

열간 선재 압연제품의 치수정밀도 향상을 위한 롤 갭 조정

김동환* (부산대 정밀정형 및 금형가공연구소)

김병민** (부산대 기계공학부)

이영석***, 유선준***, 주용용*** (포항제철주식회사, 기술연구소)

Adjustment Of Roll Gap For The Dimension Accuracy Of Bar In Hot Bar Rolling Process

D. H. Kim* (ERC for Net Shape and Die Manufacturing), B. M. Kim** (Mechanical Eng. Dept., PNU)

Y. Lee***, S. J. Yoo***, W. Y. Joo*** (Technical Research Laboratories, POSCO)

ABSTRACT

The objective of this study is to adjust the roll gap for the dimension accuracy of bar in hot bar rolling process considering roll wear. In this study hot bar rolling processes for round and oval passes have been investigated. In order to predict the roll wear, the wear model is reformulated as an incremental form and then wear depth of roll is calculated at each deformation step on contact area using the results of finite element analysis, such as relative sliding velocity and normal pressure at contact area. Archard's wear model was applied to predict the roll wear. To know the effects of thermal softening of DCI (Ductile Cast Iron) roll material according to operating conditions, high temperature micro hardness test is executed and a new wear model has been proposed by considering the thermal softening of DCI roll expressed in terms of the main tempering curve. The new technique developed in this study for adjusting roll gap can give more systematically and economically feasible means to improve the dimension accuracy of bar with full usefulness and generality.

Key Words : Roll wear(롤 마멸), Hot bar rolling(열간 선재 압연), Thermal softening (열연화), Roll gap(롤 갭), Neural network(신경망)

1. 서론

금속성형의 산업적인 응용에 있어서 공구 파손의 주된 원인 중 하나는 마멸이다. 이런 종류의 파손은 공정의 원가뿐만 아니라 제품의 치수 정밀도에 큰 영향을 미친다. 이러한 것에 대한 제어의 유일한 방법은 마멸에 대해 예측하고 디자인의 단계에서도 적용이 가능한 방법을 공정의 최적화를 위해 발전시켜야 한다. 선재압연에 관한 연구는 수십년 동안 진행되어 왔으며 선재압연 공정 설계 시 우수한 치수 정밀도 및 기계적 성질 그리고 낮은 생산원가를 얻기 위해서 많은 조건을 고려하여 설계하는 추세이지만, 각 패스마다 롤 마멸량을 평가한 후 롤의 수명을 예측하고 그 교체 시기를 결정하는 등의 연구는 미흡한 실정이다. 또한 롤은 응력변동(Stress Fluctuation), 열적 사이클, 접촉 연삭(Contact Abrasion) 작용과 화학적 영향을 받기 때문

에 정확한 마멸형상의 예측은 쉬운 일이 아니다. 현재, 압연공정의 효율화를 위하여 마멸율을 감소시키고, 제품의 치수정밀도 및 롤의 수명 연장 그리고 균일한 마멸형상을 얻기 위한 연구가 진행 중에 있다.

1940년대 초부터 기본적인 마멸 메커니즘에 관한 연구가 시작되었다. 압연공정에서의 마멸의 연구를 살펴보면 Sachs^[1]는 작업롤(Work Roll)과 보강롤(Backup Roll)의 마멸형상을 중요시 하여, 마멸형상이 생산량과 연관이 있음을 밝혔으나 정량적인 마멸에 관한 연구는 수행되지 못했다. Onuki^[2] 등은 연삭작용이 활발한 초기의 사이클에서 압연하중이 클수록 롤의 마멸로 인한 손실이 더 크다는 것을 증명하였다. Wusatowski^[3]는 압연 공정에서 후방슬립(Backward Slip)은 전방슬립(Forward Slip)보다 크고, 입구속도가 출구속도 보다 소재의 변형기동에 미치는 영향이 크다는 사실은 설명하였다.

