



ScienceDirect 에서 제공되는 콘텐츠 목록

교통 연구 파트 F

저널 홈페이지: www.elsevier.com/locate/trf



자가 보고 피로에 기반한 피로 위험 관리:
피로 관련 생물수학적 모델 확장
주관적인 졸음을 예측하기 위한 성능 저하



Mark E. McCauley^{a, b, 1}, 피터 맥콜리 사만다 M. 리디 레오니드 V. 칼라체프 수레쉬 랑간 a, b, 2, 씨,³ 시오반 벵크스 c, 2, 디,
Adrian J. Ecker^{a, *}, 데이비드 F. 딕슨^{a, *},
Hans PA Van Dongen

^a 미국 워싱턴 주립대학교 수면 및 성과 연구 센터, 스포칸 건강 과학부
^b 엘슨 S. 플로이드 워싱턴 주립대학교 의과대학 건강 과학 스포칸, 미국
미국 펜실베이니아 대학교 페넬런 의과대학 수면 및 시간생물학부 실험정신의학 cUnit
^c 호주 남호주 대학교 행동-뇌-신체 연구 센터
미국 몬테나 대학교 수학과학과
^{*} 페더럴 익스프레스 코퍼레이션, 미국

기사 정보

기사 내역:
2020년 12월 25일 수신
2021년 3월 21일 개정된 형태로 접수됨
2021년 4월 11일 승인됨
2021년 5월 12일 온라인 출시

키워드:
경보
피로 및 성능 모델
피로 위험 관리
카롤린스카 졸음 척도
정신운동 각성 테스트
자가평가 졸음

추상적인

피로의 생물수학적 모델은 신경행동적 결손을 예측하는 데 사용될 수 있습니다. 수면/각성 또는 작업/휴식 일정. 현재 모델은 객관적인 수행 능력 저하 및/또는 주관적인 졸음을 예측하지만, 객관적 결과와 주관적 결과의 시간적 역학에 대한 알려진 차이점은 다루지 않았습니다. 우리는 이전에 객관적인 성능을 예측하기 위해 개발된 피로의 생물수학적 모델 정신운동 경계 테스트(PVT)에서 측정된 적자는 주관적 예측에도 사용됩니다. 카롤린스카 졸음 척도(KSS)에 자가 보고된 졸음. KSS의 고유한 역학을 포착하고 다음을 설명하기 위해 네 가지 모델 매개변수를 재추정했습니다. KSS와 PVT 간의 스케일 차이. 두 개의 개별 데이터 세트 앙상블 - 다음에서 추출된 수면 부족, 수면 제한, 모의 야간 작업, 낮잠에 대한 실험실 연구 및 회복 수면 - 모델의 교정 및 후속 검증에 사용되었습니다. 주관적 졸음에 대한 예측 정확도. 확장된 모델은 주관적 졸음에 대해 높은 예측 정확도를 보였으며, 객관적인 성능 저하에 대해서도 높은 예측 정확도를 유지하는 것으로 나타났습니다. 검증된 모델을 화물 기반 예시 시나리오에 적용한 결과 항공 운항은 객관적 예측과 주관적 예측 사이에 차이가 있음을 보여주었습니다. 주관적인 졸음은 누적되는 객관적인 손상을 상당히 과소평가하는 결과를 초래하며, 이는 현실 세계에 중요한 영향을 미칩니다. 상업 항공과 같이 안전에 민감한 운항에서는 졸음에 대한 자체 평가가 다음과 같은 목적으로 사용됩니다. 피로 위험 관리, 객관적 시간 역학의 체계적 차이

담당 저자: 워싱턴 주립대학교 수면 및 성과 연구 센터, 스포칸 건강 과학부, 412 E. Spokane Falls Blvd. Spokane, WA 99202-2131, USA.
이메일 주소: hvd@wsu.edu (HPA Van Dongen).
¹ 첫 번째 저자로 공동 선정됨.
² 공동 선임 저자.
³ 현재 미국 월터 리드 육군 연구소 군사 정신의학 및 신경과학 센터 행동생물학 분과에 재직 중입니다.

기능 장애에 대한 주관적 측정은 잠재적으로 심각한 위험을 나타냅니다.
평가 민감도 값. 여기에 제시된 확장된 생물수학적 피로 모델
이전에는 인식되지 않았던 격차를 메우는 데 유용한 정량적 도구를 제공합니다.
2021 Elsevier Ltd. 모든 권리 보유.

1. 서론

피로의 생물수학적 모델은 수면/각성 조절의 알려진 시간적 역학, 일주기를 통합합니다.
다양한 수면/각성 및 작업에 대한 신경행동적 결합을 예측하기 위해 리듬 및 행동적 경계성을 사용합니다.
일정 (Riedy, Hursh, Dawson, Balkin & Van Dongen, 출판 예정). 이러한 모델은 피로에 점점 더 필수적인 요소가 되고 있습니다.
상업 항공 및 기타 24시간 운영 환경에서의 위험 관리 시스템 (Dawson, Noy, Härmä, Åkerstedt, & Belenky, 2011). 상업 항공에서는 생물수학적 모델을 사용하여 피로도를 평가하고, 다양한 근무 일정("페어링")을 비교하여 일정과 근무표를 최적화하고, 신규 노선의 피로 문제를 예측하고,
규제 준수를 위한 대체 수단에 대한 안전 사례, 피로 대책 사용 안내, 피로 보고서 및 사고 조사 지원, 새로 제안된 규정 평가 (Gander, Lamp, Nesthus, Mangie, Wykoff, & Wu, in

압력; Rangan 등, 2013; Riedy et al., 인쇄 중; Romig & Klemets, 2009).
생물수학적 모델의 항공표준은 아마도 인지적 성능 결함의 예측일 것이다 (Dinges, 2004;
Riedy et al., 인쇄 중) 및/또는 안전 위험 (Raslear, Hursh, & Van Dongen, 2011) 과 같은 객관적 성과 평가
일반적으로 모델 매개변수화에 사용되는 10분 심리운동성 각성 테스트(PVT; Lim & Dinges, 2008) 와 같습니다 (Riedy et al., 인쇄 중). 그러나 상업 항공에서의 정신 피로 평가는 종종 자체 보고 측정을 기반으로 합니다.
졸음과 피로 (Gander et al., 2014). 카를린스카 졸음 척도(KSS; Åkerstedt & Gillberg, 1990) 와 삼-페렐리 피로 척도 (Samn & Perelli, 1982) 는 항공 운항에서 자주 사용되며, 특히 KSS는
각성의 3단계 모델 (Ingre et al., 2014)이라 불리는 생물수학적 모델에서 예측 결과로 사용됩니다.
KSS는 곡선성이 높은 9점 리커트형 척도로, KSS 점수 7-9점은 빠르게
졸음 수준 증가. KSS는 수면 부족과 일주기 리듬에 대한 민감성을 보였으며, 집단 평균 자료에 따르면 졸음에 대한 가장 광범위하게 검증된 자가 보고 측정법입니다 (Åkerstedt, Anund, Axelsson, & Kecklund, 2014).

이 논문에서 우리는 이전에 개발된 최첨단 생물수학적 모델의 범위를 확장합니다.
수면, 수면 부족, 그리고 일주기 리듬이 신경행동학적 수행에 미치는 영향 (McCauley et al., 2013)을 연구하여 자가 보고 졸음 예측도 포함시켰습니다. 기존 모델은 시간적 동역학을 포착하는 미분 방정식에 기반합니다.
기저 신경생물학. 이 모델의 매개변수는 예정된 수면 시간을 기반으로 10분 PVT의 객관적인 성과 측면에서 그들 평균 피로도를 예측하도록 보정 및 검증되었습니다. 주목할 만한 특징은

모델의 특징은 경험적으로 확립된 차등에 대한 통합된 설명을 제공하는 분기점을 나타낸다는 것입니다.
지속적인 수면 제한과 완전한 수면 박탈로 인한 PVT 성능 저하의 역학 (Van Dongen & Dinges, 2003; Van Dongen, Maislin, Mullington, & Dinges, 2003). 즉, 매일 예정된 각성 시간이 20.2시간으로 추정되는 입계치 Wc (즉, 하루 24시간 동안 3.8시간 이상의 수면 기회) 미만인 경우, PVT 수행 능력 저하가 며칠에 걸쳐 점진적으로 안정적인 평형 상태로 수렴할 것으로 예측되는 반면, 매일 각성 시간이 연장된 경우

