

## 유한요소격자법에 기초한 일반적인 금형면묘사와 3차원 박판성형공정에의 응용

윤정환, 양동열 (한국과학기술원 기계공학과),  
김석관, 이재진 (LG 생산기술원), 유동진 (기아자동차)

### A General Tool Surface Description Method Based on Finite Element Mesh Approach and its Application to Sheet Forming

J.W. YOON, D.Y. YANG (Mechanical Eng., KAIST),  
S.K. KIM, J.J. LEE (LG Electronics), and D.J. YOO (Kia Motors)

#### 1. 서론

CAD 시스템은 여러분야로 사용되어지고 있는데, 박판 성형 공정에서도 실제 제품의 설계에 이러한 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 임의 형상의 CAD적 금형 묘사는 CAM과 CAE를 행하기 위하여 반드시 선행되어야 한다. 임의의 형상 제품에 대한 금형면은 간단한 원, 평면등의 단순한 해석 식으로 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 복수개 모여 전체 금형면을 구성하게 된다. 박판 성형 공정을 해석할때 금형면을 효과적으로 묘사하기 위한 많은 방법들이 제안되었다. 매개변수 패치에 의한 방법[1] (Parametric Patch Approach), 유한 요소 격자에 의한 방법[2](Finite Element Mesh Approach), 비매개 변수 패치에 의한 방법[3] (Non-Parametric Patch Approach)등이 그 예이다 (Fig.1).

본 논문에서는 3차원의 박판성형공정 해석 프로그램 개발을 위해서,

일반적인 형상의 금형을 처리할 수 있는 여러 금형묘사법중에 CAD 시스템에서 모델링된 유한요소 데이터를 직접 성형해석을 위한 금형데이터로 사용할 수 있는 유한요소 격자방법과, 이에 관련된 접촉처리 방법을 개발하였다. 개발된 3차원 프로그램의 유용성을 검토하기 위해서, 클로바킵, 오일팬의 실제 예제에 적용하여 봄으로서, 프로그램의 안정성과 정확성을 평가하였다.

## 2. 일반적인 금형형상을 위한 유한요소격자 방법

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 소요되고 충분한 정확도를 가지고 부드러운 금형면을 묘사하기 위해서는 많은 수의 유한요소격자가 필요하게 되어 큰 메모리 용량을 요구한다. 또한 유한요소격자 방법은 요소가 무질서하게 분포되어 있기 때문에 적은 시간안에 접촉탐색을 하기 위해서는 효과적인 전략이 필요하다. 일반적으로 접촉탐색과정 (contact searching process)은 크게 전체탐색 (global search)과 국부탐색 (local search)으로 나눌수 있다. 전체 탐색은 접촉탐색을 하고자 하는 해당절점에 충분히 가까이에 있는 몇개의 가능성 있는 금형요소들을 찾는 작업이며, 국부탐색에 의해 해당 절점에 투사되어야할 타겟 (Target)요소가 결정되게 된다. 이렇게 결정된 요소에 해당 접촉절점이 투사되게 된다. 본 연구에서는 몇가지 제안된 방법중에 셀 전략법[4] (cell strategy method)와 매개변수 패치 방법에 쓰였던 Yoo[1]의 방법을 기초로 다음과 같은 효율적인 새로운 방법을 제안하였다.

우선 유한요소 해석에 들어가기 전에 다음과 같은 두단계의 사전 작업이 필요하다. 첫째로 Fig.2(a)와 같이 전체탐색에 이용하기 위해 금형 요소 (tool element) 각각의 최대경계 위치의 정보를 저장해 놓는다. 둘째는 Fig.2(b)와 같이 적당한 크기(풀고자하는 문제에 따라 결정됨)로 x-y 평면에 정의된 각 셀안에 들어가는 금형요소 (tool element)를 저장해 놓는다.

