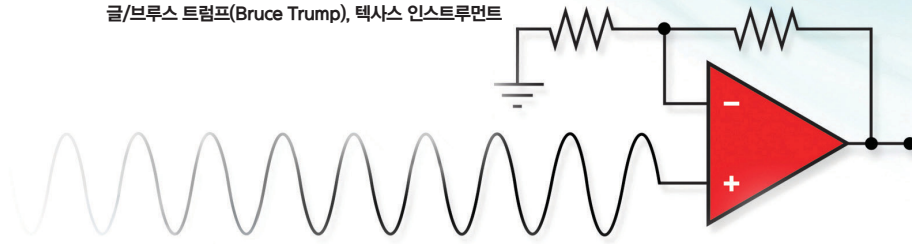


연산 증폭기 설계 ①

글/브루스 트럼프(Bruce Trump), 텍사스 인스트루먼트



앞으로 연재될 각각의 주제는 'The Signal'이라고 하는 블로그에 게재된 글들로서, TI의 E2E™ 커뮤니티에서 확인할 수 있다. 본 블로그는 내용길이는 짧지만 핵심을 짚고 있으며, 실제적이고 직관적이며, 그 자리에서 쉽게 이해하여 본인의 것으로 만들 수 있다. (이 연재에 실린 글에 대해서나 또는 다른 어떤 정밀 증폭기에 관해서나 질문이 있으면 TI E2E Community의 Precision Amplifiers Forum 참조)

서론

아날로그 엔지니어들이 지식을 습득하고 경험을 쌓는 것은 시작해서 끝으로 가는 직선적인 경로로 이루어지는 것이 아니기에 아날로그를 이해한다는 것은 결코 쉬운 일이 아니다. 아날로그 엔지니어들은 난관을 만날 때마다 장애물 넘기를 하면서 지그재그 경로로 지식을 습득한다. 오히려 여기저기에서 조금씩 배우는 식으로 자신의 이해를 높여간다. 그렇게 조금씩 퍼즐 조각을 맞춰가다 보면 안개가 낀 것처럼 뿌옇던 개념들이 차츰 선명하게 보이기 시작한다.

아무리 똑똑하고 유능한 엔지니어라 하더라도 모든 문제에 대한 해답을 갖는 것은 아니며 마지막 허들을 뛰어넘은 것 같은 또는 마지막 퍼즐을 끼워 맞춘 것 같은 만족감은 절대 있을 수 없다.

그렇기에 아날로그에 관한 짧은 글들로 이루어진 이 연재 또한 완벽하지는 않지만 그 동안 몰랐던 아주 기초적인 것들을 이해하거나 자신의 사고력을 높이는 자극제가 되기에는 충분한 도움이 될 것이다.

앞으로 연재될 각각의 주제는 'The Signal'이라고 하는 블로그에 게재된 글들로서, TI의 E2E™ 커뮤니티에서 확인할 수 있다. 본 블로그는 내용길이는 짧지만 핵심을 짚고 있으며, 실제적이고 직관적이며, 그 자리에서 쉽게 이해하여 본인의 것으로 만들

수 있다. (이 연재에 실린 글에 대해서나 또는 다른 어떤 정밀 증폭기에 관해서나 질문이 있으면 TI E2E Community의 Precision Amplifiers Forum 참조)

참고적으로 e-book 형태의 이 모음집에 사용된 대부분의 그림은 TI의 TINA-TI™ 무료 소프트웨어 툴을 사용해서 제작된 것이다. (TI 웹사이트에서 소프트웨어 다운로드 가능)

연산 증폭기의 전압 범위 문제

시스템 개발자들은 연산 증폭기의 전원 입출력 전압 범위에 대해 많은 궁금증을 가지고 있는데, 이것을 최대한 잘 이해할 수 있도록 하나하나 살펴보도록 하자.

