

해저 파이프라인의 전체 좌굴 제어 방법 비교

김구¹ · 김도균² · 최한석³ · 박규식⁴

한진중티엠에스 사원¹, PETRONAS 공과대학교 교수², 포항공과대학교 교수³, 포스코 전문연구원⁴

A Comparative Study of Subsea Pipeline Global Buckling Control Method

Kim, Koo¹ · Kim, Do-Kyun² · Choi, Han-Suk³ · Park, Kyu-Sik⁴

¹Junior Employee, Product Development Team, HHIC TMS, Busan, Korea

²Senior Lecturer (=Assistant Professor), Department of Civil and Environmental Engineering, Universiti Teknologi PETRONAS, Bandar Seri Iskandar, Perak, Malaysia

³Professor, Graduate School of Engineering Mastership, POSTECH, Pohang, Korea

⁴Principal Researcher, Steel Business Division, POSCO, Seoul, Korea

Abstract: Global buckling is a bending of pipeline and it occurs when the stability of pipeline is distributed by excessive axial force. Subsea pipeline is subjected to axial force induced by temperature and pressure from well and resulting phenomena should be controlled in appropriate manner. Global buckling of subsea pipeline is still ongoing research subject and is studied various organization. In this study, various control methods such as buoyancy module, sleeper, and snake lay for global buckling of subsea pipeline were numerically investigated with various design parameters. From the numerical simulation results, the global buckling control method using sleepers shows better results than buoyancy module and snake lay control methods in the sense of combined stress after buckling. Furthermore, the global buckling of full scale pipeline of 80km with uneven seabed profile were successfully managed when the sleeper was installed.

Key Words: global buckling, buoyancy module, sleeper, snake lay, subsea pipeline

1. 서론

일반적으로 해양에서 자원(Oil and Gas)을 개발하기 위해서는 해저생산시스템(Subsea Production System), 생산 및 수송 파이프라인(Flowline, Pipeline, Riser), 처리시설(Topside Processing System) 등이 필요하다.

파이프라인은 생산된 오일과 가스를 안전하고 효율적으로 수송할 수 있도록 설계되어야 한다. 또한, 파이프라인은 사용연한 동안 구조적 안정성을 확보해야 하며, 비용, 일정, 확장성, 신뢰성, 시공성, 유연성 등의 다양한 변수고려가 요구된다. 해양구조물 설계를

위해서는 직경, 설계압력, 설계온도, 압력 및 온도 형상, 환경하중, 지반 물성치, 유체특성성 등이 필요하다. 또한, 파이프라인과 관계된 설계기준에서는 파이프의 설치경로, 부식, 직경, 파열, 붕괴, 국부좌굴, 안정성, 자유경간, 변형, 전체좌굴, 축방향 워킹(Walking), 피로 등을 검토하는 것을 제시하고 있다(API 2009, DNV 2007).

전체좌굴은 파이프라인의 온도, 압력, 설치시 잔류인장력 등에 의한 압축력 때문에 발생하며, 심해 개발로 인해 Fig. 1과 같이 고온고압의 유정의 개발이 늘어나면서, 이러한 전체좌굴에 의한 파이프라인의 파괴가능성은 점차 증가하고 있다.

주요어: 전체좌굴, 부유모듈, 슬리퍼, 스테이크 레이, 해저 파이프라인

Corresponding author: Park, Kyu-Sik

Steel Business Division, POSCO, Teheran-ro 440, Gangnam-gu, Seoul 135-777, Korea.
Tel: +82-2-3457-1679, Fax: +82-2-3457-6000, E-mail: kyusik.park@posco.com

Received March 6, 2015 / Revised March 15, 2015 / Accepted March 17, 2015

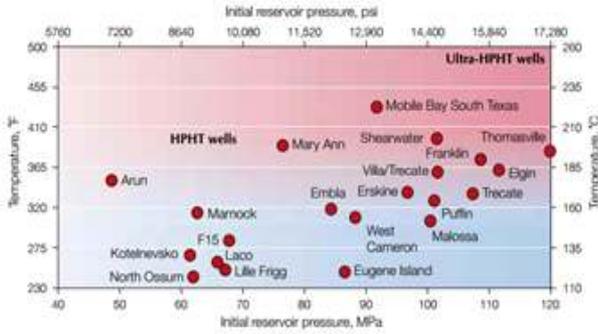


Fig. 1 High Temperature and High Pressure Wells (Baird, 1993)

20세기 후반이후 해저 파이프라인의 좌굴에 대한 연구가 진행되었으며, Palmer(1974)는 전체좌굴에 의한 파이프라인의 파괴 가능성을 최초로 제시하였다. Hobb(1984)은 철도 레일의 좌굴에 관한 연구를 파이프라인에 확장해 전체좌굴에 대한 파이프라인의 파괴가 발생하지 않는 용량을 계산하기 위해 서로 다른 파괴모드를 고려하였다.

