

논문 2004-41CI-5-7

# 체적 보존을 고려한 메쉬 간략화 알고리즘

(Mesh Simplification Algorithm Considering Volume Conservation)

김 종 영\*, 장 태 정\*\*

(Jong-Young Kim and Tae-Jeong Jang)

## 요 약

본 논문에서는 3D 모델의 체적 보존을 고려하는 메쉬 간략화 알고리즘을 제안하였다. 일반적으로 다른 대부분의 메쉬 간략화 알고리즘에서는 거리 기준을 사용한다. 거리는 기하학적인 오차를 측정하는 매우 효율적인 기준이기는 하지만 거리 기준만을 적용할 경우 원래 모델과 간략화된 모델 간에 체적 변화가 발생한다. 본 논문에서는 원래 모델의 간략화 과정 중에도 체적의 변화가 없는 메쉬 간략화 알고리즘을 제안한다. 본 알고리즘에서는 에지 하나를 줄이면서 체적의 변화가 일어나지 않는 정점 하나를 찾는 방식을 사용한다. 시뮬레이션을 통하여 제안하는 알고리즘이 비록 계산 시간은 좀 더 걸리지만 체적의 변화가 거의 없다는 장점을 가진 것을 확인하였다.

## Abstract

In this paper, a mesh simplification algorithm is proposed which considers the conservation of the volume of a 3D model. In General, most of mesh simplification algorithms use a distance metric. The distance metric is very efficient to measure geometric error, but it causes volume changes between the original model and the simplified model. In this paper, a mesh simplification algorithm which conserves the volume of the original model is suggested. A new vertex, resulting from an edge contraction, takes a position which conserves the volume of the 3D model using the proposed algorithm. Although the new algorithm needs more time than the QEM algorithm, it is shown that it conserves the original volume of the 3D model during the simplification.

**Keywords :** mesh simplification, volume conservation, edge contraction, quadric error metric

## I. 서 론

메쉬 간략화(mesh simplification)는 원래 주어진 3D 모델의 형상과 특징을 최대한 유지하면서 폴리곤(polygon)의 수를 줄여 보다 단순한 모델을 만드는 과정을 말한다. 메쉬 간략화의 장점은 필요 이상으로 상세히 묘사된 대용량 모델의 데이터량을 줄일 수 있고, 따라서 자료 구조 구축 시간도 줄어들며, 보다 빠른 속도

로 모델을 가시화할 수 있다는 것이다. 이렇게 3D 모델을 간략화 하는 기술은 컴퓨터 애니메이션, 3D 게임 또는 3D 그래픽 시뮬레이션의 LOD(level of detail) 기술 등에서 널리 활용되고 있다.

초기의 간략화 방법은 연속된 정점 제거를 통해 모델을 간략화 해나가는 알고리즘을 주로 사용하였다. Schroedor<sup>[1]</sup>는 메쉬의 지역적인 부분만을 고려하여 에러가 가장 적은 지역의 정점을 제거한 후 재삼각화(re-triangulation)하는 방식의 정점 제거 방법을 제안하였다. 여기서 정점에 대한 에러는 정점을 둘러싸고 있는 간략화 후의 평균 평면(average plane)과 정점 사이의 거리가 된다. 이 방법은 간략화 과정에서 이전 정보(history)를 저장하지 않으며, 메쉬 간략화를 위한 속도는 빠르지만 이전의 간략화되어진 지역 모델을 사용하므로 에러가 누적될 가능성이 있고, 메모리 요구량이

\* 정회원, 한국철도기술연구원 고속철도개발사업단  
(High-Speed Rail Division, Korea Railroad  
Research Institute)

\*\* 정회원, 강원대학교 전기전자정보통신공학부  
(Dept. of Electrical and Computer Engineering, Kangwon  
National University), 교신저자 (Corresponding Author)

※ 이 논문은 강원대학교 두뇌한국21 사업에 의하여  
지원되었음.

접수일자: 2004년4월15일, 수정완료일: 2004년8월31일

크다.

반복적인 에지 축약 방법을 이용하여 메쉬 모델을 간략화하는 많은 방법들이 소개되었다. Hoppe<sup>[2,3]</sup>의 PM(Progressive Mesh)에서는 점진적으로 메쉬의 전송이 가능하도록 하였다. 이 방법은 에지 축약에 기반을 두었으며 복잡한 모델에서 단순한 모델로의 변환이 가능하도록 하였고, 특히 각 간략화 단계에서 잃어버리는 정보를 보존하는 것에 착안하였다. 이 알고리즘은 두 단계로 나눌 수 있는데, 첫째는 분석 단계로서 세부 정보를 가지는 간략화 단계이다. 두 번째는 합성 단계로서 eclo/spilt를 하여 LOD 근사화를 한다.

