

축대칭 디프드로잉 공정의 웹 기반 해석시스템 개발

정원진*

(2003년 4월 11일 접수)

Development of A Web-based Simulation System for Axi-Symmetric Deep Drawing

W. J. Chung

Abstract

In this study, a web-based system was developed by utilizing finite element method and virtual system designed using Virtual Reality Modeling Language (VRML). The simulation program for axi-symmetric sheet forming is developed using finite element method. The developed system consists of two modules, client module and server module. The client module was developed by using Active-X control. The input data for FEM calculation is transferred to the server module by using communication protocol. Then server module performs several successive processes: input data generation, forming simulation, conversion of results to VRML format. After that, the results from the simulation can be visualized on the web browser in client computer. Besides, client module offers the capability to control and navigate on virtual forming machine and calculated result. By using this system, simulation result can be investigated more realistically in virtual environment including forming machine.

Key Words : Finite Element Method, Virtual Reality, Web-Based, Axi-Symmetric Deep Drawing

1. 서론

1990년대 초반 이래로 가상현실의 개념은 생산공정에 활발히 적용되고 있다. 가상현실은 가공기계 및 기구 등의 현장의 제반환경을 컴퓨터 상에서 가시화함으로써 제품 설계, 생산, 관리를 최적화하기 위한 체계적이고 통합적인 환경을 구축할 수 있다. 최근에 인터넷 통신속도의 광대역화에 힘입어 웹 기반의 가상기계를 구축하기 위한

연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁻⁵⁾ 그러나 이러한 대부분의 연구가 기계나 공정의 외관을 표현하는 데 국한되고 있다. 성형공정을 가상현실에서 실제로 구현하기 위해서는 소재의 가공상태를 물리적 모델에 의하여 해석하여 가상 환경에서 가시화할 수 있어야 한다. 즉 가공기계의 가상모델과 해석 프로그램을 웹 상에서 체계적으로 결합하여 해석결과를 가공 환경과 함께 웹 상에서 가시화하여야 한다. 이러한 가상가공 환경은 단순히 해석프로그램

* 서울산업대학교

램에 의한 분석보다 실제 공정의 최적화를 위해 훨씬 우수한 환경을 제공할 수 있어 제품 개발기간 단축, 불량 파악 및 개선 등에 큰 효과를 볼 수 있을 것이다. 또한 산업현장에서 많이 접하게 되는 생산시스템에 대한 가상 실습교육은 고가의 실험장비와 유지비 그리고 안전문제 등의 이유로 인하여 많은 학교에서 겪고 있는 어려움을 해소하는 데 기여할 것으로 기대된다.

따라서 본 연구에서는 가상성형공정을 웹 기반에서 실현할 수 있도록 가상현실 기술과 성형해석기술을 결합하여 가상 해석시스템을 구현하고자 한다. 이를 위하여 먼저 외연적 유한요소법에 의한 축대칭 박판성형해석용 프로그램을 개발하여 빠르고 신뢰성 있는 해석이 가능하도록 하였다. 가상 프레스의 조작, 원하는 제품의 성형해석이 웹 환경에서 이루어 질 수 있으며 프레스, 금형, 변형된 소재가 동일 환경에서 가시화 될 수 있는 시스템을 개발하였다.

2. 축대칭 디프드로잉의 유한요소해석

2.1 유한요소법 수식화

본 연구에서는 그 동안 충분한 국내외에서 이론적, 실험적 연구가 수행⁽⁶⁻¹⁰⁾되었고 적용이 활발한 축대칭 디프드로잉 공정을 대상으로 하였다. 수직 이방성을 고려한 탄소성 재료 모델을 사용하였으며 외연적 시간적분법을 적용하여 동적평형방정식을 계산하여 축대칭 박판성형을 해석하였다. 3차원 해석에 대해서는 기존의 연구문헌⁽¹¹⁻¹⁴⁾에 자세히 나와 있으므로 축대칭 해석에 관련된 부분을 중심으로 설명하였다.

