

# 점진 전개기법 및 유한요소 역해석법을 이용한 자동차 패널 트리밍 라인 설계

정완진<sup>#</sup>, 박춘달<sup>1</sup>, 송윤준<sup>2</sup>, 오세욱<sup>3</sup>

## Trimming Line Design using Incremental Development Method and Finite Element Inverse Method

W. J. Chung, C. D. Park, Y. J. Song, S. W. Oh

(Received May 18, 2006)

### Abstract

In most of automobile body panel manufacturing, trimming process is generally performed before flanging. To find feasible trimming line is crucial in obtaining accurate edge profile after flanging. Section-based method develops blank along manually chosen section planes and find trimming line by generating loop of end points. This method suffers from inaccurate results of edge profile. On the other hand, simulation-based method can produce more accurate trimming line by iterative strategy. In this study, new fast simulation-based method to find feasible trimming line is proposed. Finite element inverse method is used to analyze the flanging process because final shape after flanging can be explicitly defined and most of strain paths are simple in flanging. In utilizing finite element inverse method, the main obstacle is the initial guess generation for general mesh. Robust initial guess generation method is developed to handle general mesh with very different size and undercut. The new method develops final triangular mesh incrementally onto the drawing tool surface. Also in order to remedy mesh distortion during development, energy minimization technique is utilized. Trimming line is extracted from the outer boundary after finite element inverse method simulation. This method has many advantages since trimming line can be obtained in the early design stage. The developed method is verified by shrink/stretch flange forming and successfully applied to the complex industrial applications such as door outer flanging process.

**Key Words** : Automobile Body Panel, Flanging, Trimming Line, Initial Guess Generation, Finite Element Inverse Method

### 1. 서론

자동차용 패널 제작 공정은 블랭킹(blanking), 드로잉(drawing), 트리밍(trimming), 플랜징(flanging), 헤밍(hemming) 공정으로 이루어지며, 각각의 공정마다 금형이 제작된다. Fig. 1에 공정을 나타내었다. 특히 트리밍 공정은 최종 패널의 외곽 치수 정확도를 좌우하는 중요한 공정으로 완성 제품의 플

랜지 끝 단을 전개(development)하여 얻은 트리밍 라인을 이용해 금형을 제작한다. 여기서 Fig. 2와 같이 플랜지 끝단을 전개할 때 플랜지 성형에 의한 변형(deformation)을 고려하지 않고 단순한 길이 전개를 통해 트리밍 라인을 결정하기 때문에 실제 최종 패널과 설계에서 요구하는 제품형상 사이에 치수 차이가 생긴다. 이러한 차이는 완전 자동화된 자동차 조립 공정에서 용접 위치의 이

1. 부산대학교 정밀기계공학과  
2. 건국대학교 기계설계학과  
3. 현대자동차 급형기술개발팀  
# 교신저자: 서울산업대학교 급형설계학과, wjchung@snut.ac.kr

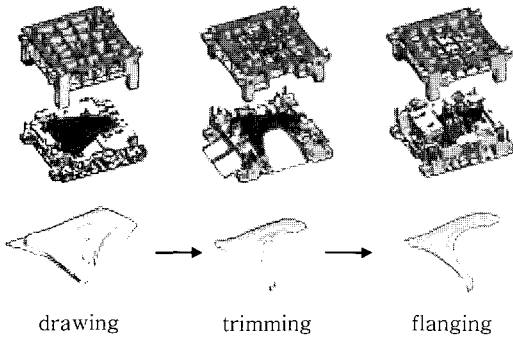


Fig. 1 Stamping operations of automobile body panel

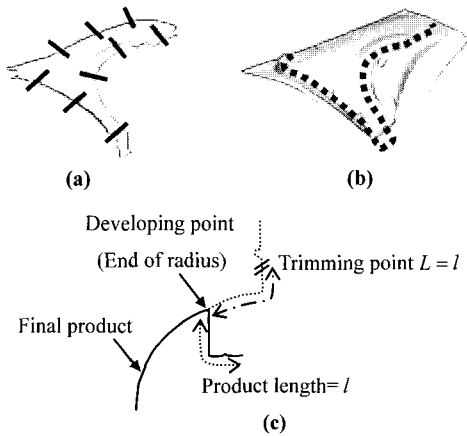


Fig. 2 The procedures to design trimming line in Automobile body panels(front fender):  
 (a) sections used in section based development,  
 (b) determined trimming line, (c) method to determine trimming line position in section

탈, 상대 파트와의 집합 불량 등의 문제를 가져오기 때문에 금형제작 과정에서 시행착오적 방법을 통하여 수정된다.

