[논문] 한국소성가공학회지(2000), 제9권 제1호
*Transactions of Materials Processing* **Vol. 9, No. 1, (2000)**

# 미니밀공정 중 저탄소강의 에지크랙에 미치는 Mn 및 S의 영향

곽재현* · 정진환* · 조경목**

(1999년 9월 20일 접수)

# Effect of Mn and S Contents on Edge Cracking of Low Carbon Steels in Mini-Mill Process

**J.H. Kwak, J.H. Chung and K.M Cho**

## Abstract

The present study tackles the metallurgical subjects involving the thin slab-direct hot rolling process, i.e. mini-mill process. In order to clarify the effect of chemical composition of steel and MnS precipitation behaviors on the development of edge cracking during hot rolling, the content of manganese and sulfur in low carbon steel was varied and the isothermal treatment prior to roughing was applied. Edge cracking during roughing in the hot-rolling process of mini-mill was effectively prevented by means of the isothermal treatment at 1150℃ for 5 minutes in the 0.4% manganese steel containing sulfur lower than 0.013%. With the increase in manganese content in low carbon steel, coarser MnS developed. The edge cracking index which denotes the total length of edge crack per unit edge-length of rolled specimens was proposed in this paper. It was found that the edge cracking index linearly decreased with the increase in the ratio of Mn/S.

**Key Words** : Mini-Mill Process, Edge Crack Index, MnS Precipitation, Mn/S ratio, Preheat treatment, Low Carbon Steels, Isothermal Heat Treatment

## 1. 서 론

미니밀이라 불리는 박슬래브(thin slab) 연주-열연 직결압연법(이하 미니밀)은 설비비가 낮고, 두께가 얇은 열연강판의 제조가 가능하고, 기존의 열간압연(이하 고로밀)법과 같이 열간압연을 위해 슬래브를 재가열하지 않으므로 에너지가 절감된다는 등의 장점이 있어서 가장 최근에 주목 받고있다.[1-3] 그러나, 박슬래브 주조와 연주-열연 직결압연의 공정으로 인하여 주조상태와 최종제품에서 표면결함이 발생하기 쉽다. 이때

* 포항제철 기술연구소 광양압연연구
** 부산대학교 금속공학과

분에 고로-전로-열간압연공정으로 이루어진 고로밀 방식에 비하여 아직까지 다양한 제품을 생산하지 못하고 있으며, 주조성 개선 및 미세 슬래브크랙의 감소, 열연 스케일(scale) 결함의 감소, 에지크랙 억제 등이 가장 우선적으로 개선되어야 할 부분이다. 미니밀의 장점인 박강판의 제조방법에는 여러 가지가 있으나, 전세계적으로 주로 사용된 것은, CSP(Compact Strip Production)방식과 같이 박슬래브를 연속주조한 다음에 열간압연 하는 방법과[1], ISP(In-line Strip Production)방식과 같이 약간 더 두꺼운 슬래브를 주조한 다음 조압연하고 다시 열간압연 하는 방법으로 대별된다[2~3]. 후자의 경우는 조압연설비가 있으므로 보다 박강판을 제조할 수 있고, 주조결함이 적다는 장점이 있지만, 조압연중 에지크랙의 발생이 쉽다는 단점이 있다. 에지크랙(edge crack)은 강의 고온취성에 의해 발생되는 것으로서 Mn 및 S함량, S의 과포화도, 열간 가공온도 및 속도 등에 지배받는 것으로 알려져 있다.[4~6] 박슬래브 주조-직결압연법에서는 슬래브 두께가 얇으므로 슬래브의 냉각이 빠르고, 재가열과 같은 균질화 열처리 없이 조압연 되므로 에지크랙발생이 쉬울 것으로 생각된다.[5]

본 연구에서는 조압연 설비를 부착한 미니밀을 대상으로 에지크랙발생에 미치는 Mn 및 S함량의 영향을 조사하였으며, 에지크랙을 완화시키기 위한 수단으로 조압연전 항온유지온도의 영향을 검토하는 한편, 에지크랙 억제를 위한 적정 Mn/S비를 제시하였다.

