

최적화기법의 적용을 통한 냉간단조품의 성형공정 평가

여흥태¹ · 박건형² · 허관도[#]

Evaluation of the Forging Process by the Application of Optimization Technology

H. T. Yeo, K. H. Park, K. D. Hur

(Received November 2, 2005)

Abstract

The fuel injector is a part that controls the fuel supply of automotive engine. The housing of the fuel injector supports the rod, the needle valve and the solenoid. In this study, the rigid-plastic FE-analysis by using the design of experiments (DOE) and the response surface methodology (RSM) has been performed to produce the product reducing the under-fill and the maximum effective strain. From the results of DOE, the stem of counter punch and the face angle of punch at the 1st process, and the stem of punch at the 2nd process were determined as the significant design variables for each response such as the upper under-fill, lower under-fill and the maximum effective strain. From the results of RSM, the optimal values of the design variables have been also determined by simultaneously considering the responses.

Key Words : Design of Experiments, Analysis of Variance, Response Surface Methodology, Rigid-Plastic FE-analysis, Under-fill

1. 서 론

연료분사장치(fuel injector)는 ECU(engine control unit)에 의해 제어되는 솔레노이드 밸브(solenoid valve)이다. 연료분사하우징(fuel injection housing)은 솔레노이드 밸브와 연료파이프(fuel pipe)에 연결되어 연료분사장치를 지지하며 연료의 유출을 방지하는 기능을 수행한다. 일반적으로 연료분사장치에서는 반복적인 연료분사에 의해 연료분사 하우징에 반복하중이 작용하게 되어 강도나 수명에 영향을 미치게 된다. 이러한 반복하중에 견디도록 강성을 증가시키고 재료 낭비를 감소시키기 위해 냉간단조에 의해 연료분사 하우징을 생산한다.

냉간단조시 금형내부의 소재의 유동은 금형의

형상, 금형과 소재의 마찰로 인하여 소재와 접하는 금형의 내면에 높은 압력이 작용하게 되어 금형과 프레스의 손상이나 최종제품의 형상에 결속(under-fill)이나 접힘(folding)등이 발생하게 된다. 또한 제품의 형상이나 설계조건에 따라서 여러 번의 단조공정을 통하여 최종제품을 생산하게 된다. 그러므로 예비성형체의 설계, 제품형상의 결합에 대한 연구가 진행되고 있다[1~3].

Shivpuri 등은 연료분사노즐의 냉간단조 성형공정에 대한 연구 및 유도가열동안 재료의 파괴모델, 미소합금강의 온간/열간단조 모델등에 대한 연구와 연료분사노즐의 냉간단조에 유한요소법을 적용하여 각 성형공정에서 펀치의 하중과 압력의 최적화에 관한 연구를 수행하였다[4~6].

1. 동의대학교 기계공학부

2. (주)센트랄 기술연구소

교신저자: 동의대학교 기계공학부

E-mail: kdhur@deu.ac.kr

본 연구에서는 실험계획법에 따라 상용 강소성 유한요소해석 코드인 DEFORM-2D[7]을 사용하여 연료분사하우징의 성형해석을 수행하였고 성형공정에 따른 결속(under-fill) 및 최대 유효변형률(effective strain)의 변화를 평가하여 영향성이 큰 설계변수를 선택하였다. 또한 반응표면분석법을 통하여 결속 및 최대 유효변형률을 최소화하는 공정을 검토하였다.

2. 냉간단조 성형공정

2.1 성형조건

연료분사장치는 Fig. 1(a)와 같고 냉간단조 후 기계 가공된 제품의 최종 형상은 Fig. 1(b)와 같다.

