

# 가속 방법을 이용하는 전파 광선 추적법에 관한 연구

## A Study on Ray Tracing Method for Wave Propagation Prediction with Acceleration Methods

권세웅 · 문현욱 · 오재림 · 임재우 · 배석희 · 김영규\* · 박정수\* · 윤영중

Sewoong Kwon · Hyun Wook Moon · Jae Rim Oh · Jae-Woo Lim · Seok-Hee Bae · Young-Gyu Kim\* · Jounghsoo Park\* · Young Joong Yoon

### 요 약

본 논문에서는 개선된 가시 트리 구조와 가시면 검색을 위해 효율적인 방법을 적용한 광선 추적법을 제안한다. 비슷한 특성을 갖는 트리의 노드를 재생성하지 않는 개선된 가시 트리 구조를 사용하였으며, 가시면 판별을 위해 묶음 광선(packet ray) 개념 검사점을 비균일하게 분포시키는 방법으로 경로 탐색 성능을 개선하였다. 충돌 검사에서 묶음 광선을 사용함으로써 3.3배의 속도 개선을 이루었으며, 비균일 검사점 분포를 통해 1.11배의 성능 향상을 이루었다. 본 광선추적법을 적용한 결과의 경우, 경로 손실에서 RMS 에러가 1.9 dB 발생하여 높은 정확도를 제공할 수 있음을 보였다.

### Abstract

In this paper, we proposed an improved ray tracing method with an amelioration of visible tree structure, a visible face determination method, and non-uniform random test point method. In a proposed visible tree structure, it reduces tree nodes by means of merging similar nodes. In a visible face determination method, it shows that a ray hit test with a packet ray method can reduce a test time. A ray tracing method involving with a packet ray hit test method can improve a tree construction time up to 3.3 times than a ray tracing method with a single ray hit test method. Furthermore, by seeding a non-uniform and random test point on a face, tree construction time is improved up to 1.11 times. Received powers from the proposed ray tracing results and measured results have good agreement with 1.9 dB RMS error.

Key words : Ray Tracing Method, Packet Ray, Visible Tree, SIMD(Single Instruction Multiple Data)

### I. 서 론

광선 추적법은 전파 예측 방법 중 하나로 파장에 비해 큰 구조물의 해석에 많이 적용되었다. 또한, 도심과 같은 복잡한 환경에서도 광선추적법을 적용하기 위한 많은 노력이 있었다. 컴퓨터가 많이 발전하지 못한 과거에는 비가시 환경에서 송수신기간에 큰

영향을 주는 전파 경로인 다중 회절 경로에 대한 연구가 많이 수행되었다. 다중 회절은 주로 송신기와 수신기 사이에 많은 건물군이 존재할 때 건물 옥상들의 회절을 고려하기 위해 연구되었으며<sup>[1]-[4]</sup>, 위성 통신의 경우 1개의 건물 주변의 전파를 예측하기 위해 한 개의 옥상에 의한 다중 회절 연구도 수행되었다<sup>[5]</sup>. 최근 컴퓨터 기술의 발전은 복잡한 다중 경로

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다(계약번호 UD070054AD).」

연세대학교 전자공학과(School of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University)

\*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20090319-029

· 수정완료일자 : 2009년 5월 19일

환경에 대해 경로 검색이 가능하게 하였으며, 건물군이 복잡하게 위치한 경우에도 높은 정확도를 가진 전파 예측이 가능하게 되었다. 그러나 깊은 음영지역과 같이 도달하기 어려운 지역을 해석하기 위해서 복잡한 경로 검색을 수행해야 하나 아직까지도 이에 대해서는 많은 고려가 되어 있지 못한 현실이다. 따라서 효율적이고 빠른 광선 추적법의 연구 개발이 필요한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 광선 추적법 중 가시 트리 생성 단계에서 개선된 트리 구조와 같은 단계에서 가시면 검색을 위해 효율적인 방법을 적용한 광선 추적법을 제안한다.

## II. 이 론

광선 추적법은 송신기에서 수신기까지 최단 경로들을 찾는 방법들로 이루어져 있으며, 순방향 탐색법과 역방향 탐색법이 주된 검색 방법이다. 기존의 광선 발사(ray launching) 방법은 순방향 또는 역방향 탐색만을 수행하여 정확한 경로를 결정하지 못하기 때문에 수신기 개념을 도입하여 정확한 경로와 유사한 경로 특성을 갖는다. 때문에 경로의 전력은 정확한 경로의 전력과 거의 유사하다. 그러나 위상 오차는 크게 발생하며 이러한 단점을 보완하기 위해 송수신 위치가 결정된 상태에서 경로 탐색을 수행하여 경로를 결정하는 방법이 존재한다. 최근의 연구는 전력뿐 아니라 신호의 위상도 중요하게 다루기 때문에 대부분의 연구가 이러한 방법을 사용한다<sup>[6]~[9]</sup>. 또한 본 논문에서도 이러한 구조의 광선 추적법을 사용하며, 그림 1과 같은 기본 구조를 갖는다.

