



## 공 학 석 사 학 위 논 문

# TWIP 강의 바우싱거 효과와 변형경화 효과에 미치는 전변형의 영향

Effect of pre-strain on Bauschinger effect and strain hardening effect of TWIP steel

울 산 대 학 교 대 학 원

첨 단 소 재 공 학 과

한 종 민

# TWIP 강의 바우싱거 효과와 변형경화 효과에 미치는 전변형의 영향

지도교수 신 상 용

## 이 논문을 공학석사 학위 논문으로 제출함

2017년 11월

울 산 대 학 교 대 학 원

첨 단 소 재 공 학 과

한 종 민

한종민의 공학석사학위 논문을 인준함

권 용 재 이 정 군 신 상 용

심사위원 심사위원 심사위원

•

## 울산대학교 대학원

## 2017년 11월

### Abstract

자동차 경량화와 성형성을 만족시키기 위한 기존 철강 제품을 경량합금, Dual phase 강, TWIP(TWinning-Induced Plasticity) 및 TRIP(TRansformation-Induced Plasticity) 강들로 대체하고 있다. 이 중 TWIP 강은 높은 인장 강도와 큰 연성의 우수한 조합으로 인해서 최근 많은 분야에서 광범위하게 연구되고 있다. TWIP 강판을 제작할 때 코일형태로 제작과 평탄화 공정으로 인해 바우싱거(Bauschinger) 효과가 발생하게 된다.

바우싱거 효과는 기존의 강재가 가지고 있는 항복강도보다 낮은 항복점에서 소성변형이 일어나는 현상이다. TWIP 강을 제품으로 성형할 시 스프링백(Spring back)을 예측하여 금형을 수정하여 제품을 생산한다.

스프링백 현상은 재료에 변형을 가했을 때 다시 원래의 방향으로 탄성변형영역만큼 돌아가는 현상이다. 또한 스프링백 현상은 후방응력(Back stress)과 관련 있으며, 이러한 후방응력은 Forward 변형 시 유동응력에 저항하지만 reverse 변형시 소성변형에 도움이 되며 바우싱거 효과로 인한 응력차이에 영향을 미친다. 바우싱거 효과로 인해 낮은 항복점에서 소성변형이 일어나면 스프링백의 양이 변화되어 정밀한 수치예측이 어려워 불량품이 만들어진다. 그래서 스프링백을 정확히 이해하기 위해서는 바우싱거 효과까지 같이 고려를 해야 한다.

TWIP 강은 소성변형 시 파단까지 쌍정이 연속으로 생성된다. 쌍정은 전위의 이동을 방해하는 역할을 하기 때문에 바우싱거 효과를 고려할 때 전위밀도와 함께 쌍정도 같이 고려해야 한다.

본 연구에서는 인장-압축-인장 시험을 통하여 다양한 전변형(인장-압축, 압축-인장, 인장-압축-인장)에 관한 바우싱거 효과와 변형경화 효과를 분석하고자 하였다. 3 가지의 바우싱거 인자(Bauschinger parameter)를 사용하여 바우싱거 효과와 변형경화 효과를 정량화했다. 또한 EBSD (Electron backscatter diffraction)분석을 통해 전위의 이동과 쌍정의 형성을 관찰하였다.

연구의 결과에서 EBSD 분석을 통해 쌍정은 전위의 이동을 방해하는 역할을 하였다. 또한 초기 쌍정의 형성은 바우싱거 효과의 증가에 도움을 주는 것을 3 가지 Bauschinger parameter 를 통해 알 수 있었다. 하지만 변형이 많이 진행되었을 때 쌍정과 전위밀도 모두 많이 증가하였다. 이 때 전위들 간에 서로 엉키는 현상으로 인해 바우싱거 효과는 감소하고 변형경화 효과가 증가하였다. 쌍정은 이러한 전위의 이동을 방해하는 역할로써 변형경화 효과의 증가에 영향을 미쳤다.

## 목차

| 제 | 1 장 서론                    | 13 |
|---|---------------------------|----|
|   | 1.1 연구배경                  | 13 |
|   | 1.2 연구목적                  | 19 |
|   | 1.3 연구내용                  | 22 |
| 제 | 2 장 이론적 배경                | 23 |
|   | 2.1 TWIP강                 | 23 |
|   | 2.2 전변형                   | 30 |
|   | 2.3 Bauschinger 효과        | 32 |
| 제 | 3 장 실험 및 측정 방법            | 36 |
|   | 3.1 강재 설명 (조성, 제조공정)      | 36 |
|   | 3.2 시편 준비                 | 37 |
|   | 3.3 인장-압축 시험 방법           | 38 |
|   | 3.4 미세조직관찰                | 40 |
|   | 3.5 항복응력                  | 40 |
|   | 3.6 Bauschinger Parameter | 42 |
| 제 | 4 장 결과                    | 44 |
|   | 4.1 인장 그래프 설명             | 44 |
|   | 4.2 미세조직 설명               | 53 |
|   | 4.3 Bauschinger Parameter | 62 |

| 제 ! | 5 장 고찰  | 66       |
|-----|---|----------|
|     | 5.1 인장 전변형에서 쌍정과 전위가 바우싱거 효과와 변형<br>효과에 미치는 영향    | 경화<br>66 |
|     | 5.2 압축 전변형에서 쌍정과 전위가 바우싱거 효과와 변형<br>효과에 미치는 영향    | 경화<br>72 |
|     | 5.3 인장-압축 전변형에서 쌍정과 전위가 바우싱거 효과와<br>경화 효과에 미치는 영향 | 변형<br>74 |
| 제 ( | 5 장 결론  | 80       |

| Figure 1. 연비 규제와 환경 규제15  |
|---|
| Figure 2. 자동차 산업에서의 고강도 강들의 인장강도와 연신율15                             |
| Figure 3. 스프링백 현상에 대한 예16   |
| Figure 4. 포스코 연연속 압연기술16  |
| Figure 5. Piping 과 평탄화 공정시 인장과 압축의 모식도17                            |
| Figure 6. 항복강도에 따른 스프링백 차이18  |
| Figure 7. 인장-압축일 때 바우싱거 효과에 따른 그래프의 변화18                            |
| Figure 8. TWIP 강의 설계 개념26   |
| Figure 9. 합금원소의 따른 SFE의 변화27  |
| Figure 10 망간과 탄소 함량에 따른 SFE의 변화28                                   |
| Figure 11. 인장 방향에 따른 Schmid factor 에 따른 쌍정의 생성에 대한 방                |
| 향 선호도   |
| Figure 12. 바우싱거 효과를 일이키는 변형장애물의 이방성                                 |
| Figure 13. ASTM E606 참고하여 만든 시험시편                                   |
| Figure 14. 인장-압축-인장 시험 개략도  |
| Figure 15. ASTM E8m-09 의 0.5% 변형률에서 응력을 구하는 방법41                    |
| Figure 16. 일반적인 이중 사이클의 테스트 곡선43                                    |
| Figure 17. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T2C0T0 의 그래프.45 |
| Figure 18. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T4C0T0 의 그래프.45 |

Figure 19. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T10C0T0 의 그래프. Figure 20. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T2C2T0 의 그래프. 47 Figure 21. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T4C2T0 의 그래프.47 Figure 22. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T0C2T4 의 그래프. 48 Figure 23. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T0C4T4 의 그래프. 48 Figure 24. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T2C2T4 의 그래프. 49 Figure 25. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T2C4T4 의 그래프. 49 Figure 26. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T4C2T4 의 그래프. 50 Figure 27. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T4C4T4 의 그래프. 50 Figure 28. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T10C2T4 의 그래프. Figure 29. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T10C4T4 의 그래프.

Figure 32. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel의 인장 전변형 4%일 때

- Figure 37. 인장 전변형에서의 Reduction in yield stress 를 fitting 한 그래프.

- Figure 40. 압축 전변형에서의 Reduction in yield stress 를 fitting 한 그래프.
- Figure 41. 압축 전변형에서의 Bauschinger stress parameter 를 fitting 한 그
  - 래프......64

| Figure 43 인장 전변형 - 압축 전변형에서의 Bauschinger stress parameter  |
|--|
| 를 fitting 한 그래프65  |
| Figure 44. 결정립 크기에 따라 바우싱거 효과의 크기 차이   |
| Figure 45. 베이나이트 강에서의 Reduction in yield stress, Bauschinger stress<br>parameter 와 Bauschinger hardening parameter를 fitting 한 그래프.<br> |
| Figure 46. TEM을 통해 쌍정의 두께가 증가한 부위를 찍어 전위와 쌍정의 형<br>성된 곳을 관찰71  |
| Figure 47. 순서에 따라 초기조직, 인장 5%, 압축 5%, 인장5%에 따른 TWIP<br>강의 방위의 선호도73  |
| Figure 48. 인장 전변형 – 압축 전변형 – 인장에서 Bauschinger stress<br>parameter의 값에서 기울기를 표시한 그래프  |
| Figure 49. 베이나이트 강의 2차 Bauschinger stress parameter 값을 fitting<br>한 그래프  |
| Figure 50. 베이나이트 강의 미세조직 사진  |

| Table 1 TWIP강 조성 (wt%)   |
|--|
| Table 2 Bauschinger parameter에서 바우싱거 효과와 변형경화 효과가 미치           는 영향                |
| Table 3. 인장 전변형의 1차 바우싱거 효과와 변형경화 효과52   |
| Table 4. 압축 전변형의 1차 바우싱거 효과와 변형경화 효과52   |
| Table 5. 인장-압축 전변형의 2차 바우싱거 효과와 변형경화 효과52  |
| Table 6. 베이나이트강에서 쌍정이 생성되었을 때 바우싱거 효과의 변화 예<br>상표                                  |
| Table 7. 각각의 전변형 (T2%, T4%, T10%)에서 압축전변형 2%와 4%의 기울<br>기 값                        |
| Table 8. 연구된 TWIP강과 Figure 49의 베이나이트 강으로 인장 전변형 2% 와 4%를 압축 전변형2% 와 4%의 기울기를 계산한 표 |

### 제 1 장 서론

1.1 연구배경

최근 자동차 산업에서는 환경 오염 문제와 관련된 온실가스 배출량 규제, 연비 규제로 인한 연비 향상 등으로 자동차 경량화, 대체연료 개발, 주행저항 저감, 엔진 구동부품 효율 향상 등의 다양한 기술들이 활발히 개발되고 있다. (Figure 1.) 또한 차량 충돌에 대한 효율적인 에너지 흡수 구조를 설계함과 동시에 승객들의 안정성이 저하되지 않는 경량 금속 재료의 개발에 상당한 노력을 기울였다. 그 중 철강분야에서는 차량의 무게를 감량하여 연비향상을 목적으로 자동차용 고강도 강판을 활발히 연구하였다. Figure 2. 를 보면 기존에 개발된 1세대 자동차용 강판들의 경우에는 강도가 증가함에 따라 연신율이 감소하는 강판들이 주로 개발되었다.[1-3]

