

외부 환경적 요인에 의한 파이프랙 구조물의 열적 거동

Thermal Behavior of a Pipe-Rack Structure Subjected to Environmental Factors

이종한¹ · 이종재^{2*} · 김성연³

Jong-Han Lee¹ · Jong-Jae Lee^{2*} · Sung-Yeon Kim³

(Received June 22, 2015 / Revised June 26, 2015 / Accepted June 26, 2015)

Pipe-rack structures supporting high temperature and pressure are of great importance to ensure the safety of the operation of the plants. If some damage occurred in the pipe-rack structure, the facilities not only bring damage to the commercial property, but also result in economic losses. Specially, since pipe-rack structures are exposed to various environmental conditions, it is essential to evaluate the thermal behavior of the structure caused by environmental conditions for the appropriate design and maintenance of the pipe-rack structure. Thus, based on a selected, typical pipe-rack structure, a thermal-stress coupled analysis was conducted to evaluate the temperature distributions and thermal stresses of the structure. For this, this study accounted for the operating condition of the pipe and the effect of environmental conditions, Yeosu in South Korea and Saudi Arabia in the Middle East. The results of the study showed the need for accounting for a variance in the environmental factors to evaluate the thermal behavior of the pipe-rack structure along with the working condition of pipe.

키워드 : 열전달, 열응력, 온도분포, 환경조건, 파이프랙

Keywords : Heat transfer, Thermal stress, Temperature distribution, Environmental conditions, Pipe-rack

1. 서론

석유가스 플랜트는 천연가스(natural gas)를 액체 원로나 연료로 전환하는 주요한 시설물 중의 하나이다(Fig. 1 참조). 특히, 고온 고압의 파이프를 지지하는 파이프랙(pipe-rack) 구조물은 플랜트 운전의 안전성을 좌우하는 중요 구조물이다. 따라서, 파이프랙 구조물에 손상이 발생한다면, 구조물의 붕괴뿐만 아니라 더 나아가 사회기반시설물에 직·간접적인 피해를 줄 수 있다. 즉, 파이프랙 구조물의 파손은 산업 전반에 부정적인 파급효과를 가져옴과 동시에 인명 및 재산상의 막대한 피해까지 가져오게 된다. Kim (1999)에 의하면 세계적으로 정유 및 석유화학 플랜트의 사고에 의한 재산 손실은 미화 10억달러(1조 4천억원 정도)에 이르고 있으며, 1989년의 경우에는 무려 35억 달러를 기록하기도 하였다. 이러한



Fig. 1. An example of a pipe-rack structure (Kim, 2013)

* Corresponding author E-mail: jongjae@sejong.ac.kr

¹대구대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongsan, 712-714, Korea)

²세종대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Sejong University, Seoul, 143-747, Korea)

³한일건설 토목팀 (Civil Engineering Team, Hanil Engineering & Construction, Seoul, 135-854, Korea)

사고로 인한 재산 손실은 오늘날 더욱 증가하고 있으며, 이의 피해는 사실상 자연재해로 인한 대형사고와 맞먹는 수준이다.

특히, 파이프랙 구조물은 외부환경에 노출되어 있어, 환경적 영향에 의한 거동 특성을 평가할 필요가 있다. 즉, 외부 환경적 요인에 의해 발생하는 구조물의 응력이나 변위는 그 정도에 따라 구조물의 안전성에 크게 영향을 미칠 수 있다. 따라서 구조물의 적절한 설계 및 유지관리를 위하여 외부 환경적 요인에 의해 발생하는 응력과 변위를 파악하는 것이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 가장 널리 설계되어지는 하나의 파이프랙 구조물을 대상으로 선정하여 현 설계기준에 따른 정적해석(static analysis)과 열-구조 연성해석(thermal-structural coupled analysis)을 수행하였다. 특히, 파이프와 직접적으로 연결되는 파이프랙 골조 부재에 대하여 외부 환경적 요인과 파이프의 운전 조건을 고려한 구조물의 열적 거동 특성을 평가하였다.

외부 환경적 요인으로는 국내의 여수지역과 중동의 사우디 지역을 대표 환경으로 설정하여, 태양복사에너지, 대기온도 등의 외부환경에 대한 영향을 비교 분석하였다. 또한, 현 설계기준과 비교하여 태양복사에너지와 대기온도 등, 외부환경에 대한 고려 여부의 필요성에 대해 검증하였다.

