

# 퍼스널 컴퓨터를 이용한 실내음향 해석 소프트웨어의 개발

李 熙源\*, 柳 信模\*, 崔 錫柱\*\*, 金 龜勳\*\*

(\*) 서울산업대학교 기계설계학과, (\*\*) 삼성건설 기술연구소

## Development of Room Acoustic Simulation Software Using Personal Computer

Hee Won Lee\*, Sin Mo Ryu\*, Seok Joo Choi\*\*, Jong Hoon Kim\*\*

(\*) Dept. of Mechanical Design, Seoul National Polytech Univ.

(\*\*) Institute of Technology Samsung Engineering & Construction Co. Ltd.

### 요 약

실내 음향특성의 컴퓨터 시뮬레이션 기법은 모형실험 기법과 더불어 건축물의 음향설계 분야에서 널리 사용되는 도구이다. 본 연구에서는 건축물의 음향특성을 설계단계에서 예측하기 위해 영상법에 기초한 실내음향 해석 소프트웨어를 개발하였다. 개발된 소프트웨어는 건축물의 3차원 형상모델, 벽면등 반사체의 흡음특성, 음원과 수음점의 위치 등의 데이터를 입력하면, 음선의 전파경로, 수음위치에서의 반사음 패턴, 실내 음향특성의 평가척(음의 평요도, 잔향시간 등)을 산출하여 출력하는 기능을 지니고 있다. 기존의 씨물레이션 기법이 소요 장비나 비용, 시간적 제약으로 널리 실용화 되기 어려웠던 점을 고려하여 PC급에서 간편하게 활용할 수 있도록 개발하였고 음선 전파경로의 그래픽 표현, 반사음 패턴의 분석등, 건축물의 음향설계를 위한 기능을 부여하는데 중점을 두었다.

### 1. 서론

연주홀이나 강당, 회의실과 같은 음향 특성이 중요시되는 건축물들은 시공에 들어가기에 앞서 그 건축물이 갖게될 음향학적 성능을 예측 분석하여 최적의 음향 특성을 갖도록 설계단계에서부터 충분히 검토하여야 한다. 설계단계에서 음향특성을 예측하기 위해 사용되는 대표적인 방법은 컴퓨터 시뮬레이션 기법과 모형실험 기법을 들수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션 기법은 건축물 내부의 기하학적 형상과 실내에서의 음향전파과정을 고려하여 음향 특성을 예측하는 방법이며 모형실험 기법은 건축물에 대한 축소 모형을 제작하고 실험과 분석을 통해 음향 특성을 예측하는 기법이다. 이 두가지 방법은 나름대로의 장단점을 지니고 있어 여러 연구자들에 의한 지속적인 연구가 진행되고 있고 기존 설계 단계에서는 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 활용하고 상세설계 과정에서는 모형실험 기법을 활용하는 형태로 정착되어 가고 있다.

3차원 공간에서의 음향 특성 컴퓨터 시뮬레이션 기법은 음선 추적법<sup>(1)</sup>과 영상 음원법<sup>(2)</sup>으로 나뉘어 각각 발전되었다. 음선 추적법은 연산 효율면에서 영상 음원법 보다 우수하지만 음향 특성 파악을 위한 기본적 파라미터라할 수 있는 임펄스 응답의 예측에 있어 정확성이 뒤지는 단점이 있다. 따라서Lee<sup>(3)</sup>, Taguchi<sup>(4)</sup> 등은 영상음원법의 연산 효율을 증대시키기 위해 무효 영상음원을 제거하는 방법을 제시하였고 Vorlander<sup>(5)</sup>, Sekiguchi<sup>(6)</sup> 등은 음선 추적법과 영상음원의 결합을 통해 연산 시간을 단축하는 연구를 수행하였다.

