



# 벨로우즈 신축관이음의 유동-구조 연성해석 및 내진평가 Fluid-structural Interaction Analysis and Seismic Evaluation of Bellows Type Expansion Joints

손인수\*†  
 In-Soo Son\*†

(Received 14 June 2019, Revision received 03 December 2019, Accepted 04 December 2019)

**Abstract:** In this study, fluid-structural interaction analysis and seismic evaluation of the bellows used in the plant field were conducted. The pressure used in the analysis was analyzed by applying the design pressure of 1.6 MPa. The material of the bellows system is STS 304, and the safety factor is obtained in comparison with the allowable stress. For the seismic analysis, the natural frequency of the bellows system was obtained and the stability of the system was evaluated by static seismic analysis comparing the lowest order natural frequency with the dominant frequency of 33 Hz. For the seismic analysis, the design response spectrum was prepared and the maximum acceleration was applied to the static seismic analysis and the stability of the entire system was confirmed. In seismic analysis, the maximum value of the expansion joint's stress value was about 9% to 11% when the seismic load was applied compared to the general structural analysis.

**Key Words :** Fluid-structural analysis (FSI), Seismic evaluation, Bellows type expansion joint, Finite element analysis.

## 1. 서 론

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 배관 사이 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 구조해석 등을 통한 설계과정에서의 핵심기술을 미리 예측하고 설계하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 또 우리나라의 지진 발생위치는 원자력 및 석유 화학 분야 플랜트 산업단지가 밀집된 곳에서 발생이 되고 있다. 따라서 플랜트 분야 배관시스템 및 신축관이음의 안정성 및 지진평가에 대한 연구는 매우 중요하다고 할 수 있다.

Kim 등<sup>1)</sup>은 시뮬레이션 기법을 이용하여 벨로우즈 형 신축관의 설계변수인 제작치수를 변화에 따른 응력분포를 비교하여 최적 형상을 도출한

\*† 손인수(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-0605-4662>) : 교수, 동의대학교 기계자동차로봇부품공학부  
 E-mail : [isson92@deu.ac.kr](mailto:isson92@deu.ac.kr), Tel : 051-890-2239

\*† In-Soo Son(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-0605-4662>) : Professor, Division of Mechanical, Automobile, Robot Component Engineering, Dong-eui University.  
 E-mail : [isson92@deu.ac.kr](mailto:isson92@deu.ac.kr), Tel : 051-890-2239

연구를 수행하였다. 최근, 벨로우즈형 신축관이음을 사용한 배관시스템의 신축성 취약도를 분석하기 위하여 신축관이음의 내구 수명예측 방법 및 신축관이음의 동적거동 특성에 대한 연구도 수행되었다.<sup>2,3)</sup> Kim 등<sup>4)</sup>은 배관시스템에서 벨브의 구조 안정성 평가를 위하여 구조-연성 해석과 단일 해석을 비교하여 구조-연성 해석의 타당성을 검토하는 연구를 수행하였으며, 유동해석에 의한 동적인 결과 값을 구조 해석에 적용하여 FSI 기법을 이용한 초대형 벨브의 구조 안전성 평가에 대한 논문도 발표되었다.<sup>5)</sup> 발전플랜트 분야에서 사용되고 있는 배관계의 유한요소해석을 통한 내진 안전성 검증에 대한 연구가 수행되었고<sup>6)</sup> 유한요소 해석을 통해 기존에 사용 중인 벨브지지대의 내진성능을 검증하고 내진성능을 향상시키기 위한 벨브지지대의 최적형상을 제안하기도 하였다.<sup>7)</sup>

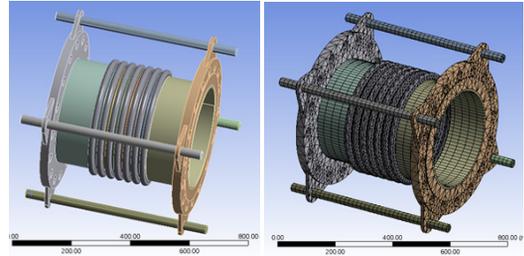
이상의 선행연구들에서는 구조해석, 유동-구조 연성해석 및 내진해석을 일관성 있게 수행하여 신축관이음의 안전성 평가에 대한 연구결과는 찾아보기 힘들며, 특히 단식 및 복식 벨로우즈 신축관이음에 대한 비교 연구는 진행하지 않았다. 따라서 이 연구에서는 단식 및 복식 벨로우즈 신축관이음에 대한 유한요소 해석(구조, 유동-구조 연성해석) 및 내진 해석을 수행하여 신축관이음의 안전성 판단을 수행하였다.

