

# 삼차원 모델에 대한 연성 워터마킹 방법

이상광, 호요성

광주과학기술원

## 요 약

최근 급증하는 디지털 멀티미디어 정보를 보호하기 위해 다양한 종류의 디지털 워터마킹 방법들이 개발되고 있다. 본 논문에서는 디지털 워터마킹의 기본 원리를 살펴보고, 삼각형 스트립(triangle strip)을 이용한 삼차원 모델에 대한 연성 워터마킹(fragile watermarking) 방법을 제안한다. 사용자 키(key) 값으로 생성된 이진 무작위 시퀀스는 배타적 논리합(exclusive OR) 연산을 통해 이진 워터마크 시퀀스와 결합한 후, 꼭지점 좌표(vertex coordinates)를 변동시켜 삼각형 스트립에 삽입된다. 컴퓨터 모의 실험을 통해, 제안한 워터마킹 방법이 무작위 잡음 첨가(additive random noise), 이동, 회전, 비례 축소(scaling), 폴리곤 간략화(polygon simplification), 기하 정보 압축(geometry compression) 등과 같은 삼차원 모델에 대한 다양한 공격을 검출할 수 있으며 변조된 위치를 표시할 수 있다는 것을 보였다.

## I. 서 론

멀티미디어 콘텐츠의 디지털 표현은 원본 콘텐츠와 동일한 여러 복사본을 쉽고 널리 배포할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만, 원본과 동일한 형태의 수 많은 복사본이 불법적으로 생산될

수 있다는 사실은 콘텐츠 소유권에 대한 심각한 위협이 된다. 최근에 개발되고 있는 디지털 워터마킹(digital watermarking) 기술은 지적 재산권을 보호하기 위해 방송 감시, 소유권 증명, 거래 추적, 콘텐츠 인증, 복사 제어, 그리고 기기 제어와 같은 다양한 응용 분야에 적용될 수 있다<sup>[1]</sup>.

워터마킹 기술은 단순히 데이터나 워터마크의 손상 여부만을 알아보는 연성 워터마킹 기술을 비롯하여 다양한 공격에도 변형되거나 제거되지 않는 강성 워터마킹(robust watermarking) 기술들이 있다. 연성 워터마킹은 원본 데이터가 바뀌었는지를 검출하기 위한 것으로 다양한 형태의 콘텐츠 변형에 대한 인증(authentication)을 가능하게 하며, 모든 워터마킹 응용들 중에 가장 낮은 수준의 강인성을 요구한다<sup>[2]</sup>.

최근 텍스트, 오디오, 정지영상, 동영상과 같은 디지털 멀티미디어 콘텐츠의 보호를 위해 다양한 종류의 워터마킹 알고리즘들이 제안되고 있다<sup>[3]</sup>. 하지만, CAD(computer-aided design)나 VR(virtual reality)을 위해 사용되는 삼차원 모델에 대한 워터마킹 기술은 상대적으로 오디오, 정지영상, 동영상의 연구 논문 발표량에 비해 연구 결과가 미미한 실정이다. 삼차원 모델에 대한 워터마킹 기술은 삼차원 데이터의 기하학적인 성질을 이용해 사용자에게 자사의 로고나 문구를 보이게 하거나 또는 보이지 않게 삽입하여, 불법적인 공격으로부터 삽입된 워터마크를 이용하여 삼차원 모델을 보호해 줄 수 있다.