실내음향전과 과정은 반사, 회절, 분산등의 매우 복잡한 파동 현상을 수반하기 때문에 엄밀한 해석을 위해서는 장시간의 연산이 소요되고 실제적인 문제에 적용하기가 어렵다. 본 연구에서는 Lee<sup>(3)</sup>에 의해 제시된 영상법을 기초로하여 PC급에서 실용화할 수 있는 음향특성 해석 소프트웨어를 개발하였다. 개발된 소프트웨어는 전파경로와 임펄스응답의 그래픽 표현, 반사음 패턴의 분석, 다양한 음향 평가척의 산출 등 건축물의 음향설계를 위한 실용적 기능을 부여하는데 중점을 두었다.

## 2. Room Acoustic Simulation Software (RASS)의 구성

### 2.1 소프트웨어 구조

개발된 RASS시스템은 Fig.1과 같이 screen menu 모듈, 경로 산출및 분석 (path processor)모듈, 임펄스 응답 산출및 분석 (impulse processor) 모듈, 음향특성치 산출 (acoustic processor) 모듈로 구성되어 있다.

screen menu 모듈은 화면메뉴를 도시하는 기능을 하며 사용자는 이 모듈을 통해 시스템과 대화형으로 모든 작업을 수행한다. path processor에서는 음선경로를 산출하고 이를 분석하여 그래픽으로 표현하는 과정을 처리하며 impulse processor는 임펄스 응답을 산출하여 화면에 표현하고 이를 분석하는 작업을 수행한다. acoustic processor는 임펄스 응답으로부터 잔향 시간, 음의 평요도 등 각종 음향 평가척을 산출하여 출력한다.

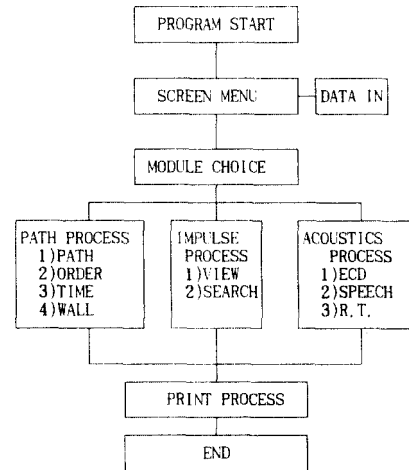


Fig.1 Structure of Room Acoustic Simulation Software

### 2.2 영상 음원과 임펄스 응답의 계산

영상음원의 계산은 Lee<sup>(3,9)</sup>에서 제시된 음선전달 경로 산출 알고리즘을 이용하여 10차반사 경로까지를 산출해 낼수있도록 프로그래밍되어 PATH PROCESSDR에서 처리된다. 산출된 영상음원으로 부터 거리감쇄와 반사면 흡음을 고려하여 임펄스 응답이 구해진다.

### 2.3 실내음향 평가척(objective acoustical measures for auditoria)의 산출

객관적 음향평가를 위한 주요 파라미터는 아래와 같은 방법으로 산출하며 ACOUSTIC PROCESSOR 모듈에서 처리된다.

퍼스널 컴퓨터를 이용한 실내용량 해석 소프트웨어의 개발

2.3.1 음악용의 음향 평가척(Objective measures for music auditoria)

- ① 잔향시간(reverberation time: RT)
 

정상상태에서 음압 레벨이 60dB 감소 하는데 걸리는 시간을 sec 단위로 표현. Schroeder<sup>17)</sup>의 backward integration method 를 이용하여 잔향에너지 감소 곡선을 구한 다음 최소자승법에 따라 직선을 대응시켜 구한다.
- ② 초기 잔향시간 ( early decay time : EDT )
 

Jordan<sup>18)</sup> 이 제안한 초기잔향 시간은 감쇄곡선의 초기구간 (0 - 10dB)에 직선을 대응시켜 구한 잔향시간을 의미하며 완전 확산 음장의 경우 잔향시간과 같아진다. 청중이 느끼는 잔향시간은 RT 보다 EDT에 가깝다는 주장이 제기되고 있다.
- ③ 전음압 레벨 (total sound level : G )
 

