대변형 해석에서 평활화를 이용한 사면체 요소망의 재조성

권기환*• 채수원**• 신상엽 ***

(2000 년 3 월 20 일 접수)

Tetrahedral Mesh Rezoning by Smoothing for Large Deformation Analysis

Gi-Hwan Kwon, Soo-Won Chae and Sang-Youp Synn

Key Words : Rezoning (요소망 재조성), Remeshing(요소망 재구성), Constrained Laplacian Smoothing(구속적 Laplacian 평활화), Tetrahedral Mesh(사면체 요소망).

Abstract

The remeshing is a method to replace a distorted mesh by a new mesh without interrupting the finite element calculation. The remeshing procedure in this paper refers to the rezoning, for which a smoothing process is developed to alleviate the distortions of mesh. In the paper, an automatic finite element rezoning system with tetrahedral elements for large deformation analysis has been developed. Our smoothing process is composed of two steps, a surface smoothing and a volume smoothing. In the surface smoothing, checking the dihedral angle and projection on surface patch reduced the change of shape and nodes penetrating die. The constrained Laplacian smoothing has been employed for the volume smoothing process. The state variables are mapped from old mesh to new mesh by using volume coordinates within a tetrahedral element. All these procedures have been linked to the NIKE3D program. As illustrated in the examples the overall strategy ensures a robust and efficient rezoning scheme for finite element simulation of metal-forming processes.

1. 서 론

단조, 압출 등과 같은 대변형 가공에서 공정 설계자는 최종 제품을 기초로 하여 설계를 시작하게 된다. 이때 공정 순서와 각 공정에서의 형상의 결정은 경험과 시행착오를 통해서 이루어지기 때문에 금형의 설계와 수정에 많은 노력과 경비가 소요된다. 따라서 변형과정에 대한 정확한 정보, 즉 각 공정에서의 성형 하중이나 변형 분포 등을 미리 알 수 있다면 이는 공정설계와 금형 설계를 최적화하는데 유용하게 사용될 수 있다. 그러나 변형량이 대단히 크고, 기하적 형상이 복잡한 성형공정에서의 성형하중 및 변형분포는 이론적으로 구하기가 거의 불가능하다. 최근 들어 비선형 대변형 유한요소법이 발달함에 따라 복잡한 형상의 성형공정에 대한 해석이 가능해졌다. 그러나 단조 공정과 같은 대변형을 유한요소법으로 해석할 때 나타나는 근본적인 어려움은 초기의 단순한 소재 형상이 재료의 변형에 의해 복잡한 형상으로 변화하게 되고, 국부적으로 집중된 변형에 의한 요소의 퇴화 현상이 발생함으로써 더 이상 해석을 수행할 수 없거나 계산상의 커다란 오차가 발생한다는 점이다. 이러한 경우 해석의 신뢰성을 높이고 원활한 해석 진행을 위하여 해석을 중단하고 변형된 형상에 따라 요소망을 재구성하고 다시 계산을 수행하여야 한다. 이러한 일련의 과정을 요소망 재구성 과정이라고 한다.[1~5]

요소망 재구성은 다음과 같은 세 과정으로 이루어진다. 첫 번째는 해석이 진행되는 중에 요소망 재구성의 필요 유무 즉, 재구성 시점을 결정하는 과정이다. 이 과정에서는 적절한 요소망 재구성 판별 기준이 필요하다. 두 번째는 요소망 재구성이 요구되었을 때, 이전 요소망의 기하학적인 정보들로부터 새로운 요소망을 생성하는 작업이다. 마지막으로 새로운 요소망이 구성된 후, 이전의 요소망에서 얻어진 각종 상태변수의 값들을 새로운 요소망으로 사상시키는 과정이다. 이와 같은 요소망 재구성 과정을 일반적인 3 차원 해석에서

* 회원, 고려대학교 대학원
** 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail : swchae@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3367 FAX : (02)926-9441
**** 현대중공업

수작업으로 수행하는 것은 거의 불가능하므로 자동화되어야 한다.

요소망 재구성에 대한 지금까지의 연구를 살펴보면, 초기에는 주로 2 차원 해석에서 Cheng 등[1]이 단조해석에 요소망 재구성 기법을 제안하고 사각형 요소를 사용하여 탄소성 재료에 대해 후방 및 전방 압출의 해석에 적용하였다. 그 후 Habraken 등[2]은 요소망 재구성 판별기준에 대한 연구와 함께 2 차원 자동 요소망 생성기(MAIL2D)를 이용하여 탄소성 및 점-탄소성 해석을 실시하였다. Wu 등[3]은 사각형 요소를 사용한 2 차원 요소망 재구성 모듈을 개발하였다. 국내에서는 이낙규 등[4]이 사각형 요소를 사용한 격자 재구성법을 제안하였고, 곽대용 등[6]과 전만수 등[7]도 사각형 요소 생성기를 개발하고 이를 이용하여 요소망을 재구성하는 기법과 모듈을 개발한 바 있다. 3 차원 요소망 재구성 기능을 포함하는 FEM 패키지로는 사면체 요소를 사용하는 DEFORM 이 있으며, 이영규 등[8]은 마스터 그리드(master grid)를 이용하여 육면체 요소망을 구성하고, 이를 토대로 3 차원 요소망 재구성 시스템을 개발하였다. 그러나, 이들의 연구는 강소성 재료의 대변형 해석에 적합하게 되어 있다. 이와 더불어 보다 적절한 요소망 재구성 시점을 결정하기 위한 판별 기준에 대하여 크게 두 가지로 연구되고 있다. 첫째는 요소의 기하학적 형상의 변형 정도를 기준으로 한 것으로서, 요소의 면적, 절점 각, 세장비, 등과 같이 변형 정도를 정량화 하는 방법[2]과 등매개변수(isoparmetric) 좌표계와 실제(real) 좌표계 사이의 역사상(inverse mapping) 관계를 이용하는 방법,[9] 음의 Jacobian, 금형의 간섭량의 검사[3] 등을 들 수 있다. 이들은 대체로 계산이 간단하여 사용이 편리한 장점이 있으나, 재구성 기준이 점진적으로 변하여 재구성 시점이 임의적이며 또한 어느 한 가지 기준을 사용하기 보다는 여러 기준을 동시에 사용하여야 한다. 둘째는 유한요소 해석결과에 대한 오차를 기준으로 하는 방법으로서, 원래 선형탄성해석에서 최적 요소망을 구성하기 위한 방법으로 사용되었으나 최근들어 대변형 해석에서 요소망 재구성 기준으로 사용하기 시작하였다. 이 방법에는 Cheng[1]의 요소와 인접요소의 유효 변형률(effective strain) 차이의 오차, Habraken 등[2]의 에너지 놈(energy norm)형태의 오차, 채수원 등[10,11]의 변형률 속도의 오차를 이용한 일률 놈(power norm) 형태의 오차 등을 들 수 있다.

