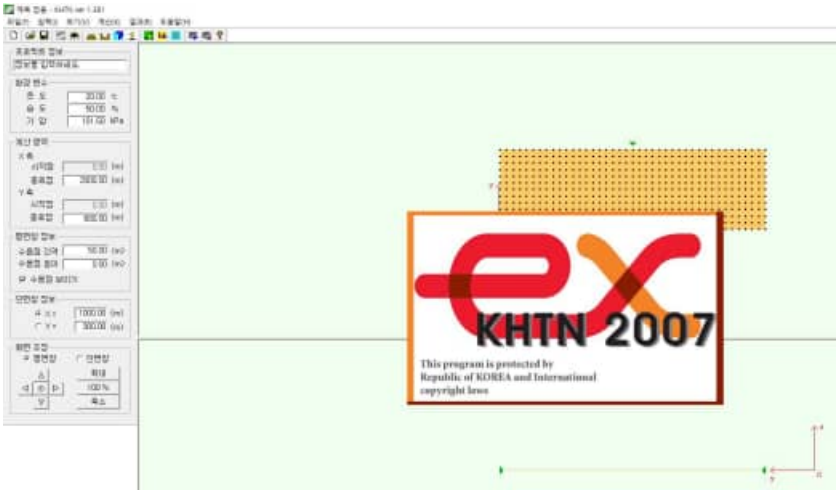
# 고속도로 교통소음 예측 프로그램
# KHTN 사용지침서




한국도로공사

KOREA
HIGHWAY
CORPORATION

도로교통기술원

# 목 차

1. 프로그램 개요 ····· 1
1.1 프로그램의 주요 특징 ····· 1
1.2 프로그램의 사용 환경 ····· 2

2. 프로그램의 실행 ····· 3

3. 프로그램 구성 ····· 6
3.1 주 메뉴 구성 및 기능 ····· 6
3.2 도구 모음 ····· 7
3.3 평면 및 단면 보기창 ····· 7
3.4 기본 정보 입력창 ····· 8

4. KHTN을 이용한 고속도로 소음 예측 ····· 9
4.1 소음 예측 영역 입력 ····· 10
4.2 통합 환경 데이터 입력 ····· 10
4.3 도로 요소 입력 ····· 10
4.4 수음점 요소 입력 ····· 13
4.5 방음벽 및 지형요소 입력 ····· 14
4.6 소음 예측 수행 및 결과 확인 ····· 16

5. KHTN의 교통소음 산정 방법 ····· 19
5.1 고속도로 교통소음의 음향발생특성 평가 ····· 19
5.2 고속도로 교통소음의 전달감쇠 산정 ····· 21

# 고속도로 교통소음예측 프로그램 KHTN 사용지침서

## 1. 프로그램 개요

KHTN(Korea Highway Traffic Noise prediction program)은 한국고속도로 음향파워 산출식과 ISO 9613의 옥외 전파소음 전달 감쇠치 계산법에 기초한 고속도로 교통소음 예측 프로그램으로 객체지향 프로그램인 Microsoft Visual C++ 6.0으로 작성되었으며, Windows 환경에서 구동된다.

KHTN에서는 고속도로 교통소음 예측을 위한 소음 모델을 크게 소음원인 도로, 차폐 및 회절구조물인 방음벽, 그리고 소음평가 지점에 해당하는 수음점으로 분류하여 구성한다. 소음 예측은 각 도로의 노면 포장 상태, 평균 주행속도 및 통과 차량 대수 등을 고려하여 계산되며, 실제 측정한 음향파워레벨을 직접 입력할 수도 있다.

KHTN은 대화상자 입력방식을 채택하여 각 모델링 대상의 형상 정보와 수음점의 지면계수 및 방음벽의 흡음률 등과 같이 소음 해석에 영향을 미치는 음향학적 특성값을 입력할 수 있으며, 소음 예측모델의 구성을 확인하기 위하여 모델링 화면의 이동, 확대/축소 기능을 가지는 평면 및 단면 화면을 동시에 제공한다. 또한, 각 수음점에서의 계산된 소음 예측 결과는 평면 및 단면 보기창에 직접 출력하거나 차트 형태로 확인할 수 있으며, 예측 결과는 클립보드로의 복사를 통해 워드프로세서(예: 흔글, MS Word) 또는 스프레드시트(예: MS Excel)에서 결과 자료의 편집이 가능하다.

### 1.1 프로그램의 주요 특징

(1) 도로 및 지형 모델링

- 도로 포장 종류 구분 (아스팔트 포장, 콘크리트 포장)
- 방음벽 흡음률 및 중앙분리대 반사 영향 반영 가능 (단, 1차반사만 고려)
- 등가 높이를 갖는 방음벽을 이용한 지형 회절 효과 반영 가능
- 지면 특성(딱딱한 지면, 부드러운 지면) 반영 가능
- 방음벽의 높이 및 연장 고려 가능

(2) 음향 파워 산정

◦2차종 또는 4차종 분류, 차종에 따른 주행속도 구분 입력

◦현장에서 계측한 음향파워레벨 이용 가능

(3) 결과 출력

◦Overall 값 및 주파수 대역별로 예측 소음 레벨 표시

◦모델링 화면 또는 차트 형태로 결과 출력

◦워드프로세서(예: 흔글, MS Word) 또는 스프레드시트(예: MS Excel)에서 결과 자료 편집 가능

## 1.2 프로그램의 사용 환경

웹 서비스로 제공되는 KHTN은 인터넷 접속이 가능한 컴퓨터에서 사용할 수 있으며, 원활하게 사용하기 위한 권장 시스템은 다음과 같다.

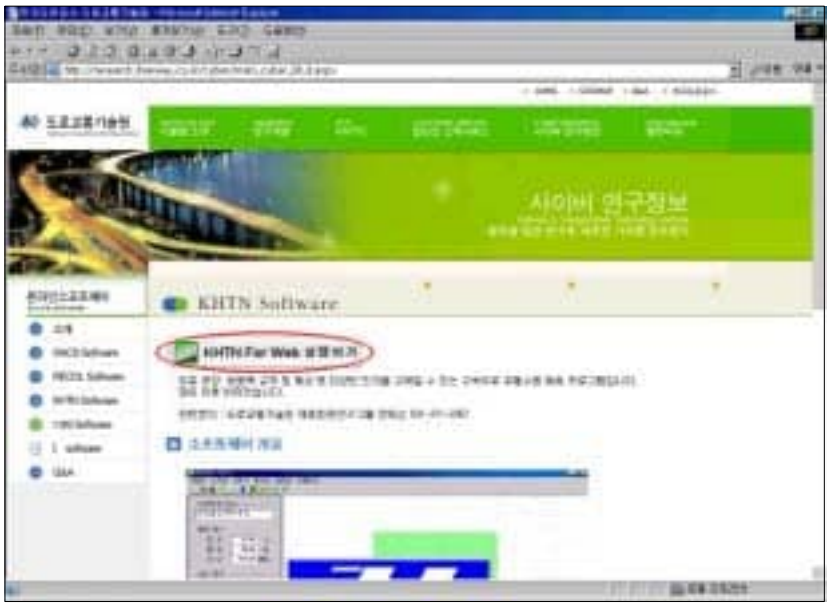
- 펜티엄 III 이상의 Windows 98/XP 시스템
- 화면 해상도 1024×768 이상

## 2. 프로그램의 실행

(1) 한국도로공사 도로교통기술원 홈페이지(https://www.ex.co.kr/research)에 접속하여 "온라인 소프트웨어"를 선택한다.

(2) 온라인소프트웨어 목록 중 「KHTN Software」를 선택한다.

(3) 「KHTN For Web 실행하기」버튼을 클릭한다.




(4) 보안 경고 창이 뜨면, "예(Y)"를 선택하여 온라인소프트웨어 실행을 위한 Active-X 컨트롤을 실행한다.

(5) KHTN 프로그램이 실행된다.

