

극저온 상태에서 AC4C-T6 의 가공 경화 모델 결정에 관한 연구

이재범*, 김경수**, 이장현†**, 유미지*, 정준모**

인하대학교 대학원 조선해양공학과*
인하대학교 선박해양공학과**

Cyclic Stress-strain Hardening Model of AC4C-T6 Alloy at Cryogenic Temperature

Jae Beom Lee*, Kyung Su Kim**, Jang Hyun Lee†**, Mi Ji Yoo*
and Joonmo Choung**

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School, Inha University*
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University**

Abstract

Present study is concerned with the simulation of plasticity models for the cyclic stress-strain behavior of aluminum alloy AC4C-T6 that can be used for primary materials of LNG cargo pump. Material model of cyclic hardening and plasticity for aluminum alloy AC4C-T6 was investigated through experiments and numerical simulations. Monotonic tensile and cyclic tension-compression test under symmetric load cycles was performed at both room temperature and cryogenic temperature of -165°C . Based on the experimental data plastic hardening models were evaluated for isotropic/kinematic/combined hardening. FEA (Finite Element Analysis) models which describe the cyclic stress-strain relationship were evaluated for the simulation of plasticity. An appropriate hardening model is proposed comparing the results of FEA with those of experiments.

※Keywords: LNG cargo pump(액화천연가스 펌프), Cyclic hardening(반복 경화), AC4C-T6, FEA(유한요소해석), Cyclic stress-strain(반복 응력-변형률)

1. 서론

접수일: 2009년 2월 15일, 승인일: 2009년 6월 18일

†교신저자: jh_lee@inha.ac.kr, 032-860-7345

액화천연가스(이하 LNG) 운반선은 -165°C 의 극저온 상태의 액화 천연가스를 운송할 수 있는 화물창 구조를 가지고 있다. 또한, 극저온 상태를 유지한 채 화물을 적/하역할 수 있는 펌프가 화물 창마다 2 대씩 설치된다. 이러한 LNG 펌프는 -

165°C 에서 운용될 수 있어야 하며, 극저온 환경에서 구조적 안전성을 가진 재료로 구성되어야 한다. 일반적으로 극저온 환경의 구조 재료로는 스테인리스 합금과 알루미늄 합금이 사용되지만, 스테인리스 합금은 가격이 비싸고, 주조가 어렵기 때문에 액화천연가스의 펌프로는 알루미늄 합금이 더 적절하다고 판단된다. 특히, 알루미늄 합금은 주조성, 내식 특성, 가공 용이성을 가지고 있기 때문에 자동차 엔진 블록과 같은 고온 환경의 기계 부품 및 인공위성과 같이 저온에서 운용되는 구조물의 재료로도 활용되고 있다(Ishihara and McEvily 2002). 이러한 이유로 알루미늄 합금은 저온 환경에 노출된 LNG 펌프의 주요 소재로도 활용이 가능하다. 펌프 덮개, 모터 프레임과 같은 펌프 재료로 알루미늄 합금이 몇몇 LNG 펌프 제조사들의 검토대상이 되어왔다.

LNG 펌프는 저온과 상온 반복에 의한 열 하중, 구동 모터의 진동과 슬로싱 하중을 받기 때문에 구조 강도 및 피로 강도를 고려한 설계가 필요하다(Hong et al. 1998, Noh 2005, Lee et al. 2007). 액화천연가스 펌프가 받는 하중이 소성 영역을 넘는 구간이 존재할 경우 저주기 피로 강도 설계가 요구된다. 유사한 연구로서 Noh et al.(1993)은 LNG 운반선의 피로 균열 발생 수명 예측 방법을 제시한 바가 있다.

본 연구는 LNG 펌프의 설계 과정에서 주 재료를 선택하기 위한 기초 연구의 결과이다. LNG 펌프의 부품 소재로 선택한 AC4C-T6 의 정적 구조 강도와 피로 강도 평가를 위한 기초 자료로서 극저온 상태의 탄성 계수 및 항복 응력 그리고 반복 경화 특성을 파악하고자 한다. 저주기 피로(LCF: Low Cycle Fatigue) 수명 평가는 주로 변형률-수명법을 사용하기 때문에 반복 응력-변형률 모델이 필요하다.

반복 응력-변형률 선도를 얻기 위하여 상온과

극저온 상태에서 단순 인장 실험(Monotonic tensile test)과 반복 인장-압축 실험 (Cyclic tension-compression test)을 수행하였다. 극저온 상태의 실험은 저온 챔버(chamber)를 이용하여 수행하였으며, 액화 질소를 이용하여 -165°C 온도를 유지하였다.

반복 인장-압축 실험 결과와 일치하는 경화 모델은 다양한 가설을 대상으로 수치 계산을 수행한 후에 실험 결과와 가장 유사한 모델을 찾는 것이 효과적이다 (Bari and Hassan 2000, Kulkarni et al. 2004, Lang et al. 2001, Kang 2005, Bari 2001). 반복 가공 경화 특성을 수치적으로 모델링하기 위한 연구는 라체팅(ratchetting) 및 소성 가공 분야의 사례에서 많이 찾아 볼 수 있다. Rahman et al.(2008)은 4130 합금강의 반복 소성 모델을 찾기 위해서 선형(bilinear) 및 다중선형(multi-linear) 특성을 가진 등방/이동 경화 모델뿐만 아니라 Chaboche, Onho-Wang 모델 등을 대상으로 상용 코드인 ABAQUS 및 ANSYS 를 이용하여 모사를 수행하였다. 그리고 수치적으로 구한 소성 경화 모델을 실험 값과 비교하여 수정된 Chaboche 모델을 제안하였다. Kulkarni et al.(2004)도 SA-333 및 SS-304 합금강을 대상으로 Chaboche 모델을 적용하여 반복 경화의 수치 모델을 제시하였다. Lee et al.(2002)은 고온 상태에 놓인 316 스테인리스강의 반복 소성경화 거동을 모사하기 위하여 ABAQUS 의 등방 경화 및 이동 경화를 동시에 고려한 복합경화 모델을 이용하였으나, 수치적인 모사의 정확성 확보가 쉽지 않음을 지적하였다.

