

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

## 단면 정보를 이용한 형상의 재구성

박형준\*, 김광수\*

### 3D Shape Reconstruction from 2D Cross-Sections

Hyung-Jun Park\*, Kwang-Soo Kim\*

#### ABSTRACT

The three dimensional(3D) shape reconstruction from two dimensional(2D) cross-sections can be completed through three main phases : the input compilation, the triangular grid formation, and the smooth surface construction. In the input compilation phase, the cross-sections are analyzed to extract the input data required for the shape reconstruction. This data includes the number of polygonized contours per cross-section and the vertices defining each polygonized contour. In the triangular grid formation phase, a triangular grid, leading to a polyhedral approximations, is constructed by extracting all the information concerning contour links between two adjacent cross-sections and then performing the appropriate triangulation procedure for each contour link. In the smooth surface construction phase, a smooth composite surface interpolating all vertices on the triangular grid is constructed. Both the smooth surface and the polyhedral approximation can be used as reconstructed models of the object. This paper proposes a new method for reconstructing the geometric model of a 3D object from a sequence of planar contours representing 2D cross-sections of the object. The method includes the triangular grid formation algorithms for contour closing, one-to-one branching, and one-to-many branching, and many-to-many branching. The shape reconstruction method has been implemented on a SUN workstation in C.

#### 1. 서 론

여러 응용 분야에서는 삼차원 물체에 대한 정보가 단지 그 물체를 지나는 여러 개의 단면들(Cross Sections)로 나타나는 경우가 있다. 예를 들면, 의학에서는 CT 촬영을 통해 신체의 원하는 부분의 단면 영상들을 얻어 병의 진단 및 처방에 이용한다. 그리고 미생물학에서는 현미경을 조절하여 원하는 높이에서 미생물의 단면을 관찰한다. 또한 컴퓨터 그래픽스의 많은 응

용 분야에서도 전자 센서를 이용하여 삼차원 물체에 대한 단면들을 얻을 수 있다. 이러한 분야에서 단면들로부터 삼차원 물체에 대한 기하학적 모델(Geometric Model)을 구하는 일, 즉 형상 재구성(Shape Reconstruction)은 매우 중요하고 절실히 요구되는 일이다.

단면 정보를 이용한 형상의 재구성은 대개 다음의 절차에 의해 이루어진다<sup>(10)</sup>. 먼저 각 단면을 분석하여 삼차원 물체의 절단 평면과의 교선에 해당하는 폐곡선들

\* 포항공과대학 산업공학과/산업과학기술연구소

을 추출한 후, 폐곡선들을 다각형들로 근사시킨다. 그런 다음, 연속하는 두 단면 내에서 관련되는 다각형들을 삼각형망으로 연결시킴으로써 삼차원 물체를 삼각면체로 근사시킨다. 근사된 삼각면체를 재구성된 형상 모델로서 이용한다. 이러한 단면 정보를 이용한 형상 재구성은 크게 Correspondence, Single Branching, Multiple Branching, 그리고 Surface Fitting의 4개 부분으로 나누어 연구되어 왔다<sup>(11)</sup>.

Correspondence는 각 단면 내에 여러 개의 다각형들이 있는 경우, 한쪽 단면에 있는 어느 다각형(또는 다각형들)이 다른쪽 단면에 있는 어느 다각형(또는 다각형들)과 연결되는지를 결정하는 일이다. 일부 논문들(7, 8, 10)에서는 다각형들 간의 겹치는 정도를 기준으로 연결 여부를 결정하는 Overlap Method가 제시되었다. Overlap Method는 보통 측정된 단면들이 충분히 많은 경우에 이용한다. Overlap Method가 적용되기 힘든 상황에서는 재구성 모델에 대한 여러 가정들의 이용과 다각형들의 전체적인 측면에서의 분석을 통해 Correspondence를 해결하는 방법들도 제시되었다<sup>(11)</sup>.

Single Branching은 서로 다른 높이에 있는 두 개의 다각형의 외부를 삼각형으로 둘러싸는 일을 말한다. Single Branching의 해결 방법은 여러 논문들(1-6)에서 제시되었는데 대개의 경우 일정한 목적 함수를 설정한 다음, 이 목적 함수를 최소화시키는 가능해를 선택하였다. Keppel<sup>(1)</sup>은 근사된 다면체의 부피를 최대화시켰다. Fuchs, Kedem, 그리고 Usselman<sup>(2)</sup>들은 근사된 다면체의 면적을 최소화시켰다. 반면 Christensen과 Sederberg<sup>(3)</sup>들은 한 삼각형을 이룰 수 있는 두 개의 가능한 Span 중에서 길이가 작은 것을 순차적으로 선택하는 Heuristic 방법을 이용하였다. Cook와 Batnitsky<sup>(4)</sup>들은 두 개의 연결할 다각형들의 중심을 잇는 선분의 방향과 되도록 가까운 방향을 갖는 삼각형들을 형성시키는 Heuristic 방법을 이용하였다.

Multiple Branching은 인접한 두 개의 단면 중에서 한쪽 단면에 있는 여러 개의 다각형과 다른쪽 단면에 있는 여러 개의 다각형을 연결하는 일을 말하는데 이의 해결을 위해 여러 개의 Heuristic 방법들이 제시되었다(7-11). Zyda, Allan, 그리고 Hogan<sup>(8)</sup>들은 Multiple Branching과 다각형 안에 다각형이 있는 경우의 해결 방안을 제시했다. Boissonnat<sup>(9)</sup>는 Delaunay Triangulation 기법에 근거하여 Multiple Branching과 다각형 안에 다각형이 있는 경우의 해결 방안을 제시했

다.

Surface Fitting은 Correspondence, Single Branching, 그리고 Multiple Branching을 거쳐 얻어진 삼각형망을 이용하여 삼각형망 상의 모든 점들을 지나거나 근사하는 부드러운 곡면을 구하는 일을 말한다. 이러한 삼각형망을 이용한 곡면 형성 방법은 여러 논문들(12-18)에서 제시되었다.

본 논문에서는 인접한 두 단면 내에 존재하는 다각형들 간의 관련 유형을 쉽게 분류하고, 해당 관련 정보를 효율적으로 추출하는 방법을 제시한다. 그리고 Span 길이의 최소화에서 근거한 Single Branching 기법을 제시하며, 여러 개의 다각형들이 개입된 복잡한 형상에 대한 Multiple Branching을 체계적으로 처리할 수 있는 일반적인 해법을 제시한다. 또한 재구성된 형상 모델로서 삼각면체 뿐만이 아니라 접평면 연속성을 만족하는 부드러운 복합 곡면을 동시에 이용할 수 있게 한다.

제2장에서는 형상 재구성에 필요한 단면 정보의 추출 및 구조에 대해 설명하고, 제3장에서는 단면 정보로부터 삼각형망을 형성하는 과정에 대해 설명하며, 제4장에서는 삼각형망으로부터 복합 곡면을 형성하는 과정에 대해 설명한다. 그리고 제5장에서는 제시된 형상 재구성 방법의 구현과 적용 결과에 대해 언급하고, 제6장에서는 논문에서 제시된 형상 재구성 방법의 장단점 및 추후 연구방안에 대해 언급한다.

## 2. 단면 정보 준비

여러 응용 분야에서 사용되는 단면 측정 기구로는 CAT Scanner, PET Scanner, NMR Imager, 그리고 Ultrasound Imager 등이 있다. 그러나 측정 기구에 따라 다소 차이는 있겠지만, 측정된 단면 데이터는 대부분 단면 영상(Cross Sectional Image) 형태로 나타나게 된다. 측정된 단면 영상들은 많은 양의 메모리를 차지하므로 형상 재구성 기법에 그대로 사용되기가 힘들다. 그러므로 이러한 단면 영상들은 가능한 정보의 손실이 없으며 적은 양의 메모리로 처리 가능한 형태의 단면 정보로 전환되어야 한다.

