

박판성형해석을 위한 자동 프리에지 제거에 관한 연구

유 동 진*

(2004년 7월 15일 접수)

A Study on the Automatic Elimination of Free Edge for Sheet Metal Forming Analysis

D. J. Yoo

Abstract

A new approach for the automatic elimination of free edges in the finite element model for the analysis of sheet metal forming processes is presented. In general, the raw finite element model constructed from an automatic mesh generator is not well suited for the direct use in the downstream forming analysis due to the many free edges which requires tedious time consuming interactive graphic operations of the users. In the present study, a general method for the automatic elimination of free edges is proposed by introducing a CAD/CAE hybrid method. In the method a trimmed parametric surface is generated to fill the holes which are originated from the free edges by using the one step elastic finite element analysis. In addition, mesh generation algorithm is suggested which can be used in the general trimmed surface. In order to verify the validity of the proposed method, various examples including actual automobile sheet metal parts are given and discussed.

Key Words : Free Edge, Trimmed Parametric Surface, Elastic Finite Element Analysis, Hole Filling

1. 서 론

차체 판넬등의 복잡한 곡면으로 이루어져 있는 박판 제품을 성형 해석하고자 할 때 고려해야 할 중요한 문제중의 하나는 임의의 복잡한 형상을 갖는 금형면의 수학적 묘사방법이다.⁽¹⁻⁴⁾ 충분한 정확도를 가지고 부드러운 금형면을 묘사하기 위하여 여러가지 방법들이 제안되어 왔는데 대표적인 방법으로는 매개변수 곡면에 의한 방법, 비 매개변수곡면에 의한 방법, 유한요소격자에 의한 방법등이 있다. 이중에서 유한요소격자에 의한 방법은 금형면을 삼각형 또는 사각형의 유한요소격자로 나누어서 금형면을 묘사하는 방법으로 복잡한 형상을 갖는 금형면 묘사를 위해 가장 보편적인

방법으로 널리 사용되고 있다. 그러나 초기곡면 CAD 데이터를 유한요소격자로 분할해야 하기 때문에 이를 위한 전용 유한요소 자동생성기 개발에 관하여 연구가 있어왔고⁽⁵⁾ 일부 상용 프로그램들이 개발 보급되어 이러한 목적으로 사용되고 있으나 초기 CAD 데이터의 불완전성, IGES CAD 데이터 변환과정중의 오류, 유한요소격자로의 변환 과정중의 오류, 곡면 데이터들간의 겹침 및 간격발생 등으로 인하여 전용 유한요소 자동생성기에 의하여 생성된 격자를 바로 성형 해석을 위한 입력 데이터로 이용하기에는 많은 문제점이 있어왔다. 이와 유사한 문제점은 최근 제품 개발기간의 단축 및 비용절감을 위하여 많이 이용되고 있는 폴리곤 기반 역공학(Reverse Engineering)의 데이

* 교신저자: 대전대학교 컴퓨터응용기계설계공학과

터 처리 과정에서도 찾아 볼 수 있는데 3 차원 스캐너로부터 점 데이터를 얻는 과정에 있어서의 측정 데이터의 누락, 서로 다른 시점(view point)에서 얻은 데이터를 합치는 과정에서의 오류등으로 인하여 많은 후처리 작업들이 필요하게 된다.⁽⁶⁻⁷⁾ 그 중에서 구멍메움(hole filling) 과정은 역공학을 위한 후처리 작업 중에서도 가장 필수적인 단계로서 구멍(hole) 또한 프리에지(free edge)로부터 비롯된 것이므로 프리에지를 원천적으로 제거해 주는 것이 필요하다.

본 논문에서는 유한요소격자 방법의 문제점중의 하나인 프리에지를 자동적으로 제거하는 알고리즘을 개발함으로써 성형해석을 위한 입력자료 준비기간의 단축에 도움을 주고자 한다. 그동안 CAD 및 역공학 분야에서 삼각, 오각, 육각등의 임의의 갯수의 경계 곡선을 가진 구멍을 곡면 또는 유한요소격자로 채우기 위하여 NURBS 패치나 메쉬분할법(subdivision method) 등을 이용한 다양한 연구가 수행되어 왔다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

본 연구에서는 오각, 육각등의 정형화된 구멍은 물론 프리에지의 형상이 복잡하여 구멍의 형상이 일반적인 경우에도 적용할 수 있는 CAD/CAE의 혼합적 방법을 제안하였는데 탄성유한요소해석을 통하여 프리에지 및 구멍을 완전히 없앨 수 있는 3 차원 기본 곡면을 생성한 후 프리에지를 트림곡면의 경계곡선으로 정의함으로써 곡면은 물론이고 필요하면 유한요소 격자도 얻을 수 있도록 하였다.

