

# 열연 슬라브 모서리 크랙과 에지-스캐프 결함의 연관성

권혁철 · 이성진

## Correlation between Edge Scab and Corner Cracks on a Slab in Hot Strip Mill

H. C. Kwon and S. J. Lee

### Abstract

Increase in tensile strength of steel is important for fuel efficiency and CO<sub>2</sub> reduction. But the higher the strip strength, the more defect could be generated in hot strip mill. This study focuses on line-type edge scab. One of the causes for the defect is initial edge cracks commonly observed on a slab but their correlation has not been verified yet. Thus, the objective of this report is to verify if the edge crack is exactly the seed for edge scab. For this, we conducted pilot hot rolling test with cracked slab and compared the development of cracks and edge scabs on hot-rolled strip.

**Key Words:** Edge Scab, Slab, Crack, Pilot mill, Edging, Rolling

### 1. 서론

열연 판의 고강도화는 제품 측면에서 소재 경량화의 장점이 있으나, 생산 설비 및 변형 소재는 예전에 경험하지 못한 상태에 놓여 다양한 결함이 나타나게 된다. 이러한 결함 중 스캐프(scab) 결함은 일명 “딱지 형” 결함으로 판 표면에서 모재 위에 모재가 얇은 덧살로 눌러 얇은 결함으로 제품 측면에서 치명적이라 할 수 있다(Fig. 1,2).

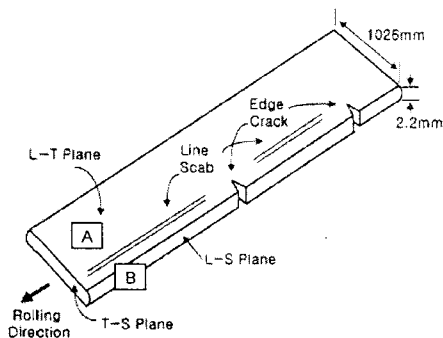


Fig.1 Line-type edge scab[1]

1. ㈜포스코 기술연구원 압연공정연구그룹
  2. ㈜포스코 기술연구원 압연공정연구그룹
- # 교신저자: 권혁철, E-mail: maximus@posco.com

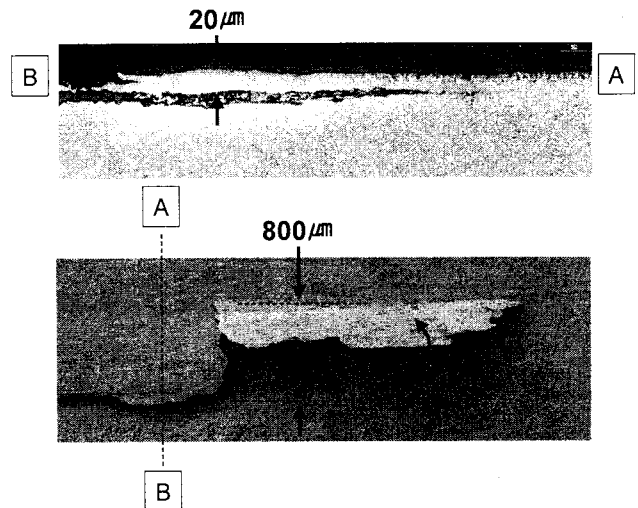


Fig.2 Micrograph of cross-section of edge scab and three-dimensional view

스캐프 결함은 판의 전 영역에 다양하게 발생하는데 양쪽 모서리 근처의 발생률이 높다. 본 고에서 다루는 스캐프 결함은 (1)모서리 근처에서 (2)선상으로 발생하는 (3)스캐프 결함 (Line-type edge scab)이며, 결함의 명칭은 편의상 에지-스캐프(edge scab)이라 하겠다. 통상적인 발생 위치는 판의 양측 모서리에서 중심방향으로 30mm 이내이며, 1~2

줄의 선상 결함으로 나타난다. 특징은 판의 측면과 나란한 방향 즉 압연 방향과 동일한 방향성을 갖는다는 점이다.

기존의 조업 경험으로 이 결함이 조압연 초기에 발생할 가능성이 큰 것으로 알려져 있다. 이는 열연의 슬라브 폭 조정 공정인 대폭압연 조건에 따라서 결함의 증감 사례가 일부 강종에서 관측되었기 때문이다. 이런 관점에서 본 고에서는 결함은 조압연 단계에서 발생하는 것으로 가정하였다. 그러나 조압연과 마무리 압연의 광범위한 영역에서 발생 가능함을 염두 해 두어야 한다.

