

碩士學位論文

박막, 셀, 연속체 요소를 이용한 박판
성형공정의 강소성 유한요소해석



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

濟州大學校 大學院

機械工學科

梁 景 富

2000年 6月

박막, 셀, 연속체 요소를 이용한 박판
성형공정의 강소성 유한요소해석

指導教授 林 鍾 桓

梁 景 富

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2000 年 6 月

梁景富의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

조경호



委

員

김영재



委

員

김동현



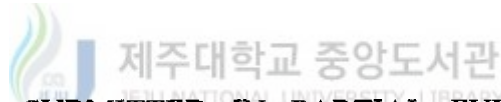
濟州大學校 大學院

2000 年 6 月

Rigid-plastic Finite Element Analysis of Sheet Metal
Forming Processes using Membrane, Shell and
Continuum Elements

Kyoung-Boo Yang

(Supervised by professor Jong-Hwan Lim)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF
ENGINEERING

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2000 . 6 .

목 차

NOMENCLATURE

SUMMARY.....	1
I. 서 론.....	4
1. 개요.....	4
2. 연구배경.....	6
3. 연구의 목적과 범위.....	9
II. 이론 해석.....	10
1. 가상일의 정리.....	10
2. 박막요소의 유한요소 수식화.....	10
3. 적층 쉘 요소의 유한요소 수식화.....	13
4. 연속체 요소의 유한요소 수식화.....	14
5. 해석과정.....	16
III. 실 험.....	19

IV. 해석결과 및 고찰	23
1. 2차원 스트레칭 해석	23
1.1 평면-변형 스트레칭 해석.....	23
1.2 박막/셸 혼합요소를 이용한 해석.....	28
2. 3차원 박판 성형해석	33
2.1 반구형 펀치에 의한 축대칭 신장성형의 해석.....	33
2.1.1 박막 요소를 이용한 스트레칭 해석.....	35
2.1.2 셸 요소를 이용한 스트레칭 해석.....	38
2.1.3 연속체 요소를 이용한 스트레칭 해석.....	40
2.1.4 동적 외연적 방법을 이용한 스트레칭 해석.....	42
2.2 원형컵 딥드로잉 해석.....	47
2.2.1 박막 요소를 이용한 딥드로잉 해석.....	49
2.2.2 셸 요소를 이용한 딥드로잉 해석.....	51
2.2.3 연속체 요소를 이용한 딥드로잉 해석.....	53
2.2.4 동적 외연적 방법을 이용한 딥드로잉 해석.....	55
V. 결 론	60
참고문헌	62
부록 A 후처리(Post-Processing) 프로그램 개발	65

NOMENCLATURE

B_i	matrix relating Lagrangian strain with nodal displacement
C	Cauchy strain tensor
e_α	base vector of the convected coordinate system
H	element shape function
K_l	matrix relating Lagrangian strain
U	right stretch tensor
\bar{U}	assembled nodal displacement vector
u	displacement vector
V	volume
v	velocity vector
x	coordinate at time $t_0 + \tau$
X	coordinate at time t_0
$\bar{\Delta \epsilon}$	effective strain increment during one step
$\bar{\epsilon}$	effective strain rate
$\epsilon_{\alpha\beta}$	Lagrangian strain tensor
ϵ_i	non-zero diagonal component
μ	friction coefficient
θ^α	arbitrary convected coordinates
$\bar{\sigma}$	effective stress
${}^\tau S^{a\beta}$	contravariant component of the 2 nd Piola-Kirchhoff stress
${}^\tau \delta W_{int}$	internal virtual work at time $t_0 + \tau$
${}^\tau \delta W_{ext}$	external virtual work at time $t_0 + \tau$

Superscripts

- o denotes values at time t_o (starting point of time increment)
- τ denotes values at time $t_o + \tau$ (end point of time increment)



SUMMARY

The Finite Element Method(FEM) is one of the most popular numerical techniques for analyzing sheet metal working. FEM has employed the membrane, shell and continuum elements representatively.

The membrane analysis has been widely applied to various sheet metal forming processes because of its time effectiveness. The rigid-plastic finite element method and elastic-plastic finite element method based on the membrane theory were successfully applied to the analyses of various sheet metal forming processes. However, it is well known that the membrane analysis can not provides sufficient information for the processes which involve considerable bending effects.

Shell analysis can be the compromise between continuum analysis and membrane analysis, and it has been widely used for sheet metal forming due to the improvement of the behavior of shell element and advancement of the computer hardwares. The shell element are incorporated in most of commercial finite element codes.

Continuum analysis has some merits ; the bending effect can be considered and the formulation is much simpler than those of other methods. However, in spite of several merits of continuum analysis, most sheet metal forming analyses using continuum or solid elements have been only applied mainly to axisymmetric or bead problems since continuum analysis involves large amount of computation times and enormous memory costs when any practical 3-D problems are to be treated. Recently, increasing computing power makes it

possible to analyze the 3-D problems.

In finite element simulation of sheet metal forming processes, the robustness and stability of computation are important requirements because the computation time and convergency become major points of consideration due to the complexity of geometry and boundary conditions. The implicit scheme employs a more reliable and rigorous scheme in considering the equilibrium at each step of deformation, while in the explicit scheme the problem of convergency is eliminated at the cost of solution accuracy. The explicit and implicit approaches have both merits and demerits.

This work presents some comparisons of these analysis and experimental data for 2-D plane-strain condition, 3-D stretching process and 3-D deep drawing process.

In the analysis of 2-D plane-strain condition, the comparisons indicate close agreements of all analysis with experimental data in pure stretching field. For the bending field it was shown that shell and continuum analysis had meaningful results. The continuum analysis gives the more detailed information but it requires large computational time.

In the 3-D embossing stretching process, all analysis was in good agreement with experimental data in the entire process. Therefore, membrane analysis is efficient in this process.

In the 3-D deep drawing process, the strain distribution of continuum analysis is in very close agreement with the experimental results. The continuum analysis shows more accurate solution than membrane and shell analysis.

Also this study is concerned with a development of a criterion for

membrane to shell conversion in 2-D finite element analysis using membrane/shell mixed element. Tzhe present study, a new criterion is proposed by using the angle between both side elements in the nodal point. The membrane/shell mixed element was efficient than the membrane and shell elements.



I. 서 론

1. 개 요

박판금속(sheet metal)을 소재로 하여 이어붙임 없이 소성변형에 의하여 필요한 형상으로 성형하는 과정을 박판성형 혹은 프레스(press) 가공이라 부른다. 이 가공법은 단조, 압출, 압연 등과 같은 체적 성형법과 함께 금속 소성가공법의 하나의 큰 줄기를 이루고 있다. 대표적인 성형품으로서는 자동차의 차체를 예로 들 수 있으며, 비행기 기체 부품, 가전제품의 케이스류, 주방용구, 맥주 캔등이 박판 성형품들이다.

단순한 판재를 이용하여 원하는 형상의 제품을 얻기 위해서는 프레스와 같은 소성 기계를 비롯하여 다이(die), 펀치(punch) 그리고 블랭크 홀더(blank holder)장치등이 필요하다. 박판 성형 공정은 굽힘(bending), 인장성형(stretching), 딥드로잉(deep drawing), 전단(shearing) 또는 이들의 조합으로 이루어진다. 또한 재료의 물질적 특성, 다이의 기하학적 형상, 다이와 재료간의 마찰 특성등 여러 가지 공정 변수들에 의하여 복합적인 영향을 받은 비선형 문제이기 때문에 합리적인 가공 설계와 축적된 경험이 필요하다. 그러나, 현대산업의 급속한 발전과 대량 생산화에도 불구하고, 박판성형공정은 주로 축적된 경험에 근거한 시행착오법에 의존하여 왔으며, 이러한 시행착오법은 많은 시간과 경비가 소요된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 체계적인 해석 방법을 도입하여 공정변수들의 영향을 명확히 규명함으로써 시행 착오를 줄이고 보다 정확한 공정 설계를 하는 것이 필요하다.

1970년대 이후 다양한 수치적 방법(numerical method)에 의한 금속 성형 공정의 해석이 시도되면서 이들 중 유한요소법(finite element method)이 다른 방법에 비해 적용이 융통성이 좋으며 다양하고 자세한 정보를 제공하고 있어 이에 대한 많은 연구가 진행되어 ABAQUS, LS-dyna3d, PAM-

STAMP 등과 같은 다양한 상용 프로그램이 개발되었다. Fig. 1은 차체의 QTR-OTR-FRT(quarter outer front)부품에 대한 성형 공정도로 유한요소 해석을 이용하여 실제 공정과 유사한 가상 성형공정을 미리 수행하여 그 결과를 미리 예측해 볼 수 있다.

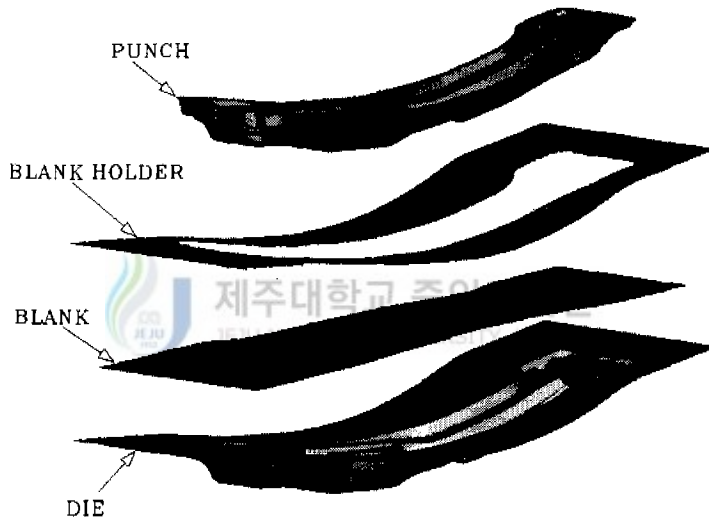


Fig. 1 Example of sheet metal forming process

유한요소법을 이용한 금속성형해석에는 다양한 방법이 사용되며 여기에는 해의 정밀도와 수렴성, 계산시간면에서 서로 상반되는 관계를 지니고 있다. 금속성형해석에는 크게 정적 내연적(static implicit) 방법과 동적 외연적(dynamic explicit) 방법이 있는데 정적 내연적 방법은 해의 정밀도가 높으나 비선형 문제일 경우 수렴하지 못하는 경우가 있으며 많은 계산시간이 소모된다. 반면 동적 외연적 방법은 항상 해를 이끌어 낼 수 있으나 내연적 방법에 비해 해의 정밀도가 떨어진다.

내연적 방법과 외연적 방법은 재료의 거동을 표현하는 구성 방정식에 따라 탄소성 유한요소법과 강소성 유한요소법으로 나눌 수 있으며 탄소성과 강소성 방법은 다시 사용하는 요소의 종류에 따라 박막해석과 쉘해석, 연속체 해석등으로 나눌 수 있다.

각각의 방법들은 해의 정밀도와 수렴성, 계산시간에서 서로 장단점을 지니고 있다. 최근 컴퓨터 하드웨어의 발달이 계산시간을 많이 단축하긴 했으나 현업에 적용하기에는 어려움이 있으며 해의 효율성(efficiency), 강건성(robustness)은 그리 간단히 풀리지 않고 있다. 대부분의 상용 소프트웨어들은 수렴성 안정과 경제적 해석을 위해 동적 외연적 방법을 채택하고 있다.

복잡하고 불규칙적인 곡선형상들과 박판과 다이 사이의 비교적 큰 상대적인 변위등의 실질적인 문제를 다루는 산업현장에서는 신뢰성 있고 경제적인 방법이 요구되므로 보다 효율적인 알고리즘(algorithm)을 개발하기 위한 노력이 필요하다.

2. 연구배경

박판금속 성형공정의 유한요소해석에 사용되는 정적 내연적 방법과 동적 외연적 방법은 해석 문제가 복잡하고 불규칙적인 3차원적으로 가면서 동적 외연적 방법으로 관심이 모아지고 있다. 이것은 산업적으로 동적 외연적 방법이 수렴성과 계산시간면에서 내연적 방법에 비해 유리하기 때문이다.

Honecker와 Mattiasson[1]은 내연적 방법을 사용하는 상용 프로그램(ABAQUS)과 외연적 방법을 사용하는 상용 프로그램(DYNA3D)을 비교하여 2차원 문제에는 내연적 방법이 유리하며 대변형 3차원 박판 성형 문제에서는 외연적 방법이 더 유리함을 보였다. Nagtegal and Taylor[2]는 사각캡 드로잉과 반구형 인장 성형에 대하여 내연적 방법과 외연적 방법을 사용하여 3차원 문제에서는 외연적 방법이 계산 시간면에서 내연적 방법보다 유리함을 보였다.

탄소성 유한요소법은 변형도의 적분과 아울러 응력의 적분을 수행하기 때문에 변형 경로 및 응력의 경로를 정확히 예측할 수 있어 제품의 최종적인 기계상태 및 결함의 예측을 가능하게 한다. 또한, 강제회전 효과를 고려할 수 있어 박판 성형과 같이 대변형이 일어나는 공정의 해석에 적합하다는 장점이 있으나 소성변형 과정이 변형 경로에 의존하므로 각 변형 단계의 유효 변형도 증분을 충분히 작게 조절해야 하므로 많은 계산시간과 해의 수렴성 문제가 크게 대두된다. 반면, 강소성 해석은 금속 성형의 경우 탄성 변형도에 비해 매우 큰 소성 변형도가 일어남으로 탄성 변형도는 무시할 수 있다고 가정하여 응력의 항복여부를 체크하기 위한 응력적분 과정이 필요없고 각 단계마다 변형량을 크게 할 수 있어 계산 시간이 줄어드는 장점이 있으나 소성 영역에서의 탄성 복원이 생기거나 변형이 다른 부분에 비해 극히 적게 일어나는 강제영역이 발생하는 경우 해석이 곤란해지는 단점을 가지고 있다.

사용하는 요소의 종류에 따른 박막해석은 계산시간이 적게 들고 계산에 소요되는 기억용량이 작아 박판금속 성형 공정에 널리 사용되고 있으나 굽힘효과를 고려할 수 없다는 단점을 가지고 있다. Wang과 Budiansky[3]는 평면-변형(plane-stress)의 가정으로부터 수직 이방성 재료에 대한 박막수식을 유도하였고 반구형 펀치에 의한 스트레칭을 해석하였다. Arlingg- aus[4]등은 Wang과 Budiansky의 수식을 이용하여 성형시 인장효과가 큰 부분인 자동차의 창문 외곽(window outer)의 성형을 해석하였다. Stoughton[5]은 Wang과 Budiansky의 수식으로 원형 박판의 스트레칭을 해석하

었고, 금형과 접촉하는 절점에 대한 특별한 처리를하여 굽힘효과를 고려하였다. Nakamachi[6]등은 굽힘효과를 고려하기 위해 금형의 주곡률을 박판의 주곡률로 사용하여 스트레칭과 딥드로잉을 해석하였다. H.B.Shim[7]은 원형 박판의 정수압 벌징과 사각형 박판의 반구형 편치에 의한 스트레칭을 해석하여 실험 결과와 잘 일치함을 보였고 원형 컵의 딥드로잉 해석을 하여 박막해석은 굽힘효과를 예측하지 못함을 보였으며 좀더 복잡한 사각형 컵의 딥드로잉 해석을 하여 박판의 변형되는 형상을 정확히 예측하였으나 변형도 분포는 정확하게 예측하지 못했다.

셸(shell)해석은 계산시간이 많이 걸리고 계산에 소요되는 기억용량도 크지만 굽힘효과를 볼 수 있다는 장점이 있다. Onate와 Zienkiewicz[9]는 점소성 유동이론을 이용하여 마찰과 이방성을 고려한 축대칭 스트레칭, 사각형 박판의 스트레칭을 해석하였다. Wang과 Tang[10]은 Total Lagrangian 수식을 이용하여 축대칭과 평면-변형문제를 해석하였고 굽힘효과를 고려하기 위해서는 셸요소를 써야하다는 사실을 알았다.

연속체(continuum)해석은 실제로 두께 방향의 응력을 고려 함으로써 두께방향의 변형 및 응력을 가장 자연스럽게 표현할 수 있는 방법으로 박막 요소와 셸요소에 의한 해석에서 블랭크(blank) 홀더의 접촉에 의한 압축력 등을 고려하지 못하는 반면 연속체해석은 이러한 양면접촉문제등을 정확하게 표현할 수 있는 방법이다. 이러한 연속체요소를 이용한 박판 금속성형 공정 해석의 연구는 계산시간의 방대함과 많은 기억용량으로 인해 그리 많지 않은 편이다. Massoni[11] 등은 반구형편치를 이용한 딥드로잉 공정을 강소성 유한요소법으로 해석한바 있고 Shimizu와 Sano[12]는 강소성 유한요소법을 이용하여 사각컵 드로잉 해석을 블랭크 홀더에 두께보다 조금 큰 간격을 두고 해석한 바 있다. 그러나, 근래 컴퓨터 하드웨어의 급속한 발달로 인해 종전의 계산시간보다 많은 계산시간을 절감할 수 있고 방대한 데이터를 처리 할 수 있으면서 좀더 정확한 해석에 대한 욕구를 충족시키기 위해 연속체 요소를 이용한 해석에 관심이 높아지고 있다.