2. 유한요소모델의 데이터 구조 및 프리에지의 탐색

프리에지라는 것은 요소의 한 변에 두 개의 요소가 인접해 있지 않을 때 발생하는 것으로 Fig. 1에서 보는 바와 같이 유한요소모델의 중간에 임의의 형상의 구멍이 존재 한다는 것을 뜻한다. 두 유한요소모델의 연결성(connectivity)에 문제가 있는 것으로 성형해석을 위한 금형면 오프셋(offset) 및 해석시의 접촉탐색 자체를 불가능 하게 만들기 때문에 프리에지의 제거는 성형해석에서 필수적인 전처리 단계이다. 본 연구에서는 이러한 문제를 야기시키는 프리에지를 효율적으로 찾아내기 위하여 유한요소모델의 형상정보와 위상정보에 관한 데이터 구조를 Fig. 2 와 Table 1 과 같이 구축하였다. 성형해석을 위한 유한요소 모델의 경

우 보통 수만에서 수십만 개의 삼각형, 사각형 요소로 구성되어 있기 때문에 효율적인 데이터 구조 및 관리는 프리에지 탐색 및 그와 관련된 후처리 작업을 위하여 필수적이다.

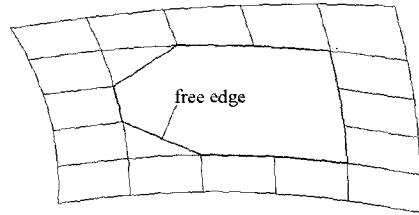


Fig. 1 Schematic diagram for free edge

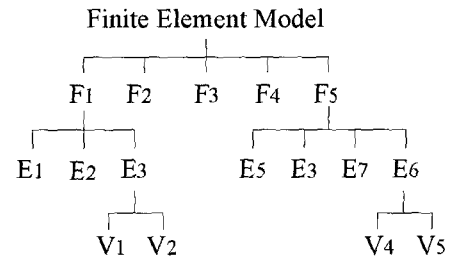
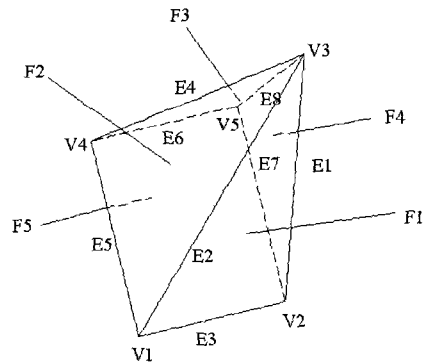


Fig. 2 Tree structure for the geometric information

Fig. 2 에서 보는 것처럼 최상위 요소인 면(face)에서부터 최하위 요소인 꼭지점(vertex)까지 트리 구조로 구성하였고 형상정보간의 연결관계를 나

타내기위한 위상정보를 Table 1 과 같이 설계하였다. 모서리에 관한 위상정보로부터 연결면이 한개인 프리에지를 찾아내고 모서리에 관한 형상정보로부터 프리에지에 의한 구멍의 개수 및 각 구멍을 구성하고 있는 점 데이터들의 개수, 좌표값 등을 구할 수 있다.

Table 1 Data structure for the topology information

Vertex	Connected elements number	Connected faces
V1	3	F1, F2, F5
V2	3	F1, F4, F5
V3	4	F1, F2, F3, F4
V4	3	F2, F3, F5
V5	3	F3, F4, F5

Edge	Connected faces
E1	F1, F4
E2	F1, F2
E3	F1, F5
E4	F2, F3
E5	F2, F5
E6	F3, F5
E7	F4, F5
E8	F3, F4

Face	Connected edges
F1	E1, E2, E3
F2	E4, E5, E2
F3	E6, E4, E8
F4	E7, E8, E1
F5	E5, E6, E7, E3

3. 트림곡면 및 요소의 생성

본 연구에서는 프리에지 및 구멍을 메우기 위하여 탄성 굽힘 에너지의 최소화 개념에 바탕을 둔 박판의 탄성유한요소 해석을 통하여 기본곡면(base surface)을 생성하고 프리에지를 트림곡면의 경계곡선으로 정의하는 CAD/CAE 의 혼합적 방법을 제안하였다. 사실 이러한 개념은 실제 차체 판넬과 같은 복잡한 형상의 박판 제품을 성형해석하기 위해 필요한 바인더 랩(binder wrap) 생성시

