

고Mn강 후판 주조재의 제조공정 중 표면결함 원인 규명

박진성^{1,2} · 강명훈² · 김성진^{1,†}

¹순천대학교 첨단신소재공학과, 전남 순천시 중앙로 255

²POSCO 기술연구원, 전남 광양시 폭포사랑길 8

(2025년 1월 22일 접수, 2025년 2월 03일 수정, 2025년 2월 09일 채택)

Investigation of Surface Defects in the Manufacturing Process of High-Mn Steel Casting Plate

Jin Sung Park¹, Myeong Hun Kang², and Sung Jin Kim^{1,†}

¹Department of Advanced Materials Science and Engineering, Sunchon National University,
255, Jungang-ro, Suncheon-si, Jeollanam-do, 57922, Republic of Korea

²POSCO Technical Research Laboratories, 8, Pokposarang-gil, Gwangyang-si, Jeollanam-do, 57807, Republic of Korea

(Received January 22, 2025; Revised February 03, 2025; Accepted February 09, 2025)

This study aimed to investigate origins of surface defects observed in high-Mn steel casting slabs after heat treatment conducted at 1170 °C for 2 h and provide insights into their mitigation strategies. The grinding process resulted in the formation of a surface-deformed area composed of a recrystallized fine-grain layer and multiple metal flows. Cross-sectional observations and analyses employing field-emission scanning electron microscopy and energy-dispersive spectroscopy revealed that the occurrence of surface defects was due to internal oxidation with a penetrating form along coarse grain boundaries. Based on oxidation of pre-corroded steel samples during the initial stage, it was found that internal oxidation was initiated at (Fe, Mn)-based corrosion products formed during the pre-corrosion process. This process facilitated deep oxygen penetration along Mn- and Cr-enriched grain boundaries, exacerbating surface degradation. These findings indicate that controlling corrosion during manufacturing of high Mn-based steel casting plate, particularly prior to heat treatment, is essential for suppressing surface defects.

Keywords: High Mn steel, Casting plate, Surface defect, Corrosion, Oxidation

1. 서론

최근, 엄격해진 환경 규제에 따라 LNG 추진선 제작을 위한 극저온용 고Mn 기반 철강소재의 개발 수요가 증가하고 있다 [1]. 해당 소재는 상온에서 면심입방격자(FCC, Face-Centered Cubic) 구조를 가지고 극저온(-100 °C)에서도 우수한 기계적 물성 보증이 가능하며, 높은 가공경화율을 토대로 우수한 내마모 특성 구현이 가능한 것으로 알려져 있다 [2]. 특히 소성변형 시 쌍정(Twin) 변형에 따른 높은 인장강도 및 연신율 확보가 가능하여 다양한 산업 내 적용성에 대한 관심이 높아지고 있다 [3,4].

한편, 고Mn 강재의 제조를 위한 공정 프로세스 중 재

가열 및 압연 시 망상형태의 결함형성에 기인한 제품 불량률 증가의 문제가 크게 대두되고 있다. 해당 제품의 일반적인 제조 프로세스는 주조, 절단, 및 적치, 그라인딩(Grinding), 산화억제제 도포, 재가열 및 압연으로 요약된다(Fig. 1).

이러한 제조 프로세스 중 망상형태의 표면결함에 직접적인 역할을 하는 공정단계 및 유기인자에 대한 원인이 불분명하여 이에 대한 원인규명이 시급한 실정이다. 특히, 주조 슬라브의 대기 노출시간 장기화에 따라 발생하는 결함수준 및 빈도 증가를 고려해 볼 때, 해당 결함은 부식 및 산화현상 등의 표면반응과 밀접한 관련이 있음을 추측해 볼 수 있다. Park *et al.* [5]의 선행연구에서는, 표면 그라인딩과 미세조직적 변화, 그리고 침투형태의 부식거동 간 상관성에 대해 논의하였다. 구체적으로, 그라인딩 공정 중 야기되는 표면부 동적재결정

