

질소 버블한 SD500 압연강의 기계적 특성 Mechanical Properties of Nitrogen Bubbled SD500 Rolled Steel

탁영준* · 이기식*† · 남기우**

Young-Joon Tak*, Ki-Sik Lee*† and Ki-Woo Nam**

(Received 13 January 2021, Revision received 14 June 2021, Accepted 14 June 2021)

Abstract : Steel makers are bubbling with argon to improve the quality of materials. However, low-cost nitrogen bubbles are being tried in order to save manufacturing cost. This study investigated the effect of nitrogen bubbling on the microstructure and mechanical properties of SD500 steel with different nitrogen concentrations. As the residual nitrogen concentration increased, not only the amount of inclusions and pin-holes increased, but also the size increased. The amount of ferrite decreased, and the amount of pearlite increased whereas but the ferrite and pearlite grain sizes were reduced. The hardness, strength and yield ratio increased, but the elongation decreased. Vickers hardness could be explained by a 2-parameter Weibull statistical analysis.

Key Words : SD500 steel, Nitrogen concentration, Microstructure, Mechanical properties, Weibull analysis

1. 서 론

일반적으로 전기로에서 용해한 용강은 레이드(LF, Ladle furnace)로 이송하고, 레이드에서 승온 - 탈산 - 탈황한 다음, 성분을 분석한다. 이와 같은 과정에서 제강 업체들은 소재의 품질을 높이기 위하여 다양한 방법을 시도하고 있다.¹⁻⁷⁾ 이와 같은 방법 중에서 가장 일반적인 방법은 강의 용해 시, 용탕 중에 존재하는 불순물 등을 슬래그와

가스 상태로 제거하기 위하여, 용탕 중에 아르곤 등과 같은 불활성 가스를 불어 넣어(Bubbling) 청정도를 높이고 있다.⁷⁻¹¹⁾ 그러나 이같이 용탕에 아르곤을 불어 넣어 청정도를 높이면, 청정도는 쉽게 높일 수 있다. 그러나 아르곤 가스는 고가이기 때문에 강의 제조 단가가 높아지게 된다. 따라서 제강 업체들은 다양한 방법으로 제조 원가를 낮추기 위해 많은 연구 개발을 시도하고 있다. 이러한 연구 개발 중에서 가장 효율적이라 판

*† 이기식(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5968-7810) : 품질파트장, POSCO

E-mail : lks419815@naver.com, Tel : 054-220-0114

*탁영준(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5968-8207) :

기술실장, 포항연구인프라 그룹 공정시험실, POSCO

**남기우(ORCID:http://orcid.org/0000-0001-7019-358X) : 교수, 부경대학교 재료공학과, 마린융합디자인공학과

*† Ki-Sik Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5968-7810) : Quality Part Manager, Cold Rolled Part, POSCO.

E-mail : lks419815@naver.com, Tel : 054-220-0114

*Young-Joon Tak(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5968-8207) : Technical Manager, Pohang Research Infra Group Process Testing Section, POSCO.

**Ki-Woo Nam(ORCID:http://orcid.org/0000-0001-7019-358X) : Professor, Dept. Materials Science and Engineering & Dept. Marine Design Convergence Engineering, Pukyong National University.

단되어 많이 사용되는 방법이 저렴한 질소를 용탕에 불어 넣어 용탕의 청정도를 높이는 방법이다.¹²⁻¹⁸⁾ 그러나 이같이 아르곤 가스 대신에 질소를 사용하여 버블하면 제조 단가 등을 낮출 수 있지만, 질소 가스 버블에 따르는 소재의 특성을 규명해야 할 필요성이 있다.

따라서 본 연구에서는 항복강도 500 MPa급 철근 규격 SD500 강을 질소 버블 농도를 다르게 제조하여, 미세조직 및 기계적 성질을 조사하였다. 또한 질소 버블 SD500 압연강의 비커스경도는 와이블확을 분포¹⁹⁾로 해석하였으며, 아르곤 버블 Ar-SD500 압연강의 비커스경도와도 비교하였다.

