

# 임펄스응답을 이용한 실내음향 측정 시스템

## Room Acoustic Measurement System Using Impulse Response

이 희 원\*  
(Hee Won Lee\*)

요 약

최근 들어 실내음향 특성의 측정과 평가를 위해 백색잡음을 이용한 잔향시간 측정법 대신에 임펄스응답을 이용한 측정법이 널리 이용되고 있다. 이 방법은 재현성이 우수하고 다양한 실내음향 특성치들을 한꺼번에 산출할 수 있어 전통적인 잔향 시간 측정법에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 MLS(Maximum Length Sequence) 신호를 이용하여 실내에서의 임펄스 응답을 측정하고 이를 후처리(post-processing) 하여 잔향시간(EDT, RT), 명료도 지수(C50, C80, D, U50, U80, AI), 음의 크기 지수(G) 등, 주로 실의 음성음향 성능을 측정하는 시스템을 구축하였다. 본 연구에서는 측정시스템과 후처리 프로그램의 구성, 몇몇 실내공간에 대한 시험 측정의 결과 및 고찰 등에 대해 소개하고자 한다.

### ABSTRACT

Recently, a method of measuring impulse response is widely used for a room acoustic evaluation instead of measuring reverberation time by white noise excitation. Comparing with the traditional reverberation time measurement, this method has many advantages such as good repeatability and the ability to extract various room acoustic parameters at one measurement. In this study, the author developed a measuring system that can extract mono-aural room acoustic parameters from an impulse response measured with MLS (Maximum Length Sequence) signal excitation. These room acoustic parameters include reverberation times(EDT, RT), speech intelligibilities(C50, C80, D, U50, U80, AI) and sound strength(G). This paper introduces the configuration of the developed measuring system, test results and discussions for the measurements at several rooms.

### I. 서 론

지난 수십 년 동안 많은 연구자들이 실내공간의 음향 성능을 객관적으로 평가하기 위한 특성치를 다양하게 제시하여 왔다[1]. 실의 음향성능을 평가하기 위해서는 다수의 측정대상과 측정점에서 특성치들을 각각 측정하여야 하므로 많은 시간과 노력이 필요하게 된다. 그러나 실내에서의 임펄스응답을 이용하면 잔향시간, 음의 크기지수, 명료도 지수 등 대표적인 실내음향 특성치들을 한꺼번에 측정할 수 있으므로 임펄스응답의 측정은 실내 음향성능 평가에 기본적 요소라 할 수 있다. 임펄스응답을 측정하는 방법도 여러 가지가 있으나 일종의 랜덤신호인 MLS 신호를 이용한 측정법[2]은 스피커를 이용해 실내를 가진하므로 권총음을 이용하는 방법[3]에 비해 재현성이 우수하고 반복측정을 통해 신호대 잡음비를 높일 수 있는 장점을 지닌다. 최근 들어 디지털 신호처리 기술과 PC 성능의 발달에 힘입어 MLS 신호를 이용한 측정법의 활용은 더욱 확산되고 있으며 일부 상품화 된 시스템도 선보이

고있다. 본 연구에서는 MLS신호를 이용하여 임펄스 응답을 측정하고 이를 ISO 표준방식[4]에 따라 후처리하여 잔향시간(RT, EDT), 명료도 지수(C50, C80, D), 음의 크기 지수(G) 등을 산출하며, 이를 토대로 소음을 고려한 음성 명료도 지수(U50, U80, AI)를 예측하는 실내음향 측정 및 평가 시스템을 구성하였다. 본 논문에서는 측정 시스템의 구성, 임펄스응답의 후처리 과정, 몇몇 실내공간에 대한 시험 측정의 결과 및 고찰 등에 대해 소개하고자 한다.

### II. 실내음향 특성치의 산출 방법

#### 2.1 잔향시간(EDT, RT)

임펄스응답으로부터 잔향시간을 산출하려면 우선 식(1)과 같이 Schroeder의 역진적분법[5] (backward integration)에 따라 잔향음 감소곡선을 얻어야 한다.

$$E(t) = \int_{\infty}^t p^2(\tau) d(-\tau) \quad (1)$$

\* 서울산업대학교 기계설계학과  
접수일자: 1999년 4월 2일

현실적으로는 적분구간을 유한한 길이로 제한할 수밖에 없으므로 식(1)에 대한 변형이 필요하다. ISO 규격에서는 역진 적분의 구간을 정하는 두 가지 방법을 제시하고 있다. 첫 번째 방식은 주변소음(background noise) 레벨을 정확히 알 수 없는 경우에 사용되는 방식이다. 우선 임펄스 응답을 잔향시간 이상의 길이로 끊은 뒤 (2)식에 의해 적분구간을 정해 잔향음 감소 곡선을 얻는다.

