

# 옥외 소음의 전파 : 음 추적 알고리즘

°박지현†

김정태‡

## Outdoor Noise Propagation : Sound Tracing Algorithm

Jihun Park, Jeongtae Kim

### Abstract

We provide methods to simulate noise propagation for an outdoor environment. Forward tracing method traces sound vectors from sources to receivers while geometry based computation finds all possible sound propagation between sources and receivers geometrically. We discuss defects in relying on a forward tracing method, and suggest a geometry based method. Geometry based method considers all possible direct and indirect(propagation via limited number of reflections) sound propagation saving computational time compared to forward sound tracing. Our simulation results are visualized using VRML(Virtual Reality Modeling Language).

### 1. 서론

물리학에서 소리는 파동현상의 한 종류로 정의하고 있는데, 이에 따라 소리는 파동의 성질과 같이 진동수가 많아지면 음정이 높아지고, 진동수가 적어지면 음정도 낮아진다. 또 진폭이 크면 소리가 커지고, 진폭이 작아지면 소리가 작아진다. 파형이란 파장의 모양새, 즉 음색이 되는 데 이는 소리가 전파되는 과정에서도 잘 변하지 않는 특성이다. 먼 곳에서 발생된 소리를 들을 때 소리의 높이나 강도는 원음과 달라지는 경우가 많으나, 음색은 대체로 그대로인 경우가 많음을 생각해 보면 될 것이다.

소리는 전파될 때 매개물의 밀도가 달라질 때 굴절이나 반사가 된다. 즉 공기의 온도가 균일하지 않고 주위환경 때문에 부분마다 달라지거나, 바람이 거꾸로 불게 되면, 소리는 직진을 하지 않게 되고, 휘어지게 된다. 또, 공기가 습기를 머금어 밀도

가 무거워 지는 부분이 생길 경우에도 소리가 직진성을 잃게 된다. 그리고, 공기가 차가와 지거나, 습기를 머금어서 밀도가 무거워 지는 경우에는 소리가 전파되는 속도가 현저하게 줄어들게 되는데 이는 시뮬레이션을 할 경우에 고려를 해야 할 정도에 이른다.

본 논문에서는 회절현상 시뮬레이션에 대해서는 다루지 않으며, 매개물의 밀도가 달라질 경우에 대해서는 처리가 가능하나, 본 논문에서는 구현되지 않았다. 본 논문에서 다루는 방법은 음원에서

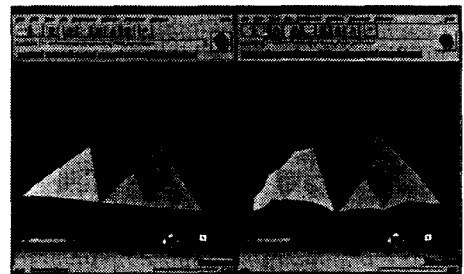


Figure 1. Fractal Generated three dimensional terrain(flat and wavy)

† 홍익대학교 컴퓨터공학과

‡ 홍익대학교 기계공학과

일정한 방향으로 소음 벡터를 쏘아서, 그들을 따라가는 정방향 추적법과, 음원과 수음자 사이의 기하학적인 관계를 계산하여 직접 및 반사에 의한 간접 전파를 계산하는 방법으로 음원이 수음자에 미치는 영향을 계산하는 기하학적인 방법에 관한 개발이다.

옥외 지형을 가상으로 만들기 위하여, 삼차원 지형을 fractal을 사용하여 임의로 제작하였으며, 제작된 임의의 삼차원 지형에 대하여 전파 시뮬레이션을 위한 알고리즘 개발 및 구현을 하였다. 이러한 가상의 지형은 실측 정보를 기초로 한 삼차원 파일(예를 들어 AutoCAD의 dxf 혹은 dwg 파일)로 쉽게 대체될 수 있다. 단 일반적으로 쉽게 구할 수 있는 삼차원 파일들은 표면을 작은 크기의 삼각형으로 나누는 등의 수음자들을 위한 작은 영역으로 바꾸는 작업이 필요하다. 그림 1은 변수를 사용하여 조정된 가상의 삼차원 지형을 보여주며, 정밀도 또한 임의로 조정이 가능하다.

