



진공단열 배관의 설계인자 변화에 따른 열-피로 수치해석 연구

A Study on the Numerical Analysis of Thermal Fatigue According to the Design Variables of Vacuum Insulated Pipe

이재훈* · 윤정환* · 김시범*†

Jae-Hoon Lee*, Jeong-Hwan Yoon* and Si-Pom Kim*†

(Received 15 March 2018, Revision received 10 July 2018, Accepted 10 July 2018)

Abstract: Because the magnetic bearing supports levitating body without contact, wear, noise and vibration are very small compared with mechanical bearings, compared with it is very useful to high revolution machinery. In general, the magnetic attractive force function that is proportional to square of control current, and inversely proportional to square of an air gap has been widely used. This paper proposed the new magnetic attractive force function that is proportional to cube of the control current, and inversely proportional to square of the air gap. The function was optimized to minimize the cost function that is the percentage of deviation about the change of a proportional constant, using the experimental data, ie, control currents and air gaps. Consequently, it was found that fatigue life are 1.744×10^6 , 3.572×10^6 at case of joint and bellows type. Therefore, it is judged that bellows type is advantageous than joint type in the use of same size.

Key Words : Vacuum Insulated Pipe, Bellows Type, Joint Type, Thermal-Structural Analysis, Thermal-Fatigue Analysis

1. 서 론

천연가스는 석유, 석탄과 함께 세계 3대 에너지 자원 중 하나이며, 생산과 수요가 높은 증가세를 보이고 있다.¹⁾ 이에 따라 천연가스 개발이 가속화되고 있고 액화천연가스(LNG; Liquefied natural gas)의 수송기술과 저장기술의 발전도 동반되고 있으며, 이로 인해 천연가스를 연료로 사용하는 것과 관련된 개발 또한 꾸준한 증가세를 보이고 있다. 그러나 이러한 액화천연가스 수송을 위한

배관은 다양한 사용 환경에 놓이게 되는데, 특히 온도 차이에 의해 액화천연가스의 약 0.15%가 기화되는 현상이 발생된다. 이처럼 기화되는 현상을 BOG(Boil-off gas)라고 부르며, BOG는 액화천연가스의 수송과 저장에 큰 악영향을 미치게 된다.^{2,3)}

이러한 BOG의 발생을 막기 위하여 외부로부터 유입되는 열을 차단하는 단열기술인 진공단열배관이 부각되기 시작하였다. 진공단열배관이란 이중 구조의 배관에 진공층을 구성하여 전도 및 대류를 최소화한 배관을 말한다.⁴⁾ 진공단열배관의

*† 김시범(교신저자) : 동아대학교 기계공학과
 E-mail : spkim@dau.ac.kr, Tel : 051-200-7646
 *이재훈, 윤정환 : 동아대학교 기계공학과

*† Si-Pom Kim(corresponding author) : Department of Mechanical Engineering, Dong-A University.
 E-mail : spkim@dau.ac.kr, Tel : 051-200-7646
 *Jae-Hoon Lee, Jeong-Hwan Yoon : Department of Mechanical Engineering, Dong-A University.

단점으로, 용도와 구조적인 문제로 인해 초저온의 액화천연가스에 의한 열적하중의 악영향을 받게 되며, 배관에 흐르는 액화천연가스는 지속적이고 반복적인 열적하중에 의해 진공단열배관의 피로를 누적시키게 된다.⁵⁾ 그러나 현재 진공단열배관의 피로 수명 문제로 내구성에 관한 연구는 미비한 실정이며, 이로 인해 피로파괴에 관한 연구가 요구된다. 진공단열배관의 진공이 파괴 될 경우 단열재 내부에 대류열전달이 증가하여 단열성능이 급격하게 저하되며, 갑작스런 압력변화로 배관이 파손되어 주변 장비의 손상을 일으킬 수 있다.⁶⁾ 따라서 열 피로해석을 이용하여 진공단열배관의 취약부를 예측하여 피로파괴의 예방이 요구된다.⁷⁻¹⁰⁾

