

자원 이송용 파이프라인의 내리기 단계에서 평면 거동 평가를 위한 해석 모델

2D Analytical Model to Evaluate Behavior of Pipeline in Lowering Phase

김정석¹ · 안기용^{2*}Jung Suk Kim¹ · Ki Yong Ann^{2*}

(Received November 7, 2023 / Revised November 27, 2023 / Accepted November 30, 2023)

To ensure the safety of the pipeline against large deformation of the pipeline during lowering construction, the analysis for pipeline becomes emphasized. The FE analysis has a lower efficiency at calculating time, while it could be obtained high accuracy. In this paper, a reasonable analytical model for analysis of pipeline is proposed during lowering-in. This analytical model is partitioned considering the geometrical characteristics and modeled as two parameters Beam On Elastic Foundation and Euler-Bernoulli beam considering the boundary condition. This takes into account the pipeline-soil interaction and the axial forces acting on the pipeline. Previous model can only be applied to standardized conditions, whereas the proposed model defined as Segmented Pipeline Model can be considered for the majority of construction conditions occurred during lowering-in. In addition, minimized assumptions and segmented elements lead to improve the convenience and applicability of modeling. Nevertheless, the model shows accurate results compared to the FE model. Accordingly, it is expected that it will be used efficiently for configuration management as well as safety assessment of pipeline during lowering-in.

키워드 : 해석모델, 탄성지지도, Euler-Bernoulli 보, 분절된 파이프라인 모델

Keywords : Analytical model, Two parameters Beam On Elastic Foundation, Euler-bernoulli beam, Segmented pipeline model

1. 서론

일반적으로 가스 수송용 파이프라인은 매질의 유동 특성에 따른 전송효율 때문에 내리기(Lowering)라는 공정을 거쳐 지반에 매립된다. 이 공정 단계를 거치며 발생하는 파이프라인의 변형은 잔류 변형을 유발시킬 수 있기 때문에 Best Practices in Applying API 1104 Appendix A.(2014)는 역학적 해석 기반의 시공단계 위험도 평가(Engineering Critical Assessment)를 권장하고 있다. 또한 내리기 공정 중 파이프라인의 최대 허용 응력을 항복 응력의 75%로 제한하고 있으며, 이를 최소항복강도(Specified Minimum Yield Strength, SMYS)로 정의하고 있다.

파이프라인은 내리기 공정(Fig. 1)을 거치며 트렌치 바닥면과 지면의 접촉조건, 파이프레이어에 의한 하중 조건이 지속적으로 변화되며 3차원 거동을 하게 된다. 실제로 내리기 공정은 파이프라인을 따라 일정한 속도로 이동하는 파이프레이어에 의해 이뤄진

다. 이 파이프레이어의 이동에 의해 파이프라인은 한쪽 단부부터 반대쪽 단부까지 순차적으로 트렌치 바닥면에 부설된다. 이 공정을 거치며 파이프라인에는 힘 변형이 발생되며 특히, 지면 또는 트렌치 바닥면에 접촉된 부분에서 큰 곡률이 발생된다.

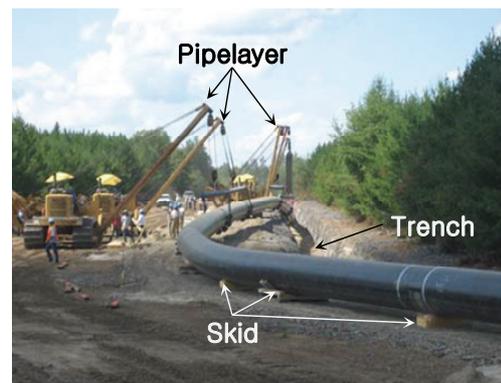


Fig. 1. Photo for construction of pipeline in lowering phase

* Corresponding author E-mail: kann@hanyang.ac.kr

¹한양대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 (Department of Civil & Environment System Engineering, Hanyang University, Gyeonggi-do, 15588, Korea)

²한양대학교 건설환경공학과 교수 (Department of Civil & Environment Engineering, Hanyang University, Gyeonggi-do, 15588, Korea)

Copyright © 2023 by Korean Recycled Construction Resources Institute

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

파이프라인은 광범위한 지역에 설치되기 때문에 시공 중 발생하는 힘 변형뿐만 아니라, 현장에서 예측 불가능한 변수가 빈번하게 발생되므로 파이프라인의 거동에 기반을 둔 공학적 판단을 통해 그 품질 및 성능을 보증해야 한다. 경계조건이 엄격하게 구현된 유한요소모델(Finite Element Model, FE model)은 시공 조건에 따른 정확한 해석 결과를 도출할 수 있지만, 모델링의 정밀도에 따라 해석에 시간이 비약적으로 증가되는 단점이 있다. 반면 역학적 특성에 기반을 둔 해석모델(analytical model)은 FE 모델보다는 정확도와 범용성이 다소 떨어지지만 해석시간을 단축할 수 있으며, 합리적인 해석 결과를 도출할 수 있다.

