

유한요소해석을 통한 고온 고압 환경내의 송유관 변형방지 연구

이현우* · 아시프 라비아** · 허종완***^{id}

Lee, Heon-Woo*, Asif, Rabea**, Hu, Jong-Wan***^{id}

Research on Preventing Deformation of Oil Pipelines in High-temperature and High-pressure Environments Through Finite Element Analysis

ABSTRACT

Traditional oil, a depleting resource, accounts for only one-third of the world's oil reserves, so research and cases of utilizing non-traditional oil as a resource are continuously increasing. However, unconventional oil contains bitumen containing solid particles such as sand, and because it is exposed to a high temperature and high pressure environment, deformation can frequently occur in oil pipelines. Therefore, variables such as material, thickness, and angle that can affect the deformation of the oil pipeline were derived and applied to the oil pipeline, and finite element analysis was performed using the Ansys program. As a result of finite element analysis, deformation and maximum load capacity were derived. Afterwards, the same analysis was performed by modeling an optimized oil pipeline by combining the factors with the best deformation resistance and maximum load capacity. As a result of the analysis, the effect of reducing deformation and increasing the maximum load capacity by about 30 % was confirmed, and factors for suppressing deformation when analyzing oil pipelines were derived.

Keywords : Oil pipelines, Unconventional oil, Finite element analysis, Optimization

초 록

고갈되고 있는 자원인 전통 석유는 전세계 석유매장량의 3분의 1에 불과하여 비전통 오일을 자원으로 활용하고자 하는 연구와 사례가 지속적으로 증가하고 있다. 하지만 비전통 오일에는 모래와 같은 고체입자가 포함된 역점이 함유되어 있으며 고온 고압의 환경에 노출되기 때문에 송유관에 변형이 빈번히 발생할 수 있다. 따라서 송유관의 변형에 영향을 끼칠 수 있는 재료, 두께, 각도 등의 변수를 도출하여 송유관에 적용하고 Ansys 프로그램을 통해 유한요소해석을 진행하였다. 유한요소해석의 결과로 변형, 최대하중 용량을 도출하였다. 이후 변형 저항과 최대하중 용량이 가장 우수한 인자를 조합하여 최적화된 송유관을 모델링하여 동일한 해석을 진행하였다. 해석 결과 변형을 감소시키며 30 % 가량 최대하중 용량을 증진시키는 효과를 확인하였고 송유관 해석 시 변형억제를 위한 인자들을 도출하였다.

검색어 : 송유관, 비전통 오일, 유한요소해석, 최적화

* 정희원 · 인천대학교 건설환경공학과 박사과정 (Incheon National University · agiko0@inu.ac.kr)

** 인천대학교 건설환경공학과 석사과정 (Incheon National University · rabeaasif19@gmail.com)

*** 정희원 · 교신저자 · 인천대학교 도시환경공학부 정교수 인천방재연구센터 센터장
(Corresponding Author · Incheon National University · jongp24@inu.ac.kr)

Received January 31, 2024/ revised February 14, 2024/ accepted February 19, 2024

1. 서론

현재 전 세계 인류가 가장 많이 사용하고 있는 에너지 자원인 석유는 고갈자원이며 원유형태로 생산가능한 지역이 극도로 한정되어 있기 때문에 새로운 에너지원을 개발하기 위한 연구개발이 지속되고 있다. 이에 따라 원유형태로 석유자원을 채취하지 않고 모래에 석유가 흡착되어 고체형태로 저장된 오일샌드에 탄화수소 용매와 고온 고압의 증기를 주입하여 석유를 생산하는 ES-SAGD (Expanding Solvent-Steam Assisted Gravity Drainage) 공법이 개발되었다(Dong et al., 2019). 이러한 에너지원을 비전통오일 자원이라 칭하며 막대한 자원량을 보유하고 있어 고갈될 수 있는 원유생산 산업에 대응하기 위한 산업으로 대두되고 있다. 하지만 모래를 포함하고 있는 오일샌드의 특성상 석유를 운송하는 송유관에 많은 결함을 발생시킨다. 이러한 결함은 피로, 부식 등을 포함하며 송유관 내부에 발생한다면 좌굴변형과 같이 큰 변형으로 이어질 수 있다(Polenta et al., 2015). Fig. 1은 앞선 좌굴변형이 송유관에 발생하였을 때의 형상과 그로 인해 발생할 수 있는 사고사례이다. ES-SAGD 공법에 의해 뜨겁고 이물질이 다량 함유된 석유가 흐르는 송유관은 좌굴변형 발생시 화재사고로 이어지기 쉽다. 2023년 12월에는 국내 포항의 포스코 공장에서 이러한 이유로 화재사건이 발생하였다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 Ansys Workbench