본 논문에서는 탄소성 재료를 포함할 수 있도록 공용 프로그램인 NIKE3D 를 사용하여 3 차원 대변형 해석에 적용할 수 있는 요소망 재조성(rezoning) 시스템을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 NIKE3D 에 요소망 재조성 모듈을 추가함으로써 대변형 3 차원 비선형 유한요소 프로그램을 완성하였다.

본 논문에서 사용하는 3 차원 요소는 복잡한 형상에 대하여 요소망 생성과 재구성이 용이한 사면체가 사용되었다. NIKE3D 에서는 3 차원 솔리드(solid)요소로서 8 절점 육면체요소만을 사용할 수 있으므로 본 논문에서는 이를 사면체 요소로 변환하여 사용하였다. 해석 도중 요소망을 재구성하는 경우 요소 수와 절점 수 등이 모두 바뀌게 되므로 이를 해석하기 위해서는 NIKE3D 전반에 걸쳐 자료 구조를 다시 프로그램해야 하는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 요소 수와 절점 수는 변화시키지 않고 왜곡된 요소망의 형상을 개선할 수 있는 요소망 재조성법을 사용하였다. 이는 NIKE3D 의 자료구조를 크게 변화시키지 않고도 비교적 용이하게 요소망 재조성 시스템을 개발할 수 있는 장점을 가진다. 왜곡된 요소망을 개선하기 위해서는 Laplacian 평활화법을 기본적으로 사용하였다. 그러나 3 차원 문제에 일반적인 Laplacian 평활화법을 적용하면 음의 체적이 발생할 수도 있다.[12,13] 따라서 음의 체적이 발생하지 않도록 하는 구속적 Laplacian 평활화법을 개발하여 사용하였다. 한편 재조성된 요소망으로 이전 요소망의 상태 변수들을 사상하는 방법은 재구성된 절점을 포함하는 이전 요소에 대한 체적 좌표를 이용한 보간 함수를 사용하였다. 이와 같이 개발한 요소망 재조성 모듈을 NIKE3D 에 통합하고 이를 두 가지 예제에 대해 적용하였다.

2. 요소망 재구성

요소망 재구성법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째 방법은 현재 요소망의 변형된 형상을 토대로 자동 요소망 생성기를 사용하여 전체적으로 요소망을 재구성(remeshing)하는 것이다.[1-2] 이때 국부적인 변형의 특성을 고려한 요소망 생성을 하지 않으면 현재 요소망에서 얻을 수 있는 해석의 정확도를 잃어버릴 수도 있다. 이 경우 어떤 부분에서는 부분적으로 자유도가 감소할 수도 있고, 이것은 과도강성(over-stiff) 요소를 발생시킬 수도 있다. 이와 같은 현상은 Fig. 1(b)의 점선 안에서 보는 바와 같이 비정상적인 변형 모습으로 나타날 수 있다.[1] 따라서 이 방법으로 요소망을 재구성할 경우, 재구성할 영역에 대해 요소의 밀도를 적절히 조절할 수 있어야 하며, 이러한 기능을 가진 3 차원 요소망 자동 생성기를 개발하기는 일반적으로 어려운 문제이다. 두 번째 방법은 왜곡된 요소망의 형상을 개선하기 위해 현재의 요소망에서 절점의 위치만 변화시키는 방법이다. 이러한 방법 중 대표적인 것이 평활화법으로, 본 연구에서는 Laplacian 평활화법을 기본으로 사용하였다. 일반적으로 평활화란 요소망의 형상을 개선하거나 요소의 밀도를 고르게 하기 위해 절점의 위치를 수정하는 과정을 의미한다. Fig. 1(c)는 중심축 위의

절점들을 고정하고 평활화법을 이용하여 요소망을 재구성한 것이다. 여기서 과도강성 요소 문제로 인한 찌그러짐 현상을 해결하면서 요소망을 개선할 수 있음을 알 수 있다. 또한 이 방법은 전체적인 요소망 재구성법에 비하여 계산량이 현저히 줄며 전체적으로 절점 수나 요소 수의 변화가 없으므로 자료의 크기에 변화가 없어 저장장소(memory) 크기의 변경을 요구하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 요소망을 재구성할 때 발생하는 일부 문제에 대해 개선 방법을 제공하면서도 NIKE3D 의 소스 코드를 크게 변경하지 않고 사용할 수 있는 평활화 기법을 이용하여 요소망의 품질을 개선하였다. 평활화법에는 전체 해석 영역에서 비구속 절점들의 위치를 동시에 조절하여 전체 요소망을 최적화하는 전역 평활화(global smoothing) 기법과 한 점을 둘러싸고 있는 이웃 절점들을 이용하여 한번에 하나씩 절점의 위치를 조절하는 지역 평활화(local smoothing)가 있다. 전역 평활화는 계산량 많기 때문에 주로 지역적 평활화가 사용된다.[12-14]

