

가열로 내부에서 발생하는 고탄소강 주편의 판파단 원인 분석

김용주¹, 장민지¹, Peyman Asghari-Rad¹, 정영진², 김형섭¹ #

Fracture Analysis of High Carbon Steel Slabs in a Furnace

Y. J. Kim, M. J. Jang, P. Asghari-Rad, Y. J. Jung, H. S. Kim

(Received February 18, 2020 / Revised May 7, 2020 / Accepted May 13, 2020)

Abstract

In general, the cause of slab cracking during heat treatment has been analyzed with focus on processing conditions. However, in the present work, the cause of cracking is analyzed based on the microstructural evolution during heat treatment. The microstructural analysis indicates that the structure of the slab consists of three main regions as the top, quarter, and center parts. The tensile properties are investigated in each region of the slab in the temperature range from 25 to 350 °C. Results demonstrate that the cracking is mainly attributed to the thermal stress and specific morphology of the microstructure. It is proposed that the cracking during the heat treatment is related to the presence of inclusion at the ferrite phase which is located at the boundary of pearlite grains.

Key Words: Slab, Plate Fracture, Microstructure Analysis, High Temperature Tensile Test

1. 서 론

현재 대부분의 연속 주조 공정을 통해 생산된 슬라브는 압연 공정을 통해 강판이나 선재로 만들어진다. 압연 공정에서 슬라브의 두께를 효과적으로 감소시키기 위해 압연 공정 이전 단계에서 예열 공정이 필요하다. 예열 공정은 가열로 내에서 진행되며 철강제품의 품질이 결정되는 중요한 단계이다. 예열 공정에 장입 될 슬라브는 가열로로 진입 될 시점에서의 슬라브의 표면 온도를 측정하여 특정 온도의 이상일 때의 HCR(Hot Charge Rolling)공정과 이하일 때의 CCR(Cold Charge Rolling) 공정으로 분류하고, 고로 내 장입된 슬라브의온도는약 1100~1300 °C 까지 상승시킨다. 이때, 가열로 내 슬라브의 온도 변화는 시뮬레이션을 이용하여 예측하는 연

구가 많이 보고되었다 [1~3].

경험적으로 가열로에서 내부에서 발생하는 슬라브의 판파단을 억제하기 위해, 고온의 슬라브를 가열로 내로 장입하는 HCR 공정이 표준 조업 조건으로 운용되고 있다. 그러나, 계절별 온도 영향 혹은 고객 수주 대응에 따라 현실적으로 불가피하게 CCR 공정이 요구되는 경우가 종종 발생하고 있다. CCR 공정은 상온의 차가운 슬라브가 고로 내로 유입되어 고로 고로 장입 시 상승하는 슬라브의 온도 폭이 더 크고, 슬라브 내 온도 구배가 높기 때문에 일반적으로 고로 내에서 열응력에 의한 판파단 발생 확률이 높다.

특히, 판파단이 발생하면 연속주조공정의 제약으로 약 한 달 정도 조업을 멈추고 청소 및 정비를 하는 동안 회사에 막대한 피해가 발생하게 된다. 그러므로, 안전한 CCR 공정 도입을 위해 먼저 고로 내에서 발생하는 슬라브의 판파단 발생 원인을 분석하고 해결방안을 모색하는 것이 요구된다 [4].

1. 포항공과대학교 신소재공학부, 대학원생

2. 포스코 강재연구소 에너지조선연구그룹, 수석연구원

Corresponding Author : Department of Materials Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), E-mail:

hskim@postech.ac.kr, ORCID : 0000-0002-3155-583X

따라서 본 연구에서는 먼저 고로내에서의 고탄소강의 판파단 원인 규명을 위해 상대적으로 판파단 확률이 낮은 중탄소강과 파단 확률이 높은 고탄소강을 비교하였다. 슬라브의 두께에 따른 방향으로 표면, 쿼터, 중심의 각 미세구조 분석을 진행하였고, CCR 공정 조건과 비슷하게 상온의 시편을 이용하여 상온~350 °C 온도 범위에서 열적 기계적 물성을 측정하였다. 해당 분석 결과를 토대로 고탄소강 판파단 원인을 제시하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 미세조직 분석방법

본 연구는 POSCO로부터 전체 슬라브의 중심 부근의 후판용 슬라브를 전달받았으며, 해당 슬라브의 두께는 300 mm이다. 탄소 함유량 0.45% 중탄소강과 탄소 함유량 0.55% 고탄소강 슬라브의 미세조직 분석을 위해 슬라브의 표면에서부터 두께 방향(TD)으로 각 25 mm 길이의 시편으로 절단하였다.