2. 재료 및 실험 방법

재료는 질소 농도를 달리하여 버블한 SD500 압연강을 사용하였으며, 아르곤 버블 SD500 압연강은 비커스경도의 분포를 비교하기 위하여 사용하였다. 질소 버블은 용탕의 질소 농도가 140 ppm, 290 ppm, 340 ppm이 되도록 하였다. 이때 질소 농도를 달리하기 위하여 질소 버블과 동시에 질화 망간(Mn 94%, N 6% 함유 합금철)을 투입하여, 질소 버블 SD500 강괴를 제조하였다. 질소 버블 SD500 강괴는 1,230℃로 가열 후, 압연하고 공랭하였다. 이후 질소 버블 SD500 압연강은 각각 RN140, RN290 및 RN340이라 부른다. 그리고 아르곤 버블 SD500 압연강은 Ar-SD500이라 부른다.

Table 1은 연구에 사용된 시험편의 화학성분을 나타낸다. RN140, RN290 및 RN340은 순철로 제조되었기 때문에 5가지 성분(C, Si, Mn, P, S)만 나타난다. 비교하기 위한 아르곤 버블 Ar-SD500강은 고철을 사용하여 철근을 제조하였으므로 5가지 성분 외 Ni, Cr, Mo, Cu 등의 성분이 나타났다.

Table 2는 각각 질소 버블 SD500 압연강의 화학적 성분과 기계적 성질을 나타낸다. 여기서 TS, YS 및 EL은 각각 인장강도(Tensile strength), 항복강도(Yield strength), 연신율(Elongation)을 나타내고, TS/YS는 강도비를 나타낸다. Table 3은 KSD3504에 규정되어 있는 아르곤 버블 Ar-SD500 압연강의 화학적 성분 및 기계적 성질을 나타낸다.

Table 1 Chemical compositions of SD500 rolled steel with nitrogen bubbling, (wt.%)

Comp. Specimen	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
RN140	0.28	0.25	0.37	0.038	0.035	-	-	-	-
RN290	0.28	0.25	0.89	0.033	0.031	-	-	-	-
RN340	0.30	0.24	1.36	0.044	0.007	-	-	-	-
Ar-SD500	0.30	0.16	0.73	0.032	0.044	0.23	0.10	0.20	0.029

Table 2 Mechanical properties of SD500 rolled steel with nitrogen bubbling

Comp. Specimen	TS (MPa)	YS (MPa)	EL (%)	TS/YS
RN140	612	382	28.7	1.60
RN290	722	458	21.0	1.57
RN340	745	480	7.2	1.55

Table 3 Chemical compositions and mechanical properties of SD500 rolled steel with argon bubbling (KSD3504)

C	Si	Mn	P	S
0.28-0.32	0.2-0.3	1.3-1.4	0.05<	0.05<
TS (MPa)	YS (MPa)	EL (%)	TS/YS	
< 710	< 500	12~14	1.24	

아르곤 버블 Ar-SD500 압연강의 항복강도는 500 MPa 이상, 인장강도는 620 MPa 이상으로 규정하고 있다.

질소 버블 SD500 강은 용해 후, 질소 농도를 측정하였다. 강의 질소 농도는 NO 분석기를 사용하여 측정하였다.

압연강의 조직은 5% 나이탈 용액으로 10초간 에칭하여 금속현미경으로 관찰하였다. 압연강의 페라이트 분률 및 조직 분포는 올림포스 광학현미경으로 측정하였다.

인장시험은 ASTM E-8 규격에 의하여 시험편을 제작하고, 만능인장시험기를 사용하여, 크로스헤드 속도 5 mm/min으로 하였다.

경도는 비커스 경도기(HM-124, Akashi, Japan)를 사용하여, 압입 하중 200 g, 유지시간을 10초로 하여 측정하였다. 경도값은 각 시험편에서 22회

측정하여 평균값을 사용하였다. 또한 와이블 확률 평가는 각 시험편의 최댓값과 최솟값을 제외한 20회를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직

Fig. 1은 질소 버블 SD500 압연강의 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 것이다. (a), (b) 및 (c)는 각각 질소 농도가 140 ppm, 290 ppm 및 340 ppm이다. 압연강의 미세조직은 잔존 질소 농도가 증가할수록 페라이트의 양이 적어지고, 펄라이트의 양이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 결정립은 잔존 질소 농도가 증가할수록 페라이트와 펄라이트의 크기가 작아지고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 질소 농도가 증가할수록 오스테나이트에서 페라이트와 펄라이트로 변태되는 변태점이 낮아지고, 상변태에 요구되는 구동력이 향상되기 때문에 페라이트 변태가 억제되기 때문이라 판단된다.

