■ 特輯 · 技術解說

음향 측정 기술

殷 熙 俊
(正 會 員)
韓國標準研究所 音響研究室

Ⅰ. 서 론

넓은 의미에서 음향 현상은 탄성매질의 탄성 복원력에 의해서 그 매질을 구성하는 입자들이 평행위치를 중심으로 왕복운동을 할 때 나타나는 진동현상을 의미한다. 대기중의 음향 현상을 소리라고 부르고 고체에서는 진동, 물에서는 수중음향이라고 부르지만 이들 모두에 수반되는 물리적 과정은 본질적으로 비슷하다. 그러나 여기서는 소리라고 하는 대기중의 한 특별한 파동현상을 대표하는 좁은 의미의 음파만을 다루기로 한다. 음파는 대기중에 존재할 수 있는 압력파 중에서 사람이 들을 수 있는 크기와 주파수 범위의 파동으로서 정의된다. 이 주파수를 가청 주파수라고 하며 대체로 20Hz에서 20KHz 사이의 값을 갖는다. 그러나 가청 주파수 범위내의 파동일지라도 그 크기가 "소리의 크기 범위"밖이라면 소리라고 볼 수 없다. 예를 들어서 음압도가 140dB을 넘어서 귀에 통증을 주는 높은 소음은 이미 소리로서의 의미를 갖지 않으며 이의 측정 역시 별도의 장비와 절차를 요구한다. 이와 같이 음향측정은 파동현상을 대상으로도 하기 때문에 다른 측정에서는 볼 수 없는 특별한 절차와 주의를 요구한다. 우선 측정인과 측정장비가 측정 대상 음장내에 있어야 하기 때문에 음장이 교란되어 측정 결과에 오차가 발생할 수 있다. 대상음장의 교란은 음향 측정에서 우선적으로 해결해야 할 문제이다. 음파는 기본적으로 동적물리 현상이며, 따라서 음파를 설명하는 물리량들은 시간변화 함수로써 주어진다. 따라서 음향 측정은 기본적으로 시간신호의 신호처리를 바탕으로 한다. 신호처리 기술은 근래 고용량 고속 마이크로프로세서와 컴퓨터가 일반화 되면서 활용 범위가 크게 확대되고 있다. 이에 따라서 불과 10년 전까지만해도 상상할 수 없었던 측정기술이 이제는 쉽게 활용할 수 있게된 경우를 흔히 볼 수 있다.

이 논문에서는 음향 측정기술이 요구되는 여러 분야 중에서 특히 전기음향분야를 중심으로 이와 관련된 측정기술을 소개하고자 한다. 이에 앞서서 음향현상에 대한 기본적인 개념과 주요 측정량을 설명함으로써 측정기술의 활용에서 요구되는 물리적 개념의 이해를 도모한다. 끝으로 음향측정의 신기술에 대한 세계적인 추세와 연구동향을 소개함으로써 이 분야에 대한 앞으로의 국내 연구방향을 함께 생각해 볼 수 있는 계기로 삼고자 한다.

Ⅱ. 음향현상과 측정량

1. 음파의 기본 파라미터

음파가 진행할 때 대기의 압축탄성에 의해서 평형상태의 대기압을 중심으로 작은 압력의 변화가 발생된다. 이 압력의 변화를 음압이라고 부르며 p로 나타낸다. 평형상태의 대기압은 $10^5 N/m^2$가량되는데 반해서 통증을 느끼게 되는 높은 음압의 경우도 $200N/m^2$밖에 안되어서 음파에 의한 대기의 섭동이 미세함을 알 수 있다. 간단한 예로써 그림 1과 같은 정현파를 살펴보자. 이 그림에서 수평축을 공간 변수 x로 가정할 때 한 파동의 크기를 파장이라고 부르며 λ로 나타낸다. 반면에 수평축을 시간변수 t로 가정할 때의 한 파동의 크기는 주

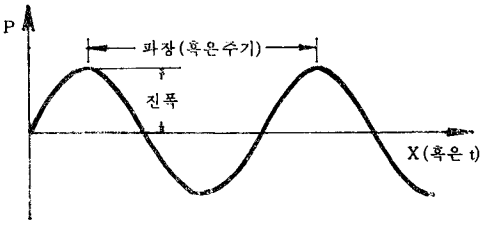


그림 1. 단순 정현파와 파동의 파라미터

기를 의미하면서 T로 나타낸다. 음파의 주파수 f는 1초 동안에 발생되는 파동의 수로써 정의된다. 이 정의를 하는데 주파수와 주기 사이에는 다음과 같은 관계식이 존재한다.

$$f=\frac{1}{T} \quad (1)$$

이 같은 주파수의 정의는 음파가 1초 동안에 진행한 길이를 파장으로 나눈 수와 동일하다. 음파가 1초 동안에 진행한 길이를 위상속도라고 부르며 c로써 나타낸다. 따라서

$$f=\frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

이상 설명한 파장, 주기, 주파수, 위상속도 및 그림 1에서 정의된 진폭은 정현파의 특성을 나타내는 기본 파라미터들이다. 이들 중에서 진폭을 제외한 네개의 파라미터들은 식(1), (2)에 의해서 서로 관련되기 때문에 임의의 두개만 알면 정현파를 정의할 수 있다. 더우기 특별한 경우를 제외하면 위상속도 c는 정상상태 대기에 대한 값(약 340m/s)으로써 가정된다. 따라서 대부분의 실제 음향 문제에서는 진폭과 주파수(혹은 주기, 파장)의 두가지 파라미터만을 취급한다.