이러한 현장의 시행착오적 방법을 개선하기 위해서 성형 전후의 면적이 일정하다는 가정을 이용한 기하학적 방법으로 사각형 형상 요소에 국한된 최적 트리밍 라인을 계산하려는 연구가 시도되었다[1~2]. 또한 해석적 방법으로 최적 트리밍 라인을 구하려는 연구도 진행되었다. 이 방법은 임의의 트리밍 라인을 결정한 후 결정된 트리밍 라인과 완성 제품 형상의 오차가 최소화되도록 반복 계산을 수행한다[3]. 반복 계산에 의해 트리밍 라인을 결정하는 방법은 플랜징 공정에서

소재 변형을 고려하므로 기하학적 방법보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. 하지만 플랜징 공정의 해석을 수행하기 위해서는 사전에 금형 형상이 필요하므로 금형 설계 초기 단계에 적용하기에는 어렵다. 효율적인 금형 제작을 하기 위해서는 반드시 트리밍 라인이 금형 설계 초기 단계에서 최적으로 결정되어야 한다. 이를 위해 유한요소 역해석(finite element inverse method)을 이용, 플랜지 라인의 점진적 전개를 완성하는 방법이 연구되기도 하였다[4~5]. 또한 플랜지 전개 방식에 문제를 해결하기 위해 향상된 역 모자이크 방법(inverse mosaic method)을 사용한 전개 방법에 대한 연구도 수행된 바 있다[6].

본 연구에서는 최적 트리밍 라인 설계를 위해 유한요소 역해석을 사용하였다. 이 방법은 구하고자 하는 플랜징 성형후의 형상을 완성 제품 형상(final product shape)으로 간주한다. 그리고 유한요소 역해석을 통해 최종 제품형상에 대한 초기 형상(initial configuration)을 구하여 드로잉 금형 표면에 나타내게 된다. 언더컷 부위를 가진 일반적인 요소망에 대하여 초기 가정 생성(initial guess generation)을 수행할 수 있는 전개 계산방법을 개발하였다. 제안된 방법의 타당성 검증을 위해 인장 및 압축 플랜징에 대한 유한요소 역해석을 수행하였다. 또한 실제 양산 중인 도어 아웃터(door outer) 금형의 손잡이 부분 플랜징 공정에 적용하여 기존의 단면전개 방식과 제안한 방법의 해석 결과를 비교하였다.

## 2. 수치해석적 트리밍 라인 설계

### 2.1 트리밍 라인 설계

트리밍 공정은 드로잉 패넬을 이용하여 플랜징 공정 이전에 이루어지는데, 예측된 트리밍 라인으로 제작한 트리밍 다이로 드로잉 패넬을 절단하는 공정이다. 이때 스프링백 현상은 고려하지 않는다. Fig. 3에 트리밍 라인을 수치해석적으로 계산을 하기 위한 전체 프로세스를 나타내었다.

사용의 편의성을 위해 전체 시뮬레이션 과정에서 삼각 요소(triangular mesh)를 사용하였다. 플랜징 공정후 최종의 요구 형상으로 제품 형상의 CAD 데이터가 바로 사용된다. 드로잉 공정에서의 틀 형상 요소는 제품 데이터의 요소 조건에 부합하기 위해 충분히 정교한 요소망(fine mesh)이 되어야 한다. 입력 데이터로부터 프로그램은 제안한

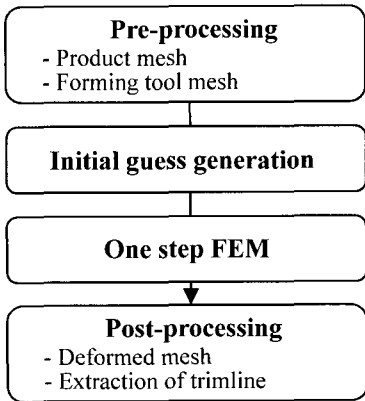


Fig. 3 Flow chart for design of trimming line

전개 방법을 통하여 드로잉 금형 요소 위에 최종 제품의 요소 데이터를 전개한다.

