

계층적 접촉 탐색방법을 이용한 박판성형 공정해석

김일권 · 김용환*

(2000년 1월 10일 접수)

Sheet Forming Analysis by Using Hierarchical Contact Searching Method

I. K. Kim and Y. H. Kim

Abstract

A dynamic explicit finite element code for simulating sheet forming processes has been developed. The code utilizes the discrete Kirchhoff shell element and contact force is treated by a conventional penalty method. In order to reduce the computational cost, a new and robust contact searching algorithm has been developed and implemented into the code. In the method, a hierarchical structure of tool segments is built for each tool at the initial stage of the analysis. Hierarchical structure is built in a way to divide a box to 8 sub-boxes, 2 in each direction, until the lowest level of the hierarchical structure contains exactly one segment of the tool or empty. Then at each time step, contact is checked from the box to sub-boxes hierarchically for each node. Comparisons of computational results of various examples with the existing ones show the validity of the method.

Key Words : Discrete Kirchhoff Shell Element, Sheet Forming Analysis, Contact Searching, Penalty Method, Hierarchical Structure

1. 서론

소성가공 공정의 하나인 박판성형 공정은 산업의 많은 부분을 차지하는 중요한 공정으로서, 주로 자동차의 바디 부품이나 전자제품의 생산에 사용되며 높은 생산성과 고품질의 제품을 얻을 수 있다는 장점으로 널리 이용되고 있다. 최근 들어 국내 자동차산업이나

전자산업의 비약적인 발전이 이루어지고 있으며, 점차적으로 전세계시장이 경쟁화되는 시기에, 보다 좋은 제품을 보다 빠르게 그리고 적은 비용으로 개발, 보급하는 것은 산업 발전에 필수불가결의 요소가 되고 있다. 박판성형에 관한 해석과 연구는 성형제품의 정밀도, 생산성, 생산단가 절감 등을 위해서 필수적이다.

* 충남대학교 기계설계공학과

따라서 박판성형 공정을 해석하기 위한 해석도구가 필요하게 되는데, 박판성형 공정의 해석도구에 요구되는 사항은 요소의 정확성과 계산시간의 효율성, 그리고 문제에 무관한 해의 강건성(robustness)등을 들 수 있다. 그러한 요구사항들을 만족시키기 위해서 고려되어야 할 사항중 가장 중요한 사항은 요소의 선택과 접촉탐색방법, 그리고 요소재구성 기법에 관한 내용이다. 유한요소법이 박판성형 공정에 적용된 이후로 눈부신 발전을 거듭하여 현재는 자동차회사나 가전업체를 중심으로 실제 공정설계나 금형설계에 이용되고 있다. 또한 컴퓨터 하드웨어의 발달로 성형해석에 소요되는 계산시간은 상당히 감소하였다고는 하지만 복잡한 형상의 제품에 대해서는 슈퍼컴퓨터도 수 내지 수십 시간이 소요되어 아직도 실제 현장에서 설계에 사용하기에는 곤란한 상황이다. 따라서 해의 정확도를 유지하면서 계산시간을 줄일 수 있는 방안이 강구되어야 한다.

본 논문에서는 C^1 -셸을 사용하면서 수식화를 비교적 간단하게 처리하기 위해서 횡전단 변형률이 0이라는 Kirchhoff의 제한조건이 요소내의 이산된 점들에서만 만족되는 DKQ(discrete Kirchhoff quadrilateral) 셸요소^(1,2)를 사용하고자 한다. DKQ 셸요소는 Discrete Kirchhoff 판이론을 이용하여 대변형을 다룰 수 있는 4절점 셸요소이며, locking 현상을 제거하기 위한 방법을 적용하고, 과도한 zero energy mode를 제거하기 위해서 적절한 hourglass control 방법으로 drilling 자유도^(3,4)를 도입하게 된다.

일반적으로 실제 해석시간 중 가장 많은 계산시간을 필요로 하는 부분은 접촉탐색부분이다. 따라서 계산시간을 줄이기 위해서 효과적인 접촉탐색 기법이 필요하다. 본 논문에서는 계층적 구조(hierarchical structure)를 이용하여 최소의 시도로 정확한 접촉부위를 찾아내는 계층적 접촉탐색 알고리즘을 개발하고 그에 따른 데이터 구조에 관하여 기술하고, DKQ 셸요소와 동적 외연적 유한요소 해석 프로그램에 적용하여, 그 방법의 타당성을 검증하려 한다.

2. 프로그램의 수식화

2.1 3차원 shell요소

박판성형 해석은 길이에 비해 두께가 아주 작은 얇은 판의 탄소성 대변형, 대회전을 해석하기 때문에 주로 3차원 셸요소가 사용되고 있다. 셸요소에는 아주 많은 종류가 구조해석에 사용되며, 현재까지 박판성형해석 분야에서는 Mindlin-Reissner 판이론을 이용한 셸요소가

