

극저온 재료 성능분석을 위한 온도의존 손상모델 개발

이경준*, 김태우*, 유재신*, 유성원*, 전민성**, 이제명†*

부산대학교 조선해양공학과*

삼성중공업(주)**

Development of Temperature Dependent Damage Model for Evaluating Material Performance under Cryogenic Environment

Kyoung-Joon Lee*, Tae-Woo Kim*, Jea-Sin Yoo*, Seong-Won Yoo*,
Min-Sung Chun** and Jae-Myung Lee†*

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan Naval University*
Samsung Heavy Industries co., Ltd.**

Abstract

In this paper, the constitutive equation is developed to analyze the characteristics of strain-induced plasticity in the range of low temperature of 316 stainless steel. The practical usefulness of the developed equations is evaluated by the comparison between experimental and numerical results. For 316 stainless steel, constitutive equations, which represent the characteristics of nonlinear material behavior under the cryogenic temperature environment, are developed using the Bodner's plasticity model. In order to predict the material behaviour such as damage accumulation, Bodner-Chan's damage model is implemented to the developed constitutive equations. Based on the developed constitutive equations, 3-D finite element analysis program is developed, and verified using experimental results.

※Keywords: Continuum damage mechanics(연속체 손상 역학), Finite element methods(유한요소법), Transformation induced plasticity(변태소성), Bodner's damage evolution equation(Bodner 손상발전방정식), Cryogenic environment(극저온 환경)

접수일: 2008년 6월 11일, 승인일: 2008년 10월 14일

†교신저자: jaemlee@pusan.ac.kr, 051-510-2342

1. 서론

청정에너지의 세계적인 수요증대 및 액화천연가스의 생산원가의 하락에 힘입은 원유와의 경쟁 등으로 인하여 LNG 관련제품의 지속적인 물량증대가 예상되고 있으며, 이러한 이유로 전 세계적으로 조선해양산업계에서는 LNG관련 제품의 주력제품화가 이루어지고 있다(Lee 2007a).

LNG운반선 대형화 및 극지항로 투입 등에 따라 안전에 대한 정밀평가는 향후 LNG운반선 설계에 필수적으로 채용되어야하는 현황이다(Lee 2007b).

일반적으로 LNG 운반선용 안전밸브 등은 상온에서 -162°C 사이의 온도환경 변화를 겪게 되므로, 극저온에서의 기계적 성질이 우수한 304 스테인레스강 또는 316 스테인레스강이 주로 사용되고 있다(Kim 2001).

이들 재료의 극저온 성능은 현상론적인 관점에서 안전성에 대한 검증이 이루어져 있다고 알려지고 있으나, 재료의 온도별 성능 분석 결과나 재료 특성을 모사하는 수치해석 기술에 대한 연구결과는 매우 제한적이다. 300 계열의 스테인레스강에 대해서는 온도변화에 따른 실험적 관찰 결과 등이 보고되고 있으며, 이들 문헌에서는 공통적으로 저온영역에서의 내부 상 변태에 따른 2차 경화현상(Martensite phase transformation induced hardening/plasticity)이 보고되어 있다(Kim et al. 2000, Saburo and Takanobu 2000, Makkaouk et al. 2008).

2차 경화 현상은 매우 비선형적이며 일반적인 해석용 구성방정식으로는 표현이 불가능하지만, 예측을 위한 수치해석 모델의 개발이나 실제적인 적용 예는 거의 찾아볼 수 없다. 따라서 해당 특성을 갖는 재료를 채용한 구조 체에 대한 정밀 강도해석에 활용할 수 있는 이론을 찾기가 쉽지 않은 점이 극저온 구조의 건전설계나 정밀 강도평가에 애로점으로 작용하고 있다.

본 연구에서는, 316 스테인레스강에 대한 저온영역 소성변형 특성 해석용 정밀 구성방정식을 개발하고 실험결과를 이용하여 적용에 대한 유용성을 분석한다. 비교적 폭넓은 온도범위에 대한 적용성 때문에 재료 비선형 표현에 있어 자주 채용

되는 Bodner의 비탄성모델과 손상역학에 기반을 둔 손상모델 연계를 이용하여 극저온 하에서 비선형 재료 거동 특성을 보이는 316 스테인레스강용 구성방정식을 개발한다.

