

유한요소격자에 기초한 일반적인 금형면 묘사와 3 차원 박판성형공정에의 응용

윤정환*, 김종봉**, 양동열****, 김석관*, 이재진*, 유동진***
(1997년 4월 4일 접수)

A General Description of Tool Surface Based on Finite Element Mesh and Its Application to 3-D Sheet Forming Processes

Jeong-Whan YOON, Jong-Bong KIM, Dong-Yol YANG, Seoggwon KIM, Jai-Jin Lee,
and Dong-Jin YOO

Key Words : Tool Description(금형면 묘사), Finite Element Mesh Approach(유한요소격자 금형면 묘사법), Sheet Forming(박판성형)

Abstract

One of the most important factor to be considered for the analysis of sheet metal forming processes is the tool surface description for arbitrarily-shaped sheet metal parts. In the present study, finite element approach is used to describe the arbitrarily shaped tool surface. In finite element mesh approach, tool surfaces are described by finite elements. The finite elements mesh description of the tool surface, which is originally described by CAD data, needs much time and time-consuming graphic operation. The method, however, has been widely used to describe a complex tool surface. In the present study, the contact searching algorithm for the finite element mesh approach is developed based on cell strategy method and sheet surface normal scheme. For the verification purpose, a clover cup drawing, Baden-Baden oilpan problem and a trunk floor drawing were investigated. The computational results based on the finite element approach were compared with the results of available parametric patch approach and experiments.

기호설명

- λ : 절점과 금형면과의 틈새
- $\bar{\sigma}$: 유효응력
- $\bar{\epsilon}$: 유효변형률
- R : 수직이방성 계수

1. 서론

CAD 시스템은 여러 분야로 사용되어지고 있는데, 박판 성형 공정에서도 실제 제품의 설계에 이

러한 CAD 시스템이 도입되어 금형 설계, 제작 등에 사용되고 있다. 우선 금형의 설계도면을 기본으로 하여 CAD 시스템을 이용한 3차원적인 곡면을 생성한 후 CAM 시스템에 의하여 금형을 제작하기 위한 가공경로 데이터를 작성하게 된다. 따라서 임의의 형상의 CAD적 금형 묘사는 CAM과 CAE를 행하기 위하여 반드시 선행되어야 한다. 임의의 형상 제품에 대한 금형면은 간단한 원, 평면 등의 단순한 해석식으로 표현되지 않는 복잡한 곡면들로 이루어져 있다. 실제 산업 현장에서 쓰고 있는 CAD 시스템에서는 Ferguson, NURBS (Non Uniform Rational B-Spline) 등의 패치가 많이 사용되고 있는데, 이러한 패치들이 모여 한 곡면을 이루고 곡면들이 다시 복수 개 모여 전체 금형면을 구성하게 된다. 박판 성형 공정을 해석할 때 금형면을 효과적으로 묘사하기 위한 많은 방법들이 제안되었다. 매개변수 패치에 의한 방법⁽¹⁾ (parametric

* LG 생산기술원

** 한국과학기술원

*** 대전대학교

**** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : dyyang@hanbit.kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3214 FAX : (042)869-3210

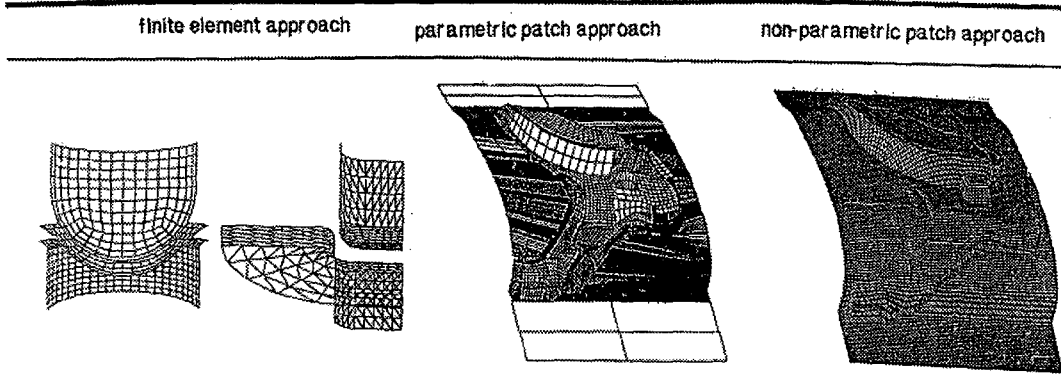


Fig. 1 General tool surface description method for sheet metal forming processes

patch approach), 유한 요소 격자에 의한 방법⁽²⁾ (finite element mesh approach), 비매개 변수 패치에 의한 방법⁽⁴⁾(non-parametric patch approach) 등이 그 예이다 (Fig. 1). 묘사한 박판성형공정을 위한 각각의 금형면 묘사방법에 대한 장단점의 비교는 참고 문헌⁽⁴⁻⁶⁾에 자세히 소개되어 있다. Kuem 등⁽³⁾은 금형면을 이론적인 식과 B-spline, 그리고 jewel patch로 묘사하고 mesh normal 과 tool normal 방법을 적용했을 때의 해석 결과를 비교하였다. Kuem 등은 B-spline 과 jewel patch로 금형면을 묘사하는데 있어 매개변수를 평면좌표계(x,y)를 사용하였기 때문에 직벽에 가까운 금형형상을 묘사하고 접촉점을 찾는데 있어 효율성이 떨어지는 문제점이 있다.

