야간 이동 플랫폼 노동자에서 각성 안정 상태 실측으로 정의한 직업성 심박예비율(%HRR) 쉼·회복 문턱

RestingPoint · Pre-open · 세미나 발표 자료
산업보건연구소 세미나 발표일: 2026-08-21
사전 공개일: 2026-10-18 · **Version 1.0 (Pre-open)**
세미나 주제 관련 원고의 사전 공개본입니다. 정식 학술지 출판본이 아니며 내용과 저자 정보, 선언 항목은 수정될 수 있습니다. 발표일은 이 공개본의 작성일을 뜻하지 않습니다.

An empirically anchored rest/recovery threshold for occupational heart rate reserve (%HRR), defined from awake sedentary states in night-shift mobile platform workers

이원태[1], 윤진하 (Jin-Ha Yoon)[1,2]
[1] 세브란스병원 직업환경의학과
[2] 연세대학교 의과대학 예방의학교실

Abstract

Objectives: The occupational cardiovascular-load scale %HRR has established upper thresholds (24.5, 30, 33) but no low end demarcating rest/recovery. We examined the reported criteria, assessed sensitivity to resting-heart-rate definitions, and evaluated an empirical estimation procedure.

Methods: All 76 studies included in the selected systematic review (Dias et al., 2023) were re-extracted, four primary sources cross-checked, and the search extended to August 2026. In 55 night-shift designated-driver platform workers (Fitbit, 2021–2022; ≥100,000 heart-rate minutes each), awake stationary minutes were identified by a heart-rate-independent activity rule (worn device, zero steps ≥10 min, non-wear-safe sleep exclusion), and per-person p10/p25/p50 of %HRR were summarized as cohort medians [bootstrap 95% CI], with sensitivity analyses across six axes and seven selections.

Results: No study defined a low-end %HRR threshold (0/76; 0/16 updated). The reviewed <30 %CVL criterion was a management grade without a reported derivation; MAWT estimates in the low-intensity range were extrapolated. A 90-bpm criterion converted to 14.1–33.6 %HRR across conventions. Measured awake stationary %HRR gave p10/p25/p50 = 6.1/8.9/16.3 in the primary subgroup (n = 11; 6.0/10.2/15.8 in all 55); p25 was robust across the seven selections (8.9–10.8). Per-person p25 was <9 in 16/55 workers and ≥12 in 11/55. In 2,302 recomputed shorter observation windows, the 25th percentile was negative in 88% of windows holding 30–100 awake stationary minutes, last at 767 minutes (0/2,074 above).

Conclusions: The estimated rest/recovery threshold was 9 %HRR [8.3–12.0] in this cohort. We propose exploratory reporting categories (<9, 9 to <12, and ≥12 %HRR), with analysis conditions specified and ≥1,000 awake stationary minutes per person. These categories require validation for individual recovery assessment. Insufficient rest observation may inflate the baseline and understate working %HRR.

Keywords: heart rate reserve; cardiovascular load; rest; recovery; threshold; wearable device; night shift work; platform workers

교신저자: 윤진하 (flyinyou@yuhs.ac), 연세대학교 의과대학 예방의학교실 및 세브란스병원 직업환경의학과
ORCID: Jin-Ha Yoon — https://orcid.org/0000-0003-4198-2955

이 논문 읽기 · 활용 안내

핵심 용어 HRR: 최대심박과 안정시심박의 차이. %HRR: 이 여유심박 대비 현재 심박 증가의 백분율. CVL: 심혈관 부하 지표. MAWT: 최대허용작업시간 추정치. 상세 정의·계산식·한계는 부록 B 참조.

핵심 결과 전체 55명 중 주 분석 11명에서 개인별 각성 안정 상태 %HRR의 25백분위수를 구하고, 그 중앙값 8.9 %HRR(부트스트랩 95% 신뢰구간 8.3–12.0)을 얻었다.

활용 방법 직업성 심박 자료의 쉼·회복 기준을 탐색하고 연구 간 분석 조건을 비교할 때 활용한다. 개인의 회복 여부나 안전한 작업 강도를 판정하는 검증된 기준은 아니다.

인용 시 핵심 문장 예시 "본 연구는 쉼을 객관적으로 추정하기 위해 개인당 10만 분 이상(약 70일분)의 심박수 기록이 확보된 야간 이동 플랫폼 노동자 55명의 자료를 분석하였다. 주 분석 하위집단 11명에서 각성 안정 상태의 개인별 %HRR 25백분위수 중앙값이 8.9로 나타나, 약 9 %HRR을 쉼의 탐색적 기준으로 제안하였다."

1. 서론

착용형 심박 기기의 보급과 함께, 심박수 기반의 심혈관 부하 평가는 직업환경 현장 연구의 표준 도구가 되었다. 상대적 부하는 통상 심박예비율(percentage of heart rate reserve, %HRR; $\%\ \mathrm{HRR} = (\mathrm{HR} - \mathrm{HR}_{rest})/(\mathrm{HR}_{max} - \mathrm{HR}_{rest}) \times 100$)로 표현하며 [1], 이 척도에는 작업 부하의 상한 기준이 제시되어 있다. Wu & Wang [2] 은 자전거 에르고미터 실험에서 최대허용노동시간(maximum acceptable work time, MAWT) 모형을 유도해 8시간 지속 가능한 상한으로 24.5 %HRR을 제시했고, 이후 30 %HRR과 33 %HRR이 관리 문턱으로, 40 %HRR이상이 고강도 구간으로 통용되어 왔다 [3].

반면 쉼·회복 상태를 구분하는 %HRR 기준값은 명확하게 정의되어 있지 않다. 근무 중 강도 구간별 시간이나 휴게 중 회복 수준, 심박수 기반 좌식 시간을 평가하려면 이러한 기준이 필요하지만, 기존 연구에서는 기준값의 선정 근거가 충분히 제시되지 않았다. 예를 들어 Lund Rasmussen et al. [4]은 %HRR과 좌식행동을 함께 분석했으나, 좌식 상태의 %HRR을 쉼의 문턱으로 정의하지는 않았다. 대기시간, 회복 불량, 심혈관 회복 지표, 불충분한 휴식시간을 다룬 연구에서도 쉼·회복 상태와 %HRR 기준값의 관계를 확인할 필요가 있다.

쉼·회복 문턱의 선택은 회복 여부의 평가에 영향을 줄 수 있다. 같은 자료에서도 문턱을 <5 %HRR로 설정하는 경우와 <24.5 %HRR로 설정하는 경우의 분류 결과는 달라질 수 있다. 또한 안정시심박 기준선의 정의에 따라 같은 절대 심박수가 서로 다른 %HRR 값으로 환산된다. 따라서 문턱값과 기준선의 선정 근거를 함께 검토해야 한다.

본 연구의 목적은 다음과 같다.

첫째, 직업성 심혈관 부하 연구에서 %HRR로 쉼·회복 상태를 구분하는 기존 기준의 유무와 근거를 평가하고자 했다.

둘째, 안정시심박의 정의가 절대 심박수 기준의 %HRR 환산값에 미치는 영향을 정량화하고자 했다.

셋째, 심박수와 독립적인 활동량 지표로 식별한 각성 안정 상태의 %HRR 분포를 바탕으로 쉼·회복 문턱을 추정하는 절차를 제안하고, 분석 조건과 대상자 선별에 따른 민감도를 평가하고자 했다.

주요 약어, 연구에서 정한 분석 조건 및 해석상의 주의점은 부록 B에 정리했다. 본 연구는 문헌 검토를 통해 기존 기준의 근거를 확인하고, 관측 자료를 이용하여 쉼·회복 문턱을 정의하는 절차를 제안한 방법론 연구이다.

2. 방법

2.1 문헌 검토

문헌 검토는 기존 고찰의 수록 연구 추출, 1차 출처 대조, 보완 검색의 세 단계로 수행했다.

Dias et al. [3]의 Table 1에 수록된 76편을 대상으로 원문 4~6쪽의 표에서 연구 정보를 수기로 추출했다. 각 연구의 사용 지표(RHR/%HRR, %CVL, %CVS, %HRmax, VO_2 등), 문턱값의 제시 여부와 수치, 쉼·회복 또는 저강도 작업을 구분하는 기준의 유무를 분류했다. 쉼·회복 개념을 언급했으나 기준값을 제시하지 않은 경우도 구분했다.

문헌 검토에서 쉼·회복 상태의 판별 기준과 관련된 주요 문헌 4편을 선정하여 원문을 검토했다. 검토 대상은 MAWT 모형을 제시한 Wu & Wang [2], %CVL 기준을 적용한 Yoopat et al. [5], 해당 연구가 방법론적 근거로 인용한 Yoopat et al. [6], 그리고 %CVL 척도의 출처인 Yoopat et al. [7]이었다. 각 문헌에서 기준값의 도출 근거, 휴식시간의 설정 근거, 안정시심박의 측정 방법을 확인했다.

Dias 등의 문헌 검색은 Google Scholar에서 “cardiovascular load” AND (“occupational” OR “workers”)를 검색식으로 사용했으며, 검색 종료일은 2022년 6월 22일이었다. 본 연구는 같은 검색식과 포함 기준을 적용하여 검색 기간을 2026년 8월 11일까지 연장했다. OpenAlex와 PubMed를 이용하여 보완 검색을 수행했다.

동료심사 학술지에 영어로 게재된 관찰연구 중 실제 작업 중의 심혈관 부하를 평가하고, 직업군과 측정 도구를 명시했으며, 표본이 2인 이상인 연구를 포함했다. 순수 시뮬레이션 연구와 중복 게재 논문은 제외했다. 문헌 선별은 연구자 1인이 수행했다. 검색과 선별 과정은 PRISMA-ScR [8] 흐름도로 정리하여 부록 A에 제시했다.

2.2 연구 대상과 자료

본 연구는 플랫폼 건강협동조합 구조를 통한 취약 노동자 건강관리 시스템 개발 및 실증(Development and Demonstration of Health Care System for Vulnerable Workers through Platform Health Cooperatives) 과제에서 수집한 야간 대리운전 노동자의 Fitbit 자료를 이용했다. 자료 수집 기간은 2021년 11월부터 2022년 7월까지였으며, 심박수, 걸음수, 거리 및 열량이 분 단위로 기록되었다. 연구는 연세대학교 의료원(Yonsei University Health System) 기관생명윤리위원회의 승인을 받았다(4-2021-1447). 분 단위 심박수 자료가 10만 분(약 70일) 이상이고 연령 정보가 있는 55명을 분석에 포함했다. 연령 중앙값은 57세였으며 범위는 35–68세였다.

모든 관측 시각은 한국 표준시(KST)를 기준으로 처리했다. 실제 근무 일정 정보가 없어, 각 날짜의 00:00–05:00 걸음수 합을 이용해 야간 근무 여부를 활동 기반으로 추정했다(§2.4). 분석에는 실명과 연락처를 포함하지 않고 기기 식별자로 대상자를 구분한 탈식별 반복측정 자료를 사용했다.

%HRR은 $(\mathrm{HR}-\mathrm{HR}_{rest})/(\mathrm{HR}_{max}-\mathrm{HR}_{rest})\times 100$으로 계산했다. 최대심박수(HRmax)는 220에서 연령을 뺀 값으로 산출하고, 개인별로 동일한 값을 적용했다. 코호트의 최대심박수 중앙값은 163 bpm이었다. 안정시심박(restHR)은 1분 단위 측정값의 일시적인 변동을 줄이기 위해 개인별 심박수의 60분 이동평균 중 최솟값으로 정의했다. 이는 본 연구에서 채택한 조작적 기준선이며, 임상적으로 측정한 안정시심박과 구분된다. 코호트의 안정시심박 중앙값은 53.3 bpm, 여유심박 중앙값은 109.9 bpm이었다.

개인별 측정 기간 전체에 동일한 안정시심박 기준값을 적용했다. 안정시심박을 일별로 산출하면 당일 활동이나 회복 상태에 따라 기준값이 달라져, 동일한 작업 중 심박수도 서로 다른 %HRR로 계산될 수 있기 때문이다.