첫째, 통상적인 연산 증폭기는 접지 단자를 갖지 않는다. 표준적 연산 증폭기는 접지가 어디인지 '알지' 못한다. 그러므로 자신이 듀얼 전원(±)으로 동작하고 있는지 단일 전원으로 동작하고 있는지 알 수 없다. 전원 입력과 출력 전압이 동작 범위 내에 있으면 된다.

다음의 세 가지 전압 범위를 중요하게 고려해야 한다:

- ① 총 전원 전압 범위(total supply-voltage range): 이것은 2개 전원 단자 사이의 총 전압이다. 예를 들어서 ±15V이면 총 30V이다. 어떤 연산 증폭기가 동작 전압 범위가 6V~36V라고 하자. 그러면 가장 낮을 때는 ±3V 다시 말해서 +6V일 수 있으며, 최대일 때는 ±18V 다시 말해서 +36V나 또는 -6V/+30V일 수도 있다. 비평형 전원도 사용해도 되지만 아래의 두 번째 및 세 번째 범위들을 잘 맞춰야 할 것이다.
- ② 입력 공통 모드 전압 범위(input common-mode voltage range): 입력 공통 모드 전압 범위는 그림 1에서 보는 것과 같이 양과 음의 전원 관계로써 정의된다. 이 가설적 연산 증폭기의 입력 공통 모드 전압 범위는 음의 레일보다 2V 높은 지점에서부터 양의 레일보다 2.5V 낮은 지점까지이다. 이것을 수학적으로 표현하면 $(V-)+2V \sim (V+)-2.5V$ 이다.
- ③ 출력 전압 범위(출력 스윙) 역시 레일 전압과의 관계로써 정의된다. 이 예의 경우에 출력 전압 범위는

$(V-)+1V \sim (V+)-1.5V$ 이다.

그림 1, 2, 3은 $G = 1$ 버퍼 구성을 보여준다. 여기서 핵심적인 점은, 그림 1의 예로 가능한 출력은 음의 레일로부터 2V 및 양의 레일로부터 2.5V로 제한된다는 것이다. 이것은 입력 공통 모드 범위 제한 때문이다. 전부의 출력 전압 범위를 제공하기 위해서는 이 연산 증폭기를 더 높은 이득으로 구성해야 한다.

그림 1. 듀얼 전원(±)을 사용한 표준적 연산 증폭기의 입출력 전압 범위

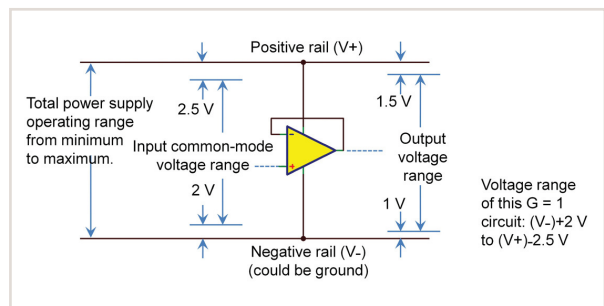
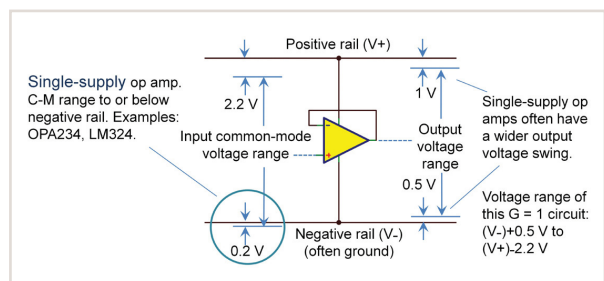


그림 1의 예는 듀얼 전원을 사용한 전형적인 연산 증폭기를 보여준다. 이것은 '단일 전원'이라고는 말할 수 없으나, 이러한 범위 이내에 머문다면 단일 전원으로 동작할 수 있다.

