

# 실리콘 강판 압연시 에지크랙 발생에 관한 유한요소해석

## Finite Element Based Edge Crack Analysis of Silicon-Steel Sheet in Cold Rolling

변 상 민†      이 재 현\*      김 상 록\*      장 윤 찬\*\*      나 두 현\*\*  
Byon, Sang-Min      Lee, Jae-Hyun      Kim, Sang-Rok      Jang, Yun-Chan      Na, Doo-Hyun

이 종 빈\*\*\*      이 규 택\*\*\*      송 길 호\*\*\*      이 성 진\*\*\*  
Lee, Jong-Bin      Lee, Gyu-Taek      Song, Gil-Ho      Lee, Sung-Jin

(논문접수일 : 2009년 9월 28일 ; 심사종료일 : 2009년 12월 15일)

### 요 지

본 논문에서는 냉간압연 중에 실리콘 강판의 에지부에 발생하는 크랙을 해석하는 방법을 제시하였다. 본 방법은 손상역학의 개념에 기초하여 소재의 변형 중 발생하는 손상개시와 손상진전 및 파괴의 형태로 순차적으로 해석하는 기법이다. 이를 통해 압연 중에 크랙 발생 유무와 발생 후 크랙의 진전된 길이 및 형상을 예측할 수 있다. 소재의 파괴물성치는 일반 판상시편 및 노치 판상시편의 인장실험을 통해서 도출하였다. 압연중 발생하는 에지크랙 해석결과가 얼마만큼 정확한지 평가하기 위해서 시험압연기를 통해 얻은 압연시편과 직접 형상·비교를 수행하였다. 크랙의 길이 및 방향 측면에서 본 해석기법의 예측정도가 실험에 상당부분 근접함을 알 수 있었다. 마지막으로 실리콘 강판의 실제 압연공정으로 에지크랙 해석을 수행하여 초기크랙 길이 및 압연기 출측 강판 감기 인장력에 따른 크랙 진전 거동에 대해 분석하였다.

**핵심용어** : 에지크랙, 냉간압연, 실리콘 강판, 손상개시, 손상진전, 초기크랙

### Abstract

In this paper an finite element approach for the edge crack analysis of silicon-steel sheet during cold rolling is presented. Based on the damage mechanics, the proposed approach follows the analysis steps which are composed of damage initiation, damage evolution and fracture. Through those steps, we can find out the initiation instant of crack and resulting propagated length and shape of the crack. The material constants related to fracture is experimentally obtained by tension tests using standard sheet-type specimen and notched sheet-type specimen. To evaluate the prediction accuracy, we performed a pilot rolling test with a initially notched sheets. It is shown that the results obtained by the approach converged to the experimental one concerning about the direction and length of propagated crack. The capability of the proposed one is demonstrated through the application to the actual silicon-steel rolling mill.

**Keywords** : edge crack, cold rolling, silicon-steel sheet, damage initiation, damage evolution, initial crack

## 1. 서 론

실리콘 강판은 철에 규소를 첨가하여 자기적 특성을 현저하게 개선한 특수강판으로 변압기 및 모터의 철심으로 사용된다. 그러나 규소 첨가에 의해 소재의 특성이 취성적으로

변하기 때문에 가공상에 심각한 어려움을 야기한다. 그 중에서 압연 중에 강판의 에지(Edge)에서 발생하는 크랙(Crack)이 판파단으로 직접적으로 이어지기 때문에 가장 중요한 문제로 대두되고 있다.

최근에 에너지 절약이 세계의 가장 중요한 이슈 중의 하나

† 책임저자, 정회원 · 동아대학교 기계공학과 교수  
Tel: 051-200-7639 ; Fax: 051-200-7656  
E-mail: smbyon@dau.ac.kr

\* 동아대학교 기계공학과 대학원생

\*\* 중앙대학교 기계공학과 대학원생

\*\*\* 포스코 기술연구소 압연공정연구Gr.

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 2월 28일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 4월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

가 되고 있는 시점에서 변압기나 모터의 철손(철심이 전류에 의해 자성을 나타낼 때 발생하는 에너지 손실)을 줄이는 가장 확실한 방법 중의 하나인 고-실리콘 강판재의 수요가 급증하고 있다. 특히, 하이브리드카(Hybrid-car)에서 요구되는 고효율 전동기 개발과 맞물려서 고품질 실리콘 강판의 개발이 필수적으로 되고 있다. 그러나 생산적인 측면에서 볼 때 실리콘 함량이 높으면 높을수록 취성도 같이 증가하고 따라서 가공성은 훨씬 떨어지게 된다(Espenhahn, 1988; Hilbert, 1976).