본 논문에서는 3차원의 박판성형공정 해석 프로그램 개발을 위해서, 일반적인 형상의 금형을 처리할 수 있는 여러 금형 묘사법 중에 CAD 시스템에서 모델링된 유한요소 데이터를 직접 성형 해석을 위한 금형 데이터로 사용할 수 있는 유한요소 격자방법과, 이에 관련된 접촉처리 방법을 개발하였다. 유한요소 격자로 금형면을 묘사하였기 때문에 직벽이 있는 형상의 묘사에도 어려움이 없고, 접촉의 탐색에 있어서는 셀 전략(cell strategy)을 이용하였기 때문에 역시 직벽 등의 복잡한 형상에 대해서도 접촉점 탐색을 용이하게 수행할 수 있었다. 개발된 유한요소격자 금형면 묘사법의 유용성을 검토하기 위해서, 클로바킵, 오일팬, 트렁크 플로어 등의 실제 박판성형 예제들에 적용하였다. 클로바킵의 경우에는 실험치 및 실제 금형면을 가장 정확히 묘사하는 매개변수 방법(parametric patch approach)⁽¹⁾과도 비교하여 계산의 효율성과 정확성을 평가하였다. 오일팬 예제는 매개변수 곡면이 주어지지 않아 Baden-Baden 벤치마크 위원회⁽⁸⁾에서 제시한 실험치와 비교하여 계산의 정확성을 보였다. 또한 실제 복잡한 자동

차 판넬(panel)에서 계산의 효율성을 보이기 위해 트렁크 플로어를 해석하여 매개변수 방법과 비교하였다.

2. 일반적인 금형형상 묘사를 위한 유한요소격자 방법

유한요소격자 방법은 금형을 유한요소격자로 나누어서 금형을 묘사하는 방법으로 복잡한 형상을 갖는 금형면 묘사를 위해 가장 보편적인 방법으로 쓰이고 있다. 금형면의 묘사는 유한요소 해석에서 영역을 유한요소로 이산화하는 것과 같이 절점의 좌표와 요소의 연속성(connectivity)으로 다음과 같이 묘사된다.

$$\begin{aligned}
 x &= \sum_{i=1}^{N_i} N_i x_i \\
 y &= \sum_{i=1}^{N_i} N_i y_i \\
 z &= \sum_{i=1}^{N_i} N_i z_i
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

식 (1)에서 N_{ei} 은 한 개의 금형 유한요소를 이루고 있는 절점의 수이고 N_i 는 형상함수, 그리고 x_i, y_i, z_i 는 각각 절점 i 의 x, y, z 좌표이다. 이와 같이 절점 좌표를 형상함수를 이용하여 보간하여 금형을 묘사하기 때문에 금형면을 묘사하는데 있어 거의 제한이 없다. 그러나, 초기 곡면 CAD 데이터를 유한요소격자로 분할해야 하기 때문에 그래픽 작업에 시간이 많이 소요되고 충분한 정확도를 가지고 부드러운 금형면을 묘사하기 위해서는 많은 수의 유한요소격자가 필요하게 되어 큰 메모리 용량을 요구한다. 또한 유한요소격자 방법으로 묘사된 금형면을 실제 유한요소 해석에 적용하기 위해

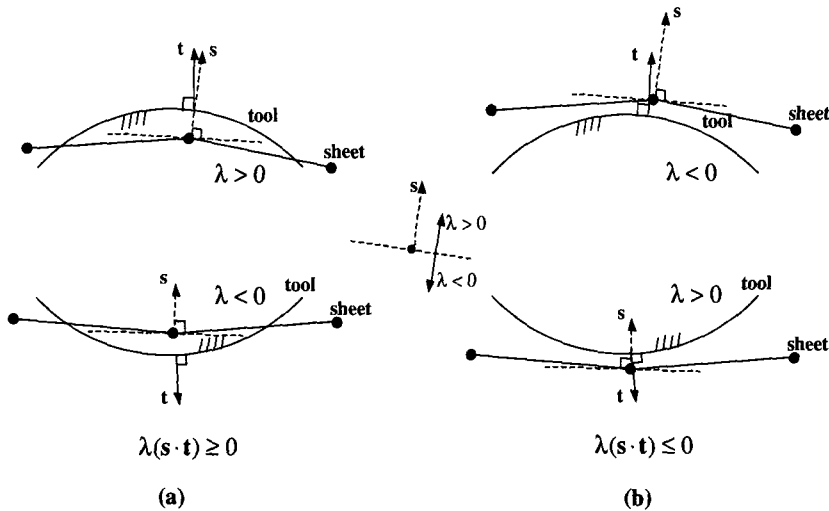


Fig. 2 Contact checking procedure : (a) Contact (b) Free

서는 박판과 금형면 사이에 접촉처리(contact treatment)를 위한 접촉탐색(contact search)이 필수적으로 수반되게 된다. 특히 유한요소 격자 금형면 묘사법의 경우에는 일반적으로 요소가 무질서하게 분포되어 있기 때문에 적은 시간 안에 접촉 탐색을 하기 위한 효과적인 전략에 필요하게 된다.⁽¹⁾ 본 절에서는 유한요소 격자 금형면 묘사법을 위한 접촉 판별 및 이와 관련된 접촉탐색 방법을 토론하였다.

