

최대 처짐  $\delta$ 는

$$\begin{aligned} \delta &= \tan(\theta) \times r \\ &= \tan(0.22) \times 1000 = 3.8397(\text{m}) \end{aligned} \quad (3)$$

이다. 여기서  $r$ 은 파이프의 반경을 의미하며, 식

Table 3. Results of structural analysis of pipeline system without seismic effect

Pipe length(m)	Without earthquake	
	Deformation(mm)	Stress(MPa)
16.4	0.96829	55.839
30	1.6737	56.171
100	5.5056	67.498
150	8.2421	71.512
200	10.977	75.017
300	16.445	81.111
500	27.386	91.211

(6.3)에서  $r$ 을 1,000(m)로 대입한 이유는 2 km 배관계 중간에 벨로우즈형 신축관이음이 결합되어 있다고 가정하여 파이프 길이의 반에 해당하는 수치를 대입한 것이다.

Table 3은 지진하중을 고려하지 않은 경우에 대하여 파이프의 스패ن 변화에 따른 배관계의 구조 해석결과를 도시한 것이다. 이 변위 결과를 이용하여 Fig. 9와 같이 선형 회귀분석을 통하여 2km 배관계의 안정성을 검토하였다. 회귀분석 결과 선형 결과, 배관계의 최대 처짐  $d_{pipe}$ 는 다음 식 (4)와 같이 얻을 수 있다.

$$d_{pipe} = 0.0547 \times l_{pipe} + 0.0466 \quad (4)$$

여기서  $d_{pipe}$ 는 배관계의 최대 처짐,  $l_{pipe}$ 는 파이프의 스패를 의미한다. 식 (4)를 이용하여 계산한 2km 배관계의 최대 처짐은 약 110mm로 앞에서 구한 배관계의 허용 최대 처짐인 3.8m에 비하여 매우 작은 값이므로 벨로우즈 및 배관계는 안전하

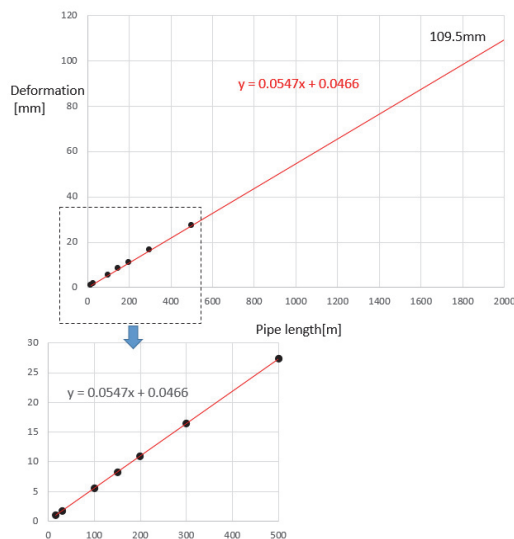


Fig. 9 Linear regression analysis for pipeline without seismic effect

다고 판단할 수 있다.

Table 4는 0.3g의 지진하중을 고려한 경우 파이프의 스펠 변화에 따른 배관계의 구조 해석결과를 나타낸 것이다. 이 결과를 이용하여 Fig. 10과 같이 선형 회귀분석을 수행하여 2km 배관계의 안정성을 검토하였다. 회귀분석 결과 지진하중을 고려한 경우 파이프 처짐( $d_{pipe}$ )의 선형 결과 식은 다음과 같다.

$$d_{pipe} = 0.0711 \times l_{pipe} + 0.0497 \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 계산한 2 km 배관계의 최대 처짐은 약 142.3 mm로 배관계의 허용 최대 처짐과 비교할 때 지진하중을 갖는 벨로우즈형 신축관 이음은 안전하다고 판단할 수 있다.

Table 4. Results of structural analysis of pipeline system with seismic effect

Pipe length(m)	With earthquake(0.3g)	
	Deformation(mm)	Stress(MPa)
16.4	1.2481	57.024
30	2.1653	58.835
100	7.1473	72.787
150	10.705	78.287
200	14.261	83.082
300	21.37	91.39
500	35.595	105.08

#### 4. 결론

이 연구에서는 직경 350A 벨로우즈형 신축관이 음에 대한 휨 각도 예측 및 하중에 따른 구조적 안정성을 판단하였다. 또한 해석에서 얻은 신축관 이음의 허용 휨 각도를 적용하여 배관설치에서 일반적으로 많이 사용하는 2km 배관계 시스템의 안정성을 예측하였다.

