

판재 성형에 미치는 damping의 영향 고찰

이상욱†, 양동열‡, 정완진

† 한국과학기술원 기계공학과

‡ 삼성종합기술원

Consideration of Damping Effect on Sheet Metal Forming

Sang Wook LEE†, Dong Yol YANG† and Wan Jin CHUNG‡

† Dept. of Mechanical Engineering, KAIST

‡ Samsung Advanced Institute of Technology

ABSTRACT

In the recent sheet metal forming simulations, it increases to adopt the dynamic explicit method for an effective computation and the elastic-plastic formulation for stress recovery. It is inevitable in the dynamic explicit method that some noises occur and sometimes partly spoil results of simulations. It is severer when complicated contact conditions are included in simulations. An effective method to control these noises is introduction of damping effects.

In this paper, the concept of contact damping is introduced in order to suppress noises due to complicated contact conditions. This is checked by analyzing a simple sheet metal forming process(U-bending). From the computational results, it is shown that the contact damping can effectively control the noises due to contacts and develop more reliable internal stress states.

Key Words: Contact Damping, Explicit Time Integration, Elastic-Plastic Formulation

서 론

판재 성형 과정을 잘 모사(simulation)하기 위한 유용한 도구로써 유한요소법(FEM)이 가장 널리 사용되고 있다. 유한요소법은 모사하고자 하는 재료의 모델링에 따라 강소성(rigid-plastic) 및 탄소성(elastic-plastic) 유한요소법으로 대별되고, 시간 적분법에 의해서는 내연적(implicit) 및 외연적(explicit) 유한요소법으로 나뉜다. 복잡한 형상의 3차원 판재 성형 모사의 경우, 스프링백 계산의 여지를 포함할 수 있는 탄소성 수식화가, 효율적 계산 시간을 위해서는 외연적 수식화가 많이 채택되고 있는 것이 최근의 경향이다.

외연적 시간 적분법을 채택할 경우, 관성 효과를 고려하는 동적 문제(dynamic problem)로 모델링하는 것이 일반적이다. 따라서 전체 해석계가 항상 동적 상태에 놓

이므로 여러 요인에 의한 잡음(noise)이 쉽게 계제 된다. 이로부터 해가 불안정해질 수 있다. 특히 접촉이 많은 문제에서는 더욱 심각하게 나타난다. 판재 성형에 있어서 금형을 빼놓고 생각할 수 없으므로 보다 정확한 해를 얻기 위해서는 복잡한 접촉 상태를 잘 고려하여 이러한 잡음을 잘 억제해 주어야 할 필요가 있다.

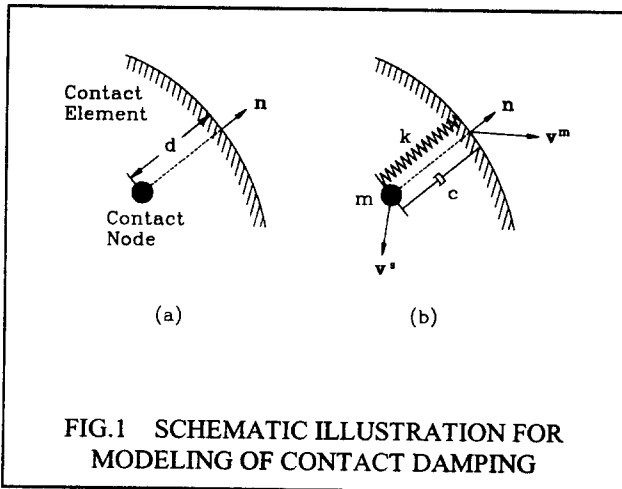
본 논문에서는 외연적 시간 적분법을 이용하여 판재 성형 모사를 수행할 때 잡음의 발생을 억제하기 위한 접촉 감쇠(contact damping)를 수식화 하여 도입한다. 이를 단순화된 판재 성형 공정인 U-bending 성형 공정에 적용하여 그 효과를 보고자 한다.

접촉 감쇠법의 수식화

관성항(inertial term)을 고려한 가상일의 원리(principle of virtual work)로부터 다음의 동적 힘 평형식을 얻을 수 있다[1].

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}^{\text{ext}} - \mathbf{f}^{\text{int}}, \quad (1)$$

여기서 \mathbf{M} 은 질량 행렬, \mathbf{x} 는 변위 벡터, \mathbf{f}^{ext} 는 외력 벡터 및 \mathbf{f}^{int} 는 내력 벡터이다. 위 식을 외연적(explicit)방법으로 적분해 나가기 위해 질량 행렬 \mathbf{M} 은 집중 질량(lumped mass)화 된 것을 사용한다.



