

# 국소 분할된 패치를 갖는 비매개변수 금형묘사법을 이용한 3차원 박판성형공정해석

윤정환\*, 양동열\*, 유동진\*\*

\* 한국과학기술원 기계공학과 \*\* 기아자동차 생기연구팀

Finite element simulation of sheet metal forming by using  
non-parametric tool description with locally refined patches

J.W.Yoon\*, D.Y.Yang\*, and D.J.Yoo\*\*

\* Dept. of Mechanical Eng., KAIST

\*\* R-D Dept. of Production Eng., KIA Motors

## ABSTRACT

An improved nonparametric tool description based on successive refined nonparametric patches is proposed and the related criterion for refinement is also discussed. In the proposed scheme, any required order of tool surface conformity can be achieved by employing successive refinements according to the suggested criterion. By using the suggested adaptive tool refinement technique based on the nonparametric patch tool description, the locally refined nonparametric tool surface with economic memory size and sufficient accuracy as well as with favorable characteristics for contact treatment can be obtained directly from the parametric patch related with commercial CAD system. Computation is carried out for a chosen complex sheet forming example of an actual autobody panel in order to verify the validity and the efficiency of the developed tool surface description.

## 1. 서론

박판성형공정 해석에 있어서 고려되어야 할 중요한 문제중의 하나는 임의의 형상을 갖는 박판제품의 금형면 묘사방법이다. 이러한 금형묘사 방법에는 제안된 여러가지 방법이 있다. 예를들면 유한요소 격자(finite element)에 의한 방법[1], piecewise linear 방법[2], 매개변수 패치(parametric patch)방법[3], 비매개변수 패치(non-parametric patch)방법[4] 등이 있다.

우선 유한요소격자 방법은 금형을 유한요소격자로 나누어서 금형을 묘사하는 방법으로 복잡한 형상을 갖는 금형면 묘사를 위해 가장 보편적인 방법으로 쓰이고 있다. 그러나, 초기 곡면 CAD 데이터를 유한요소격자로 분할해야 하기 때문에 그래픽 작업에 시간이 많이 소요된다. 또한 충분한 정확도를 가지고 부드러운 금형면을 묘사하기 위해서는 많은 수의 유한요소격자가 필요하게 되어 메모리 크기를 증가시킨다.

Piecewise linear 방법은 포인트 데이터(point data)방법 또는 삼각형 주얼 패치(triangular jewel patch)방법이라고도 말하는데, 이 방법은 x-y 평면에서 등간격 또는 비등간격의 사각형 그리드 데이터로 나누고 매개변수 패치에 Z-방향으로 투사하여 사

각형 격자를 두개의 삼각형으로 분할하여 다수의 선형 삼각형 평면으로서 임의의 금형면을 묘사하게 된다. 이 방법은 요소의 수나 connectivity와 같은 정보가 필요없게 된다. 그 이유는 포인트(point)의 규칙적인 배열로서 이에 필요한 관계를 쉽게 알아낼 수 있기 때문이다. 따라서, 이방법은 FE 해석에 적용하기에는 쉽지만, 유한요소격자 방법과 같이 금형면이 부드럽지 않고 수직벽을 가진 제품을 묘사할 수 없다는 단점이 있다.

매개변수 패치 방법은 실제 산업 제품의 임의의 곡면을 묘사할 수 있는 가장 편리한 방법중의 하나이다. 또한, 상업용 CAD 시스템에서 만들어지는 금형면을 직접 FE 해석을 위한 입력 파일로 전환시킬 수 있다. 그러나, 이방법은 다른 방법에 비해 접촉 탐색 알고리즘이 복잡하고 매개변수 패치의 수가 늘어나면 계산시간이 증가한다는 단점이 있다.

비매개변수패치 방법은 매개변수패치에서 처럼  $C^1$  연속성을 유지하기 위해 3차의 blending 함수를 도입하고 등간격 또는 비등간격의 패치로서 금형면을 묘사한다. 이방법은 접촉탐색이 효과적이고 해석에 있어서 계산시간이 빠르고, 알고리즘이 강건하다. 그러나, 이방법은 piecewise linear 방법처럼 수직벽을 가진 제품은 묘사할 수 없고, 메모리 문제에 있어서도 금형면을 정확하게 묘사하기 위해서는 많은 수의 포인트가 필요하게 되어 많은 하드웨어 메모리 용량을 요구한다.

