

오일 샌드 플랜트 내 탑재설비(배관)의 안정성 향상을 위한 연구

박민우* · 아시프 라비아** · 이상엽*** · 허종완****

Research On Improving the stability of installed facilities(pipes) within the Oil Sand plant

Park, Min-woo* · Asif Rabea** · Lee, Sang-Yeob*** · Hu, Jong-Wan****

Abstract: With the development of the plant industry, there has been an increasing frequency of major accidents both domestically and internationally, emphasizing the importance of plant safety. Therefore, this study aims to investigate measures to enhance the stability of piping, a key component within the plant. Upon examining the piping, erosion, buckling, and fatigue emerged as significant risk factors among various potential hazards, leading to their selection as the primary risk factors in this study. Identifying variables that can collectively mitigate these factors, the study focuses on the material, thickness, and elbow angle of the piping. The reference piping model is established as the pipeline connecting the Skim Tank and IGF within a 300BPD oil sands modular plant in Yeoncheon, Gyeonggi-do. Utilizing the FEA analysis program ANSYS, the study conducts a variable analysis for the identified risk factors. The results of the analysis, through comparison and evaluation, provide evidence of the effectiveness of enhancing stability. It is observed that reducing the elbow angle significantly improves erosion and buckling, while changing to a material with high yield stress most significantly enhances stability when considering fatigue.

키 워 드: 오일샌드 플랜트, 배관, 안정성, 침식, 좌굴, 피로

Key Words: Oil Sand Plant, Piping, Stability, Erosion, Buckling, Fatigue

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근에는 석유 화학 플랜트 분야에서 전 세계적 인 에너지 수요 증가 및 유가 상승의 영향으로 관련 프로젝트가 증가하고 있다. 특히, 중동 지역을 중심으로 시장 규모가 확대되고 있는 상황이다(이입택, 2000). 현재는 기존 자원의 고갈과 가격상승으로 인해 캐나다의 오일샌드, 미국의 셰일 및 치밀 오일·가스 등과 같은 비전통 자원 생산에 관한 관심이 증가하고 있다.

비전통 자원은 기존의 전통 자원과 비교했을 때 탐사 위험도는 낮지만, 대량으로 존재하며, 개발 및 생산비용이 높은 특징을 가지고 있다(신현돈, 2020). 이러한 비전통 자원은 저유가 시기엔 개발이 어려웠던 자원이었으나, 현재는 지속한 기술개발과 가격상승으로 감소하는 전통 자원의 생산량을 보충할 수 있는 세계 석유 공급의 주요 축으로 부상하여 현재 비전통 자원이 아닌 주요 자원으로 인식되고 있다. 따라서, 한국과 같은 자원이 부족한 국가들은 비전통 자원을 다각적인 장기화 사업

측면에서 주목해야 할 분야임이 분명하다. 국내에서는 이런 상황에 대응하여 시장 진출을 위해 대형 EPC 건설사들이 현지 플랜트 산업에 참여하고 있으며 기술격차를 좁히기 위해 관련 R&D가 증가하고 있다. 또한, 국내 플랜트 산업은 글로벌 플랜트 시장의 급격한 성장과 함께 꾸준한 발전을 이루어왔다. 하지만 국내 플랜트 시설은 산업 발전과 함께 설치된 많은 플랜트 내 탑재설비들이 노후화되어 폭발, 화재 등과 같은 대형사고가 발생하고 있다(윤용진, 박달재, 2019). 특히, 2011년 SK에너지 인천 정유공장 화재 사고, 2003년 SK에너지 울산 정유공장 화재 사고, 2020년 서산 롯데케미칼 폭발 사고, 2017년 S-Oil 울산 정유공장 폭발 사고 등 그 외에도 많은 사고들이 빈번하게 발생하고 있다. 이에 따라, 플랜트의 전체적인 안정성이 중요한 과제로 부각 되고 있다. 특히, 배관은 플랜트 내에 설치되는 탑재설비들을 연결하여 오일이나 가스가 흐를 수 있게 하는 중요한 역할을 담당하기 때문에 구조적인 안정성을 확보하는 것이 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 플랜트 내 배관의 안정성을 향상시키는 방안에 대해 연구를 진행하였다.

1.2 연구 방법 및 범위

본 연구에서는 기존 대상을 캐나다 앨버타주에 오일샌드 모듈화 플랜트 건설을 위한 설계,

* 인천대학교 구조진동연구실 석사과정

** 인천대학교 구조진동연구실 석사과정

*** 인천대학교 구조진동연구실 석사과정

**** 인천대학교 도시환경공학부 건설환경공학과 교수
(교신저자: jongp24@inu.ac.kr)

현장 적용 및 제작 기술개발을 위해 제작된 경기도 연천지역 300BPD급 오일샌드 육상플랜트 내 Skim Tank와 IGF(Induced Gas Flotation Package)를 연결하는 배관으로 설정하였다(Figure 1 참고). 기존 대상으로 설정한 배관 부분을 나타낸 설계도를 Figure 2에 나타내었다. 먼저, 플랜트 산업을 조사하고 배관에서 발생할 수 있는 주요 위험 요인을 분석한 뒤, 이를 저감시킬 수 있는 변수를 설정하였다. 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)프로그램인 ANSYS를 활용하여 변수 해석을 통해 기존 배관 모델과 21개 배관 모델 해석결과를 비교·분석하여 안정성 향상 효과를 입증하였다.



Figure 1. 기준 플랜트

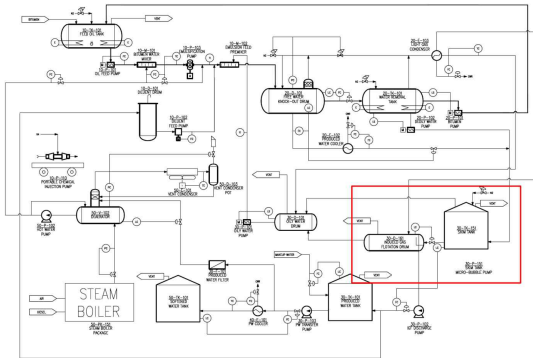


Figure 2. 기준 플랜트 설계도

2. 플랜트 사업

산업통상자원부의 ‘2023년 상반기 해외 플랜트 수주실적’ 보고서에 따르면, 2023년 상반기 국내 기업의 해외 플랜트 수주실적은 130억 5천만 달러로 집계되었으며, 전년 동기 대비 40.2% 증가한 것으로 나타났다. 이러한 성장은 특히 아프리카와 중동 지역에서 플랜트 수주실적이 크게 증가한 것에 기인하였으며, 플랜트의 산업 부문은 발전·담수, 산업시설, 기자재, 석유 화학, 오일·가스, 해양 등 다양한 형태로 존재한다. 본 논문에서 다루는 전통 자원인