3. 연구의 목적과 범위

앞에서 언급한 바와 같이 박판 금속성형 공정의 유한요소해석에는 다양한 방법이 사용된다. 각각의 방법은 나름대로 장단점을 가지고 있어 효율적 해석을 위해 해석 문제에 따른 적절한 해석 방법을 선택하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 효과적인 해석 방법의 선택을 위해 해의 정밀도가 좋은 정적 내연적 방법을 이용하여 각각의 요소별로 2차원과 3차원의 대표적 형상에 대하여 해석을 수행하여 문제에 따른 각각의 방법들의 특징을 비교 검토하였다. 또한 효율적인 계산을 위한 요소혼합방법을 제안하였다. 계산 시간의 효율성을 위해 구성 방정식은 강소성 방법을 채택하였으며 대부분의 수식화 과정은 기존 연구결과를 이용하였다.

2차원 해석으로는 평면-변형상태를 가정하여 사각편치에 의한 스트레칭 해석을 하였으며 인장 스트레인 분포를 기존 실험 데이터와 비교하였다.

3차원 해석으로는 반구형 편치에 의한 스트레칭과 원형 편치에 의한 딥드로잉 해석을 수행하였고 동적 외연적 방법과의 비교를 위해 상용 프로그램인 DYNA-3D를 이용하여 외연적 방법을 같은 조건하에 수행하였다.

작성된 해석코드의 타당성을 검증하고 해석 방법들의 정확성을 비교하기 위해 50Ton급 만능 프레스를 이용하여 반구형 스트레칭과 원형컵 딥드로잉 실험을 수행하고 두께 방향의 변형도를 측정하여 각각의 3차원 해석 결과와 비교하였다.

요소 혼합방법을 이용한 해석에서는 박막요소와 셸요소를 혼합하여 쉘해석보다 계산시간을 단축 시키면서 결과는 쉘해석과 대등한 효과를 나타내는 알고리즘을 개발하여 2차원 스트레칭 문제에 적용시켜 기존 해석 방법과 비교하였다.

그리고 다양한 해석 방법들을 효과적으로 사용하고 그 결과를 시각적으로 확인할 수 있는 후처리(post processing) 그래픽 응용 프로그램을 개발하였다.

II. 이론 해석

1. 가상일의 원리

시간 t_0 에서 체적형상과 유효 변형율분포 그리고 경계조건이 주어졌을 때 시간 $t_0 + \tau$ 에서 강소성 박판 금속재료에 대한 응력장의 필요충분조건은 다음과 같이 가상일의 정리로 나타낼수 있다.[13]

$${}^{\tau}\delta W_{int} = \int_{\sigma V} {}^{\tau}S^{a\beta} \delta \epsilon_{a\beta} {}^0dV \quad (1)$$

여기서 ${}^{\tau}S^{a\beta}$ 는 2-nd Piola-Kirchhoff 응력텐서(tensor) 성분이며 $\epsilon_{a\beta}$ 는 한 스텝(step)동안의 Lagrangian 변형율 텐서이다.

일의 평형원리를 적용하면 (1)식은 다음과 같이 표현된다.

$${}^{\tau}\delta W_{int} = \int_{\sigma V} {}^{\tau}\bar{\sigma} \delta(\Delta \bar{\epsilon}) {}^0dV = {}^{\tau}\delta W_{ext} \quad (2)$$

2. 박막요소의 유한요소 수식화

Fig. 2에서 x_i 를 시간 t_0 에서 위치벡터의 직교좌표계 성분이라 하고 u_i 는 τ 동안의 이동 변위의 직교좌표계 성분이라 하면 요소의 국부 좌표계는 질점 좌표계의 성질도 지니고 있으므로 요소의 국부 좌표계 $(\theta^1, \theta^2, \theta^3)$ 를 그대로 질점 좌표계로 택하여 사용하여도 무방하다. 국부 질점 좌표계에서 Lagrangian 변형도의 성분은 다음 식으로 주어지고

$$\epsilon_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial \theta^\alpha} \frac{\partial x_i}{\partial \theta^\beta} + \frac{\partial u_i}{\partial \theta^\beta} \frac{\partial x_i}{\partial \theta^\alpha} + \frac{\partial u_i}{\partial \theta^\alpha} \frac{\partial u_i}{\partial \theta^\beta} \right) \quad (3)$$

형상함수 H를 사용하면 요소내의 위치와 변위는 다음의 행렬식으로 표현된다.

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \mathbf{H}\bar{\mathbf{X}} \quad (4)$$

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} = \mathbf{H}\bar{\mathbf{U}}$$

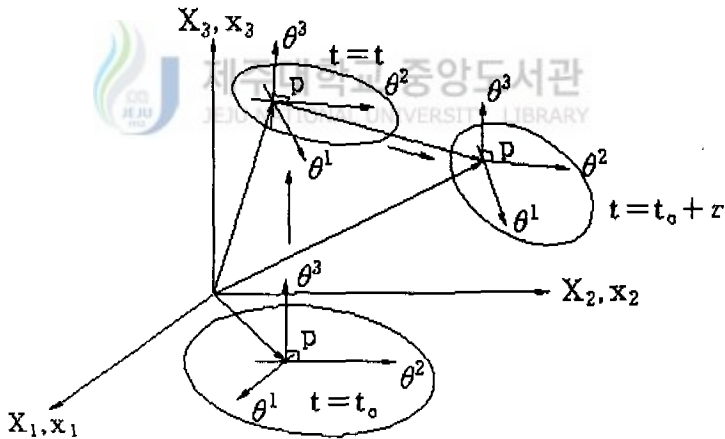


Fig. 2 Coordinates systems in the sheet deformation process

여기서, \bar{X} 와 \bar{U} 는 각각 절점의 좌표와 변위벡터를 나타낸다. 따라서 Lagrangian 변형율은 다음 식으로 주어지게 된다.

$$e = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \bar{X}^T B_1 \bar{U} + \bar{U}^T B_1 \bar{X} + \bar{U}^T B_1 \bar{U} \\ \bar{X}^T B_2 \bar{U} + \bar{U}^T B_2 \bar{X} + \bar{U}^T B_2 \bar{U} \\ \bar{X}^T B_3 \bar{U} + \bar{U}^T B_3 \bar{X} + \bar{U}^T B_3 \bar{U} \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서, B_1 , B_2 와 B_3 는 각각 다음과 같이 주어지고 이는 좌표값에 무관하므로 모든 요소에 대하여 같은 값을 가진다.

$$B_1 = \frac{\partial H^T}{\partial \theta^1} \frac{\partial H}{\partial \theta^1}$$

$$B_2 = \frac{\partial H^T}{\partial \theta^2} \frac{\partial H}{\partial \theta^2} \quad (6)$$

$$B_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial H^T}{\partial \theta^1} \frac{\partial H}{\partial \theta^2} + \frac{\partial H^T}{\partial \theta^2} \frac{\partial H}{\partial \theta^1} \right)$$

Lagrangian 변형도의 변화량은 식(5)에서부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta \epsilon = \begin{pmatrix} \delta \bar{U}^T B_1 (\bar{X} + \bar{U}) \\ \delta \bar{U}^T B_2 (\bar{X} + \bar{U}) \\ \delta \bar{U}^T B_3 (\bar{X} + \bar{U}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta \bar{U}^T K_1 \\ \delta \bar{U}^T K_2 \\ \delta \bar{U}^T K_3 \end{pmatrix} \quad (7)$$

직교좌표계를 기준좌표계로 하였을 경우 변형도의 성분을 구하기 위하여는 국부좌표계에서의 미분을 역 Jacobian 행렬을 곱하여 직교좌표계에서와 미분으로 변환시켜 주는 과정이 필요하게 된다. 또한 이러한 변환 과정을 매 반복계산단계(iteration)마다 모든 요소에 대해 취하여야 하기 때문에 계산 시간을 많이 차지하게 된다. 따라서 국부 절점 좌표계로써 변형을 묘

사한 식(5)에 의해서 계산시간을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 유한요소 프로 그래밍 과정도 훨씬 간단해진다.[14,15]

3. 적층 셀요소의 유한요소 수식화

적층 셀요소는 변위장을 등계수화(isoparametric)하여 표현할 수 있기 때문에 정식화가 간단하다. 두께방향의 재료 특성변화를 고려하기 위하여 각 요소는 몇 개의 층으로 나누어진다. 일반적으로 적층 셀은 횡방향(transverse) 수직 응력을 무시한 5개의 응력 성분을 가지지만 여기서는 각 층에서 평면-응력(plane-stress)상태 즉 3개의 응력 성분을 가지는 것으로 가정한다. 시간 t_0 와 $t_0 + \tau$ 에서 각 절점의 좌표는 다음과 같다.

$$X = \sum_{k=1}^m h_k X^k + \frac{\theta^3}{2} \sum_{k=1}^m a_k h_k V_N^k \quad (8)$$

$$x = \sum_{k=1}^m h_k x^k + \frac{\theta^3}{2} \sum_{k=1}^m a_k h_k v_n^k$$

여기서, a_k 와 h_k 는 k 번째 절점의 두께와 형상함수이고 m 은 한 요소내의 절점수이다. V_N^k 와 v_n^k 는 각각 시간 t_0 와 $t_0 + \tau$ 에서 중간층내의 k 번째 절점의 θ^3 방향 단위 수직벡터이다. 시간 τ 동안의 변위는 아래와 같이 표현된다.

$$u = x - X \quad (9)$$

식(8)을 식(9)에 대입하면 변위장이 아래와 같이 표현된다.

$$u = \sum_{k=1}^m h_k u^k + \frac{\theta^3}{2} \sum_{k=1}^m a_k h_k (v_n^k - V_N^k) \quad (10)$$

β_1^k 와 β_2^k 를 시간 τ 동안에 V_1^k 와 V_2^k 에 대한 수직벡터 V_N^k 의 회전량으로 정의하면 아래와 같은 근사식이 얻어진다.

$$v_n^k - V_N^k = -V_2^k \beta_1^k + V_1^k \beta_2^k \quad (11)$$

식(10)을 식(11)에 대입하면 시간 τ 동안의 증분 변위량이 각 절점의 회전량과 변위량으로 표현된다.

$$u = \sum_{k=1}^m h_k u^k + \frac{\theta^3}{2} \sum_{k=1}^m a_k h_k (-V_2^k \beta_1^k + V_1^k \beta_2^k) \quad (12)$$

식(12)를 식(4)에 대입하여 박막요소에서의와 같은 변형율을 구할 수 있다.[16]

4. 연속체요소의 유한요소 수식화

Fig. 2에서 x_i 는 시간 t_0 에서 재료의 주직좌표계 성분이고 u_i 는 한 스텝 τ 동안 변위 벡터의 직좌표계 성분이라고 하자. 요소의 임의 질점 좌표계와 자연 좌표계 ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$)는 같은 성질을 지니고 있으므로 자연좌표계를 질점좌표계로 택하여 수식을 유도하면 된다.

형상함수(shape function) H 를 사용하여 요소내의 위치와 변위를 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\mathbf{x} \equiv \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \bar{\mathbf{X}} \quad (13)$$

$$\mathbf{u} \equiv \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \bar{\mathbf{U}} \quad (14)$$

여기서, $\bar{\mathbf{X}}$ 와 $\bar{\mathbf{U}}$ 는 주어진 요소에 대한 각 절점에서의 좌표와 변위 벡터를 나타낸다. 따라서 Lagrangian 변형율은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{12} \\ \epsilon_{13} \\ \epsilon_{23} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{X}}^T \mathbf{B}_1 \bar{\mathbf{U}} + \bar{\mathbf{U}}^T \mathbf{B}_1 \bar{\mathbf{X}} + \bar{\mathbf{U}}^T \mathbf{B}_1 \bar{\mathbf{U}} \\ \bar{\mathbf{X}}^T \mathbf{B}_2 \bar{\mathbf{U}} + \bar{\mathbf{U}}^T \mathbf{B}_2 \bar{\mathbf{X}} + \bar{\mathbf{U}}^T \mathbf{B}_2 \bar{\mathbf{U}} \\ \bar{\mathbf{X}}^T \mathbf{B}_3 \bar{\mathbf{U}} + \bar{\mathbf{U}}^T \mathbf{B}_3 \bar{\mathbf{X}} + \bar{\mathbf{U}}^T \mathbf{B}_3 \bar{\mathbf{U}} \\ \bar{\mathbf{X}}^T \mathbf{B}_4 \bar{\mathbf{U}} + \bar{\mathbf{U}}^T \mathbf{B}_4 \bar{\mathbf{X}} + \bar{\mathbf{U}}^T \mathbf{B}_4 \bar{\mathbf{U}} \\ \bar{\mathbf{X}}^T \mathbf{B}_5 \bar{\mathbf{U}} + \bar{\mathbf{U}}^T \mathbf{B}_5 \bar{\mathbf{X}} + \bar{\mathbf{U}}^T \mathbf{B}_5 \bar{\mathbf{U}} \\ \bar{\mathbf{X}}^T \mathbf{B}_6 \bar{\mathbf{U}} + \bar{\mathbf{U}}^T \mathbf{B}_6 \bar{\mathbf{X}} + \bar{\mathbf{U}}^T \mathbf{B}_6 \bar{\mathbf{U}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서, $\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_3, \mathbf{B}_4, \mathbf{B}_5, \mathbf{B}_6$ 는 각각 다음과 같이 주어지고 이는 좌표 값에 무관하므로 모든 요소에 대하여 같은 값을 가진다.

$$\begin{aligned}
B_1 &= \frac{\partial H^T}{\partial \theta^1} \frac{\partial H}{\partial \theta^1} \\
B_2 &= \frac{\partial H^T}{\partial \theta^2} \frac{\partial H}{\partial \theta^2} \\
B_3 &= \frac{\partial H^T}{\partial \theta^3} \frac{\partial H}{\partial \theta^3} \\
B_4 &= \frac{1}{2} \left[\frac{\partial H^T}{\partial \theta^1} \frac{\partial H}{\partial \theta^2} + \frac{\partial H^T}{\partial \theta^2} \frac{\partial H}{\partial \theta^1} \right] \\
B_5 &= \frac{1}{2} \left[\frac{\partial H^T}{\partial \theta^1} \frac{\partial H}{\partial \theta^3} + \frac{\partial H^T}{\partial \theta^3} \frac{\partial H}{\partial \theta^1} \right] \\
B_6 &= \frac{1}{2} \left[\frac{\partial H^T}{\partial \theta^2} \frac{\partial H}{\partial \theta^3} + \frac{\partial H^T}{\partial \theta^3} \frac{\partial H}{\partial \theta^2} \right]
\end{aligned} \tag{16}$$

Lagrangian 변형도 변화량은 식(15)로부터 다음과 같이 구할수 있다.[13]

$$\delta \varepsilon = \begin{bmatrix} \delta \bar{U}^T B_1 (\bar{X} + \bar{U}) \\ \delta \bar{U}^T B_2 (\bar{X} + \bar{U}) \\ \delta \bar{U}^T B_3 (\bar{X} + \bar{U}) \\ \delta \bar{U}^T B_4 (\bar{X} + \bar{U}) \\ \delta \bar{U}^T B_5 (\bar{X} + \bar{U}) \\ \delta \bar{U}^T B_6 (\bar{X} + \bar{U}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \bar{U}^T K_1 \\ \delta \bar{U}^T K_2 \\ \delta \bar{U}^T K_3 \\ \delta \bar{U}^T K_4 \\ \delta \bar{U}^T K_5 \\ \delta \bar{U}^T K_6 \end{bmatrix} \tag{17}$$

5. 해석 과정

위의 비선형방정식의 해를 구하기 위해 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson)방법을 이용하면 식(2)는 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$K \Delta U^i = R - F^{(i-1)} \tag{18}$$

여기서, $F^{(i-1)}$ 은 시간 $t_0 + \tau$ 일 때 (i-1)번째 축차(iteration)의 응력발산항(stress divergence)이며 R 은 시간 $t_0 + \tau$ 일 때 외부로부터 작용한 힘 벡터이다.

축차는 아래의 조건을 만족 시킬 때 까지 반복하게 된다.

$$\frac{\|\Delta U\|}{\|U\|} \leq \delta \quad (19)$$

여기서, δ 는 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 정도의 매우 작은 상수값이다.

본 연구에서는 사용하는 강소성 재료의 특성방정식은 해중(elastic unloading)의 경우 그 부분에서의 응력을 알 수 없어 해가 발산하게 된다. 따라서, 이러한 어려움을 수치적으로 해결하기 위하여 Osakada[17]등이 사용한 다음과 같은 변형된 유효변형을 증분방법을 사용하였다.

$$d\bar{\epsilon} = \sqrt{d\epsilon^{-2} + d\epsilon_0^{-2}} \quad (20)$$

이 때 구성방정식은 다음과 같이 표현된다.



$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{d\epsilon^{-2} + d\epsilon_0^{-2}}} d\bar{\epsilon} \quad (21)$$

Fig. 3에서 해석코드의 전체 해석과정을 보여주고 있다.

