

Hyper Duplex STS 중 Ce 첨가 시 비금속개재물 생성거동

홍성훈¹, 장필용¹, 박영민¹, 변선민², 김광태², 유병돈[#]

The Formation Behavior of Non-metallic Inclusion in the Ce-added Hyper Duplex STS

S. H. Hong, P. Y. Jang, Y. M. Park, S. M. Byun, K. T. Kim, B. D. You
(Received July 13, 2010 / Revised July 21, 2010 / Accepted July 22, 2010)

Abstract

Rare earth metal Ce has a relatively low melting point and high specific gravity. Because of its significantly high affinity to oxygen, nitrogen and sulfur, it is highly usable as a steel refining agent. However, because Ce compound has relatively high specific gravity, it is difficult to be separated from molten steel through floatation, and it degrades the purity of molten steel, or may clog the nozzle in continuous casting. Such problem may be solved by using an appropriate deoxidation agent together with Ce and settling molten steel sufficiently after refining. Thus a fundamental study in the formation behavior of non-metallic inclusion in Ce added Hyper Duplex STS melts was investigated. The addition amount of Ce, melt temperature were considered as experimental variables. A main non-metallic inclusion in mother alloy is 51(wt%MnO) - 27.6(wt%SiO₂) - 10.9(wt%Cr₂O₃). Non-metallic inclusion was dramatically decreased and the particle size was fined as the amount of Ce increased. Moreover (%MnO) and (%SiO₂) of non-metallic inclusion were decreased. But (%Al₂O₃) were relatively increased. The number of non-metallic inclusion were decreased and the large particle size were increased by increasing the temperature of molten steel.

Key Words : Rare Earth Element, Non-Metallic Inclusion, SEM, Stainless, Melting

1. 서 론

Ce 은 희토류 금속 원소 중에서도 고부가가치의 부존자원으로, 비교적 용점이 낮고(798℃) 비중이 높다(6.771g/cm³). 하지만, 산소, 유황 및 질소 등과의 친화력이 강하여 철강 정련제로서의 활용가치가 매우 높기 때문에 용강의 탈산제, 탈황제 또는 합금원소로서의 활용 가능성을 검토하기 위한 여러 연구 결과들이 보고되고 있다[1,2]. Ce 산화물은 다양한 비화화양론적 산화물들을 형성하며, 제강 온도 범위 내에서 CeO₂(s), Ce₂O₃(s)의 산화물, CeS(s), Ce₂S₃(s)의 황화물 등이 안정하지만, 산소와 유황이 공존하는 경우에는 Ce₂O₂S(s)가 형성될 수

있는 것으로 알려져 있다[3,4]. 그런데 이러한 Ce 화합물들은 비교적 비중이 높기 때문에 용강으로부터 부상 분리되기 어렵고, 용강의 청정성을 악화시키며 연속주조 시 노즐 막힘의 원인이 될 수 있다. 그러므로 용강 중에 Ce 을 첨가할 경우에는 가급적 비금속개재물의 생성을 억제해야 하며, 불가피한 경우에는 비중이 낮은 복합산화물을 형성시켜 부상 분리, 제거해야 할 필요가 있다. 제강공정에서 용강 중에 Ce 을 첨가할 경우에는 용강의 품질과 작업성 개선을 위해 비금속개재물의 형성 거동에 대한 조업조건의 영향을 충분히 고려해야 할 것으로 판단된다. 특히 비금속개재물의 조성 및 형태 변화에 대한 용강 중 산소, 유황

1. 인하대학교 공과대학 신소재공학부

2. ㈜포스코 기술연구소

교신저자: 인하대학교 공과대학 신소재 공학부 유병돈

E-mail: bdyou@inha.ac.kr

Table 1 Interaction coefficients of molten iron at 1600°C

$\begin{matrix} j \\ i \end{matrix}$	O	C	Cr	Mn	Mo	N	Ni	S	Si	Al	W
O	-0.17	-0.421	-0.055	-0.021	0.005	-0.14	0.006	-0.133	-0.066	-1.17	0.0085
Si	-0.119	0.18	-0.0003	-0.0146	2.36	-0.092	0.005	-0.066	-0.103	-0.058	
Al	-1.98	0.091				0.015		0.035	0.056	0.043	
Cr	-0.16	-0.114	-0.0003	0.0039		-0.182		-0.17	-0.004		

Table 2 Chemical composition of mother alloy (wt%)

Cr	Ni	Mo	Mn	W	Si	C	S	N	Al	Others (P,Cu,B)
27	7	2.5	0.93	3.3	0.3	0.018	<0.003	0.328	0.03	0.187

및 합금원소 함량 등의 조업인자가 미치는 영향을 체계적으로 조사할 필요가 있다. 일반적으로 용강 중에 첨가되는 Ce 은 산화물, 황화물, 질화물 등을 형성할 수 있으며, 내화물이나 탈산반응 생성물들과 다양한 화합물을 형성할 수도 있다.

