

이상공정이론 및 하이브리드 박막/셸 방법을 이용한 박판성형품의 충돌거동 해석

류한선* · 정관수* · 윤정환** · 한정석*** · 윤재륜* · 강태진*

Incorporation of Sheet Forming Effects in Crash Simulations Using Ideal Forming Theory and Hybrid Membrane/Shell Method

H. Ryou*, K. Chung*, J. W. Yoon**, C. -S. Han***, J. R. Yoon* and T. J. Kang*

Abstract

In order to achieve reliable but cost-effective crash simulations of stamped parts, sheet forming process effects were incorporated in simulations using the ideal forming theory mixed with the 3D hybrid membrane/shell method, while the subsequent crash simulations were carried out using a dynamic explicit finite element code. Example solutions performed for forming and crash simulations of I- and S-shaped rails verified that the proposed approach is cost-effective without sacrificing accuracy. The method required a significantly small amount of additional computation time, less than 3% for the specific examples, to incorporate sheet forming effects to crash simulations. As for the constitutive equation, the combined isotropic-kinematic hardening law and the non-quadratic anisotropic yield stress potential as well as its conjugate strain-rate potential were used to describe the anisotropy of AA6114-T4 aluminum alloy sheets.

Key Words : Crashworthiness, Ideal Forming, Hybrid Method, Isotropic-Kinematic Hardening, Non-Quadratic Anisotropic Yield Potential and Strain-Rate Potential

1. 서 론

자동차 제작에 있어서 승객을 보호하기 위해서는 충돌 거동을 정확하게 예측하는 것이 중요하다. 점점 컴퓨터의 성능이 향상되어 충돌 거동을 예측하기 위한 유한요소법과 같은 수치해석 기법이 발달되고 있지만 성형 공정의 계산에 소모되는 시간이 막대하기 때문에 충돌 해석에 제대로 반영되지 못하고 있다. 따라서 본 논문에서는 성형 공정의 계산을 빠르게 수행하기 위하여 이상 공정 이론(ideal forming theory)⁽¹⁾을 이용하였으며 박막 요소를 사용하고 있는 이상 공정 이론에 굽힘 효과를 부여하기 위하여 하이브리드 박막/셸 방법⁽²⁾을 이용하였다.

판재의 비등방성을 표현하기 위하여, 강소성체 정식화를 위한 소성 변형률 포텐셜과 탄소성체 정식화를 위한 항복 응력 포텐셜이 사용되었다. 경화 거동에 대해서는 Chaboche 모델⁽³⁾에 근거한 등방 및 이동 경화 법칙 (isotropic-kinematic hardening law)이 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/Explicit 에 사용자 서브루틴 VUMAT 을 이용하여 적용되었다. 또한 응력의 증분을 구하기 위하여 변형 증분 이론⁽⁴⁾에 근거한 응력 적분 방법이 이용되었다.

본 논문에서 제안된 방법의 검증을 위하여 I 모양과 S 모양의 레일에 자동차용 알루미늄 합금 판재 AA6111-T4 의 물성⁽⁵⁾을 적용하여 셸 요소를 사용한 판재 성형 해석, 굽힘 효과를 고려

* 서울대학교 재료공학부
** MSC Software Corporation, U.S.A.
*** Max Planck Institute for Metals Research Heisenbergstr, Germany

하지 않은 이상 공정 이론의 해석, 성형 효과를 고려하지 않은 해석에 대한 충돌 해석이 수행되었으며, 계산 속도의 효능을 입증하기 위하여 CPU 시간이 비교되었다.

2. 이론

충돌 해석을 위해 이상 공정 이론과 하이브리드 박막/셸 방법을 이용하여 성형 공정의 효과를 부여한 과정은 다음과 같다.

- 1) 이상 공정 이론을 이용하여 셸 요소의 중립면의 해를 구한다.
- 2) 후 처리 과정인 하이브리드 박막/셸 방법을 이용하여 셸 요소의 두께 방향의 응력과 변형을 부여한다.
- 3) 셸 요소에 근거한 충돌 거동의 초기 조건으로 코시 응력(Cauchy stress), 이동 응력(back stress), 유효 변형(effective strain) 등을 부여한다.
- 4) ABAQUS/Explicit 을 이용하여 충돌 거동을 모사한다.

