

## 열간 선재 압연제품의 치수정밀도 향상을 위한 롤 갭 조정

김동환\*, 김병민\*, 이영석\*\*

### Adjustment of Roll Gap for The Dimension Accuracy of Bar in Hot Bar Rolling Process

Dong Hwan Kim\*, Byung Min Kim\*, and Youngseog Lee\*\*

#### 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 마모), Hot rod 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 정밀도에도 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 수 십년 동안 진행되

어 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 때문에 정확한 마멸형상의 예측은 쉬운 일이 아니다. 현재, 압연공정의 효율화를 위하여 마멸율을 감소시키고,

2001년 12월 14일 접수

\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

\*\* 포항종합제철주식회사 기술연구소

Table 1 The properties of the DCI roll materials

Roll Material	Mechanical Properties		Chemical Compositions	Heat Treatment
DCI	Tensile Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	35-55	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
	Elongation (%)	0.2-0.5		
	Impact Value (kg.m/cm <sup>2</sup> )	0.2-0.5		
	Hardness (Hs)	55/60		

제품의 치수정밀도 및 롤의 수명 연장 그리고 균 일한 마멸형상을 얻기 위한 연구가 진행 중이다.

1940 년대 초부터 기본적인 마멸 메커니즘에 관 한 연구가 시작되었다. 압연공정에서의 마멸의 연 구를 살펴보면 Sachs<sup>[1]</sup>는 작업롤(work roll)과 보강 롤(backup roll)의 마멸형상을 중요시 하여, 마멸형 상이 생산량과 연관이 있음을 밝혔으나 정량적인 마멸에 관한 연구는 수행하지 못하였고, Onuki<sup>[2]</sup> 등은 연삭 작용이 활발한 초기의 사이클에서 압연 하중이 클수록 롤의 마멸로 인한 손실이 더 크다 는 것을 증명하였다. Wusatowski<sup>[3]</sup>는 압연 공정에서 후방 슬립(backward slip)은 전방 슬립(forward slip)보다 크고, 입구속도가 출구속도 보다 소재의 변형거동에 미치는 영향이 크다는 사실은 설명하 였다.

압연공정의 마멸에 관한 실험과 이론적 해석이 이전의 많은 연구자들에 의해 수행되었으나, 마멸 량의 정량적인 평가를 위한 해석적 도구는 아직 미비한 실정이다. 또한 상온의 롤이 고온의 소재 에 접촉하면 온도가 상승하는데 이에 따른 롤의 마멸이 달라질 수 있으므로, 롤 온도에 따른 롤 마멸의 D/B 화가 필요하다. 이러한 목적을 달성하 기 위해서는 열연화(thermal softening) 현상을 고려 한 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.

따라서, 본 연구의 목적은 개발된 3 차원 마멸해 석 프로그램<sup>[4]</sup>을 이용하여 열간 선재 압연공정, round-oval 및 oval-round 공정에 적용하여 생산량 에 따른 롤 마멸을 예측하고, 롤 마멸량을 고려한 롤 갭 조정치를 예측하는데 있다. 본 연구를 위하 여 압연 롤에 대한 마멸실험과 고온경도실험을 수 행하였고, 롤 갭 조정치의 예측을 위하여 신경망 해석을 수행하였다.

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. 실험장 치는 주 시험장치, 압축기, 컴퓨터 등으로 구성되 어 있으며, 주 시험장치는 하부 하중 액츄에이터 구성부, Pin-on-disk 구성부(two/three pin-on-disk type), 전기로를 이용한 가열 시스템부로 구성되어 있다. 실험은 롤 재질에 대해 두 개의 핀을 한조로 상부 모터쪽에 중심으로부터 반대편의 동일위치에 수직 으로 끼워 장착 시키고, 압연재 재질의 디스크를 하부에 장착 시킨 다음 아래에서 수직하중을 가하 면서 한 방향으로만 회전 미끄럼 운동을 준다. 이 때 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<sup>[5]</sup> 마멸식을 이용하여 계산하였다.

$$W = \frac{kPL}{3H} \tag{1}$$

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

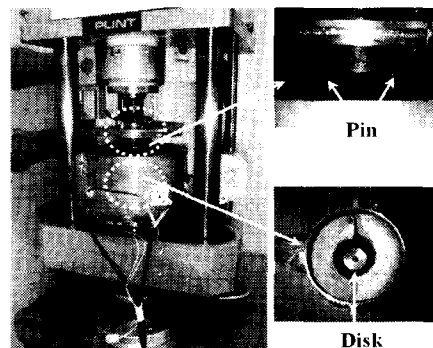


Fig. 1 Wear tester (PLINT, TE92)

### 2.2 고온경도측정

본 연구에서는 DCI 롤에 대한 열간 압연공정 중 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, 500°C 이고, 롤 시편의 고온유지시간은 각 온도에서 12, 24, 48, 72hr 로 하였다. 롤 시편의 고온경도측정 방법을 Fig.2 에 제시하였다. 고온경도 측정 시험조건으로 가열은 10 분당 100°C씩 증가하였고, 진공상태는 1x10<sup>-5</sup> 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.