정 방향 광선추적을 통한 시뮬레이션은 계산 시간은 빨라질 수 있으나, 빠뜨리는 표면이 쉽게 발생할 수 있어서 시뮬레이션의 질이 떨어지며, 목표 지점과의 거리에 따라 발생하는 추적 벡터의 개수를 조절하여야 한다. 아주 많은 광선을 쏠 경우 계산 시간 역시 많이 걸리게 된다.

기하학을 사용한 시뮬레이션은 음원과 수음자 및 주위환경에서 1번 2번 등 제한된 횟수로 반사하여 도달할 수 있는 가능성만 따진다. 1번 반사만 허용할 경우 빠른 시간에 계산이 가능하고, 실외 환경일 경우 계산 질도 만족스러운 정도이나, 실내 환경 등 여러 번 반사가 필요한 환경을 위한 시뮬레이션의 질은 역 방향 광선 추적보다 뒤떨어지는 것을 발견하였다.

## II. 관련 연구

전파와 소리는 밀접한 연관관계를 가지고 있다. 본 논문에서는 주파수 대역별로 소리의 전파를 구별하고자 한다. 소음 진동 학에서의 소리 추적 및 계산법은 일반적으로 음원부터 시작하여 수음자까지 추적하여 나가는 정 방향 추적 법이다. 이 방법에 의하면 필요 없는 소리 파를 추적하게 되어

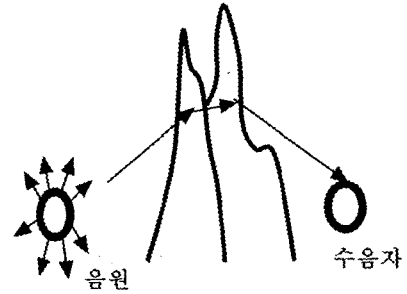


Figure 2. Forward Sound Tracing

계산시간을 낭비하거나, 혹은 음원에서 아무리 많은 추적을 하더라도 빠트리게 되는 수음자가 있으므로, 수음자 입장에서 볼 때, 정확한 추적이 되지 않을 수 있다.

컴퓨터를 사용한 시뮬레이션은 전파에 관한 논문에서 찾을 수 있으므로, 이 들을 먼저 살펴보기로 한다. [1]번 논문은 전파 기지국과 수신기 사이의 직접 혹은 1번만 반사된 간접 전파 전달을 계산하는데, 이 결점으로 인하여 여러 번 반사될 경우에 대하여 고려하지 못한다. 본 논문에서 제안한 기하학적인 계산법과 유사하리라 추정되나, 자세한 알고리즘은 나타나 있지 않다. 본 저자들은 실내 환경 등 여러 번 반사가 필요한 계산을 위해서는 역 방향 추적 법을 제시한다. [2,3] 논문은 역방향 추적을 사용하는 3차원 ray tracing 기법을 사용하고 있으나, 송신자와 수신자가 각각 1개일 경우만 전파 세기 예측을 할 수 있는 시스템이며, 본 저자들은 무한대의 수신자에 대하여 전파 세기를 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. [4] 논문은 2차원 ray tracing 기법을 사용하여 삼각형 분할을 사용하여 빠른 전파 전달 예측을 할 수 있는 기법에 관한 논문이며, [5]번 논문은 knife-edge 회절에 대한 2차원 ray tracing 기법을 사용한 논문이며, 본 연구의 후속 연구에서 보다 일반적인 경우에 대하여 연구할 계획이며, [1,2,3,4,5]논문들은 전파 송신 예측 기능을 가진 소프트웨어 개발에 중점을 둔 반면, [6]번 논문은 이러한 소프트웨어를 소개하고 현장 실험결과와 비교 분석한다.

## III. 전파 경로 추적 방법

### 1. 소리 전파 경로 추적 방법

소리 전파 경로 추적 방법은 그 벡터들을 각각 추적해 나간 후에 그 결과를 모아서 가시화(visualization)/시물레이션을 함으로써 전파된 상태를 알아낼 수 있다. 경로 추적 방법에는 정 방향 추적 방법과 역 방향 추적 방법, 혹은 기하학 적인 추적 방법이 있다. 역 방향 추적 방법이 정 방향 추적 방법에 비해서 벡터를 계산할 때 필요 없는 계산을 줄일 수 있기는 장점이 있으나 계산 시간은 많이 소요될 수 있다. 모든 계산에 있어서 직접적인 전파와 간접적인 전파로 인한 거리를 계산한다. 여기서 계산된 거리는 전파 식에 입력되어져서 상응하는 전파 세기를 계산하게 된다.