2. 탄소성 손상해석용 구성방정식 개발

재료의 사용 환경이나 구조물의 가동 환경이 극심한 경우, 예를 들면 고온 또는 저온환경이나 충격 충돌 등의 시간 의존형 과대하중의 경우, 이들 거동의 예측을 위한 해석에는 정밀한 구성방정식의 채용이 필수적으로 요구된다.

특히 전자의 경우, 재료비선형 문제의 가장 일반적인 모델인 소성모델의 개선이나 확장이 시도되고 있으며 많은 종류의 유용한 구성방정식 모델들이 제안되어 있다. 그 중에 Walker's model(1987)은 고온, 충돌 그리고 부식손상에 의해 야기된 크리프와 피로균열 등 시간과 온도의존적인 소성영역을 모사하기위한 일체화된 구성방정식의 현상학적인 개발 모델이며, 크리프와 소성 사이의 물리적인 상호작용관계를 주기적인 경화 또는 연화 그리고 크리프회복, 변형률 속도민감도 등을 통해 밝혀냈다. 이렇게 개발된 일체화된 구성이론은 고전적인 소성-크리프이론에 비해 물리적인 과정을 예측하는데 우수하다.

Miller and Tanaka(1988)는 NONSS(a non iterative, self-correcting solution)를 개발했다. 이 방법은 implicit나 explicit 방법에 상관없이 재료정수를 결정할 수 있으며, 정확성은 self-adaptive time control과 각 스텝에서 오차를 수정함으로써 확보된다. 그러나 이 모델은 요소 한 개에만 적용되어왔으므로, 유한요소해석에 대한 적용성은 검증되지 않았다.

또한, Krieg et al.(1978)은 금속 계 재료에 대해 내부 상태변수를 사용하여 크리프와 소성에 관한 일체화된 모델을 개발하였다. 이 모델은 3차원 해석이 가능하도록 일반화되었고, 발전방정식은 변형률 경화와 열 회복을 고려한 내부 상태변수를 계산하기 위해 개발되었으며, 이렇게 일반화된 모델은 임의의 변형경로에 따른 기계적인 응답을 예측하는데 활용될 수 있다.

특히, Bodner-Partom's model과 Walker's model은 온도 및 변형속도에 대해서 폭넓은 적용 범위를 갖는 유용성이 보고되고 있다. 본 연구에서는 Bodner and Chan(1986)의 비탄성 모델을 기본으로 채용하여 316 스테인레스강의 극저온 재료 비선형 모델을 개발한다.

2.1 비탄성 구성방정식 개발

Bodner의 비탄성 구성방정식 모델은, 원래 gas turbine engine과 발전기를 가동할 때 발생하는 고온 크리프 문제와 관련하여 크리프 변형률에 대한 제안을 목적으로 개발되었다. 따라서 기본적으로 시간 의존형 점소성 모델로 구성되어 있으며, 재료정수의 적절한 선택을 통하여 매우 유용하게 사용할 수 있는 장점을 지니고 있다.

온도변화를 포함하여 재료의 비탄성 거동의 표현을 위한 구성방정식은, 비탄성영역에서의 변형을 분리(Strain decoupling) 원리를 이용하여 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\sigma} = E_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl}^{(e)} - E_{ijkl} \alpha_{kl} \dot{T} \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^{(e)} + \dot{\epsilon}_{ij}^{(p)} + \dot{\epsilon}_{ij}^{(s)} \quad (2)$$

여기서 $\dot{\epsilon}_{ij}^{(e)}$, $\dot{\epsilon}_{ij}^{(p)}$ 는 각각 탄성 변형률 속도, 비탄성 변형률 속도를 의미하며, $\dot{\epsilon}_{ij}^{(s)}$ 는 마르텐사이트 상 변태 유기 소성 변형률 속도(Phase transformation induced plastic strain rate of martensite)이다. E_{ijkl} 은 탄성계수 텐서, α_{kl} 은 선팅창계수, \dot{T} 는 온도변화를 의미한다. 비탄성 변형률에 대한 발전방정식(evolution equation)은 Bodner의 이론을 채용하면 응력상태와 내부변수의 함수로써 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{(p)} = \frac{3 \sqrt{D_0^2 \exp \left[- \left\{ \frac{Z}{f} \right\} \left(\frac{n+1}{n} \right)^{\frac{1}{n}} \right]^n}{f} \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \right) \quad (3)$$

