

빙해선박 강재의 저온 소성경화 구성방정식

민덕기¹·허영미²·조상래^{2,†}
(주)현대미포조선¹
울산대학교 조선해양공학부²

Low Temperature Plastic Hardening Constitutive Equation for Steels of Polar Class Vessels

Dug-ki Min¹·Young-Mi Heo²·Sang-Rai Cho^{2,†}
Hyundai Mipo Dockyard Co., Ltd.¹
University of Ulsan²

Abstract

In this study, a plastic hardening constitutive equation for steels of polar class vessels at low temperature is proposed. The equation was derived using the experimental data obtained from tensile tests at room and low temperatures. Tensile tests at low temperature are both costly and time consuming because an expensive cold chamber is necessary and it takes too much time to cool down a specimen to set temperature. Using the proposed plastic hardening constitutive equation the plastic hardening characteristics of steels for polar class vessels at low temperature can be easily predicted from the tensile test results at room temperature.

Keywords : Plastic hardening constitutive equation(소성경화 구성방정식), Tensile test(인장실험), Low temperature(저온), Polar class vessels(빙해선박), Cold chamber(저온 챔버)

1. 서론

현재 한국에서 유럽(로테르담)으로 가는 해상항로는 수에즈운하를 경유하는 항로가 주로 이용되는데 21,000 km에 약 24일이 소요된다. 반면 부산~베링해~북극해~바렌츠해로 이어지는 북극해항로를 이용하면 12,700km에 대략 14일이 걸려 운항기간을 약 40% 줄이는 물류혁명으로 이어질 수 있다. 또한 해적 출몰 지역인 아덴만 부근을 지나는 인도양 항로의 대체 항로로 해적 문제가 없고 기간이 단축돼 연료비가 절감되는 등의 효과가 있어 북극해항로에 대한 관심과 논의가 활발해지고 있다. 그러나 북극해항로는 유빙으로 인한 해상사고의 위험이 상존한다. 사고 발생 시 인명과 재산의 손실과 환경 재앙을 일으킬 수 있다는 것이 이미 여러 차례의 사례를 통하여 교훈을 얻은 바 있다. 그럼에도 북극해항로에서의 유빙에 의한 충돌 시 구조적 안전성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지 못한 실정이다. 최근에 소수의 연구가 수행되었고, 많은 연구자들이 관심을 갖기 시작하였지만 구조분야에서는 아직 미진한 상태이다. 아직도 많은 연구자들이 빙해선박용 강재의 소성경화 특성을 강소성 또는 선형경화로 간주하고 있다. 이는 지금까지 빙해선박용 강재의 구조적 거동에 관한 연구와 소성영역에서의 재료적 거동에 대한 기초연구가 부족했기 때문이다. 더욱이 북극해항로의 기온이 겨울에 최저 -30°C ~ -50°C 이고 여름에도 최고 5°C 를 넘지 못하는 실정임에도 모든

연구자들이 상온으로 가정하여 연구를 수행하고 있는 실정이다.

일반적으로 강재는 생산자 및 생산일자에 따라 재료의 물성치가 다르게 나타난다고 알려져 있다. 따라서 구조실험을 수행할 경우 실험 모델의 모재로부터 인장시편을 취해 인장실험을 수행하여 재료의 물성치를 확보해야 한다. 이 경우 상온에서의 인장실험은 인장실험기의 보급률이 높고 실험의 절차가 간편하고 간단하므로 별 어려움 없이 수행할 수 있다. 그러나 저온 인장실험은 저온 챔버의 구비가 필수적으로 필요하고 시편의 온도를 원하는 온도로 맞추기에는 상당한 시간과 노력이 필요하다.

