Ray-tracing기법을 이용한 전파전파분석

이강미*, 김백현*, 신경호*
*한국철도기술연구원 열차제어통신연구실
e-mail : kmlee246@krri.re.kr

Analysis on The Wave Propagation Using Ray-Tracing Method

Kang-Mi Lee*, Baek-Hyun Shin*, Kyung-Ho Shin*
*Train Control & Communication Department,
Korea Railroad Research Institute

요 약

본 논문에서는 원형구조의 전파환경을 위한 경로손실을 다각형모델링과 수학적 모델링을 통해 분석하였다. 원형의 통신환경은 비교적 좁은 반경에 곡률이 거의 없고, 내부는 공기저항을 고려한 감압상태로 Ray-tracing 기법은 원형이라는 구조적 특징을 완벽히 적용하는데 문제가 있기 때문에 원에 가까운 다각형을 모델링하였다. 다각형 모델링 방법와 수학적 방법의 전파손실분석결과 반사횟수와 관계없이 유사한 전파손실성능을 확인하였다.

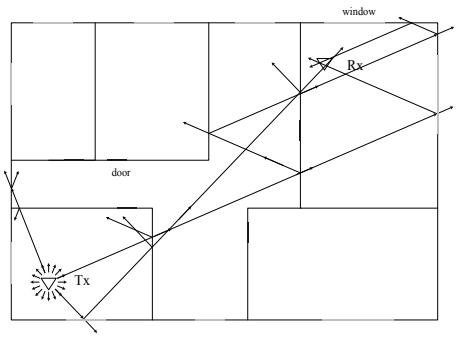
본 논문은 무선을 이용한 튜브 즉, 원형의 철도운영환경도 고려되고 있는 시점에서, 기존의 철도환경과 다른 환경에 대한 무선환경분석을 위한 기초자료로 사용될 수 있을 것이다.

1. 서론

1.1. Ray-tracing 기법

Ray-tracing(전파 추적) 기법의 핵심은 전파의 높은 주파수, 즉 작은 파장 을 고려하여 전파를 광선으로 모델링하는 것이다. 전파의 작은 파장을 고려한다면 전파의 전파 과정은 광선의 전파 과정과 유사하게 된다. 따라서 광선으로 모델링된 전파는 직선을 따라 진행하며 반사, 투과, 회절, 산란에 의해서만 그 진행 방향이 바뀌게 되며 GO(Geometric Optics)의 개념을 이용해 전파의 전파 현상을 해석할 수 있다. 또한 광선이 진행하며 만나게 되는 벽에서의 전파 및 투과 현상은 전자파 이론을 이용하여 해석함으로써 보다 정확한 채널 특성 분석이 가능하다.

광선이 진행하다 벽을 만나게 되면 그 중 일부는 투과하고 일부는 반사된다. 이렇게 나누어진 두 광선은 다시 벽을 만나면 위 그림과 같이 네 개, 여덟 개로 나누어지는 과정을 계속 반복적으로 겪는다. Ray-tracing 기법에서는 이러한 일련의 과정을 binary tree 구조로 해석한다. 즉, 광선이 진행을 하면서 만나는 벽들을 하나의 레벨로 보고 광선이 레벨을 거치면 광선은 두 갈래로 갈라지게 되는 과정을 binary tree 구조로 해석하는 것이다. 그림1은 binary tree의 개념을 나타낸 그림이다.



[그림 1] Ray-tracing 기법의 개념

수신기에 신호가 수신되면 수신기는 수신 광선으로부터 경로 거리, 시간, 전기장의 세기 및 위상 등의 정보를 얻게 된다. 이 때 수신되는 신호의 전기장의 세기는 식1과 같이 구할 수 있다.

$$E_i = E_0 f_{tif} f_{ri} L_i(d) \prod_m R(\theta_{mi}) \prod_m T(\theta_{mi}) e^{-jdk_o} \qquad (1)$$

여기서 변수는 아래표와 같다.

