사용자지정 재료 서브루틴을 활용한 LNG선박 단열시스템 멤브레인의 수치해석

김 정 현¹ · 김 슬 기¹ · 김 명 수¹ · 이 제 명^{1*}

¹부산대학교 조선해양공학과

Numerical Simulation of Membrane of LNG Insulation System using User Defined Material Subroutine

Jeong-Hyeon Kim¹, Seul-Kee Kim¹, Myung-Soo Kim¹ and Jae-Myung Lee^{1*}

¹Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

Abstract

304L stainless steel sheets are used as a primary barrier for the insulation of membrane-type liquefied natural gas(LNG) carrier cargo containment system. 304L stainless steel is a transformation-induced-plasticity(TRIP) steel that exhibits complex material behavior, because it undergoes phase transformation during plastic deformation. Since the TRIP behavior is very important mechanical characteristics in a low-temperature environment, significant amounts of data are available in the literature. In the present study, a uniaxial tensile test for 304L stainless steel was performed to investigate nonlinear mechanical characteristics. In addition, a viscoplastic model and damage model is proposed to predict material fractures under arbitrary loads. The verification was conducted not only by a material-based comparative study involving experimental investigations, but also by a structural application to the LNG membrane of a Mark-III-type cargo containment system.

Keywords : LNG membrane, 304L stainless steel, LNG insulation system, subroutine based simulation

1. 서 론

액화천연가스(LNG: Liquefied Natural Gas)는 천연가스를 110K 이하의 극저온 환경에서 액화시켜 부피를 1/600로 줄인 것으로 저장·운송이 용이한 특성을 지닌 천연자원이다(Kim *et al.*, 2012). LNG는 원유·석탄과 같은 석유 자원에 비해 공해물질을 약 30% 덜 생산하고 온실효과를 약 7% 감소시킨다는 장점으로 인해 점점 더 그 중요성이 부각되고 있으며, 최근에는 셰일가스의 수출 본격화와 원전 가동을 중단하는 국가의 증가로 인해 전 세계 LNG 수요는 매년 4~5% 증가할 것으로 추정된다(Ruester *et al.*, 2008).

이러한 LNG의 경우 자원이 매장되어 있는 곳과 소비되는 곳이 멀리 떨어져 있기 때문에 LNG 수출·수입은 특수한 구조의 방열시스템을 가지는 LNG선이 담당하며 이들 LNG

선은 화물을 저장하는 방법에 따라 멤브레인 타입과 독립형 타입으로 나눌 수 있다(Choi *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2013). 최근에는 큰 용적성과 경제성을 인정받아 멤브레인 타입의 탱크 시스템이 활발하게 건조되고 있는 실정이다. 또한, 멤브레인 타입의 탱크 시스템은 탱크 방열시스템의 구조에 따라 Mark-III타입과 NO96타입으로 구분되며 현재에는 두 가지 구조 형태의 방열시스템이 동시에 채택되어 건조되고 있다.

이들 중 Mark-III 타입의 방열시스템은 Fig. 1과 같은 다층구조로 제작되어 LNG를 극저온 액체상태로 유지시켜주는 기능을 하게 된다. 방열시스템의 표면은 스테인리스 강판으로 제작된 주름이 있는 멤브레인으로 구성되어 있으며 그 아래에 플라이우드(plywood), 강화 폴리우레탄폼(R-PUF: Reinforced Poly Urethane Foam)이 위치하게 된다. 트

* Corresponding author:

Tel: +82-51-510-2340; E-mail: jaemlee@pusan.ac.kr

Received July 11 2014; Revised July 29 2014

Accepted July 30 2014

©2014 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

리플렉스(triplex)는 LNG선의 2차 방벽으로 R-PUF사이에 위치하여 가스가 누출되는 것을 막는 역할을 하는 복합소재이다. 또한 마스틱(mastic)은 선박의 내부 탱크와 방열시스템을 연결시켜주는 역할뿐만 아니라 온도의 전달을 줄여주는 역할을 하는 접착소재이다.

