

홈 오디오 용 하이파이 스피커 시스템 개발

Development of HiFi Speaker System for Home Audio

박 석 태*

Seok-Tae Park

Key Words : HiFi Speaker(하이파이 스피커), Woofer(우퍼), Tweeter(트위터), Thiele-small Parameter(틸레-스몰 매개변수), Acoustic Radiation(음향 방사), Optimal Crossover Network(최적 크로스오버 네트워크)

ABSTRACT

In this paper, it was describe the processes of development of HiFi speaker system. Woofer and tweeter were fabricated by unskilled students and their T-S parameters were identified by known mass method. Based on T-S parameters, port enclosure was designed and built by means of software. Acoustic radiation phenomena of port enclosure were simulated and compared to test result. Acoustic pressure difference between lower frequency and higher frequency was flattened by adopting optimal crossover network. Finally, built HiFi speaker system was showed good sound quality and sound pressure and electrical impedance was well agreed with test results each other.

1. 서 론

많은 경우에 가정용 홈 오디오를 구입하는 사용자들은 오디오 회사에서 미리 헤드 세트에 맞게 제작된 스피커 시스템을 선택하고 있다. 그러나, 음악 매니아들은 좋은 음질의 음악을 듣고자 하는 열망으로 고가의 오디오 시스템을 구성 요소별로 구입한 후에 조합하여 사용하고 있는 실정이다. 이들 매니아들은 튜너, CDP, 앰프, 스피커 인클로저 시스템등을 각각 구입하여 사용하게 된다. 본 연구에서는 중 저가 이상의 스피커 인클로저 시스템을 개발하고 제작하는 과정을 소개하고자 한다. 첫번째 단계는 주성대학 음향과의 교과과정중의 일부로서 먼저 스피커 유니트를 제작하는 과정을 포함하고 있다. 제작하는 스피커 유니트는 저음 영역을 담당하는 우퍼와 고음 영역을 담당하는 트위터로 나눌 수 있다. 각 유니트는 이들을 대량 생산되는 업체에 부탁하여 부품형태로 구입하여 수업시간에 각 부품을 결합, 접착, 위치 교정, 납땜, 착자 과정등 공장에서는 자동 또는 수동화 하는 작업들을 학생들이 수작업으로 제작하게 된다 [1]. 두번째 과정은 제작된 스피커 유니트들을 이용하여 2way 포트 박스 인클로저를 최적설계한다. 일반적으로 스피커에 대한 음향해석은 유연체로 가정하여 해석을 수행하나 [2-4] 강체 운동을 고려하는 주파수까지만 관심이 있다면 간단한 방법을 사용할 수도 있다. 본 논문에서는 이러한 방법을 사용하여 시스템을 제작하고자 한다. 인클로저

의 부피와 우퍼와 트위터의 상대위치, 포트의 공진주파수와 포트내의 공기의 부피속도등을 고려하여 설계하며 설계 결과에 따라 인클로저를 제작하였다. 세번째 과정은 2way 하이파이 시스템을 구성하기 위하여 크로스오버 네트워크를 설계한다. 설계된 크로스오버는 저음과 고음의 균형과 인클로저 내부의 특성에 의한 음향왜곡 및 인클로저 외관에 의한 음향 회절을 고려하여 설계하였으며 또한 이를 제작하였다. 제작된 인클로저 시스템의 음향특성과 전기 임피던스 특성을 측정하여 시뮬레이션 결과와 비교하여 크로스오버 네트워크를 수정하여 하이파이 스피커 인클로저 시스템을 완성하는 과정을 기술하고자 한다 [5].

