

6 단 압연을 크라운을 고려한 동극박 냉간 압연 패스스케줄 설계

Design of Rolling Pass Schedule in Copper Thin Foil Cold Rolling According to Roll Crown of 6 High Mill

이상호¹, 옥순영², 황인엽², 황원재², ✉김병민³
Sang Ho Lee¹, Soon Young Ok², In Youb Hwang², Won Jea Hwang² and ✉Byung Min Kim³

1 부산대학교 정밀가공시스템 (Precision Manufacturing Systems Division, Pusan Univ.)

2 ㈜ 풍산 온산공장 (ONSAN plant, POONGSAN corporation)

3 부산대학교 기계공학부 (Mechanical Engineering, Pusan Univ.)

✉ Corresponding author: bmkim@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-3074

Manuscript received: 2008.7.10 / Revised: 2008.8.22 / Accepted: 2008.8.28

During the plate and foil cold rolling process, considerable values of the force of material pressure on the tool occur. These pressures cause the elastic deformation of the roll, thus changing the shape of the deformation region. Rolled copper foils should be characterized by a good quality and tight dimensional tolerances. Because of automation that is commonly implemented in flat product rolling mills, these products should meet the requirements of tightened tolerances, particularly strip thickness, and feature the greatest possible flatness. The shape of the roll gap is influenced by the elastic deformation of rolls parts of the rolling process affected by the pressure force. However, to control roll deformation should be difficult. Because the foil thickness is very thin and the permissible deviations in the thickness of foil are small. In this paper, FE-simulation of roll deformation in thin foil cold rolling process is presented.

Key Words: Roll Elastic Deformation (롤 탄성 변형), Cold Rolling (냉간 압연), Copper Foil (동극박), FEM (유한요소법), Rolling Pass Schedule (압연 패스스케줄)

1. 서론

전자제품의 각종 부품을 연결하거나 지지해주는 역할의 인쇄회로기판 PCB (Printed Circuit Board)는 전자제품의 소형화, 고밀도화, 굴곡성 있는 디자인으로의 변화에 따라 소형화와 고밀도화가 가능하며 반복적인 굴곡에 높은 내구성을 갖는 FPCB(Flexible Printed Circuit Board)로의 대체가 이뤄지고 있다.

FPCB는 전자기기의 신호 및 전기전달의 역할을 담당하는 소재로 박판의 구리소재를 주로 사용한다. 그리고 FIOG(Flexible Input/Output Gate)의 핵

심소재 및 리튬이온 전지의 음극집전체로도 사용되고 있는 등, IT 산업과 전기 전자 부품소재 산업의 필수 및 핵심 원소재라고 할 수 있다.

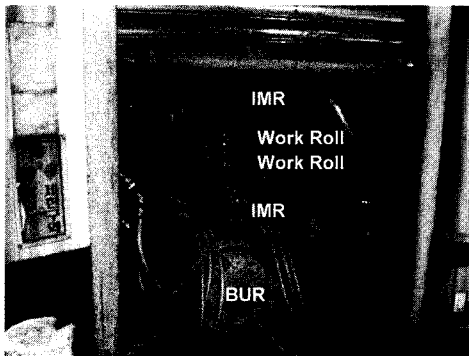
그러나, 현재 전기 전자제품용 동박판은 압연 동박과 전해동박이 용도 및 기능면에서 양분하고 있다. 전해동박의 경우 대부분 Rigid 기판용 도전층에 사용되고 있으며 LCD 패널 및 리튬이온전지의 집전체소재로도 사용된다. 그러나 하드디스크 및 10 μm 급 극박판에 있어서, FPCB 및 휴대폰 Hinge 부는 전량 압연동박으로 대체되고 있다. 또한 휴대용 전자기기의 시장증가, 전자기기의 고용량화, 초소형화에 따라 기계적 특성이 우수한 동

박판의 수요가 급증하고 있는 추세이다.