이들 중, Fig. 2에 보이는 것과 같이 LNG와 직접 접촉하게 되는 멤브레인은 LNG 방열시스템의 1차 방벽으로 LNG의 선적/하역 시 발생하는 반복적인 열 변형에 쉽게 대응하기 위해 주름이 있는 구조로 제작되며, 이는 LNG의 선적 시 쉽게 수축하고 하역 시 팽창이 용이하도록 하기 위함이다. 1차 방벽의 경우 저온 환경에서 우수한 성능을 발휘하는 304L 오스테나이트계 스테인리스강으로 제작되는데, 이는 변태유기소성(transformation-induced plasticity)현상으로 인해 저온 환경에서 강도 및 연신율이 증가하는 우수한 재료적 특성 때문이다.

Fig. 1 The Mark-III type LNGC insulation system

Fig. 2 (a) Mark-III type LNG cargo tank and (b) LNG membrane

이러한 우수성으로 인해 몇몇 연구자들에 의해 304L 스테인리스강의 인장거동, 압축거동, 피로거동과 같은 실험적 규명을 비롯하여 Johnson-Cook 모델, Zerilli-Armstrong 모델을 적용한 구성모델 제안에 이르는 다양한 연구가 수행되었다(Lee *et al.*, 2002; 2010; Qu *et al.*, 2008; Abed *et al.*, 2005; Samantaray *et al.*, 2009; Gupta *et al.*, 2013). 하지만, 304L 스테인리스강의 저온특성에 있어서의 우수성에도 불구하고 극저온 환경에서 수행한 실험적 연구는 상대적으로 많지 않으며, 특히 LNG액화온도인 110K 근방의 환경에서의 재료성능평가 및 이들 재료거동을 반영한 멤브레인에 대한 실험, 해석적 연구를 수행한 연구는 찾아볼 수 없다.

본 연구에서는 304L 스테인리스강의 극저온 재료실험을 바탕으로 재료의 소성구간의 거동을 모사할 수 있는 재료모델을 제안하여 상용 유한요소해석 프로그램과 연계한 재료 서브루틴을 개발하였다. 실험결과와 수치해석 결과의 재료단위 검증을 수행하였으며 검증이 완료된 재료 모델을 멤브레인에 적용시켜 유한요소해석을 수행 후 랩 단위(lab scale) 극저온 구조실험 결과와의 비교를 통한 적용성을 검토하였다.

2. 재료시험

2.1 장비 및 시나리오

본 연구에서는 극저온 환경에서 재료거동을 파악하기 위해 73K까지 사용이 가능한 극저온용 챔버(chamber)를 만능시험기에 설치한 후 액체질소를 분사시켜 극저온 온도 환경을 설정하였다. 챔버 내부에 있는 3개의 온도계와 온도 컨트롤러를 통해 극저온 온도를 제어하였으며 시험 내부의 열 평형 상태를 고려하기 위해 30분 동안 예냉을 실시하였다. 시험에 사용된 시험편은 한국산업규격(KS B 0801 10)에 따라 제작되었으며, 시험 데이터의 정확성 확보를 위해 재료시험편에 극저온용 신율계를 장착하여 시험을 수행하였다.

Table 1 Experimental scenario

No.	Temperature(K)	Strain-rate(s^{-1})
1	293	10^{-4}
2		10^{-2}
3	223	10^{-4}
4		10^{-2}
5	153	10^{-4}
6		10^{-2}
7	133	10^{-4}
8		10^{-2}
9	110	10^{-4}
10		10^{-2}

Fig. 3 Results of uniaxial tension test at 10^{-4}s^{-1}

304L 스테인리스강의 온도 및 변형률속도에 따른 재료거동을 분석하기 위해 5개의 온도 및 2개의 변형률 속도에서 인장시험을 수행하였으며 Table 1에 본 연구에서 수행한 시험 시나리오를 정리하였다. 반복성을 검증하기 위해 각각의 시험 케이스에 대해 3번의 반복시험을 수행하였으며 이들의 평균값을 이용하여 결과를 정리하였다.

