

## 3 차원 단조해석용 후처리기 개발

정완진\* · 최석우\*\*

(2003 년 4 월 11 일 접수)

### Development of a Post-Processor for Three-Dimensional Forging Analysis

W. J. Chung and S. Choi

#### Abstract

Three-dimensional forging analysis becomes an inevitable tool to make design process more reliable and more producible. In this study, in order to make the investigation for three-dimensional forging analysis more conveniently and accurately, a new post processor was developed. For post-processing of multi-stage forging simulation, efficient data structure was proposed and applied by using STL. New file architecture was developed to handle successive and huge data efficiently, common in three-dimensional forging analysis. Since sectioning and flow tracing plays an important role in the investigation of analysis result, we developed an algorithm suitable for 4-node and 10-node tetrahedron. This flow tracing algorithm can trace and reverse-trace flow through remeshing. Developed program shows good performance and functionality. Especially, a big size problem can be handled easily due to proposed data structure and file architecture.

**Key Words** : Forging, FEM, Post-Processor, Section, Metal Flow, Flow Net

#### 1. 서 론

단조공정은 금형을 이용하여 품질이 우수한 기계부품을 저렴한 가격에서 대량으로 생산할 수 있는 공정으로, 기계부품 생산에 널리 활용되는 우수한 공정이다. 그러나 금형설계 및 제품 제조에 많은 경험과 기술이 필요한 기술집약적 공정으로 많은 기업들이 단조공정 및 금형 개발에 대한 기술을 보유하고자 노력하고 있다. 따라서 단조 공정을 사전에 해석하여 보고 검토하는 기법들이 오래 전부터 연구자들에게 관심의 대상이 되어 왔으며, 2D 시뮬레이션을 중심으로 꾸준히 발

전하여 왔다.<sup>(1-3)</sup> 시뮬레이션 기법을 이용하여 시행착오적 시험금형제작 금형 수의 감소에 의한 금형비, 인건비 및 납기 단축에 의한 제조 비용의 절감, 가상 시험을 통한 신제품 개발 능력의 향상, 시뮬레이션 기법을 이용한 신제조 공법의 개발 등이 가능해지고, 정형(Net Shape)이 산업계에서 보다 중요시되면서, 3D 시뮬레이션을 중심으로 시뮬레이션의 필요성은 더욱 중요시 되고 있다. 특히 그 동안 어려웠던 3D 요소 재구성, 해석 시간의 단축 등이 수 많은 연구를 통하여 해결기미를 보이면서 3D 단조공정 시뮬레이션이 점차 산업계에서 응용이 활발히 검토되고 있다.

\* 서울산업대학교 금형설계학과

\*\* 한국생산기술연구원 디지털생산공정팀

이와 같이 3D 해석기술이 발달하면서 3D 해석자료를 사용자 인터페이스를 통하여 사용자가 필요한 정보를 손쉽게 파악할 수 있는 후처리기에 대한 기술의 요구도 점차 증진되고 있다. 해석 시물레이션을 통하여 얻어진 자료를 가시화하여 소재의 유동 및 변형 상태 또는 금형에 걸리는 압력 및 금형과 소재의 온도변화 등 여러 가지 공정 상태를 사용자가 쉽게 파악할 수 있도록 도와주는 후처리기의 개발은 3D 해석의 경우에는 제품의 복잡성 때문에 2D 해석의 경우보다 절대적으로 필요하다고 생각된다.<sup>(4-8)</sup>

따라서 보다 유용한 3D 해석용 후처리기의 개발은 산업계에서 절실히 필요하다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 관점에서 3 차원 단조 해석용 후처리기를 개발하게 되었으며, 해석결과로의 접근 편리성, 결과 파악의 신속성, 신뢰성 및 보편성 등의 확보에 주력하여 개발하였다. 또한 소재 및 금형은 4 절점사면체 요소나 10 절점 사면체 요소로 해석한 경우를<sup>(9)</sup> 처리할 수 있도록 개발하였다. 개발된 후처리기는 어떤 시뮬레이터라도 용이하게 연결할 수 있고 고속처리가 가능하도록 전용 바이너리 입출력 라이브러리를 사용하여 운용되도록 하였다. 또한 재료의 유동을 보다 정확히 살필 수 있도록 단면 생성기술과 재료유동 추적 기능을 강화하였다.

