

## 技術解説

## 실내임펄스응답의 측정법

— Measurement of impulses in rooms —

최 석 주

(삼성건설(주) 기술연구소)

## I. 서 론

실내음향측정에서는 일반적으로 echo time pattern, 음압분포, 잔향시간 등 측정항목에 따라 제각기 다른 측정법이 사용되고 있다. 하지만 선형이며 시불변 음향계의 가장 기본적이고 중요한 물리량중의 하나인 임펄스응답(impulse response)을 알게 되면 원리적으로는 상기 각 측정항목에 대한 결과를 한꺼번에 구할 수 있다. 또한 임펄스응답을 정확하게 측정해 놓으면 단순한 물리적 파라메타만을 구하는 것이 아니고 임의의 신호와 convolution 연산을 하므로써 실제홀에서의 연주음을 직접 들으며 그 홀의 음향적인 성능도 확인할 수 있다.

하지만, 실내음장은 다른 물리현상과 비교할 때 매우 긴 과도현상을 가지고 있기 때문에 지금까지의 범용 FFT 프로세서로는 충분한 길이의 응답을 기록할 수 없었으며 실내임펄스응답을 측정하는 것도 일반적이지 않았다.

최근 PC(personal computer, 이하 PC)와 그 주변 기기의 고성능화, 저전력화에 따라 수십초되는 광대역음향신호를 직접 컴퓨터에 입출력시키는 작업이 그다지 어렵지 않게 되었다. 이 때문에 실내임펄스응답의 중요성은 날로 증대되고 있으며 이에 관한 측정/예측에 관한 연구도 활발하게 진행되고 있다<sup>1)</sup>.

본고에서는 임펄스응답에 대한 각종 측정원리와 실물홀에서의 측정결과를 몇가지 소개하고자 한다. 또한 보형실헌에서 임펄스응답을 측정하는 방법 및

그 결과를 적용하여 청감평가용 신호를 합성하는 방법 등에 대하여 논한다.

## II. 임펄스응답의 측정방법

## 2.1 矩形펄스법(직접법)

임펄스응답은 수학적으로  $\delta$ 함수에 대한 응답이지만 디지털신호처리에서는 단위샘플응답이라고 말할 수 있다. 즉, clock주기에 비하여 아주 짧은 矩形펄스를 피측정계에 가하면 이에 대한 응답은 단위샘플응답으로 볼 수 있다. 하지만 이것만으로는 측정신호의 에너지가 작기 때문에 충분한 SN비를 얻을 수 없다. 즉, 펄스진폭을 고정하여 생각하면 펄스에너지는 펄스폭에 비례하기 때문에 높은 SN비를 얻기 위해서는 가능한 한 펄스폭을 크게 할 필요가 있다. 한편 평탄한 주파수특성을 얻기 위해서는 거꾸로 펄스폭을 작게 하지 않으면 안된다.

그림 1은 矩形펄스폭과 그 진폭스펙트럼과의 관계를 나타낸 것이다. 펄스폭이 clock주기와 같을 때에는  $f_s/2$ ( $f_s$ : sampling frequency)의 주파수로서 3.9 dB의 서하기 생긴다. 즉, 스펙트럼편차를 1 dB 이하로 하고 싶은 경우는 펄스폭을 샘플링주기의 반 이하로 하지 않으면 안된다. 또한 시간관계를 정확하게 측정할 필요가 있는 경우에는 응답을 읽는 clock이 펄스중심에 동기되도록 하지 않으면 안된다<sup>2)</sup>.

펄스신호는 그 에너지가 작으므로 SN비가 충분한 측정을 하기 위해서는 단위샘플응답이 충분히 감쇠

되는 시간간격으로 펄스를 반복제시하여 그 응답을 가산평균하므로써 SN비를 개선할 수 있다. 이 방법을 동가가산이라 부른다. 이 방법은 가산하므로써 신호성분의 전력이 4배가 되는데 반하여 random 잡음의 전력은 2배밖에 되지 않는 성질을 이용한 것이다. N회의 가산을 한 경우 SN비의 개선율은  $10\log N$  [dB] 이다.