2.2 시험 결과

Fig. 3은 변형률속도 10^{-4}s^{-1} 조건에서 온도에 따른 304L 스테인리스강의 인장시험 결과를 나타낸 그래프이다. 거시적인 관점에서 온도가 상온에서 저온으로 점점 감소함에 따라 오스테나이트계 스테인리스강의 저온특성인 비선형 경화현상이 뚜렷이 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 온도가 감소함에 따라 항복강도와 인장강도가 모두 증가하였으나 상대적으로 항복강도에 비해 인장강도가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 파단변형률은 전반적으로 온도가 감소함에 따라 감소하였으나, 223K 환경에서는 상온에서의 값보다 오히려 증가하였는데, 이는 향후 재료의 미시적 관점에서 추가적으로 연구가 진행되어야 할 부분으로 생각된다. 본 논문에 제시되지는 않았으나 변형률 속도 10^{-2}s^{-1} 조건에서의 응력-변형률 거동을 보이며 10^{-4}s^{-1} 결과와 마찬가지로 상온에서 극저온으로 온도가 감소함에 따라 비선형 경화현상, 항복 및 인장강도의 증가, 파단변형률의 감소와 같은 유사한 경향의 결과를 얻을 수 있었다. 변형률 속도가 증가함에 따라 항복강도가 증가하지만 인장강도는 감소하는 경향을 보였는데, 과거 연구에 의해 이는 단열효과에 의한 현상 때문이며, 또한 온도가 감소함에 따라 변형률 속도에 대한 의존성은 더욱 뚜렷이 나타난다고 보고된 바 있다(Talonon *et al.*, 2005).

3. 이론모델

본 연구에서 제안된 구성-손상모델은 저자의 과거 연구를 기반으로 수행되었으며 본 연구의 내용에 맞게 수정 및 보완하여 아래에 간략히 나타내었다(Kim *et al.*, 2012).

3.1 점소성 모델

일반적으로 변형률속도는 탄성영역과 소성영역으로 분리 가능하며 변형률 분리 식은 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (1)$$

여기서, $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ 는 탄성 변형률속도, $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ 는 비탄성 변형률속도이다. 탄성 변형률속도는 일반화된 Hooke 법칙에 의해 시간미분 항으로 나타낼 수 있다. 소성 변형률은 Prandtl-Reuss의 유동법칙을 따르며 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\epsilon}_{ij}^p = \lambda s_{ij} \quad (2)$$

여기서, λ 는 소성승수(plastic multiplier)이며, s_{ij} 는 편차 응력텐서를 나타낸다. 식 (2)를 제곱하면 다음과 같다.

$$D_2^p = \lambda^2 J_2 \quad (3)$$

$$D_2^p = D_0^2 \exp\left\{-\left(\frac{Z^2}{\sigma_{eff}^2}\right)^n\right\} \quad (4)$$

여기서, $D_2^p = (1/2)\dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p$ 이고 $J_2 = (1/2)s_{ij}s_{ij}$ 이며 각각 편차 소성 변형률의 2차 불변량, 편차응력의 2차 불변량이다. 식 (4)에서 D_0 와 n 은 재료정수이고, 각각 최대 변형률속도를 제한하는 변수 및 변형률 속도 민감도를 조정하는 변수를 의미한다. 일반적으로 정적 문제에 있어서 D_0 는 10^4 를 사용하고, n 은 온도에 의존한 재료정수로 결정된다. 변수 Z 는 소성 유동에 대한 재료의 전체적인 저항의 크기를 나타내는 상태 변수로 하중 이력과 관계가 있다. 식 (4)을 식 (2)와 (3)에 대입하게 되면 다음과 같은 식이 도출된다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = D_0 \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{Z^2}{\sigma_{eff}^2}\right)^n\right\} \frac{\sqrt{3}s_{ij}}{\sigma_{eff}} \quad (5)$$

$$Z = Z_1 - (Z_1 - Z_0) \exp(-m W_p) \quad (6)$$

$$W_p = \int dW_p = \int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^p \quad (7)$$

여기서, 열 회복을 무시할 수 있다면 변수 Z 는 식 (6)과 같이 표현 할 수 있으며 Z_0 와 Z_1 는 각각 항복응력, 포화응력을 의미하는 재료정수로 온도 및 변형률속도에 의존한다. 또한 W_p 는 축적소성일을 의미하며 식 (7)와 같이 정의된다.