개발된 고강도 강판 중 쌍정유기소성 (Twinning induced plasticity, TWIP)강은 다른 강에 비해서 우수한 기계적 성질 (인장강도 800MPa 이상, 균일 연신율 60% 이상)을 갖는 자동차 강판이다. TWIP 강은 상온에서 오스테나이트 단상의 조직을 가지며, 소성 변형 중에 기계적 쌍정(Mechanical twin)이 발생하여 결정립 미세화 효과로 인한 동적 홀-패치 효과를 나타낸다. 쌍정은 파단까지 계속 생성되어 전위들의 장애물의 역할을 함으로써 높은 인장강도와 연신율을 가지게 된다.[4,5] 하지만 TWIP 강판을 제작할 때 Figure 4. 과 같이 코일형태로 감는 공정을 통해 옮기고 다시 평탄화 공정을 통해 강판을 제작 한다. 이 때 Figure 5. 를 보면 코일형태로 만들 때 강판의 외부에는 인장과 강판의 내부에는 압축이 일어난다. 다시 평탄화 공정을 하여 강판을 평탄하게 만들 때 강판의 외부에는 압축 내부에는 인장이 일어난다. 이로 인하여 바우싱거 효과가 일어난다.[7] 바우싱거 효과는 재료가 가지고 있는 항복강도보다 낮은 항복점에서 소성변형이 일어나는 현상이다. (Figure 7.) TWIP 강을 자동차용 강판으로 성형시에 스프링백 현상이 발생한다. (Figure 3.) 스프링백을 제어하기 위하여 유한요소해석을 통하여 금형을 개발한다. 하지만 바우싱거 효과로 인하여 항복점이 낮아지면 Figure 6. 에서 보듯이 스프링백의 양이 변화하여 제품을 성형할 때 정밀한 수치 예측의 한계가 보인다. 많은 연구자들이 바우싱거 효과를 분석을 하였는데 바우싱거 효과는 전위밀도와 관련이 있다고 하였다.[8-16] 전위밀도에 따라 바우싱거 효과가 증가하거나 감소하는 현상을 연구하였다. 또한 TWIP 강의 바우싱거 효과에 대한 연구는 수식적 해석을 통한 연구가 많이 진행되었다.[17-21]



Figure 1. 연비 규제와 환경 규제. [71]



Figure 2. 자동차 산업에서의 고강도 강들의 인장강도와 연신율. [3]

# Eliminating 'springback' to help make environmentally friendly cars



What is Springback? Credit: Hiroshima University

Figure 3. 스프링백 현상에 대한 예. [72]



Figure 4. 포스코 연연속 압연기술. [73]



Figure 5. Piping 과 평탄화 공정시 인장과 압축의 모식도 [7]



Figure 6. 항복강도에 따른 스프링백 차이. [74]



Figure 7. 인장-압축일 때 바우싱거 효과에 따른 그래프의 변화. [17]

### 1.2 연구목적

선행 연구에서 TWIP 강에 대한 바우싱거 효과는 수식적인 해석에 관한 연구가 많이 진행되었다.[17-21]

스프링백을 정확하게 제어하기 위해서는 바우싱거 효과를 정확하게 이해해야 한다. 바우싱거 효과를 정확히 이해하기 위해서 Forward 와 reverse 응력의 크기를 예측할 때 더 나은 정확도를 보이는 Isotropic-kinematic 경화 법칙으로 분석한다. Kinematic 경화는 항복 강도의 이방성을 반영하는 후방응력에 의한 등방성 경화가 추가된다. 즉 후방응력이 증가할수록 바우싱거 효과가 증가한다. 후방응력은 Three-point bending tests, shear tests, tension-compression tests 와 같은 시험으로 결정된다.[10,22-25]

이 논문에서는 바우싱거 효과에 대한 식을 다음과 같이 나타낸다.[39-42]

$$\tau = \tau_0 + \tau_f + \tau_b \qquad (1)$$

$$\tau_{rev} = \tau_0 + \tau_f - \tau_b$$
 식(2)

$$\tau_{\rm b} = (\tau - \tau_{\rm rev})/2$$
 식(3)

이 식에서  $\tau_0$ : Initial yield stress  $\tau_f$ : Forest hardening  $\tau_b$ : Back stress 이다.

τ 는 Forward 변형 동안의 유동응력 식이며 τ<sub>rev</sub> 는 reverse 변형 동안의
 유동응력 식이다. 두개의 식을 조합하면 후방응력에 관한 식이 나온다.

이 논문에서는 금속 판재의 이방성 항복응력을 설명하기 위해, Barlat 등에 의해 제안된 Yld2000-2d 항복응력함수를 사용했다.[43]

$$f^{\frac{1}{M}} = \left\{\frac{\Phi}{2}\right\}^{\frac{1}{M}} = \overline{\sigma}$$
 
$$- \underline{A}(4)$$

 $\overline{\sigma}$  : effective stress, M : exponent associated with crystal structure

$$\Phi = \left| \tilde{S}_{I'} - \tilde{S}_{II} \right|^{M} + \left| 2 \tilde{S}_{II}'' + \tilde{S}_{I}'' \right|^{M} + \left| 2 \tilde{S}_{I}'' + \tilde{S}_{II}'' \right|^{M}$$
 (5)

 $\tilde{S}'_k$  와  $\tilde{S}''_k$  (k = I, II) Principal values of the modified deviatoric stress tensor  $\tilde{s}$  ( $\tilde{s}'$  or  $\tilde{s}''$ ).

$$\tilde{\mathbf{s}}' = \mathbf{C}' \cdot \mathbf{s} = \mathbf{C}' \cdot \mathbf{T} \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{L}' \cdot \boldsymbol{\sigma}$$
  
 $\tilde{\mathbf{s}}'' = \mathbf{C}'' \cdot \mathbf{s} = \mathbf{C}'' \cdot \mathbf{T} \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{L}'' \cdot \boldsymbol{\sigma}$   $\underline{A}_{(6)}$ 

C` 와 C``(L` 와 L``) : anisotropic coefficients

그런데, 이러한 논문들에서는 TWIP 강의 변형에 대한 기계적 물성에 초점을 두고 있기 때문에 조직학적인 관점에서의 연구는 부족하다. TWIP 강은 소성변형 동안 전위의 형성 뿐만 아니라 쌍정도 함께 형성된다. 이러한 변형 쌍정의 형성으로 인해 유효 결정립 크기 (effective grain size)를 감소시켜 전위의 이동을 억제하는 장애물 역할을 한다. 또한 쌍정은 오스테나이트 결정립 내에 새로운 슬립계(Slip system)로 작용하여 이동하지 못하던 전위를 더욱 잘 움직이도록 하는 역할을 한다. 이로 인해 전위들이 쌍정에 집적되거나 쌍정으로 인해 전위들이 움직이면서 바우싱거 효과와 변형경화 효과에 영향을 미치므로 조직학적인 관점으로 연구를 하는 것은 중요한 일이다.

### 1.3 연구내용

본 연구에서는 Fe-0.45C-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu (wt.%) 조성을 갖는 TWIP 강으로 인장-압축 시험을 실시하였다. 다양한 전변형을 사용하여 바우싱거 효과와 변형경화 효과를 분석하였다.(1)인장-압축 (2)압축-인장, (3)인장-압축-인장 순으로 시험하였다. 이 후 그 결과로부터 바우싱거 효과와 변형경화 효과를 수치화하고 경향성을 조사하였다. 인장 시험을 마친 시편을 EBSD 분석을 사용하여 쌍정과 전위를 관찰했다. 그리고 쌍정과 전위가 바우싱거 효과와 변형경화 효과에 미치는 영향에 대한 상관관계를 규명하고자 하였다.

### 제 2 장 이론적 배경

#### 2.1 TWIP강

TWIP(Twinning Induced Plasticity) 강은 상온에서 오스테나이트 단상의 조직을 가지며, 소성변형 시 결정립 내에 변형쌍정(Mechanical twin)이 생성되어 응력집중을 완화하여서 높은 강도와 연신율을 가지는 우수한 기계적 특성을 가지는 강이다.[4,5] Mn의 함유량이 높고 Mn은 오스테나이트 안정화 원소로서 오스테나이트 단상을 가지게 한다. TWIP강의 합금 설계 시 기본적으로 세 가지 열역학적 요인을 만족시켜야 한다.(Figure 8.) 첫 번째 열간 압연 후 상온에서 오스테나이트 단상을 유지해야 하며, 두 번째 소성변형 중에 마 르텐사이트가 생성되지 않아야 하며, 세 번째 변형 중에 소성 변형 쌍정인 기계적 쌍정 이 생성 되어야 함.[2] 또한 TWIP강은 적층 결함 에너지(Stacking fault energy, SFE)와 연 관이 있다. SFE란 재료 내부의 적층 순서에 생긴 결함(Stacking fault)이 회복되고자 하는 계면 에너지이다. 보통 SFE가 20mJ·m<sup>-2</sup> 이하인 경우 소성변형 중 α'+ε 마르텐사이트 변 태가 쉽게 일어난다고 하며, SFE가 SFE 20~55 mJ·m<sup>-2</sup> 사이인 경우 변형 중 상변태가 일어 나지 않고 기계적 쌍정(Mechanical twin)이 잘 생성 되며, SFE 55 mJ·m<sup>-2</sup> 이상인 경우 완 전 전위에 의해 가공경화가 진행된다고 알려져 있다.[44-46,50]

TWIP강에서 3가지의 SFE 계산하는 방법이 있다.[47-49]

[1]. 열역학 데이터를 토대로 수식을 사용하여 계산하는 방법이 있다. 아래의 식을 이 용하여 SFE 값을 계산한다.

식(9)  $\Gamma = 2\rho\Delta G^{\gamma \to \epsilon} + 2\sigma^{\gamma/\epsilon}$ 

Γ : Stacking faults energy , ρ : the molar surface density of atoms in the {1 1 1} planes,  $\Delta G^{\gamma \to \epsilon}$ : the free molar enthalpy of the transformation $\gamma \to \epsilon$ ,  $\sigma^{\gamma/\epsilon}$ : the energy per surface unit of a {1 1 1} interface between  $\gamma$  and  $\epsilon$ . 식(1)을 사용하여 SFE를 조절함으로써 변형중 마르텐사이트 변태가 일어나지 않고 오스테나이트 단상을 유지하면서 쌍정이 형성된다. Figure 9.은 합금원소에 첨가량에 따라 SFE가 조절되는 그림이다. [75] 다양한 합금원소를 추가하여 SFE를 조절한다. Figure 10.은 Fe-Mn-C 에서 Mn과 C에 함량에 따라 SFE가 변화하는 그림이다.[76] [2]. X-ray diffraction : X-선 회절을 측정하여 Schramn and Reed의 방정식으로 SFE를 계산할 수 있다.[0]

$$\gamma = \frac{K_{111}\omega_0 G_{(111)} a_0 A^{-0.37}}{\pi\sqrt{3}} < \epsilon_{50}^2 >_{111}{\alpha}$$

$$\overset{(10)}{=}$$

 $K_{111}\omega_0 = 6.6$  proportionality constant,  $G_{(111)} =$  shear modulus in the (111) fault plane : 1/3( $c_{44} + c_{11} - c_{11}$ ), a0 : unit cell edge dimension, A = Zener anisotropy :  $2c_{44}/(c_{11}-c_{12})$ , and  $c_{ij}$  : elastic stiffness coefficient

[3]. TEM 관찰 : TEM으로 부분 전위와 완전 전위의 버거스 벡터와 전위 선 사이의 각도를 쉽게 측정할 수 있다. SFE는 다음 방정식과 데이터를 비교하여 계산할 수 있다.

$$d = \frac{G|b_p|^2}{8\pi\gamma} \cdot \frac{2-\nu}{1-\nu} (1 - \frac{2\nu\cos 2\theta}{2-\nu})$$
<sup>(4)</sup>(11)