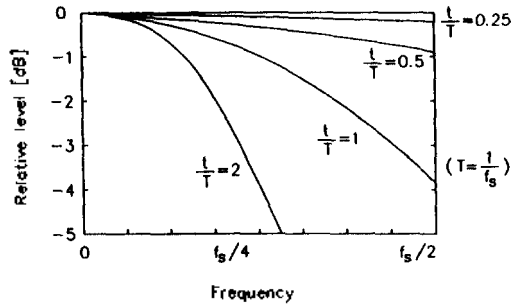


그림 1. 矩形펄스의 폭( $\tau$ )과 진폭스펙트럼의 관계

2.2 상호상관법

선형시불변시스템의 임펄스응답은 다음식으로 주어진다.

$$h(n) = \text{IDFT}[\Phi_{xy}(k)/\Phi_{xx}(k)] \tag{1}$$

여기서  $\Phi_{xy}(k)$ ,  $\Phi_{xx}(k)$ 는 각각 입출력간 cross-spectrum, 입력의 power-spectrum이다. 또한 IDFT는 離散적인 Fourier 역변환을 나타낸다. 따라서 입력이 평탄한 power-spectrum을 갖는 random 신호인 경우에는 입출력간의 상호상관계수  $\phi_{xy}(n)$ 만을 구하면 다음식으로 임펄스응답이 측정된다.

$$h(n) = \phi_{xy}(n)/\sigma_x^2 \tag{2}$$

단,  $\sigma_x^2$ : 입력과워

다음 그림 2와 같이 임펄스응답  $h(n)$ 을 갖는 계에  $x(n)$ 이 입력되고 그 응답에 잡음  $n(n)$ 이 혼입된  $y(n)$ 이 출력된 경우를 생각한다.  $x(n)$ ,  $h(n)$ ,  $y(n)$ ,  $n(n)$ 의 DFT를 각각  $X(k)$ ,  $H(k)$ ,  $Y(k)$ ,  $N(k)$ 라 하면,

$$Y(k) = X(k)H(k) + N(k) \tag{3}$$

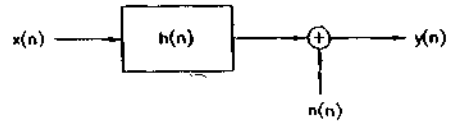


그림 2. 임펄스응답  $h(n)$ 인 계에  $x(n)$ 이 입력되어 잡음이 가해져서  $y(n)$ 이 출력되는 시스템

식(3)의 양변에  $X^*(k)$ 를 곱하여 수차에 걸쳐 평균하면

$$X^*(k)Y(k) = \sum_l [ X^*(k)X(k)H(k) + X^*(k)N(k) ] \tag{4}$$

식(4)의 좌변은  $\Phi_{xy}(k)$ 가 된다.  $H(k)$ 는 일정하기 때문에 식(4)의 우변 제1항은  $\Phi_{xx}(k)H(k)$ 에 수렴하고 제2항은 평균회수를 많이 하면 함수값 0에 가까워진다. 따라서

$$\Phi_{xy}(k) = \Phi_{xx}(k)H(k)$$

이므로 이등식으로부터 전달함수  $H(k)$ 는 다음식으로 구해진다.

$$H(k) = \Phi_{xy}(k)/\Phi_{xx}(k) \tag{5}$$

즉, 어떤 진단계의 입력신호  $x(n)$ 과 출력신호  $y(n)$ 이 일치하면 수차에의 평균을 하므로써 잡음의 영향을 제거할 수 있다.

이 방법에서 주의해야될 점은 임펄스응답의 길이 보다 긴 DFT를 해야하는 것이다. 따라서 잔향시간이 2초인 실의 경우, 샘플링주파수 48 kHz에서  $2^{16} - 2^{17}$  오퍼의 많은 계산을 해야만 한다. 그러나 펄스에 비하여 대단히 큰 에너지의 신호를 이용하게 되므로 SN비의 측면에서는 유리하다.

$x(n)$ 으로는 통상 white noise가 이용되지만 정음이 있는 상태에서의 측정을 목적으로 음악을 사용하는 방법도 검토되고 있다.

2.3 sweep 펄스법

임펄스응답을 측정하기 위한 신호로서는 단위펄스만이 이용되는 것이 아니고 주파수특성이 평탄한 광대역 신호면 어느것 이든 좋다. 하지만 sweep펄스법은 에너지가 큰 신호를 사용하므로 펄스법에 비하여 적은 회수의 동기가산으로도 SN비가 좋은 측정이 가능하다.

Berkhout<sup>11</sup>등이 맨처음 sweep 정현파를 방사시켜

그 응답에 대하여 방사신호의 역필터를 convolution 하므로써 임펄스응답을 구하는 방법을 제안하였다. 그러나 방사되는 sweep 신호와 역필터의 자세한 내용에 대해서는 설명하고 있지 않다.