Garland와 Heckbert<sup>[4]</sup>는 평면에서 한 점과의 거리 제곱의 합을 간단하면서도 빠르게 수행되는 이차(quadric) 형식으로 표현함으로써 모델의 간략화 속도와 품질을 향상시킨 QEM(Quadric Error Metrics) 알고리즘을 제안하였다. QEM 알고리즘은 반복적인 에지 축약(iterative edge contraction)을 이용하여 메쉬 모델을 간략화하는 방법으로서 각각의 에지에서 거리 에러가 최소인 정점을 에지 축약 이후의 새로운 정점의 위치로 정하고 그 정점의 거리 에러가 가장 작은 에지부터 선택하여 제거해 나간다. 최근 Sun-Jeong Kim 등<sup>[9]</sup>은 거리 에러에 곡률까지 고려한 알고리즘을 제안하여 QEM 알고리즘을 이용한 간략화 과정 중에 곡률이 큰 세부 묘사 부분이 빨리 간략화되는 현상을 줄일 수 있게 하였다.

이러한 방법들은 기하학 정보만을 이용하기 때문에 컬러(color), 법선(normal), 텍스처(texture) 좌표 등을 가지는 메쉬를 간략화하기에는 부적합하다. 그래서 Garland와 Heckbert<sup>[5]</sup> 그리고 Hoppe<sup>[6]</sup>는 이차 형식을 확장하여 컬러, 법선 텍스처 좌표를 고려한 새로운 QEM 간략화 방법을 제안하였다. 이차 형식을 이용한 것은 아니지만 Cohen<sup>[7]</sup>은 텍스처를 고려한 텍스처 오차 측정 알고리즘을 제안하였다.

대부분의 이러한 기존의 알고리즘들은 거리 오차만을 고려하였기 때문에 원래 메쉬 모델의 간략화 과정 중에 체적의 변화를 가져올 수 있다. 본 논문에서는 거리 오차는 에지 제거 우선순위 결정시에만 이용하고 근본적으로 원래 메쉬 모델의 체적(volume)이 보존되는 간략화 알고리즘을 제시하고자 한다. 먼저 QEM 알고리즘에서 사용된 이차 에러 매트릭을 이용하여 모든 에지에 제거 우선순위를 부여한 다음, 가장 먼저 제거해야 할 에지부터 하나씩 선택하여 메쉬 모델의 체적이 변하지 않으면서 외형도 적게 변하는 새로운 정점의 위치

를 찾아가는 방법을 제안한다.

## II. 체적 보존을 고려한 간략화 알고리즘

### 1. 이차 에러 매트릭(Quadric Error Metric)

먼저 QEM 알고리즘에서 에지 축약의 우선 순위를 결정하는 비용 함수로 사용된 이차 에러 매트릭에 대해 간략히 알아본다. 임의의 평면은  $n^T v + d = 0$  을 만족하는 모든 점( $v$ )들의 집합으로서  $n = [a \ b \ c]^T$  은 평면의 단위법선벡터(unit normal vector),  $d$  는 스칼라 상수를 나타낸다. 한 정점  $v = [x \ y \ z]^T$  에서 이 평면까지의 거리를  $D(v)$  라 하면  $D(v) = |n^T v + d|$  가 되며 이의 제곱은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} D^2(v) &= (n^T v + d)^2 \\ &= v^T (n n^T) v + 2(dn)^T v + d^2 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 이차(quadric)  $Q$  를

$$Q = (A, b, c) = (n n^T, dn, d^2) \quad (2)$$

와 같이 정의하고, 이를 이용하여 공간상의 정점  $v$  에 대한 이차 방정식을

$$Q(v) = v^T A v + 2b^T v + c \quad (3)$$

로 정의하면 (1), (2) 및 (3)으로부터

$$Q(v) = D^2(v) \quad (4)$$

가 됨을 확인할 수 있다. 즉,  $Q(v)$  는 공간 상의 정점  $v$  에서 이차  $Q$  와 연관된 평면까지 거리의 제곱이 된다.

두 개의 서로 다른 평면과 연관된 이차  $Q_i$  와  $Q_j$  에 대해 이차의 합은 다음을 만족한다.

$$Q_i(v) + Q_j(v) = (Q_i + Q_j)(v) \quad (5)$$

여기서  $(Q_i + Q_j) = (A_i + A_j, b_i + b_j, c_i + c_j)$  이다. 따라서 한 정점  $v$  와 관련된  $l$  개의 평면이 주어졌을 때 이 정점  $v$  에서 각 평면까지 거리의 제곱의 합은

$$E_Q(v) = \sum_{k=1}^l D_k^2(v) = \sum_{k=1}^l Q_k(v) = Q(v) \quad (6)$$

가 됨을 알 수 있다. 여기서  $Q = \sum_{k=1}^l Q_k$  이다.

