

# 선박 및 해양구조물용 극저온 재료의 온도 및 변형률 속도 의존 통합 구성방정식 개발

박웅섭<sup>1</sup>·김정현<sup>1</sup>·전민성<sup>2</sup>·이제명<sup>1,†</sup>  
부산대학교 조선해양공학과<sup>1</sup>  
삼성중공업 조선해양연구소<sup>2</sup>

## Development of Temperature and Strain-Rate Dependent Unified Constitutive Equation for Ships and Offshore Structures

Woong-Sup Park<sup>1</sup>·Jeong-Hyeon Kim<sup>1</sup>·Min-Sung Chun<sup>2</sup>·Jae-Myung Lee<sup>1,†</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan Naval University<sup>1</sup>  
Marine Research Institute, Samsung Heavy Industries Co., Ltd.<sup>2</sup>

### Abstract

The mechanical properties of the most widely used cryogenic materials, i.e. austenitic stainless steel (ASS), aluminum alloy and invar steel, strongly depend on temperatures and strain rates. These phenomena show very complicated non-linear behaviors and cannot be expressed by general constitutive equation. In this study, an unified constitutive equation was proposed to represent the effect of temperature and strain rate on the materials. The proposed constitutive equation has been based on Tomita/Iwamoto and Bodner/Partom model for the expression of 2nd hardening due to martensite phase transformation of ASS. To simulate ductile fracture, modified Bodner/Chan damage model was additionally applied to the model and the model validity was verified by comparison of experimental and simulation results.

**Keywords** : Cryogenic material(극저온 재료), Visco-plastic constitutive equation(점소성 구성방정식), Damage evolution equation(손상발전 방정식), Transformation induced plasticity model(변태 유기 소성 모델), Finite element analysis(유한 요소 해석)

## 1. 서론

LNG 운반선의 대형화 및 극지 항로의 개발에 따라 극저온 환경에서의 재료의 물성 변화에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있으며, 극저온 환경을 고려한 구조 안전성 기반 설계 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하지만, 설계 이전 단계에서 반드시 수행되어야 하는 극지 운항 구조물의 안전성 평가는 극저온 환경 하 재료 거동 분석의 난점 및 적합한 역학적 도구의 부재 등으로 인하여 기존 선박의 구조물 안전성 평가의 틀에서 크게 벗어나지 못하는 실정이며, 이에 대한 유한요소 해석용 구성방정식 개발이 요구되고 있다.

일반적으로 선박용 극저온 재료로 가장 널리 사용되고 있는 AISI 300 계열 스테인리스 강, 알루미늄 합금, 니켈 강 합금 등 FCC 결정구조의 재료는 극저온 환경에서 안전성이 검증되었다고 보고되고 있다. 하지만 위의 저온용 재료는 저온영역에서 일반적인 재료와는 다른 독특한 거동을 나타낸다고 알려져 있음에도 불구하고, 이러한 재료의 독특한 거동 분석 결과나 재료의 특성을 묘사하는 수치 해석 기술에 대한 연구결과는 매우 제한적이다.

특히 AISI 300 계열의 스테인리스 강의 경우, 저온영역에서 내부 상변태에 따른 2차 경화현상과 같은 독특한 재료의 비선형성이 보고된 바 있는데(Hong, et al., 2008; Park, et al., 2010), 현재까지 이러한 현상의 예측을 위한 수치해석 모델의 개발이나 실제적인 적용 예는 찾아볼 수 없으며(Lee, 2009), 이러한 수치해석적 연구의 부재는 해당 특성을 갖는 재료를 채용한 구조에 대하여 과잉 보수적 또는 안전성이 결여된 구조물 설계로 이어질 수 있는 문제가 있다.

본 연구에서는 재료 거동 평가의 실험적 연구에 이어, 2차 경화 거동을 나타내는 AISI 300계열을 포함하여 기타 다양한 극저온 재료들의 거동을 표현할 수 있는 연속체 손상역학 기반 점탄소성 통합 구성방정식 및 재료 정수 결정법을 제시하며, 제안 구성방정식의 타당성 및 유효성을 검증한다.

## 2. 극저온 재료용 통합 구성방정식 개발

과거 몇몇 연구에서는 상변태량 또는 점소성 구성방정식과 상변태 구성방정식을 결합하여 2차 경화의 양상을 표현하는 방법이

시도되었다. 하지만 과거 상변태를 이용한 재료 거동 평가는 과거 연구에서 제안된 상변태 발전 방정식(Olson & Cohen, 1975; Tomita & Iwamoto, 2001)을 이용하여 각 재료의 온도 및 변형률 속도별 상변태를 추정해야 하며, 이 상변태량을 점소성 구성방정식에 탑재하여 재료 거동을 표현한다. 즉, 실험적 근거를 기반으로 한 정확한 재료별 온도 및 변형률 속도 의존 상변태량의 부재 시, 기존 연구에서 보고된 상변태량을 보완하여 사용하는 근사적 방법을 이용해야 하며, 이는 근사치를 이용한 접근이므로 기본적으로 많은 수치적 입력과 고려해야 하는 가정이 다수 발생하게 된다.