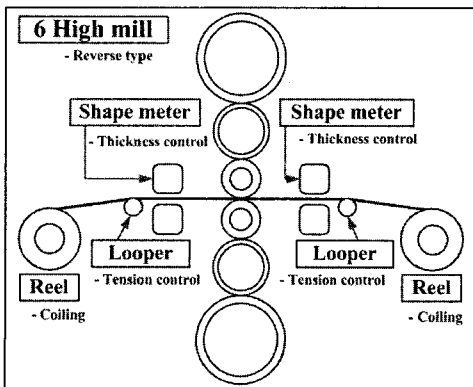
한편, 리튬이온전지 집전체의 경우, 24 μm 급의 박판은 전해동박이 대부분을 점유하고 있으나, 고온연신을 및 양호한 굴곡성의 요구에 따라 두께가 감소할수록 압연 동박판으로 전환되고 있는 추세이다. 이에 따라 박판압연에 대한 관심이 커지고 있으며 Furukawa¹ 와 Sakamoto²에서는 극박 압연에서의 판 형상 등에 대하여 기술하고 있다.

그러나 압연 동박의 경우 대부분 일본 등에서 수입하고 있는 실정이며, 일부 국내에서 생산되고 있는 제품 또한 품질면에서 떨어져 고품질의 압연 동극박의 국내 생산이 시급하다.

따라서 본 논문에서는 폭 600mm 이상 두께 24 $\pm 1 \mu\text{m}$ 급의 압연 동박의 품질을 향상 시키기 위하여 압연 공정시 6 단 압연기 압연 롤의 탄성 변형을 CAE 를 통하여 예측하여 동극박의 폭 방향 크라운(Crown) 현상을 줄일 수 있는 공정 조건을 적용하였다. 그리고 설정된 공정 조건에 따라서 냉간 압연시험 생산을 수행하였다.



(a) FM9 rolling equipment



(b) Structure of FM9

Fig. 1 6 High UC-Mill equipment

2. 냉간 압연 공정 조건

2.1 냉간 압연기의 구조

Fig. 1 은 본 논문에 적용된 6 단 압연기를 나타내는 그림이다. 압연기는 6High UC-Mill 로 압연롤이 수직으로 나열되어있는 타입이다. 그리고 압연 방식은 리버스 타입(Reversing type)이며, 작업 가능한 판의 폭은 380~650mm 이다. 압연 가능 하중은 400ton 이며 최대 압연 속도는 700m/min 이다. 압연중 판 형상을 실시간으로 제어할 수 있는 웨이퍼 메타(Shper meter), 전후방 장력을 제어할 수 있는 루퍼(Looper) 그리고 패스벨 코일링(Coiling)이 가능한 릴(Reel)로 구성되어 있다.

2.2 해석 모델 및 물성치

Table 1 은 해석에 사용된 압연 공정 조건을 나타 내었다. 압연롤 소재는 SKH-51 이며, 압연 소재는 판 폭 600mm 의 T/P copper 이다. 그리고 압연 속도는 100~700m/min 의 범위로 설정하였다.

Saeki,³ Wataru⁴ 및 Kim⁵는 실험 및 CAE 해석을 통하여 압연에서의 특성을 분석하였다. 본 논문에서는 압연롤의 탄성 변형 해석은 압연기의 형상이 상하 대칭인 것을 고려하여 위쪽 부분만을 해석에 적용하였다.

해석에 사용된 압연롤 소재의 탄성계수(E)는 205GPa 이며, 프야송 비(ν)는 0.3 으로 설정하였다.

본 논문에 사용된 압연재는 터프피치동(Tough pitch copper)으로써 Cu-99.9 wt%, O-0.04 wt% 및 미량 원소(P, Fe 등)이 화학 성분조성을 가진다. 터프 피치동의 경우 FPCB 의 요구 특성 중 우수한 전기 전도도를 만족하는 소재를 사용하였다.⁶

Fig. 2 는 터프피치동의 물성치를 나타내는 그림이다. 시험편의 두께 0.45mm 의 소재를 사용하였으며, 변형율 속도($0.001\sim 10\text{s}^{-1}$)의 범위에서 시

