

박판성형을 위한 신속한 금형곡면의 수정

유동진#

Rapid Die Surface Modification for Sheet Metal Forming

D. J. Yoo

(Received July 11, 2007)

Abstract

In this paper, a novel approach which enables rapid die surface modification for sheet metal forming process is proposed. In this method an implicit surface which interpolates a given set of control points and displacement constraints is generated to compute the displacements at arbitrary points located on die surface. The proposed method does not depend on the underlying surface representation type and is affected neither by its complexity nor by its quality. In addition, the domain decomposition method is introduced in order to treat large surface model. The global domain of interest is divided into smaller domains where the problem can be solved locally. And then the local solutions are combined together to obtain a global solution. In order to verify the validity and effectiveness of the proposed method, various surface modifications are carried out for three kinds of die surface model including polygonal surface composed of triangular and rectangular meshes, polynomial surface and NURBS surface.

Key Words : Sheet Metal Forming, Die Surface Modification, Implicit Surface, Domain Decomposition Method

1. 서론

차체 패널과 같은 프레스 제품의 개발에 있어서 많은 중요한 과정중의 하나는 일차적으로 설계된 프레스 금형의 성형성 및 최종 성형 제품의 치수 정밀도 등 프레스 공법상의 여러 주요인자들을 사전에 평가하는 것이다. 최근 컴퓨터 및 관련 소프트웨어의 급속한 발달로 프레스 제품 개발 관련 산업체들에서는 스탬핑(stamping)전용 해석 소프트웨어에 의한 프레스 공정 평가 업무가 제품 개발 사이클중의 주요 부분으로 정착될 정도로 해석기술의 적용이 보편화되고 있다. 초기에는 드로잉(drawing)공정의 해석[1~5]이 주류를 이루었지만 최근에 와서는 트리밍[6~7], 벤딩[8], 헤밍[9~10] 등 프레스 전 공정으로 해석의 범위도 확대되어 가고 있는 추세이다. 국내에 박판성형해

석 전용 CAE 시스템이 도입되어 적용되기 시작한지 채 10 년도 안되었지만 대부분의 주요 공정 변수들을 해석의 결과로부터 정량적으로 판단할 수 있게 되었을 정도로 해석기술에 많은 발전이 이루어져 왔다. 그 중에서도 박판성형해석에 있어서 최대 난제중의 하나인 스프링백(spring back) 해석기술[11~13]에 있어서도 계산속도 및 정확도면에서 실제 양산 금형에 적용할 수 있을 정도의 수준으로까지 발전되었다. 그러나 박판성형해석분야의 이와 같은 발전에도 불구하고 해결해야 할 몇 가지 문제점도 남아있다. 그 중의 하나가 본 논문에서 다루고자 하는 내용으로서 박판성형해석과 관련한 금형곡면의 수정에 관한 문제이다. 스프링백 해석의 경우 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 드로잉 직후의 제품과 금형을 제거한 후의 제품 간에는 스프링백양 만큼의 형상오차가 발생하게

교신저자: 대전대학교 컴퓨터응용기계설계공학과,
E-mail: djyoo@daejin.ac.kr

된다. 다른 공정변수들의 제어에 의하여 이 현상을 방지할 수 없다면 원래의 금형곡면을 수정하여 스프링백 후의 제품형상이 원하는 형상으로 되도록 해야 한다. 결국 스프링백에 해당하는 변위만큼 역으로 금형을 이루고 있는 곡면들을 수정해 주어야 한다. 현재 실제 산업현장에서는 이 작업을 CAD 작업자가 일일이 수작업으로 수행하고 있는데 숙련된 CAD 엔지니어라 하더라도 수 시간 내지는 수 일이 걸릴 정도로 지루하고 힘겨운 작업이다. 또한 그렇게 해서 완성된 금형곡면이 원래의 금형곡면과 같은 수준의 품질을 갖게 될 수 있을지도 장담할 수 없는 일이다. 이런 이유 때문에 일부 상용 CAD 시스템에서는 스프링백을 보정하기 위한 금형면의 자동수정프로그램을 개발하여 보급하고는 있으나 워낙 고가인데다 사용한 알고리즘이 공개되어 있지 않기 때문에 일반 사용자들이 접근하기에는 많은 어려움이 있는 것이 현실이다.

본 연구에서는 이런 문제점을 갖고 있는 스프링백을 감안한 금형면의 수정작업을 위하여 기존 상용 소프트웨어에 비하여 개발자 입장에서는 구현이 용이하고 계산시간도 짧으며 사용자 입장에서는 조작이 용이하고 수정후의 곡면 품질도 우수한 새로운 방법을 제안하고자 한다. 본 논문에서 제안하고자 하는 금형면 수정방법은 드로잉의 해석결과와 스프링백의 해석결과로부터 모든 절점에서의 변위를 계산한 후 이 변위를 하나의 음함수곡면으로 보간하는 방법이다. 즉 변위에 관한 곡면을 생성해서 금형면의 모든 위치에서의 변위장(displacement field)을 구해 이를 금형면의 변형에 이용하는 방법이다. 변위를 하나의 부드러운 곡면으로 보간하기 때문에 원래 금형면의 세부형상들과 곡면간의 연속성은 그대로 유지되면서 정밀한 곡면의 수정이 가능해진다. 이와 같은 음함수 곡면기법에 기초한 스프링백양을 보정하기 위한 금형면 수정방법은 드로잉해석을 위한 틀메시의 정밀오프셋(offset)이나 제품 또는 여육면의 자동형상변형 등 박판성형과 관련한 다양한 종류의 금형면 수정에 적용될 수 있다. 원래 음함수 곡면기법[14~19]은 3 차원 공간상에 흩어져 있는 점들을 하나의 부드러운 곡면으로 보간하기 위하여 CG, CAD, RP 등의 분야에서 오래 전부터 사용해 오던 방법이다.