QEM 알고리즘에서는 없애고자 하는 에지에 연결된

모든 평면과의 이차 에러 메트릭의 합이 최소인 정점을 선택하여 에지를 그 정점으로 축약하게 되며, 그 이전에 이 거리 오차 값은 에지 축약 우선 순위 결정에도 이용되게 된다.

2. 제안하는 간략화 알고리즘 개요

본 논문의 간략화 알고리즘은 반복적인 에지 축약 방법을 이용하여 메쉬 모델의 점진적인 간략화를 수행한다. 반복적인 에지 축약에서의 두 가지 중요한 결정 사항은 ① 원래 모델의 수많은 에지에 어떤 방법으로 제거의 우선순위를 부여하느냐와 ② 에지 축약 이후 새로운 정점의 위치를 어디로 정하느냐는 것이다. 본 논문에서는 에지 제거의 우선순위를 부여하는 방법으로 QEM 알고리즘과는 약간 다르게 간략화 하고자하는 에지의 중점에서 그 에지에 연결된 모든 평면에 이르는 이차 에러 메트릭을 사용하였다. 또한 에지 제거 이후 새로운 정점의 위치를 선택하는 방법으로 본 논문에서 제안하는 원래 모델의 체적을 변화시키지 않는 정점으로 결정하는 알고리즘을 사용하였다. 본 논문의 알고리즘은 그림 1과 같은 과정을 거쳐서 메쉬 모델을 간략화한다.

초기화 과정에서는 먼저 입력받은 메쉬 모델의 모든 에지에 대해 그 에지 중점으로부터 그 에지에 연결된 모든 평면까지의 이차 에러 메트릭의 합, 즉 거리 오차

제곱의 합을 계산한다. 다음으로 이 값들을 힙(heap)에 저장하고 중점의 거리 오차가 작은 에지부터 우선순위에 따라 정렬(sorting)한다.

초기화 과정이 끝난 후 사용자가 원하는 정도의 간략화된 모델이 될 때까지 에지 제거 과정을 반복적으로 수행하게 되는데, 에지 제거는 미리 정렬해 놓은 순서에 따라 중점에서의 거리 오차가 최소인 에지를 선택하는 것으로 시작된다. 최소 에러를 가지는 에지를 선택한 후 그 에지와 연결되어 있는 모든 에지들까지를 포함하는 지역적인 체적을 축약 이전의 체적값으로서 구한다. 이 때 계산의 편의를 위해 연결 에지 끝점들의 중심점을 구해 그 점을 중심으로하는 삼각뿔들의 합으로 체적을 계산한다.

다음으로 제거할 에지가 그 에지의 중점으로 축약되었다고 가정하고 앞에서와 비슷한 방법으로 새로운 삼각뿔들의 합으로서 가상의 에지 축약 이후의 체적을 구한다. 에지 제거 이후의 새로운 정점의 위치는 에지 축약 이전의 체적이 유지되는 정점을 새로 선택해야 하는데, 이 점은 앞에서 구한 에지 축약 이전의 체적과 가상의 에지 축약 이후의 체적의 비율을 이용하여 쉽게 구할 수 있다.

마지막으로 에지 축약을 수행한 후 새로운 정점과 연결되어 있는 에지들 각각의 중점들을 구하고 각각의 중점에서 그 에지에 연결된 모든 평면들과의 이차 에러 메트릭을 계산해서 그 크기에 따라 힙 내 적절한 위치에 저장하여 에지 정보들을 수정한다.

3. 우선순위 결정

본 논문에서는 에지 제거의 우선순위를 부여하는 기준으로 간략화 하고자하는 에지의 중점에서 그 에지에 연결된 모든 평면에 이르는 이차 에러 메트릭(quadratic error metric, QEM)을 사용하였다. 이는 에지에 연결된 모든 평면과의 거리 오차가 최소인 정점을 계산하여 그 최소 거리 오차를 에지 제거 우선순위 결정에 사용하는 QEM 알고리즘과는 약간 다른 것인데, 이렇게 하는 것은 에지 제거 우선순위 정렬은 QEM 알고리즘과 비슷하면서 계산 시간은 줄이는 효과가 있기 때문이다.

