

# 단조하중을 받는 벨로우즈 신축이음관의 구조적 불확실성에 의한 민감도 분석

## Sensitivity Analysis of a Bellows Expansion Joint subjected to Monotonic Loading Due to Structural Uncertainty

손호영\* · 이종륜\*\* · 전법규\*\*\* · 주부석\*\*\*\*

Son, Hoyoung · Lee, Jong-Ryun · Jeon, Bub-Gyu · Ju, Bu-Seog

### 요약

지반 침하 및 액상화 등에 따른 과도한 상대변위로 인한 매립배관 시스템의 손상을 저감시키기 위해 종종 벨로우즈 신축이음관은 사용된다. 벨로우즈 신축이음관의 성형과정에서 회선의 벽두께 감소와 같은 구조적인 불확실성이 발생할 수 있으며 특히, 벽두께 감소는 벨로우즈 신축이음관의 성능에 영향을 미칠 수 있다. 매립배관 시스템의 효율적인 유지관리를 위해 회선의 벽두께 감소에 의한 벨로우즈 신축이음관의 성능평가는 필요하다. 하지만 회선의 벽두께 감소가 벨로우즈 신축이음관의 성능에 미치는 영향을 조사하는 연구는 미미하다. 따라서 본 연구는 기초적인 연구로써 고충실도 유한요소 모델을 이용하여 단조하중을 받는 벨로우즈 신축이음관의 벽두께 감소에 의한 성능을 평가하고 민감도 분석을 수행하였다. 각 회선의 벽두께 감소를 20%로 적용하였을 때 최대하중은 약 3% 감소하는 것으로 나타났으며 2번 회선의 벽두께 감소가 최대하중 감소에 비교적 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

**Keywords :** 벨로우즈 신축이음관, 구조적 불확실성, 벽두께 감소, 고충실도 유한요소 모델

## 1. 서론

현대사회에서 효율적인 자원 수송을 위해 매립배관 시스템은 필수적인 요소이다. 하지만 매립배관 시스템은 지반 침하, 액상화 등으로 인해 과도한 상대변위를 경험할 수 있으며 과도한 상대변위로 인한 매립배관 시스템의 손상은 주로 연결부에 집중되는 것으로 연구되었다. 벨로우즈 신축이음관은 기하학적 특성으로 인해 수평 및 축방향 변위와 회전을 일부 허용하기 때문에 비교적 큰 변위용량을 갖으며 연결부의 손상을 저감하기 위해 종종 사용된다. 벨로우즈는 주로 유압식 성형방법을 이용하여 제작되는데, 성형과정에서 소성변형을 경험할 수 있으며 벽두께 얇아짐 등의 구조적 불확실성이 발생할 수 있다(Liu et al., 2020). 회선 벽두께 감소는 단조하중을 받는 벨로우즈 신축이음관의 성능평가에 있어 중요한 영향인자인 것으로 나타났다(손호영 등, 2022). 하지만 단조 하중을 받는 벨로우즈 신축이음관의 벽두께 감소에 의한 구조적 성능에 대한 민감도 분석 연구는 미미한 상황이다. 따라서 본 연구는 벨로우즈 신축이음관의 벽두께 감소에 의한 구조적 성능 및 민감도 검토를 위해 고충실도 유한요소 모델을 이용하여 주효과를 분석하였다.

## 2. 민감도 분석

### 2.1 벨로우즈 신축이음관의 고충실도 유한요소 모델

수치해석 기반의 민감도 분석을 위해 실험 데이터를 기반으로 검증된 고충실도 유한요소 모델을 사용하였다. 벨로우즈 신축이음관의 단조하중 실험 및 고충실도 유한요소 모델 검증에 대한 내용은 손호영 등(2022)의 연구에 자세히 기술되어 있다. 그림 1 (a)와 같은 2겹 벨로우즈 신축이음관의 단조 하중 실험을 수행하였다. 실험 데이터를 기반으로 그림 1 (b)와 같이 고충실도 유한요소 모델을 구축하였으며 그림 1 (c)와 같이 하중-변위 관계를 비교하여 구축된 유한요소 모델을 검증하였다.