일반적으로 단면 영상으로부터 단면 정보를 추출하는 과정은 다음과 같다. 먼저 각 단면 영상에 대해 경계선 검출기법(Boundary Extraction)을 적용하여 단면 내에 존재하는 폐곡선들을 추출한다<sup>(22)</sup>. 그런 다음, 추출된 폐곡선들에 대해 다각형 근사기법(Polygonal Fitting)을

적용하여 다각형들로 근사시킨다<sup>(6)</sup>. 그런 다음, 각 단면 내에 있는 다각형의 갯수와 각 다각형을 이루는 점들의 갯수와 좌표들을 저장한다. 다각형을 이루는 점들은 처리하기 편리하도록 일관된 순서(시계 방향 또는 반시계 방향)로 저장한다.

본 논문에서는 계층 구조로 이루어진 단면 정보를 입력 정보로서 사용한다. 최상위 구조는 전체 단면들의 갯수를 저장하고 단면들을 가리키고 있다. 단면은 각 단면 내에 있는 다각형들의 갯수를 저장하고 다각형들을 가리키고 있다. 그리고 다각형은 점들의 갯수를 저장하고 다각형 상의 점들을 반시계 방향으로 가리키고 있다. 점은 삼차원 좌표 값을 갖고 있다.

### 3. 삼각형망 형성

준비된 단면 정보로부터 삼각형망을 형성하는 과정은 다음과 같다. 가장 윗 단면과 아랫 단면에 있는 모든 다각형들에 대해 Contour Closing 기법을 적용하고, 중간을 연속하는 두 개의 단면들에 대해서는 단면 관련도를 작성 및 분석하여 다각형들 간의 관련 유형을 분류한 후, 각 유형에 따른 Triangulation 기법을 적용한다. 그런 다음, 이웃하는 삼각형들 사이에 연결성 정보(Connectivity)를 부여하여 삼각형망(Triangular Grid)을 형성함으로써 각 면이 삼각형인 다면체를 이룬다. 이때 구해진 삼각면체는 일종의 입체모델(Solid Model)로서 형상 재구성 모델로 이용된다.

#### 3-1. 단면 관련도 작성

단면 관련도는 연속하는 두 개의 단면 내에 존재하는 다각형들이 서로 어떻게 관련되는가를 나타내 주고, 한쪽 단면에 있는 어느 다각형(혹은 다각형들)이 다른쪽 단면에 있는 어느 다각형(혹은 다각형들)과 연결되어야 하는지를 나타내는 도표이다. 연속되는 두 개의 단면을 A, B(단면 A가 단면 B의 위에 있다고 가정)라고 하자. 그리고  $A_i(i=1, \dots, m)$ 는 단면 A의  $i$ 번째 다각형을 가리키고,  $B_j(j=1, \dots, n)$ 는 단면 B의  $j$ 번째 다각형을 가리킨다. 다각형  $A_i$ 와  $B_j$ 의 Convex Polygon을 각각  $P_i$ 와  $Q_j$ 라고 하고, 다각형  $P_i$ 와 다각형  $Q_j$ 를 단면 A(또는 B)와 평행한 평면에 놓았을 때 공통으로 겹치는 부분의 다각형을  $S_{ij}$ 라고 할 때, 다각형  $A_i$ 와 다각형  $B_j$ 의 관련 정도  $O_{ij}$ 는 다음 식에 의해 구해진다.

$$O_{ij} = 0.5 \frac{S_{ij} \text{의 면적}}{P_i \text{의 면적}} + 0.5 \frac{S_{ij} \text{의 면적}}{Q_j \text{의 면적}}$$

관련정도  $O_{ij}$ 는 항상 0과 1사이의 정규화된 수치(Normalized Value)를 나타낸다.  $O_{ij}$ 가 0에 가까워질수록 다각형  $A_i$ 와 다각형  $B_j$ 가 서로 겹치는 부분이 작아진다는 의미이고,  $O_{ij}$ 가 1에 가까워질수록 다각형  $A_i$ 와 다각형  $B_j$ 가 서로 겹치는 부분이 많아진다는 의미이다. 그러므로 만약  $O_{ij}$ 가 일정한 값보다 크거나 같으면, 다각형  $A_i$ 와 다각형  $B_j$ 는 서로 연결되어야 한다. 또한  $O_{ij}$ 가 일정한 값보다 작다면, 다각형  $A_i$ 와 다각형  $B_j$ 는 연결될 필요가 없다. 이러한 개념을 바탕으로 단면 A와 단면 B의 관련도 L의  $i$ 행  $j$ 열의 원소  $L_{ij}$ 는 다음 식에 의해 구해진다.

$$L_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } O_{ij} \geq \text{Threshold} \\ 0 & \text{if } O_{ij} < \text{Threshold} \end{cases} \quad (i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n)$$

일반적으로 인접한 단면 간의 간격이 작은 경우에는 Threshold 값이 형상 재구성 결과에 미치는 영향력은 매우 작다. 그러나 단면 간의 간격이 커질수록 Threshold 값의 영향력은 점점 커진다. 극단적인 경우에는 Threshold의 미세한 변동에 의해 원래의 삼차원 물체와 다른 형상 모델이 구해지거나 복수 개의 형상 모델이 구해질 수 있다. 일반적으로 단면 간격이 작은 경우에는 Threshold 값을 크게 설정하고, 단면 간격이 큰 경우에는 Threshold 값을 작게 설정한다.

#### 3-2. 단면 관련도 분석

연속한 두 개의 단면 사이에서 한쪽 단면에 있는 다각형(혹은 다각형들)과 다른쪽 단면에 있는 다각형(혹은 다각형들)이 연결되는 유형은 그림 1에서와 같이 One-To-One Link, One-To-Many Link, Many-To-Many Link, 또는 Self Link로 분류된다. Self Link는 한쪽 단면에 있는 한 다각형이 다른쪽 단면의 어느 다각형과도 연결되지 않은 경우인데 Contour Closing 기법이 적용된다. One-To-One Link는 한쪽 단면에 있는 한 개의 다각형과 다른쪽 단면의 한 개의 다각형이 연결되는 경우인데 One-To-One Branching 기법이 적용된다. One-To-Many Link는 한쪽 단면에 있는 한 개의 다각형과 다른쪽 단면의 여러 개의 다각형들이 연결되는 경우인데 One-To-Many Branching 기법이 적용된다. 그리고 Many-To-Many Link는 한쪽 단면에 있는 여러 개의 다각형들과 다른쪽 단면의 여러 개의

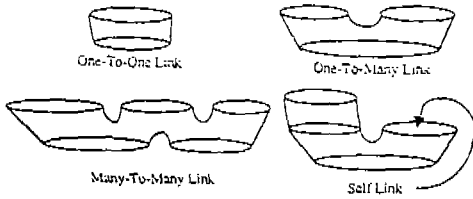


그림 1. Link의 4가지 유형들

다각형들이 연결되는 경우인데 Many-To-Many Branching 기법이 적용된다.

다음은 이러한 Link의 유형들이 단면 관련도에서 나타나는 조건식들을 나타낸다.

- 다각형  $A_p$ (또는  $B_q$ )가 Self Link인 경우

$$\sum_{j=1}^n L_{pj} = 0 \quad (\text{또는 } \sum_{i=1}^m L_{iq} = 0)$$

- 다각형  $A_p$ 와  $B_q$ 가 One-To-One Link인 경우

$$\sum_{j=1}^n L_{pj} = 1 \quad \text{그리고} \quad \sum_{i=1}^m L_{iq} = 1$$

- 다각형  $A_p$ 와 다각형  $B_j(j \in J)$ 가 One-To-Many Link인 경우

$$\sum_{j=1}^n L_{pj} = \sum_{j \in J} L_{pj} > 1 \quad \text{여기서 } J = \{j \mid L_{pj} = \sum_{i=1}^m L_{ij} = 1\}$$

- 다각형  $B_q$ 와 다각형들  $A_i(i \in I)$ 가 One-To-Many Link인 경우

$$\sum_{i=1}^m L_{iq} = \sum_{i \in I} L_{iq} > 1 \quad \text{여기서 } I = \{i \mid L_{iq} = \sum_{j=1}^n L_{ij} = 1\}$$

그외의 Many-To-Many Link는 복잡하여 수식으로 나타내기가 곤란하다. 단면 관련도가 크고 복잡해짐에 따라 위의 관계식들을 이용하여 단면 관련도로부터 Link들을 분류하고 해당 Link에 관련된 다각형들을 추출하는 일은 어렵고 복잡해진다. 작성된 단면 관련도로부터 Link의 유형들을 효과적으로 분류하여 각 Link 유형에 따른 Triangulation 기법을 적용하는데 필요한 정보(해당 Link에 관련된 다각형 혹은 다각형들)를 추출하는 일은 사용자의 개입없이 형상을 재구성하기 위해 무엇보다 선행되어야 한다. 본 논문에서는 Link의 분류 및 관련 정보 추출을 쉽고 효율적으로 처리할 수 있는 방안을 제시한다.

