

직접격자 사상법을 이용한 차체 구조물의 유한요소 역해석 및 성형효과를 고려한 충돌해석

김승호* · 허 훈*

(2002년 5월 21일 접수)

Inverse Finite Element Analysis of Autobody Structures with a Direct Mesh Mapping Method for Crash Analysis Considering Forming Effects

S. H. Kim and H. Huh

Abstract

A finite element inverse analysis is utilized to consider forming effects of an S-rail on the assessment of the crashworthiness with small amount of computation time. A crash analysis can be directly performed after the inverse simulation of a forming process without a smoothing or remeshing scheme. The direct mesh mapping method is used to calculate an initial guess from a sliding constraint surface that is extracted from the die and punch set. Analysis results demonstrate that energy absorption of structures is increased when simulation considers forming effects of thickness variation and work hardening. The finite element inverse analysis is proved to be an effective tool in consideration of forming effects for the crash analysis.

Key Words : Inverse Finite Element Analysis, Direct Mesh Mapping Method, Crash Analysis, Forming Effect

1. 서론

컴퓨터의 성능향상과 더불어 유한요소 해석 기법은 지속적으로 개발되고 있으며, 특히 자동차용 차체의 설계에 적용하여 설계 비용과 시간을 줄이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 지속적인 운송수단의 대량생

산 및 이용으로 막대한 화석에너지가 사용되어 환경오염 문제의 해결과 에너지 절감의 필요성이 절실히 요구되고 있다. 이러한 문제를 해결하려는 노력의 일환으로 연비향상을 목적으로 하는 차체 경량화 기술의 개발은 새로운 과제로 인식되고 있다. 차체의 경량화는 충돌 안전성을 확보한 상태에서 이루어져야 하기 때문에 정확한 성

* 한국과학기술원 기계공학과

형이력을 고려한 충돌해석을 바탕으로 안정적인 경량 차체설계가 이루어져야 할 것이다. 그러나 차체 구조물의 형상이 복잡하여 성형이력을 계산하기 위한 시간이 막대하게 소요되고 있어서 대부분의 연구가 성형 해석과 충돌해석을 별개로 수행하고 있는 실정이다. 현재까지 성형이력을 고려하며 충돌특성을 향상시키기 위한 차체의 설계에 관한 연구는 미국, 일본 등의 자동차 회사를 중심으로 시도되고 있으나 계산 시간의 제약으로 인해 실제의 차체 설계에는 반영되지 못하고 있다. Suh등⁽¹⁾은 S-rail의 충돌해석을 통해서 성형이력을 고려한 경우 에너지 흡수율이 증가함을 발표하였고, Kellicut등⁽²⁾은 하이드로포밍으로 제작된 S-rail의 충돌해석을 성형이력을 고려하여 수행하였다. Mikami등⁽³⁾은 일반적인 성형공정을 이용한 박관구조물의 충돌해석에 성형이력을 고려하였고, Lee등⁽⁴⁾은 성형이력을 고려한 S-rail과 하이드로포밍으로 제작된 튜브의 충돌해석을 수행하였다. Kim과 Huh⁽⁵⁾는 성형 이력과 성형 형상을 모두 고려하여 S-rail의 충돌해석을 수행하였고, Kang과 Huh⁽⁶⁾는 변형률 속도 경화 효과를 고려하여 차체 구조물의 충돌해석을 수행하였다.

직접해석을 통해 성형이력을 계산하려면 성형해석, 트리밍해석, 스프링백 해석을 모두 수행하여야 하며 해석시간이 상당히 많이 요구된다. 성형이력을 계산하는데 있어서, 변형이론을 근간으로 한 유한요소 역해석⁽⁷⁻¹⁰⁾을 이용하면, 짧은 계산 시간으로 최종 형상의 변형률 분포와 초기 블랭크의 설계를 수행할 수 있는 장점이 있다. 직접 해석으로 성형 이력을 계산할 경우, 요소의 뒤틀림으로 인하여 충돌 해석 시에 계산 시간이 증가하게 되므로, 격자의 재구성 (remeshing)이나 요소 유연화 방법과 같은 전처리 공정이 필요하게 된다. 유한요소 역해석은 최종형상의 격자가 변하지 않기 때문에, 성형해석을 통해 발생하는 격자의 뒤틀림을 보완하기 위한 격자의 재구성없이 바로 충돌 해석에 적용할 수 있는 장점이 있다. 차체용 구조부재는 대부분 수직 벽의 경사가 크고 형상이 복잡하여 기하학적 사상법(Geometric Mapping Method)⁽¹¹⁾, 선형 역사상법(Linear Inverse Mapping Method)⁽⁷⁾등과 같은 기존의 방법으로는 초기 추측치를 구하기가 난해하여 해석이 어려운 단점이 있다. 본 논문에서는 복잡한 형상이나 수직벽의 경사가 큰 경우에도 유한요소 역해석을 수행할 수 있도록 초기 추측치를 계산할 수 있는 직접격자 사상법(Direct Mesh Mapping Method, DMMM)을 제안하였다. 직접격자 사상법은 최종 형상에 맞는 초기 격자를 절점들로 구성하고 구성된 유한요소 격자를 다이와 펀치로부터 추출한 미끄럼 구속면에 직접 사상하여 초기 추측치를 계산하는 방법이다.