한편 青島<sup>2)</sup>는 DFT를 이용하여 단위샘플의 위상을 원상으로 변화시키므로써 큰 에너지를 갖는 신호의 산출방법을 제안하였다.

sweep 신호는 식(6)과 같이 먼저 주파수영역에서 정의된다.

$$\left. \begin{aligned}
 H(k) &= \exp\left[-\left(\frac{k-699}{800}\right)^2\right] \\
 &\cdot \exp\left[-j\frac{12(k+1)^2}{10000}\right], \quad 0 \leq k \leq 2047 \\
 H(k) &= 0, \quad k = 2048 \\
 H(k) &= H^*(4096-k), \quad 2049 \leq k \leq 4095
 \end{aligned} \right\} (6)$$

식(6)의 맨 윗식 우변 제1항은 진폭특성, 제2항은 위상회전을 나타내는 항이며 파라메타를 변화시키므로써 진폭주파수특성과 신호의 계속시간을 바꿀수 있다. 윗식은 현재 동경대학 다찌비나연구소에서 오디오 트리어의 측정에 사용하고 있는 신호로서 상한주파수 약 15 kHz, 계속시간 약 40 ms가 되도록 파라메타를 설정하고 있다. 이 식을 역 DFT 하므로써 시간신호  $h(n)$ 이 얻어진다. 이  $h(n)$ 에 대한 측정계의 응답에 다음식의 위상 shift 필터를 convolution(시간압축)하면, 측정계의 임펄스응답이 구해진다.

$$\left. \begin{aligned}
 S(k) &= \exp\left[+j\frac{12}{10000}\left(\frac{4096}{N}(k+1)\right)^2\right], \\
 &0 \leq k \leq (N/2-1) \\
 S(k) &= 0, \quad k = N/2 \\
 S(k) &= S^*(N-k), \quad (N/2+1) \leq k \leq N-1
 \end{aligned} \right\} (7)$$

여기서  $N$ 은  $h(n)$ 에 대한 응답길이, 단, 여기서 구해진 응답은 엄밀하게 말하여 단위샘플응답이 아니고 측정신호  $h(n)$ 의 주파수특성이 곱해져 너해진 것이다.

그림 3에 sweep 펄스신호와 그 압축신호 및 이들 각각의 에너지 스펙트럼을 나타낸다.

구체적인 측정방법은 그림 3(a)의 sweep 펄스신호를 먼저 방사하고 그 응답이 충분히 감쇠되는 길이 ( $N$ )까지의 데이터를 읽어 들인다. 이 신호는 단일 펄

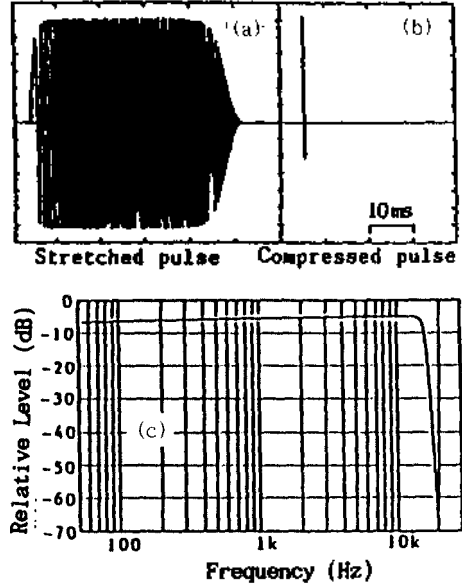


그림 3. Sweep 펄스신호.

스에 비하여 훨씬 큰 에너지를 갖고 있으나 SN비가 불충분한 경우는 단일펄스와 마찬가지로 동기가산을 하면 된다. 최종가산결과에 대하여 길이  $N$ 의 FFT를 하여 식(7)의 위상 shift 필터를 곱한 후, 역 FFT를 하면 임펄스응답이 구해진다. 이 방법에 대한 구체적인 해설은 문헌 8)에 잘 소개되어 있다.

### 2.4 M계열 고속 Hadamard 변환법

2.2절에서 논한 상호상관법에서는 임펄스응답을 구하는데 많은 회수의 FFT를 해야된다. 이에 대하여 Alrutz, Shroeder<sup>9)</sup>는 유원으로  $M$ 계열신호를 사용하여 고속으로 상호상관함수를 계산하는 방법을 발표하였다. 이 방법은 상호상관함수의 계산을 고속 Hadamard 변환과 순서변환조작을 하여 실행하는데, 데이터 수가  $N$ 인 경우,  $N \log_2 N$  회의 가감산만으로 임펄스응답이 계산된다.