2. 스피커 매개변수 규명

자작용 2way 스피커 시스템을 제작하였다. 제작 목표는 80Hz 에서 16kHz 까지 평탄도 2dB 내의 하이파이 스피커시스템이다. 사용한 우퍼는 직경 5인치(유효직경, 11cm, 단면적= 0.009503m²)이고 트위터(직경 2.85cm, 단면적, 0.0006379 m²)는 직경 1 인치이었다. 스피커의 Thiele Small (T-S) 매개변수를 규명하기 위해서는 전기 임피던스 곡선 데이터가 필요하다. 한편, 이 데이터들을 이용하여 T-S 매개변수를 규명하는 방법들은 크게 3 가지로 구분할 수 있다. (1)질량추가법(added mass or delta mass method), (2)박스법, (3)다이아프램계의 질량과 자유공기 상태하에서의 전기 임피던스 곡선법 등이 있다[6,7].

* 주성대학 음향과

E-mail : stpark@jsc.ac.kr
Tel : (043) 219-1202, Fax : (043) 219-1224

2.1 우퍼 매개변수 규명

LMS 소프트웨어의 다이아프램계의 질량을 알고

있는 경우에 적용할 수 있는 방법을 사용하여 우퍼의 T-S 매개변수를 규명하였다. Fig.1 에 시험으로 구한 우퍼의 전기임피던스 곡선과 규명한 T-S 매개변수로 시뮬레이션한 결과를 비교하였다. 비교적 잘 일치함을 보였다. Fig.2 에는 이 방법으로 규명한 우퍼의 T-S 매개변수를 나타냈다. 공진주파수가 70Hz, $Q_{es}=0.742$ 이므로 EBP (Efficiency Bandwidth Product) >90 이상되어 포트인클로저를 사용 가능하다는 결론을 얻었다.

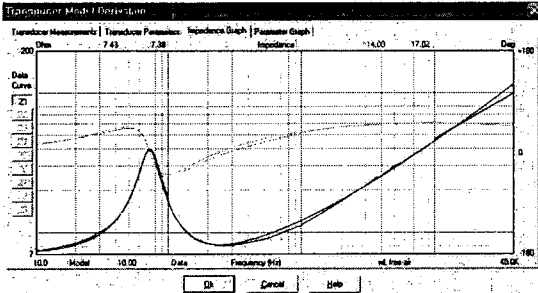


Fig.1 Comparison of electrical impedance of woofer; test result and simulated result by T-S parameters

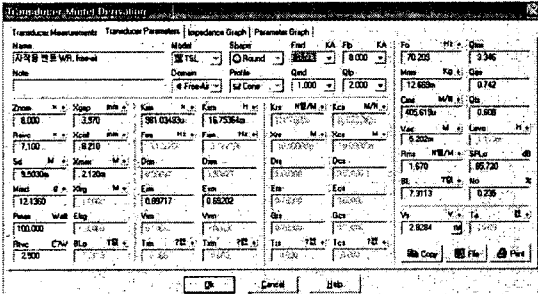


Fig.2 Identified T-S parameters for woofer

2.2 트위터 매개변수 규명

트위터의 경우에도 다이아프램부의 질량을 알고 있을때 사용하는 방법을 사용하여 T-S 매개변수를 규명하였다. Fig.3 은 규명된 T-S 매개변수로 시뮬레이션한 전기 임피던스와 시험결과를 나타냈다. 공진 주파수 이하에서는 상대적으로 잘 맞지않았으나 그 이상의 주파수에서는 잘 일치함을 보였다. 230Hz 부근에서 새로운 피크가 발생하였으나 이는 실제 트위터의 관심있는 작동 주파수 영역이 아니므로 문제될 것이 없었다.

3. 인클로저 모델링

2way 포트 인클로저를 설계하였다. Fig.4 에 포트 인클로저의 모습과 그라운드 플레인법(ground

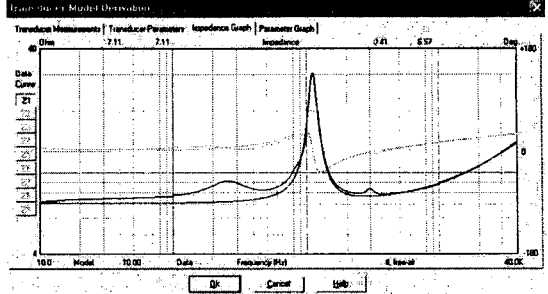


Fig.3 Comparison of electrical impedance of tweeter; test result and simulated result by T-S parameters

plane method)으로 음압을 측정하는 모습을 나타냈다[3]. Fig.4 에는 박스전면배플 중심을 기준으로 지면에 놓인 마이크로폰이 배플과 만나는 지점이 (35,210) mm 임과 배플이 수평면과 이루는 각도가 5도 임을 나타낸다. 우퍼박스와 포트에 대한 제원을 Fig.5 에 나타냈다.