그림 2와 그림 3은 에지의 중점에서 에지에 연결된 모든 평면까지의 거리가 에지의 길이와 곡률에 따라 어떻게 변하는지를 2차원 평면으로 간략화시켜 보여주고 있다. 그림 2에서 에지의 길이  $L$ 이 길수록, 그림 3에서 에지의 곡률  $R$ 이 클수록 에지의 중점에서 에지에 연결된 모든 평면까지의 거리 오차가 크다는 것을 알 수 있

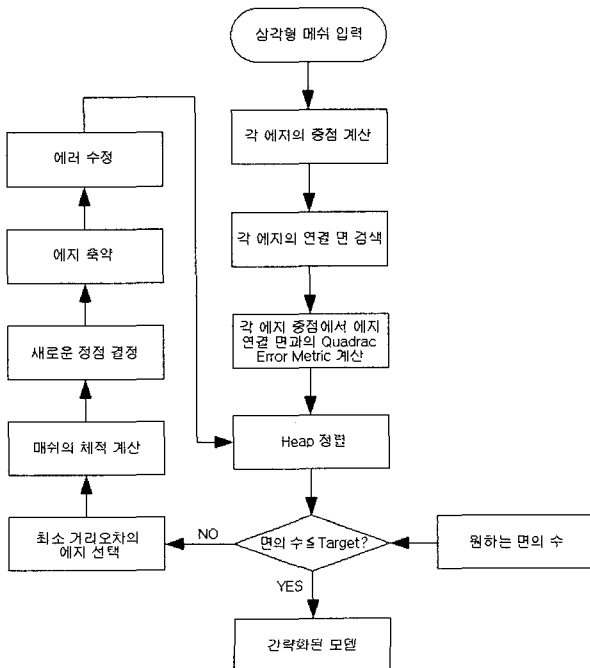


그림 1. 제안한 메쉬 간략화 과정  
Fig. 1. Suggested mesh simplification process.

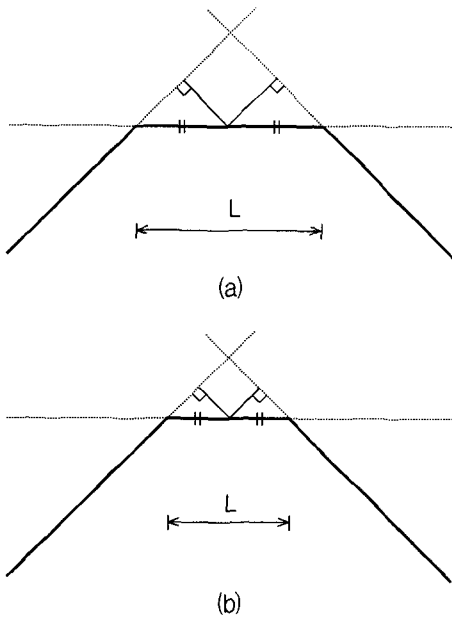


그림 2. 에지의 길이에 따른 거리 오차, (a) 긴 에지 (b) 짧은 에지  
 Fig. 2. Distance error due to edge length, (a) Long edge (b) Short edge.

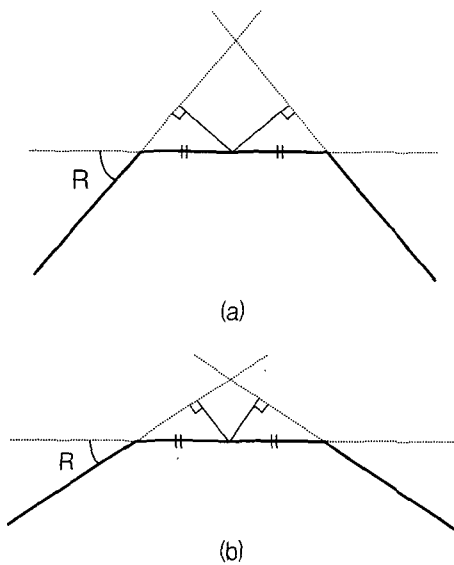


그림 3. 에지의 곡률에 따른 거리 오차, (a) 큰 곡률 (b) 작은 곡률  
 Fig. 3. Distance error due to curvature, (a) Big curvature (b) Small curvature.

다. 실제로 QEM 알고리즘에서 사용된 기준 대신에 본 논문에서와 같이 에지의 중점에서 그 에지와 연결된 모든 평면까지의 거리 오차 제곱의 합, 즉 에지의 중점에서의 이차 에러 메트릭을 없애고자 하는 에지의 우선순위 결정에 사용해도 QEM 알고리즘에서와 비슷한 결과를 얻을 수 있다. 에지의 중점은 식 (7)과 같이 쉽게 구

해질 수 있으므로 간략화 수행 시간을 조금이나마 단축시킬 수 있다.

$$v_i^c = \frac{v_i^1 + v_i^2}{2} \tag{7}$$

여기서  $i$ 는  $i$ 번째 에지를 나타내고  $v_i^1$ 과  $v_i^2$ 는 그 에지의 두 정점을 말한다.

