사업장 설계 시 소음 평가 시뮬레이션 툴 개발

김태구† · 이형원* · 정대업**
인제대학교 보건안전공학과 · *인제대학교 컴퓨터응용과학부 · **전북대학교 건축도시공학부
(2007. 1. 15. 접수 / 2007. 2. 15. 채택)

Development of Noise Evaluation Simulation Tool for Factory Design

Tae-Gu Kim† · Hyung-Won Lee* · Dae-Up Jeong**
Department of Occupational Health & Safety Engineering, Inje University
*School of Computer Aided Science, Inje University
**Department of Architectural Engineering, Chonbuk University
(Received January 15, 2007 / Accepted February 15, 2007)

Abstract : With the rapid industrialization and civilization development, noise has become a major problem in cities and is a very serious issue for the environment. Noise induced in a factory has a bad influenced on operation efficiency, accuracy and detail of work. The purpose of this paper is to develop a new noise evaluation software for predicting acoustic condition including noise properties during the design of a factory. Majority of commercial softwares for this purpose have been developed in foreign countries and they are quite expensive and hard to use. A new home-made software tool has been developed in the present work, which aimed at providing a more user-friendly environment. The tool developed in this work consists of four major part; the prediction and evaluation of noise in system design, database design, noise analysis development and 3D graphic modeling. The outcome of present work is expected to provide domestic users with a more user-friendly and economic acoustic design tool.
Key Words : noise analysis, 3D graphic modeling, software, user-friendly, economic aspects

1. 서 론

산업과 문명이 발달할수록 지역사회에 소음·진동의 영향이 직·간접적으로 생활에 미치고 있다. 2006년 중앙환경분쟁조정위원회에 접수된 환경민원 총 1,780건 중 처리된 1,476건에 대한 통계 자료를 살펴보면, 약 86%에 해당하는 1,274건 이 소음·진동에 관한 것 이었다[1]. 이와 같이 생활의 질이 향상될수록 소음·진동에 대한 피해는 증가추세를 나타내고 있다. 특히, 산업현장에서 발생하는 직업병에 대한 2006년 산업재해분석 통계(노동부 한국산업안전공단)를 살펴보면 다른 질병에 비해 소음성 난청은 전년대비 약 13.5%가 증가하였으며, 여타 질병에 비해 매년 증가추세에 있다[2]. 피해현상이 오염물질에 기인(Tangible)하는 일반 환경오염과는 달리 소음과 진동은 대부분 정신적인 피해(Intangible)이기 때문에 대책을 마련하는 것이 쉽지 않다.

소음·진동 원인에 대한 대책으로는 공장 설계 단계부터 소음·진동이 일어나지 않도록 설계하여 소음·진동의 피해를 미연에 방지하는 것이다. 이를 위해서는 소음예측평가 시뮬레이션이 필요한데, 현재 사용되고 있는 소음예측평가 시뮬레이션은 외국에서 들여온 것이 대부분으로 비전문가가 프로그램을 관리할 때 어려움을 느끼고 있다. 이를 보완하기 위해 보다 쉽고 활용도가 높은 프로그램을 개발할 필요가 있으며, 국산 프로그램의 개발로 인해 외국으로 지출되는 비용을 저감할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구의 목적은 소음·진동의 원인을 저감 시킬 수 있는 방안을 마련하기 위해 산업현장에서 공장 설계 및 시공, 관리에 필요한 소음예측 평가 시뮬레이션 툴을 개발하는 것이다.

† To whom correspondence should be addressed.
tgkim@inje.ac.kr

2. 이 론

건축물 설계를 위해서는 소음을 분석하여 이를 예측하는 과정을 거쳐야 한다. 그러나 아직 완공되지 않은 건축물에서 발생하는 소음은 실제로 들어볼 수 없다. 그래서 건축물 소음예측·평가 프로그램과 축척모형실험 기술 등을 활용하여 실내공간에서 발생하는 소음을 3차원적으로 해석하고 소음의 요소를 가시화하여 직접 확인할 수 있는 기술이 여러 방면에서 개발되고 있다. 일반적으로 행해지고 있는 건축물 소음예측·평가 기술의 경우 먼저 대상 건축물을 모델링한 후 건축물의 소음 특성을 검토하여 설계에 적용하는 방식으로 시행된다. 이 때, 설계는 최적 잔향시간의 결정 및 잔향특성의 만족, 음압의 균일한 분포 등을 만족시킬 수 있도록 건축물의 형태 및 흡음재의 배치 등에 대한 분석과 검토가 충분하게 이루어져야 한다.