## 2. 강의 고온취성

에지크랙은 강의 고온취성에 의해 발생하는 결함이다. 강의 고온취성을 기구에 따라 3단계로 구분할 수 있고 이를 요약하면 다음과 같다.

(1) 1단계 취화: 강의 응고 직하의 온도에서 형성된 수지상 사이에 저융점 금속 및 그 화합물이 편석을 일으켜 취화 되는 것이다. 주로 연속주조 슬래브의 벌징(bulging)이나 break-out 및 슬래브의 내부크랙, 표면크랙 등으로 나타난다.[5],[7]

(2) 2단계 취화: 900~1200℃ 사이의 온도에서 강을 가공하면 변형모드중 입계 미끄럼이 일어난다. 석출물 또는 개재물은 공공을 형성하여 크랙의 시작점으로 작용한다. 이때 FeS와 같은 액상이 입계에 존재하면, 공공 내부로 빨려 들어가 크랙의 표면에너지를 낮추므로 서 매우 낮은 응력하에서도 공공의 확장과 크랙전파가 용이하게 된다.[7] 성장된 크랙은 이웃하는 크랙과 합체되어 취성파단을 일으킨다. 따라서 2단계 취성은 입계에 존재하는 액상금속의 종류 및 량과 석출물의 밀도 및 크기, 입계면적 즉 결정립의 크기 등에 좌우된다.

(3) 3단계 취화: 600~900℃의 페라이트-오스테나이트 이상역에서 강을 가공할 때 발생한다. 페라이트의 고온변형저항이 오스테나이트보다 낮기 때문에, 입계석출 페라이트에 변형이 집중된다. 이때 석출페라이트 내부 또는 오스테나이트와 석출페라이트 계면에 석출물이나 개재물이 존재하면, 석출물/페라이트 계면에서 공공을 형성하고, 전파하여 크랙이 발생한다. 이 경우, 크랙의 민감도는 가공온도와 오스테나이트 입계에 존재하는 입계크기 이상의 석출밀도에 크게 의존한다. 특히 미세한 Nb(C,N), AlN, BN, Ti(C,N)[8]과 같은 석출물과 반대로 매우 조대한 (Fe,Mn)O,S[1]와 같은 석출물은 3단계 취성파괴의 장소를 제공하는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서 관찰되는 에지크랙은 조압연 온도특성상 1단계 혹은 2단계 일 것으로 판단되지만, 조압연온도가 950~1050℃ 임을 감안한다면, 2단계 취성이 에지크랙발생의 주요 기구로 생각된다.

## 3. 실험방법

본 연구에서는 Table 1과 같은 성분을 진공유도로에서 용해한 다음 주조에 의해 슬래브를 제작하였다. Mn과 S를 각각 0.1~0.3%, 0.005~0.013%의 범위로 변화시켰다. 진공유도 용해로 내에서 주조한 다음 미리 가열된 이동로에 시료를 장입하여, 열간압연 시험기로 이송하였는데, 용강의 온도, 주형으로부터 시편을 취출할 때까지의 시간, 이동로 장입시간 등을 일정하게 하여 Fig. 1과 같은 조압연전 열이력을 받도록 하였다. 조압연전 열이력은 박강판 제조에 보다 유리한 ISP방식의 설비를 상으로 선열해석[9]하여 표면온도 profile을 참고하였고, 슬래브 모서리로부터 10mm지점에 약 2mm 깊이로 열전

**Table 1 Chemical composition in weight percent of steels**

| C | Mn | P | S | Si | Al | Cu | Cr | Ni | N |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.033~ | **0.093~** | 0.014~ | **0.003~** | 0.006~ | 0.014~ | 0.076~ | 0.039~ | 0.031~ | 0.004~ |
| 0.048 | **0.305** | 0.016 | **0.013** | 0.016 | 0.037 | 0.082 | 0.043 | 0.043 | 0.005 |

