

교통 시뮬레이션과 공간 모델링 기법을 적용한 실시간 소음 시뮬레이션 통합 모델에 대한 연구

The Study for the Realtime Noise Simulation Integration Model Applied to Traffic Simulation and Spatial Modeling

강 태 옥 Kang, Tae-Wook | 정희원 · 중앙대학교 사회기반시스템 공학부 공학박사 · 건설IT 소프트웨어 융합센터장 (E-mail : laputa99999@gmail.com)
 조 윤 호 Cho, Yoon-ho | 정희원 · 중앙대학교 사회기반시스템 공학부 공학박사 · 정교수 (E-mail : yhcho@cau.ac.kr)
 김 인 태 Kim, In-Tai | 정희원 · 명지대학교 교통공학부 교수 · 공학박사 (E-mail : kit1998@mju.ac.kr)

ABSTRACT

The noise prediction model, KRON-2006, in South Korea has been developed for obtaining the average noise level. The model is based on an outdoor sound propagation method based on ISO9613 and ASJ Model-1998 and supports the analysis of the linear noise source, such as highway, for obtaining L_{eq} . Because of that, the model can't obtain L_{max} , L_{min} from the time series noise profile based on traffic at every moment. In order to address this problem, the real time noise prediction model based on traffic simulation using GIS model and algorithm is proposed. It can predict the vehicle point noise level based on vehicle type, speed generated from traffic simulation by using headway and obtain L_{max} , L_{min} as integrating the noise profile generated from it at every moment. An evaluation of the noise prediction model using field measurements finds good agreement between predicted and measured noise levels at 1m, 8m, 15m from curb of the near side lane.

KEYWORDS

noise, L_{max} , analysis, simulation, assessment, traffic, 3D spatial indexing, noise map

요지

본 연구에서는 실시간으로 개별 차량에 대한 소음 예측 시뮬레이션을 통해 매 순간 소음지도와 L_{max} , L_{min} 등을 얻을 수 있는 소음 예측 모델을 제시하였다. GIS 지형처리 기법을 이용해 공간 모델 처리 기법을 바탕으로 실시간 교통소음예측 시스템 모델을 제안하고, 객체지향기법을 이용해 개발하였다. 실시간 소음 시뮬레이션 모델을 이용하여 교통 흐름의 변화에 따라 소음레벨, 소음지도 변화, L_{min} , L_{max} 값을 한눈에 파악하거나 비교할 수 있다. 현장에서 수행한 소음측정치와 예측치를 비교한 결과, 대부분 거리에서 L_{eq} 는 2~3dB, L_{max} 는 3~4dB 이내의 차이를 나타내어 소음예측의 신뢰성이 양호함을 확인할 수 있었다. 개발된 시스템을 이용해 민감도 분석을 수행한 결과, 대형차 비율, 차량 속도, 방음벽 높이에 따라 소음레벨의 차이를 보였고, 특히 방음벽 높이는 L_{eq} 나 L_{min} 보다 L_{max} 에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

핵심용어

교통소음, 실시간, 소음예측모델, 소음지도, L_{min} , L_{max}

1. 서론

소음은 환경적인 문제 중에 가장 시민들이 민감하게 반응하는 요소 중 하나다. 우리나라가 OECD에 가입하고, 점점 선진국화되면서 소음에 대한 민원은 점차 증가 추세에 있다. 교통소음의 증가와 국민생활 수준의 향상

은 환경 서비스 요구의 마찰로 인하여 소음에 관한 민원, 소송을 날로 증가시키고 있다. 환경부 분쟁조정사례에 따르면 1991~2000년까지 총 분쟁조정사례 401건 중 312건(78%)이 소음진동에 따른 문제였다. 환경부의 2001년 조사에서 대기, 수질 등 다른 오염에 비해 소음

/진동으로 인한 피해진정은 5,723건으로 전체 진정건수의 75%에 해당되며, 피해분쟁 조정건수 또한 90%에 육박하고 있다(서금렬, 2004).

소음 문제 해결책을 찾기 위해 예측 시스템의 활용도는 높아가고 있으나, 아직 대부분의 교통 소음 예측 시스템은 교통 시뮬레이션은 배제된 채 도로의 차량들 선소음원이라 가정하고, 특정 시간의 교통량을 입력함으로써 1시간 Leq (등가소음레벨)를 예측하고 소음지도를 생성하고 있다. 도로에서 운행되는 차량의 분포에 따라 실시간으로 소음분포가 달라지므로 평균값으로 소음을 예측하고 있는 것이다. 이미 소음 분쟁에서 L_{max} 를 사용하는 경우가 점점 많아지고 있으나, Leq 가 아닌 L_{max} 를 사용하는 것은 어렵다. 매 순간마다 소음이 교통량에 따라 어떻게 달라지는지 보고 싶을 때는 기존의 시스템으로는 이런 값을 얻을 수 있는 방법이 없다. 현재 널리 사용되고 있는 소음 해석 시스템인 CADNA-A(DataKustik), SoundPLAN(Braunstein & Berndt, 1999), TNoiseGIS(Pamanikabud & Tansatcha, 2003)과 같은 몇몇 상업용 패키지는 대규모 지역에 소음 예측을 할 수 있다. 이 시스템은 1988년도에 발표된 CRTN(Calculation of Road Traffic Noise)과 FHWA(Federal Highway Administration)에서 연구된 TNM(Traffic Noise Model)등을 기반으로 소음을 예측한다. 이러한 시스템은 외국에서 개발되어 국내 차량 음향파워 산정식을 반영하지 못하고 있으며(Bhaskar, 2004), 음향파워레벨이 현재 자동차 기술을 반영하지 못하고 있고, 무엇보다도 실시간 교통 소음 시뮬레이션을 할 수 없으므로 L_{max} 값을 평가할 수 없다.