2.1. 잔향시간(RT: Reverberation Time)

소음 예측·평가를 위한 주요 척도로 사용되는 잔향시간은 잔향감과 일대일로 대응하지 않기 때문에, 잔향의 길이와 길이감에 관한 연구가 지속되고 있다. 만약 실내 임펄스 응답(Impulse response)의 모든 세부사항을 무시한다면, 음원이 정지한 후 혹은 충격 여진(Excitation)후 최종적으로는 일반적인 음에너지 감쇠에 이르게 된다. 이 감쇠의 길이(Duration)는 음에너지 감쇠가 지수법칙을 따른다고 가정할 때, 잔향시간이나 감쇠시간으로 정의된다.

잔향시간은 정상상태의 음이 60dB 감쇠하는 데까지 소요되는 시간으로, 건축물에 있어서 잔향시간에 대한 의미는 건축물의 사용목적에 따라 차이가 있는데 최종잔향시간이라는 값에 설계목표를 두고 조건을 달성해 가게 되며, 건축물 규모 및 사용목적 등에 이용된다.

2.1.1. 에너지 커브 계산(Energy Curve Calculation)

주어진 수음점에서의 음 에너지의 감쇠곡선을 계산한다. 감쇠곡선은 음선추적의 결과를 바탕으로 선택된 산란공식을 적용하여 각 시간에 도달하는 에너지를 계산하고 이를 다음 수식을 이용하여 계산한다[3,4].

$$r^2(t)=\int_0^{\infty} p^2(\tau)\,d\tau-\int_0^{t} p^2(\tau)d\tau=\int_t^{\infty} p^2(\tau)d\tau=\int_{\infty}^{t} p^2(\tau)d\tau \tag{1}$$

위 식에서 $p(t)$는 주어진 시간 t에서의 음파의 진폭이다. $p(t)$를 적분하는 데 사용하는 시간 간격은 사용자가 선택할 수 있도록 하였으며, 임펄스 응답 간 간격과 같다.

2.1.2. 잔향시간 계산(Reverberation Time Calculation)

잔향시간 계산은 평균자유행로의 값, 건축물의 부피, 면적을 Sabine과 Eyring 공식에 적용하여 계산하였다. 계산에 사용한 공식은 다음과 같다[5-7].

$$T^{S}=\frac{24\,V\ln(10)}{c(S\bar{\alpha}+4m\,V)},\ \text{Sabine's reverberation time} \tag{2}$$

$$T^{E}=-\frac{24\,V\ln(10)}{c(S\ln(1-\bar{\alpha})-4m\,V)},\ \text{Eyring's reverberation time} \tag{3}$$

위 식에서 V, S와 $\bar{\alpha}$는 다음과 같이 주어진다.

$$V=\frac{cS}{4\bar{l}} \tag{4}$$

$$S=\sum_{\text{all surfaces}} S_i \tag{5}$$

$$\bar{\alpha}=\frac{1}{S}\sum_{\text{all surfaces}} S_i\,\alpha_i \tag{6}$$

여기서, S_i는 면의 면적, α_i는 면의 흡수율, $\bar{l}$는 평균 자유행로, m은 공기에 의한 감쇠계수이다.

