

## 냉간압연공정에서 공정변수에 따른 엣지 크랙 성장에 관한 연구

X. Z. Cui<sup>1</sup> · 이상호<sup>1</sup> · 이성진<sup>2</sup> · 이종빈<sup>2</sup> · 김병민<sup>#</sup>

### Study of Edge Crack Growth According to Rolling Condition in Cold Rolling

X. Z. Cui, S. H. Lee, S. J. Lee, J. B. Lee, B. M. Kim

(Received March 26, 2009 / Revised July 14, 2009 / Accepted July 15, 2009)

#### Abstract

The shape of edge cracking in rolling process generally occurred "V" shape. This cracking is successively generated at width edge of strip. The edge cracking is developed to center of strip during rolling process. In the results, the strip is occurred fracture, and the productivity is gone down because of the extensive production time. Accordingly, we need to control crack propagation during rolling process. But, the control of cracking is very difficult in rolling process. Previously the studies of edge cracking were mainly performed on hot rolling process. In this paper, the shape of the edge cracking in rolling was estimated according to process conditions such as initial edge crack size, reduction ratio and tension using FE-simulation and the simplicity experiments on cold rolling process.

**Key Words** : Edge Crack, Cold Rolling, Tension, Reduction Ration, FE-simulation

#### 1. 서 론

냉간압연공정에서 발생하는 엣지 크랙은 귀가 톱날처럼 깨져 들어간 홈으로 중, 후판, 강대에 발생한다. 이런 엣지 크랙은 판의 품질에도 영향을 줄뿐더러 작업과정에서 엣지에서 발생한 크랙으로 인해 판의 절판으로 이어져 조업시간의 상승을 가져오며 생산율을 떨어뜨린다. 또한 엣지 크랙의 크기가 크면 폭의 정밀도에 영향을 주며 소재의 낭비도 적지 않다. 현재 냉간압연에서 엣지 크랙에 대해 완전히 제어하기는 어려운 상황이다.

엣지 크랙은 여러 가지 원인에 의해 발생하고 공정조건에 의해 변형을 하게 된다. Nobuki[1~3] 등은 열간에서 초기 크랙의 형상, 압하율, 마찰

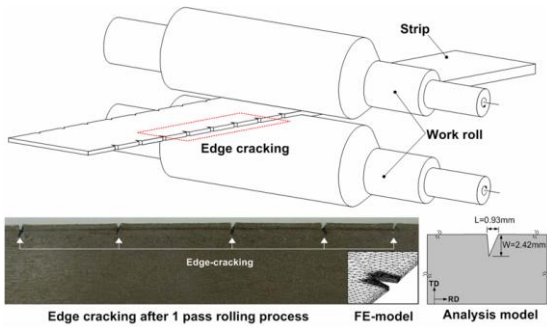
등 조건이 슬래브표면에 발생하는 크랙의 진전에 대한 영향을 연구하였고 Yu[4~7] 등은 크랙의 크기, 소재내부에서 크랙의 위치 등 조건이 슬래브 내부에서 크랙의 진전에 주는 영향, 개재물로 인한 크랙의 발생 및 진전에 대해 연구하였다. 또 Ervasti[8, 9] 은 열간에서 슬래브 표면의 폭 방향 크랙과 압연 방향 크랙의 진전에 대해서도 연구를 하였다. 그러나 냉간압연에서 엣지부 크랙의 진전에 대해 많이 연구를 하지 않았다.

냉간압연에서 엣지 크랙은 엣지부에서 일정한 거리를 간격으로 반복적으로 나타나며 엣지 크랙의 형상은 거의 일치한다. 냉간에서 엣지 크랙은 연속압연에 의한 판 연성감소, 엣지 응력 불균형 등에 의해 발생하기 때문에 열간에서 크랙의 발생원인과 다르다. 그리고 발생한 엣지 크랙은 압

1. 부산대학교 대학원 정밀가공시스템

2. POSCO 기술연구소

# 교신저자 : 부산대학교 기계공학부, bmkim@pusan.ac.kr



**Fig. 1 Occurrence of edge-cracking after cold rolling process**

연공정 중에 압축 및 인장응력 등에 의해 진전을 하게 된다.

본 연구에서는 공정조건이 엣지 크랙의 진전에 대한 영향에 대해 연구하였다. 실제 공정에서 발생하는 엣지 크랙과 동일한 형상과 크기를 해석에 적용하였다. 압연공정조건에 따라서 엣지 크랙의 진전에 대하여 분석하였다. 그리고 해석과 실험결과를 비교하여 해석결과의 타당성을 입증하였다.

