



콘덴서와 코일의 동작원리

한국산업기술시험원 전기전자본부 전기기기팀
공학박사 유 종 길

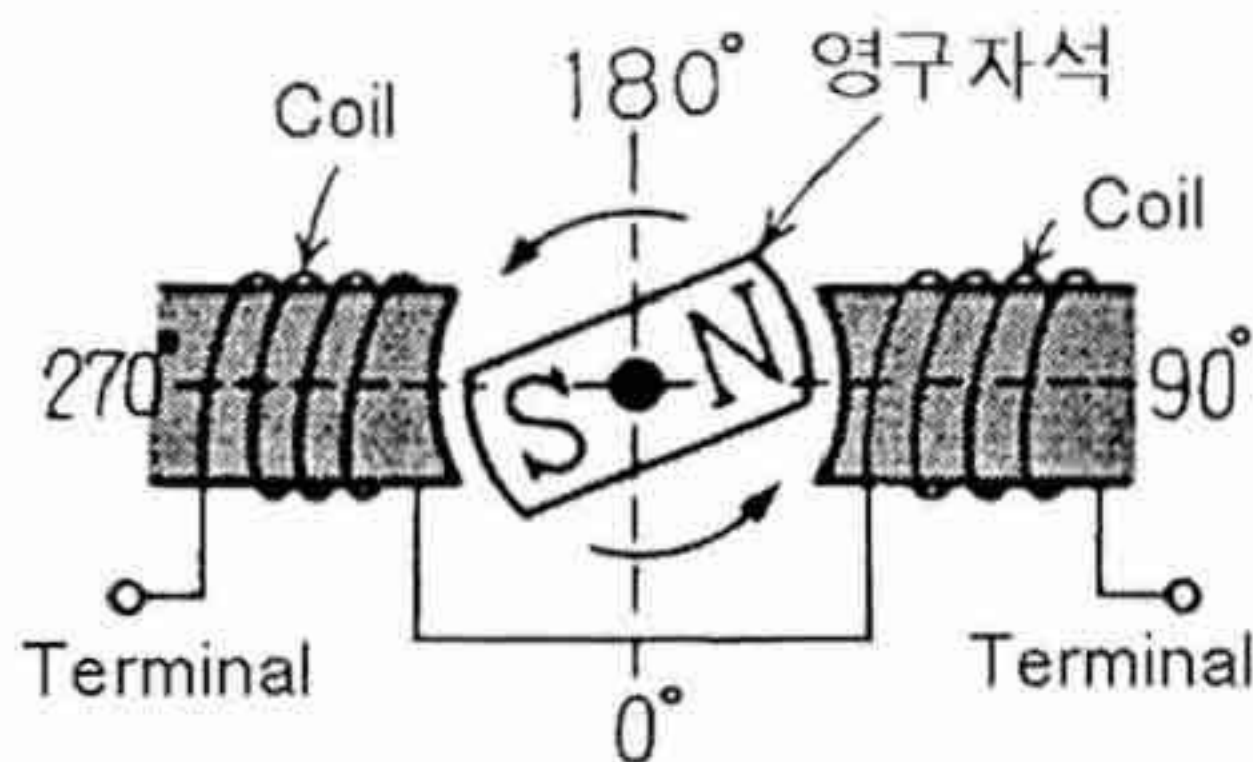
전기 관련 엔지니어들 중에도 콘덴서 및 코일의 동작 원리에 대하여 정확히 파악하고 있지 못한 경우를 종종 목격하게 된다. 전기에너지란 전압과 전류로 구분하여 이해할 수 있는데 저항, 콘덴서, 코일이 직렬로 결선된 회로에 교류 전류가 흐르면 전압과 전류의 위상은 어떻게 될까? 콘덴서에 흐르는 전류는 인가전압보다 90°만큼 먼저 진행하고 코일에 흐르는 전류는 인가전압보다 90°만큼 지연된다. 또한 고주파에 대해서 콘덴서는 낮은 저항값(용량성 리액턴스)을 나타내고 코일에서는 높은 저항값(유도성 리액턴스)을 나타낸다. 이번 호에서는 콘덴서 및 코일의 동작원리와 용도에 대해서 알아보고, 콘덴서와 코일을 사용한 대표적 사례인 전자파 대응용 필터회로를 Pspice를 통해 미리 시뮬레이션하여 부품과 용량을 결정한 후 실제 회로를 구성한 사례를 설명하고자 한다.

그에 앞서 교류 전기가 정현파가 되는 이유를 살펴보자.

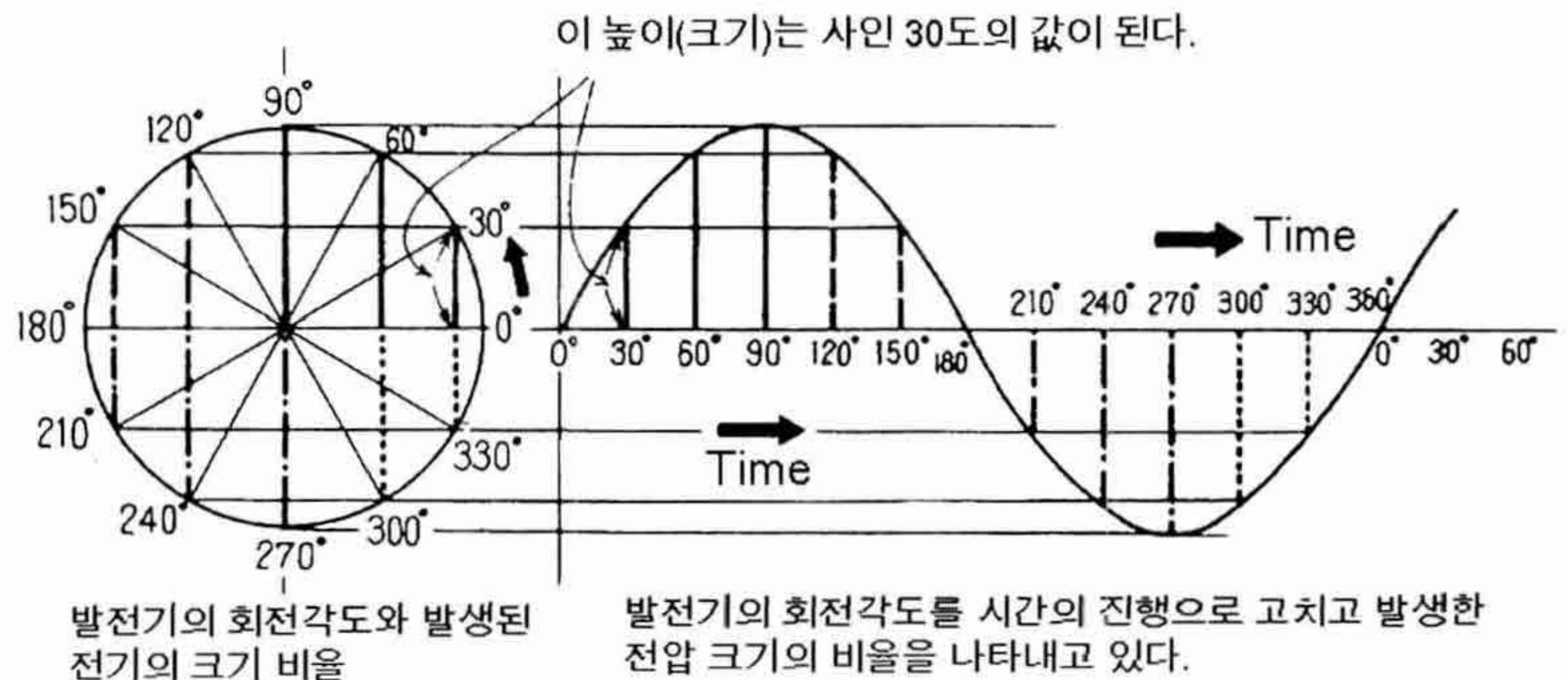
우리들이 평소 사용하는 전기는 크게 교류와 직류 2가지로 나누어지는데 [그림 1]은 교류발전기를 나타낸 것이다.