판재 성형 해석시 금형이 모델링되어 해석에 사용되므로, 금형과 판재간의 접촉은 필연적이다. 외연적 유한요소법의 경우 축차(iteration)를 하지 않기 때문에 접촉 처리법으로는 대부분 벌칙 함수법(penalty method)이 사용된다.

그림 1의 (a)와 같이 판재의 한 절점이 깊이 d 만큼 금형으로 침투했을 경우, 침투 절점에 가해

지는 접촉력은 다음과 같다.

$$\mathbf{f}^{\text{contact}} = d k \mathbf{n}, \quad (2)$$

여기서 d 는 침투 깊이, k 는 접촉 강성이고 \mathbf{n} 은 침투 절점에 가장 가까운 금형 요소의 한점에서의 수직 단위 벡터이다. 이때 $d < 0$ 이다.

그런데 식(2)의 접촉력을 가할 경우 d 의 절대값이 커지면 과도한 접촉력이 가해 지므로 접촉 절점이 불안정하게 되어 잡음을 발생시킨다. 이에 따라 판재 요소 내부에 불필요한 응력파(stress wave)가 발생하여 해의 신뢰도를 떨어뜨린다. 특히 홀더(holder)와 다이(die)와의 양면 접촉이 일어나는 플랜지 부분에서는 이같은 현상이 더욱 심하게 나타난다. 이러한 잡음 발생을 억제하기 위해 접촉 감쇠를 도입한다. 즉,

그림 1의 (b)처럼 일자유도 진동계로 모델링한다. 따라서 감쇠력은 다음과 같다.

$$\mathbf{f}^{\text{damp}} = c(\mathbf{v}^r \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}, \quad (3)$$

$$\mathbf{v}^r = \mathbf{v}^s - \mathbf{v}^m. \quad (4)$$

임계 감쇠비(fraction of critical damping) ζ 를 접촉 감쇠 파라미터로 도입하면 감쇠 계수 c 는 일자유도 진동계에서 다음과 같이 표현된다[2].

$$c = 2\zeta\omega_n m, \quad (5)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (6)$$

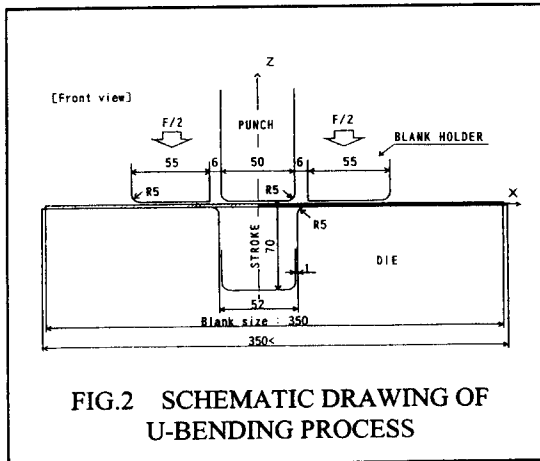
따라서 식(1)은 접촉을 고려하여 다음과 같이 된다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}^{\text{ext}} - \mathbf{f}^{\text{int}} - \left\{ dk + 2m\omega_n(\mathbf{v}^r \cdot \mathbf{n})\zeta \right\} \mathbf{n}. \quad (7)$$

해석 예: U-bending 공정

해석 예로는 NUMISHEET'93[3]에서 정의된 U-bending 문제로 하였다. 금형 및 판재의 크기와 초기 셋업을 그림 2에 나타내었다. 판재의 절점수는 325개, 요소수는 175개이다. 두께 방향으로 5개의 적분점을 두어 굽힘을 묘사하였다. 또한 평면 변형을 가정하였다. 해석에 사용한 재료는 mild steel이며, 블랭크 홀딩력(BHF)은 2.45KN이다. 해석 결과를 나타내기 위해 판재의 바깥 표면에 위치한 한 점을 선택하되, 굽힘-역굽힘의 전과정을 받는 곳으로 정하였다. 아래의 모든 결과는 이 점에서의 값을 기준으로 하였다.

