

탄소강 선재 압연공정의 DCI 롤 마멸 예측 기술의 개발

김동환* · 김병민† · 이영석** · 유선준*** · 주웅용***

(2001년 7월 30일 접수, 2002년 7월 5일 심사완료)

Development of Technique Predicting of the Wear of DCI Roll Using Carbon Steel in Hot Rod Rolling Process

Dong-Hwan Kim, Byung-Mim Kim, Young-seok Lee, Sun-Joon Yoo and Woong-Yong Choo

Key Words : Roll Wear(롤 마모), Hot Rod Rolling(열간 선재 압연), Round-Oval(원형-타원형) Oval-Round(타원형-원형), Thermal Softening(열연화)

Abstract

The objective of this study is to predict the roll wear in hot rod rolling process. In this study hot rod rolling process for round and oval passes has 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 thermal softening of DCI (Ductile Cast Iron) roll 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 parameter curve. 3D wear program developed in this study might be used for adjusting the gap of rolls to set up a suitable rolling schedule for keeping dimensional tolerance of the product.

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 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 마

멸량을 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, 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.

Williams⁽²⁾ 등은 적철강(hematite), 자철강(magnetite) 등의 산화물의 연삭 작용에 의한 롤의 마멸에 관한 연구를 수행하였으며, Kihara⁽³⁾ 등은 산화층이 압연재의 표면 뿐만 아니라 롤의 표면에 도 발생하여 다양한 마멸 현상이 롤에 발생한다는

* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소

** 회원, 포항종합제철(주) 기술연구소

*** 포항종합제철(주) 기술연구소

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : bmkim@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2319 FAX : (051)514-7640

것을 밝혔다. Onuki⁽⁴⁾ 등은 연삭작용이 활발한 초기의 사이클에서 압연하중이 클 수록 롤의 마멸로 인한 손실이 더 크다는 것을 증명하였다. Park⁽⁵⁾ 등은 내 마멸성이 우수한 고속도강 롤에 대해서 탬퍼링에 따른 기지조직의 변화가 내 마멸성에 미치는 영향을 조사하였고, Rogberg,⁽⁶⁾ Klimenko⁽⁷⁾ 등은 냉간압연공정에서는 롤의 마멸보다 롤과 소재가 접촉하는 부분에서의 롤 표면 거칠기가 더 중요하다는 것을 밝혔다. Wusatowski⁽⁸⁾ 는 압연 공정에서 후방 슬립(backward slip)은 전방 슬립(forward slip)보다 크고, 입구속도가 출구속도 보다 소재의 변형거동에 미치는 영향이 크다는 사실을 설명하였다. Lundberg⁽⁹⁾는 연삭 마멸 메커니즘으로 압력, 롤 속도, 마찰, 온도에 따른 롤의 마멸을 평가를 위한 실험 및 이론해석을 수행하였다. 배 등⁽¹⁰⁾은 열간 연속판재 압연공정에서 사상압연 후단용 작업롤의 응력특성을 고려하여 최적의 롤 사용조건 및 수명연장 방안을 제시하였고, 이를 위해 롤 마멸량, 열 팽창량 및 롤 겹 형상을 계산하였다.

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 필수적이다.

본 연구에서는 열연화 현상을 고려한 열간 선재 압연공정의 3 차원 롤 마멸해석 프로그램을 개발 하기 위하여 DCI 롤에 대한 마멸시험과 열연화 실험을 수행하여 온도와 시간에 따른 고온경도 변화를 반영하도록 하였다.

열간 선재 압연공정의 성형해석은 상용 3 차원 강소성 유한요소 프로그램인 DEFORM 을 이용하였고, 성형해석의 결과로부터 마멸해석에 적용하기 위한 입력데이터로 응력, 절점 속도, 절점 압력, 롤 및 소재의 온도분포 등을 추출 및 변환하였다. 금형의 마멸계산을 위해 Archard 의 마멸 모델을 적용하여 pin-on-disk 타입의 마멸시험을 수행하였고, 열연화 현상을 고려하여 생산량에 따른 마멸 형상을 예측하기 위하여 시간과 온도에 따른 롤의 고온 경도를 측정하였다.

선재 압연제품의 치수 정밀도 및 생산성 향상을 위하여 롤에 편 마멸 및 국부 마멸이 생기지 않는 공형 설계 및 패스 스케줄설계는 필수적이다. 본 연구에서는 개발된 3 차원 열간 선재 압연공정의 마멸해석 프로그램으로 round-oval 및 oval-

round 공정에 적용하여, 마멸 형상을 예측하였고, 생산량에 따른 정량적인 마멸량을 계산하였다.

2. 이론해석

2.1 마멸 모델

본 연구에서는 열간 선재압연공정에서 롤 마멸을 예측하기 위하여 아래의 Archard⁽¹¹⁾ 마멸 이론식을 적용하였다.