적용하였던 셸 요소에 의한 탄성유한요소해석법과 동일한 것으로 본 연구에서도 6 자유도의 셸(shell)요소와 곡면 경계조건을 이용하였다.⁽¹¹⁾ Fig. 3에서 보는 바와 같이 구멍을 이루는 점 데이터들로부터 루프를 구성한 후 루프를 이루는 점 데이터의 법선 벡터값의 평균에 수직인 평면상에 초기 메쉬를 구성한후 각 절점을 평면에 수직인 방향으로 유한요소모델에 투영시켜 구해진 점에서의 좌표값 및 경사각을 탄성유한요소 해석시 경계조건으로 하였다. 루프를 구성하는 각 점에서의 법선 벡터를 계산하기 위하여 앞절에서 정의된 꼭지점에서의 위상정보등이 이용된다. 이상 기술된 내용은 기본 곡면 구성에 관한 것으로 프리에지 및 구멍의 근본적인 제거를 위해서는 프리에지를 경계곡선으로 하는 트림곡면으로의 전환이 필요하다.

3.1 기본 곡면의 수식적 표현

탄성유한요소 해석을 통하여 구하여진 메쉬로부터 기본곡면을 생성하기 위하여 식(1)과 같은 매개변수 곡면 방정식을 이용하였다.

$$r(u, v) = x(u, v)i + y(u, v)j + z(u, v)k \quad (0 \leq u, v \leq 1) \quad (1)$$

여기서 $x(u, v)$, $y(u, v)$, $z(u, v)$ 는 사용하고자 하는 곡면의 형태에 따라 여러가지 방법으로 수식화될 수 있는데 본 연구에서는 일반 CAD 시스템과의 연계성을 위하여 식(2)와 같은 u, v 에 관한 3차 다항식을 사용하였다.

$$\begin{aligned} r(u, v) &= \sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^3 a_{ij} u^i v^j \quad (2) \\ &= a_{00} + a_{10}u + a_{20}u^2 + a_{30}u^3 \\ &\quad + (a_{01} + a_{11}u + a_{21}u^2 + a_{31}u^3)v \\ &\quad + (a_{02} + a_{12}u + a_{22}u^2 + a_{32}u^3)v^2 \\ &\quad + (a_{03} + a_{13}u + a_{23}u^2 + a_{33}u^3)v^3 \end{aligned}$$

식 (2)의 a_{ij} 는 곡면을 구성하는 한 패치(patch)의 형상을 결정짓는 계수로서 본 연구에서는 퍼거슨 곡면 보간법을 이용하여 구하였다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 탄성유한요소해석으로부터 구해진 각 절점 P_{ij} 는 퍼거슨 곡면을 생성

하게 될 구성점으로서 여러 개의 패치가 모여있는 곡면을 생성하게 된다. 퍼거슨 곡면을 형성하기 위해서는 각 패치의 4 귀퉁이 점과 각 점에서의 u, v 방향 접선 벡터값등이 필요하다. 본 연구에서는 각 귀퉁이 점에서의 u, v 방향 접선 벡터를 구하기 위하여 3 차 퍼거슨 곡선 보간법을 이용하였다. Fig. 4 에서 보는 바와 같이 u, v 두 방향에 대하여 곡선 보간을 하게 되면 각 점에서의 u, v 방향 접선벡터를 구할 수 있다. 이렇게 구해진 접선 벡터들과 각 구성점들로 부터 식(3)과 같이 퍼거슨 패치를 표현할 수 있다. 본 연구에서는 각 점에서의 트위스트 벡터값을 0 으로 하였다.

여기서

$$\begin{aligned} \alpha_0(u) &= 1-3u^2+2u^3 & \beta_0(u) &= u-2u^2+u^3 \\ \alpha_1(u) &= 3u^2-2u^3 & \beta_1(u) &= -u^2+u^3 \\ \alpha_0(v) &= 1-3v^2+2v^3 & \beta_0(v) &= v-2v^2+v^3 \\ \alpha_1(v) &= 3v^2-2v^3 & \beta_1(v) &= -v^2+v^3 \end{aligned}$$

이다.