Table 1 Condition of cold rolling process

Condition	Value
Rolling type	6 Hi UC-Mill
Work roll size (mm)	$\Phi 140 \times W850$
IMR size (mm)	$\Phi 300 \times W890$
BUR size (mm)	$\Phi 630 \times W835$
Roll material	SKH-51
Rolling speed(m/min)	100~700

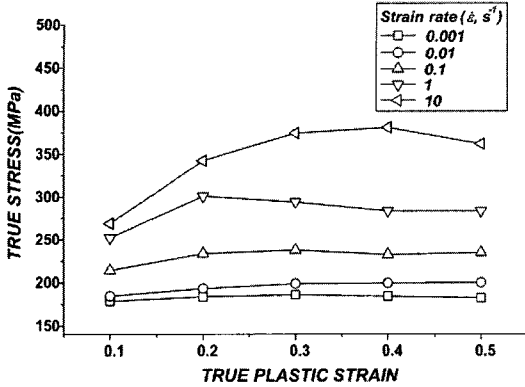


Fig. 2 True strain-stress curve (T/P copper)

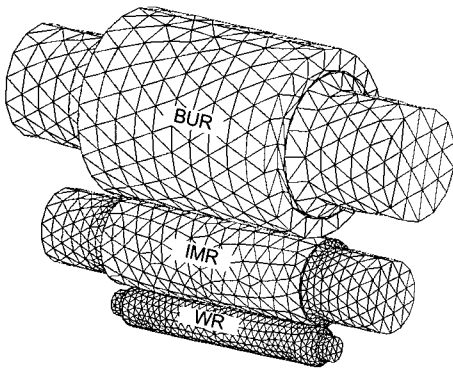


Fig. 3 CAE model for strength analysis in 6 high mill

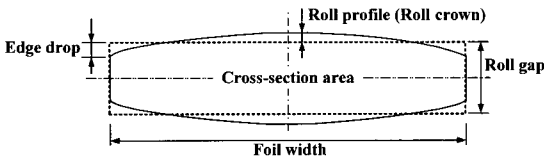


Fig. 4 Roll crown profile after rolling process

험을 수행하였다.

Fig. 3 은 냉간 압연에 6 단 압연롤의 탄성변형에 대한 영향을 확인하기 위한 해석 모델을 나타내는 그림이다. 압연기의 구조적 형상에 따라서 상하 대칭을 고려하여 상부만을 모델링 하였다.⁷⁻¹² 압연롤끼리의 마찰계수는 0.3 으로 설정하였다. 그리고 소재와 압연롤 사이의 마찰계수는 0.025 로 설정하였다.¹³

해석에 사용된 해석 프로그램은 MSC. Marc Mentat 2005 를 사용하였다.

2.3 롤 크라운에 의한 판 두께

Fig. 4 는 압연공정 이후 롤 크라운(Roll crown)에 의한 판 형상을 나타내는 그림이다. 롤 크라운은 통상적으로 중심부가 볼록한 형상을 가지고 있으며, 이에 따라서 본 연구에서는 롤 크라운에 의한 판 두께 공차를 식(1)에 나타내었다.

$$|C(x) - G(0)| \leq 1 (\mu m) \quad (1)$$

$C(x)$ 는 롤 크라운을 나타내고, $G(0)$ 은 설정된 롤 갭을 나타낸다. 따라서 $C(x)$ 와 $G(0)$ 의 차가 $1 \mu m$ 이 내로 설정하였다.

3. 해석결과

박판 냉간압연에서 초기소재의 두께는 $0.45mm$ 이며, 총 압하율은 94.67% , 최종두께 $24 \mu m$ 까지 압연을 수행한다. Table 2 는 초기 패스스케줄을 나타낸다 설정된 패스스케줄은 현장 경험 및 축적 데이터를 토대로 설정하였다.