삼차원 데이터의 워터마킹에 관련된 연구 논문

은 1997년에 Obuchi<sup>[4]</sup>가 최초로 발표하였다. 그들은 삼차원 폴리곤 모델의 꼭지점 좌표나 위상(topology)을 수정한 정보를 이용해 워터마크 데이터를 삽입하는 알고리즘들을 제안하였다. Yeو Yeung<sup>[5]</sup>은 워터마크가 삽입된 삼차원 모델에 대한 변형을 검출할 수 있는 연성 워터마킹 기술은 제안하였다. 즉, 각 꼭지점 좌표의 해쉬 함수(hash function)가 이웃하는 꼭지점들의 중심(centroid)에 적용되는 또다른 해쉬 함수와 정합하도록 꼭지점 좌표를 변화시켜 워터마크를 삽입하였다. 또한 Kanai<sup>[6]</sup>는 웨이블릿을 이용해 삼차원 폴리곤 모델에 워터마킹을 하였다. Benedens<sup>[7]</sup>는 폴리곤 모델의 기하학적인 정보를 이용하여 워터마크를 삽입하고 추출하는 방법을 제안하였다. 이와 같이 삼차원 모델에 대한 워터마킹 기술은 크게 공간 영역에서의 워터마크 삽입 기술과 변환 영역에서 삽입하는 기술로 구별될 수 있으며, 워터마크가 악의적인 공격으로부터 살아남을 수 있는 강성 워터마킹 기법에 대해서 주로 연구가 집중되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 삼각형 스트립을 이용한 삼차원 모델에 대한 연성 워터마킹 방법을 제안한다. 삼차원 모델 데이터의 인증을 위해 삼각형 스트립 상에 이웃하는 꼭지점 사이의 연관성을 이용하여 워터마크 신호를 삽입하였다. 이는 삼각형 스트립을 이용하는 다양한 응용에서 실시간으로 워터마크를 삽입하거나 검출할 수 있으며, 각 삼각형 스트립 상에서 독립적으로 워터마크를 삽입할 수 있다는 장점을 가지고 있다<sup>[8]</sup>. 또한 워터마크 검출 과정에서는 원본 삼차원 모델 데이터가 요구되지 않으므로 효과적인 연성 워터마킹 방법으로 적절하다.

본 논문의 II장에서는 디지털 워터마킹의 기본 원리를 살펴보고, III장에서는 제안한 방법의 워터마크 삽입 및 복원 방법을 설명한다. IV장에서는 제안한 연성 워터마킹 방법에 대한 실험 결과와 분석을 제시한 뒤에, V장에서 결론을 맺는다.

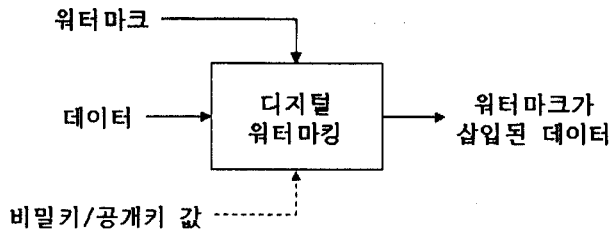
## II. 워터마킹의 기본 원리

워터마킹은 워터마크 신호를 헤더(header)가 아닌 호스트(host) 데이터에 삽입하는 것으로, 워터마크 신호는 워터마크가 삽입된 신호 내에서 지각적으로 구별하기 어렵고 보안(security)이 유지되어야 한다. 또한, 올바른 키 값을 사용하여 부분적으로 또는 전체적으로 워터마크 신호를 복원할 수 있어야 한다.

지각적으로 구별하기 어렵게 워터마크 신호를 삽입하기 위해 몇 가지 지각적인 특성이 암시적이거나 명시적으로, 또는 고정적이거나 적응적으로 호스트 데이터에 이용될 수 있다. 또한, 워터마크가 지각적으로 구별되지 않도록 하기 위해 워터마크 신호가 삽입되는 샘플이나 변환 계수는 평균 크기에 비해 상대적으로 적은 양으로 변형되어야 한다.

적은 양을 변화시키고도 강인성을 보장받기 위해, 일반적으로 워터마크 신호는 호스트 데이터에 중복적으로 삽입된다. 따라서, 워터마크를 복원하는데 많은 데이터를 이용할 수 있으므로 좀더 강인한 워터마크 복원이 이루어진다. 일반적으로, 워터마킹 시스템은 워터마크의 조작과 삭제 막기 위해 하나 혹은 그 이상의 키 값을 사용한다.