이러한 측면에서 실리콘 강판 압연기술은 소재의 취성적 특성을 고려하여 최대한 에지크랙을 피하면서 기존의 생산성을 확보하는 것이 관건이라고 할 수 있다. 이것을 실현하기 위해서는 어떠한 공정조건일 때 에지크랙이 발생되고 혹은 둔화되는지 미리 예측할 수 있는 해석기술이 필수적이다(Nishiura, 1998). 본 연구에서는 고-실리콘 강판재를 대상으로 압연 중에 발생하는 에지크랙 발생을 예측하고, 또한 진전된 길이 및 형상을 예측할 수 있는 유한요소해석 방법을 제시하였다.

이것을 실현하기 위해서 먼저, 소재의 파괴물성치를 일반 판상 시편 및 노치 판상 시편의 인장실험을 통해서 도출하였다. 강판재의 에지크랙 현상을 손상역학(Damage mechanics) 개념(Lemaitre, 1996)과 접목하여 소재의 압연 중 발생하는 손상개시(Damage initiation)와 손상진전(Damage evolution) 및 파괴(Fracture)로 순차적으로 해석하는 방법을 정립하였다. 에지크랙은 판 형상에 따라 큰 영향을 받기 때문에 판 형상(즉, 롤갭 형상)이 고려된 탄-소성 압연해석 기법을 도입하였다.

에지크랙 해석한 결과가 얼마만큼 정확한지 평가하기 위해서 시험용 협폭 형상롤을 제작하였고, 압연중 크랙진전 시험을 직접 실시하였다. 시험결과로 얻은 에지크랙 형상과 해석한 결과를 직접 비교·분석하였다. 실제 고-실리콘 강판재를 생산하는 압연기의 표준 공정조건으로 에지크랙해석을 수행하였다. 표준 공정조건을 기준으로 초기크랙 크기와 출측 강판 인장력 변경에 따라 나타나는 크랙 생성 및 진전 거동을 비교·분석하였다.

## 2. 손상역학

### 2.1 손상개시 조건

금속의 손상개시를 예측하는 여러 물리적 모델 중에서 본 연구에서는 수직응력 조건식(Normal criterion; Hooputra 등, 1996)을 선택하였다. 이 조건식은 소재 속에 항상 잔존해 있는 마이크로 기공이 수직응력에 의해 손상이 성장하는

것으로 모델링한 이론인데, 일반적인 소성변형하는 소재에 가장 많이 사용하고 있는 식이다. 식 (1)은 이 조건식을 수식으로 나타낸 것이다.

$$\int \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_f(\eta)} = 1 \tag{1}$$

여기서,  $\bar{\epsilon}$ 는 등가 소성변형률(Equivalent plastic strain;  $((2/3)\epsilon_{ij}\epsilon_{ij})^{1/2}$ ),  $\bar{\epsilon}_f$ 는 등가 파손변형률,  $\eta$ 는 수직응력 강도(Stress triaxiality)를 나타낸다.  $\eta$ 는 또한 다음식과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{-p}{\bar{\sigma}} \tag{2}$$

여기서,  $-p=(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3$ 은 평균 팽창 수직응력(Mean expansion normal stress)을 나타내고,  $\bar{\sigma}$ 는 등가소성응력(Equivalent plastic stress)을 나타낸다.

식 (1)에서  $\bar{\epsilon}_f(\eta)$ 는 실험적으로 결정되는 소재의 물성치인데, 본 연구에서는 다음과 같은 통상적인  $\bar{\epsilon}_f-\eta$  곡선식을 사용하였다(Hooputra 등, 1996).

$$\bar{\epsilon}_f = C_1 \text{Exp}(C_2 \eta) \tag{3}$$

여기서,  $C_1$  및  $C_2$ 는 실험상수이다. 본 식은 큰 수직응력강도(즉, 팽창 수직응력) 상태에서는 작은 소성변형률로도 파괴가 발생하고 작은 수직응력강도에서는 큰 소성변형률에서도 파괴가 잘 발생하지 않는다는 물리적 의미를 담고 있다. 가공성이 좋은 소재에서는 위의  $\bar{\epsilon}_f-\eta$  값 수준이 매우 크고, 본 연구에서와 같이 취성이 큰 실리콘 강판에서는  $\bar{\epsilon}_f-\eta$  값 수준이 매우 낮다.

### 2.2 손상진전 및 파괴

손상해석을 수행하여 최종적으로 파악하고자 하는 것은 '손상을 받은 부위가 얼마 정도 더 진전되어서 크랙이 유발될 것인가'이다. 이것을 계산하기 위해서는 손상 개시점 이후에 손상성장(Damage evolution)을 예측할 수 있는 모델이 필요하고, 또한 손상이 100% 진행되었을 경우 크랙을 발생시키기 위한 수치기법이 필요하다.

