

실험계획법을 적용한 라이너 단조 공정의 유한요소해석

김용관¹ · 강경필¹ · 서승재² · 이재근² · 윤태식³ · 이경훈[#]

DOE approach in the FE Simulation of Liner Forging Process

Y. G. Kim, G. P. Kang, S. J. Seo, J. K. Lee, T. S. Yoon, K. Lee

(Received October 17, 2018 / Revised November 27, 2018 / Accepted, November 27, 2018)

Abstract

A liner is a crucial component that directly affects the penetration performance of the shaped charge warhead. If the material of the liner has fine grain size and high strength, then the penetration performance can be further improved. There have been attempts to use a preform obtained by a severe plastic deformation (SPD) process. In this study, the process of minimizing the strain deviation to maintain the characteristics of material obtained by the severe plastic deformation process was investigated. The FE analysis of liner forging process was performed using the design of experiments (DOE), to optimize various shape parameters of the forming process such as shape of preform and forging die. As a result, the combination of design variables with the minimum effective strain deviation in the liner forging process were obtained.

Key Words : Design of Experiment (DOE), Finite Element Analysis (FEA), Cold Forging, Liner, Shaped Charge Warhead

1. 서론

성형작약탄두(shaped charge warhead)는 화약 기폭에 의한 충격파로 내부의 라이너를 붕괴시켜 고온 고압의 제트(jet)를 형성함으로써 목표물을 파괴하는 무기이다(Fig. 1). 라이너는 성형작약탄두의 관통력에 직접적인 영향을 주는 핵심부품으로, 재질은 보통 무산소동(OFC)을 사용하며 구리의 입도가 작고 일정 수준의 강도가 확보되었을 때 관통능력이 향상되는 것으로 알려져 있다[1-3]. 라이너 제조공정에서 균일 입도미세화를 위한 다양한 연구가 진행되었는데, 김영무 등[2]은 라이너 재료인 텅스텐-구리 복합 분말의 압축 성형공정 시험을 통해 물성 모델의 재료상수를 결정하였고, CAE 소프트웨어를 이용하여 라이너 형상 전반에 걸쳐 균일한 밀도 분포가 나타날 수 있는 성형공정을 모사하였다. 장수호 등[3]은 라이너 전 영역에서 균질한 입도를 가지도록 냉간 단조의 변형률 제어, 열처리 조건의 최적화를 통해

균일한 미세조직의 라이너 제작이 가능함을 보였다. 이태영 등[4]은 라이너의 열간 단조공정에서 실험계획법을 적용한 유한요소해석을 수행하여 유효 변형률의 편차가 최소인 단조공정 설계 및 금형 형상을 결정하였다. 지금까지의 연구방향은 라이너 성형단계에서 입도 미세화 수준을 만족하는 공정설계에 있었으나 성능향상에는 한계가 있었다. 최근에는 강소성(severe plastic deformation) 가공이 입도를 미세화 하면서 강도를 확보하는 데 유용한 가공법임이 입증되면서 이를 라이너 제조공정에 적용하는 연구가 진행되고 있다[5-6].

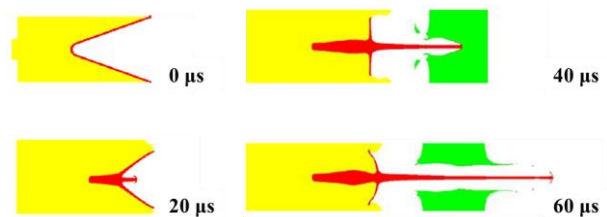


Fig. 1 The mechanism of jet generation on shaped charge warhead [1]

1. ㈜ 솔루션랩
2. ㈜ 풍산
3. 방위산업기술지원센터, 광운대, 방위사업학과 박사과정
Corresponding Author : Solution-Lab Co., E-mail: klee@solution-lab.co.kr

본 연구에서는 다축대각단조(MADF, Multi-Axial Diagonal Forging) 가공법[7]으로 입도와 강도가 확보된 원소재를 라이너 형상으로 가공하는 냉간 단조 공정에서, 기확보된 물성특성을 균일하게 유지시킬 수 있도록 변형률 편차를 최소화하는 공정설계를 검토하였다. 라이너 성형공정의 수많은 형상 파라미터를 최적화하기 위해 수치적 실험계획법을 도입하여 예비 단조품 형상 및 라이너 단조금형 형상에 따른 변형률의 균일 정도를 평가하였다.