## 2. 해석모델 및 방법

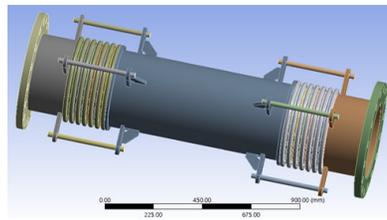
Fig. 1은 해석에 사용한 단식 및 복식 벨로우즈 신축관이음의 형상 및 유한요소 모델링을 도시하고 있다. 벨로우즈 신축관이음은 직경이 350 mm, 재질은 STS304이며 주요 기계적 물성치는 Table 1에 나타내었다. 단식 벨로우즈는 크게 body, 벨로우즈 링, 그리고 홀더로 구성되어지며, 복식 벨로우즈는 중간 파이프 부분이 추가되어진다. 이 연구에서는 먼저 Fig. 1의 단식 및 복식 벨로우즈에 대하여 내부 설계압력인 1.6 MPa를 적용하여 구조해석을 수행하였다. 또한 내부 설계압력을 적용하여 유동-구조 연성해석을 수행하여 안정성을 판단하였으며, 마지막으로 내진해석을 수행하여

Table 1 Material properties of bellows

| Description | Material | Yield Strength | Tensile Strength |
|-------------|----------|----------------|------------------|
| Bellows     | STS304   | 205MPa         | 520MPa           |



(a) single type bellows



(b) double type bellows

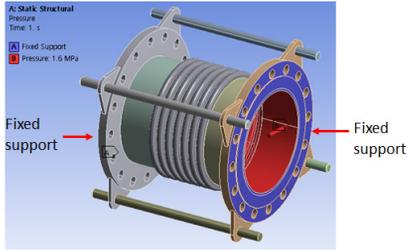
Fig. 1 3D modeling and FE model of bellows

지진 평가를 수행하였다. Fig. 1의 유한요소 모델링에서 단식 벨로우즈의 경우 노드 수는 109,106개, 요소 수는 49,391개, 복식 벨로우즈에서는 노드와 요소 수는 각각 169,256개와 72,841개를 사용하여 해석을 수행하였다.

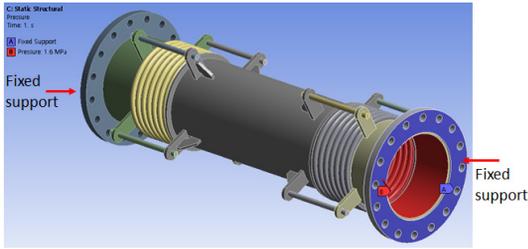
## 3. 해석결과 및 고찰

### 3.1 구조해석

구조해석을 위한 경계조건은 Fig. 2에 도시한 것과 같이 파이프와 연결되어지는 벨로우즈의 양 끝 플랜지 부분을 완전 고정하였으며, 하중조건은

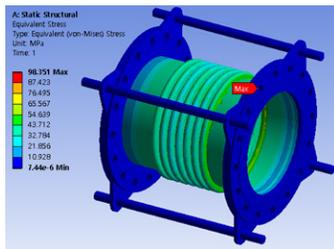


(a) single type bellows

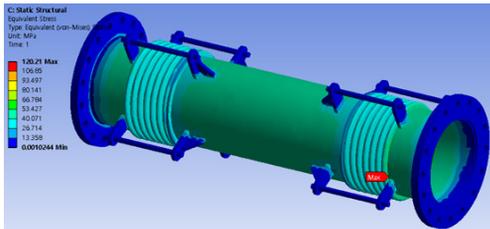


(b) double type bellows

Fig. 2 Boundary and loading condition of bellows



(a) single type bellows



(b) double type bellows

Fig. 3 Stress distribution results of bellows

수압에 해당하는 내부 설계압력인 1.6 MPa를 적용하였다. 구조해석을 통하여 얻은 응력값을 벨로우즈 재료의 항복강도 205 MPa과 비교하여 벨로우즈의 안전성을 검토하고자 한다.

