

음향 챔버 내부의 1/3 옥타브 스펙트럼 실시간 제어 시스템 Real Time 1/3 Octave Band Control System for High Intensity Acoustic Chamber

김영기*·김홍배*·문상무*·우성현*·이상설*

Youngkey K Kim, Hong-Bae Kim, Sang-Mu Moon, Sung-Hyun Woo and Sang-Seol Lee

Key Words: 1/3-Octave Band, Spectrum Control, Acoustic Chamber, Launch Vehicle Dynamics, Environmental Test

ABSTRACT

This paper presents the performance and the algorithm of a 1/3-octave band spectrum control system. The system is developed to provide various spectrums in a high intensity acoustic chamber. The required spectrum, which usually comes from launch vehicle company, starts from 25Hz band and ends 10kHz band. Automatic spectrum control system is preferred since the system requires short settling time to guarantee the safety of test objects and to reduce the amount of operating gas. The developed system adapted a PCI data-acquisition/signal-generation board installed in a personal computer to implement whole control logic. The control software used three cascade digital Butterworth filters using software. The filters are designed following ANSI S1.11 standard to implement 1/3 octave band filter bank. The graphical user interface of the system guides the user to follow standard operation procedure. The averaged control spectrum showed less than 0.05 dB in every running 1/3-octave band.

1. 서론

우주 비행체의 발사환경 내구성 실험의 한 단계로 음향 환경 시험이 수행된다⁽¹⁾. 음향 환경 시험의 수행을 위해서 대형 잔향실(그림 1)이 사용되며, 음원을 통해 설정된 규격의 스펙트럼이 재현된다. 음향 챔버는 이러한 스펙트럼의 재현에 알맞도록 설계되며, 음원은 주어진 스펙트럼의 최대값에 따라 선택된다⁽²⁾. 다양한 스펙트럼(그림 2)의 재현을 위해 1/3 옥타브 밴드 필터를 기초로 한 스펙트럼 제어 시스템이 사용된다.

효과적인 스펙트럼의 제어를 위해서는 자동제어를 통한 실시간 스펙트럼 제어 시스템의 사용이 요구된다. 기존에 음향 챔버에 사용되어온 수동 1/3 옥타브 밴드 스펙트럼 제어 시스템은 크게 두 가지 단점을 갖는다. 첫째, 20 개 이상의 밴드를 동시에 혹은 순차적으로 조정해야 하므로 숙련된 운영자를 필요로 한다. 둘째, 숙련된 운영자의 경우에도 완벽한 스펙트럼의 제어를 위해서는 수십 초에서 수분의 시간이 소요되므로 측정 대상에 악영향을 줄 수 있으며, 운용상의 경제적 손실을 가져온다. 따라서, 1/3 옥타브 밴드를 동시에 제어할 수 있는 자동제어 시스템이 요구된다.

본 연구에서는 한 장의 다목적 신호수집 보드(multi-function DAQ board)와 개인용 컴퓨터를

이용하여 효과적으로 신호 재생 시스템을 개발한다. 자동제어 시스템의 개발요구에 의해 기존에 개발된 제어 시스템은 컴퓨터의 성능이 급격히 향상되기 이전에 개발된 것이거나⁽³⁾, 고가의 이산 신호 처리 보드(DSP board)를 이용하여 개발된 것들이다. 따라서 본 연구에서는 하드웨어의 사양은 최소한으로 하고 향상된 개인용 컴퓨터의 성능을 최대한 이용하여 소프트웨어로 제어시스템을 구성한다.