많은 연구자들이 용강 중 Ce 의 반응평형에 관한 연구를 시도하였으며, Ce 은 산소와의 반응성이 크기 때문에 실험이 까다로우며 주의를 요하는 것으로 보고되고 있다. 즉, 용강 중 불순 원소의 함량, 반응 도가니 내화물과의 반응, 분위기 중의 산소와 온도, Ce 과 산소 농도의 정확한 측정공란 및 비중이 높은 미세한 반응 생성물의 부상분리 문제 등 실험방법이 난해하기 때문에 연구자들마다 연구결과와 편차가 심하다[5,6].

실제 제강공정에서도 용강의 탈산, 탈황 또는 합금성분 조정을 위해 용강 중에 Ce 을 첨가하는 경우에도 조업 상황에 따라 조성과 형상이 다양한 비금속개재물이 형성될 것으로 사료되며, 작업성을 개선하고 우수한 품질의 용강을 제조하기 위해서는 이에 대한 충분한 이해가 선행되어야 할 것으로 판단된다. 그러므로 본 연구에서는 Hyepr Duplex STS 을 대상으로 Ce 첨가량, 용강 온도에 따른 비금속개재물의 생성 거동을 실험실적으로 조사함으로써, Hyper Duplex STS 의 제조 공정에서 용강의 청정성과 작업성 개선을 위한 기초자료를 확보하고자 한다.

2. 예비적 고찰

Hyper Duplex STS 중 공존원소인 Si, Al, Cr 의 온도에 따른 평형산소농도와 공존 원소들의 상호

작용 계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\%O] = \frac{10^{\left(\frac{-21,325.9}{T} + 6.68\right)}}{f_{[O]} \cdot f_{[Al]}^{2/3} \cdot [\%Al]^{2/3}} \quad (1)$$

$$[\%O] = \frac{10^{\left(\frac{-15,053}{T} + 5.70\right)}}{f_{[O]} \cdot f_{[Si]}^{1/2} \cdot [\%Si]^{1/2}} \quad (2)$$

$$[\%O] = \frac{10^{\left(\frac{-14,678}{T} + 6.473\right)}}{f_{[O]} \cdot f_{[Cr]}^{2/3} \cdot [\%Cr]^{2/3}} \quad (3)$$

여기에서 f_i 는 i 원소의 활동도계수로, 이는 용질원소(j)들의 농도와 상호작용 조계수를 이용하여 구할 수 있으며, 용질원소들의 농도가 매우 높지 않으면 다음 관계가 성립된다.

$$\begin{aligned} \log f_i &= \log f_i^i + \log f_i^j \\ &= e_i^i \cdot [\%i] + e_i^j \cdot [\%j] \end{aligned} \quad (4)$$

f_i^j 는 i 원소의 j 원소의 i 성분 에 대한 활동도계수에 대한 영향을 나타내며, e_i^j 역시 i 원소의 j 원소의 i 성분 에 대한 상호작용 조계수를 의미한다. 제강공정의 대표 온도 1600°C 기준으로 산소를 포함한 제강반응에 관여하는 대표적인 원소들의 상호작용 조계수를 Table 1 에 정리하였다[7]. Hyper Duplex STS 중 용질원소의 농도

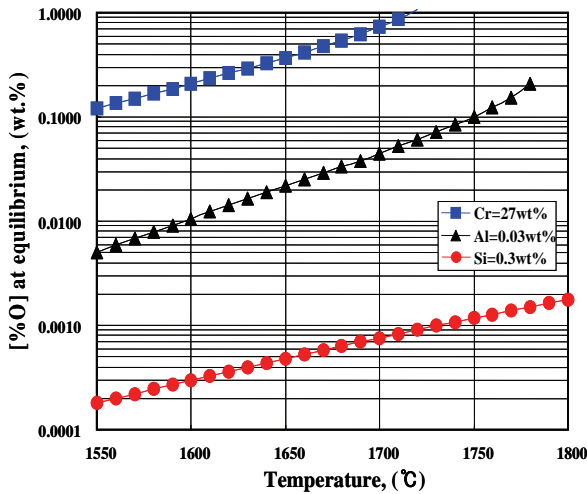


Fig. 1 Change of the oxygen content in molten steel depending on temperature.

가 [%Si]= 0.3wt%, [%Al]= 0.03wt%, [%Cr]= 27wt% 일 경우 용강 온도에 따른 평형산소농도를 Fig. 1 에 도식적으로 나타내었다. 용강 중 평형산소농도는 온도가 증가할 수록 증가하며, [Si]에 대한 영향이 지배적인 것을 알 수 있다. 그리고 일반적인 제강 온도의 범위인 1600°C 에서 용강 중 평형산소농도는 약 10ppm 미만으로 예상된다.

