

RH 공정 조건이 다른 TMCP강의 개재물 및 기계적 특성

Inclusions and Mechanical Properties of TMCP Steel under Different RH Process Conditions

권영국¹, 최병철², 이금화³, 남기우^{1,3*}

Yung-Kug Kwon¹, Byoung-Chul Choi², Gum-Hwa Lee³, Ki-Woo Nam^{1,3*}

〈Abstract〉

TMCP(Thermo Mechanical Control Process) steel was continuously cast (CC) by varying the argon gas flow rate and vacuum time in the Ruhrstahl Heraeus (RH) refining process. Using the CC specimens, the distribution of the inclusions and the mechanical properties were evaluated. A lot of oxides and Al-O type inclusions were observed. The average Vickers hardness did not show a constant, but showed dispersion in a certain range. The shape and scale parameters of the CC specimen with an argon gas flow rate of 160Nm³ and a vacuum time of 12 minutes was the best. Mechanical properties (tensile strength, yield strength and elongation) were consistent with the Weibull probability distribution analysis results. The impact resistance was the best for CC specimens with an argon flow rate of 140 Nm³ and a vacuum time of 12 minutes. Although the inclusions and mechanical properties of the CC specimens were evaluated according to the argon gas flow rate and vacuum time, these values were no significant difference.

Keywords : Continuous Casting, Ruhrstahl Heraeus, Inclusions, Mechanical Properties, TMCP(Thermo Mechanical Control Process) Steel

1,3* 부경대학교 재료공 & 마린융합디자인공, 교수
E-mail: namkw@pknu.ac.kr

1,3* Professor, Dept. of Materials Science and Engineering & Marine Design Convergence Engineering, Pukyong National University

1 부경대학교 재료공, 대학원생

1 Graduate Student, Dept. of Materials Science and Engineering, Pukyong National University

2 한국폴리텍대학 석유화학공정기술교육원 석유화학공정과 교수 2

2 Professor, Department of Energy and Chemical Process, Petro Chemical Training Center of Korea Polytechnics

3 부경대학교 마린융합디자인공, 대학원생

3 Graduate Student, Dept. of Marine Design Convergence Engineering, Pukyong National University

1. 서론

개재물은 강의 특성에 큰 영향을 미친다. 미세 개재물은 위험하지 않지만, 조대 개재물은 강도를 떨어뜨리고, 반복하중에서 응력 집중원으로 균열 진전의 원인이다. 그래서 강 제조 공정의 새로운 정련 및 개재물 저감 기술은 용강 및 강 제품에 존재하는 비금속 개재물의 크기 및 양을 감소시켰다[1].

Ruhrstahl-Heraeus(RH) 탈기기는 용강에서 수소, 질소, 탄소 및 개재물을 제거하고, 래들에서 용강의 혼합 상태를 개선하기 위하여 사용되는 철강 진공 정련로의 일종이다[2]. Hirase는 RH 탈기 공정에 의한 저탄소강 제조에 대한 산업적 시도를 보고하였다[3]. Wahlster와 Reichel은 RH 공정 적용의 일부 기술 및 야금학적 측면에 대해 논의하였다[4]. Watanabe 등은 RH 공정에서 기포 거동과 순환 속도 계산에 대해 논의하였다[5]. Maas와 Hupfer는 순환율의 중요성에 대해 논의하였다[6]. Ono 등[7], Watanabe[5] 및 Kuwabara 등[8]은 순환 유량을 계산하기 위한 공식을 제안하였다. Tsujino 등은 RH 탈기 공정의 래들에서 3차원 단

상 유체 흐름을 모델링하였다[9]. Kato 등은 3차원 단상 유체 흐름을 래들에서 연구하고, 이것이 RH 탈기 장치에서 탈탄 속도에 미치는 영향을 연구하였다[10]. Ahrenhold과 Pluschkell[11] 및 Kamata 등[12]은 RH 공정에서 순환율의 계산과 측정을 연구하였다. 이와 같이 RH 정련 공정에서 아르곤 가스 유량[13,14] 및 진공 시간[15,16] 등에 관한 실험 및 해석 연구가 수행되었지만, 아르곤 유량 및 진공 압력에 따른 개재물 분포 및 기계적 특성에 관한 체계적인 실험 연구가 거의 없다.

