https://doi.org/10.21289/KSIC.2018.21.6.419

차량용 블로우 모터 케이스 2축 굽힘 공정의 치수 정밀도 향상에 관한 연구

A Study on Improvement of Dimensional Accuracy in 2-axis Bending for Automotive Blow Motor Case

권일근[1], 김국용[2*], 박준우[3]

Il-Keun Kwon[1], Gug-Yong Kim[2*], Jun-Woo Park[3]

〈Abstract〉

In case high strength steels are applied for press-formed automotive parts, it is very difficult to secure forming accuracy due to large springback compared to moderate strength steels. In this study, a repetitive step-wise forming analyses based on secant method was proposed as the die design method for mandrel(bending tool) for the 2-axis bending equipments. A bending die with circular mandrel was designed for the DP780 blow motor case of which diameter and thickness are 70.8mm and 2.0mm respectively. Forming tests were performed to verify the validity of established die design and the results were compared with that of conventional HGI(Hot galvanized iron steel) blow motor case. For additional improvement in forming accuracy, an elliptical mandrel was proposed and its validity was verified using forming analyses based on secant method.

Keywords : Blow motor case, 2-axis bending, forming accuracy, die design, forming test

1 동의과학대학교 기계계열 교수,
E-mail: kik@dit.ac.kr
2* 교신저자, 동의과학대학교 기계계열 교수,
E-mail: kgy@dit.ac.kr
3 항성산업사

1 Division of Mechanical Eng., Dongeui Institute of Technology, Prof. Ph.D.
2* Corresponding Author, Division of Mechanical Eng., Dongeui Institute of Technology, Prof. Ph.D.
3 Hang Seong Industrial Co., Ltd.

1. 서 론

자동차 산업계에서는 환경오염 저감 및 연비 향상을 위해 부품의 경량화를 위한 다양한 노력을 지속해 오고 있다. 기존에 일반강을 적용하는 자동차 부품을 고장력강으로 대체하는 방법은 높은 항복강도로 인해 제품 두께를 얇게 설계하여 중량 감소 효과를 기대할 수 있다. 이러한 고장력강의 적용을 통한 자동차 부품 경량화는 지금까지 프런트 사이드[1], 사이드 실[2], 시트 레일[3] 등 다양한 자동차 부품에 적용이 시도되어 오고 있다. 또한, 고강도 강판의 적용 확대를 위해 스프링백 거동[4], 성형 및 스프링백 해석 기법[5]에 관한 연구가 이루어져왔다.

블로우 모터 케이스는 자동차용 에어컨에 부속되는 제품으로 일반 아연도금 강판의 일종인 HGI(Hot galvanized steel) 소재를 적용하고 있으나 최근에 고강도 강판을 적용하기 위하여 클린칭 접합부의 강도에 대한 연구가 이루어졌다[6].

블로우 모터 케이스의 방사형 굽힘 가공 장치로 제조하였으나 금형장치가 고가일 뿐만 아니라 대량 생산 과정에서 잦은 피딩 불량으로 개선이 요구되고 있다. 또한 기존의 HGI 소재를 대체하여 고강도 소재로 대체하는 경우 높은 스프링백으로 부품 정밀도를 확보할 수 있는 최적 금형의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 기존의 블로우 모터 케이스의 방사형 굽힘 공법을 대체하여 2축 굽힘 성형공법을 적용하는 경우 고강도 소재인 DP780 소재의 높은 스프링백으로 인한 성형품 정밀도 저하 문제를 해결하기 위해 반복적인 성형 해석 할선법(Secant) 방법[7]으로 최적 금형 형상을 선정하고자 하였다. 확보된 최적 금형 설계 결과를 시험 금형에 적용하여 금형 설계 방법론 및 금형 설계 결과의 타당성을 검증하고자 하였다. 또한 추가적인 정밀도 향상을 위한 금형 설계 방안을 도출하여 선도적으로 품질 경쟁력 향상에 기여하고자 하였다.