전개된 요소는 초기 가정 형상(initial guess shape)으로 사용된다. 그리고 유한요소 역해석에 생성된 최종의 요소는 역학적 계산이 고려되어 재차 전개되기 때문에 초기형상의 정확도가 더욱 향상된다. 따라서 최종적으로 후처리(post processing) 과정에서 유한요소 역해석에 의해 향상된 전개 요소의 외곽 테두리가 트리밍 라인으로 추출될 수 있다. 본 프로그램을 수행하기 위한 입력 데이터로는 최종 제품 형상에 대한 요소 데이터와 드로잉 공정에 대한 요소 데이터만을 필요로 하기 때문에 금형 설계 초기 단계에서도 적용이 용이한 장점을 가진다.

## 2.2 유한요소 역해석(finite element inverse method)

유한요소 역해석은 최종 형상이 주어진 경우 최초형상을 쉽게 예측할 수 있기 때문에 주로 금형 설계의 초기 단계에서 성형성의 평가를 위해 사용되고 있다[7]. 이 방법은 변형 경로를 가정하여 계산하기 때문에 복잡한 변형 경로를 가지는 성형 공정에서는 예측 정도가 저하되는 단점이 있다. 그러나 대부분의 플랜징 공정이 단순한 변형 경로에 의해 성형되는 점을 고려한다면 유한요소 역해석을 이용하여 정밀도 높은 플랜징 공정 해석이 가능하다. 물론 해석에 있어 복잡한 변형 경로에 대한 해석 및 마찰 영향의 정확한 고려 등의 문제에서 수치해석상의 오차가 발생할 수도 있다. 그러나 기존의 증분 해석 방법(Incremental FEM)과 비교하여, 특히 플랜징 공정

에 있어서는 계산의 신속성과 단순성에서 장점을 가지는 방법이 된다. 유한요소 역해석은 초기 연구에서 주로 평판상의 초기 블랭크 형상 예측에 많이 적용되었는데, 최근에는 3차원 공간상의 임의의 면 위에서 초기 형상 예측에 적용되기도 하였다[8~9].

본 연구에서 전개된 요소의 각 절점은 접촉하고 있는 3차원 금형 면에 접한 면 위에서 변형이 허용되도록 변위를 제한하는 방법으로 반복 계산하여 드로잉 금형 요소 곡면에서 초기형상이 결정된다. 복잡한 경계조건 처리를 위해서 분할된 요소 표면으로부터 임의 방향으로의 접촉탐색 및 접촉구속을 개발, 적용하였다.

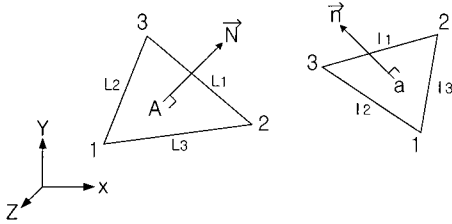
## 2.3 초기 가정 형상(initial guess shape) 생성

유한요소 역해석을 하기 위해서는 미리 정확하고 요소 형상이 왜곡되지 않은 초기 형상이 제공되어야 한다. 기존의 기하학적 전개 방법을 이용한 초기 형상 결정은 면적 일정 법칙의 가정하에 최종 제품 형상이 2차원 평면상에 매핑된다[1~2]. 그러나 트리밍 라인은 3차원의 임의의 형상을 가지는 드로잉 공정 패널 표면 위에 정의되어야 하므로 이 방법은 실제 금형 제작 공정에서 적용에 한계를 갖는다. 그리고 플랜지의 일반적인 특성상 플랜지 부위의 요소는 형상비(aspect ratio)가 크고 크기가 불규칙하게 생성되어야 하는 문제를 안고 있으므로 안정된 초기 형상 결정 방법이 요구된다.

최근 컴퓨터 그래픽 연구에서 삼각형 폴리곤 형상에 대해 2차원 구조를 3차원으로 매핑하는 연구가 활발히 진행중이다[10~11]. 이 방법은 약간의 수정을 거쳐 임의의 3차원 면상에서의 초기 형상 결정 방법으로 사용될 수 있다. Fig. 4에 최종 제품 형상의 매핑되어야 할 면이 매개변수 함수로 정의된다고 가정하면 :

$$\phi: U \rightarrow E \quad (1)$$

여기서  $U$ 는 3차원의 최종 제품 형상 요소 데이터이고  $E$ 는 3차원의 드로잉 금형 표면을 나타내는 요소 데이터이다.  $U$  상의 각 포인트( $u, v$ )는 함수  $\phi$  즉,  $\phi(u, v)$ 에 의해  $E$  상으로 매핑된다. 여기서 변수  $u$  와  $v$  는 각각 최종 제품 형상을 표현하는 기하학적 정보이다.