#### 4. 체적 계산

본 논문에서 제안하는 알고리즘에서 가장 중요한 부분은 메쉬 모델을 간략화하면서 에지 축약 이전의 체적이 에지 축약 이후에도 변하지 않도록 한다는 것이다. 이를 위해서는 먼저 에지 축약 이전의 원래 메쉬 모델의 체적을 구해야 하고, 다음으로 체적의 변화가 없으면서 제거할 에지를 대신할 새로운 정점 하나를 찾아야 한다. 이러한 정점은 유일하게 하나 존재하는 것이 아니기 때문에 가능하면 계산량이 적으면서도 원래 형상의 특징을 최대한 유지할 수 있는 점으로 정하는 것이 좋다. 본 논문에서는 먼저 제거할 에지의 중점으로 에지가 축약되었다고 가정하고 축약된 모델의 체적을 먼저 구한 다음 이 체적과 앞에서 구한 원래 메쉬 모델의 체적과의 비율을 이용하여 체적의 변화가 없는 새로운 정점을 구한다.

본 논문의 알고리즘에서는 매 에지의 축약 때마다 그 에지 부근의 지역적인 부분에 대한 체적만을 계산하면서 간략화를 수행한다. 이를 위하여 먼저 제거할 에지의 두 정점을 제외한 그 두 정점과 연결된 모든 에지들의 끝점들에 대하여 중심점  $C$ 를 구한다. 그림 4는 에지 축약 이전의 메쉬 모델에 대한 전체 체적을 보여 주고 있다. 또한 그림 5는 각각의 면에 대한 삼각뿔의 체적 중 일부를 보여주고 있다. 각각의 삼각뿔에 대한 체적은 중심점  $C$ 에서 삼각형 면의 세 정점으로 향하는 세 벡터를 계산하고 벡터의 체적을 구하는 방법을 적용하여 구할 수 있다. 세 벡터  $(a_1, a_2, a_3)$ ,  $(b_1, b_2, b_3)$ ,  $(c_1, c_2, c_3)$ 가 이루는 삼각뿔의 체적  $V$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{6} \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{vmatrix} \\ &= \frac{1}{6} | (a_1 b_2 c_3 + a_2 b_3 c_1 + a_3 b_1 c_2) \\ &\quad - (a_3 b_2 c_1 + a_1 b_3 c_2 + a_2 b_1 c_3) | \end{aligned} \tag{8}$$

따라서 그림 4의 에지 축약 이전의 전체 체적은 그림 5의 각각의 삼각뿔에 대한 체적들을 모두 합한 것이다.

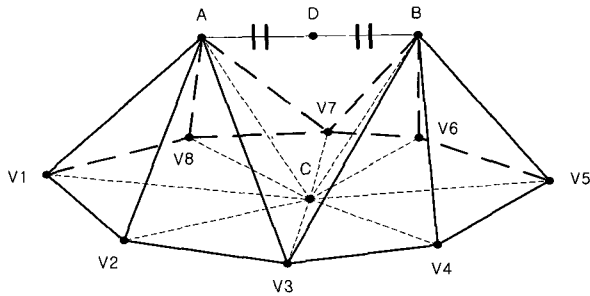


그림 4. 에지 축약 이전의 체적  
Fig. 4. Volume before edge contraction.

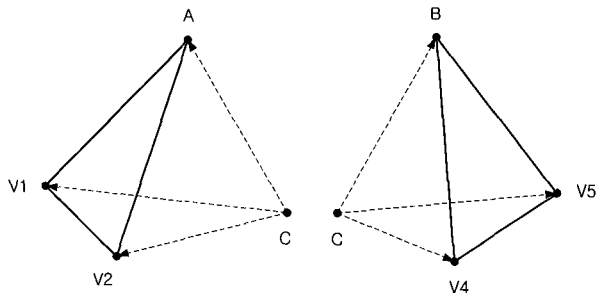


그림 5. 에지 축약 이전의 일부 면을 포함하는 삼각뿔  
Fig. 5. Trigonomal pyramids including several faces before edge contraction.

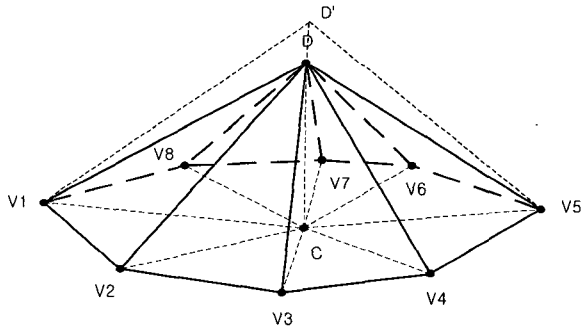


그림 6. 가상의 에지 축약 이후의 체적  
Fig. 6. Volume after virtual edge contraction.

