논 문

-270 -

주강의 유화물 형태와 편석에 대한 연구 (II) (Fe-Mn-S 합금의 유화물 형태에 미치는 Mn/S비의 영향)

박흥일[†]•김지태 *•김우열

부경대학교 대학원 소재프로세스공학과 *삼영엠텍(주)

Morphology and Segregation of Sulfide Inclusions in Cast Steels (II) (Influence of [Mn/S] Ratios on the Morphology of Sulfide Inclusions in Fe-Mn-S Alloys)

Heung-Il Park[†], Ji-Tae Kim*, and Woo-Yeol Kim

Department of materials processing engineering, Graduate school, Pukyung National University, Busan, 608-739, Korea *Samyoung M-Tek Co., Ltd., Kyungnam, 637-941, Korea

Abstract

After casting button-type small ingots of ternary Fe-Mn-S alloys which had three different Mn/S ratios (1, 5 and 70) in a vacuum arc furnace, the effect of the ratio on the sulfide formation was investigated. In case of the Mn/S ratio of 1, if alloy composition was located in an iron-rich corner on a Fe-Mn-S ternary phase diagram, only duplex MnS-FeS sulfide films were observed in the grain boundary. If the alloy composition was located in the miscibility gap area of the phase diagram, primary globular dendritic sulfides and dendritic sulfide slags were generated within the grain and tubular monotectic sulfides were also detected in the grain boundary. When the Mn/S ratio was 5, if the alloy composition was in the iron-rich corner, only bead-like sulfides were generated. On the other hand, if the composition was in the miscibility gap area, globular dendritic sulfides and dendritic sulfide slags were generated in the form of primary sulfide inclusions and rod-like eutectic sulfides were observed in the grain boundary. Especially, if the contents of Mn and S increased more in the miscibility gap area of the phase diagram, primary globular sulfides containing iron intrusions were observed. In case of Mn/S ratio of 70, if the contents of Mn and S was decreased in the Fe corner of the phase diagram, only bead-like sulfides were observed in the grain boundary. Despite the composition was outside the miscibility gap area of the phase diagram, if the contents of Mn and S increased, clusters of fine sulfide particles as well as fine spherical primary monophase sulfides were observed in the grain boundary.

Key words : Fe-Mn-S alloys, Sulfide inclusions and morphology, Mn/S ratios.

(Received November 8, 2009; Accepted December 8, 2009)

1.서 론

유화물은 강의 기계적 성질과 밀접한 관계가 있으므로 유화 물의 형태, 조성 및 편석을 제어하는 것은 제강이나 주조공정 의 중요한 관리항목이다[1-8]. Sims 등[9,10]은 유화물 형태 분류에 대한 연구에서 Type I의 구상 유화물 또는 Type III의 다각형 유화물 보다 Type II의 필름상 또는 사슬모양의 유화 물이 강의 기계적 성질에 훨씬 유해하다고 하였다.

유황(S)을 함유하는 강에 망간(Mn)이 첨가되면 저융점인 FeS 유화물의 생성은 억제되고 고융점인 MnS 유화물의 생성 에 의한 유화물의 개량효과가 촉진된다[11,12]. 따라서 Mn은 강의 고온연성을 개선하는 유용한 합금원소이며, 최적의 Mn 첨가량, 즉 [Mn/S]비를 구하는 많은 연구들이 수행되었다[1316]. E. T. Turkdogan [14]은 고온취성을 피하려면 임계 [Mn/ S]비가 3.0 이상이어야 하며, H. Nakata [16]는 [Mn³/S]비가 1.5 이하가 되면 고상선 온도 이하에서 연성 회복률은 급감한 다고 보고 하였다.