Fig. 3은 단식 및 복식 벨로우즈의 응력분포에 대한 해석 결과를 도시하고 있다. 단식 벨로우즈

Table 2 Results of structural analysis for single type bellows

| Parts        | Deformation (mm) | Stress (MPa) | S.F. (safety factor) |
|--------------|------------------|--------------|----------------------|
| Total        | 0.056            | 98.35        | 0.48(stable)         |
| Bellows ring | 0.036            | 54.17        | 0.26(stable)         |
| Holder       | 0.0002           | 0.086        | 0.0004(stable)       |

Table 3 Results of structural analysis for double type bellows

| Parts        | Deformation (mm) | Stress (MPa) | S.F. (safety factor) |
|--------------|------------------|--------------|----------------------|
| Bellows      | 0.061            | 120.21       | 0.59(stable)         |
| Bellows ring | 0.052            | 62.24        | 0.20(stable)         |
| Holder       | 0.049            | 7.61         | 0.004(stable)        |
| Middle pipe  | 0.049            | 48.42        | 0.24(stable)         |

의 경우 최대 응력은 약 98.4 MPa를 나타내었으며 플랜지와 벨로우즈 파이프가 연결되어지는 부분에서 최대 응력이 발생함을 알 수 있다. Fig. 3(b)는 복식 벨로우즈의 응력해석 결과를 보여주고 있으며 최대 응력값은 약 120.2 MPa를 나타내었다. 단식 벨로우즈의 경우 최대 변형은 약 0.056 mm를 보였으며, 복식 벨로우즈에서는 약 0.06 mm의 최대 변형을 나타내었다. 단식 벨로우즈의 구조해석 결과를 Table 1, 복식 벨로우즈의 해석 결과를 Table 2에 각각 나타내었다. 여기서 S.E.는 안전계수를 의미하며 다음 식 (1)에 의하여 도출한 값이다.

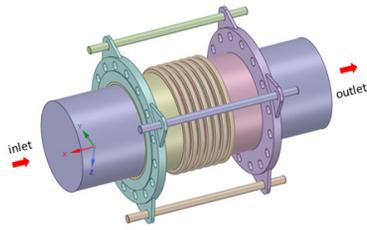
$$S.F. = \frac{\text{Analysis stress}}{\text{Yield stress}} \quad (1)$$

안전계수의 값이 1 이하이면 벨로우즈는 안전하다고 판단할 수 있다. 단식 벨로우즈의 경우 최대 안전계수는 0.48, 그리고 복식 벨로우즈는 약 0.59로 벨로우즈는 모두 충분한 설계 강도를 확보하고 있음을 알 수 있다.

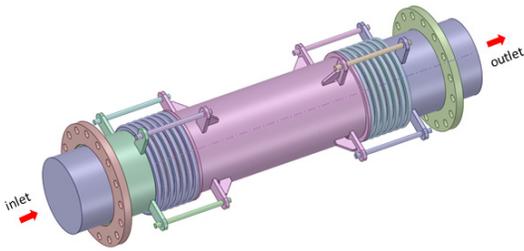
### 3.2 유동-구조 연성해석

Fig. 4는 유동해석을 위한 벨로우즈 시스템의

모델링을 나타낸 것이며, Fig. 5는 유동해석을 위한 유한요소 모델을 도시하고 있다. 유동해석을 위하여 가상의 파이프 내부를 모델링하였으며, 그 길이는 단식 벨로우즈는 플랜지를 기준으로 약 0.3 m, 복식인 경우 약 0.15 m 각각 모델링하였다. 유동해석에 있어 입구 압력은 설계 압력인 1.6 MPa를 정압으로 적용하였으며 출구는 대기압으로 설정하여 해석을 수행하였다.