## 2. 해석방법

본 연구에서는 냉간압연에서 엣지 크랙의 진전에 대해 해석을 수행하여 압연조건이 엣지 크랙의 진전에 대한 영향을 알아보았다. 초기 두께가 2.3mm 인 일반전기강판인 소재를 1.438mm 로 압연을 하였을 때 나타난 엣지 크랙의 형상은 Fig. 1 에서와 같이 “V”형 모양의 엣지 크랙이 엣지부에 나타났으며 일정한 간격을 두고 반복적으로 나타났다. 엣지 크랙의 크기는 압연 방향에서 0.5~1.2mm, 폭 방향에서는 0.6~3.6mm 이다.

소재는 소성변형을 하면서 엣지부의 연성이 작아지고 손상치(Damage)가 연성과괴값에 도달하면 엣지 크랙이 발생하게 된다. 발생한 엣지 크랙은 압연과정에서 롤 갭 내를 통과하면서 점점 성장하게 된다.

Fig. 1 에서의 실공정에서 발생하는 엣지 크랙을 참고하여 해석에서 초기 엣지 크랙의 크기와 형상을 설정하였다. 엣지 크랙의 진전을 분석하기 위하여 1 패스(pass) 압연 후 발생한 엣지 크랙의 크기로 해석을 진행하였다. 해석의 편의를 위해 1/4 모델로 해석을 진행하였다. 해석은 강소성 유

**Table 1 Rolling pass schedule of plasticine test**

Test No.	Thickness (mm)			
	1	2	3	4
Initial	2.3	2.3	2.3	2.3
1pass	1.32	1.386	1.438	1.571
2pass	0.776	0.819	0.889	1.073
Reduction ratio(%)	41.2	40.1	38.2	31.7

한요소 프로그램인 DEFORM 3D 를 사용하였고 해석에서 사용한 수식은 Cockcroft & Latham 식으로 다음과 같다[10].

$$C = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_{Max}}{\bar{\sigma}} d\epsilon = 0.1836 \quad (1)$$

해석시 임계손상치는 수식(1)에서와 같으며 인장실험과 해석을 비교하여 도출하였다. 본 논문에서 사용된 소재는 전기강판으로 식 (2)에 유동응력식을 나타내었다.

$$\sigma = 985.905(0.001 + \epsilon)^{0.113} \quad (2)$$

소재의 탄성계수는 210MPa 이고 푸아송비는 0.3 이고 롤의 반지름은 200mm 이다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 실험결과와의 비교

해석의 타당성을 검증하기 위하여 실험과 CAE 해석결과를 비교하였다. 실험에서는 1 패스에서 발생한 엣지 크랙에 대해 Table 1 에서와 같은 패스스케줄로 2 패스 압연을 진행하였다. 소재는 플라스틱인(Plasticine)재료로서 강과 유동 특성이 매우 유사하여 본 실험에서 사용하였다[11]. 플라스틱인의 변형저항식은 식(3)과 같다.

$$\bar{\sigma} = 0.224\epsilon^{0.117} \quad (3)$$

폭의 길이는 100mm 이고 롤 속도는 71.35m/min, 마찰계수는 0.03 이다. 첫 번째 패스에서 발생한 엣지 크랙의 크기는 압연 방향에서는 1mm 이고 폭 방향에서는 2.5mm 이다. 해석에서 사용한 롤 속도, 마찰계수 등 공정조건은 실험과 동일하게 설정하였다.

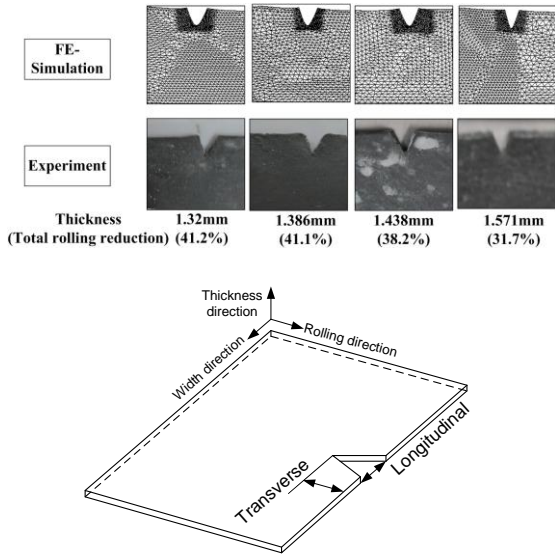


Fig. 2 Comparison between analytical and experimental result

Table 2 Edge crack of Analytical result and plasticine test

Case	Transverse(mm)		Longitudinal(mm)	
	CAE	Test	CAE	Test
1	3.525	3.25	2.952	2.90
2	3.278	3.17	2.921	2.89
3	3.305	3.11	2.914	2.85
4	2.764	2.71	2.815	2.80