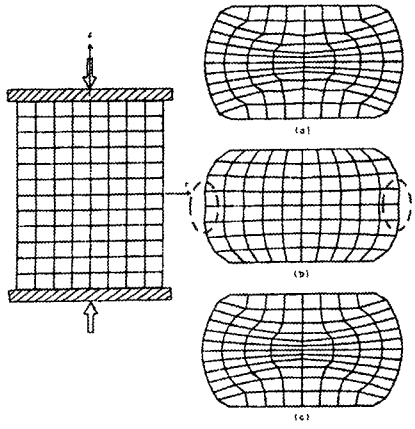


Fig. 1 An upsetting process[1]

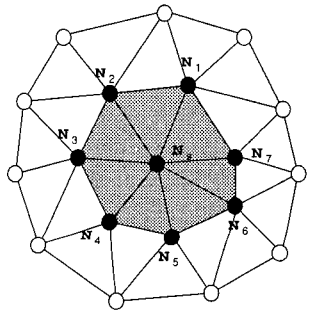


Fig. 2 Local smoothing

지역적 평활화는 평활화할 절점의 순서를 결정하고 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 평활화할 절점(N_s)과 주변 절점(N_i)들을 사용하여 평활화를 실시한다. 이것을 의사코드(pseudo-code)로 표현하면 식(1)과 같다.

For i= 1, ..., n **do**

$$N^* = smooth(N_s, N_i) \qquad (1)$$

Enddo

여기서 N_s 는 평활화될 절점, N_i 는 평활화될 절점의 주변 절점들, N^*는 평활화된 절점이다.

지역 평활화 기법에는 평활화 함수에 따라서 Laplacian 평활화[12,13]와 최적화 기법을 절점하나 하나에 적용하는 지역적 최적화 기법[13,14] 등이 있다. 최적화를 위한 목적 함수로는 Oddy 의 변형 행렬(deformation metric)이나 형상비(aspect ratio) 등을 사용한다.[14] 이와 같은 최적화 기법은 효과에 비하여 계산량이 너무 많아서 비효율적 수도 있다. 따라서 계산량에 비해 요소망의 개선 효과가 큰 Laplacian 평활화 기법이 많이 사용된다.

2.1구속적 Laplacian 평활화

Laplacian 평활화는 계산량은 적고 대부분의 경우 요소망 품질의 개선 효과도 크다. 그러나 모든 경우의 요소망에 대하여 품질의 향상을 항상 보장하지 못한다. 특히 3 차원 Laplacian 평활화에서는 음의 체적이 발생할 수도 있다.[13] 음의 체적은 해석을 불가능하게 하는 문제를 발생시킨다는 사실이 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 이 문제를 해결하기 위하여 0 또는 음의 체적이 발생하지 못하도록 적절한 제약 조건을 두어 평활화를 적용하도록 하였다. 이와 같이 개선된 Laplacian 평활화법을 의사코드 (2)에서 같이 평활화될 절점(N_s)에 적용하였다. 먼저 절점(N_s)에 대해 Laplacian 평활화를 수행하고 평활화에 의해서 갱신된 주변 요소의 체적(V^*_{adj})을 계산하여 이들 체적이 0 보다 클 경우에만 새로운 좌표로 절점을 갱신한다. 그리고 표면 절점에 대한 Laplacian 평활화를 수행할 때 내부 절점들에 의하여 표면 절점들이 내부로 파고드는 현상이 발생할 수도 있다.

For i= 1, ..., n **do**

$$N^* = \frac{1}{2}\left(N_s + \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} N_i\right) \qquad (2)$$

Calculate volumes(V^*_{adj})

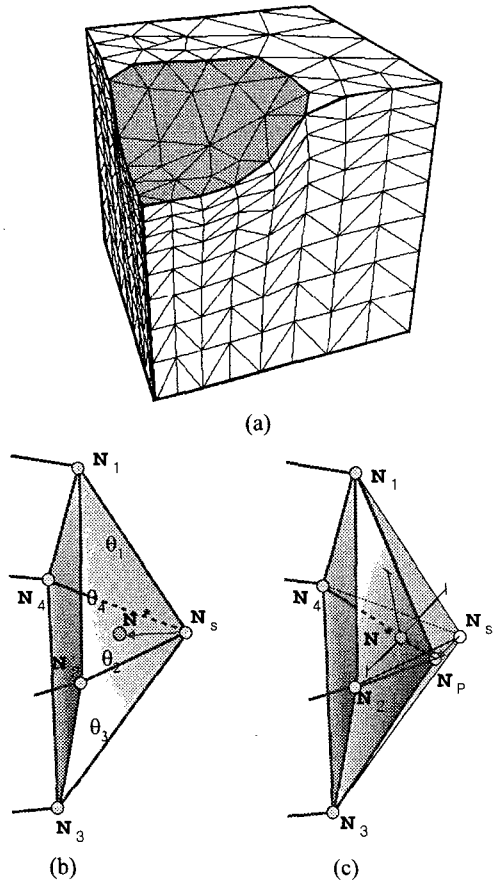
If $(V^*_{adj} > 0)\ N_s = N^*$

Enddo

따라서 이런 문제점을 해결하기 위하여 표면 절점과 내부 절점을 나누어 표면 평활화와 체적 평활화를 수행한다.