최종패스 물집은 목표 두께 $24 \mu m$ 와 동일하게 설정하였으며, 초기 판두께는 $0.45mm$ 로 설정하였다. Fig. 5 는 최종패스에서 압연 속도에 따른 롤의 탄성 변형량을 나타내는 그림이다. 최종패스에서 압하율은 25% ($32 \mu m \rightarrow 24 \mu m$)로 동일하게 설정하였다. 압연롤의 탄성변형의 결과에서 압연 속도가 증가함에 따라 탄성 변형량이 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 6 은 판과 롤의 접촉부에서 두께 방향으로 위크롤 크라운을 나타내는 결과이다. 압연 속도가 증가함에 따라서 판의 중심부와 끝단부와의 편차가 큰 것으로 나타났다.

Table 2 1st Rolling schedule at cold rolling process

Pass	Roll gap=24 μm , Roll speed=300m/min		
	Thickness (μm)	Tension(kgf)	
		Back	Front
1	450→180	1400	1800
2	180→80	600	1000
3	80→50	300	350
4	50→32	300	330
5	32→24	300	310

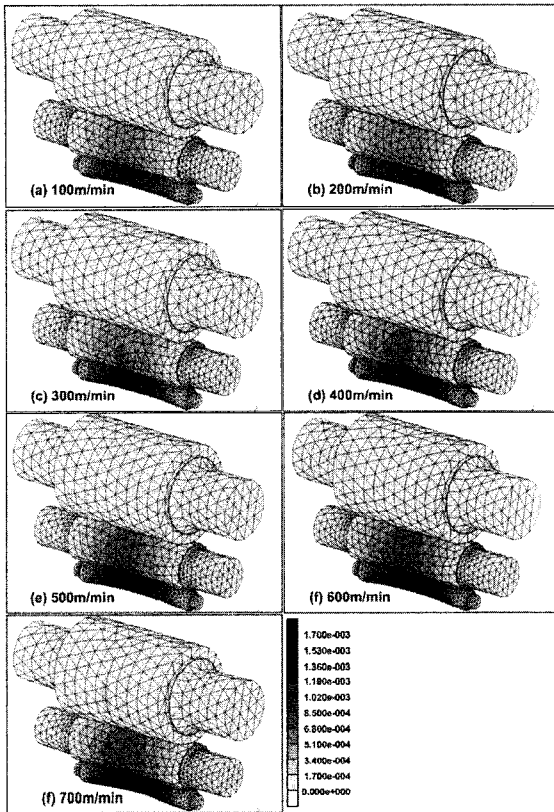


Fig. 5 Distribution of roll elastic deformation according to roll speed

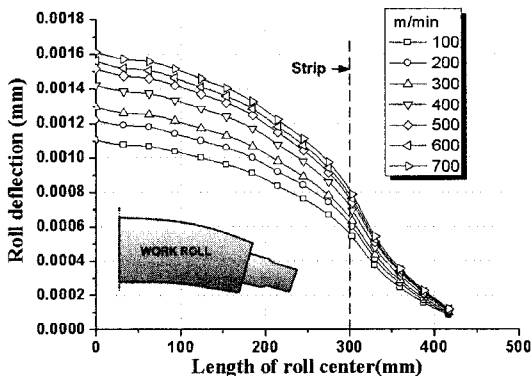


Fig. 6 Distribution of work roll crown along the roll speed in the region of contact with strip

Fig. 7 은 압연 속도에 따른 최대 크라운량과 압연 하중을 나타내는 결과이다. 결과에서 나타나는 바와 같이 압연 속도가 감소함에 따라 최대 변형량과 압연 하중값이 감소하고 판의 평탄도가 좋은 것을 확인할 수 있다.

그러나 압연롤의 탄성 변형이 1 μm 이상인 경우 목표 두께 $24 \pm 1 \mu\text{m}$ 를 만족할 수 없으므로, 모든 압연 속도범위에서 롤갭의 조절이 필요하다.

Table 3 은 최종패스에서 압연롤 탄성 변형을 고려하여 롤 갭을 수정한 압연 스케줄을 나타낸다. 초기 판 두께를 400 μm 로 줄여 총압하율을 94.25%로 90%이상으로 유지시켜 박판의 특성에 영향이 없게 조절하였다.