2. 수치적 DOE 적용

2.1 라이너 단조 개요

일반적으로 라이너는 원통형 소재를 가지고 2~3 단계의 냉간단조 공정을 거쳐 최종 단조품을 만든 후 절삭 과정을 거쳐 완성하게 된다. 그러나 본 연구의 라이너 성형공정에서는 원소재가 강소성 가공으로 제조되어 직사각형의 바(bar) 형태가 됨에 따라 이를 원통형으로 성형하는 공정이 추가되었다. Fig. 2는 라이너 냉간 단조공정의 개요를 나타낸 것으로, 예비 단조공정, 절단공정, 라이너 1차 단조, 라이너 2차 단조의 순으로 총 4단계로 구성된다.

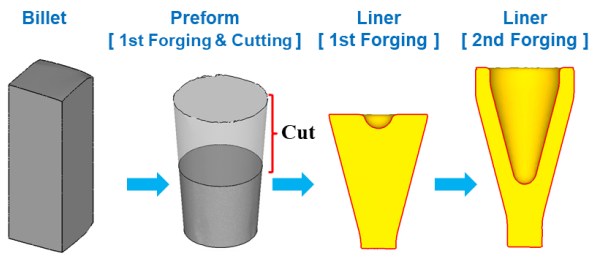


Fig. 2 The forming sequence of liner

2.2 수치적 DOE 개요

실험계획법(DOE, design of experiments)은 시스템 또는 프로세스의 설계 변수를 체계적으로 변화시키는 실험을 수행하고, 그 결과를 분석하여 유용한 정보를 생산하는 절차이다. 실험계획법을 유한요소해석에 적용하기 위해서는 변수의 조합에 따라 수십 또는 수백 개의 샘플을 모델링 해야 하며, 각각의 샘플에서 변수의 영향도 또는 관심 영역의 결과값을 추출하여 비교 분석하는데 많은 시간이 필요하다. 특히 3 차원 문제의 경우 계산시간이 큰 비중을 차지한다. 따라서 실험계획법의 변수에 따른 모델 생성 및 해석을 자동화하고 결과 평가 과정을 일괄적으로 수행할 수 있는 시스템이 요구된다.

본 연구에서는 실험계획법을 효율적으로 적용하도록 고안된 DEFORM DOE 시스템을 사용하여 라이너 단조 공정의 금형 설계에 적용하였다. 라이너 단조 공정의 수치적 DOE 해석 절차는 Fig. 3와 같다. 3 차원 단조공정 해석에서 설계변수에 따른 금형 형상은 CAD 프로그램(SolidWorks)과 연동하여 자동으로 생성되며, 각각의 변수 조합에 의한 샘플링은 내장된 샘플링 기법들(라틴 하이퍼큐브, 완전요인, 다구찌, 사용자정의)을 선택하여 결정한다. 수십 개의 샘플 해석이 완료되면 DOE 후처리기에서 각 변수의 민감도 분석, 반응표면 분석, 토네이도 차트 등의 결과를 산출하여 가장 적합한 변수 조합을 결정할 수 있다.