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

여기서, W 는 마멸 체적이고, k 는 재료와 접촉조건에 의존하는 마멸계수, P 는 접촉하중, L 는 미끄럼 길이, H 는 마멸이 발생하는 상태에서 금형의 표면경도다. 식 (1) 에서 마멸깊이, δw 를 구하기 위하여 금형과 소재의 접촉면에서의 접촉하중을 접촉면적으로 나눈 수직응력성분, σ_n 과 접촉면에서의 미끄럼길이를 미끄럼속도와 시간증분의 곱으로 나타내어 유한요소해석에 적용할 수 있도록 식 (2)와 같이 수정하였다.

$$\delta w = \frac{k}{H} \int_0^{T_{total}} \sigma_n \Delta v dt \quad \text{on } \partial\Omega^{Tool} \quad (2)$$

여기서, δw 는 마멸깊이, σ_n 는 수직 응력, Δv 는 롤과 소재의 상대속도이며, T_{total} 은 전체 변형 시간을 나타낸다. 아래의 식 (3)을 이용하여 시간, $t + \Delta t$ 에서의 마멸깊이, $\delta w_{t+\Delta t}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\delta w_{t+\Delta t} = \delta w_t + \frac{k}{H} [\sigma_n \Delta v]_{t+\Delta t} \Delta t \quad \text{on } \partial\Omega^{Tool} \quad (3)$$

식 (3)은 금형과 소재의 온도와 접촉시간에 따른 경도 변화를 고려하여 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\delta w_{t+\Delta t} = \delta w_t + \frac{k}{H(T,t)} [\sigma_n \Delta v]_{t+\Delta t} \Delta t \quad \text{on } \partial\Omega^{Tool} \quad (4)$$

여기서, T 는 접촉온도이며, t 는 금형과 소재의 접촉 시간이다. 즉, $H(T,t)$ 는 탬퍼링 파라미터를 고려한 경도 연화 함수이다.⁽¹²⁾

본 연구에서는 성형해석 후 계산된 소재의 압력을 금형면상의 압력으로 계산하기 위하여 접촉

압력은 금형표면 요소 내부에서는 선형적으로 변한다고 가정하여 속도장 계산에서 사용된 동일한 보간함수를 이용하여 구하였다.⁽¹³⁾

2.2 마멸해석의 접촉 알고리즘

선재 압연 롤의 마멸을 해석하기 위해서는 본 연구에서는 롤 표면의 4 절점 요소(X)를 25 개의 모니터링 포인트로 아래와 같이 재분할하였다.

$$X_{i(i=1,4)} = x_{j(j=1,25)} \tag{5}$$

Fig. 1 은 요소 분할된 롤 형상과 x-y-z 평면에서의 4 각형 요소로 구성된 롤 표면을 간략히 나타내었다. 본 연구에서 금형표면과 소재의 접촉처리 확인 과정은 전역탐색(global search)과 지역탐색(local search)의 두 단계로 나누어 접촉을 판단하였다. 전역탐색은 지역탐색을 하기 위하여 금형의 한 요소가 소재 요소 격자와 일정거리에 있는 모든 모니터링 포인트를 찾는 과정이다. 금형의 표면이 몇 개의 격자로 구성되어 있다고 가정할 경우, Fig. 2 에 묘사된 것처럼, 격자의 구조적 관점으로부터 격자 경계라 불리는 x, y, z 방향으로 제한된 경계를 갖게 될 것이다. 식 (6) 으로부터, 접촉영역 내에 소재 표면과 접촉하고 있는 금형의 모든 모니터링 포인트가 검색된다. 이렇게 검색된 모니터링 포인트는 소재 표면과 실제 접촉되지 않을 수도 있으므로, 소재 표면과의 접촉을 판단하기 위해서는 지역탐색을 이용하여 재 검색하였다.

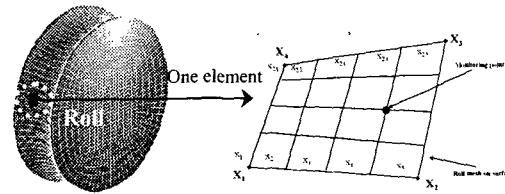


Fig. 1 Discretization of roll surface using 25 monitoring point

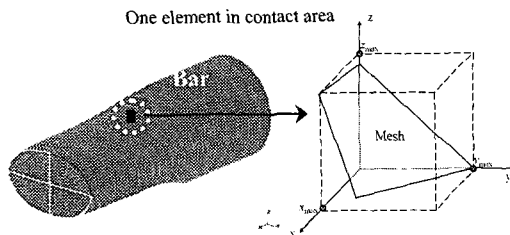


Fig. 2 The concept of global searching boundary

$$\min X_{wi(i=1,3)} \leq M_p(X_{pi(i=1,3)}) \leq \max X_{wi(i=1,3)} \tag{6}$$

$$\vec{n}_w = \frac{\vec{a} \times \vec{b}}{|\vec{a} \times \vec{b}|} = N_{i(i=1,3)} \tag{7}$$

$$X_{pi(i=1,3)} = N_{i(i=1,3)} \times \frac{\sum_{i=1}^3 (X_{wi} - N_i \cdot X_{mpi})}{\sum_{i=1}^3 N_i^2} + X_{mpi(i=1,3)} \tag{8}$$

여기서, \vec{n}_w 는 소재 표면의 수직 벡터이며, X_{pi} 는 선 벡터와 소재 표면 사이에서 투영점의 x,y,z 좌표를 나타낸다. X_{wi} 는 소재 표면을 구성하는 접촉가능성을 가진 격자 상의 임의의 점을 나타낸다. X_{mpi} 는 금형 표면상의 모니터링 포인트를 나타낸다. 유한요소해석 동안 모니터링 포인트는 금형의 표면을 침투하기 때문에, 모니터링 포인트와 소재의 격자사이에 갭이 존재한다. 그러므로 이 갭의 길이는 소재와의 접촉 결정을 위한 한계조건으로 사용된다.