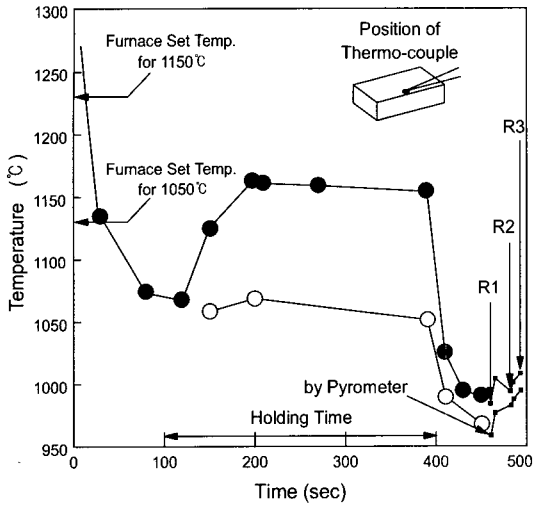


**Fig. 1 Schematic time-temperature diagram prior to roughing mill simulation in mini-mill process**

대를 삽입하여 3회 측온실험한 결과 용탕의 주조 온도와, 단계별 시간제어를 통해 일정한 열이력이 얻어짐을 확인하였다. 본 연구에서는 기존의 ISP방식에는 없지만, 조압연전 항온유지 열처리가 에지크랙 억제에 효과적일 것으로 판단되어 슬래브모서리 부분의 온도가 1050℃, 1150℃ 가 되도록 이동로 내에서 5분간 유지하였고 이동로의 온도를 각각 1230, 1130℃로 설정하였다. 이동로를 설정온도에서 1시간이상 미리 가열한 다음, 시료장입 직후 전원을 단락하고 실험압연기로 이동하였기 때문에 설정온도와 측정된 온도간에는 차가 있다. 이후부터는 시편의 온도를 기준으로 항온유지 온도조건을 구분하였다.

60mm 두께의 슬래브를 3pass의 가역압연에 의해 조압연 모사시험하였다. 각 pass별 시료의 두께는 41, 21, 11.2mm로 각각의 pass에서 31.7, 48.8, 46.7%의 압하율로 압연하였다. 압연된 시료는 에지부만을 절단하여 1/2t 까지 밀링 및 평면연삭한 다음, 가공에 의해서 형성된 burr 및 변형대를 제거하고 크랙을 보다 정확히 관찰할 수 있도록, 염산수용액으로 에칭하였다. 에지크랙의 깊이는 버니어캘리퍼스로 1/100mm까지 측정한 다음 소수점 이하 둘째자리를 반올림하였고, 시료의 측면에 직선자를 대고 이를 기준으로 하였다. 시료의 에지부분에서 석출된 석출물의 종류 및 그 크기는 리프리카 추출법에 의해 120kV의 TEM(Philips CM-120)으로 관찰하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

Fig.2는 0.01%의 S를 함유한 시편에서 조압연 중 발생한 에지크랙을 관찰한 것이다. a)는 조압연된 시료의 측면을, b)는 앞의 실험방법에서 설명한 것과 같이 1/2t로 가공한 시료를 관찰한 것으로서, 각각 Mn함량과 항온유지온도로 구분하여 나타내었다. Mn함량이 증가함에 따라 에지크랙은 감소하였고, 같은 수준의 Mn함량에서는 에지크랙이 1150℃로 항온유지한 경우에 보다 감소하