2.3 설계변수의 선정 및 샘플링

본 연구에서는 라이너 성형공정을 총 4 단계로 구성하였다. 예비 단조품 형상과 관련된 설계변수는 하부 금형 원뿔면 각도(A)와 절단 높이(B)이며, 라이너 단조 금형의 형상에서 선택된 설계변수는 하부

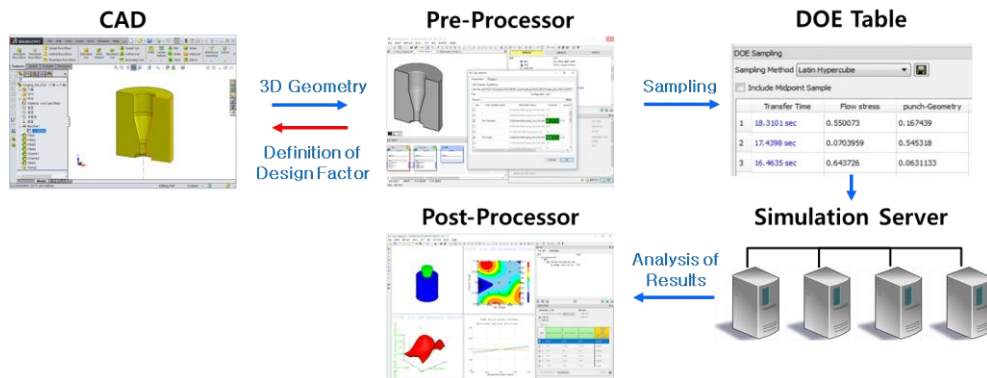


Fig. 3 The schematic diagram of numerical DOE analysis system

금형의 그림부 직경(C)과 원뿔면 각도(D), 최종 단조 편치의 원뿔면 각도(E)이다(Fig. 4). Table 1 은 선정된 설계변수의 범위를 나타낸 것으로 예비 단조품 설계변수(A, B)는 3 수준, 라이너 단조 설계변수(C, D, E)는 5 수준으로 정의하였다.

설계변수는 예비 단조품 설계변수와 라이너 단조 설계변수의 2그룹으로 나눌 수 있는데, 먼저 예비 단조품 설계변수 그룹의 샘플링은 소재의 체적이 일정하기 때문에 변수 A와 변수 B가 동시에 결정되어 총 3개의 샘플로 구성하였으며, 이후 해석에서는 Case 1, 2, 3으로 구분하였다. 라이너 단조 설계변수 그룹은 다구찌(Taguchi)의 직교 배열표를 이용하여 총 25 개의 샘플을 구성하였다. 예비 단조품 설계변수 그룹과 라이너 단조 설계변수 그룹의 조합은 완전요인법(full factorial)으로 조합하여 총 75개의 샘플이 시뮬레이션에 적용되었다. 예비 단조품 설계변수 그룹과 라이너 단조 설계변수 그룹의 샘플에 대한 변수 정의는 Table 2와 같다.

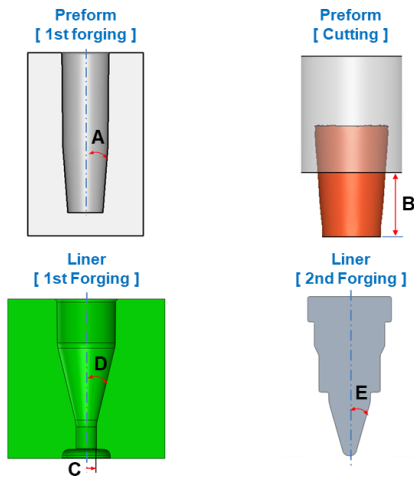


Fig. 4 Design variable definition of preform and forging die

Table 1 Definition of design variables and level

Factor	Unit	Level				
		1	2	3	4	5
A : Die Angle	deg.	2	4	6	-	-
B : Cutting Height	mm	58.5	70	83.2	-	-
C : Die Diameter	mm	12.5	13.75	15	16.25	17.5
D : Die Angle	deg.	12.5	13.75	15	16.25	17.5
E : Punch Angle	deg.	12.5	13.75	15	16.25	17.5

