

【 기술 노트 14 】

바이패스 커패시터와 필터 커패시터

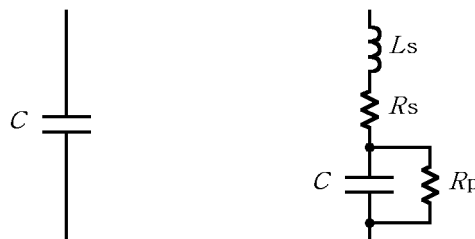
전기회로에서 기본적인 3가지의 수동소자를 열거하면 저항, 커패시터, 인덕터를 꼽을 수 있다. 이 중에서 일반적으로 저항에 대하여는 누구나 너무나도 잘 알고 있지만, 커패시터나 인덕터에 대하여는 의외로 무지한 경우가 많다. 이들 2가지 소자는 특히 아날로그 회로에서 매우 중요한 역할을 수행하는데, 이에 대하여 자세하게 논하자면 너무나도 길어지므로 여기서는 디지털 회로에서 매우 중요한 기능을 수행하는 커패시터에 대하여만 논하기로 한다.

1. 커패시터에 대한 기본 상식

(1) 콘덴서인가? 커패시터인가?

전기회로에서 기호 C로 표현되는 진하를 축적하는 소자를 흔히 콘덴서(condenser) 또는 커패시터(capacitor)라고 부른다. 그러면, 콘덴서와 커패시터는 같은 말인가? 결론부터 말하면 이는 서로 약간 다른 말이지만 굳이 이를 엄격히 구분할 필요까지는 없다는 것이 필자의 생각이다. 우선, 학술적으로는 순수하게 정전용량(capacitance)만을 가지는 이상적인 소자를 커패시터라고 하고, 여기에 등가 저항이나 등가 인덕턴스까지 존재하는 것을 고려한 실제의 소자를 콘덴서라고 부르는 경향이 있다. 대부분의 회로에서는 이를 이상적인 소자로 가정하고 해석하므로 회로이론이나 전자공학에 관한 거의 모든 영문 원서에서는 커패시터라는 용어를 사용하며, 콘덴서라고 용어를 사용하는 책은 거의 찾아보기 어렵다.

일반적으로 실제의 콘덴서에는 <그림 1>에 보인 바와 같이 C성분 이외에 직렬로 등가 인덕턴스 및 등가 저항이 존재하며, C와 병렬로 등가 저항이 존재하게 된다. 여기서, R_s 는 당연히 리드선 및 전극에서의 저항값에 기인하며, R_p 는 전극 사이에 완전한 절연이 이루어지지 않아 누설전류가 흐르는데 따르는 등가 절연저항을 나타낸다. 또한, L_s 는 리드선 및 전극의 구조에 따른 등가 인덕턴스로서 리드선이 길면 이 값이 커지며, 전해 콘덴서나 필름 콘덴서처럼 두루마리 형태의 구조를 가지는 콘덴서에서는 이 값이 커진다.



(a) 이상적인 커패시터 (b) 실제의 콘덴서 회로

<그림 1> 커패시터의 일반적인 등가회로

학술적으로는 이처럼 콘덴서와 커패시터를 구분하는 경향이 있지만, 속설로는 콘덴서는 커패시터의 일본식 표현이라는 주장도 있다. 과거에 우리나라의 책들이 일본의 영향을 많이 받았던 탓인지 우리말로 된 많은 공학서적이나 기술서적에서도 커패시터보다는 콘덴서라는 말을 더 많이 사용하는 듯하다. 필자의 견해로도 대부분의 경우 책에서 설명하는 것은 이상적인 C소자로 간주하므로 커패시터라는 말을 사용하는 것이 바람직하다고 생각되기는 하지만, 이미 우리나라에서는 콘덴서라는 말이 상당히 정착되어 있으므로 이를 굳이 구분하지 않고 같은 의미로 사용하는 것도 무방하리라고 생각된다. 이런 이유로 이제부터 아래의 설명에서는 보다 원칙적인 커패시터라는 용어를 사용하기로 한다.