본 논문에서는 Min, et al. (2011)이 수행한 DH32, DH36 및 EH36 강재의 상온 및 저온 인장실험결과로부터 구축된 데이터 베이스를 기반으로 하여 저온(-30°C ~ -50°C)에서의 재료 물성치를 예측할 수 있는 저온 소성경화 구성방정식을 개발하였다. 제안된 식을 이용하여 많은 시간과 비용이 소요되는 저온 인장실험을 수행하지 않고 상온 인장실험 결과로부터 손쉽게 -30°C ~ -50°C 구간에서의 재료의 물성치를 구할 수 있다. 이때 계산되는 재료 물성치는 평균 진응력-진변형률이다. 등가 진응력-진변형률이 요구될 시에는 Bridgman (1952)의 응력 수정식을 이용하여 구할 수 있다.

2. 소성경화 구성방정식

Ludwik (1909)은 항복응력 항이 포함된 구성방정식, 식 (1)을

제한하였다. 여기서 σ 는 응력이고, σ_0 는 초기 항복응력이다.

$$\sigma = \sigma_0 + K(\epsilon^p)^n \quad (1)$$

Hollomon (1945)은 소성구간에서의 응력-변형을 관계를 변형을 경화지수(n)와 강도계수(K)를 이용하여 식(2)와 같이 나타내었다. 여기서 ϵ^p 는 소성 변형률이다.

$$\sigma = K(\epsilon^p)^n \quad (2)$$

반면에 Swift (1952)는 항복변형률(ϵ_0) 항이 포함된 구성방정식을 식(3)과 같이 나타내었다.

$$\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon^p)^n \quad (3)$$

식 (4)와 같이 종속변수가 소성변형률로 나타내어지는 Ramberg and Osgood (1943) 구성방정식도 자주 사용되는 소성 경화 구성방정식이다. 여기서 E 는 탄성계수 이다.

$$\epsilon^p = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{1/n} \quad (4)$$

Table 1 Material properties at various temperature

Steels grade	Yield stress [MPa]	Tensile stress [MPa]	n	K [MPa]	Temp [°C]
GL-DH32	375.7	524.1	0.21	891.5	RT
GL-DH32	451.8	625.2	0.21	1084.4	-30
GL-DH32	425.8	571.9	0.22	988.7	-50
GL-DH36	385.1	552.1	0.20	929.5	RT
GL-DH36	427.3	599.1	0.21	1021.3	-30
GL-DH36	448.0	596.3	0.23	1048.8	-50
GL-EH36	395.2	516.9	0.16	801.74	RT
GL-EH36	442.6	563.9	0.16	884.5	-30
GL-EH36	442.5	572.6	0.18	929.98	-50

Min, et al. (2011)은 빙해선박의 외판에 사용되는 DH32, DH36 그리고 EH36 강재로부터 봉형시편 37개를 제작하여 상온 및 저온(-30°C 와 -50°C)에서 인장실험을 수행하고 각 재료의 초기 항복응력, 인장강도, 변형을 경화지수 그리고 강도계수를 구하였다. 그 결과를 Table 1에 정리하였다. 변형을 경화지수(n)과 강도계수(K)는 ASTM E646-07에 따라 계산되었다.