Table 1 The properties of the DCI roll materials

Roll Material	Mechanical Properties		Chemical Compositions	Heat Treatment
DCI	Tensile Strength (kg/mm ²) Elongation (%) Impact Value (kg.m/cm ²) Hardness (Hs)	35-55 0.2-0.5 0.2-0.5 55/60	C: 3.20-3.60, Si: 1.40-2.20 Mn: 0.30-0.60, Ni: 1.60-2.30 Cr: 0.30-0.80, Mo: 0.20-0.60	Stress Relief

압연공정의 마멸에 관한 실험과 이론적 해석이 이전의 많은 연구자들에 의해 수행되었으나, 마멸량의 정량적인 평가를 위한 해석적 도구는 아직 미비한 실정이다. 또한 상온의 롤이 고온의 소재에 접촉하면 온도가 상승하는데 이에 따른 롤의 마멸이 달라질 수 있으므로, 롤 온도에 따른 롤 마멸의 D/B 화가 필요하다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 열연화(Thermal Softening) 현상을 고려한 3 차원 롤 마멸예측기술개발이 요구된다. 또한 선재 압연제품의 치수 정밀도 및 생산성 향상을 위하여 롤에 편 마멸 및 국부 마멸이 생기지 않는 공형 설계 및 패스 스케줄설계는 필수적이다.

본 연구의 목적은 열연화 현상을 고려한 열간 선재 압연공정의 3 차원 롤 마멸해석 프로그램의 개발이며, 개발된 3 차원 열간 선재 압연공정의 마멸해석 프로그램으로 round-oval 및 oval-round 공정에 적용하여 마멸 형상을 예측하였다. 또한 압연제품의 치수정밀도 향상을 위하여, 생산량에 따른 롤 마멸량을 고려한 롤 갭 조정치를 신경망을 이용하여 예측하였다.

2. 실험

2.1 마멸실험

마멸시험장치는 Fig.1(a)와 같은 마멸시험기(TE92 Base Unit, PLINT Co., England)를 이용하여 pin-on-disk 방식의 마멸시험을 실시하였다. 시험장치는 주 시험장치, 압축기, 컴퓨터 등으로 구성되어 있으며, 주 시험장치는 하부 하중 액츄에이터 구성부, pin-on-

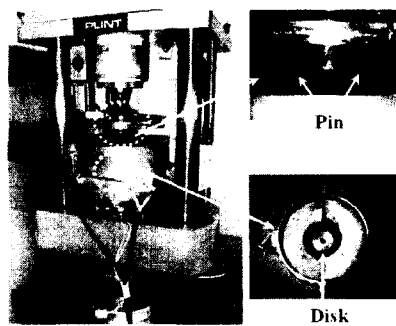


Fig.1 Wear tester (PLINT, TE92)

disk 구성부(Two/Three Pin-on-disk Type), 전기로틀이 용한 가열 시스템부로 구성되어 있다. 실험방법은 각각의 핀 재질에 대해 두 개의 핀을 한조로 상부 모터쪽에 중심으로부터 반대편의 동일위치에 수직으로 끼워 장착 시키고 디스크는 하부에 장착 시킨 다음 아래에서 수직하중을 가하고 한 방향으로 미끄럼 운동을 주었다. 이때 마찰조건은 무 윤활상태이며 두 핀간의 거리는 40mm 이다. 실험 전 핀의 무게를 아세톤에 세척 후 전자저울로 측정하였고, 실험 후에는 마멸분을 털어내고 아세톤으로 세척한 후 동일한 방법으로 측정하였다. 본 연구의 마멸량은 아래의 Archard 마멸식^[4]을 이용하여 계산하였다.

$$W = \frac{kPL}{3H} \quad (1)$$

여기서, W 는 마멸 체적, k 는 마멸계수, P 는 접촉하중, L 는 미끄럼 길이, H 는 경도이다.

2.2 고온경도측정

본 연구에서는 DCI 롤에 대한 열간 압연공정중 경도변화를 파악하기 위하여 고온경도측정실험을 수행하였다. 고온경도측정을 위해 사용된 장비는 High Temperature Micro Hardness Tester (QM-2, Nikon Co.)다. 시편의 크기는 5x5x10mm 로 제작하였다.

고온경도측정 온도는 200, 300, 400, 500C° 이고, 롤 시편의 고온유지시간은 각 온도에서 12, 24, 48, 72hr 로 하였다. Fig.2 에 롤 시편의 고온경도측정 방법을 제시하였다. 고온경도 측정 시험조건으로 가열은 10 분당 100C°씩 증가하였고, 진공상태는 1x10⁻⁵ torr 로 하였다. 경도 압입자의 재질은 다이아몬드로 300g 의 압입 하중으로 하였으며, 경도측정을 위한 유지시간은 15 분으로 하였다. Fig.3 에 미소경도측정 장비에 장착된 시편의 사진을 나타내었다. 고온경도 실험 후, DCI 롤의 온도와 시간에 따른 경도 변화를 측정하였다.