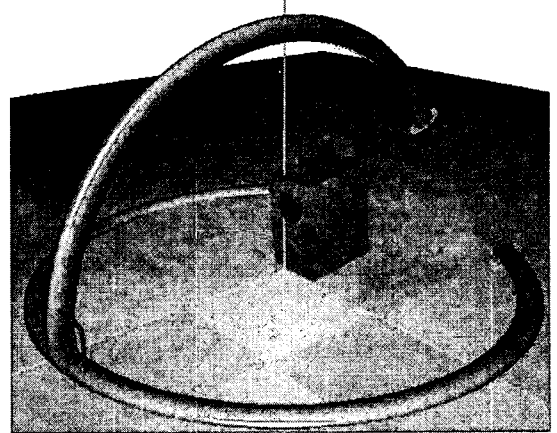


Fig.4 Test setup for SPL measurement by ground plane method

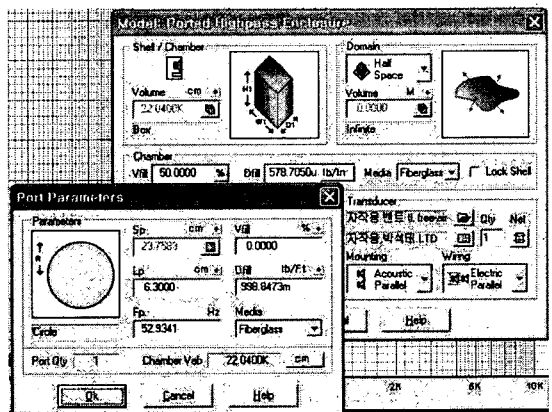


Fig.5 Specification of port enclosure

중심의 위치는 전면배플 중심을 기준으로 (-35, -115,0)mm 에 있음을 나타냈다. 우퍼의 임피던스를 박스상태에서 측정된 것과 시뮬레이션으로 구한 결과를 Fig.6 에 비교하였다. 검은 실선은 실제 박스상태에서 측정된 결과이고 붉은 파선은 포트 박스상태를 가정하여 시뮬레이션으로 구한 결과이다. 시험결과와 T-S 매개변수와 포트 인클로저 모델을 사용하여 시뮬레이션 한 결과가 잘 일치함을 보였다. 포트 공진주파수로 인하여 스피커 공진이 2 개로 나뉘어짐을 보였다.

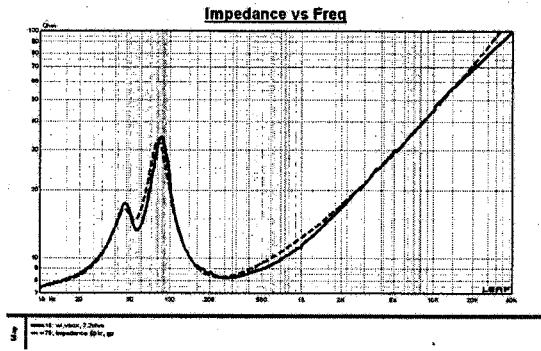


Fig.6 Comparison of electrical impedance for woofer attached at port enclosure, solid line: test result, dash line: simulated result

포트 인클로저에 장착한 트위터의 전기 임피던스 특성 비교를 Fig.7 에 나타냈다. 우퍼의 경우와 마찬가지로 시험결과와 해석 결과가 관심있는 주파수 대역에서 잘 일치함을 보였다. 또한, 트위터의 경우에는 전기 임피던스 결과를 보면 인클로저에 의한 영향이 없음을 보여주었다.

