한계를 넘어: 스마트 오디오 증폭기가 마이크로스피커 사운드를 동적으로 향상시키는 방법

Supriyo Palit
Systems engineer, consumer audio amplifiers and haptics

Aditya Sundar
Systems engineer, consumer audio amplifiers and haptics

소개

마이크로스피커가 직면한 엄격한 음량 제한 때문에 얇고 가벼운 장치에서 크고 몰입감 넘치는 사운드를 구현하기는 쉽지 않습니다. 설계자들은 고전압으로 인해 음성 코일이 끊어지거나 다이어프램이 찢어지지 않도록 위해 피크 볼륨을 스피커의 정격 전력보다 훨씬 낮게 설정하여 달성 가능한 SPL(음압 수준)을 제한해 왔습니다. 이러한 제한 사항은 Bluetooth 장치와 사운드바의 대형 스피커에도 영향을 미칩니다. 스마트 오디오 증폭기는 실시간 DSP 및 보호 알고리즘과 고정밀 IV 감지 ADC(아날로그-디지털 컨버터) 프론트 엔드를 융합하여 이러한 문제점을 해결합니다. 스마트 증폭기는 안전 영역 내에서 짧은 시간 동안 스피커를 지능적으로 오버드라이브하여 하드웨어가 실제 물리적 한계에 도달할 수 있도록 합니다. 이를 통해 8dB~10dB의 더 높은 체감 음량과 깊은 저음을 제공합니다.

마이크로스피커 취약성의 물리적 원리

일반적인 마이크로스피커는 자기장에 매달린 음성 코일로 구성되며 다이어프램(또는 콘)에 부착되고 서스펜션 시스템에 의해 제자리에 고정됩니다. 전기 신호가 코일을 통과하면 전자기력을 생성하며, 이 전자기력이 콘을 움직임으로써 공기를 진동시켜 소리를 냅니다. 그림 1을 참조하십시오.

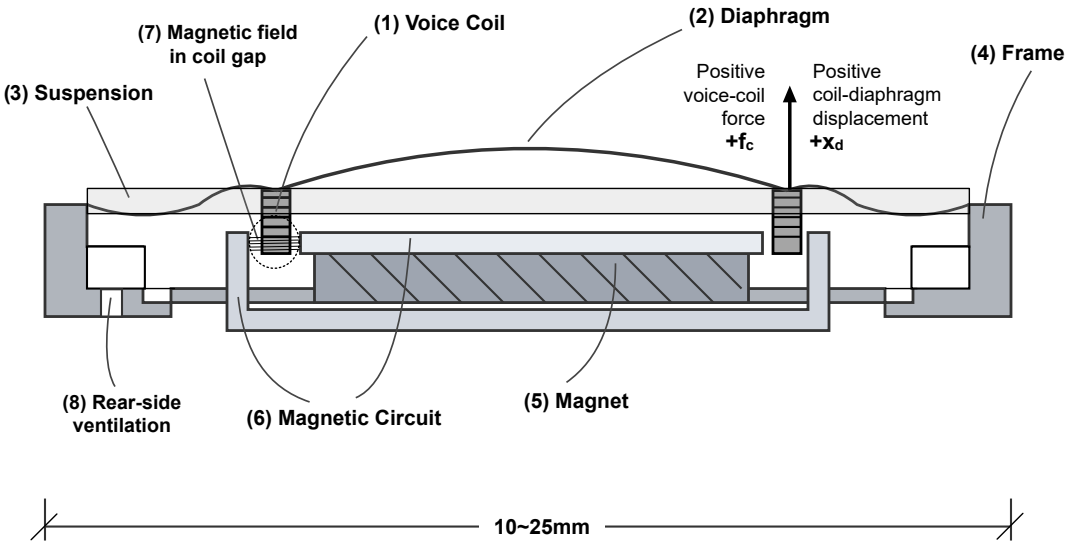


그림 1. *마이크로스피커 구조*

엔지니어가 더 큰 사운드를 생성하기 위해 이러한 작은 부품의 오디오 출력을 증가시키면 열 과부하와 기계적 과편위라는 두 가지 치명적인 고장 메커니즘이 발생합니다.

열 측면에서 볼 때 스피커의 효율은 매우 낮으며, 입력 전기 에너지의 95%~99%가 소리가 아닌 열이 됩니다. 따라서 연속적인 고전압 신호는 음성 코일을 정격 온도(T_{max}) 이상으로 밀어넣을 수 있으며, 이로 인해 와이어 절연체가 녹아 전기적 단락을 일으킬 수 있습니다. 기계적 측면에서 보면, 높은 볼륨에서 저음을 재생할 때는 콘 편위가 커야 합니다. 구동 전압이 콘을 물리적 이동 한계(X_{max}) 이상으로 밀면 서스펜션이 탄성 한계 이상으로 늘어날 수 있어, 음성 코일이 자석의 백플레이트에 부딪히거나(바텀 아웃) 다이어프램이 서라운드에서 찢어져 왜곡, 윙윙거림 또는 전체적인 음향 기능 상실이 발생할 수 있습니다.

