

소성인장변형 및 아연도금된 Fe-Mn-C계 TWIP 강역 전기화학적 수소투과거동

김성진[†]

순천대학교 신소재공학과

(2023년 5월 31일 접수, 2023년 6월 14일 수정, 2023년 6월 20일 채택)

Electrochemical Hydrogen Permeation Behaviors of Pre-Strained Fe-Mn-C TWIP Steel With or Without Zn Coating

Sung Jin Kim[†]

Department of Advanced Materials Engineering, Suncheon National University, Jungang-ro, Suncheon 57922, Republic of Korea

(Received May 31, 2023; Revised June 14, 2023; Accepted June 20, 2023)

This study aimed to evaluate hydrogen permeation behaviors of pre-strained twinning-induced plasticity steel with or without Zn coating using electrochemical permeation technique. In contrast to un-strained and 30% strained samples, permeation current density was measured in the 60% strained sample. Tensile pre-straining at 60% involved microstructural modifications, including a high level of dislocation density and stacking fault with a semi-coherent twin boundary, which might provide a high diffusion path for hydrogen atoms. However, reproducibility of measurements of hydrogen permeation current was low due to non-uniform deformation and localized stress concentration. On the other hand, the permeation current was not measured in pre-strained TWIP steel with Zn coating. Instead, numerous blisters with some cracks were observed on the surface of the coating layer. In locally damaged Zn coating under tensile straining, hydrogen atoms could relatively easily permeate through the coating layer. However, they were trapped at the interface between the coating layer and the substrate, which might delay hydrogen penetration into the steel substrate.

Keywords: Tensile strain, TWIP steel, Hot-dip galvanizing, Hydrogen permeation

1. 서론

TWIP강은 대부분 오스테나이트를 기지조직으로 하여 소성변형 시 미세한 쌍정을 형성하는 방식으로 응력을 해소하고 가공경화속도를 높임으로써 고강도-고인성 조합의 우수한 기계적 물성을 가지는 강재로 알려져 있다 [1,2]. 따라서, 20년 이상 학술적, 산업적으로 많은 관심을 받아왔고 최근 초고강도 자동차용 부품소재로의 적용 또한 고려되고 있다 [2,3]. 이를 위해, TWIP강을 대상으로 한 지연파괴 저항성 평가 및 저항성 향상을 위한 야금학적 기술개발에 대한 연구는 지속적으로 이루어져 왔다 [1,4]. 지연파괴의 주 원인으로 간주되는 수소의 유입 및 취화 측면에서, 오스테나이트 조직은 수소취화에 덜 민감한 것으로 알려져 있다. 일반적으로 오

스테나이트 조직 내 수소원자의 확산계수($\sim 10^{-15}$ m²/s)는 페라이트 조직 대비 현저히 낮은 수준 [5]이고 소성변형 시에도 수많은 변형쌍정이 형성되어 수소원자의 추가적인 트랩 가능성 [6]이 제기되는 등으로 판단컨대 수소원자의 유효확산속도는 크게 낮은 것으로 이해될 수 있다. 또한, AI 첨가를 통한 지연파괴저항성 향상 메커니즘 연구 또한 활발히 이루어진 바 있다 [4,7]. 하지만, 오스테나이트 조직 내 수소원자의 낮은 확산계수에 기인하여 TWIP 강 내 수소원자의 확산 및 투과거동을 실험적으로 규명하는 것은 쉽지 않다. 고온·고압 조건 하에서 수소기체 투과실험이 수행될 수 있지만, 실험의 안전성, 편의성 측면과, 고온·고압의 구동조건 하에서 실험 중 발생할 수 있는 미세조직적 변화의 가능성을 전적으로 배제하기 위한 측면에서는 상온·상압 하에서 수행되는 전기화학적 투과실험이 효율적인 실험법이 될 수 있다. 물론, 이 경우에도, 소재에 따라 시편의 두께를 일정 이하로 감소시키는 준비 작업 또는 인장응력

[†]Corresponding author: sjkim56@snu.ac.kr

김성진: 교수

기반의 정적 및 동적 변형 등이 수반될 필요가 있다.