## 2. 후처리기 개요

후처리기를 개발하기 위한 기본도구로써 Visual C++<sup>(10)</sup>를 이용하였고 그래픽 라이브러리는 OpenGL<sup>(11)</sup>을 사용하였다. 또한 데이터 구조 작성시에 데이터 관리를 효율적으로 하기 위해 STL(Standard Template Library)<sup>(12)</sup>를 사용하여 구현하였다.

### 2.1 후처리기 화면구성

Fig. 1 과 같이 전체 화면은 몇 개의 영역으로 분할되어 표시된다. 단조품의 형상이 보이는 창이 주 그래픽 창(Main Graphic Window)으로써 이곳에 소재의 형상 및 변수분포 등을 표시하게 된다. 주 그래픽 창 좌측의 리스트 창은 시간창(Time Window)으로 공정진행에 따라 여러 개의 공정(Stage)과 이에 따르는 일련의 성형시점(State)들을 표시하고 직접 원하는 시간으로 접근할 수 있게 한다. 하단에서 좌측 창은 공정의 객체(Object)등을 표시하는 창(Mesh Bar)이다. 소재 및 각각의 금형은 하나의 객체로 간주된다. 각 객

체는 리스트로 표시되며 클릭하여 메쉬 가시화 방법 및 화면 표시여부를 설정할 수 있다. 또한 가시화 변수 선택 및 컬러셰이딩 방법(Color Shading) 등을 설정할 수 있다. 하단 우측 창은 절점이나 요소의 정보를 출력하거나 프로그램이 필요한 메시지를 출력하는 창이다. 상단에는 아이콘들이 배치되어 있으며 필요에 따라 해당하는 다이얼로그를 생성하여 작업을 수행한다.

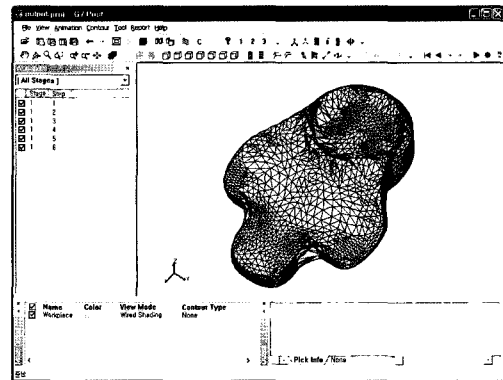


Fig. 1 View of Post Processor

### 2.2 후처리기 기능

개발된 후처리기는 크게 두가지의 화면 출력 방법을 가진다.

첫째는 메쉬 형태의 출력으로써 솔버에서 해석된 모든 공정의 금형 및 소재의 형상 데이터를 그래픽 영역에 표현해 주며 금형 및 소재의 변수값을 셰이딩하거나 색띠를 이용하여 표현해주는 기능이다. 이 기능을 이용하여 사용자는 변수의 분포나 최대, 최소 값의 위치 등을 용이하게 추적할 수 있으며 Fig. 1 의 주 그래픽 창 영역에 항상 출력된다.

둘째는 그래프 형태의 출력으로써 금형 및 소재의 상태 정보를 그래프를 이용하여 시간에 따른 변수의 변화 및 특정변수에 따른 다른 변수의 변화 등을 탐색할 수 있게 하는 기능이며 Fig. 2 와 같은 그래프 창이 활성화 될 경우에 출력된다.

메쉬형태의 출력에서는 해석결과에 이해를 돕기 위해서 다양한 방법으로 메쉬를 변형하거나 보조적인 방법을 사용하여 정보를 제공한다.

셋째는 단면(Section) 기능으로써 금형 및 소재를 임의의 단면으로 절단하여 내부의 형상 및 정보를 보여주는 기능이다.

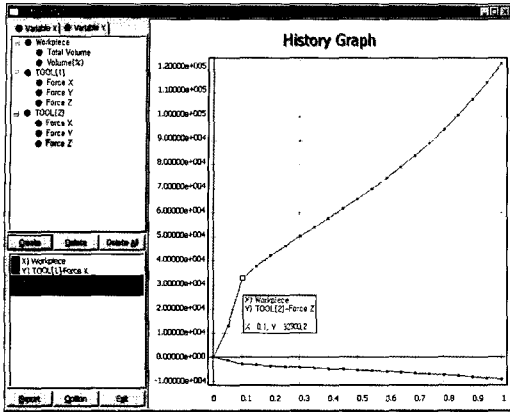


Fig. 2 Graph Window

둘째는 애니메이션(Animation) 기능으로써 단조성형 시 모든 공정의 상태를 연속적으로 보여 줌으로써 사용자가 모든 공정을 좀 더 실제와 가깝게 이해할 수 있도록 도와주는 기능이며, 또한 모든 공정의 진행상황을 동영상 파일로 출력 가능하다.