파이프라인 해석모델은 내리기 단계, 매립된 파이프라인, 해저 파이프라인의 시공 모델로 분류될 수 있다. Scott et al.(2008)과 Duan et al.(2014)은 파이프라인의 기하학적 형상과 하중 조건에 따라 분할하고, 고정단과 자유단으로 단순화 된 경계조건을 적용하여 보(Beam) 요소로 모델링했다. 이로 인해 보 요소들 간의 경계점에서 회전 변형의 연속성이 보존되지 않아 파이프라인의 실제 거동과 부합되지 않으며, 정형화된 내리기 단계의 하중 조건만을 적용할 수 있다. 때문에 시공환경 조건에 따라 내리기에 필요한 장비 운용의 변화를 반영하는 것이 불가능하므로 다양한 시공 시나리오에 대한 해석이 불가능하다. Wang et al.(1979)과 Nelson and Weidlinger(1979)는 매립된 파이프라인과 지반과의 상호작용을 해석하기 위해 탄성지지보(Beam On Elastic Foundation, B.O.E.F.)를 기반으로 한 준정적 해석 모델을 제안했지만, 파이프라인 축 방향 변형의 영향이 반영되지 않았다. 축 방향 변형 측면에서의 재연성과 좌굴 현상 검토를 위해 평면 변형 요소(plane strain element)를 이용한 해석 모델이 제안되었으나(Wong et al. 1986; Datta et al. 1984; Takada and Tanabe 1987; Lee et al. 2009), 평면 요소 사용으로 계산 효율이 떨어지며, 지반과 파이프라인 상호작용을 반영하지 못 했다. 단층 지대에 매설된 파이프라인의 구조적 성능 평가에 있어 계산 효율과 정확성을 높이기 위해 B.O.E.F.와 케이블 요소로 구성된 모델도 제안되었으나, 케이블 요소로 구성된 영역에서의 휨 응력에 대한 평가가 불가능한 한계가 있었다(Kennedy et al. 1977). 파이프라인의 휨응력 산정을 위해 지반의 변형에 민감하게 거동하는 영역은 BOEF로, 그 외의 영역은 분할된 Euler-Bernoulli 보로 구성된 해석모델은 정형화 되고 대칭적인 조건에 따라 최대 휨응력 발생지점에 대한 오차가 발생된다(Wang and Yeh 1985; Karamitros et al. 2007; Trifonov and Cherniy 2010). 이 외에도 Dixon and Rutledge(1968)과 Maats Pipeline Professionals(2018)는 해저 파이프라인의 단면력 분포 특성을 고려하여 Beam On Elastic Foundation -케이블-보

요소의 조합으로 분할된 2차원 평면 모델이 제안했다. 하지만 해저 지반을 반무한 경계로 가정함에 따라 파이프라인의 lift-off 등과 같은 시공 초기 현상에 대한 해석이 불가능하다.

상기 기술된 해석 모델들을 파이프라인 내리기 단계 해석에 적용하기에는 1) 연속체 거동을 하는 파이프라인의 역학적 성능을 정확하게 판단할 수 없으며, 2) 시공 단계에 따른 다양한 하중 조건이 반영된 해석이 불가능하고, 3) 다중의 곡률을 보이는 내리기 단계 파이프라인의 변형이 구현되지 않는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 한계를 보완하고 파이프라인은 내리기 과정을 거치며 지속적으로 변화되는 하중 및 경계조건을 고려한 파이프라인의 구조적 거동 해석 모델을 제안하고자 한다. 제안 모델에서 파이프라인은 변형과 역학적 특이점을 기준으로 분할되었으며, 분할된 영역들은 two parameters Beam On Elastic Foundation (B.O.E.F.)와 축력을 고려한 Euler-Bernoulli 보로 모델링 했다. 또한 유한요소 해석과 비교하여 해석모델의 유효성을 검증했으며, 내리기 단계의 하중 시나리오를 3단계로 구분하여 이에 대한 파이프라인의 거동을 해석했다.

2. 파이프라인의 수학적 모델링

2.1 파이프라인 모델링을 위한 기본 가정사항

파이프라인의 3차원 거동은 Fig. 2와 같이 수직방향($x-y$ 평면) 평면거동으로 단순화될 수 있다. 실제로 내리기 중 발생하는 파이프라인의 변형은 휨 모멘트와 전단력에 의해 지배적으로 발현되는 반면, 비틀림과 축력의 영향은 무시할 수 있을 정도로 미비하다. 따라서 비틀림은 무시했으며, 축력은 파이프라인의 모든 영역에 걸쳐 고르게 분포되는 것으로 가정됐다.

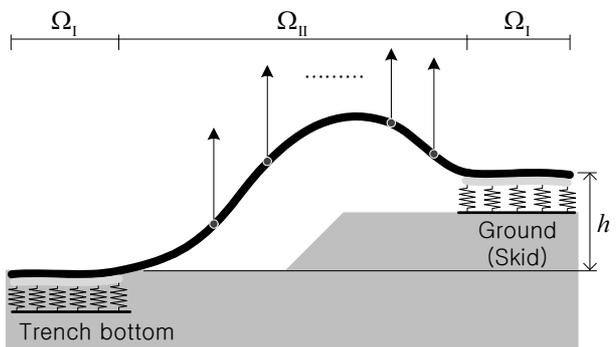


Fig. 2. Schematic diagram divided into vertical and horizontal planes for modeling a 3D deformed pipeline in vertical plane

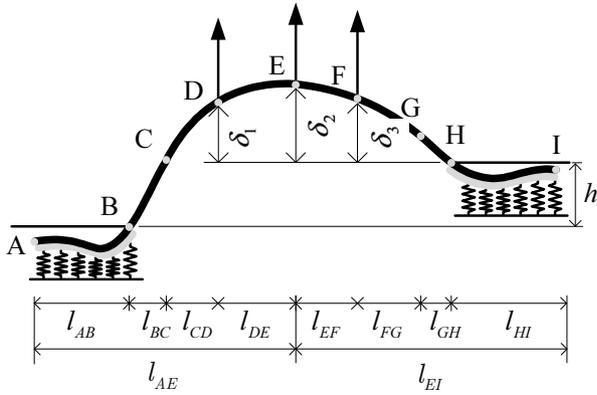


Fig. 3. Segmental pipeline model in vertical plane

각 평면에서 파이프라인은 기하학적 형상과 하중 전달의 연속성을 고려하여 Ω_I 과 Ω_{II} 영역으로 구분되었다. Ω_I 영역은 파이프라인 거동에 대한 지반 특성의 영향을 반영하기 위해 Two parameters BOEF로 모델링됐으며, Ω_{II} 영역은 파이프레이어의 지지력과 파이프라인의 자중을 고려하여 Euler-Bernoulli 보로 모델링됐다.