2개의 코일 사이에 영구자석이 회전하면 코일에는 전자유도 작용(플레밍의 오른손 법칙)에 의해서 전기가 발생한다. 영구자석의 회전과 코일에 생기는 전압의 관계를 나타낸 것이 [그림 2]이다. 영구자석이 자속을 직각으로 끈을 수록 발생 전압이 커지는데 영구자석이 30°까지 회전하면 코일에는 최대전압의 1/2의 전압이 생긴다. 또 60°가 되면 약 87%의 전압으로 되고, 90°로 되면 최대전압이 된다. 이와 같이 시간에 따라 전압과 전류의 크기 및 방향이 변하는 전기를 교류라 한다.

[그림 2]와 같이 변화를 되풀이하는 교류를 정현파 교류라 한다.



[그림 1] 교류발전기의 구성과 원리

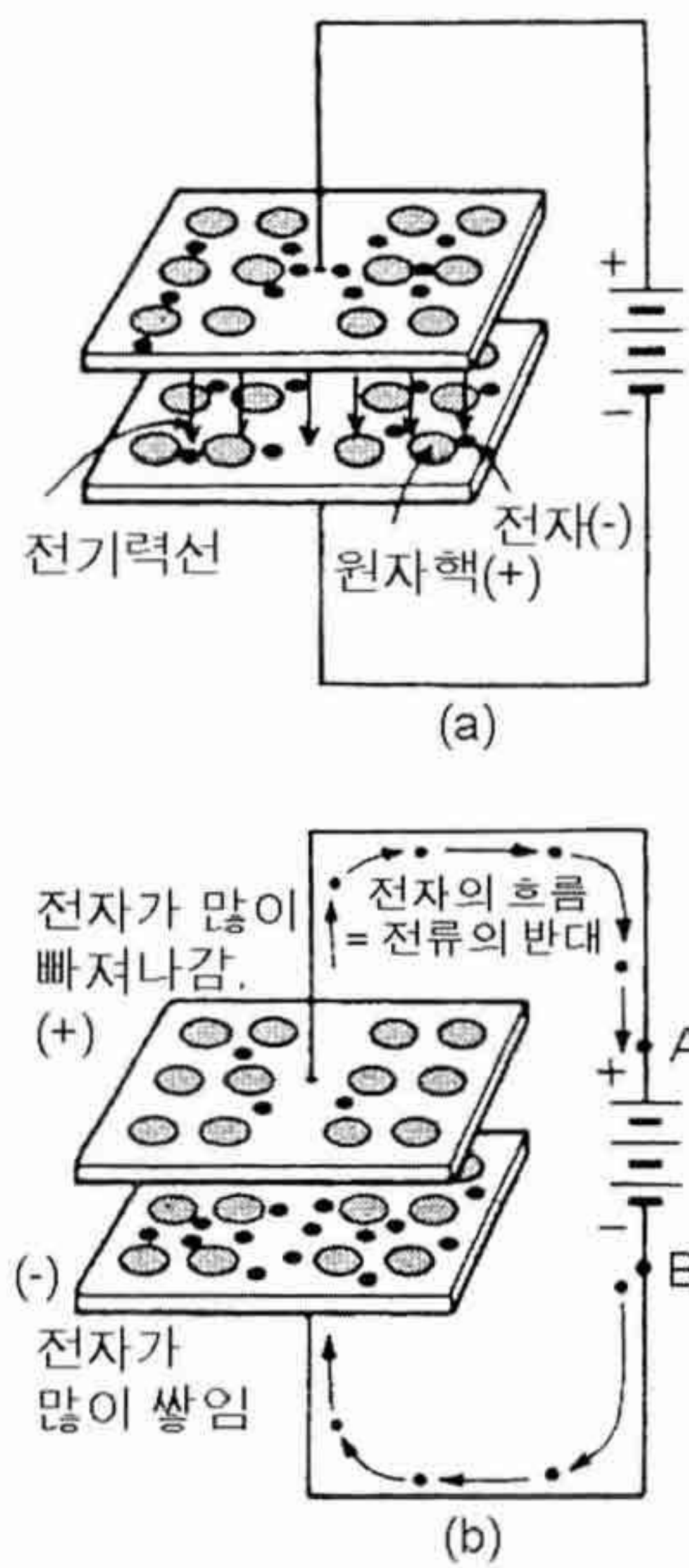


[그림 2] 영구자석 회전자의 위치에 따른 발생 전압의 크기

1) 콘덴서(커패시터, Capacitor)

콘덴서는 [그림 3]의 (a)와 같이 2장의 금속판을 마주 보게 하여, 그사이에 절연물을 끼우고 전기를 저장할 수 있는 구조로 되어 있으며, 축전기(蓄電器)라고도 하는데 명칭으로 인한 오해로 충전 배터리의 동작원리를 콘덴서의 동작원리라고 우기는 경우를 종종 본다.

콘덴서에 건전지를 연결하면 [그림 3]과 (a)같이 2장의 금속판 사이에 전기력선이 생겨서 전자가 이동하기 시작한다. 전자는 마이너스 성질을 가지고 있으므로 건전지의 +극에 끌려서 전원 쪽으로 흘러가고, 건전지의 전자는 -극에서 흘러나와 맞은편 금속판으로 흘러든다.

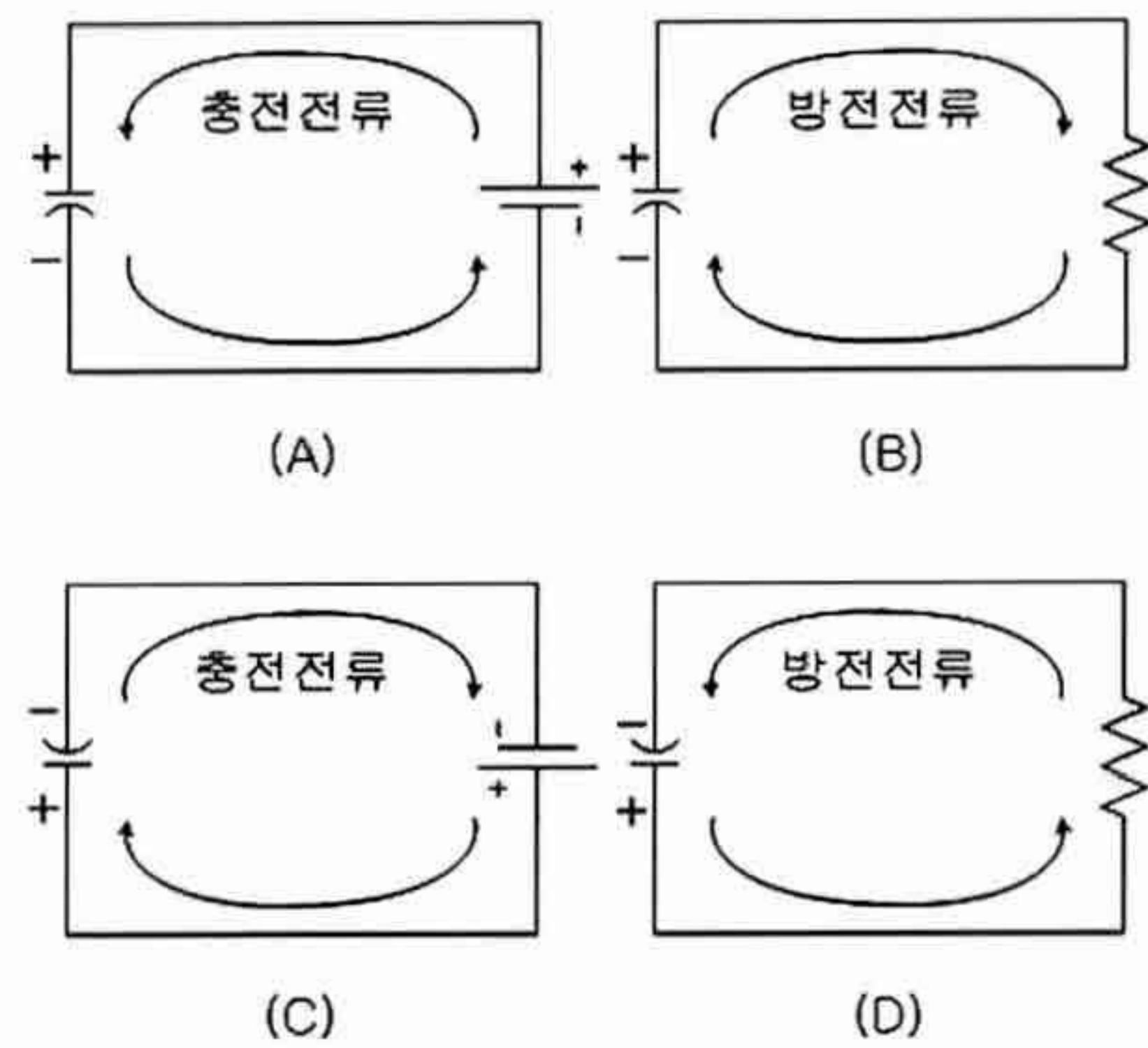


[그림 3] 콘덴서 양 금속판에 전자가 축적되는 개념

따라서 [그림 3]의 (b)와 같이 +극에 연결된 금속판은 전자가 부족하므로 양(+)으로 대전하고, -극에 연결된 금속판은 전자가 많아지므로 음(-)으로 대전한다. 이때의 전자 흐름은 2장의 금속판 사이의 전위차가 전지의 전압과 같아질 때까지 계속 흐른다.

