

해저면에 설치된 가스관의 외부충격에 의한 좌굴 안전성 검토

박주신* · 이명수**†

* 삼성중공업 조선해양연구소 프로, ** 조선대학교 선박해양공학과 교수

A Study on the Buckling Stability due to Lateral Impact of Gas Pipe
Installed on the Sea-bed

Joo-Shin Park* · Myung-Su Yi**†

* Principal engineer, Ship and Offshore Research Institutes, Samsung heavy industries, Geoje 53261, Korea

** Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

요 약 : 해저 석유와 가스 탐사가 점점 더 깊은 수심으로 진행되고 있으며, 해저 파이프라인은 고압 및 고온 조건에서 작동하는 것이 일반적이다. 온도 및 압력 차이로 인하여 파이프 축 방향 힘이 축적되는 현상이 있다. 이러한 현상은 파이프라인을 구속하는 해저면 효과 때문에 파이프라인은 횡 좌굴이 발생하게 된다. 온도가 증가하는 경우 축 방향의 압축 하중이 가해지며 이 하중이 임계 수준에 도달하면 파이프가 수직방향으로 움직이게 된다. 또는 파이프라인의 구조적 안전성을 위태롭게 할 수 있는 횡 방향 좌굴이 발생하는 상황에서, 작동 중 파이프라인의 구조적 안전함을 보장하기 위해 파이프라인의 상세 구조 강도평가가 수행되어야 한다. 본 연구에서는 해저면의 마찰 효과 및 재료의 열 수축/팽창을 고려한 비선형 구조해석을 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 활용하여 검토하였으며, 외부충격에 의한 횡 방향 좌굴 안전성을 분석하였다. 본 연구의 결과를 통하여 수치 해석적 단순화된 분석 모델을 통하여 해저면의 효과를 고려한 조건에서의 실제 파이프라인의 붕괴 조건을 예측할 수 있다.

핵심용어 : 파이프라인, 수직형 좌굴, 토양 마찰 효과, 횡 방향 좌굴, 비선형구조해석

Abstract : Subsea oil and gas exploration is increasingly moving into deeper water depths, and typically, subsea pipelines operate under high pressure and temperature conditions. Owing to the difference in these components, the axial force in the pipe is accumulated. When a pipeline is operated at a high internal pressure and temperature, it will attempt to expand and contract for differential temperature changes. Typically, the line is not free to move because of the plane strain constraints in the longitudinal direction and soil friction effects. For a positive differential temperature, it will be subjected to an axial compressive load, and when this load reaches a certain critical value, the pipe may experience vertical (upheaval buckling) or lateral (snaking buckling) movements that can jeopardize the structural integrity of the pipeline. In these circumstances, the pipeline behavior should be evaluated to ensure the pipeline structural integrity during operation in those demanding loading conditions. Performing this analysis, the correct mitigation measures for thermal buckling can be considered either by accepting bar buckling but preventing the development of excessive bending moment or by preventing any occurrence of bending.

Key Words : Pipeline, Upheaval buckling, Soil friction effect, Lateral buckling, Nonlinear structural analysis

1. 서 론

해양 산업에서 활용되고 있는 심해 파이프라인은 기름과 가스를 생산 시설에서 육상 터미널로 운반하는데 널리 사용되고 있다.

해양 파이프라인 시장은 2022년부터 2028년까지 시장 규모 115억 달러에서 158억 달러로 연평균 성장률(CAGR) 6.54%를 기록할 것으로 예상된다. 특히 러시아-우크라이나 사태로 인하여 유럽의 자원 독립화의 하나로 LNG 전환의 가속화 현상도 파이프라인 시장의 성장세를 견인할 전망이다. 해양 자원 개발 시 유정 및 가스전의 수심에 따라서 다양한 설비가 운용되고 있으며, 파이프라인은 Fig. 1에서 나타내는 것과

* First Author : scv7076@nate.com, 055-630-9613

† Corresponding Author : true413@chosun.ac.kr, 062-230-7182

같이, 생산된 원유 및 가스를 육상으로 운송하는 통로 기능을 하고 있다.



Fig. 1. Offshore platforms and subsea pipelines according to water depth (www.oilstates.com).

파이프라인은 해저면의 안정성 문제, 어업 활동으로 인한 장비와의 충돌 위험 및 낙하물에 의한 손상 원인으로 인해 해저 하부에 준설하여 설치할 수가 있다. 그러나, 비싼 설치비와 긴 공사 기간으로 인하여, 해저면 위에 놓고 그 위에 움직임을 제어할 수 있는 장치를 설치하는 경우가 많다. 파이프라인을 통해 이송이 시작되면 파이프 내부 온도와 압력이 상승하며, 온도가 상승하면 강재의 열팽창이 반복적으로 발생한다. 파이프라인은 해저면 마찰로 인해 배관 경로를 따라 다양하게 굽곡이 발생하며, 온도 상승은 파이프의 축방향 압축력을 발생시키며, 파이프의 국부적인 곡률 변화와 상호 작용하는 종 방향의 압축력에 대한 응답으로 인하여, 횡 좌굴 거동이 발생할 가능성이 존재한다. 파이프라인은 자유 스펠 조건에서는 아래쪽으로 구부러지며, 내부 압력 상승에 의해서는 위쪽으로 변형하는 특성이 있다. 파이프라인의 수직 좌굴(Uphoaval buckling)은 종 방향 압축력이 지배적인 인자이며, 파이프라인의 수직 방향으로 변형이 발생한다. 왜냐하면, 이것이 최소한의 저항의 길이기 때문이다. 좌굴에 의해 파이프가 해저에 노출되면 기능상 심각한 문제가 발생한다.

