

리드용 와이어의 생산성 향상을 위한 평압연 최적설계

박창형, 김진호*
영남대학교 기계공학과

Optimal Design of flat rolling about Lead Wire for Productivity Improvement

Chang Hyung Park, Jin Ho Kim*

Division of Mechanical Engineering, Yeungnam University

요약 본 논문에서는 압연 공정을 통해 리드용 와이어를 생산할 때 생산성을 향상시키기 위해 와이어의 직진 속도를 증가시키는 방법을 연구했다. 직진 속도를 증가시킬 때 가장 중요한 점은 와이어가 원래의 목적을 바르게 수행할 수 있는 것이다. 즉, 와이어의 직진 속도가 증가함과 동시에 균열이 발생하지 않으며, 치수 공차를 만족시켜야 한다. 하지만 와이어의 직진속도를 증가시키게 되면 기존의 압하량 보다 더 큰 수치를 주어야 하고 이는 와이어에 보다 큰 손상을 주어 표면에 무리를 주게 된다. 따라서 기존의 2단계 평압연 공정을 통해 생산되었던 와이어의 필요스펙을 충족시키면서 생산성 향상까지 도모할 수 있는 3단계 평압연 공정에 관해 연구하였다. 본 연구에서는 3단계 평압연 롤러의 압하량만을 변수로 가정하고 다른 조건은 현장 조건과 일치시킨다. 상용 PIDO(Process Integration and Design Optimization) 툴인 PIANO (Process Integration, Design and Optimization)를 통해 지정한 변수 3가지를 조작하면서 실험점을 분포하고 이를 바탕으로 최적설계를 진행하여 와이어의 생산성을 향상시키고 동시에 필요 스펙인 최대 응력의 최소화가 가능하도록 설계되었다.

Abstract In this paper, we report a method of improving the productivity of lead wire fabricated through the rolling process by increasing its linear velocity. The most important point to consider when raising the linear velocity is that the original specifications must still be adhered to. In other words, the dimensional tolerance must be satisfied when increasing the linear velocity of the wire without causing cracks. However, if the linear velocity of the wire is increased, the degree of reduction must also be increased, which causes more damage to the wire and increases the load on its surface. Therefore, we studied a three step rolling process which can satisfy the specifications of the wire produced through the two step rolling process and improve the productivity. In this study, only the roll gap of the three-stage rolling roller is assumed to be a variable, while the other conditions are the same as the field conditions. In addition, through the PIANO (Process Integration, Design and Optimization) tool, the (optimum?) surface roughness and maximum stress are maintained.

Keywords : Cold rolling, Flat rolling, Lead, Optimal design, Productivity

1. 서론

특수섬유의 제직품질에 직접적인 영향을 미치는 리드용 와이어는 높은 치수정밀도와 응력의 최소화가 필요하다. 따라서 리드용 와이어는 냉간 압연 공정을 통해 생산

되는데, 냉간 압연 공정을 채택한 이유는 표면조도의 향상과 crack의 발생 가능성을 감소시키기 위한 가장 적절한 방법이기 때문이다[1]. 또한 압연 공정 시 높은 치수정밀도를 위해서는 압축되었다가 다시 복원되는 양인 탄성 회복량을 고려하여 롤 갭을 선정하여야 한다. Lee[2]

본 연구는 중소기업청의 기술혁신개발사업의 일환으로 수행하였음. [S2340243, 고정밀(두께공차:10um, 진직도:1/1000mm) 반환선개발]

*Corresponding Author : JinHo Kim(Yeungnam University)

Tel: +82-10-2881-8215 email: jinho@ynu.ac.kr

Received February 9, 2017

Revised (1st March 10, 2017, 2nd March 30, 2017)

