

1일차 (DAY 1)



센서와 신호처리의 이해

센서 · 증폭회로 · 계측 실습

교육 과정 · 7시간 구성

CURRICULUM — 총 7 시간

01

센서의 이해

Introduction to Sensors

p.3–10

02

센서의 특성

Sensor Characteristics

p.11–29

休

휴식 Break

03

센서의 분류

Sensor Classification

p.30–37

04

신호처리와 증폭 (OP-Amp)

Signal Processing & Amplification

p.38–65

休

점심식사 Break

05

계측 장비

Measurement Instruments

p.66–69

06

실습 — Practice #1~6

Hands-on Practice

p.70–76

MODULE 01



센서의 이해

01

Introduction to Sensors

센서의 정의·외부 자극·트랜스듀서·스마트 센서까지, 센서의 기본

슬라이드 p.3-10

센서의 정의

■ 센서(sensor)

- 외부자극(stimulus)을 받아 이것을 전기신호로 변환하는 소자
- 외부자극 : 검출하고자 하는 양(quantity), 특성 (property) 또는 상태(condition)
- 변환에 이용하는 현상 : 물리적, 화학적, 생물학적 현상



외부 자극의 종류

에너지 형태	센서에 이용되는 특성 예	인간의 오감
역학적 에너지 (mechanical energy)	위치, 속도, 가속도, 힘, 압력, 응력, 변형, 유체흐름, 질량, 밀도, 모멘트, 토크, 형상, 방위, 점도	청각(hearing) · 촉각(touch)
복사 에너지 (radiant energy)	복사강도, 에너지, 파장, 진폭, 위상, 투과율, 편광(polarization)	시각(seeing) · 촉각(touch)
열 에너지 (thermal energy)	열(heat), 온도(temperature), 열속(thermal flux)	촉각(touch)
자기 에너지 (magnetic energy)	자계세기, 모멘트, 투자율, 자속밀도	—
화학 에너지 (chemical energy)	농도, 반응률(reaction rate), 산화환원전위(redox potential), 생물학적 특성	후각(smell) · 미각(taste)
전기 에너지 (electrical energy)	전압, 전류, 저항, 정전용량, 주파수	—

인간의 오감과 센서

Human Senses → Electronic Sensors :
다섯 가지 감각을 대응하는 전자 센서로 구현



시각 Vision

전자 눈 (electronic eye)

물리적 : 광자 감지 (Photon sensing)



청각 Hearing

전자 귀 (electronic ear)

물리적 : 음압 감지 (Sound pressure)



후각 Smell

전자 코 (electronic nose)

화학적 : 휘발성 화합물 (Odorants)



촉각 Touch (Tactile)

전자 피부 (electronic skin)

물리적 : 압력·질감 (Pressure, Texture)



미각 Taste

전자 혀 (electronic tongue)

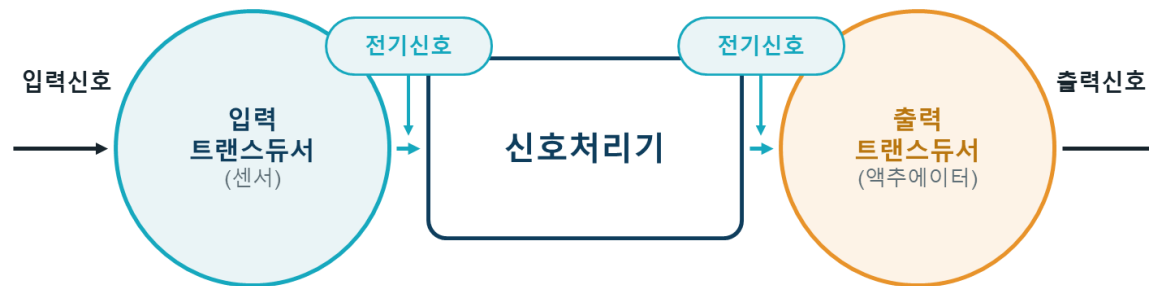
생물학적 : 단백질 등 (Proteins)



센서와 트랜스듀서

- 트랜스듀서(transducer)

- 한 에너지 형태(신호)를 다른 에너지 형태(신호)로 변환하는 소자를 총칭하는 용어
- 측정 시스템에서
 - **센서** : 비전기적 양을 전기신호로 변환하는 입력 트랜스듀서(input transducer)
 - **액추에이터(actuator)** : 전기신호를 다른 에너지로 변환하는 출력 트랜스듀서(output transducer)
- 센서와 액추에이터의 차이는 출력이 전기적 신호(에너지)인가 아닌가에 의해서 결정된다. 그러나 실제로는 두 용어가 자주 동일한 의미로 사용되고 있다.



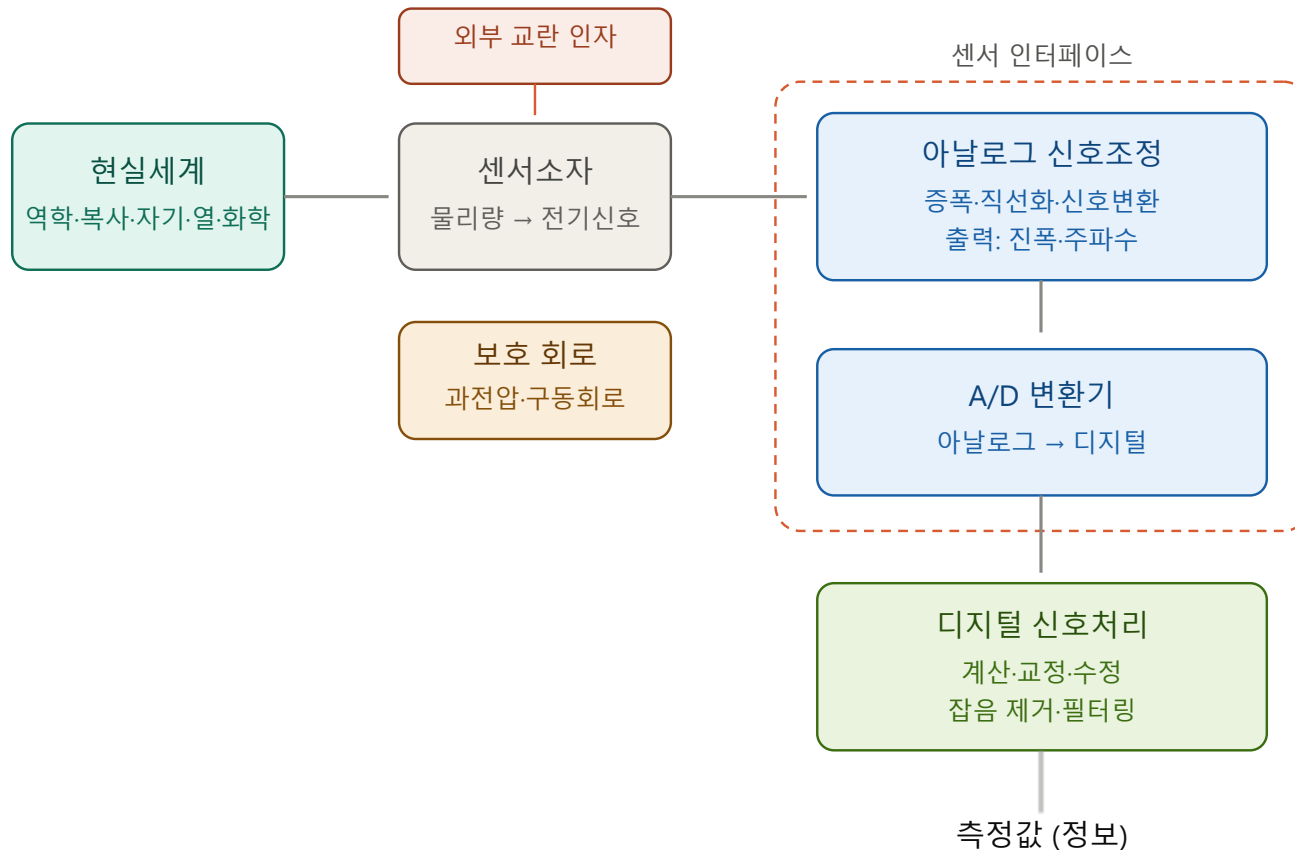
예 : 온도 측정 시스템



센서 시스템

■ 센서 시스템(sensor system)

- 센서 및 그것과 관련된 신호처리 하드웨어(signal processing hardware)
- 시스템은 측정 시스템, 데이터 획득 시스템 (data acquisition system), 공정 제어 시스템 (process control system)이 될 수 있다.



Smart 센서

- 스마트 센서(smart sensor) 또는 인텔리전트 센서(intelligent sensor)
 - 컴퓨터 기술의 결합에 의해서 센서가 지능을 갖도록 한 센서
 - 새로운 데이터의 취득, 처리, 저장: 피측정량을 측정하고, 연산, 통계적 처리를 하여 그 결과를 메모리에 저장
 - 자동보상 기능 : 외부 파라미터의 변화를 자동으로 보상
 - 자기진단 기능(self-diagnostics) : 자기 스스로를 테스트
 - 의사결정 기능(decision-making) : 어떤 데이터를 전송할 것인지를 스스로 선택
 - 통신기능(communications capability) : 다른 센서와 대화기능(정보교환기능)

Smart 센서

- 바이오 센서를 통하여 획득한 혈당 정보를 무선으로 전송하여 인슐린 펌프에서 자동으로 인슐린을 분비하여 혈당 수치를 제어한다

수동적 채혈 방식 (Legacy) (수동 제어)



채혈을 통한 혈당 수치 측정
(Measuring Blood Glucose via sampling)

 수치  인경사

통합형 무선 관리 시스템 (Modern) (실시간 통합 관리)



MODULE 02



센서의 특성

02

Sensor Characteristics

정특성·동특성, 확도와 정도, 교정, 직선성·히스테리시스 등 센서의 기준

슬라이드 p.11-29

센서의 기본 특성

- **센서의 특성**

- **정특성(static characteristics)**

- 입력이 시간적으로 변하지 않을 때의 특성
 - 예 : 감도(sensitivity)
선형성(linearity)
히스테리시스(hysteresis)

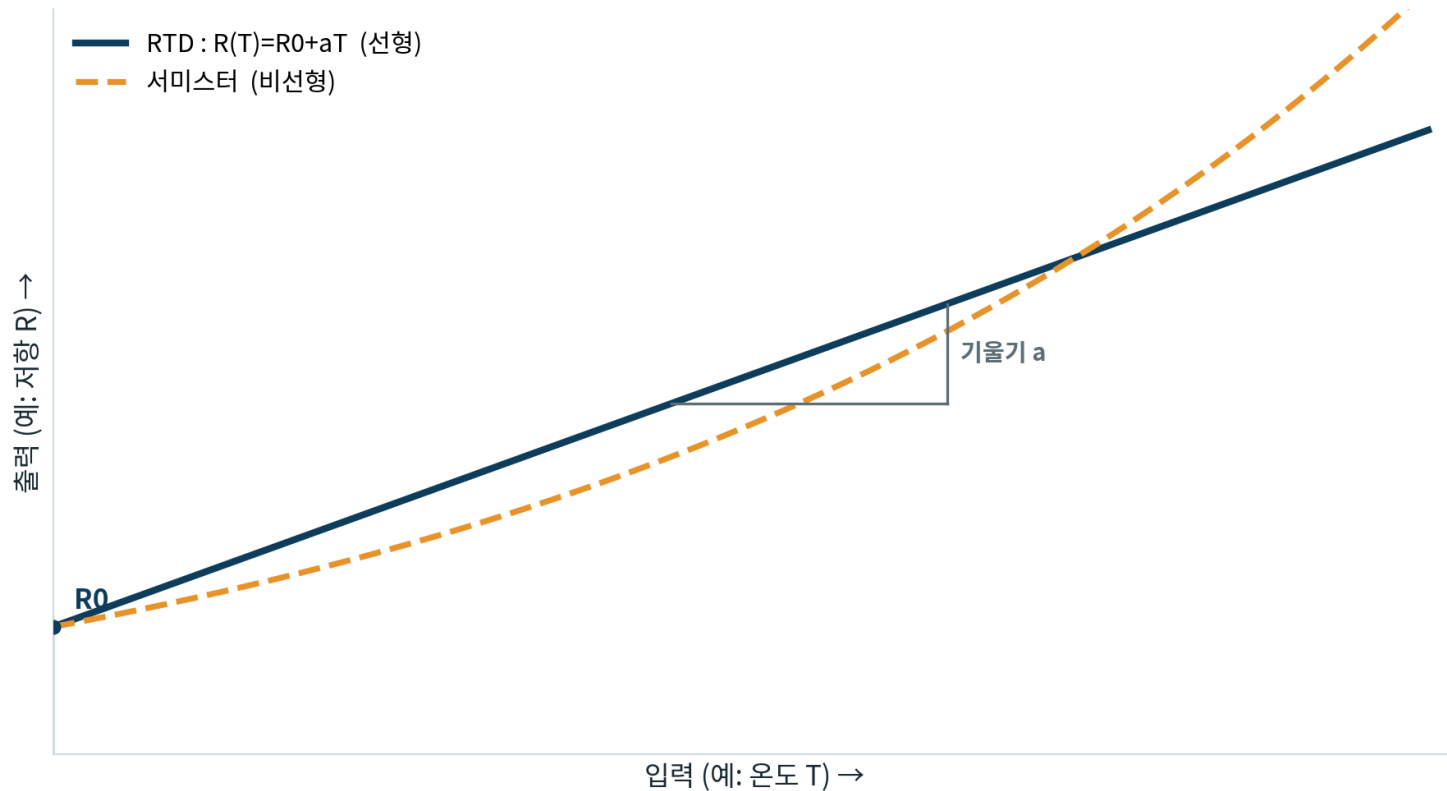
- **동특성 (dynamic characteristics)**

- 입력이 시간에 따라 변할 때의 특성
 - 예 : 응답 시간 (response time or speed)
주파수 특성 (frequency characteristic)

전달 함수 (Transfer Function)

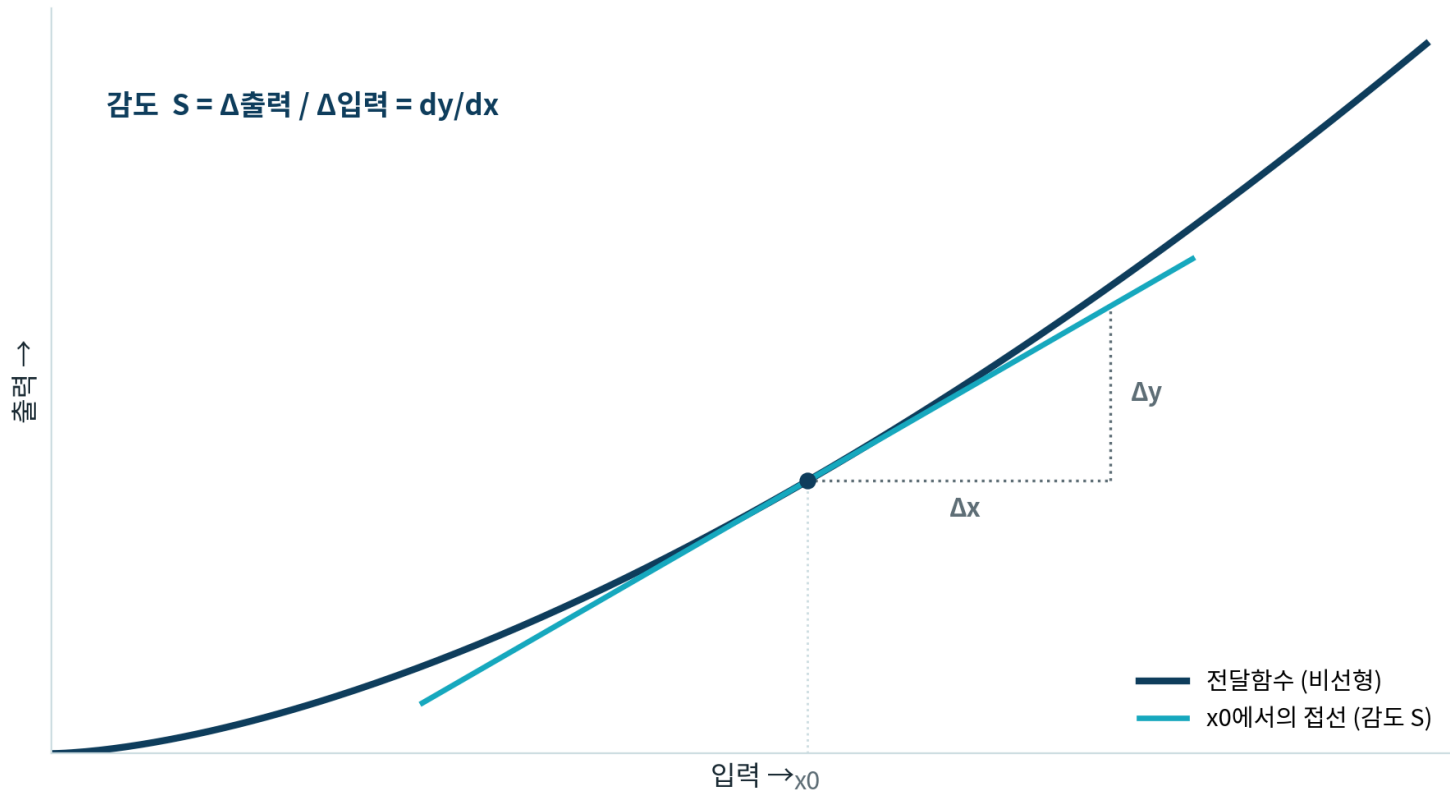
■ 센서의 물리적 입력과 출력 사이의 함수 관계

예: RTD $R(T)=R_0+aT$ (선형), 서미스터(비선형)



감도 (Sensitivity)

- 감도 = 출력 변화 / 입력 변화 (전달함수의 기울기) — 비선형이면 특정 입력값에서의 접선 기울기 dy/dx



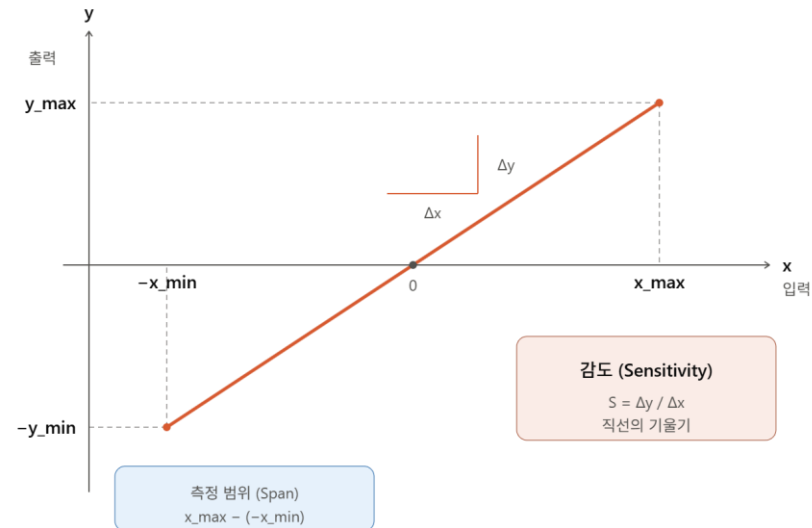
Operating range 와 full scale 출력

- 동작범위 (operating range) 또는 스패(span)

- 의미 있는 센서출력을 발생시키는 최대입력과 최소입력 사이의 범위

$$-x_{min} \sim +x_{max}$$

- 이것을 입력 풀 스케일(input full scale ; FS) 또는 풀스케일 레인지(full scale range)라고 부름
- 많은 경우 스패는 $0 \sim +x_{max}$ 임.