그림 2는 단일 전원 연산 증폭기를 보여준다. 이 증폭기는 공통 모드 범위가 음의 레일을 지나서 음의 레일보다 조금 더 낮은 지점까지 이르고 있어 접지에 가깝게 동작하는 더 다양한 회로에 사용될 수 있다. 그러므로 '단일 전원'이라고 할 수 없는 연산 증폭기도 실제로 일부 단일 전원 회로에 사용될 수 있으나, 진정한 단일 전원은 좀더 범용적으로 사용될 수 있다.

그림 2. 단일 전원 연산 증폭기의 입출력 전압 범위



G = 1 버퍼 회로에서 이 연산 증폭기는 V- 레일로부터 0.5V에서부터(출력 범위 제한에 따른 것) V+ 레일로부터 2.2V까지(입력 공통 모드 범위 제한에 따른 것) 출력 스윙을 제공할 수 있다.

그림 3은 '레일-투-레일(rail-to-rail)' 연산 증폭기를 보여준다. 그림 3에서 보는 것처럼, 이 연산 증폭기는 양쪽 전원 전압 레일과 같거나 조금 더 벗어난 입력 전압을 사용해서 동작할 수 있다. 레일-투-레일 출력이란, 출력 전압이 전원 레일로부터 10mV~100mV까지 이내로 매우 가깝게 스윙할 수 있다는 것을 말한다. 어떤 연산 증폭기들은 레일-투-레일 출력이라고만 말하고, 그림 3에서와 같은 입력 특성은 알려주지 않을 수 있다. 레일-투-레일 연산 증폭기는 단일 5V 전원 및 그 이하에서 아주 일반적으로 사용된다. 제한적인 전원 범위로 신호-전압 능력을 극대화하기 때문이다.

레일-투-레일 연산 증폭기는 신호-전압 제약을 완화할 수 있다는 점에서 선호되기는 하나, 항상 최선의 선택이

그림 3. 레일-투-레일 연산 증폭기의 입력 전압 범위

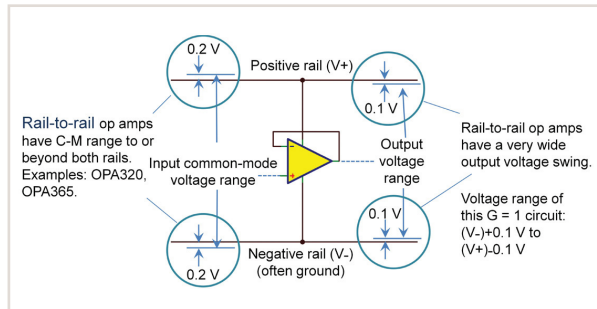
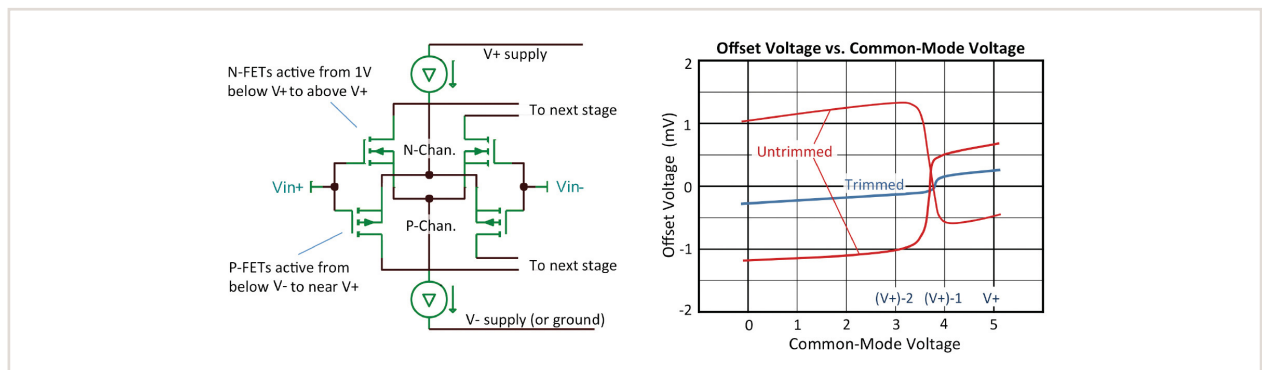


그림 4. N-채널 및 P-채널 트랜지스터 쌍을 사용한 듀얼 입력 레일-투-레일 스테이지



될 수는 없다. 삶에서 다른 많은 것들을 선택할 때와 마찬가지로 여타의 많은 성능 측면들과 절충이 필요한데 바로 이 점이 아날로그 개발자의 존재 이유이다.