이상이 콘덴서의 충전 원리인데 전자 흐름과 반대 방향으로 전류의 방향을 정의하였으므로 콘덴서에 건전지를 연결하면 순간적으로 충전 전류가 흐르게 된다.

방전의 경우는 [그림 3]의 (b)회로에서 충전이 완료되었을 때 전지를 떼어내고 A와 B를 직접 연결하면 전자가 남아 있는 쪽에서 전자가 부족한 쪽으로 순식간에 전자가 흘러 들어간다. 이와 같이 콘덴서에 건전지를 연결하면 순간적으로 전류가 흐르지만 그 후에는 전혀 흐르지 않는데, 그 이유는 전극 사이에 절연물이 들어 있기 때문이다.



[그림 4] 건전지의 극성에 따른 충전 및 방전

그러나 [그림 4]의 (B)와 같이 충전된 콘덴서의 단자를 단락하면 방전 전류가 충전과 반대 방향으로 흐른다. 다시 (C)처럼 전지를 반대 방향으로 연결하면 그 순간 충전 전류가 흐른다. 다음에 (B)와 같이 단자를 단락하면 방전 전류가 (C)와 반대방향으로 흐른다.

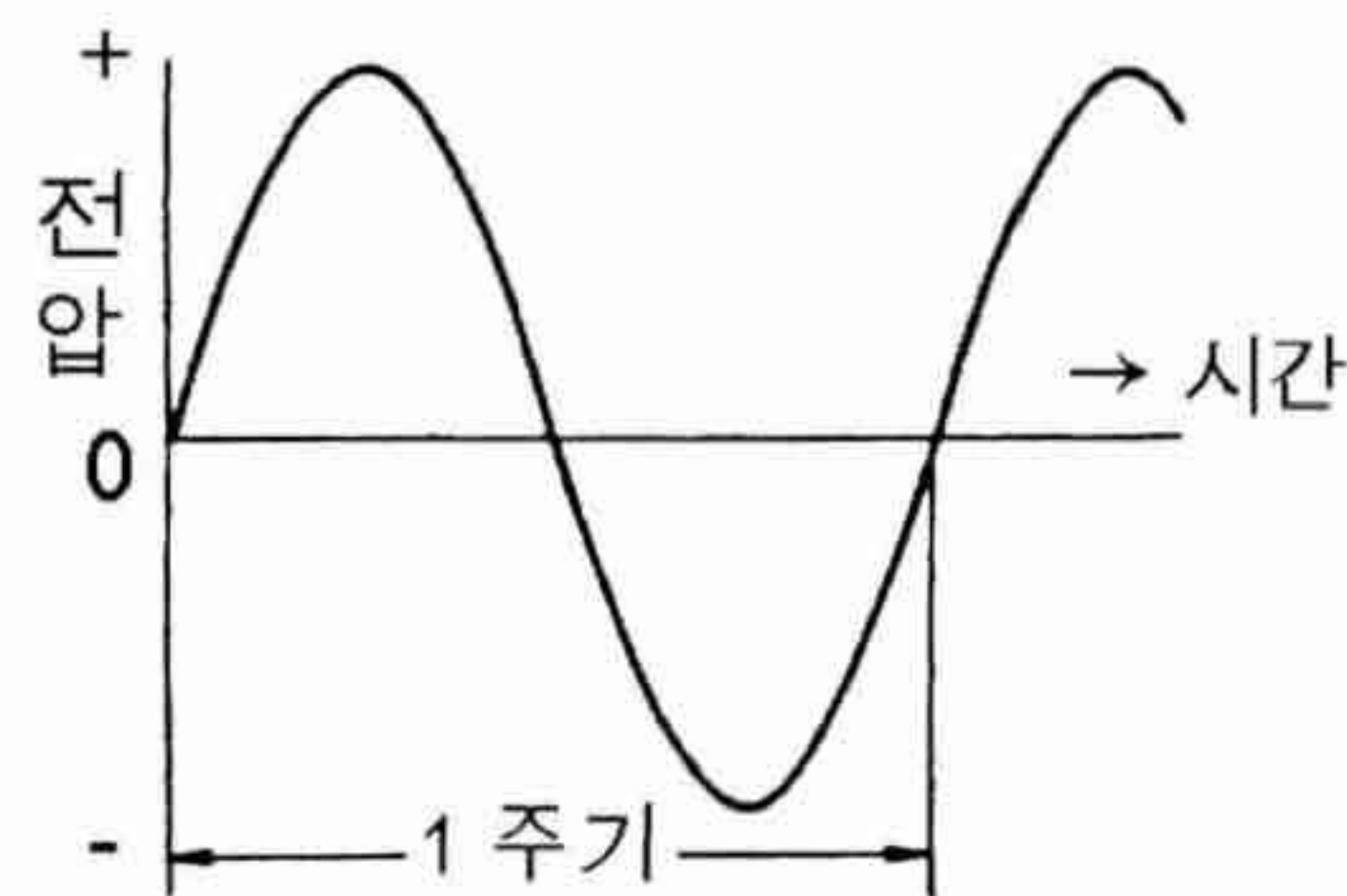
만약 전지의 방향을 아주 빠른 속도로 바꿀 수 있다면 어떻게 될까? 아마 회로에는 건전지의 방향을 바꾸는데 맞는 속도와 방향으로 항상 전류가 흐르고 있을 것이다.

건전지의 극성을 매우 빠르게 바꾸는 대신 [그림 5]와 같이 교류 전원을 연결해 보자.