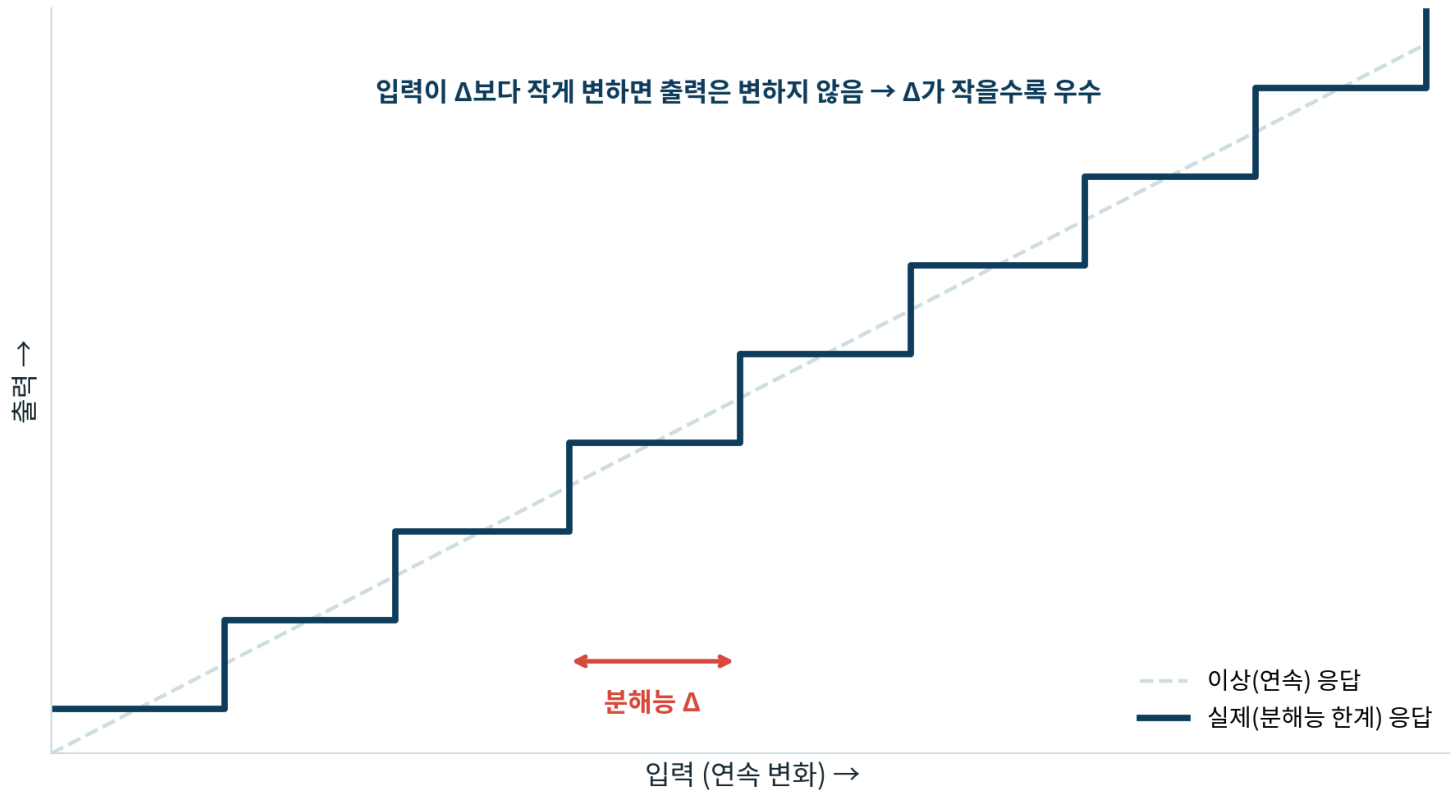


- 풀 스케일 출력(full scale output ; FSO)

- 최대출력($+y_{max}$)과 최소출력($-y_{min}$)사이의 대수적 차
- 입력에 대해 정격입력, 출력에 대해 정격출력이란 용어도 함께 사용

분해능 (Resolution)

- **검출 가능한 최소 입력 변화량** — 입력이 연속 변해도 출력은 계단처럼 변하며, 분해능은 작을수록 우수



확도와 정도

■ 확도(accuracy)

- 센서 출력이 참값(true value)에 얼마나 가까운가를 나타내는 척도
- 오차 : 확도를 나타내는 방식

- 참값(x_t)과 센서가 측정한 값(x_m) 사이의 최대 편차

$$\varepsilon = x_m - x_t$$

- 상대오차(백분율 오차)로 정의

$$\varepsilon = \frac{x_m - x_t}{x_t} \times 100 \%$$

- 정격출력(FSO)의 백분율로 정의

$$\varepsilon = \frac{x_m - x_t}{FSO} \times 100 \%$$

- 센서의 확도(오차) 표시 예 :

입력 풀 스케일이 100 kPa, 풀 스케일 출력이 10Ω 인 압력센서의 경우,
±0.5%, ±500 Pa, ±0.05Ω

확도와 정도

- **반복성 (repeatability)**

- 동일한 양을 동일조건(환경, 사람 등)하에서 동일방법으로 단기간(short time interval)에 연속 측정할 때 측정값들이 서로 얼마나 일치하는가를 나타냄

- **재현성 (reproducibility)**

- 동일한 양을 같은 방법으로 장기간에 걸쳐 측정하거나 다른 사람에 의해서 측정되거나 또는 다른 실험실에서 측정될 때 측정값 사이에 일치하는 정도를 나타냄
- 재현성을 좋게 유지하기 위해서는 센서를 정기적으로 검사, 교정, 보수해야 함.

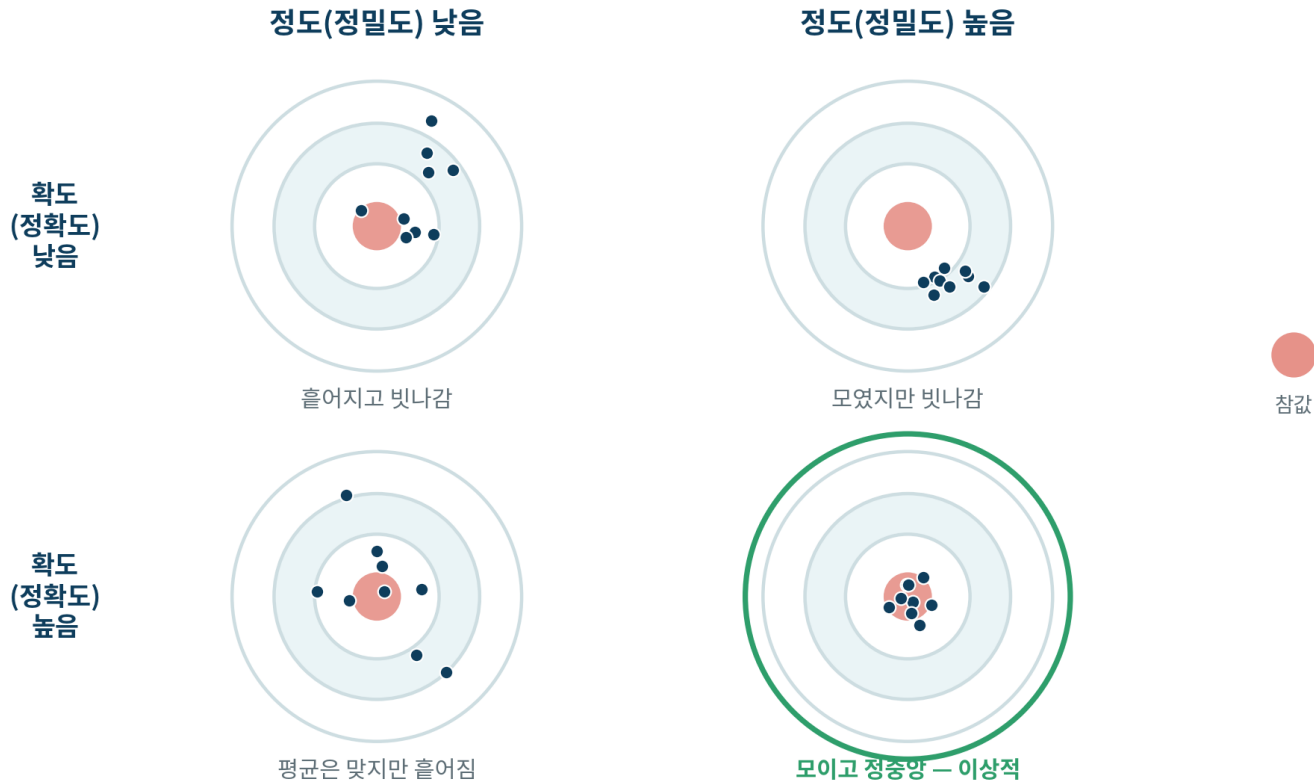
- **정도 (precision)**

- 측정의 반복성이나 재현성의 척도

확도와 정도의 차이

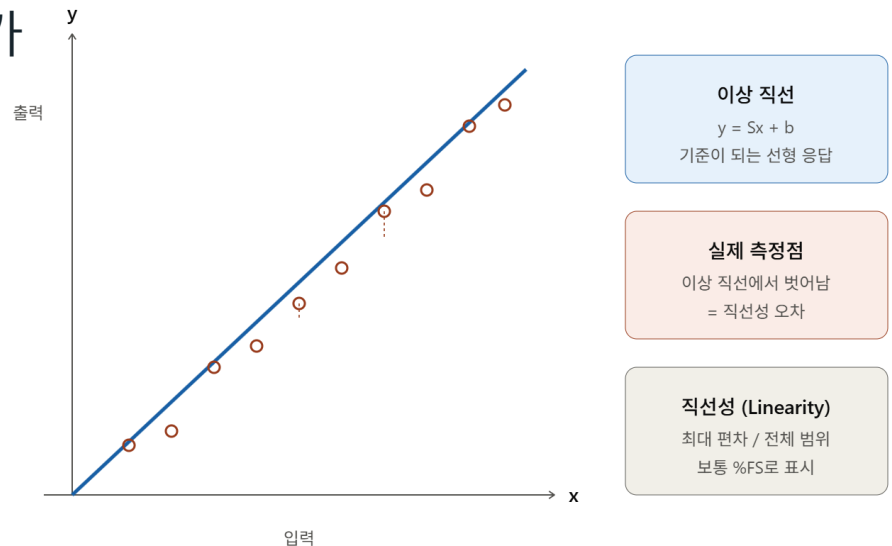
- **확도(accuracy)** 측정값이 참값에 가까운 정도
- **정도(precision)** 측정값들이 서로 일치하는 정도

정도(precision) — 측정값들이 서로 얼마나 모여 있는가



Calibration

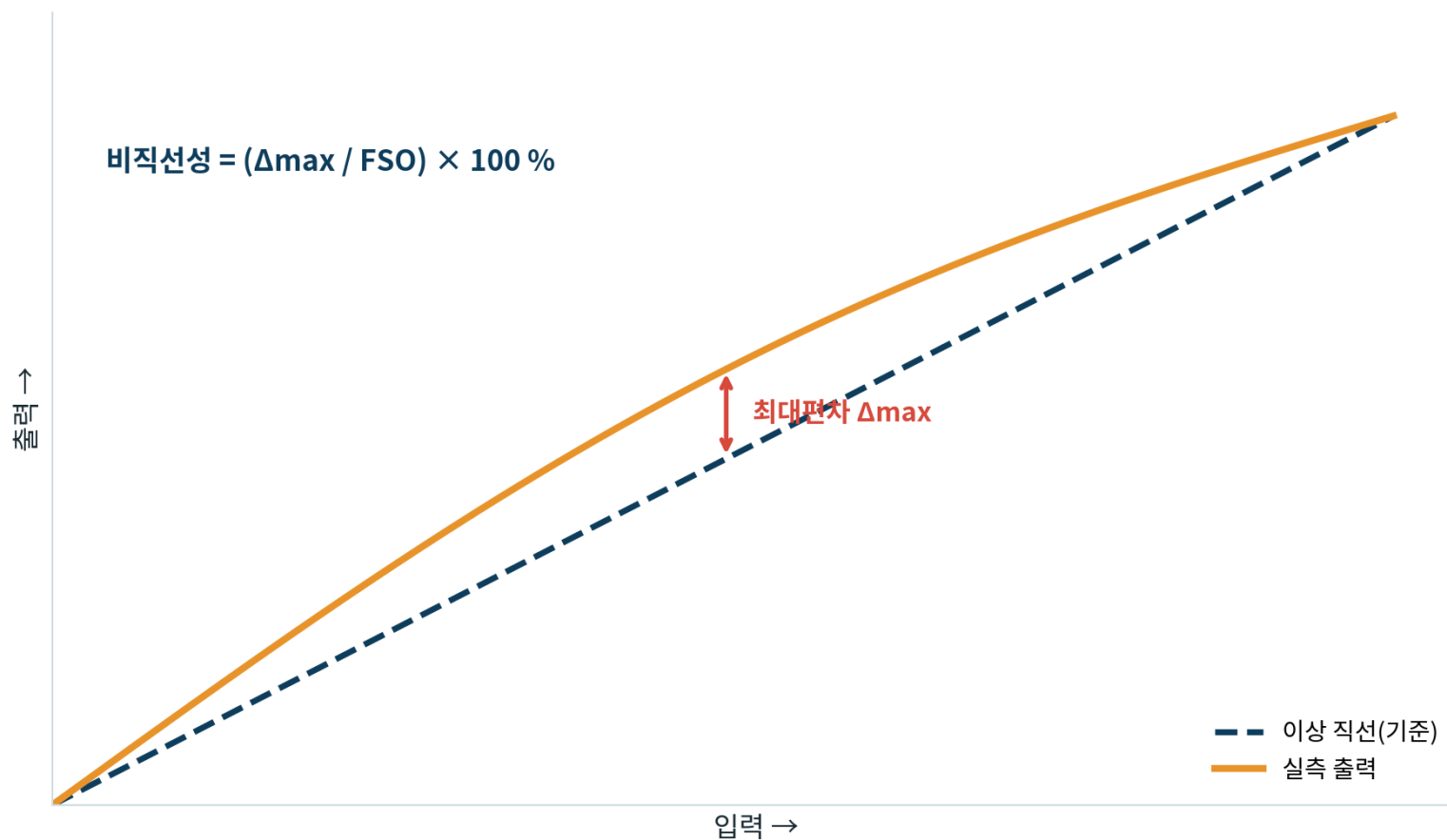
- 센서에 기지의 입력 값 (known value)을 인가하여 출력을 측정하는 과정
- 교정에 사용되는 기지의 입력 값을 표준(standard)이라고 부른다.
- 교정에 의해서 입력과 출력 사이에 관계가 수립되며, 이때 얻어지는 곡선을 교정 곡선(calibration curve)이라고 한다.



- 비선형 전달함수를 교정하는 방법은 교정곡선을 다수의 작은 섹션으로 나누고, 각 섹션을 직선으로 생각하여 각 섹션에 대한 상수 a , b 를 구한 다음, 교정곡선을 다수의 직선군으로 나타낸다.
- 센서의 교정은 긴 시간을 요하는 과정이기 때문에, 제조비용을 감소시키기 위해서는 가능한 한 교정점을 최소화하는 것이 매우 중요하다.