2. 파이프랙 온도하중에 대한 설계기준

파이프랙 구조물은 플랜트 운영을 위한 필수적인 구조물이지만, 구조물 설계 시 현재 명확한 설계기준을 적용하기 어렵다. 따라서, 각 국에서는 명확한 규명 없이 각 국의 기준들을 이용하고 있는 실정이며, 대표적으로 적용되어 지고 있는 설계기준으로는 ASCE 7 (2010)의 설계하중에 대한 기준과 철골구조에 대한 AISC (2005) 설계기준이라 할 수 있다.

ASCE 7 건축 구조물에 대한 온도하중은 일반적으로 시공 시 온도와 여름철의 평균 최고온도, 겨울철의 평균 최저온도간의 온도차에 의해 결정한다. 측정 데이터를 이용하지 않는 일반적인 경우 햇볕에 노출된 강재 구조물은 36°C 온도변화량을 설계 시 고려하도록 하고 있다.

또한, 미국에서는 국제적인 설계기준으로 사용되고 있지는 않지만, 파이프랙 구조물 설계 시 PIP (Process Industry Practices)의 Structural Design Criteria (2007)을 많이 적용하고 있다. PIP 기준에 의하면 파이프랙 구조물의 설계 시 파이프의 열적 팽창과 수축 변형을 파이프와의 연결부분에 마찰력으로 작용시켜 해석 및 설계를 수행하도록 하고 있다. 파이프의 마찰력은 파이프 총 중량의 10% 또는 온도변화를 받고 있는 파이프에 대한 중량의 40%중

큰 하중을 선택하여 이를 앵커의 전단력으로 작용시킨다.

국내 건축구조설계기준(AIK 2009)에는 구조물의 설계 시 온도에 의한 하중효과를 고려하도록 하고 있지만, 구체적인 기준은 제시하지 않고 있다. 일반적으로는 기상청 자료를 바탕으로 여름철과 겨울철에 대한 월 평균온도와 여름철 평년 최대·최소 온도값의 차이와 겨울철 평년 최대·최소 온도값의 차에 의해 증감온도를 결정한다. 일반적으로 여름철은 6~7월을 대상으로 하며 겨울철은 12~1월을 기준으로 한다.

특히, 파이프랙 구조물이 많이 건설 운영되어 지고 있으며, 열적 하중효과가 높은 지역 중에 하나인 사우디 아라비아(Saudi Arabia)의 파이프랙 구조물의 설계 시에는 로컬 설계기준인 SAES (Saudi Aramco Engineering Standards)기준을 많이 사용하고 있다. SAES에 의하면 설계 온도하중은 일 평균 최대온도와 최저온도의 차이에 일사량의 효과를 더하여 고려하며, 일반적으로 일사량에 의한 열적효과를 약 20°C 정도로 고려하고 있다. 그리고, 일 평균 온도차는 약 63°F (16°C) 정도로 고려하므로, 총 온도변화량은 약 36°C 정도이다.

3. 해석모델

3.1 환경 영향인자 모델

여수지역은 국내에서 태양 일사량과 기온이 높은 지역이며, 많은 파이프랙 구조물이 있는 주요한 산업단지이다. 따라서, 본 연구에서는 환경적 조건으로 여수 산업단지 여름으로 가정하였다. 기상청의 30년간(1981년~2010년) 여수지역 6월 일 평균기온을 이용하여 대기온도와 태양복사에너지의 시간당 변화량을 예측하였다.

외기온도의 시간 변화량은 일 평균 최고기온(T_{max})과 최저기온(T_{min})으로부터 Kreith and Kreider (1978) 제안식을 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$T(t) = \frac{1}{2}(T_{max} + T_{min}) + \frac{1}{2}(T_{max} - T_{min})\sin\left(\frac{(t-9)\pi}{12}\right) \quad (1)$$