만약 교통 시뮬레이션에 근거한 실시간 소음 시뮬레이션을 소음 예측 시 적용한다면 Leq 뿐만 아니라, L_{max} , L_{min} 등의 값을 이용해 소음저감대책에 좋은 참고자료나 기준으로 활용할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 교통 소음에 대한 예측을 위해서는 특정 시간대뿐만 아니라 실시간으로 개별 차량에 대한 소음 예측 시뮬레이션을 통해 매 순간 소음지도와 L_{max} , L_{min} 등을 얻을 수 있는 교통 시뮬레이션과 소음 예측 모델이 통합된 실시간 소음 시뮬레이션 통합 모델을 제시하였다. 아울러 소음 시스템의 편의성을 높이기 위해 대용량 지형도를 직접 입력 받아 3차원 공간 모델을 자동으로 생성할 수 있도록 실시간 교통 소음 시뮬레이션 시스템을 개발하였다.

2. 공간객체 모델링과 실시간 교통 소음 예측 모델

2.1. 공간객체 모델링과 인덱싱

소음 지도에 필요한 공간 객체 모델링의 편의성을 위해 국립지리원에서 제공하는 지형도를 직접 활용한다. 지형도는 DXF 포맷으로 그림 1과 같이 등고선, 표고점, 건물영역등이 도면층(Layer) 개념으로 지형정보가 분리되어 있으며, 도면층에는 Z값이 포함된 연결선(POLYLINE) 도형 형태의 등고선 정보와 축점이 Z값을 포함하고 있다. 연결선은 정점(VERTEX)을 포함한 형태의 배열이고, 각 정점은 X, Y, Z값을 포함하고 있다. 폐합된 연결선 형태로 건물영역이 표현되어 있어, 이를 이용해 구조물 3차원 모형을 생성할 수 있다. 다만, 건물의 높이 값이 포함되어 있지 않은 이유로 Z값은 따로 입력 받도록 해야 한다. 본 연구에서는 지형도에서 공간 모델을 생성하기 위해 필요한 3차원 점(POINT)를 추출할 때, 범용 캐드 엔진인 AUTOCAD의 ObjectARX 기술을 이용해 이러한 도형정보를 직접적으로 얻어, 자동으로 3차원 공간모형을 생성한다.

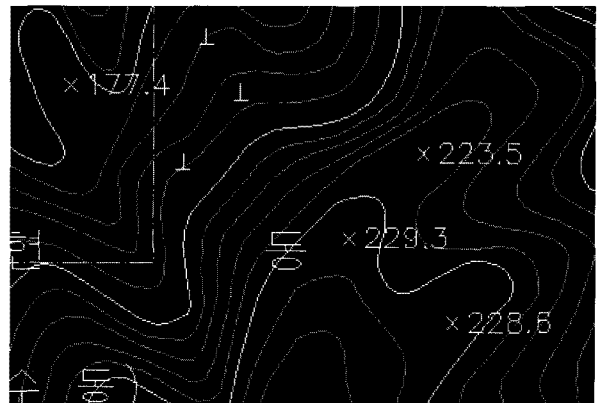


그림 1. 지형도(NGIS)

이를 위해 손쉽게 공간모형을 생성할 수 있도록 직접 X, Y, Z값을 입력하는 방식이 아닌, 범용 캐드인 AUTOCAD의 ObjectARX 기술을 이용해 국립지리원에서 직접 얻은 지형도를 해석해 별도의 변환없이 바로 지형모형을 생성할 수 있도록 하였다. 지형도에는 등고선뿐만 아니라 도로의 계획도 까지도 표시되므로, 이를 소음원의 높이 값으로 사용하도록 하였다.

공간 인덱싱 모델은 쿼드 트리(Quad Tree)기법을 사용한다. 쿼드 트리는 공간 객체의 동적 삽입, 삭제가 없을 경우 다른 인덱싱 모델에 비해 뛰어난 성능을 가지고 있다. 본 연구에서는 최초 해석 영역이 불변이며, 많은 검색이 발생되므로 넓은 지역에 대한 소음지도 생성을 위해 쿼드 트리를 사용한다.

2.2. 교통 시뮬레이션 모델

본 논문에서는 도시고속도로에 해당하는 연속류 구간에 있어 각 개별 차량별 흐름과 상황을 표현할 수 있는 미시적인 교통류 시뮬레이션 모형을 대기행렬 기법을 이용해 개발하기로 한다. 대기행렬 기법을 이용하기 때문에 각 선소음원이 되는 한 차로에 대해 미시적인 교통 시뮬레이션을 수행할 수 있고, 이를 통해 소음파워식에 입력되는 차종별 교통량과 평균속도를 실시간으로 얻을 수 있다. 차종별 차량 발생 순서를 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우를 분리해 각각 필요한 자료를 사용해 시뮬레이션하도록 하여, 예측된 소음 차이를 비교해 볼 수 있도록 하였다. 개발된 교통 시뮬레이션 모델은 대기행렬에서 매 초마다 개별 차량 흐름 자료를 출력하여 그 모습을 그래픽적으로 확인할 수 있다. 실제 교통량과 교통 시뮬레이션 결과가 얼마나 차이를 보이는지 보기 위해, 경춘국도(3번 국도)에서 이천방향으로 2.2km지점에서 교통량을 측정해 검증하였다. 대부분의 시간대에서 포아송분포 차량발생모델에 따라 랜덤(random)하게 측정값과 2~28% 정도의 차이를 보이고 있음을 확인하였다.