셋째는 소재 유동경로 탐색 기능으로써 절점 추적기능(Particle Tracing)과 평면 추적기능(Flow Net Tracing)을 개발하였다. 이로써 표면의 절점의 변화를 추적하거나 소재 내부에 임의의 평면을 설정함으로써 공정 진행 시 해당 평면의 형상이 어떻게 변화하는지를 추적하여 보여주는 기능이다.

넷째는 조회(Report)기능으로써 금형 및 소재의 특정 절점이나 요소의 정보나 변수를 보여주는 기능이다.

이 외에도 기본적인 뷰 조작 기능 외에 사용자 편의 기능으로 미러(Mirror)기능, 블렌딩(Blending)기능 등을 추가하였다. 미러기능은 해석 프로그램에서 꼭 필요한 기능으로 해석하려는 형상이 대칭을 이룰 시에는 전체 형상을 모두 해석할 필요 없이 일부분만을 해석한 뒤에 나머지 부분은 미러기능을 이용하여 전체를 표현하면 해석시간을 크게 줄일 수 있다. 블렌딩기능은 물체를 투명하게 해주는 기능으로 단조 공정은 진행 시 내부 소재의 상태나 형상이 편치와 다이에 둘러싸여 보이지 않기 때문에 편치와 다이를 투명하게 함으로써 공정 진행 시에도 소재의 상태와 형상을 볼 수 있게 하는 기능으로 블렌딩기능을 추가하였다.

### 2.3 후처리기 데이터 구조

데이터 구조는 화면 출력 종류별로 설계하였다. 메쉬 형태의 출력은 Fig. 3 과 같은 클래스들을 활용하여 관리하는 데 공정 및 소재나 금형 등의 객체들에 대한 관리를 위한 상위 구조에 대한 정보를 가지고 있는 클래스, 각 객체형상에 대한 데이터와 변수정보를 입력하여 가지고 있는 클래스 그리고 그래픽처리를 위한 데이터를 저장하고 있는 클래스들로 구분된다. 이렇게 데이터를 나눠서 관리하는 이유는 데이터를 용도에 따라 효과적으로 운용하기 위해서다.

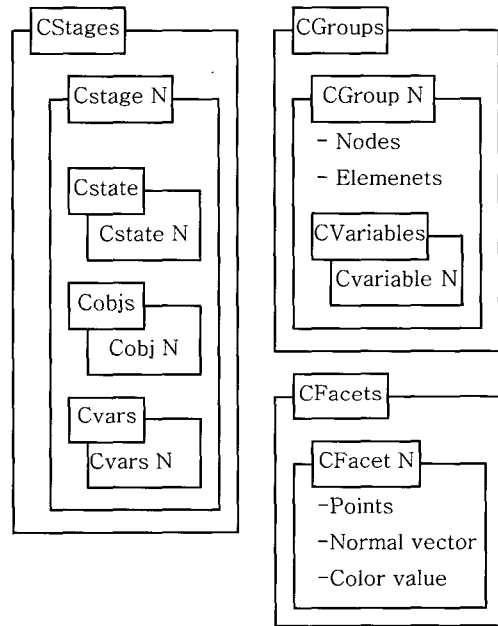


Fig. 3 Mesh Output Data Structure

첫째, 프로그램 내에서 다양한 여러 가지 컨트롤들을 관리하고 작동시키기 위해서는 전체적인 공정 및 상태 들에 대한 정보, 객체에 대한 리스트, 변수에 대한 리스트들의 상위 구조를 표현하는 데이터를 별도로 관리하는 것이 편리하다. 성형해석에서 이러한 정보는 가변적이며 따라서 클래스는 변화를 반영할 수 있도록 작성되었다. 공정과 상태의 수, 공정별 객체 수 및 변수의 종류 등이 모두 변경가능하며 솔버에서 출력한 대로 반영되어 나타나게 된다. 예를 들면 출력 변수를 솔버에서 지정하면 해당 변수만 선택 창에 나타나고 선택될 수 있다.

한 개의 공정은 일련의 성형시점들로 표현되

어지며 주 그래픽 창에는 시간창에서 선택된 성형시점이 출력된다. 요소재생성(Remeshing)이 임의의 시점에서 수행될 수 있기 때문에 요소재생성이 수행되는 시점에서는 반드시 해석결과가 출력되어야 하며 요소재생성 전과 후의 데이터가 순차적으로 같은 성형시점에서 출력되어야 한다. 만일 요소재생성 시점에서 데이터가 적절히 출력되지 않으면 유동추적을 수행할 수 없게 된다는 점을 유의해야 한다.

