

<연구논문>

선형 매칭 기법을 활용한 해저 샌드위치 파이프의 복합하중 영향도 분석

박거락*, 송규*, 최영재*, 조락균**, 김충수**

Investigating the Subsea Sandwich Pipeline Integrity under Complex Loadings

Geo-Rak Park*, Kyu Song*, Youngjae Choi*, Nak-Kyun Cho**† and Chung-Soo Kim**

(Received 19 November 2021, Revised 10 December 2021, Accepted 23 December 2021)

ABSTRACT

Subsea pipelines are widely used to transport hydrocarbons from ultra-deep seawater to facilities on the coast. A sandwich pipe is a pipe-in-pipe system in which the annulus between the two concentric steel pipes is filled with polymer cores and fillers for insulation and structural reinforcement. Sandwich pipeline is always exposed to complex loading such as bending moment, bulking, internal and external pressures caused by installation, operation and environmental factors. This research provides insights into the structural integrity of sandwich pipeline exposed to complex loading conditions using a linear matching method (LMM). The finite element model of the sandwich pipeline has been generated from previous research, and the model validation is performed by comparing the results of the linear analysis between the two models. The temperature dependent material properties are used to simulate the behavior of real pipeline, and the elastic-perfectly plastic (EPP) model has been taken into account for the material non-linearity. Numerical results provide comprehensive insights into the structural response of the sandwich pipeline under monotonic and cyclic loading and provide notable points about the evaluation of the plastic collapse limit and the elastic shakedown limit of the sandwich pipeline.

Key Words : Sandwich pipelines (샌드위치 파이프라인), Linear matching method (선형매칭기법), Elastic Shakedown (탄성셰이크다운), Plastic collapse limit (소성 붕괴 한계)

1. 서 론

초심해저에서 채굴한 탄화수소를 수송하는 역할을 하는 해저 파이프라인은 저온과 고압의 환경에 노출되어 있다. 해저 파이프라인은 사고 시, 막대한 자원 손실과 심각한 환경 오염이 뒤따르기 때문에 구조적 안전성은 물론이고, 원활한 수송을 위한 파

이프 내, 외부 간의 단열은 필수적이다⁽¹⁾.

이와 관련된 문제를 극복하기 위해 많은 연구가 수행되었으며, Bai, Q.에 의해 파이프 인 파이프(pipe-in-pipe) 시스템이 최초로 고안되었다⁽²⁾. 그러나, 파이프 인 파이프 시스템은 단열적인 측면에서만 기여하였고 충분한 구조적 안전성을 확보할 수 없었다^(3,4). 단열 및 구조적 성능 향상을 위해 새로운 형태의 파이프 인 파이프 시스템인 샌드위치 파이프라인(sandwich pipeline)이 고안되었고⁽⁵⁾, 현재까지도 구조 건전성을 극대화하기 위해 다양한 연구가 진행 중이다^(6,7).

일반적인 형태의 샌드위치 파이프라인은 이중관

† 조락균, 회원, 서울과학기술대학교 MSDE 학과

E-mail : nkcho@seoultech.ac.kr

TEL : (02)970-7278 FAX : (02)974-5388

* 서울과학기술대학교 MSDE학과

** 한국생산기술연구원 첨단정형공정그룹

의 형태로 되어있으며, 폴리머 재료가 파이프 사이의 환형 공간(annular space)을 코어(core)와 필러(filler)로서 채우고, 서로 다른 직경의 내, 외부 파이프는 용접으로 연결되어 있다⁽⁸⁾. 샌드위치 파이프라인은 해류와 지진 등의 환경적 요인으로부터, 그리고 설치, 운전과정에서 내압(inner pressure), 외압(outer pressure), 굽힘 모멘트(bending moment), 좌굴(buckling) 하중 등 다양한 종류와 형태의 하중에 노출된다. 따라서 샌드위치 파이프라인의 기하학적 특성과 복합적인 하중을 고려한 구조 건전성(structural integrity) 평가는 필수적이다.