변수	변수의 의미
f_{ti}	송신안테나의 방사 패턴
f_{ri}	수신안테나의 방사 패턴
$L_i(d)$	i번째 다중 경로 전파의 경로 감쇄
d	경로 거리 [meter]
$R(\Theta_{mi})$	반사 계수
$T(\Theta_{ni})$	투과 계수
E_i	i번째 다중 경로 전파의 전기장의 세기, [V/m]
E_0	송신 전기장의 세기 [V/m]
$e^{-jk_0 d}$	경로 거리로 인한 수신 전파의 위상

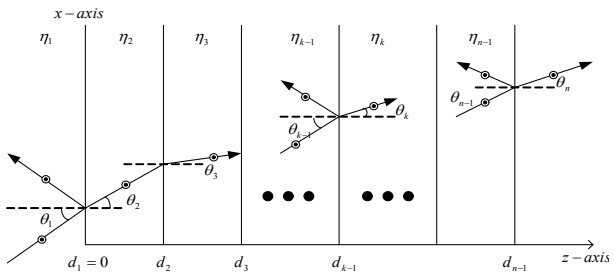
송신 안테나와 수신안테나를 옴니 안테나로 가정하였을 때 방사 패턴은 각도와 상관없이 모두 1.0을 갖게 되므로, 전파의 경로 감쇄 Li(d)는 식 2와 같이 FSPL 모델을 이용하여 구하였다.

$$L_i(d) = \sqrt{P_i(d)} = \sqrt{\frac{P_t \lambda^2}{(4\pi d)^2}} \qquad (2)$$

여기서 $P_i(d)$는 수신안테나에서의 전력, P_t는 송신안테나의 전력, λ는 파장, d는 경로의 총 거리를 나타낸다.

1.2. 벽투과 및 반사 손실특성

벽에서의 투과 및 반사 손실 특성을 도출하기위해, 본 논문에는 그림 2와 같은 다층 구조의 벽 모델을 고려한다.



[그림 2] 다중구조의 벽 모델링

위 그림과 같은 다층 구조 벽에 k-1번째 경계면에서의 경계조건 수식은 식3, 식4와 같다.

$$E_{k-1}^{+} e^{-j\beta_{k-1} z\cos\theta_{k-1}} + E_{k-1}^{-} e^{+j\beta_{k-1} z\cos\theta_{k-1}} = E_k^{+} e^{-j\beta_k z\cos\theta_k} + E_k^{+} e^{-j\beta_k z\cos\theta_k} \qquad (3)$$

$$\frac{1}{\eta_{k-1}} E_{k-1}^{+} \cos\theta_{k-1} e^{-j\beta_{k-1} z\cos\theta_{k-1}} - \frac{1}{\eta_{k-1}} E_{k-1}^{-} \cos\theta_{k-1} e^{+j\beta_{k-1} z\cos\theta_{k-1}} \qquad (4)$$
$$= \frac{1}{\eta_k} E_k^{+} \cos\theta_k e^{-j\beta_k z\cos\theta_k} - \frac{1}{\eta_k} E_k^{-} e^{+j\beta_k z\cos\theta_k}$$

이를 통해 반삭계수와 투과계수를 식5를 최종 도출하였다.

$$R^{TE} = -\frac{B_{21}}{B_{22}}, \quad T^{TE} = B_{11} + B_{12} R^{TE} \qquad (5)$$

2. 원형구조의 Ray-tracing분석을 위한 모델링

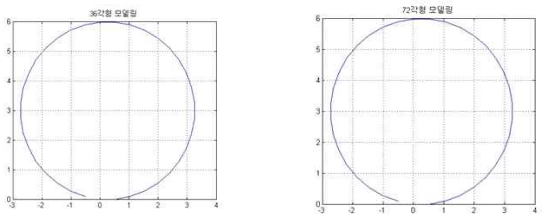
원형의 외벽 구조를 가지므로 이를 툴에 최대한 정확하게 인식시킬 수 있도록 모델링하는 방법이 요구된다. 이를 위해, 본 논문에서는 원에 내접하는 다각형으로 모델링하였다.