2. 연구 내용

2.1 모터 케이스 굽힘 공정 개요

자동차용 모터 케이스의 2축(2-axis) 굽힘 공정은 도그랙(Dog-leg)을 이용하여 수평 수직 양 방향으로 판재를 굽혀서 원형상으로 성형하는 공정으로 장치의 구성을 Fig. 1에 나타내었다. 도그랙 캠은 사출금형에서 사이드 코어 등 부품을 구동하기 위해 널리 사용되는 부품이다.

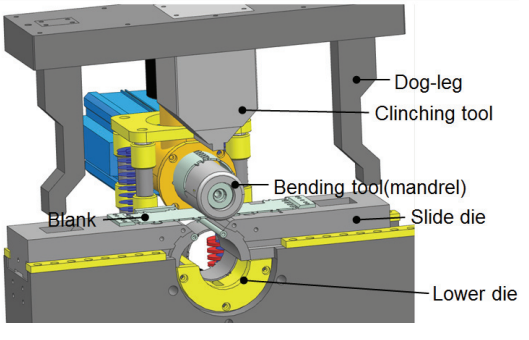


Fig. 1 Configuration 2-axis bending equipment for blow motor case

2.2 재료특성

Fig. 2는 HGI 재료와 DP780 재료의 인장시험으로부터 얻어진 인장강도, 항복강도 및 연신율 값을 나타낸 것으로 DP780 소재의 인장강도는 HGI 소재의 약 2배, 항복강도는 약 1.7배로 높은 것을 알 수 있다. Fig. 3은 두 소재의 응력-변형

률 선도를 비교하여 나타낸 것이다. DP780소재는 HGI 소재에 비해 높은 항복강도와 더불어 소성변형시 가공경화가 상대적으로 많이 일어나므로 성형 공정에서 탄성복원이 큰 소재라고 할 수 있다.

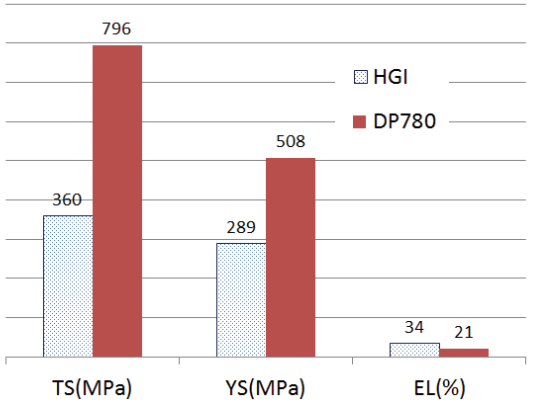


Fig. 2 Comparison of mechanical properties, HGI vs. DP780

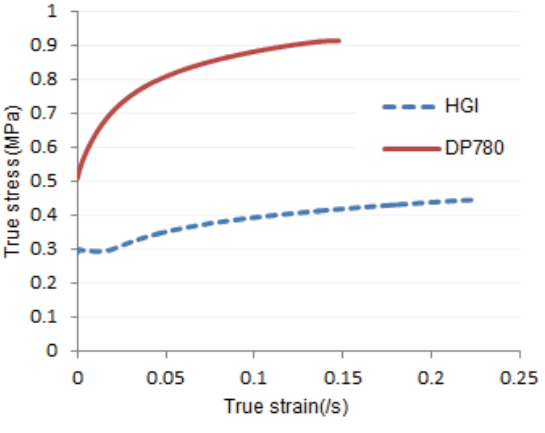


Fig. 3 True stress - true strain curves for HGI and DP 780

2.3 2축 굽힘 금형 형상 설계

2.3.1 최적 금형 형상 선정

본 연구의 대상 모델은 내경이 70.8mm이며 DP780 소재를 적용하고 두께 2.0mm인 모터 케이스이다. DP780 제품은 기존 HGI 제품에 비해 탄성복원이 많은 재료로 성형정밀도를 얻기 어려우므로 비선형 함수의 최적해 탐색 방법의 일종인 시컨트 방법과 반복 성형해석을 이용하여 최적 금형 형상을 선정한다. Fig. 4는 본 연구에서 적용한 최적 금형 형상 선정 절차를 도시화한 것이다.