3. 실험 방법

모합금 시료의 화학성분 분석치는 Table 2 와 같다. 비금속개재물 형성 거동에 대한 Ce 첨가의 영향을 조사하기 위하여 일본의 고순도화학연구소로부터 입도 3~10mm, 순도 99.9%의 금속 Ce 을 구입하여 사용하였다. 그런데 금속 Ce 은 대기 중에 노출될 경우 산화될 위험성이 있으므로 Spindle oil 중에 보관된 상태로써 유통되는 것이 보통이며, 원하는 임의의 크기로 파쇄하는 것이 쉽지 않았다. 그러므로 용강 중 Ce 첨가량을 조절하기 위하여 Fe-Ce 을 제조하여 사용하였다. 전해 철과 금속 Ce 을 Al_2O_3 도가니에 혼합, 장입하여 불활성 가스 분위기 하에서 용해하였으며, 조성을 균질하게 하기 위해서 2~3 회 재용해를 실시하였다. 제작된 시편은 임의로 여러 부분을 채취하여 화학성분분석(ICP)을 수행하였고, Ce 함량이 약 3.2wt%인 Fe-Ce 을 제조하여 필요한 만큼의 크기로 절단 후 사용하였다.

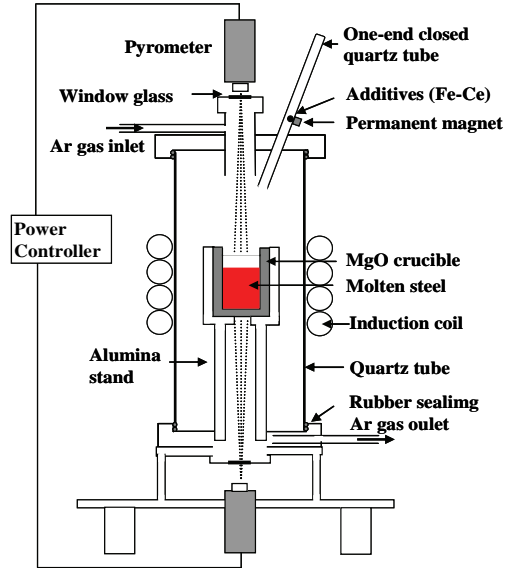


Fig. 2 Schematic drawing of experimental apparatus

Fig. 2 는 비금속개재물 형성거동을 조사하기 위해 사용한 분위기 제어가 가능한 고주파 유도 용해로의 개략도를 나타낸 것이다. 내경 약 70mm 의 석영관 내부에 무게가 약 120g 인 직경 25mm, 높이 30mm 의 원통형으로 가공한 Hyper Duplex STS 모합금을 장입한 내경 26mm, 높이 약 50mm 의 전용 MgO 도가니를 유도 Coil 중앙부에 위치시키고, 노체 상부로부터 200cc/min 의 공업용 Ar 가스를 1 시간 동안 purging 하여 불활성 분위기를 유지하였다. 승온 과정에서는 상부에 위치한 비접촉식 Optical Pyrometer 를 이용하여 온도를 측정 및 제어 하였으며, 용탕의 온도가 목표치에 도달하면 도가니 하부에 위치한 비접촉식 Optical Pyrometer 를 이용하여 측정한 도가니 바닥의 온도를 기준으로 용탕 온도를 일정하게 유지하였다.

비금속개재물 형성 거동에 대한 Ce 첨가의 영향을 알아보기 위해 1600°C 의 용강 온도를 유지한 상태에서 Ce 을 100~1900ppm 의 범위에서 300ppm 간격으로 첨가 하였고, 온도에 따른 영향 또한 Ce 첨가량 400ppm 조건으로 용강 온도는 1550°C~1700°C 범위에서 50°C 간격으로 변화시켰다. 온도가 최종 목표치에 도달하면 일정시간 유지한 후 냉각 응고 시켰다. 응고한 시료는 도가니로부터 분리, 절단하여 화학성분분석용 시료와 비금속개재물 형상 관찰용 시편제작에 사용하였다.

실험 조건을 변화시키며 제조된 시편을 직경 방향으로 2 등분한 시료의 단면에 대해 비금속개재물 분포상태를 조사 하였다. 2 등분한 시료의 단면을 에폭시 수지로 Mounting 한 후, 미세 연마한 시편에 대해 직경 방향으로 2.5mm, 높이 방향으로 3.75mm 간격으로 시편당 약 40 회의 이미지 촬영을 실시하여 비금속개재물 분포 상태를 조사 하였다. Image analyzer 를 이용하여 시편의 단위 면적당 비금속개재물의 입도 및 수의 분포상태를 정량적으로 조사 하였다. 이 경우 비금속개재물은 2 차원적인 면적을 측정할 수 있으며, 비금속개재물은 구형으로 가정하고 측정된 면적으로부터 직경을 계산하여 입도분포를 평가 하였다. 비금속개재물의 입도분포는 현미경의 확대율에 따라 다른 경향을 나타내었다. 예비실험에서는 배율을 100~500 배로 변화시키며 비금속개재물의 입도분포를 관찰하였으나, 배율이 높을수록 미세한 입자의 분율이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. Image analyzer 를 이용하여 비금속개재물의 분포상태를 측정하는 과정에서 시편 당 동일한 횟수로 분석한 결과 배율이 낮을수록 더 넓은 면적을 촬영하게 되어서 비금속개재물 수는 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서, 본 연구에서는 모든 시편에 대하여 일정한 배율로 확대하여 비금속개재물의 분포상태를 관찰함으로써 상대적인 청정성을 평가하였다. 통상적인 경우는 실험 횟수의 제약 때문에 200 배의 배율로 확대하여 시편의 비금속개재물의 분포상태를 관찰함으로써 실험조건에 따른 시편의 청정성을 상대적으로 평가하였다. 또한, SEM(EDX)을 이용하여 비금속개재물의 화학성분을 정량분석 하였으며, 시편의 화학성분분석은 ICP 분석을 실시하였으며, [Ce]의 경우는 SEM(EDX)를 이용하여 근사적인 농도를 파악하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 Ce 첨가량에 따른 비금속개재물 생성거동