본 논문에서는 이러한 음함수 곡면기법을 일반 산업현장에서 흔히 접할 수 있는 수십 만개의 절

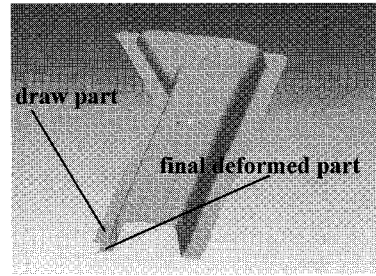


Fig. 1 Difference of shapes between draw part and final deformed part due to springback

점으로 구성된 대형모델의 변위장 보간에 사용될 수 있도록 절점이 차지하고 있는 공간을 복수개의 영역으로 나누어 처리하는 영역분할법[20~24]을 이용함으로써 해석에 소요되는 메모리의 절감 및 계산시간의 단축을 도모하고자 한다.

2. 변위에 관한 음함수곡면의 생성

종래의 음함수 곡면생성법과 본 연구의 가장 큰 차이점은 절점들의 형상좌표를 보간하는 것이 아니라 각 절점에서의 변위를 보간한다는 데 있다. 음함수 곡면기법에 의하여 생성된 변위장으로부터 금형면상의 모든 위치에서의 변위를 구할 수 있으므로 곡면들간의 연속성을 유지하면서 전체 곡면을 부드럽게 변화시킬 수 있다. 일반적인 음함수 곡면식은 식(1)과 같이 정의된다.

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^N \lambda_j \phi(\mathbf{x} - \mathbf{c}_j) + P(\mathbf{x}) \quad (1)$$

여기서

\mathbf{X} : 임의의 점의 좌표값(x,y,z)

N: 절점수

\mathbf{C}_j : 절점들의 좌표 값

ϕ : 기초함수

λ_j : 각 절점에서의 가중치

$P(\mathbf{x})$: 일차 다항식

이다.

식(1)에서 ϕ 는 보간을 위한 기초함수로서 본 연구에서는 곡면의 보간에 많이 사용되고 있는 식(2)와 같은 레이디얼 기초 함수(radial basis function)를 사용하였다.

$$\phi(\mathbf{x}) = |\mathbf{x}|^2 \log(|\mathbf{x}|) \quad (2)$$

식(1)에 변위에 관한 음함수 곡면이 각 절점들에서 특정 변위 값을 갖는다는 변위 구속조건을 대입하면 식(3)을 구할 수 있다.

$$h_i = \sum_{j=1}^N \lambda_j \phi(\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_j) + P(\mathbf{c}_i) \quad (3)$$

여기서

$h_i = f(\mathbf{c}_i) = d_i$: i 번째 조정절점에서의 변위값이다.

아울러 각 절점에서의 가중치 λ_j 는 식(4)와 같은 조건을 만족해야 한다.

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j = \sum_{j=1}^N \lambda_j C_j^x = \sum_{j=1}^N \lambda_j C_j^y = \sum_{j=1}^N \lambda_j C_j^z = 0 \quad (4)$$

모든 절점들을 통과하는 부드러운 음함수 곡면을 얻기 위해서 모든 절점들에 대하여 식(3)과 식(4)의 구속조건식을 식(1)에 적용하면 식(5)와 같은 행렬 형태의 선형 연립 방정식 계를 구성할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \phi_{13} & \dots & \phi_{1N} & 1 & C_1^x & C_1^y & C_1^z & \lambda_1 \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \phi_{23} & \dots & \phi_{2N} & 1 & C_2^x & C_2^y & C_2^z & \lambda_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_{N1} & \phi_{N2} & \phi_{N3} & \dots & \phi_{NN} & 1 & C_N^x & C_N^y & C_N^z & \lambda_N \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_0 \\ C_1^x & C_2^x & C_3^x & \dots & C_N^x & 0 & 0 & 0 & 0 & P_1 \\ C_1^y & C_2^y & C_3^y & \dots & C_N^y & 0 & 0 & 0 & 0 & P_2 \\ C_1^z & C_2^z & C_3^z & \dots & C_N^z & 0 & 0 & 0 & 0 & P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_N \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서

$$\phi_{ij} = \phi(\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_j)$$

이다.

기존의 삼각화분해법(LU decomposition method) 및 가우스(Gauss) 소거법 등의 수치해법을 이용하면 각 절점에서의 가중치 λ_j 와 일치 다항식의 계수 P_i 를 구할 수 있다. 따라서 식(1)로부터 금형곡면상의 모든 위치에서 변위 값의 계산이 가능해진다. 산업현장에서 흔히 접할 수 있는 해석모델의 경우 절점의 수가 보통 수십 만개에 달하므로 팍 찬 행렬(dense matrix) 형태의 계수행렬을 포함한 식(5)로 표현되는 연립방정식의 해를 구하는데 있어서 메모리의 확보나 계산시간 측면에서 볼 때 많은 문제점이 예상된다. 이런 이유 때문에 본 논

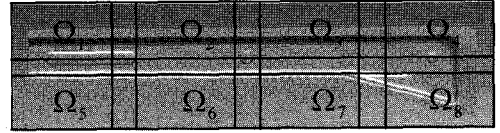


Fig. 2 Basic concept of domain decomposition method

문에서는 절점이 차지하고 있는 공간을 복수개의 영역으로 나누어 처리하는 영역분할법을 도입하고자 한다. 영역 분할법은 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 해석모델이 점유하고 있는 3 차원 공간을 다수의 영역으로 분할하여 각 영역에서의 해를 구한다음 적절한 혼합함수(blending function)에 의하여 전체 해를 구하는 방법으로서 수십 만, 수백 만개의 절점으로 구성된 대형의 해석모델에 대해서도 적용이 가능할 뿐만 아니라 계산시간을 획기적으로 단축 할 수 있다.