논문에서는 해저면 위에 설치된 파이프라인에 어업 활동에 의한 외부 충격하중에 의한 횡 좌굴 현상에 대해, 해저면과 파이프라인의 상호 작용 효과를 비선형 수치해석을 적용하여 검토하였다. 해저면과 실제 마찰조건을 구현하기 위하여 비선형 접촉요소를 고려하였다. 지금까지의 파이프라인 설계는 온도변화, 외부 충격하중을 기본으로 하여 다소 높은 안전계수를 도입한 허용응력 설계를 수행하고 있어서,

실제 운용되는 조건을 제대로 반영하지 못하고 있다. 이러한 문제들은 안전성의 미확보로 인한 환경오염 및 추가 대응 전략 수립으로 전개될 경우의 공정과 추가 예산 수립이 발생하게 된다. 또한, 전체 프로젝트의 물량증가가 크게 발생하게 되어 설치비 증가를 초래한다. 이러한 특성치를 포함하는 구조에 대한 설계 및 구조 안전성 평가에 관련하여, 상세 구조해석방법 도입을 통하여, 신뢰성 평가가 필요한 시점이다. 본 논문에서는 구조 강도평가 시 참고할 수 있는 해석절차 및 방법을 소개하였다. 이와 관련된 기존의 선행 연구는 아래와 같이 요약하였다.

Zhu et al.(2015)는 열 하중과 마찰 저항과의 관계에서 해저 파이프라인의 좌굴 거동을 수치 해석적 방법을 이용하여 연구하였다. 이를 통하여, 구조적 모델에서 열응력과 변형에 대한 구성관계식을 도출하였다. 이 식은 파이프라인에서 국부좌굴 거동에 영향을 미치는 인자들의 민감도가 포함되어 있다. 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여, 마찰 및 전단 변형 효과에 대한 시리즈해석을 수행하였고, 구성관계식의 결과와 잘 일치함을 확인하였다.

Wang et al.(2017a)는 횡 하중에 의하여 발생하는 좌굴 현상을 제어하기 위하여 Sleeper가 제안한 방법을 적용하였다. 횡 방향 좌굴 거동에 대한 주요 인자 여섯 가지를 선정하고, 수치해석을 통하여 분석하였다. 좌굴 변위 및 좌굴응력은 유전자알고리즘 프로그래밍을 통하여 계산하며, 파이프라인의 압축응력에 의한 좌굴 거동을 평가하는데 높은 정확도를 갖고 있음을 확인하였다.

Chee et al.(2018)은 고압 및 고온 조건인 파이프라인에서 주로 발생하는 파손 모드인 횡 방향 좌굴 현상에 관한 기존의 연구 결과를 분석하였다. 기존 해양 파이프라인 설계 시, 횡 방향 좌굴을 방지하기 위하여 고가의 특수 해저 구조물을 사용한 것에 비하여, 본 연구에서 제안하는 설치 전에 파이프라인의 특성을 고려하여, 파이프라인을 지속해서 변형시키는 새로운 방법을 제안하였다. 여러 가지 검증방법을 통하여, 새롭게 제안된 방법의 건전성을 검증하였다.

Wang et al.(2017b)은 해저면에 묻히지 않는 파이프라인의 횡 방향 좌굴을 제어하려는 분석방법을 개발하였다. 본 연구에서는 파이프 간 서로 다른 지점 반력 및 해저면의 저항 정도에 따른 영향에 의해, 좌굴변형 및 최대 굽힘 모멘트 분포가 달라짐을 확인하였다. 따라서, 파이프 간 반력 지점을 짧고, 일관되게 유지하고, 횡 방향 토질 저항을 줄이는 방법을 제안하였다. 개발된 해석방법은 기존 사용 유한요소해석 프로그램 결과와도 잘 일치함을 확인하였다.

Sharifi et al.(2019)는 South Pars Gas Field에 설치할 파이프라인의 횡 좌굴에 대한 구조 안전성을 평가하였다. 연구에서

는 해저 파이프라인의 횡 좌굴을 발생하는 주요 매개변수의 신뢰도 지수의 변화를 연구하고, 정량화하기 위한 신뢰도 분석을 수행하였다. 기하학적 매개변수의 불확실성을 고려하기 위하여 고장 확률 및 신뢰도 지수를 도입하였다. 신뢰성 지수를 계산하는 3가지 방법(FOA, SORM and Monte-Carlo)에 대한 비교 평가를 하였고, SORM 방법이 가장 낮은 신뢰성 지수를 FORM이 가장 큰 값을 나타냈다. 연구 결과를 통하여 파이프라인은 횡 좌굴, 부식 조건을 고려하더라도 설치 후 30년 동안은 구조 안전성에 문제가 발생하지 않음을 확인하였다.