용강 중 Ce 첨가에 따른 비금속개재물의 양, 입도분포 및 화학성분의 변화를 조사하였다. 비금속개재물의 단위면적당 무게와 크기의 상관관계를 Fig. 3 에 나타내었다. 전체적으로 1 μm 이하의 비금속개재물이 주를 이루고 있으며 Ce 첨가량이 증가 할수록 개재물의 수가 감소하였고, 특히 1000 ppm 이상을 첨가한 경우에는 단위 면적당 약 50~60 개로 일정한 수준을 나타내었다. 또한 Ce 첨가량

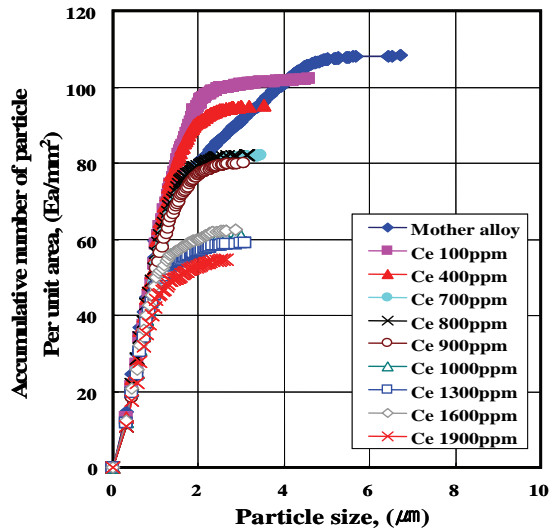


Fig. 3 Change of the accumulative number of non-metallic inclusions per unit area depending on the particle size for the cerium content in metal

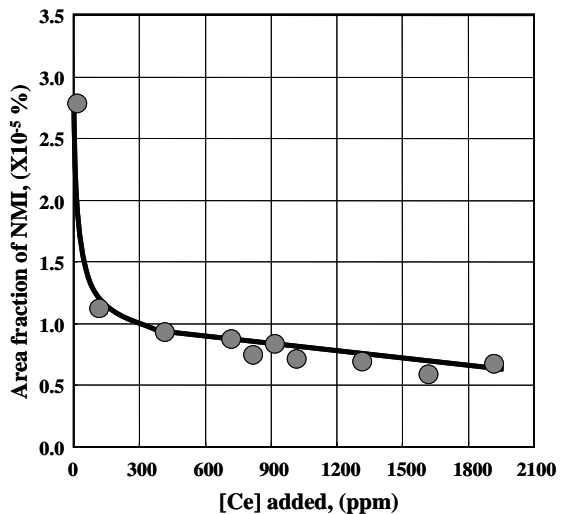


Fig. 4 Change of the area fraction of non-metallic inclusion depending on the cerium content in metal

에 따른 비금속개재물이 차지하는 평균 면적율의 변화를 Fig. 4 에 도시하였다. Ce 을 100ppm 첨가한 경우에는 면적율이 모합금에 비하여 거의 2.5 배

감소하는 것을 확인 할 수 있었고, 첨가량이 증가할수록 지속적으로 감소하는 경향을 보여주고 있다. Fig. 5 는 Ce 첨가량에 따른 비금속개재물의 분포를 나타내고 있다. 모합금의 경우에는 개재물이 비교적 크고 선명하게 나타났는데 첨가량이 증가함에 따라 구형(흑색)의 비금속개재물의 수 및 크기가 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있었고, 1000ppm 이상이 첨가된 경우에는 개재물을 거의 확인 할 수 없었다.

일반적으로 용강 중에 Ce 을 첨가하면 비중과 용점이 비교적 높은 다양한 산화물, 황화물 및 질화물의 형성으로 용강의 청정도가 악화되는 것으로 알려져 있지만, 본 실험에서는 앞선 내용과 상반되는 결과를 얻었다. 이는 Ce 을 첨가하는 시기와 그 목적의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 일반적으로 종래에는 탈산, 탈황 및 탈질의 정련을 목적으로 하여 Ce 을 첨가했기 때문에 용강 중에 다량의 산소, 유황 및 질소가 용해 되어 있어 Ce 와 단독으로 산화물, 황화물 및 질화물을 형성했을 가능성도 있을 것으로 예상되나, 본 실험에서는 사용하는 Hyper Duplex STS 에서는 이미 정련공정이 종료된 후, 합금성분조절의 용도로 소량 첨가하였기 때문에 이와 같은 결과가 발생한 것으로 판단된다. 한편, Ce 첨가량에 따른 비금속개재물 중 산소, 유황 및 질소의 농도 변화를 Fig. 6 에 비교 하였다.