직선성 (Linearity)

- 센서 특성곡선이 이상적 직선에서 벗어나는 정도
 - 최대편차/FSO(Full scale output)로 비직선성 표현

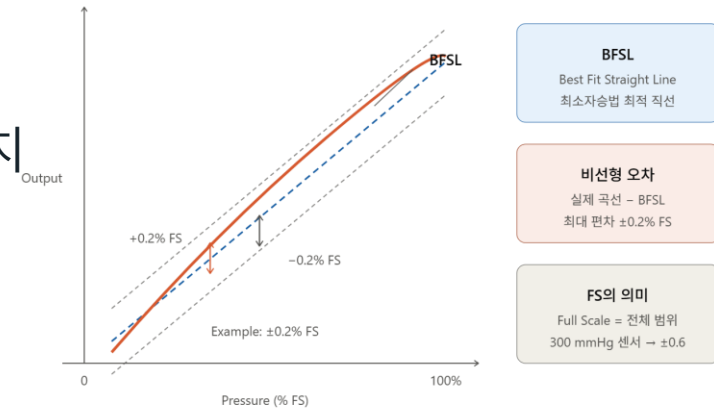


Linearity

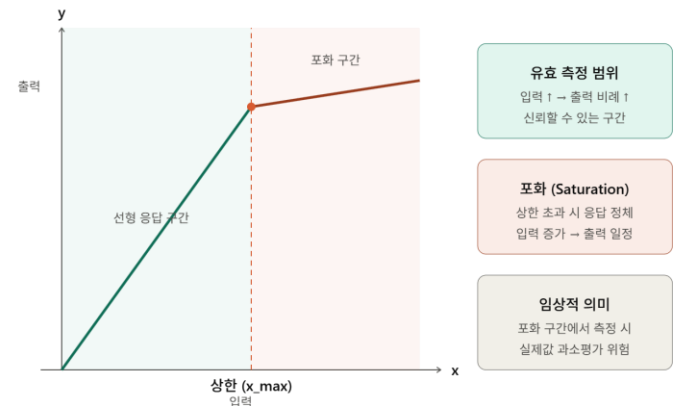
■ 센서 특성의 직선화

- 센서의 직선성을 측정하는 한 방법은 최소 자승법 (least squares method)을 사용해 가장 잘 일치하는 직선(best fit straight line)을 구함.

이 경우 직선성을 독립 직선성 (independent linearity) 라고 한다.



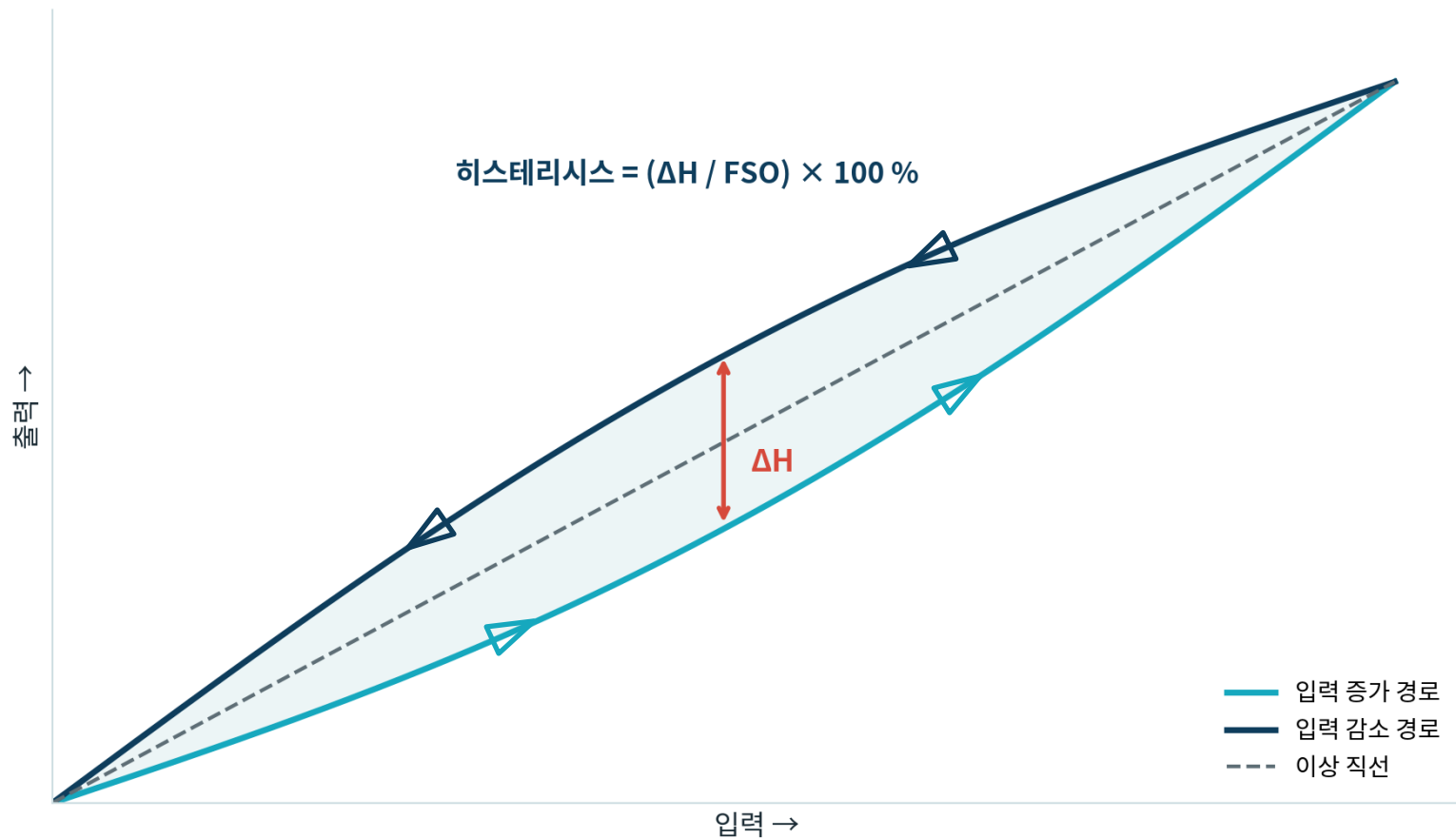
- 센서입력이 허용한계를 초과하면 출력이 포화 (saturation)되기 시작하여 응답의 직선성을 상실하기 때문에 동작범위의 상한 또는 정격을 정함



- 센서소자 자체의 특성이나 변환원리 자체가 비직선일 경우에는(즉 1차함수가 아닐 때) 변환회로를 사용해서 센서 전체의 입출력이 직선성을 갖도록 한다.
- 센서소자를 직선성이 우수한 범위에서 사용하여도, 변환회로나 증폭기의 직선성이 좋지 않으면 센서 전체의 직선성은 나빠진다.

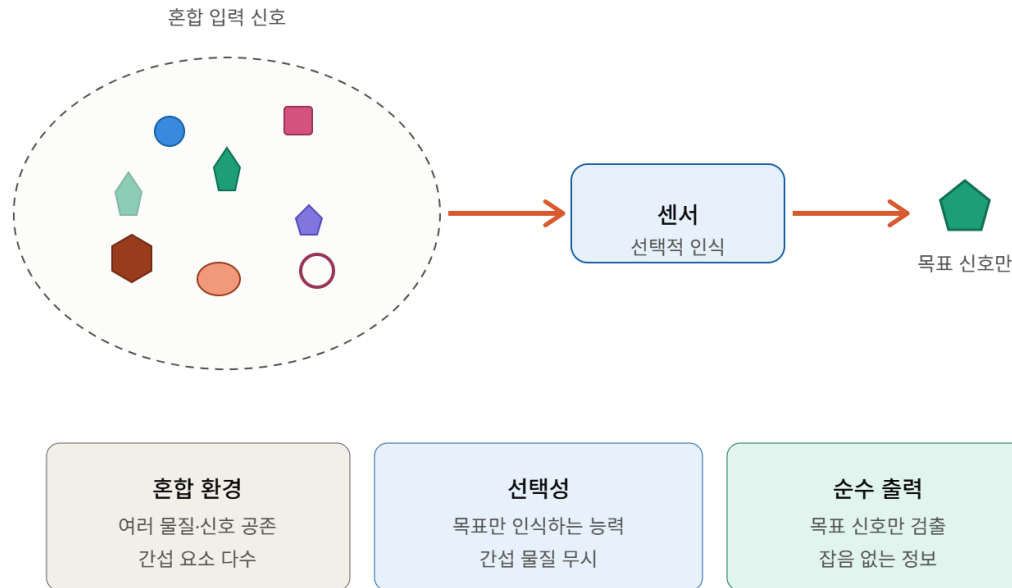
히스테리시스 (Hysteresis)

- 같은 입력이라도 올릴 때와 내릴 때 출력이 달라지는 현상 → 최대 출력차(ΔH)를 FSO로 나눠 표시



선택성 (Selectivity)

- 센서에 입력되는 여러 변수 중에서 원하는 변수만을 선택적으로 검출하는 성질.

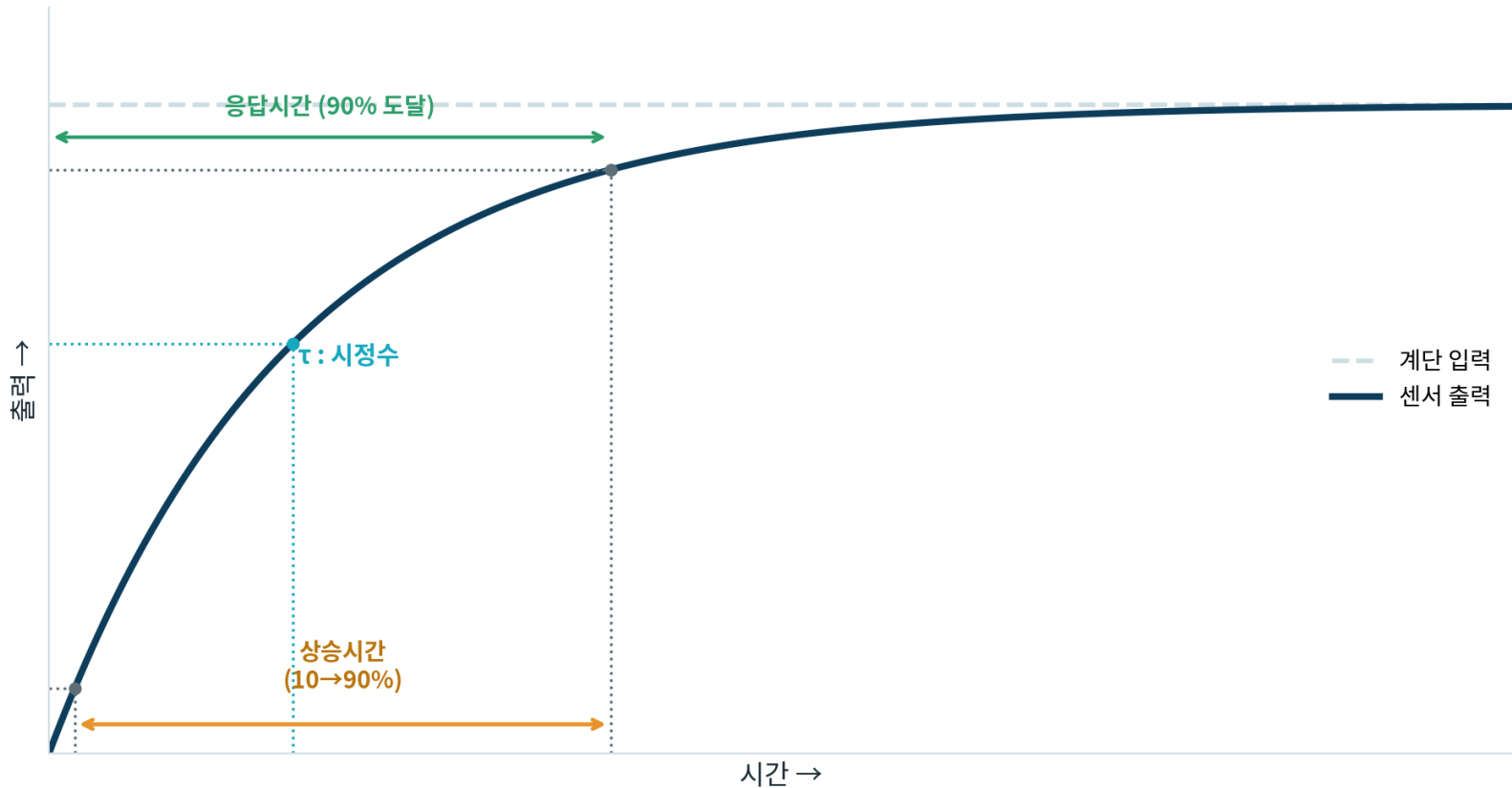


- 센서는 원하는 물리현상만을 검출하고, 다른 현상의 영향을 받지 않는 것이 바람직하다.
- 예를 들면, 일반적으로 대부분의 센서는 온도나 습도의 영향을 받기 때문에, 센서 구조를 변경하거나 전자회로로 보상하여 센서의 선택성을 향상시키기도 하고, 또는 습도센서와 가스센서 등에서처럼 특정한 화학물질에 의해 선택성을 실현하기도 한다.

동특성 — 응답 시간

■ 계단 입력에 대한 시간 응답

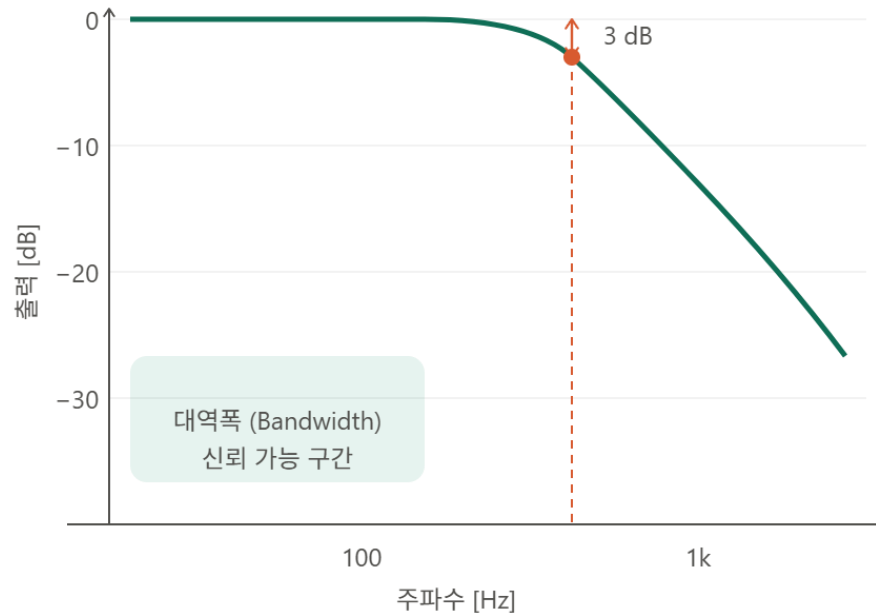
— 상승시간(10→90%)·응답시간(90% 도달)·시정수(τ)로 평가



동특성

▪ 주파수 응답특성

- 센서입력을 정현적(sin 또는 cos)으로 변화시킬 때의 주파수 응답특성
- 대역폭 : 입력 주파수에 대해서 출력이 -3dB 만큼 저하될 때의 주파수 범위



차단 주파수 f_c
-3 dB 지점

대역폭

-3 dB까지의 주파수 범위
출력이 70.7% 이상 유지

차단 주파수 (f_c)