저자들은 Fe-FeS[17], Fe-Mn-S 및 Fe-C-Mn-S 합금계의 유화물 형태를 관찰하고, 대형 주강품의 유화물 편석[18]과 고 온성질에 대한 일련의 연구를 수행하고 있다. 본 연구는 주입 용강의 [Mn/S]비가 충분히 높게 관리되어도 주강품의 형상이나 응고조건에 따른 합금편석으로 국부적인 [Mn/S]비의 변화가 생 길 경우, 또는 [Mn/S]비가 동일할지라도 Mn 및 S 함량이 증 가 또는 감소할 경우에 생성되는 유화물의 형태를 고찰하기 위한 실험실적 기초연구이다. 이를 위하여 [Mn/S]비가 1, 5 및 70인 각각의 시편그룹에서 Mn 및 S의 함량을 변화시킨

[†]E-mail : castpark@pknu.ac.kr

Fe-Mn-S 합금의 단추모양 소형주괴를 제조하고, 이들 합금의 유화물 형태에 미치는 [Mn/S]비의 영향을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편제조

무게 약 5 g, 직경 12-13 mm, 높이 7-8 mm 크기의 단추모 양 소형주괴를 진공아크용해로(Vacuum arc furnace, 220V, 60Hz, 30kW)에서 수냉 구리기판을 이용하여 제조하였다. 구리 기판의 홈 속에 순철(99.9%)과 금속망간(99.9%), 그리고 Fe-39wt.%S 합금철을 평량하여 장입하고 아크 용해하여 목표 성 분조성을 갖는 시편을 제조하였다. 시편의 성분편석을 최소화하 기 위하여 소형 주괴는 3회 반복 용해하였다.

Table 1은 본 실험에 사용된 시편의 [Mn/S]비 그룹별 화학 조성을 나타낸다. 시편의 [Mn/S]비는 각각 1, 5 및 70의 3가 지 그룹으로 나누었다. Mn의 변화폭은 좁고 S의 변화폭이 넓 은 [Mn/S]비가 1인 시편그룹은 Mn/S의 함량(wt.%)이 각각 0.7/0.7 (IA) 및 1.4/1.4 (IIA)의 2가지이다. [Mn/S]비가 5인 시편그룹은 Mn 및 S의 함량이 동시에 큰 폭으로 증가하며, Mn/S의 함량(wt.%)이 각각 0.7/0.14 (IB), 1.4/0.28 (IIB), 3.5/ 0.7 (IIIA) 및 7.0/1.4 (IIIB)의 4가지이다. 그리고 Mn의 변화 폭이 크고 S의 변화폭이 좁은 [Mn/S]비가 70인 시편그룹은 Mn/S의 함량(wt.%)이 각각 0.7/0.01 (IC), 1.4/0.02 (IIC), 3.5/ 0.05 (IIIC) 및 7.0/0.10 (IIID)의 4가지이다.

2.2 유화물 관찰

단추모양의 소형 주괴 시편을 중심 종단면으로 절단하고 마 운팅하여 연마하였다. 연마 상태, 나이탈 용액 또는 황산수용액 으로 부식한 시편에 대하여 광학현미경과 주사전자현미경 (SEM)으로 유화물 형태를 관찰하였다. 유화물의 성분분포와 화 학조성은 EPMA를 이용하여 분석하였다. 이 때 유화물의 관찰 위치는 시편바닥에서 5-6 mm 높이로 통일하였다. Fig. 1은 본 실험에서 제조된 단추모양 소형주괴의 형상과 미세조직 관찰위 치를 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 초정 유화물의 형태분류

본 실험에서 관찰된 유화물의 미세조직 특성을 바탕으로 응 고조직의 결정입내에서 관찰된 유화물은 초정 유화물(primary sulfide inclusions)로, 그리고 응고조직의 결정입계에서 관찰된 유화물은 2차상 유화물(secondary sulfide inclusions)로 분류하

 Table 1. Chemical compositions of Fe-Mn-S alloy specimens used for morphological study of sulfide inclusions.