### 2-1 광선 추적법 기본 구조

본 논문에서 사용한 광선 추적법의 기본적인 구조는 그림 1과 같다. 먼저 주어진 지형 정보와 송수신기 정보를 읽고 기본적인 정보를 정하고 송신기로부터 순방향으로 가시 트리를 생성한다. 생성된 가시 트리를 이용하여 역방향으로 탐색을 수행하며, 광선 경로를 설정하고 최종적으로 GO(Geometric Optics)/UTD(Uniform Theory of Diffraction)를 적용하여 광선의 전파 특성을 결정한다. 각 단계는 독립적이며 각각에 대해 효율적인 방법을 적용할 수 있다. 이때

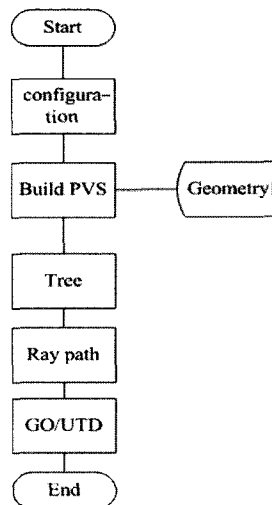


그림 1. 광선 추적법의 기본 구조  
Fig. 1. Basic process of a ray tracing method.

GO/UTD에서 회절계수는 Luebbers에 의해 제안되고 Holm, Sallabi에 의해 회절 특성이 개선된 회절 계수를 사용한다<sup>[10]</sup>. 이 단계에서 안테나의 방사 패턴을 고려하기 위하여 광선의 도래각(angle of arrival)과 발사각(angle of departure)를 이용한다.

본 논문에서는 두 가지 광원을 가정한다. 점신 호원은 실제 신호원과 실제 신호원이 영상법에 의해 만들어진 가상의 점 신호원이 존재한다. 선 신호원은 실제 신호원이 썩기에서 회절될 때 송신점과 무관하게 기하학적인 썩기 위치에 의해 결정되는 특성으로 인해 정의되는 신호원이다. 이러한 선 전원도 영상

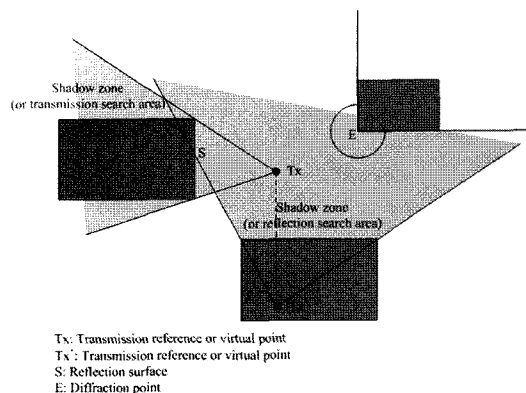


그림 2. 가시 볼륨 예(직접파, 반사파)  
Fig. 2. An example of visible volumes(direct and reflect waves).

법에 의해 가상의 선 신호원이 존재할 수 있다. 먼저 송신기에서 광선 트리를 생성한다. 광선 트리 생성 단계에서 각 신호원은 신호원에 의해 보이는 면과 보이지 않는 면을 검색한다. 검색된 면에 영상 신호원을 발생시키고 검색된 뼈기에는 선 전원을 발생시키고 검색을 계속한다. 이때 트리의 각 노드는 공간 상에서 그림 2와 같이 표현되는 신호원과 건물의 면으로 딱히 생성되는 음영지역에 의해 결정되는 가시 볼륨(viewing volume)을 갖게 된다. 일반적으로 가시면을 검색하기 위해서는 다음과 같은 4가지 단계를 거친다<sup>[11]</sup>.

- 1단계) 후면 검사 비가시 다각형 제거
- 2단계) 시야(viewport) 검사 비가시 다각형 제거
- 3단계) 차폐물(occluder) 검사에 의한 비가시 다각형 제거
- 4단계) Raycast 검사에 의한 비가시 다각형 제거

이때 1단계가 계산량이 가장 적고 4단계가 가장 많은 계산량을 갖는다. 면을 검색하기 위해서는 전체 면에 대한 검색을 수행해야 하고, 각 단계에서 전체 면에 대한 검색을 수행하는 것은 계산 속도를 크게 저하시키기 때문에 이를 개선하기 위한 연구가 수행되었다<sup>[12]</sup>.