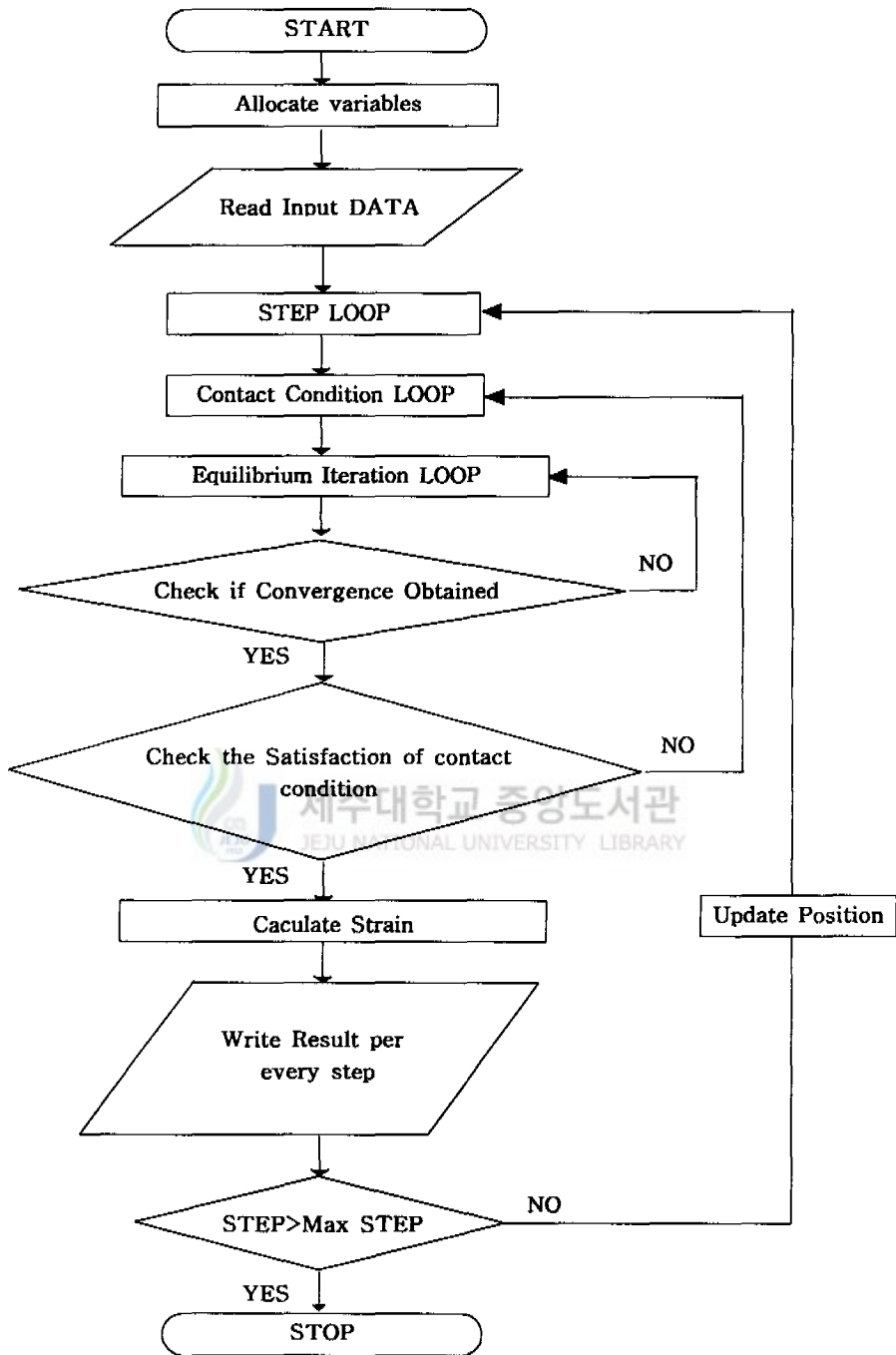


Fig. 3. Flow chart of rigid-plastic finite element analysis

Ⅲ. 실험

3차원 해석결과의 타당성을 검증하기 위한 실험으로 반구형 펀치에 의한 스트레칭과 원형 펀치에 의한 딥드로잉 공정을 수행하였다. Fig. 4는 실험에 사용된 유압식 50ton급 만능 프레스의 전경이다.

실험에 사용된 재료는 자동차차체 성형용 압연강판으로 JIS규격인 SPCEN을 사용하였다. SPCEN의 S는 Steel을, P는 Plate를, 세 번째의 C는 Cold rolled를 E는 강판의 등급을 나타내며 N은 시효보증을 뜻한다. 강판의 두께는 0.8mm이다. 성형실험에 앞서 해석을 위한 재료의 물성치를 파악하기 위해 재료에 대한 단축인장실험을 수행하여 하중-공칭 변형도 곡선으로부터 해석에 쓰일 유동응력-변형도 관계를 구하였다. 실험에 의해 얻어진 재료의 성질은 Table 1과 같다.



Fig. 4 50ton Hydraulic press for experiment

Table 1 Material constants

$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n$ (Mpa)	
K	540.76
n	0.216
t_0	0.8mm

Fig. 5(a)는 3차원 스트레칭 실험에 사용된 반구형 펀치와 다이의 형상이며 Fig. 5(b)는 초기 블랭크 형상을 보여주고 있다. 다이의 형상에서 다이 주위로 스트레칭 구속조건을 주기 위한 비드가 설치되어 있는 것을 볼 수 있는데 이 비드에 의해 바깥쪽 재료가 성형과정 중 안으로 빨려 들어가지 않도록 재료를 구속시켜 준다. 성형전 초기상태의 시편에는 질점의 위치를 추적하기 위하여 전기화학적 에칭(electro-chemical etching)을 사용하여 격자를 새기고 변형 후에 두께를 측정하였다. 스트레칭 실험에서 펀치 진행거리는 33mm지점에서 파단이 일어났기 때문에 30mm 지점까지를 성형하여 그 단면을 절단하고 5mm의 에칭 간격을 따라 마이크로 미터를 이용하여 두께를 측정하였다. Fig. 6은 스트레칭실험에서 초기형상에서 펀치 진행거리 30mm일 때 까지의 성형과정을 보여주고 있다.

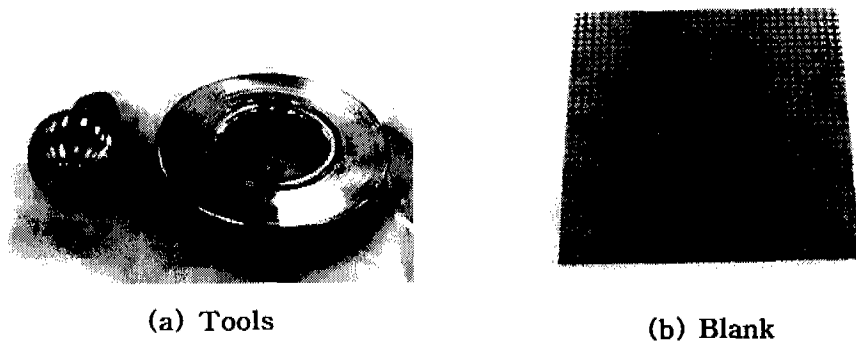


Fig. 5 Hemispherical tools and initial shape of blank
(stretching experiment)



Fig. 6 Deformed shape when the stroke is 30mm
(stretching experiment)

Fig. 7(a)는 3차원 딥드로잉 실험에 사용된 원형 펀치와 다이의 형상이며 Fig. 7(b)는 초기 재료 형상을 보여주고 있다. 딥드로잉 공정에서 가장 중요한 것은 블랭크 홀딩력의 크기이다. 블랭크 홀딩력이 너무 작으면 플랜지에 주름이 발생하게 되며 너무 크면 재료가 파단되어 원하는 성형을 할 수 없게 된다.[18] 이러한 블랭크 홀딩력은 주로 시행착오에 의해서 결정되어 지는 데 일반적으로 주름이 발생하지 않는 최소의 블랭크 홀딩력을 사용한다. 본 실험에서도 시행오차에 의해 최소 블랭크 홀딩력을 구한 결

과 80kN을 블랭크 홀딩력으로 사용하여 실험하였다. 딥드로잉 실험에서는 플랜지 주위의 두께 변화를 관찰하기 위해 재료가 다이에서 완전히 빠져 나가기 전인 40mm 까지를 성형하여 역시 단면을 절단하고 예칭 간격을 따라 두께를 측정하였다. Fig. 8은 3차원 딥드로잉 실험에서 초기 재료가 펀치 40mm 진행까지의 성형과정을 보여주고 있다.

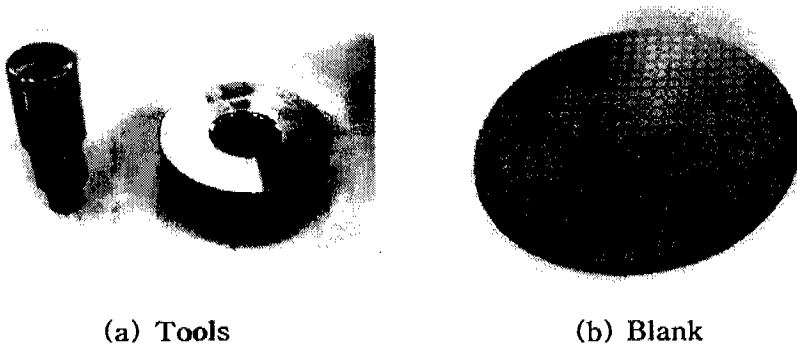


Fig. 7 Cylindrical tools and initial shape of blank
(deep drawing experiment)



Fig. 8 Deformed shape when the stroke is 40mm
(deep drawing experiment)

IV. 해석결과 및 고찰

1. 2차원 스트레칭 해석

1.1 평면-변형 스트레칭 해석

2차원 박판 성형의 예제로 사각편치에 의한 평면-변형(plane-strain)상태의 스트레칭 해석을 박막요소와 셸요소 그리고 연속체요소를 이용하여 각각 수행하였다. Fig. 9는 해석한 스트레칭의 초기 공정도이며 박막과 셸해석은 2절점에 19개의 요소를 사용하였고 연속체해석은 4절점에 19개의 요소를 사용하여 해석을 수행하였으며 해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 Yang등[19]의 실험결과와 비교하였다. 해석에 사용된 재료상수와 공정변수들도 Yang이 취한 값을 사용하였으며 Table 2와 같다.

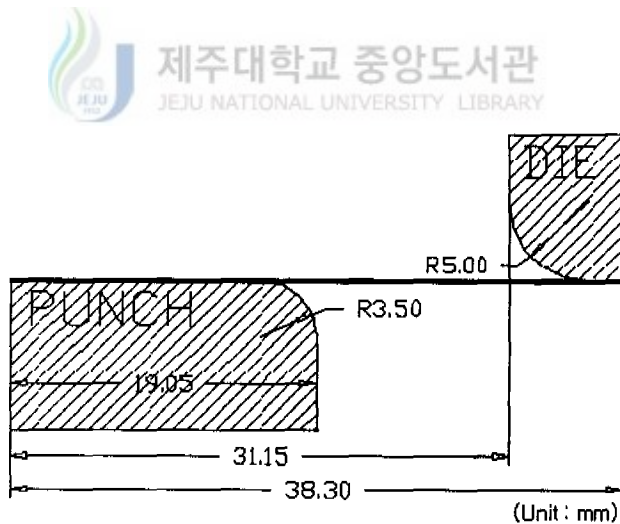


Fig. 9 Geometry of the tools
(2-D stretching process)

Table 2 The material and process variables

Material	Cold-rolled steel
Stress-strain curve	$\bar{\sigma} = 595.15 \epsilon^{-0.216}$ Mpa
Coulomb coefficient of friction	$\mu = 0.25$
Sheet thickness	0.742 mm

Fig. 10은 박막요소를 해석에서 펀치가 최종 스트로크 12mm에서의 신장 변형을 분포를 실험과 비교한 것이다. Fig. 10에서 박막해석에 의한 변형을 분포는 국부적인 대변형이 나타나지 않고 있으며 펀치와 다이 곡률부위에서의 굽힘변형을 예상하지 못하고 있다. 실제적으로 펀치와 다이 곡률부위에서 곡률반경이 작기 때문에 국부적인 대변형이 예상된다. 박막해석에 소요된 계산시간은 펜티엄/400MHz에서 22초(CPU time)가 소요되었다.

Fig. 11은 쉘 해석에서 박막해석과 마찬가지로 펀치가 12mm 이동했을 때의 신장변형을 분포를 실험과 비교한 것으로 쉘 해석의 변형을 분포는 펀치곡률 부위에서의 국부적인 변형을 잘 예측하여 박막해석에 비해 더 나은 변형예측을 하고있으나 계산시간은 펜티엄/400MHz에서 박막해석에 3배정도 많은 약 71초가 소요되었다. 따라서 쉘 해석은 굽힘 변형을 예측할 수 있으나 박막해석에 비해 많은 계산시간이 소요됨을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 2차원 스트레칭 해석에서 연속체요소를 이용한 해석의 신장 변형을 분포를 보여주고 있다. 연속체 해석은 펀치곡률에서의 국부적인 대변형과 펀치와 다이 사이의 블랭크의 변형까지도 실험과 잘 일치하면서 박막 해석과 쉘해석에 비해 매우 정확한 해석을 수행하고 있음을 알 수 있다. 연속체요소를 이용한 해석의 컴퓨터계산 시간은 펜티엄/400MHz에서 약 572초가 소요되어 박막과 쉘해석에 매우 많은 계산시간을 필요로 한다.

Fig. 13은 박막해석과 셸해석 그리고 연속체해석 모두를 실험과 같이 비교한 것으로 편치상부의 굽힘이 없는 부분에서는 세가지 해석 모두 실험 결과와 거의 일치하고 있으나 편치와 다이 곡률 부위에서는 박막해석은 굽힘변형을 전혀 예상하지 못하고 있으며 셸해석은 어느정도 굽힘 변형을 예측하고 있으나 연속체 해석에 비해 정확도가 떨어지고 있다. 그러나 연속체 해석은 박막과 셸해석에 비해 많은 계산시간을 필요로한다. 따라서 2차원 스트레칭 해석에서 박막해석은 굽힘영역이 없는 형상에서는 유리하나 굽힘이 많은 형상에서는 굽힘을 예상하지 못하기 때문에 굽힘해석에는 적당하지 않으며 연속체해석은 계산시간의 과다로 인해 정밀한 해석을 요구하지않는 한 셸요소를 선택하는 것이 경제적인 것으로 생각된다. 연속체해석은 굽힘해석에 자세한 정보를 제공할 수 있어 정확한 해석을 요구하는 스프링백(spring back)해석에 적합할 것으로 생각된다.

최근에는 보다 효율적이고 정확한 해석을 수행하기 위해 각 해석방법들의 장점만을 가진 혼합요소를 이용한 해석도 시도되고 있다.



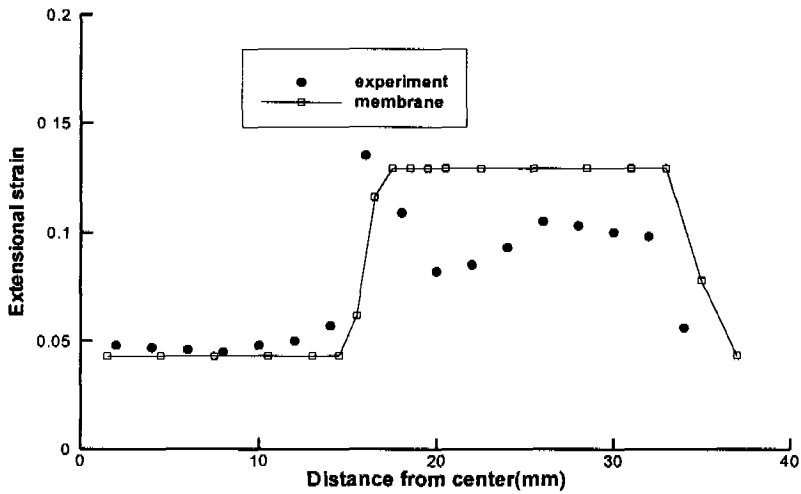


Fig. 10 Comparison of the extensional strain distribution between the membrane analysis and experimental result (2-D stretching process, stroke=12mm)

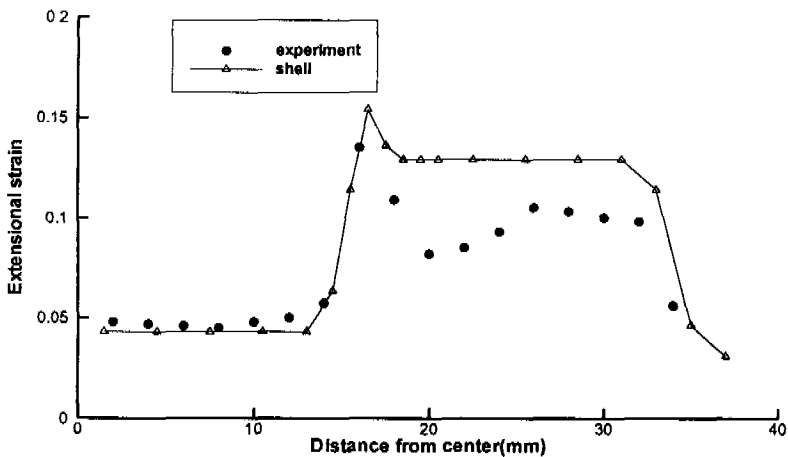


Fig. 11 Comparison of the extensional strain distribution between the shell analysis and experimental result (2-D stretching process, stroke=12mm)