[Mn/S] ratios	1	5	70	
	[IA] 0.7/0.7	[IB] 0.7/0.14	[IC] 0.7/0.01	
$(\mathbf{M}_{m}/\mathbf{S})_{m+1} 0/\mathbf{S}$	[IIA] 1.4/1.4	[IIB] 1.4/0.28	[IIC] 1.4/0.02	
(WIII/S)Wt.%	-	[IIIA] 3.5/0.70	[IIIC] 3.5/0.05	
	-	[IIIB] 7.0/1.4	[IIID] 7.0/0.10	



Fig. 1. (a) shape and (b) dimensions of a button-type small steel ingot produced by vacuum arc melting system. The dark circle in Fig. 1b indicates a metallographic examination point of specimens.

였다.

Fig. 2는 대표적인 초정 유화물의 미세조직을 나타낸다. Fig. 2a(IIID), Fig. 2b(IIA), Fig. 2c(IIIA) 및 Fig. 2d(IIIB) 및 Fig. 2f(IIIB의 슬래그)는 나이탈 용액으로 부식한 광학현미경 미세 조직이다. 그리고 Fig. 2e는 Fig. 2d(IIIB)와 동일한 시편을 황산 수용액으로 심부식한 주사전자현미경(SEM) 사진이다. Fig. 2a는 [Mn/S]비가 70인 IIID의 미세조직이다. 크기 5 µm 이하의 미세입상의 단상 유화물이 관찰되었으며, 이들 유 화물의 EPMA 분석결과는 7.8%Fe-57.1%Mn-35.1%S(at.%)이었다. Fig. 2b는 [Mn/S]비가 1인 IIA의 미세조직이다. 크기 10-20 µm 정도의 수지상의 응고조직을 갖는 구상 유화물이 관찰되었으며, 이 수지상 유화물의 화학조성은 8.2%Fe-40.9%Mn-50.9%S(at.%)이었다. Fig. 2c는 [Mn/S]비가 5인 IIIA의 미세 조직이다. 오스테나이트 셀에 둘러싸인 크기 10-20 µm 정도의 수지상 유화물이 관찰되었으며, 이 유화물의 화학조성은 9.2%Fe-49.1%Mn-48.3%S(at.%)이었다.

Fig. 2a, Fig. 2b 및 Fig. 2c에서 관찰된 유화물의 형태와 크기는 서로 다르지만 구상의 공통점을 보였다. 이로부터 이들 유화물은 액상에서 초정으로 생성되었으며, 소량의 FeS가 고용 된 고온상의 Mn(Fe)S 유화물임을 알 수 있다.

Fig. 2d는 [Mn/S]비가 5인 IIIB의 미세조직이다. 반지모양 (ring shape)과 말발굽 모양의 구상 유화물이 오스테나이트 셀 에 둘러싸여 관찰되었다. 이 유화물의 화학조성은 2.0%Fe-47.8%Mn-50.1%S(at.%)로 분석되었다.

Fig. 2f는 Fig. 2d와 동일한 IIIB 시편의 밑바닥에서 관찰된 슬래그의 미세조직이다. 이 수지상 슬래그의 화학조성은 2.0%Fe-46.8%Mn-51.2%S(at.%)이었으며, Fig. 2d의 구상 유 화물의 화학조성과 동일한 Mn(Fe)S 유화물임이 확인되었다. 이로부터 수지상 응고조직을 갖는 초정 구상 유화물은 용강의 응고과정에서 부상하거나 침전하여 슬래그로 분리됨을 알 수 있다. 이와 같은 유화물 슬래그의 분리현상은 수지상의 구 상 유화물이 생성되는 IIA, IIIA 및 IIIB에서만 관찰되었다.

Fig. 2e는 Fig. 2d에서 관찰된 유화물을 황산 수용액으로 용 출시킨 SEM 사진이다. Fig. 2d의 반지모양 또는 말발굽 모양 유화물은 기지를 이루는 Fe와 연결되어 있음을 볼 수 있다. 그 리고 Fig. 2f에서와 같이 유화물 슬래그의 입계에서도 Fe 액적 이 관찰되었다.