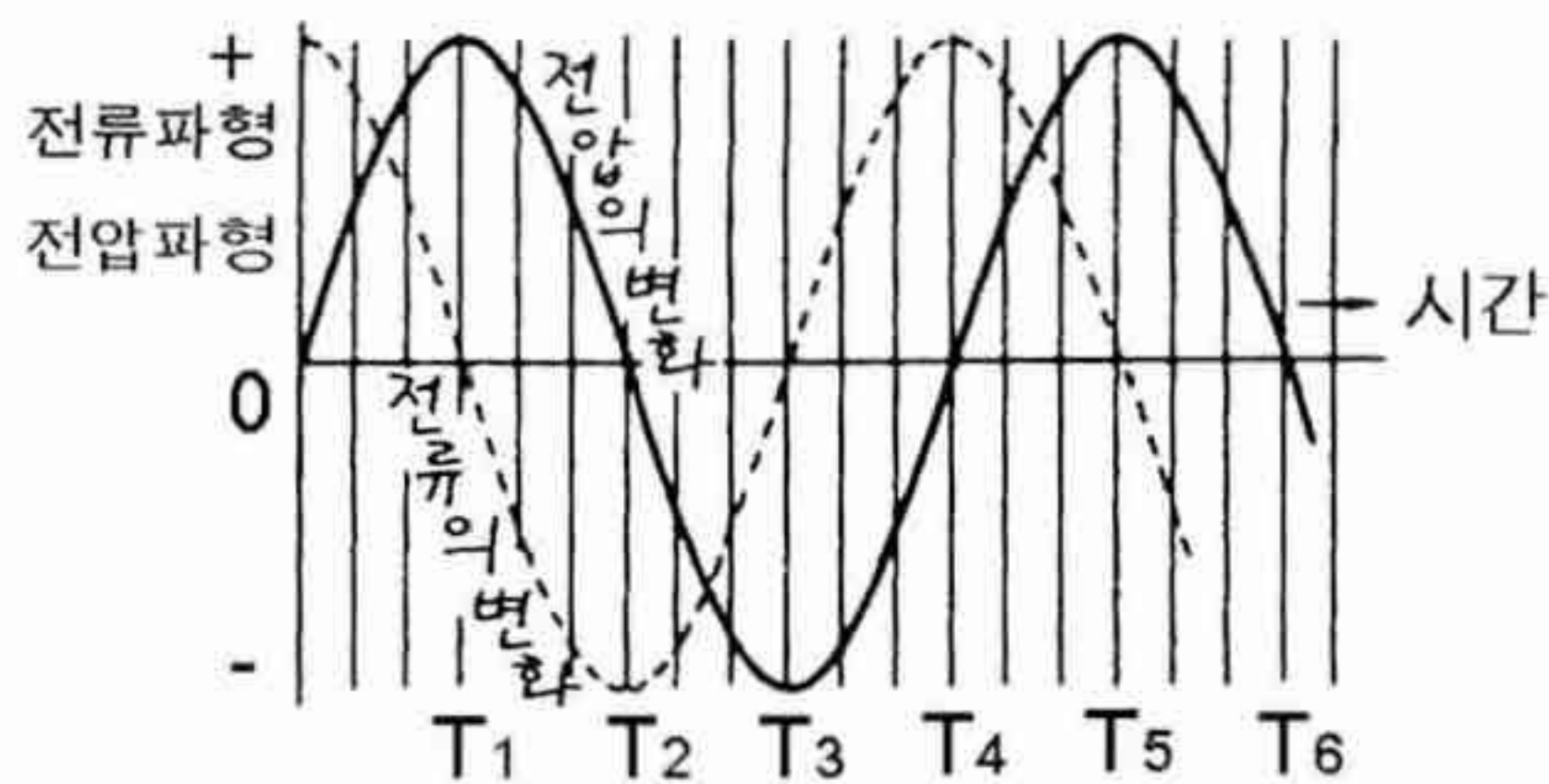


[그림 5] 교류를 인가한 콘덴서 회로

실제 교류정현파 전압을 오실로스코프를 이용하여 관찰하면 [그림 6]처럼 시간의 흐름에 따라 주기적으로 극성(⊕, ⊖)이 바뀌는 것을 알 수 있다. 이 교류정현파 전압에 콘덴서를 연결하여 전류프로브를 이용하여 전류 파형을 관찰하면 [그림 7]과 같다.



[그림 6] 콘덴서 인가 전압 파형



[그림 7] 콘덴서의 전압 및 전류

[그림 7]에서 T1 일 때 전압은 하강하기 시작하는데 콘덴서의 충전 전압이 전원보다 높으므로 반대 방향으로 전류가 흐른다. T2에서는 전압이 0V로 되고 전류는 최대가 된다.

T2에서 T3까지 전원의 극성(⊕, ⊖)이 바뀌어, 반대 방향으로 전압이 올라가면 충전 전류는 감소하면서 흐른다.

T3에서 T1과 반대 방향의 충전이 종료되므로 전류는 흐르지 않게 되므로 전류는 0A가 된다. T3에서 T4까지는 T1에서 T2의 반대 극성의 현상이 되므로 방전 전류가 흘러나온다. 그리고 T4에서 최대 전류가 된다. T4에서 T5까지 전원의 극성이 또다시 교체되어 올라가므로 충전전류는 감소하면서 흘러간다. T5에서 다시 충전이 종료되고, 전류는 0A가 된다. 최종적으로 T1에서부터 동일한 패턴으로 반복하게 된다.

콘덴서에 직류를 연결하여도 전류는 흐르지 않지만 교류를 연결하면 위에서 언급한 동작 원리에 의해서 전압 변화보다 4분의 1주기 빠르게 변화 하면서 교류 전류가 흐른다. 그래서 “콘덴서는 직류는 흐르지 않지만 교류는 흐른다”라고 알려진 것이다. 주파수를 0Hz(직류)에서 점차 높게 되면 높은 주파수의 교류가 보다 잘 흐르는 것을 알 수 있는데 그것은 콘덴서의 교류에 대한 저항 즉 용량성 리액턴스가 주파수에 반비례하기 때문이다. 용량성 리액턴스는 다음 식으로 나타낸다.

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} [\Omega] \text{ 또는 } \frac{1}{\omega C} [\Omega], \omega = 2\pi f$$

f여기서는 주파수이며 단위는 헤르쯔[Hz], C는 정전 용량이며 단위는 패럿[F]이다. 이 식을 보면 주파수를 높이거나 정전용량을 크게 하면 콘덴서의 저항값이 작아진다는 것을 알 수 있다.

2) 코일(인덕터, Inductor)

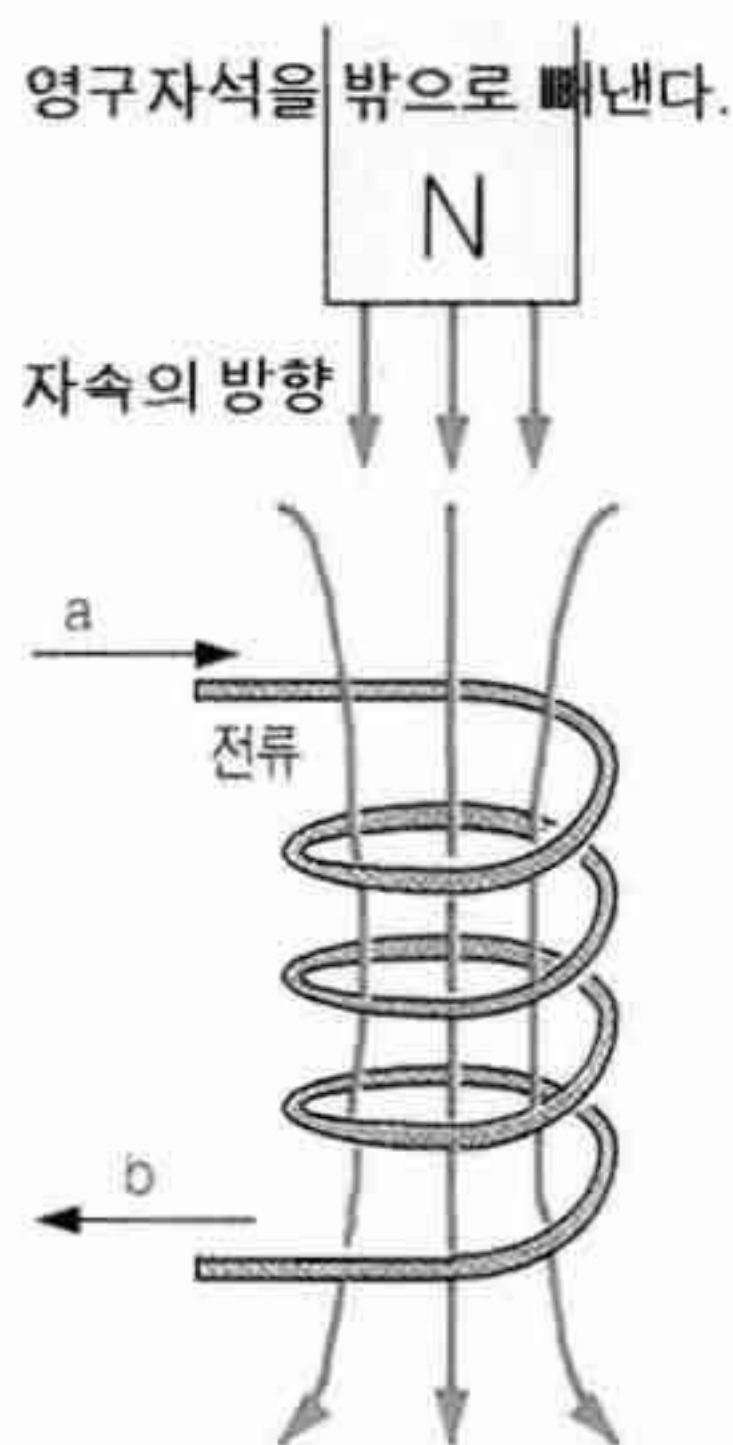
콘덴서만큼 많이 사용되는 부품 중에 코일이 있는데, 그 성질이 콘덴서와 정 반대라고 생각하면 된다. 코일은 직류에서는 작은 저항값을 나타내지만 교류에서는 매우 큰 저항값을 나타낸다. 코일은 구리선을 용수철 같이 감아놓은 것이므로 직류에서는 일반 전선과 마찬가지로 구리의 저항값만을 생각하면 되지만 교류에서는 현상이 다르게 나타난다.