이에, 본 연구에서는 TWIP 강 내 수소원자의 빠른 확산경로를 제공하는 측면과 실제 자동차용 소재로 적용 시 가공공정 모사 측면에서, 소재를 소성변형 후 전기화학적 투과거동을 분석하고자 하였다. 뿐만 아니라, 자동차용 차체로 적용 가능성 하에 표면부 아연도금 적용 후 소성변형과 수소투과거동 간 상관성을 규명하고자 하였다. 이를 위해, TWIP강 시편을 대상으로 높은 수준의 소성인장변형 후, 변형 수준에 따라 전기화학적 수소투과실험을 수행하였고, 그 결과를 투과전자현미경 (Transmission electron microscopy, TEM)을 활용한 미세조직적 변화 측면에서 해석하여 자연과괴저항성과 연관 지어 이해하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 정보

본 연구에 사용된 시편은 무게비로 17 ~ 18% Mn - 0.5 ~ 0.6% C를 포함하는 TWIP 강재로서 슬라브를 1200 °C 온도에서 재가열 후 열간압연 하였고 수냉하여 650 °C까지 냉각한 이후 1시간 유지 후 상온으로 최종 냉각하였다.

표면 Zn 도금층 형성을 위해 고온의 수소분위기에서 환원 열처리 직후, 440 °C로 유지되고 있는 용융 아연도금욕에 수 초간 침지하였으며 시편 추출과 동시에 도금층 두께 측어를 위해 도금 표면은 Air-knife 처리되었다.

2.2 소성인장변형과 미세조직 관찰

소성인장변형된 TWIP 강의 미세구조 관찰을 위해 우선 인장시험편 형태로 가공된 시편을 대상으로 인장시험기(ZWICK)를 활용하여 Strain이 각각 30%와 60%에 해당되는 소성변형을 10⁻³/s의 Strain rate 하에서 인가하였다. 인장시험편의 길이방향으로 중심부에 해당되는 위치에서 시편을 채취 후 전해연마를 통해 Thin foil로 제작하여 TEM을 활용하여 미세구조를 분석하였다.

2.3 전기화학적 투과실험

ISO 17081 [8] 규격을 토대로 소성인장변형된 TWIP 강의 수소투과거동을 분석하고자 하였다. SIC paper (#2000)로 기계적 연마 및 초음파 세척한 시편(두께: 1~2 mm)을 대상으로 HCl 수용액 내에서 수초간 산세 후 투과실험 Cell에 장착하여 수소검출부 면에 100 ~ 150 nm 두께의 Pd 도금층을 전기도금 처리하여 형성시켰다. 도금용액 및 조건의 경우 선행연구 문헌 [9]에 기재되었다. 이후, 탈기된 0.1M NaOH 수용액 내 260 mV_{SCE} 수준의 양극전위를 인가하며 0.1 μA/cm² 이

하의 배경전류를 획득하였다. 수소주입부 면의 경우 3 wt%의 NaCl + 0.3 wt% NH₄SCN 수용액을 주입하고 -3 mA/cm²의 음극전류를 인가시키는 방식으로 수소를 유입시켰다. 이후 측정되는 투과전류밀도가 정상상태에 도달 시 아래의 equation을 이용하여 수소의 확산계수, 투과유량 및 용해도 값을 도출하였다.

$$D_{app} = L^2/6 \cdot t_{lag} \quad (1)$$

$$J_{ss} = i_{ss}L/nF \quad (2)$$

$$C_{app} = J_{ss}L/D_{app} \quad (3)$$

여기서, D_{app} , L , t_{lag} , i_{ss} , $J_{ss}L$, n , F , C_{app} 는 각각 수소확산계수, 시편두께, 정상상태의 투과전류밀도의 63%에 해당되는 전류밀도 값에서의 시간, 정상상태에서의 투과전류밀도, 수소원자의 투과유량, 반응에 참여한 전자수, 패러데이 상수, 수소원자의 용해도를 의미한다.