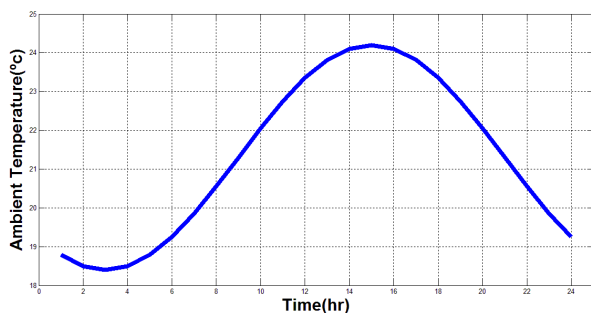
일사는 태양의 복사에너지로 대기에 의한 흡수와 반사의 영향을 받지 않는 직접일사(beam radiation)와 대기에 의해 흡수되거나 반사되어 대기에 균일하게 분포되는 분산일사(diffuse radiation), 직접일사와 분산일사가 지표면 등에 반사되는 반사일사(reflected radiation)의 세 가지 형태로 구분할 수 있다. 위의 세 가지 일사

중 직접일사성분이 비선형온도분포의 주된 영향인자이지만, 분산 일사와 지면 반사일사의 영향 또한 무시할 수 없는 정도이다.

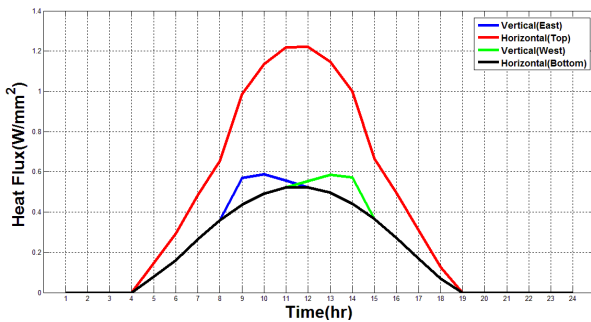
따라서, 일사영향을 받는 파이프랙의 거동을 분석함에 있어서 위 세 가지의 일사를 모두 고려하였다. 즉, 시간에 따른 태양의 이동경로를 고려하여 파이프랙 구조물의 수평면과 수직면 등에서의 일사량을 각각 산정하였다. 그리고, 수평면의 바닥면과 태양복사에너지가 직접적으로 닿지 않는 부분은 분산일사와 지면 반사일사량만을 산정하여 구조물에 적용하였다. 따라서, 구조물에 도달하는 총 일사에너지(I_t)는 다음식에 의해 계산되었다(Duffie and Beckman, 1980).

$$I_t = I_b \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} + I_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + I\rho \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad (2)$$

여기서, I_b 는 수평면에서의 직접일사량(W/m^2), I_d 는 수평면에서의 분산일사량(W/m^2), I 는 수평면의 전체일사량($I_b + I_d$), β 는 경사면과 수평면의 사잇각, θ 는 경사면의 법선과 일사방향이 이루어진 각, θ_z 는 천정각(zenith angle)으로 일사각과 수평면 법선이 이루는 사잇각, ρ 는 지면의 반사율이다. 본 연구에서는 지면의 반사율로서 Duffie and Beckman(1980)에 제시된 0.2를 사용하였다.



(a) Ambient temperature



(b) Solar radiation

Fig. 2. Hourly variations in ambient temperature and solar radiation predicted from daily-average meteorological data

이전의 연구(Kim et al, 2014)에서 보인 바와 같이, 여수지역의 30년(1981년~2010년)간의 6월 일평균기온을 이용하여 식 (1)과 (2)에 의해 예측되어진 대기온도와 태양복사에너지의 시간당 변화량은 Fig. 2와 같다. 태양복사에너지는 Fig. 2(b)에 보인 바와 같이 파이프랙의 수직면과 수평면의 방향을 고려하여 계산하였다.

3.2 파이프랙 구조물의 모델링

가장 널리 설계되는 하나의 파이프랙을 대상 구조물로 선정하고, 그 중 파이프와 직접적으로 연결되는 파이프랙 골조 구조물을 모형화하였다. 먼저, AutoCAD 2014를 이용하여 구조물의 3차원 기하학적 형상을 구성한 후, Ansys 상용유한요소프로그램을 이용하여 구조물의 유한요소 모델을 완성하였다. Fig. 3은 Ansys에서 모형화한 파이프랙 구조물 형상을 보여준다. 파이프랙 구조물의 높이는 9m, 폭은 7m이며, 파이프는 직경 900mm, 두께 10mm이다. 파이프와 구조물의 접합부는 볼트결합에 의한 3차원 유한요소 모델로 모형화하였으며, 구조물 및 파이프와의 경계조건은 일체거동으로 가정하였다.

