

# ICM-20948 (9 DOF IMU)

[https://www.waveshare.com/wiki/10\\_DOF\\_IMU\\_Sensor\\_\(C\)](https://www.waveshare.com/wiki/10_DOF_IMU_Sensor_(C)) + BMP280 센서 (고도 센서)

ICM20948 가속도, 자이로, 지자기 I2C+DMA+INT (HAL)

[https://github.com/varofla/STM32F103\\_ICM20948\\_I2C\\_DMA/blob/main/src/app/app.c](https://github.com/varofla/STM32F103_ICM20948_I2C_DMA/blob/main/src/app/app.c)

## ICM-20948 (3축 Gyro, 3축 Accel, 3축 Magnetic)

- 7-bit Address = 0b1101000 = 0x68 (Default)
  - I2C 통신 방식 (8-bit 주소) W/R (0/1)
    - 쓰기 (Write) → 0xD0 == (0x68 << 1 | 0)
    - 읽기 (Read) → 0xD1 == (0x68 << 1 | 1)
- FIFO Buffer 크기 : 512 byte
- 자이로스코프 출력을 위한 16-bit ADC 3개 (6 byte)
  - 각속도(회전 속도) 측정
    - ±250, ±500, ±1000, ±2000dps (각속도 범위, 해상도)
      - 저 dps 범위 (±250 dps)는 느린 움직임을 정밀하게 추적할 때 유리
      - 고 dps 범위 (±2000dps)는 빠른 회전을 측정할 때 필요
- 가속도 계 출력을 위한 16-bit ADC 3개 (6 byte)
  - 선형 가속도 측정
    - ±2g, ±4g, ±8g, ±16g (±2g일 때 해상도가 가장 높음)
- 온도 측정 16-bit ADC 1개 (2 byte)
- 지자 계 데이터 입력 (외부 센서 AK09916)
  - bit Address = 0b1101000 = 0x68
  - EXT\_SLV\_SENS\_DATA\_xx - Data Registers
  - I2C\_MST\_xxx - 센서를 I2C Master 역할을 부여
  - I2C\_SLVx\_xxx - Slave 센서를 제어

## 사용 방법

1. 센서 내장 I2C Master를 활용해 ICM-20948이 직접 데이터를 읽음  
→ MCU 측에서 하나의 주소만 인식
2. 센서 자체 I2C 버스에 직결해 MCU 측에서 직접 제어  
→ MCU 측에서 두 개의 주소를 인식

→ DMA 사용 시 주소를 2개로 분할하면 DMA 호출을 2번 해야 함. 따라서, 1번 방식 채택

## 센서 Sampling 주기

$1125/(1 + \text{SMPLRT\_DIV}) \text{ Hz}$

- SMPLRT\_DIV 레지스터
- 필요 Sampling 주기
  - 200Hz ~ 1000Hz (권장 값 : 500Hz)
  - 평균 필터 x4 average
- PID 제어 주기
  - 일반적인 값 : 100Hz ~ 500Hz (권장 값 250Hz)

### ▼ 이유

#### 센서 데이터가 PID 루프보다 느릴 때 ( $125\text{Hz} < 250\text{Hz}$ )

- 센서 데이터 업데이트 속도( $125\text{Hz}$ ) < PID 제어 루프 속도( $250\text{Hz}$ )
- 즉, PID 루프는 매번 새로운 센서 데이터를 받지 못할 수도 있음.
- 하지만! 추정(Interpolation) 또는 이전 값을 재사용하면 문제 없음!
  - 예를 들어, PID 루프가 두 번째 사이클( $4\text{ms}$ )일 때, 이전 센서 데이터를 다시 사용하면 됨.
  - 대부분의 드론 컨트롤러(FC)는 이런 방식을 사용함.
  - 필요하면 보간(Extrapolation) 기법을 적용해서 데이터 간극을 보완 가능.

#### ◆ 해결 방법:

1. 이전 값을 재사용 → 단순히 가장 최근 센서 값을 그대로 사용 (많은 드론에서 사용)
2. 보간(Interpolation) 적용 → 두 센서 데이터 간의 중간값을 계산하여 보정 가능
3. 예측(Extrapolation) 적용 → 센서 데이터를 기반으로 한 스텝 앞을 예측 가능

## DLPF (Digital Low Pass Filter)

센서 데이터에서 고주파 신호를 차단하여 노이즈 제거

- **CONFIG\_1 레지스터 (GYRO\_CONFIG\_1, ACCEL\_CONFIG)**
- **3DB BW [Hz]**
  - 필터가 신호의 전력을 절반(-3dB)으로 감소시키는 두 지점 사이의 주파수 범위
- **NBW [Hz]**
  - 특정 주파수 대역의 신호를 집중적으로 제거하는 노치 필터의 대역폭

센서	DLPF 설정 값	대역폭 BW	지연시간 Delay
자이로 Gyro	DLPF_CFG = 3	41Hz	5.9ms
가속도 Accel	DLPF_CFG = 3	45.9Hz	5.8ms

▼ 이유

DLPF 3 (약 40Hz 설정 시, 고주파 진동을 효과적으로 제거하면서 응답 속도 충분히 빠름)

