로어투스의 롤오버 및 금형 면압 저감을 위한 하프블랭킹 공정 설계

장명진¹ · 최홍석¹ · 이상훈¹ · 김동수² · 배재호² · 고대철³ · 김병민[#]

Design of Half Blanking Process for Reducing Rollover and Stress Acting on Tools in Forming of Lower Tooth

M. J. Jang, H. S. Choi, S. H. Lee, D. S. Kim, S. G. Lee, D. C. Ko, B. M. Kim

(Received November 29, 2011 / Revised January 6, 2011 / Accepted April 7, 2011)

Abstract

In recent years, automotive seat components have been manufactured by the fine blanking process, allowing an improvement of dimensional accuracy at sheared surface in series production. However, the rollover has increased and die failures have occurred more frequently when manufacturing gears by fine blanking. Consequently, important goals for manufacturing seat recliner parts with gears have been to decrease the rollover as well as to improve the tool life. In this study, the half blanking and shaving processes were introduced to improve aforementioned problems for the lower tooth, the main component of a seat recliner. For this purpose, the half blanking process was optimized using the finite element (FE) analysis and design of experiment (DOE). The optimized conditions resulting from this study were an offset of 0.2 mm, a clearance of 0.1 mm and a penetration depth of 4.5 mm. Fine blanking experiment conducted under the optimal condition resulted in a rollover depth decrease from 1.9 to 1.3 mm, and no die failure occurrence.

Key Words : Lower Tooth, Recliner, Fine Blanking, Half Blanking, Shaving, Design of Experiment, FE-analysis

1. 서 론

자동차 시트는 크게 등받이 역할을 하는 백(Back), 좌석을 앞뒤로 조정하는 트랙(Track) 및 리클라이너(Recliner)로 나뉘어진다[1,2]. 그 중에서 리클라이너는 시트백과 트랙을 연결할 뿐만 아니라 좌석의 각도를 조절하는 기능을 가진 부품이며, 승객의 안전과 감성에 매우 중요한 역할을 한다[3]. 리클라이너를 구성하는 부품은 주로 전단 공정에 의해 제작되고 이들은 요구 특성 및 구동 메커니즘에 따라 엠보싱, 기어 성형 등이 이루어진다[4]. 한편, 전단된 부품의 단면을 살펴보면 필

연적으로 롤오버(Roll-over), 유효전단면(Effective sheared surface), 파단면(Fracture surface), 버(Burr)가 발생하는데[5,6] 파단면과 버가 존재할 경우, 이들을 제거하기 위한 후공정이 필요할 뿐만 아니라 시트에 장착 시, 미끄럼 접촉부 등에서 소음, 진동의 문제를 일으키고, 경우에 따라서는 리클라이너의 수명을 단축시키는 원인이 되기도 한다. 따라서 높은 정밀도를 요구하는 시트 리클라이너 부품 제조 산업에서는 비교적 생산성이 뛰어나며 100%에 가까운 유효전단면을 확보할 수 있는 파인블랭킹(Fine blanking) 공법이 많이 적용되어 오고 있다[7,8].

1. 부산대 정밀가공시스템전공

2. ㈜ 다스 금형팀

3. 부산대 부품소재산업협력연구소

교신저자: 부산대 기계공학부, E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

한편, 결합 강도를 증가시키기 위해 리클라이너의 부품 중, 외측 기어 또는 내측 기어를 가진 부품이 많이 적용 되고 있다. 결합 강도를 향상시키기 위해서는 기어간의 접촉 면적을 증가 시켜야 한다. 그러나 파인블랭킹 공정에서 발생하는 롤오버로 인해서 부품 결합 시, 유효 접촉 면적이 상당히 감소되는 경우가 많다. 이는 특히 90°보다 훨씬 작은 산부의 각도를 가진 기어류에서 문제가 된다. Nakagawa 등[9]은 파인블랭킹 공정에서 전단윤곽의 형상이 제품의 정밀도에 미치는 영향에 대해서 실험적으로 조사하였는데, 이 끝부분의 각도가 30°인 경우 롤오버는 소재 두께의 30% 이상까지 증가함을 보였다. 결과적으로 롤오버를 감소시키면서 동력 전달 및 결합 기능이 가능한 각도를 가진 기어를 파인블랭킹으로 제조하기 위해서는 기존의 성형 방법과는 다른 방식이 요구된다.