2.1.1 축대칭 셸요소를 이용한 소재변형 모사

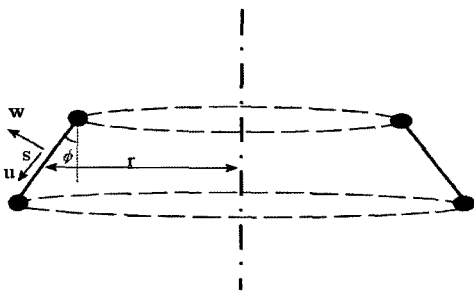


Fig. 1 Geometric representation of axis-symmetric sheet

Fig. 1과 같은 축대칭 셸 요소를 도입하여 소재의 형상을 표현함으로써 축대칭 박판성형공정을 효과적으로 해

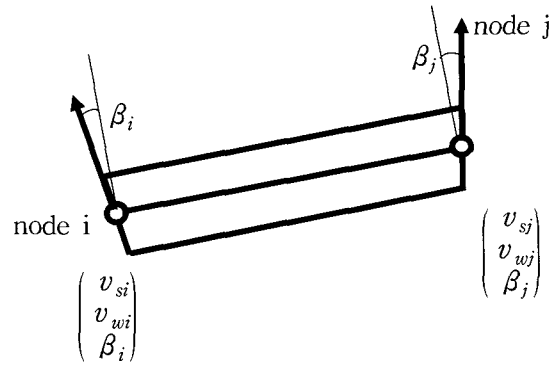


Fig. 2 Kinematics of axis-symmetric shell

석할 수 있도록 하였다.

Fig. 2와 같은 축대칭 셸 요소의 임의 위치의 변위(displacement) v' 를 형상함수(shape function) N 을 사용하여 나타내면 다음과 같다.

$$v' = N V' \quad (1)$$

$$V' = \begin{pmatrix} v_{si} \\ v_{wi} \\ \beta_i \\ v_{sj} \\ v_{wj} \\ \beta_j \end{pmatrix} = T V = T \begin{pmatrix} v_{ri} \\ v_{zi} \\ \beta_i \\ v_{rj} \\ v_{zj} \\ \beta_j \end{pmatrix} \quad (2)$$

로 표현된다. 여기서, V' 는 각 절점의 국부좌표계(local coordinate)에서의 속도이므로 전체 좌표계에서의 속도 V 를 요소로의 변환행렬 T 로 변환하여 구할 수 있다. 각 방향에 대한 변형률은 Fig. 2의 중간면에서 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_{sm} \\ \epsilon_{\theta m} \\ \epsilon_{ws} \\ \chi_s \\ \chi_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} du/ds \\ (w \cos \phi + u \sin \phi)/r \\ (dw/ds) - \beta \\ -d\beta/ds \\ -(\sin \phi/r)(dw/ds) \end{pmatrix} \quad (3)$$

식 (3)으로부터 1점적분을 사용할 때 다음과 같이 변형 속도를 표현할 수 있다.

$$\epsilon_{sm} = \frac{(v_{si} - v_{sj})}{L} \quad (4a)$$

$$\epsilon_{\theta m} = \frac{(v_{xi} + v_{xj})}{2r_{ave}} \quad (4b)$$

$$\epsilon_{s\theta} = \frac{v_{wi} - v_{wi}}{L} - \frac{\beta_i + \beta_j}{2} \quad (4c)$$

$$\dot{\chi}_s = -\frac{(\beta_j - \beta_i)}{L} \quad (4d)$$

$$\dot{\chi}_\theta = -\left(\frac{\sin \phi}{r_{ave}}\right) \frac{(v_{wj} - v_{wi})}{L} \quad (4e)$$

여기에서 r_{ave} 은 중심축으로부터 절점의 평균 거리를 의미하고, L 은 요소의 길이를 의미한다.

중간면에서 z 만큼 떨어진 층에서의 주 변형속도는 Fig. 2의 기구학적 표현과 식(4)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_s = \epsilon_{sm} + z \dot{\chi}_s \quad (5a)$$

$$\dot{\epsilon}_\theta = \epsilon_{\theta m} + z \dot{\chi}_\theta \quad (5b)$$

2.1.2 외연적 유한요소법의 수식화

소재 변형과정에서 외력에 의해 행해진 일과 내력 및 관성력에 의해 행해진 일은 같아야 한다는 일평형 원리로부터 다음 식이 성립된다.

$$\int_v \delta \mathbf{x}^T \boldsymbol{\phi} dv + \int_s \delta \mathbf{x}^T \boldsymbol{\phi} ds + \sum_i \delta \mathbf{x}_i^T \mathbf{F}_i = \int_v (\delta \boldsymbol{\epsilon}^T \boldsymbol{\sigma} + \delta \mathbf{x}^T \rho \dot{\mathbf{x}}) dv \quad (6)$$

여기서 $\delta \mathbf{x}$ 및 $\delta \boldsymbol{\epsilon}$ 은 임의의 변위 및 임의의 변형률을 각각 나타내고, $\boldsymbol{\phi}$ 는 체적력, $\boldsymbol{\phi}$ 은 표면력, \mathbf{F}_i 는 집중 하중력, $\boldsymbol{\sigma}$ 는 내부 응력, ρ 는 밀도 그리고

$\dot{\mathbf{x}}$ 은 가속도 벡터를 의미한다. 형상 함수 N 을 도입하여 식(6)을 공간적으로 이산화시킨 후 정리하면 다음과 같은 동적 힘 평형방정식(dynamic force balance equation)을 구할 수 있다.