따라서 비매개 변수 패치의 장점을 유지하면서 내포된 단점을 보완하기 위해서 국부적으로 분할된 패치를 갖는 개선된 비매개 변수 패치 금형 묘사법을 제안하였다. 이 방법은 원하는 order의 금형면 원활성을 매개변수패치로 부터 연속적인 분할에 의해 얻을 수 있다. 제안된 금형 묘사방법은 경제적인 메모리 크기, 충분한 정확도와 함께 강건한 접촉탐색 알고리즘을 가지고 있다. 본 연구의 목적은 산업현장에서 만나는 대부분의 복잡한 금형면을 다룰 수 있는 방법으로서 국부적으로 분할된 비매개 변수 패치 방법에 의한 금형 묘사법을 제안하는 것이다. 또한, 제안된 방법에 적합한 효과적이고 안정된 접촉 탐색 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방법의 검증과 효율성을 확인하기 위해서 자동차 차체 판넬에 대해 유한요소 해석을 수행하였다.

## 2. 이론

### 2.1 매개변수 패치(parametric patch)에 의한 금형묘사법

단순히 해석적 표현에 의해 묘사되지 않는 임의의 복잡한 형상의 곡면은 매개변수 패치를 사용하여 연속성을 갖는 곡면으로 묘사할 수 있다. 자동차 차체와 같은 제품의 금형면은 Fig.1과 같이 매개변수 패치의 조합으로서 CAD 시스템에서 묘사되어진다. 즉, 각 곡면의 패치는 두개의  $u, v$ 의 함수로서 나타내어지는데 매개변수 패치의 한점에서 Cartesian 좌표는 다음과 같이 주어진다.

$$r(u,v)=x(u,v)\mathbf{i} + y(u,v)\mathbf{j} + z(u,v)\mathbf{k} \quad (1)$$

여기서  $x(u, v), y(u, v)$ 와  $z(u, v)$ 는 사용된 곡면 패치의 형태이다. 매개변수 패치를 FE 해석에 적용했을때 다음과 같은 단점이 있다.

#### #장점

- i) CAD 시스템과 FEA 사이에 직접적이고 효과적인 데이터 전송
- ii) 금형면의  $C^1$  또는  $C^2$  연속성

#### #단점

- i) 금형과 박판 사이에 접촉 처리에 있어서 복잡한 알고리즘과 많은 계산시간이 요구됨
- ii) CAD 데이터와 IGES 파일에 트림(trim)되지 않는 곡면이 존재하면 해석하기 힘들

따라서, 매개 변수 패치 방법의 많은 장점에도 불구하고 위에서 언급한 단점들 때문에

초기 CAD 데이터를 FE 해석을 위해서 간단하고 효율적으로 변환할 필요가 있다. 이러한 매개 변수 방법을 FE 해석을 위한 금형면 묘사 방법으로 바꾸는 방법은 Fig. 2와 같이 많은 방법이 있다. 즉, 유한요소 격자에 의한 방법, piecewise linear 방법, 비매개변수 패치에 의한 방법등이 있다. 이 과정에서 가장 중요한 것은 변환이 곡면의 정확성을 잃지 않으면서 효율적으로 수행되어야 한다. 이러한 방법들 중 비매개 변수 패치에 의한 방법은 임의의 형상을 갖는 금형면을 묘사하기 위한 편리하고 효율적인 방법중의 하나이다.

## 2.2 비매개변수 패치(nonparametric patch) 방법

Fig. 3은 x-y 평면에서 사각 패치로 구성된 비매개변수 금형면을 보여주고 있다. 이것은 x-y 평면에서 등간격 또는 비등간격의 그리드(grid)점들에서 매개변수 패치에 투사하여 쉽게 얻을 수 있다. 본 방법은 매개 변수 패치와 다르게 각 패치는 x, y의 함수이다.

$$Z=f(x,y) \quad (2)$$

비매개변수 패치 방법은 FE 해석에 적용되었을 때 아래와 같은 장단점을 가지고 있다.

