

경기장의 잔향시간 측정 및 건축음향 시뮬레이션

김 준 태* · 고 상 철* · 이 상 희* · 신 호 철**

(*삼성종합기술원 CES Lab · **영국 Hull Univ.)

1. 머리말

일반적으로 공간 내에서 음 울림의 다소를 나타내는 양인 잔향 시간의 정의는 음원이 존재 할 때의 정상 상태 실내 음의 에너지 밀도에 대하여 음원을 차단 시킨 후 잔향 에너지 밀도가 1/100만이 될 때까지 걸리는 시간으로 나타낸다. 즉, 정상 음에 대하여 -60 dB 될 때까지의 소요 시간(단위는 초)으로 정의된다. 실내 공간에서와 같이 확산 음장(diffuse field)인 경우의 잔향 시간은 다음과 같은 식으로 간이 산출할 수 있다.⁽¹⁾

Eyring's reverberation formula:

$$RT = 0.163 \frac{V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}) + 4mV} \text{ (sec)} \quad (1)$$

여기에서 V = 실 용적 (m^3), S = 실의 전 표면적 (m^2), $\bar{\alpha}$ = 실의 평균 흡음률, m = 평면 음파가 공기 중에 단위 길이 전파할 때의 흡수에 의한 감쇠율이다. 위의 식은 통계적인 방법에 의한 간이 산출식임으로써 세부 주파수에 대하여 잔향 시간의 변화와 공간 내의 위치 변화에 대한 잔향 시간의 차이 등을 나타낼 수 가 없다.

옥외 경기장과 같은 대형 구조물 내에서는 위치에 따라 음장의 에너지 밀도가 다른 비확산 음장의 특성을 나타내며, 음원으로부터 전파되는 음의 전달 경로 상의 길이 차이로 인한 간섭 효과와 음의 반사, 회절, 산란 등이 모두 중첩된 복잡한 음향 환경을 갖는다. 따라서 이러한 음향 환경 내에서는 음원의 위치 변화와 음원의 특성에 따라 옥외 경기장 내의 음장의 에너지 밀도가 매우 큰 영향을 받기 때문에 식 (1)을 직접 적용하기에는 많은 오차가 발생한다. 따라서, 옥외 경기장

과 같이 반 폐쇄형 대형 구조물 내에서의 음향 특성을 계산하기 위해서는 수치적인 방법을 이용한 기하 음향 이론⁽²⁾을 사용함이 일반적이다. 이때의 잔향 시간은 다음의 식으로부터 감쇠율을 산출함으로써 구해진다.⁽³⁾

Schroeder integration curve:

$$s^2(t) = \int_0^{\infty} p^2(\tau) d\tau \quad (2)$$

본 연구에서는 Triangular Beam Method⁽⁴⁾를 사용할 수 있는 RAYNOISE S/W를 이용하였으며, 이로부터 계산된 잔향 시간을 검증하기 위하여 각 지점에서 별도의 echogram을 산출하여 적분 방법에 의한 결과 검증을 병행 수행하였다. 따라서 계산 오차를 최소화 한 해석 모델과 계산 조건 등을 구성할 수 있었으며 이로부터 원하는 해석 모델에 대한 음향 특성 값들을 산출, 분석하였다.

2. 해외 선진 경기장의 잔향시간 측정

2.1 잔향시간 측정 실험개요

실험적으로 잔향시간을 얻는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 임펄스(impulse)를 이용하여 적분을 하는 방법과 음감쇠 곡선(sound decay curve)을 여러 번 구하여 평균하는 방법이 있다. 전통적으로는 음감쇠 곡선을 평균하는 방법을 많이 사용하고 있으며, 이와 같이 앙상블 평균(ensemble average)를 하는 것은 매번 측정할 때마다 얻어지는 음원의 랜덤 가진에 의한 비 재현성을 줄일 수 있기 때문이다. 그러나, 이 방법은 비교적 매끄러운 음감쇠 곡선을 얻기 위해서 많은 실험을 반복해서 해야 하는 단점을 지니고 있다. 임펄스를 이용한 역적분 방식의 장점은 주파

† 기획 : 편집이사진, 김현실 편집위원

수 별로 한 번의 실험만으로도 이론적으로는 무한대의 음감쇠 곡선을 평균한 것과 같은 효과가 있다는 것이다. 그러나 임펄스에 의한 적분법은 주파수별로 실험을 달리해야 하는 단점이 있다.