(2022) 유한요소해석 프로그램을 활용하여 다중 유한요소기법 (Multiple Finite Element Analysis)의 해석을 수행하였다. 해석 시에 송유관의 재료, 두께, 각도 등에 변수를 두어 해석을 진행하였으며 비교군으로는 연천에 위치한 오일플랜트의 송유관을 선택하였다. 또한, 해석의 순서는 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 통한 유체해석, 열 해석, 정적 구조 해석 순으로 진행하였다(Mao et al., 2023; Wiseman and Barkey, 2019). 최종적으로 좌굴 발생을 저감할 수 있는 변수들을 채택하여 최적화된 송유관을 모델링하고 동일한 해석을 진행하여 그 결과를 분석하였다.

2. 비전통 오일 송유관 설계

2.1 비전통 오일 송유관의 선정

Fig. 2(a)는 국내 위치한 연천 오일플랜트의 전경이며 이 곳에서 실제로 사용하고 있는 송유관 중 일부를 Fig. 2(b)와 같이 모델링하였다. 모델링된 송유관의 주요 역할은 유수(99.97%), 역청(0.02%) 및 CO₂(0.01%)로 구성된 오일을 탈지 탱크로부터 IGF(Induced Gas Flotation)까지 운송하는 것이다. 송유관 모델은 수평 파이프 750 mm, 수직 파이프 350 mm, 각도가 90°, 반지름 265 mm 연결 파이프로 총 3가지 파이프가 이어진 구조로 형성되었으며 비전통 오일을 운송하는 총 길이는 1474 mm로 구성되었다. 각 파이프들은 볼트로 체결되어 있으며 모델링시 이를 고정 연결하였



Fig. 1. Accident Cases in Non-conventional Oil Pipelines: (a) Buckling Deformation of Yeoncheon Oil Pipeline, (b) Oil Pipeline Destroyed due to Buckling, (c) POSCO Factory Fire Accident

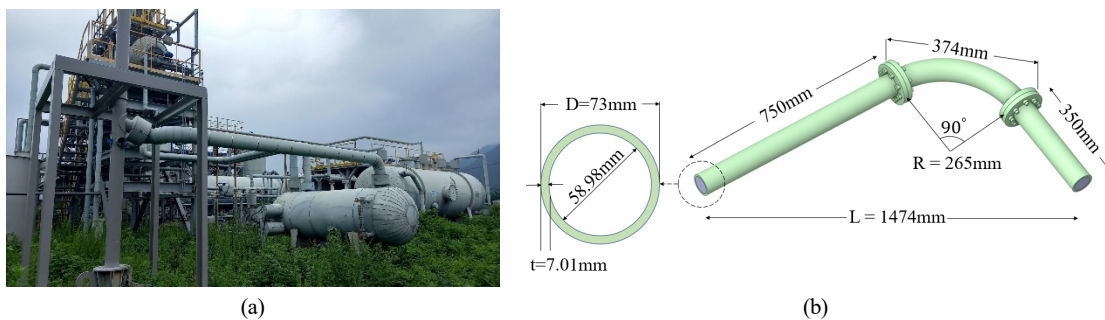


Fig. 2. Modelling of Standard Pipeline from Yeoncheon Oil Plant: (a) Yeoncheon Oil Plant, (b) Standard Pipeline Modelled in Ansys

Table 1. Classification of Oil Pipelines according to Variables

Variable	Case ID	Pipe Material	Pipe Thickness (mm)	Pipe Angle (°)
General case	GC	Carbon Steel	7.01	90
Material cases	MC1	AISI 304 Stainless Steel	7.01	90
	MC2	Inconel 617 Alloy	7.01	90
Size cases	SC1	Carbon Steel	5.16	90
	SC2	Carbon Steel	14.02	90
Angle cases	AC1	Carbon Steel	7.01	45
	AC2	Carbon Steel	7.01	25
Optimized case	OC	Inconel 617 Alloy	14.02	25

