

# 소음계 교정 자동화 시스템 개발 및 성능평가

<sup>0</sup>김용태\*, 조문재\*, 이용봉\*, 서재갑\*, 서상준\*

## Development and Performance of Automated Calibration System of Sound Level Meters

Yong Tae Kim, Moon Jae Jho, Yong Bong Lee, Jae Gap Suh, and Sang Jun Suh

### ABSTRACT

An automated calibration system of sound level meters was developed and tested. As a standard sound source, the speaker unit(Forstex FE208) cabined by  $440 \times 390 \times 490$  mm<sup>3</sup> (LHW) volume wood box was adopted. Including this source, the driving part was found out to have a good linearity of sound pressure output vs AC input. We use the Hybrid-Bisect/Newton-Raphson method modified by the linearity as searching algorithm. Personal computer and program do the control, measurements, and calculations and finally do the accumulation of useful data and results. Several trials of automatic calibration using this developed system give reliable results.

### 1. 서론

소음계는 1980년대에 제정된 환경정책기본법과 소음규제법에 의해 주기적 교정이 필요한 산업체의 법정설비 기계이다. 소음계 교정은 1982년 초에 본 연구원에서 처음으로 시작되었고, 소음계 표준 교정 절차는 1996년 KASTO의 개정안[1]을 따른다.

산업체의 교정 요구가 갈수록 증가하고 음향계측 기술이 발달함에 따라 소음계 교정의 자동화가 가능해 졌다. 일본의 경우 1982년 M. Muto 연구진[2]은 OKITAC 4300 미니컴퓨터를 사용하여 정밀 소음계 교정 자동화 시스템을 개발하였고, Canada의 경우 1995년 Lixue Wu 연구진[3]은 IEEE-488 GPIB interface와 RS-232-C를 이용한 PC 제어 자동화 시스템을 개발한 바 있다. 선진국의 경우 자동화가 비교적 잘 이루어져있고 또한 유지 향상을 위한 시스템의 개량에 힘을 기울이고 있다. 따라서 본 연구에서는 국가표준 유지 및 향상 연구의 일환으로 소음계 교정 자동화 시스템을 개발하여 이 시스템의 측정 정밀도를 평가하였다.

### 2. 소음계 교정 원리

소음계 교정이란 소음계에 가해지는 음압에 대한 주파수 응답을 측정하는 것으로 동일한 음장 하에서 표준 마이크로폰과 교정 대상 소음계와의 상대 비교를 통해 이루어진다. 표준 마이크로폰이란 교정에 사용되는 마이크로폰의 감도(mV/Pa)값이 표준 가역교정 시스템[4]에 의해 결정된 마이크로폰을 말한다. 교정은 대상 소음계를 표준 마이크로폰과 동일한 위치에 일치시킨 상태에서 이루어지며, 1/3 옥타브 밴드의 중심 주파수인 순음의 정현신호를 사용하도록 규정되어 있고, 이때 기준 음압레벨은 85 dB이다. 따라서 음압이 0.356 Pa이 되는 입력신호의 전압  $V_s$ 를 교정 주파수에서 각각 찾아 기록하는 음장 교정이 필요하다. 이러한 음장 교정이 끝난 후 표준 마이크로폰을 제거하고 교정 대상 소음계를 동일한 위치에 설치하여 앞서 구한 음원의 입력 전압  $V_s$ 로 음원을 구동시킨 상태에서 소음계의 지시 음압 레벨  $SPL_m$ 을 읽어 85 dB의 음압레벨과의 차이를 기준응답 및 허용오차와 비교하여 교정한다.

음장교정시 표준 마이크로폰과 전치 증폭기 및

\* 한국표준과학연구원 음향·진동 그룹

측정용 증폭기를 거쳐 디지털 전압계에 의해 측정된 음압은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$p = V_1 / SG_e \quad (1)$$

여기서  $V_1$  은 측정된 교류 전압,  $S$  는 감도값이다.  $G_p$  를 전치 증폭기의 증폭률,  $G_m$  을 측정용 증폭기의 증폭률이라 할 때 유효 증폭률은  $G_e = G_p \times G_m$  이다.