정 방향 광선추적을 통한 시물레이션은 계산 시간은 빨라질 수 있으나, 빠뜨리는 표면이 쉽게 발생할 수 있어서 시물레이션의 질이 떨어지며, 목표 지점과의 거리에 따라 에러가 발생할 수 있으므로, 생성하는 추적 벡터의 개수를 조절하는 등 다른 조치가 필요하다. 또한 아주 많은 개수의 광선을 쏠 경우 계산 시간 역시 많이 걸리게 된다.

기하학을 사용한 시물레이션은 송신기와 수신기 및 주위환경에서 1번(혹은 2번 등) 반사하여 도달할 수 있는 가능성만 따진다. 상대적으로 빠른 시간에 계산이 가능하고, 계산 질도 옥외에서는 만족스러운 정도이나, 실내 환경에서의 시물레이션의 질은 역 방향 광선 추적보다 뒤떨어지는 것을 발견하였다.

## 2. 정 방향 추적 법

정 방향 추적은 소음 원에서부터 일정한 방향으로 음선(ray)을 쏘아서 음선을 따라간다.<그림 2> 음선이 표면에 반사되면 반사되는 음선을 계속 추적하며, (소리의 진동이 전달되는 것을 투과로 표현한다면, 단 옥외의 전파에 있어서는 투과는 전혀 없는 것으로 처리하였다) 투과될 경우 투과된 음선 또한 따라가는 방법이다. 이러한 방법을 사용할 경우, 음선은 반사/투과를 거치면서 세기가 약해지게 된다. 일정한 세기 이하로 약해지면 더 이상 추적하지 않는다. 반사되는 음선의 방향은 입사각과 반사각이 같도록 결정되며, 투과되는 음선의 방향은 굴절 율을 계산하여 결정하며, 하나의 음선

에 대하여 물체 표면 충돌 시 반사 및 투과가 일어날 경우, 무수히 많은 음선들이 발생한다. 주위 환경의 표현은 삼차원 다각형들을 사용하는데, 다각형에는 기하학 정보 외에 표면 특성에 대한 정보를 포함한다. 주위 환경을 나타내는 다각형의 수직 방향으로 1.5m 떨어진 위치에 소음을 수음하는 수음자가 위치한다. 표면 특성의 정보는 반사율 및 투과율 정보를 포함한다. 이러한 음선들은 주위 환경으로 표현된 물체에 소음의 세기 정보를 제공할 수 있게되며, 각각의 음선의 세기 정보를 모아서 합하면 한 표면의 세기로 결정할 수 있다.

이 방법에서는 음원에서부터 소리의 전파를 시물레이션 해 나가는 방법이다. 이를 위하여 음원을 시작으로 하여 음선을 의미하는 벡터를 쏘고 이를 추적한다. 벡터를 쏘는 방법은 음원을 하나의 구로 간주하고, 구의 표면을 동일한 면적을 가진 구 표면영역들로 분리한다. 각각의 구 표면 영역의 중심