본 연구에서는 실험적 연구에서 보고한 바와 같이, 응력변형을 곡선을 이용하여 계산된 변형률 경화 속도 (strain hardening rate,  $\theta$ ) 및 변형률 속도 민감도(strain rate sensitivity,  $M$ )를 통해 재료의 점소성 거동을 수치해석적으로 표현하는 구성방정식을 제안한다. 또한 제안된 구성방정식을 이용하여 극저온 재료뿐만 아니라 고온 등에서 나타나는 대부분의 복잡한 재료 거동 또한 표현할 수 있도록 하는 재료정수의 결정법을 제안한다.

### 2.1 점소성 구성방정식

본 연구에서는 항복조건 없이 통합된 점소성 이론을 제안한 Bodner/Partom의 점소성 모델을 사용한다(Bodner, 2002). 이 모델은 비탄성 변형에 대한 모든 양상은 어떠한 하중에 대해서도 단일 비탄성 변형률로 표현할 수 있다는 사실에 기초를 두고 있으며, 기본적으로 시간 의존형 점소성 모델로 구성되어 있고, 재료정수의 적절한 선택을 통하여 매우 유용하게 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

이 모델에서 전체 변형률 속도(total strain rate  $\dot{\epsilon}_{ij}$ )는 아래 식 (1)과 같이 탄성 변형률 속도(elastic strain rate  $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ )와 비탄성 변형률 속도(inelastic strain rate  $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ )로 표현 할 수 있다고 가정한다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p \tag{1}$$

여기서 탄성 변형률 속도는 후크의 법칙(Hooke's law)을 통하여 아래 식 (2)와 같이 표현되고, 비탄성 변형률 속도는 Prandtl-Reuss의 유동 법칙을 따르며 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \frac{1}{2\mu} \dot{\sigma}_{ij} - \bar{\lambda} [2\mu(3\bar{\lambda} + 2\bar{\lambda})] \dot{\sigma}_{kk} \delta_{ij} \tag{2}$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{e}_{ij}^p = \lambda s_{ij}, \quad \dot{\epsilon}_{kk}^p = 0, \quad \lambda \geq 0 \tag{3}$$

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \tag{4}$$

$\bar{\lambda}$ ,  $\bar{\mu}$ 는 라메상수(Lame constant)이며,  $\dot{e}_{ij}^p$ 는 소성 변형률 속도,  $\dot{e}_{ij}^p$ 는 편차 소성 변형률 속도, 식 (4)의  $s_{ij}$ 는 편차응력을 나타낸다. 또한 상태 변수들의 스칼라 함수인  $\lambda$ 는 식 (3)으로부터 아래 식 (5)가 유도된다.

$$D_2^p = \lambda^2 J_2 \tag{5}$$

$D_2^p$ 는  $D_2^p = (1/2)\dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p$ 로 편차 변형률 속도의 2차 불변량,  $J_2$ 는  $J_2 = (1/2)s_{ij}s_{ij}$ 로 편차 응력에 대한 2차 불변량을 의미하며, 여기서 유효 소성 변형률 속도  $\dot{e}_{eff}^p$ 는 식 (6), 유효 응력의 함수  $\sigma_{eff}$ 는 식 (7)과 같이 정의된다.

$$\dot{e}_{eff}^p = \dot{e}_{eff}^p = \frac{2}{\sqrt{3}} (D_2^p)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{2}{3} \dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \right)^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

$$\sigma_{eff} = (3J_2)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{3}{2} s_{ij}s_{ij} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

$$D_2^p = D_0^2 \exp \left[ - \left( \frac{Z^2}{\sigma_{eff}^2} \right)^n \right] \tag{8}$$

식 (8)에서  $D_0$ 와  $n$ 은 재료 상수이고, 각각 최대 변형률 속도를 제한하는 변수 및 변형률 속도 민감도를 조정하는 변수를 의미한다. 일반적으로  $D_0$ 로  $10^4$ 를 사용하고,  $n$ 은 온도에 의존적이며 온도에 의존적인 재료상수로 결정된다. 또한  $Z$ 는 소성 유동(plastic flow)에 대한 재료의 전체적인 저항의 크기를 나타내는 상태변수로 하중 이력(load history)과 관계가 있다(Bodner, 2002).

Gilman에 의해 제안된 식 (8)은 식 (3), (6), (7)의 대입을 통하여 아래 식 (9)으로 표현된다. 식 (9)의  $Z$ 는 열 회복(thermal recovery)을 배제하며, 등방경화를 전제로 하는 식 (10) 형태로 표현되며,  $Z_0$ ,  $Z_1$ 는 각각 항복응력, 포화응력을 의미하는 재료 정수로 각각 온도 의존성 및 변형률 속도 의존성을 나타내고,  $m$ 은 경화 곡선 형상,  $W_p$ 는 축적 소성일을 의미하며 식 (11)과 같이 정의된다(Moreno & Jordan, 1986).

$$\dot{e}_{eff}^p = D_0 \exp \left\{ - \frac{1}{2} \left( \frac{Z}{\sigma_{eff}} \right)^{2n} \right\} \frac{\sqrt{3} s_{ij}}{\sigma_{eff}} \tag{9}$$

$$Z = Z_1 + (Z_0 - Z_1) \exp(-m W_p) \tag{10}$$

$$W_p = \int dW_p = \int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^p \tag{11}$$