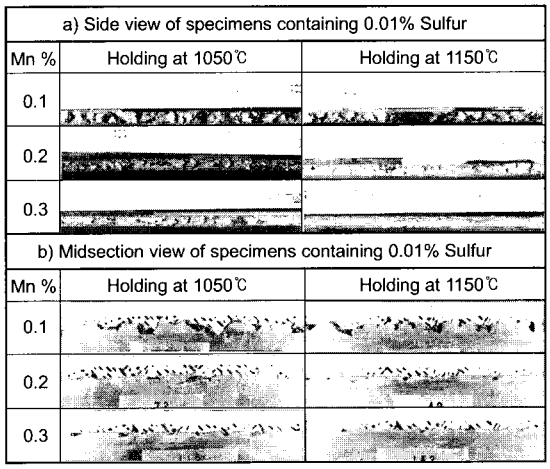


**Fig. 2 Edge crack appearance of low carbon steel containing 0.01% sulfur**

였다. Fig.2-b)와 같이 가공된 시료에 대해 각각의 에지크랙의 길이를 측정하였으며, 이를 산술 평균하여 평균 에지크랙 길이를 구하였다. 0.1%의 Mn이 함유된 시료에서 볼 수 있듯이 넓은 크랙은 내부에 여러 개의 미세한 크랙을 포함하는데, 이 경우에는 하나의 크랙으로 간주하고 가장 깊은 것을 측정하여 대표값으로 하였다. 본 연구에서는 에지크랙의 발생정도 평가방법에 있어서 에지크랙지수를 제안하였다. 에지크랙 지수는 시편 에지의 단위길이(cm) 당 존재하는 크랙의 깊이의 총화를 의미하며 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\text{Crack index} = \overline{L_C} \cdot \overline{D_C} = \sum L_C \,/\, \sum L_{SE} \qquad (1)$$

여기에서 $\overline{L_C}$ 는 평균 크랙깊이(mm), $\overline{D_C}$ 는 시편 에지부분의 단위길이당 크랙의 밀도(1/cm), $L_C$ 는 측정된 개별 크랙깊이(mm), $L_{SE}$ 는 측정된 시료의 에지길이(cm)를 의미한다. 이와 같은 식을 사용하게 된 것은 미세한 크랙이 높은 밀도로 존재하는 경우와 깊은 크랙이 한 두개 존재하는 경우, 시료의 전체길이 변형량에 크랙이 기여하는 바가 같다할 지라도, 평균 크랙길이는 후자가 더 크게 나타나는 문제가 있기 때문이다.

Mn/S비에 대한 평균 에지크랙 길이와 에지크랙지수의 관계를 Fig. 3과 4에 나타내었으며, 각각 1050, 1150℃에서 5분간 항온유지한 것이다. 에지크랙지수의 변화는 Mn/S비가 증가할수록 직선적으로 감소하였고, 에지크랙 평균길이의 Mn/S비 의존성에 비하여 에지크랙지수가 더 직선적인 감소를 보였다. 1050℃에서 항온유지된 Fig. 3에 의하면, S함량의 수준에 관계없이 Mn/S비가 증가하면 에지크랙의 길이는 감소하는 것으로 나타났다. 그러나, S함량의 수준에 따라 Mn/S비에 따른 에지크랙지수의 감소는 차이가 있었다. 즉 S함량이 0.005%인 경우 에지크랙 억제를 위한 Mn/S비는 65이상, 0.01%S인 경우 50이상이 필요하였다. 1150℃로 항온유지한 경우에는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 0.005% S는 60이상, 0.01% S는 40이상, 0.013% S는 25이상의 Mn/S비가 에지크랙 억제를 위해 필요함을 알 수 있다. 이를 Mn 첨가량으로 환산하면, 0.005% S함량에서는 0.3%의 Mn을, 0.01% S인 경우 0.4%, 0.013% S수준에서는 0.32% 이상의 Mn을 첨가하면 미니밀에서 조압연시 에지크랙을 억제할 수 있다. 종합해 볼 때, 0.013%이하의 S함량을 갖는 저탄소강에서는 S의 수준에 관계없이 0.4%이상의 Mn이 첨가되어야 에지크랙을 억제할 수 있다.