손상을 성장시키는 에너지를 파괴에너지(Fracture energy

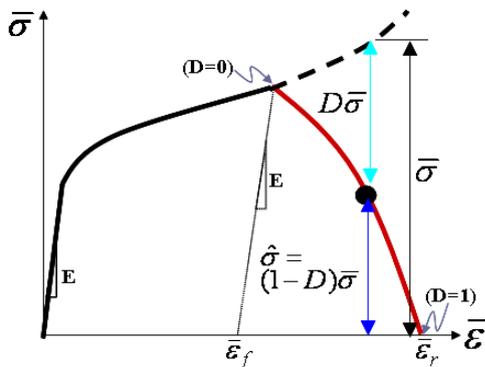
( $G_f$ ) 라고 하고 식 (4)와 같이 나타난다. 이 에너지는 손상이 시작된 소재내의 한 점의 단위면적을 열 때 필요한 에너지이다. 단위는 단위면적당 에너지이다. 그림 1에 파괴 에너지의 개념을 나타내기 위한  $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$  선도를 나타내었다.

$$G_f = \int_{\bar{\epsilon}_f}^{\bar{\epsilon}_r} L \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} = \int_0^{\bar{u}_r} \bar{\sigma} d\bar{u} \quad (4)$$

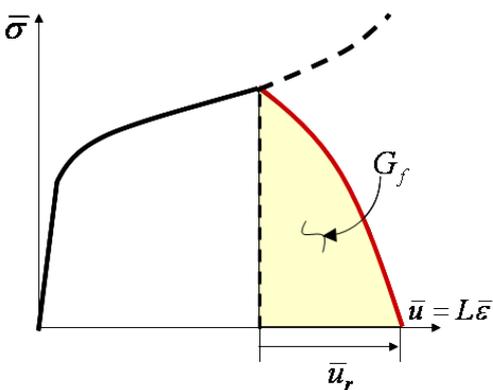
여기서,  $\bar{\epsilon}_f$  는 등가 파손변형율,  $\bar{\epsilon}_r$  는 등가 파괴변형율,  $\bar{u}_r$  는 등가 파괴변위,  $L$ 은 특성길이(요소 길이)를 나타낸다. 손상 성장 중에 소재가 받는 응력을  $\hat{\sigma}$ 로 나타내면, 손상이 없었을 경우 소재가 받는 응력( $\bar{\sigma}$ )에서 손상된 비율만큼 차감한 응력으로 표현될 것이다. 식 (5)는 이것을 수학적으로 표현한 것이다.

$$\hat{\sigma} = (1 - D)\bar{\sigma} \quad (5)$$

여기서,  $D$ 는 손상변수(Damage variable)로써  $D=0$ 일 경우 손상이 전혀 일어나지 않은 상태를 나타내고,  $D=1$ 일 때



(a) 손상성장 응력 ( $\hat{\sigma}$ )



(b) 파괴에너지( $G_f$ )와 등가파괴 변위( $u_r$ )

그림 1 손상진전 및 파괴의 개념을 나타낸  $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$  선도

는 손상이 100% 진행되었음을 의미한다. 요소중에서  $D=1$ 에 도달한 요소는 적분점에서 강성을 영으로 만들어 다음 해석 시간 증분에서 해당 요소를 제외하는 요소제거(Element removing)기법을 채용하여 균열진전을 모사하였다.

### 3. 실험과 유한요소해석(FEA)

#### 3.1 파괴물성 도출 실험과 FEA

판의 에지크랙(Edge crack)과 같은 소재의 손상 및 파괴 해석을 수행하기 위해서는 소재의 파괴 물성치에 대한 기본 데이터가 필요하다. 이것을 얻기 위해서 (i)판상 인장시편과 (ii)노치 판상 인장시편을 제작하고 인장 테스트를 수행하였다. 그리고 인장 테스트를 통해서 구한 유동응력 물성치를 동일 조건의 유한요소해석 입력 데이터로 넣어 인장을 받고 있는 요소의 응력성분을 파악하였다. 그림 2는 실제 인장 시편과 노치 여부에 따라 1/4해석과 전체 해석을 수행한 격자 형상을 보여주고 있다.

#### 3.2 Pilot 압연시험과 FEA

고-실리콘 강판재 압연 중에 실제로 발생하는 에지크랙과 유한요소해석에 의해 예측한 결과가 서로 일치하는지 평가하기 위해서 시험압연기를 통한 강판 압연시험을 수행하였다. 그림 3는 시험에 사용된 시험압연기 및 시험에 사용된 압연 시편의 예를 보여주고 있다.