먼저 단면 관련도에서 한 행(또는 열)의 원소들이

모두 0인 경우(Self Link), 해당 행(또는 열)이 가리키는 다각형에 대해 Simple Contour Closing 기법을 적용한 후 해당 행(또는 열)을 삭제한다. 그런 다음, King<sup>(21)</sup>의 Rank Order Clustering 기법을 이용하여 단면 관련도를 재배열한다. 재배열된 단면 관련도로부터 부분 행렬을 추출하여 부분 행렬의 행과 열의 크기에 따라 Link를 분류하고 해당 Link의 관련 정보를 추출한다.

단면 관련도가 크고 복잡해도 Rank Order Clustering 기법에 의해 단면 관련도를 재배열하면, 각 Link는 단면 관련도에서 부분 행렬(Submatrix)의 형태로 나타난다. 그리고 각 부분 행렬의 행과 열의 크기에 따라 Link가 결정된다. 그러므로 초기에 작성된 단면 관련도로부터 어렵고 힘들게 Link의 조건식들에 근거하여 Link들을 분류하고 해당 Link에 대한 관련 정보를 추출할 필요가 없다. Rank Order Clustering 기법에 의해 재배열된 단면 관련도에 존재하는 부분 행렬의 크기에 따라 다음과 같이 Link를 분류하고 해당 관련 정보를 추출한다. 여기서 부분 행렬의 열의 수를  $p$ , 행의 수를  $q$ 라고 한다.

- (1)  $p=1, q=1$ (One-To-One Link) :  $p$ 행이 가리키는 다각형과  $q$ 열이 가리키는 다각형에 대해 One-To-One Branching 기법 적용
- (2)  $p=1, q > 1$ (One-To-Many Link) :  $p$ 행이 가리키는 다각형과  $1-q$ 열이 가리키는 다각형들에 대해 One-To-Many Branching 기법 적용
- (3)  $p > 1, q=1$ (One-To-Many Link) :  $q$ 열이 가리키는 다각형과  $1-p$ 행이 가리키는 다각형들에 대해 One-To-Many Branching 기법 적용
- (4)  $p > 1, q > 1$ (Many-To-Many Link) :  $1-p$ 행이 가리키는 다각형들과  $1-q$ 열이 가리키는 다각형들에 대해 Many-To-Many Branching 기법 적용

그림 2는 단면 관련도 작성 및 분석의 예를 나타낸다. 그림에서 재배열된 단면 관련도의 부분 행렬의 집합으로 이루어지며, 부분 행렬의 행과 열의 크기에 의해 Link의 유형이 정해짐을 알 수 있다.

### 3-3. Contour Closing

Contour Closing 기법은 Island의 존재 여부에 따라 Simple Contour Closing과 Contour Closing with Islands로 나누어진다. Island는 임의의 다각형 내부에 존재하는 다각형을 말한다.

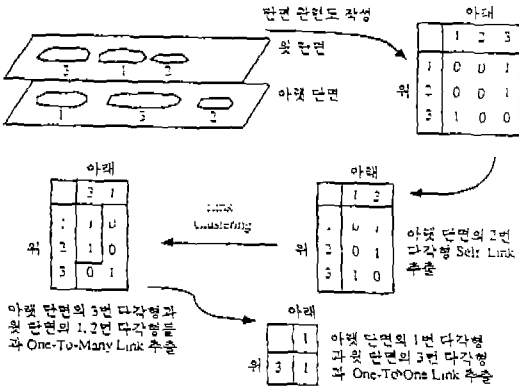


그림 2. 단면 관련도 작성 및 분석의 예

3-3-1. Simple Contour Closing

Simple Contour Closing은 일종의 Planar Triangulation<sup>(20)</sup>으로서 그림 3에서와 같이 다각형의

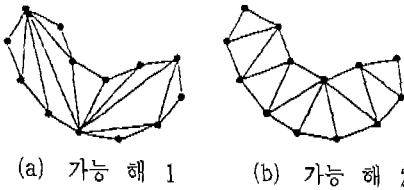


그림 3. 두 개의 가능한 Triangulation 해

내부를 서로 겹치지 않는 삼각형으로 채우는 일을 말한다. 다각형을 이루는 점의 갯수에 따라, 주어진 다각형에 대한 Triangulation 가능 해의 갯수는 매우 급격히 증가한다. 이러한 가능한 해들 중에서 목적에 잘 부합되는 해를 선택해야 한다. 그림 3은 한 다각형에 대한 두 개의 가능한 해를 나타낸다. (b)의 가능 해가 (a)의 것보다 다각형 내부에 채워진 변들의 길이가 작고, 정삼각형에 가까운 삼각형들이 많다. 다각형 내부에 채워지는 삼각형들의 모양은 복잡 곡면 형성 과정의 법선 벡터 추정에 영향을 미치므로 (b)의 가능 해처럼 다각형 내부에 채워진 변들의 길이가 작고, 정삼각형에 가까운 삼각형들이 많은 Triangulation 해를 선택해야 한다.

임의의 다각형 P를 이루는 m개의 점들은 반시계 방향으로 저장되어 있다. 다각형 P의 i번째 점을  $P_i (i=1, \dots, m)$ 라고 하자. 그리고 다각형 P 상에서 연속하

는 세 점  $P_{i-1}, P_i, P_{i+1}$ 가 삼각형으로 선택되기 위해 필요한 비용  $CV_i$ 를 다음과 같이 정의한다. 만약 세 점  $P_{i-1}, P_i, P_{i+1}$ 으로 유효한 삼각형을 이룬다면,  $CV_i$ 는 변  $P_{i-1} P_{i+1}$ 의 길이에 해당한다. 그렇지 않으면,  $CV_i$ 는 현재 세 점으로 삼각형을 이룰 수 없다는 의미로 매우 큰 값을 갖는다. 세 점  $P_{i-1}, P_i, P_{i+1}$ 으로 유효한 삼각형을 이루기 위해서는 변  $P_{i-1} P_{i+1}$ 이 다각형 P 내부에 존재해야 하고, 세 점이 이루는 삼각형 내부에 다각형 P 상에 있는 어느 점도 포함되지 않아야 한다. 본 논문에서는 비용을 가능한한 최소화 시키는 Heuristic 접근 방식을 이용하여 Simple Contour Closing 문제를 해결한다. 먼저 현재의 다각형 P 상에서 삼각형을 이루는데 가장 작은 비용  $CV_i$ 를 필요로 하는 세 점  $P_{i-1}, P_i, P_{i+1}$ 을 우선적으로 선택하여 삼각형을 이룬다. 그런 다음, 현재의 다각형 P에서 점  $P_i$ 를 삭제하여  $P_{i-1}$  다음에 점  $P_{i+1}$ 이 놓이도록 한다. 현재의 다각형 P를 이루는 점들의 갯수가 3개 보다 작을 때까지 수행을 반복한다. 삼각형을 이루는 세 점을 저장할 때에는 삼각형의 법선 벡터가 삼차원 볼체의 외부로 향하도록 저장 순서를 고려해야 한다.

3-2-2. Contour Closing with Islands

Contour Closing with Islands는 그림 4에서와 같이 Island들을 포함하는 임의의 다각형 내부 중 Island들의 내부를 제외한 나머지 부분을 서로 겹치지 않는 삼각형으로 채워넣는 일을 말한다. 이러한 Contour Closing with Islands는 One-To-Many Branching과 Many-To-Many Branching을 수행하는데 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 삼각형으로 채워질 부분을 여러 개 (Island 갯수+1)의 다각형으로 분할하여 각기 분할된 다각형에 대해 Simple Contour Closing을 적용한다.