다음으로 기계적 폴리싱 및 3% 질산 용액으로 에칭 후, 광학 현미경(Optical Microscopy, OM, BX51M/OLYMPUS) 이용하여 미세조직을 관찰하였다. 그 결과, 슬라브의 높이방향으로 비슷한 미세조직끼리 분류하여 슬라브의 표면/쿼터/중심부 영역으로 나눌 수 있었다.

또한, 고온인장실험 결과 가장 낮은 파단연신율을 가지는 시편의 파단면을 SEM을 통해 많은 비금속 개재물(non-metallic inclusion)을 확인하였고, 전계 방사 전자현미분석기(ElectronProbe Micro Analyzer, EPMA, JXA-5830F/JEOL_JAPN)를 이용하여 해당 성분 분석을 진행하였다.

2.2 기계적/열적 특성 실험 방법

인장 시험은 할로겐 가열 챔버를 부착한 Instron 8862를 이용하여 상온 및 고온 (150 °C, 250 °C, 350 °C)의 온도 조건과 Strain rate은 $10^{-3}/s$ 을 적용하여 고온 인장 시험을 수행하였다. 이 때의 온도는 초기 가열로에 진입하는 분위기와 비슷한 범위로 설정하였다. 슬라브의 미세조직 분석을 기반으로, 봉상의 표점 거리가 30 mm 인장 시험 편으로 가공하였다. 슬라브의 조성의 차이로 인해 슬라브 내부의 미세조직은 각 영역별로 다르게 분류되었다. 특히, 주상조직(columnar structure)의 방향별 기계적

물성을 알아보기 위해 가로(rolling direction)와 세로 방향(thickness direction)의 시편을 얻었다. 슬라브 내부의 각 영역에서 방향을 고려한 시편에 대해 Fig. 1에 나타내었다. 또한, 실험의 재현성을 확보하기 위해 각 조건에 대해서 3회 반복 시험을 수행하였다.

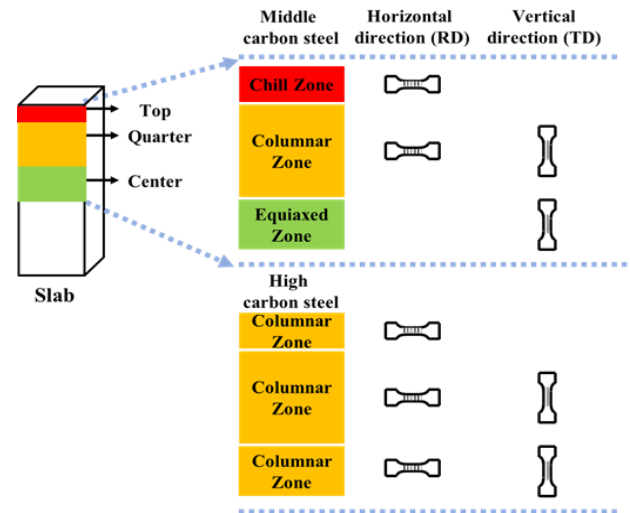


Fig. 1 Illustration of specimens in divided slab's region for high-temperature tensile test. Especially, the columnar zone needs to be considered in two different directions for vertical (growing direction, RD) and horizontal (TD)