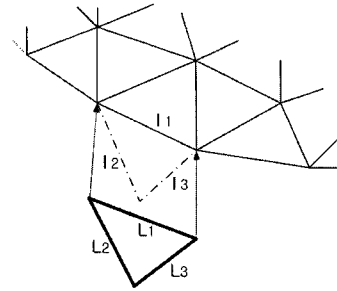


**Fig. 4 Mapping from final mesh onto drawing tool mesh surface**

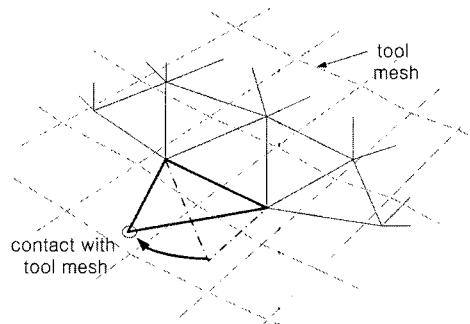
최종 제품 형상의 요소 데이터는 드로잉 금형 형상 요소면에 전개되어야 한다. 요소 데이터의 전개에는 주로 매핑 기법이 사용되는데, 이 방법은 요소를 순서적으로 전개하는 방법으로 언더컷 부위 처리에 한계가 있다. 본 연구에서는 이 문제를 해결하기 위해 층(layer)의 개념을 도입하였다. 층은 이미 전개된 요소의 절점으로 이루어진 요소 그룹으로 정의된다. 3차원 접촉 문제와 언더컷 문제를 해결하기 위한 개념을 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)에서 요소의 모서리가 이미 전개된 요소와 모서리를 공유하도록 연결하고 나머지 점은 Fig. 5(b)와 같이 드로잉 금형 형상 요소면과 접촉이 이루어질 때까지 회전하게 된다.

이 과정을 거친 후 최종 제품 형상의 요소 데이터와 드로잉 금형 형상 요소면에서 일치되는 형상면이 플랜징 과정에서 변형을 받지 않는 패드 영역을 정의하고 이를 자동적으로 전개 대상에서 제외한다. 그리고 패드 영역의 바깥쪽 모서리로부터 전개 출발선이 정해진다. 출발선에 놓인 절점을 가지는 요소들로 이루어진 첫 번째 층에서 전개가 시작된다. Fig. 6에서 보여지는 층 전개 방법과 같이 한 층의 전개가 완료되면 그 다음 층에 대해서도 같은 방법으로 전개가 이루어진다. 이러한 과정이 모든 요소에 걸쳐 수행되면 전체 전개 과정이 완료된다. 전개가 완료된 형상을 초기 가정 형상(initial guess shape)으로 변형 매커니즘을 고려한 유한요소 역해석을 통해 그 결과의 정도를 향상시키게 된다.

이 과정에서 층의 전개가 이루어지는 방향은 불규칙적이고 요소의 형상 왜곡 및 크기의 다양성 등으로 인해 전개되는 요소는 매우 왜곡될 수 있으며 심지어는 뒤집히기도 한다. 이때 새로운 층의 모든 요소가 금형 형상 요소면에 접촉하게 되면 기하학적으로 전개된 요소에 대한 왜곡 현

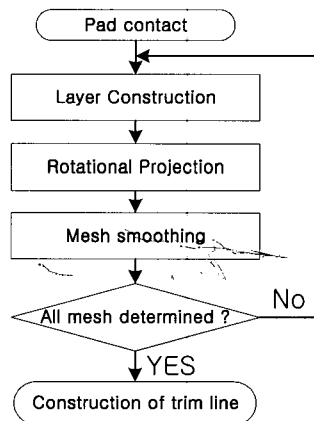


(a)



(b)

**Fig. 5 Procedure of rotational projection: (a) move and attach nodes to pre-developed edge, (b) rotate the third node onto the drawing tool mesh surface**



**Fig. 6 Procedure of initial guess generation**

상을 제거하기 위해 에너지 최소화 과정이 진행 된다. 폴리곤으로 이루어진 면상에는 본질적으로 매개 변수가 없기 때문에 각 요소의 왜곡을 최소

화하여 최종 제품 형상의 요소 데이터를 매핑하기가 대단히 어렵다. 이를 해결하기 위해 아래와 같은 에너지 범함수를 도입했다.