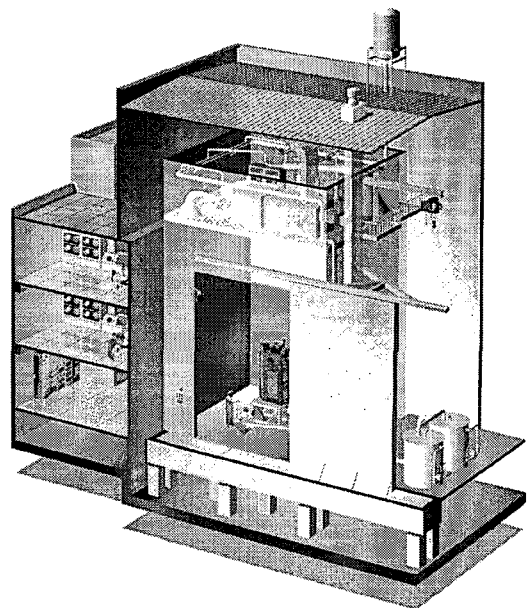


그림 1. 한국항공우주연구원에 건설 중인 음향 환경 시험 시설(음향 챔버)의 조감도

* 한국항공우주연구원 위성사업부
E-mail : youngkey@kari.re.kr
Tel : (042) 860-2186, Fax : (042) 860-2234

개발된 시스템에서 1/3 옥타브 밴드 필터는 이산 버터워스 필터 (digital Butterworth filter)를 사용하여 소프트웨어로 구현되었으며, ANSI S1.11 규격을 만족하도록 개발된다. 최근 디지털 기술의 발전에 따라 기존에 아날로그 회로를 이용한 옥타브 밴드 필터를 디지털 필터가 대체하여 왔으나, 디지털 필터 역시 고가이며 시스템 구성자에게 친숙하지 않은 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 향상된 개인용 컴퓨터의 성능 (1GHz Dual CPU)을 최대한 이용하여 소프트웨어를 이용한 버터워스필터를 구현한다.

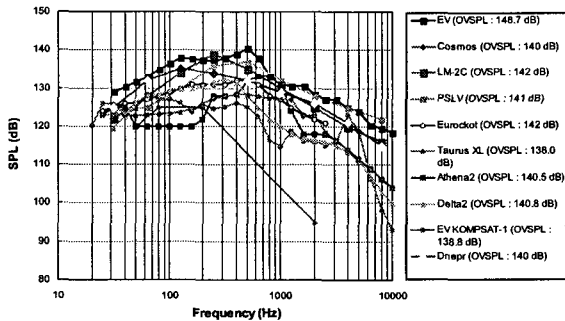


그림 2. 발사체에 따른 음향 환경 스펙트럼

본 연구에서 개발된 시스템은 다양한 사용자 인터페이스를 통해 사용자가 센서의 교정, 시스템의 예비 테스트, 순차적 주 테스트 데이터의 정리를 손쉽게 수행할 수 있도록 설계한다. 따라서, 숙련된 운영자가 아니더라도 손쉽게 음향 챔버의 운용에 접근할 수 있으며, 단시간 내에 시험의 수행과 보고서의 작성을 끝마칠 수 있는 장점 갖는다.

본 논문에서는 제어 시스템의 구성 및 기능을 정립하고, 제어 시스템의 성능을 검증한다.

2. 제어 시스템 구성

2.1 음향 챔버의 실제 음원

음향 챔버는 140dB 이상의 고출력을 요구하므로 압축공기를 이용한 음원을 사용한다. 그림 3은 질소가스를 이용한 음원 시스템의 구성도를 나타낸다. 기화기에서 기화된 질소가스는 노즐과 혼으로 구성된 모듈레이터를 통과하여 음향 챔버에 공급된다. 노즐의 작동에 의해 질소가스의 압력이 변화하므로 고출력의 음압이 재생된다. 노즐 (WAS-3000, EPT-200)의 구동은 전자기적으로 구동되며 원리는 일반 라우드 스피커와 동일하다. 일반적으로 25Hz 에서 10,000Hz 사이의 음을 재생한다. 2,000Hz 까지는 스펙트럼의 직접

제어가 가능하며 그 이상은 비선형성에 의해 재생된다.