Table 2. Physical and Thermal Properties of Materials

Pipeline Material	Carbon Steel	AISI 304 Stainless Steel	Inconel Alloy 617
Density (g/cm^3)	7.85	8.00	8.36
Modulus of elasticity (Gpa)	200	193	173
Poisson's ratio	0.29	0.29	0.3
Tensile ultimate strength (Mpa)	460	586	570
Tensile yield strength (Mpa)	250	207	260
Specific heat ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{k})$)	480	500	419
Isotropic thermal conductivity ($\text{w/m}\cdot\text{k}$)	47.6	16.2	13.6

다. 또한, 단면은 내경 73 mm, 외경, 58.98 mm, 두께 7.01 mm의 SCH80 탄소강으로 구성되었다. 연천 오일플랜트에서는 송유관 내부의 유속을 0.688 m/s로 유지하고 있어 본 연구의 유속 또한 이와 같이 설정하였다.

2.2 송유관 좌굴저감을 위한 유한요소해석 변수 설정

Table 1은 본 연구에서 진행한 송유관 유한요소해석의 변수와 그에 따른 Case ID를 정리하여 나타낸 표이다. GC는 실제 연천 오일플랜트에서 사용되고 있는 송유관으로 모든 변수와 대조되는 변수이다. MC1과 MC2는 송유관의 재료에 변수를 둔 경우로 외적인 모델링은 GC와 동일하다. MC1 송유관의 AISI 304 Stainless Steel은 파이프 제조에 있어 보편적으로 사용되고 있는 재료이며 MC2의 Inconel 614 Alloy는 탄소강으로 구성되어 뛰어난 성능을 발휘한다(Lopez, 2005; Sah, 2023). 각 재료에 대한 기계적 특성은 Table 2에 정리하였다. Size cases는 송유관의 두께에 변수를 두어 SC1은 GC보다 얇은 두께(5.16 mm), SC2는 GC보다 두꺼운 두께(14.02 mm)로 설계하였다. 이는 미국 기계공학회(ASME)의 ASME B36.10M-2015(2015) 코드에 기반하여 설계되었으며 송유관 내부 유속에 영향을 주지 않도록 외경을 축소, 확장하여 모델링하였다. 파이프 각도는 GC의 90°보다 작은 45°, 25°로 설정하여 AC1과 AC2 송유관을 모델링하였다.

3. 비전통 오일 송유관의 유한요소해석

3.1 비전통 오일 송유관 유한요소해석 과정

Fig. 3은 본 연구에서 진행한 송유관의 유한요소해석의 과정을 나타낸 그림이다. 첫 번째로는 CFD 해석을 진행하였으며 이 단계에서 Ansys 프로그램 내부의 오일라-라그랑주 방정식, $k-\epsilon$ 난류모델을 통하여 난류모델을 정하였다(Eqs. (1)&(2)), (Ariyaratne et al., 2019; Peng and Cao, 2016). 이때, 난류를 일으키는 역청, CO₂, 모래 등 고체 입자의 존재를 고려하기 위해 DPM(Discrete Phase Model)을 사용하였다(Pereira et al., 2010). 그 결과로 온도분포와 압력분포의 결과를 도출하였고 압력분포는 정적 구조해석의 초기 단계로, 온도분포는 열해석의 초기단계로 입력되었다. 열해석은 유체의 온도 환경과 열역학 제 1법칙을 고려하여 수행되었으며 이 결과는 압력분포와 마찬가지로 정적 구조해석의 초기 단계로 입력되었다(Eqs. (3)&(4)), (LV, 2014). 이후 Eq. (5)에 따라 송유관에 수평하중 $P_p(133.54 \text{ N})$ 를 적용하여 정적 구조해석을 수행하였다(Balan and Kaliveeran, 2023). 여기서 r_i 는 송유관 내부의 반지름을 의미하고 p 는 송유관 내부 유체의 압력을 의미한다. 구조해석의 결과로 송유관에 발생한 좌굴 및 변형량을 확인하였다.