2.1. 다각형 모델링

우선 원에 내접하는 36각형과 72각형을 각각 모델링하였다. 원에 내접하는 정N각형을 생각했을 때, 한 변의 길이 l은 식6과 같다.

$$l = 2r\sin(\pi/N) \qquad (6)$$

모든 다각형의 외각의 합은 360°이므로 정N각형의 한 외각의 크기는 $\alpha = 360^\circ / N$ 으로 구할 수 있다. (0,0)과 (1,0)을 잇는 변을 정N각형의 한 변으로 놓고, 한 변의 끝점을 두 번째 변의 시작점으로 한다. 변의 기울기는 외각의 각도만큼 변화시켜가며 길이 N만큼에 해당하는 두 번째 점을 찾으면 두 번째 변이 완성된다. 이 과정을 반복하여 마지막 점과 시작점 (0,0)을 연결하면 그림3과 같이 원에 내접하는 정N각형에 근사한 도형의 좌표를 모두 도출할 수 있다.



(a) 36각형 (b) 72각형

[그림 3] 모델링한 다각형의 모습(36각형, 72각형)

2.2. 다각형 모델링의 한계

다각형 모델링을 이용한 Ray-tracing 분석 결과,

불가능한 경로들이 일부 확인되었다. 이러한 경로들이 생기는 원인으로는 원의 구조적 특징을 다각형으로는 충분히 반영할 수 없다는 점과 이에 따라 금속 부상 구조물의 위치 역시 정확한 반영이 어렵다는 점을 우선적으로 생각해 볼 수 있다. 이에 대한 우선적인 해결 방안으로 120각형/360각형과 같은 보다 세밀한 다각형을 모델링 방법을 생각하였으나 이 방식에도 많은 문제점이 발견되었다. 가장 중요한 요인으로 정확한 Ray-tracing 분석을 위해서는 분해능(resolution)을 고려해야 한다는 점이다. 기존에 연구된 전파 추적 기법 이론에서는 광선의 파장의 10배 정도에 해당하는 길이 이상으로 벽이 모델링되어야 한다고 그 기준을 제시하고 있다. 본 논문에서 고려하고 있는 주파수에 따른 파장의 길이는 표1과 같다.

[표 1] 주파수별 파장의 길이

주파수	파장
18GHz	0.0167m
5.8GHz	0.0517m
2.4GHz	0.1249m

따라서 모델링한 다각형의 한 변의 길이는 표2와 같다.

[표 2] 다각형모델링에 따른 한 변의 길이

다각형	한 변의 길이
36각형	0.5229m
72각형	0.2617m
120각형	0.1571m
360각형	0.0524m

표2를 통해 모델링한 다각형이 72각형 이상만 되어도 전파 추적 분해능(resolution)에 문제가 발생한다는 것을 알수 있다. 다각형 모델링의 또 한 가지 오류 발생 요인으로는 송신 안테나에서 방사 된 광선이 벽과 벽이 만나는 모서리(꼭짓점)에 맞는 경우, 기존 전파 추적 방식에서는 그 광선의 방향성을 결정할 수 없기 때문에 소실된 것으로 처리 한다. 분석하고자 하는 원형 구조에서는 지속적으로 반사가 이루어 지는 위치들이지만 다각형 모델링에서는 그 경로가 소실될 여지가 있다. 따라서 다각형 모델링에서의 오차 요소를 고려하였을 때, 최적이라고 판단되는 36각형 모델링으로 결정하였다.