6 단 압연기에서 극박 압연을 수행함에 있어 속도를 최저로 낮추어도 롤 변형이 1 μm 이상이 발생하게 된다. 따라서 롤 변형을 고려하여 최종 패스에서의 롤 갭을 23 μm 로 수정하여 해석을 수행하였다. 압연속도는 생산성을 고려하여 300m/min로 설정하였다. 그리고 또한 최종 패스에서 전후방 장력을 300kgf 이하로 감소시켜 박판 압연에서 발생할 수 있는 질판의 영향을 감소시켰다.

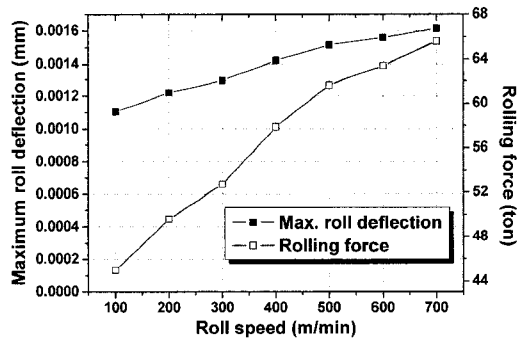


Fig. 7 Effect of maximum roll deflection and rolling force according to roll speed

Table 3 2nd Rolling schedule at cold rolling process

Pass	Roll gap=23 μm , Roll speed=300m/min		
	Thickness (μm)	Tension(kgf)	
		Back	Front
1	400→200	1200	1700
2	200→100	650	950
3	100→55	250	320
4	55→33	180	250
5	33→23	150	200

Fig. 8 은 각 패스별 압연롤의 탄성 변형에 의한 응력 분포를 나타낸다. 초기 두께 400 μm 에서 24 μm 로 압연된다.롤 변형은 2, 3, 4 패스에서 비교적 높게 나타났다.

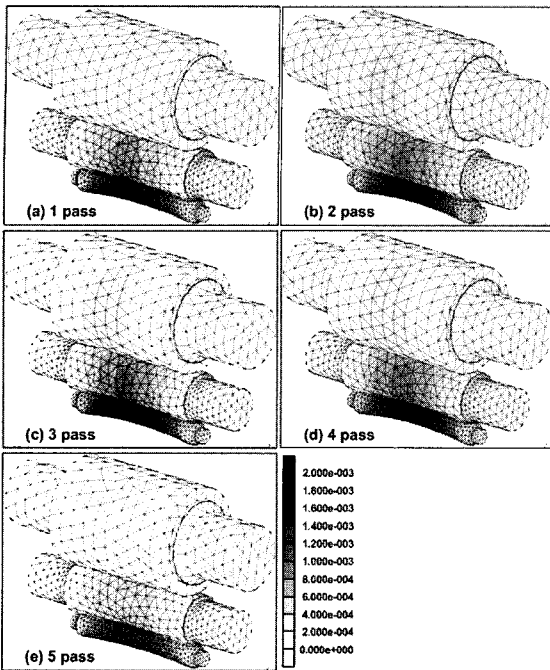


Fig. 8 Distribution of roll displacement according to pass toward the height of the roll assembly

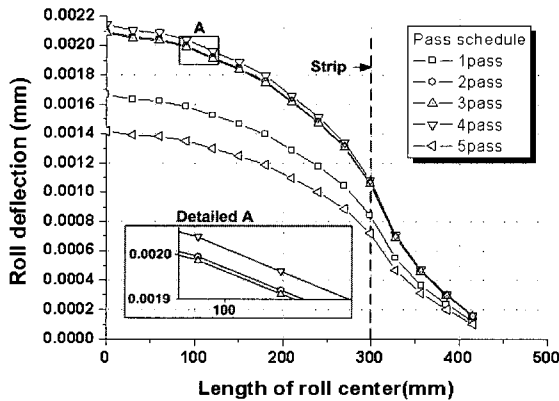


Fig. 9 Distribution of work roll crown along the pass schedule in the region of contact with strip

Fig. 9 는 각 패스에서 두께 방향의 워크롤 크라운량을 나타낸다. 롤 변형은 4→2→3→1→5 패스의 순으로 롤 중심과 판 끝 단 부에서 편차가 작아 짐을 확인할 수 있다. Fig. 10 은 패스별 최대 변형량과 압연 하중을 나타내는 그림이다. 롤 변형과 하중은 서로 비례하는 것으로 나타났다. 압연 하중이 압연롤의 탄성 변형에 영향이 큰 것을 확인할 수 있다.