각 영역에서의 음함수 곡면식이 구해지면 혼합함수에 의하여 전체 음함수 곡면식을 구할 수 있는데 혼합함수는 전체 음함수 곡면식의 영역간 연속성을 결정짓는 주요한 인자로서 본 연구에서는 영역간에 C^2 이상의 연속성이 보장되도록 저자의 선행연구[21] 에서 제안하였던 다음과 같은 혼합함수를 사용하였다.

$$d_i(\mathbf{P}) = 1 - \prod_{r \in \{x,y,z\}} \frac{4(\mathbf{P}_r - \mathbf{S}_r)(\mathbf{T}_r - \mathbf{P}_r)}{(\mathbf{T}_r - \mathbf{S}_r)^2} \quad (6)$$

$$W_i(\mathbf{P}) = -6d_i^5 + 15d_i^4 - 10d_i^3 + 1 \quad (7)$$

여기서

S: 각 영역의 최소 x,y,z 값

T: 각 영역의 최대 x,y,z 값

P: 구하고자 하는 점의 좌표값

W_i : i 번째 영역의 가중치

이다.

식(7)의 가중치를 유리함수형태로 나타내면 식(8)과 같이 표현된다.

$$w_i(\mathbf{P}) = \frac{W_i(\mathbf{P})}{\sum_{j=1}^{ND} W_j(\mathbf{P})} \quad (8)$$

(ND : number of domain)

각 영역에서 구한 변위 값과 각 영역의 가중치에 의하여 \mathbf{P} 점에서의 실제 변위 값은 식(9)로부터 구할 수 있다.

$$F(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^{ND} f_i(\mathbf{P})w_i(\mathbf{P}) \quad (9)$$

3. 금형곡면의 수정

모든 절점에서의 변위가 하나의 부드러운 연속 곡면으로 보간되었다는 것은 금형곡면상의 모든 위치에서 변위 값을 연속적으로 구할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 다양한 형태의 곡면방정식으로 표현되는 금형면을 원하는 형상으로 용이하게 변형시킬 수 있다.

본 연구에서는 기본 곡면방정식의 형태로 크게 세가지를 다루고자 한다. 첫 번째는 상용 CAE 시스템에서 사용되고 있는 일반 메시 형태의 곡면으로서 삼각형과 사각형이 혼재된 일반적인 경우에도 적용이 가능하도록 하였다. 두 번째는 상용 CAD 시스템에서 채택하고 있는 다항식 형태의 곡면으로서 변형된 곡면을 두 방향의 매개변수 u, v 에 관한 일반적인 고차다항식 형태의 곡면으로 표현하였다. 세 번째는 상용 CAD 시스템에서 가장 많이 사용하고 있는 너브스(NURBS) 곡면으로서 실용적인 면과 정밀도 등을 감안하여 변형된 곡면을 원래 곡면과 동일한 토폴로지(topology) 데이터를 가진 너브스 곡면으로 재 구성하였다.

3.1 메시곡면의 수정

메시로 구성된 곡면의 경우에는 각 절점들에서 변위를 구하여 현재의 절점의 좌표 값에 변위 값을 더해주기만 하면 된다. 메시의 품질이 바로 곡면의 품질과 직결되므로 정밀한 곡면의 수정이 필요하다면 초기에 금형면으로부터 메시를 생성할 때 허용오차를 작게 하고 메시의 크기도 균일하게 하는 것이 좋을 것이다.

3.2 고차다항식곡면의 수정

본 연구에서는 일반 CAD 시스템과의 호환성을 위하여 식(10)과 같은 u, v 에 관한 고차다항식을 사용하였다.

$$\mathbf{r}(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \mathbf{a}_{ij} u^i v^j \quad (10)$$

여기서

n : u 방향의 차수

m : v 방향의 차수

이다.

식(10)의 \mathbf{a}_{ij} 는 곡면을 구성하는 한 패치(patch)의 형상을 결정짓는 계수로서 본 연구에서는 미정계수법을 이용하여 \mathbf{a}_{ij} 를 구하였다. 원래의 곡면에서 u 방향으로 $n+1$ 개 v 방향으로 $m+1$ 개의 절점들을 생성하고 이때의 u, v 값 및 절점들의 좌표 값들을 저장해 둔다. 이렇게 생성된 절점들을 식(9)로부터 계산한 변위 값만큼 이동시킨 후 이동된 절점들을 known vector 로 하고 앞서 계산한 각 절점에서의 u, v 값을 이용하여 계수행렬을 구성한 후 미지수 벡터(unknown vector) \mathbf{a}_{ij} 를 구한다.

3.3 NURBS 곡면의 수정

너브스(NURBS)는 Non-Uniform Rational B-Spline 의 약자로서 본 연구에서 사용한 너브스 곡면식은 식(11) 과 같이 정의된다.

$$\mathbf{S}(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)w_{i,j}\mathbf{P}_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)w_{i,j}} \quad (11)$$

여기서

$\mathbf{P}_{i,j}$: 곡면을 구성하는 조정점의 좌표

p, q : u, v 방향의 차수

n : u 방향의 조정점의 수 - 1

m : v 방향의 조정점의 수 - 1

$N_{i,p}(u), N_{j,q}(v)$: u, v 방향의 B-스플라인 블렌딩 함수

$w_{i,j}$: 조정점 $\mathbf{P}_{i,j}$ 의 가중치이다.

식(11)에서 $N_{i,p}(u)$ 와 $N_{j,q}(v)$ 는 B-스플라인 블렌딩 함수로서 다음과 같은 재귀함수로 정의된다.