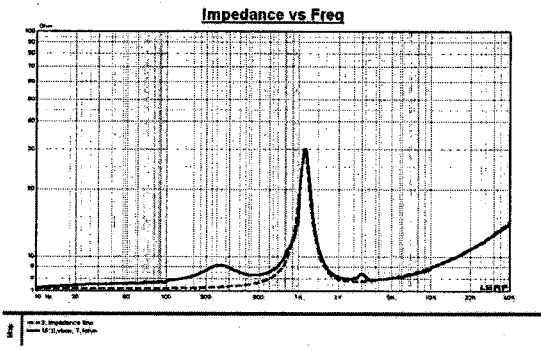


Fig.7 Comparison of electrical impedance for tweeter attached at port enclosure;solid line: test result, dash line: simulated result

Fig.8 과 Fig.9 는 각각 우퍼와 트위터를 포트박스에 장착한 상태에서 시험으로 구한 음향응답곡선을 시뮬레이션으로 구한 결과와 비교하였다. 음향응답특성 비교결과로 우퍼의 경우를 나타내는 Fig.8 을 보면 검은 실선은 포트박스를 약 5 도 정도 경사지게 한 후에 (Fig.4) 측정된 결과이며 붉은 점선은 포트박스에 장착한 우퍼를 반무한 평면에서 5 도 기울어지게 한 후에 시뮬레이션한 결과를 비교한 것이다. 트위터의 경우 (Fig.9) 에도 검은 실선은 트위터를 장착한 포트박스에 대하여 시험으로 구한 음향응답곡선을 나타내며 붉은 파선은 시뮬레이션으로 구한 음향응답곡선을 나타냈다. 우퍼와 트위터 모두 해석결과와 시험결과가 잘 일치함을 보여주었다. Fig.10 에는 우퍼와 트위터를 병렬연결한 상태로 동시에 1 와트 전력으로 가진하여 얻은 음향응답특성을 비교한 것이다. 시험결과인 검은 실선과 해석결과인 붉은 파선이 잘 일치함을 보여준다. 그러나, 저주파수 영역과 고주파수 영역의 응답특성이 평탄치 않으며 레벨차이가 많이 나타남을 보였다. 이러한 결과는 트위터의 민감도가 우퍼보다 크며 또한 인클로저 효과로 인함이다. 따라서, 하이파이 특성을 만족시키려면 음향특성이 평탄화하도록 전기 네트워크를 설계하고 제작하여 장착하여야 한다. Fig.11 은 2way 상태인 포트 인클로저에서 측정된 전기 임피던스를 시험결과(실선)와 해석결과(파선)을 비교한 것이다. 4 장에서는 우퍼와 트위터가 장착된 곳의 기하학적인 데이터와 Fig.10 과 Fig.11 을 이용하여 음향응답특성의 평탄화를 얻기 위한 최적크로스오버 네트워크 설계를 기술하였다. 설계된 네트워크는 앰프 파손을 방지하기 위하여 최저 임피던스를 제약조건으로 하는 최적 네트워크 설계방법을 택하였다.

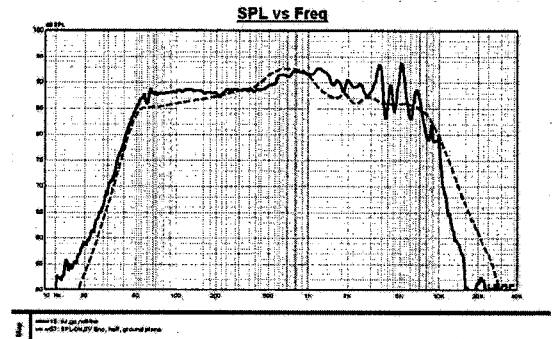


Fig.8 Comparison of SPL for woofer attached at port enclosure;solid line: test result, dash line: simulated result@1w, 1m