1단계의 후면 다각형 제거에서는 신호원에서 기하학적으로 보일 수 없는 후면을 제거한다. 이 단계에서는 평면의 방정식과 신호원에 대한 위치에 내적을 이용하며, 반사인 경우 반사면의 뒷부분에 위치한 다각형도 제거한다. 이 단계는 신호원의 위치와 무관하기 때문에 PVS(Potentially Visible Surface) 구조에 저장하여 재계산하지 않고 사용할 수 있다.

2단계에서는 반사의 경우 신호원과 반사면으로 만들어지는 기하학적 영역(시야: viewport) 내에 포함되는 다각형과 포함되지 않는 다각형을 구분하는 단계로 역시 몇 번의 내적으로 계산할 수 있다.

3단계에서는 시야에 포함된 면이면서 다른 다각형에 의해 가려지는 다각형과 가려지지 않는 다각형을 검사하는 것으로 가려지지 않는 면만을 남긴다. 2, 3단계에서는 절두체 검사(frustum test) 방법을 사용하며, 이 과정에서 중간에 걸친(intersect) 면이 발생하게 되며, 2개 이상의 다각형에 걸쳐진(intersect) 다각형은 차폐물(occluder) 검사 단계에서 정확히 검

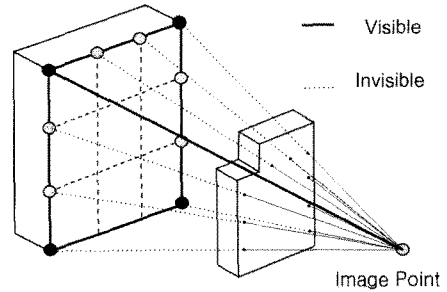


그림 3. Raycast 검사  
Fig. 3. A Raycast test.

사하기 어려우며 4단계로 넘겨지게 된다.

4단계에서는 3단계에서 정확히 구분하지 못한 면에 대해 그림 3과 같은 Raycast 방법으로 신호원과 다각형 사이에 광선을 만들어 중간에 가로막는 다각형이 존재하는지 여부로 판단한다. 다각형에는 검사를 위한 점들이 생성되어 있고 신호원과 이 검사 점들을 검사하여 하나의 점이라도 중간에 장애 다각형 없이 광선이 도달한다면 보이는 면으로 판별하게 된다. 이렇게 가시면으로 결정된 면에 대해 영상 송신점을 생성하고 1, 2, 3, 4 단계를 반복하여 그림 4와 같이 신호원에 대한 계층적인 트리를 구성한다.

### 2-2 개선된 가시 트리 구조

다각형을 다루기 위해서는 일반화된 방법을 적용하기 위해 삼각화를 수행한다. 일반적인 광선 추적법에서는 사각형의 건물 벽과 다각형의 지붕, 그리고 삼각화된 지면으로 이루어졌음을 가정하고 있다<sup>[8]</sup>. 이렇게 삼각화하는 것은 기하학적인 구조를 다루기 위해서는 효율적이나 도심과 같은 환경을 다루기 위

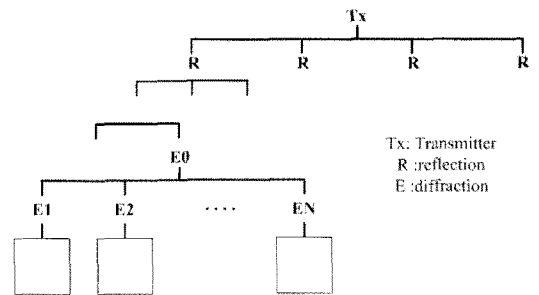


그림 4. 구성된 가시 트리 예  
Fig. 4. An example of a visible tree.

해서는 다각형을 정의해야 하며 다각형을 삼각형으로 자를 경우, 각각의 삼각형에 대해 가시 노드가 생성되며 노드 생성이 많아지게 된다. 특히 평탄한 지면은 비슷한 특성을 갖는 평면을 삼각화함으로써, 삼각형의 개수가 크게 증가하므로 이에 대한 고려가 필요하다.

본 논문에서는 한 평면에 위치한 다각형을 셀(cell)이라는 삼각형의 묶음으로 처리한다. 이러한 셀의 단위로 가시면을 결정하며 지면과 같이 많은 삼각형으로 이루어져 있지만 그 중 일부만 보이는 경우를 위하여 가시 삼각형만을 선택하여 가시 셀을 구성한다. 벽면은 같은 특성을 갖는 삼각형 모음인 사각형 구조의 셀이 되어서 같은 특성을 갖는 동일 노드의 재생성을 줄일 수 있다. 특히 평탄한 지면에서 건물이 위치하면 일부 삼각형만 보이는 경우가 많기 때문에 삼각형 모음인 셀을 정의하는 경우 노드 수를 줄일 수 있다.