멀티메타를 이용하여 20W급 코일의 저항을 측정하면 약 25Ω 정도이지만 동일한 코일에 교류 100V를 인가하여 흐르는 전류를 측정하고 옴의 법칙을 이용하여 저항값을 계산하면 60Hz의 교류에서 약 170Ω 정도가 된다. 이 실험을 통하여 코일은 높은 주파수의 교류일 수록 저항이 커진다는 것을 알 수 있다.

코일은 발생 자속의 변화를 매우 싫어하는 부품인데, 코일에 교류 전류가 흐르면 자속변화가 일어나게 되고 그 자속 변화를 방해하도록 역기전력이 발생되므로 앞서 흐른 교류 전류의 변화가 억제된다. 즉 저항에 부딪친 것과 같은 결과가 된다.



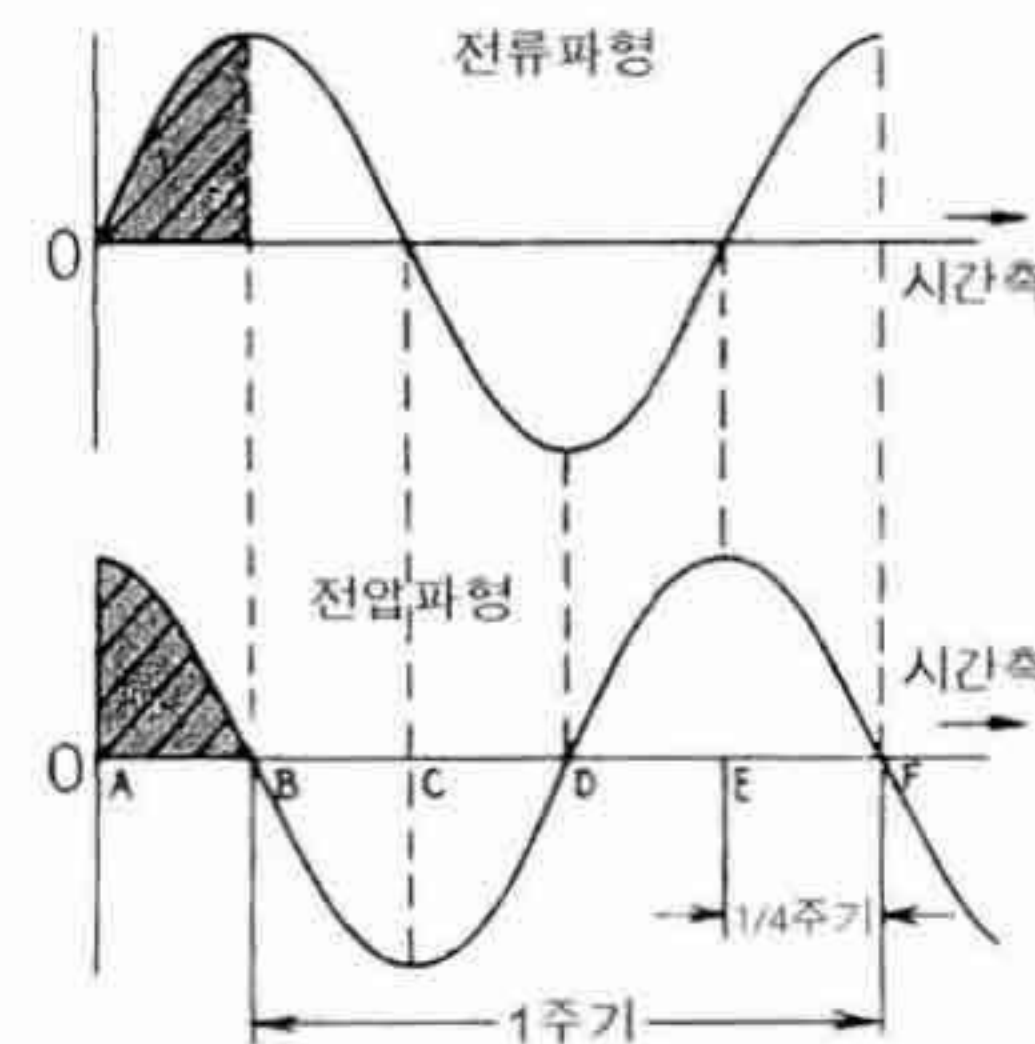
[그림 8] 들어오는 자속을 막으려는 역방향 자속 발생(렌츠의 법칙)



[그림 9] 영구자석을 빼내면 오히려 잡아두려는 방향으로 자속 발생

[그림 8] 및 [그림 9]는 영구자석을 사용하여 역기 전력 발생을 실험한 것이다. 영구자석을 사용하지 않고 코일에 단지 전류를 흐르도록 하는 동작만으로도 같은 현상을 볼 수 있는데 직류의 경우 전압을 인가하는 순간에만 이러한 현상이 보이지만 교류의 경우 극성이 바뀌는 매 순간마다 이러한 현상이 나타난다. 따라서 역기전력은 자속 변화 비율에 비례하므로 주파수가 높아질수록 이 저항은 커진다. 이와 같은 교류 저항을 리액턴스라고 하는데, 코일의 경우는 유도성 리액턴스라고 하며, X_L 이라는 기호가 사용된다.

유도성 리액턴스는 $X_L[\Omega] = 2 \times f[Hz] \times L[H]$ 의 수식으로 정의되는데, 이때 f 는 주파수, L 은 자기 인덕턴스이다. 주파수가 높아지고 또한 인덕턴스가 커지면 유도성 리액턴스도 커지는 것을 알 수 있다.



[그림 10] 코일에서의 전압 및 전류 파형

유도성 리액턴스의 영향을 받은 전류는 [그림 10]과 같이 1/4주기만큼 지연된다. [그림 10]의 사선부분을 고찰해 보면 “전자 유도에 의해서 코일에 생긴 기전력은 그 기전력에 따라서 흐르는 전류가 코일 속 자속의 변화를 방해하는 방향으로 발생한다”고 하는 유명한 렌츠의 법칙으로 설명된다. 따라서 포인트 A→B로 전압값이 내려가면 자속이 감소하지 않도록 하는 방향으로 유도 전류가 흐르기 시작하여 B에서 최대가 된다. 다음에 B→C로 전압이 역방향으로 올라가면 반대 방향의

