

## 조정 메쉬의 각진 모서리를 유지하기 위한 수정 Doo-Sabin 곡면 분할 알고리즘 개발

이현찬\*, 주병준\*\*, 홍충성\*\*\*

### Development of an Algorithm Preserving Sharp-Edges of Control Meshes in the Doo-Sabin Subdivision Scheme

Lee, H. C.\*, Joo, B. J.\*\* and Hong, C. S.\*\*\*

#### ABSTRACT

Recently, designing 3D objects using various modeling techniques become getting more important issues in related industrial fields. The subdivision scheme is a technique that generates a smooth surface through many times of refinement processes that split polygons of control mesh into several smaller polygons. In this paper, we propose a new subdivision algorithm that preserves sharp-edges of control mesh after several refinement processes in the Doo-Sabin subdivision scheme. Using the proposed algorithm, the Doo-Sabin subdivision scheme can be well applied to modeling 3D objects with sharp-edges.

**Key words** : Subdivision, Refinement, Mesh, Sharp-Edge

#### 1. 서 론

오늘날 새로운 제품을 디자인, 평가, 개발하기 위해 사용되고 있는 물리적 목업(mock-up)은 점차 3차원 가상 목업의 형태로 대체되고 있고, 이는 관련 산업 전반에서 시간과 비용의 측면에서 매우 중대한 이슈로 떠오르고 있다. 실제로 많은 자동차 회사들에서 신차의 개발 과정에 CAD 시스템 기반의 가상디자인(Virtual Design)을 도입함으로써 개발비용과 시간을 크게 단축시키고 있다. 이러한 추세는 앞으로 가상의 3차원 제품 모델링이 물리적 목업을 완전히 대체하고 신제품의 개발비용과 시간이 최대한 단축될 때까지 계속될 전망이다.

물체를 3차원으로 디자인하는 방법에는 곡면 모델링(surface modeling), 솔리드 모델링(solid modeling), subdivision 등의 여러 가지 방법이 있다. 곡면 모델링은 주어진 조정 다각형(control polygon)의 보간

(interpolation)을 통하여 생성된 베지에르(Bezier) 혹은 B-스플라인(B-Spline) 곡면을 이용하여 물체의 외형적인 곡면을 생성해내는 방법이다. 솔리드 모델링은 구(sphere)나 원통(cylinder) 등 여러 가지 기본 형상들에 대한 다양한 연산을 통해, 면으로 이루어진 외형뿐만 아니라 내부까지도 꼭 찬 형태의 3차원 물체를 디자인하는 방법이다.

본 연구의 배경이 되는 subdivision이란 조정 메쉬(control mesh)에 refinement 프로세스를 여러 번 수행한 결과로 얻는 부드러운 형태의 곡면을 통해 3차원 물체를 디자인하는 방법이다. Refinement란 조정 메쉬의 다각형들을 더 작은 새로운 다각형으로 분할하여 새로운 메쉬를 얻는 과정이다. Fig. 1과 같이 refinement를 여러 번 수행해 나아갈수록 메쉬는 점차

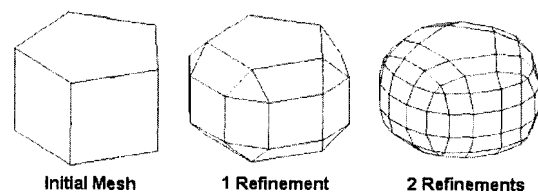


Fig. 1. Doo-Sabin refinement.

\*홍익대학교 정보컴퓨터공학부  
\*\*한국과학기술원 산업공학과  
\*\*\*홍익대학교 정보산업공학과  
- 논문투고일: 2002. 04. 01  
- 심사완료일: 2002. 07. 31

더 부드러운 곡면에 가까운 형태로 수렴하게 된다.

전통적인 subdivision 방법은 크게 Doo-Sabin<sup>[1]</sup>, Catmull-Clark<sup>[2]</sup>, Loop<sup>[3]</sup>의 세 가지 방법을 들 수 있고, 이 외에도 여러 가지 방법이 현재까지 상당수 개발되어 왔다. 각각의 방법은 독자적인 꼭지점 생성 방법과 위상(topology) 구축 방법을 제시하고 있다.

Doo-Sabin subdivision 방법은 George Chaikin의 코너컷팅(corner-cutting)에 의한 곡선 생성 방법을 2차 곡면(bi-quadratic uniform B-spline surface)으로 확장하여 최초로 개발된 subdivision 방법이다. 임의의 위상을 갖는 메쉬에 대한 refinement가 가능하며, 무한대의 refinement에 의해 생성된 곡면은 C<sup>1</sup> 연속성(continuity)을 보장한다. 이 방법은 기존의 곡면 모델링과는 달리, 3차원 꼭지점들로 이루어진 메쉬를 통해 곡면을 얻을 수 있는 매우 간단한 방법을 제시하고 있다<sup>[1]</sup>.

Catmull-Clark subdivision 방법은 Doo-Sabin subdivision 방법론을 응용하여 개발된 3차 곡면(bi-cubic uniform B-spline surface)에 대한 subdivision 방법이다. Doo-Sabin 방법과는 다른 위상 구축방법과 꼭지점 계산 방법을 제시하고 있다. 마찬가지로 임의의 위상을 갖는 메쉬에 대한 refinement가 가능하고, 결과 곡면은 C<sup>1</sup> 연속성만을 보장하는 extraordinary vertex를 제외한 모든 꼭지점에서 C<sup>2</sup> 연속성을 보장한다<sup>[2]</sup>.