Fig. 2 와 Table 2 는 해석과 실험에서 발생된 엣지 크랙의 진전을 비교한 결과이다. 결과에서 해석과 실험은 거의 일치한 형상을 보여주며 엣지 크랙의 크기 또한 실험결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 해석에 의해 엣지 크랙 진전을 예측함에 있어 타당함을 확인하였다. 본 연구에서는 해석을 통해 압연 공정조건에 따라서 엣지 크랙 진전에 대한 영향을 분석하였다.

### 3.2 엣지 크랙 초기 크기의 영향

초기 엣지 크랙의 크기가 엣지 크랙의 진전에 관한 영향을 알아보기 위한 해석조건은 Table 3 와 같다. 1패스 냉간 압연 후에 발생한 엣지 크랙 크기는 대체로 압연 방향에서 0.5~1.2mm이고 폭 방향에서 0.6~3.6mm으로 나타났다. 따라서 초기 엣지

Table 3 Rolling pass schedule after 1pass

Condition		Value
Thickness(mm)	In	1.438
	Out	0.889
Tension(ton)	Back	1.67
	Front	1.42
Speed(m/min)		71.35
Friction coefficient( $\mu$ )		0.03

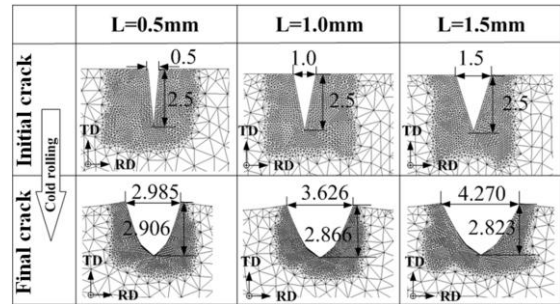


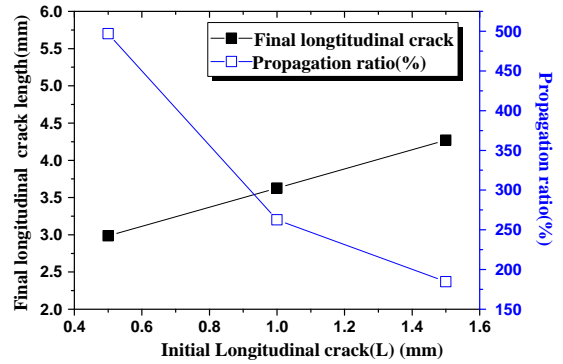
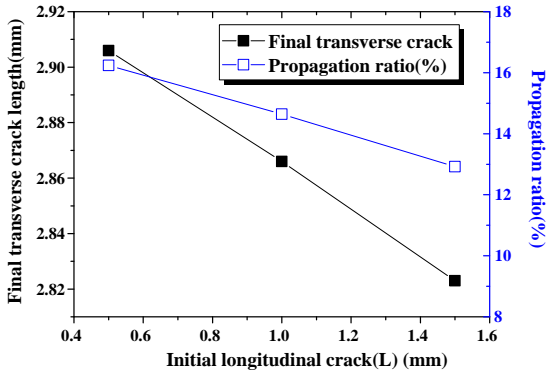
Fig. 3 Variation of edge crack according to length of L (W=2.5mm, L=0.5mm, 1.0mm, 1.5mm)

엣지 크랙 크기는 1패스에서 발생된 엣지 크랙 크기를 참고하여 압연방향 1mm, 폭 방향 2.5mm로 설정하였다.

엣지 크랙의 진전율(Propagation ratio)을 분석하기 위해 폭 방향에서 엣지 크랙 크기는 모두 2.5mm설정하고 압연 방향에서의 엣지 크랙의 크기는 각각 0.5mm, 1mm, 1.5mm로 설정하여 해석을 진행하였다.