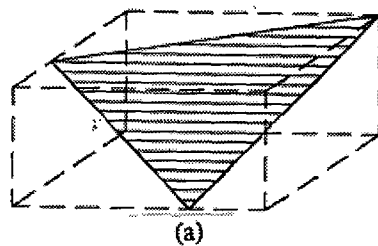
1.1 절점의 접촉판별

절점의 접촉 여부는 해당 절점이 금형을 침투했는지를 판별하는 기하학적 조건에 의해 판별된다. Sheet Surface Normal 방법을 사용할 경우, Fig. 2와 같이 한 절점에서 Sheet Surface Normal 방향으로의 벡터를 s 라 하고, s 와 금형과의 교차점에서 금형의 수직 벡터를 t 라 하면, 다음과 같은 조건에 의해 절점의 접촉여부를 쉽게 판별할 수 있다.

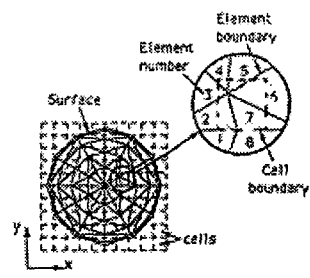
$\lambda(s \cdot t) \geq 0$ (contact)

$\lambda(s \cdot t) \leq 0$ (free)

여기서, λ 는 절점으로부터 금형과의 교차점까지의 거리이다.(λ 의 부호는 Fig. 2에 나와 있다.) 만약, 절점에서 위 조건이 만족되면 해당 절점은 접촉 절점으로 간주하여, 기하학적 구속조건과 마찰경계조건을 가하게 된다. 2.2 절에 기술된 접촉탐색 알고리즘은 위의 조건에서 이용되는 금형면과 절점의 교차점(s , t)과 침투량(λ)을 구하기 위해 수행된다.



(a)



(b)

Fig. 3 Information stored before FEA : (a) Calculation of tool element boundary (b) Storage of tool elements using the cell strategy

2.2 접촉탐색 알고리즘

일반적으로 접촉탐색과정(contact searching process)은 크게 전체탐색(global search)과 국부탐색(local search)으로 나눌 수 있다. 전체탐색은 접촉탐색을 하고자 하는 해당 절점에 충분히 가까이 있는 몇 개의 가능성 있는 금형 요소들을 찾는 작업이며, 국부탐색에 의해 해당 절점에 투사되어야

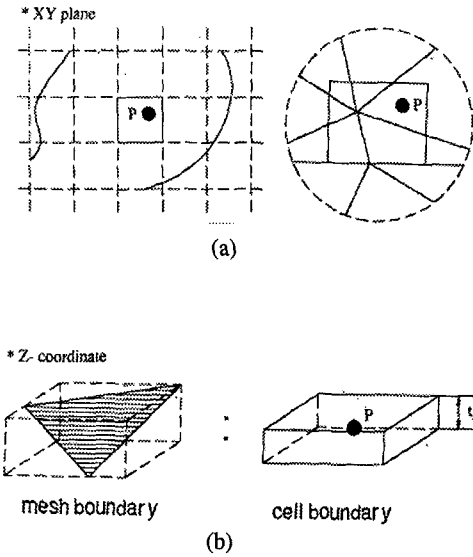


Fig. 4 Global search procedure for finite element mesh approach (a) X-Y plane searching (b) Z-coordinate searching

할 타겟(target)요소가 결정되게 된다. 이렇게 결정된 요소에 해당 접촉 절점이 투사되게 된다. 이 두 단계는 계산시간과 신뢰성 측면에서 충분히 효율성을 갖도록 처리해야 한다.

2.2.1 전체탐색

앞에서 언급했듯이, 전체탐색(Global Search)은 주어진 절점으로부터 일정한 범위에 있는 접촉 가능성 있는 금형 요소들을 고르는 과정이다. 유한요소 격자법에 의한 금형묘사는 일반적으로 금형 요소들이 무질서하게 배열되어 있기 때문에 전체탐색을 위해서 효과적인 전략이 필요하다. 본 연구에서는 셀 전략법(cell strategy method)⁽⁶⁾의 개념을 응용한 전체탐색 알고리즘을 개발하였다.

우선 유한요소 해석에 들어가기 전에 다음과 같은 두 단계의 사전 작업이 필요하다. 첫째로 Fig. 3(a)와 같이 전체탐색에 이용하기 위해 금형요소(tool element) 각각의 최대경계 위치의 정보를 저장해 놓는다. 여기에서 최대경계 위치정보란 금형요소를 이루고 있는 절점들의 좌표 중에서 최소 및 최대의 x, y, z 값을 의미한다. 둘째는 Fig. 3(b)와 같이 적당한 크기(풀고자 하는 문제에 따라 결정됨)로 x-y 평면에 정의된 각 셀 안에 들어가는 금형요소(tool element)를 저장해 놓는다.

이와 같이 두 가지 사전 작업이 끝난 후에 FE 해석 중에 전체탐색은 다음과 같이 진행된다. 전체탐색은 Fig. 4 에서와 같은 탐색과정을 이용하여 쉽게 진행되어진다. x-y 평면탐색은 유한요소 해석

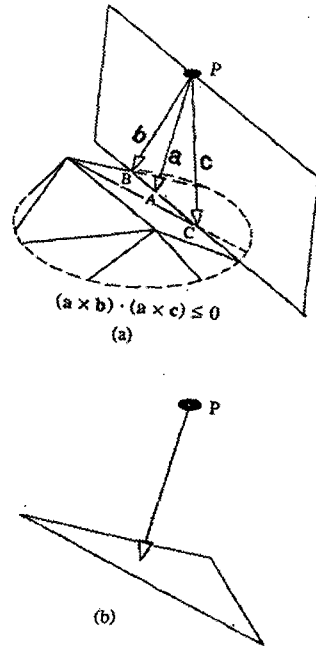


Fig. 5 Local search procedure for finite element mesh approach : (a) Target mesh selection (b) Intersection