둘째, 해석결과를 입력하여 저장하기 위한 클래스를 사용한다. 3 차원 단조 해석결과 데이터는 양이 매우 크기 때문에 컴퓨터 주 메모리에 모두 기억하는 것은 적합하지 않고 프로그램의 속도를 크게 저하시킨다. 따라서 필요할 때마다 선택된 한 개의 성형시점에 대한 해석결과 데이터만 결과파일에서 입력하여 주 메모리 상에 기억하도록 하였다. 해석결과는 형상에 대한 데이터와 해석결과 변수 데이터로 나누어진다. 유한요소법을 사용하여 해석하게 되므로 각 객체별로 절점 및 요소 데이터를 저장하는 클래스를 사용한다. 또한 변수 값을 읽어 들여 저장하는 클래스가 있으며 절점변수와 요소변수에 대하여 각각 1 종류의 데이터를 저장할 수 있는 공간이 할당되어 주 메모리에서는 항상 현재 지정된 변수 값만 저장한다. 새로운 변수가 요구되면 결과파일에서 입력하여 대체하게 된다.

셋째, 주 그래픽 창에 가시화하기 위하여 직접 주 메모리에 있는 결과 데이터를 매번 접근하는 것은 비효율적이며 사용자가 부여한 뷰 옵션이나 효과 그리고 칼라셰이딩 등의 변수표현 방법을 반영한 결과를 저장하고 이를 이용하여 그래픽 처리하는 것이 효율적이다. 3 차원 단조 성형해석에서 입방체 요소(Solid Element)를 사용하기 때문에 사용자에게 보여지는 외부보다 내부에 더 많은 수의 요소가 있는 것이 일반적이다. 따라서, 외부의 면(Facet)만을 추출하여 저장하는 클래스를 사용하고 이에 대해 그래픽 가공을 하고 가시화하여 그래픽처리의 속도를 크게 향상시킬 수 있도록 하였다. 이러한 외부면을 표현하는 클래스에서는 STL(Standard Template Library)의 벡터(Vector)를 사용하였는데 벡터는 메모리를 동적으로 할당하고, 데이터를 다루는데 유용한 여러 함수들을 제공해 주기 때문에 데이터의 크기와 순서가 변화해야 하는 이러한 클래스에는 매우 적합하였다.

그래프를 위한 데이터 구조는 상대적으로 간

단하다. 기록된 데이터의 종류 및 특성별로 계층적 구조가 기록된 클래스를 사용한다. 이 클래스는 그래프 창의 왼쪽에 트리 형태로 계층적 구조를 표현한다. 각 변수는 지정된 균일한 간격의 시점마다 기록되므로 모든 변수에 대해 동일한 수의 데이터가 기록된다. 따라서 시간-변수 그래프나 변수-변수 그래프가 모두 가능하다. 메쉬 형태의 데이터에 비해 그래프를 위한 데이터는 매우 많은 시점에서 기록하여 부드러운 그래프가 생성되도록 하는 것이 일반적이다.

#### 2.4 후처리기 데이터 입출력

3 차원 단조공정 해석의 결과는 방대한 경우가 많기 때문에 해석결과를 기록하는 파일의 크기를 줄일 필요가 있다. 또한, 특정 성형시점의 결과만을 필요로 하기 때문에 모든 결과 값을 모두 읽지 않고 선택적으로 읽을 수 있는 기능이 요구된다.

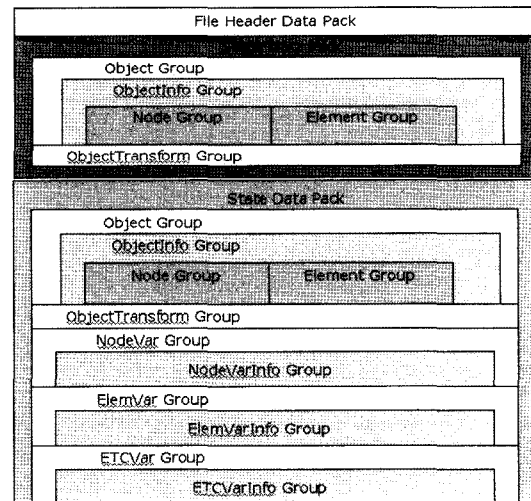


Fig. 4 File Architecture for Mesh Output

이러한 목적을 달성하기 위하여 임의의 위치 접근(Random Access)이 가능한 이진법(Binary) 형태로 해석결과를 저장하였다. 해석결과는 공정별로 1 개씩 생성되도록 하였으며 Fig. 4 와 같은 구조를 가진다. 파일의 맨 앞에 파일 헤더가 있으며 공정전체의 기술에 사용되는 데이터가 1 개 존재한다. 공정 데이터는 공정에 대한 정보와 공정이 전체에 걸쳐 변화하지 않는 객체에 대한 형상 데이터를 기록한다. 성형시점에 따른