이와 같이 두가지 사전 작업이 끝난후에 FE 해석중에 전체탐색은 다음과 같이 진행된다. 전체탐색은 Fig.3 에서와 같은 탐색과정을 이용하여 쉽게

진행되어진다. x-y 평면탐색은 FE 해석전에 저장해 놓은 셀 정보를 이용하여 해당 절점이 속하는 셀에 포함된 금형 요소(tool element)를 쉽게 찾을 수 있고, z-방향 탐색은 역시 FE 해석전에 저장해 놓은 최대 경계 위치정보로부터, 가능성 있는 금형요소만을 고를 수 있다. 전체탐색이 끝난후 국부탐색은 Fig.4와 같이 타겟 요소를 고르는 과정과 타겟요소에 교차점을 구하는 과정으로 나뉘어진다. 타겟요소를 고르는 과정은 Fig.4(a)와 같은 벡터 판별식으로 부터 쉽게 찾을 수 있고, 선택된 요소와 해당 절점과의 교차점은 쉽게 구해진다 (Fig.4(b)). 본 연구에서는 Sheet normal 방법을 사용하기 때문에 직선 벡터와 선형 삼각형과의 교차점을 구하는 문제로 귀결되어 쉽게 교차점을 구할 수 있다.

### 3. 결과 및 토론

#### 3.1 클로바컵의 디프드로잉

클로바컵 디프 드로잉은 압축과 인장을 동시에 받는 복잡한 응력상태를 가지고 있고, 금형면도 간단하지 않아 재료의 인장, 압축거동 및 금형묘사방법의 효율성을 평가하기 위한 어려운 예제이다. 본 해석에서는 수치적 효율성을 입증하기 위해서 박판재료가 완전히 성형되어 금형에서 빠져나올 때까지 시뮬레이션을 진행하였고 정확성 평가를 위해서 참고문헌 [5]의 실험치와 비교하였다. 해석에 쓰인 공정변수는 다음과 같다.

박판재료 : 냉연강판

$$\text{응력-변형률 곡선} : \bar{\sigma} = 60.7 ( 0.0009 + \bar{\epsilon} )^{0.216} \quad \text{Kgf/mm}^2$$

R- 값 :  $r = 1.66$

초기박판두께 :  $t = 0.742 \text{ mm}$

쿨롱 마찰계수 : 펀치/박판 - 0.24, 다이/박판 - 0.1

Fig.5 는 해석에 쓰인 금형면을 보여주고 있는데 역시 Ideas에서 선형삼각형 요소로 모델링한 것이다. 해석은 대칭성을 고려하여 1/4만 해석하였다. 클로바컵 드로잉의 경우 기존의 박막요소를 사용할 경우 압축응력으로 인한

수치적 좌굴현상 때문에 수렴성 문제에 봉착하게 된다. 본 연구에서는 BEAM(Bending Energy Augmented Membrane)요소[1]를 사용하여 이러한 수치적 좌굴현상을 극복하였다. Fig.6는 초기와 중간 그리고 최종상태에서의 변형형상을 보여주고 있는데, 특히 압축을 받고있는 부분에서 수치적 좌굴현상 없이 깨끗하게 성형되었음을 알 수 있다. Fig.7는 두개의 선택된 스트로크 13.5mm와 23.2mm에서 플랜지에서의 edge 컨투어를 실험과 비교하였는데, 해석결과와 실험치가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig.8는 펀치증분 24.2mm에서 주축과 부축에 대해 두께변형률 분포를 도시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 해석결과가 실험치와 잘 일치하고 있다. 본 공정의 성형성을 검증해 보기 위해 Fig.9에 성형한계를 도시하였다. 예상대로 성형성은 충분히 안전범위에 놓여있음을 보여주고 있다.

### 3.2 오일팬의 디프드로잉 공정

본 연구에서 제안한 금형묘사법의 일반성을 보이고, 복잡한 실제 산업 현장 예제의 적용성과 제안된 접촉탐색방법의 효율성을 검증하기 위하여, 94' Barden-Barden Benchmark 오일팬을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다[6]. 또한 해석결과의 검토를 위하여 Benchmark위원회가 제시한 실험치와도 비교하였다. 해석에 쓰인 공정변수는 다음과 같다.