Loop subdivision 방법은 Doo-Sabin이나 Catmull-Clark의 subdivision 방법과 유사하나, Doo-Sabin과 Catmull-Clark 방법이 2차 곡면과 3차 곡면을 지원하는 것과 달리, 4차 곡면(quartic uniform box spline)에 대한 subdivision 방법이다. 또한 Loop subdivision 방법은 임의의 위상을 지원하지 않으며 오직 삼각 메쉬에 대한 refinement만이 가능하다. Catmull-Clark 방법과 마찬가지로 C<sup>1</sup> 연속성만을 보장하는 extraordinary vertex를 제외한 모든 꼭지점에서 C<sup>2</sup> 연속성을 보장한다<sup>[3]</sup>.

기타 subdivision 방법들로는 Butterfly<sup>[4]</sup>, Kobelt<sup>[5]</sup>, 4-8 subdivision 방법<sup>[6]</sup> 등 여러 가지 방법이 현재까지 개발되고 있다.

subdivision 방법은 곡면 모델링시, 조정 메쉬(control mesh) 정보만을 이용하여 복잡한 계산 과정을 거치지 않고 곡면을 쉽게 생성할 수 있으며, refinement를 무한히 반복하게 될 경우 생성되는 곡면은 사용된 방법에 따라 일정 수준 이상의 연속성을 지니게 되는 장점이 있다. 그러나 코너컷팅 효과에 의해 점차 부드러운 형태로 곡면이 수렴하게 되는 subdivision 방법은 모델의 일부분에서 각진 부분의 유

지가 필요하게 될 경우 사용하기 힘든 단점이 있다.

이러한 요구사항을 고려하여 subdivision 수행시 각진 모서리를 유지하는 연구가 DeRose *et al.*<sup>[7]</sup>에 의하여 수행되었다. 이 연구는 애니메이션에 필요한 곡면 모델링을 위하여 Catmull-Clark의 subdivision을 이용할 때, 코너컷팅 효과가 덜 나타나기 원하는 edge에 가중치를 부여하고 가중치에 따라 subdivision 마스크(mask)를 정의함으로써 각진 모서리의 유지를 가능하게 하였다.

본 연구에서는 Doo-Sabin subdivision 방법에서 조정 메쉬의 날카롭게 각진 부분을 refinement를 여러 번 수행하여도 유지할 수 있게 하는 알고리즘의 개발을 연구의 목적으로 하고 있다. Doo-Sabin subdivision 방법에서 조정메쉬의 각진 부분을 유지하는 작업은 refinement 단계를 한번 수행함에 따라 edge가 face에 대응되며 변해나가기 때문에, Catmull-Clark subdivision 방법에 비해 subdivision 마스크를 정의하는 작업만으로는 불가능하다. 현재 CAD 상용 시스템은 이러한 subdivision 곡면의 지원을 하지 않고 있으며, 애니메이션 제작에 주로 사용되는 MAYA나 3D MAX등에서 간단한 Catmull-Clark 방법의 subdivision 곡면 모델링 기능이 제공되어지고 있다.

본 연구의 결과 알고리즘을 Doo-Sabin subdivision 방법에 적용하면 refinement에 의한 코너컷팅 효과를 사용자가 원하는 메쉬의 특정 부분에서 억제하는 결과를 가져오게 되므로 최종 결과 곡면의 꼭지점 좌표의 수정 없이도 원하는 각진 결과를 쉽게 얻을 수 있을 것이라 기대된다.

2장에서는 기존의 Doo-Sabin subdivision 알고리즘의 기본 개념에 대하여 알아본 후, 실제 구현 결과로 나타나는 알고리즘의 특징에 대하여 서술한다. 3장에서는 subdivision을 통하여 곡면 생성시 각진 부분을 유지하기 위하여, Doo-Sabin subdivision 알고리즘을 개선한 Edge-Chain 알고리즘의 개념과 구현 방법에 대하여 설명하고, 실제 예제를 통하여 결과를 구현 결과를 보여준다. 4장에서는 본 연구의 결론과 함께 추후 연구 방향을 알아본다.

## 2. Doo-Sabin Subdivision 방법

### 2.1 Subdivision의 기본 개념

메쉬(mesh)란 꼭지점(vertex), 모서리(edge), 면(face)으로 이루어진 그물 모양의 기하학적 형상을 뜻하며, 조정 메쉬란 subdivision에서 refinement를 수행하기 위해 디자인된 초기 입력 값이다. Valence란 하

나의 꼭지점에 연결된 모서리의 수를 뜻하며, 대부분의 꼭지점(ordinary vertex)이 갖는 valence와는 다른 valence를 갖는 꼭지점을 extraordinary vertex라고 정의한다.