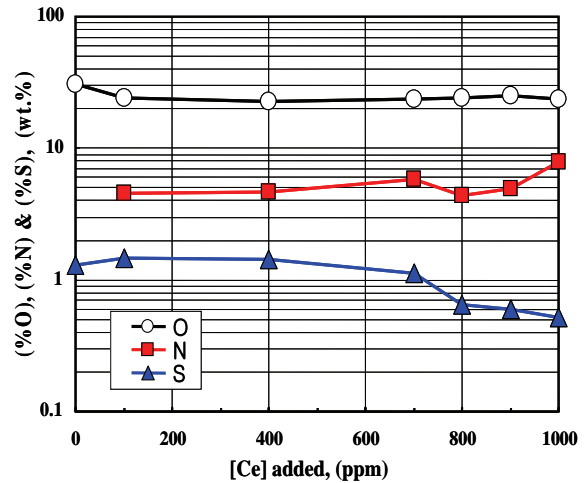


Fig. 6 Change of the (%O), (%N) and (%S) depending on the cerium content in metal

그림에서 알 수 있는 바와 같이 산소는 Ce 을 첨가 하였을 경우 모합금 중 개재물에 존재하는 양에 비해 감소하는 것으로 나타났는데 이는 Ce 첨가에 따른 질소 함량의 상대적인 증가로 인한 결과로 판단된다. 질소의 경우 금속 Matrix 에 비해 비금속개재물 중으로 농축되는 것을 알 수 있었다.

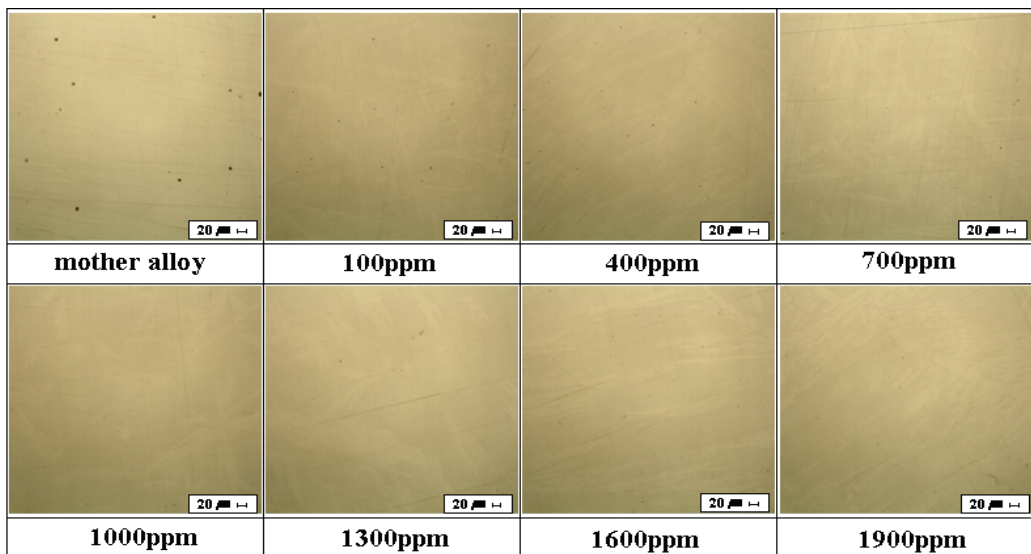


Fig. 5 Change of the non-metallic inclusion shape depending on the cerium content in metal (optical microscope)

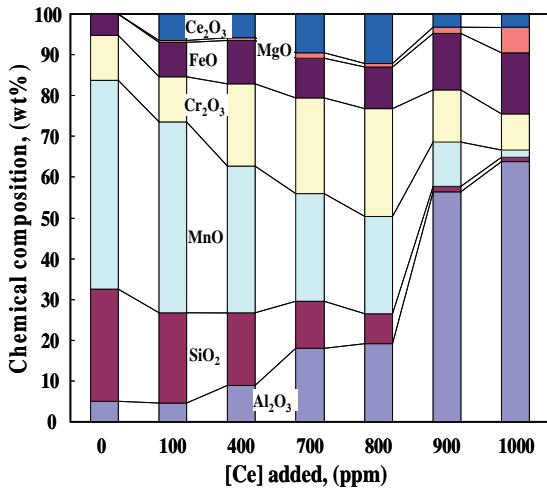


Fig. 7 Change of the chemical composition of non-metallic inclusions in average depending on the cerium content in metal

이와 같이 개재물내에 유황과 질소가 검출되는 것으로 보아 개재물내에 Ce 은 산화물, 황화물 및 질화물이 혼존 해 있는 것으로 판단되나, 정확히 분리하여 농도를 표시 하는 데는 어려움이 있어 다량 함유되어 있는 산화물 형태인 Ce_2O_3 로 계산하여 사용하였다.