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

박진성: 연구원, 강명훈: 연구원, 김성진: 교수

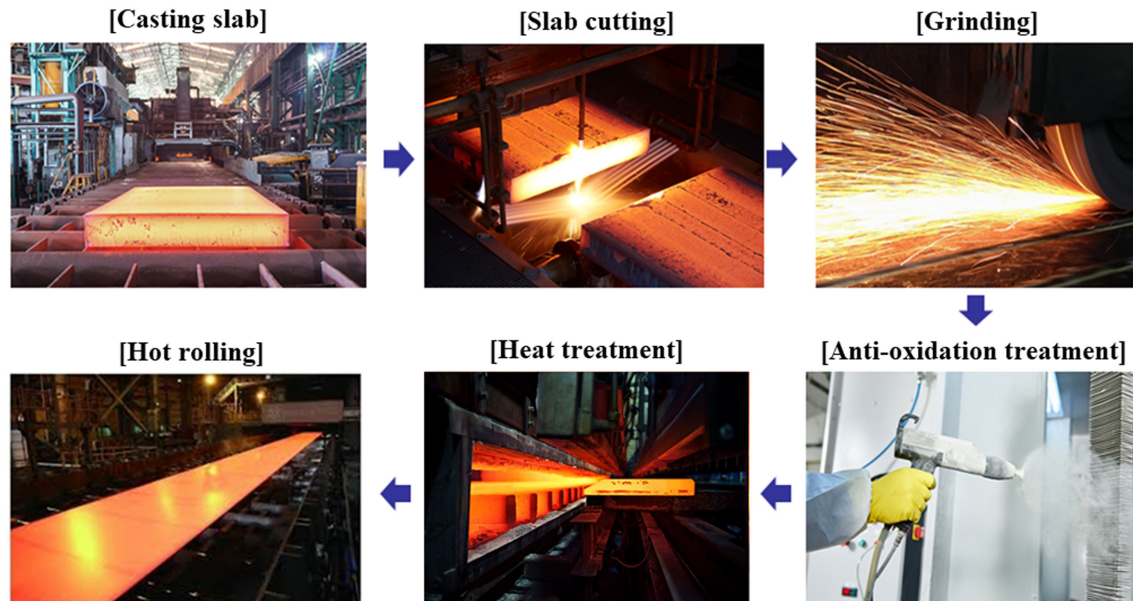


Fig. 1. Typical manufacturing process of steel casting plates

Table 1. Chemical composition of the sample used in this study

| Element | C | Mn | Si | Cr | Ni | Fe |
|---------|---------|-------|---------|-----|-----------|----------|
| wt% | 0.3~0.4 | 20~24 | 0.2~0.3 | 2~3 | 0.02~0.03 | Balanced |

과 금속단류선(Metal flow) 형성, 그리고 조대한 Cr_{23}C_6 의 입계석출 등이 습도가 높은 환경 내에서 침투형태의 부식손상을 야기하는 것이다.

에너지산업용 고Mn 강재의 부식거동에 대한 연구는 최근 국내 (주)POSCO에서 신 합금설계를 바탕으로 체계적인 연구가 수행되고 있으며 주로 미량의 Cr 첨가를 통한 제품의 장기수명 확보에 초점이 맞추어져 있다 [6,7]. 하지만 실제 사용(In-service) 과정이 아닌, 생산 및 제조 공정 중 부식과 산화의 복합적인 과정에 기인한 표면 결함 형성에 대한 메커니즘적 연구는 극히 미미한 실정이다.