기존에 제안된 Bodner/Partom 모델은 식 (10)의  $m$ 을 온도 의존성을 지닌 상수 값으로 제안하면서, Fig. 1의 ④와 같은 일반적인 변형 경화 거동을 매우 효과적으로 표현할 수 있다. 과거 이러한  $m$ 의 결정법에 대해 많은 연구가 진행된 바 있으나, ②와 같은 2차 경화 거동을 표현할 수 있는 구성방정식 개발에 관한 연구를 찾아볼 수 없으며, 추가적 수식의 도입이나 가정 없이 Bodner/Partom 모델만을 이용한 2차 경화의 표현은 불가능한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제에 대한 해결 방안으로 식 (12), (13)과 같은 경화 발전방정식 제안한다.

$$m = \left\{ \frac{m_i - m_{i-1}}{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i} (\bar{\varepsilon}^p - \varepsilon_{i-1}) + m_{i-1} \right\}_{(1 \leq i \leq j)} \quad (12)$$

$$Z = Z_1 + (Z_0 - Z_1) \exp(m W_p) \quad (13)$$

식 (10)은 재료정수  $m$ 의 적절한 적용을 위하여 식 (13)으로 수정되며, 축적 소성 변형률  $\bar{\varepsilon}^p$  의존 함수로 계산된  $m$ 을 이용하여 복잡한 형태의 재료 거동을 표현할 수 있도록 하였다. 또한,  $j$ 의 연장을 통하여 2차 경화 외의 더욱 복잡한 형태의 재료 거동 또한 표현할 수 있도록 재료 정수  $m$ 에 대한 결정법을 제안하였다.

이에 대한 구체적인 결정법은 2.3장에서 설명한다.

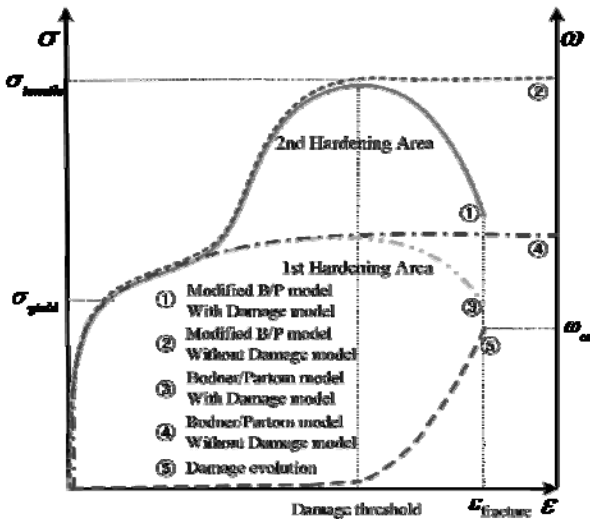


Fig. 1 A schematic of stress strain relationship of constitutive models for the expression of 2nd hardening with damage evolution

식 (10)은 재료정수  $m$ 의 적절한 적용을 위하여 식 (13)으로 수정되며, 축적 소성 변형률  $\bar{\varepsilon}^p$  의존 함수로 계산된  $m$ 을 이용하여 복잡한 형태의 재료 거동을 표현할 수 있도록 하였다. 또한,  $j$ 의 연장을 통하여 2차 경화 외의 더욱 복잡한 형태의 재료 거동 또한 표현할 수 있도록 재료 정수  $m$ 에 대한 결정법을 제안하였다.

이에 대한 구체적인 결정법은 2.3장에서 설명한다.

## 2.2 손상 모델 적용 구성방정식

연속체 손상역학에서는 일정부위에 분포된 미소 결함들의 평균적인 밀도를 손상이라는 내부변수로 간주하고, 이를 도입함으로써 재료 비선형 거동을 거시적인 관점에서 합리적으로 표현할 수 있으며(Lee, 2008), 최근 재료 내부의 손상에 대한 통합적인 표현을 위한 일체형 구성방정식 개발이 시도되고 있다.

Bodner/Partom 모델에 널리 사용되고 있는 Bodner/Chan 손상 모델은 식 (14)와 같은 형태로 기존 구성방정식에 적용되며, 식 (15), (16)과 같이 정의된다. 여기서  $w$ 는 재료 내부의 강성 저하를 나타내는 변수이며, 스칼라량으로 표현되는 등방 손상 (Isotropic damage) 표현분야에서 자주 사용된다. Bodner/Chan의 손상발전방정식은 Lemaitre 모델과는 달리 손상 시작점 (Damage threshold)을 직접적으로 사용하지는 않지만, 지수함수의 형태로 내부 변수  $b$ 와  $h$ 를 통해 구성방정식 내부에서 손상의 누적에 따라 Fig. 1의 ① 및 ③과 같은 강성저하를 표현할 수 있고, ⑤와 같이 임계손상치  $D_{cr}$ 을 결정하여 재료의 파단을 거시적으로 표현 가능하다.

$$\dot{\varepsilon}^p = D_0 \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{Z(1-w)}{\sigma_{eff}} \right)^{2n} \right\} \frac{\sqrt{3} s_{ij}}{\sigma_{eff}} \quad (14)$$

$$\dot{w} = \frac{b}{h} \left[ \ln \left( \frac{1}{w} \right) \right]^{(b+1)/b} w \dot{Q} \quad (15)$$

$$w = \exp \left\{ - \left( \frac{h}{Q} \right)^b \right\} \quad (16)$$

$$\dot{Q} = (\alpha \sigma_{max}^+ + \beta \sigma_{eff} + \gamma I_1^+)^r \quad (17)$$