3. 저온 소성경화 구성방정식의 개발

본 논문에서 소개된 구성 방정식은 단조 하중(monotonic load)이 작용할 때 재료는 등방성 경화(isotropic hardening)한다는 가정에 근거하고 있으며, 피로와 같이 반복 하중이 작용할 경우 등방성 경화와 이동성 경화(kinematic hardening)를 동시에 고려한 구성 방정식을 적용해야 한다. Ludwik 구성 방정식은 초기 항복 강도 항을 포함하기 때문에 비교적 정확한 공식으로 보여지지만, 실제 실험 데이터를 곡선 적합 후 실험 데이터와 비교해보면 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 이는 초기 항복 강도를 상수로 고정하여 곡선 적합을 실시하기 때문에 고변형을 구간에서 상관도가 작아지기 때문이다. ASTM (2007)에서는 Hollomon식을 이용하여 소성 변형을 경화 지수와 강도 계수를 도출하는 방법을 제시한다. 즉 균일 진응력 곡선에서 평탄부의 종료 시점부터 최대 균일 진응력 (진인장 강도, σ_{uts}) 사이의 데이터에 대한 선형 회귀 분석을 통하여 소성 변형을 경화 지수 및 강도 계수를 산출한다. 따라서 별도의 언급이 없는 한 소성 변형을 경화 지수와 강도 계수는 Hollomon 상수를 의미한다. Hollomon 구성 방정식을 이용하여 유동 응력을 표현하고자 할 때, 초기 항복강도 부근에서는 작은 증분의 소성 변형률을 적용 하여야 부드러운 유동응력 곡선을 얻을 수 있다. Swift 구성 방정식은 항복 변형률 항을 포함하기 때문에 성형가공의 분야에서 많이 사용되고 있다. Ramberg-Osgood 구성 방정식은 Hollomon 구성 방정식에 탄성 변형률을 포함하여 전체 변형률로 나타낸 구성 방정식이다. 비선형 유한 요소 해석에서 재료의 정적 경화를 정의할 때 소성변형률에 상응하는 유동 응력을 정의하기 때문에 Ramberg-Osgood 구성 방정식은 사용하기에 오히려 불편한 단점도 있다.

본 논문에서는 Min, et al. (2011)의 상온 인장실험에서 얻은 평균 진응력-진변형률 결과를 이용해 Hollomon, Ludwik 그리고 Swift 소성경화 구성방정식의 곡선적합을 실시하여 변형을 경화 지수와 강도계수를 구하여 Table 2 ~ 4에 나타내었다. 구해진 강도계수와 변형을 경화지수의 경우 Hollomon과 Swift는 거의 유사한 값을 보여주고 있는데 반해 Ludwik은 상당한 차이를 보여주고 있다.

Table 2 Obtained mechanical properties for GL-DH32

Constitutive model	n	K (MPa)
Hollomon	0.21	891.50
Ludwik	0.39	527.75
Swift	0.20	898.70

Table 3 Obtained mechanical properties for GL-DH36

Constitutive model	n	K (MPa)
Hollomon	0.20	929.50
Ludwik	0.36	542.73
Swift	0.18	933.39

Table 4 Obtained mechanical properties for GL-EH36

Constitutive model	n	K (MPa)
Hollomon	0.16	801.74
Ludwik	0.33	414.35
Swift	0.14	802.63

Fig. 1 ~ 6은 Table 2 ~ 4의 재료상수를 이용하여 나타낸 유동응력을 보여주고 있다. Hollomon 식과 비교하였을 때 Swift식과 Ludwik식 모두 저변형률 구간에서 상대적으로 제법 큰 오차를 보이지만 고변형률에서는 유사하다. 저변형률 구간만 확대하여 실험값과 비교하였을 때 Hollomon식이 실험값과 잘 일치하고 있다.