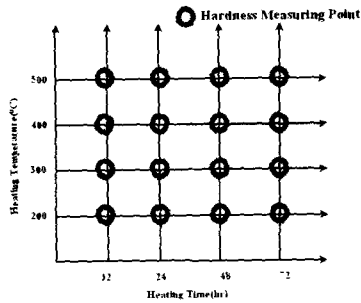


Fig. 2 Process of thermal softening experiment

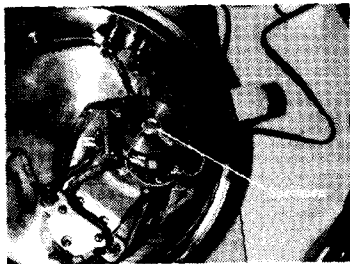


Fig. 3 Inside view of high temperature micro hardness tester

### 2.3 열연화를 고려한 DCI 롤 마멸에측수식

템퍼링 파라미터(M)는 열처리에 따른 온도와 시간의 함수로 식(2)과 같이 나타낼 수 있다<sup>[6]</sup>.

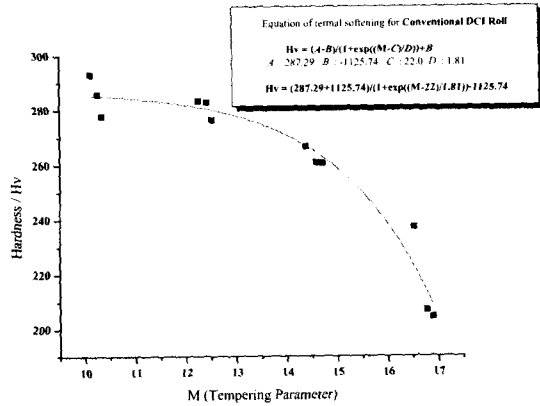


Fig. 4 Master tempering curve of DCI roll

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

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( $H$ )와의 관계를 나타낸 것이며, 식(3)과 같이 근사화 할 수 있다.

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

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  $8.096 \times 10^{-6}$  이었으며, DCI 롤의 온도와 시간에 따른 경도 변화, 식(3)을 마멸해석 프로그램에 입력하여 고온경도변화를 고려한 마멸해석에 적용하였다.

### 3. 탄소강 압연재의 성형해석

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

압연재, SM10C 에 대한 유동응력식은 탄소함유량, 온도, 변형률 및 변형률 속도의 함수로 된 Sida<sup>[7]</sup>의 구성방정식을 이용하였다.

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

Conditions	Process	1pass: round-oval	2pass: oval-round
Rod temperature (°C)		1100	1100
Roll temperature (°C)		300	300
Rod 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 rod rolling processes

Items	Process	1pass: round-oval	2pass: oval-round
Section area (mm <sup>2</sup> )		2076	1658
Contact area (mm <sup>2</sup> )		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. rod temp. (°C)		675	673
Max. roll temp. (°C)		440	442
Average effective strain		0.525	0.431

초기소재직경 60mm, 초기소재온도는 1100°C 그리고 롤의 초기 온도는 300°C 로 가정하였고, 소재와 롤의 마찰상수(m)는 일반적으로 무 윤활 열간 압연상태에서 적용되고 있는 0.7 로 가정하여, 첫번째 패스인 round-oval 공정과 두 번째 패스인 oval-round 공정의 성형해석을 수행하였다[8]. 롤 직경은 두 공정 모두 310mm 이고, 분당 회전수는 34rpm 이다. 그리고 롤 갭은 3.25mm 로 하였으며, 이때 단면감소율은 첫번째 패스, round-oval 공정에서는 39.2%이고, 두 번째 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 접촉 부에서의 롤의 최대 상승온도 및 소재의 표면온도는 round-oval 공정에서 각각 440°C, 675°C 이었고, oval-round 공정에서는 각각 442°C, 673°C 이었다.