3. 실험 결과 및 고찰

중탄소강 슬라브의 경우 Fig. 2를 통해 슬라브의 표면에서 중심부까지 냉금대(chill zone), 주상정대(columnar zone), 그리고 등축대(equiaxed zone) 순서대로 관측되었다. 그리고 고탄소강 슬라브의 경우엔 Fig. 3과 같이 슬라브의 표면에서 중심부까지 모두 동일한 주상조직으로 구성되었다. 이러한 슬라브의 미세구조 차이 원인은 탄소 함량의 차이에 의한 슬라브의 냉각 속도와 미세조직의 관계를 통해 설명할 수 있다. 고탄소강에서는 중탄소강보다 높은 탄소 함량으로 인해 낮은 열전도도와 낮은 냉각속도를 가진다 [5]. 그로 인해 고탄소강 슬라브 내부에 남아 있는 열이 펄라이트 기지의 주상조직을 성장시켜, 중심부로 갈수록 조대한 주상조직이 형성하게 된다. 다음과 같은 현상은 Fig. 3(c)와 같이 중심부에서 조대한 주상조직이 관측되었다.

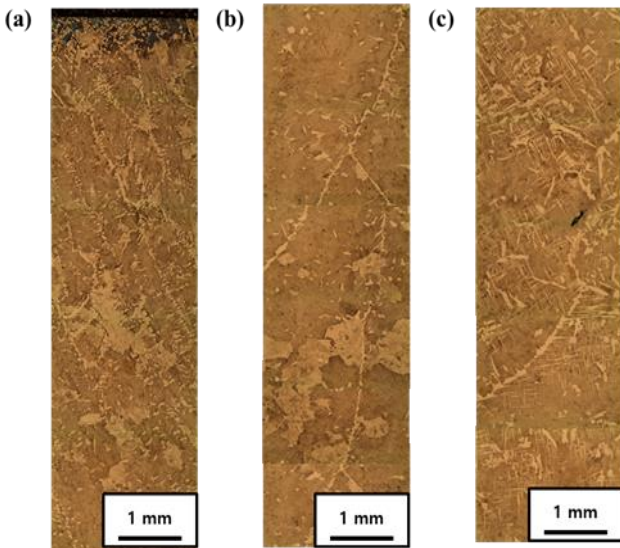


Fig. 2 Optical microstructures of middle carbon steel with 300 mm of slab thickness; (a) top part, (b) quarter part, and (c) center part

또한, 상대적으로 밝은색 영역을 나타내는 페라이트 상으로 형성된 주상조직의 계면과, 상대적으로 어두운 영역을 나타내는 펄라이트 상으로 형성된 주상조직 내부를 Fig. 2와 Fig. 3의 OM이미지를 통해 확인하였다. 특히, 두 슬라브의 표면 영역에서의 페라이트와 펄라이트 상 분율 차이가 두드러졌다. 표면영역에서 탈탄층을 갖는 중탄소강은 12:77 (페라이트:펄라이트)의 높은 페라이트 비율을 얻었으며, 조대한 주상조직으로 이루어진 고탄소강에서는 1:99의 낮은 페라이트 비율을 얻었다.

앞선 미세조직 분석 결과를 기반으로, 주상조직의 방향성과 기계적 물성 관계를 알아보기 위해 그림 1과 같이 가로(RD 방향) 및 세로 방향(TD 방향)의 시편을 준비하여 고온 인장 시험을 진행하였다. 특히, 고탄소강의 경우 슬라브의 중심부에서도 주상조직이 발견되어 가로 방향의 시편을 추가 가공하여 실험을 진행하였다.

고온 인장 시험 결과, 고탄소강에서 중탄소강보다 더 낮은 UTS와 파단 연신율을 얻었으며, 중탄소강과 고탄소강 모두 쿼터 영역의 방향에 따른 두드러진 물성 차이를 확인하였다. 이를 토대로 온도와 주상조직의 방향성에 따른 기계적 물성 차이에 미치는 영향에 대해 자세히 분석하였다.