이 중요한 한계점을 넘어서면 성과 저하가 확산(즉, 확대)될 것으로 예측됩니다 (McCauley et al., 2009).
우리의 목표는 이전에 개발된 모델 (McCauley et al., 2009, 2013) 의 범위를 확장하여 예측하는 것 입니다.
KSS에서 그들 평균 주관적 졸음도를 측정합니다. 이를 달성하기 위한 표현적으로 간단한 접근법은 PVT 성능에서 KSS 졸음도로 (비선형) 변환 함수를 추정하는 것이지만, 이 접근법은 적합하지 않습니다.
모델의 메트릭별 동적 측면과 공유 동적 프로세스를 구별하지 못하므로 실패합니다.
예측의 일반화 가능성을 보장합니다 (Olofsen, Van Dongen, Mott, Balkin, & Terman, 2010). 예를 들어, 시간적
주관적 졸음의 역학은 지속적인 수면 제한 조건 하에서 객관적인 성과 장애의 역학과 다릅니다 (Belenky et al., 2003; Mollicone, Van Dongen, Rogers, Banks, & Dinges, 2010; Van Dongen et al., 2003), 주관적인 졸음으로 인해 객관적인 성능 저하가 체계적으로 점점 더 과소평가되는 경우
수면 손실이 누적됩니다. 따라서 KSS 졸음증의 분기점 역치 Wc 가
PVT 성능. 따라서 여기서는 모델의 역학을 다시 조사하고, 지표에 따라 분리된 프로세스를 분석합니다.
일반 프로세스 및 매개변수의 매개변수를 추출하고 모델을 재보정 및 재검증하여 KSS 졸음을 예측합니다.
PVT 성능과 동일한 주요 모델 역학을 사용합니다. 따라서 다재다능한 생물수학적 모델을 개발하고자 합니다.
상업 항공 및 기타 24시간 운영에서 피로를 안정적으로 예측할 수 있는 모델
객관적인 성과나 주관적인 졸음 결과가 고려됩니다.

* 운영 환경에서 피로와 졸음이라는 용어는 종종 같은 의미로 사용됩니다. 두 개념 사이에는 다양한 차이점이 있지만, 문헌에 제안된 이러한 것들은 일반적으로 이 논문의 초점인 시간적 역학에 거의 영향을 미치지 않습니다 (Satterfield & Van Dongen, 2013). 여기서, 피로라는 용어는 일반적으로 기능 장애의 맥락에서 사용되는 반면, 졸음이라는 용어는 주관적인 측면을 지칭하는 데 구체적으로 사용됩니다.

2. 재료 및 방법

2.1. 생물수학적 모델 공식화

수면 조절의 선구적인 두 과정 모델 (Borbély, 1982; Daan, Beersma, & Borbély, 1984) 에 기반한 생물수학-생리학적 모델의 피로 예측은 기본적으로 수면 시간과 깨어 있는 시간의 균형을 추구하는 항상성 과정과 낮에는 각성 상태를, 밤에는 수면 상태를 촉진하는 일주기 과정에 기반합니다 (Riedy et al., 출판 예정). 최근 연구에 따르면 항상성 과정의 평형 상태와 일주기 과정의 진폭은 수면/각성 이력에 의해 조절됩니다 (Mollicone et al., 2010; Rupp, Wesensten, Bliese, & Balkin, 2009). 이러한 상호작용 효과를 포착하기 위해, 본 연구에서 구축한 발표된 모델 (McCauley et al., 2013)은 다음과 같은 상태 변수를 갖는 세 가지 동적 과정으로 구성됩니다.

$p(t)$ 는 다른 것과 상호 작용하는 항상성 과정에 기반한 피로 예측을 나타냅니다.
과정; $u(t)$ 는 항상성 과정의 평형 상태의 변조를 나타냅니다. $j(t)$ 는 일주기 과정의 진폭의 변조를 나타냅니다.

피로에서의 일주기 리듬을 포착하기 위해 모델에서 동적이지 않은 네 번째 프로세스가 포함되었습니다.

일주기 과정을 나타내는 $c(t)$ 입니다.

모델을 구성하는 방정식은 연결된 1차 상미분 방정식(ODE)을 기준으로 공식화되었으며 표 1에 나와 있습니다. 상태 변수 $p(t)$ 는 예측되는 메트릭의 단위, 즉 PVT의 실수 수(반응 시간 500ms) 또는 KSS의 졸음 등급을 기준으로 표현됩니다. 매개변수 pf 는 해당 메트릭의 최저값을 나타내며 PVT 실수의 경우 $pf = 0$ 이고 KSS 졸음의 경우 $pf = 1$ 입니다. 표 1의 방정식은 이전에 제공된 모델 방정식 (McCauley et al., 2013) 을 간단하게 재구성한 것이며 PVT의 경우 정확히 동일함을 쉽게 보여줄 수 있습니다.

PVT 성능과 KSS 졸음을 동시에 예측할 수 있도록 모델 역학을 재조사한 것은 모델의 대부분의 매개변수가 신경생물학적 과정을 설명하고 그 역학이 계량적으로 독립적이어야 한다는 가정에서 근거였습니다. 구체적으로, 우리는 다음 매개변수를 이전에 추정된 값 (McCauley et al., 2013)으로 고정할 수 있다고 가정했습니다. 일주기 과정의 위상 위치, u ; 일주기 진폭 변조에 대한 각성 및 수면 특정 속도 상수, kw 및 ks ; 일주기 과정의 영향에 대한 각성 및 수면 특정 오프셋, lw 및 ls ; 항상성 과정의 평형 상태 변조에 대한 증가 속도, gw ; 이 변조 과정의 영향에 대한 각성 및 수면 특정 스케일링 인자, bw 및 bs . 또한, 빛/어둠 주기의 지속 시간이 $T = 24$ 시간이며, 일주기 과정이 빛/어둠 주기에 동조되어 일주기 주기가 $s = 24$ 시간이라는 기존 가정 (McCauley et al., 2009, 2013) 을 유지했습니다. 따라서 KSS 졸음을 모델링하기 위해 추정해야 할 네 가지 지표 특정 매개변수만 남았습니다. 항상성 증가 및 소실 속도(aw 및 as), 일주기 과정 진폭의 점근적 최댓값(상한값), n , 그리고 분기 역치(Wc)입니다.

2.2. 데이터 세트

우리는 두 개의 양상을 데이터 세트를 형성하는 공개된 데이터를 활용했습니다. 첫 번째는 A1~A3의 세 개의 실험실 연구 데이터 세트로 구성되고 교정(즉, 자유 모델 매개변수 추정)에 사용되었습니다. 두 번째도 B1~B3의 세 개의 실험실 연구 데이터 세트로 구성되고 검증에 사용되었습니다. 이것은 이전에 사용된 것과 동일한 데이터 세트 (McCauley et al., 2013)이지만 PVT 데이터에서 모델링 목적으로 이전에 사용되지 않은 KSS 데이터로 초점을 옮겼습니다. 아래에서 교정 및 검증 연구에 대해 간략하게 설명합니다. 더 포괄적인 설명은 아래에 인용된 출처 출판물에서 찾을 수 있습니다. 각 연구에서 KSS는 참가자에게 이전 5분 동안의 졸음을 설명하도록 요청했고 (Åkerstedt et al., 2014), 사용된 PVT 버전은 원래 설계한 대로 (Dinges & Powell, 1985) 이전에 설명한 대로 (Lim & Dinges, 2008) 작업 기간이 10분이었습니다. 참가자들은 실험실 내의 별도의 방에서 방해받지 않고 이러한 평가를 완료했습니다.

연구 프로토콜은 펜실베이니아 대학 또는 워싱턴 대학의 기관 검토 위원회에서 사전에 승인되었습니다.
인턴 주립대학교. 각 참가자는 참여 전 서면 동의를 제공했습니다.

연구 A1: 완전 수면 부족 및 지속적인 수면 제한. 이 연구 (Van Dongen et al., 2003) 에서 $N = 45$ 명의 건강한 성인(연령대 21~38세, 여성 13.3%)은 88시간의 완전 수면 부족($n = 12$)에 배정되거나 세 가지 14일 수면 제한 조건 중 하나에 무작위로 배정되었습니다. 즉, 하루 4시간 수면 기회($n = 12$), 하루 6시간 수면 기회($n = 13$), 하루 8시간 수면 기회($n = 8$)입니다. 이전에 포함되었던 (McCauley et al., 2013) 두 명 (한 명은 완전 수면 부족 조건, 다른 한 명은 하루 4시간 수면 조건)은 KSS 데이터가 없었고, 여기에 사용된 45명의 피험자에도 포함되지 않았습니다.

