

실험 II: AC 회로 응용 및 측정

(2020년 전자학 및 계측론 실험 모듈 II 설명서)

담당교수: 김 기 훈

2020년 10월 7일 수정본

■ 모듈 1 에서 dc 저항의 측정을 위해 우리는 AD2 의 dc voltage source 를 이용하여 일정한 전압을 가하고, DUT 양단과 표준 저항 (혹은 load 저항) 양단에 생겨나는 ~mV 수준의 전압을 측정하고, 이로부터 회로에 흐르는 전류를 알아냈고, DUT 의 저항을 측정하였다. 물론 van der Pauw 라는 저항 측정방법의 원리도 적용해 보았다. 사실 이렇게 일정한 전압 혹은 전류를 가하는 dc 실험보다 물리학에서는 교류 (alternating current, ac)를 사용하는 일이 훨씬 많다. 결국 교류, AC, 측정은 일정한 주파수($f = \omega/2\pi$), 진폭(V_0), 위상(ϕ)을 가진 다음과 같은 harmonic 함수형태를 만들어 내는 교류 전원을 발생시키면서 시작한다. 곧, $V_{in}(t) = V_0 \sin(\omega t + \phi)$.

■우리가 배운 대표적인 수동 소자인 저항, 축전기, 코일은 이 교류 전원에 대해 각기 독특한 전압 반응을 보이며, 이 소자 양단의 전압강하는 주어진 주파수, 진폭, 위상의 함수로 표현된다. 특히, 축전기와 코일은 정확히 알려진 V_{in} 과 V_{out} 사이의 위상차 측정해도 구별할 수 있고, 각각 축전용량 (C), 인덕터스 (L)를 V_{out} 의 크기 측정을 통해 구할 수 있다. 이 같은 인덕터, 축전기(커패시터), 저항, 곧, L, C, R 을 정확히 측정할 수 있는 장비를 LCR meter 라고 한다. 이 같은 LCR meter 를 AD2 구현하기 위해서는 우선 각 소자들이 나타내는 전압, 위상 특성을 이해해야 한다.

■ 교류 측정의 가장 대표적인 장비인 lock-in amplifier (락인 증폭기)은 물리학 실험에서 매우 중요한 장비이므로, 다양한 실험 과목을 수강하면서 충분히 이해되어야 한다. 2 학년, 3 학년 전공에서 이 장비를 이용하는 실험을 통해 이용법과 장비의 특성을 배우게 될 기회가 있을 것이다. 간단히 설명하자면, lock-in amp 는 위상과 진폭, 파형을 잘 알고 있는 전압 input 신호 (흔히 위상은 0 으로 시작하는 sine 함수)를 측정하고 있는 대상에 반복적으로 일정 주파수로 가하면서, 이렇게 크기가 변화하는 전압 원인 (cause)에 대해 반응하는 DUT 에 나타나는 output 신호의 크기와 위상을 측정하는 같은 주파수로 측정 주파수 대역을 고정하여 측정하는 장비이다. 위에서 기술한 LCR meter 도 이 같은 측정 원리를 이용하여, 저항, 축전용량, 인덕터스를 정확히 측정해주는 기구이다. 가령 수업시간에 설명한 AM radio 의 원리에서 수백 MHz 로 진동하는 일정 주파수의 신호만을 선별하고자 한다면, 특정 주파수의 신호만을 주변 주파수 신호는 걸러낸 후 측정하여야한다. 이것이 lock-in 의 기능이다. 이렇게 측정한 특정 주파수의 신호만을 증폭하여 이 교류 신호의 진폭등을 정확히 측정하여 음파등으로 변환 시킬 수 있는 것이다. 더 자세한 내용이 궁금한 학생들은 상용 standford research 혹은 EG&G 사의 lock-in amp 매뉴얼 등을 참고하여 알아보자. 아울러, 3 학년 전공 현대 물리 실험에서는 다양한 lock-in amp 의 기능을 교육용 lock-in amp kit 을 통해 배울 수 있는 기회도 있을 것이다. 또, 우리가 사용하는 AD2 엔 impedance 측정과 network analyzer 라는 교류측정도구가 미리 내장된 waveform software 를 가지고 있다. 이 측정 도구들도 lock-in amp 와 LCR meter 에 관련된다. 하지만, 두 장비 모두

시간의 변화를 Fourier 변환한 주파수 특성을 주로 보여주거나, 분석하는 역할을 수행하는 측정도구이다.