G : shear modulus,  $b_p$  : magnitude of the Burgers vector of the partial dislocations, v : the Poisson;s ratio)

앞에서 설명한 것처럼 TWIP강은 소성변형시 결정립 내에 변형 쌍정이 생성되어 전위의 이동을 방해하는 역할로 작용하여 높은 가공경화가 일어난다. 소성변형 할 때 생성되는 기계적 쌍정은 우선 생성 방위에서 생성되어 TWIP강의 주변형 매커니즘으로 작용한다.[4,5] 그리고 이것은 Schimid factor 관계식으로 계산할 수 있다. 쌍정의 생성 순서는 Figure 11과 같이 나타난다.[53] TWIP 강재의 우수한 인장 특성에도 불구하고, 몇가지 문제가 선행연구에서 보고되었다. 이러한 문제들 중 낮은 항복강도, 지연파괴와 불균일 변형이 있다. 이 문제를 해결하기 위해서 선행연구에서는 AI을 첨가하여 시멘타이트의 석출을 억제하고, 지연파괴와 관련된 수소취성을 줄이고, Dynamic Strain Aging(DSA) 을 감소시켜 여러 문제들 중 일부분을 해결하였다. [51,52]



Figure 8. TWIP 강의 설계 개념. [77]



Figure 9. 합금원소의 따른 SFE의 변화.[75]



Figure 10 망간과 탄소 함량에 따른 SFE의 변화. [76]



Figure 11. 인장 방향에 따른 Schmid factor 에 따른 쌍정의 생성에 대한 방향 선호도. [53]

#### 2.2 전변형

TWIP 강에서 전변형은 판재로 가공할 때 코일형태로 제작과 평탄화 공정을 할 때 일어난다. 손석수 저자의 논문에 따르면 전변형이 진행됨에 따라 재료의 전위 밀도가 높아져서 바우싱거 효과가 증가하거나 변형경화효과가 증가한다고 한다.[54] 바우싱거 효과가 증가하면 항복강도가 감소하고 변형 경화 효과가 증가하면 항복강도는 증가한다. 이러한 전변형으로 인하여 재료의 항복강도가 달라지며 제품 성형에 영향을 미친다. TWIP 강에서도 제품성형 및 판재 가공에서도 전변형은 매우 중요한 변형 인자로 작용한다. TWIP 강은 변형율이 높아짐에 따라 쌍정이 형성된다. 이 쌍정은 전위의 이동을 방해하는 역할을 함으로써 바우싱거 효과의 증가에 영향을 미치거나 변형 경화 효과의 증가에 영향을 미친다. 이에 따라 전변형이 진행 시 전위의 형성과 함께 쌍정도 중요한 영향을 미치는 인자로 발생한다.

변형경화효과는 3개의 단계로 나눌 수 있다. [55]

제 1 단계는 용이활주영역으로 결정이 변형경화를 거의 일으키지않는 단계이다. 이 단계에서는 전위가 장애물을 만나지 않고 비교적 큰 거리를 이동할 수 있다. 이 단계에서 가공경화가 작다는 사실로 보아 전위의 대부분이 표면에서 결정을 빠져나간다는 것을 알 수 있다. 용이활주 중에는 슬립이 항상 하나의 슬립계에서만 일어난다.

제 2 단계는 선형경화영역으로서 변형경화가 급격히 증가하는 유동곡선의 직선부분이다. 전위분포특성은 변하지 않고 분포의 크기만 변한다. 변형이 더욱 증가하면 방 내부의 자유전위의 수가 감소하게 되어 활주전위가 한 방에서 다른 방까지 비교적 방해받지 않고 이동한다. 제 3 단계는 변형경화속도가 감소하는 영역이다. 이 단계에서 일어나는 과정을 종종 동적회복이라 한다. 이 영역에서는 응력이 매우 크기 때문에 응력이 작을 때는 일어나지 않는 과정이 일어날 수 있다.

앞에서 설명하듯이 전변형으로 인해 재료가 바우싱거 효과가 발생할 수 있고 변형경화 효과가 발생할 수 있다. 또한 변형경화가 일어남에 따라 변형경화속도도 바뀔 수 있다.

#### 2.3 Bauschinger 효과

바우싱거 효과란 단축 인장-압축시험에서 인장항복응력 이상으로 하중을 가한 후, 하 중을 제거하고 다시 압축하중을 가하면, 이전보다 낮은 항복점에서 소성변형이 시작되는 현상이다. 재료에 하중을 가하였을 때 전위들이 생성된다. 생성된 전위 중에 이동전위들 은 슬립면을 따라 이동하여 결정립과 같은 장애물에 방해를 받으면서 집적된다. 이때 집 적된 전위 사이에서 내부 분극 응력 현상으로 인해 척력이 발생한다. 이 척력을 후방응 력(Back stress)라고 부르며 후방응력이 증가하면 재료에 반대 방향의 하중을 가할 때 전 위가 후방응력의 크기만큼 이동이 잘 일어나서 재료가 가지고 있는 초기 항복점보다 낮 은 항복점에서 소성변형이 일어나는 현상이 발생한다.[26-31,56]

최근 바우싱거 효과를 설명하는 연구들은 전위론에 기초하여 설명한다. 대표적인 모델 로는 Orowan 모델이다. 전위의 집적에 의한 후방응력의 영향과 전위 숲(Dislocation forest) 경화에 의한 슬립 장애물의 이방성에 의한 영향에 의존하는 이론이다. Orowan은 전위가 운동하는 통로에 불규칙하게 분포된 장애물의 작용으로서 바우싱거 효과를 설명 했다.[33-38]

장애물에 대한 전위의 집적, 교차하는 전위숲의 특히 조밀한 지점에서의 활주전위의 정지가 포함되어 있다. 예를 들면 활주전위의 슬립면을 꿰뚫는 수풀전위가 활주전위에 밀려 그림과 같이 활주전위 앞에 축적될 것이다. 변형방향이 반대로 될 때 뒤로 움직이 는 전위는 처음에는 장애물을 별로 만나지 않기 때문에 전보다 낮은 응력에서 변형될 것 이다. 이같이 반대방향으로 변형이 진행함에 따라 반대방향으로도 슬립장애물의 새로운 이방성이 생길 것이다. (Figure 12)[55]

선행논문에서는 API 라인파이프 강을 만들 때 바우싱거 효과는 매우 중요한 요인이라 고 한다. API 가 요구하는 항복강도를 충족시키는 라인 파이프 강을 만들어야 한다. 하지 만 라인파이프 제조사에서는 열간 압연 코일에서 평탄화하여 측정한 항복강도보다 파이 핑 공정 후 평탄화해서 측정할 때 더 낮은 항복강도가 나오게 된다. 이렇게 API 요구하 는 항복강도를 충족시키지 못하게 되는 문제점이 발생하여 베이나이트 강에 대한 바우싱 거 효과를 연구하였다.[54]



Figure 12. 바우싱거 효과를 일이키는 변형장애물의 이방성.[55]

### 2.4 결정립 미세화 효과

참고문헌에 따르면 단순한 결정입계가 고유의 강도를 거의 가지고 있지 않고 결정입계에 의한 강화는 결정립 내의 슬립에 대한 상호간섭에 의해 일어난다고 한다. 또한 다결정 재료가 단결정재료보다 가공경화속도가 더 클 뿐만 아니라 단결정보다 강도가 더 크다. 이것은 다결정일 때 다중슬립이 일어나기 때문이다. 따라서 결정립 크기가 작아질수록 전위의 이동에 대한 장애물로 작용하기 때문에 재료의 강도는 증가하게 된다. 이것에 대한 항복응력과 결정립크기의 관계식이 Hall 에 의해 제안되었고, Petch 에 의해 확장됬다.[55,57]

 $\sigma_0 = \sigma_i + k ' D^{-1/2}$  식(12)

o<sub>0</sub>: 항복응력, o<sub>i</sub>: 전위의 운동을 방해하는 마찰응력, k ': 전위가 장벽에서 집적되는 정도를 나타내는 상수 (또는 입계의 상대적 강화를 측정하는 상수) D: 결정립의 지름 이 식을 흔히 Hall-Petch 식이라 한다. 최근에는 TWIP 강의 단점 중 하나인 낮은 항복 강도를 높이기 위해 Hall-Petch 식을 이용한 결정립 미세화에 대한 연구가 진행되었다. [58-60]

TWIP 강에서는 변형 중 발생하는 기계적 쌍정이 유효 결정립 크기의 감소를 일으킨다. 유효 결정립 크기가 감소함에 따라 전위의 이동을 막아 강도가 증가하여 동적 Hall-Petch 효과(Dynamic Hall-Petch efeect)라고도 불린다. [32]
# 제 3 장 실험 및 측정 방법

3.1 강재 설명 (조성, 제조공정)

TWIP 강의 조성은 Table 1 에 표시하였다. 제조공정은 균질화처리 1150±100 ℃ 에서 1 시간동안 열처리를 진행하였으며 그 후 열간 압연(1000±100℃)을 하고 수랭 (400±100 ℃까지)을 진행한 후 상온까지 공랭을 진행하였다.

Table 1. TWIP강 조성 (wt%)

|    | Fe  | Mn   | Cr  | С    | Cu  |
|----|-----|------|-----|------|-----|
| 조성 | Bal | 24.5 | 3.8 | 0.45 | 0.5 |

3.2 시편 준비

시편의 형상은 ASTM E606 을 참고하여 Figure 13 과 같이 만들었다. 시편의 두께는 초기 5mm 였다. 시편의 표면에서 울퉁불퉁한 부분을 표면 연마를 통하여 매끄럽게 하여 시험의 정밀도를 높였다. 시편의 최종 두께는 4.65mm 이다. [62]



Figure 13. ASTM E606 참고하여 만든 시험시편.

### 3.3 인장-압축 시험 방법

INSTRON 5582 기계를 활용하여 인장, 압축 시험하였다. 저주기 피로시편의 모식도는 Figure 13 에 나타냈다. 저주기 피로 시편은 압연 판재의 L 방향으로 채취하였다. 첫 번 째 인장 시험 각각 0%, 2%, 4%, 10% 전변형을 주고 압축 시험 0%, 2%, 4% 전변형과 두 번째 인장 시험을 4%로 하여 시험을 진행하였다.

첫 번째 인장 시험에서 2%, 4%와 10% 전변형을 정한 이유는 본 연구에서 사용된 TWIP 강은 4% 변형률 근처에서 쌍정이 형성된다. 그래서 2%에서는 전위밀도 증가만을 관찰하고 4%에서 전위밀도와 쌍정 생성을 관찰하고 10%에서는 전위와 쌍정이 많이 형성된 경우를 관찰하기 위해 기준을 정했다. 압축에서 2% 와 4% 변형률을 정하였는데 더 많은 압축을 주면 선행연구에서 연구된 바와 같이 버클링(Buckling) 현상이 발생하게 되어 2%와 4% 변형률을 정했다.

인장-압축-인장 시험의 개략도를 Figure 14 과 같이 나타냈다.



Figure 14. 인장-압축-인장 시험 개략도.

3.4 미세조직관찰

기계적 특성 평가를 마친 시편들의 L-T면을 기계적 연마 및 전해 연마한 후, EBSD 분 석을 실시하였다.