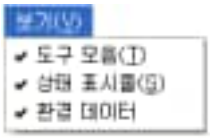
# 3. 프로그램 구성

## 3.1 주 메뉴 구성 및 기능

(1) “파일” 메뉴

· 새 모델을 작성
· 기존 파일 불러오기
· 현재 작업 중인 모델 및 결과 파일 저장
· 새로운 이름으로 저장
· 프로그램 종료

(2) “보기” 메뉴




· 단축 아이콘의 표시 여부 선택
· 상태 표시줄의 표시 여부 선택
· 통합 환경 데이터 입력창의 표시 여부 선택

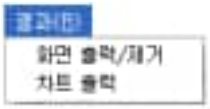
(3) “입력” 메뉴

· 수음점 좌표, 지면 계수의 입력/수정
· 도로 형상, 교통 조건 등의 입력/수정
· 방음벽의 형상 및 흡음률의 입력/수정

(4) “계산” 메뉴

· 현재 작업 중인 모델에 대한 소음 예측 수행

(5) “결과” 메뉴




· 예측 결과를 화면상에 출력/제거
· 예측 결과를 차트에 출력/제거

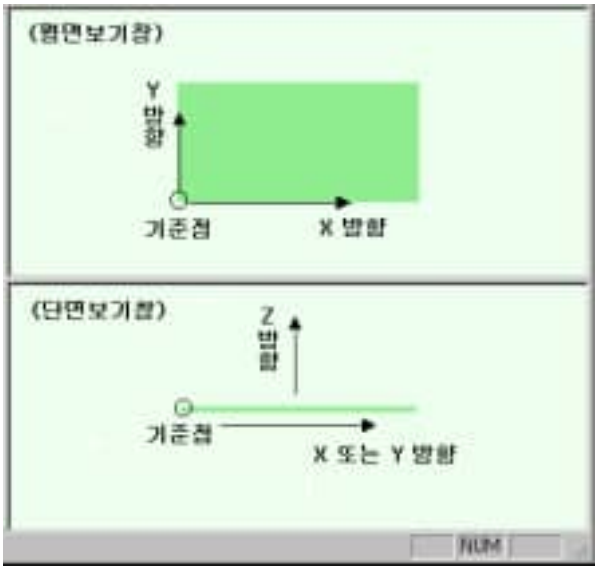
## 3.2 도구 모음

주 메뉴 아래의 툴 바는 자주 사용하는 기능을 단축 아이콘으로 모아놓은 것이다.

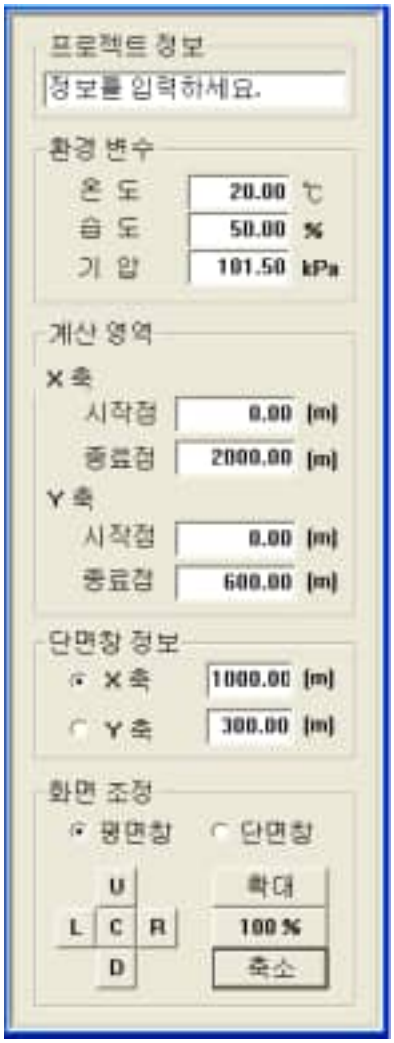
표 3.1 단축 아이콘의 기능

| | |
|---|---|
| | 신규 모델 생성 |
| | 기존에 저장된 모델 호출 |
| | 작업중인 모델 저장 |
| | 도로 요소 편집 대화상자 호출 |
| | 수음점 요소 편집 대화상자 호출 |
| | 방음벽 요소 편집 대화상자 호출 |
| | 현재 작업중인 모델에 대한 소음 예측 실행 |
| | 소음 예측 결과를 차트 형태로 나타내는 대화상자 호출 |
| | 소음 예측 결과를 그래픽 화면상에 나타내는 대화상자 호출 |
| | 평면창 화면 캡처 |
| | 단면창 화면 캡처 |
| | 프로그램 정보 |

## 3.3 평면 및 단면 보기창



## 3.4 기본 정보 입력창




· 작업 중인 소음 예측 모델에 대한 정보

· 온 도 설정
· 상대습도 설정
· 대 기 압 설정

· 계산 영역의 X축 시작점
· 계산 영역의 X축 종료점

· 계산 영역의 Y축 시작점
· 계산 영역의 Y축 종료점

· 단면 보기창에 표시할 단면의 X축 좌표
· 단면 보기창에 표시할 단면의 Y축 좌표

· 평면창 또는 단면창 보기 선택

· 상(U)·하(D)·좌(L)·우(R)·중앙(C)으로 영역 이동
· 보기창 확대/축소 또는 초기 배율(100%)로 전환

표 3.2 대화상자 명령어 버튼

| | |
|---|---|
| 확인 | · 대화상자의 작업 내용을 저장하고, 대화상자를 종료 |
| 적용 | · 대화상자의 작업 내용을 저장. 데이터를 변경한 경우 반드시 실행 |
| 취소 | · 대화상자의 변경사항을 취소하고, 대화상자를 종료 |
| 제거 | · 대화상자의 선택 요소를 제거 |

# 4. KHTN을 이용한 고속도로 소음 예측

KHTN을 이용하여 고속도로 소음을 예측하기 위해서는 먼저 소음 해석 대상 영역을 선택·지정하고 그 지역에 대한 환경 정보와 도로, 수음점 및 방음벽을 각각의 3차원 형상과 음향학적 특성을 고려하여 모델링한 후, 소음 예측을 실시하면 각 수음점에서의 소음 예측 결과를 차트 또는 그래픽 화면상의 모델에서 확인할 수 있다.