Subdivision 곡면이란 전장에서 설명한 것과 같이 조정 메쉬에 refinement 프로세스를 여러 번 반복하여 수행한 결과로 얻는 부드러운 형태의 곡면이다. Refinement란 조정 메쉬의 다각형들을 더 작은 다각형으로 분할하여 새로운 메쉬를 얻는 과정으로 Fig. 1에 refinement 프로세스의 반복 수행에 따른 메쉬의 세밀화 과정이 잘 나타나있다. Subdivision 곡면에서는 여러 번의 refinement 프로세스를 거침으로써 초기 조정 메쉬는 결국 매우 부드러운 형상으로 수렴하게 된다. Refinement 프로세스는 크게 조정 메쉬의 꼭지점의 좌표값을 이용하여 새로운 꼭지점을 계산 및 생성하는 단계와, 새로운 꼭지점들을 연결하여 면과 모서리를 생성하는 위상 구축의 단계로 나눌 수 있는데, 각각의 subdivision 방법에 따라 새로운 꼭지점 계산 방법과 위상 구축 방법에는 많은 차이가 있다.

Subdivision 마스크란 조정 메쉬의 꼭지점들의 좌표값을 이용하여 새로운 꼭지점들의 좌표를 계산할 때 사용되는 조정 메쉬의 꼭지점들에 대한 가중치를 뜻한다. Doo-Sabin subdivision 방법에서는 조정 메쉬의 각 면에서 그 면이 갖는 꼭지점의 수 만큼의 새로운 꼭지점이 생성되는데, 이 때의 마스크는 Fig. 2와 같이 9:3:3:1이 된다. 마찬가지로 각각의 subdivision 방법마다 고유한 마스크를 이용하여 새로운 꼭지점을 계산하게 된다<sup>1)</sup>.

새로운 꼭지점을 계산할 때 조정 메쉬의 면에서 계산되는 face point와 모서리에서 계산되는 edge point, 꼭지점에서 계산되는 vertex point의 개념은 각각의 subdivision 방법마다 차이가 있다. Fig. 3에서 보여주고 있는 Doo-Sabin 방법에서의 face, edge, 그리고 vertex point는 조정 메쉬에서 새로운 꼭지점을 생성하

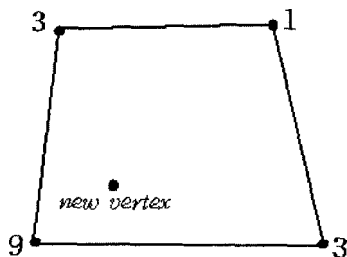


Fig. 2. Doo-Sabin mask.

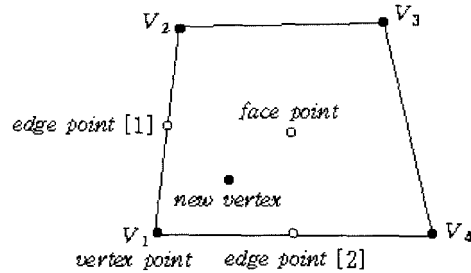


Fig. 3. Face, edge, vertex point.

기 위한 계산 과정에 사용되는 임시 좌표값일 뿐이며, 이것을 이용하여 새로운 꼭지점을 계산하게 된다<sup>1)</sup>.

Face, edge, 그리고 vertex point와 함께 새 꼭지점(new vertex)의 계산식은 다음과 같다.

$$face\ point = \frac{\sum V_i}{n}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$edge\ point[k] = \frac{V_i + V_{i+1}}{2}, \quad k = 1, 2$$

$$vertex\ point = V_i$$

$$new\ vertex =$$

$$\frac{face\ point + \sum edge\ point[k] + vertex\ point}{4}$$

이러한 방식으로 새 꼭지점을 계산한 결과는, 조정 메쉬의 꼭지점을 9:3:3:1의 마스크를 통하여 직접 계산한 결과와 동일하다.

Doo-Sabin subdivision 방법에서 한 번의 refinement는 내부적으로 Fig. 5, Fig. 6, Fig. 8과 같은 세 단계로 이루어진다. 첫 단계에서는 새로운 꼭지점을 계산하고 조정 메쉬의 각 면에서 새로운 면과 모서리를 생성한다. 두 번째 단계에서는 조정 메쉬의 각 꼭지점에서 새로운 면과 모서리를 생성한다. 마지막 세 번째 단계에서는 조정 메쉬의 각 모서리에서 새로운 면을 생성한다<sup>1)</sup>.

## 2.2 자료 구조

Winged-Edge 자료구조는 메쉬가 갖는 모서리, 꼭지점, 면에 대한 정보를 효율적으로 저장하여 메쉬를 표현할 수 있는 자료구조로 3차원 메쉬의 위상을 다룰 때 많이 쓰이고 있다. 그러나 Winged-Edge 자료구조는 메쉬의 정보를 저장 및 표현하는 데에는 매우 효율적이지만, subdivision 과정 수행시 refinement 이전의 메쉬 정보를 이용하여 refinement 이후의 새로운 메쉬 정보를 생성해 내어야 하는 과정을 Winged-Edge 자

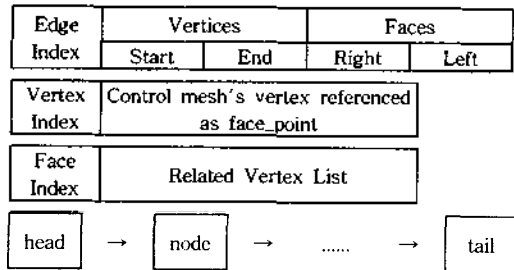


Fig. 4. Edited winged-edge data structure.

