

박격포 포신 제작을 위한 Inconel718 소재의 전진 유동성형 조건 선정에 관한 연구

고세권*, 조영태*.#

*창원대학교 기계공학부

A Study on the Selection of Forward Flow Forming Conditions with Inconel718 Tube for Mortar Barrel Manufacturing

Se-Kwon Ko*, Young-Tae Cho*.#

*Department of Mechanical Engineering, Changwon National Univ.

(Received 19 June 2019; received in revised form 19 June 2019; accepted 12 July 2019)

ABSTRACT

Flow forming is an eco-friendly and high-efficiency plastic deformation process with fewer chips during a process which is specifically used to manufacture seamless tubular products like tire wheels, rocket motor cases etc. On the development of mortar barrel using Inconel718 tube, some flow formed products had dimensional errors on their thickness. In this study, our purpose is to optimize the process conditions with the smallest dimensional error. In order to find an optimum process condition, 2D axisymmetric FEM simulation analyses with Taguchi method were conducted. Geometric variables (attack angle, flattening angle, roller nose radius) and operating parameters (depth of forming, feed rate) are considered as control factors. Forward flow forming with single roller was first analyzed to determine the effective factors using AFDEX software and attack angle of the roller was identified as the most influential factor. Also, the nose radius of the rollers was confirmed as a significant factor in multi-rollers flow forming system. The effect of rollers offset values are also studied and finally, we proposed optimal conditions to improve the accuracy of flow forming process with Inconel718 tube for mortar barrel manufacturing.

Key Words : Flow Forming(유동성형), Inconel718(인코넬718), Design of Experiment(실험계획법),
Finite Element Analysis(유한요소해석), Mortar Barrel Manufacturing(박격포 포신 제조)

1. 서 론

유동성형(Flow forming)은 가공 공정 중 발생하는 칩의 양을 최소화한 친환경·고효율의 경제적인 제

조공정 중 하나로, 자동차, 항공우주, 방위산업 등의 분야에서 사용되며, 주로 고정밀도의 얇은 벽으로 이루어진 이음매 없는 튜브나 실린더 및 기타 축 대칭 부품의 생산에 사용되는 소성변형 금속성형 공정이다^[1]. 타이어 휠, 로켓 및 미사일 케이싱, 로켓 모터 케이스 등이 유동성형공정을 이용하여 제작되는 대표적인 제품이다^[2].

최근에 박격포 포신의 경량화를 위해 Inconel718

Corresponding Author : ytcho@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3608, Fax: +82-55-275-0101

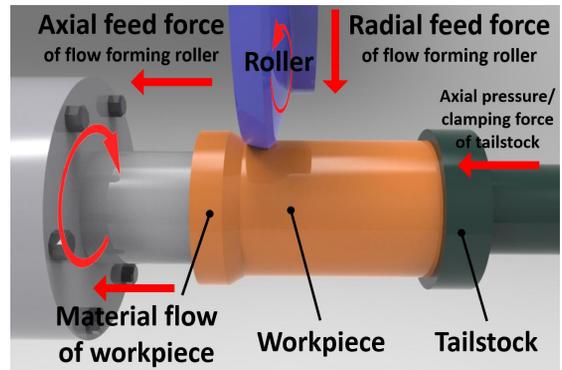
소재를 적용한 유동성형공정이 개발되었는데 이러한 공정에서는 제품의 두께 오차를 관리하는 것이 매우 중요하다. 내경의 치수오차는 맨드렐의 회전을 통한 내경 확장으로 인해 발생하고 외경의 치수 오차는 부적절한 공정 조건 때문에 주로 발생하게 된다. 따라서 내경 확장현상은 맨드렐의 직경 치수 보정으로 개선이 가능하지만 외경의 치수오차는 적절한 공정 조건을 선정하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 실제 실험에 있어 독일제의 유동성형 전용 장비가 사용됐는데 공구의 형상 변경이나 장비의 작동 변수를 변경하는 것에 제약이 있고 Inconel 718이라는 값비싼 소재를 사용하기 때문에 실험 이전에 해석적인 방법으로 공정 조건 최적화를 수행할 필요성이 있다.

본 연구에서는 장축의 Inconel718 관에 전진 유동성형 기법을 적용할 때 발생하는 외경의 치수 오차 해결을 위해, 소성 가공 전용 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 유동성형공정을 해석하였고 외경 치수의 오차를 최소화 할 수 있는 공정 조건을 제시하는 것을 목표로 하였다.