(2) 커패시터의 종류 및 특징

커패시터에는 매우 많은 종류가 있고 이것들은 서로 상당히 다른 특징을 가지고 있지만, 여기서는 디지털 회로에서도 널리 사용되는 몇가지의 중요한 커패시터에 대하여만 간단히 그 특징을 알아보기로 한다. 커패시터를 선정하는데 중요한 특징은 주파수 특성과 허용 정격전압이다. 또한, 전해 커패시터처럼 극성을 가지거나 온도에 민감한 영향을 받는 소자의 경우에는 이것들도 중요한 요소가 된다.

커패시터의 정전용량은 그냥 30pF나 47μF처럼 정전용량을 직접 값으로 표시하는 경우도 있고, 저항 소자에서의 3색띠 표시 방법처럼 104와 같이 3자리의 숫자로 나타내기도 한다. 이때 앞의 2자리는 정전용량의 유효숫자를 나타내고 3번째 자리는 10의 누승을 나타내며 단위는 항상 pF이므로

$$104 = 10 \times 10^4 \text{ pF} = 0.1 \text{ } \mu\text{F}$$

가 된다. 그러나, 전해 커패시터의 경우는 대부분 정전용량을 직접 값으로 표시하지만, 이것이 3자리 숫자로 표시될 경우에는 단위가 μF임에 유의해야 한다. 한편, 이러한 정전용량의 허용오차는 주로 <표 1>과 같이 기호로 나타낸다.

<표 1> 커패시터의 정전용량 허용오차를 나타내는 약어

(a) 10 pF 이하인 경우

기호	B	C	D	F	G
허용오차 [pF]	±0.1	±0.25	±0.5	±1	±2

(b) 일반적인 경우

기호	B	C	D	F	G	J	K	M	N	P	Q	T	U	V	W	X	Y	Z
허용오차 [%]	±0.1	±0.25	±0.5	±1	±2	±5	±10	±20	±30	+100 0	+30 -10	+50 -10	+75 -10	+25 -10	+100 -10	+40 -20	+150 -10	+80 -20

또한, 커패시터의 정격전압도 직접 16V 또는 1KV처럼 직접 전압값으로 나타내기도 하지만 <표 2>에 나타낸 바와 같이 약어로 나타내기도 한다. 이것은 뒤쪽의 알파벳 문자가 정격전압의 유효숫자를 나타내고, 그 앞의 숫자는 10의 누승을 나타낸다고 생각할 수 있다.

<표 2> 커패시터의 정격전압을 나타내는 약어

기호	정격전압 [V]	기호	정격전압 [V]	기호	정격전압 [V]
0A	1	1A	10	2A	100
0B	1.25	1B	12.5	2B	125
0C	1.6	1C	16	2C	160
0P	1.8	1P	18	2P	180
0D	2	1D	20	2D	200
0E	2.5	1E	25	2E	250
0F	3.15	1F	31.5	2F	315
0V	3.5	1V	35	2V	350
0G	4	1G	40	2G	400
0W	4.5	1W	45	2W	450
0H	5	1H	50	2H	500
0J	6.3	1J	63	2J	630
0K	8	1K	80	2K	800

보통 전해 커패시터라고 불리는 알루미늄 전해 커패시터(aluminum electrolytic capacitor)는 정전용량 대 부피의 비율(capacitance-to-volume ratio)이 커서 정류회로에서의 전압 평활용과 같이 매우 큰 정전용량이 필요한 응용에 널리 사용되는 제품이다. 그러나, 이는 주파수 특성이 매우 낮고, 극성이 있으며, 수명이 비교적 짧고 동작온도에 매우 민감한 단점을 가지므로 사용에 많은 주의가 필요하다. 일반적인 모델인 85℃ 제품은 수명이 약 1000시간 정도이며, 온도가 10℃ 상승하면 수명은 1/2로 감소한다. 전해 커패시터는 주파수 특성이 낮고 내부 구조가 복잡하여 <그림 1>에서 보인 것보다 훨씬 복잡한 등가회로를 가지며, 등가 직렬저항값이 매우 커서 소비전력이 크고, 특히 여기에서의 리플전압이 커지면 자체 발열량이 급증하여 내부 온도가 상승하고 이는 수명을 현저히 감소시킨다는데 유의해야 한다. 따라서, 이는 큰 정전용량이 필요하며 저주파인 정류기의 평활회로 등에 가장 유용하다.

