

판재성형의 탄성복원해석에 대하여

조진우* · 정완진*

(1997년 6월 13일 접수)

On the Springback Analysis of Sheet Metal Forming

J.W.Cho and W.J.Chung

Abstract

The analysis of the springback is done based on the stress of sheet after forming. Therefore, it is important to get the accurate stress from forming analysis. In this study, some parameters that influence on the accuracy of the springback estimation are investigated. Discretization of sheet and tools, choice of penalty constant and damping in contact treatment, and tool speed scaling are chosen as parameters. As a numerical example, the 2D draw bending benchmark problem of the NUMISHEET'93 is used. Also, the springback results of the s-rail benchmark problem of the NUMISHEET'96 are presented.

Key Words : Springback, Stress Relaxation, Finite Element Method, Sheet Metal Forming

1. 서론

판재성형에서 탄성복원현상이란 재료가 금형에 의한 강제적인 변형을 겪은 후 재료가 금형에서 추출되면서 새로운 정적평형상태를 만족하기 위해 변형이 생기는 현상이다. 탄성복원량은 성형품의 기하학적인 형상과 재질 그리고 성형방법 등에 좌우되며 때에 따라서는 변형량이 과다하여 제품공차를 만족하지 못할 수도 있다. 항복응력이 크고 탄성계수가 작은 재료일수록 탄성복원량이 크기 때문에 고강력강(high strength steel) 또는 알루미늄 합금(aluminum alloy)을 점차 많이 사용하고 있는 현재의 추세에 비추어 볼 때, 탄성복원량의 정확한 예측은 금형설계에 매우 중요한 요소임에 틀림없다.

탄성복원해석은 성형해석의 결과로 얻어지는 소재내의

응력에 기초하여 수행된다. 현재 주로 활용되는 성형해석 프로그램은 크게 외연적 시간적분법(explicit time integration)과 내연적 시간적분법(implicit time integration)에 의한 프로그램으로 구분되며 문제의 특성에 맞게 선택되어 사용된다. 동적외연적유한요소법(dynamic explicit FEM)은 해의 수렴성이 보장되며 문제를 풀기 위한 계산시간 및 기억장소가 적다는 장점이 있으나 정적평형(static equilibrium)을 만족하지 않는 결과를 준다는 단점을 가지고 있다. 반면에 정적내연적유한요소법(static implicit FEM)은 비선형성이 포함된 문제의 경우 수렴된 해를 얻기가 어렵고 연립방정식을 풀기 위한 계산시간 및 기억장소를 많이 필요로 한다는 단점을 가지고 있으나 정적 평형상태를 만족하는 결과를 준다는 장점을 가지고 있다. 이러한 상반된 장단점을 가지고 있는 두가

* 삼성종합 기술원

지 프로그램은 풀고자 하는 문제에 따라 적절히 선택되어 사용해야 하는데 재료의 비선형성이 크고 많은 접촉(contact)이 수반되며 복잡한 형태의 기하학적 형상을 표현해야 하는 문제의 경우에는 대부분 동적외연적유한요소법을 사용하게 된다. 그러나 동적외연적유한요소법은 앞서 지적했듯이 정적 평형상태를 만족하는 해를 주지 않고 사용자가 결정하는 해석인자에 따라 응력 계산결과가 큰 차이를 보이게 된다. 따라서 성형해석의 응력결과를 토대로 수행되는 탄성복원해석도 결과에서 큰 차이를 보일 수 밖에 없는 것이다.

이에 대해 Mattiasson⁽¹⁾은 NUMISHEET'93의 평면변형률 드로우 벤딩(2d draw bending benchmark)⁽²⁾을 예로 들어 동적외연적유한요소법을 이용한 성형해석시 발생하는 응력완화(stress relaxation) 현상이 탄성복원 해석결과에 주는 영향에 대하여 기술한 바 있다. Mattiasson의 연구에서는 소재의 유한요소 크기와 가공경화 모델의 선택 그리고 동적 효과(dynamic effects) 등에 대한 논의가 이루어 졌으며 기본적인 접촉처리 방법으로서 금형을 유한요소화하지 않고 CAD 곡면으로 사용하는 방법을 사용하였다. 그러나 일반적인 판재성형 해석의 경우, 금형면은 상당히 복잡한 기하학적인 형태를 지니게 되어 이를 표현하기 위해서는 많은 곡면이 필요하기 때문에 CAD 곡면을 해석에 그대로 이용하는 접촉처리 방법은 과다한 해석시간을 소요하게 되고 해의 수렴성문제도 있어 실용적인 면에서는 아직 한계를 지니고 있다. 또한 동적외연적유한요소법에서 사용되는 접촉처리에는 일반적으로 벌칙방법(penalty method)이 사용되는데 벌칙상수의 선택은 해석결과에 상당히 민감한 요소로서 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

이에 본 연구에서는 금형면을 유한요소로 표현하고 벌칙함수법을 사용하는 접촉처리방법을 사용하는 경우, 정확한 응력상태를 구하기 위한 해석인자의 적절한 선택방법에 대하여 연구하였다. 사용한 예제는 NUMISHEET'93의 평면변형률 드로우 벤딩이며 응력완화 현상의 발생에 민감하다고 판단되는 중요 인자들에 대한 특성을 알아보기로 한다. 또한 분석된 인자들을 고려하여 수행된 NUMISHEET'96의 벤치마크(benchmark)인 s-rail⁽³⁾의 성형해석과 탄성복원 해석결과를 소개한다.