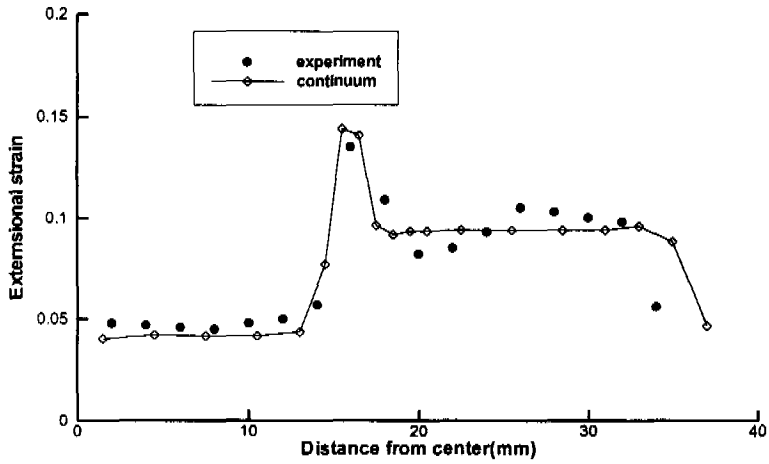


Fig. 12 Comparison of the extensional strain distribution between the continuum analysis and experiment result (2-D stretching process, stroke=12mm)

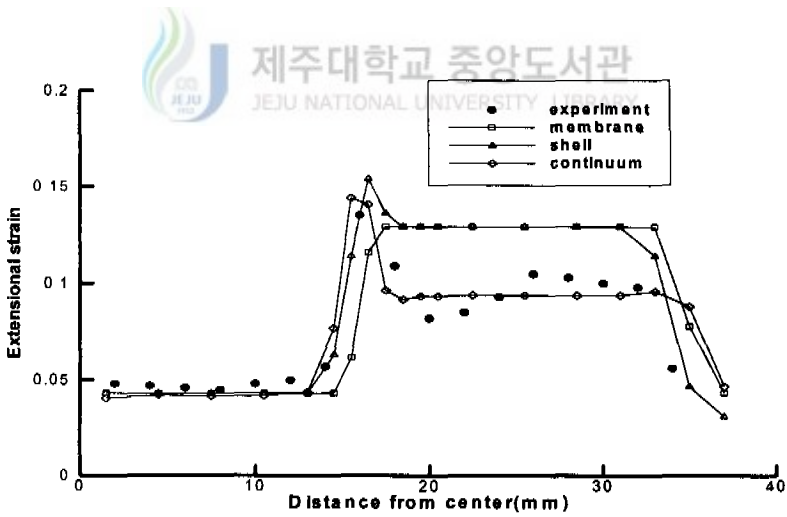


Fig. 13 Comparison of the extensional strain distribution between the computed and experimental result (2-D stretching process, stroke=12mm)

1.2 박막/셸 혼합요소를 이용한 해석

박막/셸(membrane/shell, 이후 M/S로 약함)혼합요소를 이용한 해석은 계산시간이 짧다는 박막해석의 장점과 굽힘효과를 볼 수 있다는 셸해석의 장점을 갖춘 방법으로 순수한 스트레칭(stretching)조건하에서는 박막요소를, 굽힘이 작용하는 조건하에서는 셸요소를 사용하여 굽힘효과를 고려하면서 모든 요소를 셸요소로 사용했을 때보다 계산시간을 줄여 준다. 이 M/S 혼합요소 해석방법은 1989년 Onate등[20]에 의해 제안되었고 1990년 Onate와 Saracibar[21]는 박막요소를 점성 셸요소로 변화시켜주는 조건을 에너지율(energy rate)의 비로서 정의하여 2차원 평면-변형(plane-strain)사각형 박판의 초소성 성형(super-plastic forming)에 적용하였다. Yang등[19]은 변형형상의 기하학적 조건을 고려한 곡률반경의 비를 사용하여 2차원 스트레칭 성형에 적용하였다.

이 박막/셸 혼합요소를 이용한 해석에서 중요한 부분은 박막요소와 셸요소를 변환시키는 판별조건(criterion)을 정의하는 것으로 판별조건 정의에서 가장 중요한 점은 굽힘이 작용하는 부분과 그렇지 않은 부분을 각각 구별하는 것이다. 따라서, 본 연구에서는 굽힘작용 여부의 판별을 위해 순수한 스트레칭 조건하의 박막요소에서는 절점에서의 사이각이 180° 를 유지하며 사이각이 180° 보다 작으면 굽힘이 작용한다고 가정하여 Fig. 14에서 보는 바와 같이 i 번째 절점에서의 양쪽 요소의 사이각을 계산하는 식을 도입하여 판별식을 정의하였다.[22,23]

$$\theta = \arccos \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|}$$

$$\alpha = \pi - \theta$$

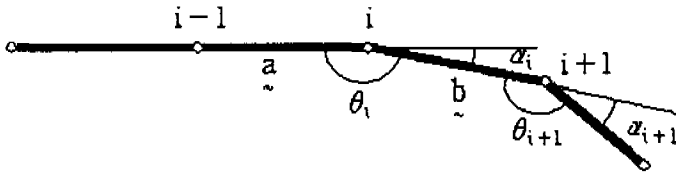


Fig. 14 Criterion for membrane to shell conversion
in the M/S analysis

여기서, θ 는 i 번째 절점에서의 요소사이각이며 \vec{a} 와 \vec{b} 는 각각 $(i-1)$ 과 $(i+1)$ 번째요소의 vector 성분이다. α 는 굽힘이 작용하여 발생하는 각도로서 $\alpha > \mu$ 이면 굽힘작용이 일어남으로 쉘요소로 변환시키며 $\alpha \leq \mu$ 이면 굽힘효과(bending effect)가 나타나지 않으므로 박막요소로 변환시킨다. 여기서 μ 는 각도를 계산하는데 있어서 π 값에 의한 오차 한계값이 수치적인 실험에 의해 나온 상수값으로 보통 $\mu = 10^{-5}$ 정도이며 그이하의 값에서는 모든요소를 쉘요소로 변환시켰다. 박막요소와 쉘요소가 공유하는 절점의 변위는 회전의 연속성(rotation continuity)을 위해서 회전효과를 제외시켰다. Fig. 15는 각도를 이용한 판별조건의 프로그램 구조이다.

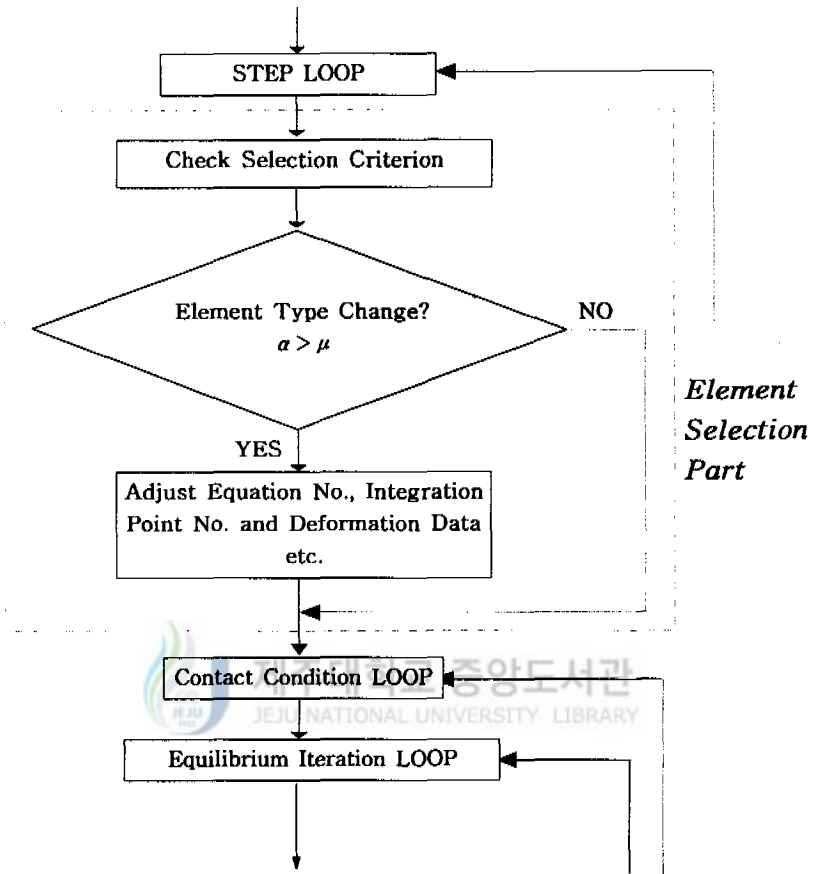


Fig. 15 Flow chart for element type change according to the proposed criterion

Fig. 16는 박막/셀 혼합요소를 이용한 해석결과를 박막해석과 셀해석 그리고 실험결과와 서로 비교한 것이며 Fig. 17은 박막 해석과 셀 해석 그리고 M/S 해석의 컴퓨터 계산시간을 비교한 것이다. Fig. 16에서 혼합요소를 이용한 해석은 급힘영역에서 셀해석과 잘 일치하고 있다. 그러나 혼합요소를 이용한 해석의 계산시간은 펜티엄/400MHz에서 약 45초가 소요되어 전체 셀해석보다 컴퓨터 계산시간을 단축하면서 변형을 분포는 셀해석과 동일한 결과를 보여주고 있다. 따라서 절점에서의 각도를 이용한 판별조건을 사용한 박막/셀 혼합요소의 해석이 잘 적용됨을 알 수 있다.



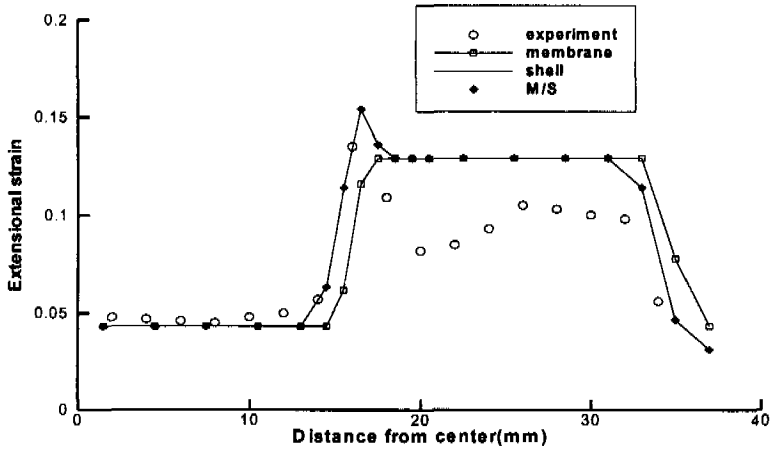


Fig. 16 Comparison of the Extensional strain distribution between the general and M/S analyses (2-D stretching process, stroke=12mm)

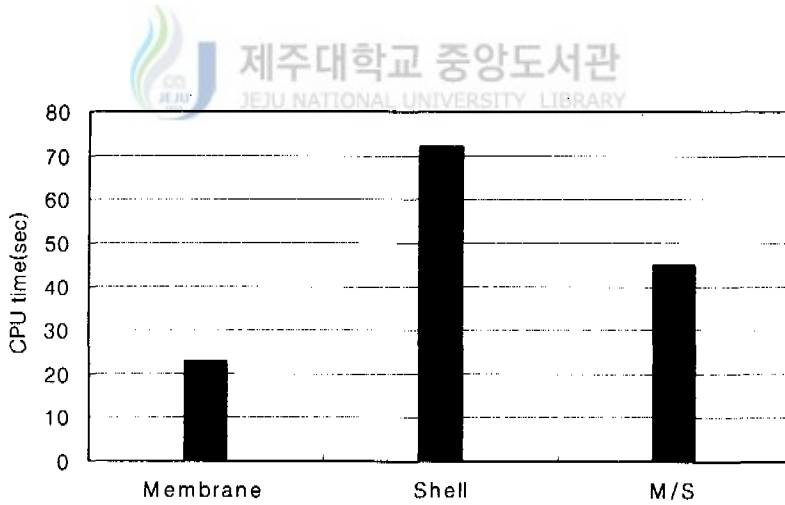


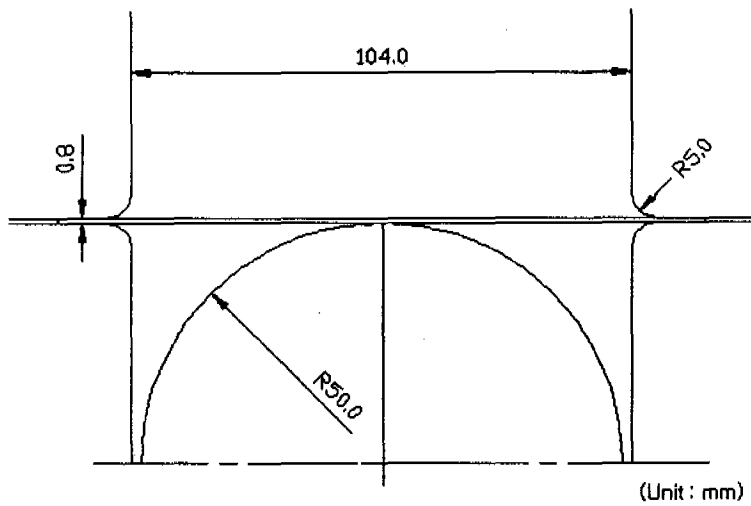
Fig. 17 Comparison of computational time between the general and M/S analyses (2-D stretching process)

2. 3차원 박판성형 해석

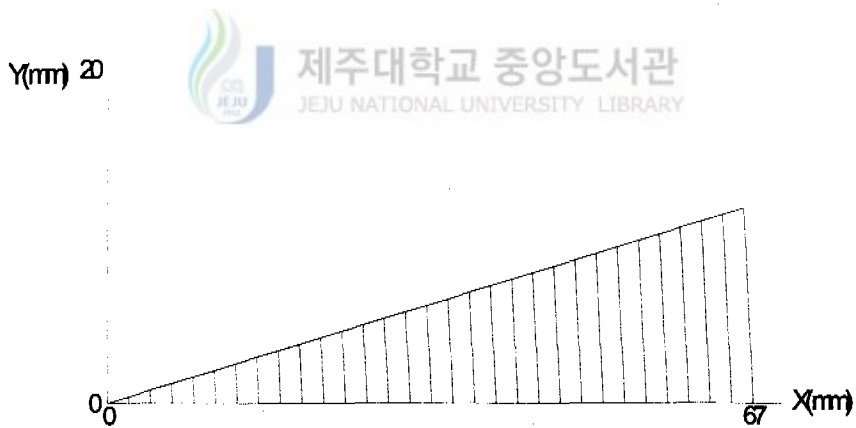
2.1 반구형 편치에 의한 축대칭 신장 성형의 해석

3차원 박판 성형의 예제로서 반구형 편치에 의한 정사각형 박판의 스트레칭을 해석하고 실험과 비교하였다. 스트레칭 공정의 경우 성형하중이 편치가 진행함에 따라 계속 증가하기 때문에 비교적 간단한 변형 역학을 갖는 공정으로 알려져 있다.

Fig. 18(a)는 해석모델의 개요도이며 Fig. 18(b)는 해석에 사용된 유한요소 격자를 나타낸다. 본 예제는 축대칭 문제이기 때문에 계산시간의 단축을 위해 전체 형상을 해석하지 않고 중심축에서 15° 각 만큼의 유한요소격자를 생성하여 박막과 셀요소는 두께가 없는 62절점에 30개의 요소를 사용하였고 연속체 요소는 두께를 고려한 124절점에 30개의 요소를 사용하였다. 해석에서 최대 편치행정은 30mm이고 각 변형단계의 변위증분을 1mm로 하여 모두 30단계의 변형과정을 거쳤다. 스트레칭 해석의 경우 블랭크 외곽이 구속되어 있어 딥드로잉 공정에서 발생하는 압축응력이 작용하지 않아 수렴성이 안정되어 변위증분을 딥드로잉 해석보다 크게 설정할 수 있다. 계산에 사용된 공정변수는 Table 3과 같다.



(a) Geometry of the tools



(b) Mesh System

Fig. 18 Geometry of the tools and finite element mesh system (stretching by a hemispherical punch)

Table 3 The material and process variables

Material	SPCEN
Stress-strain curve	$\bar{\sigma} = 540.76 \bar{\epsilon}^{0.216}$ Mpa
Coulomb coefficient of friction	$\mu = 0.24$
Lankford value	R=1.66
Sheet thickness	0.8 mm

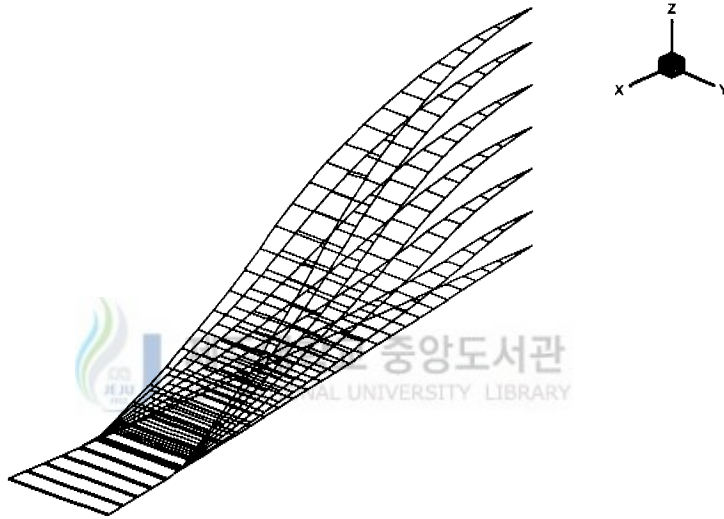
2.1.1 박막요소를 이용한 스트레칭 해석

Fig. 19는 박막해석과 셸해석에서 초기위치 0mm에서 최종 스트로크 30mm까지의 변형과정을 보여주고 있다. 박막과 셸해석의 변형과정은 두께를 고려하지 않아 전체적인 변형 모습만을 보여주고 있으며 그 형상도 유사하다. 박막해석의 컴퓨터 계산시간은 펜티엄/400MHz에서 약 110초가 소요되었다.