$$\Pi = \sum_{k=1,m} \Pi_k \quad (2-a)$$

$$\Pi_c = \alpha \Pi_1 + (1-\alpha) \Pi_A \quad (2-b)$$

$$\Pi_1 = \sum_{i=1}^3 \left( \frac{l_i - L_i}{L_i} \right)^2 \quad (2-c)$$

$$\Pi_A = \left( \frac{A - A_0}{A_0} \right)^2 \quad (2-d)$$

여기서  $\Pi_c$  는 삼각형 요소당 에너지를 나타낸다. 식 (2-c)에서  $\Pi_1$  는 최종형상 요소에 대한 길이 단위의 에너지이다. 여러가지 다양한 요소 크기가 존재하는 모델에서도 계산이 원활할 수 있도록 무차원화(Normalization)가 적용되었다. 무차원화를 적용하지 않으면 요소 크기가 불규칙할 경우 계산 결과를 신뢰할 수 없게 된다. 식(2-d)에서  $\Pi_A$  는 각 삼각형 요소에 대해 부호화된 영역의 구별을 위해 사용되는데, 방향이 다른 삼각 요소에 대해 높은 에너지를 갖게 하였다. 따라서 계산 중에 삼각형 요소가 뒤집히는 경우, 에너지에 의해 방향을 바르게 설정할 수 있다. 이 에너지에 대해서도 여러 가지 요소 크기에 대해 잘 계산될 수 있도록 무차원화가 적용된다. 그리고 요소당 에너지 계산시 가중치를 나타내는 변수인  $\alpha$  는 제품 해석에서  $\alpha=0.5$ 인 경우에 안정적인 수렴성을 보였다. 또한 식(2-a)가 비선형 방정식이므로  $\Pi$  의 최소에너지를 계산하기 위해, 뉴턴-랩슨 반복(newton-raphson iteration) 방법이 사용되었다.

에너지 무차원화 과정에서는 모든 절점의 운동이 금형 형상 요소면의 법선벡터 방향과 수직인 접선면을 따라 움직이도록 제한된다. 요소는 층을 따라 점진 전개되기 때문에 언더컷 부위의 전개 시에도 별다른 제한이 없다. 일반적으로 에너지 무차원화 과정은 모든 전개층에 대해 적용되는 것이 아니라 전개 과정에서 요소가 과도하게 왜곡된 경우에만 적용되는데, 요소가 뒤집힌 경우에는 반드시 에너지 무차원화 과정을 적용하여야

한다. 이 방법은 요소의 과도한 변형을 억제하여 정확한 전개가 이루어지는데 꼭 필요하다.

### 2.4 트리밍 라인의 추출

트리밍 라인의 추출은 자유 모서리(free edge)의 선정 및 연결로 이루어진다. 모든 요소의 모든 면에 대해 모서리가 생성되는데, 공통의 모서리를 갖는 경우를 내부 모서리라고 판단한다. 내부 모서리를 제외한 나머지는 모두 자유 모서리가 된다. 이러한 자유 모서리를 연결하여 트리밍 라인을 얻게 된다.

## 3. 제안된 방법의 검증

제안한 플랜지 라인 예측 방법의 정확성을 검증하기 위해 인장, 압축 플랜징 성형에 적용하여 보았다. 상용 성형해석 프로그램을 사용하여 성형 해석한 최종형상을 사용하여 제시한 알고리즘을 사용한 유한요소 역해석을 수행하였다. 그리고 원래의 소재형상과 비교하여 정확성을 검증하였다. 또한 도어 아웃터 손잡이 플랜징 성형에 대해 기존의 단면전개 방식과 제안한 방법의 결과를 비교하였다.

### 3.1 인장 압축 플랜징 성형

Table 1, 2와 Fig. 7에서 제시한 형상과 조건들로 성형 해석을 수행하였다. 특히 소재 요소는 굽힘부의 해석 오차를 최소화 하기 위해 플랜지 굽힘 방향에 평행하도록 분할하였다.