Fig. 3 은 초기 압연 방향 엣지 크랙의 변화에 따른 압연 전후 엣지 크랙 크기를 비교한 그림이다. 엣지 크랙 크기는 압연방향의 엣지 크랙 크기가 증가함에 따라서 압연후 엣지 크랙은 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 4 는 압연 방향에서 초기 엣지 크랙 크기의 변화에 따른 압연후 엣지 크랙 크기 변화를 나타낸 그래프이다. 초기 엣지 크랙에 대해 압연후 압연 방향과 폭 방향에서의 엣지 크랙의 크기에 대해 비교해보았다. Fig. 4(a)의 폭 방향으로 초기 엣지 크랙 크기가 증가함에 따라서 엣지 크랙 진전량은 감소하는 것으로 나타났으며, 진전율 또한 감소하였다. Fig. 4(b)는 초기 엣지 크랙의 크기 변화에 따른 압연후 엣지 크랙의 압연 방향 변화를



(a) Edge crack growth in the transverse direction

(b) Edge crack growth the in longitudinal direction

Fig. 4 Edge crack growth and propagation ratio according to initial longitudinal crack length

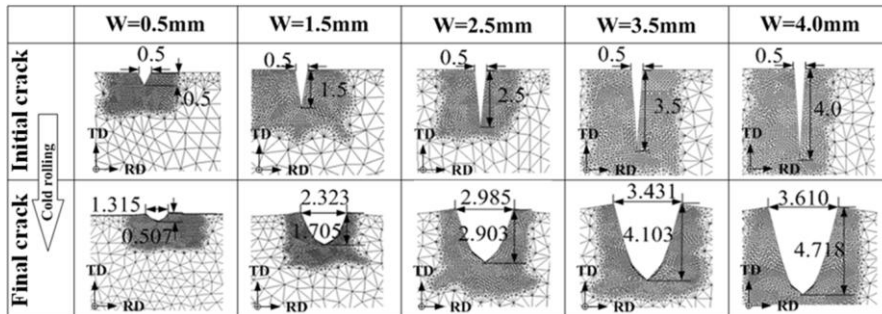


Fig. 5 Variation of edge crack size according to length of W(L=0.5mm, W=0.5mm, 1.5mm, 2.5mm, 3.5mm, 4.0mm)

나타낸다. 압연 방향 초기 엣지 크랙 크기가 증가할수록 압연후 압연방향 엣지 크랙 크기는 증가하였지만, 진전을율은 감소하는 것으로 나타났다.

압연이 진행됨에 따라서 폭 방향으로의 엣지 크랙의 성장은 압연공정중 절판의 위험을 증가시키지만 상대적으로 압연 방향 엣지 크랙은 증가할수록 절판의 가능성이 줄어든다고 판단된다. 따라서 압연 방향 초기 엣지 크랙은 증가할수록 엣지 크랙의 진전을 감소시키는 것으로 판단된다.

Fig. 5 는 초기 폭 방향 크랙의 변화에 따른 크랙의 크기의 변화를 나타내는 그림이다. 압연 방향의 크랙 크기는 0.5mm 로 고정두고 폭 방향의 크랙 크기는 0.5~4.0mm 로 변화를 주었다. 설정된 크랙의 크기에 따라서 압연후 폭 방향 및 압연 방향 크랙의 진전을 비교해보았다.

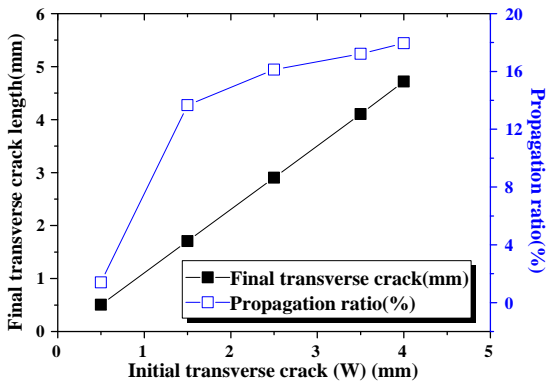
Fig. 6 은 초기 폭 방향 엣지 크랙의 변화에 따른 폭 방향 및 압연 방향엣지 크랙 크기의 변화를 나타내는 그래프다. 초기 엣지 크랙 크기가 증가함에 따라서 압연후의 엣지 크랙 크기는 성장