Fig. 7 에 Ce 첨가량에 따른 비금속개재물의 화학성분 분석결과를 도시하였다. SEM(EDX)를 이용하여 비금속개재물을 구성하고 있는 금속원소를 분석한 결과 주로 Al, Cr, Fe, Si, Mn, Mg 및 Ce 가 검출 되었으며, 비금속개재물을 형성 할 수 있는 안정한 산화물을 Al_2O_3 , Cr_2O_3 , FeO, SiO_2 , MnO, MgO 및 Ce_2O_3 라는 가정하에 이 7 성분의 합을 100%로 환산하여 각 산화물의 백분율을 계산하였다. Ce 를 첨가하지 않은 경우 MnO, SiO_2 가 대부분을 차지하는 비금속개재물이 주로 관찰되었으나, Ce 을 첨가함에 따라 MnO 와 SiO_2 가 Ce 에 의해 환원이 되어서 함량이 감소하고 상대적으로 Al_2O_3 의 농도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 Cr_2O_3 , FeO 의 경우에는 대체적으로 Ce 첨가량에 따라 함량이 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 타성분의 감소에 따른 상대적인 증가로 판단되고, Ce_2O_3 의 경우 전체적으로 약 10% 전후의 농도를 나타내는 것으로 확인 되었다.

금속성분 중 Ce 의 분석방법으로 ICP 및 SEM(EDX) 분석을 실시하였다. Fig. 8 에 나타낸

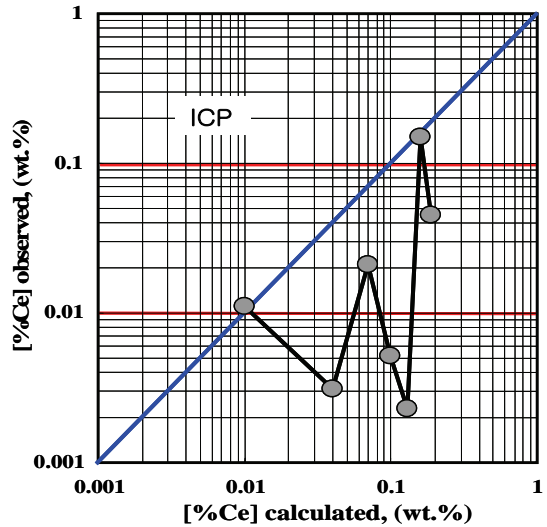


Fig. 8 Change of the [Ce] content depending on added cerium content (ICP)

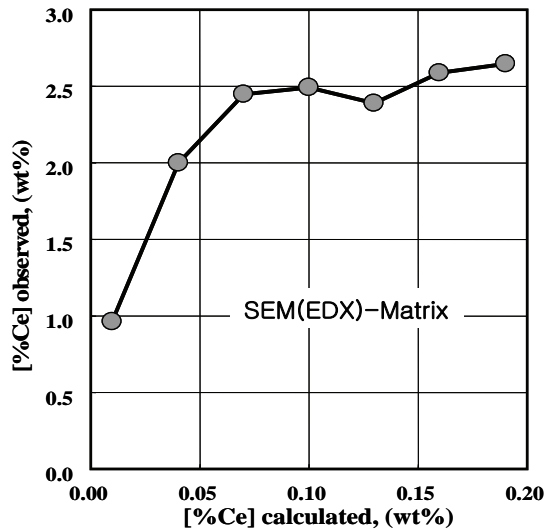


Fig. 9 Change of the [Ce] content depending on added cerium content (SEM-EDX)

ICP 분석의 경우 Ce 첨가량에 따른 용강 중 [Ce] 농도 변화에 대한 상관성이 적어 보다 체계적이고 상세한 검토가 필요할 것으로 판단되고, Fig. 9 에 나타낸 SEM(EDX) 분석의 경우 실제값과는 다소 차이가 있지만 각 시편에 대하여 비금속개재물이 없는 건전한 부위를 선정하여 무작위로 10 회 이상 [Ce]농도를 분석하고 평균치를 취한 결과,

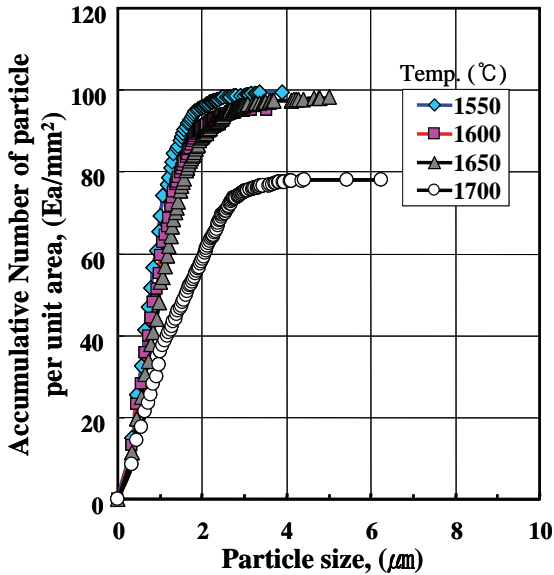


Fig.10 Change of the accumulative number of non-metallic inclusions per unit area depending on the particle size for the change of melt temperature