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (12a)$$

$$N_{j,q}(v) = \frac{v - v_j}{v_{j+q} - v_j} N_{j,q-1}(v) + \frac{v_{j+q+1} - v}{v_{j+q+1} - v_{j+1}} N_{j+1,q-1}(v) \quad (12b)$$

식(12)의 u_i, v_j 는 노트벡터(knot vector)의 요소로서 다음과 같은 u, v 방향의 노트벡터를 구성한다.

$$U = \{a, \dots, a, u_{p+1}, \dots, u_n, b, \dots, b\} \quad (13a)$$

$$V = \{c, \dots, c, v_{q+1}, \dots, v_m, d, \dots, d\} \quad (13b)$$

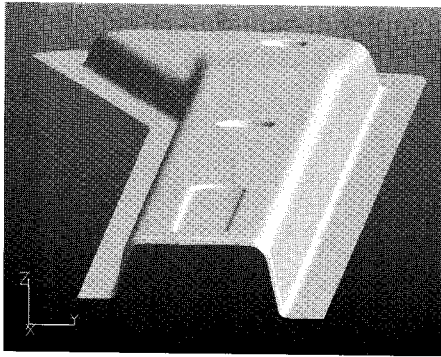
너브스 곡면의 경우에도 그 근본원리는 다항식 곡면의 경우와 같다. 원래의 너브스 곡면에서 u 방향으로 $n+1$ 개 v 방향으로 $m+1$ 개의 절점들을 생성하고 이때의 u, v 값 및 절점들의 좌표 값들을 저장해 둔다. 이렇게 생성된 절점들을 식(9)로부터 계산된 변위 값만큼 이동시킨 후 이동된 절점들을 known vector 로 하고 앞서 계산한 각 절점에서의 u, v 값을 이용하여 계수행렬을 구성한 후 미지수 벡터 $P_{i,j}$ 를 구한다. 즉 모든 토폴로지 데이터는 원래의 곡면과 정확히 일치하며 조정점의 좌표 값만 변하게 된다.

4. 적용 및 결과

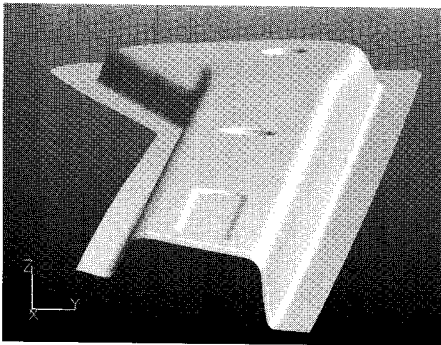
본 연구를 통하여 제안된 금형곡면 수정알고리즘의 효용성 및 타당성을 검증하기 위하여 다양한 금형곡면에 대하여 실험을 해보았다.

Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 절점과 요소의 개수가 각각 167,159 와 317,773 인 실제 차체 패널의 성형 해석을 위한 유한요소모델로서 드로잉 후의 해석 결과와 스프링백 후의 해석결과를 보여주고 있다. 금형곡면은 스프링백양을 보정해주기 위하여 역방향으로 변형시켜야 하지만 제안한 알고리즘의 타당성을 확인해 보기 위하여 스프링백 후의 박판메시(sheet mesh)를 목표메시(target mesh)로 하고 원래의 틀메시를 소스메시(source mesh)로 하여 변형을 시도해 보았다. 물론 틀메시의 모든 절점에서의 변위는 박판메시의 변위에 관한 음함수 곡면으로부터 계산하였다. Fig. 3(e)와 Fig.3(f) 에서 보는 바와 같이 틀메시가 스프링백 후의 박판메시의 형상으로 정확하게 변형되었음을 확인할 수 있었다. 틀메시의 절점과 요소의 개수는 각각 15,710 과 28,651 로서 박판메시와는 전혀 다른 위상 형태를 갖고 있지만 모든 절점에서의 변위가 보간된 하나의 부드러운 음함수 곡면으로부터 계산되기 때문에 결과에서 보는 바와 같이 변형 후의 틀메시는 메시 간의 연속성도 우수하고 주요한 세부형상들도 그대로 유지되고 있음을 알 수

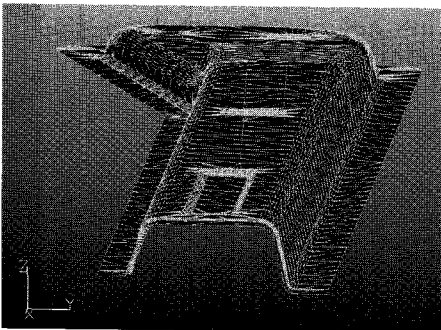
있다. Fig. 4는 역방향의 변위를 주고 계산한 변형 후의 틀메시를 보여주고 있는데 이렇게 수정된 틀메시는 해석을 다시 시도해 보고자 할 때 기본 입력데이터로 활용될 수 있다. 현재 일반적으로 사용되고 있는 박판성형전용 해석시스템들에는 이러한 기능이 없기 때문에 스프링백양을 보정해 주고 다시 해석을 해보려면 금형곡면의 CAD 데이터를 CAD 시스템에 의하여 일일이 수작업으로 수정하고 다시 틀메시를 생성한 후 해석을 수행하여야 한다. 본 연구를 통하여 지루하고 힘든 이러한 수작업이 완전히 생략될 수 있으므로 프레스제품 개발과 관련된 해석기술에 큰 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다. 물론 해석결과의 판단 및 프레스공법상의 주요 인자들의 변경 및 수정은 여전히 설계자와 현장 작업자의 몫으로 남겠지만 박판성형해석기술의 효율성을 위하여 본 연구에서 제안한 금형면 수정방법은 반드시 확보되어야 할 필수적인 수단으로 판단된다. Fig. 3(a)과 Fig. 3(b)와 같은 완전한 3 차원 해석결과를 확보하기 힘든 경우에는 다소 단순화된 형태로 금형곡면을 수정할 수 있다. 실제 금형에 의한 트라이얼(trial) 결과 및 현장 작업자들의 경험 등을 바탕으로 하여 Fig. 5 와 같이 주요 단면선에 대한 변위 형태를 가정하여 금형면을 수정하는 방법이다. 이 방법의 경우에는 변위에 관한 음함수 곡면 생성 시간이 매우 빠르므로 실시간 수정이 가능할 정도로 계산시간측면에서 매우 효율적이다. 몇 개의 주요 단면선상의 절점들에 대하여 변위 구속조건을 주고 금형면을 수정하는 것 이므로 3 차원 해석결과를 이용하는 것만큼 정확한 변형 형상을 얻을 수는 없지만 3 차원 해석결과 자체도 어차피 가정이기 때문에 어느 방법이 반드시 우위에 있다고 단정할 수는 없을 것이다. 최근에는 3D 스캐닝(scanning)과 같은 3 차원 측정기술이 많이 발전되어 있기 때문에 실제 성형된 최종 패널로부터 주요 단면선에 대한 변위 데이터를 얻는 것이 그리 어렵지 않으므로 이런 형태의 금형면 수정방법도 매우 효율적으로 활용될 수 있다. 물론 U 자 단면을 가진 채널형상의 제품 및 S 레일형 제품의 경우 스프링백 해석자체도 실제 거동과 많은 차이가 날 수 있기 때문에 단순히 역방향 변위를 고려한 금형면의 수정을 통하여 단면의 벌어짐 및 제품의 뒤틀림 등 다양한 스프링백 문제를 완전하게 해결할 수는 없을 것이다. 그러나 해석자와 프레스공법 기술자와의 다각적인 협의를 통하