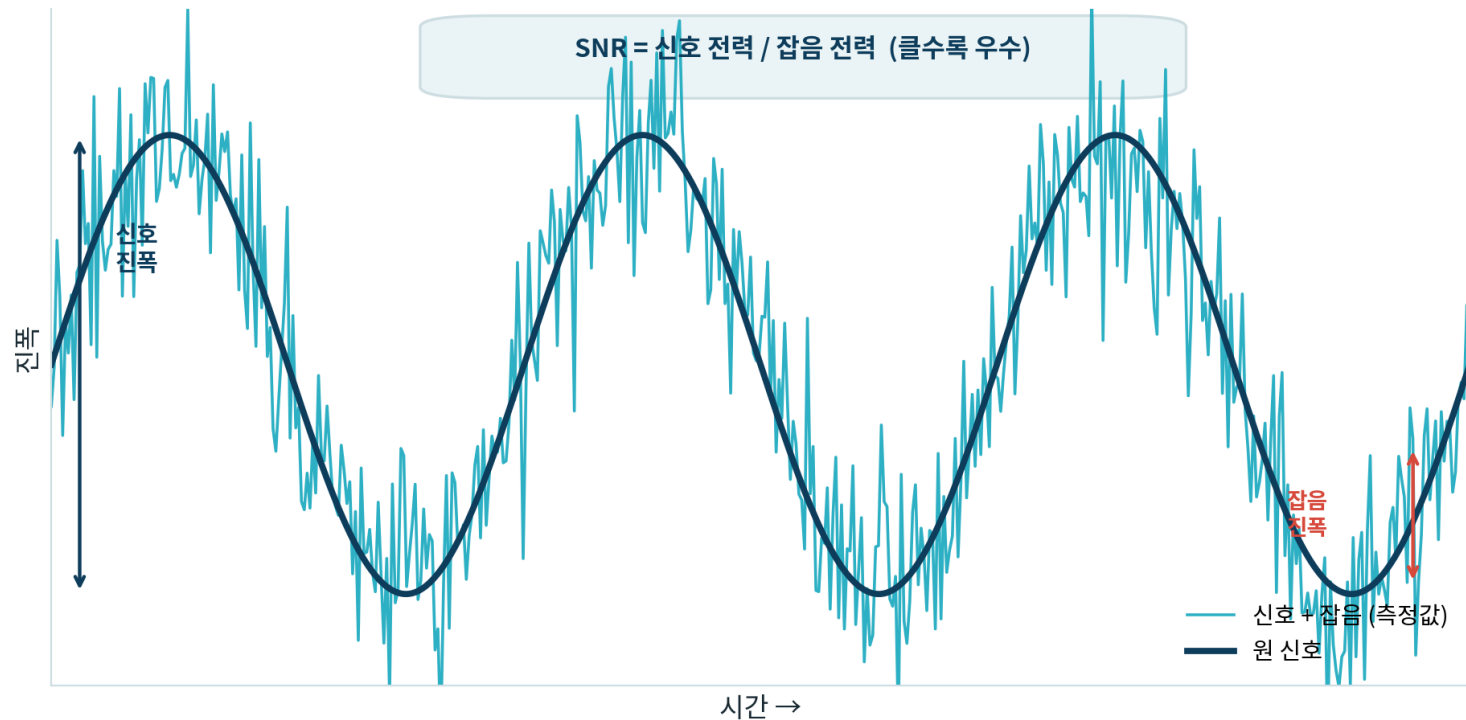
-3 dB 감쇠 지점
응답 한계 경계

3 dB의 의미

전력 절반 (50%)
진폭 약 70.7%

잡음과 SNR (Noise)

- 원하지 않는 불규칙 신호가 잡음 — 신호대잡음비(SNR)로 평가하며, 필터로 잡음을 억제

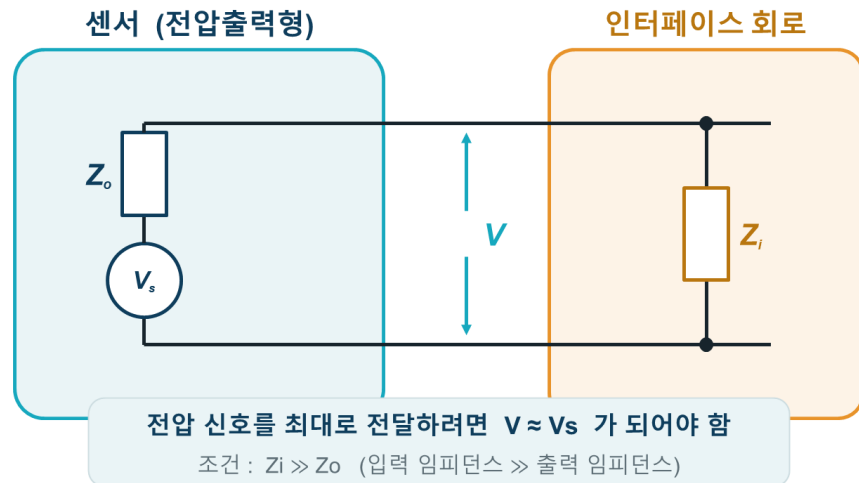


출력 임피던스

- 센서를 전자회로에 접속할 때, 센서의 출력 임피던스(output impedance)와 회로의 입력 임피던스 관계는 매우 중요하다.

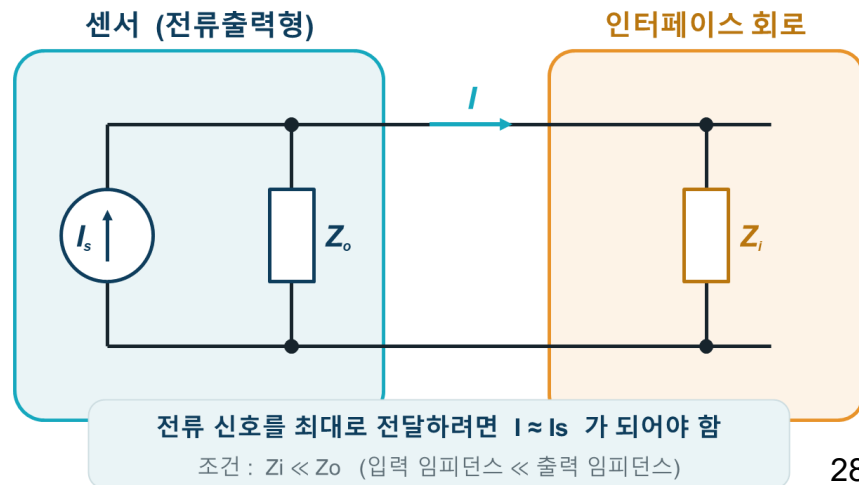
- **출력이 전압인 센서의 경우**

- 센서 임피던스 Z_o 는 회로의 입력 임피던스 Z_i 와 직렬로 접속됨
- 출력 신호의 일그러짐을 최소화하기 위해서는, 즉 $V = V_s$ 로 되기 위해서는 센서의 출력 임피던스가 작아야 함 ($Z_o \ll Z_i$)



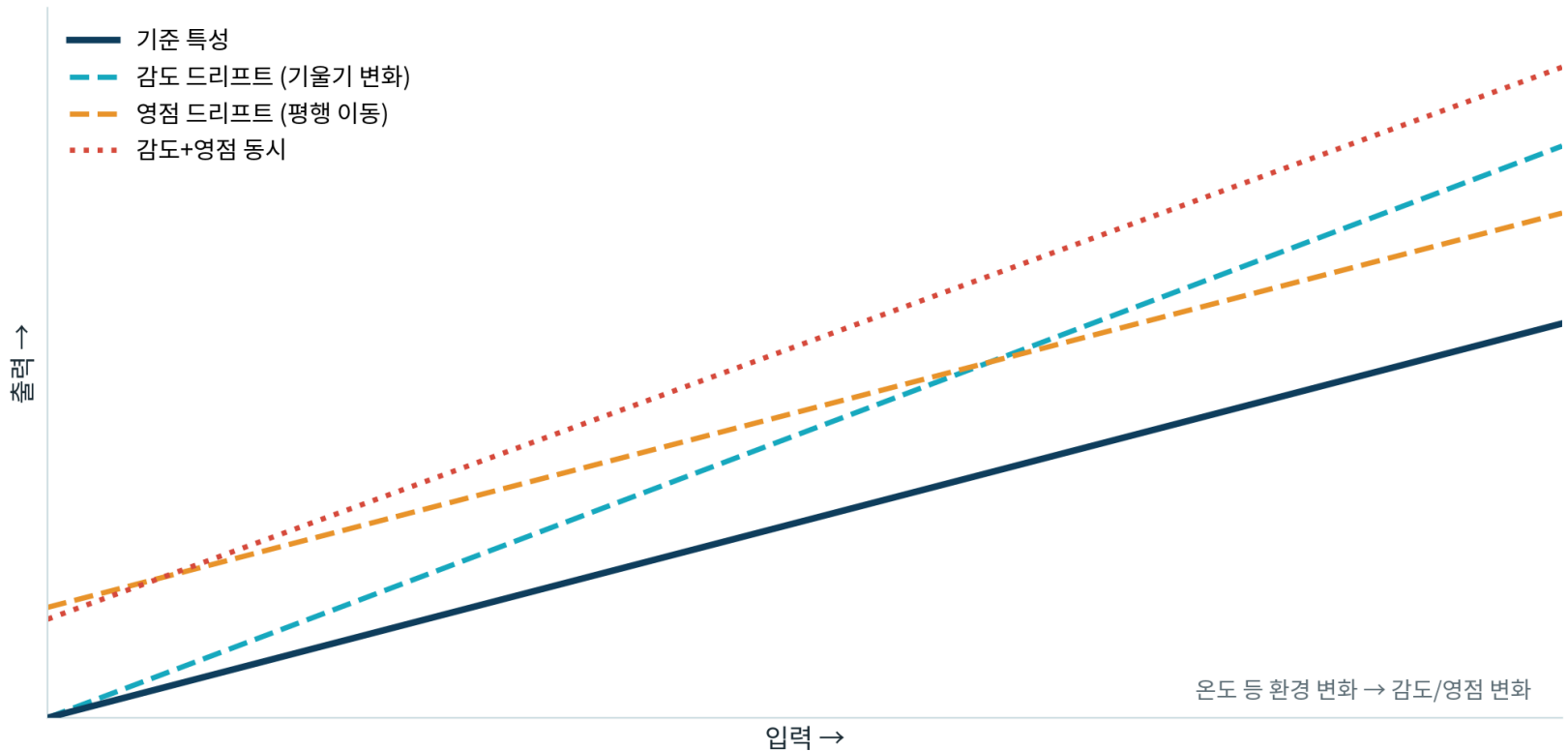
- **출력이 전류인 센서의 경우**

- 센서 임피던스 Z_o 는 회로의 입력 임피던스 Z_i 와 병렬로 접속됨
- $I = I_s$ 가 되기 위해서는 회로의 입력 임피던스가 작아야 함 ($Z_o \gg Z_i$)



환경의 영향 — 드리프트(drift)

- 온도 등 환경 변화로 감도 드리프트·영점(오프셋) 드리프트 발생 → 센서 특성 불안정



MODULE 03



센서의 분류

03

Sensor Classification

동작 에너지·출력 형식·검출 대상·재료·변환 현상 등 다양한 분류 체계

슬라이드 p.30-37

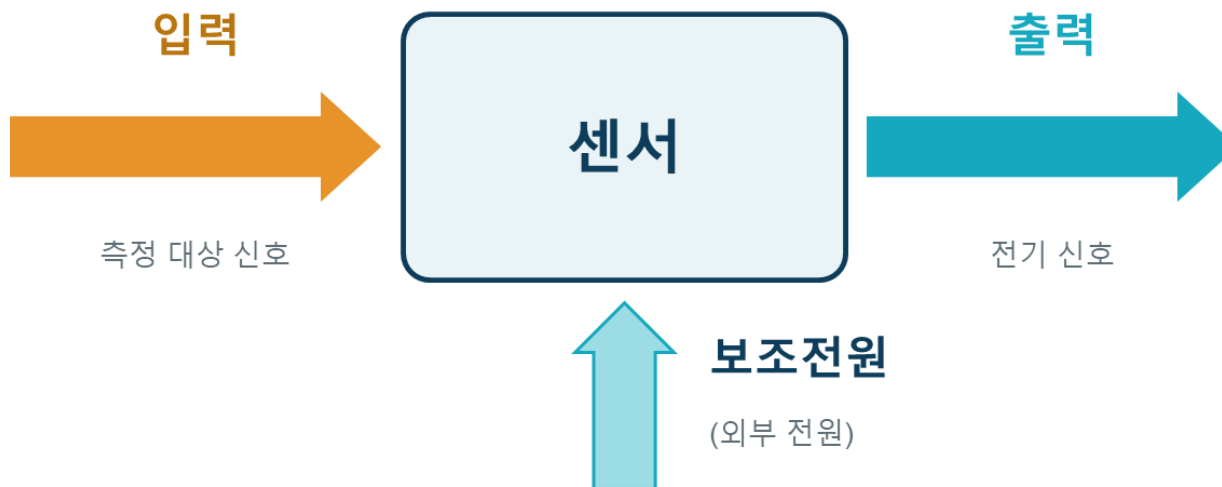
센서의 종류

- 동작 에너지 공급 유무에 따른 분류
- 출력신호 형식에 따른 분류
- 검출대상에 따른 분류
- 센서재료에 따른 분류
- 변환현상에 따른 분류
- 용도에 따른 분류

동작 에너지 유무에 따른 분류

▪ 변조형 센서 (Modulating sensor)

- 변환동작을 위해서 외부에서 전원을 공급
- 출력신호 전력의 대부분은 외부에서 가한 전원으로부터 얻는다.
- 입력은 단지 출력만을 제어한다.
- 장점은 공급전원전압이 전체적인 감도를 변화시킬 수 있다
- 변조형 센서를 **능동형 센서(active sensor)**라고 부르기도 한다.



장점 : 공급전원으로 전체 감도를 변화시킬 수 있음
변조형 = 능동형(active) 센서

동작 에너지 공급 유무에 따른 분류

▪ 자기 발전형 센서(self-generating sensor)

- 외부에서 전원을 공급할 필요가 없으며, 출력전력은 입력으로부터 얻어진다. 즉, 변환에 필요한 전력을 측정대상(입력)으로부터 얻는다.
- 센서 예 : 태양전지(solar cell ; 제2장), 열전대(thermocouple ; 제5장)
- 자기발전형 센서를 **수동형 센서(passive sensor)**라고도 한다.



출력신호 형식에 따른 분류

▪ 아날로그 센서

- 센서 출력이 연속적으로 변하는 아날로그 신호
- 정보는 출력신호의 진폭으로부터 얻어진다.
- 출력신호가 가변주파수인 센서도 아날로그 센서로 분류하지만, 주기신호는 디지털 신호로 변환이 용이하므로 준 디지털 센서(quasi-digital sensor)라고 부르기도 한다.
- 대부분의 센서가 아날로그 센서이다.

▪ 디지털 센서

- 센서 출력은 디지털 신호이다.
- 디지털 신호는 아날로그 신호보다 전송이 더 용이하고, 재현성이 우수하고, 신뢰성이 높고, 더 정확한 경우가 많다.
- 센서소자의 출력자체가 디지털인 경우는 흔하지 않으며, 아날로그-디지털 변환기를 조합해서 디지털 신호출력을 얻는다.

검출대상에 따른 분류

- 센서가 검출하는 대상에 따라서 센서를 분류
 - 압력센서, 속도센서, 온도센서, 변위센서
 - 가스센서, 습도센서
 - 혈당

수	위치	변형	유속	성분조성	입자	열량	유해.유독가스
길이	레벨	압력	속도 가속도	수분	비중밀 도	온도	맛
면	직선변위	토크	음파	이온농도	탐상	화재	냄새
입체	회전변위	유량	진동	탁도	습도	연기	혈당

센서재료에 따른 분류

- 변환기능을 수행하는 재료에 따라서 센서를 분류
 - 무기재료 : 금속센서, 반도체 센서, 세라믹 센서, 광섬유 센서
 - 유기재료 : 고분자 센서, 바이오센서
 - 복합재료 : PZT 압전 센서

센서재료	대표적인 센서 예
금 속	RTD, 스트레인 게이지, 로드셀, 열전대
반 도 체	홀 소자, 홀 IC, 반도체 압력센서, 포토다이오드, CCD
세 라 믹	습도센서, 서미스터, 가스센서, 압전센서, 산소센서
광 섬 유	온도센서, 레벨센서, 압력센서, 변형센서
유 전 체	초전형 센서, 온도센서
고 분 자	습도센서, 압전 센서
생체 물질	각종 바이오센서
복합 재료	PZT 압전 센서

변환현상에 따른 분류

- 변환에 이용되는 원리, 효과에 따라 센서를 분류

분 류	대표적 센서
역학센서	근접센서, 회전각센서, 레벨센서, 속도센서, 가속도센서, 진동센서, 하중센서, 압력센서, 유량센서
전자기센서	홀 센서, 홀 IC, 자기저항(MR)센서
광 센 서	포토다이오드, 포토트랜지스터, 적외선센서, 자외선센서, 광전관, 이미지센서(CCD 및 CMOS)
온도센서	열전대, RTD, NTC/PTC 서미스터, IC온도센서
화학센서	가스센서, 습도센서, 이온센서, 바이오센서(효소센서, 면역센서)

MODULE 04



신호처리와 증폭

04

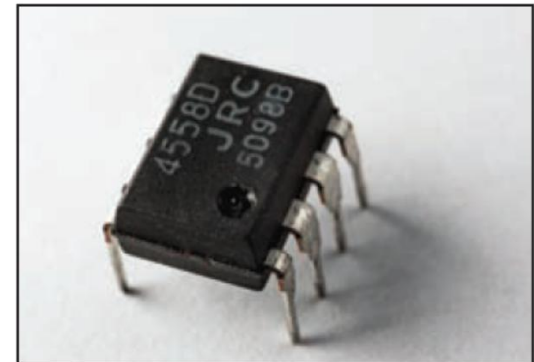
Signal Processing & OP-Amp

OP-Amp 기초부터 반전·비반전·차동·계측 증폭기, ADC와 필터까지 신호처리

슬라이드 p.38-65

Operational Amplifier

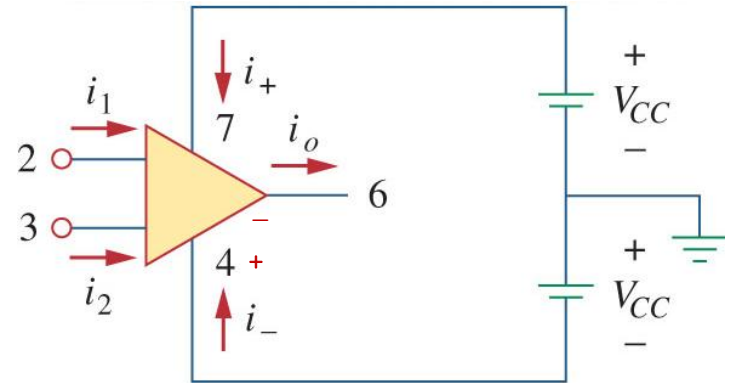
- Operational Amplifier
 - 줄여서 **op-amp** 라고 부름.
 - Voltage-controlled voltage source
 - 다른 소자들과의 조합으로 수학적 연산을 수행할 수 있는 능동회로
- 이상적인 op-amp
- 실제적인 op-amp