2.2 파이프라인의 수학적 모델링

수직방향 평면에서 파이프라인은 Fig. 3에 도식화된 바와 같이 두 개의 영역으로 구성되며, Ω_I 영역의 요소들은 파이프라인과 지반의 상호작용이 발생된다. 따라서 이 영역 요소들의 거동은 식 (1)로 정의될 수 있다.

$$v_s = \frac{q}{k} + e^{\alpha x} \sum_{i=1}^2 c_i \psi_i(x) + e^{-\alpha x} \sum_{i=3}^4 c_i \psi_i(x) \quad (1)$$

여기서, q 는 파이프라인의 단위하중을 의미하며, 지반의 수직방향 스프링 상수인 k 는 $k = [E_s \gamma (1 - \nu_s)] / [2(1 + \nu_s)(1 - 2\nu_s)]$ 로 정의되며, 지면과 파이프라인의 접촉에 의해 발생하는 견인력인 T 는 $T = E_s / 4\gamma(1 + \nu_s)$ 로 정의된다(Vlasov and Leont'ev 1966). 여기서, E_s 는 지반탄성계수, ν_s 는 지반의 Poisson's ratio이다. γ 는 지반 깊이 따른 구조물의 수직 변형을 나타내는 변수로 보통 $1.0m^{-1} \sim 2.0m^{-1}$ 정의되며, 본 연구에서는 γ 를 $1.0m^{-1}$ 로 가정했다. c_i 는 적분상수이며, $\psi_1(x)$ 과 $\psi_3(x)$ 는 각각 $\cos(\beta x)$ 로 정의되는 반면, $\psi_2(x)$ 와 $\psi_4(x)$ 는 각각 $\sin(\beta x)$ 로 정의된다. 그리고 α 와 β 는 각각 $\sqrt{k/4EI} + \sqrt{T/4EI}$ 와 $\sqrt{k/4EI} - \sqrt{T/4EI}$ 로 정의된다.

기존의 Two parameters B.O.E.F. 모델들은 계산의 편의를 위해 반무한 경계조건을 적용하여 해석되었다. 이러한 경계조건은 파이프라인이 지면 또는 스키드와 충분한 접촉면을 확보된 경우 합리적인 해석이 될 수 있다. 그러나 파이프라인과 지면 또는 스키드의 접촉 면적이 작은 내리기 공정의 시작과 마무리 단계에 대한 적용이 제한될 수 있다. 따라서 파이프라인에 작용하는 지반의 압력을 $p(x) = kv(x) - Tv''(x)$ 으로 정의하고 이에 대한 제차해를 도출함으로써 파이프라인과 지반 또는 스키드의 유한한 접촉문제를 고려하기 위한 전단층은 $v_s = c_{i+4}e^{\mu x}$ 로 구할 수 있으며, 이때 $\mu = \sqrt{k/T}$, c_{i+4} 는 적분상수다.

수직방향 평면에서 Ω_{II} 영역의 모델은 힘 모멘트가 0이 되는 변곡점과 전단력이 점프하는 파이프레이어 작용점에서 분절된다. 이 영역의 요소들은 Euler-Bernoulli 보 이론을 기반으로 하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v(x) = -\frac{qx^2}{2T} + c_j + c_{j+1}x + c_{j+2}\sinh(\lambda x) + c_{j+3}\cosh(\lambda x) \quad (2)$$

여기서, $v(x)$ 는 파이프라인의 수직 변위, T 는 파이프라인에 가해지는 축력, $\lambda = \sqrt{T/EI}$, q 는 파이프라인의 자중이다.

3. 파이프라인 시공 단계 해석

3.1 내리기 공정에 따른 파이프라인 모델

내리기 공정은 (1) 스키드에 가설된 파이프라인을 들어올리는 단계, (2) 들어올린 파이프라인을 수평 방향으로 이동시켜 트렌치 중앙에 위치시키는 단계, (3) 트렌치 중앙부에 위치한 파이프라인을 트렌치 바닥으로 내려놓는 총 3단계로 구분될 수 있다. 내리기 공정 단계는 분절화된 파이프라인 요소를 기하학적 특성과 경계조건을 고려한 조합을 통해 해석될 수 있다. 즉, 1 단계에서 파이프라인은 오직 수직방향에서만 거동하므로 Ω_I 과 Ω_{II} 영역요소들의 조합만으로 해석될 수 있다.

3대의 파이프레이어 운영을 가정하여 3개의 전단력 불연속점과 2개의 변곡점이 존재한다. 따라서 2개의 Ω_I 영역 요소와 6개의 Ω_{II} 영역 요소로 구성되고, 조합된 모델은 식 (3)과 같이 파이프라인 양 끝단의 전단층 방정식 2개와 연립을 통해 내리기 공정 3단계의 파이프라인 거동을 나타낸다.