Vosooghi et al.(2021)은 해저 파이프라인의 설치 시 선박의 움직임에 의하여 최초 설치 경로에서 이탈하는 경우 파이프라인의 좌굴 영향성을 검토하였다. 파이프라인의 직선도에 따른 임계 좌굴하중의 범위를 연구하기 위한 엔지니어링 절차와 방법을 제공하기 위해서 해저면과 파이프의 상호 작용을 검토하는 해석 모델 기법을 제시하기 위하여 기존 상용 프로그램에서 제공하지 않은 간단 모델을 개발하였다. 개발된 서브프로그램으로 횡 좌굴 저항에 관여하는 매개변수를 자유롭게 구현할 수 있었으며, 실제적인 파이프라인 좌굴 거동을 표현할 수 있음을 확인하였다.

지금까지 해저 파이프라인의 좌굴 거동에 관한 연구는 국외 결과가 대부분을 차지하고 있다. 본 연구에서는 파이프라인의 횡 방향 좌굴의 기본적인 고온, 고압 상태를 구현한 상태에서 추가로 어업 활동 시 사용되는 도구에 의한 추가적인 충격하중을 가정하였다. 해저면에 매설되지 않는 파이프라인에서는 가장 보수적인 하중 조건 조합이 될 수 있으며, 해저면의 저항력도 수치 모델링에 반영하여 종합적인 검토가 될 수 있도록 구성하였다. 본 연구를 통하여 도출된 주요 결과는 향후 매립되지 않는 해저 파이프라인의 구조설계 및 구조 강도평가에 관련한 기초적인 자료로 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

2. 해저 파이프 배치 및 설계

2.1 파이프라인 횡 방향 좌굴

Fig. 2에서는 해저에 매립되지 않는 파이프라인에서 발생한 횡 방향 좌굴에 대해서 나타내고 있다. 이 현상은 고온 및 고압 운용 조건에서 발생하게 되는 응력 및 변형과 해저 토질 저항력이 조합되어서 나타나며, 횡 방향 변형이 증가할수록 길이 방향 압축 하중은 줄어드는 특징을 나타낸다. 이러한 현상이 발생할 경우, 파이프라인의 길이 방향 접합부위에서 과도한 응력집중으로 인한 크랙 및 좌굴 손상이 주로 발생한다.

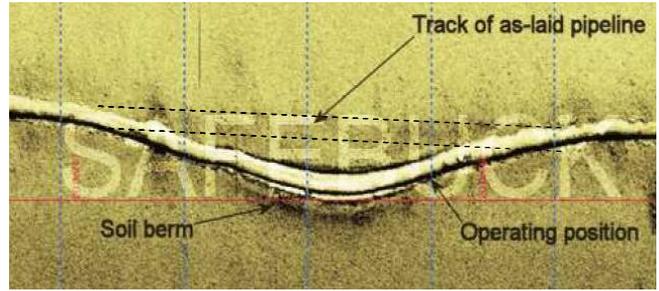


Fig. 2. Deformed shape against lateral buckling of the subsea pipeline (www.safebuck.com).

2.2 파이프라인 기본 제원 및 설계

파이프라인의 기초설계를 위해서는 국제 규정 혹은 선급에서 제시하는 가이드에 의한 파이프라인의 최소 두께, 파이프라인 재질 결정, 피복량, 해저면의 안전성, 최대 허용 자유 경간(Free-span)에 대한 검토가 수행된다. 연구에서는 노르웨이 선급(DNV)에서 제시하고 있는 기초설계 사항을 쉽게 계산할 수 있도록 사용자 편의의 프로그램을 만들어서 활용하였다. 주요 입력창은 Table 1의 정보를 이용하였고, 프로그램의 입력창은 Fig. 3에서 나타내고 있고, 계산된 결과는 Fig. 4와 같다. 기본 변수들이 이론식의 허용기준을 만족하지 못하면 반복 계산을 하여, 만족한 범위를 찾아야 한다. 기본적으로 설계의 근간은 한계상태설계법을 채택하고 있다. 한계상태설계는 구조물이 외력에 저항하여 최대도 유지할 수 있는 구조물의 성능이다. 파이프라인에 대한 횡 좌굴 효과에 일반적으로 적용할 수 있는 한계 상태는(DNV-OS-F101, 2012) 다음과 같다.

- 좌굴 한계 상태 : 파이프라인을 따라 유효 축 방향 압축력에 의해 발생하는 길이 방향 압축 변형률은 변위 제어되므로 (DNV-OS-F101, 2012) 요구사항에 따르는 국부좌굴 파손을 평가한다.

- 피로 한계 상태 : 고온 및 고압 파이프라인은 주로 운용 사이클 및 파이프라인 설치에서 저주파-고진폭 영향을 지배적으로 받을 때의 피로 수명을 검토한다.

- 용접 파괴 : 관련 표준에서 지시한 범위 내에서 감지되지 않은 균열을 정확하게 검사하기 위해 파괴 분석을 수행한다.

- 저인망 기어 상호 작용 : 좌굴 단면에 대한 저인망 어구의 영향은 환경 영향, 작업 영역 및 수심에 따라 고려되며, 저인망 어구의 형상도 관련이 있다. 그러나, 현재까지는 형상에 기인한 하중의 차이는 구분하지 않는다.