S의 함량에 관계없이 Mn의 첨가량이 비슷한 수준에서 에지크랙을 억제할 수 있었던 것은, 2단계 취성역에서 취성방지를 위한 Suzuki 등[10]의 결과와도 유사하다. 이들은 저탄소 알미늄킬드강을 1450℃가열하여 반 액상으로 만들고 다시 900~1200℃까지 20℃/sec.로 냉각시킨 다음 고온변형특성을 조사한 결과, S의 수준에 관계없이 0.7%이상의 Mn이 함유된 강에서 60% 이상의 단면감소율이 얻어지며, 강의 고온취성을 억제할 수 있다고 보고하였다. 이것은 Mn함량이 증가함에 따라 MnS가 조대화 하고[11], 액상의 S가 MnS로 석출 제거된 효과로 생각된다. 그러나, 본 연구에서 에지크랙 억제를 위한 Mn함량은 0.4% 정도로서 Suzuki 등의 결과에 비하면 매우 낮다. 이는 항온유지의 효과[6,8,11,12,13]로 생각된다. 즉 본 연구에서는 용해-주조후 곧바로 냉각-압연하지 않고, 5분 동안 일정온도로 미리 가열된 이동로에서 유지한 다음 조압연실험을 하였다. 이때 상당량의 MnS가 석출하는 효과로 인하여 고용 S가 보다 감소하였고, MnS 역시 성장하므로 서, 크랙 발생site와 입계에 액상으로 존재하는 FeS량이 보다 감소하여 크랙 발생 및 전파가 억제될 수 있었기 때문으로 판단된다.

항온 유지온도의 효과를 비교하기 위해 S 함량별 및 항온유지 온도별 에지크랙 지수에 미치는 Mn/S비의 영향을 Fig. 5에 나타내었다. 1150℃로 항온유지하는 경우가 1050℃의 것보다 에지크랙지수가 낮게 나타났다. Suzuki 등[10]에 의하면 앞에서 설명한 것과 같은 조건으

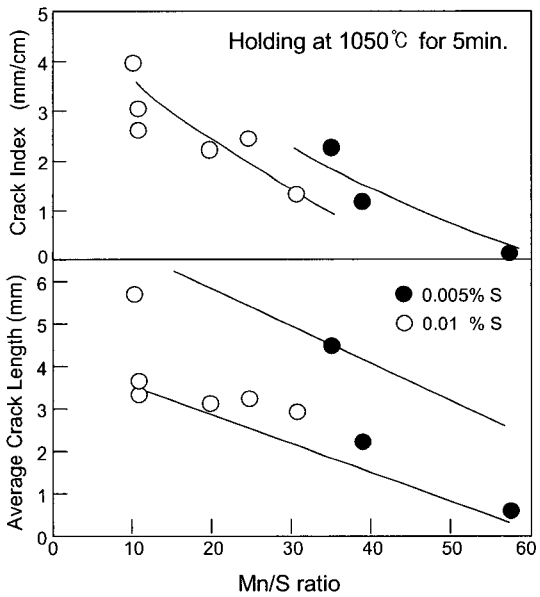


**Fig. 3 The effect of Mn/S ratio on the average edge crack length and edge crack index of low carbon steel hold at 1050℃**