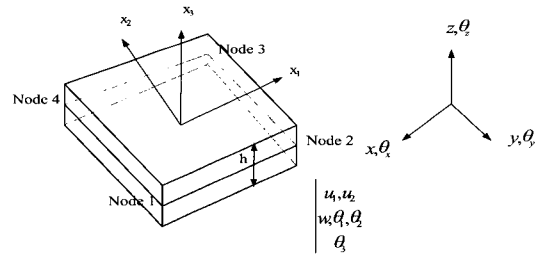


Fig. 1 Geometric representation of a quadrilateral plate element

주로 사용되고 있으며 (Hughes-Liu⁽⁵⁾, Belytschko-Tsay shell⁽⁶⁾) 별도의 hourglass 조절 방법을 적용하고 있다. 이는 횡단면 전단력이 0이 되어야 하는 Kirchhoff 판이론의 경우 C^1 연속성이 요구되어 수식화가 복잡해지기 때문이다. 하지만 두께가 얇은 박판성형에서는 횡전단에 의한 변형은 거의 무시할 만하다. 이는 Kirchhoff의 제한조건을 적용시킬 수 있다는 의미이다. 다른 종류의 3차원 셸요소로 횡단면 전단력이 요소의 변을 따라 몇 개의 불연속 점에서 0이 되도록 한 Discrete Kirchhoff 요소^(1,2)가 있다(Fig. 1). 이 요소는 그 적용이 간단하고 요소의 변형에 대해 Mindlin 판보다 덜 예민한 장점이 있다.

Fig. 1의 4절점 셸요소에서 요소에 접한 평면방향의 변형은 다음으로 주어진다.

$$\underline{u}_m = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \sum_{I=1}^4 N_I(\xi, \eta) \underline{U}_{mI} \quad (1)$$

여기서 u_1, u_2 는 각각 x, y 방향의 변위, \underline{U}_{mI} 은 절점에서의 평면 변위값이며, $N_I(\xi, \eta)$ 는 4절점 요소에 대한 쌍선형(bilinear) 형상 함수이다.

셸요소의 회전을 고려하기 위하여 요소 내의 한 점에서의 회전은 다음의 2차식으로 가정된다.

$$\underline{\theta} = \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} = \sum_{I=1}^4 N_I \underline{\theta}_I + \sum_{K=5}^8 H_K \Delta\theta_K \underline{z}_K \quad (2)$$

여기서 θ_1, θ_2 는 각각 x, y 방향의 회전, $\Delta\theta_K$ 는 요소의 4면에서의 회전을 의미하며, \underline{z}_K 는 변에서의 단위벡터이다. $H_K(\xi, \eta)$ 는 8절점 요소의 형상함수이다.

$$H_K = \begin{cases} \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1+\eta_K\eta) & K=5, 7 \\ \frac{1}{2}(1-\eta^2)(1+\xi_K\xi) & K=6, 8 \end{cases} \quad (3)$$

그러면 횡방향 변위는 기하학적 조건에서 3차식으로 표현되어야 하며 다음과 같이 주어진다.

$$w = \sum_{I=1}^4 N_I W_I + \sum_{K=5}^8 H_K \Delta w_K + \sum_{K=5}^8 M_K \beta_K \Delta \theta_K \quad (4)$$

여기서 Δw_K 는 요소의 4변에서의 횡방향 변위를 의미하며, M_K 는 3차 형상함수로

$$M_K = \begin{cases} \frac{1}{2}(1 - \xi^2)\xi(1 + \eta_K\eta) & K=5, 7 \\ \frac{1}{2}(1 - \eta^2)\eta(1 + \xi_K\xi) & K=6, 8 \end{cases} \quad (5)$$

로 주어진다.

Discrete Kirchhoff 제한조건은 횡방향 전단변형이 0이라는 Kirchhoff 조건을 영역 내의 몇 개의 점에서만 만족하는 것이다. 여기서는 Kirchhoff 제한조건이 요소의 변을 따라서만 만족된다고 가정한다. 즉

$$\gamma_{sz} = w_{,s} + \theta_s = 0 \quad (6)$$

여기서 $0 \leq s \leq L_K$ 는 변 K 를 따른 국부좌표를 의미하며, L_K 는 그 변의 길이이다. 식 (1)~(5)을 Kirchhoff 제한조건 (6)에 대입하면 형상함수상의 미지수 $\Delta \theta_K$, Δw_K , β_K 를 구할 수 있고, 따라서 식(7)과 (8)와 같이 회전과 횡축 변위에 대한 외연적 표현을 나타낼 수 있다.

$$\underline{\theta} = \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} = \sum_{I=1}^4 N_I \underline{\theta}_I + \sum_{K=5}^8 H_K \left(\frac{3}{2L_K} (w_i - w_j) + \frac{3}{4} \underline{n}_K \underline{n}_K^T (\underline{\theta}_i + \underline{\theta}_j) \right) \quad (7)$$

$$w = \sum_{I=1}^4 N_I W_I + \sum_{K=5}^8 H_K \frac{L_K}{8} \underline{n}_K^T (\underline{\theta}_j - \underline{\theta}_i) + \sum_{K=5}^8 M_K \left(\frac{1}{4} (w_j - w_i) + \frac{L_K}{8} \underline{n}_K^T (\underline{\theta}_i + \underline{\theta}_j) \right) \quad (8)$$

여기서 첨자 i, j 는 변 K 의 양단의 절점을 의미한다.

식 (1)과 (7), (8)의 형상함수는 4절점 사변형 요소에 대해 각 절점에서 5개의 자유도를 갖는 쉘요소의 형상함

수를 이루며, 이는 locking 현상에 대해 자유롭게 된다. 실제 성형해석에 사용하는 요소는 인접한 요소가 동일 평면상에 존재할 때 발생할 수 있는 hourglass mode의 적절한 제어를 위해 drilling 자유도^(3,4)를 도입하여 절점에서 6 자유도를 갖게 유도되며, 모든 식이 외연적으로 표현이 가능하여 전체적인 수식화가 Mindlin 이론을 사용한 쉘요소에 비해 간단해지는 반면, 네 개의 적분점을 사용하여야 한다.