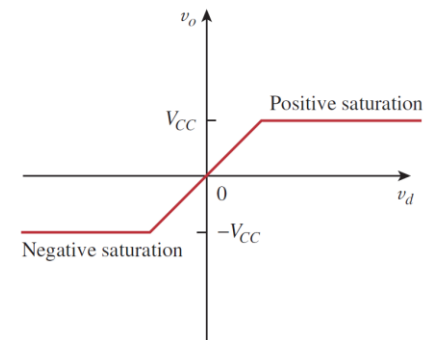
Powering an Op-amp

- 일반적으로 5개의 단자가 있음

- 반전 입력
- 비반전 입력
- 출력
- 양전원 공급 V^+
- 음전원 공급 V^-



- 능동 (active) 소자 이기 때문에 power (전원) 필요함
- 회로도에서 전원부를 그리지 않는 경우도 있음
- 대부분의 OP amp는 V^+ 와 V^- 두개의 전원이 사용되며 그 사이에 ground reference를 기준으로 함
- 전원 전압에 의하여 출력 범위 결정됨



Output Voltage

- OP-amp 의 출력은 반전 입력과 비반전 입력의 차에 비례한다.

$$v_o = Av_d = A(v_2 - v_1)$$

- A : 개방루프 전압 이득 (Open loop gain)
- 이상적인 경우 : $A \rightarrow \infty$
- 실제의 경우 : $A = 10^5 \sim 10^8$ volts/volt

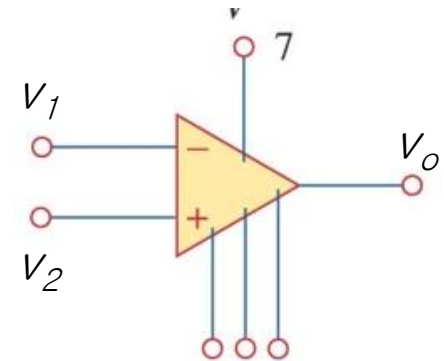
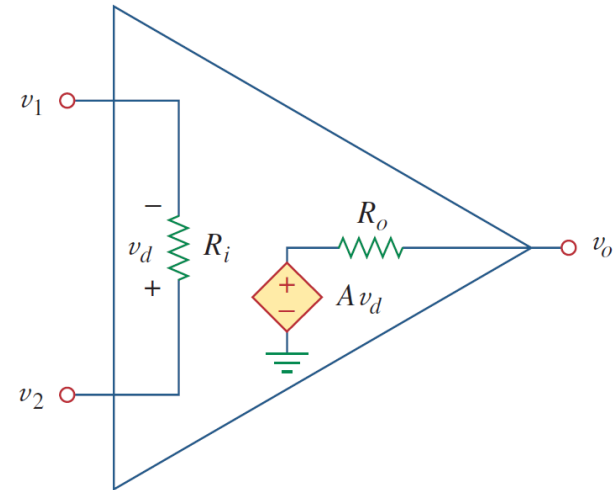
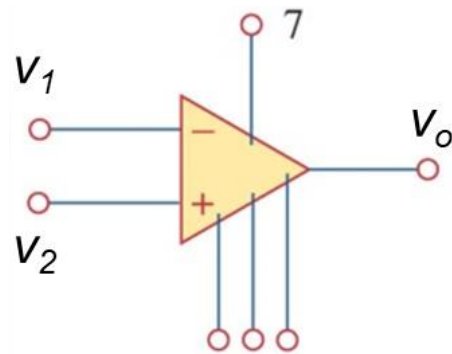


TABLE 5.1

Typical ranges for op amp parameters.

Parameter	Typical range	Ideal values
Open-loop gain, A	10^5 to 10^8	∞
Input resistance, R_i	10^5 to $10^{13} \Omega$	$\infty \Omega$
Output resistance, R_o	10 to 100 Ω	0 Ω
Supply voltage, V_{CC}	5 to 24 V	

Practical OP-Amp



$$v_d = v_2 - v_1$$

$$v_o = A v_d = A(v_2 - v_1)$$

Feedback

- Feedback : 출력이 입력에 영향을 주도록 설계
- Op-amps 에 feedback 적용 → 다양한 기능 구현.
- Feedback에 사용하는 소자에 따라 op-amp 의 이득(gain)과 특성이 변함.
- 출력을 Inverting terminal (반전 입력)에 연결하는 feedback을 “negative feedback (부궤환)” 이라 함.
- Positive feedback (정궤환) 은 oscillation (발진) 을 불러일으키기 때문에 특별한 경우 외에는 사용하지 않는다.

Ideal Op Amp

- 이상적인 op-amp의 특성

1. Infinite open-loop gain, $A \simeq \infty$.
2. Infinite input resistance, $R_i \simeq \infty$.
3. Zero output resistance, $R_o \simeq 0$.

→ 입력 저항이 무한대이기 때문에 입력이 연결되는 다른 노드에 영향을 미치지 않는다.

→ 출력 저항이 0 이기 때문에 부하에 영향을 주지 않는다.

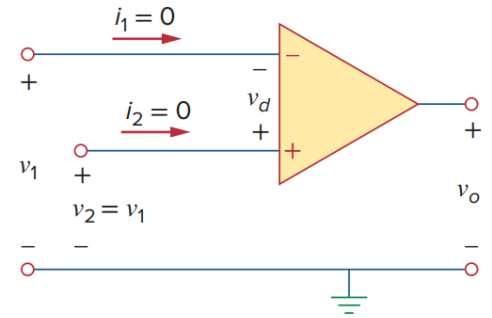
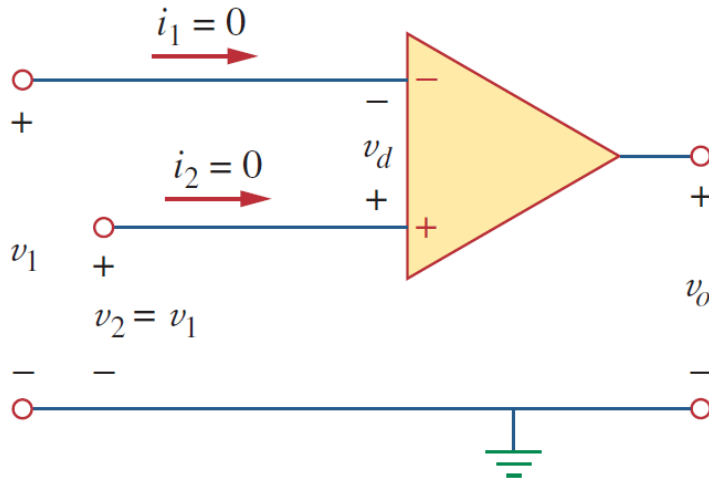


Figure 5.8

Ideal op amp model.

Ideal OP-Amp



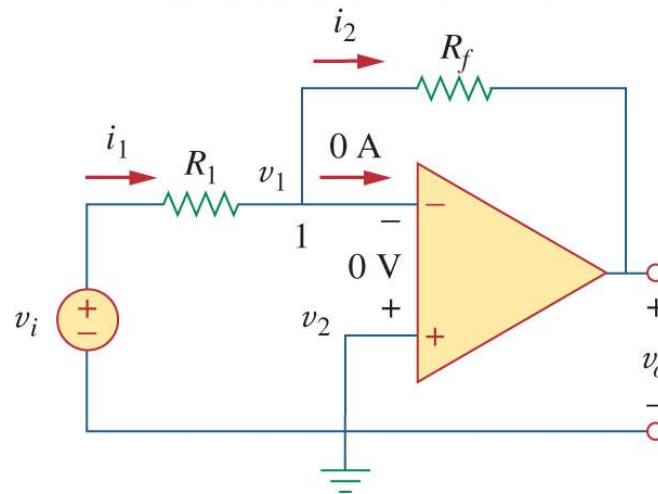
$$i_1 = 0, \quad i_2 = 0$$

$$v_1 = v_2$$

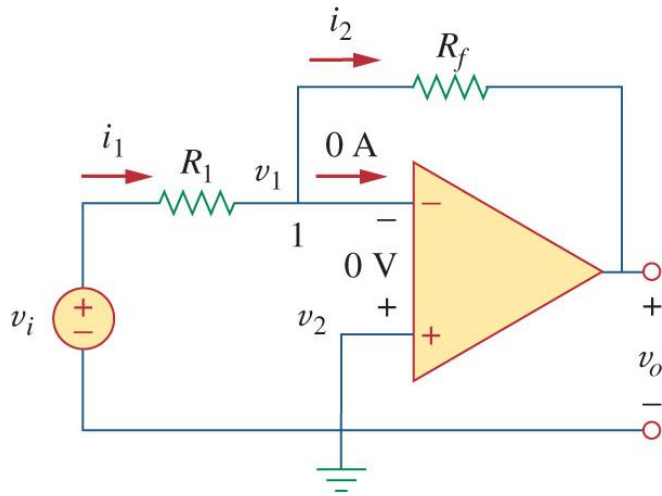
- 오늘날 실제 사용하는 op-amp는 ideal한 값이 근접해 있음 :
 - Gain : $>10^6$
 - 입력 저항 : Giga Ω ~ Terra Ω
 - 입력 단자에 들어가는 전류 : 0

Inverting Amplifier

- (-) 반전 단자에 저항 (R_1)과 함께 입력 연결
- (+) 비반전 단자는 Ground에 연결
- (-) 반전 단자에 (R_f) feedback 저항을 이용하여 Negative feedback을 준다.



Inverting Amplifier



- 1 노드에 KCL 적용

$$i_1 = i_2 \Rightarrow \frac{v_i - v_1}{R_1} = \frac{v_1 - v_o}{R_f}$$

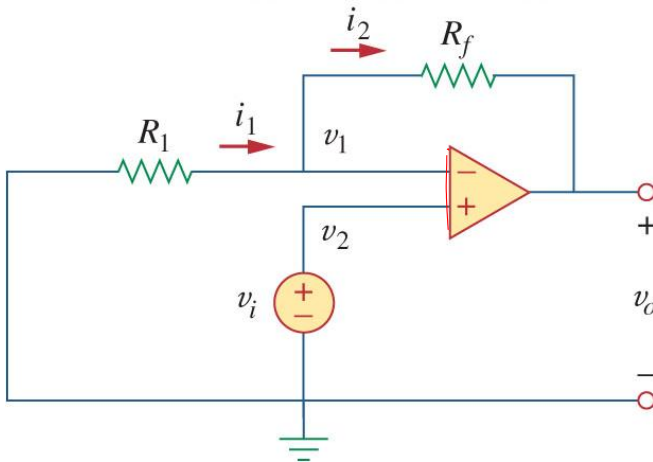
- $v_1 = 0$ $v_1 = v_2$

$$\frac{v_i}{R_1} = -\frac{v_o}{R_f} \Rightarrow \boxed{v_o = -\frac{R_f}{R_1} v_i}$$

- 출력과 입력의 극성이 바뀐다
➔ 'Inverting (반전)' amplifier

Non-Inverting Amplifier

- Non-inverting amplifier (비반전 증폭기)
- Inverting amplifier와 저항 연결은 동일하나 입력의 위치가 다르다.



$$i_1 = i_2 \Rightarrow \frac{0 - v_1}{R_1} = \frac{v_1 - v_o}{R_f}$$

Non-Inverting Amplifier

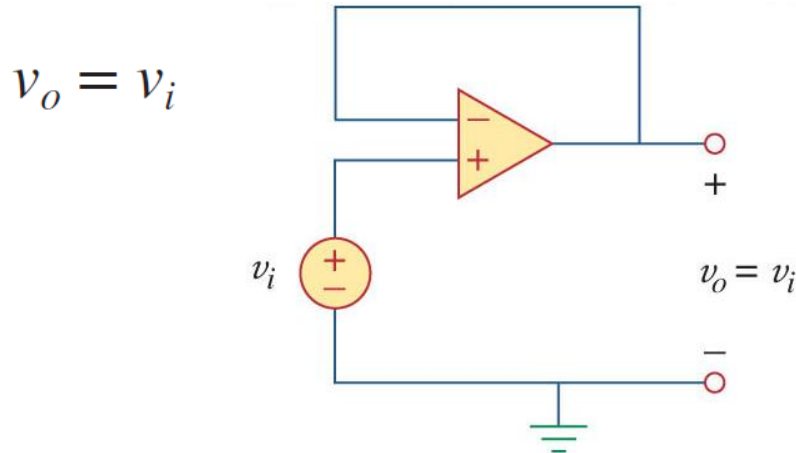
- 앞의 식을 전개하면 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$\frac{-v_i}{R_1} = \frac{v_i - v_o}{R_f} \quad \Rightarrow \quad v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) v_i$$

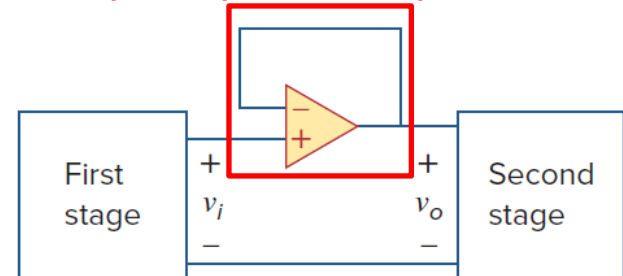
- **(+)양의 전압 Gain**

Non-Inverting Amplifier

- Non-inverting Amplifier의 특징
 - (+) 양의 Gain
 - 입력이 op-amp에 바로 연결 → 무한대의 입력 저항
 - Gain은 항상 1보다 큼
 - 저항 R_1 과 R_f 를 전선으로 연결하면 $\text{gain}=1$ 임
 - 이와 같은 구조는 voltage follower (unity gain amplifier)라고 함
 - 회로간 연결 buffer 역할을 함 (높은 입력 저항, 낮은 출력저항)



연결 부분의 buffer 역할



Difference Amplifier

- Difference amplifier (차동증폭기)

- a 노드에 KCL 적용

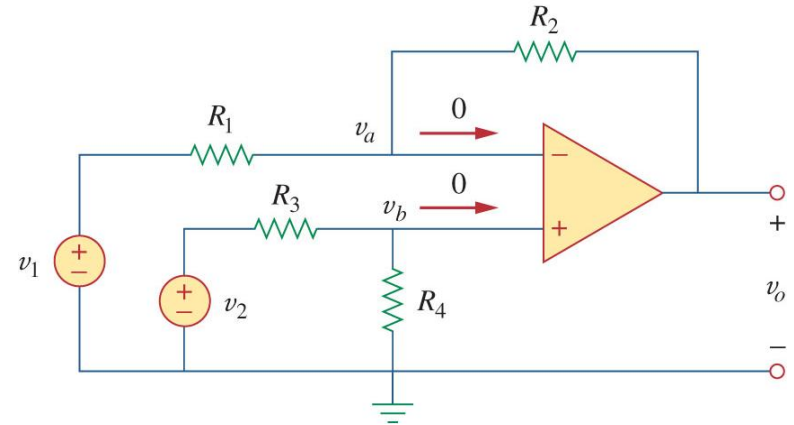
$$\frac{v_1 - v_a}{R_1} = \frac{v_a - v_o}{R_2}$$

$$v_o = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) v_a - \frac{R_2}{R_1} v_1$$

- B노드에 KCL 적용

$$\frac{v_2 - v_b}{R_3} = \frac{v_b - 0}{R_4}$$

$$v_b = \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_2$$



$$v_a = v_b$$

$$v_o = \frac{R_2(1 + R_1/R_2)}{R_1(1 + R_3/R_4)} v_2 - \frac{R_2}{R_1} v_1$$

Common mode rejection

- Common mode rejection

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

$$v_o = \frac{R_2(1 + R_1/R_2)}{R_1(1 + R_3/R_4)}v_2 - \frac{R_2}{R_1}v_1 \quad \Rightarrow \quad v_o = \frac{R_2}{R_1}(v_2 - v_1)$$

Cascaded Op Amp Circuits

- **Cascade connection (종속 접속)**
 - 2개 이상의 op amp 회로가 직렬 연결됨.
 - 한 회로의 출력이 다음 회로의 입력으로 사용됨.
- Cascaded 연결된 op amp 회로에서 각 op amp 회로는 단계 (stage)라고 부름
- Cascade 접속 회로의 총 이득:

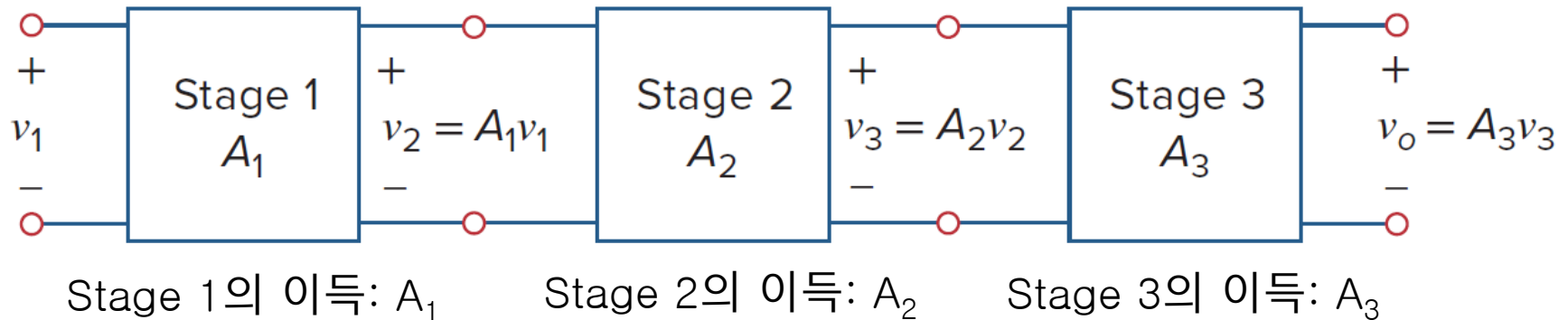
$$A = A_1 A_2 A_3$$

- 여기서 A_1, A_2, A_3 는 각 stage의 이득

Cascaded Op Amp Circuits

- Cascaded 연결된 회로의 이득 :

$$A = A_1 A_2 A_3$$



Cascaded Op Amp Circuits

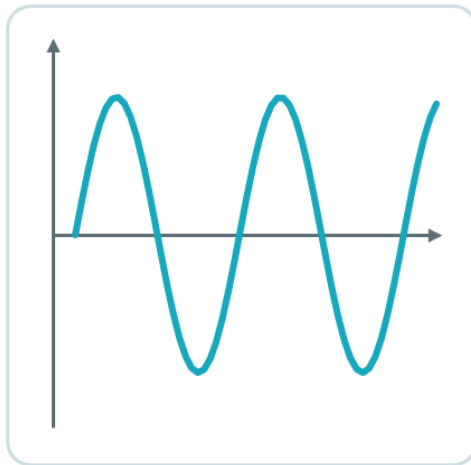
- **Cascade 접속을 하는 이유**

- 높은 이득을 얻기 위하여
- 높은 입력 저항
- 낮은 출력 저항

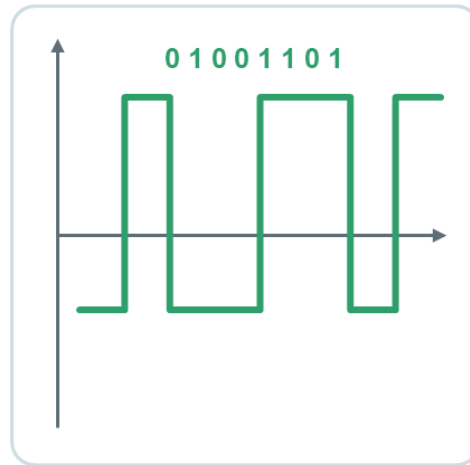
※ 높은 이득, 좋은 입력 및 출력 저항 특성을 모두 만족하는 op amp를 설계하기 어려움.

→ 개별 특징을 만족하는 op amp를 cascade 접속하면 모든 특성을 만족 할 수 있음.

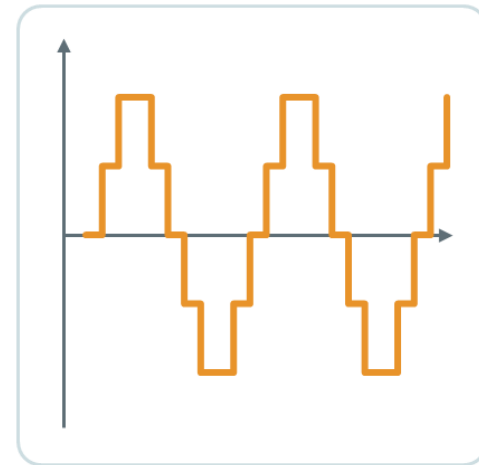
ADC · DAC : 아날로그 디지털 신호 변환



V_{in} — 아날로그 입력



01001101 — 디지털 신호



V_{dac} — 아날로그 출력(계단형)

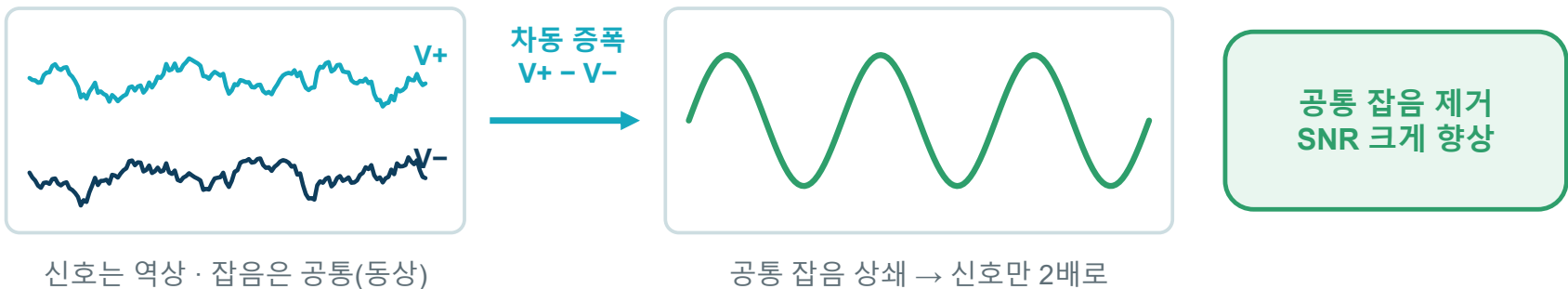
차동 신호 — Differential Signal

- 미세 센서 신호는 잡음에 취약 → 차동 신호와 차동 증폭으로 공통 잡음을 제거하여 SNR을 높인다

① 단일(single-ended) 신호 증폭



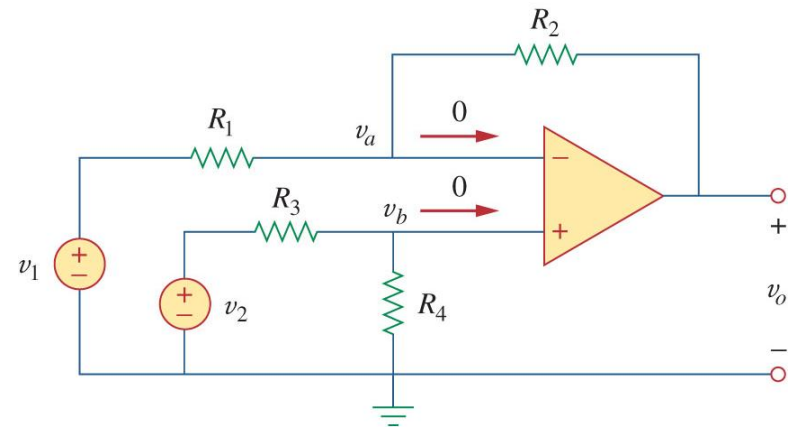
② 차동(differential) 증폭



핵심 : $V+$ · $V-$ 에 똑같이 실린 **공통 잡음**은 차동 연산에서 서로 **상쇄** → 역상 신호 차이만 남아 증폭

Instrumentation Amplifier

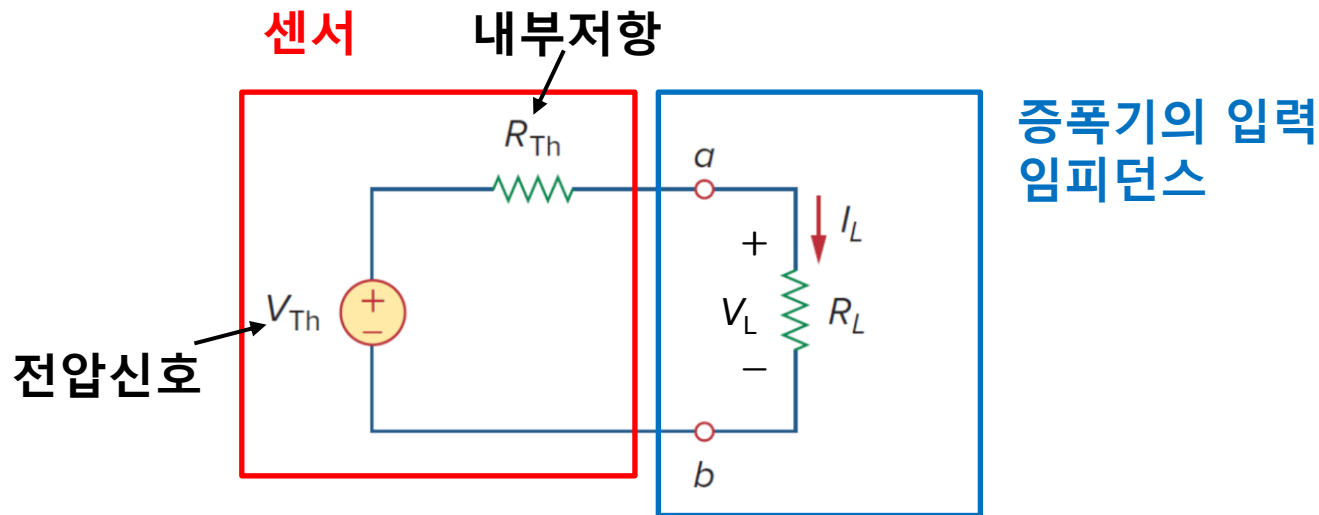
- 부하효과와 입력 임피던스
 - 차동증폭기의 이득을 높이기 위해서는 R_1, R_3 을 낮추고 피드백저항을 키워야함
 - 이것은 높은 입력 임피던스를 갖는다는 이상적인 Op amp의 특성과 어긋남.



$$v_o = \frac{R_2(1 + R_1/R_2)}{R_1(1 + R_3/R_4)}v_2 - \frac{R_2}{R_1}v_1$$

Instrumentation Amplifier

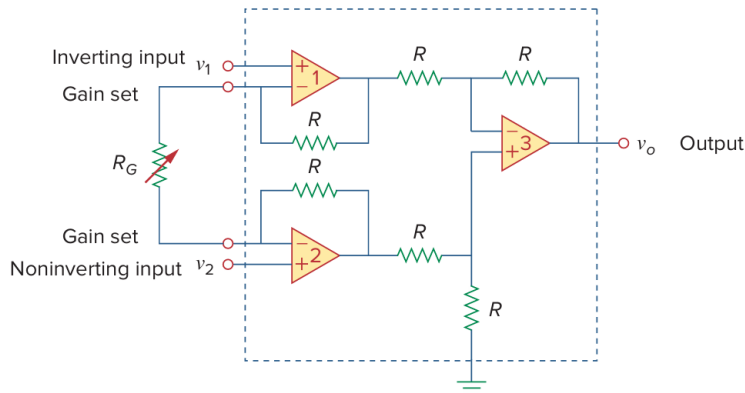
- 부하효과와 입력 임피던스
 - 전압 신호를 발생시키는 센서는 전압원과 저항으로 모델링 가능함.
 - 증폭기의 입력저항 감소는 센서에서의 전압신호 감쇄를 발생시킴



$$V_L = \frac{R_L}{R_{Th} + R_L} \times V_{Th}$$

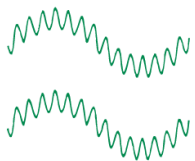
Instrumentation Amplifier

- Instrumentation Amplifier (계측증폭기)
 - 입력 저항의 감소 없이 차동증폭을 하기 위함
 - 센서 등의 정밀 계측에 주로 사용됨

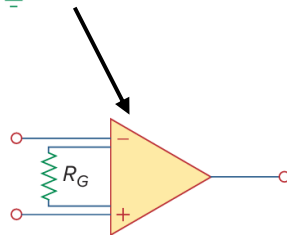


$$v_o = A_v(v_2 - v_1)$$

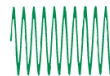
$$A_v = 1 + \frac{2R}{R_G}$$



Small differential signals riding on larger common-mode signals



Instrumentation amplifier

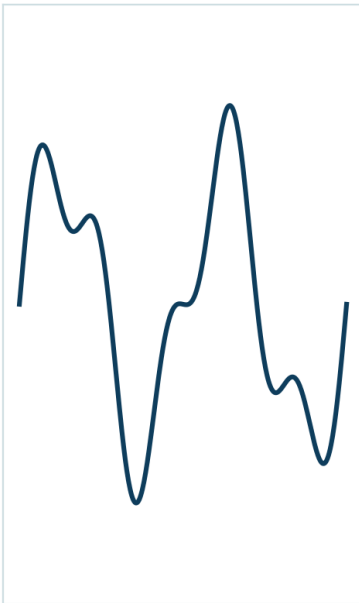


Amplified differential signal, no common-mode signal

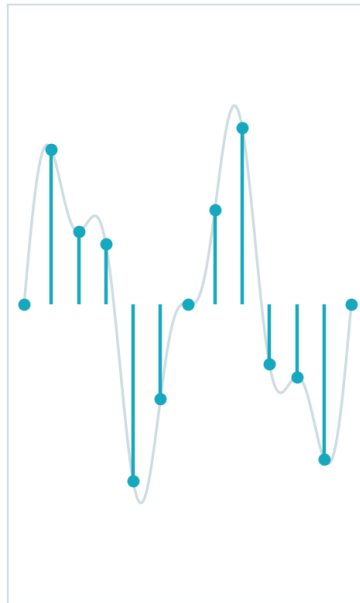
아날로그-디지털 변환 (ADC)

- 연속(아날로그) 신호를 샘플링 → 양자화 → 부호화 3단계로 디지털 신호로 변환

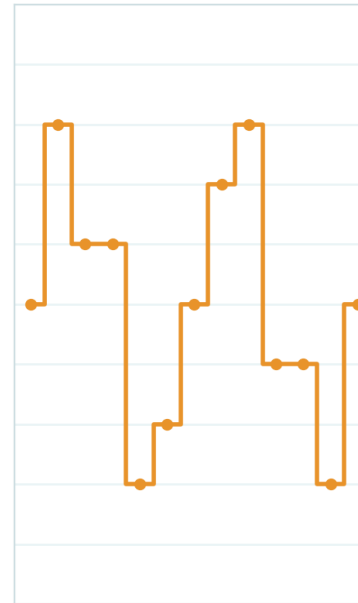
① 연속(아날로그)



② 샘플링



③ 양자화



④ 부호화

100

110

100

100

001

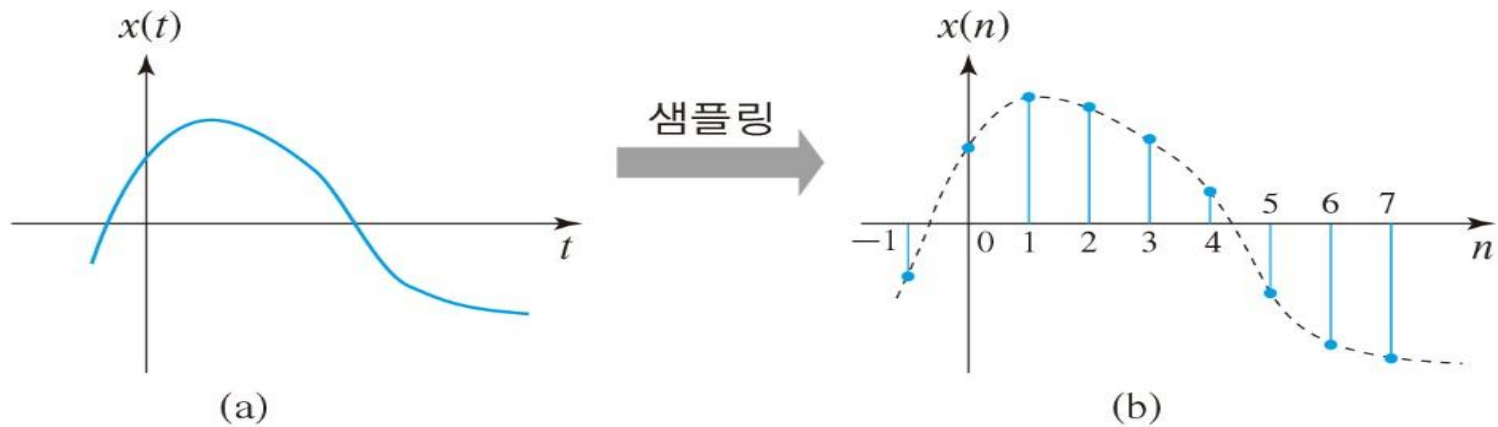
010

3-bit 디지털 코드

아날로그-디지털 변환

■ 샘플링 과정

- 샘플링(sampling)은 일정한 간격을 가지고 규칙적으로 연속 신호로부터 샘플을 취함으로써 연속 신호를 이산 신호로(discrete-time signal)로 변환하는 하는 과정
- 이산 신호의 독립변수 n 은 정수이며, 정수 이외의 시각에서는 신호의 값이 정의되지 않음