이를 위해 본 연구에서는 선형 매칭 기법(linear matching method; LMM)을 활용하여 단조 하중 조건(monotonic loading case)하에서의 구조물의 소성 붕괴 한계(plastic collapse limit)와 반복 하중 조건(cyclic loading case)하에서의 탄성 셰이크다운 한계(elastic shakedown limit)에 대한 연구를 수행하였다. 이를 통해 여러 가지 하중의 종류에 따른 구조물의 허용 하중 크기(load bearing capacity)를 도출할 수 있으며, 샌드위치 파이프라인의 구조 건전성에 영향을 미치는 하중 조건과 조합을 예측할 수 있다.

2장에서는 본 연구에서 사용된 해석 기법인 선형 매칭 기법과 해석에 사용된 유한요소모델에 관련된 내용이 소개된다. 3장에서는 선형 및 비선형 해석 결과와 선형 매칭 기법을 통해 도출된 허용 하중 크기에 대한 분석을 통해 샌드위치 파이프라인의 구조 건전성에 영향을 주는 요인을 제시할 것이다. 마지막으로 4장에서 본 연구의 결론에 대해 기술된다.

2. 선형 매칭 기법 및 유한요소모델

2.1 선형 매칭 기법

구조물이 반복적인 하중(cyclic loading)에 노출되면 탄성 셰이크다운(elastic shakedown), 소성 셰이크다운(plastic shakedown) 그리고 라체팅(ratchetting)과 같은 반복 소성 거동(cyclic plasticity behaviour)을 보일 수 있다. 선형 매칭 기법은 이러한 반복 소성 거동을 해석하기 위해 개발된 다이렉트 해석 기법(direct method)이며, 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS의 UMAT subroutine을 통해 생성된다. 본 연구에서는 물성은 등방성(isotropic) 재질로 가정하고 경화 모델은 탄성-완전소성(elastic-perfectly plastic; EPP) 모델을, 항복 조건은 von-Mises 항복 조

건을 사용한다. 선형 매칭 기법은 선형 탄성 해석 결과를 바탕으로 재료의 강성을 교체하며 구조물 전체에 응력을 재분포시키는 반복 계산 과정을 통해 소성 붕괴 한계와 탄성 셰이크다운 한계의 상한값(upper bound)과 하한값(lower bound)을 도출한다. 셰이크다운 한계값을 계산하기 위한 수식은 선형 연구들을 통해 소개되었으므로 이 논문에서는 생략한다^(9,10).

2.2 유한요소모델

본 연구에서 사용된 샌드위치 파이프라인 모델은 Onyegiri의 연구에서 사용된 모델을 차용하였으며⁽¹¹⁾ 단면과 치수는 Fig. 1 및 Table 1과 같다. 내부 파이프와 외부 파이프 사이의 환형 공간은 Fig. 1과 같이 코어와 필러로 채워져 있다. 파이프 용접부에는 buttered weld, swaged weld, girth weld의 세 가지 유형이 있다. 내부 파이프 사이의 용접부인 girth weld는 ±1mm 공차를 고려한다. 내부 및 외부 파이프 형상은 각각 NPS Schedule 80의 8인치 및 NPS Schedule 60의 12인치인 미국 표준 파이프 규격을 참고했다. 파이프라인의 half shell은 외부 파이프와 같은 크기이고 본 연구에서는 파이프의 타원도는 고려하지 않았다.

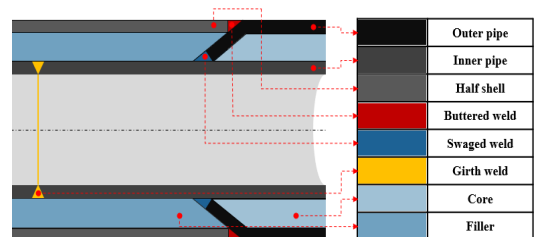


Fig. 1 Sandwich pipe schematic diagram

Table 1 Geometric parameters

Geometric parameters		Size (mm)
Inner pipe diameter	D_i	219.1
Outer pipe diameter	D_o	323.9
Inner pipe wall thickness	t_i	12.7
Outer pipe wall thickness	t_o	14.3
Half shell wall thickness	t_h	14.3
Cutback length	L_c	350
Total length	L_t	2000
Swaged angle	θ_s	28(°)