$$E(t) = \int_{t+T_0}^t p^2(\tau) d(-\tau) \quad (2)$$

여기서, 적분구간  $T_0$ 는 잔향시간의 1/5 값으로 한다. 처음부터 잔향시간을 알 수는 없으므로 잔향시간을 가정한 뒤 (2)식에 따라 잔향음 감소 곡선을 구하고 이를 토대로 잔향시간을 산출한 뒤 처음에 가정한 잔향시간과 25% 이상의 오차가 나면 잔향시간의 가정치를 바꾸어 25% 오차범위 내로 수렴할 때까지 반복하는 방법이다. 두 번째 방법은 주변소음의 레벨을 알고 있는 경우에 적용하는 방법이다. 임펄스 응답의 자승평균값(mean square)의 감소를 대표할 수 있는 직선과 주변소음 레벨을 대표하는 수평선이 교차하는 점을 찾아낸 뒤 그 점을 기준으로 임펄스 응답의 뒷부분을 끊어 버림으로서 임펄스 응답에서 잡음이 주도하는 구간을 제거한다. 잡음구간이 제거된 임펄스 응답을 역진 적분하여 (3)식에 따라 잔향 감소곡선을 구한다.

$$E(t) = \int_{T_1}^t p^2(\tau) d(-\tau) + C \quad (3)$$

여기서  $T_1$ 은 임펄스 응답  $p(t)$ 의 길이,  $C$ 는  $T_1$  시간 이후의 음에너지에 대한 보정치이다. EDT(Early Decay Time)은 (2) 또는 (3)식으로 구한 잔향음 감소곡선의 0dB ~ -10dB 구간에서 구한 잔향시간이며 RT(Reverberation Time)는 -5dB ~ -35dB 구간 또는 -5dB ~ -25dB 구간에서 구한 잔향시간으로 정의된다. 주파수 대역별 잔향시간은 광대역(wide band) 임펄스 응답을 필터링하여 대역별 임펄스 응답을 구한 뒤 같은 방법으로 구한다. 본 연구에서는 위의 두 가지 적분방법에 의해 구해진 잔향음 감소곡선을 비교 검토한 뒤 (3)식에 의해 잔향음 감소 곡선을 구하고 이에 따라 RT, EDT를 산출하도록 했다[6].

## 2.2 명료도 지수 (C50, C80, D)

선후 음에너지 비 (early-to-late energy ratio) C50와 C80은 50ms 또는 80ms를 기준시간으로 하여 그 전후에 도착되는 음에너지의 비율로서 식(4)로, 명료도(definition) D는 전체 음에너지에 대한 50ms 이내 도착에너지의 비로 식(5)와 같이 정의된다.

$$C_w = 10 \log_{10} \left[ \int_0^{t_w} p^2(t) dt \right] \left/ \int_{t_w}^{\infty} p^2(t) dt \right. \quad (4)$$

여기서  $t_w$ 는 50ms, 80ms로 설정된 기준시간이다.

$$D = \int_0^{0.05} p^2(t) dt \left/ \int_0^{\infty} p^2(t) dt \right. \quad (5)$$

주파수 대역별 값은 임펄스 응답을 대역별로 필터링하여 구할 수 있다. 이때 필터의 응답시간 지연으로 인하여 직접음 도달시간이 변동되는 경우가 발생할 수 있는데 ISO 규격에서는 이로 인한 오차를 줄이기 위해 광대역 임펄스 응답을 기준 시간(50ms 또는 80ms)에 따라 끊는 time windowing을 시행한 후 대역별 필터링을 하도록 규정하고 있다. 본 연구에서도 이 방법에 따라 명료도 지수들을 산출하였으며 time windowing을 적용하지 않을 경우 125Hz 이하의 저주파 대역에서 오차가 발생하는 것으로 알려져 있다.[6]

## 2.3 음의 크기 지수 (G)

음의 크기 지수(sound strength) G는 측정위치에서의 음의 크기를 자유음장에서 동일음원로부터 10m 거리의 음의 크기에 대한 레벨로 환산한 것으로, 식 (6)에 따라 계산한다.

$$G = 10 \log_{10} \left[ \int_0^{\infty} p^2(t) dt \right] \left/ \int_0^{\infty} p_A^2(t) dt \right. \quad (6)$$

