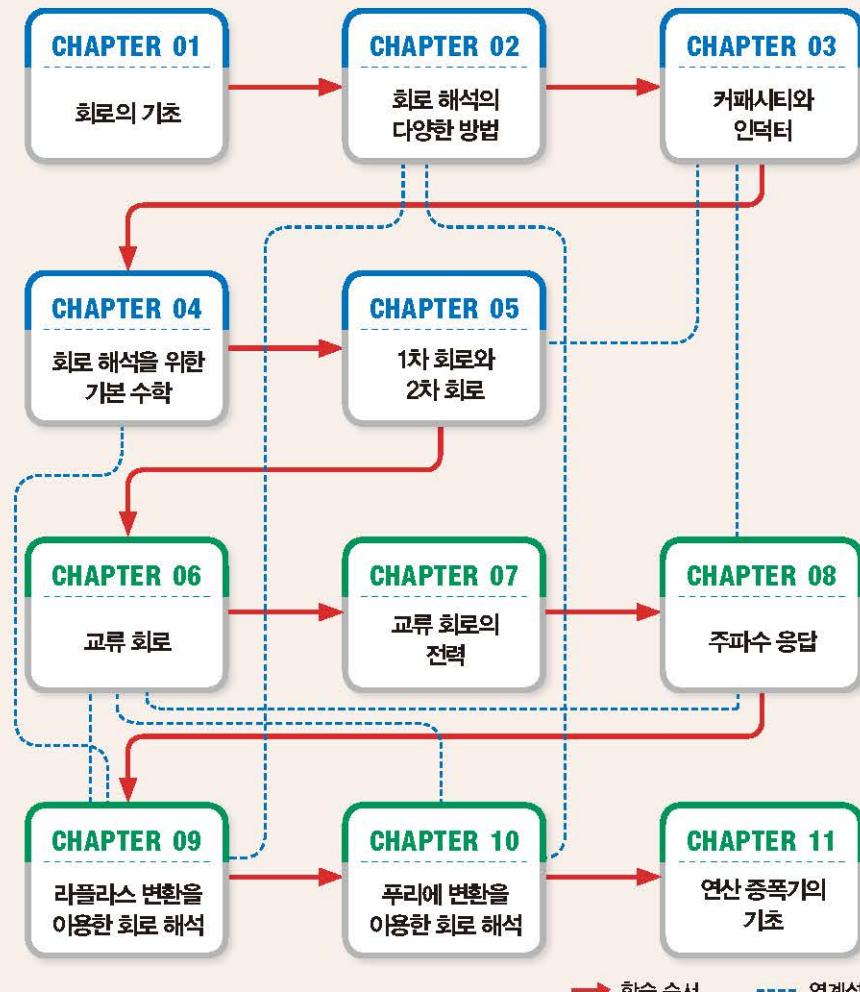


# 처음 만나는 회로이론

방성완 지음

● 학습 로드맵

이 책에서 다루는 내용이 무엇이고, 각 주제가 어떻게 연계되어 있는지 보여준다.

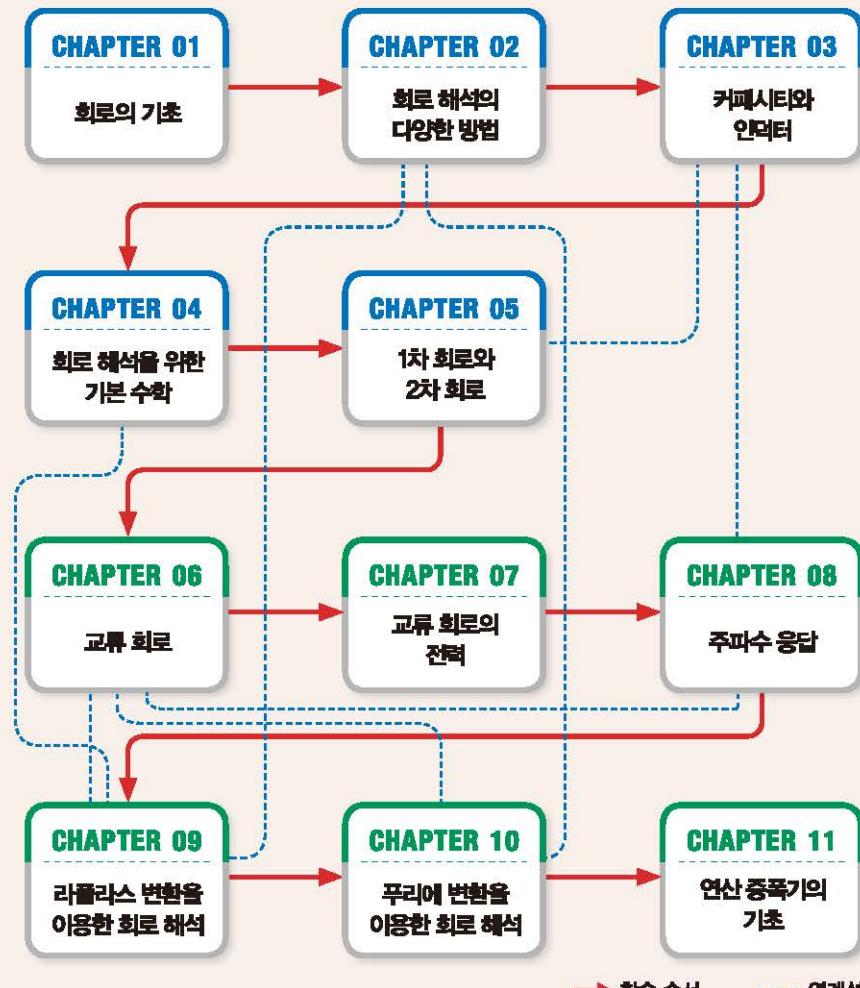


● 참고 문헌

- G. Rizzoni, "Principles and Applications of Electrical Engineering, 5th Ed.", McGraw-Hill, 2005.
- C. Alexander, M. Sadiku, "Fundamentals of Electrical Circuits, 5th Ed.", McGraw-Hill, 2007.
- C. Desoer, E. Kuh, "Basic Circuit Theory, 5th Ed.", McGraw-Hill, 1984.
- Dennis G. Zill, Warren S. Wright, "Advanced Engineering Mathematics, 4th Ed.", Jones & Bartlett Publishers, 2009.

● 학습 로드맵

이 책에서 다루는 내용이 무엇이고, 각 주제가 어떻게 연계되어 있는지 보여준다.



● 참고 문헌

- G. Rizzoni, "Principles and Applications of Electrical Engineering, 5th Ed.", McGraw-Hill, 2005.
- C. Alexander, M. Sadiku, "Fundamentals of Electrical Circuits, 5th Ed.", McGraw-Hill, 2007.
- C. Desoer, E. Kuh, "Basic Circuit Theory, 5th Ed.", McGraw-Hill, 1984.
- Dennis G. Zill, Warren S. Wright, "Advanced Engineering Mathematics, 4th Ed.", Jones & Bartlett Publishers, 2009.

지은이 소개	2
지은이 머리말	3
미리보기	4
학습 로드맵과 참고 문헌	6

CHAPTER  
01

## 회로의 기초

<b>SECTION 01</b> 회로 소자의 바른 이해	16
전하 : 회로의 출발점	16
전류 : 전하의 시간 여행	17
전압 : 전류의 동업자	18
저항 : 전류와 전압의 연결 다리	18
옴의 법칙 : 모르고 지나면 계속 후회하죠	20
전력과 에너지 : 비슷한 말 같지만 느낌이 다르죠	20
<b>SECTION 02</b> 회로 설계의 구성원	23
회로 설계의 기본 용어 : 기본 용어를 이해하면 회로 해석이 편해요!	23
회로의 측정 장치 : 정말로 간단하게 측정할 수 있어요	26
키르히호프의 전류 법칙 : 회로 해석에서 감초 역할을 하지요	30
키르히호프의 전압 법칙 : 이 법칙도 회로 해석에서 감초 역할을 하지요	32
<b>SECTION 03</b> 등가 저항과 개방/단락 회로	34
직렬 저항 : 계속 더하세요	34
병렬 저항 : 역수를 더하고 다시 역수를 취하세요	36
개방 회로 : 전류가 지나는 길이 끊어졌군요	39
단락 회로 : 전압이 존재감을 상실하네요	41
<b>연습문제</b>	43

CHAPTER  
02

## 회로 해석의 다양한 방법

<b>SECTION 01</b> 전압과 전류 분할 법칙	48
전압 분할 법칙 : 문자에 우리편 저항만 곱하세요	48
전류 분할 법칙 : 문자에 상대편 저항만 곱하세요	51

## Contents

<b>SECTION 02 핵심 회로 해석 방법</b>	54
접점 전압 방법 : 키르히호프의 전류 법칙 기억하시죠	54
그물망 전류 방법 : 키르히호프의 전압 법칙 기억하시죠	58
중첩 방법 : 해쳐 모여주세요	61
전류원과 전압원의 상호 변환 : 계속해서 서로를 바꿀 수 있군요	68
<b>SECTION 03 테브난과 노턴 등가 회로</b>	71
테브난 등가 회로 : 개방 회로 기억하시죠	71
노턴 등가 회로 : 단락 회로 아시죠	74
테브난과 노턴 등가 회로를 이용한 최대 전력 전달 : 많을수록 좋아요	78
<b>연습문제</b>	81

## CHAPTER 03

### 커판시터와 인덕터

<b>SECTION 01 커판시터란?</b>	86
수동 소자와 능동 소자 : 에너지 생성 여부로 판단하세요	86
커판시터 : 전하가 모여 들어요	87
<b>SECTION 02 커판시터의 연결</b>	91
직렬 커판시터 : 저항의 병렬 계산이군요	91
병렬 커판시터 : 저항의 직렬 계산이군요	92
커판시터 읽는 법 : 종류별로 다양하군요	94
<b>SECTION 03 인덕터란?</b>	95
인덕터 : 자기장에 에너지를 저장합니다	95
<b>SECTION 04 인덕터의 연결</b>	98
직렬 인덕터 : 저항의 직렬 계산이군요	98
병렬 인덕터 : 저항의 병렬 계산이군요	99
인덕터 읽는 법 : 저항 읽는 법 아시죠	101
<b>연습문제</b>	103

CHAPTER  
04

## 회로 해석을 위한 기본 수학

<b>SECTION 01</b>	<b>선형방정식</b>	108
선형방정식 :	일차방정식 말하는 것 아시죠	108
선형방정식의 수학적 풀이 :	알고 있는 방법이 있으면 활용하세요	108
역행렬을 이용한 선형방정식 풀이 :	복잡하게 보이세요? 아닙니다	109
크래머 법칙을 이용한 선형방정식 풀이 :	상당히 스마트한 체계이지요	113
<b>SECTION 02</b>	<b>미분방정식</b>	116
미분방정식 :	줄여 나가세요	116
1차 미분방정식의 풀이 :	1차 회로의 풀이는 이것으로 O.K.	117
2차 미분방정식의 풀이 :	복잡한 회로를 해석할 수 있어요	122
<b>SECTION 03</b>	<b>복소수</b>	127
복소수 :	시간 영역과 주파수 영역의 툴케이트	127
오일러 공식 :	지수함수와 삼각함수의 만남	133
<b>SECTION 04</b>	<b>라플라스 변환</b>	135
라플라스 변환 :	변수 $t$ 보다 변수 $s$ 가 좋아요	135
라플라스 역변환 :	변덕스럽지만 변수 $t$ 가 그리워요	139
<b>연습문제</b>		144

CHAPTER  
05

## 1차 회로와 2차 회로

<b>SECTION 01</b>	<b>1차 회로</b>	148
RC 회로 :	저항과 커패시터만 보이네요	148
RL 회로 :	저항이 인덕터와 새로운 만남을 하는군요	152
<b>SECTION 02</b>	<b>2차 회로</b>	156
병렬 RLC 회로 :	평행으로 만나는데 2차 회로가 되네요	156
직렬 RLC 회로 :	무심히 하나씩 따라가니 2차 회로가 되네요	163
RC- $\pi$ 회로 :	1차 RC 회로와 근본이 다르죠	168
RL-T 회로 :	이것 역시 1차 RL 회로와 근본이 다르죠	173
<b>연습문제</b>		179

### CHAPTER 06

#### 교류 회로

<b>SECTION 01</b>	<b>정현파 신호</b>	184
정현파 신호 : 사인파 혹은 코사인파	184	
제곱평균제곱근(ms) : 복잡 미묘하지 않은 평범한 수식이지요	187	
<b>SECTION 02</b>	<b>교류 해석을 위한 푸리에 정리</b>	189
푸리에 정리 : 주기 함수이면 정현파 함수와 늘 함께하지요	189	
삼각 푸리에 급수 : 삼각함수와 푸리에 급수가 만날 수 있군요	189	
<b>SECTION 03</b>	<b>위상벡터</b>	193
오일러 공식을 이용한 정현파 : 복소수와 삼각함수 사이의 벽을 낮추네요	193	
회로 소자의 위상벡터 : 소자도 주파수 영역으로 이사갑니다	197	
<b>SECTION 04</b>	<b>수동 소자의 임피던스</b>	200
저항, 커파시터, 인덕터의 임피던스 : 실수부와 허수부 기억하시죠	200	
회로의 등가 임피던스 계산 : 등가 저항 계산 아직 기억하죠?	201	
저항, 커파시터, 인덕터의 어드미던스 : 역수만 생각하세요	204	
회로의 등가 어드미던스 계산 : 임피던스의 역수만 생각하세요	205	
<b>SECTION 05</b>	<b>교류 회로의 분석</b>	207
교류 회로의 분석 과정 : 잠시 임피던스, 위상벡터를 사용합니다	207	
<b>연습문제</b>		212

### CHAPTER 07

#### 교류 회로의 전력

<b>SECTION 01</b>	<b>교류 회로의 전력</b>	216
교류 회로에서 전력이란? : 다양하게 표현하네요	216	
순간 전력 : 빠른 측정이 필요하군요	217	
평균 전력 : 순간 전력보다 천천히 계산하세요	219	
최대 평균 전력 전달 : 테브난 등가 저항 기억하죠?	223	
실효값 전력 : 실제 전력을 측정할 때 사용하지요	227	
피상 전력과 역률 : 완벽 추구를 위해 실효값만 고려하는군요	230	
복소 전력 : 전력 해석의 집대성이죠	233	
역률 개선 : 삼각함수의 기본만 알면 끝!	237	

<b>SECTION 02 3상 전력</b>	242
3상 회로 : 공급원이 세 개 보이네요	242
<b>SECTION 03 평형 3상 시스템</b>	245
평형 3상 시스템의 유형 : Y와 Δ를 번갈아 조합하세요	245
평형 3상 Y-Y 시스템 : 두 개의 Y가 거꾸로 보이네요	246
평형 3상 Y-Δ 시스템 : 전압원은 Y가 거꾸로, 부하는 Δ로 보이죠	249
평형 3상 시스템의 전력 : 단상 시스템의 전력과 비슷한군요	252
<b>연습문제</b>	255

**CHAPTER  
08**

## 주파수 응답

<b>SECTION 01 주파수 함수의 활용</b>	260
주파수 응답 : 입력하면 출력으로 보여주네요	260
<b>SECTION 02 전달함수</b>	264
전달함수 : 주파수 응답을 도와줘요	264
<b>SECTION 03 공진 주파수</b>	267
공진 주파수 : 인덕터와 커패시터의 상호 관계	267
직렬 공진 회로의 공진 주파수 : 임피던스의 헤수가 0이네요	268
병렬 공진 회로의 공진 주파수 : 어드미턴스의 헤수가 0이네요	271
<b>SECTION 04 주파수 범위로 분류하는 다양한 필터</b>	275
필터 : 필요 없는 것은 제거하세요	275
저역통과 필터 : 높은 주파수는 사절합니다	275
고역통과 필터 : 낮은 주파수는 사절합니다	278
대역통과 필터 : 내부만 취급해요	280
대역저지 필터 : 외부만 취급해요	283
<b>SECTION 05 시각적인 주파수 응답 해석 방법</b>	286
전달함수의 영점과 극점 : 분자와 분모의 근이지요	286
보드 선도 : 세미로그 들어보셨나요?	287
<b>연습문제</b>	297

### CHAPTER 09

#### 리플라스 변환을 이용한 회로 해석

<b>SECTION 01</b>	<b>리플라스 변환의 기본 특성</b>	302
단위 계단 함수 : 한 계단 한 계단 의미가 있군요	302	
유용한 리플라스 변환의 특성 : 필요하면 마음대로 사용하세요	306	
<b>SECTION 02</b>	<b>리플라스 영역의 회로 소자 및 전달함수</b>	314
리플라스 영역의 회로 소자 : 모두 $s$ 를 사용하네요	314	
리플라스 변환의 전달함수 : 주파수 응답을 도와주네요	319	
<b>SECTION 03</b>	<b>리플라스 영역의 회로 해석</b>	322
리플라스 변환과 역변환을 이용한 회로 해석 : 쉬운 것 먼저!	322	
<b>연습문제</b>		327

### CHAPTER 10

#### 푸리에 변환을 이용한 회로 해석

<b>SECTION 01</b>	<b>푸리에 변환</b>	332
푸리에 변환 : 라플라스 변환보다 시간 영역이 넓군요	332	
<b>SECTION 02</b>	<b>푸리에 변환의 기본 특성</b>	335
유용한 푸리에 변환의 특성 : 필요하면 마음대로 사용하세요	335	
<b>SECTION 03</b>	<b>푸리에 변환의 회로 소자 및 전달함수</b>	344
푸리에 변환의 회로 소자 : 주파수 영역과 동일하군요	344	
푸리에 변환의 전달함수 : 역시 주파수 응답을 도와주네요	344	
<b>SECTION 04</b>	<b>푸리에 변환의 회로 해석</b>	348
푸리에 변환을 이용한 회로 해석 : 상황에 맞춰 사용하세요	348	
<b>연습문제</b>		353

**CHAPTER  
11****연산 증폭기의 기초**

<b>SECTION 01</b>	<b>연산 증폭기란?</b>	358
연산 증폭기 :	회로에서 다양한 역할을 하지요	358
비이상 연산 증폭기 :	이상 연산 증폭기보다 복잡하군요	359
이상 연산 증폭기 :	보다 쉽게 연산 증폭기를 설명하네요	363
<b>SECTION 02</b>	<b>다양한 연산 증폭기</b>	365
반전 증폭기 :	전압 이득은 음의 값을 보이네요	365
적분기 :	적분 기능이 있군요	367
미분기 :	미분 기능이 있군요	368
비반전 증폭기 :	반전 증폭기와 기능이 반대네요	369
가산 증폭기 :	덧셈 기능이 있군요	372
차동 증폭기 :	뺄셈 기능이 있군요	374
<b>연습문제</b>		377
<b>찾아보기</b>		381



---

# CHAPTER 01

---

## 회로의 기초

이 장에서는 회로의 기초 개념을 이해하고, 회로 해석을 위한 기본 및 응용 능력을 배양하는 것을 목표로 한다. 단순하게 구성된 회로뿐만 아니라 복잡하게 구성된 회로도 좀 더 쉽고 정확하게 해석하기 위해서는 회로의 기초에 대한 선행 학습이 반드시 필요하다. 따라서 이 장에서는 회로에 자주 등장하는 전류, 전압, 저항 등의 기초 개념을 학습하고, 이들의 상호 연관성을 살펴본다. 또한 회로 설계를 이해하는 그 밖의 다양한 개념에 대해 살펴본다.

---

### CONTENTS

- SECTION 01** 회로 소자의 바른 이해
- SECTION 02** 회로 설계의 구성원
- SECTION 03** 등가 저항과 개방/단락 회로
- 연습문제**

# 회로 소자의 바른 이해

회로에서 중요한 개념인 전하, 전류, 전압, 저항에 대해 살펴보고, 이들의 연관성을 음의 법칙을 통해 알아본다. 또한 전력과 에너지에 대한 개념을 살펴본다.