료구조가 갖는 정보만으로 수행해 나가기에는 지나치게 복잡하고 많은 질의가 필요하다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 보다 효율적인 메쉬 정보의 저장 및 표현을 위해 Fig. 4와 같이 Winged-Edge 자료구조를 수정하여 사용하였다.

우선 새로운 꼭지점이 계산될 때 이전 메쉬의 어느 꼭지점을 마스크 9로 참조하였는지에 대한 정보를 저장하게 되는데, 이 정보를 이용하면 Doo-Sabin 알고리즘에서 상대적으로 질의가 간단해지게 된다. 또 모서리의 자료구조에서 전혀 사용되지 않는 오른쪽 및 왼쪽 traverse에 대한 정보와 꼭지점과 면의 자료구조에서 인접 모서리의 자료구조를 삭제하였다. 그리고 각각의 면이 어떤 꼭지점으로 구성되어 있는지에 대한 질의가 많이 필요하였으므로 연결 리스트(Linked-list)의 형태로 면이 갖는 꼭지점의 리스트를 보관한다.

### 2.3 Doo-Sabin 알고리즘

#### 2.3.1 STEP 1

첫 단계는 Fig. 5와 같이 조정 메쉬의 모든 면에서 새로운 꼭지점, 모서리, 그리고 면을 생성해내는 단계이다.

조정 메쉬의 각 면이 포함한 꼭지점을 이용하여 새로운 꼭지점을 계산할 때에는 Doo-Sabin subdivision 마스크 또는 face, edge, vertex point를 이용하는 방법이 사용된다. 새로운 꼭지점의 계산 및 정의가 끝나

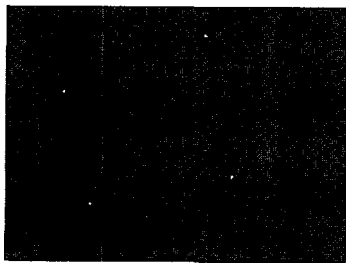


Fig. 5. STEP 1 of Doo-Sabin algorithm.

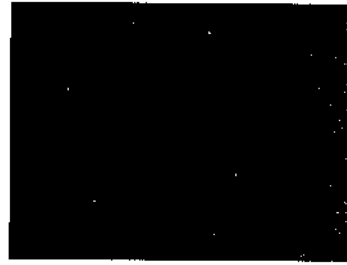


Fig. 6. STEP 2 of Doo-Sabin algorithm.

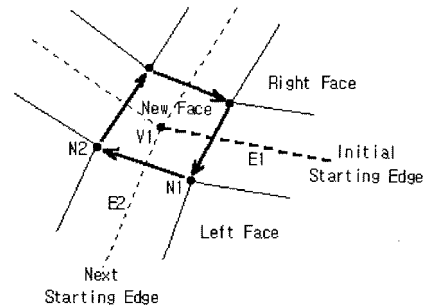


Fig. 7. Topological expression of STEP 2.

면 조정 메쉬의 각 면에서 생성된 꼭지점들을 연결하여 새 모서리와 면을 정의하게 된다.

#### 2.3.2 STEP 2

Fig. 6에 나타난 두 번째 단계에서는, STEP 1에서 생성된 새 꼭지점들 중 조정 메쉬의 각 꼭지점을 마스크 9로 참조하여 계산된 새 꼭지점들을 연결하여 새로운 면과 모서리를 생성해낸다. 따라서 STEP 1에서 새 꼭지점들이 계산될 때, 조정 메쉬의 어떤 꼭지점을 마스크 9로 참조했는지에 대한 정보를 저장하는 작업이 필수적이다.

STEP 2에서 생성되는 새로운 면의 형태는 조정 메쉬 꼭지점의 valence에 따라 결정된다. 예를 들어 꼭지점의 valence가 5이면 오각형 면이 생성되고, valence가 3이면 삼각형 면이 생성된다.

Fig. 7은 STEP 2의 알고리즘을 보여주는 그림이다. 점선으로 표시된 메쉬가 조정 메쉬이고, 실선이 새로 생성된 메쉬이다. 먼저 조정 메쉬의 꼭지점 V1에 인접한 모든 모서리(E1, E2를 포함하여 4개)를 검색하고, V1을 마스크 9로 참조한 새 꼭지점(N1, N2를 포함하여 4개)을 검색한다. 그리고 랜덤하게 E1이 초기 시작 모서리(initial starting edge)로 선택되고 이 모서리의 왼쪽 면(left face)을 찾아낸다. 각 모서리의 왼쪽, 오른쪽 면의 정보는 초기 조정 메쉬에 이미 정의



Fig. 8. STEP 3 of Doo-Sabin algorithm.

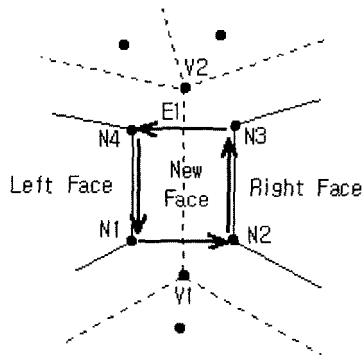


Fig. 9. Topological expression of STEP 3.