여기서 D_0 , n , Z 는 소성경화의 크기를 제어하는 내부변수를 의미한다. 먼저 D_0 값을 결정한 후에

변형률속도 의존형 포화응력 (strain-rate dependence of saturation stress)으로 부터 n 을 얻는데 대부분의 변형률 시험(straining test)에서 비탄성 불안정성 (inelastic instability)등의 이유로 포화응력까지 도달하지 못하므로 이용 가능한 데이터로부터 추정하게 된다. 일반적으로 광범위한 온도 범위에서 D_0 에 대해서는 1.4×10^4 (sec⁻¹), n 에 대해서는 2.4 수준의 값들이 제안되고 있다(Bodner 2002). F 는 von-Mises 항복함수이고, f 는 유효응력 ($\sqrt{3J_2}$, J_2 : 편차응력의 2차 불변량)을 의미한다. 경화의 크기를 제어하는 내부변수 Z 는 비탄성변형과 함께 변화하는 변수이므로 발전방정식을 이용한 표현이 필요하게 되며 아래 식이 사용된다.

$$Z = Z_1 + (Z_0 - Z_1) \exp \left(- \frac{m W_p}{Z_0} \right) \quad (4)$$

$$W_p = \int dW_p = \int \{ \sigma \} \{ \dot{\epsilon}_p \} dt \quad (5)$$

여기서, Z_0 , Z_1 는 재료정수이며, Z_0 값의 크기는 해당 재료의 항복응력을 기준으로 사용된다. m 은 등방경화율(isotropic hardening rate)을 조절하는 함수로써, 그것 자체가 누적된 소성에너지의 함수이며 범용적인 값들이 제안되어 있다(Bodner 2002). w_p 는 내부적으로 축적되는 소성에너지를 의미하며, τ 는 증분제어용 이력변수를 의미한다.

일반적으로 316 스테인레스강은 Table 1에서 알 수 있듯이 온도가 낮아질수록 즉, 극저온에서 인장강도가 증가하는데, 이는 비탄성 변형 과정에서 불안정상태의 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태하기 때문이다. 이러한 변태 소성 변형률 속도 $\dot{\epsilon}_{ij}^{(s)}$ 는 다음 식으로 정의된다(Makkouk et al. 2008).

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{(s)} = R f_m \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \right) \quad (6)$$

$$R = R_0 + R_1 \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_{ya}} \right) \quad (7)$$

$$f_m = 4.3714p - 0.3873 \quad (8)$$

여기서, R_0 , R_1 은 재료정수로써 2차 경화 이후

의 최대응력 크기에 관련된 값이다(Makkouk et al. 2008). f_m 은 마르텐사이트의 체적률(Volume fraction)(Cedric et al. 2006), $\bar{\sigma}$ 는 유효항복응력, σ_{ya} 는 오스테나이트의 초기 항복 응력이며, F 는 누적 소성 변형률(Accumulated plastic strain)을 의미한다. 즉, 식(3)에 의하면, 임의 상태의 비탄성 변형율의 발전량은 누적된 소성에너지의 크기와 해당 시점의 응력상태에 따라 결정되며 따라서 누적개념의 내부의 변형이력을 모두 포함하게 된다.

또한 식(6)에 의해서, 소성변형의 증가에 의해 변태하는 변태소성의 크기도 계산이 가능하게 된다. 따라서 식(3) 및 식(6)의 조합에 의하여, 내부적으로 발생하는 마르텐사이트 변태 유기 2차 경화를 표현할 수 있는 구성방정식이 갖추어 지게 된다.

본 연구에서는, 316 스테인레스강에 대한 적용을 위하여 식(1) ~ (5)의 구체적인 확립을 시도한다. 실제로 316 스테인레스강의 극저온에서의 일축 인장시험을 통하여 마르텐사이트 상 변태에 의한 2차 경화현상과 항복점 이후 응력이 완만히 증가하다가 약 10%~20% 이내의 변형을 범위에서 최대인장응력까지 응력이 다시 크게 증가하는 저온 인장 특성을 확인할 수 있었으며, 그 결과를 바탕으로 구성방정식 모델 구체화를 수행하였다.

Fig. 1에 Bodner 모델을 이용한 실험결과 모사에 대한 개요를 보인다. Model F1, F2는 재료정수인 Z_1 값의 변화에 따른 차이를 나타낸다. 본 연구의 적용대상인 316 스테인레스강의 저온 특성은 상 변태에 의한 2차 경화를 보이며 이러한 현상은 식(1) ~ (5)의 적용, 즉 Model F1 또는 F2의 단순 이용만으로는 표현이 불가능하다.

