

차체용 드로우 다이의 블랭크 홀더 굽힘 변형 해석

인정제*, 신용승**, 김현영***

Analysis on the Bending Deflection of the Blank Holder in Automotive Body Panel Draw Die

Jeong-Je Yin*, Yong-Seung Shin**, Heon-Young Kim***

Abstract

In the drawing of large size automotive panels, elastic deflection of die components is induced by the contact force between them. The deflection is nonuniform and locally distributed, and results in nonuniform material flow. In order to arrange such a nonuniform die gap, a correcting operation, so called die spotting, is inevitable, which requires trial and error works and consuming time. A prediction of the bending deflection prior to a try-out must be useful to reduce the die spotting time. In this study, the drawing process of a front fender is simulated first, and the deflection of the blank holder is calculated from the contact force imposing on the blank holder. The balance block heights ensuring a uniform deflection are optimized by the analysis and design of experiments.

Key Words : Draw die(드로우 다이), Die structure (금형구조), Blank holder(블랭크 홀더), Die spotting(다이 스포팅), Balance block(밸런스 블록), Optimization(최적화)

1. 서 론

최근 세계 유수의 자동차 업계에서는 국제 경쟁력 강화를 위한 구조 개편이 급속도로 진행되고 있으며, 부품조달 체계 개선, 신기술 개발, 신차 개발 기간 단축 등으로 급변하는 시장환경에 대응하고 있다. 특히 적기에 고객이 요구하는 자동차를 생산하기 위해서는 신차 개발 기간의 단축

이 무엇보다 중요하다. 자동차의 차체는 300여 개의 강판 프레스 성형품으로 이루어지는데 신차 개발기간을 결정하는 주요 요인 중 하나는 이들 프레스 성형품을 생산하기 위한 금형 개발의 리드타임이다. 따라서 국내 자동차 산업이 국제경쟁력을 갖추기 위해서는 금형 설계 및 제작 기간 단축이 무엇보다도 중요한 과제이다.

차체용 대형 금형은 리브 구조의 주물로 만들어진다. 차

* 인덕대학 컴퓨터응용기계계열(jjyin@mail.induk.ac.kr)
** 강원대학교 대학원 기계공학과
*** 강원대학교 기계공학과

제용 금형은 성형 하중을 적절히 분산시킬 수 있고 충분한 강도를 가지면서도 경량인 구조로 설계되는 것이 좋고, 성형이 원활히 이루어지도록 하기 위해서는 상하형 간의 간극이 일정하게 유지되어야 한다. 그러나 금형에 성형 하중이 작용하면 탄성변형에 의해 부분적인 굽힘변형이 발생하게 되어 간극에 변화가 생기므로 금형 제작시에 이를 보정하기 위한 다이 스포팅 작업에 많은 공수가 소요된다. 따라서 성형품질 향상과 제작공수 절감을 위해서는 설계단계에서부터 금형의 강성이 균일하게 분포되도록 설계할 필요가 있다.⁽¹⁴⁾

본 연구는 차체용 대형 금형의 구조강도 및 굽힘 변형을 최적화 하기 위한 해석기술을 개발하여 최적 구조설계에 활용하는 것을 목표로 하고 있다. 본 논문에서는 드로우 금형의 구조해석을 위한 모델링 기법을 제안하여 펀더의 드로우 금형 구조해석에 적용하였고 밸런스 블록을 이용하여 블랭크 홀더의 굽힘 변형을 최소화하기 위한 방안을 연구하였다.

2. 블랭크 홀더 구조해석을 위한 모델링

차체 패널을 성형하기 위한 드로우 다이는 Fig. 1 (b)에 나타낸 바와 같이 주물 리브 구조로 이루어진 상형 다이, 하형 펀치 및 블랭크 홀더로 이루어진다. 이중 블랭크 홀더에는 Fig. 1 (a)와 같이 상형 다이로부터의 하중이 다이 페이스 하중 및 밸런스 블록 하중으로 전달되어 쿠션 핀의 하중과 평형을 이루게 된다. 다이페이스에는 다이페이스 압력 및 드로우 비드 인출력이 함께 작용하게 된다. 성형도중에는 이들 힘의 작용에 따라 블랭크 홀더에 굽힘 변형이 유발되고 이 변형에 의해 금형의 간극에 변화가 생기고 변화된 간극은 블랭크와 금형의 접촉부에 국부적으로 높은 압력을 유발한다.