기존 접근 방식과 스마트한 접근 방식의 오디오 설계 비교

기존의 오디오 설계에서는 엔지니어가 안전을 위해 피크 오디오 전력을 스피커의 연속 정격 전력으로 제한합니다. 이 고정 전압 상한은 전체 신호를 방어적인 하한까지 강제로 낮추므로 볼륨이 작고 저음이 약해집니다.

스마트 증폭기는 스피커의 상태를 지속적으로 모니터링하고 실시간으로 출력을 조정합니다. 밀리초마다 스마트 음성 코일이 얼마나 뜨거운지와 다이어프램이 얼마나 이동하는지를 파악하므로 기존 시스템에서라면 스피커를 즉시 망가뜨렸을 고전압 피크로도 스피커를 안전하게 구동할 수 있습니다.

스마트 증폭기 알고리즘은 스피커의 예상 편위 거리가 X_{max} 내에, 예상 음성 코일 온도가 T_{max} 내에 유지되도록 음량을 동적으로 변조함으로써 피크 음량 SPL를 8dB~10dB 더 높일 수 있습니다. 이 알고리즘은 스피커가 물리적 임계점에 실제로 가까워질 때만 에너지를 줄입니다. **그림 2**을 참조하십시오.

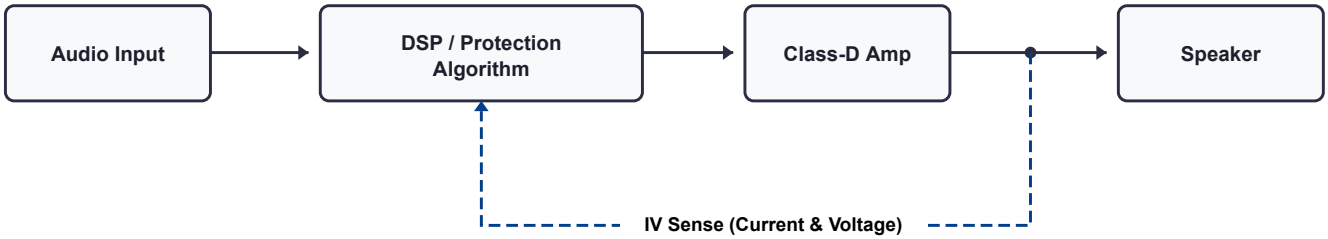


그림 2. *스마트 증폭기 시스템 아키텍처*

전용 감지 하드웨어는 DSP에서 실행되는 음향 소프트웨어 모델과 함께 실시간 피드백 루프를 형성하여 증폭기가 즉시 출력을 조정할 수 있게 합니다.

통합 IV 감지 회로

스마트 증폭기는 전류 및 전압(IV) 감지 회로를 활용합니다. 통합 ADC(아날로그-디지털 컨버터)가 스피커에 인가된 전압과 여기에서 유입하는 전류의 수준을 정확하게 포착하면, 시스템은 스피커의 전기 임피던스(Z = V/I)를 실시간으로 계산합니다. 온도 및 기계적 움직임에 따른 동적 임피던스 변화는 보호 알고리즘을 위한 원시 센서 입력을 제공합니다.

ADC의 변환 범위는 증폭기를 통해 재생되는 풀 스케일 오디오 신호를 감지할 수 있도록 설정됩니다. 고정밀 하드웨어는 스피커의 음량을 최대한 활용하도록 합니다. 전류 또는 전압 감지 오차는 음량에 직접적인 영향을 미칩니다. 스피커 보호 알고리즘이 X_{max} 및 T_{max} 한도를 넘지 않으려면 그 오차만큼의 추가적인 보호 대역이 필요하기 때문입니다.

일반적으로 ±0.35%의 오차는 IV 감지를 통한 음성 코일 온도 추정에서 ±1℃ 오차로 이어집니다. TI의 **TAS2781**, **TAS2783** 및 **TAS2573** ADC는 IV 감지에서 높은 정확도를 달성하여 온도 및 편위에 필요한 보호 대역을 최소화합니다. 높은 SNR(신

호 대 잡음 비율) 및 DNR(동적 범위)은 감지 오차를 방지하고 스피커를 통해 오디오 콘텐츠를 충실하게 재생합니다. **그림 3**을 참조하십시오.

