

## 셸 유한 요소 모델의 라운딩 기능 개발

이원경\*, 이상현\*\*, 인정제\*\*\*

### Rounding Operations on Shell Meshes

Lee, W. K.\*, Lee, S. H.\*\* and Yin, J. J.\*\*\*

#### ABSTRACT

In this paper, we propose rounding operations on shell meshes, which give a constant or variable radius of rounding directly to sharp edges on a shell mesh. The rolling-ball methods for freeform surface rounding are introduced to devise the algorithms for these operations. Our algorithms consists of three steps as follows: detecting sharp edges, generating a rolling-ball surface contacting with two face groups adjacent to the sharp edges, and then replacing the rounding area of the original mesh with the mesh generated on the rolling-ball surface. In addition, this paper shows their application to the area of stamping die design. These operations enable CAE engineers to directly change the meshes of stamping tools without modification of CAD models for dies and regeneration of their meshes.

**Key words** : Mesh, Rounding, Blending, Sheet metal forming, Stamping, Simulation, Die design

#### 1. 서 론

라운딩(rounding) 작업이란 날카로운 모서리를 부드럽게 해주는 작업으로서 블렌딩(blending) 또는 필레팅(filleting)이란 용어로도 불리워지고 있으며 CAD/CAM의 3차원 곡면이나 솔리드 모델링 관련 분야에서 오랫동안 주요한 연구 과제가 되어 왔다. 그것은 라운딩 작업이 제품의 안전성, 가공성 및 심미적인 관점에서 매우 중요하여 설계시 필수적으로 자주 사용되는 반면, CAD 시스템 개발시 이 작업을 구현하고자 할 경우 기하학적인 또는 위상학적인 문제의 해결이 그렇게 용이하지 않다는데 있다. 라운딩 곡면을 수학적으로 표현하기 위하여 Holmström과 Laakko<sup>[1]</sup>와 Martin<sup>[2]</sup>은 원통면과 같은 해석적인 곡면을 제안하였다. 그러나 라운딩 작업에 해석적인 곡면을 사용하게 되면 라운딩 곡면의 유형이 제한되는 단점을 가지게 된다. Rossignac과 Requicha<sup>[3]</sup>와 Rockwood와 Owen<sup>[4]</sup>은 라운딩 곡면

의 형상을 자유 곡면을 이용하여 나타내는 방법을 제안하였다. Choi와 Ju<sup>[5]</sup>와 Varady<sup>[6]</sup>는 두 곡면 사이에 구를 굴릴 때 구에 의해 쓸려 지나가는 곡면으로서 라운딩 곡면을 만드는 방법을 제안하였다. 또한, Chiyokura<sup>[7]</sup> 및 Harada, et al.<sup>[8]</sup>은 라운딩 곡면의 수학적 표현뿐만 아니라 라운딩 곡면을 구성하는 위상학적인 요소들을 생성시키는 방법을 동시에 제시하였다. 한편, 국내에서도 두 자유 곡면간의 교선 계산 및 라운딩 곡면 생성<sup>[9]</sup>, 비매개변수 곡면에 대한 라운딩<sup>[10]</sup>, z-map 곡면에 대한 라운딩<sup>[11]</sup>, 가공 데이터로 주어진 곡면에 대한 라운딩<sup>[12]</sup>, 그리고 라운딩 곡면을 Bezier 곡면으로 근사시키는 방법<sup>[13]</sup>에 대한 연구들이 다양하게 진행되어 왔다.

한편, CAD/CAE시스템을 이용한 현재의 자동차 차체 판넬용 금형 설계 및 해석 작업 과정을 살펴보면 Fig. 1에 나타난 바와 같이 크게 3단계의 과정을 반복 수행하게 된다<sup>[14,15]</sup>.

(단계 1) 설계된 금형의 CAD데이터를 바탕으로 하여 해석에 필요한 다이, 펀치 및 블랭크 홀더에 대한 메쉬(mesh)를 생성한다. 메쉬 생성 작업은 자동 메쉬 생성 기능을 갖춘 CAD시스템에서 수행될 수도 있으며, 혹은 이를 위한 전용 프로그램을 사용하여 수행할 수도 있다.

\*SIEMENS 오토모티브(주)  
\*\*중신회원, 국민대학교 자동차공학과  
\*\*\*인덕대학 기계설계과  
- 논문투고일: 2001. 1. 18  
- 심사완료일: 2001. 3. 9

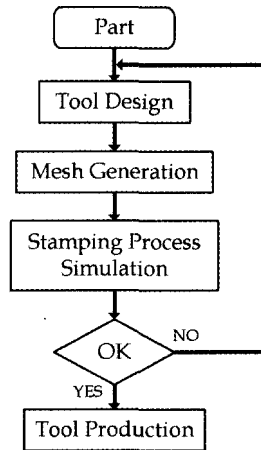


Fig. 1. Current tool design and analysis process using CAD/CAE systems.

(단계 2) 성형 공정에 대한 시뮬레이션 작업을 수행한다. 메쉬 생성이 끝나면, 작업에 필요한 공정 변수들을 설정하고, CAE 시스템을 사용하여 시뮬레이션 하게 된다.

(단계 3) 작업 조건 및 금형 형상을 수정한다. 성형 완료 후 변형률 분포 등의 해석 결과를 토대로 성형성을 판단하고, 파단 등과 같은 문제가 발생하면 공정 변수를 재 설정하거나, 필요한 경우 CAD 모델을 수정하게 된다. 이때, 금형의 주된 수정 부분은 드로우 비드나 다이 건부(die shoulder)이나 드로우 비드는 해석시 등가의 외력 모델로 대치되므로 형상 수정은 주로 다이 건부의 라운드 값을 변화시키는 작업이 된다.

이와 같이 다이 건부의 라운드 값을 국부적으로 변경하기 위해서는 CAD 시스템을 사용하여 CAD 모델을 수정하는 작업이 필요하다. 또한, 차체 판넬에 대한 CAD 모델에 라운드 처리를 완전히 하지 않아서 성형성 해석을 위해서 먼저 라운드 작업을 수행해야 하는 경우도 있다. 그러나, 일반적으로 CAE 엔지니어가 CAE 뿐만 아니라 CATIA와 같은 복잡한 CAD 시스템까지 잘 다룰 수 있는 경우는 드물기 때문에 CAD 작업자에게 협조 의뢰를 요청하는 사례가 빈번히 일어나며, 또한 CAD 모델을 수정한다 하더라도 그로부터 유한 요소들 다시 생성하는 데 많은 시간을 소모해야 한다.

따라서, 만일 셸 메쉬(shell mesh)상에서 직접 라운드 작업을 제공할 수 있다면 CAE 엔지니어가 해석에 필요한 메쉬 모델을 직접 수정하여 사용할 수 있으며, 따라서 인력 및 장비의 절약과 설계 및 해석 사이클 시간의 단축을 가져올 수 있을 것이다. 즉, Fig. 2에

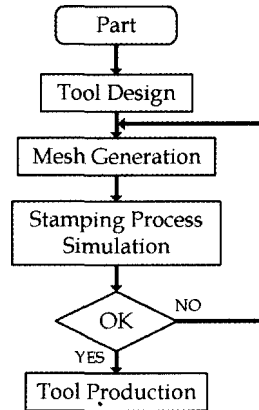


Fig. 2. New tool design and analysis process using the direct mesh modification capability

나타난 것과 같이 기존의 CAD 시스템 상에서의 작업을 생략시켜 기존의 3단계 설계/해석 사이클을 메쉬 수정 및 해석의 2단계로 단축시킬 수 있게 될 것이다.

이러한 현실적인 필요성에 부응하기 위하여 최근 셸 메쉬(shell mesh)상에서 직접 라운드 작업을 수행하는 연구들이 진행되어 왔으며, 일부 상용 성형 해석 프로그램에서는 이러한 기능이 Auto-Filleting Function이라는 이름으로 제공되기 시작하고 있으나<sup>16)</sup>, 현재까지 이에 대한 구체적인 알고리즘 등이 논문으로 출판된 것은 아직 발견하지 못하였다.

이에 본 논문에서는 자유 곡면상의 모서리 라운드 작업에 상응하는 셸 메쉬상의 모서리 라운드 작업의 알고리즘을 제시하고자 한다. 라운드 작업은 일정 반경과 가변 반경 라운드를 모두 포함하며, Choi<sup>17)</sup>가 제안한 rolling-ball method를 바탕으로 구현되었다. 또한, 본 라운드 작업을 박판 성형 공정을 위한 스탬핑 금형 설계에 응용한 예를 보이도록 하겠다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 셸 메쉬상의 모서리 라운드 작업을 구현하기 위한 전체적인 알고리즘을 소개하며, 제3장에서는 세부 알고리즘을 설명하도록 하겠다. 제4장에서는 이미 라운드되어 있는 셸 메쉬로부터 라운드 영역을 찾는 알고리즘을 소개하도록 하겠다. 이것은 CAD 모델이 없이 실제 금형만 존재하는 경우 이를 측정하여 메쉬 모델을 만든 후, 그에 대해 라운드 작업을 수행시키고자 할 때 유용하게 사용될 수 있는 기능이다. 제5장에서는 본 모서리 라운드 기능을 박판 성형을 위한 스탬핑 금형 설계 분야에 적용한 예를 보여주며, 제6장에서는 이 논문의 결론 및 향후 연구 과제를 언급하도록 하겠다.