Table 2 Mechanical properties

API-5L-X70					
	E(GPa)	ν	σ_y (MPa)	k(W/m°C)	α (m/m°C)
4°C	207.16	0.281	705.95	45.33	1.14x10 ⁻⁵
65°C	202.78	0.282	681.53	44.53	
Polypropylene					
4°C	1.0	0.43	Perfectly Elastic	0.2	1.48x10 ⁻⁵
65°C					

E=Elastic modulus, ν =Poisson's ratio, σ_y =Yield strength, k=Thermal conductivity, α =Thermal expansion coefficient

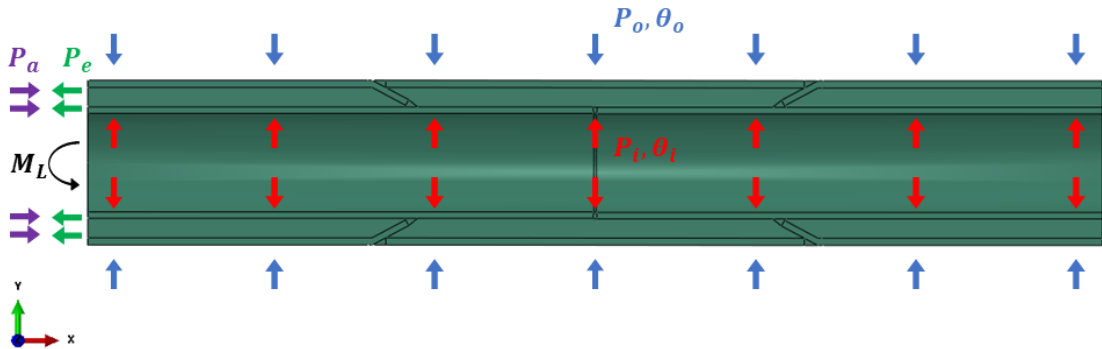


Fig. 2 Loading conditions of the sandwich pipeline

샌드위치 파이프라인의 모든 재료의 물성은 Table 2와 같다. 파이프라인과 half shell은 API-5L-X70이고 온도 의존물성(temperature dependent property)을 적용하였다. 코어와 필러는 폴리프로필렌(polypropylene)으로 완전 탄성 거동으로 가정한다.

해석에 적용된 하중은 Fig. 2에 묘사되어 있고 상세한 값은 Table 3와 같다. 운전 하중(operating loads)인 내압과 외압은 각각 파이프의 내부와 외부에 적용되었고, 파이프를 닫힌 상태로 가정하기 위한 축 인장 하중(end-cap pressure)이 한쪽 파이프 단면에 적용되었다.

운전 하중(external loads)인 굽힘 모멘트와 좌굴을 야기하는 축 압축 하중(axial compression)은 축 인장 하중과 동일한 단면에 적용되었다. 하중이 작용하지 않는 단면은 반지를 방향을 제외한 모든 방향으로 구속을 부여했다. 내압은 실제 운전 중 발생하는 압력을 적용하였고, 외압, 굽힘 모멘트 그리고 축 압축 하중은 직관(straight pipeline)에서 소성 붕괴를 야기하는 하중⁽⁵⁾을 적용하였다. 내부 온도(θ_i)는 일반적으로 원할한 탄화수소 운반을 위한 온도인 65°C, 외부

온도(θ_o)는 심해저에서의 평균 수온인 4°C로 적용한다. 본 연구에 적용된 하중 이력은 Fig. 3와 같다.

샌드위치 파이프라인의 유한요소모델은 Fig. 4에 나타나 있다. 이차 축소 적분형 육면체 요소인 C3D20R을 사용하였으며 요소 최적화 연구(mesh sensitivity study)는 기존 연구 결과⁽¹²⁾를 차용하여 총 42,330개의 요소가 생성되었다. 생성된 유한요소모델의 검증(model validation)을 위해 참고 연구의 해석 모델과 위치에 따른 변형률을 비교했다.