측정에 있어서는 필요한 주파수대역의 2배 이상의 clock로  $M$ 계열 신호를 방사시킨다.  $M$ 계열 신호는 주기신호기 때문에 상호상관함수도 주기함수가 된다. 따라서 임펄스응답의 aliasing을 피하기 위하여 그 1주기를 대상실의 임펄스응답 보다 길게 한다. 2.2절에 언급했듯이  $N$ 은 통상  $2^{16} \sim 2^{17}$ 의 오더가 되지만 연산은 가감산 뿐이므로 PC로도 실행 가능하다.

또한  $M$ 계열은 shift register에 의하여 쉽게 발생시킬 수 있으므로 sweep 펄스법과 마찬가지로 DA변

환기를 필요로 하지 않으며 정수연산이므로 오차의 발생이 적고 고속연산이 가능한 이점들을 가지고 있다.

III. sweep 펄스법에 의한 측정예

초기 오디오리움의 음향측정에서는 처리가 용이한 뿐 아니라 측정중에 과도응답을 직접 키로 들고 확인할 수 있다는 장점 때문에 矩形펄스법이 주로 이용되어 왔다. 그러나 이 방법에 의한 측정에서는 시간이 한정되는 경우가 많고 단시간에 SN비가 충분한 입력 응답을 얻는데는 한계가 있다. 이에 대처하는 방법으로 선술한 sweep 펄스법과 M계열법을 생각할 수 있다. 이 중 M계열법은 SN비의 측면에서는 유리하지만 연속신호를 사용하기 때문에 실의 과도응답을 키를 확인할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 본래에는 펄스법과 상관법의 중간적 성질을 가진 sweep 펄스법을 사용하여 측정하는 예가 보고되고 있다<sup>10,11)</sup>.

그림 4는 sweep 펄스법의 측정 및 연산의 흐름도를 나타낸다. 여기서 sweep 펄스신호는 식(6)의 관계를 PC로 합성하여 DAT에 반복 녹음한다. 이때 1/3 octave band equalizer를 사용하여 음원으로 사용하는 12번째 스피커(TS-12M)의 주파수특성에 대한 개략적인 보정을 한다. 그림 5는 스피커에 가해진 신호와 그것을 시간압축한 신호 및 각각의 에너지 스펙트럼이다. 또한 그림 6은 부향실내에서 sweep 신호를 스피커로 방사시키며 음원으로부터 8m 떨어진 위치에서 수용한 주파수특성과 파형을 나타낸다. 그림 4의 음원측 DAT에는 동기가산용 trigger 신호를 녹음

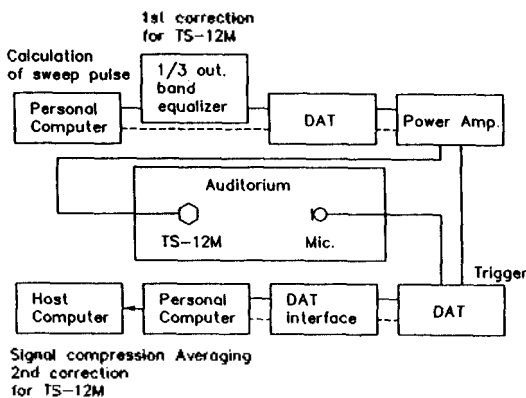


그림 4. Sweep 펄스법의 Block Diagram

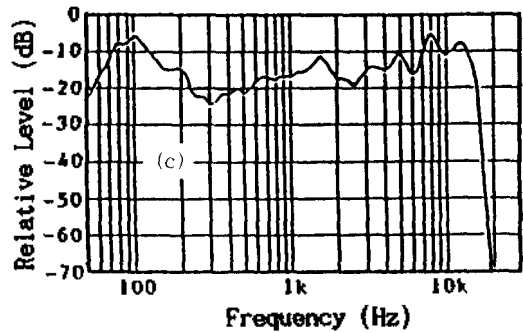
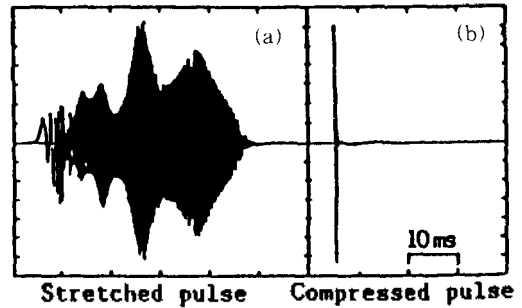