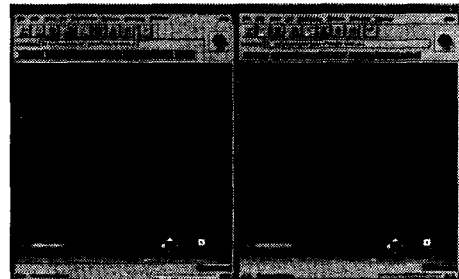


Figure 3. Forward Sound tracing

에 해당하는 지점을 찾아내어 음원의 중심(구의 중심)에서 영역의 중심으로 벡터를 쏜다. 이 벡터가 하나의 영역을 대표하는 음선을 의미하게 되는 것이다. 추적 음선 벡터 생성 방법은 후에 자세히 설명한다. 정방향 추적 방법의 문제점은 음선을 의미하는 벡터의 개수를 생성하는데 있다. 벡터의 개수가 많으면 보다 정확한 소리 추적이 가능할 수 있다. 그러나 엄청난 개수의 벡터 추적으로 인하여 아주 많은 계산 시간이 소요될 뿐만 아니라, 아무리 많은 벡터를 쏘아도 맞추지 못하는 표면이 있을 수 있다. 즉 이러한 표면에 대한 정보는 소리가 도달하지 못하는 지역에 있는 것인지 아니면 소음원에서 부터 발사한 벡터 개수가 부족한 이유인지 쉽게 결정을 내리지 못한다. 이러한 치명적인 문제점을 극복하기 위하여 음원과 지표면과 거리 및

지표면을 나타내는 다각형의 크기를 고려하여 추적용 음원 개수를 결정할 수 있겠으나, 발생 가능한 문제를 완벽히 해결하지 못하므로 바람직한 접근 방법은 아니라고 본다. 다음은 정방향 추적법을 사용한 전파 추적 알고리즘을 나타낸다.

```
main()
{
    for ( i = 1 ; i <= n ; ++i )
        /* 반복:음원을 나타내는 구의 위도상으로 n번 분할*/
        for ( j = 1 ; j <= 2*n ; ++j )
            /* 반복:구의 경도상으로 2n 개로 분할*/
            {
                구 표면상 하나의 영역에 대한 표면 중심점
                계산 ;
                추적벡터 = 표면 중심점 - 구 중심 ;
                call intersect(추적벡터) ;
            }
        /*추적 벡터와 주위지형 표현 다각형과의 교차계산 */
    }
}
```

함수 intersect() 는 다음과 같이 구성된다.

```
intersect(추적벡터)
{
    모든 다각형에 대하여 제일 가까운 다각형 찾을.
    만약 못 찾았으면 return ;
    충돌한 다각형 알아냄. 충돌지점 계산;
    충돌한 다각형의 정보 기록 난에 충돌지점 세기.
    위치 저장 ;
    반사벡터 계산 ; 표면 특성 고려한 반사벡터
    세기 결정 ;
    투과벡터 계산 ; 표면 특성 고려한 투과벡터
    세기 결정 ;
    call intersect(반사벡터) ;
    call intersect(투과벡터) ;
}
```

이러한 계산이 종료된 후에 주위 환경을 나타내는 각각의 다각형들에 저장된 모든 충돌 정보를 합하면 각각의 다각형에서 받는 소리 세기가 계산된다. 충돌 정보는 추후의 정교한 계산을 위하여 linked list로 저장된다.

### 3. 기하학적 추적 법

시뮬레이션 결과 질을 높이는 정 방향 추적법 및 역 방향 추적의 공통적인 어려움은 엄청난 계산시간에 있다. 이러한 계산시간 상의 어려움을 보완하기 위하여 기하학 적인 계산 방법을 개발하였다.<그림 4,5> 이 방법에서는 음원과 수음자 사이

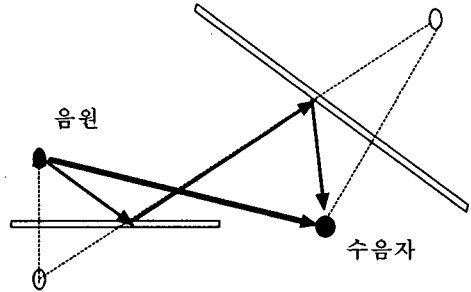


Figure 4. Propagation computation based on geometry(2 reflections)

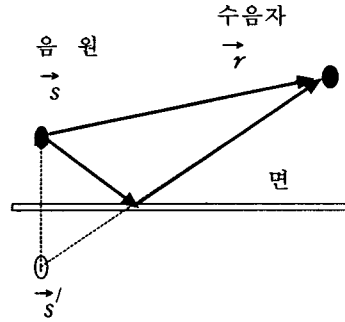


Figure 5. Propagation computation based on geometry(1 reflection)