2.1.1 표면 평활화

단조 등과 같은 소성가공 공정에서 초기의 단순한 형상의 가공물은 소성변형에 의하여 원하는 형상의 제품이 된다. 이와 같은 소성가공 공정에서 가공물의 표면은 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 일반적으로 곡면을 가지게 된다. 이들 곡면 위의 절점들에 대한 Laplacian 평활화에서는 Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 평활화된 절점(N^*)이 삼각형 $N_sN_1N_2$, 삼각형 $N_sN_2N_3$, 삼각형 $N_sN_3N_4$, 삼각형 $N_sN_4N_1$ 로 이루어진 초기의 표면 밖으로 이동될 수 있다. 이렇게 되면 변형 형상과 전체 체적의 변화를 유발할 수 있다. 이와 같은 평활화에 의한 변화를 줄이기 위하여 Fig. 3(c)에서 보는 바와 같이 평활화된 절점(N^*)을 초기의 표면 위로 투영하여 새로운 개선점(N_p)을 찾도록 표면에서의 Laplacian 평활화법을 개선하였다.



(a) (b) (c)

Fig. 3 Surface smoothing

본 논문에서 사용한 표면에 대한 Laplacian 평활화는 다음과 같은 과정으로 이루어진다. 먼저 표면 절점들이 내부 절점들에 의하여 내부로 파고드는 현상을 막기위해 Fig. 3(a)와 같은 임의의 형상의 가공물의 위상 정보를 이용하여 내부 절점을 제외한 표면 절점들로 이루어진 위상 정보를 구축한다. 이들 표면 절점의 위상 정보와 기하 정보를 이용하여 평활화를 수행한다. 표면의 모서리 형상을 유지하기 위해 Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 평활화될 절점(N_s)과 주변 절점(N_i)들을 잇는 선분들에서 만나는 두면이 이루는 각도(θ_i)들을 검사하고, 이들 2 면각(dihedral angle)들이 허용각(θ_a)보다 작을 때는 평활화를 수행하고 그렇지 않을 때는 절점(N_s)을 평활화 대상에서 제외시킨다. 그러나 허용각(θ_a)이내의 곡면 상의 절점에 대한 표면 평활화에서 전술해 듯이 평활화된 절점이 초기의 표면 밖으로 이동될 수 있다. 이와 같은 현상이 발생하면 표면 형상의 왜곡뿐만 아니라 평활화된 절점이 다이의 표면을 침투할 수 있다. 가공물의 절점이 다이의 표면을 침투할 경우 접촉 알고리즘(contact algorithm)에 따라서 해석이 불가능하거나 다이와 가공물 사이에 작용하는 반력에 상당한 오차를 발생시킨다. 따라서 이와 같은 현상을 상당 부분 완화시키기 위해서 초기의 표면 밖에 위치한 평활화된 절점을 초기의 표면 위로 수직 투영한다. 이때 투영된 점의 위치가 초기의 표면 삼각형들의 확장된 평면 위로 투영될 수 있다. 따라서 Fig. 3(c)에서 보는 바와 같이 투영된 점의 위치가 초기 표면 삼각형 위에 있고 길이를 최소로 하는 점(N_p)으로 평활화된 절점(N^*)을 이동시킨다.

For i= 1, ..., n **do**

calculate dihedral angles(θ_i)

If ($\theta_i < \theta_a$) **then**

$$N^* = \frac{1}{2}\left(N_s + \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} N_i\right)$$

If ($N^* \in S$) **then** (3)

$N_s = N^*$

Else

find the projection point(N_p)

$N_s = N_p$

Endif

Endif

Enddo

표면 평활화를 의사코드로 표현하면 식 (3)과 같다. 식 (3)에서 S 는 평활화될 절점에 연결된 삼각형들로 이루어진 표면 패치이다.

2.1.2체적 평활화

표면 평활화가 끝나면 내부 절점에 대한 평활화를 수행한다. 이때 표면 절점들을 주변 절점으로 인식하여 평활화에 포함시킴으로써 요소망의 밀도를 유지할 수 있도록 하였다. 여기서 주의할 점은 표면 절점들의 영향을 고려함으로써 Fig. 4 에서 보는 바와 같이 내부 절점들이 영역 경계를 벗어남으로써 음의 체적이 발생할 수 있다. 또한 3 차원 평활화에서는 표면 절점을 포함하지 않는 주변 요소들을 갖는 내부 절점의 Laplacian 평활화에서도 Fig. 4 와 유사하게 평활화된 절점에 연결된 주변 요소들로 이루어진 공간을 벗어날 수도 있다. 이러한 현상이 발생하면 음의 체적이 발생할 가능성이 상당히 높다. 이를 방지하기 위하여 의사코드 (2)와 같이 구속적 Laplacian 평활화를 실행하였다. 이와 같은 평활화 기법을 이용하여 1/4 실린더에 대해 생성한 요소망을 평활화 해 보았다. Fig. 5(a)와 (b)는 평활화 전과 후에 대한 요소망의 형상을 보여주고 있다. 사면체의 형상의 품질을 평가하는 형상비로 Fig. 6 에서 보는 바와 같이 사면체의 내접구와 외접구의 반지름비(r/R ratio)를 사용하였다. 평활화에 의한 요소망 품질의 개선 효과를 보기위해 Fig. 7 에서 보는 바와 같이 평활화 전과 후의 요소망에 대한 반지름비를 비교하였다.