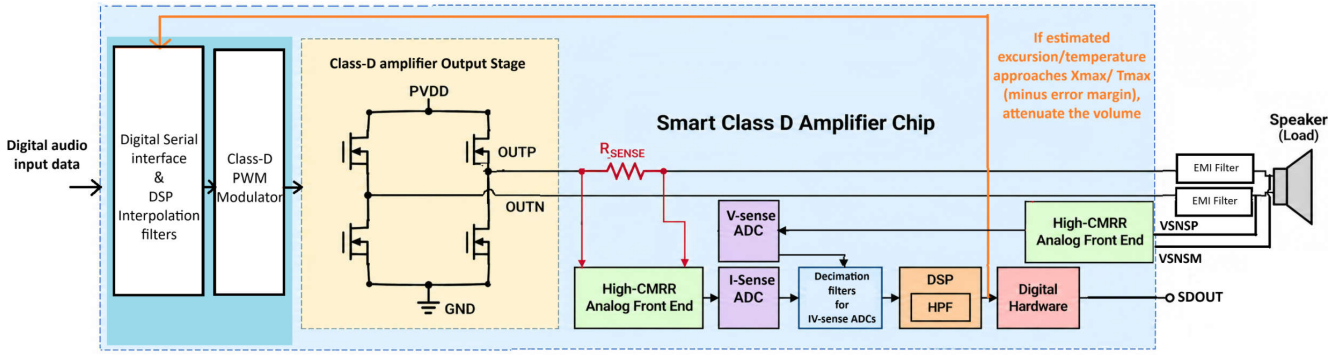


그림 3. *스마트 증폭기에서 하드웨어와 소프트웨어의 협업*

장치의 VSNSP 및 VSNSN 핀은 스피커 양단의 전압을 감지합니다. 이 감지 라인들은 정확한 측정을 위해 스피커 단자에 최대한 가깝게 연결해야 합니다.

클래스 D 증폭기 스피커의 양단 전압은 고전압 스위칭 노드이므로 IV 감지 ADC에는 공통 모드 제거 비율이 높은 아날로그 프론트 엔드 회로가 필요합니다. 이 회로는 스위칭 전압에서 오디오 콘텐츠를 추출하고 정밀 감지를 위해 고전압을 더 낮은 전압으로 변환합니다. 시그마-델타 또는 연속 근사 레지스터 ADC 회로는 이 저전압 오디오 콘텐츠를 감지하여 정밀한 IV 정보를 추출합니다. 데이터 ADC는 높은 SNR과 DNR을 달성하기 위해 오버샘플링되므로, ADC 출력은 일반적으로 3MHz와 같은 훨씬 더 높은 주파수에 있습니다. ADC 출력 데이터는 오디오 레이트(48KSPS)로 데시메이션되고 고역 필터를 거쳐 DC 콘텐츠(있는 경우)가 제거된 후, TAS2781, TAS2783 또는 TAS2573의 통합 DSP에서 실행 중인 SmartAmp 알고리즘에서 사용됩니다.

I 및 V 오디오 채널의 위상을 ±1µs 미만의 높은 정밀도로 매칭하면 스피커 임피던스를 실시간으로 매우 정밀하게 추정할 수 있습니다. IV 감지 데이터는 사용자가 모니터링 할 수 있으며, TDM SDOUT 핀 또는 Soundwire 데이터 인터페이스를 통해 출력할 수도 있습니다.

DSP는 스마트 증폭기의 두뇌입니다. 스피커 보호 알고리즘을 호스팅하여 실시간 예측 필터와 함께 스피커의 복잡한 수학 모델을 실행합니다. DSP는 게이트키퍼 역할을 하여 IV 감지 하드웨어에서 제공하는 원격 측정을 기반으로 입력되는 디지털 오디오 스트림을 즉각적으로 수정합니다.

스마트 증폭기가 작동하려면 해당 증폭기가 구동 중인 특정 스피커에 맞게 보정돼야 합니다. 오디오 엔지니어는 전용 진단 도구를 사용하여 음향 챔버에서 대상 마이크로스피커의 특성을 분석합니다. 이때 열 저항(R_E), 공진 주파수(f_0), 기계 댐핑(Q_{ms}) 및 자기 강도(Bl)를 측정합니다. 이러한 매개 변수를 DSP에 프로그래밍하면 스피커가 맞춤형 안전 엔벨로프를 만들기 위한 모델 역할을 합니다. TI의 PurePath™ Console 3 오디오 툴킷은 보정, 모델링 및 최종 시스템 튜닝 지원을 제공합니다.

온도 보호 알고리즘

스마트 증폭기의 열 보호는 금속 도체의 전기 저항이 온도에 따라 예측 가능하게 변화한다는 물리 법칙에 기반합니다. 이를 저항의 온도 계수(α)라고 합니다.

음성 코일이 가열되면 R_E가 선형적으로 증가하고 스마트 증폭기의 IV 감지 하드웨어는 측정된 임피던스로부터 이러한 저항을 분리합니다. **방정식 1**으로 코일의 내부 온도를 얻을 수 있습니다.

$$R_{dc}(T) = R_E(T_0)[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (1)$$

여기서 $R_E(T)$는 현재 시간 T에 측정된 저항이고, $R_E(T_0)$는 공장 보정에서 얻은 기준 저항이며, α는 코일 재료(예: 구리)의 저항 온도 계수입니다.

따라서 부피가 크고 응답이 느린 물리적 서미스터가 필요하지 않습니다.