홀내에서 전달되는 음의 크기를 나타내는 평가척이다. 무한 공간에 동일한 음원이 존재할 때 음원으로 부터 10m 떨어진 위치에서의 음향에너지를 기준으로 하여 홀내에서 반사음이 고려된 음향에너지 레벨을 산출하여 dB 단위로 산출한다.
- ④ 객관적 명료도 ( objective clarity : C80 )
 

초기/지연 에너지비 (early/late energy ratio) 라고도 불리우는 평가척으로 80msec 이내에 도착되는 초기에너지의 지연에너지에 대한 비율을 산출한뒤 log를 취해 dB 단위로 산출한다.

2.3.2 음성용의 음향 평가척 (objective measures for speech auditoria)

- ① 초기 에너지 비 ( early energy fraction : D )
 

명료도(definition) 라고도 표현되는 이 평가척은 Thile<sup>19)</sup>에 의해 처음으로 제시되었으며 회화의 명료도 평가척으로 인정받고 있다. 다음식과 같이 전시간동안 도착되는 음에너지에 대한 50msec 이내의 도착 에너지의 비율로 산출한다.
- ② Lochner and Burger ratio (C95)
 

Lochner<sup>20)</sup>등의 실험을 통해 제시된 평가척으로 dB 단위로 산출한다.
- ③ 유용/방해 에너지비 (useful/detrimental energy ratio : 1/80)
 

Bradley<sup>21)</sup>는 음의 명료도가 초기 음에너지 뿐만 아니라 잡음(background noise) 에너지의 크기에 의해서도 크게 영향을 받으므로 신호대 잡음비 (S/N ratio)를 고려한 useful/detrimental energy ratio (L<sub>10</sub>) 를 음의 명료도 지수로 사용하였다.

3 소프트웨어의 적용 사례

개발된 소프트웨어의 실제 적용 사례로서 발코니형 2층 좌석을 갖고 있는 A 성당을 모델로 하여 시뮬레이션을 실시하였다. 적용 대상으로 선정된 홀은 21개의 반사면과 28개의 곡지점으로 형상 모델링되었고 Fig.2 는 7차 반사경로가 계산된 결과를 나타내고 있다.

Fig.3은 시스템의 각 구성 모듈을 실행 시키는 Main menu로서 스크린 메뉴형태로 18개 항목의 하루 메뉴를 선택하여 실행한다. Fig.2의 부시도도 PATH 메뉴중 BASIC GRAPHIC 메뉴를 선택하여 표현된 것이다.

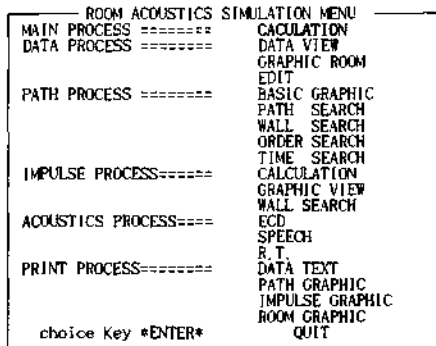


Fig.3, MAIN SCREEN MENU

소프트웨어의 수행은 다음과 같은 순서로 진행 하며 Fig.4에서 Fig.6은 작업 진행중의 주요 화면상태를 예시한 것이다.

- (1) DATA PROCESS 에서 입력데이터를 작성하고 그래픽으로 확인.
- (2) MAIN PROCESS에서 음선의 전파경로를 산출.
- (3) PATH PROCESS 에서 전파경로를 경로, 반사면, 반사횟수, 도달시간 등에 따라 분석하고 그래픽으로 표현.
- (4) IMPULSE PROCESS에서 충격응답을 산출하고 그래픽으로 표현.
- (5) ACOUSTIC PROCESS에서 잔향곡선을 구하고 각종 음향 평가척을 산출.
- (6) PRINT PROCESS에서 필요한 출력을 생성.