#### 4. 탄소강 선재압연 공정의 마멸해석

##### 4.1 마멸해석

본 연구에서는 열간선재압연공정에서 롤 마멸을 예측하기 위하여 접촉면에서의 미끄럼길이를 미끄럼속도와 시간 증분의 곱으로 나타내어 유한요소해석에 적용할 수 있도록 식(1)을 식(4)와 같이 수정하였다.

$$\delta w = \frac{k}{H} \int_0^{t_{total}} \sigma_n \Delta v dt \quad (4)$$

여기서,  $\delta w$  는 마멸깊이,  $\sigma_n$  는 수직 응력,  $\Delta v$  는 롤과 소재의 상대속도이며,  $T_{total}$  은 전체 변형시간을 나타낸다. 시간,  $t + \Delta t$  에서의 마멸깊이,  $\delta w_{t+\Delta t}$  는 다음과 같이 계산된다.

$$\delta w_{t+\Delta t} = \delta w_t + \frac{k}{H(T,t)} [\sigma_n \Delta v]_{t+\Delta t} \Delta t \quad (5)$$

여기서,  $T$  는 접촉온도이며,  $t$  는 금형과 소재의 접촉시간이다. 즉,  $H(T,t)$  는 템퍼링 파라미터를 고려한 경도연화함수이다. 본 연구에서는 성형해