본 압연시편을 평롤 압연할 경우, 에지부분에 미리 가공된 초기 노치는 소성변형으로 인해 노치 형상이 늘어나기만 할 뿐 크랙이 발생하지 않는 것을 예비실험으로부터 관찰할 수 있었다. 소재에 폭방향 형상편차를 주어 폭 방향으로 불균일 변형을 유도하면 노치 끝에 추가적인 인장력이 발생하여 크랙이 발생할 것이라는 것을 예상할 수 있다. 이러한 측면에

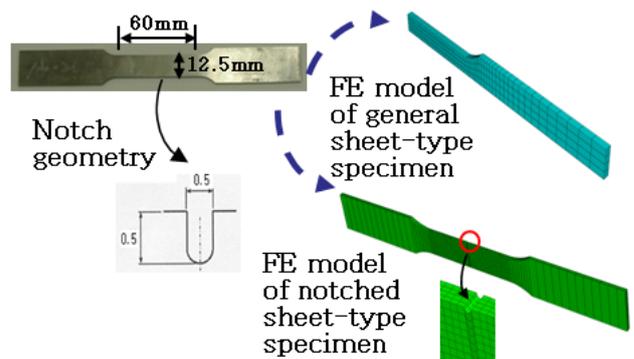


그림 2 인장시편과 유한요소해석 모델

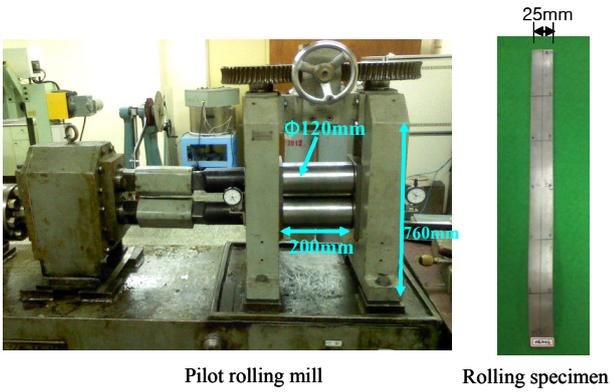


그림 3 시험압연기 및 압연시편

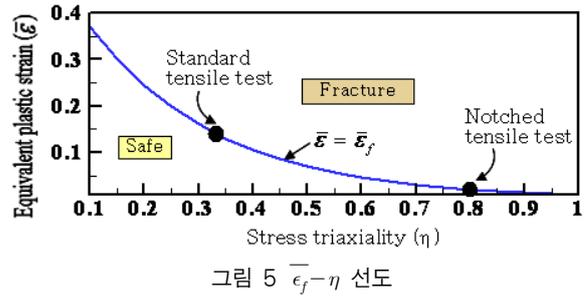


그림 5  $\bar{\epsilon}_f-\eta$  선도

#### 4. 결과 및 토의

##### 4.1 등가 파손변형율( $\bar{\epsilon}_f$ )-수직응력 강도( $\eta$ )

앞의 3.1절에서 시행한 판상 일반 인장시편과 판상 노치 인장시편을 이용한 인장실험 결과와 동일조건에서의 유한요소해석 결과로부터 파손 시작할 때의 수직응력 성분( $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ )과 그때의 변형율 성분( $\bar{\epsilon}_f$ )을 구하였다. 그림 5에 나타난 바와 같이, 일반 인장시편 실험으로부터 한 포인트를 얻고, 노치 인장시편 실험으로 또 한 포인트를 얻었다. 그 사이의 데이터는 식 (3)에 언급된 모델을 사용하여 구현하였다.

소재는 외부에서 힘을 받으면 외부 힘에 해당하는 만큼 저항을 하게 된다. 지속적으로 더 큰 힘을 받게 되면 어느 순간부터 더 이상 지탱하지 못하고 소재의 강성이 급격히 떨어지게 된다. 손상해석에서는 이 시점을 소재의 손상 개시점으로 판단한다. 그림 5는 압연중인 소재의 손상 개시점을 나타내는 그래프이다.  $\bar{\epsilon}_f-\eta$  곡선의 안쪽은 파괴로부터 안전한 영역을 나타내고, 선을 기준으로 바깥쪽은 손상이 발생하는 영역을 나타내고 있다.

손상진전해석을 위해 필요한 파괴에너지( $G_f$ )는 인장실험을 통해 얻은  $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$  선도에서 그림 1에서와 같은 방식으로 계산된다. 즉, 손상개시점(즉,  $\bar{\epsilon}_f$ )에 해당되는 변위를 기준으로 하여 파괴될 때까지의 변위( $\bar{u}_r$ )에 해당되는 소성응력 곡선 이하의 면적으로 계산한다. 본 해석의 경우에는  $G_f$ 값은  $8047.5 \text{ J/m}^2$ 이었다.