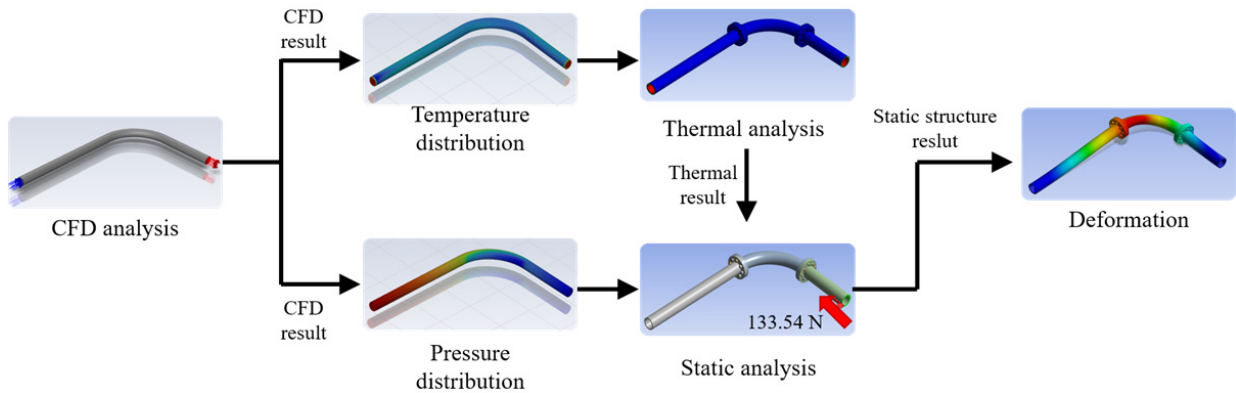


Fig. 3. Non-traditional Oil Pipeline Finite Element Analysis Process

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(pku_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_l}{\sigma_\epsilon})\frac{\partial k}{2x_j}] + G_k + G_b - \rho\epsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(p\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_l}{\sigma_\epsilon})\frac{\partial \epsilon}{2x_j}] + C_{1\epsilon}\frac{\epsilon}{K}(G_k + C_{3\epsilon}G_b) - C_{2\epsilon}\rho\frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx}\frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy}\frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz}\frac{\partial T}{\partial z}) + \ddot{q} = 0 \quad (3)$$

$$[K]\{T\} = \{Q\} \quad (4)$$

$$P_p = \pi r_i^2 p \quad (5)$$

3.2 비전통 오일 송유관 유한요소해석 결과

CFD해석, 열해석, 정적 구조해석 순으로 유한요소해석을 진행한 결과로 송유관에 발생한 변형, 최대하중 용량을 도출하였다(Fig. 4, Fig. 5). Fig. 4(a)에서 비교군인 GC와의 변형량을 확인하였을 때 가장 변형이 적게 발생한 송유관은 AC2로 송유관의 변형량을 줄이기 위해서는 송유관 각도를 최대한 작게 설정하여 설계하는 것이 중요한 것으로 확인되었다. 또한, 가장 많은 변형이 발생한 송유관은 SC1으로 나타났다. 파이프의 두께가 얇아짐에 따라 수평 하중에 의해 좌굴이나 휨 같은 변형이 GC에 비해 심해지는 것을 확인할 수 있으며 이와 반대로 두께가 두꺼운 파이프에 대해 유한요소해석을 진행했을 때 GC와 큰 변형의 차이가 발생하지 않았다. 이는 과대 설계로 이어질 수 있기 때문에 적절량의 두께는 GC와 동일한 것으로 판단된다. 재료를 변경하여 해석을 진행한 경우 GC와 큰 변형량의 차이가 없는 것을 확인하였지만 탄소강 보다는 Inconel 합금이 다소 우수한 성능을 나타내었다. Fig. 4(b)는 각 송유관의 최대하중 용량을 나타낸 그래프이다. 여기서 최대 하중