**Keywords** | 전하 | 전류 | 전압 | 저항 | 음의 법칙 | 전력 | 에너지 |

## 전하 : 회로의 출발점

전하(charge)는 실제 존재하는 것이 아니라 인위적으로 만들어낸 개념으로, 가장 기본적인 전기량을 나타낸다. 즉, 전하는 정전기, 전류 등 모든 전기적 현상의 출발점이다.<sup>1</sup>

전하량 보존 법칙은 전하는 새로 생성되거나 소멸되지 않고 단지 위치를 이동한다는 법칙이다. 전하량 보존 법칙에 의하면 한 물체가 양의 성질을 띠면 다른 물체는 반드시 음의 성질을 가지므로 동일한 부호의 전하 사이에는 서로 밀어내는 힘이 작용하고, 반면에 다른 부호의 전하 사이에는 서로 잡아당기는 힘이 작용한다. 그러므로 정해진 회로에서 전하의 총합은 변하지 않는다.

전하는  $q$  혹은  $Q$ 로 표기하고, 단위는 쿠лон(coulomb, [C])을 사용한다. 전하는 전자에 의해 옮겨지는 음전하(electron)와 양성자에 의해 옮겨지는 양전하(proton)로 구별된다. 이때 음전하는 중성자가 전자를 추가로 얻을 때 띠는 성질을, 양전하는 중성자가 전자를 잃을 때 띠는 성질을 가진다.

### 음전하의 단위는

$$q_e = -1.602 \times 10^{-19} [\text{C}]$$

이고, 양전하의 단위는 다음과 같다.

$$q_p = +1.602 \times 10^{-19} [\text{C}]$$

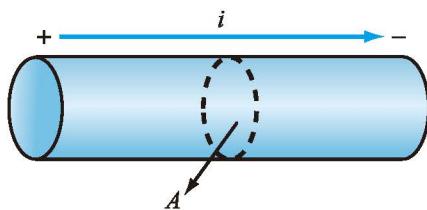
<sup>1</sup> 휴대전화의 배터리가 소모되면 전력을 공급을 위해 다시 충전을 해야 한다. 이때 ‘충전’을 영어로 ‘battery charge’라고 하는데, 그 이유는 전하가 모두 소모되면 배터리가 더 이상 전력을 공급할 수 없어 다시 배터리가 전력을 공급할 수 있도록 비어 있는 배터리에 전하를 채우기 때문이다.

**Q** 1콜롱을 구성하기 위해 필요한 전하의 개수는 몇 개인가?

- A** 전하의 값  $1.602 \times 10^{-19}$  에 대한 역수를 계산하면 1콜롱은 대략  $6.242 \times 10^{18}$  개의 전하로 구성된다. 이처럼 하나의 전자가 갖는 전하량은 너무 작기 때문에 실제 전하량을 측정하는 국제 단위계(International System of Units, SI)인 콜롱은  $6.242 \times 10^{18}$  개의 전자가 한꺼번에 운반하는 전하량을 나타낸다.

**전류 : 전하의 시간 여행**

전류(current)는 [그림 1-1]과 같이 원통 모양인 도체(전선)의 단면적(cross-sectional area)  $A$  를 얼마나 많은 전하가 통과하는지를 시간의 변화에 따른 비율로 나타낸다.



[그림 1-1] 전류의 생성

전류는  $i$  혹은  $I$  로 표기하고 단위는 암페어(ampere, [A])를 사용하며, 다음과 같이 단위 시간당 흐르는 단위 전하의 양으로 나타낸다. 즉, 1[A]는 1[C/sec]와 동일하다.

$$i = \frac{dq}{dt} [\text{A}] \quad (1.1)$$

전류는 전하의 흐름을 말한다. 전류의 진행 방향은 전하가 높은 값에서 낮은 값으로 흐르는, 즉 양에서 음으로 가는 방향을 의미한다. 전압(다음에 설명 예정)의 관점에서 표현하면, 도체 양끝에 전위차(전압)가 있으면 전하가 흐르고 전위차가 없으면 전하가 흐르지 않는다. 자연의 법칙에 의하면 물은 높은 위치에서 낮은 위치로 흐르는데, 이때 물과 물의 위치를 전하와 전위차로 대체 설명 할 수 있다.<sup>2</sup>

**2** 대부분의 금속처럼 전하가 잘 이동해서 전기 저항이 작은 물질을 도체라 하고, 전하가 잘 이동하지 않는 물질은 부도체라 한다. 반도체는 도체와 부도체 중간에 위치하는 물질을 말한다. 이때 반도체는 불순물 첨가 여부에 따라서 부도체와 도체의 성질을 띠게 된다.

**Q** 전하의 개념으로 1암페어를 설명하라.

**A** 1암페어는 1초 동안에 전하  $6.242 \times 10^{18}$  개가 흐르는 양을 나타낸다.

### 전압 : 전류의 동업자

전압(voltage)은 두 지점 사이의 전위차에 대한 상대적인 물리량으로, 전류를 흐르게 하는 힘이다. 전압은 정해진 양쪽 지점 사이에서 전하의 흐름, 즉 단위 전하당 이루어지는 전체 일한 양(혹은 에너지)을 나타낸다.

전압은  $v$  혹은  $V$ 로 표기하고 단위는 볼트(volt, [V])를 사용하며, 다음과 같이 에너지  $W$  와 전하  $q$  의 관계식으로 나타낸다. 즉,  $1[V]$ 는  $1[joule/coulomb]$ 과 동일하다.

$$v = \frac{dW}{dq} [\text{V}] \quad (1.2)$$

전압이 높으면 흐르는 전기의 힘도 강해진다. 예를 들어, 같은 양의 물 한 통을 1층 높이에서 땅에 부울 때보다 10층 높이에서 땅에 부울 때 충격이 더 큰 것과 동일한 개념이다.

### ■ 전류-전압 특성

전압과 전류의 함수적인 관계에서 어느 한쪽의 값을 알면, 전류-전압( $I-V$ ) 특성 그래프에 의해서 나머지 한쪽의 값은 자연스럽게 결정된다. 회로 소자에 대한  $I-V$  특성 그래프의 가장 간단한 형태는 다음과 같은 일차 직선식  $y = ax$  형태로 표시한다.

$$V = kI \quad (\text{혹은 } I = k'V) \quad (1.3)$$

전압  $V$  는 독립 변수인 입력 전류  $I$ 에 의존하는 출력 변수를 나타내고, 상수  $k$ 는 일차 직선식의 기울기를 나타낸다. 여기서  $k'$ 은  $k$ 의 역수를 나타낸다.

### 저항 : 전류와 전압의 연결 다리

저항(resistance)은 전압과 전류에 의해 결정되는 특정한 크기로, 식 (1.4)와 같이 전압과는 비례하고 전류와는 반비례 관계를 갖는다. 예를 들어, 전류가 전압에 비해서 상대적으로 아주 작은 값이

면 저항의 값은 굉장히 커진다. 그러므로 저항이 크면 클수록 전류의 흐름은 더욱 방해를 받는다.

$$R = \frac{V}{I} \quad (1.4)$$

저항은  $R$ 로 표기하고 단위는 옴(ohm,  $[\Omega]$ )을 사용하면, 1옴은 다음과 같이 나타낸다.<sup>3</sup>

$$1[\Omega] = \frac{1[V]}{1[A]}$$

전도도(conductance)는 저항의 역수 개념으로 정의할 수 있는데, 저항과 달리 얼마나 전류를 손실 없이 많이 보낼 수 있는지를 나타낸다. 전도도는  $G$ 로 표기하고 단위는 지멘스(siemens,  $[S]$ )를 사용한다. 저항과 전도도의 관계는  $G = \frac{1}{R}$  이므로 식 (1.4)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$G = \frac{I}{V} \quad (1.5)$$

### 예제 1-1

[그림 1-2]에서 저항과 전도도를 구하라. 단, 저항  $R$ 에 흐르는 전압은  $v = 2 [V]$ 이다.



[그림 1-2] [예제 1-1]의 회로

### 풀이

저항  $R$ 에 흐르는 전류  $i$ 는 전류원에서 공급하는 전류와 같은  $1 [mA]$ 가 된다. 식 (1.4)를 이용하여 저항을 구하면 다음과 같다.

$$R = \frac{v}{i} = \frac{2}{10^{-3}} = 2 [k\Omega]$$

전도도는 식 (1.5)에 의해서 저항의 역수가 되므로 다음과 같다.

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{2 \times 10^3} = 0.5 [mS]$$

<sup>3</sup> 저항의 영향으로 도체에 실제 전류가 흐르면 에너지가 열로 바뀐다.

## 옴의 법칙 : 모르고 지나면 계속 후회하죠

옴의 법칙(ohm's law)은 전류의 세기는 두 점 사이의 전위차에 비례하고 저항에 반비례한다는 법칙으로, 식 (1.4)를 이용하여 다음과 같이 나타낸다.

### ★ 옴의 법칙 ★

$$V = IR \quad (1.6)$$

전압이 회로상의 어떤 소자(element)를 가로지르면서 흐르면, 전류는 전압에 직접적으로 비례하면서 변한다. 이때 저항은 전류의 양을 조절한다. 다시 말해, 전압값의 변화는 저항의 크기 변화에 의해 결정된다.

### 예제 1-2

옴의 법칙을 이용하여 [그림 1-3]의 저항  $R$ 에 흐르는 전류  $i$ 를 구하라.



[그림 1-3] [예제 1-2]의 회로

### 풀이

저항  $1 [k\Omega]$ 에 흐르는 전압  $v$ 는 전압원에서 공급하는 전압과 같은  $2 [V]$ 가 된다. 식 (1.6)을 이용하면 구하고자 하는 전류는 다음과 같다.

$$i = \frac{v}{R} = \frac{2}{10^3} = 2 [\text{mA}]$$

## 전력과 에너지 : 비슷한 말 같지만 느낌이 다르죠

전력(power)은 단위 시간당 이루어진 일의 양으로, 전류와 전압을 이용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = VI \quad (1.7)$$

전력은  $P$ 로 표기하고 단위는 와트(watt, [W])를 사용한다. 1와트는 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{[\text{joule}]}{[\text{coulomb}]} / \frac{[\text{coulomb}]}{[\text{sec}]} = [\text{joule/sec}] \text{ 혹은 } [\text{watt}]$$

음의 법칙을 이용하여 전류와 저항 혹은 전압과 저항에 대해 전력을 나타내면 다음과 같다.

### ★ 전력 계산 ★

$$P = VI = I^2 R = \frac{V^2}{R} [\text{W}] \quad (1.8)$$

식 (1.8)에서 전력은 전류가 일정할 때는 저항에 비례하고, 전압이 일정할 때는 저항에 반비례함을 알 수 있다. 만일 저항 대신에 전도도를 이용하면 식 (1.8)은 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$P = V^2 G = \frac{I^2}{G} [\text{W}] \quad (1.9)$$

에너지(energy)는 일정 시간 동안 일을 할 수 있는 용량을 말한다. 에너지는  $W$ 로 표기하고 단위는 주울(joule, [J])을 사용한다. 에너지는 전력을 시간에 대해 적분하면 구할 수 있으므로 시간  $t_1$ 에서 시간  $t_2$  사이에 회로 소자에 의해서 소모되거나 공급되는 에너지는 다음과 같다.

### ★ 에너지 계산 ★

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P dt = \int_{t_1}^{t_2} (VI) dt \quad (1.10)$$

전력은 전압처럼 양과 음의 극을 가지며, 에너지이므로 소모되거나 혹은 공급되는 성질을 갖는다. 만일 전류가 높은 전압에서 낮은 전압으로 흐르면, 이때는 전력이 소모되는 경우로 부호는 양으로 표시된다. 반대로 전류가 낮은 전압에서 높은 전압으로 흐르면 전력이 공급되는 경우로 부호는 음으로 표시된다. 쉽게 말해, 낮은 곳에서 높은 곳으로 걸어가려면 평지와는 다르게 더 많은 운동량을 제공받아야 한다. 한마디로 힘이 듈다.

그러므로 소모된 전력(dissipated power)과 공급된 전력(supplied power)의 관계는 다음과 같다.

$$\text{소모된 전력} = -\text{공급된 전력}$$

즉, 회로에서 에너지 보존 법칙에 의해서 순간 시간에서 전력의 총합은 0이 된다.

## Q 전력의 부호는 어떻게 결정하는가?

- A 전력의 부호를 쉽게 결정하는 방법은 단일 전압 공급의 방향이 전류와 동일하면 양의 부호, 반대인 경우는 음의 부호로 정하는 것이다.

### 예제 1-3

[그림 1-4]에서 회로 소자  $E_1$ 과  $E_2$  중 전력을 공급하는 소자와 소모하는 소자가 어느 것인지 각각 구하고, 소모된 전력 혹은 생성된 전력의 값을 구하라.

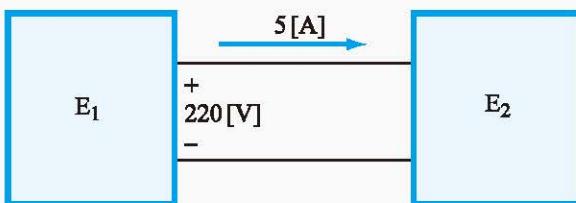


그림 1-4) [예제 1-3]의 회로

#### 풀이

회로 소자  $E_1$ 에서 전압원의 방향이 전류와 반대이다. 그러므로 전력은 음의 부호를 가지며, 다음과 같이 구한다.

$$P = -VI = -(220[V])(5[A]) = -1100[W]$$

전류가 높은 전위에서 낮은 전위로 흐르고 있기 때문에 회로 소자  $E_1$ 은 공급원으로서 전력을 공급하고, 반면에 회로 소자  $E_2$ 는 부하로서 같은 전력 1100[W]를 소모한다(흡수한다).

# 회로 설계의 구성원

회로를 설계하는 데 자주 사용하는 기본 용어를 살펴보고 회로 측정 장비를 알아본다. 또한 회로를 해석할 때 가장 기본으로 사용하는 키르히호프의 법칙을 학습한다.

**Keywords** | 단자 | 분기 | 접점 | 루프 | 그물망 | 저항계 | 전류계 | 전압계 | 전류원 | 전압원 |

## 회로 설계의 기본 용어 : 기본 용어를 이해하면 회로 해석이 편해요!

회로 설계는 기본적으로 음의 법칙에서 보여주는 저항, 전압, 전류를 가지고 구성한다. 여기에서는 회로 설계에 사용하는 기본 용어를 살펴보자.

### ■ 단자

단자(terminal)는 회로 내에서 발생한 전력을 외부로 보내거나, 반대로 회로 외부의 전력을 회로 내로 공급하기 위한 전류 흐름의 출입구 역할을 한다.<sup>4</sup>

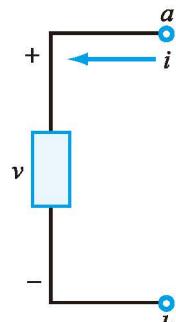
### ■ 분기

분기(branch)는 [그림 1-5]와 같이 두 개의 단자  $a$  와  $b$  사이에 연결되어 있는 부분을 말한다.

일반적으로  $a$  와  $b$  사이의 전위차를 나타내는 분기 전압  $v$  는 임의의 시간  $t$  에 대해 양의 값을 갖는다( $v(t) > 0$ ). 일정 시간  $t$  에 대해  $a$  의 전위(+가 연결)는  $b$  의 전위(-가 연결)보다 큰 값을 갖는다. 분기 전압  $v_{ab}$  는 두 전위  $v_a$  와  $v_b$  의 차이가 되고, 다음과 같이 나타낸다.

$$v_{ab}(t) = v_a(t) - v_b(t) \quad (1.11)$$

이때  $v_{ab}$  는 아래 첨자의 순서대로, 식 (1.11)의 우변 항과 같이  $v_a$  에서  $v_b$  를 빼는 형태로 지정하고  $v_{ab} > 0$  을 의미한다. 그러면  $v_{ba}$  는  $v_b - v_a$  로 표시 할 수 있고  $v_{ab} = -v_{ba}$  로 나타낼 수 있다. 반대로  $a$  의 전위(-가 연결)가  $b$  의 전위(+가 연결)보다 작은 값을 갖는 경우는  $v_{ab} < 0$  이 된다.



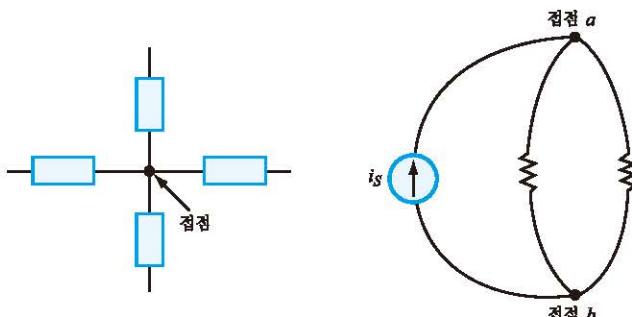
[그림 1-5] 분기

<sup>4</sup> 일반 가정용 건전지의 경우 + 극성과 - 극성을 갖는 양쪽 부분이 단자이며, 이것을 포트(port)라고 한다.

[그림 1-5]에서 단자  $a$ 와  $b$  사이에 흐르는 분기 전류  $i$ 도 임의의 시간  $t$ 에 대해 양의 값을 갖는다 ( $i(t) > 0$ ). 블록은 저항과 이후에 배울 전류원, 전압원과 같은 전기 소자들을 나타낸다.

### ■ 접점

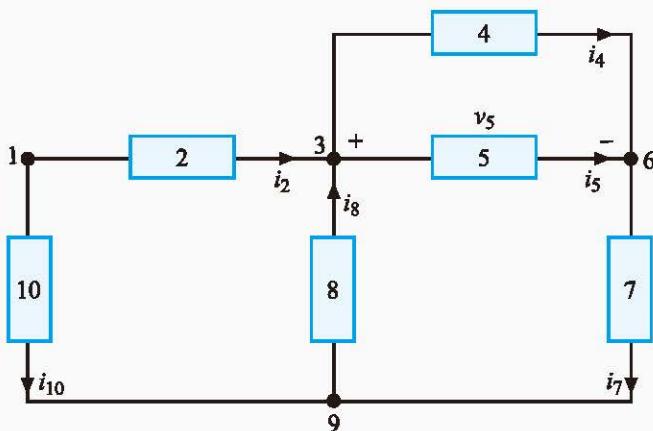
접점(node)은 [그림 1-6]처럼 두 개 혹은 그 이상 분기들이 만나는 공통 지점을 말한다. 실제 접점에서는 대부분 금속선이 서로 연결되어 있기 때문에 저항값이 완전히 0이 아닌 작은 값을 갖는다.



[그림 1-6] 접점

### 예제 1-4

[그림 1-7]에서 분기와 접점을 모두 찾으라.



[그림 1-7] [예제 1-4]의 분기와 접점 구성

### 풀이

번호 2, 4, 5, 7, 8, 10은 각각 분기를 나타내고, 번호 1, 3, 6, 9는 각각 접점을 나타낸다. 참고로, 전압  $v_5$ 와 전류  $i_5$ 는 단자 3과 단자 6 사이에 흐르는 분기 전압과 분기 전류를 나타낸다.

## ■ 루프(폐회로)

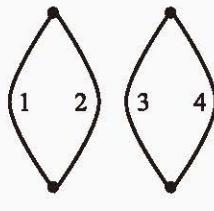
루프(loop)는 분기의 연결이 닫혀 있는 것을 말한다. 루프가 되기 위해서는 다음 두 조건을 동시에 만족해야 한다.