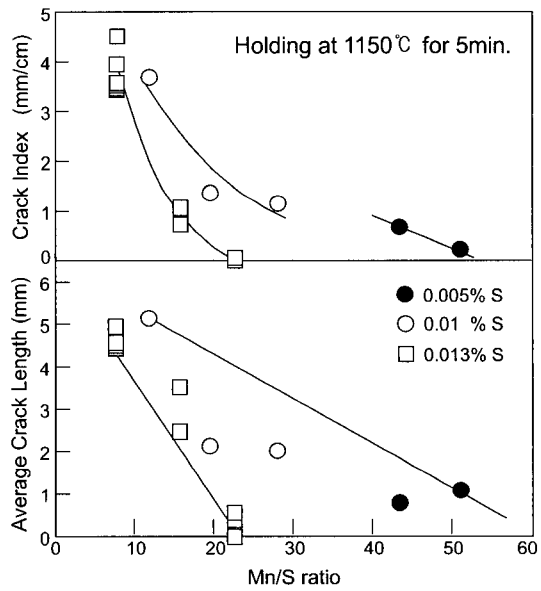


**Fig. 4 The effect of Mn/S ratio on the average edge crack length and edge crack index of low carbon steel hold at 1150℃**

로 시료를 열처리하고 단면감소율을 조사한 결과, 강의 취성이 억제되는 단면감소율 60% 이상을 얻기 위해서는 900℃의 경우 수백초(약 600초)이상, 1050℃인 경우에는 200여초, 1150℃인 경우에는 수십초가 필요하다 하였다. 또한 Kobayashi[6]는 0.01% S, 0.15%Mn이 함유된 저탄소강을 항온 열처리한 결과 1050℃의 온도에서는 2000초, 1125℃의 경우는 200초 정도 유지를 할 경우 80% 이상의 단면감소율이 얻어진다고 하였다. 이들의 실험결과에서도 알 수 있듯이 1150℃의 열처리조건에서는 MnS의 석출밀도가 낮고 성장이 좀더 빠르기 때문에, 입계에 편석된 액상의 S량이 보다 적고 크랙생성 자리도 감소되어 에지크랙이 보다 완화된 것으로 판단된다.

그러나 2가지 온도조건 모두 S함량이 높을수록 에지크랙발생이 억제되는 Mn/S비가 낮았다. 앞에서 언급한 바와 같이, S수준이 배수로 변화하여도 에지크랙 억제에

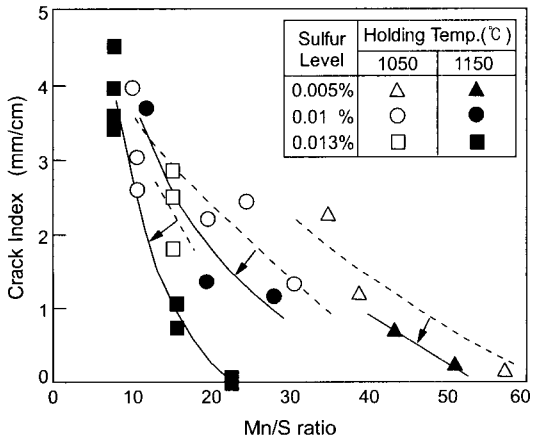


**Fig. 5 The effect of Mn/S ratio and holding temperature on the edge crack index of low carbon steel in roughing mill**

필요한 Mn함량은 거의 일정한 것으로 나타났다. 즉, S 함량이 낮다 해서 적은 량의 Mn으로 에지크랙을 억제할 수 있는 것은 아니다. Mn/S비가 20으로 일정한 조성에 대하여, MnS 용해도적식을 이용한 고용 S의 계산결과를 Fig. 6에 나타내었다.

계산에 사용한 용해도적식은 MnS석출물에 있어서 가장 널리 쓰이는 Turkdogan 등[14]의 것으로 식 2와 같다.