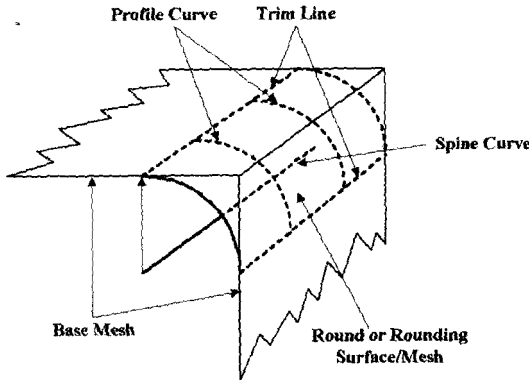


Fig. 3. Terminology for mesh rounding.

2. 모서리 라운딩 알고리즘의 개요

이와 같은 메쉬 라운딩에 사용되는 각종 용어를 정리하면 다음과 같으며, 이해를 돕기 위해서 이를 간략히 Fig. 3에 나타내었다.

- 다이 건부 모서리(die-shoulder edges): 라운딩이 되지 않은 다이 건부의 일련의 날카로운 각진 모서리들(sharp edges).
- 기반 메쉬(base mesh): 다이 건부 모서리에 인접한 두 유한 요소들의 집합으로서 이들간에 부드럽게 연결되는 라운딩 메쉬가 만들어지게 된다.
- 구 중심점(ball center points): 가상의 구가 두 기반면에 접할 때 그 중심점.
- 구 접촉점 (ball-contact points): 가상의 구가 기반면 상에 접촉하는 한 쌍의 점.
- 척추 곡선(spine curve): 가상의 구가 다이 건부 모서리를 따라 두 기반면에 접하며 움직일 때 구 중심점들의 궤적이 그리는 곡선.
- 단면 곡선(profile curve): 라운딩 곡면의 한 단면 곡선으로서 가상의 구가 임의의 위치에 놓였을 때 두 접촉점들 사이를 연결하는 원호 곡선.
- 라운딩 곡면(rounding surface): 한 쌍의 기반 메쉬를 부드럽게 연결시켜 주는 곡면으로서, 단면 곡선들을 척추 곡선을 따라 부드럽게 연결시켜 줌으로써 얻을 수 있다.
- 라운딩 메쉬(rounding mesh): 두 기반 메쉬를 부드럽게 이어주는 라운딩 곡면상에 생성된 메쉬.
- 절단 곡선(trim lines): 가상의 구가 기반면상에 접촉하는 점들로 이루어진 곡선. 이 곡선을 따라 기반 메쉬가 잘려 나간다.

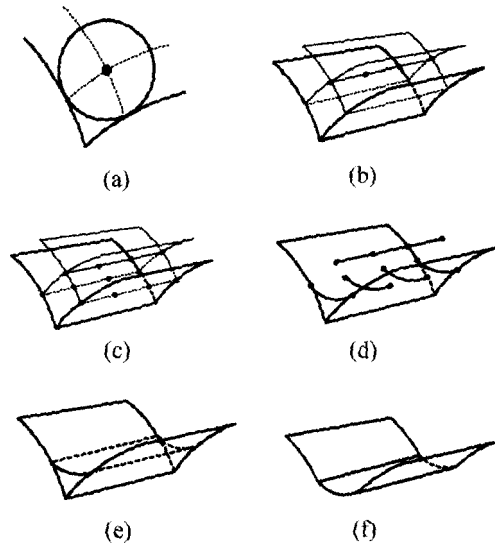


Fig. 4. Overall procedure for mesh rounding (a) generating a pair of offset meshes (b) generating a spine curve by intersecting two offset meshes (c) calculating ball contact points (d) creating profile curves (e) creating a rounding surface and trimming the original mesh with the surface boundary (f) generating a rounding mesh and implanting it into the original mesh.

본 논문에서 제안한 메쉬 라운딩 알고리즘은 구 궤적법(rolling-ball method)을 바탕으로한 자유 곡면 라운딩 알고리즘을 바탕으로 고안되었으며<sup>14)</sup>, 다음과 같은 주요 8단계로 구성되어 있다.

- (단계 1) 다이 건부 모서리들을 찾고, 이것들에 인접한 한 쌍의 기반 메쉬들을 찾아낸다.
- (단계 2) 한 쌍의 기반 메쉬에 대하여 주어진 라운드 반경만큼 읍셋시킨 메쉬를 생성시킨다(Fig. 4(a)).
- (단계 3) 두 읍셋 메쉬들간의 교차 곡선을 구한다. 이 곡선은 구 중심 궤적이 되며 척추 곡선이라고 부른다(Fig. 4(b)).
- (단계 4) 척추 곡선상의 구 중심점들을 샘플링하여, 각 점에 대한 한 쌍의 구 접촉점을 구한다(Fig. 4(c)).
- (단계 5) 두 구 접촉점 사이를 잇는 원호 곡선을 생성한다(Fig. 4(d)). 가변 반경 라운딩의 경우에는 평균 라운딩 반경에 대해서 단면 원호 곡선을 생성한 후, 실제 반경에 맞는 단면 원호 곡선을 다시 수정하여 라운드 곡면을 생성하는 방법을 사용한다<sup>14)</sup>.
- (단계 6) 원호 곡선들을 스킨닝(skinning)시켜 라운딩 곡면을 생성한다(Fig. 4(e)).
- (단계 7) 원래 메쉬를 라운딩 곡면의 경계 곡선으로

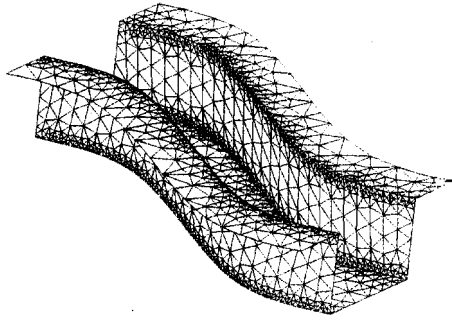


Fig. 5. A sample mesh for the stamping die of a s-rail part.

잘라낸다.

(단계 8) 라운딩 곡면상에 메쉬를 생성시키고, 이를 원래의 메쉬에 씌어 넣는다(Fig. 4(f)).

본 논문의 메쉬 라운딩 시스템의 개발 환경은 하드웨어는 Intel Pentium-II CPU와 128MB RAM을 장착한 IBM 호환 PC이며, 시스템 개발을 위한 소프트웨어로서는 한글 Windows NT 4.0 운영 체제, TGS사의 OpenInventor 2.4 그래픽 라이브러리, Microsoft사의 Visual C++ 5.0 컴파일러, 그리고 NURBS(Non Uniform Rational B-Splines) 곡면과 곡선의 모델링이 가능한 SINTEF사의 SISL(Sintef Spline Library) V.4.1 라이브러리<sup>[10]</sup>를 사용하였다. 또한, 스탬핑 성형해석용 상용 패키지로써 ESI사의 PAM-STAMP을 사용하였다.

한편, 앞으로 진행될 라운딩 과정의 설명에 있어서 이해를 돕기 위해 Fig. 5에 나타난 것과 같이 차체의 주요 구조 부품중 하나를 단순화한 에스 레일(s-rail)형상을 예제 모델로 선정하여 그 중간 결과들을 보여주도록 하였다. 이 에스 레일 모델은 박판 성형 해석에 대한 학술 대회인 NUMISHEET '96의 벤치 마크 테스트 문제로서<sup>[11]</sup>, 본 논문에서는 이 에스 레일 모델을 먼저 Pro/ENGINEER에서 모델링한 후, Pro/MESH에서 메쉬를 자동 생성하도록 하였다.

### 3. 모서리 라운딩 알고리즘의 세부 과정

#### 3.1 다이 건부 모서리 및 기반 메쉬 찾기

이 단계에서는 사용자로부터 다이 건부 모서리상의 한 노드점을 입력받은 다음 다이 건부를 구성하는 일련의 날카로운 모서리들을 추적하여 찾아낸 후, 이에 인접한 한 쌍의 기반 메쉬를 찾아낸다. 먼저 다이 건부 모서리를 찾는 방법을 설명하면 다음과 같다.

먼저, 사용자가 선택한 노드점과 연결된 모든 모서리에 대해 그 모서리에 이웃한 두 면의 법선 벡터간의

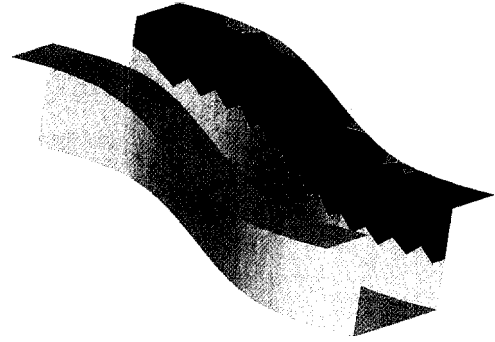


Fig. 6. Sharp edges on the die shoulder and a pair of adjacent base meshes.