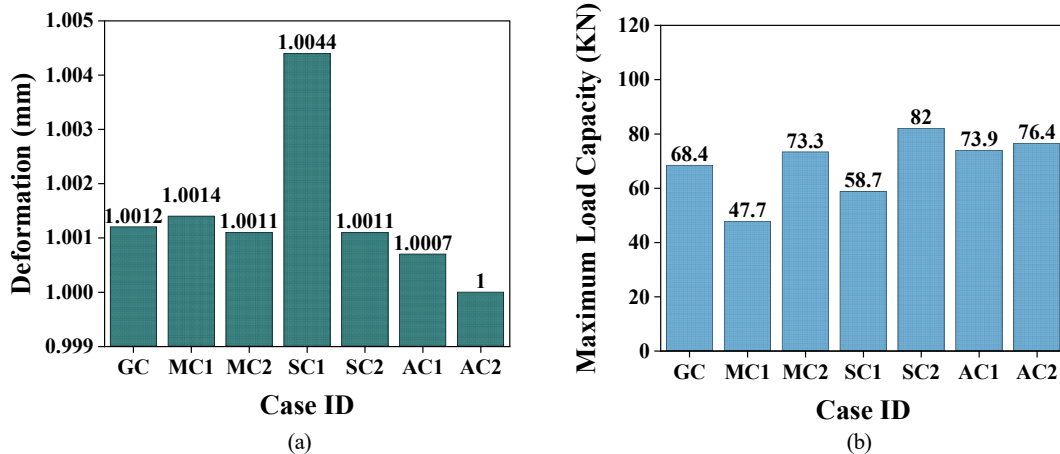


Fig. 4. FEM Results of Oil Pipeline: (a) Deformation Result, (b) Maximum Load Capacity Result

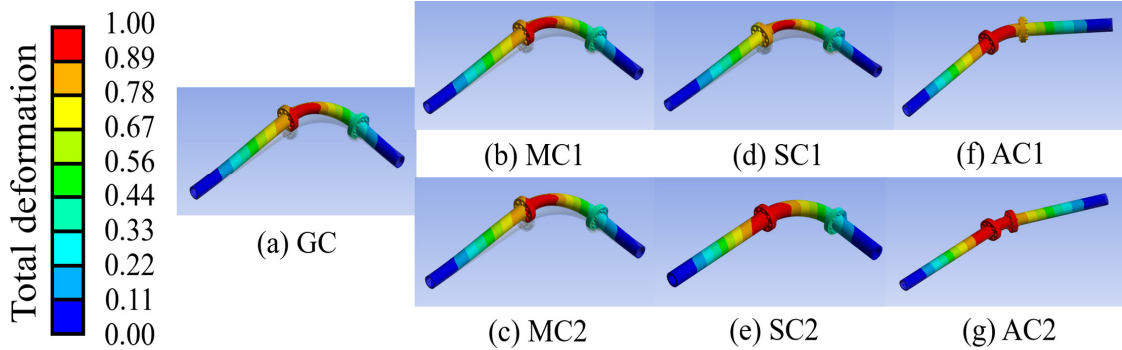


Fig. 5. Deformation Contour of Oil Pipeline

용량은 좌굴이 발생하는 임계하중을 말하며 Eq. (6)를 통해 도출되었다. Eq. (2)의 MLC는 최대하중 용량을 의미하며 Load factor는 Ansys를 통해 도출된 하중 계수이다. Axial load는 송유관에 적용되는 수평하중을 의미하고 본 연구의 경우 133.54 N이 적용되었다. 도출된 최대하중 용량을 비교하였을 때 재료의 중요성이 확인되었다. 탄소강이 아닌 일반 파이프용 강재인 AISI 304 Stainless Steel이 적용된 MC1의 하중 용량이 GC에 비해 상당히 낮은 것을 확인할 수 있으며 파이프의 각도가 줄어들수록 하중 용량이 점차 증가하는 것으로 나타났으며 변형이 가장 많이 발생하였던 SC1은 하중용량도 GC보다 낮은 것을 확인할 수 있다. 또한, 송유관 두께가 두꺼워짐에 따라 변형량의 차이가 두드러지지 않았던 SC2는 최대하중 용량 측면에서 우수한 성능을 나타내었다. 모든 송유관 케이스 중에서 가장 큰 82 kN의 최대하중 용량을 나타냈으며 변형이 가장 적게 발생하였던 AC1, AC2와 비교하여도 우수한 결과가 도출되었다.

