

## 3차원 미세조직에 기반한 잔류응력 하의 이상 조직강의 소성변형률비 예측

하진진<sup>1</sup> · 이진우<sup>2</sup> · 이명규<sup>3</sup> · Frédéric Barlat<sup>1</sup> · 김지훈<sup>#</sup>

### Prediction of the Plastic Strain Ratio Evolution of a Dual-phase Steel

J. Ha, J.W. Lee, M. G. Lee, F. Barlat, J. H. Kim

(Received July 24, 2015 / Revised August 28, 2015 / Accepted November 5, 2015)

#### Abstract

A microstructure-based finite element simulation was conducted to predict the plastic strain ratio (R-value) of a dual-phase (DP) steel. The representative volume elements (RVEs) concept was adopted for the image-based FE modeling and a 3D model was constructed using sequential 2D images. Each phase was considered with the von-Mises yield criterion and the Swift model. The Swift parameters were defined by the empirical equations based on the chemical composition. The developed model was applied to analyze the effect of residual stress on the R-value and stress distribution. In order to consider the residual stress development after cold rolling, 10 % compression was applied in the thickness direction and unloaded before the tensile stress was applied in the rolling direction. The results showed a reasonable prediction for the R-value evolution: a sharp increase at small strains was well described and a transition followed in the downward direction. The R-value evolution was analyzed using the stress distribution change on the  $\pi$ -plane.

**Key Words** : R-value, Meso-scale, Representative Volume Element, Dual-phase Steel, Finite Element Simulation

#### 1. 서론

컴퓨터 기반 전산 모사 기술의 발전으로 소성 학계 전반에서 초고강도(AHSS) 판재에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 1 세대 초고강도 강철의 하나인 페라이트-마르텐사이트 이상 조직강의 (DP) 경우, 미세 조직을 고려한 성형성 해석 연구가 집중적으로 수행되었다[1].

많은 연구에서 대표 체적 모델 (representative volume element, i.e. RVE) 을 사용하여 이상 조직강의 미세 조직을 유한 요소 해석에 반영하였다[2, 3]. 초기에는 미세 조직 특성을 반영한 간단한 cell 모델이 주를 이루었으나 이미징 기술의 발전으로 광학이나

SEM 이미지를 사용한 대표 체적 모델 구성이 가능해졌다. 이를 기반으로 미세 역학적 변형에 대한 연구가 활발히 진행 되었으며, 재료의 성형성, 특히 파괴 거동의 이해도를 높이는데 기여하였다[4~6].

그러나 일반적으로 파괴 이전 단계에서 판재의 성형성은 소성변형률비(R 값, Lankford value)[7]로 평가된다. 과거 R 값이 상수로 결정 되었던 것에 비해, 현재는 R 값이 변형률에 따라 변화하는 값으로 실험에서 확인되었다[8]. 따라서 본 연구에서는 이상 조직강의 R 값 변화를 미세 조직 불균형의 관점에서 고찰하고자 한다. 이를 위해 실제 이미지를 사용하여 3차원 대표 체적 모델을 제작 하였고 유한 요소 해석을 위해 각 상의 구성 방정식을 결정하였다.

1. 포스텍, 철강대학원

2. 재료연구소, 공정실용화센터

3. 고려대학교, 신소재 공학과

# Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Pusan National University, E-mail: kimjh@pusan.ac.kr

또한 압연 과정을 거치는 판재의 특성을 반영하기 위하여 두께 (3) 방향으로 압축을 가한 이후 압연 (1) 방향 일축 인장을 수행하였으며, 이때 R 값의 변화를 응력 분포도를 사용하여 분석하였다.

## 2. 대표 체적 요소(RVE) 모델링

### 2.1 RVE 모델 형성

대표 체적 모델은 광학 현미경으로 관찰된 실제 미세 조직 이미지를 기반으로 제작되었다. 이상 조직강 이미지는 1% Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 용액에서 85초 동안 화학적으로 동판화시켜 페라이트(밝은 부분)와 마르텐사이트(어두운 부분)를 구분하였다. 이미지 분석 결과 본 연구에 사용된 이상 조직강은 대략 30% 마르텐사이트와 70% 페라이트로 구성되어 있으며, 페라이트 결정립계에 마르텐사이트 결정들이 집합적으로 분포 하고 있음을 확인 할 수 있다.