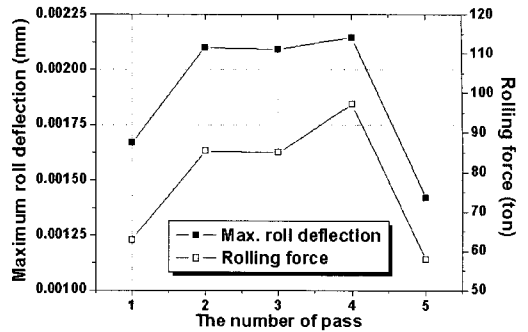
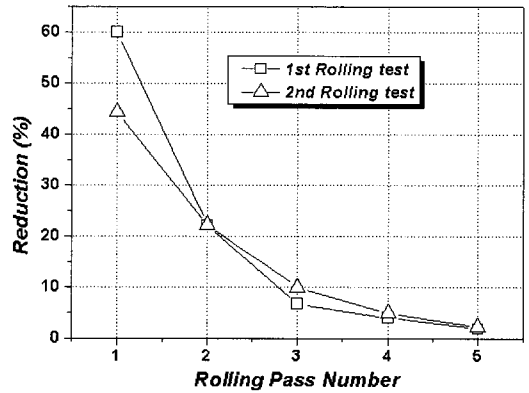
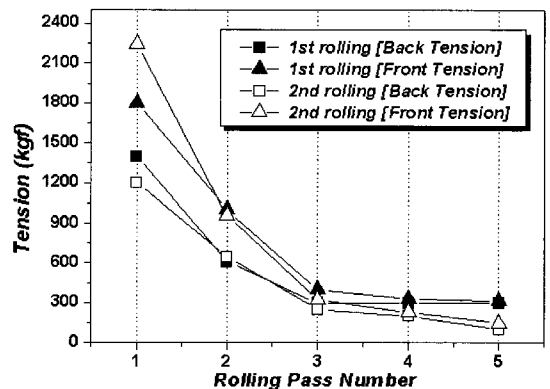


Fig. 10 Effect of maximum roll deflection and rolling force according to pass schedule



(a) Reduction ratio



(b) Back-Front tension

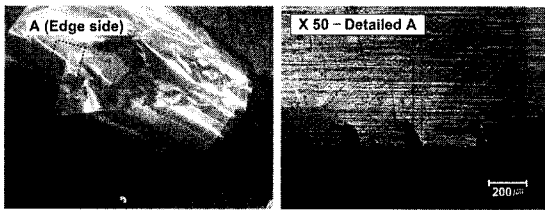
Fig. 11 Comparison of variables according to rolling pass number

Fig. 11 은 초기 패스스케줄(1st)과 수정된 패스스케줄(2nd)의 압하율과 전후방 장력을 비교한 그림이다. 압하율의 경우, 1st에서는 2nd에 비하여 1 패스에서 매우 높은 압하율이 설정되는 것을 확인

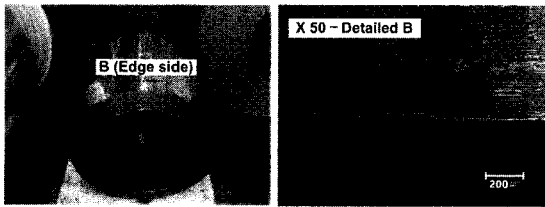
할 수 있다. 1 패스에서 가공경화가 더욱 많이 받은 1st의 경우가 2nd보다 질판의 위험이 더욱 큰 것을 예측할 수 있다. 그리고 전후방 장력에서 또한 1st보다 2nd가 더욱 낮은 장력분포를 설정한 것을 확인할 수 있다.