본 연구에서는 극저온용 고Mn 철강소재 주조 슬라브를 대상으로 생산 공정 모사 샘플을 채취하여 망상 형태의 표면 결함 형성에 대한 주요 영향인자를 규명하고, 이를 토대로 결함 억제를 위한 기술적 방안에 대해 논의하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시편 정보 및 제조

본 연구의 대상소재는 고Mn 후판 슬라브(폭: 700 mm, 길이: 4000 mm × 두께: 225 mm)이며 합금조성은 Table 1과 같다. 해당 슬라브는 주조 후 야드 적치하여 200 °C

이하로 냉각되었다. 이후 세라믹 타입 연마 휠(F46, 직경: 300 mm, 폭 : 25 mm)의 평면 그라인더(Grinder)로 표면을 연삭하였다. 연삭 깊이, 이송속도, 연마 휠 속도는 각각 0.1 mm, 20 mm/s, 35,000 mm/s이다.

2.2 미세조직 관찰

연삭된 주조 슬라브로부터 시편 채취하여 단면부 미세조직 분석을 위해 우선 마운팅과 기계적 연마(~0.04 μm) 수행 및 에탄올 내 초음파 세척 후 전계방사형 주사전자 현미경(Field emission scanning electron microscopy, FE-SEM)을 활용하여 표면부 미세조직을 관찰하였다.

2.3 부식 및 산화거동 분석

표면 연삭된(Ground) 시편을 대상으로 열처리 전 대기노출 과정에서 수반될 수 있는 부식반응 유도를 위해 시편을 25 °C 챔버 내 고정된 후 수돗물(Tap water, Ca: 19.7 mg/L, Mg: 4.5 mg/L, Na: 13.3 mg/L, K: 4.4 mg/L, Cl⁻: 13.3 mg/L, SO_4^{2-} : 21 mg/L)를 활용하여 수직방향으로 12 시간을 주기로 7일간 분사와 건조를 반복하였다. 이후 세라믹 타입으로 제조된 산화억제제를 표면에 도포하고 건조 후 1170 °C의 온도에서 2 시간 동안 열처리 하여 표면 산화거동을 분석하였다. 이를 위해 시편의 단면부 분석을 목적으로 마운팅 및 기계적 연마

(~0.04 μm) 수행 및 에탄올 내 초음파 세척 후 FE-SEM과 에너지분산분광기(Energy Dispersive Spectroscopy)를 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직 관찰

Fig. 2는 표면 연삭된(Ground) 시편의 표면 매크로 사진과 단면 마이크로 사진을 보여준다. 최외각 표면부는 그라인딩(Grinding) 과정 중 동적재결정 되어 미세한 결정립이 형성되었으며 직 하단부는 높은 수준의 소성응력 하에 그라인딩 방향을 따라 금속단류선(Metal flow)이 형성된 것을 짐작할 수 있다.

그라인딩 공정을 통한 열과 소성응력의 복합효과는 핵생성속도(\dot{n})에 의존하여 반비례적으로 재결정 입자 크기가 결정되는 것으로 알려져 있다 (Eq. (1) [8]).

$$\dot{n}(\dot{\epsilon}, T) = C \dot{\epsilon}^m \exp\left(-\frac{Q_{act}}{RT}\right) \quad (1)$$

여기서 \dot{n} , $\dot{\epsilon}$, C , m , Q_{act} , R , T 는 각각 핵생성속도($\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$), 변형률속도, 비례상수 [9], 변형률지수, 활성화에너지, 기체상수, 온도를 나타낸다.

이는 그라인딩 공정 중 높은 변형률 속도($\dot{\epsilon}^m$)에 기인하여 핵생성 속도가 현저히 증가함을 나타내며, 특히 그라인딩에 의한 가공의 영향권 내(대략 100 μm 이내)에서 높은 변형률에 의한 결함밀도의 증가가 미세결정립 형성의 구동력이 되었음을 짐작해 볼 수 있다.