본 논문에서는 유한요소 역해석을 이용하여 S-rail의 성형공정을 해석하여 두께 변형률, 유효 소성변형률 등의 성형이력을 계산하였다. 직접해석에 이용되는 다이와 펀치로부터 미끄럼 구속면을 추출하고 직접격자 사상법을 이용하여 초기 추측치를 계산하였다. 계산된 성형이력을 이용하여 S-rail의 충돌해석을 수행하였고, 직접해석을 통해 계산한 성형이력을 이용한 충돌해석 결과와 비교하여 유효성과 신뢰성을 검증하였다.

2. 유한요소 역해석

유한요소 역해석은 모든 미지수를 초기 상태의 변수로 나타내어 초기 상태의 변형률 정보와 최종 상태의 형상으로부터 초기의 블랭크 형상과 최종 상태의 변형률 정보를 구하는 방법이다. 최종상태의 변형률 분포와 초기 블랭크 좌표는 포텐셜에너지 최소화 과정으로 얻어진다. 최종상태의 소성변형 에너지는 각 요소내의 에너지의 합으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_p(\mathbf{X}) = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega_e} \left(\int_0^{\epsilon'} \sigma \, d\epsilon \right) d\Omega$$

$$= \sum_{e=1}^E \int_{\Omega_e} \left(\int_0^{\epsilon'} \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\epsilon} D_{\alpha\beta} \epsilon_{\alpha} \epsilon_{\beta} \right) t dA \quad (1)$$

여기서, E는 격자 분할된 전체 구간 요소의 개수이고, ϵ_{α} 는 요소의 변형률, $D_{\alpha\beta}$ 는 항복조건식으로부터 유도되는 구성행렬을 나타낸다. 마찰에 의한 일은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$W_f(\mathbf{X}) = \sum_{e=1}^E \int_{\Gamma_e} \left(\int_0^{u'} t_f \cdot d\mathbf{u} \right) d\Gamma$$

$$= - \sum_{node} \left[\mu F_n \tanh(\alpha |U|) \frac{U}{|U|} \right] \quad (2)$$

$$U(\mathbf{X}) = \{ (\mathbf{x} - \mathbf{X}) - [\mathbf{N}' \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{X})] \} \quad (3)$$

여기서, t_f 는 마찰력, μ 는 마찰계수, F_n 은 수직력, U 는 접선방향의 변위, \mathbf{N}' 은 초기 상태의 절점에서의 수직벡터를 나타낸다. 판재의 최외곽에 작용하는 블랭크 홀딩력에 의한 일은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_f(X) = \sum_{e=1}^{E_t} \int_{\Gamma_e} \left(\int_0^{u_f} t_b \cdot d u \right) d\Gamma$$

$$= - \sum_{node} \left[\mu F_b \tanh(\alpha |U|) \frac{U}{|U|} \right] \quad (4)$$

여기서, F_b 는 절점에 작용하는 블랭크 홀딩력을 나타낸다. 포텐셜 에너지는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있고, 힘평형과 가상일의 원리로부터 포텐셜 에너지를 최소화하여 해를 구할 수 있다.

$$\Psi(X) = W_p(X) - W_f(X) - W_b(X) \quad (5)$$

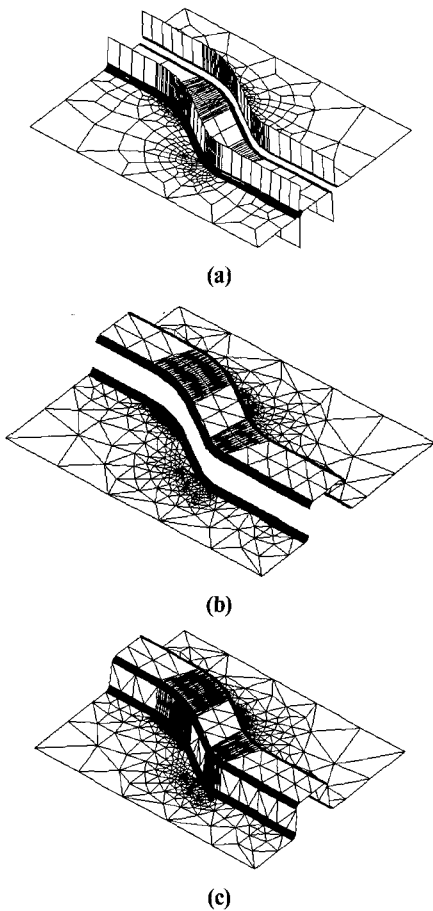


Fig. 1 Procedure of constructing sliding constraint surfaces for the S-rail forming process: (a) die and punch set; (b) initial set up; (c) sliding constraint surface