$$MLC = Load\ factor \times Axial\ load \quad (6)$$

4. 비전통 오일 송유관의 좌굴 최적화

Fig. 6은 비전통 오일 송유관의 유한요소해석 결과 가장 변형이 적게 발생하고 최대 좌굴 허용하중이 높은 변수들만을 채택 및

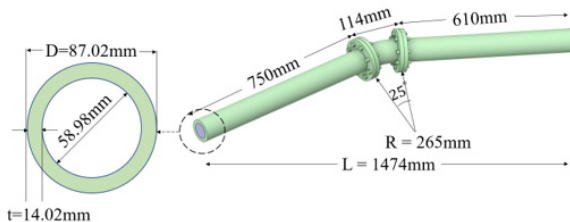


Fig. 6. Modeling of OC

조합하여 모델링한 OC이다(Table 1 참고). 재료는 Inconel 617 Alloy를 사용하였으며 송유관 두께는 14.02 mm, 연결파이프 각도는 25°로 설정하였다. 이때 비전통 오일이 운송되는 총 거리는 동일해야 하기 때문에 GC와 마찬가지로 길이 1474 mm의 송유관으로 모델링하였다. 이후 앞서 수행한 유한요소해석과 동일한 과정의 해석을 이 OC 송유관에도 동일하게 적용하여 수행하였다.

Fig. 7은 OC에 대한 유한요소해석 결과를 GC와 비교하여 나타낸 그래프이다. 변형량은 1 mm로 상당히 적은 변형이 나타난 것을 확인할 수 있으며 이는 각도에 변수를 둔 AC2와 동일한 양의 변형이다. 이를 통해 각도라는 변수에 다른 부가적인 변수를 도입하더라도 변형량이 줄어들지 않는 것을 확인하였다. 최대하중의 경우 88.4 kN으로 68.4 kN의 GC보다 20 kN이나 향상된 결과를 도출하였다. 송유관 두께의 변수가 적용된 SC2의 하중 용량은 82 kN으로 나타났지만 이 변수에 재료, 파이프 연결 각도 등의 변수가 추가되었을 때 더욱 향상되는 것을 확인하여 OC의 구조적 우수성을 확인하였다.

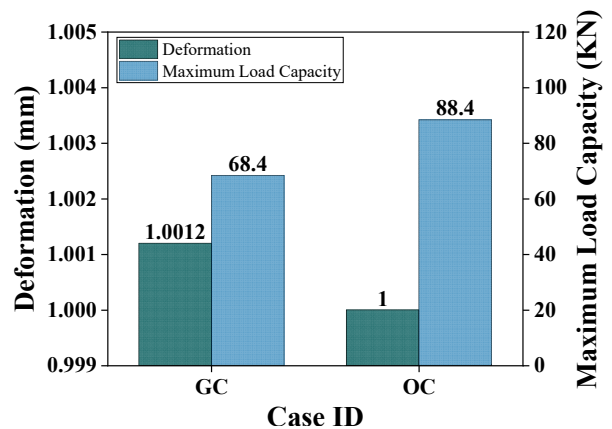


Fig. 7. FEM Results of Optimized Oil Pipeline

5. 결론


본 연구에서는 송유관의 내부에 고온, 고압의 비전통오일이 운송됨에 따라 송유관에 발생할 수 있는 변형에 의한 사고를 저감하기 위해 수행되었다. 첫 번째 단계로 국내에 있는 연천 오일플랜트에 실제 가동 중인 송유관에 대해 조사하여 같은 수치의 송유관을 Ansys 프로그램 내에 모델링하였다. 이후 송유관의 변형에 영향을 끼칠 수 있는 재료, 두께, 각도 등의 인자에 대해 조사하여 Case를 나누었으며 각 케이스에 따른 송유관을 모델링하여 유한요소해석을 진행하였다. 유한요소해석은 CFD, 열해석, 정적 구조해석 순으로 진행되었으며 그 결과로 최대하중 용량과 변형량을 도출하였다. 해석 결과 변형을 가장 줄일 수 있는 변수는 송유관의 각도로 판별되었고 가장 변형이 많이 발생하는 변수는 파이프의 두께로 판별되었다. 최대하중 용량의 경우 재료 변수가 적용된 송유관이 가장 낮은 하중 용량을 나타내었으며 가장 높은 하중 용량을 나타낸 변수는 두께였다. 이 결과를 통해 변형량은 가장 적고 최대하중 용량은 큰 변수만을 도출하여 최적의 송유관 OC를 모델링하였다. OC에 대해서도 같은 해석을 진행하여 가장 기본 모델인 GC와 발생한 변형량과 최대하중 용량을 비교하였다. 그 결과 변형량은 감소되며 하중용량은 약 30 % 가량 향상됨을 확인하였다.