각 조건은 2~3일의 기준일로 시작되었으며, 각 일마다 8시간의 수면 시간이 주어졌습니다(모델 보정에는 사용되지 않았습니다). 완전 수면 부족 조건에 배정된 참가자들은 연구 종료 시 다양한 용량의 회복 수면을 제공받았습니다(모델 보정에는 사용되지 않았습니다). 부분 수면 부족 조건에 배정된 참가자들은 2일 동안

표 1
생물수학적 정의를 위한 상미분방정식(ODE)
모델. 모델 매개변수는 표 2에 설명되어 있습니다.

| | | |
|------|---|---|
| (1가) | $\frac{dp}{dt} = \frac{1}{4} aw \frac{1}{2} p \delta t p pf bbu \delta t p gw \delta t p$ | 깨어 있는 동안 |
| (1b) | $\frac{dp}{dt} = \frac{1}{4} as \frac{1}{4} dt du \delta t p$ | 수면 중 $p \delta t p pf bsu \delta t p gs \delta t p$ |
| (2가) | $\frac{1}{4} gwu \delta t p dt$ | 깨어 있는 동안 |
| (2b) | $\frac{du}{dt} = \frac{1}{4} dt \frac{1}{4} WcT$ | 수면 중 $p p p 1$ |
| (3가) | $\frac{C}{dt} = \frac{1}{4} kwj \delta t p 1$ | 깨어 있는 동안 |
| (3b) | $\frac{C}{dt} = \frac{1}{4} ks j \delta t p dt c \delta t p$ | 수면 중 |
| (4) | $\sin 2 p t u$ | |
| (5a) | $gw \delta t p \frac{1}{4} j \delta t p c \delta t p p lw$ | 깨어 있는 동안 |
| (5b) | $gs \delta t p \frac{1}{4} j \delta t p c \delta t p p ls p gw$ | 수면 중 $\frac{ASBS}{WcT}$ |

14일간의 수면 제한 후 8시간씩 회복 수면을 취했습니다. 모든 참가자는 매일 오전 7시 30분에 기상했습니다. 조건. PVT와 함께 KSS는 오전 7시 30분부터 예정된 각성 시간 동안 2시간마다 시행되었습니다. 각 깨어 있는 기간의 처음 두 번의 테스트는 수면 무기력으로 인한 혼란을 피하기 위해 여기서는 생략되었습니다. 연구 A2: 야간 및 주간 교대 근무 일정 시뮬레이션. 본 연구 (Van Dongen, Belenky, & Vila, 2011)에서는 건강한 성인 27명을 대상으로 했습니다. (연령대 22~39세, 여성 51.9%)는 시뮬레이션된 야간 근무 일정(n = 13) 또는 시뮬레이션된 주간 근무 일정으로 무작위로 배정되었습니다. 일정(n = 14). 야간 근무 일정은 각각 10시간의 야간 수면 기회로 구성된 두 주기로 구성되었습니다. (22:00~08:00) 그 후 5시간 낮잠(15:00~20:00)을 자고, 그 후 밤에 깨어 있는 날이 5일, 낮에 10시간씩 4일을 잔다. (10:00~20:00) 그리고 5시간 낮잠(10:00~15:00)을 잤습니다. 일정은 10시간의 회복 수면으로 마무리되었습니다. 기회(22:00~08:00). 주간 근무 일정은 동일한 일수와 동일한 총 수면 시간을 가졌습니다. 하지만 밤에 잠을 잘 수 있는 시간은 10시간(22:00~08:00)에 불과했고 낮잠은 없었습니다. 야간 근무가 예정된 각 날 또는 주간 근무가 예정된 동일한 날 동안 4개의 테스트 블록으로 구성됨 PVT의 경우 30분 운전 시뮬레이터 세션과 PVT가 (a) 21:00 또는 (b)에 시작하여 3시간 간격으로 시행되었습니다. 야간 근무 일정에서 22:30(참가자 무작위 배정) 또는 (a) 09:00 또는 (b) 10:30(참가자 무작위 배정) 주간 근무 일정에 따라. KSS는 각 테스트 블록(해당되는 경우) 후에 시행되는 신경 행동 테스트 배터리의 일부였습니다. "a"로 무작위 배정되거나 "b"로 무작위 배정된 경우 각 테스트 블록 전에 배정되었습니다. PVT와 KSS도 함께 시행되었습니다. 연구의 다른 예정된 각성 기간 동안 3시간 간격으로 신경 행동 테스트 배터리의 일부로(시작 (09:30에)). 연구 A3: 지속적인 야간 수면 제한과 주간 낮잠. 이 연구 (Mollicone, Van Dongen, Rogers, & Dinges, 2008), N = 90명의 건강한 성인(연령대 21~49세, 여성 42.2%)을 18가지 수면 제한 조건 중 하나에 무작위로 배정했습니다. 각 조건은 야간 수면 기회의 네 가지 지속 시간(약 02:00): 4.2시간, 5.2시간, 6.2시간 또는 8.2시간. 세 가지 짧은 낮잠 시간은 일곱 가지 낮잠 시간 중 하나와 짝을 이루었습니다. 기회(14:00 중심): 0.0시간(즉, 낮잠 없음), 0.4시간, 0.8시간 또는 1.2시간; 또는 1.6시간 또는 2.0시간(4.2시간 및 5.2시간 야간 수면 시간만 해당); 또는 2.4시간(야간 수면 시간만 4.2시간). 18가지 조건 모두에 대한 일정은 2일 기준일로 시작하여 각 날마다 8.2시간의 야간 수면을 취하게 했고, 그 후 10 일 동안 해당 조건에 맞는 야간 수면을 취했습니다. 그리고 주간 수면 요법 - 처음 8개는 여기에 사용할 만큼 충분히 완전한 데이터를 가지고 있었습니다. 참가자는 n = 5명이었습니다. 조건별로. PVT와 함께 KSS는 예정된 각성 시간 동안 2시간마다 시행되었습니다. 모든 조건에 공통적이며 수면 관성의 영향을 받지 않는 08:10, 10:10, 12:10, 16:10, 18:10, 20:10에 여기서는 모델 교정에 사용됩니다. 연구 B1: 완전 수면 박탈과 회복. 이 연구 (Tucker, Whitney, Belenky, Hinson, & Van Dongen, 2010)에서는 N = 12명의 건강한 성인(연령대 22~37세, 여성 41.7%)이 완전 수면 박탈 실험에 참여했습니다. 2일 동안 10시간씩(22:00~08:00) 수면을 취하도록 기본 계획을 세웠습니다. 그 후 총 62시간 동안 수면을 취했습니다. 박탈. 이 연구는 두 번의 회복일로 마무리되었으며, 각 회복일에는 10시간의 수면 기회가 주어졌습니다(22:00~08:00). 이러한 회복일의 데이터가 포함된 것은 연구 A1의 완전한 수면 박탈 조건과 비교했을 때 연구 B1의 뚜렷한 특징입니다. PVT는 예정된 각성 시간 대부분 동안 오전 9시 30분부터 2시간 간격으로 시행되었습니다. 각 PVT는 KSS의 선행 및 후행에 따라 진행되었습니다. 여기서는 PVT에 선행하는 KSS만 사용합니다. 각 각의 첫 번째 테스트는 여기서는 수면의 무기력함으로 인한 혼란을 피하기 위해 마침표를 생략했습니다. 연구 B2: 야간 및 주간 낮잠과 함께 장시간 깨어 있는 시간. 이 연구 (Doran, Van Dongen, & Dinges, 2001)에서는 N = 14명의 건강한 성인(연령대 21~46세, 모두 남성)이 연구 A1의 88시간 총 수면 부족 조건과 동일한 연구 조건에 참여했습니다. 다만 12시간마다(02:45 및 14:45에 시작) 2시간의 낮잠 기회가 제공되었습니다. 88시간 동안 PVT와 함께 KSS는 예정된 시간인 오전 7시 30분부터 2시간 간격으로 시행되었습니다. 각성 상태. 각 예정된 각성 후 처음 두 번의 테스트는 수면으로 인한 혼란을 피하기 위해 여기서는 생략되었습니다. 관성. 연구 B3: 지속적인 수면 제한과 용량-반응 회복 수면. 이 연구 (Banks, Van Dongen, Maislin, & Dinges, 2010), N = 142명의 건강한 성인(연령대 22~45세, 여성 48.6%)이 다음과 유사한 수면 제한 실험에 참여했습니다. 연구 A1의 4시간 수면 제한 조건. 기준일 2일 후, 각 날마다 10시간씩 수면을 취한 후 수면을 제한했습니다.