Table 3 Magnitudes of all loading

Type of loadings		Value
Operating loads	P_o	60.18 (MPa)
	P_i	4.5 (MPa)
	P_e	91.18 (MPa)
	θ_o	4 (°C)
	θ_i	65 (°C)
External loads	M_L	1.039E+09 (Nmm)
	P_a	681.5 (MPa)

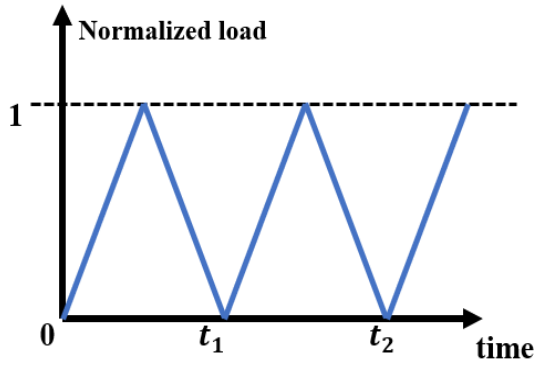


Fig. 3 The loading wave form

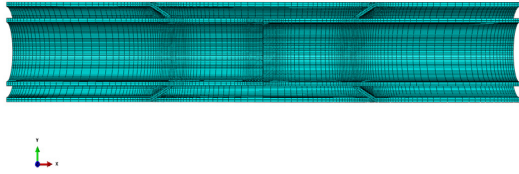


Fig. 4 Finite element model of the sandwich pipeline

3. 해석 결과

3.1 선형 및 비선형 해석 결과

Fig. 5 ~ Fig. 7은 각각 모든 하중, 운전 하중과 축 압축 하중 그리고 운전 하중과 굽힘 모멘트 하중조합이 적용된 샌드위치 파이프 라인의 선형 탄성 해석 결과이다. 모든 하중조합에서는 Fig. 5와 같이 최대 등가 응력이 buttered weld에서 나타나며 모든 하중조합 중에서 가장 큰 등가 응력이 발생된다. 운전 하중과 축 압축 하중조합은 Fig. 6와 같이 swaged weld에서 최대 등가 응력이 발생하는 반면, 운전 하중과 굽힘 모멘트 하중을 받을 때는 Fig. 7과 같이 buttered weld 영역이 취약부가 된다. 선형 탄성 해석 결과, 최대 등가응력의 위치가 하중조합에 따라 변경된다. 또한, 최대 등가 응력이 값을 비교해 보았을 때, 굽힘 모멘트는 샌드위치 파이프라인의 구조 건전성에 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 8과 Fig. 9은 코어와 필러의 유무에 따른 샌드위치 파이프라인의 비선형 해석 결과이다. 경화 모델은 탄성-완전소성 모델을 적용하였다. 코어와 필러가 파이프라인에 포함된 경우(Fig. 8)와 그렇지 않은 경우(Fig. 9)를 비교해 보았을 때, 코어와 필러가 없는 경우에서 약 20% 큰 최대 등가응력을 보인다. 즉, 코어와 필러가 구조적 역할을 하는 것을 확인할

수 있다. 따라서 보수적인 관점에서 샌드위치 파이프라인의 구조 건전성을 평가하기 위해 코어와 필러가 없는 파이프 모델을 사용하여 소성 붕괴 한계 분석과 탄성 셰이크다운 한계 분석이 수행되었다.