그림 5. 12번째 스피커의 구동신호

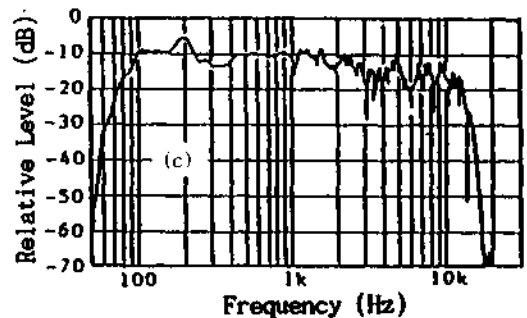
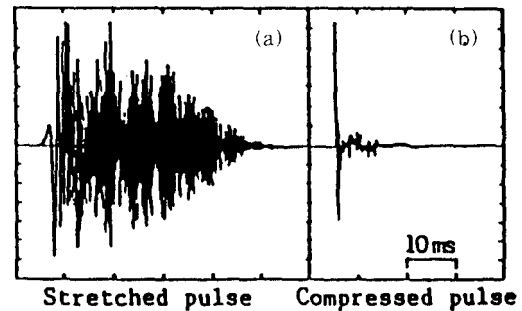


그림 6. 12번째 스피커에서 방사한 Sweep 펄스신호

하여 놓고 현장 측정시에는 이것을 수음측 DAT의 다른 채널에 유선으로 동시 녹음시킨다. 측정결과 후처리시에는 DAT로부터 디지털형으로 PC에 데이터를 읽어 들이고 샘플링주파수 48 kHz, 데이터 길이 128 Kword(2.7s)로 trigger 신호에 동기시켜 가산평균한다. 이 결과에 대형계산기를 통한 시간압축처리(식(7))를 하여 임펄스응답을 구한다. 측정결과에 한 예로서 sweep 펄스응답과 임펄스응답을 그림 7에 나타낸다.

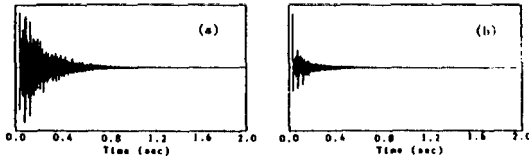


그림 7. Sweep 펄스응답(a)과 그응답에서 산출한 임펄스응답(b)

그림 8은 동일한 점의 임펄스응답을 sweep 펄스법과 矩形펄스법(20 $\mu$ s)에 의하여 동기가산회수를 변화시키며 측정한 결과다. 이들 결과의 SN비를 검토하기 위하여 Schroeder 방법으로 구한 잔향감쇠과정(잔대역)을 그림 9에 나타낸다. 단일펄스법에 비하여 효율이 좋고 SN비가 크다는 것을 알 수 있다.