2.3 열연화를 고려한 DCI 롤 마멸예측수식

템퍼링 파라미터(M)는 열처리에 따른 온도와 시간의 함수로 식(2)과 같이 나타낼 수 있다^[5].

$$M = T(20 + \log t) \quad (2)$$

3. 탄소강 압연재의 성형해석

본 연구에서는 실제 열간압연공정에 대한 개발된 3 차원 롤 마멸해석 프로그램의 유효성을 검증하기 위하여, 첫번째 패스, round-oval 과 두번째 패스, oval-round 압연공정의 롤에 대한 마멸해석을 수행하였다. 먼저, 마멸해석의 데이터 획득을 위해 열간 압연공정의 유한요소해석을 수행하였다.

소재, SM10C 에 대한 유동응력식은 탄소함유량, 온도, 변형률 및 변형률 속도의 함수로 된 Sida^[6] 의 구성방정식을 이용하였다. 초기소재직경은 60mm, 초기소재온도는 1100°C 그리고 롤의 초기온도는 300°C로 가정하였고, 소재와 롤의 마찰상수(m)는 일반적으로 무윤활 열간압연상태에서 적용되고 있는 0.7 로 가정하여, 첫번째 패스인 round-oval 공정과 두번째 패스인 oval-round 공정의 성형해석을 수행하였다^[7]. 롤 직경은 두 공정 모두 310mm 이고, 분당 회전수는 34rpm 이다. 그리고 롤갭은 3.25mm 로 하였으며, 이때 단면감소율은 첫번째 패스, round-oval 공정에서는 39.2%이고, 두번째 패스, oval-round 공정에서는 20%이다.

Table 2 에 성형해석의 공정조건을 나타내었고, 그 결과를 Table 3 에 정리하였다. 성형해석 후, 실험으로 얻어진 선재 단면 형상을 비교하여 Fig.5 에 나타내었다. 성형해석 결과, 실험으로 얻어진 선재 단면과 매우 잘 일치하였고, 롤과 소재 접촉부에서의 롤의 최대 상승온도 및 소재의 표면온도는 round-oval 공정에서 각각 440°C, 675°C 이었고, oval-round 공정에서는 각각 442°C, 673°C 이었다.

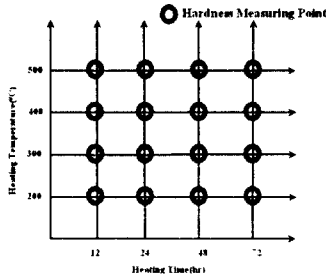


Fig. 2 Process of thermal softening experiment



Fig. 3 Inside view of high temperature micro hardness tester

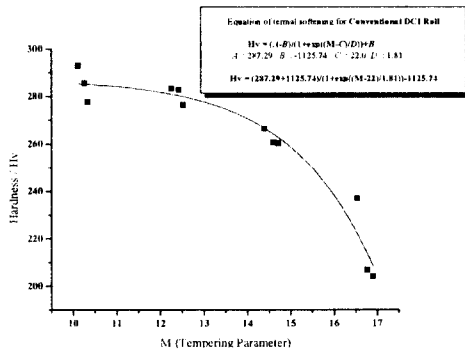


Fig. 4 Master tempering curve of DCI roll

여기서, T 는 온도이며 t 는 시간이다. DCI 롤의 주 템퍼링 곡선(Main Tempering Curve)을 Fig.4 에 나타내었다. 주 템퍼링 곡선은 온도와 시간에 따른 템퍼링 파라미터와 경도(Hv)와의 관계를 나타낸 것이며, DCI 롤에 대하여 식(3)과 같이 근사하였다.

$$H = (A - B) / (1 + \exp((M - C) / D)) + B \quad (3)$$

여기서 A , B , C 그리고 D 는 템퍼링 곡선의 계수들이며, DCI 롤에 대한 템퍼링 연화곡선식의 계수는 $A:287.29$, $B:-1125.74$, $C:22.0$, $D:1.81$ 이다.