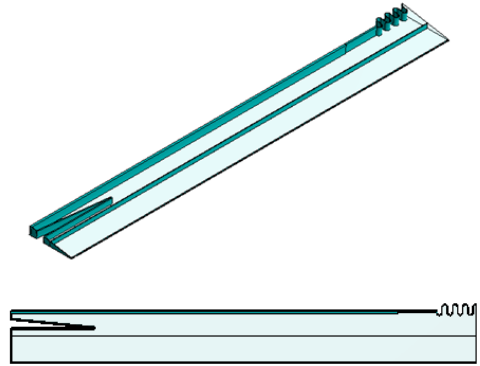
따라서 본 연구는 초저온 환경에 사용되는 진공단열배관의 형상 변화 및 직경 변화에 따른 열-피로 해석을 시행하였다. 열-피로 해석 진행을 위해 선형 수치해석으로 열-구조 연성해석을 통한 열응력 및 열 변형을 관찰하고, 이를 통해 진공단열 배관의 구조안전성을 평가하였다. 또한 열-구조 연성해석을 통해 얻은 온도분포, 응력 분포, 변형을 변화를 토대로 열-피로 해석 경계조건으로 적용하였다. 따라서 진공단열 배관의 설계인자 변화에 따른 피로수명 평가 후, 그 결과를 열-피로 연구의 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 수치해석

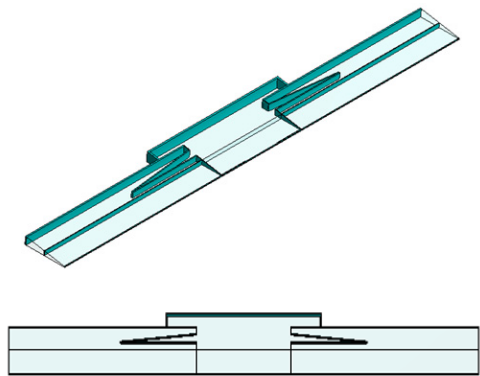
2.1 유한요소 모델

수치해석에 사용된 모델인 진공단열 배관은 원형 배관이므로, 이는 대칭조건을 통해 모델을 축소하여 모델링이 가능하다. 따라서 실제 수치해석 진행에 사용 된 모델은 진공단열 배관의 형상을 1/16로 축소한 모델에 대하여 수치해석을 진행하였으며, 수치해석에 사용된 변수 및 형상을 Fig. 1 과 Table 1에 각각 나타내었다.

진공단열배관의 주요 설계변수에서 파이프 길이는 수치해석에 적용된 모델의 전체길이를 말하며, 단열재의 재질 및 파이프 재질의 선정은 실제 진공단열배관에 주로 사용되고 있는 재질로 선정하여 수치해석을 진행하였다.



(a) bellows type



(b) joint type

Fig. 1 Types of vacuum insulated pipe

Table 1 Design parameters of vacuum insulated pipe

Parameter	Value
Vacuum insulated pipe type	bellows, joint
Pipe length (mm)	2,000
Pipe diameter (mm)	15, 50, 100, 150
Insulation thickness (mm)	15
Insulation material	polyurethane
Pipe material	SUS304

2.2 열-구조 연성해석

열-구조 연성해석을 진행하기 위해 열 해석을 선행하여 시행하였으며, 사용된 프로그램은 ANSYS V. 16.0을 사용하여 해석을 진행하였다. 이때 열 해석은 시간 변화에 따른 수치해석에 적

합한 과도 열 해석으로 진행하였다. 또한 해석 조건으로 수치해석 진행시간을 30분으로 설정하였으며, 수치해석의 정밀도를 높이기 위해 이를 1초 단위로 구분하여 과도 열 해석을 수행하였다.

과도 열 해석을 통해 얻은 온도 분포를 열-구조 연성해석에 적용하였으며, 배관의 양 끝부분에 강제변위 구속조건을 통해 고정된 후 수치해석을 진행하였다. 열 해석 및 열-구조 연성해석에 필요한 조건은 Table 2에 나타내었다. 본 해석의 내부 온도 조건과 압력은 액화천연가스의 온도인 -179°C 및 320 bar로 설정하였다. 외부 온도는 대기로 설정하였다. 또한 외부의 강제유동이 없으므로 자연 대류 계수로 열적 교환이 가능하게 설정하였다.

수치해석 결과를 통해 열-피로 해석 진행에 필요한 열응력 및 열 변형을 관찰하였다.

Table 2 Boundary condition for thermal structural coupling analysis

Boundary condition	Value
Inner tube temperature	-179°C
Outer tube temperature	22°C
Convective heat transfer coefficient	6.5 W/m ² K
Radiation rate of pipe	0.1
Radiation rate of insulation material	0.2
Internal pressure condition	320 bar
Vacuum pressure	10 ⁻³ Torr

Table 3 Boundary condition for thermal fatigue coupling analysis

Boundary condition	
Surface roughness factor	Polished
Short-axis stress condition	Von-Mises stress
Stress life estimation	Goodman corrected equation
Load type	Ratio

2.3 열-피로 연성해석

열-구조 연성해석을 통해 얻은 응력 분포를 토대로 열-피로해석을 수행하였으며, ANSYS V. 16.0의 N-code를 사용하였다. 피로해석에 적용된 수식은 아래와 같다.

