

냉간압연에서 Edge-cracking 발생 예측에 관한 연구

손영기¹, 이상호², 이종빈³, 이성진³, 김병민[#]

Prediction of Edge-cracking Generation in Cold Rolling

Y. K. Son, S. H. Lee, J. B. Lee, S. J. Lee, B. M. Kim

Abstract

The rolling of flat slabs or sheet metal is probably the most advanced technique of metalworking technology. In spite of this very intensive activity, the problem of edge cracking has not been resolved. Although edge cracking is a major industrial problem, relatively little well-documented experimental work has been published on subject. Despite the paucity of exact experiments, it is reasonably certain from published data that three causes contribute to its occurrence; (1) limited ductility of the rolled material (2) uneven deformation at the edges and (3) variations in stresses along the width of the rolled material, particular near the edge. The present study was carried out to show the generation of edge cracking using ductile fracture criteria and FE-simulation. The validity of simulated results was verified by rolling experiments of steel strip.

Key Words : Cold rolling(냉간압연), Tandem mill(텐덤 압연기), Edge-cracking(엣지 크랙), Ductile fracture(연성 파괴), FEM(유한요소법)

1. 서론

냉간 압연 설비의 운전속도가 대단히 빠르므로 판 두께 변동의 자동감시 및 관련 신호를 고속수집 및 처리하여 이상발생을 조기에 운전자가 감시 가능하게 함으로써, 항상 설비의 관리관찰이 가능하다.

압연공정은 2 개의 원통형 롤 사이에 일정 재료를 통과시켜 재료의 형상을 변형시키는 기본적인 소성가공공정이다. 판재 및 선재 등의 간단한 형상뿐만 아니라 롤의 형상에 따라서 좀더 복잡한 형상까지 성형이 가능하며, 무엇보다 연속적으로 성형이 가능한 것이 특징이다. 현재 제철업계의 최근 추세는 염산을 이용하여 판 표면에 산화 스케일을 제거하는 산세와 압연기를 연속화하여

고속화하는 경향을 가짐에 따라 연연속 PCM(Picking & Cold Rolling Mill)으로 설치하여 운전하고 있다. 그러나 냉간 압연에 있어서 소재의 유동 불균일, 연성감소, 폭 퍼짐, 압연롤의 탄성변형에 의한 크라운 등에 의하여 압연 후 판 끝 단 부에서 엣지 크랙(Edge cracking)이 발생하게 된다[1, 2]. 이는 연속압연공정에서 크랙 크기가 성장하게 되어 판 파단의 결함으로 나타나게 된다[3]. 판 파단의 발생은 롤과 롤 사이에 걸려있는 판을 제거하고 다시 통판을 거쳐 다시 압연할 수 있는 상태로 설정하게 되는데 이때 사용되는 인력, 자원 및 시간적인 손실을 입히게 된다. 따라서 판 파단의 발생을 저하시키기 위하여 장치의 제어와 압연 시 공정의 관찰이 필요로 하게 된다.

본 논문에서는 연속냉간압연시 패스가 진행됨에 따라 나타날 수 있는 엣지부에서의 크랙의 발생을 강소성 유한요소법을 이용하여 냉간압연공정을 수행하고, 6 단 압연기의 롤 크라운(Roll crown)을 예측하여 판 엣지부 변형불균형, 연성감

1. PNU-IFAM JRC
2. 부산대학교 정밀가공시스템공학과
3. POSCO 기술연구소 압연공정 연구그룹
교신저자:부산대학교 기계공학부,
E-mail:bmkim@pusan.ac.kr

소에 대하여 예측하였으며, 판 압연시 엣지부의 데미지(Damage)값을 예측하였다. 그리고 실제 냉간 압연 공정에서 발생하는 엣지 크랙을 유한요소 해석 결과와 비교하였다.

2. 해석 조건

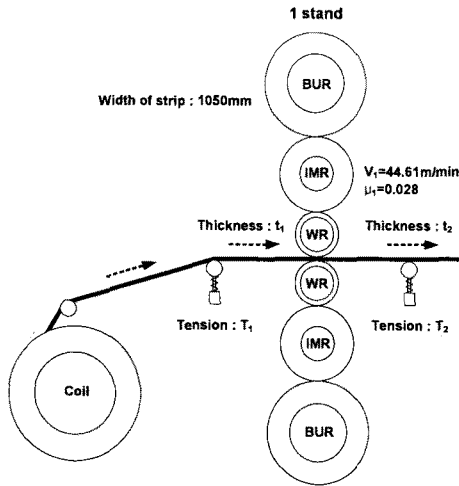


Fig. 1 Lay out of tandem-mill for cold rolling

Fig. 1은 냉간압연 TCM(Tandem cold mill) 설비를 나타내는 그림이다. 압연 방식은 6단 압연기를 사용하였고, 장력은 각각의 스탠드 전후방에서 조절하는 방식이다. 그리고 연속적으로 압연이 진행되는 방식을 취하고 있다.

