

반응표면분석법을 이용한 휠 베어링 허브 단조에 관한 연구

송요선 *, 여홍태**, 허관도#

A Study on the Forging of Wheel Bearing Hub by using Response Surface Methodology

Yo Sun Song *, Hong Tae Yeo** and Kwan Do Hur #

ABSTRACT

The objective of the study is to improve the quality of wheel bearing hub by the rigid-plastic finite element analysis and the response surface methodology. The rigid-plastic finite element codes, AFDEX-2D and DEFORM-3D, were used to analyze the two-dimensional and three-dimensional forging processes, respectively. The response surface analysis is used to find the minimum underfill by the variation of design variables such as the height of billet after upsetting and punch angles of blocker dies. The metal flow of forged product shows good agreement with the results from 2D and 3D analysis. Also, the quality of the wheel bearing hub has been improved by the optimization of design variables and the machining time has been reduced by the machining allowance.

Key Words : Blocker (블락커), Metal flow (단류선), Response surface analysis (반응표면분석), Rigid-plastic FE-analysis (강소성유한요소법), Underfill (결육)

1. 서론

휠 베어링(wheel bearing)용 아웃터 링 허브(outer ring hub)는 단조공정에 의해 제작되며 차량의 주행 시 발생하는 여러 가지 충격과 진동이 직접 가해지며 동시에 고속 회전이 일어나는 부품이다. 그러므로 소재 결함, 단조품의 단류선(metal flow)의 결함, 접침(folding), 금형의 마모로 인한 표면 결함등에 대한 예방과 개선이 무엇보다 중요하게 요구된다.

오늘날 단조 공정은 소재의 단련을 통한 우수한 기계적 성질을 획득하는 본래의 통상적인 개념을 뛰어 넘어 주조나 가공에 의존해야만 했던 제품들도 공정의 추가 및 개선, 작업 장비의 개발 및 부가적인 라인의 결합을 통한 설계변경으로 보다 정밀한 제품을 보다 안정적인 공정으로 대량 생산하고 있다. 또한 가공 공정에서 소요되는 2차 생산비를 감소시키고자 가공여유를 최소화함으로써 최종 형상에 근접하도록 성형하는 추세이다.

이러한 단조공정의 설계에 있어 여러 가지 경

접수일: 2004년 5월 12일; 게재승인일: 2005년 6월 29일

* 구미기능대학 컴퓨터응용기계과

** 동의대학교 기계공학부

교신저자: 동의대학교 기계공학부

E-mail kdhur@deu.ac.kr Tel. (051) 890-1644

험적인 지식을 정량적으로 표현하고 체계화하려는 연구가 진행되어 왔다. Osman¹ 과 Bramley²는 상계 요소법(UBET: Upper Bound Element Technique)을 이용하여 소재의 최적화된 속도장(velocity field)을 구하고 이를 이용하여 예비형상(perform)을 구하는 방법이 제시하였다. 최근 Oh³ 등은 지역필터를 이용하여 예비형상을 찾는 방법이 연구하였고, Shin⁴ 등은 전기장을 이용한 예비형상설계방법을 사용하여 일반적인 3차원 제품의 예비형상설계와 최적화에 관한 연구를 수행하였다. 또한 Kim^{5,6} 등은 예비형상의 설계시스템을 자동화하기 위해 축대칭 열간 강단조에 대한 피니셔(finisher) 및 블락커(blocker) 설계시스템을 오토리츱(AutoLisp) 및 포트란(FORTRAN)을 이용하여 개발하였다.

Park⁷등은 자동차 에어컨 클러치에 조립되어 사용되는 허브 제품에 대하여 유동제어성형공법(Flow Control Forming: FCF)을 시도하여 공정수 감소 및 재료 손실 최소화의 실현가능성을 평가하였다.

본 연구에서는 실험계획법(design of experiment) 중 직교중심합성계획(orthogonal central composite design)에 따른 반응표면분석법(response surface methodology)⁸을 이용하여 휠 베어링 허브 단조용 금형설계에 적용하여 제품의 결육(underfill)방지, 단류선 향상 및 결함을 예방하였다. 또한 비축대칭 모델에 대해 현장에서 주로 사용되는 2차원 해석과 실제 3차원 형상의 성형 해석을 수행하여 해석 결과를 비교 검토하였다.