Accepted May 12, 2017

Published May 31, 2017

는 냉간 압연에서 재료의 탄성 변형량을 고려한 두께 설계로 구리 호일 생산에 관한 연구를 하였으며 Kim[3]은 연속 압연 공정에서 롤 갭을 제어하는 방식을 연구하였는데 이는, 발생 가능한 오차를 줄일 수 있는 방안으로 롤 갭과 롤 회전속도 등의 변수들을 적절한 수치의 조정을 통해 제어하는 방법을 고안하였다. 또한 Park[4]는 고속 냉간 압연 방법을 이용해 압하량을 적절히 분포하여 웨더스트립용 인서트메탈을 제작 시 표면에 crack이 발생하지 않는 방법에 관해 연구하였다. 이 연구는 앞서 언급한 바와 같이 리드의 제작에 사용되는 와이어의 정밀한 치수와 매끄러운 표면 조건의 지침이 된다. 또한 Lee[5]는 열간압연 공정에서 응력집중을 최소화시킬 수 있는 최적의 모양을 설계하는 방법에 관해 연구하였다. 이를 바탕으로 압연 롤러의 최적설계 시 유한요소법을 사용하여 각각의 압하량을 적절하게 분배하는 법을 연구하였다. 하지만 와이어의 제작 시 정밀한 치수와 매끄러운 표면을 얻을 수 있는 압하량 분배에 관한 연구는 진행된 바가 없으며 심지어 체계적으로 정리가 되어 있지 않기 때문에 제작이 필요한 와이어의 직경이 바뀌게 된다면 다시 압하량을 선정하기 위해 이전과 같은 시행착오를 겪는 것이 불가피하다. 따라서 본 논문에서는 와이어의 제작품질을 만족시키면서 생산성을 향상시킬 수 있는 방법에 관해 연구하였다. 하지만 제품의 생산성을 향상시키기 위해 와이어의 직진속도를 향상시키게 되면 기존의 압하량 보다 더 큰 수치를 주어야 하고 이는 와이어에 보다 큰 손상을 주어 표면에 무리를 주게 된다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 기존 2단계 평압연 공정에서 3단계 평압연 공정으로 개선하여 각각의 압하량을 보다 적게 분배시킴으로써 와이어에 작용하는 최대응력을 최소화 하고자 한다. Fig. 1. 은 3단계 평압연 공정의 모식도와 구성요소의 명칭을 나타낸 것이다. 또한 와이어 제작 시 필요 스펙에 가장 큰 영향을 미치는 압하량 분배를 연구의 초점으로 두고 Fig. 2. 와 같이 각각의 변수를 롤 갭(roll gap)이라 정의하였다. 또한 최적설계는 상용 PIDO(Process Integration and Design Optimization) 툴인 PIANO(Process Integration, Automation, and Optimization) 프로그램을 사용하여 응력을 최소화할 수 있는 최적의 압하량 분포를 선정하였다. 그리고 해석시간의 단축과 효율적인 분석을 위해 각 step의 압하량 분배를 대략적인 범위로 나누어 해석하였다. 이렇게 획득한 최적 값의 분석을 통해 연구목표인 생산성을 향상과

동시에 응력의 최소화의 성과를 이루었다. 또한 Joo[6]는 FMEA를 이용한 링압연 공정의 신뢰성을 분석하였는데 이를 참고하여 압연해석의 소프트웨어를 통한 신뢰성을 증명 하였다. 따라서 해당 분야에 관한 연구를 진행함으로써 최종적으로는 롤 갭과 와이어 사이의 관계를 수식으로 정리하는데 필요한 데이터 정립에 이바지 하게 될 것이다.