음압레벨은 지시음압과 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$SPL_m = 20 \log(p_m / p_{ref}) \quad (2)$$

여기서 아래첨자  $m$  은 측정된 값을 의미하고,  $p_{ref}$  는 기준음압으로  $20 \mu Pa$  이다. 85 dB의 음압레벨을 보장하는 입력 전압을 찾는 방법으로 Newton-Raphson 방법과 분절법을 결합한 Hybrid-Bisect/Newton-Raphson 방법[5]을 이용하면 안정된 알고리즘을 구현할 수 있다. 한편 표준음원의 출력 음압과 입력신호의 전압간에 선형성이 보장된다면 입력신호의 전압은 다음과 같은 관계로 구할 수 있다.

$$V_s^{85} = 10^{85 \times \log(V_s / SPL_m)} \quad (3)$$

여기서  $V_s$  는 초기 입력신호의 전압이고,  $V_s^{85}$  는 음압레벨의 값이 85 dB가 될 것으로 기대하는 입력신호의 전압이다. 이 같은 방식으로 3 차례의 시도에서 음장 교정이 이루어지지 않을 때 Hybrid-Bisect/Newton-Raphson 방법을 사용하면 빠르면서 안정적인 알고리즘의 구현이 가능하다.

이러한 음장 교정이 끝난 후 표준 마이크로폰을 제거하고 교정 대상 소음계를 동일한 위치에 설치하여 앞서 구한 음원의 입력전압  $V_s$  로 음원을 구동시킨 상태에서 소음계의 AC 출력[6]을 측정용 증폭기로 증폭시켜 디지털 전압계로 읽고, 이를 지시 음압 레벨  $SPL_m$  로 환산하여 85 dB의 음압레벨과의 차이를 기준응답 및 허용오차와 비교한다. 소음계의 종류에 계기판의 지시값에 따른 출력신호의 크기가 다르므로 증폭기의 증폭률을 조정하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 1 kHz 주

파수에서의 계기판의 지시값과 전기적 신호의 크기를 비교하여 환산인자를 구하고, 고정된 증폭률에 대해 전 주파수 구간에서 이를 이용하여 소음계의 지시 음압 레벨을 구하였다. 환산인자  $R$  은 측정된 출력 신호값  $V_2$  값과 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$R = 85 - 20 \log V_2 \quad (4)$$

따라서 환산인자를 이용하면 아래의 관계로부터 음압레벨을 구할 수 있다.

$$SPL = 20 \log V_2^m + R \quad (5)$$

여기서 위첨자  $m$  은 측정값임을 의미한다.

### 3. 시스템 구성

본 연구에서 구성한 소음계 자동화 교정 시스템은 그림 1과 같다. 그림에 나타난 바와 같이 표준음원과 표준 마이크로폰(또는 교정 대상 소음계)사이의 거리는 1 m로 유지하였다. 또한 표준음원과 표준 마이크로폰 및 교정 대상 소음계를 제외한 모든 측정장비들은 이들로부터의 반사파의 영향을 최소화하기 위해 무향실 외부에 설치하였다. 소음계 교정 시스템은 표준음원에 정현신호를 가해주는 구동부와 마이크로폰의 개방회로 전압 및 소음계의 지시값을 측정할 수 있는 계측부로 구성되어 있다. 구동부는 신호 발생기(B&K 1049)로부터 나온 정현신호의 주파수를 측정하기 위한 와 주파수 계수기(HP53131A)와 표준음원에 인가되는 전압을 측정하기 위한 디지털 전압계 I (Keithley 2000) 및 표준음원을 구동하기 위한 전력 증폭기(B&K 2706)로 이루어진다. 표준음원은 기존에 사용하던 2-way 동축형 스피커 시스템(Tannoy Stirling)의 Cross-over 주파수에서의 간섭현상을 최소화하기 위해 스피커 유닛이 하나로 구성된 단일형(Full range) 스피커 시스템으로 교체하였다. 단일형 표준음원은 스피커 유닛(Forstex FE 208)과 본 연구에서 자체적으로 설계 제작한 스피커 캐비닛으로 이루어진다. 스피커 캐비닛은 전체 크기가  $440 \times 390 \times 490 \text{ mm}^3$ (LWH)이다.