아연도금 처리재의 경우, 표면 산세 및 수소검출부 면의 Pd 도금 처리 등의 작업 시 수소주입부 면의 도금층의 부식 및 손상을 배제하기 위해 수소주입부 표면을 우선 Lacquer 처리 후 연마, 산세 및 도금으로 이어지는 일련의 공정처리 후 최종적으로 아세톤 내에서 초음파세척을 통해 Lacquer를 제거하는 방식으로 수소투과실험을 수행하였다. 자세한 방법 및 기타 실험조건은 선행연구 문헌 [10]에 기재되어 생략하기로 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전기화학적 수소투과거동

TWIP 강 시편을 대상으로 30 및 60%의 소성인장변형 인가 후 수행한 전기화학적 수소투과실험 결과는 Fig. 1에 나타내었다. 30% 변형 인가 시에는 대략 2주간에 걸친 장시간에서도 수소투과가 이루어지지 않은 반면, 60%의 변형에서는 비교적 빠른 시간 내에 수소투과가 가능함을 알 수 있다. 우선 소성인장변형을 통해 예상할 수 있는 미세구조의 변화로는 Dislocation, Twin 및 Stacking fault의 생성이다. FCC 기반의 재료 내에서 Dislocation은 수소원자의 이동을 촉진시키는 역할을 한다는 것은 과거 Kurkela [11] 등의 연구자들에 의해 이미 밝혀진 바 있지만, 본 연구결과를 토대로 30% 이하의 소성변형 하에서 생성된 Dislocation 및 Stacking fault에 의해서는 상온에서 TWIP 강 내 존재하는 수소의 이동을 가속화시키는데에 한계가 있음을 추측해 볼 수 있다. 반면, 60%의 소성변형 하에서는 수소투과가 이루어졌고 수소투과 변수 값들이 Table 1에서 제시된 바와

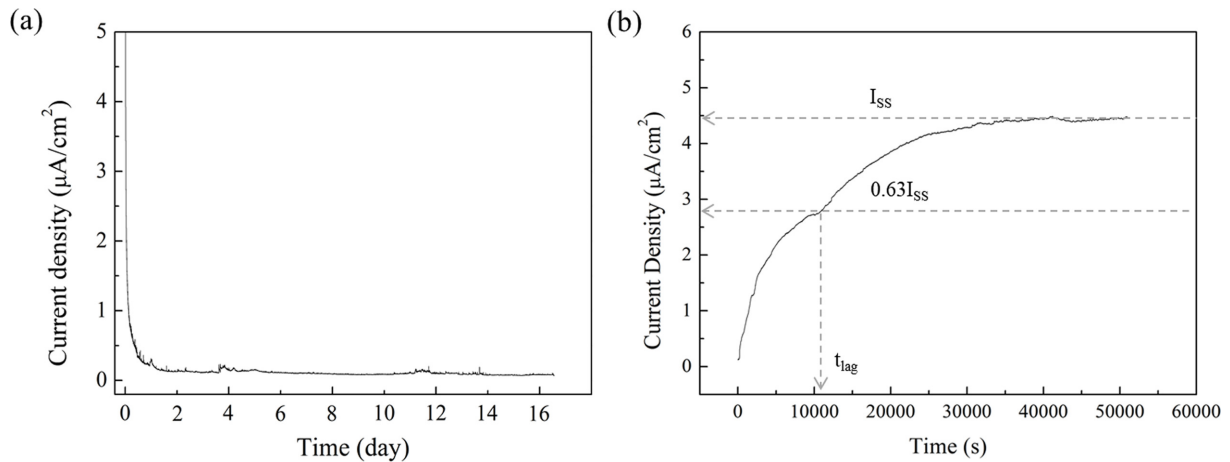


Fig. 1. Hydrogen permeation current densities of the TWIP steel samples after tensile pre-straining at (a) 30% and (b) 60%

Table 1. Hydrogen diffusion parameters of TWIP steel sample after tensile pre-straining at 60%

Diffusion parameters	60% Pre-strained sample
D_{app} ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	1.87×10^{-12}
$J_{ss}L$ ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.60×10^{-10}
C_{app} ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$)	85.99

같이 도출되었지만 데이터의 신뢰성이 실험의 재현성에 의존하는 바, 재현성의 정도가 상당히 낮아 Table 1에 제시된 데이터 값을 일반화하여 TWIP 강의 수소확산 거동을 논의하는 것은 무리가 있다고 판단된다. 또한, 실제로 60%에 해당되는 소성변형이 시편에 인가되면 시편 전반에 걸쳐 균일한 변형이 이루어지지 않는다. 심지어, Necking이 발생되기도 하고, 시편 내에 다양한 형태의 Microvoid의 형성 또한 가능해지면서, 응력의 국부집중 및 불균일한 변형이 야기되는 것으로 볼 수 있다. 이는 수소의 이동 및 투과 측면에서 볼 때 도출되는 투과전류 값이 보이는 비재현성의 원인으로 판단된다.