되어 있다고 가정하며 새 메쉬의 왼쪽, 오른쪽 면의 정보는 STEP 3이 끝난 후에 정의한다. 왼쪽 면에 속하면서 V1을 마스크 9로 참조한 새 꼭지점은 N1이 된다. 첫 번째 새 꼭지점의 검색이 끝나면, 왼쪽 면에 포함되는 모서리 중에서 V1에 인접하면서 초기 시작 모서리가 아닌 모서리 E2가 다음 시작 모서리가 된다. 같은 방법으로 새 꼭지점 N2를 검색하면 새로운 모서리와 면을 생성해 낼 수 있다.

### 2.3.3 STEP 3

마지막 세 번째 단계에서는 Fig. 8과 같이 조정 메쉬의 모든 모서리에서 각 모서리의 시작 꼭지점과 끝 꼭지점을 마스크 9로 참조한 새 꼭지점들을 연결하여 새로운 면을 생성한다. STEP 3에서 생성되는 새로운 면은 항상 사각형의 형태를 갖는다.

Fig. 9는 STEP 3의 알고리즘을 보여주고 있다. 먼저 모서리 E1의 시작 꼭지점 V1과 끝 꼭지점 V2를 찾아낸 후에 E1의 오른쪽 면과 왼쪽 면을 찾아낸다. 그리고 E1의 시작 꼭지점인 V1을 마스크 9로 참조하여 계산된 모든 새 꼭지점(N1, N2를 포함하여 세 개)과 오른쪽 면이 포함하는 모든 새 꼭지점들과의 비교를 통해 일치하는 꼭지점을 검색하면 N2가 선택된다.

마찬가지로 왼쪽 면이 포함하는 모든 새 꼭지점과

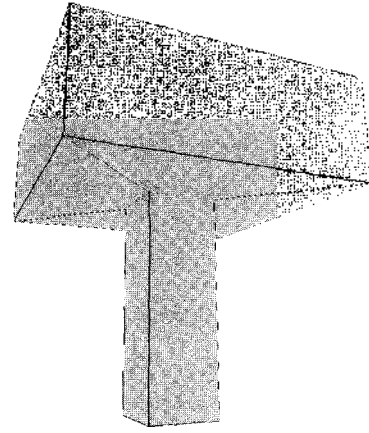


Fig. 10. Example - initial control mesh.

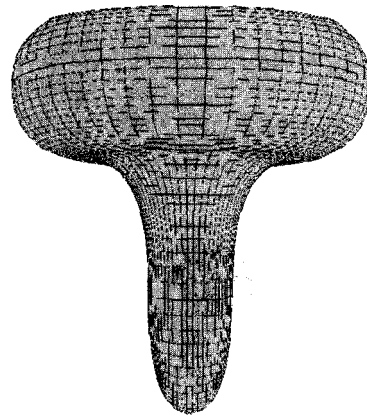


Fig. 11. Example - After 5 refinements using Doo-Sabin algorithm.

일치하는 꼭지점은 N1이 된다. 같은 방법으로 끝 꼭지점인 V2에 대하여 검색을 수행하면 N3와 N4가 선택된다. 이렇게 검색된 네 개의 새 꼭지점들을 연결하면 STEP 3에서 새로운 면을 생성할 수 있다.

위와 같은 세 단계의 위상 구축이 끝나면 모든 새 모서리에 대해 오른쪽, 왼쪽 면의 정보를 저장하게 된다. 그러나 명목상으로 오른쪽과 왼쪽이라는 구분이 있을 뿐, 실제로는 모서리에 대한 방향과는 무관하게 인접한 두 개의 면이 오른쪽, 왼쪽 모서리로 각각 저장된다.

### 2.4 구현(Implementation) 결과

Fig. 10의 나사 예제로 Doo-Sabin subdivision 방법에 대한 테스트를 수행하였다. 이 예제의 초기 조정 메쉬는 28개의 모서리, 14개의 면, 16개의 꼭지점으로

구성되어 있다. 여러 번의 refinement 적용 후에 메쉬는 매우 부드러운 형상으로 바뀌었음을 Fig. 11을 통하여 확인할 수 있다.

Fig. 11에서처럼 조정 메쉬는 refinement 프로세스를 여러 번 거치게 되면 날카롭게 각진 부분이 점차 부드럽게 변한다. 그러나 subdivision 방법을 이용한 특정 물체의 모델링의 결과에서 부분적으로 날카롭게 각이 진 형상을 필요로 하는 경우가 있다. 예를 들어 나사는 머리 부분과 몸통 부분이 90도로 날카롭게 각이 진 모양을 하고 있으나 앞에서 사용되었던 나사 형상 예제의 결과인 Fig. 11을 보면 각도가 90도로 날카롭게 유지되어야 하는 부분 역시 부드러운 곡면으로 변해있다. 따라서 결과물의 해당되는 수많은 꼭지점의 좌표를 일일이 수작업으로 조정해야 하므로 시간과 비용의 낭비가 크다고 할 수 있다

### 3. Edge-Chain 알고리즘

#### 3.1 모서리에 대한 제약

Edge-Chain 알고리즘은 조정 메쉬에서 특정한 부분에서 날카로운 모서리(sharp-edge)의 형상이 필요할 때 해당되는 부분의 모서리에 제약을 부과하여 날카로운 모서리가 유지되도록 Doo-Sabin 알고리즘을 부분적으로 개선한 것이다. Fig. 10의 조정 메쉬에서 나사와 같이 머리와 몸통의 이음새 부분이 날카롭게 각진 모양을 하고 있는 결과 메쉬를 얻고자 한다면 나사 머리와 몸통의 경계에 해당하는 네 개의 모서리에 제약을 부과한다. 제약 조건이 추가됨에 따라 Fig. 12와 같이

| Edge Index | Vertices |     | Faces |      | Constraint |
|------------|----------|-----|-------|------|------------|
|            | Start    | End | Right | Left |            |

Fig. 12. Data structure of edge with constraint.