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

여기서 D_i , n_i 및 N_i 는 각각 응력 레벨 i 에서 하중 사이클 동안 축적된 데미지, 하중 사이클 개수 및 피로응력-반복회수 선도(S-N curve; Stress-number of cycle curve)에서 얻어진 응력 레벨 S_i 에서의 피로 수명을 나타낸다.

$$S_a = \left(1 - \frac{S_m}{S_u}\right) S_e \quad (2)$$

위의 수식은 응력 수명법의 Goodman 평균 응력 이론이며 여기서 S_a , S_m , S_u 및 S_e 는 각각 응력 진폭, 평균 응력, 인장 강도 및 피로 한도를 나타낸다.

$$\Delta \epsilon \Delta \sigma = (K_t)^2 \Delta S \Delta e \quad (3)$$

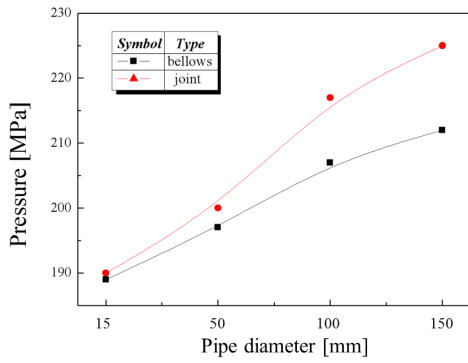
수식 (3)은 Neuber's Rule이며 여기서, ϵ 는 국부 변형률, σ 는 국부 응력, K_t 는 기하학적 응력 집중 계수, e 는 공칭 탄성 변형률, S 는 공칭 탄성 응력을 나타낸다.

해석에 적용된 수치해석 인자를 Table 3에 나타내었다. 피로해석 진행 시 표면 거칠기는 피로 거동에 영향을 주게 되며, 특히 거친 표면 마무리는 피로 강도를 약화시키게 되므로 표면처리를 통해 피로 강도를 향상시켜 해석에 적용하였다. 또한 구조해석 결과는 다축 하중으로 표현되므로, 이를 피로응력-반복회수 선도상에 적용시키기 위해서 단축 하중으로 변환하여 열-피로 해석에 적용하였다.