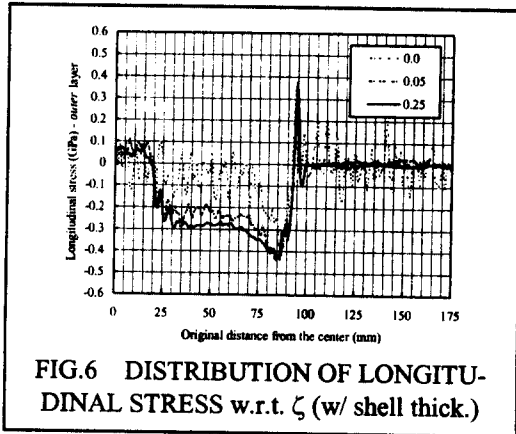
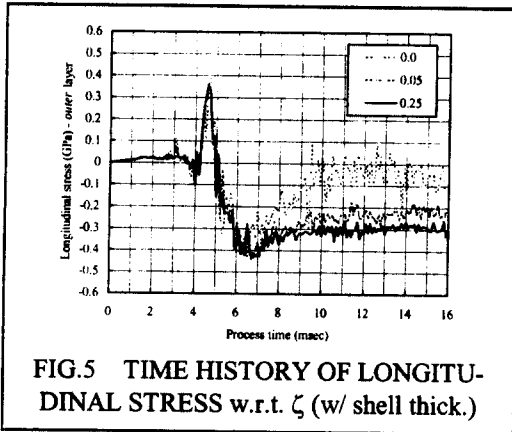
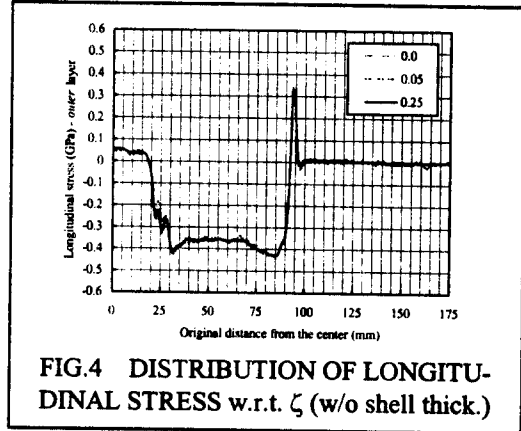
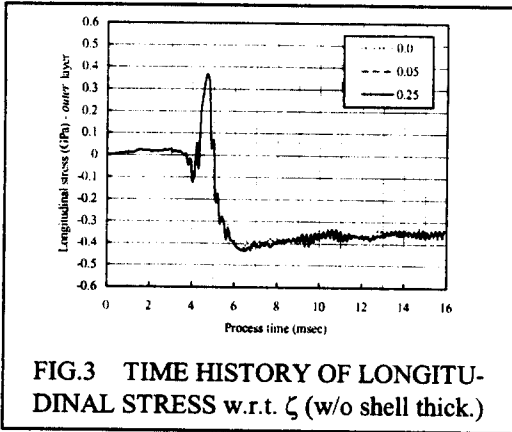
그림 3은 접촉 감쇠 파라미터 ζ 의 크기에 따라 길이 방향 응력이 공정 시간에



따라 어떻게 변화하는 가를 보여준다. 또한 그림 4는 성형 직후 길이 방향 응력의 공간상의 분포도를 보여준다. 두 그림의 경우 접촉 처리시 판재 두께를 무시하였다. 때문에 양면 접촉이 없어서 접촉 조건이 비교적 단순화된다. 이러한 이유로 두 그림에서 보듯 접촉 감쇠의 효과가 두드러지게 나타나지 않는다.

그림 5와 그림 6은 각각 접촉 감쇠 파라미터 ζ 의 크기에 따라 길이 방향 응력이 공정 시간 및 공간상으로 어떻게 변화하고 분포하는 가를 보여준다. 이때 판재 두께를 고려하였기 때문에 양면 접촉이 일어나는 등 접촉 조건이 매우 복잡해졌다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 접촉이 복잡하게 됨으로써 잡음에 의한 응력 완화(stress relaxation)[4] 현상이 일어난다. 이때 접촉 감쇠는 큰 효과를 발휘하고 있음

을 두 그림에서 확인할 수 있다. 특히 양면 접촉이 일어나는 플랜지 부분에서 두드러진다. ζ 값이 0.25 이상에서는 더 이상의 효과가 나타나지 않았다.



결론

판재 성형 공정 해석에서, 접촉 상태가 매우 복잡할 때 생길 수 있는 잡음을 제어하기 위한 접촉 감쇠를 수식화 하였다. 이를 U-bending 문제에 적용하여 양면 접촉이 일어나는 복잡한 접촉이 계제된 경우 효과가 있음을 입증하였다.

참고 문헌

1. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, R.D.Cook, D.S.Malkus and M.E.Plesha, 3rd ed., John Wiley & Sons, 1989.
2. *Mechanical Vibrations*, F.S.Tse, I.E.Morse and R.T.Hinkle, 2nd ed., Allyn and Bacon Inc., 1978.
3. *Proceedings of The 2nd International Conference NUMISHEET'93*, A.Makinouchi, E.Nakamachi, E.Onate and R.H.Wagonor (eds), Isehara, Japan, 1993.
4. 판재성형의 탄성복원해석에 대하여, 조진우, 김충식 및 정완진, *한국자동차공학회 1996년도 추계학술대회 논문집*, pp.15-20, 1996.