■ Analog Device사에서 여러 단계로 수동소자의 AC 반응을 익숙하게 접하는 다양한 실험을 제공하였다. 이제 이 사이트의 여러 실험을 통해 AC 회로 및 측정 에 대한 이해를 높여보자. Labview 와 Waveform 의 연동은 이미 모듈 1 을 진행하며 이루었으리라 여겨지지만, waveform 을 활용한 보다 많은 labview 예제 vi 는 이 [사이트](#)에서 받을 수 있다.

■ 실험 2-1 : 교류 회로의 응용 실험

[Introduction to Electrical Engineering Based Lab Activity Material](#) 에 Analog Devices 에서 제공하는 대표적인 교류 관련 실험이 있다. 관련된 소자 및 역할별로, 몇가지 예를 들어보면,

1. For capacitors, please see activity (“[Transient Response of an RC Circuit](#)”)
2. For inductors, please see activity (“[Transient Response of an RL Circuit](#)”).
3. For oscillations and resonance, “[Parallel LC Resonance](#)”
4. For resonance, “[Resonance in RLC circuits](#)”
5. For filters, “[Low Pass and High Pass Filters](#)”.

먼저 학생들은 1-5 의 실험중 2 개의 실험을 수행하고 실험수행 결과 보고서에 독립적인 장 혹은 절(section)으로 그 내용을 보고한다.

■ 실험 2-2 : 교류 회로 측정 연습

[The Lissajous pattern, A Classic phase measurement](#)

오실로스코프를 이용하여 리사주 (Lissajous) 그림을 그려보는 일은 꼭 한번쯤은 해봐야할 흥미로운 오실로스코프 응용실험이다. 같은 실험 현상은 아니지만, 이 같은 실험 경험을 통해 광학에서 빛의 전파와 성분 분해에 의해 선편광, 원편광 등의 변환 이해에도 도움이 될 것이다.

■ 실험 2-3 : 물리학에 관련된 교류 실험들: 제시한 실험 중 택 1

(1) 저항의 교류 특성

우리가 실험 모듈 1 에서 다룬 thermistor 나 carbon 저항은 가격이 싸지만, 결국 반도체 입자 (powder)가 압착된 형태로 고온에서 열처리 되어 엉겨붙어 있을 것이며, 이로 인해 내부에는 수 μm -수백 μm 반경의 반도체 알갱이(grain)들과 이들이 연결된 계면에서 알갱이 주변(grain boundary)들이 존재할 것으로 예상된다. 이는 결국 반도체 간극으로, 추가적인 축전용량 (parasitic capacitance)을 제공하는 원천 (source)이다. 곧, grain 간의 연결에 의해 전도가 이루어지는 저항 특성외에도 grain boundary 등에 의해 반도체의 특성인 capacitance 가 존재할 것으로 예상된다. (과연 L 에 해당하는 inductance 는 어떻게 생겨날 수 있을까?). 따라서, 우리가 생각했던 이상적인 저항이라기 보다 유효한 그림과 같은 회로로 나타내지는 복합적인 RLC 를 갖춘 저항으로, 자연스럽게 주파수 특성을 보이는 impedance 를 보여줄 것으로

예상된다. Carbon 저항을 통해 이 교류 특성으로부터, C_{par} , L_{par} 을 얻어보자. 이를 위해 힌트를 얻고자 한다면 테스트 실험으로 [Impedance Measurements-Frequency Effect](#) 를 참고하도록 한다.¹

메모 포함[W사1]:

- (2) WaveForms 은 자체 impedance meter 와 network analyzer 가 있다. 이를 바탕으로 자신만이 쓸 수 있는 LCR-meter 를 디자인하고 구현해 보라. 이를 이용하여, 알려져 있지 않는 수동소자 (저항, 축전기, 인덕터)를 정확히 알아내는 방법을 기술하라. 본인이 만든 LCR meter 가 각 소자 (R, L, C components) 를 측정할 수 있는 한계를 기술하라.² 이와 관련하여, 알려져 있지 않은 수동 소자의 저항, 축전용량, 인덕턴스를 정확히, 정밀하게, 그리고 빠르게 측정할 수 있는 테스트 회로를 설계해보라. 이 테스트 회로가 정확하게 측정할 수 있는 각 소자의 값의 변화폭을 기술하라.
- (3) 역사적으로 수많은 아날로그 계산기가 있었는데, 우리가 아는 단순 숫자계산을 위한 주판 (counting frame, mechanical abacus) 등에서부터 Fourier 분석을 해주는 역학적 기계들이 있다. 교재의 후반부에서 많은 예가 나오지만, 결국 우리가 배우는 회로도 모든 적분, 미분, 수학적 연산을 하는데 응용될 수 있다. 가장 간단한 예로, 우리가 이론 강의에서 배운대로, RC circuit 을 이용하면 가장 쉬운 형태의 integrator, differentiator 를 만들 수 있다. 정해진 주파수의 신호를 input 으로 하여 정해진 크기의 저항과 축전기의 조합으로 어떻게 신호의 주파수가 적분 혹은 미분되는지 확인할 수 있다. 간단한 사각파, 삼각파를 이용하여, input 과 output 의 신호 형태를 측정하여 보라. 그리고, 어떻게 이 모양이 변화하는지 실험회로로 구현하고 측정결과를 정리한다. Waveform 을 이용하면 특정 사각파와 삼각파를 input 으로 만들어 낼 수 있을 것이다. 이제 output 을 자세히 관찰한 후, 실험 결과로 plot 하고 분석한다.
- (4) 영화배우 조디 포스터가 주연하여 1997 년 완성된 영화 The Contact 은 Carl Sagan 의 같은 이름의 1985 년 소설을 바탕으로 한다. 여기에서 외계 행성에서 신호가 티비에 방영되지만, 그 내부에 또다른 digital 신호들이 숨겨져 있고, 결국 외계로 이르는 하나의 우주선 도면을 보여준다. 여기서, 외계인이 보낸 신호가 modulated 가 되었다는 표현이 자주 나오는데,

¹ 이를 응용하여, 부도체 혹은 유전체 소립자 pellet 에 적용할 경우, 고주파로 유전율의 실수부, 허수부에 대한 측정을 해서, 이를 x-y 로 리사주 그림처럼 그리면 (cole-cole plot 이라고 한다), 이를 이용해서 grain boundary, grain, 전극과 pellet 사이의 저항등도 예측할 수 있는 방법이 존재한다. 본 실험실에서 이 측정 방법을 적용하기에는 전기 차폐 (electrical shielding)가 좋고, 고주파 (200 MHz 정도)까지 적용할 수 있는 유연한 동축선(flexible coaxial wire (BNC)를 반드시 이용하여야 한다. (필요한 사람은 조교가 대여 가능)

² 구글에 LCR-meter 를 쳐보면, 이미 상용화된 제품중에, 'smart tweezer'라는 제품이 있어 tweezer 형태로 제작된 프로브를 통해 회로의 LCR 을 "Automatic Component Recognition"을 통해 측정해 낼 수 있다. 이 같은 상용도구를 참고하고 그 원리를 이해하면서 자신이 편하게 사용할 수 있는 LCR-meter 를 각자 나름대로 영리함과 유저 편리성을 가질 수 있는 버전으로 제작해 본다. 필요하다면, 회로에 circuit 을 달리 할 수 있는 reed relay 를 사용할 수 있다 하지만, 이들의 접촉 저항과 교류 특성을 알아서, 실험에 오히려 방해가 되지 않도록 주의해야 한다.