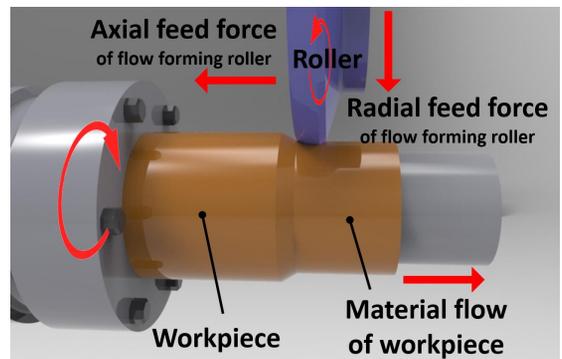
2. 유동성형 개론

유동성형공정에는 크게 전진 유동성형 방식과 후진 유동성형 방식이 있다. 두 방법의 큰 차이는 소재의 유동방향과 롤러의 진행 방향이다. 이 2가지가 같은 방향을 가지게 되면 전진 유동성형이라고 하며, 반대가 되면 후진 유동성형이 된다^[3]. 전진 유동성형 방식은 Fig. 1(a)와 같이 제품의 한쪽이 막힌 압력용기나 종모양의 부품에 적용한다^[4]. 따라서 공정이 진행되더라도 맨드렐에 의해 지지되고 있기 때문에 종단면까지 치수 정확도가 높은 편이다. 후진 유동성형 방식은 Fig. 1(b)와 같이 제품의 내경 구멍이 완전히 가공된 중공축에 주로 적용한다^[5].

박격포 포신 개발에 적용된 Inconel718 관의 유동성형공정은 Fig. 2와 같이 120° 간격의 롤러 3개를 이용한 전진 유동성형 방식이다. 3개의 롤러는 각각의 축을 중심으로 회전하며, 반경 방향과 축 방향으로 서로 오프셋 되어있다.



(a) Forward flow forming



(b) Backward flow forming

Fig. 1 Schematic diagram of flow forming processes and related feed forces

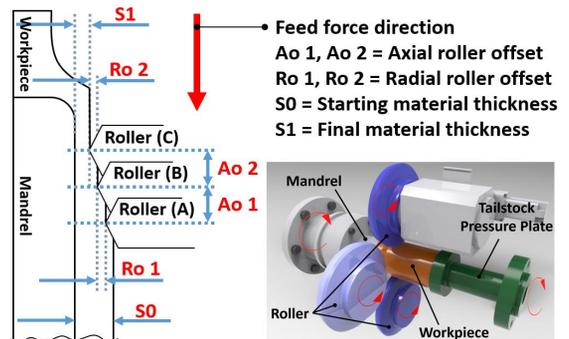


Fig. 2 General arrangement of rollers in forward flow forming process

공작물 예비성형체의 내경을 맨드렐 상에 조립하면 장비의 스핀들 부와 심압대 부가 회전하면서 공

작물을 회전시키며, 맨드렐의 회전과 반대방향으로 회전하는 롤러의 이동에 의해 공작물이 소성변형을 일으켜 두께가 감소하고 길이가 늘어나게 된다⁶⁻⁹.

초기에 롤러가 소재를 눌러 변형시키기 시작할 때 롤러 아래의 영역이 탄력적으로 압축되었다가, 롤러가 움직이면 가해진 하중이 해제되며 탄력적으로 압축된 소재가 원래 부피로 복원을 시도하는데, 이 때 눌러진 소재의 바깥 부분 중 소성변형이 일어난 부분이 복원 가능한 방향을 제한하여 결국 소재를 길이 방향으로 늘어나게 한다¹⁰. 유동성형공정에 사용되는 재료별 성형성의 평가 척도는 아직까지 불분명하다^{4,10}.