2. 주파수 분석

단순 정현파는 하나의 진폭과 주파수 값에 의해서 정의된다. 이러한 음파를 순음(純音)이라고 부르기도 한다. 순음은 확성기, 마이크로폰, 기타 음향기기들의 주파수 반응 특성조사를 위한 테스트 신호로써 흔히 사용된다. 실제 대부분의 음파들은 시간 공간상의 변화가 대단히 복잡하여 단순 정현파에 의해서 간단히 설명할 수가 없다. 그러나 이러한 복잡한 음파도 여러개의 순음의 합으로 구성되어 있음을 증명할 수 있다. 음파를 순음의 성분으로 나누는 기술을 주파수 분석이라고 한다. 주파수 분석에는 광대역 분석과 협대역 분석이 있다. 어떠한 주파수 분석에서든 밴드폭 B와 분석시간 T는 다음과 같은 조건을 만족시켜야 한다.

$$BT \geq 1 \quad (3)$$

따라서 밴드폭이 좁을수록 분석시간은 증가하며 이러한 이유로 협대역 분석은 음향기기 성능 테스트나 기계진동 분석같이 신호 내용이 시간에 따라서 거의 변하지 않는 定常 신호를 대상으로 할 때 주로 이용된다. 협대역 분석의 대표적인 예가 FFT(Fast Fourier Transform) 분석이다. 반면에 일반 환경 소음과 같이 신호 내용이 시간에 따라서 심하게 변하는 非定常 신호에 대해서는 분석시간이 짧은 광대역 분석을 이용한다. 더우기 많은 주파수 성분이 섞여있는 음파에 대한 인간 귀의 반응은 개개의 주파수 성분에 대한 것이라기 보다는 전반적인 주파수 특성을 바탕으로 하기 때문에 광대역 분석은 보다 실질적인 의미를 갖는다. 옥타브 밴드 분석은 음향의 광대역 주파수 분석에서 가장 흔히 사용되는 분석방법이다. 옥타브 밴드 분석은 일반적으로 아날로그 여파기에 의해 이루어지며, 좀 더 높은 주파수 분해능이 필요한 경우에는, 이를 삼등분한 좁은 밴드인 1/3옥타브 밴드를 이용하기도 한다. 옥타브 밴드는 그 밴드의 최고 주파수 f_2가 최저 f_1의 2배인 주파수 폭으로 정의된다. 즉

$$f_2=2f_1 \quad (4)$$

따라서 옥타브 밴드는 f_1과 f_2를 명시함으로써 정의될 수 있으나 일반적으로 다음과 같이 정의된 중간 주파수에 의해서 정의된다.

$$f_c=\sqrt{f_1\times f_2}=\sqrt{2}\,f_1 \quad (5)$$

가청 주파수 범위에 대한 국제 기준에 의한 옥타브 밴드가 표 1에 나타나 있다. 옥타브 밴드 분석은 흔히 휴대용 소음계에 부착할 수 있는 옥타브 밴드 여파기에 의해서 수행된다. 이러한 여파기는 한번에 한 밴드씩만 측정하고 동시에 모든 밴드를 측정할 수 없다.

표 1. 옥타브 밴드의 국제기준

중간주파수(Hz)	주파수 폭(Hz)
31.5	22 - 44
63	44 - 88
125	88 - 177
250	177 - 354
500	354 - 707
1000	707 - 1414
2000	1414 - 2828
4000	2828 - 5657
8000	5657 - 11314
16000	11314 - 22628

따라서 특성이 심하게 변하는 非定常 소음에는 직접 이용할 수 없다. 이 경우 분석하고자 하는 소리를 일단 녹음한 테이프를 반복 재생하여 각 밴드의 시간에 따른 변화를 구할 수도 있으나, 實時間 분석기를 이용하기도 한다. 실시간 분석기는 모든 주파수 밴드에 대한 분석을 거의 實時로 동시에 하기 때문에 더단히 편리하지만 값이 비싼 것이 흠이다.

3. 실효치

이제까지 음파의 두 기본 파라미터인 주파수와 진폭 중에서 주파수에 의해서 음파의 특성을 나타내는 과정

을 살펴보았다. 본 절의 나머지 부분에서는 진폭과 관련된 개념을 살펴보기로 한다. 진폭은 음파의 세기를 나타내어서 정현파의 경우에는 그 자체로서 충분한 역할을 한다. 그러나 그림 2(b)와 같은 랜덤파의 경우에 진폭은 의미가 없으며, 이러한 파동의 세기를 단일 지수로써 나타내기 위해서는 적절한 평균치 개념을 사용해야 한다. 시간 신호의 순간값의 실효치는 그 신호에 포함된 에너지양과 직접 관련되는 양으로서 물리적으로 중요한 개념이다. 어떤 물리량 X(t)의 측정 시간폭 T에 대한 실효치는 다음 식에 의해서 정의된다.

$$X_{rms}=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T X^2(t)\,dt} \qquad (6)$$

음향측정에서는 X대신에 음압 P를 사용한다. 그림 2는 정현파와 랜덤파에 대한 실효치의 예이다. 특히 정현파의 경우에는 실효치와 진폭 사이에 다음과 같은 단순 관계식이 존재한다.

$$P_{rms}=\frac{A_P}{\sqrt{2}} \qquad (7)$$

여기서 A_P는 정현파의 진폭이다.

현재 사용중인 모든 음향 측정기기들은 측정된 음압을 실효치로써 나타낸다. 이제부터 이 논문에서 사용하는 모든 양은 실효치를 나타내는 것으로 가정한다.