이러한 높은 압력은 블랭크의 유입을 억제하므로 블랭크의 유입상태가 불균일하게 되어 터짐 등의 성형결함을 발생시킨다. 따라서 금형 제작 시 다이페이스의 부분적인 사상, 밸런스 블록의 높이조정 등 상하형의 간극을 균일하게 하기 위한 다이 스포팅이 시행착오적으로 이루어진다. 이 과정은 금형 제작시 상당한 공수를 요하며 이후의 성형 결과에도 많은 영향을 미치게 된다. 따라서, 금형 설계 단계에서 구조해석을 실시하여 블랭크 홀더의 변형을 최소화 할 수 있는 구조설계를 하도록 하여야 한다. 드로우 금형의 구조해석을 위해서는 금형 각부에 작용하는 하중 및 경계조건 등의 처리가 중요하다. 이하에 드로우 금형의

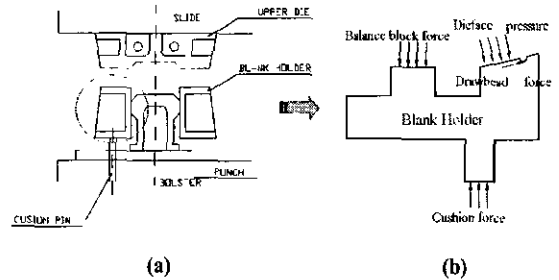


Fig. 1 Structure of single action draw die and acting forces. (a) structure of single action draw die (b) acting forces on blank holder

블랭크 홀더를 구조해석 하기 위해 본 연구에서 제안된 모델링 기법을 기술한다.

2.1 다이페이스 작용 하중의 처리

성형과정에서 블랭크 홀더에 작용하는 하중은 성형해석 결과로부터 얻는다. 본 연구에서 성형해석은 PAM-STAMP™를 이용하여 수행하였다. 성형해석으로부터 얻은 접촉압력 분포를 구조해석의 입력 하중으로 변환하기 위한 인터페이스 프로그램을 작성하였으며 이를 이용한 구조해석 과정을 Fig. 2에 나타내었다.

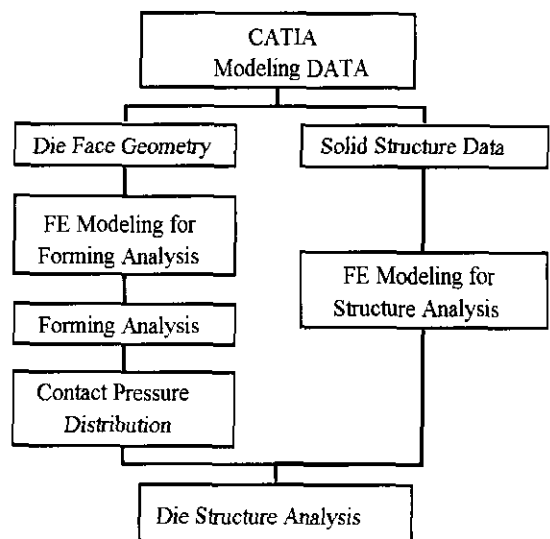


Fig. 2 Draw die structure analysis process

2.2 상형 다이 모델링

블랭크 홀더에는 상형 다이로부터 밸런스 블록의 접촉을 통하여 하중이 전달되는데 상형과의 접촉을 처리하기 위해 갭 요소를 사용하였고, 상형의 탄성 변형을 고려하기 위해 밸런스 블록이 접촉하는 위치에서의 프레스 방향 강성을 상형 다이에 대한 강성해석으로부터 구하였다. 이렇게 얻어진 강성 값으로 밸런스 블록 접촉부위의 상형 다이를 등가 스프링으로 치환하고 이 스프링들을 강체 요소로 연결하여 블랭크 홀더의 구조해석에 사용하였다. 이 과정을 Fig. 3에 나타내었다.