2. 설계변수의 최적화

2.1 반응표면분석법

본 연구에서는 휠 베어링 허브의 열간 성형을 위해 금형의 설계변수를 최적화하기 위해 반응표면분석법을 도입하였다. 먼저 설계변수를 선정하고 중심합성계획에 따라 해석을 수행하고 식(1)의 2차 회귀모형식의 계수를 최소자승법에 의해 구하였다.^{8,9}

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

2.2 해석 모델 및 공정 조건

휠 베어링용 허브의 소재는 AISI 1055이고 성형

시 소재의 온도는 1200℃이며 이때 유동응력(flow-stress)은 식(2)와 같다.

$$\bar{\sigma} = 62.0\dot{\epsilon}^{0.18} \quad (2)$$

또한 소재와 금형의 마찰계수 $\mu = 0.3$ 으로 가정하였고 금형의 온도는 400℃이지만 등온조건으로 가정하여 소재의 성형 해석을 수행하였다.

Fig. 1은 외국에서 생산된 기존 제품의 형상으로 빗금친 부분과 같이 과도한 가공여유(machining allowance)를 가지고 있다. 가공 생산성의 향상과 비용 절감을 위하여 기존 제품에 비해 타원으로 표시된 허브 내면을 2단으로 하여 가공여유를 줄인 최종 성형된 제품의 형상은 Fig. 2(a)와 같고 빗금친 부분은 기계가공에 의해 제거되는 부분이다. Fig. 2(b)는 1/8 모델에서 대칭면의 형상과 2차원 및 3차원 해석 모델의 범위를 나타낸다.

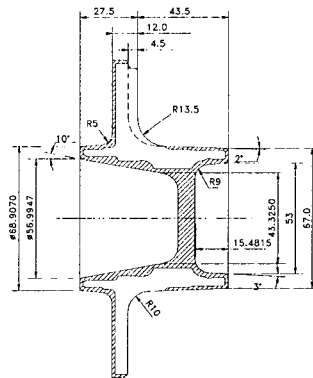
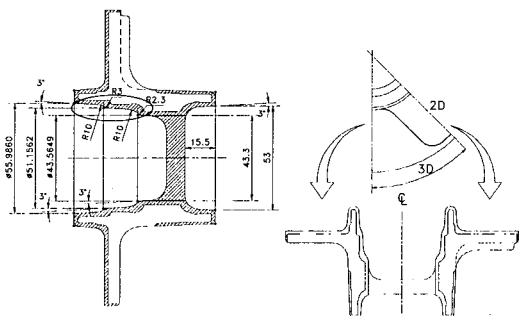


Fig. 1 Dimensions of the previous product



(a) Dimensions

(b) Sections

Fig. 2 Dimensions and sections of the new product

Fig. 3은 성형공정에 대해 2차원으로 간략하게 나타낸 것이다. (a)는 업셋팅 공정으로 소재를 가압 성형하여 (b)의 블락커공정에 잘 안착되도록 하고 블락커공정에서는 최종 형상에 근접하도록 성형 후 (c)의 피니셔공정에서 마무리한다. Fig. 4는 해석에 사용되는 금형의 설계변수로 선택한 업셋팅 후 소재의 높이(x_1)와 블락커 금형에서 상부와 하부 금형에서 소재 유동에 영향이 큰 인자인 상·하 펀치의 각도(x_2, x_3)에 대해 2차원 및 3차원으로 나타낸 것이다. 직교중심합성계획에 따른 반응표면분석을 수행하기 위해 Table 1과 같이 설계변수에 따른 수준과 실제값을 나타낸다. 여기서 설계변수가 3개이고 중심점이 1개인 경우 축점값 $a = 1.216$ 으로 규정된다.⁸