식 (15)의 다축 응력 함수  $\dot{Q}$ 는 식 (17)과 같이 정의되며,  $\sigma_{max}^+$ ,  $\sigma_{eff}$ ,  $I_1^+$ 는 각각 최대 인장 주응력, 유효응력, 1차 응력 불변량을 의미하며,  $\alpha, \beta, \gamma$ 는  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 의 조건을 만족해야 하는 다축 응력 제어 상수이다. 위 상수는 Hayhurst의 일반적인 금속재료의 일축인장의 실험적 연구를 통해 제시된  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 0.75$ ,  $\gamma = 0.25$ 의 수치적 관계를 이용하였다(Hayhurst & Leckie, 1977).

또한 본 연구에서는 실험적 연구에서 인장강도 이후 재료 거동에서 재료 손상의 정도가 온도 및 변형률 속도에 따르는 경향성을 반영하기 위해 Zener-Hollomon 계수를 도입하였다(Zener & Holloman, 1944; Durrenberger, et al., 2007).

제안된 Zener-Hollomon 계수는 소성변형률 속도와 온도의 항으로 식 (18)과 같이 표현되며, 식 (15)에 반영하여 최종적으로 식 (19)의 형태로 구성방정식에 반영된다.

$$C_{ZH} = \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\varepsilon_{ref}} \exp \left( \frac{T_{ref}}{T} \right) \quad (18)$$

$$\dot{w} = \frac{b}{h} \left[ \ln \left( \frac{1}{w} \right) \right]^{(b+1)/b} w \dot{Q} C_{ZH} \quad (19)$$

### 2.3 재료 정수 결정

과거의 몇몇 연구에서 Bodner/Partom 모델을 적절하게 이용하기 위한 재료정수 결정법이 제안되었다. 그러나 대부분의 재료 정수 결정법은 일반적인 경화 즉, 1차례의 변형 경화를 보이는 재료를 대상으로 하므로, 기존 실험적 연구에서 나타난 오스테나이트 스테인리스 강의 2차 경화와 같은 재료 비선형 거동의 표현에는 사용이 불가능하다. 특히 경화 양상을 조절하는  $m$ 은 식 (10)과 같이 지수함수의 지수로 표현되므로,  $m$ 의 범위가 음수로 제한되며, 식 (10)에 대입되어 인위적으로 음의 부호를 곱하여 양의 지수를 갖는 함수로 표현된다.

Chan은  $\eta = \theta/\sigma_{11}$ 로부터 도출되는  $\eta - \sigma$  곡선을 이용한 재료정수  $m$ 에 대한 결정법을 제시하였다. 선형으로 표현되는 일반적인 등방성 재료의  $\eta - \sigma$  거동을 전체적 기울기 측정을 통해  $m$ 을 결정할 수 있도록 제안하였으며, 그 유효성이 여러 등방성 재료에 대하여 입증되었다(Bodner & Chan, 1986). 그러나 앞에 언급한 바와 같이 일반적인 재료의 경우  $\eta - \sigma$  곡선의 기울기인  $m$ 이 음수 값을 보이는 반면, 오스테나이트 스테인리스 강의 경우 2차 경화 현상으로 인하여 그 기울기가 역 포물선의 형상을 나타내게 된다. 즉, 양의 값의  $m$ 범위를 갖게 되는 문제점이 나타나게 되며, 결정된 재료정수는 기존의 식 (10)에 적용이 불가능하게 된다. 즉, 기존의 방법으로는 2차 경화 양상과 같은 표현이 불가능하기 때문에, 정확한 재료 거동 표현을 위해 구성방정식의 수정과 재료 정수 결정법에 대한 수정은 불가피하다.

본 연구에서는 이러한 비선형 경화 현상을 표현하기 위하여 기존 구성방정식에 재료의 변형률 경화 속도 개념을 도입한 접근법을 이용하였다(Durrenberger, et al., 2007). 본 연구에서 도입된 변형률 경화 속도  $\theta = (\partial\sigma/\partial\varepsilon_p)$ 는 온도 및 소성 변형률 속도에 의존하는 거동을 나타내며, 실험적 연구에서 산출된 응력변형률 관계를 이용하여 산출할 수 있다.

본 연구에서는 응력 변형률 관계를 통해 산출된  $\theta$ 와 진변형률  $\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{eng})$ 의 관계 즉,  $\theta - \varepsilon_{true}$  곡선을 이용하여,  $m$ 을 산정하는 방법을 아래와 같이 제안한다.