워터마킹 시스템을 설계하는데 다음 세 가지 주요 사항을 고려해야 한다. 첫 번째 사항은 호스트 신호에 더해지는 워터마크 신호의 설계이다. 전형적으로, 워터마크 신호는 키 값과 워터마크 정보와 관련이 깊다. 두 번째 고려사항은 워터마크 신호를 호스트 데이터에 삽입하는 알고리즘의 설계이다. 세 번째 사항은 키 값과 원본 데이터를 이용하여 워터마크가 삽입된 신호에서 워터마크 정보를 복원하는 검출 알고리즘의 설계이다. 워터마크 신호 설계와 워터마크 신호 삽입 알고리즘 설계에 관한 처음 두 가지 고려사항은 삽입되는 워터마크 신호가 호스트 신호에 따라 적응적으로 만들어질 때, 하나의 통합된 형태로 취급된다.

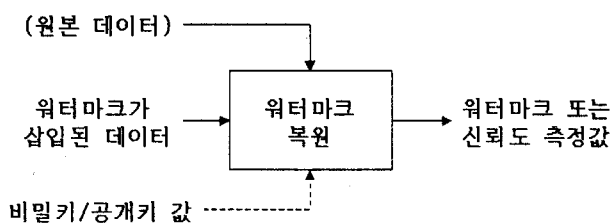


<그림 1> 일반적인 워터마크 삽입 과정

<그림 1>은 일반적인 워터마크 삽입 과정을 보여준다. 입력 신호는 워터마크, 호스트 데이터, 공개키 또는 비밀키 값이다. 응용에 따라 호스트 데이터는 비압축 또는 압축된 형태이며, 대부분의 방법에서는 비압축 데이터 상에서 동작한다. 워터마크는 문자나 정지영상 같이 어떠한 형태도 가능하다. 비밀키 또는 공개키 값은 보안을 강화 하는데 사용된다. 즉, 인증되지 않은 사용자가 워터마크를 검출하지 못하도록 키 값은 워터마크를 보호하는데 사용된다. 비밀키 또는 공개키 값과 조합되어 워터마킹 방법은 각각 비밀 워터마킹 또는 공개 워터마킹 방법으로 분류된다. 워터마크 삽입 알고리즘의 결과는 수정된, 즉 워터마크가 삽입된 데이터가 된다.

<그림 2>는 일반적인 워터마크 복원 과정을 보여주고 있다. 입력 신호는 워터마크가 삽입된 데이터, 비밀키 또는 공개키 값이며, 원본 데이터는 워터마킹 방법에 따라 필요 여부가 결정된다. 워터마크 복원 알고리즘의 출력 신호는 복원된 워터마크 또는 원본 워터마크와 입력 데이터에 포함되어 있는 워터마크와의 유사성을 나타내는 신뢰도 측정값이 된다.

대부분의 워터마킹 방법들은 대역확산(spread-spectrum) 통신과 유사한 방법을 이용하고 있



<그림 2> 일반적인 워터마크 복원 과정

다. 이 방법은 호스트 데이터에 비해 상대적으로 작은 크기의 의사잡음 시퀀스를 더해 주어 워터마크를 삽입한다. 의사잡음 시퀀스는 상관관계 수신기(correlation receiver) 또는 정합 필터(matched filter)를 이용하여 검출될 수 있다. 의사잡음 시퀀스를 적절히 선택하여 적용하면, 오경보 확률(false alarm rate)을 낮출 수 있다.