본 연구에서는 자동차 시트의 주요 구성요소인 외치형 리클라이너의 주요 부품인 로어투스(Lower tooth)의 기어부 성형 시, 롤오버를 저감하기 위하여 하프블랭킹(Half blanking, H/B) 및 셰이빙(Shaving) 공정을 도입하였다[10,11]. 기존의 파인블랭킹에 의한 제품은 롤오버가 소재 두께의 40% 이상 발생하였을 뿐만 아니라 성형 시, 과도한 부하로 인해 금형 파손이 빈번하였다. 따라서 셰이빙 후, 롤오버의 감소와 금형 수명의 향상을 위한 주요 공정 설계변수으로써 하프블랭킹 금형의 형상, 클리어런스(Clearance), 성형 높이 등을 선정하였으며 적정값을 결정하기 위하여 유한요소해석 및 실험계획법을 적용하였다. 또한 최적화 된 공정 조건 하에서 하프블랭킹 및 셰이빙을 수행한 후, 롤오버 저감량을 측정하여 본 연구의 타당성을 입증하였다.

2. 자동차 시트 리클라이너

2.1 리클라이너 구조

Fig. 1 시트 리클라이너의 구조를 나타내었다. 리클라이너는 시트백과 시트 트랙을 연결하는 부품으로 시트백의 각도 고정 및 조정역할을 하며 시트 리클라이너는 어퍼투스(Upper tooth), 로어투스, 캠(Cam) 및 브라켓(Bracket) 등으로 구성되어 있다.

로어투스는 리클라이너 기능에 아주 중요한 역할을 하는 부품으로써 11개의 치형을 가지고 있으며 두께는 5mm 이다. Fig. 2에 로어투스의 형상 및 주요치수를 나타내었다.

Fig. 1 Components of an automotive seat recliner

Fig. 2 Shape and dimensions of the lower tooth

2.2 로어투스의 제조 공정

2.2.1 파인블랭킹 및 브로칭 적용

Fig. 3에 기존의 로어투스 제조 공정을 나타내었다. 치형부를 제외한 외곽 부분을 파인블랭킹으로 성형하고 버를 제거하기 위한 바렐(Barrel) 연마를 수행한다. 치형은 브로칭(Broaching)에 의해 절삭되어 최종 제품으로 된다. 그러나 파인블랭킹 및 브로칭 공정에 대한 각각의 치수 관리가 필요하며 무엇보다 공정수 증가에 따른 원가 상승이 문제가 된다. 이를 개선하기 위하여 치형부를 포함한 로어투스의 외곽부를 1회의 파인블랭킹으로 제조하는 것이 필요하다.

Fig. 3 Previous manufacturing process for the lower tooth by fine blanking and broaching

2.2.2 파인블랭킹에 의한 로어투스 제작

Fig. 4에 파인블랭킹에 의해 제작된 로어투스를 나타내었다. 그러나 치형부에서 소재 두께의 약 40% 가량의 롤오버가 발생하였다. 과도하게 발생

Fig. 4 Lower tooth manufactured by fine blanking process and its cross section

Fig. 5 Lower tooth assembled with the upper tooth

Fig. 6 Fine blanking tools which occurs chipping

Fig. 7 Half blanking and shaving lay-out for the lower tooth

한 롤오버를 Fig. 5 에 나타낸 바와 같이 어퍼투스와의 결합 시, 실접촉면적을 감소시켜 치형부의 면압을 증가시키고 결과적으로 리클라이너의 수명을 단축시킬 수 있다.

Fig. 6 에 치핑(Chipping)이 발생한 금형 사진을 나타내었다. 이러한 원인으로서는 성형 시, 제품의

형상에 따라 구조적으로 취약한 치형부에 높은 면압이 작용하기 때문으로 판단된다.