파이프라인 전체좌굴에 대한 설계 가이드라인 제시를 위해, Hotpipe 프로젝트와 Safebuck JIP (Joint Industry Project)가 시작되었다. Hotpipe 프로젝트의 결과는 2001년 처음으로 출판되었으며, 그 이후 DNV-RP-F110(DNV, 2007)으로 개정되었다. 또한, 2002년 시작된 Safebuck JIP에는 파이프라인의 설치, 제작, 운영, 설계 등을 담당하는 많은 관련업체가 참여하여, 2008년 연구결과를 출판하였다 (Safebuck, 2015).

파이프라인과 지반의 상호작용은 전체좌굴의 해석에 매우 중요한 요소이며, 파이프라인의 매립여부와 관계된다. Muff 등(1989), Aubeny 등(2005), Randolph와 White(2008)는 이러한 파이프라인의 매립을 이론적으로 접근했으며, Safebuck JIP와 DNV는 경험식을 고려하였다.

Matheson 등(2004)은 스네이크 레이(Snake Lay) 방법을 이용해 초기좌굴 위치를 계산하기 위한 이론식을 제안했으며, Guan 등(2007), Rundsga(2008), Liu 등(2012)은 스네이크 레이 방법을 최적화하기 위한 방법을 제안하였다. Bai와 Brunner(2009)는 이중 슬리퍼(Dual Sleeper) 방법의 성능을 검증하였으며, Anunes 등(2010)은 부유체의 의한 파이프라인의 좌굴 영향도를 살펴보았다.

또한, 최근에는 복합재료를 이용한 라이저(Riser) (Yoo 등, 2014)의 개발 및 적용이 활발히 되고 있으며, 향후에는 강재 파이프라인의 좌굴 방지를 위해 복합재료의 활용도가 증가될 전망이다.

본 논문에서는 파이프라인의 전체좌굴을 방지하기 위해 기존에 제시된 스네이크 레이, 슬리퍼, 부유모듈

방법을 수치해석 기법을 통해 각 방법의 상호 장단점을 비교하고자 한다.

2. 파이프라인 전체좌굴

2.1 파이프라인 변형 및 유효축력

파이프라인 설계 초기단계에서 유효축력 및 임계좌굴력을 계산함으로써 좌굴에 민감한 파이프라인의 위치를 예측할 수 있다. 파이프라인의 축력은 식 (1)과 같은 파이프라인의 변형이 해저면과의 마찰에 의해 구속될 때 발생하게 된다.

$$\epsilon_{total} = \epsilon_E + \epsilon_v + \epsilon_T - \epsilon_f - \epsilon_r \quad (1)$$

여기서, ϵ_{total} : 전체변형률

ϵ_E : 캡 효과에 의한 변형률

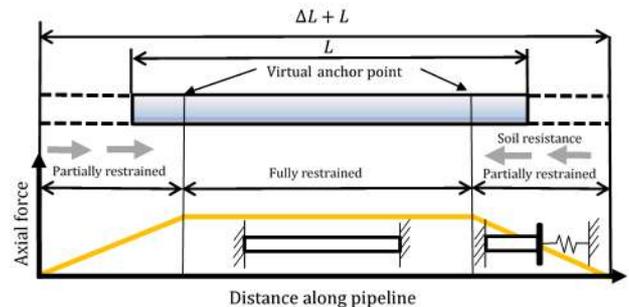
ϵ_v : 포아송 효과에 의한 변형률

ϵ_T : 온도에 의한 변형률

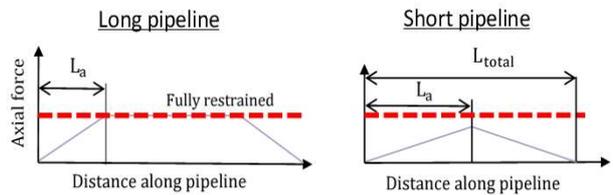
ϵ_f : 지반 이동에 의한 변형률

ϵ_r : 설치 이후 잔류인장력에 의한 변형률

파이프라인이 해저면의 마찰력에 의해 구속되는 길이를 가상앵커길이라고 한다. 파이프라인의 축력과 가상앵커길이와의 관계는 Fig. 2와 같으며, 파이프라인의 변형과 지반의 구속력에 따라 식 (2) 및 (3)과 같이 가상앵커길이를 계산 할 수 있다.