3.5 항복응력

본 연구에서는 인장-압축-인장 시험으로 얻어진 진응력-진변형률 곡선에서 항복강도를 0.5% 변형률에서의 응력값으로 정하였다.(Figure 15) 그 이유는 인장-압축-인장 시험에서 첫 하중을 가한 후, 반대방향으로 하중을 가할 시 진응력-진변형률 곡선의 기울기가 달라지기 때문이다. 다른 논문에서도 이런 현상이 있는데 곡선의 기울기가 0.2% offset 방법을 통해서 구하기에는 어려움이 있는 연속 항복 거동이 보이는 강재의 항복 강도를 ASTM 의 기준에 따라 0.5% 변형률에서 응력값을 구했다.[61]



Figure 15. ASTM E8m-09 의 0.5% 변형률에서 응력을 구하는 방법.

## 3.6 Bauschinger Parameter

TWIP강의 바우싱거 효과와 변형경화효과를 분석하기 위해 3가지 바우싱거 인자를 이용하였다. [54]

Reduction in yield stress의 식은 식(13)에서 나타냈다.

(13) 
$$\Delta YS = \sigma_{y1} - \sigma_{y2}$$

Bauschinger stress parameter는 식(14)를 통해 나타냈다.

(14) 
$$B_{\sigma} = (\sigma_{pre} - \sigma_{y2})/(\sigma_{pre})$$

Bauschinger hardening parameter 식(15)을 통해 나타냈다.

(15) 
$$B_h = (\sigma_{y1} - \sigma_{y2})/(\sigma_{pre} - \sigma_{y2})$$

여기서 σ<sub>y1</sub>은 전변형에서의 항복응력 값이며 σ<sub>y2</sub>는 전변형 후 반대방향으로 하중을 가했을 때의 항복응력 값이다. σ<sub>pre</sub>는 전변형에서의 최대 응력값이다.(Figure 16)

Reduction in yield stress 에서는 바우싱거 효과가 증가하면  $\sigma_{y2}$ 값이 감소하여  $\Delta YS$ 값은 증가하게 되고 변형경화효과가 증가하면  $\sigma_{y2}$ 값은 증가하여  $\Delta YS$ 값은 감소한다.

Bauschinger stress parameter 에서 바우싱거 효과가 증가하면  $\sigma_{y2}$ 값이 감소하여  $B_{\sigma}$ 값은 증가하게 되고 변형경화효과가 증가하면  $\sigma_{pre}$ 값은 증가하여 값이 증가하게 된다.

Bauschinger hardening parameter 에서 바우싱거 효과가 증가하면 σ<sub>y2</sub>값이 감소하여 B<sub>h</sub> 값은 증가하게 되고 변형경화효과가 증가하면 σ<sub>pre</sub>값은 증가하여 B<sub>h</sub> 값은 감소한다. 바우싱거 효과와 변형경화효과의 영향에 대한 3가지 바우싱거 인자의 값 변화를 Table 2로 나타냈다.



Figure 16. 일반적인 이중 사이클의 테스트 곡선.

Table 2. Bauschinger parameter에서 바우싱거 효과와 변형경화 효과가 미치는 영향.

|                     | ΔYS | Β <sub>σ</sub> | B <sub>h</sub> |
|---------------------|-----|----------------|----------------|
| Bauschinger 효과      | 1   | 1              | 1              |
| Strain hardening 효과 | ↓   | 1              | ↓              |

# 제 4 장 결과

#### 4.1 인장 그래프 설명

각각의 인장-압축, 압축-인장, 인장-압축-인장시험을 통해 기계적 특성평가를 마친 시 험 데이터를 진응력-진변형률 그래프를 그렸다. 항복응력은 0.5%의 총 변형률에서 수직 으로 올렸을 때의 값으로 정했다. 그래프마다 σ<sub>y1</sub>, σ<sub>y2</sub>, σ<sub>pre1</sub>, σ<sub>pre2</sub> 값을 모두 표시하였다. 모든 데이터를 3가지 바우싱거 인자를 통해 계산했다. 계산한 인자를 Table 3,4,5로 나타 내었다.

모든 데이터를 편의상 인장인 경우 T 압축인 경우 C로 표시하겠다.(예 T2COTO, T4C4C4 과 T10C4T4) 인장의 곡선 그래프는 파랑색으로 표시하고 압축 그래프는 빨강색으로 표 시했다. 모든 그래프에서 압축곡선은 180도 회전시켜 비교하기 편하게 했다.







Figure 18. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T4C0T0 의 그래프.



Figure 19. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T10C0T0 의 그래프.



Figure 20. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T2C2T0 의 그래프.



Figure 21. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T4C2T0 의 그래프.



Figure 22. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T0C2T4 의 그래프.



Figure 23. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T0C4T4 의 그래프.



Figure 24. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T2C2T4 의 그래프.



Figure 25. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T2C4T4 의 그래프.







Figure 27. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T4C4T4 의 그래프.



Figure 28. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T10C2T4 의 그래프.



Figure 29. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 의 T10C4T4 의 그래프.

|         | σ <sub>y1</sub> (MPa) | σ <sub>pre1</sub> (MPa) | σ <sub>y2</sub> (MPa) | ΔYS(MPa) | Β <sub>σ</sub> | B <sub>h</sub> |
|---------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------|----------------|----------------|
| T2C2T0  | 349                   | 416                     | 302                   | 47       | 0.27           | 0.41           |
| T4C2T0  | 359                   | 471                     | 294                   | 65       | 0.38           | 0.37           |
| T2C2T4  | 352                   | 407                     | 288                   | 64       | 0.29           | 0.54           |
| T2C4T4  | 357                   | 422                     | 304                   | 53       | 0.28           | 0.45           |
| T4C2T4  | 375                   | 480                     | 322                   | 53       | 0.33           | 0.34           |
| T4C4T4  | 363                   | 471                     | 308                   | 55       | 0.32           | 0.28           |
| T10C2T4 | 355                   | 601                     | 339                   | 16       | 0.44           | 0.06           |
| T10C4T4 | 344                   | 593                     | 341                   | 3        | 0.42           | 0.01           |

Table 3. 인장 전변형의 1차 바우싱거 효과와 변형경화 효과.

Table 4. 압축 전변형의 1차 바우싱거 효과와 변형경화 효과.

|                      | σ <sub>y2</sub> (MPa) | σ <sub>pre1</sub> (MPa) | σ <sub>y3</sub> (MPa) | ΔYS(MPa) | Βσ   | Bh   |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------|------|------|
| T0C2T4               | 357                   | 426                     | 311                   | 46       | 0.27 | 0.40 |
| T0 <mark>C4T4</mark> | 355                   | 498                     | 349                   | 6        | 0.30 | 0.04 |

Table 5. 인장-압축 전변형의 2차 바우싱거 효과와 변형경화 효과.

|                       | σ <sub>y1</sub> (MPa) | σ <sub>y2</sub> (MPa) | σ <sub>pre2</sub> (MPa) | σ <sub>y3</sub> (MPa) | Βσ   |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|------|
| T2 <mark>C2T4</mark>  | 352                   | 288                   | 429                     | 357                   | 0.17 |
| T2 <mark>C4T4</mark>  | 357                   | 304                   | 529                     | 359                   | 0.32 |
| T4C2T4                | 375                   | 322                   | 496                     | 385                   | 0.22 |
| T4C4T4                | 363                   | 308                   | 568                     | 433                   | 0.24 |
| T10 <mark>C2T4</mark> | 355                   | 339                   | 561                     | 440                   | 0.16 |
| T10 <mark>C4T4</mark> | 344                   | 341                   | 648                     | 517                   | 0.20 |

### 4.2 미세조직 설명

인장-압축, 압축-인장, 인장-압축-인장 시험을 마친 TWIP 강 시편을 EBSD 를 통해 Inverse pole figure map, Image quality map, Phase map, Kernel average misorientation map 으로 분석하였다. [63]

Inverse pole figure(IPF) map 은 미세조직과 함께 방위정보를 제공한다. 칼라코드 표준삼각형에서 하나의 색깔은 하나의 동등한 결정방향 지수 <uvw> 또는 동등한 결정면 지수 {hkl}를 나타낸다. IPF map을 통해 결정립 내에 쌍정이 우선적으로 형성되는 결정방향을 보았다. 인장 전변형 2%에서 쌍정의 형성은 보이지 않았다. 인장 전변형 4%에서 <101>방향으로 쌍정이 생성되었다. 인장 전변형 10%에서 <101>방향으로 쌍정이 많이 형성되었으며 새로운 <111>결정방향으로 쌍정이 형성되었다.

Image quality(IQ) map 은 EBSD 실험결과 데이터 파일에는 방위 정보뿐 아니라 측정점들에서 얻은 Kikuchi회절패턴의 선명도 값이 수록되어 있다.IQ값이 높을수록 전위 밀도가 낮은 측정 점을 뜻한다. IQ map 에서 밝은 부분은 IQ 값이 높은 곳이고 어두운 부분은 IQ 값이 낮은 부분으로 전위 밀도가 높은 곳이다. 인장 전변형 2%에서 쌍정은 없었으며 인장 전변형 4%에서 쌍정이 생성되었다. 인장 전변형 10%에서 쌍정의 분율이 많이 증가하였으며 쌍정의 두께도 두꺼워졌다.

Phase map 은 EBSD 를 측정하면 측정 점의 Kikuchi 회절패턴이 얻어지고 EBSD 소프트웨어는 얻어진 회절패턴을 측정된 재료의 결정 데이터베이스를 이용하여 측정 점의 결정방위를 해석한다. 대부분의 EBSD 시료는 하나의 상(Phase)을 가진다. 하지만 EBSD 시료에 2 개 이상의 다른 상(phase)이 존재하면 이 2 상의 결정 데이터베이스를 이용하여 Kikuchi 회절패턴을 해석한다. Phase map 을 통해 변형동안 상변화가 일어나는지 확인하기 위해 분석하였다. 빨강색을 오스테나이트 상으로 지정하여 분석하였다. 모든 전변형에서 오스테나이트 단상을 유지하였다. 초록색으로 보이는 부분은 변형이 많이 일어나서 노이즈 현상으로 보인다.

Kernel average misorientation(KAM) map 은 misorientation 의 변화량에 따라 파란색부터 빨강색으로 보여진다. KAM map을 통해 전위밀도와 집적된 부분을 예상했다. 변형률이 증가할수록 전위밀도가 증가하는 것이 보이며 전위들이 결정립과 쌍정에 집적된 것이 보인다.

이정훈 박사의 논문에서도 KAM map 을 통해 전위의 이동을 관찰했다. KAM map 은 결정립 내부의 변형 유도된 국부적인 방향 구배의 척도로서 작용한다고 한다. 오스테 나이트 결정립의 높은 KAM 값은 높은 전위밀도, misorientation 의 넓은 분포 및 많은 변형이 일어났음을 나타낸다. [64]



Figure 30. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel 변형전의 EBSD 분석을 통한 (a) Inverse Pole Figure map, (b) Image map, (c) Phase map, (d) Kernel average misorientation map.