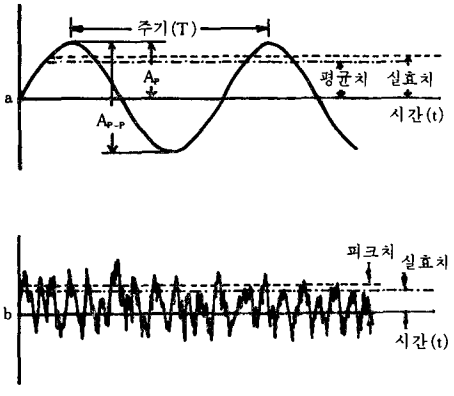


그림 2. 정현파와 random파의 r. m. s. 평균값

4. Intensity와 음향파워

음향 측정의 기본량은 마이크로폰에 의해서 측정되는 음압이다. 압력이 물리현상을 설명할 수 있는 기본량의 하나인 것은 사실이지만 이 보다 더 근본이 되는 물리량은 에너지이다. 일반적으로 음파에 수반되는 에너지는 음압과 입자속도의 함수이기 때문에 음향 에너지를 음압만으로 나타낼 수는 없다. 그러나 정현파(sinusoidal plane wave)의 경우에는 시간평균 음향 에너지 밀도 E와 음압 실효치 P사이에 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$E=\frac{P^2}{\rho_0 c^2} \qquad (8)$$

여기서 ρ_0는 대기 밀도이다.

음향 intensity는 단위 시간당 단위면적을 통해서 흐르는 음향 에너지로써 정의된다. 따라서 시간평균 intensity I는 다음과 같이 주어진다.

$$I=E\cdot c=\frac{P^2}{\rho_0 c} \qquad (9)$$

여기서 $\rho_0 \cdot c$는 대기음향 특성 임피던스로써 정의된다. 이 관계식은 평면파 뿐만 아니라 구면파에 대해서도 그대로 적용될 수 있음을 증명할 수 있다. 정현파의 intensity에 대한 위의 단순 관계식은 실제음향 측정에서 중요한 의미를 갖는다. 이의 대표적인 적용은 음향파워 측정에서 예를 들 수 있다. 음향 파워는 단위시간당 음원이 방출하는 총 음향 에너지로써 정의되며 다른 전자기계적 특성과 함께 음원의 고유한 물리량 중의 하나이다. 이의 대표적인 활용은 스피커의 음향출력 효율 결정에서 찾을 수 있다. 또한 소음 발생기계들의 상대적인 비교에서 객관적인 평가량으로써 활용되기도 한다. 음향 파워의 정의를 따를 때 음향 파워는 다음과 같이 음압의 함수로써 나타낼 수 있다.

$$W=\int_S I\,ds=\frac{1}{\rho_0 c}\int_S P^2\,ds \qquad (10)$$

여기서 S는 음원을 둘러싼 임의의 측정면이다. 이 식에 의하면 S면위의 모든 점에서 음압을 측정함으로써 그 음원의 음향파워를 결정할 수 있다. 이 방법의 정밀도는 S면 위의 측정위치의 수에 따라서 다르다. 음압의 측정위치 수를 무한히 크게하면 대단히 정밀하게 음향파워를 결정할 수 있다. 그러나 대부분의 경우에 S면 위에서의 위치에 따른 음압의 변화는 그리 크지 않기 때문에 10내지 20개점에서의 음압 측정으로써도 비교적 정확하게 음향파워를 결정할 수 있다.

5. 음압도 dB(deciBel)

일반적으로 음향에서는 dB라는 단위로써 음파의 크기를 나타낸다. 소리는 본질적으로 대기의 압력의 변화를 우리 귀의 고막에 의해서 감지하는 현상이다. 따라서 소리의 크기는 이 압력의 크기로써 정의하면 될 것이다. 그러나 사람이 들을 수 있는 소리의 크기는 최저 가청압력인 2×10^{-5} Newton/m²에서 통증을 느끼기 시작하는 압력인 200 Newton/m²까지 광범위하기 때문에 압력 자체로써 소리의 크기를 정의하는 데는 불

편이 따른다. 이처럼 넓은 범위에서 변하는 양을 취급하기 위해서 물리학이나 공학에서는 흔히 그 양의 log 값을 이용한다. dB(deciBel)은 기본적으로 다음과 같이 정의된다.

$$dB = 10\log\left(\frac{power}{기준power}\right) \quad (11)$$

음향에서의 dB는 power 대신에 앞에서 정의된 intensity를 사용하며,

$$\text{intensity level } L_I = 10\log\left(\frac{I}{I_o}\right) \quad (12)$$

로 정의한다. 여기서 I_o는 기준 intensity로서 최저 가청압력 $P_o = 2\times10^{-5}$ Newton/m²에 해당하는 $I_o = 10^{-12}$ Watt/m²로 가정한다. 식(9)에 의하면 I는 P의 자승에 비례하므로 식(12)는 다음과 같이 음압의 함수로 쓸 수 있다.

$$\text{음압도 } L_P = 10\log\left(\frac{p^2}{p_o^2}\right) = 20\log\left(\frac{p}{p_o}\right) \quad (13)$$

이처럼 dB는 어떤 기준값에 의해 정의된 상대적인 양이다. 한가지 주의할 것은 식(12), (13)에서 intensity 와 음압은 모두 실효치인 점이다. 이와 같이 정의된 dB는 intensity에 의한 것이든 음압에 의한 것이든 같은 값을 준다. 앞서 말한대로 dB scale의 가장 큰 장점은 넓은 범위의 양을 취급하기 쉬운 작은 범위의 숫자로 바꾼다는 것이다. 예컨대 최저 가청압력과 통증을 느끼기 시작하는 압력은 10^7의 차이가 있지만 dB scale에서는 불과 140dB의 차이로 줄어든다. 그림 3은 몇가지 경우들에 대한 음압도를 보여준다. 이 그림에서 mirco pascal(μP_a)는 10^{-6} Newton/m²의 압력으로서, 각 경우에 대한 절대 음압을 나타낸다.