2.2 접촉탐색 알고리즘

금형은 삼각형 요소를 사용하여 표현되며, 금형요소와 재료의 절점과의 접촉을 찾아내게 된다. 종래의 접촉탐색은 주로 재료상의 한 절점에 대하여 모든 금형요소를 확인하는 직접탐색(brutal force search)이나 전체탐색(global search)과 국부탐색(local search)을 병행하는 방법이 주로 사용되어져 왔다. 본 연구에서는 금형의 모든 요소를 계층적 구조(hierarchical structure)로 구분하여 탐색을 효과적으로 수행하는 방법을 소개하고자 한다.

2.2.1 기본개념

계층적 구조의 기본적인 개념은 Global 좌표축에 평행한 면을 가진 상자(box)로 각 금형을 포장하는 것이다. 그 다음 각 상자가 정확히 금형의 한 요소를 포함할 때까지 단계(level)를 낮추어가며 상자를 세분화 해 나가는 것이다. 프로그램의 처음에 단 한 번만 상자를 세분화 해 놓은 다음 해석의 매 시간단계마다 세분화된 상자들을 추적하면서 접촉탐색을 수행하게 된다. 재료의 절점이 금형 안에 있을 때 접촉이 된 것이다. 가장 높은 단계에서 재료의 절점이 상자를 가로지른다면 탐색을 시작하게 된다. 만일 탐색이 시작되면, 가장 낮은 단계에 도착할 때까지 단계를 낮추어 가며 작은 상자(sub-box)들의 면을 가로질렀는지를 검사한다. 결국 찾아낸 가장 낮은 단계의 상자가 포함하고 있는 금형의 한 요소가 바로 재료와의 접촉이 발생하고 있는 요소이다.

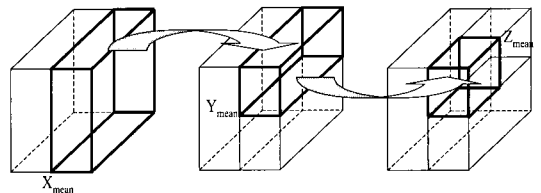


Fig. 2 Subdivided boxes in hierarchical structure

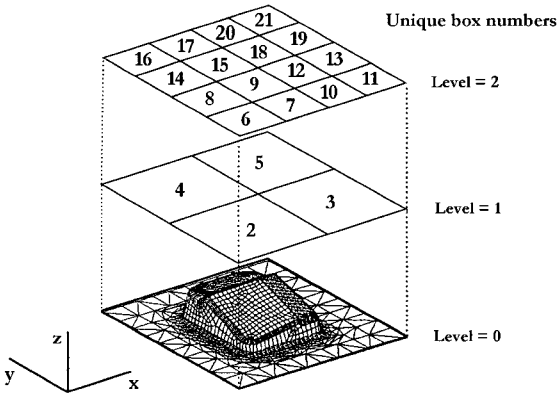


Fig. 3 Box division of tool into two levels in 2D

2.2.2 계층적 구조(Hierarchical structure)의 생성

다수의 금형요소를 포함하는 임의 단계에서의 상자는 상·하, 좌·우, 전·후의 8개의 작은 상자로 나뉜다. Fig. 2에서 볼 수 있는 과정이 한 단계에서 수행되는 과정이다. 다시 말하면, 단계가 내려갈 때마다 Fig. 2에서 처럼 각 상자들은 8개의 작은 상자들로 세분화되는데 작은 상자를 생성하기 위해 x 축을 따라 상자의 반을 포함하는 두 개의 작은 상자들로 쪼개고, 다시 y 축을 따라 이 두 개의 상자들을 각각 두 개의 작은 상자들로 쪼갬다. 마지막으로 z 축을 따라 이들 4개의 상자들 각각을 두 개의 상자들로 쪼개는 것이다. 이를 위해 금형요소의 기준점으로서 면의 무게중심을 사용한다. 어느 한 방향으로 상자를 나누기 위해 포함된 금형요소의 중심의 위치에 대한 평균값을 구하여 $x \leq x_{mean}$ 인 첫 번째와 $x \geq x_{mean}$ 인 두 번째의 두 개의 작은 상자를 형성하고 각각에 포함된 금형요소를 정의할 수 있게 된다. y 와 z 방향에 대해 같은 방법을 적용하면 금형요소의 상자를 여덟 개의 작은 상자로 나눌 수 있게 되며, 그 작은 상자들에 대하여 과정을 반복할 수 있다. 단계가 높아질수록 각 상자들은 세분화되는데, Fig. 3에 2차원의 경우에 단계가 높아지는 과정을 표시하였다. Fig. 3에서는 2차원이기 때문에 단계가 높아질수록 1개의 상자가 4개의 작은 상자로 나뉘어졌지만 3차원의 경우는 1개의 상자가 8개의 작은 상자로 나뉘어지게 된다. 이 과정의 중지 기준은 작은 상자가 오직 하나의 금형요소를 포함하거나 작은 상자가 비어 있을 때다. 첫 번째 작은 상자의 모든 요소들이 쪼개는 값보다 작고, 두 번째 작은 상자의 모든 요소들이 쪼개는 값보다 큰 상자를 두 개의 작은 상자들로 나누기 위한 방법은 quicksort⁽⁷⁾에 의한 분할방법을 사용하였다. 단계가 높아지면서 만들어지는 각 작