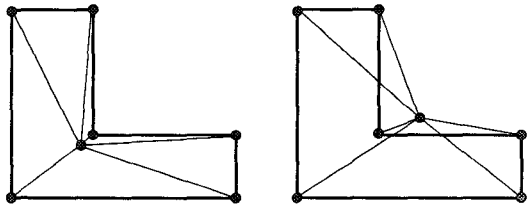
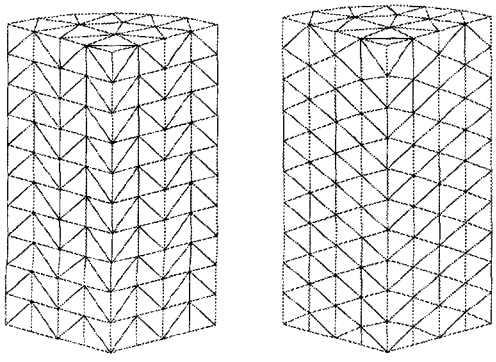


Fig. 4 Failure of Laplacian smoothing



(a) Before smoothing (b) After smoothing

Fig. 5 Mesh improvement by smoothing

Fig. 7 에서 보는 바와 같이 평활화를 사용하면 반지름비가 낮은 요소들의 품질을 개선할 수 있음을 알 수 있다.

3. 요소망 재조성 시스템

요소망을 재조성하고 재해석(restart)하려면 이전 요소망의 상태 변수를 새로 조정된 요소망으로 사상하여야 한다. 상태변수의 사상은 다음과 같은 과정으로 이루어진다. 먼저 새로 조정된 절점들에 대한 체적 좌표를 구하기 위하여, 이전 요소망에서 재조성된 절점을 포함하는 요소를 결정하고, 구요소에서 재조성된 절점의 체적 좌표를 Fig. 8 에서 보는 바와 같이 전체 체적과 부분 사면체의 체적의 비로 정의한다.

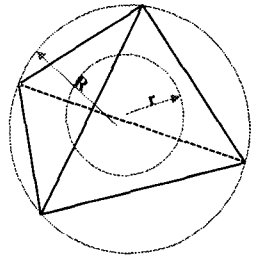


Fig. 6 r/R ratio

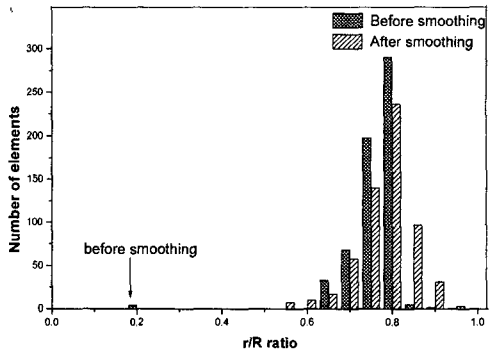
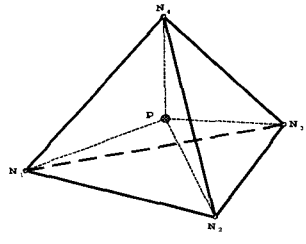


Fig. 7 The histogram of the element quality distributions



$L_1 = v_1/V$, $L_2 = v_2/V$
$L_3 = v_3/V$, $L_4 = v_4/V$

V : element$_{1234}$ volume
v_1 : element$_{243p}$ volume
v_2 : element$_{134p}$ volume
v_3 : element$_{142p}$ volume
v_4 : element$_{123p}$ volume

Fig. 8 Volume coordinates

이렇게 구하여진 체적 좌표의 합이 1 이라는 사실을 이용하여 재조성된 절점을 포함하는 구요소를 찾을 수 있다. 이와 같이 재조성된 절점의 체적 좌표와 이를 포함하는 구요소가 결정되면 식 (4)와 같이 재조성된 절점의 절점 값(X)을 계산한다.

$$X = L_1 x_1 + L_2 x_2 + L_3 x_3 + L_4 x_4 \qquad (4)$$

여기서 x_i 는 재조성된 절점을 포함하는 구요소의 절점 값이고 L_i 는 재구성된 절점의 구요소에 대한 체적 좌표이다.

보간 함수를 이용하여 재조성된 요소망으로 상태변수의 사상이 완료되면 재해석을 시도한다.

본 논문에서는 평활화 기법과 보간 함수를 이용한 사상법을 적용한 요소망 재조성 모듈 rezone.f 을 개발하고 NIKE3D 코드의 서브루틴 solve.f 에 Fig. 9 에서 보는 바와 같이 삽입(built-in)하여 요소망 재구성 시스템을 완성하였다. 또한 NIKE3D 의 입력 카드에 요소망 재구성 모듈에 필요한 정보를 제공하는 카드를 추가하였다.

NIKE3D 는 3 차원 솔리드 요소로 육면체요소만을 제공한다. 따라서 사면체 요소를 사용하기 위해서는 NIKE3D 의 육면체 요소를 변환해야 한다.[15] 본 논문에서는 NIKE3D 의 특성을 고려하여 Fig. 10 에서 보는 바와 같은 변환 방법을 사용하였다.

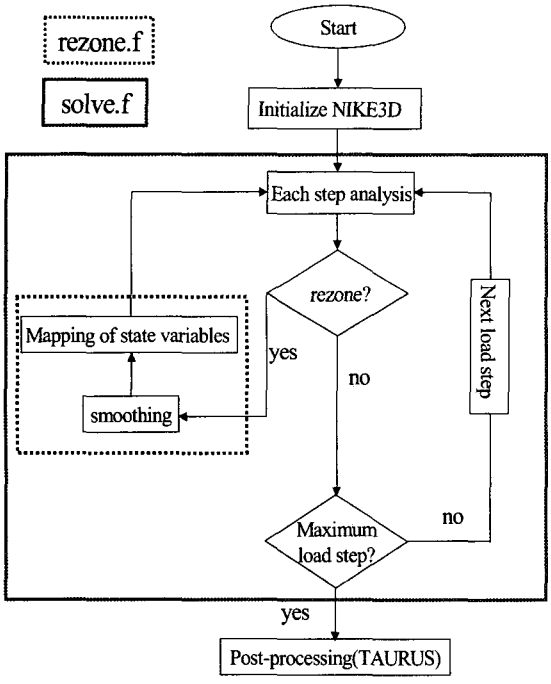


Fig. 9 Rezoning system linked with NIKE3D

3.1 해석 예

본 연구에서 개발한 요소망 재조성 시스템을 검증하기 위하여 구속 압입 공정과 크랭크 스로우 성형 공정을 해석하였다.