에는 직접적인 전파와 1 회 혹은 2회의 제한적인 반사만 존재하는 것으로 가정한다. 즉 이 방법에서는 먼저 음원과 수음자 사이에 직접적인 경로가 있는지, 혹은 1회, 2회 등 제한적인 반사를 통한 경로가 있는지 전적으로 기하학 적인 수식에 의존하여 계산한다. <그림 5> 에 1회 반사 <그림 4> 에 2회 반사를 사용한 계산 방법이 나타나 있다. 물론 필요에 따라 반사 횟수를 늘일 수 있는 계산 속도 유도 가능할 것이나, 계산 시간 증대로 연결된다. 이 방법은 방향과는 전혀 무관한 방법이다. 반사 횟수에 대한 제한이 높은 주파수 대역별에 따른 소리의 전파 특성에 따라 무리일 수 있으나, 주파수가 아주 높지 않은 경우에는 큰 무리 없이 받아들일 수 있다고 가정한 것이다. 이를 위하여

음원과 수음자 사이의 반사지점을 계산하는 식을 개발하였다. <그림 5, 그림 4>은 소리가 한 번, 두 번 반사될 경우 소리 추적에 위한 수식을 유도하는 절차를 나타낸 그림이다. 여기서 각각의 음원/수음자에서는 반사가 가능한 임의의 벽면을 기준으로 허상을 만든다. 두 개의 허상을 연결하면 각각의 벽면과 만나는 지점들이 반사지점이 된다. 이러한 방법에서 삼각형으로 이루어진 벽면의 개수가  $m$ 이고, 한 개의 음원이며, 1번 반사일 경우  $m^2$ 번, 2번 반사일 경우  $m^3$  번의 반사 확인이 필요하다. 물론 계산 횟수를 줄이는 방법도 개발 가능하다. 이 방법의 장점은 실외 환경을 고려한 1번 반사일 경우, 계산 시간이 이때까지 제안된 방법 중 제일 빠르다는 점이다. 다만 여기서 고려하는 반사 회수는 1번 혹은 2번만 고려하므로, 여러 번 반사되는 경우에 대해서는 적절한 계산법이 되지 못할 것이다. 여러 번 반사를 위한 계산 방법으로 수정은 용이하나, 계산 시간이 길어진다.

$\vec{n}$  : 반사면의수직벡터

$\vec{s}'$  : 음원의허상위치벡터

$\vec{n} \cdot \vec{x} = d$  : 반사면의평면방정식

$$\vec{s}' = \vec{s} + 2 \left( \frac{d - \vec{n} \cdot \vec{s}}{|\vec{n}|} \right) \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|}$$

$$\text{반사지점} = \vec{r} + \frac{d - \vec{n} \cdot \vec{r}}{\vec{n} \cdot \left( \frac{\vec{s}' - \vec{r}}{|\vec{s}' - \vec{r}|} \right)}$$

다음은  $n$ 개의 음원에 대하여 기하학적 계산법을 사용한 소리 전파 세기 계산 알고리즘을 나타낸다. 여기서는 1번 반사만을 가정하기로 한다. 2번 반사일 경우, main()의 제일 내부에 모든 물체들에 대한 또 하나의 반복이 필요하다.

main()

```
{
for ( k = 1 ; k <= m ; ++k ) /* 반복:모든 지표 환경 표현
다각형 m개에 대하여 */
for ( i = 1 ; i <= n ; ++i ) /* n개 음원 */
{
k번째 다각형에 대한 표면 중심점 계산 ;
수직 벡터 방향으로 중심점(수음자) 1.5
미터 상승시킴 ;
```

수음자와 음원 사이의 직접 경로 확인 ;

경로 존재시 경로 길이 저장 ;

/\* 수음자에서 음원으로의 1 번 반사 경로 확인 \*/

for ( j = 1 ; j <= m ; ++j )

/\* 반복:모든 지표 다각형 m개에 대하여 \*/

```
{
j 번째 다각형을 경유한 경로가 존재하는
지 확인 ;
```

경로 존재시 반사 경로 길이 저장 ;