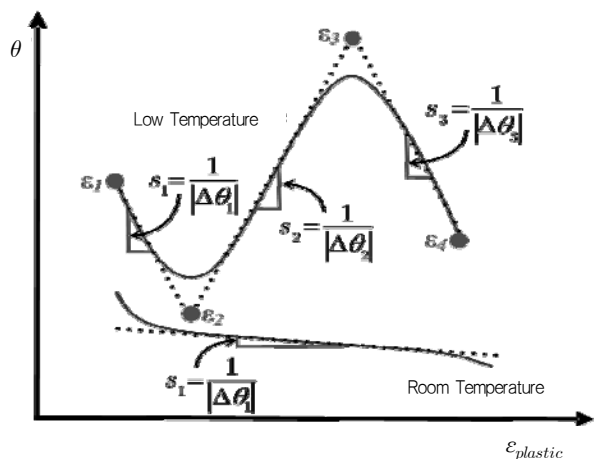


Fig. 2 The identifying method of material parameter  $s$  for AISI 304L

AA5083 재료나 Invar 강의 경우, 일반적인 강재와 마찬가지로 모든 온도 영역에서 Fig. 2의 상온 곡선과 같이 선형적 형태의  $\theta - \varepsilon_{true}$  곡선 형상을 나타내며, 이 경우는 식 (12)의  $j$ 는 1로 가정된다. 또한 AISI 300계열 스테인리스 강의 저온 영역에서와 같이 3차식으로 표현 가능한 비선형성을 나타내는 경우는  $j$ 가 3으로 가정된다. 식 (20) 및 Fig. 2에 나타난 바와 같이 각 구간에서의  $s_i$ 를 계산하여  $m_i$ 를 산정하게 되고, 식 (12)를 통해 최종적인  $m$ 을 결정하게 된다.

$m$  결정시 사용되는  $\theta - \varepsilon_{true}$  거동은 실험적 연구에서 보고한 바와 같이 온도, 변형률 속도뿐만 아니라 차후 연구에서 고려될 사전 변형률(Pre-strain) 등 다른 인자에 의해서도 변형될 수 있다. 하지만, 현재까지 연구된 결과에 따르면, ASS 계열의 재료는 고 변형률 속도 범위에서도 2차 경화를 보이며, 3차식 형상의  $\theta - \varepsilon_{true}$  거동을 나타낸다. 즉  $m$ 은 온도에 의해서만  $j$ 가 증감될 수 있음을 의미하며, 아래와 같은 방법을 통해 각  $j$ 구간의  $s_i$ 를 산정할 수 있다.

각 구간별 기울기  $s_i$ 는 각 온도 및 변형률 속도에 의존적인  $\theta - \varepsilon_{true}$  곡선 형상에 따라 최소자승법을 통하여 산정되고, 식 (20)을 통하여  $m_i$ 로 계산된다.

$$m_i = s_i \cdot W_s \cdot (1 + \varepsilon^p) \tag{20}$$

$$\varepsilon^p = \int^t |\dot{\varepsilon}^p| dt \tag{21}$$

여기서,  $W_s$ 는 본 연구에서 제안하는 상수로 변형 경화 민감도(work-hardening sensitivity)를 의미하는 스칼라량이다.  $\theta - \varepsilon_{true}$  곡선에서 다수의 기울기를 나타낼 경우, 온도 및 변형률 속도 의존  $W_s$ 를 이용하여 각 구간별  $s_i$ 를 한 번에 조정할 수 있으며, 곡선의 전체적 형상 결정에 있어 중요한 역할을 한다. 또한,  $\varepsilon^p$ 는 식 (21)로 정의되는 축적 소성 변형률(Owen & Hinton, 1980)을 식 (20)에 반영하여, 축적 소성 변형률에 의존적인 전위론 기반의 변형 경화의 진전을 표현할 수 있다.

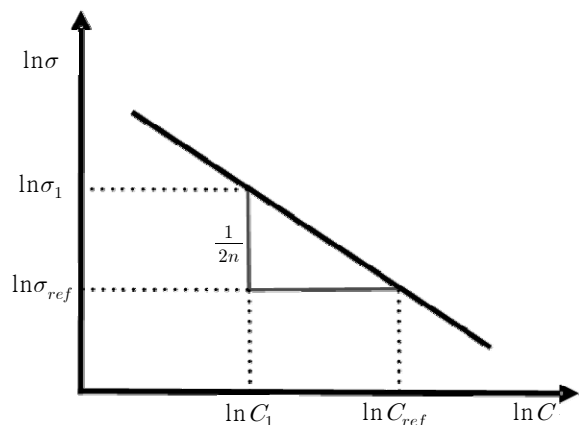


Fig. 3 The identifying method of material parameter  $n$

식 (14)에서  $n$ 은 Bodner/Partom 모델의 변형률 속도 민감도 (strain rate sensitivity)를 결정하는 재료정수로 재료의 전체적 거동 형태를 결정하는 가장 중요한 매개변수이다. 이 재료정수의 결정은 수치해석적으로 매우 큰 영향을 끼치며,  $n$ 의 결정에 따라 기타 재료정수가 다르게 결정된다.