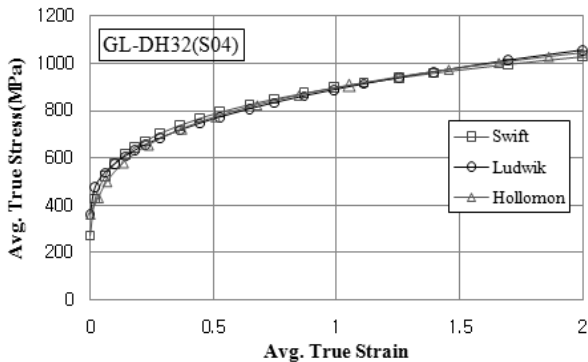


Fig. 1 Comparison of constitutive models for GL-DH32

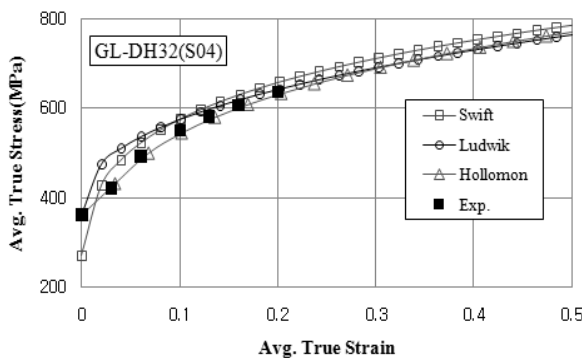


Fig. 2 Magnification of constitutive models for GL-DH32 between 0 and 0.5 strain

Fig. 2, 4 그리고 6에서 실험값은 인장실험결과의 공칭 응력-공칭변형률을 이용하여 구한 균일 진응력-진변형률이다. 따라서 본 연구에서는 Hollomon의 식을 기반으로 식 (5)와 같이 저온 소성경화 구성방정식을 개발하였다. 식 (5)를 이용하면 저온 인장실험을 수행하지 않고 상온 인장실험 결과로부터 손쉽게 저온에서의 재료의 물성치를 구할 수 있다. 이때 계산되는 재료 물성치는 평균 진응력-진변형률이다. 등가 진응력-진변형률이 요구될 시에는 식 (5)를 이용해 계산된 평균 진응력-진변형률을 Bridgman의 응력 수정식 (9)에 대입하여 구할 수 있다.

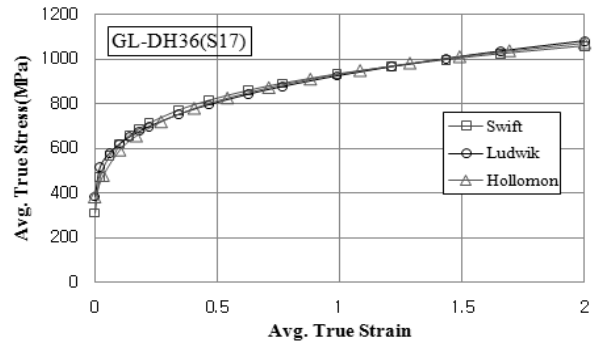


Fig. 3 Comparison of constitutive models for GL-DH36

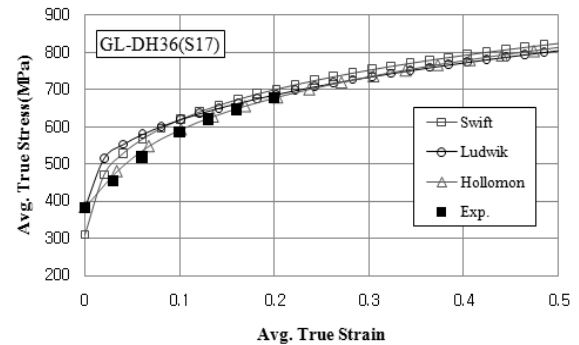


Fig. 4 Magnification of constitutive models for GL-DH36 between 0 and 0.5 strain

$$\sigma_{(avp)lt} = K(\epsilon^p)^n \left(\frac{T_R}{T} + 1 \right)^{T^c} \quad (5)$$

$$T^c = q \cdot \ln \left(\frac{|T|}{T_R} \right) \quad (6)$$

$$q = m^* \cdot \frac{T_R}{|T|} \quad (7)$$

$$(\sigma_{(avp)lt})_{\min} \leq 1.1 \times \sigma_0, \text{ when } \epsilon^p = 0 \quad (8)$$

$$\sigma_{eq} = \frac{P}{A} \frac{1}{\left(1 + \frac{2R_s}{a_s} \right) \ln \left(1 + \frac{a_s}{2R_s} \right)} \quad (9)$$

여기서, σ_0 는 초기 항복응력, T_R 은 상온(25°C 기준), ϵ^p 는 소성 변형률, n 은 소성 변형률 경화지수 그리고 T 는 재료 물성치를 구하고자 하는 온도이며 m^* 는 재료상수이다. 실험결과의 회귀분석을 통해 m^* 을 Table 5에 나타내었다. 식 (9)에서 A 는 초기 단면적 P 는 적용하중이며, R_s 및 a_s 는 각각 봉형시편의 네킹부위 곡률반경과 최소단면부의 반경을 나타낸다.