Table 1 Tool dimension and forming condition

Flange radius	500mm
Die / Punch radius	1mm
Flange height	10mm
Pad force	400kN

Table 2 Material properties

Young's modulus	206GPa
Hardening coefficient	645MPa
Hardening exponent	0.238
Thickness	0.8mm
Element size	0.95mm x 0.4mm (W x H)

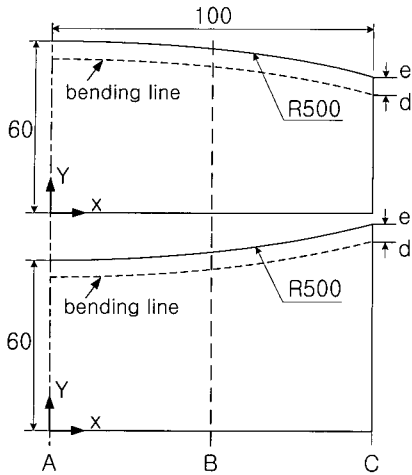


Fig. 7 Blank dimensions and coordinates (unit:mm)

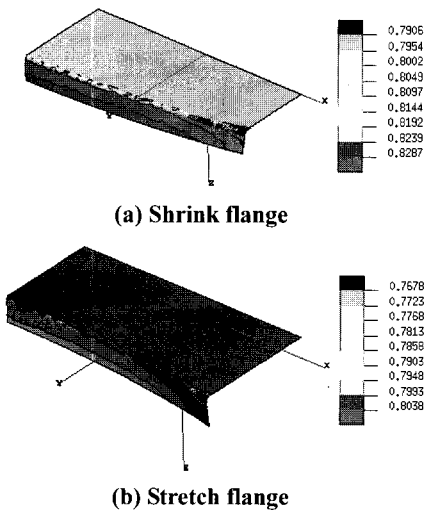
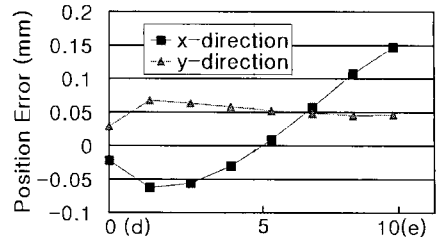


Fig. 8 Distribution of thickness

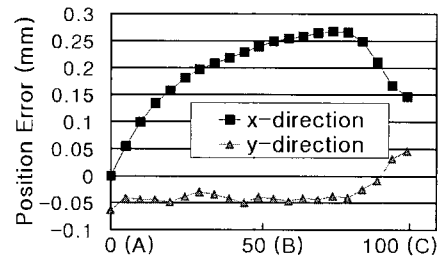
Fig. 7에 소재 치수와 좌표축 방향을 나타내었다. 성형해석 결과 나타난 두께 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 특별히 압축과 인장에 의한 심한 주름이나 파단은 보이지 않음을 확인할 수 있다.

### 3.1.1 압축 플랜징 유한요소 역해석

압축 플랜지에서 성형 전 소재 끝단의 절점 위치를 기준으로 역해석 후의 x, y방향으로의 이동량을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)는 Fig. 7에서 제시한 굽힘선부터 플랜지 끝 단까지 10mm의 d-e 구간에서 절점의 이동량을 나타내고, Fig. 9(b)는 플랜지 끝 단을 따른 절점의 이동량을 나타낸다.



(a) Side edge (d-e), (flange height : 10mm)



(b) Flange edge

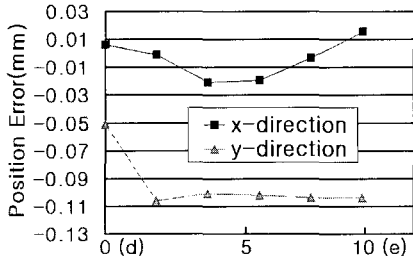
Fig. 9 Position error on shrink flange

Fig. 9(a)에 제시된 d-e 구간에서 y축 방향 이동량을 보면 증분해석을 통해 얻어진 목표치 하는 절점 위치와 비교하여 0.05mm 정도로 큰 차이 없이 해석되었다. 그러나 x축 방향은 y축 방향에 비해 다소 큰 차이를 보인다. Fig. 9(b)에서 플랜지 끝 단 절점의 x방향 오차를 살펴보면 단면 A의 대칭 중심선 절점에서는 초기소재 위치와 차이가 전혀 없었으나 단면 C방향으로 갈수록 소재 절점의 위치 차이가 더 크게 나타났다. 그러나 전체적으로 초기 소재 절점과의 위치 차이는 0.25mm 이내로 나타나 소재 폭에 비해 그 정도가 크지 않다고 판단할 수 있다.