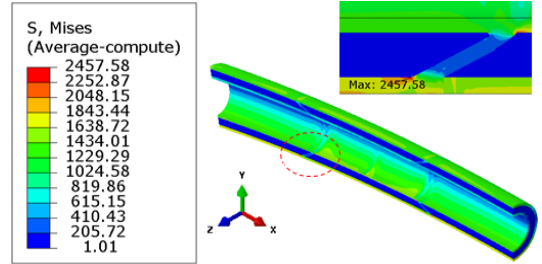


Fig. 5 Elastic solution for all loads

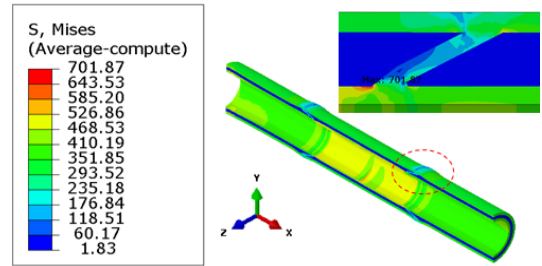


Fig. 6 Elastic solution for axial compression and operating loads

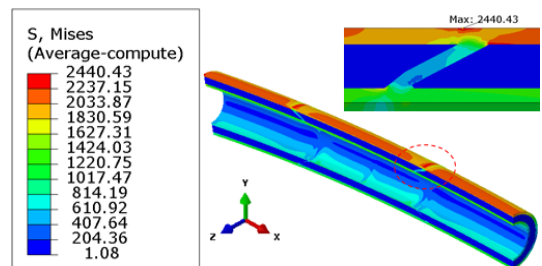


Fig. 7 Elastic solution for bending moment and operating loads

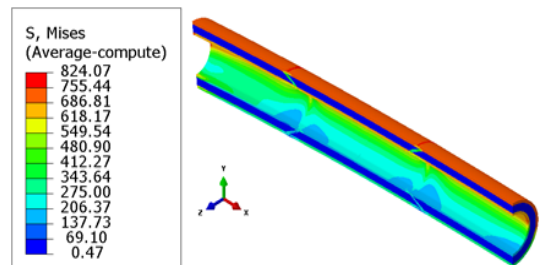


Fig. 8 Non-linear solution for full model

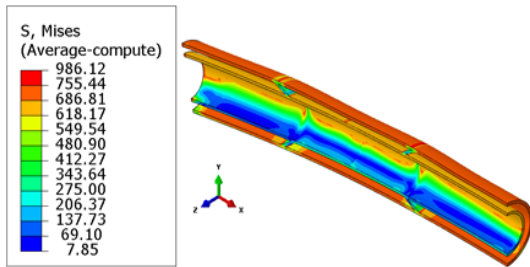


Fig. 9 Non-linear solution for pipe-only model

3.2 소성 붕괴 한계 및 탄성 셰이크다운 한계

선형 매칭 기법을 활용한 여러 하중조합에서 샌드위치 파이프라인 모델에 대한 소성 붕괴 한계와 탄성 셰이크다운 한계 분석 결과는 Fig. 10과 같다. LM은 소성 붕괴 한계, SD는 탄성 셰이크다운 한계 범위를 의미한다. 모든 하중 조합에서 두 경계 사이에 차이가 없는 것은 탄성 셰이크다운 한계와 소성 붕괴 한계가 동일함을 의미한다.

운전 하중만 작용한다면, 내부 파이프의 한계 압력보다 낮은 수준에서 적용된 탄화수소의 압력으로 인해 샌드위치 파이프라인의 내구성이 11% 증가한다. 한편, 같은 하중에 대한 일반적인 직관과 비교하여, 조합 하중(combine load) 및 굽힘 모멘트에 대한 샌드위치 파이프라인의 내구성은 각각 47% 및 65% 감소한다.

조합 하중과 운전 하중(Fig. 10의 파란색 도식) 그리고 축 압축 하중과 운전 하중(Fig. 10의 빨간색 도식)에 대한 허용 하중 크기는 운전 하중이 증가함에 따라 함께 커지다가 작아지는 경향을 보이는 데, 이는 조합 하중과 축 압축 하중이 운전 하중에 포함된 축 인장 하중과 어느 정도 상쇄됨으로 인하여 압력 보상이 일어나기 때문이다. 굽힘 모멘트의 경우(Fig. 10의 초록색 도식) 운전 하중이 55%까지 증가할 때, 허용 하중 크기가 조합 하중의 경우를 초과하는 반면, 이 지점을 지나면 굽힘 모멘트가 샌드위치 파이프라인의 구조 건전성에 가장 심각한 영향을 끼친다.

선형 매칭 기법을 통해 도출된 소성 붕괴 한계 범위와 탄성 셰이크다운 한계 범위를 검증하기 위해 Fig. 10에 도식된 점 A부터 점 F까지 총 6개의 하중 조합 지점에서 단계 해석(step-by-step)이 수행되었다. 단계 해석을 위한 하중 조합 점들은 도출된 한계 범위 근처에서의 거동 변화를 민감하게 파악하기 위해 한계 범위를 기준으로 내부와 외부의 하중 조합 점들이 설정되었다. 하중 주기에 대한 구조물의