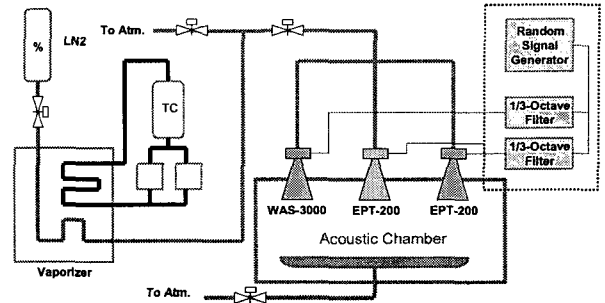


그림 3. 실제 음향 챔버의 음원 구성도

2.2 실시간 스펙트럼 제어 시스템의 개념

실시간 제어 시스템은 신호 재생부와 신호 수집부로 구분할 수 있다 (그림 4). 신호 재생부는 랜덤 신호 재생기로부터 재생된 신호를 1/3 옥타브 밴드 필터를 통과 시켜 음원에 전달하는 역할을 한다. 각각의 음원은 효율을 고려하여 지정된 주파수 영역이 있으므로, 재생부의 끝 단에는 신호 분배기가 설치된다. 신호 수집부는 재생되는 신호를 수집하여 1/3 옥타브 밴드 레벨을 계산한다. 계산된 옥타브 밴드 레벨은 설정 값과 비교되어 곧바로 피드백 된다.

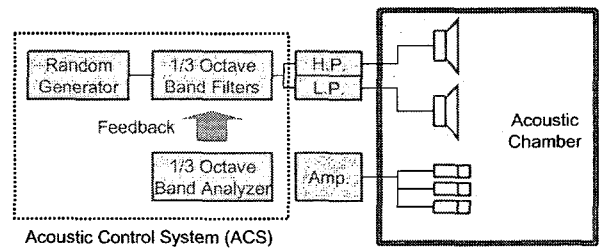


그림 4. 실시간 스펙트럼 제어 시스템

2.3 소형 시험 챔버

실시간 스펙트럼 제어 시스템의 개발 및 시험을 위해 본 연구에서는 실제 음향 챔버의 1/10 크기의 소형 챔버를 제작하여 사용하였다 (그림 5). 크기는 1.45m x 1.05m x 0.85m 이며 3cm 두께의 투명 아크릴 판으로 제작되었다. 저주파수의 가진을 위해서는 1 개의 라우드 스피커를 사용하였으며, 고주파 용으로는 1 개의 혼드라이버를 사용하였다. 일반 오디오 파워 앰프를 채택하여 스피커를 구동하였다.

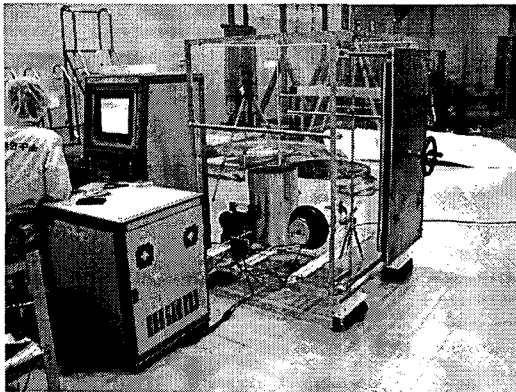


그림 5. 소형 음향 챔버를 이용한 제어 시스템의 성능 시험

2.4 제어 시스템의 규격

제어 시스템의 구성에 따른 제어 시스템의 규격은 표 1 과 같다.

표 1. 실시간 제어 시스템의 규격

	Specifications	Remarks
Frequency Range	25Hz ~ 5,000Hz	
Output Channel	Single Channel	
Distributor	Low: 25~500Hz, High: 630~5,000Hz	1/3 Octave Band
Input Channels	Max 8 Channels	
1/3 Octave Filter	Digital Filter (S/W implemented)	BW Order 3 x 3
1/3 Octave Analyzer	Digital Filter (S/W implemented)	BW Order 3 x 3
Dynamic Range	60dB ~ 160dB	Expandable

3. 하드웨어 및 제어 논리

3.1 하드웨어

제어 시스템의 기본 하드웨어는 개인용 컴퓨터이며 데이터 수집 및 신호 재생은 다목적 신호수집 보드를 사용하였다(그림 6). 음압의 측정은 마이크로폰을 사용하였으며, 마이크로폰 앰프에 장착된 필터를 안티알리어싱 (Anti-Aliasing) 필터로 사용하였다. 신호 수집 보드는 최대 8 채널까지 입력받을 수 있다.