그림 6은 제거할 에지의 두 정점 A와 B가 에지의 중점 D로 축약되었다고 가정한 후의 메쉬 모델의 전체 체적과 각각의 삼각뿔에 대한 체적을 보여주고 있다. 에지의 중점 D로 가상으로 축약되어 이루어진 전체 체적은 앞의 체적을 구하는 똑같은 방법으로 구해진다. 삼각뿔의 체적  $V$ 는 다음과 같이 밑면의 면적  $S$ 에 높이  $h$ 를 곱해서 얻을 수도 있다.

$$V = \frac{1}{6}Sh \tag{9}$$

물론 식 (8)과 식 (9)에서 구한 체적은 서로 같다. 에지 축약 이전의 전체 체적을  $V_b$ , 삼각뿔의 개수를  $m$ , 그리고 가상의 에지 축약 이후의 전체 체적을  $V_a$ , 삼각

뿔의 개수를  $n$ 이라 하면 축약 후 2개의 삼각뿔이 사라지므로  $m = n - 2$ 이며,  $V_b$ 와  $V_a$ 는 각각 식 (10)과 식 (11)로 표현할 수 있다.

$$V_b = \sum_{i=1}^n V_i^b = \frac{1}{6} (S_1^b h_1^b + S_2^b h_2^b + \dots + S_n^b h_n^b) \tag{10}$$

$$V_a = \sum_{i=1}^m V_i^a = \frac{1}{6} (S_1^a h_1^a + S_2^a h_2^a + \dots + S_m^a h_m^a) \tag{11}$$

또한 두 체적간의 비율  $k$ 는 다음과 같다.

$$k = \frac{V_b}{V_a} = \frac{S_1^b h_1^b + S_2^b h_2^b + \dots + S_n^b h_n^b}{S_1^a h_1^a + S_2^a h_2^a + \dots + S_m^a h_m^a}, (V_a \neq 0) \tag{12}$$

여기서  $V_b$ 는 에지 축약 이전의 체적,  $V_a$ 는 가상의 에지 축약 이후의 체적이고  $k$ 는 두 체적간의 비율이다. 후에 두 체적간의 비율  $k$ 를 이용하여 메쉬 모델의 체적이 유지되는 새로운 정점의 위치를 정한다.

### 5. 새로운 정점 위치

에지 축약 이후 새로운 정점의 위치를 정하는 것은 매우 중요하다. 왜냐하면 원래 메쉬 모델과 간략화된 모델 사이의 오차는 결정되는 새로운 정점의 위치에 따라 좌우되기 때문이다. 그림 4와 그림 6을 비교하여 살펴보면, 제거할 에지의 두 정점과 연결된 모든 에지들의 끝점들이 그 점들의 중심점 C와 연결되어 삼각뿔의 밑면을 구성하고 있으며, 축약 이전과 이후에도 밑면의 면적이나 형태는 변함이 없다는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 6에서 모든 삼각뿔의 꼭지점은 점 D로 공통이고, 따라서 선분  $\overline{CD}$ 는 모든 삼각뿔들의 공통 에지이다. 만약 선분  $\overline{CD}$ 를  $\overline{CD'}$ 로 연장한다면 늘어난 선분의 길이 비율만큼 각각의 삼각뿔의 높이가 커지게 되므로 체적도 같은 비율로 늘어날 것이라는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 새로운 정점의 위치를 정하기 위해 앞에서 구한 두 체적간의 비율  $k$ 를 이용한다. 선분  $\overline{CD}$ 를  $k$ 배만큼 그 길이를 연장하여 새로운 꼭지점  $D'$ 를 얻으면 원래 선분  $\overline{CD}$ 에 비해하던 각 삼각뿔의 높이는  $k$ 배만큼 늘어난 선분  $\overline{CD'}$ 에 대해서도 역시 비례하여 삼각뿔의 높이를  $k$ 배만큼 높게 된다. 따라서 모든 삼각뿔의 체적이 각각  $k$ 배만큼 커지면서 전체 체적도  $k$ 배만큼 커지게 되어 그림 4에 보인 메쉬 간략화 이전의 체적과 같게 된다.

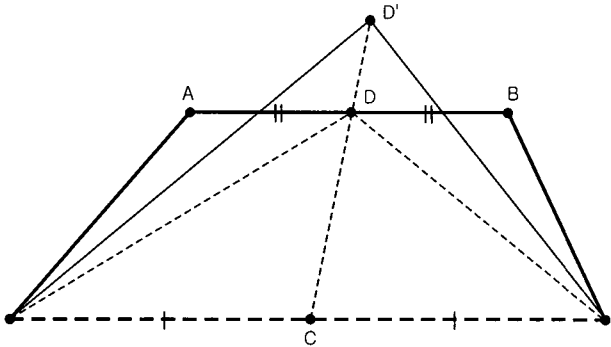


그림 7. 새로운 정점의 위치  
Fig. 7. New vertex position.