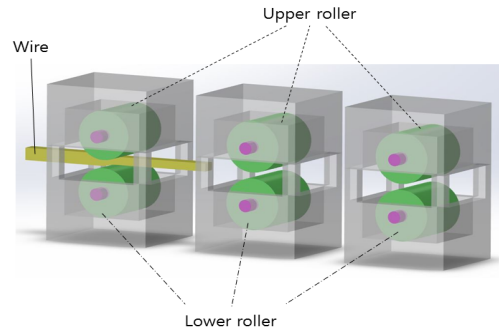


Fig. 1. Design for flat rolling system

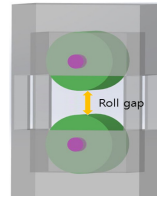


Fig. 2. Definition of roll gap

2. 설계문제 정식화

2.1 설계요구사항

본 논문에서 얻고자하는 결과는 제품의 생산성을 향상시키는 것이다. 하지만 이를 위해서 와이어의 직진속도를 향상시키는 것은 기존의 압하량보다 더 큰 압하량을 부여하게 되므로 와이어에 더 큰 무리가 갈 수 있다. 따라서 생산성과 생산품질의 향상을 동시에 얻기 위해 3단계 평압연 방식으로 와이어를 생산하기로 결정하고 이에 관한 최적설계와 그 해석을 진행하였다. 최적설계는 상용 PIDO(Process Integration and Design Optimization) 툴인 PIANO(Process Integration, Automation, and Optimization)를 통해, 최적설계로 설계된 3단계 압연 공정의 해석은 범용유한요소 프로그램인 ANSYS를 사용하여 해석하였다. 해석과정에서는 와이어의 치수와 최대응력에 변화를 줄 수 있는 변수를 1st

롤 갭(G1), 2nd 롤 갭(G2), 3rd 롤 갭(G3) 3가지로 설정하였다. 또한 해석의 정확도와 신뢰성을 높이기 위해 실제 와이어의 생산 공정과 동일하게 만들었다. Table 1. 은 앞서 언급한 바와 같이 와이어의 생산성을 향상시키기 위해 현장에서 사용되는 속도보다 더 빠른 속도인 1m/s로 설정하였고, 길이가 무한한 와이어지만 해석시간의 단축을 위해 300mm로 제한하였다. 또한 실제 현장에서 사용되는 마찰계수인 0.2, 와이어의 뒤틀림을 방지하는 wire tensioner의 역할을 할 수 있도록 와이어 진행방향의 반대방향에 30kgf(294N)의 힘을 작용하였다. 또한 해석상에서 실제 와이어와 같은 재질인 Stainless steel 430을 선택하였고 재료 물성치는 Table 2. 와 같다.

Table 1. Analysis conditions

Velocity	1m/s
Length	300mm
Coefficient of friction	0.2
Tension	30kgf(294N)
time step	0.01s

Table 2. Material properties

Material	Stainless Steel 430
Density	7750kg/m ³
Poisson's ratio	0.31
Yield stress	205MPa
Tensile stress	450MPa

2.2 설계문제 정식화

와이어의 설계요구사항을 충족시키는 설계변수를 찾기 위해 설계문제를 정식화하면 Table 3. 와 같다. 와이어의 직진속도를 증가시키으로써 생산성을 증진시키는 것과 동시에 설계요구사항인 치수공차(10 μ m)를 만족하고 최대응력(σ_{max})을 최소화시키는 것이 최적설계의 목적이다. 또한 변수는 와이어의 최대응력에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 1st 롤 갭(G1), 2nd 롤 갭(G2), 3rd 롤 갭(G3)로 선정하였다. 각각의 변수로 설계된 공정을 통해 생산된 와이어는 구속조건인 재료의 항복응력조건(205MPa 이하)과 치수공차(10 μ m)를 만족시켜야 한다.

Table 3. Optimization of design

Objective Function	To minimize Max_stress(σ_{max})
Design Variables	G1, G2, G3
Constraint	$\sigma_{max} \leq 205\text{MPa}$
	$0.64\text{mm} \leq T \leq 0.66\text{mm}$

2.3 설계변수

변수들의 상, 하한 경계값과 초기값을 효과적으로 정하고 시간을 실험점과 해석시간을 줄이기 위해서는 대략적인 변수의 범위가 필요하다. 따라서 대략적인 변수의 범위를 선정하기 위해 5가지 CASE를 모델링하여 각각 해석을 하였다. 그 결과는 Table 4. 와 같고 이를 바탕으로 최적의 롤 갭은 각각 표에서 음영을 준 부분과 같이 $0.725\text{mm} < G1 < 0.775\text{mm}$, $0.675\text{mm} < G2 < 0.725\text{mm}$, $0.625\text{mm} < G3 < 0.675\text{mm}$ 에 있다고 추정할 수 있었다. 이를 바탕으로 Table 5. 와 같이 변수들의 상, 하한 경계값과 초기값을 설정하였다. 여기서 상, 하한 값은 최적설계를 시행할 때 각각의 변수마다의 범위를 지정해주는 것이다. 즉, 이 범위 안에서 초기값을 바탕으로 각 변수의 최적 값이 존재하는 변수의 경우를 분석해준다.