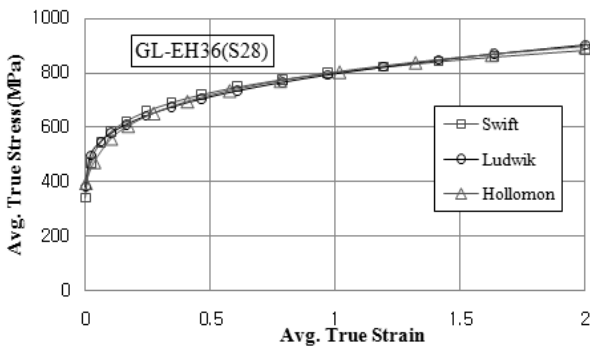


Fig. 5 Comparison of constitutive models for GL-EH36

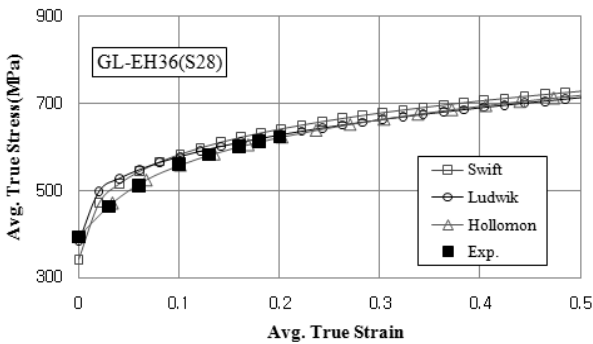


Fig. 6 Magnification of constitutive models for GL-EH36 between 0 and 0.5 strain

식 (5)는 소성변형률이 0일 때 항복응력(즉, 초기 항복응력)의 저온에서 경화상태를 고려하지 못하므로 식 (8)과 같이 상온에서의 초기 항복응력을 10% 증가시킨 값을 저온에서의 초기 항복응력의 최소값으로 정하도록 하였다.

Table 5 Material parameter under low temperature plastic hardening equation

Material	m^*
DH32	1.3
DH36	1.0
EH36	0.74

4. 저온 소성경화 구성방정식의 유효성

식 (5)를 이용하여 구한 DH32, DH36 및 EH36 강재의 -30°C 와 -50°C 에서의 평균 진응력-진변형률을 Min, et al. (2011)이 수행한 실험결과와 비교하여 Fig. 7 ~ Fig. 12에 나타내었다.

Fig. 7 ~ Fig. 12에서 볼 수 있듯이 식 (5)를 이용해 구한 -30°C 및 -50°C 에서의 평균 진응력-진변형률은 저온인장실험의 결과와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

또한, 식 (5)는 본 연구에서 목표로 하고 있는 $-30^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$ 구간으로 사용범위를 한정하고 있다. 이는 $0^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$ 구간에서 실험을 수행하지 않았기 때문이며, 상온과 -30°C 결과로부터

보간법을 이용하여 $0^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$ 구간에서 재료의 물성치를 구하는 것에 대한 기술적 근거가 부족하다고 판단하였다.

이는 Nemat-Nasser and Guo (2003)가 DH-36 강을 대상으로 실시한 고온실험에서 유동응력의 온도의존성이 온도증가에 비례하지 않는 것으로 나타났기 때문이다. 따라서 제안된 식의 적용온도 확장을 위해서는 상온과 -30°C 구간에서 추가적인 실험이 필수적으로 요구된다. 이에 대한 부분은 향후 연구가 필요하다.