본 연구에서는 실제의 해외 선진 경기장 내에서 충분한 음향 파워를 발생시킬 수 있도록 하기 위하여, 랜덤 노이즈(random noise)에 의한 음감쇠 평균법을 사용하여 잔향시간 측정 실험을 위한 음원을 제작, 준비하였다. 사용된 음원은 5000 Hz 까지의 주파수 성분을 지니고 있는 랜덤 노이즈로써, 10초 가진 10초 중지의 20초 동안을 하나의 세트로 하여 총 30번을 연속적으로 테스트할 수 있는 샘플을 제작하여 DAT 테이프에 녹음하였으며, 이를 측정 현장에서 재생하였다. 이때, 주파수에 따라서 매끈한 음감쇠 곡선을 얻을 수 있는 실험 회수는 저주파를 기준으로 할 때 30회 정도면 충분하다고 보고되어 있다.⁽⁵⁾ 경기장에서의 잔향 시간 측정 실험에서는 경기장내의 메인 스피커 시스템을 통하여 음원을 재생하였고, Sony의 휴대용 DAT 녹음기(TCD-D7)를 사용하여 소리를 채집하였다. 후 처리는 125~4000 Hz 영역의 옥타브 주파수 별로 각각 1/3옥타브의 필터를 씌우고, 이를 3ms의 평균 시간으로 정리를 하여 최종적인 앙상블 평균이 이루어진 음감쇠 곡선을 얻었고, 이의 기울기로부터 잔향 시간을 계산하였다. 그림 1은 잔향시간 측정 개요도이다.

2.2 잔향시간 측정 결과

그림 2는 프랑스 생드니 월드컵 경기장에서 잔향시간 측정 실험을 통하여 공식시에 측정된 수음점에서의 신호의 일부이다. 2회의 실험 세트에 대한 결과이고, 각 세트의 끝부분에서 소리가 감쇠되고 있는 것을 볼 수가 있다. 그림 3은 500 Hz 에서 구하여진 평균화된 음감쇠 곡선이다. 이로부터 약 4.5초의 잔향시간을 가지는 것을 알 수가 있다. 참고적으로, 프랑스 생드니 월드컵 경기장의 스피커 형태는 클러스터 음원(지향성)이 5개씩 묶음으로 되어 있고, 모두 32개의 묶음 스피커 형태로 구성되어 있다. 총 스피커 수는 160개며, 경기장 전체의 스피커를 동시에 사용하여 경기장의 각 지점에서의 잔향시간을 측정하였다.

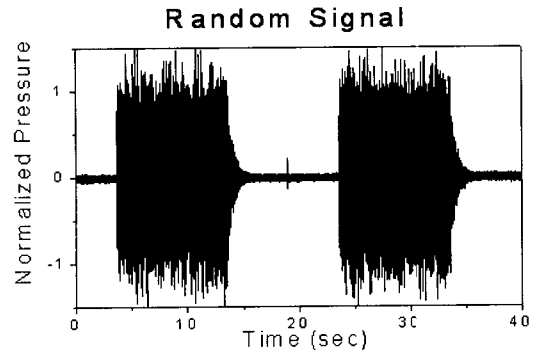


그림 2 공식시에 측정된 수음점에서의 신호의 일부 (프랑스 생드니 월드컵 경기장)