본 자료에는 근무 중 휴게 시각, 기기의 수면 판정 결과 및 GPS 이동 경로가 포함되어 있지 않았다. 따라서 실제 휴게시간을 직접 식별할 수 없었으며, 수면·각성 상태와 야간 근무일은 분 단위 걸음수를 이용하여 추정했다. 심박수로 안정 상태를 정의한 뒤 같은 심박수로 기준값을 산출하는 순환적 정의를 피하기 위해 상태 구분에는 심박수의 크기를 사용하지 않았다. 심박수 기록의 존재 여부는 기기 착용을 확인하는 데만 사용했다. 거리와 열량 자료도 수집되었으나 기준값 산출에는 사용하지 않았다. 특히 기기의 거리값은 걸음수에 근거한 추정치이므로 차량 이동을 구분하는 데 사용할 수 없었다.

2.3 안정시심박 정의에 따른 민감도 분석

안정시심박의 정의가 %HRR 환산값에 미치는 영향을 평가하기 위해 저강도 작업의 절대 심박수 기준인 90 bpm을 사용했다. 이 기준은 Åstrand의 light work <90 bpm 기준으로, Dias 등의 문헌에서 재인용했다 [3]. 개인별 최대심박수는 동일하게 유지하고 안정시심박에 다섯 가지 값을 적용했다. 본 연구의 웨어러블 심박수 60분 이동평균 최솟값, 인구집단 규준 [9], Åstrand 시대의 통상적인 안정시심박인 약 70 bpm, 10분 좌위 측정값 [2], Yoopat 연구군의 임상 안정시심박인 약 78 bpm이었다. 각 조건에서 개인별 %HRR 환산값을 구하고 코호트 중앙값으로 요약하여 차이를 비교했다.

Wu & Wang [2]의 식 $\mathrm{MAWT} = 26.12 \cdot \exp(-4.81 \cdot \%\,\mathrm{HRR}\,/100)$을 역산하여 허용 작업시간별 %HRR 값을 구하고, 원문 Table 4의 값과 비교했다. 각 환산값이 원 연구의 실측 범위인 RHR 24.4~65.6%에 포함되는지 확인하여 실측 범위 내 추정과 외삽을 구분했다.

2.4 각성 안정 상태의 식별과 기준값 산출

쉼·회복 판별 기준을 관측 자료로 추정하는 절차를 제안하고 본 코호트에 적용했다. 기기의 수면 판정 정보가 없으므로, 심박수의 크기와 독립적인 활동 지표를 이용하여 각성 안정 상태를 다음과 같이 정의했다. 상태 식별과 기준값 산출의 흐름은 Figure 1에 제시했다.

1. 걸음수가 기록되어 있고 그 값이 0인 분을 정지(still) 상태로 정의했다. 심박수가 낮다는 이유로 안정 상태를 선정하지 않도록 걸음수만을 상태 구분에 사용했다.
2. 심박수 기록으로 기기 착용이 확인되고 정지 상태가 180분 이상 연속되는 구간을 수면으로 추정했다. 비착용 구간에도 걸음수 0이 기록될 수 있으므로 착용 여부를 함께 확인했다. 이 조건이 없으면 비착용 구간이 수면으로 오분류되어 안정 상태의 관측값이 부적절하게 제외될 수 있다(§3.6 ⑤).
3. 기기 착용 중이며 추정 수면 구간에 포함되지 않고, 직전 q분 동안 정지 상태가 지속된 분을 각성 안정 상태로 정의했다. 주 분석에서는 q를 10분으로 설정하고, 민감도 분석에서는 5·10·15·30분을 비교했다.
4. 각성 안정 상태로 분류된 관측값에서 개인별 %HRR의 10백분위수, 25백분위수 및 중앙값(p10·p25·p50)을 구했다. 집단 수준의 기준값은 개인별 값의 중앙값으로 요약하고 부트스트랩 95% 신뢰구간을 산출했다. 개인 간 분포 차이를 고려하여 평균 대신 중앙값을 사용했다.
5. 각 날짜의 00–05시 걸음수 합을 산출하고, 해당 개인에서 야간 걸음수 합이 0보다 큰 날짜들의 중앙값과 비교했다. 이 중앙값을 초과한 날짜를 야간 근무일로 분류했다. 근무 후 구간의 시작점으로 설정한 05시부터 12시간(05:00–17:00)을 제외 구간으로 정의했다. 이는 관측한 근무 종료 시각이 아니라 분석을 위한 가정이다. 회복을 고려한 기준선 조건(recovered)에서는 전체 자료에서 계산한 60분 이동평균 중 이 구간에 위치한 값을 제외하고 최솟값을 선택했다. 각성 안정 구간의 선택에서도 같은 제외 구간을 적용하는 조건과 적용하지 않는 조건을 비교했다. 주 분석에는 recovered 기준선과 제외 구간 적용 조건을 함께 사용했다. 본 연구의 기준값은 개인별 판정값이 아닌 코호트 수준의 공통값으로 제시했다.

연속 정지 10분 기준은 보행 직후 심박수가 회복 중인 관측값을 제외하기 위해 설정했다. 운동 후 심박 회복에는 미주신경 재활성이 관여하는 초기 1~2분의 빠른 회복과 이후 수 분간의 느린 회복이 포함된다 [10,11]. 기존 측정 절차도 참고했다. Wu & Wang [2]은 10분간 좌위 안정을 취한 뒤 마지막 3분의 심박수를 기준선으로 사용했으며, 좌식행동 연구에서도 10분 연속 구간을 분석 단위로 사용한 바 있다 [12].

휴식 도중 짧은 보행이 발생한 경우에는 보행한 분과 그 직후 10분만 제외하고, 이후 다시 조건을 충족한 정지 구간은 분석에 포함했다. 이 기준으로 확보한 각성-정지 관측 시간의 개인별 중앙값은 35,518분이었다. 민감도 분석에서는 연속 정지 기준이 5분일 때 추정값이 높았고, 10분 이상에서는 일정했다(§3.6 ①). 이러한 생리학적 근거, 기존 측정 절차 및 민감도 분석 결과를 함께 고려하여 주 분석 기준을 정했다.

기준선은 심박수의 60분 이동평균으로, %HRR의 분자는 1분 단위 관측값으로 계산했다. 기준선의 우연한 변동을 줄이면서 단시간의 낮은 심박수 관측값은 유지하기 위해 두 계산에 서로 다른 시간 해상도를 적용했다. 이때 60분 평균보다 낮은 1분 관측값이 존재할 수 있으므로, 각성-정지 분의 약 0.25%(개인별 비율의 중앙값)에서 %HRR이 음수가 되었다. 주 분석에는 이러한 값을 그대로 포함했다. 음수를 포함하거나, 0으로 대체하거나, 제외했을 때 처리 방법에 따른 개인별 25백분위수 차이의 중앙값은 0.00 %HRR 포인트였으며, 개인별 25백분위수의 코호트 중앙값도 동일했다.

예방 목적의 참고 기준을 추정하기 위해 대상자 선별에 따른 추정값의 안정성을 평가했다. 착용시간 비율, 야간 근무일 비율 및 수면 시각의 규칙성으로 하위집단을 구성하고 기준값을 비교했다(§3.6). 전체 분석

대상자는 55명이었다. 이 중 착용시간 비율이 60% 이상이고 야간 근무일 비율이 33% 이하인 11명을 주 분석 하위집단으로 선정했다. 이는 충분한 관측 자료가 확보되고 야간 근무 빈도가 상대적으로 낮은 집단에서 기준값을 추정하기 위한 조건이었다. 대상자 선별에 따른 민감도 분석에서는 전체 55명을 포함한 집단과 선별 조건별 하위집단 등 총 7가지 구성을 비교했다. 각 구성의 대상자 수와 결과는 Table 4 및 Figure 2에 제시했다.

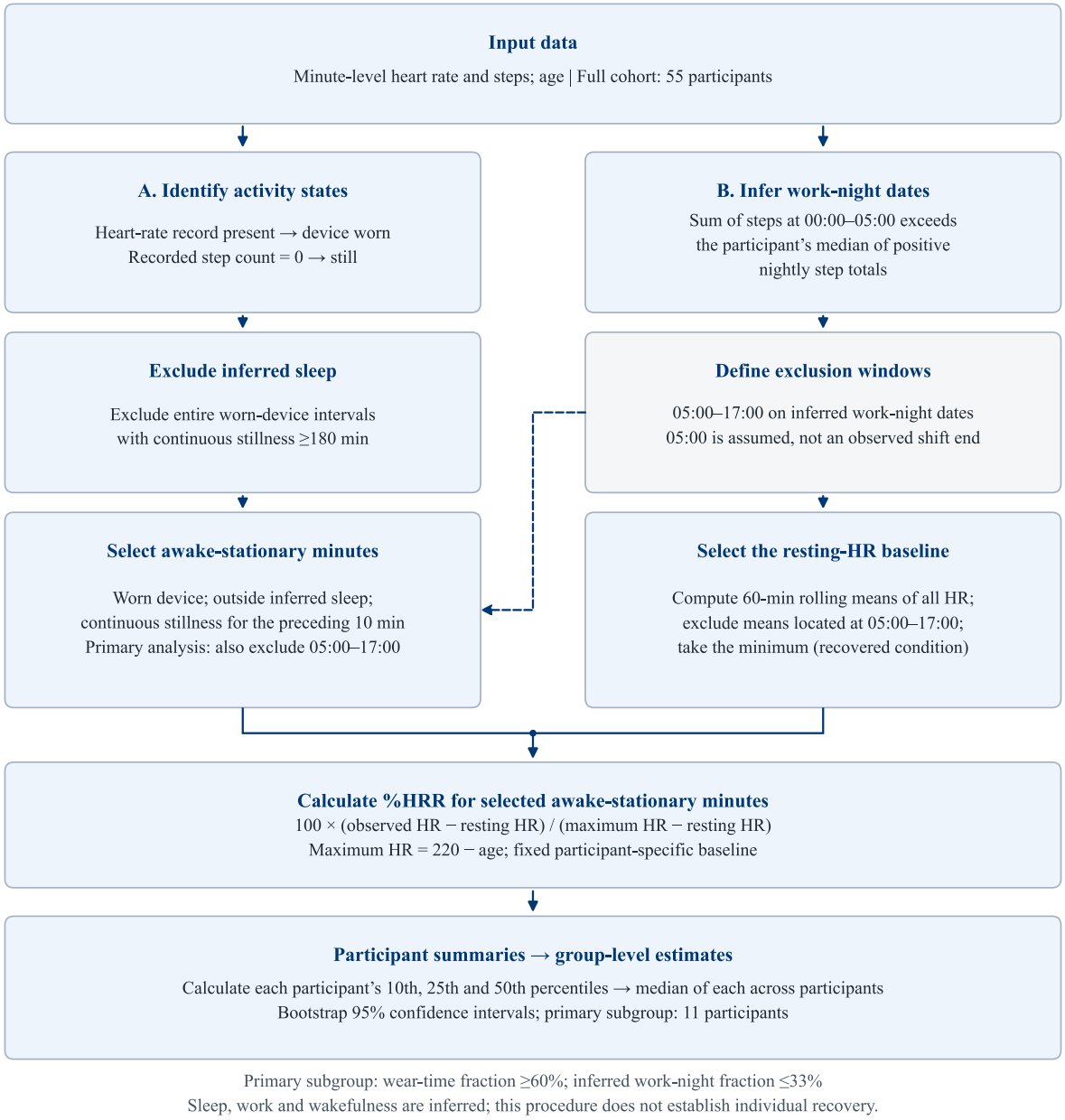


Figure 1. Identification of awake-stationary minutes and estimation of group-level thresholds under the primary analysis conditions. Left: activity-based state selection. Right: work-night inference and baseline selection. The dashed arrow applies the 05:00–17:00 exclusion window to state selection. Sleep and work are inferred; recovered names a baseline condition. Rolling means require at least 30 valid heart-rate records per 60-min window; if no baseline candidate remains after exclusion, the full-period minimum is used.

2.5 분석 조건과 관측량에 따른 민감도 평가

제안한 절차의 민감도를 여섯 가지 조건에서 평가했다. ① 연속 정지 기준을 5·10·15·30분으로 변경했을 때의 기준값 차이, ② 10백분위수·25백분위수·중앙값 선택에 따른 개인 간 분포 차이, ③ 전체 관측 기간과 근무 후 12시간을 제외한 기간에서 각각 산출한 안정시심박을 사용했을 때의 차이, ④ 판정된 근무일의 05시

이후 12시간 제외 여부에 따른 차이, ⑤ 추정 수면 구간 제외 여부에 따른 차이, ⑥ 각성-정지 관측량에 따른 추정의 안정성을 비교했다.