각도를 계산한다. 이렇게 계산된 각도가 사용자가 지정한 각도( $\theta$ )보다 크면 그 모서리를 라운딩을 적용시킬 모서리로 선정한다. 만일 복수의 모서리가 발견되면 사용자가 그 가운데 하나를 선택하도록 한다. 먼저 최초 노드점에서 한쪽 방향으로 모서리들을 추적하여 추적 도중 메쉬의 경계에 이르거나 최초의 위치에 다시 돌아오면 추적을 끝낸다. 만일 메쉬 경계에 이르러서 추적이 끝난 경우에는 반대 방향으로 다시 한번 건부 모서리를 추적하는 과정을 거친다.

일단 다이 건부의 날카로운 모서리들이 모두 찾아지면, 이 모서리들을 기준으로 사용자가 선택한 라운딩 반경( $R$ )의 세배 이내에 드는 면들을 선택하여 다이 건부 모서리들을 기준으로 Fig. 6에 나타난 것과 같이 두 그룹으로 구분한다. 이 두 개의 면 그룹들이 한 쌍의 기반 메쉬가 된다. 여기서 세배를 택한 이유는 그 정도까지의 면들으로써 충분히 구 중심 궤적을 구할 수 있기 때문이다. 만일 가변 반경 라운딩을 수행하는 경우에는 전체 평균 반경을 구하여 이에 대한 세배 이내의 면을 선정하도록 한다.

#### 3.2 기반 메쉬의 읍셋

두 번째 단계에서는 한 쌍의 기반 메쉬에 대하여 주어진 라운딩 반경만큼 읍셋시킨 읍셋 메쉬(offset mesh)를 생성시킨다. 이 과정에서는 자유 곡면의 라운딩 과정에서와 마찬가지로 두 기준면 집합 사이를 지나가는 구 궤적 중심을 찾기 위해 두 그룹의 기준면 집합의 읍셋 시킨다. 이때, 메쉬 모델은 평면 다면체 모델이므로 다면체 읍셋 방법을 사용하여 읍셋시킨다.

메쉬 읍셋에 관련되어서는 공구 경로 검증 분야에서 많은 연구들이 되어 왔다. 즉, 간섭 검사 범위 내의 간섭 발생 가능한 영역을 찾은 다음, 삼각 다면체의 모든 읍셋된 삼각형 보다 위에 놓이도록 하여 간섭이 없는

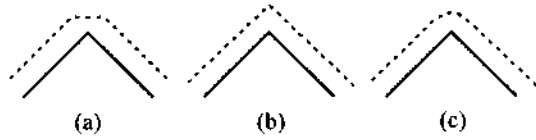


Fig. 7. Offset methods for a polyhedral model.

CL point 및 CL곡선을 구하는 과정에 다면체 오프셋이 사용되었다<sup>20)</sup>. 최근에는 비다양체 자료 구조를 이용하여 다면체를 다면체와 구, 원통 형상으로 정확하게 오프셋시키는 연구도 진행되고 있다<sup>21)</sup>.

일반적으로 평면 다면체를 오프셋시키는 방법은 크게 다면체를 오프셋 거리만큼 정확한 오프셋을 시키고, 볼록한 모서리나 꼭지점으로 말미암아 생긴 오프셋 면들간의 간극을 채워 주게 되는데 이를 위한 방법에는 크게 Fig. 7과 같은 세 가지 근사 방법이 있다<sup>22)</sup>. 첫번째 방법은 오프셋된 면들간의 간극을 평면으로 메우는 방법이며, 두 번째 방법은 오프셋된 면들을 연장시켜 간극을 메우는 방법이고, 마지막 세 번째 방법은 원통 또는 구면으로 간극을 메우는 방법으로서 이 방법이 수학적으로 정확한 오프셋을 구한 것이라고 할 수 있다.

본 논문에서는 Fig. 7(b)와 같은 두번째 방법을 채택하여 두 기판 메쉬에 대한 오프셋 메쉬들을 구하였다. 즉, 각 기판 메쉬에 대하여 먼저 자신과 같은 위상 정보를 갖는 메쉬 모델을 새로 생성한 후, 이 모델의 각 노드 점에 대해 세 개의 인접한 면들의 오프셋 평면들을 서로 교차시켜 새로운 노드점을 구한다. 이 방법은 오프셋 이전과 오프셋 이후의 위상 정보가 동일하게 유지되기 때문에 오프셋 모델을 생성하기 용이하다는 장점이 있는 반면에, 수학적으로 정확한 오프셋 면을 제공하지 못하며, 어느 한 노드의 곡률 반경이 오프셋 반경보다 작을 경우에는 꼬임이 발생하여 부적절한 형상을 갖게 되는 단점이 있다. 그러나 본 논문의 대상인 스텝핑 급형 면은 일반적으로 넓고 부드러운 곡면으로 이루어져 있기 때문에 이러한 꼬임의 발생 가능성이 적고, 또한 만일 이러한 현상이 발생한다 하더라도 교차점의 계산 후 이를 정확히시키는 단계를 거치도록 하였으며, 오프셋 메쉬간의 교차점 계산시 실제 교차하지 않는 것이 교차하는 것으로 나타나더라도 이를 걸러 내는 단계를 삽입하여 이와 같은 문제들을 해결하도록 하였다.

### 3.3 두 오프셋 메쉬간의 교차 곡선 계산

세 번째 단계에서는 앞에서 구한 두 오프셋 메쉬들간의 교차 곡선을 구한다. 이 곡선이 구 중심 궤적이 되며, 이것을 척추 곡선(spine curve)라고도 부른다. 이를

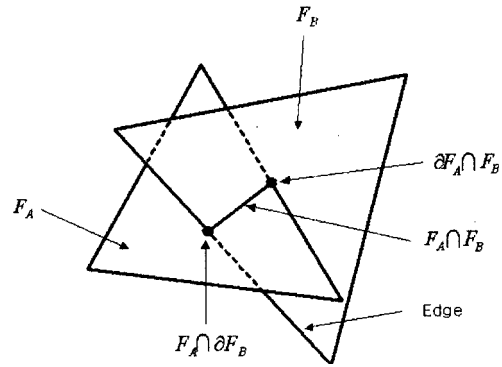


Fig. 8. Finding intersection points between two faces.

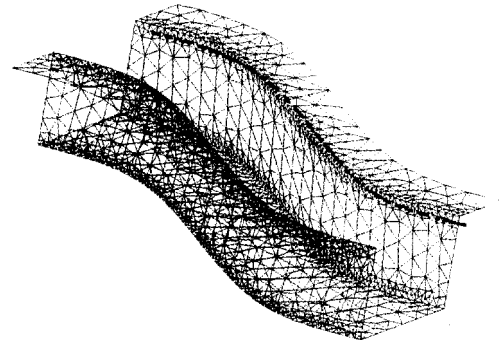


Fig. 9. Intersection points of two offset base meshes.

구하기 위해 먼저 각각의 오프셋 메쉬에 속해 있는 임의의 두 면간의 교차 계산을 생각해 보면, Fig. 8에서와 같이 그 교차 계산 결과는 직선이 되며, 이 직선의 양 끝점을 구하는 것은 면과 모서리의 교차 문제가 된다. 결국 두 오프셋 메쉬간의 교차 계산 결과는 각각 면들간의 직선 교선들을 모은 연속적인 직선들의 집합이 된다.

본 논문에서는 먼저 이들 교선의 양 끝점을 이루는 점들이 구한 후 이를 정렬시키고, 이들 가운데 원래의 기판 메쉬로부터 오프셋 거리 이내에 드는 교차점들을 제거하도록 하였다. 이는 본 논문이 택한 오프셋 방법에서는 곡률 반경이 오프셋 거리보다 작은 영역에서는 꼬이는 오프셋 메쉬가 발생 가능하기 때문에 이 부분에서 구해진 교차점들을 제거하기 위함이다. 에스 레일 모델에 대해 생성된 구 궤적 중심점들을 Fig. 9에 보인다.