하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(a)의 결과에서 초기 폭 방향 엣지 크랙 크기가 증가함에 따라 압연후 폭 방향 엣지 크랙 크기는 증가하고 진전을 또한 소폭으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(b)는 초기 폭 방향 엣지 크랙 크기가 증가함에 따라 압연 방향 엣지 크랙 크기는 매우 크게 증가하고 진전을 또한 매우 큰 폭으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

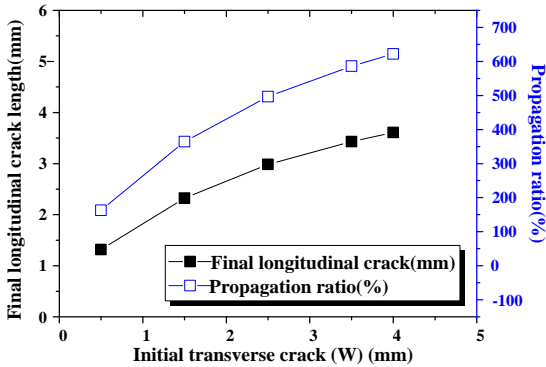
결과에서 보는 바와 같이 폭 방향 엣지 크랙이 증가함에 따라서 폭 방향과 압연 방향 엣지 크랙 모두 증가하는 것으로 나타났고 진전을 또한 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 초기 폭 방향 엣지 크랙이 클수록 엣지 크랙의 진전을 증가시키는 것을 알 수 있다.

### 3.3 압하율의 영향

압하율은 압연공정에서 중요한 공정변수 하나로서 압하율이 엣지 크랙의 진전에 대한 영향을 알아보았다. 초기 엣지 크랙의 크기를 압연 방향



(a) Edge crack growth in the transverse direction



(b) Edge crack growth in the longitudinal direction

Fig. 6 Edge crack growth and propagation ratio according to initial transverse crack length

에서 1mm, 폭 방향에서 2.5mm 로 설정하였다. 사용한 해석조건은 Table 3 와 동일하게 적용하였다. 압하율을 28.18%, 38.18%와 48.18%로 변화를 주었다.

Fig. 7 에서는 압하율의 변화에 따른 압연 전후 엣지 크랙의 크기를 비교하여 나타낸 그림이다. 압하율이 증가함에 따라서 엣지 크랙의 크기는 폭 방향 및 압연 방향으로 모두 증가하였다. Fig. 8 은 압하율에 따른 엣지 크랙 크기변화를 나타내 그래프이다. Fig. 8(a)에서 압연 방향에서 압하율이 클수록 엣지 크랙은 많이 진전하고 진전을 또한 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 8(b)에서 폭 방향에서 압하율이 클수록 엣지 크랙은 많이 진전을 하고 진전을 또한 증가한다. 압하율이 클수록 엣지 크랙은 압연 방향에서 폭 방향보다 더 많이

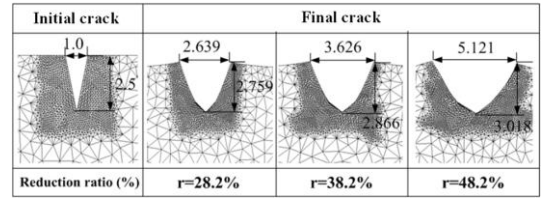
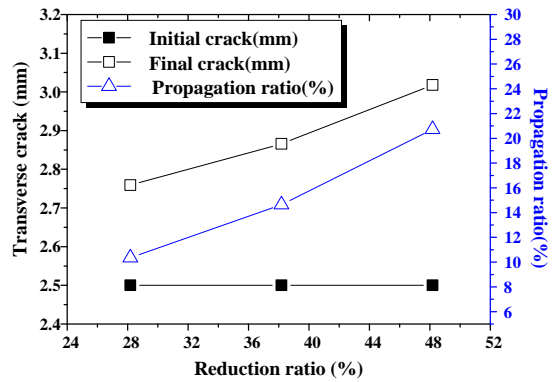
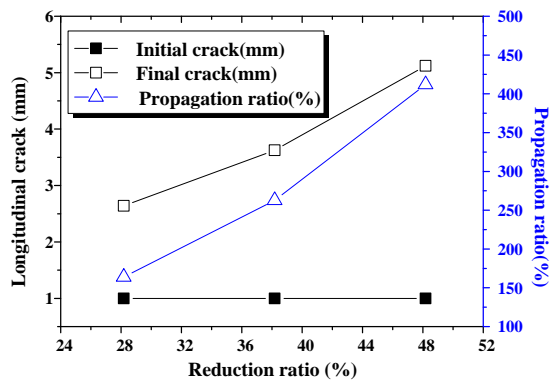


Fig. 7 Variation of edge crack size according to reduction ratio (r=28.18%, 38.18%, 48.18%)



(a) Edge crack growth in the transverse direction



(b) Edge crack growth in the longitudinal crack

Fig. 8 Edge crack growth and propagation ratio according to reduction ratio

진전을 하였고 진전을 또한 압연 방향에서 더욱 많이 증가한다는 것을 확인할 수 있다.