Figure 31. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel의 인장 전변형 2%일 때 EBSD 분석을 통한 (a) Inverse Pole Figure map, (b) Image map, (c) Phase map, (d) Kernel average misorientation map

| A1<br>A2<br>(Highlighted Points)(Total Number of Points) = 0.000  | ↑ A1   |                    |                |  |  | <sup>↑</sup> A1   |                |       |  |
|---|--|--------------------|----------------|--|--|---|----------------|-------|--|
| (Highlighted Points)/(Number of Good Points) = 0.000<br>(Highlighted Points)/(Number of Partition Points) = 0.000 | <u> </u>   |                    |                | <u> </u>   |  |   |                |       |  |
| Gray Scale Map Type: <none></none>  | A2   |                    |                | A2   |  |   |                |       |  |
| Color Coded Map Type: Inverse Pole Figure [001]<br>Austenite  | (Highlighted Points)/(Total Number of Points) = 0.000<br>(Highlighted Points)/(Number of Good Points) = 0.000<br>(Highlighted Points)/(Number of Partition Points) = 0.000 |                    |                |  | Gray Scale Map Type: <none></none>               |   |                |       |  |
|   | Gray Scale Map Ty  | /pe: <none></none> | >              | Color Coded Map Type: Kernel Average Misorientatio |  |   |                |       |  |
| 001 101   | Color Coded Map  | Type: Pha          | se             |  | Total Partition <u>Min Max Fraction</u> Fraction |   |                |       |  |
| Ferrite   | Dhaaa  | Total              | Partition      |  | 0  | 5   | 1.000          | 1.000 |  |
|   | Austenite<br>Ferrite   | 0.860<br>0.140     | 0.860<br>0.140 | Bound  | daries   | : <none< td=""><td><del>}</del>&gt;</td><td></td></none<> | <del>}</del> > |       |  |
| 001 101   | Boundaries: <non< td=""><td>e&gt;</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></non<>  | e>                 |                |  |  |   |                |       |  |



Figure 32. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel의 인장 전변형 4%일 때 EBSD 분석을 통한 (a) Inverse Pole Figure map, (b) Image map, (c) Phase map, (d) Kernel average misorientation map





Figure 33. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel의 인장 전변형 10%일 때 EBSD 분석을 통 한 (a) Inverse Pole Figure map, (b) Image map, (c) Phase map, (d) Kernel average misorientation map

| A1<br>A2<br>(Highlighted Points)(Total Number of Points) = 0.000<br>(Highlighted Points)(Number of Points) = 0.000<br>(Highlighted Points)(Number of Partition Points) = 0.000 | A1   |                            |                            |       |  | ∱ A1  |              |                           |
|--|--|----------------------------|----------------------------|-------|--|---|--------------|---------------------------|
| Gray Scale Map Type: <none></none>   |  |                            |                            | A2    |  |   |              |                           |
| Color Coded Map Type: Inverse Pole Figure [001]<br>Austenite   | (Highlighted Points)/(Total Number of Points) = 0.000<br>(Highlighted Points)/(Number of Good Points) = 0.000<br>(Highlighted Points)/(Number of Partition Points) = 0.000 |                            |                            |       | Gray Scale Map Type: <none></none>           |   |              |                           |
|  | Gray Scale Map Ty  | /pe: <none></none>         | •                          | Color | Code   | d Map 1   | Type: Kerne  | el Average Misorientation |
| 001 101  | Color Coded Map  | Type: Phas                 | se                         | _     | Total Partition<br>Min Max Fraction Fraction |   |              | Partition<br>Fraction     |
| Ferrite  |  | Total                      | Partition                  |       | 0  | 5   | 1.000        | 1.000                     |
|  | Austenite<br>Ferrite   | Fraction<br>0.860<br>0.140 | Fraction<br>0.860<br>0.140 | Bound | laries                                       | : <none< td=""><td><u>}&gt;</u></td><td></td></none<> | <u>}&gt;</u> |                           |
| 001 101  | Boundaries: <non< td=""><td>e&gt;</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></non<>  | e>                         |                            |       |  |   |              |                           |



Figure 34. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel의 인장 전변형 2% - 압축 전변형 2% - 인 장 4%일 때 EBSD 분석을 통한 (a) Inverse Pole Figure map, (b) Image map, (c) Phase map, (d) Kernel average misorientation map

| A1<br>(Highlighted Points)((Total Number of Points) = 0.000<br>(Highlighted Points)(Number of Good Points) = 0.000<br>(Highlighted Points)(Number of Partition Points) = 0.000<br>Gray Scale Map Type: <none></none> | A1   |                                     |   | A2  |  | ↑ A1 |       |                       |
|--|--|-------------------------------------|---|---|--|------|-------|-----------------------|
| Color Coded Map Type: Inverse Pole Figure (001)<br>Austenite   | (Highlighted Points)/(Total Number of Points) = 0.000         (Highlighted Points)/(Number of Good Points) = 0.000         (Highlighted Points)/(Number of Partition Points) = 0.000 |                                     |   |   |  |      |       |                       |
|  | Gray Scale Map T   | /pe: <none></none>                  | >                                       | Color Coded Map Type: Kernel Average Misorientati |  |      |       |                       |
| 001 101  | Color Coded Map  | Type: Pha                           | se                                      | _   | Total Partition<br>Min Max Fraction Fraction |      |       | Partition<br>Fraction |
| Ferrite  | Phase<br>Austenite<br>Ferrite  | Total<br>Fraction<br>0.860<br>0.140 | Partition<br>Fraction<br>0.860<br>0.140 | 0 5 1.000 1.000<br>Boundaries: <none></none>      |  |      | 1.000 |                       |
| 001 101  | Boundaries: <non< td=""><td>e&gt;</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></non<>  | e>                                  |   |   |  |      |       |                       |



Figure 35. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel의 인장 전변형 4% - 압축 전변형 4% - 인 장 4%일 때 EBSD 분석을 통한 (a) Inverse Pole Figure map, (b) Image map, (c) Phase map, (d) Kernel average misorientation map

| A2 (Highlighted Points)(Total Number of Points) = 0.000 (Highlighted Points)(Number of Good Points) = 0.000 (Highlighted Points)(Number of Partition Points) = 0.000 Gray Scale Map Type: <none></none> | Å1   |                                       |  | ⊀<br>A2 |          | ↑ A1   |                            |                                |
|---|--|---------------------------------------|--|---------|----------|--|----------------------------|--------------------------------|
| Color Coded Map Type: Inverse Pole Figure [001]<br>Austenite  | (Highlighted Point<br>(Highlighted Point<br>(Highlighted Point   | s)/(Total N<br>s)/(Numbe<br>s)/(Numbe | (Total Number of Points) = 0.000<br>(Number of Good Points) = 0.000<br>(Number of Partition Points) = 0.000<br>Color Coded Man Type: Kernel Average Misorientation |         |          |  |                            |                                |
| 001 101<br>Ferrite  | Gray Scale Map Type: <none> Color Coded Map Type: Phase Total Partition</none>   |                                       |  |         | Min<br>0 | Max<br>5                                       | Total<br>Fraction<br>1.000 | Partition<br>Fraction<br>1.000 |
| 001 101   | Phase<br>Austenite<br>Ferrite<br>Boundaries: <non< td=""><td>Fraction<br/>0.860<br/>0.140<br/>e&gt;</td><td>Fraction<br/>0.860<br/>0.140</td><td>Bound</td><td>daries</td><td>: <none< td=""><td>3&gt;</td><td></td></none<></td></non<> | Fraction<br>0.860<br>0.140<br>e>      | Fraction<br>0.860<br>0.140   | Bound   | daries   | : <none< td=""><td>3&gt;</td><td></td></none<> | 3>                         |                                |



Figure 36. Fe-24.5Mn-3.8Cr-0.5Cu-0.45C TWIP steel의 인장 전변형 10% - 압축 전변형 4% - 인 장 4%일 때 EBSD 분석을 통한 (a) Inverse Pole Figure map, (b) Image map, (c) Phase map, (d) Kernel average misorientation map

| A1<br>(Highlighted Points)(Total Number of Points) = 0.000<br>(Highlighted Points)(Number of God Points) = 0.000<br>(Highlighted Points)(Number of Partition Points) = 0.000 | A1   |                                       |  |   |                                    | ↑ A1  |                   |                       |  |
|--|--|---------------------------------------|--|---|------------------------------------|---|-------------------|-----------------------|--|
| Gray Scale Map Type: <none></none>   | A2   |                                       |  | A2  |                                    |   |                   |                       |  |
| Color Coded Map Type: Inverse Pole Figure (001)<br>Austenite   | (Highlighted Point<br>(Highlighted Point<br>(Highlighted Point                                   | s)/(Total N<br>s)/(Numbe<br>s)/(Numbe | lumber of Points) = 0.000<br>er of Good Points) = 0.000<br>er of Partition Points) = 0.000 | Gray S  | Gray Scale Map Type: <none></none> |   |                   |                       |  |
|  | Gray Scale Map Ty  | /pe: <none></none>                    | >  | Color Coded Map Type: Kernel Average Misorientation |                                    |   |                   |                       |  |
| 001 101  | Color Coded Map  | Type: Pha                             | se   |   | Min                                | Max   | Total<br>Fraction | Partition<br>Fraction |  |
| Ferrite  | Dharas   | Total                                 | Partition  |   | 0                                  | 5   | 1.000             | 1.000                 |  |
|  | Austenite<br>Ferrite   | 0.860<br>0.140                        | 0.860<br>0.140   | Bound   | laries                             | : <none< td=""><td><del>9</del>&gt;</td><td></td></none<> | <del>9</del> >    |                       |  |
| 001 101  | Boundaries: <non< td=""><td>e≻</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></non<> | e≻                                    |  |   |                                    |   |                   |                       |  |

#### 4.3 Bauschinger Parameter

각각의 실험데이터에서 3가지 Bauschinger Parameter로 계산하여 fitting해서 경향성을 보았다.

인장 전변형일 때 Reduction in yield stress는 변형률 4%까지 ΔYS 값이 증가하고 변형 률 10%에서 ΔYS값이 많이 감소했다. Bauschinger stress parameter는 변형률이 증가할수 록 B<sub>o</sub> 값은 증가했다. Bauschinger hardening parameter는 전변형이 증가할수록 B<sub>h</sub> 값이 점차 감소했다. (Figure 37, 38 과 39)

압축 전변형일 때 Reduction in yield stress는 변형률 2%에서 ΔYS 값은 인장 전변형의 ΔYS값과 비슷하다. 하지만 4%에서는 인장 전변형 4%의 값과 다르게 ΔYS값이 많이 감소 하였다. Bauschinger stress parameter는 변형률이 증가함에 따라 B<sub>σ</sub> 값이 증가했다. Bauschinger hardening parameter는 변형률이 증가함에 따라 B<sub>h</sub> 감소했다. (Figure 40, 41 과 42)

인장-압축 전변형일 때 Bauschinger stress parameter는 압축 2%에서 인장 전변형 4%, 2%와 10% 순으로 B。값이 높았다. 압축 4%에서는 인장 전변형 2%, 4% 와 10%순으로 B。값이 높았다.(Figure 43)



Figure 37. 인장 전변형에서의 Reduction in yield stress 를 fitting 한 그래프.



Figure 38. 인장 전변형에서의 Bauschinger stress parameter 를 fitting 한 그래프.



Figure 39. 인장 전변형에서의 Bauschinger hardening parameter 를 fitting 한 그래프.



Figure 40. 압축 전변형에서의 Reduction in yield stress 를 fitting 한 그래프.



Figure 41. 압축 전변형에서의 Bauschinger stress parameter 를 fitting 한 그래프.



Figure 42. 압축 전변형에서의 Bauschinger hardening parameter 를 fitting 한 그래프.



Figure 43 인장 전변형 - 압축 전변형에서의 Bauschinger stress parameter 를 fitting 한 그래프.