Contour Closing with Islands 기법은 Recursion

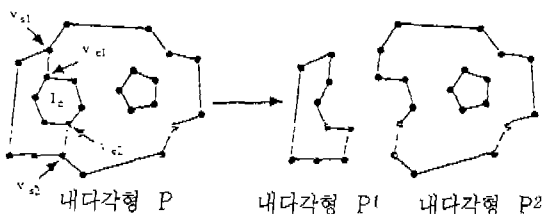


그림 4. Island 제거하기의 예

형태를 취하고 있다. 다각형 P가 Island를 포함하지 않는 경우, 다각형 P에 대해 Simple Contour Closing 기법을 적용한다. 다각형 P가 Island를 포함하는 경우, 그림 4에서와 같이 최적 분할 쌍을 이루는 두 변  $v_{s1}$   $v_{e1}$ 과  $v_{s2}$   $v_{e2}$ 를 기점으로 Island  $I_c$ 를 다각형 P에 병합시켜 두 개의 다각형 P1과 P2를 만든다. (여기서 다각형 P와 Island  $I_c$ 를 연결하는 서로 다른 두 변의 쌍들 중 다른 Island들과 교차하지 않는 쌍을 유효 분할 쌍이라고 할 때, 두 변의 길이의 합이 가장 작은 유효 분할 쌍을 최적 분할 쌍이라고 한다.) 그런 다음, 분리된 다각형 P1 P2에 대해 Recursion 형태로 Contour Closing with Islands 기법을 반복 수행한다.

3-4. One-To-One Branching

One-To-One Branching은 높이가 다른 두 다각형들이 이루는 측면을 삼각형으로 돌려짜는 일을 말한다. 본 논문에서는 Christiansen과 Sederberg<sup>(3)</sup>들이 사용한 방법과 비슷한 Span 길이를 최소화 시키는 Heuristic 기법을 제시한다. Span이란 한쪽 다각형에 있는 한 점과 다른쪽 다각형에 있는 점을 잇는 변을 말한다. 다각형 P와 다각형 Q를 이루는 점들의 갯수가 각각

$m, n (m \leq n)$ 이라 하자. 그리고 다각형 P의  $i$ 번째 점을  $P_i$ 라고 하고, 다각형 Q의  $j$ 번째 점을  $Q_j$ 라고 할 때, One-To-One Branching 기법은 다음과 같다.

먼저 다각형 P의 중심점이 다각형 P(또는 Q)를 포함하는 단면과 수직하고, 다각형 Q의 중심점을 지나는 직선 위에 놓이도록 다각형 P를 이동시킨다. 다각형 P'를 다각형 P에 대해 이동된 다각형이라고 하자. 그런 다음, 이동된 다각형 P'의 각 점에 대해  $m$ 개의 가능한 Span List들 중 Span들의 길이의 합이 가장 작은 Span List를 선택한다. (Span List 선택방법에 대한 설명은 아래에 있음) 선택된 Span List에서 연속하는 두 개의 Span으로부터 중복되지 않는 세 점으로 삼각형을 이룬다. 삼각형을 이룰 때 이동된 다각형 P'상의 점이 아닌 원래의 다각형 P상의 점을 사용한다. 삼각형의 법선 벡터가 삼차원 물체의 외부로 향하도록 저장 순서를 고려하여 삼각형들을 저장한다.

그림 5는 가능한 Span List를 형성하는 예를 나타낸다. 여기서 다각형 P'는 다각형 P에 대해 이동된 다각형을 가리킨다. 다각형 P'에 있는 임의의 점  $P_s$ 와 점  $P_s$ 에서 가장 가까운 거리에 있는 다각형 Q상에 있는 점  $Q_r$ 이 이루는 Span  $P_s Q_r$ 을 시작으로 현재의 Span이 초기 Span  $P_s Q_r$ 에 다시 도달할 때까지 반시계 방향으로 Span을 하나씩 선택함으로써 Span List를 형성한다. 현재의 Span이  $P_c Q_d$ 라고 할 때, Span  $P_{c+a} Q_d$  또는 Span  $P_c Q_{d+1}$  중에서 Span 길이가 작은 것을 다음 Span으로 선택한다. 그림 6은 모양이 다른 두 다각형에 대해 One-To-One Branching을 수행한 예를 나타낸다. 그림을 통해 구해진 삼각형들이 두 다각형이 이루는 측면을 잘 표현해 주고 있음을 알 수 있다.

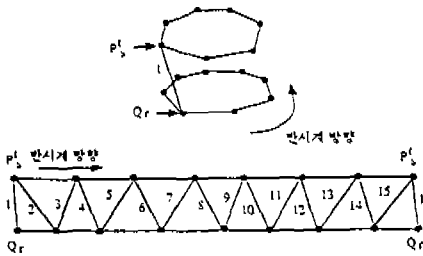
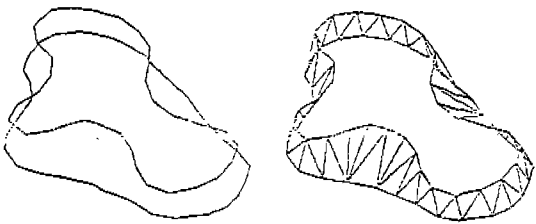


그림 5. Span List의 형성 예



(a) 두 개의 다각형 (b) 적용 결과

그림 6. One-To-One Branching의 적용 예

3-5. One-To-Many Branching

One-To-Many Branching은 연속하는 두 단면 중에서 한쪽 단면에 있는 한 개의 다각형과 다른쪽 단면에 있는 여러 다각형들을 삼각형으로 연결하는 Triangulation 기법이다. 본 논문에서는 One-To-Many Branching을 One-To-One Branching과 Contour Closing으로 체계적으로 분해하므로써 여러 개의 다각형들이 개입된 복잡한 One-To-Many Branching 문제에 간단하게 해결하는 Heuristic 기법을 제시한다.

One-To-Many Link에 포함된 여러 다각형을 포함하

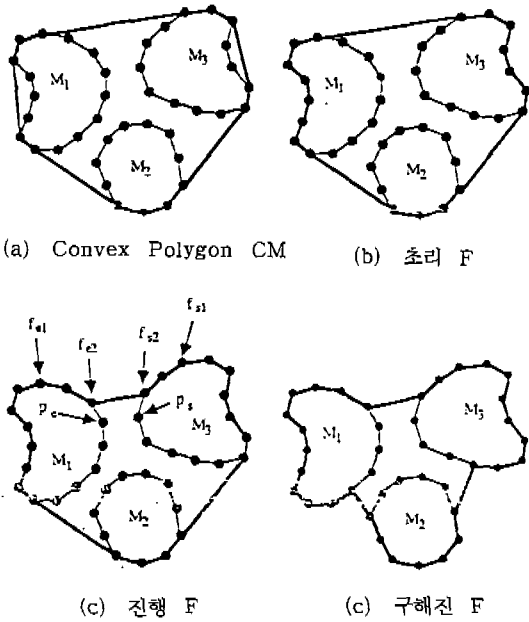


그림 7. 외다각형 구하기의 예

는 단면의 다각형을  $M_i (i=1, \dots, m)$  라고 하고, 한 개의 다각형을 포함하는 단면의 다각형을  $S$  라고 하자. 그리고 각 다각형을 이루는 점들은 반시계 방향으로 저장되어 있다고 할 때, One-To-Many Branching 기법은 다음과 같다. 먼저  $m$  개의 다각형  $M_i (i=1, \dots, m)$  로부터 외다각형 (Exterior Polygon) 을 구하여 다각형  $S$  와 외다각형에 대해 One-To-One Branching 기법을 적용한다. 그런 다음, 구해진 외다각형으로부터 내다각형들 (Interior Polygons) 을 구하여 각 내다각형에 대해 Contour Closing 기법을 적용한다. 다각형  $M_i (i=1, \dots, m)$  중에서 외다각형을 이루는데 참여하지 않은 다각형은 Island로서 처리된다. 내다각형 내부에 Island가 없는 경우, 내다각형에 대해 Simple Contour Closing 기법을 적용한다. 그렇지 않으면, 내다각형과 해당 Island들에 대해 Contour Closing with Islands 기법을 적용한다.