2.3. 교통 소음 시뮬레이션 모델

기존의 교통 소음 예측 모델은 교통 소음을 선음원으로 취급해 소음 L_{eq} 를 예측하므로, 실제 교통흐름에 따른 소음의 분포나 변화 및 최대소음도 등을 얻을 수가 없다.

실시간 차량의 소음발생에 대한 영향은 ASJ RTN-Model 2003에서 제안한 시간적분 모델을 개선해 차량 한대 당 음향출력레벨로 변환하여 사용한다. KRON-2006에서는 최근의 차종에 대한 음향출력레벨 산정식이 연구되었으나 중형차는 제외되어 있어 2차종 분류에 의한 산정식이 포함되어 있지 않으므로, ASJ RTN-Model 2003의 차종구분에 따른 음향출력레벨 산정식을 참고해 소형차, 대형차에 해당하는 산정식을 개선해 적용하기로 한다. 소음해석이 끝나면 그 결과를 TIN과 유사한 3차원 소음수치 모델형태로 저장해 소음지도 생성의 편의성 및 속도개선을 고려하였다. 선소음원을 점 소음원으로 이산화해서 적분하는 모델은 ASJ Model-1998을 사용하며, 각 소음원에서 수음원까지의 소음 감소 모델은 ISO 9613을 이용한다. KRON-2006에서 소음감쇠는 ISO 9613과 ASJ Model-1998에 의해 해석된다. 본 연구에서 제안하는 소음 예측 모델은 그림 2와 같다.

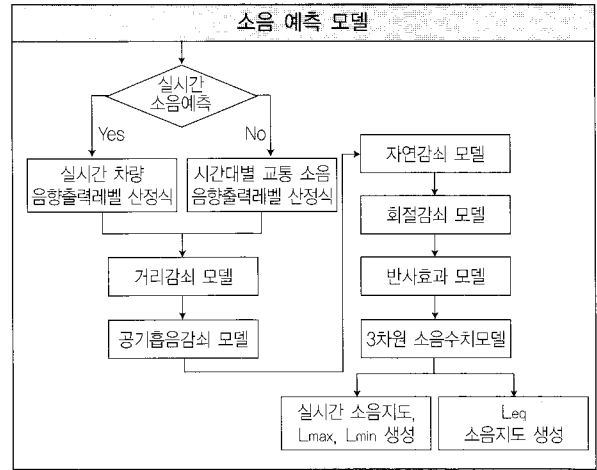


그림 2. 제안된 소음 예측 모델

교통 시뮬레이션을 통한 실시간 소음 예측을 통해 L_{max} , L_{min} 과 같은 값을 얻는 것을 목적으로 하므로 교통 시뮬레이션과 실시간 소음 예측 모델을 통합시켜야 한다. 그림 3은 본 연구에서 제안하는 교통소음예측 통합 시스템 모델이다. 여기에 포함된 3차원 공간 모델링, 교통 시뮬레이션 모델, 소음 해석 모델은 앞에서 제안한 모델을 적용한다. 본 연구에서는 3차원 공간 모델, 교통 시뮬레이션 모델, 실시간 소음예측 모델이 개별적으로 재활용될 수 있도록 모듈을 크게 이 세 부분으로 나누고, 이 셋 사이의 정보 교환은 XML 형식의 데이터 베이스나 DTM(수치지형모델)을 이용하도록 한다.

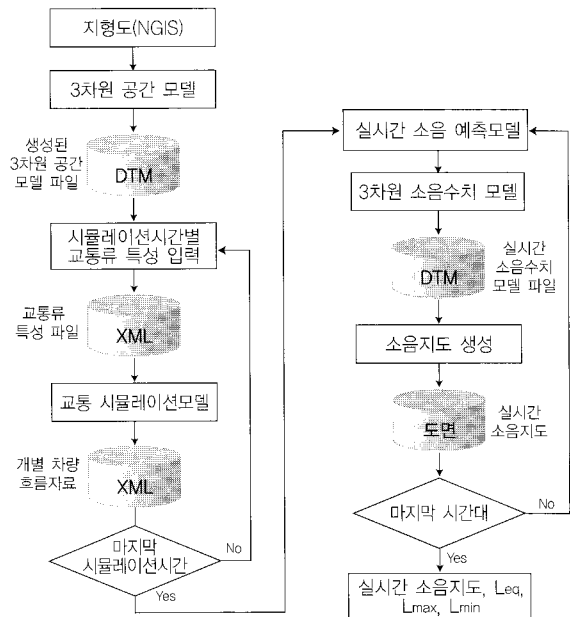


그림 3. 실시간 교통소음예측 시스템 통합 모델

2.3.1. 차량 음향출력레벨 산정식

소음원의 음향발생 특성은 물론 음의 전달과정에서

발생하는 감쇠특성도 주파수 대역별로 달라진다. 이에 ISO 9613에서는 특정 수음점에서의 소음을 중심주파수 63Hz부터 8kHz까지의 1/1옥타브밴드별 등가 음압레벨 L_p 를 각각을 대수 합하여 수음점의 총합 A-가중치 음압레벨을 산정한다.

음향출력레벨은 보통 아래와 같은 식으로 나타낸다.

$$L_w = A + B \log_{10}(V) \quad (1)$$

A, B : 음향파워계수

V : 차량평균속도

음원의 종류에 따라 A, B의 계수값이 다르다. KRON-2006에서는 개선된 CPX와 Pass-by방식으로 포장노면별로 10km/h단위로 차량을 주행시켜 발생되는 1/1옥타브별 음향파워 최대값을 얻은 후, 회귀분석을 통해 A, B값을 도출하였다. 이 산정식에 ASJ RTN-Model 2003의 차종구분에 따른 음향출력레벨 산정식 차이 값을 이용해, KRON-2006의 승용차와 중형차를 기준으로 소형차, 대형차에 해당하는 산정식을 개선해 적용하였다.