본 연구에서는 재료정수  $n$ 의 결정을 위하여 Senchenkov와 Tabieva가 제안한 방법을 이용하였으며(Senchenkov & Tabieva, 1996), 그 결정 방법을 아래와 같이 간단히 요약한다.

$$C = 2 \ln \left( \frac{2D_0}{\sqrt{3} \dot{\epsilon}_p} \right) \quad (22)$$

$$n = \frac{\ln C_1 - \ln C_{ref}}{2(\ln \sigma_1 - \ln \sigma_{ref})} = \frac{\ln(C_1/C_{ref})}{2M_S \cdot \ln(\dot{\epsilon}_1/\dot{\epsilon}_{ref})} \quad (23)$$

여기서, 식 (23)의  $M_S$ 는 실험적 결과를 바탕으로 제공 되었으며, saturation stress에서의 변형률 속도 민감도  $M$  수치를 의미한다. 하지만, 실제 재료 거동에서는 비탄성 불안정 요소로 인하여 saturation stress까지 도달할 수 없으므로(Bodner, 2002), 인장강도에서의  $M$ 을 의미하는  $M_S$ 를 이용하여  $n$ 을 결정하며, 그 이후의 거동은 손상거동을 통해 열화를 표현할 수 있도록 제안한다.

AA5083의 경우, 기존 연구에서 보고한 바와 같이 저온영역에서 변형률 속도 둔감 특성(strain rate insensitivity)을 반영하여, Bodner가 제안한 알루미늄 합금의  $n$  값으로 일괄적으로 반영하였다.

### 2.4 유한요소 해석

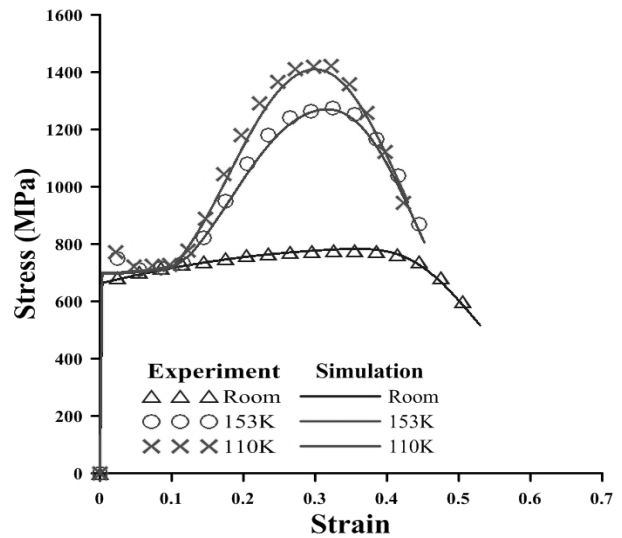
본 연구에서는 전술한 점소성-손상 구성방정식을 채용한 자체 개발 유한요소해석 프로그램을 사용하여 적용된 구성방정식과 손상 모델의 유효성을 검증하였다.

사용된 유한요소해석 프로그램은 식 (24)과 같은 초기 변형률 법을 이용한 유한요소해석용 지배방정식을 나타낸다.

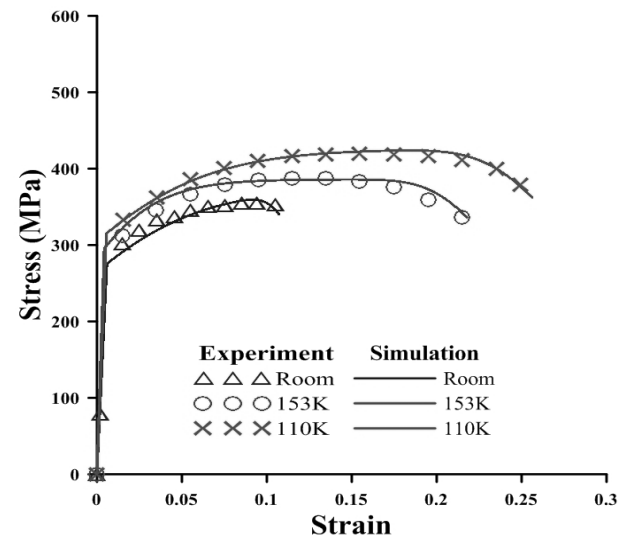
$$\{F^r\} + \{\Delta F\} + \int_V [B]^T [D^e] (\{\Delta \epsilon^{th}\} + \{\Delta \epsilon^p\}) dV = [K^e] \{\Delta U\} \quad (24)$$

여기서  $\{F_r\}$ 은 잔차력 벡터,  $\{\Delta F\}$ 는 하중 증분벡터,  $[B]$ 는 변위변형률 행렬,  $[D^e]$ 는 탄성 응력변형률 관계 행렬,  $\{\Delta \epsilon^{th}\}$ 는 초기변형률 증분 벡터 (열변형률 증분 벡터),  $\{\Delta \epsilon^p\}$ 는 소성 변형률 증분 벡터,  $\{\Delta U\}$ 는 변위 증분 벡터이며,  $[K^e]$ 는 탄성 강성 행렬을 의미한다.

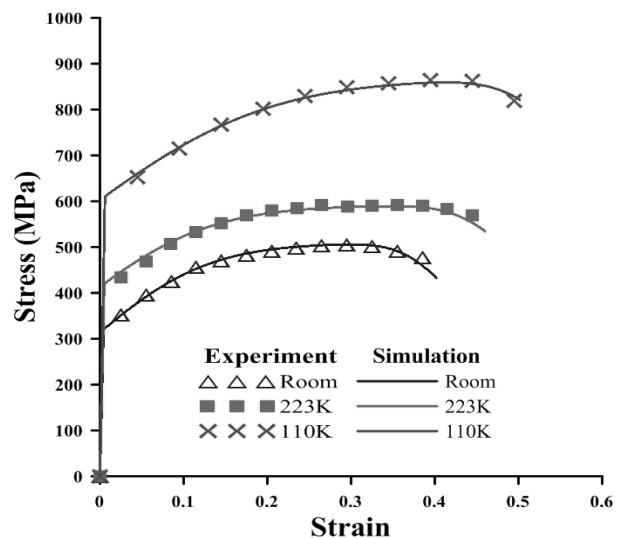
비탄성 변형률 증분량 계산에 필요한 적분은 식 (24)를 바탕으로 증분 구간별 중심 차분법을 이용한다.