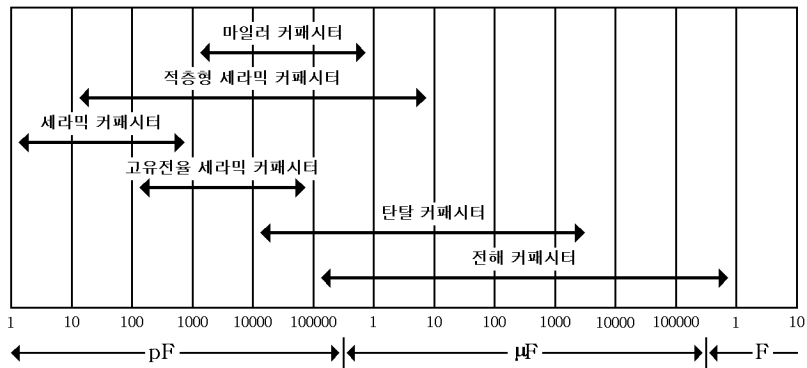
흔히 탄탈 커패시터(tantalum electrolytic capacitor)라고 불리는 것은 전해 커패시터의 일종이지만, 알루미늄 전해 커패시터에 비하여 등가 직렬저항 및 누설전류가 작고 주파수 특성 및 온도 특성이 우수하다. 그러나, 탄탈 커패시터는 일반 전해 커패시터에 비하여 상대적으로 다소 작은 정전용량에 주로 사용되며, 역시 극성이 있고 가격이 비싼 것이 단점이다. 정상적인 수명을 유지하기 위하여 모든 종류의 전해 커패시터는 정격전압의 80%를 초과하는 범위에서 사용하는 것은 바람직하지 않다. 그러나, 대부분의 다른 커패시터들은 보통 정격전압의 약 5배 정도까지 견딜 수 있는 것으로 알려져 있으며, 이를 초과하게 되면 절연이 파괴될 수 있다.

세라믹 커패시터(ceramic capacitor)는 등가 인덕턴스 값이나 직렬 등가 저항값이 매우

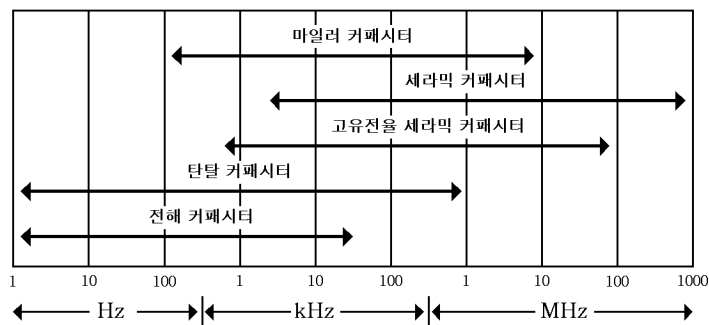
작고 상당히 높은 주파수 특성을 가진다. 여기에는 다시 몇가지의 종류가 있는데, 고유전율 세라믹 커패시터는 정전용량 대 부피의 비율이 큰 것이 장점이지만 주파수 특성이나 전압에 대한 안정성이 떨어진다. 또한, 일반적으로 세라믹 커패시터는 정전용량이 비교적 작기 때문에 이를 크게 하기 위한 것으로 적층형 세라믹 커패시터가 사용된다.

필름 커패시터(film capacitor)는 직렬 등가저항은 상당히 작으나 등가 인덕턴스는 비교적 크며 중간 정도의 주파수 특성을 가지는데, 원통형으로 감는 필름의 종류에 따라서 폴리에스테르(mylar), 폴리프로필렌, 폴리스티렌, 폴리카보네이트 등으로 나뉘어진다. 이 중에서 마일러 커패시터가 비교적 널리 사용되며, 폴리스티렌 커패시터는 직렬 등가저항이 극도로 작고 주파수에 따른 동작 특성이 매우 안정되어 있어서 가장 이상적인 커패시터라고 말할 수 있다.