2.3.2. 실시간 차량 음향출력레벨 모델

소음원은 기하학적 분할을 통해 유한개의 분할 소음원의 총합으로 나타낼 수 있다. 실시간 소음을 해석하기 위해서는 선소음원으로 해석할 수 없으므로 선소음원을 개별 차량 한대가 발생하는 순간 소음원으로 해석해야 한다. 그림 4는 점소음원과 선소음원의 차이를 보여준다.

이를 위해 그림 5와 같이 도로에 차량 한대가 지나가고 있으며, 이 소음이 수음점에 전달되고 있는 상황을 가정한다(Shinichi 등, 2004). 먼저 도로는 여러 개의 구간으로 나누어 질 수 있다. 여기서 Δl_i 는 i 번째 구간 길이(m)이며, v_i 은 i 번째 구간에서 차량의 운행 속도(m/s)이며, 이때 발생한 A가중치 소음 음압을 $P_{A,i} [N/m^2 = Pa]$ 라 한다.

수음점에서 얻은 음압 레벨 패턴은 시간이 지나면서 그림 5의 우측 그래프 같은 형태를 가지게 된다. 위의 음압 레벨을 모두 시간 적분하면 수음점에서의 전체 소음도를 구할 수 있다. 먼저 음압을 소리의 세기(dB)로 변환할 수 있도록 수음점에서 A가중치 음압 레벨 $P_{A,i}^2$ 를 정의한다. 참고로 $E_{A,i}$ 를 음압레벨(dB)로 표현

할 때 소리세기레벨 공식에 의해 식 (2)와 같은 관계가 있다.

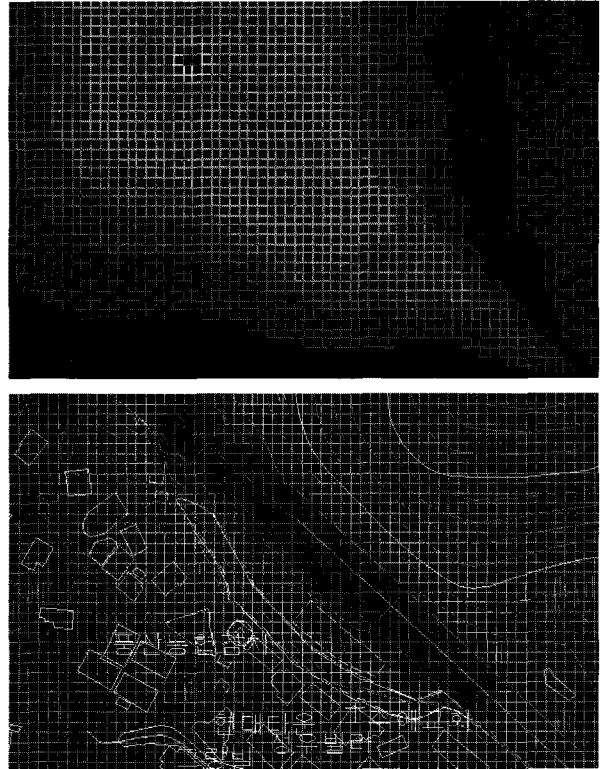


그림 4. 개별 점소음원과 선소음원의 소음지도 차이

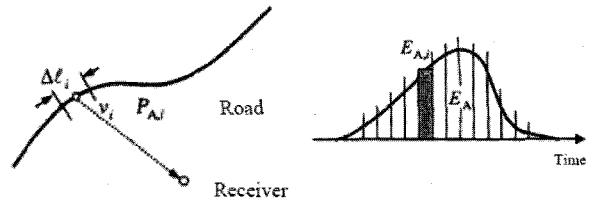


그림 5. Sound propagation from the source to the receiver and Unit pattern

$$IL = 10 \log \frac{(P/\rho C)^2}{(P_0/\rho C)^2} = 10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right)^2 = SPL(dB) \quad (2)$$

여기서, $P_0 = 2 \times 10^{-5} Pa^2s$, ρ =매질밀도(kg/m³), C =매질 내 음의 속도(m/s)이다.

이때 음향이 존재하고 있는 시간구간 Δt 를 정의하면, A가중치 에너지 출력치 $E_{A,i} [Pa^2s]$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$E_{A,i} = P_{A,i}^2 \cdot \Delta t_i = P_{A,i}^2 \frac{\Delta l_i}{v_i} \quad (3)$$

전체 시간 적분치는 위의 각 구간을 모두 합한 값이므로 식 (4)와 같다.

$$E_A = \sum_i E_{A,i} = \sum_i p_{A,i}^2 \Delta t_i = \sum_i p_{A,i}^2 \frac{\Delta l_i}{V_i} = \sum_i p_{A,i}^2 \frac{3.6 \Delta l_i}{V_i} \quad (4)$$

여기서, V_i 는 i 번째 구간의 차량 속도(km/h)이다($v_i = V_i/3.6$).

그러므로 i 세그먼트에서의 소음출력레벨(dB)은 다음과 같다.

$$L_{A,i} = 10 \log_{10} \frac{E_{A,i}}{E_0} \quad (5)$$

하나의 차량 발생에 대한 시간 적분 소음 출력 레벨 L_{AE} dB은 $L_{A,i}$ 에 대한 Log sum이므로 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$L_{AE} = 10 \log_{10} \frac{E_A}{E_0} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T_0} \sum_i 10^{L_{A,i}/10} \cdot \Delta t_i \right) \quad (6)$$

이 때 $E_0 = 4 \times 10^{-10} Pa^2s$ (표준 음향 출력), $T_0 = 1s$ (표준 시간)이다.