또한, 식 (2)와 (3)을 시뮬레이션하는 과정에서 각 면에 도달하는 레이의 수에 따라 유효 면적과 유효 흡수율을 사용하여 식 (7)과 (8)의 수정식을 도출하였다.

$$T^{MS}=\frac{24\,V_{\text{eff}}\ln(10)}{c(S_{\text{eff}}\bar{\alpha}_{\text{eff}}+4m\,V_{\text{eff}})} \tag{7}$$

Modified Sabine's reverberation time

$$T^{ME}=-\frac{24\,V_{\text{eff}}\ln(10)}{c(S_{\text{eff}}\ln(1-\bar{\alpha}_{\text{eff}})-4m\,V_{\text{eff}})} \tag{8}$$

Modified Eyring's reverberation time

위 식에서 V_{eff}, S_{eff}와 $\bar{\alpha}_{\text{eff}}$는 다음과 같이 주어진다.

$$V_{\text{eff}} = \frac{cS_{\text{eff}}}{4\bar{l}} \tag{9}$$

$$S_{\text{eff}} = \frac{\sum_{\text{all surfaces}} H_i S_i}{\sum_{\text{all surfaces}} H_i} \tag{10}$$

$$\overline{\alpha_{\text{eff}}} = \frac{\sum_{\text{all surfaces}} H_i \alpha_i}{\sum_{\text{all surfaces}} H_i} \tag{11}$$

여기서, H_i는 면에 반사된 횟수이다.

2.2. 음선추적모듈(Ray Trace Module)

음선추적모듈은 광자의 움직임에 따른 운동 방향과 크기를 벡터화하여 공간 내에서 광자의 운동 경로를 수학적으로 예측할 수 있도록 한 기법을 말한다.

음선추적(Ray Trace)은 교차한 면에 대한 빛의 반사 특성, 투과 특성 등과 같은 벡터의 방향이나 크기에 변화를 줄 수 있는 여러 가지 요인 등을 고려하여 벡터의 새로운 방향과 크기를 결정하게 되는데, 음선추적모듈에 대한 산출 식은 다음과 같다[8].

$$p_n = \sum_{i=0}^{n} \sum_{k=0}^{N_i} A_{ik} e^{j\phi_{ik}} e^{-ikd_{ik}} \tag{12}$$

여기서, n은 반사치수, N_i는 i번째 차수의 이미지 음원의 수, p_n은 압력, d_{ik}는 수음자와 이미지 음원 ik 사이의 거리를 의미하며, ϕ_{ik}는 벽면 반사에서의 위상 지연과 음원의 초기 위상의 합, k는 파수, A_{ik}는 반사 ik의 크기를 의미한다.

3. 연구방법

본 연구에서 사용된 소음 예측 · 평가 시뮬레이션에 필요한 각종 파라미터 분석의 객관성을 확보하기 위하여 ISO 3382에 규정된 평가파라미터를 산출하였다. 단일평가 파라미터, IACC1, IACC2, IACC3, LF를 포함한 3D평가 파라미터를 산출하여 분석 결과에 대한 예측을 수행하였다.

거울반사를 이용한 음선추적 기법을 이용하여 개발한 기술은 음원에서 나온 음이 어떠한 경로로 퍼져나가는가를 시각화하여 보여줌으로써 사용자로 하여금 공간이 원하는 대로 설계가 되었는지를 판단할 수 있도록 하여, 음압의 분포와 저감대책 시의 정보를 제공하였다.

또한, 음선 추적을 지정한 시간, 반사 횟수, 거리의 조건이 맞는 동안 추적하도록 하였으며, 조건 중에 어느 하나만 만족해도 추적을 종료 하도록 하였다. 추적의 결과는 음선을 보여 주는 방법과 각 면에 반사하는 횟수에 따라 면의 색을 바꾸어 표현하는 방식, 각 면에 도달하는 음압의 값에 따라 다른 색으로 보여주는 방법을 택하여 사용자가 원하는 정도를 손쉽게 알아보도록 하였다.

4. 연구결과

4.1. 소음 예측 · 평가 시스템 설계

본 연구에서 개발한 소음 예측 평가 시뮬레이션 시스템은 RAPAS(Room Acoustic Prediction and Auralization System)이다.