석유 화학 플랜트와 오일·가스 플랜트 수주 규모는 각각 총 74억 달러, 7억 3천만 달러로 전년 동기 대비 각각 119.6%, 90.3%로 두 배 안팎으로 증가한 수치를 보였다. 한국플랜트산업협회에 따르면 국내에서는 현대건설, DL이앤씨, 삼성물산 등 대기업 및 기타 중소기업들이 중동 지역을 중심으로 해외 플랜트 사업 수주 사례가 증가하고 있다고 보도했다. 열석유 회수증진(Thermal Enhanced Oil Recovery, EOR) 보고서에 따르면, 2018년부터 2028년까지 비전통 오일의 생산과 관련된 플랜트의 EOR 부문 건설시장은 연평균 1.7% 성장하여 2028년 약 229억 달러 수준으로 성장할 것으로 전망되었다. 또한 해외에서는 대표적으로 중국이 2003년부터 벤쿠버와 알버타주를 잇는 파이프라인 건설 사업을 수행하며 비전통 자원의 개발에 노력을 기울이고 있다. 국내에서는 국토교통부가 관련 연구과제를 발주하여, 비전통 오일 개발 기술 자립화를 통해 플랜트 건설 경쟁력을 높이기 위해 플랜트 핵심 기술들을 국산화하고, 기본 설계 기술(Front End Engineering and Design, FEED)을 확보하여 해외 비전통오일 플랜트 건설시장에 진출하는 것을 목표로 하고 있다.

플랜트 특성상 에너지 및 화학물질 생산과 같은 위험성 높은 작업을 수행하는 복잡한 시설로, 다양한 생산 설비들이 통합되어 운영되기 때문에 안정성은 경제적인 피해 및 환경적인 피해를 방지하는 데 중요한 부분이다. 따라서 플랜트에서 발생가능한 여러 위험 요인들을 최소화하는 방안을 마련해야 한다.

3. 배관의 위험요인

배관이란 플랜트 내에 설치되는 각종 탑재설비와 설비를 연결하여 유체나 가스를 이동하고 저장하는 핵심적인 구성요소로, 안정성을 유지하는 것은 중요하다. 특히 플랜트 내의 배관은 외부 환경, 장시간 운전, 제작 오차와 같은 상황에 따라 다양한 문제들이 발생할 수 있다. 이로 인해 구조적 결함이 발생하고 결과적으로 배관 파손이 발생하면 플랜트의 운영 효율과 전반적인 안정성에 안 좋은 영향을 미칠 수 있다. 배관 파손은 여러 가지 원인으로 인해 발생할 수 있다(한국산업안전보건공단, 2012). 예를 들면, 유지·외부의 침식 및 부식에 의한 파손, 재료결함, 용접결함, 피로, 좌굴, 유지관리 문제로 인한 기계적 파손, 온도효과, 지반의 움직임, 지진과 같은 외부 유해 위험 요인에 의한 파손 등이 이에 해당한다. 특히, 오일샌드 플랜트 내 배관은 극한 조건의 외부 환경의 영향과 비튜멘, 모래, 물 등 다양한 입자가 혼합된 유체가 흐르기 때문에 설계, 제작 및 운영 단계에서 이러한 원인들을 고려하여 안정성을 향상시키는 것은 중요하다. 다

양한 원인 중에서도 침식, 좌굴, 피로가 가장 큰 문제점으로 부각되고 있으며 이와 관련된 대형 사고 사례도 증가하고 있는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 침식, 좌굴, 피로를 주요 위험 요인으로 설정하였다.

침식(Erosion)이란 유체 내에 흐르는 불순물이나 입자의 충격으로 인해 두께가 감소하는 현상이다. Figure 3은 침식된 배관의 단면이다(C. Duarte, 2017). 배관 감육 현상은 주로 3가지로 구분된다(김정훈 외., 2014). 첫째, 저합금강 및 탄소강에서 용해 작용 및 표면 산화 피막의 부식 및 용해 작용에 의해 촉진되는 유동 가속 부식(Flow Accelerated Corrosion, FAC)이다. 두 번째, 배관경이 감소하는 부분의 하류 등에서 발생하는 캐비테이션 침식(Cavitation Erosion)은 배관이 손상을 입는 현상으로, 기포의 붕괴 압력으로 인해 발생한다. 마지막으로 본 연구에서 다루는 고체 입자 충돌침식(Solid Particle Erosion)은 유체 내 불순물이나 입자가 배관 표면에 충돌하여 발생하여 발생하는 충격력에 의해 발생한다. 고체 입자 충돌침식은 대부분 입자 특성, 배관 재질, 외부 환경, 두께, 곡률, 코팅 여부 등의 다양한 요인에 영향을 받는다. 특히 유체의 흐름이 변하는 구간에서 국부적으로 발생하는데 이는 누출, 배관 파손을 유발하여 대형사고를 초래하고, 결과적으로 플랜트 운영 정지를 야기할 수 있다.



Figure 3. 배관 침식 단면

좌굴(Buckling)이란 축 방향 압축력을 받는 구조물이 변형되는 현상을 의미한다. 이는 안정성을 저감시키는 주요 요인 중 하나이므로 좌굴에 대한 위험성을 판단하는 것은 중요하다.

구조물은 좌굴이 발생하기 전까지 평형상태를 유지한다. 하지만 좌굴이 시작되면 구조물은 평형을 잃고 횡 방향으로 변형이 발생하게 되어 외부 하중을 지지할 수 없는 상태가 된다. 이러한 좌굴 현상은 두께가 얇은 판이나 기둥의 휨 좌굴(Flexural Buckling) 국한되는 것은 아니며, 비틀림에 의해 발생하는 비틀림좌굴(torsional Buckling)과 전단력에 의해 발생하는 전단 좌굴

(Shear Buckling), 마지막으로 본 연구에서 다루고 있는 구조물의 국부 지역에서 발생하는 국부 좌굴(Local Buckling) 등이 있다(이철호 외., 2012). 또한, 좌굴에 의해 발생하는 변형이 구조물의 바깥에 있는지 아니면 내부에 있는지에 따라 면외좌굴(out-of-plane buckling), 면내좌굴(In-plane buckling)으로 구분된다. 좌굴 현상은 주로 구조물의 형상 조건이나 불완전한 하중조건 뿐만 아니라, 배관의 굽힘, 배관 재질, 지반 조건 등과 같은 다양한 요소의 영향을 받아 발생한다. Figure 5는 좌굴이 발생한 배관이다(Amer, 2017). 좌굴이 발생하면 해당 부위에서의 흐름이 정체되거나 저속화되어 배관 내 불순물이나 입자가 침전되는 적층 현상이 발생하며 응력이 집중된다. 결과적으로 좌굴 변형을 증가시키며, 좌굴 부위에서 파손이 발생하고 전체적인 안정성에 영향을 미친다.