본 연구는 Ruhrstahl Heraeus (RH) 정련 공정에서 아르곤 가스 유량 및 진공 시간 시간을 달리하고, 연속주조(Continuous casting; CC)로 TMCP강을 제조하여, 개재물 및 기계적 특성을 평가하였다.

2. 재료 및 실험방법

RH 정련은 MgO-C 유형 내화물이 있는 래들에서 처리하였다. 래들에 담긴 용강은 3종류의 아르곤 가스 유량 (140Nm³, 160Nm³, 190Nm³) 및

Table 1. Conditions of Ruhrstahl Heraeus (RH) process and continuous casting (CC) process for each specimen

Speci.	Ruhrstahl Heraeus (RH) process			Continuous casting (CC) process
	Ar flow (Nm ³)	Vacuum (Torr, min)	Time (min)	
TMCP 14-12	140	2, 12	18	- Shroud Nozzle Ar flow 90L/min - Stopper Ar flow 5L/min - Immersion Nozzle(SEN) Ar flow 5L/min - Flow of primary coolant (inside mold) and secondary coolant (outside segment) 0.78L/kg - Casting speed 0.78m/min - Segment light pressure reduction 4mm
TMCP 16-12	160		17	
TMCP 19-12	190		23	
TMCP 14-10	140	2, 10	20	
TMCP 16-10	160		27	
TMCP 19-10	190		16	

2torr의 진공에서 10분 및 12분 동안 탈탄, 탈산 합금, 탈기 등의 루르슈탈 헤레우스 (Ruhrstahl Heraeus; RH) 정련 공정을 거쳐, 폭 2,200mm, 두께 300mm로 연속 주조(Continuous casting; CC)하였다.

Table 1은 각 시험편의 루르슈탈 헤레우스 (Ruhrstahl Heraeus; RH) 정련 공정 및 연속 주조(Continuous casting; CC) 공정의 조건을 나타낸다.

시험편은 가스 유량 및 진공 시간에 따라서 다음과 같이 부르기로 한다.

- ① TMCP14-12, ② TMCP16-12
- ③ TMCP19-12, ④ TMCP14-10
- ⑤ TMCP16-10, ⑥ TMCP19-10

개재물 및 경도는 가로 10mm × 세로 10mm으로 경면 연마하여, 관찰 및 측정하였다. 인장시험편은 압연방향 단면으로 채취한 Fig. 1과 같은 형상과 치수를 사용하였다. 충격흡수에너지는 압연방향으로 채취한 Fig. 2와 같은 형상과 치수의 시험편을 사용하였다.

개재물의 크기와 양은 Auto-SEM-EDS를 사용하여, 경면 연마한 12종류 시험편의 가로 3mm x 세

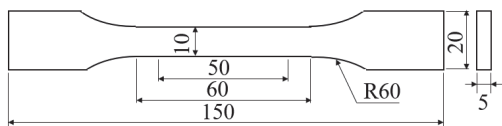


Fig. 1 Dimension and shape of tensile specimen (Unit : mm)

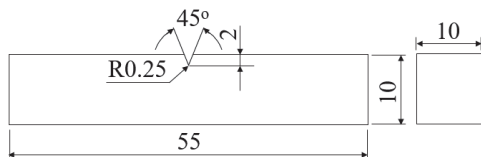


Fig. 2 Dimension of the V-notch charpy impact test specimen (unit: mm)

로 3mm의 면적에서 분석하였다. 인장은 10톤의 인장시험기 ((DTU-900MH)를 사용하였으며, 크로스 헤드 속도는 5 mm/min이었다. 충격 흡수 에너지를 측정하기 위한 충격시험기(OTC-500, ORIENTAL)는 20kgf-m를 사용하였다. 경도는 마이크로 비커스 경도기(HM-124, Akashi, Japan)로 시험편마다 22번 측정하고, 최소값 및 최대값을 제외한 20개를 사용하여 와이블분포 해석하였다. 측정 조건은 압입 하중 500g, 압입시간 10초로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 개재물 관찰

Fig. 3은 대표적으로 TMCP19-12 시험편에서 분석한 개재물을 나타낸다. (a)(b)(c)는 각각 Al_2O_3/CaO , MnS 및 TiNb 개재물이다.