본 논문에서는 Critical value 를 구하기 위하여 실험과 유한요소법을 이용하여 결정하였다. 파괴 기준수식으로 Cockroft & Latham 의 연성파괴수식을 사용하여 실공정과 비교하였다.

$$\int_0^{\epsilon_f} \frac{\sigma_{\max}}{\sigma} d\epsilon = C > C_c \quad (2)$$

ϵ_f 는 파괴시 유효변형률, σ_{\max} 는 주인장응력의 최대치, σ 는 유효응력, ϵ 는 유효변형률, C 는 수정된 Cockroft-Latham 의 수식에 의한 데미지값을 나타낸다[4].

본 논문에서는 인장시험을 통하여 C_c 를 결정하였다. 수정된 Cockroft-Latham 식을 계산하기 위하여 강소성 유한요소해석을 수행하였다. 실공정에서 발생하는 크랙의 발생을 통하여 유한요소해석과 비교하여 C_c 를 결정하였다. 식 (2)에서 C_c 는 0.193 에 도달하면 파괴가 일어난다고 가정하였다.

3. 해석 결과

3. 1 압연롤 크라운

냉간압연에서 판 형상 및 롤 크라운은 압연판재의 생산 및 치수정밀도에 있어서 매우 중요한 것으로 압연판의 정밀도 향상을 위하여 많은 연구가 계속되었다. 특히 압연시 발생하는 엣지 크랙 혹은 센터 크랙(Center crack) 등은 단순히 제품 품질뿐만 아니라 판 파단, 진동 등의 압연 불안정에 관련되어 양호한 형상으로의 압연하는 것이 생산 기술상의 기본적인 것으로 말할 수 있다.

본 논문에서는 박판 압연공정에서 사용되고 있는 텐덤압연기의 압연하중에 의한 롤 크라운을 유한요소해석을 이용하여 계산하고 이를 엣지 크랙을 예측하는데 적용하였다. Table 1 은 냉간압연기의 압연롤 탄성해석을 위한 조건을 나타낸다. 롤의 탄성계수(E)는 220GPa, 푸아송비는 0.3, 밀도는 7.86E-06kg/mm³ 으로 설정하였다[5, 6]. 압연기는 6 단 압연기이며, 압연롤은 크라운 발생 억제롤

Table 1 Condition of 6 high-mill for strength analysis

Condition	Value	
Rolling type	6 H-IMR shift	
Modulus of elasticity of roll (GPa)	220	
Poisson's ratio of roll	0.3	
Density of roll (kg/mm ³)	7.86E-06	
Friction coefficient	0.03	
Shifting length of IMR (mm)	375	
Bending force (ton)	F _{WR}	50
	F _{IMR}	75

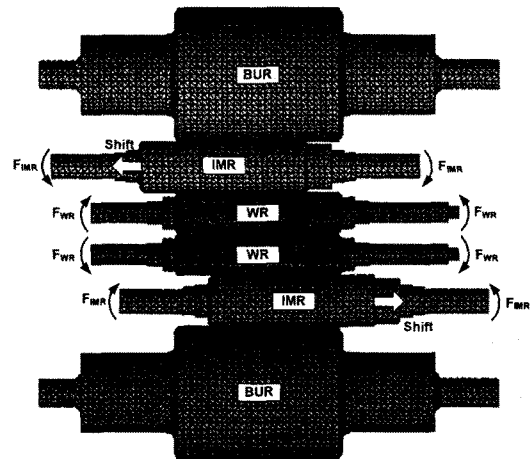


Fig. 2 FE-model of 6 high-mill for strength analysis

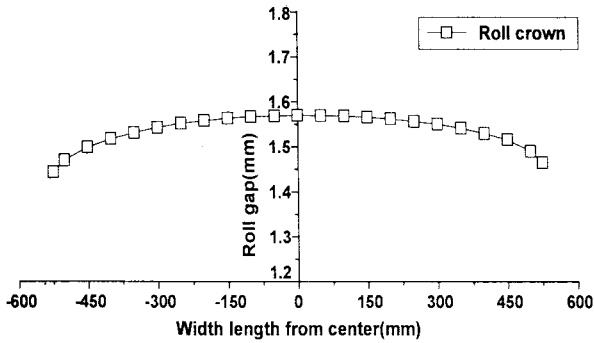


Fig. 3 Roll crown of work-roll in cold rolling

위하여 중간롤(IMR)이 중심에서 시프팅하여 워크롤(WR)에 발생하는 크라운을 줄인다. 또한 워크롤과 중간롤의 베어링 부에 벤더량을 주어 워크롤의 크라운을 억제하는 형태를 가지고 있다[7].