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}^{ext} - \mathbf{f}^{int} \quad (7)$$

여기서

$$\mathbf{f}^{ext} = \int_v \mathbf{N}^T \boldsymbol{\phi} dv + \int_s \mathbf{N}^T \boldsymbol{\phi} ds + \sum_i \mathbf{F}_i \quad (8)$$

$$\mathbf{f}^{int} = \int_v \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dv \quad (9)$$

로서 각각 외력항과 내력항을 나타내며 \mathbf{B} 는 변위-변

형율행렬(displacement-strain matrix)을 의미한다. 또한

$$\mathbf{M} = \int_v \mathbf{N}^T \rho \mathbf{N} dv \quad (10)$$

로서 일관질량 행렬을 나타내는데 식(7)의 해를 축차 없이 외연적으로 구할 수 있도록 다음과 같은 집중 질량 행렬(lumped mass matrix)을 도입한다.

$$\mathbf{M} = \sum_{je} m_{je} \quad (11)$$

$$m_j = \frac{1}{n_j} \int_v \rho dv : \text{대각요소} \\ = 0 : \text{비대각요소}$$

여기에서 ρ 는 밀도를 의미하고, n_j 는 j 번째 요소를 구성하는 절점의 수를 의미한다.

중앙 차분법(central difference method)을 도입하여 식(7)을 시간적으로 이산화시키면 외연적 방법으로 계산이 이루어진다(1). 식 (7)로부터 시간 t_n 일 때의 가속도는 식으로 표현된다.

$$\ddot{\mathbf{x}}^t = \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{F}_{ext}^t - \mathbf{F}_{int}^t) \quad (12)$$

이 때의 식 (12)에서 얻어진 가속도로부터 중앙 차분법을 이용하면 속도와 변위를 구할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}}^{t+\frac{1}{2}\Delta t} = \dot{\mathbf{x}}^{t-\frac{1}{2}\Delta t} + \Delta t \cdot \ddot{\mathbf{x}}^t \quad (13)$$

$$\mathbf{x}^{t+\Delta t} = \mathbf{x}^t + \Delta t \cdot \dot{\mathbf{x}}^{t+\frac{1}{2}\Delta t} \quad (14)$$

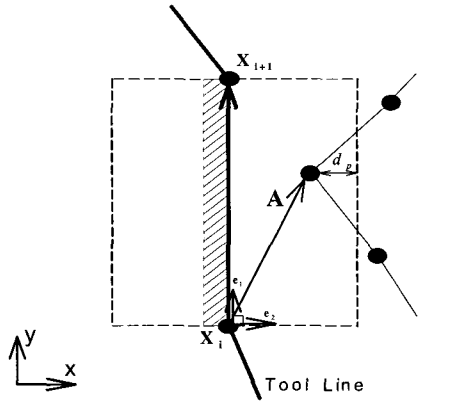
2.1.3 접촉 처리

판재 성형 해석에서 금형은 판재에 비해 변형이 매우 작으므로 강체로 나타내는 것이 편리하다. 따라서 접촉 처리방법은 강체-변형체 접촉처리가 된다. 축대칭 문제에서 접촉처리 시간을 최소화하고 정확성을 향상시키기 위하여 직선과 원호 패치(patch)를 사용하여 금형을 표현하였다. 접촉력 계산 및 부여는 외연적 유한요소법에서 보편적으로 널리 쓰이는 penalty법을 사용하였다.