Fig. 4는 온도에 따른 슬라브 내부의 각 영역 별

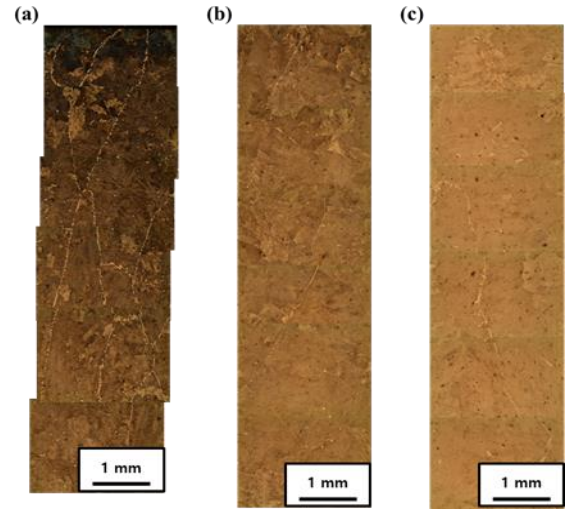


Fig. 3 Optical microstructures of high carbon steel with 300 mm of slab thickness; (a) top part, (b) quarter part, and (c) center part

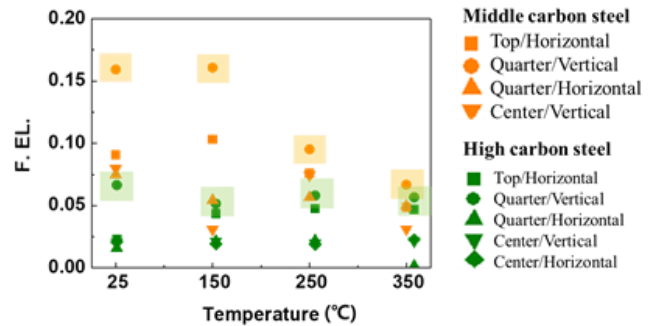


Fig. 4 Fracture elongations of middle and high carbon steels in range of RT to 350 °C, the formation of non-metallic inclusions along the boundary of columnar structure causes lower fracture elongation of vertical direction in quarter region

물성을 비교한 결과와 중탄소강(노란색)과 고탄소강(초록색)의 두드러진 파단 연신율의 격차를 보여준다. 높은 탄소 함량을 가지는 고탄소강은 중탄소강보다 일반적으로 강도가 높으며, 단위 부피당 흡수할 수 있는 에너지가 낮은 것으로 보고되었다 [6]. 그러나 이번 고온 인장 시험 결과에서는 해당 고탄소강의 기계적 물성은 중탄소강보다 전반적으로 저하된 경향을 보였다. 해당 고탄소강 대부분의 영역에서 낮은 UTS 값을 갖는 원인을 설명하기 위해 고온 인장 시험 데이터에서 얻은 진응력-진변형률

곡선과 가공 경화율 곡선을 이용하여 접점의 유무를 관측하였다. 그 결과 표면부를 제외한 대부분의 영역에서 접점이 발견되지 않았으며, 이는 넥킹 발생 전 취성에 의한 파단을 의미한다.

특히, 해당 고탄소강의 낮은 기계적 물성은 주상조직의 열응력과 깊은 관련이 있다. 이는 주상조직이 성장하는 온도에 따라 비금속 개재물의 이동과 연관하여 설명할 수 있다. Fig. 5에서 나타내는 것과 같이 승온 시 슬라브 내부의 미세조직이 페라이트에서 주상 조직으로 변화됨에 따라 비금속 개재물은 주상조직 결정립계에 주로 위치하게 된다.

이때 슬라브의 상단 부근 영역에서 관측된 개재물들은 연속주조 공정에 의해 생산된 슬라브에 자연스럽게 나타나는 현상이다 [7]. 연속주조에서 슬라브 제조시, 공기와 닿는 먼저 닿는 용탕의 표면부터 고상화가 진행된다. 그로인한 고상화에 의한 열의 이동 방향은 슬라브의 중심부 방향으로 향하게 되고, 슬라브의 중심부 영역이 온도가 높아짐에 따라 점성 또한 증가하여 비금속 개재물이 중심부에서 밀려나게 된다. 따라서, 슬라브의 쿼터 영역에 비금속 개재물이 집중적으로 분포하게 된다 [8].