RAPAS의 디자인은 기본적으로 기존의 예측 프로그램들이 가진 모듈을 내부 시스템 구성과 그에 따른 결과물의 측면에서 그리고 사용자 접근 측면에서 분석하는 것을 시작으로 하였으며, 기존의 프로그램들이 가진 장점은 복합적으로 수용하고 불필요한 요소는 제거하였다. 다소 복잡할 수 있는 시뮬레이션 과정을 직관적으로 인식하고 실행할 수 있도록 구성하는데 역점을 두었다. 주어진 음원으로부터 나온 음이 주변의 물체에 반사하여 어떻게 진행해 가는가를 Fig. 1에 표현하였다. Fig. 2는 RAPAS의 시스템 설계 흐름도(Flowchart)이다.

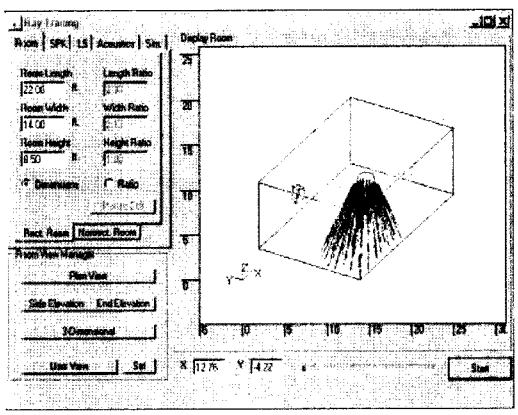

Fig. 1. View of Ray Trace.

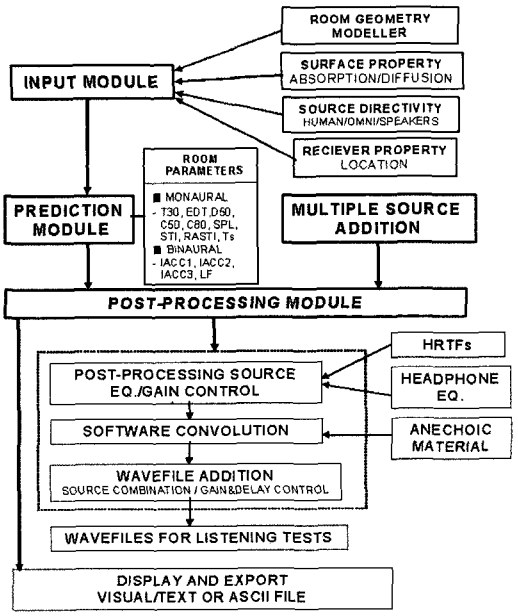

Fig. 2. Flowchart of RAPAS system structure.

4.2. Database 설계

진주예술공연장을 대상으로 RAPAS 모델링을 실시하였다. RAPAS 분석에 필요한 Database는 재료의 흡음율과 확산률을 포함한 데이터와 음원의 지향성 데이터인 두 가지 형태로 나타내었다. 또한 건물을 이루는 다양한 표면재료를 그 특성에 따라 스타일(Style)로 정의한 데이터와 종류별로 분류된 건물 모델 라이브러리 데이터를 저장하였다. Figs. 3, 4는 각각 흡음율과 지향성에 대한 예시이다[9,10].

4.3. 소음 예측 및 분석 기술

RAPAS 시뮬레이션 분석 기술은 음선추적모듈을

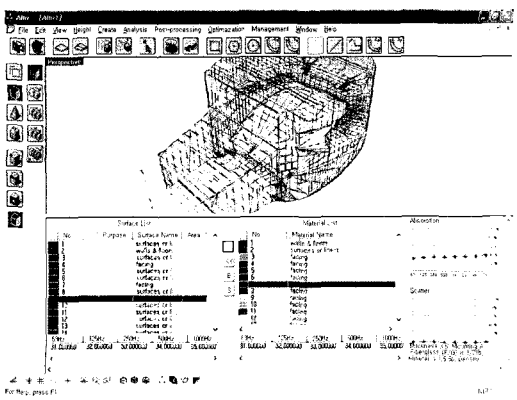

Fig. 3. Database of Absorption in Window.