즉, Model F1을 이용할 경우는, 1차 항복을 포함한 1차 경화는 표현 가능하지만 2차 경화를 나타낼 수 없다. 반면에 Model F2를 채용할 경우는 최대인장응력을 포함한 2차 경화는 표현이 가능하지만 1차 항복 및 1차 경화는 표현할 수 없다. 이것은 고정적인 재료 정수 Z_1 의 사용으로는 1차 및 2차 경화현상에 대한 통합형 표현은 불가능하다는 것을 의미하며, Fig. 1에 나타내는 Model V와 같은 형의 구성방정식 모델이 요구된다는 것을

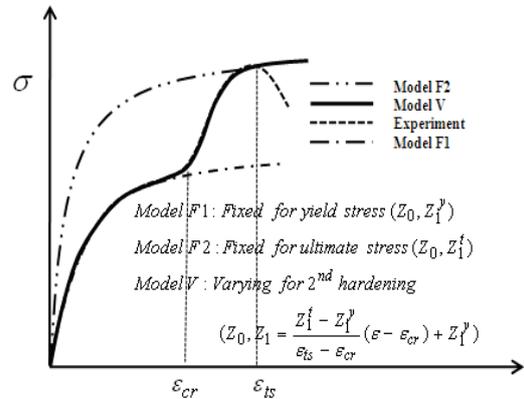


Fig. 1 A Schematic of stress-strain relationship of 316 stainless steel under cryogenic environment and comparison of constitutive models

알 수 있다. Model V는 1차 및 2차 경화현상을 통합적으로 표현할 수 있는 모델로써 거시적인 응력-변형을 관계에서 2차 경화가 발생하는 시점인 ϵ_{cr} 을 이용하여 표현가능하며, ϵ_{cr} 의 구체적인 값은 각 실험별로 획득된 응력-변형을 선도에서 기울기가 반전되는 시점을 대상으로 결정하였다. 이러한 값들은 저온용 오스테나이트 강재의 2차 소성경화의 시작 시점을 예측하는 데 사용되었으며, 수치해석 등에서 비선형 현상의 발생 분기점에 대한 근거로써 활용되었다.

따라서 본 연구에서는 재료 정수 Z_1 에 대한 함수를 도입하여 실험적으로 관찰된 1차 및 2차 경화문제에 모두 적용할 수 있도록 구성방정식을 개발한다.

Bodner 구성방정식에 요구되는 재료 정수 Z_0, D_0, Z_1, n 중에서 임의의 온도에 대하여 Z_0, D_0, n 을 고정 값으로 결정하고(Bodner 2002), Z_1 에 대해서는 1차 항복 및 최대인장응력을 기준으로 각각 서로 다른 값인 Z_1^y, Z_1^t 를 결정한다.

이 과정을 통하여 Fig. 1의 Model F1, F2 상세가 결정된다. 이어서 2차 경화에 대한 고려를 위해 최종적으로 Z_1 을 식(9)의 형태로 결정하며 이들 값들은 온도의 함수로 주어지게 된다.

이상의 과정을 통하여 저온영역에서 매우 강한 비선형성을 보이는 316 스테인레스강의 비탄성

구성방정식이 정리된다. ($\epsilon_{cr}, \epsilon_{ts}$ 는 Fig. 1 참조)

$$Z_1 = \frac{Z_1^t - Z_1^y}{\epsilon_{ts} - \epsilon_{cr}} (\epsilon - \epsilon_{cr}) + Z_1^y \quad (9)$$

2.2 손상모델 적용

전술한 바와 같이 재료의 비선형 현상을 표현하기 위해서는 정밀한 구성방정식의 개발이 필요하며 본 연구를 포함한 이론개발 연구가 많이 수행되고 있다. 재료의 비선형 문제에서 소성경화 등과 같은 분야는 아주 오랜 역사를 지니고 있으며, 구조물의 안전성 평가에 적용되는 손상역학연계 수치해석기술은 과거 수행되어 오던 연구들을 살펴볼 때, 상당한 활용성을 가지고 있다(Han et al. 2007).

연속체 손상역학에서는 일정부위에 분포된 미소 결함들의 평균적인 밀도를 손상이라는 내부변수로 간주함으로써, 재료의 비선형 거동을 거시적인 관점에서 합리적으로 표현할 수 있다(Nho 2000)는 장점을 지니고 있으며, 최근 들어서는 재료 내부의 손상현상에 대한 통합적인 표현을 위한 일체형 구성방정식 개발로 이어지고 있다.