Table 1 은 모델 홀의 12개 위치에서 산출된 음향평가척들을 수록한 것으로 확산음장 가정하에서는 위치에 관계없이 단일한 잔향시간만을 예측할수 있는데 비하면 훨씬 진보된 예측 수단임을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과, R6(1층후방코너) 과 R8(2층 후방코너) 좌석에서 음의 명료도가 상대적으로 낮게 예측되었다.

4. 검토

- ① 예측 정도
 

본연구에서 제시된 시뮬레이션 소프트웨어는 음파의 파동성을 생각하고 음선의 전파로 단순화 하므로 임펄스응답을 정확히 예측할 수는 없다. 이와 관련하여 영상법의 예측정도가 실측치에 어느정도 접근하는가에 관한 연구도 수행된바 있으며<sup>19)</sup> 음향 평가척의 상대적인 변화를 예측하기에는 무리가 없다고 평가된다.
- ② 연산의 한계
 

개발된 소프트웨어는 좌표변환기법과 무효음원 검색기능을 도입하여 연산효율의 증대를 도모하였으나 PC 성능의 한계로 50 개 반사면을 가진 다면체형 실내공간에서 10차 반사까지 계산할 수 있다. 앞서의 적용사례에서는 각위치에서 7차 반사까지 고려하였고 연산시간은 486DX2급 PC에서 평균 200초 정도가 소요되었다.
- ③ 잔향에너지의 보정
 

임펄스 응답은 유한개의 반사경로로 부터 계산되므로 실제와 달리 유한한 길이로 제한 될 수밖에 없다. 따라서 계산되지 않은 잔향성분에 대한 보정이 필요하며 이를 위해 Sabin의 잔향식에 따라 계산된 잔향에너지를 보정량으로 추가하도록 하였다.

5. 맺음말

본 연구에서는 영상법에 기초한 실내용량 해석 소프트웨어를 개발하였고 개발된 프로그램의 특성을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 영상법을 근간으로 하여 확산음장법, 음선추적법 등에 비해 정도가 높고 다양한 음향 평가척을 산출할 수 있다.
- (2) 좌표변환과 무효음원 검색기능을 도입하여 연산 효율의 증대를 꾀하였다.
- (3) 잔향에너지 보정을 실시하여 임펄스 응답이 유한한 길이로 제한되는 데서 비롯되는 오차를 줄이도록 하였다.
- (4) 스크린 메뉴 방식으로 개발하여 프로그램의 운용 편의를 도모하였다.
- (5) 반사경로와 임펄스 응답의 분석기능과 그래픽 표현기능을 도입하여 실용성을 강화하였다.