5일 연속으로 매일 4시간씩 수면을 취했습니다. 다음 날 밤, 참가자들은 6가지 수면 기호 중 하나에 무작위로 배정되었습니다. 0시간($n = 13$), 2시간($n = 27$), 4시간($n = 29$), 6시간($n = 25$), 8시간($n = 21$), 10시간($n = 27$). 이 연구에서 모든 수면 기호는 오전 8시에 끝났습니다. PVT와 함께 KSS는 오전 8시에 시작하여 예정된 각성 시간 동안 2시간마다 시행되었습니다. 수면 관성으로 인한 교란을 피하기 위해 각 예정된 각성 후 처음 두 번의 테스트는 여기에서 생략되었습니다.

2.3. 모델 교정 및 검증

연구 A1~A3 및 B1~B3의 모든 참가자의 각 테스트 시합에 대해 KSS(범위: 1~9)에서 졸음에 대한 자가 평가가 수집되었습니다. 데이터는 동일한 연구 조건에서 개인별로 시점별로 평균화되었습니다. 0일은 수면 손실 또는 수면 대체의 첫날 전날 연구일 또는 대조군의 경우 동등한 날로 정의되었습니다. 연구 A1(4개 조건)에는 427개의 그룹 평균 데이터 포인트가 있었고, 연구 A2(2개 조건)에는 96개, 연구 A2(18개 조건)에는 972개, 연구 B1(1개 조건)에는 31개, 연구 B2(1개 조건)에는 28개, 연구 B3(6개 조건)에는 317개가 있었습니다.

네 개의 자유 매개변수 aw , as , n , Wc 의 교정(즉, 피팅)은 고성능 컴퓨팅 클러스터에서 구현된 체인 길이 911,123(100만 반복, 9% 가각율)의 Metropolis-Hastings 유형 Markov chain Monte Carlo(MCMC) 피팅 절차 (Haario, Laine, Mira, & Saksman, 2006)를 사용하여 데이터 세트 A1~A3를 사용하여 수행되었습니다. 초기값을 결정하기 위해 각 연구에서 기준일의 수면/각성 일정에 대한 평형 상태를 가정하고, 해당 일정을 사용하여 각성 시작일(허용 수준 $e = 1.49 \times 10^{-8}$)에 대한 정상 상태에 도달 때까지 해당 일정을 사용하여 여러 날에 걸쳐 반복했습니다.

모델 적합도는 설명된 분산과 평균 제곱근 오차(RMSE)를 사용하여 결정되었습니다. 모델은 각 데이터 세트의 총평균으로 정의되었습니다.

2.4. 모델 적용 시나리오

교정 및 검증 후, 확장된 모델을 화물 운항 기반 시나리오에 적용했습니다. 이 시나리오에는 이른 아침 비행 패턴이 포함됩니다. 조종사는 허브에서 화물 인도 장소(아웃스태이션)로 출발하여 다시 새로운 화물을 싣고 허브로 복귀합니다. 이러한 이른 아침(AM) 왕복 일정은 조종사가 야간 수면 시간을 줄이고 낮에 보충 수면을 취하도록 요구하지만, 아웃스태이션에서 잠깐 낮잠을 잘 수 있는 기회도 있을 수 있습니다. AM 왕복 일정은 일반적으로 규칙적이며, 일반적으로 주중에 3~4회의 연속 근무 기간을 포함합니다.

이 시나리오는 3~4일 연속으로 AM 왕복 비행을 하는 23명의 조종사가 측정한 수면을 바탕으로 작성되었습니다. 그림 1은 평균 현지 시간으로 오전 2시 55분인 가지에서 야간 출발 시간을 기준으로 첫 번째부터 세 번째 연속 AM 왕복 근무 기간 동안의 수면 분포를 보여줍니다. 그림에서 볼 수 있듯이 첫 번째 근무일 이전의 수면은 주로 야간에 취했습니다. 그러나 이른 아침 비행으로 인해 두 번째와 세 번째 근무일 이전의 야간 수면은 줄어들었고 조종사는 일반적으로 늦은 오전이나 이른 오후에 수면 시간을 추가하여 보충했습니다. 일부 조종사는 추가로 선택 위치에서 낮잠을 잤습니다(거기서 보낸 시간이 충분히 길다면). 이륙 10시간 전쯤의 이른 저녁 시간에는 거의 잠을 자지 못했습니다. 이 시간대는 일주기 리듬이 깨어 있는 데 큰 압력을 가하는 시기로, 이로 인해 잠을 자기가 어렵습니다 (Strogatz, Kronauer, & Czeisler, 1987).

그림 1에 표시된 데이터에서 모델링에 사용할 시뮬레이션된 근무 및 수면 일정을 구성했으며 이는 그림 2에 나와 있습니다. 시나리오는 4개의 연속된 7시간 야간 근무 기간(03:00~10:00)이 있는 주를 특징으로 합니다. 각 근무 기간 전에는 4시간의 단축된 저녁 수면 기간(21:00~01:00)이 있습니다. 각 근무 기간 다음에는 3시간의 따라잡기 낮잠 기간(11:00~14:00)이 있는데, 시뮬레이션의 목적상 이는 재량으로 간주됩니다(즉, 낮잠을 자거나 건너뛸 수 있음). 외근지에서 낮잠을 자지 않습니다. 4개의 연속된 야간 근무 후에 8시간마다 3개의 야간 회복 수면 기간이 가정됩니다(22:00~06:00). 그 후에 시나리오가 반복된다고 가정합니다. 첫째 주 이전의 기준 수면 시간은 매일 8시간(22:00~06:00)으로 가정합니다.

3. 결과

3.1. 모델 교정

확장된 모델은 연구 A1~A3의 KSS 데이터셋을 기반으로 보정되었으며, 이 데이터셋에 대한 모델의 적합도는 모델이 수면 부족, 지속적인 수면 제한, 회복 수면, 모의 야간 근무, 그리고 낮잠 등 다양한 수면 주기에 걸쳐 주관적인 졸음의 시간적 동태를 얼마나 잘 포착하는지에 대한 통찰력을 제공합니다. 보정 결과는 확장된 모델에 대한 적절한 예측 정확도를 보여주었으며, 연구 A1~A3의 KSS 졸음 분산의 40.4%를 설명할 수 있었고, 전반적으로 만족스러운 적합도(RMSE: 1.01)를 나타냈습니다. 그림 3과 4를 참조하십시오.

그림 3은 완전 수면 박탈 실험과 지속적인 수면 제한을 포함하는 세 가지 조건을 포함하는 연구 A1의 네 가지 조건에 대한 보정 모델의 예측을 보여줍니다. 예상대로, 이 모델은 완전 수면 박탈 시 KSS 졸음에 대한 각성 시간(항상성 과정)과 하루 중 시간대(일주기 과정)의 영향 간의 상호작용을 포착했습니다 (그림 3, 왼쪽 상단, 검은색 곡선). 또한, 이 모델은 지속적인 수면 제한 조건에서 수면 기호 용량(하루 4시간, 6시간 또는 8시간) 간의 차이와 KSS 졸음 감소를 포착했습니다.

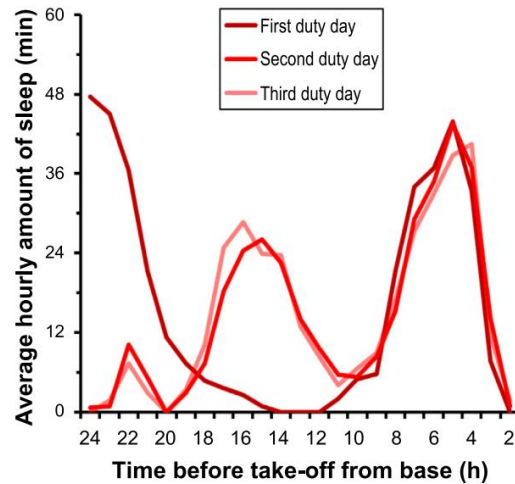


그림 1. 3일 연속 야간 근무일 동안 AM 왕복 비행을 한 조종사의 기지 이륙 전 24시간 동안의 평균 시간당 수면 시간.