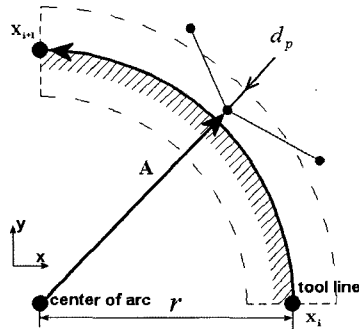
Fig. 3에서와 같이 금형형상을 직선패치와 원호패치를 사용하여 해석적으로 표현하였으며 진행방향의 좌측을 금형내부로 하였다. 절점의 금형 침투 깊이, d_b 는 직선

패치일 때와 원호 패치일 때에 대하여 다음과 같이 각각 구하여진다.

$$\begin{aligned} \text{직선패치: } d_p &= 0.5t - \vec{A} \cdot \vec{e}_2 \\ \text{원호패치: } d_p &= r + 0.5t - |\vec{A}| \end{aligned} \quad (15)$$



(a) straight line patch



(b) arc patch

Fig. 3 Contact model

식 (15)에서 구해진 침투깊이 d 를 이용하여 접촉력을 다음의 식으로 구할 수 있다. 박판에 속한 한 절점이 깊이 d_p 만큼 금형으로 침투했을 경우, 침투 절점에 가해지는 접촉력은 다음과 같다.

$$f^{contact} = d_p k \mathbf{n} \quad (16)$$

여기서 $d_p \geq 0$ 이고, \mathbf{n} 은 침투 절점에 가장 가까운

금형 요소의 한 점에서의 수직 단위 벡터이다. 또한 k 는 접촉 강성을 나타낸다. 그런데 식(16)에서 d_p 의 절대값이 커지면 과도한 접촉력이 접촉 절점에 가해지게 되어 접촉상태가 불안정해 질 수 있어 이를 방지하기 위하여 다음과 같은 접촉 감쇠 모델을 도입하게 되면 식 (7)에서의 외력항, f^{ext} 는 접촉력 및 접촉 감쇠력을 부가하여 다음과 같이 수정된다.⁽¹⁴⁾

$$f_{mod}^{ext} = f^{ext} + \{d_p k - 2m\omega_n(\mathbf{v}^r \cdot \mathbf{n})\zeta\} \mathbf{n} \quad (17)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (18)$$

$$\mathbf{v}^r = \mathbf{v}^s - \mathbf{v}^m \quad (19)$$

여기서 $\mathbf{v}^r, \mathbf{v}^s, \mathbf{v}^m$ 은 각각 소재와 금형의 상대속도, 접촉 절점 속도, 접촉 절점에 가장 가까운 금형 요소의 속도를 나타내며 ζ 는 감쇠계수를 나타낸다. 또한 본 연구에서는 변경된 Coulomb 마찰법칙을 적용하였다.⁽¹⁵⁾

2.2 원형 컵 디프 드로잉 예제수행에 의한 검증

본 연구에 사용하게 될 해석 프로그램의 신뢰성을 알아보기 위하여 개발된 축대칭 프로그램으로 해석한 결과와 실험 결과⁽¹⁶⁾를 비교 분석하였다. 해석에 사용된 조건은 아래와 같다.

Sheet material : aluminum-killed steel

Stress-strain curve : $\sigma = 508.79(\epsilon)^{0.247}$ MPa

Lankford value for normal anisotropy : 1.867

Coulomb coefficient of friction :

$\mu = 0.24$ on the punch

$\mu = 0.12$ on the die

Blank holding force : 1000 kgf (9806 N)

Fig. 4는 해석에서 사용될 금형의 형상이다. 해석을 하기 위한 메쉬는 균등간격으로 100개의 요소로 모델링하였다. Fig. 5는 펀치의 변위와 드로잉 하중의 관계를 나타낸 그래프이다. 해석과 실험에서 얻은 결과를 보면 실제 실험보다 계산에 의하여 얻은 값이 약 10~15%정도 적게 나오며 펀치의 변위가 증가함에 따라 해석결과와 실험결과가 차이가 증가한다. 이러한 차이는 유한요소해석에서 항복조건을 고려할 때 평면 응력조건(plane strain condition)을 적용한 점과 shell 요소의 기하학적 가정으로 인해 전단응력을 항복조건에서 고려하지 못한 영향이라고 판단된다. Fig. 6은 성형 깊이에 따라 두께 변형률