3. 직접격자 사상법을 이용한 초기추측치의 계산

기존의 기하학적 사상법이나 선형 역사상법과 같은 방법은 최종형상으로부터 사상이나 절점의 위치 변경과 같은 방법을 이용하여 평면상에 초기 추측치를 계산한다. 이와 같은 방법들은 최종 형상이 복잡하거나, 수직벽의 경사가 큰 경우, 굴곡이 심한 경우에는 적용이 불가능한 단점이 있다. 또한 다단계 해석 시에 중간 단계의 임의의 곡면 상에서는 초기 추측치를 계산을 수행하기가 난해하여 다단계 역해석에는 적용할 수 없다. 직접 격자 사상법은 최종형상의 격자에 맞는 직선들을 구성하고 이 직선들로 격자를 구성한 후, 직선들을 미끄럼 구속면에 직접 사상함으로써 초기 추측치를 계산하는 방법이다.

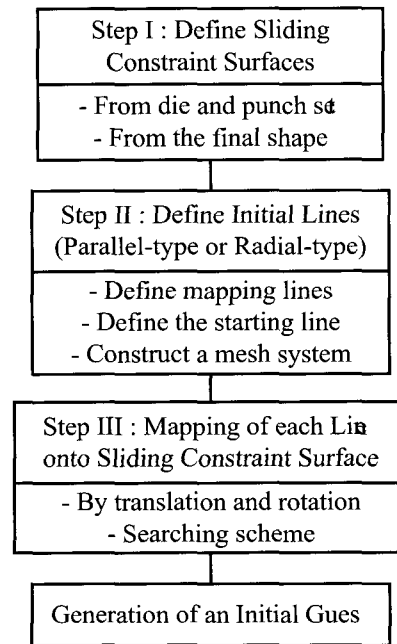


Fig. 2 Schematic procedure of a direct mesh mapping method

미끄럼 구속면은 실제 성형에 이용되는 다이와 펀치로부터 추출되고, 최종형상에 알맞은 방사형 또는 평행선형의 직선들을 정의한다. 최종형상의 격자에 맞게 시작 직선을 정의하고 격자를 구성한 후 구성된 격자를 직선의 절점별로 미끄럼 구속면에 위치시키게 된다. 다단계 해석 시에는 단계별 미끄럼 구속면만 정의해주면 중간 단계의 초기 추측치를 계산할 수 있게 된다. Fig. 1은 S-rail 성형 해석 시에 미끄럼 구속면을 추출하는 절차

를 나타낸 그림이다. Fig. 1 (a)는 성형 해석에 사용되는 다이와 펀치를 나타낸 것이고, Fig. 1 (b)는 벽면을 제외한 초기의 다이와 펀치를 해석 높이만큼 이동한 형상을 나타낸 것이다. Fig. 1 (c)는 벽면 부분의 격자를 상부의 펀치 반경과 하부의 펀치 반경에 동시에 접하도록 생성하여 구성된 미끄럼 구속면을 나타낸 것이다.

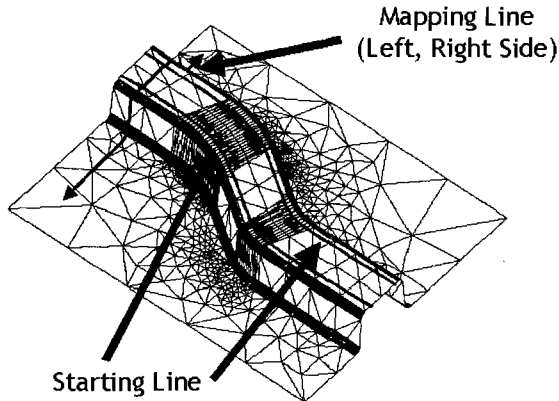


Fig. 3 Description of the starting line and mapping line for a direct mesh mapping method