손상모델의 채용 유무에 따른 해석결과의 차이를 Fig. 2에 도식적으로 나타낸다. 즉 어떠한 종류의 구성방정식을 이용하더라도 실제 관찰되는 강성저하 현상은 표현할 수 없으며, 따라서 손상변수와 구성방정식의 적절한 연계를 통하여 내부 강성저하 현상을 표현할 수 있게 된다.

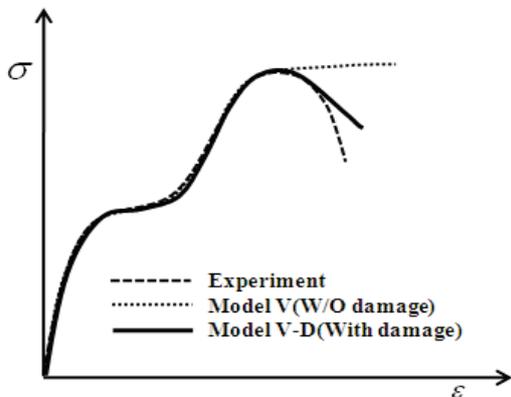


Fig. 2 A Schematic of comparison between damage coupled and uncoupled model

Bodner and Chan(1986)은 점소성 구성방정식과 손상모델을 결합한 점소성 손상모델을 아래와 같이 제안한 바 있으며, 실제로 크리프 파단문제에의 적용을 통하여 그 유용성을 검증한 바 있다.

$$\dot{\epsilon}^{(p)} = \frac{3\sqrt{D_0^2 \exp\left[-\left\{\frac{Z}{f}(1-\omega)\right\}\left(\frac{n+1}{n}\right)^{\frac{1}{n}}\right]^n}}{f} \quad (10)$$

여기서 ω 는 재료 내부의 강성저하를 나타내는 손상변수이며, 스칼라량으로 표현되는 등방손상(Isotropic damage) 표현분야에 자주 사용된다. 본 연구의 관심 대상은 금속으로써 일반적으로 등방성이 채용되는 재료이므로 식(10)의 사용으로 충분하며, 여기서 계산되는 손상변수는 (4)의 경화변수 Z 와 연계되어 내부손상이 발생할수록 경화의 크기를 저하시키는, 즉 강성저하를 야기하는 물리적 근거를 주게 된다.

구성방정식 내부에서 손상변수의 역할은 손상의 누적에 따른 강성저하이며, 활용을 위한 관점에서는 정량적인 표현이 중요하게 된다. 손상변수 역시 비탄성 거동이 진행됨에 따라 발전하는 양이므로 발전방정식에 대한 정의가 필요하다.

본 연구에서는 저자의 경험에 의거하여 다음과 같은 손상발전방정식을 식(10)의 ω 에 대하여 채용하였다(Lee 1996).

$$\dot{\omega} = f_1(\omega)f_2(\sigma) = \frac{P}{H} \left\{ \ln\left(\frac{1}{\omega}\right)^{\frac{P+1}{P}} \right\} \omega \dot{Q} \quad (11)$$

$$\dot{Q} = [\alpha\sigma_{max}^+ + \beta\sqrt{3J_2} + \gamma I_1^+]^r \quad (12)$$

여기서 P, H 는 재료 정수로써 광범위한 온도 범위에서 각각 1.0과 2.0×10^{20} 을 쓰며(Bodner 2002), α, β, γ 는 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 을 만족하는 응력함수 제어정수이다. Hayhurst and Leckie(1977)의 실험적 연구에 의하면 일반적인 금속계 재료에 대해서

는 $\alpha = 0, \beta = 0.75$ 의 사용이 제안되어 있다.

2.3 유한요소해석

구성방정식의 개발이나 손상모델의 채용 등을 궁극적으로 유한요소해석을 위한 재료비선형 이론 개발이 목적이며, 따라서 개발된 이론을 채용한 유한요소해석을 통한 검증이 필요하다.

본 연구에서는 전술한 비탄성-손상 구성방정식을 채용한 유한요소해석 프로그램을 개발하였다. 식(13)에 초기 변형을 법을 이용한 유한요소해석용 지배방정식을 나타낸다.

$$\{F_r\} + \{\Delta F\} + \int_{\nu} [B] (\{\Delta \epsilon_0\} + \{\Delta \epsilon_p\} + \{\Delta \epsilon_s\}) = [K_0] \{\Delta u\} \tag{13}$$

여기서 $\{F_r\}$ 은 잔차력 벡터, $\{\Delta F\}$ 는 하중중분 벡터, $[B_0]$ 는 변위-변형을 행렬, $\{\Delta \epsilon_0\}$ 는 초기변형을 증분(열변형을 증분), $\{\Delta \epsilon_p\}$ 는 소성 변형을 증분, $\{\Delta \epsilon_s\}$ 는 변태 소성 변형을 증분, $\{\Delta u\}$ 는 변위증분이며 $[K_0]$ 는 요소강성을 의미한다.