따라서 로어투스 롤오버를 감소시키면서 금형 수명까지 확보할 수 있는 성형 공법이 요구되며 본 연구에서는 하프블랭킹 및 셰이빙 공정을 도입하였다.

3. 하프블랭킹 및 셰이빙 공정의 적용

3.1 하프블랭킹 및 셰이빙 공정 레이아웃

Fig. 7에 로어투스 제조를 위한 공정 레이아웃(Lay-out)을 나타내었다. 기존에는 피어싱 및 파인 블랭킹으로 제작되었으나 하프블랭킹 및 셰이빙 공정으로 분할함으로써 롤오버 및 금형에 작용하는 응력을 저감시킬 수 있을 것으로 예상된다. 셰이빙 금형 형상은 로어투스의 형상과 동일하므로 본 연구에서는 하프블랭킹 금형의 형상 및 변수 최적화에 중점을 두었으며 이를 위하여 유한요소 해석 및 실험계획법을 적용하였다.

3.2 하프블랭킹 공정 설계

3.2.1 유한요소해석 모델

Fig. 8 FE-model of half blanking for lower tooth

Fig. 8 에 유한요소해석 모델을 나타내었다. 해석은 치형부의 롤오버를 중점적으로 파악하기 위하여 제품 내부의 피어싱부를 기준으로 1/4 모델에 대해 수행되었다. 한편, 하프블랭킹 해석은 비링(Vee-ring)이 소재를 클램핑하는 1 단계 및 스트리퍼, 카운터 펀치가 하중을 가하면서 성형하는 2 단계로 나누어 진행하였다.

유한요소해석은 강소성 유한요소해석 코드인 DEFORM 3D(ver. 10.1)에 의해 수행되었다. 또한 로어투스의 소재인 SNCM220 의 유동응력식은 인장시험을 통하여 다음과 같이 얻었으며 소재 두께가 5mm 로 비교적 두꺼우므로 압연에 의한 이방성은 고려되지 않았다.

Fig. 9 The relationship between compressive yield strength and hardness of the tool material [12]

$$\bar{\sigma} = 727 \bar{\varepsilon}^{0.171} \quad [MPa] \quad (1)$$

스트리퍼 하중 및 카운터 하중을 선정하기 위하여 로어투스의 파인블랭킹 시 작용하는 성형 하중을 계산하였다. 일반적으로 전단 공정 시 작용하는 하중은 식(2)에 의해 계산된다.

$$F_p = 0.8 \times T_s \times L \times h \quad (2)$$

여기서 T_s 는 소재의 인장강도, L 은 전단 윤곽 길이, h 는 성형 깊이를 의미한다. 식 (2)를 통해 계산된 로어투스의 성형 하중은 약 30ton 이다. 한편, 파인블랭킹 공정에서의 스트리퍼 하중 및 카운터 하중은 각각 성형하중의 50% 및 15%를 적용하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 하프블랭킹 시 스트리퍼 하중 및 카운터 하중을 각각 15ton, 5ton 으로 적용하였다. 또한 소재와 금형 간의 마찰상수(m)은 0.1로 선정하였다.

한편, 금형의 항복 여부를 파악하기 위해 Fig. 9에 나타난 바와 같이 금형재의 경도와 압축항복 강도와의 관계를 이용하였다[12]. 본 연구에서 사용된 금형재는 열처리된 STD11종으로 HRc 60~61

을 가진다. 따라서 압축항복강도의 범위는 2,000~2,800MPa의 값을 가지지만 안전률을 고려하여 2,000MPa 이상의 응력이 금형에 작용할 시, 항복되어 파손에 이르는 것으로 판단하였다.