### 3.4 구 접촉점의 계산

네 번째 단계에서는 각 구 중심점들에 대한 두 기준 메쉬상의 한 쌍의 구 접촉점들을 구한다. Fig. 7(c)와 같은 방법에서는, 구 중심점은 오프셋된 면들간에 교차에 의해 생성된 것이므로, 오프셋 전의 면상의 접촉점은

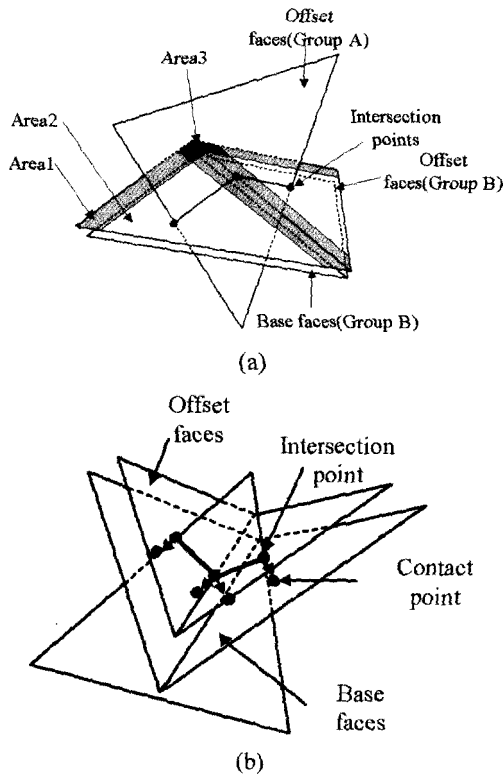


Fig. 10. Finding a pair of contact points from a ball center point.

중심점으로부터 면의 법선 반대 방향으로 오프셋 거리만큼 떨어진 곳에 위치하게 된다. 그러나 본 논문에서는 Fig. 7(b)와 같이 근사적인 오프셋 방법을 사용하였기 때문에 오프셋 모델이 오차를 포함하고 있으므로 접촉점 계산시 이를 고려하여야 한다.

먼저, Fig. 10(b)와 같이 오프셋된 후의 면의 면적이 오프셋되기 전의 면적보다 축소된 경우에는 오프셋된 면에서 교차점을 바로 반대 방향으로 오프셋시켜 접촉점을 구할 수 있다. 그러나, 만약 Fig. 10(a)와 같이 오프셋된 후의 면의 면적이 오프셋되기 전의 면의 면적보다 크다면 오프셋 면을 그림에서와 같이 세 지역으로 분류하여 어느 위치에 교차점이 위치하느냐에 따라 접촉점을 달리 계산한다.

Fig. 10(a)에서 오프셋된 면은 세 영역으로 분류된다. 제1영역(area 1)은 볼록한 모서리가 오프셋된 영역이며, 제2영역(area 2)은 면이 오프셋된 부분이며, 제3영역(area 3)은 볼록한 꼭지점이 오프셋된 영역이다. 따라서 제2영역에 교차점이 위치할 경우에는 오프셋되기 전의 면과 일대일로 대응되므로 접촉점은 오프셋되기 전의 면 내부

에 생기며, 교차점으로부터 면의 법선 반대 방향으로 오프셋 거리 만큼 이동시킨 위치에 접촉점이 놓이게 된다. 제1영역에 교차점이 위치할 경우에는 접촉점은 오프셋되기 전의 면의 모서리에 위치하므로 면의 모서리상의 가장 가까운 점으로 투영시켜 접촉점을 얻는다. 제3영역에 교차점이 위치할 경우에는 오프셋되기 전의 면의 꼭지점 상에 접촉점이 위치하는 것으로 판단되므로 해당 꼭지점을 접촉점 삼는다. 앞의 3가지 경우에서 제2영역에 교차점을 투영시켜 접촉점을 얻는 것은 정확한 접촉점이 되지만 나머지 제1 또는 제3영역에 대해서 구한 접촉점은 정확한 값이 아닐 수 있다. 이는 꼭지점과 모서리에 대한 정확한 오프셋 면을 만들어 이를 오프셋 매쉬에 포함시키지 않고 근사적인 오프셋 방법을 사용하였기 때문이며, 이로 말미암아 실제 정확한 오프셋 면끼리는 교차하지 않는 경우에도 교차하는 것으로 나타날 수 있다. 이를 방지하기 위하여 구해진 두 접촉점과 교차점으로 이루어진 평면상에서 두 교차점을 중심으로 그런 원들간의 교차점을 구하여 이를 다시 정확한 구 중심으로 설정하는 작업을 추가하도록 하였다. 만일 여기서 교차가 발생하지 않는다면 이 교차점과 그것의 접촉점 삭제하도록 한다.

### 3.5 라운드의 단면 곡선의 생성

다섯번째 단계에서는 각 구의 중심점과 그것의 두 접촉점을 이용하여 라운딩 곡면의 단면 곡선(profile curve)을 생성한다. 즉, 각 구의 중심점과 두 접촉점으로부터 Fig. 11과 같은 원호 곡선(circular arc)을 생성하여 라운드 단면 곡선으로 사용한다.

#### 3.5.1 가변 반경 라운딩을 위한 단면 곡선

가변 반경 라운딩 작업의 경우에 사용자는 라운딩을 적용할 모서리상에 위치하는 몇 개의 노드점에 대하여

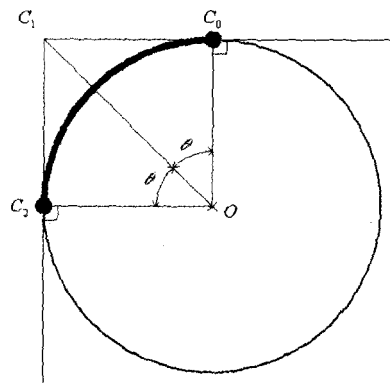


Fig. 11. Defining a circular arc as a rounding cross-section.

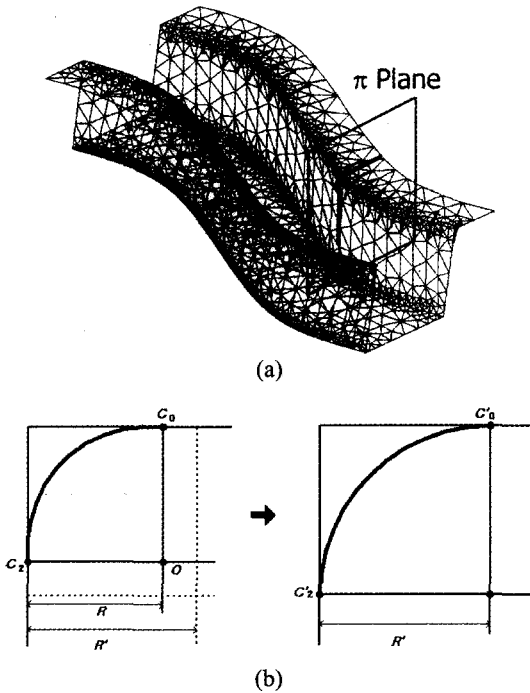


Fig. 12. Finding a new cross-section for variable-radius rounding.

기본 라운딩 반경과 다른 반경들을 지정하게 된다. 이 경우에는 먼저 동일 반경 라운딩과 마찬가지로 기본 라운드 반경을 사용하여 단면 곡선들을 생성한다. 그 다음 가변 반경 구간에 들어오는 구 중심 및 접촉점들에 대해서 정확한 위치를 다시 계산한다. 이들을 계산하는 데는 여러 가지 방법이 있으나, 그 가운데 가장 간단하면서 엔지니어링의 목적에 적합한 Choi의 방법을 사용하도록 하였다<sup>[17,23]</sup>. 가변 반경 구간의 반경은 주어진 반경들을 3차 스플라인(cubic-spline)으로 곡선 보간하여 사용한다. 모든 교차점에 대해 라운드 가변 반경에 의한 라운드 반경이 계산되면, Fig. 12와 같이 교차점과 두 접촉점을 통과하는 평면  $\pi$ 를 설정하고,  $\pi$  평면과 기존 메쉬들과의 교선을 구한다. 이후 그 교선을  $\pi$  평면상에서 실제 라운드 반경에 맞도록 움직여서 가변 반경 라운딩에 사용될 라운드 중심과 접촉점들을 구하고 이를 이용하여 새로운 단면 곡선을 생성시킨다.

### 3.6 라운딩 곡면의 생성

여섯 번째 단계에서는 원호 곡선들을 보간하여 라운딩 곡면(rounding surface)을 생성한다. 모든 단면 원호 곡선이 완성되면 이를 SISL 라이브러리의 로프팅(lofting) 함수인 s1538()을 이용하여 Fig. 13과 같은 라운딩 곡

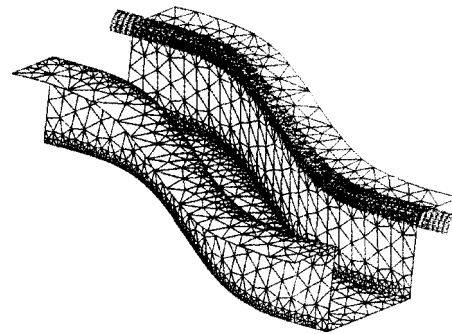


Fig. 13. Constructing a rounding surface.

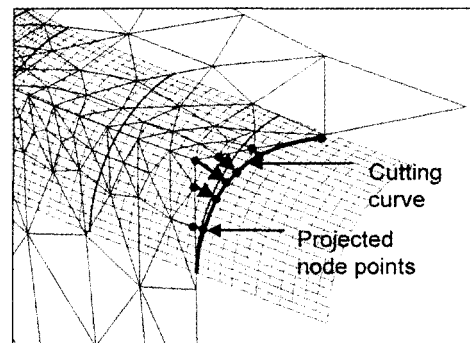


Fig. 14. Trimming a rounding surface at a mesh boundary.