식 (3)의 결과를 최종적으로 식(2)의 형태로 바꾸어 주기 위해서 식(4)와 같은 변환 작업을 수행하였다.⁽¹²⁾

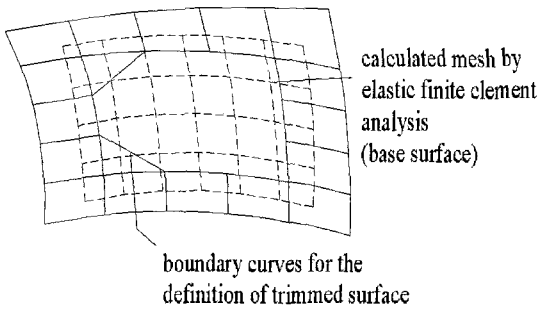
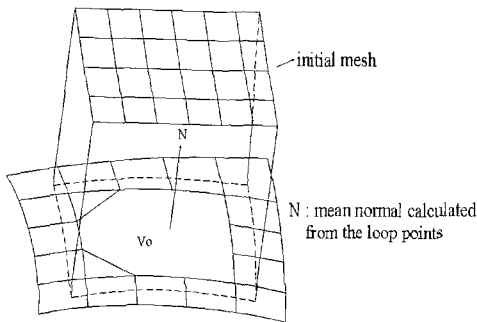


Fig. 3 Generation of trimmed surface

$$\begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} r(0,0) & r(0,1) & r_v(0,0) & r_v(0,1) \\ r(1,0) & r(1,1) & r_v(1,0) & r_v(1,1) \\ r_u(0,0) & r_u(0,1) & 0 & 0 \\ r_u(1,0) & r_u(1,1) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 & -3 & 0 & 1 \\ -2 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$r(u,v) = \begin{bmatrix} \alpha_0(u) & \alpha_1(u) & \beta_0(u) & \beta_1(u) \\ r(0,0) & r(0,1) & r_v(0,0) & r_v(0,1) \\ r(1,0) & r(1,1) & r_v(1,0) & r_v(1,1) \\ r_u(0,0) & r_u(0,1) & 0 & 0 \\ r_u(1,0) & r_u(1,1) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0(v) \\ \alpha_1(v) \\ \beta_0(v) \\ \beta_1(v) \end{bmatrix} \quad (3)$$

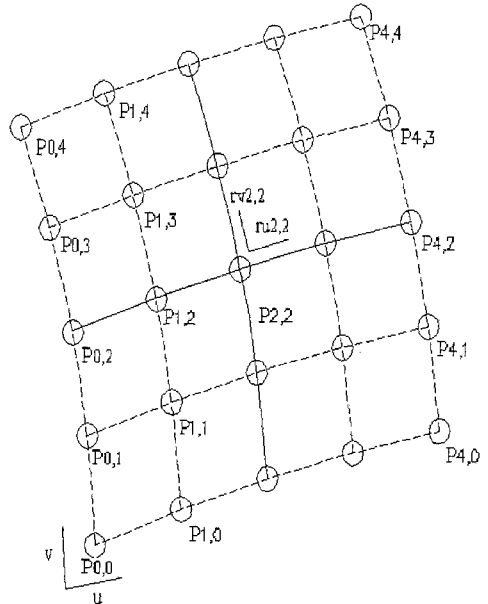


Fig. 4 Schematic diagram illustrating the Ferguson surface interpolation

각 패치의 형상을 결정짓는 계수가 구해졌으므로 기본 곡면은 수식적으로 표현될 수 있다. 대부분의 경우에 있어서는 프리에지가 3 차원 곡면상에 위치하지만 경우에 따라서는 한 평면상에 존재할 수도 있다. 이러한 경우에는 탄성유한요소 해석을 하지 않고 바로 3 차원 평면으로 정의하였다. 3 차원 평면의 경우에는 곡면에서나 필요한 식(2)에서의 계수들 대신 식(5)와 같은 평면 방정식을 구성하기 위한 수치 데이터를 필요로 한다.

$$r(u, v) = r_0 + uV_1 + vV_2 \quad (5)$$

여기서

r_0 : 평면상의 한 점
 V_1, V_2 : 평면상의 임의의 두 단위 벡터이다.