(a) Concept of Virtual Anchor Length



(b) Long and Short Pipelines

Fig. 2 Virtual Anchor Length and Axial Force along Pipeline

$$L_{a-long} = \frac{(\varepsilon_E + \varepsilon_v + \varepsilon_T - \varepsilon_r)AE}{\mu w_s} \quad (2)$$

$$L_{a-short} = \frac{L_{total}}{2} \quad (3)$$

여기서, L_{a-long} : 긴 파이프라인 가상앵커길이
 $L_{a-short}$: 짧은 파이프라인 가상앵커길이
 L_{total} : 파이프라인 길이
 A : 파이프라인 단면적
 E : 탄성계수
 μ : 지반 마찰계수
 w_s : 단위길이당 파이프라인 수중질량

파이프라인의 변형이 지반의 마찰력에 의해 구속된 영역에서의 유효축력은 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$S = H - \Delta p_i A_i (1 - 2\nu) - A_s \alpha \Delta T E \quad (4)$$

여기서, H : 잔류 설치 인장력
 Δp_i : 운영 전후 압력차
 A_i : 내부 단면적
 ν : 포아송비
 α : 온도팽창계수
 ΔT : 운영 전후 온도차

2.2 임계좌굴력

임계좌굴력은 Hobb(1984)에 의해 제안된 수정 오일러 좌굴식을 이용해 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$p_o = p + k_3 \mu w_s L \left[\left(1 + k_2 \frac{AE \mu w_s L^5}{(EI)^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (5)$$

여기서, p_0 : 좌굴이전 축력
 p : 좌굴이후 축력
 L : 좌굴길이
 k : 좌굴과 관계된 상수
 I : 관성모멘트

식 (5)에서 최소 좌굴이전 축력을 계산함으로써 임계 좌굴력을 구할 수 있다. 또한, 각 모드별 좌굴길이는 Fig. 3과 같다.

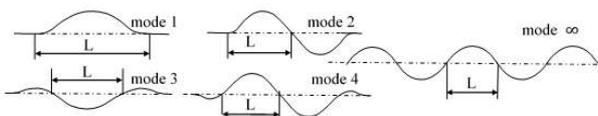


Fig. 3 Length of Buckle

3. 전체좌굴 제어 수치예제

3.1 전체좌굴 제어방법

본 논문에서는 Fig. 4와 같이 전체좌굴을 제어하는 방법으로 부유모듈, 슬리퍼, 스네이크 레이 3가지를 고려하였다.



Fig. 4 Global Buckling Control Methods

부유모듈은 가장 최근에 사용되는 방법으로서 2011년에 실제 적용되었다. 부유모듈의 개념은 필요한 부분에 파이프라인 무게를 감소시킴으로써 횡방향 구속력을 저감시키는 것이다. 그러나, 심해에서 많이 사용되는 PIP(Pipe in Pipe)와 같이 무게가 무거운 파이프라인의 경우 과도한 부유모듈이 필요한 단점이 있다.

슬리퍼는 수직방향으로 파이프라인의 결함을 유도해 횡방향 구속력을 감소시키는 장치이다. 그러나, 슬리퍼의 높이가 높을 경우 자유경간이 발생해 와류진동이 발생할 수 있는 단점이 있다.

스네이크 레이는 파이프라인 설치시 결함을 유도하기 때문에 앞서 설명한 다른 두 방법에 비해 설치비용이 증가할 수 있으며, 설치 반경이 적절하지 않을 경우 추가적인 조치가 필요하다.

3.2 설계과정 및 설계기준

DNV-RP-F110(DNV, 2007)에서 파이프라인의 좌굴은 평평한 해저면 위의 파이프라인, 평평하지 않은 해저면 위의 파이프라인, 매설된 파이프라인에 대해 설계기준 및 해석과정을 제시하고 있으며, 본 논문에서는 평평하지 않은 해저면 위의 파이프라인을 고려하였다. Fig. 5는 전체좌굴 설계과정을 나타낸 것이며, 파이프라인의 거동에 대한 각 설계기준은 Table 1과 같다.