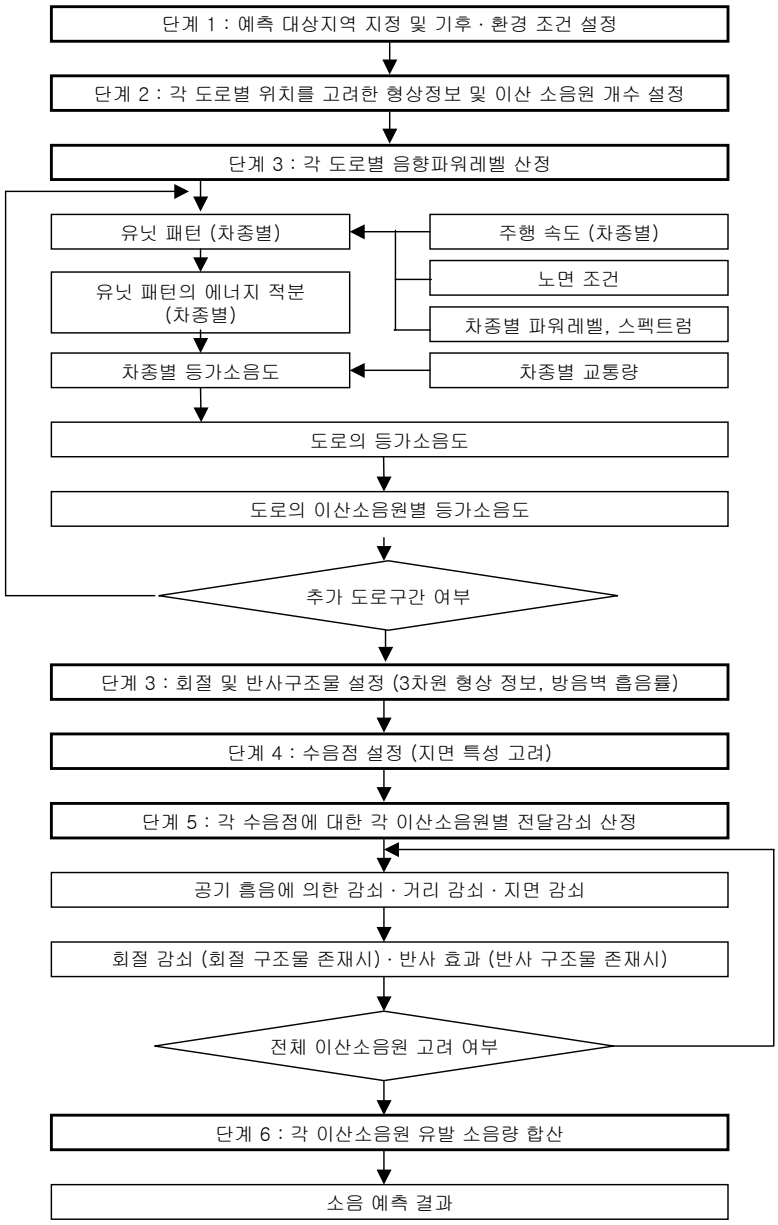



그림 4.1 고속도로 소음 예측 및 방음벽 설계 순서도

## 4.1 소음 예측 영역 입력

고속도로 소음 예측 영역의 가로 및 세로 방향을 입력하면 평면 및 단면 보기창의 모델이 자동적으로 갱신된다. 이때, 보기창의 화면 배율 및 위치는 입력된 소음 예측 영역의 크기에 적합하게 자동적으로 조절되며, 화면 조정창의 기능을 이용하여 수동으로도 조정할 수 있다.

소음 예측 영역은 도로와 수음점, 주변 지형 등을 고려하여 충분히 넓게 잡아준다.

**⚠ 소음 예측 영역 초기값 : 2,000m × 600m**

## 4.2 통합 환경 데이터 입력

각각의 입력창에 입력되는 온도, 상대습도 및 대기압은 전달 감쇠 효과 중 공기 흡음 감쇠, 회절 감쇠 및 반사 효과에 영향을 주기 때문에 특정 시점에서의 소음 예측을 하는 경우에는 각각의 값을 정확하게 입력할 필요가 있다. 단, 상대습도 및 대기압의 측정자료가 없거나 특정 시점이 아닌 소음 예측인 경우에는 일반적으로 초기값을 그대로 적용한다.

## 4.3 도로 요소 입력

도로교통소음 해석에 있어서 주요 소음원인 도로는 단위길이당 발생 음향파워레벨을 가지는 유한 선소음원으로 모델링되며, 이때 선소음원은 ISO 9613에서 정의한 바와 같이 이산 소음원들의 집합체로 간주한다. 도로 요소의 입력은 “입력→도로” 명령을 실행하거나, 아이콘을 클릭하여 호출되는 대화상자를 이용해서 편집한다. 하나의 도로 요소에 대한 입력을 마치고, 계속해서 다음 도로 요소를 입력할 때에는 반드시 “적용” 버튼을 누른 후, ID를 “NEW"로 변경하여 동일한 방식으로 입력한다.

도로의 폭 방향 좌표(일반적으로 도로의 Y좌표) 설정 시 기준은 도로의 중심이 된다. 도로의 발생 음향 파워레벨 산정에 있어서 교통흐름 상태와 속도제한은 각각 “정상소통 구간”과 “속도제한 없음”이 기본적으로 적용된다.

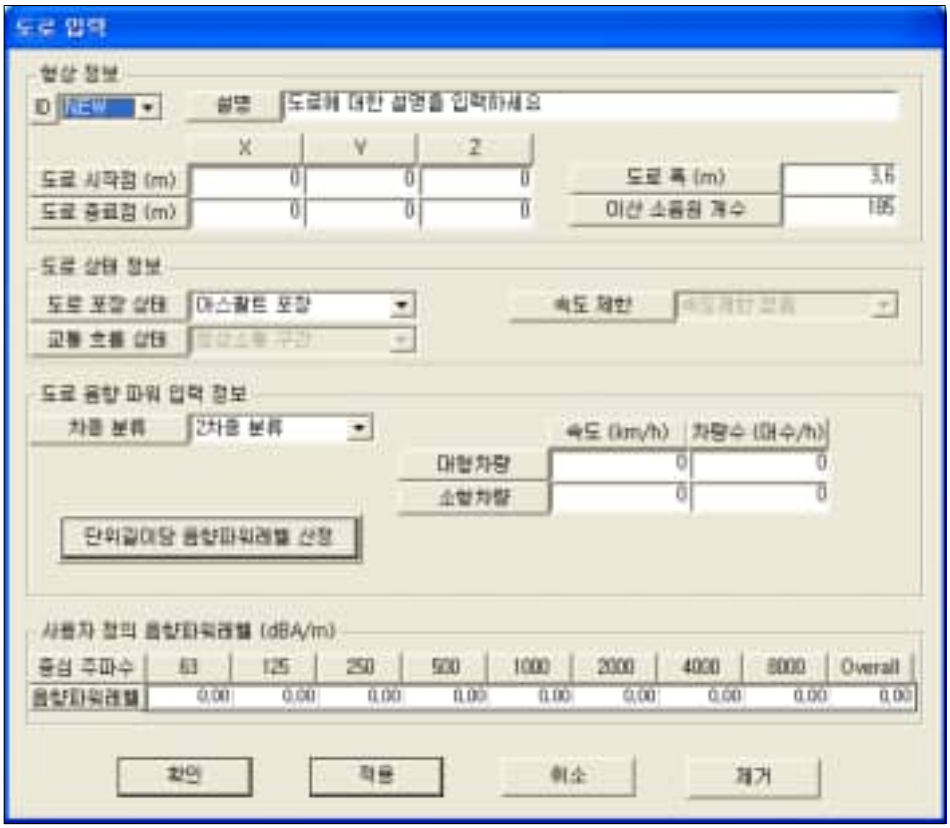



그림 4.2 도로 요소 편집 대화상자

표 4.1 도로 요소 입력 변수

| | |
|---|---|
| ID | · 자동 지정되는 도로 고유번호이며 초기값은 “NEW”.<br>· 모델링 후 하단의 “적용” 버튼을 누르면, 1, 2, 3, 4로 계속하여 갱신됨. |
| 설 명 | · 현재 작업중인 도로 요소에 대한 사용자 입력 설명문 |
| 도로 시작점/종료점 | · 미터(m) 단위로 입력되는 도로 길이 방향 양 끝단의 3차원 X, Y, Z 좌표 |
| 도로폭 | · 미터(m) 단위로 입력되는 도로 폭 방향 길이 |
| 이산 소음원 개수 | · 라인 소스 형태의 도로를 구성하고 있는 점소음원의 개수 |
| 도로 포장 상태 | · 아스팔트/콘크리트로 입력되는 도로 포장 상태 |
| 차종 분류 | · 2차종/4차종으로 구분되는 차종 분류 |
| 속도/차량수 | · 해당 차종의 평균 속도(단위: km/h)와 통과 대수(단위: 대수/h)를 입력 |
| 단위길이당<br>음향파워레벨 산정 | · 차종별 평균속도와 통과 대수를 입력한 후, 버튼을 눌러 현재 작업중인 도로 요소의 단위길이당 음향파워레벨(단위: dBA/m)를 산출 |
| 사용자 정의<br>음향파워레벨 | · 계산된 단위길이당 음향파워레벨을 표시하거나, 임의의 옥타브밴드 중심 주파수에 해당하는 편집창을 왼쪽 마우스 버튼을 클릭하여 사용자가 직접 입력 가능 (단, 실측값이 없는 경우 임의로 조정해서는 안됨.) |

KHTN에서 차종 구분은 4차종(대형차, 중형차, 소형화물차, 승용차) 또는 2차종(대형차+중형차, 소형화물차+승용차)의 두 가지 분류법을 적용할 수 있다. 차량의 주행 속도와 교통량을 입력한 후에는 반드시 “단위길이당 음향파워레벨 산정” 버튼을 눌러서 음향파워레벨을 갱신하여야 한다.

