

반응표면분석법을 이용한 연료분사하우징의 성형공정설계

박건형* · 여흥태** · 허관도***

Forming Process Design of Fuel Injector Housing by Response Surface Method

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

Abstract

The housing of the fuel injector supports the rod, the middle valve and the solenoid. Based on the procedure of process design, in this paper, the forming operation is designed by the rigid-plastic finite element method. The metal flow during the forming of the fuel injector housing is axisymmetric until the final forming process. The response surface method has been performed to reduce the under-fill and the maximum effective strain. From the results of RSM, the second order regression model of equation is calculated by the least square method and used to determine the optimal values of design variables by simultaneously considering the responses. It is noted that upper under-fill is affected by the design variables of the 2nd forming process and lower under-fill is affected by the design variables of the 1st forming process.

Key Words : Fuel injector Housing, Response Surface Method, Rigid-plastic FEM, Under-fill

1. 서론

연료분사하우징은 솔레노이드 밸브와 연료파이프에 연결이 되고 연료분사장치를 지지하며 연료의 유출을 방지하는 기능을 수행한다. 일반적으로 연료분사하우징은 연료분사장치에서 반복적으로 연료를 연료분사노즐을 통하여 분사하므로 반복적인 분사압력은 하우징의 강도나 수명에 영향을 미치게 된다. 이러한 영향을 줄이기 위해서는 생산된 제품은 강성을 가지고 있어야 한다. 그러므로 연료분사하우징은 냉간단조에 의해서 성형이 이루어지고 있다. 냉간단조시 금형내부의 소재의 유동은 금형의 형상, 금형과 소재의 마찰로 인하여 소재와 접하는 금형의 내면에 높은 압력이 작용하게 되어 금형과 프레스의 손상이나 최종제품

의 형상에 결육(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 냉간단조에서 유도가열동안 재료의 파괴모델, 미소합금강의 온간/열간단조 모델등에 대한 연구와 연료분사노즐의 냉간단조에 유한요소법을 적용하여 각 성형공정에서 펀치의 하중과 압력의 최적화에 관한 연구를 수행하였다.⁽⁴⁻⁶⁾

본 연구에서는 상용 강소성 유한요소해석프로그램인 DEFORM-2D⁽⁷⁾을 사용하여 연료분사하우징의 성형공정해석을 수행하였고 반응표면분석법을 통하여 발생 가능한 결함들을 예측하고 최소화

* 동의대학교 기계공학과 일반대학원
** 동의대학교 기계공학부 기계공학전공
*** 동의대학교 기계공학부 기계공학전공

할 수 있는 성형공정을 설계하였다.

2. 냉간단조 성형공정

2.1 성형조건

연료분사하우징의 초기소재는 $\phi 20.25 \times 18.7$ 이고 재료는 SUS410 으로 재료의 유동응력식은 다음과 같다.

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

금형과 소재사이의 마찰은 전단마찰로 가정하고 전단마찰상수 m 은 0.1로 가정하였다.

Fig. 1 은 연료분사하우징의 냉간단조공정에 대해서 나타내고 있다. Fig. 1(a)는 초기소재의 형상을 나타내고 있다. Fig. 1(b)는 첫 번째 성형공정에 전방압출과 후방압출에 의해 성형된 제품형상을 나타내고 있다. Fig. 1(c)는 두 번째 성형공정에서 슬레노이드를 감싸는 부분이 성형되는 것을 알 수 있다. Fig. 1(d)는 성형공정의 세 번째 단계로 가공시 요구되는 치수로 하우징을 성형하게 된다.

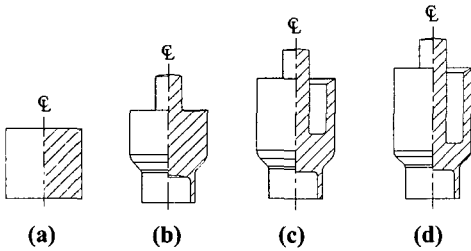


Fig. 1 Forming sequence for fuel injector housing

3. 반응표면분석

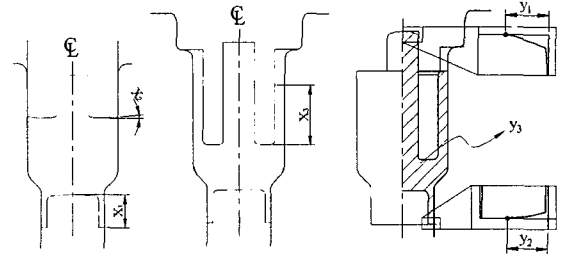
반응표면분석(response surface analysis)⁽⁸⁻⁹⁾은 여러 개의 설계변수가 복합적으로 작용을 하여 어떤 반응량에 영향을 주고 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법이다.

