

# 직접 격자 사상법을 이용한 직사각컵 및 S-Rail 성형공정의 3차원 유한요소 역해석

김승호\* · 허 훈\*

## Three Dimensional Finite Element Inverse Analysis of Rectangular Cup and S-Rail Forming Processes using a Direct Mesh Mapping Method

S. H. Kim and H. Huh

### Abstract

An inverse finite element approach is employed for more capability to design the optimum blank shape from the desired final shape with small amount of computation time and effort. In some drawing or stamping simulation with inverse method, it is difficult to apply inverse scheme due to the large aspect ratio or steep vertical angle of inclination. The reason is that initial guesses are hard to make out with present method for those cases. In this paper, a direct mesh mapping scheme to generate initial guess on the sliding constraint surface described by finite element patches is suggested for one step inverse analysis to calculate initial blank shape. Radial type mapping is adopted for the simulation of rectangular cup drawing process with large aspect ratio and parallel type mapping for the simulation of S-Rail forming process with steep vertical angle of inclination.

**Key Words** : Direct Mesh Mapping Method, Inverse Finite Element Analysis, Initial Guess, Rectangular Cup Drawing Process, S-Rail Forming Process

### 1. 서 론

드로잉이나 스탬핑으로 성형되어 지는 박판 부재는 제조 공정의 중요한 역할을 차지하고, 적용 분야가 광범위한데 비하여 성형 공정 및 초기 블랭크의 설계는 여전히 경험적 기술에 바탕을 두고 있다. 초기 블랭크의 설계는 재료의 낭비를 줄이고 성공적인 부재의 성형을 보장하는 최소의 블랭크 형상을 예측하는 것으로, 최근 수치해석 기법과 컴퓨터의 성능향상과 기법과 컴퓨터의 성능 향상

에 더불어 활발한 연구가 진행되어 오고 있다. 이와 같은 초기 소재 예측방법에는 변형이론을 고려하지 않은 미끄럼 선장법(Slip-line Method)<sup>(1)</sup>, 평면응력 특성(Characteristic of Plane Stress)<sup>(2)</sup>, 기하학적 사상법(Geometric Mapping)<sup>(3)</sup>과 같은 변형이론을 고려하지 않은 방법과, 변형이론을 근간으로 하는 이상성형(Ideal Forming)이론 및 유한요소 역해석(Finite Element Inverse Analysis)<sup>(4-10)</sup>등이 있다. 변형이론을 기본으로 한 연구들은 블랭크 형상뿐만 아니라 변형률 분포도 매우 짧

\* 한국과학기술원 기계공학과

은 계산시간으로 허용 가능한 정도의 정성적인 예측이 가능하다. Lee와 Huh<sup>(8)</sup>는 유한요소 역해석을 3차원으로 확장하여 좋은 결과를 얻었음을 보여주었다. 최근에는 체적 가감법<sup>(11)</sup>, 민감도 법을 이용한 초기 블랭크의 설계<sup>(12)</sup> 및 유한요소 역추적방법을 이용한 연구<sup>(13)</sup>도 진행되고 있지만 해석 대상이 복잡해지면 계산시간이 상당히 커지는 단점이 있다.

설계 비용이나 계산시간에 비추어 보면 변형이론을 기본으로 한 유한요소 역해석이 상당히 효과적인 초기 블랭크의 설계방법이라 할 수 있겠지만, 드로잉 공정이나 스탬핑 공정에서 자주 볼 수 있는 세장비가 큰 부품이나, 다이와 펀치사이의 갭이 작고 수직벽의 경사가 큰 경우는 해석 시에 필요한 초기 추측치를 기존의 방법으로는 만들기가 난해하여 해석을 수행하기가 어려운 단점이 있다. Lee와 Huh<sup>(7)</sup>는 초기 추측치를 만드는 데 있어서, 미끄럼 선장법이나 기하학적인 사상법보다 발전적인 형태인 선형 역사상(Linear Inverse Mapping)법을 제안하여 수직벽을 적절히 조절하여 해석을 수행했지만 수직벽의 처리에 한계가 있고, 임의의 복잡한 곡면에서는 사상함수를 구하기가 어려운 점이 있다.

본 논문에서는 3차원 임의의 형상을 가지는 부품의 유한요소 역해석을 위한 초기 추측치의 계산을 위해서 직접 격자 사상법(Direct Mesh Mapping Method)을 제안하였다. 제안된 방법을 사용하여 세장비가 큰 직사각 겹성형 공정의 해석을 위한 초기 추측치를 계산하였고, 수직벽의 경사가 큰 S-Rail의 성형 공정을 해석하였다.