3. 유동성형공정의 유한요소해석

3.1 해석 모델 및 경계조건

시뮬레이션에 사용된 프로그램은 소성가공 전용 소프트웨어인 AFDEX이며 다음과 같은 몇 가지 전제 조건을 고려하였다. 먼저, 결과의 정확도와 해석 시간을 고려해 2차원 축대칭 형상으로 해석하며, 공정 중의 회전에 관한 변수는 마찰계수 값의 조절을 통해 반영하였다. 소재 물성치의 경우, 실제 예비성형체(preform)의 열처리 효과 및 기계적 성질의 변화를 정확하게 적용할 수 없으므로 프로그램 내의 Inconel718 물성치 값을 사용하였다. 다음으로, 유동성형의 소재 거동은 탄성회복과 밀접한 관련이 있기 때문에 탄소성 해석을 적용하며, 요소망 재구성으로 인한 형상 및 상태변수의 인위적 변화가 탄성회복의 영향보다 훨씬 클 수 있으므로 요소망 재구성은 실시하지 않았다. 실제 장비의 형태를 단순화하여 해석에 반영하였고 해석적으로 반드시 필요한 롤러(Roller), 맨드렐(Mandrel), 심압대(Tailstock), 공작물(Workpiece)을 실제 개발에 사용된 치수 정보를 바탕으로 Fig. 3과 같이 모델링하였다. 공정 후 공작물의 외경 치수에 초점을 맞추므로 모든 공구는 강체(Toolsteel)로 설정해 소재의 유동만 해석하였다¹¹⁻¹². 마지막으로, 롤러와 공작물 간 마찰은 없다고 가정하였다. 정확한 마찰계수 예측이 어려울 뿐만 아니라 실제 가공에서 많은 양의 냉각수가 사용되며 회전체와 회전체가 접촉하고 있는 상태임을

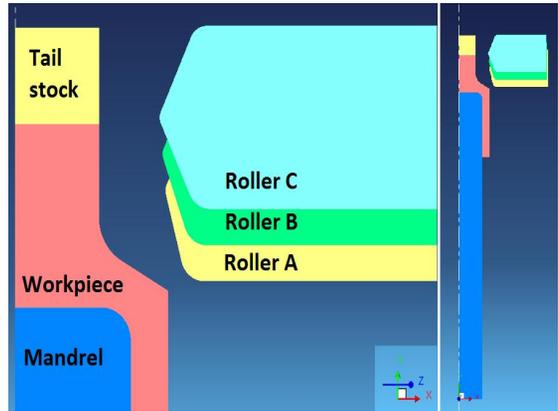


Fig. 3 2D axis-symmetric model of multi roller flow forming in AFDEX FEM software

고려해 마찰계수를 매우 작은 값으로 설정한다. 모델을 축대칭으로 보면 롤러 형상이 인발 공정의 금형과 유사하지만, 롤러와 공작물 간 마찰이 0이라는 점에서 유동성형공정에 해당되는 결과를 얻게 된다.

AFDEX의 2차원 해석에는 사각형 요소가 사용되며 최대 생성 가능한 수가 10,000개인데, 그 크기를 요소망 재구성 없이 조절할 수 없게 돼있다. 따라서 정밀한 해석 결과를 위해 공작물 변형 부의 길이를 100mm로 고정시켰다. 이때 생성되는 요소는 8,263개, 질점은 8,580개이다. 해석 경계조건으로 프레스, 금형속성, 마찰 등을 입력하는데, 실제 공정 개발 중 맨드렐의 직경 수정으로 내경 확장 현상을 보완한 사례를 참고했다. 프레스 입력은 ‘테이블 운동’을 이용해 롤러에 평행이동속도를 부여하여 y축(-)방향으로 이동 및 공작물을 변형시키도록 했고, 심압대와 맨드렐은 실제로 회전하지만 해석은 2차원이므로 어떠한 이동이 없도록 설정했다. 금형속성은 심압대를 공작물 상단에 고정시키기 위한 접촉 속성과, 공작물의 내경 치수가 공정 중 확장 없이 일정하게 유지된 채 공작물이 축 방향으로 신장하게 하기 위해 맨드렐에 슬라이딩 속성을 이용했다. 롤러에는 특별한 금형속성을 부여하지 않았다. 마찰은 롤러에 전제 조건과 같이 무마찰, 심압대에 접촉 마찰, 맨드렐과 공작물 간에는 냉간 가공 해석에 보편적으로 쓰이는 쿨롱마찰 0.05를 적용했다.

3.2 해석 목표

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_i - m| \quad (1)$$

m : 목표하는 외경의 치수

X_i : 롤러 진행 완료 후 외경부 절점의 x좌표

초기 공작물 외경 106mm, 두께 13mm에서, 목표 두께 10mm를 위해 두께를 총 3mm 줄였을 때 가장 좋은 외경 치수 정도를 갖는 공정 조건 탐색이 본 연구의 상세 목표이다. 공정의 시뮬레이션 후 공작물 외경부 절점의 X좌표 값을 얻고, 이를 이용해 (1)의 식으로 치수 정도를 계산한다.