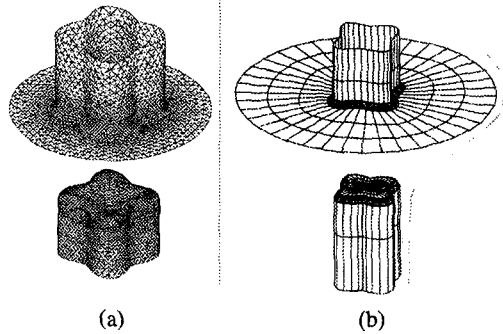


Fig. 6 Tool surface for the analysis of a clover-cup

전에 저장해 놓은 셀 정보를 이용하여 해당 절점이 속하는 셀에 포함된 금형 요소(tool element)를 쉽게 찾을 수 있고, z-방향 탐색은 역시 유한요소 해석 전에 저장해 놓은 최대 경계 위치정보로부터, 가능성 있는 금형요소만을 고를 수 있다. 즉 평면 탐색에 의해서 셀에 선택된 금형 요소들 중에서 금형 요소를 이루고 있는 절점의 최대 및 최소 z 좌표가 박판소재 절점의 z 좌표로부터 일정한 거리 안에 있으면 접촉 후보 요소로 선택을 하게 된다.

2.2.2 국부탐색

국부탐색(Local Search)은 관계된 계산의 신뢰성과 강건성에 직접적으로 연관되어 있기 때문에 접촉처리시 가장 중요하고 주의가 요망되는 단계이다. 본 연구에서는 국부탐색을 위해서 Yoo 등⁽¹⁾의 Sheet Surface Normal 에 기초한 국부탐색 알고리즘을 사용하였다.

Sheet Surface Normal 에서 국부탐색은 이미 방향을 알고있는 직선벡터와 금형요소와의 교차점을 찾는 문제로 귀결된다. 그러나, 교차점을 찾기 전에 전체탐색과정을 통해 선택된 타겟(target) 요소들로부터 실제로 소재의 절점이 접촉하고 있는 마스터(master)요소를 고르는 것이 필요하다. Fig. 5(a)에서 접촉절점 P를 지나고 절점 P에서의 sheet normal 을 방향벡터로 가지는 직선과 삼각형 금형요소와의 교점이 A 이다. 그리고 점 P에서 점 A로의 단위벡터 a 를 포함하는 임의의 평면과 삼각형 금형요소의 변화의 두 교점이 B, C 이다. 이와 같이 점 P, A, B, C 를 정의하고, 벡터 a, b, c 를 각각 점 P에서 A, B, C 로의 단위벡터로 정의하면, 금형요소가 절점 P의 마스터 요소가 될 가능성의 여부는 다음과 같은 벡터 판별식으로부터 쉽게 판단할 수 있다.

$$(a \times b) \cdot (a \times c) \leq 0$$

이렇게 하여 선택된 요소와 해당 절점과의 교차점은 직선 벡터와 선형 삼각형과의 교차점을 구하는 문제로 귀결되어 쉽게 교차점을 구할 수 있다.

3. 적용 예 및 토론

3.1 클로바컵의 디프드로잉

클로바컵 디프드로잉은 압축과 인장을 동시에 받는 복잡한 응력상태를 가지고 있고, 금형면도 간단하지 않아 재료의 인장, 압축거동 및 금형묘사방법의 효율성을 평가하기 위한 적당한 예제이다. 본 해석에서는 수치적 효율성을 입증하기 위해서 박판재료가 완전히 성형 되어 금형에서 빠져나올 때까지 시뮬레이션을 진행하였다. 또한 계산의 정확성 및 효율성을 평가하기 위하여 3차 이상의 다항함수(polynomial)로 금형면을 가장 정확히 묘사하는 매개변수 금형면 묘사법⁽¹⁾과 비교하였고 실험치와도 비교하였다. 해석에 쓰인 재료와 공정변수는 다음과 같다.