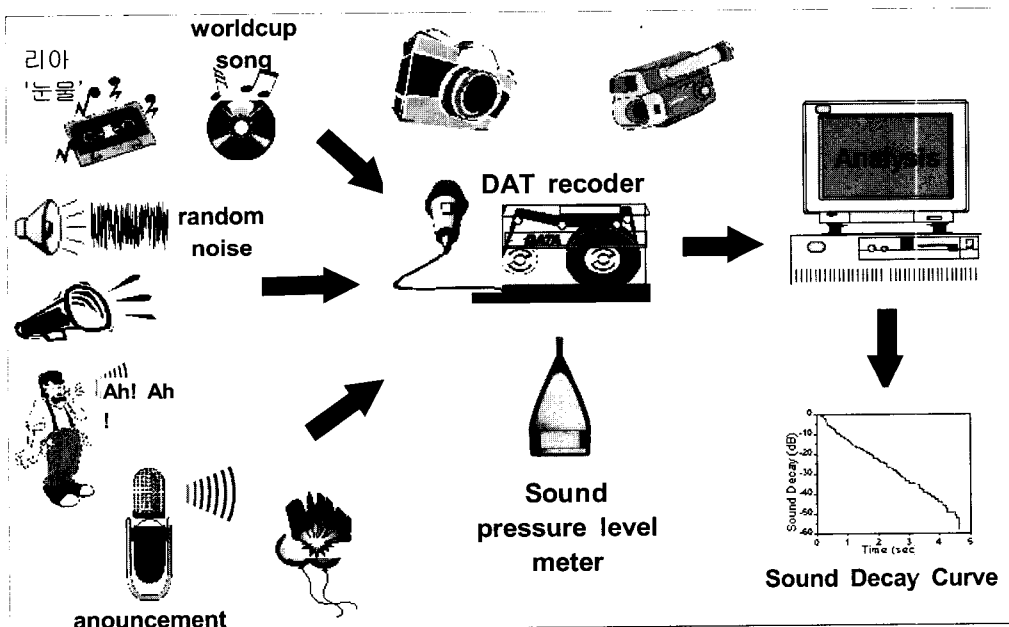


그림 1 잔향시간 측정 개요도

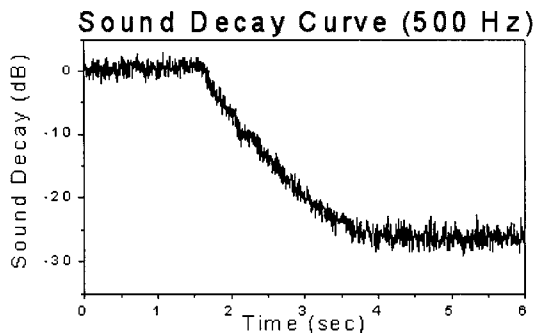


그림 3 평균화된 음감쇠 곡선(500 Hz, 프랑스 생드니 월드컵 경기장)

표 1 잔향시간 측정 실험결과(공석시, 지역 평균값 기준)

경기장 명	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
프랑스 생드니 (흡음천장, 전체 음원)	4.5초	4.8초	3.9초	2.8초
호주 시드니 (유리천장, 전체 음원)	5.7초	5.8초	5.1초	3.5초
말레이시아 콰라룸푸르 (막천장, 전체 음원)	7.1초	6.1초	5.4초	4.2초
프랑스 파리 (부분 음원*)	5.1초	3.9초	2.5초	1.5초
일본 요코하마 (부분 음원*)	5.9초	4.7초	2.8초	2.7초

주: * 이동식 간이 음원을 사용하여 경기장 국부지역에서의 잔향시간 측정을 뜻함.

3. 잔향시간 산출을 위한 간이계산식과 수치 시뮬레이션 비교

Eyring의 잔향 공식 식 (1)은 원칙적으로 공간이 확산 음장을 형성할 때만 충분한 정밀도를 가지고 적용될 수 있는 공식이다.^(6, 7) 확산 음장이란 공간 내의 어떠한 지점에서든 소리가 전 방향에 걸쳐서 입사하고 또 그때의 음의 세기가 서로 같아야 하는 조건을 만족해야 하며, 공간 내의 모든 지점에서 음압의 세기가 일정해야 하는 조건을 만족해야 성립되는 음장이다. 따라서 옥외 경기장과 같이 개구부가 있거나 마감재의 흡음률 분포가 일정하지 않는 공간은 확산 음장의 조건과는 큰 차이를 가지게 된다. 그 이유는 Eyring의 잔향 공식은 평균 도달거리(mean free path)의 개념으로부터 출발을 하는데,^(1,6) 평균 도달거리는 이론상으로 음선(sound ray)이 공간 내에서

무한대의 반사를 거듭할 때에 두 반사 지점 사이를 이동하는데 평균적으로 지나게 되는 거리를 말하므로, 옥외 경기장과 같이 개구부가 있어 음선(sound ray)이 빠져나간다면 이때 산출된 거리는 진정한 평균의 개념을 가지지 못하기 때문에 평균 도달거리를 구할 수가 없게 됨으로 Eyring의 잔향 공식은 많은 오차를 포함하게 되기 때문이다. 이와 같이 음선이 개구부로 사라진다면, 경기장 내의 음압의 세기가 일정하지도 않을 것이고 또한 소리가 전 방향에 걸쳐서 같은 세기로 입사하지도 않을 것이다. 확산 음장의 기본 가정에 위배되는 음장에 적용한다면 Eyring의 잔향 공식은 큰 오차를 나타낼 수가 있으며,⁽⁷⁾ 옥외 경기장과 같은 비확산 음장이 형성되는 공간에서는 Eyring의 잔향공식 보다는 음선 추적법(ray tracing method)과 같은 수치 시뮬레이션이 더욱 적합하다고 할 수 있다.