표 4.2 KHTN에서의 차종 분류

| 차 종 | | 자동차의 종별, 제원 등 | 참 고 |
|---|---|---|---|
| 대형차류 | 대형차 | 대형화물자동차: 차량 총중량 8톤 또는 최대 적재량이 5톤 이상인 차<br>대형버스: 승차정원 30인 이상<br>대형특수 자동차 | 대형화물자동차에는 속도표시 등의 장비가 의무 장착되며, 대부분이 3축차임 |
| | 중형차 | 화물자동차: 배기량이 2,000cc를 넘는 대형차 제외<br>중형버스: 승차정원 : 11～29명 | 대부분 2축차임 |
| 소형차류 | 소 형 화물차 | 화물자동차: 배기량 2,000cc 이하 | 밴 제외 |
| | 승용차 | 승용차: 승차정원 : 10인 이하 | 밴 포함 |

**⚠ 일반적인 고속도로 환경에 대한 도로 요소 설정은 다음 조건을 기본으로 한다.**

- **도로는 각 차선을 별도로 지정**
- **시작점과 종료점의 X좌표는 소음 예측 영역의 각 X좌표와 동일하게 설정**
- **Y좌표는 도로 및 갓길의 폭, 중앙분리대, 그리고 수음점의 위치 등을 고려하여 설정**
- **도로폭 : 3.6 m (1개 차선 기준)**
- **이산 소음원 개수 : 도로의 길이 / (도로폭의 3배)**
- **속 도 : 해당 차종의 평균주행속도 입력. 단, 차종별 평균주행속도에 대한 측정자료가 없는 경우에는 해당 도로의 차종별 설계 속도를 적용한다.**
- **차량수 : 첨두시간(Peak Time)의 교통량 입력. 단, 차선별 차량수에 대한 측정자료가 없는 경우에는 방향별로 차량대수를 차선 수로 나눈 교통량을 적용한다.**
- **중앙분리대가 있는 상행선과 하행선 사이 : 3.0 m**
- **갓길의 폭 : 3.0 m**

## 4.4 수음점 요소 입력

고속도로 소음 예측 모델에 있어서 계산지점이 되는 수음점 요소 입력 자료는 “입력→수음점” 명령을 실행하거나, 아이콘을 왼쪽 마우스 버튼을 클릭하여 호출되는 그림 4.3과 같은 대화상자를 이용해서 편집한다. “옵션→직선 등간격 입력”을 선택하면 일정한 간격의 수음점을 자동으로 추가할 수 있다.

그림 4.3 수음점 요소 편집 대화상자

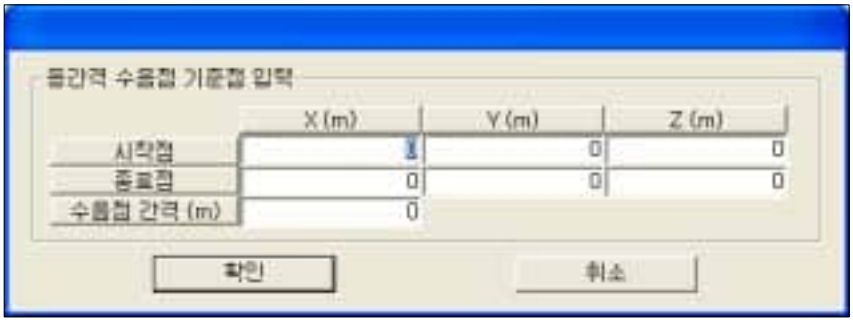



그림 4.4 직선 등간격 수음점 입력 대화상자

표 4.3 수음점 요소 입력 변수

| | |
|---|---|
| ID | · 자동적으로 부여되는 수음점의 고유번호. 초기값은 “NEW" |
| X/Y/Z | · 미터 단위로 입력되는 수음점의 3차원 X, Y, Z 좌표. |
| 중간영역/수음영역 지면계수 | · 소음원과 수음점 사이의 중간 영역 및 수음점 영역에서의 지면의 음향학적 특징을 ISO 9613에서 제시하는 부드러운 지면(예: 풀, 잡목 등이 있는 지면)과 딱딱한 지면(예: 아스팔트, 콘크리트, 호수 등)으로 분류하고 해당 지역의 지면 분포정도에 따라 그 비율로 입력.<br>· 0 : 전형적인 딱딱한 지면, 1 : 전형적인 부드러운 지면<br>· 도로부에 해당하는 소음원 영역은 프로그램 내부에서 0으로 지정됨. |
| 수음점 정보 편집 | · 이미 입력한 수음점 정보를 수정하거나 삭제할 경우에는 해당 ID에 해당하는 편집창에 왼쪽 마우스 버튼을 클릭하면 상단의 입력창에 선택한 수음점의 정보가 표시됨.<br>· 수음점 정보에 대한 수정이 완료된 후에는 “적용” 버튼을 선택하여 정보를 갱신. |

## 4.5 방음벽 및 지형요소 입력

KHTN에서는 소리의 전달감쇠경로 상에서 회절 및 반사 효과를 발생시키는 모든 요소를 방음벽 요소로 모델링 할 수 있도록 지원한다. 방음벽 요소의 형상 및 음향학적 입력 자료는 “입력→방음벽” 명령을 실행하거나, 아이콘을 클릭하여 호출되는 그림 4.5와 같은 대화상자를 이용해서 편집한다.

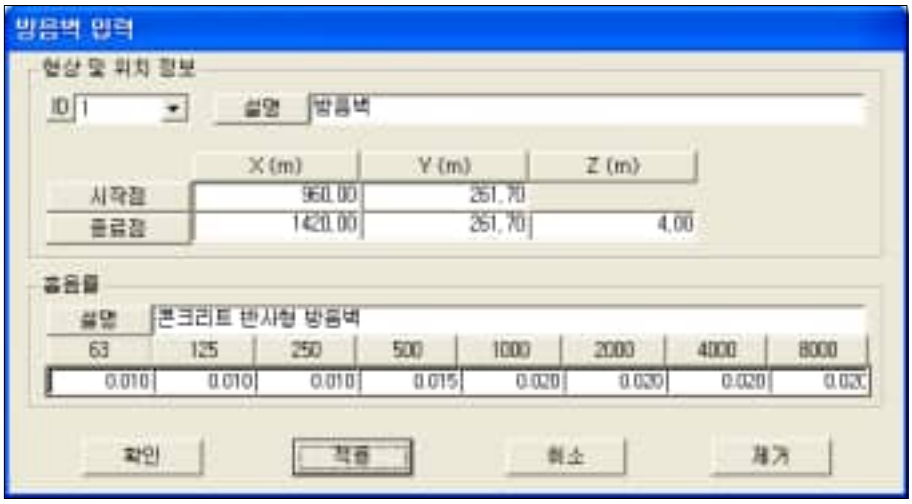



그림 4.5 방음벽 요소 편집 대화상자

흡음률은 해당 재질의 측정값 적용을 원칙으로 하되 측정자료의 확보가 어려운 경우에는 일반적으로 알려진 동일 또는 유사 재질의 흡음률을 적용한다. 콘크리트 반사형 및 알루미늄 흡음형 방음벽에 대한 흡음률의 예를 표 4.4에 나타내었다.