본 연구에서는 극저온 상태의 AC4C-T6 합금강을 대상으로 반복 응력-변형률 모델을 찾고자 한다. 선형 또는 비선형 형상을 가진 등방 및 이동 경화 모델에 대하여 각각 유한요소 해석을 수행하고, 수치 결과와 실험 결과를 비교하여 가장 적절한 모델을 찾아보고자 한다.

Table 1 Chemical composition of AC4C-T6

Comp.	Mg	Al	Si	Ti	Cr	Cu	Mn	Zn	Fe	Sn	Ni	Pb
Wt%	0.2-0.45	90-93.3	6.5-7.5	Max: 0.2	Max: 0.1	Max: 0.25	Max: 0.35	Max: 0.35	Max: 0.55	Max: 0.05	Max: 0.1	Max: 0.1

2. 실험 결과

2.1 실험 조건

본 연구에서 사용한 재료는 AC4C-T6 로써 주조 알루미늄 합금이며 열처리를 거쳤다. 재료의 화학적 조성은 Table 1에 보인 것과 같다. 실험에 사용된 환봉 시편은 ASTM 1450-03 "Standard Test Method for Tension Testing of Structural Alloys in Liquid Helium(ASM 2002)"에서 정의한 방법에 따라서 제작하였으며 각 치수는 Fig. 1에 보인 것과 같다. 시험 구간의 직경은 12.5mm이며 시편의 길이는 200mm로 제작하였다.

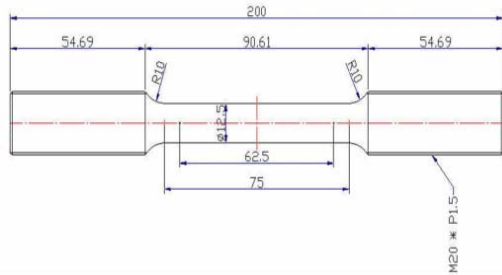


Fig. 1 Specimen geometry for monotonic tensile test and cyclic tension-compression test

단순 인장 실험과 반복 실험은 UTM과 저온 챔버(Fig. 2)를 이용하였다. 변형률과 변형량 계측을 위해서 50mm 길이의 신률계(Extensometer)를 시편에 부착하였다(Fig. 3). Fig. 4는 단순 인장시험 후 파단이 발생한 시편을 일례로 나타낸 것이다. 저온 챔버는 액화 질소를 이용하여 온도를 하강시키고 Peltier 효과를 응용한 열전소자를 이용하여 온도를 정밀하게 제어하도록 구성하였다.

인장 실험은 ASTM(1999)와 ASTM(2003)에서 정한 극저온 상태의 실험법과 변형률 기반의 피로 실험 규정에 따라 변형률 범위 및 하중 속도를 부가하여 진행하였다. 인장 실험은 탄성 계수, 항복 응력, 인장 강도를 계측하기 위하여 수행하였으며 하중은 0.05kN/sec 속도로 부가하였다.

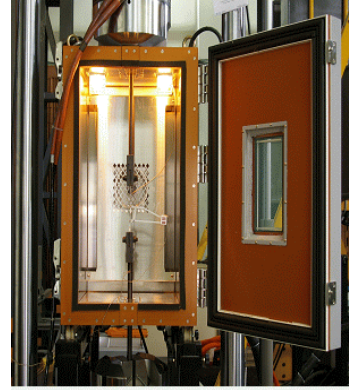


Fig. 2 Configuration of cryogenic chamber



Fig. 3 Experimental configuration of monotonic tensile test



Fig. 4 Fractured specimen after monotonic tensile test

반복 하중 실험 역시 ASTM(1999)와 ASTM(2003)에서 정한 규정에 따라 변형을 비율 및 하중 속도를 정하였다. 상온 및 극저온 상태에서 수행하였으며, Fig. 5와 같이 ±0.5%의 공칭 변형률을 각 블록에 40cycle로 작용시켰으며, 각 cycle당 적용시간은 10초이다.

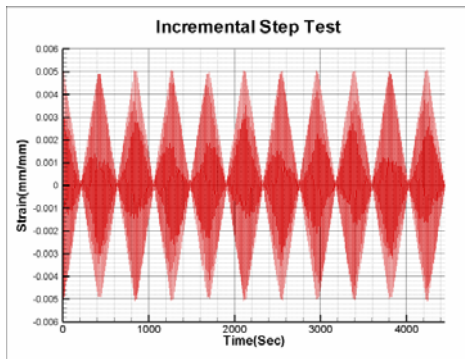


Fig. 5 Strain amplitude and cycles for incremental step test

2.2 단순 인장 및 반복 인장 압축 실험 결과

인장 실험의 실험 결과로 얻은 응력-변형을 선도는 Fig. 6에 보인 것과 같다. 계측 선도에 0.2% 오프셋 방법을 적용하여 구한 탄성 계수 및 항복 응력, 그리고 인장 강도를 Table 2에 정리하였다.