벨로우즈형 신축관이음의 휨(굽힘) 해석을 통하여 최대 휨 각도를 계산하였으며, 수치계산에 의한 최대 휨 각도는 약 1.8°이며, 구조해석을 통하여 재료의 허용강도와 비교하여 얻은 벨로우즈의 최대 휨 각도는 약 0.22°를 얻었다. 이 각도는 신축관이음 규정의 허용 휨각도(3°)에 비하여 매우 안정하다는 것을 확인하였다.

최대 휨 각도를 적용하여 2km 배관계의 허용 최대 처짐은 약 3.8m를 얻었으며, 회귀분석을 이용하여 지진하중을 고려한 경우 2 km 배관계의 최대 처짐은 약 142.3 mm로 배관계의 허용 최대 처짐과 비교하여 신축관이음 및 배관계는 안정함을 확인할 수 있었다.

이와 같은 연구결과는 향후 배관연결부의 지진 안정성 시험방법에 대한 KS 규격 제정의 참고 데이터로 활용 될 것이며, 배관계 시공 및 벨로우즈 시스템의 개발에 대한 설계 및 해석 지침을 제시하였고, 체계적인 연구개발을 진행할 수 있는 기초데이터로 활용할 수 있을 것이라 판단된다.

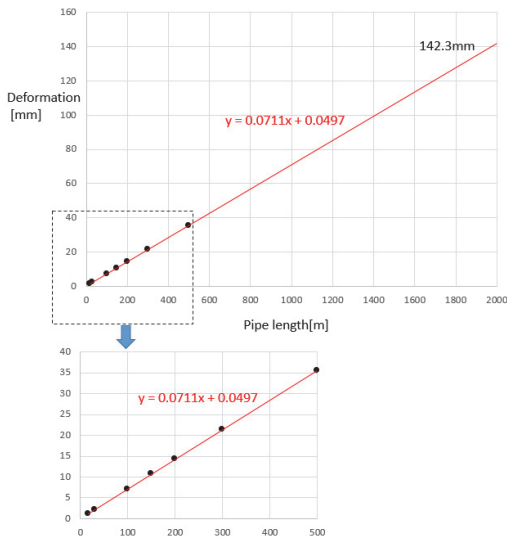


Fig. 10 Linear regression analysis for pipeline with seismic effect

## 참고문헌

- [1] Hur, K. D. and Son, I. S., "Study on Support Span Optimization of Pipeline System Considering Seismic Load", Journal of the Korean Society of Industry Application, Vol. 23, No. 4, pp. 627-635, (2020)
- [2] Oh, J. S. and Cho, S. H., "A Study for Lifetime Prediction of Expansion Joint Using HILS", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society Vol. 19, No. 4 pp. 138-142, (2018)
- [3] Kim, C. W., Lim, J. G. and Lee, Y. S., "Feasibility Study of Fluid-Structure Coupling Analysis in Butterfly Valve", Proceeding of SCDE Conference, pp. 1210-1213, (2011)
- [4] Son, I. S., Ha, S. H., Kim, G. L., Yu, J. S. and Sim, S. G., "Dynamic Behavior Evaluation of Bellows Type Piping System", Proceedings of the KSPSE Spring Conference, pp. 160~161, (2019)
- [5] Son, I. S., "Fluid-structural Interaction Analysis and Seismic Evaluation of Bellows Type Expansion Joints", Journal of the KSPSE, Vol. 23, No. 6, pp. 11~18, (2019)
- [6] Son, I. S., "Seismic Stability Evaluation of Bellows Type Expansion Joints Piping System (350A)", Journal of the Korean Society of Industry Application, Vol. 23, No. 4, pp. 653-659, (2020).

---

(접수: 2022.08.31. 수정: 2022.09.22. 게재확정: 2022.09.27.)