Fe-MnS의 상태도[19,20]를 보면 1610°C 이상의 고온에서



Fig. 2. Typical as-cast microstructures and morphology of the primary sulfide inclusions; (a) fine spherical mono-phase sulfides in IIID, (b) globular dendritic sulfides in IIA, (c) globular dendritic sulfides enveloped in austenitic shell in IIIA, (d) globular dendritic sulfides contain iron intrusion in IIIB and (f) dendritic sulfide slags contain iron droplets in IIIB specimen, nital etched optical micrographs. Fig. 2 (e) shows a sulfuric acid deep-etched scanning electron micrograph of Fig. 2d.

액상은 편정반응으로 Fe 부화액상(L_M) 및 S 부화액상(Ls)이 공용하게 된다. 한편 유화물 액적의 온도가 편정반응[L_M+Ls → L_M+Ls+MnS(solid)]범위인 1610-1580°C로 떨어지면 액적은 응고하기 시작하고 소량의 Fe가 배출된다. 편정반응으로 분리 된 유화물 액적이 응고하면 수축이 일어나고 그 수축부에 주 변의 액상 Fe가 Fig. 2e에서와 같이 침투하여 Fig. 2d의 유화 물 형태로 응고할 것이다. 이러한 Fe의 침투현상은 Bigelow 등[19]의 연구에서도 관찰되고 있다. 한편 Fig. 2f와 같이 유 화물 슬래그의 수지상 결정입계에 Fe가 정출한 것은 앞서 언 급한 편정반응으로 생성된 유화물 액적의 응고과정에서 배출된 Fe 또는 유화물 수축으로 침투한 Fe가 유화물에 포집된 상태 로 부상 또는 침전 분리되었기 때문으로 여겨진다.

3.2 2차상 유화물의 형태분류

Sims 등[9,10]은 강의 결정립계에 생성된 유화물의 형태에 따라 구상은 Type I, 필름 또는 사슬모양은 Type II, 그리고 다각형은 Type III 유화물로 구분하였다. Fig. 3과 같이 결정입 계에서 관찰된 2차상 유화물을 보면 Fig. 3a의 사슬모양, Fig. 3b의 필름상, Fig. 3d의 봉상은 Type II에 해당되고, Fig. 3c 는 Type I에 해당된다.

Fig. 3은 본 실험에 사용된 Fe-Mn-S 합금의 결정입계에서 관찰된 대표적인 2차상 유화물의 형태이며, 나이탈 용액으로 부식한 SEM 사진이다.

Fig. 3a는 [Mn/S]비가 5인 IB의 SEM 사진이다. 미세한 입 상 유화물이 결정입계에 시슬모양으로 줄지어 있다. 이 유화물 의 화학조성은 45.3%Fe-19.1%Mn-35.6%S(at.%)이었다. Fig.



Fig. 3. Typical as-cast morphology of the secondary sulfide inclusions; (a) bead or chain-like sulfides in IB, (b) sulfide films or networks in IA, (c) clusters of fine sulfide particles in IIIC and (d) rod-like eutectic sulfides in IIIB specimen, nital deep-etched scanning electron micrographs.



Fig. 4. Typical as-cast morphology of the secondary sulfide inclusions; (a) duplex MnS-FeS sulfide films in IA and (b) ring-like small sulfides in IIA specimen, sulfuric acid-etched optical micrographs. Fig. 4(c and d) show tubular monotectic sulfides observed in "C" area of Fig. 4b, nital deep-etched scanning electron micrographs.



(b) Secondary sulfide inclusions

Fig. 5. Effects of [Mn/S] ratios on the morphological changes of (a) primary and (b) secondary sulfide inclusions in Fe-Mn-S alloy specimens.

3b는 [Mn/S]비가 1인 IA의 SEM 사진이다. 결정입계를 따라 그물모양으로 생성된 전형적인 필름 또는 판상의 유화물 형태 를 보여 준다. Fig. 3c는 [Mn/S]비가 70인 IIIC의 SEM 사 진이다. 미세한 입상 유화물이 포도송이 모양으로 군집되었으며, 화학조성은 56.7%Fe-22.7%Mn-20.6%S(at.%)이었다.