## 제 5 장 고찰

5.1 인장 전변형에서 쌍정과 전위가 바우싱거 효과와 변형 경화 효과 에 미치는 영향

손석수 박사의 선행연구에서 베이나이트 강을 통해 바우싱거 효과를 분석하였다. 초기 변형에서 전위 밀도가 증가하면 결정립에 집적되는 전위의 수가 증가하여 바우싱거 효과가 증가한다. 변형률이 증가함에 따라 전위밀도가 계속 증가하여 전위들 간의 상호작용으로 인해 전위가 얽혀서 변형경화효과가 증가하게 되고 전위들이 이동하지 못해 바우싱거 효과는 감소하게 된다. 또한 바우싱거 효과는 결정립의 크기와 관련이 있다고 한다. 결정립의 크기가 큰 강보다 결정립의 크기가 작은 강이 결정립에 집적되는 전위의 수가 많아져서 바우싱거 효과가 더 크다고 한다. (Figure 44) [54]

TWIP 강에서는 변형동안 쌍정이 계속 형성된다. 쌍정이 형성됨으로 인해 전위의 이동을 방해하는 장애물의 역할을 함으로써 바우싱거 효과의 증가에 영향을 준다. 즉 쌍정이 형성되면서 결정립 미세화와 같은 효과가 나타나 바우싱거 효과의 증가에 영향을 미친다. 하지만 변형률이 증가하면 전위밀도가 증가하고 쌍정도 더 많이 생길 것이다. 집적된 전위들 간의 상호작용으로 인해 전위가 얽혀서 변형 경화 효과가 증가 될 것이고 바우싱거 효과도 감소할 것이다. 이 때 많은 쌍정의 형성은 더 많은 전위들의 이동을 방해하여 변형경화효과가 더 많이 증가 될 것이다.

만약 손석수 저자의 논문의 베이나이트 강에서 Table 6 와 같이 쌍정이 형성된다면 초기변형에서 쌍정의 형성은 결정립과 같은 장애물의 역할로써 전위의 이동을 방해하여 바우싱거 효과가 더 증가 할 것이다. 하지만 쌍정이 많이 형성되게 되면 전위의 이동을 방해하는 장애물의 역할을 더 많이 하게 되고 전위밀도도 많이 증가하여 쌍정과 결정립에 집적된 전위들이 더 많이 얽혀서 변형경화 효과가 더 증가할 것이다. 이러한 예상을 (Figure 37, 38, 39 와 45)에서 볼 수 있다.

3 가지 바우싱거 파라미터를 fitting 한 Figure 37,38 과 39 을 보면 인장 전변형 2%에서 Bauschinger hardening parameter 의 값이 높고 ΔYS 값이 높은 것으로 보아 바우싱거 효과만 있다고 예상한다. 또한 Bauschinger stress parameter 값이 가장 낮은 것을 보아 바우싱거 효과만 있고 변형경화 효과가 거의 없다는 것을 예상할 수 있다. EBSD 사진 (Figure 30, 31,32 와 33)을 보면 쌍정의 형성은 없고 전위밀도가 증가하고 전위들이 결정립 쪽에 집적 되었다. 전위들이 결정립에 집적됨으로써 전위간의 척력이 발생하여 후방응력이 증가하게 되고 바우싱거 효과가 증가한 것을 예상하였다.

인장 전변형 4%에서 높은 바우싱거 효과로 인해 ΔYS 값이 가장 높았다. Baushinger hardening parameter 값이 인장 전변형 2%보다 감소한 것을 보아 변형경화효과가 조금 증가했다. Baushinger stress paramter 의 값도 인장 전변형 2%의 값보다 높은 것을 보아 바우싱거 효과와 변형경화효과가 증가한 것을 예상할 수 있다. 여기서 ΔYS 값이 인장 전변형 2%보다 높다는 것은 변형경화효과보다 바우싱거 효과가 더 지배적이라는 것을 예상할 수 있었다. EBSD 사진(Figure31 과 32)을 보면 인장 전변형 4%에서 쌍정이 형성되며 쌍정과 결정립에 전위들이 집적된 것이 확인된다. 인장 전변형 2%보다 전위밀도가 더 증가하고 쌍정이 형성됨으로 인해 결정립 미세화와 같은 효과로 인하여 전위들이 쌍정과 결정립에 집적되어 후방응력이 더 증가하여 바우싱거 효과가 증가했다고 예상한다.

인장 전변형 10%는 ΔYS 값이 큰 폭으로 감소하고 Bauschinger hardening parameter 값이 매우 낮아 바우싱거 효과는 많이 감소하고 변형경화효과가 많이 증가한 것을 예상할 수 있다. (T10C0T0)EBSD (Figure33)을 보면 쌍정이 아주 많이 형성되고 전위밀도도 많이 높아진 것을 확인할 수 있다. 또한 쌍정과 결정립에 전위가 많이 집적이 되어 집적된 부분에 변형이 많이 일어난 것이 확인된다. 인장 전변형 10%에서 쌍정은 인장 전변형 4%의 생성된 쌍정과 마찬가지로 전위의 이동을 방해하는 역할을 한다. 하지만 전위밀도가 인장 전변형 4%보다 훨씬 많이 증가하여 전위들 간에 서로 엉켜버려 변형경화효과가 증가하게 되는데 많이 형성된 쌍정은 이러한 전위들이 이동을 방해하여 쌍정과 결정립에 전위들이 집적되면서 변형경화효과에 더 큰 영향을 미친다.

선행논문에서 쌍정의 두께가 증가함에 따라 바우싱거 효과가 감소한다고 한다. EBSD(Figure 32 와 33)을 보면 변형이 증가함에 따라 쌍정의 두께가 증가한 것이 보인다. 참고문헌을 보면 두께가 증가한 쌍정을 TEM 을 통해 분석하였다. TEM 사진(Figure46)을 보면 미세한 쌍정들이 많이 형성되어 있다. 이 쌍정 사이에 전위들이 집적되었다. 이로 인해 반대 방향으로 하중을 가했을 때 전위들이 쌍정에 의해 움직이지 못해 변형경화효과가 증가하는 것을 예상할 수 있다. 즉 변형이 증가함에 따라 쌍정이 많이 형성되어 전위들의 이동을 방해하는 역할을 한다. [20, 65]

다음 밑의 식은 선행논문의 쌍정 두께에 관한 식이다.[65]

$$\sigma_b = M \frac{\mu \cdot b}{L} n$$
식(16)

 $\sigma_b$ : Back stress , M: Average Taylor factor ,  $\mu$ : Shear modulus , b : Burgers vector n : number of dislocations stopped at the boundary , L : mean intercept length

$$L = 2t \left( \frac{1 - f_{\rm v}}{f_{\rm v}} \right)$$
식(17)

t : Twin thickness,  $f_v$ : Twin volume fraction

쌍정의 두께가 증가하면 L 값이 증가하고 후방응력의 식은 감소하게 된다. 후방응력이 감소한다는 것은 바우싱거 효과가 감소하는 것이다. 또한 쌍정의 부피분율이 증가하면 L 값은 감소한다. L 값이 감소하면 후방응력 값은 증가한다. 후방응력 값이 증가한다는 것은 바우싱거 효과가 증가하는 것이다.

Figure46 은 선행논문의 TEM 그림이다. [20] 쌍정의 두께가 증가한 부분을 TEM 으로 관찰한 결과 쌍정의 다발들이 생성되고 쌍정의 다발 사이에 전위들이 집적된 것으로 보인다. 즉 쌍정의 두께가 두꺼워지면 쌍정의 수가 증가하고 전위가 반대방향으로 이동하는 것이 방해됨으로 변형경화효과가 더욱 증가한다고 생각한다.



Figure 44. 결정립 크기에 따라 바우싱거 효과의 크기 차이. [54]

| Table 6. 베이나이트강에서 쌍정이 생성되었을 때 바우싱거 효과의 변화 여 |
|---|
|---|

|                   | 1%         | 2% | 3%     | 4% |
|-------------------|------------|----|--------|----|
| 전위밀도              | <u>\</u> \ | 中  | 大      | 大大 |
| 쌍정                | х          | 小  | 中      | 大  |
| Bauschinger<br>효과 | 변화없음       | 증가 | 증가or감소 | 감소 |



Figure 45. 베이나이트 강에서의 Reduction in yield stress, Bauschinger stress parameter 와 Bauschinger hardening parameter를 fitting 한 그래프. [54]



Figure 46. TEM을 통해 쌍정의 두께가 증가한 부위를 찍어 전위와 쌍정의 형성된 곳을 관찰. [65]
5.2 압축 전변형에서 쌍정과 전위가 바우싱거 효과와 변형 경화 효과에 미치는 영향

인장 전변형에서 결과와 압축 전변형에서 결과는 비슷할 것이라고 예상 했다. 인장 전 변형과 마찬가지로 3가지 바우싱거 파라미터를 통해 계산해보았다. 압축 전변형 2%에서 3가지 바우싱거 파라미터의 값은 인장 전변형 2%의 3가지 바우싱거 파라미터의 값과 비 슷한 경향을 나타냈다. 하지만 압축 전변형 4%에서 인장 전변형 4%와 비교했을 때 정반 대의 결과가 나왔다. 인장 전변형 4%는 바우싱거 효과가 가장 높아서 ΔYS 값이 가장 높 게 나왔지만 압축 전변형에서는 바우싱거 효과가 거의 없었고 변형경화효과가 가장 높았 다.

선행연구에서 고 망간강에서 쌍정은 결정립 방향에 대한 강한 의존성을 보이는 이방성 현상이 발생한다고 한다. 인장 방향에서는 쌍정이 형성이 쉬운 방향이 선호되어 변형이 증가함에 따라 쌍정의 형성이 쉽게 일어난다고 한다. 하지만 압축방향에서는 초기변형에 서 쌍정이 빠르게 형성 되지만 변형이 증가함에 따라 새로운 방향의 쌍정의 형성이 제한 이 된다고 한다. (Figure 47) [66-69]

T4COTO (Figure32), T4C4T4(Figure 35)과 T10COTO(Figure 33)을 비교해보았다. 400에서 444의 변형이 일어나면 총변형률은 12%다. 1000은 총변형률 10%이다. 하지만 쌍정은 1000에서 더 많이 형성되었다. 즉 압축에서 쌍정의 형성은 초반에 조금 형성되지만 전위 가 이동하면 쌍정으로 형성되지 않고 집적만 일어나 변형경화 효과가 더 증가했다고 예 상하였다. 하지만 변형률 4%는 작은 변형률이라 바우싱거 효과가 거의 없고 변형경화효 과가 많다는 것이 이것으로는 완벽하게 설명되지 않는다. 압축4%에서 변형경화효과가 지배적인 것에 대해서는 더 연구해야 되는 부분이라 생각한다.



[20]

5.3 인장-압축 전변형에서 쌍정과 전위가 바우싱거 효과와 변형 경화 효과에 미치는 영향

선행논문에서는 인장-압축 전변형을 통해 그림과 같이 피팅을 했다. 인장 전변형에서 변형률이 증가함에 따라 변형경화효과가 증가한다. 변형경화효과가 증가로 인해 2 차 Bauschinger stress parameter 값은 감소한다고 한다. [70]

본 연구에서 Figure 48 과 같이 압축 전변형 4%에서 선행논문의 결과(Figure49)와 동일한 경향성을 나타낸다. 인장 전변형 10%에서 가장 낮은 Bauschinger stress parameter 값이 나왔으며 인장 전변형 4%와 2%순으로 Bauschinger stress parameter 값이 증가하였다.