### #장점

- i) 접촉 탐색 시간이 빨라서 해석 시간이 적게들
- ii) 매개 변수 패치로 부터 복잡한 금형형상 데이터를 쉽게 만들
- iii) C<sup>1</sup> 연속성을 가진 부드러운 금형면을 가짐

### #단점

- i) 금형면을 정확하게 묘사하기 위해서는 메모리 크기가 커짐
  - ii) 직벽을 묘사하는데 어려움이 있음
- 따라서 이러한 비매개 변수 패치의 단점을 보완하기 위해서 국부적으로 분할된 패치를 갖는 개선된 비매개 변수 패치를 제안하였다.

## 2.3 국부적으로 분할된 비매개변수 패치(locally refined nonparametric patch)

### 2.3-1 금형면 묘사 방법 및 패치분할 criterion

(I+1)×(J+1)의 그리드 점으로 정의된 사각형 패치를 생각해 보면 비매개변수 패치의 한점에서의 좌표는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Z^{ij} = \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 a_{mn} \left( \frac{x-x_i}{h_i} \right)^m \left( \frac{y-y_j}{k_j} \right)^n, \quad (3)$$

$$i \in [0:I] \text{ 그리고 } j \in [0:J]$$

여기서 한개의 패치에 대해  $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ ,  $y_j \leq y \leq y_{j+1}$ . 식(3)에서  $h_i = x_{i+1} - x_i$ , 그리고  $k_j = y_{j+1} - y_j$  이다. 식(3)에서 상수  $a_{mn}$ 은 패치의 코어점과 미분량에 관련되어 있다. 즉,

$$A = CH_i Q K_j C^T \quad (4)$$

이다. 여기에서 각 행렬은 다음과 같다.

$$A = [a_{mn}], \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 2 & -2 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad H_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_i \end{bmatrix}, \quad K_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_j \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} Z_{i,j} & Z_{i,j+1} & Z_{y,ij} & Z_{y,i,j+1} \\ Z_{i+1,j} & Z_{i+1,j+1} & Z_{y,i+1,j} & Z_{y,i+1,j+1} \\ Z_{x,ij} & Z_{x,i,j+1} & Z_{xy,ij} & Z_{xy,i,j+1} \\ Z_{x,i+1,j} & Z_{x,i+1,j+1} & Z_{xy,i+1,j} & Z_{xy,i+1,j+1} \end{bmatrix}$$

마스터 패치(master patch)의 네개의 점에서 미분량  $Z_x, Z_y$ 은  $x, y$  방향에서 3차 퍼거슨 곡면으로서 마스터 패치(master patch)의 모든 그리드 점들을 보간하여 얻을 수 있다. 슬레이브 패치(slave patch)에서  $Z_x, Z_y$ 는 마스터 패치의 미분량을 선형보간하여 얻었다. 본 연구에서 각 패치의 코어 네점에서의 Cross-boundary 미분량  $Z_{xy}$ 는 무시하였다. 재분할 과정은 마스터 패치를 네개의 슬레이브 패치로 분할하는 과정을 반복하여 이루어진다. 따라서, Fig. 4와 같이 한개의 마스터 패치로부터 많은 슬레이브 패치를 얻을 수 있다. 자동 재분할을 위해서 쓰여진 두가지 Criterion은 다음과 같다.

$$Z_x \geq \text{slope crit} \quad \text{or} \quad Z_y \geq \text{slope crit} \quad (5)$$

여기서  $Z_x, Z_y$ 는  $x, y$  방향으로의 미분량이고  $\rho$ 는 마스터 패치의 Cartesian 점에서의 곡률을 나타낸다. 적당한  $\text{slope crit}$ 와  $\rho_{crit}$ 는 문제가 요구하는 정확도에 따라 입력할 수 있다.

### 2.3-2 자동 분할된 비매개변수 패치 방법의 접촉탐색 알고리즘

국부적으로 분할된 비매개변수 패치방법의 접촉 탐색은 매개변수 방법보다 계산에 있어서 간단하고 빠르다. Fig. 4는 접촉탐색의 개략도를 보여주고 있다.

#### i) 패치 선택

Z-방향으로 투사될 절점의 마스터 패치는 다음과 같다.

$$m = \text{int}\left(\frac{x-x_0}{\Delta x}\right) + 1, \quad n = \text{int}\left(\frac{y-y_0}{\Delta y}\right) + 1, \quad (6)$$

#### ii) 투사

case 1) 마스터 패치의 Level=0:

투사점은 식(3)으로부터 얻을 수 있다.

case 2) 마스터 패치의 Level $\geq$ 1: 절점이 투사되어야 할 슬레이브 패치는 마스터 패치에 속해있는 슬레이브 패치로부터 간단한 탐색으로부터 얻을 수 있다. 따라서, Level $\geq$ 1인 경우에는 마스터 패치에 속해있는 슬레이브 패치수와 슬레이브 패치 4코너에서 좌표값과 미분량을 FE 해석전에 저장해놓아야 한다.