본 연구에서 사용된 성형해석 프로그램은 동적외연적유한요소법을 사용하는 LS-DYNA3D⁽⁴⁾이며 탄성복원 해석은 직접 개발한 내연적 프로그램⁽⁵⁾을 사용하여 LS-

DYNA3D에서 최종 응력상태를 넘겨받아 탄성해석으로 수행되었다.

2. 평면변형률 드로우 벤딩 벤치마크 (NUMISHEET'93)

평면변형률 드로우 벤딩은 형상에 의한 구속이 없어 큰 탄성복원량을 유발하며 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 드로잉(drawing) 된 벽면부위에서 발생하는 감김(curl) 현상이 특징적이다. 평면변형률 드로우 벤딩에서는 잔류모멘트에 의한 감김 현상이 탄성복원량을 결정짓는 가장 큰 요인이기 때문에, 정확한 탄성복원 해석을 하기 위해서는 이 현상을 잘 모사할 수 있어야 한다.

본 연구에서 평면변형률 드로우 벤딩 문제를 예제로 정한 이유는, 감김 현상은 동적외연적유한요소법을 이용한 해석에서 전술한 응력완화현상으로 인해 정확한 결과를 얻기가 어려우며 그로 인해 탄성복원량이 대부분 과소평가되는 경우가 많기 때문에 이러한 오류를 범하지 않기 위한 해석인자의 적절한 선택을 연구하기 위해서이다. 또한 형상이 간단하여 응력을 해석적으로 쉽게 예측할 수 있으므로 해석에서 구해지는 응력의 오차를 평가할 수 있기 때문이다.

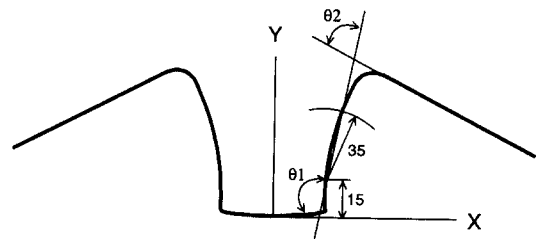


Fig. 1 Final deformed shape of the NUMISHEET'93 2D drawbending benchmark problem

2.1 문제 정의

Fig. 2는 NUMISHEET'93의 평면변형률 드로우 벤딩 문제의 기하학적 형상을 보여주는데 실제 해석은 대칭성을 이용하여 전체의 1/2 모델에 대하여 수행되며, 계산시간의 단축을 위하여 평면변형률(plane strain)의 경계조건으로 Fig. 3의 모델을 이용하여 수행되었다. 사용된 해석프로그램은 LS-DYNA3D⁽⁴⁾이며 금형을 이산화하여 유한요소를 이용한 접촉처리방법을 사용하였다.

실제 NUMISHEET'93 benchmark에서는 재료와 홀

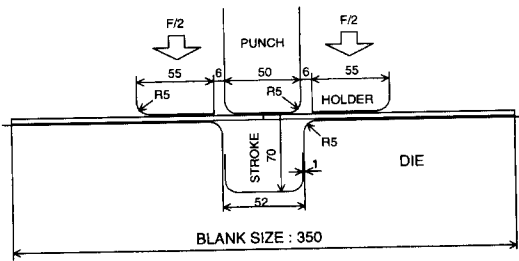


Fig. 2 Geometry description of the NUMISHEET'93 2D drawbending benchmark problem

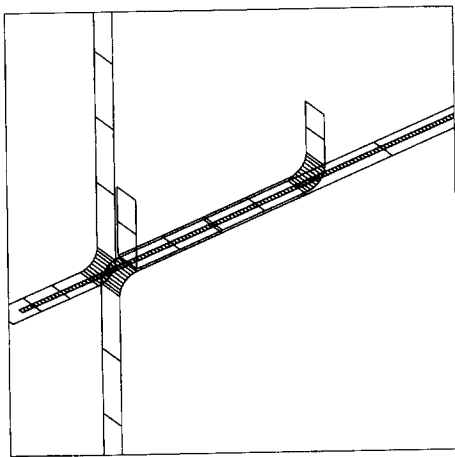


Fig. 3 Finite element model of the NUMISHEET'93 2D drawbending benchmark problem

당력(blank holding force)에 따라 총 6가지의 해석이 수행되었으나 본 연구에서는 19.6kN의 홀딩력을 이용한 두께 0.74 mm의 고강력강(high strength steel) 경우를 해석하였다. 재료 물성치는 mattiasson⁽¹⁾의 연구와 같이 응력과 변형률와의 상관관계를 다음의 식으로 정의하여 탄소성해석을 수행하였다. 이때 가공경화 모델로는 등방성 가공경화(isotropic hardening) 모델을 사용하였다.

$$\sigma = \sigma_y + H \cdot \epsilon_p, \quad \sigma_y = 302 \text{ MPa}, H = 1149 \text{ MPa}$$

본 해석에서 관심을 두고 응력을 관찰한 부분은 변형 전의 x 좌표가 40 mm 인 홀더와 접촉하는 소재표면이다. 해석에서는 두께방향으로 5개의 적분점을 설정하였는데 이중 홀더에 가장 가까운 적분점에서의 응력을 관찰한다.