꼭 알아 두어야 할 레일-투-레일 입력

레일-투-레일 연산 증폭기는 아주 널리 사용되고 있으며, 특히 낮은 전원 전압일 때 유용하다. 그렇다면 레일-투-레일 입력을 어떻게 달성할 수 있으며 어떤 절충들을 해야 하는지 살펴보자.

그림 4는 N-채널 및 P-채널 트랜지스터 쌍으로 이루어진 전형적인 듀얼 입력 레일-투-레일 스테이지를 보여준다. P-채널 FET은 공통 모드 전압 범위의 하위 부분에서부터 음의 레일(또는 단일 전원 접지)보다 조금 낮은 지점까지 신호를 처리한다.

N-채널 FET은 양의 레일에 가까운 공통 모드 전압에서부터 양의 레일보다 조금 더 높은 지점까지를 처리한다. 추가적인 회로(그림에는 표시되지 않음)가 트래픽을 지정하고 다음 스테이지가 어느 입력 스테이지 신호를 처리할지 판단한다. 대부분의 TI의 듀얼 입력 스테이지 연산 증폭기는 양의 레일로부터 약 1.3V 지점에서 전이(transition)가 발생되도록 설계되었다. 이 전압을 넘으면 P-채널 스테이지로 게이트 전압이 불충분하므로 신호 경로가 N-채널 스테이지로 전환된다.

P 및 N 입력 스테이지가 오프셋 전압이 조금 다를 수 있다. 공통 모드 전압이 이러한 전이를 통과할 때(레일-투-

레일 $G = 1$ 동작에서처럼) 오프셋을 변화시킨다. 일부 연산 증폭기들은 공장에서 레이저 또는 전자식 트리밍을 해서 입력 스테이지 오프셋을 낮추도록 조정하기도 한다. 이러한 트리밍을 함으로써 전이 시의 변화를 줄일 수 있으나 여전히 잔류적인 움직임이 남을 수 있다. P에서 N 입력 스테이지로 전이를 제어하는 회로는 접지가 아니라 양의 전원 전압을 참조한다. 3.3V 전원을 사용할 때는 이 전이가 이상한 지점으로 움직일 수 있는데 이것이 바로 중간전원 (midsupply)이다.

오프셋 전압이 이렇게 변화하는 것은 대부분 애플리케이션에서는 무시하고 넘어갈 수 있으나, 높은 정확도를 요구하는 경우에는 문제가 될 수 있다. 또한 교류(AC) 애플리케이션에서는 왜곡을 일으킬 수 있다. 하지만 이 때도 공통 모드 입력 전압이 이들 스테이지 간에 전이를 통과할 때 왜곡이 발생할 것이다.

그림 5는 두 번째 타입의 레일-투-레일 스테이지를 보여준다. 여기서는 내부적인 차지 펌프가 단일 P-채널 입력 스테이지를 구동하기 위한 전압을 양의 전원 레일보다 약 2V 높게 부스트한다. 이러한 전압 부스트를 함으로써 단일 입력 스테이지가 전이 글리치를 일으키지 않고서 하단 레일보다 낮은 지점부터 상단 레일보다 높은 지점까지의 전체적인 레일-투-레일 입력 전압 범위에 걸쳐서 매끄럽게 동작할 수 있다.

