

4.4 CMRR 과 PSRR

먼저, CMRR 부터 얘기해보자. CMRR 은 Common Mode Rejection Ratio 의 앞머리글자다. 한문으로 옮기자면 동상신호제거비율 정도라고 할 수 있겠다. Op Amp 는 기본적으로 차동 증폭기이다. 차동이라함은 Op Amp 의 두 입력단에 인가되는 신호의 차이를 말한다. 이 차이를 증폭함과 동시에 그 차이가 없는 신호, 즉, 동상신호, 즉, 두 입력단에 공통된- Common Mode- 신호는 감쇠시킨다. 그 감쇠비율이 CMRR 이다. CMRR 이 높을수록 좋은 차동증폭기가 된다. 예를 들어, CMRR 이 매우 높다면, 두 입력단에 동일하게 유입되는 외부 노이즈는 별도의 필터없이 높은 비율로 걸러 내어진다. 멋지지 아니한가? 혹은 두 입력단에 동일하게 유입된 DC 전압 이라던지, 혹은 60Hz 전원에 의해 발생한 노이즈 등은 별도의 필터링 과정없이 Op Amp.의 특유의 성질인 CMR(Common Mode Rejection) 기능에 의해 제거 된다는 것인데 대단하지 아니한가? 그림 4-4-1 은 TLC2274 제품 설명서에서 CMRR 그래프를 옮긴 것이다.

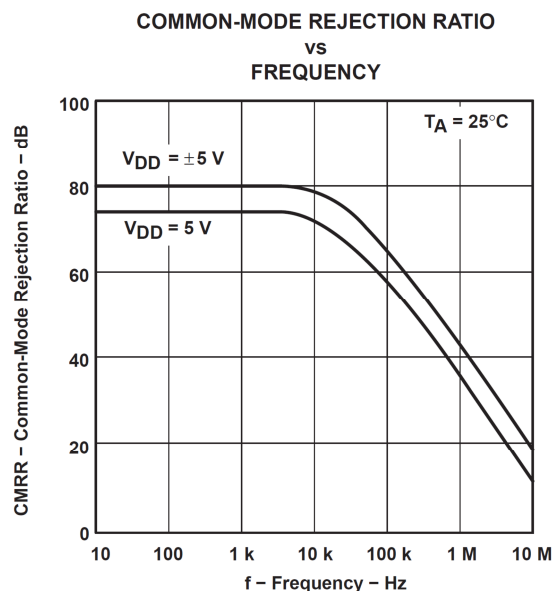


그림 4-4-1 TLC2274 의 CMRR 그래프

제품 설명서에서는 CMRR 이 통상 75dB 라고 밝히고 있다. 그래프를 보면, +/-5V, 즉, 양전원을 이용했을 때의 CMRR 그래프가, +5V 단일전원을 사용했을 경우보다 약 5dB 가량 높다는 것을 확인할 수 있다. LM2902 의 CMRR 은 80dB 로 나와있다. LM2902 가 5dB 가량 우수하다고 할 수 있을텐데, 과연 그럴까? 5dB 라 함은 LM2902 가 동상 신호를 TLC2272 에 비해서 약 1.78 배 더 억제 시킨다라는 것이기에 상당한 수치다. 하지만, 여기에 혹하면 안된다. 그래서 이 책과 이 절이 준비된 것이다. CMRR 은 주파수에 대한 함수로 나타난다는 점을 명심해야 한다. 그림 4-4-1 을 보라. CMRR 의 코너 주파수는 대략 10KHz 로 보이고, 감쇠비율은 대략 -20dB/decade 로 보이는데 실제로 그러하다. LM2902 의 CMRR 그래프는 제품설명서에 없어서 못 옮겼는데, 대개 비슷한 패턴을 보인다. 다만, 코너 주파수가 다르기에 커너 주파수가 높을수록 좋은 CMRR 특성을 보이는구나 라고 판단 해야 한다.

CMR 기능을 정확하고 손쉽게 이해하기 위해서는 트랜지스터 레벨에서 차동 증폭기를 살펴봐야 하는데, 트랜지스터에 대한 기초적인 부분까지 설명하려니 양이 너무 많아지는 것 같고, 책 주제를 벗어나는 것도 같아 갈등을 많이 했다. 그렇다고, 트랜지스터 도움없이 설명을 하자니 능력이 모자라서 진도가 나가지 않을기에 부득이 트랜지스터의 힘을 조금 빌렸다. 이 점 깊은 양해를 구한다. 트랜지스터에 대해서는 최대한 간단하고 단순하게 다루고, CMR 에 초점을 맞추어서 설명하고자 하니 페이지 넘기지 마시고 계속해서 읽어 나가봐 주시길 바란다. 동상 신호가 제거되는 원리만 살펴 본 후에는 Op Amp.로 즉시 넘어오니 채널고정, 책 고정 해주시면 감사하겠다.