박판재료 : 냉연강판

응력-변형률 곡선 :  $\bar{\sigma} = 427.56 ( 0.00818 + \bar{\epsilon} )^{0.1847}$  Mpa

R- 값 :  $r = 2.02$

초기박판두께 :  $t = 0.63$  mm

쿨롱 마찰계수 : 0.165

Fig.10는 Benchmark위원회가 제공한 금형데이터를 보여주고 있는데 복잡한 형상의 오일팬임을 알 수 있다. 해석을 위해 1800개의 선형 4각형의 BEAM요소를 사용하였다. 총 펀치 스트로크는 85mm이며 한단계당 0.25mm씩 성형하였다. Fig.11는 초기의 박판모양을 보여주고 있는데, 단순한 형상이 아니므로 다수의 점으로서 블랭크를 묘사하였다. 여기서 격자생성은 본 프로그

램의 자동 격자생성 모듈을 이용하였다. Fig.12는 최종변형형상을 보여주고 있고, 변형률의 국부화를 관찰하기 위해 Fig.13에 표시된 A-B선을 따라서 Fig.14와 Fig.15에 실험치와 비교하였다. Benchmark위원회에서 보고되었듯이 A-B선에서 네킹이 발생한 것을 시뮬레이션 결과가 잘 예측하고 있다. 이것을 다시 한번 검증하기 위해 Fig.16에 성형한계도를 도시하였다. 예상대로 많은 요소들의 변형률이 성형한계위에 놓여짐으로서 파단이 일어났음을 확인할 수 있다. 또한 Fig.17에서 볼 수 있듯이 계산시간은 IBM RISC 6000에서 12시간 정도 소요되었다. 그러나, 한 단계당 펀치 스트로크를 1mm씩 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.

#### 4. 결론

3차원의 임의의 형상을 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 유한요소격자방법과 이에 관련된 접촉처리 방법을 제안하였으며, 프로그램의 안정성을 검토하기 위해 클로바컵, 오일팬, S-Rail등의 예제에 적용하여 실제 산업 현장 문제의 성형성 평가를 위한 소프트웨어로서 성공적으로 적용될 수 있음을 보여주었다.

#### 참고문헌

1. D. J. Yoo, I. S. Song, D. Y. Yang and J. H. Lee, Int. J. Mech. Sci., Vol. 36, No. 6, pp. 513-546 (1994)
2. K. Schweiserhof and J. O. Hallquist, In Proc. VDI (edited by Altan, T. et al), Zurich, Switzerland, pp. 405-439 (1991)
3. D. Y. Yang, D. J. Yoo, I. S. Song and J. H. Lee, J. Mater. Process. Tech, 45, pp. 267-273 (1993)
4. A. Santos and A. Makinouchi, Proc of the 2nd international conference NUMISHEET'93 in A. Machinouch et.al (ed.), Isehara, Japan (1993)
5. D.Y. Yang and H.S. Lee, Analysis of three - dimensional deep drawing by the energy method, Int.J. Mech. Sci, pp.491-513 (1993).
6. Barden-Barden Benchmark'94 Organizing committee, Metal forming process simulation in industry conference, Barben-Barden, Germany (1994).