3.1.1 구속 압입(constrained indentation) 공정

구속 압입은 Fig. 11 에서 보는 바와 같이 다이에 변위 경계 조건을 주고 소재의 아래면을 고정시켜 해석하였다. 다이의 변위는 전체 소재 높이 만큼을 100 단계로 나누어 아래로 이동하면서 압입한다. Fig. 11 에서 1/4 단면들은 대칭면으로 경계를 주었다. 다른 두 측면은 강체 벽으로 막아서 측면으로 소재가 유동할 수 없도록 구속하였다. 이때 사용한 사면체 요소의 개수는 1982 개이며 절점의 개수는 533 개이다. 접촉면에서 정지 마찰계수는 0.3 이며 BFGS 반복법을 사용하였다. 요소망 재조성의 효과를 보기 위하여 15 단계마다 요소망 재조성을 수행하는 경우와 요소망 재조성을 하지 않는 경우를 비교하였다.

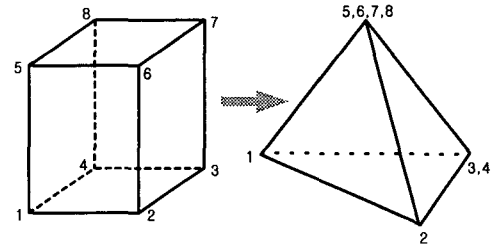


Fig. 10 Collapsing hexahedron to tetrahedron

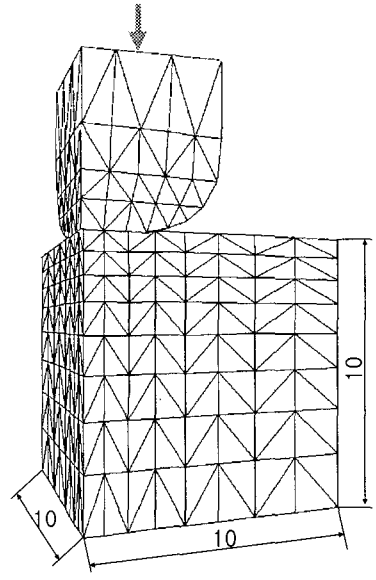


Fig. 11 Constrained indentation process

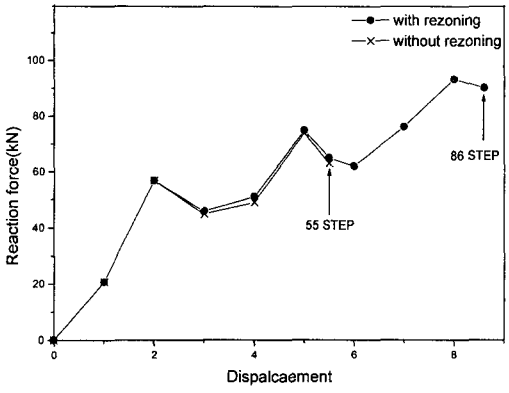
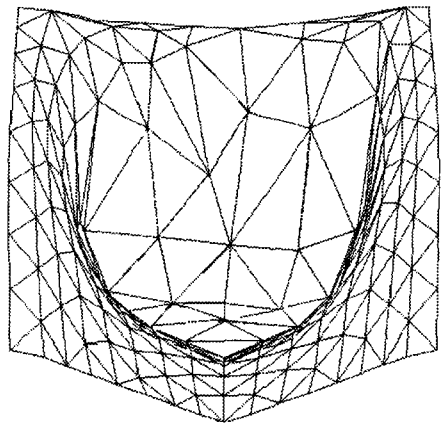
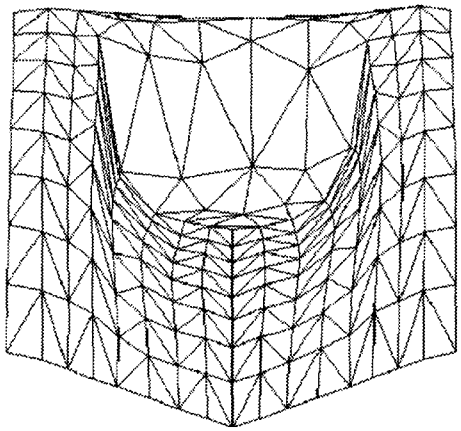


Fig. 12 The relationship between displacements and total reactions



(a) The deformed shape with rezoning at 86 step



(b) The deformed shape without rezoning at 55 step

Fig. 13 The deformed shapes of constrained indentation process at each interrupted step

해석 결과에서 하중-변위 관계는 Fig. 12 에서 보는 바와 같이 요소망 재조성을 한 경우와 요소망 재조성을 하지 않는 경우에서 비슷한 결과를 얻었다. 그러나 요소망 재조성을 실행한 경우는 Fig. 13 (a)에서 보는 바와 같이 86 단계까지 해석이 진행되지만, 요소망 재조성을 실행하지 않은 경우는 Fig. 13 (b) 에서 보는 바와 같이 55 단계에서 해석이 중단되었다. 따라서 요소망 재조성을 수행함으로써 해석이 보다 원활히 진행됨을 알 수 있다.