## 2. 직접 격자 사상법

본 논문에서는 유한요소 역해석의 초기 추측치를 계산하기 위해 직접 격자 사상법을 제안하였다. 직접 격자 사상법은 최종형상의 격자에 맞는 직선들을 구성하고 이 직선들로 격자를 구성한 후, 직선들을 미끄럼 구속면에 직접 사상함으로써 초기 추측치를 계산하는 방법이다. 일반적으로 원통형 컵이나 직사각 겹 같이 두 축에 대해 기하학적인 대칭성을 가지고 있는 경우 방사형태의 격자를 사용하면 적절하고, S-Rail이나 Front Door Panel 같이 기하학적인 대칭성이 없거나 복잡한 형상이 경우 평행선 타입의 격자를 사용하는 것이 적절하다고 판단되어진다. 먼저 원하는 최종형상으로부터 미끄럼 구속면을 유한요소 패치를 사용하여 모델링하고, 방사형 또는 평행선형의 직선들을 정의한다. 최종형상의 격자에 맞게 시작 직선을 정의하고 격자를 구성한 후 구성된 격자를 직선의 절점별로 미끄럼 구속면에 위치시키게 된다. 최종 격자를 유한요소 역해석의 초기 추측치로 사용하여

해석을 수행하게 된다. Fig. 1은 이와 같은 직접 격자 사상법의 절차를 나타낸 것이다.

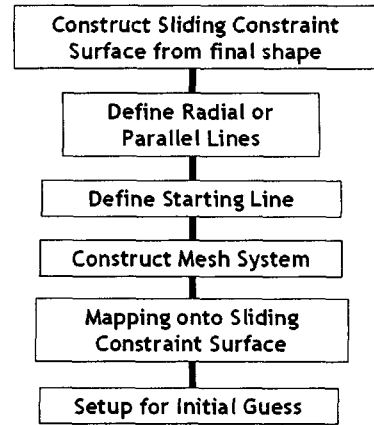


Fig. 1 Schematic procedure of a direct mesh mapping method

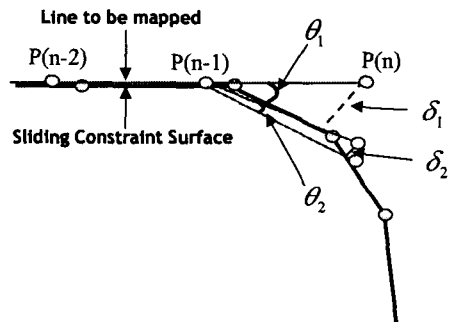


Fig. 2 Schematic diagram of mapping procedure for each line

각 직선별로 절점을 배치하는 방법은 유한요소 패치를 사용한 미끄럼 구속면에 위치시키려는 절점 사이의 탐색 작업을 통하여 이루어진다. Fig. 2는 각 직선을 미끄럼 구속면에 위치시키는 과정을 나타낸 것이다. (n-2)점과 (n-1)점이 미리 배치된 절점이라고 놓고 (n)점을 배치시키는 과정은 다음과 같다. 먼저 (n-2)점과 (n-1)점이 이루는 각도와 초기 설정된 격자의 길이만큼 (n)점을 배치시킨다. (n)점을 전체 탐색 과정을 통해서 상관 관계를 가지는 미끄럼 구속면 상의 요소를 구하고 이 요소와 이루는 각도  $\theta_1$  만큼 회전을 시켜 준다. 이후에 절점과 미끄럼 구속면상의 요소 사이의 탐색을 거쳐서 절점과 요소 사이의 거리  $\delta$ 가 상당히 작아 질 때까지 탐색을 반복하게 된다. 각 직선별 첫 번째 절점의 배치는 사상의 시작 직선과 만나도록 위치시키고 두 번째 절점은 각도를 0으로 놓고 위치시킨 후에 탐색과정을 거치면 된다.

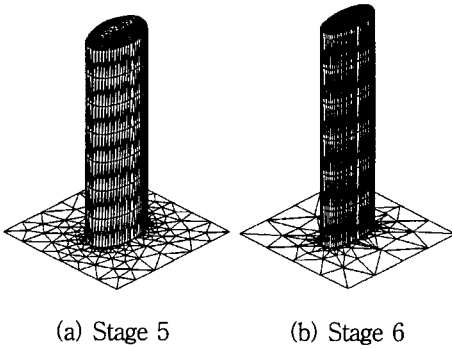


Fig. 3 Sliding constraint surfaces for the multi-stage inverse analysis of rectangular cup drawing process with large aspect ratio

직접 격자 사상법은 기존의 방법에 비해서 최종 형상과 초기 형상의 격자를 모두 새로 구성해야 하는 단점이 있지만 수직벽의 경사가 큰 경우나 세장비가 큰 경우에도 적절한 초기 추측치를 구함으로써 유한요소 역해석을 수행할 수 있고, 해석의 정확도를 높이기 위해 다단계로 쉽게 확장 할 수 있는 장점이 있다.