4. 박판 냉간 압연시험

Fig. 12 은 냉간압연 공정을 통한 24 μm 동극박 제품과 엣지(Edge)부의 광학현미경 사진을 나타낸다. 결과에서 보는 바와 같이 1st의 경우 최종 5 패스에서 압연시 엣지 크랙을 인하여 연속 질판이 발생하여 제품 생산이 불가능하였으나, 수정된 2nd의 경우 두께 24 μm 의 동극박을 생산할 수 있었다.



(a) 1strolling pass schedule (5pass)



(b) 2ndrolling pass schedule (5pass)

Fig. 12 Fabrication of 24 μm copper foil and edge shape

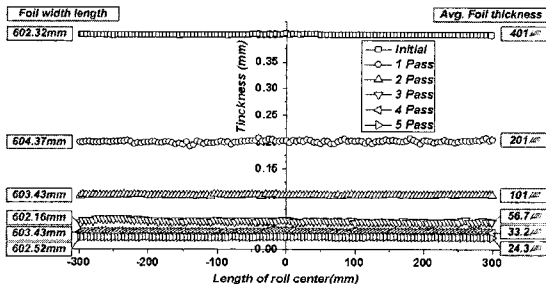


Fig. 13 Distribution of rolled copper foil thickness at width Direction

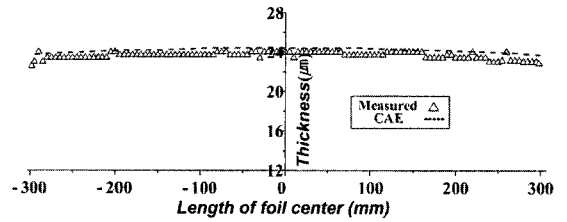


Fig. 14 Comparison of rolling test and CAE results

과도한 전후방 장력을 줄이고 패스별 압하량을 재설정하여 엣지 크랙의 방지하고 압연 공정 중의 질판을 방지할 수 있는 효과를 가져왔다.

Fig. 13 은 냉간 압연 후 패스별 폭 방향에서 판 두께를 나타내는 그림이다. 판 폭의 경우 600mm 이상을 확보할 수 있었으며, 두께 분포의 경우, 최종패스에서 목표 두께 24 \pm 1 μm 를 만족하는 것으로 나타났다.

Fig. 14 는 생산된 두께 24 μm 박판의 두께 분포를 CAE 해석과 시험 결과를 비교한 그림이다. 실제 압연 공정에서 발생하는 판의 형상과 CAE를 통하여 롤 변형을 고려한 판의 형상을 비교해 보면 CAE를 통한 결과가 다소 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 CAE를 통한 변형을 고려할 경우 판 두께 24.37 μm 로 압연 시험에서의 판 두께 24.3 μm 와 거의 일치함을 확인할 수 있다.

Table 4 는 패스별 제품의 물성치를 나타낸다. 초기 소재의 인장강도(Tensile strength, T.S)는 219.74MPa, 연신율(Elongation, El) 35%, 비커스 경도(Vickers hardness, Hv) 58.5Hv이며, 압연이 진행됨에 따라 인장강도와 비커스 경도는 점차 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 15 는 패스별 인장강도와 연신율의 변화를 나타낸 그래프이다. 24 μm 급 박판의 물성치는 인장강도 423.4MPa, 연신율 0.3%, 비커스 경도 127Hv를 가지는 것으로 나타났다.

Table 4 Properties of strip at each pass

Pass	Thickness (μm)	T.S (MPa)	El(%)	Hv
Initial	401	219.74	35	58.5
1	201	340.31	1	111.5
2	101	372.19	1	122.5
3	56.7	378.47	0.5	126
4	33.2	389.75	0.5	127
5	24.3	423.40	0.3	127

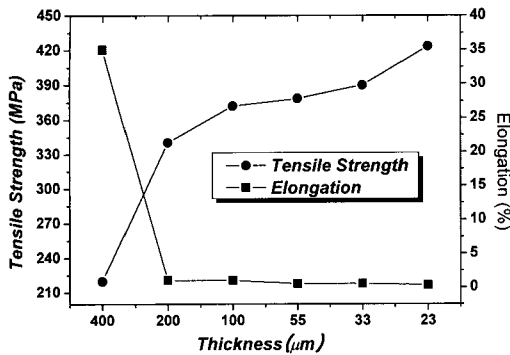


Fig. 15 Results of tensile strength and elongation

5. 결론

냉간 압연공정에서 6 단 압연롤의 변형량을 두께 24 μm 폭 600mm 동극박을 생산에 적용하였다.