### III. 제안한 워터마킹 방법

#### 1. 워터마크 삽입

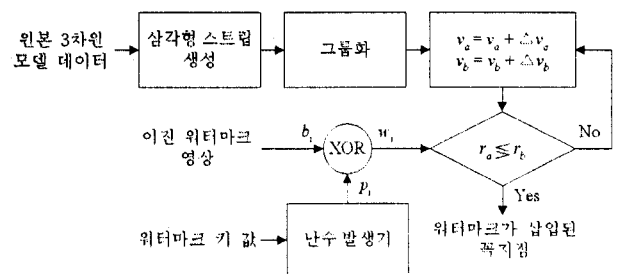
<그림 3>은 제안한 방법의 워터마크 삽입 과정을 나타낸 것이다. 워터마크 삽입 알고리즘은 삼각형 스트립 생성, 그룹화, 워터마크 삽입의 세 단계로 구성되며, 입력은 삼차원 모델 데이터, 이진 워터마크 영상, 워터마크 키 값이다.

삽입되는 워터마크  $W$ 는 워터마크 키 값에 의해 생성된 무작위 비트열  $P$ 와 워터마크 영상 비트열  $B$ 의 배타적 논리합 연산을 통해 만들어지며 각 비트열의 크기는  $B$ 의 크기에 해당되는  $M \times N$ 이 된다.

$$w_i = p_i \oplus b_i \text{ for } i=0, 1, \dots, M \times N - 1 \quad (1)$$

여기서  $\oplus$ 는 배타적 논리합을 나타내며,  $w_i$ ,  $p_i$ ,  $b_i$ 는 각각  $W$ ,  $P$ ,  $B$ 에 속해 있는  $i$ -번째 성분을 나타낸다.

삼각형 스트립은 삼각형 메쉬(triangle mesh)의 효과적인 렌더링(rendering)을 위해 이용된다. 즉, 삼각형 메쉬가 단순 명료한 형태로 저장



<그림 3> 제안한 워터마크 삽입 알고리즘

되어 메모리 낭비를 줄일 수 있으며, 렌더링 API에 메쉬를 전송할 때 좀더 적은 대역폭을 사용할 수 있다는 장점을 갖는다. 삼차원 모델에서 서로 연결된 삼각형을 추적하여 스트립을 생성하기 위해서는 모든 면(face)들 사이의 연결성(connectivity) 정보가 필요하며, 삼각형 스트립 생성의 알고리즘은 다음과 같다<sup>[9]</sup>.

- 1) 스트립 생성을 시작하기 위한 초기 삼각형 선택
- 2) 스트립을 따라 탐색(traversing)할 에지(edge) 방향 선택
- 3) 진행 방향으로 더 이상 연결이 없는 삼각형에 도달할 때까지 스트립 확장
- 4) 모든 에지 방향에 대해 2)-3) 과정을 통해 스트립을 생성한 후 길이가 가장 긴 스트립을 선택
- 5) 모든 면을 방문할 때까지 1)-4) 단계를 반복적으로 수행

1)의 과정에서 선택된 초기 삼각형을 알 수 없다면, 워터마크 삽입을 위해 사용되었던 삼각형 스트립을 생성할 수 없다. 따라서 초기 삼각형이 워터마킹 알고리즘의 비밀 키 값으로 이용될 수 있으므로 워터마크 신호의 보안성을 개선시킬 수 있다. 또한, 연결되어 있는 꼭지점들의 국부적인 특성을 이용하여 독립적으로 워터마크를 삽입할 수 있다는 점에서 분할(partition) 방법과 유사한 특성을 갖는다. 본 논문에서는 이러한 꼭지점 탐색 과정에서 워터마크를 삽입하여 이웃하는 꼭지점 사이의 연관성을 효과적으로 이용할 수 있도록 삼각형 스트립 상에서 워터마크를 삽입하였다.

그룹화 과정에서는 앞서 생성된 삼각형 스트립에서 이웃하는 꼭지점들을 서로 다른 두 그룹으로 형성한다. 이렇게 나누어진 두 그룹의 꼭지점들은 삽입되는 비트값에 따라 대응하는 관계를 만족할 수 있도록 약간 변동시킨다.