표 4.4 방음벽 재질의 흡음률

| 주파수(Hz) / 재 질 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 콘크리트 반사형 방음벽 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.015 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 |
| 알루미늄 흡음형 방음벽 | 0.150 | 0.270 | 0.900 | 0.990 | 0.870 | 0.683 | 0.570 | 0.400 |

표 4.5 방음벽 요소 입력 변수

| | |
|---|---|
| ID | · 자동 부여되는 방음벽(또는 지형)의 고유번호. 초기값은 “NEW”<br>· 이미 모델링 되어있는 방음벽(또는 지형)이 존재할 때에는 클릭하여 원하는 ID를 선택 |
| 방음벽 요소 설명 | · 현재 작업중인 방음벽(또는 지형) 요소에 대한 사용자 설명 입력 |
| 시작점/종료점 X, Y 좌표 | · 방음벽(또는 지형)의 시점과 종점의 X, Y 좌표를 미터(m) 단위로 입력 |
| 방음벽 높이 | · 방음벽(또는 지형) 높이를 미터 단위로 입력 |
| 흡음률 설명 | · 방음벽(또는 지형) 요소의 흡음 특성에 대한 사용자 설명 입력 |
| 흡음률 | · 방음벽 요소의 옥타브밴드별 흡음률 입력 |

KHTN에서는 ISO 9613-2의 회절 효과 산정 방법을 적용하여 방음벽의 소음 저감 효과를 평가한다. 성토부, 절토부 등에서의 지형에 의한 회절 효과는 그림 4.6과 같이 회절을 유발하는 지형부에 등가 높이를 갖는 방음벽을 모델링하여 고려한다. 이때, 도로, 수음점 및 방음벽은 지형의 높이 변화를 고려하기 위하여 절대 높이를 기준으로 입력한다. 한편, 지형등가방음벽의 흡음률은 기본값을 그대로 적용하는 것을 원칙으로 하되 수음점 주변의 높은 지형이나 장해물을 모델링하는 경우에는 지형(또는 장해물)의 형태, 성상 등에 따라 반사영향이 크게 달라질 수 있으므로 이를 충분히 감안하여 설정한다.

**⚠ 지형은 도로와 수평 또는 수직으로 모델링하는 것을 원칙으로 한다.**

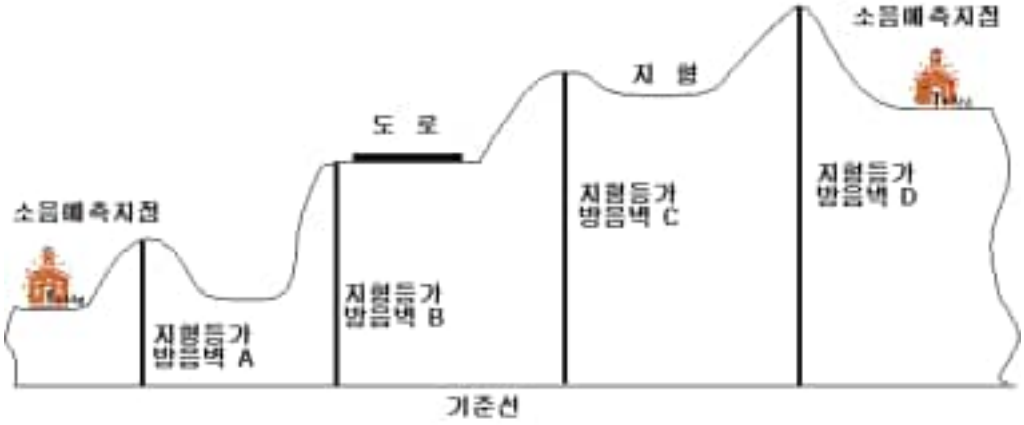


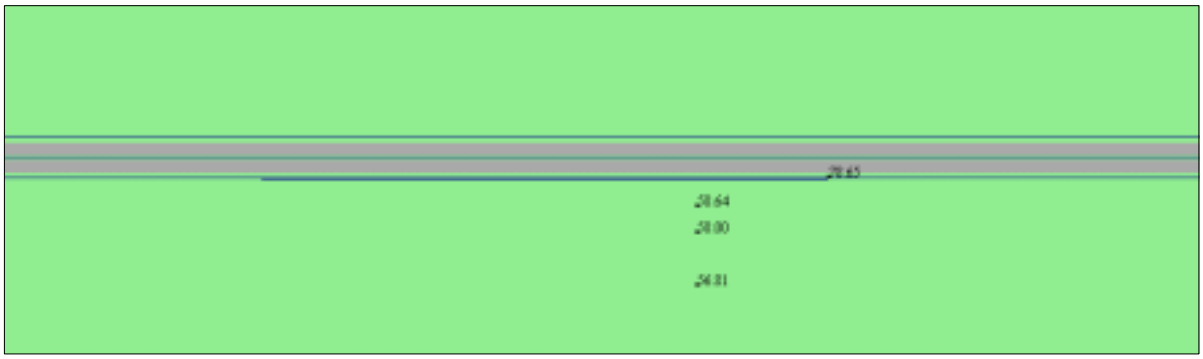

그림 4.6 지형 회절 효과를 고려하기 위한 지형등가 방음벽 모델링 방법

## 4.6 소음 예측 수행 및 결과 확인

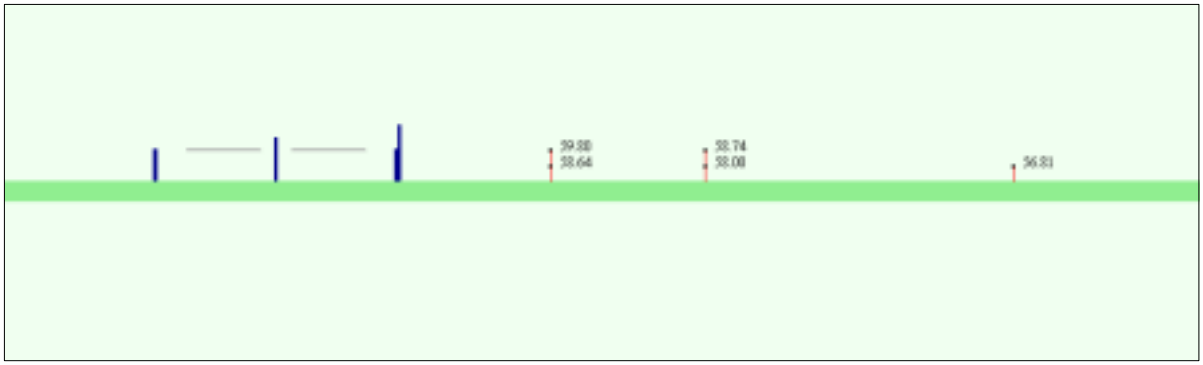
고속도로 교통소음 예측에 필요한 자료 입력을 완료한 후, “계산→소음 예측” 명령을 실행하거나, 아이콘을 클릭하여 소음 예측을 실시한다. 소음 예측이 완료되면 그림 4.7과 같은 계산종료를 알리는 대화상자가 나타나며 “확인” 버튼을 누르면 모든 계산 과정이 종료된다.

그림 4.7 계산 완료 확인 대화상자

KHTN에 의한 소음 예측 결과는 그림 4.8~4.9와 같이 각 수음점에서의 소음 예측 결과값을 차트 또는 화면상에서 확인할 수 있다.



(a) 평면창



(b) 단면창

그림 4.8 화면상에 출력된 소음 예측 결과

그림 4.9 차트로 출력된 소음 예측 결과

차트 출력의 경우, 주 메뉴에서 “결과→소음예측 결과→차트 출력” 명령을 실행하거나, 아이콘을 왼쪽 마우스 버튼으로 클릭하면 나타나는 차트에서 각 수음점별로 옥타브밴드별 소음 예측 레벨값 및 Overall 값을 확인할 수 있다. “클립보드로 복사” 버튼을 누르면, 예측 결과가 클립보드에 저장되어 흔글, MS Word 등의 워드프로세서나 Excel과 같은 스프레드시트 프로그램에서 편집이 가능하다.

화면 출력의 경우, 주 메뉴에서 “결과→화면 출력/제거” 명령을 실행하거나 아이콘을 왼쪽 마우스 버튼을 클릭하면, 그림 4.10과 같은 결과 출력 선택창이 나타난다. Overall 또는 원하는 주파수 밴드를 선택한 후 “출력 확인” 버튼을 선택하면, 평면 및 단면 보기창의 해당 수음점 위치에 선택된 결과값이 표시된다. 단, 화면에 예측 결과가 출력된 상태에서는 도로 요소, 방음벽 및 지형 요소, 수음점 요소 등을 수정할 수 없다. 모델의 수정이 필요한 경우에는 “결과→화면 출력/제거” 명령을 다시 실행한 후 “출력 제거” 버튼을 눌러 화면에 출력된 예측 결과를 제거한 후 모델을 수정하여야 한다.