(a) single type bellows



(b) double type bellows

Fig. 4 Bellows modeling for fluid-structural interaction analysis

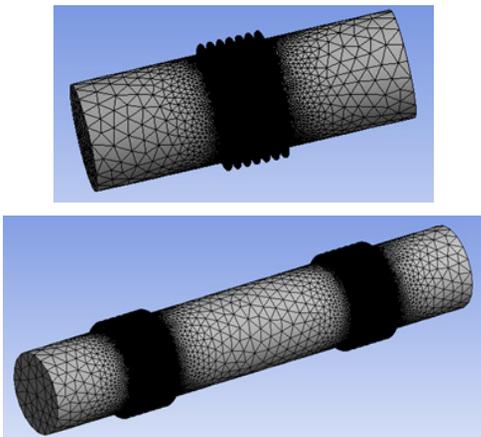
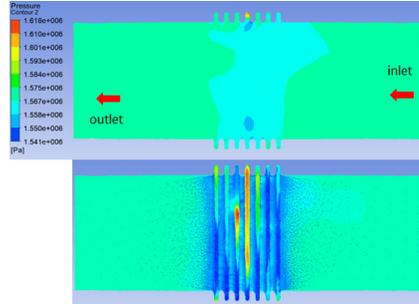
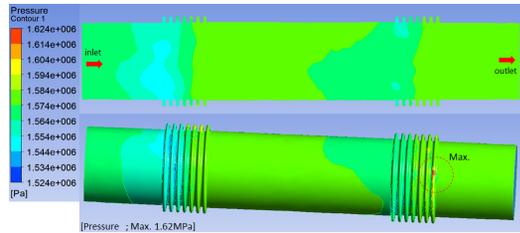


Fig. 5 Mesh shape of bellows

Fig. 6은 유동해석에서 압력분포 결과를 도시한 것으로 Fig. 6(a)의 단식 벨로우즈의 경우 벨로우즈 중앙부분에서 최대 압력은 약 1.62 MPa를 나

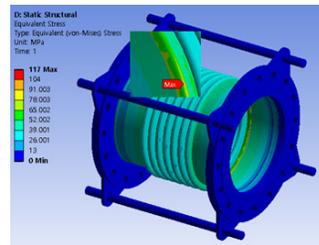


(a) single type bellows

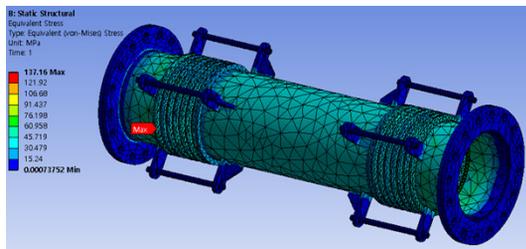


(b) double type bellows

Fig. 6 Pressure distribution results of bellows



a) single type bellows



(b) double type bellows

Fig. 7 Stress distribution results of bellows for fluid-structural interaction analysis

Table 4 Results of fluid-structural interaction analysis for single type bellows

| Parts        | Stress(MPa) |       | S.F.(safety factor) |              |
|--------------|-------------|-------|---------------------|--------------|
|              | SA          | FSI   | SA                  | FSI          |
| Total        | 98.35       | 117.0 | 0.48(stable)        | 0.57(stable) |
| Bellows ring | 54.17       | 39.35 | 0.26(stable)        | 0.19(stable) |
| Holder       | 0.086       | 0.156 | 0.0004              | 0.0007       |

Table 5 Results of fluid-structural interaction analysis for double type bellows

| Parts        | Stress(MPa) |        | S.F.(safety factor) |               |
|--------------|-------------|--------|---------------------|---------------|
|              | SA          | FSI    | SA                  | FSI           |
| Bellows      | 120.21      | 137.16 | 0.59(stable)        | 0.67(stable)  |
| Bellows ring | 62.24       | 43.62  | 0.20(stable)        | 0.21(stable)  |
| Holder       | 7.61        | 9.39   | 0.004(stable)       | 0.046(stable) |
| Middle pipe  | 48.42       | 45.76  | 0.24(stable)        | 0.22(stable)  |

타내었다. Fig. 6(b)의 복식 벨로우즈에서는 출구 쪽벨로우즈 부분에서 최대 압력을 나타내었으며 그 값은 단식 벨로우즈의 압력값과 동일한 약 1.62 MPa를 보였다. 유동해석 결과 단식 및 복식 벨로우즈는 모두 벨로우즈가 존재하는 부분에서 압력 변화가 크게 발생하였으며 출구압력은 균일한 경향을 보인다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 유동-구조 연성해석을 통하여 얻은 응력분포 결과를 도시하고 있다. 구속조건은 구조해석에서와 동일한 구속조건을 적용하였으며 하중 조건은 유동해석에 설계압력을 부여하여 유동해석 결과를 구조해석에서 입력하중으로 적용되도록 설정하여 연성해석을 수행하였다. Fig. 7에서 단식 및 복식 벨로우즈의 최대 응력은 각각 117.0 MPa와 137.2 MPa를 나타낸다. 구조해석 결과와 비교하여 최대응력 발생위치는 동일하며 전체적인 응력분포의 경향성은 유사하다는 것을 알 수 있다. Fig. 7(a)의 단식 벨로우즈의 경우 구조해석 결과와 비교하여 유동-구조 연성해석으로 얻은 최대 응력은 약 19% 정도 증가하였으며, Fig. 7(b)의 복식 벨로우즈는 연성해석 결과가 단순 구조해석 결과에 비하여 약 14% 증가한다는 것을 알