데이터는 다수가 계속 기록될 수 있으며 변화하는 객체의 형상 및 변수 값을 기록한다. 이러한 데이터는 적은 수의 조회로 탐색하여 읽을 수 있고 확장이 가능하고 버전 호환성을 확보하기 위하여 여러 수준에서 링크드 리스트(Linked List)를 사용하여 설계되었다. 이러한 형태로 데이터를 입출력할 수 있는 라이브러리를 구현하였으며 솔버와 후처리는 이를 이용하여 데이터를 저장하고 입력하도록 하였다.

### 3. 단면(Section) 생성 알고리즘

3 차원 단조 해석 결과에서 소재의 내부의 유동 및 변수를 관측하기 위해서 또는 금형과 함께 관찰하기 위해서 단면을 설정하고 이에 따라 절단하여 가시화할 수 있는 기능은 매우 필수적이다. 본 프로그램에서는 연계되어 개발된 솔버<sup>(6)</sup>에서 사용하는 4 절점, 10 절점 사면체 요소에 대하여 단면처리 알고리즘을 개발하였다. Fig. 5 에 단면처리 알고리즘이 도시되어 있다. 4 절점 사면체를 단면에 의해서 분리하면 단면에 의해 (a) 절점 1 개와 절점 3 개로 나뉘는 경우와 (b) 절점 2 개와 절점 2 개로 나뉘는 경우로 나눌 수 있다. Fig. 5 에 각각의 경우를 나타내었다. 4 면체의 요소의 4 개의 삼각형 면 중에서 단면과 교차하는 면은 삼각형과 사각형으로 나뉘게 된다. 또한 단면 상에 삼각형 면 또는 사각형 면을 생성해야 한다. 이를 위해서는 사면체 모서리와 단면의 교점계산을 수행하고 새로운 절점을 생성하여야 한다.