최소 관측량은 개인별 자료를 서로 겹치지 않는 7·14·21·30·45·60·90·120일 구간으로 나누어 평가했다. 각 구간에 포함된 자료만으로 안정시심박, 수면 구간 및 각성 안정 상태를 다시 산출했다. 총 2,302개 관측 구간에서 개인별 25백분위수가 음수 %HRR로 추정되는 비율을 각성-정지 관측 시간에 따라 집계했다. 추가로 대상자 선별 기준 7종에서 추정값을 비교했으며, 개인별 값의 중앙값에 대한 부트스트랩 신뢰구간을 산출했다.

분석에는 Python 3를 사용했다. 재현 검증에는 NumPy와 pandas를 이용하여 저장된 기준 결과와 재계산 결과를 대조했다. 개인별 %HRR의 10백분위수, 25백분위수 및 중앙값의 차이는 모두 0.001 %HRR 포인트 미만이었으며, 대상자 수와 관측 분 수는 정확히 일치했다. 이는 지정된 계산 결과의 재현 여부를 확인한 것으로, 분석 방법의 임상적 타당성이나 모든 연구 주장을 검증한 것은 아니다.

3. 결과

3.1 문헌 검토 결과: %HRR 기반 쉼·회복 판별 기준

Dias의 고찰에 포함된 76편 중 상대심박수(RHR; relative heart rate, 본문에서 %HRR과 대응) 계열 지표를 사용한 연구는 34편(45%)이었다(Table 1). 기준값을 제시한 연구는 11편이었다. 이 중 8편은 작업 부하의 상한 기준으로 30·33·40·50·60 %HRR, %CVL >40 또는 MAWT 초과 여부를 사용했다. 나머지 3편은 모두 Yoopat 연구군의 논문으로, 2편은 %CVL <30을, 1편은 15분 휴식을 기준으로 제시했다. 그러나 %HRR을 이용하여 쉼 상태를 구분하는 기준값을 제시한 연구는 76편 중 0편이었다.

Dias et al. [3]의 Table 1에서 쉼·회복 개념을 다루었으나 문턱값을 제시하지 않은 연구는 8편이었다. 이 연구들은 대기시간, 현장 안정심박, 안정심박 예측, 불충분한 휴식시간, 회복 불량, 열스트레스와 회복, 심혈관 회복 지표, 좌식행동을 다루었다. 이러한 분류는 Dias 등의 고찰에 보고된 정보를 바탕으로 했다. 해당 고찰은 %HRmax가 안정 상태를 기준으로 한 부하를 반영하지 못한다는 점에서 RHR 계열 지표를 권고했으나, 쉼 상태를 구분하는 %HRR 기준은 제시하지 않았다. 가벼운 작업의 기준으로 제시된 90 bpm 역시 Åstrand의 절대 심박수 기준을 인용한 것이었다.

Table 1. Literature landscape: 76 studies of Dias et al. (2023) and 16 studies from the updated search

Category	Dias (n = 76)	Update (n = 16)
Used the RHR (%HRR) family	34 (45%)	3
Upper threshold reported	8	2 (30 · 24.5/33 %HRR)
Low-end %HRR threshold reported	0	0
Low-end criterion on another scale	3 (all Yoopat series: %CVL or duration)	0 (many used the ≤30 %CVL management grade)
Mentions rest/recovery without a value	8	—

보완 검색(2022-06-22 ~ 2026-08-11)에서도 쉼·회복 판별을 위한 %HRR 기준값을 정의한 연구는 확인되지 않았다. 후보 65건 중 16편이 포함되었고(불명확 13편 별도), 쉼·회복 판별을 위한 %HRR 기준값을 제시한 연구는 0편이었다. RHR(%HRR) 계열 3편 [13–15] 은 모두 작업 부하의 상한 기준(24.5 · 30 · 33 · 50)만 사용했다. 특히 Dinh-Dang 은 호텔 청소원의 휴무일 %HRR을 실측하고도 그것을 쉼의 기준으로 쓰지 않았다. 포함 연구의 다수는 %CVL 계열로, ≤30 %CVL = 조치 불요 관리등급이 표준처럼 전파되고 있었고, 휴식을 산정하는 연구들은 에너지 기반 시간 배분(Murrell 계열)이었다. 2026년 8월까지의 포함 문헌에서는 쉼·회복 판별을 위한 %HRR 기준을 확인하지 못했다.

3.2 %CVL <30 기준의 관리 등급으로서의 의미

쉼·회복 관련 기준을 제시한 Yoopat 연구군의 원문 검토 결과, 세 가지가 확인됐다.

첫째, 검토한 원문에는 30 %CVL 기준값의 도출 과정이 제시되어 있지 않았다. Yoopat et al. [7]의 Table 2는 0–30 %CVL을 “No particular fatigue”(특별한 피로 없음)로 분류했다. 전체 등급은 0–30 조치 불요, 30–50 주의, 50–80 단기 내 조치, 80–100 즉시 조치, >100 작업 불가로 구성되어 있었다. 이는 필요한 관리 조치를 구분한 분류이며, 쉼이나 회복이라는 생리적 상태를 직접 정의한 것은 아니었다. Yoopat 등의 1998년 논문은 이 분류의 출처로 Vanwonterghem & Intaranont (1993)를 인용했다. 본 연구에서는 Yoopat 등의 서술을 통해 해당 기준을 확인했다.

둘째, Yoopat et al. [5]은 20분 시술 후 15분 휴식이 회복에 충분한지를 평가했다. 따라서 15분은 결과에서 도출된 최적 휴식시간이 아니라 사전에 설정한 실험 조건이었다. 2020년 논문은 방법의 근거로 2015년 논문을 인용했으나, 해당 연구는 30분 마사지 전후를 비교한 것으로 15분 휴식 절차를 포함하지 않았다. 또한 15분 휴식 후에도 심혈관 부하는 24~28 %CVL이었고, 저자들은 대상자에게 전신 피로가 남아 있다고 기술했다.

셋째, 안정시심박은 연구 등록 시 임상 환경에서 1회 측정한 값이었다. 2020년 논문에서는 경력에 따른 3개 집단의 값이 각각 76·78·79 bpm이었고, 2015년 논문에서는 79.8 bpm이었다. 두 연구 모두 약 80 bpm의 안정시심박을 사용했다. 또한 2015년 논문의 고찰에서는 “허용 가능한 손실의 한계값을 개발하도록 재설계되어야 한다(예: 최소 x% 의 회복)”고 기술하여, 회복 판정 기준의 추가 개발 필요성을 제시했다.

3.3 저강도 영역에서의 MAWT 모형 외삽

MAWT 모형의 원문 [2] 을 대조한 결과가 Table 2 다. 원 실험은 12명(남 6 · 여 6)의 20–30세 비훈련 건강인이 자전거 에르고미터에서 6개 강도(20~70% Wmax)를 수행한 것으로, $\mathrm{MAWT} = 26.12 \cdot e^{-4.81 \cdot \mathrm{RHR}}$ ($R^2 = 0.87$)이 유도됐다.

Table 2. Full-text cross-check of the MAWT source (Wu & Wang, 2002)

Item	Original study	Implication
Calibrated range	MAWT 1.2–8.7 h · RHR 24.4–65.6%	Among the 8–12 h criteria, 24.5 (8 h) lies inside the data; 20 (10 h) and 16 (12 h) are extrapolations; the rest-candidate region (5–15) is entirely outside
Baseline	Last 3 min of 10-min seated rest · 78.8 (M) / 73.7 (F) bpm	20–25 bpm above wearable-derived baselines (53.3 in this cohort) — ladder values and wearable %HRR are not directly comparable
Rest-schedule assumption	50 min work / 10 min rest every hour	Underestimates load where no regular breaks exist
Intended scope	Dynamic lower-limb work (walking, stair climbing)	Driving-centred work falls outside the stated scope — §4.4
Table 4 scale	12h/16 · 10h/20 · 8h/24.5 · 4h/39 %HRR	Matches the inverse of the equation — the common thresholds are one formula

모형의 해석에는 실측 범위를 고려해야 한다. 원문 Table 2 의 실측 최저 RHR이 24.4%이므로, MAWT 모형의 8시간 값(24.5)만이 자료 경계 안에 있고, 10시간(20.0)과 12시간(16.0)은 외삽이며, 회복 문턱의 후보 영역(5~15 %HRR)은 완전히 자료 밖이다. 따라서 해당 모형을 쉼 상태에 적용하는 데에는 개념적 차이(§4.2)와 실측 근거 부족이라는 제약이 있다.

3.4 안정시심박 정의에 따른 %HRR 환산값의 차이

문헌의 유일한 저강도 작업 절대값 기준(< 90 bpm)을 본 코호트의 사람별 (restHR, HRmax) 로 환산하면, 환산값은 안정시심박의 정의에 따라 달라진다(Table 3). 관례 5종에서 같은 90 bpm 이 14.1 에서 33.6 %HRR 까지, 19.5 %HRR 포인트의 차이를 보인다. 절대 심박수 기준을 상대적 부하 척도로 환산할 때 기준선 정의에 따라 20점 가까운 차이가 발생했다. 따라서 저강도 및 고강도 영역의 기준을 비교할 때에는 기준값과 안정시심박의 정의를 함께 고려해야 한다.

Table 3. The 90-bpm light-work criterion converted to %HRR under five resting-HR conventions (cohort median of per-person conversions, n = 55; HRmax = 220 − age)

Resting-HR convention	restHR (bpm)	90 bpm → %HRR
Yoopat series · clinical resting	~78	14.1
Wu & Wang (2002) · 10-min seated	76.3	15.8
Åstrand-era typical resting	70.0	21.5
Lunde (2016) · population norm (HUNT3)	68.6	22.7
This study · wearable 60-min rolling minimum	53.3	33.6

본 코호트의 각성-정지 상태에서 관측된 %HRR 중앙값은 16.3이었다(§3.5). 이는 임상 안정시심박을 적용하여 90 bpm을 환산한 14.1 %HRR과 가까웠다. 임상 좌위 측정에서 얻은 안정시심박 76~78 bpm은 본 코호트의 안정 상태에서 관측된 심박수보다 높았다. 따라서 이 값을 기준선으로 적용하면 동일한 심박수에 대한 %HRR이 낮게 계산될 수 있다.

부수적 발견으로, Yoopat et al. [7] 의 Table 1 이 싣는 Hettinger (1980)의 작업심박(working heart rate, WHR) 척도는 저강도 심혈관 부하의 등급을 제시한 고전적 척도다. WHR 은 절대증가(근무 중 심박 − 안정시 심박)이므로 기준선 가정 없이 여유심박만으로 환산된다. 본 코호트의 사람별 여유심박(중앙 109.9 bpm) 기준으로 등급 I("Very light cardiovascular stress")의 상한 WHR 17 은 15.5 %HRR, 등급 II 의 상한 WHR 26 은 23.7 %HRR에 해당한다. 다만 등급 I도 심혈관 부담을 분류한 것으로, 쉼 상태를 직접 정의한 것은 아니다.

3.5 각성 안정 상태의 %HRR 분포

제안한 절차를 야간 플랫폼 노동자 55명에게 적용한 결과를 Table 4에 제시했다. 이하의 %HRR 추정값은 본 연구에서 채택한 안정시심박 기준선의 정의와 분석 조건에 따른 결과이다. 착용시간 비율 ≥60%, 야간 근무일 비율 ≤33%를 충족한 주 분석 집단(n = 11)에서 개인별 10백분위수·25백분위수·중앙값의 코호트 중앙값은 각각 6.1·8.9·16.3 %HRR이었다. 전체 55명에서 개인별 10백분위수와 25백분위수의 코호트 중앙값은 각각 6.0·10.2 %HRR이었다.

본 연구에서는 개인별 25백분위수의 코호트 중앙값인 약 9 %HRR을 쉼·회복 기준값으로 제안했다. 10백분위수에 해당하는 약 6 %HRR과 중앙값에 해당하는 약 16 %HRR도 함께 제시하여 분포를 설명했다. 기존에 잠정적으로 사용한 <10 %HRR은 이번 분석의 25백분위수 범위인 8.9~10.2 %HRR에 포함되었다. 다만 값이 유사하다는 사실만으로 기존 잠정 기준의 타당성이 확인되는 것은 아니며, 본 연구의 9 %HRR은 해당 코호트의 관측 자료에서 추정한 값이다.