설계변수의 변화에 따라 설계변수 x_i 와 반응량 y_j 간의 반응표면을 가지게 된다. 이 반응표면을 통계적인 모형으로 만들어 설계변수와 반응량간의 방정식을 구하게 되고 이를 바탕으로 최적화를 수행하게 된다. 따라서 본 연구에서는 설계변수에 대해 반응표면분석을 수행하여 최종제품의 결함 즉, 소재의 유동에 의해서 발생하게 되는 소재의 결속이나 접합등을 평가하고 냉간단조공정의

연성과피치가 소재의 유효변형률사이에서 일정한 관계가 있으므로 최종제품의 형상에서 소재의 결함과 유효변형률에 대해서 최적화를 수행하였다.⁽¹⁰⁾

3.1 설계변수

하우징의 냉간단조금형의 형상에서 선택된 설계변수와 최종형상에서의 결속과 유효변형률분포 등의 반응량은 Fig. 2 와 Table 1 과 같다. Table 2 는 선택한 설계변수의 수준을 나타낸다. 여기서 α 의 값은 1.216 이고 기존의 설계변수의 값은 0 수준으로 사용하였다.



(a) design variable (b) responses
Fig. 2 Definitions of design variables and responses

Table 1 Content of Factors

Factor		Content
Design variable	x_1	Stem of counter punch at the 1 st process (mm)
	x_2	Face angle of punch at the 1 st process (deg.)
	x_3	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

Table 2 Level of design variables

Factor	Coded level				
	$-\alpha$	-1	0	1	α
x_1	5.7583	5.8545	6.3	6.7455	6.8417
x_2	0.7002	1.4645	5.0	8.5360	9.2998
x_3	12.0649	12.2665	13.2	14.1335	14.3351

3.2 중심합성계획

일반적으로 2^k 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 2^k 요인실험에 중심점(center point)과 축점(axial point)을 추가하여 이러한 단점을 보완한 형태의 실험계획이다.

중심합성계획의 결과를 통하여 다음과 같은 2차 회귀방정식을 얻는다

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

여기서, 계수 β 는 회귀계수라 하고 ε 는 오차항을 나타낸다.

Table 3 Results of central composite design

	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3
1	-1	-1	-1	1.5813	0.8391	4.24767
2	-1	-1	1	3.5450	1.3800	4.42820
3	-1	1	-1	1.9554	1.3800	4.30410
4	-1	1	1	3.5450	1.3800	4.29561
5	1	-1	-1	2.0733	0.6401	3.99267
6	1	-1	1	3.5450	0.6368	4.21155
7	1	1	-1	2.7969	1.1226	4.15954
8	1	1	1	3.5450	0.6865	4.14303
9	0	0	0	3.5450	1.3800	4.11875
10	$-\alpha$	0	0	3.5450	1.3800	4.50045
11	α	0	0	3.5450	1.3800	4.16633
12	0	$-\alpha$	0	3.5450	1.3800	4.10424
13	0	α	0	3.5450	1.3800	4.16837
14	0	0	$-\alpha$	2.1535	0.9469	3.86979
15	0	0	α	3.5450	0.9557	4.56034

Table 3 은 중심합성계획에 의한 강소성 유한요한요소해석결과를 나타내고 있으며 이 결과로부터 얻어진 2차 회귀방정식은 다음과 같다.

$$y_1 = 3.68318 + 0.121710x_1 + 0.100177x_2 + 0.681280x_3 - 0.124161x_1^2 - 0.124161x_2^2 - 0.594687x_3^2 + 0.0436790x_1x_2 - 0.166701x_1x_3 - 0.137209x_2x_3 \quad (3)$$

$$y_2 = 1.42510 - 0.172754x_1 + 0.0979218x_2 + 0.0102390x_3 - 0.0405254x_1^2 - 0.0405254x_2^2 - 0.330410x_3^2 - 0.00110500x_1x_2 - 0.122533x_1x_3 - 0.121713x_2x_3 \quad (4)$$

$$y_3 = 4.18376 - 0.107244x_1 + 0.00914092x_2 + 0.110804x_3 + 0.0867459x_1^2 - 0.0465383x_2^2 + 0.00672527x_3^2 + 0.0218131x_1x_2 + 0.00379137x_1x_3 - 0.0530521x_2x_3 \quad (5)$$

반응량 y_1, y_2, y_3 를 동시에 고려하기 위해서 목적함수 Y 를 다음과 같이 가정하였다.