그룹 A에 속한 꼭지점을  $v_a$ 라 하고, 그와 쌍을 이루는 그룹 B에 속한 꼭지점을  $v_b$ 라 하면, 다음과 같이 꼭지점 좌표 값을 초기값(seed)으로 하

는 난수 함수(random function)를 이용하여 정보 비트를 삽입할 수 있다.

$$\begin{aligned} s_a &= \text{scal}(v_a) ; \text{srand}(s_a) ; r_a = \text{rand}() ; \\ s_b &= \text{scal}(v_b) ; \text{srand}(s_b) ; r_b = \text{rand}() ; \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\text{scal}()$ 은 부동소수점형의 꼭지점 좌표 값을 부호없는 정수형으로 변환시켜주는 함수이며,  $\text{srand}()$ 는 난수 함수인  $\text{rand}()$ 의 초기값을 설정해주는 함수이다. 삽입하고자 하는 비트값에 따라 다음의 조건을 만족하도록 꼭지점 좌표 값을 변경시킨다.

$$\begin{aligned} r_a > r_b &\leftarrow \text{bit '0'} \\ r_a \leq r_b &\leftarrow \text{bit '1'} \end{aligned} \quad (3)$$

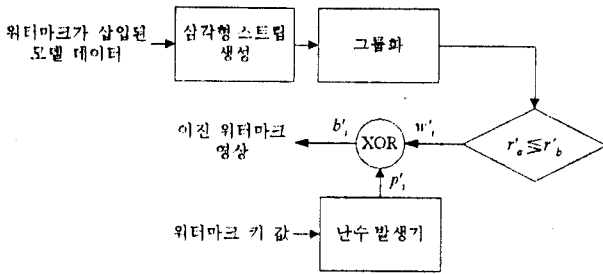
삽입 과정은 각 좌표에 개별적으로 수행되며  $x$ -좌표에 삽입될 경우 다음과 같은 순서로  $x$ -좌표 값을 변동량(perturbation step)  $\Delta x$ 만큼 이동시켜 꼭지점 좌표 값을 변경하며 식 (3)의 조건이 만족될 때까지  $\Delta x$ 를 증가시키며 반복한다.

$$\begin{aligned} v_a'(x, y, z) &\leftarrow (x + \Delta x, y, z) \\ v_a'(x, y, z) &\leftarrow (x - \Delta x, y, z) \\ v_b'(x, y, z) &\leftarrow (x + \Delta x, y, z) \\ v_b'(x, y, z) &\leftarrow (x - \Delta x, y, z) \end{aligned} \quad (4)$$

## 2. 워터마크 검출

<그림 4>는 워터마크 검출 과정을 보여준다. 워터마크 검출은 워터마크가 삽입된 3차원 모델 데이터와 워터마크 키 값을 이용하여, 앞서 설명한 워터마크 삽입 알고리즘과 유사한 과정으로 처리된다.

<그림 4>에 보인 것처럼, 이진 워터마크 영상을 복원하기 위해 먼저 워터마크가 삽입된 모델로부터 삼각형 스트립을 생성한다. 워터마크 삽입과정에서 원본 모델 데이터의 꼭지점 좌표값만이 변경되고 연결성 정보는 그대로 유지되기 때문



〈그림 4〉 제안한 워터마크 검출 알고리즘

에 워터마크가 삽입된 모델로부터 원본 모델과 동일한 삼각형 스트립을 생성할 수 있다. 삼각형 스트립의 꼭지점들은 워터마크 삽입 과정에서의 동일한 방법으로 그룹화되며, 그룹간에 쌍을 이루는 각각의 꼭지점 좌표값을 초기값으로 하는 난수 함수값  $r'_a$ 와  $r'_b$ 에 따라 다음과 같은 방법으로 삽입된 비트를 검출하게 된다.

$$\begin{aligned} \text{bit '0'} &\leftarrow r'_a > r'_b \\ \text{bit '1'} &\leftarrow r'_a \leq r'_b \end{aligned} \quad (5)$$