평균 0.2μm 두께 간격으로 재료를 연마 하였으며, 동일 지점에서 이미지를 촬영하였다. 이렇게 얻은 50여 장의 이미지를 AVISO 소프트웨어를 사용하여 10×10×10μm<sup>3</sup> 크기의 3차원 대표 체적 모델로 구현하였으며, 대표 체적 모델 내부에 페라이트 70% 마르텐사이트 30% 분율이 유지되도록 모델을 구성 하였다. 전 과정을 Fig. 1에 도식화 하였다.

### 2.2 물성 상수 결정

페라이트와 마르텐사이트 각각의 경화 거동에 관한 실험 수행이 어렵기 때문에 문헌 값을 참고하여 화학적 조성에 기반한 Swift 식을 사용하였다[9]. 이상 조직강의 화학적 조성을 방출분광기로 측정하였고 이 결과를 이용하여 각 상의 조성을 상 분율에 근거하여 Thermo-calc 로 계산하였다. 이를 기반으로 Swift 경화식을 아래와 같이 지정하였으며 각 상은 등방성 탄-소성 재료로 가정하였다.

$$\text{페라이트} \quad \sigma = 659(0.002 + \epsilon_p)^{0.118} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

$$\text{마르텐사이트} \quad \sigma = 2675(0.0001 + \epsilon_p)^{0.11} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

Fig. 2는 각 상의 등방 경화 거동을 나타낸 것으로 페라이트는 316MPa의 항복 응력을, 마르텐사이트는 971MPa의 항복 응력을 각각 보였다. Fig. 3은 대표 체적 모델의 일축 인장 경화 거동 해석 결과와 실험을 진응력-진변형으로 비교한 것이다.