Figure 4. 좌굴 발생 배관

피로(Fatigue)는 반복되는 하중이 구조물에 지속적으로 작용할 경우 구조물의 강도가 감소하는 현상을 의미한다. Figure 7은 피로균열이 발생한 배관이다(Jang et al., 2016). 허용 하중보다 작은 하중이 작용하더라도 이를 반복적으로 받게 되면 내부에 균열이 발생하게 되고, 이로써 장기간에 걸쳐 파괴되는 피로파괴 현상이 발생하게 된다.

피로균열은 주로 금속 표면의 응력 집중 부위에서 연마, 거칠기와 같은 표면 결함과 용접결함 및 구조 설계 효과에 의해 발생한다. 또한, 피로 손상에는 두 가지 유형으로 나뉜다. 첫째, 10^4 반복 주기 이상에서 탄성영역의 낮은 응력의 반복 하중이 적용되어 발생하는 고주기피로(high-cycle fatigue)이다. 두 번째로, 10^4 반복 주기 이하에서 발생하는 상대적으로 적은 반복 주기의 반복하중이 걸리는 부위에서 발생하는 저주기피로(low-cycle fatigue)이다(황재현 외., 2016).

피로현상은 주로 배관의 재질, 반복적인 응력, 외·내부 온도 조건, 형상 조건이 피로를 발생시키는 주요 원인이다. 이러한 원인들이 지속적으로 작용하면 균열의 성장 속도가 지수적으로 증가하

여 피로파괴가 돌발적으로 발생하며, 플랜트의 안정성을 저해할 뿐만 아니라 운영 효율성도 저하한다.



Figure 5. 피로균열 발생 배관

앞서 선정된 위험 요인인 침식, 좌굴, 피로에 대해 분석 결과를 토대로, 이를 공통적으로 저감시킬 수 있는 변수를 배관의 재료, 두께, 엘보우 각도로 선정하였다.

4. 배관 해석

4.1 해석 조건

본 연구에서는 경기도 연천지역에 있는 300 BPD급 오일샌드 모듈화 플랜트 내에 Skim Tank와 IGF를 연결하는 배관을 기준 배관 모델로 설정하여 모델링을 수행하였다. 기준 배관 모델에서 선정된 변수값을 변경하고 ANSYS 프로그램을 활용하여 유한요소해석을 통해 침식, 좌굴, 피로에 대한 거동 특성을 비교하고 분석하여 안정성 향상 효과를 입증하였다. 기준 배관 모델의 재료는 탄소강(Carbon Steel), 두께는 5mm, 엘보우 각도는 90도이다. 기준 배관 모델에서 재료를 스테인리스강(Stainless Steel), 니켈 합금(Inconel 617)으로 변경하였다. 각 재료에 대한 물성치는 ANSYS 프로그램에서 주어진 조건을 참고하여 Table 1에 정리하였다. 또한, 각 재료에 대한 Strain Life 선도는 Figure 9에 나타내었다.

Table 1. 배관 재료에 따른 물성치

종류	Carbon Steel	Stainless Steel	Inconel Alloy 617
밀도	7.85 g/cm ³	7.75 g/cm ³	8.36 g/cm ³
비열	0.480 J/(g·°C)	0.5 J/(g·°C)	0.419 J/(g·°C)
열전도율	47.6 W/m·K	16.3 W/m·K	13.6 W/m·K
탄성계수	200000 MPa	193000 MPa	173000 MPa
포아송비	0.29	0.31	0.3
인장 항복응력	250 MPa	207 MPa	260 MPa
극한 인장응력	460 MPa	555 MPa	570 MPa
압축 항복응력	250 MPa	207 MPa	260 MPa
극한 압축응력	460 MPa	555 MPa	570 MPa

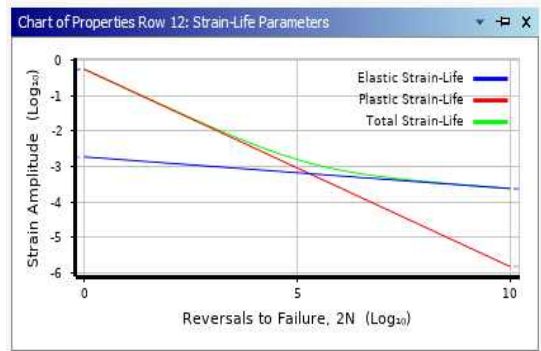
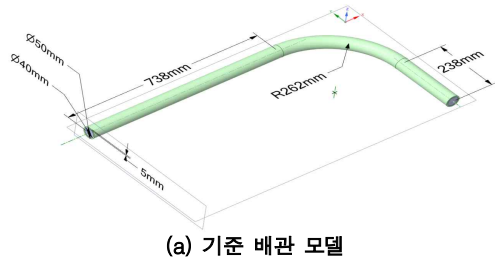
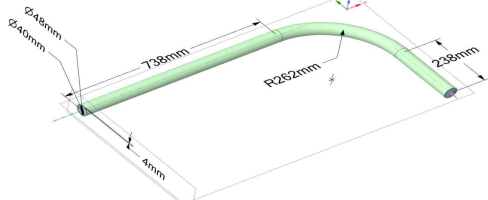


Figure 6. 각 재료에 대한 strain life 선도

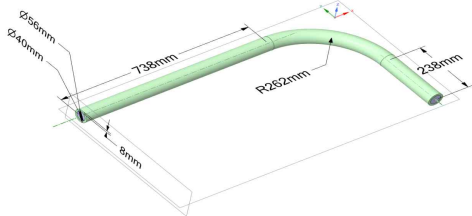
배관의 두께를 4mm, 8mm로 변경하였으며, 두께에 대한 영향성만을 보기 위해 내부 직경은 고정하였다. 엘보우 각도를 60도, 45도로 변경하였고 룡 엘보우로 고정시키기 위해 곡률반경은 262mm로 고정하였다. Figure 7에 두께를 변경하여 모델링한 배관 모델을 나타내었고 Figure 11에 엘보우 각도를 변경하여 모델링한 배관 모델을 나타내었다.