Table 1. Boundary conditions for calculation of integral constants and unknown parameter in vertical direction plane

Connectivity	Boundary condition	Connectivity	Boundary condition	Connectivity	Boundary condition
A	$\begin{cases} v_s(0) = v_1(0) \\ M_1(0) = 0 \\ V_s(0) = V_1(0) \end{cases}$	D	$\begin{cases} v_4(0) = \delta_1 + h \\ \theta_3(l_{CD}) = \theta_4(0) \\ M_3(l_{CD}) = M_4(0) \end{cases}$	G	$\begin{cases} v_6(l_{FG}) = v_7(0) \\ \theta_6(l_{FG}) = \theta_7(0) \\ M_6(l_{FG}) = 0 \\ M_7(0) = 0 \\ V_6(l_{FG}) = V_7(0) \end{cases}$
B	$\begin{cases} v_s(l_{AB}) = 0 \\ v_2(0) = 0 \\ \theta_1(l_{AB}) = \theta_2(0) \\ M_1(l_{AB}) = M_2(0) \\ V_1(l_{AB}) = V_2(0) \end{cases}$	E	$\begin{cases} v_5(0) = \delta_2 + h \\ \theta_4(l_{DE}) = \theta_5(0) \\ M_4(l_{DE}) = M_5(0) \end{cases}$	H	$\begin{cases} v_8(0) = h \\ \theta_7(l_{GH}) = \theta_8(0) \\ M_7(l_{GH}) = M_8(0) \\ V_7(l_{GH}) = V_8(0) \end{cases}$
C	$\begin{cases} v_2(l_{BC}) = v_3(0) \\ \theta_2(l_{BC}) = \theta_3(0) \\ M_2(l_{BC}) = 0 \\ M_3(0) = 0 \\ V_2(l_{BC}) = V_3(0) \end{cases}$	F	$\begin{cases} v_6(0) = \delta_3 + h \\ \theta_5(l_{EF}) = \theta_6(0) \\ M_5(l_{EF}) = M_6(0) \end{cases}$	I	$\begin{cases} v_8(l_{HI}) = h \\ M_8(l_{HI}) = 0 \\ V_s(l_{HI}) = V_8(l_{HI}) \end{cases}$

$$\begin{cases} v_s(x_1) = c_0 e^{\mu x_1} \\ v_1(x_1) = \frac{q}{k} + c_1 \Phi_1(x_1) + c_2 \Phi_2(x_1) + c_3 \Phi_3(x_1) + c_4 \Phi_4(x_1) \\ \vdots \\ v_n(x_n) = -\frac{qx_n^2}{2T} + c_{4n-3} + c_{4n-2} x_n \\ \quad + c_{4n-1} \sinh(\lambda x_n) + c_{4n} \cosh(\lambda x_n) \\ \vdots \\ v_8(x_8) = \frac{q}{k} + c_{29} \Phi_1(x_8) + c_{30} \Phi_2(x_8) \\ \quad + c_{31} \Phi_3(x_8) + c_{32} \end{cases} \quad (3)$$

여기서, $n = 2, 3, \dots, 6, 7, 0$ 이며, $v_s(x_1)$ 과 $v_s(x_8)$ 는 전단 층의 변형을, $v_1(x_1)$ 과 $v_8(x_8)$ 은 Ω_1 영역 요소의 수직 변형을, 그리고 $v_n(x_n)$ 은 6개의 Ω_{II} 영역 요소의 수직 변형을 나타낸다. 식 (3)에는 34개의 적분상수와 6개의 요소 길이($l_{AB}, l_{BC}, l_{CD}, l_{FG}, l_{GH}$, 그리고 l_H)가 미지수이다. 따라서 이 미지수는 경계치 문제로 구할 수 있으며, 이를 위한 경계조건을 Table 1에 정리했다. 이를 이용하여 식 (3)의 적분상수는 길이에 대한 함수로 정의된다. 또한 Fig. 2의 D, E, F, H에서 파이프라인 수직 변위에 관한 식과 파이프라인 전체 길이에 관한 조건식은 각각 식 (4)와 같으며, 길이의 함수로 변환된 적분상수를 식 (4)에 대입 후 길이에 대한 식 ($l_{AE} = l_{AB} + l_{BC} + l_{CD} + l_{DE}$, $l_{EI} = l_{EF} + l_{FG} + l_{GH} + l_{HI}$)과 연립하면 식 (5)와 같은 6×6 비선형 시스템을 도출할 수 있다.

$$\begin{cases} v_3(l_{CD}) = \delta_1 + h \\ v_4(l_{DE}) = \delta_2 + h \\ v_5(l_{EF}) = \delta_3 + h \\ v_7(l_{GH}) = h \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} f_1(l_{AB}, l_{BC}, l_{CD}) = l_{AE} - l_{AB} - l_{BC} - l_{CD} - l_{DE} \\ f_2(l_{FG}, l_{GH}, l_{HI}) = l_{EI} - l_{FG} - l_{GH} - l_{HI} - l_{EF} \\ f_3(l_{AB}, l_{BC}, l_{CD}) = -\frac{q_{CD}^2}{2T} + C_9 + C_{10} l_{CD} \\ \quad + C_{11} \sinh(\lambda l_{CD}) + C_{12} \cosh(\lambda l_{CD}) - \delta_1 - h \\ f_4(l_{AB}, l_{BC}, l_{CD}) = -\frac{q_{DE}^2}{2T} + C_{13} + C_{14} l_{DE} \\ \quad + C_{15} \sinh(\lambda l_{DE}) + C_{16} \cosh(\lambda l_{DE}) - \delta_2 - h \\ f_5(l_{AB}, l_{BC}, l_{CD}) = -\frac{q_{EF}^2}{2T} + C_{17} + C_{18} l_{EF} \\ \quad + C_{19} \sinh(\lambda l_{EF}) + C_{20} \cosh(\lambda l_{EF}) - \delta_3 - h \\ f_6(l_{FG}, l_{HI}) \end{cases} \quad (5)$$

여기서, 적분상수 $C_{10} - C_{13}$ 은 l_{AB} 와 l_{BC} 의 함수, 적분상수 $C_{14} - C_{21}$ 은 l_{AB}, l_{BC} 와 l_{CD} 의 함수이며, 적분상수 $C_{26} - C_{29}$ 는 l_{FG}, l_{GH} ,와 l_H 의 함수이다. 이 비선형 시스템은 Newton-Raphson 방법으로 구할 수 있다. 위의 과정을 통해 모든 적분상수가 계산되며, 탄성론 ($M(x) = EIv''(x)$, $V(x) = EIv'''(x) - Tv'(x)$)을 이용하여 세그먼트 파이프라인 모델의 단면력을 구할 수 있다.