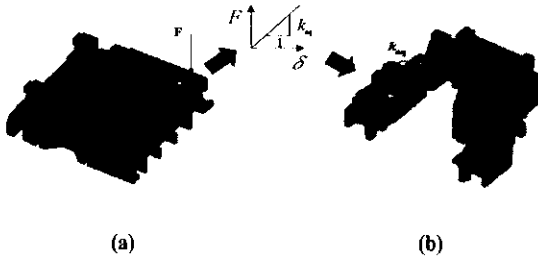


Fig. 3 Equivalent stiffness modeling of the upper die (a) determination of upper die stiffness (b) analysis of blank holder using equivalent stiffness spring element

2.3 쿠션핀 모델링

블랭크 홀더 아래쪽은 쿠션 핀으로 지지되어 있다. 쿠션 핀의 강성 역시 등가 스프링으로 모델링하였고 쿠션 핀과 블랭크 홀더와의 접촉을 갭 요소로 처리하였다.

3. 블랭크 홀더 굽힘변형 해석

3.1 해석모델

이상의 모델링 방법을 생상 예정인 소형 승용차 펜더의 드로우 금형의 블랭크 홀더 굽힘 변형 해석에 적용하였다. 이 금형은 좌/우의 부품이 하나의 금형에서 동시에 성형되는 구조로, 블랭크 홀더가 한쪽으로 긴 형상이 되어 굽힘 변형이 클 것으로 예상된다. 해석은 금형이 좌우 대칭이므로 1/2 모델에 대하여 실시되었다. 블랭크 홀더는 14만 5천여 개의 사면체 요소로 구성되었고, 해석정도를 높이기 위해 10 질점의 2차 요소로 해석하였다. 구조해석

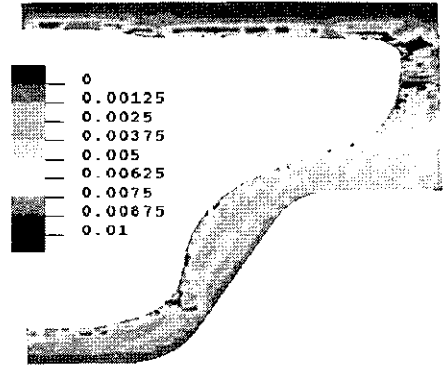


Fig. 4 Contact pressure distribution

은 I-DEAS를 사용하여 Pentium III급 PC에서 수행하였는데 1회 해석에 2.5~12시간 정도가 소요되었다.

3.2 해석조건

블랭크 홀더력은 980 kN (100 ton)을 부여하였다. 성형 해석 결과 얻어진 바인더 랩 단계에서의 다이페이스 접촉 면압 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 웨어 플레이트(wear plate)는 프레스 방향으로만 이동할 수 있도록 경계조건을 부여하였고, 1/2 모델의 대칭면에는 대칭 경계조건을 부여하였다. 금형의 재질은 인장강도 294 MPa 이상인 GM241이다.

3.3 해석결과

3.3.1 블랭크 홀더 변위 및 응력 분포

Fig. 5 (a)에 블랭크 홀더의 Z-변위 분포를 나타내었다. 그림의 A부위의 변형이 가장 심한데 금형이 위로 굽는 변형모드를 보여주고 있다. 바깥쪽은 0.03mm 위로 들리고 다이페이스 부위는 -0.14mm 아래쪽으로 치지는 형태의 굽힘 변형이 나타났다. 이 부분의 굽힘 변형이 심한 이유는 이곳에 배치된 이중 드로우 비드로 인해 드로우 비드 인출력이 다른 부위보다 상대적으로 높으면서도, 구조 강성이 다른 부위보다 상대적으로 약하기 때문인 것으로 보인다. Fig. 5 (b)-(c)는 등가 응력 및 변형률 에너지 분포를 나타낸 것인데 A부위의 굽힘 변형으로 인해 블랭크 홀더 코너부 B에 높은 응력이 걸리며 변형률 에너지 역시 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이상의 결과로 볼 때 A부위의 굽힘 변형을 완화하기 위한 보강이 필요한 것으로 판단된다.