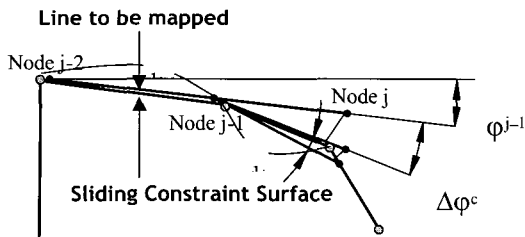


Fig. 4 Schematic diagram of a mapping procedure for each line

Fig. 2는 직접격자 사상법의 절차를 나타낸 것이다. 첫 번째 단계에서는 최종 형상이나 다이와 펀치로부터 미끄럼 구속면을 Fig. 1과 같은 절차를 거쳐서 유한요소 격자를 이용하여 구성한다. 두 번째 단계에서는 재료의 유동방향이나 최종 플랜지 형상에 맞는 방사선 또는 평행선들을 이용하여 초기 직선들을 정의 하고, 이 직선들로부터 초기의 격자 시스템을 구성하게 된다. Fig. 3은 사상 직선과 시작 직선을 도시한 것이다. 세 번째 단계에서는 각 직선상의 절점들을 회전 이동과 평행 이동을 통해 미끄럼 구속면에 위치시키는 작업을 수행한다. Fig. 4는 각 직선상의 절점을 미끄럼 구속면에 위치시키는 절차를 나타내는 그림이다.

i 번째 직선을 미끄럼 구속면 상에 배치하는 절차는 다음과 같다. 초기의 시작 절점 2개는 미끄럼 구속면에 투영하여 구해지게 된다. 절점 *j*-2와 절점 *j*-1이 미리 배치된 절점이고 절점 *j*를 새로 배치해야 할 절점이라고 하면 다음과 같은 절차로 미끄럼 구속면 상에 위치시킨다. 먼저, 절점 *j*를 절점 *j*-2와 절점 *j*-1이 이루는 각도 ϕ_{j-1} 만큼 절점 *j*-1을 기준으로 초기에 정해진 절점 *j*-1과 절점 *j*사이의 거리 d_j 만큼 회전시켜 배치한다. 국부 탐색과정을 거쳐서 절점 *j*를 위치시킬 미끄럼 구속면 상의 요소 *E*를 구하여 회전각을 구한다.

$$\Delta\phi_c = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}}{|\mathbf{a}| |\mathbf{b}|} \right) \quad (6)$$

where $\mathbf{a} = \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_{j-1}$, $\mathbf{b} = \mathbf{a} + \mathbf{n}_E$

여기서, \mathbf{x}_j 와 \mathbf{x}_{j-1} 은 각각 절점 *j*와 절점 *j*-1의 좌표를 나타내는 위치벡터이다. \mathbf{n}_E 는 미끄럼 구속면 상 요소의 수직벡터를 나타낸다. 절점 *j*의 새로운 좌표는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} x_j &= y_{j-1} + d_j \cos \theta_i \cos(\phi_{j-1} + \Delta\phi_c) \\ y_j &= y_{j-1} + d_j \sin \theta_i \cos(\phi_{j-1} + \Delta\phi_c) \\ z_j &= z_{j-1} + d_j \sin \Delta\phi_c \end{aligned} \quad (7)$$

초기에 배치된 직선은 최종형상에 따라 전체좌표계에서 기울기를 가질 수도 있게 된다. 컵 높이 방향을 *z*축으로 놓으면, θ_i 는 초기에 배치된 *i*번째 직선이 전체 좌표계의 *x*축과 이루는 각도를 나타낸다. 각 직선은 2차원적으로 d_j 와 ϕ_j 로부터 위치를 계산하고, 전체좌표계에서의 위치는 θ_i 를 이용하여 나타내게 된다. 개량된 절점 *j*의 좌표로부터 위의 탐색 작업과 회전 작업을 절점 *j*와 미끄럼 구속면 상의 요소사이의 거리가 0에 가까워 질 때까지 반복하게 된다. 모든 절점의 배치가 끝나면 최종 형상이 구해지게 되고, 초기 추측치는 초기에 배치된 직선으로부터 구해지게 된다.

직접격자 사상법은 최종 형상과 초기 추측치를 모두 계산해야 하는 단점이 있지만, 세장비가 큰 경우나 수직벽의 경사가 급격한 경우에도 적용할 수 있는 장점이 있다. 또한 다단계 해석의 경우에도 추가되는 세팅 작업 없이 각

단계의 중간 형상을 쉽게 구할 수 있다. 직접 격자 사상법을 이용하면 거의 대부분의 기하학적 형상에 대해서 유한요소 역해석을 위한 초기 추측치 및 중간 형상을 구할 수 있다.