Fig. 2는 질소 버블 SD500 압연강의 페라이트 결정립 크기 분포를 조사하여 나타낸 것이다. (a), (b) 및 (c)는 각각 질소 농도가 140 ppm, 290 ppm

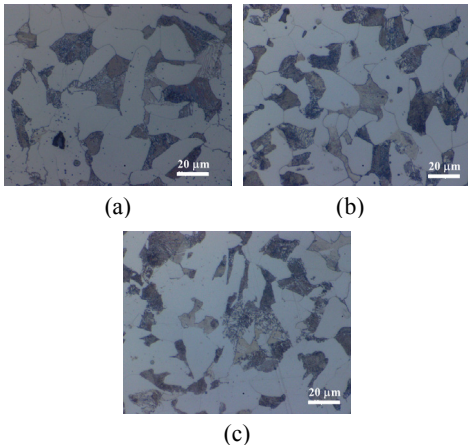


Fig. 1 Microstructure observation to investigate the effect of different residual nitrogen concentration in nitrogen bubble SD500 rolled steel (a) RN140, (b) RN290, (c) RN340

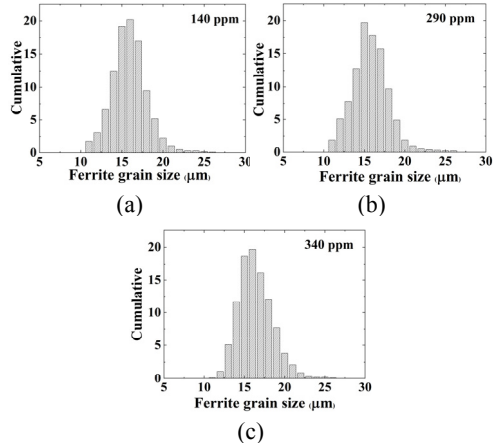


Fig. 2 Grain size distribution of ferrite according to different residual nitrogen concentration in SD500 rolled steel. (a) RN140, (b) RN290, (c) RN340

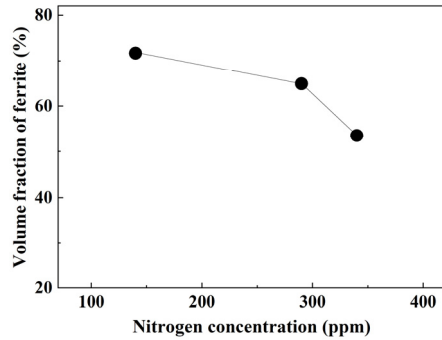


Fig. 3 Volume fraction of ferrite according to different residual nitrogen concentration in SD500 rolled steel

및 340 ppm이다. 분포는 정규 분포를 나타내고 있으며, 질소 농도가 증가함에 따라서 결정립 크기 분포가 작은 쪽으로 이동하고 있는 것을 알 수 있다. 결정립이 작아지는 이유는 Fig. 1에서 설명하였다.

Fig. 3은 질소 버블 SD500 압연강의 페라이트 체적분율을 나타낸다. 잔존 질소 농도가 증가할수록 페라이트의 양이 빠르게 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이같이 페라이트의 양이 빠르게 감소하는 이유는 질소 농도가 많아질수록 오스테나이트

트에서 페라이트와 펄라이트로 변태되는 변태점이 낮아지고, 펄라이트로 변태되는 구동력이 향상되고 페라이트 변태가 억제되기 때문이라 판단된다.

3.2 기계적성질

Fig. 4는 잔존 질소 농도가 다르도록 버블한 SD500 압연강의 항복 및 인장강도를 조사하여 나타낸 것이다. 항복 및 인장강도는 잔존 질소 농도가 증가할수록 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 역시 잔존 질소의 농도가 증가할수록 기지금속에 고용되는 질소 농도가 증가하여, 고용강화 효과가 커지기 때문이라 판단된다. 그러나 RN340은 항복강도는 RN290보다 낮게 나타났다. 이것은 질소가 강에 고용되지 못하고, 가스 성분으로 핀홀을 형성하거나 불순물로 남은 것의 영향으로 판단된다. 항복강도는 KSD3504에서 규정하는 500 MPa 이상에는 약간 부족한 결과를 나타냈다. 이는 향후 더 연구할 필요가 있는 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 질소 버블 SD500 압연강은 잔존 질소 농도가 증가할수록 경도와 강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 질소 농도가 증가할수록 기지금속에 고용되는 질소 고용량이 증가하는 데 따른 고용강화 효과가 커지기 때문이다. Fig. 1 및 2에서 알 수 있는 바와 같이 잔존 질소 농도가 증가함에 따라서 연한 상인 페라이트의 양이 줄어들고, 상대적으로 강도가 높은

