

Fe-18Mn TWIP강의 Pre-strain에 따른 저주기 피로 수명 예측 모델 연구

김용우¹, 이종수[#]

A Prediction Model for Low Cycle Fatigue Life of Pre-strained Fe-18Mn TWIP Steel

Y. W. Kim, C. S. Lee

Abstract

The influence of pre-strain in low-cycle fatigue behavior of Fe-18Mn-0.05Al-0.6C TWIP steel was studied by conducting axial strain-controlled tests. As-received plates were deformed by rolling with reduction ratios of 10 and 30%, respectively. A triangular waveform with a constant frequency of 1 Hz was employed for low cycle fatigue test at the strain amplitudes in the range of $\pm 0.4 \sim \pm 0.6$ pct. The results showed that low-cycle fatigue life was strongly dependent on the amount of pre-strain as well as the strain amplitude. Increasing the amount of prestrain, the number of reversals to failure was significantly decreased at high strain amplitudes, but the effect was negligible at low strain amplitudes. A new model for predicting fatigue life of pre-strained body has been devised adding a correction term of $\Delta E_{pre-strain}$ to the energy-based fatigue damage parameter.

Key Words : TWIP, Low Cycle Fatigue, Pre-strain, Life Prediction

1. 서론

1990년대 말 이후 세계적인 환경규제와 승객의 안전에 대한 관심이 급증하면서 차체에 고강도강의 비율이 증가하고 있다. 이러한 요구에 부응하여 인장강도 800MPa, 연신율 60% 이상인 고가공성 TWIP(TWinning Induced Plasticity)강이 개발되었다[1].

TWIP강은 같은 등급의 DP(Dual Phase), TRIP(TRansformation Induced Plasticity) 강에 비하여 가공성이 우수하며, 충격 에너지를 효율적으로 많은 양을 흡수할 수 있으며, 충돌에 대한 우수한 저항성을 가진다고 보고되고 있다[1,2]. 그러나 항복강도가 타 강종에 비해 비교적 낮은 편이다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 냉간 압연을 통한 pre-strain 처리로 항복강도를 향상시키고자

하였다.

TWIP강이 적용될 자동차 차체는 여러 요인에 의한 반복적인 응력 및 변형 환경에 있기 때문에, 저주기 피로 수명 평가가 필요하며, 특히 pre-strain처리 후 변화한 물성에 따른 피로 특성에 대한 평가가 필요하다. 그러나 피로 현상은 그 수명이 매우 길고 실험 속도의 제약 때문에 그 특성평가에 어려움이 있어 피로 수명을 예측하고자 하는 노력이 진행되어 왔다. 그러나 기존의 예측 기술들은 주로 fitting에 의존하는 상수를 포함하고 있어 타 강종에는 적용하기 어려우며 더구나 본 연구에서 사용된 TWIP강의 경우 타 강종에 비해 연신율이 월등히 좋아 기존 강종에 대한 예측 기술은 의미가 없다. 따라서 본 연구에서는 TWIP강의 pre-strain에 따른 피로 수명의 변화를 예측하고자 하였다.

1. 포항공과대학교 신소재공학과

포항공과대학교 신소재공학과 cslee@postech.ac.kr

2. 실험 방법

본 실험에 사용된 강재의 화학 조성은 Table. 1과 같다. 또한 항복강도를 높이기 위하여 압하율 10, 30%로 냉간 압연을 통한 pre-strain처리를 하였다.

Table. 1 Chemical composition of investigated steel (wt%)

Fe	C	Si	Mn	Al	Others
Bal.	0.6	0.2	18	0.05	Cr, Ni, Cu

Pre-strain에 따른 기계적 물성 평가는 유압식 Instron 8801을 사용하여 strain rate 5mm/min의 속도로 수행하였다. 또한 Instron 8801을 사용하여 Strain-Controlled Method로 Strain 조건 0.4~0.6%에서 strain ratio = -1로 저주기 피로 특성 평가를 수행하였다. 실험에 사용된 시편은 Fig. 1에 나타내었다.

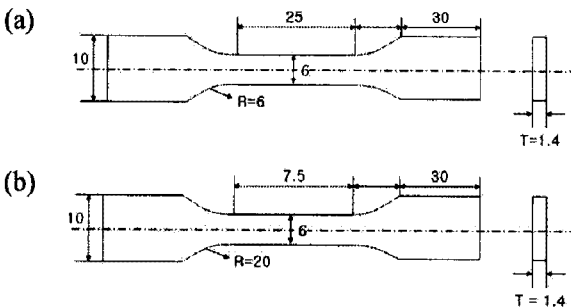


Fig. 1 Dimension of (a) tensile test specimens and (b) low cycle fatigue test specimens

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Pre-strain에 따른 기계적 성질

Fig. 2는 pre-strain 처리 시편의 인장 곡선이다. Pre-strain의 양이 증가할수록 항복강도와 인장강도가 높아지는 반면, 연성은 감소하는 현상을 보이고 있다. Table. 2에 pre-strain 전후의 인장 특성을 나타내었다.