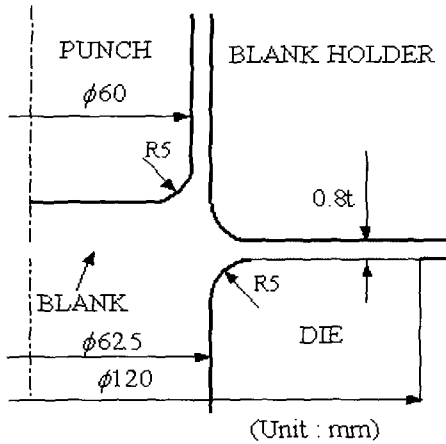


Fig. 4 Finite element model for deep drawing of a cylindrical cup

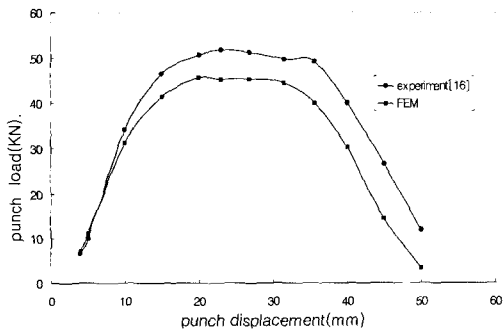


Fig. 5 Comparison of drawing load between FEM and the experiment

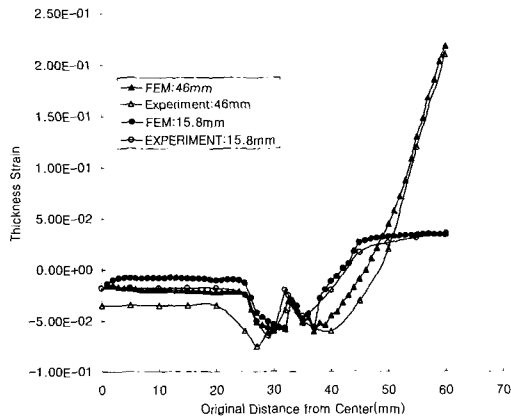


Fig. 6 Comparison of the thickness strain between FEM and the experiment

(thickness strain)을 비교한 것이다. 그래프를 보면 일반적으로 알려진 것과 같이 펀치 바닥에서는 두께 변화가 거의 없고 펀치 반경 부분과 벽 부분이 얇아졌으며, 플랜지 부분이 두꺼워지는 현상을 볼 수 있다. 해석된 결과가 실험 값과 비교할 때 기존의 해석결과와 비교하여 충분한 해석정확도를 보이는 것을 확인하였다.

3. 웹기반 성형 해석 시스템 설계 및 구현

3.1 시스템 설계

Fig. 7은 가상 프레스 시스템의 구조와 작동방법을 보여 준다. 가상프레스는 웹 상에서 공정을 시험하고 결과를 탐색할 수 있도록 구성되었다.

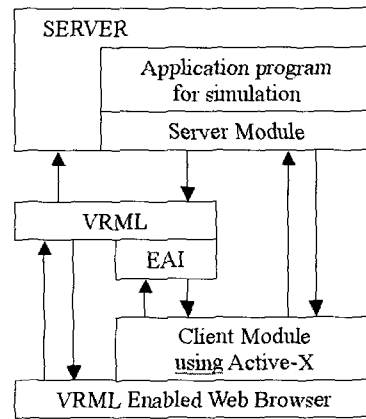


Fig. 7 System architecture of virtual forming system

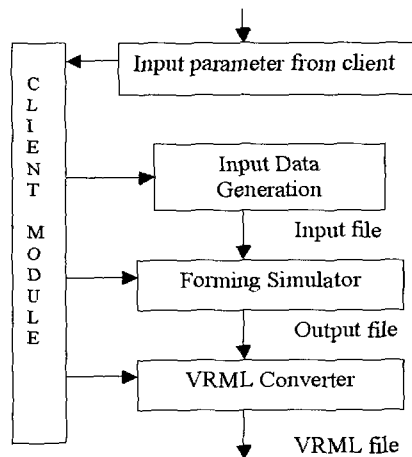


Fig. 8 Analysis procedure by client-server model

Virtual Reality Modeling Language(VRML 2.0) 은 3차원 객체의 형상을 기술할 수 있고 대화적인 제어가 가능한 표현언어이다.⁽¹⁷⁾ 사용자는 Active-X콘트롤⁽¹⁸⁾과 EAI(External Authoring Interface)⁽¹⁹⁾를 이용하여 가상프레스 내의 객체를 조작할 수 있으며 VRML의 내비게이션 기능을 활용하여 시점을 이동하며 모든 상황을 탐색할 수 있다.