(A)



(B)



(C)

Fig. 4 Comparison of stress-strain relationship between numerical results and experimental results of (A) AISI 304L, (B) AA5083 and (C) Invar steel at 0.00016/s

### 3. 해석 모델의 검증 및 고찰

제안된 모델은 유한요소의 해석과 실험 결과의 비교를 통하여 그 유효성이 검증되었다.

해석에서는 초기 손상이 발생할 때까지의 변형과정을 다루므로 해의 정확도는 요소밀도에 크게 의존하지 않는다(Toy & Lee, 2002). 따라서 3차원 요소 1개를 이용한 인장해석을 수행하여 해석용 알고리즘 및 구성방정식 검증을 수행하였다.

해석 결과, 실험적 연구에서 진행된 모든 재료의 극저온 거동을 본 연구에서 제시한 통합된 구성방정식과 적절한 재료 정수의 결정을 통하여 매우 흡사한 형태의 재료거동을 표현할 수 있었다.

AISI 300 계열 스테인리스 강의 경우, 1. 저온 영역의 거동 특성인 2차 경화 현상, 2. 온도가 감소함에 따라 항복 및 인장강도가 증가하는 현상, 3. 변형률 속도가 증가함에 따라 항복강도는 증가하나 인장강도는 감소하는 독특한 경향을 거시적인 관점에서 매우 흡사하게 모사할 수 있었다.

또한 AA5083과 Invar 강의 저온에서 온도가 감소함에 따라 항복강도, 인장강도, 연신율이 증가하는 현상을 매우 흡사하게 모사할 수 있음을 Fig. 4 및 Fig. 5를 통해 확인할 수 있다.

또한 본 연구 결과는 MSC.NASTRAN, ABAQUS 또는 LS-DYNA 등의 상용 해석 프로그램에서 제공하는 user subroutine을 통해 실제 구조물 해석에 반영 가능하도록 설계되었다.

### 4. 결론

본 연구에서는 극저온 재료로 널리 사용되고 있는 AISI 300 계열 오스테나이트 스테인리스 강(304L, 316L, 321, 347), 알루미늄 합금(AA5083), 니켈 강 합금(Invar 강)의 온도 및 변형률 속도 의존 통합 구성방정식 및 재료정수 결정법을 제안하였다. Bodner/Partom 비탄성 모델을 기반으로 적절한 수정을 통하여 복잡한 재료 비선형 거동을 효과적으로 표현하였으며, 수정 Bodner/Chan 손상 모델을 이용하여 재료의 열화 및 파단을 표현하는 통합 비탄성 구성방정식을 제안하였다.

본 연구 결과를 아래와 같이 요약한다.

1) AISI 300계열 재료의 저온 영역에서 상변태(Phase transformation)로 인해 나타나는 2차 경화현상과, 변형률 속도에 의한 단열효과(Adiabatic effect)를 재료강도적 관점에서 수치적으로 표현할 수 있는 이론을 제시하였다.

2) 기타 복잡한 재료 비선형 거동에도 응용할 수 있는 전산 모사용 해석기법이 개발되었다.

3) 각 재료의 온도 및 변형률 속도 의존 경향을 표현하기 위한 재료 정수 결정법을 제안하였고, 이를 바탕으로 실험적 연구를 모사할 수 있는 재료 정수를 제안하였다.