금형 형상 인자는 모터 케이스 부품의 치수 정밀도 검사 항목인 모터 케이스의 직경과 진원도이며 성형해석에서의 모터 케이스 직경을 평가하기 위해 굽힘가공이 이루어진 소재의 원주상에 존재하는 절점 집합에 대해 최소자승원(Least square circle, LSC)을 구한다. 성형품의 진원도는 최소자승원의 중심을 공유하면서 가장 바깥쪽의 절점을 지나는 원과 가장 안쪽 절점을 지나는 원의 반경 차이로 평가한다.

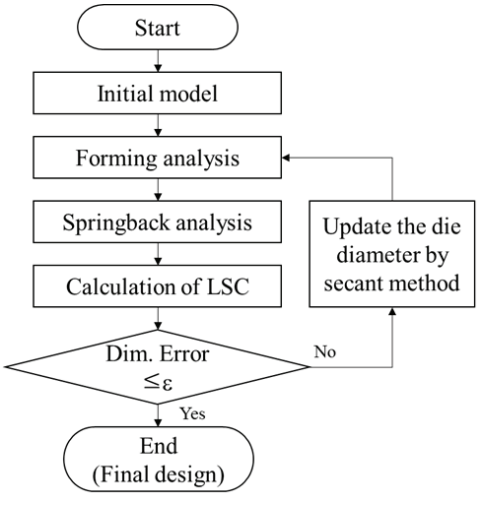


Fig. 4 Diagram for optimization of bending tool geometry

최적 금형 형상을 얻기 위해 도입한 시컨트 방법(Secant method)은 i 번째 단계의 금형 직경을 x_i로, 성형품의 직경오차를 $f(x_i)$로 표현할 때 Fig. 5 와 같이 $(n-2)$단계와 $(n-1)$단계의 추정해(x_{n-2}, x_{n-1})로부터 시컨트 선(Secant line)을 얻고 시컨트 선이 x축과 만나는 점을 단계의 추정해 (x_n)로 구한다. 이 과정을 수식으로 표현하면 식(1)과 같다.

$$x_n = x_{n-1} - f(x_{n-1})\frac{x_{n-1}-x_{n-2}}{f(x_{n-1})-f(x_{n-2})} \quad (1)$$

이러한 과정을 $f(x_n) \le \epsilon$(치수 오차 및 진원도 허용값)을 만족할 때까지 반복하고 최종 단계의 추정해를 최적 금형 치수로 이용한다.

본 연구에서 성형해석으로부터 얻어진 성형품의 최소자승원 직경과 목표 직경의 차이가 허용값(0.05mm) 이하가 될 때까지 탐색 과정을 반복한다.

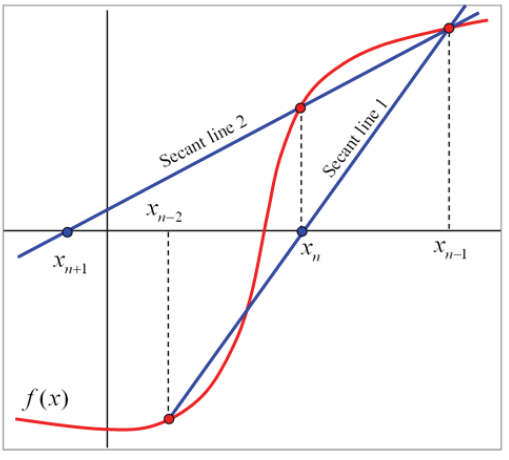


Fig. 5 Secant method for optimization of bending tool geometry(x-axis: diameter of bending tool, y-axis: error in diameter of formed part

2.3.2 성형 해석

유한요소 모델은 Fig. 6과 같이 실제 금형과 동일하게 클린칭 펀치, 벤딩 툴(심봉), 블랭크, 슬라이드 금형, 하부 다이의 총 5개 부품으로 구성하였다. 해석에 사용한 소프트웨어는 ESI사에서 공급하는 판재성형해석 전용소프트웨어인 PAM-STAMP이다.