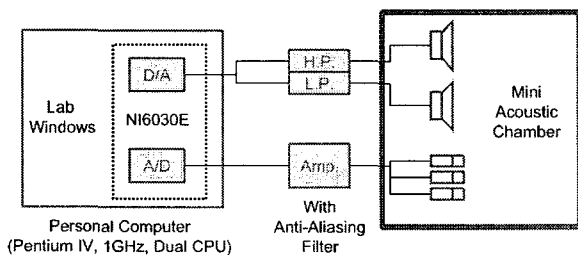


그림 6. 제어시스템의 하드웨어 구성

3.2 제어 논리

제어 논리를 압축하여 표현하면 그림 7 과 같다 2.2 절에 설명된 바와 같이 측정된 신호가 피드백되어 재생된다. 이때 단순히 각 1/3 옥타브 밴드레벨만이 피드백 된다. 신호의 감시는 실시간 신호 및 1/3 옥타브 밴드 레벨에 대해 동시에 이루어 진다.

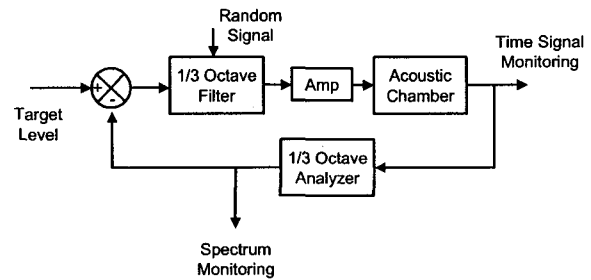


그림 7. 실시간 제어 시스템의 제어 논리

4. 1/3 옥타브 필터

4.1 디지털 1/3 옥타브 밴드 필터

디지털 필터는 다음 식(1)과 같이 과거의 입력과 출력이 현재의 출력신호에 더해지는 방식으로 구성된다. 본 연구에서는 수치 처리 능력의 향상을 위해 과거의 출력까지 현재의 출력에 더해지는 필터(IIR Filter)를 사용하였다.

$$a_0 y(n) = b_0 x(n) + b_1 x(n-1) + \dots + b_N x(n-N) - a_1 y(n-1) + \dots + a_M y(n-M) \quad (1)$$

필터의 형태는 다양하게 선택할 수 있으나, 본 연구에서는 기존 아날로그 회로에서 사용되던 3 차의 버터워스필터(Butterworth)⁽⁴⁾를 직렬 사용하여 각각의 필터를 구성하였다(그림 8). 또한 25Hz 에서 5,000Hz 까지의 주파수 범위의 스펙트럼을 얻기 위하여 설명된 필터 24 개를 병렬 연결하였다.

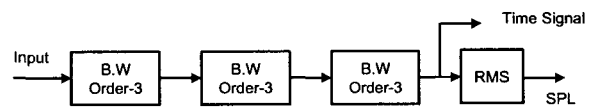


그림 8. 3 차 버터워스필터를 직렬연결하여 구성한 디지털 1/3 옥타브 밴드 필터

4.2 필터의 특성

구성된 1/3 옥타브 필터의 특성은 그림 9 와 같다. 옥타브 필터의 기울기는 -30dB/Octave 로 ANSI S1.11 의 규격을 만족한다.

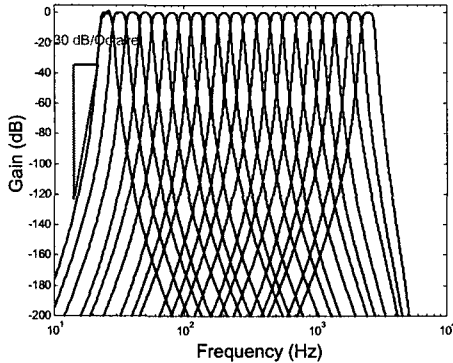


그림 9. 1/3 옥타브 밴드 필터의 주파수 특성(그림 7)

필터의 기울기가 급격해 짐에 따라 이웃 밴드와의 간섭이 줄어든다. 그림 10 은 이웃 밴드와의 겹침(간섭) 현상을 개념적으로 표시한 것이다. 겹침의 결과는 제어 성능을 저하시킨다. 예를 들어 하나의 밴드만을 재생할 때도 주변의 밴드도 같이 재생되는 현상이 발생한다(그림 11). 본 연구에서 사용한 필터는 기울기를 -30dB 이상으로 하여 이러한 현상을 최소화 하였다. 계산 결과 본 연구에서 사용한 필터의 재생할 밴드 크기와 야기된 밴드의 크기 비는

$$\frac{\text{Side Lobe}}{\text{Main Lobe}} = -17\text{dB} \quad (2)$$

로 이론적으로 이웃 밴드간 레벨차가 -17dB 이내 인 모든 스펙트럼의 제어가 가능하다.