- ① 전체 그래프를 구성하는 부분 그래프가 서로 연결되어야 한다.
- ② 부분 그래프의 두 분기들이 정확하게 각 접점을 한 번만 통과해야 한다.

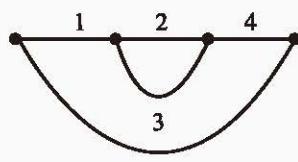
즉, 중복되지 않는 접점으로 구성되는 경로 중에서 시작 접점과 끝나는 접점은 서로 같아야 한다.

### 예제 1-5

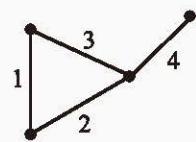
[그림 1-8]의 도형 중에서 루프를 찾고, 루프가 아닌 경우에는 그 이유를 간략히 설명하라.



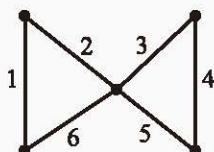
(a)



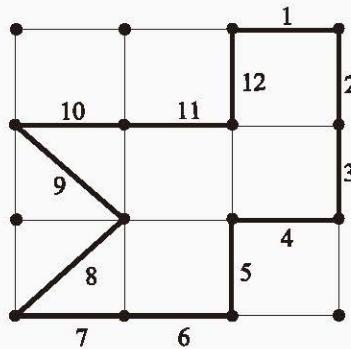
(b)



(c)



(d)



(e)

[그림 1-8] [예제 1-5]의 다양한 도형

### 풀이

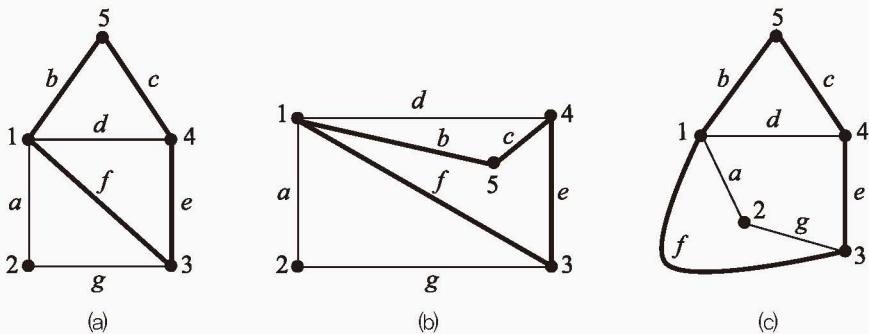
[그림 1-8]에서 (e)만 루프의 조건을 모두 만족한다. (a)는 루프의 조건 ①에 위반되고 (b), (c), (d)는 조건 ②에 위반되어 루프가 될 수 없다.

## ■ 그물망

그물망(mesh)은 루프의 특수한 형태로, 하나의 루프가 다른 루프를 포함하지 않는 닫힌 회로를 말한다.

### 예제 1-6

[그림 1-9]의 도형 중에서 그물망을 찾고, 그물망이 아닌 경우에는 그 이유를 간략히 설명하라.



[그림 1-9] [예제 1-6]의 다양한 도형

## 풀이

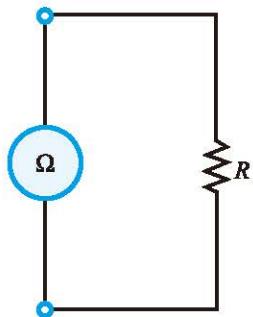
[그림 1-9]에서 (b)만 기준 그물망의 형태를 유지한다. (a)는 내부에 루프  $def$  를 포함하므로 그물 망이 아니다. (c)는 그물망의 바깥쪽에 분기를 포함하지 않는 특별한 그물망으로, 그래프의 외부 그 물망이라 한다.

### 회로의 측정 장치 : 정말로 간단하게 측정할 수 있어요

회로를 구성하는 요소인 저항, 전류, 전압을 측정하는 장치를 살펴보자.

## ■ 저항계의 사용 방법

[그림 1-10]은 회로 소자들 사이에 있는 저항을 측정하는 저항계(ohmmeter)의 기본 구성을 보여준다.

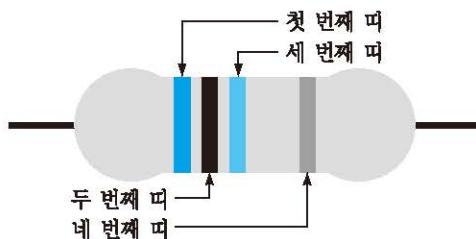


[그림 1-10] 저항계의 기본 구성

저항계는 저항 한 가지만 측정하기 위한 장치로서, 저항계의 눈금은 옴 단위로 되어 있다. 저항계에는 저항에 흐르는 전류를 이용하여 측정하는 방식과 저항에 가해지는 전압과 전류의 비를 이용하는 방식이 있다. 직접 저항계의 바늘이 가리키는 눈금을 읽어서 미지 저항의 값을 알 수 있다.

한편, 저항계를 이용하지 않고 저항의 값을 찾을 수도 있다. 실제 저항에는 [그림 1-11]과 같이 네 개의 색 띠가 있는데, 왼쪽부터 오른쪽으로 차례로 색 띠를 숫자로 변환시켜서 저항값을 찾을 수 있다. 각 띠들은 다음을 나타낸다.

- 첫 번째 띠 : 두 자리 저항값의 십의 자리
- 두 번째 띠 : 두 자리 저항값의 일의 자리
- 세 번째 띠 : 저항값의 단위를 10의 지수승으로 표시
- 네 번째 띠 : 저항의 오차 범위



[그림 1-11] 저항의 색 코드

각 색에 따른 숫자는 [표 1-1]을 이용해서 읽을 수 있다.

[표 1-1] 숫자로 변환한 저항의 색 코드

띠 색	첫 번째/두 번째 띠	세 번째 띠(단위)	네 번째 띠(오차)
검정	0	$\times 10^0$	$\pm 1\%$
갈색	1	$\times 10^1$	$\pm 2\%$
빨강	2	$\times 10^2$	—
주황	3	$\times 10^3$	—
노랑	4	$\times 10^4$	—
초록	5	$\times 10^5$	$\pm 0.5\%$
파랑	6	$\times 10^6$	$\pm 0.25\%$
보라	7	$\times 10^7$	$\pm 0.1\%$
회색	8	$\times 10^8$	$\pm 0.05\%$
흰색	9	$\times 10^9$	—
금색	—	$\times 10^{-1}$	$\pm 5\%$
은색	—	$\times 10^{-2}$	$\pm 10\%$

### 예제 1-7

저항의 띠 색이 다음과 같을 때 [표 1-1]을 이용하여 저항값을 구하라. 단, 네 번째 띠 색은 고려하지 않는다.

첫 번째 띠 : 갈색, 두 번째 띠 : 검정, 세 번째 띠 : 빨강

#### 풀이

갈색은 10을 나타내고, 검정은 0을 나타내므로 두 자리 저항값은  $10\Omega$  된다. 여기에 빨강이 나타내는  $10^2$  을 곱하면  $1000\Omega$  된다. 따라서 구하고자 하는 저항값은  $1[k\Omega]$  이 된다.

### 예제 1-8

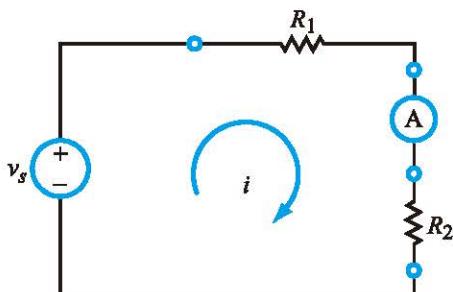
저항  $330[\Omega]$  을 띠 색으로 나타내라. 단, 저항의 오차를 고려하지 않는다.

#### 풀이

$330 = (30+3) \times 10^1$  으로 표시가 가능하기 때문에, 첫 번째와 두 번째 띠가 주황이고 세 번째 띠가 갈색이면  $330[\Omega]$  이 된다.

## ■ 직류 및 교류 측정에 사용하는 전류계

[그림 1-12]는 직렬(나중에 설명할 예정)로 연결되어 있는 회로 소자 사이에 흐르는 직류 전류 또는 교류 전류를 측정하는 전류계(ammeter)의 기본 구성을 보여준다. 전류계의 바늘이 가리키는 눈금을 읽어서 전류의 세기를 측정한다.

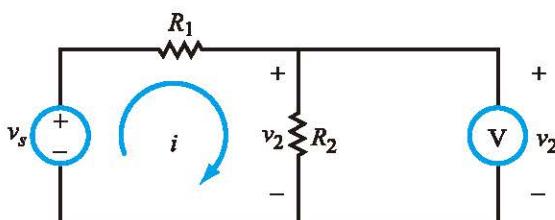


[그림 1-12] 전류계의 기본 구성

전류계를 사용할 때는 전류계를 회로에 직렬로 연결해야 하며, 전류계의 극이 바뀌면 눈금의 지침도 반대로 움직이므로 극이 바뀌지 않도록 주의해야 한다. 디지털 전류계는 내부에 설치된 표준 저항기에 전류를 흘린 후 전압 강하를 측정한 이후에 전류를 계산한다. 또한 디지털 신호로 변환하여 숫자로 나타내기 때문에 측정값을 정확히 읽을 수 있다. 전류계의 내부 저항값을 작게 하면 할수록 측정하는 전류값의 정확도를 향상시킬 수 있다. 왜냐하면 전류계 자체의 내부 저항으로 발생하는 전압 강하를 미연에 방지하기 때문이다.

## ■ 전위차를 측정하는 전압계

[그림 1-13]은 기본적으로 전류계와 같은 구성인 회로 소자에 흐르는 전압을 측정하는 전압계(voltmeter)의 기본 구성을 보여준다.

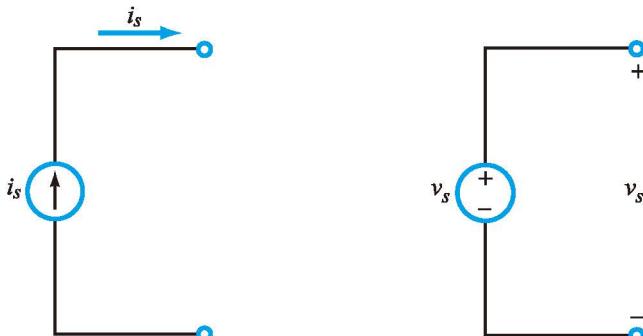


[그림 1-13] 전압계의 기본 구성

전압은 회로에서 두 접점 사이의 전위차를 나타내기 때문에, 전압계는 측정하려는 전압의 소자에 가로질러 연결해야 한다. 그러므로 전류계와는 반대로 회로에서 전압계는 병렬(나중에 설명할 예정) 연결로 접속해야 한다.

## ■ 전압 발생을 위한 전류원

전류원(current source)은 일정 전류를 회로에 공급하는 역할을 한다. 이때 임의의 전류를 공급하는 전류원을 이상 전류원(ideal current source)이라 한다. 이것은 양단자를 통해서 흐르는 전압과 상관없이 전류를 미리 규정된 값으로 유지할 수 있는 전류원이기 때문에 이론적으로 무한대의 전력을 공급할 수 있다. 이때 회로에 연결된 전류 공급원에 의해서 전압이 발생된다. [그림 1-14]는 이상 전류원을 보여준다.



[그림 1-14] 이상 전류원

[그림 1-15] 이상 전압원

## ■ 전류의 양을 결정하는 전압원

전압원(voltage source)은 일정 전압을 회로에 공급하는 역할을 한다. 이때 독립(independent) 전압원은 전압이 회로 다른 부분의 전압이나 전류에 영향을 받지 않지만, 종속(dependent) 전압원은 전압이 회로 다른 부분의 전압이나 전류에 의해 결정된다.

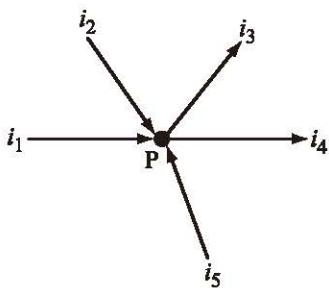
이상 전압원(ideal voltage source)은 전압의 양을 임의로 조절하여 제공한다. 이것은 양단자를 통해서 흐르는 전류와는 상관없이 미리 정해진 전압을 제공하기 때문에 이상 전류원과 마찬가지로 무한대의 전력을 공급할 수 있다. 이때 회로에 연결된 전압 공급원에 의해서 전류의 양이 결정된다. [그림 1-15]는 이상 전압원을 보여준다.

### 키르히호프의 전류 법칙 : 회로 해석에서 감초 역할을 하지요

키르히호프의 전류 법칙(Kirchhoff's current law) 혹은 간단하게 KCL은 접점 법칙 또는 전류 법칙이라고도 하며, 전하 보존 법칙을 기반으로 한다. 주어진 회로에서 하나의 접점으로 들어가는 전류의 방향을 양의 부호로 정하면, 반대로 동일한 접점에서 나가는 전류의 방향은 음의 부호로 표시한다. 동일한 개념으로, 들어가는 전류의 방향을 음의 부호로 먼저 지정해도 아무런 문제는 없

으나 나가는 전류의 방향은 반드시 반대 부호인 양의 부호로 표시해야 한다. 전하는 생성되는 것이 아니고 항상 보존되어야 하기 때문에, 접점에서 들어가거나 나오는 전류의 합은 항상 0이 되어야 한다. 여기서 0은 상태가 보존된다는 의미이다. 즉, 전류가 통과하면서 서로 만나는 접점을 기준으로 접점으로 들어오는 전류와 접점에서 나가는 전류의 합은 같다.

[그림 1-16]은 접점 P에서 각각 다른 다섯 개의 전류가 임의로 들어가거나 나가는 것을 보여준다.

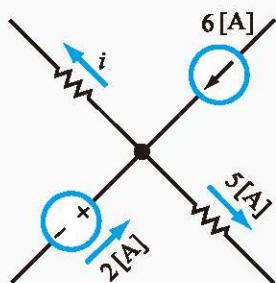


[그림 1-16] KCL의 해석

먼저 접점으로 들어가는 전류를 양의 부호로 정할 것인가 아니면 음의 부호로 정할 것인가를 결정하자. 접점으로 들어가는 모든 전류를 양의 부호로 결정하면  $+i_1$ ,  $+i_2$ ,  $+i_5$ 가 된다. 그러면 접점으로부터 나가는 모든 전류는 음의 부호로 결정되어  $-i_3$ ,  $-i_4$ 가 된다. KCL에 의해서 접점으로 들어오고 접점에서 나가는 전류의 합은 0이므로  $i_1 + i_2 - i_3 - i_4 + i_5 = 0$ 으로 나타낼 수 있다. 만일 접점으로 들어가는 전류를 음의 부호로 먼저 정하면, 접점으로부터 나가는 전류는 양의 부호가 되고 위의 과정을 반복하면  $-i_1 - i_2 + i_3 + i_4 - i_5 = 0$ 이 된다. 즉, 최종 결과는  $i_1 + i_2 - i_3 - i_4 + i_5 = 0$ 과 같다.

### 예제 1-9

KCL을 이용하여 [그림 1-17]의 전류  $i$  값을 구하라.



[그림 1-17] [예제 1-9]의 회로

## 풀이

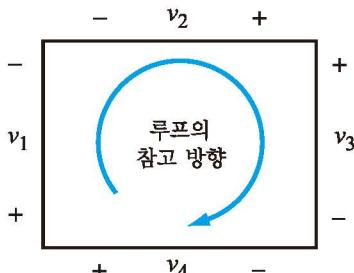
접점으로 전류계에서 생성된 전류  $6[A]$  와 전압계에 의한 전류  $2[A]$  가 들어간다. 반면에, 전류  $5[A]$  가 접점에서 나온다. 이때 구하고자 하는 전류  $i$  는 나오는 전류이다. 만일 들어가는 전류를 양의 부호로 설정하면  $+6, +2$  가 되고, 나오는 전류는 음의 부호를 붙여서  $-i, -5$  가 된다. 여기에 KCL을 적용하면  $-i - 5 + 6 + 2 = 0$  이 되므로, 구하고자 하는 전류값은  $i = 3[A]$  가 된다.

## 키르히호프의 전압 법칙 : 이 법칙도 회로 해석에서 감초 역할을 하지요

키르히호프의 전압 법칙(Kirchhoff's voltage law) 혹은 간단하게 KVL은 루프 법칙 또는 전압 법칙이라고도 하며, 에너지 보존 법칙을 기반으로 한다.

몇 개의 분기로 이루어진 루프에서, 루프(폐회로)의 시계 방향 혹은 반시계 방향 중 한쪽을 참고 방향으로 정한 후 각 분기를 흐르는 전압 방향이 참고 방향과 일치하면 양의 부호를 붙이고, 일치하지 않는 경우는 음의 부호를 붙인다. 이때 루프를 통과하는 모든 분기 전압의 대수합은 0이 된다.

[그림 1-18]은 사각형 루프에서 각각 다른 네 개의 분기 전압을 보여준다.

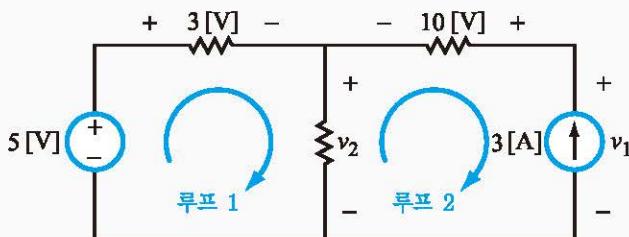


[그림 1-18] KVL의 해석

먼저 루프의 참고 방향을 시계 방향으로 정하면(반시계 방향을 참고 방향으로 정해도 상관없다), 분기 전압  $v_1$  과  $v_3$  는 참고 방향과 동일하므로 양의 부호를, 분기 전압  $v_2$  와  $v_4$  는 참고 방향과 반대이므로 음의 부호를 붙인다. KVL에 의해서 분기 전압의 전체 합은 0이므로  $v_1 - v_2 + v_3 - v_4 = 0$  으로 나타낼 수 있다.

### 예제 1-10

KVL을 이용하여 [그림 1-19]의 분기 전압  $v_1$ 과  $v_2$ 를 구하라.



[그림 1-19] [예제 1-10]의 회로

#### 풀이

[그림 1-19]에서 왼쪽 루프를 ‘루프 1’로 하고 오른쪽 루프를 ‘루프 2’라고 정한 후에 양쪽 모두 시계 방향을 참고 방향으로 정한다.

먼저, 루프 1에서 전압원 5[V]는 참고 방향과 반대이므로 음의 부호를 갖고, 분기 전압 3[V]와 구하는 분기 전압  $v_2$ 는 참고 방향과 동일하므로 양의 부호를 갖는다. 여기에 KVL을 적용하면

$$-5 + 3 + v_2 = 0$$

이 되어 루프 2와 공유하는 분기 전압  $v_2 = 2 \text{ [V]}$ 가 된다.

루프 2에서 분기 전압  $v_2$ 와 10 [V]는 참고 방향과 반대이므로 음의 부호를 갖고, 구하는 분기 전압  $v_1$ 은 참고 방향과 동일하므로 양의 부호를 갖는다. 여기에 KVL을 적용하면

$$-v_2 - 10 + v_1 = 0$$

이 되고, 루프 1에서 구한  $v_2 = 2$  를 대입하면 분기 전압  $v_1 = 12 \text{ [V]}$ 가 된다.

SECTION  
03

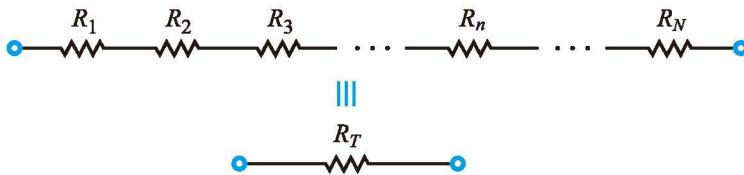
## 등가 저항과 개방/단락 회로

직렬 및 병렬로 연결된 저항의 등가 저항을 구해보고, 무한대 저항에 의한 개방 회로와 0의 저항에 의한 단락 회로를 이해한다.