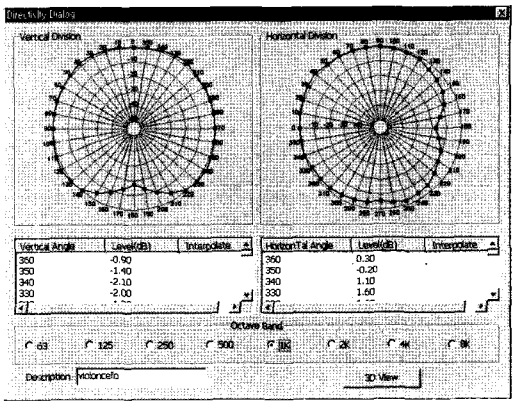

Fig. 4. Source directivity dialog in Window.

사용하여 기본적으로 음원에서 모든 방향으로 고르게 음이 발생하도록 하고 각 음에 대하여 만나는 면을 찾아서 거울 반사를 하도록 구성하였다. 또한 음원 배치에 따른 변수를 계산하여 잔향시간과 수음점에서의 임펄스응답 계산(Impulse Response Calculation)을 하였다.

끝으로 주어진 위치에 따라서 각종 필요한 변수를 계산하여 후처리 과정에서 2차원, 3차원으로 결과를 나타내었다.

Fig. 5는 본 연구에서 개발한 기술인 음선 추적 과정의 한 장면을 나타낸 것이다. 특히, 건축물에서 음압레벨(SPL: Sound Pressure Level)이 가장 높은 곳을 도식화 하였다.

Fig. 6은 반사음 영역 모듈(Reflect Coverage Module)로 사용자가 선택한 면을 통하여 반사된 음이 어디에 도착하는가를 시각적으로 보여 줌으로써 반사판이나 면을 설계할 때 유용하게 쓰일 수 있다. 또한 1차 반사음뿐만 아니라 지정한 차수의 반사음을

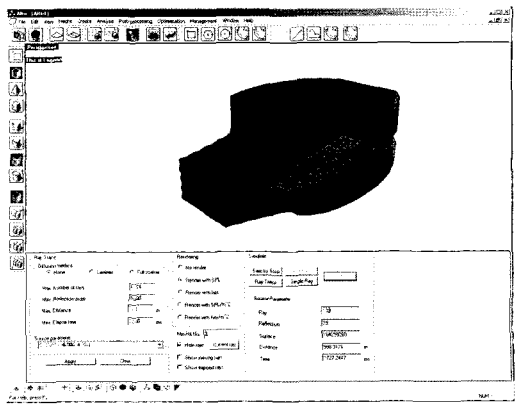

Fig. 5. High SPL on Ray Tracing.

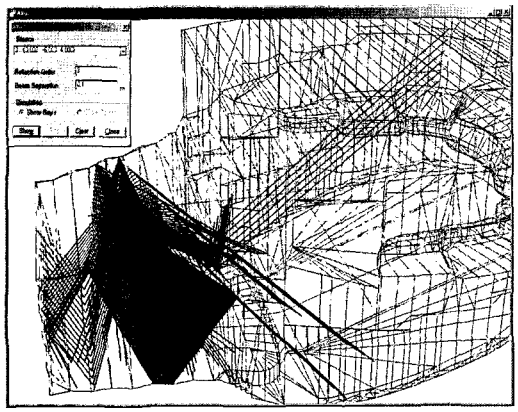

Fig. 6. Reflect Coverage.

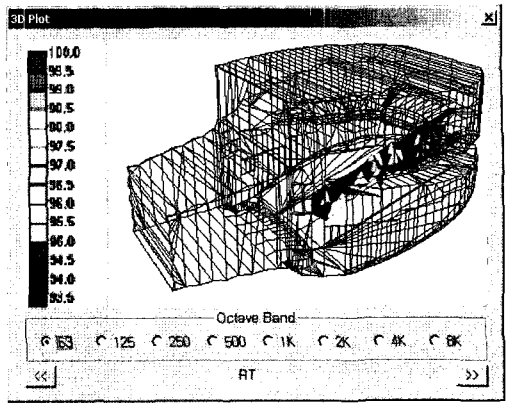

Fig. 8. Result view of 3D Plot.