$$\text{Log } [\text{Mn\%}][\text{S\%}]\, f_S^{Mn} = -9020/T + 2.929 \qquad (2)$$

$$\text{Log } f_S^{Mn} = (-215/T + 0.097)\text{Mn\%} \qquad (3)$$

여기서 Mn%, S%는 각각 $\gamma$ 중 Mn과 S의 조성%, T는 절대온도, $f_S^{Mn}$는 Mn의 S에 대한 interaction coefficient이다. 0.1%Mn-0.005%S조성은 초기의 S 함량은 낮지만, MnS 석출온도가 낮고 석출이 잘 이루어지지 않아, 다른 2조성에 비하여 고용 S 량이 많다. 본 연구에서 조압연 온도는 950~1050℃ 사이의 온도로서, Fig. 6에 의하면, 3가지 조성간의 평형 고용S량에 차이가 거의 없는 것으로 볼 수 있지만, 응고 이후 냉각으로 평형상태에서 벗어나 있기 때문에, 계산결과와 실제 고용량은 일치하지 않는다. 다만 그 경향을 알 수 있는 바, Fig. 5의 Mn/S비 20 근처에서 크랙지수는 S 함량이 낮을수록 더 크게 나타난다는 점에서 Fig. 6의 경향과 일치한다. 따라서 S 함량이 높은 경우에는 Mn/S비가 낮아도 MnS 석출이 활발하여 고용 S의 저감효과가 큰 반면,

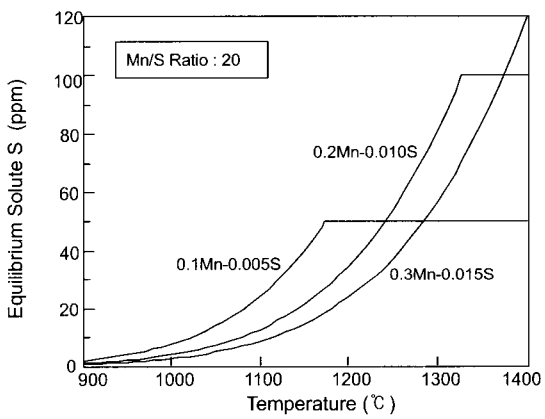


**Fig. 6 Comparison of the equilibrium solute S with three different Mn and S compositions**

S 함량이 낮은 경우에는 더 높은 Mn/S비에서, 고용 S를 MnS로 석출 제거시킬 수 있기 때문에, S 함량에 크게 관계없이 에지크랙 억제에 필요한 Mn 함량은 거의 일정한 것으로 생각된다. Fig.7은 0.1Mn-0.01S 및 0.3Mn-0.01S 시료에 대해 에지부분의 유화물을 TEM 관찰한 것이다. Fig.7 a의 0.1Mn-0.01S시료에서는 FeS 및 (Fe,Mn,Cu)S 등이 관찰되었고, 석출물의 크기가 매우 작고, 열을 지어 분포하는 경향으로 미루어, 대부분의 석출물이 조압연중 소성유기석출된 것으로 판단된다. 반면, b)에 나타낸 0.3Mn-0.01S 시료는 비교적 성장된 MnS석출물이 존재하였다. 이는 0.1Mn-0.01S에서의 MnS석출온도가 더 낮음을 의미한다. 다시 말해서 Mn 및 S함량이 낮게 되면 비교적 낮은 온도에서 MnS가 석출하고,

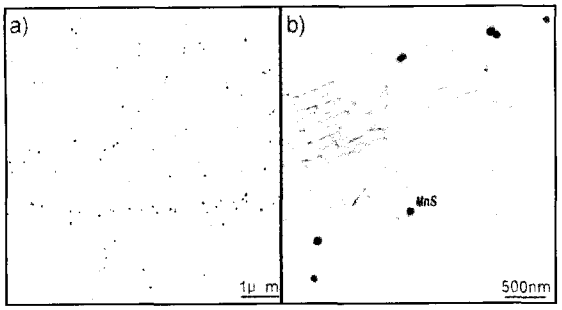


**Fig.7 T.E.M. observation of sulfides using extraction carbon replica in :**
**a) 0.1Mn-0.01S, hold at 1150℃ and**
**b) 0.3Mn-0.01S, hold at 1150℃**