3.2.2 하프블랭킹 공정설계

Fig. 10(a), (b)에 하프블랭킹 공정의 개략도 및 고려된 설계 변수를 각각 나타내었다. 설계 변수는 오프셋(Offset)량, 클리어런스 및 펀치 스트로크로 선정하였으며 펀치 및 다이의 선단부 반경은 0.1mm로 고정하였다. 오프셋의 증가에 따라 하프블랭킹 후 이 끝 반경(R_1)이 제품의 이 끝 반경(R_2)보다 증가하기 때문에 물오버가 감소되는 효과가 있다[9]. 그러나 오프셋이 과도할 경우에는 셰이빙 공정에서의 성형량이 증가하여 금형의 강도적 측면에서 취약하다는 단점이 있다. 한편, 클리어런스가 음(-)인 경우에는 금형의 공동부로 유입되는 재료의 양이 증가할 뿐만 아니라 정수압 응력이 형성되어 기어부의 물오버가 감소하고 전단면의 품질 또한 향상되는 효과가 있다[13]. 그러나 과도한 음의 클리어런스의 조건에서 성형할 경우, 금형에 높은 면압이 작용하는 문제가 있다. 또한 하프블랭킹 공정에서의 스트로크는 주로 하프블랭킹 및 셰이빙 금형에 작용하는 응력을 적절하게 분산시키는 효과가 있으므로 이에 대한 적정값을 선정하는 것이 중요하다. 따라서 이러한 공정변수를 최적화시키기 위하여 실험계획법 및 유한요소해석이 적용되었다. Table 2에 설계 변수 및 그 수준값을 나타내었다. 유한요소해석은 Table 2의 설계변수를 바탕으로 $L_9(3^4)$ 의 직교배열표를 작성하여 각 수준 조합에 따라 수행되었다.

한편, 목적함수(Π_{OF})는 물오버, 하프블랭킹 및 셰이빙 금형의 강도를 고려할 수 있도록 식(3)에 의해 정의하였다.

Fig.10 Schematic drawing of half blanking process and considered design parameters

Table 2 Design parameters and their levels of half blanking process

Level		1	2	3
Factor				
A	Offset (mm)	0.1	0.2	0.3
B	Clearance (mm)	-0.1	-0.2	-0.3
C	Punch stroke (mm)	4.2	4.5	4.8

$$\Pi_{O.F} = L_R \times \frac{\bar{\sigma}_{H,max}}{\bar{\sigma}_Y} \times \frac{\bar{\sigma}_{S,max}}{\bar{\sigma}_Y} \quad \text{if } \bar{\sigma}_{max} < \bar{\sigma}_Y, \text{ die material}$$

$$\Pi_{O.F} = L_R \quad \text{if } \bar{\sigma}_{max} \geq \bar{\sigma}_Y, \text{ die material} \quad (3)$$

여기서 L_R , $\bar{\sigma}_{H,max}$, $\bar{\sigma}_{S,max}$ 는 각각 셰이빙 후의 물오버 크기, 하프블랭킹 및 셰이빙 공정에서 금형에 작용하는 최대 유효 응력을 의미한다. 목적함수는 망소특성이며, 식(3)을 이용할 경우 물오버 뿐만 아니라 금형에 작용하는 응력 또한 작은 값을 가지는 설계변수의 조합을 선정할 수 있다.

3.3 유한요소해석 결과 및 고찰

Table 3에 유한요소 해석을 통해 예측된 물오버 크기, 금형의 강도 및 이에 따라 계산된 목적함수 값을 나타내었으며 Fig. 11에는 목적함수에 대한 설계변수의 영향도를 그래프로 나타내었다.

Fig. 11(a)에서 알 수 있듯이 하프블랭킹 금형 수명에 영향을 미치는 인자는 오프셋량, 클리어런스이며, 이 값들이 클수록 금형에 작용하는 응력이 증가하였다. 이는 오프셋량이 크면 전단윤곽길이 가 길어지며 클리어런스가 음으로 커질수록 소재의 압축응력이 증가하여 금형에 큰 응력을 발생시키기 때문이다. Fig. 11(b)에서 셰이빙 금형 수명에 가장 영향을 주는 인자는 오프셋량임을 알 수 있는데 오프셋량이 클수록 셰이빙 공정에서의 가공량이 증가하기 때문인 것으로 사료된다. 또한 Fig. 11(c)에서 알 수 있듯이 로어투스 치형부의 물오버 크기에 영향을 미치는 설계변수는 오프셋량과 클리어런스이다. 오프셋량의 증가에 따른 치형 끝부의 곡률반경 증가로 인해 물오버가 감소하는 것으로 판단되며, 음의 클리어런스의 증가로 인해 소재가 물오버 측으로 유동하는 것이 결과적으로 물오버의 저감을 가져 오는 것으로 생각된다.