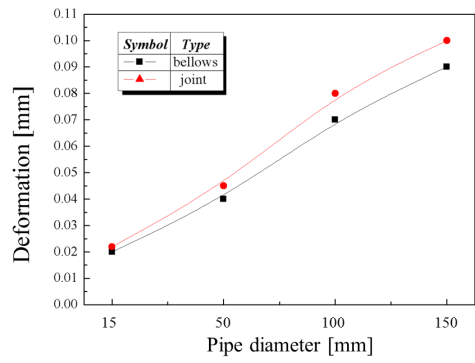
3. 수치해석 결과

3.1 열-구조 연성해석 결과

진공단열 배관의 구조 안전성 평가를 위해 진



(a) Thermal stress



(b) Thermal deformation

Fig. 2 Thermal structural coupling analysis result for vacuum insulated pipe

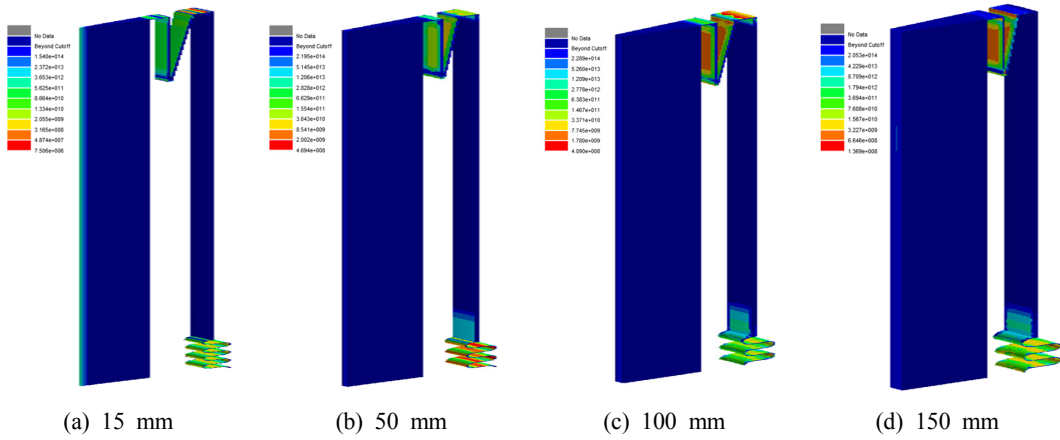


Fig. 3 Thermal fatigue analysis of bellows-type pipe

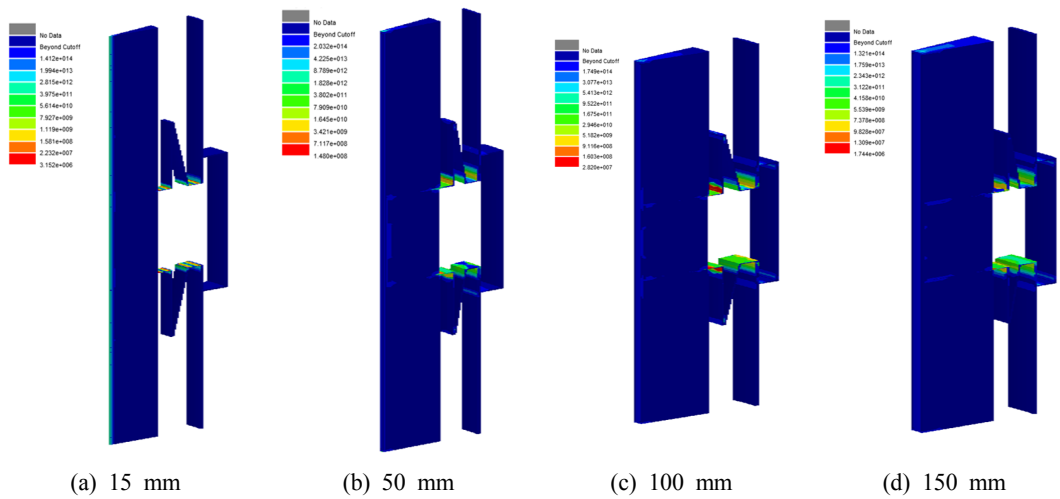


Fig. 4 Thermal fatigue analysis of joint-type pipe

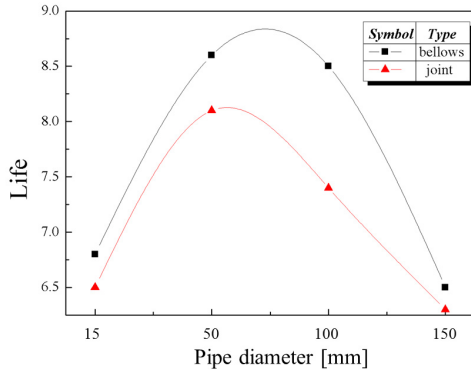


Fig. 5 Thermal fatigue according to type and size of pipe

행한 열-구조 연성해석의 경우 직경의 크기 및 배관의 종류에 따라 열응력 및 열 변형을 Fig. 2에 나타내었다. 열-구조 연성해석 결과, 형상 별로 최대 열 응력 및 열 변형이 발생하는 위치가 다르게 나타났으며, 연결형 형상(joint type)의 경우 주로 양 끝단부에 발생하였고 주름형 형상(bellows type)의 경우 중심부에서 집중적으로 발생하였다. 또한 직경의 크기가 증가할수록 응력 및 변형률변화가 두 경우 모두 더 증가하는 것을 관찰하였으며, 직경의 크기가 가장 큰 150 mm에서 연결형 형상이 최대열응력 228.34 MPa과 열 변형 0.1 mm로 가장 크게 나타났다. 그러나 이는 배관의 재질인 SUS304의 허용 응력보다 매우 낮은 값이며, 변형을 또한 매우 미소하므로 구조적으로 안전하다고 판단된다.

3.2 열-피로해석 결과

앞서 시행한 열-구조 연성해석에서 발생된 열 응력 데이터를 적용하여 진행 한, 열-피로 해석 결과를 배관의 크기 및 타입 변화에 따라 아래 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 열-피로해석 결과, 배관의 크기가 150 mm인 경우 가장 짧은 피로 수명을 나타내었으며, 특히 연결형 형상의 피로수명 1.744×10^6 보다 주름형 형상의 피로수명이 3.572×10^6 으로 더 높은 것을 관찰할 수 있다. 이는 동일 직경의 경우 연결형 형상보다 주름형 형상의 피로수명이 더 긴 것으로 보이며, 진공단열 배

관의 크기가 동일한 경우 피로수명을 고려한 설계 시 주름형 형상 선정이 구조적으로 좀 더 안전하다고 판단된다. 또한 두 경우 모두 곡면부에서 피로 수명이 저하되는 것을 확인할 수 있는데, 이는 열-구조 연성해석에서 발생된 응력 분포에 의해 동일한 결과를 나타내는 것으로, 동일한 배관의 직경에서 높은 응력이 발생하는 부분의 수명이 짧게 나타나는 것으로 판단된다. 열-피로해석 결과를 좀 더 구체적으로 확인하기 위해 Fig. 5에 피로수명, 타입, 배관직경에 따라 그래프로 나타내었다. 배관의 직경을 4가지 크기의 경우로 고정 한 후, 타입 변화에 따른 피로수명 관찰 시 주름형 형상 선정이 안전한 것으로 판단되나, 배관의 크기별로 피로수명의 차이를 보이므로 추후 직경 변화의 크기를 좀 더 조밀하게 설계인자로 선정하여 추가적인 연구가 요구된다.

