

# RPL/BRPL 스트레스 실험 결과 보고서

## 개요

본 문서는 RPL/BRPL 스트레스 테스트의 실행 환경, 실험 방법, 데이터 처리 절차, 그리고 측정 결과를 한국어로 정리한 LaTeX 보고서이다. 분석 데이터는 `results/summary.csv`와 `results/analysis/*.csv`를 기준으로 한다.

## 실험 환경

- 시뮬레이터: Cooja (Contiki-NG, headless 실행)
- 실행 방식: `cooja.jar -nogui <file.csc>` 형태의 CLI 실행
- 실행 스크립트: `run_sweep_stage1.sh`, `run_sweep_stage2.sh`, `run_sweep_stage3.sh`
- 로그 수집: `receiver_root.c`의 CSV 출력 라인을 파싱
- 측정 시간: 총 360s (WARMUP=60s, MEASURE=300s)
- 재현성: seed 기반 실행

## 실험 설계

### 공통 규칙

- 성능 지표는 MEASURE 구간에서만 계산
- 결과는 개별 실행 로그로부터 `summary.csv`로 집계
- 출력 구조:
  - `results/raw/<stage>/<mode>/Nxx_seedY_srX_irZ_siT.{csc,log,csv}`
  - `results/summary.csv`
  - `results/thresholds.csv`

### Stage 1: N 스윙

- 고정: `SUCCESS_RATIO=1.0`, `INTERFERENCE_RATIO=1.0`, `SEND_INTERVAL_S=10`
- 노드 수: {5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50}
- Seed: {1, 2, 3}
- Mode: `rpl-classic`, `brpl`

## Stage 2: 링크 품질 스윙

Stage 1의 RPL classic 결과에서 N을 자동 선택:

- Stable N:  $PDR \geq 0.95$ 를 만족하는 가장 큰 N
- Marginal N:  $0.90 \leq PDR < 0.95$ 를 만족하는 가장 큰 N
- Marginal N이 없으면 stable N 위의 다음 N 사용

스윙 파라미터:

- SUCCESS\_RATIO  $\in \{1.0, 0.95, 0.9, 0.85, 0.8, 0.75\}$
- INTERFERENCE\_RATIO  $\in \{1.0, 0.95, 0.9, 0.85\}$
- Seed:  $\{1, 2, 3\}$
- Mode: rpl-classic, brpl

## Stage 3: 트래픽 스윙

Stage 2의 RPL classic 결과에서 knee 조건을 선택:

- $0.85 \leq PDR \leq 0.92$ 인 조건이 있으면 0.90에 가장 가까운 조건 선택
- 없으면 0.90에 가장 가까운 조건 선택

스윙 파라미터:

- SEND\_INTERVAL\_S  $\in \{20, 10, 5, 2\}$  (내림차순)
- Seed:  $\{1, 2, 3\}$
- Mode: rpl-classic, brpl

## 지표 정의

- PDR:  $PDR = \frac{rx\_count}{tx\_expected}$
- 평균 지연: avg\_delay\_ms
- 95퍼센타일 지연: p95\_delay\_ms
- 제어 오버헤드(초당):  $overhead\_per\_s = \frac{dio\_count + dao\_count}{duration\_s}$

## 붕괴 시점 탐지 기준

- 기본 기준:  $PDR < 0.9$  또는  $rx\_count \leq 0$
- 스윙 순서: Stage 1은 N 증가, Stage 2는 success\_ratio 감소 후 interference\_ratio 감소, Stage 3은 send\_interval\_s 감소 순

## 분석 파이프라인

- 집계: `results/summary.csv`
- 붕괴 추정 및 비교 요약: `tools/r/analyze_results.R`
- 결과 산출물: `results/analysis/collapse_stage*.csv, mode_stage_comparison.csv`

## 모드/스테이지별 요약 통계

Table 1: 모드/스테이지별 평균 요약

Mode	Stage	PDR	Avg Delay(ms)	P95 Delay(ms)	Overhead/s	Runs
brpl	stage1	0.00	0.00	0.00	2.67	69
brpl	stage2	0.00	0.00	0.00	2.74	72
brpl	stage3	0.00	0.00	0.00	3.15	12
rpl-classic	stage1	1.00	382.21	574.57	10.59	121
rpl-classic	stage2	1.00	456.99	943.87	24.38	173
rpl-classic	stage3	1.00	418.27	690.10	24.03	12

## 붕괴 시점 요약

Table 2: Stage별 붕괴 조건(최초 발생 기준)

Mode	Stage	N	Success Ratio	Interference Ratio	Send Interval(s)
brpl	stage1	5	1.00	1.00	10
brpl	stage2	50	1.00	0.85–1.00	10
brpl	stage3	50	1.00	1.00	2
rpl-classic	stage1–3	붕괴 조건 미검출			