여기서  $p_A(t)$ 는 자유음장내 10m 거리에서의 임펄스 응답을 의미하며 일반적으로 무지향성 스피커를 자유음장 조건에서 실험하여 구하여야 한다. 본 연구에서는  $p_A(t)$ 를 직접 측정하지 않고 실내에서의 임펄스 응답으로부터 산출하는 방법을 사용하였다. 실내에서 측정된 임펄스 응답의 직접음 성분, 즉 첫 번째 펄스는 자유음장에서 측정된 것과 같다고 할 수 있으므로 time windowing으로 첫 번째 펄스만을 분리한 뒤 10m 위치에서의 크기로 환산하면 (6)식의  $p_A(t)$ 를 산출할 수 있다.

## 2.4 소음을 고려한 음성 명료도(Ute, AI)

실내에서의 음성 명료도는 식(4)로 정의되는 선후 음 에너지 비 뿐만 아니라 음성신호대 잡음신호의 비(Signal to Noise Ratio)에도 크게 영향을 받는다. 이를 고려한 음성 명료도 평가지수가 U50와 U80로 다음의 식(7)로 정의된다.

$$U_w = C_w - 10 \log_{10} \{ [1 + (10^{C_w/10} + 1) 10^{-SN/10}] \} \quad (7)$$

여기서 SN은 음성 신호대 잡음비 이고 AI(Articulation Index)는 이 SN을 주파수대역별로 가중치를 두어 합산한 값이다. ANSI의 AI산출 규정[7]에 따르면 확정기를 사용하지 않은 보통의 음성신호 레벨은 1m 거리에서 77dB로 설정되어 있다. 이는 평균 남성의 대화시 순간 피크레벨로서 장시간 평균 레벨보다 12dB 높은 값이고 주파수 대역별 분포는 표 1과 같다. 본 연구에서는 1m 거리의 음성

신호 레벨에서 20dB를 감하여 자유음장 10m거리에서의 레벨로 환산하고 그 값에 음의 크기 레벨 G를 더하여 측정점에서의 음성신호 레벨을 산출하였다. 이 음성신호 레벨과 주변소음 레벨의 차이가 SN 레벨이고 이를 토대로 Ute 와 AI값을 산출하게 된다.

표 1. 주파수별 음성신호 레벨 기준 (ANSI)  
Table 1. Average speech level (ANSI).

frequency(Hz)	250	500	1k	2k	4k	overall
level(dB)	72.5	74	68	62	57	77

### III. 측정시스템의 구성

#### 3.1 하드웨어 구성

본 연구에서 사용한 측정시스템은 미국 Crown International 사의 TEF20 system으로 DSP 기반의 실내음향 측정 시스템이다. 시스템은 그림 1과 같이 소프트웨어 처리를 담당하는 PC와 DSP를 담당하는 TEF20, 오디오 앰프, 스피커, 마이크론 등으로 구성된다. TEF20 system은 MLS 신호를 생성하여 스피커를 통해 실내를 가진하고 마이크론으로 측정된 응답신호를 변환하여 임펄스응답을 측정한다.

#### 3.2 후처리(post-processing) 프로그램

TEF20 시스템으로 측정된 임펄스 응답은 PC에 저장된 뒤 후처리 프로그램에 의해 실내음향 특성치로 산출된다. 본 연구에서는 2장에서 설명한 방법으로 실내음향 특성치를 산출하는 Matlab 프로그램을 개발하였다. 후처리 과정에서의 오차를 줄이기 위해 임펄스응답의 길이 결정, 잔향음 감소곡선의 산출, 대역별 필터링 등은 ISO의 표준방식에 따라 처리하도록 하였고 G값 산출을 위한 자유음장 임펄스응답은 직접음 성분으로부터 산출하는 방법을 사용하였다. 실내음향 특성치는 광대역과 1/1 옥타브 대역 (63Hz~8kHz)별로 산출되며 표 2는 초등학교 교실에서의 측정 결과를 출력한 예이다.

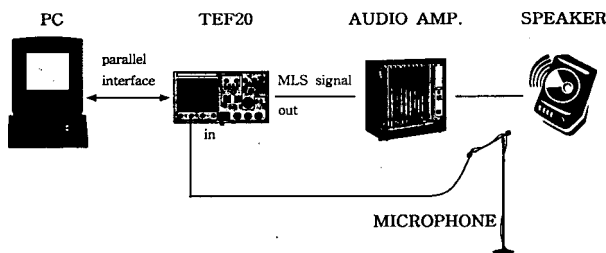


그림 1. 측정시스템의 구성  
Fig. 1. Configuration of measurement system.