소성 변형률은 Fig. 11에 PEMAG (non-integrated measure of plastic strain)을 통해 나타나 있다. 탄성 셰이크다운 한계 범위(혹은 소성 붕괴 한계 범위) 내부에 있는 하중 조합 점 A, C, E는 첫 번째 부하 과정에서 생성된 소성 변형이 이후의 하중 주기에서도 일정하게 유지되는 것을 통해 탄성 셰이크다운 응답을 보이는 것을 확인할 수 있다. 반면에 한계 범위 외부에 있는 하중 조합 점 B, D, F는 첫 번째 부하 과정에서 많은 소성 변형과 함께 구조물의 붕괴가 일어난다는 것을 확인할 수 있다. 이 결과를 기반으로 선형 매칭 기법을 통해 도출된 한계 범위의 신뢰성이 검증되었다.

Fig. 12는 운전 하중의 유무에 따른 굽힘 모멘트와 축 압축 하중에 대한 허용 하중 크기가 나타나 있다. 반복 하중이 작용하는 샌드위치 파이프라인은

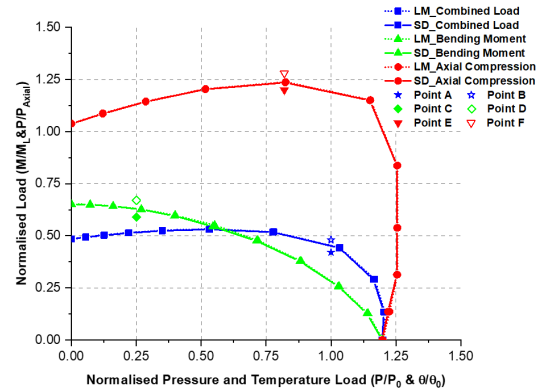


Fig. 10 Elastic shakedown and plastic collapse limit boundaries against applied load combinations

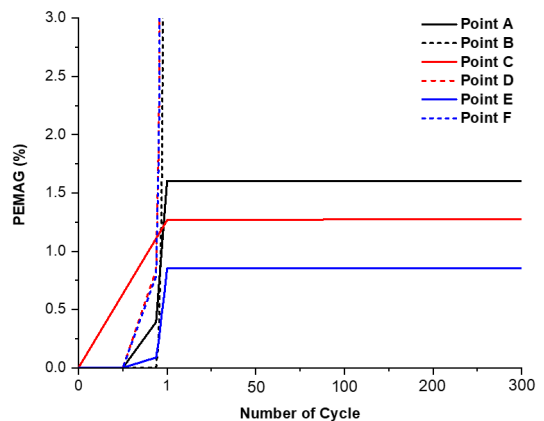


Fig. 11 Plastic strain histories for the cyclic loading points shown in Fig. 10

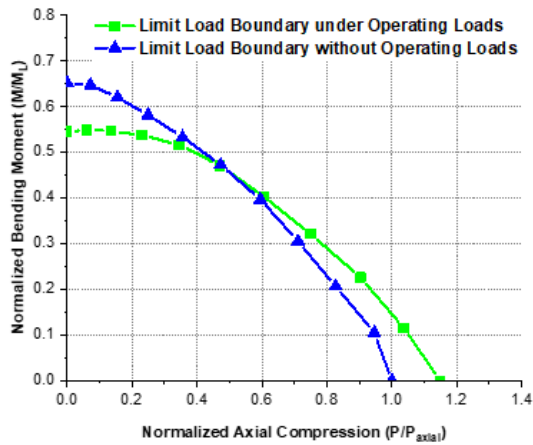


Fig. 12 Plastic collapse limit boundaries according to operating loads

소성 붕괴 한계와 탄성 셰이크다운 한계가 동일함을 앞서 확인했으므로, 소성 붕괴 한계로 허용 하중 크기를 표현했다. 허용 하중 크기에 대한 운전 하중의 영향은 축 압축 하중에 대해서는 증가하지만 굽힘 모멘트에 대해서는 감소함을 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 선형 매칭 기법을 활용하여 굽힘 모멘트, 축 압축 하중, 내압, 외압 그리고 열 하중을 받는 샌드위치 파이프라인에 대한 소성 붕괴 한계 및 탄성 셰이크다운 한계를 규명하였다. 본 연구에서 발견된 주목할 점은 다음과 같다.