##### 4.2 시험압연에서의 크랙예측과 실험과의 비교

그림 6는 블록한 롤 형상을 사용하여 센터부에 압하가 많이 발생하도록 한 시험압연 실험결과 및 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 롤이 블록할 경우는 폭 센터부가 압하가 많이 발생하므로 이 부분의 신장량이 커져 판의 센터 웨이브가 발생하고 결과적으로, 센터부에는 압축응력이 걸리고 에지부

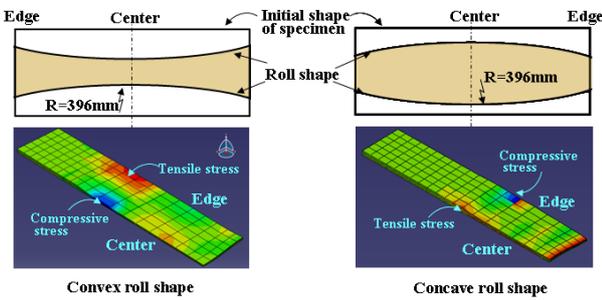


그림 4 폭방향 롤형상 설계 및 예비 FE해석

서 그림 4과 같이 롤 센터 부위가 블록한 경우와 롤 에지 부위가 블록한 2가지 형태의 롤형상을 설계하였고, ABAQUS® (2007)를 이용하여 예비 유한요소해석을 수행하였다. 그 결과는 그림 4에 응력 분포로 나타내었다.

그림 4을 고찰하면, 롤의 형상에 따라 발생하는 판의 에지와 센터에 생기는 판 길이방향 성분 응력이 다르게 나타남을 알 수 있다. 판의 초기 단면 형상은 직사각형 형상으로 가정하였다. 롤 형상이 블록(Convex)할 경우에는 센터부위가 압하가 많이 되기 때문에 이 부분의 신장량이 커져 센터 웨이브가 발생한다. 반대로 롤 형상이 오목(Concave)할 경우에는 에지 부분의 압하가 많이 되어 이 부분의 신장량이 커져 에지 웨이브가 발생한다. 웨이브가 발생하는 부위는 길이방향의 압축응력이 걸리고 상대적으로 신장이 적게 된 부분은 인장응력이 걸리는 것을 알 수 있다.

위와 같은 점에 착안하여 롤을 폭 방향으로 형상 절삭 가공을 하여 실제 압연공정에서 소재 및 롤 갭에서 발생하는 폭 방향 형상편차를 구현하도록 하였다. 2가지 형상을 가공하였는데, 롤 곡률반경의 크기는  $R=396\text{mm}$ 으로 같도록 하였고, 곡률의 방향은 정반대로 하였다. 따라서, 발생하는 폭 방향으로의 압하의 경향도 서로 정반대로 일어날 것으로 예상할 수 있다.

에는 인장응력 발생하게 된다. 실험결과에서 보면, 이 인장응력으로 인해 에지부의 노치 선단에서 크랙이 크게 성장한 것을 알 수 있다.

본 실험에서와 같이 폭방향으로 롤 곡률이 매우 큰 협폭 압연 중, 롤갭에서 이루어지는 크랙은 압연방향으로 진행되는 것을 압연시험 결과로부터 알 수 있다. 유한요소해석 결과에서도 압연방향으로 크랙이 진행되는 것으로 나타났다. 그러나 정확한 크랙의 방향면에서는 시험결과와 해석결과에 있어서 약간의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 실제 압연시험에서 발생할 수 있는 우연요인들 즉, 롤 수평(Level) 편차, 롤 점핑, 강관 압연시 길이방향 롤갭의 변동, 상하롤의 조립오차로 인한 진동 및 충격 등을 해석과정에서 경계조건으로 설정하기 힘든 것들이 오차를 유발하기 때문일 것이다. 크랙 길이 측면에서 고찰해 보면, 유한요소해석으로부터 얻은 결과가 실험결과 보다 항상 적음을 알 수 있다. 이것은 실험중에 발생할 수 있는 동적(Dynamic)요인 들로 인해 크랙 선단에 더 큰 에너지가 전달되었기 때문으로 분석 된다.

그림 7은 오목한 롤 형상을 사용하여 에지부에 압하가 많이 발생하도록 한 시험압연 실험결과 및 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 롤이 오목할 경우는 폭 에지부가 압하가 많이 발생하므로 이 부분의 신장량이 커져 판의 에지 웨이브가 발생하고 결과적으로, 에지부에는 압축응력이 걸리고 센터부

에는 인장응력 발생하게 된다. 실험결과에서 보면, 에지부에 압축응력이 걸리므로 초기 가공되어진 노치가 압연 중에 닫혀진 것을 알 수 있다.