Fig. 7은 본 연구에서 개발된 시스템 구조를 나타내고 있다. 소재를 제외한 프레스 및 금형은 변형하지 않고 강제 운동을 하므로 쉽게 VRML을 이용하여 가시화할 수 있다. 그러나 성형과정에서 소재는 연속적으로 변형하기 때문에 성형해석을 요청하여 수행된 후에야 변형과정을 가시화할 수 있다. 해석을 수행한 뒤 가상현실에서 가시화하기까지는 데이터 입력, 입력데이터 생성, 해석수행 및 가시화를 위한 데이터 변환 등의 일련의 과정을 순차적으로 수행해야 한다. 이러한 과정 중 어느 부분까지 클라이언트에서 수행하고 나머지를 서버에서 수행하는 것이 적합한 가 결정하는 것은 매우 어려운 과제가 될 것이다. 문제의 특성에 따라 또는 구성시스템의 특성에 따라 최적화된 형태가 달라질 수 있기 때문에 본 연구에서는 가능한 형태 중 하나를 구현하기로 하였다. 사용자 입장에서는 단지 데이터를 입력하고 해석수행을 요청하면 해석이 종료된 뒤에 그 결과를 가상 프레스와 함께 브라우저에서 탐색할 수 있게 된다. Fig. 7의 전체 시스템에서 클라이언트-서버 모듈에 의해서 수행되는 해석 수행 및 가시화를 위한 일련의 작업에 대하여 Fig. 8에 나타내었다.

3.2 Client-Sever Model을 사용한 해석수행 및 가시화 과정

해석은 2절에서 개발된 측대칭 프로그램을 사용하여 수행한다. Fig. 8에 나타난 일련의 작업을 수행하기 위하여 클라이언트-서버 모듈이 작성되었다. Fig. 8에서 보여주는 바와 같이 클라이언트 측에서는 해석용 데이터 입력, 해석용 input데이터 작성 등을 수행한 뒤 이를 서버로 전송한다. 서버 측에서는 해석용 input데이터를 전송받은 후에 해석프로그램을 구동한다. 해석이 종료된 뒤 해석결과를 VRML로 변환하고 해석결과를 웹 브라우저에서 볼 수 있는 상태를 클라이언트에 통보하면 해석과정은 종료된다.

본 연구에서는 제품의 형상, 재질 그리고 공정변수가 주어지면 측대칭 딥 드로잉 해석 프로그램으로 해석을 수행하여 그 결과를 VRML화하여 가시화한다. 유한요소법에서는 메쉬를 사용하여 해석을 수행하게 되는데 본

연구에서는 제품의 형상이 주어지면 이를 성형할 수 있는 금형의 형상을 자동생성한다. 또한 금형 및 소재의 메쉬를 자동생성하여 사용하므로 브라우저에서 적은 수의 정보 입력을 하여 해석을 수행할 수 있다.

해석 프로그램은 변형형상 및 응력, 변형을 등을 ASCII형태로 출력한다. 해석결과를 VRML로 변환하여야 사용자가 브라우저에서 결과를 탐색할 수 있다. 변환된 VRML형태의 결과는 가상프레스에 포함되어 성형과정을 보여줄 뿐 아니라 응력이나 변형을 분포 등을 탐색할 수도 있다. 해석결과를 가상프레스의 계층적 구조에 포함시키면 가상 프레스와 해석결과를 동일한 장면에서 가시화할 수 있다.

3.3 가상 프레스 모델링

VRML 2.0을 지원하는 브라우저에서 내비게이션 및 시점 설정 등을 제어할 수 있으므로 가시화 엔진으로 사용할 수 있다. 대부분의 상용 CAD/CAE 도구들이 모델 형상이나 해석결과를 VRML 형식으로의 출력을 지원하고 있어 가상성형에서 활용되는 프레스나 금형의 형상 모델링이 용이하다. 이렇게 하여 모델링된 형상은 가상 현실 편집도구를 활용하여 가상현실 환경에서 가시화할 수 있다.

본 연구에서 구현한 프레스는 같이 이동하는 부분을 하나의 객체로 하여 모델링하였다. 프레스와 금형의 형상을 부분품을 Pro-Engineer⁽²⁰⁾를 사용하여 모델링하였으며 VRML 형식으로 export하였다. 모델링된 형상은 같이 동작되는 부분들이 계층적 구조로 연결되어 객체와 같이 취급될 수 있도록 하였다.