### 2.3-3 국부 분할 비매개변수 금형묘사법을 위한 Normal scheme

접촉 방법 계산중에 접촉된 절점은 적절한 경로를 통해서 금형면 위에 위치시켜야 한다. 이 과정에서 많은 종류의 투사방법이 쓰이고 있는데 그 중 Z-투사방법은 비매개변수 패치 방법에 있어서 좌표를  $x, y$  좌표값으로부터 식(3)에 의해 쉽게 갖을 수 있다. 그러나, 이 방법은 금형면의 경사가 급하게 되면 수렴성 문제를 야기시킨다. 따라서, Z-투사방법의 수치적 효율성을 유지하면서 제안된 금형묘사법에 적합한 혼합(mixed) normal 방법에 기초한 개선된 Z-투사방법을 제안하였다.

## 3. 트렁크 플로어의 스탬핑 해석

트렁크 플로어는 자동차의 차체를 구성하는 박판 제품중의 하나이다. 이 제품은 경사가 급하고 날카로운 코너를 가지고 있어서 성형하기 어려운 제품이다. 본 해석에서

는 금형면을 매개변수 패치와 국부적으로 분할된 비매개변수 패치로 묘사하여 두가지 금형 묘사 방법의 정확성과 수치적 효율성을 검증하였다. 매개 변수 패치에 있어서는 충분한 매개변수 패치로 이루어진 CAD 곡면 데이터를 상업용 CAD 시스템에서 만들어서 성형해석을 위한 입력파일로 직접 연결되었다. 국부적으로 분할된 비매개변수 패치의 경우는 본 연구에서 제안한 알고리즘에 의해 매개변수 패치로 부터 직접 구할 수 있다. 형상의 정확성 측면에서 본 예제에서는 4번의 연속 재분할을 하였기 때문에 등간격으로 분할된 비매개변수 패치의 경우 제안한 방법과 똑같은 정확성을 가지려면 최대 16배의 메모리 크기가 필요하게 된다. 해석에 쓰인 재료와 공정변수는 다음과 같다.

Sheet material : Cold rolled steel  
 Stress-strain characteristics :  $\bar{\sigma} = 519.2(0.0019 + \bar{\epsilon})^{0.27}$  MPa  
 Lankford value :  $r=1.72$  Sheet thickness : 0.8mm,  
 Coulamb coefficient of friction : 0.12

해석을 위해서 1681개의 절점과 1600개의 4각형 격자를 사용하였다. 매개변수 패치의 경우 sheet normal 방법을 사용하였고, 제안된 방법은 Z-투사와 연계된 혼합 normal 방법을 사용하였다. 드로우비드에 해당되는 상당력은 드로우 비드의 형태에 의해 블랭크의 주변 절점들에 대해 가하였다. 또한 본 연구에서 바인더랩은 저자[6]에 의해 개발된 비선형 탄성 FEM code를 사용하여 계산하였다. 그림 7은 최종 펀치 행정 222mm에서 매개변수 패치와 제안된 방법의 변형형상을 보여주고 있다. 계산된 결과로부터 변형형상과 빨려들어간 양이 두 방법에서 거의 같음을 알 수 있다. 또한 Fig. 8은 최종 펀치 행정에서 두께 변형을 컨투어를 보여주고 있고, Fig. 9는 단면 A-A로 표시된 한 단면에서 두께 변형을 분포를 보여 주고 있다. 그림에서 전체적 경향은 거의 같으나 약간의 차이를 발견할 수 있는데, 이것은 근본적으로 금형묘사방법이 다르고 normal scheme도 다르기 때문에 기인된 차이라고 생각된다. Table 1에 매개변수 방법과 본 연구의 해석결과 방법을 요약해 놓았다. 이로부터 만약 박판의 절점수와 매개변수 패치수가 증가하면 제안된 금형면 묘사 방법이 매개 변수 방법보다 더 효율적임을 알 수 있다. 따라서, 제안된 금형면 묘사방법이 계산의 효율성, 금형의 원활성, 메모리 크기, 해의 정확성 면에서 일반적인 형상의 금형을 묘사하기 위한 하나의 좋은 선택이 될 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

국부적으로 분할된 비매개변수 패치 방법과 이에 연관된 접촉 탐색 알고리즘을 적용하여 임의의 금형면을 갖는 자동차 판넬을 해석하여 보았다. 다음과 같은 근거에 의해 제안된 금형묘사 방법의 일반적 사용 가능성과 강건성을 확인할 수 있었다.