MnS석출 성장의 구동력이 낮아지기 때문에 조압연중 소성유기석출하는 MnS가 많았을 것으로 생각된다. 미니밀과 같은 연주-열연 직결압연 공정에 있어서 MnS 석출을 조사한 Senuma 등[11]에 의하면, MnS의 성장속도는 Mn의 농도와 MnS/오스테나이트 계면의 농도에 차에 비례한다 하였다. 950℃ 이상의 고온에서 S의 확산계수는 매우 높으므로 MnS의 성장이 Mn의 확산에 따라 율속된다 하면, Mn의 농도가 높을수록 MnS의 성장은 빨라지며, S의 농도가 높을수록 MnS석출량 및 석출개시온도가 높아진다. 따라서 2가지 효과에 의해 동일 S 함량에서 Mn/S비가 높을수록, 적정량수준 이상의 Mn/S비에서 S 함량이 높을수록 고용 S가 보다 저감되므로 서 에지크랙지수가 낮아진 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

(1) 미니밀에서 조압연전 1150℃의 온도에서 5분간 항온유지하고 0.4%의 Mn을 첨가와 함께 S를 0.013%S이하로 하면 조압연에서 발생하는 에지크랙을 억제할 수 있다.

(2) 강이 동일한 S함량을 가질 때, Mn의 농도가 높을수록 보다 조대한 MnS석출이 관찰되었고, 동일한 Mn/S비에서 S의 농도가 높을수록 에지크랙발생은 감소하였다.

(3) 에지크랙 지수라는 에지크랙발생 정도의 평가 방법을 본 연구에서 제안하였으며, 평균 크랙깊이 측정결과 보다 S의 수준 및 Mn/S비에 대해 더 선형적인 관계를 보여 Mn/S비에 따른 에지크랙 발생경향을 잘 설명할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

(1) N.L.Samways, 1997, "Iron and Steel Engineer", pp.15~26.

(2) D. Kothe, B. Kruger, F. -P. Pleschiutschnigg, M.Spangenberg and C,Caesar, 1997, "Iron and Steel Engineer", pp.31~38.

(3) E.A.Donini, R.Borsi and A.Carboni, 1997, Iron and Steel Engineer, pp.39~44.

(4) H. G. Suzuki, S. Nishimura and S. Yamaguchi ,1979, Tetsu-to-Hagane, Vol.65 No.4, pp.2038~2046.

(5) W.T.Lankford, Jr., 1972, Metal. Trans. Vol.3, pp.1331~1357.

(6) H. Kobayashi, 1991, ISIJ International, Vol.31, No.3, pp.268~277.

(7) H.Suto, 1982, "Metallurgy of Hot Deformation of Steel", Report of hot deformation Committee, ISIJ, 3, pp.249~257.

(8) K.Matsumoto and C.Ouchi, 1982, "Metallurgy of Hot Deformation of Steel", Report of hot deformation Committee, ISIJ, 3, pp.366~372.

(9) H. Y. Kim, 1997, "Development of Tracking Model for Hot Rolling Process of Mini-Mill", Research Report of POSCO.

(10) H. G. Suzuki, S. Nishimura and S. Yamaguchi, 1988, "Physical Simulation of Continuous Casting of Steels", Proceedings of International symposium on "Physical Simulation of Welding, Hot Forming and Continuous Casting", Ottawa, Canada, pp.II-1~II-14.

(11) T. Senuma, S. Sanagi, K. Kawasaki, S.Akamatsu, T. Hayashida and O.Akisue, 1992, Tetsu-to-Hagane, Vol.79, No.2, pp.194~200.

(12) H. Sudo and Y.Hanai, 1982,"Metallurgy of Hot Deformation of Steel", Report of hot deformation Committee, ISIJ, pp.352~358.

(13) Y.Hanai and H.Sudo, 1979, J. Japan Inst. Met., Vol.43, No.7, pp.647~652.

(14) E.T.Turkdogan , S.Ignatowicz and J.Pearson, 1955 JISI, pp.349~354.