(a) 기준 배관 모델

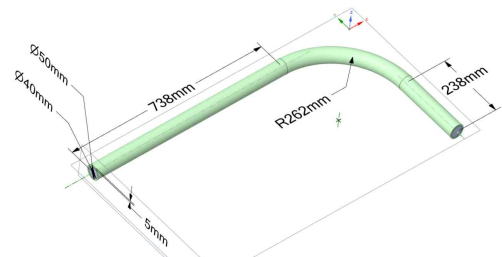


(b) 두께 4mm 배관 모델

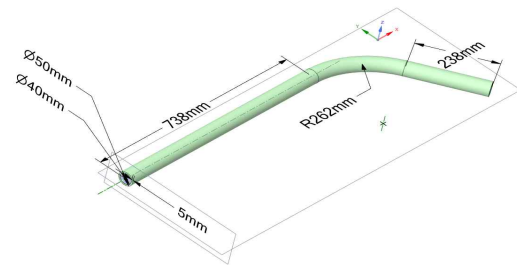


(c) 두께 8mm 배관 모델

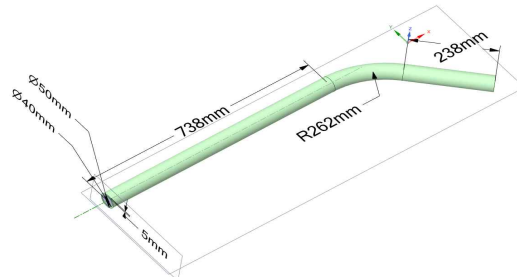
Figure 104. 두께에 따른 배관 모델



(a) 기준 배관 모델



(b) 엘보우 각도(60°) 배관 모델



(c) 엘보우 각도(45°) 배관 모델

Figure 8. 엘보우 각도에 따른 배관 모델

Meshing 단계에서 배관 모델의 Mesh 크기는 61.43mm, 유체모델은 9.71mm로 분할하였다. 배관 내에는 이산화탄소(CO₂)와 비튜멘(Bitumen)이 혼합된 유체를 구현하였으며, 하중은 열 수축과 열팽창으로 인한 열 하중과 내부 유체에 의한 축 방향 하중만으로 고려하였다. 또한, 지점 조건은 입·출구 부분에 고정(Fix)지점으로 설정하였다. 환경조건, 입자 조건, 유체조건은 Table 2에 나타내었다. 총 21개의 케이스를 제작하여 위험 요인에 대한 FEA 해석을 진행하였다.

Table 2. 유체·입자·환경 조건

항목	세부 항목	값
Fluid	유량	6.77 m ³ /hr
	유체속도	0.688 m/s
	압력(Guage Pressure)	0.05 Mpa
	유체 밀도	956.1 kg/m ³
	비열	1.005 kcal/kg-°C
	점성	0.311 cp
	유체 흐름	난류 (Turbulent Flow)
Particle	종류	CO ₂ , Bitumen
	CO ₂ (직경)	3.3×10 ⁻¹⁰ m
	CO ₂ (질량유량)	0.000179 kg/s
	Bitumen (직경)	2.5×10 ⁻⁶ m
	Bitumen (질량유량)	0.000358 kg/s
	총 질량유량=유량×유체 밀도	1.79 kg/s
Environment	내부압력	0.05 Mpa
	배관 내부 온도	90 °C
	배관 외부 온도	-10 °C
	하중	133,549 N

4.2 해석 방법

침식에 대한 거동 특성을 예측하기 위해, 난류 모델은 엘보우 주변의 흐름 특성을 정확하게 예측하는 k-ω 난류 모델을 사용하였다. 좌굴 해석을 위해서는 다음과 같은 절차가 필요하다. 먼저, Fluent 기능을 활용하여 각 배관 모델에 대해 모델링을 수행하고, Meshing 단계에서 유체 및 배관 모델을 여러 개의 요소로 분할한다. 그 후, 각 재료에 대한 물성치를 입력하고 지점 조건, 온도 조건, 하중조건 등을 설정하여 전산 유체 역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 해석결과를 도출한다. 최종적으로, 다상 유동 모델(Discrete Phase Model, DPM)을 구현하기 위해 각 입자에 대한 물성치를 입력하고, 이를 통해 해석 결과인 침식률(Erosion Rate)을 도출하였다. 침식률이란 단위 시간당 단위 면적에 침식되는 양을 의미한다.

좌굴에 대한 거동 특성을 예측하기 위해 다음과 같은 절차가 필요하다. 먼저, 열 해석(Thermal Analysis) 시스템을 활용하여 경계조건에 따른 열 하중을 도출하고 정적 구조해석(Static Structural) 시스템을 활용하여 각 배관 모

델에 대해 모델링을 수행하고 Meshing 단계를 거쳐 도출된 결과와 침식해석에서 수행한 CFD 해석결과를 결합한다. 최종적으로, 고유치 좌굴(Eigenvalue Buckling) 해석 시스템을 사용하여 좌굴 하중 계수와 변형 결과를 도출한다. 좌굴 하중 계수와 축 방향 하중을 곱하여 임계하중 값을 도출하였다. 임계하중이란 좌굴을 일으키는 최소의 압축력을 의미한다.

피로에 대한 거동 특성을 예측하기 위해, 외부 환경조건을 극한 조건으로 간주하여 각 재료에 대해 Strain Life 방법은 실험값과 비교해 높은 정확도를 제공하는 수정 공통 경사법(Modified Universal Slopes)을 사용하였다(Harun et al., 2018; Zhang et al., 2009; Kim, et al., 2002). 수정 공통 경사법 적용을 위한 변형률 조건은 Table 3에 정리하였다. 또한, 금속재료의 피로 손상을 정확히 예측하는 Goodman 피로 방정식을 적용하였다. 피로해석을 위해서는 다음과 같은 절차가 필요하다. 좌굴해석 절차에서 Thermal Analysis 결과, CFD 해석결과와 결합하는 단계까지는 동일하며, Static Structural 단계에서 Fatigue Tool을 사용하여 Goodman 피로 방정식을 적용한 뒤, 피로 수명에 관한 결과를 도출한다. 피로수명이란 피로 파괴 될 때까지의 하중 반복 횟수를 의미한다.