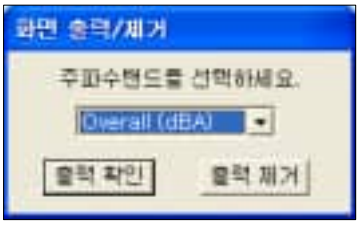



그림 4.10 화면 출력 대화상자

표 4.5 차트 출력과 화면 출력의 비교

| | |
|---|---|
| 차트 출력 | · 소음 예측 결과 차트는 각 수음점의 ID 및 3차원 좌표값과 옥타브밴드별 및 Overall 소음레벨값을 dBA 단위로 출력.<br>· 소음원의 개수가 100개가 넘는 경우에는 “이전 100개의 수음점 정보” 및 “다음 100개의 수음점 정보” 버튼을 왼쪽 마우스 버튼으로 클릭하여 원하는 수음점의 소음 예측 결과값을 확인. |
| 화면 출력 | · 그래픽 모델 화면상에 소음 예측 결과를 표시하는 경우에는 해당 수음점 우측에 사용자가 선택한 옥타브밴드 및 Overall 결과값을 나타냄. 이때, 단면 보기창에서는 현재의 단면 보기창에 표시된 수음점에서만 결과값을 표시함.<br>· “출력 제거” 버튼을 선택하면 화면에 표시된 결과값이 사라짐. |

# 5. KHTN의 교통소음 산정 방법

## 5.1 고속도로 교통소음의 음향발생특성 평가

(1) 차종별 음향파워레벨

KHTN에서는 고속도로에서 시속 40 km/h 이상의 속도로 정상 주행하는 1대의 차량에 대한 차종별 음향파워를 표 5.1에 나타낸 평가식으로 산정한다. 여기서, $V$는 차량의 평균 주행속도(km/h)를 의미한다. 2차종 분류의 경우는 대형차와 중형차에 대한 혼입비율이 같고, 승용차에 대한 소형트럭의 혼입비율은 0.25로 설정되어 유도된 식을 적용한다.

표 5.1 KHTN의 정상주행상태 차량 1대당 음향출력레벨(dBA) 평가식

| 구 분 | 아스팔트 포장 | | 콘크리트 포장 | |
|---|---|---|---|---|
| | 4차종 분류 | 2차종 분류 | 4차종 분류 | 2차종 분류 |
| 대 형 차 | $56.22+30\log_{10}V$ | $55.02+30\log_{10}V$ | $58.86+30\log_{10}V$ | $57.66+30\log_{10}V$ |
| 중 형 차 | $53.32+30\log_{10}V$ | | $55.96+30\log_{10}V$ | |
| 소형화물차 | $49.42+30\log_{10}V$ | $48.52+30\log_{10}V$ | $52.06+30\log_{10}V$ | $51.16+30\log_{10}V$ |
| 승 용 차 | $48.22+30\log_{10}V$ | | $50.86+30\log_{10}V$ | |

(2) 포장 종류별 음향파워스펙트럼

고속도로로부터 수음영역까지의 전달경로 상에서 발생하는 감쇠는 주파수 대역별로 달라지므로 정밀한 교통소음 예측을 위해서는 주파수 대역별 음향발생특성을 파악해야 한다. KHTN에서는 이를 위하여 평탄부 도로의 계측 결과를 이용해서 A-가중치 총합음압레벨로부터 중심주파수 기준 63 Hz부터 8 kHz까지의 옥타브밴드별 A-가중치 음압레벨을 뺀 차이값의 평균치를 이용해서 중심주파수 $f_i$에서의 옥타브밴드별 음향파워레벨 $L_{WA,i}$는 다음과 같이 산정한다.

$$L_{WA,i} = L_{WA} + \Delta L(f_i)\ dB \tag{5.1}$$

여기서, $L_{WA}$ 는 차종별 음향파워레벨이고, $\Delta L(f_i)$는 표 5.2에 나타낸 포장 유형에 따른 옥타브밴드별 음향파워 산정계수(dB)이다.

표 5.2 포장 유형에 따른 옥타브밴드별 음향파워 산정계수(dB)

| 주파수(Hz) / 포장 종류 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 아스팔트 | -27.9 | -19.9 | -11.9 | -6.7 | -3.6 | -6.5 | -13.7 | -20.3 |
| 콘크리트 | -30.0 | -21.9 | -12.6 | -7.8 | -3.2 | -6.2 | -13.8 | -21.6 |

(3) 도로의 등가음향출력레벨

단위 시간당 차종별 교통량과 평균주행속도를 고려한 차종별 A-가중치 시간 적분 음향출력은 다음과 같이 산정한다.

$$(L_{WAT})_i = L_{WA} + 10\log_{10}(\frac{3.6\Delta l}{V} \cdot \frac{N}{3600})\ \text{dB} \tag{5.2}$$

여기서, $L_{WA}$는 차량 1대당 음향출력레벨(dB), $\Delta l$은 도로의 길이(m), $V$는 해당 차종의 평균 주행속도(km/h)이며, $N$은 시간당 차량통과대수이다. 모든 차종에 의한 도로 교통소음의 등가 음향출력레벨 $L_{WAeq}$은 다음과 같이 산정한다.

$$L_{WAeq} = 10\log_{10}\sum_i 10^{(L_{WAT})_i/10} \tag{5.3}$$

## 5.2 고속도로 교통소음의 전달감쇠 산정

KHTN은 ISO 9613 방법에 기초하여 고속도로로부터 수음점에 전달되는 동안의 소음감쇠량을 산정한다.

(1) 고속도로 교통소음 예측식

교통소음의 음향 발생 특성은 물론 음의 전달과정에서 발생하는 감쇠 특성도 주파수 대역별로 달라진다. KHTN에서는 고속도로 교통소음을 무지향성 소음원으로 간주하고, 전달경로상의 기하학적 확산에 의한 감쇠, 공기 흡음 효과, 지면 감쇠 효과, 회절 효과 및 반사 효과를 고려하여 특정 수음점에서의 중심주파수 63 Hz부터 8 kHz까지의 옥타브밴드별 등가 음압레벨 $L_{fT}$를 다음과 같이 산정한다.

$$L_{fT} = L_W - A_{div} - A_{atm} - A_{gr} - A_{bar} \quad (5.4)$$

여기서,

$L_W$ : 분할된 교통 소음원 또는 이의 경상 소음원(image source)에 대한 A-가중치 옥타브밴드 음향출력레벨 (dB ref = $10^{-12}$ W)

$A_{div}$ : 기하학적 확산 효과에 의한 감쇠

$A_{atm}$ : 공기 흡음에 의한 감쇠 효과

$A_{gr}$ : 지면에 의한 감쇠 효과

$A_{bar}$ : 구조물에 의한 회절 효과

수음점에서의 총합 A-가중치 등가 음압레벨 $L_{AT}$는 식 (5.4)에 의거해서 경상 소음원을 포함한 각각의 소음원에 대해 중심주파수 63 Hz부터 8 kHz까지의 1-옥타브밴드별 등가 음압을 산정한 후 다음과 같이 산정한다.

$$L_{AT} = 10\log\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{8} 10^{0.1(L_{fT})_{ij}}\right] \quad (5.5)$$

여기서,

$n$ : 경상 소음원을 포함한 소음원으로부터 수음점으로 전달되는 음의 전파 경로 개수

$j$ : 중심주파수 63 Hz부터 8 kHz 까지의 1-옥타브밴드를 나타내는 지수

(2) 도로 소음원 모델링

KHTN에서는 고속도로를 직선 또는 굴곡진 도로를 유한 직선 소음원을 이용해서 모델링한다. 이때, 각각의 직선도로에 대한 음향파워레벨 $L_{WAeq}$은 차선·차종별 교통량 및 평균주행속도를 이용해서 산정하거나, 사용자가 음향파워레벨을 별도로 지정한다. 한편, 도로는 대표적인 선소음원에 해당하나 기하학적 확산 효과를 제외한 잉여 감쇠 산정 방법의 대부분이 점소음원을 대상으로 하므로, KHTN에서는 한 개의 직선 소음원을 임의 개수로 분할하는 방법을 사용한다. 이때, $N$개로 분할된 도로의 각 분할 요소에 대한 음향파워레벨 $(L_{WAeq})_i$은 다음과 같이 산정한다.

$$(L_{WAeq})_i = L_{WAeq} - 10\log_{10}N \quad \text{dB} \quad (5.6)$$

고속으로 주행하는 차량으로부터 방사되는 소음은 타이어 소음이 지배적이므로, KHTN에서는 각 소음원이 분할된 도로의 길이 및 폭 방향 중심에 위치하는 것으로 간주하였으며, 유효 음향 방사 높이는 지면과 동일한 것으로 설정한다.