Fig. 4는 본 예제에서 예상되는 펀치의 진행거리에 따

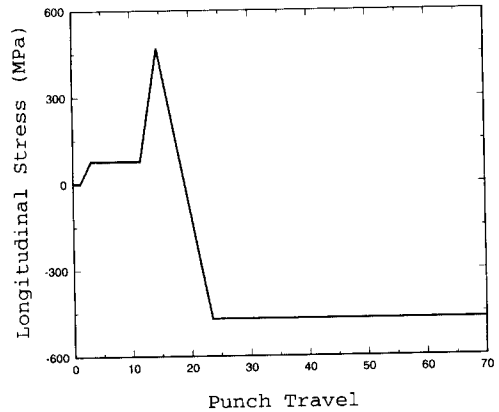


Fig. 4 Expected stress history in a point on the outer surface of the sheet strip

른 응력의 추이를 나타낸 것이다. 응력추이의 예상에 관한 자세한 내용은 mattiasson⁽¹⁾의 연구에도 기술되어 있으나 간략히 설명하면 먼저 펀치가 움직이기 시작할때 관찰점에는 소재와 금형간의 마찰력에 의하여 약간의 인장응력이 발생한다. 그 후 소재가 드로잉되면서 관찰점이 다이의 드로우 반경으로 들어가면 굽힘에 의한 인장응력이 발생하면서 소성변형을 일으킨다. 펀치가 진행함에 따라 관찰점은 다이의 수직벽부분으로 빠져나오게 되는데 이때 압축응력을 받으면서 다시 소성상태로 들어가게 된다. 그 후 관찰점은 계속 다이의 수직벽을 따라 움직이는데 이때 추가적인 응력변화가 발생하지는 않으며 Fig. 4의 응력과 같이 발생된 크기의 압축응력을 그대로 유지할 것이다. 그러나 실제 해석을 통해 구해지는 응력은 압축응력이 유지되지 않고 작아지는 경향을 보인다. 이러한 응력완화 현상은 성형후 소재에 발생하는 굽힘 모우멘트의 값을 실제보다 작게 하기 때문에 탄성복원 해석을 하더라도 과소평가된 결과를 얻게 된다.

2.2 응력예측에 영향을 미치는 주요 해석인자

동적외연적유한요소 프로그램에서 사용되는 해석인자 중 응력완화 현상에 가장 민감한 5가지 인자를 선정하였는데 다음과 같으며 괄호안은 해석에 사용된 기본값을 나타내었다.

- 소재의 유한요소 크기 (1 mm)
- 다이 반경부에서의 유한요소 개수 (9개)
- 접촉면에 대한 벌칙상수 (LS-DYNA⁽⁴⁾ 기본값의 10%)
- 접촉면에 대한 수직방향의 감쇄계수 (임계감쇠값의 40%)

- 펀치의 속도 (5M/sec)

위에서 선정된 5가지의 인자들 중 소재 유한요소 크기와 펀치의 속도에 대해서는 mattiasson도 이미 연구한 바 있으며 특히 펀치 속도의 경우 그 외에도 많은 연구결과들이 발표되어 있다. 그러므로 본 연구에서 중점을 두고 토의될 인자는 나머지 3가지이며 이들은 특성상 접촉치리와 깊은 관계를 가지고 있다.

동적외연적 유한요소법에서 응력완화는 소재 또는 금형을 이산화(discretization)하여 유한요소로 해석함으로써 생기는 현상이다. 금형을 이산화하게 되면 다이의 곡면부는 유한요소로 모델링되기 때문에 불연속적인 기울기를 가지게 되며 따라서 이를 통과해야 하는 소재의 절점(node)은 불연속적인 거동을 보이게 된다. 이에 따라 실제로는 존재하지 않는 굽힘파(bending wave)가 생성되게 되며 이 파동은 소재를 따라 관찰점까지 다다르게 된다. 이러한 굽힘파는 관찰점의 응력상태를 변화시켜 응력완화를 일으킨다. 응력완화의 현상은 mattiasson⁽¹⁾의 연구에 자세히 기술되어 있다. 따라서, 응력완화의 크기를 줄이기 위해서는 이산화에 의한 오차를 줄여야 한다. 소재의 요소크기와 다이 반경부를 묘사하기 위한 요소 개수는 이산화에 따른 오차에 직접적인 영향을 주며 굽힘파 발생의 원인이 된다.