(1) 압연속도가 증가함에 따라서 롤 변형과 압연하중이 증가한다. 그러나 속도에 따라서 롤 변형이 1 μm 이상 분포됨에 따라서 기존의 패스 스케줄에 의한 롤 갭 24 μm를 수정할 필요가 있다.

(2) CAE 해석을 통하여 롤 갭을 23 μm로 설정하고 패스 스케줄을 설계하여 냉간 압연 해석을 수행한 결과, 최종 패스에서 롤 변형이 1.37 μm로 목표 두께 24 ± 1 μm를 만족하는 것으로 나타났다.

(3) 수정된 압연 스케줄로 냉간 압연 시험을 수행하였다. 최종 생산된 판의 두께 분포의 경우 24.3 μm로 CAE 를 통하여 예측된 값과 매우 유사하게 나타났다. 극박 압연에서 압연롤의 탄성 변형이 제품의 품질에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

(4) 압연시험 결과, 인장강도 423.4MPa, 연신율 0.3%, 비커스 경도 127Hv 를 가지는 24 μm급 동극박을 생산하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(No. R15-2006-022-03003-0)과 산업자원부의 산업혁신기술개발사업 중 “중기거점기술개발사업”의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Furukawa, T. and Kawamoto, K., “The rolling characteristics of Copper Foil,” J. of JSTP, Vol. 4, No.

27, pp. 203-212, 1963.
 2. Sakamoto, N., Nishimura, K., Iwasaki, M. and Misonoh, K., “An analysis of strip shape in cold rolling of ultra thin steel strip,” J. of JSPT, Vol. 23, No. 263, pp. 1230-1237, 1982.
 3. Saeki, K. and Hashimoto, Y., “Speed Effects on the Cold Rolling of Thin Plate,” J. of JSPT, Vol. 7, No. 63, pp. 183-192, 1966.
 4. Wataru, S. and Shun-ichi, O., “Rolling Pressure Distribution in Thin Foil Rolling,” J. of JSTP, Vol. 28, No. 321, pp. 1029-1034, 1987.
 5. Kim, D. H., Kim, B. M. and Lee, Y., “Adjustment of Roll Gap for the Dimension Accuracy of Bar in Hot Bar in Hot Bar Rolling Process,” International Journal Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 4, No. 1, pp. 56-62, 2003.
 6. Lange, K., “Handbook of metal forming,” McGraw-Hill Book Company, Chapter 12, 1985.
 7. Knapiński, M., “The numerical analysis of roll deflection during plate rolling,” JMPT, Vol. 175, Issues 1-3, pp. 257-265, 2006.
 8. Malik, S. A. and Grandhi, V. R., “A computational method to predict strip profile in rolling mills,” JMPT, Vol. 206, Issues 1-3, pp. 263-274, 2008.
 9. Roberts, W. L., “Cold rolling of steel,” MARCEL DEKKER, INC., pp. 478-567, 1978.
 10. Timoshenko, P. S. and Goodier, N. J., “Theory of elasticity,” McGraw-Hill, pp. 65-164, 1934.
 11. Fleck, A. N., Johnson, L. K., Mear, E. M. and Zhang, C. L., “Cold Rolling of Foil,” Proc. Institution of Mechanical Engineers, Vol. 206, pp. 119-131, 1992.
 12. Johnson, L. K., “Contact Mechanics,” Cambridge University Press, pp. 320-339, 1985.
 13. Le, H. R. and Sutcliffe, P. F. M., “Rolling of Thin Strip and Foil: Application of a Tribological Model for “Mixed” Lubrication,” Journal of Tribology, Vol. 124, Issue 1, pp. 129-136, 2002.