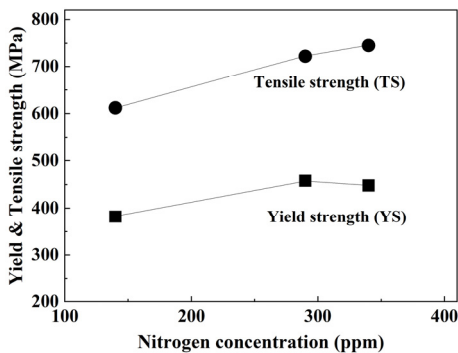


Fig. 4 Yield and tensile strength of SD500 rolled steel with different residual nitrogen concentration

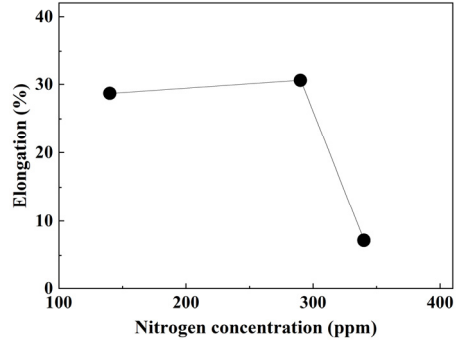


Fig. 5 Elongation of SD500 rolled steel with different residual nitrogen concentration

펄라이트의 양이 증가하기 때문이다. 또한 미세조직의 결정립 크기가 작아지기 때문이라 판단된다.

Fig. 5는 잔존 질소 농도가 다른 SD500 압연강의 연신율을 조사하여 나타낸 것이다. 잔존 질소 농도가 증가할수록 연신율이 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 역시 잔존 질소 농도가 증가할수록 기지금속에 고용되는 질소 농도가 증가하여 고용강화 효과가 커지기 때문이다. 또한 Fig. 1 및 2에서 알 수 있는 바와 같이 연한 상인 페라이트의 양이 적어지고, 강도가 높은 펄라이트의 양이 증가하기 때문이라 판단된다. 특히 질소 고용량 340 ppm의 SD500 압연강은 연신율이 빠른 속도로 감소하여 약 7%를 나타내었다. 이것은 KSD3504의 규정에서 Ar-SD500 강 연신율 14%의 1/2이다. 이와 같은 이유는 질소 고용량이 증가하면서 연한 페라이트의 양이 줄어들고, 강한 펄라이트의 양이 증가하기 때문이다. 이것은 고용되지 못한 질소로 인하여 생성된 개재물과 핀홀의 증가가 연신율에 나쁜 영향을 미치게 되었다고 판단된다.

Fig. 6은 질소 버블 SD500 압연강의 강도비(인장강도/항복강도)에 미치는 잔존 질소 농도의 영향을 나타낸 것이다. 질소 농도가 많아질수록 강도비가 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 역시 질소 농도가 많을수록 고용강화 효과가 커질 뿐만 아니라, 연한 상인 페라이트의 양이 감소하고, 상대적으로 강도가 높은 펄라이트의 양이 증가하면서 결정립 크기가 작아지기 때문이라 판단된다.