3.4 Active-X 및 EAI를 사용한 가상 프레스 제어

가상환경의 객체를 조작하기 위해서 인터페이스가 필요하게 되는데 이를 위한 도구로써 현재 EAI(External Authoring Interface)가 인터페이스로 제공되고 있다. EAI는 VRML이벤트 모델을 지원하여 외부 프로그램이 VRML의 객체를 접근하여 변경하는 작업을 수행할 수 있게 한다. 본 연구에서는 Microsoft사에서 지원하는 Active-X 콘트롤을 사용하여 EAI에 접근하였다. Active-X 콘트롤을 작성하기 위하여 Visual Basic이 사용되었다. 웹 페이지에 Active-X 기술을 활용한 작동 버튼이 구현되었으며 이를 이용하여 VRML의 데이터를 조작할 수 있다. 구현된 Active-X 콘트롤은 프레스의 동작(상승, 하강, 쿠션 하강, 쿠션 상승, 자동, 정지)등의 기능을 수행할 수 있고 상형을 투명하게 하여 사용자가 변형 상

태를 관찰할 수 있도록 할 수도 있게 하였다.

4. 통합된 가상 시스템 구현 결과

Fig. 9에서 브라우저에 나타난 가상프레스의 모습을 볼 수 있다. 프레스의 스위치를 누르거나 조정판을 클릭하여 프레스를 조정할 수 있다. Fig. 10은 시점을 이동하여 금형을 관찰하는 그림이다. 성형해석결과를 관찰하기 위하여 상형을 투명하게 처리하였다. Fig. 11은 공정해석을 수행하기 위하여 필요한 데이터를 입력하는 창을 보여준다. 재질, 제품의 형상, 공정 변수 등을 입력할 수 있다. 현재 축대칭 컵의 1차 드로잉에 대한 데이터를 입력하고 해석을 수행할 수 있다. Fig. 12에 해석이 완료된 후 변형된 소재의 형상을 보여준다. 현재 축대칭 딥 드로잉 공정의 경우 2Ghz의 PC를 서버로 사용할 때 1공정에 대하여 약 30초 정도에 해석을 완료하고 결과를 가시화할 수 있다. 본 연구에서는 1공정에 대하여만 구현되어 있으나 동일한 기법은 다공정이나 3차원 공정의 경우에도 용이하게 확장 가능하다.

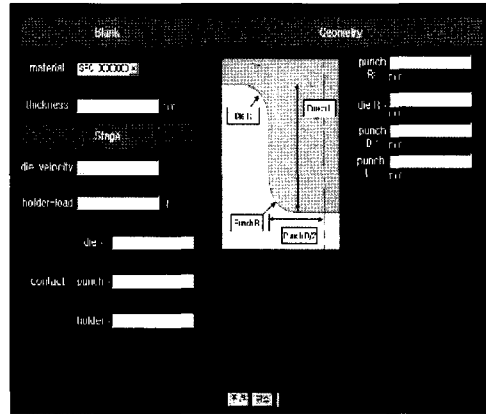


Fig. 11 Input window for analysis data



Fig. 12 Deformed shape by deep drawing simulator

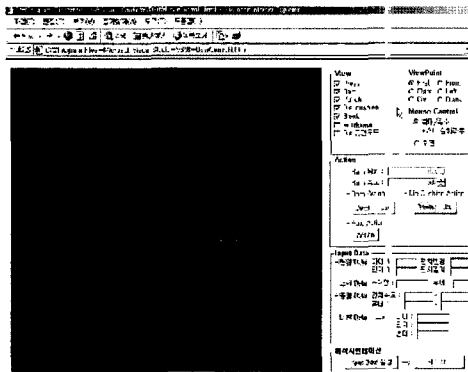


Fig. 9 The Forming Press in the Web

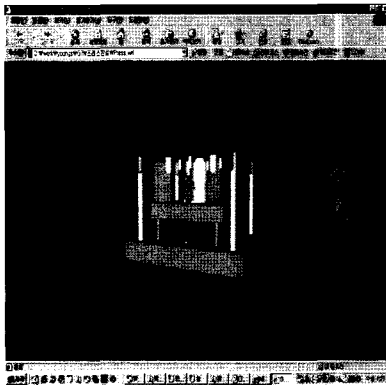


Fig. 10 View of Deep Drawing Die

5. 결론

본 연구에서는 소성가공 공정을 가상현실을 이용하여 설계에 활용하기 위하여 역학적 해석에 의한 결과를 가상현실세계에서 가시화하기 위한 기법에 대한 연구를 수행하였다. 이러한 기능을 수행하기 위해서는 가상현실 기법과 해석기술을 웹기반으로 결합하여 통합적 시스템을 구성하였다.