본 논문에서는 필요한 삼각형을 검색하기 위해서 공간 트리(KD(K Dimensional) 트리)를 사용한다<sup>[11]</sup>. 공간 트리는 공간적인 상관도가 높은 기하 도형을 계층적으로 구분하여 필요한 조건의 기하 도형을 빠르게 검색하여 찾을 수 있도록 만들어 놓은 트리이다. 이전에는 쿼드트리(quadtree), 옥트리(octree) 등이 많이 사용되었으나, 이진 공간 분할(BSP: Binary Space Partitioning) 트리나 KD 트리가 성능상으로 우월한 것으로 알려져 있으며, 최근에는 주로 KD 트리가 사용되고 있다. KD 트리는 이진 공간 분할 트리의 장점과 옥트리의 장점을 동시에 가지고 있는 것으로 쿼드 트리나 이진 공간 분할 트리가 높이를 표현하지 못하는 단점을 보완하고, 공간상에 다각형을 찾기 위해 1 노드의 자식 노드 검색이 옥트리가 3차원 공간에서 8회, 쿼드 트리가 2차원 공간에서 4회인데 반해, KD 트리는 3차원 공간상에서 3회, 2차원 공간에서 2회에 불과해 검색 성능을 크게 높일 수 있다. 또한, 검색 속도를 높이기 위해 실의 환경에서는 건물 단위로 축 정렬 외곽 상자(axis aligned bounding box)를 사용하였다.

### 2.3 가속 방법

먼저 환경을 구성하기 위한 기본적인 기하 도형은 삼각형을 가정한다. 삼각형은 어떤 경우든 한 평면

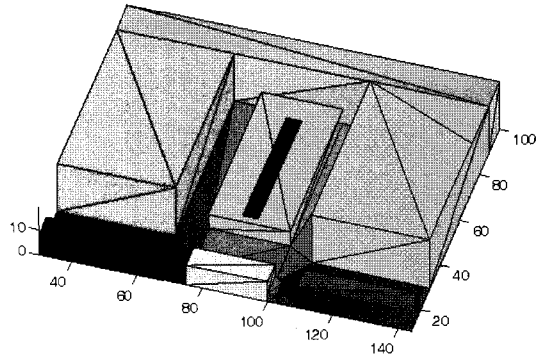


그림 5. 삼각화된 건물과 지면 예  
Fig. 5. Triangulated buildings and a ground.

에 세 점이 위치하고 있으며, 다각형은 들로네(Delaunay) 방법으로 삼각화할 수 있어 일반화된 광선과 평면의 충돌 검사가 가능하다. 삼각화된 환경의 예가 그림 5에 나타나 있다. 일반적으로 사용하는 충돌 검사법은 무게 중심 좌표(barycentric coordinate)를 이용한 충돌 검사법을 주로 사용하고 있으나, 본 논문에서는 Wald에 의해 제안된 충돌 검사법을 사용한다<sup>[12]</sup>. Wald 충돌 검사는 고정된 삼각형에서 미리 계산된 변수를 저장하고 있는 구조체를 이용하여 계산량을 획기적으로 줄여준다. 또한, 같은 평면에 위치한 삼각형에 대해서는 광선에 종속적인 부분만 재계산하기 때문에 충돌 검사를 더욱 빠르게 할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 광선 추적 속도를 높이기 위해 단계4의 Raycast 검사 방법을 개선하여 속도 개선을 꾀하였다. 이를 위해 SIMD(Single Instruction Multiple Data) 명령어를 사용하며 동시에 4개의 연산이 하나의 명령어로 가능한 특성을 이용하여 두 가지 충돌 검사 방법을 제작하였다. 먼저 그림 6의 첫 번째 방법은 4개의 광선이 하나의 삼각형에 충돌하였는지 여부를 검사하기 위한 방법으로 한번에 여러 광선을 검사할 수 있으며, 그림 7의 두 번째 방법은 하나의 광선에 대해 삼각형 4개에 해당하는 데이터를 연산하여 검사 속도를 가속하였다<sup>[13]</sup>. 첫 번째 방법은 4 단계에서 주로 사용하며, 두 번째 방법은 경로 검색 시에도 정의된 볼륨에 의해 광선이 가로막히는지를 검사하기 위해 사용된다. 이를 위하여 벡터(vector)와 패킷(packet)을 사용하며, 이때 메모리 구조는 그림 8과 같다.  $x, y, z, w$ 는 연산에 사용될 점의 좌표이며,

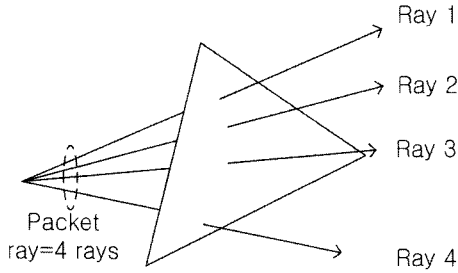


그림 6. 묶음 광선 충돌 검사  
Fig. 6. Triangle hit test with a packet ray.