투영점은 격자를 삼각형 면적으로 나누게 되므로, 한 요소의 4 개 절점에 의한 실 면적과 4 개의 삼각형 면적 합과의 차가 접촉조건의 결정하는 또 다른 조건이 된다. 식 (9)와 식 (10)에 의해 그 한계조건을 결정하며, 이러한 조건을 Fig. 3 에 표현하였다.

$$\overline{M_p P} \leq error_1 \tag{9}$$

$$Area_p - \sum_{i=1}^4 A_i \leq error_2 \tag{10}$$

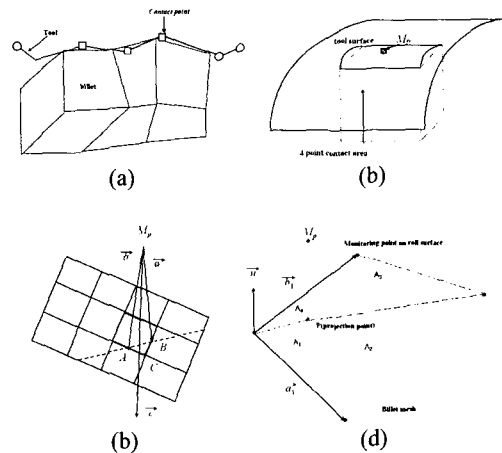


Fig. 3 Schematic diagram for local searching algorithm

Table 1 The properties of the DCI roll materials

Roll Material	Mechanical Properties		Chemical Compositions	Heat Treatment
DCI	Tensile Strength (kg/mm ²)	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 ²)	0.2-0.5		
	Hardness (Hs)	55/60		

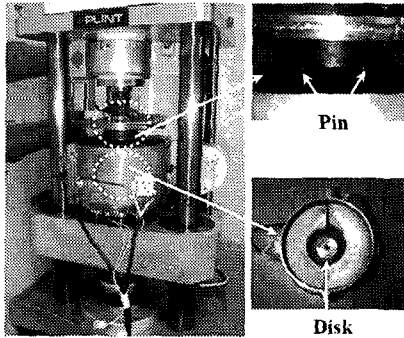


Fig. 4 Wear tester (PLINT, TE92)

3. 실험

3.1 마멸시험

마멸시험장치는 Fig. 4(a)와 같은 마멸시험기 (TE92 Base Unit, PLINT Co., England)를 이용하여 pin-on-disk 방식의 마멸시험을 실시하였다. 실험장치는 주시험장치, 압축기, 컴퓨터 등으로 구성되어 있으며, 주 시험장치는 하부 하중 액츄에이터 구성부, pin-on-disk 구성부(Two/Three Pin-on-disk Type), 전기로를 이용한 가열시스템부로 구성되어 있다. pin-on-disk 구성부에는 열측정을 위한 장치와 회전력계산을 위한 장치가 부착되어 있고 하부 하중의 공기압으로 2.5kN 까지 상승시킬 수 있으며, 회전수는 1000rpm 까지 가능하다. Fig. 4(b) 는 pin-on-disk 구성부에서 실험 시편인 핀과 디스크를 장착한 사진이다. 하부에 소재 재질인 디스크를 장착하고 상부에 금형재질인 핀을 장착하였다.

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 방향만으로 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.

Table 2 Conditions of wear experiments

Experimental Conditions			
Pin material	DCI		
Disk material	SM10C		
Load (N)	200N		
Velocity (m/s)	0.0628 (30rpm)	0.125 (60rpm)	0.188 (90rpm)
Sliding length (m)	452	904	1356
Temperature (C°)	400	500	600

본 연구에서는 탄소강 선재압연공정에서 사용되는 DCI 롤과 압연소재 SM10C 에 대한 마멸계수 획득을 위해 마멸시험을 수행하였다. Table 1 에는 DCI 롤 재질에 대하여 나타내었고 Table 2 에는 마멸 실험조건을 나타내었다.

3.2 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. Fig. 5 에 롤 시편의 고온경도측정 방법을 제시하였다. 고온경도 측정 시험조건으로 가열은 10 분당 100°C씩 증가하였고, 진공상태는 1x10⁻⁵ torr 로 하였다. 경도 압입자의 재질은 다이아몬드로 300g 의 압입 하중으로 하였으며, 경도측정을 위한 유지시간은 15분으로 하였다. Fig. 6 에 미소경도측정 장비에 장착된 시편의 사진을 나타내었다. 고온경도 실험 후, DCI 롤의 온도와 시간에 따른 경도 변화를 측정하여 Fig. 7 에 나타내었다.

3.3 열연화를 고려한 DCI 롤 마멸 예측수식

주 템퍼링 곡선은 템퍼링 파라미터(M)과 경도(H_v)와의 관계를 열처리 조건에 대하여 하나의 수식으로 근사화 한 것으로 온도와 시간에 따른 롤의 연화정도를 구할 수 있다.

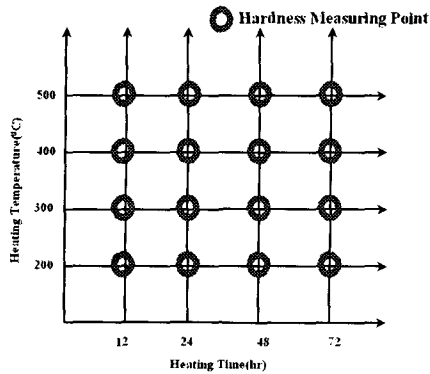


Fig. 5 Process of thermal softening experiment

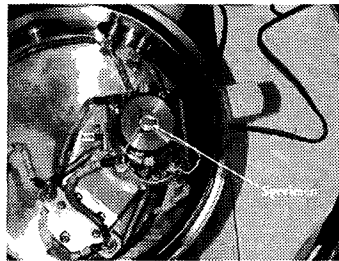


Fig. 6 Inside view of high temperature micro hardness tester

본 연구에서는 주 템퍼링 연화곡선을 아래의 식 (11)을 이용하여 근사화 하였다.

$$H_v = (A - B) / (1 + \exp((M - C) / D)) + B \quad (11)$$

여기서 A, B, C 그리고 D 는 템퍼링 곡선의 계수들이다.