이 식은 공정 후 외경의 x좌표들과 목표로 하는 외경 치수 값의 편차 평균을 확인하는 것이며, 값이 작을수록 치수 정도가 좋다고 정의한다. 3단 롤러를 사용한 해석에서는 목표 외경 치수 m 의 값이 50, 단일 롤러 해석에서는 m 의 값이 Depth of forming의 값에 따라 바뀐다.

모든 해석은 다구찌 실험계획법의 단계에 따라 진행했으며, 다구찌 실험계획법은 직교배열표를 통해 자료를 얻고 이 결과로부터 S/N(Signal-to-Noise)비를 분석해 최적 값을 선정하는 것이다. S/N비는 목적함수의 평균과 산포를 동시에 고려하는 척도이며 다구찌 실험계획법의 모든 단계는 산포를 줄이는 방향이고, 산포를 줄이는 것은 S/N비를 높이는 것과 같다^[13].

3.3 단일 롤러 해석

다중(3단) 롤러가 적용된 유동성형공정 해석에 앞서, 공정변수가 Inconel718 관재의 유동성형 해석 결과에 미치는 경향을 알아보기 위해 단일 롤러를 사용한 2차원 축대칭 유동성형공정 해석을 실시했다. 선정된 공정변수는 5가지로 Fig. 4와 같다. 각 인자의 수준은 실제 공정 정보를 바탕으로, 결합 없이 실제 및 해석에 적용이 가능한 기술적으로 의미 있는 최대 폭의 간격을 정해 그 중 최소, 중간, 최대값의 3수준으로 설정했으며, 상세 값은 Table 1에 나타내었다. 반응 값(결과 값)은 식 (1)로 계산하며, 이때 m 값은 Depth of forming의 수준 값에 따라 각각 52, 51, 50이 된다. 선정된 5인자 3수준으로 직교배열표를 작성해 총 27회의 해석을 수행했다.

이를 토대로 Minitab 프로그램으로 S/N비를 분석했다. S/N비는 신호 대 잡음비로 잡음에 대한 제어 인자의 영향력 정도를 나타내며^[14], 값이 클수록 해석결과에 대한 잡음인자의 영향이 작아 실험자가 제어하는 인자가 영향을 많이 미치는 것을 의미한다. S/N비는 문제에 따라 망목(Nominal the best), 망소(Smaller the better), 망대(Larger the better) 특성으로 정의된다^[15]. 식 (1)의 치수 정도는 작을수록 좋다고 정의하였으므로 망소특성이며, 망소특성의 다구찌 실험계획법에서는 인자별로 S/N비 값이 가장 큰 수준들의 조합이 반응 값을 가장 작게 만드는 최적 조합이 된다.

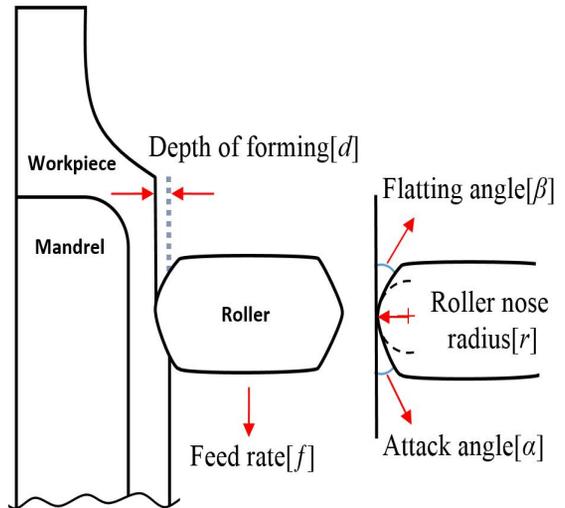


Fig. 4 Control factors in forward flow forming process; Attack angle, Flattening angle, Feed rate, Roller nose radius, Depth of forming

Table 1 Selection of control factors and each levels

Control factor	Symbol	Level		
		1	2	3
Attack angle(°)	α	5	15	25
Flattening angle(°)	β	5	15	25
Feed rate(mm/s)	f	0.8	1.9	3.0
Roller nose radius(mm)	r	4	8	12
Depth of forming(mm)	d	1.0	2.0	3.0