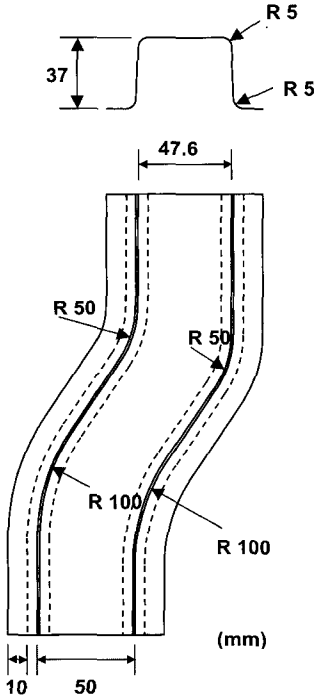


Fig. 5 Dimensions of the S-rail part

4. 유한요소 역해석을 이용한 성형이력의 계산

본 절에서는 유한요소 역해석을 사용하여 S-rail 성형 공정의 성형이력을 계산하였다. 미끄럼 구속면은 S-rail 성형 공정의 직접해석에 사용되는 다이와 펀치를 이용하여 구성하였다. 초기 추측치는 평행선 타입의 유한요소 격자를 이용하여 직접격자 사상법을 이용하여 계산하였다. Fig. 5는 해석에 사용된 S-rail의 크기 및 형상을 나타낸 것으로 NUMISHEET'96에서 성형해석 예제로 제시된 것이다. 수직벽의 경사가 크고, 다이와 펀치 사이의 간극이 작음을 알 수 있다. Fig. 6은 평행선 타입의 직선으로부터 구해진 초기 격자 시스템을 나타낸 것이고, Fig. 7은 직접격자 사상법으로 계산된 최종형상을 나타낸 것이다. 수직벽의 경사가 크고 곡면의 굴곡이 심한 형상임에도 불구하고, 최종 형상이 적절히 구해졌음을 알 수 있다. 초기 격자 시스템을 초기 추측치로 하여 일단계 유한요소 역해석을 최종 형상과 초기 추측치 사이에서 수행하였다. 초기 블랭크는 초기 두께 1mm의 IF 강판으로 수직이방성을 가정하

였고, 마찰계수는 0.15, 블랭크 홀딩력은 10kN으로 추가하였다. 해석에 사용한 재료의 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 158.0 + 526.0 \bar{\epsilon}^{0.233} \quad (\text{MPa}) \quad (8)$$

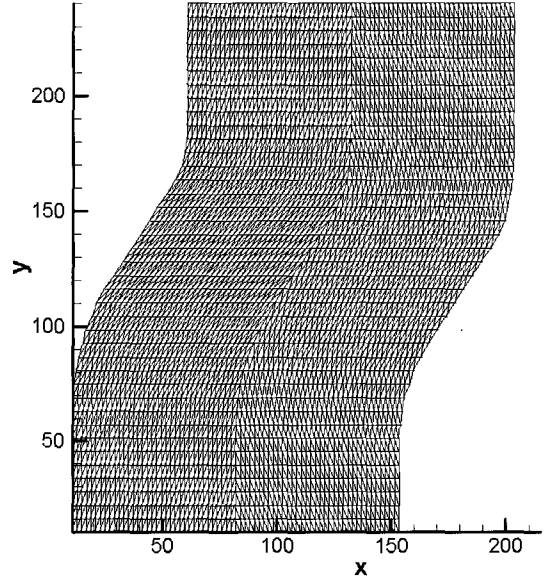


Fig. 6 Initial mesh system for the analysis of the S-rail forming

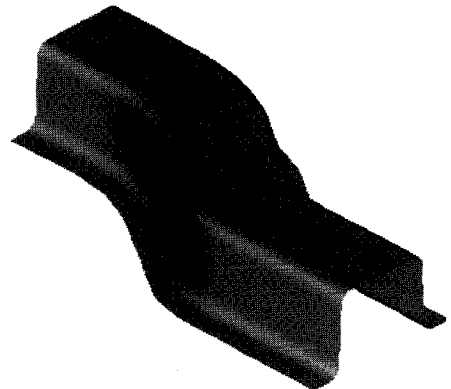


Fig. 7 Calculated final shape for the analysis of the S-rail forming

Fig. 8은 유한요소 역해석과 LS-DYNA3D를 이용하여 해석한 탄소성 유한요소 해석의 두께 분포를 비교한 것이다. 굴곡부에서의 변형이 집중되어 국부적으로 얇아지거

나 두꺼워지는 양상을 확인할 수 있다 Fig. 9은 단면 별로 두께 분포를 정량적으로 비교한 것이다. 대체적인 경향은 비슷하지만, 굴곡부에서는 역해석의 결과가 더 크게 예측되고 있고, 다른 부분에서는 직접해석의 결과가 더 크게 예측되고 있음을 알 수 있다.