Table 4. Measured awake stationary %HRR (recovered restHR · post-shift windows excluded · QUIET = 10; cohort medians; brackets show IQR for all subjects and bootstrap 95% CI for the primary subgroup)

Selection	n	p10 (%HRR)	p25 (%HRR)	p50 (%HRR)
All subjects	55	6.0	10.2 [8.6–11.6]	~16
Wear time ≥ 60%	26	6.0	10.0	16.2
Estimated work-night fraction ≤ 33%	38	5.9	9.9	15.8
Fit-for-purpose (primary)	11	6.1	8.9 [bootstrap 8.3–12.0]	16.3
Stable sleep timing	26	6.0	10.8	16.3
Primary subgroup with stable sleep timing	8	7.1	10.1	16.6
Age ≤ 59	36	5.9	9.6	15.8

대상자 선별에 따른 기준값 차이도 관찰되었다. 주 분석 집단(n = 11)의 하위 25% 값(8.9)은 전체 집단(10.2)보다 낮았다. 이는 예방 목적의 참고 기준을 설정할 때 대상 집단의 부하 수준과 선별 조건을 함께 고려할 필요가 있음을 시사한다.

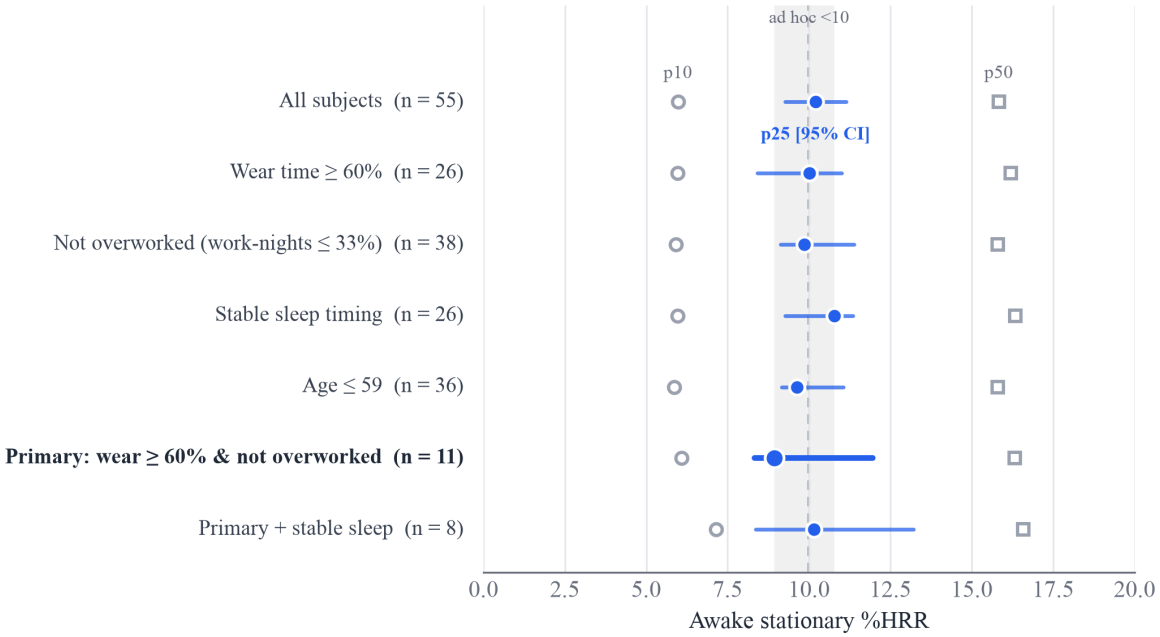


Figure 2. Measured awake stationary %HRR across seven participant selections. Filled circle = cohort median of per-person p25 (horizontal line = bootstrap 95% CI); open circle and square = p10 and p50. Grey band = range of p25 across the seven selections (8.9–10.8); dashed line = the ad hoc value 10, which has never been defined in the literature (§3.1). p25 stays within a narrow band regardless of selection, and the ad hoc <10 falls inside it.

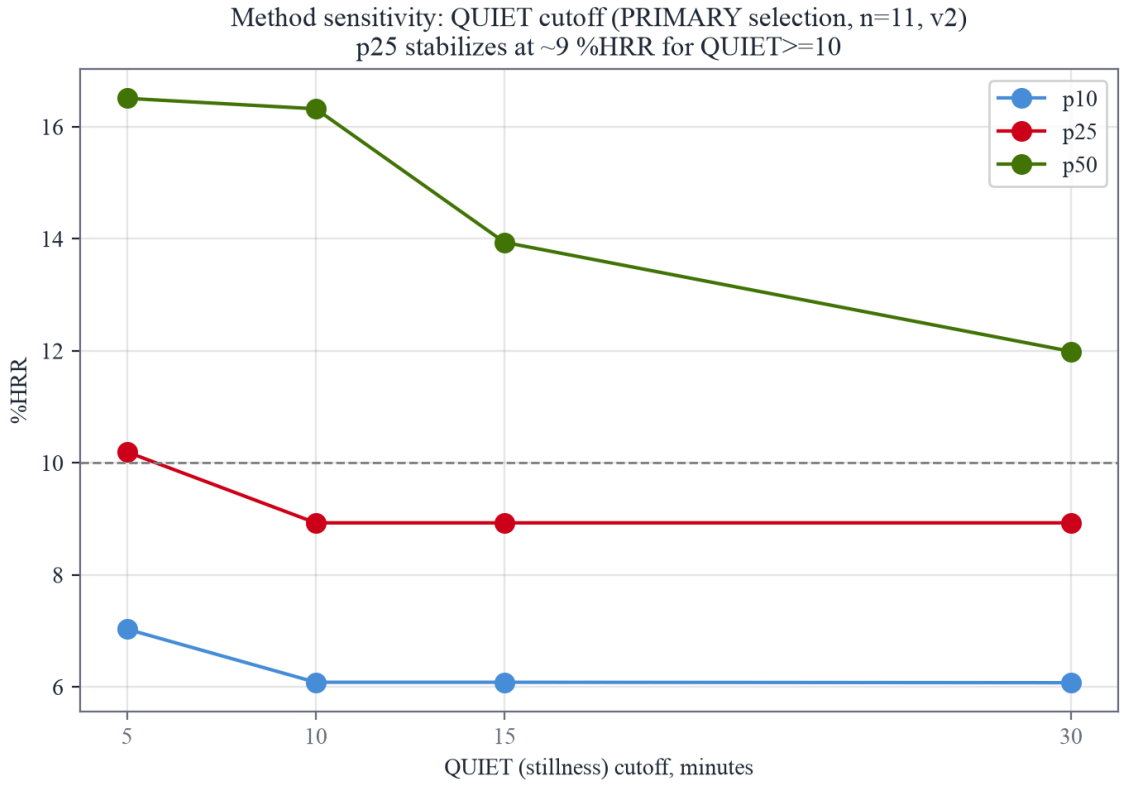


Figure 3. Sensitivity to the awake-stationary criterion (QUIET). Across QUIET = 5, 10, 15 and 30 min, p25 of the primary selection is elevated only at 5 min (≈10.2 %HRR) and flattens at 8.9 %HRR for 10–30 min — the primary choice q = 10 is a practical compromise. Note that q is a definitional degree of freedom, not noise: extending the stillness requirement to 60 min keeps lowering the full-cohort value (§3.6 ①).

3.6 분석 조건에 따른 민감도 평가

각성-정지 기준(QUIET), 안정시심박 정의 및 야간 근무일 처리 등을 포함한 민감도 분석 결과를 Table 5에 제시했다.

Table 5. Validation of the measurement procedure (six axes plus selection sensitivity)

Axis	Result	Verdict
① QUIET (5/10/15/30 min)	p25 10.2 → 8.9 → 8.9 → 8.9 (primary selection); longer stillness keeps lowering the full-cohort value (10.2 → 7.5 at 60 min)	Definitional df — report q with the value
② Percentile choice	p10 6 · p25 9 · p50 16 — report a band, not a point	Report all three
③ restHR global vs recovered	Difference < 0.2 %HRR	Small difference in this cohort
④ Post-shift window exclusion (with/without)	Difference < 0.2 %HRR	Small difference in this cohort
⑤ Sleep exclusion (applied / not applied)	p25 10.2 (excluded) vs 9.1 (not excluded) — including inferred sleep lowers the estimate by 1.1 %HRR	Report the sleep rule; gate it on wear
⑥ Minimum awake-stationary minutes	p25 collapses below baseline in 88% of windows with 30–100 min; last failure at 767 min; 0/2,074 windows above	Secure ≥1,000 min per person
Selection sensitivity	p25 medians 8.9–10.8 across 7 selections	Threshold robust

① 연속 정지 시간의 기준을 변경했을 때 주 분석 집단의 25백분위수는 5분 조건에서 약 10.2 %HRR이었고, 10분부터 30분까지는 8.9 %HRR이었다. 5분 조건에서는 이동 직후 심박수가 충분히 감소하지 않은 구간이 포함되었을 가능성이 있다. 다만 10~30분에서 값이 일정하다는 사실만으로 기준값이 수렴했다고 볼 수는 없다. 연속 정지 조건을 60분까지 연장하면 전체 코호트의 25백분위수는 10.2, 8.1, 7.5 %HRR로 감소했으며, 55명 중 53명에서 같은 방향의 변화가 나타났다.

반면 심박수에 적용한 이동평균의 기간을 1분에서 60분으로 늘리면 추정값은 10.2에서 12.0 %HRR로 증가했고, 55명 모두에서 증가했다. 연속 정지 시간은 분석에 포함되는 안정 상태를 바꾸고, 이동평균의 기간은 순간 심박수와 일정 시간의 평균 심박수 중 무엇을 분석하는지를 바꾼다. 따라서 이 두 조건은 단순한 측정오차가 아니라 분석 대상의 정의에 해당하므로 결과와 함께 명시해야 한다. 연속 정지 시간과 심박수 이동평균을 모두 60분으로 설정했을 때의 추정값은 7.6 %HRR이었다.

② 개인별 10백분위수·25백분위수·중앙값의 코호트 중앙값은 각각 약 6·9·16 %HRR이었다. 개인 간 산포와 재현성을 함께 고려했을 때 특정 백분위가 일관되게 우수하다고 판단하기 어려웠으므로, 세 값을 함께 제시했다.

③ 전체 관측 기간에서 산출한 안정시심박과 근무 후 12시간을 제외한 자료에서 산출한 안정시심박을 각각 적용했을 때, 쉼·회복 기준값의 차이는 0.2 %HRR 미만이었다. 본 자료에서는 두 기준선 정의에 따른 차이가 작았다.

④ 판정된 근무일의 05시 이후 12시간 자료를 각성 안정 구간에서 제외했을 때 개인별 25백분위수의 코호트 중앙값 차이는 0.2 %HRR 미만이었다. 본 자료에서는 근무 후 구간 제외 여부가 추정값에 미치는 영향이 작았다.

⑤ 추정 수면 구간을 제외했을 때 전체 코호트의 25백분위수는 10.2 %HRR이었고, 수면 구간을 포함하면 9.1 %HRR로 1.1 %HRR 낮아졌다. 수면 중의 낮은 심박수 관측값이 분석에 포함되면서 추정값이 감소한 것으로 해석했다. 따라서 쉼·회복 기준값을 보고할 때에는 수면 구간의 정의와 제외 여부를 명시해야 한다.

수면 구간의 추정에는 기기 착용 여부도 영향을 미쳤다. 본 자료는 비착용 구간의 걸음수가 0으로 기록될 수 있으므로, 착용 여부를 확인하지 않고 연속 정지 180분만 적용하면 장기간의 비착용 구간을 수면으로 오분류할 수 있다. 이 경우 낮은 심박수가 기록된 착용 구간까지 제외되어 기준값이 높게 추정될 수 있었다.

초기 분석에서 이러한 오류를 수정했을 때 기준값 차이는 약 1.7 %HRR이었다. 이 값은 오류 수정 전후의 비교 결과이며 Table 5의 최종 민감도 분석과는 구분된다. 수면 구간을 포함하는 경우와 비착용 구간을 수면으로 오분류하는 경우에는 추정값이 서로 반대 방향으로 달라질 수 있으므로, 수면 판정과 착용 확인 절차를 함께 적용했다.