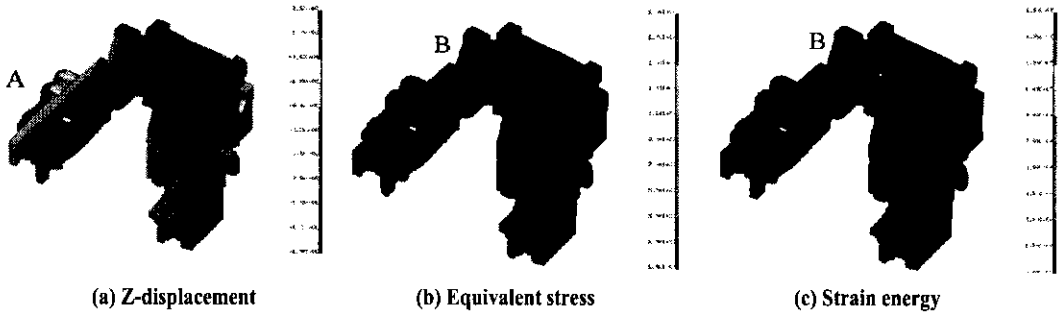


Fig. 5 Blank holder structural analysis results

3.3.2 작용하중에 따른 변형 모드

Fig. 6에 작용하중별 변형 모드를 알아보기 위해 i) 밸런스 블록 하중만 고려한 경우, ii)다이페이스 면압까지 고려한 경우, iii)드로우 비드력까지 고려한 경우에 대한 Z-방향의 변형 모드를 나타내었다. 밸런스 블록 하중은 아래쪽으로 굽는 변형을, 다이페이스 압력 및 드로우 비드력은 위로 굽는 변형을 유발함을 볼 수 있다.

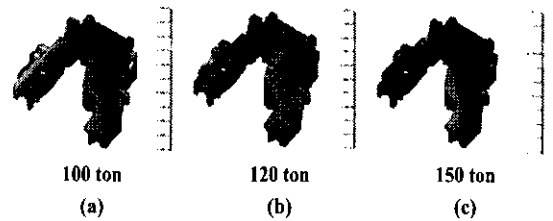


Fig. 7 Effect of blank holding force

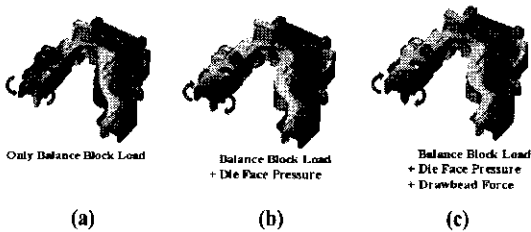


Fig. 6 Deformation modes with applied loads

3.3.3 블랭크 홀더력의 영향

Fig. 7에 블랭크 홀더력이 증가함에 따른 변형 양상을 나타내었다. 블랭크 홀더력이 증가함에 따라 바깥으로 굽는 변형이 증가되는 경향을 나타내고 있다.

3.3.4 밸런스 블록 높이의 영향

드로우 금형 제작을 위한 다이 스폰팅 작업시 현장에서는 부분적인 접촉 상태 개선을 위해 밸런스 블록의 높이를 조정하는 작업이 현장기술자의 경험과 직관에 의존하여 시행착오적으로 수행되고 있다. 이러한 밸런스 블록의 높이 조정이 굽힘 변형에 미치는 영향을 알아보기 위해 일부 밸런스 블록의 초기 간극을 0.05 ~ 0.1mm를 주고

해석한 결과를 Fig. 8에 보였다. 즉, 일부 밸런스 블록의 높이를 0.05 ~ 0.1mm 낮추었을 때 나타나는 굽힘 변형의 변화이다.