Op Amp. 는 대개 3~ 40 개의 트랜지스터로 구현된다. Op Amp 의 첫번째단은 입력단으로 차동 증폭기(Differential Amplifier)로 구현되어 있다. 그러기에 입력 핀이 +/- 2 개이다. 그 다음 증폭단도 차동 증폭기로 구현되어 있는 것이 대부분이며, 마지막 단은 단동(Single Ended) 증폭기로 구성되는 것이 일반적이다. 마지막 출력단까지 차동 증폭기로 이뤄져있으면서 차동으로 출력되는 증폭기를 Fully Differential Amplifier 라고 하는데, 이는 4.9 절에서 자세히 다룬다. 각단에 설계된 차동 증폭기가 CMR 기능을 제공하고 있는데, 트랜지스터로 구성된 차동 증폭기를 그림 4-4-2 에서 보도록 하자.

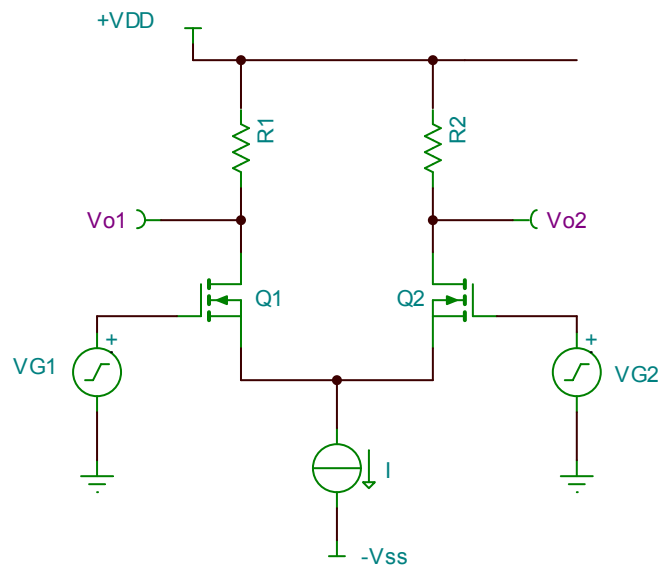


그림 4-4-2 FET 로 구현된 차동 증폭기

그림 4-4-2 의 회로는 현재 동작이 잘 된다고 가정을 하자. 이를 Bias 가 제대로 잡혔다 라고 말한다. Q1 과 Q2 는 Field Effect Transistor, 줄여서 FET 라고 한다. Q1 과 Q2 의 심볼을 보면 화살표가 점선을 가르키고 있는 것을 볼 수 있다. 점선은 몸통을 표시하는데, 이게 점선인 이유는 특정 조건이 되면 이 점선이 이어져서 전류가 흐르는 채널이 형성되기에 그렇다. 화살표는 반도체 극성을 말한다. 정식으로 쓰자면, Enhanced Metal Oxide P-type Semiconductor Field Effect Transistor 인데, 이 정도까지 알고 계신다면 이미 훌륭한 상태이신 것이고 모른다고 한들 전혀 상관없다. Vo1 과 Vo2 가 인출된 트랜지스터의 다리를 드레인(Drain)이라고 하는데 이것도 몰라도 된다. VG1 과 VG2 가 인가된 핀을 게이트(Gate)라고 하고, I 라는 전류원이 연결된 핀을 소스(Source)라고 하는데 전혀 몰라도 된다. 그저, FET 라는 트랜지스터는 Gate 에 인가되는 전압에 의해서 드레인-소스간에 흐르는 전류량이 제어되는 구나라고만 알아두면 더 이상도 필요없을만큼 적당한 수준이지만, 이것마저도 몰라도 된다. 머리속에서 회로를 한번 구동 시켜보자.