Table 4. Five cases analysis

	G1(mm)	G2(mm)	G3(mm)	thickness(mm)	max stress (kPa)
1	0.625	0.575	0.525	0.554189	2.290
2	0.675	0.625	0.575	0.591442	2.014
3	0.725	0.675	0.625	0.62877	1.834
4	0.775	0.725	0.675	0.691045	1.806
5	0.825	0.775	0.725	0.774581	1.784

Table 5. Limit values of the variables

Design variables	Lower boundary	Initial	Upper boundary
G1(mm)	0.725	0.750	0.775
G2(mm)	0.675	0.700	0.725
G3(mm)	0.625	0.650	0.675

2.4 실험계획법

모델의 최적설계를 진행할 때 정확한 결과를 얻기 위해서는 효과적인 실험점 분포가 중요하다. 그리고 효과적인 실험점을 통해 정확도가 높은 근사모델을 생성해야 한다. 이렇게 생성된 근사모델에 근거하여 유한요소해석 프로그램을 활용하여 치수공차와 응력조건과 같은 구속조건의 만족여부를 판단하여야 한다. 효과적 실험점 분포가 전 과정의 출발선이기 때문에 효율적인 실험점 분포가 연구결과의 성패를 좌우한다. 따라서 본 연구에서는 효율적인 실험점 분포를 위해서 상용 PIDO(Process Integration and Design Optimization)틀인 PIANO(Process Integration, Automation, and Optimization)를 사용하여 효율적인 실험계획법을 작성 후 이에 근거하여

효과적인 실험점 획득에 이바지 하였다. 이처럼 효과적인 실험점 분포가 중요한 이유는 모든 실험을 하지 않고 중요하거나 특징이 있는 점만 해석함으로써 효율적으로 변수와 결과 사이의 상관관계를 얻기 위함이다. 또한 상대적으로 연구가 더딘 분야에서는 이론적 지식이 부족하기 마련인데, 이러한 경우 작은 실험의 크기만으로도 결과값을 효율적으로 얻어 낼 수 있다는 점에서 이와 같은 효과적인 실험점 분포가 필요하다. 본 논문에서는 PIANO에서 제공하는 직교배열표를 활용하여 변수의 개수와 level을 통해 $L_9(3^4)$ 를 선정, 실험점을 효과적으로 분포하였다. 또한 level은 변수와 결과의 선형성을 나타내는 척도인데, 압하율은 압하량과 비선형성이 강하므로 3 level 으로 설정하였다. 이처럼 직교배열표를 활용한 실험점 분포를 하는 이유는 지정한 변수 이외에 다른 조건에 의해 여러 가지 변동될 수 있는 수치를 제외하기 위해서이다. $L_9(3^4)$ 를 선정하여 9가지 실험점을 각각 모델링하여 유한요소해석을 진행하였다. 또한 이를 바탕으로 근사모델을 생성하였다. 하지만 9개의 실험점을 바탕으로 작성된 근사모델은 예측 정확도가 70%이하로 신뢰성이 결여되었다. 따라서 16개의 실험점을 ALDH(Augmented Latin-Hypercube Design)방식을 이용해 추가하여 총 25개의 실험점을 통해 근사모델을 생

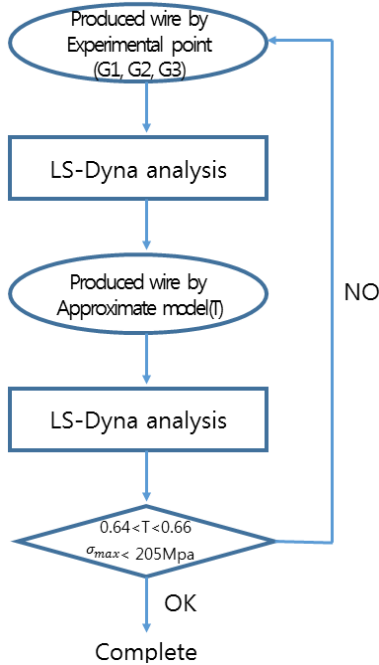


Fig. 3. Algorithm of simulation

성하였다. Fig. 3. 는 최적설계 틀을 통해 얻은 실험점을 유한요소해석프로그램을 통해 해석하는 알고리즘을 나타낸 것이고, Fig. 4. 는 25가지의 실험점의 scatter을 나타낸 것이고 Table 6. 는 각각의 실험점의 데이터를 나타낸 것이다. 또한 음영 표시한 부분은 근사모델의 정확도를 떨어뜨리는 이상점(maverick)으로 분류되어 최적설계 분석 시 배제한 점이다.