후판 주조 슬라브의 특성상 냉각속도가 현저히 낮아 육안관찰이 가능한 수준의 조대 결정립의 형성(그라인딩에 의한 표면가공부를 제외한 슬라브 전 영역에 위치함)과 입계에 석출된 M_{23}C_6 (M: Cr)의 경우 후방산란전자 회절패턴분석(EBSD, Electron Backscattered Diffraction)

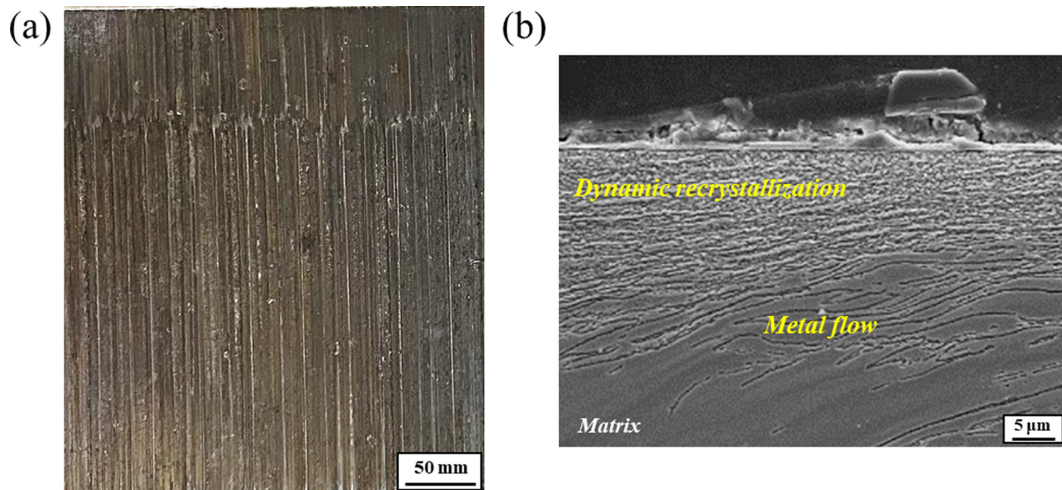


Fig. 2. (a) Surface and (b) cross-sectional observations of the ground sample, examined by digital camera and FE-SEM, respectively

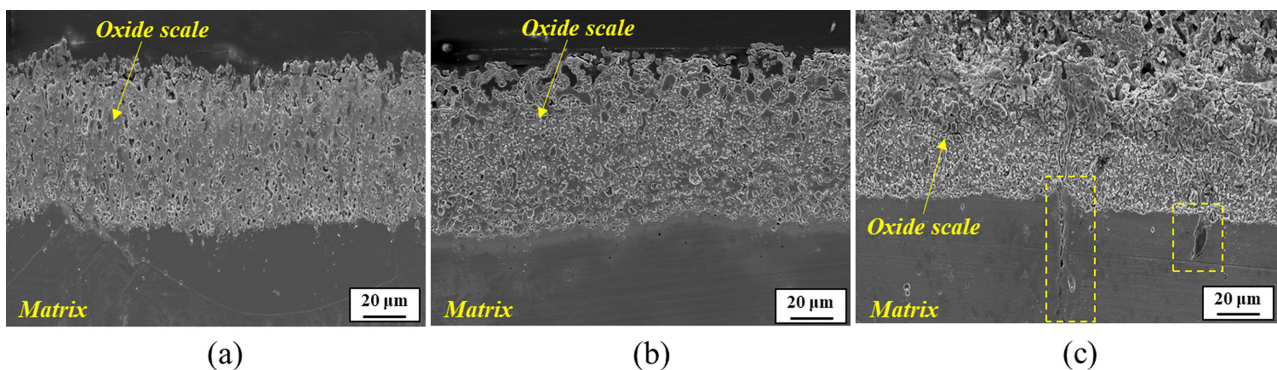


Fig. 3. Cross-sectional images of samples oxidized at 1170 °C for 2 h after undergoing the following treatments: (a) grinding only, (b) grinding followed by anti-oxidation treatment, and (c) anti-oxidation treatment, and corrosion