표 2. 실내음향 특성치의 출력 예

Table 2. An example output of room acoustical parameters calculated by the developed program.

Roomacoustical measurement by TEF MLS classroom(A)									
filename	receiver 1								
	wide	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz	8KHz
C50	6.89	4.57	7.85	5.7	4.47	4.03	6.47	7.54	8.03
C80	11.34	9.51	13.02	10.57	9.22	8.18	10.78	12.01	12.74
D	0.83	0.74	0.86	0.79	0.74	0.72	0.82	0.85	0.86
EDT	0.42	0.54	0.39	0.45	0.46	0.59	0.47	0.39	0.35
RT1	0.44	0.43	0.42	0.47	0.53	0.56	0.43	0.43	0.4
RT2	0.47	0.48	0.45	0.49	0.53	0.51	0.48	0.45	0.41
RT3	0.47	0.48	0.49	0.47	0.47	0.48	0.48	0.45	0.43
SPL	80.53	50.58	58.41	66.92	68.23	69.8	71.66	75.08	76.28
SPLA10	67.71	21.78	27.08	32.09	44.07	52.88	57.72	62.49	63.35
SPEECH	69.82	81.29	83.83	87.33	78.15	64.93	55.94	49.59	49.93
NOISE	53.84	52.51	46.41	40.71	38.51	29.2	24.8	21.92	22.42
S/N	15.98	28.78	30	30	30	30	30	27.67	27.51
U50	6.29	4.54	7.82	5.68	4.46	4.01	6.44	7.49	7.98
U80	9.97	9.46	12.93	10.52	9.18	8.15	10.72	11.89	12.59
AI	0.98								
ACNOISE	66	65	59	53	49	42	41	38	42
S/N	3.82	16.29	24.83	30	29.15	22.93	14.94	11.59	7.93
U50	1.52	4.19	7.75	5.68	4.45	3.95	5.77	5.88	4.64
U80	2.85	8.6	12.73	10.52	9.17	8.02	9.27	8.64	6.52
AI	0.63								

### IV. 측정 실험 및 고찰

#### 4.1 잔향시간 측정결과 및 고찰

그림 2는 본 연구에서 개발한 시스템으로 측정된 잔향시간과 백색잡음법으로 측정된 잔향시간의 재현성을 비교한 것으로 MLS를 이용한 임펄스 응답법이 백색잡음법보다 전 주파수 대역에서 반복측정의 편차가 적은 것을 알 수 있다. 측정은 200 --- 1000석 규모의 강당 4곳을 대상으로 하여 24개 측정점에서 8개 옥타브 대역별로 측정하였다.

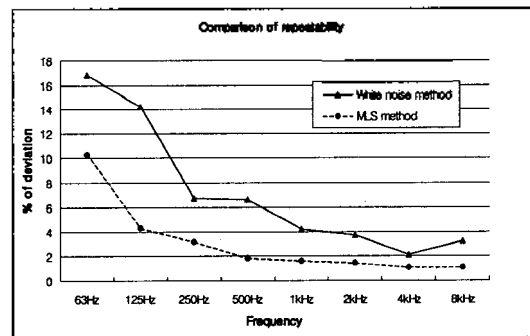


그림 2. 잔향시간 측정의 재현성 비교 (MLS 신호법과 백색잡음법)

Fig. 2. Comparison of repeatability in RT measurement (MLS vs. white noise method).

그림 3과 표 3은 두 방법에 의해 측정된 잔향시간의 상관성을 비교한 것이다. 그림 3은 두 방법에 의한 측정치의 비례관계를 XY 그래프로 표시한 그림이고 표 3은

주파수 대역별 상관계수 값을 나타낸 것이다. 고주파수 대역일수록 상관계수는 1에 가까워 두가지 측정치가 거의 같은 값을 보였으나 저주파 대역에서는 최대 20% 정도의 차이를 보였다. 그림 2에서와 같이 백색잡음법의 저주파 대역 반복측정 편차가 최대 17%임을 고려하면 125Hz 이하의 저주파 대역에서 상관성이 낮은 것은 MLS 신호법 보다는 백색잡음법이 지니는 반복측정 오차로부터 기인되는 것으로 판단된다.