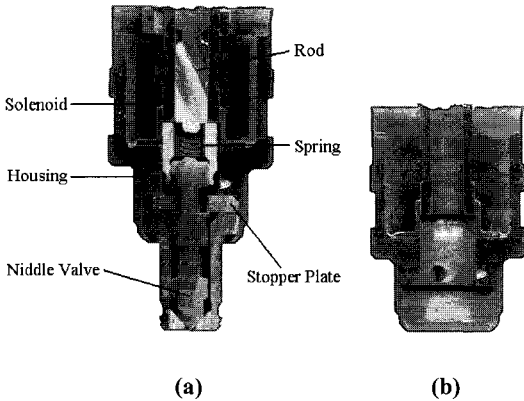


Fig. 1 The fuel injector and housing: (a) section of the fuel injector; (b) final shape of cold forged housing with machining

연료분사하우징의 소재는 STS410 이며 유동응력(flow-stress)은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 960\bar{\epsilon}^{0.1} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

초기 빌렛의 직경이 20.25mm 이며 길이가 18.7mm 이다. 금형과 소재사이의 마찰은 일정전단마찰상수 $m=0.1$ 로 가정하였다.

Fig. 2 는 연료분사하우징의 냉간단조공정을 나타낸다. Fig. 2(a)는 초기소재의 형상이며 Fig. 2(b)는 첫 번째 성형공정으로 전방압출과 후방압출에 의해 성형된 제품형상을 나타낸다. Fig. 2(c)는 두 번째 성형공정에서 솔레노이드를 감싸는 부분을 성형한다. Fig. 2(d)는 성형공정의 세 번째 단계로 가공이 요구되는 치수로 하우징을 성형한다.

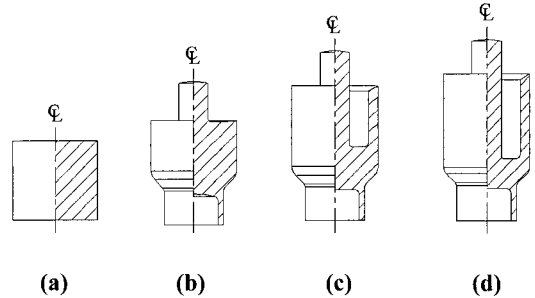


Fig. 2 Work sequence in the cold forging of fuel injector housing: (a) initial billet; (b) 1st process; (c) 2nd process; (d) 3rd process

3. 성형공정 최적화

3.1 실험계획법에 의한 설계변수 결정

하우징의 냉간단조금형의 형상에서 선택된 설계변수와 최종형상에서의 결속과 유효변형률분포 등의 응답을 Table 1 과 Fig. 3 에 나타낸다.

Table 1 Content of factors

Factor	Content	
Design variable	A	Flat portion of punch face at the 1 st process (mm)
	B	Stem of counter punch at the 1 st process (mm)
	C	Face angle of punch at the 1 st process (deg.)
	D	Stem of punch at the 2 nd process (mm)
Response	y_1	Upper under-fill(mm)
	y_2	Lower under-fill(mm)
	y_3	Maximum effective strain

설계변수 A 는 1 공정 펀치의 평면부 직경이고 B 는 카운터 펀치의 스템부 길이를 나타낸다. C 는 1 공정 펀치 경사면의 각도이고 D 는 2 공정의 펀치 스템부의 길이를 나타낸다.

설계변수 값의 변화에 따른 반응량으로 후가공을 고려하여 길이로 표현된 상부 결속(y_1)과 하부 결속(y_2)를 선택하였고 제품 내부 결함을 방지하기 위하여 변형이 심한 부분에서 연성파괴에 의한 결함[8]이 발생할 수 있으므로 이 위치에서 최대 유효변형률을 선택하여 낮게 설계되도록 하였다.

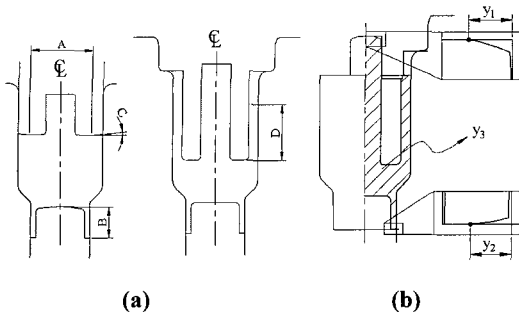


Fig. 3 Definitions of design variables and responses: (a) design variables (A, B, C, D); (b) responses (y_1, y_2, y_3)

Table 2와 같이 설계변수를 2수준으로 하고 최소값 -1과 최대값 1로 두어 대응하는 실제값을 표시하였다. Table 3의 직교배열표에 따라 설계변수의 수준에 해당하는 Table 2의 실제값을 대입하여 유한요소해석을 수행하였고 그 해석 결과를 Table 3의 응답(response)에 기록한다.