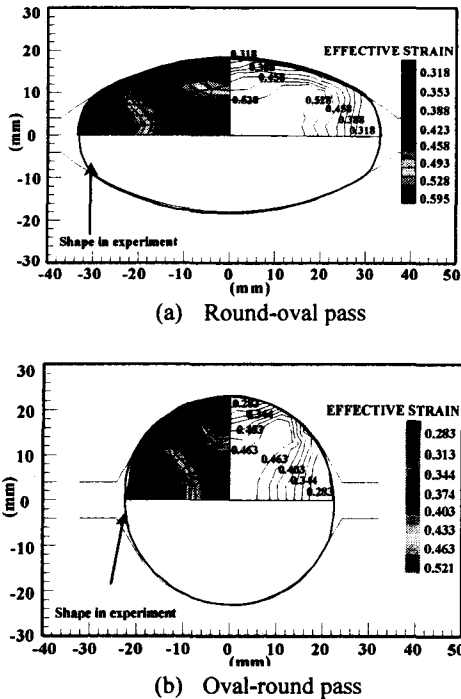


Fig. 5 The shape of exit from FE-analysis compared with experimental results

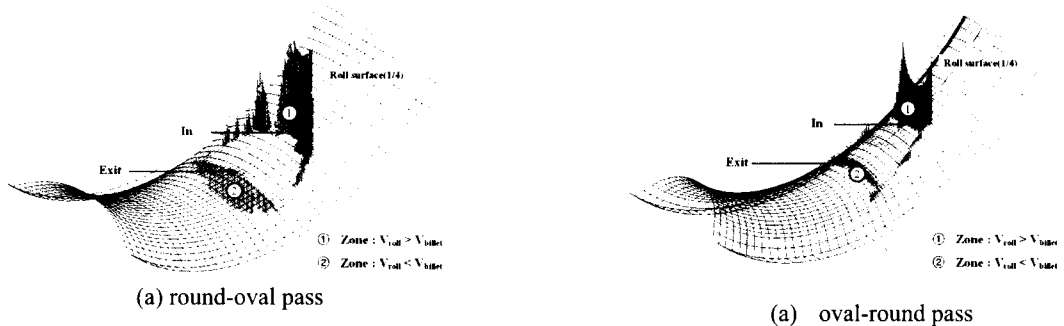


Fig. 6 Profile of relative velocity in contact area in hot rod rolling processes

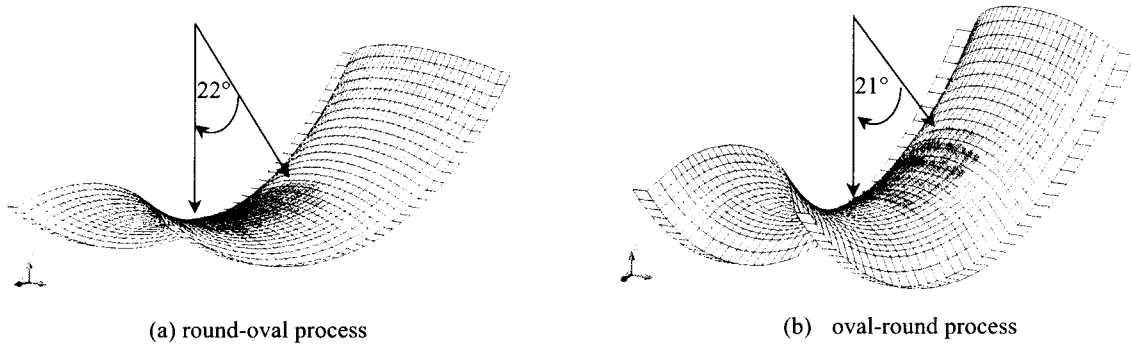


Fig. 7 Profile of relative velocity in contact area in hot rod rolling processes

석 후 계산된 소재의 압력을 금형면상의 압력으로 계산하기 위하여 접촉압력은 금형표면 요소 내부에서는 선형적으로 변한다고 가정하여 속도장 계산에서 사용된 동일한 보간함수를 이용하여 계산하였으며, 금형표면과 소재의 접촉처리 확인 과정은 Global Search 와 Local Search 의 두 단계로 나누어 접촉을 판단하였다<sup>[4]</sup>.

4.2 마멸형상

롤과 소재 접촉면에서의 미끄럼 속도는 롤 마멸형상에 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 연삭 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 나

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

Tonnage 별 마멸계산을 위하여 먼저, 롤 1 회전시 소재 생산량이 계산되어야 한다. 롤이 1 회전할 때 소재와 롤의 물림각(bite angle)은 round-oval 공정에서는 약 22°이며, oval-round 공정에서는 약 21°였다(Fig.7). 롤 1 회전시 생산되는 소재에 대한 롤 마멸량은 물림각에 해당되고, 단위시간당 생산되는 소재의 체적,  $\dot{V}$  는 아래의 식으로 계산된다.

$$\dot{V} = v_{exit} \times A \tag{6}$$

여기서,  $v_{exit}$  는 소재의 출구속도이며,  $A$  는 출구에서 빠져 나오는 소재의 단면적이다. 롤과 소재의 1 회전시 접촉시간은 round-oval 공정의 경우 0.135sec, oval-round 공정에서는 0.112sec 였다. 따라서, 롤의 1 회전당 소재의 체적은 접촉시간과 소재 출구단면적의 곱으로 계산되며, 1 회전당 롤의 중량은 소재의 체적과 비중량의 곱으로 계산된다. 본 연구에서 사용된 SM10C 소재의 비중량은 737,4310g/m<sup>3</sup> 이다. 1 회전시 생산량은 round-oval

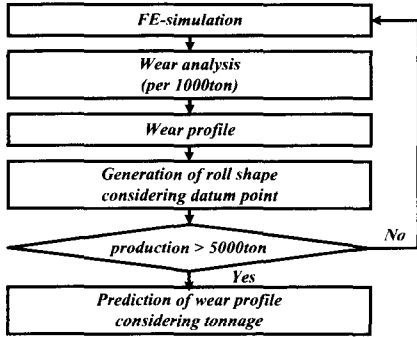


Fig. 8 Flowchart for prediction of wear profile

공정에서는 18kgf, oval-round 공정에서는 11kgf 있다. Tonnage 별 마멸형상을 예측하기 위하여, 초기 롤 형상으로 유한요소해석을 수행하고, 1000ton 생산 후의 롤 회전수를 고려하여 마멸해석을 수행하였다. 1000ton 마멸해석 후, 마멸깊이를 롤 형상에 반영하여 마멸된 롤 형상으로 유한요소해석을 수행하고, 다시 마멸해석을 수행하는 방식으로 Tonnage 별 마멸 형상을 예측하였다. Tonnage 별 마멸된 롤 형상 반영 및 Tonnage 별 롤의 마멸 형상 예측을 위한 절차를 Fig.8 에 요약하였다.

4.3 롤 갭 조정치 예측

일반적으로 롤 성형시, 롤 마멸에 의해 균일한 단면적을 갖는 제품생산이 어려우며, 롤 마멸로 인한 공형 형상이 변하면 스펀드 간 압하율이 변하는데 현장의 경험에 의존하여 롤 갭을 조정하는 실정이다. 따라서, 스펀드 간 압하율을 균일하게 하기 위해 생산량에 따른 마멸깊이를 목적함수로 하여 역전과 학습 알고리즘의 신경망 프로그램을 이용하여 롤 갭 조정치를 예측하였다<sup>[9-11]</sup>.

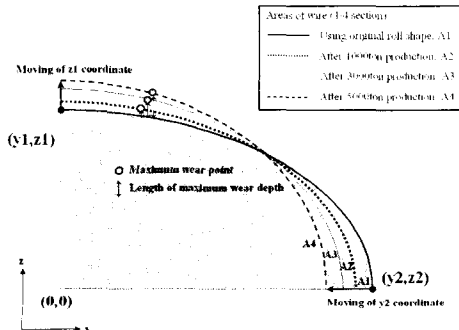


Fig. 9 Variation of area according to roll wear

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

Rolling process		Input data for neural network			Output	
		Input layer		Output layer	Output	
		y2 (mm)	1/4section area (mm <sup>2</sup> )	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	528.3563	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		

Fig.9 는 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.9 에서 알 수 있듯이, 마멸이 진행됨에 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 선정하였고, 목적함수로 는 생산량 1000 ton 당 최대 마멸깊이로 선정하였다.