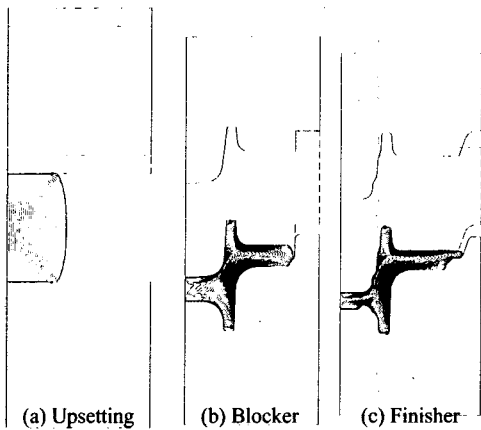


Fig. 3 Schematic illustrations of two dimensional forging analysis

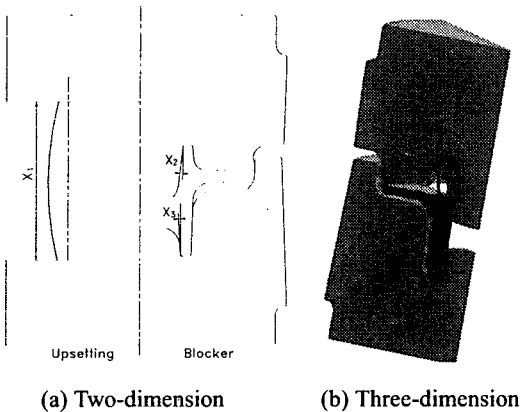


Fig. 4 Design variables of forging dies

Table 1 Level of design variables for analysis

Design variable	$-a$	-1	0	1	a
Billet height after upsetting (x_1) [mm]	73	74.333	83	91.223	93
Upper punch angle of blocker (x_2) [deg.]	3	3.444	5.5	7.556	8
Lower punch angle of blocker (x_3) [deg.]	1	1.356	3	4.644	5

3. 성형해석

3.1 2차원 성형해석

2차원 성형해석은 AFDEX-2D를 이용하였다. 제품을 축대칭 형상으로 가정하여 성형해석을 수행하기 위해 해석 단면의 초기 치수는 최종 제품의 체적을 고려하여 변경하였다. 반응표면분석에 의한 2차원 성형 해석 결과 중 블락커 공정에서 상·하 금형의 결육 면적을 각각 계산하고 또한 전체 면적을 계산하여 Table 2에 나타냈다.

Table 2 Orthogonal array and results of two dimensional analysis

	Design variable			Underfill area [mm ²]		
	x_1	x_2	x_3	Top	Bottom	Total
				y_1	y_2	y_3
1	-1	-1	-1	6.7152	16.6234	23.3386
2	-1	-1	1	7.7136	14.6827	22.3963
3	-1	1	-1	7.7136	14.6827	22.3963
4	-1	1	1	3.9842	27.6243	31.6085
5	1	-1	-1	5.5797	11.6595	17.2392
6	1	-1	1	5.7249	11.6595	17.3844
7	1	1	-1	5.5797	11.6595	17.2392
8	1	1	1	5.5797	11.6595	17.2392
9	0	0	0	5.0162	18.1153	23.1315
10	$-a$	0	0	5.2798	23.718	28.9978
11	a	0	0	5.1508	15.1107	20.2615
12	0	$-a$	0	6.7972	11.7962	18.5934
13	0	a	0	3.4557	25.0877	28.5434
14	0	0	$-a$	4.7154	20.0637	24.7791
15	0	0	a	4.8695	17.7362	22.6057

반응표면분석에 의해 구한 2차 회귀곡선식은 식(3), (4) 및 식(5)와 같다.

$$y_1 = 4.466 - 0.3171x_1 - 0.6333x_2 - 0.2503x_3 + 0.343x_1^2 + 0.5689x_2^2 + 0.629x_3^2 + 0.3232x_1x_2 + 0.3595x_1x_3 - 0.6091x_2x_3 \quad (3)$$

$$y_2 = 20.709 - 2.7201x_1 + 2.479x_2 + 0.0487x_3 - 1.8003x_1^2 - 2.11x_2^2 - 1.4524x_3^2 - 1.3751x_1x_2 - 1.3751x_1x_3 + 1.8602x_2x_3 \quad (4)$$

$$y_3 = 25.175 - 3.037x_1 + 1.8456x_2 - 0.2015x_3 - 1.4573x_1^2 - 1.5411x_2^2 - 0.8234x_3^2 - 1.0518x_1x_2 - 1.0155x_1x_3 + 1.2511x_2x_3 \quad (5)$$

회귀곡선식을 이용하여 각각의 경우의 설계 영역내에서 최소 결육을 갖는 값을 Table 3에 나타냈다.