Fig. 3d는 [Mn/S]비가 5인 IIIB의 SEM 사진이며, 이 봉상 유화물의 화학조성은 64.9%Fe-15.6%Mn-19.5%S(at.%)이었다. Bigelow 등[19]은 이 봉상 유화물을 Fe-MnS 합금계의 공정반 응물이라 하였다.

Fig. 4a 및 Fig. 4b는 각각 [Mn/S]비가 1인 IA 및 IIA의 결정입계에서 생성된 유화물을 황산 수용액으로 부식한 광학현

미경 미세조직이다. Fig. 4a의 IA에서 관찰된 필름상 유화물은 "A"로 표시한 연한 회색상과 "B"로 표시한 흑색상의 2상으로 이루어져 있다. EPMA 분석결과 A상의 화학조성은 42.5%Fe-6.5%Mn-51.1S(at.%)이고 B상의 화학조성은 40.1%Fe-15.8% Mn-44.1%S(at.%)이었으며, A상보다 B상의 Mn 함량이 2배 이상 높았다. 이 유화물은 MnS와 FeS의 고용량이 서로 다른 두 종류의 Mn(Fe)S 유화물이 공존하는 MnS-FeS의 2상 유화 물로 확인되었다. 이 2상 유화물은 Mn에 대한 초기 S가 과다 한 IA와 IIA에서 관찰되었다. Fredriksson 등[21]은 이 2상 유화물은 FeS를 고용하는 MnS 유화물상(Q-phase)으로 보고하 였으며, Biglow 등[19]은 봉상 유화물이 변형된 유화물형태 (degenerate rod morphology)이며 [Mn/S]비가 감소할수록 필 름상으로 나타난다고 하였다.

한편 IIA의 미세조직(Fig. 4b)을 보면 MnS-FeS 2상 유화 물과 함께 "C"로 표시한 고리모양의 유화물이 관찰되었다. 이 유화물의 화학조성은 34.1%Fe-51.3%Mn-14.5%(at.%)이었으며, 2상 유화물보다 Mn의 함량이 훨씬 높았다. 한편 Fig. 4c 및 Fig. 4d는 이 고리모양 유화물의 SEM 사진이다. 나이탈 용액 으로 고리모양 유화물의 중심부를 구성한 Fe를 용출시킨 결과, 광학현미경 조직에서 고리모양으로 관찰된 이 유화물은 직경 3-5 µm 이하의 파이프 또는 나팔모양의 관상 유화물로 확인되 었다. [Mn/S]비가 1인 IIA와 같이 Mn 및 S 함량이 매우 높 을 경우, 결정입계의 잔류액상 역시 Mn 및 S의 편석의 증가가 예상된다. 그 결과 Fe-MnS의 상태도에서와 같이 Lm 쪽의 액 상은 MnS-FeS의 2상 유화물을 형성하고, MnS가 많은 Ls 액 상은 편정반응이 촉진되어 관상의 편정 유화물[20]이 생성된 것으로 여겨진다.

3.3 유화물 형태에 미치는 [Mn/S]비의 영향

Fig. 5는 Fe-Mn-S 3원 평형 상태도[19,22]에서 Fe 모서리 부를 정성적으로 그린 것이다. 이 상태도에는 Mn 및 S의 정 량적인 비율에 따른 공정반응경계와 편정반응경계, 그리고 본 실험에 사용된 시편들의 [Mn/S]비가 그려져 있다. Fig. 5a 및 Fig. 5b는 [Mn/S]비와 Mn 및 S 함량을 달리한 각각의 합금 시편들에서 관찰된 초정 및 2차상 유화물의 형태를 Fe-Mn-S 3원 평형 상태도에 나타낸 것이다.