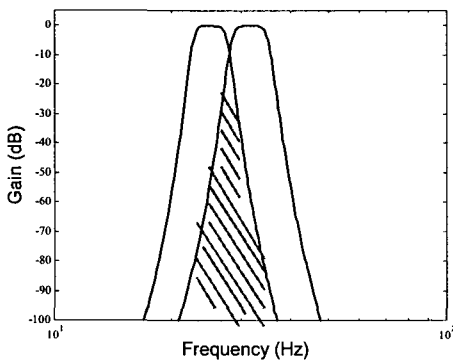


그림 10. 옆 밴드와의 겹침 현상 (interference)

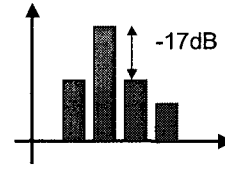


그림 11. 주 밴드와 주변 밴드의 입력에 의해 야기된 주변 밴드의 차이

5. 제어 시스템의 기능

5.1 제어 시스템의 작동 순서

제어 시스템은 시스템의 초기화 및 목표 값의 설정, 시험 대상물의 보호 등을 위해 그림 12 과 같은 순서에 따라 운용된다. 시스템의 초기화는 센서의 교정 및 시험 신호에 대한 응답 함수 측정을 통해 이루어 진다. 시험은 낮은 레벨부터 시작 되어 레벨을 서서히 증가 시키며 진행된다. 일반적으로 3dB 씩 증가하며 실험 하고, 시험 대상체의 특성에 따라 단계의 수는 조정된다. 각 단계에서의 시험 레벨 및 레벨의 변화 정도, 노출 시간은 시험 대상체의 관리를 위해 기록되어 관리된다

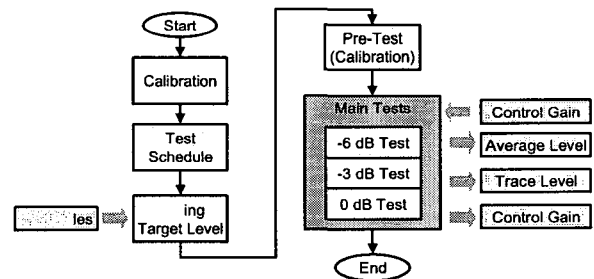


그림 12. 음향 챔버 실시간 제어 시스템의 작동순서

5.2 제어 시스템의 작동 및 기능

본 연구에서 개발된 제어 시스템은 각 단계 마다 적절한 사용자 인터페이스를 제공한다. 그림 13 은 목표 값의 설정을 위한 설정 창을 보여준다. 파일에서의 입출력도 가능하다. 본 연구에서 개발된 장비는 세계 주요 발사체의 시험 규격을 데이터 베이스로 가지고 있도록 개발되었다.

장비의 초기화는 그림 14 과 같은 시간 신호를 주어 반응을 살피는 방법으로 이루어 진다. 이때, 장비의 전달함수를 구하여, 제어 초기 값 설정에 사용한다. 입력신호의 후리에 변환과 출력신호의 후리에 변환으로부터 전달함수를 구하고, 이의 역

을 취하여 제어 초기값을 설정 한다. 입력신호는 시험 대상물의 가해지는 충격을 최소화 하기 위하여 해닝 윈도우(Hanning Window)씩워진 랜덤 신호를 사용하였다.