계산해 준다. 계산은 선택한 면의 경계에서 반사되는 음을 보여 줌으로써 선택한 면에서 반사한 음이 도달하는 영역을 볼 수 있도록 하였다.

Fig. 7은 음선추적을 하면서 공간의 평균자유행로, 부피, 면적 등을 계산하여 Sabine과 Eyring 공식에 적용한 공간 잔향시간을 계산한 것이다. 계산은 실제 면적을 사용한 것과 음이 부딪힌 면만을 고려한 효과적인 면을 사용한 것 두 가지를 계산하고, 에너지 커브로부터 계산한 값을 같이 표시하였다.

Fig. 8은 음향 변수 계산 모듈(Acoustical Parameter Calculation Module)에 의해 구해진 수음점들에 대하여 각종 필요한 음향변수를 계산하여 후처리 과정에서 그 결과를 3차원으로 나타낸 것이다.

4.4. 공간 시뮬레이션 기술

기존에 사용되고 있는 Sketch Up, AutoCAD, 3D Studio Max, FormZ 등과 같은 3D 툴은 기능의 다양화로 비전문가가 이해 및 사용이 용이하지 않았다. 따라서 본 시스템은 기존 모델링에서의 약점인 소음 평가 분석 시스템을 보완하고 비전문가가 이용하기 어려운 사용자 인터페이스 및 작동방법을 개선하여 쉽게 조작하며 원하는 공간에서 음원을 분석하고 음원의 배치 및 공간구성에 도움을 주도록 설계하였다. 또한 기존 프로그램의 장점을 벤치마킹하여 시스템에 적용하고, 불필요한 중간과정을 과감히 삭제 및 이미지를 중심으로 인터페이스와 아이콘을 구성하였다. 특히 아이콘 배치를 크게하는 기능(Function), 설정(Mode), 윈도(Window)로 분류 및 그룹화하여 중첩조작을 통하여 모델링 시 쉽게 조작이 가능하도록 표현하였다. 또한 현장의 비전문가가 소음 저감대책을 선정하는 데에 쉽게 이용할 수 있도록 하여 저감대책 후의 저감치를 예측할 수 있도록 했다[11,12].

Fig. 9는 모델링(Modeling)과 분석(Analysis)을 탭 툴바(Tap Toolbar)로 명확하게 구분하고 있다. 전체적으로 이미지를 위주로 사용자가 직관적인 이해가 가능하도록 설계되어졌다.

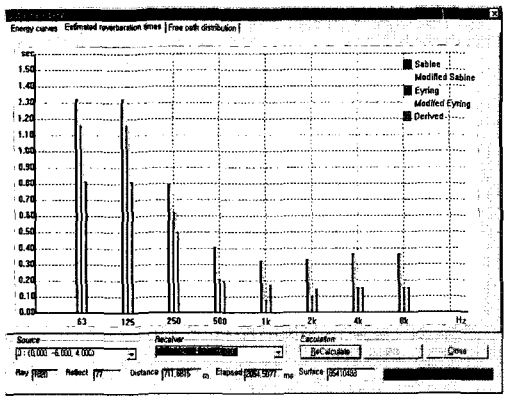

Fig. 7. Reverberation Time Calculation.

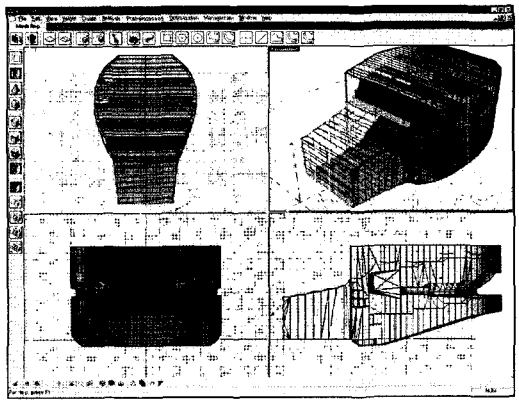

Fig. 9. Graphic windows.