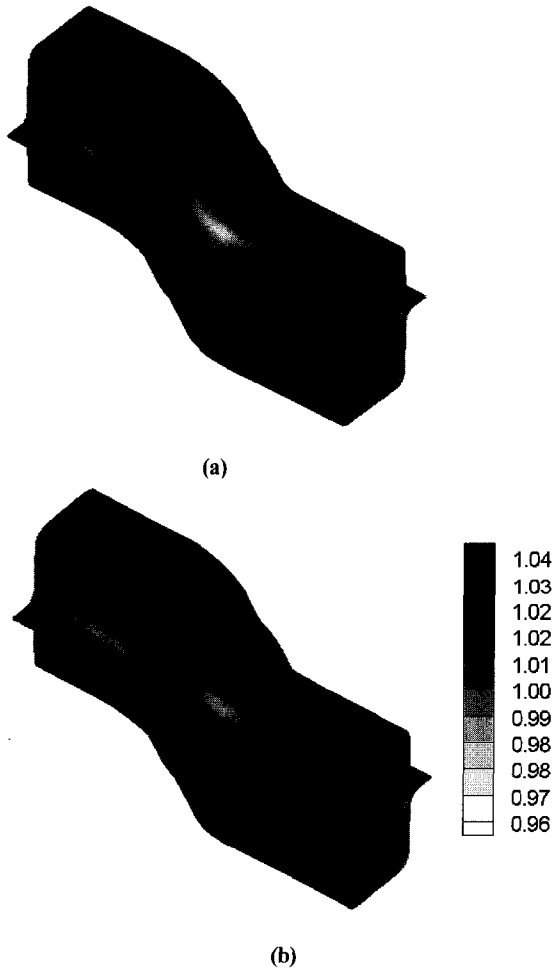
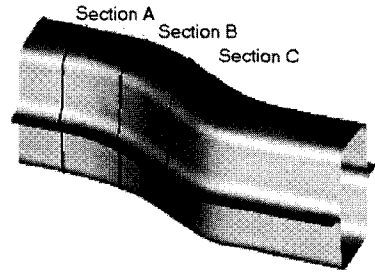
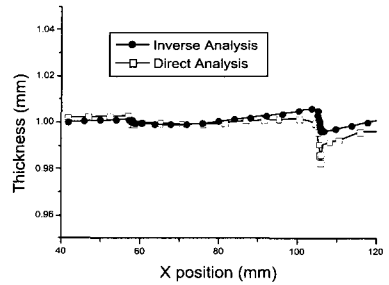


Fig. 8 Comparison of calculated thickness distribution: (a) from inverse analysis; (b) from direct analysis

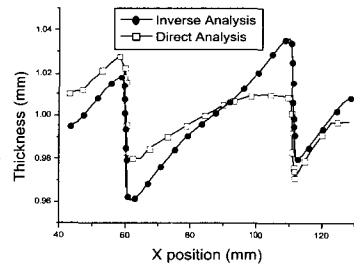
해석 결과를 통해서 직접격자 사상법이 수직벽의 경사가 큰 경우나, 세장비가 큰 경우에 대해서 초기 추측치를 계산하는데 매우 유용함을 알 수 있다. 유한요소 역해석의 CPU 시간은 HPC 320 SMP 시스템에서 33초가 소요되었고, 직접해석의 경우에는 초기 세팅 시간 및 트리밍 공정을 위한 세팅 시간을 제외하고 4302초가 소요되었다.



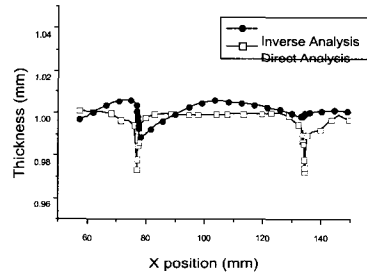
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 9 Comparison of calculated thickness distribution: (a) Section division; (b) along section A; (c) along section B; (d) along section C

5. 성형이력을 고려한 S-rail의 충돌해석

본 절에서는 유한요소 해석으로 구한 성형이력을 고려하여 S-rail의 충돌해석을 DYNA-3D를 이용하여 수행하였다. 성형해석으로 구한 S-rail의 상부와 하부의 플랜지를 접합하여 하나의 완성된 구조물로 모델을 설정하였다. S-rail의 끝단에서 강체가 48 km/h로 충돌하였을 경우 시간에 따른 변형 형상과 에너지 흡수율, 반발 하중을 비교하였다. 역해석 결과를 이용한 충돌해석의 경우는 성형이력을 고려하지 않은 경우와 두께 분포와 유효소성 변형률을 고려한 경우에 대해서 해석결과를 비교하였고, 직접해석 결과를 이용한 충돌해석의 경우는 성형이력을 고려하지 않은 경우와 변형률, 응력, 변형 형상 등의 전체 성형이력을 고려한 경우를 해석하였다.