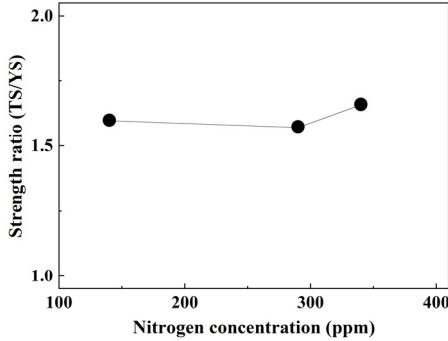


Fig. 6 Strength ratio of SD500 rolled steel with different residual nitrogen concentration

3.3 비커스경도의 와이블 해석

Fig. 7은 질소 버블 SD500 압연강(RN140, RN290, RN340)의 비커스경도를 나타낸다. 아르곤 버블 Ar-SD500 압연강은 비교를 위하여 함께 나타내었다. 4종류 SD500의 경도는 균일한 것이 아니라, 질소 버블량에 따라서 분산이 많은 것을 알 수 있다. 이같이 분산이 많은 정도 특성은 최약링크설을 가정하여, 와이블은 다음 식 (1)과 같은 2-파라미터 통계 해석을 제안하였다.¹⁹⁾

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

여기서, α 는 경도의 분산을 나타내는 형상 파라미터(shape parameter)로서, α 가 클수록 정도 분산이 작아지므로 균일한 분포를 나타내고 신뢰성이 증가한다. β 는 척도 파라미터(scale parameter)로서 63.2%에서 와이블 분포의 특성수명을 나타내는 것이다. x 는 확률변수이다.

Fig. 8은 SD500 강과 및 압연강의 비커스경도를 와이블 확률로 나타낸 것이다. SD500의 정도는 SM45C²⁰⁾이나 스테인리스강²¹⁾의 정도와 같이 2-파라미터 와이블 통계 해석으로 설명 가능함을 보여준다. 정도의 해석 결과는 Table 4에 나타낸다. Table 4에는 산술통계의 평균, 표준편차 및 변동계수도 나타내었다.

아르곤 버블 Ar-SD500 압연강은 RN140 및 RN240 정도 분포보다 높게 나타났었다. 이것은

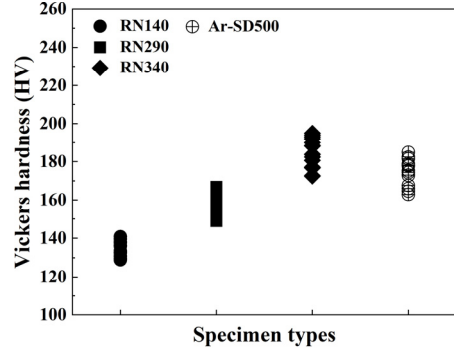


Fig. 7 Vickers hardness according to specimen types

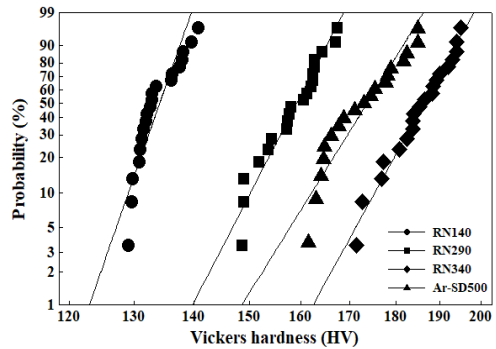


Fig. 8 Weibull plots of Vickers hardness according to specimen types

Table 4 The estimated Weibull parameters by 1.96 N of indentation load

Parameter Specimen	Shape parameter	Scale parameter	STD/Mean/COV
RN140	48.4	135.2	3.56/133.8/0.027
RN290	32.8	160.9	5.78/158.3/0.037
RN340	30.8	188.5	7.07/185.3/0.038
Ar-SD500	27.3	176.0	7.80/172.7/0.045

Ar-SD500 압연강은 5가지 화학성분 외에 Cr, Ni, Mo, Cu 등의 영향으로 RN140 및 RN240보다 상대적으로 고강도인 펄라이트 양이 증가한 것으로 판단된다. 반면 SD500 압연강은 5가지 화학성분 외에 질소의 첨가로 인하여 고강도인 펄라이트 양이 증가하고, 5가지 화학성분으로 추정된 Ar-SD500 압연강은 고강도인 펄라이트가 가장 작은 것으로 나타났다.

질소 버블 SD500 압연강은 잔존 질소 농도가 증가할수록 형상 파라미터가 작아졌으나, 척도 파라미터는 크게 나타났다. 이와 같은 이유는 질소 고용량이 증가하고, 펄라이트의 양이 증가하면서 결정립 크기가 작아지기 때문이다. 또한 형상 파라미터가 작아지고, 척도 파라미터가 커짐에 따라서 변동계수가 증가하는 것을 알 수 있다. 한편 아르곤 버블 Ar-SD500 압연강의 형상 파라미터는 질소 버블 압연강(RN140, RN290, RN340)보다 작게 나타나 분산이 약간 크다. 척도 파라미터는 질소 버블 SD500 압연강의 RN140, RN290보다 크지만, RN340보다 작게 나타났다.