\* 정회원 · 경희대학교 사회기반시스템공학과 연구박사 shyoung0623@khu.ac.kr

\*\* 학생회원 · 경희대학교 사회기반시스템공학과 석사과정

\*\*\* 부산대학교 지진 방재연구센터 연구교수

\*\*\*\* 정회원 · 경희대학교 사회기반시스템공학과 교수 bju2@khu.ac.kr



그림 1. 벨로우즈 신축이음관의 고충실도 유한요소 모델 구축 및 검증 (손호영 등, 2022)

## 2.2 벽두께 감소에 의한 민감도 분석

Liu et al.(2020)의 연구에서 유압식 성형과정에서 5%에서 20%까지 벽두께 감소가 발생할 수 있는 것으로 연구되었다. 본 연구는 6개의 회선을 갖는 벨로우즈 신축이음관에서 그림 2와 같이 각 회선의 벽두께 감소를 20%로 적용하였으며 단조 힘 하중을 적용한 수치해석을 수행하였으며 벽 두께 감소에 의한 민감도를 분석하였다. 벽두께 감소가 발생하지 않았을 경우 최대하중은 약 31.1kN으로 발생하였으며 각 회선의 두께 감소가 발생할 경우 최대 약 3%의 최대하중이 감소하는 것으로 나타났다. 1번 및 2번 회선의 벽두께 감소가 최대 하중 감소에 비교적 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

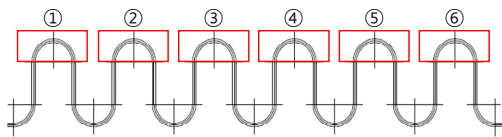


그림 2. 민감도 분석 case

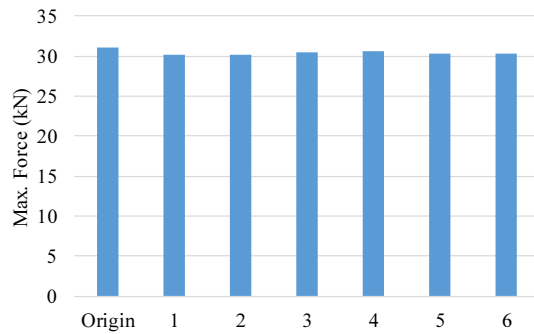


그림 3. 최대하중 비교

## 3. 결론

본 연구는 단조 힘 하중을 받는 벨로우즈 회선의 벽두께 감소에 의한 민감도 분석을 수행하였다. 6개의 회선을 갖는 벨로우즈 신축이음관의 각 회선이 20% 벽두께 감소가 발생하였을 때 최대하중을 비교하였다. 벽두께 감소가 발생한 회선에 따라 최대 하중의 감소량은 차이가 있는 것으로 나타났으며 1번 및 2번 회선의 벽두께 감소가 최대하중 감소에 비교적 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 본 연구는 국부 민감도 분석을 통해 벽두께 감소가 최대하중에 미치는 주효과를 검토하였으나 교호작용에 의한 효과를 검토할 필요가 있다. 또한 재료 특성의 불확실성은 벨로우즈 신축이음관의 구조적 성능에 영향을 미칠 수 있는 주요 영향인자이기 때문에 추후 연구를 통해 추가적인 불확실성으로 고려하여 전역 민감도 분석을 수행하고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. 2021R1A2C1010278)

## 참고문헌

- 손호영, 전법규, 유진석, 주부석 (2022) 실험적 성능 기반 단조하중 하에서 벨로우즈 배관 감육을 고려한 해석적 성능평가, 한국 복합신소재구조학회 논문집, 13(6), pp.62 ~ 70.
- Liu, J., Lv, Z., Liu, Y., Li, L. (2020) Deformation Behaviors of Four-Layered U-Shaped Metallic Bellows in Hydroforming, Chinese Journal of Aeronautics, 33(12), pp.3479~3494.