본 연구에서는 가상현실기법과 유한요소법을 사용하여 가상성형시스템을 구축하였다. 유한요소법을 활용하여 축대칭 박판성형공정을 해석할 수 있는 프로그램을 개발하여 연구에 적용하였다. Active-X기술과 EAI를 활용하여 가상 프레스를 대화적인 방법에 의하여 제어가 가능하도록 하였다. 또한 축대칭 박판성형공정에 대하여 성형해석이 웹 기반에서 수행되고 또 그 결과가 가시화될

수 있도록 이에 적합한 클라이언트-서버 프로그램을 개발하였다. 예제로써 축대칭 딥 드로잉 공정에 대하여 가상환경에서 해석을 수행하고 해석된 형상 및 변형결과를 탐색할 수 있음을 보였다.

앞으로 성형해석분야에서도 가상현실기법과 웹 인프라를 활용한 설계지원기술이 활발히 연구되어 보다 실제적인 설계환경을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- (1) T.P. Yeh, J.M. Vance, 1998, "Interactive Design of Structural systems in a Virtual Environment", *Comput. Modeling Simulation Eng.*, Vol.30, No.3, pp. 166~169.
- (2) M.J. Ryken, J.M. Vance, 2000, "Applying Virtual Reality Techniques to the Interactive Stress Analysis of a Tractor Lift Arm", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol.35, pp. 141~155.
- (3) E. WestKamper, M. Mersinger and B. Klumpp, 2002, "Virtual Reality for Configuration of Transformable Assembly Systems", *Proceedings of The 35th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, Seoul, Korea, pp. 195~198.
- (4) H.C. Kim et al., 2000, "VRML모델을 이용한 쾌속조형에 관한 연구", *한국정밀공학회지*, 제17권 제7호, pp. 63~73.
- (5) D.K. Baek, T.J. Ko, 2002, "디지털 기계제작과 가상 공작기계", *한국정밀공학회지*, 제19권 6호, pp. 15~22.
- (6) 김석관, 유동진, 윤정환, 양동열, 1994, "축대칭 다단계 디프 드로잉 공정의 유한요소해석", *한국소성가공학회지*, 제3권 제4호, pp. 468~481.
- (7) 이승열, 금영탁, 박진부, 정관수, 1995, "원통컵 디프 드로잉 공정의 귀발생 예측", *한국소성가공학회지*, 제4권 제3호, pp. 222~232.
- (8) 박상봉, 최영, 김병민, 김보환, 최재찬, 1996, "축대칭 디프 드로잉 제품에 대한 공정설계 시스템에 대한 연구(I)", *한국소성가공학회지*, 제5권 제1호, pp. 27~36.
- (9) 박상봉, 이종, 최재찬, 최영, 김병민, 1996, "축대칭 디프 드로잉 제품에 대한 공정설계 시스템에 대한 연구(II)", *한국소성가공학회지*, 제5권 제1호, pp. 61~71.
- (10) 김두환, 1999, "원통형 용기의 다단계 디프 드로잉에 대한 다이 곡률반경 및 틈새의 영향", *한국소성가공학회지*, 제8권, 제3호, pp. 262~268.
- (11) R.D. Cook, D.S.Malkus and M.E.Plesha, 1989, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York.
- (12) LS-DYNA3D User's manual, 1998.
- (13) 정완진, 조진우, 1999, "박판금속성형공정 해석시스템 개발", *한국소성가공학회지*, 제8권, 제1호, pp. 29~37.
- (14) 이상욱, 양동열, 정완진, 1999, "접촉감쇠의 수식화 및 외연적 유한요소법에의 적용", *한국소성가공학회지*, 제8권 제3호, pp. 306~312.
- (15) J.O.Halliquist, G.L.Goudreau and D.J.Benson, 1985, "Sliding Interfaces with Contact-Impact in Large-Scale Lagrangian Computations", *Compu. Meth. Appl. Eng.*, Vol.51, pp. 107~137.
- (16) 정완진, 1989, "접촉과 마찰을 고려한 박판성형의 강소성 유한요소해석", *한국과학기술원, 박사학위논문*.
- (17) Jed Hartman, Josie Wernecke, 1998, *The VRML 2.0 Handbook*, Silicon Graphics.
- (18) 전병선, *Visual C++ ATL COM Programming*, 1999, 삼양출판사.
- (19) External Authoring Interface Working Group, <http://www.vrml.org/WorkingGroups>.
- (20) Pro Engineer 2000i, <http://www.ptc.com>.