**Keywords** | 직렬 저항 | 병렬 저항 | 개방 회로 | 단락 회로 |

### 직렬 저항 : 계속 더하세요

만일 두 개 이상의 저항 소자가 [그림 1-20]처럼 연속적으로 연결되어 있고 각 저항에 동일한 전류가 흐르면, 이것을 저항의 직렬 연결이라고 한다.



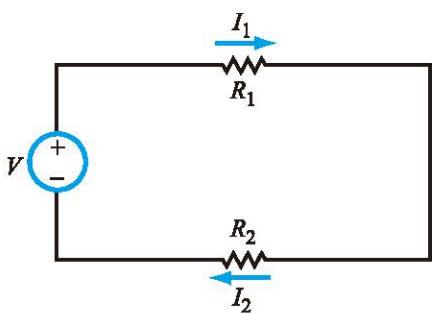
[그림 1-20] 저항의 직렬 연결

저항  $N$  개가 직렬로 연결되어 있는 경우, 총 저항값  $R_T$  혹은 등가 저항값은 다음과 같이 각각의 저항값을 합한 식으로 나타낼 수 있다.

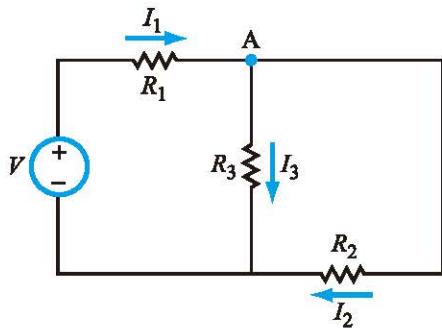
### ★ 직렬 저항 계산 ★

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n + \cdots + R_N = \sum_{n=1}^N R_n \quad (1.12)$$

[그림 1-21]에서 저항  $R_1$ 과  $R_2$ 는 한쪽 끝에 아무런 접합점 없이 연결되어 있으므로 서로 직렬이다. 그러므로 각각의 저항에는 같은 양의 전류  $I_1 = I_2$  가 흐른다. 그러나 [그림 1-22]의 회로에서 저항  $R_1$ 과  $R_2$ 는 직렬 연결이 아니다. 왜냐하면 KCL에 의해 접점 A에서  $I_1 = I_2 + I_3$  가 되어 두 개의 저항  $R_1$ 과  $R_2$ 에 흐르는 전류가  $I_1 \neq I_2$  이기 때문이다.



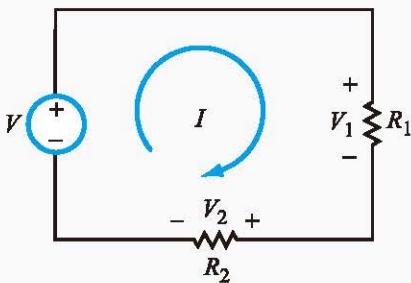
[그림 1-21] 직렬 저항의 경우



[그림 1-22] 직렬 저항이 아닌 경우

### 예제 1-11

[그림 1-23]에서 저항  $R_1$  과  $R_2$  를 지나는 전압  $V_1$  과  $V_2$  를 구하라.



[그림 1-23] [예제 1-11]의 회로

### 풀이

KVL을 이용하여 전압원  $V$ 를 나타내면  $V = V_1 + V_2$  이다. 직렬로 연결된 두 저항의 총합을 구하면  $R_T = R_1 + R_2$  이므로, 옴의 법칙으로 회로에 흐르는 전류  $I$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = \frac{V}{R_T} = \frac{V}{R_1 + R_2}$$

저항  $R_1$  과  $R_2$  에 다시 옴의 법칙을 이용하여 전압  $V_1$  과  $V_2$  를 구하면 다음과 같다.<sup>5</sup>

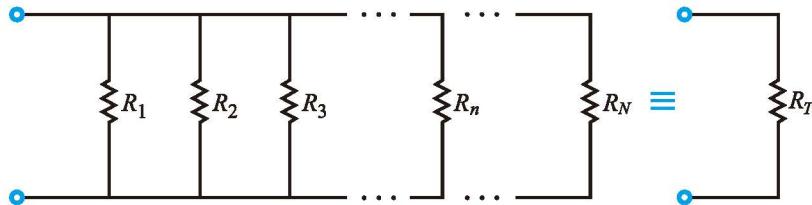
$$V_1 = IR_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}V$$

$$V_2 = IR_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}V$$

<sup>5</sup> 두 식은 2장에서 학습한 전압 분할 법칙의 기본 개념이 적용된다.

## 병렬 저항 : 역수를 더하고 다시 역수를 취하세요

만일 두 개 이상 저항 소자가 [그림 1-24]처럼 평행으로 연결되어 있고 각 저항에 동일한 전압이 흐르면, 이것을 저항의 병렬 연결이라고 한다.



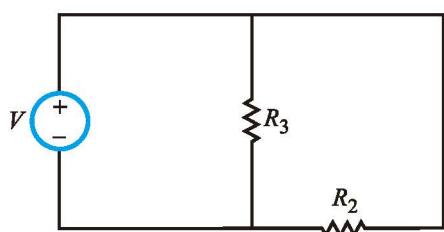
[그림 1-24] 저항의 병렬 연결

저항  $N$  개가 병렬로 연결되어 있는 경우, 총 저항값의 역수는 다음과 같이 각 저항의 역수의 합을 더한 식으로 나타낼 수 있다.

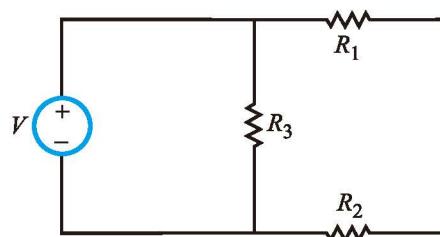
### ★ 병렬 저항 계산★

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} + \dots + \frac{1}{R_N} \quad (1.13)$$

[그림 1-25]에서 저항  $R_2$  와  $R_3$ 는 그 사이에 다른 회로 소자가 없고, 직접 연결되어 있으므로 서로 병렬이다. 그러므로 각 저항에는 동일한 전압의 양이 흐른다. 그러나 [그림 1-26]의 회로에서 저항  $R_2$  와  $R_3$ 는 병렬 연결도 직렬 연결도 아닌 상태를 보여준다.



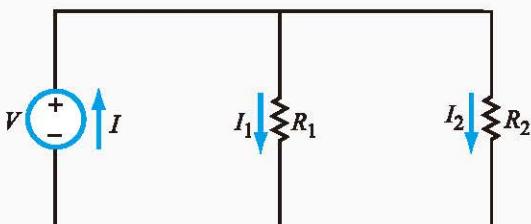
[그림 1-25] 병렬 저항의 경우



[그림 1-26] 병렬 저항이 아닌 경우

### 예제 1-12

[그림 1-27]에서 저항  $R_1$  과  $R_2$ 에 흐르는 전류  $I_1$  과  $I_2$ 를 구하라. 또한 전압원  $V$ 를 지나는 전류  $I$ 를 구하라.



[그림 1-27] [예제 1-12]의 회로

풀이

KCL을 이용하면 전압원  $V$ 를 지나는 전류  $I$ 를 나타내면 다음과 같다.

$$I = I_1 + I_2$$

병렬로 연결된 두 저항의 총합은

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

혹은

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

이 된다. 옴의 법칙으로 전압원을 지나는 전류  $I$ 를 나타내면 다음과 같다.

$$I = \frac{V}{R_T} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} V$$

저항  $R_1$  과  $R_2$ 에 다시 옴의 법칙을 이용하여 전류  $I_1$  과  $I_2$ 를 구하면 다음과 같다.<sup>6</sup>

$$I_1 = \frac{V}{R_1} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) I$$

$$I_2 = \frac{V}{R_2} = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) I$$

<sup>6</sup> 두 식은 2장에서 학습한 전류 분할 법칙의 기본 개념이 적용된다.

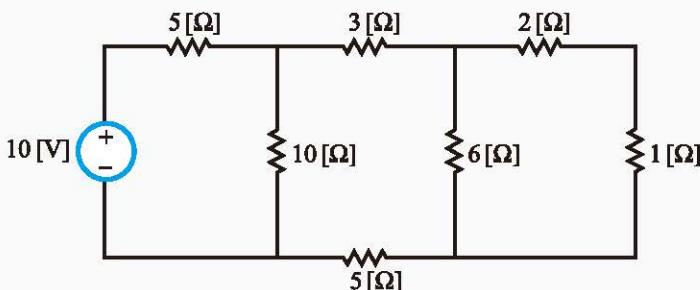
Q 여러 개의 저항이 연결되어 있을 때, 어떻게 하면 등가 저항을 쉽게 찾을 수 있을까?

A 다음 과정을 통해 등가 저항을 쉽게 찾을 수 있다.

- ① 먼저 주어진 회로의 왼쪽 끝 혹은 오른쪽 끝 중 어느 쪽에서 해석을 시작할지를 결정한다. 대개의 경우 전압원이 놓여 있는 반대 방향부터 해석을 시작한다.
- ② 왼쪽 혹은 오른쪽 방향을 결정한 후에는 처음 놓여 있는 저항을 시작으로 하여 다음의 저항이 수직으로 놓여 있는 경우에는 저항의 병렬 연결을 실행하고, 저항이 수평으로 놓여 있는 경우에는 저항의 직렬 연결을 실행한다.

### 예제 1-13

[그림 1-28]의 전압원에서 본(seen by source) 등가 저항값을 구하라.



[그림 1-28] [예제 1-13]의 회로

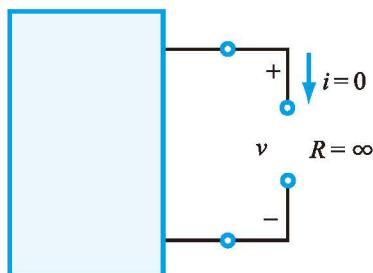
#### 풀이

전압원의 반대 방향인 회로의 오른쪽부터 저항 해석을 시작하여 전체 저항, 즉 등가 저항을 다음과 같은 과정으로 계산한다.

- ① 오른쪽의 맨 처음에 놓여 있는 저항  $1[\Omega]$ 은 수평으로 저항  $2[\Omega]$ 과 연결되어 있으므로, 직렬 저항 계산을 하면  $2+1=3[\Omega]$ 이다.
- ② ①에서 계산된 저항  $3[\Omega]$ 은 수직으로 저항  $6[\Omega]$ 과 연결되어 있으므로, 병렬 저항 계산을 하면  $6 \parallel 3 = 2[\Omega]$ 이다.
- ③ ②에서 계산된 저항  $2[\Omega]$ 은 수평으로 저항  $3[\Omega]$ ,  $5[\Omega]$ 과 연결되어 있으므로, 직렬 저항 계산을 동시에 하면  $2+3+5=10[\Omega]$ 이다.
- ④ ③에서 계산된 저항  $10[\Omega]$ 은 수직으로 저항  $10[\Omega]$ 과 연결되어 있으므로, 병렬 저항 계산을 하면  $10 \parallel 10 = 5[\Omega]$ 이다.
- ⑤ ④에서 계산된 저항  $5[\Omega]$ 은 수평으로 저항  $5[\Omega]$ 과 연결되어 있으므로, 직렬 저항을 계산을 하면 최종적으로 등가 저항은  $R_T = 5+5=10[\Omega]$ 의 값을 얻는다.

## 개방 회로 : 전류가 지나는 길이 끊어졌군요

개방 회로(open circuit)는 회로의 소자를 연결하는 도선이 열려 있는 경우, 전류가 더 이상 흐르지 못하는 상태를 말한다. [그림 1-29]는 개방 회로를 보여준다. 회로 소자에서 저항값이 무한대에 접근하면, 개방 회로상에 전류가 전혀 흐르지 않게 된다. 즉,  $R = \infty$  가 되면 임의의 전압값  $v$  가 발생해도 옴의 법칙에 의해서  $i = \frac{v}{R} = \frac{v}{\infty} = 0$  이 된다.

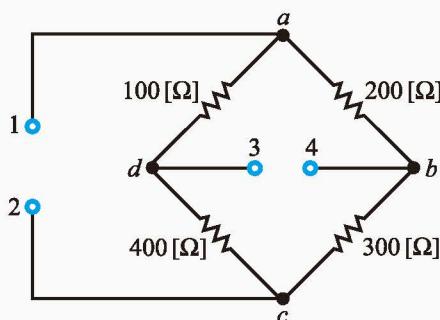


[그림 1-29] 개방 회로

### 예제 1-14

[그림 1-30]에 대해 다음을 구하라.

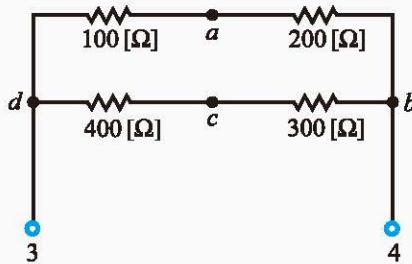
- 단자 1과 단자 2 사이가 개방되었을 때, 단자 3과 단자 4 사이에서 들여다 본 등가 저항
- 단자 3과 단자 4 사이가 개방되었을 때, 단자 1과 단자 2 사이에서 들여다 본 등가 저항



[그림 1-30] [예제 1-14] 회로

## 풀이

- (a) 단자 1과 단자 2 사이를 개방시킨 후 단자 3과 단자 4 사이에서 들여다 본 등가 회로를 그리면 [그림 1-31]과 같다.

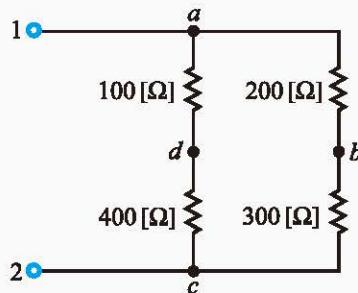


[그림 1-31] 단자 3과 단자 4 사이에서 들여다 본 등가 회로

[그림 1-31]을 이용하면 다음과 같이 등가 저항을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_T &= (100 + 200) \parallel (400 + 300) \\ &= \frac{300 \times 700}{300 + 700} = 210 [\Omega] \end{aligned}$$

- (b) 단자 3과 단자 4 사이를 개방시킨 후 단자 1과 단자 2 사이에서 들여다 본 등가 회로를 그리면 [그림 1-32]와 같다.



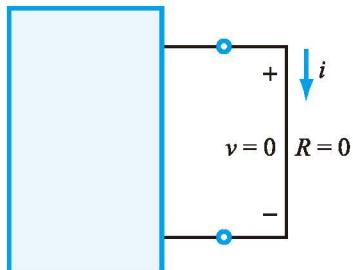
[그림 1-32] 단자 1과 단자 2에서 들여다 본 등가 회로

[그림 1-32]를 이용하면 다음과 같이 등가 저항을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_T &= (100 + 400) \parallel (200 + 300) \\ &= \frac{500 \times 500}{500 + 500} = 250 [\Omega] \end{aligned}$$

## 단락 회로 : 전압이 존재감을 상실하네요

개방 회로와는 다르게 단락 회로(short circuit)는 끊어진 도선 없이 회로 소자와 소자는 모두 연결되어 있지만, 저항값이 0에 가까운 상태가 된다.



[그림 1-33] 단락 회로

[그림 1-33]은 단락 회로를 보여준다. 회로 소자에서 저항값이 0에 접근하여 전류의 흐름에 방해를 받지 않도록 한다. 즉,  $R = 0$ 이 되면 임의의 전류값  $i$ 가 흘러도 옴의 법칙에 의해서 양단의 전압은  $v = iR = i \cdot 0 = 0$ 이 된다. 한편, 단락 회로는 저항값이 0에 가깝기 때문에 매우 높은 전류가 흐르게 되면 회로에 문제가 발생할 수 있다.

### 예제 1-15

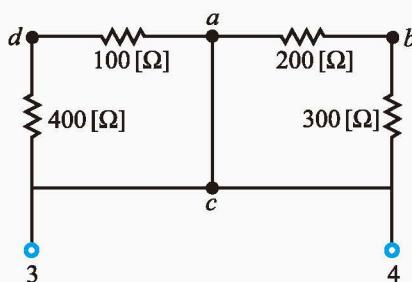
[예제 1-14]의 [그림 1-30]에 대해 다음을 구하라.

- 단자 1과 단자 2 사이가 단락되었을 때 단자 3과 단자 4 사이에서 들여다 본 등가 저항
- 단자 3과 단자 4 사이가 단락되었을 때 단자 1과 단자 2 사이에서 들여다 본 등가 저항

### 풀이

(a) 단자 1과 단자 2 사이를 단락시킨 후 단자 3과 단자 4 사이에서 들여다 본 등가 회로를 그리면

[그림 1-34]와 같다.

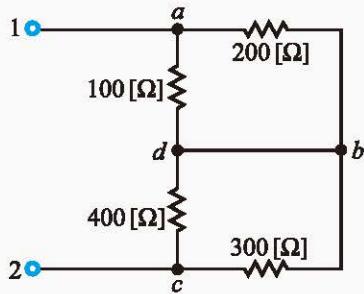


[그림 1-34] 단자 3과 단자 4에서 들여다 본 등가 회로

[그림 1-34]를 이용하면 다음과 같이 등가 저항을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}R_T &= (100 \parallel 400) + (200 \parallel 300) \\&= \frac{100 \times 400}{100 + 400} + \frac{200 \times 300}{200 + 300} = 200 [\Omega]\end{aligned}$$

- (b) 단자 3과 단자 4 사이를 단락시킨 후 단자 1과 단자 2 사이에서 들여다 본 등가 회로를 그리면 [그림 1-35]와 같다.



[그림 1-35] 단자 1과 단자 2 사이에서 들여다 본 등가 회로

[그림 1-35]를 이용하면 다음과 같이 등가 저항을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}R_T &= (100 \parallel 200) + (400 \parallel 300) \\&= \frac{100 \times 200}{100 + 200} + \frac{400 \times 300}{400 + 300} \approx 238 [\Omega]\end{aligned}$$

## 01

## 연습문제

**1.1** 100만 개의 전자가 운반하는 전하량을 구하라.

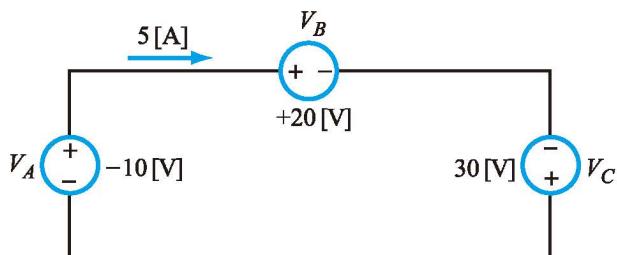
**1.2** 다음 회로에서 전도도  $G$  와 저항을 구하라. 단,  $G$  에 흐르는 전류는  $i = 2 \text{ [mA]}$  이다.



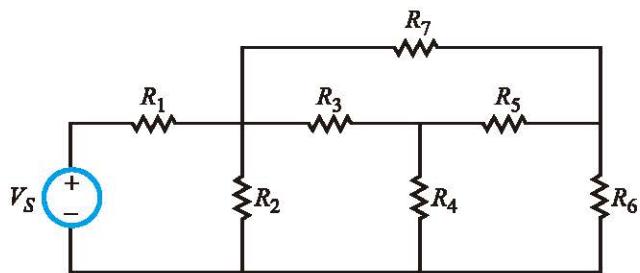
**1.3** 다음 회로에서 저항  $R = 10 \text{ [k}\Omega\text{]}$ 에 대한 전력  $P$ 를 구하라.