따라서 SD500 압연강은 잔존 질소 농도가 증가함에 따라서 63.2%의 특성수명(135.2 MPa → 160.9 MPa → 188.5 MPa)이 증가하였다. 질소 버블 RN340의 특성수명(188.5 MPa)은 아르곤 버블 Ar-SD500의 특성수명(176 MPa)보다 약 1.07배 크게 나타났다.

4. 결 론

SD500 강 of 제조 단가를 절약하기 위하여, 질소 버블 고질소 SD500 강을 제조하였다. 용탕 중에 존재하는 질소 농도가 다르도록 질소 버블 SD500 강 of 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 잔존 질소 농도가 많아질수록 개재물과 핀홀의 양이 많아질 뿐만 아니라 크기가 증가하였다. 페라이트의 양은 감소하고, 상대적으로 강도가 큰 펄라이트의 양이 증가하였다. 이것은 고용 질소 농도가 증가하는데 기인하여 경도, 강도 및 강도비가 증가하고, 연신율은 감소하였다. 또한 페라이트와 펄라이트 결정립 크기는 작아졌다.

2) SD500 압연강의 경도는 2-파라미터 와이블 통계 해석으로 설명 가능하였다. SD500 압연강의 형상 파라미터는 잔존 질소 농도가 증가할수록 형상 파라미터가 작아졌으며, 척도 파라미터는 크게 나타났다.

3) 아르곤 버블 Ar-SD500 압연강의 형상 파라미터는 질소 버블 SD500 압연강(RN290, RN340)

보다 작게 나타났다. 척도 파라미터는 질소 버블 SD500 압연강의 RN140 및 RN290보다 크지만 RN340보다 작게 나타났다.

4) 질소 버블 SD500 압연강은 잔존 질소 농도가 증가함에 따라서 63.2%의 특성수명(135.2 MPa → 160.9 MPa → 188.5 MPa)이 증가하였다. 질소 버블 RN340의 특성수명은 아르곤 버블 Ar-SD500보다 약 1.07배 크게 나타났다.

5) 아르곤 버블 SD500 압연강의 규격보다 약간 낮은 항복강도를 나타내어 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

Author contributions

Y. J. Tak; Investigation & Methodology. K. W. Nam; Supervision, Validation & Visualization. K. S. Lee; Writing-original draft & editing.

References

1. T. Fujii, Y. Oguchi, N. Sumida, T. Emi and K. Ishizaka, 1982, "Commercial scale experiments on pulsating mixing process for ladle refining of molten steel", *Tetsu-to-Hagane*, Vol. 68, No. 10, pp. 1595-1603. (https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.68.10_1595)
2. Y. H. Seo and C. G. Kang, 1999, "Effects of hot extrusion through a curved die on the mechanical properties of SiCp/Al composites fabricated by melt-stirring", *Composites Science and Technology*, Vol. 59, No. 5, pp. 643-654. ([https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(98\)00123-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(98)00123-7))
3. S. Naher, D. Brabazon and L. Looney, 2003, "Simulation of the stir casting process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 143-144, pp. 567-571. ([https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00368-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00368-6))
4. S. B. Prabu, L. Karunamoorthy, S. Kathiresan and B. Mohan, 2006, "Influence of stirring speed and stirring time on distribution of particles in