Fig. 4는 6종류 시험편에서 분석한 전체 산화물과 Al-O계 개재물의 총수를 나타낸다. 전체 산화물 및 Al-O계 개재물의 총수는 아르곤 가스 유량 및 진공 시간과 관계없는 것으로 판단된다.

①~⑥ 시험편의 전체 산화물 총수는 ⑤시험편에서 최소인 78개, ③시험편에서 최대인 183개 관찰되었다. Al-O계 개재물 총수는 8~24개이다. Al-O계 개재물 최대는 ④시험편에서 24개가 관찰되었고, 최소는 ③시험편에서 8개이다.

전체 산화물과 Al-O계 개재물의 총수에서 판단하면, ⑤시험편이 78개 및 14개로 가장 개재물이 작았다.

Fig. 5는 6종류 시험편에서 분석한 전체 산화물과 Al-O계 개재물의 평균 크기를 나타낸다. 전체 산화물 및 Al-O계 개재물의 평균 크기는 아르곤 가스 유량 및 진공 시간과 관계없는 것으로 판단된다.

전체 산화물 평균 크기는 ①~⑥시험편에서 4.4~6.2 μm 분포였으나, 최소 평균 크기는 ⑤시험편

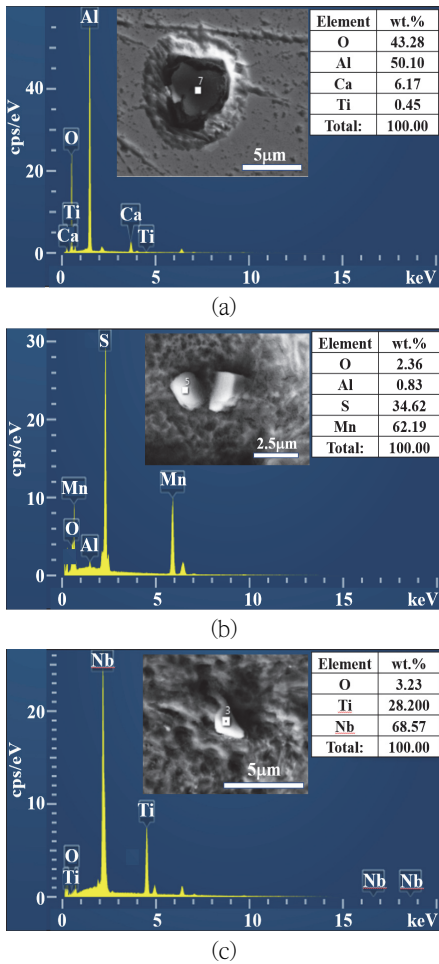


Fig. 3 SEM-EDS of inclusions (a) Al₂O₃/CaO, (b) MnS, (c) TiNb

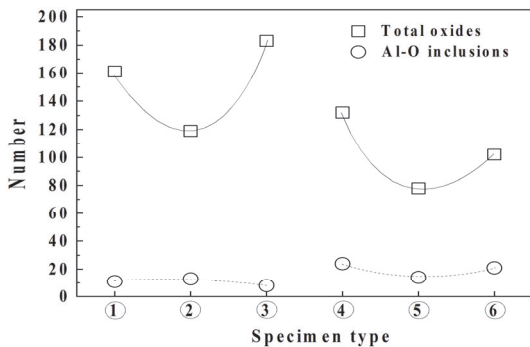


Fig. 4 Number of total oxides and Al-O inclusions for 6 types of specimen

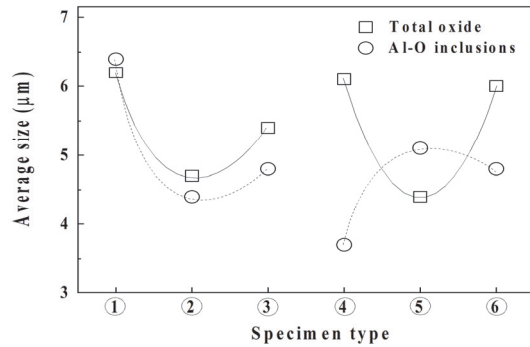


Fig. 5 Average size of total oxides and Al-O inclusions for 6 types of specimen

에서 4.4 μ m, 최대 평균 크기는 ②시험편에서 6.2 μ m였다. 그러나 전체 산화물 평균 크기는 5.47 μ m이다. 한편, Al-O계 개재물의 평균 크기는 ①~⑥ 시험편에서 3.7~6.4 μ m 분포였으나, 최소 평균 크기는 ④시험편에서 3.7 μ m, 최대 평균 크기는 ① 시험편에서 6.4 μ m였다.