에지-스캐프 결함 발생에는 연주 슬라브의 미세 조직도 큰 역할을 할 것이나, 본 고에서는 주조 조직 측면에서 논의는 접고, 열연에서의 메탈 플로우에 초점에 맞추었다. 기존에 에지-스캐프의 원인으로 많이 논의가 된 것은 연주에서 발생하는 슬라브 모서리 크랙이다. 이 크랙이 폭압연과 수평압연을 거치면서 스캐프 결함으로 발생한다는 의견이 많았다. 본 연구의 목적은 슬라브 크랙의 거동을 보고 크랙이 과연 에지-스캐프의 발생지 인지를 밝히는 것이다. 상관성이 있다면 크랙 확장을 방지하는 공정조건을 설정할 수 있을 것이다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험 개요

일반 열연 공정은 Fig. 3(a)와 같이 조압연과 마무리 압연으로 구성된다. 본 연구의 대상인 조압연은 대폭압연기와 수평압연기로 구성된 1단계 조압연과 다수의 소폭압연기와 수평압연기로 구성된 2단계 조압연으로 구성된다. 파일롯트 실험 장치는 Fig. 3(b)와 같이 대폭압연기와 수평압연기로 구성되어 조압연 1단계는 비교적 정확한 모사 가능하다. 그러나 조압연 2단계는 수평압연 위주이므로, 파일롯트 수평압연기만으로도 메탈 플로우가 모사 가능하다고 보았다.

파일롯트 실험 장치는 가열로, 대폭압연기, 그리고 수평압연기로 구성되어 있다. 실험 대비 약 1/5 스케일이며, 실험용 슬라브도 상사성을 고려, 실제 슬라브의 1/5 스케일로 제작하였다.

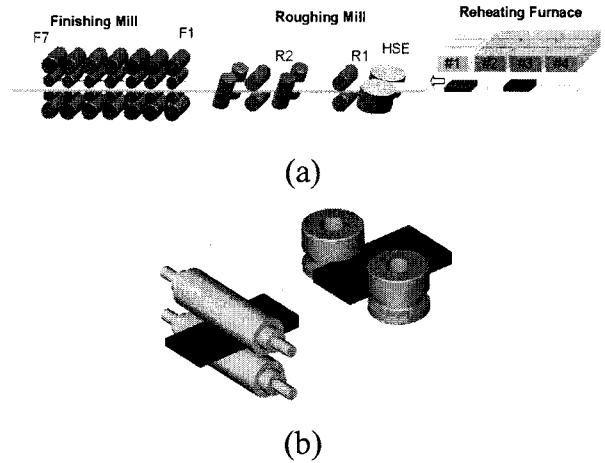


Fig.3 (a)Layout of hot strip mill and (b)pilot mill

### 2.2 결함 생성

실험의 상사성을 위해서 인공크랙의 크기도 실제 슬라브 결함의 1/5 스케일로 생성하였다. 슬라브 한 개당 6개의 결함을 부여하였으며 결함의 폭은 1.5~2.0mm, 길이는 10mm로 가공하였다. 결함의 폭은 실제 결함보다 클 가능성이 크나, 크랙의 열림 거동 및 후속 변형 양상을 본다는 측면에서는 크게 문제가 되지 않을 것으로 보았다. 결함의 내부 형상은 사각형이 아닌 삼각형으로 제작하였는데, 연주 공정의 모서리 과냉에 의한 수축과 응력 발생 패턴은 크랙의 내부 형상을 삼각형으로 만들기가 더 유리하다는 점을 고려하였다.

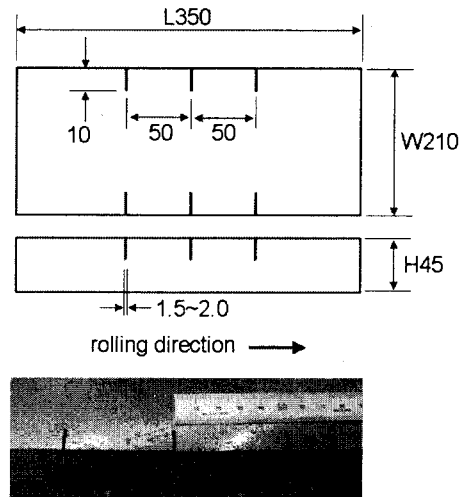


Fig. 4 Geometry and photograph of a pilot slab with artificial edge cracks (unit:mm)

## 2.3 실험 조건

슬라브는 1250℃에서 1 시간 재가열 하였고, 슬라브의 이송/준비 시간은 약 40 초였으며 폭압연 직전 판 내부 온도는 1060~1080℃였다. 대폭압연 실시 후, 폭압연과 수평압연을 반복하였다. 슬라브 두께가 얇아지면서 온도가 급감하여 재가열한 후 후속 수평압연을 하였다. 재가열에서 가열 온도와 준비시간은 동일하게 설정하였으나 두께가 얇아진 슬라브의 복사 열손실이 커서 압연 직전 판 온도는 1080℃보다 낮았을 것으로 추정한다.