또한 같은 유한요소 모델이라도 접촉치리방법에 따라 발생하는 굽힘파의 크기가 달라질 수 있는데 본 연구에서는 벌칙함수법을 사용하였으므로 벌칙상수와 감쇄력의 크기를 해석인자로 선택하였다. 벌칙함수법을 사용하는 접촉치리시 소재의 절점이 금형에 침투하면 금형면의 수직 방향으로 벌칙힘(penalty force)을 가하게 되는데 힘의 값은 절점과 금형면을 연결하는 벌칙상수와 침투깊이를 곱하여 결정된다. 이 힘이 필요이상으로 크면 역시 굽힘파의 크기를 증가시켜서 더 큰 응력완화 현상을 초래하게 되므로 최소한의 벌칙상수를 사용하는 것이 바람직하다. 이때 침투깊이가 과다하면 문제의 경계조건에서 크게 멀어지게 되므로 가능한 침투깊이를 일정값이하로 유지하여야 한다. 따라서 벌칙상수는 이와같은 두가지 요소를 고려하여 적절하게 선택하여야 할 것이다. 감쇄력을 이용하여, 발생한 굽힘파가 다른 부분에 전파되기 전에 감쇄시키는 것도 유효한 방법이 될 수 있다. 작용된 벌칙힘은 금형에 침투한 절점을 금형의 바깥쪽으로 밀어내는 역할을 하는데 이러한 과정이 반복되면서 절점은 불안정한 진동을 하게 된다. 그러므로 진동을 감쇄시키기 위하여 감쇄력을 부가한다. 해석 프로그램에서는 소재 절점의 집중질량과 벌

칙상수에 의하여 임계감쇠값이 계산되며 사용자는 해석에 필요한 인자값으로 임계감쇠값에 대한 백분율을 입력한다. 그러나 너무 과다한 감쇄력의 설정은 소재의 실제 거동과 부합되지 않는 결과를 초래할 수 있기 때문에 유의하여야 한다.

동적유한요소법에서는 시간증분이 매우 작으므로 박판 급속성형과 같이 느린 공정을 실제의 시간척도로 계산하면 계산시간이 과다하게 소요되므로 실제속도보다 금형의 작동속도를 증가시켜 해석을 수행하게 된다. 금형속도가 크면 관성력이 커져서 다이의 반경부를 소재가 지날 때의 불연속적인 거동이 커질 수 있으며 따라서 굽힘파의 크기도 증가하게 된다. 따라서 준정적 과정인 판재성형을 해석하기 위해서는 적절한 금형의 속도를 설정해야 한다. 이에 대하여 정완진⁽⁶⁾ 등은 탄성에너지에 대한 운동에너지의 비를 참고하여 동적외연적 유한요소법에서 정확한 응력을 예측하고자 할 때 금형속도를 설정하는 기준에 대해 제안한 바 있다.

2.3 선택된 해석인자의 영향 분석

소재 요소의 크기와 다이 반경부의 요소개수에 따른 응력 계산결과를 Fig. 5, 6에 나타내었다. 소재 요소의 크기가 작고 다이 반경부 요소가 많을 수록 응력완화 현상의 발생이 억제되어 Fig. 4에서 예측된 응력추이에 보다 가까운 결과를 얻을 수 있다. 여기서 응력완화 현상이 탄성복원 해석에 주는 영향을 보기 위하여 Fig. 5의 3가지 최종응력상태를 가지고 탄성복원 해석을 실시한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 응력완화 현상이 작은 성형해석 결

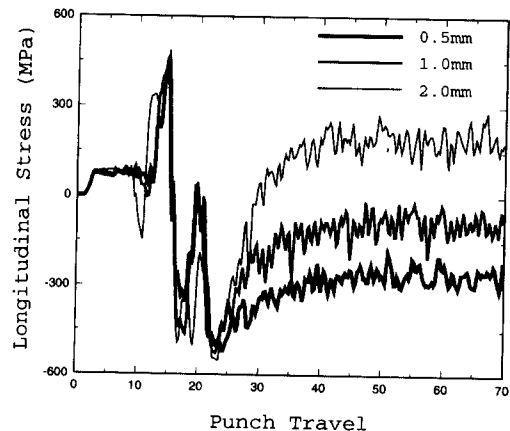


Fig. 5 Stress histories in a point on the outer surface for different element size of the sheet strip

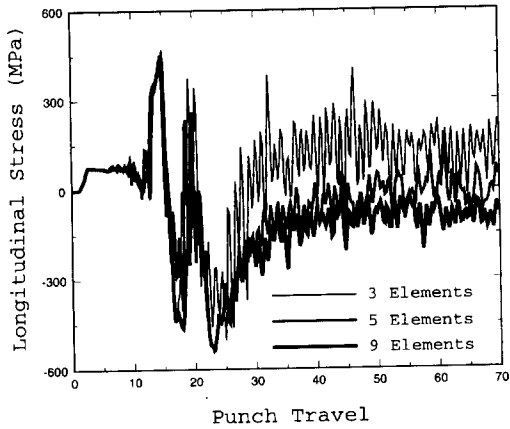


Fig. 6 Stress histories in a point on the outer surface for different element size of die radius

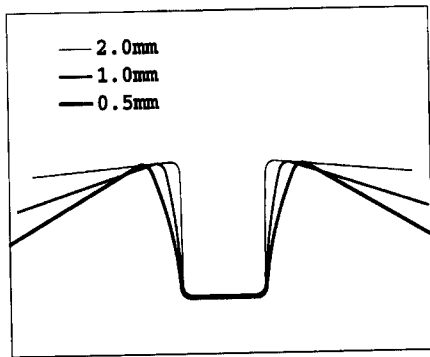


Fig. 7 Deformed shapes from springback analysis for different element size of the sheet strip