전파 세기 계산법에 의하여 하나의

수음자에 대한 세기를 축적해 나감 ;

```
}
```

```
}
```

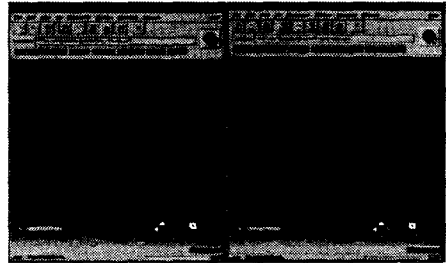


Figure 6. Geometry based sound propagation computation

#### IV. 결론

본 논문에서는 서로 다른 세 가지의 다른 음선 추적 방법을 제시하였다. 정 방향 추적 법은 아무리 많은 개수의 추적 벡터를 발산하여도 맞을 수 있음에도 불구하고 맞추지 못하는 삼각형이 있을 수 있다. 이러한 이유는 소음 원에 대한 모델링이 완벽하지 못하기 때문이며, 더 좋은 방법이 존재하겠지만 상당한 계산 시간이 소요될 것이다. 이를 보완하기 위하여 거리에 따라 발산하는 추적 벡터의 수를 조절할 수 있겠으나 완벽한 대안은 되지 못한다.

역 방향 추적 방법은 수음자에서 추적 벡터를 쏘아 소리를 추적하는 방법이다. 이 방법의 단점은 하나의 표면을 나타내는 삼각형에 대하여 하나의 수음자를 두어야 한다는 것이며, 결국 엄청난 개수

의 추적 벡터를 발산하게 된다. 이것이 방법의 단점이 되며, 장점은 상당히 정확한 추적 결과를 얻을 수 있으며, 한정된 공간으로 구성된 실내의 추적 등에 사용하면 보다 효과적이다.

본 논문에서 제시한 추적 방법은 기하학 적으로 추적하는 방법인데, 이 방법은 빠르게 추적할 수 있으나, 허용되는 반사의 횟수가 제한적이므로 야외 등 전파 반사 회수가 낮은 지역에서 사용하는데 적합할 것이다.

이러한 방법의 공통적인 문제점은 하나의 물체를 표현하는 방법에 따라 결과가 달라질 수 있다는 점이다. 즉 하나의 원통을 생각해 보자. 한쪽 끝에는 소음 원이, 다른 한쪽 끝에는 수음자가 있다고 가정한다. 원통을 표현하는 방법은 아주 많다. 원통을 표현하는 데 있어서 중요한 것은 원통을 몇 개의 삼각형으로 나누느냐 하는 것이다. 개수가 많을수록 소음 원에서 수음 자로의 경로는 많아지며, 경로가 많아지면 상대적으로 수음 자에 도달하는 음압도 세어진다. 즉 이러한 삼각형을 사용한 지표면 모델링 및 소리 추적 법에 있어서 지표면을 나타내는 삼각형의 크기를 고려하여 소음의 세기를 계산하는 방법이 강구되어야 할 것이다.

#### 참고 문헌

- (1) C. M. Peter Ho , 1993, Theodore S.Rappaport, Wireless Channel Prediction in a Modern Office Building Using an Image-Based Ray Tracing Method, *Proceedings of the Globecom '93*.
- (2) Reinaldo A. Valenzuela, 1993, A Ray Tracing Approach to Predicting Indoor Wireless Transmission, *Proceedings of the 1993 IEEE 43th Vehicular Technology Conference*.
- (3) S. Naruniranat, Y. Huang, D. Parsons, 1999, A three-dimensional Image Ray Tracing (3D-IRT) Method for Indoor Wireless Channel Characterization, *Proceedings of the 1999 High Frequency Postgraduate Student Colloquium*.
- (4) Zhang ZJ, Yun Z, Iskander MF, 2000, Ray

tracing method for propagation models in wireless communication systems, *Electronics Letters*, V.36 N.5, 464-465.

- (5) Mokhtari H, Lazaridis P, 1999, Comparative study of lateral profile knife-edge diffraction and ray tracing Technique Using GTD in Urban Environment, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, V.48 N.1, 255-261.
- (6) Kim S. C. et al., 1999, Radio propagation measurements and prediction using three-dimensional ray tracing in Urban Environments at 908 MHz and 1.9GHz, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, V.48 N.3, 931-946.
- (7) A. O. Fapojuwo et al, 1992, A simulation study of speech traffic capacity in digital codeless telecommunication systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Vol. VT-41, pp. 5-17.
- (8) Heinrich Kuttruff, 1991, Room Acoustics (3rd editon), Elsevier applied science.