3.2 경계곡선에 의한 트림곡면의 생성

트림곡면은 식(2)로 표현되는 각 패치의 수치 정보외에 곡면에서 사용되어질 부분과 사용되지 않을 부분을 구분짓기 위한 경계곡선의 데이터가 추가적으로 요구되어지는데 본 연구에서는 프리에지로부터 얻은 구멍들의 루프를 구성하는 점 데이터들을 기본곡면에 수직투영(normal projection)하여 각 점에서의 u, v 값을 구한 후 다음과 같이 매개변수 t 에 관한 함수로 표현하였다. 경계곡선 역시 많은 세그먼트(segment)로 이루어지는데 한 세그먼트는 다음과 같이 표현된다.

$$u(t) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i t^i$$

$$v(t) = \sum_{i=0}^{n-1} b_i t^i \quad (6)$$

여기서 a_i, b_i 는 각각 u, v 에 관한 다항식의 계수들이고 n 은 곡선의 오더이다. 식(6)과 같은 경계곡선을 얻기 위해서는 루프를 구성하는 각 점들의 기본곡면에 대한 투영점들을 구해야 하는데 본 연구에서는 다음과 같은 뉴턴랩슨 방법을 이용하였다. 어떤 점 P 를 곡면 $r(u, v)$ 에 수직 투영시킨다는 것은 곡면 $r(u, v)$ 상에서 점 P 에 가장 가까운 근접점을 구하는 것이므로 다음과 같은 비선형 방정식의 해를 구하는 문제로 된다.

$$f(u, v) = r_u(u, v) \cdot (r(u, v) - P) = 0$$

$$g(u, v) = r_v(u, v) \cdot (r(u, v) - P) = 0 \quad (7)$$

식(7)을 풀기 위하여 비선형 뉴턴랩슨 방법을 적용하면

$$\begin{bmatrix} f_u & f_v \\ g_u & g_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f(u, v_i) \\ g(u, v_i) \end{bmatrix} \quad (8)$$

으로 된다.

여기서

$$\Delta u : u_{i+1} - u_i$$

$$\Delta v : v_{i+1} - v_i$$

$$f_u : |r_u|^2 + (r - P) \cdot r_{uu}$$

$$f_v : r_u \cdot r_v + (r - P) \cdot r_{uv}$$

$$g_u : r_u \cdot r_v + (r - P) \cdot r_{vu}$$

$$g_v : |r_v|^2 + (r - P) \cdot r_{vv}$$

이다.

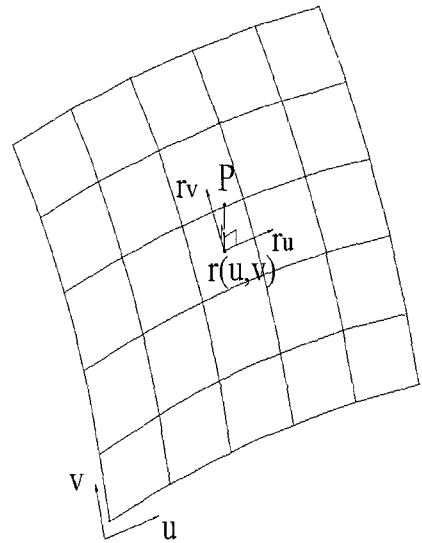


Fig. 5 Normal projection of loop points onto a base surface

식 (8)로 표현되는 반복계산식을 식(9)의 조건이 만족되는 근을 구할때까지 수행하게 된다.

$$|r(u_i, v_i) - P| \leq \epsilon, \quad (9a)$$

$$\frac{|r_u(u_i, v_i) \cdot (r(u_i, v_i) - P)|}{|r_u(u_i, v_i)| \|r(u_i, v_i) - P\|} \leq \varepsilon_2 \quad (9b)$$

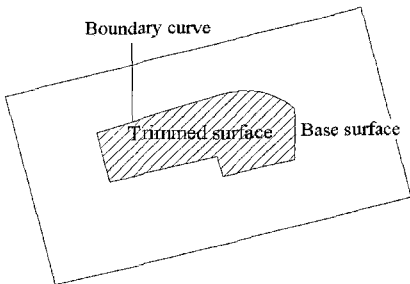
$$\frac{|r_v(u_i, v_i) \cdot (r(u_i, v_i) - P)|}{|r_v(u_i, v_i)| \|r(u_i, v_i) - P\|} \leq \varepsilon_2$$

식 (9a)는 P 점이 곡면상에 정확히 위치하고 있을 때의 종료조건을 의미하며 식 (9b)는 P 점이 곡면상에서 미소량 벗어나 있을 때 P 점과 최소근접점을 잇는 직선이 최소 근접점에서의 u, v 방향 접선벡터와 90°를 이룬다는 기하학적 개념에 바탕을 둔 종료조건을 나타낸다. 어떤 조건이든 만족되면 식 (8)의 반복계산은 종료되고 최소 근접점에서의 u_i, v_i 를 경계곡선을 이루는 한 점에서의 매개변수로 정의하게 된다. 이러한 과정은 루프를 구성하는 모든 점들에 대해서 행해지게 된다.