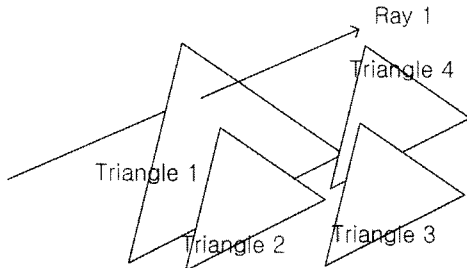


그림 7. 단일 광선-4 삼각형 충돌 검사  
Fig. 7. One ray-four triangles hit test.

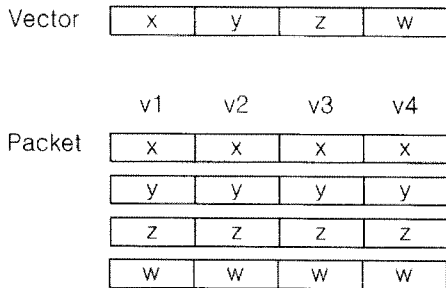
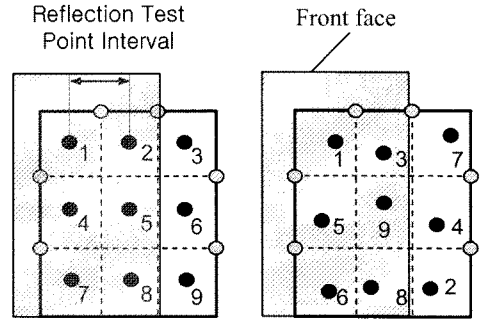


그림 8. SIMD 사용을 위한 패킷과 벡터의 메모리 할당  
Fig. 8. Packet and vector allocations for SIMD.

그림 8의 묶음 광선 개념이 4개의 벡터를 동시에 포함하고 있음을 나타내고 있다.

또한, 속도 향상을 위해 그림 9와 같은 검사점 방법을 제안한다. Raycast 방법을 적용하기 위해 검사면에 검사점을 분포시키며, 송신기로부터 검사점까지 광선을 생성하고 검사를 수행한다<sup>[14]</sup>. 이때 검사면이 다른 면에 의해 가려지는 경우, 검사점 시점에서는 그림 9(a)와 같이 블록 형태로 가리게 된다. 따라서 순차적인 검사를 수행하는 경우는 가려지는 블록을 빠져 나가기 위해 여러 번 연산을 해야 하지만



(a) 등간격, 규칙 (b) 비균일간격, 불규칙  
(a) Regular and uniform test points (b) Irregular and non-uniform test points

그림 9. 검사점 분포 비교  
Fig. 9. Comparisons of test point distribution.

비균일, 불규칙 순서로 검사하는 경우는 검사점이 검사면에 대해 공간적으로 균일하게 퍼져서 존재하게 되며 블록을 빠져나갈 확률이 높게 된다.

이 과정을 반복적으로 적용하여 구성된 트리는 수신기 위치가 결정되면 각 노드에 대해 노드의 신호원(또는 가상 신호원)과 신호가 나오는 면(viewport)와 가시면(이면서 음영지역을 생성하는 면)으로 이루어진 가시 볼륨에 포함되어 있는지 검색한다. 수신기가 가시 볼륨내에 포함된다면 송신기에서 수신기까지 경로를 결정하고 결정된 경로 내에서도 마찬가지로 각 경로 광선이 존재할 수 있는 광선인지 검사한다.

### III. 해석 결과

#### 3-1 해석 환경

광선 추적법을 적용하기 위하여 피코셀로 적당한 환경을 선정하였다. 선정된 환경은 그림 10과 같은 대학 내 건물로 삼각형은 200개, edge는 34개이다. 특히 지면은 건물에 의해 삼각화가 이루어져 있다. 본 해석을 위한 공간은 약 8만개의 검사점으로 이루어져 있으며, 송신기의 위치와 수신기 이동 경로는 그림 10(b)에 주어져 있다. 전체 공간은 유전율 8, 도전을 0.03을 갖는 공간으로 가정하였다.