3.2 소성인장변형 후 미세조직 변화와 수소확산 거동 간 상관성

변형되지 않은 TWIP 강의 미세조직에는 선행연구 [12]에서 제시된 바와 같이 Dislocation, Twin 등이 관찰된다. 반면, 높은 수준의 소성인장변형이 인가되면 추가적인 미세조직적 변화가 수반된다. Fig. 2에서 제시된 바와 같이 60%의 변형에서는 많은 Twin 밴드가 추가로 형성될 뿐 아니라, 밴드의 두께가 대략 20 ~ 30 nm 정도로 두껍게 관찰되며 그 내부가 다량의 Stacking fault가 명확히 관찰된다. 뿐만 아니라 Twin 밴드를 확대해서 관찰하여 Boundary 자체가 계단식으로 Step을 형성

하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, Twin 밴드 내에 Stacking fault가 생성되면서 Semi-coherent 한 Twin boundary가 형성되는 것이다. Twin boundary와 수소의 확산거동 간 상관성에 대하여, 강제 내 형성된 Twin boundary는 수소이동에 대한 트랩으로서 수소확산을 지연시키는 요소로 보고된 바 있다 [6]. 이와 상반된 연구로서, Cho et al. [13]에 따르면, 높은 수준의 소성변형으로 기 형성된 Twin boundary에 수소가 유입될 경우 수소 유기 균열이 형성됨과 함께 결국 수소 확산이 촉진됨을 보여주었다. 이와 같은 상반된 연구결과가 야기된 것과 관련해, 강재의 종류, 인가된 소성변형 수준 및 수소주입 방식과 주입된 수소량 등의 상이함 등으로 그 원인을 추측해 볼 수 있으나 현재까지도 불명확한 부분은 여전히 존재한다. 본 연구에서는 수소주입된 60%의 변형시편 내 Twin boundary에서 균열형성 여부에 대해서는 정확히 판단할 수 없으나, 60% 수준의 인장변형으로 형성된 다량의 Stacking fault에 의해 Semi-coherent한 Twin boundary 또한 앞서 언급한 Microvoid와 함께 수소의 확산경로를 제공할 수 있는 주 요인으로 추측한다. 반면, 30% 수준에 해당되는 소성변형이 인가된 경우, 60%의 경우와 달리 생성된 Twin 밴드의 두께가 상대적으로 얇고 내부에 Stacking fault 또한 명확히 관찰되지 않음을 예비연구에서 확인한 바 있다. 뿐만 아니라, 시편 내 전위밀도 또한 60% 변형재 대비 30% 변형재의 경우가 현저히 낮을 것으로 추측된다. 일부 선행연구 [14]에서는 TWIP 강재의 경우 높은 수준의 소성변형 인가 시 국부적으로 ϵ -martensite로의 상변태가 가능한 것으로 보고되고 있지만, 본 연구에서 수행된 XRD 분석(Fig. 3)으로는 명확한 구분이 되지 않았다. 물론, 국부적인 영역에 한정된 변태상 형성 또는 XRD 피크로 분석되지 않을 수준의 변태상 형성의 가능성도 배제할 수는 없다. 특히, FCC

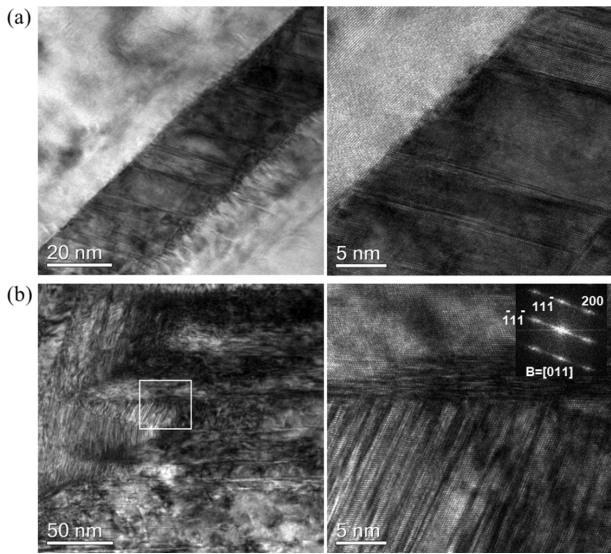


Fig. 2. TEM observations with the diffraction pattern of TWIP steel sample after tensile pre-straining at 60%: (a) Twin band; (b) Stacking fault in twin band