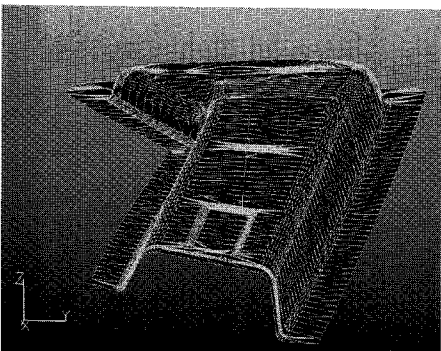
(a)



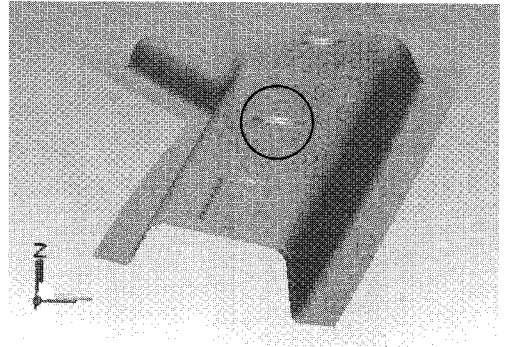
(b)



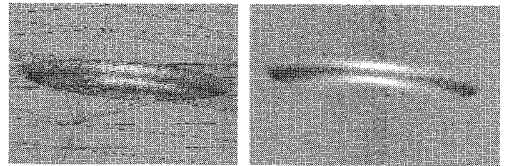
(c)



(d)



(e)



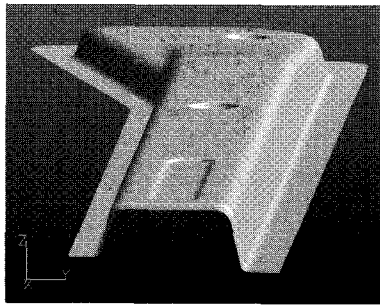
(f)

Fig. 3 Shape modification of tool surface composed of meshes;

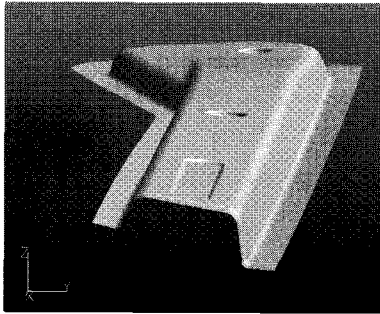
- (a) sheet mesh after drawing
- (b) deformed sheet mesh due to springback
- (c) tool mesh before modification
- (d) tool mesh after modification
- (e) combined view of (b) and (d)
- (f) detailed view of (e)

여 도출된 수정안을 갖고 실제 모델링 작업을 수행할 때 본 연구에서 제안한 음함수를 이용한 절점의 변형 및 단면선의 변형 등에 의한 곡면 수정방법은 기존 방법들에 비하여 작업강도의 감소 및 작업시간의 단축 등 많은 편의성을 제공해 줄 수 있을 것이다.

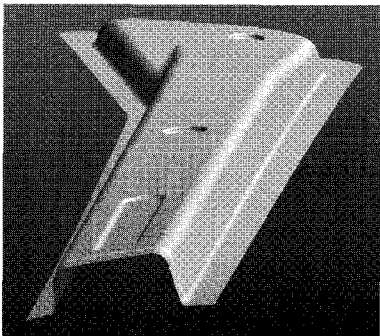
본 연구의 다른 응용형태로 툴메시의 오프셋(offset)문제를 생각해 보고자 한다. 현재 대부분의 박판성형해석전문가들은 툴메시에 있어서 요소의 연결성(connectivity)은 당연한 것으로 생각하는 것 같다. 이렇게 생각하는 가장 큰 이유는 정확한 오프셋을 위해서는 툴메시의 연결성이 반드시 필요하다 고 생각하기 때문이다. 또한 연결성이 확실하지 않으면 성형해석시 접촉계산에 있어 어떤 오류가 발생할지도 모른다는 막연한 판단을 하여 요소의 연결성 확보에 아까운 시간을 기꺼이 투자하고 있는 것이 현실이다. 그러나 사실 최근의 CAE 소프트웨어들의 접촉 알고리즘이 상당히 발



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Shape modification of tool mesh considering springback effect;