Table. 2 Tensile properties of TWIP steels after pre-strain

Pre-strain	YS(MPa)	UTS(MPa)	EI
0%	471	1004	0.78
10%	749	1129	0.5
30%	1152	1357	0.2

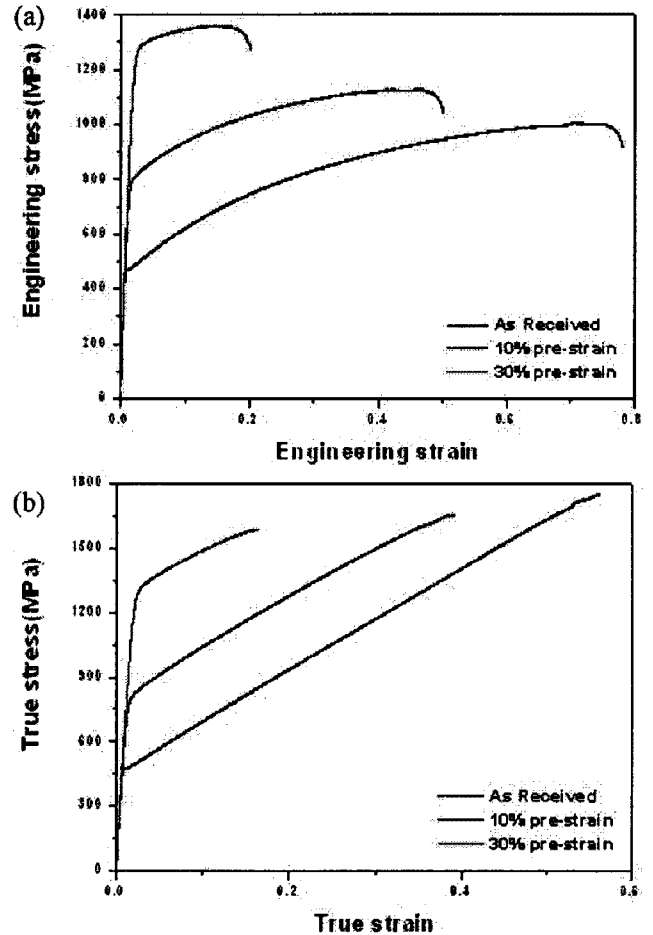


Fig. 2 The effect of pre-strain on the deformation behavior of TWIP steel: (a) engineering and (b) tensile stress-strain curve

3.2 저주기 피로 수명 예측

Ellyin에 의하면 재료의 피로손상은 각 cycle당 누적되는 total strain energy, Ψ 와 관련이 있으며, 피로 수명은 식 (1)을 통하여 예측할 수 있다[3-6].

$$\Psi = \Delta W^p / \rho + \Delta W^{e+} = \kappa_u \cdot (2N_f)^\alpha + C_u \quad (1)$$

ΔW^p 는 plastic strain energy density로 Fig. 3과 같이 반수명에서 hysteresis loop의 안쪽 면적을 나타낸다. ΔW^{e+} 는 positive or tensile elastic strain energy로 Fig. 3에서의 삼각형의 면적을 나타낸다. ρ 는 multi-axial constraint factor로서 uniaxial fatigue test에서는 그 값이 1이 된다. C_u 는 fatigue limit와 관련된 energy value로서 유한 피로 수명 영역에서는 그 값이 무시된다. 따라서 본 실험에서는 식 (1)이 식 (2)와 같이 적용될 수 있다[7,8].

$$\Psi = \Delta W^p + \Delta W^{e+} = \kappa_u \cdot (2N_f)^\alpha \quad (2)$$

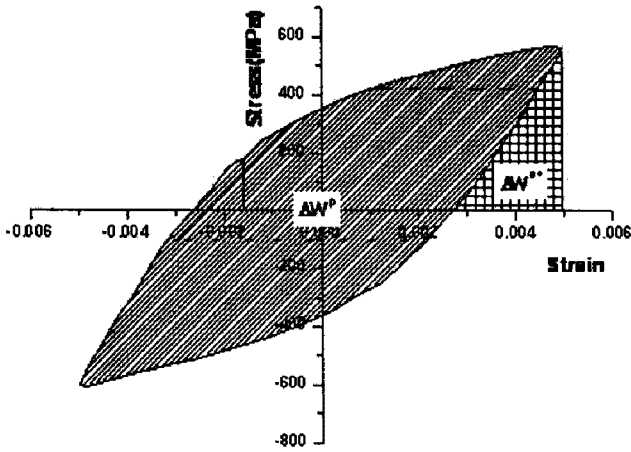


Fig. 3 Plastic strain and tensile strain energy per cycle

재료가 파괴될 때까지 받는 총 damage의 양이 일정하다고 가정하면 피로 파괴될 때까지 받는 총 damage의 양은 아래와 같이 표현된다.

$$\Psi \cdot N_f \quad (3)$$

또한 pre-strain의 경우도 재료가 받는 damage로 본다면, 식 (3)에 pre-strain에 의한 damage를 보정하여 pre-strain 처리 후의 피로수명을 예측할 수 있다. 즉 pre-strain처리 후의 저주기 피로 수명 변화를 Ψ^P , N_f^P 로 나타내면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$(\Psi \cdot N_f) \cdot \Delta E_{pre-strain} = \Psi^P \cdot N_f^P \quad (4)$$