물리학자들이 흔히 사용하는 두가지 modulation 은 amplitude modulation (AM) 과 frequency modulation (FM)이다. 물론 수업시간에 배운 AM radio 는 amplitude modulation 을 대표적으로 설명한 예이다. 무엇보다 이러한 AM 신호를 만들어 내는 것을 생각해보자. 두가지 교류 신호를 add 하거나 곱하는 voltage adder 혹은 voltage multiplier 회로가 필요하다. 수 백 수십 MHz 신호와 그 크기를 20-20 KHz 주파수 대역으로 역시 modulation 하는 신호를 적절한 산수 계산을 해내는 회로가 필요할 것이다. (물론 측정의 원리는 충분히 이론 강의에서도 설명했고, 이 글의 lock-in amp 에서도 설명한 것 처럼, 특정 주파수로 진동하는 신호를 선별적으로 측정하거나 걸러내는 역할이 중요하다. 물론 수동 소자 회로로 이를 구현하는 간단한 회로를 이론 강의에서 배웠다.) 본 주제에서는 AM 신호를 만들어 내는 산수 계산이 가능한 (적어도 덧셈 혹은 곱셈 한가지) 회로를 구현해보자. 실제 고주파 신호를 생성하고 측정하는 것은 위에서 설명한 shielding wire 등의 한계로 AD2 로 구현은 어려울 수 있다. 다만 비슷한 주파수라도 AM 신호를 더하거나 곱하는 연산이 가능한 가장 간단한 형태의 회로를 구현해보자. (나중에 op amp 로 이를 쉽게 구현하게 되지만, 이는 차차 관심을 가지고 학기말까지 구현해 보면 되고, 여태 배운 수동 소자와 지식을 바탕으로 해도 충분하다.)

- (5) AC lock-in amplifier 는 결국 다소 어려운 주제이지만, 결국 학부과정에서 꼭 이해야 할 필수 실험 도구이며, 이를 응용한 측정 방법이 향후 물리 실험 전반에 사용되고 있음을 배우게 될 것이다. 우리는 AD2 와 software 의 조합으로 (LabView 와 Waveform) 이를 구현할 수 있으며, 그 예제 vi 를 업로드 하였다. 이를 이용해서 특정 주파수를 사용하는 교류 신호를 input voltage 로 사용하고 교류 특성을 알고자 하는 특정 수동 소자를 측정하면서 그 진폭과 위상을 측정할 수 있다. 이를 이용하면 (2)의 주제인 LCR meter 도 어느정도 구현 가능할 것으로 예상된다. 그렇다면, 우리가 실험모듈 1 에서 배운 저항 측정에는 이 lock-in amp 을 어떻게 활용할 수 있을까? 또, 어떤 점이 유리할 까? 우선 두가지 예를 들어보면, 아주 작은 저항을 가지는 DUT 시료의 측정에 유리하다. 또 differential conductance dI/dV 등을 측정하기에 용이하다. 이외에도 수없이 많은 응용예가 있지만, 우리는 인터넷에서 쉽게 구할 수 있는 두가지 실용예에 대한 참고문헌^{3,4}을 바탕으로 이제 AD2 로 구현된 작은 lock-in 을 이용해 다시 한번 작은 저항을 갖는 시료의 저항 측정을 해보자. 만일 더 도전적인 주제를 원한다면, nonlinear 한 I-V 특성을 가지 소자의 differential resistance 혹은 differential conductance 를 측정해볼 수 있다. 단 이 두가지 주제는 모두 electrical shielding 에 대한 경험이 있는 조교의 도움이 꼭 필요하다. 관련된 lock-in amp 에 대한 사전 공부도 필요하다.