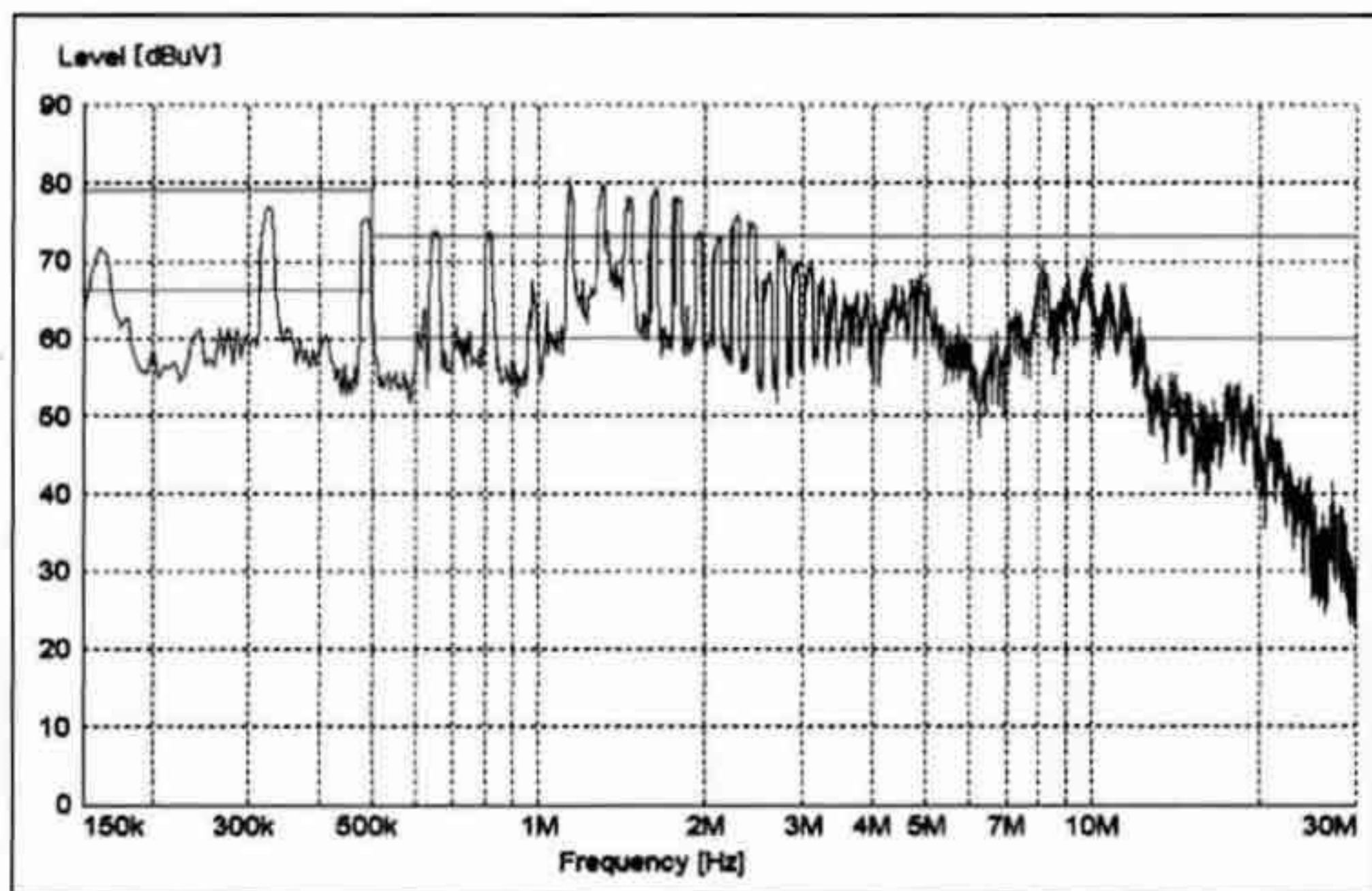
특별기고

자속이 증가 하지 않도록 지금까지와 같은 방향의 전류가 계속해서 흐른다. 이러한 현상이 한주기에 1/4 회씩 발생하므로, 코일의 전류는 전원 전압 변화보다 1/4주기만큼 지연된다고 볼 수 있다. 이와 같이 전압 변화와 전류 변화가 시간적으로 벗어나는 것을 위상이 벗어난다고 한다.

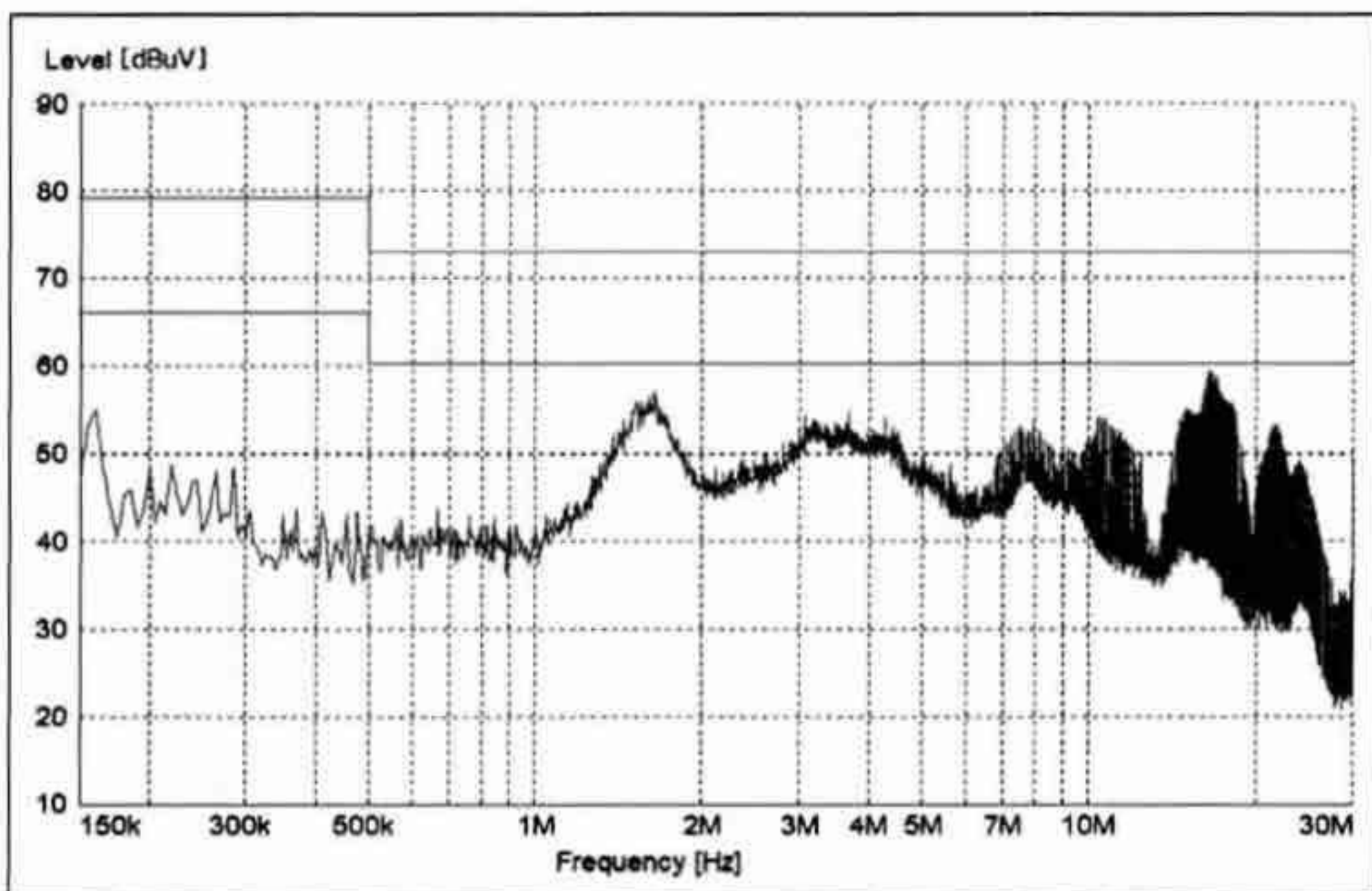
3) 응용사례(EMI 대책)

지금까지 살펴본 콘덴서와 코일의 성질을 적절히 이용하면 무수히 많은 기능을 얻어 낼 수 있지만 전자파 문제 해결을 위한 필터회로 구성의 예를 들어 보고자 한다.

다음은 스펙트럼 어날라이저를 이용하여 불요 전자파를 측정 한 결과이다.