Table 2 Orthogonal array table of design variables

Preform Design Variable	A	B		
Case 1	0	0		
Case 2	0.5	0.5		
Case 3	1	1		
3 X 25				
Die Design Variable No.	C	D	E	
1	0	0	0	
2	0	0.25	0.25	
3	0	0.5	0.5	
4	0	0.75	0.75	
5	0	1	1	
6	0.25	0	0.25	
7	0.25	0.25	0.5	
8	0.25	0.5	0.75	
9	0.25	0.75	1	
10	0.25	1	0	
11	0.5	0	0.5	
12	0.5	0.25	0.75	
13	0.5	0.5	1	
14	0.5	0.75	0	
15	0.5	1	0.25	
16	0.75	0	0.75	
17	0.75	0.25	1	
18	0.75	0.5	0	
19	0.75	0.75	0.25	
20	0.75	1	0.5	
21	1	0	1	
22	1	0.25	0	
23	1	0.5	0.25	
24	1	0.75	0.5	
25	1	1	0.75	

2.4 관심영역 및 출력변수 선정

라이너는 제품 전체에 걸쳐 요구 재료특성이 균일해야 관통 성능을 확보할 수 있다[3]. 강소성 가공으로 얻어진 재료 특성을 최대한 유지하여 최종 제품에 반영하기 위해 라이너 단조공정에서 변형률 편차를 제어하여 균일성을 확보해야 한다. 따라서 해석결과의 평가기준으로 최종제품(절삭품) 위치에서의 유효 변형률을 선택하였고, 단조품의 균일 정도는 유효 변형률의 최대/최소값의 편차로 정의하였다. 절삭된 라이너 제품 형상을 관심영역으로 지정하여 해당 영역 내에 있는 유효 변형률을 추출하였다.

3. 해석 및 결과

3.1 라이너 성형해석

실험계획법에 의해 생성된 변수 조합의 개수만큼 라이너 단조 공정해석을 수행하였다. 라이너 소재는 무산소동이며 유동응력은 강소성 가공이 완료된 소재를 인장시험한 결과를 사용하였고, 다음과 같다.

$$\sigma = 63\epsilon^{0.042} + 367 \text{ MPa} \quad (1)$$

라이너 제조단계에서 직사각형 바가 원통형으로 성형됨에 따라 비대칭의 형상 및 변형률 분포를 포함하므로, 3차원 해석 수행이 필요하였다. 소재는 강소성체로 가정하였으며 펀치의 성형속도는 25 mm/s로 설정하였다. 금형과 소재의 마찰은 전단마찰계수 0.05로 가정하였는데, 이는 이항 몰리브덴 계열의 윤활제가 사용된 MADF 가공 시험과 MADF 성형해석의 프레스 하중을 비교하여 결정된 마찰계수 값을 참조한 것이다.

Fig. 5는 예비 단조 및 절단 공정을 거친 소재의 형상을 나타낸 것으로, 금형의 원뿔면 각도(A)와 절단 높이(B)에 따라 3가지 형상의 예비 단조품이 생성되었다. 각각의 예비 단조품은 2단계 라이너 단조 공정해석에 적용된다. Case 2의 펀치 스트로크에 따른 유효 변형률 분포는 Fig. 6와 같다. 먼저 1차 단조 공정에서 초기 소재는 예비 단조 공정후 비대칭 유효 변형률을 포함하고 있으며, 단조후 소재의 유효 변형률은 1~2.5 사이의 분포를 보였다. 2차 단조 공정 후에는 1.25~3.5 사이의 유효 변형률 분포를 나타내었으며, 원뿔면에는 비교적 균일한 변형률을 보였고 하부의 그립부 부근에 높은 변형률을 나타내었다. Fig. 7은 예비 단조품 형상별로 특정 단면에서 단조품의 유효 변형률을 비교한 것으로, 그립부와 원뿔면 사이의 유효 변형률 편차가 약 1.5 수준이었으며, Case 2가 Case 1, 3에 비해 낮은 변형률 수준을 나타내었다.