Fig. 20은 박막해석에서 펀치 스트로크 30mm에서 해석한 결과의 형상을 대칭축으로 회전시킨 전체형상의 두께 분포를 보여주고 있다. Fig. 19에서 형상의 외곽에서부터 두께가 감소하고 있으며 곡률의 중간부분에서 두께가 많이 감소하였음을 볼 수 있다.

Fig. 21은 펀치 스트로크 30mm에서의 두께 변형을 분포를 실험과 비교한 것으로 곡률의 중간부분 즉 블랭크 중심에서 거리 약 30mm 지점에서 가장 많은 변형이 일어나고 있으며 계속 하중이 증가할 경우 약 30mm 지점에서 파단이 발생할 가능성이 많다는 것을 예측할 수 있다. 실험에서 펀치를 30mm이상 진행시켰때 펀치 스트로크 약 33mm지점에서 예상했던 곡

를부위에서 파단이 발생했다. 변형을 분포는 전체적으로 실험과 잘 일치하고 있어 축대칭 스트레칭 해석에서 박막요소를 이용한 해석이 잘 적용되고 있음을 알 수 있다.



**Fig. 19 Deformed mesh of the membrane and shell elements
(stretching by a hemispherical punch)**

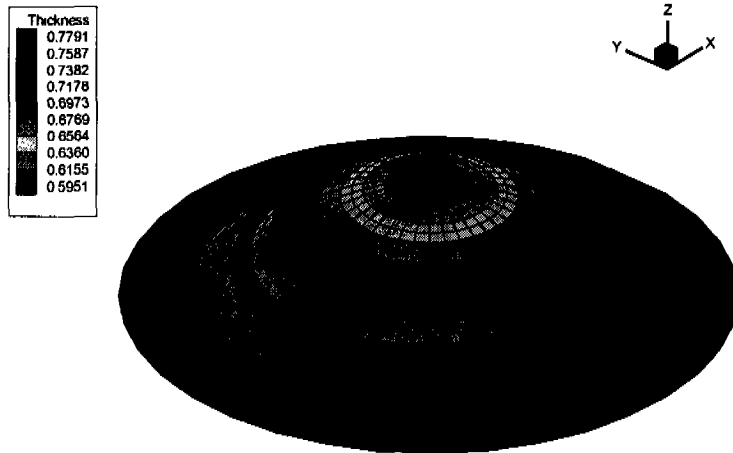


Fig. 20 Deformed shape and thickness distribution (stretching by a hemispherical punch, membrane, stroke=30mm)

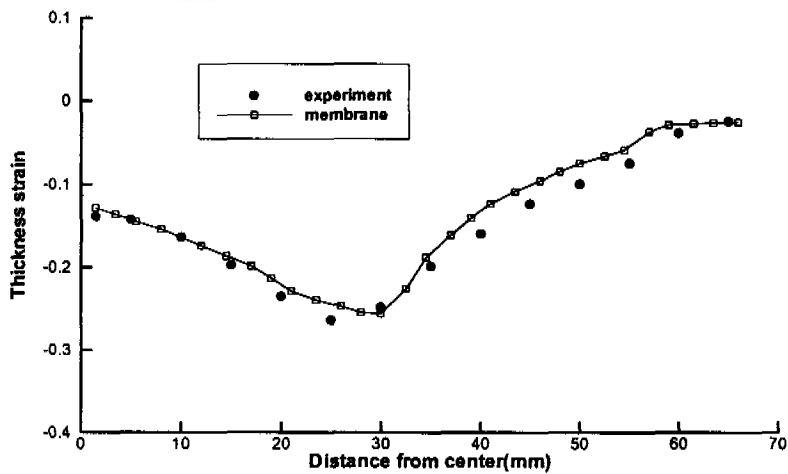


Fig. 21 Comparison of the thickness strain distribution between the membrane analysis and experimental result (stretching by a hemispherical punch, stroke=30mm)

2.1 2 셀 요소를 이용한 스트레칭 해석

Fig. 22는 셀해석에서 최종 펀치 스트로크 30mm에서의 해석결과를 대칭축으로 회전시킨 전체형상의 두께 분포를 보여주고 있다. 전체적으로 박막 해석의 결과와 유사한 모습을 보여주고 있는 것을 알 수 있다. 컴퓨터 계산시간은 펜티엄/400MHz에서 약 362초가 소요되었다.

Fig. 23은 셀해석 결과의 두께 변형을 분포를 실험과 비교한 것으로 셀해석도 실험과 잘 일치하고 있는 모습을 확인할 수 있다.



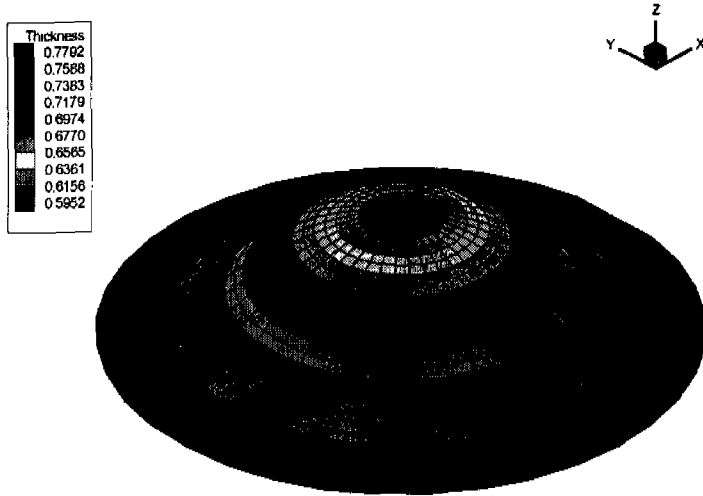


Fig. 22 Deformed shape and thickness distribution (stretching by a hemispherical punch, shell, stroke=30mm)

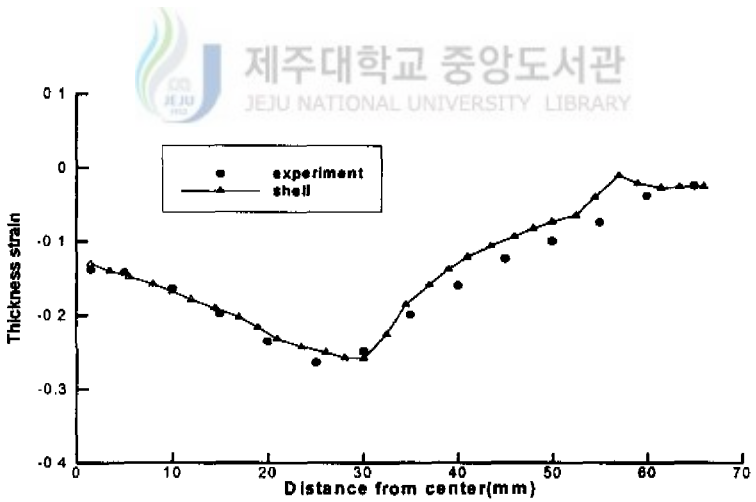


Fig. 23 Comparison of the thickness strain distribution between the shell analysis and experiment result (stretching by a hemispherical punch, stroke=30mm)

2.1.3 연속체요소를 이용한 스트레칭 해석

Fig. 24는 연속체 해석에서 펀치 초기위치 0mm에서 30mm까지의 변형 과정을 보여주고 있다. 박막과 셸해석과는 달리 두께를 고려한 요소를 사용하였기 때문에 실제적인 변형과정을 볼 수 있으며 두께 변화도 확인 할 수 있다. 연속체요소의 컴퓨터 계산시간은 펜티엄/400MHz에서 약 976초가 소요되어 세가지 요소중 가장 많은 시간을 필요로 했다.

Fig. 25는 연속체 해석결과의 최종 형상으로 전체 형상의 두께 분포를 보여주고 있다. 두께 분포는 박막/셸 해석의 결과와 유사하나 두께를 고려하고 있어 실제 형상과 거의 유사한 모습을 볼 수 있다.

Fig. 26은 연속체 해석 결과의 두께 변형을 분포를 실험과 비교한 것으로 실험과 잘 일치하고 있어 세가지 해석 모두 실험과 근접하는 결과를 보여주고 있다.

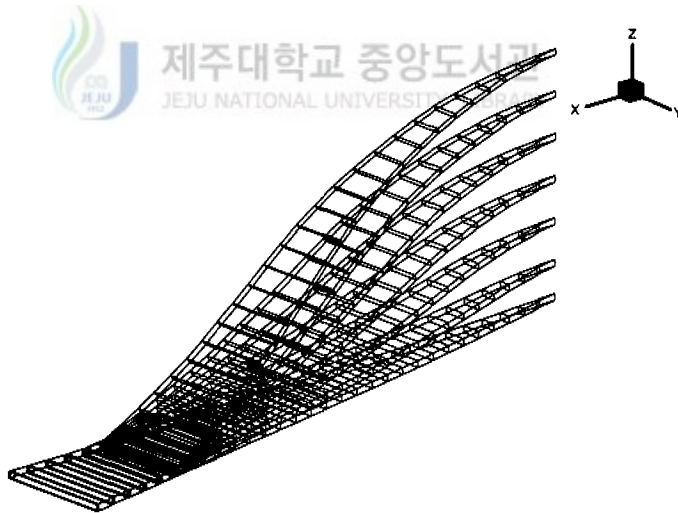


Fig. 24 Deformed mesh of the continuum element
(stretching by a hemispherical punch)

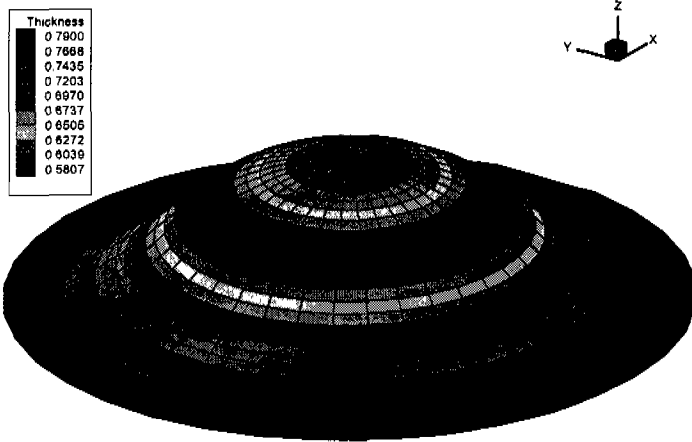


Fig. 25 Deformed shape and thickness distribution (stretching by a hemispherical punch, continuum, stroke=30mm)

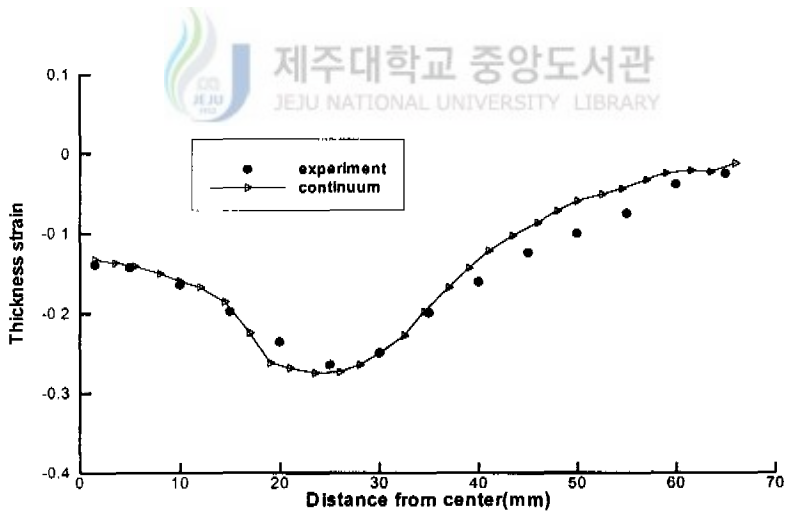


Fig. 26 Comparison of the thickness strain distribution between the continuum analysis and experimental result (stretching by a hemispherical punch, stroke=30mm)

2.1.4 동적 외연적 방법을 이용한 스트레칭 해석

정적 내연적 방법과 동적 외연적 방법의 해석 비교를 위해 동적 외연적 해석을 수행하는 상용 프로그램인 LS-dyna3d를 이용하여 반구형 펀치에 의한 스트레칭 해석을 수행하였다. 해석형상의 모델링과 유한요소 격자 생성은 박판해석 전용 전후처리(pre-post process) 프로그램인 Dynaform을 이용하여 생성하였으며 블랭크에 대한 요소는 내연적 해석과의 비교를 갖게 하기 위해 4절점에 30개의 BEAM(Bending Energy Augmented Membrane) 요소를 사용하여 대칭축 회전시킨 전체형상을 모델링하여 해석을 수행하였다. 해석 모델의 개요도와 유한요소 격자는 Fig. 27에 나타내고 있다.

동적 외연적 해석에서 펀치속도는 10m/s를 사용하였는데 이 값은 해의 정확성과 경제성을 고려한 경제적인 속도로 보고되어 지고 있다. 해석은 총 20단계의 변형과정을 거쳐 수행되었다.

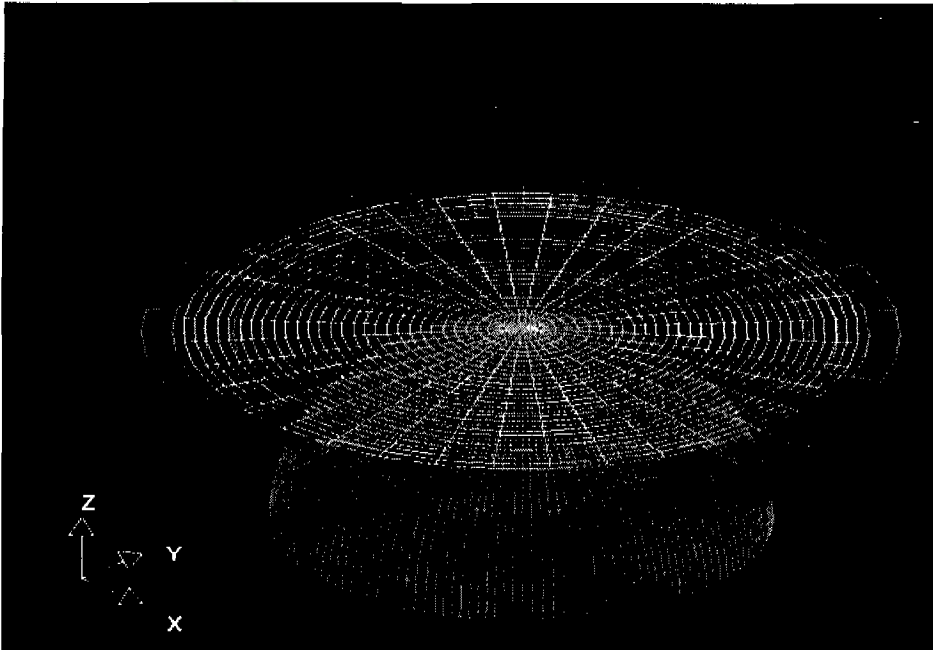


Fig. 27 Scheme and finite element mesh systems (stretching by a hemispherical punch, LS-dyna3d)

Fig. 28은 LS-dyna3d의 해석에서 펀치 스트로크 30mm에서의 최종형상과 두께 분포를 보여주고 있다. 해석결과 형상과 두께 분포형상은 내연적 해석 방법과 유사한 모습을 보여주고 있다.

Fig. 29는 동적 외연적 해석을 수행한 결과의 두께 변형을 분포를 실험과 비교한 것으로 전체적인 경향은 실험과 유사하게 분포되어 있으나 내연적 방법에 비해 오차가 많이 있음을 알 수 있다.