만약 인접한 두 단면 간의 간격이 큰 경우에는 다각형  $M_i (i=1, \dots, m)$  를 위치 및 크기 조절하여 윗 단면과 아랫 단면의 중간 높이로 복사하여 다각형  $M_i$  와 복사된 다각형  $B_i (i=1, \dots, m)$  에 대해  $m$  번의 One-To-One Branching 기법을 적용한다. 그런 다음, 다각형  $S$  와  $m$  개의 복사된 다각형  $B_i (i=1, \dots, m)$  에 대해 언급된 One-To-Many Branching 기법을 적용한다.

3-5-1. 외다각형 구하기

$m$  개의 다각형  $M_i (i=1, \dots, m)$  를 이용하여 다각형  $S$  와 One-To-One Link로 연결될 외다각형을 구하는 일은 One-To-Many Branching에서 가장 중요하다. 그림 7은 외다각형 구하기의 예를 나타낸다. 먼저 그림 7의 (a)에서와 같이  $m$  개의 다각형  $M_i (i=1, \dots, m)$  에 대한 Convex Polygon CM을 구한 후, 그림 7의 (b)에서와 같이 다각형 CM으로부터 초기 외다각형  $F$  를 구한다. (다각형 CM을 이루는 점들은 반드시 반시계 방향으로 저장되게 한다.) 그런 다음, 서로 다른 다각형  $M_s$  와  $M_e$  에 속해 있고, 초기 외다각형  $F$  상에서 연속하는 두 점  $f_{s1}, f_{e1} (f_{s1} \in M_s, f_{e1} \in M_e)$  을 잇는 변을 시작으로 외다각형을 개선시킨다. 그림 7의 (c)는 시작 변  $f_{s1}, f_{e1} (f_{s1} \in M_s, f_{e1} \in M_e)$  에 대해 최종 변  $f_{s2}, f_{e2} (f_{s2} \in M_s, f_{e2} \in M_e)$  를 구하여 외다각형을 개선시키는 과정을 나타낸다. 그림 7의 (d)는 최종적으로 구해진 외다각형  $F$  를 가리킨다.

서로 다른 다각형  $M_s$  와  $M_e$  에 속해 있고, 초기 외다각형  $F$  상에서 연속하는 두 점  $f_{s1}, f_{e1} (f_{s1} \in M_s, f_{e1} \in M_e)$  을 잇는 변을 시작으로 외다각형을 개선시키는 방법은 Recursion 형태를 취하는데 다음과 같다. 먼저 그림 7의 (c)에서와 같이 다각형  $M_s$  와  $M_e$  간의 거리가 가장 작은 변  $p_s, p_e (p_s \in M_s, p_e \in M_e)$  을 구한다.

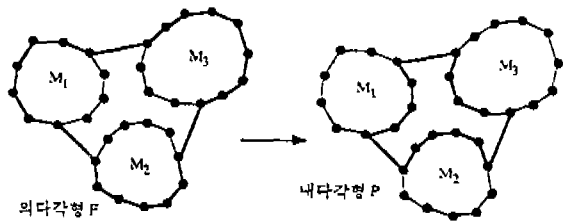


그림 8. 내다각형 구하기의 예

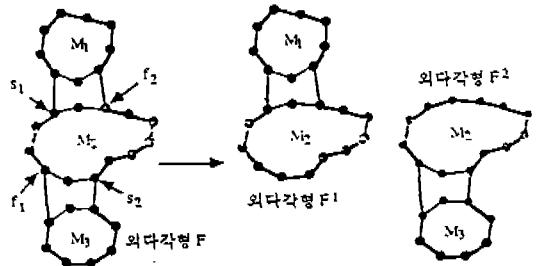
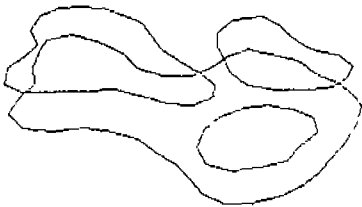


그림 9. 외다각형 분리하기의 예

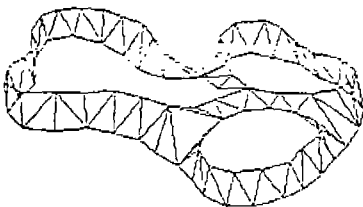
만약 시작 변  $f_{s1} f_{e1}$ 와 변  $p_s p_e$  사이에 있는 부분과 어떤 Island와 겹치지 않으면 다각형  $M_s$  상에서 시계 방향으로 점  $p_s$ 의 다음 점  $f_{s2}$ 와 다각형  $M_e$  상에서 반시계 방향으로 점  $p_e$ 의 다음 점  $f_{e2}$ 를 잇는 변을 최종 변으로 선택한다. Island는 현재의 외다각형을 이루는데 참여하지 않은 다각형을 말한다. (여기서 변  $p_s p_e$ 를 최종변으로 선택할 수 있겠으나 언급된 방법으로 최종변을 선택했을 경우에 비해 좋지 않은 실험적 결과를 보여준다. 예를 들어 변  $p_s p_e$ 를 최종변으로 선택할 경우 최종변 주변의 점들이 외다각형의 중심을 향해 너무 들어가는 경우가 발생한다. 그리고 One-To-Two Branching의 경우 동일한 변  $p_s p_e$ 가 최종변으로 중복 선택되어 유효하지 않은 외다각형이 구해진다. 따라서 다각형 S와 구해진 외다각형 간에 수행되는 One-To-One Branching에 좋지 않은 영향을 주게된다.) 그러나 만약 시작변  $f_{s1} f_{e1}$ 와 변  $p_s p_e$  사이에 있는 부분과 Island I가 겹치게 된다면 현재의 외다각형을 이루는데 Island I를 포함시킨다. 즉, Island I 상에 있는 점들 중에서 시작변  $f_{s1} f_{e1}$ 에서 가장 가까운 점  $f_c$  ( $f_c \in I$ )을 구한다. 그런 다음 점  $f_{s1}, f_c$  ( $f_{s1} \in M_s, f_c \in I$ )을 잇는 변을 시작 변으로 외다각형을 개선시키고, 마찬가지로 점  $f_c, f_{e1}$  ( $f_c \in I, f_{e1} \in M_e$ )을 잇는 변을 시작 변으로 외다각형을 개선시킨다.

### 3-5-2. 내다각형 구하기

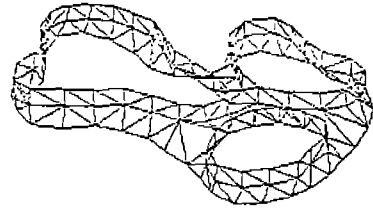
다각형  $M_i$  ( $i=1, \dots, m$ ) 중 외다각형을 이루는데 참여



(a) One-To-Many Link에 포함된 다각형들



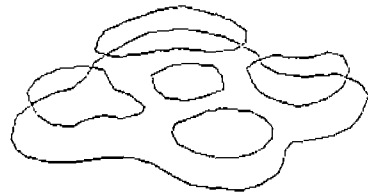
(b) 적용 결과-중간 단면을 넣지 않은 경우



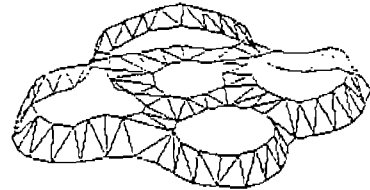
(c) 적용 결과-중간 단면을 넣은 경우

그림 10. One-To-Many Branching의 적용 예1

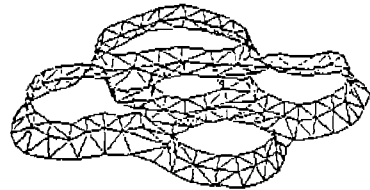
하는 다각형을 모다각형이라고 한다. 그리고 동일한 모다각형  $M_i$ 에 속하고, 외다각형 상에서 반시계 방향으로 연속하는 몇 개의 점들을 모다각형  $M_i$ 의 점군(Vertex Sequence)이라고 한다. 그림 8에서는 다각형  $M_1, M_2,$  그리고  $M_3$ 는 외다각형 F를 이루는 모다각형들이며, 다각형 F는 3개의 점군으로 이루어짐을 알 수 있다. 이러한 모다각형들과 외다각형을 이루는 점군들을 이용하여 내다각형들을 구한다. 그런 다음, 각 내다각형에 대해 Contour Closing 기법을 적용한다. 외다각



(a) One-To-Many Link에 포함된 다각형들



(b) 적용 결과-중간 단면을 넣지 않은 경우



(c) 적용 결과-중간 단면을 넣은 경우

그림 11. One-To-Many Branching의 적용 예2



형을 이루는데 참여하지 않은 다각형들은 Contour Closing 기법에서 Island로 사용된다.