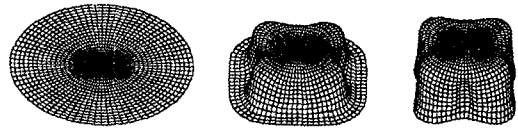


Fig. 7 Deformed shape of a clover cup

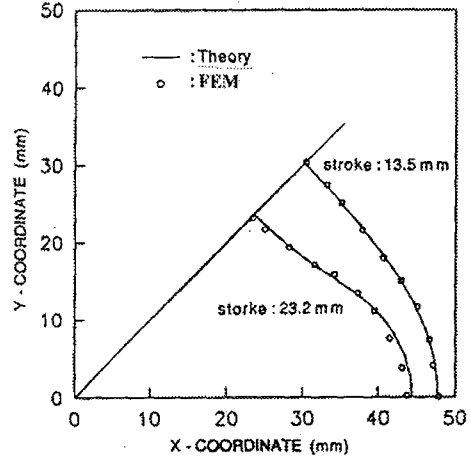


Fig. 8 Edge contour

박판재료 : 냉연강판

응력-변형률 곡선: $\bar{\sigma} = 594.86(0.0009 + \bar{\epsilon})^{0.216}$ MPa

Lankford value : $r = 1.66$

초기박판두께 : $t = 0.742$ mm

쿨롱 마찰계수 : 편치/박판 - 0.24,
다이/박판 - 0.1

Fig. 6은 해석에 쓰인 금형면을 보여주고 있다. Fig. 6(a)는 상업용 소프트웨어인 IDEAS에서 선형 삼각형으로 모델링한 것으로서 유한요소 격자법의 금형면으로 사용되게 된다. Fig. 6(b)는 3차식의 퍼거슨 패치(Ferguson patch)로 모델링된 데이터로 유한요소 해석시 매개변수 방법을 위한 금형면으로 쓰인다. 해석은 대칭성을 고려하여 1/4만 해석하였다. 클로바컵 드로잉의 경우 기존의 박막요소를 사용할 경우 압축응력으로 인한 수치적 좌굴 현상 때문에 수렴성 문제에 봉착하게 된다. 본 연구에서는 BEAM(Bending Energy Augmented Membrane) 요소⁽¹⁾를 사용하여 이러한 수치적 좌굴 현상을 극복하였다. Fig. 7은 초기와 중간 그리고 최종상태에서의 변형형상을 보여주고 있는데, 특히 압축을 받고 있는 부분에서 수치적 좌굴 현상 없이 깨끗하게 성형되었음을 알 수 있다. Fig. 8은 두 개의 선택된 스트로크 13.5mm와 23.2mm에서 플랜지에서의 에지(edge) 컨투어를 실험과 비교하였는데, 해석결과와 실험치가 잘 일치하고 있음을 알 수

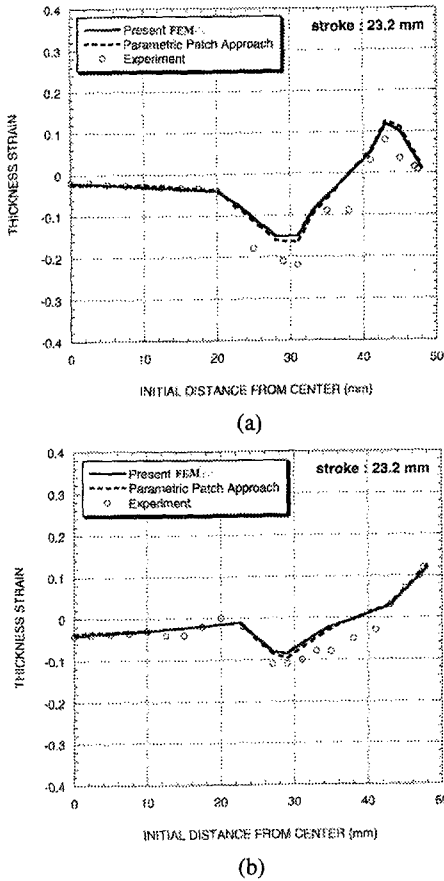


Fig. 9 Thickness strain distribution of a clover cup (a) major axes (b) minor axes

있다. Fig. 9는 펀치중분 24.2mm에서 주축(major axes)과 부축(minor axes)에 대해 두께변형률 분포를 도시하였으며, 비교를 위해 실험치 및 매개변수 방법의 결과를 첨가하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 본 연구의 해석결과가 가장 정확한 금형면 묘사 방법인 매개변수방법의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 계산의 효율성에 있어서 본 연구에서 제안한 유한요소 격자법의 경우 IBM RISC 6000 23W에서 1시간 정도 소요되었으나, 매개변수방법의 경우는 3차원 곡면과의 접촉처리기 복잡한 알고리즘과 많은 계산조건으로 인해 약 2시간 30분 정도 소요되었다.⁽¹⁾ 따라서 본 예제에서는 거의 같은 정확성을 얻는데 있어서 유한요소 격자법의 계산 효율성이 매개변수 방법보다 뛰어난을 알 수 있다. 본 공정의 성형성을 검증해 보기 위해 Fig. 10에 성형한계를 도시하였다. FLD는 탄소함유율 2% 이내의 일반 강(steel)에 대해 Keeler⁽¹¹⁾가 제시한 자료를 이용하였다. 예상대로 성형성은 충분히 안전범위에 놓여 있음을 보여주

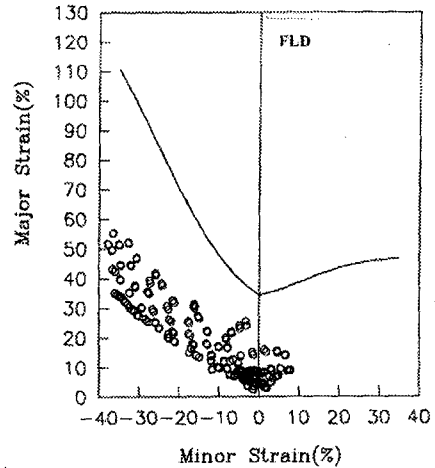


Fig. 10 Distribution of the strain in the forming limit diagram(clover cup)

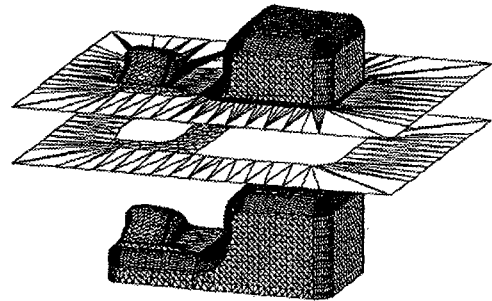


Fig. 11 Tool surface data of an oilpan

고 있다. 이상에서 본 연구에서 제안한 유한요소 격자 금형면 묘사법에 기초한 접촉탐색방법이 복잡한 해석적 예제에 성공적으로 적용할 수 있음을 보였다.