RAY PATHS FROM SOUND SOURCE IN A POLYHEDRON, 10000

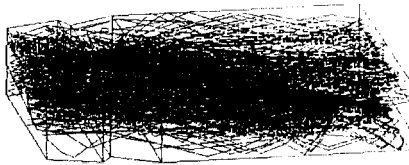


Fig.2. Calculated all paths are displayed using the BASIC GRAPHIC menu

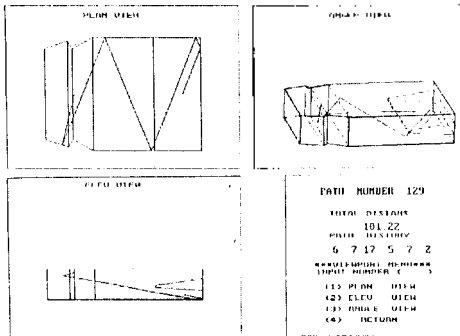


Fig.4. A specified path is displayed using the PATH SEARCH menu

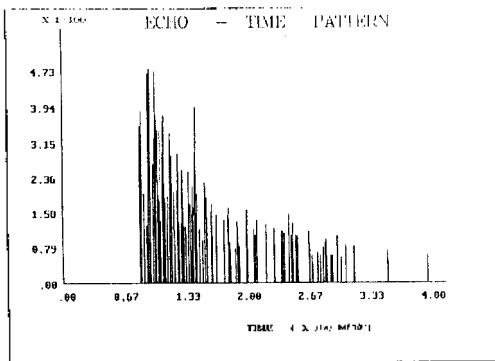


Fig.5. Echo-time pattern is displayed using the GRAPHIC VIEW menu in IMPULSE PROCESS

```

*** SPEECH INTELLIGIBILITY VALUES IN dB ***
S/R RATIO= 50.244 dB
U35L= -2.5515 dB
U50L= -6.4583 dB
U80L= 2.8276 dB
U95L= 2.0140 dB
C35L= -2.5514 dB
C50L= -6.4575 dB
C80L= 2.8277 dB
C95L= 2.0150 dB

*** REVERBERATION TIME ***
REVERB. DECAY STARTS AT TIME .70000E-01 WITH LEVEL 94.732 dB
REVERB. DECAY ENDS AT TIME .37000 WITH LEVEL 81.685 dB
REVERBERATION TIME = 1.38 SEC

*** PART DECAY TIME ***
EARLY DECAY STARTS AT TIME .70000E-01 WITH LEVEL 94.732 dB
EARLY DECAY ENDS AT TIME .29700 WITH LEVEL 81.685 dB
EARLY DECAY TIME = 1.91 SEC

*** DEFINITION AND TOTAL SOUND LEVEL ***
DEFINITION= .40200
TOTAL SOUND LEVEL= 0.2063 dB
LQDNES= 95.214 dB
    
```

Fig.6. Objective room acoustical measures are calculated using the SPEECH menu

Table 1. Predicted values of the Room Acoustical Measures in the sample hall

Position of Receiver	Room Acoustical Measures						
	RT60 sec	EDT sec	G dB	C80 dB	D	U95 dB	SPL dB
R1	1.16	0.81	10.0	9.0	0.78	9.0	99.1
R2	1.15	0.77	7.9	7.7	0.72	7.9	96.9
R3	1.42	1.02	6.1	3.8	0.64	4.6	95.1
R4	1.41	0.98	6.5	5.6	0.67	6.4	95.9
R5	1.16	1.18	4.5	5.1	0.47	4.4	93.5
R6	1.35	1.63	3.1	1.7	0.49	1.3	92.1
R7	1.14	1.04	7.3	4.7	0.48	4.5	96.3
R8	1.38	1.51	6.2	2.8	0.46	2.0	95.2

Sound power level of source = 120, dB  
 Reverberation Time by Sabine Eqn. = 0.97 sec

5. 참고문헌

[1] A. Krokstad, S. Strom, and S. Sorsdal, "Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique," J. Sound and Vib., vol. 8, n.1, pp.118-125 (1968).

[2] J. Borish, "Electronic simulation of auditorium acoustics," Ph.D thesis, Stanford university (1984).

[3] Heewon Lee and Byung-ho Lee, "An efficient algorithm for the image model technique", Applied Acoustics, vol. 24, pp. 87-115, 1988

[4] A. Taguchi, T. Yosizawa, K. Sato and M. Serikawa, "An efficient algorithm for tracing reflected rays in acoustic field simulation by geometrical method," J. Acoust. Soc. Japan., vol. 41, pp. 542-545 (1985)

[5] M. Vorlander, "Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing image-source algorithm", J. of Acoust. Soc. Am., vol. 86(1), pp. 172-178 1989

[6] K. Sekiguchi, S. Kimura, and T. Sugiyama, "Approximation of impulse response through computer simulation based on the finite sound ray integration," J. Acoust. Soc. Jpn., vol. 6, n. 2, pp 103-115 (1985)

[7] M.R. Schroeder, "New method of measuring reverberation time", J. Acoust. Soc. Am. 37, 309-412, 1965

[8] M. Barron, Auditorium Acoustics and Architectural Design, Appendix B, D, E&FN SPON, London 1993, pp. 837-845, 1986

[9] 이희원, "실내 음향 특성의 예측을 위한 효율적 영상 모델 알고리즘", 박사학위 논문, 한국 과학 기술원, 1988