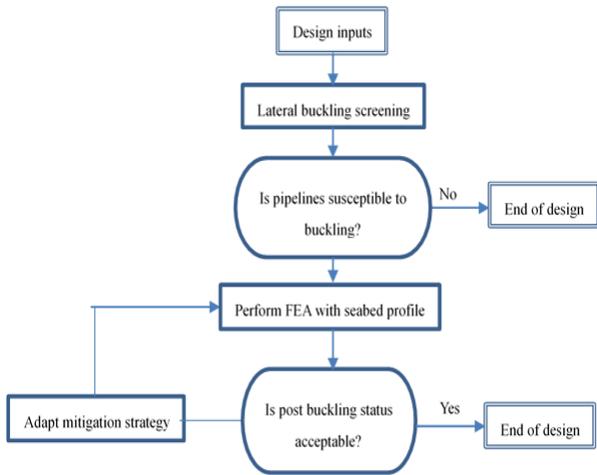


Fig. 5 Global Buckling Design Flow

Table 1. Required Pipe Integrity Checks (DNV, 2007)

Item	Design Code
Pressure Containment	DNV-OS-F101
Local Buckling	DNV-OS-F101
Axial	DNV-RP-F110
Fatigue	DNV-OS-F101
Fracture	DNV-OS-F101
Trawl Interface	DNV-OS-F111
Free Span	DNV-OS-F105

3.3 설계데이터

본 논문에서 고려된 파이프라인 및 콘크리트 코팅의 제원은 Table 2, 3과 같다.

Table 2. Pipeline Data

Parameter	Value
Outer Diameter(mm)	812.8
Wall Thickness(mm)	22.2
Internal Corrosion Allowance(mm)	3
External Corrosion Allowance(mm)	0.685
Field Joint Coating	FBE
FBE Density(kg/m ³)	1400
FBE Cutback Length(mm)	250
Minimum Product Density(kg/m ³)	78.1

Table 3. Concrete Coating Data

Parameter	Value
Thickness(mm)	95
Density(kg/m ³)	3044
Cutback Length(mm)	360

본 논문에서는 횡방향 좌굴해석을 위해 식 (6)과 같은 Ramberg-Osgood 응력-변형률 곡선을 이용하였다 (Kyriakides and Corona, 2007).

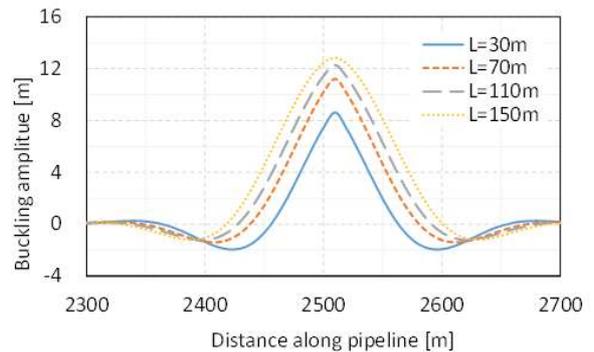
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \frac{3}{7} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{n-1} \right] \quad (6)$$