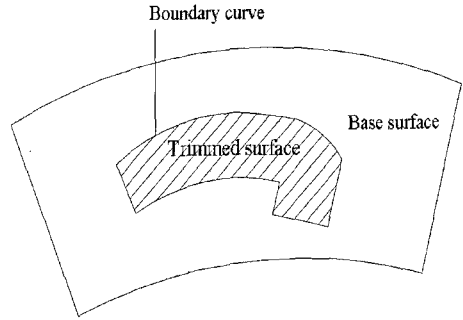
앞절에서 구해진 기본 곡면방정식과 아울러 본절에서 구한 경계곡선 데이터는 트림곡면 및 트림 평면을 정의하는 기본 데이터가 된다. Fig. 6에서와 같이 경계곡선안이 사용되어질 부분을 뜻하고 바깥부분은 사용되지 않는 버리는 부분을 의미한다.

3.3 트림곡면에 대한 요소의 생성

앞 절에서 정의된 트림평면 및 트림곡면을 이용하여 프리에지 및 구멍을 제거하기 위하여 트림된 영역 내부에 요소를 생성하였다. 본 연구에서 사용된 요소 생성기는 저자에 의하여 개발, 상용화된 박판성형해석 전용 자동요소생성기로서 격자 이용법 및 Delaunay 삼각화법을 기본으로 하고 있다.^(5,13) 생성된 요소를 구멍주위의 요소들과 결합시켜주면 프리에지 및 구멍이 없는 완전한 형태의 유한요소모델을 얻을 수 있다.



(a)



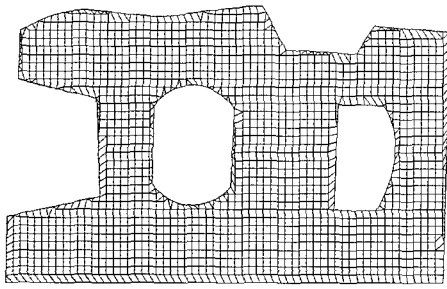
(b)

Fig. 6 Classification of trimmed surface

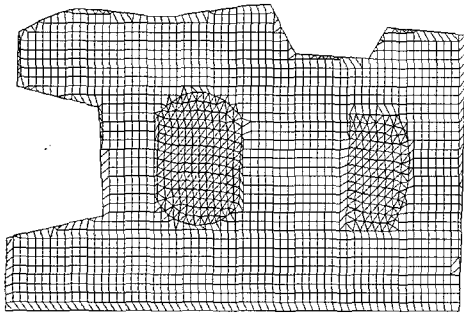
- (a) Trimmed planar surface
- (b) Trimmed curved surface

4. 적용 예

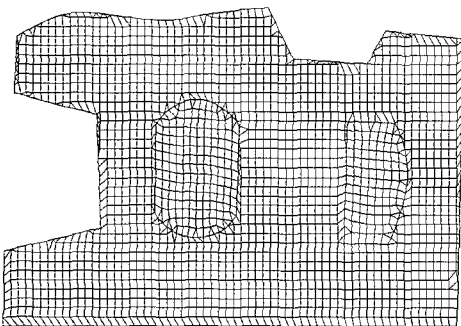
본 연구를 통하여 개발된 프리에지의 자동제거알고리즘의 효율성 및 타당성을 검증하기 위하여 다양한 유한요소모델에 대하여 실험을 해보았다. Fig. 7 은 두개의 내부홀이 존재하는 트림 평면의 경우로서 Fig. 7(a)는 프리에지 및 홀이 제거되기 전의 모습이며 Fig. 7(b)는 홀을 메운 후의 모습을 보여주고 있는데 홀의 내부를 삼각요소로만 채운 경우이고 Fig. 7(c)는 홀의 내부를 삼각 및 사각요소로 채운 경우를 보여주고 있다. 기본면이 곡면인 트림곡면의 프리에지 제거를 통하여 본 연구에서 제안한 탄성유한요소법에 의한 기본곡면 생성 및 경계곡선계산 알고리즘의 효율성을 검증해 보았다. Fig. 8 은 세개의 내부홀이 존재하는 트림곡면의 경우로서 Fig. 8(a)는 프리에지 및 홀이 제거되기 전의 모습이며 Fig. 8(b)는 탄성유한요소해석을 통하여 생성된 기본곡면들을 보여주고 있는데 기존의 유한요소곡면들에 잘 어울리면서 부드럽게 접하고있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8(c)는 트림곡면상에 요소생성을 하고 난 후의 모습으로서 세 개의 내부홀을 성공적으로 메운 결과를 보여주고 있다. Fig. 9 는 점과 요소의 개수가 각각 39474 와 53878 인 실제 차체 판넬의 성형해석을 위한 유한요소모델로서 판넬 전체 부위에 산재되어 있는 14 개의 홀 및 프리에지를 성공적으로 제거한 결과를 보여주고 있다.