한편, 식 (3)에 의해 계산된 목적함수에 대한 영향도 평가를 Fig. 11(d)에 나타내었다. 여기서 목적함수를 최소화할 수 있는 설계변수의 조합은 A_2

Table 3 $L_9(3^4)$ OA table and FE-analysis results of roll over, effective stress acting on the tools and objective function

No.	A	B	C	L_R (mm)	σ_{max} (MPa)		$\Pi_{O.F}$
					H/B	Shaving	
1	1	1	1	1.38	1,440	1,890	0.943
2	1	2	2	1.37	1,640	1,800	1.013
3	1	3	3	1.33	2,050	1,770	1.300
4	2	1	2	1.32	1,640	1,850	1.003
5	2	2	3	1.31	1,860	1,810	1.109
6	2	3	1	1.10	1,860	2,010	1.100
7	3	1	3	1.38	1,850	1,940	1.243
8	3	2	1	1.21	1,950	2,150	1.200
9	3	3	2	1.11	2,100	2,050	1.100

B_1C_2 , 즉 오프셋량 0.2mm, 클리어런스 -0.1mm, 펀치 스트로크 4.5mm이다. 이 조건은 No. 4의 조건과 동일하다. 이 때의 금형강도는 하프블랭킹, 셰이빙 각각 1,640MPa, 1,850MPa로 금형의 파손 없이 로어투스 생산이 가능할 것으로 판단된다. Fig. 12에 $A_2B_1C_2$ 조건 하에서의 금형강도해석 결과를 나타내었다.

4. 로어투스 제작 실험

앞에서 제시한 최적조건의 해석을 통하여 물오버 저감 및 금형파손의 신뢰성을 확보하기 위하여 실험을 수행하였다. Fig. 13에 하프블랭킹 및 셰이빙 실험을 위한 금형 세트를 나타내었다.

Fig. 14에 최적조건 하에서의 유한요소해석 결과 및 이에 따라 제작된 로어투스를 나타내었다. 그 결과 최적조건에서의 로어투스 치형부에서 발생한 물오버는 1.3mm로 기존의 파인블랭킹 공정에서의 물오버인 1.9mm에 비해 30% 이상 저감효과가 있는 것을 알 수 있다. 이는 하프블랭킹에서 발생한 물오버의 끝단부를 셰이빙 금형에 의해 절삭할 수 있기 때문이다. 한편, 유한요소해석 결과에서도 예상되듯이 공정 분할에 따른 금형 응력 또한 감소되므로 파인블랭킹 공정에 비교하여 치핑 발생에 대한 한계 수명을 늘릴 수 있을 것으로 판단된다.

(a) Effect on Max. effective stress acting on H/B tool

(b) Effect on Max. effective stress acting on Shaving tool

(c) Effect on roll over

(d) Effect on objective function

Fig.11 Main effect plots of parameters level

Fig. 12 Effective stress distribution acting on the die

Fig.13 Experimental apparatus for half blanking and shaving of the lower tooth

Fig.14 FE-analysis result(a) and manufactured lower tooth(b) under the determined process condition

5. 결 론

본 연구에서는 치형을 가진 리클라이너 부품인 로어투스의 파인블랭킹 성형 시, 롤오버 저감과 동시에 금형 수명 향상을 위하여 하프블랭킹 및 세이빙 공정을 도입하였다. 유한요소해석 및 파인블랭킹 실험을 통해 로어투스를 제조한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 브로칭 공정을 생략하기 위해 로어투스의 전체 윤곽을 1회 파인블랭킹만으로 제조하였을 경우, 치형부에 1.9mm의 과도한 롤오버가 발생하였으며 금형에 큰 응력이 작용하여 치핑이 쉽게 일어났다.