이 측정은 연속 스트림이 아닌 체크포인트 판독 방식으로 주기적으로 수행됩니다. 그 이유는 두 가지가 있습니다. 첫째, 출력 수준이 낮거나 저전력-고전력 전환(잡음 제한 신호, 정착 오차 및 오프셋) 중에는 신뢰도가 떨어집니다. 둘째, 감지 ADC와 아날로그 프론트 엔드를 지속적으로 실행하면 특히 배터리 구동, 저볼륨 청취 환경에서 불필요한 전력을 소비하게 됩니다.

열 모델링 및 제어

R_E 측정이 주기적으로 수행되기 때문에 알고리즘은 측정 사이 공백 동안에도 음성 코일의 온도를 연속적으로 파악할 수 있는 방법이 필요합니다. 그 해법이 다단계 저항-커패시터 열 네트워크인 예측 열 모델입니다(**그림 4** 참조). 이 모델은 음성 코일에서 스피커 자석 구조로, 그리고 최종적으로는 장치의 섀시 및 주변 공기로 전달되는 열을 시뮬레이션하며, 전체 제어 루프 속도로 실행됩니다. 새로운 IV 감지 기반 R_E 판독값이 도착할 때마다 모델이 이 값을 기준으로 재고정되고, 마지막 체크포인트 이후 누적된 드리프트가 보정됩니다.

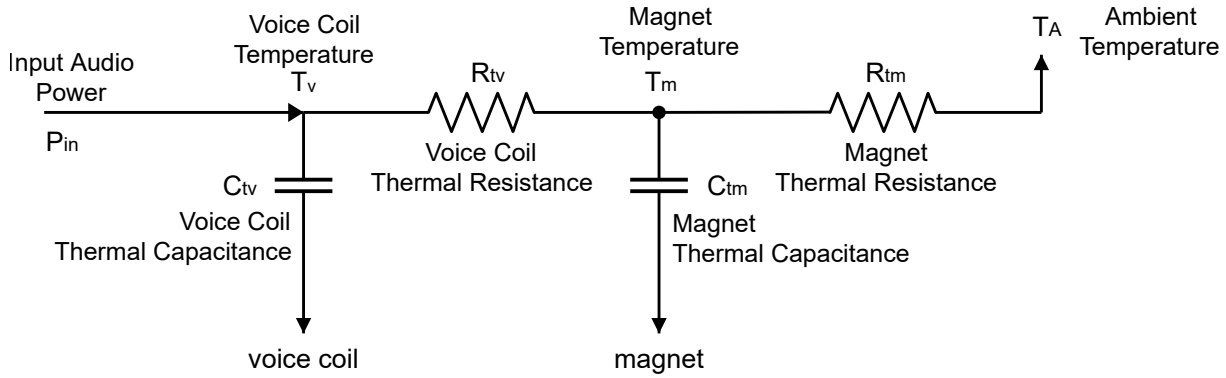


***그림 4.** 스피커 예측 열 모델*

이러한 방식으로 방열 경로를 추적함으로써 알고리즘은 향후 오디오 피크 중 온도가 상승하는 속도와 일시 정지 시 냉각되는 속도를 예측할 수 있습니다. 이러한 추정치는 전력 컨트롤러로 전달되며, 전력 컨트롤러는 오디오 신호의 안전 작동 한계를 중단 없이 지속적으로 적용합니다. 예상 음성 코일 온도가 스피커의 T_{max}에 가까워지면 컨트롤러가 허용 한계를 낮춰 스피커가 과열되지 않도록 보호합니다. 스피커가 조용한 오디오 구간 중 냉각되면 컨트롤러가 스피커로 더 높은 전력을 전달할 수 있습니다.

열 보호 알고리즘은 열 컨트롤러가 예측한 전력 한계를 기반으로 오디오 신호를 제어하며, 부드러운 광대역 게인 감소를 적용함으로써 스피커에 전달되는 전체 RMS(평균 제곱근) 전력을 낮춥니다. 이를 통해 음성 코일이 갑작스러운 가청 볼륨 저하 없이 냉각될 수 있습니다. 이 게인 감소에는 느린 어택 및 릴리스 시간이 적용됩니다. 사람의 청각은 전체 볼륨의 점진적인 변화에 덜 민감하기 때문에 감쇠가 배경으로 자연스럽게 녹아들어 오디오의 체감 다이내믹스가 유지됩니다. **그림 5**을 참조하십시오.