웨이브가 작용하는 에지 부위에는 길이방향 압축응력이 작용하므로 초기에 가공되어 있는 노치를 밀폐시킬려는 응력이 작용하게 된다. 확대된 노치 부위의 실험결과 사진과 유한요소해석 결과로부터 확연히 이러한 효과를 관찰할 수 있다. 실험결과에서는 초기 노치의 간극(0.5mm)이 거의 밀접하게 붙어 있는 정도로 나타났지만, 유한요소해석에서는 접혀지는 정도까지 과도하게 나타나고 있다. 이것은 실제 압연시험에서는 소재의 압연방향 길이가 길지만 해석시에는 초기 노치 좌우 1쌍을 포함하는 아주 짧은 압연길이에 대해서만 해석하기 때문인 것으로 사료된다.

### 4.3 광폭 실제 압연 사이즈에서의 에지크랙 예측

실제 압연공장에서 생산되는 실리콘 강관의 폭은 1000mm 전후로 초기 소재 판 두께인 2mm에 비교해서 두께 대 폭 비 차이가 현저하게 크기 때문에 엄청나게 많은 격자(Mesh)를 해석시에 수반하게 된다. 또한, 롤이 소재에 가하는 압력분포가 폭 방향으로 다르게 나타나고, 롤 끝단에 벤더(Bender)가 장착되어 판 단면 형상을 제어하기 때문에 폭 방향 변형 기하학을 설정하기가 상당히 어려운 점이 있다(Ginzburg, 1989; Roberts, 1978).

실제 압연 사이즈의 소재 해석시 어려운 점을 고려하여 그림 8과 같은 해석모델을 제안하였다. 압연기에 들어오는 소재의 형상과 별도의 해석을 통해 알려진 롤 갭 형상이 주어지면, 롤을 폭 방향으로 구획설정(Sectioning)을 하여 선형 형상(Line segment)으로 모델링하는 것이다. 롤의 형상이 급격한 부분은 선형 형상의 수를 늘리고, 이 부분에 해당되는 소재의 격자도 늘여서 해석의 정도를 높일 수 있다.