(2) 치형부 롤오버 감소와 금형에 작용하는 응력을 분산시키기 위하여 하프블랭킹 및 세이빙 공정을 도입하였다. 이 때, 하프블랭킹 공정의 주요 설계변수는 오프셋량, 클리어런스 및 펀치 스트로크로 선정하였으며, 목적함수는 롤오버와 하프블랭킹 및 세이빙 금형의 강도를 고려할 수 있도록 정의하였다.

(3) 하프블랭킹 공정 최적화를 위하여 실험계획법 및 유한요소해석을 적용하였으며 금형재의 항복강도 범위 내에서 가장 작은 롤오버량을 나타낸 하프블랭킹 공정 변수는 오프셋 0.2mm, 클리어런스 -0.1mm, 펀치 스트로크 4.5mm이다.

(4) 선정된 조건에 의해 로어투스를 제조한 결과, 롤오버가 기존의 1.9mm에서 1.3mm로 30% 저감되었으며 금형 강도적인 측면에서도 우수하다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업 및 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2009년-K20601000004-09E0100-00410).

참 고 문 헌

[1] B. M. Kim, H. S. Choi, M. J. Jang, J. H. Bae, S. B. Lee, D. C. Ko, 2008, Development of High Precision Plate Holder in Automotive Seat Recliner by Mechanical Press(I), J. Kor. Soc. Precis. Eng., Vol. 25, No. 7, pp. 55~63.

[2] B. M. Kim, H. S. Choi, M. J. Jang, J. H. Bae, S. B. Lee, D. C. Ko, 2008, Development of High Precision Plate Holder in Automotive Seat Recliner by Mechanical Press(II), J. Kor. Soc. Precis. Eng., Vol. 25, No. 7, pp. 64~71.

[3] C. S. Woo, J. S. Koo, H. J. Cho, H. S. Kim, J. S. Jeong, 2001, Structural Analysis and Evaluation Technologies of Automotive Seat Frames, Process. Kor. Soc. Mech. Eng. (A), pp. 806~811.

[4] J. Y. Kim, J. H. Kim, W. J. Chang, 2005, Influence of Die Design Variables on the Sheared Surface in Shearing Process of Sandwich Sheet Metal, J. Kor. Soc. Technol. Plast., Vol. 14, No. 1, pp. 37~42.

[5] T. S. Kwak, Y. J. Kim, M. K. Seo, W. B. Bae, 2003, The effect of V-ring indenter on the sheared surface in the fine-blanking process of pawl, J. Mater. Process. Technol., Vol. 143-144, pp. 656~661.

[6] T. S. Kwak, Y. J. Kim, W. B. Bae, 2002, Fine element analysis on the effect of die clearance on shear planes in fine blanking, J. Mater. Process. Technol., Vol. 130-131, pp. 462~468.

[7] Y. J. Kim, T. S. Kwak, W. B. Bae, 2000, Finite element analysis on effect of die clearance on shear planes in fine blanking, J. Kor. Soc. Technol. Plast., Vol. 9, No. 2, pp. 40~44.

[8] J. D. Kim, J. J. Kang, H. K. Kim, S. K. Hong, B. J. Kim, 2005, A progressive fine blanking process design for forming of carrier plate, J. Kor. Soc. Technol. Plast., Vol. 14, No. 3, pp. 207~214.

[9] T. Nakagawa, K. Suzuki, M. Kinoshita, 1971, Profile effects on the sheared surface qualities in fine blanking, J. of Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 12, No. 129, pp. 742~751.

[10] B. V. Hien, S. M. Kim, H. Y. Kim, T. W. Ku, B. S. Kang, 2007, Numerical analysis of parameters affecting formability in micro half blanking using thin sheet metal, Proc. Kor. Soc. Precis. Eng., pp. 15~16.

[11] K. S. Lee, J. Y. Jung, J. H. Kim, 2010, Influence of working variables in simplified gear shaving process, J. Kor. Soc. Technol. Plast., Vol. 19, No. 5, pp. 290~295.

[12] P. D. Harvey, 1985, Engineering Properties of Steel, 2nd ed., American Society for Metals, Ohio. pp. 431~468.

- [13] K. Kondo, K. Maeda, A. Meada, K. Hirota, 1994, Development of a simple precision shearing process for thick plates, J. of Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 35, No. 396, pp. 67~72.