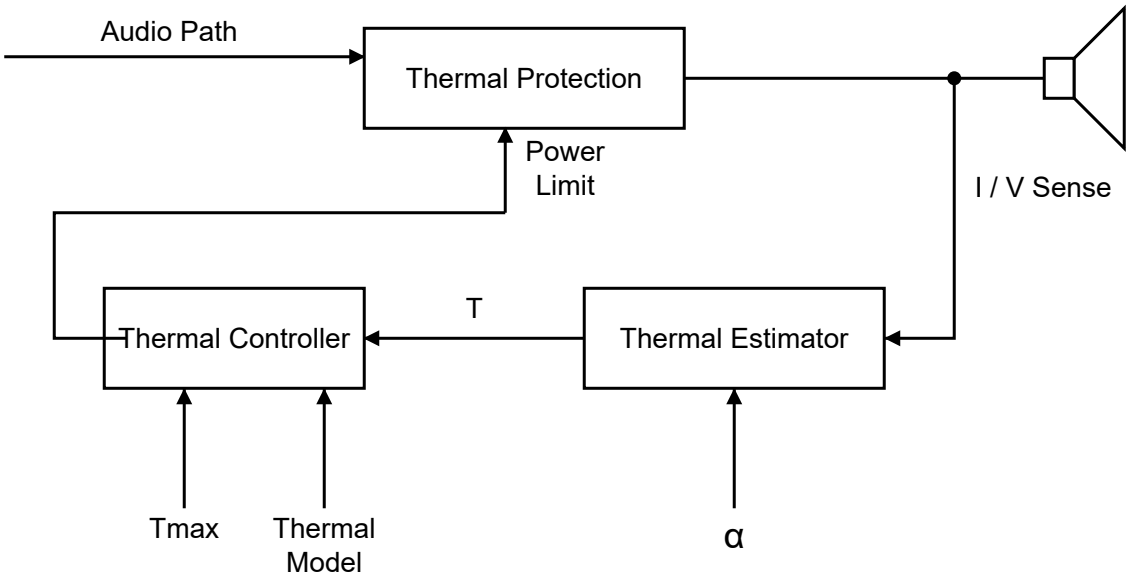


그림 5. *폐쇄형 루프 온도 보호*

그림 6에서 파란색 곡선은 스마트 증폭기의 추정 온도를 나타내고, 빨간색 선은 T_{max} 한계를 나타냅니다. 증폭기는 스피커가 항상 안정적인 온도 한도 내(IV 감지 오차를 고려한 약간의 헤드룸 포함)에 있도록 오디오를 동적으로 조절합니다.

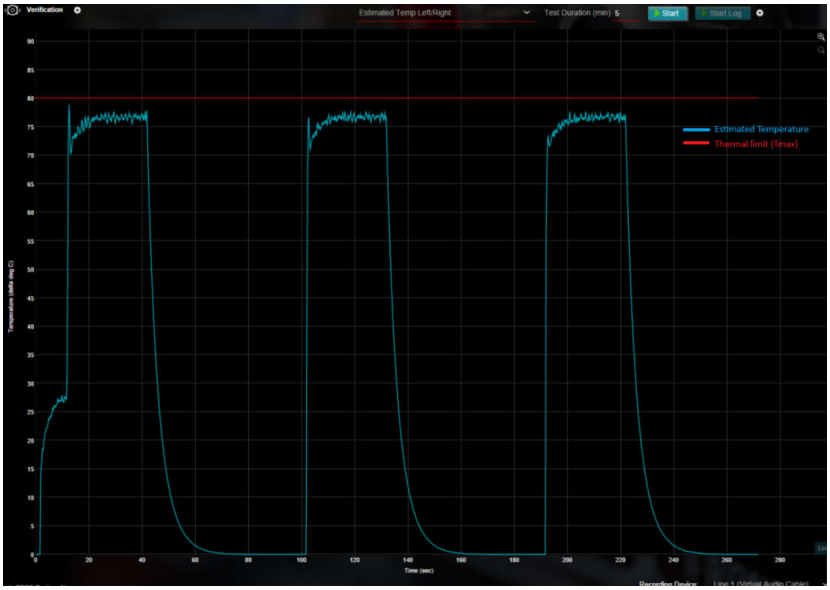


그림 6. *스마트 증폭기 온도 추정치와 T_{max} 한계 비교*

편위 보호 알고리즘

느리게 변하는 열 질량과 RMS 전력을 처리하는 열 보호와 달리, 편위 보호는 변화가 매우 급격합니다. 스피커 콘은 단일 파형 주기 내에서 1밀리초도 안 되는 시간에 정지 상태에서 최대 과편위 상태까지 이동할 수 있습니다.

스피커 콘의 이동을 추적하기 위해 스마트폰 내부에 물리적 레이저 편위 센서를 장착하는 것은 불가능하기 때문에 스마트 증폭기는 스피커 역학의 수학적 시뮬레이션에 의존합니다. 이 시뮬레이션은 변환기의 Thiele-Small 매개 변수와 선형 상태 공간 모델을 기반으로 합니다. **그림 7** 및 **표 1**을(를) 참조하십시오.