밸런스 블록의 높이를 조정함으로써 금형의 굽힘 변형량을 조절할 수 있음을 해석결과로부터 알 수 있다. 이와 같은 구조해석 결과가 적절히 활용될 수 있다면 형 맞춤 작업에 소요되는 공수를 줄일 수 있을 것이다.

4. 블랭크 홀더 굽힘 변형 최적화

4.1 밸런스 블록의 높이 최적화

이상과 같이 경험적으로 이루어지는 블랭크 홀더의 형 맞춤을 위한 밸런싱 작업을 효과적으로 수행하는데 지침을 줄 수 있도록 밸런스 블록 높이가 굽힘 변형에 미치는 영향과 최적의 높이를 직교배열실험⁶⁾을 통하여 알아보았다.

밸런스 블록 7개의 높이를 2수준으로 하고 인자들간의 교호작용은 없다고 가정하여 L_8 직교 배열표를 구성하여 8회의 해석을 수행한 결과를 Table 1에 나타내었다.

여기서 수준 1은 밸런스 블록의 높이 변화 0mm, 수준 2는 높이변화 -0.05mm를 준 경우이며, ΔZ 는 Z-변위 최대치와 최소치의 차이이다.

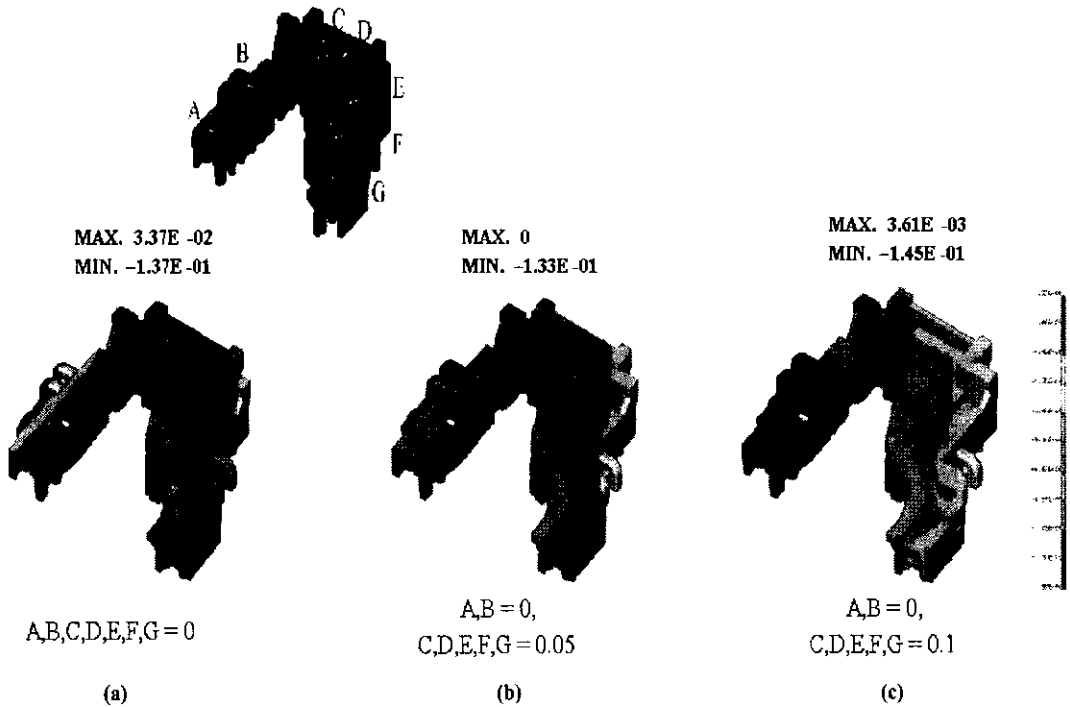


Fig. 8 Effect of balance block height on bending deflection

Table 1 L_8 orthogonal array and simulation results for the optimization of balance block