구조의 Austenite 구조 내 현저히 낮은 수준의 수소확산 계수 대비 60% 소성변형 하에서 크게 증가된 확산계수 값(Table 1 참조)을 비교해 볼 때, 소성변형 시 국부적으로 BCC/BCT 구조의 상변태 가능성을 고려해 볼 수도 있다. 이상의 결과 및 논의를 토대로, 본 TWIP 강의 경우 60% 수준의 소성변형을 통해 조직 내 형성된 Microvoid 와 Stacking fault에 야기된 Semi-coherent한 Twin boundary 가 수소원자의 주된 확산 채널로 작용하였을 것으로 판단되며, Twin boundary에서 수소유기균열의 형성 여부 및 소성변형 하에서 국부적인 변태상의 형성 또한 영향 인자로서의 가능성을 추가로 검증해 볼 필요가 있다. 결국 높은 수준의 소성변형 하에서 형성된 수소의 확산 채널 형성은 수소지연과피 저항성 측면에서 불리할 것으로 짐작된다.

3.3 아연도금과 수소확산 거동 간 상관성

선행연구 [4]에서는 주로 TWIP 강의 수소지연과피 저항성 향상을 위한 노력의 일환으로 소재 내 소량의 Al 을 합금으로 첨가하여 Stacking fault 에너지를 증가시키고 Austenite의 안정도를 높여 Martensite로의 변태를 억제시키는 방식으로 수소지연과피의 저항성을 높이고자 하였다. 이와는 별도로 본 연구에서는 표면 아연도금처리가 소성변형된 TWIP 강의 수소유입 억제 측면에서 지연과피 저항성 과의 관계를 논의해보고자 하였다. 우선, Zn 도금된 TWIP 강을 60% 소성변형 후 전기화학 적 수소투과실험 결과 Fig. 1a와 유사하게 장시간 음극차전 하에도 수소투과전류가 측정되지 않았다. 하지만, 음극차전 후 도금시편 표면 관찰 시, 다량의 Blister가 관찰되었다(Fig. 4b,c), Blister 형성 영역을 확대 관찰하면 인근영역 사이에 균열 또한 형성되었다(Fig. 4d). 단면의 경우, 마치 Sponge 형태의 크고작은 기공들이 도금층 내부에 다량 형성되었음을 알 수 있다. 일반적으로 소재 내 수소유입 후 표면에 형성되는 Blister 및 Blister 균열의 경우 표면과 인근의 하단 부에 수소재결합 반응($H + H \rightarrow H_2$)을 통한 내압으로 표면이 들러 올라감에 따른 결과로 간주된다. Zn 도금된 TWIP 강재 또한 유사한 맥락에서 표면 Blister의 형성을 해석할 수 있다. 구체적으로, 음극차전으로 Zn 도금층 표면에서 발생하는 수소는 동일 음극전류 하에서 강재 표면의 경우 대비 낮은 수준임을 예상해 볼 수 있다. 이는 Fe 대비 Zn의 수소 교환전류밀도가 낮음에 기인한 것이며, 발생한 수소가 일부 손상된 Zn 도금층 내부를 침투할 수 있을 것으로 판단된다. Zn 도금층은 HCP 구조를 형성하며 수소원자의 확산계수가 극히 낮은 수준($\sim 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$)으로 보고되지만 [15], 높은 수준의 소성변형으로 손상된 Zn 도금층의 경우 수소원자의 침투 및 유입이 상대적으로 용이할 것으로 생각된다. 그리고 도금층 내부에서