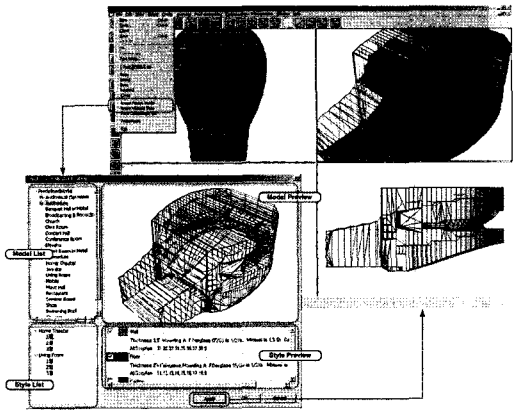

Fig. 10. The Style of RAPAS Modeling.

Fig. 10은 RAPAS 프로그램에서 공간 사용용도에 따라 공간의 유형을 분류하고, 공간 내의 구성요소와 마감 재질을 분류, 사용용도에 따른 공간 유형별 마감재의 모듈화를 통하여, 여러 실내공간의 스타일의 프로토타입(Prototype)을 만들고, 이에 따라 손쉬운 매핑(Mapping)이 가능한 데이터 구조를 만들어 스타일화 한 것이다.

5. 결 론

본 연구개발의 결과물인 소음 예측·평가 시뮬레이션 툴은 건축물 설계 및 관리 시 소음 예측·평가를 보다 쉽게 사용할 수 있는 프로그램으로, 비전문가도 사용 가능하도록 제작하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 시스템 구축 시 기존의 프로그램들이 가진 장점을 수용하고 불필요한 요소를 제거하여 다소 복잡할 수 있는 시뮬레이션 과정을 직관적으로 인식하고 실행할 수 있도록 구성하였다.

2) Database 설계 시 재료의 흡음율과 확산율을 포함한 데이터와 음원의 지향성 데이터인 두 가지 형태로 나타내었다. 또한 건물을 이루는 다양한 표면재료를 그 특성에 따라 스타일로 정의한 데이터와 종류별로 분류된 건물 모델 라이브러리 데이터를 저장하였다.

3) 본 소음 예측·분석 기술은 음선추적모듈을 사용하고 잔향시간 및 여러 예측 파라미터를 사용하여 소음을 예측·평가하고 3차원적으로 나타내었다.

4) 공간 시뮬레이션을 사용하여 기존에 사용되었던 프로그램의 약점을 보완하여 비전문가도 활용하기 편하도록 제작하였으며, 3차원적으로 결과를 나타내도록 하였다.

추후 이를 더 발전시켜 현장의 저감 대책 선정 시 간단한 시뮬레이션만으로도 저감대책후의 결과를 예측하므로 대책선정이 용이하게 되어 현장소음저감 대책에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1) 환경부 중앙환경분쟁조정위원회, 2006 환경분쟁조정분석집, 2006.
2) 노동부 산업안전공단, 2006 산업재해분석, 2006.
3) ISO 3382, Measurement of reverberation time in auditoria, 1997.
4) L. Cremer, H. A. Mueller, Principles and applications of room acoustics, Applied science publishers, London, 1978.
5) H. Kuttruff, Room acoustics, Taylor& Francis Group, Fourth Edition, 2000.
6) L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, J. V. Sanders, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, Inc., Fourth Edition, 2000.
7) 김준태, 고상철, 이상희, 신호철, "경기장의 잔향시간 측정 및 건축음향 시뮬레이션", 한국소음진동공학회지, Vol. 10, No. 4, pp. 559~564. 2000.
8) RAYNOISE Rev 3.0 User's Manual, LMS Numerical Technologies, 1998.
9) P. Parkin, ACOUSTICS, NOISE AND BUILDINGS, Faber, 3rd edition, 1969.
10) D. A. Harris, Noise control manual for Residential Buildings, McGraw-Hill Science Ltd., N.Y., 1997.
11) V. O. Knudsen, C. M. Harries, Acoustical Designing in Architecture, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 161~165, 1995.
12) ibid., pp. 192~195.