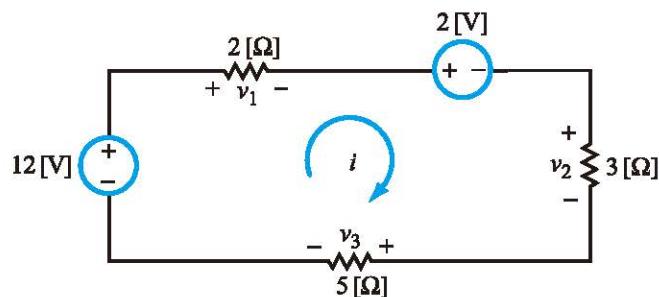
**1.4** 다음 회로에서 세 개의 전압원에 대한 전력을 구하라. 그리고 전력을 소모하는 전압원과 전력을 공급하는 전압원을 각각 판별하라.



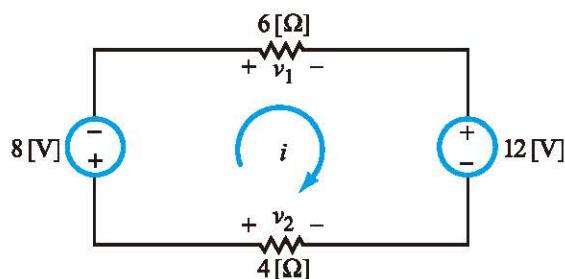
**1.5** 다음 회로에서 접점과 분기의 수를 구하라.



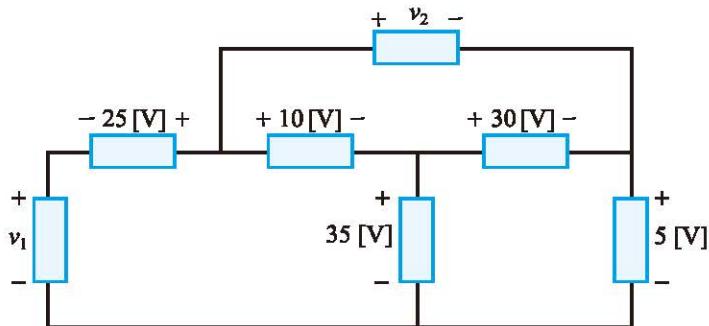
**1.6** 다음 회로에서 전류  $i$ 를 구하라.



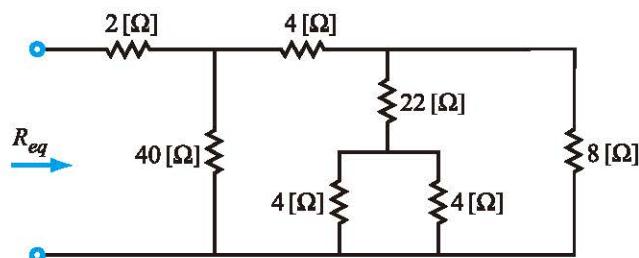
**1.7** 다음 회로에서 전압  $v_1$ 과  $v_2$ 를 구하라.



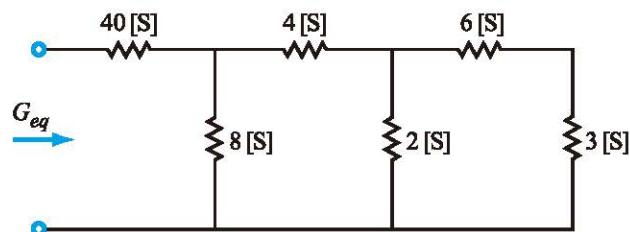
**1.8** 다음 회로에서 전압  $v_1$ 과  $v_2$ 를 구하라.



**1.9** 다음 회로의 전압원에서 들여다 본 등가 저항을 구하라.



**1.10** 다음 회로에 대한 등가 전도도를 구하라.



지은이 소개	2
지은이 머리말	3
미리보기	4
학습 로드맵과 참고 문헌	6

CHAPTER  
01

## 회로의 기초

<b>SECTION 01 회로 소자의 바른 이해</b>	16
전하 : 회로의 출발점	16
전류 : 전하의 시간 여행	17
전압 : 전류의 동인자	18
저항 : 전류와 전압의 연결 다리	18
옴의 법칙 : 모르고 지나면 계속 후회하죠	20
전력과 에너지 : 비슷한 말 같지만 느낌이 다르죠	20
<b>SECTION 02 회로 설계의 구성원</b>	23
회로 설계의 기본 용어 : 기본 용어를 이해하면 회로 해석이 편해요!	23
회로의 측정 장치 : 정말로 간단하게 측정할 수 있어요	26
키르히호프의 전류 법칙 : 회로 해석에서 감초 역할을 하지요	30
키르히호프의 전압 법칙 : 이 법칙도 회로 해석에서 감초 역할을 하지요	32
<b>SECTION 03 통과 저항과 개방/단락 회로</b>	34
직렬 저항 : 계속 더하세요	34
병렬 저항 : 역수를 더하고 다시 역수를 취하세요	36
개방 회로 : 전류가 지나는 길이 끊어졌군요	39
단락 회로 : 전압이 존재감을 상실하네요	41
<b>연습문제</b>	43

CHAPTER  
02

## 회로 해석의 다양한 방법

<b>SECTION 01 전압과 전류 분할 법칙</b>	48
전압 분할 법칙 : 분자에 우리편 저항만 곱하세요	48
전류 분할 법칙 : 분자에 상대편 저항만 곱하세요	51

## Contents

<b>SECTION 02 핵심 회로 해석 방법</b>	54
접점 전압 방법 : 키르히호프의 전류 법칙 기억하시죠	54
그물망 전류 방법 : 키르히호프의 전압 법칙 기억하시죠	58
중첩 방법 : 해쳐 모여주세요	61
전류원과 전압원의 상호 변환 : 계속해서 서로를 바꿀 수 있군요	68
<b>SECTION 03 테브난과 노턴 등가 회로</b>	71
테브난 등가 회로 : 개방 회로 기억하시죠	71
노턴 등가 회로 : 단락 회로 아시죠	74
테브난과 노턴 등가 회로를 이용한 최대 전력 전달 : 많을수록 좋아요	78
<b>연습문제</b>	81

### CHAPTER 03

#### 커판시터와 인덕터

<b>SECTION 01 커판시터란?</b>	86
수동 소자와 능동 소자 : 에너지 생성 여부로 판단하세요	86
커판시터 : 전하가 모여 들어요	87
<b>SECTION 02 커판시터의 연결</b>	91
직렬 커판시터 : 저항의 병렬 계산이군요	91
병렬 커판시터 : 저항의 직렬 계산이군요	92
커판시터 읽는 법 : 종류별로 다양하군요	94
<b>SECTION 03 인덕터란?</b>	95
인덕터 : 자기장에 에너지를 저장합니다	95
<b>SECTION 04 인덕터의 연결</b>	98
직렬 인덕터 : 저항의 직렬 계산이군요	98
병렬 인덕터 : 저항의 병렬 계산이군요	99
인덕터 읽는 법 : 저항 읽는 법 아시죠	101
<b>연습문제</b>	103

CHAPTER  
04**회로 해석을 위한 기본 수학**

<b>SECTION 01</b>	<b>선형방정식</b>	108
선형방정식 : 일차방정식 말하는 것 아시죠		108
선형방정식의 수학적 풀이 : 알고 있는 방법이 있으면 활용하세요		108
역행렬을 이용한 선형방정식 풀이 : 복잡하게 보이세요? 아닙니다		109
크래머 법칙을 이용한 선형방정식 풀이 : 상당히 스마트한 체계이지요		113
<b>SECTION 02</b>	<b>미분방정식</b>	116
미분방정식 : 줄여 나가세요		116
1차 미분방정식의 풀이 : 1차 회로의 풀이는 이것으로 O.K.		117
2차 미분방정식의 풀이 : 복잡한 회로를 해석할 수 있어요		122
<b>SECTION 03</b>	<b>복소수</b>	127
복소수 : 시간 영역과 주파수 영역의 블레이트		127
오일러 공식 : 지수함수와 삼각함수의 만남		133
<b>SECTION 04</b>	<b>라플라스 변환</b>	135
라플라스 변환 : 변수 $s$ 보다 변수 $t$ 가 좋아요		135
라플라스 역변환 : 변덕스럽지만 변수 $s$ 가 그리워요		139
<b>연습문제</b>		144

CHAPTER  
05**1차 회로와 2차 회로**

<b>SECTION 01</b>	<b>1차 회로</b>	148
RC 회로 : 저항과 커패시터만 보이네요		148
RL 회로 : 저항이 인덕터와 새로운 만남을 하는군요		152
<b>SECTION 02</b>	<b>2차 회로</b>	156
병렬 RLC 회로 : 평행으로 만나는데 2차 회로가 되네요		156
직렬 RLC 회로 : 무심히 하나씩 따라가니 2차 회로가 되네요		163
RC- $\pi$ 회로 : 1차 RC 회로와 근본이 다르죠		168
RL-T 회로 : 이것 역시 1차 RL 회로와 근본이 다르죠		173
<b>연습문제</b>		179

### CHAPTER 06

#### 교류 회로

<b>SECTION 01</b>	<b>정현파 신호</b>	184
정현파 신호 : 사인파 혹은 코사인파		184
제곱평균제곱근(rms) : 복잡 미묘하지 않은 평범한 수식이지요		187
<b>SECTION 02</b>	<b>교류 해석을 위한 푸리에 정리</b>	189
푸리에 정리 : 주기 함수이면 정현파 합수와 늘 함께하지요		189
삼각 푸리에 급수 : 삼각함수와 푸리에 급수가 만날 수 있군요		189
<b>SECTION 03</b>	<b>위상벡터</b>	193
오일러 공식을 이용한 정현파 : 복소수와 삼각함수 사이의 벽을 낫추네요		193
회로 소자의 위상벡터 : 소자도 주파수 영역으로 이사갑니다		197
<b>SECTION 04</b>	<b>수동 소자의 임피던스</b>	200
저항, 커패시터, 인덕터의 임피던스 : 실수부와 허수부 기억하시죠		200
회로의 등가 임피던스 계산 : 등가 저항 계산 아직 기억하죠?		201
저항, 커패시터, 인덕터의 어드미턴스 : 역수만 생각하세요		204
회로의 등가 어드미턴스 계산 : 임피던스의 역수만 생각하세요		205
<b>SECTION 05</b>	<b>교류 회로의 분석</b>	207
교류 회로의 분석 과정 : 잠시 임피던스, 위상벡터를 사용합니다		207
<b>연습문제</b>		212

### CHAPTER 07

#### 교류 회로의 전력

<b>SECTION 01</b>	<b>교류 회로의 전력</b>	216
교류 회로에서 전력이란? : 다양하게 표현하네요		216
순간 전력 : 빠른 측정이 필요하군요		217
평균 전력 : 순간 전력보다 천천히 계산하세요		219
최대 평균 전력 전달 : 테브난 등가 저항 기억하죠?		223
실효값 전력 : 실제 전력을 측정할 때 사용하지요		227
피상 전력과 역률 : 완벽 추구를 위해 실효값만 고려하는군요		230
복소 전력 : 전력 해석의 진대성이죠		233
역률 개선 : 삼각함수의 기본만 알면 괜!		237

<b>SECTION 02 3상 전력</b>	242
3상 회로 : 공급원이 세 개 보이네요	242
<b>SECTION 03 평형 3상 시스템</b>	245
평형 3상 시스템의 유형 : Y와 Δ를 번갈아 조합하세요	245
평형 3상 Y-Y 시스템 : 두 개의 Y가 거꾸로 보이네요	246
평형 3상 Y-Δ 시스템 : 전압원은 Y가 거꾸로, 부하는 Δ로 보이죠	249
평형 3상 시스템의 전력 : 단상 시스템의 전력과 비슷한군요	252
<b>연습문제</b>	255

**CHAPTER  
08**

## 주파수 응답

<b>SECTION 01 주파수 함수의 활용</b>	260
주파수 응답 : 입력하면 출력으로 보여주세요	260
<b>SECTION 02 전달함수</b>	264
전달함수 : 주파수 응답을 도와줘요	264
<b>SECTION 03 공진 주파수</b>	267
공진 주파수 : 인덕터와 커패시터의 상호 관계	267
직렬 공진 회로의 공진 주파수 : 임피던스의 하수가 0이네요	268
병렬 공진 회로의 공진 주파수 : 어드미턴스의 하수가 0이네요	271
<b>SECTION 04 주파수 범위로 분류하는 다양한 필터</b>	275
필터 : 필요 없는 것은 제거하세요	275
저역통과 필터 : 높은 주파수는 사절합니다	275
고역통과 필터 : 낮은 주파수는 사절합니다	278
대역통과 필터 : 내부만 취급해요	280
대역저지 필터 : 외부만 취급해요	283
<b>SECTION 05 시각적인 주파수 응답 해석 방법</b>	286
전달함수의 영점과 극점 : 분자와 분모의 근이지요	286
보드 선도 : 세미로그 들어보셨나요?	287
<b>연습문제</b>	297

## Contents

### CHAPTER 09

#### 라플라스 변환을 이용한 회로 해석

<b>SECTION 01</b>	<b>라플라스 변환의 기본 특성</b>	302
단위 계단 함수 : 한 계단 한 계단 의미가 있군요	302	
유용한 라플라스 변환의 특성 : 필요하면 마음대로 사용하세요	306	
<b>SECTION 02</b>	<b>라플라스 영역의 회로 소자 및 전달함수</b>	314
라플라스 영역의 회로 소자 : 모두 $s$ 를 사용하네요	314	
라플라스 변환의 전달함수 : 주파수 응답을 도와주세요	319	
<b>SECTION 03</b>	<b>라플라스 영역의 회로 해석</b>	322
라플라스 변환과 역변환을 이용한 회로 해석 : 쉬운 것 먼저!	322	
<b>연습문제</b>		327

### CHAPTER 10

#### 푸리에 변환을 이용한 회로 해석

<b>SECTION 01</b>	<b>푸리에 변환</b>	332
푸리에 변환 : 라플라스 변환보다 시간 영역이 넓군요	332	
<b>SECTION 02</b>	<b>푸리에 변환의 기본 특성</b>	335
유용한 푸리에 변환의 특성 : 필요하면 마음대로 사용하세요	335	
<b>SECTION 03</b>	<b>푸리에 변환의 회로 소자 및 전달함수</b>	344
푸리에 변환의 회로 소자 : 주파수 영역과 동일하군요	344	
푸리에 변환의 전달함수 : 역시 주파수 응답을 도와주세요	344	
<b>SECTION 04</b>	<b>푸리에 변환의 회로 해석</b>	348
푸리에 변환을 이용한 회로 해석 : 상황에 맞춰 사용하세요	348	
<b>연습문제</b>		353

**CHAPTER  
11****연산 증폭기의 기초**

<b>SECTION 01</b>	<b>연산 증폭기란?</b>	358
연산 증폭기 :	회로에서 다양한 역할을 하지요	358
비이상 연산 증폭기 :	이상 연산 증폭기보다 복잡하군요	359
이상 연산 증폭기 :	보다 쉽게 연산 증폭기를 설명하네요	363
<b>SECTION 02</b>	<b>다양한 연산 증폭기</b>	365
반전 증폭기 :	전압 아득은 음의 값을 보이네요	365
적분기 :	적분 기능이 있군요	367
미분기 :	미분 기능이 있군요	368
비반전 증폭기 :	반전 증폭기와 기능이 반대네요	369
가산 증폭기 :	덧셈 기능이 있군요	372
차동 증폭기 :	뺄셈 기능이 있군요	374
<b>연습문제</b>		377
<b>찾아보기</b>		381



---

# CHAPTER 01

---

## 회로의 기초

이 장에서는 회로의 기초 개념을 이해하고, 회로 해석을 위한 기본 및 응용 능력을 배양하는 것을 목표로 한다. 단순하게 구성된 회로뿐만 아니라 복잡하게 구성된 회로도 좀 더 쉽고 정확하게 해석하기 위해서는 회로의 기초에 대한 선행 학습이 반드시 필요하다. 따라서 이 장에서는 회로에 자주 등장하는 전류, 전압, 저항 등의 기초 개념을 학습하고, 이들의 상호 연관성을 살펴본다. 또한 회로 설계를 이해하는 그 밖의 다양한 개념에 대해 살펴본다.

---

### CONTENTS

- SECTION 01 회로 소자의 바른 이해
- SECTION 02 회로 설계의 구성원
- SECTION 03 등가 저항과 개방/단락 회로
- 연습문제

# 회로 소자의 바른 이해

회로에서 중요한 개념인 전하, 전류, 전압, 저항에 대해 살펴보고, 이들의 연관성을 음의 법칙을 통해 알아본다. 또한 전력과 에너지에 대한 개념을 살펴본다.

**Keywords** | 전하 | 전류 | 전압 | 저항 | 음의 법칙 | 전력 | 에너지 |

## 전하 : 회로의 출발점

전하(charge)는 실제 존재하는 것이 아니라 인위적으로 만들어낸 개념으로, 가장 기본적인 전기량을 나타낸다. 즉, 전하는 정전기, 전류 등 모든 전기적 현상의 출발점이다.<sup>1</sup>

전하량 보존 법칙은 전하는 새로 생성되거나 소멸되지 않고 단지 위치를 이동한다는 법칙이다. 전하량 보존 법칙에 의하면 한 물체가 양의 성질을 띠면 다른 물체는 반드시 음의 성질을 가지므로 동일한 부호의 전하 사이에는 서로 밀어내는 힘이 작용하고, 반면에 다른 부호의 전하 사이에는 서로 잡아당기는 힘이 작용한다. 그러므로 정해진 회로에서 전하의 총합은 변하지 않는다.

전하는  $q$  혹은  $Q$ 로 표기하고, 단위는 쿠лон(coulomb, [C])을 사용한다. 전하는 전자에 의해 옮겨지는 음전하(electron)와 양성자에 의해 옮겨지는 양전하(proton)로 구별된다. 이때 음전하는 중성자가 전자를 추가로 얻을 때 띠는 성질을, 양전하는 중성자가 전자를 잃을 때 띠는 성질을 가진다.

### 음전하의 단위는

$$q_e = -1.602 \times 10^{-19} \text{ [C]}$$

이고, 양전하의 단위는 다음과 같다.

$$q_p = +1.602 \times 10^{-19} \text{ [C]}$$

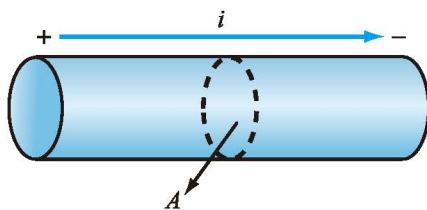
<sup>1</sup> 휴대전화의 배터리가 소모되면 전력을 공급을 위해 다시 충전을 해야 한다. 이때 ‘충전’을 영어로 ‘battery charge’라고 하는데, 그 이유는 전하가 모두 소모되면 배터리가 더 이상 전력을 공급할 수 없어 다시 배터리가 전력을 공급할 수 있도록 비어 있는 배터리에 전하를 채우기 때문이다.

Q 1콜롱을 구성하기 위해 필요한 전하의 개수는 몇 개인가?

- A 전하의 값  $1.602 \times 10^{-19}$  에 대한 역수를 계산하면 1콜롱은 대략  $6.242 \times 10^{18}$  개의 전하로 구성된다. 이처럼 하나의 전자가 갖는 전하량은 너무 작기 때문에 실제 전하량을 측정하는 국제 단위계(International System of Units, SI)인 콜롱은  $6.242 \times 10^{18}$  개의 전자가 한꺼번에 운반하는 전하량을 나타낸다.

전류 : 전하의 시간 여행

전류(current)는 [그림 1-1]과 같이 원통 모양인 도체(전선)의 단면적(cross-sectional area)  $A$  를 얼마나 많은 전하가 통과하는지를 시간의 변화에 따른 비율로 나타낸다.