DLPF (0, 1) 설정 → 고주파 노이즈 문제

DLPF (6, 7) 설정 → 필터링이 심해서 응답 속도가 낮아짐

## I2C Configuration

- **Master Features**
  - **Fast Mode = 400000Hz(=400kHz)**
  - **Fast Mode Duty Cycle = Tlow/Thigh = 2**
- **Slaver Features**
  - **Clock No Stretch Mode = Disable**
  - **Primary Address Length Selection = 7 bit**
  - **Dual Address Acknowledge = Disable**
  - **Primary slave address = 0**
  - **General Call address = Disable**

## Manual

### 센서 값 저장 레지스터 Address

→ 센서 데이터 읽기 (ACCEL\_XOUT\_H ~ GYRO\_ZOUT\_L)

Address	Name	Address	Name	Address	Name
0x33	Gyro_X_H	0x2D	Accel_X_H	0x39, 0x3A	Temp_H,L
0x34	Gyro_X_L	0x2E	Accel_X_L	0x3B, 0x3C	EXT_SLA0_xx
0x35	Gyro_Y_H	0x2F	Accel_Y_H	0x3D, 0x3E	EXT_SLA0_xx
0x36	Gyro_Y_L	0x30	Accel_Y_L	0x3F, 0x40	EXT_SLA0_xx
0x37	Gyro_Z_H	0x31	Accel_Z_H	0x41	ST2
0x38	Gyro_Z_L	0x32	Accel_Z_L		

## ICM-20948 센서 Configuration

- 센서 Address
  - AD0 → 0x68
- BANK\_SEL 설정 (Bank 0, Bank 1, Bank 2, Bank 3)
  - REG\_BANK\_SEL → 0x7F, REG\_BANK\_SEL 는 모든 BANK가 공유
    - 0x00 : Select User Bank 0
    - 0x10 : Select User Bank 1
    - 0x20 : Select User Bank 2
    - 0x30 : Select User Bank 3
- Sleep 모드 해제 (Bank 0)
  - PWR\_MGMT\_1 → 0x06 = 0x00
- 센서 데이터 읽는 주기 설정 (Bank 0)
  - LP\_CONFIG → 0x05 = 0x00
- 샘플링 속도 설정 (Bank 2)
  - GYRO\_SMPLRT\_DIV → 0x00 = 0x01
  - ACCEL\_SMPLRT\_DIV\_1 → 0x10 = 0x00
  - ACCEL\_SMPLRT\_DIV\_2 → 0x11 = 0x00
- Config 설정 (Bank 2)
  - GYRO\_CONFIG\_1 → 0x01 = 0x1D
  - GYRO\_CONFIG\_2 → 0x02 = 0x02
  - ACCEL\_CONFIG → 0x14 = 0x1D
  - ACCEL\_CONFIG\_2 → 0x15 = 0x00

→ BANK\_SEL 레지스터에 따라 다른 BANK의 레지스터에 접근

Table 12 lists the user-accessible power modes for ICM-20948.

MODE	NAME	GYRO	ACCEL	MAGNETOMETER	DMP
1	Sleep Mode	Off	Off	Off	Off
2	Low-Power Accelerometer Mode	Off	Duty-Cycled	Off	On or Off
3	Low-Noise Accelerometer Mode	Off	On	Off	On or Off
4	Gyroscope Mode	On	Off	Off	On or Off
5	Magnetometer Mode	Off	Off	On	On or Off
6	Accel + Gyro Mode	On	On	Off	On or Off
7	Accel + Magnetometer Mode	Off	On	On	On or Off
8	9-Axis Mode	On	On	On	On or Off

## + AK09916 센서

### ICM-20948 센서의 I2C Master 모드로 AK09916 센서의 레지스터를 Read/Write

- 7-bit Address = 0b0001100 = 0x0C
  - I2C 통신 방식 (8-bit 주소) W/R (0/1)
    - 쓰기 (Write) → 0xD0 == (0x0C << 1 | 0)
    - 읽기 (Read) → 0xD1 == (0x0C << 1 | 1)
- ICM-20948 (I2C\_MST, BANK 3)
  - I2C\_MST
    - I2C\_MST\_ODR\_CONFIG → 0x00 = 무시
    - I2C\_MST\_CTRL → 0x01 = 0x00
    - I2C\_MST\_DELAY\_CTRL → 0x02 = 무시
  - I2C\_SLV
    - I2C\_SLV0\_ADDR → 0x03
      - 0x8C : Read / 0x0C : Write
    - I2C\_SLV0\_REG → 0x04 = Slave Register Address
    - I2C\_SLV0\_CTRL → 0x05 = 0x89
    - I2C\_SLV0\_DO → 0x06 = data

## ▼ Gyroscope Spec

Typical Operating Circuit of section 4.2, VDD = 1.8V, VDDIO = 1.8V, T<sub>A</sub>=25°C, unless otherwise noted.