2.1 이상공정이론

이상 공정 이론은 해석적 이론과는 달리 재료 요소들이 최소 소성일의 경로를 따라 변형한다고 가정한다. 이러한 경로는 최적의 성형성을 제공하게 되고, 이는 최종 제품으로 성형 후 균일한 변형 분포를 가지도록 한다. 최적의 변형률 분포 이외에 직접 설계법을 활용하여 이상적 블랭크 형상과 최소 소성일의 경로를 따르는 중간 형상도 예측할 수 있다.

이상 공정 이론에서는 일반적으로 제품의 최종 형상은 미리 주어지고 초기 블랭크 형상은 미지수이다. 최종 형상이 미리 주어지고 초기 형상을 구할 경우, 이상 공정 이론은 최소 소성일의 경로를 따라 재료가 성형 되도록 소성일을 최소화하는 방정식을 풀게 됨으로써 최적의 블랭크 형상을 얻게된다.

2.2 하이브리드 박막/셸 방법

하이브리드 박막/셸 방법에 의해 두께 방향의 응력을 생성하기 위해서는 박막 요소로 해석한 중립면의 해가 주어져야 하며 최종 형상과 초기 형상간의 곡률 변화를 고려하여 두께 방향의 응력이 후 처리 방법으로 생성된다. 이렇게 생성된 응력값들이 셸 요소의 충돌 거동을 해석하기 위한 초기조건으로 사용되게 된다.

2.3 등방 및 이동 경화

항복 표면(yield surface)은 다음과 같이 표현된다.

$$\Psi(\sigma - \alpha) - \bar{\sigma}_{iso}^m = 0 \quad (1)$$

여기서 Ψ 는 항복 함수, σ 는 코시 응력, α 는 이동 응력(back stress)이고, $\bar{\sigma}_{iso}$ 는 항복 표면의 크기를 결정하는 유효응력이다.

Chaboche 모델에 근거한 등방 및 이동 경화에서 이동 응력의 증분은 다음과 같이 표현된다.

$$d\alpha = \left(\frac{d\bar{\alpha}_1}{d\bar{\epsilon}} d\bar{\epsilon} \right) \frac{(\sigma - \alpha)}{\bar{\sigma}_{iso}} - \left(\frac{d\bar{\alpha}_2}{d\bar{\epsilon}} d\bar{\epsilon} \right) \alpha \quad (2)$$

3. 성형 공정 및 충돌 해석

충돌 거동에 성형 공정의 효과를 비교하기 위하여 다음과 같이 4 가지의 서로 다른 성형 공정의 방법을 사용하였다.

Case 1 : 셸 요소를 사용한 ABAQUS/Explicit 을 이용하여 성형 해석

Case 2 : 하이브리드 방법과 이상 공정 이론을 이용하여 성형 해석

Case 3 : 이상 공정 이론만을 사용하여 성형 해석

Case 4 : 성형 효과를 고려하지 않음

첫번째 예제로 끈은 레일 (I-rail)을 사용하였다. 우선 Case 1을 위하여 Fig. 1과 같은 성형 틀을 구성하였다. 이상 공정 계산은 미리 구성된 레일의 최종 형상을 이용하여 이루어졌으며, Case 2는 후 처리 기법인 하이브리드 방법을 이용하여 두께 방향의 응력과 변형을 생성시켰으며, Case 3은 이상 공정 계산에서 얻은 응력과 변형을 두께방향으로 균일하게 생성시켰다.

위의 성형 방법으로부터 얻은 결과를 비교해보면, Case 3은 굽힘이 고려되지 않는 박막 요소를 사용한 이상 공정의 결과를 두께방향으로 균일하게 생성 시켰기 때문에 I-rail과 같은 예제에서는 해를 제공하지 않으며, 따라서 Case 4와 마찬가지로 성형 공정의 효과가 고려되지 않는다. Case 2는 하이브리드 방법에 의해 굽힘 변형이 부가되었기 때문에 굽힘이 일어나는 모퉁이 부근에서 응력과 변형이 존재하며, Case 1은 굽힘 뿐만 아니라 벽에서 신장(stretch)도 일어나기 때문에 Case 2보단 더 큰 변형이 분포한다.