3.2 유한요소해석

본 연구에서 제안된 파이프라인 모델 정확성을 검증하기 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS(Simulia 2016)를 사용하여 제안된 모델과 유한요소 모델의 힘 거동을 비교했다. 유한요소 모델은 3차원 보 요소(B31)로 모델링된 파이프라인과 3차원 쉘 요소(S4)로 모델링된 트렌치로 구성되며, General contact을 적용하여 상호작용을 고려했다. 접촉면의 법선방향 거동은 hard contact을 접선방향 거동은 마찰계수 0.3을 각각 적용하였다. 일반적으로

강재와 지반 사이의 마찰 계수의 범위는 0.14~0.26 이지만 파이프라인이 트렌치의 면에서 미끄러지는 현상(slip)을 방지하기 위해 일반적인 수치보다 높은 0.3을 사용했다. 파이프라인의 등급은 가스 이송에 주로 사용되는 X70 급을 적용했으며, 길이, 지름, 그리고 두께는 각각 400 m, 0.762 m, 그리고 0.021 m 로 가정했다. 트렌치는 SP 42-102-2004(2004)와 파이프라인의 직경을 고려하여 기하학적 형상을 결정했으며, 트렌치의 폭과 깊이는 각각 400 m와 2 m로 트렌치 사면의 경사도는 1:2로 모델링 했다. 또한 일반적인 지반의 활동층과 동결층의 깊이를 고려하여 트렌치의 변형 가능 깊이는 1 m로 가정하였으며 이 깊이는 쉘 요소의 두께로 반영했다. 본 연구의 주안점은 파이프라인-지반의 정적 상호작용을 고려한 파이프라인의 거동해석이므로 지반은 탄성체로 가정했다. 유한요소 해석에서 사용된 파이프라인과 지반 모델의 재료적 물성치는 Table 2에 정리했다.

파이프레이어는 파이프라인과 트렌치의 접촉면과 동일한 General contact을 적용하여 파이프라인을 지지함과 동시에 수직방향과 수평방향으로 이동하는 역할을 할 수 있도록 모델링 했다. 스키드의 재료 특성은 트렌치와 동일한 재료 특성으로 가정했으며, 그 높이는 파이프라인의 초기 위치로 가정했다. 트렌치는 모든 면이 구속되어 있는 반면, 파이프라인은 내리기 공정의 진행에 따

라 구속조건이 변하게 된다. 내리기 공정 시작 전 파이프라인은 변위에 대한 모든 구속이 해제되지만, 트렌치 상단에 배치된 파이프라인의 자중과 트렌치와의 접촉 조건으로 인해 변위가 발생되지 않는다. 내리기 공정이 진행되면 파이프라인은 파이프레이어에 의해 변위가 발생되고 이 변위하중의 영향이 미치지 않는 파이프라인의 영역은 자중과 트렌치와의 접촉조건에 의해 고정된다. Fig. 4는 내리기 공정의 단계별 경계조건의 변화가 반영된 유한요소 해석 결과 중 파이프라인 단면의 휨 모멘트를 나타내는 contour 이다.

3.3 제안모델 검증

제안된 해석 모델의 정확도 검증을 위해 3대의 파이프레이어가 파이프라인의 45 m, 65 m, 그리고 80 m 지점에 작용하는 경우를 가정했다. 해석모델의 검증은 유한요소 모델의 수직방향 변위, 휨모멘트, 그리고 전단력의 비교를 통해 수행되었다. 파이프라인의 거동은 Fig. 5에 나타난바와 같이 변위, 휨모멘트, 그리고 전단력이 대체적으로 매우 일치했다. 그러나 Fig. 5 (b)와 (c)에 나타난바와 같이 파이프라인의 0 m 부분에서 휨모멘트와 전단력은 해석모델의 경우 0으로 수렴하는 경향을 보이는 반면 유한요소 모델의 경우 0으로 수렴하지 않았다. 이 지점에서 해석모델의 전단력과 휨모멘트는 0으로 적용되었으나 유한요소 모델의 경우 자유단으로 적용되었기 때문이다. 제안된 해석 모델은 파이프라인의 3차원 거동을 수직방향 평면 모델로 단순화 시킨 모델이며, 파이프라인의 축방향 변형은 발생되지 않고 일정한 크기의 축력이 균일하게 분포되는 것으로 가정했다. 이러한 가정과 함께 수직방향 평면 모델은 파이프라인과 지지층(지반 또는 스키드)의 상호작용을 고려하기 위해 스프링과 전단층을 적용하여 단순화 시켰다. 이와 달리 유한요소 모델은 파이프라인과 트렌치의 접촉면에서 접선방향, 법선방향의 거동뿐만 아니라 재료 특성까지 반영되어 파이프라인과 지지층의 상호작용을 수직방향과 수평방향 평면에서 모두 상세히 구현된다. 휨 모멘트와 전단력의 차이는 파이프라인과 지지층간의 상호작용에 대한 모델링의 구체성과 제안된 해석 모델의 경계조건 단순화로 인한 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 제안된 모델은 내리기 공정 중 발생하는 파이프라인의 수평방향 거동이 생략되었으나, 내리기 공정 중 파이프라인 거동은 수직방향 휨모멘트에 의해 지배적으로 발현된다. 따라서 수직방향 평면 거동에서 정확도가 확보된 제안 모델은 충분히 합리적인 파이프라인의 거동 평가를 할 수 있다.