DCI 롤에 대한 템퍼링 연화곡선식의 계수는 A:287.29, B:-1125.74, C:22.0, D:1.81 이다.

실험으로 DCI 롤에 대하여 온도와 시간에 따른 경도 측정치와 변환된 템퍼링 파라미터의 관계 및 식 (11)을 이용한 계산치를 비교하여 Fig. 8 에 나타내었다. Fig. 8 에 나타난 바와 같이 계산치와 실험 측정치를 비교한 결과, 계산치는 실험 측정치를 잘 반영하였으며, 따라서 이 식을 마멸해석 프로그램에 입력하여 고온경도변화를 고려한 마멸해석에 적용하고자 하였다.

본 연구에서는 실제 열간 압연작업 시 롤과 소재의 접촉영역의 온도가 약 400°C 정도로 가정하여, 이 온도의 경도값으로 DCI 롤의 마멸계수, 8.096 E-6 를 초기의 마멸계수에 적용하였다.⁽¹⁴⁾

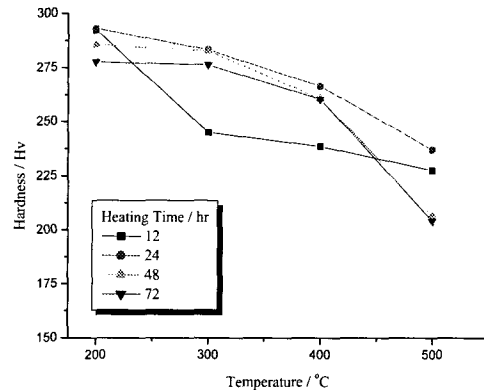


Fig. 7 Hardness variation for DCI roll according to temperature and heating time

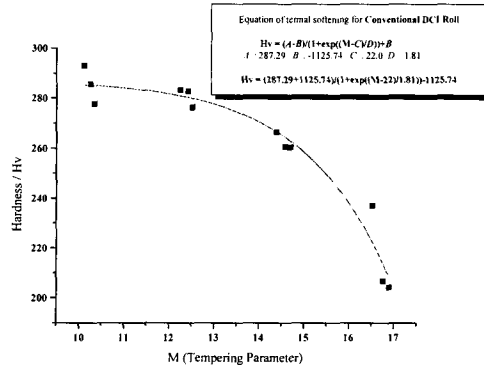


Fig. 8 Master tempering curve of DCI roll

4. 탄소강 압연공정의 성형해석

본 연구에서는 실제 열간 압연공정에 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.

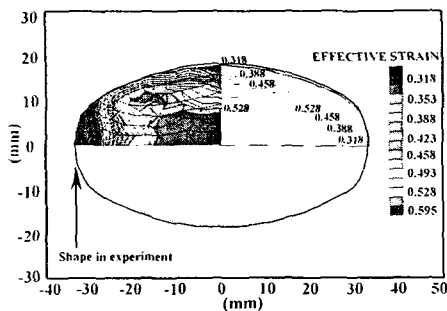
소재, SM10C 에 대한 유동응력식은 탄소함유량, 온도, 변형률 및 변형률 속도의 함수로 된 Shida⁽¹⁵⁾의 구성방정식을 이용하였다. 초기소재직경은 60mm, 초기소재온도는 1100°C 그리고 롤의 초기온도는 300°C 로 가정하였고, 소재와 롤의 마찰상수(m)는 일반적으로 무 윤활 열간 압연상태에서 적용되고 있는 0.7 로 가정하여, 첫번째 패스인 round-oval 공정과 두 번째 패스인 oval-round 공정의 성형해석을 수행하였다.^(16,17) 롤 직경은 두 공정 모두 310mm 이고, 분당 회전수는 34rpm 이다. 그리고 롤 겹침은 3.25mm 로 하였으며, 이때 단면감소율

Table 3 The conditions of FE-simulation for hot rod rolling processes

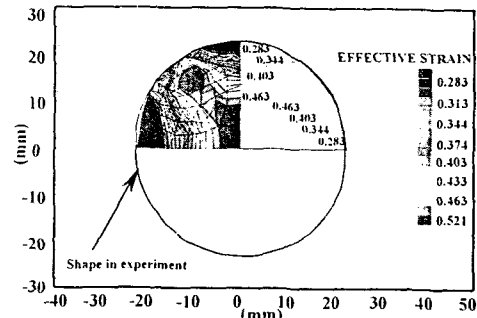
Conditions	Process	1pass : round-oval	2pass : oval-round
Rod temperature (°C)		1100	1100
Roll temperature (°C)		300	300
Rod diameters (mm)		60	-
Roll diameter (mm)		320	320
Roll gap (mm)		3.25	3.25
Roll velocity		34rpm	34rpm
Friction factor (m)		0.7	0.7
Lubricant		No	No

Table 4 The results of FE-simulation for hot rod rolling processes

Items	Process	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. rod 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. 9 The shape of exit from FE-analysis compared with experimental results

은 첫번째 패스, round-oval 공정에서는 39.2%이고, 두번째 패스, oval-round 공정에서는 20%이다.

Table 3 에 성형해석의 공정조건을 나타내었고, 그 결과를 Table 4 에 정리하였다. 성형해석 후, 실험으로 얻어진 선재 단면 형상을 비교하여 Fig. 9 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.