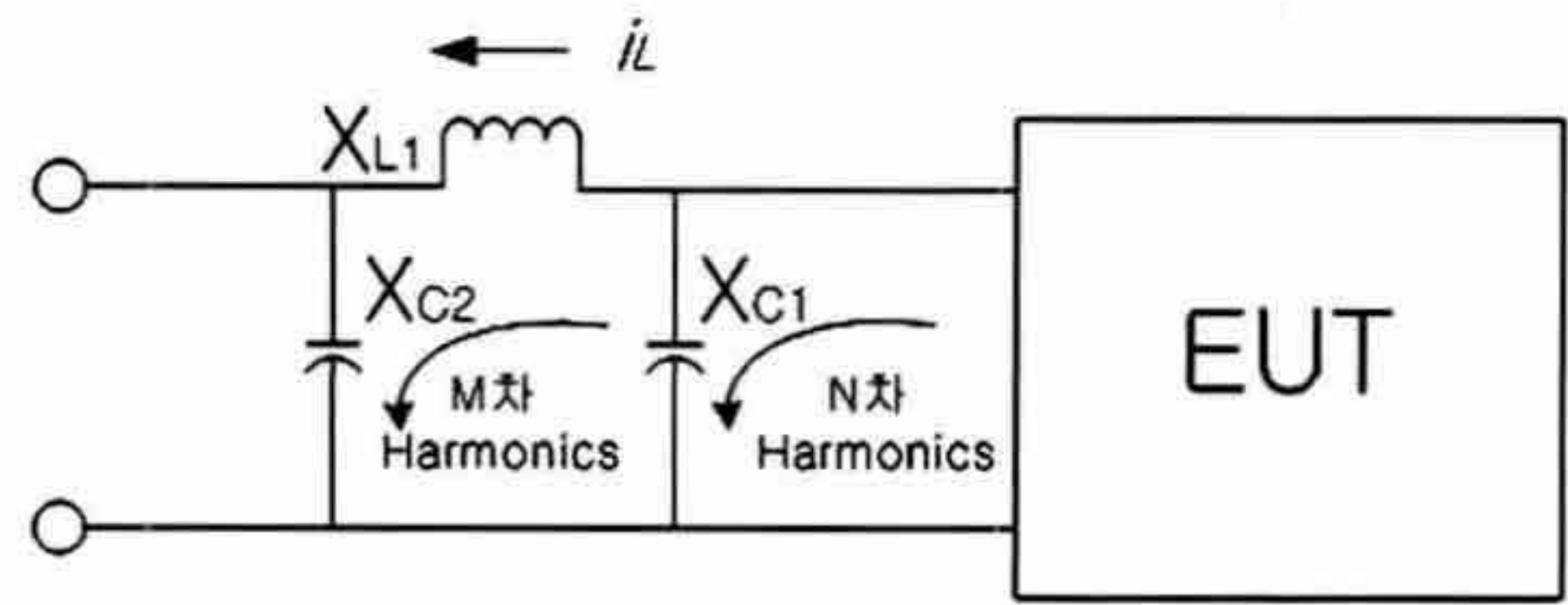


[그림 11] EMI-Conducted Emission 측정 결과 - Fail



[그림 12] EMI-Conducted Emission 측정 결과 - Pass

[그림 11]은 EMI-CE 불합격 제품의 시험 결과인데 특정 대역의 주파수를 제거하기 위하여 [그림 13]과 같은 필터 회로를 구성하여 전원단 앞에 설치하였다. 그리고 나서 측정한 시험결과가 [그림 12]인데 결과는 양호하다.



[그림 13] 필터 회로의 예

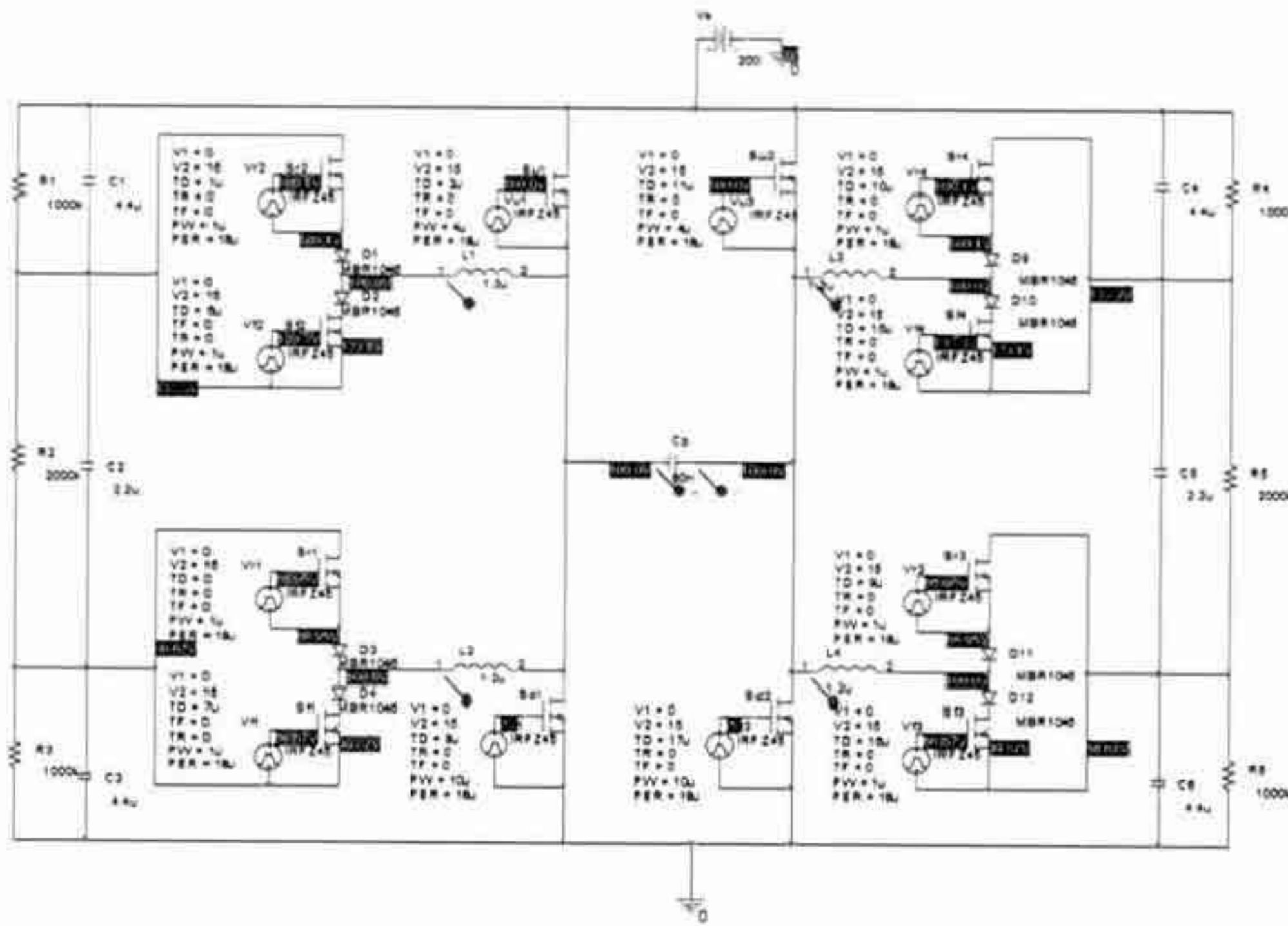
$X_L = 2\pi fL$, $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ 의 커패시턴스 [C]와 인덕턴스 [L]을 적절히 조절하여 X_L 과 X_C 값을 설정해 주면 특정 주파수 대역의 발생을 억제할 수 있다. 즉, 콘덴서는 높은 주파수에서 저항값이 작아지므로 [그림 13] 회로상의 C값을 갖는 병렬 콘덴서를 통하여 특정 대역의 주파수를 바이패스 시킬 수 있으며, 이와 반대로 코일은 L값을 적절히 조절하여 특정대역의 주파수를 억제시킬 수 있으므로 필터회로가 되는 것이다. 이때 회로설계의 시행착오를 줄이기 위하여 회로를 직접 만들지 않고 컴퓨터상에서 시뮬레이션할 수 있는데, 관련 소프트웨어들이 많이 나와 있으므로 시간과 경비를 최소화 할 수 있다.

아래 [그림 14]는 설계자가 구상한 회로를 시뮬레이션 프로그램 Pspice에 작성한 예를 나타낸다. CAD프로그램 사용법과 매우 유사하며 부품의 용량을 자유자재로 바꿀 수 있다.