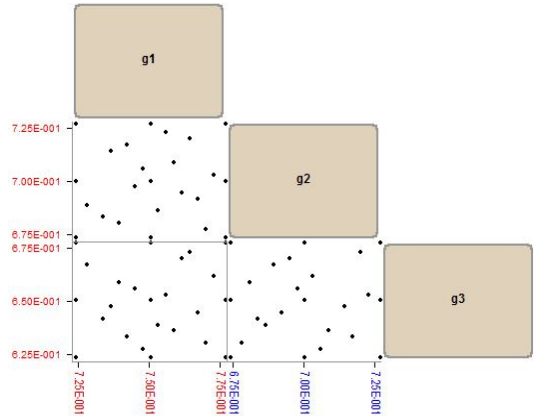


Fig. 4. Scatter of experimental point

Table 6. Table of experimental point

	roll gap 1	roll gap 2	roll gap 3	thickness	max stress
	(mm)	(mm)	(m/s)	(mm)	(kPa)
1	0.725	0.675	0.625	0.62877	1.834
2	0.725	0.700	0.650	0.671465	1.839
3	0.725	0.725	0.675	0.688589	1.832
4	0.750	0.675	0.650	0.681158	1.757
5	0.750	0.700	0.675	0.68691	1.792
6	0.750	0.725	0.625	0.641874	1.923
7	0.775	0.675	0.675	0.684349	1.719
8	0.775	0.700	0.625	0.653619	1.831
9	0.775	0.725	0.650	0.672723	1.821
10	0.728947	0.689474	0.665789	0.686403	1.787
11	0.731579	0.710526	0.663158	0.684677	1.833
12	0.734211	0.684211	0.642105	0.673302	1.796
13	0.736842	0.713158	0.647368	0.672588	1.835
14	0.739474	0.681579	0.657895	0.683252	1.761
15	0.742105	0.715789	0.634211	0.662983	1.910
16	0.744737	0.697368	0.655263	0.675824	1.824
17	0.747368	0.705263	0.628947	0.655275	1.873
18	0.752632	0.686842	0.639474	0.676096	1.777
19	0.755263	0.721053	0.652632	0.673575	1.833
20	0.757895	0.707895	0.636842	0.662668	1.826
21	0.760526	0.694737	0.668421	0.6868	1.757
22	0.763158	0.718421	0.671053	0.681603	1.830
23	0.765789	0.692105	0.644737	0.668119	1.788
24	0.768422	0.678947	0.631579	0.66443	1.808
25	0.771053	0.702632	0.660526	0.679442	1.792