각종 커패시터의 정전용량 범위를 상대적으로 비교하여 나타내면 <그림 2>와 같다. 또한, 각 커패시터들의 주파수 특성을 비교하면 <그림 3>과 같다.



<그림 2> 각종 커패시터의 정전용량 범위



<그림 3> 각종 커패시터의 동작 주파수 특성 범위

2. 바이패스 커패시터

오늘날 TTL이나 CMOS와 같은 모든 디지털 소자의 출력단 회로는 대부분 기본적으로

토텐폴(totem pole) 또는 콤플리멘터리(complementary) 회로로 되어 있다. 오픈 콜렉터(open collector) 또는 오픈 드레인(open drain)형이나 3스테이트형으로 동작하는 일부를 제외하면 이러한 회로들은 항상 상보형으로 동작한다. 즉, 이것은 항상 아래 위에 2개의 스위칭 소자가 있어서 위의 것이 ON되어 있으면 아래 것이 OFF되고, 위의 것이 OFF되면 아래 것이 ON된다. 이러한 스위칭 동작을 상보형 동작이라고 한다. 그런데, 거의 모든 바이폴라 트랜지스터나 FET들은 턴온 시간(turn-on time)이 턴오프 시간(turn-off time)보다 짧기 때문에 이러한 출력단 회로가 ON→OFF 또는 OFF→ON으로 스위칭될 때는 아주 짧게 아래 위의 소자가 모두 ON되는 순간 단락이 존재한다. 켜져 있던 소자가 미처 꺼지기도 전에 반대편의 다른 소자가 먼저 켜지기 때문이다.

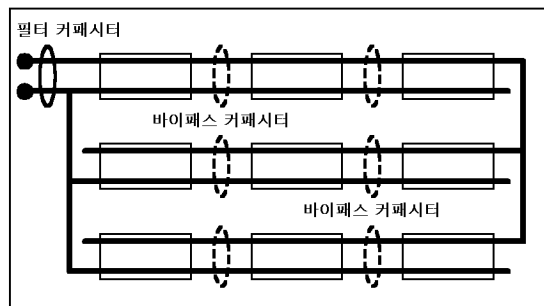
이렇게 출력단 회로의 위 아래 스위치가 동시에 ON 상태로 되는 것은 디지털 회로의 전원 단자와 접지 단자의 순간적인 단락을 의미한다. 물론 TTL의 경우에는 출력단에 수십 오옴 정도의 저항이 직렬로 들어가므로 완전한 단락은 아니지만 상당히 큰 도통전류를 야기하게 된다. 이러한 전원 단락은 순간적으로 전원 전압이 뚝 떨어지게 만들고, 반대로 다시 이러한 단락이 종료되는 순간에는 전원 라인의 등가 인덕턴스에 의하여 전원단에 높은 전압이 유기될 수 있으며, 이는 전원선에 잡음과 같은 장애를 발생시켜서 곧바로 옆에 있는 다른 디지털 소자의 동작에 불안정한 영향을 주게 된다. 즉, 인접한 디지털 소자들이 잡음으로 결합(coupling)되는 것이다. 디지털 회로의 동작중에 전원을 오실로스코프로 관측해보면 크기는 작지만 상당히 높은 주파수의 리플(ripple) 또는 글리치(glitch)가 포함되는 것을 볼 수 있는 것은 바로 이러한 이유이다. 그러나, 리셋 스위치를 눌러서 시스템을 구성하는 회로의 모든 스위칭 동작을 멈추도록 하면 신기하게도 갑자기 전원의 리플이 없어지면서 직선적인 직류전압으로 되는 것을 관찰할 수 있다. 모든 스위칭 동작이 멈추게 되므로 당연히 이러한 전원선의 잡음이 없어지는 것이다.