5. 탄소강 선재 압연공정의 3D 마멸해석

5.1 마멸형상

3 차원 마멸해석을 위하여, 성형해석 결과로부터 롤 및 소재 접촉면에서의 표면온도(T), 응력(σ_{ij}), 변형률(ϵ_{ij}), 변형률 속도($\dot{\epsilon}_{ij}$), 절점 속도(V_{ij}),

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 공정의 성형해석 후, 소재가 롤에 접촉 개시 한 후 롤을 빠져 나올 때 까지 소재의 속도 분포를 Fig. 10(a)에 나타내었고, Fig. 10(b)에는 두번째 패스인, oval-round 공정에 대한 속도분포를 나타내었다. Fig. 10 의 제 (1) 영역은 롤 속도가 소재의 속도보다 빠른 후방슬립이 일어나는 영역으로, 이 영역에서 연삭 마멸이 발생하게 된다. 제 (4) 영역에서는 소재가 롤 회전속도보다 빠른 전방슬립이 발생하는 영역이며 이 영역에서는 소재가 롤에 달라붙는 응착이 발생하는 영역이다.

롤의 회전속도와 소재 속도가 일치하는 제 (2), (3) 영역은 중립영역으로 롤과 소재의 접촉면에서의 마찰에 의해 그 영역이 달라진다. 따라서, 본 연구에서는 롤 속도가 소재속도보다 빠른 영역, 즉 롤의 미끄럼이 발생하는 영역에서 롤의 마멸계산을 수행하였다.

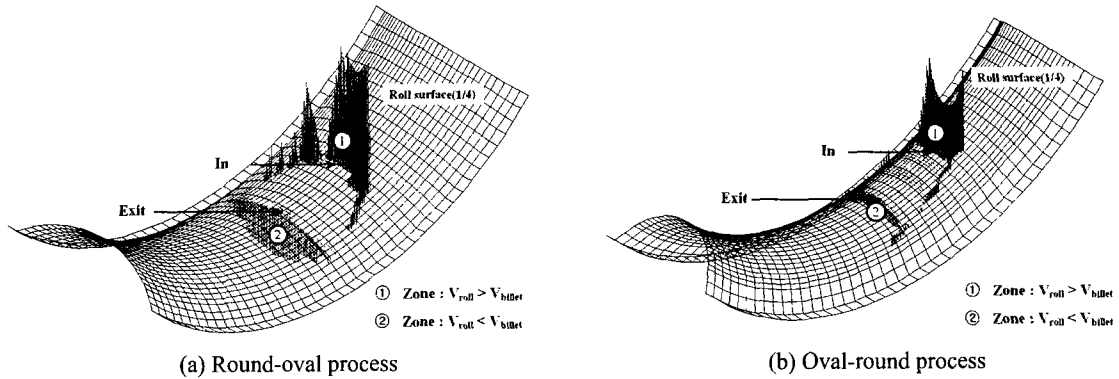


Fig. 10 Profile of relative velocity in contact area in hot rod rolling processes

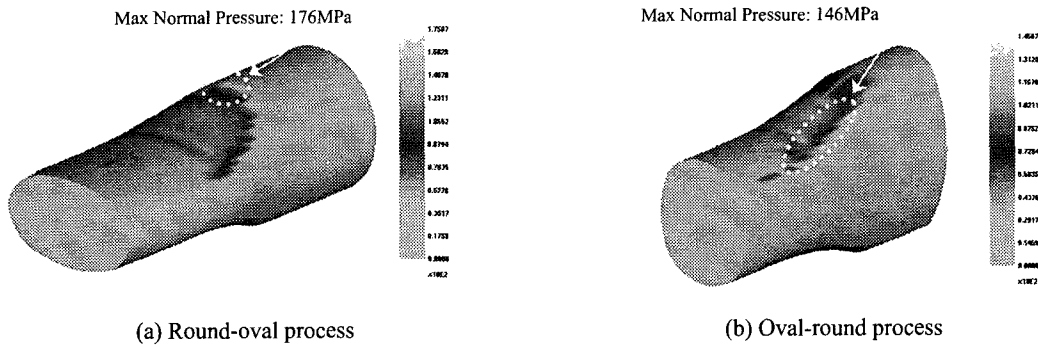


Fig. 11 Normal pressure distribution in hot rod rolling processes

Fig. 11 에 롤과 소재 접촉면에서의 압력분포를 나타내었다. Fig. 11(a)의 round-oval 공정의 압력분포를 보면, 롤과 소재가 접촉 개시 영역에서 높은 압력을 나타내고 있고, 폭 방향의 접촉영역 경계부로 압력이 점차 커짐을 알 수 있다. Fig. 11(b)의 oval-round 공정의 압력분포를 보면, 접촉 개시 영역보다는 소재의 폭 퍼짐 방향으로 롤과 소재의 경계부에서 출구쪽으로 갈수록 높은 압력을 나타남을 볼 수 있다.

Table 3 의 공정조건으로 round-oval 공정 및 oval-round 공정을 유한요소 해석하고, 그 결과를 이용하여 본 연구에서 개발한 3 차원 마멸프로그램을 이용하여, 각 공정의 마멸형상을 예측하였다.