성형 해석에 사용하는 물성은 인장시험에 서 얻어진 응력-변형률 데이터(Fig. 3)와 소성변형비(r_0, r_{45}, r_{90}는 각각 0.91, 1.06, 0.96)를 입력데이터로 사용하였다. 또한, 판재 자중의 영향은 무시하였다.

성형해석은 성형과정 2단계와 탄성복원 단계, 즉, 3단계로 구성된다. 성형1 단계는 클린칭 펀치를 수직 하강하여 고정된 슬라이드 금형 상에서 U 형상으로 성형하며, 성형 2단계는 클린칭 펀치의 추가 하강시 이와 연결된 도그랙이 슬라이드 금형을 수평으로 이동시켜 완전한 원형으로 성형되는 과정이다. 탄성복원 단계는 프레스 압력을 해제하고 성형품을 금형에서 취출했을 때 탄성복원이 일어나는 단계이다. 성형 1 단계와 2 단계는 외연적 해법((Explicit solver)으로 해석을 수행하며 탄성복원 단계에는 내연적 해법(Implicit solver)으로 해석을 수행하였다. Fig. 7은 탄성복원에 의한 응력 이완을 보여주는 성형해석 직후와 탄성복원해석의 직후 성형품 상면의 주응력을 나타낸 것이다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 금형 형상 최적화 결과

본 연구의 개발 대상 모델은 내경이 70.8mm이며 두께 2.0mm의 DP780 판재를 적용한 모터 케

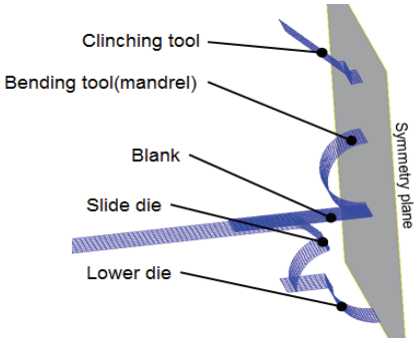
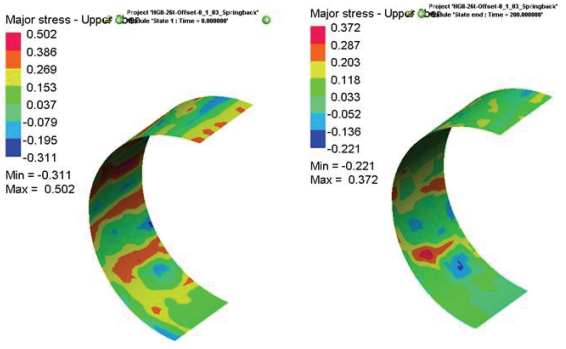


Fig. 6 Finite element model for bending analysis



(a) (b)

Fig. 7 Major stress of upper fiber((a) after forming, (b) after springback)

이스 부품이다. 굽힘 금형에 해당하는 심봉의 최적 직경을 찾기 위해 1단계와 2단계의 심봉 직경을 각각 70.8mm와 69.8mm로 두고 이에 대하여 성형해석을 수행한 후 최소자승법으로 구한 성형품 직경과 목표 직경의 차이, 즉 직경 오차를 구하였다. 1단계와 2단계의 심봉 직경과 성형품 직경 오차를 식(1)에 대입하여 다음 단계인 3단계에 심봉 직경을 구하고 해석 모델의 심봉 치수를 갱신하여 3단계의 성형해석을 수행하였다. 이러한 과정은 성형품의 직경 허용 오차 기준(0.05mm 이하)과 진원도 허용 오차 기준(0.08mm이하)을 만족할 때까지 반복하였으며 총 5단계의 성형해석을 수행하였다.

Table 1과 Fig. 8은 성형해석 단계별 심봉과 성형품의 직경과 성형품의 직경오차 및 진원도를 나타낸 것이다. 성형품의 직경 오차는 1~3 단계에서 급격하게 감소하며 4, 5단계에서는 완만하게 직경 오차 허용 기준값이하로 감소하며 성형품의 진원도는 감소와 증가를 반복한 후 5단계에서 허용값을 만족하여 5단계의 심봉 직경을 최적 금형 설계 값으로 채택하였다.