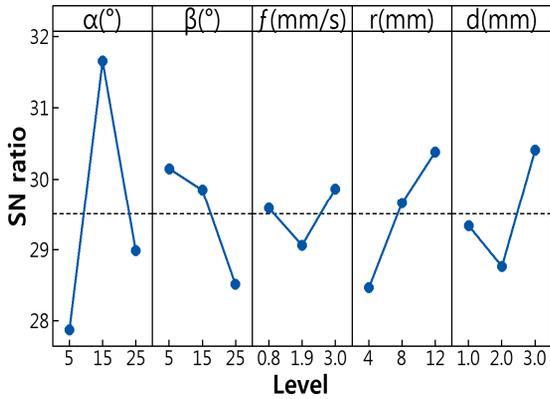


Fig. 5 S/N ratio analysis of single roller process

Fig. 5는 망소특성의 S/N비에 대한 주효과도를 나타낸 것이다. 인자별로 S/N비 값이 최대인 조합이 Attack angle 15°, Flattening angle 5°, Feed rate 3.0mm/s, Roller nose radius 12mm, Depth of forming 3.0mm임을 확인할 수 있다.

다음으로, 치수 정도에 대해 유의한 영향을 미치는 인자를 확인하기 위해 분산분석을 실시했다. 분산분석은 반응 값 전체의 분산을 몇 개의 요인 효과에 대응하는 분산과 그 나머지 오차 분산으로 나누어 검정이나 추정을 실시하는 것으로^[6], 본 연구에서는 유의수준을 0.05로 설정해 유의수준과 유의확률 P값을 비교했으며, ‘해당 인자가 해석결과에 영향을 미치지 않는다.’는 귀무가설을 세웠다. P값이 0.05보다 작거나 같게 되면 이 귀무가설을 기각, 해당인자가 결과에 지대한 영향을 미친다고 판단한다. Table 2에서 보는 바와 같이 Attack angle과 Roller nose radius가 유의인자이며, 그 중 Attack angle이 반응 값에 매우 유의한 것으로 확인됐다.

S/N비 분석 및 분산분석의 검증을 위해 최대 S/N비의 조합으로부터 하나의 인자씩만 차례대로 수준을 바꾸는 방법으로 확인 해석을 실시했다. Table 3과 Fig. 6에 확인 해석 결과를 나타내었고, 최대 S/N비 조합이 가장 작은 반응 값을 갖는 것이 확인됐다. 또한 Fig. 6을 통해 매우 유의한 인자인 Attack angle의 수준 간 반응 값 변화가 다른 인자들에 비해 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다.

Table 2 Significant factors after ANOVA pooling

Factor \ P-value	Initial value	1 st pooling
Attack angle	0.000	0.000
Flattening angle	0.075	0.074
Feed rate	0.346	-
Roller nose radius	0.041	0.040
Depth of forming	0.127	0.127

Table 3 Confirmation of result with several additional simulation

No.	Factor					ϵ (mm)
	a	β	f	r	d	
1-1	15	5	3.0	12	3.0	0.01579
1-2	5	5	3.0	12	3.0	0.02993
1-3	25	5	3.0	12	3.0	0.02631
1-4	15	15	3.0	12	3.0	0.01677
1-5	15	25	3.0	12	3.0	0.02215
1-6	15	5	0.8	12	3.0	0.01717
1-7	15	5	1.9	12	3.0	0.01989
1-8	15	5	3.0	4	3.0	0.02329
1-9	15	5	3.0	8	3.0	0.01785
1-10	15	5	3.0	12	1.0	0.01959
1-11	15	5	3.0	12	2.0	0.02172

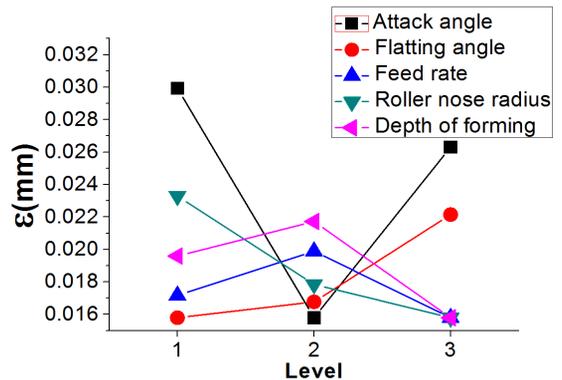


Fig. 6 Comparison of result with respect to level changes

3.4 다중 롤러 해석

단일 롤러를 이용한 해석 정보를 바탕으로 3단 롤러를 이용한 유동성형공정의 해석을 실시했다.