총 75개의 샘플 해석은 Intel Core-i7(4-Core)을 기준으로 계산시간이 약 550 시간 소요되었으며 4대의 Simulation Server를 사용하여 약 6일간 계산을 수행하였다.

3.2 DOE 해석 결과 분석

각 예비 단조품의 형상에 따른 25가지 조건 하에

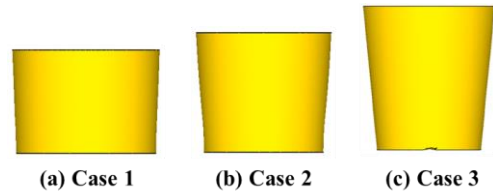


Fig. 5 Preform after preliminary forging and cutting

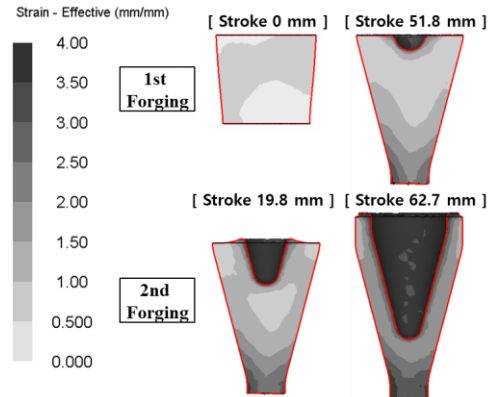


Fig. 6 Variation of shape and effective strain with punch stroke in liner forging process(Case2)

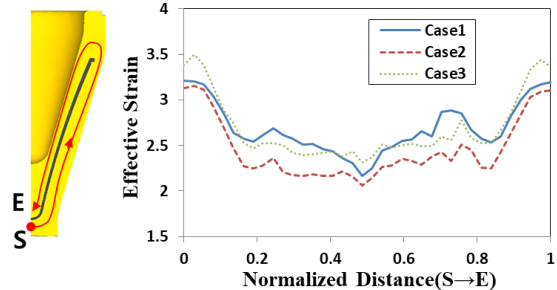


Fig. 7 Comparison of effective strain according to shape of preform at specific cross-section

서의 해석 결과를 바탕으로 각 설계 변수들의 최대/최소 유효 변형률의 편차에 대한 주효과 분석 내용을 Fig. 8-10에 나타내었다. Fig. 8에 보인바와 같이 라이너 단조 금형의 그립부 직경(C)의 민감도는 Case 3 > Case 1 > Case 2 순으로 나타났다. Case 1, 2에서는 금형의 그립부 직경이 작을수록 변형률 편차가 작고, Case 3에서는 클수록 변형률 편차가 작은 경향을 보였다. Fig. 9에서 라이너 단조 금형의 원뿔면 각도(D)의 민감도는 Case 1 > Case 3 > Case2 순으로 나타났으며 전반적으로 금형의 원뿔면 각도(D)가 작을수록 변형률 편차가 작아지는 경향을 보였다.

Fig. 10에서 라이너 단조 펀치의 원뿔면 각도(E)의 민감도는 Case 1 > Case 3 > Case 2 순으로 나타났으며 전반적으로 펀치의 원뿔면 각도가 클수록 변형률 편차가 작아지는 경향을 보였다. 이 결과에서 금형의 원뿔면 각도(D)와 펀치의 원뿔면 각도(E)는 예비 단조품 형상별로 동일한 효과를 미치는 것으로 나타났으며, 금형의 그립부 직경(C)은 Case 3에서만 반대의 경향을 보인다. 한편, Case 2는 Case 1, 3에 비해 라이너 단조 설계변수에 따른 영향도가 상대적으로 낮은 것으로 나타났고 유효 변형률 편차의 최대값 또한 가장 작은 수준이었다.