위 결과에서 상부 결육을 최소로 하기 위해 업셋팅 후 빌렛의 높이를 78.1048mm 로 하고 블락커 상부 금형의 펀치 각도를 7.9367° 로 하며 블락커 하부 금형의 펀치 각도를 4.5407° 로 하는 것이 좋고 하부 결육을 줄이기 위해서는 업셋팅 후 빌렛의 높이를 93mm 로 하고 블락커 상부 금형의 펀치 각도를 3° 로 하고 블락커 하부 금형의 펀치 각도를 5° 로 하는 것이 좋은 것으로 나타났다. 또한 총 결육이 최소인 조건은 하부 결육이 최소인 경우와 동일하였다.

Table 3 Design variables for minimization of underfill area

Design variable		Top	Bottom	Total
		area	area	area
x ₁ [mm]	Coded	-0.5953	1.216	1.216
	Natural	78.1048	93	93
x ₂ [deg.]	Coded	1.1852	-1.216	-1.216
	Natural	7.9367	3	3
x ₃ [deg.]	Coded	0.9372	1.216	1.216
	Natural	4.5407	5	5
Predicted underfill area [mm ²]		4.0376	3.7663	11.545

이와 같이 상부 금형의 펀치 각도가 증가하면 상부의 유동이 좋아져 상부의 결육은 감소하지만 하부의 결육이 증가하게 되고 하부 금형의 펀치 각도가 증가하면 하부 결육은 감소하나 상부의 결육은 증가하는 경향을 가지는 것을 알 수 있다. 또한 업셋팅 후 높이가 길수록 하부 결육이 줄어드는 경향을 알 수 있다.

Fig. 5는 블락커 공정에서 단류선의 형상을 비교한 것이다. Fig. 5(a)에서 위치 1과 같이 하부 금형의 굴곡부에서 소재가 하부로 밀려들어가지 않고 성형되어 접합 결함이 발생될 수 있는 단류선 형상을 나타내고 있다. Fig. 5(b)의 위치 2와 같이 굴곡부에서 단류선 형상이 부드럽게 성형되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 성형해석을 통하여 설계단계에서 제품 성형 불량을 예방할 수 있다.