3개 롤러 각각에 변수를 선정해 모든 인자를 2~3수준으로 실험계획법을 적용하려면 완전요인 배치법의 사용이 적절할 것이다. 따라서 다구찌 실험계획법의 원활한 적용을 위해, 단일 롤러 해석에서 매우 유의한 인자로 확인된 Attack angle을 실제 공정 조건인 롤러 (A)15°-(B)20°-(C)25°로 고정하고, Flattening angle, Roller nose radius, Feed rate는 단일 인자로 가정해서 모든 롤러에 동일한 수준 값을 적용했다. Depth of forming은 Fig. 7과 같이 공정 변수로 추가된 롤러 간의 Radial offset과 관련된다. 목표하는 총 두께감소량이 3mm이므로 우선 Radial offset을 등간격으로 1mm, Axial offset은 실제 공정 조건과 같이 등간격 5mm로 설정한 뒤 다구찌 기법 이후에 추가로 해석을 실시했다. 3단 롤러를 사용한 공정 해석은 Fig. 8과 같이 소성 변형과 탄성회복이 반복되면서 유체가 흐르는 듯한 소재의 변형을 보였다.

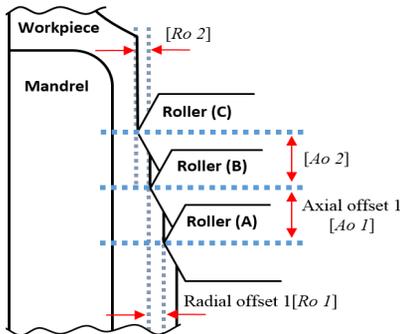


Fig. 7 Additional control parameters with 3 step rollers; Radial offset and axial offset between rollers

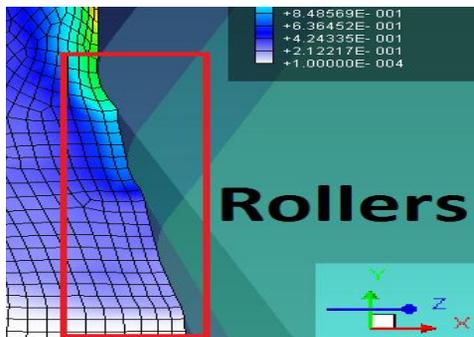


Fig. 8 A cross section during multi roller process

Table 4 Selection of control factors and each levels for multi-roller system

Control factor	Symbol	Level		
		1	2	3
Flattening angle(°)	β	5	15	25
Roller nose radius(mm)	r	4	8	12
Feed rate(mm/s)	f	0.8	1.9	3.0

Table 5 Orthogonal array of L_9 with results

No.	Factor			ϵ (mm)
	β	r	f	
2-1	5	4	0.8	0.04261
2-2	5	4	0.8	0.04474
2-3	5	4	0.8	0.03881
2-4	15	8	1.9	0.04088
2-5	15	8	1.9	0.04301
2-6	15	8	1.9	0.03707
2-7	25	12	3.0	0.04010
2-8	25	12	3.0	0.04223
2-9	25	12	3.0	0.03629

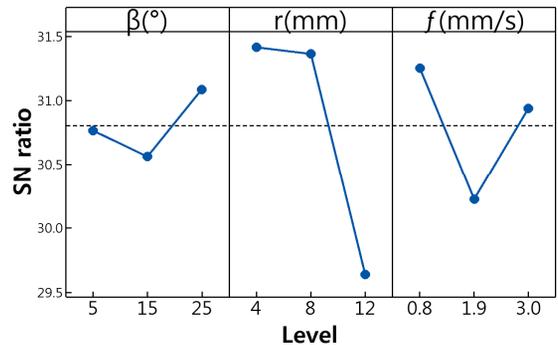


Fig. 9 S/N ratio analysis of multi-roller process

Flattening angle, Roller nose radius, Feed rate를 Table 4와 같이 인자로 선정해 3인자 3수준의 직교 배열표로 총 9회 해석을 수행하였으며 그 결과를 Table 5에서 보여주고 있다.