VG1 이 변하면, Q1 의 드레인-소스간 전류가 변한다. 즉, R1 에 흐르는 전류가 변한다. R1 을 통해서 Id1 이라는 전류가 흐른다고 하자. 그렇다면 Vo1 전압은 다음과 같다.

$$V_{o1} = V_{DD} - I_{d1}R1$$

수식에서 보듯이, Q1 이 어떻게 드레인이 어떻게, 게이트가 어떻다는 말 전혀 없다. 참고로, MOSFET 에서 Id1 은 VG1 와 2 차 함수 관계가 있고, 기하학적 구조, 즉, 트랜지스터 면적에 비례하고 채널 길이에 반비례 관계가 있다. 이것까지 알면, FET 가 순한 양으로 바뀔 것인데, 우리는 Op Amp 를 사용하기에 이런 내용 전혀 필요 없다. 동일한 방식으로 Vo2 를 구하면,

$$V_{o2} = V_{DD} - I_{d2}R2$$

이다. 일단, V_{DD} 를 공통으로 사용하고 있는데, 반도체 정밀 공정 덕에 Q1 과 Q2 의 면적등이 모두 동일하고 도핑 농도까지 모두 동일하며, R1 과 R2 가 동일하다면 (실제 CMOS 공정에서는 R1, R2 대신에 트랜지스터로 부하를 만들어서 더 높은 이득을 얻고 있다.), 정확히 $V_{o1} = V_{o2}$ 이다. 의심의 여지는 전혀 없다. 그렇다면, $V_{o2} - V_{o1}$ 는 얼마인가? Q1 과 Q2 의 양단 dp 서 출력의 차이를 취하다 보니, $I_{d1} = I_{d2}$ 라면, 즉, 트랜지스터의 동일한 입력 신호는 상쇄되어버리는 결과를 얻게 된다. 즉, 동상 제거 능력이 생기는 것이다. 그런데, 어떻게 Q1 과 Q2 가 똑같겠는가? 뭐가 달라도 조금씩 다르지 않겠는가? 게다가 반도체 속성상 어쩔 수 없는 발생하는 기생 커패시턴스 성분과 증폭기의 주파수 보상 문제 때문에 어쩔 수 없이 장착해야 하는 커패시터 때문에 CMRR 이 주파수 함수로 나타난다. 따라서, 차동 증폭기를 입력단으로 사용하는 모든 Op Amp.는 동상신호제거능력을 가지고 있다. 이제 Op Amp 로 넘어와서 동상신호제거 능력을 관찰해보도록 하자.

그림 4-4-3 의 Op Amp. 회로를 보도록 하자. Op Amp.로 구현한 Difference Amplifier 회로이다. 번역하자면 차분증폭기다. 차동 증폭기가 아니라, 차분 증폭기. 말장난같지만, 둘은 엄연히 다르다라고 주장하시는 분들이 많지만, 그다지... 입출력관계를 구해보면 두 입력단의 빼기 값이 증폭되기에 Difference 라는 말이 붙었는데, 차동 증폭기와 동작원리는 동일하니 이름에 현혹되지 마시길 바란다. 굳이 이름을 달리한 기준을 말하자면, 입력 값이 중앙값을 기준으로 동일한 수준의 차이를 보이는 경우를 차동 증폭기라고 한다. 단순히, 그냥 차이를 증폭하면 차분증폭기라고 하는데, 뭐 어떠랴 같다고 보자. 회로도 사실상 같다.

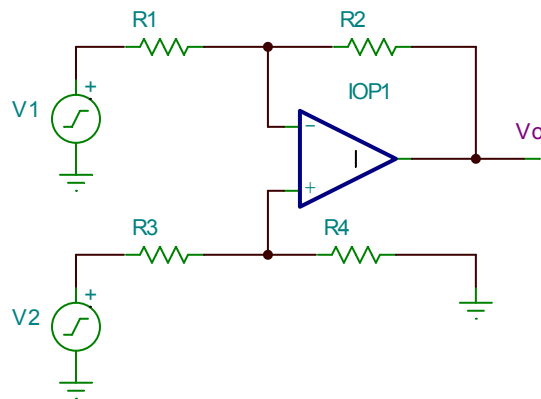


그림 4-4-3 차분 증폭기

V_o 를 구해보실 수 있겠는가? Op Amp. 회로에서 입력신호원이 2 개 이상일 때에는 중첩의 원리를 적용하면 정말로 쉽게 풀린다라는 점 떠올리셨는가? 한번 풀어보자. V_1 에 의한 출력을 구하려고 한다면, V_2 영향을 없애야 한다. 전압원이니 단락(Short)시키면 된다. 따라서, 다음의 회로로 바뀐다.