Table 2 Level of design variables

Factor	Coded level	
	-1	1
A	27.8784	32.1216
B	5.8540	6.7455
C	1.4640	8.5360
D	12.2665	14.1335

직교배열표에 따라 구한 각각의 응답에 대한 설계변수(인자)의 영향성을 분산분석(analysis of variance)을 통하여 검토하였다.

상부 결육에 대하여 영향성이 작은 인자를 제거한 분산분석의 결과는 Table 4와 같다. 여기서 영향성의 크기를 나타내는 F0를 보면 D 인자가 가장 큰 값을 가지므로 양향성이 가장 크다. 각 인자의 교호작용(interaction)을 배제한 경우 영향성의 크기는 $A < C < B < D$ 순으로 나타났다.

하부 결육에 대하여 영향성이 작은 인자를 제거한 분산분석의 결과는 Table 5와 같다. 여기서 B 인자만 영향이 있는 것을 알 수 있다.

최대 유효변형률에 대하여 영향성이 작은 인자를 제거한 분산분석의 결과는 Table 6과 같다. 여기서 영향성은 D 인자가 가장 크게 나타났다. 각 인자의 교호작용을 배제한 경우 각 인자의 영향성은 $C < D$ 순으로 나타났다.

Table 3 Orthogonal array and results by rigid-plastic

	FE-analysis				Response		
	A	B	C	D	y_1	y_2	y_3
1	-1	-1	-1	-1	1.733	0.841	4.1084
2	-1	-1	-1	1	3.545	1.380	4.2632
3	-1	-1	1	-1	2.178	1.380	4.0915
4	-1	-1	1	1	3.545	1.380	4.2971
5	-1	1	-1	-1	2.173	0.913	4.2318
6	-1	1	-1	1	3.545	0.825	4.2880
7	-1	1	1	-1	2.853	0.650	4.2556
8	-1	1	1	1	3.545	1.380	4.3779
9	1	-1	-1	-1	1.554	1.380	4.0985
10	1	-1	-1	1	3.545	1.380	4.3833
11	1	-1	1	-1	1.694	1.380	4.1065
12	1	-1	1	1	3.545	1.380	4.6277
13	1	1	-1	-1	1.988	0.821	4.0093
14	1	1	-1	1	3.545	0.816	4.2557
15	1	1	1	-1	2.572	0.617	4.1436
16	1	1	1	1	3.545	0.617	4.4695

Table 4 Analysis of variance for the upper under-fill after pooling

Factor	S	\emptyset	$V(=S/\emptyset)$	F0	F(0.05)
A	0.0797	1	0.0797	7.239	5.32
B	0.3681	1	0.3681	33.452	5.32
C	0.2137	1	0.2137	19.416	5.32
D	8.4318	1	8.4318	766.170	5.32
AD	0.0797	1	0.0797	7.239	5.32
BD	0.3681	1	0.3681	33.452	5.32
CD	0.2137	1	0.2137	19.416	5.32
E	0.0880	8	0.0110		

Table 5 Analysis of variance for the lower under-fill after pooling

Factor	S	\emptyset	$V(=S/\emptyset)$	F0	F(0.05)
B	0.9322	1	0.9322	18.996	4.6
E	0.6870	1	0.0491		

이와 같이 분산분석을 통하여 영향성이 큰 설계변수로 B, C, D를 선택하고 반응표면분석을 실시하였다.

Table 6 Analysis of variance for the upper under-fill after pooling

Factor	S	∅	V(=S/∅)	F0	F(0.05)
C	0.0334	1	0.0334	25.957	5.32
D	0.2298	1	0.2298	178.460	5.32
AB	0.0334	1	0.0334	25.937	5.32
AC	0.0138	1	0.0138	10.716	5.32
AD	0.0440	1	0.0440	34.199	5.32
BD	0.0108	1	0.0108	8.383	5.32
CD	0.0117	1	0.0117	9.093	5.32
E	0.0103	8	0.0013		

3.2 반응표면분석

분산분석을 통해 선택된 설계변수값의 변화에 따른 최적값을 결정하기 위하여 반응표면분석법을 도입하였다.