그림 9는 강관에 초기크랙이 존재할 경우 압연후에 얼마

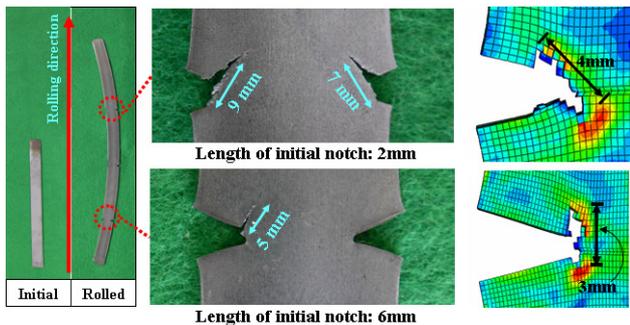


그림 6 볼록한 롤 형상을 사용한 시험압연 및 FE해석 결과

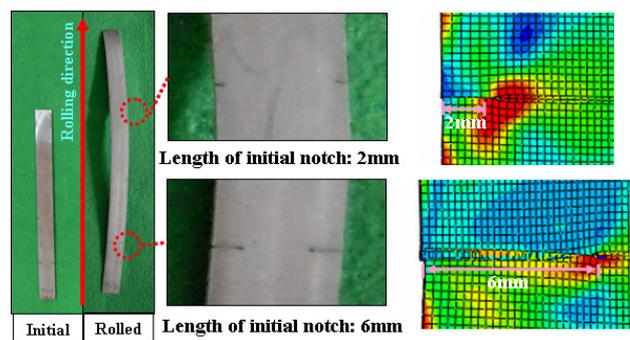


그림 7 오목한 롤 형상을 사용한 시험압연 및 FE해석 결과

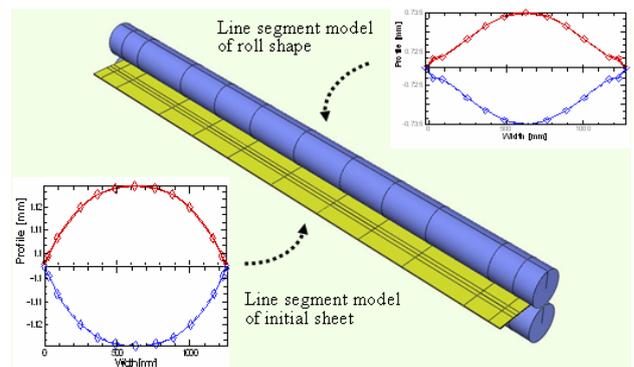


그림 8 광폭 실제 압연 사이즈에서의 판과 롤의 해석모델

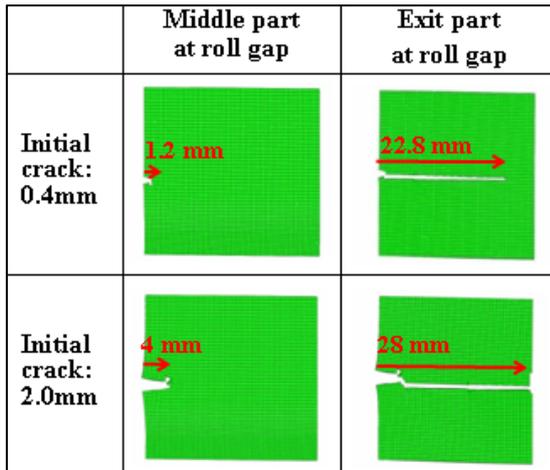


그림 9 초기크랙 길이에 따른 롤갭에서의 크랙성장

정도의 크랙이 성장할 것인지에 대한 해석 결과이다. 초기크랙 길이에 따른 크랙 성장양을 고찰해 보면, 크랙길이가 작을수록 성장된 길이도 같이 작아지는 것을 알 수 있다. 초기크랙 길이가 클수록 폭 방향으로 발생하는 응력 불균형 분포의 영향을 받는 부분이 증가하여 크랙을 성장시키는 에너지가 더 증가하기 때문일 것이다.

초기크랙 크기와 관계없이 에지크랙 성장은 크게 2단계로 이루어지는 것을 그림 9를 통해 알 수 있다. 즉, 롤갭 중심부에서의 크랙성장과 롤갭 출측부에서의 강판 감기 인장력(Reel tension)에 의한 크랙성장이 그것이다. 크랙 성장 길이 측면에서 볼 때, 롤갭에서의 크랙성장 보다 롤갭 출측부 인장력에 의한 크랙성장이 훨씬 더 큼을 관찰할 수 있다. 이것은 롤갭에서는 유효응력( $\bar{\sigma}$ )에 비해 평균 팽창 수직응력( $-p$ )이 적고(즉, 수직응력 강도( $\eta$ )가 적음), 또한 유효 소성 변형율이 완전히 커지지 않았기 때문에 파손에 도달하는 요소가 적는데 반해, 롤갭 출측부에서는 출측 인장력으로 인해 팽창 수직응력이 유효응력에 상대적으로 큰 비중을 차지하고(즉, 수직응력 강도( $\eta$ )가 큼), 압연이 완료된 시점이므로 유효 소성변형율이 크기 때문에 이 위치에서 크랙이 크게 성장하는 것으로 나타난다.

그림 10은 초기크랙 길이가 0.4mm 인 경우에 대해 출측 강판 감기 인장력의 크기를 증가시킴에 따른 크랙성장의 거동을 나타낸 것이다. 출측 인장력이 증가함에 따라 롤갭 중심부에서도 롤갭 출측부에서도 모두 크랙성장의 길이가 증가함을 알 수 있다. 롤갭 중심부보다도 롤갭 출측부에서 인장력 증가에 따른 크랙성장의 길이 증가 효과가 더 확연하게 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 롤갭 중심부에서는 압연력의 영향으로 출측 인장력 증대의 효과가 크게 작용하지 않지만, 롤갭 출측부에서는 직접적으로 출측 인장력의 영

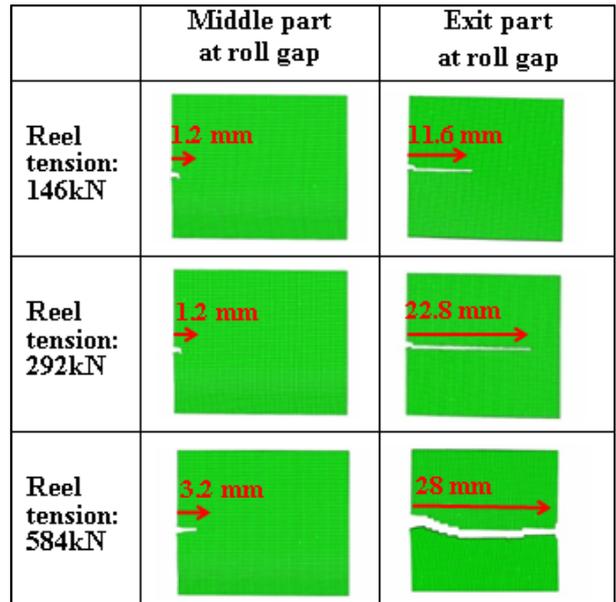


그림 10 출측 인장력에 따른 롤갭에서의 크랙성장

향 범위 내에 있기 때문일 것이다.