3.1.2 크랭크 스로우 성형 공정

크랭크 스로우는 선박용 엔진에 사용되는 부품으로, 그 성형 공정의 해석은 Fig. 14 에서 보는 바와 같이 1/4 크랭크 스로우 소재와 상하부 다이로 이루어졌다. 여기서 상부 다이에 변위경계 조건을 주고 하부 다이에 속한 모든 절점들의 자유도를 전방향에 대해서 구속하였다. 변위경계조건을 총 300 단계 동안 Z 축으로 -900 만큼 이동하도록 주었다. 사면체 요소 수는 2761 개이고, 쉘 요소 수는 238 이고, 절점 수는 897 개이다. 접촉면에서 정지 마찰 계수는 0.3 이며 BFGS 반복법을 사용하였다. 요소망 재조성 효과를 보기 위하여 100 단계마다 요소망 재조성을 수행하는 경우와 요소망 재조성을 하지 않는 경우를 비교하였다. 해석 결과에서 하중-변위 관계는 Fig. 15 에서 보는 바와 같이 요소망 재조성을 실행하는 경우가 요소망 재조성을 하지 않는 경우보다 반력이 약간씩 증가되는 경향을 얻었다.

한편 요소망 재조성 후 체적 좌표를 이용한 상태 변수들의 사상이 타당한지를 확인하기 위해서 크랭크 스로우 단조 공정 중 100 단계에서 요소망 재조성을 실행하기 전과 실행한 후의 σ_z 선도를 Fig. 16 에서 비교해 보았다.

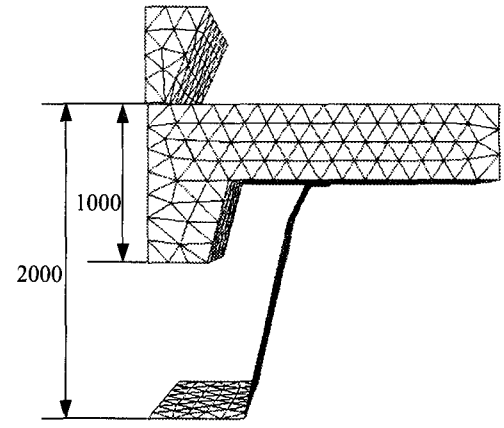


Fig. 14 Crack throw process

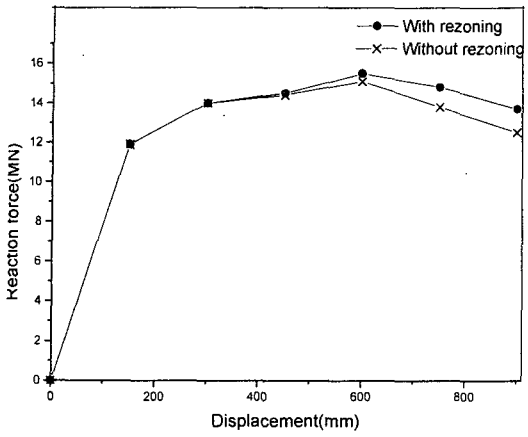
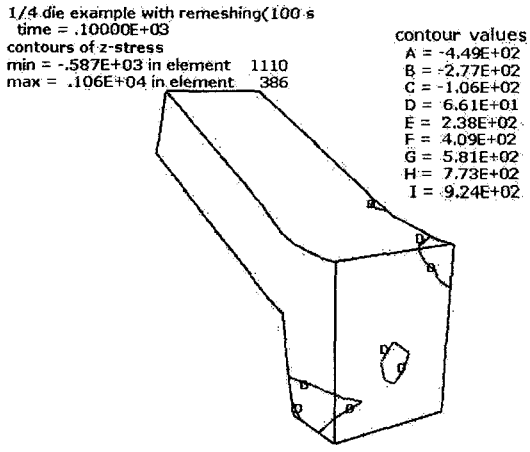
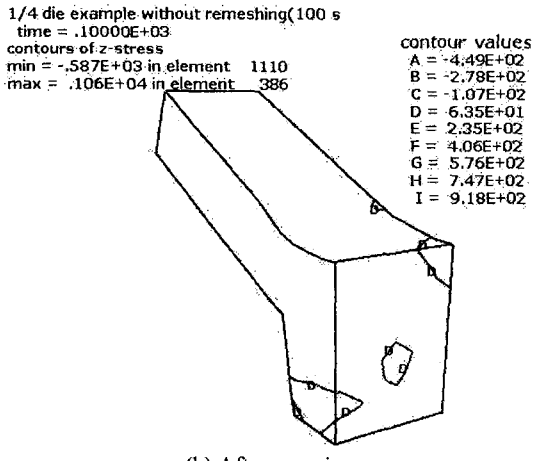