5.1.1 Round-oval 공정의 마멸 형상

Round-oval 공정의 유한요소 해석을 수행한 후, 롤 표면에서의 롤과 소재의 상대속도 분포를 Fig. 10(a)에 나타내었다. 롤에 수직으로 나타낸 선의 크기는 롤과 소재의 상대 속도차를 나타낸다. 입구영역에서는 롤 속도가 빠른 영역(①)이며, 출구

영역에서는 소재 속도가 빠른 영역(②)이다. 제 ① 영역에서 롤과 소재의 상대속도 크기는 롤과 소재가 접촉하는 동일 접촉시간에 롤 중심부에서 가장 작고, 롤 중심부에서 가장 먼 접촉지점에서 가장 크다. 제 ② 영역에서는 반대로 롤과 소재의 상대속도 크기는 롤과 소재가 접촉하는 동일 접촉시간에 롤 중심부에서 가장 크고, 롤 중심부에서 가장 먼 접촉지점에서 가장 작다.

본 연구에서 개발한 3 차원 마멸해석 프로그램을 이용하여 round-oval 공정의 마멸 형상을 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12(a)는 round-oval 공정에서 롤이 이 물질각 만큼 회전하였을 경우, 즉 1 회전에 해당하는 마멸 형상을 나타내었다. 마멸의 깊이는 가운데 영역에서 폭 방향으로 갈수록 줄어드는 균일한 양상을 나타내고 있다.

5.1.2 Oval-round 공정의 마멸 형상

Oval-round 공정의 유한요소 해석을 수행한 후, 롤 표면에서의 롤과 소재의 상대속도 분포를 Fig. 10(b)에 나타내었다. 롤에 수직으로 나타낸 선의

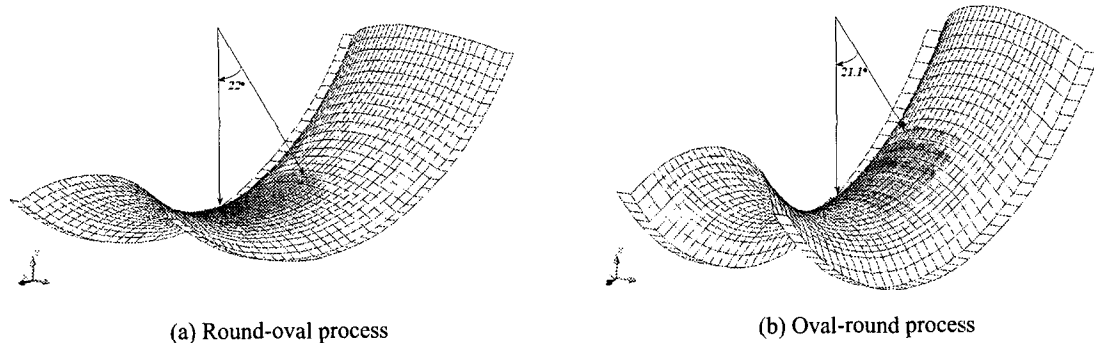


Fig. 12 Wear profile for DCI roll in hot rod rolling process

크기는 롤과 소재의 상대 속도차를 나타낸다. 입구 영역에서는 롤 속도가 빠른 영역(①)이며, 출구 영역에서는 소재 속도가 빠른 영역(②)이다. 제 ① 영역에서 롤과 소재의 상대속도 크기는 round-oval 공정과 마찬가지로, 롤과 소재가 접촉하는 동일 접촉시간에 롤 중심부에서 가장 작고, 롤 중심부에서 가장 먼 접촉지점에서 가장 크다. 그러나, 제 ② 영역에서 롤과 소재의 상대속도 크기는 round-oval 공정과는 달리, 롤 중심부에서 가장 먼 접촉 지점에서도 상대속도가 크게 나타났는데, 이것은 소재의 폭 퍼짐 속도가 round-oval 공정보다 크다는 것을 말해주며, oval-round 공정은 폭 퍼짐에 의한 영향이 마멸에 큰 영향을 줄 수 있음을 암시한다. Fig. 12(b)는 oval-round 공정에서 롤이 물림각 만큼 회전하였을 경우, 즉 1 회전에 해당하는 마멸 형상을 나타내었다. round-oval 공정에서의 마멸깊이는 롤과 소재가 접촉하는 동일 접촉시간에 폭 퍼짐 방향으로 갈수록 증가하면서 다시 줄어드는 형태를 나타내고 있다.

5.2 생산량(Tonnage)에 따른 마멸 형상

생산량에 따른 마멸계산을 위하여 round-oval 및 oval-round 공정에서 롤의 1 회전시, 소재 생산량이 계산 되어야 한다. 롤이 1 회전 할 때, 소재와 롤의 물림각은 성형해석결과 round-oval 공정에서는 약 22°,이며 oval-round 공정에서는 약 21.1°이다. 롤이 1 회전하여 소재가 생산될 때, 실제 롤 마멸이 계산되어야 할 부분은 물림각에 해당하므로, 롤 1 회전시 생산되는 소재에 대한 마멸량은 롤과 소재의 물림각 만큼 누적된 마멸량이어야 한다. 먼저, 단위시간당 생산되는 소재의 체적, \dot{V} 는 식 (12)으로 계산된다.

Table 5 Production of rod for the given passes

Item	Process	Round-oval process	Oval-round process
Bite angle (°)		22	21.1
Exit velocity of stock (m/sec)		0.529	0.509
Section area (mm ²)		0.002076	0.001658
Volume/sec (m ³ /sec)		0.00110	0.00084
Specific gravity of rod (g/m ³)		7374310	
Product for one revolution (kgf)		18	11
Product / day (Ton)		881	539

$$\dot{V} = v_{\text{exit}} \times A \quad (12)$$

여기서, v_{exit} 는 소재의 출구속도이며, A 는 출구에서 빠져 나오는 소재의 단면적이다. 롤과 소재의 접촉시간과 물림각은 Table 5 에 나타나 있고, 롤의 1 회전시 접촉시간이 계산된다. 따라서 롤의 1 회전 당 소재의 체적, V 는 접촉시간과 소재의 출구단면적의 곱으로 계산되며, 1 회전 당 롤의 중량은 아래의 식으로 계산된다.

$$W = V \times \gamma \quad (13)$$

여기서, W 는 소재의 중량이며, γ 는 소재의 비중량이다. Table 5 에는 Table 4 의 성형해석결과를 근거하여, round-oval 및 oval-round 공정의 롤 1 회전당 소재의 생산량을 계산하여 정리하였다.