이러한 현상은 물론 근본적으로 디지털 회로의 출력단에서 순간적인 단락으로 인하여 발생하는 것이지만, 이론적으로 전원이 제로 임피던스(zero impedance)를 가지는 이상적인 전압원(ideal voltage source)이라면 이러한 전원 리플이 나타나지 않을 것이다. 그러나, 실제의 전원은 이러한 이상 전압원도 아니며, 디지털 회로내에서의 전원선이 임피던스를 가지므로 리플이 발생하게 되고, 이것들은 회로내의 모든 소자들을 잡음으로 결합하게 된다. 이러한 문제를 해결하려면 이 리플을 야기하는 소자에서 가장 가까운 거리의 전원 양단에 커패시터를 설치하면 된다. 이러한 커패시터는 각 소자들이 전원 잡음으로 결합되는 것을 방지한다는 의미에서 디커플링 커패시터(decoupling capacitor)라고도 하고, 커패시터의 주파수 특성으로하여 이러한 리플을 옆으로 흡수 통과시킨다는 의미에서 바이패스 커패시터(bypass capacitor)라고도 한다.

바이패스 커패시터는 디지털 소자 1~3에 하나씩 달아주는 것이 바람직하며, 정전용량이 103~104 즉 0.01~0.1uF 정도이고 고주파 특성이 우수한 세라믹 커패시터를 사용하는 것이

좋다. 자세하게 해석하면 출력단 회로의 스위칭 동작 즉, 전압의 시간변화율과 전류의 변화량을 고려하여 최적의 정전용량을 계산할 수 있으며, 이에 따르면 TTL이나 CMOS 소자에 따라 정전용량이 다소 달라지고 TTL중에도 표준 TTL이나 LS TTL, S TTL 등에서 정전용량이 서로 달라지지만 굳이 그렇게까지 계산하지 않아도 대략 0.01~0.1uF 정도의 범위를 사용하면 무난하다. 현실적으로는 정전용량의 값보다는 어떤 종류의 커패시터를 사용하느냐가 훨씬 중요하다고 할 수 있다. 위에서 설명한 바와 같이 이러한 문제로 발생하는 전원 잡음은 상당히 주파수가 높으므로 당연히 고주파 특성이 우수한 세라믹이나 마일러 커패시터를 사용하는 것이 좋으며, 전해 커패시터와 같은 종류는 바람직하지 않다. 이론적으로 여러 개의 커패시터를 병렬로 연결하면 정전용량이 산술적으로 합해져서 커진다. 그러나, 바이패스 커패시터를 큰 용량의 커패시터 1개로 통합하여 한 곳에 설치하는 것은 아무 의미가 없으며, 반드시 각 소자에 가까운 거리에 개별적으로 붙임으로써 전체 PCB에 널리 분포시켜야 한다.

이상을 요약하면 바이패스 커패시터 또는 디커플링 커패시터는 디지털 회로의 출력단 스위칭 동작에서 발생하는 글리치를 억제하는 것으로 0.01~0.1uF 정도의 세라믹 또는 마일러 커패시터가 좋으며, 반드시 IC 1~3개 정도마다 1개씩 그 소자에 가장 가까운 거리에 위치하도록 PCB에 널리 분포시키라는 것이다. 자신이 마이크로프로세서 키트를 가지고 있다면 한 번 이것의 PCB 기판을 유심히 살펴 보라. 모두 이상에서 설명한 바와 같이 바이패스 커패시터가 설치되어 있다는 것을 알 수 있을 것이다.



<그림 4> 필터 커패시터와 바이패스 커패시터의 올바른 설치 방법

3. 필터 커패시터

이밖에도 PCB 기판에서 전원 입력부의 양단에 접속하는 필터 커패시터(filter capacitor)라고 하는 것이 있다. 이것은 위에서 설명한 바이패스 커패시터와는 전혀 다르며, 거의 전원 입력단에서 가까운 어느 한 곳에 수십 uF 정도의 전해 커패시터나 탄탈 커패시터를 사용한다. 바이패스 커패시터는 주로 디지털 스위칭 동작에 기인하는 전원잡음 문제를 해결하기 위한 것이므로 디지털 회로에 관계되지만, 이 필터 커패시터는 디지털 회로나 아날로그 회

로에 모두 해당된다. 즉, 회로내에 전류 소비가 큰 소자 특히 순간적으로 전류 소비가 크게 변동하는 소자가 있을 경우 반드시 사용한다. 예를 들면 기판내에서 여러개의 LED를 동시에 깜빡이는 경우가 이에 해당한다.