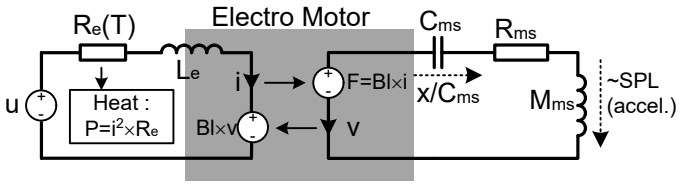


그림 7. *스피커의 기전력 모델*

기전력 매개 변수	설명
R_{ms}	기계적 감쇠율
M_{ms}	기계적 질량
C_{ms}	기계적 준수
Bl	하중 계수
R_E	음성 코일의 DC 저항
L_E	음성 코일의 인덕턴스
u	증폭기 전압
i	음성 코일 전류
v	멤브레인 속도
F	자기장 내 기계적 힘
x	자기 편위

표 1. *스피커 기전력 모델의 주요 매개 변수*

이 알고리즘은 실시간 전류 및 전압 데이터를 사용하여 스피커의 움직임에 의해 생성되는 역기전력(back-EMF)을 계산합니다. 역기전력 데이터를 "디지털 트윈" 스피커 모델과 결합한 후 DSP는 정규화된 최소 평균 제곱 필터와 같은 옵저버 루프를 실행하여 모델을 실시간으로 업데이트합니다. 스피커 모델은 편위 예측기 전압-편위 필터를 사용하여 콘의 순간적인 물리적 편위(x)를 계산하는 데 사용됩니다(**방정식 2**).

$$Z_{exc}\left(s\right) = \frac{X(s)}{V(s)} = \frac{Bl}{M_{ms}R_E} \times \frac{1}{s^2 + s \times \left(\frac{R_{ms} + \frac{Bl^2}{Re}}{M_{ms}} + \frac{1}{M_{ms}C_{ms}}\right)} \quad (2)$$

예측 제한기

저주파 저음 과도 상태(예: 스네어 드럼 타격음 또는 영화 속 폭발음)가 콘을 X_{max} 이상으로 밀어낼 위험이 있는 경우, 편위 보호 알고리즘은 신속하고 표적화된 대책을 구축합니다. DSP는 짧은 디지털 지연 버퍼(일반적으로 수밀리초)를 통해 위험한 피크가 실제로 증폭기 단계에 도달하기 전에 미리 파악할 수 있으므로, 알고리즘이 해당 파형 주기에 정밀하고 즉각적인 피크 감쇠를 적용할 시간을 확보할 수 있습니다. **그림 8**을 참조하십시오.

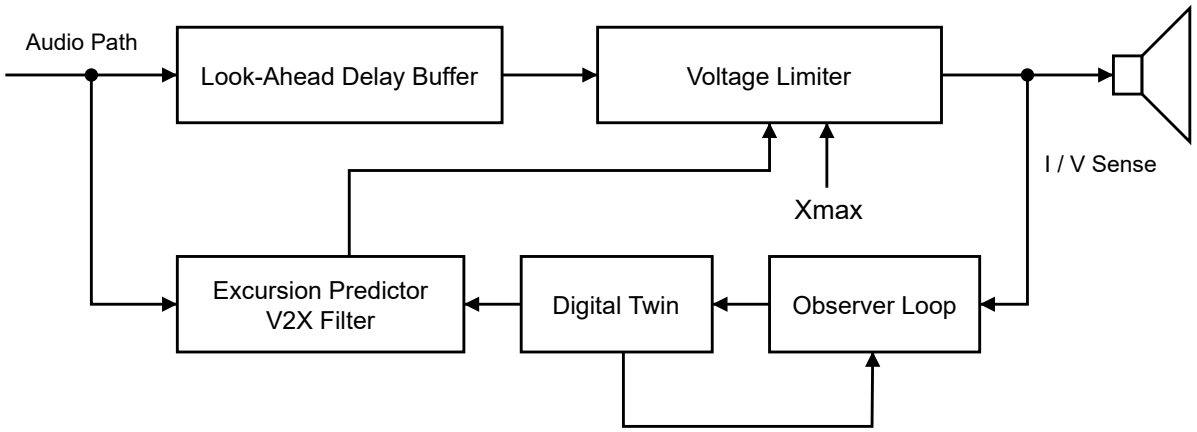


그림 8. 폐쇄형 루프 편위 보호

그림 9에서 파란색 곡선은 스마트 증폭기의 추정 편위를 나타내고, 빨간색 선은 X_{max} 한계를 나타냅니다. 증폭기는 오디오를 동적으로 조정하여 스피커가 항상 안정적인 편위 한계 내에 있도록 합니다.