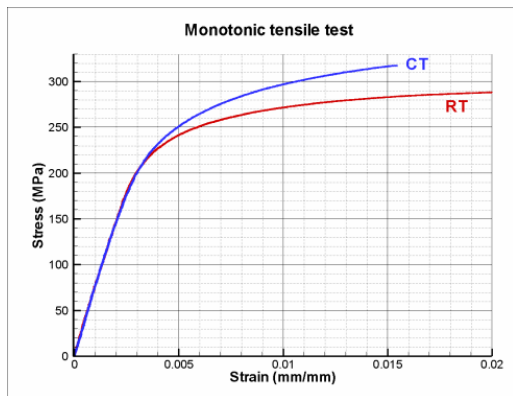


Fig. 6 Stress-strain curves obtained from monotonic tensile test at RT and CT

Table 2 Tensile material properties at RT and CT

Temp.	Elastic modulus [MPa]	Yield Stress [MPa]	Ultimate Stress [MPa]
RT	71,900	254	291
CT	71,000	277	318

이때 RT는 상온, CT는 극저온(-165°C)를 의미한다. 탄성 계수는 상온 및 극저온에서 비슷한 값을 보였으나, 항복 응력과 인장 강도는 극저온 상태일 때 약간 큰 것으로 판단된다. 극저온 상태의 AC4C-T6 인장 실험결과를 찾기 어려워 비교하지는 못하였으나, Shiozawa et al.(1997)이 제시한 상온 항복 응력 241MPa, 상온 인장강도 305MPa와 비교하면 본 실험 결과는 유사한 것으로 판단된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 20°C와 -165°C일 때의 반복 응력-변형을 실험 선도이다. 실험 과정에서 온도오차를 ±2°C로 제어하였다. 응력-변형을 선도는 식(1)에 보인 Ramberg-Osgood 식을 이용하였으며, Hyun et al.(2008)과 Kim et al.(2006)이 정한 방법에 따라 Fig. 6의 선도로부터 진응력-진소성 변형을 선도를 추출하여 구하였다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \tag{1}$$

여기서, K' 과 n' 은 각각 반복강도계수(Cyclic strength coefficient) 및 반복가공경화지수(Cyclic strain hardening exponent)를 의미한다. 단순 인장 실험 및 반복 인장-압축 실험 결과로부터 구한 K' 과 n' 은 Table 3에 정리하였다.

Table 3 Cyclic stress-strain material constants at RT and CT

Temp.	K' [MPa]	n'
RT	388.5	0.0509
CT	465.5	0.0526

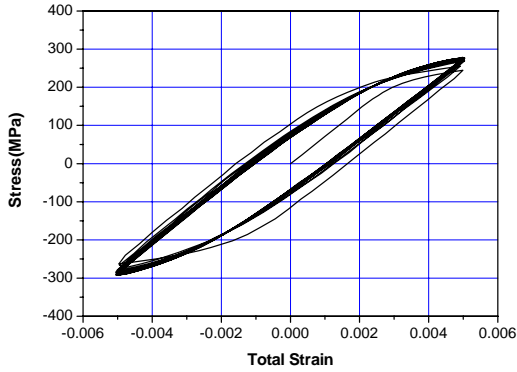


Fig. 7 Cyclic hardening curves at 20°C

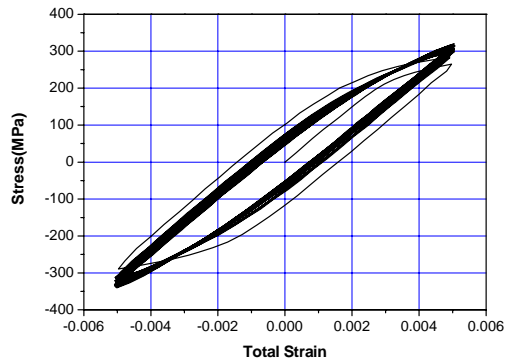


Fig. 8 Cyclic hardening curves at -165°C

3. 가공 경화 모델

금속 재료의 가공 경화 모델은 여러 가지로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 아래와 같이 5 가지의 경화 모델을 대상으로 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 실험과 비교하여 적절한 가공 경화 모델을 파악하고자 한다(Lemaitre and Chaboche 1990). 수치 해석의 편의를 위하여 ANSYS 에서 제공하는 재료 특성 모델을 이용하였다.

- 선형 등방 경화 모델(이하 BISO)
 - Bilinear Isotropic Hardening
- 선형 이동 경화(이하 BKIN)
 - Bilinear Kinematic Hardening
- 비선형 등방 경화(이하 NLISO)

- Nonlinear Isotropic Hardening
- 비선형 이동 경화(이하 Chaboche)
- Nonlinear Kinematic Hardening
- 복합 경화
 - Combination of NLISO and Chaboche

3.1 선형 등방 및 이동 경화 모델

선형 등방 경화 모델은 von Mises 항복 조건과 등방 경화 조건의 조합을 의미하며 Fig. 9 에 설명한 것과 같다. 소성이 진전되면서 항복 면도 점진적으로 커지는 특징을 가지고 있으며, 탄성영역과 소성 영역을 각각 직선으로 표현하는 가설이다.