과가 감김 현상을 더 잘 표현하는 탄성복원 결과를 준다는 것을 볼 수 있다. 그러므로 정확한 탄성복원 해석을 위해서는 성형해석시에 발생하는 응력완화 현상의 발생을 억제해야 한다. 금형 이산화 오차가 응력결과에 주는 영향을 좀 더 살펴보기 위하여, Fig. 6의 경우에서 다이 반경부에 18개의 요소를 사용하면 9개의 요소를 사용한 경우에 비하여 응력완화가 상당히 감소된 응력추이(Fig. 8)를 얻을 수 있는데, 이 사실은 금형의 이산화에 의한 오차가 응력 예측에 큰 영향을 주는 인자라는 것을 보여준다.

Fig. 9에서는 벌칙상수의 값에 따른 응력추이를 볼 수 있는데 과도한 벌칙상수는 더욱 큰 응력완화를 유발할 수 있다는 것을 알 수 있다. 또 Fig. 10은 감쇄력의 변화에 따른 응력완화 현상을 보여준다. Fig. 9 및 Fig. 10의 결과로부터 벌칙함수법에서 벌칙상수 및 감쇄력의 선택이

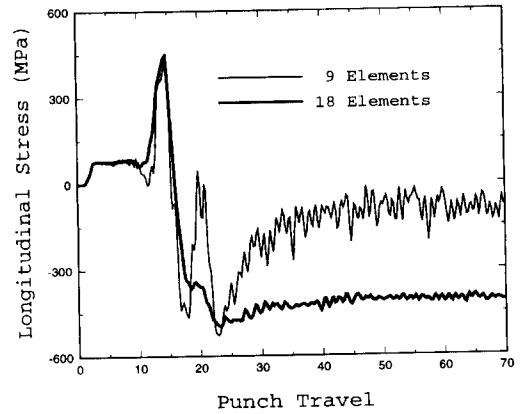


Fig. 8 Stress histories in a point on the outer surface in the case that 18 elements are used for die radius

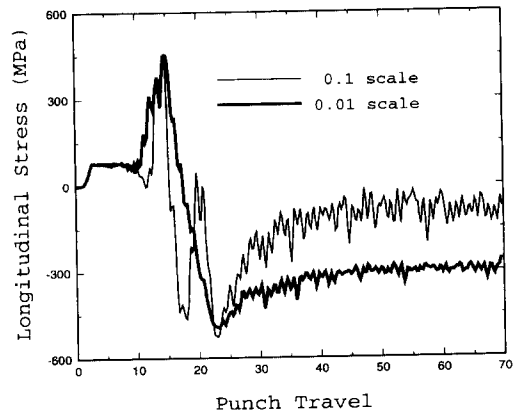


Fig. 9 Stress histories in a point on the outer surface for different penalty constant scale factor

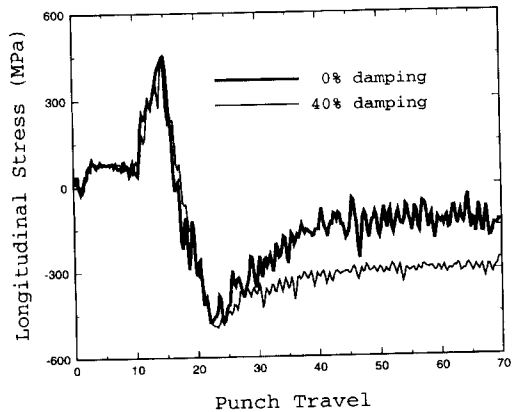


Fig. 10 Stress histories in a point on the outer surface for different contact damping force

응력예측에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

이상의 결과에서 볼 때, 성형해석에서 정확한 응력의 계산에는 접촉처리가 중요한 요소임을 알 수 있다. 실제의 형상과 이산화된 유한요소 해석모델의 형상 사이에 존재하는 오차는 접촉처리에 실제로는 존재하지 않는 소재의 거동을 만들게 되며 이것이 응력완화라는 현상을 초래하므로 소재와 금형의 이산화 작업에는 각별한 주의를 필요로 한다. 그러나 소재의 유한요소 크기는 해석시간에 큰 영향을 주기 때문에 원하는 만큼 줄일 수 없는 것이 사실이므로 금형의 이산화 오차를 줄이는 노력이 필요하다. 또

한 벌칙방법(penalty method)를 사용하는 접촉처리의 경우에는 과도한 침투(penetration)가 일어나지 않는 수준의 벌칙상수를 설정하고 적절한 감쇄력을 부여하는 것이 중요하다.