음원에 의해 방사된 정현신호는 1 m 떨어진 거

리에 있는 마이크로폰(B&K 4165)의 진동막을 가진 시커 출력 전압을 발생시킨다. 그림에 나타난 바와 같이 마이크로폰에서 출력된 신호는 측정용 증폭기(B&K B&K 2636), 고조파 신호를 제거하기 위한 추적 필터(Tracking filter; B&K 1623)를 거쳐 디지털 전압계 II(Keithley 2000)에 의해 측정된다. 이때 출력되는 신호 파형을 관찰하기 위해 오실로스코프(HP 54601A)를 사용하였다. 소음계 교정을 자동화하기 위해 그림에 나타난 바와 같이 신호 발생기, 디지털 전압계 등이 GPIB interface를 통해 PC에 의해 제어되고, 최종 결과는 레이저 프린터로 출력된다.

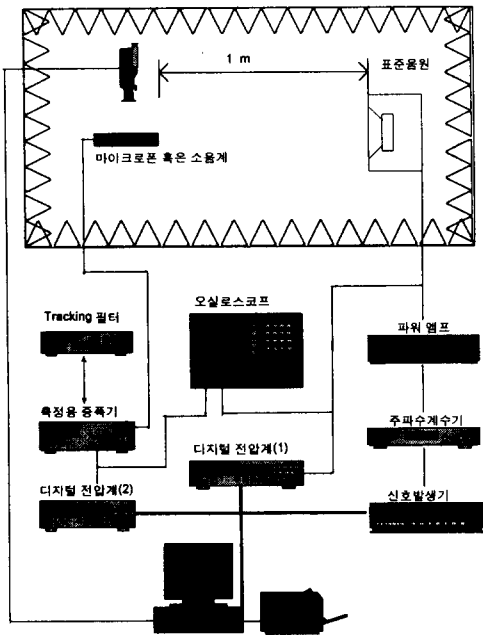


그림 1. 소음계 교정 자동화 시스템의 구성도.

#### 4. 교정 시스템의 자동화 기법

소음계 교정 시스템 자동화의 핵심적 요구 사항은 수동으로 수행하던 장치의 자동 제어와 계속 작업을 대신할 컴퓨터와 프로그램이다. 최근 고성능의 PC와 장치간의 Interface가 개발되고 사용 환경이 DOS에서 Windows로 전환됨에 따라 프로그램의 구성을 수형도(Tree chart)와 흐름도 병행 방식의 구성이 가능하다. 수형도식 프로그램 기법은 한 프로그램으로 여러 가지의 기능을 함께 구성하

여 사용자가 기능을 선택 사용할 수 있기 때문에 보다 높은 응용성을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 교정 자동화 프로그램이 수형도 방식의 기본 구성과 이에 다른 세부 흐름도 방식의 구성을 복합적으로 가지도록 구성하였다.

본 교정 자동화 시스템에 필요한 기능들은 음장 및 소음계의 자동 교정 기능과 같은 기본 기능 이외에도 등급별 분류기능, 교정결과 자료의 데이터 베이스(Data base)화 기능, 및 불확도 자동 연산 기능 등이 부가적으로 필요하며 교정 조건의 재설정 기능, 교정 결과 자동 작성 및 출력 기능, 양식 재편집 기능 및 결과 가시화 기능과 같은 응용 기능들이 있다.

자동 교정 기능은 무향실 내에 배치된 표준 음원(스피커)의 출력 음장이 실험 주파수 대역에서 일정한 값(85 dB)이 되도록 보상해 주기 위한 신호발생기의 출력 전압을 구하는 음장 교정 기능과 음장 교정 실험에서 얻어진 주파수별 신호발생기 출력 전압 자료를 사용하여 음원을 85 dB의 일정한 레벨로 구동하면서 소음계 교정을 일련의 자동 동작을 수행하는 기능이다.