본 연구의 유한요소해석을 통해 고온, 고압 등의 환경으로부터 변형에 안전하며 오일 화재 사고를 저감할 수 있는 송유관의 설계인자를 도출하였다. 추후 연구에서는 해석 결과를 바탕으로 송유관의 경계분석을 실시하여 과대 설계를 방지하며 위험은 방지할 수 있는 송유관을 도출하고자 한다. 또한, 송유관 일부만이 아닌 파이프 라인 전체에 대한 유한요소해석을 진행하여 오일플랜트의 전체의 위험성을 저감하기 위한 연구를 수행하고자 한다.

Acknowledgements

This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant RS-2022-00143541).

ORCID

Jong-Wan Hu  <https://orcid.org/0000-0001-6081-4469>

References

- Ansys Workbench. (2022). *Ansys Inc.* Canonsburg, Pennsylvania, USA.
- Ariyaratne, W. H., Ratnayake, C. and Melaen, M. C. (2019). "CFD modeling of dilute phase pneumatic conveying in a horizontal pipe using Euler-Euler approach." *Particulate Science and Technology*, Vol. 37, No. 8, pp. 1015-1023, <https://doi.org/10.1080/02726351.2018.1435595>.
- ASME B36.10M-2015 (2015). *Welded and Seamless Wrought Steel Pipe (B36.10M - 2015)*. The American Society of Mechanical Engineers(ASME), New York, USA.
- Balan, R. and Kaliveeran, V. (2023). *Thermal buckling of steel tube using finite element method*. Materials Today: Proceedings.
- Dong, X., Liu, H., Chen, Z., Wu, K., Lu, N. and Zhang, Q. (2019). "Enhanced oil recovery techniques for heavy oil and oilsands reservoirs after steam injection." *Applied Energy*, Vol. 239, pp. 1190-1211, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.244>.
- Lopez, D., Congote, J. P., Cano, J. R., Toro, A. and Tschiptschin, A. P. (2005). "Effect of particle velocity and impact angle on the corrosion-erosion of AISI 304 and AISI 420 stainless steels." *Wear*, Vol. 259, No. 1-6, pp. 118-124.
- Lv, L. W. (2014). "Thermal analysis module of ANSYS." *Advanced Materials Research*, Vol. 1030, pp. 653-656, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1030-1032.653>.
- Mao, S., Liu, W., Zhou, T., Xue, C. and Wei, D. (2023). "Steady-state and transient thermal-hydraulic analysis for high temperature heat pipe cooled reactors." *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 412, 112479, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112479>.
- Peng, W. and Cao, X. (2016). "Numerical prediction of erosion distributions and solid particle trajectories in elbows for gas-solid flow." *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 30, pp. 455-470, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.02.008>.
- Pereira, F. A. R., Ataide, C. H. and Barrozo, M. A. S. (2010). "CFD Approach using a discrete phase model for annular flow analysis." *Latin American Applied Research*, Vol. 40, No. 1, pp. 53-60.
- Polenta, V., Garvey, S. D., Chronopoulos, D., Long, A. C. and Morvan, H. P. (2015). "Effects of pipe curvature and internal pressure on stiffness and buckling phenomenon of circular thin-walled pipes." *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 278-282.
- Sah, I., Park, J. and Kim, E. S. (2023). "Fatigue life curves of alloy 617 in the temperature range of 800-950°C." *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 55, No. 2, pp. 546-554, <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.09.027>.
- Wiseman, P. E. and Barkey, M. E. (2019). "A study of buckling analyses of piping structures." *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 172, pp. 10-16, <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.020>.