3.2 손상모델

Bodner-Chan은 등방 손상발전식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = D_0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Z(1-\omega)}{\sigma_{eff}} \right)^{2n} \right] \frac{\sqrt{3} s_{ij}}{\sigma_{eff}} \quad (8)$$

여기서, ω 는 재료 내부의 강성저하를 나타내는 변수이며, 본 연구에서는 점소성모델과 연계하여 재료의 연화현상을 효과적으로 모사하였다. 본 연구에서 재료의 손상변수인 ω ($0 < \omega < 1$)는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\omega} = \frac{b}{H} \left[\left\{ \ln \left(\frac{1}{\omega} \right) \right\}^{(b+1)/b} \right] \omega \dot{Q} \quad (9)$$

$$\dot{Q} = [A\sigma_{max}^+ + B\sigma_{eff} + C\dot{\epsilon}_1^+]^z \quad (10)$$

3.3 모델 검증

상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS는 프로그램 자체에서 제공하지 않는 비선형 현상을 사용자가 직접 FORTRAN 언어로 코딩하여, 시뮬레이션 수행 시 반영할 수 있는 환경을 제공한다. 304L 스테인리스강은 저온영역에서 이차경화와 같은 비선형 거동을 보이나 ABAQUS에서는 지원하지 않는 재료의 비선형 특성이므로 본 연구에서는 사용자지정 재료 서브루틴을 개발하여 제안 모델을 적용시켜 보았다. Fig. 4는 재료단위 수치시물레이션을 수행하기 위한 유한요소해석 모델링 및 하중, 경계조건을 보인다. 요소의 크기에 따른 최적 해석시간을 선정하기 위해 mesh study를 수행하였으며, 그 결과 본 연구에서는 3차원 C3D8I요소 3960개가 이용되었다.

Fig. 5는 제안 모델을 유한요소해석 프로그램에 적용시킨 후 재료실험 결과와 비교한 그래프이다. 먼저, 오스테나이트계 스테인리스강의 저온 특성인 비선형 경화현상을 잘 모사할 수 있음을 알 수 있다. 둘째, 항복강도, 인장강도와 같은 재료의 기계적 거동에 대해서도 예측이 가능한 것을 알 수 있으며, 셋째로 손상모델이 구성모델과 연계되어 재료의 강성저하현상을 잘 모사했기에 임의 온도에 대해 재료의 파단

Fig. 4 Quarter FE model and its boundary conditions

Fig. 5 Numerical verification of experimental results at 10^{-4}s^{-1}

을 비교적 잘 예측할 수 있었다. 즉, 구성방정식과 재료정수 결정기법을 활용하여 재료의 거동을 성공적으로 모사하였다. 본 연구에서 분석된 수치해석 결과는 304L 스테인리스강으로 제작된 구조물의 건전성평가 혹은 구조해석 수행 시 재료의 거동을 나타낼 수 있는 정보(material card)로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

4. 구조시험

4.1 유한요소해석

본 연구에서는 제안 구성-손상모델을 탑재한 304L 스테인리스강의 재료 서브루틴에 대한 구조적용 가능성을 검증하고 유효성을 검증하기 위해 LNG 멤브레인에 적용시켜 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 6은 Mark-III 타입 LNG선의 1차 방벽인 멤브레인의 유한요소해석 모델링 및 하중조건을 보여준다.

구조적용을 수행하기 위해 인장하중을 채택하였으며 이는

Fig. 6 Loading condition of the membrane specimen

멤브레인이 LNG탱크 내부에서 반복적인 열 하중에 의해 수축, 팽창하여 인장과 압축을 반복해서 받게 된다. 다시 말해, LNG가 저장탱크 내부에 채워져 있을 경우 극저온이라는 특성상 멤브레인은 수축하며, LNG를 하역하게 되면 상온의 온도로 인해 1차 방벽은 팽창하면서 인장과 압축 하중을 반복해서 받게 되는 것이다. 둘째로, 인장하중이 균열이나 손상과 같은 결함을 발생시키는데 가장 지배적인 하중으로 알려져 있기 때문에 LNG 탱크 안전설계를 위해 반드시 고려되어야 하는 중요한 하중 조건이기 때문이다. 이와 관련해서는 과거 저자의 연구에서 논의된 바 있다(Lee *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2013). 본 연구에서는 이러한 설계요구조건을 반영하여 손상문제에 있어서 가장 지배적인 인장 하중에 초점을 맞추어 구조해석 및 구조실험을 수행하였다.