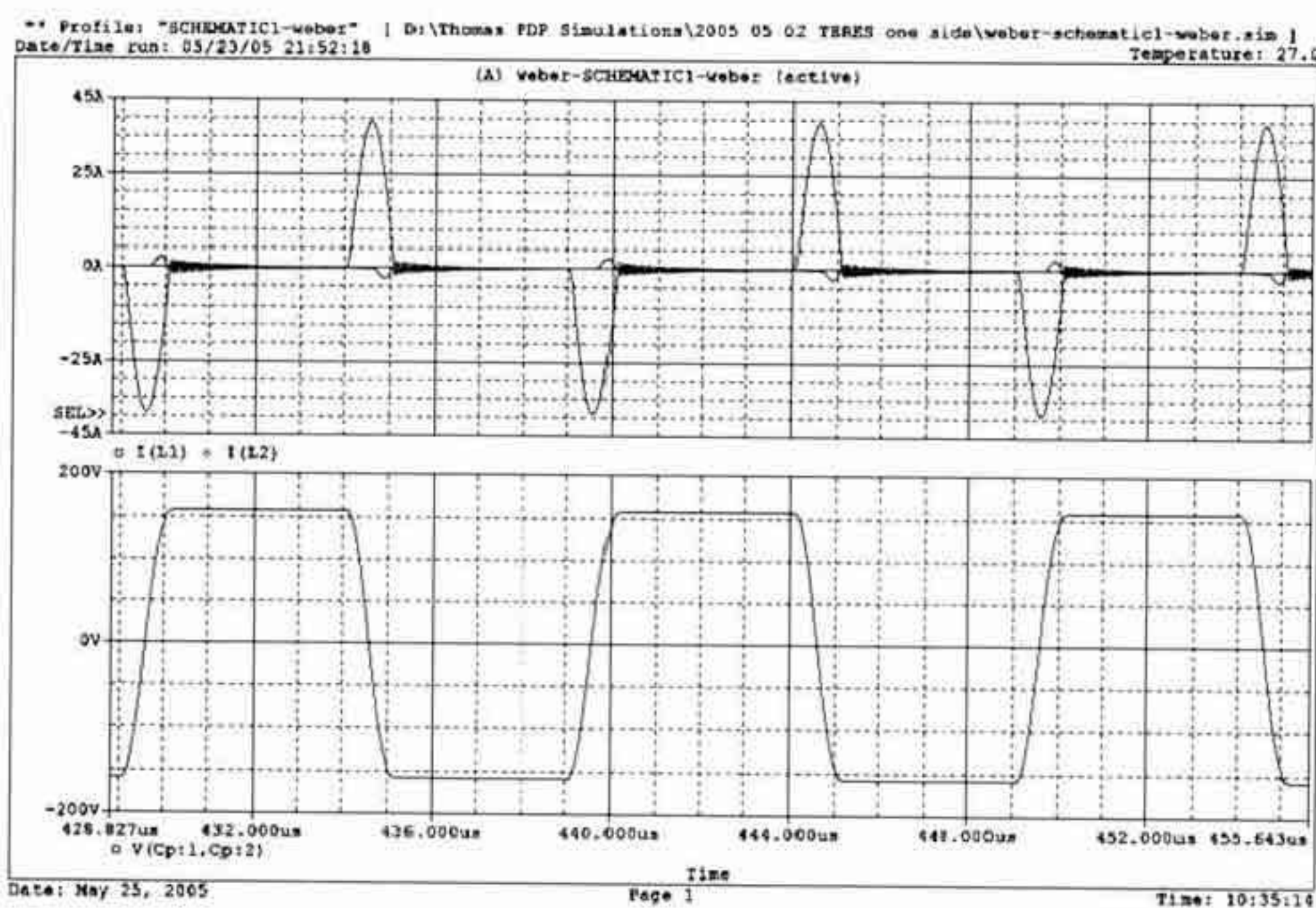
[그림 15]는 확인하고자 하는 포인트를 지정한 후 시뮬레이션 프로그램의 실행 버튼을 누름으로서 화면에 나타난 전압과 전류의 파형이다.

[그림 16]은 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실제 회로를 꾸민 후 오실로스코프를 이용하여 동일 포인트를 측정한 전압과 전류의 파형인데, 같은 결과임을 알 수 있다.

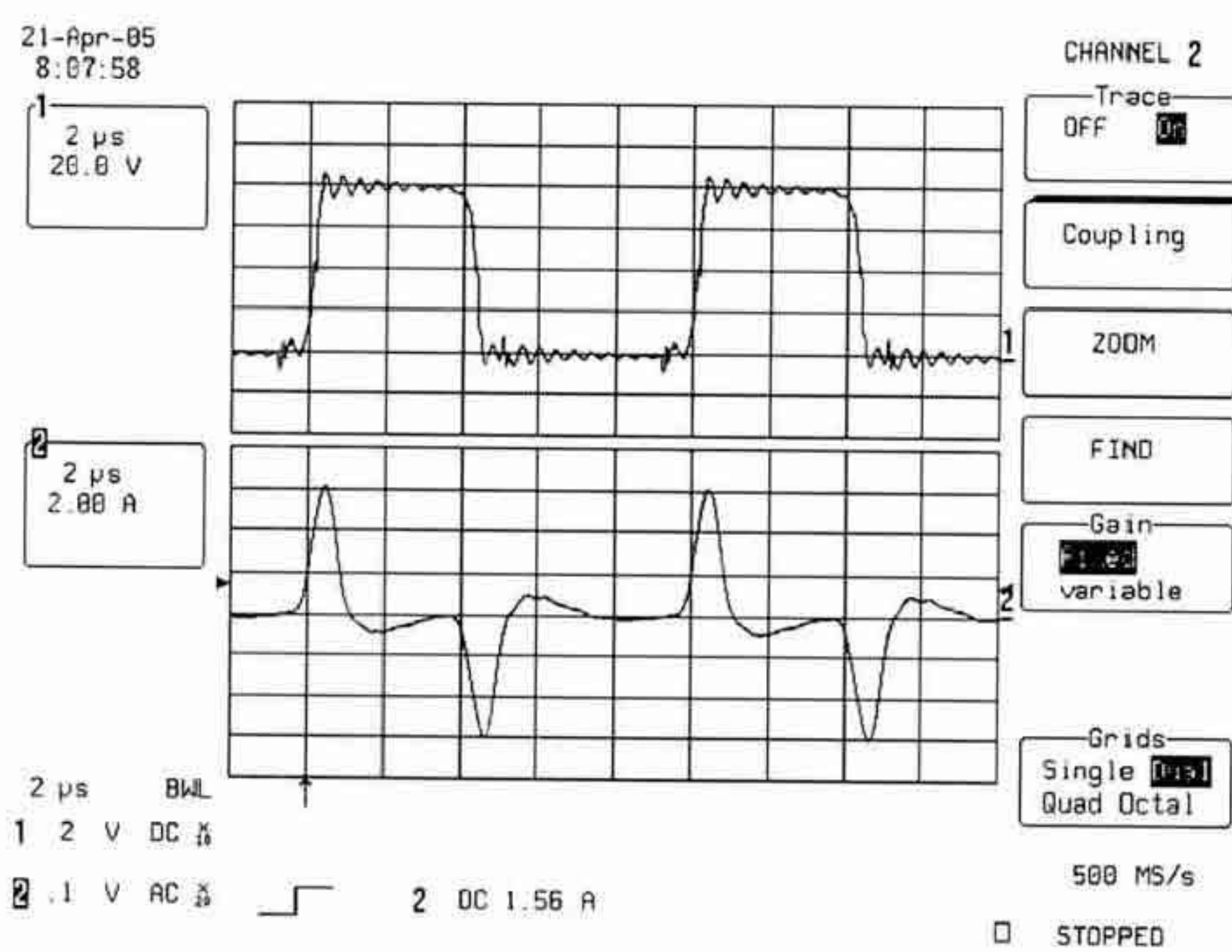
본 “전기제품 안전 21”의 특별 기고를 통해 몇 가지 종류의 전자부품을 설명하였으나 그 외에도 무수히 많은 종류의 전자부품이 있으며 지면 관계상 보다 많이 소개하지 못한 점이 아쉬움으로 남는다. 작으나마 도움이 되었기를 바라며 이번 콘덴서와 코일의 동작 원리를 끝으로 본인의 연재를 마칠까 한다.



[그림 14] 시뮬레이션 프로그램 Pspice에 설계한 회로의 예



[그림 15] Pspice를 이용하여 시뮬레이션한 전류와 전압의 출력 파형



[그림 16] 실제 회로를 구성하여 오실로 스코프로 측정한 전압과 전류의 출력 파형