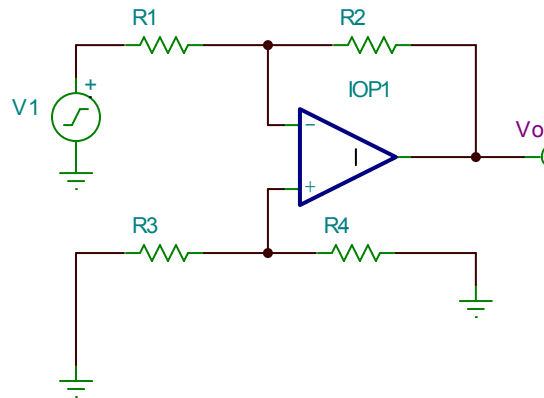


그림 4-4-4 V2 영향을 배제한 회로

그렇다면, V_o 는? 쉽게 구할 수 있다. 왜냐면, Op Amp 의 입력 전류는 0 이기에 R_3 와 R_4 의 영향은 없다. 그냥 접지와 바로 연결된 것과 같다. 흔히 보는 반전 증폭기 회로가 된다. 따라서, V_o 는,

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (4-4-1)$$

이다. 이제 V_2 에만 의한 V_o 를 구해보자. 회로는 다음과 같이 변한다.

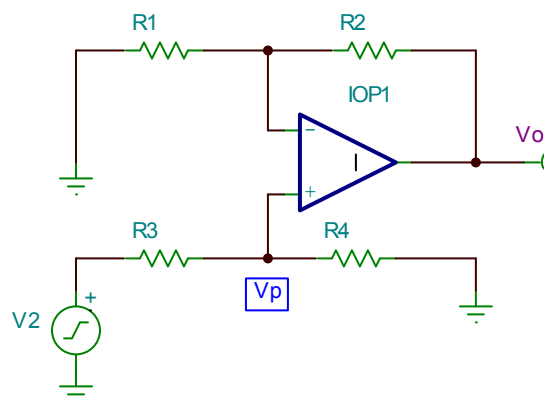


그림 4-4-5 V1 영향을 배제한 회로

흔히 보는 비반전 증폭기다. 사실 비반전 증폭기라는 말도 웃긴다. 그냥 증폭기라고 하면 될 것을 말이다. 비반전 증폭기라는 말을 쓰면, 그냥 '증폭기'는 뭔가? 그냥 증폭기와는 다른 증폭기인가? 하고 오해를 부를 수 있기 때문이다. 혹시나 헛갈릴까봐 이런 용어를 쓰신 것 같다. 증폭기는 반전 증폭기와 비반전 증폭기로 이뤄져 있다고. 이제부터 그냥 증폭기라고 하면 입력과 출력이 동위상인 일반적인 증폭기, 즉, 비반전증폭기를 가리키는 것으로 이 책에서는 규정하겠다. 그림 4-4-6 은 V1 영향을 배제한 증폭기다.

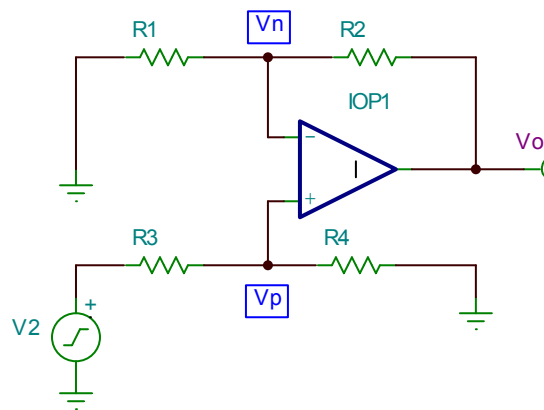


그림 4-4-6 V1 영향을 배제한 증폭기

3 장에서 열심히 구했었는데, 기억이 나는지 모르겠다. 이러한 형태의 증폭기 전달함수를 구하는 쉬운 방법은 Op Amp.의 또 다른 중요한 성질 중에 하나인 Op Amp. 두 입력단의 전압은 같다라는 성질, 명심하시길 바란다. 즉, 두 입력단의 전위차는 늘 0 이다 라는 점을 이용하는 것이다. 즉, 그림에서 Vn 과 Vp 는 같다고 관계를 설정하고 풀면 된다.

$$V_n = \frac{R1}{R1 + R2} V_o$$

$$V_p = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2$$

$$V_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2$$

중첩의 원리를 이용해서 수식 (4-4-1)과 합치면,

$$V_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1$$

이 된다. 이 수식이 $V_o = A(V_2 - V_1)$ 형태의 차분(혹은,차동) 증폭기가 될려면, $R_4=R_2$, $R_3=R_1$ 로 설정하면 된다. 이렇게 설정하면, 그림 4-4-3 의 전달함수는 다음과 같다.