차량이 도로를 주행하는 시간 동안 발생된 소음의 합은 선소음원을 점소음원으로 이산화시켜 거리감쇠 등을 거쳐 합산되므로 최대 소음이 발생된 Δt 만 고려하면 차량 한대가 발생하는 최대 소음 레벨을 구할 수 있다. 그러므로 최대 소음 출력 레벨 $L_{A,max}$ 만 가정한다. 본문에서 제안한 음향출력레벨 산정식은 KRON-2006에서 Pass-by로 측정된 순간 최대 소음도를 기준으로 산출되었으므로 $L_{A,max} = L_{WA}$ 이며, 위 식은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$L_{A,max} = 10 \log_{10}(10^{L_{A,max}/10} \cdot \Delta t) = L_{A,max} + 10 \log_{10} \left(\frac{3.6 \Delta l}{V} \right) = L_{WA} + 10 \log_{10} \left(\frac{3.6 \Delta l}{V} \right) \quad (7)$$

여기서 Δl_i 은 순간 최대 소음도와 관련된 값이며, 최대 소음이 발생하는 순간에서 소음원의 기하학적 크기와 관계가 있으므로, 차량에서 주 소음이 발생하는 곳인 차축과 차축의 거리로 볼 수 있다. 이를 이용해 차량 한대 당 소음 출력 레벨을 얻는다. 교통 시뮬레이션을 이용하면, 이 모델을 통해 차량이 도로에서 주행될 때마다 실시간으로 소음 레벨을 표현할 수 있어, L_{eq} 뿐만 아니라 시간의 흐름에 따른 소음 변화와 최대 소음도 L_{max} 및 최소 소음도 L_{min} 을 구할 수 있다.

2.3.3. 소음 감쇄 모델

상기 점소음원에 의한 기하학적 확산 효과 산정 방법

은 소음 전파거리 d 가 소음원의 최대 변의 크기보다 2배 이상인 경우에는 정확도가 보장되나, 소음원의 근접장에서는 오차가 크므로 KHTN에서 적용된 방식을 사용하였다(문성호 등, 2006). 대기 온도, 습도 및 대기압에 따라 달라지는 옥타브밴드별 공기 흡음 효과 및 회절 효과 등 각종 감쇠효과는 ISO 9613-1, 9613-2 방법을 이용해서 산정한다.

음선의 회절 현상을 3차원적으로 모델링하기 위해서, 음선과 교차하는 구조물들 최상단 지점의 최외곽 볼록 다각형(Convex Hull)을 구해야 한다. 이를 위해 Graham Scan을 사용하였다(Graham, 1972).

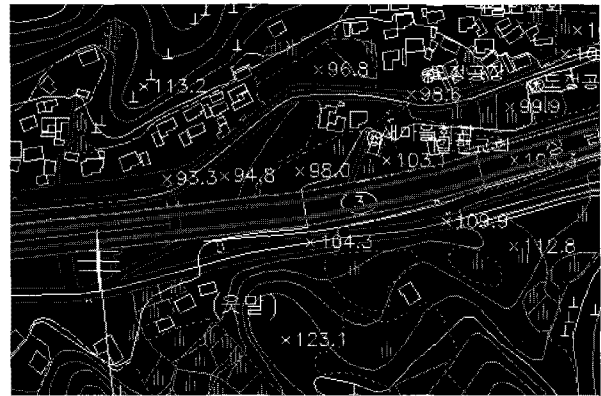


그림 6(a). 지형도

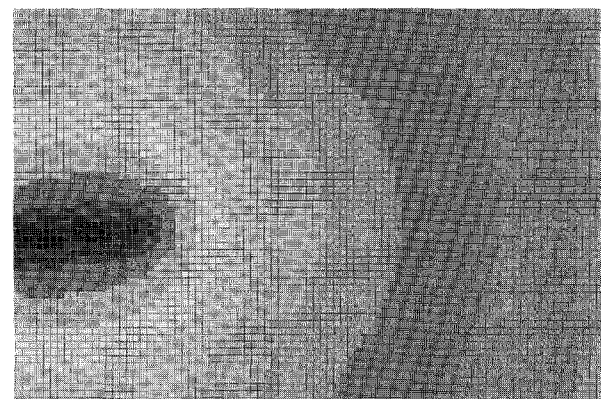


그림 6(b). 지형에 의한 회절효과 고려안했을 때 소음지도

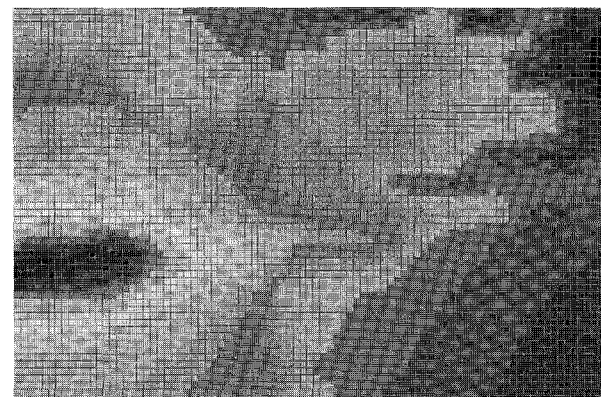


그림 6(c). 지형에 의한 회절효과 고려했을 때 소음지도

그림 6에서 보는 바와 같이 지형 모델이 없을 시에 소음원에서 거의 등심원처럼 소음이 퍼져 나가나, 지형에 의한 회절을 고려하면 계곡에 따라 상대적으로 표고가 낮은 주택지로 소음이 전파되는 것을 확인할 수 있다.