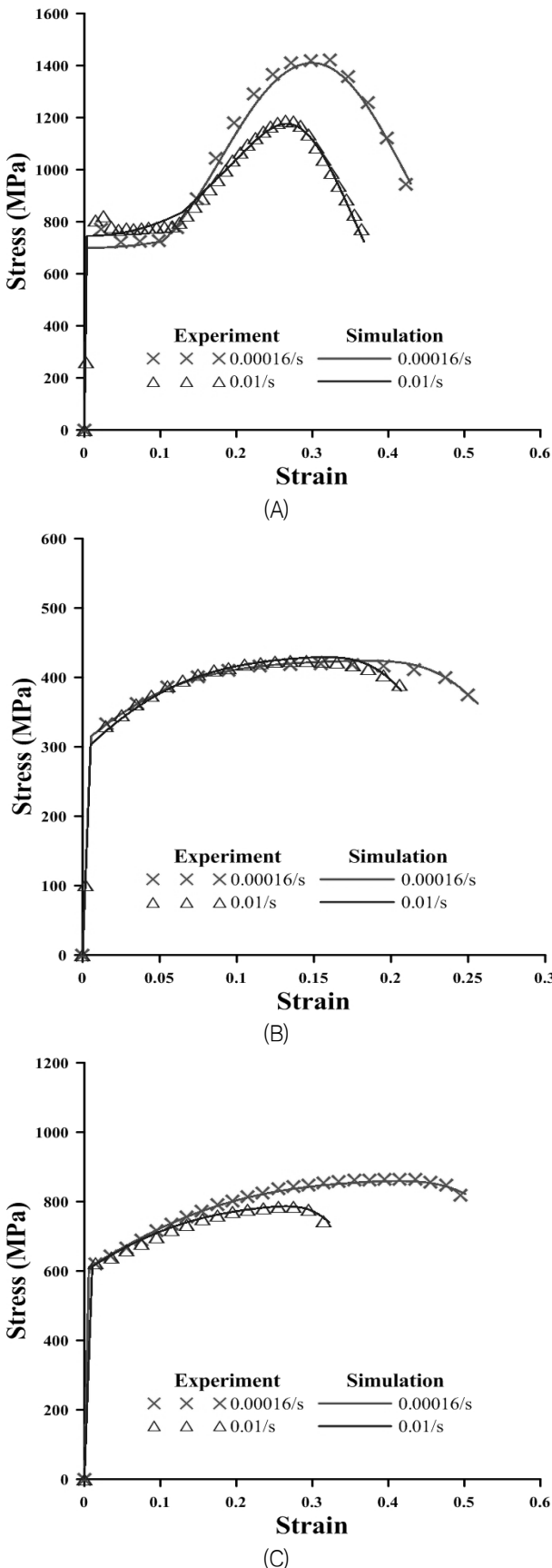


Fig. 5 Comparison of stress-strain relationship between numerical results and experimental results of (A) AISI 304L, (B) AA5083 and (C) Invar steel at 110K

4) 비탄성 구성방정식과 연계하여 사용할 수 있는 일체형 온도 및 변형률 속도 의존 손상모델을 제안하였으며, 체계적인 유한요소 해석 알고리즘을 이용한 프로그램을 개발하였다. 또한, 시리즈 해석을 수행한 후 실험 결과와 비교를 통하여 그 유효성을 검증하였다.

LNG 운반선, 극저온 밸브 등 조선기자재를 비롯하여 다양한 산업 구조물에서 점차 적용범위를 넓히고 있는 극저온용 재료에 대하여 통합적으로 적용할 수 있는 유한요소 해석용 이론을 제안하였다.

본 연구의 결과는 상용 해석 프로그램에서 제공하는 user subroutine을 통해 적용 가능하며, 실제 구조물의 정밀 강도 평가를 위한 이론으로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0011489), 첨단 조선공학 연구센터 (ASERC)의 지원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

Bodner, S. R., 2002. *Unified Plasticity for Engineering Applications*. Kluwer Academic/Plenum Publishers: New York.

Bodner, S.R. & Chan, K.S., 1986. Modeling of Continuum Damage for Application in Elastic-viscoplastic Constitutive Equations. *Engineering Fracture Mechanics*, 25(5-6), pp. 705-712.

Durrenberger, L. Klepaczko, J.R. & Rusinek, A., 2007. Constitutive modeling of metals based on the evolution of the strain hardening rate. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 129(4), pp.550-558.

Hayhurst, D. R. & Leckie, F. A., 1977. Constitutive Equation for Creep Damage. *Acta Metallurgica*. 25, pp.1059-1070.

Hong, J.H. et al., 2008. Mechanical Characteristics of Stainless Steel under Low Temperature Environment. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(5), pp.530-537.

Lee, K.J. et al., 2008. Development of Temperature Dependent Damage Model for Evaluating Material Performance under Cryogenic Environment. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(5), pp.538-546.

Lee, K.J. Chun, M.S. Kim, M.H. & Lee, J.M., 2009. A new constitutive model of austenitic stainless steel for cryogenic applications. *Computational Material Science*, 46(4), pp. 1152-1162.

Moreno, V. & Jordan, E.H., 1986. Prediction of material thermomechanical response with a unified viscoplastic constitutive model. *International Journal of Plasticity*, 2(3), pp.223-245.

Olson, G.B. & Cohen, M., 1975. Kinetics of strain-induced martensitic nucleation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 6(4), pp.791-795.

Owen, D.R.J. & Hinton, E., 1980. *Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice*. Pineridge Press: Swansea.

Park, W.S. Yoo, S.W. Kim, M.H. & Lee, J.M., 2010. Strain-rate Effects on the Mechanical Behavior of the AISI 300 Series of Austenitic Stainless Steel under Cryogenic Environments. *Materials and Design*. 31(8), pp.3630-3640.

Senchenkov, I.K. & Tabieva, G.A., 1996. Determination of the parameters of the Bodner-Partom model for thermoviscoplastic deformation of materials. *International Applied Mechanics*. 32(2), pp.132-139.

Toi, Y. & Lee, J.M., 2002. Thermal Elasto-Viscoplastic Damage Behavior of Structural Members in Hot-Dip Galvanization. *International Journal of Damage Mechanics*, 11, pp.171-185.

Tomita, Y. & Iwamoto, T., 2001. Computational prediction of deformation behavior of TRIP steels under cyclic loading. *International Journal of Mechanical Science*, 43(9), pp. 2017-2034.

Zener, C. & Hollomon, J.H., 1944. Effect of strain rate upon plastic flow of steel. *Journal of Applied Physics*. 15(1), pp. 22.