Table 1. Diameters of mandrel(bending tool) for each optimization step(Unit:mm)

Step	Diameter of mandrel	Diameter of formed part
1	70.80	71.88
2	69.80	71.31
3	68.89	70.71
4	69.03	70.85
5	68.98	70.84

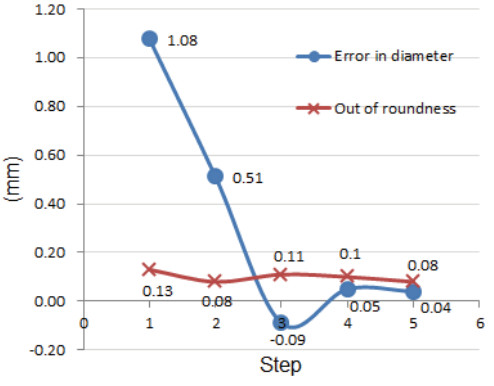
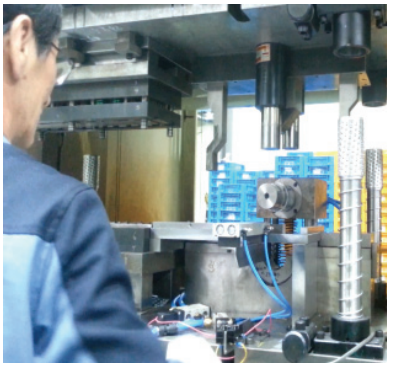


Fig. 8 Error in diameter of formed part for each optimization steps

3.2 시험 성형 결과

선정된 최적 금형 치수를 반영하여 시험용 2축 굽힘 금형을 제작하였으며 Fig. 9와 같이 시험성형을 실시하였다.



(a)

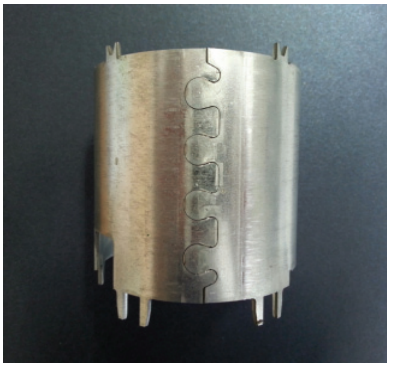


Fig. 9 Forming test((a) equipment for forming test, (b) formed part)

시험 성형품의 직경은 Table 2와 같이 0.015~0.04mm 수준으로 허용 오차 기준(0.05mm 이하)을 잘 만족하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 기존의 동일한 직경의 다축성형 HGI 소재의 모터 케이스의 성형 결과(Table 3)와 비교하여 정밀도가 크게 개선된 결과이다. 따라서, 본 연구에서 도입한 성형해석과 시컨트 방법을 이용한 금형 직경 선정 방법이 최적 금형 형상을 선정할 수 있게 하는 효과적인 수단이라고 할 수 있다. 그러나, 성형품의 진원도는 허용기준(0.08mm 이하)은 만족하지만 HGI 재료의 부품에 비해 개선된 결과를 보여주지 못하므로 추가적인 개선대책이 요구된다고 할 수 있다.

Table 2. Error in diameter and out of roundness of formed parts(DP780, 2.0mm thickness, unit:mm)

No.	Diameter	Error in diameter	Out of roundness
1	70.8311	0.0311	0.0632
2	70.8232	0.0232	0.0603
3	70.8268	0.0268	0.0606
4	70.8155	0.0155	0.065
Average		0.0245	0.062

Table 3. Error in diameter and out of roundness of formed parts(HGI, 2.6mmt, unit:mm)

No.	Diameter	Error in diameter	Out of roundness
1	70.8572	0.0572	0.0637
2	70.8447	0.0447	0.0415
3	70.8467	0.0467	0.0328
4	70.8487	0.0487	0.0632
Average		0.0493	0.050

3.3 타원 심봉 적용

모터 케이스 성형품의 직경 오차와 진원도 공차가 작을수록 내부에 에폭시 접착제로 조립하는 영구자석과의 밀착상태가 좋아지고 이로 인해 모터 케이스의 전반적인 성능도 향상될 수 있다. 본 연구에서는 모터 케이스 성형품의 치수 정밀도를

더욱 높이는 방안으로 심봉의 단면형상을 타원으로 선정하는 방안에 대해 추가적으로 금형설계를 검토하였다.