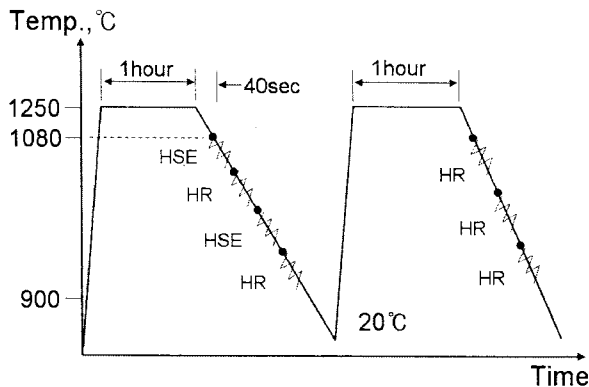


Fig. 5 Experimental conditions

실제 열연 조압연 1, 2 단계와 유사하게 폭압연과 수평압연을 배치하였으며 Table 1 에 세부조건을 나타내었다. 슬라브는 두께가 45mm 에서 3mm 로, 폭은 210mm 에서 23mm 만큼 압연된다. Table 에 측정된 크랙의 크기를 나타내었는데 패스가 증가함에 따라 크기가 증가하였다. 상세한 크랙의 모양 변화는 다음 장에 상술하였다.

Table 1 Draft schedule for crack behavior analysis

	Process	Thick/Width (mm)	Crack size (mm)	Pass no.
(a)	(slab)	45/210	1.5	0
(b)	E1	45/195	2.2	1
(c)	R1	39/195	4.7	1
(d)	R23	27/195	6.0	2
(e)	E2	27/187	5.2	1
(f)	R4	21/187	6.1	1
(g)	R56	9/187	미 측정	2
(h)	R78	3/187	미 측정	2

## 3. 실험 결과

### 3.1 패스 별 크랙 거동

크랙 결함은 폭압연과 수평압연에 따라 대칭형으로 변하다가 ((b)~(e)) 후단 압연에서 비대칭적인 모양으로 발전하였다 ((f)~(h)) (Fig. 6).

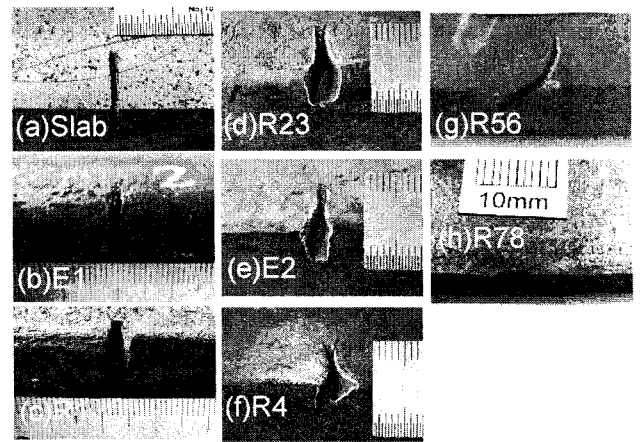


Fig. 6 Behaviors of a crack in a slab during heavy size edging and rolling process

위의 변형 형상에 대해 각 패스 별로 결함의 거동 특성을 정리하면 다음과 같다.

(b) Crack opening: 최초 크랙은 폭압연을 통해 크기가 증가하며, 폭압연이 클수록 크랙은 커짐

(c)(d) Crack opening: 수평압연도 크랙을 증가시키며 측면에 도그분형 메탈 플로우를 발생시킴

(e) Crack closing: 폭압연은 도그분 돌출부를 중앙으로 밀어 넣어 크랙을 약하게 닫음

(f)(g)(h) Non-symmetric crack: 수평압연은 대칭이던 크랙을 압연 방향으로 쏠리게 하며, 추가 압연으로 크랙 강도는 약해지나 최종적으로 갈고리형의 미세한 결함으로 남음

### 3.2 대폭압연기의 역할

실험 결과, 대폭 압연기는 폭 저감 외에 크랙의 비대칭성을 유발하는 측면도 있었다. Fig. 7 에 대폭압연 없이 수평압연만 한 경우와 대폭압연과 수평압연을 조합한 경우를 비교하였다. 수평압연만 있는 경우, 크랙은 대칭을 유지하면서 4 시, 8 시 양 방향으로 기울어지고, 모재는 내부로부터

상승하여 크랙은 두 갈래로 나뉘어진다. 이에 반해 폭압연 된 슬라브는 후속 수평압연에서 한 방향으로 쏠리면서 8 시 방향으로 기울어져 최종적으로 한 갈래의 크랙으로 남았다.