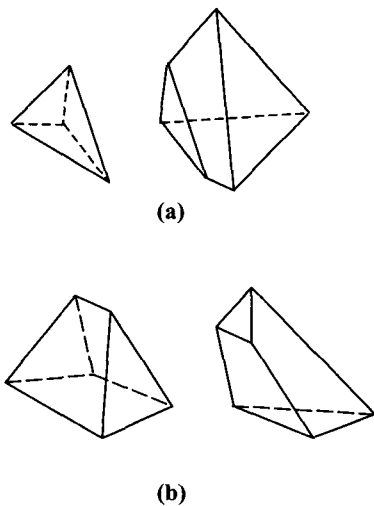


Fig. 5 Sectioning for 4-node Tetrahedron

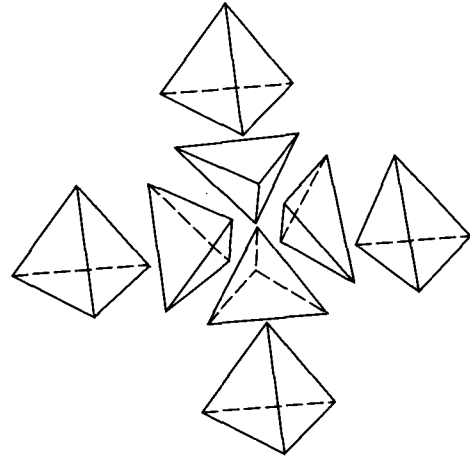


Fig. 6 Sub-Tetrahedrons for 10-node Tetrahedron

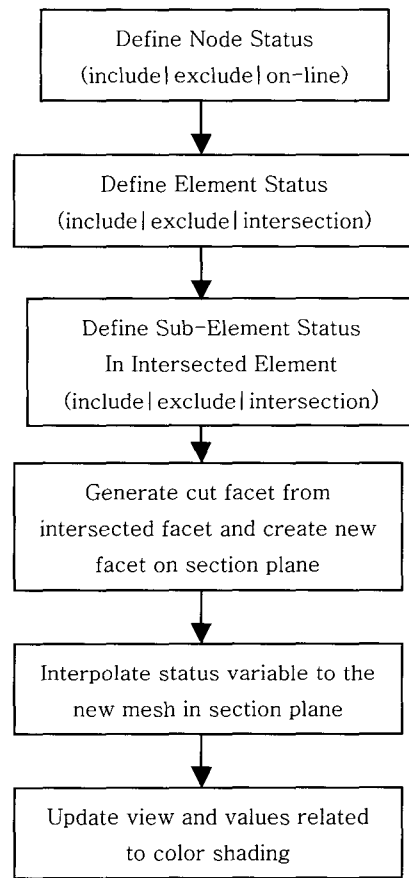
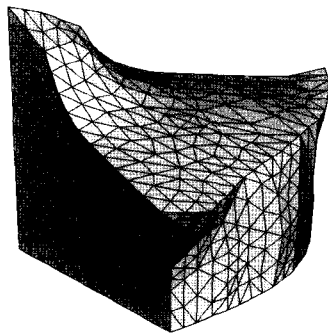


Fig. 7 Flow Diagram for Sectioning

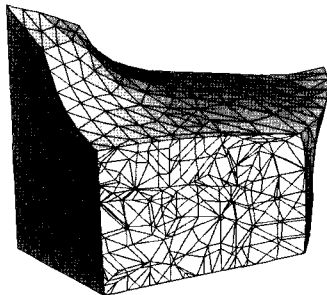
10 절점 사면체 요소를 단면처리하는 것은 보다 복잡한데 본 프로그램에서는 Fig. 6 과 같이 8 개의 4 절점 사면체 부요소로 나눈 다음 각각의

부요소에 4 절점 사면체의 단면처리 방법을 적용하여 간단히 처리하였다. Fig. 7 에 단면생성을 위한 알고리즘을 요약하였다. 단면처리를 위해서는 단면을 생성하는 작업 이외에 단면에 대해서 변수를 칼라셰이딩하는 작업도 수반된다. 미리 추출된 물체의 외부 면 중에서 단면의 가시화하는 방향에 있는 면들은 가시화하며 단면에 의해서 절단되는 면들은 절단한 후에 가시화한다. 또한 단면에 새로 생성되는 면들은 가시화하기 위해서 가시화대상 면으로 추가해야 한다.

Fig. 8 에 스파이크 형상의 단조성형 공정에서 단면형상을 가시화한 모습을 나타내었다. 금형은 4 절점 사면체 요소를 소개는 10 절점 사면체 요소를 사용하여 해석이 수행되었다. 단면생성 작업은 Fig. 9 와 같은 단면설정을 위한 대화상자를 이용하여 수행되는데 XY, YZ, ZX 평면에서는 슬라이드바를 이용하여 용이하게 단면설정을 할 수 있도록 하였으며 임의의 방향과 위치에서도 단면설정을 할 수 있도록 하였다.



(a) before sectioning



(b) after sectioning

Fig. 8 Generated Section by Developed Algorithm

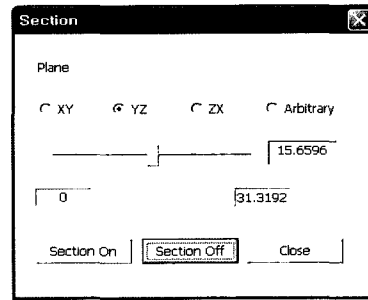


Fig. 9 Dialogue for Defining Section

#### 4. 유동추적 알고리즘

단조공정에서 소재의 유동추적은 성공적인 공정설계에 큰 역할을 담당한다. 본 연구에서는 표면절점의 이동을 추적하는 기능과 소재내부에 설정한 평면이 변형에 따라 변화해 가는 모습을 추적하는 유동평면 추적기능을 개발하였다.

먼저 표면절점 추적기능을 살펴본다. 특정 시점에서 절점들을 선택하게 되면 변형이 진전됨에 따라 이 절점들을 추적하게 된다. 요소재생성이 수행되지 않으면 절점들의 고유번호에 의해서 용이하게 추적된다. 그러나 요소재생성이 수행되면 표면 메시가 변경되므로 요소재생성전의 절점 위치에서 새로 생성된 메시평면으로 가장 근거리로 투영하여 절점의 새로운 위치를 추적하도록 하였다. 절점은 표면 위의 어떤 면상의 한 점으로 투영될 것이므로 절점이 속한 면과 국부좌표계를 구하고 다음 요소재생성까지 이를 이용하여 추적한다. 요소재생성이 발생할 때마다 이러한 과정을 반복한다. 이러한 알고리즘은 나중 시점의 상태에서 앞의 시점으로 역추적하는 경우에도 동일하게 적용될 수 있다.

