

## 미세조직이 고려된 이상 조직강의 유한 요소 해석

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

### Micro-mechanical FE Analysis of Dual-phase Steels

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

(Received January 5, 2015 / Revised February 9, 2015 / Accepted February 11, 2015)

#### Abstract

Microstructure based FE simulations were conducted to investigate the micro-mechanical properties of ferrite-martensite dual-phase steels. The FE model was built based on real microstructure images which were characterized by optical microscopy through the thickness direction. Serial sectioned 2D images were converted into semi-2D representative volume elements (RVEs) model. Each RVE model was subjected to a non-proportional loading condition and the mechanical response was analyzed on both the macroscopic and microscopic levels. Macroscopically, stress-strain curves were described under tension-compression and tension-orthogonal tension conditions and the Bauschinger effect was well captured for both loading paths. In addition, micromechanical properties were investigated in the view of stress-strain partitioning and strain localization during monotonic tension.

**Key Words** : Meso-scale, Representative Volume Element, Dual-phase Steel, Bauschinger Effect, Cross-hardening, Finite Element Simulation

### 1. 서 론

자동차 산업에서 고강도 판재에 대한 수요도가 높아짐에 따라 고강도 강역의 기계적 물성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 페라이트-마르텐사이트 이상 조직강의 경우, 강도 대비 우수한 연신율로 다양한 분야에 활용도가 높아 산업 현장에서도 많은 관심을 받고 있다. 그러나 복합 조직강의 특성상, 기존의 단상 연성 강과는 매우 다른 경화 거동을 보이는데 대표적인 예로 바우싱거 효과를 들 수 있다[1, 2]

높은 강도를 가지는 고강도 강역의 특성상, 성형 이후 탄성 회복의 영향이 크기 때문에 이를 저감할

수 있는 연구가 활발히 진행되고 있다[3~5]. 기초적인 연구로 재료의 미세 구조적 특징을 파악하고 비등방 경화 거동의 영향에 대한 이해가 필수적으로 요구된다[6~9].

본 연구에서는 이상 조직강을 구성하는 페라이트-마르텐사이트 간의 강도 불균형으로 인한 기계적 물성 특징을 거시적인 관점과 미시적인 관점에서 알아보고자 한다. 이를 위해 실제 관찰된 미세조직을 사용하여 대표 체적 (RVE) 유한 요소 모델을 형성하고 적절한 구성 방정식을 결정하였다. 미세조직이 고려된 대표 체적 모델로부터 일축 인장 조건 하에서 재료의 기계적 거동을 예측하였으며, 미시적 응력-연신을 분포 분리와 응력 집중화 관점에서

1. 포스텍, 철강대학원

2. 재료연구소, 공정실용화센터

3. 부산대학교, 기계공학부

# Corresponding Author: Department of Materials Science and Engineering, Korea University, E-mail: myounglee@korea.ac.kr

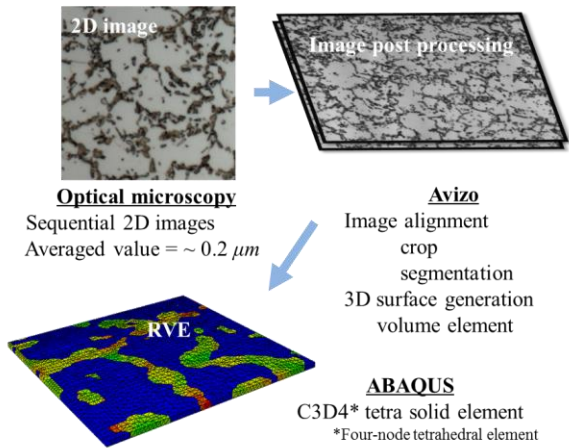


Fig. 1 RVE development process from 2D images to semi 2D model

이를 분석 하였다. 또한 비-선형 하중 조건 하에서 이상 조직강의 비-선형 응력-변형을 거동을 분석하고자 한다.

## 2. 대표 체적 요소(RVE) 모델링

### 2.1 RVE 모델 형성

유한 요소 해석에 사용된 모델은 광학 현미경으로 관찰한 미세조직에 기반하여 형성 되었다. 동일 위치에서 적층적으로 측정된 2차원 이미지를 사용하여 준 2차원 대표체적요소 모델을 형성 하였다.

1% Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 용액에서 85초 동안 화학적 동판화로 페라이트(밝은 부분)와 마르텐사이트(어두운 부분) 상을 구분 할 수 있도록 하였다. 표면분을 분석 결과 마르텐사이트가 약 30% 정도 차지하는 것으로 확인 되었다. 광학 현미경으로 얻은 이미지를 AVISO 이미징 분석 소프트웨어를 사용하여 3차원 모델을 생성하였으며 ABAQUS로 유한요소 해석을 수행 하였다. 도식화된 과정을 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.2 물성 변수 결정

단상의 페라이트와 마르텐사이트의 경화 거동 방정식을 얻기 위하여 화학적 조성에 기반한 실증적인 방법을 채택하였다[9]. 복합 조직강의 전체 조성을 OES 로 측정하여, 각 상의 화학적 조성을 Thermo-calc로 계산하여 Table 1에 나타내었다. 이 결과에 기반하여 Swift 경화식으로 계산한 응력-변형을 곡선을 유한 요소 해석에 사용 하였다. 각 상은 등방성 탄-

Table 1 Chemical composition of constituent phases

Phase	Chemical composition in mass %			
	C	Si	P	Mn
Ferrite	-	1.10	0.013	1.55
Martensite	0.335	-	-	-

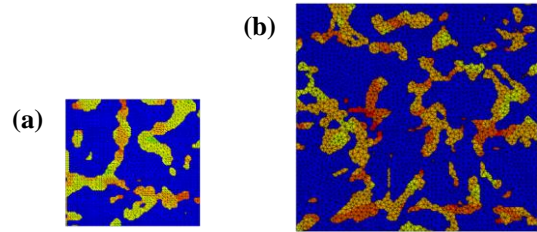


Fig. 2 Semi-2D model: (a) Model 1 is 10x10x0.1 and (b) model 2 is 20x20x0.1 μm

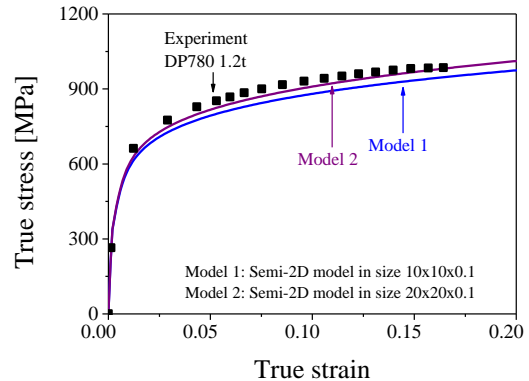


Fig. 3 Stress-strain curves of Semi-2D model 1 and 2 for monotonic tension

소성 재료로 가정하였다.

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

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

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 유한 요소 해석

앞에서 설명 된 과정을 통하여, 크기가 다른 준 2차원 대표체적 모델을 형성하였다. 각 모델의 크기는 10x10x0.1 μm(model 1, Fig. 2 (a))와 20x20x0.1 μm(model 2, Fig. 2 (b)) 로 전체 마르텐사이트 분율이 30% 로 유지 될 수 있도록 조건을 잡아 주었다.

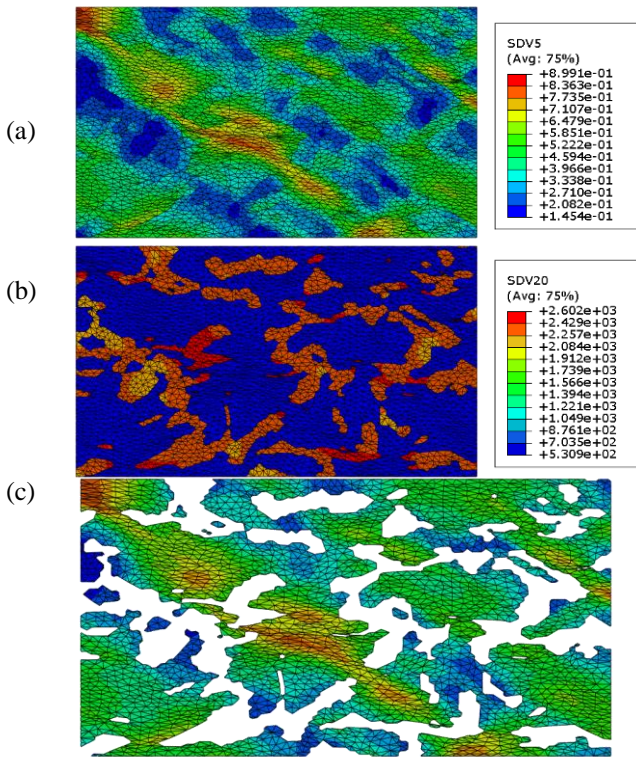


Fig. 4 Stress-strain distribution in model 2: (a) equivalent plastic strain, (b) equivalent stress and (c) equivalent plastic strain in the ferrite phase only