내다각형 구하기는 Recursion 형태를 취하는데 다음과 같다. 외다각형을 이루는 모든 점군들이 각각 한 개의 내다각형을 형성한다. 그러나 외다각형을 이루는 점군들 중에서 두 개의 점군이 동일한 모다각형에 속할 경우, 그림 9에서와 같이 두 점군이 속한 모다각형을 분기점으로 외다각형 F를 두개의 외다각형 F1과 F2로 분리한다. 그런 다음, 분리된 외다각형 F1과 F2에 대해 Recursion 형태로 내다각형 구하기를 반복 수행한다.

그림 10과 11은 One-To-Many Branching의 예를 나타낸다. 그림 10은 Island가 없는 경우에 대한 적용 예이고, 그림 11은 Island가 있는 경우에 대한 적용 예이다. 그림을 통해 제시된 One-To-Many Branching 방법이 타당한 해를 제공해 줄 수 있다.

### 3-6. Many-To-Many Branching

Many-To-Many Branching은 연속하는 두 단면 중에서 한쪽 단면에 있는 여러 다각형들과 다른쪽 단면에 있는 여러 다각형들이 연결되어야 할 경우(Many-To-Many Link)에 적용되는 Triangulation 기법이다. 보통 인접한 단면 간의 간격이 너무 큰 경우에 Many-To-Many Link가 발생한다. Many-To-Many Link는 다른 Link들에 비해 처리하기가 복잡하며, 잘못된 결과를 초래하기가 쉽다. 그러므로 삼차원 물체로부터 단면들을 얻을 때, 인접한 단면 간의 간격을 잘 고려하여 가능한 Many-To-Many Link의 발생을 줄여야 한다. 그러나 불가피하게 Many-To-Many Link가 발생한 경우에는 두 단면의 중간 높이에 위치 및 크기 조절된 다각형을 삽입시켜 윗 단면에 있는 다각형들과 삽입된 다각형에 대해 One-To-Many Branching 기법을 적용한다. 마찬가지로 아랫 단면에 있는 다각형들과 삽입된 다각형에 대해 One-To-Many Branching 기법을 적용한다.

Many-To-Many Link에 포함된 윗 단면의 다각형을  $U_i(i=1, \dots, m)$ 라고 하고, 아랫 단면의 다각형을  $L_j(j=1, \dots, n)$ 라고 할 때, 중간 단면에 삽입될 다각형 CM은 다음에 의해 구한다. 먼저 다각형  $m$ 개의 다각형  $U_i(i=1, \dots, m)$ 의 Convex Polygon CU과  $n$ 개의 다각형  $L_j(j=1, \dots, n)$ 의 Convex Polygon CL을 구하여 다각형 CU와 CL을 윗 단면과 아랫 단면의 중간 높이

로 위치 이동 및 크기를 조절한다. 그런 다음, 위치 이동 및 크기 조절된 다각형 CU와 CL의 모든 점들의 Convex Polygon을 다각형 CM으로 한다. 다각형 CM을 이루는 변들의 길이가 최대 허용 길이보다 클 경우에는 해당 변 사이에 점들을 적절히 끼워 넣는다.

### 3-7. 연결성 정보 지칭

연급된 Triangulation 기법들에 의해 삼각형망을 형성할 모든 삼각형들을 구하였다. 그러나 각 삼각형의 변을 공유하는 이웃 삼각형을 나타내는 연결성(Connectivity) 정보가 없는 상태이다. 그러므로 이러한 연결성 정보를 각 삼각형을 이루는 세 점과 함께 정해주어야 한다. 각 삼각형은 세 점  $v_j(j=0, 1, 2)$ 와 함께 연결성 정보를 의미하는  $adt_j(j=0, 1, 2)$ 를 갖는다.  $v_j(j=0, 1, 2)$ 는 삼각형을 이루는  $j$ 번째 점을 나타내고,  $adt_j(j=0, 1, 2)$ 는 삼각형상에서 점  $v_j$ 와 마주보는 변을 공유하는 이웃 삼각형을 가리킨다. 구해진 모든 삼각형들을 검색하여 각 삼각형의  $adt_j(j=0, 1, 2)$ 를 지정해주므로써 삼각형망을 형성할 수 있다. 형성된 삼각형망은 삼각면체를 이룬다. 이 삼각면체는 형상 재구성 모델로서 이용된다.

## 4. 복합 곡면 형성

여러 개의 논문들에서 삼각 Bezier 단위 곡면(Triangular Bezier Patch)을 계산 모형으로 사용하여 삼각형망에서 이웃하는 삼각형들 간에 접평면 연속성을 유지하는 복합 곡면을 형성하는 방법을 제시하였다(11-13, 15, 18). 본 논문에서도 삼각 Bezier 단위 곡면을 계산 모형으로 사용하여 삼각형망의 각 삼각형의 내부를

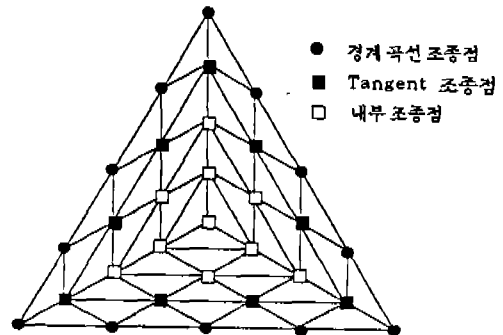


그림 12. 한 삼각형 내의 조종점들

일정한 곡면으로 표현하기 위해 3개의 4차 삼각 Bezier 단위 곡면들을 사용한다. 그림 12는 각 삼각형 내부를 표현하는 3개의 4차 삼각 Bezier 단위 곡면들의 조종점들(Control Points)을 나타낸다. (삼각 Bezier 단위 곡면에 대한 특성 및 이론은 Farin(14, 19)에 자세히 나와 있다.)

복합 곡면을 형성하는 과정은 다음과 같다. 먼저 삼각형망의 각 점에서의 법선 벡터를 추정한다. 삼각형망의 한 점 P에서의 법선벡터는 점 P를 공유하는 삼각형들의 법선벡터들의 가중 평균으로 추정할 수 있다. 이러한 가중치를 주는 방법으로 점 P와 각 삼각형  $T_i$ 에서 점 P를 마주보는 변의 중심점과의 거리  $d_i$ 의 제곱을 가중치로 사용한다(18). 그런 다음, 삼각형망 상의 각 변의 대하여 양 끝점을 지나고, 양 끝점에서의 접선벡터를 만족하는 3차 Bezier 단위 곡선을 구하여 곡선망을 형성한다. Piper(15)에 제시된 방법을 적용하여 점 P, Q를 양 끝점으로 하고 점 P에서 법선벡터가  $N_p$ 이고 점 Q에서 법선벡터가  $N_q$ 인 3차 Bezier 단위 곡선의 조정점들을 쉽게 구할 수 있다. 그런 다음, 곡선망의 각 3차 Bezier 단위 곡선에 대해 4차로 차수 올림(Degree Elevation)을 함으로써 경계 곡선 조종점들을 결정한다(14, 18, 19). 그런 다음, 곡선망의 내부를 채우면서 인접한 삼각형과 VC<sup>1</sup> 연속성을 만족하도록 Tangent 조종점들을 결정한다. 두 Bezier 단위 곡면들이 하나의 경계 곡선 상에서의 접평면이 경계 곡선을 따라 연속하게 변할 때 두 개의 Bezier 단위 곡면들을 VC<sup>1</sup> 연속하다고 말한다. 그림 13은 두 4차 삼각 Bezier 단위 곡면들 간의 가장 간단한 VC<sup>1</sup> 연속 조건을 나타내는데 빗금친 각 쌍의 삼각형들을 이루는 네 점들  $R_i, L_i, C_i, C_{i+1}$  ( $i=0, \dots, 3$ )이 상수  $p, q, r$  ( $p+q+r=1$ )에 대하여  $R_i=pL_i+qC_i+rC_{i+1}$  ( $i=0, \dots, 3$ )을 만족