어떤 개발자들에게는 ‘차지 펌프’ 사용이 안 좋게 들릴 수도 있을 것이다. 차지 펌프는 잡음이 심하기 때문이다. 하지만 TI의 최근 제품들은 눈에 띄게 조용해졌다. 차지 펌프

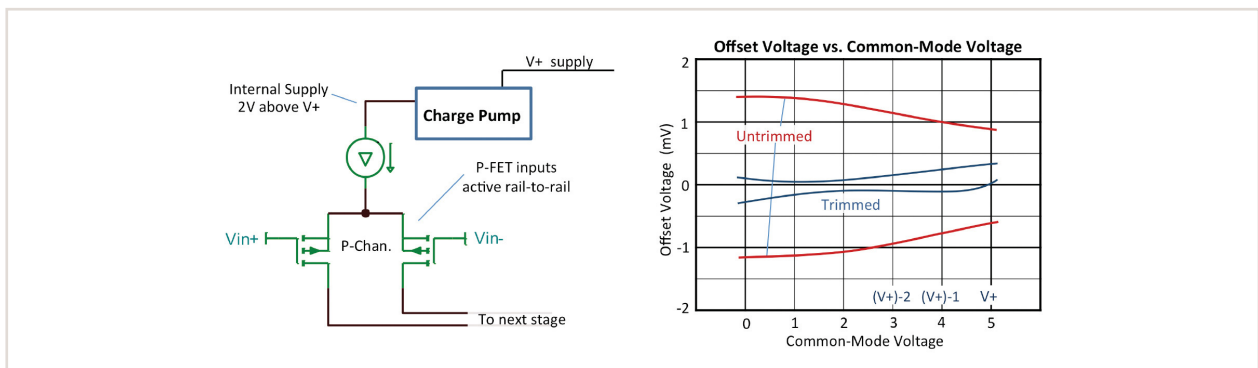
는 입력 스테이지만을 구동하므로 매우 적은 전류를 필요로 한다. 외부적인 편이나 커패시터를 필요로 하지 않는다. 내부적으로 모두를 포함하기 때문이다. 차지 펌프 잡음은 광대역 잡음 수준 이하이므로 시간 도메인으로는 거의 알아차릴 수 없다. 하지만 광대역 잡음 수준 아래로 스펙트럼 반응을 분석하는 애플리케이션에서는 일부 아티팩트가 나타날 수 있다.

모든 애플리케이션이 연산 증폭기에 레일-투-레일 입력을 필요로 하지는 않는다. 예를 들어서 반전 연산 증폭기 회로나 단위 이득보다 큰 이득을 사용하는 증폭기는 레일-투-레일 입력을 필요로 하지 않으면서도 레일-투-레일 출력을 제공할 수 있다. 정말로 자신의 애플리케이션에 레일-투-레일 입력 증폭기를 필요로 하는가? 많은 엔지니어들이 이러한 증폭기를 사용하기를 선호한다. 공통 모드 범위를 벗어날 염려를 하지 않아도 되기 때문이다. 또한 엔지니어들은 자신의 시스템의 다양한 지점에 동일한 연산 증폭기를 사용한다. 그런데 어떤 위치에서는 레일-투-레일 입력을 필요로 하고, 또 어떤 위치에서는 필요하지 않을 수 있다. 그러므로 선택을 어떻게 하든 레일-투-레일 증폭기와 필요한 절충에 대해서 더 잘 이해하여 더욱 현명한 선택을 할 수 있을 것이다. (더 궁금한 게 있다면 언제라도 동료 엔지니어들에게 도움을 구할 수 있는 TI E2E™ 커뮤니티의 Precision Amplifiers Forum 참조)

이러한 연산 증폭기 제품들로는 다음을 예로 들 수 있다:

- OPA340: 듀얼 입력 스테이지, 오프셋 트리밍, 5.5MHz,

그림 5. 내부 차지 펌프를 사용해서 전압을 부스트해서 단일 P-채널 FET을 구동하는 레일-투-레일 입력 스테이지



레일-투-레일 CMOS

- OPA343: 듀얼 입력 스테이지, 오프셋 트리밍 안함, 5.5MHz, 레일-투-레일 CMOS
- OPA320: 차지 펌프를 사용한 입력 스테이지, 20MHz, 레일-투-레일 CMOS
- OPA322: 차지 펌프를 사용한 입력 스테이지, 오프셋 트리밍 안함, 20MHz, 레일-투-레일 CMOS

접지에 가깝게 스윙: 단일 전원 동작

레일-투-레일 증폭기는 접지에 아주 가까운 출력 전압을 발생시킬 수 있다. 그렇다면 얼마나 가깝게 일까? 저전압 디자인에 흔히 사용되는 CMOS(complementary metal-oxide semiconductor) 연산 증폭기를 가지고 출력 전압 스윙을 극대화하고자 할 때를 살펴보자. TI의 이러한 디바이스 제품은 표 1에서처럼 사양을 표기한다.

표 1. 레일-투-레일 증폭기의 출력 사양

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Output					
Voltage output swing from both rails	RL = 10 kΩ		15	25	mV
	RL = 2 kΩ		35	50	mV

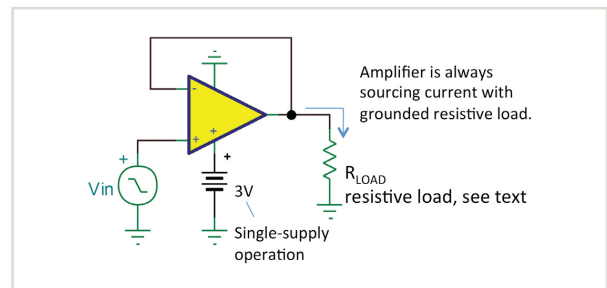
표 1에서는 출력이 접지로부터 15mV보다 더는 가깝게 스윙하지 않을 것으로 보이는데, 0을 기준으로 한 정확한 측정을 위해서는 이 마지막 15mV가 중요할 수 있다. 하지만 여기서 잠깐 짚고 넘어갈 것이 있는데 이 사양의 모든 조건들을 아주 신중하게 해석해야 한다는 것이다. 여기서는 부하가 전원 단자들 사이의 중간으로 연결된 것으로 간주하고 있기 때문이다.

대개 이러한 사양 표 상단에는 관련 조건들을 표기하고 있는 것을 볼 수 있다. 예를 들어서 “RL이 $V_s/2$ 로 연결되어 있음”이라고 하는 문장 같은 것을 볼 수 있다.

이러한 조건이면 출력이 접지에 가까워질 때 증폭기가 부하 저항을 통해서 전류를 싱크해야 한다. 이것은 증폭기를 이런 식으로 테스트하고 증폭기가 전류를 적절히 소싱 및 싱크하는지 확인했다는 것을 말한다. 증폭기를 이렇게 테스트하고 사양을 표기하는 것은 이해할 만하며 타당하

다. 그렇지만 본인의 설계는 이렇게 연결하지 않는다면 어떻게 할 것인가? 예를 들어서 그림 6에서처럼 부하를 접지로 연결한다고 가정하면 부하 저항이 실제로 출력을 접지로 풀링하기에 증폭기가 전류를 싱크할 필요는 없다.

그림 6. 증폭기 부하를 접지로 연결한 예



이렇게 하면 대부분의 CMOS 연산 증폭기가 1밀리볼트 또는 2밀리볼트 이내까지로 접지에 아주 가깝게 스윙할 수 있다. 사양 표에서는 이 능력에 관해서 표기하지 않더라도, 그림 7과 같은 것을 통해서 유추할 수 있다. 이 그림에서는 출력 전류에 따른 출력 전압 스윙을 보여준다. 이 그래프는 분해능이 좀더 세밀했으면 좋았을 테지만, 이 예의 경우에 정격 전압 레일을 향해서 수렴되는 출력 전압이 $\pm 2.75V$ 라는 것을 알 수 있다. 단일 전원 동작의 경우에 V^- 전원은 0V이다.

