

6. 정규 속도 단계별 상승 실험 보고서

1. 실험 개요

- 실험 목적:** 표준 보드레이트 및 초고속 구간(1200 ~ 1,000,000 bps)을 단계별로 상승시키며 **소프트웨어 비트뱅(Bit-bang)** 방식의 송신 안정성을 검증하고, 속도 변화에 따른 **비트 폭(Bit Width)**의 물리적 변화와 통신 한계점을 확인한다.
- 연결 구성:** Arduino Uno D8 (Software TX) ↔ D0 (Hardware RX)

Loopback

- 측정 방법:** 각 속도별로 5개의 테스트 문자(a , A , 0 , 9 , !)를 3회 반복 송신(총 15회)하여 수신 성공률을 측정.

2. 실험 결과 데이터 (Summary)

| Baud Rate (bps) | Bit Width (이론값, μs) | Total Tests | Success | Errors | No Data | Success Rate (%) | 비고 |
|--------------------|---------------------------------|-------------|---------|--------|---------|------------------|--------------|
| 1200 | 833.33 | 15 | 15 | 0 | 0 | 100.00% | 매우 안정적 |
| 2400 | 416.67 | 15 | 15 | 0 | 0 | 100.00% | 매우 안정적 |
| 4800 | 208.33 | 15 | 15 | 0 | 0 | 100.00% | 매우 안정적 |
| 9600 | 104.17 | 15 | 15 | 0 | 0 | 100.00% | 안정적 |
| 19200 | 52.08 | 15 | 15 | 0 | 0 | 100.00% | 안정적 (실용 한계) |
| 38400 | 26.04 | 15 | 6 | 9 | 0 | 40.00% | 불안정 (데이터 깨짐) |
| 57600 | 17.36 | 15 | 0 | 15 | 0 | 0.00% | 수신 불가 |
| 115200 | 8.68 | 15 | 0 | 15 | 0 | 0.00% | 수신 불가 |
| 230400 | 4.34 | 15 | 0 | 15 | 0 | 0.00% | 수신 불가 |
| 460800 | 2.17 | 15 | 0 | 15 | 0 | 0.00% | 수신 불가 |
| 921600 | 1.09 | 15 | 0 | 15 | 0 | 0.00% | 수신 불가 |

| | | | | | | | |
|---------|------|----|---|----|---|-------|-------|
| 1000000 | 1.00 | 15 | 0 | 15 | 0 | 0.00% | 수신 불가 |
|---------|------|----|---|----|---|-------|-------|

참고: 19200 bps까지는 데이터 무결성이 보장되나, 38400 bps부터 급격한 성능 저하가 발생하며 그 이상의 초고속 구간에서는 통신이 전혀 불가능함.

3. 결과 분석

A. 저속 구간(1200 ~ 19200 bps)의 안정성

측정된 데이터에 따르면 1200 bps부터 19200 bps까지의 모든 테스트에서 **성공률 100.00%**를 기록하였다.

- **비트 폭의 여유:** 19200 bps 기준 비트 폭은 약 **52.08 μs**이다.
- **소프트웨어 처리 능력:** 아두이노(ATmega328P, 16MHz)의 GPIO 제어 및 루프 오버헤드(Overhead)는 수 μs 수준이다. 50 μs 이상의 비트 폭 내에서는 이러한 오버헤드가 통신 타이밍 오차에 큰 영향을 주지 않아 안정적인 통신이 가능하다.

B. 고속 구간(38400 bps ~ 1 Mbps)의 한계 및 실패 원인

38400 bps부터 성공률이 40%로 급락하고, 57600 bps부터 1,000,000 bps까지의 전 구간에서는 통신이 불가능하였다.

- **타이밍 마진 부족:** 38400 bps의 비트 폭은 **26.04 μs**이며, 1 Mbps에 이르면 단 **1.00 μs**로 줄어든다. 소프트웨어 비트뱅 방식에서 `delayMicroseconds()` 와 GPIO 조작 명령어의 실행 시간(Instruction Cycle)만으로도 이미 1~2 μs 이상 소요되므로, 초고속 구간의 타이밍을 맞추는 것은 물리적으로 불가능하다.
- **샘플링 불일치:** 수신 측(Hardware UART)은 정확한 타이밍에 샘플링을 시도하지만, 송신 측(Software)의 지연으로 인해 Start Bit와 Data Bit의 경계가 완전히 어긋나 모든 패킷이 프레임 에러(Frame Error) 또는 깨진 데이터로 처리되었다.

C. 전송 속도와 비트 폭의 상관관계

$$T_{bit} = \frac{1}{\text{Baud Rate}}$$

보드레이트가 증가함에 따라 비트 폭은 반비례하여 감소하며, 비트 폭이 줄어들수록 소프트웨어 방식의 타이밍 제어 난이도가 기하급수적으로 상승한다. 특히 1MHz(1Mbps) 대역은 하드웨어 전용 모듈 없이는 처리가 불가능한 영역임을 확인하였다.

4. 결론

본 실험을 통해 **소프트웨어 비트뱅 방식의 유효 대역폭은 최대 19200 bps**임이 재확인되었다.

- **권장 속도:** 안정적인 데이터 전송을 위해서는 **9600 bps 이하** 사용을 권장한다.
- **한계 속도:** 환경에 따라 **19200 bps**까지 사용 가능하나, 그 이상의 속도(38400 bps ~ 1 Mbps)가 필요한 경우 반드시 **하드웨어 UART**를 사용해야 한다.