전체 산화물과 Al-O계 개재물의 평균 크기에서 판단하면, ②시험편은 각각 4.7 μ m 및 4.4 μ m로 가장 작은 것으로 판단하였다. 그러나 전체적으로 개재물의 크기는 오차 범위 내의 크기라 판단하였다.

3.2 기계적 특성

Fig. 6은 6종류 시험편의 인장강도, 항복강도 및 연신율을 나타낸다. 진공 시간 12분 ①~③시험편의 인장강도 및 연신율은 아르곤 가스 유량과 상관없이 거의 비슷하지만, 항복강도는 아르곤 가스 유량 160Nm³인 ②시험편이 약간 낮은 값을 나타내었다.

한편 진공 시간 10분 ④~⑥시험편의 인장강도 및 항복강도는 아르곤 가스 유량이 증가함에 따라서 감소하는 경향을 나타내었으나, 연신율은 거의 비슷하였다. 진공 시간 12분 ①~③시험편의 기계적 특성은 진공 시간 10분 ④~⑥시험편보다 약간 우수한 것을 알 수 있었다. 이상에서 기계적

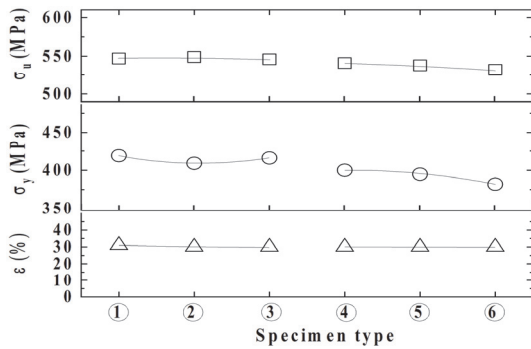


Fig. 6 Tensile strength, yield strength and elongation of 6 types of specimen

특성은 아르곤 가스 유량 160Nm³, 진공 12분인 ②시험편이 가장 우수한 것이라 판단되었다. 이것은 비커스경도의 와이블 확률 분포 해석 결과와 일치하였다.

Fig. 7은 6종류 시험편의 항복비 및 단면감소율을 나타낸다. 진공 시간 10분인 ④~⑥시험편의 항복비는 모두 진공 시간 12분인 ①~③시험편보다 약간 낮았다. 특히 아르곤 가스 유량 190Nm³, 진공 시간 10분인 ⑥시험편은 가장 낮은 항복비를 나타내었다. 진공 시간 12분 및 10분인 ①~⑥시험편의 단면감소율은 각각 2.3, 2.0, 2.3 및 1.9, 2.4, 1.6을 나타내었다. 진공 시간 10

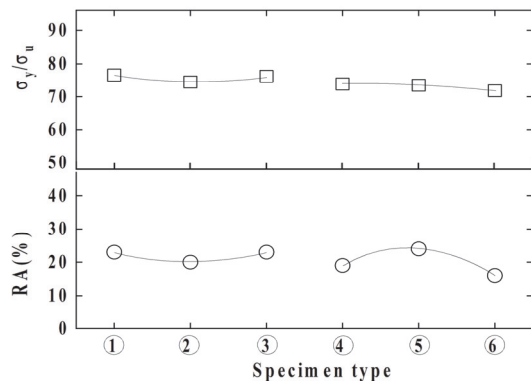


Fig. 7 Yield ratio(σ_y/σ_u) and reduction of area(RA) of 6 types of specimen

분인 ④~⑥시험편의 인장강도 및 항복강도는 진공 시간 12분인 ①~③시험편보다 약간 작음에도 불구하고, 단면수축율이 작은 것은 개재물의 영향이라 판단되었다.

Fig. 8은 6종류 시험편의 가공경화지수(n) 및 강도계수(K)를 나타낸다. 가공경화지수는 재료의 가공경화 정도를 나타내며, 진응력(σ)과 진변형률(ε) 곡선에서 식 (1), (2)와 같이 나타낸다.