- i) 제안된 방법이 단일 매개변수 패치의 수가 커지면 계산시간이나 접촉처리 알고리즘 면에서 매개변수 패치보다 더 효율적이다.
- ii) 제안된 방법이 금형의 정확성과 메모리 크기 면에서 일반적인 비매개변수 패치 방법보다 우수하다.

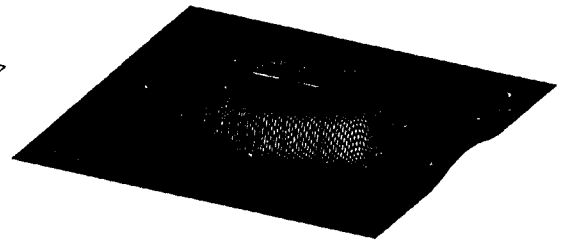
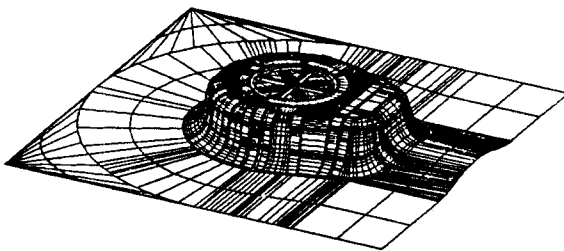
따라서, 제안된 방법은 복잡한 박판 부품 해석을 위한 금형면 묘사 방법으로 효과적으로 적용될 수 있을 것이다.

후기

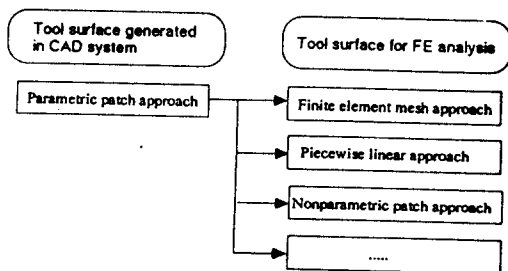
본 논문의 매개변수 금형면을 제공해주신 기아자동차 김광혁 과장님께 감사드립니다.

## REFERENCES

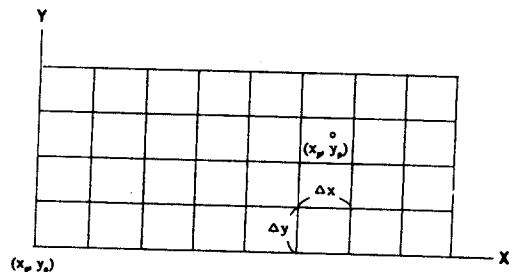
- [1] Schweizerhof, K. and Hallquist, J.O. 1991. Explicit integration schemes and contact formulations for thin sheet forming. In Proc. VDI(edited by Altan, T. et.al.). Zurich, Switzerland : 405-439
- [2] Makinouchi, A., Nakamachi, E., and Nakagawa, T. 1991. Development of CAE system for auto-body panel forming die design by using 2-D and 3-D FEM. Annals of the CIRP. 40 : 307-310.
- [3] Yoo, D.J., Song, I.S., Yang, D.Y., and Lee, J.H. 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. No.6 : 513-546
- [4] Yang, D.Y., Yoo, D.J., Song, I.S., and Lee, J.H. 1994. Investigation into tool surface description for finite element analysis of three-dimensional sheet metal forming processes. J. Mater. Process. Technol. 45 : 267-273.
- [5] Faux, I.D. and Pratt, M.J. 1979. Computational geometry for design and manufacture. Ellis Horwood.
- [6] Song, I.S., Yoo, D.J., Yoon, J.W., Yang, D.Y., Huh, H., and Lee, J.H. 1995. Accepted, Finite element analysis and design of binder wraps for automobile sheet metal parts using surface boundary condition. J. Mater. Engng. Perf.