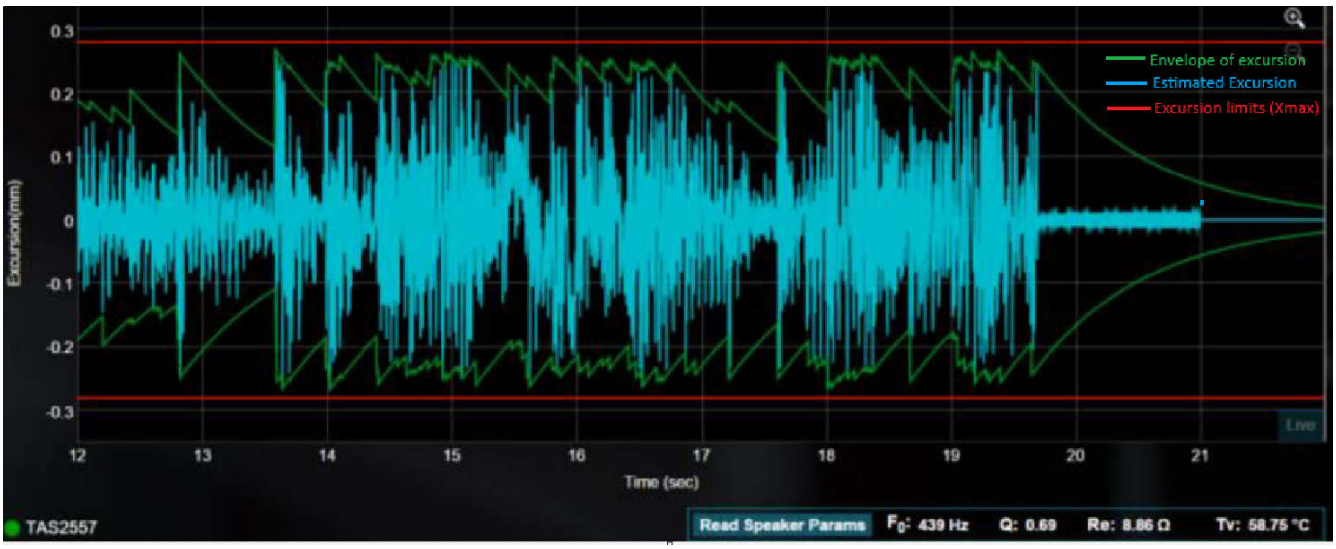


그림 9. X_{max} 한계 대비 실시간 편위 추적

오디오 튜닝 체인 통합

EQ(이퀄라이저) 및 DRC(동적 범위 컴프레서)를 마이크로스피커 보호를 위한 공격적인 제한 도구로 사용하는 기존 오디오 설계와 달리, 스마트 증폭기 패러다임에서는 오디오 신호 체인을 진정한 의미에서 예술적으로 튜닝할 수 있습니다. 예를 들어, 튜닝 엔지니어는 파라메트릭 EQ를 사용하여 저주파를 공격적으로 부스트(저음 확장)하여 스마트폰의 소형 스피커를 훨씬 더 큰 음향 인클로저처럼 만들 수 있습니다. 또한 EQ로 응답 피크를 평탄화하여 보컬 선명도를 최적화할 수 있습니다.

스마트 증폭기는 보호 모델에 연계된 멀티밴드 DRC도 사용하여 오디오를 저역, 중역, 고역으로 분리할 수 있습니다. 설계자는 중역과 고역을 최적화하여 체감 음량을 극대화하고, 대사를 선명하게 하며, 넓은 공간감을 구현할 수 있습니다. 저역은 콘의 편위 모델과 긴밀하게 결합되어 실제 물리적 편위에 따라 최적의 저음 응답을 제공합니다.

스마트 증폭기는 스피커 출력을 안전하게 극대화하여 음량과 주파수 응답을 개선함으로써, 하드웨어 성능, 설계 및 안정성 측면에서 이점을 제공합니다. 구체적인 이점은 다음과 같습니다.

- 확장된 저주파 응답: 스마트 증폭기는 고정 하드웨어 필터로 저음을 영구적으로 롤오프하는 대신 지능형 슬라이딩 저음 확장 전략을 사용합니다. 볼륨이 낮을 때는 저음이 더 낮은 주파수까지 깊게 확장됩니다. 볼륨이 높아지면 예측 제한기가 과편위를 방지하는 데 필요한 만큼만 작동하므로, 모든 볼륨 수준에서 저음의 존재감을 최대한 유지합니다.
- 부품 최적화 및 공간 절약: 소프트웨어가 보호를 담당하기 때문에 제품 설계자는 더 작고 얇은 스피커 모듈을 채택할 수 있습니다. 이를 통해 좁은 장치 인클로저 내부에서 공간을 확보해 더 큰 배터리, 고급 카메라 센서 또는 더 얇은 제품 프로파일에 활용할 수 있습니다.
- 제로에 가까운 현장 반품률: 스마트 증폭기는 음성 코일의 그을림과 다이어프램의 찢어짐을 방지하는 안정적인 디지털 차폐막 역할을 하여 하드웨어 고장을 획기적으로 줄이고 보증 지원과 현장 반품 청구 비용을 수백만 달러 절감합니다.

그림 10은 스마트 증폭기와 기존 증폭기의 음량과 주파수 응답을 비교한 결과입니다.