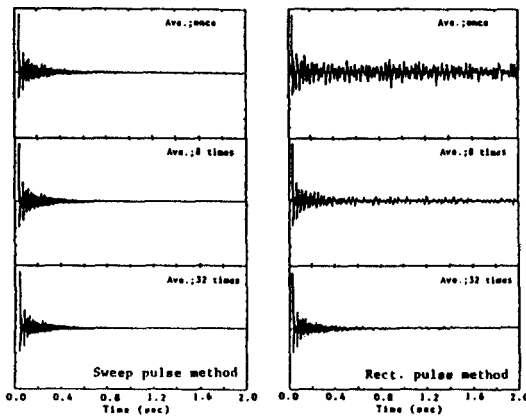


그림 8. Sweep 펄스법과 矩形펄스법에서 동기가산회수를 바꾸며 측정한 임펄스응답

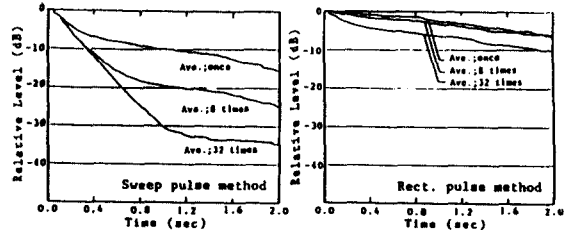


그림 9. 그림 8의 임펄스응답에서 구한 잔향감쇠과정

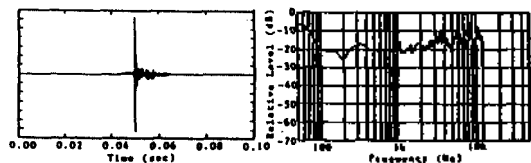
#### IV. 측정시스템의 주파수특성 보정<sup>4)</sup>

스피커나 기타 음원을 사용하여 측정한 임펄스응답에는 음원의 임펄스응답도 포함되어 있다(마이크로폰과 電氣系의 응답도 포함되어 있으나 통상음원의 응답에 비교하면 짧다). 따라서 피측정음향계의 순수한 임펄스응답을 얻기 위해서는 측정된 임펄스응답에서 측정시스템의 임펄스응답을 제거하지 않으면 안된다. 이와같은 처리를 일반적으로 역 convolution이라 부른다.

원리적으로는 먼저 무향실내에서 측정시스템의 임펄스응답을 측정하여 그 응답에 대한 역필터를 만든다. 이렇게 만든 역필터를 동일한 시스템에서 측정할 실의 임펄스응답에 convolution하면 음향계만의 임펄스응답이 구해진다.

다음은 12면체 음원 스피커(TS-12M)에 대한 주파수특성의 보정 가능성에 대한 검토결과다. 그림 6(b)의 임펄스응답에 대한 보정목표대역을 대략 80 kHz-12 kHz로 하고 최소 2승법에 의하여 1280 word의 역필터를 구한다. 그 결과를 그림 10에 나타내며 이 역필터에 그림 6(b)의 응답을 convolution하면 그림 11이 된다.

이상의 처리를 해주면 측정한 어느 한점의 임펄스응답에 대한 주파수특성을 거의 평탄하게 할 수 있다. 그러나 스피커와 같은 음원은 강한 지향성을 갖기 때문에 어느 한점에서 측정된 특성을 그대로 보정하는 것이 옳을지 어떨지는 앞으로 검토해 볼 필요가 있



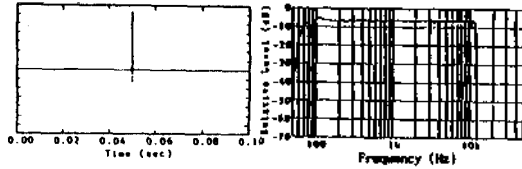


그림 11. 측정계의 임펄스응답(그림 6(b))과 그 역필터(그림 10)의 역필터

다. 더 나아가 공간적으로 평균하는 방법, 1/N 옥타브 파워를 일정하게 하는 방법도 고려해 볼 수 있다.

### V. 모형실내 임펄스응답의 측정

콘서트홀이나 극장 등의 설계시에는 축적모형에 의한 음향실험을 하는 경우가 많다. 이와같은 음향모형실험에서는 실물홀에서 측정하는 경우와 마찬가지로 각종 물리적 파라메타의 측정이 주가 된다. 하지만 모형실험의 단계에서 홀의 음향효과를 실제 귀로 확인할 수 있으면 더욱 효과적이라 할 수 있다. 이와같은 목적을 위하여 지금까지 속도가변형 tape recorder와 초음파용 스피커를 이용한 실험이 시도되어 왔다. 그렇지만 이와같은 아날로그식 기술에 의한 방식은 SN비, 주파수특성 등의 면에서 한계가 있다. H.Els, J.Blauert<sup>12)</sup>는 디지털신호처리 기술을 홀모형실험에 도입, 모형에서 측정한 임펄스응답과 임의 신호와의 convolution 합성을 시도하여 그 유효성을 보고하고 있다. 그후 橋는 동일한 원리에 입각하여 모형실험기술과 디지털기술을 조합시킨 모형실험방법(Hybrid simulation)의 개발을 진행하여 왔다<sup>13)</sup>. 여기서는 그중 임펄스응답의 측정과 관련된 내용을 소개한다.