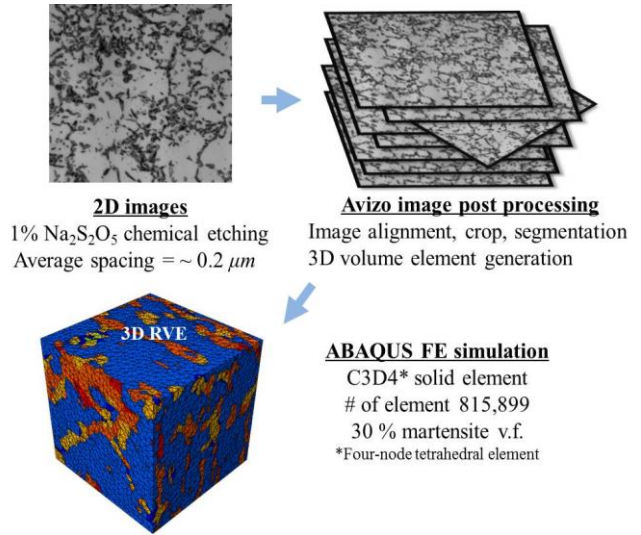


Fig. 1 RVE generation in 3D model

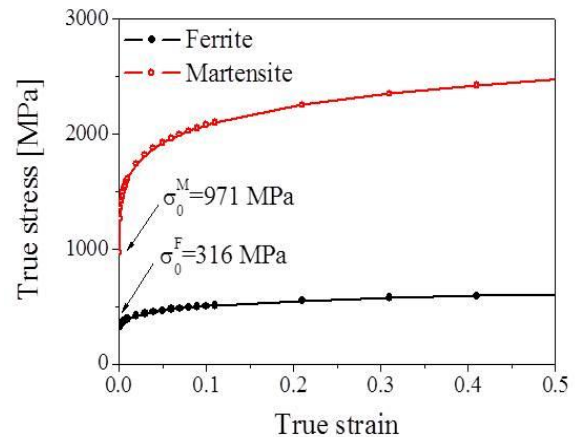


Fig. 2 Hardening curves for ferrite and martensite

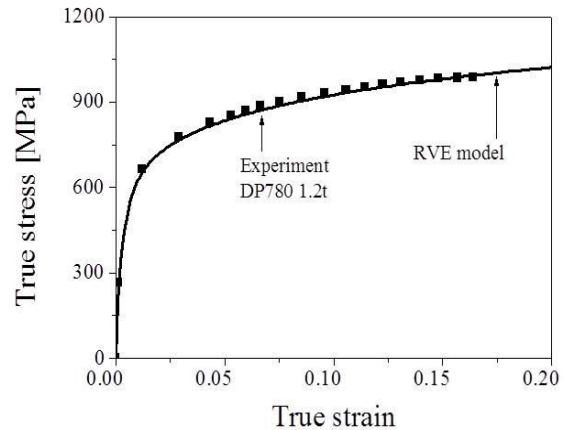


Fig. 3 Predicted monotonic stress strain curve

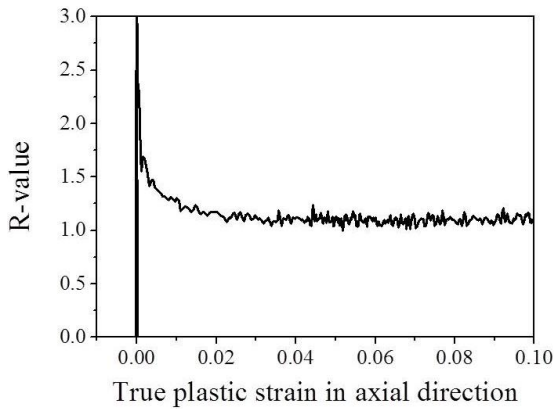


Fig. 4 R-value experiment result of DP780

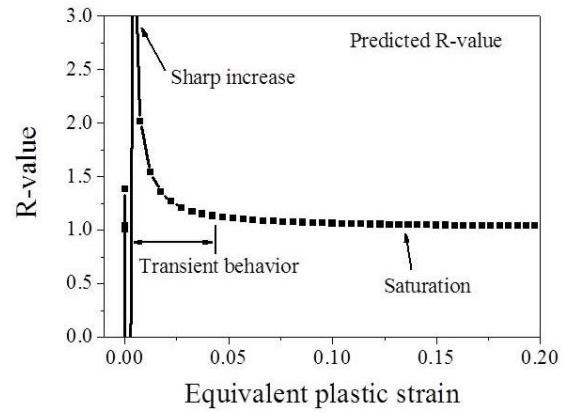


Fig. 5 Predicted R-value result using 3D RVE model

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 실험 결과

R 값은 Lankford 상수의 정의에 따라서 너비와 두께 방향 소성변형률의 순간적인 변화 비율로 수식화 하였다. Lankford 상수의 정의 ( $R = d\epsilon_w / d\epsilon_t$ )에 따라, 이상 조직강의 R 값을 일축 인장 실험을 통하여 얻었다. 실험은 압연 방향으로 수행 되었으며 Fig. 4에 결과를 정리하였다. 그러나 상수로 정의한 Lankford 결과와는 달리 실험에서는 변형률의 증가에 따라 R 값이 변화하는 양상을 보였다. 특히 변형 초기에 급격히 증가 한 후 위에서 아래로 수렴하는 과도 거동이 나타났다.

#### 3.2 유한 요소 해석

2장에서 설명 된 과정을 통하여, 3차원 대표 체적 모델을 생성하였고, 이 모델을 사용하여 R 값의 변화 추이를 예측 하였다.

일반적으로 R 값은 재료 고유의 텍스처에 영향을 받는다고 알려져 있다[10]. 그러나 복합 조직강의 경우 조직을 구성하는 상들의 상호 작용이 재료의 기계적 물성에 주요한 영향이 있다고 알려져 있다 [11]. 따라서 본 연구에서는, 텍스처 정보를 포함하지 않은 대표 체적 모델을 사용하여, 이상 조직강의 응력 불균형 관점에서 R 값의 변화를 예측 하였다.

