

연속접촉처리를 고려한 박판성형공정의 해석

김태정¹, 양동열[#]

FE-analysis of sheet metal forming processes considering continuous contact treatment

T. J. Kim, D. Y. Yang

Abstract

In this paper, a continuous contact treatment has been considered during FE-analysis of the sheet metal forming processes. Because the simulation is usually performed stepwise, the status of contact can change suddenly. In case of implicit scheme, the increment of punch stroke can be chosen as large value. For exact assessment of contact force and friction force between die and sheet, the continuous contact treatment is proposed. The virtual surface of sheet metal is modeled by NURBS curves or surfaces in order to calculate exact contact area and penetration depth. From the geometrical evaluation of contact behavior, additional contact pressure is imposed to the element. The deformation of bending process and hydroforming process are analyzed based on this scheme.

Key Words : Contact Treatment, Contact Pressure, Shell Element

1. 서론

일반적으로 박판 성형 공정의 해석에서 접촉 처리는 매우 중요하다. 박판 성형 공정은 소재의 부피에 비해 면적이 상당히 큰 공정으로 성형을 위한 대부분의 힘은 금형과 소재의 접촉처리를 통해 전달된다. 그러므로 해석의 정확도 및 해석의 수렴성이 접촉 처리에 상당한 영향을 받게 된다.

유한요소해석에서 소재와 금형간의 접촉처리의 일반적인 방식은 해당 절점에 대해서 제한 조건을 가하는 것이다. E. A. Wilson 과 B. Parsons 는 제한조건을 사용해서 강성식을 수정하였다.[1] 또한, 접촉력을 미지수로 도입하여 제한조건을 가하는 Lagrange multiplier 기법과 Penalty 함수를 이용하는 방법이 있으며 mathematical programming 기법을 이용해서 접촉 문제의 해를 구하는 방법이 있다.

소재와 금형간의 불침투 조건을 구현하는 또 다른 방법으로 접촉 요소 혹은 간격(gap) 요소라고 불리는 접촉처리 요소를 사용하는 방법에 대한 연구결과도 보고되었다. W.R.C Underhill 등은 가상의 절점과 요소를 정의하고 해당 요소에 하중을 부여한다[2]. R. E. Jones 등은 경계면에서의 압력을 정의하고 Lagrange multiplier 방식을 적용하여 부드러운 접촉을 처리하였다[3]. H. Parisch 등은 마찰이 고려된 대변형 접촉 문제에서 임의의 형상을 가질 수 있는 표면 요소를 수식화하여 적용하였다[4]. T.W. McDevitt 등은 영역분할(domain decomposition) 기법에서 적용되는 mortar 요소를 접촉 문제에 적용하였다[5]. S.H.Ju 등은 하나의 접촉 절점을 가지고 있는 접촉 요소를 수식화하고 곡면과의 접촉 탐색에 관한 연구를 수행하였다[6]. 또한, 매개 변수에 의한 곡면의 표현식을 이용하여 유한요소의 부드러운 곡면 묘사를 통해서 접촉

1. 한국과학기술원 기계공학과 대학원

#. 한국과학기술원 기계공학과, dyyang@kaist.ac.kr

영역의 계산에 관한 연구가 수행되었다[7].

2. 연속 접촉 처리

2.1 개요

박판 성형과정을 수치적으로 해석하기 위하여 유한요소해석이 광범위하게 적용되고 있다. 일반적으로 박판 성형 해석에서는 박판 소재와 금형을 유한요소 격자로 묘사하게 된다. 즉, 연속체로서의 소재와 금형의 특성이 유한개의 삼각형 또는 사각형 격자로 표현되게 된다. 이러한 이산화과정으로 발생하는 오차를 줄이기 위하여 유한요소를 연속체 요소 등으로 묘사하거나 소재의 다양한 변형 모드를 정확히 묘사하기 위한 기법들이 소개되고 있다.

또한, 금형과 소재사이의 접촉 탐색과 처리를 수행하여 접촉력 및 마찰력의 정확한 부과를 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 금형과 소재의 접촉부에서는 국부적인 응력 집중 현상이 발생하게 된다. 이러한 접촉 특성과 응력은 박판 부품이나 금형의 품질과 결합등에 직접적인 원인이 되므로 접촉면의 접촉력과 마찰력에 대한 정확한 평가는 유한요소해석 및 금형 설계의 정확도를 위해서 반드시 선행되어야 한다.