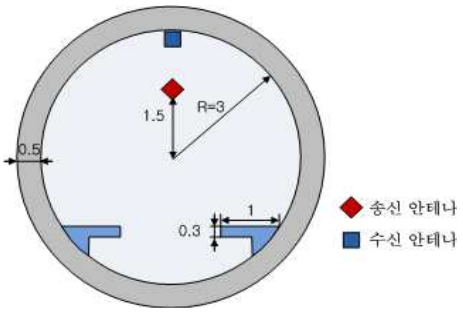
2.3. 다각형모델링을 통한 Ray-tracing 분석방안

본 논문에서는 분해능을 초과하지 않는 36각형으로 모델링하여 분석을 진행하였다. 즉, 이미지를 이용한 경로 추적 알고리즘을 구현하고, 모서리에서 방향성 문제로 경로가 소실되는 부분에 대한 보정 알고리즘을 적용하였다. 이미지를 이용한 전파 경로 추적은 송신 지점과 수신 지점을 고정하고 그 사이를 연결할 수 있는 경로를 찾아낸다.

3. 다각형모델링 및 수학적 분석에 의한 Ray-tracing 비교분석

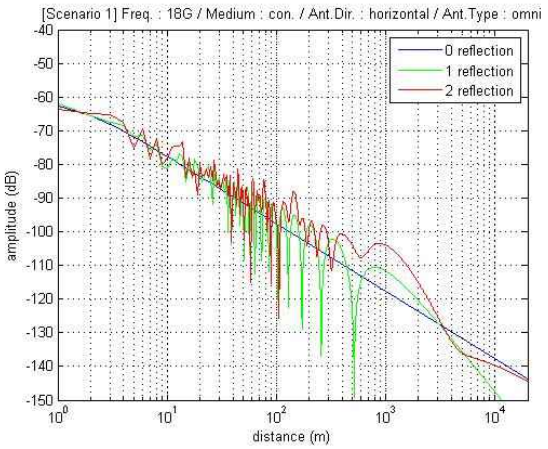
실험을 위한 환경 조건은 주파수 18GHz, 매질은 콘크리트 구조, 안테나는 옴니 안테나로 가정하였고, 안테나 방향이 수평인 경우와 수직인 경우에 대해서 분석하였다.

3.1. Ray-tracing분석을 위한 시나리오

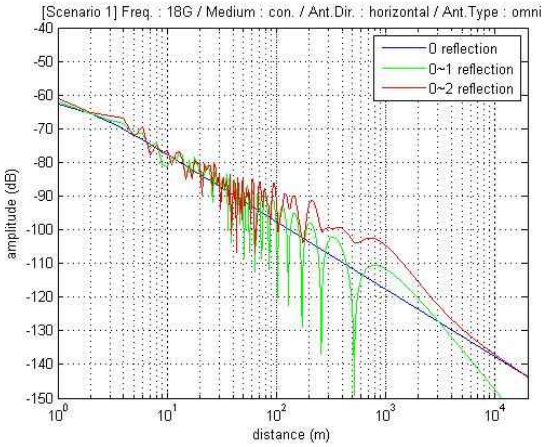


[그림 4] 시나리오1:콘크리트 구조(송/수신 안테나)

3.2. Ray-tracing분석 결과비교



(a) Ray-tracing 방식 (수평 안테나)



(b) 수학적 방식 (수평 안테나)

[그림 5] 경로손실결과 비교

4. 결론

본 논문에서는 원형구조의 전파환경을 위한 경로손실을 다각형모델링과 수학적 모델링을 통해 분석하였다.

원형의 통신환경은 비교적 좁은 반경에 곡률이 거의 없고, 내부는 공기저항을 고려한 감압 상태로 Ray-tracing 기법은 원형이라는 구조적 특징을 완벽히 적용하는데 문제가 있기 때문에 원에 가까운 다각형을 모델링하였다. 다각형 모델링 방법와 수학적 방법의 전파손실분석결과 반사횟수와 관계없이 유사한 전파손실성능을 확인하였다.

본 논문은 무선을 이용한 튜브 즉, 원형의 철도운영환경도 고려되고 있는 시점에서, 기존의 철도환경과 다른 환경에 대한 무선환경분석을 위한 기초자료로 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] 김백현, 이강미 외, “초고속 튜브철도 급전 및 신호 핵심기술개발”, 2009년도, 한국철도기술연구원 기본사업 보고서