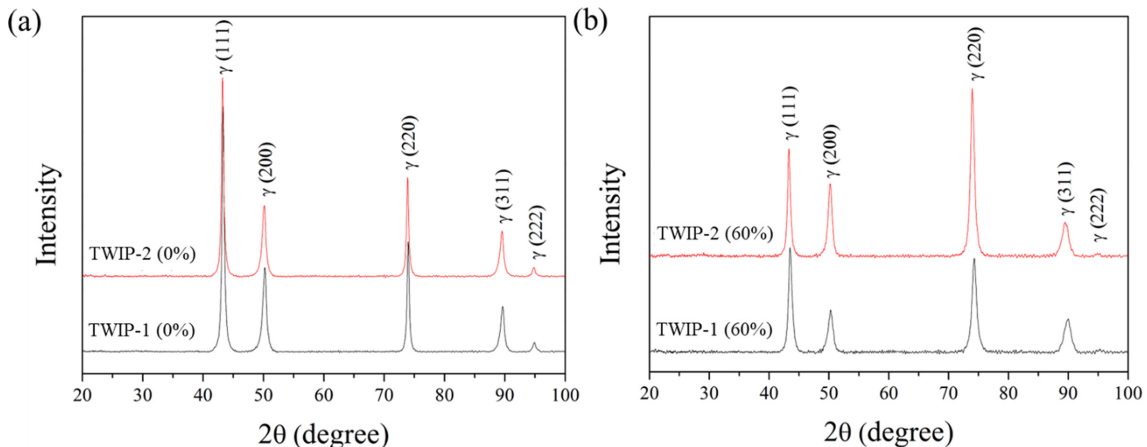


Fig. 3 XRD patterns of TWIP steel samples after tensile pre-straining at (a) 30% and (b) 60%

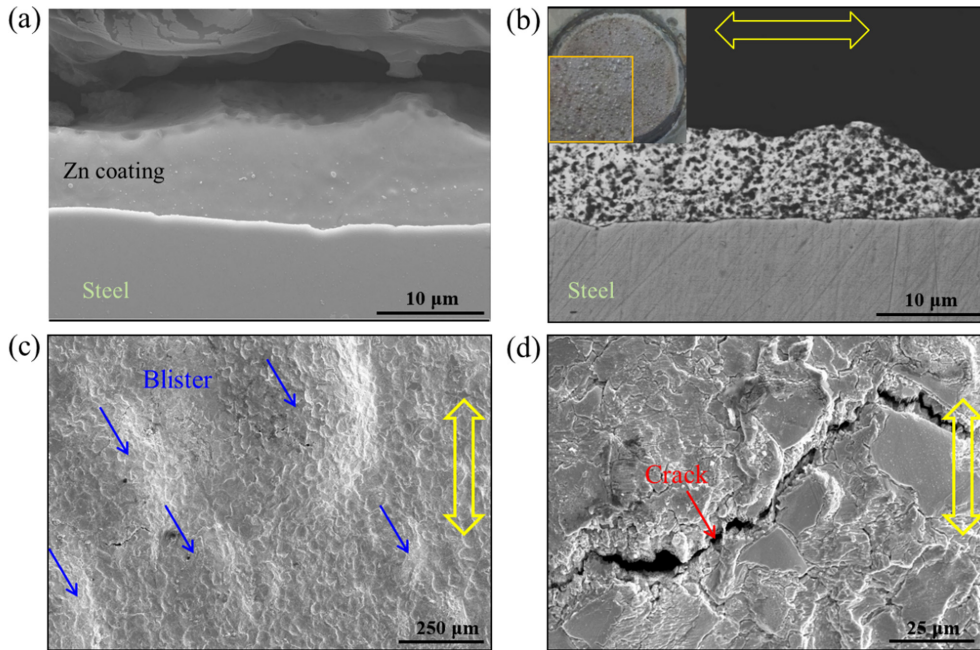


Fig. 4. FE-SEM observations of Zn-coated TWIP steel sample (a) before and (b-d) after tensile pre-straining at 60%; (a,b) Cross-section images; (c,d) Surface images