일반적으로 박판 성형 공정에서 접촉 현상은 극히 복잡하고 접촉 영역과 접촉 조건등이 비선형적으로 발생하므로 정확한 수학적 모델을 적용할 수 없다. 이러한 금형과 소재와의 접촉 특성을 정확히 부가하기 위한 방법으로 불침투 조건을 정확히 부가하는 접근법과 접촉력과 마찰력을 정확히 부가하는 접근법 등으로 분류할 수 있다.

유한요소해석에서는 금형과 소재의 불침투조건에 의해서 접촉력과 마찰력을 쉽게 부가할 수 있으므로 이에 대한 연구가 많이 진행되었다. 또한, 금형과 소재 사이의 침투량을 정확히 계산하기 위하여 금형을 매개변수 등을 이용해서 정확히 묘사하는 Bicubic 다항식 곡면, Ferguson 곡면, Bezier 곡면, B-spline 곡면 및 NURBS 곡면 등이 이용되고 있다. NURBS 곡면은 다른 매개변수 곡면에 비해 원통면, 원추면, 구면, 포물면, 쌍곡면 등의 이차 곡면을 정확히 표현할 수 있는 장점을 가지는 일반적인 형태의 곡면으로 그 적용범위가 광범위하다. 그러나 매개변수에 의해서 금형을 묘사하게 되면 복잡한 접촉처리 과정과 계산시간이 과다하게 요구되므로 CAE 분야에서 그 유용성이

제한되게 된다.

본 연구에서는 해석의 시간과 정확성을 고려하여 일반적으로 사용되는 4 절점의 쉘 요소를 사용하였다. 그러므로 각 절점에서의 굽힘 변형모드를 구현할 수 있다. 이러한 쉘요소와 유한요소 격자에 의해 표현되는 금형면과의 정확하고 연속적인 접촉처리를 위해서 본 연구에서는 접촉면의 정확한 계산과 계산된 접촉면을 기초로 접촉력과 마찰력을 보정해 주는 연구를 수행하였다.

2.2 가상 접촉면

2.2.1 요소선택 조건식

위에서 설명한 바와 같이 모든 요소들에 대해 NURBS 곡선식으로 접촉을 판별하게 되면 계산시간이 많아져서 해석시간이 길어진다. 그러므로 접촉할 가능성이 있거나 연속 접촉 처리가 필요한 요소를 미리 선택할 필요가 있다.

이러한 선택 조건식으로 판별된 요소에 대해서만 NURBS 곡선식을 이용한 교차점을 계산하게 되면 효율적인 계산을 수행할 수 있게 된다.

본 연구에서는 4 절점의 사각형 쉘 요소를 사용하였다. 또한 각 절점에서는 모두 5 개의 자유도를 가지며 회전 자유도인 α_x, θ_y 를 이용하여 굽힘 변형까지 고려할 수 있다. 또한, 연속접촉처리는 곡률을 가지는 요소에 대해서 고려되어야 함을 예상할 수 있다. 즉, 굽힘 에너지가 작은 요소들에 대해서는 곡률의 변화가 심하지 않으며 금형과의 접촉에서도 민감하게 반응하지 않는다.

이러한 기본 가정을 토대로 연속 접촉 처리를 위한 요소는 굽힘 변형 에너지의 증분이 큰 요소로 선택하였다.

각 요소마다 아래 식 (1)과 같은 조건함수를 계산하고 그 값이 임계값보다 큰 경우에 대해서 연속접촉처리를 하게 된다. 물론, 조건함수값이 임계값보다 작은 경우에 대해서도 각 절점마다 기본적인 불침투 조건의 접촉 처리를 수행하게 된다.

$$f(\Delta\alpha_i, \Delta\theta_i) = \frac{\sum_{i=0}^3 (\Delta\alpha_i \cdot \Delta\alpha_i + \Delta\theta_i \cdot \Delta\theta_i)}{\max(\sum_{i=0}^3 (\Delta\alpha_i \cdot \Delta\alpha_i + \Delta\theta_i \cdot \Delta\theta_i))} \geq f_{cr} \quad (1)$$

위의 식에서 분모항은 정규화를 위한 값으로 전체 요소에 대한 최대값으로 설정한다. f_{cr} 값은 예제에 따라 다소 차이가 있으나 0.1~0.5의 값을 가질 때 선택되는 경우와 요소수가 가장 적절하다