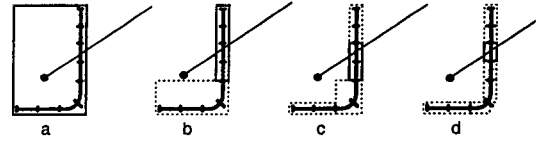


Fig. 4 Contact Searching

은 상자들에 대한 정보는 queue에 저장이 된다. 각 queue가 포함하고 있는 정보는 각 축의 최대, 최소로서 이것으로 상자의 한계평면을 결정한다. 다음으로 포함하는 정보는 현재 상자의 다음 단계에서 나뉘어지는 여덟 개의 작은 상자들의 queue상에서의 위치에 대한 정보이며, 마지막으로 포함하는 정보는 현재 상자의 상위 단계의 상자(parent box)에 대한 queue상에서의 위치 정보이다. 이러한 정보들을 바탕으로 접촉위치를 찾아가기 위해 계층적 구조를 추적하게 된다.

2.2.3 접촉탐색

변형 중 매 시간단계에서 각각의 절점에 대하여 절점이 금형 안에 있는지의 여부를 검사해야 한다. 계층적 구조의 정보들을 가지고, 작은 상자들을 쫓아가면서 정확한 접촉위치를 찾게 된다. 모든 금형요소를 포함하고 있는 첫 번째 단계의 상자를 검사하여 접촉이 확인되면 다음 단계의 8개의 작은 상자들을 검사하여 접촉이 확인된 하나의 상자를 찾아내고 그 다음 단계에서 확인된 상자의 8개의 작은 상자들을 검사하게 된다. 이 과정을 반복하면 가장 마지막 단계에서는 접촉이 일어나고 있는 하나의 요소를 찾아내게 된다. Fig. 4에 접촉탐색의 과정이 간단하게 묘사되었다. 경계표면으로의 법선 \bar{a} 를 정의하면, 교차점에서 outer normal을 가진 반 무한한 직선의 방향 벡터 \bar{n} 과의 내적의 부호를 검사함으로써 교차선이 금형의 안쪽으로 가고 있는지 바깥쪽으로 가고 있는지를 찾아낼 수 있다. \bar{n} 은 현재 단계에서의 요소의 법선벡터로서 절점주위의 요소의 수직벡터의 합으로 표시된다. 가장 가까운 절점에서 내적 $\bar{a} \cdot \bar{n}$ 가 음수이면, 점은 금형의 내부에 존재한다. 접촉탐색은 계층적 구조의 가장 낮은 단계에서 상자와의 교차를 검사함으로써 시작하여 최종적으로 교차점을 포함하는 가장 높은 단계에서의 작은 상자를 찾아내고, 그 작은 상자의 x, y, z 방향의 최대값과 최소값을 이용하여 절점의 금형 내부로의 침투량 δ 를 계산하게 된다. 이 경우 탐색의 한 단계가 내려갈 때마다 탐색해야 하는 상자가 1/8씩 줄어들게 되므로 탐색에 소요되는 계산시간은 N개의 금형요소 에 대하여 $O(N \log_8 N)$ 이 되며, 직접탐색의 경우 $O(N^2)$

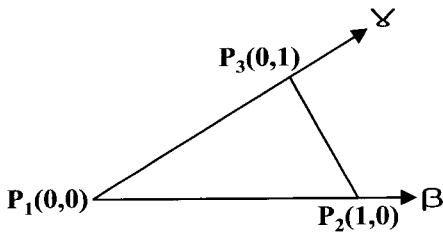


Fig. 5 Natural coordinate of tool segment

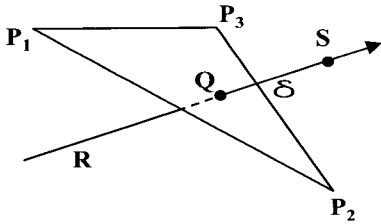


Fig. 6 Tool segment to find exact contact position and penetration

에 비해 $O(N/\log_8 N)$ 의 속도 향상을 가져올 수 있다.

정확한 접촉위치와 침투량 δ 를 계산하기 위해 Fig. 5의 고유 좌표계(natural coordinate)를 도입하면,

$$\begin{aligned} \phi_1 &= 1 - \beta - \gamma = \alpha \\ \phi_2 &= \beta \\ \phi_3 &= \gamma \end{aligned} \quad 0 < \alpha, \beta, \gamma < 1 \quad (9)$$

또한 금형 요소 위의 임의의 한 점의 좌표는 다음으로 묘사된다.

$$\begin{aligned} x &= \sum_{i=1}^3 \phi_i x_{pi} \\ y &= \sum_{i=1}^3 \phi_i y_{pi} \\ z &= \sum_{i=1}^3 \phi_i z_{pi} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 (x_{pi}, y_{pi}, z_{pi}) 는 요소를 정의하는 3개의 절점 P_1, P_2, P_3 의 좌표이다.