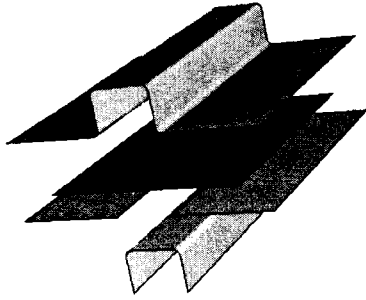


Fig. 1 Schematic view of I-rail forming

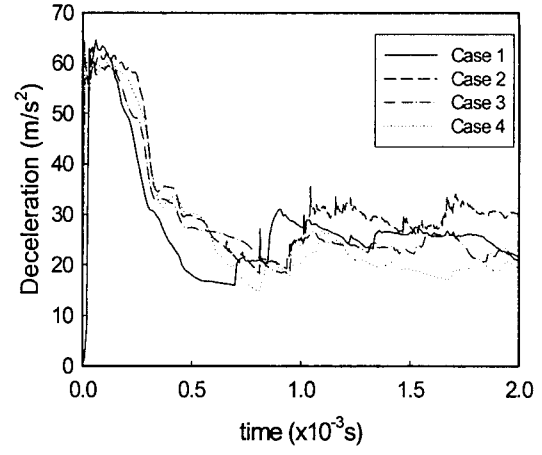
충돌 해석을 위해 400kg의 강체를 10m/s의 속력으로 정면 충돌을 시행하였다. Fig. 2는 네 가지 성형 방법에 따른 감속 그래프와 최대 감속도 값을 나타내고 있다. 감속 그래프는 구조물이 충격에 얼마나 잘 견디는지를 결정하는 최대 감속이 초반에 발생하고 있음을 보여주고 있다. 최대 감속도 값을 비교해 보면, 성형 공정의 효과가 없는 Case 3과 4는 서로 같은 값을 나타내고 있고, 성형 공정의 효과가 부여된 Case 1과 2는 Case 3과 4의 경우보다 더 높은 값을 나타내고 있다.

성형 방법에 따라 소요되는 CPU 계산 시간을 비교해 보면 Case 2는 충돌 해석에 소요되는 시간의 2%의 추가 계산으로 성형 공정의 효과를 부여할 수 있지만 Case 1은 충돌 해석에 소요되는 시간과 맞먹는 시간을 추가로 소요해야 성형 공정의 효과를 부여할 수 있다. 뿐만 아니라 Case 1은 이상 공정 계산에서는 필요하지 않는 성형 틀을 구성해야 하는데, 이를 위해서는 CPU 시간 외에도 많은 시간이 소요된다.

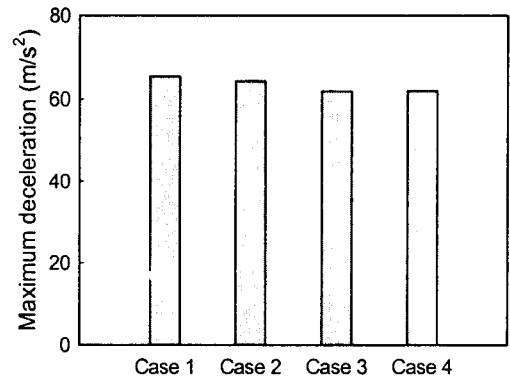
두 번째 예제로는 NUMISHEET'96에서 성형 예제로 제시한 S-rail을 사용하였다. 성형 결과를 비교해보면 앞의 예제와는 다르게 이상 공정 이론이 중립면의 해를 제공한다. Case 2는 Case 1보다 최적의 변형률 분포로 인하여 적은 변형 분포를 이루고 있으며, Case 3은 굽힘 효과가 고려되지 않기 때문에 Case 2보다 더 적은 변형 분포를 이룬다.

충돌 조건도 앞의 예제와 동일하게 설정하였다. Fig. 3은 각각의 성형 방법에 따른 감속 그래프와 최대 감속도 값을 보여주고 있다. S-rail은 I-rail과 다르게 구부러져 있는 구조이기 때문에 최대 감속도 값이 I-rail의 경우보다 뒷부분에서 나타나며, 소성 변형이 용이하기 때문에 I-rail의 경우보다 훨씬 낮은 최대 감속도 값을 나타내고 있다. Case 1은 Case 2보다 더 많은 소성 변형이 일어나기 때문에 최대 감속도 값이 약간 높게 측정되었으며, 굽힘 효과가 고려되지 않은 Case 3은 Case 1과 2보다 낮은 최대 감속도 값을 보

여주고 있다. 전체적으로 보면, Case 1과 2는 성형 효과가 고려되지 않은 Case 4보다 높은 최대 감속도 값을 보여주고 있고, 굽힘 효과가 고려되지 않은 Case 3은 그 중간 정도의 최대 감속도 값을 나타내고 있다.