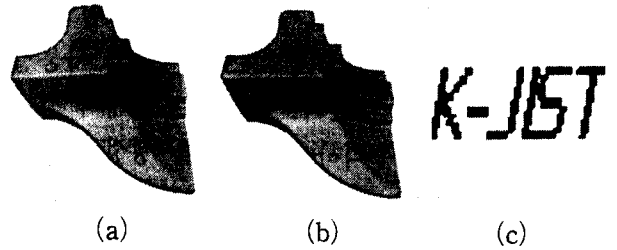
이진 워터마크 영상  $B'$ 을 복원하기 위해 검출된 비트열  $W'$ 과 워터마크 키 값에 의해 생성된 비트열  $P$ 와의 배타적 논리합 연산을 수행한다.

$$b'_i = p_i \oplus w'_i \text{ for } i=0, 1, \dots, M \times N - 1 \quad (6)$$

여기서  $b'_i$ 와  $w'_i$ 는 각각  $B'$ 와  $W'$ 에 속해 있는  $i$ -번째 성분을 나타낸다.

#### IV. 실험 결과 및 분석

본 논문에서 제안한 연성 워터마킹 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 6475개의 꼭지점과 12946개의 면을 갖는 Fandisk 모델에 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 〈그림 5〉는 원본 Fandisk 모델과 III-1절에서 기술한 워터마크 삽입 과정에 의해 64×32 크기의 이진 워터마크 영상을 삽입한 결과를 보여주고 있다. 〈그림 5〉에 보인 것처럼, 워터마크 삽입 과정에서 꼭지점 좌표값의



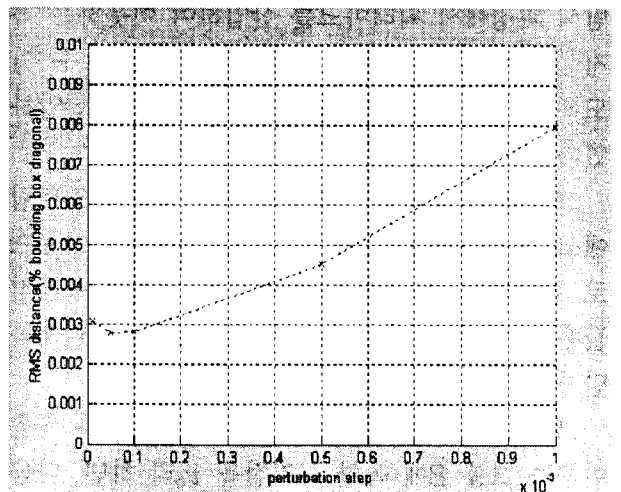
〈그림 5〉 워터마크가 삽입된 모델

- (a) 원본 Fandisk 모델
- (b) 워터마크가 삽입된 결과 모델
- (c) 64×32 크기의 이진 워터마크 영상

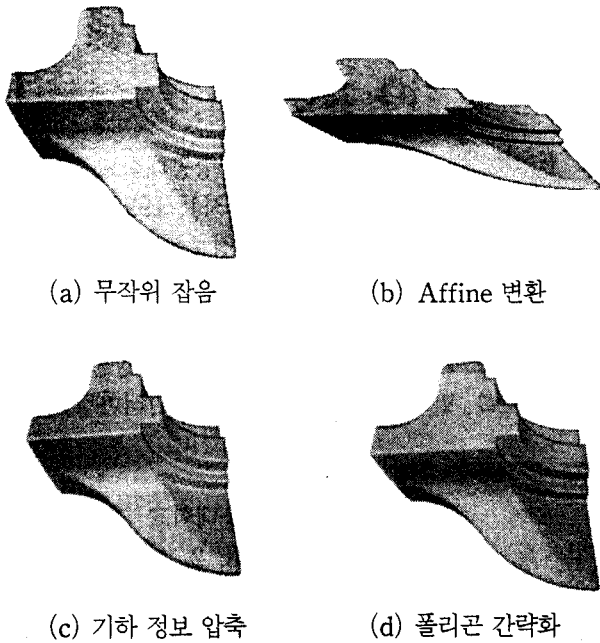
변동이 적어 원본 모델과 결과 모델을 시각적으로 구별하기 어렵다.