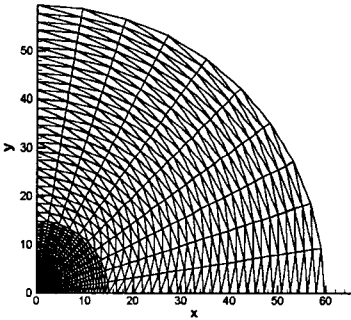


Fig. 4 Initial mesh system for the direct mesh mapping of the rectangular cup (radial type)

### 3. 세장비가 큰 직사각 컵의 유한요소 역해석을 위한 초기 추측치의 계산

본 절에서는 직접격자 사상법을 이용하여 세장비가 큰 직사각컵의 다단계 유한요소 역해석을 위한 초기 추측치를 계산하였다. 해석 모델은 Kim과 Huh등이 해석한 다단계 직사각컵 성형 공정<sup>(14)</sup>의 5단계와 6단계로, Fig. 3는 중간단계의 편치 형상으로부터 구성된 미끄럼 구속면을 나타낸 것이다. Fig. 4는 방사형의 직선들로 구성된 초기 격자를 나타낸 것이고, Fig. 5의 (a)와 (b)는 직접 격자 사상법을 이용하여 구성한 5단계와 6단계의 캔 형상이다. 임의의 곡면에 따라 적절한 사상이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 5단계와 6단계사이의 역해석을 수행할 때, 5단계의 캔 형상이 초기 추측치가 되고, 6단계의

캔 형상이 최종형상이 된다. Fig. 5의 (c)는 1단계 역해석을 통해 구한 6단계 캔의 두께변형을 분포를 도시한 것이다. 이와 같은 일단계 해석은 변형 양상을 정량적으로 구해 설계의 변경을 쉽게 할 수 있는 장점이 있다.

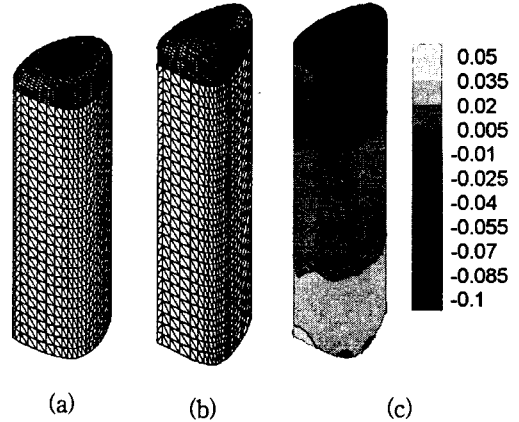


Fig. 5 (a) Initial guess generated by the direct mesh mapping (stage 5); (b) Final shape generated by the direct mesh mapping (stage 6); (c) Calculated thickness strain distribution of stage 6

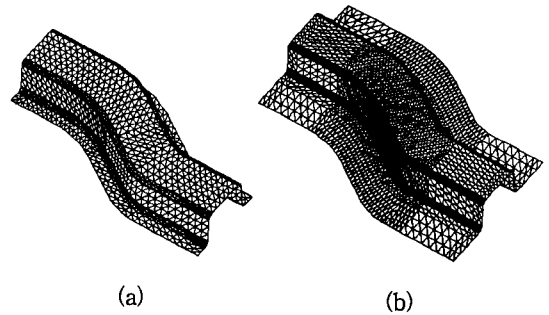


Fig. 6 (a) Final desired shape; (b) sliding constraint surface generated from the final shape.

### 4. 직접 격자 사상법을 이용한 S-Rail 성형공정의 유한요소 역해석

본 절에서는 직접 격자 사상법을 이용하여 수직벽의 경사가 큰 S-Rail 성형공정을 유한요소 역해석을 이용하여 해석하였다. 기존의 사상법으로는 초기 추측치를 구하기가 어려워 해석을 수행하기가 난해한 모델이다. 평행선 타입의 초기 직선들로부터 최종형상을 구하여 해석에 이용하였다. Fig. 6의 (a)는 성형하고자 하는 S-Rail의 최종형상을 나타내고, Fig. 6의 (b)는 원하는 최종형상으로부터 구성된 미끄럼 구속면을 나타낸다. Fig. 7의 (a)는 평행선으로 구성된 직선들로부터 이루어진 초기 격자 시스템을 나타낸 것이고, Fig. 7의 (b)는 초기 격자를 미끄럼 구속면에 사상시켜 얻은 최종형상을 나타낸

것이다. 수직벽의 경사가 크고 형상이 복잡하지만 적절한 사상이 이루어지고 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 일 단계 유한요소 역해석으로 구한 두께 변형을 분포를 도시한 것이다.