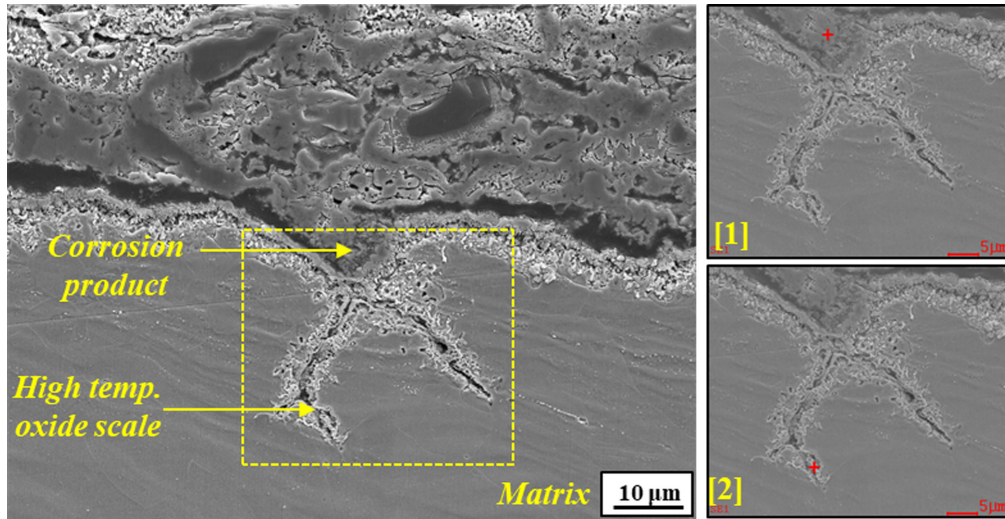


Fig. 4. Cross-sectional images of samples subjected to grinding, corrosion, anti-oxidation treatment, and subsequent oxidation at 1170 °C for 1 min

과 투과전자현미경(TEM, Transmission Electron Microscopy) 등의 활용을 토대로 기 보고된 연구 [5]에서 규명된 바 있다.

3.2 부식 및 산화거동 분석

Fig. 3은 표면 연삭된(Ground) 시편을 대상으로 산화억제제 도포하여 1170 °C에서 열처리 후 단면 형상을 보여주는 것으로 산화억제제 도포 전 부식반응이 미치는 효과를 짐작할 수 있다. 즉, 단순 산화억제제 도포 시편(Fig. 3b) 대비 부식반응이 수반된 후 도포된 시편의 경우(Fig. 3c)에는 산화 스케일(Scale) 하단부에 침투하는 형태의 손상이 명확히 나타나 부식과 고온산화의 복합효과의 가능성을 추측해 볼 수 있다.

선행연구 [5]에서, 동적재결정 되어 미세한 입자크기, 직 하단부의 금속단류선 및 입계 석출된 $M_{23}C_6$ 의 존재는 입계를 따른 침투형태의 부식거동이 나타남을 보고한 바 있다. 또한, Fe, Mn 기반의 부식생성물의 침투와 부피팽창이 추가적인 부식손상과 함께 동적재결정 영역의 탈착으로 귀결됨을 보인 바 있다. 이를 고려해 볼 때, 기 부식된 상황에서 추가적인 고온산화가 진행될 경우 초기 산화거동을 보다 명확히 이해할 필요가 있으며 이는 1170 °C의 산화 초기시점(1 min)에서 산화 개시영역 인근의 관찰/분석(Fig. 4 and 5, Table 1)을 통해 이루어졌다.