그러면 이제 몇 가지 부가적인 것들을 살펴보자. 그림 8에서는 피드백 네트워크가 접지로 참조하고 있다는 것을 알 수 있다. 증폭기 상에서 RL뿐만 아니라 모든 부하 소스들을 고려해야 한다. 이 예에서는 $R1 + R2$ 가 실제적으로 RL과 병렬로 부가적인 접지 참조 부하들이다. 그런데 R1이 만약 양의 전압을 참조한다면 출력이 0V에 가까워짐에 따라서 증폭기가 피드백 네트워크를 통해서 들어오는 전류를 싱크해야 할 것이다. 그러면 출력은 접지에 그렇게 가깝게 스윙하지 못할 것이다.

이 동일한 회로로 이득이 높다면 입력 오프셋 전압이 출력 스윙에 영향을 미칠 것이다. 예를 들어서 $G = 20$ 이고 연산 증폭기의 입력 오프셋 전압이 +1mV이면, 제로의 입력이 20mV 출력을 발생시킬 것이다. 이것은 출력 스윙 제한 때문이 아니라 오프셋 전압 문제 때문이다. 물론 작은 음의

그림 7. 출력 전류에 따른 출력 전압 스윙

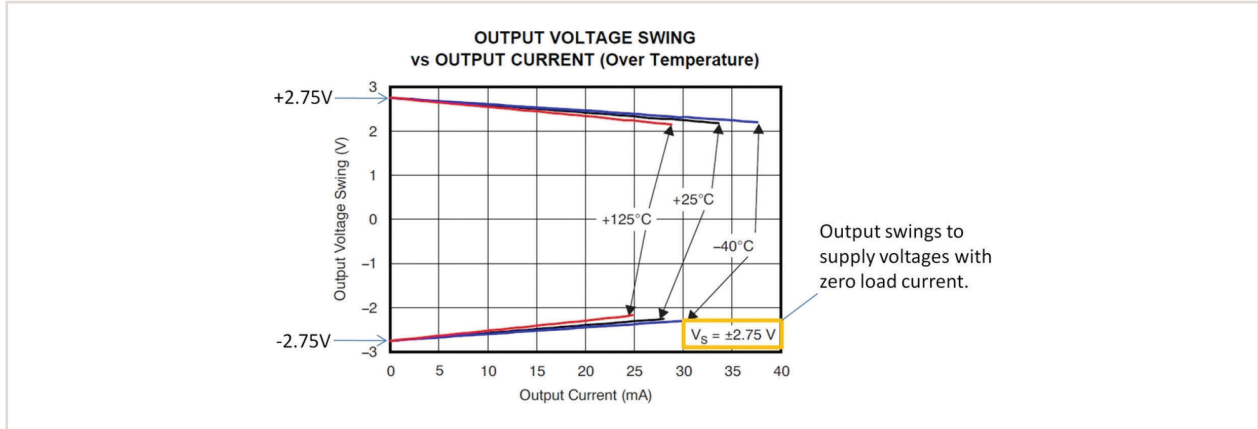
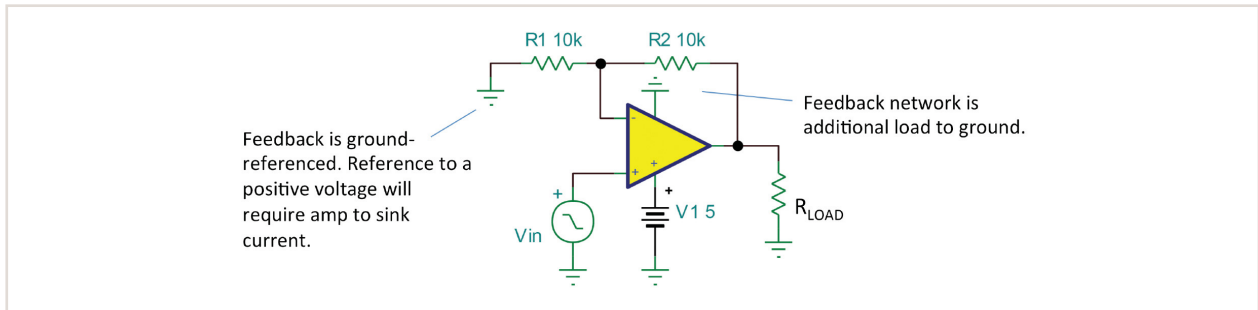