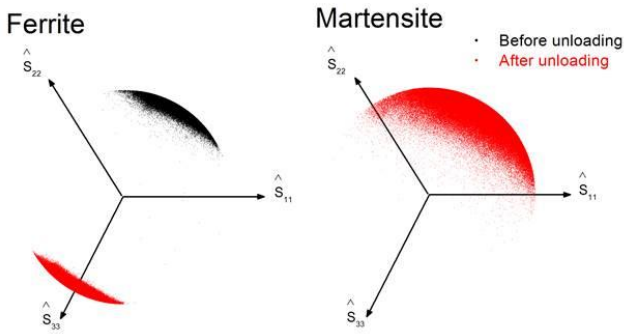
응력 불균형에 영향을 받을 수 있는 대표적인 예로 재료 내부에 존재 하는 잔류 응력을 들 수 있다. 특히, 압연 과정에서 잔류 응력이 발생 할 수 있는데 이를 표현해 주기 위하여 두께 방향으로 10% 압축을 가한 후 일축 인장 경계 조건을 적용하였다.

실제 압연은 10% 이상의 변형이 일어 나지만, 압연 이후 열처리를 통하여 많은 양의 잔류 응력이 제거 된다. 또한 평면 변형과 전단 변형의 복합적인 양상을 최대한 단순화 하면서 그 효과를 정성적으로 표현 하기 위하여 10% 압축을 고려 하였다. R 값은 일축 인장 경계 조건에서 Lankford 정의에 따라 계산되었으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

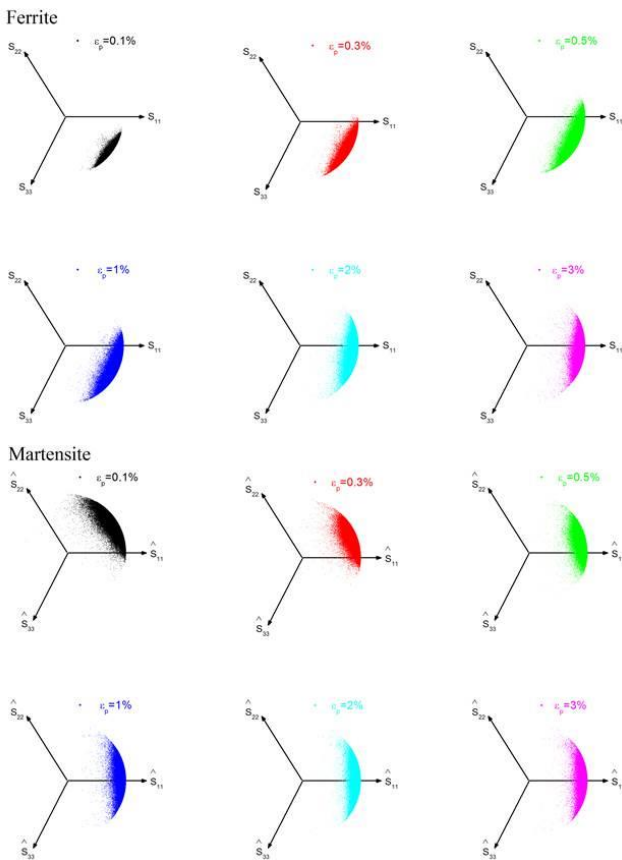
전반적인 예측 결과는 실험과 비슷한 경향을 보인다. 변형 초기에 R 값이 급격하게 증가 한 후 위에서 아래 방향으로 변하는 과도 거동을 보이고 그 뒤 특정 값에 수렴한다. 응력 불균형으로 인한 잔류 응력의 영향이 R 값의 과도 거동에 영향이 있음을 예상 할 수 있다. 과도 거동과 잔류 응력의 관계에 대해 다음 장에서 응력 분포 변화로 분석 하였다.