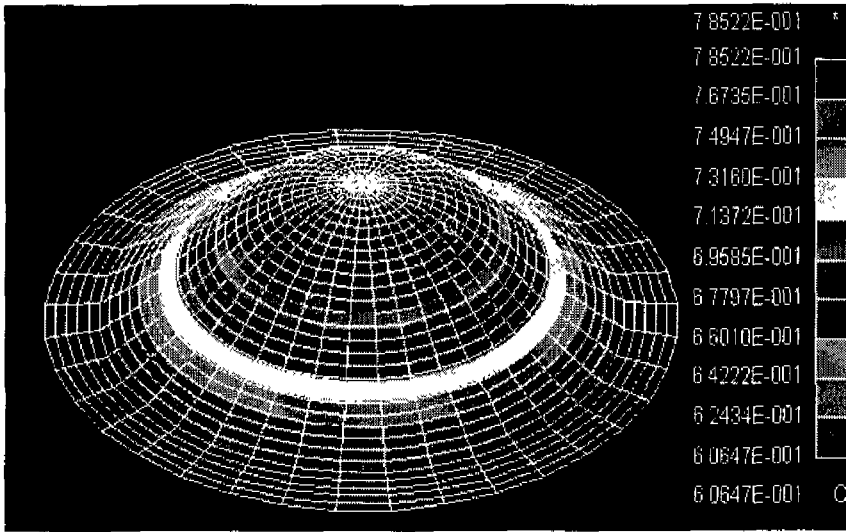


Fig. 28 Deformed shape and thickness distribution
 (stretching process by a hemispherical punch,
 LS-dyna3d, stroke=30mm)

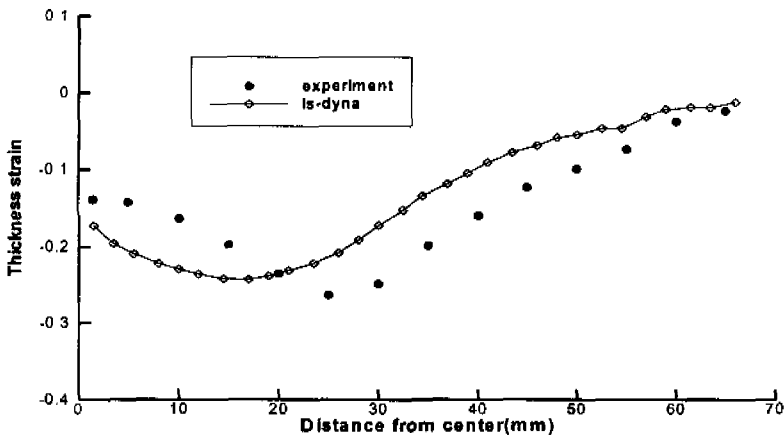


Fig. 29 Comparison of the thickness strain distribution between
 the LS-dyna3d analysis and experimental result
 (stretching by a hemispherical punch, stroke=30mm)

Fig. 30은 정적 내연적 방법을 사용한 박막, 셸 그리고 연속체 해석결과와 동적 외연적 방법을 사용한 LS-dyna3d의 최종 펀치스트로크 30mm에서의 두께 변형을 분포를 실험과 같이 비교한 것이다. Fig. 30에서 정적 내연적 방법을 이용한 세가지 해석은 실험과 거의 유사한 분포를 보이고 있으며 그중에서 연속체 해석이 굽힘에 더 민감하게 작용하고 있음을 알 수 있다. 동적 외연적 방법의 LS-dyna3d의 해석은 내연적 방법에 비해 실험과의 오차가 많아 정적 내연적 방법이 동적 외연적 방법에 비해 더 정확한 해석을 하고 있음을 알 수 있다. 그러나 내연적 방법은 계산중 수렴성 문제에 신경써야 하나 외연적 방법은 항상 결과를 볼 수 있다는 장점이 있어 산업현장에서 널리 쓰이고 있는 상황이다.

축대칭 스트레칭 문제에서는 내연적 방법에 박막, 셸, 연속체 해석 모두 비슷한 경향을 보이고 있어 축대칭 스트레칭 해석의 경우 많은 계산시간을 요구하는 해석방법보다는 계산시간이 적은 박막해석을 사용하는 것이 효율적인 것으로 생각된다. Fig. 31은 반구형 펀치에 의한 펀치 행정 30mm에서의 실험 결과 형상이다.



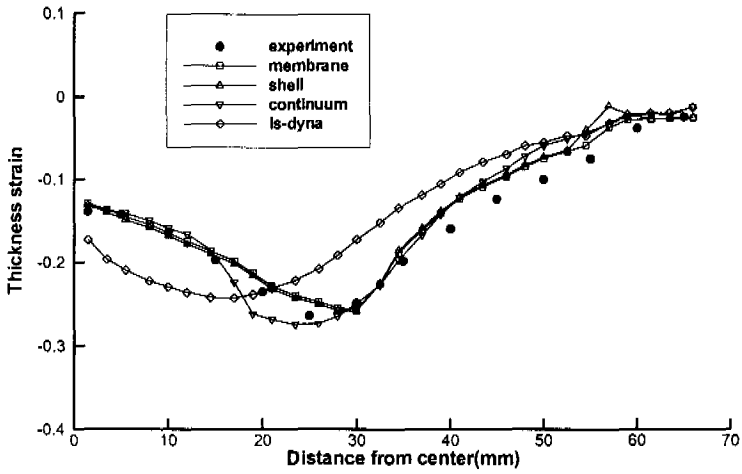


Fig. 30 Comparison of the thickness strain distribution between the computed and experimental result (stretching by a hemispherical punch, stroke=30mm)

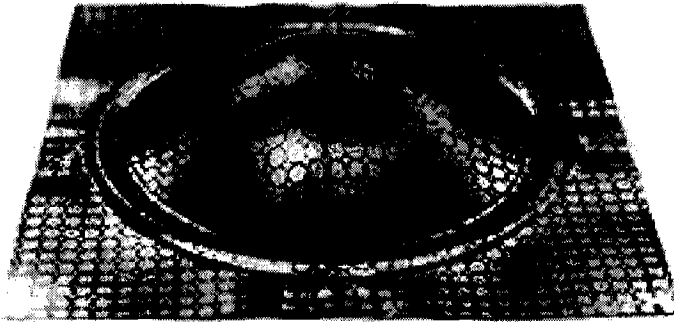
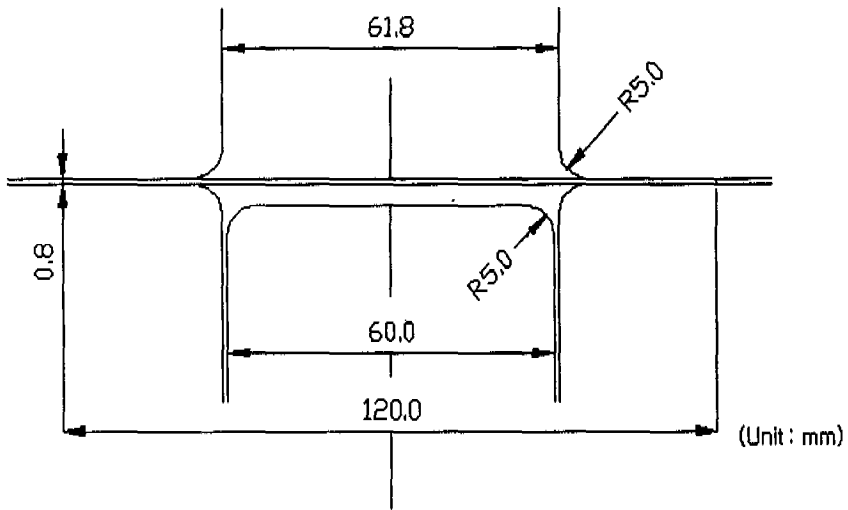


Fig. 31 Deformed shape after the stretching by a hemispherical punch (experiment, stroke=30mm)

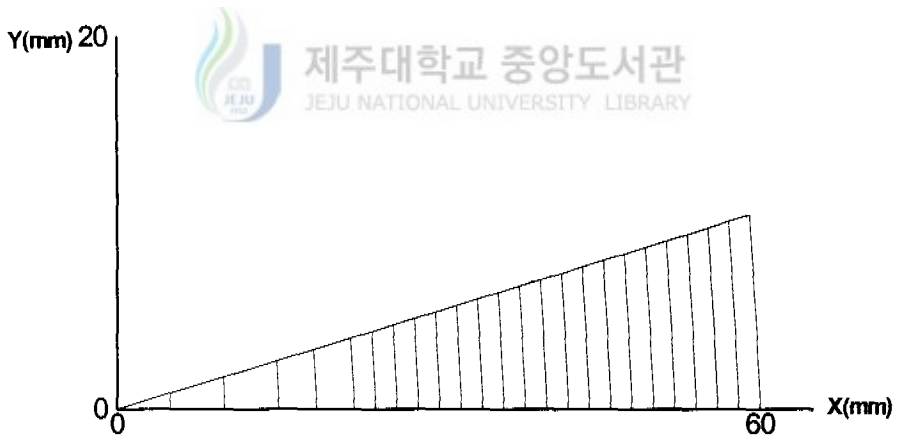
2.2 원형컵 딥드로잉 해석

3차원 박판 성형의 딥드로잉 예제로 원형컵에 대한 딥드로잉 공정을 해석하였다. 딥드로잉 성형은 박판 성형 공정중에서 산업적으로 가장 널리 사용되고 있는 기본적인 공정으로 다른 성형 공정에 비해 매우 복잡한 변형 기구를 가지고 있다. 이러한 딥드로잉 공정을 수치적으로 계산할 때의 어려움은 다른 공정과는 달리 압축응력의 존재로 인한 수치적 좌굴현상(numerical buckling)과 탄성해중의 발생이 있다. 편치가 진행함에 따라 성형 하중은 증가하게 된다. 이 때 편치가 움직임에 따라 성형 하중의 주된 발생의 원인인 플랜지 부위가 금형의 공동(die cavity)속으로 빨려들어 가게 되어 점차 줄어들게 되므로 어떤 점을 지나면서 부터는 성형 하중이 다시 감소하게 된다. 성형 하중이 감소하는 영역에서는 성형된 컵의 벽면과 바닥 부분에서 해중이 생기게 된다. 컵의 벽면과 플랜지에서의 응력 상태는 기본적으로 축방향 또는 반경 반향으로는 인장 응력상태이고 원주 방향으로는 압축 응력 상태이다. 박판 금속은 두께가 다른 치수에 비하여 아주 작기 때문에 이러한 압축 응력의 존재가 실제 공정에서는 주름 현상(wrinkling)을 가져올 수 있고 수치 해석시에는 수치적인 좌굴현상을 가져올 수 있다.

Fig. 32(a)는 딥드로잉 해석에 사용한 모델의 개요도이며 Fig. 32(b)는 해석에 사용된 유한요소 격자이다. 해석에 사용된 요소는 박막과 셸요소인 경우 4절점 24개의 요소를 사용하였고 연속체 요소의 경우 두께를 고려한 8절점 24개의 요소를 사용하여 변형증분 1~0.1mm 간격으로 최종 스트로크 40mm까지를 성형하였다. 변형증분을 1~0.1mm까지 가변적으로 계산한 이유는 딥드로잉공정시 발생하는 수치적 좌굴현상을 방지하기 위하여 계산도중 어느 정도의 수렴여부를 판단하여 수렴이 어려울 경우 변형증분을 단축시키면서 계산을 수행하기 위해서이다.



(a) Geometry of the tools



(b) Mesh System

Fig. 32 Geometry of the tools and finite element mesh system
(deep drawing by a cylindrical punch)

2.2.1 박막요소를 이용한 딥드로잉 해석

Fig. 33은 박막해석과 셸해석에서 초기위치 0mm에서 최종 스트로크 40mm까지의 변형과정을 보여주고 있다. 스트레칭해석과 마찬가지로 박막과 셸해석의 변형과정은 전체적인 변형 모습만을 보여주고 있으며 그 형상도 유사하다. 박막해석의 컴퓨터 계산시간은 펜티엄/400MHz에서 약 319초가 소요되어 스트레칭 해석보다 많은 계산시간을 소요하고 있다.

Fig. 34는 박막해석에서 펀치 스트로크 40mm에서 해석한 결과의 형상을 대칭축으로 회전시킨 전체형상의 두께 분포를 보여주고 있다. Fig. 33에서 원형컵의 최종 형상은 플랜지 부위의 두께가 증가 하였으며 펀치 곡률 부위에서 두께가 감소한 것을 알 수 있다.

Fig. 35는 펀치 스트로크 40mm에서의 두께 변형을 분포를 실험과 비교한 것으로 펀치 상부의 변형율은 실험과 유사한 분포를 보이고 있으나 펀치곡률과 컵 벽면 부분에서 많은 오차를 보이고 있다. 이 결과에서도 박막해석은 굽힘 변형을 제대로 예측하지 못하고 있음을 알 수 있다.

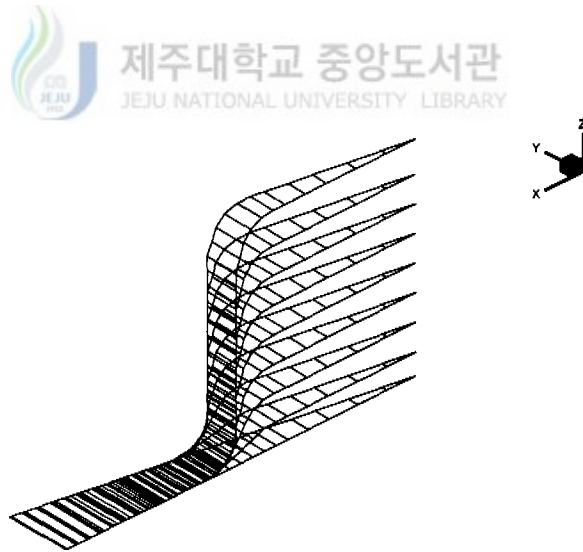


Fig. 33 Deformed mesh of the membrane and shell elements
(deep drawing by a cylindrical punch)

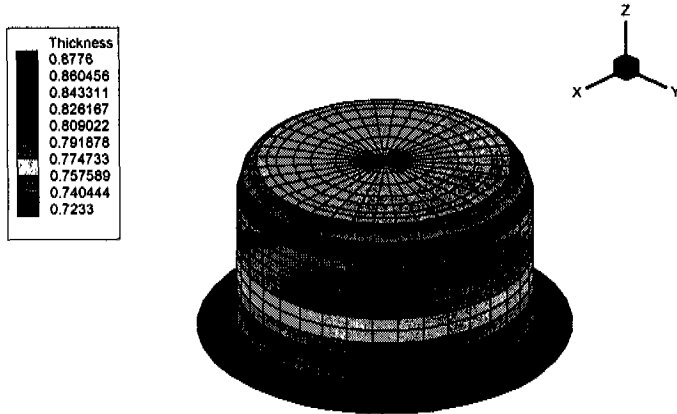


Fig. 34 Deformed shape and thickness distribution (deep drawing by a cylindrical punch, membrane, stroke=40mm)

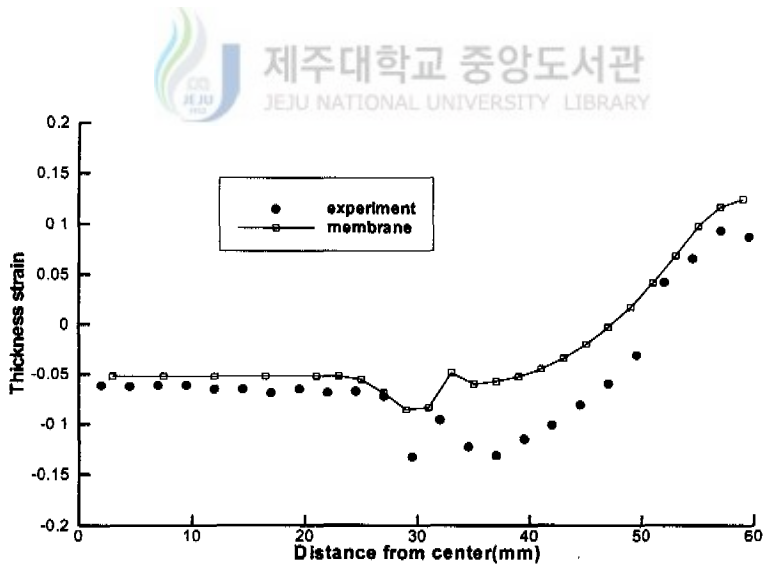


Fig. 35 Comparison of the thickness strain distribution between the membrane analysis and experimental result (deep drawing by a cylindrical punch, stroke=40mm)

2.2.2 셀요소를 이용한 딥드로잉 해석

Fig. 36은 셀해석에서 최종 펀치 스트로크 40mm에서의 해석결과를 대칭축으로 회전시킨 전체형상의 두께 분포를 보여주고 있다. Fig. 36에서는 박막해석에 비해 곡률 부분에 두께가 더 감소한 것을 볼 수 있다. 컴퓨터 계산시간은 펜티엄/400MHz에서 약 1362초가 소요되었다.

Fig. 37은 셀해석 결과의 두께 변형율 분포를 실험과 비교한 것으로 편치곡률부위에서 실험과 오차를 보이고 있지만 박막 해석에 비해 굽힘에 더 민감하게 작용하는 것으로 보인다.

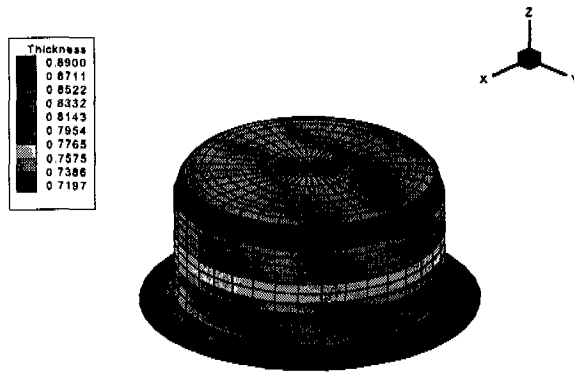


Fig. 36 Deformed shape and thickness distribution (deep drawing by a cylindrical punch, shell, stroke=40mm)

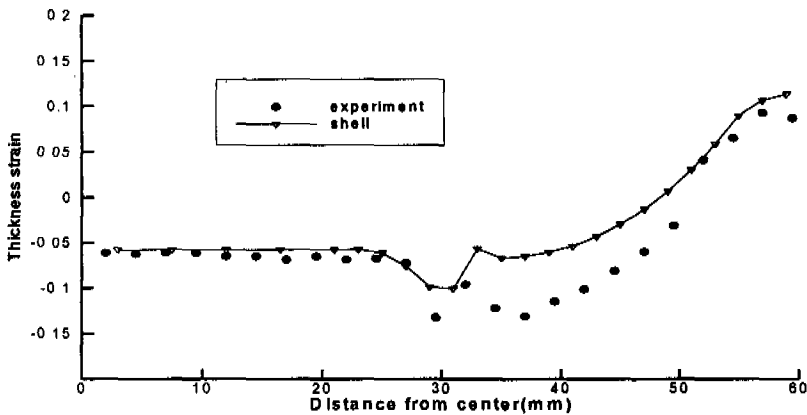


Fig. 37 Comparison of the thickness strain distribution between the shell analysis and experimental result (deep drawing by a cylindrical punch, stroke=40mm)

2.2.3 연속체 요소를 이용한 딥드로잉 해석

Fig. 38은 연속체 해석에서 펀치 초기위치 0mm에서 40mm까지의 변형 과정을 보여주고 있다. 연속체 요소는 두께를 고려하여 요소를 생성하기 때문에 변형 과정에서 박판성형에 가장 중요한 부분인 두께 변화를 실제적으로 관찰하고 위험 부분을 예측할 수 있는 장점이 있다. Fig. 38에서도 펀치 곡률부분에서 두께가 많이 얇아졌음을 볼 수 있다. 연속체요소의 컴퓨터 계산시간은 펜티엄/400MHz에서 약 2976초가 소요되었다.