해저면에 설치된 가스관의 외부충격에 의한 좌굴 안전성 검토

Table 1. Design parameters and properties of the pipeline

Parameter	Unit	Value
Outside diameter	mm	700
Wall thickness	mm	26
Corrosion allowance	mm	3
Material grade	-	5L X70
Steel density	kg/m ³	7850
Yield strength	MPa	485
Tensile strength	MPa	570
Poisson ratio	-	0.3
Young's modulus (E)	MPa	206,000
Thermal expansion coefficient (α)	°C ⁻¹	0.000117
Thermal de-rating factor	MPa	Ref. DNV-F101
Flowline length	km	2
Pipe submerged weight	kN/m	2.54
Minimum radius of curvature in straight line	mm	1,000
Operating temperature	°C	95
Ambient temperature	°C	5
Operating pressure	MPa	15
Water depth	m	750

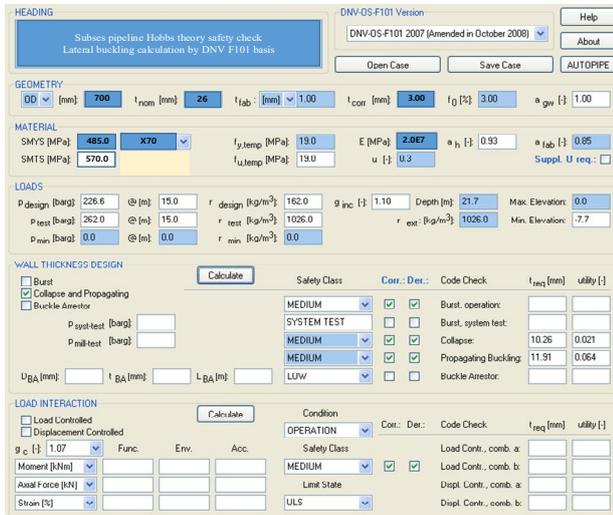


Fig. 3. Pipeline design in-house program based on recommended practice both DNV F101 and F110.

파이프라인 내 작용하는 압력은 가장 널리 인용되고 있는 미국기계학회(ASME, 2012)의 식(2.1)을 이용하여 계산하였으며, 15MPa를 사용하였다. 대구경 파이프라인은 1면 용접 라인이 생성되며, 압력 계산 시, 용접부에 대한 경험계수를 0.8에서 0.5 사이에서 결정해야 한다. 본 연구에서는 보수적인 엔지니어링 시 사용하고 있는 0.57을 결정하였다.

$$P = (2 \times S \times t / D) \times F \times E \times T \quad (2.1)$$

where, *S* is the SMYS value, *T* is temperature derating factor (0.92, 450/485), *F* is the basic design factor (0.8-normal condition), *E* is weld joint factor (0.57-worst condition).

기본적인 해저 파이프라인의 설계에 대한 최소 요구조건을 확인하고, 횡 좌굴 조건에서의 파이프라인의 구조 건전성을 확인한다. 이것은 허용 가능한 가상 앵커 간격을 얻기 위한 주요 기준인 국부좌굴 검사(변위 제어 기준)를 사용하여 수행되며, Fig. 3의 결과물이기도 하다.

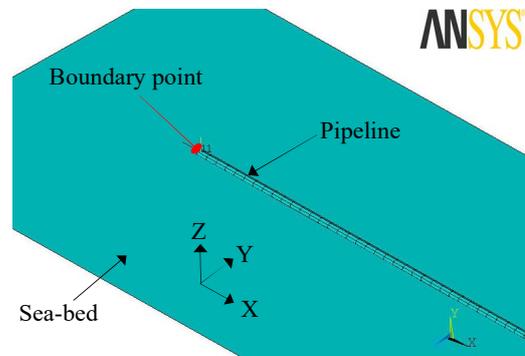
Prepared:	Sign:	Verified:	Design:	Sign:
RELEVANT INPUT PARAMETERS:				
Nominal outer steel diameter:	OD	Collapse	700 mm	Prop. Buckling
Nominal steel wall thickness:	t _{nom}		26.0 mm	
Fabrication tolerance:	t _{fab}		1.00 mm	
Corrosion allowance:	t _{cor}		0.00 mm	
Out-of-roundness:	e _o		3.00 %	
Young's modulus:	E		2.070E+05 MPa	
Poisson's ratio:	ν		0.30	
Specified minimum yield stress:	SMYS		485 MPa	
Derating in yield stress due to temperature:	f _{c, temp}		19.0 MPa	
Fabrication factor:	φ _{fab}		0.85	
Material strength factor:	φ _M		0.96	
Minimum internal pressure at reference level:	P _{int, ref}		0.00 barg	
Reference level for minimum internal pressure:	Z _{int, ref}		0.0 m	
Minimum density of internal fluid:	ρ _{int, min}		0.0 kg/m ³	
Depth:	d		21.7 m	
Density of external fluid:	ρ _{ext}		1026.0 kg/m ³	
Safety Class:			MEDIUM	MEDIUM
Corroded wall thickness:			YES	YES
Derated material properties:			Collapse	Prop. Buckling
INTERMEDIATE RESULTS:				
Characteristic yield stress:	f _c		259.8 MPa	259.8 MPa
Steel wall thickness used in code check:	t ₁ , t ₂		16.80 mm	17.80 mm
Elastic collapse pressure:	P _e		503.1 barg	NA
Plastic collapse pressure:	P _p		212.0 barg	NA
Characteristic collapse pressure:	P _c		139.3 barg	NA
Material resistance factor:	γ _M		1.15	1.15
Safety class resistance factor:	γ _{SC}		1.14	1.14
External pressure:	P _e		2.2 barg	2.2 barg
Local minimum internal pressure:	P _{int, loc}		0.0 barg	NA
SYSTEM COLLAPSE AND PROPAGATING BUCKLING:				
			Collapse	Prop. Buckling
			0.02 OK	0.06 OK
Minimum required nominal wall thickness:				
			10.26 mm	11.91 mm

Fig. 4. Results of the structural checks of pipeline based on DNV-OS-F101 and DNV-RP-F110.