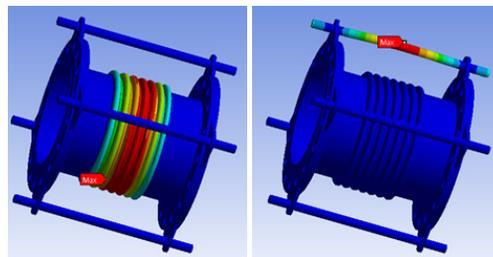
수 있다.

Tables 4, 5는 구조해석 및 유동-구조 연성해석 결과를 정리하여 나타낸 것으로 단식 및 복식 벨로우즈 시스템은 안전계수(최대 안전계수 0.67)를 판단하여 모두 안전하다는 것을 확인할 수 있다. 여기서 SA는 구조해석(structural analysis)을 의미하며, FSI는 유동-구조 연성해석(fluid-structural interaction analysis)을 나타내고 있다.

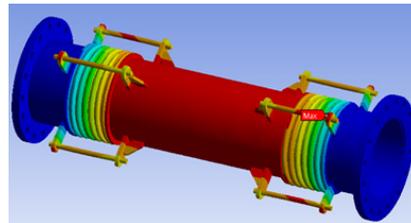
### 3.3 내진해석

벨로우즈 신축관이음에 대한 내진해석을 수행하기 위하여 먼저 대상 모델에 대한 진동해석을 통하여 고유진동수를 구한다. 일반적으로 대상모델의 최저차 고유진동수가 지진력의 지배 진동수 구간의 상한이 되는 33 Hz를 초과하면 정적 내진해석을 수행하고, 33 Hz 미만인 경우에는 공진현상에 취약하다고 판단하여 동적 내진해석을 수행한다.<sup>8)</sup>

Fig. 8은 단식 및 복식 벨로우즈의 모달해석을 수행한 결과를 도시한 것으로 감쇠효과를 무시하고, 구조해석에서의 경계조건을 그대로 적용하여



(a) single bellows(1st mode; 451.09 Hz, 2nd mode; 487.49 Hz)



(b) double bellows(1st mode; 181.52 Hz)

Fig. 8 Natural frequencies of bellows

해석을 수행하였다. 해석 결과, 벨로우즈의 1차 고유진동수는 모두 지진의 지배 진동수인 33 Hz 이상이기 때문에 이 연구에서는 정적내진해석을 통하여 벨로우즈의 내진해석을 수행하도록 한다.

정적내진해석을 위하여 먼저 등가 정하중 산출을 수행하였다. 지반의 종류를 토사지반(S2)으로, 지진 구역계수를 0.11 g으로 하였을 경우 구해지는 지반증폭계수를 이용하여 표준설계응답스펙트럼을 도출하였다. 설계응답스펙트럼에서 위험도 계수 1을 적용하여 얻은 최대 가속도는 다음 식에 의하여 구할 수 있다.

$$a_{\max} = 2.5F_a \times S \tag{2}$$

여기서  $F_a$ 는 단주기 지반증폭계수이며,  $S$ 는 유효수평지반가속도를 의미한다. 보수적인 평가를 위하여 식 (2)에서 얻은 최대 가속도를 적용할 때 등가정하중은 뉴턴의 제 2법칙에 의하여 다음 식 (3)에 대입하여 결정할 수 있다.

$$F = ma_{\max} [N] \tag{3}$$

여기서  $m$ 은 벨로우즈의 질량이며, 단식 및 복

식 벨로우즈의 질량은 각각 약 112.3 kg, 192.2 kg 이다. 따라서 지진해석을 위하여 식 (3)을 계산하면 단식 벨로우즈는 약 424.2 N, 복식 벨로우즈는 약 725.8 N이며, 이 등가정하중을 적용하여 해석을 수행하도록 한다.