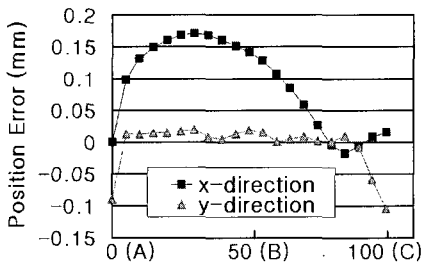
반면 플랜지 끝 단의 y방향 오차를 보면 전체적으로 길이가 감소했으며 전체적으로 0.05mm 이내의 오차를 보이고 있다. x, y방향 모두에서 단면 C부근의 위치 차이는 다른 부위에 비해 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 이 부위는 소재 성형시 소재 이동의 구속이 적으므로 다른 부위의 오차가 누적되어 나타나기 때문으로 판단된다.

### 3.2 인장 플랜징 유한요소 역해석

Fig. 10(a)를 보면 압축 플랜지와는 다르게 y방향의 길이 변화가 x방향의 폭 방향 변화보다 크게 나타났다. 인장 플랜지는 x방향으로 인장을 받기 때문에 플랜징 성형시 구속이 없는 끝 단의 -y방



(a) Side edge (d-e), (flange height : 10mm)



(b) Flange edge

Fig.10 Position error on stretch flange

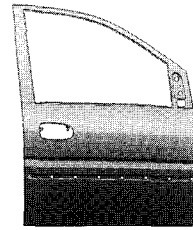
향으로의 소재 이동이 압축 플랜지보다 더 크게 나타났으나 변화량은 0.1mm 미만으로 압축 플랜지 보다 적게 나타났다. x방향의 위치 변화에 있어서도 압축 플랜지보다 적은 차이를 보이고 있다. Fig. 10(b)의 플랜지 끝 단의 위치는 x방향과 y 방향 모두 압축 플랜지와 비슷한 양상을 나타내었으며 다소 작은 오차를 보였다.

압축 플랜지와 인장 플랜지의 해석 결과를 비교하면 x방향으로 인장을 받는 인장 플랜지가 해석에서도 보다 정확한 예측을 가능하게 함을 알 수 있다. 또한 인장과 압축의 영향을 직접적으로 받는 x방향의 절점 위치 해석 결과가 대체적으로 y방향보다 더 큰 차이를 보인다. 이로서 소재 변형 양상이 해석 결과의 정확성에 영향을 주는 주요 요인임을 알 수 있다.

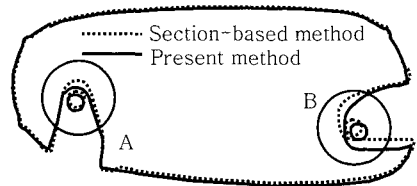
### 3.3 도어 아웃터 핸들부 플랜징 성형

Fig. 11(a)에 나타난 도어 아우터 핸들부의 플랜지에는 핸들봉치를 조립하기 위한 두 개의 브래킷이 있으며, 브래킷의 성형시 변형이 발생하므로 트리밍 라인을 설계하기가 어려운 부분이다.

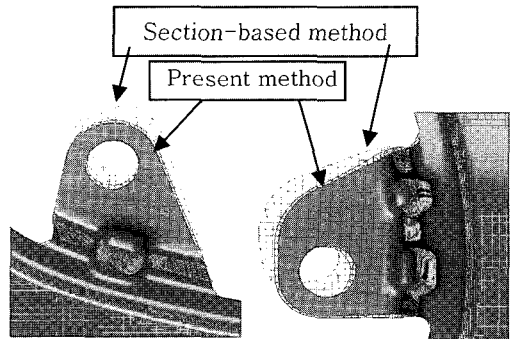
Fig. 11(b)에서 핸들부의 플랜징 형상과 기존의 단면 전개 방식으로 설계하여 증분 해석 방법 (Incremental FEM)으로 해석한 결과와 제안한 유한



(a)



(b)



(c)

(d)

Fig.11 Comparison between simulation-based method and section-based method: (a) view of flanging of handle part of door outer, (b) trimming line by two methods, (c) comparison of part-(A) after flanging, (d) comparison of part-(B) after flanging(shaded image is the target shape.)