3. 유한요소해석 및 고찰

3.1 모델링 및 경계, 하중 조건

본 연구에서는 유한요소법(Finite Element Method)을 근간으로 하여 공학용 해석이 가능한 상용프로그램인 ANSYS V.19를 이용하였다.



(a) arrangement of the FE-model

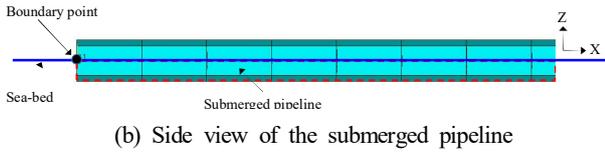


Fig. 5. FE-modeling for sea-bed and pipeline and boundary point.

파이프라인은 탄성, 초탄성, 소성, 크리프 및 기타 비선형 재료 모델의 비선형 모델링을 지원하는 Pipe288 요소를 사용하였다(ANSYS, 2016). 이 요소는 3차원의 2개의 노드를 갖는 파이프해석 전용 요소이다. 각 노드(Node)에서 6개의 자유도를 갖는다.(X, Y, Z 및 X, Y, Z 방향에 대한 회전). 실제로 해저에 설치된 파이프라인은 고르지 않은 해저, 설치 중 바지선 움직임 또는 어구 활동으로 인해 발생할 수 있는 불안정성이 항상 존재한다. 경계 조건은 총 길이 2km 파이프라인의 양 끝단은 고정 조건으로 가정하고, 파이프라인이 토질에 잠긴 무게는 측면 및 축 방향 이동에 저항하는 마찰력으로 작용하기 위해 모든 노드에 반영하였다. 해저면 모델링은 TARGE 170 요소를 사용하여 Z 방향을 따라 적용하였다. 이 요소는 3차원 노드와 접촉요소를 표현하는 데 사용되며, QUAD 형상으로 Fig. 5와 같이 표현하였다. 파이프라인의 토질에 잠긴 무게는 개별 파이프 요소에 자체 무게를 포함한다. 해저면과 파이프라인의 접점은 CONTA175를 사용하여 접촉조건을 부여하였다.

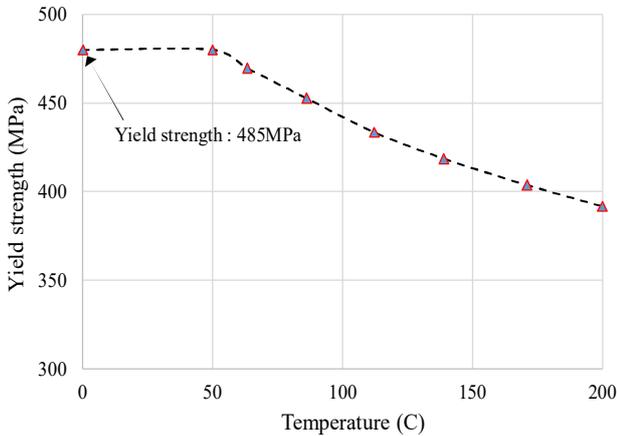


Fig. 6. Material property of the pipeline according to change of temperature (DET NORSKE VERITAS, 2012).

이 요소는 길이 방향과 폭 방향의 마찰계수를 모두 표현 가능하며, 폭 방향으로 표면 접촉을 생성하였다. 탄소강 파이프는 콘크리트 대비 강도와 강성이 우수한 재료로서 내진, 내구성 측면에서 우수한 성능을 갖고 있지만, 열전도가 높아 주변 온도가 상승함에 따라 구조의 강성이 감소하는

현상을 필수적으로 고려해야 한다. X70 재료의 응력-변형률 특성을 기반으로 온도에 따른 항복 강도의 감소 변화를 Fig. 6에 표현하고 있다. 계산된 온도 조건을 기반으로 하여 감소한 재료 속성이 구조 강도해석 시 반영된다.

3.2 검토 절차

ANSYS에서 2 km 파이프라인모델의 횡 좌굴에 대한 구조 안전성을 확인하기 위하여, 파이프라인 설치 및 운영이 수행되는 방식과 같은 조건을 구현하였다. 가장 먼저, 파이프라인 가동에 적합한 요소를 선택한 후 해석 모델링을 끝낸다. 해석면의 모델링 후 파이프라인을 정 중앙에 배치를 완료한다. 파이프라인의 양 끝단에 경계 조건을 부여하고, 해저면에 잠긴 50%의 면적에 대한 중량을 각 노드에 적용한다. 실제 결함이 없는 완벽한 파이프라인은 횡 좌굴이 발생하지 않기 때문에, 임의 하중을 파이프라인의 정 중앙에 적용하여 가상의 처짐을 유발하며, Fig. 7과 같이 적용하였다.