선형 이동 경화 모델은 소성이 진전되면서 항복 면이 커지지는 않으나 이동하는 특징을 가지고 있다. Bauschinger 효과가 포함되어 있다(Smith 2001). Fig. 10 은 선형 이동 경화의 특징을 표현하였다. 선형 경화 모델은 반복 하중을 받는 응력-변형을 관계를 표현하기 어려운 것으로 알려졌으나(Avanzini 2008) 본 연구에서는 이를 확인하기 위하여 수치 검증에 포함하였다.

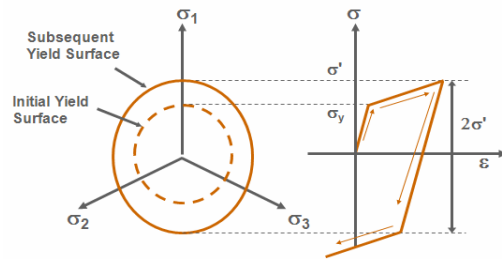


Fig. 9 Stress-strain behavior of BISO

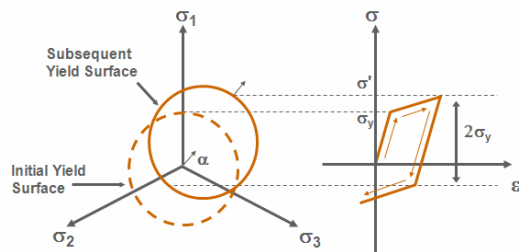


Fig. 10 Stress-strain behavior of BKIN

3.2 비선형 등방 경화 모델

비선형 등방 경화 모델은 등방 경화 가설에 Voce 의 응력-변형을 곡선을 적용한 것으로 지수 포화 경화 계수 (exponential saturation hardening term)을 선형 항에 추가한 가설이다. 일반적으로 경화 가설에 필요한 응력-변형을 곡선은 Voce 또는 Hollomon 모델을 주로 사용하지만, 알루미늄 합금은 Voce 모델이 가장 적절한 것으로 알려져 있다(Chung et al. 2005). Voce 의 가설에 의하면 소성 응력($\bar{\sigma}$)은 다음과 같이 등가 소성 변형률과 재료 계수의 식으로 표현할 수 있다(Lemaitre and Chaboche 1990, ANSYS 2006).

$$\bar{\sigma} = k + R_0 \bar{\epsilon}^p + R_\infty (1 - e^{-b \bar{\epsilon}^p}) \quad (2)$$

여기서, k 와 $\bar{\epsilon}^p$ 은 탄성 한계와 등가 소성 변형률을 의미한다. R_0 , R_∞ 와 b 는 Voce 의 응력-변형률 곡선을 정의하기 위해 필요한 재료 상수이다. 식(2)를 그래프로 표현하면 Fig. 11 과 같다.

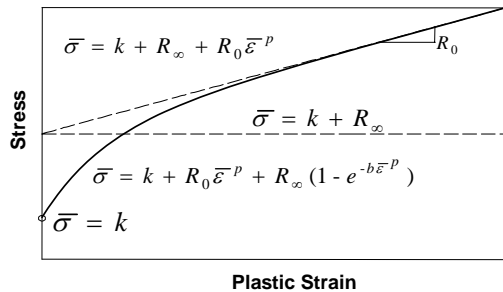


Fig. 11 Stress-strain curve based on Voce model

Voce 모델을 정의하기 위해 필요한 재료 상수는 증분(incremental step) 실험으로 측정한 응력-소성 변형률 선도(Fig. 11 의 실선)로부터 구하는 값이다. k 는 단순 인장 실험에서 얻은 항복 응력이며, 다른 계수는 응력-소성 변형률 선도로부터 얻은 값이다. 즉, 식 (1)에 제시한 응력-변형률 선도로부터 소성 변형률과 응력 만을 고려하여 곡선을 그린 후 곡선 보간 (curve fitting)을 이용하여

k 를 제외한 나머지 상수를 구하였다.

정리하면, 본 연구에서 사용한 비선형 등방 경화 모델은 Mises 항복 조건과 Voce 의 재료 모델을 흐름 법칙(Flow rule)에 적용한 것이다.

3.3 비선형 이동 경화 모델

비선형 이동 경화 모델은 Chaboche (Lemaitre and Chaboche 1990) 가설에 바탕을 두고 있다. 선형 이동 경화 모델과 마찬가지로 이 모델은 Bauschinger 효과를 포함할 수 있다. 소성 응력은 식(2)에 제시한 항복 함수에 의하여 정의하였으나, 배 응력 텐서(back stress tensor)는 식 (5)와 같이 정의된 값을 적용하였다.

$$\dot{\mathbf{a}} = \sum_{i=1}^n \dot{\mathbf{a}}_i = \frac{2}{3} \sum_{i=1}^n C_i \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p - \gamma_i \mathbf{a}_i \dot{\lambda} + \frac{1}{C_i} \frac{dC_i}{dT} \dot{T} \mathbf{a}_i \quad (3)$$

여기서, \mathbf{a} 는 배 응력 텐서, $\boldsymbol{\epsilon}^p$ 는 소성 변형률 텐서(plastic strain tensor)를 의미하며 λ 과 T 는 축적 등가소성 변형률(accumulated equivalent plastic strain)과 온도를 각각 의미한다. γ_i 와 C_i 는 재료 상수이며 n 은 비선형 이동 경화 곡선을 정의하는데 필요한 곡선 조각이 몇 개인지를 의미한다. 흐름 법칙을 적용하면 소성 변형률의 증분은 식 (4)과 같이 표현된다.

$$\Delta \boldsymbol{\epsilon}^p = \lambda \left\{ \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\} = \frac{3}{2} \lambda \frac{\mathbf{s} - \mathbf{a}}{\sigma_e} \quad (4)$$

여기서, \mathbf{s} 는 편차 응력 텐서(Deviatoric stress tensor), F 와 σ_e 는 흐름 법칙의 항복 함수 및 등가 응력을 의미한다.