등급별 분류기능은 정밀급과 보통급 외에도 사용자의 필요에 따라 실험환경을 변화시킬 수 있는 사용자 정의 등급의 세 가지 분류를 사용하였다. 보통급과 정밀급의 분류는 허용 오차 외에도 실험 주파수 범위가 서로 다르기 때문에 음장 교정 실험에서부터 이를 반영하여야 한다. 경우에 따라서는 외부 출력 단자가 없는 소음계도 교정의뢰가 들어오므로 이 경우 교정 실험은 반자동으로 교정할 수밖에 없다. 또한 외부 출력단자가 존재하여도 출력 특성이 계기판의 눈금 지시값과 선형적 관계를 갖지 않는 경우도 반자동으로 교정할 수밖에 없다. "반자동"의 용어는 CC TV를 통해 모니터된 계기판을 사용자가 판독하여 입력하는 방식으로 구성되어 있다.

교정결과 자료의 데이터 베이스(data base)화 기능은 소음계의 교정 결과를 계속 축적하여 이를 필요에 따라 재구성 및 통계 처리할 수 있게 하는 기능이다. 일반적으로 교정 의뢰가 이루어진 소음계의 경우 그 자료의 보관이 필요할 뿐 아니라 교정 성적의 통계도 필요하다. 따라서 교정 결과들을 재 취합할 수 있게 하기 위하여 인덱스에 따라 정렬과 검색이 가능하여야 한다. 분류 가능한 인덱스로 교정의뢰 기관, 교정 번호, 품명, 기종, 제조 회사 및 형식, 일련번호, 교정일자, 온도, 습도

등의 9 가지가 가능하다. 특히 위의 인덱스들과 교정 검사 결과 파일을 레코드화 하여 인덱스별 재배열이 가능하면 이를 분석하여 연구하는데 이용 가능하다. 검색 기능은 정렬된 자료들로부터 의뢰 기관을 입력할 경우 이 의뢰 기관에서 의뢰한 건수의 통계와 그 내역들의 일목요연하게 화면상에 표현되는 기능을 말하며 이를 Text 형식의 파일로 저장하여 Spread sheet에서 불러 통계 처리할 수 있게 한다.

불확도 자동 연산기능은 각종의 교정 조건들과 실험상의 불확도를 자동으로 연산하여 이를 교정 성적서에 명기할 수 있게 하는 기능을 말한다.

교정 조건의 재설정 기능은 등급에 따른 설정 값들(예를 들면 실험의 청감 보정치, 표준 음원의 구동 음압 레벨, 측정용 증폭기의 증폭률 및 마이크로폰의 감도 등)이 변화할 경우 이를 사용자가 새로이 설정하거나 설정된 값들을 Default 값으로 전환하는 기능을 말한다.

교정 결과 자동 작성 및 출력 기능은 교정 실험을 통해 얻어진 결과를 일련의 자동화된 기능에 따라 정의된 양식으로 출력이 이루어지도록 하는 기초 기능 이외에 파일로 저장하여 이 자료들을 검색 및 통계 처리 할 수 있게 보관하는 기능을 포함하여야 한다.

경우에 따라서는 정의된 양식이 수정 될 필요가 있을 것으로 예측되므로 필요한 경우 이를 수정할 수 있어야 한다. 결과서의 자동 출력기능이 이러한 요구조건을 만족할 수 없으면 이 자동화 시스템의 양식의 변경만으로 무용지물이 될 소지가 있기 때문이다. 따라서 이 같은 요구를 양식 재편집 기능이 가져야 한다.

결과 가시화 기능은 음장교정 실험 결과와 소음계 교정 실험 결과를 실험도중에 그래프로 모니터링 해줌으로서 실험의 진행 상태와 측정 결과가 오차 범위 내외인지를 판단하기 쉽게 시각적으로 확인할 수 있도록 도와주는 기능을 말한다.