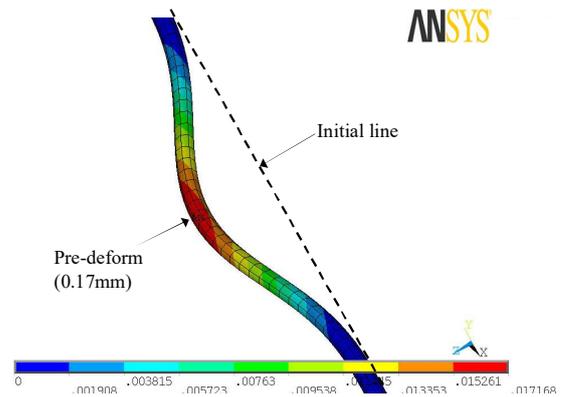


Fig. 7. Pre-deformation at the middle of the pipe line.

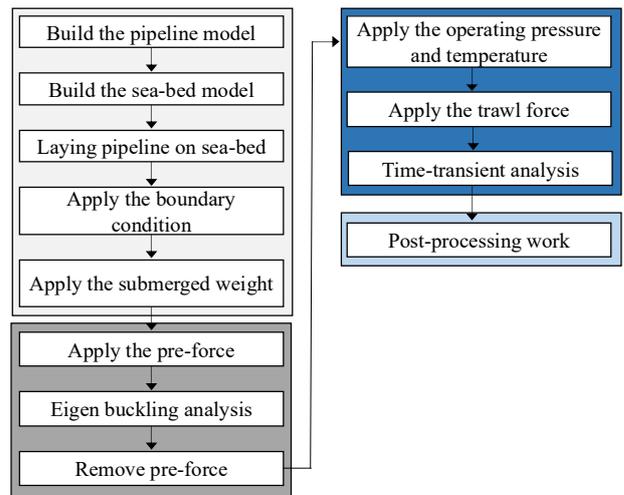


Fig. 8. Analysis flow-chart as a combination pre-processing, solving and post-processing works.

해저면에 설치된 가스관의 외부충격에 의한 좌굴 안전성 검토

이는 비선형 좌굴해석을 하는데 필수적인 항목이며, 본 해석에서는 임의 하중을 제거한다. 비선형 해석에 필요한 온도 하중, 내부 압력 하중, 저인망 하중을 입력한 후, 시간 이력에 따른 증분 해석을 하는 과정으로 진행하며, Fig. 8의 절차와 같다.

앞서 언급된 이론식에 의한 설계 결과에 대해서, 유한 요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 기존 파이프라인의 토양-파이프라인 상호 작용을 모델링에 구현하고, 시간 변화에 따른 비선형 유한요소해석으로 검증한다. 횡 좌굴에 대한 수치해석은 초기 결함이 없는 파이프로 가정하며, 유체역학적 힘(항력, 양력 및 관성)의 효과는 고려하지 않았다. 온도 스펙트럼은 파이프라인을 따라 기하급수적으로 분포한다고 가정하였으며, 파이프라인의 기본 사양은 DNV-RP-F110(DNV, 2007)의 기준에 만족한다. 저인망 어구에 의한 집중하중을 계산하기 위하여 참고문헌(Taghizadeh Edmollai and Edalat, 2017)의 정보를 참고하였으며, 주요 제원은 Table 2와 같다. 위 참고문헌에서는 OrcaFlex 프로그램을 이용하여 해저면과 파이프를 모델링 한 후 자유스팬(Free-span)의 높이 3가지와 길이 3가지를 조합하여 수치해석을 통하여 총 3가지 하중 유형을 제안하였으며, Table 3과 같다. 본 연구에서는 가장 보수적인 하중 시나리오를 구성하기 위하여 제안된 값중 가장 큰 187.1 kN을 사용하였다.

Table 2. Polyvalent trawl gear data

Parameter	Unit	Value
Trawl board steel mass	kg	4,000
Trawl size (length*height)	m	4.5*3.5
Trawl velocity	m/sec	2.8
Warp line length	m	900
Warp line diameter	mm	38
Load effect factor		1.1
Condition load effect factor		1.07

Table 3. Pull-over force calculated by DNV-RP-F111 (DNV, 2014) according to span gaps

Span gap(m)	F[kN]	wave period(sec)
0	48.6	0.98
1	133.7	2.7
2	187.1	3.7

이전에 언급된 이론식에 의한 임계 좌굴응력 계산은 파이프라인의 초기 불완전성과 좌굴 후 거동을 평가하는 것이 불가능하다. 따라서 초기 불완전성이 횡 좌굴에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 비선형 유한요소법을 통한 상세 검토가 필요하다.

비선형 해석에서는 재료 모델링, 해저면 모델링, 파이프-토양 상호 작용의 비선형성, 초기 불완전성 그리고 온도 이력 경향을 동시에 고려할 수 있다.