⑥ 총 2,302개 관측 구간에서 분석 절차를 반복하여 각성-정지 관측량과 추정 안정성의 관계를 평가했다(Table 6, Figure 4). 각성-정지 관측 시간이 30~100분인 구간에서는 개인별 25백분위수가 음수 %HRR로 추정된 비율이 88%였다. 이 비율은 100~250분에서 32%, 250~500분에서 21%, 500~1,000분에서 2%로 감소했다. 1,000분 이상인 2,030개 구간에서는 음수 추정값이 관찰되지 않았다.

음수 추정값이 관찰된 구간 중 각성-정지 관측 시간이 가장 긴 구간은 767분이었다. 이를 초과한 2,074개 구간에서는 음수 추정값이 없었으며, 해당 비율의 95% 신뢰상한은 0.14%였다(0/2,074). 전체 관측 기간이 7일, 21일, 45일인 구간의 음수 추정 비율은 각각 4%, 7%, 2%로 기간에 따라 일관되게 감소하지 않았다. 따라서 전체 측정 일수뿐 아니라 실제로 확보한 각성-정지 관측 시간을 확인할 필요가 있다.

안정시심박은 60분 이동평균으로 정의하지만 %HRR은 1분 단위 심박수로 계산하므로 기준선보다 낮은 관측값이 일부 존재할 수 있다(§2.4). 각성-정지 관측량이 적으면 개인별 25백분위수도 이러한 낮은 값의 영향을 받아 음수가 될 수 있다. 본 연구에서는 음수 추정값이 관찰된 최대 관측량인 767분에 여유를 두어 개인별 각성-정지 자료를 1,000분(약 17시간) 이상 확보할 것을 제안했다. 주 분석 대상자는 모두 3,141분 이상의 자료를 확보했으며 개인별 중앙값은 35,518분이었다. 이 관측량 기준은 전체 측정 일수만으로 충족 여부를 판단할 수 없으므로 연구 설계와 결과 보고에 별도로 명시할 필요가 있다.

Table 6. Collapse of the per-person p25 below baseline as a function of accumulated awake-stationary minutes (2,302 non-overlapping observation windows of 7–120 days; full procedure, including the restHR baseline, recomputed within each window)

Awake-stationary minutes in window	Windows	p25 below baseline
30–100	67	88%
100–250	65	32%
250–500	52	21%
500–1,000	88	2% (last failure at 767 min)
≥1,000	2,030	0%

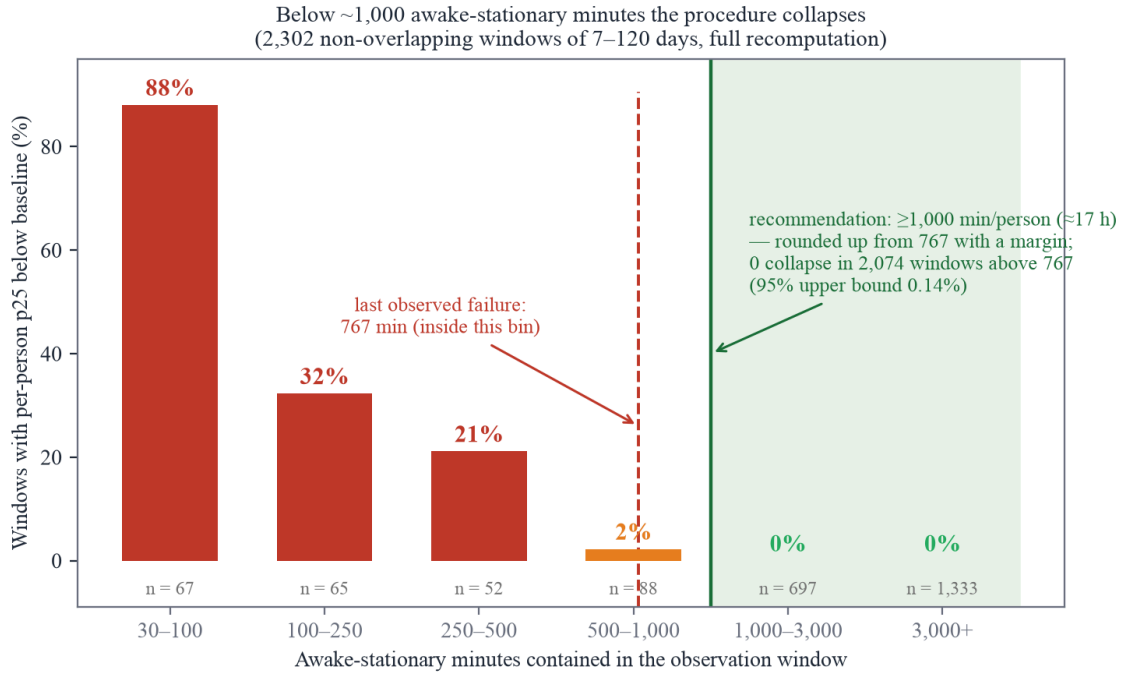


Figure 4. Collapse of the per-person rest threshold (p25) below the baseline as a function of accumulated awake-stationary minutes (2,302 non-overlapping observation windows of 7–120 days; full procedure, including the restHR baseline, recomputed within each window). Bars = share of windows whose p25 falls below the baseline, with window counts underneath. The last observed failure holds 767 awake-stationary minutes; none of the 2,074 windows above it fail (95% upper bound 0.14%). The recommendation of ≥1,000 minutes per person (≈17 h) rounds up from this boundary with a margin.

대상자 선별 기준 7종에서 개인별 25백분위수의 코호트 중앙값은 8.9~10.8 %HRR이었다(Figure 2). 그러나 전체 55명에 주 분석의 처리 조건을 적용한 개인별 25백분위수는 6.3~17.9 %HRR로 분포했고, 대상자를 선별한 뒤에도 개인 간 차이가 남아 있었다. 이중 경계(§4.3)를 적용하여 관측값을 기술하면, 개인별 25백분위수가 9 %HRR 미만인 대상자는 16명(29%), 9 이상 12 미만 %HRR인 대상자는 28명(51%), 12 %HRR 이상인 대상자는 11명(20%)이었다(Figure 5). 이러한 분포를 설명하기 위해 집단 요약값과 개인별 분포를 함께 제시했다.

개인별 10백분위수가 9 %HRR 미만인 경우는 49명(89%)으로, 어떤 백분위수를 선택하는지에 따라 기준을 충족하는 비율이 달라졌다. 또한 기준값을 개인별 25백분위수의 코호트 중앙값으로 정의하면 약 절반의 대상자가 그 이하에 위치하게 된다. 실제로 전체 코호트의 기준값인 10.2 %HRR 이하에 해당하는 대상자는 27/55명(49%)이었다. 이 분류는 관측값의 분포를 설명하기 위한 것으로, 개인의 회복 여부를 진단하는 도구로 검증된 것은 아니다.

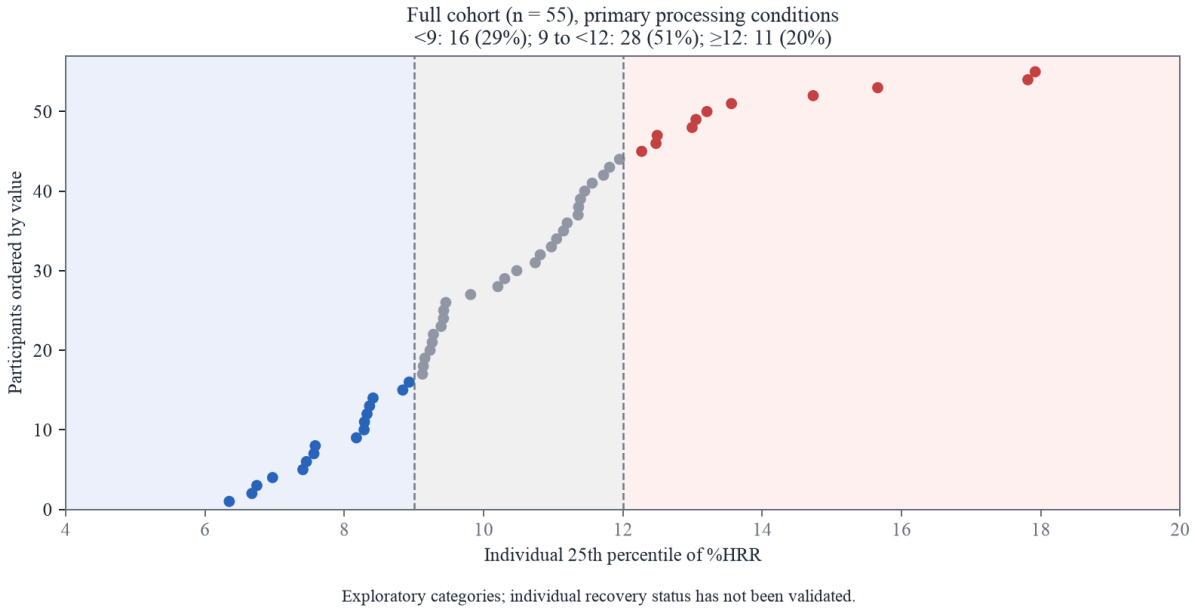


Figure 5. Per-person p25 of awake stationary %HRR described against the dual boundaries (one dot = one worker, full cohort n = 55; primary processing conditions). Per-person p25 <9: 16 workers; 9 to <12: 28; ≥12: 11. The 20% with p25 ≥12 illustrate between-person variation beyond the cohort median (9). These categories describe the observed distribution and are not validated classifications of individual recovery.

4. 고찰

4.1 주요 결과

본 연구의 주요 결과는 다음과 같다. 첫째, Dias의 고찰에 포함된 76편과 이후 4년간의 보완 검색에서 %HRR로 쉼·회복 상태를 정의한 연구는 0편이었다. 관련 기준으로 검토한 Yoopat 연구군의 %CVL <30은 관리 등급이었으며, MAWT 모형을 저강도 영역에 적용한 값은 외삽에 해당했다.

둘째, 안정시심박의 정의에 따라 동일한 절대 심박수 기준의 환산값이 14.1~33.6 %HRR로 달라졌다. 셋째, 각성 안정 상태의 관측 자료로 개인별 25백분위수의 코호트 중앙값인 약 9 %HRR과 개인별 중앙값의 코호트 중앙값인 약 16 %HRR을 추정했다. 다만 개인 간 분포 차이가 있어 이를 개인의 회복 여부 판정에 바로 적용할 수는 없다.

넷째, 각성-정지 관측량이 적은 구간에서는 개인별 25백분위수가 음수로 추정되었다. 음수 추정값이 관찰된 구간의 최대 각성-정지 관측 시간은 767분이었으며, 1,000분 이상인 구간에서는 음수 추정값이 관찰되지 않았다. 이는 기준값을 산출할 때 충분한 안정 상태 자료를 확보할 필요가 있음을 보여준다.

4.2 작업 강도 기준을 쉼·회복 판별에 적용할 때의 한계

기존 작업 강도 기준을 낮은 영역으로 확장하여 쉼·회복 문턱으로 사용하는 데에는 개념, 실측 범위, 문헌 근거 측면의 제약이 있다.

첫째, MAWT는 일정 강도의 작업을 지속할 수 있는 시간을 나타내며, 작업에서 회복하는 상태를 직접 정의하지 않는다. 따라서 허용 작업시간이 길어지는 것을 쉼 상태에 도달한 것으로 해석할 수 없다.

둘째, Wu & Wang 모형의 실측 범위는 RHR 24.4~65.6%였다(§3.3). 12시간 허용 작업시간에 해당하는 16 %HRR은 실측 최저값보다 약 8점 낮으며, 회복 문턱의 후보 영역인 5~15 %HRR은 실측 범위 밖에 있다. 이 영역에 모형을 적용한 값은 외삽에 해당한다.

셋째, 검토한 76편과 보완 검색에서 쉼·회복 판별을 위한 %HRR 기준값을 정의한 연구는 확인되지 않았다(§3.1). %CVL <30 기준도 쉼 상태에서 유도된 값이 아니라 관리 등급으로 제시되어 있었다(§3.2).