Fig. 6의 접촉점은 금형을 통과하는 절점 S의 좌표와 침투거리 δ , 그리고 각 방향의 단위벡터 R 을 이용하여, 다음으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= x^S + \delta \cdot R_x \\ y &= y^S + \delta \cdot R_y \\ z &= z^S + \delta \cdot R_z \end{aligned} \quad (11)$$

그러면, 식(10)과 식(11)을 이용하여 α, β, δ 에 대한 연립 방정식을 풀어 접촉이 발생하는 정확한 접촉위치와 침투량 δ 를 구할 수 있고, 구하여진 δ 와 벌칙상수를 이용하여 접촉력을 계산하게 된다.

2.2.4 접촉력 처리

접촉력의 계산을 위해서 동적양해법에서 주로 사용되는 벌칙법을 사용하였다. 이는 박판의 한 점이 금형 안으로 침투한 양(δ)을 계산하여 이 침투량에 벌칙상수(K_p)를 곱하여 접촉력을 구하는 방법으로 다음으로 표시할 수 있다.

$$F_c = K_p \delta \quad (12)$$

여기서 침투량 δ 는 변위 U 의 함수로 식(10)과 (11)에서 구해지며, K_p 는 벌칙상수이다.

벌칙상수의 결정은 Hallquist⁽⁸⁾에 의해 제안된 다음의 경험식을 사용하였다.

$$K_p = \frac{fKA_i^2}{V_i} \quad (13)$$

여기서 A_i, V_i 는 각각 i 번째 요소의 면적과 부피이며, K 는 재료의 체적 탄성 계수이다. 식에서 f 는 사용자의 경험과 문제에 따라 정해지는 상수로 본 연구에서는 0.1의 값을 사용하였다.

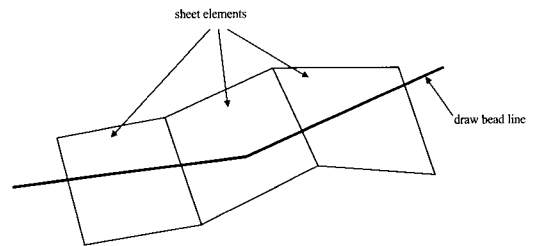


Fig. 7 Discretization of bead element

2.3 드로우비드 알고리즘

재료유동을 조절하는 드로우비드를 모델링하기 위하여 등가 드로우비드 모델^(9,10)을 사용하였다. 이 모델에서 실제의 드로우비드는 관련된 금형 표면의 하나 위의 드로우비드 선들로서 표현된다. 그리고 실제의 드로우비드에 의한 억제력에 상응하는 힘들이 변형된 박판 위에서 이 비드 선을 따라 부과된다.

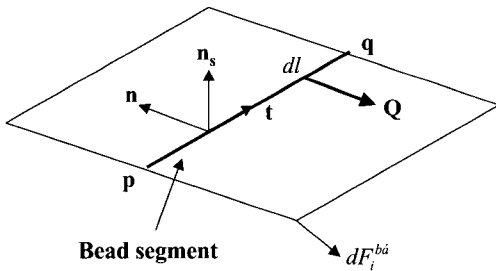


Fig. 8 Draw bead segment and coordinate system

2.3.1 등가(equivalent) 드로우비드 모델

드로우비드 선의 서술을 위해 다음의 기본적인 가정을 하였다.

(1) 상응 드로우비드는 금형 표면 위에 고정되고, 선 요소들의 집합으로 표현된다. 드로우비드의 선요소를 비드 요소라고 한다. 하나의 비드 요소는 Fig. 7에서 보여진 것처럼 몇 개의 박판 요소들에 걸쳐 위치될 수 있다.

(2) 하나의 비드 요소를 하나의 박판 요소에 걸쳐 위치하도록 하기 위해 작은 요소들로 이산화시킬 수 있다. 비드 요소 위의 점 P에서, 벡터 \bar{t} , \bar{n} , 그리고 \bar{n}_s 인 직교 local 좌표계를 정의한다(Fig. 8). 여기서 \bar{n}_s 은 접촉하는 박판 표면에 대한 단위 법선 벡터이다. 이 박판 위의 법선벡터는 같은 점에서 금형 위의 법선벡터와 다를 수도 있다. 그러나 그 차이는 비드 영역에서의 박판이 금형들에 의해 단단히 고정된다고 간주되기 때문에 무시될 수 있다.

(3) 드로우비드의 단위 길이당 구속(restraining) 힘인 일반화된 비드 응력 Q 를 정의한다. 그것은 비드 형상에 의존하고, 보통 실험에 의해서 결정된다. 박판의 굽힘이나 unbending에 관계된 어떤 힘이나 변형을 포함하지 않는다.

(4) 비드 선 위의 한 점에 대하여 '탄성'과 '소성'의 가능한 2가지 상태가 있다. 탄성 상태는 절점에 부과되는 힘이 그 절점에서의 항복응력(draw bead restraining force)보다 훨씬 작고, 그 점은 고정되는 상태라고 표현된다. 소성 상태는 그 힘(nodal force)이 임계 힘까지 도달하고, 그 비드에 걸쳐 미끄러움이 일어나는 상태로 간주한다. 이 순간에는, 단지 일정한 구속력만이 고려된다.

Fig. 8에서 비드 요소가 박판 요소를 가로지른다고 하면 절점 α 에 대한 비드구속력의 총 기여도는 다음과 같이 쓰여진다.

$$F_i^{ba} = \int dF_i^{ba} = \int_p^q Q_i N^\alpha dl \tag{14}$$

여기서 N^α 는 절점 α 에 대한 형상함수이다.