그림 7은 이해를 돕기 위해 2차원으로 간략화 시킨 그림으로 표현한 것이다. 축약 이전의 에지  $\overline{AB}$ 에 연결된 모든 점들의 중점  $C$ 와 축약하고자하는 에지  $\overline{AB}$ 의 중점  $D$ 를 연결하는 선분  $\overline{CD}$ 를 구하고, 이의 길이를  $k$ 배 연장하여 얻어지는 새로운 정점  $D'$ 는 축약 이전의 체적(면적)과 축약 이후의 체적(면적)이 동일한 에지  $\overline{AB}$ 의 축약점이 될 수 있다. 아래 면과 위의 에지 각각의 중점  $C$ 와  $D$ 를 이어주는 연장선상에서 새로운 축약점  $D'$ 를 찾는 것은 그림 7에서 보듯이 축약하고자하는 에지의 두 꼭지점에서의 곡률이 서로 달라 한쪽으로 치우쳐 있는 경우에도 상당히 자연스럽게 체적의 변화가 적은 축약점  $D'$ 을 구하게 해준다는 점에서 매우 바람직한 방법인 것을 알 수 있다.

### III. 결과 분석

본 알고리즘의 성능을 알아보기 위한 시뮬레이션은 CPU III 900Mhz, 256M RAM, Window2000의 컴퓨터에서 수행되었으며, 알고리즘 구현을 위하여 MixKit 라이브러리, OpenGL 라이브러리와 Visual C++를 사용하였다. 본 알고리즘의 입력 메쉬 모델로는 간략화 알고리즘의 성능 검증에 많이 사용되는 bunny, cow 등의 모델을 사용하였으며, 메쉬 모델의 색깔이나 텍스처 등을 제외한 정점과 면의 값만을 가진 데이터 파일을 읽어 들여서 간략화를 수행하였다. 그리고 본 알고리즘과 QEM 알고리즘에 의해 각각 간략화된 메쉬 모델들을 간략화 수행 시간, 거리 에러, 체적 변화에 대하여 서로 비교 분석하였다. 거리 에러는 Metro<sup>[8]</sup> 알고리즘을 사용하여 측정하였다.

본 논문의 체적을 고려한 알고리즘과 QEM 알고리즘

표 1. Bunny 간략화 거리 에러  
Table 1. Bunny Simplification distance error.

면의 수	QEM 알고리즘	본 알고리즘
	max	max
40000	0.001174	0.001174
20000	0.001177	0.001176
10000	0.001267	0.001287
5000	0.001323	0.001299
1000	0.003016	0.003954

표 2. Bunny 간략화 수행 시간(sec)  
Table 2. Bunny Simplification Time(sec).

면의 수	QEM 알고리즘	본 알고리즘
40000	18.0860	24.8557
20000	18.7670	28.7013
10000	19.0975	30.7943
5000	19.3678	31.6856
1000	19.4179	32.5768

표 3. Bunny 간략화 체적 오차  
Table 3. Bunny Simplification volume error.

면의 수	QEM 알고리즘	본 알고리즘
40000	2.071367E-007	2.001372E-021
20000	1.094891E-006	2.729866E-021
10000	3.000502E-006	1.945874E-021
5000	6.787182E-006	3.878497E-021
1000	3.116341E-005	-3.598377E-021

을 비교 분석해본 결과를 표 1~3에 나타내었다. 표 1을 보면 거리 에러는 서로 비슷한 수준으로 나왔다는 것을 알 수 있으나, 표 2의 수행 시간 비교에서는 QEM 알고리즘이 본 논문의 알고리즘보다 조금 나은 결과를 보였다. 그러나 표 3을 보면 QEM 알고리즘에 의해 간략화된 메쉬 모델에서는 원 모델에 대한 체적 오차가 어느 정도 존재하나, 본 논문에서 제안한 방법으로는 약간의 계산 오차만을 보일 뿐이다. 그것은 본 논문에서 제안한 방법을 사용했을 경우 이론적으로는 체적 오차가 있을 수 없기 때문이다. 그림 8에는 주어진 원본 bunny 모델을, 그리고 그림 9와 그림 10에는 두 방법을 사용하여 간략화한 결과 예를 보였다.

### IV. 결론

현재까지 제안된 대부분의 메쉬 간략화 알고리즘에



그림 8. 69451 면의 원본 Bunny 모델  
Fig. 8. Original bunny model with 69451 faces.