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_2 - V_1)$$

즉, V_2 와 V_1 의 차이를 증폭하는 회로가 되는 것이다. 그런데, V_2 와 V_1 이 다음과 같이 합성되어 있다고 해보자.

$$V_1 = V_{CM} - V_{DM}/2$$

$$V_2 = V_{CM} + V_{DM}/2$$

위 수식에서 V_{CM} 은 공통 성분, V_{DM} 은 서로 다른 성분을 말한다. 이 수식을 토대로 그림 4-4-3 회로를 바꿔 볼 수 있겠는가? 그림 4-4-7 처럼..

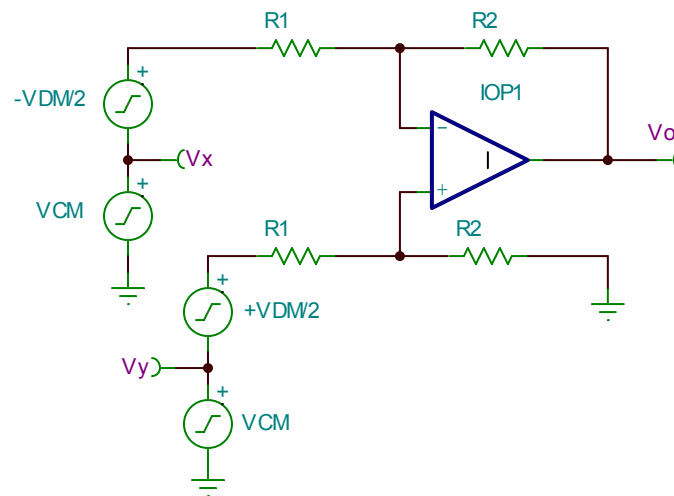


그림 4-4-7 입력을 동상 신호와 이상 신호로 구분한 회로

V1 에 쪽에 달린 $V_{DM}/2$ 신호원에 음의 기호를 할당한 것은, V1 과 V_o 관계가 반전이기 때문에 그런 것이다. 그림 4-4-7 에서 V_x 와 V_y 의 전압이 V_{CM} 만큼은 서로 동일하기에 한데 묶을 수가 있다. 그렇다면, 그림 4-4-8 과 같이 된다.. $-V_{DM}/2$ 전압원의 극성이 어떻게 바뀌었는지 유심히 살펴보고 이해하시길 바란다. 사기나 꿈수 같은 것은 전혀 없다. 등가 회로의 원리를 잘 떠올리시면 된다.

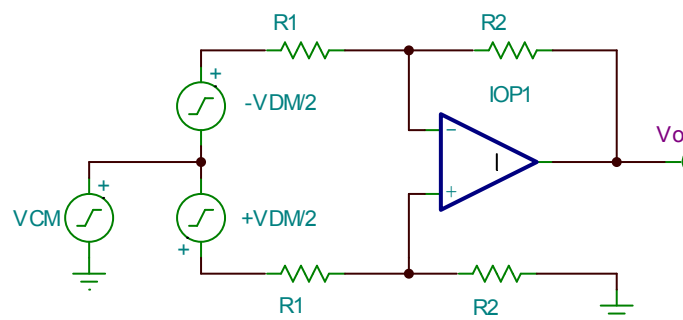
그림 4-4-8 그림 4-4-7 등가 회로 : V_{CM} 을 공통으로 처리

그림 4-4-8 처럼 신호원을 쪼개어서 그린 이유는 동상 신호와 이상 신호의 관계를 쉽게 파악할 수 있기 때문이다. 먼저, $\pm V_{DM}/2 = 0$ 이라고 해보자. V_{CM} 이 바뀐들 V_o 에 무슨 영향이 있을까? 즉, 동상 신호는 Op Amp 의 기본 속성에 의해서 아주 손쉽게 걸러내어진다. CMR 기능이 이해되시는 가?