만약 재료의 온도 변화가 없다고 가정한다면 $\Delta \mathbf{a}_i = 2/3 C_i \Delta \boldsymbol{\epsilon}_{pl} - \gamma_i \mathbf{a}_i \lambda$ 로 표현될 수 있다. 따라서 비선형 이동 경화 모델을 정의하기 위해 필요한 재료 상수는 항복 응력과 C 와 γ 이다 (Lemaitre and Chaboche 1990). 이 값들의 물리적 의미는 Fig. 12 에 보인 그래프에 설명하였다. Brunet et al. (2001)은 합금강을 대상으로

SQP(Sequential Quadratic Program) 방법을 적용하여 재료 상수를 결정한 예를 보였으나, 본 연구에서는 Lemaitre and Chaboche(1990)이 제안한 방법을 이용하였다.

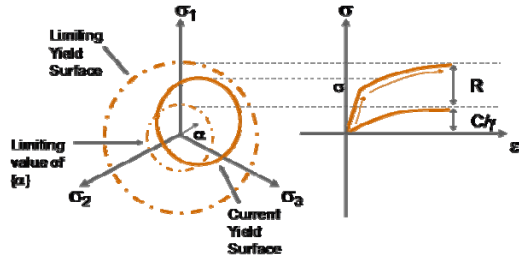


Fig. 12 Stress strain relationship of nonlinear kinematic hardening(ANSYS 2006)

3.4 복합 경화 모델

Chaboche의 이동 경화 모델 또는 비선형 등방 경화 모델은 통상 반복 하중을 받는 재료의 소성 경화 거동을 표현하는 데 사용한다. 3.1 절에서 언급한 바와 같이 이동 경화의 항복 면은 주 응력 공간 상에서 이동만 하며, 등방 경화는 항복 면의 크기가 달라진다. 그간 연구된 결과에 따르면, 반복 응력-변형을 선도는 재료에 따라 매우 다르며, 이동 경화 및 등방 경화의 두 가지 특성을 모두 가지고 있는 경우도 있다. 복합 경화 모델은 등방 경화 및 이동 경화를 모두 고려한 것으로 Lemaitre and Chaboche(1990)가 제시한 가설에 근거를 두고 있다. 복합 모델에서 소성 응력의 크기는 식(2)를 사용하지만, 흐름 법칙을 적용하면 배 응력 텐서는 식(5)와 같이 달라진다(Avanzini 2008, Lemaitre and Chaboche 1990).

$$\dot{\alpha} = C\dot{\epsilon}^p \frac{1}{Y}(\sigma - \alpha) - \gamma\alpha\dot{\epsilon}^p \quad (5)$$

여기서, $\dot{\alpha}$ 는 배응력 텐서의 증분이다.

Fig. 13은 복합 경화 모델의 특징을 일축 응력 상태에서 이상화시켜 배 응력 변화를 설명하였다.

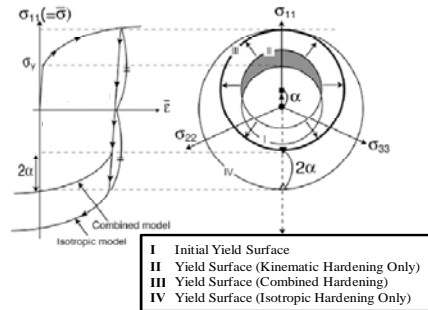


Fig. 13 Combined Kinematic and isotropic hardening under uni-axial loading(Myers 2009)

4. 반복 경화의 유한요소 해석

3장에서 언급한 가공 경화 모델을 수치적으로 모사하기 위하여 상용 코드인 ANSYS를 이용하였다. Fig. 1에 보인 것과 같이 길이 62.5mm를 2-차원 8-Node 평면 요소 (PLANE182)로 모델링하고, 축 대칭 조건을 적용하였다. Fig. 14에 유한요소 모델을 예시하였다. 실험과 동일한 하중 조건을 적용하기 위하여 Fig. 5에 보인 것과 같이 ± 0.5%의 공칭 변형률을 등가 하중으로 치환하여 모델의 상면에 압력으로 부가하고, 하면은 단순 지지로 모델링하였다.

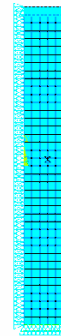


Fig. 14 Finite element mesh for numerical simulation

4.1 선형 경화 모델 계산

3장에서 언급한 바와 같이 선형 경화 모델은 항복 응력과 선형으로 가정한 가공 경화 지수를

필요로 한다. Table 4 는 각각 RT 와 CT 의 항복 응력과 가공 경화 지수를 정리한 것이다. 이 값들은 단순 인장 실험의 응력-변형을 선도로부터 소성 구간을 선형으로 보간하여 구하였다. Fig. 15 와 Fig. 16 은 선형 등방 경화 모델을 적용하여 구한 반복 변형률-응력 선도이다. Fig. 17 과 Fig. 18 은 선형 이동 경화 모델을 적용하여 구한 선도이다. Fig. 7 과 Fig. 8 에 제시된 실험 곡선과 비교하였을 때 극 저온에서 결과는 적절하지 못함을 뚜렷하게 알 수 있다.