압하율이 증가함에 따라 압연소재의 압하량이 증가하게 되고 소재가 받는 변형율이 증가하게 된다. 엣지 크랙은 압하율이 증가함에 따라서 압연 방향으로 더욱 많은 진전을 보였다.



### 3.4 장력의 영향

장력은 냉간압연에서 압연하중에 영향을 미치는 중요한 공정변수이다. 따라서 장력이 엿지 크랙의 진전에 대한 영향을 분석하기 위해 압연공정에서의 장력의 변화에 따른 초기 엿지 크랙 크기의 변화를 확인하였다.

#### 3.4.1 후방장력의 영향

공정조건에서 전방장력은 195.28MPa 로 고정하고 후방장력은 실제 사용한 장력 142.14MPa 의 90%, 95%, 105%, 110%의 크기에 대해 해석을 진행하였다.

Fig. 9 에서는 후방장력변화에 따른 압연후 엿지 크랙 크기 변화를 비교하여 나타내는 그림이다. 전방장력이 변화에 따라서 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. Fig. 10 은 압연 방향과 폭 방향에서 엿지 크랙의 진전과 진전율을 나타낸 그림이다.

Fig. 10(a)에서는 압연 방향에서 엿지 크랙은 1 mm 에서 3.612mm, 3.614mm, 3.634mm, 3.642mm 로 진전을 하였고 진전율은 후방장력이 커지면서 미소하게 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 10(b)에서는 폭 방향에서 엿지 크랙은 2.5mm 에서 2.867mm, 2.868mm, 2.865mm, 2.865mm 로 진전하였고 후방장력이 커지면서 진전율은 거의 변하지 않는다는 것을 알 수 있다.

엿지 크랙은 압연 방향에서는 진전을 많이 하였고 진전율도 미세하게 증가하였다. 폭 방향에서는 후방장력이 증가할수록 엿지 크랙의 크기는 증가하여 진전에 대한 영향은 크지만, 진전율은 0.1%차이를 보이면서 진전율에 대한 영향은 미세하다는 것을 알 수 있다. 후방장력이 커지면서 엿지 크랙의 진전율은 폭 방향보다 압연 방향에서 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 이것은 소재가 냉간압연을 하면서 롤과 소재 사이의 마찰력으로 인해 압연방향에서의 유동이 훨씬 크기 때문일 것이다.

#### 3.4.2 전방장력의 영향

공정조건에서 후방장력은 142.14MPa 로 고정하고 전방장력은 실제 사용한 장력인 195.28MPa 의 90%, 95%, 105%, 110%의 크기에 대해 해석을 진행하였다.

Fig. 11 에서는 전방장력의 크기의 변화가 엿지 크랙의 형상을 비교하여 나타낸 그림이다. 압연후 엿지 크랙은 미소하게 진전하는 경향을 보였다.

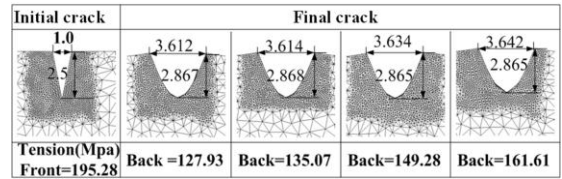
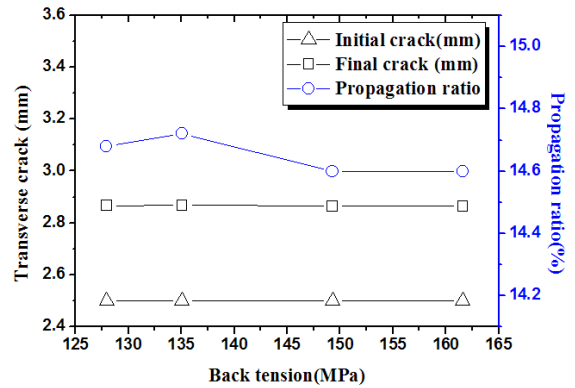
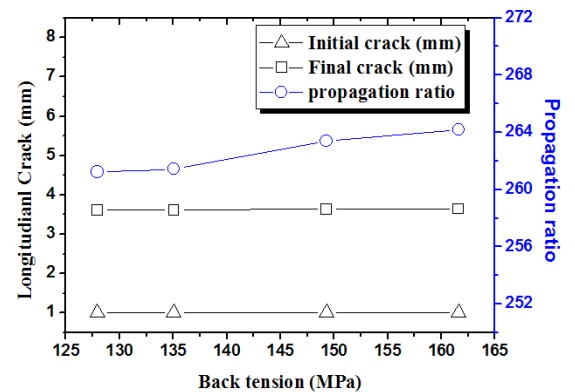