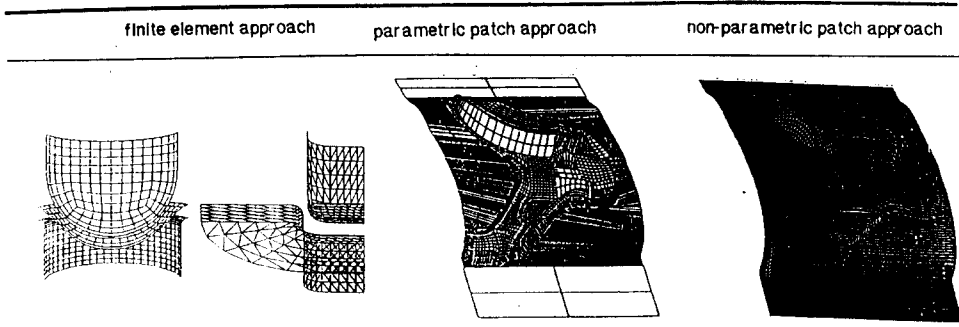


Fig.1 박판성형공정을 위한 일반적인 금형묘사법

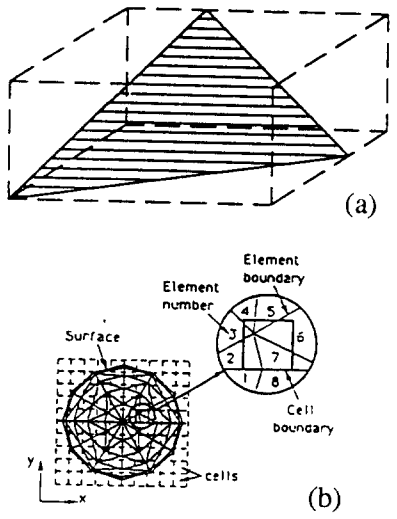


Fig.2 FEA 전에 저장할 정보:  
 (a) 금형요소의 경계 계산  
 (b) 셀 전략법을 이용한 금형요소의 저장

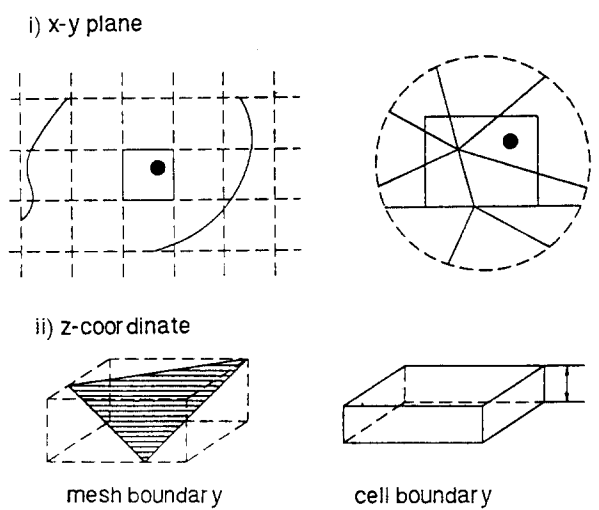


Fig.3 유한요소격자방법을 위한 전체탐색 과정

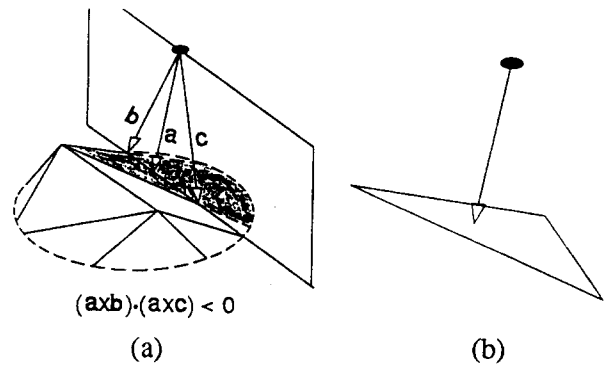


Fig.4 유한요소격자방법을 위한 국부탐색 과정:  