2.3.2 비드선의 탐색

비드구속력을 부과하기 위해, 비드선을 가로지르는 박판 요소를 찾아내야 한다. 박판 요소들에 대해 금형 요소의 경우와 같이 계층적 구조를 구성함으로써 접촉 탐색에서 사용했던 알고리즘과 동일한 탐색 알고리즘을 사용한다. 박판요소에 대한 계층적 구조는 비드 탐색 전에 만들어져야 하고, 드로우비드 선들(비드 요소들)은 각각의 접촉 요소들 위의 비드 요소들로 이산되어진다. 요소 경계가 변형과 동시에 변화하므로, 이 요소 계층적 구조는 각 시간 단계(time step)마다 갱신된다.

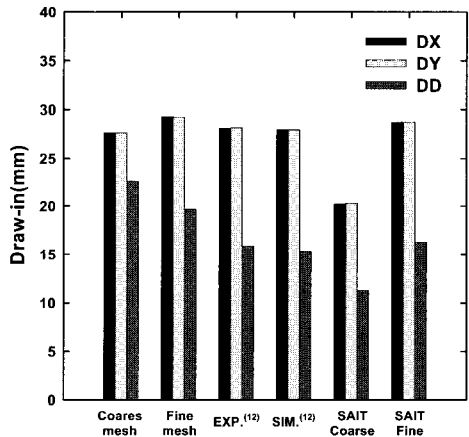


Fig. 9 Comparison of draw-in amount in DX, DY and DD at punch stroke of 40mm for square cup drawing

3. 유한요소해석

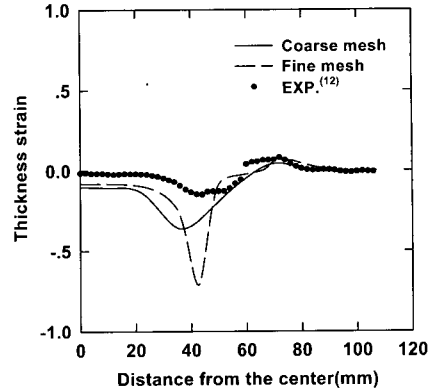
새로운 접촉탐색 방법의 타당성을 검토하기 위해 박판 성형 해석용 유한요소 프로그램을 작성하고, 작성된 프로그램을 이용하여 NUMISHEET 93⁽¹¹⁾의 사각컵 해석과 NUMISHEET' 96⁽¹²⁾의 S-rail 성형공정의 해석, 그리고 자동차 연료탱크의 성형 해석을 수행하고, 결과들을 비교해 보았다.

3.1 사각컵 해석

사각컵 해석은 NUMISHEET 93의 Benchmark 문제에 포함되었던 예제로서 간단하면서도 박판성형 공정해석을

비교해 보기 좋은 대표적인 성형공정이다. 사각컵의 재원은 NUMISHEET 93에서 제시된 형상과 같은 형상을 사용하였다. 블랭크의 초기크기는 150×150mm이며, 초기두께는 0.78mm이다. 대칭성에 의하여 제품의 1/4만을 모델링하였고, 해석에 사용된 재료는 연강(mild steel)이다. 블랭크 홀딩력은 4.9kN이며, 사인파형 펀치속도를 사용한 펀치의 평균 속도는 10m/s, 펀치의 총 이동거리는 40mm이다.

요소수 100개의 거친 요소와 요소수 1225개의 조밀한 요소 두 가지의 블랭크를 가지고 해석을 수행하였는데, Fig. 9에서는 각각 NUMISHEET 93의 실험 결과와 전산해석 결과, SAIT_STAMP⁽¹³⁾의 해석결과로서 각각 거친 요소와 조밀한 요소를 사용하였을 때의 draw-in양을 보였다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 거친 요소는 다른 결과들에 약간의 오차를 보이고 있는 반면, 조밀한 요소는 다른 결과들과 거의 일치하는 결과를 확인할 수가 있다. 이는 본 논문에서 제안된 접촉 탐색 방법은 문제가 없고, 다만 요소의 크고 작음이 미치는 영향임을 알 수가 있다. 이처럼 요소의 크기에 따라 시간 증분이 다른 값으로 결정되고, 그에 따라 적절한 감쇠상수의 수치도 달라짐을 알 수 있다. 감쇠상수 역시 사용자의 임의로 설정하지 않아도 프로그램 상에서 적절히 선택되어지는 기준이 제시되어야겠다. Fig. 10은 두께 변형률의 거친 요소와 조밀한 요소 그리고 NUMISHEET 93의 실험 결과의 평균값과의 비교를 보여준다. 코너부에서 부분적으로 오차가 나타나는데 이는 개발된 DKQ 요소가 평면 내에서 4개의 적분점을 가지기 때문에 stiff한 경향을 보이기 때문으로 보이고, 계산된 주변형률(major strain)이

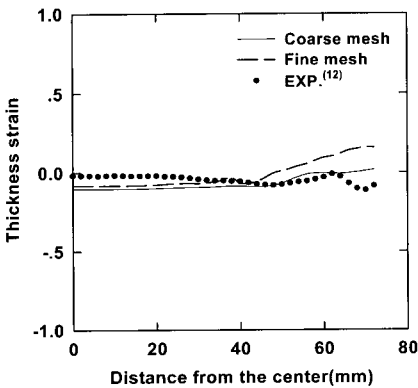


(b)

Fig. 10 Thickness strain distribution at punch stroke of 40mm for square cup drawing along (a) longitudinal and (b) diagonal direction

실험치보다 작게 나오는 경향을 보이고 있으며, 이는 향후 보완이 필요한 것으로 판단된다.