반응표면분석(response surface analysis)[9~10]은 여러 개의 설계변수가 복합적으로 작용하여 어떤 반응량에 영향을 주고 이러한 반응량의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법이다.

설계변수의 변화에 따라 반응표면을 통계적인 모형으로 만들어 설계변수와 반응량간의 방정식을 구하게 되고 이를 바탕으로 최적화를 수행하게 된다.

본 연구에서는 설계변수에 대해 반응표면분석을 수행하여 최종제품의 결육과 최대 유효변형률을 감소시키고자 하였다.

3.2.1 설계변수

Table 7 은 선택한 설계변수의 수준을 나타낸다. 여기서 극값(a)는 설계변수가 3 개이고 직교배열표에 따른 실험에서 중심점의 반복횟수가 1 회인 경우 1.216 을 일반적으로 선택한다[9]. 분산분석에서 사용한 설계변수의 최대, 최소값을 극값의 실제값으로 두고 5 수준으로 구성하였다.

3.2.2 중심합성계획

일반적으로 2k 요인실험에서는 각 변수의 두 수준에서만 실험이 되므로, 변수의 수준변화에 따라서 발생하는 반응량의 곡면적인 변화를 감지할 수 없으며, 회귀계수를 추정할 수가 없으므로 중심합성계획(central composite design)은 2k 요인실험에 중심점(center point)과 축점(axial point)을 추가하여 이러한 단점을 보완한 형태의 실험계획이다[9].

Table 7 Level of design variables

Factor	Coded level				
	-a	-1	0	1	a
x ₁ (=B)	5.7583	5.8545	6.3	6.7455	6.8417
x ₂ (=C)	0.7002	1.4645	5.0	8.5360	9.2998
x ₃ (=D)	12.0649	12.2665	13.2	14.1335	14.3351

중심합성계획의 결과를 통하여 다음과 같은 2 차 회귀방정식을 얻는다. 여기서, x_i 는 설계변수이며, 계수 β는 회귀계수라 하고 ε 는 오차항을 나타낸다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

Table 8 Results of the central composite design

	x ₁	x ₂	x ₃	y ₁	y ₂	y ₃
1	-1	-1	-1	1.5813	0.8391	4.2477
2	-1	-1	1	3.5450	1.3800	4.4282
3	-1	1	-1	1.9554	1.3800	4.3041
4	-1	1	1	3.5450	1.3800	4.2956
5	1	-1	-1	2.0733	0.6401	3.9927
6	1	-1	1	3.5450	0.6368	4.2116
7	1	1	-1	2.7969	1.1226	4.1595
8	1	1	1	3.5450	0.6865	4.1430
9	0	0	0	3.5450	1.3800	4.1188
10	-a	0	0	3.5450	1.3800	4.5005
11	a	0	0	3.5450	1.3800	4.1663
12	0	-a	0	3.5450	1.3800	4.1042
13	0	a	0	3.5450	1.3800	4.1684
14	0	0	-a	2.1535	0.9469	3.8698
15	0	0	a	3.5450	0.9557	4.5603

Table 8 은 중심합성계획에 따라 감소성 유한요한요소해석을 수행한 결과를 나타내고 있으며 이 결과로부터 얻어진 2 차 회귀방정식은 다음과 같다.

$$y_1 = 3.6832 + 0.1217x_1 + 0.1002x_2 + 0.6813x_3 - 0.1242x_1^2 - 0.1242x_2^2 - 0.5947x_3^2 + 0.0437x_1x_2 - 0.1667x_1x_3 - 0.1372x_2x_3 \quad (3)$$

$$y_2 = 1.4251 - 0.1728x_1 + 0.0979x_2 + 0.0102x_3 - 0.0405x_1^2 - 0.0405x_2^2 - 0.3304x_3^2 - 0.0011x_1x_2 - 0.1225x_1x_3 - 0.1217x_2x_3 \quad (4)$$

$$y_3 = 4.1838 - 0.1072x_1 + 0.0091x_2 + 0.1108x_3 + 0.0867x_1^2 - 0.0465x_2^2 + 0.0067x_3^2 + 0.0218x_1x_2 + 0.0038x_1x_3 - 0.0531x_2x_3 \quad (5)$$