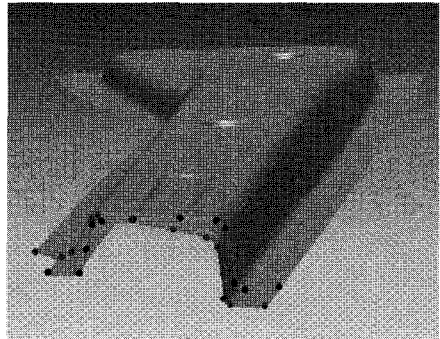
(a) original tool mesh

(b) modified tool mesh in forward direction

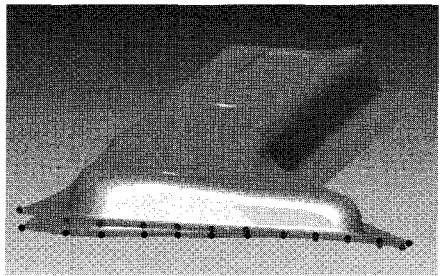
(c) modified tool mesh in backward direction

전하였기 때문에 요소들간에 약간의 간격(gap)이나 겹침(overlap)이 존재하여도 접촉계산에는 별 문제가 없는 것으로 생각하여도 좋을 것이다. 따라서 정확한 오프셋만을 위하여 요소의 연결성 확보에 집착하는 것은 재고해 보아야 할 일이다.

Fig. 6은 기존의 메시에 의한 읍셋 방법과 본 연구에서 제안한 읍합수 곡면에 의한 읍셋 방법을



(a)



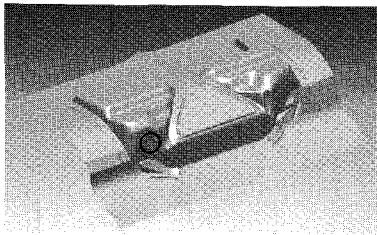
(b)

Fig. 5 Shape modification of tool mesh using sectional displacement data;

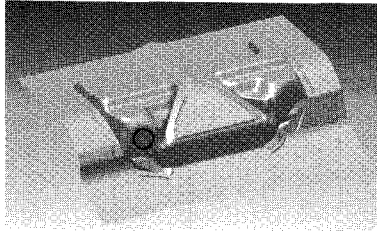
(a) front view

(b) rear view

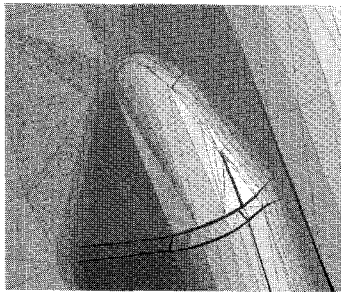
비교해 본 결과이다. 메시 오프셋은 각 절점을 절점에 연결된 요소들의 평균법선벡터방향으로 오프셋양만큼 이동시키는 방법이고 읍합수 곡면에 의한 방법은 각 요소의 중심점들을 요소에 수직인 방향으로 오프셋양만큼 이동시켜 얻은 모든 중심점에서의 변위를 하나의 곡면으로 보간하여 원래의 모든 툴메시의 절점들에서의 오프셋 변위를 구하는 방법이다. 적용형태만 약간 다를 뿐 금형곡면의 수정방법과 그 근본원리는 동일하다. Fig. 6(c)는 종래의 요소에 의한 오프셋 결과를 Fig. 6(d)는 본 연구에서 제안한 오프셋 변위에 관한 곡면보간방법에 의한 오프셋 결과를 보여주고 있다. 요소간의 연결성이 완전하지 않은 경우 종래의 요소에 의한 오프셋 결과에서는 Fig. 6(c)에서 보는 바와 같이 요소간에 무시할 수 없는 큰 간격 및 겹침이 발생하는 반면에 곡면보간에 의한 오프셋 결과에서는 모든 요소의 중심점에서의 오프셋 변위를 하나의 곡면으로 재생성하고 이 곡면으로부터 각 절점에서의 오프셋 변위를 정확히



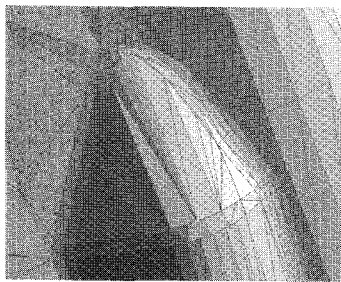
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6 Offsetting of tool mesh ;

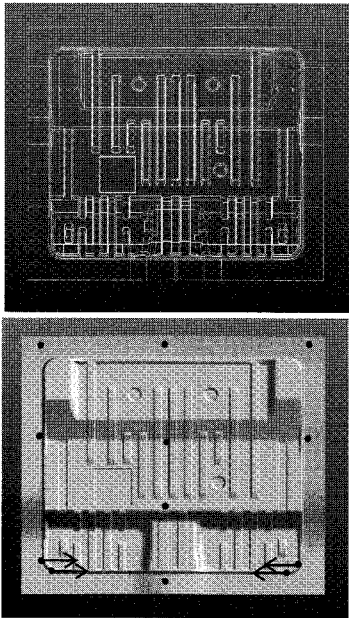
- (a) mesh offset
- (b) implicit surface offset
- (c) detailed view of (a)
- (d) detailed view of (b)

구할 수 있으므로 Fig. 6 (d)에서 보는 바와 같이 결함이 없는 완전한 결과를 얻을 수 있었다.