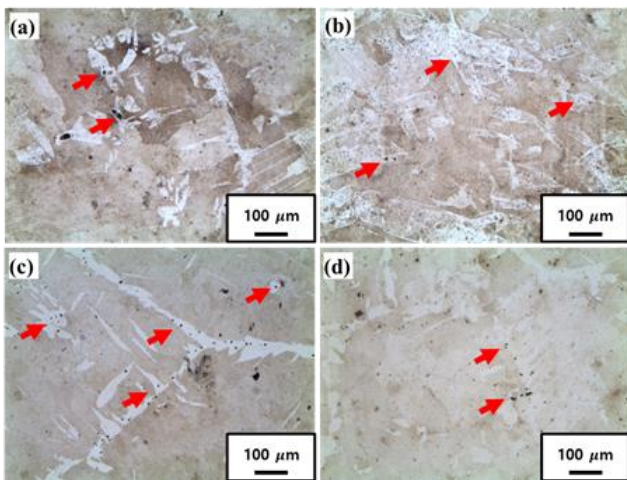


Fig. 5 Change of microstructure at different temperatures within middle carbon steel's quarter region near the top surface. The interesting point is that most of non-metallic inclusions are found in ferrite phase which is grain boundary of columnar structure; (a) RT, (b) 150 °C, (c) 250 °C, and (d) 350 °C

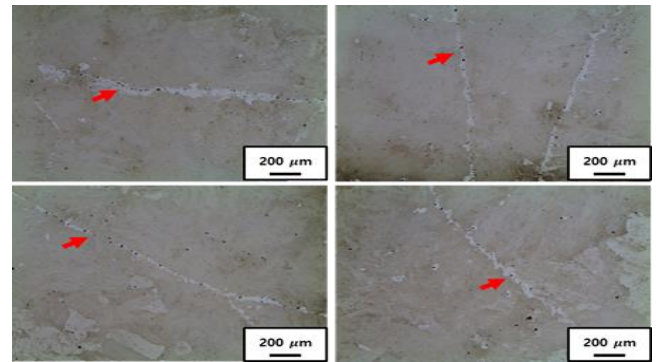


Fig. 6 Many non-metallic inclusions formed along ferrite grain boundaries were observed in middle carbon steel's quarter region at 250 °C

특히, Fig. 6 의 250 °C 중탄소강 미세조직 사진을 통해 비금속 개재물이 슬라브의 상단 영역에 위치한 주상조직의 결정립계를 따라 분포하는 경향이 확인되었다. 이는 Fig. 4에서 보여주는 것과 같이 중탄소강 250 °C 쿼터/세로(quarter/vertical)의 물성이 급작스럽게 낮아진 현상과 관련 있는 것으로 추측된다. 즉, 온도가 증가함에 따라 성장하는 주상조직 주위로 많은 양의 비금속 개재물들이 형성되고 주상조직의 성장이 방향에 따라 제한을 받게 된다. 상대적으로 세로방향보다 가로방향에서 열응력의 영향을 더 크게 받아 이로 인해 가로 방향의 주상조직 연신율이 현저하게 낮은 값을 가지게 된 것으로 판단된다. 또한, 온도 상승과 함께 페라이트 상의 주상조직 결정립계에 존재하는 비금속 개재물의 양은 증가하는 것으로 관측되었다. 이는 저탄소강에서도 유사 현상이 관측되었다 [9].

이처럼, 주상조직의 성장 방향과 동일한 쿼터/세로에서 가장 높은 파단연신율을 얻었으며, 그에 반해 주상조직의 성장 방향과 수직인 쿼터/가로(quarter/horizontal) 방향은 상대적으로 낮은 파단연신율을 얻었다. 이는 쿼터/가로 시편이 높은 분율의 주상조직 경계면인 페라이트 상으로 이루어진 것을 의미한다. 형성된 페라이트 상 내부에 다량의 비금속 개재물 존재는 주상조직의 성장을 방해하여 고온 인장 시 이른 파단을 야기하는 것으로 판단된다. 나아가 위 사실은 높은 페라이트 상 분율은 비금속 개재물이 결정립계에 존재할 확률 또한 증가하는 것을 의미한다. 이를 통해 주상조직의 방향별

거동이 주상조직 결정립계의 분율과 그에 따라 존재하는 비금속 개재물의 양과 높은 관련성을 확인할 수 있다. 또한, 최근 연구에 의하면 특정온도에서 흡수에너지는 이방성을 가지며, 또한 흡수에너지가 온도에 따른 변화가 확인되었다 [10]. 즉, 특정 온도에서의 열응력이 슬라브 내부 미세조직 및 파단 거동에 큰 영향을 끼치는 것을 의미한다.