 (a) 타겟격자 선정 (b) 교차점 찾기

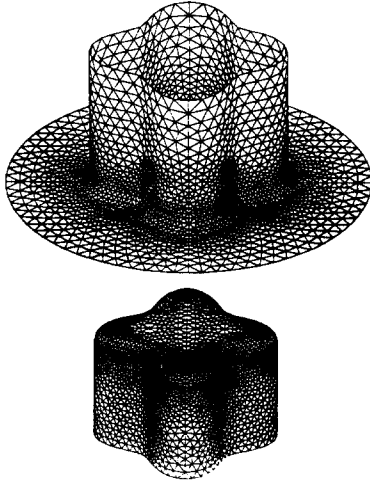


Fig.5 클로바컵 성형해석을 위한 금형면

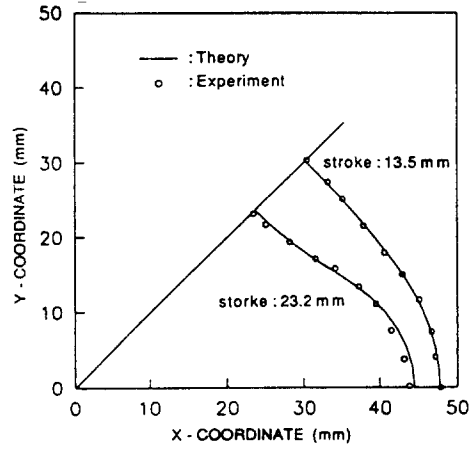


Fig.7 edge 컨투어

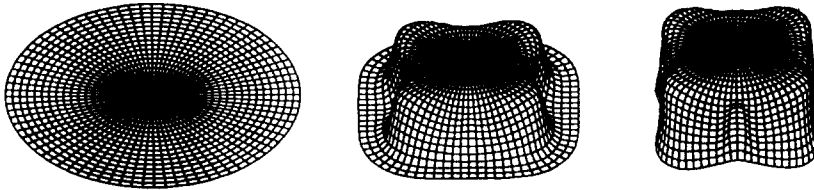
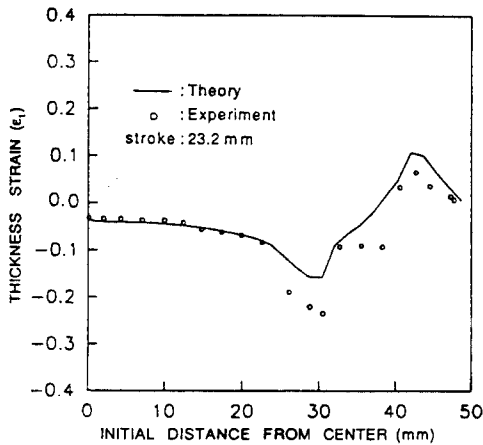
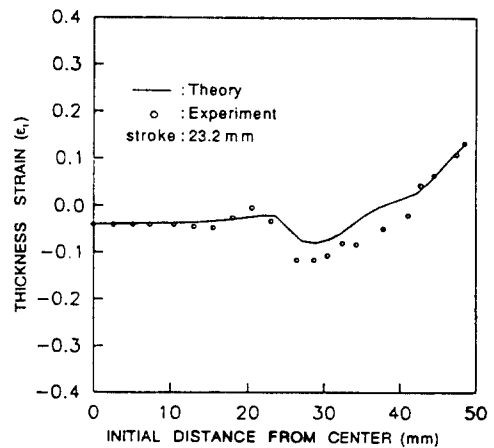


Fig.6 클로바컵의 변형형상



(a)



(b)