Table 4 Material properties for bilinear hardening model

Temp. [°C]	20	-165
Yield stress [MPa]	254	277
Tangent modulus [MPa]	2,000	4,000

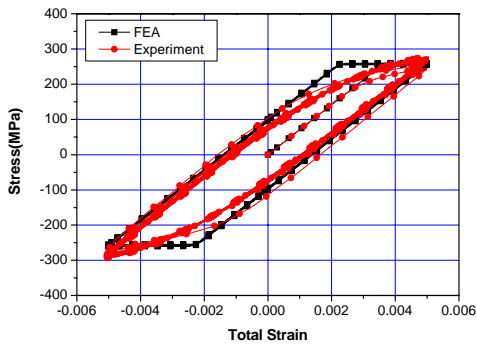


Fig. 15 BISO model at 20°C

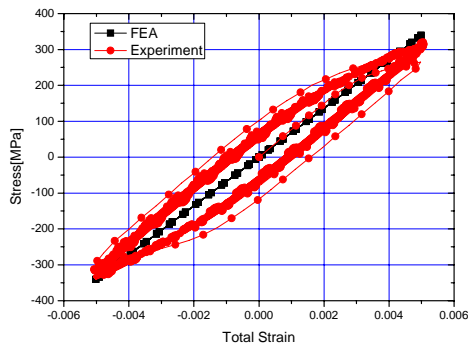


Fig. 16 BISO model at -165°C

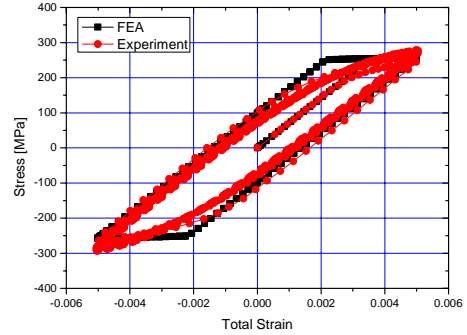


Fig. 17 BKIN model at 20°C

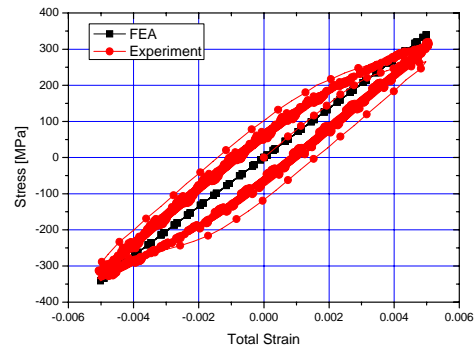


Fig. 18 BKIN model at -165°C

4.2 비선형 등방 경화 모델 계산

비선형 등방 경화 모델은 Fig. 11 에 보인 것과 같이 네 개의 재료 상수로 정의된다. 각 계수를 구하는 과정은 Lemaitre and Chaboche(1990)가 제시한 방법을 이용하였다. RT 와 CT 의 실험 결과로부터 소성 변형률과 응력 곡선으로부터 3.2 절에 설명한 방법으로 계수를 추정하여 Table 5 에 정리하였다. Fig. 19 와 Fig. 20 은 해석 결과를 표현한 것이다. 가공 경화 모델의 정성적인 성향은 추적하였으나, 최대 값의 오차가 큼을 알 수 있다.

Table 5 Material properties for NLISO model

Temp.	k	R_0	R_∞	b
20°C	180	1000	90	500
-165°C	200	1200	110	550

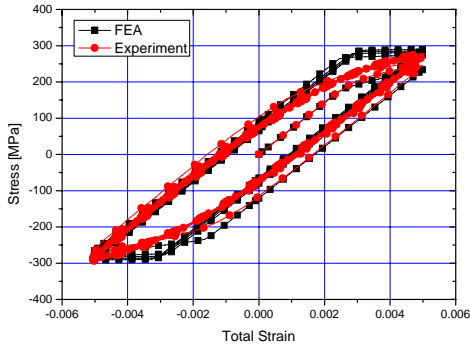


Fig. 19 NLISO model at 20°C

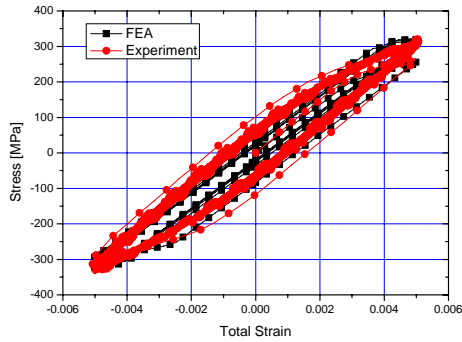


Fig. 20 NLISO model at -165°C

4.3 비선형 이동 경화 모델 계산

비선형 이동 경화 모델을 정의하기 위한 재료 상수는 Table 6 에 정리하였다. 유한요소 해석한 결과를 Fig. 21 과 Fig. 22 에 각각 표시하였다. 해석 결과와 실험 결과를 비교한 결과 비선형 이동 경화 모델은 실험 결과를 적절하게 표현하지는 못하는 것으로 파악되었다.