임펄스응답의 측정법에는 전술한 몇가지 방법이 있으나 모형에서 측정할 경우에는 음원이 가장 문제된다. SN비 면에서는 고음용 스피커를 사용하여 상관법을 이용하면 좋으나 이런 종류의 음원은 치수가 크고 지향성이 현저하여 모형실험에는 적합하지 않다. 이점의 보완을 위하여 스피크방전 음원을 사용하는 방법이 추진되어 왔다. 하지만 이 음원도 파형의 재현성과 큰 에너지를 동시에 실현시키는 데는 어려움이 많다. 이 때문에 橋 등은 파형의 재현성을 중시한 음원장치를 제작하여 임펄스응답을 측정하고 있으며, 우리도 같은 음원장치를 이용하여 모형실험을 하고있다. 그림 12는 64발의 음압파형을 중첩시켜 작

성한 결과로서 만족할 만한 재현성을 나타내고 있다. 이와같이 동기가산을 하면 SN비의 개선이 가능해진다.

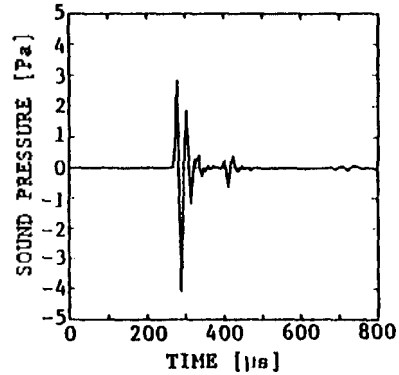


그림 12. 스피크방전 음원의 음압파형(64회중첩, 측정거리 50 cm)

그림 13은 그림 12의 파형을 동기가산하여 직접파를 분리한 결과와 그 에너지 스펙트럼을 나타낸다. 이렇게 얻어진 모형실내의 응답에 그림 14의 역필터를 convolution하면 대략 1.3~80 kHz의 정보를 내포한 임펄스응답이 얻어진다. 실제 모형내의 임펄스응답을 측정하는 경우에는 200~300 회의 동기가산을 하므로 측정에 소요되는 시간은 15분 정도이다. 그림 15에 모형용 dummy head를 사용하여 얻어진 모형 콘서트홀의 임펄스응답을 나타낸다.

이와같이 측정된 우리의 임펄스응답을 dry source(음악, 아나운스 등)와 convolution하여 청취시험용 신호를 생성 headphone을 통한 청감시험을 한 결과, 종래의 아날로그방식에 비하여 음질이 훨씬 개선됨을 물론 잔향감과 loudness 등의 차이까지 확실하게 구별할 수 있었다. 또한 임펄스응답 그 자체도 실의 음향상태를 판단하는데 적당한 신호라고 여기지며 그 응답을 직접 들어보면 어느정도의 SN비로 측정되었는지도 확인할 수 있다. 이때 이상적으로는 잡음이 전혀 들리지않을 정도의 SN비로 측정되지 않으면 안된다. 그렇지않으면 convolution 할 때 임펄스응답만이 아니고 잡음도 convolution 되어 외견상 잔향이 길어진 신호와 합성되는 것이 된다. 스피크를 사용한 측정에서는 동기가산회수를 많이 하므로서 SN비를 개선하고 있으나, 청감실험에 사용한 정도의 SN비를 얻는데는 수백회의 가산이 필요하나 전술한

이상적인 조건을 만족시키는데는 한계가 있다.

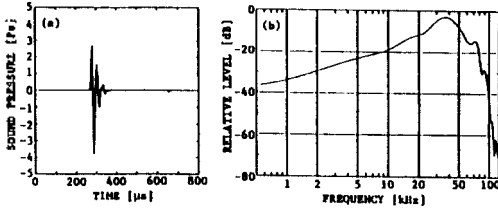


그림 13. 동기가산한 스파크방전 펄스파형(a)과 에너지스펙트럼(b)

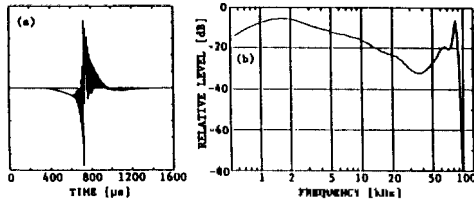


그림 14. 역필터의 임펄스응답(a)과 주파수특성(b)