Fig. 4의 표면부에는 기 부식된 형상인 부식생성물이 잔존하고 있으며 (주로 짙은 회색부로 나타남), 생성물의 하부 끝단부를 개시로 그 아래로 침투하는 형태의 내부산화가 발생함을 알 수 있다. 저온 부식생성물 대

Table 1. EDS elemental composition at each point marked in Fig. 4

| | [1] | | [2] | |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| | wt% | at.% | wt% | at.% |
| CK | 6.25 | 16.89 | 4.92 | 17.17 |
| OK | 19.51 | 39.6 | 5.83 | 15.29 |
| CrK | 2.19 | 1.37 | 5.20 | 4.19 |
| MnK | 10.17 | 5.47 | 18.36 | 14.02 |
| FeK | 61.89 | 36.68 | 65.69 | 49.33 |

비 내부산화영역의 경우 산소량이 부족하기 때문에 평형산소분압이 낮은 산화물이 우선 형성된다. 본 합금계에서는 Mn-Oxide 및 Cr-Oxide가 주로 해당되며, EDS 점 정량분석(Table 1) 및 매핑(Fig. 5) 결과에서도 확인된다. Mn과 Cr이 기지(Matrix) 내 농화되어 있는 영역은 주로 입계이며 일부는 $M_{23}C_6$ 로 석출된 형태로 존재하게 되는데, 고온산화 시 기 부식손상영역을 따라 미량의 산소 침투가 이루어지면 입계를 따른 내부산화가 촉진됨을 짐작할 수 있다.

선행연구 [5]에서 제시된 부식거동과 상기 제시된 결과를 토대로 판단컨대, 산화 전 기 부식손상은 극 표면부 미세재결정 형성영역과 금속단류선을 따라 가속화된 침투부식 형태와 동적재결정 영역의 탈착 및 Fe, Mn 기반의 부식생성물의 잔류로 요약될 수 있다. 해당 부식생성물은 금속대비 부피팽창수준이 높아 [10], 표면부 개방/확장과 함께 고온산화 공정 시 산소의 우선침투 영

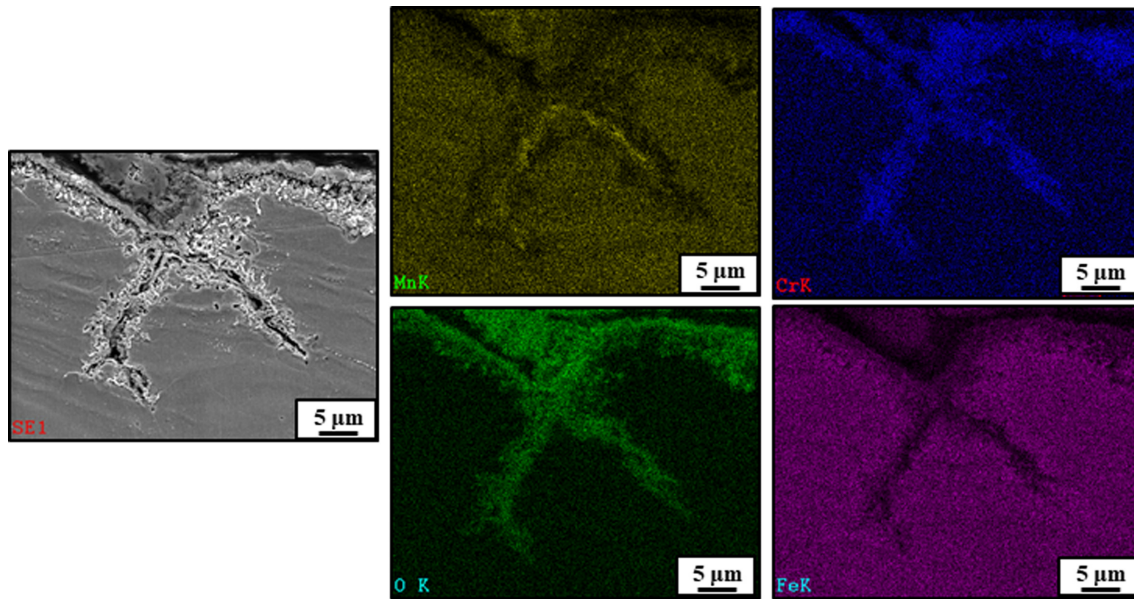


Fig. 5. Cross-sectional images and EDS mapping of samples subjected to grinding, corrosion, anti-oxidation treatment, and subsequent oxidation at 1170 °C for 1 min