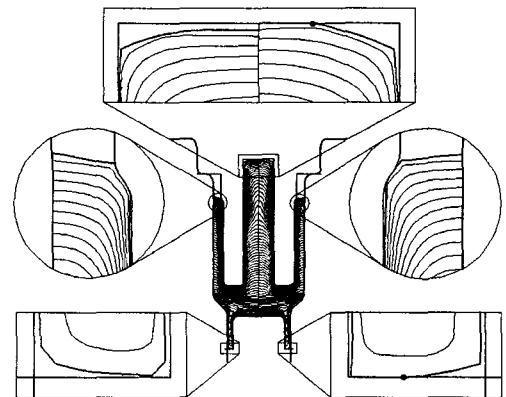
$$Y = Ay_1 + By_2 + Cy_3 \quad (6)$$

여기서, A, B, C 는 각 반응량에 대한 가중치를 나타낸다. 하우징의 아랫부분 즉, 전방압출에 의해서 성형된 부분이 니들밸브를 지지하므로 다른 반응량에 비해서 중요하므로 $B = 0.5, A = 0.25, C = 0.25$ 로 가정하였다.

위의 식으로부터 최적의 설계변수의 값과 예상되는 최종형상의 결속과 유효변형률을 얻을 수 있었다.

Table 4 Optimal values of design variables

		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 response	y_1	3.5450	1.6134
	y_2	1.3800	0.4779
	y_3	4.1188	3.8606
	Y		1.60745



(a) Previous design (b) Optimal design
Fig. 4 comparison of underfill and metal flow

참 고 문 헌

식(6)을 목적함수로 하여 Table 2로 주어진 설계 영역에서 각 설계변수에 대한 최적값을 탐색하였으며 Table 4에서 기존의 설계값과 최적값에서 최종형상에서의 결육과 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 처음공정에서 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 유효변형률도 기존의 공정에 비해서 더 낮은 값을 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 연료분사하우징의 성형공정에 강소성 유한요소해석과 반응표면분석법을 적용하여 최종형상에서 발생하는 소재의 결육과 유효변형률의 최소화 설계를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 중심합성계획을 이용하여 성형공정에서 발생하는 결육과 유효변형률을 예측할 수 있는 2차 회귀방정식을 구하였다. 또한 결육과 유효변형률의 최소화를 동시에 만족하는 성형공정의 설계변수를 구하기 위해서 각각의 2차 회귀방정식의 반응량에 가중치를 달리하여 목적함수를 가정하였다.

(2) 최종형상에서 하부의 결육은 첫 번째 공정에서 카운터 펀치의 스템의 길이와 펀치면의 각도 의해서 결정이 되고 상부의 결육은 두 번째 공정에서 펀치의 스템의 길이에 의해서 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

(3) 연료분사하우징의 성형공정에 반응표면분석법을 적용하여 기존의 공정보다 상부결육은 32.8%, 하부결육은 34.6%, 유효변형률은 6%가 줄어들었다. 그 결과, 기존의 공정보다는 개선된 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 고대철, 김병민, 초재찬, 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 내외부 결함 방지를 위한 공정 설계”, 한국소성가공학회지, 제 8 권, 제 6 호, pp.612~619.
- (3) 장용석, 최진화, 고병두, 이호용, 황경복, 2000, “숫넵 플랜지의 공정설계에 관한 연구”, 한국정밀공학학회지, 제 17 권 제 6 호, pp.127~134.
- (4) Shivpuri, R., Babu, S., Kini, S., and Pauskar, P., Deshpande, A., 1994, "Recent advances in cold and warm forging process modeling techniques: selected examples", Journal of Materials Processing Technoogy., Vol. 46, pp.253-274.
- (5) Seth, S., and Shivpuri, R., 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) Kini, S. D., and Shivpuri, R., 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 Coperation
- (8) 박성현, 2003, 현대실험계획법, 민영사, pp.453~498
- (9) Yeo, H. T., Gong, J. Y., and Hur, K. D., "A Study on the Forging of Hub by using Response Surface Methodology", 2002, Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 2, No. 3, pp.1167-1172.
- (10) 고대철, 이진희, 김병민, 최재찬, 1994, “금속성형공정에서 연성파괴예측”, 한국소성가공학회지, 제 3 권, 제 2 호, pp.167~177