이러한 결과는 쉼·회복 문턱을 정하기 위해 해당 상태의 심박수를 직접 관측할 필요가 있음을 보여준다.

4.3 쉼·회복 기준값의 산출과 해석

제안한 절차에서는 심박수와 독립적인 활동 지표로 안정 상태를 선정하여 순환적 정의를 피했다(§2.4). 연속 정지 시간과 백분위수의 선택에 따라 추정값이 달라졌으므로, 이 조건들은 결과와 함께 제시해야 한다. 수면 구간의 포함 여부에 따른 차이도 1.1 %HRR이었으므로 수면 판정 규칙을 명시해야 한다(§3.6 ⑤). 또한 비착용 구간을 수면으로 잘못 분류하지 않도록 기기 착용 여부를 확인해야 한다.

본 연구의 추정값을 기존 부하 기준과 비교했다(Figure 6). 각성 안정 상태에서 얻은 약 9 %HRR은 Hettinger 척도 등급 I의 상한인 15.5 %HRR보다 낮았다. 임상 안정시심박, Wu & Wang의 좌위 측정값 및 Åstrand 시대의 통상적인 안정시심박으로 환산한 저강도 작업 기준은 각각 14.1, 15.8, 21.5 %HRR이었으며, Hettinger 등급 II의 상한은 23.7 %HRR이었다. 본 연구의 추정값은 이들 작업 부하 기준보다 낮았지만, 각 기준이 구분하려는 상태가 서로 다르므로 값의 상대적 위치만으로 회복 상태의 타당성이 입증되는 것은 아니다.

ACSM의 운동 강도 분류는 매우 가벼운 운동을 <30 %HRR, 중강도 운동을 40–59 %HRR로 제시한다[16]. 이 분류도 쉼 상태를 별도로 정의하지 않는다. 따라서 본 연구의 9 %HRR과 기존 운동·작업 부하 기준을 비교할 때에는 각 기준의 목적과 안정시심박 정의의 차이를 함께 고려해야 한다(§3.4).

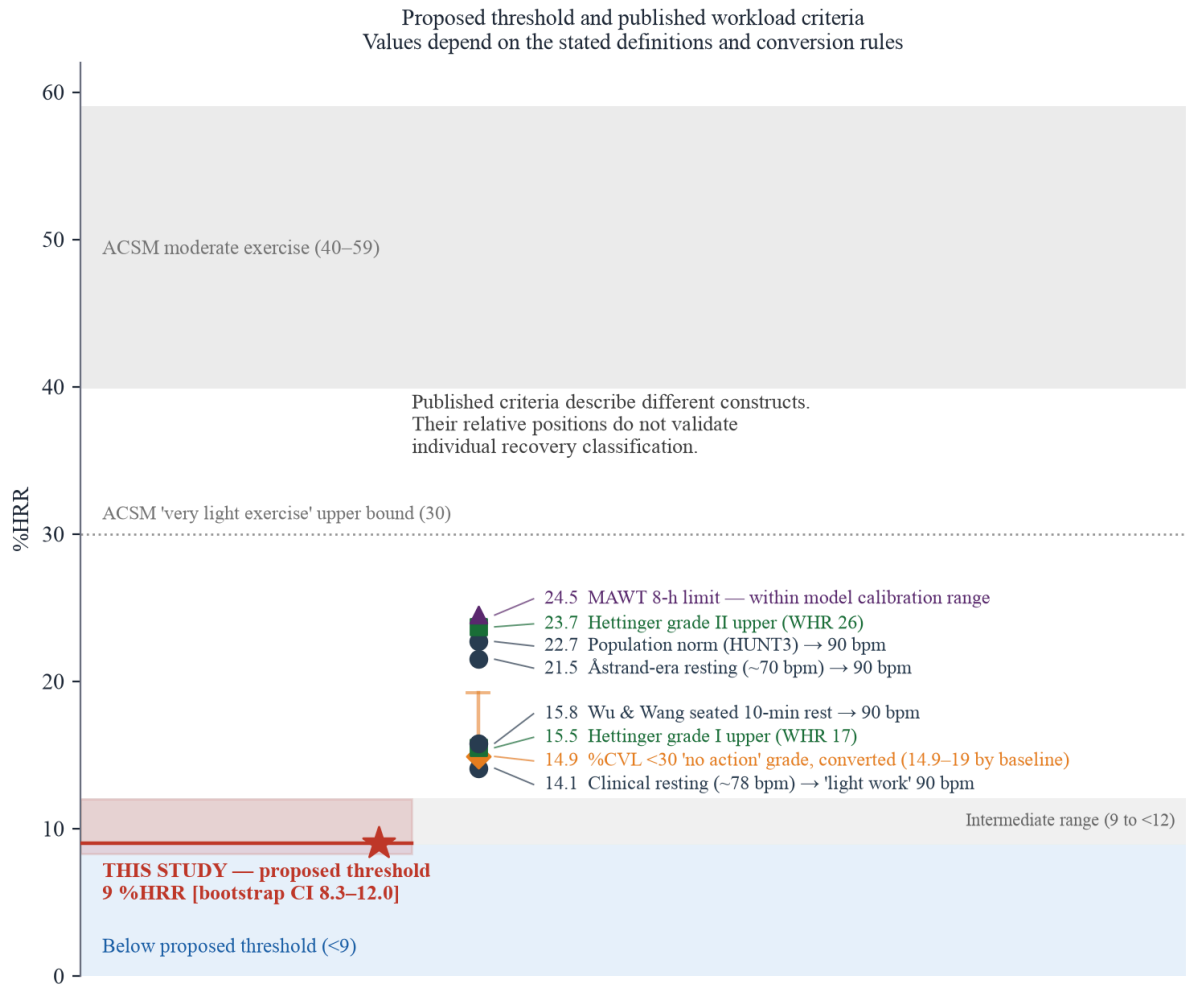


Figure 6. Comparison of the estimated rest threshold with published workload criteria. Red star: this study's measured threshold (9 %HRR, bootstrap CI 8.3–12.0). Navy circles: the 90-bpm "light work" boundary converted under four resting-HR conventions (clinical ~78 bpm; Wu & Wang seated 10-min rest; Åstrand-era ~70 bpm; population norm HUNT3). Green squares: Hettinger working-heart-rate grades, which need no resting baseline. Orange diamond: Yoopat's %CVL <30 "no action" management grade converted to %HRR (14.9 with this cohort's baseline; whisker to 19.2 across baseline conventions). Purple triangle: MAWT 8-h limit, within the model calibration range. The workload criteria have different purposes from the proposed rest threshold; their relative positions do not establish criterion validity.

실무 보고를 위한 탐색적 분류로 두 기준값을 제안했다. 개인별 25백분위수의 코호트 중앙값을 반올림한 9 %HRR과 부트스트랩 95% 신뢰구간 상한을 반올림한 12 %HRR이다. <9 %HRR은 제안한 쉼·회복 기준 미만의 구간으로, ≥12 %HRR은 상위 경계 이상의 부하 구간으로 구분하고, 9 이상 12 미만 %HRR은 중간 구간으로 보고할 수 있다. 이는 하나의 절단값만 사용하는 대신 추정의 불확실성을 함께 나타내기 위한 제안이다. 집단 추정값의 신뢰구간을 근거로 개인의 실제 회복 여부를 확정할 수는 없으므로, 이 분류의 판별 성능은 별도로 검증해야 한다.

쉼·회복 기준값을 추정할 때에는 각성-정지 관측량을 함께 보고할 필요가 있다. 본 자료에서는 관측량이 수백 분에 그친 구간에서 음수 추정값이 발생했으며, 마지막 발생 구간의 관측량은 767분이었다. 이를 초과한 2,074개 구간에서는 발생하지 않았고, 1,000분 이상인 구간에서도 발생하지 않았다(§3.6 ⑥).

안정 상태의 관측량이 부족하면 충분히 낮은 심박수가 기록되지 않아 안정시심박 기준선이 높게 추정될 수 있다. 높은 기준선을 적용하면 동일한 작업 중 심박수의 %HRR이 낮게 계산되므로, 작업 부하를 과소평가할 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 개인별 각성-정지 관측 시간을 1,000분 이상 확보할 것을 제안했다. 이 조건을 충족하지 못한 경우에는 부하 추정값이 낮게 산출되었을 가능성을 결과 해석에 반영해야 한다.

제안한 절차는 집단별로 쉼 상태의 %HRR을 추정하고, 기준선과 분석 조건을 명시하여 결과를 재현할 수 있도록 한다. 기준선의 정의에 따라 환산값이 20점 가까이 달라진다는 점에서(§3.4), 모든 집단에 하나의 문턱값을 적용하는 데에는 주의가 필요하다. 대상자 선별은 높은 부하에 노출된 집단의 관측값을 그대로 예방 기준으로 사용하는 문제를 줄이기 위한 것이다(§3.5). 또한 웨어러블 심박수와 활동량 자료를 사용하므로 실험실 측정이나 기기의 수면 판정 정보 없이 적용할 수 있다.

문턱과 작업 중 부하를 같은 기준선으로 계산하면, 기준선의 정의가 달라질 때 두 값이 함께 변하여 일부 차이가 상쇄될 가능성이 있다. 그러나 본 자료에는 휴게 시각 기록이 없어 휴게 구간별 회복 도달률 등의 결과 지표로 이러한 상쇄를 검증하지 못했다. 이를 평가하려면 휴게 기록이 있는 코호트의 추가 분석이 필요하다(§4.6).

4.4 MAWT 등가 보고의 해석과 적용 범위

통용되는 24.5·30.5·39.0 %HRR은 동일한 MAWT 식을 역산하여 얻을 수 있으며, 원문 Table 4의 값과도 일치했다(§3.3). 따라서 %HRR 기준과 이에 대응하는 허용 작업시간을 함께 제시하면 기준값의 의미를 설명하고 연구 간 비교를 돕는 데 유용할 수 있다. 예를 들어 ≥30 %HRR에 대응하는 MAWT가 약 6시간 미만임을 함께 보고할 수 있다.

다만 이러한 환산값을 사용할 때에는 모형의 실측 범위와 적용 대상을 명시해야 한다. 원문 Table 4에서 비교한 장시간 작업 기준 중 24.5 %HRR은 실측 범위에 포함되지만, 그보다 낮은 기준값은 외삽에 해당한다(§3.3). 또한 원 연구가 적용 대상으로 명시한 작업은 빠른 보행이나 계단 이용과 같은 하지의 동적 작업이었다. 운전이 중심인 본 코호트에 같은 관계를 적용할 수 있는지는 별도 검증이 필요하며, 허용 작업시간을 쉼·회복 상태의 판별 기준으로 해석해서는 안 된다(§4.2).

4.5 기존 관례와의 관계

본 연구진의 선행 작업 분석에서도 쉼·회복 판별을 위한 %HRR 기준의 명확한 근거가 없는 상태에서 <10을 어림값으로 사용했다. 본 연구에서 관측한 하위 25% 값의 범위는 8.9~10.2 %HRR로 이 값과 가까웠다. 그러나 이러한 근접성이 기존 어림값을 일반적인 기준으로 확정하는 것은 아니다. 본 연구의 의의는 해당 집단의 각성 안정 상태에서 9 %HRR [8.3–12.0]를 추정하고, 그 산출 절차와 불확실성을 함께 제시한 데 있다.

Yoopat 연구군의 15분 휴식은 20분 시술 후 회복을 평가하기 위한 실험 조건이었으며, 본 연구는 연속 착용 자료에서 각성 안정 상태를 식별했다는 점에서 분석 대상이 다르다. 또한 30 %CVL은 회복 여부가 아닌 조치 불요의 관리 등급으로 제시되었고, 해당 연구에서 15분 휴식 후 부하는 24~28 %CVL이었다(§3.2).

%CVL의 분모는 최대심박의 3분의 1이므로 [7], <30 %CVL을 %HRR로 환산한 값은 안정시심박의 정의에 따라 약 15~19 %HRR이었다. 본 코호트의 기준선을 적용한 값은 14.9 %HRR로, 본 연구의 쉼·회복 추정값인 9 %HRR보다 높았다(Figure 6). 이 비교는 관리 조치를 결정하는 등급과 생리적 상태를 구분하는 기준을 구별하여 해석할 필요가 있음을 보여준다. 보완 검색에서도 %CVL 관리 등급이 여러 연구에 사용되고 있었으므로, 이를 쉼·회복 판별 기준과 동일하게 취급하지 않도록 주의해야 한다.