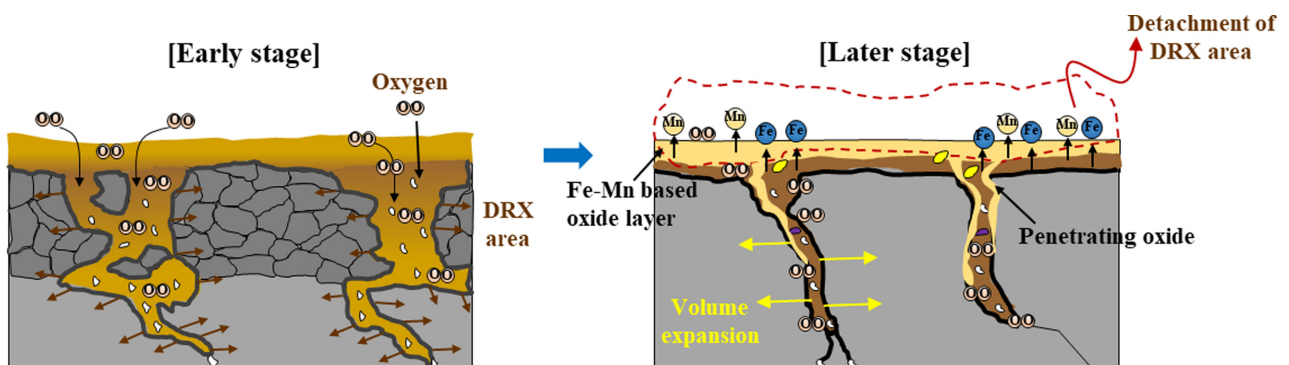


Fig. 6. Schematic illustration of oxide penetration under high-temperature oxidation conditions, following grinding and corrosion of high-Mn casting steels (DRX: Dynamic recrystallization)

역을 제공할 수 있다. 이에 용이하게 침투된 산소는 주로 조대 입계를 따른 Mn 및 Cr 농화 영역을 내부산화시키며 깊은 침투가 이루어질 것으로 판단된다. 언급된 부식유기 산화촉진 메커니즘은 Fig. 6에 도식화하여 나타내었다.

고Mn강 후판 주조슬라브의 제조과정 시 열처리 후 나타나는 표면결함의 기원은 단순히 산화로 인한 손상 그 자체에서 비롯된 현상이 아니며, 그라인딩 공정을 통한 표면부 미세조직적 변화와 침투형태의 부식거동과 밀접하게 연계되어 나타나는 내부산화 촉진 현상이라 할 수 있다. 따라서, 고Mn-저Cr 기반 후판강재에서 나타나는 표면결함의 효과적인 억제에 위해서는 주조 슬라브 제조에서부터 그라인딩 공정, 산화억제제 도포 및

고온열처리에 이르는 단계 중 부식반응에의 노출을 최대한 억제할 수 있도록 공정 및 리드타임(Lead time) 관리 등이 반드시 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 고Mn-저Cr 기반 후판 주조슬라브의 제조과정 시 열처리 후 나타나는 표면결함의 기원 규명과 결함억제를 위한 기술전략 수립의 기초연구를 위해 일련의 실험 및 분석이 수행되었고, 도출된 결론은 아래와 같이 간략히 요약될 수 있다.