**Fig. 1** Typical example of complex curved tool surface composed of parametric patches



**Fig. 2** Conversion procedures from parametric tool surface to the tool surface description for FE analysis



**Fig. 3** Typical example of complex curved tool surface composed of non-parametric patches

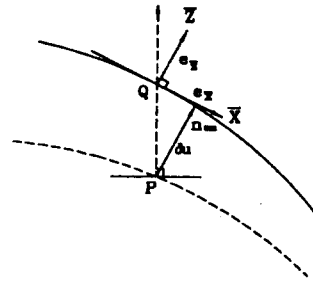
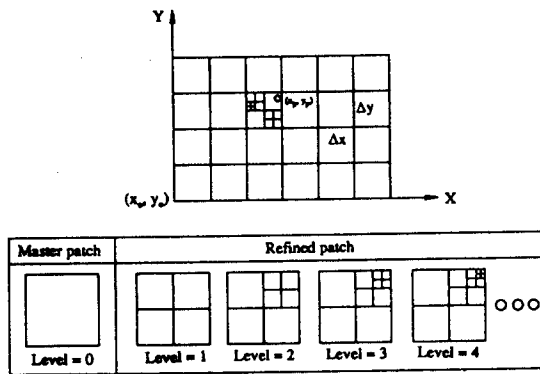


Fig. 4 Schematic diagram of locally refined non-parametric tool description

Fig.5 Z-projection combined with mixed normal

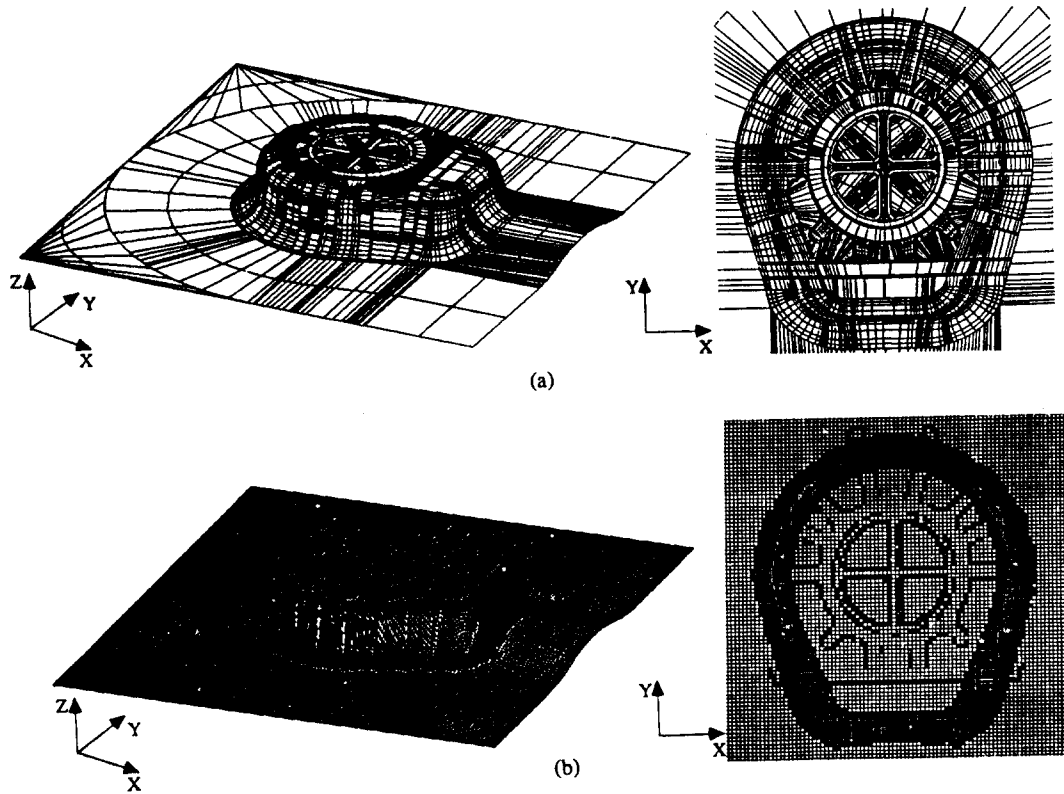


Fig. 6 Schematic view of the tool surfaces for stamping analysis of a trunk floor : (a) parametric patches, (b) locally refined nonparametric patches