각 대표체적 모델의 일축 인장 해석 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 실제 실험값에 대비하여 두 모델 모두 비교적 좋은 예측 결과를 보여 주었다. 그러나 크기가 작은 model 1이 model 2에 비해 미세조직의 기하학적 분포의 영향을 더욱 크게 받는 것으로 보인다. 본 결과에는 포함 되어 있지 않으나, 관심영역을 결정하는 위치에 따라 응력-변형 곡선이 실험값 보다 낮게 혹은 높게 예측되기도 하였다. 따라서 model 2가 model 1에 비해 대표체적 모델로써 대표성을 갖는 것으로 보고 model 2에 대한 비교 분석을 수행 하였다.

Fig. 4에서 나타낸 바와 같이, 각 상의 강도 차이에 의한 변형 양상의 차이를 확인 할 수 있었다. 연성이 우수한 페라이트 상에서 대부분 소성변형이 관찰되었고(Fig. 4(a)) 전반적인 재료의 강도는 마르텐사이트 상에서 구현됨을(Fig. 4(b)) 알 수 있다. 소성변형이 페라이트 상에서 대부분 집중 되었기 때문에, 변형의 국부적 집중 (strain localization) 이 강

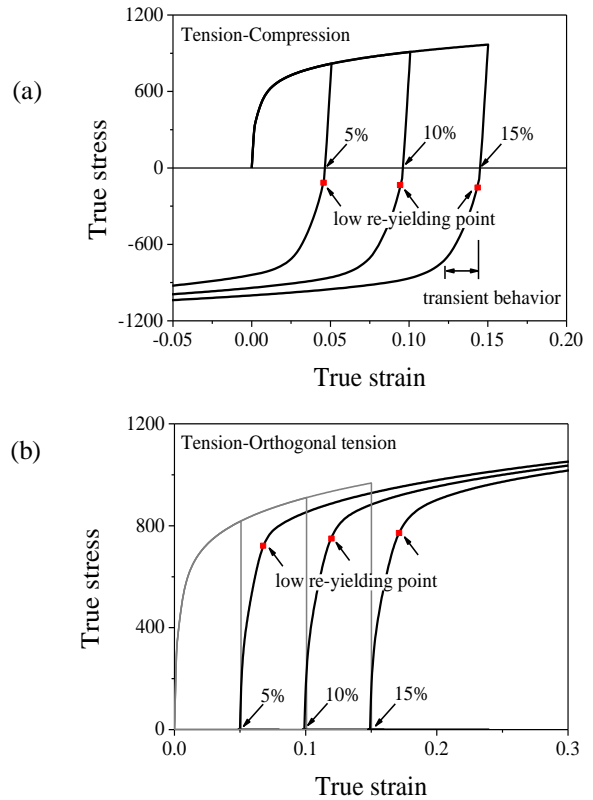


Fig. 5 Stress-strain curves of (a) Tension-compression and (b) Tension-orthogonal tension using semi-2D model 2

하게 나타나는 부분을 관찰할 수 있다. 좀 더 명확한 분석을 위하여 마르텐사이트 상을 제외하고 페라이트 상만을 Fig. 4(c)에 나타내었다. 붉은 색으로 나타나는 부분들이 변형율이 집중된 영역으로 이후 잠재적인 파괴 지점으로 연결될 것으로 예상 된다. 이러한 변형을 집중 지역은 전단 밴드(shear band)의 방향을 따라 집중적으로 분포하거나, 혹은 마르텐사이트의 사이가 가까워 페라이트에서의 소성변형이 높은 곳 등에 위치하여 미세조직의 기하학적 구조에 영향을 받음을 알 수 있다.

### 3.2 비-선형 하중 조건에서 응력-변형을 특성

본 연구에서는 일축인장 조건뿐 만 아니라 비-선형 인장 조건에 대한 유한 요소 해석도 수행 하였다. 비-선형 하중 조건으로 인장-압축과 인장-직교인장 조건을 고려하였다. 두 조건 모두, 실험 상에서 단상 연성 강과는 다른 기계적 특성을 보임을 이전

연구자료를 통하여 확인할 수 있다[6].

인장-압축 조건에서 이상 조직 강은, 낮은 항복점을 보이는 바우싱거 효과와 과도 경화 거동이 명확하게 나타나는 것으로 알려져 있다[3]. 본 연구에서 수행한 유한 요소 해석에서도 바우싱거 효과와 과도 경화 거동을 표현 할 수 있었으며 이는 응력-변형률 곡선(Fig. 5 (a))을 통해 확인 가능 하다.