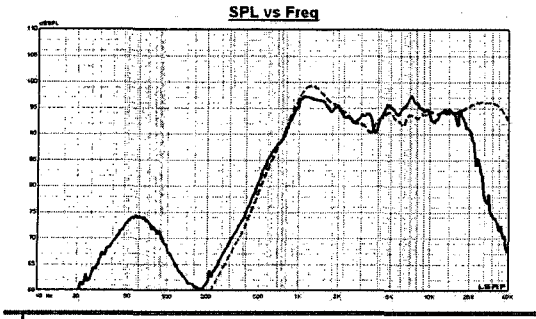


Fig.9 Comparison of SPL for tweeter attached at port enclosure;solid line: test result, dash line: simulated result@1w, 1m

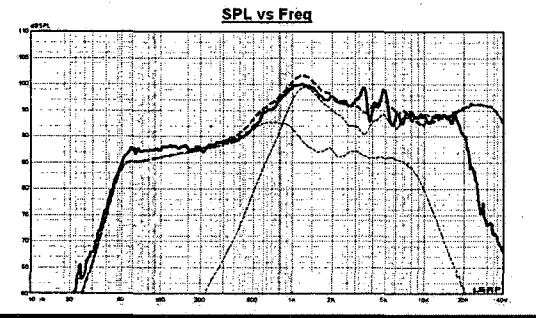


Fig.10 Comparison of SPL for 2 way , woofer + tweeter attached at port enclosure;solid line: test result, dash line: simulated result@1w, 1m

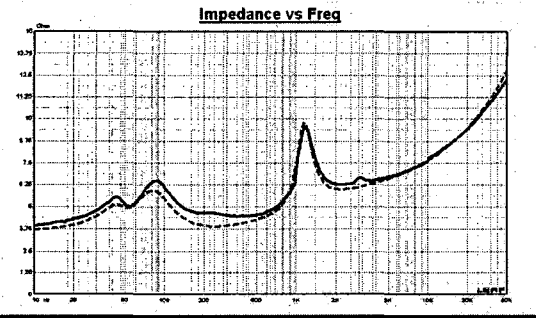


Fig.11 Comparison of electrical impedance for woofer + tweeter attached at port enclosure; solid line: test result, dash line: simulated result

Fig.12 는 그라운드 플레인법으로 음향응답을 측정하는 모습을 나타냈다. 사방이 평탄한 지형에서 시험하므로 반사음에 의한 음향왜곡을 방지할 수 있었다.

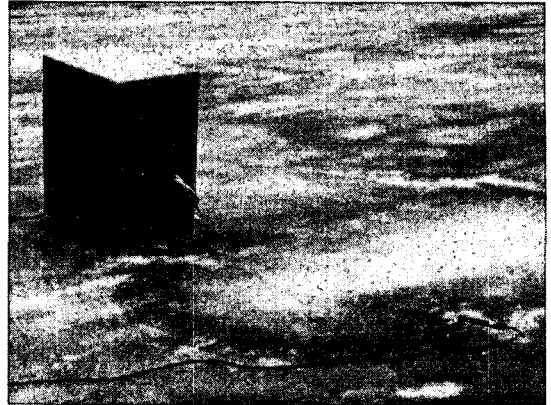


Fig.12 Test setup for SPL measurement for 2 way port enclosure by ground plane method

4. 네트워크 설계 및 제작

4.1 자동 설계법을 이용한 네트워크 설계

LEAP 소프트웨어의 wizard 를 이용하여 자동설계를 하였다. 먼저 왼쪽 우퍼와 트위터로 구성된 2 way 스피커 시스템에 대하여 필터설계를 하였다 크로스오버 주파수는 2.5kHz 로 하였고 하이파이를 위한 음압보정 및 전기 임피던스 평탄화를 구현하기 위하여 각각 저역필터와 고역필터 및 conjugate 필터 및 이들에 대한 최적필터를 구현하였다. 각 유니트에 대한 설계목표차수와 실제 구현차수를 Table 1 에 나타냈다.