여기서, σ_0 , n : 항복응력 및 인장응력에 따른 변수

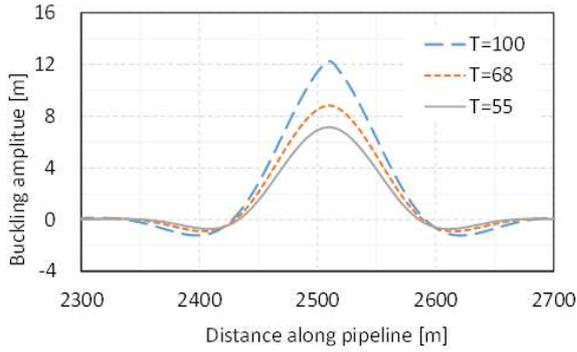
3.4 해석결과

3.4.1 단일 좌굴 발생시 제어방법 비교

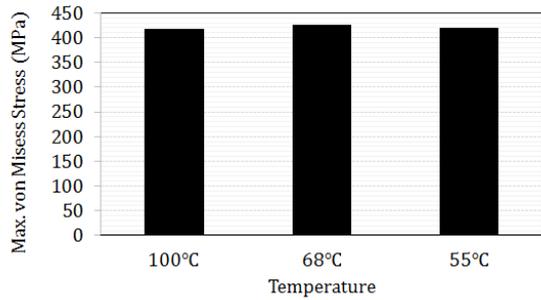
Fig. 6은 부유모듈을 전체좌굴 제어방법으로 사용했을 경우 해석결과를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)에서 보듯이 온도 및 부유모듈에 의해 감소된 파이프라인의 무게가 동일할 때 부유모듈 길이가 증가할수록 좌굴 진폭이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 6(b)에서 보듯이 동일한 조건에서 온도가 증가할수록 좌굴 진폭이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나, Fig. 6(c)에서 보듯이 온도변화에 따른 파이프라인의 응력변화는 크지 않은 것을 알 수 있다.



(a) Buckling Amplitude for Different Buoyancy Module Length (T=100°C, Reduced Pipeline Weight=80%)



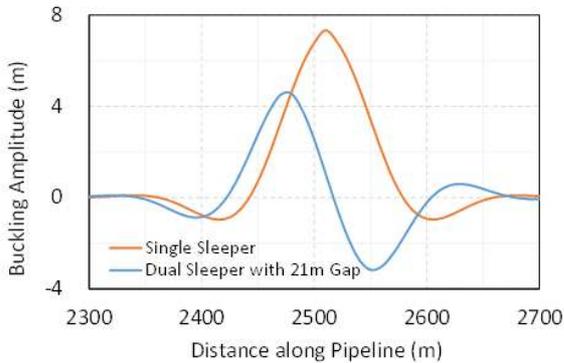
(b) Buckling Amplitude for Different Temperature (Buoyancy Module Length=110m, Reduced Pipeline Weight=80%)



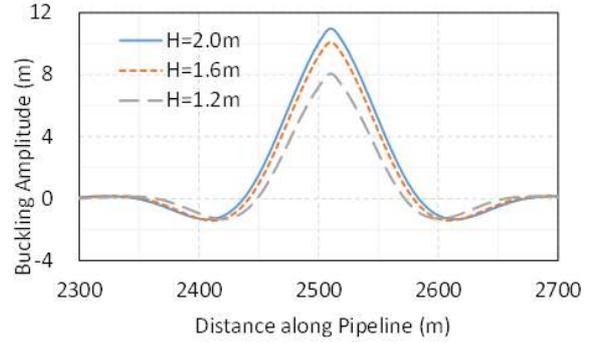
(c) Stress for Different Temperature (Buoyancy Module Length=70m, Reduced Pipeline Weight=80%)

Fig. 6 Single Buckling Analysis Results with Buoyancy Module

Fig. 7은 슬리퍼가 설치된 파이프라인의 좌굴해석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)에서 보듯이 슬리퍼를 일정한 간격(21m)을 두고 2개를 설치했을 경우가 1개를 설치했을 경우보다 좌굴진폭이 감소한 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 7(b)에서 보듯이 슬리퍼 높이가 증가할수록 좌굴진폭이 증가했다.



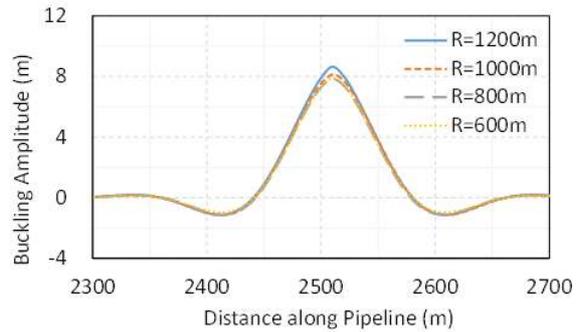
(a) Buckling Amplitude with Single and Dual Sleepers (Sleeper Height=1.8m, T=68°C)



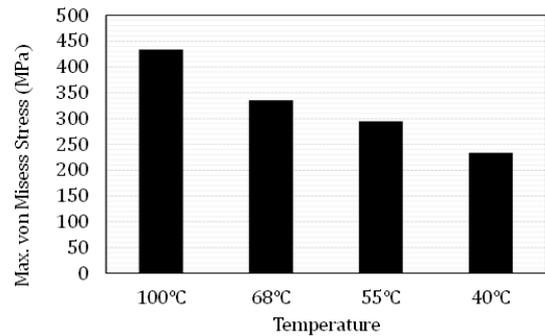
(b) Buckling Amplitude for Different Sleeper Height (T=100°C)