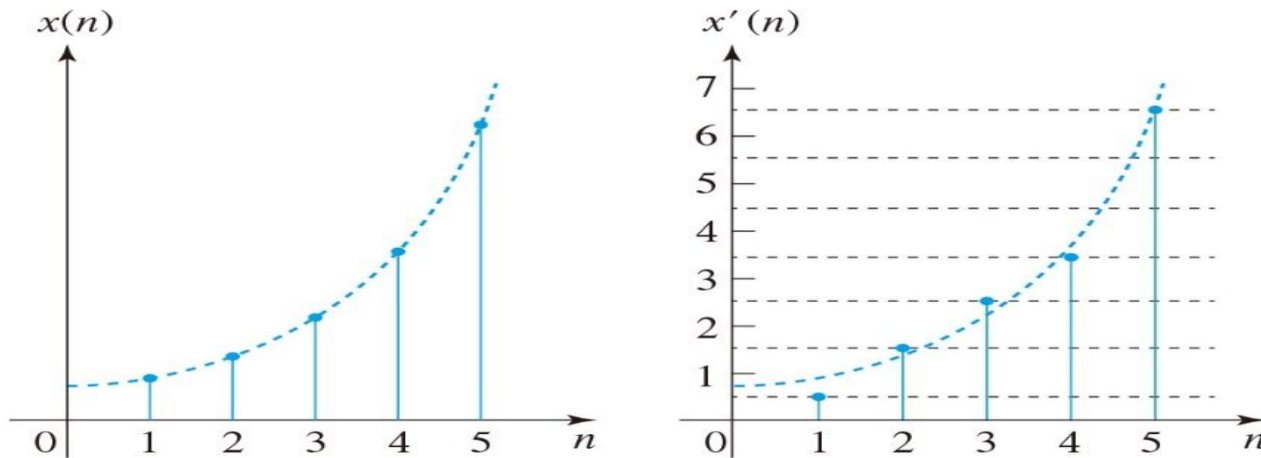


연속 신호와 이산 신호의 예

아날로그-디지털 변환

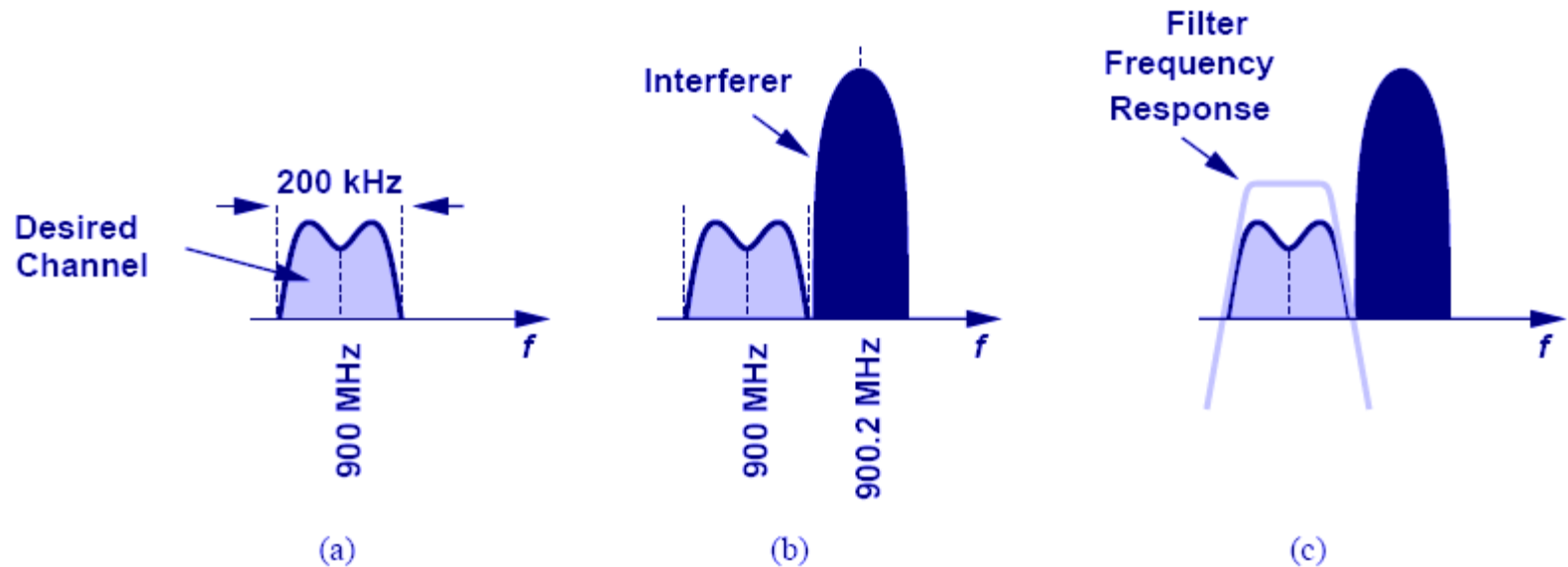
■ 양자화 과정

- 유한한 데이터 처리를 위한 디지털 처리를 위해서는 이산 신호를 이산 시간과 이산 값을 갖는 신호(discrete-time & discrete-valued signal)로 다시 변환하는 과정이 필요함. 이 과정이 바로 양자화(quantization) 과정임
- 양자화 과정을 거치면 신호가 가질 수 있는 값의 개수는 유한하게 됨. 이때 신호가 가질 수 있는 값의 개수는 그림과 같이 신호 값의 전체 범위(dynamic range)를 몇 개의 구간(레벨)으로 구분하는가에 따라 결정됨.



양자화 과정

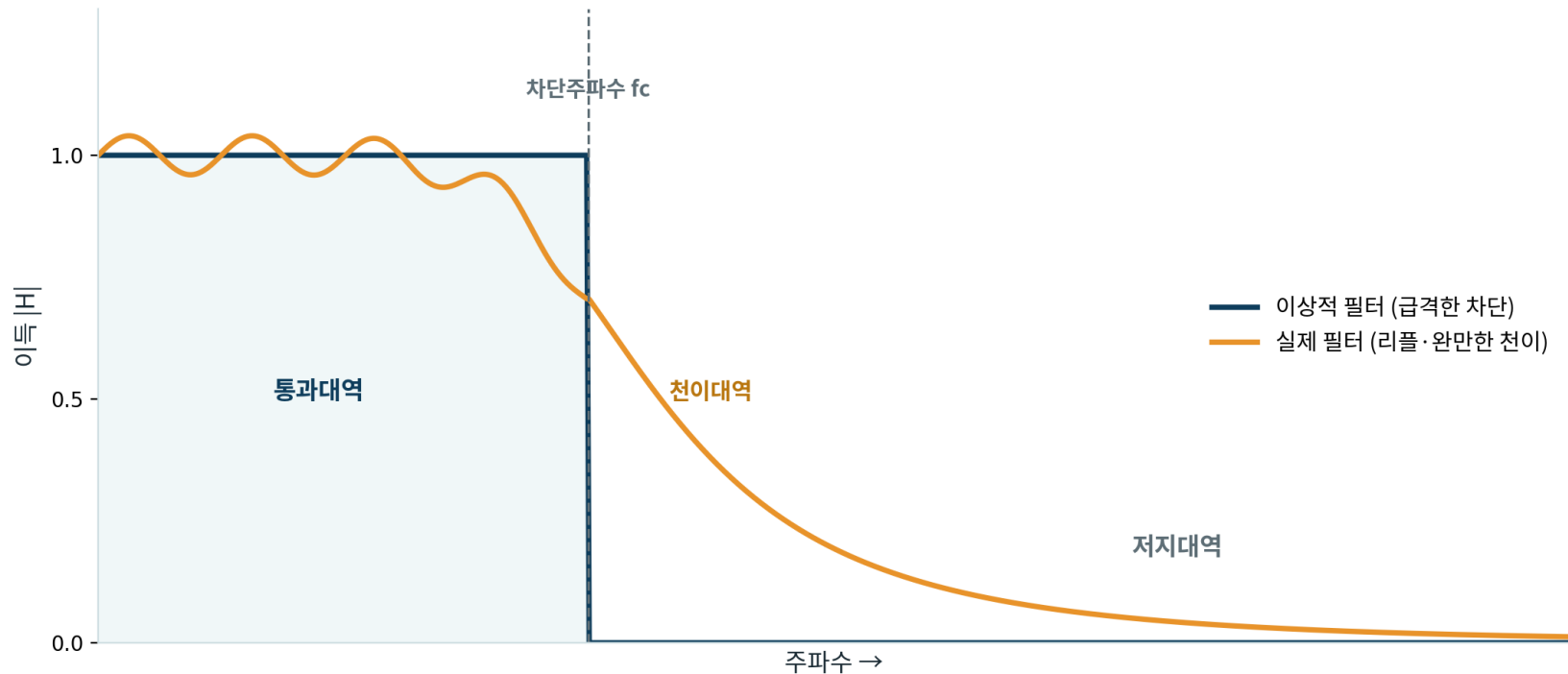
Why We Need Filters



- 신호에 원하지 않는 잡음을 제거하기 위해 필터가 필요하다.

필터 특성 — 이상적 vs 실제

- 이상적 필터는 평탄한 통과대역·급격한 차단, 실제 필터는 리플과 완만한 천이대역을 가짐



MODULE 05



계측 장비

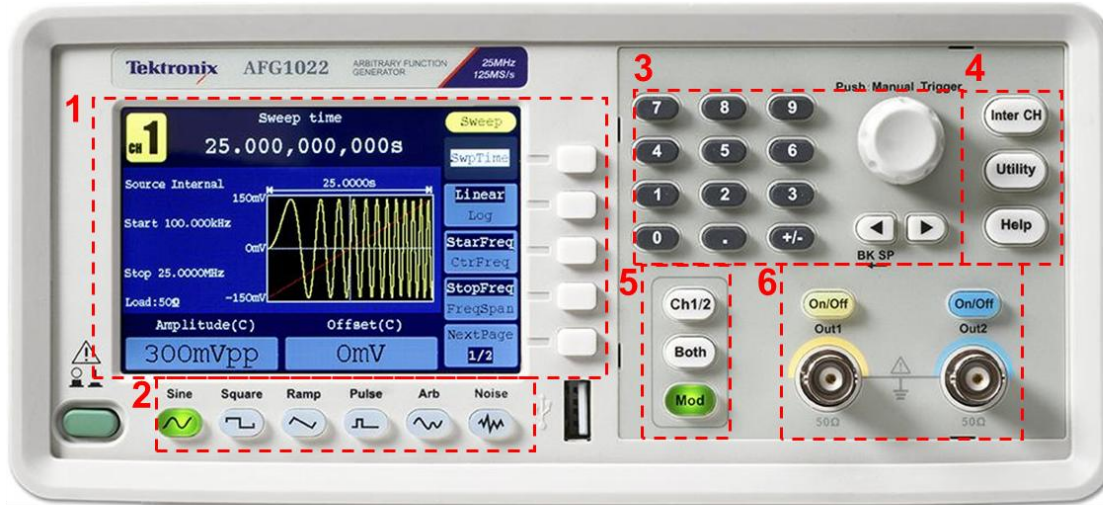
05

Measurement Instruments

함수발생기·오실로스코프·741 OP-Amp 등 실습에 사용하는 계측 장비 소개

슬라이드 p.66–69

함수발생기

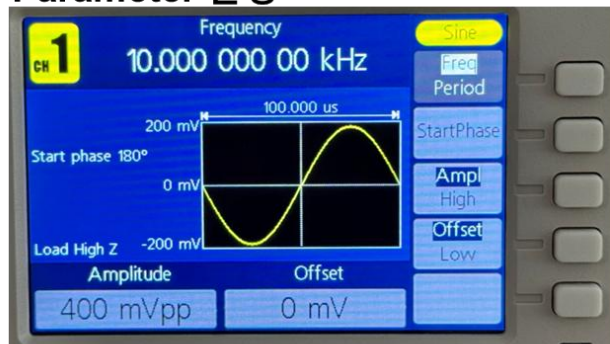


1. 주 화면
2. 파형 선택
3. 숫자패드 & 다이얼
4. 기능 버튼
5. 채널 설정
6. 출력 포트

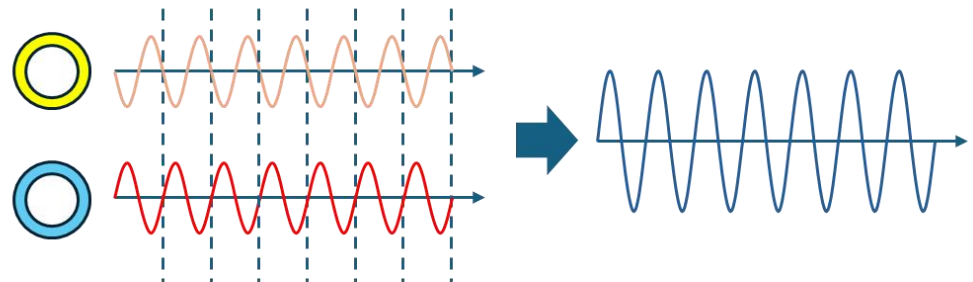


BNC-악어클립 케이블

Parameter 설정

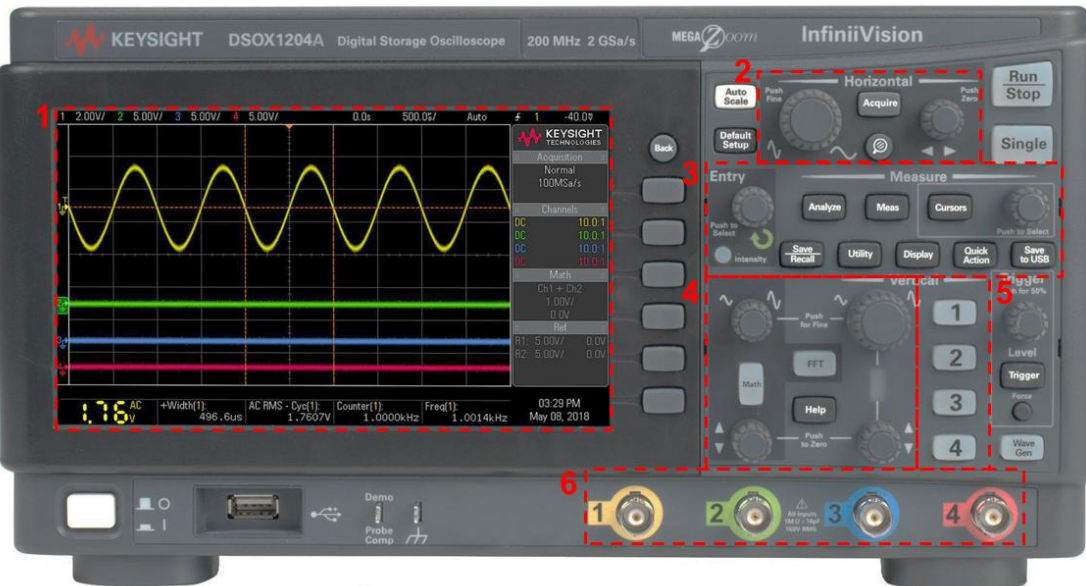


- 주파수/주기 설정
- 위상 설정
- 진폭|최고전압 설정
- 오프셋|최저전압 설정



차동 신호를 발생시킬 땐 두 출력의 위상은 반대(180°)가 되어야 함

오실로스코프



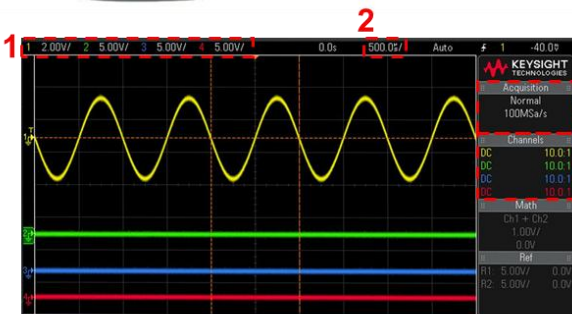
1. 주 화면
2. 시간축 다이얼
3. 기능 버튼
4. 전압축 다이얼
5. 채널 선택 버튼
6. 출력 포트(BNC)

시간축

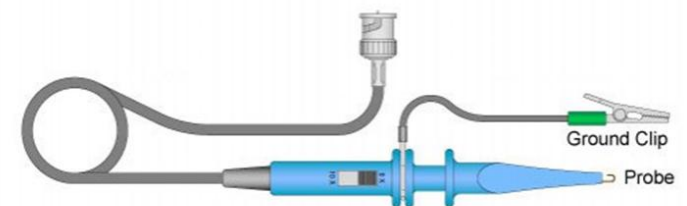


- Time scale을 조정
- Time position을 조정

전압축

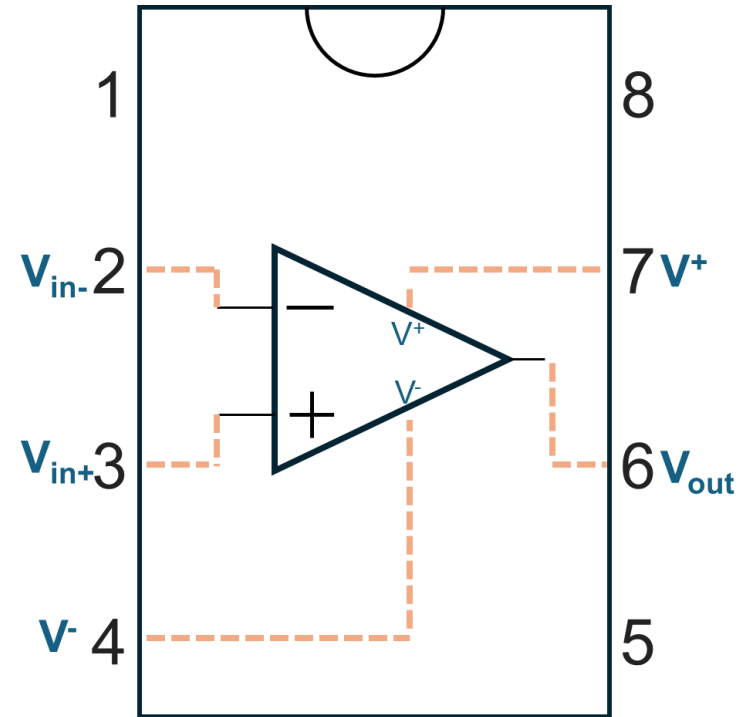
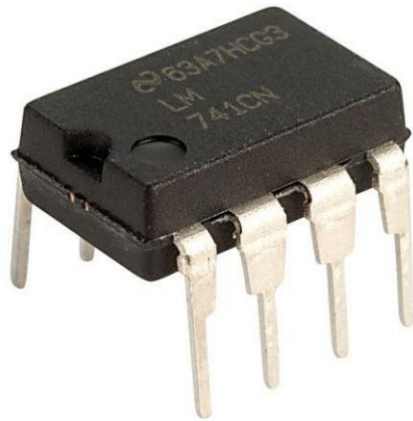


1. 전압축 scale (/div)
2. 시간축 scale (/div)
3. Sampling 상태
4. Probe 배율



Probe의 구조

741 Operational Amplifier



MODULE 06



실습

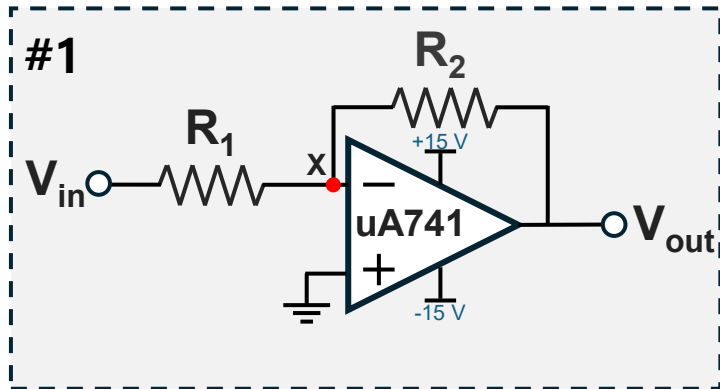
06

Hands-on Practice

Practice #1~6 — 증폭기·필터·계측 회로를 직접 구성하고 측정·고찰합니다.