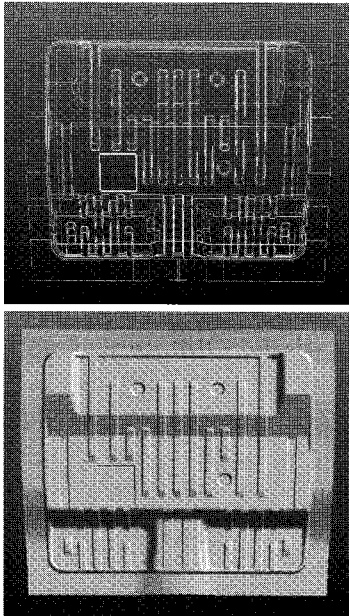
Fig. 7 은 2,006 개의 고차다항식곡면으로 구성된

어있는 차체패널의 틀곡면의 변형에 관한 결과를 보여주고 있다. Fig. 7(a)의 원래 곡면데이터를 Fig.7(b)와 같이 수정하기 위하여 12 개의 절점을 관계되는 위치에 배치시킨 후 원하는 변위(이 경우에는 좌우 각각 30mm)를 해당되는 절점에 부여하여 전체 형상을 변형시켰다. 결과에서 보는 바와 같이 제품면과 여유면의 연속성이 그대로 유지되면서 전체 형상이 부드럽게 변한 것을 확인할 수 있었다. 변형된 곡면의 품질도 우수하고 수정에 소요되는 시간도 수 분 밖에 되지 않으므로 제품면 및 금형면의 쾌속 수정이 가능하다. 이런 기능은 현재 상용화 되어 있는 대부분의 범용 CAD 시스템에도 없는 것으로서 수 천 개의 곡면 데이터를 다양한 형태로 수정해야 하는 프레스금형과 관련한 CAD 와 CAM 및 CAE 기술자들에게 실질적인 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 하단부의 폭이 조금 줄어드는 것 외에 크게 달라지는 것이 없어 보이지만 만약 이와 똑 같은 작업을 기존의 범용 CAD 시스템을 이용하여 숙련된 엔지니어가 수행한다 하더라도 수 시간내지는 수십 시간이 소요될 수도 있는 까다로운 작업에 속한다. 솔리드 모델링의 경우는 매개변수 모델링(parametric modeling) 기법이 많이 발전되어 있어 매개변수 수정에 의한 전체형상의 변형이 용이하지만 곡면 모델링의 경우는 현존하는 CAD 시스템 대부분이 이런 기능을 지원하지 못하고 있다.

Fig. 8 은 1,470 개의 너브스곡면으로 구성되어 있는 차체패널의 금형곡면의 변형에 관한 결과를 보여주고 있다. 너브스 곡면의 경우도 고차다항식 곡면의 경우와 마찬가지로 몇 개의 조정절점에 변위구속조건을 부여함으로써 전체형상을 원하는 형태로 변형시킬 수 있다. 계수행렬을 구성하는 혼합함수의 형태가 고차 다항식 곡면에 비해 다소 복잡해지지만 그 근본원리는 동일하다고 볼 수 있다. 본 예는 중앙부분의 여유면의 형상을 이루고 있는 직선적인 단면선의 형태를 곡선형태로 변화시켜 금형면을 부드럽게 수정한 예이다. 이 경우에는 수정해야 할 곡면이 몇 개 되지 않지만 여유면 내부의 곡면을 제거하고 의도하는 곡면을 다시 생성하는 일련의 작업들이 생각만큼 그리 간단치 않은 일이다. 22 개의 절점을 관계되는 위치에 배치시킨 후 원하는 변위를 조정절점에 부여하여 해당되는 여유면의 형상을 변형시켰다. 이 경우에도 결과에서 보는 바와 같이 제품면과 여유면의 연속성이 그대로 유지되면서 전체



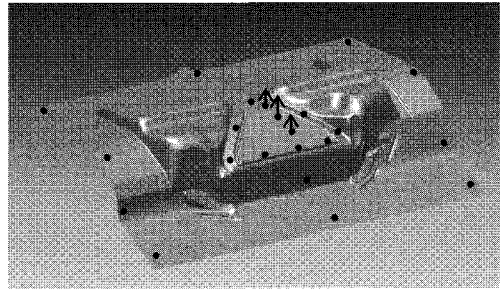
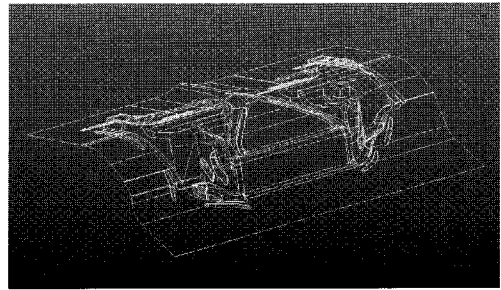
(a)



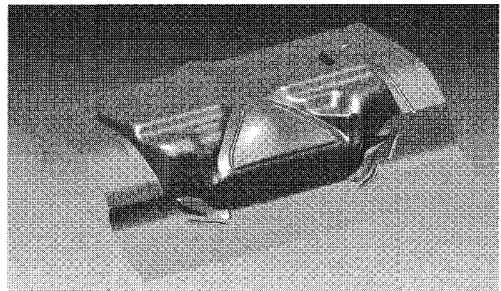
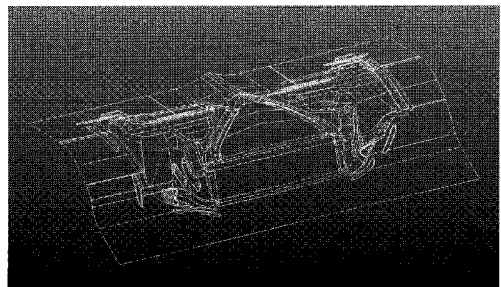
(b)

Fig. 7 Shape modification of a panel composed of polynomial surfaces;
(a) before shape modification
(b) after shape modification

형상이 부드럽게 변한 것을 확인할 수 있었다. 물론 금형면의 수정을 신속하게 한다는 것이 우수



(a)



(b)

Fig. 8 Shape modification of a panel composed of NURBS surfaces;
(a) before shape modification
(b) after shape modification

한 설계를 의미하는 것은 아니지만 금형면의 수정작업 자체가 설계자에게 큰 부담이 되고 있는 현실을 생각해 보면 본 연구에서 제안한 금형면 수정방법은 박판성형해석은 물론이고 프레스 공

법설계와 관련된 많은 엔지니어들에게 새로운 기회의 문을 열어줄 수 있을 것으로 확신한다.