(3) 기하학적 확산 효과($A_{div}$)

ISO 9613 방법은 선소음원 또는 면소음원 등을 이산 점소음원의 집합체로 간주한다. 이때, 분할된 소음원의 중심에 위치하는 것으로 간주되는 점소음원에 의한 자유 음장에서의 기하학적 감쇠 효과는 다음과 같이 산정한다.

$$A_{div} = 20\log d + 11 \quad \text{dB} \quad (5.7)$$

여기서,

$d$ : 점소음원으로부터 수음점까지의 거리

상기 점소음원에 의한 기하학적 확산 효과 산정 방법은 소음 전파거리 $d$가 소음원의 최대 변의 크기보다 2배 이상인 경우에는 정확도가 보장되나, 소음원의 근접장에서는 오차가 크다. 따라서, 고속도로와 같이 소음원의 크기를 무시할 수 없는 경우 이들 소음원을 다수의 점소음원의 결합체로 반영하여야만 근접장에서의 계산 정확도를 향상시킬 수 있으나, 이는 연산 부담을 증가시킬 수 있다. KHTN에서는 적은 연산 부담으로 도로 인근 지역에 대한 소음 예측의 계산 정확도를 높이기 위해서 소음원의 기하학적 형상과 소음 전파거리를 고려하여 다음과 같이 기하학적 확산 효과를 산정한다.

$$d < \frac{b}{\pi} \ : \ A_{div} = 10\log\left(\frac{\pi}{4bl}\right) \ \text{dB} \tag{5.8a}$$

$$d > \frac{b}{\pi} \ : \ A_{div} = 10\log\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{d_o l}\right) + 11 \ \text{dB} \tag{5.8b}$$

여기서, $b$는 분할된 도로의 단변 길이(m)이며, $l$ 은 분할된 도로의 장변 길이(m)이다. $\theta_1$, $\theta_2$ 및 $d_o$의 정의는 그림 5.1에 나타낸 바와 같다. 상기 식 (5.8a)는 면 소음원, 식 (5.8b)는 선 소음원에 대한 기하학적 확산 효과 평가식에 해당하며, 식 (5.8b)는 소음 전파거리 $d$가 커질 경우, $\theta_2 - \theta_1 \approx (l/d_o)\cos\theta \approx l/d$ 과 같은 근사 관계식이 성립하므로, 소음원으로부터 원거리에서는 식 (5.7)에 나타낸 점 소음원의 기하학적 확산 효과 산정식과 같게 된다.

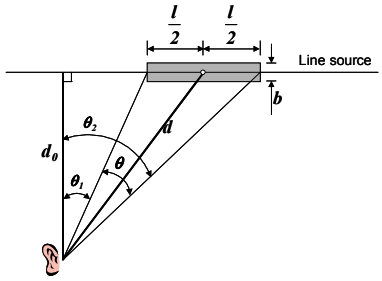
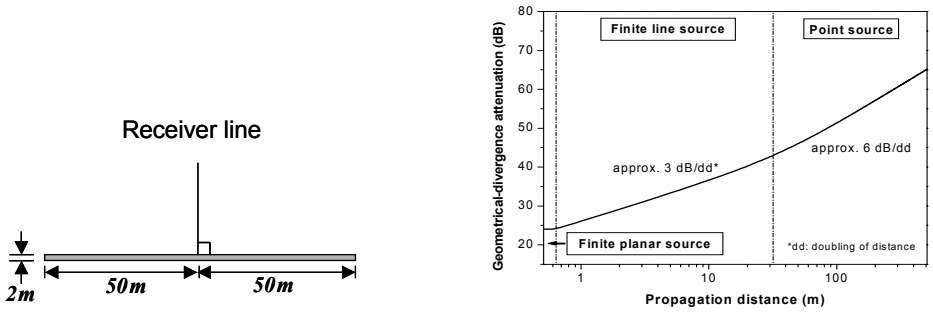



그림 5.1 유한 선 소음원의 기하학적 확산 효과를 계산하기 위한 부호 정의

소음원의 형상과 전파 거리별 거리 감쇠 효과에 대한 이해를 돕기 위하여 상기 방법에 의해 길이 100 m, 폭 2 m인 소음원을 한 개의 소음원으로 모델링한 경우의 기하학적 확산 효과 계산 결과를 그림 5.2에 나타내었다.

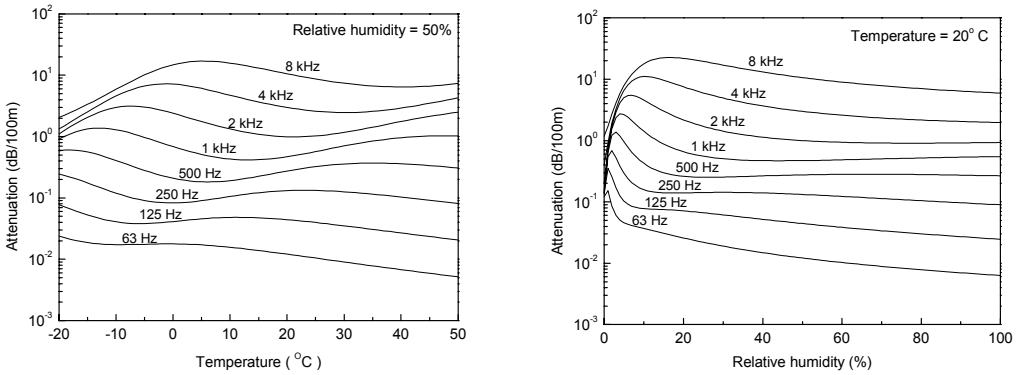



(a) 유한 선 소음원 (b) 기하학적 확산 감쇠

그림 5.2 단일 선 소음원 방법에 의한 기하학적 확산 감쇠 계산 예

(4) 공기 흡음 효과($A_{atm}$)

KHTN에서는 대기 온도, 습도 및 대기압에 따라 달라지는 옥타브밴드별 공기 흡음 효과를 ISO 9613-1 방법을 이용해서 산정한다. KHTN에 적용된 방법으로 공기 흡음 효과를 산정한 예를 그림 5.3에 나타내었다.




(a) 상대 습도: 50% (b) 대기 온도: 20℃

그림 5.3 100 m 소음전파시 공기 흡음 효과 산정 예

(5) 지면 감쇠 효과($A_{gr}$)

KHTN에서는 ISO 9613에 규정된 두 가지의 지면 감쇠 효과 평가방법 중 옥타브밴드별로 계산하는 방법을 적용한다. 이때, 소음원 영역, 수음점 영역 및 중간 영역에서의 음향학적으로 딱딱한 지면과 부드러운 지면의 구성비에 따라 달리 평가되는 지면 감쇠 효과 산정에 있어서 유효 음향방사 높이가 지면과 동일한 고속도로 소음원 영역은 항상 딱딱한 지면으로 간주하여 다음과 같이 지면 감쇠 효과를 산정한다.

$$A_{gr}=\begin{cases}-3M-3 & \text{at 63 Hz}\\ G_r A_r-3M(1-G_p)-3 & \text{at 125 Hz}\\ G_r B_r-3M(1-G_p)-3 & \text{at 250 Hz}\\ G_r C_r-3M(1-G_p)-3 & \text{at 500 Hz}\\ G_r D_r-3M(1-G_p)-3 & \text{at 1 kHz}\\ 1.5G_r-3M(1-G_p)-3 & \text{at 2~8 kHz}\end{cases} \tag{5.9}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
M &= 1-\frac{30h_r}{d_p} \;\geq\; 0\\
A_r &= 1.5+3.0\left\{1-\exp\left(\frac{-d_p}{50}\right)\right\}\exp\{-0.12(h_r-5)\}\\
&\quad +5.7\{1-\exp(-2.8\times10^{-6}d_p^2)\}\exp(-0.09h_r^2)\\
B_r &= 1.5+8.6\left\{1-\exp\left(\frac{-d_p}{50}\right)\right\}\exp(-0.09h_r^2)\\
C_r &= 1.5+14.0\left\{1-\exp\left(\frac{-d_p}{50}\right)\right\}\exp(-0.46h_r^2)\\
D_r &= 1.5+5.0\left\{1-\exp\left(\frac{-d_p}{50}\right)\right\}\exp(-0.9h_r^2)
\end{aligned} \tag{5.10}$$

$h_r$은 수음점의 높이(m), $d_p$는 지면에 투영된 소음원과 수음점간의 거리(m)이며, $G_r$ 및 $G_p$는 각각 수음점 영역 및 중간 영역 지면에서 음향학적으로 부드러운 지면이 차지하는 비율을 나타내는 지면계수이다.