Fig. 5a를 보면 Fe-Mn-S 3원 평형 상태도에서 공용간격 (miscibility gap, Lm +Ls)에 들어가는 합금조성의 경우, 즉 [Mn/S]비 1인 IIA, [Mn/S]비 5인 IIIA와 IIIB에서는 Mn(Fe)S 의 수지상 응고조직을 갖는 구상 유화물과 슬래그가 관찰되었 다. Fe-MnS[19,20] 상태도에서 Mn 함량이 증가할수록 Fe가 많은 액상(Lm)과 S가 많은 액상(Ls)의 2액상 분리현상이 증가 한다. 이는 공용간격의 합금조성에서 생성된 구상 유화물이 부 상 또는 침강하여 유화물 슬래그를 생성시키는 과정을 잘 뒷 받침한다.

한편 Fe-Mn-S 3원 평형 상태도의 Fe 모서리, 즉 Mn 및 S의 함량이 낮은 합금조성으로 [Mn/S]비가 1인 IA, [Mn/S]비 가 5인 IB와 IIB, [Mn/S]비가 70인 IC와 IIC에서는 초정 구 상 유화물이 관찰되지 않았다. 그러나 [Mn/S]비가 70으로 동 일하여도 IIIC와 IIID와 같이 Fe-Mn-S 3원 평형 상태도의 공 용간격은 벗어나지만 Mn과 S의 함량이 높아지면 미세한 단상 의 구상 유화물이 관찰되었다.

Fig. 5b는 본 실험에서 관찰된 2차상 유화물의 형태를 Fe-Mn-S 3원 평형 상태도상에 나타낸 것이다. [Mn/S]비가 1인 IA 및 IIA 시편의 경우, FeS와 MnS의 2상으로 이루어진 필 름상의 유화물이 생성되었으며, 특히 Fe-Mn-S 3원 평형 상태 도에서 공용간격에 해당하는 IIA의 경우 MnS-FeS의 2상의 필름상 유화물과 관상의 편정 유화물이 동시에 관찰되었다.

[Mn/S]비가 5인 경우 IB와 IIB, [Mn/S]비가 70인 경우 IC 와 IIC, 즉 Fe-Mn-S 3원 평형 상태도에서 Fe 모서리의 Mn 및 S의 함량이 낮은 힙금조성은 시슬모양의 유화물만이 결정입 계에 생성되었다. 한편 [Mn/S]비가 5인 경우, 공용간격으로 Mn 및 S 함량이 높아진 IIIA와 IIIB에서는 미세한 봉상의 공 정 유화물이 관찰되었다. 특히 [Mn/S]비가 70으로 높은 시편 그룹에서 Mn 함량은 높지만 S 함량은 낮아서 Fe-Mn-S 3원 평형 상태도에서 공용간격을 벗어난 IIIC와 IIID의 경우는 미 세한 알갱이의 유화물 군집체가 결정입계에서 관찰되었다.

Table 2는 본 실험에서 관찰된 대표적인 유화물의 형태를 미세조직 특성을 바탕으로 분류한 것이다. 단상의 미세입상 유 화물(Fig. 2a), 수지상 응고조직의 구상 유화물(Fig. 2b), 오스 테나이트 셀에 둘러싸인 수지상 응고조직의 구상 유화물(Fig. 2c,d), Fe가 침투된 수지상의 구상 유화물(Fig. 2d) 및 Fe의 액적이 정출된 수지상 유화물 슬래그(Fig. 2f)은 초정 유화물로 관찰되었다. 한편 시슬모양의 유화물(Fig. 3a), 그물모양의 필름 상 유화물(Fig. 3b), 포도송이 모양으로 군집된 미세 입상 유 화물(Fig. 3c), 봉상의 공정 유화물(Fig. 3d), 필름상의 FeS-MnS 2상 유화물(Fig. 4a,b), 그리고 파이프 또는 나팔모양의 가느다란 관상의 편정 유화물(Fig. 4c,d)은 2차상 유화물로 관 찰되었다.