Table 3. Strain life parameters

Muralidharan Manson's Modified Universal Slopes	
Strength Coefficient (σ'_f)	3.75e+08
Strength Exponent(b)	-0.090
Ductility Coefficient(ϵ'_f)	0.955
Ductility Exponent(c)	0.575
Cyclic Strength Coefficient (k')	4.18e+08
Cyclic Strain Hardening exponent (n')	0.16

4.3 해석결과 및 분석

4.3.1 침식해석결과 및 분석

침식해석결과, 재료를 탄소강에서 스테인리스강, 니켈 합금으로 변경했을 때 최대 침식률이 각각 $4.00 \times 10^{-10} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $3.78 \times 10^{-10} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $3.59 \times 10^{-10} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 이다. 기존 배관 모델의 재료보다 스테인리스강, 니켈 합금을 사용하는 것이 더 적은 침식이 발생한다는 것을 확인할 수 있고 니켈 합금의 침식이 가장 적게 발생한다는 것을 확인할 수 있다. Table 4는 Figure 9의 해석결과를 정리한 것이다.

Table 4. 재료에 따른 최대 침식률

종류	최대 침식률
Carbon Steel	$4.00 \times 10^{-10} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
Stainless Steel	$3.78 \times 10^{-10} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
Inconel 617	$3.59 \times 10^{-10} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

두께를 4mm로 감소시켰을 경우 최대 침식률이 $4.80 \times 10^{-10} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 이고, 8mm로 증가시켰을 경우 최대 침식률이 $3.81 \times 10^{-10} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 이다. 두께를 증가시키에 따라 침식이 적게 발생한다는 것을 확인할 수 있다. Table 5는 Figure 10의 해석결과를 정리한 것이다.

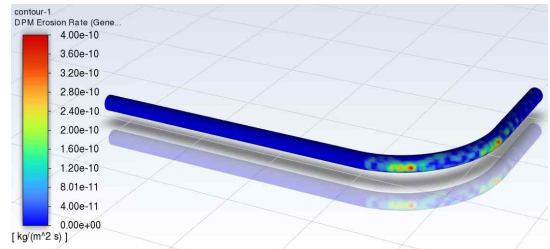
Table 5. 두께에 따른 최대 침식률

종류	최대 침식률
5mm	$4.00 \times 10^{-10} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
4mm	$4.80 \times 10^{-10} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
8mm	$3.81 \times 10^{-10} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

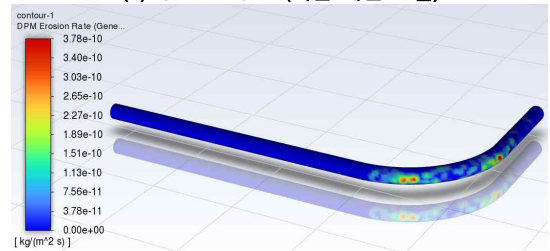
엘보우 각도를 60도로 변경할 경우 최대 침식률이 $3.36 \times 10^{-10} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 이고, 45도로 변경할 경우 $2.09 \times 10^{-10} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 이다. 엘보우 각도를 감소시키에 따라 침식률이 감소한다는 것을 확인할 수 있다. Table 6은 Figure 11의 해석결과를 정리한 것이다.

Table 6. 엘보우 각도에 따른 최대 침식률

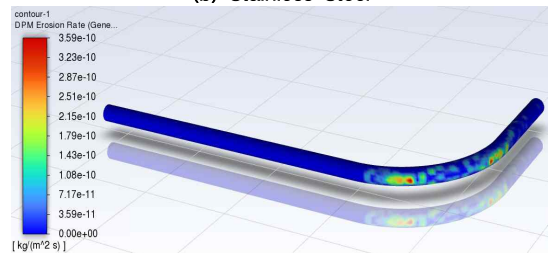
종류	최대 침식률
90°	$4.00 \times 10^{-10} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
60°	$3.36 \times 10^{-10} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
45°	$2.09 \times 10^{-10} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$



(a) Carbon Steel(기준 배관 모델)

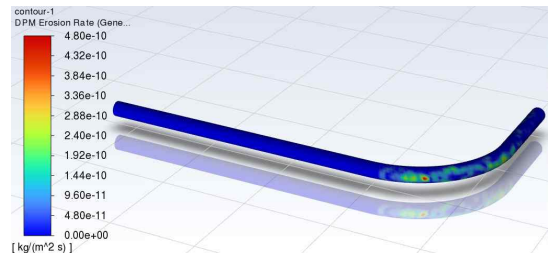


(b) Stainless Steel

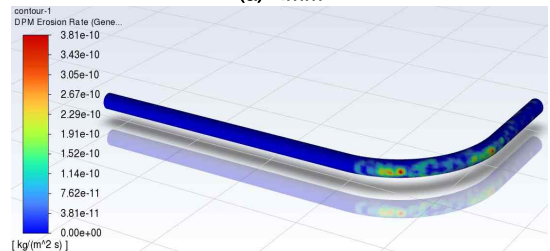


(c) Inconel 617

Figure 9. 재료에 따른 침식 결과



(a) 4mm



(b) 8mm

Figure 10. 두께에 따른 침식 결과

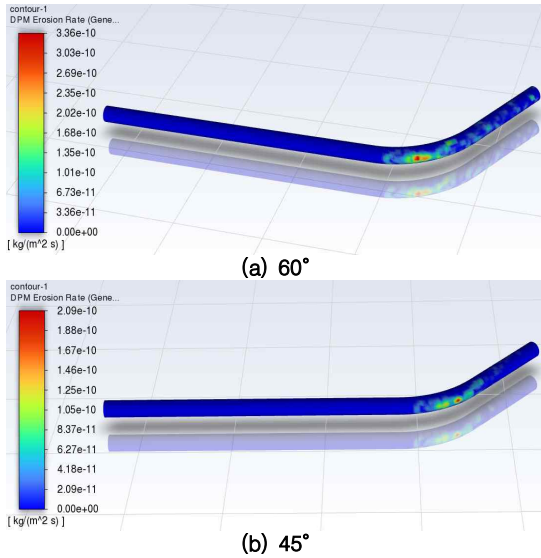


Figure 11. 엘보우 각도에 따른 침식 결과

결론적으로, 엘보우 부분에서 침식률이 높은 것을 확인할 수 있으며, 최대 침식률이 기준 배관 모델 대비 재료를 니켈 합금으로 변경했을 때 11.42% 감소하였고, 두께를 증가시켰을 때 4.75% 감소하였으며, 엘보우 각도를 감소시켰을 때 47.75% 감소하였다. 특히, 다른 변수보다 엘보우 각도를 감소시켰을 때 상대적으로 적은 침식이 발생했다. 이는 배관 벽면에서의 속도 벡터가 수직 방향으로 변경되어 충격이 증가하기 때문이다. 이를 통해, 침식은 엘보우 각도를 감소시켰을 때 가장 큰 안정성 향상 효과를 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