KHTN에서는 각 수음점마다 사용자가 $G_r$ 및 $G_p$를 지정할 수 있다.

(6) 회절 효과( $A_{bar}$)

KHTN에서는 ISO 9613-2의 회절 효과 산정 방법을 적용하여 방음벽의 소음 저감 효과를 평가한다. 이때, 회절 경로는 방음벽 높이 방향은 물론 좌·우 측면 방향에 대해서도 고려한다. KHTN에서 방음벽의 개수 제한은 없으므로, 지형에 의한 회절 효과는 회절을 유발하는 지형부에 등가 높이를 갖는 방음벽을 모델링하여 고려할 수 있다.

회절 효과에 의한 소음 감쇠는 ISO 9613에서와 동일하게 단일 회절의 경우 20 dB, 이중 회절의 경우에는 25 dB로 제한한다. 한편, 소음원과 수음점 사이의 다수의 차음 구조물로 인해 3번 이상의 다중 회절 효과가 있는 경우에 대해서는 이들 중 가장 차음 효과가 큰 두 개의 회절 기준점을 선정하여 이중 회절로 평가하도록 규정하고 있다. 그러나, ISO 9613에서는 가장 효과가 큰 차음 구조물의 선정 기준을 제시하고 있지는 않으므로, KHTN에서는 그림 5.4와 같이 소음원 중심, 수음점 및 회절점으로 구성되는 삼각형들 중에서 소음원 및 수음점에서의 내각의 크기가 가장 큰 방음벽을 선택한다.

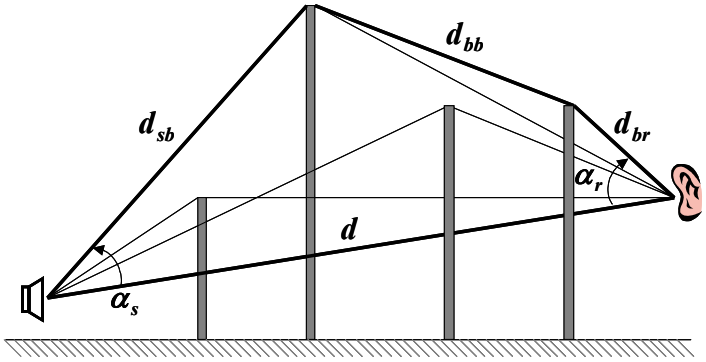
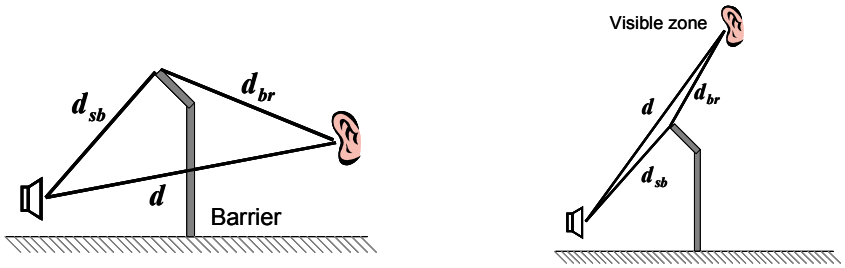


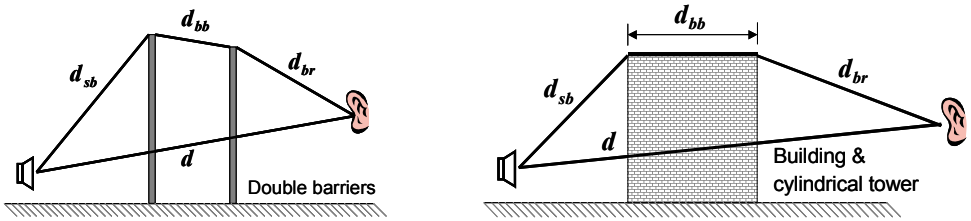

그림 5.4 차음 성능이 가장 높은 두 방음벽의 결정 방법

(7) 반사 효과( $A_{bar}$)

건물, 방음벽 등에 의한 반사 효과는 가상 음원을 이용하여 고려한다. 이때, 지면 반사 효과는 지면 감쇠 효과 산정에서 반영되므로 고려하지 않는다. 반사 효과는 면의 반사계수가 0.2보다 큰 경우에 대해서만 고려한다. 즉, 면의 흡음계수가 0.8 이상인 경우에는 반사효과가 없는 것으로 간주한다. 반사 효과를 고려하기 위한 가상음원의 위치는 광학에 있어서 입사각과 반사각이 같다는 Snell의 법칙을 적용하여 그림 5.6과 같이 결정한다. 또한, 특정 면이 반사 효과를 가지기 위해서는 면의 기하학적 크기가 파장보다 충분히 커야 한다는 다음 조건을 만족해야 한다.




(a) 단일 회절




(b) 이중 회절

그림 5.5 음의 단일 및 이중 회절경로 평가

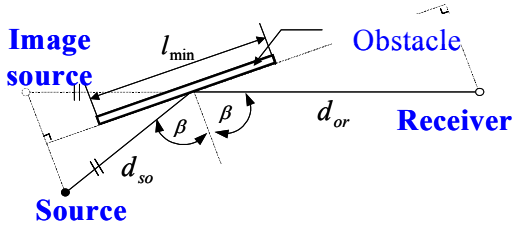



그림 5.6 가상 음원의 위치 결정

$$\frac{1}{\lambda} > \frac{2}{(l_{\min}\cos\beta)^2}\frac{d_{so}d_{or}}{d_{so}+d_{or}} \tag{5.11}$$

여기서,

$\lambda$ : 1-옥타브밴드 중심주파수에서의 파장( $m$)

$d_{so}$ : 음원과 면의 반사점까지의 거리( $m$)

$d_{\mathrm{or}}$ : 수음점과 면의 반사점까지의 거리( $m$)

$\beta$ : 소리의 입사각도(그림 5.12 참조)

$l_{\min}$: 반사면의 최소 크기(길이 또는 높이)

상기의 반사 조건을 만족할 경우 가상 음원의 음향출력레벨 $L_{W,im}$은 다음과 같이 결정된다.

$$L_{W,im} = L_W + 10\log\rho + D_{Ir}\ \mathrm{dB} \tag{5.12}$$

여기서, $\rho(\geq 0.2)$는 입사각이 $\beta$인 경우에 대한 면의 반사계수이고, $D_{Ir}$은 음원으로부터 반사점 방향으로의 방향성 지표이다.
KHTN에서는 ISO 9613의 경상 소음원을 이용한 반사 효과 산정 방법을 적용하되, 도로교통소음은 무지향성 소음이므로, 경상 소음원의 음향파워레벨 $L_{W,im}$을 다음과 같이 산정한다.

$$L_{W,im} = L_W + 10\log_{10}(1-\alpha_s)\ \mathrm{dB} \tag{5.13}$$

여기서, $L_W$는 분할된 도로 소음원의 음향파워레벨이며, $\alpha_s$는 반사면의 흡음률이다.

KHTN에서는 방음벽의 흡음률을 옥타브밴드별로 정의할 수 있다. 단, 반사차수는 1차까지만 고려가 가능하다.