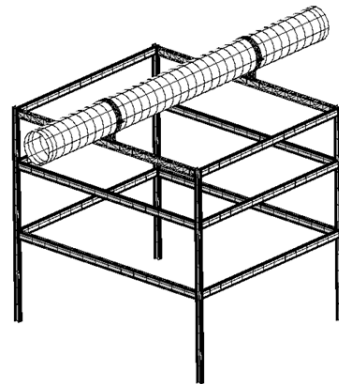


Fig. 3. Finite element model of the pipe-rack structure involved in this study

3.3 열-구조 연성해석

파이프의 운전조건에 대한 고려와 함께, 지역적 특성에 따른 환경적 영향을 고려하여 Ansys Workbench를 이용한 열-구조 연성해석 등을 수행하였다. 환경적 영향은 우리나라의 여수 지역과 극한의 상태에 대한 영향을 확인하기 위하여 사우디 지역의 환경적 조건을 반영한 해석을 함께 수행하였다.

석유 화학 플랜트 배관의 설계온도 조건으로 운전 시 41°C, 82°C로 제시하고 있다(Jeong et al, 2011). 배관의 운전온도 82°C는 유체가 수소화합을 위해 고압증발 저장기로 유입되는 배관의

Table 1. Mechanical and thermal properties of the pipe-rack structure

Density	7850 kg/m ³	Thermal conductivity	60.5 W/m · C
Modulus elasticity	200 GPa	Specific Heat	434 J/kg · C
Poisson's ratio	0.3	Coefficient of thermal expansion	1.20 × 10 ⁻⁵

운전온도이므로, 본 논문에서는 배관의 운전조건으로 41°C로 가정하였다. 이와 같은 조건 하에서 외부 환경에 의해 파이프랙 구조물에 열전달이 발생하게 된다. 따라서, 외부 환경적 조건인 태양복사 에너지, 외기온도, 바람에 의한 전도(conduction), 대류(convection), 복사(radiation)현상을 고려하여 열전달 해석(heat transfer analysis)을 수행하였다. 외부 환경 조건은 시간에 따라 변화하기 때문에, 본 연구에서는 열 흐름을 유발하는 환경조건들의 시간의존성(time dependent)을 고려하는 과도상태(transient) 해석을 수행하였다. 열전달 해석을 수행하여 계산된 구조물의 온도 분포 결과는 구조해석 시 열 하중으로 입력하여 열응력 해석(thermal stress analysis)을 통해 파이프랙의 열응력과 변형을 평가하였다. 구조해석 시 파이프랙 구조물의 지점조건은 기둥 4개의 아랫부분을 고정단(fixed support)으로 설정하였고, 파이프는 길이방향의 연속되어 있어, 길이방향의 변위만을 구속하였다. 파이프랙 구조물의 열-구조 연성해석 시 사용된 물성치는 Table 1과 같다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 온도분포 특성

외부환경에 의해 파이프랙 구조물의 최고온도는 태양복사에너지가 가장 강한 오후 12시경에, 최저온도는 새벽 3시경에 나타났다. Table 2와 같이 최고온도는 여수지역은 약 32°C~42°C, 사우디 아라비아 지역은 약 59°C~71°C였다. 최고온도와 최저온도와 의 차이는 여수지역은 최대 약 24°C, 사우디 아라비아 지역은 최

Table 2. Temperature of the pipe-rack obtained from the heat-transfer analysis

Structures	Yeosu		Saudi Arabia	
	Max.	Min.	Max.	Min.
Pipe	42°C	18°C	71°C	34°C
Beam	41°C	18°C	71°C	34°C
Column	32°C	18°C	59°C	34°C

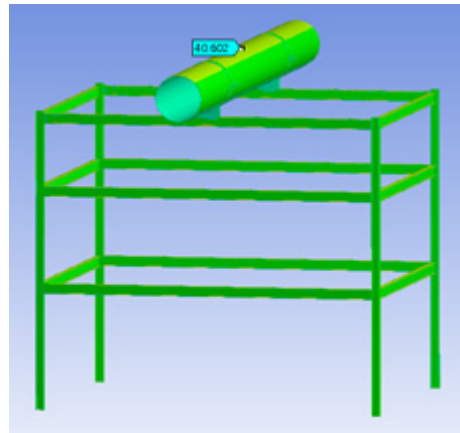


Fig. 4. Temperature distribution of the pipe-rack structure at noon in Yeosu due to environmental conditions

대 약 37°C였다.