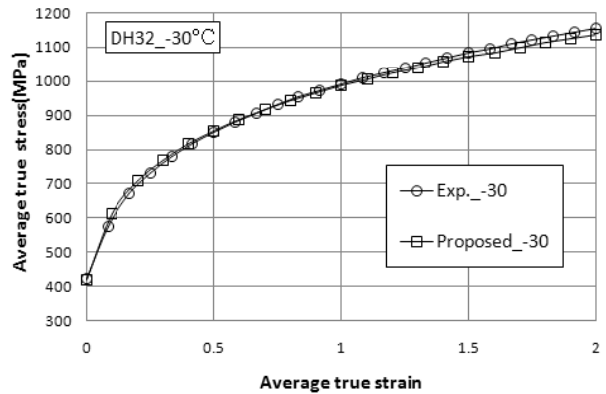


Fig. 7 Comparison of average true stress-true strain by experiment and proposed one for DH32 under -30°C

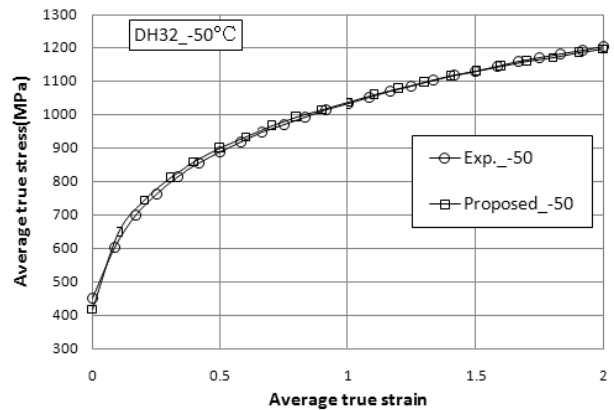


Fig. 8 Comparison of average true stress-true strain by experiment and proposed one for DH32 under -50°C

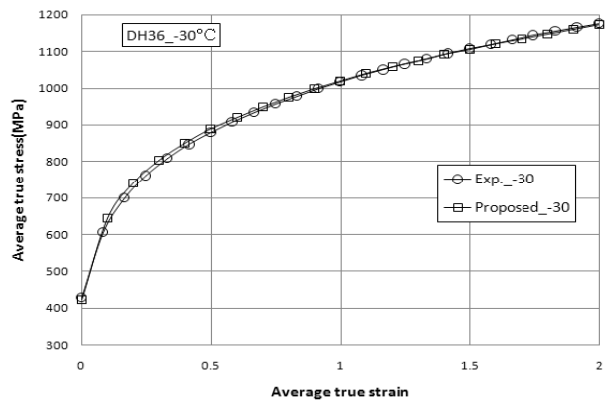


Fig. 9 Comparison of average true stress-true strain by experiment and proposed one for DH36 under -30°C

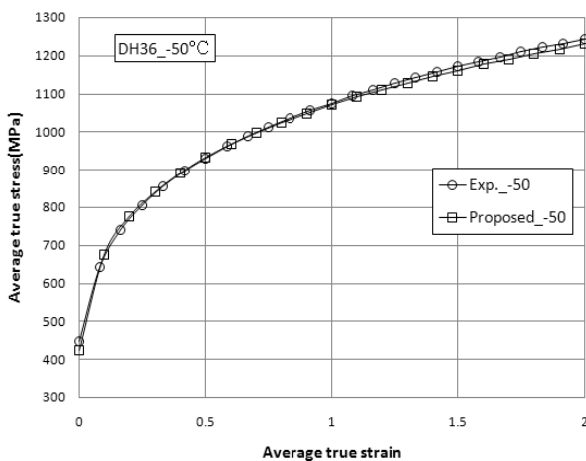


Fig. 10 Comparison of average true stress-true strain by experiment and proposed one for DH36 under -50°C