주조 슬라브의 최외각 표면부는 그라인딩 공정 중 동적재결정이 이루어져 미세한 결정립이 형성되었으며, 직

하단부에는 높은 수준의 소성응력 하에서 그라인딩 방향을 따른 금속단류선(Metal flow)이 형성되었다. 단순 산화억제제 도포 시편 대비 부식반응이 수반된 후 도포된 경우 1170 °C에서 열처리 후 산화 스케일 하단부에 침투하는 형태의 손상이 관찰되었다. 이는 산화 전, 기 부식된 상태에서 Fe-Mn 기반의 부식생성물이 잔존하며, 생성물 끝단부를 개시점으로 하부 침투하는 형태의 내부산화가 발생한 것으로 나타났다. 이러한 내부산화는 부피팽창 수준이 높아 표면부의 개방/확장과 함께 산화과정에서 산소의 우선 침투 영역을 제공한 것으로 판단된다. 침투된 산소는 주로 조대 입계를 따라 Mn 및 Cr 농화 영역을 내부산화 시키며 깊은 침투가 이루어진 것으로 사료된다. 이와 같은 부식유기 산화촉진 현상에 기인한 표면결함의 효과적인 억제를 위해서는 주조슬라브의 제조에서부터 고온열처리에 이르는 일련의 단계 내 부식반응에 대한 노출을 최대한 방지해야 할 것이다.

Acknowledgement

This work was supported by the Sunchon National University's Glocal University Project, 2024 (Grant number: 2024-0468)

References

1. J. C. Park, Steel & Metal News (2022). <http://www.snmnews.com/news/articleView.html?idxno=504938>
2. E. Bayraktar, F. A. Khalid, C. Levailant, Deformation and fracture behavior of high manganese austenitic steel, *Journal of Materials Processing Technology*, **147**, 145 (2004). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.007>
3. Z. M. He, Q. C. Jiang, S. B. Fu, J. P. Xie, Improved work-hardening ability and wear resistance of austenitic manganese steel under non-sever impact-loading conditions, *Wear*, **120**, 305 (1987). Doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(87\)90024-X](https://doi.org/10.1016/0043-1648(87)90024-X)
4. B. C. D. Cooman, Y. Estrin, S. K. Kim, Twinning-induced plasticity (TWIP) steels, *Acta Materialia*, **142**, 283 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.06.046>
5. J. S. Park, M. H. Kang, S. J. Kim, Surface-grinding induced recrystallization and metal flow causes corrosion-assisted penetrating attack of high Mn-low Cr casting steel in humid environments, *Materials*, **17**, 5922 (2024). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma17235922>
6. Y. J. Jeong, S. O. Kim, J. S. Park, J. W. Lee, J. K. Hwang, S. K. Lee, J. K. Choi, S. J. Kim, Strong and ductile Fe-24Mn-3Cr alloy resistant against erosion-corrosion, *npj Materials Degradation*, **5**, 47 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1038/s41529-021-00195-0>
7. J. S. Park, S. O. Kim, Y. J. Jeong, S. K. Lee, J. K. Choi, S. J. Kim, Long-term corrosion behavior of strong and ductile high Mn-low Cr steel in acidic aqueous environments, *Materials*, **15**, 1746 (2022). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma15051746>
8. R. Ding, Z. X. Guo, Microstructural modelling of dynamic recrystallisation using an extended cellular automaton approach, *Computational Materials Science*, **23**, 209 (2002). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0927-0256\(01\)00211-7](https://doi.org/10.1016/S0927-0256(01)00211-7)
9. T. Sakai, M. G. Akben, J. J. Jonas, Dynamic recrystallization during the transient deformation of a vanadium microalloyed steel, *Acta Metallurgica*, **31**, 631 (1983). Doi: [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(83\)90053-6](https://doi.org/10.1016/0001-6160(83)90053-6)
10. E. Gebreyouhannes, K. Maekawa, Nonlinear gel migration in cracked concrete and broken symmetry of corrosion profiles, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **14**, 271 (2016). Doi: <https://doi.org/10.3151/jact.14.271>