5. 결 론

본 연구에서는 박관성형을 위한 새로운 금형면 수정방법을 제안하였다. 이 방법은 세부형상들과 곡면간의 연속성을 그대로 유지하면서 복잡한 금형면의 수정작업을 매우 신속하고 정확하게 처리할 수 있는 장점이 있다. 또한 메시곡면과 고차다항식곡면 및 너브스 곡면과 같은 다양한 형태의 금형면에 대하여 일관된 방법의 적용이 가능하므로 알고리즘의 구현이 매우 용이하다.

개발된 프로그램을 이용하여 스프링백 보정을 위한 금형메쉬의 수정과 드로잉해석을 위한 금형메쉬의 정밀 오프셋 및 다양한 형태의 금형면 수정을 통하여 제안한 방법의 효용성 및 타당성을 검증하였다.

향후에는 제안한 알고리즘을 현재 상용화 되어 있는 CAD 시스템들에 접목하여 박관성형과 관련한 해석기술자 및 공법설계자들에게 실질적인 도움을 줄 수 있는 연구를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] D. J. Yoo, I. S. Song, D. Y. Yang, 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.

[2] D. Y. Yang, D. J. Yoo, I. S. Song, 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.

[3] 송정환, 허훈, 김세호, 김승호, 2005, 해석적인 방법을 이용한 복잡한 형상의 자동차 부재 스탬핑 공정에서의 주요 설계인자 연구, *한국소성가공학회지* 제 14 권 제 1 호, pp. 21~28.

[4] 박춘달, 김병민, 정완진, 2006, 자동차 멤버 부품의 다공정 성형해석, *한국소성가공학회지* 제 15 권 제 4 호, pp. 281~288.

[5] 송민재, 금영탁, 2006, 금형 변형을 고려한 자동차 팬더패널의 성형해석, *한국소성가공학회*

지 제 15 권 제 5 호, pp. 387~394.

[6] 김지용, 김중호, 정완진, 2005, 샌드위치 강판의 전단가공에 있어서 전단면에 미치는 금형설계 변수의 영향, *한국소성가공학회지* 제 14 권 제 1 호, pp. 37~32.

[7] 김종덕, 강정진, 김홍규, 홍석관, 김병준, 2005, 캐리어 플레이트 성형을 위한 프로그래시브 파인 블랭킹 공정의 설계, *한국소성가공학회지* 제 14 권 제 3 호, pp. 207~214.

[8] 김태정, 양동열, 2005, 연속 접착 처리를 고려한 실린더 벤딩 성형 공정의 유한요소해석, *한국소성가공학회지* 제 14 권 제 6 호, pp. 547~552.

[9] 김형중, 정헌철, 임재규, 2005, 헤밍 공정에서의 미세 결합 평가 및 예측에 관한 연구, *한국소성가공학회지* 제 14 권 제 6 호, pp. 533~540.

[10] 김동직, 송윤준, 정훈, 한영호, 2006, 자동차 패널용 헤밍 금형설계를 위한 타이밍차트 자동생성, *한국소성가공학회지* 제 15 권 제 7 호, pp. 496~503.

[11] 양동열, 이상욱, 윤정환, 유동진, 1999, 박관성형에서의 스프링백 해석과 산업적 응용, *한국소성가공학회지* 제 8 권 제 1 호, pp. 22~28.

[12] 박인천, 김영주, 이종문, 박영철, 2005, 스프링백 전산모사를 이용한 자동차 판별의 설계공법 최적화, *한국소성가공학회지* 제 15 권 제 2 호, pp. 164~171.

[13] 송정환, 김세호, 허훈, 박성호, 2006, 고강도강 프린트 사이드멤버의 응력분포 최적화를 통한 스프링백 저감, *한국소성가공학회지* 제 15 권 제 4 호, pp. 295~303.

[14] M. S. Floater, A. A. Iske, 1996, Multistep scattered data interpolation using compactly supported radial basis functions, *Journal of Comp. Appl. Math.*, Vol. 73, pp. 65~78.

[15] G. Turk, J. F. O'Brien, 1999, Variational implicit surfaces, *Tech. Rep. GIT-GVU-99-15*, Georgia Institute of Technology.

[16] J. C. Carr, R. K. Beatson, J. B. Cherrie, T. J. Mitchell, W. R. Fright, B. C. McCallum, T. R. Evans, 2001, Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis function, In *Proceedings of SIGGRAPH 2001*, pp. 67~76.

[17] D. Lazzaro, L. B. Montefusco, 2002, Radial basis

- functions for multivariate interpolation of large scattered data sets, *Journal of Computational and Applied Math.*, Vol. 140, pp. 521~536.
- [18] N. Kojekine, I. Hagiwara, V. Savchenko, 2003, Software tools using CSRBFs for processing scattered data, *Computer & Graphics*, Vol. 27, pp. 311~319.
- [19] 유동진, 2005, 음함수 곡면기법을 이용한 폴리곤모델의 홀메움에 관한 연구, *한국정밀공학회지* 제 22 권 제 3 호, pp. 107~114.
- [20] Y. Ohtake, A. Belyaev, M. Alexa, G. Turk, H. P. Seidel, 2003, Multi-level partition of unity implicits, *ACM Transactions on Graphics(TOG)*, Vol. 22, pp. 463~470.
- [21] 유동진, 2006, 음함수 곡면기법과 영역 분할법을 이용한 대형 폴리곤모델의 홀메움에 관한 연구, *한국정밀공학회지* 제 23 권 제 1 호, pp. 174~184.
- [22] 유동진, 2006, 적응적 영역분할법을 이용한 임의의 점군으로부터의 형상 재구성, *한국정밀공학회지* 제 23 권 제 8 호, pp. 89~99.
- [23] 유동진, 2006, 임의의 점 군 데이터로부터 NURBS 곡면의 자동생성, *한국정밀공학회지* 제 23 권 제 9 호, pp. 200~207.
- [24] 유동진, 2006, 반복적 영역분할법을 이용한 임의의 점군으로부터의 형상 재구성, *한국정밀공학회지* 제 23 권 제 11 호, pp. 93~102.