(a)



(b)

Fig. 2 Crash simulation results for I-rails: (a) deceleration curves (b) maximum deceleration

CPU 계산 시간은 Case 2는 충돌 해석시간의 약 2%의 추가 계산만으로 성형 공정의 효과를 부가할 수 있지만 Case 1은 성형 해석을 위해서는 거의 충돌 해석 시간과 맞먹는 시간이 필요하며 이 외에도 성형 틀을 구성해야 하는 추가시간이 필요하다.

4. 결론

비용을 절감할 수 있는 충돌 해석을 위하여 이상 공정 이론과 하이브리드 박막/셀 방법이 성형

공정 효과를 위해 사용되었으며 충돌 해석은 상용 유한 요소 프로그램인 ABAQUS/Explicit 을 이용하였다. 구성 방정식은 Chaboche 모델에 근거한 혼합형 등방 및 이동 경화 법칙을 사용하였고, AA6114-T4 알루미늄 합금 판재의 비등방성을 표현하기 위하여 비이차 비등방 항복 응력 포텐셜과 그것에 짝을 이루는 소성 변형률 포텐셜이 사용되었다. 충돌 해석 결과 제안된 모델은 정확성을 유지하면서 해석 시간을 크게 줄일 수 있었다. 급힘이 고려되지 않은 이상 공정 결과는 시간은 줄일 수 있지만 정확성은 떨어진다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업을 통하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Chung, K., and Richmond, O., 1992, "Ideal Forming, Part I. Homogeneous Deformation with Minimum Plastic Work," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol 34, pp. 575-591.
- (2) Yoon, J.W., Pourboghrat, F., Chung, K., and Yang, D.Y., 2002, "Springback Prediction for Sheet Metal Forming Process Using a 3D Hybrid Membrane/Shell Method," *Int. J. of Mech. Sci.*, Vol 44, pp. 2133-2153.
- (3) Chaboche, J. L., 1986, "Time independent constitutive theories for cyclic plasticity", *Int. J. Plasticity*, Vol. 2, p. 149.
- (4) Chung, K., and Richmond, O., 1993, "A Deformation Theory of Plasticity Based on Minimum Work Paths," *Int. J. of Plasticity*, Vol 9, pp. 907-920.
- (5) Lee, M.-G., Kim, D., Kim, C., Wenner, M.L., Wagoner, R.H., and Chung, K., 2003, "Spring-Back Evaluation of Automotive Sheets Based on Combined Isotropic-Kinematic Hardening Laws and Non-Quadratic Anisotropic Yield Functions, Part II: Characterization of Material Properties," *Int. J. Plasticity* (submitted).
- (6) Lee, J.K., Kinzel, G.L., and Wagoner, R.H., Eds, 1996, NUMISHEET'96 Numerical Simulation of 3-D Sheet Metal Forming Processes - Verification of Simulation with Experiment.

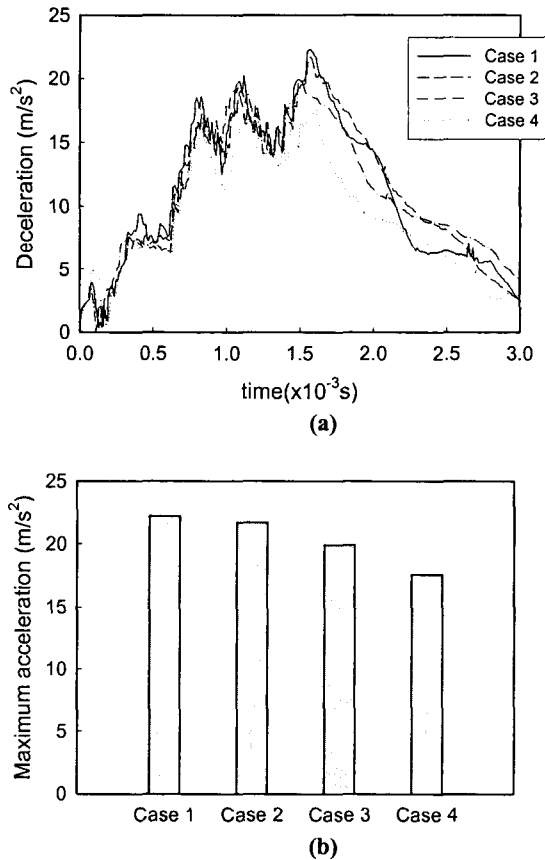


Fig. 3 Crash simulation results for S-rails:
(a) deceleration curves (b) maximum deceleration