- cast metal matrix composite", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 171, No. 2, pp. 268-273.
(<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.071>)
5. H. Wang, G. Li, Q. Dai, Y. Lei, Y. Zhao, B. Li, G. Shi and Z. Ren, 2006, "Effect of additives on viscosity of LATS refining ladle slag", *ISIJ International*, Vol. 46, No. 5, pp. 637-640.
(<https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.637>)
 6. Z. G. Yang, B. Wang, X. F. Zhang, Y. T. Wang, H. B. Dong and Q. Liu, 2014, "Effect of electromagnetic stirring on molten steel flow and solidification in bloom mold", *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 21, No. 12, pp. 1095-1103.
([https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(14\)60189-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(14)60189-8))
 7. J. S. Kim, M. Kawakami and K. Tanida, 1995, "Effect of Ar bubbling on removal rate of alumina inclusion in Al deoxidized steel", *Tetsu-to-Hagane*, Vol. 81, No. 3, pp. 167-172.
(https://doi.org/10.2355/tetsuohagane1955.81.3_167)
 8. B. G. Thomas, A. Dennisov and H. Bai, 1997, "Behavior of argon bubbles during continuous casting of steel", *ISS 80th Steelmaking Conference*, Chicago, IL, ISS, April 13-16, 1997, *Proceedings*, pp. 375-384.
 9. Z. Wang, K. Mukai and D. Izu, 1999, "Influence of wettability on the behavior of argon bubbles and fluid flow inside the nozzle and mold", *ISIJ International*, Vol. 39, No. 2, pp. 154-163.
(<https://doi.org/10.2355/isijinternational.39.154>)
 10. M. Burty, M. D. Santis and M. Gesell, 2002, "Behaviour of argon gas bubbles in the continuous casting machine", *Metallurgical Research & Technology*, Vol. 99, No. 1, pp. 49-53.
(<https://doi.org/10.1051/metal:2002180>)
 11. C. Pfeiler, M. Wu and A. Ludwig, 2005, "Influence of argon gas bubbles and non-metallic inclusions on the flow behavior in steel continuous casting", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 413 - 414, pp. 115-120.
(<https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.178>)
 12. M. Kawakami, Y. Kitazawa, T. Nakamura, T. Miyake and K. Ito, 1985, "Dispersion of bubbles in molten iron and the nitrogen transfer in the bubble dispersion done at 1250°C", *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, Vol. 25, No. 5, pp. 394-402.
(<https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.25.394>)
 13. P. D. Marco, W. Grassi and G. Memoli, 2003, "Experimental study on rising velocity of nitrogen bubbles in FC-72", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 42, No. 5, pp. 435-446.
([https://doi.org/10.1016/S1290-0729\(02\)00044-3](https://doi.org/10.1016/S1290-0729(02)00044-3))
 14. M. R. Ridolfi and O. Tassa, 2003, "Formation of nitrogen bubbles during the solidification of 16 - 18% Cr high nitrogen austenitic stainless steels", *Intermetallics*, Vol. 11, No. 11 - 12, pp. 1335-1338.
([https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(03\)00176-6](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(03)00176-6))
 15. H. B. Li, Z. H. Jiang, M. H. Shen and X. M. You, 2007, "High nitrogen austenitic stainless steels manufactured by nitrogen gas alloying and adding nitrided ferroalloys", *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 14, No. 3, pp. 63-68.
([https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(07\)60045-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(07)60045-4))
 16. K. Dai, B. Wang, F. Xue, S. Liu, J. Huang and J. Zhang, 2018, "Formation of nitrogen bubbles during solidification of duplex stainless steels", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 49, pp. 2011-2021.
(<https://doi.org/10.1007/s11663-018-1263-2>)
 17. J. Zhang, J. Liu, S. Yu, D. Dong, G. Wang and S. Li, 2018, "Production of clean steel using the nitrogen elevating and reducing method", *Metals*, Vol. 8, No. 7, p. 560.
(<https://doi.org/10.3390/met8070560>)
 18. I. P. Shabalov, G. A. Filippov, A. E. Semin and L. E. Shchukina, 2015, "Effect of liquid melt

- nitriding method on steel's nitrogen content", Metallurgist, Vol. 59, pp. 54-59.
(<https://doi.org/10.1007/s11015-015-0060-2>)
19. W. Weibull, 1951, "A statistical distribution function of wide applicability", ASME J. Applied Mech., Vol. 18, pp. 293-297.
20. C. S. Kim, K. W. Nam and S. H. Ah, 2017, "Failure analysis and Weibull statistical analysis according to impact test of the angular pin for injection molding machines", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 37-44.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2017.21.3.037>)
21. K. W. Nam, S. D. Cho, S. J. Kim and S. H. Ahn, 2017, "A study on Weibull probability statistics characteristics for Vickers hardness of degraded stainless steel", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 21, No. 5, pp. 79-85.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2017.21.5.079>)