그림 8. 단일 전원 연산 증폭기 구성으로서, 피드백 네트워크가 접지로 참조

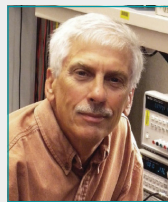


입력 전압만으로 출력을 0V에 아주 가깝게 만들 수 있으나 이 회로는 음의 입력 전압이 될 수 없다.

리액티브 부하를 사용하는 교류(AC) 신호는 예외일 수 있다. 부하 전류와 전압은 리액티브 부하와 동위상(in-phase)이 아니다. 그러므로 출력 전압이 접지에 가까워질 때 증폭기가 전류를 싱크해야 할 수 있다. (CMOS 연산 증폭기와 관련해서, 바이폴라 연산 증폭기는 접지에 그렇게 가깝게 스윙하지 못한다.)

배터리로 구동되는 저전압 회로는 설계하기가 까다로우며, 엔지니어들은 거의 언제나 전압 스윙을 극대화하기 위해서 애를 먹는다. 연산 증폭기 특성을 더 잘 이해함으로써 접지에 가깝게 추가적인 출력 스윙을 이끌어낼 수 있을 것이다. (어떤 특정한 증폭기나 회로 구성에 관한 궁금증이 있으면 TI의 E2E 커뮤니티의 Precision Amplifiers Forum 참조) **SN**

저자 소개



브루스 트럼프는 실험하기를 좋아한 소년이자 무선 햄 활동가답게 자연스럽게 전기공학에 매료되었다. 그는 이 길이 자신의 진로임을 한 번도 의심하지 않았다. 아이오와 주립대학에서 학사학위를 취득한 후에 오하이오주에서 첫 직장을 다녔고 이곳에서 초기의 레이저 메모리 시스템과 여타의 아날로그 시스템 소자와 관련된 일을 했다.

이 후 미시간주에 있는 Heathkit을 설계하는 Heath에 근무하였으며, 전자 시계, 메가폰, 금속 탐지기, 항법 계산기, 고전력 스테레오 증폭기등과 같은 다양한 프로젝트들에 관여하였다. 하지만 진정한 아날로그에 대한 갈망은 멈추지 않았다. 당시에 아날로그 집적 회로를 선도하던 회사인 Burr-Brown이 그에게 최고의 아날로그 전문가들과 어울리고 배울 수 있는 절호의 기회였던 애리조나주 Tucson의 일자리를 제안하였다. 2000년에 텍사스인스트루먼트가 Burr-Brown을 인수함으로써 브루스의 아날로그 경력에 있어서 새로운 장이 열리게 되었다. 이곳에서 제품 개발, 제품 정의, 애플리케이션 엔지니어링, 기술 자료, 제품 홍보, 사업 관리와 관련된 다양한 직책을 역임하였다. 그가 자신의 경력을 되돌아볼 때 가장 좋아했던 일은 언제나 고객의 애플리케이션 문제를 다루는 것이었다고 한다. 특히 고객 세미나와 데이터시트를 개발하는 일을 좋아했고 현재 맡는 직책이 어떤 것이든 그 경험은 다른 작업의 밑바탕이 된다고 말했다. 그리고 정말 아날로그 소자의 내부적인 작동과 응용을 알기 쉽게 설명한다는 것은 항상 어려운 일이라고 덧붙였다.