#### 3.3 표준 편향 응력 분포 분석

R 값의 과도 거동과 잔류 응력의 상관 관계를 분석하기 위하여 편향 응력 성분( $s_{11}$ ,  $s_{22}$ ,  $s_{33}$ )을 유효 응력으로 표준화 한( $\hat{s}_{11}$ ,  $\hat{s}_{22}$ ,  $\hat{s}_{33}$ ) 분포도를  $\pi$ -plane 상에 표현하였다. Fig. 6에서 두께 방향으로 10% 압축 직후(검은점)와 하중 제거 이후(빨간점) 응력 분포도의 차이를 표현하였다. 이것은 마르텐사이트가 페라이트 보다 큰 응력을 가지기 때문에 탄성 회복력의 차이가 발생하여 나타난 결과 라고 볼 수 있다. 상대적으로 회복량이 많은 페라이트는 인장 상태가 되고 마르텐사이트는 회복량이 충분하지 않아 여전히 압축 상태에 놓이게 된다. 이러한 상태에서 일축으로 인장 하중이 가해지면서, 인장 방향을 따라 응력이 회전 하며 진행 하게 된다. Fig. 7에서 결과를 확인



**Fig. 6** Deviatoric stress distribution change before-after unloading after 10 % compression in z-direction



**Fig. 7** Deviatoric stress distribution change with respect to equivalent plastic strain

할 수 있으며 각 인장 변형률 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2, 3%에 해당하는 응력 상태를 표현하였다.

압축 변형과 하중 제거 이후 일축 인장이 가해졌을 때, 페라이트와 마르텐사이트는 각기 다른 방향으로 응력 진행을 보인다. 페라이트는  $s_{33}$ -축의 양의 방향에서부터, 마르텐사이트는 음의 방향에서부터  $s_{11}$ -축의 양의 방향으로 응력 상태가 점차 진행

하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 페라이트의 응력 진행 방향에  $(\hat{s}_{11}, \hat{s}_{22}, \hat{s}_{33}) = (1, -1, 0)$ 의 순수 전단 조건이 존재 하는데, 이 조건에서 두께 방향의 변형률이 0에 가까워 지면서 전체 R 값이 급격히 증가하는 것으로 해석 할 수 있다. 이후 응력이 일축 인장 방향으로 진행하면서, R 값도 1에 수렴하는 경향을 보인다. 따라서 과도 거동은 R 값이 급격히 증가 이후 수렴하면서 나타나는 현상으로 이해 할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 페라이트-마르텐사이트 이상 조직강의 R 값에 대하여 미세 조직 기반 유한 요소 해석을 수행하였다. 잔류응력에 의한 R 값의 과도 거동의 영향을 알아 보기 위하여 두께 방향으로 10% 압축 변형을 가한 뒤, 일축 인장 변형을 가하였다.

(1) 압축 변형과 하중 제거 이후, 일축 인장 조건에서 R 값을 유한 요소 해석으로 예측하였다. 결과는 실험과 유사한 수준으로 표현 되었으며, R 값의 증가와 수렴, 그 사이의 과도 거동을 합리적인 수준에서 표현 할 수 있었다.

(2) R 값의 변화를 이상 조직강의 특성으로 인해 페라이트-마르텐사이트 내부에 생성 되는 잔류 응력과, 변형 경로의 변경으로 인한 각 상의 응력 진행 방향의 차이로 해석하였다.

(3) 압축 변형 이후 하중을 제거 하면, 응력 상태가 페라이트에서는 양의 방향으로 이동하고 마르텐사이트에서는 음의 방향에 남아 있는 것을 확인 할 수 있다. 이는 페라이트와 마르텐사이트 간의 응력 불균형으로 인한 것으로 이로 인해 잔류 응력이 생성 됨을 알 수 있다.