면을 생성시킨다<sup>[18]</sup>.

그런데, 단면 원호 곡선만을 이용하여 생성한 라운드 곡면은 Fig. 14에서와 같이 다이 견부상의 모서리들이 폐곡선을 이루지 않고 열려 있는 경우 실제 메쉬의 경계와 라운드 곡면의 경계가 서로 일치하지 않을 수 있다. 이 경우에는 라운드 곡면을 경로 곡선 방향으로 연장시켜 다시 정확한 경계로 잘라 새로운 라운드 곡면을 만들 필요가 있다. 즉, 라운딩 영역에 들어오는 메쉬 경계점들을 라운딩 곡면 위로 투영시켜서 이 점들이 연결되는 라운딩 곡면상의 곡선을 만들어 라운딩 곡면을 트리밍시킨다.

### 3.7 메쉬의 절단 작업

라운딩 곡면이 일단 생성되면 이를 이용하여 라운딩 메쉬를 생성하는 방법은 크게 두 가지가 존재할 수 있다. 첫 번째는 기존의 노드점들 가운데 라운딩 영역에 들어가는 노드점들을 라운딩 곡면상으로 옮기는 방법이고, 두 번째는 기존 메쉬의 라운딩 영역을 잘라 내고 라운딩 곡면상에 새로운 메쉬를 생성시켜 잘라 낸 부분을 이로써 채워 넣는 방법이다. 전자의 방법은 기존의 메쉬의 위상 정보를 기반으로 메쉬를 수정하는 것

이기 때문에 위상 정보를 관리하는 측면에서는 용이하다. 그러나, 메쉬의 형상이 라운딩 곡면의  $u, v$  방향과 일치하지 않고, 명확히 라운딩 영역의 경계가 정확히 나타나지 않는 단점이 있다. 물론 라운딩 곡면과 각 요소들 간의 오차를 계산하여 오차 범위를 넘는 경우 요소를 분할시켜 보다 정밀한 메쉬를 얻도록 할 수도 있으나 후자의 방법보다 질 좋은 메쉬를 만들기는 어렵다. 후자의 방법은 질 좋은 메쉬를 만들어 준다는 장점이 있으나, 기존의 메쉬에 대한 절단 및 새로운 라운딩 메쉬의 연결이 용이하지 않은 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 결과의 질을 높이기 위해 후자의 방법을 채택하였다.

이 단계는 전체 과정의 일곱 번째 단계로서 원래 메쉬를 라운딩 곡면의 길이 방향 경계 곡선으로 잘라낸다. 이를 위해 먼저 라운딩 곡면의 길이 방향 경계 곡선에 걸쳐있는 메쉬의 면들은 어떤 것인지 판단하는 작업이 필요하다. 본 논문에서의 판단 방법은 Fig. 15(a)에 나타난 것과 같이 라운딩 곡면상으로 옮겨질 노드점과 그렇지 않은 노드점을 모두 가지고 있는 경우 그 면은 라운딩 곡면의 경계에 걸쳐 있는 면으로 판단한다. 이를 위해서 라운딩 곡면상으로 이동되어야 할 노드점들이 어떤 것인지 판단할 필요가 있는데, 그 판단 방법은 다음과 같다.

먼저 판단하려는 노드점  $P$ 에서 라운딩 곡면 상의 가장 가까운 점  $P'$ 을 SISL의 함수를 사용하여 찾는다. 다음,  $P'$ 에서의 법선 벡터  $n$ 과  $P-P'$ 의 단위 벡터  $m$ 을 구한다. 만일 두 벡터가 평행하면 그 노드점은 옮겨질 노드점이고, 그렇지 않으면 옮겨지지 않는 노드점이 된다.

일단 라운딩 곡면의 경계에 걸쳐 있는 면으로 판단이 되면 Fig. 15(b)와 같이 경계에 위치하는 면을 절단하여 라운딩 곡면 상에 위치한 메쉬들을 제거한다. 이때, 라운딩 곡면과 메쉬와의 경계는 완전하게 일치하지 않을 수 있으므로 라운딩 곡면의 경계에서 가장 가까운 절단선을 찾아 메쉬를 절단한다. 노드점이 라운

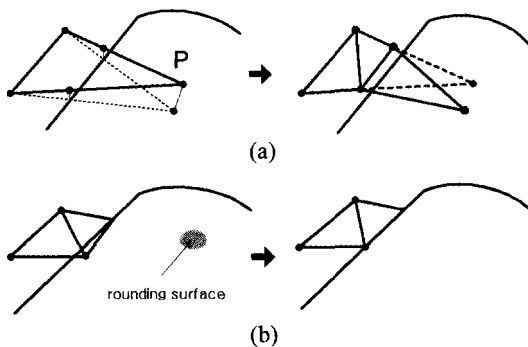


Fig. 15. Finding trim lines on the mesh.

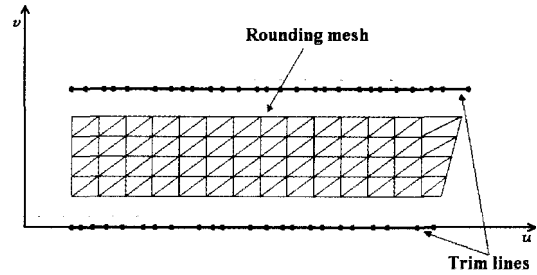


Fig. 16. Generating a mesh in a rounding surface.

딩 곡면 경계에 가까이 있을 경우에는 라운딩 곡면의 경계로 노드점을 옮기고 절단 과정을 거치지 않는다.

### 3.8 라운딩 메쉬의 생성

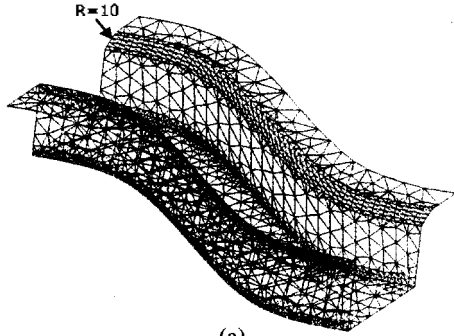
마지막 단계로서 라운딩 메쉬를 라운딩 곡면상에 완성시켜 넣는 작업을 수행한다. 메쉬 생성에 관해서는 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔으며 각종 메쉬 생성 기법에 대하여 Ho-Le<sup>[24]</sup>의 논문은 잘 구분 정리되어 있다. 본 논문에서는 네개의 경계 곡선으로 구성된 라운딩 곡면 위에 일정, 혹은 가변 간격으로 노드점을 생성한 후, 인접한 노드점들을 연결하여 메쉬를 생성하는 방법을 사용하였다. 기존의 면들이 새로운 라운딩 곡면에 의해서 소거되거나 분할되어 정리되면, 라운딩 곡면 위에 새로운 메쉬를 생성한다. 이때, 기존 모델의 면들과 기하 정보와 위상 정보가 일치하여야 하므로 Fig. 16과 같이 먼저 라운딩 곡면의 내부에 새로운 삼각형 면들을 생성한다.

새로운 삼각형들을 생성할 때 라운딩 곡면의  $u, v$  축으로의 분할 개수를 사용자가 지정하여 밀도를 조절할 수 있게 하였다. 이때,  $v$  축 상에서 기존 메쉬와의 경계가 되는 최 외곽 지역은 메쉬를 생성하지 않고, 나중에 기존 메쉬와 새로 생성된 메쉬들의 결합을 위해 남겨 놓는다.

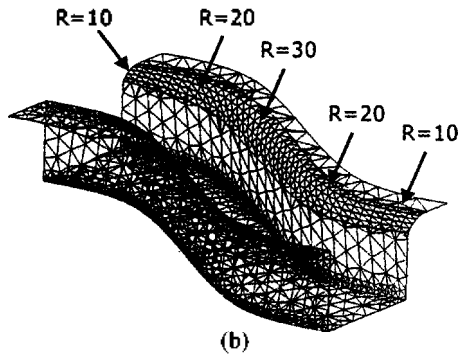
내부에 새로운 요소들이 생성되면, 마지막으로 기존의 면들과 라운딩 곡면의 내부에 새로 만들어진 면들 사이를 연결시켜 주는 새로운 면들을 만들어 주어야 한다. 이 작업은 내부에 만들어진 면의 외곽 부분과 라운딩 곡면의 외곽 부분의 면을 잘라 내었을 때 사용한 점을 이어줌으로서 이루어진다. 이를 위해 먼저 라운딩 곡면 내부의 외곽에 존재하는 이웃한 두 점의 중점에서 기존 메쉬에서 절단된 영역 중 가까운 노드점을 선택하여 이 세 점으로 면을 만들어 완성시킨다.