3.2 오일팬의 디프드로잉 공정

본 연구에서 제안한 금형묘사법의 일반성을 보이고, 복잡한 실제 산업현장 예제의 적용성과 제안된 유한요소격자 금형면 묘사법에 기초한 접촉 탐색방법의 효율성을 검증하기 위하여, 94' Barden-Barden Benchmark 오일팬을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다.⁽⁸⁾ 또한 해석결과의 검토를 위하여 Benchmark 위원회가 제시한 실험치와도 비교하였다. 해석에 쓰인 재료와 공정변수는 다음과 같다.

박판재료 : 냉연강판

응력-변형률 곡선: $\bar{\sigma} = 427.56(0.0082 + \bar{\epsilon})^{0.185}$ MPa

Lankford value : $r = 2.02$

초기박판두께 : $t = 0.63$ mm

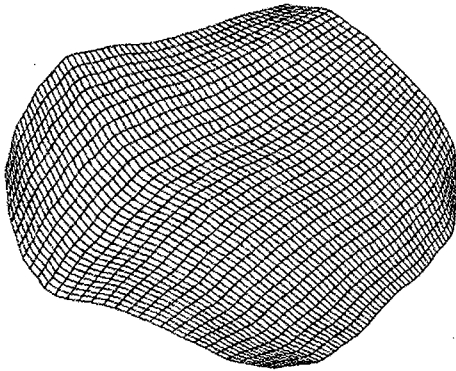


Fig. 12 Initial mesh system for the analysis of an oilpan

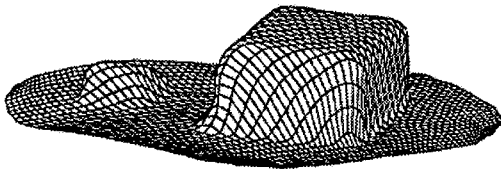


Fig. 13 Final deformed shape of an oilpan

쿨롱 마찰계수 : 0.165

15 Major strain distribution of the section A-B Fig. 11 은 Benchmark 위원회가 제공한 금형데이터를 보여 주고 있는데 복잡한 형상의 오일팬임을 알 수 있다. 해석을 위해 블랭크는 1800 개의 선형 4 각형의 BEAM 요소를 사용하여 모델링 하였다. 총 펀치 스트로크는 85mm 이며 한 단계 당 0.25mm 씩 성형하였다. Fig. 12 는 초기의 박판모양을 보여주고 있는데, 단순한 형상이 아니므로 다수의 점으로서 블랭크를 묘사하였다. 여기서 격자생성은 본 프로그램의 자동 격자생성 모듈을 이용하였다. Fig. 13 은 최종변형형상을 보여주고 있고, 변형률의 국부화를 관찰하기 위해 Fig. 14 에 표시된 A-B 선을 따라서 Fig. 15 와 Fig. 16 에 실험치와 비교하였다. Fig. 15 와 Fig. 16 에서 A-B4 와 A-B6 가운데 부분을 보면, 주변형률의 값은 0.45 정도이고 주변형률의 값은 0 정도이다. 이 변형률 값을 Fig. 17 에 나타낸 성형한계곡선에 표시해 보면 파단이 발생할 가능성이 있음을 알 수 있다. Benchmark 위원회에서 보고되었듯이 A-B 선에서 네킹이 발생한 것을 시뮬레이션 결과가 잘 예측하고 있는 것이다. 이것을 다시 한번 검증하기 위해 Fig. 17 에 성형한계도를 도시하였다. 예상대로 많은 요소들의 변형률이 성형한계 위에 놓여짐으로서 파단이 일어났음을 확인할 수 있다. 또한 Table 1 에서 볼 수 있