Fig. 10 에 원 기둥형상의 소재를 단조성형한 경우에 대한 표면 절점들의 추적과정의 예를 나타내었다. Fig. 10(a)에서 선택된 절점들은 Fig. 10(b)에서 요소재생성이 수행되기 직전까지 절점의 고유번호에 의해서 추적되었다. Fig. 10(c)는 요소재생성이 수행된 후인데 절점들이 새로운 표면 위에서 Fig. 10(b)에 비교하여 거의 동일한 위치에서 투영되어 추적된 것을 확인할 수 있다. Fig. 10(d)에서 요소재생성 후에 절점이 정확하게 추적되는 것을 확인할 수 있다.

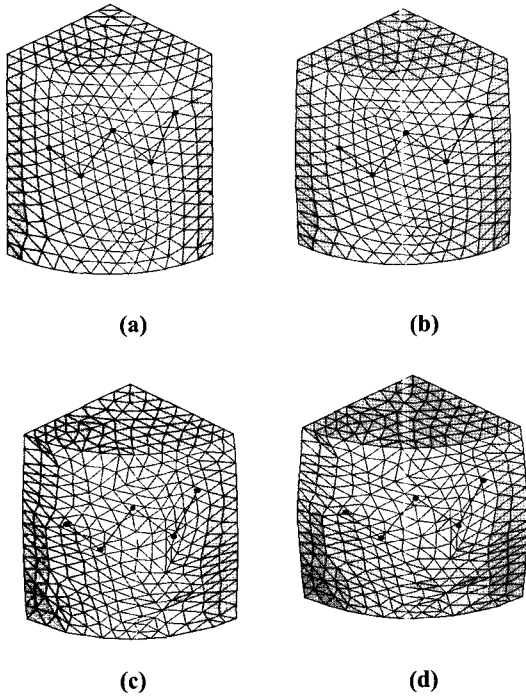


Fig. 10 Particle Tracing in Cylindrical Block Forging

또한 유동평면 추적기능을 개발하였다. Fig. 11에 추적 알고리즘을 정리하여 도시하였다. 임의의 시점에서 소재 내부에 평면을 설정하고 일정한 간격으로 그물망을 구성한다. 소재가 변형함에 따라 그물망은 변화하면서 소재의 흐름을 시각적으로 판단하기 용이하게 해준다. 그물망은 소재 내부에 생성되므로 그물망을 구성하는 점들은 입방체 요소 내부에 존재하게 된다. 따라서 추적을 하기 위해서는 그 점이 속한 입방체와 그 점에 해당하는 요소내에서의 국부좌표를 계산해야 한다. 요소재생성이 수행되지 않으면 점이 소속된 입방체 고유번호와 국부좌표로 추적한다. 그러나 요소재생성이 수행되면 요소들이 완전히 새로 생성되므로 그 점이 속한 입방체와 그 점의 좌표를 나타내는 국부좌표를 다시 계산한 다음 추적에 사용한다. 이러한 알고리즘은 역추적시에도 동일하게 적용할 수 있다.

Fig. 12는 스파이더 형상의 제품을 단조해석한 것에 대하여 유동평면을 추적하는 과정을 나타내었다. Fig. 12(a)는 성형 전 시점에서 설정된 유동평면을 보여준다. Fig. 12(b)에서는 유동평면이 점차 변형되기 시작하고 있으며 공정이 더 진행된 Fig. 12(c)에서는 유동평면이 많이 뒤틀어지는

것을 확인할 수 있다. 추적과정에서 소재는 투명도를 부여하여 내부의 유동추적면이 보일 수 있도록 하였다.