Ce 첨가량이 증가 할수록 용강 중의 [Ce] 농도는 증가하고, 첨가량이 적은 경우 증가폭이 크나, 첨가량이 많아질수록 증가폭이 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

4.2 용강 온도에 따른 비금속개재물 생성거동
전술한 바와 같이 용강의 온도가 상승하면 평형 산소 농도가 증가 하므로, 이는 일정량의 탈산제를 첨가하는 경우 탈산반응 생성물, 즉 비금속개재물 생성량이 증가하여 청정성을 악화시키는 요인이 될 것으로 판단된다. 반면에 용강의 온도가 상승하면 용강의 점성이 낮아져 유동성이 향상되므로 용강 중에 혼존하는 비금속개재물의 합체성장과 부상 분리 효과가 개선되어 용강의 청정도를 향상시키는 요인이 될 것으로 기대된다.

Fig. 10 은 비금속개재물의 누계와 크기의 상관관계를 나타낸 것으로 온도에 관계없이 주로 1 µm 이하의 비금속개재물이 주를 이루고, 온도가 증가함에 따라 개재물의 수는 감소하지만 상대적으로 큰 비금속개재물이 차지하는 비율은 증가하는 것을 알 수 있었다. Fig. 11 에 도시한 용강 온도와 평균 면적율의 상관관계를 통해 용강 온도가 증가하면 면적율이 증가하는 것을 알 수 있었고,

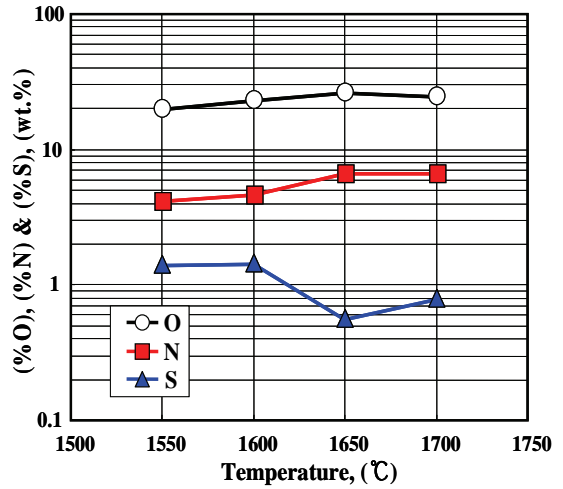


Fig.11 Change of the area fraction of non-metallic inclusions depending on the melt temperature

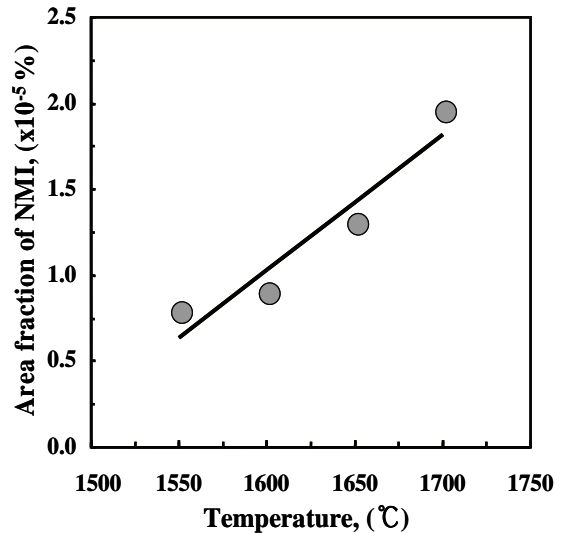


Fig.12 Change of the (%O), (%N) and (%S) depending on the melt temperature

조대한 입자의 구성비가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 용강 온도가 증가 할수록 비금속개재물의 응집, 성장이 촉진되기 때문인 것으로 추정된다. 한편, SEM(EDX)를 이용한 비금속개재물의 화학성분분석 결과와 용강 온도의 상관 관계를 Fig. 12 과 Fig. 13 에 나타내었다.