[그림 1-1] 전류의 생성

전류는  $i$  혹은  $I$  로 표기하고 단위는 암페어(ampere, [A])를 사용하며, 다음과 같이 단위 시간당 흐르는 단위 전하의 양으로 나타낸다. 즉, 1[A]는 1[C/sec]와 동일하다.

$$i = \frac{dq}{dt} [\text{A}] \quad (1.1)$$

전류는 전하의 흐름을 말한다. 전류의 진행 방향은 전하가 높은 값에서 낮은 값으로 흐르는, 즉 양에서 음으로 가는 방향을 의미한다. 전압(다음에 설명 예정)의 관점에서 표현하면, 도체 양끝에 전위차(전압)가 있으면 전하가 흐르고 전위차가 없으면 전하가 흐르지 않는다. 자연의 법칙에 의하면 물은 높은 위치에서 낮은 위치로 흐르는데, 이때 물과 물의 위치를 전하와 전위차로 대체 설명 할 수 있다.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> 대부분의 금속처럼 전하가 잘 이동해서 전기 저항이 작은 물질을 도체라 하고, 전하가 잘 이동하지 않는 물질은 부도체라 한다. 반도체는 도체와 부도체 중간에 위치하는 물질을 말한다. 이때 반도체는 불순물 첨가 여부에 따라서 부도체와 도체의 성질을 띠게 된다.

**Q** 전하의 개념으로 1암페어를 설명하라.

**A** 1암페어는 1초 동안에 전하  $6.242 \times 10^{18}$  개가 흐르는 양을 나타낸다.

### 전압 : 전류의 동업자

전압(voltage)은 두 지점 사이의 전위차에 대한 상대적인 물리량으로, 전류를 흐르게 하는 힘이다. 전압은 정해진 양쪽 지점 사이에서 전하의 흐름, 즉 단위 전하당 이루어지는 전체 일한 양(혹은 에너지)을 나타낸다.

전압은  $v$  혹은  $V$ 로 표기하고 단위는 볼트(volt, [V])를 사용하며, 다음과 같이 에너지  $W$ 와 전하  $q$ 의 관계식으로 나타낸다. 즉, 1[V]는 1[joule/coulomb]과 동일하다.

$$v = \frac{dW}{dq} [\text{V}] \quad (1.2)$$

전압이 높으면 흐르는 전기의 힘도 강해진다. 예를 들어, 같은 양의 물 한 통을 1층 높이에서 땅에 부울 때보다 10층 높이에서 땅에 부울 때 충격이 더 큰 것과 동일한 개념이다.

### ■ 전류-전압 특성

전압과 전류의 함수적인 관계에서 어느 한쪽의 값을 알면, 전류-전압( $I-V$ ) 특성 그래프에 의해서 나머지 한쪽의 값은 자연스럽게 결정된다. 회로 소자에 대한  $I-V$  특성 그래프의 가장 간단한 형태는 다음과 같은 일차 직선식  $y = ax$  형태로 표시한다.

$$V = kI \quad (\text{혹은 } I = k'V) \quad (1.3)$$

전압  $V$ 는 독립 변수인 입력 전류  $I$ 에 의존하는 출력 변수를 나타내고, 상수  $k$ 는 일차 직선식의 기울기를 나타낸다. 여기서  $k'$ 은  $k$ 의 역수를 나타낸다.

### 저항 : 전류와 전압의 연결 다리

저항(resistance)은 전압과 전류에 의해 결정되는 특정한 크기로, 식 (1.4)와 같이 전압과는 비례하고 전류와는 반비례 관계를 갖는다. 예를 들어, 전류가 전압에 비해서 상대적으로 아주 작은 값이

면 저항의 값은 굉장히 커진다. 그러므로 저항이 크면 클수록 전류의 흐름은 더욱 방해를 받는다.

$$R = \frac{V}{I} \quad (1.4)$$

저항은  $R$ 로 표기하고 단위는 옴(ohm,  $[\Omega]$ )을 사용하며, 1옴은 다음과 같이 나타낸다.<sup>3</sup>

$$1[\Omega] = \frac{1[V]}{1[A]}$$

전도도(conductance)는 저항의 역수 개념으로 정의할 수 있는데, 저항과 달리 얼마나 전류를 손실 없이 많이 보낼 수 있는지를 나타낸다. 전도도는  $G$ 로 표기하고 단위는 지멘스(siemens,  $[S]$ )를 사용한다. 저항과 전도도의 관계는  $G = \frac{1}{R}$  이므로 식 (1.4)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$G = \frac{I}{V} \quad (1.5)$$

### 예제 1-1

[그림 1-2]에서 저항과 전도도를 구하라. 단, 저항  $R$ 에 흐르는 전압은  $v = 2 [V]$ 이다.



[그림 1-2] [예제 1-1]의 회로

### 풀이

저항  $R$ 에 흐르는 전류  $i$ 는 전류원에서 공급하는 전류와 같은  $1[\text{mA}]$ 가 된다. 식 (1.4)를 이용하여 저항을 구하면 다음과 같다.

$$R = \frac{v}{i} = \frac{2}{10^{-3}} = 2 [\text{k}\Omega]$$

전도도는 식 (1.5)에 의해서 저항의 역수가 되므로 다음과 같다.

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{2 \times 10^3} = 0.5 [\text{mS}]$$

<sup>3</sup> 저항의 영향으로 도체에 실제 전류가 흐르면 에너지가 열로 바뀐다.

## 옴의 법칙 : 모르고 지나면 계속 후회하죠

옴의 법칙(ohm's law)은 전류의 세기는 두 점 사이의 전위차에 비례하고 저항에 반비례한다는 법칙으로, 식 (1.4)를 이용하여 다음과 같이 나타낸다.

### ★ 옴의 법칙 ★

$$V = IR \quad (1.6)$$

전압이 회로상의 어떤 소자(element)를 가로지르면서 흐르면, 전류는 전압에 직접적으로 비례하면서 변한다. 이때 저항은 전류의 양을 조절한다. 다시 말해, 전압값의 변화는 저항의 크기 변화에 의해 결정된다.

### 예제 1-2

옴의 법칙을 이용하여 [그림 1-3]의 저항  $R$ 에 흐르는 전류  $i$ 를 구하라.



[그림 1-3] [예제 1-2]의 회로

### 풀이

저항  $1 [k\Omega]$ 에 흐르는 전압  $v$ 는 전압원에서 공급하는 전압과 같은  $2 [V]$ 가 된다. 식 (1.6)을 이용하면 구하고자 하는 전류는 다음과 같다.

$$i = \frac{v}{R} = \frac{2}{10^3} = 2 [\text{mA}]$$

## 전력과 에너지 : 비슷한 말 같지만 느낌이 다르죠

전력(power)은 단위 시간당 이루어진 일의 양으로, 전류와 전압을 이용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = VI \quad (1.7)$$

전력은  $P$ 로 표기하고 단위는 와트(watt, [W])를 사용한다. 1와트는 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{[\text{joule}]}{[\text{coulomb}]} / \frac{[\text{coulomb}]}{[\text{sec}]} = [\text{joule/sec}] \text{ 혹은 } [\text{watt}]$$

옴의 법칙을 이용하여 전류와 저항 혹은 전압과 저항에 대해 전력을 나타내면 다음과 같다.

### ★ 전력 계산 ★

$$P = VI = I^2 R = \frac{V^2}{R} [\text{W}] \quad (1.8)$$

식 (1.8)에서 전력은 전류가 일정할 때는 저항에 비례하고, 전압이 일정할 때는 저항에 반비례함을 알 수 있다. 만일 저항 대신에 전도도를 이용하면 식 (1.8)은 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$P = V^2 G = \frac{I^2}{G} [\text{W}] \quad (1.9)$$

에너지(energy)는 일정 시간 동안 일을 할 수 있는 용량을 말한다. 에너지는  $W$ 로 표기하고 단위는 주울(joule, [J])을 사용한다. 에너지는 전력을 시간에 대해 적분하면 구할 수 있으므로 시간  $t_1$ 에서 시간  $t_2$  사이에 회로 소자에 의해서 소모되거나 공급되는 에너지는 다음과 같다.

### ★ 에너지 계산 ★

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P dt = \int_{t_1}^{t_2} (VI) dt \quad (1.10)$$

전력은 전압처럼 양과 음의 극을 가지며, 에너지이므로 소모되거나 혹은 공급되는 성질을 갖는다. 만일 전류가 높은 전압에서 낮은 전압으로 흐르면, 이때는 전력이 소모되는 경우로 부호는 양으로 표시된다. 반대로 전류가 낮은 전압에서 높은 전압으로 흐르면 전력이 공급되는 경우로 부호는 음으로 표시된다. 쉽게 말해, 낮은 곳에서 높은 곳으로 걸어가려면 평지와는 다르게 더 많은 운동량을 제공받아야 한다. 한마디로 힘이 듈다.

그러므로 소모된 전력(dissipated power)과 공급된 전력(supplied power)의 관계는 다음과 같다.

$$\text{소모된 전력} = -\text{공급된 전력}$$

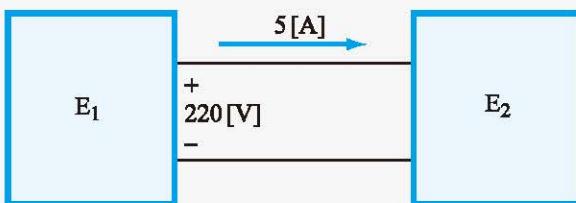
즉, 회로에서 에너지 보존 법칙에 의해서 순간 시간에서 전력의 총합은 0이 된다.

## Q 전력의 부호는 어떻게 결정하는가?

- A 전력의 부호를 쉽게 결정하는 방법은 민일 전압 공급의 방향이 전류와 동일하면 양의 부호, 반대인 경우는 음의 부호로 정하는 것이다.

### 예제 1-3

[그림 1-4]에서 회로 소자  $E_1$ 과  $E_2$  중 전력을 공급하는 소자와 소모하는 소자가 어느 것인지 각각 구하고, 소모된 전력 혹은 생성된 전력의 값을 구하라.



[그림 1-4] [예제 1-3]의 회로

#### 풀이

회로 소자  $E_1$ 에서 전압원의 방향이 전류와 반대이다. 그러므로 전력은 음의 부호를 가지며, 다음과 같이 구한다.

$$P = -VI = -(220[V])(5[A]) = -1100[W]$$

전류가 높은 전위에서 낮은 전위로 흐르고 있기 때문에 회로 소자  $E_1$ 은 공급원으로서 전력을 공급하고, 반면에 회로 소자  $E_2$ 는 부하로서 같은 전력 1100[W]를 소모한다(흡수한다).

# 회로 설계의 구성원

회로를 설계하는 데 자주 사용하는 기본 용어를 살펴보고 회로 측정 장비를 알아본다. 또한 회로를 해석할 때 가장 기본으로 사용하는 키르히호프의 법칙을 학습한다.

**Keywords** 단자 | 분기 | 접점 | 루프 | 그물망 | 저항계 | 전류계 | 전압계 | 전류원 | 전압원 |

## 회로 설계의 기본 용어 : 기본 용어를 이해하면 회로 해석이 편해요!

회로 설계는 기본적으로 음의 법칙에서 보여주는 저항, 전압, 전류를 가지고 구성한다. 여기에서는 회로 설계에 사용하는 기본 용어를 살펴보자.

### ■ 단자

단자(terminal)는 회로 내에서 발생한 전력을 외부로 보내거나, 반대로 회로 외부의 전력을 회로 내로 공급하기 위한 전류 흐름의 출입구 역할을 한다.<sup>4</sup>

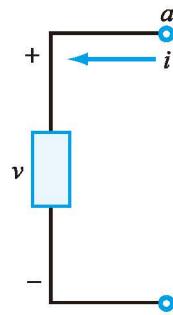
### ■ 분기

분기(branch)는 [그림 1-5]와 같이 두 개의 단자  $a$  와  $b$  사이에 연결되어 있는 부분을 말한다.

일반적으로  $a$  와  $b$  사이의 전위차를 나타내는 분기 전압  $v$  는 임의의 시간  $t$ 에 대해 양의 값을 갖는다( $v(t) > 0$ ). 일정 시간  $t$ 에 대해  $a$  의 전위(+가 연결)는  $b$  의 전위(-가 연결)보다 큰 값을 갖는다. 분기 전압  $v_{ab}$  는 두 전위  $v_a$  와  $v_b$  의 차이가 되고, 다음과 같이 나타낸다.

$$v_{ab}(t) = v_a(t) - v_b(t) \quad (1.11)$$

이때  $v_{ab}$  는 아래 첨자의 순서대로, 식 (1.11)의 우변 항과 같이  $v_a$  에서  $v_b$  를 빼는 형태로 지정하고  $v_{ab} > 0$  을 의미한다. 그러면  $v_{ba}$  는  $v_b - v_a$  로 표시 할 수 있고  $v_{ab} = -v_{ba}$  로 나타낼 수 있다. 반대로  $a$  의 전위(-가 연결)가  $b$  의 전위(+가 연결)보다 작은 값을 갖는 경우는  $v_{ab} < 0$  이 된다.



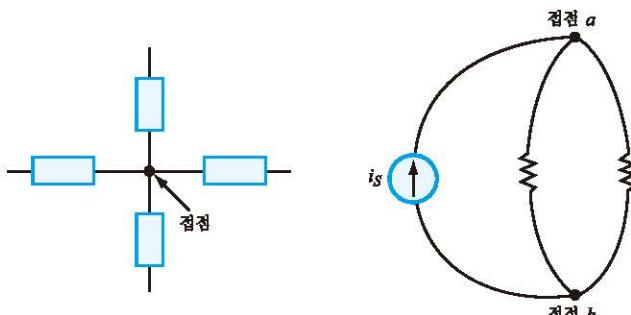
[그림 1-5] 분기

<sup>4</sup> 일반 가정용 건전지의 경우 + 극성과 - 극성을 갖는 양쪽 부분이 단자이며, 이것을 포트(port)라고 한다.

[그림 1-5]에서 단자  $a$ 와  $b$  사이에 흐르는 분기 전류  $i$ 도 임의의 시간  $t$ 에 대해 양의 값을 갖는다 ( $i(t) > 0$ ). 블록은 저항과 이후에 배울 전류원, 전압원과 같은 전기 소자들을 나타낸다.

### ■ 접점

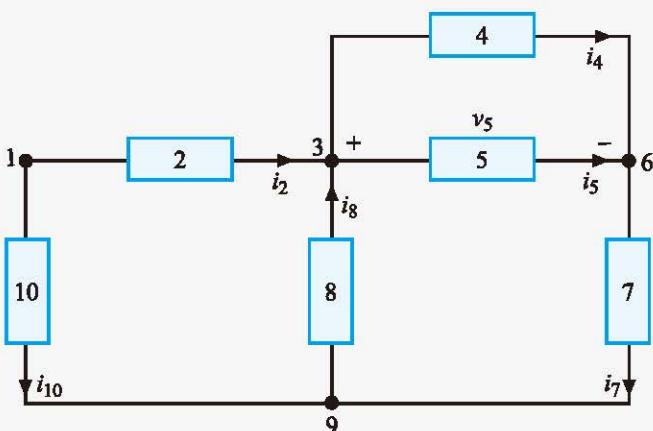
접점(node)은 [그림 1-6]처럼 두 개 혹은 그 이상 분기들이 만나는 공통 지점을 말한다. 실제 접점에서는 대부분 금속선이 서로 연결되어 있기 때문에 저항값이 완전히 0이 아닌 작은 값을 갖는다.



[그림 1-6] 접점

### 예제 1-4

[그림 1-7]에서 분기와 접점을 모두 찾으라.



[그림 1-7] [예제 1-4]의 분기와 접점 구성

### 풀이

번호 2, 4, 5, 7, 8, 10은 각각 분기를 나타내고, 번호 1, 3, 6, 9는 각각 접점을 나타낸다. 참고로, 전압  $v_5$ 와 전류  $i_5$ 는 단자 3과 단자 6 사이에 흐르는 분기 전압과 분기 전류를 나타낸다.

## ■ 루프(loop)

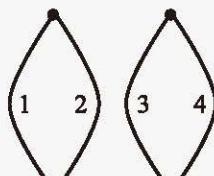
루프(loop)는 분기의 연결이 달혀 있는 것을 말한다. 루프가 되기 위해서는 다음 두 조건을 동시에 만족해야 한다.

- ① 전체 그래프를 구성하는 부분 그래프가 서로 연결되어야 한다.
- ② 부분 그래프의 두 분기들이 정확하게 각 접점을 한 번만 통과해야 한다.

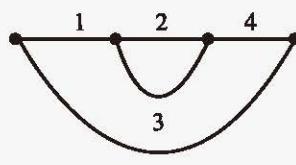
즉, 중복되지 않는 접점으로 구성되는 경로 중에서 시작 접점과 끝나는 접점은 서로 같아야 한다.

### 예제 1-5

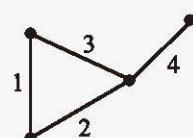
[그림 1-8]의 도형 중에서 루프를 찾고, 루프가 아닌 경우에는 그 이유를 간략히 설명하라.



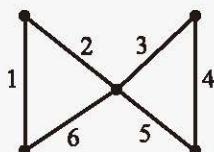
(a)



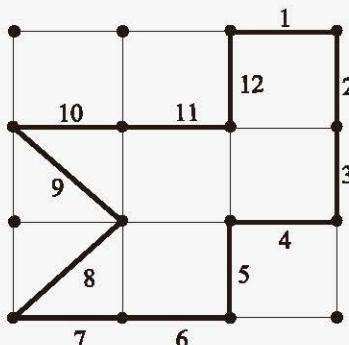
(b)



(c)



(d)



(e)

[그림 1-8] [예제 1-5]의 다양한 도형

### 풀이

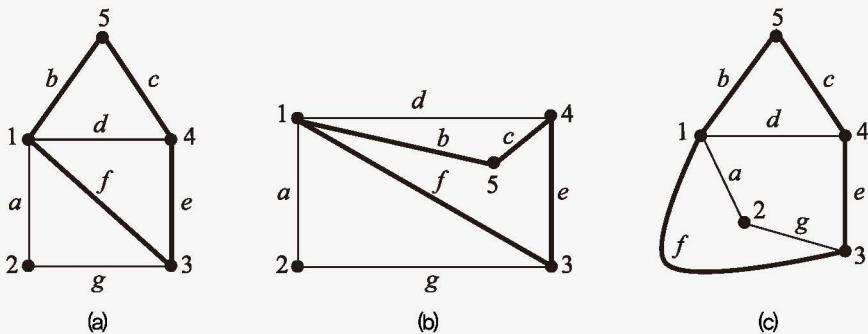
[그림 1-8]에서 (e)만 루프의 조건을 모두 만족한다. (a)는 루프의 조건 ①에 위반되고 (b), (c), (d)는 조건 ②에 위반되어 루프가 될 수 없다.

## ■ 그물망

그물망(mesh)은 루프의 특수한 형태로, 하나의 루프가 다른 루프를 포함하지 않는 닫힌 회로를 말한다.

### 예제 1-6

[그림 1-9]의 도형 중에서 그물망을 찾고, 그물망이 아닌 경우에는 그 이유를 간략히 설명하라.



[그림 1-9] [예제 1-6]의 다양한 도형

## 풀이

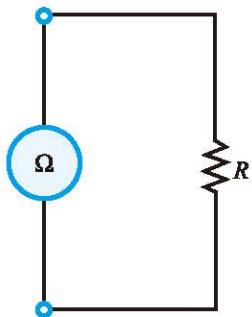
[그림 1-9]에서 (b)만 기준 그물망의 형태를 유지한다. (a)는 내부에 루프  $def$  를 포함하므로 그물 망이 아니다. (c)는 그물망의 바깥쪽에 분기를 포함하지 않는 특별한 그물망으로, 그래프의 외부 그 물망이라 한다.