2.4 그밖의 인자들

2.3절에서 검토된 인자들 외에 응력추이에 영향을 줄 수 있는 인자로는 해석에 사용되는 접촉처리법을 들 수 있다. 소재 절집과 금형면과의 접촉처리 방법에는 여러 가지가 있으나, 금형면을 유한요소로 이산화시킨후 접촉처리를 하는 방법과 금형의 CAD 곡면을 그대로 접촉처리하는 방법이 있다. CAD 곡면을 사용하여 접촉처리를 하는 경우 금형의 이산화에 의한 오차가 발생하지 않으므로 응력완화 현상은 현저히 줄어들 것이다. Fig. 11은 두가지 접촉방법을 사용한 경우의 해석결과를 나타내고 있으며 괄호안의 숫자는 CRAY-YMP에서 사용된 해석시간을 나타낸다. 이 경우, 유한요소를 이용한 접촉처리의 경우 0.01의 벌칙상수를 사용하고 다이 반경부에 18개의 요소를 사용하였는데 해석결과는 비슷하지만 CAD 평면을 이용한 접촉처리의 경우 약 60% 이상의 계산시간이 더 필요하다는 것을 알 수 있다. 그러므로 유한요소를 이용하는 접촉처리방법을 사용하되 2.3절에서 검토된 인자들의 값을 적절히 선택하여 사용한다면, 정확한 응력결과는 물론 CAD 곡면을 이용한 접촉처리의 경우보다 효율적인 해석을 할 수 있을 것이다.

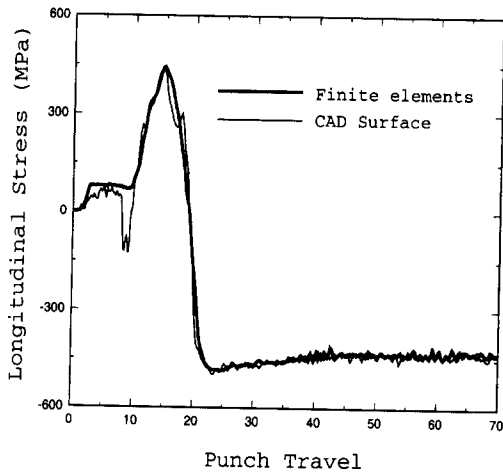


Fig. 11 Stress histories according to contact treatment methods

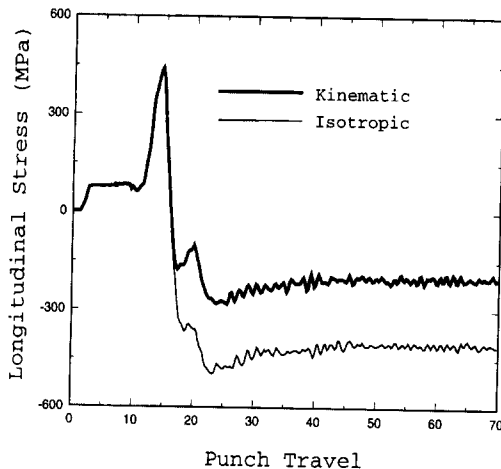


Fig. 12 Stress histories for different hardening models

가공경화 모델(hardening)은 응력완화 현상과는 직접적인 관계가 없지만 응력의 정확도에 영향을 줄 수 있는 인자로서 본 연구에서 사용한 재료 모델의 경우 LS-DYNA3D에는 등방성(isotropic)과 동적(kinematic) 두가지의 가공경화 모델이 있다. 일반적으로 실재료는 동적 가공경화 모델에 더 가까운 거동을 보이기 때문에, 응력완화가 없다고 가정하면 등방성 가공경화 모델을 사용하여 계산되는 탄성복원량은 실제 복원량보다 과대평가될 수 있으므로 동적 가공경화 모델을 사용해야 정확한 결과를 얻을 수 있다. Fig. 12은 두가지 가공경화 모델을 이용한 응력 계산결과를 나타내는데 동적 가공경화 모델의 경우 항복곡면(yield surface)이 이동했음을 볼 수 있다.

3. S-rail 벤치마크 (NUMISHEET'96)

평면변형을 드로우 벤딩 문제에서 고찰된 응력완화의 인자들에 주의하여 좀 더 복잡한 형상인 s-rail 문제를 풀

어보았다. 이 문제는 기하학적 형상에 의한 구속때문에 평면변형을 드로우 벤딩 문제에 비하여 탄성복원량이 작다. 그러므로 가장 탄성복원량이 큰 경우인 알루미늄 소재를 10KN의 홀딩력으로 성형하는 경우에 대하여 해석하였다.⁽⁷⁾

3.1 문제 정의

Fig. 13는 탄소성 성형해석을 위한 금형의 유한요소 모델이며 Fig. 14와 15는 소재의 유한요소 모델을 나타낸다.

소재의 물성은 수직이방성을 고려하였고 압연방향과의 각도에 따른 응력과 변형을 관계를 평균하여 입력하였으며 금형의 유한요소 모델은 NUMISHEET 학회에서 제공된 것을 그대로 사용하였다. 참고로 이때 다이의 반경부는 9개의 요소를 사용하여 모델링되어 있다. 해석에 사용된 펀치속도는 5M/sec, 벌칙상수는 0.01이다.

NUMISHEET'96에 제출된 해석결과들을 살펴보면 s-rail의 소성변형률(plastic strain)은 대체로 실험과 일치하는 경향을 보이는 반면 탄성복원량은 평면변형을 드로우 벤딩 문제와 마찬가지로 실험에 비하여 해석결과가 대부분 과소평가되어 있음을 알 수 있다. 이것은 변형률보다는 응력을 정확히 계산하기가 어렵다는 것을 의미하며, 앞에서 이미 지적한 응력완화의 영향때문이라고 생각된다.