반응량 y_1, y_2, y_3 를 동시에 고려하기 위해서 목적함수 Y 를 다음과 같이 가정하였다. 여기서, 하우징의 아랫 부분 즉, 전방압출에 의해 성형된 부분이 니들밸브를 지지하므로 다른 반응량에 비해 중요도를 높게 가정하였다.

$$Y = 0.25y_1 + 0.5y_2 + 0.25y_3 \quad (6)$$

Fig. 4 는 설계변수들의 변화에 따른 예측된 반응량의 변화와 최적의 설계변수값들을 나타낸다. 이와 같이 결정된 최적의 설계변수의 값과 예상되는 최종형상의 결육 및 최대 유효변형률을 결정할 수 있었다.

Table 9 및 Fig. 5 는 기존의 설계값과 최적값에서 최종형상에서의 결육과 최대 유효변형률을 비교하였다. 기존의 설계는 하우징의 상부와 하부에서 결육이 발생하는 것에 비해 최적값으로 설계된 경우는 첫 번째 공정에서 x_1 의 길이 즉, 카운터 펀치의 스템의 길이를 길게 하고 x_2 의 각도 즉, 펀치면의 각도도 작게 하여 첫 번째 공정에서 하우징의 하부의 결육이 발생하지 않도록 성형이 이루어진 것을 알 수 있다. 또한 두 번째 공정에서 펀치의 스템의 길이가 기존의 공정에 비해서 최적값으로 설계된 경우가 길이가 더 짧은 것을 알 수 있다. 그 결과 마지막 공정에서 하우징의 상부결육이 발생하는 부분으로 소재가 더 많이 유동을 하여 하우징의 상부결육을 줄인 것을 알 수 있다. 또한 최대 유효변형률도 기존의 공정에 비해서 더 낮은 값을 나타내고 있다. 기존 공정에 비해 최적값의 경우 상부 결육은 3.5450mm에서 1.6134mm로 32.8% 감소하고 하부 결육은 1.3800mm에서 0.4779mm로 34.6% 감소하였다. 또한 최대 유효 변형률은 4.1188에서 3.8606으로 6% 정도 낮게 설계할 수 있었다.

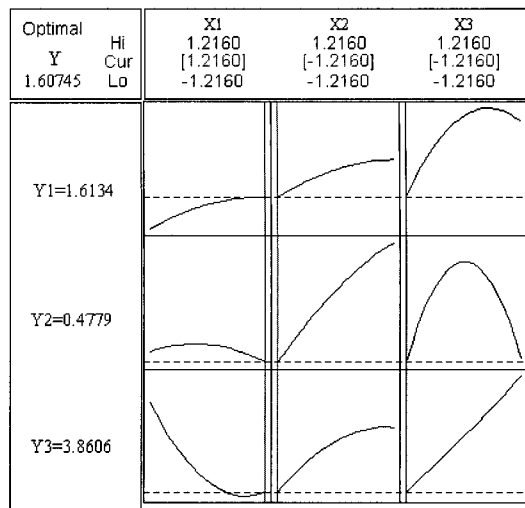
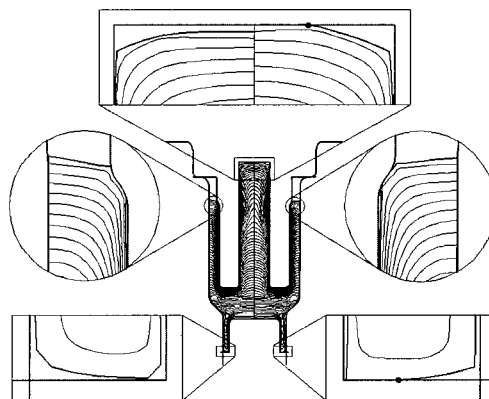


Fig. 4 Optimal values and predicted response trace plots along the design variables