위에서 설명한 기능들을 수행할 수 있도록 작성한 프로그램은 그림 2의 수형도식 구성을 갖는다. 그림에 나타낸 바와 같이 소음계 교정 자동화 시스템은 교정실험 부분, 검색 및 출력 부분, 그래프 부분, 및 GPIB interface 부분으로 4 개의 기본 Block과 그 아래에 Sub-block으로 나뉘어져 있다.

## 5. 교정 시스템의 성능 평가

소음의 정밀 측정을 위해서는 사용되고 있는 소음계의 주파수 응답 특성을 정확히 알아야 한다. 따라서 소음계 교정 시스템을 실제 교정에 활용하기 위해서는 정확한 성능평가가 이루어져야 한다.

본 항에서는 표준 음원으로 사용하기 위해 제작한 스피커 시스템의 음향특성과 시스템의 측정 정밀도에 대해 자세히 언급하기로 한다.

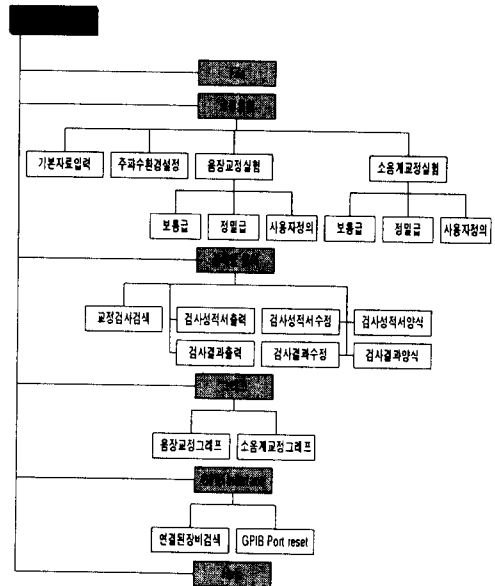


그림 2. 소음계 교정 자동화 프로그램의 구성도.

### 가. 표준 음원의 음향 특성

표준 음원의 주파수 특성은 음원에 인가되는 입력 전압의 크기를 전 주파수 대역에서 일정하게 유지시키면서 주파수에 따른 음압레벨을 측정하여

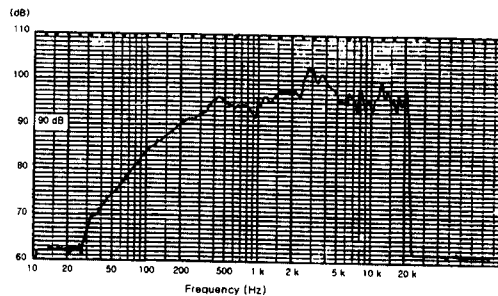


그림 3. 표준음원의 주파수 특성.

결정할 수 있다. 본 연구에서 제작한 표준음원에 신호 주파수를 20 Hz에서 20 kHz까지 변화시키면서 측정된 주파수 특성은 그림 3.과 같다.

측정시 표준음원에 인가한 입력전압은 소비전력 1 W에 해당하는 2.828 V이며, 표준 음원과 마이크로폰 사이의 거리는 1 m로 유지시켰다. 그림에 나타난 바와 같이 1 W 인가시 교정 주파수 대역인 125 Hz 이상에서의 음압레벨은 85 dB 이상인 것을 알 수 있다. 스피커 유닛의 정격출력이 40 W인 것을 감안하면 스피커 시스템의 출력음압은 100 dB까지 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.

표준음원의 비선형 왜곡은 음향출력과 전기입력 사이의 비선형에 의한 불필요한 파형의 변화이다. 이러한 왜곡은 스피커 출력의 유효 크기를 제한하며, 소음계 교정시 측정오차를 발생시키는 하나의 요소가 된다. 단일 주파수 입력에 대해 이러한 비선형 왜곡은 입력 주파수의 정수 배로 주어지는 고조파 왜곡을 발생시킨다. 본 연구에서 제작한 표준음원의 고조파 왜곡특성은 그림 4.와 같다. 이때 표준음원에 가한 입력전압은 2.828 V이다.