### 회로의 측정 장치 : 정말로 간단하게 측정할 수 있어요

회로를 구성하는 요소인 저항, 전류, 전압을 측정하는 장치를 살펴보자.

## ■ 저항계의 사용 방법

[그림 1-10]은 회로 소자들 사이에 있는 저항을 측정하는 저항계(ohmmeter)의 기본 구성을 보여준다.

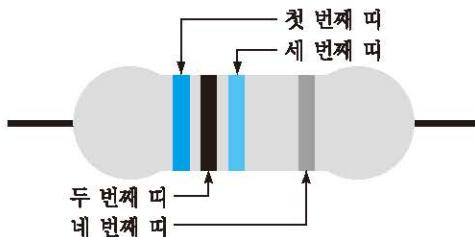


[그림 1-10] 저항계의 기본 구성

저항계는 저항 한 가지만 측정하기 위한 장치로서, 저항계의 눈금은 옴 단위로 되어 있다. 저항계에는 저항에 흐르는 전류를 이용하여 측정하는 방식과 저항에 가해지는 전압과 전류의 비를 이용하는 방식이 있다. 직접 저항계의 비늘에 가리키는 눈금을 읽어서 미지 저항의 값을 알 수 있다.

한편, 저항계를 이용하지 않고 저항의 값을 찾을 수도 있다. 실제 저항에는 [그림 1-11]과 같이 네 개의 색 띠가 있는데, 왼쪽부터 오른쪽으로 차례로 색 띠를 숫자로 변환시켜서 저항값을 찾을 수 있다. 각 띠들은 다음을 나타낸다.

- 첫 번째 띠 : 두 자리 저항값의 십의 자리
- 두 번째 띠 : 두 자리 저항값의 일의 자리
- 세 번째 띠 : 저항값의 단위를  $10^{\text{자리수}}$ 로 표시
- 네 번째 띠 : 저항의 오차 범위



[그림 1-11] 저항의 색 코드

각 색에 따른 숫자는 [표 1-1]을 이용해서 읽을 수 있다.

[표 1-1] 숫자로 변환한 저항의 색 코드

띠 색	첫 번째/두 번째 띠	세 번째 띠(단위)	네 번째 띠(오차)
검정	0	$\times 10^0$	$\pm 1\%$
갈색	1	$\times 10^1$	$\pm 2\%$
빨강	2	$\times 10^2$	-
주황	3	$\times 10^3$	-
노랑	4	$\times 10^4$	-
초록	5	$\times 10^5$	$\pm 0.5\%$
파랑	6	$\times 10^6$	$\pm 0.25\%$
보라	7	$\times 10^7$	$\pm 0.1\%$
회색	8	$\times 10^8$	$\pm 0.05\%$
흰색	9	$\times 10^9$	-
금색	-	$\times 10^{-1}$	$\pm 5\%$
은색	-	$\times 10^{-2}$	$\pm 10\%$

### 예제 1-7

저항의 띠 색이 다음과 같을 때 [표 1-1]을 이용하여 저항값을 구하라. 단, 네 번째 띠 색은 고려하지 않는다.

첫 번째 띠 : 갈색, 두 번째 띠 : 검정, 세 번째 띠 : 빨강

#### 풀이

갈색은 10을 나타내고, 검정은 0을 나타내므로 두 자리 저항값은  $100$ 이 된다. 여기에 빨강이 나타내는  $10^2$ 을 곱하면  $1000$ 이 된다. 따라서 구하고자 하는 저항값은  $1[\text{k}\Omega]$ 이 된다.

### 예제 1-8

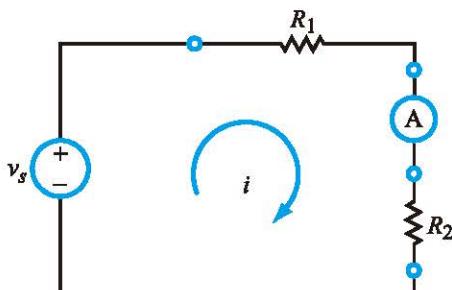
저항  $330[\Omega]$  을 띠 색으로 나타내라. 단, 저항의 오차를 고려하지 않는다.

#### 풀이

$330 = (30+3)\times 10^1$  으로 표시가 가능하기 때문에, 첫 번째와 두 번째 띠가 주황이고 세 번째 띠가 갈색이면  $330[\Omega]$  이 된다.

## ■ 직류 및 교류 측정에 사용하는 전류계

[그림 1-12]는 직렬(나중에 설명할 예정)로 연결되어 있는 회로 소자 사이에 흐르는 직류 전류 또는 교류 전류를 측정하는 전류계(ammeter)의 기본 구성을 보여준다. 전류계의 바늘이 가리키는 눈금을 읽어서 전류의 세기를 측정한다.

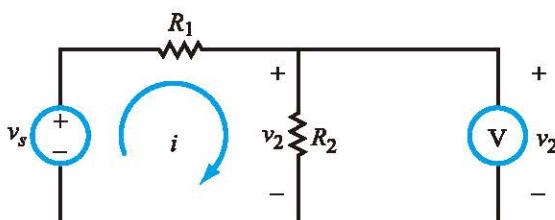


[그림 1-12] 전류계의 기본 구성

전류계를 사용할 때는 전류계를 회로에 직렬로 연결해야 하며, 전류계의 극이 바뀌면 눈금의 지침도 반대로 움직이므로 극이 바뀌지 않도록 주의해야 한다. 디지털 전류계는 내부에 설치된 표준 저항기에 전류를 흘린 후 전압 강하를 측정한 이후에 전류를 계산한다. 또한 디지털 신호로 변환하여 숫자로 나타내기 때문에 측정값을 정확히 읽을 수 있다. 전류계의 내부 저항값을 작게 하면 할수록 측정하는 전류값의 정확도를 향상시킬 수 있다. 왜냐하면 전류계 자체의 내부 저항으로 발생하는 전압 강하를 미연에 방지하기 때문이다.

## ■ 전위차를 측정하는 전압계

[그림 1-13]은 기본적으로 전류계와 같은 구성인 회로 소자에 흐르는 전압을 측정하는 전압계(voltmeter)의 기본 구성을 보여준다.

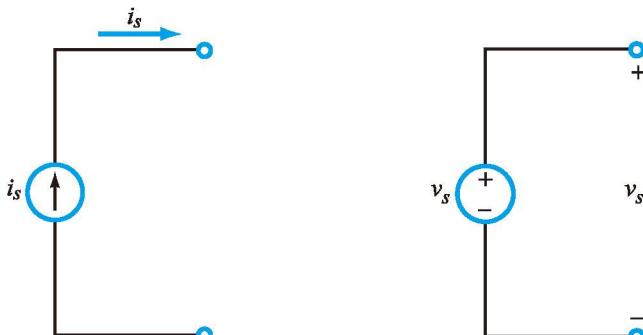


[그림 1-13] 전압계의 기본 구성

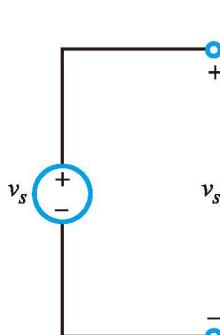
전압은 회로에서 두 접점 사이의 전위차를 나타내기 때문에, 전압계는 측정하려는 전압의 소자에 가로질러 연결해야 한다. 그러므로 전류계와는 반대로 회로에서 전압계는 병렬(나중에 설명할 예정) 연결로 접속해야 한다.

## ■ 전압 발생을 위한 전류원

전류원(current source)은 일정 전류를 회로에 공급하는 역할을 한다. 이때 임의의 전류를 공급하는 전류원을 이상 전류원(ideal current source)이라 한다. 이것은 양단자를 통해서 흐르는 전압과 상관없이 전류를 미리 규정된 값으로 유지할 수 있는 전류원이기 때문에 이론적으로 무한대의 전력을 공급할 수 있다. 이때 회로에 연결된 전류 공급원에 의해서 전압이 발생된다. [그림 1-14]는 이상 전류원을 보여준다.



[그림 1-14] 이상 전류원



[그림 1-15] 이상 전압원

## ■ 전류의 양을 결정하는 전압원

전압원(voltage source)은 일정 전압을 회로에 공급하는 역할을 한다. 이때 독립(independent) 전압원은 전압이 회로 다른 부분의 전압이나 전류에 영향을 받지 않지만, 종속(dependent) 전압원은 전압이 회로 다른 부분의 전압이나 전류에 의해 결정된다.

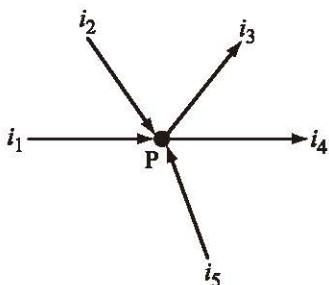
이상 전압원(ideal voltage source)은 전압의 양을 임의로 조절하여 제공한다. 이것은 양단자를 통해서 흐르는 전류와는 상관없이 미리 정해진 전압을 제공하기 때문에 이상 전류원과 마찬가지로 무한대의 전력을 공급할 수 있다. 이때 회로에 연결된 전압 공급원에 의해서 전류의 양이 결정된다. [그림 1-15]는 이상 전압원을 보여준다.

**키르히호프의 전류 법칙** : 회로 해석에서 감초 역할을 하지요

키르히호프의 전류 법칙(Kirchhoff's current law) 혹은 간단하게 KCL은 접점 법칙 또는 전류 법칙이라고도 하며, 전하 보존 법칙을 기반으로 한다. 주어진 회로에서 하나의 접점으로 들어가는 전류의 방향을 양의 부호로 정하면, 반대로 동일한 접점에서 나가는 전류의 방향은 음의 부호로 표시한다. 동일한 개념으로, 들어가는 전류의 방향을 음의 부호로 먼저 지정해도 아무런 문제는 없

으나 나가는 전류의 방향은 반드시 반대 부호인 양의 부호로 표시해야 한다. 전하는 생성되는 것이 아니고 항상 보존되어야 하기 때문에, 접점에서 들어가거나 나오는 전류의 합은 항상 0이 되어야 한다. 여기서 0은 상태가 보존된다는 의미이다. 즉, 전류가 통과하면서 서로 만나는 접점을 기준으로 접점으로 들어오는 전류와 접점에서 나가는 전류의 합은 같다.

[그림 1-16]은 접점 P에서 각각 다른 다섯 개의 전류가 임의로 들어가거나 나가는 것을 보여준다.

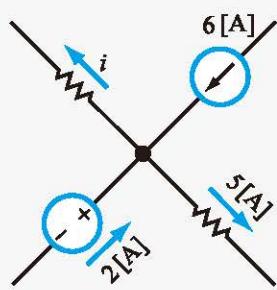


[그림 1-16] KCL의 해석

먼저 접점으로 들어가는 전류를 양의 부호로 정할 것인가 아니면 음의 부호로 정할 것인가를 결정하자. 접점으로 들어가는 모든 전류를 양의 부호로 결정하면  $+i_1$ ,  $+i_2$ ,  $+i_5$ 가 된다. 그러면 접점으로부터 나가는 모든 전류는 음의 부호로 결정되어  $-i_3$ ,  $-i_4$ 가 된다. KCL에 의해서 접점으로 들어오고 접점에서 나가는 전류의 합은 0이므로  $i_1 + i_2 - i_3 - i_4 + i_5 = 0$ 으로 나타낼 수 있다. 만일 접점으로 들어가는 전류를 음의 부호로 먼저 정하면, 접점으로부터 나가는 전류는 양의 부호가 되고 위의 과정을 반복하면  $-i_1 - i_2 + i_3 + i_4 - i_5 = 0$ 이 된다. 즉, 최종 결과는  $i_1 + i_2 - i_3 - i_4 + i_5 = 0$ 과 같다.

### 예제 1-9

KCL을 이용하여 [그림 1-17]의 전류  $i$  값을 구하라.



[그림 1-17] [예제 1-9]의 회로

## 풀이

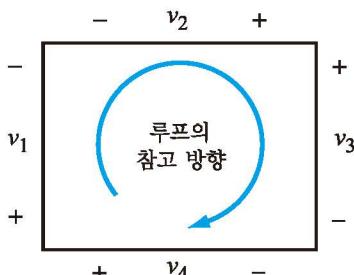
접점으로 전류계에서 생성된 전류  $6[A]$  와 전압계에 의한 전류  $2[A]$  가 들어간다. 반면에, 전류  $5[A]$  가 접점에서 나온다. 이때 구하고자 하는 전류  $i$  는 나오는 전류이다. 만일 들어가는 전류를 양의 부호로 설정하면  $+6, +2$  가 되고, 나오는 전류는 음의 부호를 붙여서  $-i, -5$  가 된다. 여기에 KCL을 적용하면  $-i - 5 + 6 + 2 = 0$  이 되므로, 구하고자 하는 전류값은  $i = 3[A]$  가 된다.

## 키르히호프의 전압 법칙 : 이 법칙도 회로 해석에서 감초 역할을 하지요

키르히호프의 전압 법칙(Kirchhoff's voltage law) 혹은 간단하게 KVL은 루프 법칙 또는 전압 법칙이라고도 하며, 에너지 보존 법칙을 기반으로 한다.

몇 개의 분기로 이루어진 루프에서, 루프(폐회로)의 시계 방향 혹은 반시계 방향 중 한쪽을 참고 방향으로 정한 후 각 분기를 흐르는 전압 방향이 참고 방향과 일치하면 양의 부호를 붙이고, 일치하지 않는 경우는 음의 부호를 붙인다. 이때 루프를 통과하는 모든 분기 전압의 대수합은 0이 된다.

[그림 1-18]은 사각형 루프에서 각각 다른 네 개의 분기 전압을 보여준다.

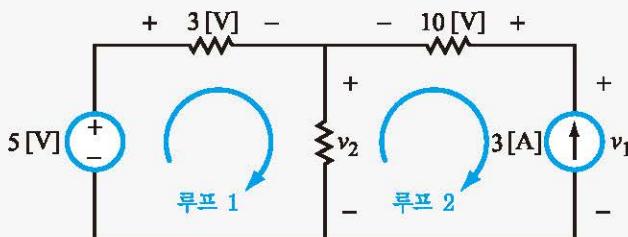


[그림 1-18] KVL의 해석

먼저 루프의 참고 방향을 시계 방향으로 정하면(반시계 방향을 참고 방향으로 정해도 상관없다), 분기 전압  $v_1$  과  $v_3$  는 참고 방향과 동일하므로 양의 부호를, 분기 전압  $v_2$  와  $v_4$  는 참고 방향과 반대이므로 음의 부호를 붙인다. KVL에 의해서 분기 전압의 전체 합은 0이므로  $v_1 - v_2 + v_3 - v_4 = 0$  으로 나타낼 수 있다.

### 예제 1-10

KVL을 이용하여 [그림 1-19]의 분기 전압  $v_1$ 과  $v_2$ 를 구하라.



[그림 1-19] [예제 1-10]의 회로

#### 풀이

[그림 1-19]에서 왼쪽 루프를 ‘루프 1’로 하고 오른쪽 루프를 ‘루프 2’라고 정한 후에 양쪽 모두 시계 방향을 참고 방향으로 정한다.

먼저, 루프 1에서 전압원 5[V]는 참고 방향과 반대이므로 음의 부호를 갖고, 분기 전압  $v_2$ 와 구하는 분기 전압  $v_2$ 는 참고 방향과 동일하므로 양의 부호를 갖는다. 여기에 KVL을 적용하면

$$-5 + 3 + v_2 = 0$$

이 되어 루프 2와 공유하는 분기 전압  $v_2 = 2$  [V]가 된다.

루프 2에서 분기 전압  $v_2$ 와 10 [V]는 참고 방향과 반대이므로 음의 부호를 갖고, 구하는 분기 전압  $v_1$ 은 참고 방향과 동일하므로 양의 부호를 갖는다. 여기에 KVL을 적용하면

$$-v_2 - 10 + v_1 = 0$$

이 되고, 루프 1에서 구한  $v_2 = 2$  를 대입하면 분기 전압  $v_1 = 12$  [V]가 된다.

SECTION  
**03**

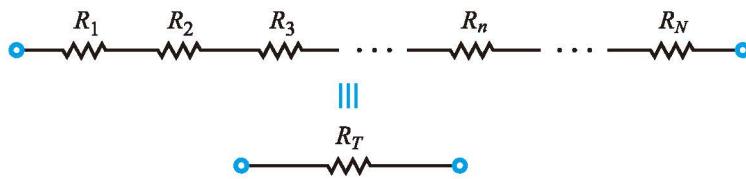
## 등가 저항과 개방/단락 회로

직렬 및 병렬로 연결된 저항의 등가 저항을 구해보고, 무한대 저항에 의한 개방 회로와 0의 저항에 의한 단락 회로를 이해한다.

**Keywords** | 직렬 저항 | 병렬 저항 | 개방 회로 | 단락 회로 |

### 직렬 저항 : 계속 더하세요

만일 두 개 이상의 저항 소자가 [그림 1-20]처럼 연속적으로 연결되어 있고 각 저항에 동일한 전류가 흐르면, 이것을 저항의 직렬 연결이라고 한다.



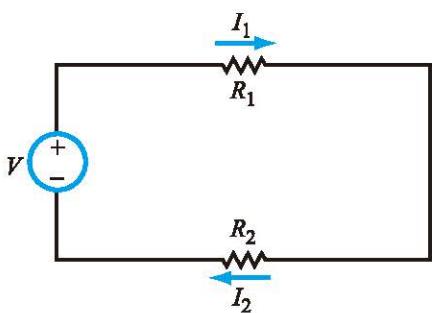
[그림 1-20] 저항의 직렬 연결

저항  $N$  개가 직렬로 연결되어 있는 경우, 총 저항값  $R_T$  혹은 등가 저항값은 다음과 같이 각각의 저항값을 합한 식으로 나타낼 수 있다.

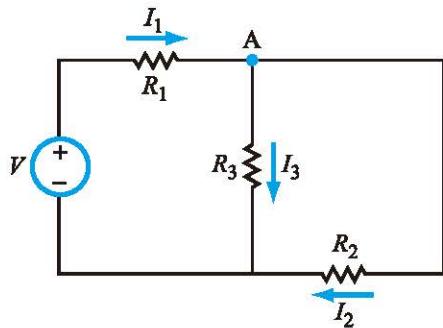
### ★ 직렬 저항 계산 ★

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n + \cdots + R_N = \sum_{n=1}^N R_n \quad (1.12)$$

[그림 1-21]에서 저항  $R_1$ 과  $R_2$ 는 한쪽 끝에 아무런 접합점 없이 연결되어 있으므로 서로 직렬이다. 그러므로 각각의 저항에는 같은 양의 전류  $I_1 = I_2$  가 흐른다. 그러나 [그림 1-22]의 회로에서 저항  $R_1$ 과  $R_2$ 는 직렬 연결이 아니다. 왜냐하면 KCL에 의해 접점 A에서  $I_1 = I_2 + I_3$  가 되어 두 개의 저항  $R_1$ 과  $R_2$ 에 흐르는 전류가  $I_1 \neq I_2$  이기 때문이다.



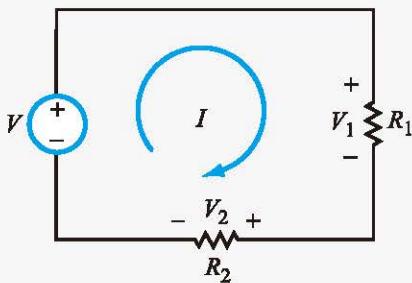
[그림 1-21] 직렬 저항의 경우



[그림 1-22] 직렬 저항이 아닌 경우

### 예제 1-11

[그림 1-23]에서 저항  $R_1$ 과  $R_2$ 를 지나는 전압  $V_1$ 과  $V_2$ 를 구하라.