Fig. 7 Single Buckling Analysis Results with Sleeper

Fig. 8은 스네이크 레이 방법으로 설치시 파이프라인의 좌굴해석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)에서 동일한 오프셋 각도일 경우 반경에 따라 좌굴진폭이 큰 변화가 없음을 알 수 있으며, Fig. 8(b)와 같이 온도가 감소할수록 파이프라인의 응력이 감소하는 것을 알 수 있다.



(a) Buckling Amplitude for Different Arc Radius (Arc Radius=7.2 deg, T=100°C)



(b) Stress for Different Temperature (Arc Radius=7.2 deg, R=1200m)

Fig. 8 Single Buckling Analysis Results with Snake Lay

Fig. 9는 전체좌굴 제어방법에서 가장 작은 좌굴 후 파이프 응력을 나타낸 것이다. 이때 부유모듈은 파이

프라인 무게가 80% 감소, 부유모듈 길이 150m, 1개 슬리퍼는 높이 2m, 2개 슬리퍼는 높이 1.4m, 간격 21m, 스테이크 레이는 반경 1,200m 일때의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 슬리퍼를 2개 사용한 경우가 가장 작은 응력을 나타냈으며, 이 결과를 이용해 80km 길이의 파이프라인 좌굴해석을 수행하였다.

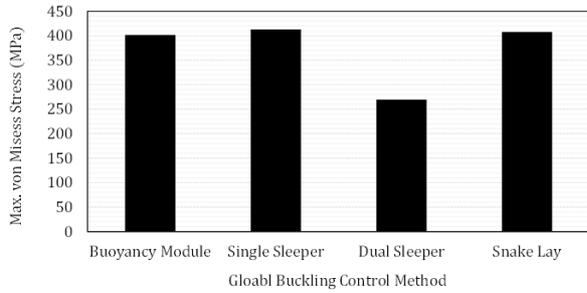
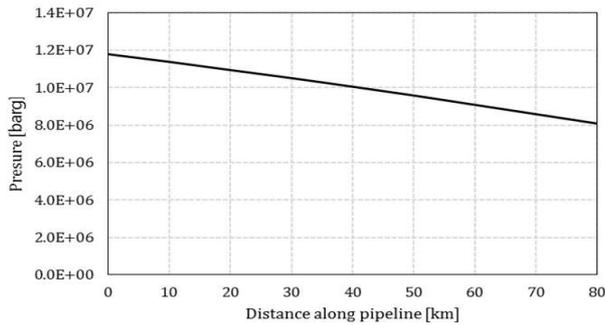


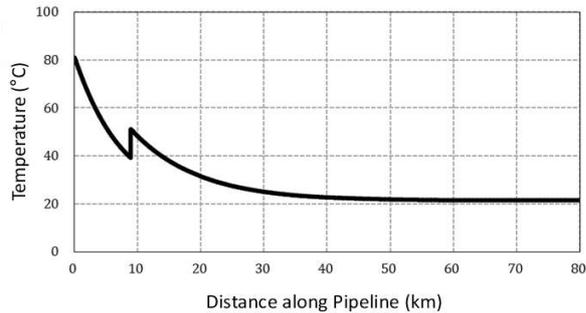
Fig. 9 Analytical Check for Susceptibility of Buckling

3.4.2 80km 파이프라인 전체좌굴 해석

80km 파이프라인 전체좌굴 해석에 사용된 압력 및 온도 형상은 Fig. 10과 같다.



(a) Pressure Profile



(b) Temperature Profile

Fig. 10 Pressure and Temperature Profile

Hobb의 법칙(Hobb, 1984)을 이용해 파이프라인의 좌굴 가능성을 검토할 결과 Fig. 11과 같이 초반 25km 구간에서 좌굴 가능성을 확인하였다. 따라서 이

후 유한요소 기법을 이용한 상세해석은 초반 25km 구간에 대해 수행하였다.