#### 3-2 방법 적용 결과

무게 중심 좌표계를 이용한 충돌 검사법과 Wald

표 1. 충돌 검사법 비교(14,652개 삼각형, 1만개 광선)  
Table 1. Comparisons of hit test methods(14,652 triangles, 10,000 rays).

검사 방법	탐색 시간	개선 효과
DirectX 함수	13 s	1배
Barycentric	7.5 s	1.73배
Wald	3 s	4.33배

충돌 검사법의 성능을 비교한 결과는 표 1과 같다. 기본값은 DirectX 라이브러리에서 사용하는 D3DX-IntersectTri 함수이며, Wald 방법이 주어진 조건에서 4.33배(433 %)의 성능 개선 효과가 나타남을 알 수 있다.

표 2와 표 3은 그림 10에 주어진 해석 환경에서 3차의 반사/회절까지 연산하였을 때 각 구현별 성능을 비교한 것이다. 표 3에서 묶음 광선을 적용한 경우 3.3배(330 %)의 성능 개선 효과를 얻을 수 있었으며, 단일 광선-4 삼각형 방법을 적용한 경우는 큰 성능 향상을 보기는 어렵다. 이는 SIMD 연산 특성상 연산 데이터 개수가 4의 배수가 되어야 하는데 묶음 광선을 위해서 광선을 항상 4의 배수로 정의할 수 있으나, 가시 삼각형의 개수는 가변적이기 때문에 항상 4의 배수가 되지 않고 이 때 나머지 삼각형에 대해 추가적인 연산이 발생하여 성능이 떨어지는 것으로 생각된다. 또한, 묶음 광선을 사용한 경우 전

표 2. Raycast 병렬 방법 적용 속도 비교

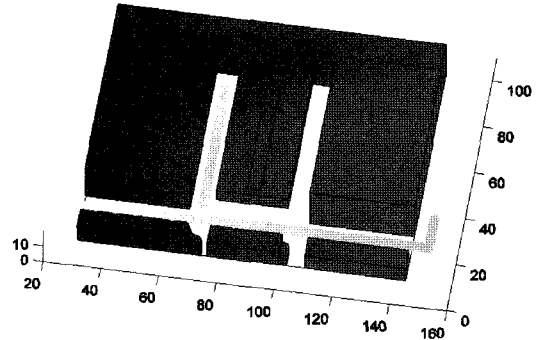
Table 2. Computation time comparisons of raycast methods.

	수행 시간	개선 효과	비고
단일 광선	51.36 s	1배	
단일 광선-4 삼각형	42.50 s	1.21배	그림 6
묶음 광선	15.67 s	3.3배	그림 7

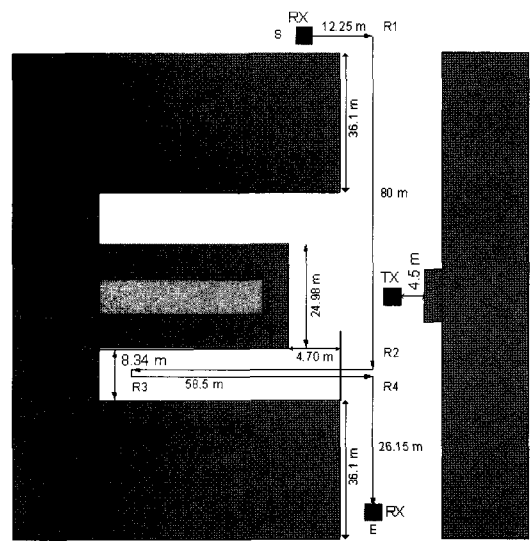
표 3. 비균일 간격 검사점 도입에 따른 속도 비교

Table 3. Comparisons of non-uniform and uniform test points seeding methods.

	수행 시간	개선 효과
균일 간격	17.41 s	1배
비균일 간격	15.67 s	1.11배



(a) 입체도  
(a) Solid view



Environment Dimension  
(b) 평면도  
(b) Plane view

그림 10. 해석 환경

Fig. 10. Test environment.

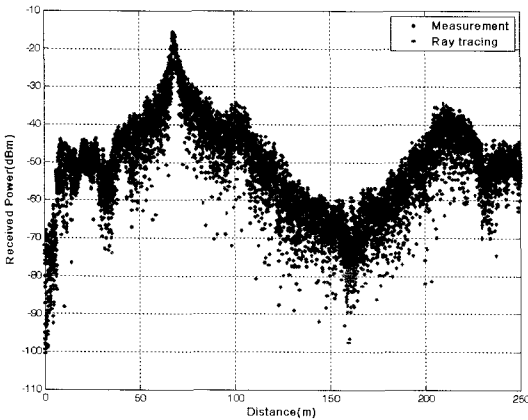
체 광선이 삼각형과 만나는 경우는 성능이 향상된다. 그러나 일부 광선만 삼각형에 만나는 경우 만나지 않는 광선에 대해 추가적인 연산이 수행되어야 하기 때문에 최대 성능에 제한이 발생하며 이 영향으로 성능이 제한된다.