Table 6 Material properties for Chaboche model

Temp.	k	C	γ
20°C	180	33000	300
-165°C	200	43200	320

4.4 복합 경화 모델 계산

Fig. 23 과 Fig. 24 은 복합 경화 모델의 상온과 저온에 대한 수치 해석 결과를 그래프로 그린 것이다. 이 결과를 Fig. 7 과 Fig. 8 에 제시한 실험

결과와 비교하면 약간의 차이는 발견되지만, 대체로 실험 결과와 일치함을 알 수 있다.

이는 AC4C-T6 의 가공 경화는 등방 경화 및 이동 경화의 특징을 모두 가지고 있음을 반증한다고 할 수 있다. 따라서 수치해석에서 검토한 다른 경화 모델에 비하여 복합 경화 모델이 AC4C-T6 의 가공 경화의 특성에 가장 가까운 것을 알 수 있었다.

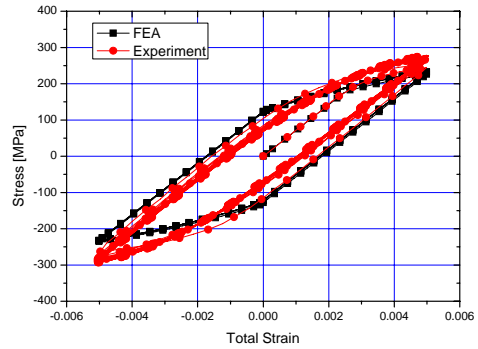


Fig. 21 Chaboche model at 20°C

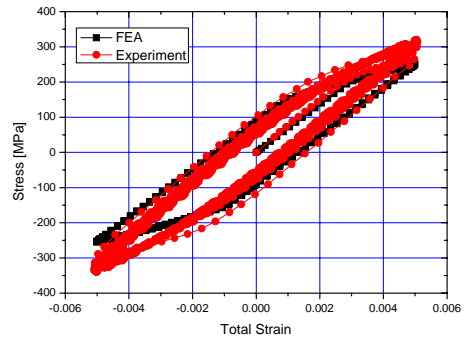


Fig. 22 Chaboche model at -165°C

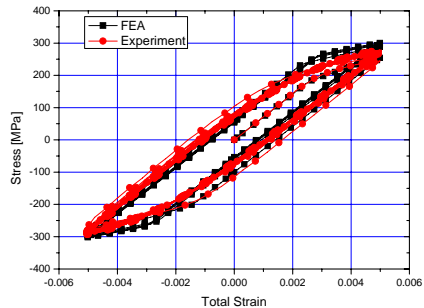


Fig. 23 Combined model at 20°C

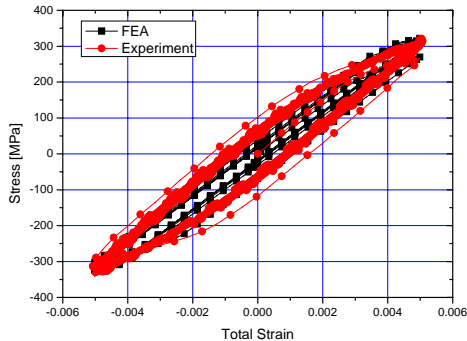


Fig. 24 Combined model at -165°C

5. 결론

본 연구에서는 극저온 상태에 놓인 AC4C-T6 합금의 가공 경화 모델을 산정하기 위한 방안을 제시하였다. 이를 위하여 극 저온과 상온에서 실험을 통하여 인장 실험 결과와 반복 응력-변형을 선도를 얻었다. 실험 결과를 바탕으로 선형 경화 모델, 비선형 등방 경화 모델, 비선형 이동 경화 모델 및 복합 경화 모델의 정의에 필요한 재료 상수를 제시하였고 이들 상수를 이용하여 각각의 가공 경화 모델을 유한요소법을 이용하여 검토하였다. 해석 결과와 실험 결과를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 비선형 이동 경화 모델 및 복합 경화 모델이 비교적 실험 결과에 근접하고 있으나, 최대 응력의 변화 등을 감안하면 복합 경화 모델이 가장 적절한 것으로 판단된다.
- 따라서, 극저온 및 상온에서 AC4C-T6 합금강의 경화 현상은 등방 경화 및 이동 경화의 복합적인 특성에 가장 가깝다고 판단된다.
- 복합 경화 모델의 수치 모델도 실험결과를 정확하게 모사하고 있지는 못하였으나, 반복 응력-변형을 선도의 모사 가능성은 있는 것으로 판단된다.

본 연구의 결과로 도출한 재료 특성값은 LNG 펌프 설계 시 열응력 해석 및 구조 강도 해석에

사용하였다. 복합 경화 모델 등을 좀 더 개선하여 반복 응력-변형을 선도를 정확하게 표현할 수 있는 수정된 경화 모델이 추가로 연구되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. R01-2007-000-20340-0)입니다.