비탄성 변형을 증분량 계산에 필요한 적분은 식(13)을 바탕으로 증분구간별 중심차분법을 이용한다.

3. 해석모델의 검증 및 고찰

본 연구에서 개발한 해석용 모델의 검증은 전술한 바와 같이 2차 경화가 시작되는 뚜렷한 변형을 영역을 지니고 있으며, 온도가 낮아질수록 최대 인장응력이 커지는 316 스테인레스강의 저온 거동 특성을 확인할 수 있는 온도별 일축 인장 실험 결과를 이용하였다.

본 연구의 해석에서 해의 정확도는 초기 손상이 발생할 때까지의 변형과정을 다루므로 요소밀도에 크게 의존하지 않는다(Toy and Lee 2002). 따라서 구성방정식 검증에 사용되는 기법으로, 3차원 요소 한 개를 이용한 인장해석을 수행하여 해석용 알고리즘 및 구성방정식의 성능을 검증하였다. Table 2 및 3에 식(6) ~ (12)에 요구되는 재료 정수를 정리한다.

Fig. 3에 나타난 각 모델별 시뮬레이션 결과를 113K(-160°C)의 경우를 대상으로 실험결과 및 해석결과와의 비교를 나타낸다. 구성방정식 개발 과정에서 검토된 모든 모델들을 이용한 해석결과와의 비교를 나타내고 있으며, Model V-D가 316 스테인레스강의 극저온 특성인 마르텐사이트 상 변태에 의한 1차, 2차 경화 뿐 만아니라 강성저하 등과 같은 비선형 특징을 가장 잘 표현하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 Bodner 모델을 사용한다 하더라도, 강성 향에 대한 적절한 제어와 손상연계 해석을 수행하여야만 실제 현상의 수치모사가 가능함을 의미한다. 따라서 본 제안모델은 저온영역에서의 복잡한 재료 비선형 문제에 가장 적합한 형태임을 나타낸다.

Fig. 4 ~ 6에 각 온도별 실험결과와 제안모델을 이용한 해석결과와의 비교를 나타낸다. 그림으로부터 확인할 수 있듯이 본 제안모델은 모든 실험 결과를 아주 정밀한 수준으로 표현하고 있다. 재료 비선형의 가장 일반적인 형태인 단조 증가형 소성 경화 현상에 대한 표현이 1차, 2차 경화 등 구간별로 나타나는 비선형 특징을 일체형 이론을 통하여 표현하고 있음을 알 수 있으며, 매우 실용적인 해석이론으로 활용될 수 있다고 판단된다.

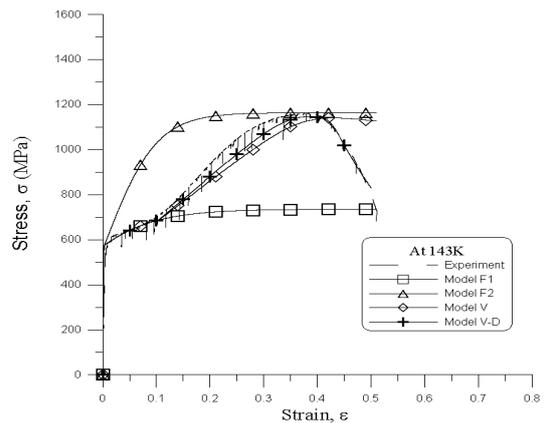


Fig. 3 Comparison of stress-strain relationship between numerical results and experimental results at 143K