(4) 압축 변형과 하중 제거 이후 변형 경로가 일축 인장으로 바뀌면서, 이전 변형 경로에서 생성된 잔류 응력이 각 상의 응력 진행 방향에 영향을 주는 것을 확인 할 수 있다.  $\pi$ -plane 상에서 페라이트는 시계 방향, 마르텐사이트는 반 시계 방향으로 응력이 진행하고 점차  $s_{11}$ -축의 양의 방향에 집중하는 모습을 보인다. 이때, 페라이트의 응력 진행 방향 중에  $\epsilon_{thickness}=0$ 을 만드는 순수 전단 조건을 지나면서 R 값이 급격히 증가 하게 되는 요인이 된다. 이후 R 값이 1에 점차 수렴하게 되면서 R 값의 과도 거동 변화를 설명 할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업 (#10040078) 및 한국연구재단 선도연구센터(ERC) (#2012R1A5A1048294), 산업통상자원부 협동연구사업 (B551179-13-02-03), 재료연구소 주요사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

## REFERENCES

- [1] J. H. Kim, M. G. Lee, D. Kim, D. K. Matlock, R. H. Wagoner, 2010, Hole-expansion Formability of Dual-Phase Steels using Representative Volume Element Approach with Boundary-smoothing Technique, *Mater. Sci. Eng., A*, Vol. 527, No. 27, pp. 7353~7363.
- [2] S. K. Paul, 2013, Effect of Material Inhomogeneity on the Cyclic Plastic Deformation Behavior at the Microstructural Level: Micromechanics-based Modeling of Dual-phase Steel, *Modell. Simul. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 21, No. 5, pp. 55001~55026.
- [3] J. Lian, H. Yang, N. Vajragupta, S. Münstermann, W. Bleck, 2014, A Method to Quantitatively Upscale the Damage Initiation of Dual-phase Steels under Various Stress States from Microscale to Macroscale, *Comput. Mater. Sci.*, Vol. 94, pp. 245~257.
- [4] V. Uthaisangsuk, U. Prahl, W. Bleck, 2011, Modelling of Damage and Failure in Multiphase High Strength DP and TRIP Steels, *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 78, No. 3, pp. 469~486.
- [5] R. K. A. Al-Rub, M. Ettehad, A. N. Palazotto, 2015, Microstructural Modeling of Dual Phase Steel using a Higher-order Gradient Plasticity-damage Model, *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 58, pp. 178~189.
- [6] C. C. Tasan, J. P. M. Hoefnagels, M. Diehl, D. Yan, F. Roters, D. Raabe, 2014, Strain Localization and Damage in Dual Phase Steels Investigated by Coupled In-situ Deformation Experiments and Crystal Plasticity Simulations, *Int. J. Plast.*, Vol. 63, pp. 198~210.
- [7] W. T. Lankford, S. C. Snyder, J. A. Bauscher, 1950, New Criteria for Predicting the Press Performance of Deep Drawing Sheets, *Trans. ASM*. Vol. 42, pp. 1197~1205.
- [8] T. Manik, B. Holmedal, O. S. Hopperstad, 2015, Strain-path Change Induced Transients in Flow Stress, Work Hardening and R-values in Aluminum, *Int. J. Plast.*, Vol. 69, pp. 1~20.
- [9] Y. Tomota, M. Umemoto, N. Komatsubara, A. Hiramatsu, N. Nakajima, A. Moriya, T. Watanabe, S. Nanba, G. Anan, K. Kunishige, Y. Higo, M. Miyahara, 1992, Prediction of Mechanical Properties of Multi-Phase Steels Based on Stress-strain Curves, *ISIJ Int.* Vol. 32, No. 3, pp. 343~349.
- [10] L. S. toch, B. Beausir, D. Orlov, R. Lapovok, A. Haldar, 2012, Analysis of Texture and R value Variations in Asymmetric Rolling of IF Steel, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 212, No. 2, pp. 509~515.
- [11] J. Ha, J. Lee, J. H. Kim, F. Barlat, M. G. Lee, 2014, Meso-scopic Analysis of Strain Path Change Effect on the Hardening Behavior of Dual-phase Steel, *Steel Research Int.*, Vol. 85, No. 6, pp. 1047~1057.