Exp. No.	Height level of balance block							ΔZ (mm)
	A	B	C	D	E	F	G	
1	1	1	1	1	1	1	1	0.171
2	1	1	1	2	2	2	2	0.133
3	1	2	2	1	1	2	2	0.163
4	1	2	2	2	2	1	1	0.172
5	2	1	2	1	2	1	2	0.188
6	2	1	2	2	1	2	1	0.195
7	2	2	1	1	2	2	1	0.222
8	2	2	1	2	1	1	2	0.237

Table 2에 나타난 평균 및 분산분석 결과 밸런스 블록의 민감도는 A, B, F, E, C, G, D 순 이었고, 최적수준은 A1, B1, C2, D2, E2, F2, G2였다. A, B, F를 유의한 인자로 보고 최적조합에서의 굽힘변형량을 실험계획법으로 예측한 결과는 0.1395 mm로 18.4% 감소되는 것으로 나타났다.

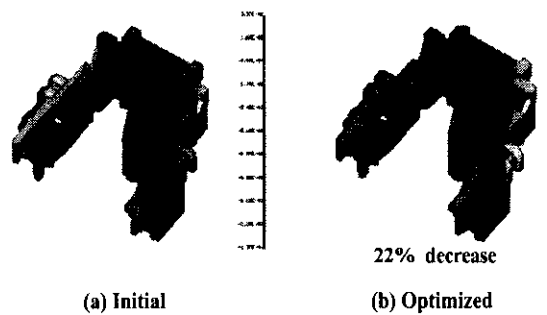


Fig. 9 Comparison of Z-displacement at initial and optimized balance block

이 경우에 대한 해석결과를 Fig. 9에 나타내었는데 최대 굽힘 변형량이 0.133mm로 22%정도 감소되는 것으로 나타났으며 이는 95% 신뢰구간인 0.126mm ~ 0.153mm 이내에 포함된다.

이상의 분석결과로부터 유의한 밸런스 블록에 대해 높이 수준을 좀더 세분화하여 적용하는 경우 굽힘 변형을

Table 2 ANOM and ANOVA table for balance block

Factor	Average ΔZ by level(num)		Degree of freedom	Sum of squares (10^4mm^2)	Mean square (10^4mm^2)	F_0	F(0.05)
	1	2					
A	0.159	0.211	1	1287.8	1287.8	26.60	7.71
B	0.172	0.198	1	357.8	357.8	7.39	
C	0.191	0.180	1	63.3	63.3*	1.31	
D	0.186	0.184	1	1.5	1.5*	0.03	
E	0.192	0.179	1	81.3	81.3*	1.68	
F	0.192	0.178	1	95.5	95.5	1.95	
G	0.190	0.180	1	47.5	47.5*	0.98	
Total			7	1933.7	216.2		
Pooled Error			4	193.6	48.4		

* Indicate the factors added to the pooled error

좀더 감소시킬 수도 있을 것으로 기대된다. 이상의 분석으로부터 얻어지는 각 블록의 민감도 및 최적수준 등에 대한 정보는 현장 트라이얼시 가이드 라인으로 활용될 수 있을 것이다.

4.2 리브 구조의 변경

구조 해석 결과 드러난 강성 취약부위의 보강을 위하여 Fig. 10에 나타낸 것과 같이 굽힘 변형이 심한 쪽의 리브 1개를 위치 변경하고 추가로 2개의 리브를 배치하였다.

리브 구조를 변경한 모델의 굽힘 변형 해석결과를 Fig. 11(a)에 나타내었는데 초기 모델에 비해 31%의 굽힘 변형 감소 효과를 보여주고 있다. 응력 분포를 나타낸 Fig.