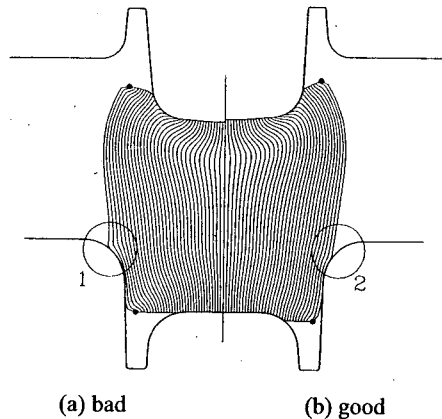


Fig. 5 Comparison of metal flow

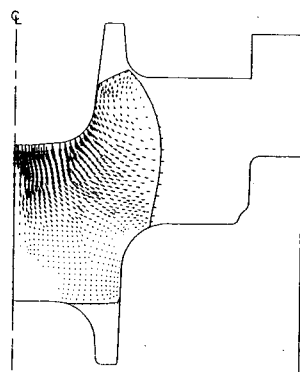


Fig. 6 Nodal velocity at blocker process

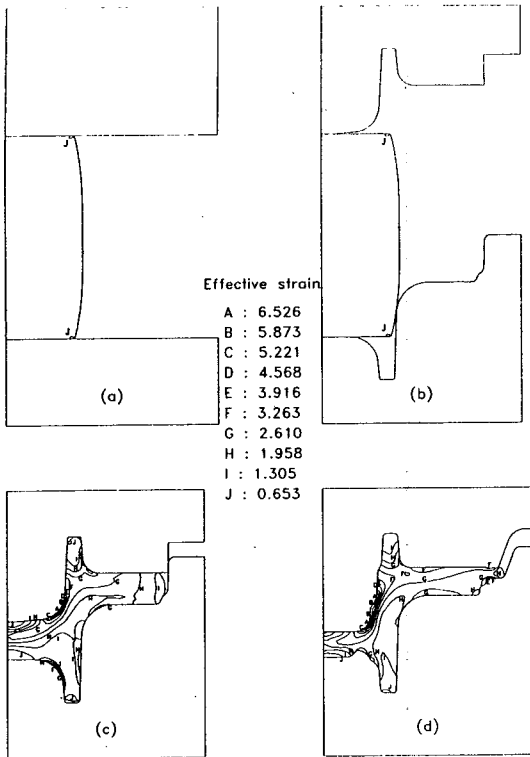


Fig. 7 Effective strain distributions at various stages with optimal case

Fig. 6은 블락커 공정에서 소재 절점의 속도를 나타낸 것이다. 상부 금형 펀치의 각도가 작아지면 하부 결육이 줄어들지만 상부 결육이 증가하는 구조인 것을 속도의 방향에 의해 알 수 있고 하부 금형 펀치 각도가 작아지면 하부 결육이 커질 수 있지만 상부 펀치의 각도 변화보다는 영향성이 작다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 총 결육이 최소인 경우에 대해 각 성형 단계에 따른 유효변형률 분포를 나타낸다. 상부 펀치와 접촉하는 부분에서 유효변형률이 높게 나타나고, 다른 경우들에 비해 블락커 최종 단계에서 상부 결육은 증가하지만 하부 결육은 감소하여 총 결육의 양은 줄어든다.

3.2.3 차원 성형해석

3차원 성형해석은 DEFORM-3D¹⁰를 이용하였다. 반응표면분석법에 의한 3차원 모델의 최적조건을 얻기 위해 해석한 결과들을 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Orthogonal array and results of three dimensional analysis

Case	Design variable			Underfill volume [mm ³]
	x_1	x_2	x_3	y_v
1	-1	-1	-1	6.5406
2	-1	-1	1	6.0937
3	-1	1	-1	1.6323
4	-1	1	1	1.5670
5	1	-1	-1	5.6026
6	1	-1	1	5.7873
7	1	1	-1	1.3766
8	1	1	1	1.5358
9	0	0	0	3.3128
10	$-\alpha$	0	0	3.5229
11	α	0	0	3.4664
12	0	$-\alpha$	0	7.1978
13	0	α	0	1.4216
14	0	0	$-\alpha$	3.8577
15	0	0	α	3.4294

3차원 해석결과는 2차원 해석결과와 달리 상부 및 하부 금형 캐비티에서 결육이 나타나지 않았다. 결국 최종 형상에 가장 근접할 수 있도록 설계변수의 변화에 따라 규정한 블락커 형상에 근접하도록 제품의 플랜지 및 보스부에서의 결육을 Fig. 8과 같이 성형된 형상을 금형 캐비티에서 뺀 나머지 체적으로 평가하였다.

Table 4에 나타낸 블락커 공정에서의 결육의 체적에 대한 2차 회귀곡선은 식(6)과 같다.

$$y_v = 3.6246 - 0.0629x_1 - 2.2757x_2 - 0.146x_3 - 0.0565x_1^2 + 0.39398x_2^2 - 0.1572x_3^2 + 0.0445x_1x_2 + 0.107x_1x_3 + 0.1197x_2x_3 \quad (6)$$

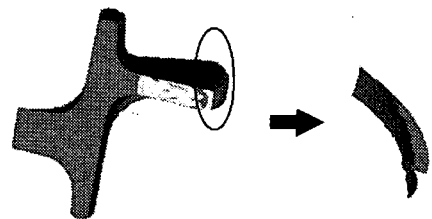


Fig. 8 The calculation of underfill volume

실제 성형과정에서는 소재가 블락커 금형에 잘 안착되어야 양호한 성형품을 얻을 수 있다. 업셋팅 공정에 따른 안착관계를 고려하기 위해 Fig. 9와 같이 블락커 하부 금형과 소재 사이의 틈새와 업셋팅 후 소재의 높이를 측정하였다.