다음으로 드로우비드의 영향을 살펴보기 위하여 사각컵의 모델에서 드로우비드가 포함된 경우와 포함되지 않은 경우를 비교하여 보았다. Fig. 11은 드로우비드의 영향을 보여주는 결과로서, 점선은 초기 블랭크의 형상을 보여주고 있고, 실선은 비드가 없는 경우의 변형형상을, 일점쇄선은 비드가 포함되어 있는 경우의 변형형상을 보여주고 있다. 비드가 있는 경우 비드의 영향으로 재료의 유동이 구속되고 있음을 확인할 수 있다.



(a)

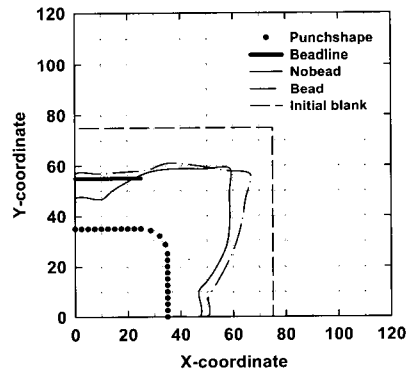
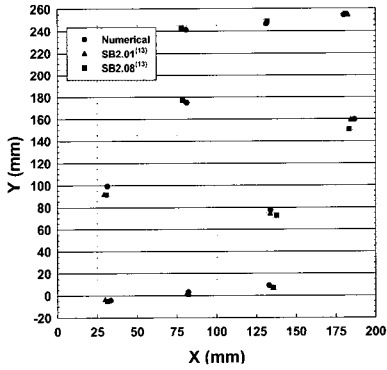
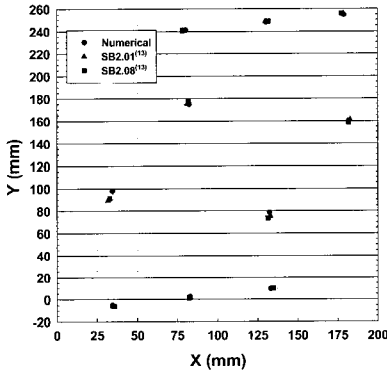


Fig. 11 Effect of draw-bead line (unit:mm)

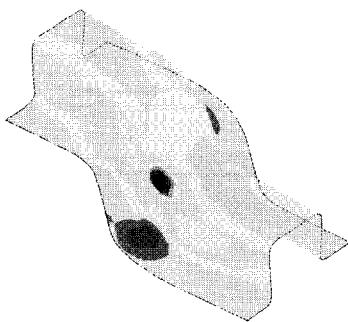


(a)

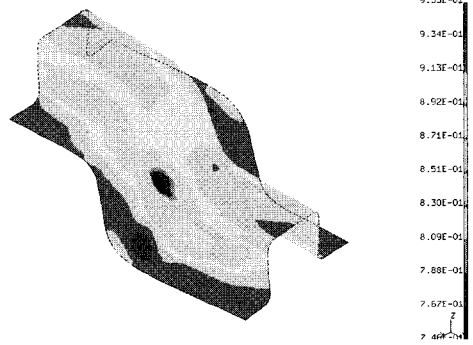


(b)

Fig. 12 Deformed position of key material points before springback for S-rail simulation with BHF of (a) 10kN and (b) 200kN



(a)



(b)

Fig. 13 Thickness distribution for S-rail forming simulation ((a)BHF=10kN, (b)BHF=200kN) (unit:mm)

3.2 S-rail 해석

S-rail 해석은 NUMISHEET 96의 Benchmark 문제에 포함되었던 예제로서 성형, 형상 뒤틀림, 주름, 탄성 복원 등을 비교해 보기 위한 문제이다. 본 논문에서는 해석 프로그램의 한계성으로 모든 부분을 비교해 보지 못하고, 비교 가능한 몇 가지 항목에 대하여 비교해 보았다. 해석에 사용된 S-rail의 기하학적 형상은 NUMISHEET 96에서 제시된 형상과 같은 형상이다. 해석에 사용된 재료는 고강도강(high strength steel)이며, 초기 블랭크의 두께는 1mm이고, 속도는 10m/s로 일정하게 하였다. 마찰계수는 펀치, 다이, 블랭크 홀더에 대하여 모두 0.11을 사용하였으며, 펀치의 총 이동거리는 40mm이다. NUMISHEET 96에서 S-rail해석은 원래 성

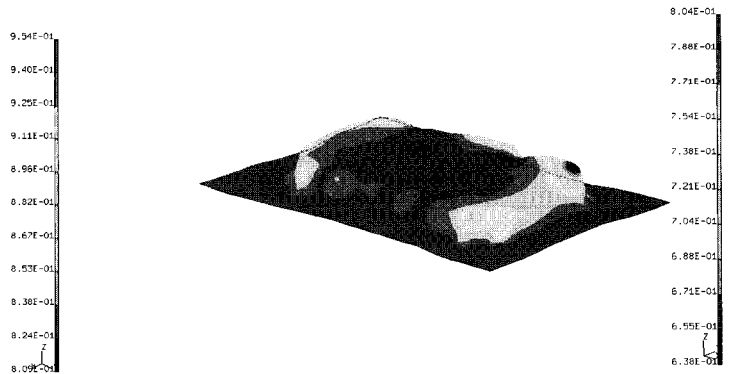


Fig. 14 Thickness distribution for fuel tank forming simulation (unit:mm)

형 후의 탄성복원에 관심을 두고 결과들을 비교해보기 위한 문제였으나, 본 논문에서 사용된 프로그램에서는 탄성복원에 관한 해석이 불가능하기 때문에, 탄성복원 전의 결과만을 비교해 볼 수 있었다.