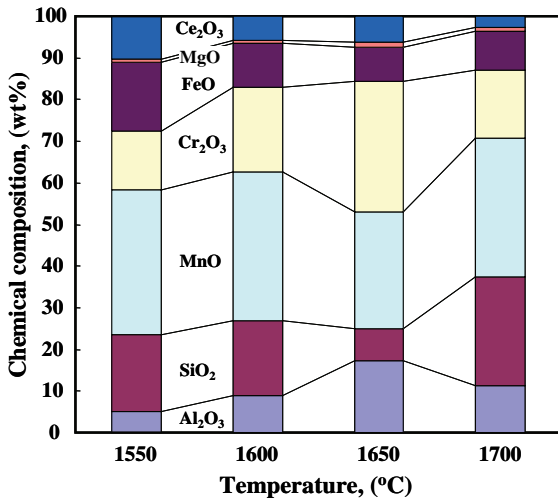


Fig.13 Change of the chemical composition depending on the melt temperature

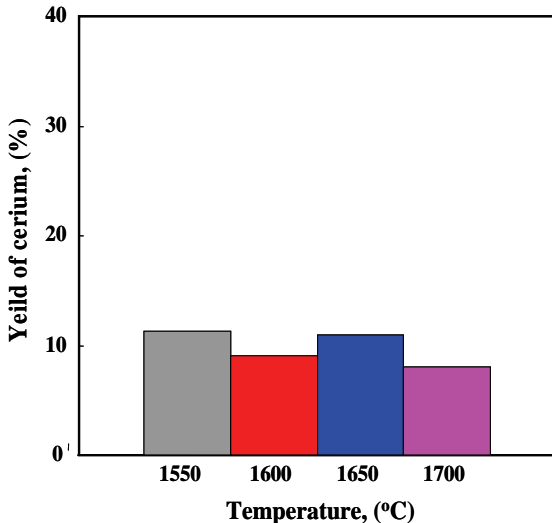


Fig.14 Change of the [Ce] content depending on melt temperature

온도의 증가에 따른 비금속개재물 중의 산소, 질소의 농도는 증가하는 경향을 나타내었고, 비금속개재물의 조성 변화에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. Fig. 14 에 용강 온도에 따른 [Ce] 실수율을 도시한 결과 용강온도에 관계없이 약 10% 전후의 실수율을 나타내었고, 이는 Ce 는 앞서 언급한 바와 같이 용점(798°C)은 낮지만 비등점(3257°C)이 상당히 높은 금속으로 용강 온도

가 증가하더라도 Ce 을 첨가할 경우에 증발 등에 의한 손실이 적었기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 [Ce] 실수율에 영향을 미치는 인자는 용강 온도의 변화가 아닌 다른 인자가 있을 것으로 예상되고, 그에 대한 검토도 추가적으로 이루어져야 될 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 Hyepx Dulpex STS 중 Ce 첨가 시 비금속개재물 형성 거동을 조사하기 위하여, Ce 첨가량 및 용강 온도에 따른 비금속개재물 형성 거동을 실험실적으로 조사하였다. 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) Ce 첨가 시 비금속개재물의 양이 현저히 감소하고, 크기가 미세해지는 것으로 보아, 용강의 청정성이 개선된 것으로 판단된다. 이는 종래의 연구와 첨가 시기 및 목적의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

(2) Ce 첨가 시 비금속개재물중의 (%O)와 (%S)는 감소하고, (%N)는 증가하는 것으로 나타났다.

(3) Ce 첨가량이 증가하면 비금속개재물 중의 (MnO), (SiO₂)가 Ce 에 의해 환원되어서 (%MnO)와 (%SiO₂)는 감소하고, 상대적으로 (%Al₂O₃)는 증가 하였다.

(4) 비금속개재물 중의 (%Ce₂O₃)는 약 10% 전후 수준을 나타낸다.

(5) 용강의 온도가 증가함에 따라 비금속개재물의 면적율은 증가하여 미세한 입자들에 비해, 조대한 입자들의 구성비가 높아지며, 이는 비금속개재물들의 응집, 성장이 촉진되기 때문인 것으로 추정된다.

후 기

본 연구는 지식 경제부 지원하의 냉각해수 열비용 Hyper Duplex STS 강 제조 및 응용기술 개발과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] M. Guo and H. Suito, 1999, Dispersion of primary Inclusions of Ce₂O₃ and CeS in Fe-0.20mass%C-0.02mass%P alloy, ISIJ int., Vol. 39, No. 7, pp. 678~686.

- [2] H. Li et al, 1988, Influence of Rare Earth Metals on the Nucleation and Solidification Behavior of Iron and 1045 Steel, Metall. Trans. B, Vol 19B, No. 6, pp. 383~395.
- [3] W. G. Wilson et al, 1974, The use of Thermodynamics and Phase Equilibria to Predict the Behavior of the Rare Earth Elements in Steel, J. Met., Vol. 5, pp. 14~23.
- [4] J. Yu et al, 1988, Rare Earths and the Mechanical Properties of Steel, J. Met, Vol. 5, pp. 25~31.
- [5] A. Karasev and H. Suito, 1999, Quantitative Evaluation of Inclusion in Deoxidation of Fe-10mass pct Ni Alloy with Si, Ti, Al, Zr, and Ce, Metall. Trans. B, Vol. 30B, No. 6, pp. 249~257.
- [6] A. Katsumata, 2001, Effect of Rare Metal in Inclusion Composition in Molten Stainless Teel, CAMP-ISIJ, Vol. 14, p. 213.
- [7] B. D. You, 2004, Introduction of Steelmaking, Inha Univ., p. 10.