위의 식에 식 (2)를 대입하여 정리하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$N_f^P = (\alpha+1) \sqrt{\Delta E_{pre-strain}} \cdot N_f \quad (5)$$

여기서 α 는 as-received 시편의 저주기 피로 특성 결과로부터 얻어지는 값으로, 대략 -0.49로 얻어진다. $\Delta E_{pre-strain}$ 은 Fig. 4와 같이, 전체 인장곡선 면적, E_{Total} 에 대한 pre-strain에 의한 면적, $E_{pre-strain}$ 의 비를 나타내며, Fig. 5를 통해 식 (5)와 실제 수명이 잘 일치함을 알 수 있다.

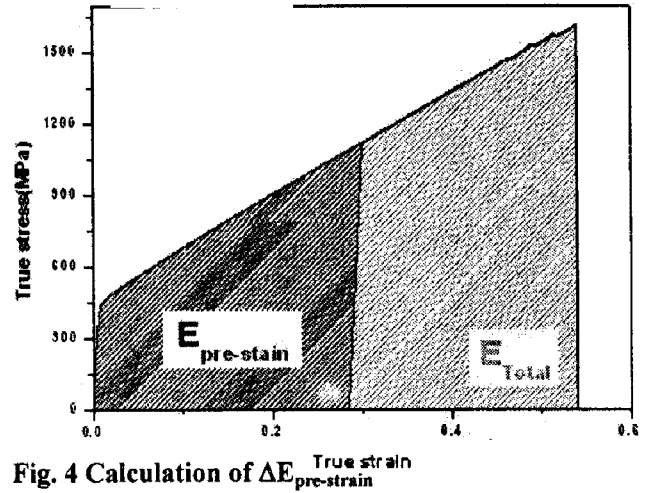


Fig. 4 Calculation of $\Delta E_{pre-strain}$

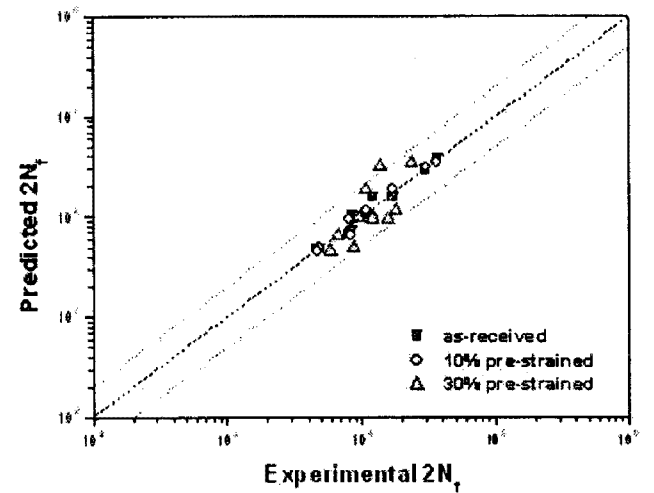


Fig. 5 Comparison of fatigue life between the experimental data and the prediction using proposed model, Eq. (5)

4. 결론

TWIP강의 낮은 항복강도를 해결하기 위해 냉간 압연을 통한 pre-strain처리를 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Pre-strain양에 따라 항복강도 및 인장강도가 증가하였으며, 연성과 저주기 피로 특성이 감소하였다.

(2) Pre-strain에 의한 damage를 보정하여 pre-strain처리 후의 저주기 피로 수명 변화를 다음과 같은 식으로 예측하였다.

$$N_f^P = (\alpha+1) \sqrt{\Delta E_{pre-strain}} \cdot N_f$$

후 기

본 연구는 POSCO 및 BK21의 지원 하에 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] ULSAB-AVC Report, 2002.
- [2] H. Hofmann et al, Properties of austenite high manganese steels with induced plasticity(L-IP steel), proceedings of SCT2005, 73, 2005
- [3] Lefebvre, D. and Ellyin, F. Cyclic response and inelastic strain energy in low-cycle fatigue. Int. J. Fatigue, 6 (1), pp.9-15, 1984.
- [4] Ellyin, F. and Kujawski, D. Plastic strain energy in fatigue failure. J. Pressure Vessel Technol., Trans. ASME, 106, 342-7, 1984.
- [5] F. Ellyin, Fatigue Damage, Crack Growth and Life Prediction, First edition, Chapman & Hall, London, 1997.
- [6] Ellyin, F. and Kujawski, D. An energy-based fatigue failure criterion, in Microstructure and Mechanical Behaviour of Materials, Vol. II, EMAS, West Midlands, UK, pp.541-600, 1986.
- [7] Golos, K. and Ellyin, F., Generalization of cumulative damage criterion to multilevel cyclic loading. Theor. Appl. Fract. Mech., 7,169-76, 1987.
- [8] Golos, K. and Ellyin, F., A total strain energy density theory for cumulative damage. J. Pressure Vessel Technol., AMSE, 110, 36-41, 1988.