먼저 금형(심봉)의 장축 길이(a)와 단축 길이(b)의 초기 추정해 (a, b)를 (70.8, 70.8)과 (70.0, 70.60)으로 두고 성형해석을 수행하였다. 성형해석에서 얻어진 성형품 오차는 시컨트 방법으로 다음 단계의 성형 해석을 위한 심봉의 타원축 길이를 얻는 데 사용하였으며 성형품 최소자승원 직경이 허용오차를 만족할 때까지 앞의 과정을 반복하였다.

Table 4. Vertical and horizontal length of mandrel(bending tool) and formed part for each optimization steps(Unit:mm)

Step	Vertical length		Horizontal length	
	mandrel	formed part	mandrel	formed part
1	70.80	72.13	70.80	70.82
2	70.00	71.18	70.60	70.77
3	69.68	70.71	70.72	70.75
4	69.74	70.78	70.42	70.76

Table 4와 Fig. 10은 각각 탐색 차수별 타원 심봉의 수직 및 수평 길이와 성형품 직경 오차를 나타낸 것으로 4단계 만에 직경 오차가 허용값을 만족함을 알 수 있다. Fig. 11과 Fig. 12는 타원 심봉과 원형 심봉을 적용하는 경우의 성형품의 직경 오차와 진원도를 비교하여 나타낸 것이다. 직경 오차와 진원도 모두 타원 심봉을 이용한 경우가 원형 심봉보다 작은 것으로 나타났다. 특히, 진원도의 경우 원형 심봉을 적용한 성형품에 있어서는 탐색 차수를 진행함에 따라 감소 증가를 반복하여 최종단계에서 0.08mm 수준으로 감소하는 반면, 타원 심봉을 적용한 경우에는 점차적으로 감소하여 5단계에서는 0.05mm로 원형 심봉에 비해 30% 이상 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 추가적인 성형품의 치수 정밀도 향상을 위해서는 심봉의 단면형상으로 원형보다는 타원 심봉이 바람직하며, 특히 진원도의 향상을 위해서는 타원 심봉이 더욱 효과적이라고 할 수 있다. 다만, 타원 형상의 금형을 가공하는 비용이 원형 심봉보다 다소 상승하므로 높은 정밀도가 요구되는 모터 케이스에 선택적으로 적용하는 것이 바람직 할 것이다.

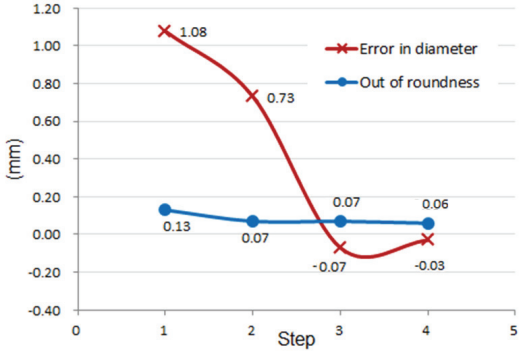


Fig. 10 Error in diameter and out of roundness (mandrel with elliptical section)

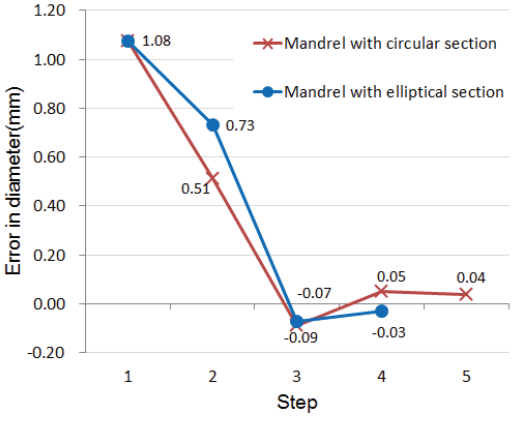


Fig. 11 Error in diameter of formed part (mandrel with circular section vs. with elliptical section)