Fig. 10은 충돌해석에 사용한 초기 형상을 나타낸 그림이다. 직접적자 사상법으로 구한 경우는 모델의 상부와 하부가 평평한데 비하여, 직접해석으로 구한 형상의 경우, 모델의 상부와 하부의 굴곡부에 주름진 형상이 있음을 알 수 있다. 이는 설계된 제품의 최종 형상으로부터 사상법을 통해 구한 형상과 직접 성형 해석을 통하여 구한 형상간의 차이를 의미하는 것이다. Fig. 11과 Fig. 12는 각각 역해석 결과와 직접해석의 결과를 이용한 충돌해석의 경우 시간에 따른 변형 양상을 비교한 것이다. 대부분의 변형이 굴곡부에 집중되어 플랜지 부분과 측면부가 접히는 현상이 발생하고 있다. 각각의 경우에서 성형이력을 고려하지 않은 경우는 모델의 뒷부분의 변형이 더 많은데 비하여, 성형이력을 고려한 경우는 충돌면인 모델의 앞부분의 변형이 더 일어나고 있음을 알 수 있다. 이는 성형이력의 고려 유무에 따라서 변형 메커니즘이 달라 질 수 있음을 의미하는 것이다. 직접해석의 경우에는 S-rail의 상부와 하부에서 주름진 형상이 초기의 조건으로 주어지므로, 변형 양상이 역해석의 경우와는 다름을 알 수 있다. 직접해석의 경우가 초기의 주름진 부분에서 변형이 집중되고 있음을 알 수 있다. 역해석의 격자를 직접해석의 격자와 일치시킨 경우는 거의 비슷한 해석결과를 얻을 수 있었는데, 실제 역해석을 초기의 성형성 평가 및 성형 효과의 계산에 이용할 때에는 직접해석으로 구해진 최종형상이 존재하지 않으므로 본 논문에서는 두가지 경우의 해석결과가 달라지는 양상을 보이고 있다.

Fig. 13은 흡수된 에너지를 비교한 것이고, Fig. 14는 수직벽에서의 반발 하중을 비교한 것이다. 역해석의 결과와 직접해석의 결과가 약간의 차이를 보이고 있는데, 이는 직접해석의 성형 이력을 고려하여 해석한 경우 초

기의 주름진 성형 형상을 고려하고 있어 충돌 양상이 달라지기 때문이다. 성형이력을 고려하지 않은 경우에 비해서 성형이력을 고려한 경우가 에너지 흡수율이 약 15% 정도 차이를 보이고 있음을 알 수 있고, 경량 차체 설계를 위해서는 충돌 해석 시에 성형이력을 반드시 고려해야 함을 알 수 있다.

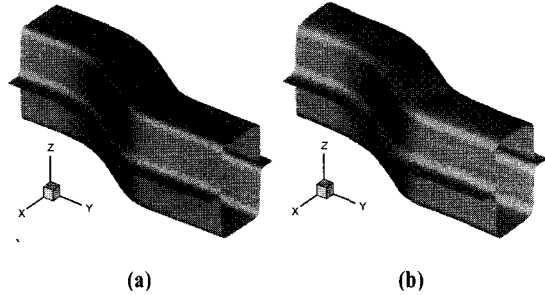


Fig. 10 Initial shape for the crash analysis: (a) mesh from the DMMM; (b) mesh from the direct analysis

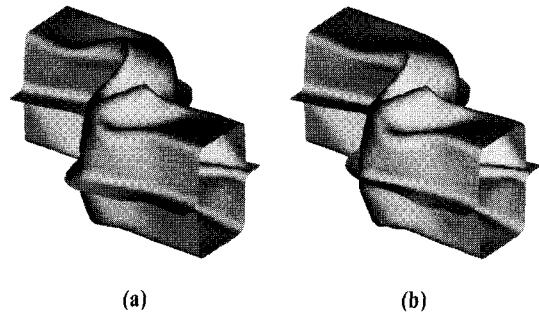


Fig. 11 Deformed shape considering forming effects from the inverse analysis: (a) without forming effects; (b) with forming effects

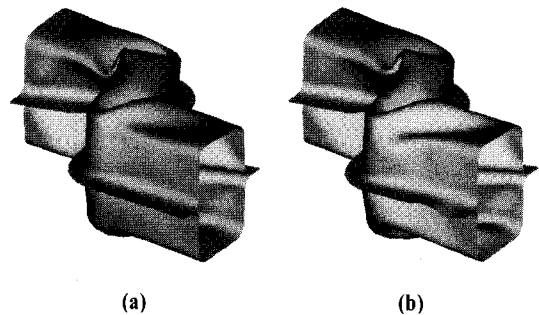


Fig. 12 Deformed shape considering forming effects from the direct analysis: (a) without forming effects; (b) with forming effects