본 연구에서는 멤브레인을 해석 모델로 선정하였으며 총 37,321개의 3차원 솔리드 요소를 이용하였다. 인장 하중조건을 부여하기 위해 멤브레인의 한쪽을 고정시키고 다른 한쪽에 대해 200mm 변위제어를 수행하였다.

4.2 멤브레인의 구조인장시험

LNG 멤브레인 유한요소해석의 유효성 및 적용성을 검증하기 위해 유한요소해석에 이용되었던 크기의 멤브레인 시편을 제작하여 구조인장실험을 수행하였다. 시편의 크기 및 형상은 Fig. 7에 보이는 것과 같이 해석에서 수행했던 조건과 동일하며 극저온(110K) 온도 조건에서 30mm/min의 하중 속도로 구조실험을 수행하였다. 멤브레인의 구조실험에 사용된 장비는 304L 스테인리스강의 재료시험에 사용되었던 장비와 동일하나, 특수 지그를 추가로 제작하여 만능재료시험기에서 구조시편을 고정하였다. 실험을 수행하면서 만능재료시험기로부터 하중-변위 데이터 정보를 얻을 수 있었으며 고속

Fig. 7 Experiment of membrane specimen at 110K temperature condition

카메라를 이용하여 실험이 진행되는 동안 시간에 따른 변형 형상에 대한 정보도 획득하였다.

4.3 결과분석 및 검증

제안 모델 및 해석 프로시저의 유효성을 검증하고 구조 적용가능성을 검토하기 위해 멤브레인의 유한요소해석 결과와 실험결과를 비교 분석하였다. 시간에 따른 유한요소해석 결과와 구조시험의 결과를 비교하기 위해 Fig. 8과 같이 이들 두 거동을 비교 분석하여 나타내었으며 해석결과와 실험결과의 전체적인 거동이 비슷함을 알 수 있다.

또한, Fig. 9은 극저온(110K) 온도 환경에서 실험 및 유

Fig. 8 Comparative study between (a) cryogenic experimental and (b) simulated results

Fig. 9 Comparison of force-displacement relationship at cryogenic(-163°C) temperature

한요소해석 해석의 하중-변위곡선을 나타낸 그래프이다. 본 연구에서는 약 70mm의 변위가 발생하는 동안의 하중-변위 그래프를 비교하였으며 제안 해석기법이 304L 스테인리스강으로 제작된 LNG멤브레인의 구조거동을 성공적으로 모사함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 Mark-III 타입의 LNG선 1차 방벽으로 채택되는 멤브레인에 대해 인장시험을 수행하였으며, 재료시험 결과를 바탕으로 점소성-손상모델을 제안하였고, ABAQUS 사용자지정 재료 서브루틴인 UMAT에 탑재하여 수치해석 결과와 재료시험 결과를 비교 분석하여 그 유효성을 검증하였다. 또한, 검증된 재료 서브루틴을 멤브레인에 적용시켜 한요소해석 및 구조인장시험을 통해 검증작업 또한 수행하였다. 이로써 개발 재료모델 및 재료 서브루틴이 구조단위의 건전성평가 및 구조해석 시에도 적절히 이용될 수 있다는 사실을 증명하였다.

본 연구에서 수행된 결과물 및 해석기법은 LNG 멤브레인 과 같이 복잡한 형상으로 인해 구조의 안전성 및 건전성을 평가하는 것이 어려운 구조물에 적용시킬 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030013). 본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(2013 시범사업)으로 수행된 연구결과임(NRF-2013H1B8A2078346).