본 연구에서의 롤 회전수는 34rpm 이며, Table 5 에서 롤을 24 시간 가동하게 된다면 48960 회전 하게 된다. 따라서 하루 생산량은 첫번째 패스,

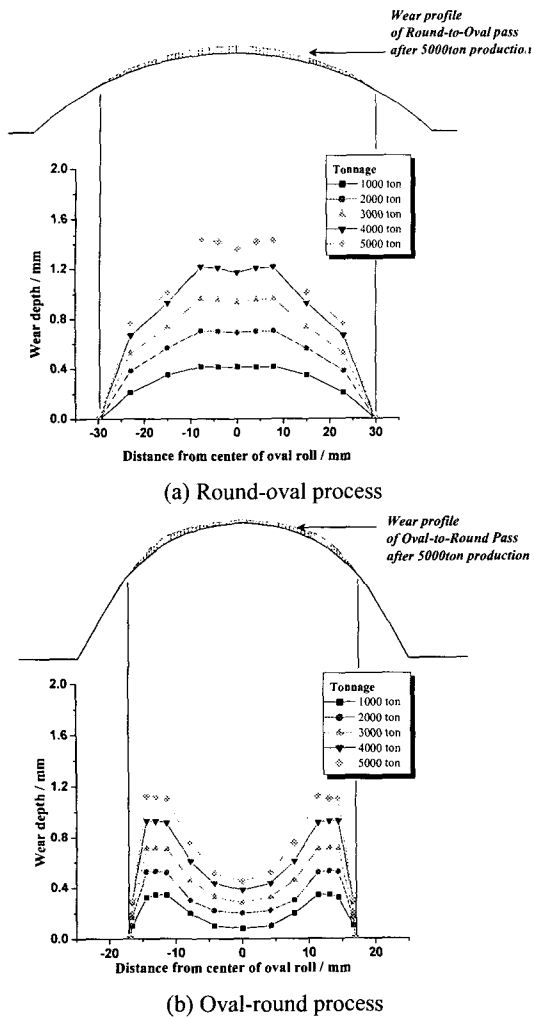


Fig. 13 Wear profile for DCI roll in hot rod rolling processes

round-oval 공정의 경우 약 881ton 이며 oval-round 공정의 경우 약 539ton 을 생산한다. 다시, 1000ton 생산 시 롤의 회전수는 round-oval 공정의 경우 약 55573 회전을 하며 oval-round 공정의 경우는 약 90834 회전을 하게 된다.

1000ton 생산량 당 마멸 형상을 예측하기 위하여 본 연구에서 개발된 마멸 프로그램을 이용하여 1000ton 당 마멸 형상과 마멸깊이를 예측하였다. 생산량에 따른 마멸 형상을 예측하기 위하여, 초기 롤 형상으로 유한요소해석 후, 1000ton 생산 후의 롤 회전수를 고려하여 마멸해석을 수행한다. 마멸해석 후, 마멸깊이를 롤 형상에 반영하여 새로운 롤 형상으로 유한요소해석을 수행하고, 유한요소 해석 결과를 이용하여 다시 마멸해석을 수행하는 방식으로 생산량 당 마멸 형상을 예측하였다.

마멸형상을 롤에 반영하기 위하여 본 연구에서는 롤의 폭 방향으로 마멸 형상을 반영하는 기준 포인트를 선정하여 이 포인트를 잇는 선으로 롤 형상을 재 정의 하였다.

Fig. 13(a)에는 round-oval 공정에서 SM10C 선재를 5000ton 생산한 후, Tonnage 별 마멸 형상을 나타내었다. 5000ton 생산 후 최대 마멸깊이는 롤 폭 방향 중심 축에서 8.4mm 떨어진 지점에 위치하였으며, 마멸 깊이는 1.43mm 로 예측하였다. Fig. 13(b)에는 oval-round 공정에서 SM10C 선재를 5000ton 생산한 후, Tonnage 별 마멸 형상을 나타내었다. 5000ton 생산 후 최대 마멸깊이는 롤 폭방향 중심 축에서 14.4mm 떨어진 지점에 위치하였으며, 예측된 마멸 깊이는 1.12mm 이었다.

여기서, 예측된 round-oval 및 oval-round 의 마멸 해석결과로부터 최대 마멸깊이의 위치는 생산량이 증가할수록 이전에 최대 마멸깊이를 기준으로 폭 퍼짐 방향으로 미소하게 이동한다는 사실을 알 수 있으며, 마멸이 진행됨에 따라 전체적인 마멸량은 줄어들지만, 국부 마멸이 크게 나타남을 해석적으로 확인 할 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 마멸시험 및 열연화를 고려한 고온경도시험을 수행하였다. 그리고 탄소강 선재 압연공정, round-oval 및 oval-round 공정에 대한 성형해석을 수행하여 성형해석 결과 데이터를 개발된 마멸해석 프로그램에 적용하여 생산량에 따른 마멸형상을 예측하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) DCI 롤의 고온경도시험 결과, DCI 롤은 시간과 온도에 따라 경도가 하락하는 열연화 현상이 뚜렷하였다. 고온경도변화에 따라 주 텀퍼링 곡선을 구하기 위한 수식을 제안하고, 이를 마멸해석 프로그램에 적용하여 마멸해석을 수행하였다.