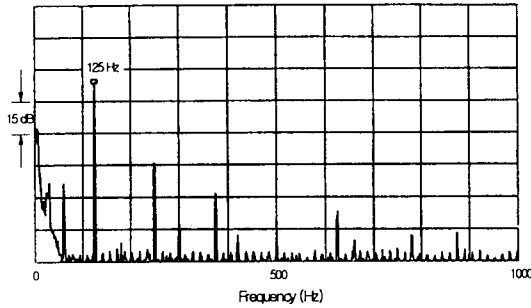


그림 4. 표준음원의 고조파 왜곡 특성.

그림에 나타난 바와 같이 인가 주파수인 125 Hz의 음압레벨과 제 2 고조파인 250 Hz에서의 상대적인 음압레벨의 차는 40 dB 정도인 것을 알 수 있다. 이 레벨 차를 고조파 의율로 환산하면 1%이며, 이는 소음계 교정시 0.1 dB 이내의 측정오차를 야기한다. 고조파 의율은 주파수가 증가할수록 감소하며, 본 연구에서 제작한 표준음원인 경우 250 Hz에서 0.5% 이내로 측정되었다. 시간에 따른 출력음압의 안정성은 측정결과 우수한 것으로 평가되었다.

이상의 결과로부터 표준음원으로 제작된 스피

커 시스템의 음향특성은 현재 소음계 교정에 사용되는 주파수 대역인 125 Hz 이상에서는 대체적으로 양호한 것으로 나타났다. 그러나 100 Hz 이하에서는 왜곡특성이 현저히 나빠지기 때문에 저주파 교정을 위해서는 스피커 유닛의 직경이 큰 우퍼(woofer)를 사용하는 것이 바람직하다고 사료된다.

## 나. 교정시스템의 측정 정밀도

측정기기의 오차 및 재현성은 사실상 무시할 수 있으며, 소음계 교정의 주된 오차의 원인은 ① 표준 마이크로폰과 소음계의 교체에 따른 오차, ② 음장 측정용 설비에 의한 반사파의 영향, ③ 소음계의 자기교정오차, ④ 소음계의 지시치 판독에 의한 오차, ⑤ 측정중 온도 변화에 따른 영향, 등을 들 수 있다.

①은 마이크로폰의 음원 중심이 주파수에 따라 변한다는 것과 측정 점에 음향 중심을 위치시킬 수 없다는 것에 기인된다. 이 오차는 현시점에서 정확히 규명하기 어려우나, 실제적으로는 거의 무시할 수 있을 것을 판단된다. ②의 오차는 주로 1 kHz 이상 주파수 대역에서 발생된다. 이 오차를 최소화하기 위해 본 연구에서는 측정 주파수를  $f_0$ 로 했을 때  $f_0$ ,  $f_0(1 \pm 1/25)$ ,  $f_0(1 \pm 2/25)$ 의 5개 주파수에서의 음압레벨을 평균하는 방법을 채택하였다. 재현성 실험 결과로부터 이에 대한 오차는 실제로 0.2 dB 이내로 평가되었다. ③과 ④의 오차는 사람이 개입되기 때문에 0.05 dB 이내의 오차는 피할 수 없다. ⑤의 측정 중에 온도 변화에 따른 영향의 한 예는 그림 5.와 같다.

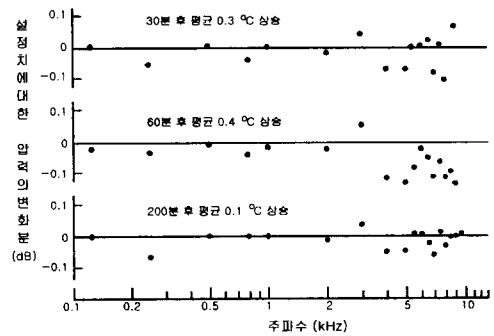


그림 5. 온도 변화에 따른 영향의 한 예.

그림은 최초의 음압레벨 측정값과 30분 후, 60분 후, 200분 후의 각 음압레벨의 차이를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 미소한 온도 변화에서도 음압레벨이 변하는 것은 온도에 따라 순음의 파장과 반사파의 영향이 바뀌기 때문이다. 이 오차에 대해서는 앞서 제시한 바와 같이 표준 마이크로폰 및 소음계를 지지하는 장치로부터의 반사파 영향을 평균하여 최소화할 목적으로 주파수 5 점에서 측정값을 구하기 때문에 그림에 나타난 변화가 그대로 나타나지는 않는다.