**NOTE:** All specifications apply to Low-Power Mode and Low-Noise Mode, unless noted otherwise

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
<b>GYROSCOPE SENSITIVITY</b>						
Full-Scale Range	GYRO_FS_SEL=0		±250		dps	1
	GYRO_FS_SEL=1		±500		dps	1
	GYRO_FS_SEL=2		±1000		dps	1
	GYRO_FS_SEL=3		±2000		dps	1
Gyroscope ADC Word Length			16		bits	1
Sensitivity Scale Factor	GYRO_FS_SEL=0		131		LSB/(dps)	1
	GYRO_FS_SEL=1		65.5		LSB/(dps)	1
	GYRO_FS_SEL=2		32.8		LSB/(dps)	1
	GYRO_FS_SEL=3		16.4		LSB/(dps)	1
Sensitivity Scale Factor Tolerance	25°C		±1.5		%	2
Sensitivity Scale Factor Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±3		%	2
Nonlinearity	Best fit straight line; 25°C		±0.1		%	2, 3
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	2, 3
<b>ZERO-RATE OUTPUT (ZRO)</b>						
Initial ZRO Tolerance	25°C (Component-level)		±5		dps	2
ZRO Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±0.05		dps/°C	2
<b>GYROSCOPE NOISE PERFORMANCE (GYRO_FS_SEL=0)</b>						
Noise Spectral Density	Based on Noise Bandwidth = 10 Hz		0.015		dps/√Hz	2
<b>GYROSCOPE MECHANICAL FREQUENCIES</b>		25	27	29	kHz	2
<b>LOW PASS FILTER RESPONSE</b>	Programmable Range	5.7		197	Hz	1, 3
<b>GYROSCOPE START-UP TIME</b>	From Full-Chip Sleep mode		35		ms	2, 3
<b>OUTPUT DATA RATE</b>	Low-Power Mode	4.4		562.5	Hz	1
	Low-Noise Mode GYRO_FCHOICE=1; GYRO_DLPFCFG=x	4.4		1.125k	Hz	
	Low-Noise Mode GYRO_FCHOICE=0; GYRO_DLPFCFG=x			9k	Hz	

## ▼ Accelerometer Spec

Typical Operating Circuit of section 4.2, VDD = 1.8V, VDDIO = 1.8V, T<sub>A</sub>=25°C, unless otherwise noted.

**NOTES:** All specifications apply to Low-Power Mode and Low-Noise Mode, unless noted otherwise

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
<b>ACCELEROMETER SENSITIVITY</b>						
Full-Scale Range	ACCEL_FS=0		±2		G	1
	ACCEL_FS=1		±4		G	1
	ACCEL_FS=2		±8		G	1
	ACCEL_FS=3		±16		G	1
ADC Word Length	Output in two's complement format		16		Bits	1
Sensitivity Scale Factor	ACCEL_FS=0		16,384		LSB/g	1
	ACCEL_FS=1		8,192		LSB/g	1
	ACCEL_FS=2		4,096		LSB/g	1
	ACCEL_FS=3		2,048		LSB/g	1
Initial Tolerance	Component-level		±0.5		%	2
Sensitivity Change vs. Temperature	-40°C to +85°C ACCEL_FS=0		±0.026		%/°C	2
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		±0.5		%	2, 3
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	2, 3
<b>ZERO-G OUTPUT</b>						
Initial Tolerance	Component-level, all axes		±25		mg	2
Initial Tolerance	Board-level, all axes		±50		mg	2
Zero-G Level Change vs. Temperature	0°C to +85°C		±0.80		mg/°C	2
<b>ACCELEROMETER NOISE PERFORMANCE</b>						
Noise Spectral Density	Based on Noise Bandwidth = 10 Hz		230		μg/√Hz	2
<b>LOW PASS FILTER RESPONSE</b>	Programmable Range	5.7		246	Hz	1, 3
<b>ACCELEROMETER STARTUP TIME</b>	From Sleep mode		20		ms	2, 3
	From Cold Start, 1 ms V <sub>DD</sub> ramp		30		ms	2, 3
<b>OUTPUT DATA RATE</b>	Low-Power Mode	0.27		562.5	Hz	1
	Low-Noise Mode ACCEL_FCHOICE=1; ACCEL_DLPFCFG=x	4.5		1.125k	Hz	
	Low-Noise Mode ACCEL_FCHOICE=0; ACCEL_DLPFCFG=x			4.5k	Hz	

## ▼ Magneometer Spec

Typical Operating Circuit of section 4.2, VDD = 1.8V, VDDIO = 1.8V, T<sub>A</sub>=25°C, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
MAGNETOMETER SENSITIVITY						
Full-Scale Range			±4900		μT	1
Output Resolution			16		bits	1
Sensitivity Scale Factor			0.15		μT / LSB	1
ZERO-FIELD OUTPUT						
Initial Calibration Tolerance		-2000		+2000	LSB	2
OTHER						
Output Data Rate				100	Hz	1

### → Register Map 7 Sector

[ICM-20948 Datasheet](#)

[AK09916 Datasheet](#)

[오차 보정 \(Offset\)](#)

[센서 테스트 코드](#)

[Gyro & Accel Code](#)

[Mag Code](#)

[icm\\_20948.h](#)

[icm\\_20948.c](#)