Fig. 11은 라이너 단조 설계변수의 순위 상관관계를 분석한 것으로, Case 1과 Case 3는 금형 원뿔면 각도(D)가 가장 큰 영향을 미쳤으며 Case 2는 펀치 원뿔면 각도(E)가 가장 큰 영향도를 보였다. 순위 상관관계 분석에서도 Spearman 상관관계 지수의 크기

와 부호를 통해 민감도를 판단할 수 있는데, 부호가 (+) 일 때는 변수의 크기가 작을수록 변형률 편차가 작음을 의미하고 (-) 일 때는 변수의 크기가 클수록 변형률 편차가 작음을 나타낸다. 이러한 결과를 통해 금형의 원뿔면 각도(D)가 작을수록, 펀치의 원뿔면 각도(E)가 클수록 변형률 편차가 작음을 알 수 있으며 금형의 그립부 직경(C)은 Case 1, 2에서 작을수록, Case 3에서 클수록 유효 변형률 편차가 작아지는 경향을 주효과 분석과 동일하게 보여준다.

금형의 원뿔면 각도(D)가 작고, 펀치의 원뿔면 각도(E)가 큰 경우에는, 그립부 부근의 체적이 커지면서 그립부 부근의 변형률이 감소함에 따라 편차가 작아지는 것으로 예측할 수 있다. 금형의 그립부 직경(C)에 대한 영향이 각 Case 마다 다르게 나타나는 것은, 상대적으로 직경이 크고 높이가 작은 Case 1, 2의 경우 후방 압출량이 Case 3에 비해 증가됨에 따