Fig.8 클로바컵 성형후 두께 변형률 (a) 장축 (b) 단축

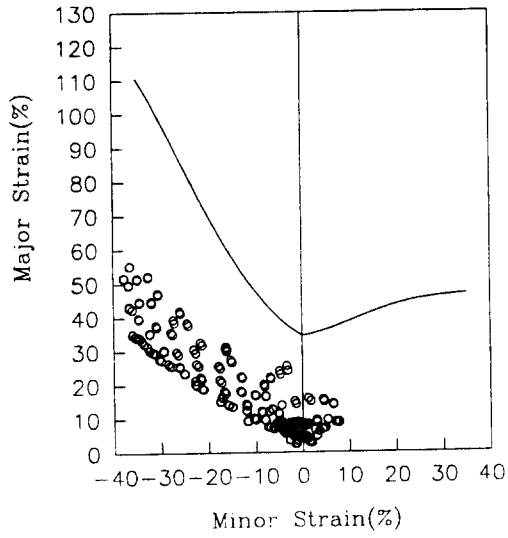


Fig.9 클로바컵 드로잉 공정의 성형한계도

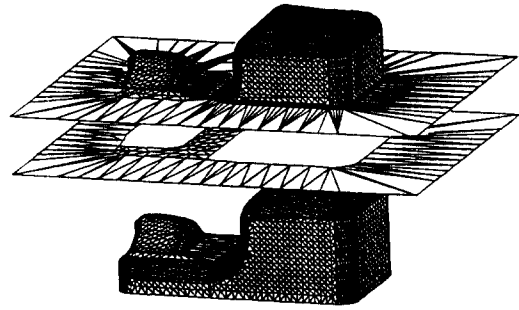


Fig.10 오일팬의 금형데이터

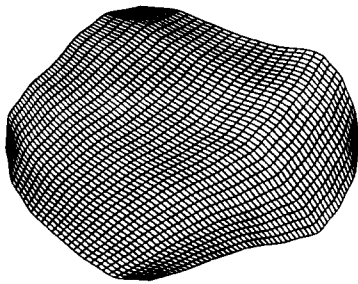


Fig.11 오일팬 성형해석을 위한 초기 유한요소격자

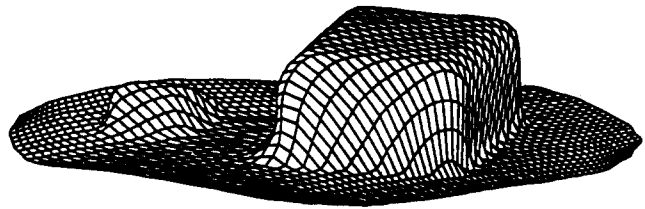


Fig.12 오일팬의 최종 변형형상

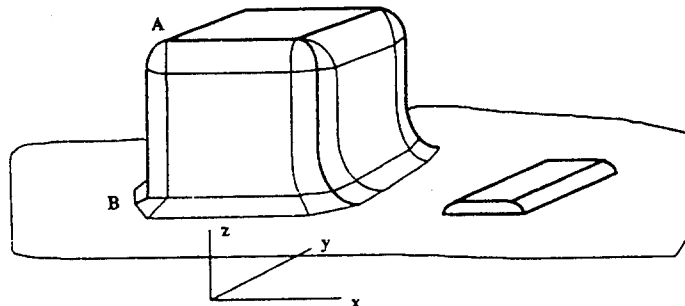


Fig.13 오일팬의 단면 A-B



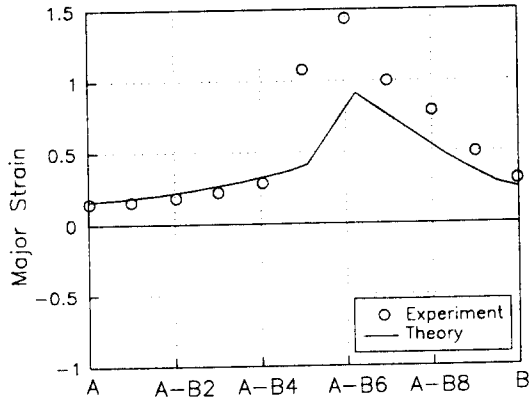


Fig.14 단면 A-B 에서의 주변형률

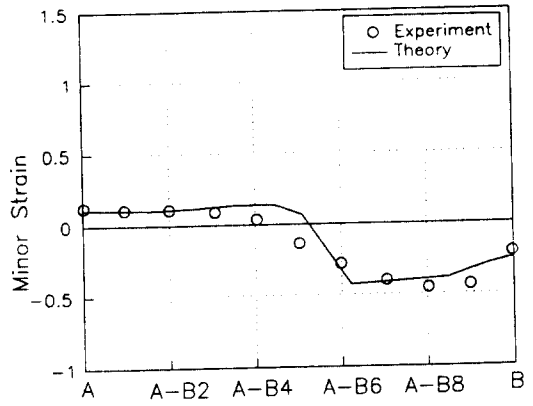


Fig.15 단면 A-B 에서의 부변형률

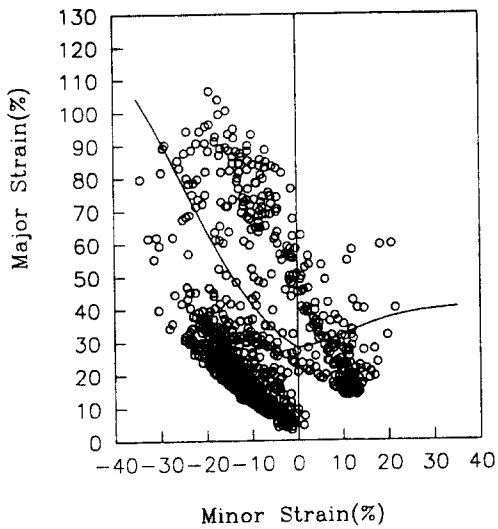


Fig.16 오일팬 드로잉 공정의 성형한계도

Tool description	Finite element approach
Total element	1,800
Average iteration per step	15
Total no. of step	340 (1step : 0.25 mm)
Total CPU time (hour)	12 (RISC 6000)
max. punch height(mm)	85.0

Fig.17 오일팬의 계산결과 정리