4.3.2 좌굴해석결과 및 분석

좌굴해석을 통해 좌굴 변형 값과 좌굴 하중 계수를 도출했다. 도출된 좌굴 하중 계수에 축방향 하중 133.549N을 곱하여 임계하중 결과를 도출하였다. 재료를 탄소강에서 스테인리스강, 니켈 합금으로 변경했을 때 임계하중이 각각 61.22kN, 42.94kN, 65.26kN이다. 앞서 진행한 침식 해석결과와 다르게 스테인리스강으로 변경했을 때 탄소강보다 낮은 안정성 향상 효과를 보여주었고 니켈 합금으로 변경했을 때 가장 큰 안정성 향상 효과를 얻을 수 있었다. Table 7은 Figure 12의 해석결과를 정리한 것이다.

Table 7. 재료에 따른 좌굴 결과

종류	좌굴 하중 계수	임계하중
Carbon Steel	458.39	61.22kN
Stainless Steel	321.52	42.94kN
Inconel 617	488.66	65.26kN

두께를 4mm로 감소시켰을 경우 임계하중이 57.83kN 이고, 8mm로 증가시켰을 경우 임계하중이 65.16kN 이다. 두께를 증가시킴에 따라 임계하중이 증가한다는 것을 확인할 수 있다. Table 8은 Figure 13의 해석결과를 정리한 것이다.

Table 8. 두께에 따른 좌굴 결과

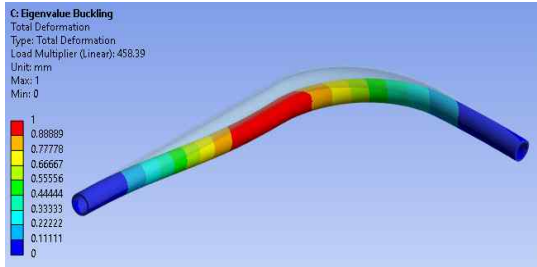
종류	좌굴 하중 계수	임계하중
5mm	458.39	61.22kN
4mm	433.02	57.83kN
8mm	487.94	65.16kN

엘보우 각도를 60도로 변경할 경우 임계하중이 64.36kN 이고, 45도로 변경할 경우 68.27kN 이다. 엘보우 각도를 감소시킴에 따라 임계하중이 증가한다는 것을 확인할 수 있다. Table 9는 Figure 14의 해석결과를 정리한 것이다.

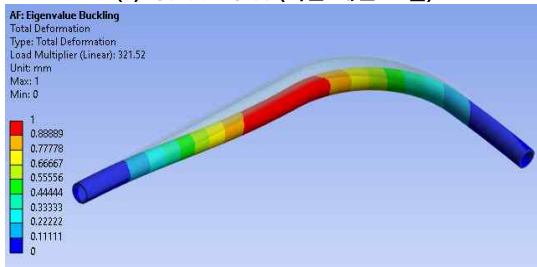
Table 9. 엘보우 각도에 따른 좌굴 결과

종류	좌굴 하중 계수	임계하중
90°	458.39	61.22kN
60°	481.91	64.36kN
45°	511.21	68.27kN

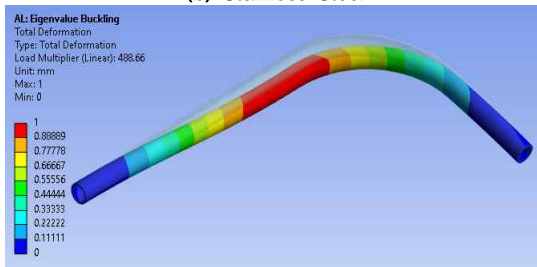
결론적으로, 침식 결과와 동일하게 엘보우 부분에서 좌굴 변형이 크게 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 임계하중이 기준 배관 모델 대비 재료를 니켈 합금으로 변경했을 때 6.6% 증가하였고, 두께를 증가시켰을 때 6.44% 증가하였으며, 엘보우 각도를 감소시켰을 때 11.52% 증가하였다. 이를 통해 엘보우 각도를 감소시켰을 때 가장 큰 안정성 향상 효과를 얻을 수 있었다.



(a) Carbon Steel(기존 배관 모델)

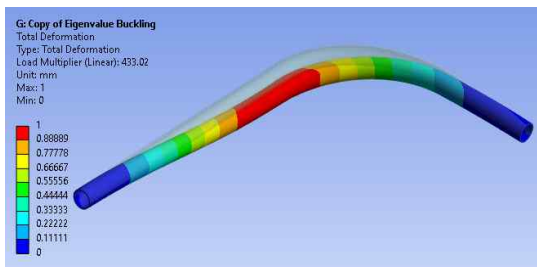


(b) Stainless Steel

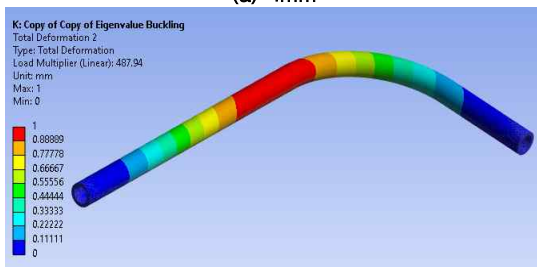


(c) Inconel 617

Figure 12. 재료에 따른 좌굴해석결과

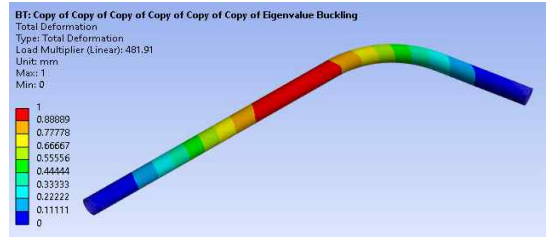


(a) 4mm

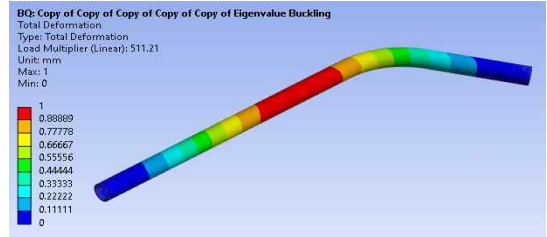


(b) 8mm

Figure 13. 두께에 따른 좌굴해석결과



(a) 60°



(b) 45°

Figure 14. 엘보우 각도에 따른 침식 결과

4.3.3 피로해석결과 및 분석

피로해석결과, 최소 피로수명이 재료를 탄소강에서 스테인리스강, 니켈 합금으로 변경했을 때 각각 20742cycle, 5257cycle, 29165cycle 이다. 앞서 진행한 해석결과와 동일하게 스테인리스강의 피로수명이 가장 낮았고, 니켈 합금의 피로수명이 가장 낮았다. Table 10은 Figure 15의 해석결과를 정리한 것이다.