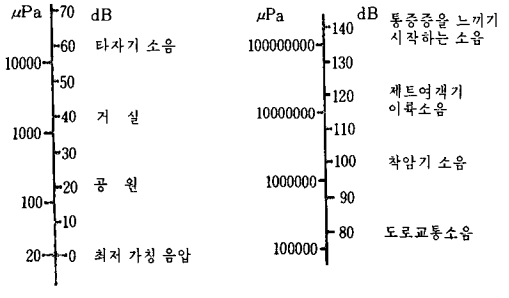


그림 3. 음압도의 예 (Pa = Pascal = Newton/m²)

6. 청감보정

음향측정 장비들은 기본 음압도를 측정하는 외에 흔히 몇가지의 청감보정 회로를 포함하고 있다. 이들 청감보정 회로는 기계적으로 측정된 음압도를 사람이 실제로 느끼는 레벨로 맞추기 위해서 개발된 것이다. 즉 사람 귀는 주파수에 따라서 그 감지도가 다르기 때문에 기계적으로 측정된 음압도를 그에 따라서 보정함으로써 실제로 사람이 느끼는 상태를 모의(simulate)해준다. 일반적으로 사람의 귀는 1000Hz 이상 고주파 영역에서 예민하고 주파수가 감소함에 따라서 감지도는 감소한다. 이와 같은 저주파에서의 감지도의 감소는 소리의 세기에 따라서 다르다. 즉 약한 소리의 경우에는 저주파 감지도의 감소폭이 큰 반면, 높은 세기의 소리에서는 감소폭이 작다. 따라서 청감보정곡선은 소리의 세기를 3등분하여, 중간 이하의 소리에서는 A곡선을 쓰고 그 이상의 소리의 세기에 대해서는 B, C 곡선을 차례로 쓴다. 그림 4는 이와 같이 정의된 3개의 곡선을 보여준다.

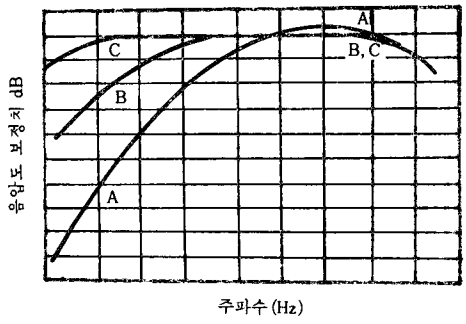


그림 4. 청감 보정곡선

이들 곡선을 사용할 때는 측정된 음압도에서 같은 주파수에 해당하는 곡선의 값을 빼면 된다. 이 감소되는 양이 바로 그 주파수에서의 사람 귀의 감지도의 감소량을 나타낸다. 가장 흔하게 쓰이는 보정은 A보정이다. 청감보정된 음압도는 dB다음의 괄호안에 해당하는 보정방법을 명시하여 나타낸다. 예컨대 dB(A)는 A보정된 음압도를 나타낸다. 모든 주파수를 합친 전체적인 음압도(overall sound pressure level)는 이와 같이 각 주파수의 음압도를 dB 대수법에 의해서 합하여서 구한다.

Ⅲ. 전기음향 측정기술

음향 측정과 관련된 분야는 전기음향, 환경소음등 여러가지 예를 들 수 있다. 지면 관계상 여기서는 전자

공학과 직접 관련이 있는 전기음향만을 취급하기로 한다. 전기음향은 음의 입력에서부터 녹음, 증폭 및 재생에 이르기 까지의 모든 단계의 전기 전자 장치들을 다루는 전자공학의 한 중요한 분야이다. 전기음향 기술의 궁극적인 목적은 좋은 재생음을 얻는 것으로서, 이를 위해서 재생음에 영향을 줄 수 있는 모든 요소들을 추적 분석하며 전자장치의 기능을 개선하는 것으로 요약할 수 있다. 각 단계에 대한 주요 장치들을 살펴보면 다음과 같다.

음의 입력장치 : 마이크로폰

녹음장치 : 테이프 녹음기, turntable, compact disk

증폭 및 조정장치 : 증폭기, tuner, equalizer

재생장치 : 스피커

여기서 음의 입출력 장치인 마이크로폰과 스피커의 성능 측정기술에 대해서 요약 설명하고자 한다.

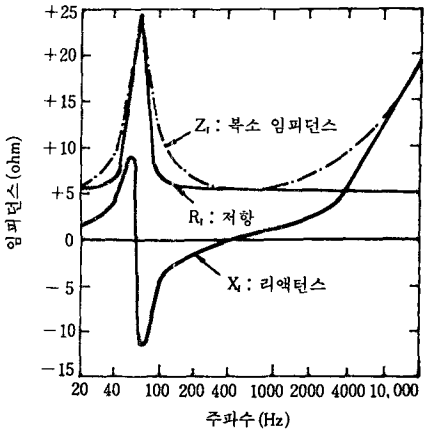


그림 5. 스피커의 전기 임피던스 측정 예

1. 스피커의 성능 측정기술

스피커의 성능과 특성을 나타내는 주요 데이타로서는 전기적 임피던스, 주파수 반응, 비선형왜곡(distortion), 지향성, 효율등을 들 수 있다. 우선 이들 각각의 측정방법에 대해서 살펴보고자 한다.

(1) 전기 임피던스

스피커 측정시 아래의 네종류의 전기 임피던스는 중요한 요소가 된다. 이들은 스피커 자체에만 관련된 문제일 뿐 아니라 신호를 공급하는 전원과의 관계에서도 중요한 역할을 한다. 또한 파워전달, 주파수반응, 비선형 왜곡특성등과 같은 양을 적절한 조건하에서 측정하기 위해서라도 이들 값의 결정은 매우 중요하다.