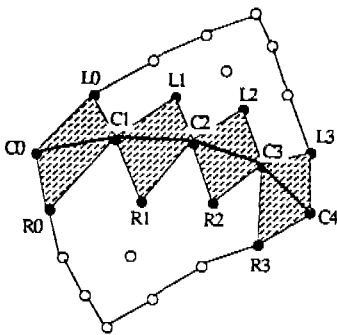


그림 13. VC<sup>1</sup> 연속 조건의 기하학적 의미

하면 경계 곡선 조종점  $C_i$  ( $i=0, \dots, 4$ )을 공유하는 두 개의 삼각 단위 곡면들은 VC<sup>1</sup> 연속한다(14, 19). Shin(17)와 Choi(18)에 제시된 방법을 이용하여 경계 곡선 조종점들을 변화시키지 않으면서 경계 곡선 양쪽의 삼각 Bezier 단위 곡면들이 VC<sup>1</sup> 연속이 되도록 Tangent 조종점들을 결정할 수 있다. 마지막으로 각 삼각형 내부를 표현하는 3개의 4차 삼각 Bezier 단위 곡면들의 조종점들중 남아있는 내부 조종점들을 결정해주므로써 VC<sup>1</sup> 연속 복합 곡면을 형성한다. 형성된 복합 곡면은 제3장에서 구해진 삼각면체와 함께 재구성된 형상 모델로서 이용된다.

### 5. 실험결과

제시된 형상 재구성 방법을 C 언어를 이용하여 SUN Workstation 상에서 구현하였다. 구현된 형상 재구성 시스템에서는 입력 데이터로서 제2장에서 언급된 단면

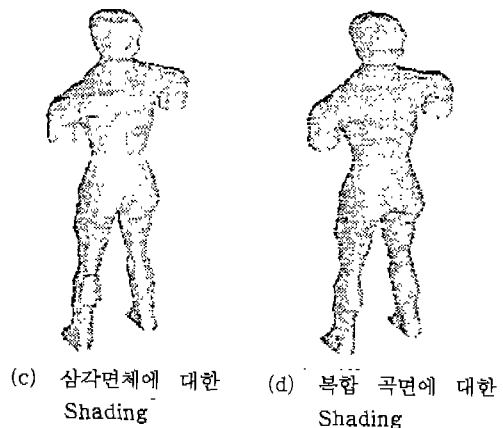
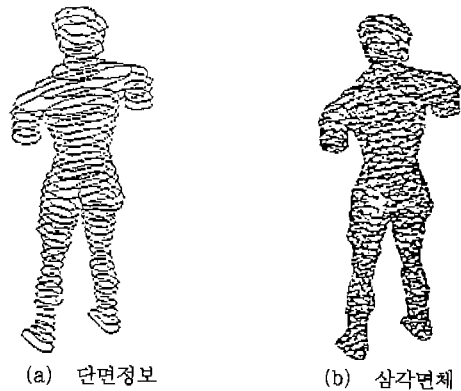


그림 14. 적용 예1-사람의 몸의 형상

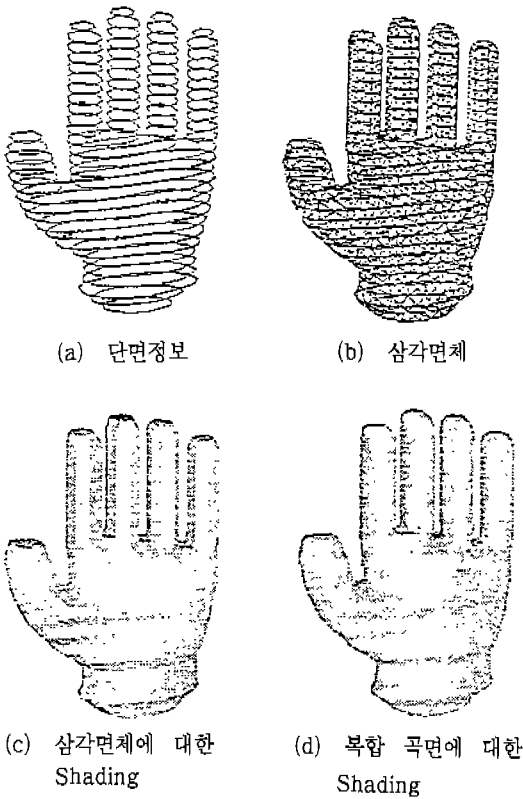


그림 15. 적용 예2-손장갑의 형상

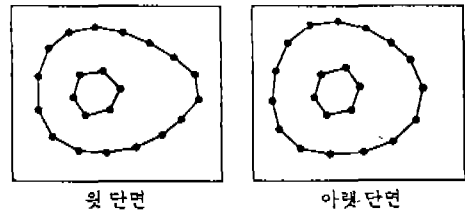
정보를 사용하였다. 그림 14는 42개의 단면으로 이루어진 사람의 몸의 형상에 대한 단면 정보를 형상 재구성 시스템에 적용한 예이다. 각 단면에는 1개에서 3개까지의 다각형이 존재한다. 그림 15는 30개의 단면으로 이루어진 손장갑의 형상에 대한 단면 정보를 적용한 형상 재구성 시스템에 적용한 예이다. 각 단면에는 1개에서 4개까지의 다각형이 존재한다. 여기서 단면 관련도 작성에 필요한 Threshold 값을 0.45로 했다. 실험결과를 통해 제시된 형상 재구성 방법은 원래의 삼차원 물체를 잘 반영해 주는 삼각면체와 매끄러운 복합 곡면을 제공해 줌을 알 수 있다. 그리고 제시된 Link 분류 및 관련 정보 추출 기법이 올바르게 작동함을 알 수 있다. 또한 제시된 여러 Triangulation 기법들이 타당한 해를 제공해 줌을 알 수 있다.

기존의 형상 재구성 방법들에서는 단면 내에 여러 개의 다각형들이 존재하는 경우 인접한 두 단면 사이에 존재하는 Link들을 식별하는 방법만을 주로 다루었으나 제시된 형상 재구성 방법에서는 Link의 분류 및 관련

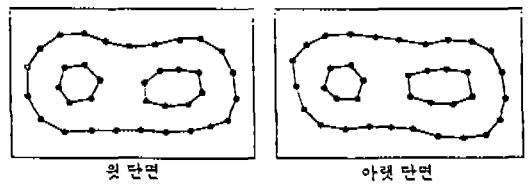
정보를 쉽게 추출하는 방법을 제시함으로써 사용자의 개입없이 형상을 자동으로 재구성 할 수 있다. 또한 제시된 One-To-Many Branching과 Many-To-Many Branching 기법은 문제를 체계적으로 One-To-One Branching과 Contour Closing으로 분해시킴으로써 기존의 기법들로는 처리되기 힘든 여러개의 다각형들이 개입된 복잡한 Multiple Branching 문제를 해결 할 수 있다. 그리고 기존의 방법들은 대부분 재구성 모델로 삼각면체만을 제공하지만 제시된 형상 재구성 방법은 삼각면체 뿐만이 아니라 미적 표현력이 뛰어나고 활용도가 큰 복합 곡면을 제공해 준다.