Table 2. Material properties for FE model

	Pipeline	Trench
Density [kg/m ³]	7850	1520
Elastic modulus [GPa]	210	50
Poisson's ratio	0.3	0.32

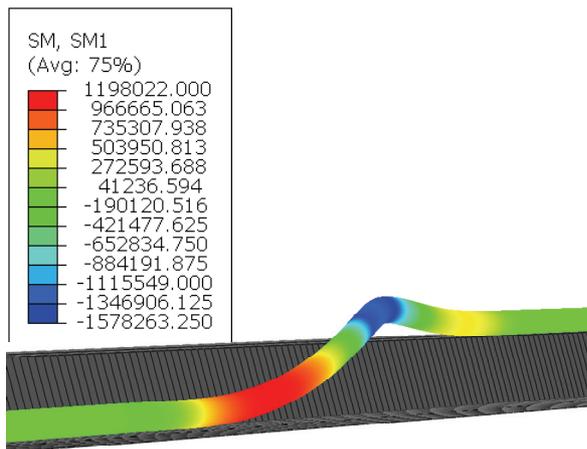


Fig. 4. Bending moment of FE model (rendering contour)

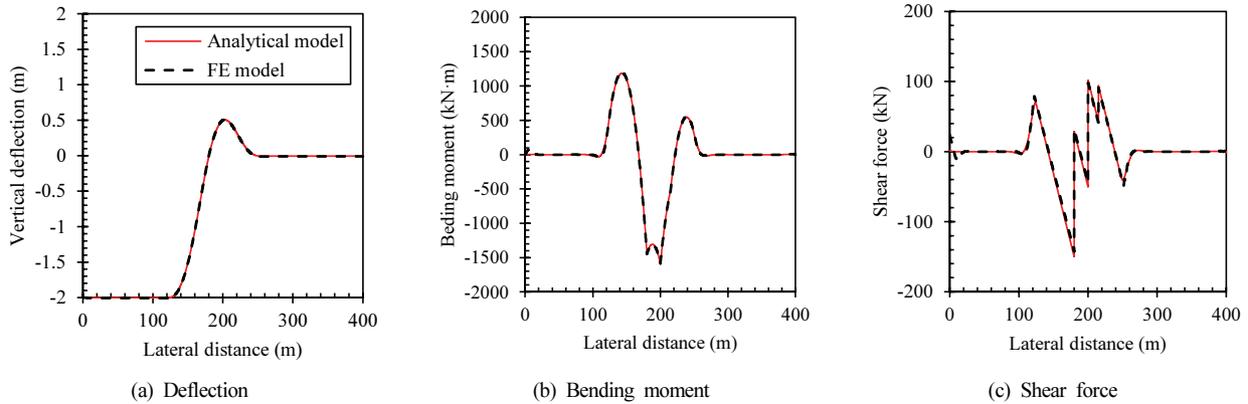


Fig. 5. Comparison of analytical model to FE model in vertical plane

4. 시공단계 해석

4.1 파이프레이어 위치

파이프라인을 트렌치 바닥면에 부설하기 위해 파이프레이어는 파이프라인을 따라 지속적으로 이동하게 되므로 내리기 진행에 따라 파이프라인의 경계조건은 지속적으로 변하게 된다. 따라서 내리기 공정에서 운용되는 파이프레이어의 수와 위치는 파이프라인의 구조적 거동을 결정하는 핵심적인 매개변수가 된다. Table 3은 내리기 공정이 진행됨에 따른 파이프레이어 수와 위치의 변화를 단순화 시켜 정리한 것이다. 내리기 공정을 수행하기 위해 파이프라인을 들어올리는 과정에서 파이프레이어의 수는 2대에서 3대로 증가되는 것으로 가정했으며, 내리기 공정의 초반 단계와 마무리 단계를 고려하여 파이프라인의 끝단 부분에 파이프레이어가 위치한 3개의 Case로 단순화했다. 이때 파이프레이어의 작용점은 파이프라인에 진입하는 순서를 기준으로 LP1, LP2, 그리고 LP3로 명명했다.

Fig. 6은 Case 1과 2의 변위, 휨 모멘트, 전단력을 보여준다. Case 1과 2의 수직 변형을 나타내는 그래프에서 공통적으로 나타나는 바와 같이 파이프라인의 약 300 m 지점까지 미소한 음수로 유지되는 수직 변형은 파이프라인 자중에 의한 지반의 초기 변형량이다. 또한 파이프레이어가 2대에서 3대로 증가됨에 따라 파이프라인에 부(-) 모멘트가 작용하여 파이프라인의 곡률이 더욱 명

확하게 발현되었다. 두 Case 모두 정(+) 모멘트가 부(-) 모멘트보다 크게 발생되며, 최대 휨모멘트는 약 9 %의 차이가 발생됐다. Case 2의 부(-) 모멘트는 Case 1의 부(-) 모멘트에 비해 크게 발생되지만 그 절대치가 Case 1의 양(+) 모멘트 절대치 보다 작게 나타났다. 전단력은 대체적으로 Case 1에 비해 Case 2가 크게 발생되었으며, 최대 전단력 기준으로 약 17 %의 차이가 발생됐다.

내리기 공정에서 파이프라인은 휨 거동을 하게 되므로 파이프레이어의 추가적 배치는 파이프라인의 휨 모멘트를 감소시켜 안전성을 향상 시킬 수 있다. 전단력은 휨 모멘트에 비해 파이프레이어 수에 따른 변화가 민감하게 나타났다. 따라서 내리기 공정 중 파이프레이어의 증가를 통해 파이프라인 안전성 향상을 고려할 경우 전단력의 변화가 반드시 고려되어야 한다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 파이프라인이 지반과 접촉된 영역은 Two-parameter BOEF가 적용된 요소로, 파이프레이어에 의해 거처된 영역은 Euler-Bernoulli beam이 적용된 요소로 각각 모델링하여 파이프라인의 지지조건과 하중조건 변화가 반영된 해석 모델을 제안했다.