롤갭 중심부에서의 크랙진전을 좀 더 관찰해 보면, 표준 인장력(292kN) 이하에서는 롤갭 중심부의 크랙성장 길이에 미치는 인장력 크기의 영향이 거의 없고, 인장력이 표준이상으로 과도해 지면 롤갭 중심부 내의 크랙 성장에도 영향을 미치는 것으로 파악된다. 표준 이하의 인장력 범위 내에서는 압연하중의 영향이 지배적이므로 롤갭 중심부의 크랙 길이는 압연하중에 의해 일정량 이상으로 성장하고, 롤갭 출측부의 인장력에 의해 가해진 인장력 크기에 상응하는 크랙 성장이 발생하는 것으로 파악된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 실리콘 강판 압연시에 강판 에지에 발생하는 크랙을 정량적으로 평가하기 위한 유한요소해석 방법을 제시하였다. 본 방법은 손상역학에 기초하여 손상의 개시 및 성장을 예측하고 성장이 완료된 시점에서 크랙이 진전되는 길이 및 형상을 정량적으로 계산한다. 먼저, 본 방법의 정확성을 검증하기 위해서 시험압연기에 초기 노치가 가공된 협폭 판재를 압연하였다. 실험시 발생하는 크랙의 방향 및 길이를 측정하고 같은 조건하에서 본 유한요소방법을 적용하여 예측하였다. 실험시 발생하는 불확실 요인은 해석조건에 반영하기 힘들기 때문에 이로 인한 오차는 존재하지만, 크랙의 방향과 길이 측면에서 실험과 유사한 경향을 보였다.

실제 광폭의 실리콘 강판 압연생산에서 발생하는 공정조건에 따른 에지크랙 발생거동을 분석하기 위해서 초기 강판재

의 형상 및 물의 형상을 고려한 모델을 개발하고 이를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 초기 강판재 에지에 있을 수 있는 초기크랙 크기에 따른 크랙 해석결과 초기크랙 길이가 클수록 압연중에 성장하는 크랙 길이가 더 큼을 알 수 있었다. 또한 압연기 출측에 있는 강판 감기 인장력이 크면 클수록 압연중에 발생하는 크랙 성장 크기가 크게 상승함을 알 수 있었다. 크랙 성장은 압연중에 롤갭 중심부에서도 발생하지만 롤갭 출측 부위에서 더 크게 성장하고 특히, 출측 강판 감기 인장력이 클 경우에는 더욱 큰 비중을 차지한다.

본 연구를 통해서, 실리콘 강판 에지크랙 예측능력 확보로 공정조건 변화에 따른 에지크랙으로 인한 강판 파단 압연 불량률을 분석할 수 있다. 또한, 이를 기반으로 에지크랙으로 발생하는 실리콘 강판의 압연 중단 시간을 감소함으로써 단위 시간당 생산량의 실질적 개선에 크게 이바지 할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 POSCO의 지원(과제코드: 2008X024)에 의해 수행된 과제 내용의 일부를 정리한 것입니다. 첫 번째 저자는 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- Abaqus® Version 6.7-2** (2007) User Manual, Volume III: Materials.
- Espenhahn, M., Giermann, G.** (1988) Modernization of A Cold Rolling Mill for High-alloy Si Strips, *Metall. Plant Technol.*, 11, pp.70~76.
- Ginzburg, V.B.** (1989) Steel-Rolling Technology: Theory and Practice, Marcel Dekker, New York and Basel.
- Hilbert, H.G., Roemmen, H.J., Boucke, K.E.** (1976) MKW Cold Mill - Rolling Silicon Steel Strip, *Iron and Steel Engineer*, pp.25~31.
- Hooputra, H., Gese, H., Dell, H., Werner, H.** (2004) A Comprehensive Failure Model for Crashworthiness Simulation of Aluminium Extrusions, *Int. J. Crashworthiness*, 9, pp.449~464.
- Lemaitre, J.** (1996) A Course on Damage Mechanics, Springer, Berlin.
- Nishiura, N.** (1998) Fundamental Study on Edge Crack Occurrence in Cold Rolling, *Proc. Current Advances in Materials and Processes, Program of the 136th ISIJ Meeting, Sept. 28-30*, pp.1000.
- Roberts, W.L.** (1978) Cold Rolling of Steel, Marcel Dekker, New York and Basel.