참 고 문 헌

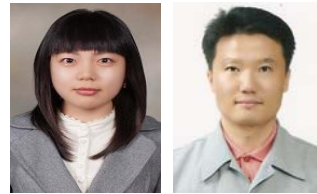
- ANSYS, 2006, Theory Reference – Structures with Material Nonlinearities, ANSYS Inc. Ltd..
- ASTM, 1999, ASTM E8M-00 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, In: Annual Book of ASTM standards, Philadelphia, American Society for Testing and Materials.
- ASTM, 2002, ASTM E1450-03 Standard Test Method for Tension Testing of Structural Alloys in Liquid Helium, American Society for Testing and Materials.
- ASTM, 2003, ASTM 606-04 Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing, In: Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, American Society for Testing and Materials.
- Avanzini, A., 2008, “Mechanical Characterization and Finite Element Modeling of Cyclic Stress-strain Behavior of Ultra High Molecular Weight Polyethylene,” Materials & Design, Vol. 29, pp. 330-343.
- Bari, S., 2001, Constitutive Modeling for Cyclic Plasticity and Ratcheting, Ph.D. thesis, North Carolina State University.
- Bari, S. and Hassan, T., 2000, “Anatomy of Coupled Constitutive Models for Ratcheting Simulation,” International Journal of Plasticity, Vol. 16, No. 3-4, pp. 381-409.
- Brunet, M., Morestin, F. and Godereaux, S.,

- 2001, "Nonlinear Kinematic Hardening Identification for Anisotropic Sheet Metals With Bending-Unbending Tests," *Journal of Engineering Materials and Technology*. Vol. 123, pp. 378-383.
- Chung, K., Lee, M.G., Kim, D., Kim, C., Wenner, M.L. and Barlat, F., 2005, "Spring-Back Evaluation of Automotive Sheets Based on Isotropic-kinematic Hardening Laws and Non-quadratic Anisotropic Yield Functions: Part I: Theory and Formulation," *International Journal of Plasticity*, Vol. 21, No. 5, pp. 861-882.
 - Hong, S.H., Lee, Y.W., Hwang, W.G., Ki, C.D. and Kim, Y.B., 1998, "Development of Diagnosis System for LNG Pump," *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 2, No. 3, pp. 88-95.
 - Hyun, H.C., Lee, J.H. and Lee, H.Y., 2008, "Mathematical Expressions for Stress-Strain Curve of Metallic Material," *Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. A, No. 32, pp. 21-28.
 - Imaoka, S., 2008, "Chaboche Nonlinear Kinematic Hardening Model," at http://ansys.net/tips_sheldon/STI0805_Chaboche.pdf
 - Ishihara, S. and McEvily, A.J., 2002, "Analysis of Short Fatigue Crack Growth in Cast Aluminum Alloys," *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, pp. 1169-1174.
 - Kang, G., 2005, "Finite Element Implementation of Visco-plastic Constitutive Model with Strain-range-dependent Cyclic Hardening," *Communications in Numerical Methods in Engineering*, Vol. 22, No.2, pp. 137-153.
 - Kim, K.S., Kim, K.S., Kwon, J.M., Park, S.M. and Kim, B.I., 2006, "Effect of Local Strain on Low Cycle Fatigue using ESPI System," *Journal of the Society of Naval Architecture of Korea*, Vol. 43, No. 2, pp. 213-219.
 - Kulkarni, S.C., Desai, Y.M., Kant, T., Reddy, G. R., Prasad, P., Vaze, K.K. and Gupta, C., 2004, "Uniaxial and Biaxial Ratcheting in Piping Materials-experiments and Analysis," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 81, No. 7, pp. 609-617.
 - Lang, H., Wirtz, K., Heitzer, M., Staat, M. and Oettel, R., 2001, "Cyclic Plastic Deformation Tests to Verify FEM-based Shakedown Analyses," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 206, No. 2-3, pp. 235-247.
 - Lee, H.Y., Kim, J.B. and Lee, J.H., 2002, "Test and Analysis of Thermal Ratcheting Deformation for 316L Stainless Steel Cylindrical Structure," *Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. A, No. 26, pp. 479-486.
 - Lee, K.M., Park, J.H., Han, S.K. and Heo, J.H., 2007, "A Development of LNG Pump Tower Analysis System," *Special Issue of the Society of Naval Architect of Korea*, pp. 7-13.
 - Lemaitre, L. and Chaboche, J.L., 1990, *Mechanics of Solid Materials*, Cambridge University Press, UK.
 - Myers, A, 2009, "Calibration Methods for The Lemaitre Chaboche Plasticity Model," at <http://www.stanford.edu/~amyers1>
 - Noh, B.J., 2005, "Sloshing Load Analysis in Spherical tank of LNG Carrier," *Special Issue of the Society of Naval Architect of Korea*, pp. 22-30.
 - Nho, I.S., Nam, Y.Y. and Lee, H.S., 1993, "Structural Safety Assessment of Independent Spherical LNG Tank (1st Report) - Fatigue Strength Analysis Based on the S-N Approach," *Transactions of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 30, No. 2, pp. 132-140.

- Rahman, S.M., Hassana, T. and Corona, E., 2008, "Evaluation of Cyclic Plasticity Models in Ratcheting Simulation of Straight Pipes under Cyclic Bending and Steady Internal Pressure," International Journal of Plasticity, Vol. 24, pp. 1756-1791.
- Shiozawa, K., Tohida, Y. and Sun, S., 1997, "Crack Initiation and Small fatigue Crack Growth Behaviour of Squeeze-Cast Al-Si Aluminum Alloys," Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 20, No. 2, pp. 237-247.
- Smith, D.J., 2001, "Simulating the Cyclic Mechanical Response of Titanium Alloy 834 at 630°C, Material at High Temperatures," Vol. 18, No. 3, pp. 153-162.



< 이 재 범 > < 김 경 수 > < 이 장 현 >



< 유 미 지 > < 정 준 모 >