4. 결 론

본 연구에서는 진공단열 배관에 관해 열 해석, 열-구조 연성해석을 통해 구조안전성을 평가하였으며, 이 결과 값을 토대로 열-피로해석을 진행하고 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 진공단열배관의 열-피로 해석을 통한 피로수명 계산된 사례가 매우 적으며, 추후 진공단열 배관 설계 시 수명계산에 관한 기초자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.
- 2) 진공단열 배관의 열-구조 연성해석 결과, 연결형 형상의 열응력 및 열 변형이 주름형상보다 228.34 MPa, 0.1 mm로 각각 더 높은 수치로 나타났으나, 이는 SUS 304의 허용응력보다 낮은 값으로 구조적 안전성이 검증되었다고 판단된다.
- 3) 진공단열 배관의 열-피로해석 결과, 배관의 직경이 150 mm일 때 최소 피로수명이 연결형 형상의 피로수명 1.744×10^6 보다 주름형 형상이 3.572×10^6 로 더 크게 나타났으며, 이는 배관의 크기가 동일한 경우 주름형 형상 사용이 권장된다.
- 4) 진공단열 배관의 열-피로해석 결과, 배관의 크기별로 피로수명의 차이를 보이므로 추후 진공 단열배관의 직경 변화를 좀 더 조밀하게 설정하

여 추가적인 연구가 요구된다.

후 기

본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 지원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINC+) 육성사업의 연구결과입니다.

References

1. D. S. Lee, 2009, "A Developing Tendency of Liquefied Natural Gas Carriers", Journal of The Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 15, No. 3, pp. 269-274.
2. D. H. Lee, C. B. Jang, S. Y. Jung, J. H. Kim, H. S. Lee, B. S. Kim and J. W. Ko, 2010, "Study on the Comparison of New And Used Reliquefaction System of Boil-Off-Gas by LNG Cold Energy", Journal of The Korean Institute of Gas, Vol. 14, No. 1, pp. 42-46.
3. Y. P. Lee, Y. H. Shin, S. H. Lee and K. H. Kim, 2009, "Boil-Off Gas Reliquefaction System for LNG Carriers With BOG-BOG Heat Exchange", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 46, No. 4, pp. 444-451. (DOI:10.3744/SNAK.2009.46.4.444)
4. H. Y. Kim and B. H. Kang, 2002, "Thermal Insulation Technology for Cryogenic Cooling Devices", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 19, No. 11, pp. 24-30.
5. S. W. Hong, C. S. Seok and J. M. Koo, 2015, "Study on the Fatigue Life of Spiral Welded Waterworks Pipe Material", The Korea Society of Mechanical Engineers, pp. 2395-2398.
6. H. Y. Lee and Y. Kim, 2014, "A Study on Thermal Performance for Damaged Vacuum Insulation", Architectural Institute of Korea, Vol. 34, No. 2, pp. 319-320.
7. J. H. Lee and J. S. Lee, 2011, "On the Fatigue Analysis of Large Crane Pedestal in Drillship", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 48, No. 4, pp. 342-345. (DOI:10.3744/SNAK.2011.48.4.342)
8. B. L. Choi and H. Chang, 2010, "Prediction of Thermal Fatigue Life of Engine Exhaust Manifold under Thermo-mechanical Cyclic Loading", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 34, No. 7, pp. 911-917. (DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.7.911)
9. M. S. Kang, W. N. Yun and J. S. Kim, 2009, "Investigation of the Thermo-mechanical Crack Initiation of the Gas Turbine Casing Using Finite Element Analysis", KSPSE, Vol. 13, No. 5, pp. 52-58.
10. R. T. Dewa, S. J. Kim, W. G. Kim and M. H. Kim, 2014, "Evaluation of Fatigue Life on Alloy 617 Base Metal and Alloy 617/Alloy 617 Weld Joints under Low Cycle Fatigue Loading", KSPSE, Vol. 18, No. 5, pp. 122-128. (DOI:10.9726/kspse.2014.18.5.122)