필자가 NUMISHEET'96에 제출한 결과는 Fig. 14의 모델(medium mesh, 6000 elements)을 이용한 것으로 이 모델의 요소크기는 대략 2.7 mm로서 드로잉되는 벽부위의 요소 크기를 줄일 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 전체적으로 요소의 크기를 2.5 mm로 줄이고 드로잉되는 벽부위는 1.5 mm 크기의 요소를 사용한 Fig. 15의

모델(fine mesh, 9400 elements)을 이용하여 해석을 재수행하였다. Fig. 16은 탄성복원 전의 성형된 s-rail 형상과 탄성복원 해석을 위한 경계조건을 나타내며 Fig. 17는 탄성복원 후의 형상을 나타낸다. 이 결과를 Fig. 14의 모델(medium mesh)을 사용했을 때와 비교하면 B 절점의 x변위가 3.9 mm에서 4.9 mm로 약 25%가량 증가하여 rail의 벌어짐이 커진 것을 알 수 있으며 이에 따라 D 절점의 z 변위는 5.9 mm에서 4.6 mm로 줄어들었다.

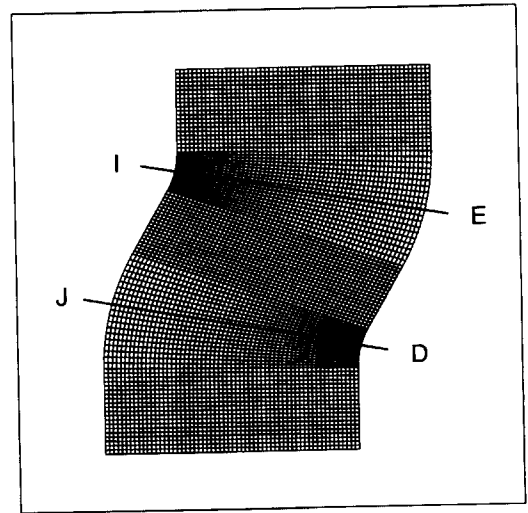


Fig. 14 Finite element mesh of blank(medium mesh)

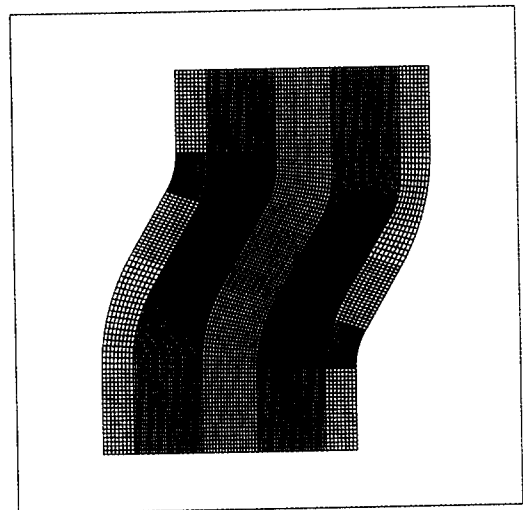


Fig. 15 Finite element mesh of blank(fine mesh)

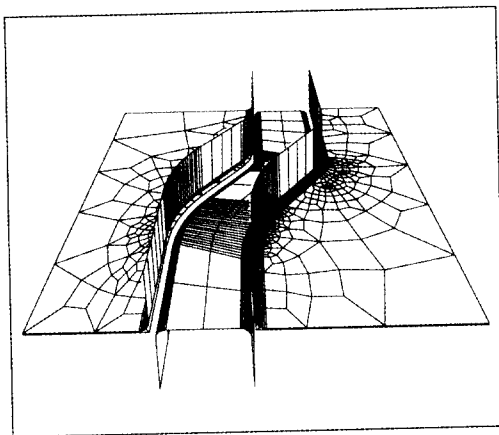


Fig. 13 Finite element model for tools of NUMISHEET'96 s-rail problem

실험과의 비교를 위하여 Fig. 14의 단면 IE와 JD를 따라 변형형상을 Fig. 18, 19에 나타내었다. 보고된 실험결과와 비교할 때, 실험에 의한 형상이 수치적으로 보고되지 않아 정확한 비교는 어려우나 대체로 해석이 약간 과소평가되고 있음을 알 수 있다.

이상과 같이, 소재의 유한요소 크기를 줄임으로써 보다 정확한 탄성복원 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 금형의 유한요소 모델은 벤치마크 시험에서 제공한 것을 사용하였기 때문에 금형에서의 이산화 오차를 더 줄이지는 못하였다. 그러므로 이산화 오차를 줄인 금형 모델을 사용하면 탄성복원 해석결과는 더욱 정확해지리라 생각된다.