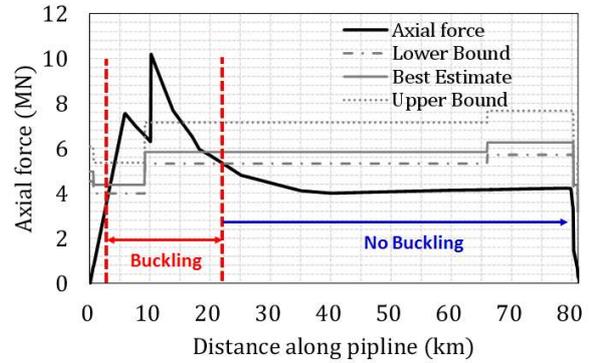
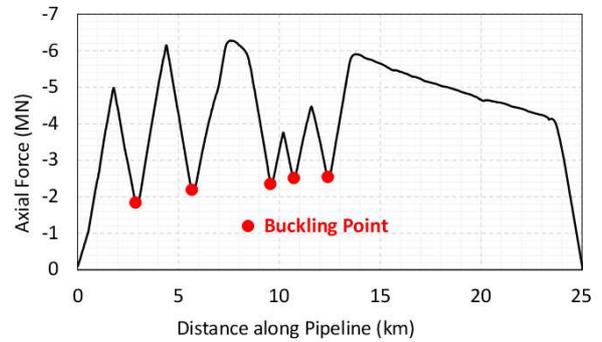
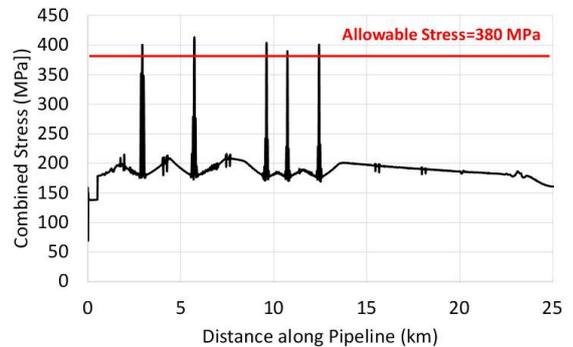


Fig. 11 Analytical Check for Susceptibility of Buckling

별도의 전체좌굴 제어장치가 설치되지 않은 경우 Fig. 12(a)와 같이 25km 구간에서 총 5개의 좌굴이 발생했으며, 응력검토 결과 Fig. 12(b)와 같이 파이프의 허용응력을 초과하였다. 따라서 전체좌굴을 제어하기 위해 높이 1.2m, 간격 21m로 총 12개의 슬리퍼를 설치하였다. 그 결과 Fig. 13(a)와 같이 12개의 좌굴이 발생했으며, 그에 따라 Fig. 13(b)와 같이 파이프라인 전체에서 허용응력을 만족하였다.