확산음장성된다고 알려져 있는 잔향실⁽⁸⁾의 형상을 이용하여 여기에 비확산 음장이 발생하게 되도록 형상을 부분 변경하였을 때의 수치 모의실험을 수행해 보았다. 즉 그림 4와 같은 잔향실을 기본 모델로 하여 여기에 확산 음장의 형성이 이루어지지 못하도록 가상으로 측면의 둘레를 따라 열린 공간을 만들었다. 이때의 가상 모델에 대하여 RAYNOISE S/W를 이용한 시뮬레이션과 Eyring의 잔향 공식을 적용하여 계산을 하였는데, Eyring의 잔향시간 공식의 결과는 표 2와 같고, 시뮬레이션의 결과인 잔향시간 분포 결과는 그림 5, 표 3과 같다. 비교 분석 결과, 경기장과 같이 개구부가 있는 경우에는 Eyring의 확산 음장 이론식 사용에 큰 오차가 있는 것을 알 수가 있다.(표 4)

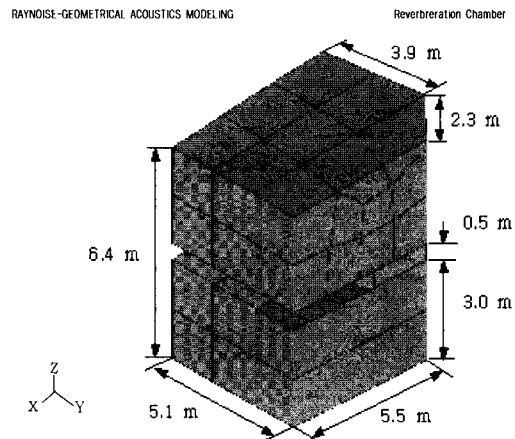


그림 4 사용된 잔향실 모델의 형상과 치수

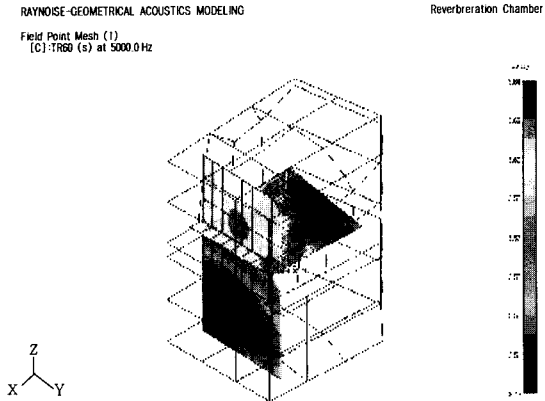


그림 5 수치 시뮬레이션에 의한 잔향 시간 분포도

표 2 Eyring의 잔향 공식 계산 결과

	Material		Wall	Anechoic
	주파수(Hz)			
개별 흡음률	125		0.02	1.00
	250		0.02	1.00
	500		0.02	1.00
	1000		0.02	1.00
	2000		0.02	1.00
	4000		0.02	1.00
면적	-		212.90	11.70

	Material		Wall	Anechoic
	주파수(Hz)			
개별 흡음력	125		4.26	11.071
	250		4.26	11.071
	500		4.26	11.071
	1000		4.26	11.071
	2000		4.26	11.071
	4000		4.26	11.071

Properties	총 흡음력	평균 흡음률	잔향시간
주파수(Hz)			
125	15.96	0.071	2.302
250	15.96	0.071	2.287
500	15.96	0.071	2.287
1000	15.96	0.071	2.258
2000	15.96	0.071	2.215
4000	15.96	0.071	2.025

표 3 수치 시뮬레이션에 의한 잔향 시간(sec)

위치 주파수(Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	잔향 공식
125	3.62	3.62	3.71	3.74	3.74	3.74	3.75	3.75	2.302
250	3.57	3.57	3.66	3.69	3.68	3.69	3.70	3.69	2.287
500	3.50	3.50	3.59	3.61	3.61	3.61	3.62	3.62	2.287
1000	3.37	3.38	3.46	3.49	3.49	3.50	3.50	3.50	2.258
2000	3.06	3.06	3.13	3.15	3.15	3.16	3.17	3.17	2.215
4000	2.31	2.32	2.36	2.38	2.38	2.38	2.39	2.39	2.025