Fig. 15 The relationship between displacements and total reactions

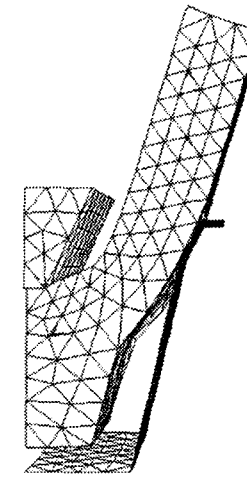


(a) Before rezoning

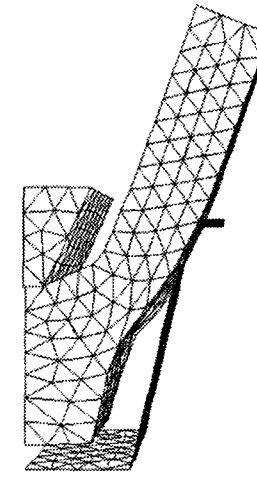


(b) After rezoning

Fig. 16 The σ_z contours of 100 step crank throw forming process



(a) With rezoning



(b) Without rezoning

Fig. 17 The deformed shapes of crank throw forming process at last step

Fig. 16 에서 보는 바와 같이 요소망 재조성을 실행하기 전과 실행한 후의 σ_z 선도가 거의 일치한다. 이것은 체적 좌표를 이용한 보간 함수로써 상태변수 값들을 사상하는 것이 4 절점 사면체에서는 타당하다는 것을 알 수 있다. Fig. 17 은 크랭크스로우 성형 공정의 마지막 단계에서의 성형된 형상을 보여주고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 평활화 기법을 이용한 요소망 재조성 모듈을 개발하고 이를 NIKE3D 에 연결하였다.

본 논문에서 요소망 재구성을 위하여 구속적 Laplacian 평활화를 사용함으로써 요소망의 품질이 개선됨을 알 수 있다. 또한 구속적 Laplacian 평활화는 3 차원 Laplacian 평활화에서 발생할 수 있는 음의 체적 문제를 해결하는 하나의 방법임을 알 수 있다. 표면 평활화에서는 표면 절점들만을 고려함으로써 내부 절점들에 의한 체적 변화와 형상의 왜곡을 줄일 수 있고 곡면에서의 표면 평활화의 경우 평활화된 절점의 초기의 표면으로 투영함으로써 가공물의 절점이 다이 내부로 침투하는 현상을 완화시키는 하나의 방편임을 알 수 있다. 이와 같이 요소망 재조성 모듈을 적용한 NIKE3D 의 3 차원 예제들의 해석 결과들에서 체적 좌표를 사용한 보간법에 의한 사상이 타당함을 알 수 있고, 구속적 Laplacian 평활화법을 사용한 요소망 재구성 모듈이 대변형 해석에서 격자 퇴화에 의한 해석의 중단 현상을 완화시키고 수렴성을 높이는 것을 알 수 있다.

본 논문에서 제안한 평활화를 이용한 요소망 재조정법은 요소망 재구성법에 비해 부분적인 과도강성 요소 문제를 어느 정도 해결할 수는 있으나, 일반적인 요소망의 재구성 문제에 모두 적용할 수는 없다. 따라서 부분적 과도강성 문제를 해결하면서도 보다 일반적인 문제에 적용 가능한 요소망의 재구성법에 대한 연구가 계속되어져야 할 것이다.

참고문헌

(1) Cheng, J.H., 1988, "Automatic Adaptive Remeshing for Finite Element Simulation of Forming Processes," *Int. J. Numer. Methods Engng.*, Vol. 26, pp. 1~18.

(2) Habraken, A.M. and Cescotto, S., 1990, "An Automatic Remeshing Technique for Finite Element Simulation of Forming processes," *Int. J. Numer. Methods Engng.*, Vol. 30, pp. 1503~1525.

(3) Wu, W.T., 1990, "Automated Mesh Generation for Forming Simulation," Ph. D. Dissertation, The Ohio State Univ.

(4) 이낙규, 윤정호, 양동열, 1989, "강소성 유한요소법을 이용한 냉간단조 금형 및 가공 공정해석," 대한기계학회논문집, 제 13 권, 제 6 호, pp. 1070~ 1081.

(5) 권기환, 김형일, 채수원, 신상엽, 1999, "NIKE3D 를 이용한 요소망 재구성 시스템," 대한기계학회 추계학술대회 논문집(A), pp. 407~412.

(6) 곽대영, 임용택, 1998, "격자 재구성을 위한 사각형요소 자동 생성기 개발," 대한기계학회 A 권, 제 22 권, 제 9 호, pp. 1639~1653.

(7) Joun, M.S. and Lee, M.C., 1997, " Quadrilateral Finite Element Generation and Mesh Quality Control for Metal Forming Simulation," *Int. J. Numer. Methods Engng.*, Vol. 40, pp. 4059~4075.

(8) 이영규, 양동열, 1997, "마스터 그리드를 이용한 자동 격자구성법과 소성가공공정해석에의 응용," 대한기계학회 추계학술대회논문집, pp. 884~888.

(9) Yang, H.T.Y., Heinstein, M., and Shin, J.M., 1989, " Adaptive 2D Finite Element Simulation of Metal Forming Processes," *Int. J. Numer. Methods Engng.*, Vol. 28, pp. 1409~1428.

(10) Chae, S.W., Cho, H.G. and Park, J.J., 1994, "Error Estimate as a Remeshing Criterion for Finite Element Analysis of Forming Processes," *Proc. of Pacific Conference on Manufacturing, Jakarta*, pp. 427~434.

(11) 조해규, 채수원, 박종진, 1996, "유한요소해석에서 요소망의 재구성을 위한 기준," 대한정밀공학회 제 13 권, 제 10 호, pp. 78~87.

(12) David A. Field, 1988, "Laplacian Smoothing and Delaunay Triangulations," *Communication in Applied Numerical Methods*, Vol. 4, pp. 709~712.

(13) Parthasarathy, V.N., 1991, " A Constrained Optimization Approach to Finite Element Mesh Smoothing," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 9, pp. 309~320.

(14) Scoott A. Canann, Michael B. Stephenson and Ted Blacker, 1993, "Optismoothing: An Optimization-Driven Approach to Mesh Smoothing," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 13, pp. 185~190.

(15) Bradley N. Maker, 1991, "NIKE3D User's Manual," LLNL, UCRL-MA-105268 Methods Development Group Mechanical Engineering.