Reference

- Abed, F.H., Voyiadjis, G.Z. (2005) Plastic Deformation Modeling of AL-6XN Stainless Steel at Low and High Strain Rates and Temperatures using a Combination of BCC and FCC Mechanisms of Metals, *International Journal of Plasticity*, 21, pp.1618~1693.
- Choi, S.W, Roh, J.U., Kim, M.S., Lee, W.I. (2011) Thermal Analysis of Two Main CCS(Cargo Containment System) Insulation Box by using Experimental Thermal Properties, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 24(4), pp.429~438.
- Gupta, A.K., Anirudh, V.K., Singh, S.K. (2013) Constitutive Models to Predict Flow Stress in Austenitic Stainless Steel 316 at Elevated Temperatures, *Materials & Design*, 43, pp.410~418.
- Kim, J.H., Park, W.S., Chun, M.S., Kim, J.J., Bae, J.H., Kim, M.H., Lee, J.M. (2012) Effect of Pre-straining on Low-temperature Mechanical Behavior of AISI 304L, *Materials Science and Engineering A*, 543, pp.50~57.
- Kim, S.K., Lee, C.S., Kim, J.H., Kim, M.H., Lee, J.M. (2013) Computational Evaluation of Resistance of Fracture Capacity for SUS304L of Liquefied Natural Gas Insulation System under Cryogenic Temperatures using ABAQUS User-defined Material Subroutine, *Materials & Design*, 50, pp.522~532.
- Ruester, S., Neumann, A. (2008) The Prospects for Liquefied Natural Gas Development in the US, *Energy Policy*, 36, pp.3160~3168.
- Kim, J.H., Lee, C.S., Kim, M.H., Lee, J.M. (2013) Prestrain-dependent Viscoplastic Damage Model for Austenitic Stainless Steel and Implementation to ABAQUS User-defined Material Subroutine, *Computational Materials Science*, 67, pp.273~281.
- Lee, C.S., Lee, J.M. (2014) Failure Analysis of Reinforced Polyurethane Foam-based LNG Insulation Structure using Damage-coupled Finite Element Analysis, *Composite Structures*, 107, pp.234~245.
- Lee, W.S., Lin, C.H., Chen, T.H., Yang, M.C. (2010) High Temperature Microstructural Evolution of 304L Stainless Steel as Function of Pre-strain and Strain rate, *Materials Science and Engineering A*, 527, pp.3127~3137.
- Lee, W.S., Lin, C.F. (2002) Comparative Study of

the Impact Response and Microstructure of 304L Stainless Steel with and without Prestrain, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33, pp.2801~2810.

Qu, S., Haung, C.X., Gao, Y.L., Yang, G., Wu, S.D., Zang, Q.S., Zhang, Z.F. (2008) Tensile and Compressive Properties of AISI 304L Stainless Steel subjected to Equal Channel Angular Pressing, *Materials Science and Engineering A*, 475, pp.207~216.

Samantaray, D., Mandal, S., Borah, U., Bhaduri,

A.K., Sivaprasad, P.V. (2009) A Thermo-viscoplastic Constitutive Model to Predict Elevated-temperature Flow Behavior in a Titanium-modified Austenitic Stainless Steel, *Materials Science and Engineering A*, 526, pp.1~6.

Talonen, J., Nenonen, P., Pape, G., Hänninen, H. (2005) Effect of Strain Rate on the Strain-induced $\gamma \rightarrow \alpha'$ -Martensite Transformation and Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steels, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 36, pp.421~432.

요 지

304L 스테인리스강관은 멤브레인타입 LNG선 단열시스템의 1차 방벽으로 이용된다. 304L 스테인리스강은 변태유기소성 (TRIP)강으로 복잡한 재료거동을 보이는데, 이는 소성변형이 발생하는 동안 상변태를 경험하기 때문이다. 본 연구에서는 304L 스테인리스 강의 비선형 기계적 거동분석을 위한 온도의존 일축인장시험을 수행하였으며 재료의 파단이나 비선형 거동을 예측하기 위한 점소성모델을 제안하였다. 수치해석의 결과와 시험 결과를 비교 분석하여 유효성을 검증하였으며 LNG 멤브레인에 대한 적용성을 검토하기 멤브레인 구조시편을 제작하여 구조해석 및 유한요소해석을 수행하였다. 재료모델은 개발 서브루틴을 이용하였으며 ABAQUS 사용자지정 재료 서브루틴을 탑재한 유한요소해석 결과와 극저온 구조인장시험을 수행한 결과를 비교하여 구조적용성을 검증하였다.

핵심용어 : LNG 멤브레인, 304L 스테인리스강, LNG 단열시스템, 서브루틴 기반 시뮬레이션