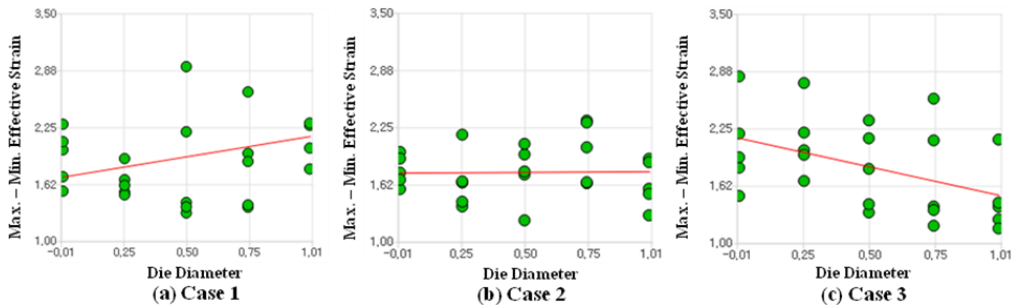


Fig. 8 Plot of main effect of die diameter(C) according to shape of preform

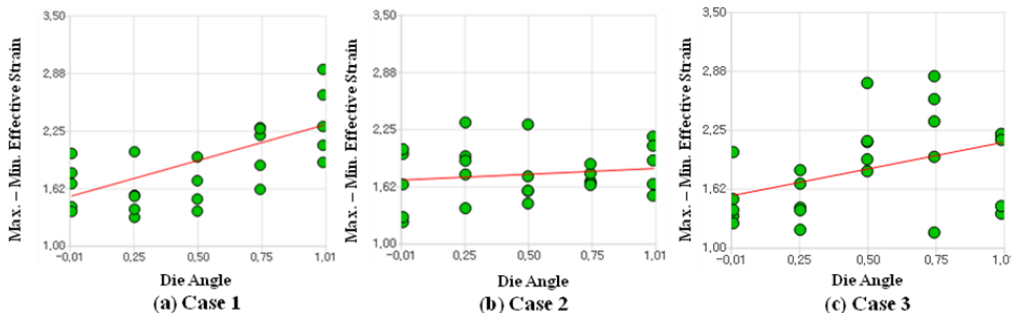


Fig. 9 Plot of main effect of die angle(D) according to shape of preform

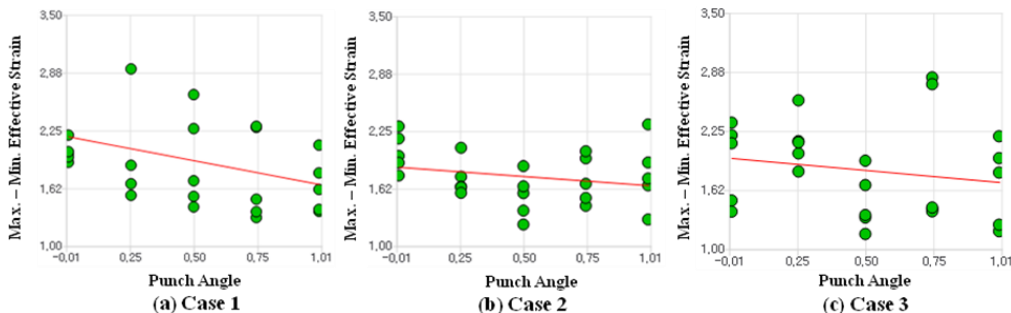


Fig. 10 Plot of main effect of punch angle(E) according to shape of preform

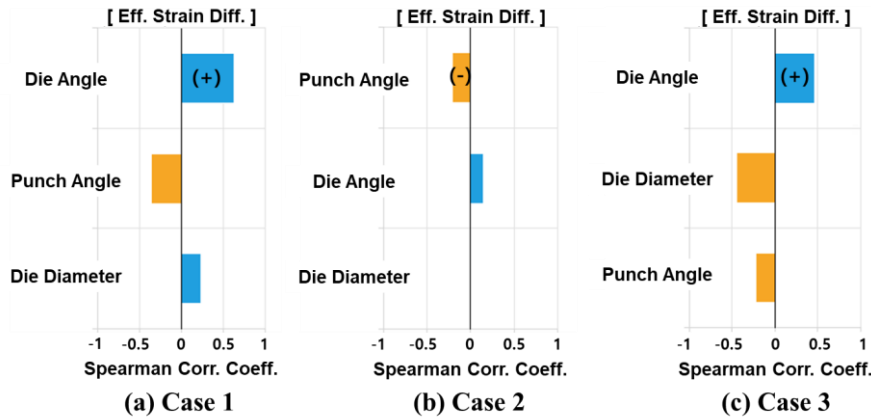


Fig. 11 The chart of rank correlation for design variables

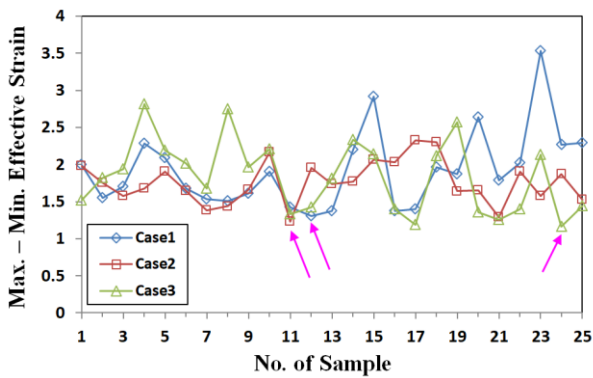


Fig. 12 The effective strain deviation predicted from each samples

Table 3 Minimum value of effective strain deviation

No.	Die Diameter (C)	Die Angle (D)	Punch Angle (E)	Output
Case 1	12	15	13.75	1.31
Case 2	11	15	12.5	1.23
Case 3	24	17.5	16.25	1.16

라 단조품의 원뿔면 부근에 변형률이 증가하여 변형률 편차에 영향을 주는 것으로 판단된다.