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (1)$$

$$\log \sigma = \log K + n \log \epsilon \quad (2)$$

여기서 n은 가공경화지수 (strain hardening exponent), K는 강도계수 (strength coefficient)이다. n은 진응력-진변형률 선도에서 기울기로 클수록 necking 발생 전까지 많은 변형이 가능하다. 즉, 연성이 커서 성형성이 우수하다. K는 진변형률의 크기가 1일 때 진응력 값으로, 진응력-진변형률에서 곡선의 높기와 관계되며, K값이 작아야 소성 가공에 유리하다.

가공경화지수는 진공 시간 10분인 ④시험편을 제외하고, ⑤과 ⑥시험편은 진공 시간 12분인 ①~③시험편보다 작았다. 이것은 진공 시간 10분인

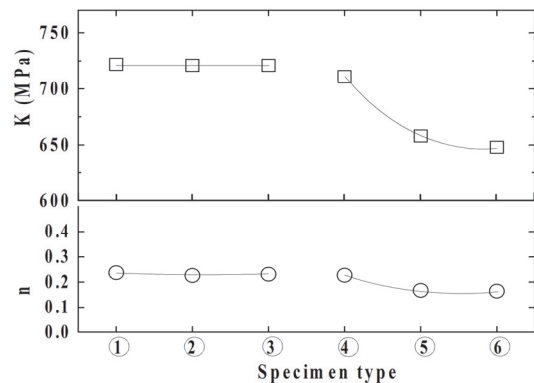


Fig. 8 Strain hardening exponent (n) and strength coefficient (K) of 6 types of specimen

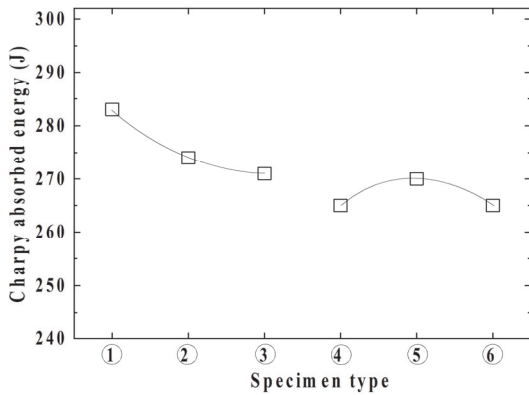


Fig. 9 Charpy absorbed energy of 6 types of specimen

시험편은 네킹의 발생이 빠르게 나타나면서 파괴하는 것을 의미하고, 진공 시간 12분인 시험편은 네킹이 늦게 나타나는 변형저항이 크다는 것을 의미한다. 한편, 진공 시간 10분인 ④~⑥시험편의 강도계수는 진공 시간 12분인 ①~③시험편보다 작으므로 소성가공이 쉽다.

Fig. 9는 6종류 시험편의 샤르피 충격 흡수에너지지를 나타낸다. 흡수에너지가 큰 것은 외부의 충격에 잘 견딘다는 것이다. 진공 시간 12분인 ①~③ 및 10분인 ④~⑥시험편은 아르곤 가스가 유량이 많을수록 충격 흡수에너지가 작아지는 경향을 나타내었다. 그리고 진공 시간 12분인 ①~③시험편의 충격 흡수에너지는 진공 시간 10분인 ④~⑥시험편보다 크다. 이것은 진공 시간 12분이 충격저항성 크다는 것을 의미한다. 이상에서 충격저항성은 아르곤 유량 140Nm³, 진공 시간 12분인 ①시험편이 가장 우수하다고 판단하였다.

3.3 마이크로 비커스경도의 와이블 해석

6종류 시험편의 비커스경도는 ① 430.1~459.0, ② 439.5~474.7, ③ 426.5~474.7, ④ 417.8~468.8, ⑤ 429.0~474.3, ⑥ 421.4~

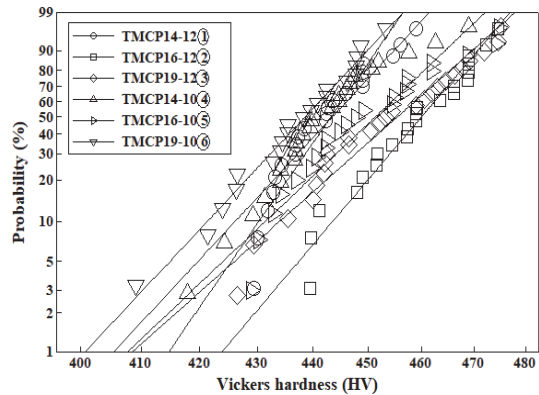


Fig. 10 Weibull plot for Vickers hardness of 6 types of specimen

453.2로 분산이 나타났다.