2.5 근사모델

근사모델이란 연구자가 집중적으로 연구하고자 하는 데이터의 부분 또는 전 영역에서 실제 해석 모델의 변수 값과 해석결과의 관계를 작성해준다. 본 연구에서는 상용 PIDO(Process Integration and Design Optimization) 툴인 PIAAnO(Process Integration, Automation, and Optimization)에서 지원하는 여러 가지 모델 중 크리킹 기법을 통해 근사모델을 생성하였다. 기존연구에서는 직진속도(V)와 롤 갭(G1, G2)의 결과 값이 각각 비선형적으로 영향을 미치기 때문에 이 변수들을 서로 분리시키지 않는다면 근사모델 생성 시 예측 정확도가 현저히 떨어질 것을 우려하여 회기분석법을 사용하였지만, 본 연구에서는 변수를 롤 갭(G1, G2, G3)만으로 사용하였기에 서로 영향을 줄 수 있다고 판단하여 크리킹 기법을 사용하였다. 또한 크리킹 기법은 전산 실험 계획으로 얻어진 정보를 바탕으로 전역모델과 국부편차의 합으로 구성된다. 따라서 크리킹은 비선형성이 강한 시스템을 매우 잘 근사화 하며, 사용자가 입력해 줘야 하는 파라미터가 없다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 3가지 변수(G1, G2, G3)에 의해 와이어의 두께가 선형적으로 변하지 않기 때문에 비선형적 특징을 가진다. 따라서 크리킹 방법이 가장 적합한 방법이라 판단했고 이를 적용하여 근사모델을 생성하였다. 또한 3가지 변수에 의해 와이어의 두께가 선형적으로 변하지 않는 이유는 재료의 탄성 회복량 때문에 와이어가 특정 롤 갭 사이를 지나더라도 비선형적 특징을 갖기 때문이다. 반면 크리킹 방법을 이용할 경우 파라미터 최적화 과정으로 많은 시간이 필요하지만 본 연구에서는 해석시간을 줄이기 위해 오직 와이어만을 변형체로 두었기 때문에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 크리킹 방법을 채택하였다. 하지만 직교배열표 $L_9(3^4)$ 를 사용하여 근사모델을 생성하였을 때 실험점을 단지 9개의 점만 사용하였기에 예측 정확도가 70%이하로 결과값이 도출되었다. 따라서 예측 정확도를 향상시키기 위해 실험점을 16개 추가하여 총 25개의 실험점으로 근사모델을 다시 작성하였다. 또한 실험점을 추가한 것 외에도 예측 정확도를 높이기 위해서 실험점 데이터 중 발견된 이상점을 제거하였다.

Fig. 5. 는 각각의 롤 갭에 따라 와이어의 두께를 연관시켜주는 상관도이다. 굵게 표시 된 점은 기존 실험점이고 얇게 표시 된 점은 이상점(maverick)으로 판단되어 근사모델 생성 시 배제된 점이다. 이 두 과정을 통

해 정확도는 99.234%로 권장 신뢰도를 넘어 상당히 신뢰성이 높은 모델을 다시 만들었다.

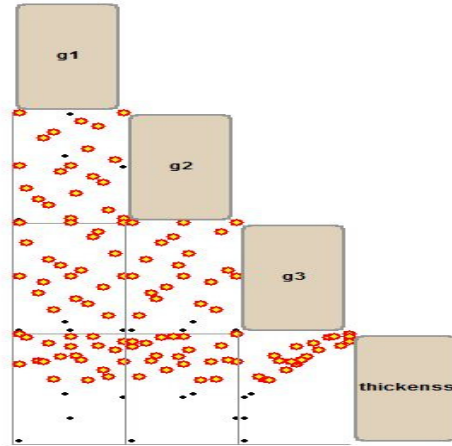


Fig. 5. Scatter of maverick removal

2.6 최적설계 결과

Fig. 6. 는 초기 값(initial)과 크리킹 모델을 이용하여 얻은 최적설계 결과(AO_pred), ANSYS 해석 결과(AO_act)이다. 먼저, 최적설계 결과(AO_pred)는 구속조건(σ_{max} , T)을 만족하면서 초기 값(initial)에 비해 σ_{max} 는 7.27% 감소한 수치인 1695Pa이다. 또한 AO_act는 initial에 비해 7.66% 감소한 수치인 1688Pa이다. 또한 AO_act는 1688Pa으로 AO_pred와의 오차율은 1% 이내이다. 근사모델과 실제 해석간의 높은 예측 정확도를 확

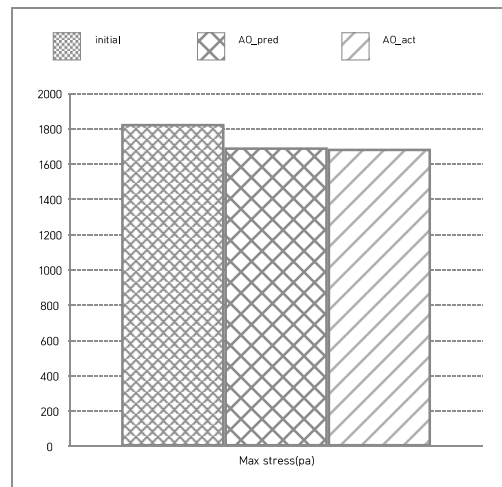


Fig. 6. Max stress of each model

Table 7. Result of meta model

	lower	initial	optimal	upper
roll gap 1(mm)	0.725	0.750	0.774	0.775
roll gap 2(mm)	0.675	0.700	0.698	0.725
roll gap 3(mm)	0.625	0.650	0.637	0.675
max stress(kpa)	-	1.828	1.695	-
thickness (mm)	0.630	0.674	0.649	0.650