요소 역해석에 의해 예측된 트리밍 라인을 비교하였다. Fig. 11(c)와 Fig. 11(d)에서 비교된 핸들부 플랜징 해석 결과를 비교하였다. A와 B부분 모두에서 제안한 유한요소 역해석 방법이 목적하는 플랜지 형상과 구멍의 위치가 기존의 단면전개 방식을 이용한 해석 결과보다 더 정확히 일치하는 것으로 나타났다. 플랜징 공정의 성형에서도 적은 양이지만 형상에 의한 변형이 발생하는데, 단면 전개 방법은 이러한 변형을 고려하지 못해

정확성이 떨어지는 것을 알 수 있다.

위의 두 가지 예제로 본 연구에서 제안한 방법을 대해 검증하고, 기존의 단면 전개 방법보다 정밀도 높은 트리밍 라인 예측이 가능함을 확인하였다. 제안한 방법에서도 변형이 다소 크게 발생하는 부위에 있어서는 변형량의 편차가 다소 발생한다. 이는 유한요소 역해석의 계산 과정에서 마찰력 등의 고려를 통해 개선할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

프레스 금형 공정 중 하나인 트리밍 공정의 트리밍 라인 설계를 위한 새로운 방법을 제안하였다. 완료된 최종 제품의 요소가 새로운 점진적 전개 방법에 의해 드로잉 금형 형상면 위에 전개되고, 이 초기 가정 형상(initial guess shape)을 이용한 유한요소 역해석을 통해 최종 트리밍 라인을 구하였다. 새로운 전개 방법은 최종 제품의 요소 품질이 좋지 않거나 언더컷이 존재하더라도 효율적인 전개를 가능하게 한다. 유한요소 역해석 방법은 플랜징 공정의 해석을 간단하게 처리할 수 있어 변형을 고려한 트리밍 라인을 신속하게 예측할 수 있다.

알고리즘의 신뢰성은 인장과 압축 플랜징 성형 해석을 통해 평가되었다. 또한 기존의 단면 전개 방식을 사용한 증분해석 방법(Incremental FEM)에 의한 해석 결과와 비교를 통해 제안한 방법이 기존의 단면 전개 방법보다 정확한 트리밍 라인을 예측함을 보였다. 차체 양산용으로 제작되는 도어 아웃터 손잡이 부분을 대상으로 두 가지 방법에 대한 정확도를 비교한 결과, 제안한 방법의 경우가 트리밍 라인의 정확성이 더 좋은 것으로 검증되었다. 결과적으로 제안한 방법은 해석에 필요한 모델의 간략성, 해석의 신속성 등의 측면에 장점을 갖게 되어 양산용 금형 제작 공정에서 효율적으로 사용이 가능할 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] R. Sowerby, J. L. Duncan, E. Chu, 1986, The modeling of sheet metal forming, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 28, pp. 415~490.
- [2] G. N. Blount, P. R. Stevens, 1990, Blank shape analysis for heavy gauge metal forming, *J. of Material Processing Technology*, Vol.24, pp. 65~74.
- [3] Autoform Manual, 2004.
- [4] Wan-Jin Chung, Hyun-Bo Shim, Choon-Dal Park, Se-Wook Oh, 2004, Optimal trimming line design for flanging using one step FEM, the 55<sup>th</sup> Japanese Joint Conference for the Technology of Plasticity, pp. 187~188.
- [5] W. J. Chung, C. D. Park, D. Y. Yang, 2005, Trimming Line Design using New Development Method and One Step FEM, *Proceedings of NUMISHEET 2005*, pp. 837~842.
- [6] Hyun Bo Shim, 2006, Geometrical mapping for triangular element. Part 2: trimming-line design for flanging operation, *Proc. IMechE*, Vol. 220 Part B:J. Engineering Manufacture, accepted publication.
- [7] K. Chung, O. Richmond, 1992, Ideal forming-2. Sheet forming with optimum deformation, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 34, pp. 617~633.
- [8] 이충호, 허훈, 1997, 박판금속성형의 초기 블랭크 최적설계를 위한 삼차원 다단계 역해석, *대한기계학회논문집 A 권*, 제 21 권 제 12 호, pp. 2055~2067.
- [9] 김승호, 김세호, 허훈, 2001, 다단계 유한요소 역해석을 이용한 세장비가 큰 직사각형 성형 공정의 해석, *한국소성가공학회지*, 제 10 권 제 5 호, pp. 389~395.
- [10] C. Bennis, J. M. Vezién, G. Iglesias, 1991, *Comput. Graphics*, Vol. 25, pp. 237~246.
- [11] J. Malliot, H. Yahia, A. Verroust, *Comput. Graphics*, 1994, Vol. 27, pp. 27~34.