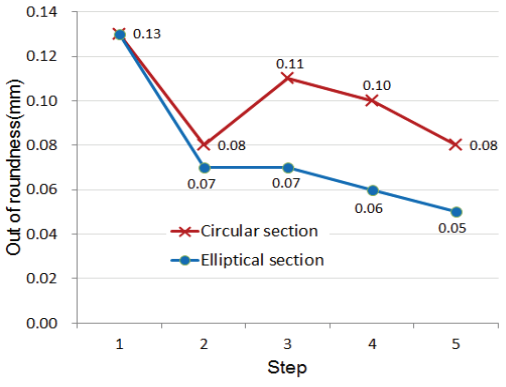


Fig. 12 Error in out of roundness of formed part (mandrel with circular section vs. with elliptical section)

4. 결 론

직경이 70.8mm이고 두께가 2.0mm인 DP780 블로우 모터의 2축 굽힘 공법에 대하여 성형해석과 할선법을 이용하여 금형 설계 및 시험 성형을 실시하고 추가적인 품질 향상 방안에 대해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 2축 굽힘 공법에 대하여 성형해석과 할선법을 이용하여 수립한 금형설계를 적용한 시험 성형에서 블로우 모터 성형품의 직경 오차 허용기준(0.05mm 이하)와 진원도가 허용기준(0.08mm 이하)를 만족하므로 본 연구에서 제안한 금형 설계 방법이 타당하다고 할 수 있다.
2. 심봉의 단면형상을 원에서 타원으로 변경하여 금형설계에 적용하는 경우 블로우 모터 케이스의 허용 직경 오차와 진원도가 각각 0.03mm와 0.05mm로 원형 심봉에 비해 30%이상 감소한 결과를 보이므로 실제 적용 시 추가적인 정밀도의 향상을 기대할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부에서 지원하는 2015년도 지역특화산업육성(R&D) 기술개발사업의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

기 호

i 최적화 단계 수
x_i 심봉 직경 [mm]
$f(x_i)$ 성형품 직경 오차 [mm]
ϵ 치수 오차 및 진원도 허용값 [mm]

참고문헌

[1] C. H. Cha, S. K. Lee, D. C. Ko, B. M. Kim, “A study on the forming of automotive front side member part with ultra high strength steel of DP980”, Transactions of Materials Processing 18(1), pp.39-44 (2009).
[2] C. H. Suh, H. D. Shin, Y-C. Jung, C. D. Park, Y. H. Lim, Y. S. Kim, “A study on the forming process of stair type side sill for automobile using DP780”, Transactions of Materials Processing 18(8), pp.601-606 (2009).
[3] D. C. Ko, J. H. An, M. J. Jang, J. H. Bae, C. H. Kim, B. M. Kim, “Process design of seat rail in automobile by the advanced high strength steel of DP780”, Transactions of Materials Processing, 17(3), pp.197-202 (2008).
[4] M. K. Choi, H. Huh, “Investigation of springback behavior of DP780 steel sheets after the U-bending process “, Transactions of Materials Processing, 21(6), pp.384-388 (2012).
[5] K. H. Kang, S. H. Kim, H. C. Ro, “Change in springback tendency during forming of a hat-type product with high strength steel using a

digital servo press", Transactions of Materials Processing, 25(1), pp.21-28 (2016).

[6] Gug-Yong Kim, Il-Keun Kwon, Jun-Woo Park, "Study on prediction of mechanical joining strength of blow motor case joint", Journal of The Korean Society of Industry Convergence 20(1), pp.81-87 (2017).

[7] Jin-Woo Lee, "Advanced method for an initial pole position estimation of a PMLSM", the transactions of korean institute of power electronics, 10(2), pp.124-129 (2005).

(접수: 2018.10.12. 수정: 2018.11.25. 게재확정: 2018.12.05.)