Table 1 Design specification for 2 way crossover network, () means numbers of components

경우	목표차수		회로차수		최적차수	
	저역	고역	저역	고역	저역	고역
1	2	2	2	2	(10)	(12)
2	4	4	4	4	(12)	(14)
3	4	4	6	6	(14)	(16)

설계경우 1 은 목표차수는 2 차이고 필터차수 2 차 및 보정회로, 최적필터를 적용하였다. 음향응답 곡선은 비교적 평탄한 결과를 보여준다(Fig.13). 4 kHz 부분에서의 산과 골이 생기는 이유는 우퍼의 음향특성에 기인한 것으로 이 영역에서의 우퍼응답을 더욱 감소시킬 필요가 있음을 보여준다. 그러나, 전기임피던스 특성을 보면(Fig.14) 5kHz 이상에서 급격히 낮아져서 20kHz 부근에서는 1.5 오

음까지 되어 앰프에 부담을 주므로 이와 같은 필터는 실제 경우에 적용할 수 없었다. 경우 2 와 3 을 시행한 결과는 저 전기 임피던스 특성은 개선 되었으나 부품수가 너무 많이 필요하므로 자동설계 기법을 사용하는 것은 문제가 있음을 파악하였다. 대안으로 수동으로 필터 형태를 결정하고 최적화하는 방법을 생각하였다. 다음절에서는 수동 설계법을 이용한 네트워크 설계를 기술하였다.

4.2 수동 설계법을 이용한 네트워크 설계

저주파 통과대역 필터와 고주파 통과대역필터를 모두 4 차로 하고 트위터의 경우에 attenuator 를 사용하였다. Fig.15 는 수동 설계방식을 사용하여 구한 트위터부(상부)와 우퍼부(하부)의 필터를 나타냈다. Fig.16 은 이 경우에 구한 전기 임피던스 특성으로 앰프에 무리가 가지 않도록 특성이 변경되었음을 나타냈다. 각 부품들이 음향응답특성에 미치는 민감도 해석을 수행하였다. 민감도 해석결과로 Fig. 15 에서 L2, C2, L4 를 제거하여도 음향특성 및 전기 임피던스 특성이 크게 변화하지 않음을 확인하였고 이를 제거한 네트워크를 제작하였다. 따라서, 우퍼 부에는 콘덴서 1 개, 코일 1 개

+ tweeter attached at port enclosure,solid line:
 woofer+tweeter, red dash line: woofer only, blue dash:
 tweeter only

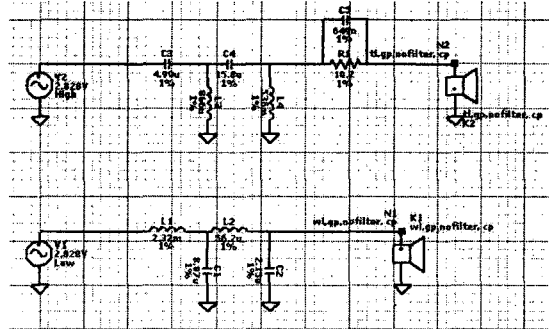


Fig.15 Schematic diagram of filter design, upper part: tweeter network, lower part: woofer network

를 사용(실제로는 등가 인덕턴스를 만족시키기 위하여 2 개를 사용함)하여 회로를 완성시켰고 트위터 부는 콘덴서 3 개 코일 및 저항을 각각 1 개씩 사용하여 제작하였다. Fig.17 에 제작한 네트워크를 나타냈다. Fig.18 에는 제작한 크로스오버 네트워크를 적용한 포트 인클로저의 전기 임피던스 곡선을