참 고 문 헌

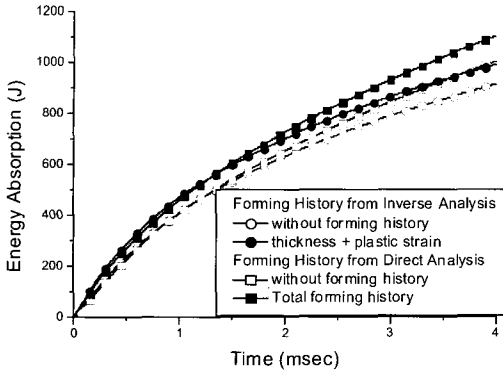


Fig. 13 Comparison of the absorbed energy

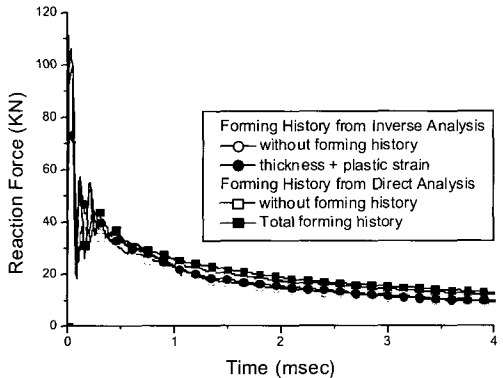


Fig. 14 Comparison of the reaction force normal to the wall

6. 결론 및 토론

본 논문에서는 직접격자 사상법을 제안하여 유한요소 역해석을 위한 초기 추측치를 계산하였다. 제안된 직접 격자 사상법을 이용하여 S-rail의 성형이력을 유한요소 역해석을 이용하여 해석하였고, 직접해석의 결과와 비교 하였다. 계산된 성형이력을 적용하여 충돌해석을 수행하여 유한요소 역해석을 이용한 성형이력 계산의 유효성을 확인하였다. 유한요소 역해석을 이용하면 해석시간의 현저한 감소 뿐 아니라, 요소의 뒤틀림으로 인한 격자 재구성을 하지 않고 바로 충돌해석을 수행할 수 있는 장점이 있다. 성형이력을 고려한 경우가 변형 메커니즘이 달라지고, 에너지 흡수율도 커지므로 경량 차체의 설계를 위해서는 충돌해석 시에 성형이력의 고려가 필요함을 확인하였다.

- (1) Suh, Y. S., Kim, Y. H. and Kim, S. W., 1996, "Virtual Manufacturing Applications on the Integrated Structural Design of Sheet-Forming Products", NUMISHEET'96, pp. 144-150.
- (2) Kellicut, A., Cowell, B., Kavikondala, K., Dutton, T., Tregbu, S. and Sturt, S., 1999, "Application of the Results of Forming Simulation in Crash Models," proc. NUMISHEET'99, pp. 509-514.
- (3) Mikami, H., Suzuki, H., Ishizawa, M. and Matsuoka, Y., 1999, "Crash Simulations Considered Influence of Stamping," proc. HANPAM99, pp. 189-200.
- (4) Lee, S. H., Han, C. S., Oh, S. I. and Wriggers, P., 2001, "Comparative crash simulations incorporating the results of sheet forming analyses", Engineering Computations, Vol. 18, pp. 744-758.
- (5) Kim, K. P., Huh, H. and Kim, S. H., 2001, "Collapse Analysis of an Auto-body Structure by a Finite Element Limit Method", proc. 6th USNCCM, pp. 35.
- (6) Kang, W. J. and Huh, H., 2001, "Crash Analysis of Auto-Body Structures Considering the Strain-Rate Hardening Effect", Int. J. Automotive Technology, Vol. 1, pp. 35-41.
- (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. Mater. Process. Technol. Vol. 80-81, pp. 76-82.
- (9) 김승호, 김세호, 허 훈, 2001, "다단계 유한요소 역해석을 이용한 세장비가 큰 직사각형 성형 공정의 해석", 한국소성가공학회지, Vol. 10, No. 2, pp. 389-395.
- (10) Kim, S. H., Kim, S. H. and Huh, H., 2001, "Finite Element Inverse Analysis for Design of Intermediate Dies in Multi-stage Deep-drawing Processes with Large Aspect Ratio", J. Mater. Process. Technol., Vol. 113, pp. 779-785.
- (11) Sowerby, R., Duncan, J. L. and Chu, E., 1986, "The Modelling of Sheet Metal Stamping", Int. J. Mech. Sci., Vol. 28, pp. 415-430.