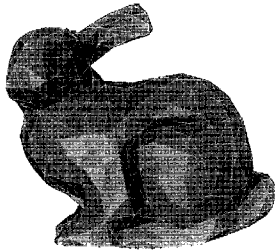


그림 9. 제안한 알고리즘을 사용한 999 면의 bunny  
Fig. 9. Bunny with 999 faces by suggested algorithm.

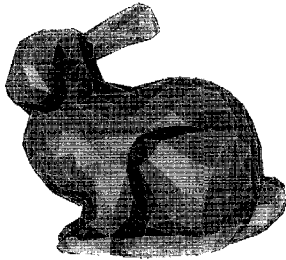


그림 10. QEM 알고리즘을 사용한 999 면의 bunny  
Fig. 10. Bunny with 999 faces by QEM algorithm.

서는 간략화시 원본과의 거리 오차가 최소가 되는 방향으로 메쉬를 줄여 나갔다. 따라서 필연적으로 메쉬 모델의 체적 오차가 생기게 되는데, 본 논문에서는 간략화 과정 중에도 원본 3D 메쉬 모델의 체적이 변하지 않도록 하는 메쉬 간략화 알고리즘을 제안하였다. 예지 축약의 우선순위 부여를 위해서는 약간 변형된 형태의 이차 에러 메트릭을 사용하였으며, 또한 간략화 중에 체적이 변하지 않는 정점을 결정하는 과정에서도 형태의 변형이 되도록이면 적게 일어나는 정점을 선택하는 방법이 제시되었다.

컴퓨터 시뮬레이션 예를 통하여 본 논문에서 제안한 알고리즘과 기존의 QEM 알고리즘을 최대 거리 오차, 계산 수행 시간, 그리고 체적 오차 면에서 비교하였다. 두 알고리즘에 의한 거리 오차는 큰 차이가 없었으며, 간략화 수행 시간은 본 논문에서 제안한 방법이 조금 더 걸린다는 것을 확인하였다. 그러나 QEM 알고리즘

이 체적 오차를 어느 정도 발생시키는 것과 달리 본 논문에서 제안한 방법으로는 컴퓨터 계산 오차 이상의 오차는 발생하지 않아 원본 메쉬 모델의 체적을 최대한 유지하는 이점이 있음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] William J. Schroeder, Jonathan A. Zarge, and William E. Lorensen, "Decimation of triangle meshes," *Proceedings of the SIGGRAPH '92 Conf.*, pp. 65-70, July 1992.
- [2] Hugues Hoppe, "Progressive Mesh" *Proceedings of the SIGGRAPH '96 Conf.*, pp. 99-108, August 1996.
- [3] Hugues Hoppe, "View-dependant refinement of progressive meshes," *Proceedings of the SIG-APH '97 Conf.*, pp. 189-198, August 1997.
- [4] Michael Garland and Paul S. Heckbert, "Mesh Simplification with quadric error metrics," *Proceedings of the SIGGRAPH '97 Conf.*, pp. 209-216, August 1997.
- [5] Michael Garland and Paul S. Heckbert, "Simplifying surfaces with color and texture using quadric error metrics," *Proceedings of the IEEE Visualization '98 Conf.*, pp. 263-269, 542, October 1998.
- [6] Hugues Hoppe, "New quadric metric for simplifying meshes with appearance attributes," *Proceedings of the IEEE Visualization '99 Conf.*, pp. 56-66, October 1999.
- [7] Jonathan Cohen, Marc Olano and Dinesh Manocha, "Appearance preserving simplification," *Proceedings of the SIGGRAPH '98 Conf.*, pp. 115-122, July 1998.
- [8] P. Cignoni, C. Rocchini, and R. Scopigno, "Metro: measuring error on simplified surfaces," *Computer Graphics Forum*, June 1998.
- [9] Sun-Jeong Kim, David Levin, and Chang-Hun Kim, "Surface Simplification Using Discrete Curvature Norm," *Computers & Graphics*, vol. 26, no. 5, pp. 657-663, October 2002.

저 자 소 개



김 종 영(정회원)  
 2001년 강원대학교 제어계측  
 공학과 학사 졸업.  
 2003년 강원대학교 제어계측공학  
 과 석사 졸업.  
 2003년~현재 한국철도기술연구원  
 고속철도개발사업단.

<주관심분야: 고속전철 계측시스템, 철도차량 전  
 기 및 센서, 계측제어, 통신 및 신호처리>



장 태 정(정회원)  
 1986년 서울대학교 제어계측  
 공학과 학사 졸업.  
 1988년 서울대학교 제어계측  
 공학과 석사 졸업.  
 1994년 서울대학교 제어계측  
 공학과 박사 졸업.

1995년~현재 강원대학교 전기전자정보통신  
 공학부 부교수

<주관심분야: 햅틱 인터페이스, 가상현실, 디지털  
 통신 및 신호처리, 제어이론 및 응용>