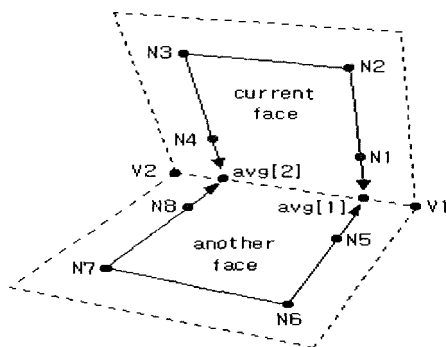


Fig. 13. Vertex calculation with constraints.

모서리의 자료구조에 제약(constraint) 항목이 추가되었다.

#### 3.2 새로운 꼭지점 계산 방법

Edge-Chain 알고리즘을 적용하여 제약 모서리가 포함된 면에서 새 꼭지점을 계산하기 위해서는 기존의 계산 방법에 변경이 따른다.

Fig. 13에서 제약 모서리는 V1V2이고 조정 메쉬의 현재 계산되는 면을 current face, 제약 모서리를 공유하고 있는 다른 면을 another face라고 하자. 먼저 기존 계산 방법으로 current face에서 네 개의 새 꼭지점  $N_i(i=1,2,3,4)$ 를, another face에서  $N_i(i=5,6,7,8)$ 를 계산한다. Fig. 13에서 제약 모서리의 시작 꼭지점인 V1을 마스크 9로 참조하여 계산된 새 꼭지점 N1과 N2는 하나의 직선을 이루고 있고 그 직선과 제약 모서리와의 교점을 구한다. 즉 N1N2를 제약 모서리에 투영(projection)시킨 결과와 같다. 같은 방법으로 another face에서도 제약 모서리의 시작 꼭지점인 V1을 마스크 9로 참조하여 계산된 새 꼭지점과 다른 새 꼭지점을 지나는 직선과 제약 모서리와의 교점을 구한다. 앞에서 구한 두 교점의 평균값이 avg[1]이며 이 점이 current face의 새 꼭지점이 된다. 마찬가지로 제약 모서리의 끝 꼭지점인 V2에 대해 avg[2]를 구한다.

결국 current face에 의해 정의되는 네 개의 새 꼭지점은 avg[1]과 avg[2], N2, N3이다. 제약 모서리의 시작 꼭지점과 끝 꼭지점을 마스크 9로 참조하여 계산된 N1과 N4는 사용하지 않게 된다. 조정 메쉬의 제약 모서리 상에서 생성되는 avg[1]과 avg[2]를 연결하는 모서리도 역시 제약 모서리가 된다.

Fig. 13과 Fig. 14를 비교해 보면, 제약 모서리를 포함하는 두 면에서 생성되는 새 꼭지점의 수는 포함하지 않는 두 면에서 정의된 것 보다 두 개가 적다.

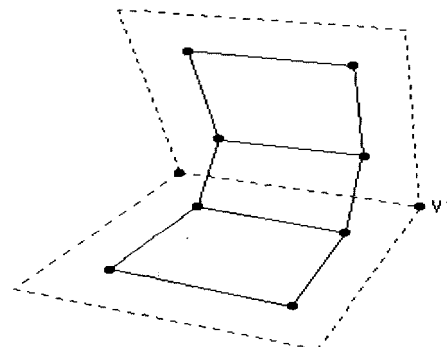


Fig. 14. Vertex calculation without constraints.

또 두 면 사이에서 조정 매쉬의 모서리에 대하여 새로이 생성되는 면 역시 제약 모서리를 포함하는 경우에는 생성되지 않는다.

### 3.3 Doo-Sabin 알고리즘의 수정

#### 3.3.1 STEP 1

제약 모서리를 포함하고 있다면 제약 모서리를 포함하는 또 다른 면(another face)을 동시에 참조하여 새 꼭지점, 모서리, 면을 생성하게 된다. 이 알고리즘을 조정 매쉬의 모든 면에 대하여 수행해 나가다 보면 새 꼭지점이 중복 생성되는 경우가 있다. 위와 같은 오류를 방지하기 위해 이전에 생성된 꼭지점과 모서리의 리스트를 배열(array)의 형태로 보관하고 있다가 다음 면이 제약 모서리를 포함하고 있는 경우 이미 생성된 것과 동일한 꼭지점과 모서리는 생성하지 않는다. 수정된 STEP 1의 위상 알고리즘은 다음과 같다.