원본 모델과 워터마크가 삽입된 모델의 차이를 정량적으로 측정하기 위해 MESH (measuring error between surfaces using the Hausdorff distance)<sup>[10]</sup>를 사용하였다. MESH는 삼각형들을 정규격자(regular grid) 구조로 만들어 Hausdorff 거리를 이용한 최대 오류, 평균 오류, 평균제곱근 (root mean square, RMS) 오류를 계산하기 위해 표본화 과정을 수행한다. 표본화 간격은 측정 거리의 정확도에 중요한 역할을 하며 바운딩 박스(bounding box)의 대각선 길이에 0.5%나 0.4% 아래의 값이 적절하다.

〈그림 6〉은 표본화 간격을 0.5%에서의 변동량에 따른 RMS 거리를 보여주고 있다. 변동량은 원본 삼차원 모델의 왜곡 정도를 조절하는데



〈그림 6〉 변동량에 따른 RMS 거리



〈그림 7〉 일반적인 공격

중요한 역할을 하며, 〈그림 6〉을 통하여 적절한 변동량을 결정할 수 있다.

다양한 공격에 대한 결과를 살펴보기 위해 워터마크가 삽입된 모델에 〈그림 7〉과 같이 무작위 잡음 첨가, affine 변환, 기하정보 압축, 폴리곤 간략화를 고려하여 실험하였다. 무작위 잡음 첨가는 좌표 값들의 바운딩 박스를 구한 후, 그 최대값과 변위 값의 비율을 0.2%로 하여 수행하였다. Affine 변환은 삼차원 모델의 일부 축의 좌표 값들을 축소, 확대, 쉬어링(shearing)하였다. 기하정보 압축은 MPEG-4 SNHC 표준의 기하정보 부호화를 이용했으며, geometry.quant는 9로, color.quant, normal.quant, texture.quant는 각각 1로 설정하여 압축하였다. 마지막으로, 폴리곤 간략화는 12956개의 면을 10000개로 간략화하였다.

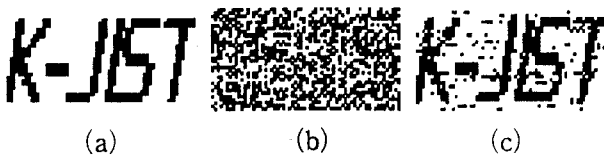
실험 결과는 제안한 워터마킹 알고리즘이 키 값이 잘못되었는지, 워터마크가 삽입되어 있는지, 또는 삼차원 모델 데이터가 공격받았는지를 검출할 수 있다는 것을 보여준다. 〈그림 8(b)〉에서 볼 수 있듯이, 잘못된 워터마크 키를 사용하거나 〈그림 7〉의 공격들에 대해서는 잡음과 같은 형태의 워터마크가 검출되며 공격받지 않았을 때에는 〈그림 8(a)〉와 같이 올바른 이진 워터마크 영상이 검출된다. 〈그림 8(c)〉는 하나의 스트립이 국부적으로 변형된 경우에 검출된 워터마크 영상으로 변형된 영역의 위치를 표시하고 있다.

### V. 결 론

본 논문에서는 삼차원 모델 데이터의 불법적인 변조를 검출할 수 있는 새로운 방법의 연성 워터마킹 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 워터마크 삽입과 검출이 삼각형 스트립 생성 과정에서 수행되기 때문에 삼각형 스트립을 이용한 여러 가지 응용들에 효과적이며, 서로 연결된 꼭지점들의 국부적인 특성을 이용할 수 있다는 장점을 갖는다. 또한 워터마크 삽입 과정에서 꼭지점 좌표값의 변동이 적어 원본 모델과 결과 모델을 시각적으로 구별하기 어렵다. 컴퓨터 모의 실험을 통해, 제안한 워터마킹 방법이 다양한 공격을 검출할 수 있으며 변조 위치를 표시할 수 있다는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 제안한 방법을 공간 영역에서 압축되지 않은 삼차원 모델에 대해 기술하였지만, 변환 영역에서 압축된 삼차원 모델에 대해 확장될 수 있다.