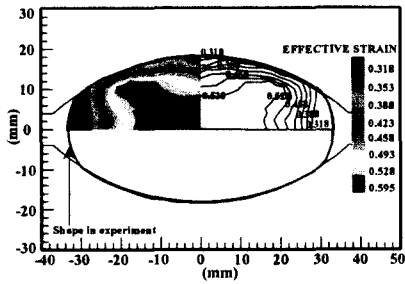
측정된 DCI 롤의 마멸계수는 8.096×10^{-6} 이었으며, DCI 롤의 열연화 현상을 반영한, 식(3) 을 마멸해석 프로그램에 입력하여 온도와 시간에 따른 마멸형상을 예측하였다.

Table 2 The conditions of FE-simulation for hot bar rolling processes

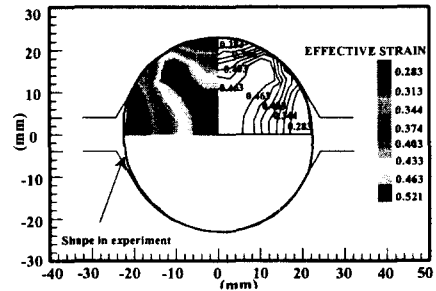
Conditions	1pass: round-oval	2pass: oval-round
Bar temperature (°C)	1100	1100
Roll temperature (°C)	300	300
Bar diameters (mm)	60	-
Roll diameter (mm)	320	320
Roll gap (mm)	3.25	3.25
Roll velocity	34rpm	34rpm
Friction factor (m)	0.7	0.7
Lubricant	No	No

Table 3 The results of FE-simulation for hot bar rolling processes

Items	1pass: round-oval	2pass: oval-round
Section area (mm ²)	2076	1658
Contact area (mm ²)	2300	1260
Wide spread (mm)	68.2	42.6
Area reduction (%)	39.2	20.0
Max. slip ratio (%)	4.35	1.77
Average slip ratio (%)	1.93	1.77
Load (kN)	162	87.5
Contact time (sec)	0.1348	0.112
Min. bar temp. (°C)	675	673
Max. roll temp. (°C)	440	442
Average effective strain	0.525	0.431