비커스경도는 아르곤 가스 유량 및 진공 시간과 상관없이 일정한 값이 아니고, 변동하는 것을 알 수 있었다. 분산을 나타내는 특성 평가는 분산 분포를 고려한 확률론적 평가가 매우 중요하여, 최약 링크 가설을 고려한 2-파라미터 와이블 분포를 적용하여 와이블 통계 해석하였다[17].

2-파라미터 와이블 분포 $F(x)$ 로 표현하는 누적 분포 함수는 다음 식과 같다.

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\beta} \right)^\alpha \right]$$

여기서, $F(x)$ 는 비커스경도의 확률, α 는 확률변수의 변동성을 의미하는 형상파라미터(shape parameter)로서, 커지면 통계적 분산이 작아지므로 신뢰성이 높아진다. β 는 63.2% 확률에서 특성 수명을 나타내는 척도파라미터(scale parameter)이다.

Fig. 10은 6종류 시험편의 비커스경도를 와이블 확률로 나타낸 것이다. (a) 및 (b)는 3종류의 아르곤 유량 (140Nm³, 160Nm³, 190Nm³)에서 각각 2torr 진공에서 12분 및 10분 RH 정련 공정을 거친 CC시험편을 나타낸다. 이와 같이 비커스경

Table 2. The estimated Weibull parameters in 6 types of specimen.

Specimen Parameter	①	②	③	④	⑤	⑥
Shape parameter	63.8	51.9	39.1	47.4	41.8	47
Scale parameter	445.7	464	459.6	446.8	455.2	441.8
Mean	442	459.8	453.4	441.8	449.5	436.8
Standard Deviation	8.65	9.29	14.02	11.53	13.37	11.15
Coefficient of variation	0.02	0.02	0.031	0.026	0.03	0.026

도는 와이블 확률 분포로 설명할 수 있다.

Table 2는 와이블 확률에서 얻어진 6종류 시험편의 형상파라미터, 척도파라미터 및 산술통계에 의한 변수도 나타내었다. 형상파라미터는 많은 분산을 나타내고 있다. 이것은 경도 분산이 많은 것을 의미한다. 형상파라미터의 최대는 ①시험편에서 63.8을 나타내고, 최소는 ③시험편에서 39.1을 나타내었다. 한편 척도파라미터는 최대는 ②시험편에서 464.0을 나타내고, 최소는 ⑥시험편에서 441.8을 나타내었다. 이상에서 비커스경도의 형상 및 척도파라미터에서 판단하면, 형상파라미터는 ①시험편의 63.8보다 ②시험편이 약간 작지만, 63.2%의 특성 수명인 척도파라미터가 ②시험편이 가장 높게 나타났으므로 가장 우수하다고 판단하였다.

Table 2에서 ①~⑥시험편의 아르곤 유량과 진공 시간에 따라서 평균은 일정하지 않고, 다르게 나타났다. ⑥시험편의 비커스경도 평균은 ①~⑤시험편의 약 94.4~98.9%로 약간 낮았다. ③-⑥시험편의 변동계수는 ①과 ②시험편의 것보다 약간 크게 나타나, 경도 분산이 많은 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 Ruhrstahl Heraeus (RH) 정련 공정에서 아르곤 가스 유량 및 진공 시간을 달리하고, 연속주조(Continuous casting; CC)한 TMCP강의

개재물 및 기계적 특성을 평가하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 연속주조 TMCP강은 산화물과 Al-O계 개재물이 많이 관찰되었다. 아르곤 가스 유량 160Nm³, 진공 시간 10분인 ⑤시험편의 산화물과 Al-O계 개재물은 각각 78개 및 14개로 가장 개재물이 작았다.
- (2) 아르곤 가스 유량 160Nm³, 진공 시간 12분인 ②시험편의 산화물과 Al-O계 개재물의 평균 크기는 각각 4.7 μ m 및 4.4 μ m로 가장 작았다.
- (3) 기계적 특성(인장강도, 항복강도 및 연신율)은 아르곤 가스 유량 160Nm³, 진공 시간 12분인 ②시험편이 가장 우수하여, 와이블 확률 분포 해석 결과와 일치하였다.
- (4) 충격저항성은 아르곤 유량 140Nm³, 진공 시간 12분인 ①시험편이 가장 우수하였다.
- (5) 비커스 경도는 분산을 나타내었고, 와이블 분포로 설명할 수 있었다. 형상 및 척도파라미터에서 비커스경도는 아르곤 가스 유량 160Nm³, 진공 시간 12분인 ②시험편이 가장 우수하였다.
- (6) 상기와 같이 아르곤 유량 및 진공 시간에 따른 시험편의 개재물 및 기계적 특성을 평가하였지만, 본 연구의 범위에서는 큰 차이가 없었다.