Fig. 39는 연속체 해석결과의 최종 형상으로 전체 형상의 두께 분포를 보여주고 있는 것으로 박막해석과 쉘해석의 결과 형상에 비해 펀치곡률과 컵벽면에 많은 두께 감소를 예측하고 있다.

Fig. 40은 연속체 해석 결과의 두께 변형을 분포를 실험과 비교한 것으로 펀치곡률과 컵벽면에 두께 변형을 분포가 실험과 잘 일치하고 있다. 다만 플랜지 부위에 두께가 증가하는부분에서 실험과 오차를 보이고 있는데 이는 연속체 요소가 실제 두께형상을 묘사하기 때문에 플랜지를 잡아주는 블랭크 홀딩력을 실제와 유사하게 적용시켜야 하는 어려움이 있기 때문이다. 딥드로잉 공정은 펀치가 진행함에 따라 플랜지가 안으로 빨려들어 가기 때문에 플랜지의 각 절점에 작용하는 홀딩력의 변화도 묘사해 주어야 한다.

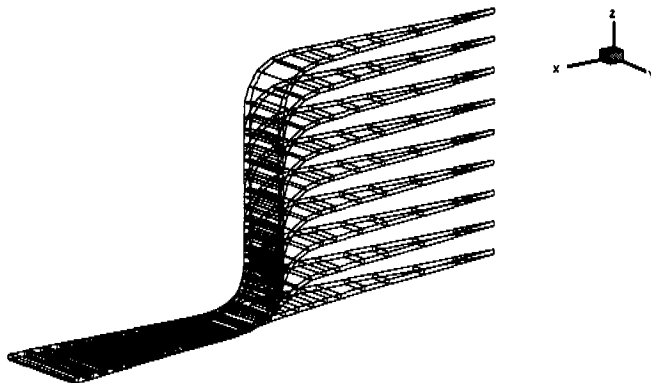


Fig. 38 Deformed mesh of the continuum element
(deep drawing by a cylindrical punch)

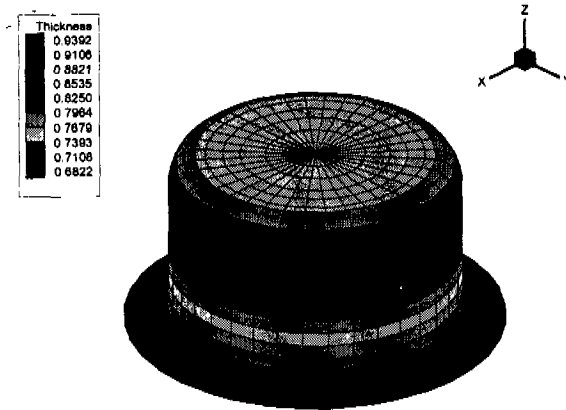


Fig. 39 Deformed shape and thickness distribution (deep drawing by a cylindrical punch, continuum, stroke=40mm)

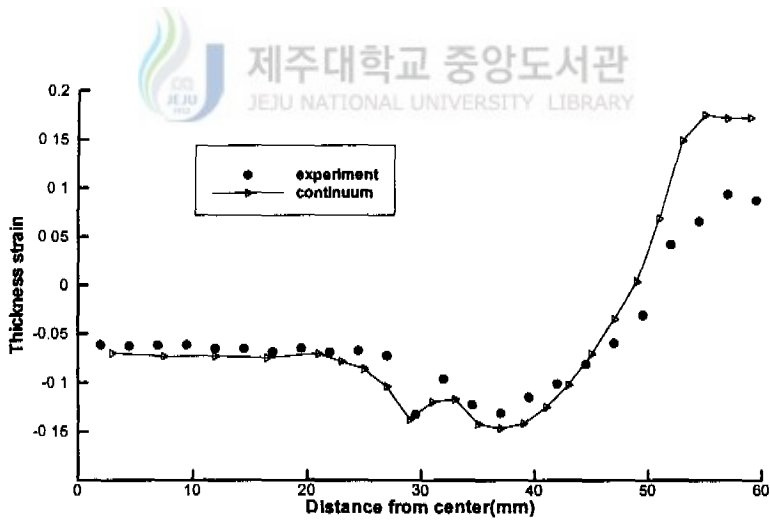


Fig. 40 Comparison of the thickness strain distribution between the continuum analysis and experimental result (deep drawing by a cylindrical punch, stroke=40mm)

2.2.4 동적 외연적 방법을 이용한 딥드로잉 해석

원형컵 딥드로잉 해석에서도 정적 내연적 방법과 동적 외연적 방법의 해석 비교를 위해 LS-dyna3d를 이용하여 해석을 수행하였다. 블랭크에 대한 요소는 4절점에 24개의 BEAM(Bending Energy Augmented Membrane) 요소를 사용하여 대칭축 회전시킨 전체형상을 모델링하였다. 원형 컵 딥드로잉 해석을 위한 편치와 다이, 블랭크 홀더와 블랭크 모델의 개요도와 유한요소 격자를 Fig. 41에 나타내고 있다. 해석에서 편치속도는 스트레칭 해석과 마찬가지로 10m/s를 사용하였으며 총 20단계의 변형과정을 거쳐 수행하였다.

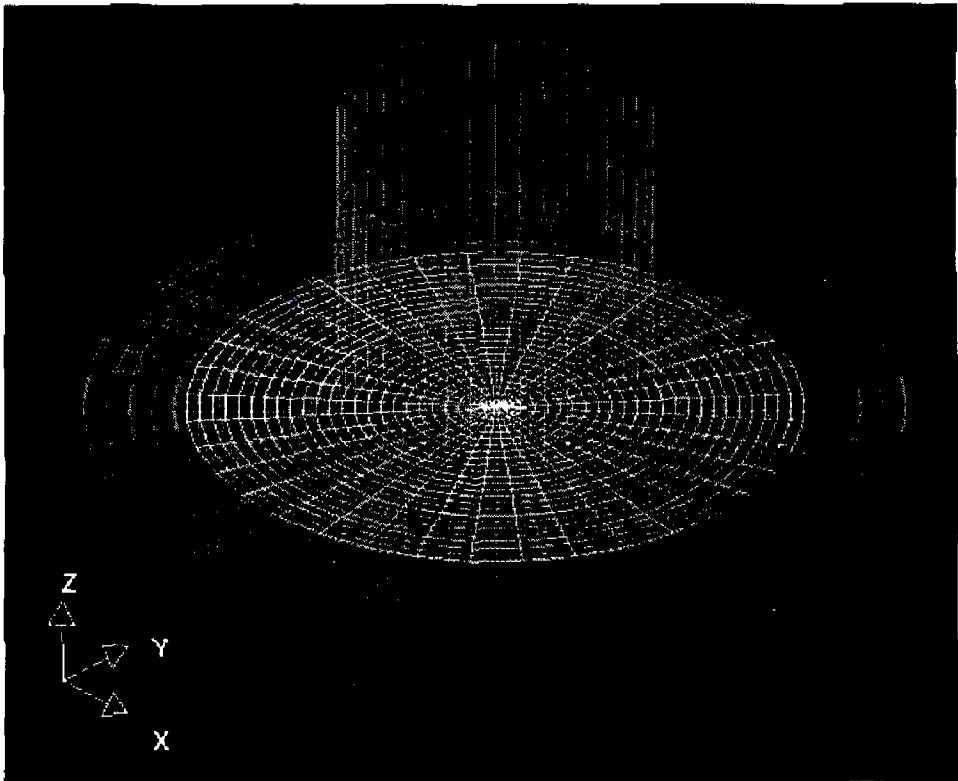


Fig. 41 Scheme and finite element mesh systems
(deep drawing by a cylindrical punch,
LS-dyna3d)

Fig. 42는 LS-dyna3d의 해석에서 펀치 스트로크 40mm에서의 최종형상과 두께 분포를 보여주고 있다. 전체적인 형상은 내연적 해석 방법과 유사한 모습을 보여주고 있다.

Fig. 43은 동적 외연적 해석을 수행한 결과의 두께 변형을 분포를 실험과 비교한 것으로 펀치 곡률에서의 굽힘을 잘 예측하고 있으나 플랜지 부위의 변형을 분포는 연속체 해석과 비슷한 분포를 보이며 오차를 나타내고 있다.



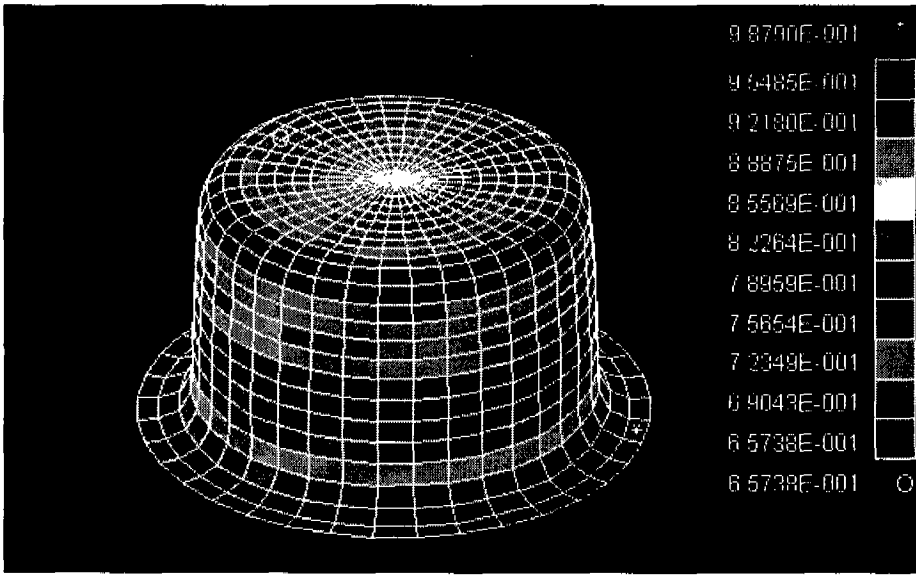


Fig. 42 Deformed shape and thickness distribution
(deep drawing by a cylindrical punch,
LS-dyna3d, stroke=40mm)

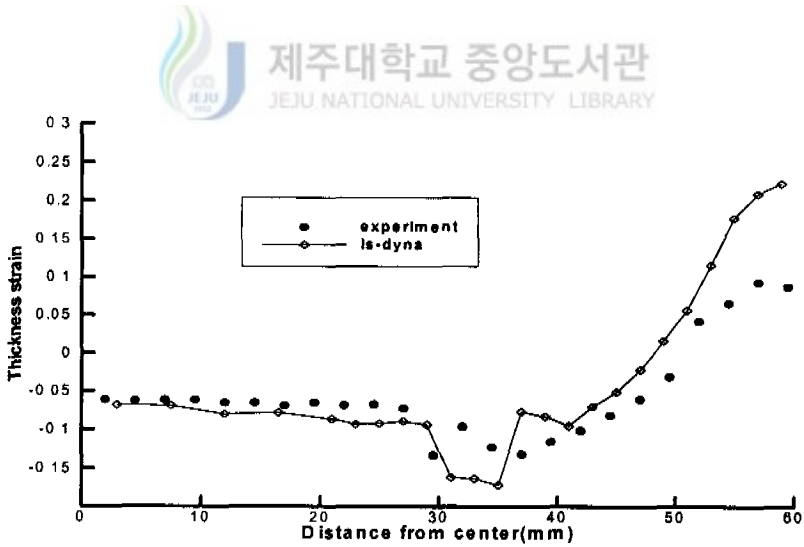


Fig. 43 Comparison of the thickness strain distribution between
the LS-dyna3d analysis and experimental result
(deep drawing by a cylindrical punch, stroke=40mm)

Fig. 44는 원형 컵 딥드로잉 해석에서 정적 내연적 방법을 사용한 박막, 셸 그리고 연속체 해석결과와 동적 외연적 방법을 사용한 LS-dyna3d의 최종 펀치스트로크 40mm에서의 두께 변형을 분포를 실험과 같이 비교한 것이다. Fig. 45는 반구형 펀치에 의한 펀치 행정 30mm에서의 실험 결과 형상이다. Fig. 44에서 두께 변형율은 펀치 곡률 부위에서 셸 해석이 박막 해석에 비해 더 실험과 근접하며 연속체 해석이 실험에 가장 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 동적 외연적 해석 방법도 굽힘 영역에서 잘 적용되고 있으나 연속체 해석에 비해 정확도가 떨어지고 있다. 다만 연속체 해석과 외연적 해석이 플랜지 영역에서 오차를 발생하는 난점을 보이고 있다. 원형 컵 딥드로잉 해석에서는 네가지 해석 모두 나름대로의 장단점을 보여주고 있는데 박막해석은 굽힘해석에 미약하며 연속체 해석은 가장 정확한 정보를 제공하나 많은 계산시간을 요구하고 있다. 동적 외연적 방법은 연속체 해석에 비해 정확하지는 않으나 실험과 비슷한 경향을 보이고 있어 수렴성과 시간적 경제성을 고려해 볼 때 딥드로잉 해석에 적합한 것으로 판단된다. 다만 블랭크 홀더적용에 관한 부분을 보강해야 할 것으로 보인다. 연속체 요소를 이용한 해석은 정확도를 고려할 때 최근 컴퓨터 하드웨어의 급속한 발전과 더불어 수렴성이 안정된 알고리즘이 개발되면 많은 분야에서 현업적용이 가능할 것으로 보인다.

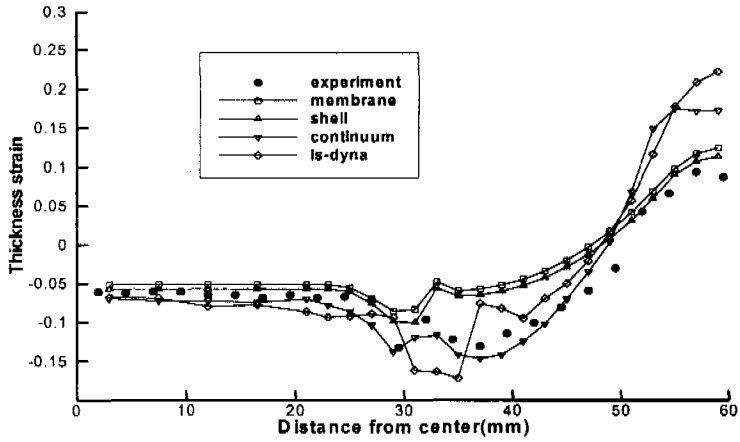


Fig. 44 Comparison of the thickness strain distribution between the computed and experimental results (deep drawing by a cylindrical punch, stroke=40mm)

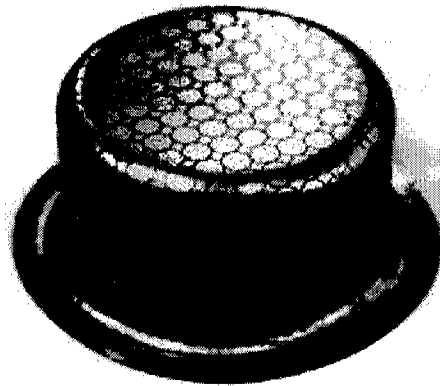


Fig. 45 Deformed shape after the deep drawing process by a cylindrical punch(experiment, stroke=40mm)

V. 결 론

박판 금속성형 공정의 유한요소 해석에는 다양한 방법들이 있으며 이들 중 정적 내연적 해석방식에서 감소성 해석 방식을 이용한 박막요소와 셸요소 그리고 연속체 요소를 이용한 해석 코드를 개발하고 2차원과 3차원의 예제를 통해 그 장단점을 파악하고 효과적이고 경제적인 해석 방식을 검토해 보았다. 또한 동적 외연적 방식을 사용하는 상용 프로그램을 이용하여 3차원해석에서 정적 내연적 방식의 해석과 비교하였으며 개발 코드의 검증 을 위해 실험을 통해 비교 확인하였다. 그리고 보다 정확하고 계산시간을 단축할 수 있는 혼합요소의 새로운 판별조건을 제시하였다. 이상의 실험과 해석으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 2차원 스트레칭 해석에서 박막해석은 굽힘영역이 없는 형상에서는 유리 하나 굽힘해석에는 적당하지 않으며 연속체해석은 계산시간의 과다로 인해 정밀한 해석을 요구하지 않는 한 셸요소를 선택하는 것이 경제적인 것으로 판단된다. 연속체해석은 굽힘해석에 자세한 정보를 제공할 수 있어 정확한 해석을 요구하는 스프링백(spring back)해석에 적합할 것으로 사료된다.
2. 2차원 박판 성형해석에서 박막해석보다 정확하고 셸 해석보다 계산시간을 단축시키는 박막/셸 혼합요소를 이용한 해석에 절점의 각도를 이용한 요소판별조건을 적용하여 2차원 평면-변형 스트레칭 공정의 유한요소 해석을 통해 판별조건이 타당성을 보였다.