2.2.2 접촉력의 부과

유한요소해석의 소재 요소는 금형과의 접촉 여부를 판별하기 위해 요소의 각 절점에 대해서 Node to Surface 방식으로 침투여부 및 침투정도를 계산하게 된다. 이러한 기하학적인 계산에서 근사화된 요소의 절점 위치 정보만으로 금형과의 침투여부를 계산하게 되면 근본적으로 오차가 발생하게 된다. 즉, 연속적인 곡선이나 곡면으로 묘사하게 되면 침투된 것으로 표현되지만 절점에 대해서만 침투 여부를 계산하게 되면 금형의 곡률 반경이 작거나 요소의 격자가 큰 경우 정확한 접촉 여부 판별이 어렵다. 또한, 요소의 격자가 큰 경우 해석 증분에 따라 접촉 영역이 갑자기 변하게 되는데 이러한 현상을 실제 접촉 현상에 근사화시키기 위하여 해석 증분에 따른 차이를 최소화해야 할 필요가 있다.

이러한 접촉 여부를 정확하게 판별하기 위해서 본 연구에서는 소재의 격자를 각각의 변에 대해서 NURBS 곡선식으로 표현한다. 해당 요소의 각 변의 2 절점과 이웃한 요소의 평면에 투사한 가상의 이웃 절점을 계산하여 NURBS 곡선식의 조정점으로 사용한다. 그러므로 비정규 격자 (unstructured mesh)의 경우에도 유연하게 적용할 수 있다. 이렇게 계산된 NURBS 곡선식은 금형 격자와의 교점을 계산하고 금형 격자의 법선 방향의 최대 침투량을 계산한다.

$$p_c = \alpha \cdot f(E, \nu) \cdot \frac{\sum_{i=0}^n \delta_{c,i}}{nh} \quad (2)$$

셀 요소의 각변의 침투량을 계산하면 위의 식 (2)과 같은 형태의 접촉 압력을 계산할 수 있으며 이 값을 각 절점에 부과하게 된다.

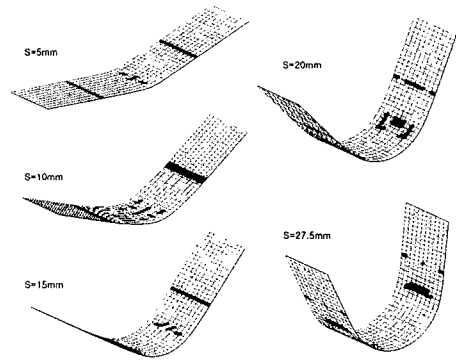
2.2.3 마찰력의 부과

본 연구에서는 마찰력 부과를 위해 Coulomb 마찰력을 사용하였으며 앞에서 계산된 각 절점에서의 접촉력에 대해서 대응하는 마찰력을 추가로 부과한다.

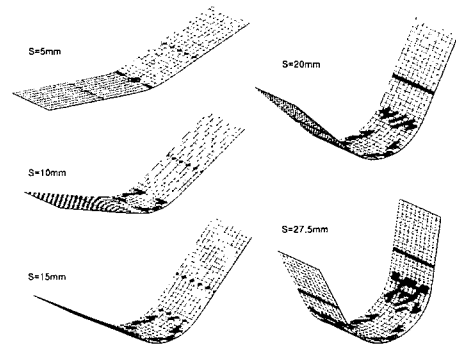
3. 박판 성형 해석

3.1 실린더 펀치에 의한 굽힘 해석

굽힘 변형이 중요한 성형 공정에서는 접촉 처리 기법이 상당히 중요하다. 즉, 소재와 금형과의



(a) w/o continuous contact treatment



(b) w/ continuous contact treatment

Fig. 1. Distribution of contact point in cylindrical bending process

접촉에 의해 주로 성형되는 과정으로서 접촉 부위에서의 응력분포가 변형경로에 영향을 미치고 잔류 응력에 의해 스프링 백 정도가 달라지기 때문이다.

그러므로 연속 접촉처리의 효과를 검증하기 위하여 실린더 형의 펀치에 의한 굽힘 변형 문제를 해석하였다. 금형 형상 및 실험 조건은 NUMISHEET 2002 의 벤치마크 예제와 동일하다. 본 예제는 블랭크가 없는 굽힘 변형 문제로 단순히 펀치의 접촉에 의해서만 성형되는 공정이다. 그러므로 접촉 영역의 처리 방법에 따라 그 해석 결과에 중요한 영향을 미치게 된다.

Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 연속접촉 처리를 하게 되면 접촉 부위에서의 절점에 대해 접촉력과 마찰력이 보정되어 접촉 모드가 달라진다. 이러한 변형 모드 변화에 의해 이

후 해석에서 접촉점이 분포가 달라지는 것을 볼 수 있다.

또한, 연속접촉 처리를 한 경우에 있어서 응력 분포가 국소적으로 차이를 보이고 있으며 연속접촉 처리한 경우에 최대 유효 응력값이 다소 높은 것을 알 수 있다.

3.2 오일팬 형상의 하이드로포밍 해석

박판 하이드로포밍 공정에서의 접촉 상태의 정확한 평가를 위해서 본 연구에서 제안한 연속접촉 처리를 고려한 해석을 오일팬 형상에 대해서 수행하였다. 본 하이드로포밍 공정의 해석은 그 특징상 압력 증분을 크게 할 수 없어 해석 시간이 오래 걸리고 접촉이 진행되고 있는 영역에서는 외력 부과 조건과 변위 부과 조건이 동시에 적용되므로 수렴성이 좋지 않다. 즉, 해석시 접촉 영역에서 접촉 상태가 빈번히 변하게 되어 진동하는 경향이 있다. 이러한 해석 시간의 문제점을 해결하기 위하여 본 연속접촉 처리 기법의 특징을 비교하여 보았다.

Table 1. Calculation time of sheet hydroforming

stage	w/o	w/	Speed up
1	10h 24m	9h 17m	10.74%
2	12h 31m	10h 58m	12.38%
3	17h 19m	15h 18m	11.65%
sum	40h 24m	35h 33m	11.59%

본 해석에서는 접촉 영역의 변화과정이 연속접촉 처리를 하지 않은 경우와 크게 다르지는 않다. 이는 주요 성형 원리가 펀치에 의한 접촉이 아니라 각 요소에 동일하게 작용하는 압력에 의해 진행되기 때문으로 판별된다.

연속접촉 처리를 한 경우 수렴성의 변화를 살펴보기 위하여 해당 단계별로 해석 시간을 표 1에 비교하였다. 연속접촉 처리를 하게 되면 수렴성이 개선되어 해석시간을 최대 12.4% 정도 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

일반 박판 성형공정에서 해의 정확성 및 수렴성을 개선시키기 위해 연속접촉 처리 기법을 제안하였다. 제안한 기법에 대해서 굽힘 변형 공정에 대해서 해석을 수행하여 접촉 거동 및 유효응력 분포가 차이를 보이는 것을 관찰하였다. 또한, 오일팬 하이드로포밍 공정의 해석에 적용하여 접촉 문제가 수렴성에 미치는 영향이 큰 해석 예제에 대해서 해석시간을 단축시킬 수 있었다.

참고 문헌

- [1] E. A. Wilson, B. Parsons, 1970, Finite element analysis of elastic contact problems using differential displacements, Int. J. for Num. Meth. in Eng. Vol. 2, pp. 387-395
- [2] W.R.C. Underhill, M.A. Dokainish, G.A.E. Oravas, 1997, A method for contact problems using virtual elements, Comput. Methods. Appl. Mech. Engrg. Vol. 143, pp. 229-247
- [3] R.E. Jones, P. Papadopoulos, 2001, A novel three-dimensional finite element based on smooth pressure interpolations, Int. J. Numer. Meth. Engng. Vol. 51, pp. 791-811
- [4] H. Parisch, CH. Lubbing, 1997, A formulation of arbitrarily shaped surface elements for three-dimensional large deformation contact with friction, Int. J. Numer. Meth. Engng. Vol. 40, pp. 3359-3383
- [5] T.W. McDevitt, T.A. Laursen, 2000, A mortar-finite element formulation for frictional contact problems, Int. J. Numer. Meth. Engng. Vol. 48, pp. 1525-1547
- [6] S.H. Ju, R.E. Rowlands, 1999, A three-dimensional frictional contact element whose stiffness matrix is symmetric, Transactions of the ASME. Vol. 66, pp. 460-467
- [7] N. El-Abbasi, S. A. Meguid, A. Czepakanski, 2001, On the medelling of smooth contact surfaces using cubic splines, Int. J. Numer. Meth. Engng. 50, pp. 953-967