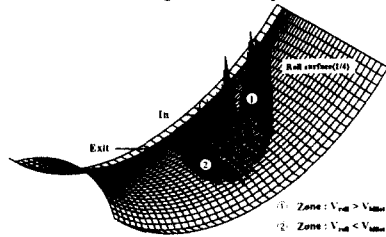


(a) Round-Oval process

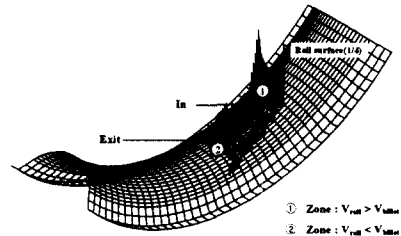


(b) Oval-Round process

Fig. 5 The shape of exit from FE-analysis compared with experimental results

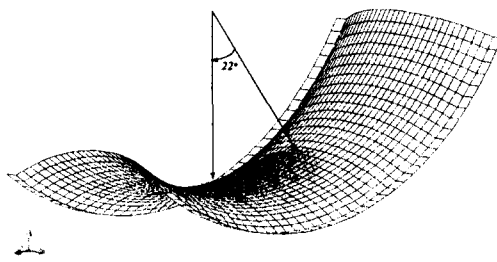


(a) round-oval process

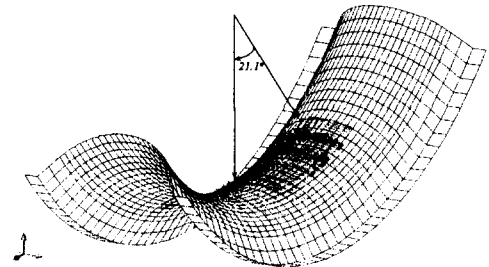


(b) oval-round process

Fig. 6 Profile of relative velocity in contact area in hot bar rolling processes



(a) round-oval process



(c) oval-round process

Fig. 7 Wear profile in hot bar rolling processes

4. 탄소강 선재압연 공정의 3D 마멸해석

4.1 마멸형상

3 차원 마멸해석을 위하여, 성형해석 결과로부터 롤 및 소재 접촉면에서의 표면온도(T), 응력(σ_y), 변형률(ϵ_y), 변형률 속도($\dot{\epsilon}_y$), 절점 속도(V_y), 절점 압력 등이 추출 및 변환 되어야 한다. 특히, 롤과 소재 접촉면에서의 미끄럼 속도는 롤 마멸 형상에 영향을 미치는 주 공정변수 중의 하나이다. Round-oval 과 oval-round 공정의 성형해석 후, 소재가 롤에 접촉 개시 한 후 롤을 빠져 나올 때 까지 소재의 속도분포를 각각 Fig.6 에 나타내었다. Fig.6 의 제 ①영역은 롤 속도가 소재의 속도보다 빠른 후방슬립이 일어나는 영역으로, 이 영역에서 연속 마멸이 발생하게 된다. 제 ②영역에서는 소재가 롤 회전속도보다 빠른

전방슬립이 발생하는 영역이며 이 영역에서는 소재가 롤에 달라붙는 응착이 발생하는 영역이다.

Fig. 7(a) 에는 round-oval 공정의 마멸형상을 나타내었고, Fig. 7(b) 에는 oval-round 공정의 마멸형상을 나타내었다.

4.2 롤 갭 조정치 예측

일반적으로 롤 성형시, 롤 마멸에 의해 균일한 단면적을 갖는 제품생산이 어려우며, 롤 마멸로 인한 공형형상이 변하면 스탠드 간 압하율이 변하는데 현장의 경험에 의존하여 롤 갭을 조정하는 실정이다. 따라서, 스탠드 간 압하율을 균일하게 하기 위해 생산량에 따른 마멸깊이를 목적함수로 하여 역전과 학습 알고리즘의 신경망 프로그램을 이용하여 롤 갭 조정치를 예측하였다^[8, 9, 10].

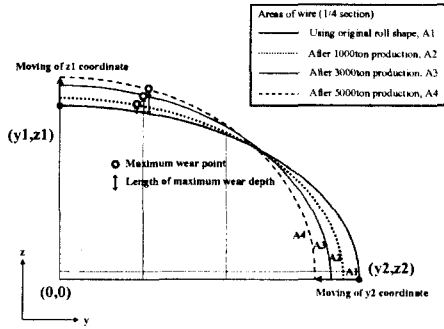


Fig. 8 Variation of area in rolling process according to roll wear

Fig.8 은 생산량에 따른 마멸된 롤을 사용하였을 경우, 생산되는 선재의 1/4 단면 변화를 나타내었다. 생산되는 선재의 1/4 단면적의 z 방향의 반경을 z1 이라고 하고, 폭 방향의 반경을 y2 라 하면, Fig.8 에서 알 수 있듯이, 마멸이 진전됨에 따라 z1 의 좌표는 롤의 회전중심 방향, 즉 z 축 방향으로 증가하게 되며 y2 좌표는 소재 폭 퍼짐의 역 방향, 즉 y 축 방향으로 감소하게 된다. 또한, 생산량에 따른 롤 마멸로 인해 변해가는 z1, y2 의 좌표에 따라 생산되는 선재의 1/4 단면적도 달라지게 된다. 따라서, 본 연구에서는 롤 갭 조정을 위한 신경망 해석의 설계 변수로 생산량 1000ton 당 y2 좌표와 단면적을 선정하였다. 목적함수로는 생산량 1000ton 당 최대 마멸 깊이를 선정하였다.

4.3 롤 갭 조정치 예측 결과 및 고찰

Table 4 에 나타나 있듯이, 신경망의 예측치는 출력층의 학습데이터와 매우 잘 일치함으로 학습이 잘 되었음을 알 수 있었고, 학습된 신경망의 연결가중치를 이용하여 균일한 단면적을 얻기 위한 롤 갭 조정치를 예측하였다. Round-oval 공정에서의 균일 단면적은 초기 롤을 사용하였을 때의 면적인 519.15 mm²로 하였고, oval-round 공정에서의 균일 단면적은 414.51mm²로 하여, 균일 단면적과 폭 퍼짐 좌표, y2 를 학습된 신경망에 입력하여 롤 갭 조정치를 예측하였다. 신경망의 학습으로 예측된 롤 갭 조정치는 round-oval 공정에서는 5000ton 을 생산한 경우에만 한쪽 롤에 대하여 0.8829mm 롤 갭을 줄여야 하고, oval-round 공정에서는 5000ton 생산한 경우, 한쪽 롤에 대하여 0.6617mm 롤 갭을 줄여야 하는 것으로 예측하였다. 따라서, 이렇게 예측된 롤 갭 조정치를 이용하여 성형해석을 수행한 후, 출구면의 선재 단면적을 계산하였고 이 단면적과 초기 롤을 사용했을 경우의 단면적을 비교하였다. Fig.10 에는 round-oval 공정에서 5000ton 의 선재를 생산한 후 마멸된 롤