4.6 한계

본 연구의 실증 자료는 단일 코호트에서 수집되었으며 야간 대리운전 플랫폼 노동(55명, 나이 중앙 57세)에 한정된다. 따라서 제시한 수치는 해당 집단에서 절차를 적용한 결과로 해석해야 한다. 주 분석 대상자 선별 집단의 표본은 11명으로 작았다. 다만 대상자 선별 기준 7종에서 하위 25% 값은 8.9~10.8 %HRR의 범위를 보였다.

제안한 기준은 개인의 회복 여부를 판정하는 용도로는 검증되지 않았다. 개인별 25백분위수는 6.3~17.9 %HRR로 분포했다(전체 55명에 주 분석의 처리 조건 적용; §3.6, Figure 5). 이 절차는 집단 문턱을 정하는 방법이며, Figure 5의 개인 분류(16/28/11)도 관측값의 기술이지 진단이 아니다.

연속 정지 시간과 심박수 이동평균의 기간을 변경하면 분석에 포함되는 관측값과 추정 대상이 달라진다(§3.6 ①). 따라서 두 조건을 기준값의 정의와 함께 보고해야 한다. 집단 공통 기준을 적용하는지 개인별 기준을 적용하는지도 명시해야 하며, 본 연구는 코호트 수준의 공통 기준을 사용했다. 근무 후 제외 시간 12시간과 수면 추정에 사용한 연속 정지 시간 180분은 고정하여 적용했으므로, 이 조건들의 변경에 따른 영향은 별도 평가가 필요하다. 집단에 따라 추정값이 달라질 수 있어 연구 간 직접 비교에 제약이 있다. 안정시심박의 정의가 서로 다른 연구를 비교할 때에도 같은 문제가 발생한다(§3.4). 비교 가능성을 높이려면 기준선과 분석 조건을 함께 보고해야 한다.

본 연구는 단기 변동의 영향을 완화하기 위해 개인별 심박수의 60분 이동평균 중 최솟값을 안정시심박 기준선으로 사용했다. 그러나 이 추정치는 관측 기간, 유효 관측량 및 이동평균 창 길이에 영향을 받을 수 있으며, 임상적으로 측정한 안정시심박과의 일치도는 확인하지 않았다. 본 연구에서는 관측 구간별 재계산과 근무 후 자료 제외 여부에 따른 민감도를 평가했으나, 이러한 비교만으로 기준선 추정 규칙의 영향을 충분히 설명하기는 어렵다. 기준선 산출에 사용하는 이동평균 창 길이와 대안적 추정 규칙, 관측 조건에 따른 결과의 민감도는 추가 평가가 필요하다. 또한 각성-정지 자료의 최소 확보량은 단일 코호트에서 음수 추정값이 관찰된 최대 관측량인 767분을 참고하여 설정했으므로, 다른 집단에서의 검증이 필요하다(§3.6 ⑥).

휴게 시각 기록과 기기의 수면 판정 결과가 없어 수행하지 못한 분석이 있다. 회복 기준을 <5~<24.5 %HRR로 변경했을 때 실제 휴게 중 기준 도달률이 어떻게 달라지는지, 같은 개인의 근무일과 비근무일 무보행 구간이 어떻게 다른지, 기준선 변경이 결과에서 어느 정도 상쇄되는지를 평가하지 못했다(§4.3). 본 연구는 연속 정지 시간과 백분위수 선택에 따른 민감도를 평가했으며, 실제 휴게 구간을 이용한 검증은 추가 자료가 필요하다(§3.6).

수면과 각성 상태를 걸음수로 추정했으므로 자세에 따른 휴식을 구분하지 못했다. 비착용 구간에 기록된 걸음수 0을 수면으로 오분류하지 않도록 착용 여부를 함께 확인했다. 초기 분석에서 이 처리를 수정했을 때 기준값은 약 1.7 %HRR 달라졌다(§3.6 ⑤). 또한 운전 중에는 걸음수가 0이어도 작업 부하가 존재할 수 있으므로 일부 운전 구간이 각성 안정 상태에 포함되었을 가능성이 있다. 걸음수에 기반한 거리값만으로는 이를 구분할 수 없었다. 00–05시 활동으로 판정한 근무일의 05시 이후 12시간을 제외했을 때 기준값 차이가 0.2 %HRR 미만이었지만(§3.6 ④), 이것만으로 운전 구간의 오분류 가능성을 배제할 수는 없다.

문헌 검토의 범위는 Dias 등의 연구 선별에 의존한다. 보완 검색에는 Google Scholar 대신 OpenAlex와 PubMed를 사용했으므로 Google Scholar에만 수록된 문헌이 누락되었을 수 있다. 선별은 연구자 1인이 수행했으며, 포함 여부가 불명확한 13건은 전문 확인이 완료되지 않았다. 따라서 문헌 검색과 선별의 불확실성을 고려하여 결과를 해석해야 한다. Hettinger의 기준은 Yoopat 등의 문헌을 통해 간접 인용했으므로 원전의 방법과 적용 범위를 직접 확인하지 못했다.

5. 결론

검토한 문헌에서는 %HRR에 근거한 쉼·회복 판별 기준을 확인하지 못했다. 기존 작업 강도 기준을 쉼 상태에 적용하는 데에는 개념적 차이와 실측 범위 밖 외삽이라는 한계가 있었다. 이에 본 연구에서는 활동 지표로 각성 안정 상태를 식별하고, 해당 상태에서 관측된 %HRR 분포를 이용하여 집단 수준의 기준값을 추정하는 절차를 제안했다.

전체 55명 중 선별한 주 분석 하위집단 11명에서 개인별 25백분위수의 중앙값을 바탕으로 제안한 기준은 약 9 %HRR이었으며, 부트스트랩 95% 신뢰구간은 8.3–12.0였다. 분포를 함께 설명하기 위해 10백분위수에 해당하는 약 6 %HRR과 중앙값에 해당하는 약 16 %HRR도 제시했다. 기존 잠정 기준인 <10 %HRR과의 유사성만으로 일반적인 판별 기준의 타당성이 확인되는 것은 아니다. <9, 9 이상 12 미만, ≥12 %HRR의 구분은 탐색적 보고 방식으로 제안한 것이며 개인의 회복 여부를 확정하는 기준은 아니다.

기준값을 사용할 때에는 연속 정지 시간, 백분위수, 안정시심박의 정의, 야간 근무일 및 수면 구간 처리, 대상자 선별 조건과 적용 수준을 함께 명시해야 한다. 또한 개인별 각성-정지 자료를 1,000분(약 17시간) 이상 확보할 것을 제안했다. 본 자료에서 음수 추정값이 관찰된 최대 관측량은 767분이었고, 이를 초과한 구간에서는 관찰되지 않았다(0/2,074). 안정 상태 자료가 부족하면 기준선이 높게 추정되어 작업 부하가 과소평가될 수 있으므로, 전체 측정 일수와 실제 각성-정지 관측 시간을 함께 보고할 필요가 있다. 제안한 기준값과 최소 관측량은 다른 집단에서 추가 검증되어야 한다.

감사의 글

장기간의 착용형 기기 측정에 참여해 주신 야간 대리운전 노동자들과 자료 수집을 도운 플랫폼 건강협동조합 관계자들께 깊이 감사드린다.

Ethics Statement

본 연구는 연세대학교 의료원 기관생명윤리위원회의 승인을 받았다(IRB No. 4-2021-1447). 참여자 동의 또는 동의 면제 여부와 해당 자료의 이차 분석 승인 범위는 저자 확인 후 기재한다.

Funding

본 연구는 플랫폼 건강협동조합 구조를 통한 취약 노동자 건강관리 시스템 개발 및 실증(Development and Demonstration of Health Care System for Vulnerable Workers through Platform Health Cooperatives) 과제에서 수집된 자료를 이용하였다. 연구비 지원기관, 과제번호 및 지원기관의 연구 관여 여부는 저자 확인 후 기재한다.

Conflict of Interest

전체 저자의 이해상충 여부를 확인한 후 최종 선언문을 기재한다.

Author Contributions

저자 명단과 실제 기여를 모든 저자가 확인한 후 기재한다. 아래 항목의 담당자 이름 또는 이니셜을 입력하며, 수행하지 않은 역할은 삭제한다.

- Conceptualization: [담당 저자]
- Methodology: [담당 저자]
- Formal analysis: [담당 저자]
- Writing – original draft: [담당 저자]
- Writing – review and editing: [담당 저자]
- Supervision: [담당 저자]

Data Availability

참여자 개인정보 보호, 동의 범위 및 자료 이용 승인 조건을 확인한 후 공개 가능 범위와 접근 절차를 기재한다. 비공개 자료인 경우 비공개 사유를 명시하고, 요청 제공이 가능한 경우에만 교신저자 연락처와 심사 조건을 제시한다.

Code Availability

분석 코드의 공개 여부와 배포 권한을 저자가 확인한 후 저장소 URL, 버전 또는 커밋, 실행 환경 및 재현 절차를 기재한다. 요청 제공이 가능한 경우에만 교신저자를 통한 제공 절차를 명시한다.

AI Use Disclosure

원고의 문장 및 서식 편집에 AI를 사용하였다. 사용 도구와 모델, 사용 시기, 적용 범위 및 저자의 검증 내용을 확인하여 최종 공개문을 완성한다. 연구 내용과 최종 원고에 대한 책임은 저자에게 있다.

참고문헌

1. Karvonen MJ, Kentala E, Mustala O. The effects of training on heart rate: A longitudinal study. Ann Med Exp Biol Fenn 1957;35:307–15.

2. Wu H-C, Wang M-JJ. Relationship between maximum acceptable work time and physical workload. Ergonomics 2002;45:280–9. https://doi.org/10.1080/00140130210123499.

3. Dias M, Silva L, Folgado D, Nunes ML, Cepeda C, Cheetham M, et al. Cardiovascular load assessment in the workplace: A systematic review. Int J Ind Ergon 2023;96:103476. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2023.103476.

4. Lund Rasmussen C, Palarea-Albaladejo J, Korshøj M, Gupta N, Nabe-Nielsen K, Holtermann A, et al. Is high aerobic workload at work associated with leisure time physical activity and sedentary behaviour among blue-collar workers? A compositional data analysis based on accelerometer data. PLOS ONE 2019;14:e0217024. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217024.

5. Yoopat P, Pitakwong P, Vanwonterghem K. Assessing the physiological strain of physical therapists according to work experience: A cross-sectional study. J Bodyw Mov Ther 2020;24:253–62. https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2019.05.033.

6. Yoopat P, Maes C, Poriau S, Vanwonterghem K. Thai traditional massage: Efficiency-assessment of three traditional massage methods on office workers: An explorative study. J Bodyw Mov Ther 2015;19:246–52.

7. Yoopat P, Vanwonterghem K, Intaranont K. An assessment of workload in the Thai steel industry. Appl Ergon 1998;29:267–71. https://doi.org/10.1016/S0003-6870(97)00014-8.

8. Tricco AC, Lillie E, Zarin W, O'Brien KK, Colquhoun H, Levac D, et al. PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. Ann Intern Med 2018;169:467–73. https://doi.org/10.7326/M18-0850.

9. Lunde L-K, Koch M, Veiersted KB, Moen G-H, Wærsted M, Knardahl S. Heavy physical work: Cardiovascular load in male construction workers. Int J Environ Res Public Health 2016;13:356. https://doi.org/10.3390/ijerph13040356.

10. Imai K, Sato H, Hori M, Kusuoka H, Ozaki H, Yokoyama H, et al. Vagally mediated heart rate recovery after exercise is accelerated in athletes but blunted in patients with chronic heart failure. J Am Coll Cardiol 1994;24:1529–35. https://doi.org/10.1016/0735-1097(94)90150-3.

11. Cole CR, Blackstone EH, Pashkow FJ, Snader CE, Lauer MS. Heart-rate recovery immediately after exercise as a predictor of mortality. N Engl J Med 1999;341:1351–7. https://doi.org/10.1056/nejm199910283411804.

12. Diaz KM, Howard VJ, Hutto B, Colabianchi N, Vena JE, Safford MM, et al. Patterns of sedentary behavior and mortality in U.S. Middle-aged and older adults: A national cohort study. Ann Intern Med 2017;167:465–75. https://doi.org/10.7326/m17-0212.