Fig. 9는 다중 롤러공정에서 망소특성의 S/N비 분석을 실시한 결과이고 Table 6은 이에 따른 분산분석의 결과를 보여주고 있다. 앞선 단일롤러의 해석 과정과 유사하게 검증을 위한 확인 해석을

실시하였으며 그 결과는 Table 7과 Fig. 10에 나타내었다. Roller nose radius가 유의인자로 수준 간 반응 값 변화가 다른 인자들에 비해 상대적으로 큰 것을 확인했으며, Flating angle 25°, Roller nose radius 4mm, Feed rate 0.8mm/s의 조합이 가장 작은 반응 값을 갖는 것으로 확인되었다.

Multi-roller의 공정 변수를 반영하기 위해 선정된 조합에서 롤러 Axial offset만 변경하며 등간격의 3mm~7mm 중 더 나은 조건을 탐색하였다.

Table 6 Significant factor after ANOVA pooling

Factor \ P-value	Initial value	1 st pooling
Flating angle	0.583	-
Roller nose radius	0.073	0.014
Feed rate	0.254	0.136

Table 7 Confirmation of result with additional simulations

No.	Factor			ϵ (mm)
	β	r	f	
3-1	25	4	0.8	0.02472
3-2	5	4	0.8	0.02569
3-3	15	4	0.8	0.02635
3-4	25	8	0.8	0.02493
3-5	25	12	0.8	0.03078
3-6	25	4	1.9	0.02791
3-7	25	4	3.0	0.02554

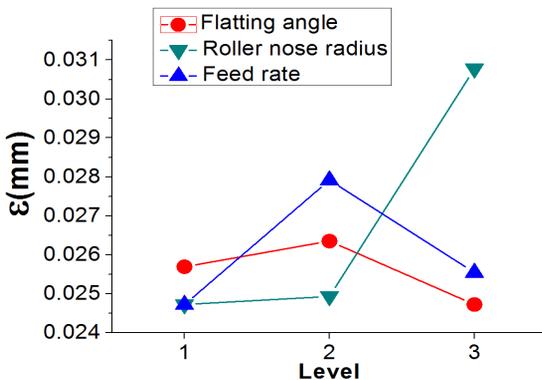


Fig. 10 Comparison of result with respect to level changes in multi-roller system

Table 8 Simulation results with various axial offset

No.	Ao 1(mm)	Ao 2(mm)	ϵ (mm)
4-1	3	3	0.03632
4-2	4	4	0.04485
3-1	5	5	0.02472
4-3	6	6	0.03301
4-4	7	7	0.03719

Table 9 Simulation result with various radial offset

No.	Ro 1(mm)	Ro 2(mm)	d			ϵ (mm)
			(A)	(B)	(C)	
5-1	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	0.03191
5-2	0.5	1.5	1.0	1.5	3.0	0.04166
5-3	1.0	0.5	1.5	2.5	3.0	0.02290
3-1	1.0	1.0	1.0	2.0	3.0	0.02472
5-4	1.0	1.5	0.5	1.5	3.0	0.02495
5-5	1.5	0.5	1.0	2.5	3.0	0.02535
5-6	1.5	1.0	0.5	2.0	3.0	0.03158

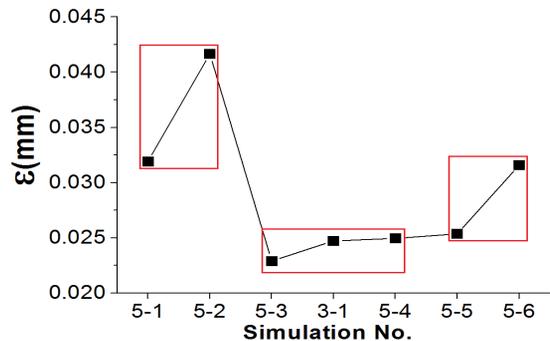


Fig. 11 Change of error value with variation of radial offset conditions

Table 8에 해석 결과를 나타내었는데 axial offset 이 기존의 등간격 5mm일 때 오차를 최소화 할 수 있음을 확인하였다. 마지막으로 radial offset을 변경하며 해석을 실시하였다. 목표 두께감소량 3mm에 대해 radial offset을 Table 9와 같이 다양한 조건으로 변경하여 해석을 실시하였으며 Fig. 11의 결과를 보면 동일한 Ro 1의 값에 대해 Ro 2의 값이 커질

수록 반응 값 또한 커지는 경향을 알 수 있다. 결과적으로 반응 값이 가장 작은 조합은 Radial offset 1을 1.0mm, Radial offset 2를 0.5mm로 하는 것이다.