1. 파이프라인의 평면 거동은 변위, 휨모멘트, 그리고 전단력 모두 대체적으로 매우 일치했으나 유한요소 모델과 제안 모델의 SP지점에서 구속조건의 상이함으로 인해 파이프라인의 0 m 부분에서 약간의 차이가 발생했다. 이 차이는 파이프라인 전반에 걸쳐 분포되는 단면력에 비해 작은 수치이며, 내리기 공정 중 파이프라인은 수직방향의 휨모멘트에 의해 지배적으로 발현되므로 제안된 모델을 통해 충분히 합리적인 파이프라인의 거동 평가가 가능 할 것으로 판단된다.

Table 3. Case examples of the segmental pipeline model

Case	LP1		LP2		LP3	
	Location	Displacement	Location	Displacement	Location	Displacement
1	380	1.5	400	1.8	-	-
2	365	2.4	385	2.5	400	2.4
3	45	0.0	65	0.5	80	0.4

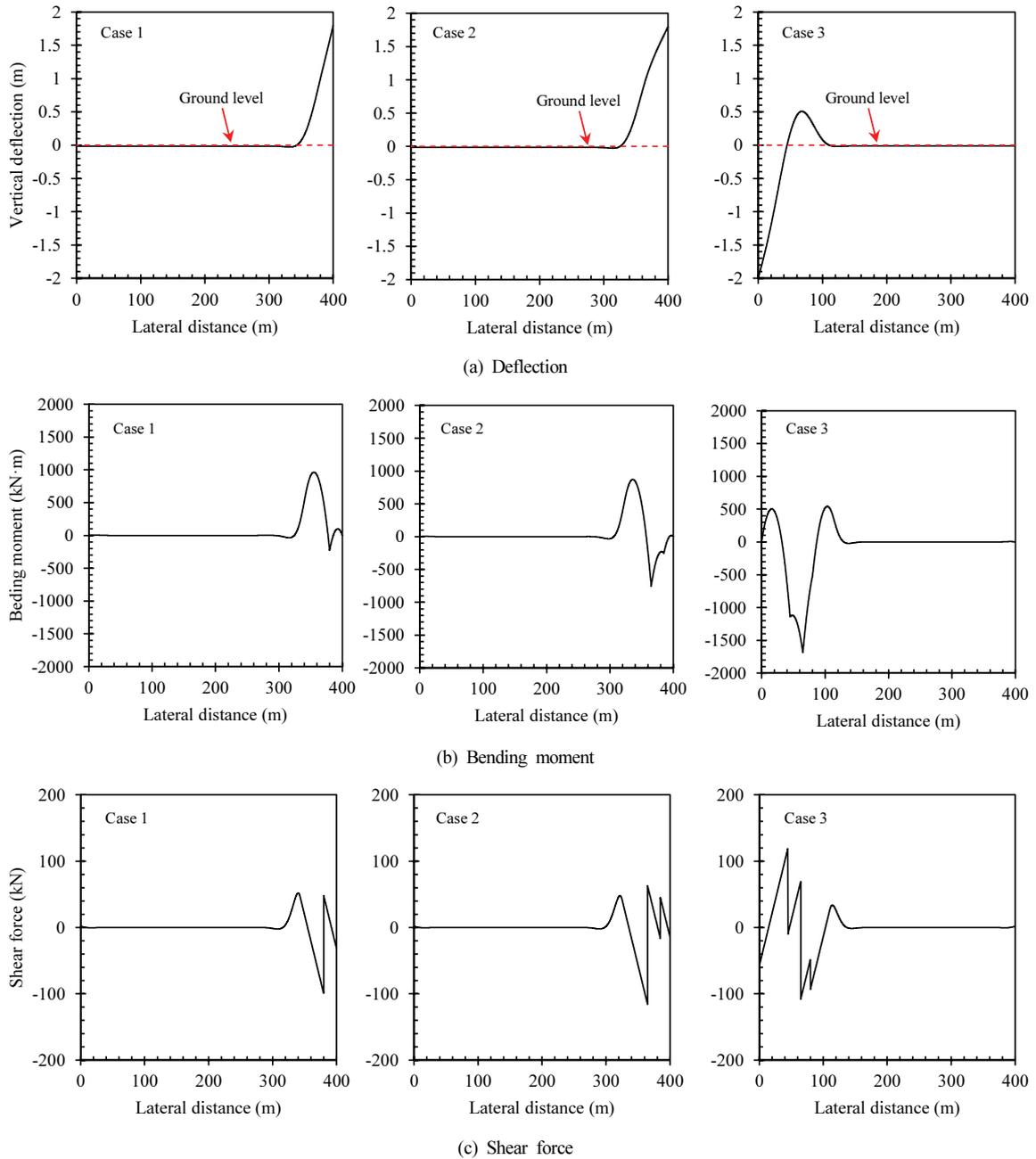


Fig. 6. Analysis result for case 1, 2 and 3

2. 내리기 공정이 진행됨에 따른 파이프레이어 수와 위치를 3개의 Case로 단순화 시켰으며, 모든 Case는 파이프레이어의 작용점과 변곡점 등을 고려하여 Case 1에 Euler-Bernoulli 보 요소를 추가함으로써 모델링할 수 있다. 최대 휨모멘트의 절대치는 Case 1이 Case 2에 비해 약 9% 크게 발생했으며, 최대 전단력의 절대치는 Case 2가 Case 1보다 약 7% 크게 발생했다. 최대 변위가 동일한 경우 파이프레이어 증가는 파

이프라인 단면의 휨모멘트를 감소시켰다.