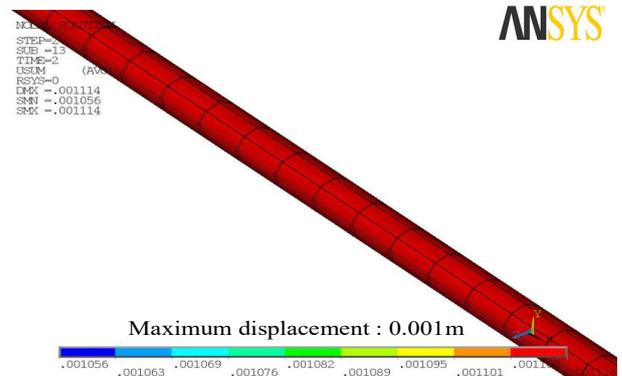


Fig. 9. Maximum displacement of the pipeline under isolated operating condition (pressure+temperature).

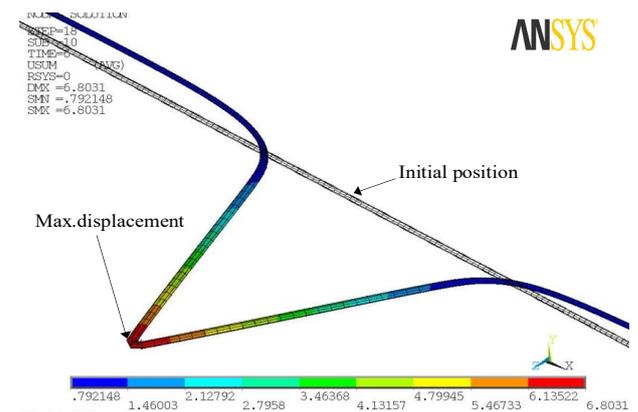


Fig. 10. Maximum displacement of the pipeline under combined load condition (pressure+temperature+trawl load).

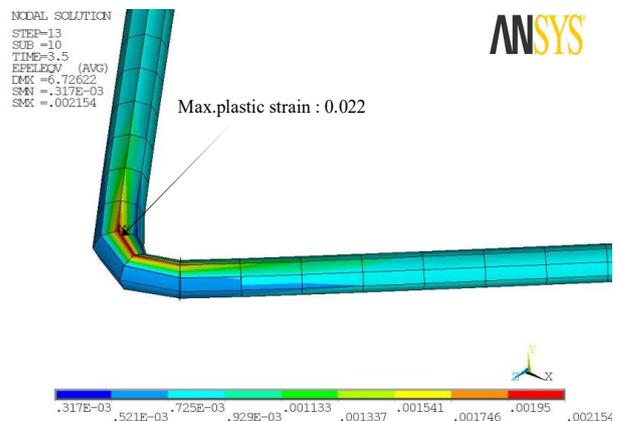


Fig. 11. Maximum plastic strain of the pipeline under combined load condition (pressure+temperature+trawl load).

유한 요소해석은 시간 단계(과도 해석)에 대해 증분 하중을 적용하여 반복적인 뉴턴 랍슨(Newton-raphson) 증분 방법을 사용합니다. 이것은 하중 및 절점 변수에 의해 정의된 평형 경로를 찾을 때 주로 사용된다.

관내 유동에 의한 작용압력만을 적용하였을 때의 최대 변위는 1mm로서 하중 조건과 비교하면 충분히 안전한 설계가 되었음을 Fig. 9에 나타내고 있다. 내부 유동 압력, 온도변화 그리고 저인망 어구의 집중하중 작용을 고려한 조건에서의 최대 변위는 6,803mm로 대변형이 발생하며, Fig. 10과 같다. 변형을 발생시키는 가장 주요한 하중 성분은 저인망 어구의 충격하중이다. X70 파이프 재료의 허용 소성 변위는 25%이며, 파이프 용접 라인에 국부적으로 최대 22%가 발생하나, 허용기준은 하며, Fig. 11에서 나타내고 있다. 가장 보수적인 조합이 동시에 발생한다고 고려하여도 현재 설계안은 안전함이 검증되었다.

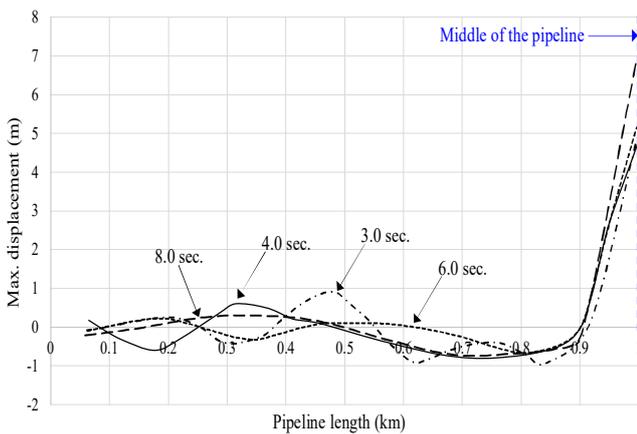


Fig. 12. A comparison of the lateral displacement according to time step from 3sec. to 8sec. under combined load condition.

하중작용 시간을 3초부터 8초까지의 범위에서 파이프라인 길이별 횡 방향 변위 결과를 Fig. 12에 비교하고 있다. 중앙부에서 최대 변위가 발생하며, 결과값은 최대 2,000mm까지 차이가 발생한다. 작용시간이 길어질수록 중앙부에서 멀어지는 구간에서 긴 주기의 사인파(Sine wave)가 형성되고, 시간이 짧을수록 반대의 현상이 발생한다. 만약 중앙부에 초기 결함이 없고, 저인망 어구의 충격이 없다면 길이 방향으로 규칙적인 진폭을 갖는 변형이 발생했을 것이다. 실제 파이프 내 유동 압력을 제어하기 위하여 밸브 셋다운과 냉각을 반복하는데 이때 불규칙한 시간으로 관리하게 되면 파이프라인의 횡 변위는 아주 복잡하게 발생하게 되어 해저면의 저항을 크게 받게 될 것이다. 이때 예상치 못한 횡 좌굴은 발생할 가능성이 커진다.