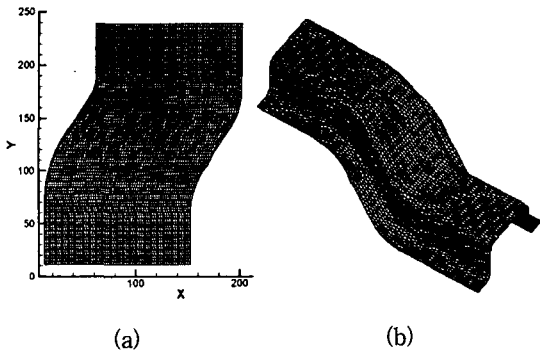


Fig. 7 (a) Initial mesh system for the direct mesh mapping of the S-Rail (parallel type); (b) Final shape generated by the direct mesh mapping



Fig. 8 Thickness strain distribution of S-Rail calculated by one step inverse analysis

### 5. 결론 및 토론

본 논문에서는 디프 드로잉이나 스탬핑의 유한요소 역해석을 위하여 직접 격자 사상법을 제안하였다. 제안된 방법을 사용하여 세장비가 큰 직사각 컵 성형 공정의 해석을 위한 초기 추측치를 계산하여 역해석을 수행하였고, 수직벽의 경사가 큰 S-Rail의 성형 공정시의 초기 추측치를 계산하여 역해석을 수행하였다. 제안된 방법은 초기 추측치와 최종형상을 모두 계산해야 하는 단점이 있지만, 계산이 힘든 부품의 초기 추측치를 쉽게 계산할 수 있고, 다단계 유한요소 해석으로의 확장이 쉬운 장점을 가지고 있다.

### 참고 문헌

(1) Karima, M., 1989, "Blank Development and Tolling Design for Drawn Parts Using a Modified Slip-Line Field Based Approach", J. of Engineering for Industry, ASME, Vol. 111, pp.

345-350.

- (2) Vogel, J. H. and Lee, D., 1990, "An Analysis Method for Deep Drawing Process Design", Int. J. MEch. Sci., Vol. 32, pp. 891-897.
- (3) Sowerby, R., Duncan, J. L. and Chu, E., 1986, "The Modelling of Sheet Metal Stamping", Int. J. Mech. Sci., Vol. 28, pp. 415-430.
- (4) Batoz, J.L., Guo, Y.Q., Duroux, P. and Detraux, J.M., 1989, "On the Estimation of Thickness Strain in Thin Car Panels by the Inverse Approach", NUMIFORM89, pp.383-388.
- (5) Chung, K. and Richmond, O., 1994, "The Mechanics of Ideal Forming", ASME trans: J. of Applied Mechanics, Vol.61, pp.176-181.
- (6) Liu, S.D. and Karima, M., 1992, "A One Step Finite Element Approach for Production Design of Sheet Metal Stampings", NUMIFORM92, pp.497-502.
- (7) Lee, C.H. and Huh, H., 1997, "Blank Design and Strain Prediction of Automobile Stamping Parts by an Inverse Finite Element Approach", J. Mater. Process. Technol., Vol.63, pp.645-650.
- (8) Lee, C.H. and Huh, H., 1998, "Three Dimensional Multi-step Inverse Analysis for the Optimum Blank Design in Sheet Metal Forming Processes", J. of Mater. Process. Technol., Vol. 80, pp. 76-82.
- (9) Huh, H., Kim, S.H. and Kim, S.H., 2000, "Multi-stage inverse analysis of elliptic cup drawing with the large aspect ratio", Proc. Metal Forming 2000, pp. 107-116.
- (10) 김승호, 김세호, 허 훈, 2000, "세장비가 큰 타원형 컵 성형 공정의 다단계 유한요소 역해석", 한국소성가공학회지, 제 9권, 제 3호, pp. 304-312.
- (11) 김두현, 이정민, 박상후, 양동열, 김용환, 1997, "박판성형의 초기소재 설계시스템", 한국소성가공학회지, Vol. 6, No. 5, pp. 400-407.
- (12) Shim, H. B., Son, K. C. and Kim, K. H., 1999, "Optimum Blank Shape Design by Sensitivity Analysis", Proc. NUMISHEET '99, pp. 523-528.
- (13) 최한호, 강경주, 구대완, 임학진, 황상문, 강범수, 2000, "유한요소법을 이용한 역추적기법 개발 및 판재성형의 초기 블랭크 형상설계에 적용", 한국소성가공학회지, 제 9권, 제 4호, pp. 348-355.
- (14) 김세호, 김승호, 허 훈, 2001, "유한요소해석을 이용한 세장비가 큰 직사각컵 다단계 성형공정의 금형설계", 한국소성가공학회지, Vol. 10, No. 2, pp. 144-150.