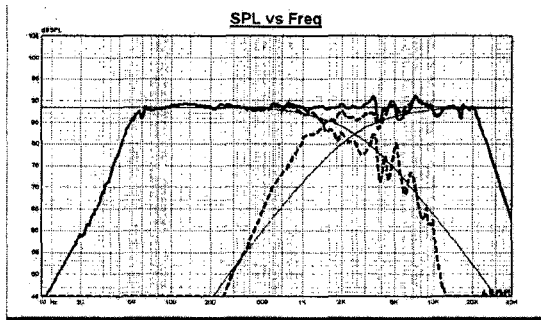


Fig.13 Simulated SPL for 2 way , woofer + tweeter attached at port enclosure, solid line: woofer+tweeter, red dash line: woofer only, blue dash: tweeter only

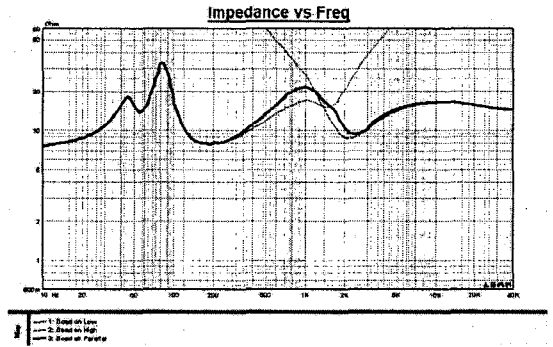


Fig.16 Simulated electrical impedance for 2 way, woofer + tweeter attached at port enclosure,solid line: woofer+tweeter, red dash line: woofer only, blue dash: tweeter only

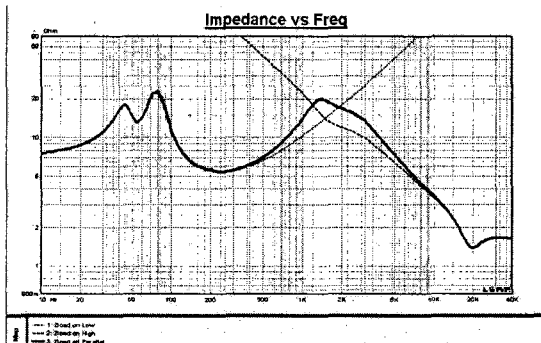


Fig.14 Simulated electrical impedance for 2 way, woofer

시험결과와 예측한 결과를 비교하였다. 한편, 제작한 크로스오버를 적용한 다음에 측정된 음향응답특성과 예측한 결과를 비교하였더니 약간의 차이가 남을 발견하였다. 이를 분석해 본 결과 부품의 공칭 값들에 의존하여 부품을 네트워크 제작에 사용하였는데 실제 부품의 값들을 조사한 결과 차이가 남을 알았다. 이들 차이가 나는 부품을 교체하여 수정회로들을 제작하였다. Fig.19 는 오른쪽 스피커 시스템을 연구실에서 측정된 결과(검은 파선, @0.5m, 반 무한평면법)를 그라운드 플레인법(붉은 실선,@1m)과 비교하였고, 후자의 크기에서

전자의 크기를 뺀 결과를 검은 실선으로 나타냈다. 수정회로 1(가는 붉은 실선, 그라운드 플레인법) 결과와 연구실에서 측정된 수정회로 2(가는 검은 파선)와 연구실의 음향특성을 고려하여 그라운드 플레인법으로 측정된 것으로 예측한 결과(굵은 검은 실선)을 비교하였다.

5. 결론

본 논문에서는 홈 오디오 용 하이파이 스피커 시스템을 개발하는 과정을 기술하였다. 스피커 유니트인 우퍼와 트위터는 모두 자체 제작한 것을 사용하였다. 각 스피커의 T-S 매개변수를 규명하였고 이를 기초로 하여 포트 인클로저를 설계하였고 제작하였다. 각 유니트의 민감도 차이와 인클로저의 특성 및 음향 회절로 인한 음향 왜곡을 보상할 크로스오버 네트워크를 설계하고 제작하였다.