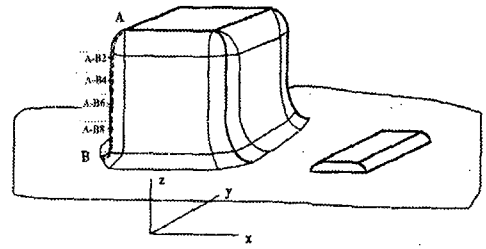


Fig. 14 Section A-B of an oilpan

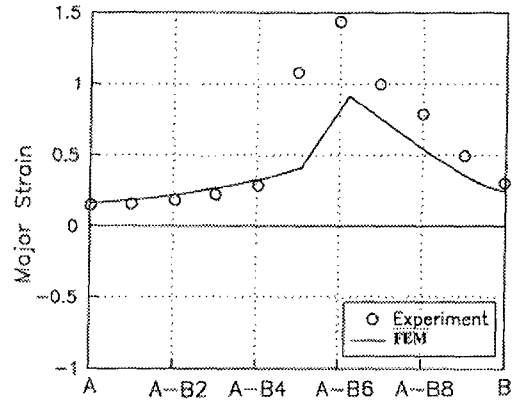


Fig. 15 Major strain distribution of the section A-B

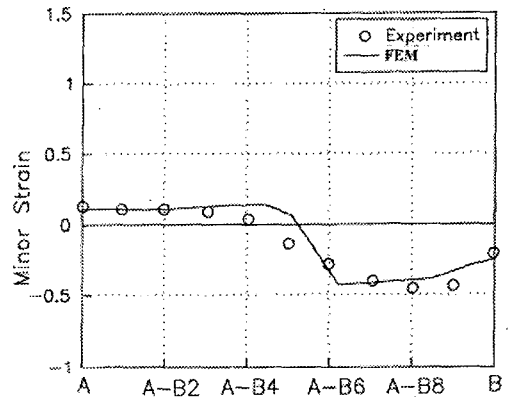


Fig. 16 Minor strain distribution of the section A-B

듯이 계산시간은 IBM RISC 6000 23W 에서 8 시간 정도 소요되었다. 그러나, 한 단계당 펀치 스트로크를 1mm 씩 진행하면 수렴성 문제에 봉착하였다. 이것은 펀치 증분이 커짐에 따라 금형의 불연속성이 심해져 생긴 문제로 생각되어진다. 따라서, 내연적 코드의 경우 펀치 증분을 적절히 선택하는 것이 중요하다고 하겠다.

3.3 트렁크 플로어 스탬핑 공정

트렁크 플로어(trunk floor)는 자동차의 스페어 타이어(spare tire)가 위치하는 판넬로써 심한 경사와

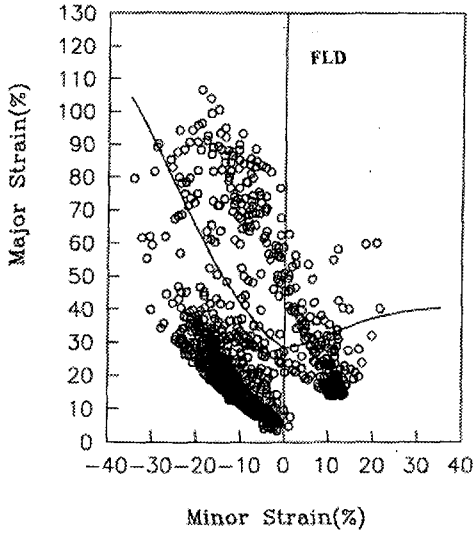


Fig. 17 Distribution of the strain in the forming limit diagram(oilpan)

Table 1 Computational results of an oilpan

Tool description	Finite element approach
Total no. of elements	1,800
Average no. of iterations per step	15
Total no. of steps	340(1step : 0.25 mm)
Total CPU time(hour)	12(RISC 6000)
Max. punch stroke	85.0

코너 때문에 성형하기 힘든 판넬 중의 하나이다. 본 연구에서는 복잡한 예제에 대해 유한요소 격자법에 기초한 접촉탐색 방법의 계산적 효율성을 보이기 위해 매개변수 패치 묘사법의 결과와 비교하였다. Fig. 18는 해석에 사용된 금형면을 보여준다. Fig. 18(a)에 나타낸 유한요소 격자 금형면 묘사에서는 부분적으로 분할된 각 패치를 1차식의 평면으로 가정하여 해석하였고, Fig. 18(b)에 나타낸 매개변수 패치 묘사법에서는 각 패치를 3차의 Ferguson 곡면으로 금형면을 묘사하였다. 해석에 쓰인 재료와 공정변수는 다음과 같다.

- 박판재료 : 냉연강판
- 응력-변형률 곡선: $\bar{\sigma} = 519.21(0.0019 + \bar{\epsilon})^{0.27}$ MPa
- Lankford value : $r = 1.72$
- 초기박판두께 : $t = 0.8$ mm
- 쿨롱 마찰계수 : 0.12

해석을 위해서 블랭크는 1681 개의 절점과 1600 개의 사각형 선형요소로 모델링하였다. Fig. 19은 바인더 랩과 펀치 증분 222mm에서 최종 변형형

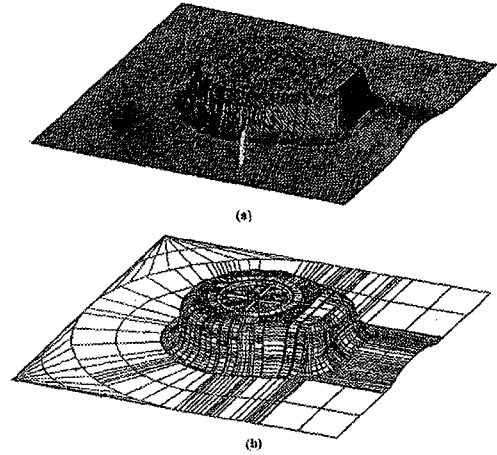


Fig. 18 Tool surface for the analysis of a trunk floor : (a)finite element mesh approach (b)parametric patch approach

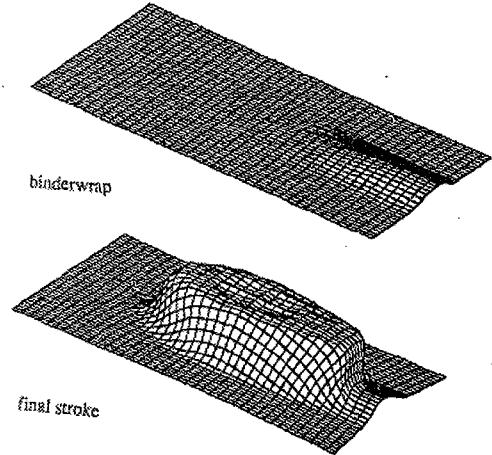


Fig. 19 Deformed shape of a trunk floor

상을 보여준다. 바인더 랩 해석은 참고문헌⁽¹⁰⁾의 방법을 이용하여 구하였다. Fig. 20은 유한요소 격자법과 매개변수 방법에서 구한 두께 변형률 분포를 보여주고 있다. 비록 유한요소 격자법에서 각 패치를 선형요소로 가정했지만, 계산 결과는 매개변수 방법과 잘 일치하고 있음을 알 수 있고, 공업적 관점에서 차이가 크지 않음을 알 수 있다. Table 2는 계산의 효율성을 비교하는 결과를 보여준다. 유한요소 격자법으로 해석하는 것이 매개변수 패치묘사법으로 해석하는 것보다 계산 시간면에서 월등히 뛰어난 것을 보여주고 있다. 이는 매개변수 방법을 사용할 때 접촉처리시 복잡한 알고리즘으로 인해 계산시간이 크게 증가한데 기인한다. 따라서, 본 연구에서 제안한 유한요소 격자법에