(2) 선재압연공정의 유한요소해석으로 얻어진 압연 후 소재의 형상은 실험으로 얻어진 형상과 잘 일치하였다. 이로써 성형해석 결과가 실제 현상을 잘 반영할 수 있음을 알 수 있었다.

(3) 성형해석 결과 데이터를 이용하여 본 연구에서 개발된 3 차원 마멸해석 프로그램으로 round-oval 및 oval-round 압연 공정의 마멸해석을 수행하였다. 마멸형상은 롤과 소재의 상대속도 및 수직

압력이 큰 영역에서 크게 나타났고, 특히, oval-round 공정에서는 소재의 폭 퍼짐 속도의 증가로 롤과 소재의 접촉 가장자리에서 마멸이 크게 나타났다.

(4) 1000ton 당 마멸된 롤 형상으로 재 정의하여 성형해석 및 마멸해석을 수행하여 5000ton 생산시의 마멸형상을 살펴본 결과, 최대 마멸깊이를 갖는 영역은 폭 퍼짐 방향으로 조금씩 이동하는 경향을 나타내었다.

(5) 생산량에 따른 DCI 롤의 최대 마멸깊이를 비교해 보면, 마멸이 진행됨에 따라 롤 압하율이 낮아지나, 시간과 온도에 따른 경도 저하로 인해 DCI 롤의 마멸은 거의 동일 비율로 증가하였다.

선재 압연제품의 치수 정밀도 및 생산성 향상을 위하여 롤에 편 마멸 및 국부 마멸이 생기지 않는 공형 설계 및 패스 스케줄 설계는 필수적이다. 본 연구의 결과로 생산량에 따른 마멸형상의 예측이 가능하고, 롤 갭 조정의 가이드 라인 제시가 가능하므로 패스 스케줄 프로그램 개발 시 생산량에 따른 롤 갭 조정의 활용이 기대된다.

향후, 본 연구에서 개발된 마멸프로그램의 검증을 위하여 열간 선재 압연공정의 생산량에 따른 마멸시험이 수행되어야 할 것이다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Sachs, G., 1961, "Roll Wear in Finishing Trains of Hot Strip Mills," *Iron and Steel Engineer*, Vol. 38, pp. 71~92.
- (2) Williams, R.V. and Boxall, G. M., 1965, "Roll Surface Deterioration in Hot Strip Mills," *J. of Iron and Steel Inst.*, Apr., pp. 369~377.
- (3) Kihara, J., 1983, "Roll Wear in Hot Strip Mill," *Iron and Steel*, pp. 62~69.
- (4) Ohnuki, A., 1987, "Wear and Deterioration of Rolling Roll and Procedure of Anti-Wear," *J of Japan Soc. Lubr. Eng.*, Vol. 32, pp. 621~626.
- (5) Park, J. W., Lee, H.C. and Lee, S., 1999, "Composition, Microstructure, Hardness, and Wear Properties of High-Speed Steel Rolls," *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 30 A, pp. 399~409.
- (6) Rogberg, R., 1990, "Experience Gained on the 5- Stand Cold Rolling Mill at SSAB with a 6-High Stand using CVC Technology," *Metall. Plant Tech. Int.*, 13, pp. 58~67.
- (7) Klimenko, V. M., 1986, "Mathematical Model of Wear of Work and Back-Up Rolls during the Interaction in Four-High Stands," *Steel in The USSR*, Vol. 16, pp. 427~429.
- (8) Wusatowski, Z., 1969, *Fundamentals of Rolling*, Pergamon Press, London, pp. 146~202.
- (9) Lundberg, S. E., 1993, "A New High-Temperature Test Rig for Optimization of Materials for Hot-Rolling Rolls," *J. of Mat. Pro. Tech.*, Vol. 36, pp. 273~301.
- (10) Bae, W. B., Park, H. D. and Song, G. H., 1995, "Analysis of the Rolling Contact Fatigue for Work Roll in Finishing Mill of Hot Strip Rolling," *J. of KSME*, Vol. 19, No. 1, pp. 292~300.
- (11) Archard, J. F., 1953, "Contacts and Rubbing of Flat Surface," *J. of APPL. Phys.*, Vol. 24, p. 981.
- (12) Yuasa, K. and Okamoto, J., 1981, "Effects of Press Slide Motion on Life of Warm- Forging Dies," *J. of JSTP*, Vol. 22, No. 241, pp. 133~138.
- (13) Kim, T. H., Kim, B. M. and Choi, J. C., 1997, "Prediction of Die Wear in the Wire in the Wire Drawing Process," *J. of Mat. Pro. Tech.*, Vol. 65, pp. 11~17.
- (14) Stevens, P. G., Ivens, K. P. and Harper, P., 1971, "Increasing Work Roll Life by Improved Roll Cooling Practice," *J. of Iron Steel Inst.*, January, pp. 1~11.
- (15) Shida, S., 1969, "Empirical Formula of Flow-Stress of Carbon Steels - Resistance to Deformation of Carbon Steels," *J. of JSTP*, Vol. 10, No. 103, pp. 610~617.
- (16) Altan, T., Oh, S. H. and Gegel, H. L., 1983, *Metal Forming: Fundamentals and Forming*, American Society For Metals, OH44073.
- (17) Geleji, A., 1960, *Bildsame Formung Der Metalle In Rechnung Und Versuch*, AKADEMIE-VERLAG GmbH, Berlin.