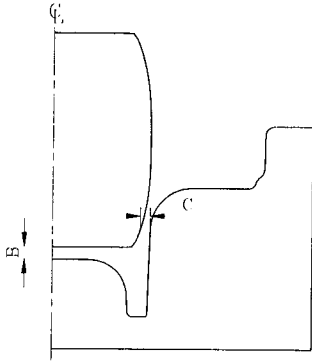


Fig. 9 Clearance between billet and lower dies of blocker

Fig. 10은 업셋팅 후 소재 높이에 따른 틈새 변화를 나타낸다. Fig. 9에서 기하학적으로 C가 0보다 크면 B는 0이 되고, B가 0이면 C는 0보다 크거나 같은 경우가 나타날 수 있다. 이 결과로부터 양호한 안착조건은 업셋팅 후 빌렛 높이 $x_1=0.0$ 인 경우를 선택할 수 있다.

Table 5는 결육의 체적을 최소화하는 경우를 Case 1으로 하고 안착조건을 고려한 경우를 Case 2로 하여 최소 결육 조건을 구하고 예상 결육을 계산하여 나타낸 것이다.

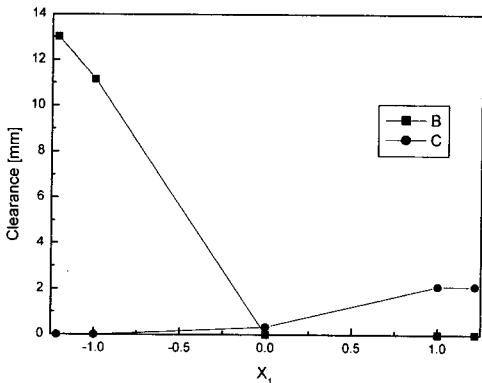


Fig. 10 Comparison of clearances for billet height after upsetting

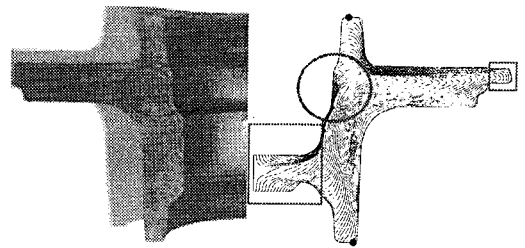
Table 5 Optimal values for the minimum underfill volume

Design variable		Underfill volume	
		Case1	Case2
x_1 [mm]	Coded	1.216	0
	Natural	93	83
x_2 [deg.]	Coded	1.216	1.216
	Natural	8	8
x_3 [deg.]	Coded	-1.216	1.216
	Natural	1	5
Predicted underfill volume [mm ³]		0.9555	1.2069

안착조건을 고려시 결육이 증가하지만 성형 공정상의 이득에 의해 안착조건을 고려한 경우로 금형을 설계하였다.

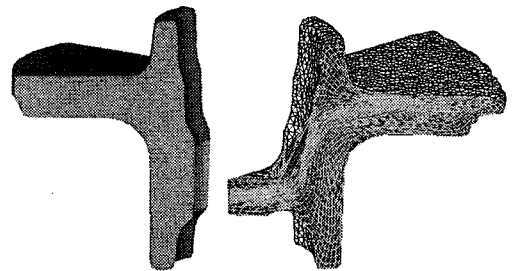
3.3.2 차원과 3 차원 성형해석 비교

Fig. 11은 완성된 제품과 2차원 및 3차원 성형 해석 결과를 비교한 것이다.



(a) Product

(b) AFDEX-2D analysis



(c) Pro/E model

(d) DEFORM-3D analysis

Fig. 11 Comparison of metal flow between two and three dimensional analysis of product

Fig. 11(a)는 실제 완성품의 단류선을 나타내고 Fig. 11(b)는 2차원 해석에 의한 단류선 분포를 나타낸다. 원으로 표시된 부분의 단류선 분포를 비교해 보면 아주 유사한 것을 알 수 있다. 사각형 부분은 트리밍(trimming) 공정에서 제거되는 부분이다. Fig. 11(c)는 3차원 해석 결과 Fig. 11(d)의 형상을 트리밍 공정을 거쳐 완성된 형상이다. Fig. 11(d)는 3차원 해석 결과의 단류선 분포를 나타낸다. 이 결과 또한 Fig. 11(a)의 실제 형상과 유사함을 알 수 있다.

Fig. 12는 슛블라스팅(shot blasting)에 의해 제품 표면의 이물질을 제거한 완성품을 나타낸다.