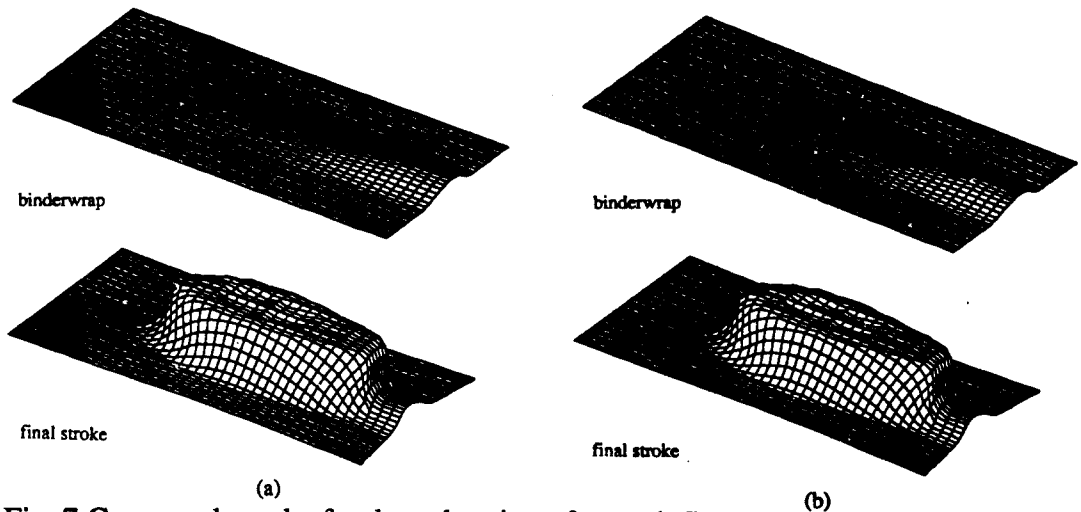


Fig. 7 Computed results for deep drawing of a trunk floor :  
 (a) parametric patch approach, (b) locally refined nonparametric patch approach

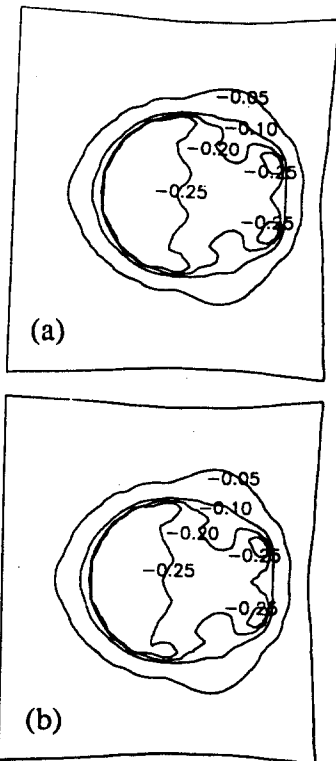


Fig. 8 Thickness strain contour for a trunk floor at the final step :  
 (a) parametric patch approach, (b) locally refined nonparametric patch approach

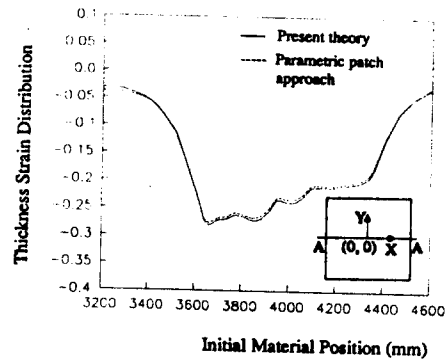


Fig. 9 Comparison of thickness strain distribution for deep drawing of a trunk floor on the section A-A

TABLE 1.  
 Comparison of numerical results for stamping of a trunk floor panel

	Parametric tool	Locally refined non-parametric tool
Projection scheme	sheet surface normal	Z-projection combined with mixed normal
Total no. of d. o. f.	5043 (1681 nodes)	5043 (1681 nodes)
Average iteration no. per step	8	9
Total no. of step	222	222
CPU (sec) per iteration (RISC 6000)	37	16
Total CPU (minutes)	1,110.0	495.0
Max. punch height (mm)	222.0	222.0