#### 3.3.2 STEP 2

Fig. 13에서 제약 모서리를 포함하고 있는 두 개의 면에서 그 모서리의 시작 꼭지점 혹은 끝 꼭지점을 마스크 9로 참조한 새 꼭지점은 단 하나 뿐이다. 따라서 제약 모서리가 다음 번 시작 모서리가 되었을 경우, 왼쪽 면은 바로 전의 면과 동일한 새 꼭지점을 포함하고 있으므로, 이 때 생성되는 새 모서리는 시작 꼭지점과 끝 꼭지점이 동일하다. 이러한 오류를 방지하기 위해 시작 모서리가 제약 모서리가 될 경우 새 모서리의 생성 없이 바로 시작 모서리를 다음으로 바꾼다. 수정된 STEP 2의 위상 알고리즘은 다음과 같다.

#### 3.3.3 제약 모서리의 연쇄 생성 알고리즘

Fig. 15처럼 두 개의 기존 제약 모서리 사이에서 생성되는 새 모서리 역시 제약을 가져야 연속되는 날카

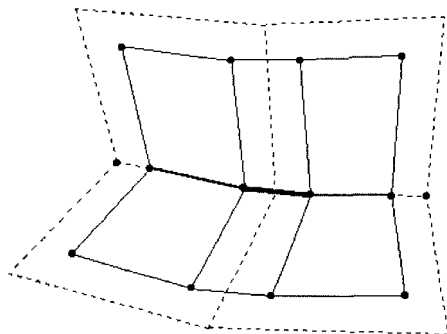


Fig. 15. New edge constraints.

로운 모서리의 유지가 가능하다. 이 알고리즘은 새 모서리가 생성될 때마다 수행되어 제약부와 여부를 결정하게 된다.

새로 생성된 모서리에 연결된 모든 모서리들 중 시작 꼭지점과 끝 꼭지점의 양쪽 모두에 각각 제약 모서리가 포함되어 있다면 이 모서리 역시 연쇄 생성 알고리즘에 따라 제약 모서리가 된다. 제약 모서리 연쇄 생성 알고리즘은 다음과 같다.

STEP 3의 알고리즘과 생성된 모든 새 모서리에 대하여 오른쪽, 왼쪽 면을 설정하는 알고리즘은 기존의 Doo-Sabin 방법과 동일하다.

#### 3.3.4 수정된 Doo-Sabin 알고리즘

이상에서 제시한 수정된 부분들은 Doo-Sabin 알고리즘에 쉽게 적용될 수 있다. 수정된 STEP 1과 STEP 2는 기존 알고리즘에 조건문(if)의 형태로 삽입이 가능하며 제약 모서리 연쇄 생성 알고리즘은 refinement의 마지막 단계에 추가될 수 있다. STEP 3의 왼쪽, 오른쪽 면 설정 단계는 종전과 동일하다. 기존 Doo-Sabin 알고리즘에 제약 모서리 조건이 추가된 Edge-Chain 알고리즘은 Fig. 16과 같이 요약될 수 있다.

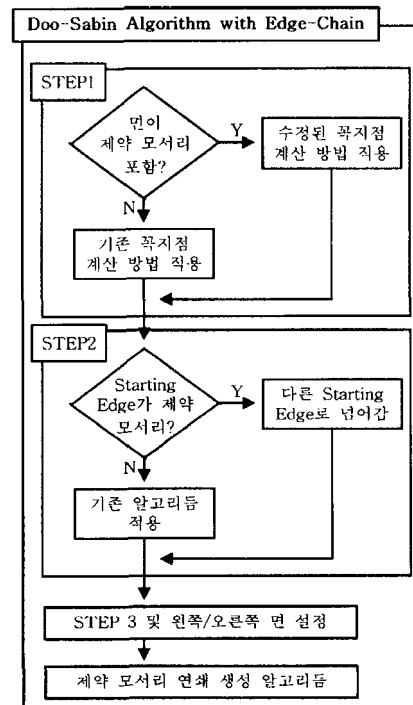


Fig. 16. Edge-Chain algorithm.

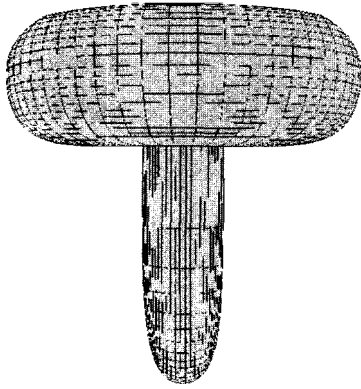


Fig. 17. Example - After 5 refinements using Edge-Chain algorithm.

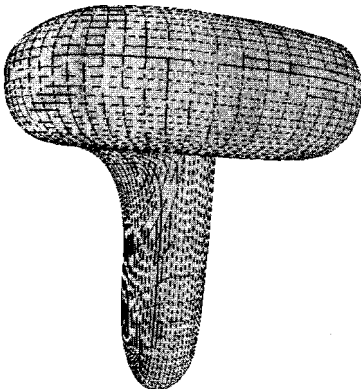


Fig. 18. Example - After 5 refinements with 3 edge constraints.

### 3.4 Edge-Chain 알고리즘 결과

기존의 Doo-Sabin subdivision 방법을 개선한 Edge-Chain 알고리즘을 예제를 통해 테스트 해 본 결과, 초기 메쉬에서 제약을 준 모서리를 포함하는 두 개의 면 사이의 각도는 refinement를 여러 번 수행하여도 초기 메쉬에서의 각도와 동일하게 유지되었다. 나사 예제의 4개 모서리에 제약을 부과하고 수행한 결과인 Fig. 17에서 볼 수 있듯이 Edge-Chain 알고리즘은 기존 Doo-Sabin 방법에 잘 적용되었고 초기 조정 메쉬에서 제약을 준 부분의 각도가 그대로 유지되고 있음을 알 수 있다.