이와 같이 라운딩 영역 내부에서 기존 메쉬 사이의 노드점을 찾아 새로운 면을 완성시키면, 반대로 기존에 메쉬 부분에서 새로 생성된 메쉬에 대응하는 노드





(a)



(b)

Fig. 17. Rounding results (a) constant-radius rounding (b) variable-radius rounding.

점을 찾아 새로운 면을 완성시킨다. 한쪽 경계에 대해 기존 메쉬와 새로운 메쉬를 이어주는 면들이 빈틈없이 완성되면, 다른 비어있는 경계에서 위의 작업을 반복하여 기존 메쉬와 라운드 곡면 내부에 생성된 메쉬를 이어주는 메쉬들을 모두 생성하게 된다.

### 3.9 적용 예

Fig. 17에 3.1~3.8의 과정을 통해 s-rail의 각진 모서리에 대해 동일 반경과 가변 반경 라운드를 적용하여 균일한 메쉬를 생성한 형상을 나타내었다. 이와 같이 동일한 간격으로 생성된 메쉬는 지나치게 세분화 될 수도 있고, 또한 사용자가 요구한 오차 범위 내에 들지 않을 수도 있기 때문에 오차 한계를 벗어나지 않는 메쉬를 생성하기 위해서는 라운드 곡면의 u, v평면상에서 비균일한 메쉬를 생성하는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 오차 한계를 벗어나는 지역 내에 생성된 메쉬들을 계속 반분해 나가는 방법으로 지정된 오차내의 메쉬를 생성하였다. Fig. 17(a)의 동일 반경 라운딩에 대하여 이와 같은 방법에 의해 만들어진 적용형 메쉬가 Fig. 18에 나타나 있다.

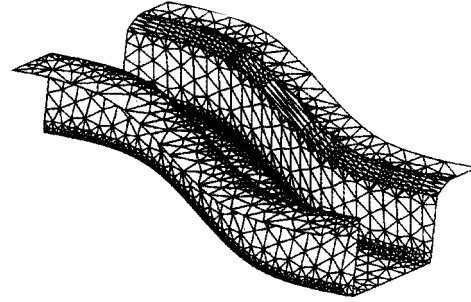


Fig. 18. Adaptive rounding mesh.

## 4. 모서리 라운딩 수정

지금까지 셀 메쉬상의 날카로운 모서리부를 찾아서 라운딩을 시키는 작업의 내부 알고리즘에 대하여 설명하였다. 그러나 위와 같은 메쉬 라운딩 기능은 모서리가 라운딩되어 있지 않은 모델의 경우에만 적용될 수 있다는 한계를 가지고 있다. 즉, 만일 실제 금형을 3차원 측정하여 평면 다면체 모델을 구성한 후, 이로부터 이미 라운딩되어 있는 금형의 건부를 찾아 그 라운딩 반경값을 변화시키면서 스탬핑 과정을 시뮬레이션하고 싶은 경우에는 앞의 모서리 라운딩 기능을 사용할 수 없다. 현실적으로 과거 금형에 대한 CAD 모델이 없는 경우가 많으며, 시뮬레이션의 정밀도를 높이기 위하여 과거의 금형 자료를 이용해야 할 필요성이 있다. 따라서 만일 일반적인 다면체 모델로부터 라운딩 특정 형상을 추출하고, 그 반경을 자유로이 바꿀 수 있는 기능을 개발한다면, 과거의 금형 형상을 바탕으로 라운딩을 변화시키면서 시뮬레이션을 손쉽게 수행할 수 있게 될 것이다. 따라서 본 장에서는 이와 같이 이미 존재하는 라운딩 부분을 메쉬상에서 직접 수정할 수 있도록 하는 방법에 대하여 설명하고자 한다. 본 논문에서 제안하는 메쉬 라운딩 수정 알고리즘은 다음과 같은 주요 3단계로 구성되어 있다.

(단계 1) 메쉬의 모서리 라운딩 영역을 찾고, 이것들에 인접한 한 쌍의 면 그룹을 찾아낸다.

(단계 2) 한 쌍의 인접 면 그룹에 대하여 주어진 라운드 반경만큼 움푹시킨 두 움푹 메쉬들간의 교차 곡선을 구한 후, 이를 구 중심 궤적으로 한 새로운 라운딩 곡면을 생성시킨다.

(단계 3) 라운딩 곡면상에 메쉬를 생성시키고, 이를 원래의 메쉬에 심어 넣는다.

위 3단계 과정 가운데 제2와 제3단계는 앞의 3장의 내용과 동일하므로 여기에서는 제1단계에 대한 설명만 하도록 하겠다. 앞으로 진행될 라운딩 과정의 설명에

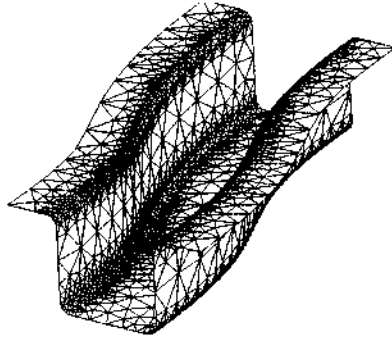


Fig. 19. A rounded s-rail mesh model.

있어서 이해를 돕기 위해 Fig. 19에 나타난 것과 같이 앞에서 사용한 에스 레일(s-rail) 형상에 라운드를 부여한 예제 모델로 선정 사용하도록 하겠다.

4.1 모서리 라운딩 영역 찾기

제1단계에서는 사용자로부터 라운딩 영역 상의 한 노드 점을 입력받아 그로부터 전체 모서리 라운딩 영역을 찾는다. 이를 위해 먼저 메쉬 모델의 모든 노드 점에 대한 곡률 특성을 구한 후, 선택한 노드점과 같은 곡률 특성을 가지는 노드점 집합을 구분해 내어 영역화 한다. 메쉬 모델의 각 노드점에 대한 곡률을 구하기 위하여 본 논문에서는 주어진 노드점을 중심으로 인접해 있는 노드점들을 이용하여 최소 자승법에 의해 2차 곡면으로 근사시키고, 이 2차 곡면으로부터 곡률 정보를 추출하여, 노드점의 특성을 부여하는 방법을 사용한다.

인접 노드점들 2차 곡면으로 근사시키기 위해서 최소한 6개 이상의 점이 필요하므로, 대상 노드 점과 그에 연결된 노드점들을 가까운 순서대로 6개 이상의 점을 선정한다. 이때, 인접 노드점이 6개 이하일 경우가 있는데, 이때에는 인접 노드 점에서 다시 인접한 노드 점을 찾아내어 거리가 가까운 순서로 점 6개를 선택하여 이들을 2차 곡면으로 근사시킨다.

2차 곡면으로 근사시키는 방법은 다음과 같다. 먼저 Fig. 20과 같이 인접 노드점들을 u, v, d축을 가지는 지역 좌표계로 매핑하고, 인접한 각각의 점(p)에 대해 지역 좌표계에서의 좌표 값(u, v, d)을 구한다. 이때 지역 좌표계의 원점은 곡률을 알고자 하는 노드점이 되며, d축은 노드점에 인접한 평면의 법선 벡터의 평균, u축은 1차 연결점중의 한 점을 d축의 법 평면에 투영한 점을 기준으로 설정하였다.

근사 하려는 2차 곡면은 다음과 같은 다항식의 형태로 나타낼 수 있다.

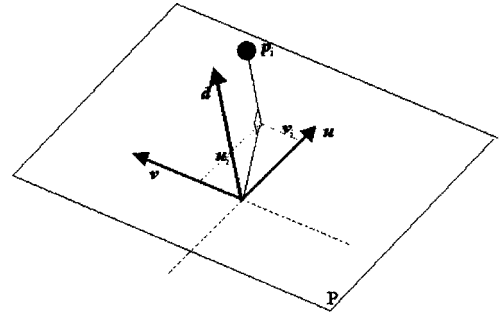


Fig. 20. Local coordinate system.

$$f_T(u, v) = c_{2,0}u^2 + c_{1,1}uv + c_{2,0}v^2 + c_{1,0}u + c_{0,1}v + c_{0,0}$$

이 식을 풀기 위해 n개의 점을 사용한다면 다음과 같은 행렬 형태로 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} u_1^2 & u_1v_1 & u_1^2 & u_1 & v_1 & 1 \\ u_2^2 & u_2v_2 & u_2^2 & u_2 & v_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_n^2 & u_nv_n & u_n^2 & u_n & v_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{2,0} \\ c_{1,1} \\ c_{0,2} \\ c_{1,0} \\ c_{0,1} \\ c_{0,0} \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} c_{2,0} \\ c_{1,1} \\ c_{0,2} \\ c_{1,0} \\ c_{0,1} \\ c_{0,0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix}$$

$$U^T U \begin{bmatrix} c_{2,0} \\ c_{1,1} \\ c_{0,2} \\ c_{1,0} \\ c_{0,1} \\ c_{0,0} \end{bmatrix} = U^T \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix}$$

이 식을 LU 분해법을 사용하여 {c<sub>2,0</sub>, c<sub>1,1</sub>, c<sub>0,2</sub>, c<sub>1,0</sub>, c<sub>0,1</sub>, c<sub>0,0</sub>}의 값을 구하면 주어진 점과 주변의 점들을 이용하여 2차 곡면을 구할 수 있다.

