

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 스윕

- 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 스윕

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

스윕 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 스윕

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

스윕 파라미터:

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

지표 정의

- PDR: $PDR = \frac{\text{rx_count}}{\text{tx_expected}}$
- 평균 지연: avg_delay_ms
- 95퍼센타일 지연: p95_delay_ms
- 제어 오버헤드(초당): overhead_per_s = $\frac{\text{dio_count} + \text{dao_count}}{\text{duration_s}}$

붕괴 시점 탐지 기준

- 기본 기준: $PDR < 0.9$ 또는 $\text{rx_count} \leq 0$
- 스윕 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 통과 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

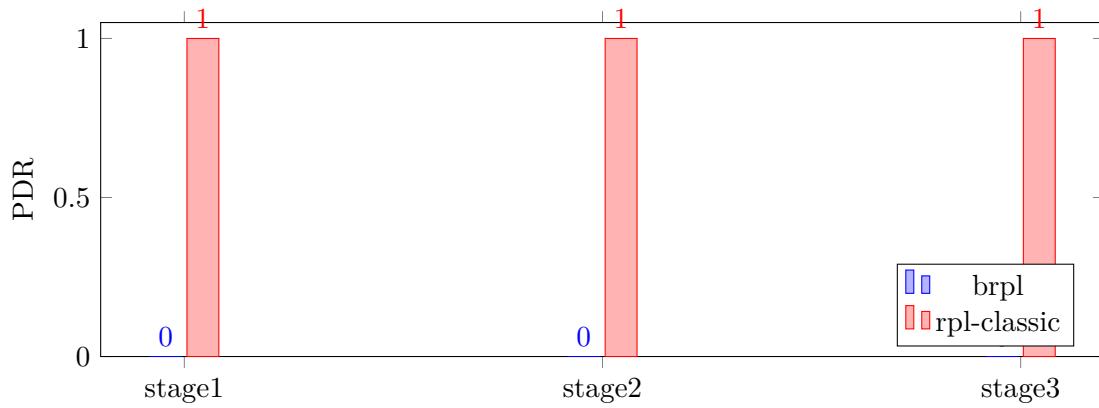


Figure 1: Stage별 평균 PDR 비교

제어 오버헤드 비교

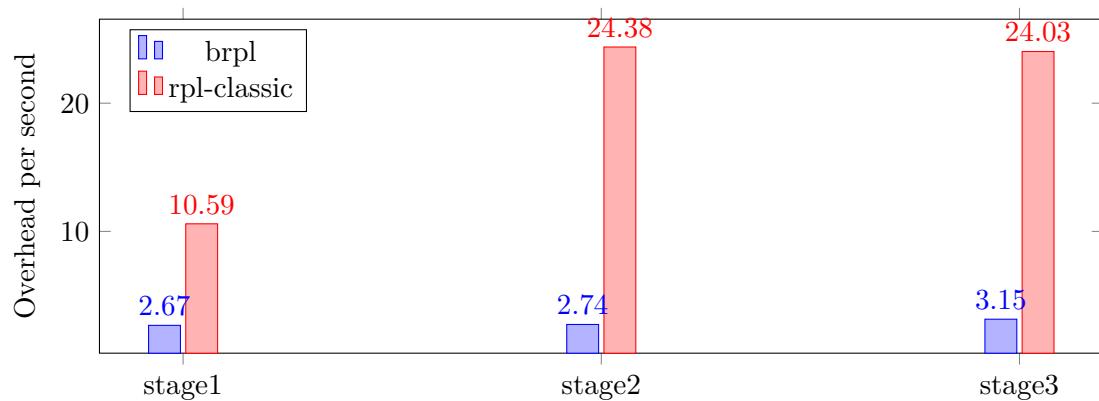


Figure 2: Stage별 평균 제어 오버헤드 비교

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
```