참고문헌

- [1] C. Yang, F. Tang, T. He, Q. Fu, "Water model on fine inclusion removal by bubble flotation in RH refining process," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 528, pp. 107-111, (2014).
- [2] C. Yang, F. Tang, T. He, Q. Fu, "Physical simulation of inclusions removal in 180t RH degasser," *Advanced Materials Research*, vol. 750-752, pp. 375-379, (2013).
- [3] M. Hirase, "Manufacture of low-carbon steel by the RH degassing process," *Iron Steel Institute Specification Report no. 154*, p. 459, (1965).
- [4] M. Wahlster, H. H. Reichel, "Some technical and metallurgical aspects of the application of the RH process," *Steel Times*, vol. 195, pp. 459-468, (1968).
- [5] H. Watanabe, K. Asano, T. Saeki, "Some chemical engineering aspects of R-H degassing process," *Tetsu-To-Hagane*, vol. 54, pp. 1327-1342, (1968).
- [6] H. Maas, P. Hupfer, "The significance of the circulation rate on the vacuum treatment of liquid steel with the RH process," *Vacuum*, vol. 19, pp. 199-203, (1969).
- [7] K. Ono, M. Yanagida, T. Katoh, M. Miwa, T. Okamoto, "The circulation rate of RH-degassing process by water model experiment," *Denki Seiko (Electr. Furnace Steel)*, vol. 52, pp. 149-157, (1981).
- [8] T. Kuwabara, K. Umezawa, K. Morim, H. Watanabe, "Investigation of decarburization behavior in RH-reactor and its operation improvement," *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, vol. 28, pp. 305-314, (1988).
- [9] R. Tsujino, J. Nakashima, M. Hirai, I. Sawada, "Numerical analysis of molten steel flow in ladle of RH process," *ISIJ Int.*, vol. 29, pp. 589-595, (1989).
- [10] Y. Kato, H. Nakato, T. Fujii, S. Ohmiya, S. Ohmiya, S. Takatori, "Fluid flow in ladle and its effect on decarburization rate in RH degasser," *ISIJ Int.*, vol. 33, pp. 1088-1094, (1993).
- [11] F. Ahrenhold, W. Pluschkell, "Circulation rate of liquid steel in RH degassers," *Steel Research*, vol. 69, pp. 54-59, (1998).
- [12] C. Kamata, S. Hayashi, K. Ito, "Estimation of circulation flow rate in RH reactor using water model," *Tetsu-To-Hagane*, vol. 84, pp. 484-489, (1998).
- [13] J. Han, X. Wang, D. Ba, "Coordinated analysis of multiple factors of argon blowing parameters on the effect of circulation flow rate in RH vacuum refining process," *Vacuum*, vol. 109, pp. 68-73, (2014).
- [14] K. Peng, C. Liu, L. Zhang, Y. Sun, "Numerical simulation of decarburization reaction with oxygen blowing during RH refining process," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 53, pp. 2004-2017, (2022).
- [15] T. Kuwabara, K. Umezawa, K. Mori, H. Watanabe, "Investigation of decarburization behavior in RH-reactor and its operation improvement," *Trans. ISIJ*, vol. 28, pp. 305-313, (1988).
- [16] Y. G. Park, K. W. Yi, S. B. Ahn, "The effect of operating parameters and dimensions of the RH system on melt circulation using numerical calculations," *ISIJ Int.*, vol. 41, pp. 403-409, (2001).
- [17] S. Y. Yun, S. H. Gu, K. W. Nam, "Reliability evaluation of hardness and impact absorption energy of tempered structure steel SCM435," *Journal of the Industry Convergence and Application*, vol. 22, no. 6, pp. 681-688, (2019).