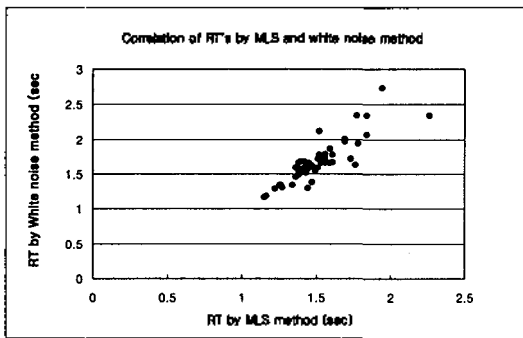


그림 3. 잔향시간 측정치의 상관성(MLS 신호법과 백색잡음법)  
Fig. 3. Correlation in RT measurement(MLS vs. white noise method).

표 3. 잔향시간 측정치의 상관계수(MLS 신호법과 백색잡음법)  
Table 3. Correlation coefficients of RT's measured by MLS and whitenoise method.

Correlation coefficients						
Frequency	125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz
Correlation coefficient	0.71	0.87	0.93	0.87	0.94	0.95
average	0.88					

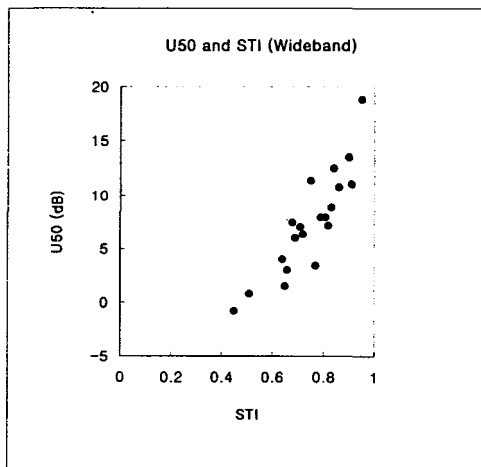


그림 4. U50와 STI 측정치의 상관 관계  
Fig. 4. Correlation between measured U50 and STI.

4.2 음성 명료도 측정 실험 및 고찰

그림 4는 2.4절에서 설명된 방법으로 산출한 U50 값과 STI(Speech Transmission Index) 측정치를 비교한 그래프이다. 측정 데이터는 초등학교 교실 2곳을 대상으로 하여 매 측정점마다 주변 소음레벨과 STI값, 임펄스응답을 측정하여 구한 것이다.

U50값과 STI 값의 상관계수는 0.88로 강한 상관성을 보였다. 이는 음성명료도의 평가를 위해 추가적인 측정 없이 임펄스응답으로부터 산출한 U50로 대신할 수 있음을 보여준다.

V. 결론

본 연구에서는 MLS신호를 이용하여 임펄스응답을 측정하고 이를 후처리하여 실내에서의 음성음향 특성치를 산출하는 측정시스템을 구성하고 다양한 실을 대상으로 측정실험을 수행하였다. 측정실험을 통해 임펄스응답 측정법이 재현성이 우수하여 종래의 백색잡음법에 의한 잔향시간 측정을 대신할 수 있음을 보여주었다. 또한 측정된 임펄스응답으로부터는 소음을 고려한 명료도 지수 Ute 와 AI값도 함께 산출되고 STI와의 상관성도 매우 높아 교실이나 강당에서의 음성 명료도를 평가하는데 활용될 수 있음을 보여 주었다.

참고문헌

1. M. Barron, Auditorium Acoustics and Architectural Design, E&FN SPON, 1993
2. John Vanderkooy, "Aspects of MLS Measuring Systems", J. Audio Eng. Soc., Vol.42(4), 1994
3. J. S. Bradley, "Auditorium Acoustics Measures from Pistol shots", J. Acoust. Soc. Am. 80(1), pp. 199-205, 1986
4. ISO 3382:1997 Acoustics — Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to other Acoustical Parameters, 1997
5. M.R. Schroeder, "New Method for Measuring Reverberation Time", J. Acoust. Soc. Am. 37, pp. 409-412, 1965
6. 이 회원, "MLS 신호를 이용한 실내음향 측정법에 대한 고찰", 제3회 한국음향학회 전기음향 학술대회 논문집, pp 172-175, 1999
7. ANSI standard S3.5-1969, "Methods for the Calculation of the Articulation Index", 1969

▲이 희 원(Hee Won Lee)



1979년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 졸업(공학사)

1981년 2월 : KAIST 기계공학과(공학석사)

1988년 2월 : KAIST 기계공학과(공학박사)

1998년 1월 : University of Florida(Visiting scholar)

1984년 9월 ~ 현재 : 서울산업대학교 기계설계학과 교수

※주관심분야 : 건축음향, 음악음향, 소음제어