### 참 고 문 헌

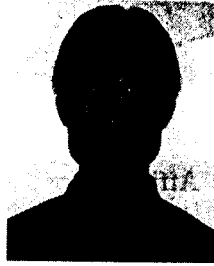
[1] I. Cox, M. Miller and J. Bloom, Digital watermarking, Morgan Kaufmann Pub., 2001.



〈그림 8〉 검출된 워터마크 영상  
(a) 공격받지 않은 경우 (b) 일반적인 공격  
(c) 국부적인 공격

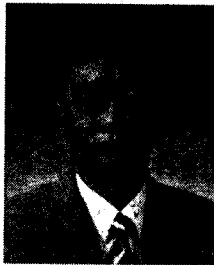
- [2] C. Podilchuk and E. Delp, "Digital watermarking: algorithms and applications," IEEE Signal Processing Magazine, vol.18, pp.33-46, 2001.
- [3] S. Katzenbeisser and F. Petitcolas, Information hiding techniques for steganography and digital watermarking, Artech House, 2000.
- [4] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono, "Watermarking three-dimensional polygonal models through geometric and topological modifications," IEEE J. on Selected Areas in Communications, vol. 16, pp.551-560, 1998.
- [5] M. Yeung and B. Yeo, "Fagile watermarking of three-dimensional object," Proc. ICIP, vol. 2, pp.442-446, 1998.
- [6] S. Kanai, H. Date, and T. Kishinami, "Digital Watermarking for 3-D Polygons Using Multiresolution Wavelet Decomposition," Proceedings sixth IFIP WG 5.2 GEO-6, pp.296-306, Dec. 1998.
- [7] O. Benedens, "Geometry-based watermarking of 3-D models," IEEE Computer Graphics and Applications, pp.46-55, 1999.
- [8] 이상광, 호요성, 문경애, "삼각형 스트립을 이용한 삼차원 모델에 대한 연성 워터마킹 방법", 대한전자공학회 컴퓨터/반도체 소사이어티 추계학술대회 논문집, 제26권 2호, pp.221-224, 2002. 11.
- [9] P. Terdiman, "Creating efficient triangle strips," <http://codercorner.com/Strips.htm>.
- [10] N. Aspert, D. Santa-Cruz and T. Ebrahimi, "MESH: Measuring Error between Surfaces using the Hausdorff distance," <http://mesh.epfl.ch>.

## 저자 소개



### 이상광

1996. 2. 한국항공대학교 항공전자공학과 (학사), 1998. 8. 광주과학기술원 정보통신공학과 (석사), 1998. 9~현재: 광주과학기술원 정보통신공학과 (박사과정), <주관심 분야: 영상 및 오디오 부호화, 멀티미디어 통신, 디지털 워터마킹>



### 호요성

1981. 2. 서울대학교 전자공학과 (학사), 1983. 2. 서울대학교 전자공학과 (석사), 1983. 3~1995. 9: 한국전자통신연구소 선임연구원, 1989. 12: University of California, Santa Barbara Dept. of Electrical and Computer Engr. (박사), 1990. 1~1993. 5: 미국 Philips 연구소 Senior Research Member, 1995. 9~현재: 광주과학기술원 정보통신공학과 교수, <주관심 분야: 디지털 신호처리, 영상신호처리 및 압축, 초저속 영상통신, 디지털TV와 고선명 TV 방식, 멀티미디어 통신, 디지털 워터마킹>