표 4 수치 시뮬레이션 결과와 Eyring 공식과의 오차(%)

위치 주파수(Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8
125	57.3	57.3	61.2	62.5	62.5	62.5	62.9	62.9
250	56.1	56.1	60.0	61.3	60.9	61.3	61.8	61.3
500	53.0	53.0	57.0	57.8	57.8	57.8	58.3	58.3
1000	49.2	49.7	53.2	54.6	54.6	55.0	55.0	55.0
2000	38.1	38.1	41.3	42.2	42.2	42.7	43.1	43.1
4000	14.1	14.6	16.5	17.5	17.5	17.5	18.0	18.0

4. 서울 월드컵경기장 건축음향 시뮬레이션 사례

4.1 수치적 잔향시간 예측(만석시)

본 수치해석 결과에서는 해외 선진 경기장의 실제 잔향시간(T30) 측정 값들과의 비교검토를 위하여, 에코그램에서 초기 음향에너지 레벨로부터 30 dB 저감될 때까지의 곡선 기울기에 2배를 하여 산출한 잔향시간(T30)을 기준으로 하였다. 관중들이 객석에 가득 찬 경우인 만석시의 경기장 각 지점에서의 시뮬레이션 결과, 500 Hz를 기준으로 할 때의 잔향시간 분포도는 그림 6과 같다.⁽⁹⁾

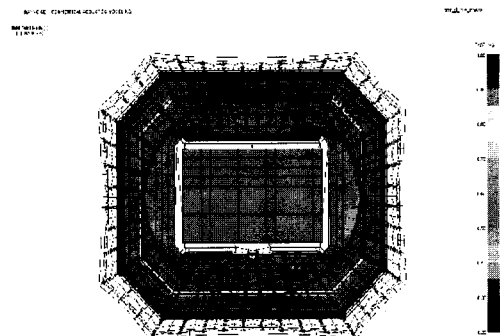


그림 6 만석시 500 Hz 에서의 잔향시간 분포도

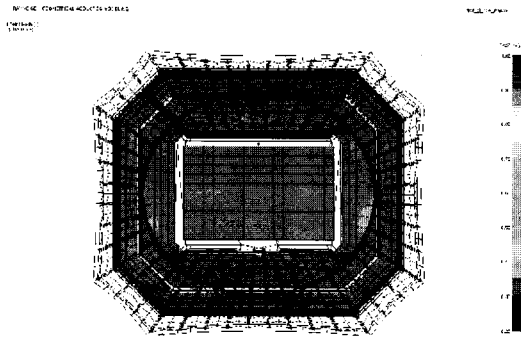


그림 7 만석시의 명료도(RaSTI) 분포도

4.2 명료도 예측(만석시)

공간상에서 음의 전달상태를 나타내는 지수로 STI(Speech Transmission Index)가 있으며, 이는 음의 이해에 관계되는 명료도를 나타내는 하나의 척도이기도 하다. 이러한 음의 명료도는 주로 잔향(reverberation), 간섭(interference) 및 암소음(background noise)등에 직접적으로 관계된다. 공간상에서 음의 감쇠 응답곡선의 하나인 MTF(Modulation Transfer Function)은 다음과 같이 정의된다.⁽¹⁰⁾

$$MTF(F) = \frac{\left| \int_0^{\infty} e^{2\pi i F t} p^2(t) dt \right|}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (3)$$

$$[1 + 10^{-SNR/10}]^{1/2}$$

여기에서 SNR=background noise(dB), F=modulation frequency(Hz)이며, MTF는 0.25 Hz에서 32 Hz 영역에서 충격응답(impulse response)의 정규화(normalized)된 푸리에 변환함수이다. STI는 MTF의 평균, 정규화된 값으로 나타내며 주파수의 함수이다. 음의 명료도의 대표 척도로서 RaSTI를 많이 사용하며, 이는 500 Hz와 2000 Hz에서의 STI 값의 산술 평균 값으로 나타낸다. 만석시 RaSTI의 분포도는 그림 7과 같다.