그림 6.는 본 연구에서 구성한 교정 시스템을 이용하여 정밀 소음계(B&K 2231)의 A-특성 주파수 응답을 측정하여 평탄 특성을 함께 나타낸 것이다. 큰 그림은 A-특성을 작은 그림은 평탄 특성을 나타낸다. 큰 그림에 나타난 실선은 기준응답을 그린 것이고 점선들은 허용차 범위를 나타낸다. 점들은 자동화 시스템을 이용하여 측정된 A-특성 주파수 응답이다. 그림에서 보는 바와 같이 교정 대상 소음계의 주파수 응답은 전 주파수 범위에서 정밀 소음계의 허용오차 범위 이내인 것을 알 수 있다.

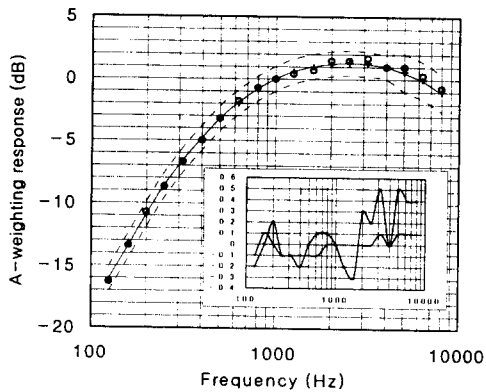


그림 6. 소음계의 주파수 응답 교정 결과. 기호 ○는 자유음장 교정 자료이고, 기호 +는 필터 특성을 측정한 자료이다. 작은 그림에서 큰 변이를 가지는 곡선은 자유음장, 작은 변이를 갖는 곡선은 필터특성이다.

측정값과 필터 특성과의 차는 125 Hz~2,000 Hz 주파수 영역에서  $\pm 0.3$  dB 이내, 4,000 Hz ~ 8,000Hz 에서  $\pm 0.5$  dB 이내 임을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 급증하는 소음계의 교정 물량에 대처하고 효율적인 관리를 위해 교정 시스템의 자동화를 꾀하였다. 이를 위해 신호발생기, 디지털 진압계 등이 컴퓨터에 의해 제어되도록 프로그램을 구성하였다.

소음계 교정 자동화 시스템의 성능에 대한 본 연구결과는 다음과 같이 요약 평가될 수 있다.

1. 표준음원으로 제작된 스피커 시스템의 음향특성은 현재 소음계 교정에 사용되는 주파수 대역인 125 Hz 이상에서는 대체적으로 양호한 것으로 나타났다. 그러나 100 Hz 이하에서는 왜곡특성이 현저히 나빠지기 때문에 저주파 교정을 위해서는 스피커 유닛의 직경이 큰 우퍼(Woofers)를 사용하는 것이 바람직하다고 사료된다.
2. 측정값과 필터 특성과의 차는 125 Hz~2,000 Hz 주파수 영역에서  $\pm 0.3$  dB 이내, 4,000 Hz ~ 8,000Hz 에서  $\pm 0.5$  dB 이내로 평가되었다.

지금까지의 연구 결과를 고찰해 볼 때 본 연구에서 수행한 교정 자동화 시스템은 소음계 교정뿐만 아니라 일반 음향 측정에 유용하게 활용될 수 있다.

## [참고문헌]

1. KASTO 96-16-011-098
2. M. Muto *et al*, 電子技術綜合研究所 보고서 46, 143-150(1982).
3. Lixue Wu and George S. K. Wong, Proceeding of Internoise, 1067-1070(1005).
4. 서 상준, 조문재, 한국음향학회지, 8(5), 23-32 (1989)
5. Paul L. DeVries, A First Course in Computational Physics, John Wiley & Sons. Inc., 1994.
6. L. W. Bean, Technical note of Apl. Acoust., 13(1980), 151-157.