Table 10. 재료에 따른 최소 피로수명

종류	최소 피로수명
Carbon Steel	20742cycle
Stainless Steel	5257cycle
Inconel 617	29165cycle

두께를 4mm로 감소시켰을 경우 최소 피로수명이 18972cycle 이고, 8mm로 증가시켰을 경우 최소 피로수명이 23847cycle 이다. 두께를 증가시키에 따라 최소 피로수명이 증가한다는 것을 확인할 수 있다. Table 11은 Figure 16의 해석결과를 정리한 것이다.

Table 11. 두께에 따른 최소 피로수명

종류	최소 피로수명
5mm	20742cycle
4mm	18972cycle
8mm	23847cycle

엘보우 각도를 60도로 변경할 경우 최소 피로수명이 24861cycle 이고, 45도로 변경할 경우 27872cycle 이다. 엘보우 각도를 감소시킴에 따라 최소 피로수명이 증가한다는 것을 확인할 수 있다. Table 12는 Figure 17의 해석결과를 정리한 것이다.

Table 12. 엘보우 각도에 따른 최소 피로수명

종류	최소 피로수명
90°	20742cycle
60°	24861cycle
45°	27872cycle

결론적으로, 입·출구 부분에서 피로수명이 가장 낮은 것을 확인할 수 있으며 최소 피로수명이 기준 배관 모델 대비 재료를 니켈 합금으로 변경했을 때 40.61% 증가하였고, 두께를 증가시켰을 때 14.97% 증가하였으며, 엘보우 각도를 감소시켰을 때 34.37% 증가하였다. 이를 통해, 재료를 항복응력이 가장 높은 니켈 합금으로 변경했을 때, 가장 큰 안정성 향상 효과를 얻을 수 있었다.

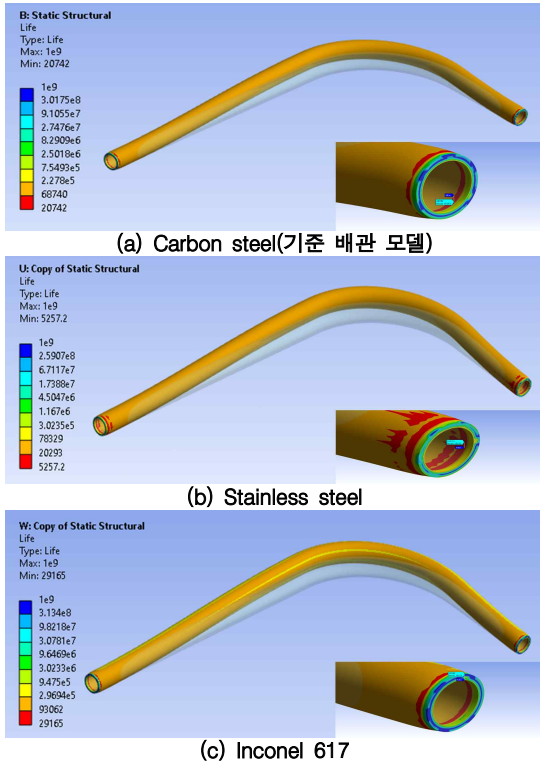


Figure 15. 재료에 따른 피로 결과

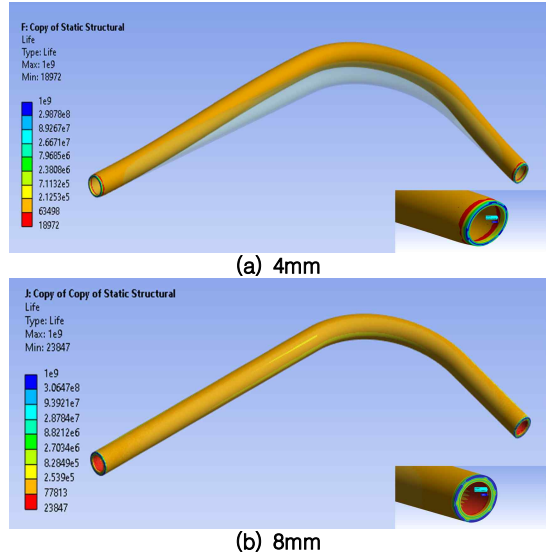


Figure 16. 두께에 따른 피로 결과

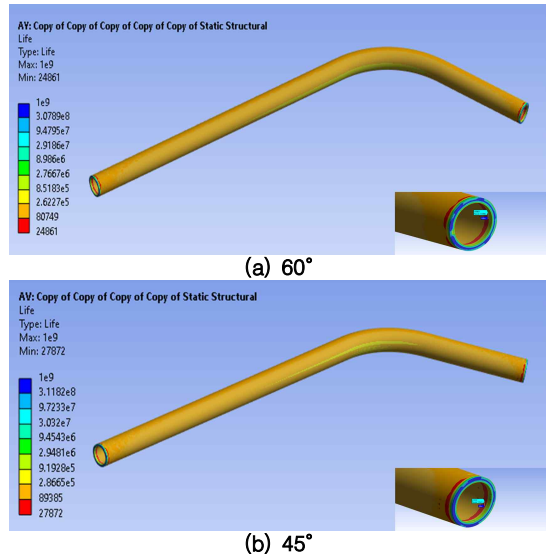


Figure 17. 엘보우 각도에 따른 피로 결과

5. 결론

본 연구에서는 경기도 연천지역 300BPD급 오일샌드 플랜트 내의 파이프라인을 기준으로 배관 모델을 설정하였다. 배관의 위험 요인을 조사한 결과, 침식, 좌굴, 피로가 주요 위험 요인으로 나타났으며, 이를 공통적으로 저감시킬 수 있는 변수로 배관의 재료, 두께, 엘보우 각도를 설정하였다. ANSYS 프로그램을 활용하여 수행한 FEA 해석을 통해 위험 요인에 대한 변수 해석을 수행하고, 이를 통해 안정성 향상 효과를 입증하였다.