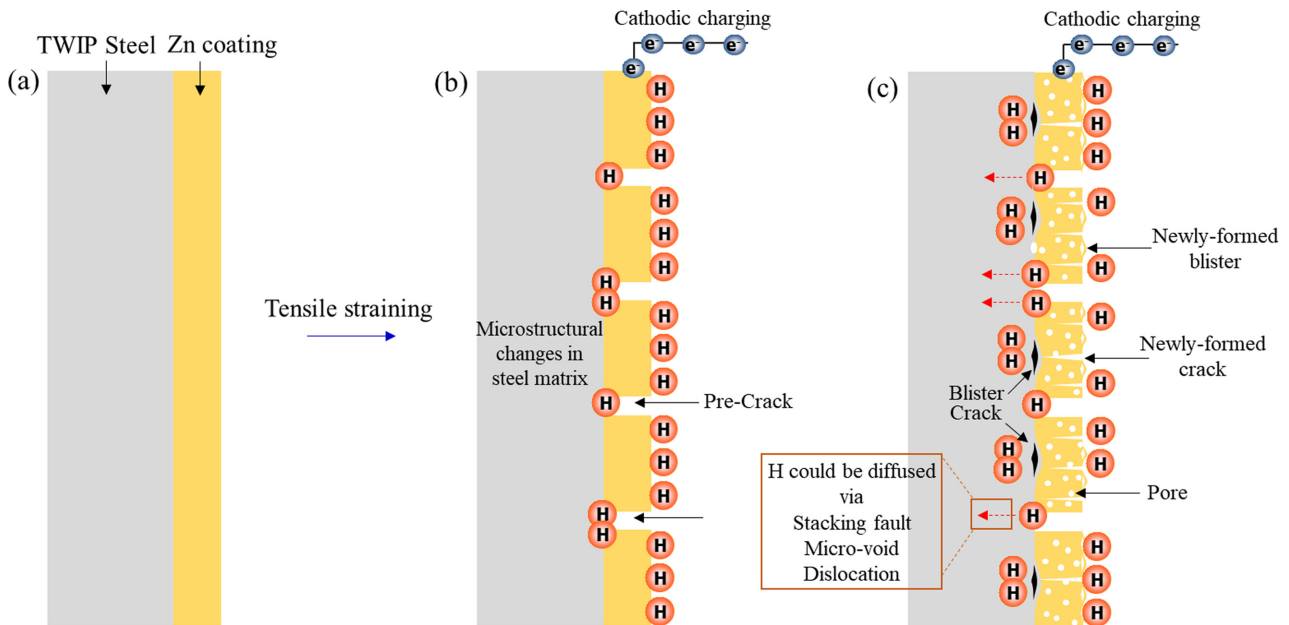


Fig. 5. Schematic illustration of the hydrogen infusion behavior of tensile pre-strained TWIP steel with Zn coating

또는 도금층과 소지철의 계면부에 다량 집적되어 트랩된 수소는 분자재결합 반응을 통해 Blister 형성에 기여하며 소지철 내부로의 유입이 상당시간 지연될 수 있을 것이다. 본 연구에서 논의된 Zn 도금된 TWIP 강 수소유입 메커니즘을 시각화하여 Fig. 5에 나타내었다. 결국, Zn 도금된 TWIP 강 경우 높은 수준의 소성 변형 하에서도 소지철 내부로 침투하는 수소의 Kinetics

를 효과적으로 억제하여 미도금재 대비 수소지연과 파괴 저항성을 일부 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 계면부에 형성되는 Blister 균열로 인한 표면부 손상으로 인해 소재의 조기파단의 가능성을 전적으로 배제할 수는 없을 것으로 사료되며, 향후 표면부에 국한된 손상과 조기파단의 상관성에 대해서는 추가연구가 필요할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 Fe-Mn-C 계 TWIP강을 대상으로 소성인장변형 및 아연도금 후 수소투과거동을 분석하고자 하였다.

강재의 30 및 60%에 해당되는 소성인장변형 인가 후 전기화학적 수소투과실험 결과 30% 변형 인가 시에는 대략 2주간에 걸친 장시간에서도 수소투과가 이루어지지 않은 반면, 60%의 변형에서는 비교적 빠른 시간 내에 수소투과가 가능하였다. 이는 높은 수준(60%)의 소성변형재에 국한하여 미세조직 내 Microvoid, Stacking fault 및 Twin 등의 형성과 관련하여 수소원자의 확산 채널로 작용한 데 따른 결과로 판단되었다. 아울러 국부적인 변태상의 형성 또한 영향 인자로서의 가능성을 추가로 검증해 볼 필요가 있다. 다만, 인가되는 응력(60%)의 국부집중 및 불균일한 변형 하에서 수소의 이동 및 투과를 통해 측정되는 투과전류 값의 재현성이 낮게 나타났다.

용융아연도금 된 TWIP 강을 대상으로 소성인장변형 후 전기화학적 수소투과실험 결과 수소투과전류가 측정되지 않았지만 도금시편 표면에 다량의 Blister가 관찰되었다. 소성변형 하에서 국부 손상된 Zn 도금층의 경우 수소원자의 침투 및 유입이 상대적으로 용이할 수 있으나 도금층과 소지철의 계면부에 다량 집적되어 트랩된 수소는 분자재결합 반응을 통해 Blister가 형성되며 소지철 내부로의 유입이 상당시간 지연될 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgement

This research was supported in part by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2022R1A2C4001255).