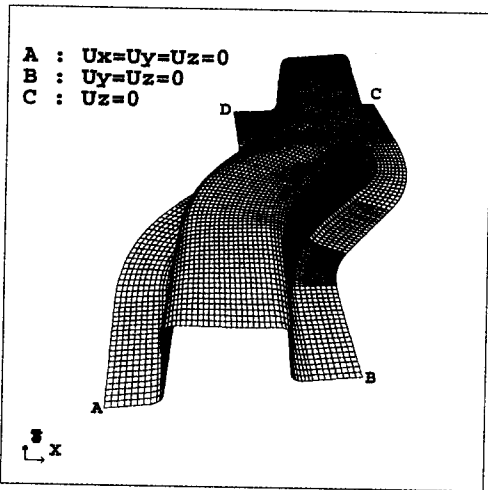


Fig. 16 Deformed shape of s-rail after forming analysis

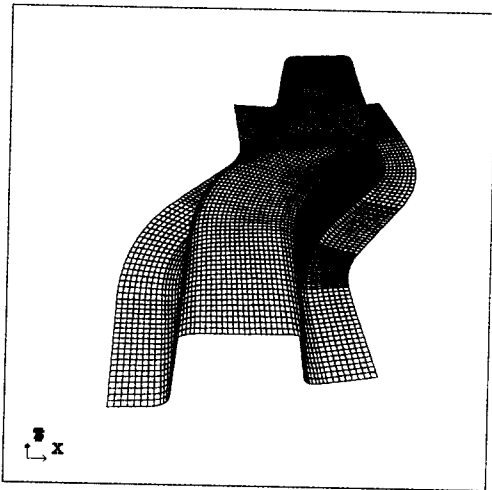


Fig. 17 Deformed shape of s-rail after springback analysis

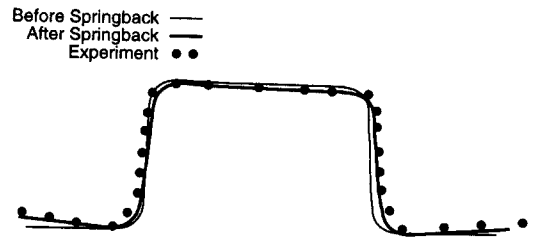


Fig. 18 Deformed profile of section IE(in Fig.14) after springback analysis

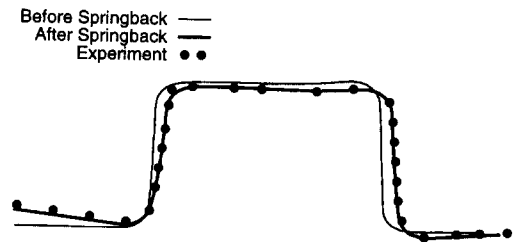


Fig. 19 Deformed profile of section JD(in Fig.14) after springback analysis

4. 결 론

NUMISHEET'93의 평면변형률 드로우 벤딩 문제를 동적의연적유한요소법을 사용하여 성형해석을 할 때 부정확한 탄성복원 해석의 원인이 되는 응력완화 현상이 발생하는 것을 살펴보았으며 응력완화에 영향을 미치는 주요 해석인자들에 대하여 고찰하였다. 응력완화 현상을 일으키는 굽힘과는 해석모델을 이산화하여 접촉처리하기 때문에 생기는 것이므로 이를 줄이기 위해서는 접촉처리에 대한 자세한 이해가 필요하다. 특히 소재와 금형의 이산화 오차는 접촉처리시 발생하는 응력완화의 직접적인 원인이며 벌칙함수법을 통하여 접촉처리를 구현하므로 적절한 벌칙상수 및 감쇄계수의 사용은 응력완화의 양을 줄일 수 있는 유효한 방법이 된다. 이 밖에 펀치속도의 설정도 해석결과에 영향을 미칠 수 있다.

NUMISHEET'96의 s-rail 문제해석에서는 위의 인자들을 고려하여 탄성복원 해석을 수행하였으며 3차원의 복잡한 기하학적 형상을 가진 문제에서도 보다 정확한 탄성복원 해석을 위해서는 검토된 인자들에 대한 세심한 주의가 필요함을 보였다.

본 연구에서는 상용 프로그램인 LS-DYNA3D를 사용하였기 때문에 접촉처리에 영향을 줄 수 있는 인자들에 국한하여 연구가 진행되었으나 보다 근본적인 응력예측 향상을 위해서는 좀 더 연속적인 접촉처리 방법의 개발에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- (1) K.Mattiasson, A.Strange, P.Thilderkvist and A.Samuelsson, 1995, "Simulation of Springback in Sheet Metal Forming", NUMIFORM'95, pp. 115~124.
- (2) Shan-Fu Shen and Paul R. Dawson, 1993, NUMISHEET'93 proceeding, pp. 398~405.
- (3) J. K. Lee, G. L. Kinzel and R. H. Wagoner, 1996, NUMISHEET'96 proceeding, pp. 444~464.
- (4) LSTC, 1995, LS-DYNA3D manual.
- (5) C.S.Kim, W.J.Chung and C.Y.Lee, 1997, "The Parallelization of Implicit Code for Springback Analysis", HPC ASIA proceeding, pp. 568~572.
- (6) W.J.Chung, J.W.Cho and T.Belytschko, 1996, "A Study on Dynamic Effects of Dynamic Explicit FEM in Sheet Metal Forming Analysis", NUMISHEET'96 proceeding, pp. 414~420.
- (7) J. K. Lee, G. L. Kinzel and R. H. Wagoner, 1996, NUMISHEET'96 proceeding, pp. 742~758.