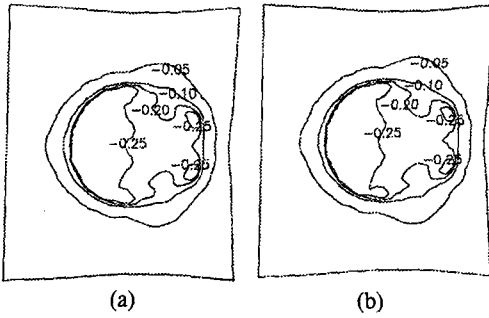


Fig. 20 Thickness strain distribution of a trunk floor : (a) finite element mesh approach (b)parametric patch approach

Table 2 Comparison of numerical results for stamping of a trunk floor panel

	Finite element approach	Parametric patch approach
Total no. of steps	222	222
Average no. of iterations per step	9	8
Total CPU time(hour)	8	18

기초한 접촉탐색법이 복잡한 차체 판넬의 성형 해석에 계산의 효율성 관점에서 성공적으로 적용될 수 있음을 보였다.

4. 결론

유한요소격자 금형면 묘사법으로 금형면을 묘사하였고, 이와 관련하여 효율적인 접촉 탐색방법을 제안하여 3차원 임의의 형상의 성형을 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 제안된 방법의 유용성을 검토하기 위해 본 연구를 클로바 컵, 오일팬, 트렁크 플로어 등의 복잡한 예제의 성형 해석에 적용하였다.

해석적 예제인 클로바 컵의 경우 매개변수 방법 및 실험치와 비교하여 해의 정확성 및 계산의 효율성을 검증하였다. 또한 본 연구를 과단이 보고된 바 있는 Baden-Baden 오일팬에 적용하여 프로그램의 강건성 및 정확성을 보였으며, 복잡한 실제 판넬인 트렁크 플로어의 성형 공정을 해석하여 매개변수 방법의 결과와 비교하여 복잡한 예제에 대해 계산의 효율성을 재검증하였다.

따라서, 본 연구에서 제안한 유한요소 격자법에 기초한 접촉탐색 방법이 실제 박판성형공정의 해석에 성공적으로 적용될 수 있음을 보였다.

후 기

클로바컵의 금형데이터를 모델링해 준 한국과학기술원 기계공학과 컴퓨터원용 정형가공연구실

의 박근씨께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 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.*, 36, 513.
- (2) Schweiserhof, 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.
- (3) Keum, Y. T., Nakamachi, E., Wagoner, R. H. and Lee, J. K., 1990, "Compatible Description of Tool Surfaces and FEM Meshes for Analyzing Sheet Forming Operations," *Int. J. Num. Meth. Engrg.*, 30, 1401.
- (4) Yang, D. Y., Yoo, D. J., Song, I. S. and Lee, J. H., 1993, "Investigation into Tool Surface Description for Finite Element Analysis of Three-dimensional Sheet Metal Forming Processes," *J. Mater. Process. Tech.*, 45, 267.
- (5) Yang, D. Y., Yoon, J. W. and Yoo, D. J., 1995, "Finite Element Simulation of Sheet Forming by Using Non-parametric Tool Description with Automatically Refined Patches," in Shan-Fu Shen and P. Dawson (ed.), *Proc. Simulation of Materials Processing : Theory, Methods and applications (NUMIFORM' 95)*, A.A. Balkema, Rotterdam, 799.
- (6) Santos, A. and Makinouchi, A., 1993, "Contact Strategies to Deal With Different Tool Description in Static Explicit FEM for 3d Sheet Metal Forming Simulation," *Proc of the 2nd international conference of NUMISHEET' 93*, edited by A. Machinouch et.al, Isehara, Japan, 261..
- (7) Yang, D. Y. and Lee, H. S., 1993 "Analysis of Three-dimensional Deep Drawing by the Energy Method," *Int.J. Mech. Sci.*, 35, 491.
- (8) Barden-Barden Benchmark'94 Organizing committee, 1994, *Metal forming process simulation in industry conference*, Barben-Barden, Germany.

- (9) 윤정환, 양동열, 김석관, 이재진, 유동진, 1996, “유한요소격자법에 기초한 일반적인 금형면 묘사와 박판성형공정에서의 응용,” 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, 31.
- (10) Song, I. S., Yoo, D. J., Yoon, J. W., Yang, D. Y., Huh, H. and Lee, J. H., 1996, “Finite Element Analysis and Design of Binderwrap for Automobile Sheet Metal Parts Using Surface Boundary Condition,” *J. Materials Eng. and Performance*, 4, 593.
- (11) Keeler, S. P., 1976, “Press Shop Application of Forming Limit Diagrams,” *IDDRG Working Group III*, Ann Arbor. MI, October 17.