벨로우즈의 내진해석은 Fig. 9에 도시한 것과 같이 모든 하중 및 구속조건은 앞장의 해석에 적용한 것과 동일하며 여기에 식 (3)에서 구한 지진하중을 부여하여 해석을 수행하였다. 벨로우즈의 자중 및 지진하중은 수직방향으로 적용하였다.

Fig. 10은 벨로우즈의 지진해석(응력분포) 결과를 나타내고 있다. Fig. 10(a)의 단식 벨로우즈의 최대 응력은 벨로우즈 접합부분에 발생하며 그 크기는 약 104.3 MPa를 보이고 있다. 복식 벨로우즈의 경우 최대 응력은 약 128.9 MPa를 나타내었

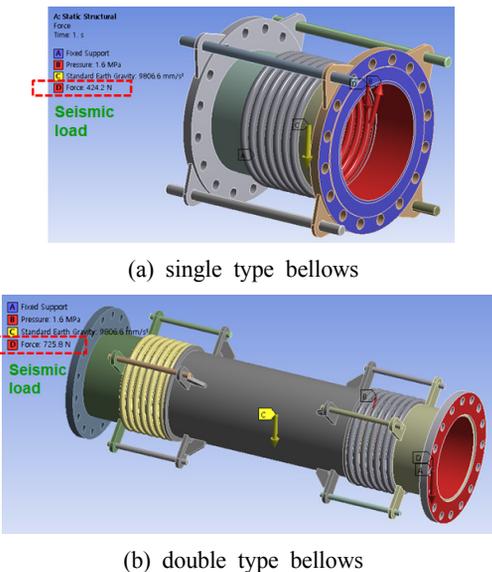
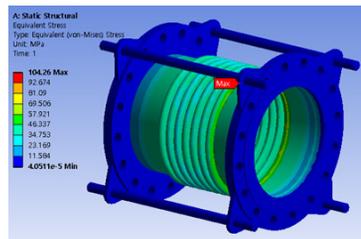
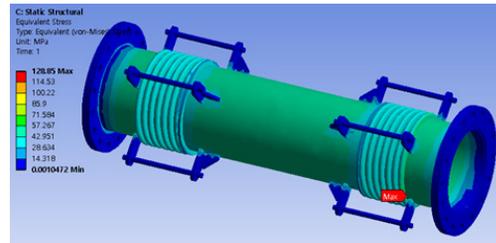


Fig. 9 Boundary condition for seismic analysis



(a) single type bellows



(b) double type bellows

Fig. 10 Stress distribution results of bellows for seismic analysis

Table 6 Results of deformation for seismic analysis

| Part         | Single bellows |                  | Double bellows |                  |
|--------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
|              | SA             | Seismic analysis | SA             | Seismic analysis |
| Bellows      | 0.056          | 0.059            | 0.061          | 0.070            |
| Bellows ring | 0.036          | 0.038            | 0.052          | 0.057            |
| Holder       | 0.0002         | 0.001            | 0.049          | 0.052            |
| Middle pipe  | -              | -                | 0.049          | 0.058            |

Table 7 Stress results of seismic analysis for single type bellows

| Part         | Stress(MPa) |                  | S.F.   |                  |
|--------------|-------------|------------------|--------|------------------|
|              | SA          | Seismic analysis | SA     | Seismic analysis |
| Total        | 98.35       | 104.26           | 0.48   | 0.51             |
| Bellows ring | 54.17       | 57.56            | 0.26   | 0.28             |
| Holder       | 0.086       | 0.433            | 0.0004 | 0.002            |

Table 8 Stress results of seismic analysis for double type bellows

| Part         | Stress(MPa) |                  | S.F.  |                  |
|--------------|-------------|------------------|-------|------------------|
|              | SA          | Seismic analysis | SA    | Seismic analysis |
| Bellows      | 120.21      | 128.85           | 0.59  | 0.63             |
| Bellows ring | 62.24       | 66.58            | 0.20  | 0.33             |
| Holder       | 7.61        | 8.41             | 0.004 | 0.0041           |
| Middle pipe  | 48.42       | 51.42            | 0.24  | 0.25             |

으며 재질의 허용강도인 205 MPa와 비교할 때 안전계수는 약 0.63으로 구조적으로 안정하다는 것을 알 수 있다.