Fig. 2 는 압연롤 크라운을 계산하기 위한 탄성 해석 모델을 나타낸다. 중간롤의 이송량은 375mm로 상하 반대로 이송된다. 벤더량은 워크롤 50ton, 중간롤 75ton 을 그림과 같은 방향으로 설정하였다. 냉간압연공정에서 발생하는 압연하중값을 압연롤 탄성해석 모델에 적용하여 롤 크라운을 구하였다. Fig. 3 은 냉간 압연에서 발생하는 워크롤의 롤 크라운을 나타낸 결과이다. 압연롤의 최대 변형은 폭 중심에서 1.566mm, 폭 끝에서 1.449mm로 나타났다. 박판 냉간압연에서 압연롤의 벤딩으로 인하여 엣지부에 변형이 증가하게 되고 응력이 집중된다.

3. 2 냉간 압연 해석 결과

일반적으로 냉간압연에서의 엣지 크랙은 압연판의 불균일한 변형, 압연시 판의 연성감소 그리고 판 폭 퍼짐에 의한 엣지부의 변형에 의하여 발생한다. 또한 박판 냉간압연에서 압연롤의 벤딩으로 인하여 엣지부에 변형이 증가하게 되고 응

Table 2 Condition of rolling process for edge crack

Condition	Value	
Roll diameter(mm)	400	
Width length (mm)	1050	
Flow stress (MPa)	$\sigma = 9.81 \times 100.5 (0.001 + \epsilon)^{0.113}$	
Rolling pass (mm)	$t_1=2.3$	$t_2=1.438$
Roll speed (m/min)	$V_1=44.61$	
Tension (MPa)	$T_1=56.81$	$T_2=142$
Friction coefficient	$\mu_1=0.028$	

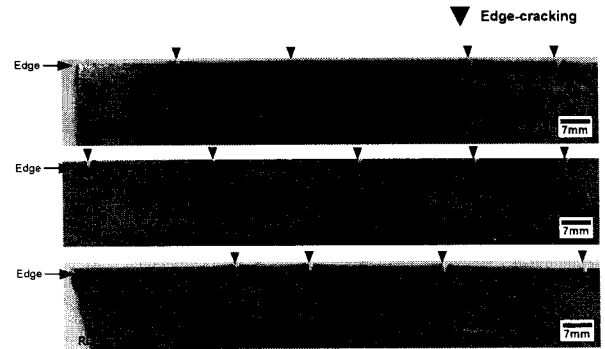


Fig. 4 Edge-cracking after cold rolling

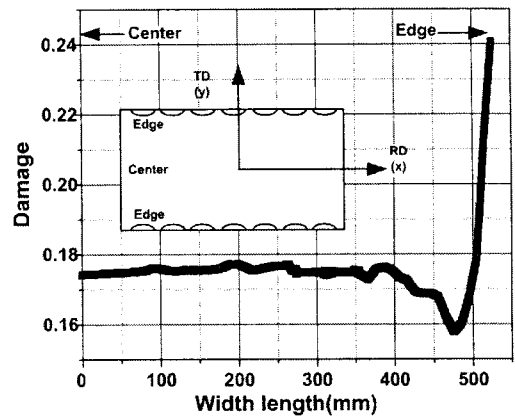


Fig. 5 Distribution of damage in width direction

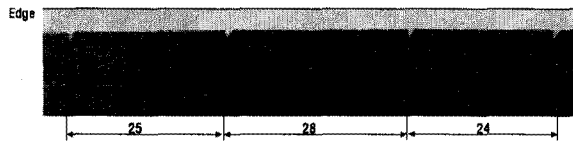
력이 집중된다. 이에 따라서 냉간 압연 공정 중에 판 엣지부에서 크랙이 발생하게 된다.

Table 2는 엣지 크랙의 해석 조건을 나타낸다. 크랙의 발생은 실험을 통하여 확인하였다. 장력, 속도, 마찰계수는 실공정조건과 동일하게 설정하였으며, 판 폭은 1050mm, 압연롤의 직경은 400mm로 설정하였다.