Table 4 The prediction results for adjustment of roll gap using neural network

Rolling process		Input data for neural network				
		Input layer		Output layer	Output	
		y2 (mm)	1/4section area (mm ²)	Wear depth (mm)	Wear depth for adjustment (mm)	
Round to Oval	Training Data	initial	34.10	519.1500	0	0.0001
		1000ton	33.94	524.2440	0.418	0.4182
		2000ton	33.78	528.3363	0.704	0.7039
		3000ton	33.60	533.5922	0.961	0.9615
		4000ton	33.42	536.4855	1.215	1.2146
	Prediction for roll gap adjustment	5000ton	33.25	539.9810	1.430	1.4298
		1000ton	33.94	519.1500	-	0.1555
		2000ton	33.78	519.1500	-	0.3359
		3000ton	33.60	519.1500	-	0.5361
		4000ton	33.42	519.1500	-	0.7163
Oval to Round	Training Data	5000ton	33.25	519.1500	-	0.8829
		initial	21.30	414.5100	0	0.0007
		1000ton	21.12	418.2443	0.344	0.3435
		2000ton	20.98	421.7150	0.533	0.5323
		3000ton	20.75	425.3511	0.709	0.7102
	Prediction for roll gap adjustment	4000ton	20.49	429.1050	0.925	0.9260
		5000ton	20.30	433.2213	1.115	1.1148
		1000ton	21.12	414.5100	-	0.1573
		2000ton	20.98	414.5100	-	0.2776
		3000ton	20.75	414.5100	-	0.4414
4000ton	20.49	414.5100	-	0.5775		
5000ton	20.30	414.5100	-	0.6617		

형상으로, 신경망으로 예측한 롤 갭 조정치, 0.8829 mm 를 아래로 내린 후 성형해석 한 그림이다. Fig.10 에서 알 수 있듯이, 예측된 롤 갭 조정치로 성형 해석 한 후의 단면적은 518.75mm² 로 초기 롤로 성형한 단면적 519.15mm² 와 거의 일치하였다. Fig.11 에는 round-oval 공정에서 5000ton 의 선재를 생산한 후 마멸된 롤 형상으로, 신경망으로 예측한 롤 갭 조정치, 0.6617mm 를 아래로 내린 후 성형해석 한 그림이다. 이 공정에서도 예측된 롤 갭 조정치로 성형해석 한 후의 단면적은 415.34mm² 로 초기 롤로 성형한 단면적 414.51mm² 과 거의 일치하였다. 본 연구 결과, 개발된 마멸해석 프로그램을 이용하여 생산량에 따른 마멸형상 및 마멸깊이를 예측하였고, 이 해석결과를 이용한 신경망 해석을 통하여 균일 단면적을 가진 선재 압연제품 생산을 위한 롤 갭 조정치를 예측할 수 있음을 확인 할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 탄소강 선재(SM10C) 압연시 생산량에 따른 DCI 롤 마멸 예측을 위하여 3 차원 마멸해석 프로그램을 개발하였다. 이를 위해 DCI 롤의 마멸실험 및 열연화를 고려한 고온경도시험을 수행하였고, 탄소강 선재 압연공정, round-oval 및 oval-round 공정에 대한 성형해석을 수행하여 성형해석한 결과 데이터를 개발된 마멸해석 프로그램에 적용하여 생산량에 따른 마멸형상을 예측하고, 롤 마멸을 고려한 균일한 선재 제품 단면을 얻을 수 있는