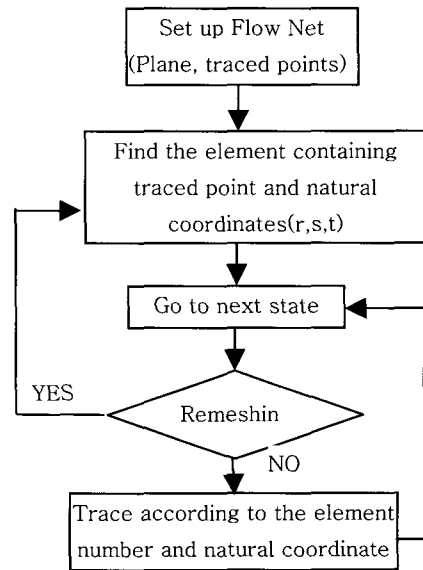


Fig. 11 Algorithm for Flow Net

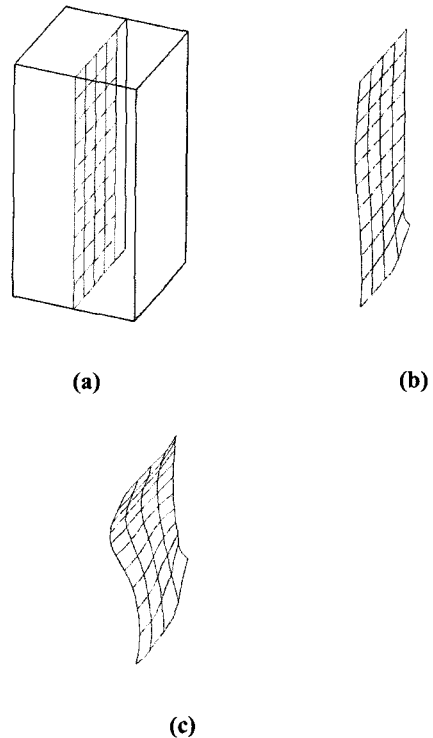


Fig. 12 Flow Net of Spider Forging

## 5. 결론

3 차원 단조공정을 유한요소법에 의하여 해석하고 실제 설계에 활용하기 위해서는 효율적이고 신뢰성 있는 3 차원 단조해석기 뿐만 아니라 생성된 데이터를 가시화하여 소재의 유동 및 변형 상태 또는 금형에 걸리는 압력 등을 효과적으로 검토하게 할 수 있는 후처리가 필수적이다.

본 연구에서는 3 차원 단조해석결과를 가시화할 수 있는 후처리를 개발하였다. 소재 및 금형이 4 절점사면체 요소나 10 절점 사면체 요소로 해석된 경우를 처리할 수 있도록 개발되었으며 3 차원 단조해석결과를 효율적으로 후처리할 수 있는 데이터 구조를 제안하였다. 또한 어느 시뮬레이터라도 용이하게 연결할 수 있도록 단조공정에 적합한 데이터 구조를 가진 전용 바이너리 입출력 라이브러리를 사용하여 개발되었다. 특히 단면 생성 및 재료유동 추적 기능에 대한 알고리즘을 개발하여 재료의 유동을 보다 정확히 검토할 수 있도록 하였다.

개발된 후처리는 많은 시험작업을 거쳐 신뢰성을 향상시켰으며, 제안된 알고리즘이 효과적으로 구현되었음을 입증하였다.

## 참고 문헌

- (1) SFTC, 2002, "DEFORM 매뉴얼".
- (2) 큐빅테크, 2002, "AFDEX 매뉴얼".
- (3) 광대영, 천재승, 김수영, 이근안, 임용택, 2000, "PC 기반 소성가공 공정 성형해석 시스템 개발"
- (4) V. Vazquez, T.Altan, 2000, "New concept in die design- physical and computer modeling applications", J. Mat. Processing Tech., 98, pp. 212~223.
- (5) H.Kim, F.Sunami, N.Yamanaka, 2000, "Computer simulation and tool manufacturing technology which support net shape manufacturing in forging industry", J. Japan Society for Tech. of Plasticity, 41, 477, October, pp. 1014~1020.
- (6) A.N. Bramley, D.J.Mynors, 2000, "The use of forging simulation tools", Mat. And Design, vol. 21, pp. 279~286.
- (7) S.I.Oh, W.T.Wu, K.Arimoto, 2001, "Recent development in process simulation for bulk forming processes", J. Mat. Processing Tech., 111, pp. 2~9.
- (8) G.Li, J.T.Jinn, W.T.Wu, S.I.Oh, 2001, "Recent development and applications of three-dimensional finite element modeling in bulk forming processes", J. Mat. Processing Tech., Vol. 113, pp. 40~45.
- (9) 박철현, 이석렬, 양동열, 김용환, 정완진, 박용복, 최석우, 배명환, 주정중, 2002, "3 차원 단조 해석 시스템의 개발 및 적용," 한국소성가공학회 춘계학술대회, pp. 145~148.
- (10) Microsoft, Visual C++ 6.0, 2002.
- (11) R.S.Wright et al., 2000, OpenGL super bible, 인포북.
- (12) D.R. Musser et al., 2002, STL 튜토리얼 레퍼런스 가이드, 인포북.