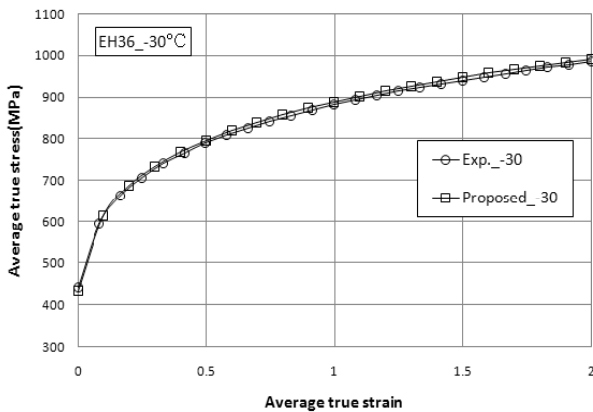


Fig. 11 Comparison of average true stress-true strain by experiment and proposed one for EH36 under -30°C

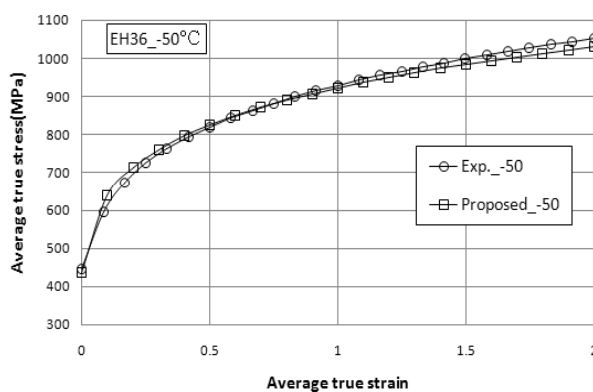


Fig. 12 Comparison of average true stress-true strain by experiment and proposed one for EH36 under -50°C

5. 결론

Min, et al. (2011)이 수행한 DH32, DH36 및 EH36 강재의 상온 및 저온실험 데이터베이스를 기반으로 하여 강재의 상온실험

결과로부터 저온($-30^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$)에서의 재료의 물성치를 예측할 수 있는 저온 소성경화 구성방정식을 개발하였다. 제안된 식을 이용하여 시간과 비용이 많이 드는 저온 인장실험을 수행하지 않고 상온 인장실험 결과로부터 손쉽게 $-30^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$ 구간에서의 재료의 물성치를 구할 수 있다. 이때 계산되는 재료 물성치는 평균 진응력-진변형률이다. 등가 진응력-진변형률이 요구될 시에는 Bridgman의 응력수정식을 이용하여 구할 수 있다.

제안된 식의 사용 온도범위를 확장하기 위해서 향후 $0^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$ 구간에서의 저온 인장실험이 요구된다.

참고 문헌

- ASTM, 2007. *Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-Values) of Metallic Steel Materials*. E646-07.
- Bridgman, P.W., 1952. *Studies in Large Plastic Flow and Fracture*. McGraw-Hill, New York.
- Hollomon, J.H., 1945. Tensile Deformation. *Trans. A.I.M.E.*, 162, pp.268.
- Ludwik, P., 1909. *Elemente der Technologischen Mechanik*. Springer-Verlag, Berlin.
- Min, D-K. Shim, C.S. Shin, D.W. & Cho, S-R., 2011. On the Mechanical Properties at Low Temperature for Steels of Ice-Class Vessels. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(2), pp.171-177.
- Nemat-Nasser, S. & Guo, W.G., 2003. Thermo mechanical Response of DH-36 Structural Steel Over a Wide Range Of Strain Rates and Temperature. *Mech. Mat.*, 35(11), pp.1023-1047.
- Ramberg, W. & Osgood, W.R., 1943. Description of Stress-Strain Curves by three Parameters. *Technical Note No. 902, National Advisory Committee For Aeronautics, Washington DC*.
- Swift, H.W., 1952. Plastic Instability under Plane Stress. *J. Mech. Phys. Solids*, 1(1), pp.1.