○ 스피커의 전기 임피던스

스피커의 전기 임피던스는 스피커의 입력단자에서 측정한 주파수별 복소 전기 임피던스이다. 이는 스피커 입력단자에 가해준 전압과 전류의 위상관계 및 크기를 측정하여 결정한다. 이때 전압과 전류는 정현파이어야 한다. 이의 표현은 복소형태로 주어지는데 크기와 위상을 주파수의 함수로 나타내거나, 저항과 리액턴스 성분을 주파수의 함수로 나타낸다.

○ 스피커의 정격 임피던스(Z_R)

스피커의 정격 임피던스는 순수한 저항값으로 이는 전원으로부터 스피커에 공급되는 전력을 측정하기 위해 대치된다. 예를 들어 스피커의 정격 임피던스가 R ohm일 경우 증폭기의 출력을 측정하기 위해서는 저항 R(ohm)을 증폭기의 출력단자에 연결하여 측정한다.

○ 스피커 측정 전원 임피던스(Z_G)와 증폭기 출력 임피던스(Z_G)

스피커 측정 전원 임피던스는 스피커의 성능을 시험하기 위해 스피커 및 일정전원과 직렬로 연결되는 순수한 저항의 값이다. 증폭기 출력 임피던스는 스피커에 전력을 공급하는 증폭기의 출력단자에서 측정된 내부 임피던스를 말한다.

(2) 주파수 반응

스피커의 기준음압 반응은 정규 음압 반응으로써 스피커의 주축상 1m 떨어진 자유음장에서 측정된 음압과 스피커의 정격 임피던스에 공급된 전력과의 비로 주어지며 단위는 dB이다. 이때 기준양은 음압일 경우 0.002μbar(dyne/cm^2)이며 전력(파워)인 경우 0.001 Watt로 주어진다. 기준음압 반응 G_L을 수식으로 표시하면 다음과 같다.

$$G_L = h - H = 20\log_{10}(P_L/P_0) - 10\log(P_E/P_0) \quad (14)$$

여기서, h는 음압도

H는 전력(파워)레벨, 단위는 dBm(re 0.001 Watt)

P_L은 스피커로부터 1m 떨어진 위치에서의 음압

$P_E = E_G^2 Z_R/(Z_G - Z_R)^2$는 스피커에 가해준 전력, E_G는 개방회로 전압이다.

위 식으로 주어지는 기준 음압반응은 스피커의 주파수 반응이라고 부른다. 스피커의 주파수 반응을 측정하기 위해서는 그림 6 에서 보는 바와 같이 무향실에 스피커를 설치한 후 제조회사에서 명시한 주축이 있는 경우에는 이 주축상에, 그렇지 않은 경우에는 스피커의 중심에서 스피커 면에 수직한 축상에 마이크로폰을 설치한다. 이때 스피커와 마이크로폰 사이의 거리는 자유음장을 얻기 위해 적어도 스피커 직경의 세배는 되어야 하는데 일반적으로 1m로 한다. 스피커의 주파수

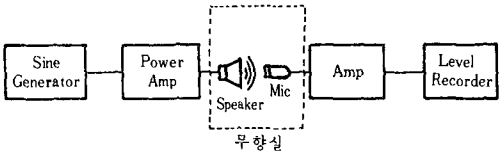


그림 6. 스피커의 주파수 반응측정 시스템

반응을 표시하기 위해서는 스피커와 마이크로폰과의 거리, 스피커의 정격 임피던스, 이에 가해준 전력, 스피커 측정에 사용된 전원의 임피던스를 명시하여야 한다.

(3) 정격효율

스피커의 정격효율 η는 주파수에 따라 그 값을 달리하며, 전력을 음향 파워로 변환시키는 능력 뿐만 아니라 전원으로 부터 전력을 받아들이는 능력에도 의존한다. 이는 음향파워 출력 W와 스피커의 정격 임피던스에 공급해 준 전력 P_E와의 비에 의해서 다음과 같이 주어진다.

$$\eta = 10\log_{10}(W/P_E) \qquad (15)$$

스피커의 음향 파워는 앞 절에서 설명한 방법에 의해서 측정한다.

(4) 지향특성

스피커의 지향계수는 스피커 주축상 자유음장에서의 음향 intensity와 스피커 중심을 원점으로 하는 구면상의 평균 음향 intensity와의 비로서 주어진다. 이를 나타내기 위해서는 주파수를 명시하여야 하며 측정 위치는 스피커로부터 충분히 멀어서 측정위치에서는 구면파를 형성하여야 한다. 지향지수는 지향계수에 상용 대수를 취해 dB로 나타내며 그 식은 다음과 같이 주어진다.

$$K_L = 10\log\left(\frac{I_r}{I_a}\right) \qquad (16)$$

여기서, I_r은 주축상 거리 r에서의 자유음장 intensity이고, I_a는 음향파워/$4\pi r^2$로 평균 음향 intensity이다.

(5) 비선형 왜곡

스피커의 비선형 왜곡은 음향출력과 전기 입력사이의 비선형에 의한 불필요한 파형의 변화이다. 이러한 왜곡은 스피커 출력의 유효크기를 제한하는 하나의 요소가 된다. 스피커의 중요한 비선형 원인으로서는 ① 스피커의 역학적 진동 시스템에 있어서 가해준 힘과 변위 사이의 비선형, ②역학적 진동 시스템을 가동시키기 위한 자장의 불균형 및 ③특히 호온 스피커에 있어서는 대기 자체의 불균일성 등을 들 수 있다. 처음의 두 원인은 주로 변위가 큰 저주파에서 왜곡을 발생시키고 세번째 원인은 고주파에서 심한 왜곡을 유발시킨다.