주 곡률은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$k_{max} = H + \sqrt{H^2 - K}$$

$$k_{min} = H - \sqrt{H^2 - K}$$

또한, 위 식에 의해 가우스 곡률(K)과 평균 곡률(H)을 계산하면 다음과 같이 된다.

$$K = \frac{f_{uu}f_{vv} - f_{uv}^2}{(1 + f_u^2 + f_v^2)^2}$$

$$H = \frac{(1 + f_u^2)f_{vv} - 2f_{uv}f_{uv} + (1 + f_v^2)f_{uu}}{2(1 + f_u^2 + f_v^2)^{3/2}}$$

원래의 2차 곡면 식을 편미분하면 다음과 같이 된다.

$$f_u = 2c_{2,0}u + c_{1,1}v + c_{1,0}$$

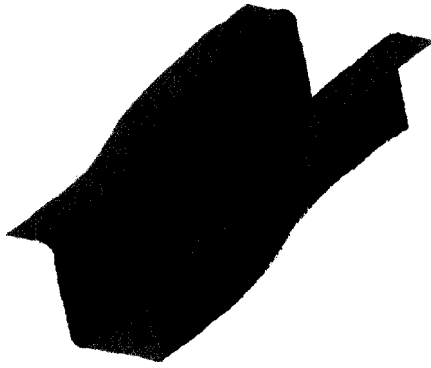


Fig. 21. Region classification according to curvature evaluation.

$$f_v = c_{1,1}u + 2c_{0,2}v + c_{0,1}$$

$$f_{uv} = 2c_{2,0}$$

$$f_{vv} = 2c_{0,2}$$

$$f_{uv} = c_{1,1}$$

따라서 위 편미분 결과를 가우스 곡률(K)과 평균 곡률(H) 식에 대입하여 가우스 곡률과 평균 곡률을 구한 후, 다시 주곡률( $k_{max}$ ,  $k_{min}$ )을 구하도록 한다.

시스템은 모든 점에 대한 곡률 값을 계산해서 저장해 두고, 사용자가 라운딩 영역의 한 노드점을 선택하고 그 노드의 곡률 값을 기준으로 허용 범위를 선정해 주면, 그 범위내에 들어가는 노드점 집합을 찾아서 화면에 나타내 준다. 만일 그 범위를 조정할 필요가 있으면 앞의 허용 범위를 조정하여 원하는 라운딩 영역을 찾아내도록 한다.

일단 라운딩 영역으로 판단되고, 이로부터 가까운 면 집합들을 구하여 두 그룹으로 구분하면 두 기준면 집합이 완성된다. S-rail 모델에 대하여 곡률 해석을 한 그림을 Fig. 21에 나타내고, Fig. 22는 두 그룹으로 구분된 라운딩 작업에 사용될 기준면 집합을 보인다.

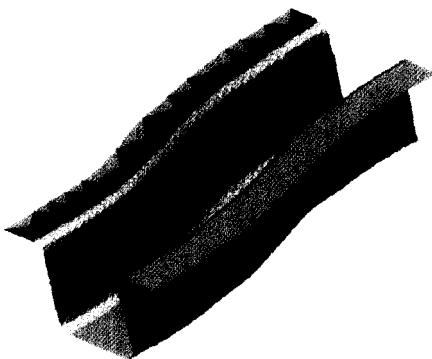


Fig. 22. Two face groups adjacent to an edge rounding area.

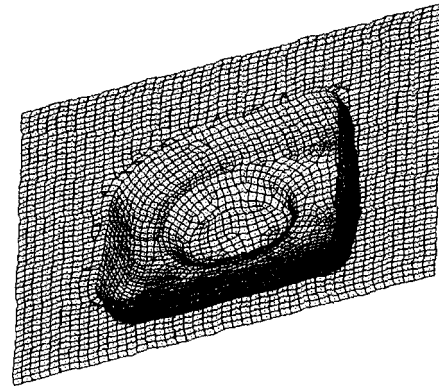


Fig. 23. A mesh model for a dash-pot die.

Fig. 22에서 보는 것과 같이 2차 곡면으로 근사하여 곡률을 계산했기 때문에 기존 라운딩 영역의 경계에서 어느 정도 오차를 가지고 있다. 하지만 이러한 오차는 곡부적으로 존재하는 것이기 때문에 이 다음 과정에서 수행하게 되는 표본화 과정을 거치면, 라운딩 곡면을 만들 수 있는 충분한 교차점들이 생성된다. 만약 표본화 시에 접촉점 사이의 간격이 너무 멀다면, 기준면 집합을 넓혀 다시 그룹화한 후, 다음 과정을 수행한다.

### 5. 스캠핑 금형 설계 적용 예

본 논문에서 개발한 메쉬 라운딩 기능을 Fig. 23에 나타난 것과 같은 자동차용 차체 부품의 해석 과정에 적용시켜 보도록 하겠다. 최초의 메쉬 형상은 Fig. 23에 나타난 것과 같은 사각형 요소들로 이루어진 다이의 메쉬 모델이다. 본 시스템에서는 삼각형 메쉬를 기준으로 개발되었으며 그밖의 형상에 대해서는 먼저 삼각형 메쉬로 변환시킨 후 나머지 라운딩 과정을 수행한다.

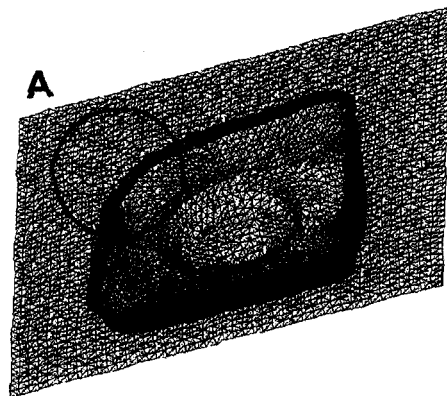


Fig. 24. Constant-radius rounding result ( $r=7.5$ ).

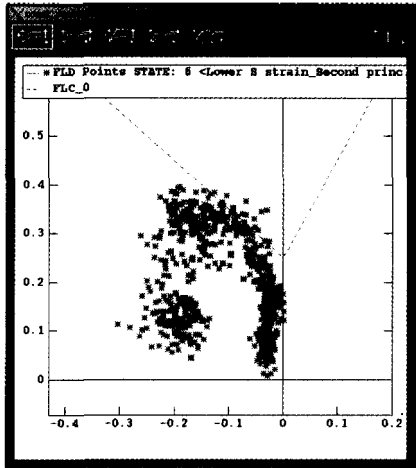


Fig. 25. A forming limit diagram for original tools.

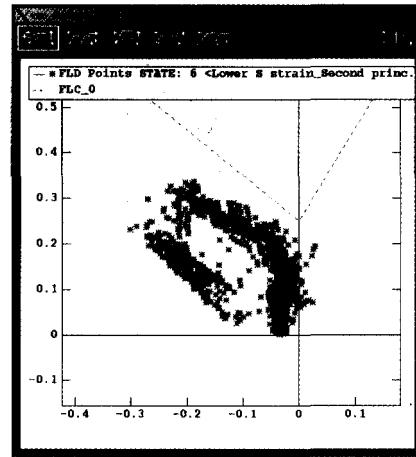


Fig. 27. A forming limit diagram for the modified tools.

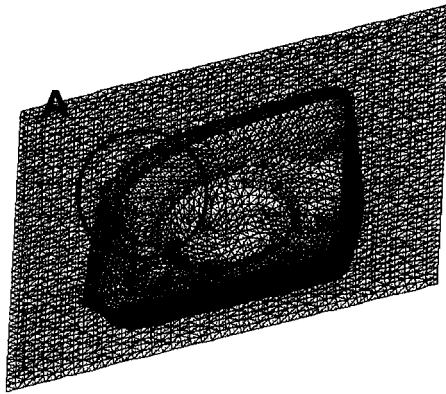


Fig. 26. Variable-radius rounding result ( $r_{max}=15$ ).

Fig. 24는  $r = 7.5$ 의 일정 반경 라운딩을 준 다이의 메쉬이다. 이 상태의 메쉬를 이용하여 스탬핑 성형 해석을 수행한 후의 결과를 Fig. 25에 나타내었다. Fig. 24의 원 내부의 두께 감소율이 최대 23%로 나타났으며 Fig. 25에 나타낸 성형 한계도로 판단하여도 판단이 예측되고 있다. 따라서 이 부분의 라운드 값을 일부 확대함으로써 성형성을 개선시키는 가상 트라이아웃을 시도할 수 있다. 그 실례가 Fig. 26에 나타나 있다. 여기서 최대 라운딩 값을 원래 값의 두배인  $r=15$ 로 지정하고 그 밖의 지점은 완만히 변화시키도록 하였다. 이와 같이 라운드를 변경시켜 성형 해석 재수행한 결과가 Fig. 27에 나타나 있다. 라운드 변경 전에 판단이 예상되던 부위의 최대 두께 감소율이 14%로 낮아졌으며 해당 부위의 변형률 상태가 모두 성형 한계 곡선 아래에 위치하여 판단의 우려가 해소되었음을 볼 수 있다.