한편, 인장-직교인장 조건에서는 바우싱거 효과와 유사하게, 변형 경로가 바뀐 후 낮은 항복점에 이어 빠른 경화 속도로 일축 인장의 강도 수준에 도달하는 것으로 확인되며, 이러한 특징이 유한요소 해석 결과에서도 잘 표현 되었다. 그러나 같은 변형조건에서 단상 연성 강은 교차하중 조건에서와 비슷하게 잠재 경화(latent hardening) 거동의 특징이 나타난다[6]. 이러한 차이는 주로 페라이트-마르텐사이트의 강도 차이에 의한 것으로 설명이 된다. 본 유한요소 모델링에서 이러한 요인을 잘 구현하였기 때문에 해석 결과에서 실제 실험의 경향성을 표현 할 수 있다고 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 페라이트-마르텐사이트 이상 조직강에 대하여 미세 조직 기반 유한 요소 해석을 수행 하였다. 이상 조직강의 페라이트-마르텐사이트 강도 불균형의 영향을 알아보기 위하여 일축 인장 조건과 비-선형 하중 조건을 고려하였다.

(1) 일축 인장 조건에서 유한요소 해석 결과가 실험과 유사한 수준으로 표현 되었다. 대표 체적 모델의 선정에 있어, 모델 크기에 따라 미세조직의 기하학적 분포 영향을 많이 받음을 알 수 있었다.

(2) 변형 시, 페라이트와 마르텐사이트의 소성 변형 및 강도에 대한 역할 차이를 연신율과 응력 분포 분리를 통하여 확인 하였다.

(3) 페라이트 상에서 변형 집중 및 국부화 현상이 두드러지게 나타난다. 주로 전단 밴드를 따라 위치하며 부분적으로 마르텐사이트의 기하학적 분포에 따라서 형성되기도 한다. 이러한 지역에서 파괴 발생 가능성이 높기 때문에 이상 조직강의 파괴 거동은 미세조직의 기하학적 분포와 관련이 있다.

(4) 비-선형 하중 조건으로 인장-압축과 인장-직교인장 경계 조건을 적용하여 유한요소 해석을 수행 하였다. 두 조건 모두 실험에서 관찰 할 수 있는 바

우싱거 효과와 과도 경화 거동 현상을[6] 성공적으로 표현 하였다. 이것은 유한요소 모델링 과정에서 페라이트-마르텐사이트의 강도 차이를 반영할 수 있었기 때문으로 보인다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업(#10040078) 및 한국연구재단 선도연구센터(ERC)(#2012R1A5A1048294), 산업통상자원부 협동연구사업(B551179-13-02-03), 2014학년도 부산대학교 신입교수연구 정착금의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

#### REFERENCES

- [1] J. Bauschinger, 1881, Ueber die Veränderung der Elasticitätsgrenze und dea Elasticitätsmoduls Verschiedener Metalle, Zivilingenieur, Vol. 27, pp. 289~348.
- [2] J. W. Lee, M. G. Lee, F. Barlat, 2012, Finite Element Modeling of HAH and its Application to Springback Prediction, Int. J. Plast., Vol. 28, pp. 13~41.
- [3] K. Piao, J. K. Lee, J. H. Kim, K. Chung, F. Barlat, R. H. Wagoner, 2012, A sheet tension/compression test for elevated temperature, Int. J. Plast., Vol. 38, pp. 27~46.
- [4] J. H. Lee, D. W. Kim, S. M. Son, M.Y. Lee, Y. H. Moon, 2007, Analysis of Springback of Sheet Metal (II): Experimental Validation of Analytical Model, Trans. Mater. Process., Vol. 16, No. 7, pp. 516~520.
- [5] 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 Res. Int., Vol. 85, No. 6, pp. 1047~1057.
- [6] J. Ha, M. G. Lee, F. Barlat, 2013, Strain Hardening Response and Modeling for EDDQ and DP780 Steel Sheet under Non-linear Strain Path, Mech. Mater., Vol. 64, pp. 11~26.
- [7] Y. S. Lee, J. U. Lim, Y. H. Moon, 2012, Mechanical Characteristics of Low-carbon-steel Pipe Bent by Local Induction Heating with Small Bending Radii, Mater. Trans., Vol. 53, No. 5, pp. 847~852.
- [8] V. Uthaisangasuk, U. Prahl, W. Bleck, 2011, Modelling

- of Damage and Failure in Multiphase High Strength DP and TRIP Steels, Eng. Fract. Mech., Vol. 78, pp. 469~486.
- [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.