○ 고조파 왜곡(harmonic distortion)

비선형의 결과로 전기신호 입력에는 없는 주파수 성분이 음향출력에 나타난다. 단일 주파수 입력에 대해 이러한 비선형 왜곡은 입력 주파수의 정수배로 주어지는 고조파 및 입력주파수를 정수로 나눈 저조파 왜곡을 발생시킨다. 입력 주파수가 1KHz인 경우 고조파 왜곡의 예가 그림 7에 나타나 있다. 총 고조파 의율은 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$d = \sqrt{\frac{p_{2'}^2 + p_{3'}^2 + \cdots}{p_{2'}^2 + p_{2'}^2 + \cdots}} \times 100\% \qquad (17)$$

여기서, $p_{2'}$는 X번째 고조파의 진폭을 나타낸다.

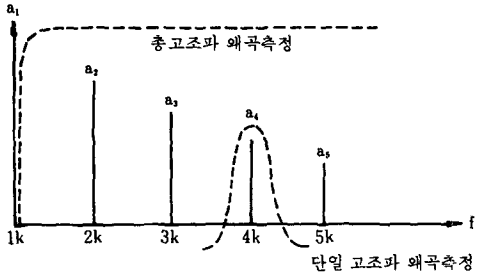


그림 7. 고조파 왜곡

총 고조파 의율을 측정하기 위해서는 고조파 통과 여파기를 사용하여 입력 주파수 성분 및 그 이하의 주파수 성분을 제외한 나머지 고조파 성분을 감쇄없이 통과시킨다. 이러한 여파기 작용을 거친 출력이 곧 의율을 나타내는데 기준레벨에 대하여 20dB, 40dB, 60dB … 떨어짐에 따라 의율은 각각 10%, 1%, 0.1%…로 주어진다. 이를 측정하기 위한 측정 시스템은 그림 8에서 보는 바와 같다. 마찬가지로 총 저조파 의율을 측정하기 위해서는 저주파 통과 여파기를 사용하여 동일한 방법으로 측정한다.

스피커 설계를 위해서는 총 고조파 의율보다는 좀더 세밀한 분석을 위해 개별 고조파 왜곡도를 측정한다.

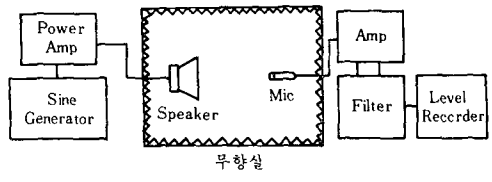
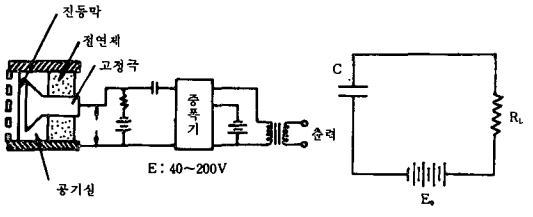


그림 8. 고조파 왜곡 측정 시스템

이를 측정하기 위해서는 대역통과 여파기를 사용하여 필요한 주파수 성분만을 통과시킨다. 이상 설명한 고조파 및 저조파 왜곡 이외에도 상호변조왜곡(intermodulation distortion)이 발생할 수 있으나 이에 대한 설명은 생략하기로 한다.

Ⅳ. 마이크로폰 특성 측정기술

음향 측정에서 정밀도와 안정도가 높아서 가장 많이 쓰이는 마이크로폰은 콘덴서 마이크로폰이다. 콘덴서 마이크로폰은 높은 내부 임피던스를 갖고 있기 때문에 마이크로폰 출력 단계에서 전치증폭기를 필요로 하며, 전치증폭기의 높은 임피던스는 회로내에 잡음을 야기시킬 수 있다. 또한 이 마이크로폰은 전지나 또는 아주 잘 정류된 출력을 가진 정류기로 부터 200-400 볼트의 분극전압을 필요로 한다. 이러한 단점 때문에 콘덴서 마이크로폰은 크리스탈 마이크로폰이나 가동코일 마이크로폰등에 비해서 일반 용도로는 많이 쓰이지 않으나 정밀 음향측정과 고감도 녹음등에 널리 사용되고 있다. 콘덴서 마이크로폰은 그림 9(a)와 같이 고정된 백플레이트와 얇은 평행 금속 진동판으로 구성되어 있다. 백플레이트는 마이크로폰의 나머지 부분과 절연되어 있고 그림 9에서 보는 바와 같이 분극전압 E_o가 백플레이트와 진동판에 작용한다. 음파가 진동판에 입사되었을 때 생기는 진동판의 변위는 마이크로폰의 용량 C를 변화시키며, 이에 의해서 부하저항 R_L에 신호전압 e_L이 발생된다.



(a) 구조 (b) 전기등가회로

그림 9. 콘덴서 마이크로폰

마이크로폰의 특성은 일차적으로 주파수에 따른 반응 감도와 동적 범위에 의해서 결정된다. 반응감도 M은 마이크로폰의 진동막에 균일하게 가해진 음압 p에 대한 출력단자의 개방회로 전압(open-circuit voltage) e의 비로서 주어진다.

$$M = e/p \qquad (18)$$

대개의 변환기가 그렇듯이 일정한 입력에 대해 출력치가 큰 것이 이상적이다. 마이크로폰의 경우도 우선 반응감도가 높은 것이 바람직하다. 그러나 특히 정밀 측정용 마이크로폰에서는 이와 함께 따른 반응감도가 일정한 값을 가져야 한다. 마이크로폰의 주파수에 따른 반응감도를 결정하는 것을 교정이라고 한다. 마이크로폰의 교정에는 비교교정과 절대교정 방법이 있다. 비교교정은 크기를 알고 있는 기준 음장속에 대상 마이크로폰을 설치하고 그 출력 전압을 측정하는 방법으로서, 일반 용도의 마이크로폰 감도 측정에 많이쓰인다. 절대 교정은 마이크로폰의 음감지와 음발생 기능의 가역성(reciprocity)에 바탕을 둔 방법으로서 가역 교정이라고도 부른다. 가역교정의 중요성에 비추어 이에 대해서 아래에 간단히 설명하고자 한다. 마이크로폰은 아래 그림과 같이 전기적 등가회로에 의해서 나타낼 수 있다.