3. 모델 평가

실시간 소음예측 모델의 유용성을 보기 위해, 측정된 자료를 이용해 실시간으로 예측된 소음도를 비교해 보았다. 예측 시 교통 시뮬레이션을 통해 실제 차량발생 순서를 고려했을 때와 고려하지 않았을 때로 구분해 비교하였다. 또한, 실시간 예측 소음분도 뿐만 아니라 CADNA-A를 통한 예측치도 같이 비교해 보았다. CADNA-A수행 시 방음벽, 지형효과를 고려하였다. 측정장소는 성남광주산업도로에 '웃말'과 '새마을 회관'에서 각각 2번 측정하였고, 측정시간은 오전 10시 21분, 10시 31분, 11시 51분, 11시 58분이며, 5분간 측정하였다.

모든 지점에 대한 표준편차는 표 1와 같다. 측정번호는 성남광주산업도로의 '웃말' 오전 10시 21분, 10시 31분과 '새마을 회관'에서 11시 51분, 11시 58분에 측정된 순서를 의미한다. 1m지점에서는 대부분 Lmax가 3.5dB 이내에 들어간다. Leq는 1.6dB이내로 대부분 비슷한 결과를 보였다.

표 1. 실측치와 예측치의 표준편차

측정 번호	Leq			Lmax			Lmin		
	1m	8m	15m	1m	8m	15m	1m	8m	15m
1	-1.0	-0.3	1.1	-0.9	-1.0	-2.9	1.2	1.5	-2.9
2	-0.2	0.0	1.0	-6.2	-8.6	-9.5	0.9	1.4	0.7
3	-1.2	1.0	2.5	-1.6	-0.5	1.3	1.8	5.9	6.2
4	-1.4	0.2	1.1	-2.8	0.6	-7.0	3.3	6.3	7.5
편차	1.1	0.5	1.6	3.5	4.3	6.1	2.0	4.4	5.1

측정 번호	CADNA (Leq)			ENPRO-2006 (Leq)		
	1m	8m	15m	1m	8m	15m
1	0.9	2.1	3.2	-4.2	-2.4	-0.9
2	1.9	2.8	3.5	-4.2	-2.8	-0.7
3	2.9	6.5	7.5	-4.2	0.9	3.3
4	3.3	6.8	7.2	-3.8	0.2	2.0
편차	2.4	5.0	5.7	4.1	1.9	2.0

결과를 보면 Lmax는 교통 시뮬레이션을 통한 소음 예측 결과치와 측정치의 표준편차가 1m지점에서 3~4dB 이하였으며, 교통 시뮬레이션을 통해 소음예측

을 하더라도 큰 차이가 나지 않으므로, 실시간 소음 예측 시뮬레이션 통합 모델을 통한 교통소음예측 시 편의성과 유용성이 크다고 판단된다. 차량발생 순서를 고려할 때 예측치와 고려하지 않을 때 예측치를 비교해 보면 Lmax, Leq와 같은 값은 큰 차이가 나지 않았으나 시간에 따른 소음 프로파일은 큰 차이를 보였고, 차량발생 순서를 고려한 소음 프로파일은 좀 더 측정된 프로파일에 근접된 경향을 보였다. 이런 결과로 미루어 보아 소음 프로파일은 차종을 더욱 세분화한다면 실제 소음 프로파일과 더욱 근접될 것이라 판단된다. 다만, 소음 측정 시 현장상황을 통제할 수 없어 특이하게 수치가 크게 나온 부분도 있음을 밝힌다. 소음 측정시 엠블런스와 같이 큰 소음원을 가지고 있는 객체가 갑자기 발생된 순간에는 그 때의 소음 시뮬레이션 결과와 차이가 날 수 있고, 실시간 소음예측에 민감한 영향을 줄 수 있다. 또한, 암소음에 대해 고려하지 않아서 차량 시뮬레이션이 한 대도 없는 경우가 10초 이상 진행되었을 때 Lmin이 너무 낮게 평가되는 문제가 있었다. 이 부분은 앞으로 개선의 여지가 있다고 판단된다.

아래 표와 그래프는 '성남광주산업도로'의 '웃말'에서 10시 21분에 측정된 측정치와 소음 시뮬레이션 결과이다.

표 2. 교통 시뮬레이션을 통한 실시간 소음예측 결과 (웃말 1미터 지점)

비교항목	1M	차이값	8M	차이값	15M	차이값
측정된 Leq	80.2		76.4		72.9	
측정된 Lmax	87.5		82.4		81.6	
측정된 Lmin	69.6		67.4		64.3	
시뮬레이션 Leq	79.2	-1.0	76.1	-0.3	74.0	1.1
시뮬레이션 Lmax	86.6	-0.9	81.4	-1.0	78.7	-2.9
시뮬레이션 Lmin	70.8	1.2	68.9	1.5	67.1	2.8
CADNA 예측치	81.1	0.9	78.5	2.1	76.1	3.2
KRON-2006	76.0	-4.2	74.0	-2.4	72.0	-0.9

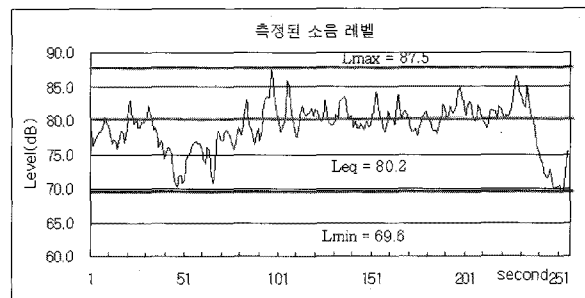


그림 7. 측정치(웃말 1미터 지점)