국내의 여수지역과 중동 사우디 아라비아 지역의 외부환경 비교 시, 사우디의 고온 기후와 큰 일사량으로 인하여 여수지역과는 온도차가 약 23°C까지 나타났다.

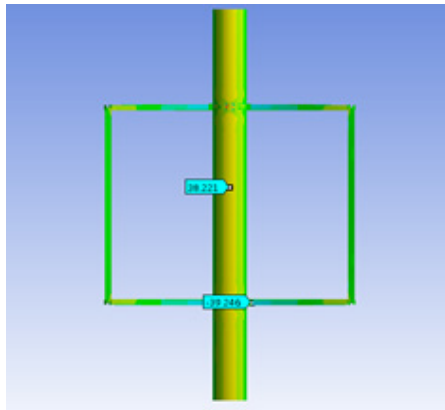
4.2 응력 특성

열전달 해석에 의해 얻은 온도 분포 결과를 열 하중으로 열응력(thermal stress) 해석을 수행하였다. 환경적 조건과 파이프의 운전으로 인한 최대응력은 최대온도 발생 시, 즉 태양 복사에너지가 가장 강한 낮 12시경에 발생하였다. 구조물의 최대응력값은 Table 3에 요약한 바와 같이, 상부 플랜지에서 발생하였으며 그 값은 여수지역은 약 55MPa, 사우디 지역은 약 68MPa로 각각 항복응력의 약 22%, 27%이다. 특히, 사우디 아라비아지역은 파이프의 운전 시 온도하중과 외부 환경과의 영향으로 약 138MPa(항복응력의 55%) 까지 증가하였다. 최대응력 발생 시 여수지역과 사우디 아라비아 지역에서의 응력분포는 Fig. 5와 같다.

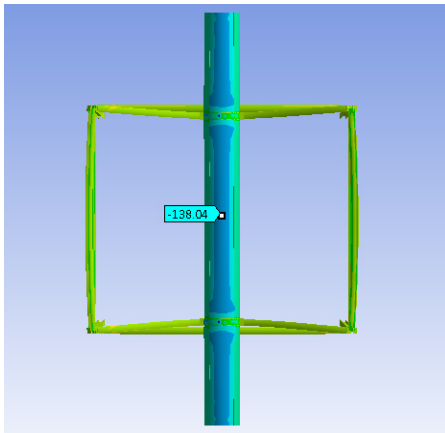
또한, 설계기준 SAES에서 고려하고 있는 사우디 아라비아 지역의 설계 온도하중인 36°C에 의한 최대 정상상태(steady state) 해석값과 외부환경의 시간적 변동성을 고려한 과도상태(transient) 해석값을 비교하였다. 여수와 사우디 아라비아지역의 외부환경을

Table 3. Normal stresses of the pipe-rack obtained from the thermal stress and steady state analyses

Structures	Yeosu	Saudi Arabia	Steady State
Pipe	54 MPa	138 MPa	89 MPa
Beam	55 MPa	68 MPa	40 MPa



(a) Normal stress in Yeosu (MAX = 39.25 MPa)



(b) Normal stress in Saudi Arabia (MAX = 138.04 MPa)

Fig. 5. Stress contours of the pipe-rack structure at noon due to environmental conditions

고려한 과도상태 해석의 최대 응력값은 정상상태의 최대 응력값의 약 1.4배, 1.7배 각각 더 발생하였다.

5. 결론

본 연구에서는 환경적 요인과 파이프 운전 조건에 의한 파이프랙 구조물의 열적 거동 특성을 평가하였다. 외부 환경적 요인으로 는 국내의 여수지역과 중동의 사우디 아라비아 지역에 대하여 태양복사에너지, 대기온도 등의 영향을 평가하였고, 그 필요성을 검증하였다. 본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

1. 외부환경에 의해 파이프랙 구조물의 최고온도는 태양복사에너지가 가장 강한 오후 12시경에, 최저온도는 새벽 3시경에 나타났다. 최고온도는 여수지역은 약 32°C~42°C, 사우디 아라비아 지역은 약 59°C~71°C로 여수지역에 비해 약 1.54배~1.59배로

나타났다.