인할 수 있다. 하지만 연구에서 분석된 결과는 이렇게 해석된 결과는 해석의 정확도와 신뢰도에 따라 실제 압연 공정의 결과와 상이할 수 있으므로 실제 공정설계를 통해 생산한 와이어를 측정하여 최적설계의 결과에 반영해야 할 것이다. 마지막으로 Table 7. 은 근사모델의 설계 변수의 상, 하한값, 초기값, 최적값과 그에 해당하는 와이어의 응력과 두께를 나타내었다.

3. 결론

본 연구는 리드 제작에 사용되는 와이어의 생산성 향상을 위해 와이어의 직진속도를 향상시킬 수 있는 방법을 찾기 위해 연구되었다. 또한 와이어가 리드 제작에 사용되기 때문에 치수공차(10 μ m)를 만족하면서, 압연 공정 중 최대응력을 최소화하는 것이 최적설계의 목적이다. 따라서 와이어의 최대응력에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 각 압연롤러의 압하량을 설계변수로 지정하였다. 또한 각 변수의 범위를 효율적으로 지정하기 위해 대략적으로 5가지 경우를 나누어 각 변수의 범위를 추측하였다. 이를 바탕으로 각 변수가 위치할 수 있는 최적설계 값의 대략적인 범위를 선정하여 분석 및 해석시간을 단축시켰다. 각각의 변수의 위치를 기반으로 실험점을 분포하였고 근사모델의 예측 정확도를 확보하기 위해 부가적으로 실험점을 추가하여 근사모델의 예측 정확도를 99%이상으로 확보하였다. 이렇게 생성된 근사모델을 바탕으로 실제 유한요소해석을 진행하였고 그 결과는 오차 5% 이하로 나타나 신뢰성이 상당히 높은 설계로 판단되었다. 또한 초기값과 비교하였을 때 최대 응력은 약 10.9% 감소한 것을 확인할 수 있었다.

References

[1] Krishna Kumar P., Ravoraka Adhikari, P. R. Prabhu,

Laxmikant G. Keni, "Deep cold rolling simulation of AISI 4140 steel using ANSYS LSDYNA", International Journal of Industrial and Mechanical Engineering Sciences, 2, pp. 33-37, 2016.

[2] S. H. Lee and B. M. Kim, "Fabrication of thick 24 copper foil according to elastic deformation of rolls," Proc. of the KSPE Autumn Conference, pp. 211-212, 2007.

[3] J. S. Kim and S. S. Kim "Thickness Control of Tandem Cold Mills Using H ∞ Control Techniques," J. of KSPE, Vol. 15, No. 8, pp. 145-155, 1998.

[4] Ji Su Park, Hyun Woo Lee, Sung Yeun Jung, Jun Ho Bae, Hwa Young Kim, Chul Kim, "Process Planning for Insert Metal of Weather Strip Using High Speed Rolling-Type", Journal of the Korean Society for Precision Engineering 28, pp. 1279-1287, 2011

[5] Boo Youn Lee, Won Jin Kim. "Shape Optimal Design to Minimize Stress Concentration in the Journal of the Heating Drum for a Hot-Rolling Press", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, vol. 22, no. 3, pp. 137-145, 2005.

박 창 형(Chang Hyung Park)

[준회원]



•2012년 3월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학부 (첨단기계전공)

<관심분야>

초정밀 모터 및 액츄에이터 설계

김 진 호(Jin Ho Kim)

[정회원]



•1999년 2월 : 한양대학교 공학사 (기계설계전공)
 •2002년 2월 : 미) U.C. Berkeley 공학 석사(기계공학전공)
 •2002년 9월 ~ 2005년 9월 : 미) U.C. Berkeley 공학 Ph.D.(기계공학전공)
 •2007년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학부 부교수

<관심분야>

초정밀 모터 및 액츄에이터 설계