압축 전변형 2%에서는 선행논문의 결과와 다른 경향이 나타났다. 인장 전변형 10%는 가장 낮은 값이 나왔지만 인장 전변형 4%의 Bauschinger stress parameter 값이 가장 높게 나왔다. 인장 전변형 4%의 값이 가장 높게 나온 이유는 쌍정의 형성으로 인해 가장 높은 바우싱거 효과를 가지고 있었기 때문에 압축 전변형 2%에서 가장 높은 Bauschinger stress parameter 값이 나왔다고 생각한다.

표(Table 5)를 보면 TWIP 강의 초기 항복응력 값과 비교하였을 때 2 차 항복응력 값은 모두 비슷하거나 높은 값이 나왔다. 모든 변형에서 변형경화효과가 일어났다고 예상한다. 그래서 변형경화의 정도를 확인하기 위해 Figure 48 과 같이 기울기를 구했다. 인장 전변형 2%인 경우 기울기 값은 0.07 이 나왔고 인장 전변형 4%와 인장 전변형 10%에서 기울기 값은 각각 0.01과 0.02가 나왔다.(Table 7) 즉 인장 전변형 2% 에서 1차 바우싱거 효과일 때 변형경화효과가 거의 없었기 때문에 변형경화속도가 많이 증가했다고 예상했다. EBSD 그림(Figure34)을 보면 224 에서 전위밀도가 조금 증가하였고 쌍정은 거의 보이지 않았다. 전위들은 결정립에 집적되었다. 인장과 압축 전변형을 통하여 전위들이 생성되고 인장방향과 압축방향으로 방향이 달라지면서 전위들이 서로 엉켜 변형경화효과가 약간 증가했다고 예상할 수 있다.

인장 전변형 4%에서 또한 변형경화가 많이 증가하였고 압축 전변형 2%에서 압축 전변형 4%로 넘어갈 때 변형경화가 상당히 많이 증가한 것을 표에서 비교하여 알 수 있다. 인장 전변형 4%에서는 바우싱거 효과와 변형경화 효과가 둘다 있음을 알 수 있다. 인장 전변형에서는 바우싱거 효과가 지배적인 영향을 미쳤지만 하중을 가하는 방향이 달라지면서 전위들이 서로 엉키는 현상이 발생함으로 인해 쌍정이 전위들의 이동을 막는 역할로 인해 더 많은 변형경화 효과가 발생했다고 예상한다. EBSD(Figure 35) 사진을 보면 전위들이 쌍정과 결정립에 집적 된 것이 보이며 초기에 생성된 쌍정을 가로지르는 쌍정이 형성 된 것도 확인된다. 또한 쌍정의 두께도 증가하였다. 참고문헌에 따르면 전위와 전위의 상호작용에 의한 변형경화속도보다 쌍정과 쌍정의 상호작용에 의한 변형경화속도가 훨씬 높다고 한다. 종합해보면 인장-압축 전변형을 통해 하중의 방향이 바뀌면서 전위가 서로 엉키는 현상, 쌍정과 쌍정의 상호작용으로 인해 변형경화속도 증가와 쌍정이 형성되었을 때 바우싱거 효과에서 변형경화가 더 지배적인 영향으로 바뀌어서 변형경화가 많이 되었다고 생각한다. 인장 전변형 10%는 이미 많은 변형경화효과가 일어나서 압축 전변형 2%와 4% 전변형에 따라 변형경화가 많이 증가한다. (T10C2T4 와 T10C4T4) EBSD(Figure 36)그림을 보면 결정립과 쌍정에 많은 변형이 일어났다.

동일한 인장 전변형 2%에서 압축 전변형 2%와 4%의 기울기 값은 TWIP 강은 기울기 값이 0.07과 참고문헌의 베이나이트 강에서의 기울기는 0.03이 나왔다. 여기서 기울기의 차이는 결정립크기와 관련있다고 생각한다. 선행 연구에 따르면 결정립 크기가 미세할수록 바우싱거 효과가 크다고 한다. 즉 작은 전변형에서 바우싱거 효과가 크지만 전변형이 증가할수록 전위의 이동을 방해하는 장애물들이 많아 가공경화가 더 많이 발생한다고 생각한다. 그림(Figure 50)을 보면 베이나이트 강의 결정립크기는 TWIP 강의 결정립크기보다 작은 것을 확인 할 수 있다. 변형경화가 TWIP 강보다 많이 발생하여 기울기는 감소했다고 생각한다. 그리고 동일한 압축 전변형 4%에서는 TWIP 강의 기울기 값은 0.01 베이나이트 강은 0.045 가 나왔다. 이를 비교한 결과 베이나이트강은 전위의 이동만 일어났기 때문에 기울기 값이 인장 전변형이 바뀜에 따라 비슷한 경향을 나타내지만 TWIP 강은 쌍정의 생성으로 기울기 값의 차이가 많이 났다.(Table 8) 이러한 이유는 쌍정이 생성되고 결정립 미세화 같은 효과로 인해 더 많은 전위의 이동을 방해하는 역할을 해서 TWIP 강의 가공경화가 많이 증가하여 기울기 값이 많이 감소했다고 생각한다. [70]



Figure 48. 인장 전변형 – 압축 전변형 – 인장에서 Bauschinger stress parameter의 값에서 기울 기를 표시한 그래프.

| Table 7. | 각각의 | 전변형 | (T2%, | T4%, | T10%)에서 | 압축전변형 | 2%와 | 4%의 | 기울기 | 값 |
|----------|-----|-----|-------|------|---------|-------|-----|-----|-----|---|
|----------|-----|-----|-------|------|---------|-------|-----|-----|-----|---|

| 인장 전변형 | 기울기 값 |
|--------|-------|
| T2%    | 0.07  |
| T4%    | 0.01  |
| T10%   | 0.02  |



Figure 49. 베이나이트 강의 2차 Bauschinger stress parameter 값을 fitting 한 그래프. [70]



Figure 50. 베이나이트 강의 미세조직 사진. [70]

Table 8. 연구된 TWIP강과 Figure 49의 베이나이트 강으로 인장 전변형 2%와 4%를 압축 전변형 2% 와 4%의 기울기를 계산한 표.

| 인장 전변형 | 기울기 값  |         |  |  |  |
|--------|--------|---------|--|--|--|
|        | TWIP 강 | 베이나이트 강 |  |  |  |
| T2%    | 0.07   | 0.03    |  |  |  |
| T4%    | 0.01   | 0.045   |  |  |  |

## 제 6 장 결론

본 연구에서 TWIP 강을 인장-압축-인장 시험을 통해 다양한 전변형 (2%,4,%,10%)을 통하여 실험을 진행하였다. 3 가지 바우싱거 파라미터를 이용하여 바우싱거 효과와 변형경화 효과를 정량화 하였다. 인장-압축-인장 시험을 마친 강재를 EBSD 분석을 통해 쌍정과 전위를 관찰하였으며 쌍정과 전위가 바우싱거 효과와 변형경화 효과에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 분석을 하였다.

### 1. 인장 전변형

인장 전변형 2%에서는 쌍정의 형성이 없었으며 전위밀도만 증가하였다. 인장 전변형 4%에서 쌍정이 형성되기 시작하였으며 쌍정은 전위의 이동을 방해하는 역할을 하고 전위밀도는 인장 전변형 2%보다 높았다. 인장 전변형 10%에서는 전위밀도와 쌍정이 많이 형성되었다. 또한 많이 형성된 쌍정은 전위를 이동을 방해하는 역할을 했다. 인장 전변형 4%까지 바우싱거 효과가 지배적 이였으며 인장 전변형 10%에서는 변형경화 효과가 지배적 이였다.

#### 2. 압축 전변형

압축 전변형 2%에서는 인장 전변형과 비슷한 바우싱거 효과를 가진다. 압축 전변형 4%에서 인장-전변형 4%와 비교하였을 때 변형경화효과가 지배적 이였으며 이러한 효과는 더 연구가 필요하다.

3. 인장-압축 전변형

모든 인장-압축 전변형에서 변형경화 효과가 일어났다. T4C4T4, T10C2T4 와 T10C4T4 에서는 많은 변형경화로 인해 기존의 항복응력보다 훨씬 높은 항복응력 값이 나왔다. 4. 쌍정

TWIP 강에서 소성변형이 증가함에 따라 쌍정이 형성이 된다. 쌍정의 형성은 전위의 이동을 방해하는 역할을 함으로써 바우싱거 효과와 변형경화효과에 영향을 미친다.

초기 쌍정의 형성은 전위의 이동을 방해하여 바우싱거 효과의 증가에 영향을 주지만 변형이 많이 일어나면 많은 쌍정들은 전위의 이동을 방해하고 전위들이 서로 엉켜서 변형경화효과가 많이 증가하는데 영향을 준다.

## Abstract

Existing steel products to satisfy automobile weight and formability have been replaced with light alloy, dual phase steel, TWIP (TWin-Induced Plasticity) and TRIP (TRansformation-Induced Plasticity) steels. Of these, TWIP steels have been extensively studied in many fields recently for their excellent combination of high tensile strength and high ductility. When manufacturing the TWIP steel plate, a bauschinger effect occurs due to manufacture of the coil shape and the planarization process

Bauschinger effect is plastic deformation that occurs at the lower yield point than that of existing steel. When the TWIP steel is formed into a product, the spring back is predicted and the mold is modified to produce the product.

The spring back phenomenon is a phenomenon that when the material gets deformed, it returns back to its original direction by the elastic deformation area and also this phenomenon is related to the back stress. This back stress is resistant to the flow stress at the time of forward deformation, but it helps the plastic deformation at the time of the reverse deformation and affects the stress difference due to the Bauschinger effect. When plastic deformation occurs at a lower yield point due to the Bauschinger effect, the amount of spring back is changed, which makes it difficult to accurately predict the numerical value and leads to defective products. So to get a better understanding of spring back, you have to consider the Bauschinger effect as well.

At TWIP steels, during plastic deformation, twinning has been produced continuously until fracture. Since twinning roles in blocking the movement of dislocations, when considering the Bauschinger effect, twinning and dislocation density should be considered together. The purpose of this study is to analyze the Bauschinger effect and strain hardening effect on various pre-strain (tensile - compressive, compressive - tensile, tensile - compressive tensile) through tensile - compression - tensile test. Three Bauschinger parameters were used to quantify the Bauschinger effect and strain hardening effect. Electron backscatter diffraction (EBSD) analysis was also used to observe the dislocation and twin formation.

In the results of the study, it comes out that twinning played a role in blocking dislocation movement through EBSD analysis. Also, the formation of the initial twinning can help to increase the Bauschinger effect three Bauschinger parameters. However, the twinning and dislocation densities both increased when the strain was increased. At this time, due to the tangling between dislocations, the Bauschinger effect decreased and the strain hardening effect increased. The twinning effected the increase of strain hardening effect as a role in blocking the movement of dislocations.

# 참 고 문 헌

[1]. O. Grassel, L. Kruger, G. Frommeyer, L.W. Meyer, Int. J. Plasticity 16 (10–11) (2000) 1391.

[2]. G. Frommeyer, U. Brux, P. Neumann, ISIJ Int. 43 (3) (2003) 438.

[3]. O. Bouaziz et al. / Current Opinion in Solid State and Materials Science 15 (2011) 141–168

[4]. J.-E. Jin, Y.-K. Lee, Effects of Al on microstructure and tensile properties of

C-bearing high Mn TWIP steel, Acta Mater. 60(4) (2012) 1680-1688.