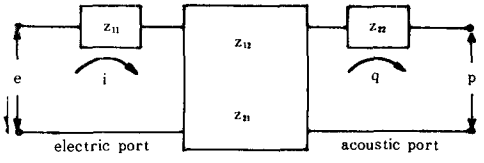


그림10. 가역 마이크로폰의 등가회로

여기서

p=진동막에 작용하는 음압

e=마이크로폰 출력단에서의 개방회로 전압

q=진동막의 부피속도

i=마이크로폰의 출력단의 전기적 임피던스

z_{11}=마이크로폰의 전기 임피던스

z_{22}=마이크로폰의 음향 임피던스

z_{12}, z_{21}=전달 임피던스

위의 등가회로로부터 다음의 관계식을 유도할 수 있다.

$$e = z_{11}\cdot i + z_{12}\cdot q$$
$$p = z_{21}\cdot i + z_{22}\cdot q \qquad (19)$$

마이크로폰의 가역성에 의해서 $Z_{12}=\pm Z_{21}$의 관계가 존재한다. 가역교정은 이 같은 특성을 갖는 세개의 가역성 마이크로폰을 다음 그림과 같이 두개씩 도합하여 결합기로 연결하여 수행한다. 이 그림의 각각의 결합에서 한 마이크로폰을 음원의 역할을 하고 다른 하나는 감지기의 역할을 한다. 이들 세개의 결합 조건에 대해서 식 (19)로 주어지는 관계식을 적용하고 결합기의

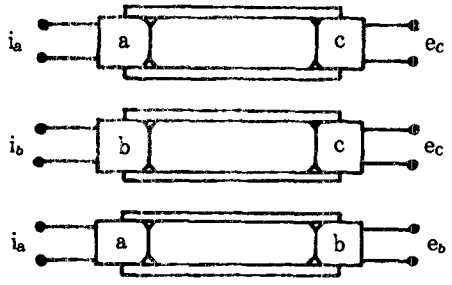


그림11. 세 마이크로폰의 결합방법

음향 전달 임피던스 Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ac} 등을 가정하여 세 마이크로폰의 감도 M_a, M_b 및 M_c에 대한 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$M_aM_b=\frac{1}{Z_{ab}}\frac{e_b}{i_a}$$

$$M_bM_c=\frac{1}{Z_{bc}}\frac{e_c}{i_b} \qquad (20)$$

$$M_aM_c=\frac{1}{Z_{ac}}\frac{e_c}{i_a}$$

여기서 음향 전달 임피던스는 결합조건과 결합기의 기하학적 구조등에 의해서 별도로 결정된다. 따라서 식 (20)은 세개의 미지수 M_a, M_b 및 M_c를 마이크로폰 출력단에서 측정된 전압과 전류 값에 의해서 결정되는 세개의 방정식으로 나타내고 있으며 이로부터 세 마이크로폰의 감도를 결정할 수 있다. 모든 조건이 적절하게 유지될 때 이 방법에 의해서 ±0.01dB 까지의 정밀도를 기대할 수 있다.

V. 신호처리 기술과 음향측정 신기술

"파동"으로서 대표되는 음향현상은 기본적으로 동적 물리현상이다. 동적현상의 두드러진 특징은 그 현상을 나타내는 양들이 시간의 함수로 주어진다는 것이다. 음향의 경우에도 음파를 나타내는 음압 P(t)는 시간변화 함수로 주어지며, 따라서 음향측정기술의 기본은 이 시간신호를 적절하게 처리하여 대상 현상을 설명할 수 있는 객관적이고 의미있는 데이타를 유도하는 것이다. 한 예로써 제Ⅱ장에서 설명한 실효치 개념은 이와 관련된 초보적이면서도 가장 중요한 개념이다. 이 같은 신호처리 개념은 대상 현상이 복잡해지고 그로부터 더욱 많은 정보의 추출이 요구됨에 따라서 점차 고도화된 신호처리 기술로 발전하여 왔다. 실제로 현대 신호처리기술의 근간은 음향문제에 대한 응용을 목적으로 개발되었으며, 오늘에도 신호처리 기술은 음향분야에서 가장 많이 활용되고 있다. 더우기 근래 마이크로프로세서와 컴퓨터의 활용이 일반화되면서 대용량 신호에 대한 고속처리가 가능하게 되어 디지탈 신호처리기술이라는 새로운 학문 분야가 나타나게까지 되었다. 이 같은 추세에서 나타난 대표적인 새로운 측정 기술로서 음향 intensity 측정기술을 들 수 있다.[2,3] 이 기술은 적당한 간격 (몇 cm정도)을 두고 설치된 두개의 마이크로폰에 의해서 측정된 음압 신호의 차이를 이용하여 두 마이크로폰을 연결하는 축 방향으로 흐르는 음파의 에너지를 측정하는 것으로서, 이제까지 scalar 음압 측정만으로는 불가능하였던 여러가지 응용 가능성을 제시하고 있다.