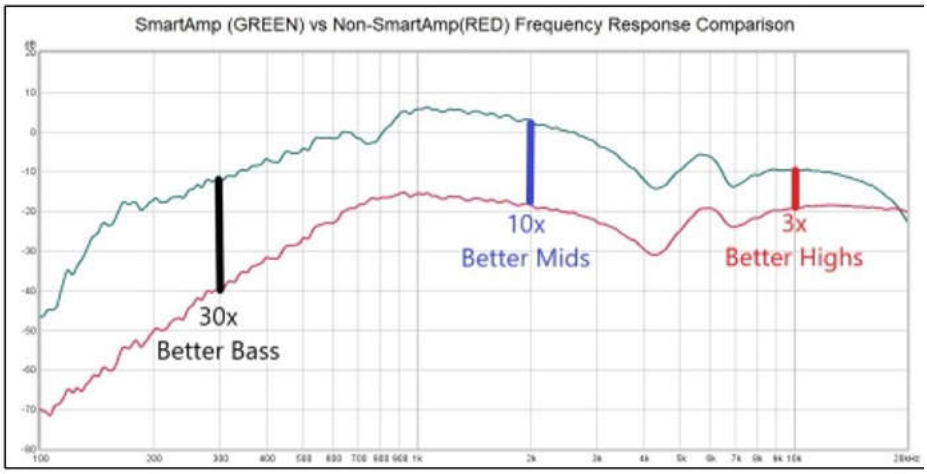


***그림 10.** 스마트 증폭기와 기존 비스마트 증폭기의 음량 및 주파수 응답 비교*

결론

스마트 증폭기는 수동적 안전 마진을 하드웨어와 소프트웨어가 공동으로 주도하는 능동적인 감시로 대체함으로써, 취약한 마이크로음향 부품과 충실도 높은 사운드를 원하는 소비자 요구 사이의 격차를 해소합니다. 이러한 시스템은 실시간 전류 및 전압 감지, 비선형 열 및 기계 모델링, 오디오 엔지니어링을 통해 마이크로스피커를 절대적인 물리적 한계까지 끌어올립니다. 그 결과 부품 신뢰성을 유지하면서도 놀랍도록 크고 풍부하며 꽉 찬 사운드를 구현하는 스마트폰, 노트북 및 스마트 홈 기기가 탄생했습니다.

작성자 소개

Aditya Sundar는 소비자용 오디오 증폭기 및 햅틱 제품의 시스템 엔지니어로, 텍사스 인스트루먼트에서 11년 이상 근무해 왔습니다. 이전에는 아날로그 설계 관리자로 근무했습니다. Sundar는 고아주 Birla Institute of Technology & Science에서 전자 및 계측 공학 학사 학위를 취득했습니다. 혼합 신호 클래스 D 오디오 신호 체인 설계를 전문으로 하며, 혼합 신호 부스트 클래스 D 오디오 증폭기, 피에조 드라이버 및 스피커 보호 기술 분야에서 폭넓게 활동하고 있습니다.

Supriyo Palit은 텍사스 인스트루먼트의 소비자용 오디오 증폭기 및 햅틱 제품의 시스템 엔지니어로, 업계 경력 30년 중 27년 이상을 텍사스 인스트루먼트에서 근무했습니다. 벵갈루루의 Indian Institute of Science에서 전기 통신 대학원 학위를 취득했습니다. 오디오 신호 처리, 스피커 보호 기술, 오디오 전력 관리, 햅틱 및 음성 알고리즘을 중점적으로 연구하고 있습니다.

감사의 말

저자들은 이 문서를 작성하는 과정에서 기술적으로 기여해 주신 Vallabha Hampiholi, Nilendra Gadre, Michael Kim, Jasjot Chadha 및 Mashkurahmed Badebade에게 감사의 뜻을 전합니다.

추가 리소스

- 이 **2015년 CES의 스마트 증폭기 프레젠테이션**을 확인하십시오.
- 애플리케이션 보고서, "**스마트 증폭기 튜닝 가이드**", "**스마트 증폭기 빠른 시작 가이드**" 및 "**스마트 증폭기 개발 시작하기**"를 읽어보십시오.

중요 알림: 이 문서에 기술된 텍사스 인스트루먼트의 제품과 서비스는 TI의 판매 표준 약관에 의거하여 판매됩니다. TI 제품과 서비스에 대한 최신 정보를 완전히 숙지하신 후 제품을 주문해 주시기 바랍니다. TI는 애플리케이션 지원, 고객의 애플리케이션 또는 제품 설계, 소프트웨어 성능 또는 특허권 침해에 대해 책임을 지지 않습니다. 다른 모든 회사의 제품 또는 서비스에 관한 정보 공개는 TI가 승인, 보증 또는 동의한 것으로 간주되지 않습니다.

PurePath™ is a trademark of Texas Instruments.
모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.

© 2026 Texas Instruments Incorporated

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES “AS IS” AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI’s products are provided subject to TI’s Terms of Sale, TI’s General Quality Guidelines, or other applicable terms available either on ti.com or provided in conjunction with such TI products. TI’s provision of these resources does not expand or otherwise alter TI’s applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025