4.결 론

진공아크로에서 [Mn/S]비가 각각 1, 5 및 70인 Fe-Mn-S

[ab	еź	2.	Morphol	ogical	classification	of sulfide	inclusions	observed	l in I	Fe-Mn-S	alloy	specimens.
-----	----	----	---------	--------	----------------	------------	------------	----------	--------	---------	-------	------------

Groups	Morphological classification	Reference figures	Specimens
	Fine spherical sulfides	Fig. 2a	IIIC, IIID
	Globular dendritic sulfides	Fig. 2b	IIA, IIIA, IIIB
Primary sulfide inclusions	Globular dendritic sulfides enveloped in austenitic shell	Fig. 2c,d	IIIA, IIIB
	Globular dendritic sulfides contains iron intrusion	Fig. 2d,e	IIIB
	Dendritic sulfide slags contain iron droplets	Fig. 2f	IIA, IIIA, IIIB
	Bead or chain-like sulfides	Fig. 3a	IB, IIB, IC, IIC
	Sulfide films or networks	Fig. 3b	IA, IIA
Sacan dame sulfida inclusions	Clusters of fine sulfide particles	Fig. 3c	IIIC, IIID
Secondary summer inclusions	Rod-like eutectic sulfides	Fig. 3d	IIIA, IIIB
	Duplex MnS-FeS sulfide films	Fig. 4a,b	IA, IIA
	Tubular monotectic sulfides	Fig. 4c,d	IIA

3원계 합금의 단추모양 소형주괴를 제조하고, [Mn/S]비가 유화 물 형태에 미치는 영향을 조사한 결과는 다음과 같다.

 1) 유화물의 미세조직 특성을 바탕으로 결정입내의 초정 유 화물과 결정입계의 2차상 유화물로 분류하였다. 초정 유화물로 는 미세입상 단상 유화물, 수지상 응고조직의 구상 유화물, Fe 가 침투된 구상 유화물 및 유화물 슬래그가 관찰되었다. 그리 고 2차상 유화물로는 시슬모양 유화물, 필름 또는 그물모양의 유화물, 미세한 알갱이의 유화물 군집체, 필름상의 FeS-MnS 2상 유화물, 봉상의 공정 유화물 및 관상의 편정 유화물이 관 찰되었다.

2) [Mn/S]비가 1인 시편들의 합금조성이 Fe-Mn-S 3원 평 형 상태도의 Fe 모서리쪽으로 이동하면 MnS-FeS 2상의 필름 상 유화물만이 입계에서 관찰되었다. 시편의 합금조성이 Fe-Mn-S 3원 평형 상태도의 공용간격으로 이동하면 수지상의 초 정 구상 유화물과 유화물 슬래그가 생성되었고, 입계에서 MnS-FeS 2상의 필름상 유화물과 함께 관상의 편정 유화물이 동시에 관찰되었다.

3) [Mn/S]비가 5인 시편들의 합금조성이 Fe-Mn-S 3원 평 형 상태도의 Fe 모서리쪽으로 이동하면 시슬모양의 유화물만이 입계에 생성되었다. 한편 시편들의 합금조성이 Fe-Mn-S 3원 평형 상태도의 공용간격으로 이동하면 수지상의 구상 유화물과 유화물 슬래그가 초정 유화물로 생성되고, 입계에서 봉상의 공 정 유화물이 관찰되었다. 특히 Fe-Mn-S 3원 평형 상태도의 공용간격에서 Mn 및 S의 함량이 더욱 증가하면 Fe가 침투된 구상의 초정 유화물이 관찰되었다.