[5]. Y.S. Jung, S.G. Kang, Y.K.Lee, High Mn TWIP Steel with High Strength and Ductility, Trends Met. Mater. Eng. 22(5) (2009) 22-27.

[7]. Seok Su Sohn1, Seung Youb Han1, Sang Yong Shin1, Jin-ho Bae2, Kisoo Kim2, Nack J. Kim3,

Hyoung Seop Kim1, and Sunghak Lee1,\*, Met. Mater. Int., Vol. 18, No. 4 (2012), pp.

597~606

[8] Fusahito Yoshida\*, Takeshi Uemori, International Journal of Plasticity 18 (2002) 661–686

[9] 김용환,김태우.이영선,이정환, 한국소성가공학회지(2004) pp.409-414

[10] P.-A.Eggertsen , K.Mattiasson , , International Journal of Mechanical Sciences 51(2009) 547–563

[11]. 박상천,박태준,고영우,석동윤, 한국소성가공학회지, 제22권 제6호,2013,pp.303-309 [12]. D. Y. Yang, S. W. Lee, J. B. Kim, J. W. Yoon, D. W. Lee, 1998, Holistic Design and Simulation System in Sheet Metal Forming Processes, Met. Mater., Vol. 4, No. 4, pp. 715~722. [13]. Y. T. Keum, T. S. Kim, H. J. In, 1993, Development of CAE System for Sheet Metal Forming, MOST, UCN954-4945-7.

[14]. J. H. Yoon, F. Barlat, 2006, Modeling and Simulation of the Forming of Aluminum Sheet Alloys, ASM Handbook 14B, Metalworking: Sheet Forming, ASM International, Materials Park, OH, USA.

[15]. B. K. Chun, H. Y. Kim, J. K. Lee, 2002, Modeling the Bauschinger Effect for Sheet Metals-Part II: Applications, Int. J. Plast., Vol.18, No. 5~6, pp. 597~616.

[16]. J. H, Lee, D. W. Kim, S. M. Sohn, Y. H. Moon, 2007, Spring Back Analysis of Thin Metal Sheets(1), Trans. Materials Processing, Vol.16, , No.7, pp. 509~515.

[17] Kanghwan Ahn1, Donghoon Yoo1, Min Hong Seo2, Sung-Ho Park2, and Kwansoo Chung1,\*, Met. Mater. Int., Vol. 15, No. 4 (2009), pp. 637~647

[18]. I. Gutierrez-Urrutia , J. A. del Valle , S. Zaefferer, D. Raabe, J Mater Sci (2010) 45:6604–6610

[19]. O. Bouaziz,\* S. Allain and Y. Estrin, Scripta Materialia 62 (2010) 713-715

[20]. J.A.Benito, R.Cobo, W.Lei, J.Calvo, J.M.Cabrera,

MaterialsScience&EngineeringA655(2016)310-320

[21]. IBRAHIM KARAMAN, HUSEYIN SEHITOGLU, Y.I. CHUMLYAKOV, HANS J. MAIER, and I.V. KIREEVA, METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A VOLUME 32A, MARCH 2001—695

[22]. F.Yoshida, T.Uemori, Int.J.Mech.Sci. 45(2003)1687–1702.

[23]. L. Geng, R.H. Wagoner, 2000. SAE paper No. 2000-01-0768. SAE, Inc.

[24]. S. Bouvier, H. Haddadi, P. Levée, C. Teodosiu, J. Mater. Process. Technol. 172 (2006)96.

[25]. R.K. Boger, R.H.Wagoner, F.Barlat, M.G.Lee, K.Chung, Int.J.Plast.21(2005) 2319–2343.

[26]. Gil Sevillano J (2009) Scripta Mater 60:336

[27]. Prager W (1955) Prog Inst Mech Eng 169:41

[28] Figueiredo RB, Corre<sup>\*</sup>a ECS, Monteiro WA, Aguilar MTP, CetlinPR (2010) J Mater Sci 45:804. doi:10.1007/s10853-009-4003-9

[29]. Zhang WH, Wu JL, Wen YH, Ye JJ, Li N (2010) J Mater Sci 45:3433.

doi:10.1007/s10853-010-4369-8

[30]. Das D, Chattopadhyay PP (2009) J Mater Sci 44:2957. doi: 10.1007/s10853-009-3392-0

[31]. Uslu MC, Canadinc D (2010) J Mater Sci 45:1683. doi: 10.1007/s10853-009-4157-5

[32]. Lu L, Shen Y, Chen X, Quian L, Lu K (2004) Science 304:422

[33]. Martin JW (1980) Micromechanisms in particle-hardened alloys. Cambridge University Press, Cambridge.

[34]. Brown LM (1977) Scripta Metall 11:127.

[35]. E. O. Hall, Proc. Phys. Soc. London, Vol. 643, 1951, p. 747, and N. J. Petch, J. Iron steel Inst, London, Vol. 173, 1953, p. 25, N. Hansen and B. Ralph, Acta Metall., Vol. 30, 1982, pp. 411-417, in G. E. Dieter, Mechanical Metallurgy Third Edition, McGraw-Hill, (1990) 75.

[36]. S. Kang, Y. S. Jung, J. H. Jun, Y. K. Lee, Mater. Sci. Eng. A 527 (2010) 745.

[37]. G. Dini, A. Najafizadeh, R. Ueji, S. M. Monir-Vaghefi, Mater. Design, 31 (2010) 3395.

[38] R. Ueji, N. Tsuchida, D. Terada, N. Tsuji, Y. Tanaka, A. Takemura, K. Kunishige, Scripta Mater., 59 (2008) 963.

[39]. Bouaziz O, Allain S, Scott C (2008) Scripta Mater 58:484 식1

[40]. Wilson DV, Bate PS (1986) Acta Metall 34:1107

[41]. Atkinson JD, Brown LM, Stobbs WM (1974) Philos Mag 30:1247

[42]. Moan GD, Embury JD (1979) Acta Metall 27:903

[43]. F. Barlat, J. C. Brem, J. W. Yoon, K. Chung, R. E. Dick, S.-H. Choi, F. Pourboghrat, E. Chu, and D. J. Lege, Int. J. Plasticity 19, 1297 (2003).

[44]. Materials Science and Engineering A 483-484 (2008) 184-187

[45]. K.T. Park, K.G. Jin, S.H. Han, S.W. Hwang, K. Choi, C.S. Lee, Stacking fault energy and plastic deformation of fully austenitic high manganese steels: Effect of Al addition, Mater. Sci. Eng. A 527(16-17) (2010) 3651-3661.

[46]. K.T. Park, G. Kim, S.K. Kim, S.W. Lee, S.W. Hwang, C.S. Lee, On the transitions of deformation modes of fully austenitic steels at room temperature, Metals and Materials International 16(1) (2010) 1-6.

[47]. Oslon GB, Cohen M. Metall Mater Trans A 1976;7A:1897.

[48]. Schramm RE, Reed RP. Metall Mater Trans A 1975;6A:1345.

[49]. Williams DB, Carter CB. Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science, Springer Science and Business Media, New York(NY);2009:423.

[50]. K. H. Jung, "Effects of Si on mechanical twinning and strain hardening of Fe-18Mn-

0.6C TWIP steel", Master's thesis, Yonsei University, Seoul (2012).

[51]. J.-E. Jin, Y.-K.Lee, ActaMater. 60 (2012) 1680–1688.

[52]. B.C. DeCooman, J.Kim, S.Lee, Scr. Mater. 66 (2012) 986–991.

[53]. E. P. Kwon, Mater. Sci. Eng. A, 570 (2013) 43.

[54]. Seok Su Sohn1, Seung Youb Han1, Sang Yong Shin2, Jin-ho Bae3, and Sunghak

Lee1,\*, Met. Mater. Int., Vol. 19, No. 3 (2013), pp. 423~431

[55]. 이동녕, 재료강도학, 문운당, pp. 309-316, pp.365-367

[56]. 김동욱\* · 방성식\* · 김민수\* · 이형일\*† · 김낙수\*, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 37, No. 10, pp. 1239~1249, 2013 [57]. E. O. Hall, Proc. Phys. Soc. London, Vol. 643, 1951, p. 747, and N. J. Petch, J. Iron steel Inst, London, Vol. 173, 1953, p. 25, N. Hansen and B. Ralph, Acta Metall., Vol. 30, 1982, pp. 411-417, in G. E. Dieter, Mechanical Metallurgy Third Edition, McGraw-Hill, (1990) 75.

[58]. S. Kang, Y. S. Jung, J. H. Jun, Y. K. Lee, Mater. Sci. Eng. A 527 (2010) 745.

[59]. G. Dini, A. Najafizadeh, R. Ueji, S. M. Monir-Vaghefi, Mater. Design, 31 (2010) 339.

[60]. R. Ueji, N. Tsuchida, D. Terada, N. Tsuji, Y. Tanaka, A. Takemura, K. Kunishige, Scripta Mater., 59 (2008) 963. 5.

[61]. ASTM Standard E8m-09, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM, (2009).

[62]. ASTM E606-92, ASTM,(1998)

[63]. 허무영, 철강재료의 집합조직 첫걸음, 문운당, pp.124-154

[64]. 이정훈, Pohang University of Science and Technology, 학위논문 (2017)

[65]. Y. Estrin, H. Mecking, Acta Mater. 32 (1984) 57.

[66]. I. KARAMAN, H. SEHITOGLU, K. GALL, Y. I. CHUMLYAKOV and H. J. MAIER, Acta mater. 48 (2000) 1345±1359

[67]. S. Vercammen a,\*, B. Blanpain a,\*, B.C. De Cooman b, P. Wollants a, Acta Materialia 52 (2004) 2005–2012

[68]. D. Barbiera,b, N. Geya,\*, S. Allain c, N. Bozzoloa, M. Humbert a, Materials Science and Engineering A 500 (2009) 196–206

[69]. L. Meng,a P. Yang,a,\* Q. Xie,a H. Dingb and Z. Tangb, Scripta Materialia 56 (2007) 931–934 [70]. Seok Su Sohn1, Seung Youb Han1, Sang Yong Shin2, Jin-ho Bae3, and Sunghak Lee1,\*, Met. Mater. Int., Vol. 19, No. 3 (2013), pp. 377~388 [71]. 메리츠종금증권 리서치센터보도자료, 국토교통부

[72]. KISTI 미리안 글로벌동향브리핑 http://phys.org/news/2015-12-springback-environmentally-

friendly-cars.html?utm\_source=menu&utm\_medium=link&utm\_campaign=item-menu

[73].포스코-연연속압연기술,

http://www.posco.co.kr/homepage/docs/kor5/jsp/product/skill/s91c5000030c.jsp?mdex=posco14C

[74]. 항복강도에 따른 스프링백의 차이, 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

[75]. A. Dumaya,\*, J.-P. Chateau a, S. Allain b, S. Migot a, O. Bouaziz b, Materials Science and Engineering A 483–484 (2008) 184–1872

[76]. A. SAEED-AKBARI, J. IMLAU, U. PRAHL, and W. BLECK, METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, VOLUME 40A, DECEMBER 2009—3077

[77]. K. H. Jung, "Effects of Si on mechanical twinning and strain hardening of Fe-18Mn-0.6C TWIP steel", Master's thesis, Yonsei University, Seoul (2012).