두 회복일 (그림 3, 왼쪽 위, 색깔 있는 곡선). KSS 졸음 (그림 3, 왼쪽)과 PVT 수행 (그림 3, 오른쪽)에서 관찰된 지속적인 수면 제한 조건에서 시간적 역학의 현저한 차이가 있었는데, 이는 이전에 객관적인 수행력 결손을 예측하기 위해 개발된 모델 구조 (McCauley et al., 2013)를 유지하면서 주관적 졸음을 예측하도록 모델을 확장했다는 점을 고려하면 매우 잘 표현되었습니다. 그러나 완전 수면 박탈 3일차 (그림 3, 왼쪽 위, 검은색 곡선)와 14일 동안 하루 4시간으로 수면 제한을 실시한 기간의 후반부 (그림 3, 왼쪽 위, 빨간색 곡선)에는 주관적 졸음이 예상치 못하게 감소했지만, 이는 모델 예측 (그림 3, 왼쪽 아래)에 반영되지 않았습니다. 그럼에도 불구하고 확장된 모델은 연구 A1의 그룹 평균 KSS 데이터의 분산을 42.1% 설명하여 만족스러운 적합도(RMSE: 0.82)를 보였습니다.

그림 4는 연구 A2의 두 가지 조건에 대한 보정 모델의 예측을 보여줍니다. 이 조건은 야간 및 주간 교대 근무 일정을 시뮬레이션한 것입니다. 야간 교대 근무 조건에서, 이 모델은 KSS의 졸음 상태의 시간적 동태를 포착했습니다.

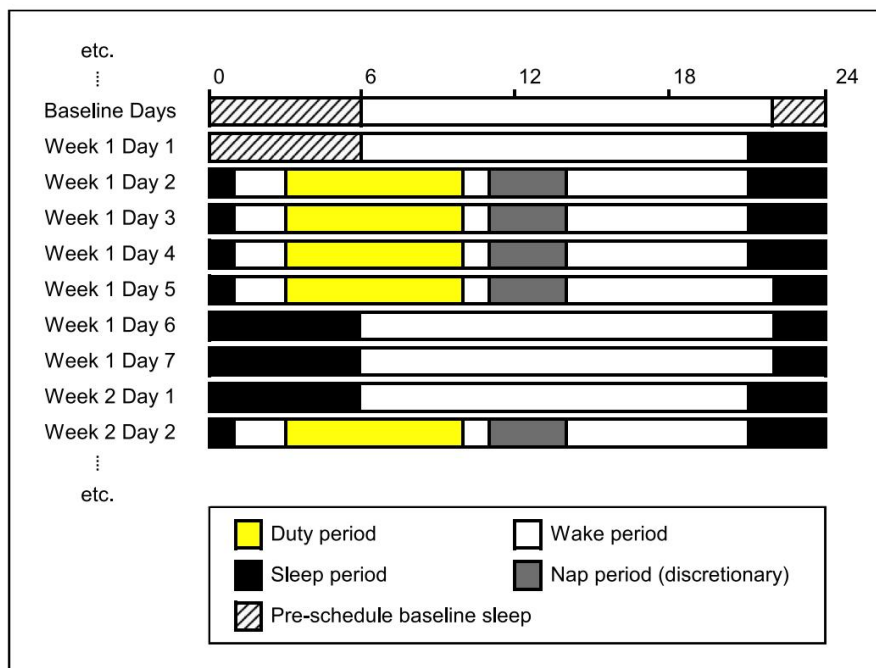


그림 2. 모델 적용에 사용된 전형적인 AM 왕복 페어링을 나타내는 시뮬레이션된 근무 및 수면 일정입니다.

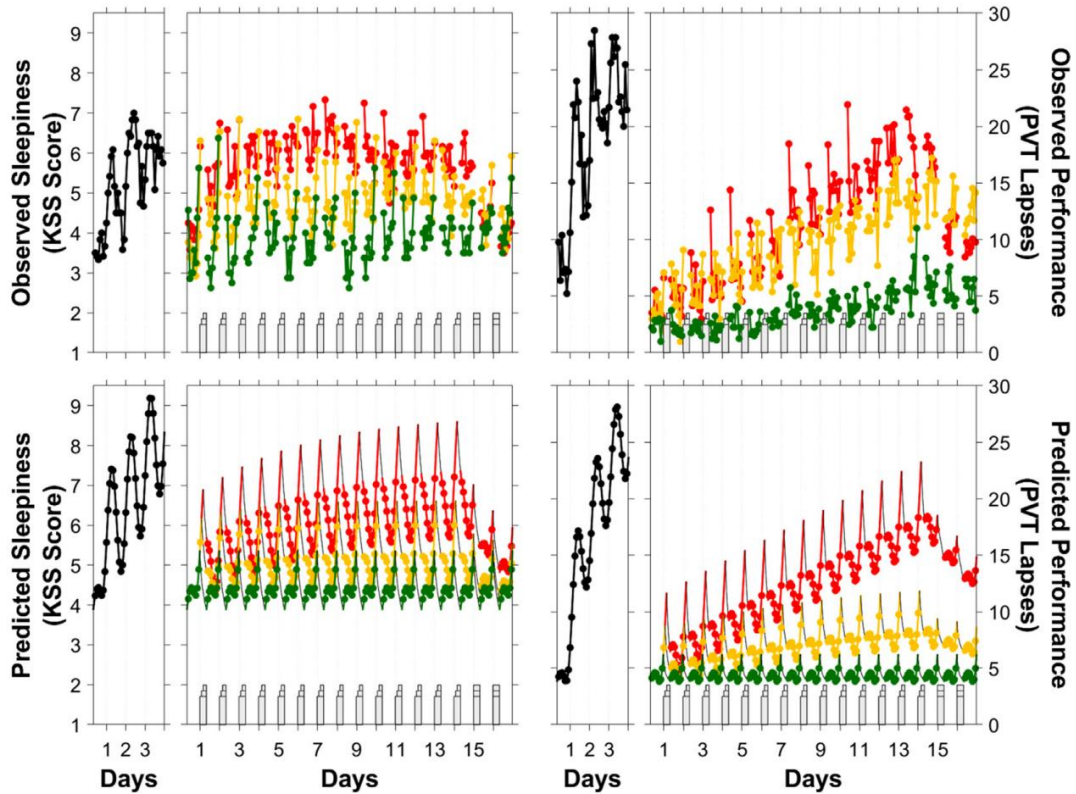


그림 3. 교정 연구 A1에서 총 수면 부족 및 지속적 수면 제한에 대한 관찰 및 예측. 왼쪽 패널은 KSS의 졸음 등급에 대한 그룹 평균 관찰(위)과 예측(아래)을 보여줍니다. 오른쪽 패널은 비교를 위해 PVT의 수면 부족 횟수에 대한 동일한 결과를 보여줍니다. 검은색 곡선은 88시간 동안의 총 수면 부족 결과를 보여줍니다. 빨간색, 노란색, 녹색 곡선은 각각 매일 4시간, 6시간, 8시간씩 14일 동안 수면 제한을 시행한 후, 8시간씩 두 번 회복 수면을 취한 결과를 보여줍니다. 아래 패널의 얇은 곡선은 연속적인 모델 예측을 나타내며, 회색 곡선은 수면 기간 동안의 (명목) 예측을 나타냅니다. 조건별 수면 기호는 회색 막대 표로 표시됩니다. 날짜는 마지막 기준일인 0일을 기준으로 번호가 매겨져 있습니다. 가로축의 체크 표시는 자정을 나타냅니다. 오른쪽 패널은 [McCauley et al. \(2013\)](#)의 자료를 허가를 받아 재작성했습니다. (그림 설명에 있는 색상에 대한 해석은 이 기사의 웹 버전을 참조하세요.)