이러한 경우에는 부하 전류가 순간적으로 급증하면 전원단자에 많은 전류가 흐르게 되고, 그러면 멀리서 오는 전원선에 존재하는 등가 저항에 의한 전압강하도 커지며, 특히 전류가 급증하는 순간에는 이것이 높은 주파수의 교류성분에 해당하므로 전원선에 존재하는 등가 인덕턴스에 의하여 전압이 뚝 떨어지기도 한다. 단, 이 시간은 앞에서의 출력단 스위칭에 기인하는 글리치에 비하면 훨씬 긴 시간이며, 이는 더 오랜 시간 동안 전원전압이 낮아진다는 것을 의미한다.

이를 방지하기 위하여 PCB의 전원 입력단에 1개 또는 IC소자 20~30개당 1개 정도씩 큰 정전용량의 커패시터를 달면 멀리서 오는 전원선에서 발생하는 문제를 크게 감소시킬 수 있다. 왜? 이 커패시터가 가장 가까운 거리에서 전하를 충전하여 가지고 있다가 이러한 순간에 잠깐동안 전압원의 역할의 수행해주기 때문이다. 사실 정류회로의 평활용 커패시터도 근본적으로는 이와 유사한 기능을 수행하는 것으로 볼 수 있다. 이는 커패시터의 전압(사실은 커패시터에 충전된 전하량)은 순간적으로 급변하지 않는 연속성이 있으며, 코일의 전류(사실은 발생된 자속)는 순간적으로 급변하지 않는 연속성이 있다는 것을 연상하면 보다 이해가 용이할 것이다. 이밖에도 필터 커패시터는 분명히 전원선을 통하여 외부에서 시스템으로 유입되는 잡음을 억제하는 노이즈 필터의 역할을 함께 수행한다. 이상 2가지의 기능은 모두 근본적으로는 필터 작용으로 볼 수 있으며, 따라서 이 커패시터를 왜 필터 커패시터라고 부르는지 충분히 짐작할 수 있다.

이 필터 커패시터의 정전용량을 얼마로 할지는 부하전류의 크기나 전류변동률에 따라 달라질 것이나 수십 μF 정도면 무난하며, 분명히 이는 전원 입력단에서 필터의 역할을 수행하므로 전해 커패시터보다는 주파수 특성이 우수한 탄탈 커패시터가 훨씬 좋다. 물론, 탄탈 커패시터는 가격이 상당히 더 비싼 것이 문제지만, 잡음이 많은 환경에서 사용하는 컨트롤러의 기판에서는 절대적으로 탄탈 커패시터를 사용할 필요가 있다. 필자는 주로 사무실과 같이 좋은 환경에서만 사용하는 교육용 키트에는 값싼 전해를 사용하지만, 같은 키트라도 이를 산업용의 제어기로 사용하는 경우에는 반드시 탄탈 커패시터로 조립하여 사용한다.

이상을 요약하면 필터 커패시터는 회로내에서 순간적으로 많은 전류를 소비하는 소자 때문에 발생하는 전원전압의 강하를 억제하는 것으로 수십 μF 정도의 전해 또는 탄탈 커패시터가 좋으며, 반드시 PCB의 전원 입력단 및 기타 필요할 경우 PCB의 몇군데 정도에 위치시키는 것이 바람직하다. 특히, 외부에서 전원선을 통하여 잡음이 유입될 수 있는 경우나 전원선이 멀리서 공급되는 경우에는 이 필터 커패시터의 역할이 더욱 중요해진다. 자신이 아무 PCB 기판이나 가지고 있으면 이를 한 번 유심히 살펴 보라. 모두 이상에서 설명한 바와 같이 필터 커패시터가 설치되어 있다는 것을 알 수 있을 것이다.