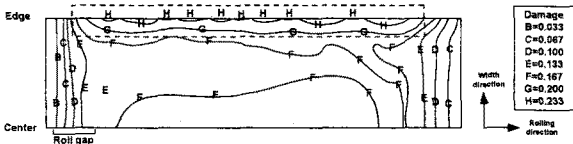
Fig. 4는 실압연공정에서 판 엣지부에 발생된 크랙을 나타내는 그림이다. Fig. 5는 판 폭 방향에서의 데미지 분포를 나타내는 그림이다. 앞선 결과에서 엣지부에서 데미지 분포 급격하게 상승하는 것을 확인할 수 있었으며, C_c (0.193) 이상의 값을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 엣지 부위에서 미소 크랙이 발생하기 시작하여 엣지 크랙으로 발전한다고 판단할 수 있다.

4. 엣지 크랙 발생

압출과 같은 연속적인 공정은 중심부에서 중심부 균열(Internal cracking) 과 같은 크랙이 발생되



(a) Edge crack in rolling test



(b) Distribution of damage in CAE analysis

Fig. 6 Generation of edge-crack in rolling process

고 일정한 간격을 두고 연속적으로 크랙이 발생된다. 본 논문에서는 압연공정 또한 연속적인 공정으로 엣지부의 크랙 발생과 동시에 연속적인 패턴을 가질 것으로 예상하여 해석을 수행하였다. 앞선 결과에서 엣지부에서 크랙이 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 연속적인 압연공정에서 크랙의 발생이 연속적으로 나타나는지 확인이 필요하다. Fig. 6(a)는 실압연공정에서 판의 엣지부에 발생하는 엣지 크랙을 나타내는 그림이다. 엣지 크랙은 일정한 간격을 두고 발생하는 것을 확인할 수 있었으며 이때의 크랙의 간격은 24~28mm로 나타났다. Fig. 6(b)는 CAE 해석 결과로 엣지부의 데미지 분포를 나타내는 그림이다. 엣지 부위에서 C_c 보다 다소 높은 0.233 이상의 데미지값이 일정한 패턴을 가지고 나타나는 것을 확인하였다. 이때의 크랙 발생 예상부의 간격은 22.4~26.6mm로 나타났다. 이는 실제 실험값에서의 간격과 유사한 것으로 나타났다.

5. 결론

냉간압연에서의 엣지 크랙은 연속 압연공정에 있어서 판 절판의 결함을 가져온다. 본 연구에서는 엣지 크랙의 원인을 실험과 해석결과와 비교하여 분석하였다.

(1) 연성과괴이론을 이용하여 압연시 판의 엣지부의 크랙을 예측하기 위하여 C_c 값을 Cockroft & Latham의 수식과 실험을 이용하여 결정하였다.

(2) 냉간압연시 압연하중에 의한 6단 압연롤의 탄성변형 즉, 롤 크라운을 결정하였다. 해석결과 중심부가 볼록한 형상의 크라운이 발생하여, 압연

시 판의 엣지부의 변형이 더욱 큰 것을 예측할 수 있다.

(3) 냉간압연시 엣지부에서 C_c 를 초과한 곳에서 크랙이 발생된다. 실제 냉간 압연공정에서 발생하는 엣지 크랙과 CAE해석결과에서 보는 바와 같이 엣지 크랙은 일정한 패턴을 가지고 발생하는 것을 알 수 있다. 압연시 압연롤의 크라운발생과 불균일한 변형에 의하여 엣지부에서의 데미지 분포가 높으며 이에 따라서 엣지 크랙이 발생하는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 POSCO 석좌교수 연구지원과 산업자원부의 산업혁신기술개발사업 중 "중기거점기술개발사업"의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] J. A. Schey, 1966, Prevention of Edge Cracking in Rolling by Means of Edge Restraint, Journal of the institute of metals, Vol. 94, pp.193-100.
- [2] Bradley dodd, Philip boddington, 1980, The causes of edge cracking in cold rolling, Journal of mechanical working technology, Vol. 3, pp. 239-252.
- [3] Yu Hai-liang, Liu Xiang-hua, Li Chang-sheng, Y. Kusaba, 2006, Behavior of transverse Crack on Slab Corner During V-H Rolling Process, Journal of iron and steel research international, Vol. 13, No. 6, pp.31-37.
- [4] H. Takuda, K. Mori, N. Hatta, 1999, The application of some criteria for ductile fracture to the prediction of the forming limit of sheet metals, Journal of materials processing technology, Vol. 95, pp. 116-121.
- [5] K. Lange, 1985, Handbook of metal forming, McGraw-Hill Book Company, Chapter 12.
- [6] P. S. Timoshenko, N. J. Goodier, 1934, Theory of elasticity, McGraw-Hill, pp.65-164.
- [7] M. Knapinski, 2006, The numerical analysis of roll deflection during plate rolling, JMPT, Vol. 175, Issues 1-3, pp.257-265.