(a)



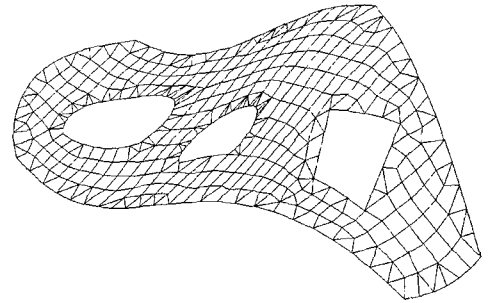
(b)



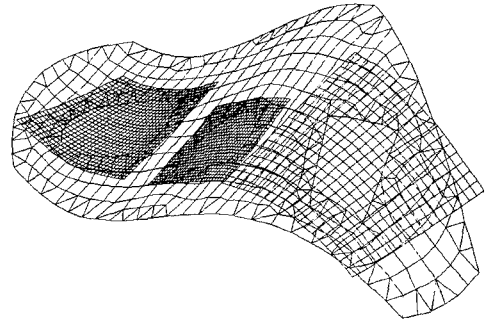
(c)

Fig. 7 Elimination of free edge using the trimmed planar surface;

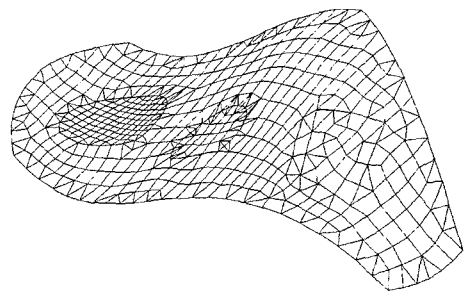
- (a) before the hole filling
- (b) hole filling with triangular meshes
- (c) hole filling with triangular and rectangular meshes



(a)



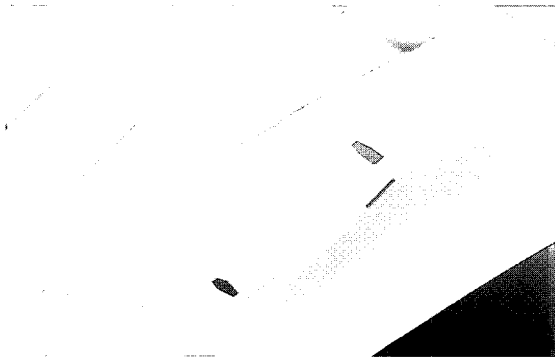
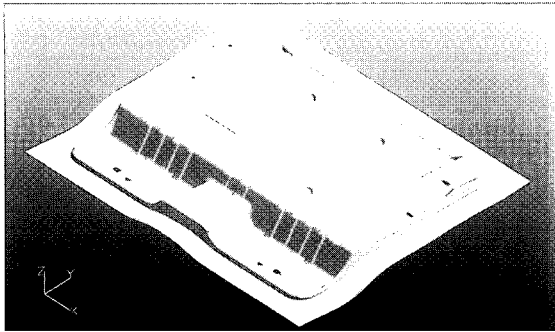
(b)



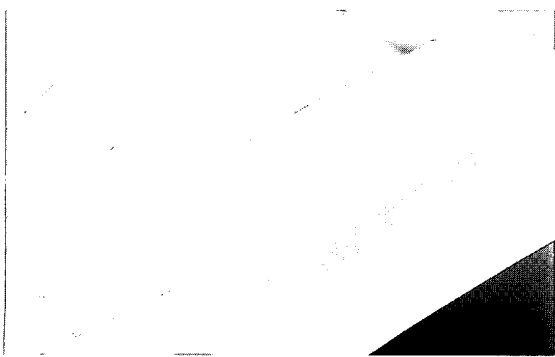
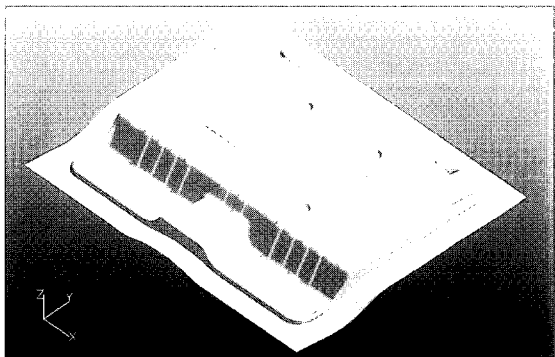
(c)