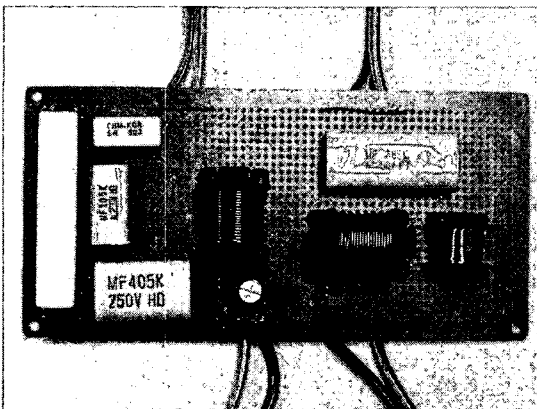


Fig.17 Crossover network for right port enclosure considering HiFi characteristics

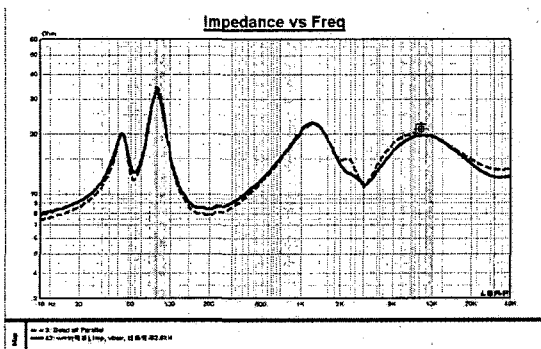


Fig.18 Simulated electrical impedance for 2 way with final crossover network, woofer + tweeter attached at port enclosure, solid line: test result, red dash line: simulated result

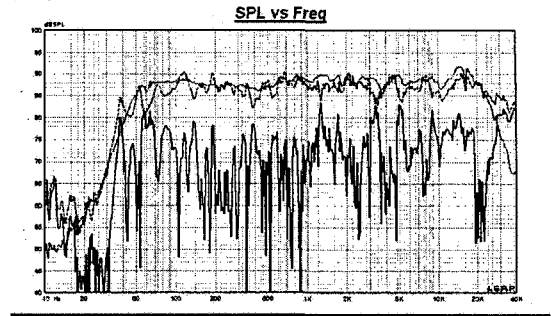


Fig.19 Comparison of SPL for 2 way applied crossover network, woofer + tweeter attached at port enclosure, red solid line: measured by ground plane method, dotted black line: measured at room condition

완성된 하이파이 스피커 시스템은 50Hz 에서 20,000Hz 까지 평탄한 음향특성을 나타냈으며 전기 임피던스 특성도 앰프에 무리가 가지 않는 조건을 만족시켰다. 본 연구를 통하여 스피커 매개변수만을 사용하여 인클로저와 네트워크를 제작하지 않은 상태에서도 시뮬레이션으로 음향특성 및 전기 임피던스 특성을 비교적 정확하게 예측할 수 있음도 보였다. 이러한 결과를 기초로 하여 새로운 시스템을 개발시에 많은 비용과 시간을 절약할 수 있음을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) 박석태, 2003, 제작과정에 따른 라우드스피커 음향 및 전기 편이분석, 주성대학논문집, 제 12 집, pp.83-96
- (2) F.J.M.Frankort, 1978, Vibration patterns and radiation behavior of loudspeaker cone, J. Audio Eng. Soc. vol. 26, no.9, pp.609-622
- (3) L.L.Beranek, 1993, Acoustics, the Acoustical Society of America
- (4) A.J.M.Kaizer, A.Leeuwstein, 1988, Calculation of the Sound Radiation of a Nonrigid Loudspeaker Diaphragm Using the Finite-Element Method, J. Audio Eng. Soc., vol. 36, no.7/8, pp.539-551
- (5) 박석태, 2003, 하이파이 스피커 시스템 개발, 산업자원부 산학공동연구과제 결과보고서
- (6) LEAP EnclosureShop Reference manual, 2003, Release 5, LinearX Systems
- (7) J.R.Ashley, 1969, Experimental Determination of Low-Frequency Loudspeaker Parameters, J. Audio Eng. Soc., vol. 17, pp. 525-531