좀 더 면밀히 파단 원인을 분석하기 위해 인장시험에서 사용된 시편의 파면 부근을 절단하여 SEM 분석을 진행하였다. 특히, 전 온도 영역에서의 쿼터/세로의 경우, 수많은 미세기공(micro voids)과 함께 연성 파괴가 관측되었다.

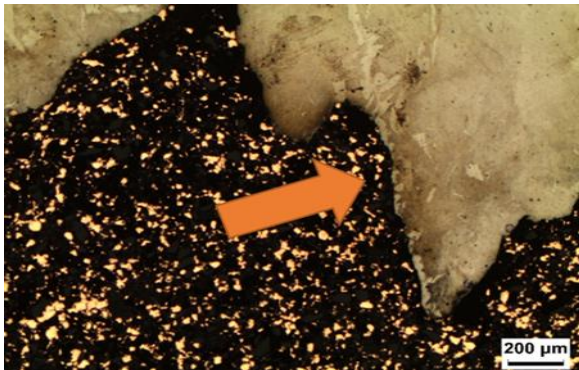


Fig. 7 The fracture surface of middle carbon steel's quarter region at 250 °C shows that fracture occurred along the columnar structure boundary

Fig. 7에서 나타내는 것과 같이 주상 조직의 결정립계를 따라 파단된 것이 관측되었으며, 해당 파단면에 존재하는 개재물로 인해 결정립계에 변형이 집중되고 개재물 주위로 많은 미세기공들이 관측되었다 [11]. 이에 반해, 쿼터/가로 파면의 경우, 저온 영역의 대부분의 시편 파면에서 취성의 물성을 가지는 벽개 파괴가 관측되었다. 해당 현상은 가장 낮은 0.0189% 파단연신율을 가진 350 °C 쿼터/가로 시편의 파단면을 통해 확인하였다.

해당 시편에서 쿼터/세로보다 많은 양의 비금속 개재물과 해당 비금속 개재물들이 떨어져 나가고 남은 기공들이 발견되었다. 이후, 비금속 개재물이 존재하는 위치를 확인한 곳에서 EPMA 장비를 이용하여 비금속 개재물의 조성을 측정하였다.

그 결과, 탄소를 포함한 시멘타이트와 AlN, MnS 그리고 다중 원소로 이루어진 전형적인 복합 비금속

개재물인 것으로 밝혀졌다.

따라서, 고온에서 고탄소강의 저하된 기계적 물성은 주상조직의 결정립계를 따라 형성된 다양한 종류의 비금속 개재물의 영향에 기인된 것으로 판단된다. 연속주조 공정으로 형성된 비금속 개재물은 그 양, 크기, 분포, 조성 그리고 형상이 해당 슬라브의 기계적 물성에 미치는 영향에 대해 많이 연구되고 있으며, 비금속 개재물의 양을 줄이기 위해 노력하고 있다 [12~15]

또한, Fig. 4에서 보여주는 것과 같이 대부분의 온도 영역에서 같이 두 조성의 슬라브 모두 중심부가 가장 취약하였다. 그 원인은 주조 시 발생한 것으로 추정되는 슬라브 중심부에서 형성된 기공으로 추측된다. 해당 기공은 충분히 육안으로 관측 가능하며, 두 조성 모두 가공된 시편의 표면에서 많은 수의 기공이 발견되었다. 인장 시 시편에 작용하는 외력이 해당 기공 주위로 집중되어 이른 파단이 야기된 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 압연 공정 전, 고로 내에서 발생하는 슬라브의 판파단 원인을 분석하기 위해 미세조직과 변화하는 온도에 따른 기계적 물성을 얻었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 중탄소강 미세조직의 경우 표면에서 중심부 방향으로 Chill zone/Columnar Zone/Equiaxed Zone 으로 구분되었으며, 고탄소강 미세조직은 전 영역에서 Columnar Zone을 이루고 있는 것을 확인하였다.