4.3 가청음화 (Auralization)

가청음화란 공간내에서 음원의 변화를 가상적으로 들을 수 있게 하는 과정으로써, 음장 (sound field)을 모델링하는 모의실험을 통하여, 양귀효과(binaural effect)를 수학적으로 반영하여 가청음 신호를 생성하는 과정이다. 가청음화는 마치 가상현실을 가시화(visualization)하여 보여주는 것과 같이 음장을 가상화하여 들을 수 있게 하는 것이

라고 말할 수 있다. 이러한 가청음화를 하기 위해서는 먼저, 수음점에서의 음원의 응답특성을 먼저 파악을 해야하는데 이것은 에코그램으로부터 충분한 정보를 얻을 수 있다. 이러한 에코그램은 그 지점에서의 음향특성을 내포하고 있는 것으로써 음원을 변화시키는 틀이 된다고 말할 수 있다. 다음 과정으로는 위의 에코그램으로부터 사람의 양쪽 귀의 특성을 반영하는 양쪽 귀의 충격응답(binaural impulse response)을 계산하여야 하는데, 이때에는 머리 전달함수의 정보가 사용된다. 머리 전달함수(head-related transfer function)란 사람의 양귀와 머리 및 어깨 등의 형상에 의해서 소리의 인지가 변화하는 것을 반영하는 값이다. 마지막으로 위에서 구한 양쪽 귀의 충격응답과 사용된 음원의 신호를 수학적으로 컨벌루션(convolution)하는 신호처리(digital signal processing)의 과정을 통하여, 수음점에서의 음원의 변화를 가청음화하여 들을 수 있게 된다. 본 연구에서는 아나운서 멘트음, 라이브 음악공연을 위한 다양한 원음 등에 대하여 서울 월드컵경기장의 음향특성에 따른 다양한 위치에서의 가청음을 산출하여 보다 좋은 경기장의 음향 환경 구현이 가능하도록 노력하였다.

5. 맺 음 말

이상의 고찰을 통하여 옥외 경기장과 같이 비확산 음장이 형성되는 공간에서는 Eyring의 잔향 공식 보다는 음선 추적법(ray tracing method)과 같은 수치 시뮬레이션이 더욱 적합함을 알 수 있다. 또한 경기장과 같이 반개방형 구조이고 내부의 음전달 경로 차이가 많은 건축 구조물의 잔향 시간은 일차적으로 건축 구조물 재질의 흡음률과 부착 위치, 설치되는 스피커 음원의 형태, 위치, 지향특성, 음원 개수 등의 영향을 받는다. 따라서 경기장의 최종적인 음향 특성은 전기음향 설비와 건축음향 특성 등이 조화를 잘 이룰 때에 궁극적으로 우수한 성능을 나타 낼 수 가 있다.

본 연구에서는 해외 선진 경기장들의 음향특성 실험을 수행, 분석함으로써 선진 경기장의 음향 현황 및 그 품질 수준을 명확히 파악하였으며, 이러한 일련의 과정을 통하여 얻어진 결과들은 2002년 한국·일본 월드컵개최를 위한 경기장 건설의 성공적인 완수를 위하여 경기장의 음향품질을 높일 수 있는 하나의 기준값으로 이용할 수 가 있다.

참 고 문 헌

- (1) Heinrich Kuttruff, 1973, Room Acoustics, Applied Science Publishers, London.
- (2) Kulowski, A., 1985, "Algorithmic Representation of the Ray Tracing Technique," Applied Acoustics, 18, pp.449~469.
- (3) RAYNOISE Theoretical Manual, 1998, "Building Acoustics & Industrial Noise Simulation", LMS International.
- (4) Lewers, T., 1993, "A Combined Beam Tracing and Radiant Exchange Computer Model of Room Acoustics", Applied Acoustics, 38, pp.161~178.
- (5) Chu, W. T., 1978, "Comparison of Reverberation Measurements Using Schroeder's Impulse Method and Decay Curve Averaging Method", J. Acoust. Soc. Am, 63, pp. 1444~1450.
- (6) Kinsler, L. E., 1982, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, New York, p. 320.
- (7) Hodgson, M., 1996, "When is Diffuse-Field Theory Applicable?", Applied Acoustics, 49, pp. 197~206.
- (8) 김현실, 김재승, 강현주, 김상렬, 1997, 잔향실의 음압분포해석 및 계측치와의 비교," 한국소음진동공학회 1997년도 춘계학술대회논문집, pp. 669~674.
- (9) 김준태, 신호철, 고상철, 이상희, 1999, "서울 월드컵경기장 건축음향 시뮬레이션 보고서 I, II," 삼성종합기술원 용역보고서.
- (10) Houtgast, T., et al, 1980, "Prediction Speech Intelligibility in Rooms from the Modulation Transfer Function", Part I, II, Acustica 16, p. 60.