Fig. 12는 예비 단조품 형상별로 각 25개의 표본에서 예측된 최대/최소 유효 변형률의 편차를 정량적으로 비교한 것으로, Case 1은 No. 12, Case 2는 No. 11, Case 3는 No. 24에서 최소 편차를 보였다. Case 2의 경우 편차의 수준이 Case 1, 3에 비해 낮은 수준이며, Case 2에서 최소 편차를 보이는 No. 11에서 Case 1, 3도 유효 변형률 편차가 감소하는 경향을 보이고 있으므로 라이너 단조에 적합한 설계안으로는 Case 2의 No. 11으로 결정할 수 있다.

4. 결론

라이너는 성형작약탄의 탄두를 구성하는 부품으로 성형과정 동안 기 확보된 원소재의 물성특성을 균일하게 분포시킬 수 있도록 하는 것이 필요하다. 이에 본 연구에서는 라이너 단조 공정의 유한요소 해석에 수치적 실험계획법을 적용하여 제품 위치에서의 변형률 편차가 최소인 설계 변수 조합을 선정하였다.

(1) 예비 단조품 형상에 따른 라이너 단조 설계변수의 영향은 금형의 원뿔면 각도가 작을수록, 편치의 원뿔면 각도가 클수록 변형률 편차가 감소하였으며, 금형의 그림부 직경은 Case 1, 2에서 작을수록, Case 3에서 클수록 유효 변형률 편차가 감소하는 경향을 보였다.

(2) 최대/최소 유효 변형률의 편차를 정량적으로 비교했을 때 Case 2가 다른 모델에 비해 낮은 유효 변형률 수준을 나타내었고, No. 11이 검토한 설계안 중 최적조건임을 확인하였다.

본 연구와 같이 공정설계에서의 수치적 실험계획법 적용은 넓은 범위의 설계 변수에 대한 영향도를 정량적으로 검토할 수 있어, 보다 체계적으로 최적화된 공정 설계안을 도출하는데 유용한 수단이 될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 방위산업기술지원센터로부터 연구비를 지원받아 수행되었습니다(계약번호: UC160008D).

REFERENCES

- [1] E. L. Baker, J. Pham, T. Madsen, W. Poulos, B. E. Fuchs, 2013, Shaped Charge Jet Characterization and Initiation Test Configuration for IM Threat Test, *Procedia Engineering*, Vol. 58, pp. 58~67.
- [2] Y. M. Kim, J. U. No, Y. S. Gwon, S. H. Jeong, 2005, Finite Element Analysis for Die Compaction Process of W-Cu Composite Powders for Shaped Charge Liner, *Proc. Kor. Powder Metall. Conf. 2005*, pp. 28~29.
- [3] S. H. Chang, K. C. Park, Y. M. Kim, 2011, The Study of Copper Liner Micro Structure Control for Shaped Charge, *J. Kor. Ins. of Military Science and Tech.*, Vol. 14, No. 6, pp. 1114~1120.
- [4] T. Y. Lee, Y. M. Kim, S. H. Lee, K. H. Lee, 2013, DOE of Hot Forging Process using Finite Element Method, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf. 2013 fall*, pp. 355~358.
- [5] J. H. Ji, L. J. Park, H. W. Kim, S. W. Hwang, C. S. Lee, K. T. Park, 2011, Homogeneity of Microstructure and Mechanical Properties of Ultrafine Grained OFHC Cu Bars Processed by ECAP, *J. Kor. Inst. Met. Mater.*, Vol. 49, No. 6, pp. 474~487.
- [6] Y. G. Kim, K. P. Kang, S. J. Seo, J. K. Lee, T. S. Yoon, K. H. Lee, 2018, DOE approach in the FEA of Liner Forging Process, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf. 2018 Spring*, pp. 133~134.
- [7] S. C. Kwon, S. T. Kim, D. V. Kim, J. K. Lee, S. J. Seo, T. S. Yoon, H. T. Jeong, 2018, Mechanical Properties of OFC Copper Fabricated by Multi-Axial Diagonal Forging(MADF), *Trans. Mater. Process.*, Vol. 27, No. 4, pp. 250~256.