그러나 묶음 광선을 사용하는 경우가 단일 광선, 또는 단일 광선 4 삼각형 방법에 비해 높은 성능을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 Raycast 검사에서 묶음 광선방법을 사용한다. 또한, 비균일 간격 검사점을 적용한 경우 같은 조건에서 약 1.11배(111 %)의

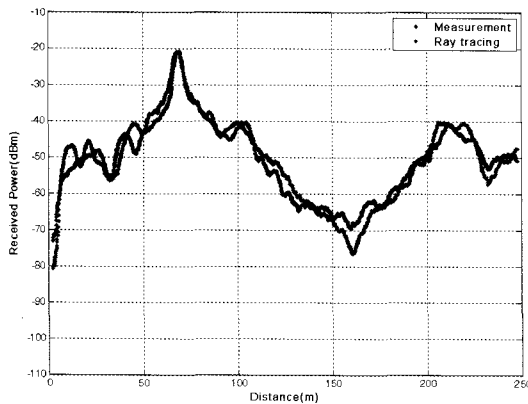
성능 향상을 기대할 수 있다.

### 3-3 전파 경로 해석 결과

이렇게 구성된 경로에 대해 1회 회절을 포함하는 4차의 반사/회절 경로에 대해 GO/UTD를 적용하였다. 235 m를 이동하면서 등간격으로 측정하기 위해 타코미터 트리거를 사용하여 측정하였다. 송신 전력은 30 dBm이며, LG 이노텍의 스펙트럼 분석기로 측정하였다. 측정된 결과와 예측된 협대역 전력을 비교한 결과가 그림 11(a)이며, 페이딩 효과를 제거하기 위해 20 파장에 대해 이동 윈도우(moving window)를 사용한 경로 손실은 그림 11(b)와 같다. 이 경우 1.9 dB의 RMS 에러를 나타내었다. 도심 환경



(a) 협대역 전력  
(a) Received narrowband power



(b) 협대역 전력(이동 윈도우)  
(b) Narrowband power with moving window method

그림 11. 해석 결과와 측정 결과 비교

Fig. 11. Comparisons of measured and ray traced results.

에서 대부분의 광선 추적법이 4~8 dB의 RMS 에러를 갖는 것으로 알려져 있으며<sup>[15]</sup>, 이 결과를 실제 응용에 사용하는 것과 비교할 때 본 연구 결과가 적합한 수준의 오차를 갖는 광선 추적 결과를 제공한다고 판단된다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 개선된 가시 트리 구조 생성과 가시면 검색을 위해 효율적인 방법을 적용한 광선 추적법을 제안하였다. 비슷한 특성을 갖는 트리의 노드를 재생성하지 않는 개선된 가시 트리 구조를 사용하였으며, 가시면 판별을 위해 묶음 광선 검사와 검사점을 비균일하게 분포시키는 방법으로 경로 탐색 성능을 개선하였다. 충돌 검사에서 묶음 광선을 사용함으로써 3.3배의 속도 개선을 이루었으며, 비균일 검사점 분포를 통해 1.11배의 성능 향상을 이루었다. 본 광선 추적법을 적용한 결과의 경우 경로 손실에서 RMS 에러가 1.9 dB 발생하여 높은 정확도를 제공할 수 있음을 보였다.

본 연구를 통하여 개선된 방법을 적용한 광선 추적법을 복잡한 도심 환경을 위한 광선 추적법으로 확장할 경우 도심 환경을 위한 전파 예측 모델 또는 전파 채널 모델로 사용할 수 있을 것이라고 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. Y. Tan, H. S. Tan, "A microcellular communications propagation model based on the uniform theory of diffraction and multiple image theory", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 44, no. 10, Oct. 1996.
- [2] Wei Zhang, J. Lahteenmaki, and P. Vainikainen, "A practical aspect of over-rooftop multiple building forward diffraction from a low source", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 41, no. 2, May 1999.
- [3] H. H. Xia, "A simplified analytical model for predicting path loss in urban and suburban environments", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 46, no. 4, Nov. 1997.
- [4] J. Walfisch, H. L. Bertoni, "A theoretical model of

UHF propagatoin in urban environments", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 36, no. 12, Dec. 1988.