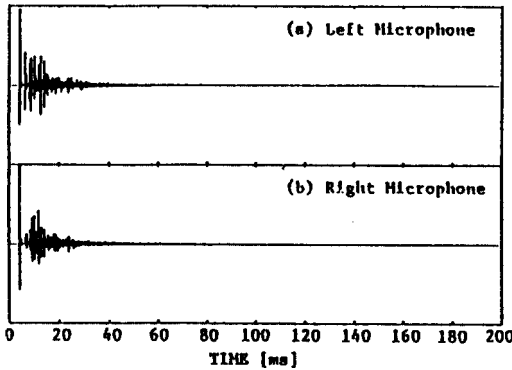


그림 15. 모형 Dummy Head로 측정된 1/10 모형관서트홀의 임펄스응답

VI. 맺음말

출동 실내임펄스응답의 각종측정법의 원리와 몇가지 응용예를 알아 보았다. 임펄스응답에는 음장의 물리적 특성의 대부분이 내포되어 있으므로 이것을 높은 정밀도로 측정할 수 있으면, 실내음향측정은 임펄스응답의 측정만으로 끝 마칠 수 있다. 하지만 현시점에서 SN비가 충분하게 유지되는 임펄스응답을 측정하는 단계까지는 이르지 못했다. 원리적으로는 장

시간에 걸쳐 다수의 평균처리를 하면 SN비는 개선될 수 있지만, 음향계는 엄밀하게 말하여 시불변시스템이 아니다. 특히 모형실험에서는 이 영향이 크다고 여겨지므로 단시간에 SN비가 큰 임펄스응답을 측정할 수 있는 방법의 개발이 요구된다. 더우기 SN비가 나쁜 환경하에서도 임펄스응답을 측정할 수 있는 방법도 검토할 필요가 있다.

실내음장은 3차원이며 음원의 지향성 및 수음방법이 변하거나 측정점이 약간 이동하면 임펄스응답은 크게 변화한다. 이와같이 매우 복잡한 음장중의 몇점에서 측정된 임펄스응답으로 음장을 어떻게 평가하나 또는 그 경우 임펄스응답을 물리적으로 이데까지 정확하게 측정하면 좋을지 등도 지난부터의 검토 과제라 할수 있다.

끝으로 앞에서 소개한 임펄스응답의 각종측정기술의 일부는 현재 필자 자신이 직접 연구에 적용하고는 있으나 대부분의 측정기술은 일본 동경대학 橋(다찌바나) 연구실에서 적용해오고 있는 기술들임을 밝혀둔다. 다만 여기 소개한 내용이 건축음향/소음분야의 연구 혹은 현업에 종사하시는데 다소나마 도움이 되었으면 하는 바램으로 본 내용을 소개하였다.

참 고 문 헌

1. A.J.Berkhout, D.de Vries and M.M.Boone, "A new method to acquire impulse responses in concert halls," J.Acoust.Soc.Am,68(1) (1980).
2. N.Aoshima, "Computer-generated pulse signal applied for sound measurement," J.Acoust.Soc.Am, 69(5) (1981).
3. 崔, 橋, "有限要素法による室内音場のインパルス応答の數値計算," 日本音響學會誌, 第49卷 5號 (1993).
4. 最近の室内音響測定法, 日本建築音響研究會資料 AA-89-14
5. 子安, 橋 외, "ホールの音響設計のための 1/10縮尺模型實驗," 日本建築音響研究會資料 AA89-5.
6. C.D.Kim, M.Abe, and K.Kido, "Investigations on the method for the estimation of impulse response using a rectangular pulse," J.Acoust. Soc.Jpn.(E)7, 5 (1986).
7. 西, 古川, "音楽信號を用いた室のインパルス應答の推定について," 日本音響學會講演論文集, 1989. 3.
8. 鈴木, 淺野, 會根, "音響系の傳達關數の模擬をめぐって(その2)," 日本音響學會誌, 第45卷 1號(1989).
9. H.Alrutz and M.R.Schroeder, "A Fast Hadarnard Transform Method for the Evaluation of Measur-

- ements Using Pseudorandom Test Signals," 11th ICA, (1983).
10. H.Tachibana, Y.Yamasaki, M.Morimoto, Y.Hirasawa, Z.Maekawa, C.Posselt, "Acoustic survey of auditoriums in Eurpoe and Japan," J.Acoust.Soc. Jpn. (E)10,2 (1989).
  11. 買手, 口高, 矢野, 橘, "スイブパルス法によるホルのインパルスの測定," 日本音響學會講演論文集, 1989. 3
  12. H.Els and J.Blauert, "A Measuring system for acoustic scale models," Proc. Vancouver Symp. (12th ICA) (1986).
  13. Y.Hidaka, H.Yano and Tachibana, "Scale model experiment on room acoustics by hybrid simulation technique," J.Acoust.Soc.Jpn. (E)10,2 (1989).

▲최석주 : Vol.12 No.2E호 참조