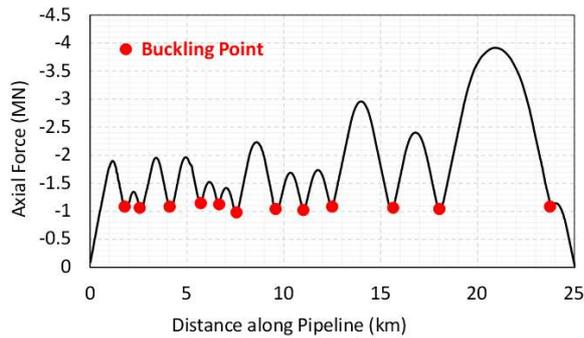


(a) Effective Axial Force

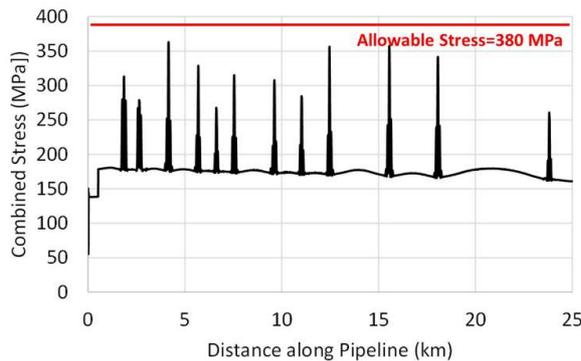


(b) Combined Stress

Fig. 12 Analysis Results for Uncontrolled Buckling



(a) Effective Axial Force



(b) Combined Stress

Fig. 13 Analysis Results for Controlled Buckling

4. 결론

본 논문에서는 해저 파이프라인의 전체좌굴을 제어하기 위해 사용되고 있는 부유모듈, 슬리퍼, 스네이크 레이 방법을 수치해석 기법을 통해 검토하였으며, 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 각 방법에서의 임계 좌굴력은 슬리퍼, 부유모듈, 스네이크 레이 방법 순으로 나타났다. 좌굴형상은 부유모듈과 슬리퍼는 설계변수에 따라 민감하였으나, 스네이크 레이 방법은 상대적으로 안정적인 형상을 보였다. 또한, 좌굴 후 응력은 슬리퍼를 일정한 간격으로 설치하는 이중 슬리퍼일 경우 가장 작게 나타났다. 따라서 좌굴 후 응력을 기준으로 했을 때 슬리퍼가 해저 파이프라인의 전체좌굴을 제어하는 방법으로 가장 효과적이었다.

(2) 슬리퍼를 설치한 평탄하지 않은 해저면에 설치된 파이프라인의 경우 제어하지 않은 경우에 비해 좌굴점이 증가해 좌굴 후 응력이 허용응력을 만족하는 결과를 보였다.

감사의 글

이 논문은 산업통상자원부가 주관하는 2013년 엔지니어링 전문인력양성사업 (과제번호: H2001-13-1001)의 지원받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사드립니다. 또한, 본 논문은 김구 연구원의 석사과정 논문 중 (GEM, POSTECH) 일부를 정리한 것임을 밝힙니다.

References

- Anunes, B., Solano, R., and Vaz, M. (2010), "Analytical Formulation of Distributed Buoyancy Sections to Control Lateral Buckling of Subsea Pipelines," *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Shanghai, China.
- API (2009), "Design, Construction, Operation and Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipelines (Limit State Design)," API-RP-1111, *American Petroleum Institute*, USA.
- Aubeny, C. P., Shi, H., and Murff, J. (2005), "Collapse Loads for a Cylinder Embedded in Trench in Cohesive Soil," *International Journal of Geomechanics*, 5, pp. 320-325.
- Bai, Q., Qi, X., and Brunner, M. (2009), "Global Buckle Control with Dual Sleepers in HP/HT Pipelines," *Proceedings of Offshore Technology Conference*, TX, USA.
- Baird, T., Drummond, T. R., Mathison, D., and Langseth, B. (1993), "High Pressure, High Temperature Well Logging, Perforating and Testing," *Schlumberger*, USA.
- DNV (2007), "Global Buckling of Submarine Pipelines," DNV-RP-F110, *Det Norske Veritas*, Norway.
- Guan, J., Hansen, H. F., and Nystrom, P. R. (2007), "Optimized Solutions to Control Lateral Buckling of Pipelines with Snake Lay," *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Trondheim, Norway.
- Hobb, R. (1984), "In-Services Buckling of Heated Pipelines," *Journal of Transportation Engineering*, 110(2), pp. 175-189.
- Kyriakides, S., and Corona, E. (2007), "Mechanics of Offshore Pipelines: Volume 1: Buckling and Collapse," Elsevier, USA.
- Liu, U., Li, X., and Zhou, J. (2012), "Post-buckling Studies on Snaked Lay Pipeline with New

- Shape,” *Journal of Information and Computational Science*, 9, pp. 3315-3324.
- Matheson, I., Carr, M., Peek, R., Saunders, P., and George, N. (2004), “Penguins Flowline Lateral Buckle Formation Analysis and Verification,” *Proceeding of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vancouver, Canada.
- Murff, J., Wagner, D., and Randolph, M. (1989), “Pipe Penetration in Cohesive Soil,” *Geotechnique*, 39, pp. 213-29.
- Palmer, A. (1974), “Lateral Buckling of Axially Constrained Pipes,” *Journal of Petroleum Technology*, 26, pp. 1283-1284.
- Randolph, M., and White, D. (2008), “Pipeline Embedment in Deepwater: Processes and Quantitate Assessment,” *Proceedings of Offshore Technology Conference*, TX, USA.
- Rundsag, J. (2008), “Optimized Snaked Lay Geometry,” *Proceedings of the International Offshore and Ploar Engineering Conference*, Vancouver, Canada.
- Safebuck (2015). <http://www.safebuck.com/>
- Yoo Y., Jae H. M., Park, S. Y., and Choi, S. H. (2014), “Structural Integrity Monitoring of the Marine Riser with Composite Structure,” *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 5, No. 4, pp. 44-51. (in Korean).