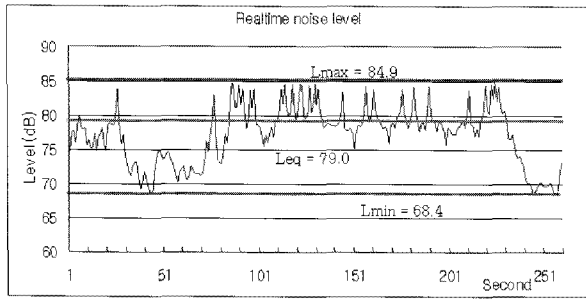


그림 8(a). 교통 시뮬레이션에서 차량 순서를 고려했을 때 실시간 소음예측 결과(웃말 1미터 지점)

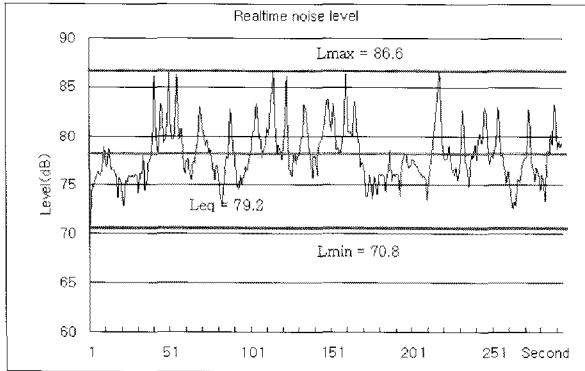


그림 8(b). 교통 시뮬레이션에서 차량 순서를 고려안했을 때 실시간 소음예측 결과(웃말 1미터 지점)

그림 9(a)는 CADNA-A에서 생성된 소음지도로 선 소음원의 특성으로 인해 실시간 차량의 분포에 따른 소음지도를 표현해 주지 못하는 한계가 있음을 알 수 있다. 그림 9(b)는 매초 별로 자동 생성된 전체 소음지도로 이를 통해 차량이 발생되면서 달라지는 소음지도의 변화를 볼 수 있음을 알 수 있다. 또한 지형 및 구조물 등을 고려한 소음의 피폭 영역을 직관적으로 파악하고 비교해 볼 수 있음을 알 수 있다.

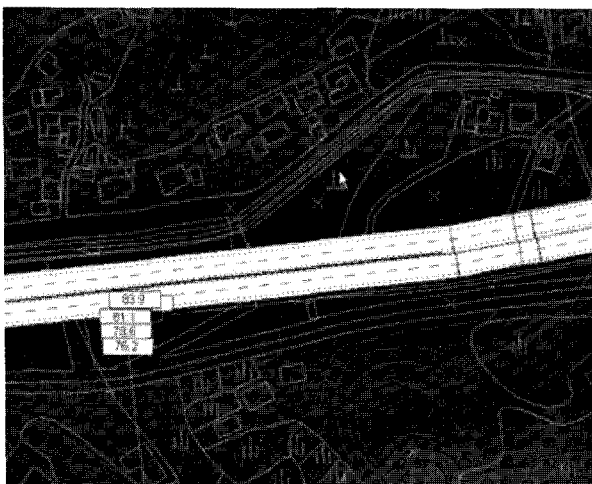


그림 9(a). CADNA-A 소음지도(웃말)

<그림 계속>

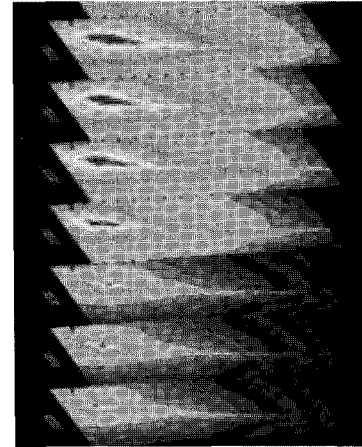


그림 9(b). 본 연구에서 제안된 실시간 소음예측에 의해 생성된 소음지도(호법JC)

4. 모델 민감도 분석

소음 예측 모델에 대한 민감도를 평가해 보기 위해, 아래와 같은 모델에서 입력의 변화에 따라 Leq , $Lmax$, $Lmin$ 값이 얼마나 달라지는 지 소음원에 영향을 미치는 대형차 비율, 차량 속도, 방음벽 설치 높이에 따른 차이, 방음벽 물성에 따른 차이를 민감도 분석하여 확인해 보았다. 민감도 분석 시 소음해석 조건은 표 3과 같다.

표 3. 민감도 분석 시 소음해석 조건

항 목	값
온도	20도
습도	60%
기압	101.33Kpa
소음원	선소음원 상행선, 하행선 각각 200m로 모델링 함.
수음점	지반으로부터 1m 높이
지형모델 크기(m)	470×410

방음벽 설치 높이에 따른 민감도를 보기 위해 표 4와 같이 2m간격으로 방음벽을 설치해 소음 시뮬레이션을 해 보았다. 방음벽은 일반 콘크리트 블럭이라고 가정해 흡음율과 투과손실을 설정하였으며, 200m 길이로 설계하여 직접 감쇠치를 고려하였다. 수음점은 각 거리별로 1m 높이에 설치하였다.

표 5 결과에서 보는 바와 같이 방음벽은 Leq 나 $Lmin$ 보다 $Lmax$ 에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있고, 방음벽의 높이가 어느 수준이상이면 방음효과가 크게 좋아지지 않는 것으로 나타나 이를 고려한 방음벽 설계가 합리적이라 판단된다.