## 6. 결 론

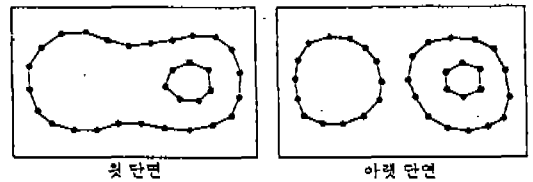
본 논문에서는 단면 정보를 이용하여 삼차원 물체에 대한 형상 모델을 재구성 하는 방법을 제시하였다.



(a) 외부는 One-To-One Link이고 내부 구멍도 One-To-One Link인 경우



(b) 외부는 One-To-One Link이고 내부 구멍 2개도 One-To-One Link인 경우



(b) 외부는 One-To-Two Link이고 내부 구멍은 One-To-One Link인 경우

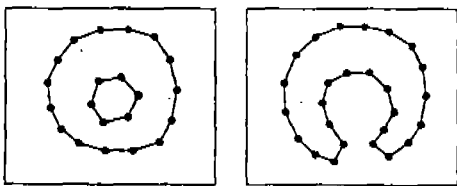
그림 16. 단면과 수직방향으로 구멍이 있는 경우

Overlap Method에 근거한 단면 관련도의 작성 및 분석을 통해 Link를 쉽게 분류하고 해당 Link의 관련 정보를 체계적으로 추출하는 방법을 제시하였다. 그리고 기존의 방법들로는 처리하기 힘든 여러 개의 다각형들이 개입된 Multiple Branching 문제를 One-To-One Branching과 Contour Closing으로 체계적으로 분석시킴으로써 타당한 문제를 제공해 주는 Multiple Branching 기법을 제시하였다. 그리고 재구성된 형상 모델로서 삼각면체와 함께 접평면 연속한 복합 곡면을 동시에 이용할 수 있게 하였다. 실험결과, 제시된 방법에 의해 구해진 형상 모델이 원래의 삼차원 물체를 잘 표현해줄 수 있었다.

제시된 형상 재구성 방법은 Link의 분류 및 관련 정보 추출의 효율성과 Multiple Branching의 일반적 처리 능력 측면에서 기존의 방법들에 비해 우수하지만 개선되어야 할 사항들을 갖고 있다. 첫째, Overlap Method에 근거하여 Correspondence 문제를 해결하기

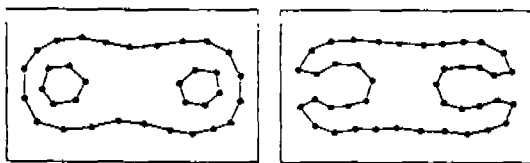
때문에 인접한 두 단면 간의 간격이 크고 복잡한 물체인 경우에는 잘못된 형상 모델이나 복수개의 형상 모델이 구해질 수 있다. 그러므로 다각형들 간의 관련 정보를 이용한 지협적인 분석과 함께 모든 다각형들 간의 유형학적 관계를 이용한 체계적인 분석이 필요하다. 둘째, 제시된 형상 재구성 방법에서는 그림 16과 그림 17에서와 같이 구멍이 있는 삼차원 물체의 경우에 발생할 수 있는 단면들을 고려하지 않았다. 그림 16은 물체에 단면과 수직인 방향으로 구멍이 있을 때 발생하는 유형들을 나타낸다. 이런 유형들은 바깥쪽 다각형들과 안쪽에 있는 다각형들을 분리하여 처리해야 한다. 그림 17은 물체의 측면에 구멍이 있을 때 발생하는 유형들을 나타낸다. 이러한 유형들은 모든 다각형들이 개입되어 처리되어야 하므로 그림 17의 것들보다 처리하기가 더욱 어려워진다.

추후 연구 방안으로서 언급된 사항들에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 그리고 단면 영상으로부터 단면 정보를 추출하는 기능이 첨가된 형상 재구성 시스템의 개발이 기대된다. 현재, 구멍이 있는 삼차원 물체에 대해 발생 가능한 연결 유형들의 분류 및 분류된 유형에 따른 Triangulation 기법에 대한 연구가 계속 진행되고 있다.



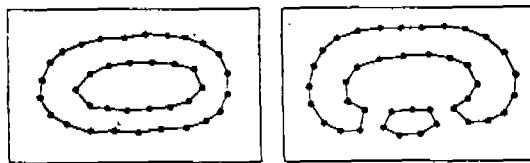
윗 단면                      아랫 단면

(a) 일종의 One-To-Two Link로서 측면에 구멍이 한 개 있는 경우



윗 단면                      아랫 단면

(b) 일종의 One-To-Three Link로서 측면 구멍이 두 개 있는 경우



윗 단면                      아랫 단면

(b) 일종의 Two-To-Two Link로서 측면 구멍이 두 개 있는 경우

그림 17. 물체의 측면에 구멍이 있는 경우

### 참고문헌

1. E. Keppel, "Approximating complex surfaces by triangulation of contour lines", IBM J. Res. Dev., Vol. 19, 1975, 2~11.
2. H. Fuchs, Z. M. Kedem, and S. P. Uzelton, "Optimal surface reconstruction from planar contours", Common. ACM, Vol. 20, No. 10, 1977, 693~702.
3. H. N. Christiansen and T. W. Sederberg, "Conversion of complex contour line definition into polygonal element mosaics", Comput. Graph., Vol. 3, No. 3, 1978, 187~192.
4. P. N. Cook and S. Batnitsky, "Three-dimensional reconstruction from serial-sections for medical applications", In Proceedings of the 14th Hawaii International

- Conference on System Sciences, Vol. 2, 1981, 358~389.
5. S. Ganapathy and T. G. Dennehy, "A new general triangulation method for planar contour", *Comput. Graph.*, Vol. 16, No. 3, 1982, 69~75.
  6. N. Kehtarnavaz, "A syntactic/semantic technique for surface reconstruction from cross-sectional contours", *Comput. Vision, Graph. Image Proc.*, Vol. 42, 1988, 399~409.
  7. M. Shantz, "Surface definition for branching contour defined objects", *Comput. Graph.*, Vol. 15, No. 2, 1981, 242~270.
  8. M. J. Zyda, R. J. Allan, and P. G. Hogan, "Surface construction from planar contours", *Comput. Graph.*, Vol. 11, No. 4, 1987, 393~408.
  9. J. D. Boissonnat, "Shape reconstruction from planar cross sections", *Comput. Vision, Graph. Image Proc.*, Vol. 44, 1988, 1~29.
  10. A. B. Ekoule, F. C. Peyrin, and C. L. Odet, "A triangulation algorithm from arbitrary shaped multiple contours", *ACM trans. Graph.*, Vol. 10, No. 2, 1991, 182~199.
  11. D. Meyers and S. Skinner, "Surfaces from Contours", *ACM trans. Graph.*, Vol. 11, No. 3, 1992, 228~258.
  12. G. Farin, "Smooth interpolation to scattered 3D data", In *Surfaces in Computer Aided Geometric Design*, North-Holland, 1983.
  13. G. Farin, "A modified Clough-Tocher interpolant", *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 2, 1985, 19~27.
  14. G. Farin, "Triangular Bernstein-Bezier patches", *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 3, 1986, 83~127.
  15. B. Piper, "Visually smooth interpolation with triangular Bezier Patches", In *Geometric modeling: Algorithms and New Trends*, SIAM, Philadelphia, 1987, 221~234.
  16. G. M. Nielson, "A Transfinite, Visually Continuous Triangular interpolant", In *Geometric modeling: Algorithms and New Trends*, SIAM, Philadelphia, 1987, 235~246.
  17. H. Y. Shin, "Surface modeling for 3D scattered data interpolation", ph. D. Dissertaion, KAIST, 1990.
  18. B. K. Choi, *Surface modeling for CAD/CAM*, Elsevier, 1990.
  19. G. Farin, *Curves and surfaces for computer aided geometric design: A practical guide*, Academic Press, 1988.
  20. F. P. Preparata and M. I. Shamos, *Computational geometry: An introduction*, Springer-Verlag, 1985.
  21. J. R. King, "Machine-component group formation in production flow analysis: An approach using a rank order clustering algorithm", *Int. J. Res.*, Vol. 18, No. 2, 1980, 213~232.
  22. R. O. Duda and P. E. Hart, *Pattern Classification and Scene Analysis*, John Wiley & Sons, 1973.