Fig. 9 Variation of edge crack size according to Back tension



(a) Edge crack growth in the transverse direction



(b) Edge crack growth in the longitudinal direction  
Fig.10 Edge crack growth according to back tension

Fig. 12 는 압연 방향과 폭 방향에서 엿지 크랙의 진전량과 진전율을 나타낸 그림이다. Fig. 12(a)에서와 같이 폭 방향에서 엿지 크랙은 2.5mm 에서 2.859mm, 2.857mm, 2.860mm, 2.860mm 로 진전하였고 진전율은 14.36%, 14.28%, 14.40%, 14.40%로 전방장력이 증가함에 따라 진전율은 미세하게 증가하는 경향을 보여주었다. Fig. 12(b)에서 엿지 크랙은 1mm 에서 압연 방향에서 3.632mm, 3.645mm,

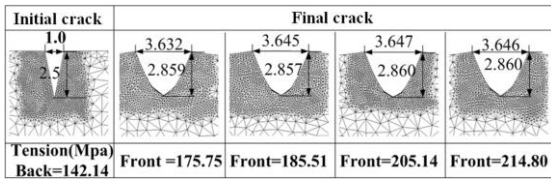
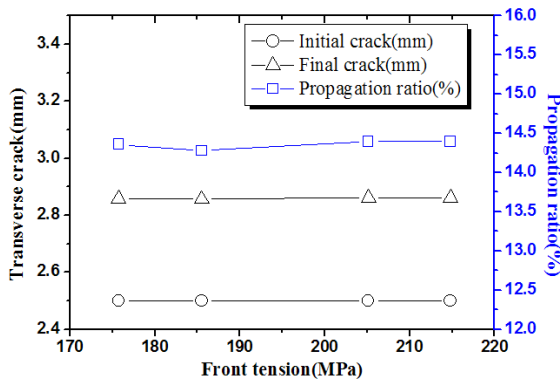
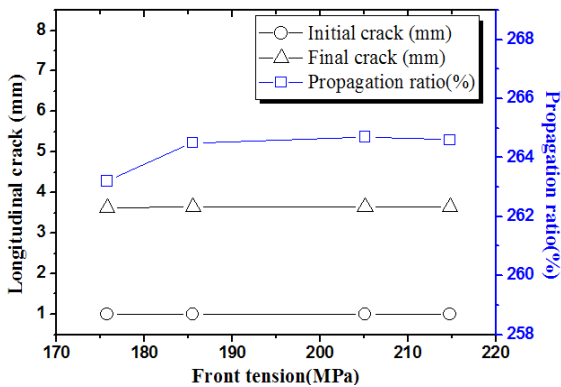


Fig.11 Variation of edge crack size according to front tension



(a) Edge crack growth in the transverse direction



(b) Edge crack growth in the longitudinal direction

Fig.12 Edge crack growth according to front tension

3.647mm, 3.646mm 로 진전을 하였고 진전율은 263.2%, 264.5%, 264.7%, 264.6%로 미소하게 증가하는 경향을 보였다. 전방장력이 증가하면서 압연 방향에서 크게 진전을 하였다. 압연 방향으로 전방장력에 의하여 변형이 증가하면서 엣지 크랙 또한 압연 방향이 폭 방향보다 전방장력의 영향을 더 크게 받는다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 전기강판 냉간압연에서의 엣지 크랙은 압연 공정 중에 진전을 하게 된다. 공정조건이 전기강판의 엣지 크랙진전에 대한 영향을 알아보기 위해 유한요소해석을 실시하여 비교 검토하였으며 실험과 유한요소해석을 수행하여 비교하여 해석 결과의 신뢰성을 입증하였다. 그 결과를 간단히 요약하면 다음과 같다.