3. Case 1과 2의 해석결과에 따르면 파이프레이어 수 증가는 휨 거동이 지배적으로 발현되는 내리기 공정에서 파이프라인의 구조적 성능 보전에 더욱 효과적이다. 다만 파이프레이어의 수에 따른 변화는 전단력이 휨모멘트 보다 민감하게 나타났으며, 특히 전단력은 파이프레이어 수와 반비례하게 나타므로 파이프레이어 운용 시 전단력 변화에 대한 검토가

수반되어야 한다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

이 논문은 2021년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국 연구재단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다(No. NRF-2020 R1A2C3012248). 이에 감사드립니다.

References

- Best Practices in Applying API 1104 Appendix A. (2014). API Publishing Services, Pipeline Research Council International, Inc. Washington, DC, USA.
- Datta, S.K., Shah, A.H., Wong, K.C. (1984). Dynamic stresses and displacements in buried pipe, *Journal of Engineering Mechanics*, **110(10)**, 1451-1466.
- Design and Construction of Gas Pipelines from Metal Pipes SP 42-102-2004. (2004). The Ministry of Fuel and Power Industry of the Russian Federation, The Ministry of Fuel and Power Industry of the Russian Federation, Moscow, Russia.
- Dixon, D.A., Rutledge, D.R. (1968). Stiffened catenary calculations in pipeline laying problem, *Journal of Engineering for Industry ASME*, **90(1)**, 153-160.
- Duan, D.M., Jurca, T., Zhou, C. (2014). A stress check procedure for pipe lowering-in process during pipeline construction, *Proceedings of the IPC, 10th International Pipeline Conference*, Calgary, Alberta, Canada.
- Hall, W.J., Newmark, N.M. (1978). Seismic design criteria for pipelines and facilities, the current state of knowledge of lifeline Earthquake engineering, *Journal of Structural Engineering ASCE*, **104(1)**, 18-34.
- Karamitros, D.K., Bouckovalas, G.D., Kouretzis, G.P. (2007). Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **27(3)**, 200-211.
- Kennedy, R.P., Williamson, R.A., Chow, A.M. (1977). Fault movement effects on buried oil pipeline, *Transportation Engineering Journal of ASCE*, **103(5)**, 617-633.
- Lee, D.H., Kim, B.H., Lee, H., Kong, J.S. (2009). Seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations, *Engineering Structures*, **31(5)**, 1011-1023.
- Lenci, S., Callegari, M. (2005). Simple analytical models for the J-lay problem, *Acta Mechanica*, **178**, 23-39.
- Luco, J.E., Barnes, F.C.P. (1994). Seismic response of cylindrical shell embedded in layered visco elastic half space, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **23(5)**, 553-580.
- Maats Pipeline Professionals (2018). <https://www.maats.com/higher-lifting-capacity-roller-cradles> (accessed to 03 December 2018)
- Muleski, G.E., Ariman, T. (1985). A shell model for buried pipes in earthquakes, *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **4(1)**, 43-51.
- Nelson, I., Weidlinger, P. (1979). Dynamic seismic analysis of long segmented lifelines, *Journal of Pressure Vessel Technology*, **101(1)**, 10-20.
- Newmark, N.M., Rosenblueth, E. (1971). *Fundamentals of Earthquake Engineering*, Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, USA.
- O'Leary, P.M., Datta, S.K. (1985). Dynamics of buried pipelines, *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **4(3)**, 151-159.
- Scott, C., Etheridge, B., Vieth, P. (2008). An analysis of the stresses incurred in pipe during laying operations, *Proceedings of the 7th International Pipeline Conference (IPC 2008)*, Calgary, Alberta, Canada.
- Takada, S., Tanabe, K. (1987). Three-dimensional seismic response analysis of buried continuous or jointed pipelines, *Journal of Pressure Vessel Technology*, **109(1)**, 80-87.
- Trifonov, O.V., Cherniy, V.P. (2010). A semi-analytical approach to a nonlinear stress-strain analysis of buried steel pipelines crossing active faults, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **30(11)**, 1298-1308.
- Vlasov, V.Z., Leont'ev, U.N. (1966). *Beams, Plates and Shells on Elastic Foundations*, Israel Program for Scientific Translation: Jerusalem, Israel (Translated from Russian).
- Wang, L.R.L., O'Rourke, M.J., Pikul, R.R. (1979). Seismic response behavior of buried pipelines, *Journal of Pressure Vessel Technology*, **101(1)**, 21-30.
- Wang, L.R.L., Yeh, Y.H. (1985). A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **13(1)**, 75-96.
- Wong, K.C., Shah, A.H., Datta, S.K. (1986). Three-dimensional motion of buried pipeline. II: Numerical results, *Journal of Engineering Mechanics*, **112(12)**, 1338-1345.

자원 이송용 파이프라인의 내리기 단계에서 평면 거동 평가를 위한 해석 모델

본 논문에서는 내리기 시 파이프라인의 단면력 해석을 위한 합리적인 해석 모델을 제안했다. 본 해석 모델은 기하학적 특성과 경계조건을 고려하여 파이프라인을 분할한 후 two parameters Beam On Elastic Foundation과 Euler-Bernoulli 빔으로 모델링했다. 또한 파이프라인과 지반의 상호 작용 뿐만 아니라 파이프라인에 작용하는 축력을 했다. 기존 모델은 정형화된 하중 조건만 적용이 용이했으나 Segmented Pipeline Model로 정의된 제안 모델은 내리기 시 발생하는 대부분의 시공 조건에 대해 고려할 수 있다. 또한 가정을 최소화하고 요소를 세분화하여 모델링의 편의성과 적용성을 향상시켰다. 그럼에도 불구하고 이 모델은 FE 모델에 대비 높은 정확도를 갖고 있으므로 내리기 시 파이프라인의 안전성 평가는 물론 형상관리에도 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 시공 단계에서 파이프라인의 안전성을 확보함에 따라 운용 중 내구성 향상에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.