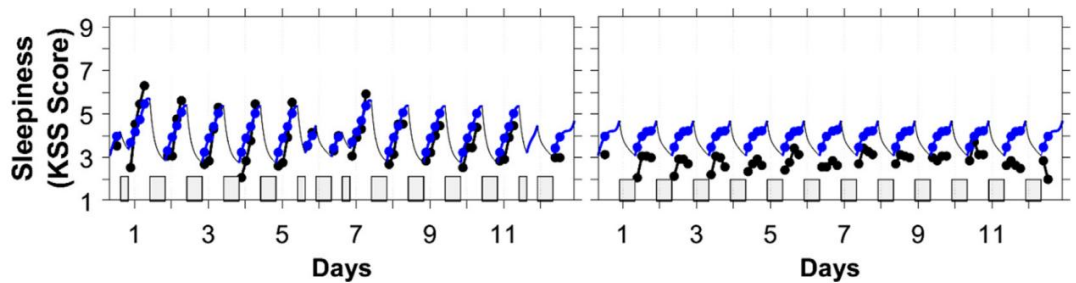


그림 4. 교정 연구 A2에서 시뮬레이션된 야간 및 주간 교대 일정에 대한 관찰 및 예측. 패널은 야간 교대 일정(왼쪽)과 주간 교대 일정(오른쪽)에서 KSS의 졸음 등급에 대한 그룹 평균 관찰치(검은색)와 예측치(파란색)를 보여줍니다. 파란색과 회색 곡선은 연속 모델 예측을 나타내며, 회색은 수면 시간 동안의 (명목) 예측을 나타냅니다. 수면 시간은 회색 막대 표로 표시됩니다. 날짜는 마지막 기준일인 0일을 기준으로 번호가 매겨져 있습니다. 가로축의 눈금 표시는 자정을 나타냅니다. (그림 범례의 색상 참조에 대한 해석은 이 논문의 웹 버전을 참조하십시오.)

일별 정확도가 높았습니다. 주간 근무 조건에서 KSS 졸음은 야간 근무 조건보다 낮게 정확하게 예측되었지만, 그럼에도 불구하고 다소 과대평가되었습니다. KSS 척도에서 낮은 졸음 점수 간의 차이는 미미하므로 ([Åkerstedt et al., 2014](#)), 이 효과는 실질적인 관련성이 거의 없을 것으로 보입니다. 확장된 모형은 연구 A2의 집단 평균 KSS 데이터 분산의 61.0%를 설명하여 만족스러운 적합도(RMSE: 1.02)를 보였습니다.

4가지 야간 수면 시간(4.2~8.2시간) 중 하나에 대한 지속적인 수면 제한을 8일간 시행하고 7가지 주간 낮잠 시간(0.0~2.4시간) 중 하나를 시행한 연구 A3의 18가지 조건에서는 KSS 점수에 큰 변동성이 없었습니다.

시간 경과에 따라 그리고 조건 간에도 차이가 있었습니다. 결과적으로, 확장된 모형은 본 연구의 그룹 평균 KSS 데이터 분산의 33.8%만을 설명했지만, 여전히 허용 가능한 적합도(RMSE: 1.08)를 나타냈습니다.

3.2. 모델 검증

교정된 모델은 연구 B1~B3의 KSS 데이터세트에 대해 검증되었으며, 이러한 데이터세트에 대한 모델의 적합도는 모델이 완전한 수면 부족, 지속적인 수면 제한, 회복 수면, 야간 및 주간 낮잠을 포함한 일정에 따른 주관적 졸음의 시간적 역학을 얼마나 잘 포착하는지에 대한 추가적인 통찰력을 제공합니다.

검증 결과, 확장된 모형에 대한 높은 예측 정확도가 입증되었으며, 연구 B1-B3을 합친 KSS 졸음증 분산의 74.2%를 설명할 수 있었습니다. 또한, 전반적으로 우수한 적합도(RMSE: 0.71)를 보였습니다. [그림 5](#)와 6을 참조하십시오.

[그림 5](#) (왼쪽)는 62시간의 완전 수면 박탈 후 2일의 회복일에 각각 10시간의 수면을 취하도록 한 연구 B1에 대한 모델의 예측을 보여줍니다. 완전 수면 박탈 기간 동안의 예측은 관측치에 정확하게 부합했지만, 회복일의 졸음은 다소 과대 예측하여 회복 수면의 회복 잠재력이 과소평가되었음을 시사합니다. 확장된 모델은 연구 B1의 집단 평균 KSS 데이터에서 분산의 75.9%를 설명하여 만족스러운 적합도(RMSE: 0.92)를 보였습니다.

[그림 5](#) (중간)는 88시간(3일 밤)의 장시간 각성 상태와 12시간마다 2시간씩 낮잠을 자는 연구 B2에 대한 예측을 보여줍니다. 예측은 전반적으로 관측치와 잘 일치했지만, 장시간 각성 상태 마지막 날의 졸음은 약간 낮게 예측했습니다. 이는 낮잠의 회복 잠재력이 과대평가되었음을 시사하며, 수면 중 회복을 다소 더 강하게 조절하는 모델이 더 효과적일 것임을 시사합니다. 이러한 단점에도 불구하고, 확장된 모델은 연구 B2의 집단 평균 KSS 데이터 분산의 77.5%를 설명하여 우수한 적합도(RMSE: 0.76)를 보였습니다.

[그림 5](#) (오른쪽)와 [그림 6](#)은 하루 4시간으로 5일간 수면 제한을 실시한 후, 0~10시간 범위의 6가지 수면 기회 중 하나로 무작위 배정된 연구 B3에 대한 예측을 보여줍니다. KSS 졸음의 시간적 역학은 5일간의 수면 제한 기간 동안 잘 포착되었습니다 ([그림 5](#), 오른쪽). 그 다음 날의 용량-반응 패턴은 상당히 정확하게 예측되었지만, 0시간과 2시간 수면 기회에 대해서는 약간 과소평가되었고, 6시간, 8시간, 10시간 수면 기회에 대해서는 약간 과대평가되었습니다 ([그림 6](#)). 위에서 설명한 연구 B1과 B2에 대한 검증 결과와 마찬가지로, 이는 확장된 모델이 비교적 긴 회복 수면 기간의 회복 잠재력을 약간 과소평가하는 반면, 비교적 짧은 낮잠 수면 기간의 회복 잠재력을 약간 과대평가할 수 있음을 나타냅니다. 전반적으로 확장된 모델은 연구 B3의 그룹 평균 KSS 데이터의 분산을 73.5% 설명했으며, 적합도는 매우 우수했습니다(RMSE: 0.68).

3.3. 매개변수 추정

KSS 졸음에 대한 모델의 매개변수 추정치는 [표 2](#)에 제시되어 있습니다. 추정된 네 가지 매개변수의 표준 오차는 비교적 작아 매개변수가 잘 정의되어 있음을 나타냅니다. 이는 [그림 7](#)에 제시된 1차원 및 2차원 주변 확률 분포를 통해 뒷받침됩니다. 1차원 주변 확률 분포는 모두 정규분포에 가깝고, 쌍대 상관관계는 비교적 작습니다. 특히, w 와 n 사이의 상관관계만이 매개변수의 상호의존성이 미미함을 시사합니다(그러나 모델의 과대사정화 우려를 불러일으킬 정도는 아닙니다).

중요한 점은, 이 모델의 분기에 대한 임계 임계값이 $W_c = 22.0$ 시간으로 추정되었다는 것입니다. 이는 매일 예정된 각성 시간이 22.0시간 미만(즉, 24시간 하루 중 수면 기회가 2.0시간 이상)인 경우, KSS 졸음은 며칠에 걸쳐 점진적으로 안정적인 평형 상태로 수렴하는 반면, 매일 각성 시간이 이 임계 임계값을 초과하는 경우, KSS 졸음은 발산(즉, 증가)할 것으로 예측됨을 의미합니다. PVT 성능 저하의 경우, 임계 임계값은 이전에 20.2시간인 것으로 밝혀졌습니다 (McCauley et al., 2009). 다시 말해, 매일 각성 시간이 20.2시간에서 22.0시간 사이인 경우, KSS 졸음 예측에 대한 모델의 동작은 PVT 성능 예측에 대한 동작과 질적으로 다릅니다.

3.4. 모델 적용 예시

교정 및 검증 후, 확장된 모델을 사용하여 [그림 2](#)에 나타난 화물 항공편 운항에 대한 AM 왕복 일정의 3개 사이클에 걸쳐 PVT 성능과 KSS 졸음을 동시에 예측했습니다. 두 세트의 모델 예측이 생성되었는데, 한 세트는 3시간짜리 보충 낮잠을 전혀 자지 않았다고 가정했고, 다른 세트는 모두 잤다고 가정했습니다.