(1) 초기 엣지 크랙 크기에 따라서 압연후 엣지 크랙 진전에 대한 영향을 분석하였다. 폭 방향 엣지 크랙 크기가 감소 또는 압연 방향 엣지 크랙 크기가 증가할수록 절판의 가능성이 줄어든다. 따라서 압연 방향의 초기 엣지 크랙의 크기가 증가할수록 엣지 크랙의 진전을 감소시키는 것으로 판단된다. 초기 폭 방향 엣지 크랙이 클수록 엣지 크랙의 진전을 증가시키는 것을 알 수 있다.

(2) 압하율의 경우, 압하율이 증가함에 따라서 폭 방향 및 압연 방향으로의 엣지 크랙의 진전이 증가하는 것으로 나타났다. 압하율이 증가하면서 엣지부의 변형이 더 커지고 엣지 크랙은 더 성장하게 되며 압연방향에서 변형율은 폭 방향에서 변형율보다 크므로 압연방향에서 더 많이 진전을 하게 된다.

(3) 장력은 전·후방장력으로 나누어 엣지 크랙의 진전에 대해 해석하였다. 장력이 커지면서 압연 방향과 폭 방향에서 모두 진전을 하였고 압연 방향과 폭 방향에서 진전율은 모두 미소하게 커진다. 하지만 진전율은 폭 방향보다 압연 방향에서 훨씬 크므로 폭 방향보다 압연방향에 대한 장력의 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다. 그것은 압연방향에서 폭 방향보다 소재유동이 많고 변형이 크기 때문이다.

#### 후 기

본 연구는 POSCO 석좌교수 연구지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

[1] Y. Nobuki, I. Takashi, Y. Yoshinori, K. Akira, 2005, Influence of rolling condition on deformation of surface micro-defect in plate rolling, ISIJ, Vol. 91, No. 12, pp. 15~21.

- [2] I. Takashi, Y. Nobuki, Y. Yoshinori, T. Yuhi, 2003, Deformation analysis of surface defects on plate rolling, ISIJ, Vol.89, No. 11, pp. 50~57.
- [3] Y. Nobuki, Y. Yoshinori, I. Takashi, 2006, Deformation analysis of longitudinal surface micro-defects in flat rolling, ISIJ, Vol. 92, No. 11, pp. 19~24.
- [4] Y. Hai-liang, L. Xiang-hua, L. Chang-sheng, Y. Kusaba, 2006, Behavior of transversal crack on slab corner during V-H rolling process, J. Iron Steel Res. Inter., Vol. 13, No. 6, pp. 31~37.
- [5] H. L. Yu, X. H. Liu, Z. Y. Jiang, 2008, FE analysis of behavior of internal-longitudinal crack in a slab during vertical-horizontal rolling, Proc. the 8th asia-pacific Conf. Mater. Process., June 15-20, pp. 799~804.
- [6] H. L. Yu, X. H. Liu, G. D. Wang, 2008, Analysis of crack tip stress of transversal crack on slab corner during vertical-horizontal rolling process by FEM, J. Iron Steel Res. Inter., Vol. 15, No. 3, pp. 19~26.
- [7] H. L. Yu, X. H. Liu, H. Y. Bi, L. Q. Chen, 2009, Deformation behavior of inclusions in stainless steel strips during multi-pass cold rolling, J. Mater. Process. Technol. Vol. 209, pp. 455~461.
- [8] E. Ervasti, U. Stahlberg, 1999, Behavior of longitudinal surface cracks in the hot rolling of steel slabs, J. Mater. Process. Technol., Vol. 94, pp. 24~28.
- [9] E. Ervasti, U. Stahlberg, 1999, Transversal cracks and their behavior in the hot rolling of steel slabs, J. Mater. Process. Technol., Vol. 101, pp. 312~321.
- [10] M. G. Cockroft, D. J. Latham, 1968, Ductility and the workability of metals, J. Inst. Met., 96, pp. 33~39.
- [11] B. S. Shin, D. S. Choi, E. S. D. J. Lee, J. H. Lee, 2000, The Manufacturing Technique of Metal Rapid Products by the Ming Process, J. Kor. Soc. Precis. Eng., pp. 759~762.