### 6. 결 론

본 논문에서는 자유 곡면 모델의 모서리 라운딩 기능에 해당되는 셀 메쉬 모델의 모서리 라운딩 기능을 개발하였다. 라운딩 작업은 일정 반경뿐만 아니라 가변 반경을 부여할 수 있다. 또한 이 기능을 박판 성형을 위한 스탬핑 금형의 설계 및 해석 과정에 응용함으로써 이 분야의 생산성 향상에 기여할 수 있는 가능성을 제시하였다. 즉, 이 기능을 사용함으로써 기존의 “CAD/CAE 시스템 상에서의 CAD 모델 변경 → 메쉬 자동 생성 및 수정 → 재해석”의 3단계 사이클을 “메쉬 변경 → 재해석”의 2단계로 단축시킬 수 있었으며, 또한 CAD 장비나 CAD 전문가의 도움없이 CAE 엔지니어가 독립적으로 해석 작업을 수행할 수 있게 하였다. 그럼으로써 작업 시간의 단축, 장비 및 인력 사용의 절감을 통한 금형 설계 및 제조의 생산성 향상을 가져올 수 있게 되었다.

이와 같은 셀 메쉬 라운딩 작업은 현재 CAD 시스템과 자동 메쉬 생성 프로그램 사이의 데이터 교환이 아직 완벽하지 않고, 또한 수정된 CAD 모델에 대해서 메쉬 전체를 재생성하는 것은 시간이 많이 걸리기 때문에 그 실용적인 가치를 가지고 있다고 할 수 있다.

그러나 현재의 메쉬 라운딩 방법은 다음과 같은 제약점을 가지고 있으므로 이를 극복하기 위한 연구가 필요하다.

첫째, 현재의 라운딩 방법은 샘플링한 단면 원호들을 내삽하여 얻은 3차 NURBS 형태의 근사적인 라운딩 곡면이므로 정확하고 간단한 형태의 라운딩 곡면을 구할 필요가 있다. 이를 위해서는 평면 다면체 모델의

정확한 읍셋과 이들간의 교차 곡선 계산을 구현하는 작업이 필요하며, 이를 위해 비다양체 읍셋 기능<sup>[21]</sup>을 이용할 수도 있다.

둘째, 현재의 방법은 하나의 곡선을 따라서 라운딩을 주는 방식이다. 여러 개의 곡선이 만나는 일반적인 경우에 대한 메쉬 라운딩 기능을 개발한다면 금형 설계 외에 보다 광범위한 분야에 응용될 수 있을 것이다.

셋째, 현재는 CAE 엔지니어가 해석 결과에 따라 메쉬 모델링 기능을 이용하여 수동으로 라운드 값을 변화시키는 방식을 택하고 있다. 만일 메쉬 라운딩 기능을 최적화 프로그램과 결합시켜 자동으로 다이 건부의 라운드 값들을 최적화시킨다면 더욱 생산성을 향상시킬 수 있을 것이다.

**감사의 글**

본 연구는 한국 과학 재단의 해외 Post Doc. 연구 프로그램의 지원을 받아 수행된 것으로 관계자 여러분에게 감사 드립니다.

**참고문헌**

1. Holmström, L. and Laakko, T., "Rounding facility for solid modelling of mechanical parts," *Computer Aided Design*, Vol. 20, No. 10, pp. 605-614, 1988.
2. Martin, R.R., *Principal Patches for Computational Geometry*, PhD Thesis, Cambridge Univertisy Engineering Department, 1982.
3. Rossignac, J.R. and Requicha, A.A.G., "Constant-radius blending in solid modelling," *Computers in Mechanical Engineering*, Vol. 3, pp. 65-73, 1984.
4. Rochwood, A.P. and Owen, J.C., "Blending surfaces in solid modeling," In G.E. Farin, editor, *Geometric Modeling: Algorithms and New Trends*, SIAM, Philadelphia, PA, pp. 367-383, 1987.
5. Choi, B.K. and Ju, S.Y., "Constant-radius blending in surface modeling," *Computer Aided Design*, Vol. 21, No. 4, pp. 213-220, 1989.
6. Varady, T., "Rolling ball blends in solid modeling," In F. Kimura and Rolstadas, A., editors, *Computer Applications in Production and Engineering*, North-Holland, Amsterdam, pp. 295-308, 1989.
7. Chiyokura, H., "An extended rounding operation for

- modeling solids with freeform surfaces," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 7, No. 12, pp. 27-36, 1987.
8. Harada, T., Toriya, H. and H. Chiyokura, H., "An enhanced rounding operation between curved surfaces in solid modeling," In T.S. Chua and T.L. Kunii, editors, *CG International '90*, Springer-Verlag, Tokyo, pp. 563-588, 1990.
9. 국형석, 두 자유 곡면간의 교선 계산 및 블렌드 곡면 생성에 관한 연구, 서울대 석사학위논문, 1991.
10. 주상윤, "비매개변수곡면의 블렌딩," *대한산업공학회지*, 제17권, 제1호, pp. 9-16, 1991.
11. 정연찬, Z-Map곡면의 읍셋과 블렌드 곡면 형성에 관한 연구, KAIST 석사학위논문, 1991.
12. 주상윤, 전차수, "가공데이터로 주어진 곡면간의 블렌딩," *한국정밀공학회지*, 제10권, 제1호, pp. 108-113, 1993.
13. 주상윤, "비지어 곡면에 의한 블렌드 곡면의 모델링 M," *한국 CAD/CAM학회 논문집*, 제2권, 제2호, pp. 122-129, 1997.
14. Dieter, G.E., *박관 금속의 성형*, 전기찬 역, 반도출판사, 1993.
15. 이종문, 김종원, "자동차 패널 성형 공정의 3차원 유한요소 해석에 관한 연구," *한국소성가공학회지*, 제6권 제2호, pp. 152-153, 1997.
16. Khaldi, E., "Industrial Validation Cases for New Rapid Stamping Simulation Solution", *Proceedings of HAN PAM '98*, pp. 409-443, 1998.
17. Choi, B.K., *Surface Modeling for CAD/CAM*, Elsevier Science Publish, 1991.
18. SINTEF, *SISL Reference Manual*, SINTEF, 1998.
19. "NUMISHEET 96-Problem Definition: B2", [http://roblix.eng.ohiostate.edu/~sridhar/numisheet/B2\\_S\\_Rail.html](http://roblix.eng.ohiostate.edu/~sridhar/numisheet/B2_S_Rail.html).
20. 김동수, 전차수, 박세형, "위상정보를 이용한 다면체 모델의 NC가공 경로생성," '98 CAD/CAM학회 학술 발표회 논문집, pp. 287-293, 1998.
21. 이상현, "비다양체 모델의 읍셋 기능 개발," *한국 CAD/CAM학회 논문집*, 제3권, 제1호, pp. 1-14, 1998.
22. Pham, B., "Offset curves and surfaces: a brief survey," *Computer Aided Design*, Vol. 24, No. 4, pp. 233-229, 1992.
23. Vida, J., Martin, R.R. and Varady, T., "A survey of blending methods that use parametric surfaces," *Computer Aided Design*, Vol. 26, No. 5, pp. 341-364, 1994.
24. Ho-Le, K., "Finite element mesh generation methods: a review and classification," *Computer Aided Design*, Vol. 20, No. 1, pp. 27-38, 1998.



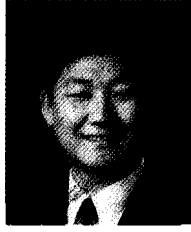
### 이 원 경

1997년 국민대학교 기계설계학과 학사  
 1999년 국민대학교 기계설계학과 석사  
 1999년~현재 SIEMENS 오토모티브(주) 연구원  
 관심분야: CAD/CAM, 금형설계



### 인 정 제

1986년 서울대학교 공과대학 기계설계학과 학사  
 1988년 서울대학교 대학원 기계설계학과 석사  
 1992년 서울대학교 대학원 기계설계학과 박사  
 1993년~1996년 자동차 부품연구원 공정개발 연구실장, 선임연구원  
 1996년~1999년 고동기술연구원 생산기술연구실, 책임연구원  
 1999년~현재 인덕대학 컴퓨터응용기계계열, 전임강사  
 관심분야: CAE, 박관성형 공정 해석, 스텝핑 금형의 설계 최적화



### 이 상 현

1986년 서울대학교 기계설계학과 학사  
 1988년 서울대학교 기계설계학과 석사  
 1993년 서울대학교 기계설계학과 박사  
 1993년~1995년 신도리코 기술연구소 선임/책임 연구원  
 1996년~현재 국민대학교 자동차공학과 조교수  
 관심분야: CAD/CAM, 금형설계, 차체 설계 및 생산