초기 메쉬에서 닫힌(closed) 형태의 정사각형을 이루는 네 개의 모서리에 제약을 주고 여러 번 refinement를 수행하면 원에 가까운 형태로 수렴하게 된다. 마찬가지로 열린(open) 형태의 모서리들에 제약을 주고 여러 번 refinement를 수행하면 Fig. 18과

같이 곡선 혹은 원호의 형태로 수렴하게 된다.

Fig. 10의 나사 예제의 경우, 초기 조정 메쉬의 제약 모서리를 포함하는 두 면은 정확히 90°의 각도를 이루고 있기 때문에 refinement 후에도 새로 생성된 두 면 역시 90°를 유지하고 있다. 또 한 번의 refinement 후에 양쪽의 제약 모서리 사이에서 연쇄 생성된 제약 모서리를 포함하는 두 면도 90°의 각도를 이루는 좌우 네 개의 면을 이어 생성되었으므로 역시 90°의 각도를 유지할 수 있다. 따라서 여러 번의 refinement 후에도 Fig. 17과 같은 조정 메쉬의 각도를 유지할 수 있다. 이 예제는 특수한 경우의 예로, 네 개의 제약 모서리가 동일 평면에 놓여 있으며 네 개의 제약모서리를 포함하는 네 쌍의 면이 모두 90°를 유지하고 있기 때문에 조정 메쉬의 각도 유지가 가능하다.

그러나 대부분의 경우에 있어서는 제약 모서리들이 동일 평면에 놓여 있지 않으며 제약 모서리를 포함하는 두 면이 이루는 각도 역시 모두 다르기 때문에, Edge-Chain 알고리즘에 의해 날카로운 모서리(sharp-edge)의 형상을 유지할 뿐 조정 메쉬의 각도를 유지할 수는 없다.

## 4. 결 론

본 논문에서 제시한 Edge-Chain 알고리즘은 Doo-Sabin subdivision 방법에 간단하게 적용되어 조정 메쉬의 날카롭게 각진 부분을 쉽게 유지할 수 있고, 이는 3차원 제품 디자인 및 게임, 애니메이션에서의 캐릭터 디자인과 같은 다양한 분야에 많은 기여를 할 수 있으리라 기대된다.

향후 연구 과제로는 조정 메쉬의 특정 부분의 형상을 refinement 후에도 그대로 유지하는 알고리즘의 개발, Doo-Sabin 방법에 Edge-Chain 알고리즘을 적용하여 얻은 결과 곡면에 대한 연속성(continuity) 분석, Edge-Chain 알고리즘에 의해 생성되는 결과 곡면에 대한 순정(fairing), Catmull-Clark이나 Loop 등의 다른 subdivision 방법에서 각진 부분을 유지하는 알고리즘의 개발에 관한 연구 등을 계획 중이다.

## 참고문헌

1. Doo, D. and Sabin, M., "Behavior of Recursive Division Surfaces Near Extraordinary Points," *Computer-Aided Design*, Vol. 10, pp. 356-360, 1978.
2. Catmull, E. and Clark, J., "Recursively Generated B-spline Surfaces on Arbitrary Topological Meshes," *Computer-Aided Design*, Vol. 10, pp. 350-355, 1978.



3. Loop, C., "Smooth Spline Surfaces Based on Triangles," Master's thesis, University of Utah, Department of Mathematics, 1987.
4. Dyn, N., Levin, D. and Gregory J., "A Butterfly Subdivision Scheme For Surfaces Interpolation with Tension control," *A+-terpolatory Subdivision on Open Quadrilateral Nets with Arbitrary Topology*," *Computer Graphics Forum*, Vol. 15, pp. 409-420, 1996.
6. Luiz. Velho and Denis Zorin, "4-8 Subdivision," *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 18, pp. 397-427, 2001.
7. DeRose, T., Kass, M. and Trung, T., "Subdivision surfaces in character animation," *Proc. of SIGGRAPH 98*, pp. 85-94, 1998.
8. Computer Graphics Group, "On-line Geometric Modeling Notes," University of California, Davis, Department of Computer Science, 1996.



**이 현 찬**

1978년 서울대학교 산업공학과 학사  
 1980년 한국과학기술원 산업공학과 석사  
 1988년 The University of Michigan 산업공학과 박사  
 1980년~1983년 새아제강 기획실  
 1988년~1991년 전자통신연구원 자동설계 연구실 실장  
 1991년~현재 홍익대학교 정보산업공학과 부교수  
 관심분야: Geometric Modeling, Computer Graphics, Engineering Database, Information Systems



**홍 충 성**

1998년 홍익대학교 산업공학과 학사  
 2000년 홍익대학교 산업공학과 석사  
 2000년~현재 홍익대학교 정보산업공학과 박사과정  
 관심분야: Geometric Modeling, Computer Graphics, Subdivision Surface



**주 병 준**

2000년 홍익대학교 정보컴퓨터공학부 학사  
 2002년 홍익대학교 정보산업공학과 석사  
 2002년~현재 한국과학기술원 산업공학과 박사과정  
 관심분야: Scheduling, Semiconductor Manufacturing