두 경우의 발전 방향은 다르지만 크랙의 깊이는 Fig. 6(h)와 같이 모두 깊이가 깊지 않다. 따라서 후속 마무리 압연 공정을 거친다면 완화될 가능성이 크다. 실제 제품 결함에서 갈고리형의 결함은 잘 보이지 않는 것으로 보아, 내부 모재가 크랙 틈 사이로 상승 및 침투하여 최종 제품 상에서는 문제가 되지 않는 것으로 볼 수 있다.

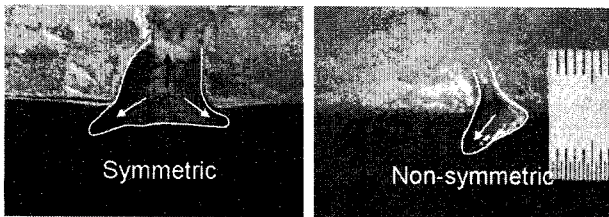


Fig. 7 Development of edge crack in roughing process with and without heavy size edging

### 3.3 최종 결함 형상과 에지-스캐프 비교

앞서 마무리 압연 후에 관찰되는 에지-스캐프 결함의 특징은 압연 방향과 나란하다는 점임을 언급하였다. 그러나 파일롯트 조압연 모사 결과는 슬라브 모서리 크랙은 갈고리 모양 결함 즉 압연 방향과 비스듬한 결함으로 발전하였다. 마무리 압연을 추가하는 경우 결함의 형상은 압연 방향에 더 가깝게 배열되겠지만, 에지-스캐프 같이 판 측면과 완전히 평행인 형상으로 발전하기는 불가능하다. 따라서 에지-스캐프의 발생 원인을 슬라브 크랙과는 다른 곳에서 찾아야 한다.

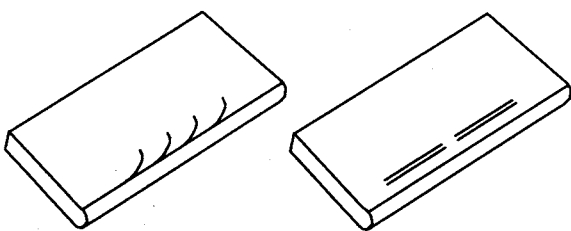


Fig. 8 Comparison of defect shape between pilot-tested strip (left) and hot-rolled strip (right)

결함의 형상 외에도 덧살부의 두께에서도 차이가 있다. 열연 강판의 에지-스캐프 덧살부는 두께가 약 20 μm로 매우 작기 때문에 압연 공정 혹은 후 공정에서 덧살부가 탈락되기도 한다. 이에 반해 크랙이 압연 중에 발전하는 경우에는 크랙 경계부의 좌/우 측 모재가 비슷한 두께를 갖는다.

## 4. 고찰

이상의 논의에서 볼 때, 크랙 결함을 에지-스캐프의 출발점으로 보기는 어렵다. 크랙이 원인이 아니라면 압연에 의해 덧살형 결함이 생기는 이유를 찾아야 한다.

앞서 보인 그림처럼 에지-스캐프의 모양은 완전한 매끄러운 곡선이 아니며, 불규칙적인 요철 형상이 많다. 이러한 형태의 결함은 고온 연성 (hot ductility) 감소에 의한 주름성 결함의 예로 볼 수 있다. 예로서 선재 압연에서 압연 속도가 매우 낮은 조압연 첫 패스에서 주름성 결함이 흔히 발생한다. 열연 첫 패스인 대폭압연도 슬라브의 국부적인 온도 급감과 변형량 집중이 가능하다.

이런 관점에서 에지-스캐프의 일차적 원인을 고온 연성 감소로 본다면, 폭압연량에 따른 슬라브의 국부적인 온도 급감 및 국부 변형량 집중 정도에 대해서 비교/분석할 필요가 있다.

## 5. 결론

파일롯트 실험 결과, 크랙의 발전 형태는 에지-스캐프 형상과 차이가 있어 에지-스캐프의 원인을 슬라브 코너 크랙으로 보기는 어려우며, 대신 고온 연성 감소에 의한 주름성 결함 관점에서 에지-스캐프의 원인을 검토할 필요가 있다.

## 참고 문헌

- [1] M. H. Han et al., 1999, Analysis and prevention of edge cracking phenomenon during hot rolling of non-oriented electrical steel sheets, Materials Science and Engineering A, Vol.264, pp.47-59.
- [2] 권혁철, 이호원, 임용택, 2008, 선재압연 공정에서의 주름 흠 발생 메커니즘 분석, 포스코 연구논문, 제13권, 제2호, pp. 61~66.