- (6). 모듈 1 에서 dc Van der Pauw 방법으로 주어진 박막이나 2 차원 4 사각 모향 시료를 측정해 보았다. 이때, 어려운 점이 source/sink current 나 voltage 를 가하는 전선을 물리적으로 바꾸어주는 일이 어려웠으리라 여겨진다. 만일 두대의 lock-in amp 가 있다면, 이 두대의

³ "Precision electrical measurements.." Soyeun Park and Yong J. Lee, New Physics 65, 328 (2015); A basic lock-in amplifier experiment for the undergraduate laboratory, American Journal of Physics 71, 1208 (2003)

⁴ An improved method for differential conductance

조합으로 사실 선을 바꾸어 갈 필요가 없는 VDP 방법을 구현할 수 있다. 이는 서울대 박영우 교수님 연구실을 졸업한 김규태 박사 (지금은 고려대 전기과 교수님)가 Rev. of Sci. Instr. 에 1999 년도에 [출간한 내용](#)이다. 모듈 1 에서 사용했던 시료를 그대로 활용할 수 있다. 다만, 주의할 점, 어려운 점들이 많은 실험이다. 우선 교류 신호 2 개를 가지고 측정한다면 물론 2 대의 lock-in 이 필요하여 AD2 한대로 구현이 어렵다. 실험실의 상용 lock-in 의 도움을 얻어야 할 수 있으며, 실제 교류 신호를 잘 전달하기 위해서는 전기차폐가 잘되는 도선인 BNC 선을 사용해서 교류 신호의 +, - 가 섞이지 않도록 ground 로 shielding 을 잘 해야 하는 실험적인 도전이 있다. 그외에도 어려움이 있을 것으로 예상되니, 흥미가 있더라도 실험을 혼자가 아닌 타조와 결합해야 할 수도 있거나 실험실의 장비를 활용하거나 조교의 도움이 필요할 것이다. 참고 문헌은 업로드 될 것이다.

(7) 다이오드의 전형적인 C-V 곡선 측정

다이오드에 reverse-bias 를 가한 상태에서 pn-junction diode 의 capacitance 를 측정하자. 이에 관한 이론적 논의는 예년 박윤 교수님 실험 자료를 추가로 업로드 하겠다. 여기서의 실험 목적은 dc bias 를 diode 에 가한 상태에서 비선형 I-V 곡선을 보이는 DUT 를 분석하는 것이다. 전기공학에서는 이런 비선형 부품을 작은 신호 영역에서 선형적인 부품으로 근사하여 실험을 하게 된다.

7.1 우리는 따라서, pn junction-diode 에 reverse bias 로 걸었을 때의 작은 신호 영역에서의 거동을 측정하고자 한다. 여기서 생각보다 큰 dc reverse bias 가 AD2 의 한계 ($\pm 5V$) 치까지 걸릴 수 있으므로 주의를 요한다. 기본 개념은 아래 그림과 같이, 이 값을 wave form 에서 만든 ac voltage 와 dc voltage 를 결합하여 DUT 에 가하여 ac 반응을 측정하는 것이다. 여기서 주의할 점은 아래의 예시 회로와 달리, ac source 의 signal 에 capacitor 를 연결하여, function generator 에 dc 전류가 흐르지 않도록 하고, high resistance (혹은 large inductance)로 diode 에 bias 를 가해, ac 신호가 dc 소스 전원에 크게 영향 미치지 않도록 해주는 것이다. (AD2 input impedances 가 그다지 좋지 못함). [op-amp 를 이용하여 ac+dc adder 회로를 활용하거나, transistor 혹은 op-amp 를 활용하여 voltage follower 를 이용할 수도 있다. 예시 회로 업로드 예정].

7.2 다이오드 양단에 흐르는 작은 ac 전류 신호는 작은 저항을 직렬로 연결하여 측정할 수 있다. 저항 측정에서 처럼, 저항과 diode 양단의 전압강하를 two channel 을 통해 측정할 수 있다. 이때 다이오드에 흐르는 전류와 전압의 위상을 Lissajous 커브를 통해 측정할 수 있다.