Table 9 Optimal values of design variables

Factor		Previous value	Optimal value
Design variable	x_1	6.3000	6.8417
	x_2	5.0000	0.7002
	x_3	13.2000	12.0649
Predicted respons	y_1	3.5450	1.6134
	y_2	1.3800	0.4779
	y_3	4.1188	3.8606
e	Y		1.6075



(a) Previous design (b) Optimal design
Fig. 5 Comparison of under-fill and metal flow

4. 결론

참고 문헌

본 연구에서는 연료분사하우징의 2 차원 강소성유한요소해석을 수행하였다. 성형된 하우징의 결육과 최대 유효변형률을 감소시키기 위하여 실험계획법에 의한 분산분석과 반응표면분석법 등의 최적화기법을 적용하여 성형공정을 평가하였고 설계변수의 영향성과 최적값을 결정하였다.

실험계획법에 의해 분산분석으로 나타난 각각의 반응량에 대한 설계변수의 영향으로 상부 결육은 제 2 공정 펀치의 스템부 길이에 가장 큰 영향을 받고, 하부 결육은 제 1 공정 카운터 펀치의 스템부 길이에 크게 종속하며, 최대 유효변형률은 제 2 공정 펀치 스템부 길이에 크게 종속하였다.

중심합성계획을 이용한 반응표면분석법에 의해 상부 및 하부 결육과 최대 유효변형률에 대한 2 차 회귀식을 결정하였고 하부 결육에 대한 가중치를 높게 설정하여 목적함수를 가정하였다. 가정된 목적함수로부터 결정된 설계변수의 최적값은 제 1 공정 카운터 펀치의 스템부 길이(x_1)는 약 6.8mm 이며 제 1 공정 펀치 경사면의 각도(x_2)는 약 0.7 도 이고 제 2 공정 펀치의 스템부 길이(x_3)는 약 12.1mm 이다.

그리고 유한요소해석 및 최적화기법을 이용하여 연료분사하우징의 성형공정에 있어 기존의 공정보다 상부결육은 32.8%, 하부결육은 34.6%, 최대 유효변형률은 6%를 감소시킬 수 있는 개선효과를 얻을 수 있었다.

후 기

이 논문은 2004 학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(과제번호 2004AA128).

- [1] 고대철, 김병민, 최재찬, 오세욱, 1996, 허브 냉간단조품의 공정설계, 대한기계학회논문집 (A), 제 20 권, 제 11 호, pp. 3387~3397.
- [2] 김동진, 김병민, 1999, 이중 리브를 가진 냉간 압출품의 내·외부 결함 방지를 위한 공정설계, 한국소성가공학회지, 제 8 권, 제 6 호, pp. 612~619.
- [3] 장용석, 최진화, 고병두, 이호용, 황경복, 2000, 슛넵 플랜지의 공정설계에 관한 연구, 한국정밀공학회지, 제 17 권 제 6 호, pp. 127~134.
- [4] R. Shivpuri, S. Babu, S. Kini, P. Pauskar, A. Deshpande, 1994, Recent advances in cold and warm forging process modeling techniques: selected examples, J. of Materials Processing Technology., Vol. 46, pp. 253~274.
- [5] S. Seth, R. Shivpuri, 1997, Simultaneous Consideration of Process Development and Die Design for Forming a Fuel Injector Nozzle, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 119, pp. 358~367.
- [6] S. D. Kini, R. Shivpuri, 2001, Precision and ejection issues in the cold forging of a fuel injector nozzle, Proc Instn Mech Engrs, Vol. 215, pp. 927~933.
- [7] DEFORM User's Manual V7.2, 2002, Scientific Forming Technologies Cooperation.
- [8] 고대철, 이진희, 김병민, 최재찬, 1994, 금속성형공정에서 연성파괴예측, 한국소성가공학회지, 제 3 권, 제 2 호, pp. 167~177
- [9] 박성현, 2003, 현대실험계획법, 민영사, pp. 453~498.
- [10] 송요선, 여홍태, 허관도, 2005, 반응표면분석법을 이용한 휠 베어링 허브 단조에 관한 연구, 한국정밀공학회지, 제 22 권, 제 8 호, pp. 100~107.