Table 6은 지진해석에 의한 벨로우즈의 변형을 나타낸 것으로 지진하중을 적용하였을 때 단식 벨로우즈의 경우 최대 변형은 약 5% 정도 증가하였으며, 복식 벨로우즈의 경우 약 14.8% 정도 증가하였다.

Tables 7, 8은 구조해석 및 지진해석을 수행하여 최대응력 결과를 도시한 것이다. 지진하중을 적용한 경우 단식 벨로우즈의 최대 응력은 약 6% 정도 증가하였으며, 복식 벨로우즈는 약 7.2% 정도 높은 응력 값을 나타내었다. 지진하중이 작용하는 경우 벨로우즈의 최대 안전계수는 약 0.63으로 지진하중에 대하여 벨로우즈는 구조적으로 안전하다는 것을 판단할 수 있다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 플랜트 분야 및 상하수도에 많이 사용되고 있는 단식 및 복식 벨로우즈 신축관 이음의 구조해석, 유동-구조연성해석 및 지진해석

을 통하여 구조적 안전성 판단을 수행하였다. 이 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 구조해석 결과, 단식 및 복식 벨로우즈의 최대 안전계수 각각 0.48과 0.59로 구조적으로 안전하였으며, 복식 벨로우즈의 경우 단식 벨로우즈에 비하여 약 23% 정도 더 높은 응력 값을 보였다.

2) 단식 벨로우즈의 경우 구조해석 결과와 비교하여 유동-구조 연성해석으로 얻은 최대 응력은 약 19% 정도 증가하였으며, 복식 벨로우즈는 연성해석 결과가 단순 구조해석 결과에 비하여 응력 값은 약 14% 증가하였다. 유동-구조연성해석 결과 응력의 최대 안전계수는 0.67로 벨로우즈 시스템은 안전함을 확인하였다.

3) 지진하중을 받는 경우 단식 벨로우즈의 경우 최대 변형은 약 5%, 복식 벨로우즈의 경우 약 14.8% 정도 각각 증가하였다. 또한 내진해석 결과 단식 벨로우즈의 최대 응력은 일반구조해석 결과와 비교하여 약 6%, 복식 벨로우즈는 약 7.2% 정도 증가하였다. 내진해석 결과, 최대 안전계수는 복식 벨로우즈에서 나타났으며 약 0.63으로 구조적으로 안전하였다.

#### References

1. H. J. Kim, J. H. Park, H. S. Kim, H. G. Kim and J. S. Lee, 2006, "Design plan for U-type bellows life improvement", The Korean Society of Mechanical Engineers, Spring Conference, pp. 43-46.
2. T. S. Yoon, 2018, "A Study on the Analysis Method for Durability Evaluation Prediction of Bellows type Piping System", Master's Thesis, Hanyang University.
3. I. S. Son, S. H. Ha, G. L. Kim, J. S. Yu and S. G. Sin, 2019, "Dynamic Behavior Evaluation of Bellows Type Piping System", Proceedings of the KSPSE Spring Conference, pp. 160-161.
4. C. W. Kim, J. G. Lim and Y. S. Lee, 2011, "Feasibility Study of Fluid-Structure Coupling Analysis in Butterfly Valve", Proceeding of

- SCDE Conference, pp. 1210-1213.
5. B. H. Lee, B. H. Jen and S. M. Kang, 2009, "Study on the Fluid Characteristic Industrial Butterfly Valve", Proceeding of KSME Conference, pp. 277-283.
  6. J. H. Kim, Y. S. Lee and Y. W. Kim, 2011, "Seismic Analysis of Power Plant Piping System", Proceeding of KSNVE Conference, pp. 480-485.
  7. H. E. Kim, D. Y. Keum, D. J. Kim, J. H. Kim and S. K. Hong, 2015, "Design Optimization of Valve Support with Enhanced Seismic Performance", J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 32, No. 11, pp. 997-1005.  
(<https://doi.org/10.7736/KSPE.2015.32.11.997>)
  8. P. R. Smith, 1987, "Piping and Pipe Support Systems", McGraw-Hill Book Company, pp. 121-127.