Table 1 Experimental results of 316 stainless steel tensile test

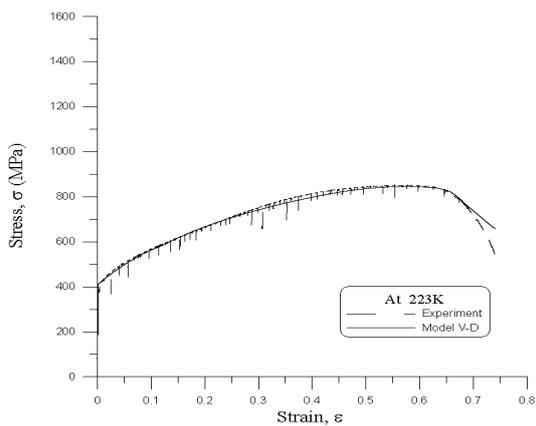
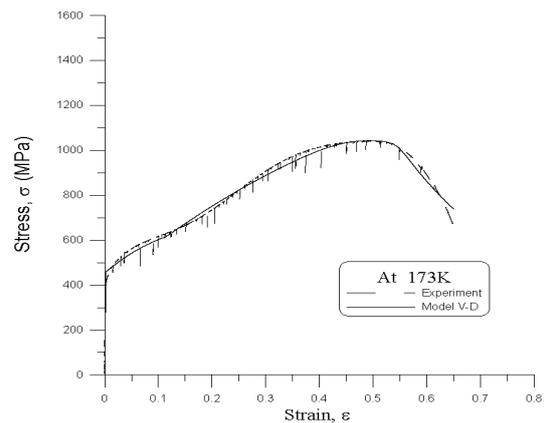
Temperature (K)	Yield stress (MPa)	Ultimate tensile stress (MPa)	Young's Modulus (GPa)
223	399.6	851.2	213.5
173	434.8	1041.1	200.5
143	470.0	1160.5	199.5
113	486.6	-	206.6

Table 2 Material parameters for plastic constitutive equation

Temperature (K)	R_0	R_1	Z_0 (MPa)	Z_1^y (MPa)	Z_1^t (MPa)	ϵ_{ts} (%)	ϵ_{cr} (%)
223	1.5	1.2	900	1500	1850	0.57	0.12
173	1.6	1.5	1000	1500	2450	0.49	0.11
143	2.0	2.1	1250	1600	2530	0.38	0.10
113	2.5	2.3	1250	1600	2800	0.33	0.10

Table 3 Material parameters for damage evolution equation

Temperature (K)	P	H	ν	α	β
223	1	2.0×10^{20}	5.15	0	0.75
173	1	2.0×10^{20}	4.94	0	0.75
143	1	2.0×10^{20}	4.92	0	0.75
113	1	2.0×10^{20}	4.88	0	0.75

**Fig. 4** Comparison of stress-strain relationship between numerical simulation and experimental results at 223K**Fig. 5** Comparison of stress-strain relationship between numerical simulation and experimental results at 173K

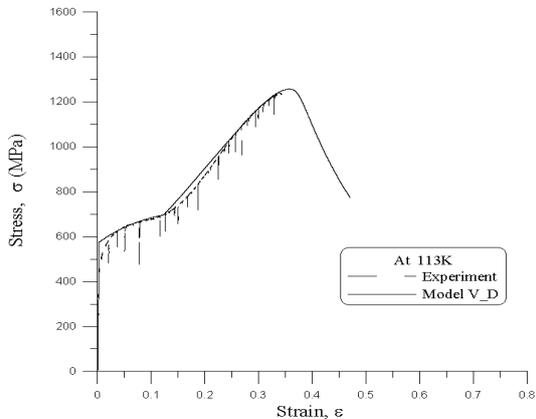


Fig. 6 Comparison of stress-strain relationship between numerical simulation and experimental results at 113K

4. 결론

본 연구에서는 316 스테인레스강 극저온 성능 평가를 위하여 Bodner 점소성 모델과 변태 소성 모델(Makkouk et al. 2008)을 이용하여 일체형 비탄성 구성방정식을 제안하였다.

본 연구의 결과를 이하에 정리한다.

- 저온영역에서 내부 상 변태 (Phase transformation)의 결과로 나타나는 2차 경화현상을, 야금학적 관점이 아닌 재료강도적인 관점에서 다룰 수 있는 이론을 제시하였다.
- 탄소성 구성방정식과 연계하여 사용할 수 있는 일체형 손상모델을 제안하였으며, 체계적인 유한요소해석 알고리즘을 이용한 프로그램을 개발하고 시리즈해석을 수행한 후 실험결과와의 비교를 통하여 유용성을 검증하였다.
- 극저온 영역에서의 비선형 거동이 실험적으로 보고된 바 있지만 해당 현상에 관한 이론적 접근 및 해석기법 개발이 미비한 316 스테인레스강 재료거동에 관하여, 전산 모사용 구성방정식이 개발되었다.