[5] H. Zhang, T. Yoshino, S. ITO, and Y. Nagasawa, "A UTD-based approach to predicting diffraction by buildings for cellular mobile communication", *IEEE-APS Conference on Antennas and Propagation for Wireless Communications*, pp. 13-16, 1998.

[6] 손해원, 명노훈, "마이크로셀 전파전파 모델을 위한 결정적인 ray tube 방법", *한국통신학회논문지*, 23(9), pp. 2637-2646, 1998년 9월.

[7] 손해원, 명노훈, "광선 추적법을 이용한 마이크로셀 전파환경 예측모델 개발", *한국전자과학기술지*, 10(1), pp. 2-15, 1999년 3월.

[8] 이행선, "실외 전파 특성 계산을 위한 고속 3차원 광선 추적법", *한국전자과학기술학회논문지*, 18(11), pp. 1231-1236, 2007년 11월.

[9] 송재영, 이행선, "실내 전파 특성 계산을 위한 삼각형 모델 기반의 3차원 광선 추적법", *한국전자과학기술학회논문지*, 19(7), pp. 733-740, 2008년 7월.

[10] H. M. El-Sallabi, P. Vainikainen, "Improvements to diffraction coefficient for non-perfectly conducting wedges", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 9, pp. 3105-3109, Sep. 2005.

[11] A. Watt, *Computer Graphics*, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA 1993.

[12] Ingo Wald, *Realtime Ray Tracing and Interactive Global Illumination*, Ph.D thesis, Computer Graphics Group, Saarland University, 2004.

[13] A. Reshetov, A. Soupikov, and J. Hurley, "Multi-level ray tracing algorithm", *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2005*, vol. 24, no. 3, pp. 1176-1185, 2005.

[14] 임재우, 권세웅, 문현욱, 윤영중, 성향숙, 이경희, 최기갑, 이해영, "지면 지형을 고려한 도심 전파 환경 해석에 적합한 개선된 3차원 광선 추적법 관한 연구", *추계 마이크로파 및 전자파 학술대회 논문집*, 2007년.

[15] L. M. Correia, *Mobile Broadband Multimedia Networks*, Academic Press, San Diego, 2006.

권 세 응



1999년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
 2002년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)  
 2002년 3월~현재: 연세대학교 전자공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 안테나, 전파전파 등

오 재 립



2009년 2월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)  
 2009년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석사과정  
 [주 관심분야] 안테나, 전파전파

문 현 욱



2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)  
 2007년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)  
 2007년 3월~현재: 연세대학교 전자공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 안테나, 전파전파

임 재 우



1995년 2월: 경원대학교 전자공학과 (공학사)  
 1997년 2월: 경원대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2002년 3월~2009년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)  
 1997년 6월~현재: 정보통신부 전파연구소 공업연구사  
 [주 관심분야] 스펙트럼 관리공학, 전파전파, 통신 등



배 석 희



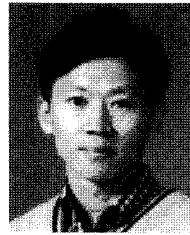
1989년 2월: 연세대학교 천문기상학과 (이학사)  
1991년 2월: 연세대학교 천문기상학과 (이학석사)  
2000년 2월: 연세대학교 천문기상학과 (이학박사 수료)  
2007년 3월~현재: 연세대학교 전자

공학과 박사과정

1991년~현재: 방송통신위원회 전파연구소 이천분소 기술과장

[주 관심분야] Radio propagation, Spectrum Management, Wireless Internet

박 정 수

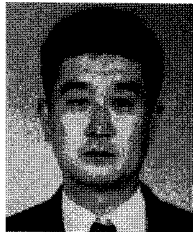


1988년 2월: 한양대학교 지구해양학과 (이학사)  
1990년 2월: 한양대학교 지구해양학과 (이학석사)  
2006년 8월: 한국해양대학교 해양공학과 (공학박사)  
1990년~현재: 국방과학연구소 선

인연구원

[주 관심분야] 수중음향, 소나음탐분석 등

김 영 규



1983년 2월: 서울대학교 해양학과 (이학사)  
1985년 2월: 서울대학교 해양학과 (이학석사)  
1996년 8월: 서울대학교 해양학과 (이학박사)  
1999년~현재: 국방과학연구소

[주 관심분야] 해양물리, 해양순환 모델링 등

윤 영 중



1981년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
1986년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
1991년 2월: Georgia Institute of Technology (공학박사)  
1993년~현재: 연세대학교 교수

[주 관심분야] 마이크로파 소자, 안테나, 전파전파 등