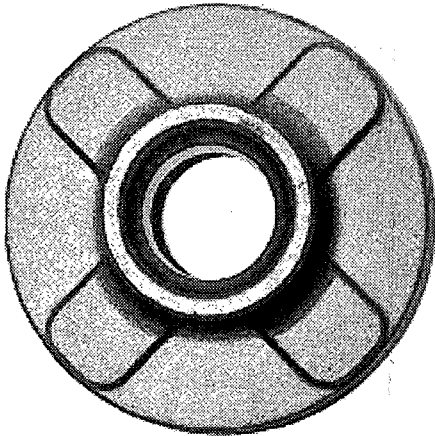


Fig. 12 Photo of the final product after shot blasting

4. 결론

반응표면분석법을 이용하여 휠 베어링용 아웃터 링 허브의 2차원 및 3차원 성형 공정을 유한요소 해석하였고 업셋팅 후 소재 길이 및 블락커 상/하부 편치 각도 변화에 따른 총 결육을 구하였다.

2차원 성형 해석 결과를 보면 상부 금형의 편치 각도가 증가하면 상부의 유동이 좋아져 상부 결육이 감소하지만 하부 결육은 증가하고, 반대로 하부 금형의 편치 각도가 증가하면 하부 결육은 감소하지만 상부 결육은 증가하는 것을 알 수 있었다. 업셋팅 후 소재 길이가 길수록 즉 업셋팅 길이가 짧으면 하부 금형으로 소재가 밀려드는데 저항을 적게 받게 되므로 하부 결육이 줄어드는 경

향을 알 수 있었다.

3차원 성형 해석에서는 2차원 해석 결과에서 결육이 발생한 상/하부 위치에서 결육을 평가할 수 없었다. 그래서 규정한 블락커 형상에 근접하도록 플랜지 및 보스부의 결육을 평가하고 안착조건을 고려하여 금형을 설계하였다.

또한 2차원 및 3차원 성형 해석결과 단류선의 분포를 볼 때 실제 제품과 유사한 것을 알 수 있었다.

이와 같이 비축대칭 형상에 대해 2차원 및 3차원 성형해석을 수행한 결과 결육부의 예측은 다소 차이가 나타나지만 단류선 분포는 비슷함을 알 수 있었다.

특히 2차원 해석의 경우는 설계변수 값의 변화가 결과에 미치는 영향을 평가하기 쉽지만 실제 3차원 모델에 대한 정확한 평가가 어려웠다. 그러므로 2차원 해석을 통해 설계변수의 영향성을 평가하고 이를 이용한 3차원 해석을 수행하여 최종 제품의 성형공정을 설계하는 방법이 보다 좋은 제품을 생산할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Osman, F. H. and Bramley, A. N., "Forging and perform design using UBET," *Advanced Tech. of Plasticity*, Vol. 1, pp. 563-568, 1984.
2. Bramley, A. N., "Computer aided forging design," *Annals of the CIRP*, Vol. 36, No. 1, pp. 135-138, 1987.
3. Oh, S. I. and Yoon, S. M., "A new method to design blocker," *Annals of CIRP*, Vol. 43, pp. 245-248, 1994.
4. Shin, H. K., Lee, S. R., Park, C. H. and Yang, D. Y., "The Optimal Design of Preform in 3-D Forging by using Electric Field Theory," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 11, No. 2, pp. 165-170, 2002.
5. Kim, D. Y. and Park, J. J., "Development of a Finisher Design System for Axisymmetric Hot Steel Forging," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 7, No. 3, pp. 291-297, 1998.
6. Kim, D. Y. and Park, J. J., "Development of a Blocker Design System for Axisymmetric Hot Steel Forging," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 7, No. 3, pp. 298-305, 1998.

7. Park, J. N., Kim, D. H. and Kim, B. M., "Process Design of Cold Forged Hub by Flow Control Forming Technique," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 6, pp. 86-95, 2002.
8. Park, S. H., "Modern Design of Experiments," Minyoungsa, 1998.
9. Myers, R. H. and Montgomery, D. C., "Response Surface Methodology - Process and Product Optimization Using Designed Experiments," Jon Wiley & Sons, Inc., 1995.
10. DEFORM-3D Labs Manual, SFTC, 2000.