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수 연구센터와 포항종합제철주식회사의 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Sachs, G., et.al., "Roll wear in finishing trains of hot strip mills," Iron and Steel Engineer, Vol, 38, pp.71-92, 1961.
2. Ohnuki, A., "Wear and deterioration of rolling roll and procedure of anti-wear," J of Japan Soc. Lubr. Eng., 32, pp.621-626, 1987.
3. Z.Wusatowski, Fundamentals of Rolling, Pergamon Press, London, pp.146-202, 1969.
4. J.F.Archard, "Constacts and rubbing of flat surface," J. APPL. Phys., Vol.24, pp.981, 1953.
5. 湯淺紘二, 岡本治郎, " 温間鍛造用 金型の壽命におけるプレススライドモーションの影響についての考察," 小松技報, 第26卷 第1號, 1980, pp.35-45.
6. Shigeru Shida, "Emprical formula of flow-stress of carbon steels - Resistance to deformation of carbon steels", J. Japan Society for Technology of Plasticity, Vol. 10, No. 103, pp.610-617, 1969.
7. Alexander Geleji, Bildsame Fromung der Metalle in Rechnung und Versuch, Akademie-Verlag GmbH, Berlin, 1960.
8. D.H.Kim, D.J.Kim, D.C.Ko, B.M.Kim and J.C.Choi, "The application of artificial neural network and taguchi method to process sequence design in metal forming Processes", Metals and Materials, Vol.4, No.3, pp.548-553, 1998.
9. D.H.Kim, D.C.Ko, B.M.Kim, "Application of artificial neural network and taguchi method to preform design in metal forming considering workability", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 39, Issue 5, May, pp.771- 785, 1999.
10. D.H.Kim, D.J.Kim, B.M.Kim, "The application of neural network and statistical method to process design in metal forming process," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 15, pp. 886-894, 1999.

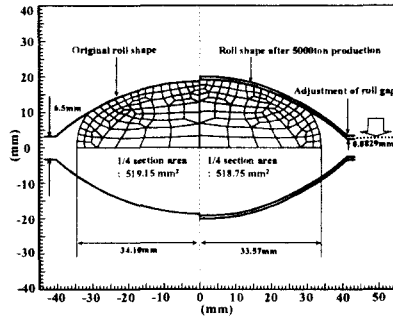


Fig. 10 Adjustment of roll gap for uniform section area using neural network in round-oval process

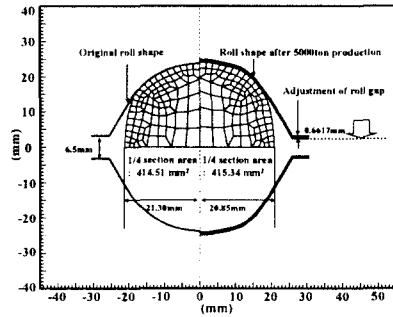


Fig. 11 Adjustment of roll gap for uniform section area using neural network in oval-round process

롤 갭 조정 방안을 신경망 기법을 도입하여 제시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) DCI 롤의 고온경도시험 결과, DCI 롤은 시간과 온도에 따라 경도가 하락하는 열연화 현상이 뚜렷하였다. 고온경도변화에 따라 주 템퍼링 곡선을 구하기 위한 수식을 제안하고, 이를 마멸해석 프로그램에 적용하여 마멸해석을 수행하였다
- 2) 유한요소해석 결과 데이터를 이용하여 본 연구에서 개발된 3 차원 마멸해석 프로그램으로 round-oval 및 oval-round 압연 공정의 마멸해석을 수행하고 마멸형상을 예측하였다. 마멸형상은 롤과 소재의 상대속도 및 수직압력이 큰 영역에서 크게 나타났다, 특히, oval-round 공정에서는 소재의 폭 퍼짐 속도의 증가로 롤과 소재의 접촉 가장자리의 마멸이 크게 나타났다.
- 3) 선재 압연제품의 치수 정밀도 및 생산성 향상을 위하여 롤에 편 마멸 및 국부 마멸이 생기지 않는 공형설계 및 패스 스케줄 설계는 필수적이다. 본 연구개발 결과로 생산량에 따른 마멸형상의 예측이 가능하고, 롤 갭 조정시 가이드 라인 제시가 가능함으로 향후, 패스 스케줄 설계 프로그램 개발 시, 생산량에 따른 롤 갭 조정에 활용이 가능하다.