LNG 운반선을 비롯하여 다양한 산업구조물에서 점차 적용범위를 넓히고 있는 극저온용 재료에 대하여 적용할 수 있는 유한요소해석용 이론이

제시되었으며, 이 결과는 향후 실제 구조물에 대한 정밀 강도평가 분야에서 유용한 이론으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 ASERC 연구 프로그램의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Bodner, S.R. and Chan, K.S., 1986, "Modeling of Continuum Damage for Application in Elastic-viscoplastic Constitutive Equations," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 25, pp. 705-712.
- Bodner, S.R., 2002, Unified Plasticity for Engineering Applications, New York, Kluwer Academic.
- Cedric, G., Blazej, S. and Stefano, S., 2006, "Constitutive Modelling and Identification of Parameters of the Plastic Strain-induced Martensitic Transformation in 316L Stainless Steel at Cryogenic Temperatures," International Journal of Plasticity, Vol. 22, pp. 1234-1264.
- Han, D.S., Cho, D.S., Kim, J.H., Lee, T.K., Rim, C.H. and Lee, J.M., 2007, "A Study of Strength of Damaged Ship Structures Using Damage Simulator," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 4, pp. 439-444.
- Hayhurst, D.R. and Leckie, F.A., 1977, "Constitutive Equation for Creep Damage," Acta Metallurgica, Vol. 25, pp. 1059-1070.
- Kim, J.K., Kim, C.S., Cho, D.H., Kim, D.S. and Yoon, I.S., 2000, "Low Temperature Effects on the Strength and Fracture toughness of Membrane Material for LNG Storage Tank," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. A, Vol. 24, No. 3, pp. 710-717.
- Kim, H.S., 2001, "The Evaluation of Mechanical

- Properties and Fatigue Life for Domestic 304 Stainless Steel Used as Membrane Material in LNG Storage Tank," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. A, Vol. 25, No. 10, pp. 1644-1650.
- Krieg, R.D., Swearingen, J.C. and Rohde, R.W., 1978, "A Physically-Based Internal Variable Model for Rate-Dependent Plasticity," American Society of Mechanical Engineers, pp. 15-28.
 - Lee, J.M., 1996, A Study of Computational Mechanics of Thermal Damage Problems for Structural Members, Ph.D Dissertation, University of Tokyo.
 - Lee, J.H., Kim, T.W., Kim, M.H., Kim, H.S., Noh, B.J., Choe, I.H. and Lee, J.M., 2007a, "Numerical Assessment of Dynamic Strength of Membrane Type LNG Carrier Insulation System," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 3, pp. 305-313.
 - Lee, J.H., Choi, W.C., Kim, M.H., Kim, H.S., Noh, B.J., Choe, I.H. and Lee, J.M., 2007b, "Experimental Assessment of Dynamic Strength of Membrane Type LNG Carrier Insulation System," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 3, pp. 296-304.
 - Makkouk, R., Bourgeois, N., Serri, J., Bolle, M., Martiny, M., Teaca, M. and Ferron, G., 2008, "Experimental and Theoretical Analysis of The Limits to Ductility of Type 304 Stainless Steel Sheet," Engineering Journal of Mechanics A/Solids, Vol. 27, pp. 181-194.
 - Miller, A.K. and Tanake, T.G., 1988, "A New Method for Integrating Unified Constitutive Equations Under Complex Histories," Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 110, No. 3, pp. 205-211.
 - Nho, I.S., 2000, "Finite Element Analysis of Elasto-Plastic Large Deformation considering the Isotropic Damage(the 1st Report)-Development of Elasto-Plastic Damage Constitutive Model-," The Korean Society of Ocean Engineers, Vol. 14, No. 2, pp. 70-75.
 - Saburo, U. and Takanobu, M., 2000, "Creep Deformation of Austenitic Steels at Medium and Low Temperatures," Cryogenics, Vol. 40, pp. 117-126.
 - Toy, Y. and Lee, J.M., 2002, "Thermal Elasto-Viscoplastic Damage Behavior of Structural Members in Hot-Dip Galvanization," International Journal of Damage Mechanics, Vol. 11, pp. 171-185.
 - Walker, K.P., 1987, "A Uniformly Valid Asymptotic Integration Algorithm for Unified Viscoplastic Constitutive Models," American Society of Mechanical Engineers, pp. 13-27.



< 이 경 준 > < 김 태 우 > < 유 재 신 >



< 유 성 원 > < 전 민 성 > < 이 제 명 >