(2) 각 영역별 미세조직을 기반으로 슬라브의 영역을 나누었으며, 이를 기반으로 고온 인장 시험 결과를 분석하였다. 그 결과, 중탄소강과 고탄소강 모두 고온의 쿼터영역 가로 방향 주상조직 시편에서 가장 낮은 파단 연신율을 얻었다. 이는 온도가 증가함에 따라 주상조직 결정립계에 위치한 비금속 개재물의 증가가 취성 파단에 기인하는 것으로 밝혀졌다. 따라서, 고로 내에서 발생하는 슬라브의 판파단을 예방을 위해 슬라브 주조 단계에서 슬라브 내부에서 형성되는 주상 조직을 최대한 억제하고, 주조속도를 조절 하여 비금속 개재물의 양을 감소시킴으로써 슬라브의 판파단 발생 확률을 낮출 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 POCSO 및 BK21의 지원 하에 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] F. N. Rhines, 1981, Furnace, Bull. Alloy Phase Diagrams, Vol. 2, No. 1, p. 27.
- [2] K. S. Chapman, S. Ramadhyani, R. Viskanta, 1991, Modeling and parametric studies of heat transfer in a direct-fired continuous reheating furnace, Metall. Trans. B, Vol. 22, No. 4, pp. 513–521.
- [3] M. Y. Kim, D. E. Lee, H. Park, 2006, Reheating Furnace, pp. 950–956.
- [4] B. Hadała, A. Cebo-Rudnicka, Z. Malinowski, A. Gołdasz, 2011, The influence of thermal stresses and strand bending on surface defects formation in continuously cast strands, Arch. Metall. Mater., Vol. 56, No. 2, pp. 367–378.
- [5] H. Liu, H. Zhang, 2015, The Influence of Carbon Content and Cooling Rate on: The Toughness of Mn-Mo-Ni Low-Alloy Steels, HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 Offshore Eng. Steels 2015 Conf. Proc., pp. 247–252.
- [6] M. Itabashi, K. Kawata, 2000, Carbon content effect on high-strain-rate tensile properties for carbon steels, Int. J. Impact Eng., Vol. 24, No. 2, pp. 117–131.
- [7] S.Y. Kim, S.H. Lee, I.S. Ahn, 2009, Automatic Measuring System Development of Slab Inner Crack and Center Segregation, J. Kor. Inst. of Electrical Eng., Vol 5, pp. 332-334.
- [8] Z. Liu, B. Li, M. Wu, G. Xu, X. Ruan, A. Ludwig, 2019, An Experimental Benchmark of Non-metallic Inclusion Distribution Inside a Heavy Continuous-Casting Slab, Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci., Vol. 50, No. 3, pp. 1370–1379.
- [9] Y. Maehara, K. Yasumoto, H. Tomono, T. Nagamichi, Y. Ohmori, 1990, Surface cracking mechanism of continuously cast low carbon low alloy steel slabs, Mater. Sci. Technol., Vol. 6, No. 9, pp. 793–806.
- [10] R.H. Ralemi, N. Gilani, Q.T. Ngo, A.D.S. Braga Neto, A. Willems, 2018, Cleavage fracture assessment of cold charged steel slabs using experimental and numerical approaches, Procedia Struct. Integr., Vol. 13, pp. 775–780.
- [11] Y. Maehara, Y. Ohmori, 1984, The precipitation of AlN and NbC and the hot ductility of low carbon steels, Mater. Sci. Eng., Vol. 62, No. 1, pp. 109–119.
- [12] L. Zhang, J. Aoki, B. G. Thomas, 2006, Inclusion removal by bubble flotation in a continuous casting mold, Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci., Vol. 37, No. 3, pp. 361–379.
- [13] L. Zhang, B. G. Thomas, 2003, State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness., ISIJ Int., Vol. 43, No. 3, pp. 271–291.
- [14] R. Lagneborg, 1977, Influence of Impurities on the Mechanical Properties of Steel., J. of Mater. Science Eng. Vol. 6, pp. 347–356.
- [15] Y.M. Won, Y.C. Shin, C.H. Yim, 2002, Improvement of Semi-macro Segregation in Continuous Cast Slabs by Soft Reduction, J. Kor. Inst. Met. & Mater, Vol. 40, No. 12.