5. 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 mm<sup>2</sup> 으로 하였고, oval-round 공정에서의 균

일 단면적은 414.51mm<sup>2</sup>로 하여, 균일 단면적과 폭 퍼짐 좌표, y2 를 학습된 신경망에 입력하여 롤 갭을 예측하였다.

신경망의 학습으로 예측된 롤 갭 조정치는 round-oval 공정에서는 5000ton 을 생산한 경우에 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 형상으로, 신경망으로 예측한 롤 갭 조정치, 0.8829 mm 를 아래로 내린 후 성형해석 한 그림이다. 예측된 롤 갭 조정치로 성형 해석 한 후의 단면적은 518.75mm<sup>2</sup> 로 초기 롤로 성형한 단면적 519.15mm<sup>2</sup> 와 거의 일치하였다. Fig.11 에는

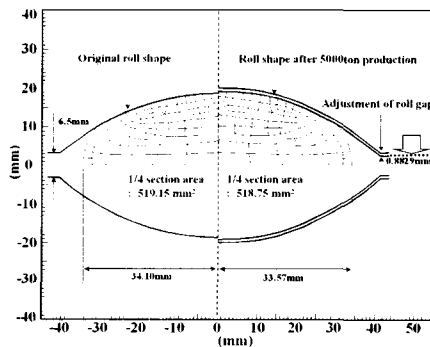


Fig. 10 Adjustment of roll gap for uniform section area using neural network in round-oval process

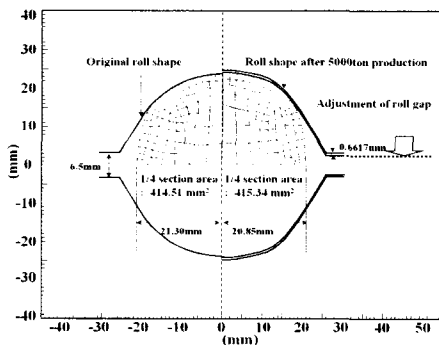


Fig. 11 Adjustment of roll gap for uniform section area using neural network in oval-round process

oval- round 공정에서 5000ton 의 선재를 생산한 후 마멸된 롤 형상으로, 신경망으로 예측한 롤 갭 조정치, 0.6617mm 를 아래로 내린 후 성형해석 한 그림이다. 이 공정에서 예측된 롤 갭 조정치로 성형 해석 한 후의 단면적은 415.34mm<sup>2</sup> 로 초기 롤로 성형한 단면적 414.51mm<sup>2</sup> 과 거의 일치하였다.

본 연구결과, 개발된 마멸 해석 프로그램을 이용하여 Tonnage 별 마멸형상 및 마멸깊이를 예측하였고, 이 해석결과를 이용한 신경망 해석을 통하여 균일 단면적을 가진 선재 압연제품 생산을 위한 롤 갭 조정치를 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 6. 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 성형해석 한 결과 데이터를 개발된 마멸해석 프로그램에 적용하여 생산량에 따른 마멸형상을 예측하고, 롤 마멸을 고려한 균일한 선재 제품 단면을 얻을 수 있는 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 나타났고, 특히, oval-round 공정에서는 소재의 폭 퍼짐 속도의 증가로 롤과 소재의 접촉 가장리의 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 필수적이

다. 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.

### 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. 김동환, 김병민, 이영석, 유선준, 주용용, "3 차원 마멸해석 프로그램을 이용한 열간 압연공정의 롤 마멸예측", 압연심포지움, 제 4 회, 한국소성가공학회 & 대한금속재료학회 pp. 90-99, 2001.
5. J.F.Archard, "Constacts and rubbing of flat surface," J. APPL. Phys., Vol.24, pp.981, 1953.
6. 湯淺紘二, 岡本治郎, " 濫間鍛造用 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, pp. 35-45. 1980.
7. 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.
8. Alexander Geleji, Bildsame Fromung der Metalle in Rechnung und Versuch, Akademie-Verlag Gmbh, Berlin, 1960.
9. 김동환, 김동진, 김호관, 김병민, 최재찬 "신경망과 실험계획법을 이용한 열간 단조품의 공정설계", 한국정밀공학회지, 제 15 권 제 9 호, pp. 15-24, 1998.
10. 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.
11. 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.