침식해석결과, 최대 침식률이 기존 배관 모델 대비 니켈 합금으로 변경할 때 11.42% 감소하였고, 두께를 8mm로 증가시켰을 때 4.75% 감소하였으며, 엘보우 각도를 45도로 감소시켰을 때 47.75% 감소하였다. 이를 통해, 침식은 엘보우 각도를 감소시켰을 때 안정성 향상 효과가 가장 높다는 것을 확인할 수 있다.

좌굴해석결과, 임계하중이 기존 배관 모델 대비 니켈 합금으로 변경할 때 6.6% 증가하였고, 두께를 8mm로 증가시켰을 때 6.44% 증가하였으며, 엘보우 각도를 45도로 감소시켰을 때 11.52% 증가하였다. 이를 통해, 좌굴은 침식해석결과와 동일하게 엘보우 각도를 감소시켰을 때 안정성 향상 효과가 가장 높다는 것을 확인할 수 있다.

피로해석결과, 최소 피로수명이 기존 배관 모델 대비 니켈 합금으로 변경할 때 40.61% 증가하였고, 두께를 8mm로 증가시켰을 때 14.97% 증가하였으며, 엘보우 각도를 45도로 감소시켰을 때 34.37% 증가하였다. 이를 통해, 피로는 재료를 변경했을 때 안정성 향상 효과가 가장 높다는 것을 확인할 수 있다.

해석결과를 통해 침식과 좌굴은 엘보우 주변 부에서 발생한다는 것을 확인할 수 있고, 피로는 입·출구 부분에서 수명이 낮다는 것을 확인할 수 있다. 엘보우 각도가 크고 두께가 얇고 재료의 항복 응력이 낮은 배관일수록 취약하다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 앞서 선정된 변수가 위험 요인을 저감시켜 배관의 성능과 내구성에 중요한 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다.

향후 본 연구 결과를 활용하여 최적화된 배관을 제작하고, 이를 통해 침식, 좌굴, 피로 등과 같은 위험 요인을 저감시켜 전체적인 플랜트의 안정성을 높일 수 있는 가이드라인을 제시할 수 있는 연구를 수행할 예정이다.

Acknowledgment

본 연구는 2023년 국토교통과학기술진흥원 “비전통오일 친환경·고수율 회수 및 순환시스템 기술개발”의 지원을 받아 수행되었습니다. (과제번호 : RS-2022-00143541).

REFERENCES

이임택 (2000), 플랜트 산업의 현황과 전망. 대한설비공학회 강연회 및 기타간행물, pp.3-9.
 윤용진, 박달재 (2019), 정유 및 석유화학플랜트 중대사고 전조신호 평가지표 개발에 관한 연구. 화학공학, 57(5), pp.637-651.
 신현돈 (2020), 비전통 석유 개발과 플랜트 산업,

기계 저널, 60(5), pp. 37-41.
 배관 주요 사고 대비 비상계획에 관한 기술 지침 (2012), 한국산업안전보건공단
 Duarte, Carlos Antonio Ribeiro. (2017), Simulation of a new pipe design for erosion reduction in curves.
 김경훈, 최덕현, 김형준 (2014), 고체 입자 충돌침식으로 인한 배관 재질의 손상에 관한 연구, Corrosion Science and Technology, 13(4), pp.130-138.
 이철호, 한규홍, 김대경, 박창희, 김진호, 이승은, 하태휴 (2012), 800MPa 급 고강도강 보 부재의 국부좌굴 및 비탄성 거동. 한국강구조학회 논문집, 24(4), pp.479-490.
 Amer Jarragh (2022), A Case Study: Distortion, Buckling of 52-Inch Gas Pipeline Related to High Temperature. Pipeline & Gas Journal, 249 (4)
 Jang, H. W., Jung, J. W., & Hong, J. W. (2016), Fatigue fracture analysis of curved pipes under cyclic loading. Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, 29(4), pp.363-368.
 황재현, 오동진, 이도영, 전민성, 김명현 (2016), 304L 스테인리스 강 용접부의 저주기 피로 성능 평가. 대한용접·접합학회지, 34(3), pp.47-51.
 Harun, M. F., & Mohammad, R. (2018), Fatigue properties of JIS H3300 C1220 copper for strain life prediction. In AIP Conference Proceedings, 1958(1).
 Zhang, Z., Qiao, Y., Sun, Q., Li, C., & Li, J. (2009), Theoretical estimation to the cyclic strength coefficient and the cyclic strain-hardening exponent for metallic materials: preliminary study. Journal of Materials Engineering and Performance, 18, pp.245-254.
 Kim, K. S., Chen, X., Han, C., & Lee, H. W. (2002), Estimation methods for fatigue properties of steels under axial and torsional loading. International journal of fatigue, 24(7), pp.783-793.
 Chen, A., Davalos, J. F., Jiao, P., & McGraw, B. (2013), Buckling behavior of sinusoidal web for composite wood I-joist with elastically restrained loaded edges under compression. Journal of Engineering Mechanics, 139(8). pp.1065-1072.
 Kwon, H. (2012), A Study on Fatigue Life Prediction of Small Bended Pipe. M.S. Thesis, Sungkyunkwan University, Republic of Korea.
 Yaghi, A., Hyde, T. H., Becker, A. A., Sun, W.,

- & Williams, J. A. (2006), Residual stress simulation in thin and thick-walled stainless steel pipe welds including pipe diameter effects. In International Journal of Pressure Vessels and Piping, 83(11-12). pp.864-874.
- Ejeh, C. J., Boah, E. A., Akhabue, G. P., Onyekp erem, C. C., Anachuna, J. I., & Agyebi, I. (2020), Computational fluid dynamic analysis for investigating the influence of pipe curvature on erosion rate prediction during crude oil production. Experimental and Computational Multiphase Flow, 2(4). pp.255-272.
- 손민우, 이관홍, 이길성, 이두한 (2011), 높은 레이놀즈수를 가진 난류 진동 경계층에서의 $k-\epsilon$ 과 $k-\omega$ 난류모형의 비교. 한국수자원학회 논문집, 44(3). pp.189-198.
- 정문, 김동언, 황인주 (2017), 오일샌드 증기주입 중력배출 플랜트 중앙 처리시설. 설비저널, 46(11), pp.44-48.
- 박민우, Asif Rabea, 허종완 (2023), 오일샌드 생산 플랜트 파이프의 위험요소를 저감하기 위한 연구. 설비저널, 52(6), pp.50-57.
- ANSYS Workbench 2022