4) [Mn/S]비가 70인 시편 그룹의 경우, Fe-Mn-S 3원 평형 상태도의 Fe 모서리쪽으로 Mn 및 S의 함량이 모두 낮은 시 편들은 입계에 사슬모양의 유화물만이 생성되었다. 한편 Fe-Mn-S 3원 평형 상태도의 공용간격을 벗어나지만 Mn 및 S가 모두 증가하면 초정의 미세한 단상 유화물과 함께 미세한 알 갱이의 유화물 군집체가 입계에서 관찰되었다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 부경대학교 연구년 교수 지원사업(PS-2007-0012000200702200)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- J. K. Brimacombe and K. Sopimachi, "Crack formation in the continuous casting of steel", Metallurgical transactions B, Vol.8B (1977) 489-505
- [2] C. L. Briant and S. K. Banerji, "Intergranular failure in steel: the role of grain-boundary composition", International metals reviews, No.4 (1978) 164-199
- [3] A. Chojecki, I. Telejko and T. Bogacz, "Influence of chemical composition on the hot tearing formation of cast steel", Theoretical and applied fracture mechanics, Vol.27 (1997) 99-105

- [4] ASM Handbook, Vol. 6 (1997) 88-106 "Cracking phenomena associated with welding"
- [5] A. Chojecki, I. Telejko and P. Kozelsky, "Influence of calcium on cracking of steel during the welding or casting process", Theoretical and applied fracture mechanics, Vol.31 (1999) 41-46
- [6] L. H. Van Vlack, O. K. Riegger and R. J. Warrick, "Sulfide inclusions in steel", The University of michigan reserch institute, UMRI project report, (1958)
- [7] W. Dahl, H. Hengstenberg and G. Dueren, "Conditions for the occurance of the various types of sulphide inclusions", Stahl und Eisen, Vol. 86, No. 13 (1966) 782-795
- [8] G. Wranglen, "Review article on the influence of sulphide inclusions on the corrodibility of Fe and steel", Corrosion Science, Vol.9 (1969) 585-602
- [9] C. E. Sims, F. B. Dahle, "Effect of Aluminum on the Properties of Medium Carbon Cast steel", Transactions of the American Foundrymen's Association, Vol.46 (1938) 65-132
- [10] C. E. Sims, H. A. Saller and F. W. Boulger, "Effects of various deoxidizers on the structures of sulphide inclusions", Transactions, American Foundry Society, 57 (1949) 233-248
- [11] C. E. Sims, "The nonmetallic constituents of steel", Transactions of the metallurgical society of AIME, Vol.215 (1959) 367-392
- [12] E. T. Turkdogan, S. Lgnatowicz and J. pearson, "The solubility of sulphur in iron and iron manganese alloys", J. of iron and steel institute, (1955) 349-354
- [13] G. S. Mann and L. H. Van Vlack, "FeS-MnS relationships in the presence of excess iron", Metallurgical transactions B, Vol.7B (1976) 469-475
- [14] E. T. Turkdogan, "Fundmentals of steelmaking", The institute of materials, (1996) 307
- [15] G. A. Teledo, Influence of sulfur and Mn/S ratio on the hot ductility of steels during continuous casting", Steel research, Vol.64, No.6 (1993) 292-299
- [16] H. Nakata and H. Yasunaka, "Effect of sulfur and manganese on hot ductility of steels at high temperature", Transactions ISIJ, Vol. 26 (1986) B-98
- [17] H. I. Park, J. T. Kim and S. G. Kim "Morphology and segregation of sulfide inclusions in cast steels (I); A fabrication of Fe-FeS alloys and the observation of their sulfide morphology." J. of the Korean Foundrymen's Society, Vol.29, No.5 (2009) 220-224
- [18] H. I. Park et al, "A case study on the solidification behavior and defects of heavy steel castings", J. of the Korean Foundrymen's Society, Vol.26, No.2 (2006) 57-62
- [19] L. K. Biglow and M. C. Flemings, "Sulfide inclusions in steel", Metallurgical Trans. Vol. 6B (1975) 275-283
- [20] K. Oikawa, et al., "The control of morphology of MnS inclusions in steel during solidification", ISIJ International, Vol.35, No.4 (1995) 402-408
- [21] H. Fredriksson and Hillert, "On the Formation of Manganese Sulfides Inclusions In Steel, Scandinavian Journal of Metallurgy, 2 (1973) 125-145
- [22] H. Wentrup, "Die Bildung von Eissenschuessen im Stahl", Technische Mitteilung Krupp, Vol.5 (1937) 131-152