NUMISHEET 96에서 주어진 대로 블랭크 홀딩력을 10kN과 200kN의 두 가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. Fig. 12는 블랭크 홀딩력을 각각 10kN과 200kN으로 하였을 경우의 변형후의 외곽선 형상을 NUMISHEET '96의 결과와 비교한 그림으로 서로 비슷한 경향을 나타냄을 볼 수 있다. Fig. 13은 각각의 블랭크 홀딩력에 대한 두께 분포를 보여준다.

3.3 자동차 연료 탱크 해석

좀 더 복잡한 형상의 모델을 해석해 보기 위해서 실제 자동차 연료 탱크의 해석을 수행하였다. 연료 탱크는 금형 표면이 계단식의 형상을 이루고 있고, 접촉과 마찰에서 고차의 비선형성이 존재하기 때문에 전산모사에 상당한 어려움이 있는 모델이다. 해석에 사용된 재료는 냉간압연강(cold rolled steel)이며, 블랭크의 초기 두께는 0.8mm이며 펀치의 속도는 10m/s, 펀치의 총 이동거리는 113mm이다. 펀치와 블랭크의 마찰계수는 0.11이며, 다이와 블랭크 홀딩과 마찰계수는 0.05로 하였다. Fig. 14는 자동차 연료 탱크의 성형후 두께 분포도이며, 개발된 접촉탐색 방법이 매우 복잡한 형상의 실제 모델에도 적용될 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

박판성형 해석에서 접촉 탐색은 많은 계산비용을 차지하는 부분으로서 개선이 필요하며, 정확하고 효율적인 해석을 위해서 유효소의 선택 또한 중요하다. 본 논문에서는 기존의 접촉 탐색 방법과는 다른 효과적이고 정확한 계층적 접촉 탐색 방법을 개발하고 Discrete Kirchhoff 유효소를 프로그램에 적용하여 해의 타당성을 검증하기 위하여 사각각 해석과 S-rail 해석, 자동차 연료 탱크 해석 등 몇 가지 문제를 풀어보았다. 계층적 접촉탐색을 이용한 경우 접촉탐색에 소요되는 계산시간은 모델에 따라 차이가 있으나 전술한 세 가지 경우에 대해 전체 계산시간의 4.5~7.9%정도가 소요되어 개발된 탐색방법이 효과적임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (과제번호 981-1008-050-2)에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) J.L.Batoz, 1982, "An Explicit Formulation for an Efficient Triangular Plate-Bending Element", Int. J. Num. Meth. Eng., Vol.18, pp.1077~1089.
- (2) J.L.Batoz, 1980, "A Study of Three-Node Triangular Plate Bending Elements", Int. J. Num. Meth. Eng., Vol.15, pp.1771~1812.
- (3) D.J.Allman, 1988, "A Quadrilateral Finite Element Including Vertex Rotations for Plane Elasticity Analysis", Int. J. Num. Meth. Eng., Vol.26, pp.717~730.
- (4) C.Chinosi, M.I.Comodi and G.Sacchi, 1997, "A New Finite Element with 'Drilling' D.O.F.", Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol.143, pp.1~11.
- (5) T.J.R.Hughes and W.K.Liu, 1981, "Nonlinear Finite Element Analysis of Shells: Part I. Three-Dimensional Shells", Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol.26, pp.331~362.
- (6) T.Belytschko and C.S.Tsay, 1984, "Explicit Algorithms for Nonlinear Dynamics of Shells", Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol.43, pp.251~276.
- (7) D.E.Knuth, 1973, The Art of Computer Programming, Vol.3, Sorting and Searching, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- (8) J.O.Hallquist, G.L.Goudreau and D.J.Benson, 1985, "Sliding Interfaces with Contact- Impact in Large-Scale Lagrangian Computations", Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol.51, pp.107~137.
- (9) E.Haug, E.Di Pasquale, A.G.Pickett and D.Ulrich, 1991, "Industrial Sheet Metal Forming Simulation Using Explicit Finite Element Methods", FE simulation of 3-D Sheet Metal Forming Processes in Automotive Industry, VDI Beriche 894, J.Reissner et. al. eds., VDI Verlag, pp.259~291.

- (10) B.D.Carleer, T.Meinders and H.Huetink, 1996, "Equivalent Drawbead Model in Finite Element Simulation", NUMISHEET 96, J.K.Lee et. al eds., Dearborn, pp.25~31.
- (11) Proc. of NUMISHEET 93, 1993, A.Makinouchi, E.Nakamachi, E.Onate and R.H.Wagoner eds.
- (12) Proc. of NUMISHEET 96, 1996, J.K.Lee, G.L.Kinzel and R.H.Wagoner eds.
- (13) 정완진, 조진우, 1998, "박판금속 성형공정 해석시스템 개발", 한국소성가공학회 제2회 박판성형 심포지엄 논문집, pp.83~94.