4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 파이프라인의 횡 방향 좌굴의 기본적인 고온, 고압 상태를 구현한 상태에서 추가로 어업 활동 시 사용되는 어구에 의한 추가적인 충격하중을 가정하였다. 해저면에 매설되지 않는 파이프라인에서는 가장 보수적인 하중 조건 조합이 될 수 있으며, 해저면의 저항력도 수치 모델링에 반영하여 상호 연관 관계가 구현되면서 검토가 될 수 있도록 구성하였다. 본 연구를 통하여 도출된 주요 결과는 향후 매립되지 않는 해저 파이프라인의 구조설계 및 구조 강도평가에 관련한 기초적인 자료로 유용하게 활용될 것으로 판단된다. 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- [1] 정수압 조건을 이용한 파이프 두께 산정은 항복 강도 관점에서는 의미가 있을 수 있으나, 좌굴 관점에서는 주요 하중 조건이 아니다.
- [2] 파이프라인의 기본적인 검토가 완료된 후, 선급에서 제시하는 이론식에 의한 최소 두께, 용량, 재질, 좌굴 강도를 계산한다. 그러나, 이 방법은 운용 및 설치 시 발생하는 비선형성 효과를 포함하지 않는다.
- [3] 비선형효과를 고려한 구조 안전성 평가를 위해서는 파이프라인과 해저면의 비선형 접촉 효과를 반영한 수치해석이 필요하다. 또한, 좌굴 거동을 예측하기 위해서는 초기 결함에 대한 정의가 필수적이다.
- [4] 횡 좌굴의 변위를 증가시키는 가장 큰 인자는 저인망 어구의 충격이며, 내부 압력과 온도변화 효과는 유사한 수준이다.

향후 연구과제로서는 해저면 주변부 항력(drag force)과 불규칙 표면에 의해서 발생하는 강제 진동의 효과까지를 종합적으로 검토가 필요하다. 또한, 대규격 파이프라인의 제작 시 발생하는 잔류응력과 초기 처짐의 특성을 기본으로 반영할 수 있는 데이터베이스 구축도 필요하다. 본 연구에서는 횡 좌굴 손상의 가능 시나리오 검토 및 관련 엔지니어링 절차에 대해서 제안하였다.

References

- [1] ANSYS Multiphysics User's Manual(2016), Introduction of nonlinear analysis and it's application of plate buckling and ultimate strength, Vol. 3, pp. 85-100.
- [2] Chee, J., A. Walker, and D. White(2018), Controlling lateral buckling of subsea pipeline with sinusoidal shape pre-deformation, Ocean Engineering, Vol. 151, pp. 170-190.

- [3] DET NORSKE VERITAS(DNV)(2007), Global Buckling of Submarine Pipelines, Recommended Practice DNV-RP-F110, Sec. 5, pp. 13-31.
- [4] DET NORSKE VERITAS(DNV)(2012), Submarine Pipeline Systems, Offshore Standard, DNV-OS-F101, Sec. 5, pp. 63-77.
- [5] DET NORSKE VERITAS(DNV)(2014), Interference between Trawl Gear and Pipelines, Recommended Practice DNV-RP-F111, Sec. 4, pp. 26-30.
- [6] Sharifi, S. M. H., A. Taheri, and M. B. Faraji Pool(2019), Assessment of Offshore Pipeline Reliability against Lateral Buckling, International Journal of Maritime Technology, Vol. 12, pp. 41-48.
- [7] The American Society of Mechanical Engineers(ASME)(2012), Gas Transmission and Distribution Piping Systems, ASME B31.8, New York.
- [8] Taghizadeh Edmollaii, S. and P. Edalat(2017), Accidental Limit State of Submarine Pipeline: Trawl Gears Pull-Over Loads and Effect of Free Span, International Journal of Maritime Technology, Vol. 8, pp. 47-58.
- [9] Vosoghi, N., A. Ivanovic, and S. Sriramula(2021), Rogue Lateral Buckle Initiation at Subsea Pipelines, Applied Ocean Research, Vol. 117, 102899.
- [10] Wang, Z., Z. Chen, H. Liu, and Z. Zhang(2017a), Numerical study on lateral buckling of pipelines with imperfections with imperfection and sleeper, Applied Ocean Research, Vol. 68, pp. 103-113.
- [11] Wang, Z., Y. Tang, L. Zhao, and C. Wang(2017b), Analytical solution for controlled lateral buckling of unburied subsea pipelines, Ocean Engineering, Vol. 146, pp. 140-150.
- [12] Zhu, J., M. M. Attard, and D. C. Kellermann(2015), In-plane nonlinear localized lateral buckling of straight pipelines, Engineering Structures, Vol. 103, pp. 37-52.

Received : 2022. 03. 29.

Revised : 2022. 04. 24.

Accepted : 2022. 04. 27.