References

1. J. K. Jung, O. Y. Lee, Y. K. Park, D. E. Kim, and K. G. Jin, Hydrogen Embrittlement Behavior of High Mn TRIP/TWIP Steels, *Korean Journal of Materials Research*, **18**, 394 (2008). Doi: <https://doi.org/10.3740/MRSK.2008.18.7.394>
2. O. Grassel, L. Kruger, G. Frommeyer, and L. W. Meyer, High strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels development — properties — application, *International Journal of Plasticity*, **16**, 1391 (2000). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(00\)00015-2](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(00)00015-2)
3. O. Bouaziz, S. Allain, C. P. Scott, P. Cugy, and D. Barbier, High manganese austenitic twinning induced plasticity steels: A review of the microstructure properties relationships, *Current Opinion In Solid State and Materials Science*, **15**, 141 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2011.04.002>
4. Y. S. Chun, K. T. Park, and C. S. Lee, Delayed static failure of twinning-induced plasticity steels, *Scripta Materialia*, **66**, 960 (2012). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.02.038>
5. K. S. Kim, J. H. Kang, and S. J. Kim, Nitrogen effect on hydrogen diffusivity and hydrogen embrittlement behavior in austenitic stainless steels, *Scripta Materialia*, **184**, 70 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.03.038>
6. H. Ji, I. J. Park, S. M. Lee, and Y. K. Lee, The effect of pre-strain on hydrogen embrittlement in 310S stainless steel, *Journal of Alloys and Compounds*, **598**, 205 (2014). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.02.038>
7. K. G. Chin, C. Y. Kang, S. Y. Shin, S. M. Hong, S. H. Lee, H. S. Kim, K. H. Kim, and N. J. Kim, Effects of Al addition on deformation and fracture mechanisms in two high manganese TWIP steels, *Materials Science and Engineering A*, 528, 2922 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.12.085>
8. ISO 17081:2004 (E), Method of Measurement of Hydrogen Permeation and Determination of Hydrogen Uptake and Transport in Metals by an Electrochemical Technique, ISO, Switzerland (2004).
9. S. J. Kim and K. Y. Kim, Electrochemical hydrogen permeation measurement through high-strength steel under uniaxial tensile stress in plastic range, *Scripta Materialia*, **66**, 1069 (2012). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.03.001>
10. J. S. Park, H. J. Lee, and S. J. Kim, Electrochemical Corrosion and Hydrogen Diffusion Behaviors of Zn and Al Coated Hot-Press Forming Steel Sheets in Chloride Containing Environments, *Korean Journal of Materials Research*, **28**, 286 (2018). Doi: <https://doi.org/10.3740/MRSK.2018.28.5.286>
11. M. Kurkela, G. S. Frankel, R. M. Latanision, S. Suresh, and R. O. Ritchie, Influence of plastic deformation on hydrogen transport in 2 14 Cr-1Mo steel, *Scripta Metallurgica*, **16**, 455 (1982). Doi: [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(82\)90172-7](https://doi.org/10.1016/0036-9748(82)90172-7)
12. J. K. Jung, N. K. Kim, Y. S. Yeon, H. H. Kim, and O. Y. Lee, Effect of Annealing Temperature and Alloying Elements on the Mechanical Properties of Fe-Mn-C TWIP

- Steels, *Korean Journal of Materials Research*, 20, 385 (2010). Doi: <https://doi.org/10.3740/MRSK.2010.20.7.385>
13. H. J. Cho, K. S. Kim, H. S. Noh, and S. J. Kim, Origin of deformation twins and their influence on hydrogen embrittlement in cold-rolled austenitic stainless steel, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 22195 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.045>
14. A. Saeed-Akbari, J. Imlau, U. Prahl, and W. Bleck, Derivation and Variation in Composition-Dependent Stacking Fault Energy Maps Based on Subregular Solution Model in High-Manganese Steels, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 40, 3076 (2009). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11661-009-0050-8>
15. S. K. Rajagopalan, pp. 203-204, McGill University, Montreal, Canada (2012).