표 4. 방음벽 높이에 따른 소음 레벨

방음벽높이(m)	거리(m)	1	8	15
0	Leq	82.0	79.0	77.5
	Lmax	89.0	85.2	83.4
	Lmin	74.9	72.7	71.4
2	Leq	78.3	75.0	72.8
	Lmax	82.8	79.6	77.2
	Lmin	71.8	67.7	65.0
4	Leq	77.9	74.3	72.0
	Lmax	82.4	78.9	76.5
	Lmin	71.0	66.0	63.2
6	Leq	77.9	74.2	71.8
	Lmax	82.3	78.7	76.3
	Lmin	70.9	65.6	62.7

표 5. 차량속도에 따른 소음 레벨 차이(1m 지점)

소음 평가단위	방음벽 높이(m)	소음레벨(dB)	차이(dB)
Lmax	0	89.0	-6.2
	2	82.8	-0.4
	4	82.4	-0.1
	6	82.3	-
Lmin	0	74.9	-3.1
	2	71.8	-0.8
	4	71.0	-0.1
	6	70.9	-
Leq	0	82.0	-3.7
	2	78.3	-0.4
	4	77.9	0.0
	6	77.9	-

5. 결론

본 연구에서는 교통 시뮬레이션을 기반으로 넓은 규모의 공간 모델 처리기법을 바탕으로 실시간 소음 예측 시뮬레이션 모델을 제안하고 이를 이용해 Lmin, Lmax와 같은 값을 효과적으로 얻을 수 있음을 보였다. Headway를 이용한 교통 시뮬레이션을 통해 교통류 특성을 얻고, 이 특성을 KRON-2006에서 적용된 소음 예측 모형에 입력하도록 하였다. 지형도에서 수치지형을 쉽게 처리할 수 있도록 델라우니 삼각화 기법을 적용하였고, 공간 모델을 효과적으로 표현할 수 있는 자료 구조를 제시하였다. 또한 지형 삼각망 및 공간 모델의 탐색 성능을 높이기 위해 쿼드 트리 공간인덱스 기법을 적용하였다. 또한 소음 모델에서 소음지도 생성시 3차

원 소음수치모형을 먼저 생성하여, 소음지도 생성시 편의성과 정확도를 개선하였다. 마지막으로 교통 시뮬레이션과 소음 예측 시뮬레이션 모델을 통합한 모델을 제안하여 구현해 봄으로써 실시간 차량 소음 발생이 적용된 소음지도와 Lmax, Lmin을 생성해 보았다. 또한 각 소음모델에 대한 민감도 분석을 위해 감쇠모델별로 입력값의 차이를 두어 해석해 보았다.

연구 결과로 실시간 소음 시뮬레이션 모델을 이용하여 시간의 흐름에 변화, 즉 소음레벨, 소음지도 변화, Lmin, Lmax값을 유의한 정확도 하에 직관적으로 한눈에 파악하거나 비교할 수 있었다. 측정 장소에서 수행한 소음예측 결과와 계측결과를 비교한 결과, 대부분 거리에서 Leq는 2~3dB, Lmax는 3~4dB 이내의 차이를 나타내어 소음예측의 신뢰성이 양호함을 확인할 수 있었다. 개발된 시스템을 이용해 민감도 분석을 수행한 결과, 대형차 비율, 차량 속도, 방음벽 높이에 따라 소음레벨의 차이를 보였고, 특히 방음벽 높이는 Leq나 Lmin보다 Lmax에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 그러므로 개발된 모델을 이용한다면 최근 많은 사회 문제 화되고 있는 교통 소음 이슈에 대한 소음저감기준을 Lmax, Lmin, Leq등 다양한 방식으로 설정하고, 공학적으로 정량화하고 분석할 수 있다고 판단되며, U-City와 같은 도시 기반 서비스에도 시민에 소음과 같은 환경정보를 제공함으로써 유용하게 활용될 수 있다고 판단된다. 다만, 현실적으로 소음 시험 장비 및 인원의 부족 문제 때문에 수행하지 못한 부분이 있다. 향후 다음과 같은 연구가 필요하다고 판단된다.

1. 도시 교통소음예측을 위해 거시적 교통 시뮬레이션 모델을 연구해 적용해 볼 필요가 있다. 또한 교통 시뮬레이션 차량 발생 모델이 교통류 특성에 따라 다르게 적용될 필요가 있다. 이에 대한 연구가 필요하다.
2. 좀 더 통제된 환경하에서 많은 시험을 통해 본 시스템에서 사용된 각 감쇠모델에 대한 세부 검증과 개선이 필요하다. 또한 지반 감쇠 G 계수와 같은 각종 소음 감쇠 계수에 대한 정확도 판단을 위해 다양한 환경에서 방음벽, 건물, 아파트 등에 대해 실제 계측된 소음과 시스템에서 예측된 소음간의 비교 평가 및 모델 개선이 필요하다.
3. 소음 비용에 대한 객관적인 평가를 위해 통합 모델과 연계한 연구가 필요하다.
4. U-City와 같은 유비쿼터스 도시 기반 시스템에서

환경정보 서비스를 실시간 웹서비스로 제공해, 서비스의 효율성을 평가해 볼 필요가 있다.

참고 문헌

문성호 등 (2006), 고속도로 포장노면과 타이어간의 마찰음 분석 및 평가기법 연구, 도로교통기술원

서금렬(2004), 교통소음이 고층아파트에 미치는 영향 연구, 석사학위논문, 전남대학교

Shinichi Sakmoto, Akinori Fukushima, Kohei Yamamoto (2004), Road Traffic Noise Prediction Model ASJ RTN-Model 2003, *Acoustical Science and Technology*.

Graham, R.L.(1972) An Efficient Algorithm for Determining the Convex Hull of a Finite Planar Set, *Information Processing Letters 1*.

Ashish Bhaskar, Edward chung, Masao Kuwahara, Yasuo Oshino (2004), Areawide road traffic noise contour maps, *Japan Automobile Research Institute*.

접 수 일 : 2011. 3. 22

심 사 일 : 2011. 3. 24

심사완료일 : 2011. 8. 9