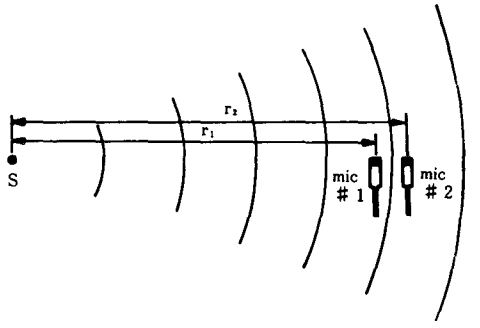


그림12. 두 마이크로폰에 의한 음향 intensity 측정

이 기술의 대표적인 응용 예로서 음원 탐지를 들 수 있다. 즉 미지의 多重 음원에 의해서 형성된 음장에 대해서 intensity 측정 기술을 적용함으로써 특정 음원의 위치와 기여도를 결정할 수 있다. 두 마이크로폰에 의한 intensity 측정 개념을 확대하여 Williams와 Maynard[4,5]는 근접장 홀로그라피 기술을 개발하였다. 이 기술에 의해서 진동면 근처에서 측정된 음압 정보를 바탕으로 진동면의 동적 특성을 가시화 할 수 있다.

신호처리 기술의 발전은 이외에도 미세음원 탐지를 위한 phased-array 안테나 개발로 이어지는 등 음향측정기술은 디지탈 기술의 발달에 의한 혜택을 다

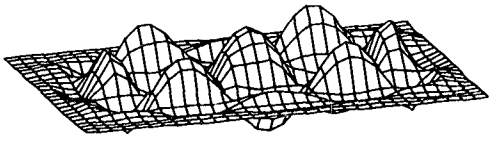


그림13. 사각 평판의 동적 진동모드 가시화

른 어느 과학기술 분야에 못지 않게 누리고 있다.

현대 과학과 기술에서 레이저는 거의 한계가 없을 정도로 응용되고 있다. 레이저의 보급에 따른 각종 광신호 처리 장비의 출현과 위에서 언급한 디지탈 신호처리기술의 활용은 음향 측정에 대한 레이저의 응용을 가능하게 하고 있다. 이의 대표적인 예가 레이저 간섭계에 의한 진동변위 측정기술과 광섬유를 이용한 음향 센서이다. 광섬유를 이용한 음향 센서는 특히 수중음향에서의 하이드로폰으로써 개발되어 일부 실용화 단계에 있는 것으로 알려져 있다. 광섬유를 이용한 센서는 재래식 전자 기계적 원리에 바탕을 둔 센서보다 동적범위와 감도면에서 우수할 뿐만 아니라 센서의 형태 변경이 용이하기 때문에 용도에 따른 특정 센서의 개발이 가능하다. 국내에서도 이에 대한 연구를 일부 수행하고 있다.[6]

이상 설명한 음향 측정의 신기술은 본 저자가 알고 있는 범위에서 예를 든 것에 불과하다. 이들 이외에도 많은 신기술들이 이미 존재하고 있거나 앞으로 출현할 가능성이 높다. 특히 음향측정기술이 전자공학의 발전에 따라서 괄목한 발전을 하여온 지난 추세를 감안할 때 앞으로의 계속적인 발전 가능성에 기대를 걸어본다.

Ⅵ. 결 론

음향 기술은 이 논문에서 주로 취급한 전기음향 분야뿐만 아니라 국내 사회경제의 전반적인 수준향상에 따라서 건축음향, 환경소음, 기계진동 문제등 많은 분야에서 그 필요성이 인식되어지고 있다. 이같은 추세는 선진공업국들의 현황을 살펴볼 때 앞으로 더욱 가속화될 전망이다. 그러나 이 같은 수요에 대응할 수 있는 국내 여건은 아직은 미숙한 상태에 머물러 있다. 이 분야의 전문 인력을 양성할 수 있는 대학의 체계적인 음향교육도 만족스러운 수준이 아니며, 특히 고가의 측정기기들을 전량 수입에 의존해야 하는 우리의 실정은 음향 이용 기술의 적극적인 발전을 저해하는 중요 요인으로 지적되고 있다. 그러나 이 모든 불리한 여건은 역설적으로 말해서 음향 분야에 참여하려는 젊은 공학도에게는 새로운 개척의 길을 보장함을 뜻하기도 한다. 아무쪼록 의욕있고 유능한 공학도들이 이 분야에 많이 참여하여 새로운 전문 분야로서의 길을 닦아 나가길 기대한다.

參 考 文 獻

[1] Beranek, L.L. Acoustic Measurement, John Wiley & Sons, New York, 1949.

[2] Chung, J.Y., Cross-spectral Method of Measuring Acoustic Intensity without Error Caused by Instrument Phase Mismatch, Journal of the Acoustical Society of America, 64-6, pp. 1613-1616, 1978.

[3] Fahy, Frank K., Measurement of Acoustic Intensity Using the Corss-spectral Density of Two Microphone Signals, Journal of the Acoustical Society of America, 62-4, pp. 1057-1059, 1977.

[4] Williams, Earl G. and J.D. Maynard, Holographic Imaging without the Wavelength Resolution Limit, Physical Review Letter, 45-7, pp. 554-557, 1980.

[5] Williams, Earl G. and J.D. Maynard, Intensity Vector Field Mapping with Nearfield Holography, Inter-Noise Proceedings, pp. 1009-1012, 1981.

[6] 정밀측정 자동화 보고서, 은희준외, 광섬유를 이용한 측정기술 개발(KSRI-86-22-IR), 과학기술처, 1986. *

♣ 用 語 解 說 ♣

Ineffective Time(비유효 시간)

기계가 작동 가능 상태이긴 하나 조작 지연이나 운휴 시간으로 인해 유효한 사용이 이루어지지 않고 있는 시간

PLA(Programmable Logic Arrays)

논리곱과 논리합의 기능을 배열한 장치 일정한 기능을 수행하도록 프로그램한 표준 논리 네트워크를 이용한 ROM의 대용으로 프로그램 가능 논리 배열을 사용한다. PLA는 MOS 또는 양극성 회로로 구현된다.

Dynamic Response (동적 반응)

시간에 대하여 입력의 함수로 나타나는 출력 장치의 출력 행위를 말함