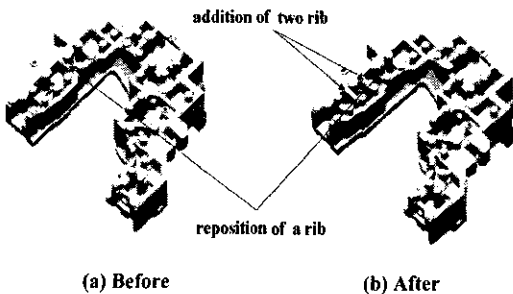


Fig. 10 Modification of the rib structure of blank holder

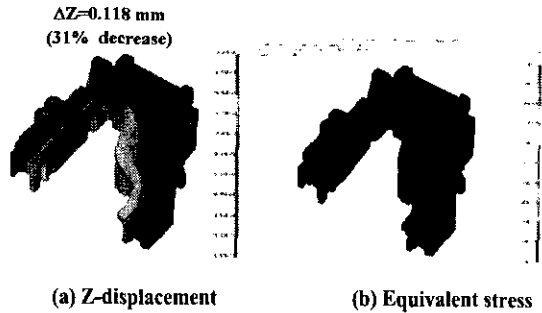


Fig. 11 Analysis results of the modified model

11(b)에서도 초기모델에서 응력이 높게 걸리던 부위의 응력집중이 해소되었음을 확인할 수 있었다.

이 결과로부터 굽힘 변형을 저감시키는 설계안은 동시에 응력 수준도 완화 시킬 수 있음을 알 수 있다. 이 모델에 대하여 밸런스 블록 최적화를 수행한다면 추가적인 굽힘 변형의 감소도 기대할 수 있을 것이다.

5. 결론

차체용 드로우 다이의 구조해석을 위한 모델링 기법을 개발하여 펜더의 드로우 다이 구조해석에 시험 적용하였다.

개발된 구조해석기법을 이용하여 금형제작시 많은 공수를 요하는 다이스포팅 작업기간의 단축에 필요한 굽힘 변형 저감 방안으로 직교배열실험을 통한 밸런스 블록의 최적화 및 리브 구조 변경방안을 제시하였다. 이로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 블랭크 홀더의 굽힘 변형을 해석하기 위한 접촉하중의 고려 방안, 금형 간의 상호작용을 고려하기 위한 강성 고려 방안 등 대형 금형의 구조 최적화를 위한 해석 기법을 제안하였다. 제안된 구조해석 기법을 활용하면 금형 설계 단계에서 구조 강도상 취약 부위를 사전에 인지하여 적절한 대응이 가능하다.
- (2) 블랭크 홀더 굽힘변형 저감방안의 하나로 직교 배열 실험을 통한 밸런스 블록의 높이 최적화 결과 22% 이상 굽힘 변형을 감소시킬 수 있었으며, 리브구조의 변경을 통해 31%의 굽힘변형 저감이 가능하였다. 밸런스 블록의 최적화 결과는 다이 스포팅작업시 가이드 라인으로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 G7 첨단생산시스템 개발사업의 지원을 받아 수행된 연구결과의 일부분입니다. 관계 제위께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) E. Becchio, A. Chiara, R. Fileccia, and M. Mastrocola, "Use of FEM in the Drawing Die Structure Design", SAE paper 982274, pp. 35~39, 1998.
- (2) 中原 孝, 玉井 秀樹, "成形過程の金型變形解析 に基礎づく, プレス金型構造の最適化", 日本自動車技術會學術講演會論文集 974 pp. 221~224, 1997.
- (3) B. Singh, G. Davies and P. Haigh, "Applications of Casting Design And Manufacturing Technologies To Reduce Body Tooling Cost and Lead Time", IBEC'96 Body Assembly & Manufacturing, pp. 1~5, 1996.
- (4) M. Fariello and G. Belingardi, "Considerations on the Role of the Actual Blank Holder in the Generation of the Restraining Force", SAE paper 970988, pp. 262~267, 1997.
- (5) 박성현, "품질공학", 민영사, 1993.