3. 3차원 반구형 편치에 의한 축대칭 스트레칭 문제에서는 내연적 방법에 박막, 쉘, 연속체해석 모두 비슷한 경향을 보이면서 실험과 잘 일치하고 있어 엠보싱 스트레칭 해석의 경우 많은 계산시간을 요구하는 쉘해석 또는 연속체 해석방법보다는 계산시간이 적은 박막해석을 사용하는 것이 효율적인 것으로 판단된다.

4. 원형 컵 딥드로잉 해석에서 박막해석은 굽힘영역에서의 두께 변형을 제대로 예측하지 못하며 연속체 해석은 가장 정확한 정보를 제공하나 많은 계산시간을 요구하고 있다. 동적 외연적 방법은 연속체 해석에 비해 정확하지는 않으나 실험과 비슷한 경향을 보이고 있어 수렴성과 시간적 경제성을 고려해 볼 때 딥드로잉 해석에 적합한 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Honecker, A. and Mattiasson, K., 1989, "Finite element procedures for 3D sheet forming simulation," proc. NUMIFORM'89, pp.457-463
- [2] Nagtegaal, J.C. and Taylor, L.M., 1991, "Comparison of Implicit and Explicit Finite Element Methods for Analysis of the FE-Sim. of 3-D Sheet Metal Forming processes," proc. NUMIFORM'86, pp.287-298
- [3] Wang, N. M. and Budiansky, B., 1978, "Analysis of sheet metal stamping by a finite element method," ASME, Vol.45, pp73-82
- [4] Arlinghaus, F. J., Frey, W. H. and Stoughton, T. B., 1985, "Finite element modeling of a stretch-formed part," AIME, pp51-64
- [5] Stoughton, T.N., 1985, "Finite element modeling of 1008 AK sheet steel stretched over a rectangular punch with bending effects," AIME, pp143-160
- [6] Nakamachi, E., 1986, "Finite element modeling of the punch press forming of thin elastic-plastic plates", Proc. NUMIFORM'86, pp.333-339
- [7] Takezano, S., Nakamachi, E. and Yamaguchi, T., 1980, "Elasto/viscoplastic analysis of thin circular plates under large strains and large deformation," ASME, Vol.47, pp741-747
- [8] Shim, H.B., 1989, "An elastic-plastic finite element formulation of single and multi-layered degenerated shells with application to sheet metal forming," Ph.D. Thesis, KAIST, Korea
- [9] Onate, E. and Zienkiewicz, O.C., 1983, "A viscous shell formulaion for the analysis of thin sheet metal forming," Int. J. Mech. Sci., Vol.25, pp305-335

- [10] Wang, N. M. and Tang, S. C., 1986, "Analysis of bending effects in sheet forming operations," Proc. NUMIFORM'86, pp.71-76
- [11] Massoni, E., Soyris, N. and Chenot, J. L., 1989, "Rigid-Plastic Deep Drawing Analysis with a 3-dimensional Finite Element Modelisation," Proc. NUMIFORM89, pp.497-502
- [12] Shimizu, T. and Sano, T., 1995, "An Application of a Penalty Method Contact and Friction Algorithm to a 3-dimensional Tool Surface Expressed by a B-spline Patch," JMPT, Vol.48, pp.207-215
- [13] Lee, D. W., 1997, "A Rigid-Plastic Finite Element Formulation of Continuum Elements and its Application to Sheet Metal Working," Ph.D. Thesis, KAIST, Korea
- [14] Kim, Y. J. and Yang, D. Y., 1985, "A Rigid-Plastic Finite Element Formulation Considering the Effect of Geometric Change and Its Application to Hydrostatic Bulging," Int. J. Mech. Sci., Vol.27, pp.453-463
- [15] Yang, D. Y. and Kim, Y. J., 1986, "A Rigid-Plastic Finite Element Formulation for the Analysis of General Deformation of Planar Anisotropic Sheet Metals and Its Applications," Int. J. Mech. Sci., Vol.28, pp.825-830
- [16] Shim, H. B. and Yang, D. Y., 1990, "An Elastic-Plastic Finite Element Analysis On Hydrostatic Bulging of Rectangular Diaphragms by using Layered Degenerated Shell Elements," Int. J. Mech. Sci., Vol.32, pp.49-64
- [17] Osakada, K., Nakano, J. and Mori, K., 1982, "Finite element method for rigid-plastic analysis of metal forming formulation for finite deformation," Int. J. Mech. Sci., Vol.24, pp.459-464
- [18] 정동원, 양경부, 1999, "원형컵 드로잉 공정에 미치는 영향인자에 관한 실험적 연구", 한국소성가공학회, 제8권, 제5호, pp.449-453

- [19] Yang, D. Y. and Jung, S. B., 1991, "Elastic-Plastic Finite Element Analysis of 2-D Stretch Forming by Using the Selective M/S-Element," KSME, Vol.15, No.5, pp.1601-1610
- [20] Onate, E., Saracibar, C. A. and Dalin, J. B., 1989, "Finite element analysis of sheet metal forming problems using a selective voided viscous shell membrane formulation," Proc. NUMIFORM'89, pp.23-30
- [21] Saracibar C. A. and Onate. E., 1990, "Finite element analysis of sheet metal forming problems using a selective bending/membrane formulation," Proc. ICTP, Vol.3, pp.1409-1416
- [22] 정동원, 양경부, 1998, "박막/셸 혼합요소를 이용한 박판성형 해석과 박막/셸 판별조건에 관한 연구", 한국해양공학회, 제12권, 제2호, pp.57-64
- [23] 정동원, 양경부, 1999, "박막/셸 혼합요소의 판별조건과 강소성/탄소성 유한요소해석 적용에 관한 연구", 한국해양공학회, 제13권, 제2호, pp.1-10



후처리(Post-Processing) 프로그램 개발

유한요소해석의 단계는 크게 전처리 과정(Pre-Processing), 계산 과정(Processing) 그리고 후처리 과정(Post-Processing)에 3단계 과정으로 구분할 수 있다. 전처리 과정은 해석 문제에 대한 모델링(modeling) 과정으로 박판 성형해석의 경우 CAD 시스템을 이용하여 해석에 쓰일 금형 형상과 초기 박판의 형상을 디자인한 후 모델에 대하여 메쉬(mesh)와 노드(node)를 정의하고 재료의 물성치와 특성치 그리고 해석조건등을 입력하여 계산 과정에 쓰일 입력 데이터를 생성하는 과정이다. 대부분의 상용 코드에서 전처리과정 프로그램을 내장하고 있으나 복잡한 형상을 모델링하는데는 불편함이 있어 복잡한 금형 형상의 경우 CAD 전용 프로그램(CATIA, I-deas, etc)을 이용하여 디자인한 후 유한요소 생성 프로그램(Hyper-mesh, Femb, etc)을 이용하여 요소를 생성하고 입력 데이터를 만들어 해석 코드에 사용하고 있다. 이 과정에서 프로그램간 데이터 파일형식(file format)의 상이함으로 인해 모델링한 파일의 프로그램간 이동에 따른 데이터의 손실 등이 발생할 수 있어 복잡한 형상도 쉽게 모델링할 수 있는 해석 코드에 맞는 전용 전처리 프로그램이 필요하다. CAD 데이터에 대한 파일형식은 표준화 파일형식(IGES, STEP, etc)이 제안되고 있으나 몇 단계의 과정을 거쳐야 하므로 해석 프로그램내에서 모두 처리하는 것이 가장 효율적인 것이다.

계산과정은 전처리 과정을 통해 생성된 입력 데이터를 이용하여 앞서 본론에서 고찰한 해석 코드에 입력하여 결과 형상에 대한 계산을 수행하는 과정으로 각 형상스텝에 대하여 응력, 변형을 분포등을 포함하여 절점의 변위, 위치 정보를 결과 출력값으로 저장하게 된다.

후처리 과정은 계산과정을 통해 생성된 결과 출력값을 이용하여 결과 형상과 형상안에 응력 및 변형을 분포등을 시각적으로 확인하는 과정으로 개발코드인 경우 그 결과를 확인하기 위해서는 결과 데이터를 처리할 수 있는 상용 프로그램을 이용하고 사용하는 상용 프로그램에 맞는 데이터로 정리, 변환하는 몇가지 단계를 거쳐야한다. 본 연구에서는 해석 결과를 바로 확인 할 수 있게 해석 코드의 출력값에 맞는 후처리 응용 프로그램을 개발하여 계산 즉시 결과를 확인할 수 있게 하였다. 개발된 후처리 응용 프로그램은 변형형상을 계산 결과 출력값의 절점 좌표를 이용하여 각 변형 단계별로 나타내며 형상안에 응력 및 변형을 분포등은 수치와 함께 분포에 따른 색상을 이용함으로써 결과 형상의 변형 분포를 쉽게 알아 볼 수 있게 한다. 후처리 응용 프로그램 개발 도구는 비주얼(Visual) C++이며 그래픽 라이브러리(library)로 오픈지엘(OpenGL)을 사용하였다. 오픈지엘은 실리콘 그래픽스사(Silicon Graphics Inc.)에서 개발한 3차원 그래픽 응용프로그램 개발을 위한 API(Application Programming Interface)로 최근 그래픽 산업계의 표준 그래픽 라이브러리로 자리잡고 있다.

Fig. A1은 개발된 후처리 프로그램을 이용하여 원형 펀치에 의한 딥드로잉 해석의 결과 형상을 보여주고 있는 것으로 각 변형 스텝마다의 변형모습을 동적으로 확인할 수 있다. Fig. A2는 원형 펀치에 의한 딥드로잉 해석에서 최종형상의 두께 분포를 수치와 함께 색상 분포로 보여주고 있다. 펀치 곡률부위의 두께가 많이 감소한 것을 쉽게 파악할 수 있다.

현재까지 본 연구에서 개발한 후처리 프로그램은 결과 형상을 보여주고 성형중에 모습을 파악하는 단순한 기능을 지니고 있으나 현장 실무에 도움을 주기위해 성형해석후 그 결과를 금형 가공으로 확장하여 만족할 만한 결과에 대해 금형의 설계도면 및 NC코드 생성등 다양한 후처리 기능이 보완되어야 할 것으로 사료된다.

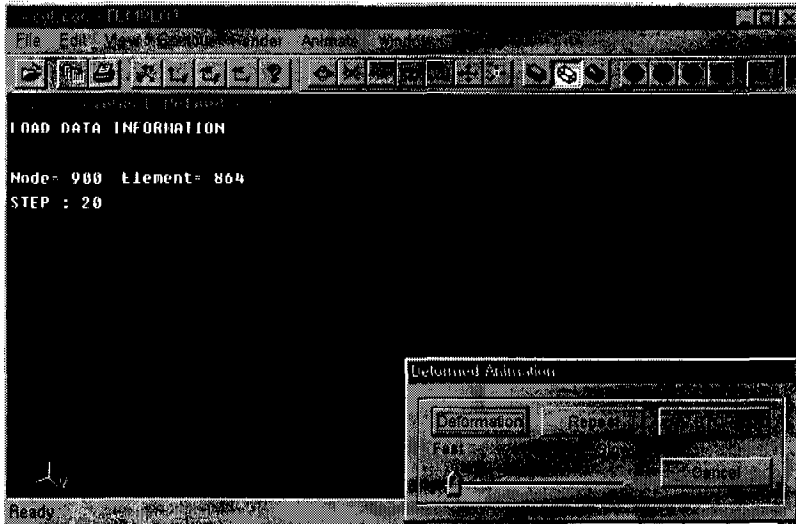


Fig. A1 Deformed mesh(deep drawing process)

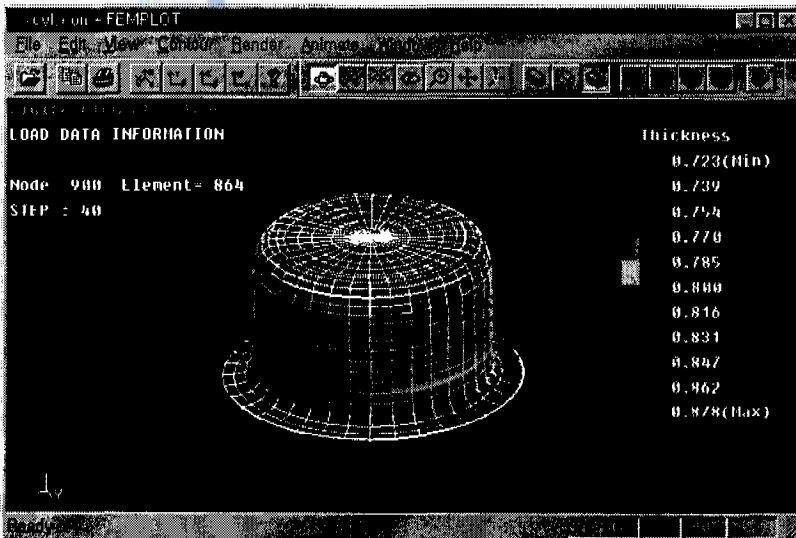


Fig. A2 Thickness distribution(deep drawing process)

감사의 글

조그만 논문 한편을 남기고 짧은 석사 과정을 마감하고자 합니다. 최선을 다했다고 감히 말할 수 없으며 이 작은 논문 한편이 대학원 생활에 전부를 대표할 수는 없을 것입니다. 주변에 많은 사람들과 지내며 겪었던 많은 일들 속에서 제가 좀더 클 수 있었던 기회가 되었던 것이 가장 큰 수확이라고 할 수 있을 것입니다. 그 과정속에서 같이 했던 많은 사람들에게 감사의 마음을 전합니다.

강한 사회인이 되도록 가르쳐 주신 고장권 교수님, 저에게 항상 칭찬을 아끼지 않으셨던 권기린 교수님, 저를 항상 찾아주시고 어려움이 있을 때마다 많은 조언과 도움을 주셨던 김귀식 교수님, 자주 접하지는 못했지만 많은 것을 일깨워주셨던 허종철 교수님, 저를 챙겨주시고 조언을 해주신 현명택 교수님, 논문 심사와 조언을 해주시고 좋은 경험과 미래에 대한 비전을 보여주시신 조경호 교수님, 이 논문을 손봐주시고 마지막까지 저를 지도하고 챙겨주셨던 임종환 교수님, 논문지도를 해주시고 살아가는데 필요한 많은 것을 일깨워 주신 정동원 교수님 감사합니다.

그리고 같이 생활했던 선배님과 동기들 그리고 후배들을 잊을 수 없을 것입니다. 많은 걸 가르쳐 주고 보살펴 준 승균이형, 즐거움과 아픔을 같이 나누고 전폭적인 지원을 해준 조교 명범이, 실험실에서 같이 생활하며 지내온 형일이와 상제, 백만불 미소 용의, 먼저 장가가서 즐거워하는 성환이, 언제나 낙천적인 창수, 얌전한 동현이, 조교하면서 도움을 많이 준 동원이, 그 옆에 양훈이, 좋은 친구 상필이, 나의 기쁨조 병수, 새로운 것을 추구하는 민호, 언제나 열심히 노력하는 훈기, 내 조카와 이름이 같은 윤석이, 착하고 열심히 후배 승현이, 도전을 좋아하는 김사장 상철이, 터프한 석우, 재미있는 혁진이 그리고 착한 조교 남훈이와 실험실 후배들 수환이, 창원이, 훈석이 정아 또한 나의 제자 정민이와 정아 모두 열심히 노력해서 원하는 일들을 이루시기 바랍니다.

또한 실험에 도움을 주신 박경석 선배님과 항상 편하게 해주신 이성철 선생님과 김성의 선생님, 대학원에서뿐만 아니라 물심양면 도움을 주신 관광대 현창해 교수님, 좋은 말씀을 해주시는 박영하 교수님과 조맹효 교수님 모두에게 감사 드립니다. 그리고 이 과정을 잘 마무리 할 수 있도록 도와주신 이용홍님과 사모님에게도 감사하는 마음을 전합니다.

무엇보다 제가 이렇게 공부할 수 있도록 도와주신 나의 어머님에게 감사하다는 말을 드립니다. 매일 새벽에 들어가며 방문을 열어 어머님 얼굴 한번 바라보는게 고작이었던 제게 항상 안스러운 표정으로 바라보시며 무엇이든지 다 해주셨던 어머님에게 다시 한번 감사드립니다. 그리고 멀리에서 항상 저를 걱정하며 도움에 손길을 주셨던 큰형과 작은형 그리고 두분 형수님들, 또한 옆에서 항상 도움을 주었던 누나와 매형 덕분에 부족함이 없이 공부할 수 있었습니다. 그리고 귀여운 나에 조카들, 윤석이, 윤제, 유지, 지윤이, 끝으로 많은 시간을 함께 보내고 힘들었던 시간들을 뒤로 한 채 나에게 큰 힘이 되어준 귀화에게 고맙다는 말을 전합니다.

짧은 글 안에 고마웠던 많은 사람들에게 감사의 마음을 전달하기에 부족함이 있지만 더욱 열심히 노력해서 더 나은 모습으로 보답하도록 하겠습니다.