[그림 1-23] [예제 1-11]의 회로

#### 풀이

KVL을 이용하여 전압원  $V$ 를 나타내면  $V = V_1 + V_2$ 이다. 직렬로 연결된 두 저항의 총합을 구하면  $R_T = R_1 + R_2$ 이므로, 음의 법칙으로 회로에 흐르는 전류  $I$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = \frac{V}{R_T} = \frac{V}{R_1 + R_2}$$

저항  $R_1$ 과  $R_2$ 에 다시 음의 법칙을 이용하여 전압  $V_1$ 과  $V_2$ 를 구하면 다음과 같다.<sup>5</sup>

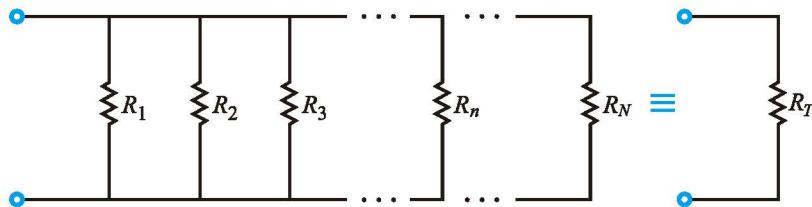
$$V_1 = IR_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}V$$

$$V_2 = IR_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}V$$

<sup>5</sup> 두 식은 2장에서 학습한 전압 분할 법칙의 기본 개념이 적용된다.

## 병렬 저항 : 역수를 더하고 다시 역수를 취하세요

만일 두 개 이상 저항 소자가 [그림 1-24]처럼 평행으로 연결되어 있고 각 저항에 동일한 전압이 흐르면, 이것을 저항의 병렬 연결이라고 한다.



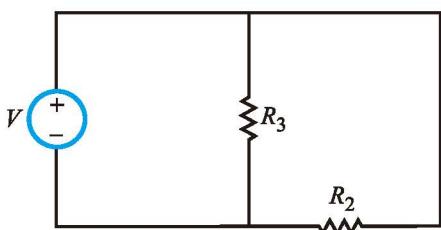
[그림 1-24] 저항의 병렬 연결

저항  $N$  개가 병렬로 연결되어 있는 경우, 총 저항값의 역수는 다음과 같이 각 저항의 역수의 합을 더한 식으로 나타낼 수 있다.

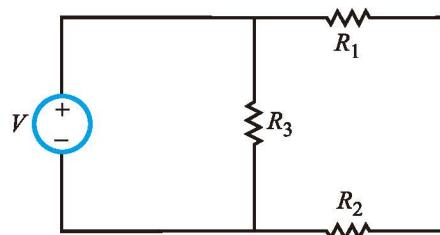
### ★ 병렬 저항 계산★

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} + \dots + \frac{1}{R_N} \quad (1.13)$$

[그림 1-25]에서 저항  $R_2$  와  $R_3$ 는 그 사이에 다른 회로 소자가 없고, 직접 연결되어 있으므로 서로 병렬이다. 그러므로 각 저항에는 동일한 전압의 양이 흐른다. 그러나 [그림 1-26]의 회로에서 저항  $R_2$  와  $R_3$ 는 병렬 연결도 직렬 연결도 아닌 상태를 보여준다.



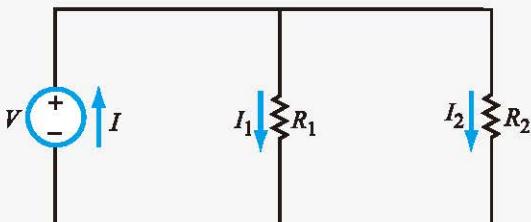
[그림 1-25] 병렬 저항의 경우



[그림 1-26] 병렬 저항이 아닌 경우

### 예제 1-12

[그림 1-27]에서 저항  $R_1$ 과  $R_2$ 에 흐르는 전류  $I_1$ 과  $I_2$ 를 구하라. 또한 전압원  $V$ 를 지나는 전류  $I$ 를 구하라.



[그림 1-27] [예제 1-12]의 회로

풀이

KCL을 이용하면 전압원  $V$ 를 지나는 전류  $I$ 를 나타내면 다음과 같다.

$$I = I_1 + I_2$$

병렬로 연결된 두 저항의 총합은

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

혹은

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

이 된다. 옴의 법칙으로 전압원을 지나는 전류  $I$ 를 나타내면 다음과 같다.

$$I = \frac{V}{R_T} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} V$$

저항  $R_1$ 과  $R_2$ 에 다시 옴의 법칙을 이용하여 전류  $I_1$ 과  $I_2$ 를 구하면 다음과 같다.<sup>❸</sup>

$$I_1 = \frac{V}{R_1} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) I$$

$$I_2 = \frac{V}{R_2} = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) I$$

❸ 두 식은 2장에서 학습한 전류 분할 법칙의 기본 개념이 적용된다.

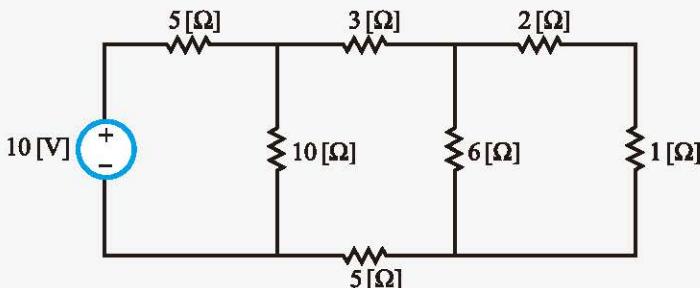
Q 여러 개의 저항이 연결되어 있을 때, 어떻게 하면 등가 저항을 쉽게 찾을 수 있을까?

A 다음 과정을 통해 등가 저항을 쉽게 찾을 수 있다.

- ① 먼저 주어진 회로의 왼쪽 끝 혹은 오른쪽 끝 중 어느 쪽에서 해석을 시작할지를 결정한다. 대개의 경우 전압원이 놓여 있는 반대 방향부터 해석을 시작한다.
- ② 왼쪽 혹은 오른쪽 방향을 결정한 후에는 처음 놓여 있는 저항을 시작으로 하여 다음의 저항이 수직으로 놓여 있는 경우에는 저항의 병렬 연결을 실행하고, 저항이 수평으로 놓여 있는 경우에는 저항의 직렬 연결을 실행한다.

### 예제 1-13

[그림 1-28]의 전압원에서 본(seen by source) 등가 저항값을 구하라.



[그림 1-28] [예제 1-13]의 회로

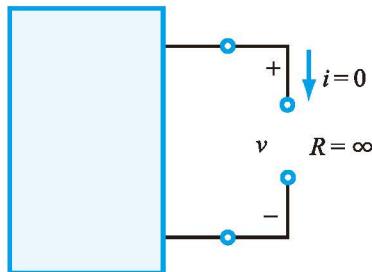
### 풀이

전압원의 반대 방향인 회로의 오른쪽부터 저항 해석을 시작하여 전체 저항, 즉 등가 저항을 다음과 같은 과정으로 계산한다.

- ① 오른쪽의 맨 처음에 놓여 있는 저항  $1[\Omega]$ 은 수평으로 저항  $2[\Omega]$ 과 연결되어 있으므로, 직렬 저항 계산을 하면  $2+1=3[\Omega]$ 이다.
- ② ①에서 계산된 저항  $3[\Omega]$ 은 수직으로 저항  $6[\Omega]$ 과 연결되어 있으므로, 병렬 저항 계산을 하면  $6 \parallel 3 = 2[\Omega]$ 이다.
- ③ ②에서 계산된 저항  $2[\Omega]$ 은 수평으로 저항  $3[\Omega]$ ,  $5[\Omega]$ 과 연결되어 있으므로, 직렬 저항 계산을 동시에 하면  $2+3+5=10[\Omega]$ 이다.
- ④ ③에서 계산된 저항  $10[\Omega]$ 은 수직으로 저항  $10[\Omega]$ 과 연결되어 있으므로, 병렬 저항 계산을 하면  $10 \parallel 10 = 5[\Omega]$ 이다.
- ⑤ ④에서 계산된 저항  $5[\Omega]$ 은 수평으로 저항  $5[\Omega]$ 과 연결되어 있으므로, 직렬 저항을 계산을 하면 최종적으로 등가 저항은  $R_T = 5+5=10[\Omega]$ 의 값을 얻는다.

## 개방 회로 : 전류가 지나는 길이 끊어졌군요

개방 회로(open circuit)는 회로의 소자를 연결하는 도선이 열려 있는 경우, 전류가 더 이상 흐르지 못하는 상태를 말한다. [그림 1-29]는 개방 회로를 보여준다. 회로 소자에서 저항값이 무한대에 접근하면, 개방 회로상에 전류가 전혀 흐르지 않게 된다. 즉,  $R = \infty$  가 되면 임의의 전압값  $v$  가 발생해도 옴의 법칙에 의해서  $i = \frac{v}{R} = \frac{v}{\infty} = 0$  이 된다.

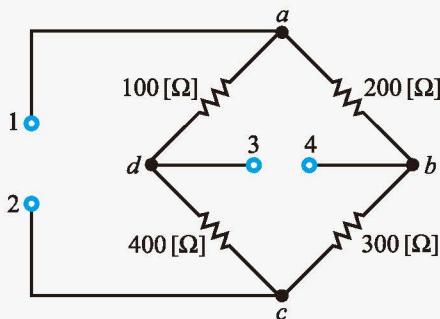


[그림 1-29] 개방 회로

### 예제 1-14

[그림 1-30]에 대해 다음을 구하라.

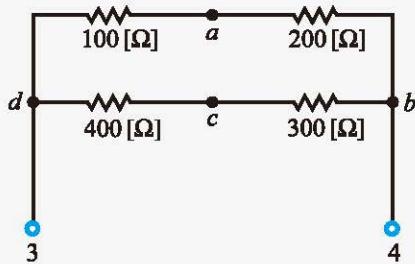
- 단자 1과 단자 2 사이가 개방되었을 때, 단자 3과 단자 4 사이에서 들여다 본 등가 저항
- 단자 3과 단자 4 사이가 개방되었을 때, 단자 1과 단자 2 사이에서 들여다 본 등가 저항



[그림 1-30] [예제 1-14] 회로

### 풀이

- (a) 단자 1과 단자 2 사이를 개방시킨 후 단자 3과 단자 4 사이에서 들여다 본 등가 회로를 그리면 [그림 1-31]과 같다.

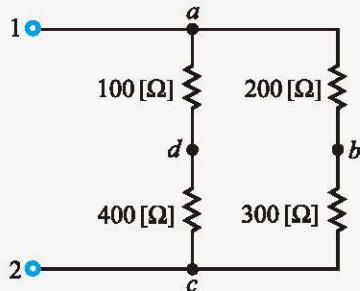


[그림 1-31] 단자 3과 단자 4 사이에서 들여다 본 등가 회로

[그림 1-31]을 이용하면 다음과 같이 등가 저항을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}R_T &= (100 + 200) \parallel (400 + 300) \\&= \frac{300 \times 700}{300 + 700} = 210 \text{ } [\Omega]\end{aligned}$$

- (b) 단자 3과 단자 4 사이를 개방시킨 후 단자 1과 단자 2 사이에서 들여다 본 등가 회로를 그리면 [그림 1-32]와 같다.



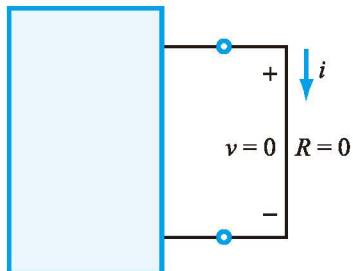
[그림 1-32] 단자 1과 단자 2에서 들여다 본 등가 회로

[그림 1-32]를 이용하면 다음과 같이 등가 저항을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}R_T &= (100 + 400) \parallel (200 + 300) \\&= \frac{500 \times 500}{500 + 500} = 250 \text{ } [\Omega]\end{aligned}$$

## 단락 회로 : 전압이 존재감을 상실하네요

개방 회로와는 다르게 단락 회로(short circuit)는 끊어진 도선 없이 회로 소자와 소자는 모두 연결되어 있지만, 저항값이 0에 가까운 상태가 된다.



[그림 1-33] 단락 회로

[그림 1-33]은 단락 회로를 보여준다. 회로 소자에서 저항값이 0에 접근하여 전류의 흐름에 방해를 받지 않도록 한다. 즉,  $R = 0$ 이 되면 임의의 전류값  $i$ 가 흘러도 옴의 법칙에 의해서 양단의 전압은  $v = iR = i \cdot 0 = 0$ 이 된다. 한편, 단락 회로는 저항값이 0에 가깝기 때문에 매우 높은 전류가 흐르게 되면 회로에 문제가 발생할 수 있다.

### 예제 1-15

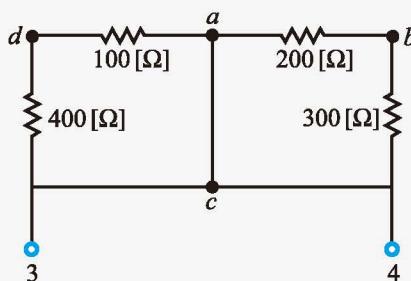
[예제 1-14]의 [그림 1-30]에 대해 다음을 구하라.

- 단자 1과 단자 2 사이가 단락되었을 때 단자 3과 단자 4 사이에서 들여다 본 등가 저항
- 단자 3과 단자 4 사이가 단락되었을 때 단자 1과 단자 2 사이에서 들여다 본 등가 저항

### 풀이

(a) 단자 1과 단자 2 사이를 단락시킨 후 단자 3과 단자 4 사이에서 들여다 본 등가 회로를 그리면

[그림 1-34]와 같다.

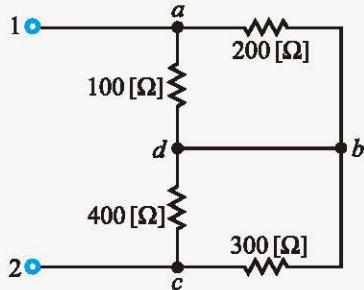


[그림 1-34] 단자 3과 단자 4에서 들여다 본 등가 회로

[그림 1-34]를 이용하면 다음과 같이 등가 저항을 구할 수 있다.

$$R_T = (100 \parallel 400) + (200 \parallel 300)$$
$$= \frac{100 \times 400}{100 + 400} + \frac{200 \times 300}{200 + 300} = 200 [\Omega]$$

- (b) 단자 3과 단자 4 사이를 단락시킨 후 단자 1과 단자 2 사이에서 들여다 본 등가 회로를 그리면 [그림 1-35]와 같다.



[그림 1-35] 단자 1과 단자 2 사이에서 들여다 본 등가 회로

[그림 1-35]를 이용하면 다음과 같이 등가 저항을 구할 수 있다.

$$R_T = (100 \parallel 200) + (400 \parallel 300)$$
$$= \frac{100 \times 200}{100 + 200} + \frac{400 \times 300}{400 + 300} \approx 238 [\Omega]$$

## 01

## 연습문제

**1.1** 100만 개의 전자가 운반하는 전하량을 구하라.

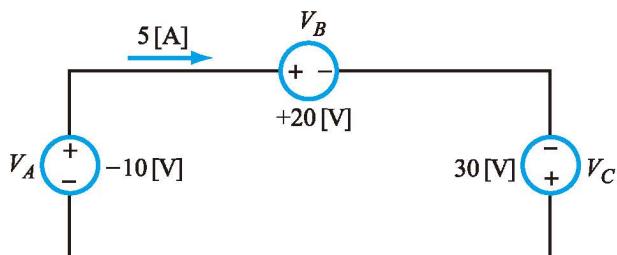
**1.2** 다음 회로에서 전도도  $G$  와 저항을 구하라. 단,  $G$  에 흐르는 전류는  $i = 2 \text{ [mA]}$  이다.



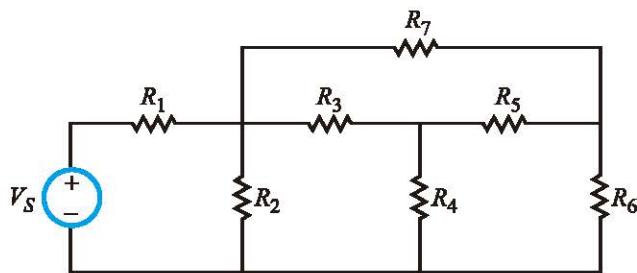
**1.3** 다음 회로에서 저항  $R = 10 \text{ [k}\Omega\text{]}$ 에 대한 전력  $P$ 를 구하라.



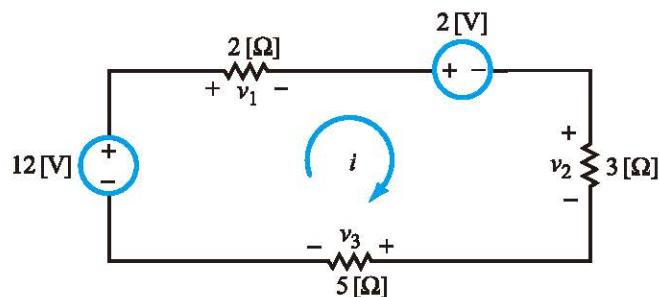
**1.4** 다음 회로에서 세 개의 전압원에 대한 전력을 구하라. 그리고 전력을 소모하는 전압원과 전력을 공급하는 전압원을 각각 판별하라.



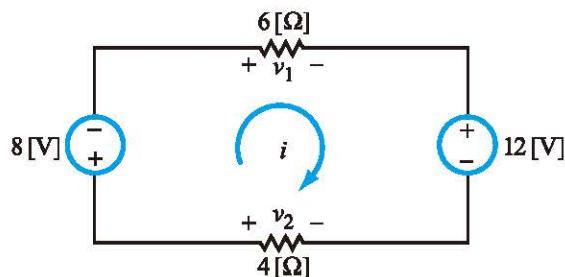
**1.5** 다음 회로에서 접점과 분기의 수를 구하라.



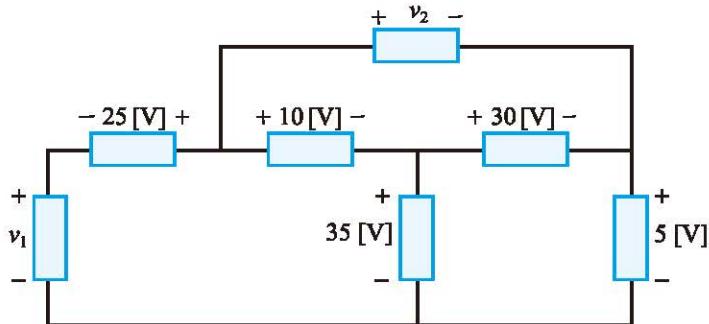
**1.6** 다음 회로에서 전류  $i$ 를 구하라.



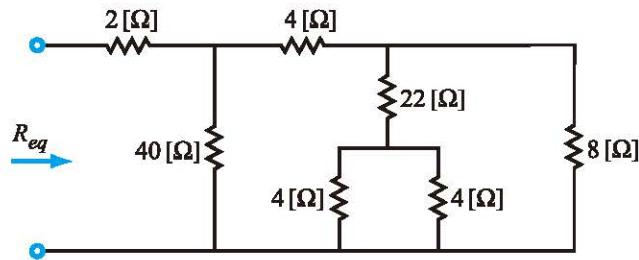
**1.7** 다음 회로에서 전압  $v_1$ 과  $v_2$ 를 구하라.



**1.8** 다음 회로에서 전압  $v_1$ 과  $v_2$ 를 구하라.



**1.9** 다음 회로의 전압원에서 들여다 본 등가 저항을 구하라.



**1.10** 다음 회로에 대한 등가 전도도를 구하라.