슬라이드 p.70-76

Practice #1



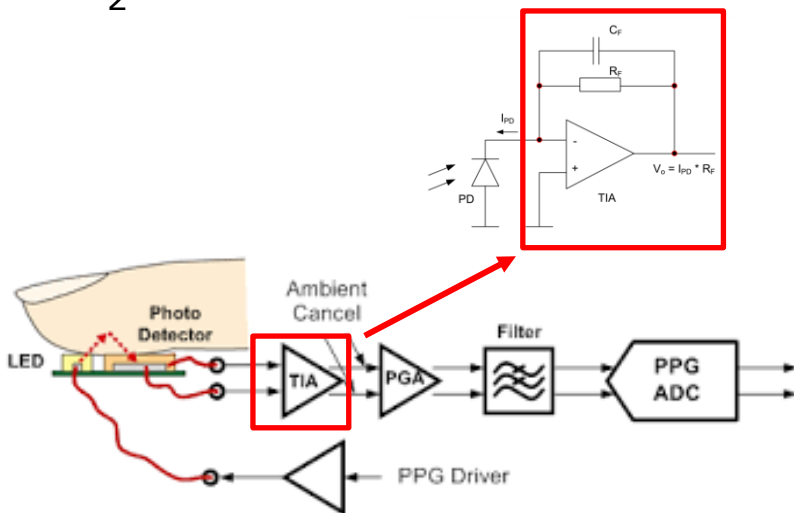
$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 100 \text{ k}\Omega$$

반전 증폭기 (Inverting Amplifier)

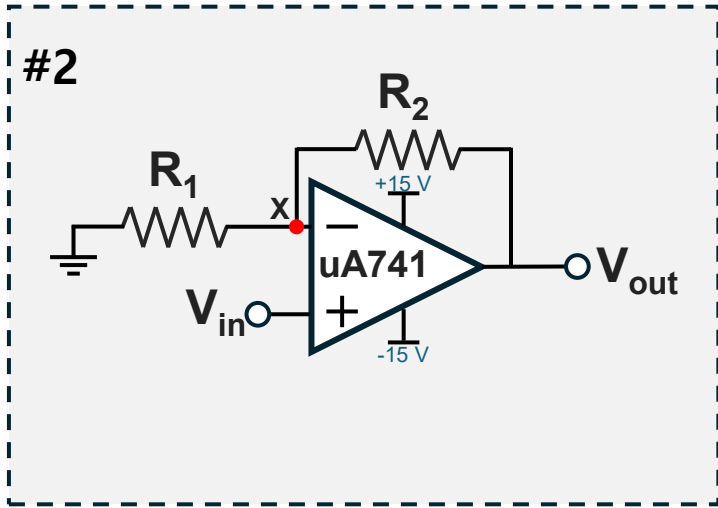
- 1) 왼쪽 회로도를 참고하여 #1과 같이 회로를 구성한다. 입력 신호 V_{in} 에 100 mVpp, 1 kHz sine 파형을 인가하고 전압이득과 신호의 위상을 관찰하고 고찰한다.
- 2) V_x 에서의 신호를 측정하고 가상 단락이 실제 이루어지는지 논한다.
- 3) 입력 신호의 주파수를 아래표와 같이 바꾸어가며 V_{out} 을 관찰하고 아래 표를 완성한다.

f_o (Hz)	10	100	1k	10k	100k
A_v (V/V)					



- 4) 위 회로는 전류 증폭을 위해서도 폭넓게 활용됨. Trans-Impedance Amplifier (TIA) 헬스케어 응용으로는 혈당센서, PPG 센서로 널리 사용되는 회로임.

Practice #2



$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$
$$R_2 = 100 \text{ k}\Omega$$

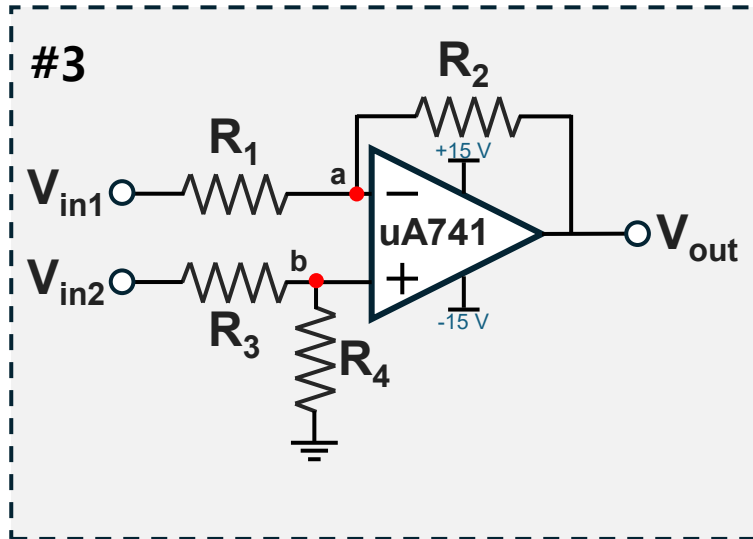
비반전 증폭기 (Non-inverting Amplifier)

- 1) 왼쪽 회로도를 참고하여 #2 와 같이 회로를 구성한다. 입력 신호 V_{in} 에 100 mVpp, 1 kHz sine 파형을 인가하고 전압이득과 신호의 위상을 관찰하고 고찰한다.
- 2) V_x 에서의 신호를 측정하고 가상 단락이 실제 이루어지는지 논한다.
- 3) 입력 신호의 주파수를 아래표와 같이 바꾸어가며 표를 완성하고 Bode plot을 그려본다.

f_o (Hz)	10	100	1k	10k	100k
A_v (V/V)					

- 4) 위 회로는 입력신호가 바로 OP amp 입력단자에 연결됨으로써 이득을 가져갈수 있는 장점이 있음. 즉, 입력측 부하효과에 자유로울수 있는 설계적 특징을 가짐.

Practice #3

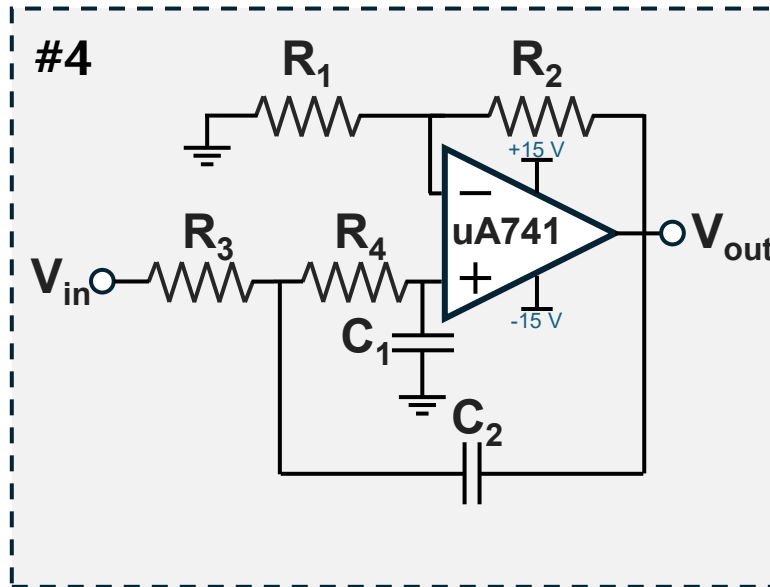


$$\begin{aligned} R_1 &= R_3 = 1 \text{ k}\Omega \\ R_2 &= R_4 = 100 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

차동 증폭기 (Difference Amplifier)

- 1) 왼쪽 회로도를 참고하여 #3 와 같이 회로를 구성한다. 입력 신호 V_{in1} 에 50 mVpp, 1 kHz sine 파형을 인가하고 V_{in2} 에는 0V DC를 인가했을때 전압이득과 신호의 위상을 관찰하고 고찰한다.
- 2) 입력신호 V_{in2} 를 50mVpp, 1kHz sine 파형으로 변경하였을때 출력을 관찰한다.
- 3) 위 회로는 두 입력간의 차이를 증폭하는 차동증폭기로서 계측회로에서 중요한회로임. 허나 위의 구조에서는 입력신호가 바로 저항을 통과하는 구조이기 때문에 부하효과로부터 자유롭지 못하다는 단점이 존재함.

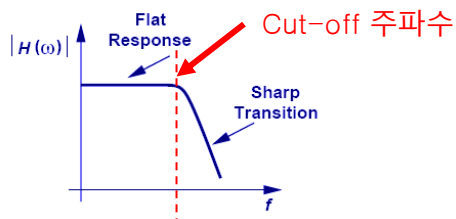
Practice #4



$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega, R_2 = 20 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 15 \text{ k}\Omega, R_4 = 30 \text{ k}\Omega$$

$$C_1 = C_2 = 47 \text{ nF}$$



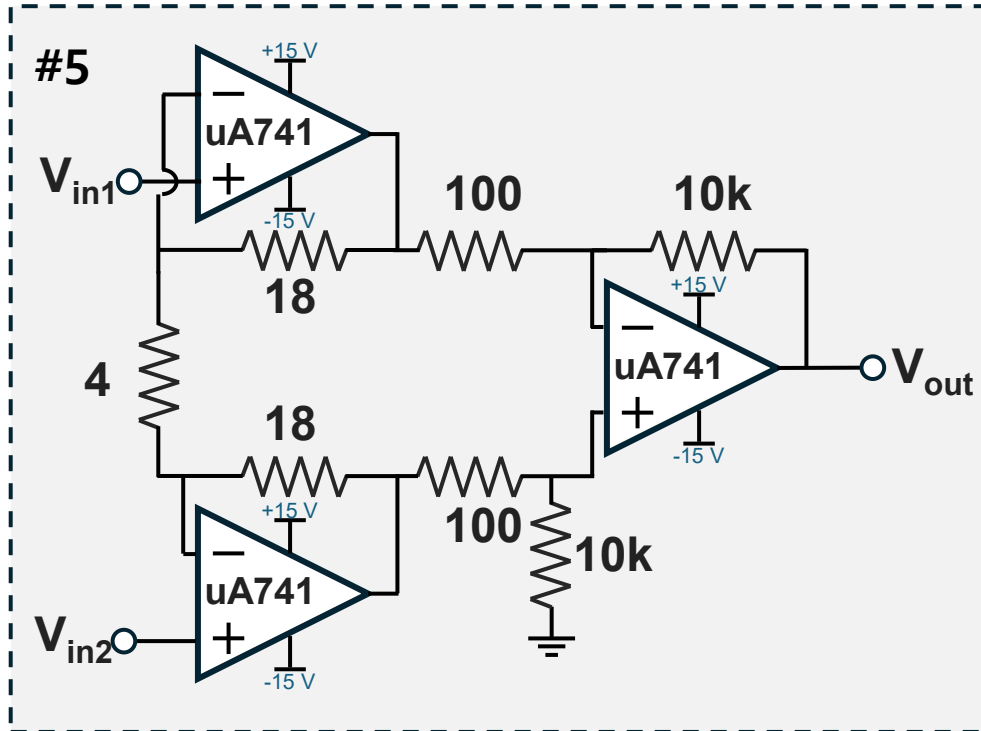
저역통과필터-증폭기

- 1) 왼쪽 회로도를 참고하여 #4 와 같이 회로를 구성한다. 입력 신호 V_{in} 에 50 mVpp, 1 kHz sine 파형을 인가하고 출력 신호를 관찰한다. 전압이득은 얼마인가?
- 2) 주파수를 50 Hz로 변경하였을 때에는 전압이득은 얼마인가?
- 3) 입력신호 V_{in} 의 주파수를 바꾸어가며 다음 표를 완성한다.

f_o (Hz)	1	10	100	1k	10k	100k
A_v (V/V)						

- 4) 위 회로는 2차 저역필터를 포함한 비반전증폭기로 고주파 잡음 신호를 제거하는데 반드시 필요하다. 본 설계는 대략 150 Hz 정도의 cut-off 주파수에서 2nd order 감쇄 특성을 갖고 있음.

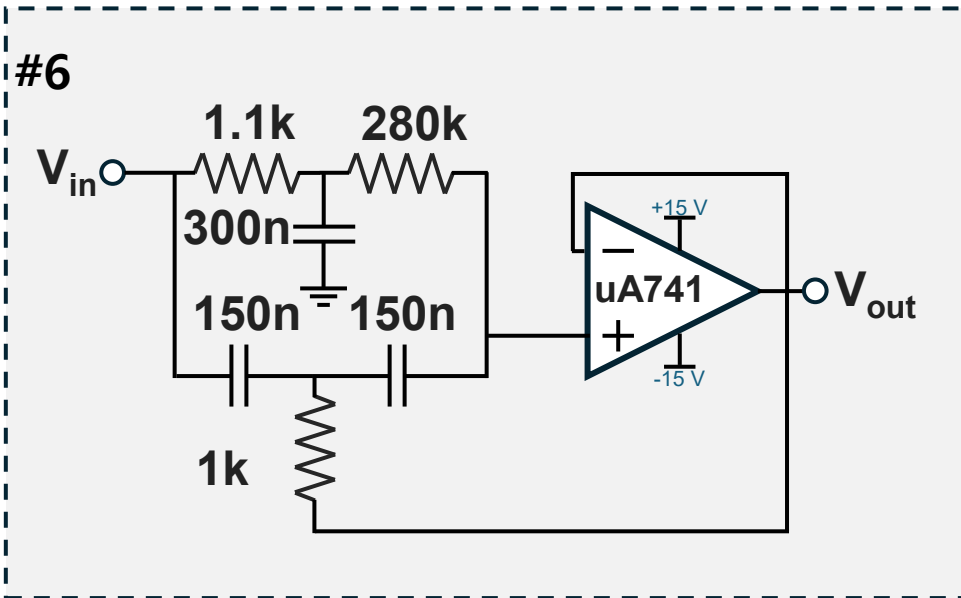
Practice #5



계측증폭기

- 1) 왼쪽 회로도를 참고하여 #5 와 같이 회로를 구성한다. 입력 신호 V_{in1} 에 5 mVpp, 1 kHz sine 파형을 인가하고 V_{in2} 에는 0V DC를 인가한다. 출력 신호를 관찰할했을 때 전압이득은 얼마인가?
- 2) V_{in2} 에 5 mVpp, 1 kHz sine 를 인가했을때 출력을 관찰하고 고찰한다.
- 4) 위 회로는 계측증폭기로 OP amp가 3개가 사용되는 단점이 있으나 입력신호가 바로 OP amp의 입력단자에 연결되어 부하효과가 없는 점과 차동으로 증폭이 이루어진다는 장점이 있음. 대부분의 미세 전압 계측 응용으로 널리 활용됨.

Practice #6



노치(Notch) 필터

- 1) 왼쪽 회로도를 참고하여 회로를 구성한다. 입력 신호 V_{in1} 에 100 mVpp, 60 Hz sine 파형을 인가하였을 때 출력 V_{out} 을 관찰하시오.
- 2) 입력 신호의 주파수를 100 Hz로 바꾸었을때 출력 신호를 관찰하시오.
- 3) 입력신호의 주파수를 1~200 Hz까지 바꾸어가며 출력신호의 크기를 관찰해보자.