Fig. 8 Elimination of free edge using the trimmed curved surface;

- (a) before the hole filling
- (b) generation of base surface by elastic FEM
- (c) hole filling with meshes



(a)



(b)

Fig. 9 Elimination of free edge in the case of actual finite element model for the inner panel

(a) before hole filling

(b) shaded view of finite element model after multiple hole filling

5. 결론

본 연구에서는 박판성형해석을 위한 쉘 유한요소모델에 있어서의 프리에지 및 홀을 자동으로 제거해주는 알고리즘을 개발하였다. 기존의 삼각, 오각, 육각등의 정형화된 형상의 홀뿐만 아니라 기하학적으로 매우 복잡한 홀의 제거에도 적용이 가능하도록 탄성굽힘 에너지의 최소화 개념에 바탕을 둔 탄성유한요소해석을 통하여 프리에지 및 홀을 완전히 덮을 수 있는 기본곡면을 생성한 후 프리에지를 트림곡면의 경계곡선으로 정의하는 CAD/CAE의 혼합적 방법을 제안하였다.

탄성유한요소 해석을 통하여 구해진 기본곡면은 프리에지 및 홀 주변의 기존유한요소들과 연속조건을 만족하면서 부드럽게 접하고 있음을 확인할 수 있었으며 생성된 트림곡면에 대한 요소의 생성 및 접합을 통하여 프리에지 및 홀을 효율적으로 제거할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2004 학년도 대전대학교 학술 연구비 지원에 의한 것임

참 고 문 헌

- (1) A. Makinouchi, E. Nakamachi and T. nakagawa, 1991, "Development of CAE system for auto-body panel forming die design by using 2-D and 3-D FEM", *Annals of the CIRP*, 40, pp. 307~310.
- (2) D. J. Yoo, I. S. Song, D. Y. Yang and J. H. Lee, 1994, "Rigid-plastic finite element analysis of sheet metal forming processes using continuous contact treatment and membrane elements incorporating bending effect", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol 36, pp. 513~546.
- (3) D. Y. Yang, D. J. Yoo, I. S. Song and J. H. Lee,

- 1994, "Investigation into tool surface description for finite element analysis of three-dimensional sheet metal forming processes", *J. Mater. Process. Tech.*, Vol. 45, pp. 267~273.
- (4) K. Schewizerhof and J. O. Hallquist, 1991, "Explicit integration schemes and contact formulations for thin sheet forming", In *Proc.VDI* edited by T.Altan etal., Zurich, Switzerland, pp. 405~439.
- (5) 유동진, 윤정환, 2000, "박판 성형 해석을 위한 자동 틀격자 생성에 관한 연구", *한국 소성가공학회지*, 제 9 권, 제 2 호, pp.140~151.
- (6) P. J. Besl and N. D. Mckay, 1992, "A method for registration of 3-D shapes.", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 14, pp. 239~256.
- (7) J. Schroeder, J. Zarge and W. Lorensen, 1992, "Decimation of triangle meshes", *Computer Graphics*, Vol. 26, pp. 65~70.
- (8) L. Piegl and W. Tiller, 1999, "Filling n-sided regions with NURBS patches", *The Visual Computer*, Vol. 15, pp. 77~89.
- (9) E. Catmull and J. Clark, 1978, "Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes", *Computer-Aided Design*, Vol. 10, pp. 356~360.
- (10) 전용태, 박광현, 노형민, 최영, 2004, "폴리곤 기반 역공학 시스템의 구멍메움에 관한 연구", *한국정밀공학회지*, 제21권, 제4호, pp. 140~147.
- (11) I. S. Song, D. J. Yoo, J. W. Yoon, D. Y. Yang, H. Huh and J. H. Lee, 1995, "Finite-Element Analysis and Design of Binder wraps for Automobile Sheet Metal Parts Using Surface Boundary Condition", *J. Mater. Eng. Perf.*, Vol. 4, pp. 593~598.
- (12) B. Vera Anand, 1992, "Computer Graphics & Geometric Modeling for Engineers, Wiley.
- (13) 유동진, 윤정환, 2000, "쿼드 트리를 이용한 일반적인 3 차원 트림곡면에서의 유한요소 자동 생성", *한국정밀공학회지*, 제 17 권, 제 3 호, pp. 136~148.