## Stage 2/3 상세 붕괴 조건

### Stage 2

Table 3: Stage 2 붕괴 조건 상세

Mode	N	Success Ratio	Interference Ratio	PDR	Runs
brpl	50	1.00	0.85	0.00	3
brpl	50	1.00	0.90	0.00	3
brpl	50	1.00	0.95	0.00	3
brpl	50	1.00	1.00	0.00	3

### Stage 3

Table 4: Stage 3 붕괴 조건 상세

Mode	N	Success Ratio	Interference Ratio	Send Interval(s)	PDR	Runs
brpl	50	1.00	1.00	2	0.00	3

### 시각화

#### PDR 비교

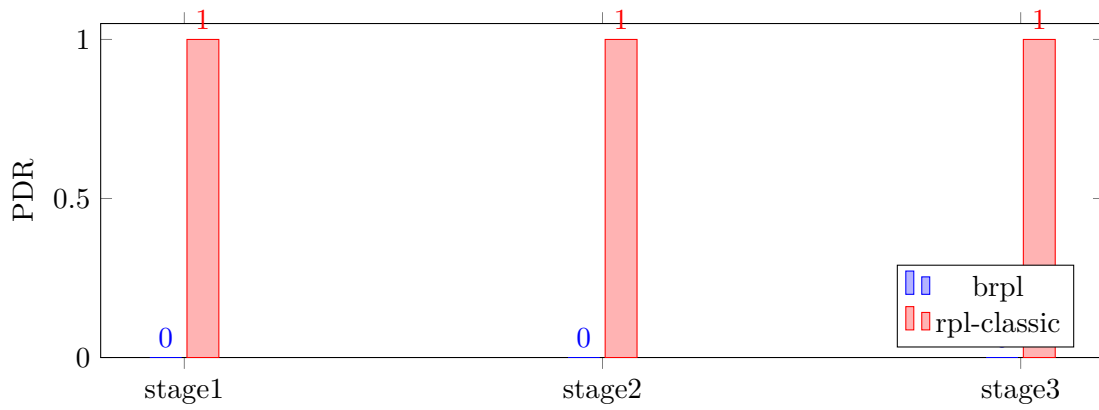


Figure 1: Stage별 평균 PDR 비교

#### 제어 오버헤드 비교

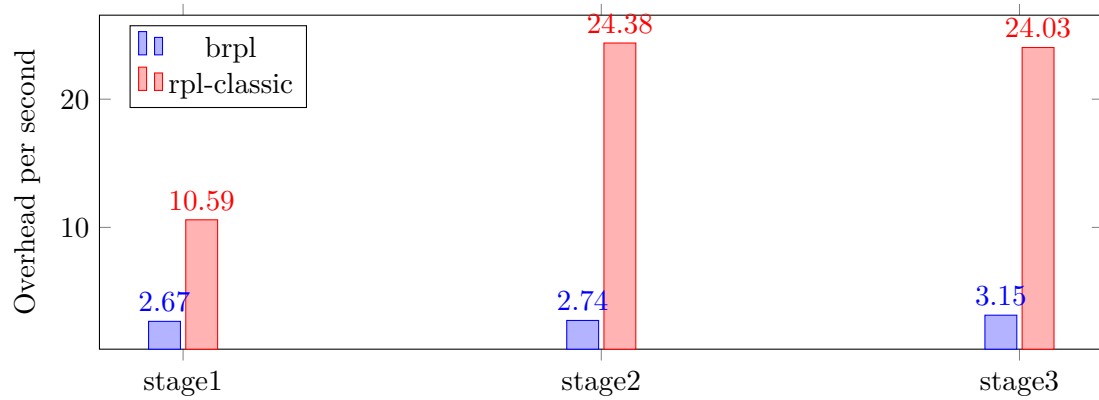


Figure 2: Stage별 평균 제어 오버헤드 비교

## 해석 및 주의사항

- brpl은 모든 stage에서 PDR이 0으로 집계되어 초기부터 붕괴로 판정되었다.
- rpl-classic은 모든 stage에서 PDR이 1.0으로 유지되어 붕괴 조건이 관측되지 않았다.
- brpl 결과는 정상 송수신 여부, 로그 파싱, 프로토콜 설정을 추가 점검할 필요가 있다.
- summary.csv에는 동일 조건 중복 실행이 존재할 수 있으므로 결과 해석 시 주의한다.

## 재현 방법

```
./run_sweep_stage1.sh
./run_sweep_stage2.sh
./run_sweep_stage3.sh
Rscript tools/r/analyze_results.R rpl-benchmark 0.9
```