[그림 8](#)은 KSS의 졸음 점수와 PVT의 휴식에 대한 확장 모델의 예측을 비교하며, 두 예측 세트를 병치합니다. 예상대로, 오전 왕복 일정은 근무 주기 사이의 회복일에 비해 야간 근무로 인한 피로를 유발할 것으로 예측되었습니다. 조종사가 따라잡기 낮잠 기회를 활용한다고 가정했을 때, KSS 예측과 PVT 예측 모두 근무일과 근무 주기에 걸쳐 미미한 피로 누적만을 나타냈습니다. 반면, 따라잡기 낮잠을 취하지 않을 경우, KSS 예측과 PVT 예측 모두 각 근무 주기 내 근무일에 걸쳐 피로가 꾸준히 누적됨을 나타냈습니다. 더욱이, PVT 예측은 근무 주기에 걸쳐 점진적인 손상 누적을 나타냈지만, KSS 예측에서는 이러한 현상이 나타나지 않았습니다.

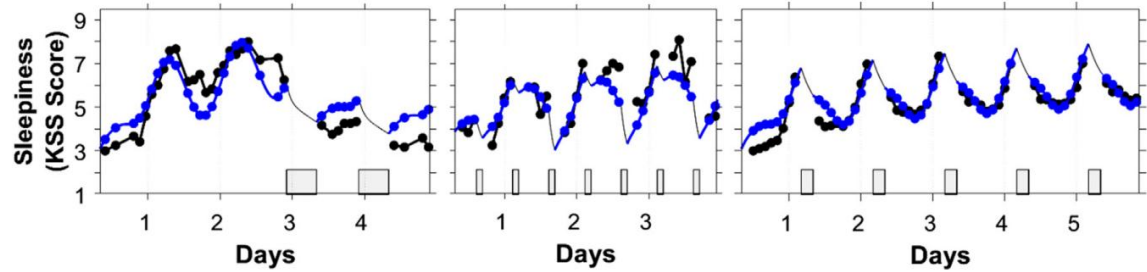


그림 5. 검증 연구 B1-B3에 대한 관찰 및 예측. 패널은 그룹 평균 관찰(검정색)과 예측(파란색)을 보여줍니다. 전체 수면 부족 및 회복 일(왼쪽), 낮과 밤 낮잠을 자면서 깨어 있는 시간이 길어짐(가운데)에 따른 KSS의 줄음 등급 그리고 지속적인 수면 제한(오른쪽). 파란색과 회색 곡선 조각은 연속적인 모델 예측을 나타내며, 회색은 (영역상의) 예측을 나타냅니다. 수면 기회 동안, 수면 기회는 회색 막대로 표시됩니다. 날짜는 마지막 기준일인 0일을 기준으로 번호가 매겨집니다. 체크 표시를 하세요. 가로축의 표시는 자정을 나타냅니다. (이 그림의 색상 참조에 대한 해석은 이 그림의 웹 버전을 참조하십시오. 기사.)

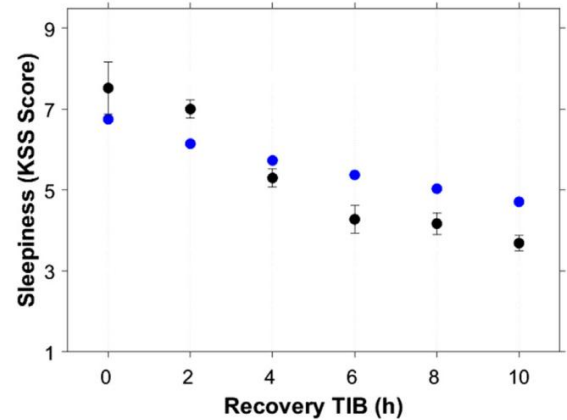


그림 6. 검증 연구 B3에서 5일간 지속된 수면 제한에 따른 용량-반응 수면 기회에 대한 예측. 가로축은 수면 제한 5일 후, 하루 4시간으로 다음 날의 수면량(침대에 누워 있는 시간, TIB). 세로축은 KSS에서 졸음 정도를 평균화한 값을 나타냅니다. 이후 각성 시간 2~14시간. 그래프는 그룹 평균 관찰치와 표준 오차(검정색) 및 해당 예측치(파란색)를 보여줍니다. (이 그림 설명에 있는 색상에 대한 참조를 해석하려면 이 기사의 웹 버전을 참조하십시오.)

4. 토론

생물수학적 피로 모델은 상업용 항공 분야에서 피로 위험 관리 프로그램 및 시스템의 일부로 널리 사용되고 있습니다. 다양한 응용 분야 중에서도 생물수학적 모델은 다음과 같은 문제를 전향적으로 예측하는 데 사용될 수 있습니다. 피로는 일정 변경이나 피로 대책의 전략적 배치를 통해 사전에 예방될 수 있습니다. (Rangan et al., 2013; Van Dongen & Belenky, 2012). 이 전략의 효과는 다음에 대해 회고적으로 확인할 수 있습니다.

표 2
KSS 졸음에 대한 모델의 매개변수와 제약 및 해석, 추정치, 추정치의 표준 오차
4개의 자유 매개변수.

| 매개변수 | 강제 | 해석 | 추정 | 표준 오차 |
|------------------------------|------|---|-----------|----------|
| α_W | >0 | 각성 중 p에 대한 항상성 구축물, 수면 중 p에 대한 항상성 소실률, 일주기 변 | 0.22/시간 | 0.01/시간 |
| $\ln n$ | >0 | 조 진폭의 점근적 최대값, 분기점에 대한 일계 암계값, u의 영향에 대한 | 0.037/시간 | 0.004/시간 |
| γ | >0 | 스케일링 인자, 각성 중 일주기 과정의 오프셋, 수면 중 일주기 과정의 오프셋, 일주기 과정 | 0.51/시간 | 0.02/시간 |
| W_c | >0 | 의 위상, (자정을 기준으로 한) 일주기 진폭 변조에 | 22.02시간 | 0.01시간 |
| $b_w = b_s \text{ gov } m_w$ | 고정 고 | 대한 속도 상수, 일주기 주기, 빛/어둠 주기 | 0.26/시간 | |
| | 정 고 | 의 지속 시간 | 0.0074/시간 | |
| | 정 고 | | 0.33 | |
| τ | 정 고 | | 1.5 | |
| / | 정 고 | | 21.2시간 | |
| $k_w = \text{개}$ | 정 고 | | 0.49/시간 | |
| τ_c | 정 고정 | | 24시간 | |
| 타 | | | 24시간 | |