2. 최고온도와 최저온도의 차이는 여수지역은 최대 24°C, 사우디 아라비아 지역은 최대 37°C로, 고온 기후와 큰 일사량으로 인하여 여수지역에 비해 약 23°C(1.5배) 증가하였다.
3. 외부 환경조건과 파이프의 운전으로 구조물의 최대응력은 상부 빔(beam)에서 발생하였으며, 여수지역은 항복응력의 약 22%, 사우디 아라비아 지역은 항복응력의 약 27%의 열응력이 구조물에 발생하였다.
4. 파이프에서의 열응력은 여수지역은 구조물과 유사하게 항복응력의 약 22%였지만, 사우디 아라비아지역은 항복응력의 약 55%까지 증가하였다. 따라서, 고온 및 큰 일사량의 지역에서는 환경적 영향에 의한 파이프랙 구조물과 함께 파이프의 열응력 평가가 필요함을 확인하였다.
5. 설계기준에서 일반적으로 고려하는 36°C에 의한 최대 정상상태 해석(steady state analysis)과 비교 시 외부환경의 시간적 변동성을 고려한 과도상태(transient)해석이 약 1.4~1.7배 정도의 큰 응력이 발생하였다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2014R1A1A1005992).

References

- ANSYS 13.0. Theory reference for ANSYS and ANSYS Workbench, ANSYS Inc., Pennsylvania, USA.
- AISC. (2005). Specification for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction (AISC) Chicago, USA.
- ASCE 7. (2010). Minimum design loads for buildings and other structures, American Society of Civil Engineers (ASCE), Virginia, USA.
- AIK. (2009). Korean building code, Architecture Institute of Korea (AIK), Korea [in Korean].
- AutoCAD. (2014). Autodesk Inc., USA
- Duffie, J.A., Beckman, W.A. (1980). Solar engineering of thermal processes, John Wiley & Sons, NY.
- Jeong, M., Lee, H.C., Hwang, I.J. (2011). Performance analysis of degree of superheat of a natural gas liquefaction, 2011. KSME Spring Conference, 68-73 [in Korean].

Kim, B.M. (1999). Corrosion of the equipment and its protection in refining and petrochemical plant, Corrosion and Protection, **1(1)**, 24–31 [in Korean].

Kim, S.Y. (2013). A study for behavior of pipe–rack structures, Master's thesis, Sejong University, Korea [in Korean].

Kim, S.Y., Lee, J.H., Lee, J.J. (2014). A study for the behavior of a pipe–rack structure with changes in environmental

conditions, 2014 KSME Spring Conference, Korea [in Korean].

Kreith, F., Kreider, J.F. (1978). Principles of solar engineering, Macmillan Company, NY.

PIP STC01015, Structural design criteria, Process Industry Practices (PIP), <http://www.pip.org/practices/practices.asp>.

SAES. (2003). Saudi aramco engineering standards (SAES), Saudi Aramco, Dhahran, Saudi Arabia.

외부 환경적 요인에 의한 파이프랙 구조물의 열적 거동

파이프랙 구조물은 고온 고압의 파이프를 지지하며 플랜트의 운전 안전성을 좌우하는 매우 중요 구조물이다. 따라서, 파이프랙 구조물의 손상은 산업 전반에 부정적인 파급효과를 가져옴과 동시에 인명 및 재산상의 막대한 피해까지 가져오게 된다. 특히, 파이프랙 구조물은 외부환경에 노출되어 있어, 구조물의 적절한 설계 및 유지관리를 위하여 환경적 영향에 의한 거동 특성을 평가할 필요가 있다. 따라서, 가장 널리 설계되어지는 하나의 파이프랙 구조물을 대상 구조물로 선정하여 열-구조 연성해석을 실시하여 파이프랙 구조물의 온도분포와 열응력을 평가하였다. 외부 환경적 요인으로는 국내의 여수지역과 중동의 사우디 지역을 고려하여 파이프의 운전조건과 함께 외부환경 영향인자에 대한 고려 필요성을 검증하였다.