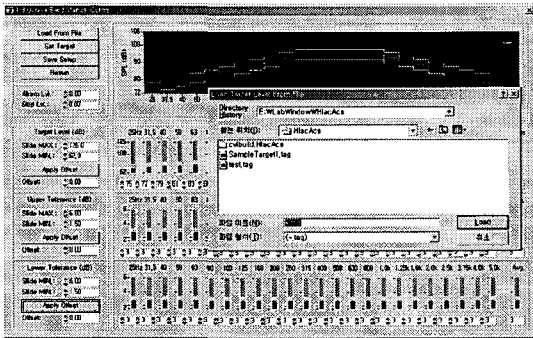


그림 13. 목표 값의 설정을 위한 사용자 인터페이스

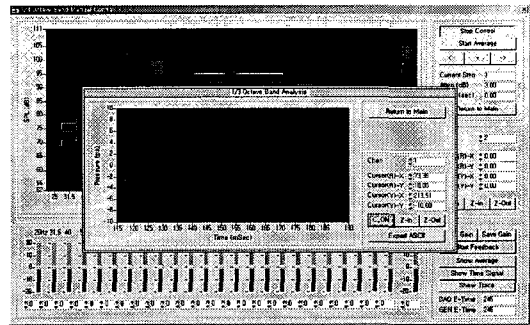


그림 16. 시간 신호의 실시간 모니터링

개발된 제어 프로그램은 실시간 신호 모니터링 및 레벨의 시간에 따른 변화를 모니터 할 수 있는 기능을 갖고 있다. 그림 16은 시간 신호를 실시간 모니터링할 수 있는 기능을 나타낸다.

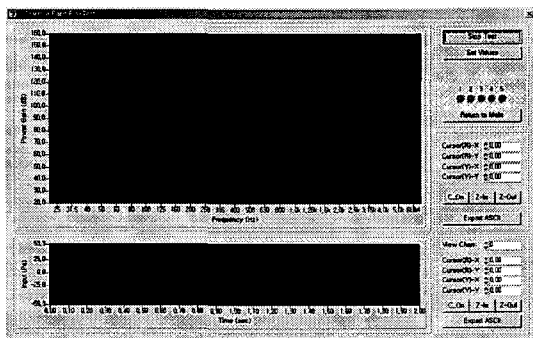


그림 14. 초기화를 위한 예비 시험

그림 15는 테스트 설정 값에 대한 소형 음향 챔버에서의 제어 결과를 보여준다. 125Hz 밴드를 제외하고 모든 대역에서 0.05dB 이내의 제어 성능을 보여준다. 125Hz는 스피커 단자의 공진 주파수 부분으로 채터링 소음이 발생하는 영역으로 확인되었다.

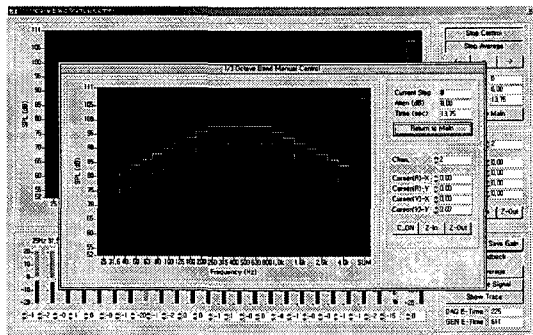


그림 15. 시험 스펙트럼에 대한 제어 결과

6. 결론

개인용 컴퓨터를 이용한 음향 환경 시험 실시간 제어 시스템의 개발로 설정된 시험 스펙트럼을 0.05dB 이내로 제어할 수 있었다. 제어 시스템은 사용자 인터페이스를 구축하여 시험 일정의 조정 데이터의 입출력이 용이한 장점을 가지고 있다. 제어시스템의 성능은 1/10 크기의 소형 챔버에서 수행되었으며, 특히 주파수(125Hz)를 제외한 모든 주파수에서 제어 성능을 확보할 수 있었다.

참고문헌

- (1) 김홍배, 문상무, 김영기, 우성현, 이상철, 김성훈, 2002, "다목적 실용위성 2 호 열-구조 모델의 음향환경 시험," 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동 공학회, pp. 245 ~ 251.
- (2) 김영기, 우성현, 김홍배, 문상무, 이상철, 2002, "설정음압 및 스펙트럼 제어를 위한 음향 챔버의 기본 설계 변수 설정", 춘계학술발표회 논문집, 한국소음진동 공학회, pp. 402~406
- (3) Shah, K. C., 1991, "PC-Based Digital Acoustic Control System (DACS)", proceedings, Institute of Environmental Science, pp.480 ~ 486.
- (4) Bendat, J. S., and Piesol, A. G., 1991, Random Data, John Wiley & Sons, New York.