13. Dinh-Dang D, Khafagy A, Krause N, Harris-Adamson C. Assessment of cardiovascular load among hotel room cleaners. Appl Ergon 2022;106:103886. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103886.

14. Tjøsvoll SO, Wiggen Ø, Gonzalez V, Seeberg TM, Elez Redzovic S, Frostad Liaset I, et al. Assessment of physical work demands of home care workers in Norway: An observational study using wearable sensor technology. Ann Work Expo Health 2022;66:1187–98. https://doi.org/10.1093/annweh/wxac052.

15. Wahlström V, Abtahi F, Forsman M, Yang L, Öhrner P, Tornevi A, et al. Cardiovascular load and physical capacity in older workers engaged in physically demanding occupations. Int Arch Occup Environ Health 2025;98:673–83. https://doi.org/10.1007/s00420-025-02161-8.

16. Garber CE, Blissmer B, Deschenes MR, Franklin BA, Lamonte MJ, Lee I-M, et al. Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: Guidance for prescribing exercise. Med Sci Sports Exerc 2011;43:1334–59. https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318213fefb.

부록 A. 문헌 검토 흐름도

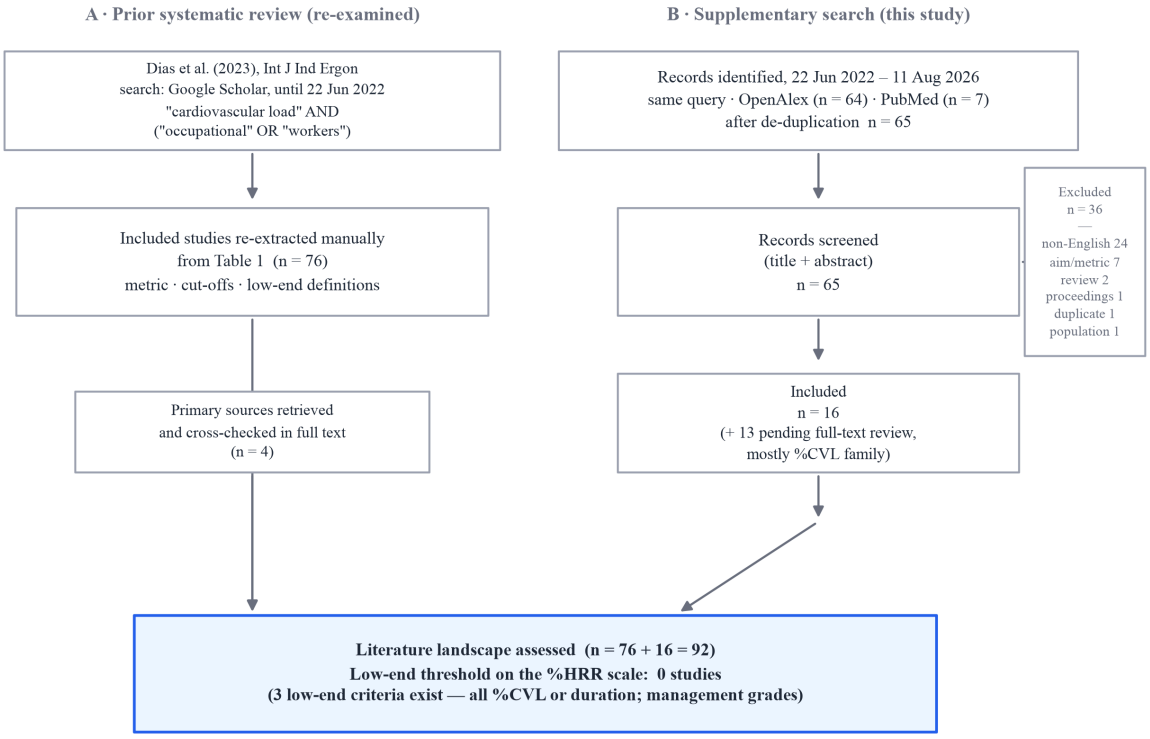


Fig A1. Flow of the two-stage literature review (PRISMA-ScR format). Stage A re-examines the 76 studies of the only systematic review in the field; stage B extends its search window by four years with the identical query.

Fig A1. Flow of the two-stage literature review (PRISMA-ScR format). Stage A re-extracts all 76 studies of the only systematic review in the field (Dias et al., 2023); stage B extends the identical search by four years (65 records → 16 included · 13 pending full text · 36 excluded). Across the combined 92 studies, no low-end %HRR threshold exists.

부록 B. 용어·정의·보건학적 해석

이 표는 기존 학술 용어와 이 연구에서 선택한 조작적 정의를 구분한다. 약어가 널리 쓰인다는 사실은 이 연구의 기준값이나 분류가 임상적으로 검증되었다는 뜻이 아니다.

심혈관 부하 지표

용어·정식 명칭	정의·이 연구의 사용	보건학적 의미와 해석 한계
HR — heart rate, 심박수; bpm — beats per minute	1분당 심장 박동 수. 여기서는 착용형 기기의 분 단위 심박수 기록을 사용한다.	활동에 따른 반응을 관찰하는 지표이다. 심박수만으로 작업 여부나 회복 상태를 확정하지 않는다.
HRmax — maximal heart rate, 최대심박수	본 연구에서는 220 − 연령으로 추정한다. 단위는 bpm이다.	상대적 부하 계산의 상한값이다. 개인에게서 직접 측정한 최대심박수가 아니다.
HRrest / restHR — resting heart rate, 안정시 심박	일반 용어이며, 이 연구의 산출 규칙은 아래 표의 조작적 정의를 따른다. 단위는 bpm이다.	부하 계산의 기준선이다. 임상 환경의 안정시 측정값과 동일하다고 가정하지 않는다.
HRR — heart rate reserve, 여유심박	HRmax − HRrest. 단위는 bpm이다.	기준선부터 추정 최대심박수까지의 차이다. %HRR과 단위·의미가 다르다.
%HRR — percentage of heart rate reserve, 심박예비율	100 × (HR − HRrest) / (HRmax − HRrest). 단위는 %이다.	기준선 대비 심박수 증가가 여유심박에서 차지하는 비율이다. 9 %HRR은 심박수 9 bpm을 뜻하지 않는다.
RHR — relative heart rate, 상대심박수	이 원고가 검토한 작업 부하 문헌에서는 %HRR에 대응하는 비율을 뜻한다. 식에 넣을 때 0–1 비율인지 0–100 백분율인지 구분한다.	다른 문맥에서는 resting heart rate의 약어로도 쓰일 수 있으므로 문헌별 정의를 확인한다. 본 연구의 안정시심박 변수는 restHR로 표시한다.

관련 척도와 통계 용어

용어·정식 명칭	정의·이 연구의 사용	보건학적 의미와 해석 한계
CVL / %CVL — cardiovascular load, 심혈관 부하	Yoopat 등의 정의: 100 × (HRwork − HRrest) / (HRmax8h − HRrest), HRmax8h = HRrest + HRmax/3.	분모가 여유심박인 %HRR과 다르다. 같은 30%라도 두 척도의 부하는 동일하지 않다. 이 식을 모든 문헌의 CVL 정의로 일반화하지 않는다.
MAWT — maximum acceptable work time, 최대허용작업시간	Wu & Wang의 모형에서 주어진 상대적 부하에 대응하는 작업 지속시간. 본 원고의 식은 26.12 × exp(−4.81 × %HRR/100), 단위는 시간이다.	작업 지속시간 추정이며 회복 판정이나 개인별 안전 보증이 아니다. 원 연구의 작업 유형과 실측 범위를 확인해야 한다.
WHR — working heart rate, 작업심박 증가량	여기서는 작업 중 심박수 − 안정시심박. 단위는 bpm이다.	작업에 따른 절대 증가량이다. HRwork 자체와 구분한다. 본문 Hettinger 기준은 Yoopat 문헌을 통한 간접 인용이다.
p10·p25·p50 — 10·25·50th percentile	각각 10백분위수·25백분위수·중앙값. 개인별 분포에서 산출한 뒤 개인별 값의 중앙값으로 집단을 요약한다.	낮은 값부터 정렬했을 때의 분포 위치이다. p25를 회복 기준으로 선택한 것은 본 연구의 제안이며 통계량의 일반적 의미와 구분한다.
CI — confidence interval, 신뢰구간; bootstrap — 부트스트랩	본 분석에서는 개인별 요약값을 재표집하여 집단 중앙값의 95% 신뢰구간을 산출한다.	집단 추정의 불확실성을 나타낸다. 개인 관측값의 95%가 들어가는 구간이나 회복 판정의 정확도 95%를 뜻하지 않는다.
IQR — interquartile range, 사분위범위	75백분위수와 25백분위수의 차이(Q3−Q1). 표의 [Q1–Q3] 표기는 중앙 50%의 구간을 나타낸다.	개인 간 값의 분산 정도를 설명한다. CI와 다르므로 표에서 구분한다.

이 연구에서 정한 상태·분석 조건

용어·변수	조작적 정의	보건학적 의미와 해석 한계
worn / still — 착용 추정 / 정지	현재 분의 심박수 기록 존재로 착용을 확인한다. 걸음수가 관측되고 0인 분을 정지로 분류한다.	상태 선정에 심박수의 크기를 사용하지 않는다. 정지는 실제 휴식이나 앉은 자세와 동일하지 않다.
inferred sleep — 추정 수면	착용이 확인된 연속 정지 구간이 180분 이상이면 수면으로 추정한다.	기기 수면 판정이나 수면검사 결과가 아니다. 장시간 움직이지 않는 각성 상태와의 오분류 가능성이 있다.
QUIET / q — 연속 정지 시간 조건	현재 분에 착용이 확인되고 추정 수면이 아니며 q분 연속 정지이면 각성 안정 관측값으로 선택한다. 주 분석 q = 10분.	연구자가 정한 활동 기반 상태이다. 실제 각성·회복을 직접 측정한 것으로 해석하지 않는다.
global / recovered — 기준선 계산 조건	global은 60분 이동평균의 전체 최솟값. recovered는 근무 후 제외 구간에 위치한 평균값을 빼고 최솟값을 선택한다.	recovered는 회복이 확인되었다는 뜻이 아닌 분석 변수명이다. 코드에서는 60분 창 내 유효 심박수가 30개 이상일 때 평균을 계산하고, 제외 후 값이 없으면 global을 사용한다.
inferred work-night / postshift	00–05시 걸음수 합이 개인별 양수 합계의 중앙값을 초과하면 근무일로 추정한다. 해당 날짜의 05–17시를 postshift로 정한다.	근무 일정의 대리 지표와 가정된 근무 후 구간이다. 실제 시작·종료 시각은 확인하지 않았다.
worknight_excl / primary subgroup	코드의 worknight_excl은 postshift 구간을 각성 안정 표본에서 제외하는 조건이다. 주 분석 하위 집단은 전체 55명 중 착용 비율 ≥60%, 추정 근무일 비율 ≤33%인 11명이다.	근무일 전체를 제거한다는 뜻이 아니다. 11명은 전체 표본수가 아니며, 낮은 근무일 비율만으로 과로가 없다고 판정하지 않는다.

본문에서 함께 사용하는 표기

- %HRmax: 최대심박수 대비 관측 심박수의 백분율. 안정시심박을 차감하지 않으므로 %HRR과 구분한다.
- %CVS: 검토 문헌의 cardiovascular strain(심혈관 부담) 지표. 문헌별 계산식을 확인하며 %CVL·%HRR과 동일한 값으로 취급하지 않는다.
- VO_2 / VO_2max: 산소섭취량 / 최대산소섭취량. 검토 문헌에서 사용하는 생리 지표이며 본 코호트에서 직접 측정한 값이 아니다.
- Wmax: 원 자전거 운동 실험의 최대 작업률. 본 코호트에서 직접 측정한 값이 아니다.
- KST: Korea Standard Time, 한국 표준시. IRB: Institutional Review Board, 기관생명윤리위원회.
- ACSM: American College of Sports Medicine, 미국스포츠의학회. PRISMA-ScR: Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses extension for Scoping Reviews, 주제범위 문헌고찰 보고 지침 확장판. 지침명을 사용하는 것만으로 검색의 완전성이나 연구 설계의 적합성이 보증되지는 않는다.