4. 결 론

유동성형공정을 이용하여 Inconel718 소재의 박격포 포신을 제작하는데 있어 발생할 수 있는 외경의 치수 오차를 최소화하기 위해 본 논문에서는 실험계획법을 적용하여 시뮬레이션을 통해 최적의 공정 조건을 제시하였다. 해석은 2차원 축대칭 모델을 이용하여 진행되었으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 단일 롤러 유동성형공정 해석에서 attack angle, roller nose radius가 외경의 치수 정도에 유의한 인자로 확인되었다.
2. Attack angle이 동일한 3단 롤러 유동성형공정 해석에서 roller nose radius가 외경의 치수 정도에 유의한 인자로 확인되었다.
3. 첫 번째 radial offset의 값이 일정할 때 두 번째 radial offset의 값이 작을수록 치수 정도가 향상됨을 확인하였다.
4. 최종적으로 attack angle (A)15°-(B)20°-(C)25°, flatting angle 25°, roller nose radius 4mm, feed rate 0.8mm/s, axial roller offset 5mm, radial roller offset 1.0mm-0.5mm를 적용하면 보다 개선된 외경 치수 특성을 얻을 수 있을 것이라고 기대된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원이 지원하는 나노금형 기반 맞춤형 융합 제품 상용화 지원센터 구축 사업(과제번호 : N0002310)으로 수행된 연구결과입니다.

REFERENCES

1. Roy, M. J., Klassen, R. J. and Wood, J. T., "Evolution of plastic strain during a flow forming process", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, No. 2, pp. 1018-1025, 2009.
2. Bhatt, R. J. and Raval, H. K., "Influence of Operating Variables during Flow Forming Process", Procedia CIRP, Vol. 55, pp. 146-151, 2016.
3. Nam, K. O., Cho, C. H. and Hong, S. I., "Comparison of Forming force on forward and Backward Flow Forming for Combustion Chamber", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 10, No. 4, pp. 34-39, 2006.
4. Marini, D., Cunningham, D. and Corney, J., "A Review of Flow Forming Processes and Mechanisms", Key Engineering Materials, Vols. 651-653, pp.750-758, 2015.
5. Marini, D., Cunningham, D., Xirouchaks, P. and Corney, J., "Flow forming: A review of research methodologies, prediction models and their applications", International Journal of Mechanical Engineering and Technology, Vol. 7, No. 5, pp. 285-315, 2016.
6. Lee, K. S. and Lu, L., "A study on the flow forming of cylindrical tubes", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, No. 1, pp. 739-742, 2002.
7. Wong, C. C., Dean, T. A. and Lin, J., "Incremental forming of solid cylindrical components using flow forming principles", Journal of Materials Processing Technology, Vols. 153-154, pp. 60-66, 2004.
8. Davidson, M. J., Balasubramanian, K. and Tagore, G. R. N., "An experimental study on the quality of flow-formed AA6061 tubes", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 203, No. 1, pp. 321-325, 2008.
9. Parsa, M. H., Pazooki, A. M. A. and Ahmadabadi, M. N., "Flow forming and flow formability simulation", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 42,

- No. 5, pp. 463-473, 2009.
10. Bylya, O. I., Khismatullin, T., Blackwell, P. and Vasin, R. A., "The effect of elasto-plastic properties of materials on their formability by flow forming", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 252, pp. 34-44, 2018.
 11. Kim, T. H. and Lee, S. W., "Estimation on Serrated Core Machining Load for Metal Gasket using Elasto-plastic Analysis", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 6, pp. 145-151, 2012.
 12. Bhatt, R. J. and Raval, H. K., "Comparative Study of Forward and Backward Flow Forming Process using Finite Element Analysis", Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science, Vol. 5, No. 2, pp. 46-50, 2015.
 13. Kim, S. G., Park, Y. C. and Park, J. H., "Optimization of Pre-form for Manufacturing of Automobile Drum Clutch Hub Products Using Taguchi Method", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 9, No. 6, pp. 101-108, 2010.
 14. Chun, S. H. and Go, T. J., "Study on the dynamic stiffness variation of boring bar by Taguchi Method", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 8, No. 3, pp. 98-104, 2009.
 15. Lim, P. and Yang, G. E., "Optimal Cutting Condition of Tool Life in the High Speed Machining by Taguchi Design of Experiment", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 8, No. 4, pp. 59-64, 2006.
 16. Lee, S. B., Utilizing Taguchi Method using Minitab, eretec, pp. 35-80, 2015.