선형 탄성 해석 결과, 모든 하중 조합에서 최대 등가 응력은 파이프라인의 용접부에서 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 기하학적 불연속성이 파이프라인의 건전성 악화에 영향을 주는 것으로 볼 수 있다.

선형 매칭 기법을 활용하여 규명한 탄성 셰이크다운 한계는 모든 하중 조합에서 소성 붕괴 한계와 동일함을 확인했다. 또한, 허용 하중 크기를 비교해 보았을 때, 적용된 하중 중 굽힘 모멘트가 파이프라인의 건전성에 가장 심각한 영향을 끼치는 것으로 확인되었다.

운전 하중이 증가함에도 불구하고 허용 하중 크기가 증가하는 현상은 축 압축 하중과 운전 하중에 속하는 축 인장 하중이 서로 상쇄되기 때문이다. 즉, 축 인장 하중이 압축력을 보상하므로 축 압축 하중만으로 파이프라인의 건전성이 향상되었다고 볼 수

있다. 그러나 굽힘 모멘트만 작용하는 경우, 파이프라인의 건전성은 운전 하중이 증가함에 따라 악화되었다.

본 연구에서는 선형 매칭 기법을 활용하여 복잡한 단조 및 반복 하중 조건에서 샌드위치 파이프라인의 구조적 응답을 우수한 정확도로 시연했다. 또한, 생성된 소성 붕괴 한계 및 탄성 셰이크다운 한계는 심해저 파이프라인 설계 및 운용 시 허용 가능한 운전 환경과 조건에 대한 통찰을 제공해줄 수 있다.

후 기

이 연구는 2021년 대한기계학회 신뢰성부문 춘계 학술대회에 발표된 연구내용을 바탕으로 추가적인 반복 하중 조건에 대한 탄성 셰이크다운 해석을 수행하여 작성되었습니다.

참고문헌

- (1) Roche, Marcel. 2007. "Corrosion management: A key issue in pipeline integrity." International Petroleum Technology Conference. OnePetro,
- (2) Bai, Qiang, and Yong Bai. 2014. *Subsea pipeline design, analysis, and installation*. Gulf Professional Publishing,
- (3) An, C., Castello, X., Duan, M., Toledo Filho, R.D., Estefen, S.F., 2012. "Ultimate strength behaviour of sandwich pipes filled with steel fiber reinforced concrete." *Ocean Engineering* 55, pp. 125-135.
- (4) An, C., Duan, M., Toledo Filho, R.D., Estefen, S.F., 2014. "Collapse of sandwich pipes with PVA fiber reinforced cementitious composites core under external pressure." *Ocean Engineering* 82, pp. 1-13.
- (5) Yang, J., Estefen, S. F., Souza, M. I. L., Wang, Y., & Hong, C. 2018. "Insulation Performance of Sandwich Pipe." *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Vol. 51241. American Society of Mechanical Engineers,
- (6) Estefen, Segen Farid, Theodoro Antoun Netto, and Ilson Paranhos Pasqualino. 2005. "Strength analyses of sandwich pipes for ultra deepwaters." pp. 599-608.
- (7) Castello, X., Estefen, S.F., 2006. "Adhesion effect on the ultimate strength of sandwich pipes," *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, pp. 261-267.
- (8) Onyegiri, I., Kashtalyan, M., 2017. "Finite element

- analysis of a sandwich pipe joint." *Ocean Engineering* 146, pp. 363-374.
- (9) Chen, H. and A. R. Ponter, 2001, "Shakedown and limit analyses for 3-D structures using the linear matching method" *International journal of pressure vessels and piping*, Vol. 78, No. 6, pp. 443-451.
- (10) Chen, H, 2010, "Lower and upper bound shakedown analysis of structures with temperature-dependent yield stress" *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 132, No.1.
- (11) Onyegiri, Ikechukwu, and Maria Kashtalyan. 2017. "Finite element analysis of a sandwich pipe joint." *Ocean Engineering* 146. pp. 363-374.
- (12) Arjomandi, K., Taheri, F., 2012, "Bending capacity of sandwich pipes", *Ocean Eng.*, Vol. 48, No. 1, pp. 17~31
- (13) ABAQUS. User's manual version 6.13; 2013.