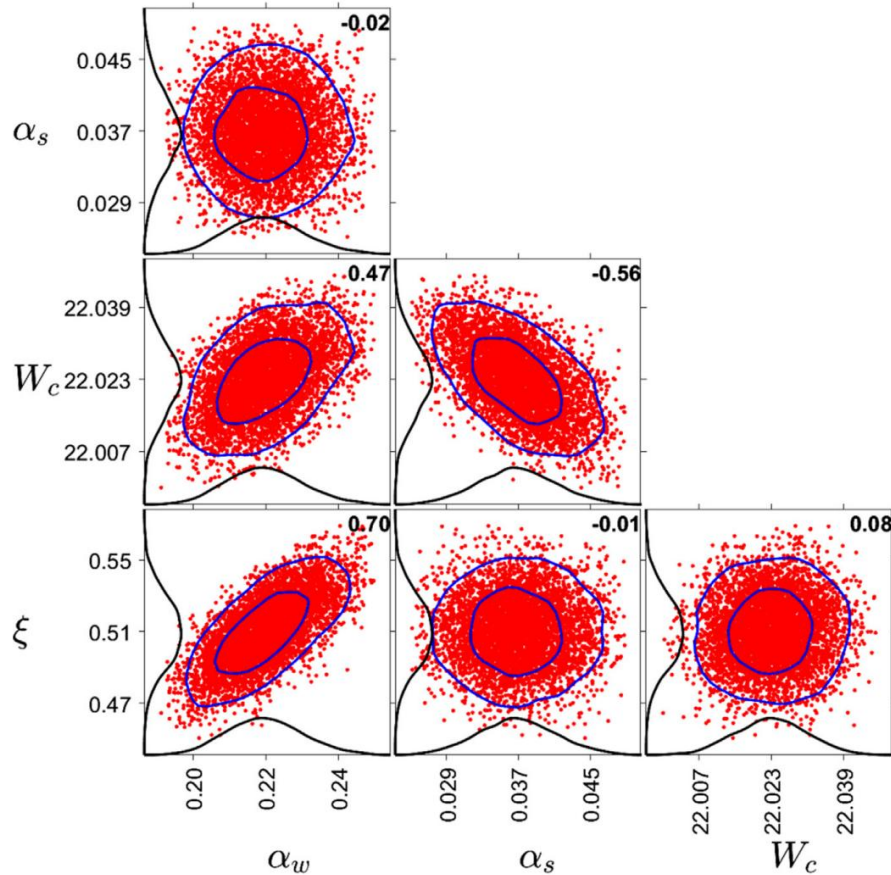


그림 7. KSS 모델의 네 가지 자유 모수에 대한 1차원 및 2차원 주변 확률 분포. 표 2에서 볼 수 있듯이, α_w 는 각성 중 항상성 증가율, α_s 는 수면 중 항상성 소실율이며, W_c 는 분기점의 임계 역치, n 은 일주기 변조의 접근적 진폭입니다. 빨간색 점은 MCMC 체인에서 추정된 모수 쌍입니다. 빨간색 점 구름 위의 파란색 곡선은 대략 50% 및 95% 신뢰도 영역의 윤곽을 나타냅니다. 축에 고정된 검은색 곡선은 1차원 주변 확률 분포입니다. 눈금은 평균과 평균에서 두 표준 오차를 기준으로 합니다. 굵은 글씨로 표시된 숫자는 MCMC 체인에서 도출된 모수 추정치 쌍 간의 상관관계입니다. (이 그림의 색상 참조에 대한 해석은 이 논문의 웹 버전을 참조하십시오.)

피로 보고서의 기초가 되는 피로는 일반적으로 졸음에 대한 자가 평가를 포함합니다 (Gander et al., 2014). 이 접근법에는 졸음에 대한 자가 평가가 피로 관련 수행 및 안전 위험에 대한 신뢰할 수 있는 지표를 제공한다는 암묵적인 가정이 있지만, 실험실 및 현장 연구에 따르면 주관적 졸음과 객관적 수행 능력 저하의 시간적 역학은 근본적으로 다릅니다 (Belenky et al., 2003; Mollicone et al., 2010; Sparrow et al., 2016; Van Dongen et al., 2003, 2011). 이는 만성적인 수면 부족 또는 수면 대체와 관련된 상황에서 특히 두드러지며, 급성 완전 수면 박탈 시에는 관찰되지 않으므로 천장 효과의 아티팩트일 가능성이 낮습니다 (Van Dongen et al., 2003). 오히려, 졸음 척도에 대한 주관적인 참조 또는 지각된 맥락의 점진적인 변화 (Skeiky, Hudson, & Van Dongen, 출판 예정) 또는 장기간 수면이 부족할 때 자기 성찰의 신뢰도가 점진적으로 저하되는 것일 수 있습니다 (Van Dongen et al., 2003). 이러한 설명과는 별개로, 피로에 대한 주관적 평가와 객관적 평가 간의 불일치는 생물수학적 모델링 문헌에서 충분히 다루어지지 않았으며, 이는 모델 기반 피로 위험 관리 구현에 있어 잠재적으로 중대한 위험 평가 간극을 남겼습니다.

이 문제를 해결하기 위해, PVT에서 측정된 객관적인 수행 능력 저하를 예측하기 위해 이전에 개발된 생물수학적 피로 모델을 확장하여 KSS에서 측정된 주관적 졸음도 동시에 예측했습니다. 기저 신경생물학에 기반한 피로의 시간적 조절을 포착한 원래 모델 (McCauley et al., 2013)의 미분 방정식이 PVT에서 발생한 졸음에서 KSS 졸음으로 모델을 일반화하는 데 충분하며, 동시에 관련된 시간적 동역학 차이를 고려했음을 보였습니다. 네 개의 모델 매개변수만 재추정하면 되었는데, 세 개는 계량적 척도에 의존하는 매개변수이고 네 번째는 모델 동역학에서 분기점의 임계값을 나타냅니다. 이 분기점은 며칠에 걸쳐 어느 정도 적응하는 비교적 적은 양의 수면 손실이 있는 일정과 피로 수준이 증가하는 심각한 수면 손실이 있는 일정에 대한 모델의 행동을 구분합니다 (McCauley et al., 2009).

특히 PVT의 경우 분기는 이전에 하루 평균 깨어 있는 시간 이 $W_c = 20.2$ 시간일 때 발생하는 것으로 추정되었지만, KSS의 경우 분기는 그보다 약 2시간 더 큰 임계값인 하루 평균 깨어 있는 시간이 $W_c = 22.02$ 시간일 때 발생하는 것으로 추정되었습니다.

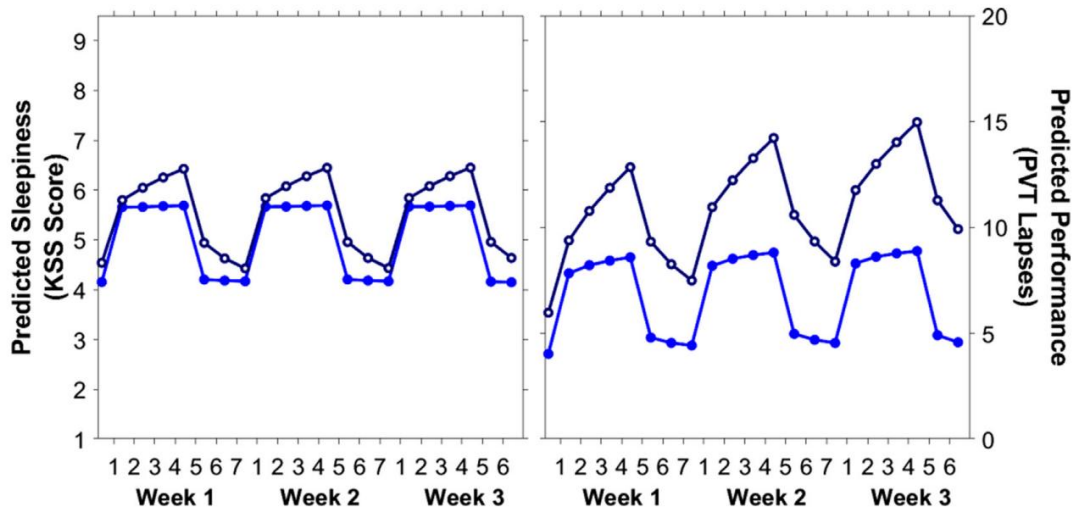


그림 8. 화물기 운항에서 시뮬레이션된 AM 왕복 일정의 세 주기에 걸쳐 확장된 모델의 일별 예측. 그래프는 그림 2에 제시된 일정의 매일 오전 10시(근무 종료 시간)에 KSS(왼쪽)의 주관적 졸음 점수와 PVT(오른쪽)의 객관적 수행(실수)을 보여줍니다. 이는 필요에 따라 낮잠을 자지 않거나(진한 파란색, 열린 원) 또는 모든 낮잠을 자는 경우(연한 파란색, 닫힌 원)를 가정한 것입니다. (이 그림 범례의 색상 참조에 대한 해석은 이 기사의 웹 버전을 참조하십시오.)

이는 지속적인 수면 제한에 대한 실험실 연구에서 관찰된 시간적 동태와 일치합니다. 이 연구에서는 PVT(Perfect Blood Test)로 객관적으로 측정했을 때, 각성 시간 이 하루 21시간 이상으로 연장된 날에 걸쳐 피로 축적이 초선형적으로 증가하는 것으로 나타났습니다 (Belenky et al., 2003; Van Dongen & Dinges, 2003). 각 성 시간이 하루 21시간 이상으로 연장된 날에는 주관적 졸음증에 대한 이러한 초선형적 증가가 관찰되지 않았습니다 (Belenky et al., 2003). 그러나 피로에 대한 객관적 및 주관적 측정 모두 사람들이 완전히 수면을 박탈당한 날에 걸쳐 증가하는 것으로 나타났습니다 (Van Dongen et al., 2003). 따라서 피로에 대한 객관적 측정과 주관적 측정 사이의 분기점 차이의 의미는 하루 2~3.8시간의 수면 단축 일정에 가장 크지만, 운영 환경에서 보다 일반적인 일정에도 차등적 시간 역학의 효과가 관련성이 있음을 보여주는 것이 야간 화물 비행 일정에 대한 시뮬레이션 (그림 8)입니다.

시뮬레이션에서 KSS 졸음과 PVT 격차를 동시에 예측한 결과, 오전 왕복 일정 중 3시간의 따라잡기 낮잠을 활용하거나 포기한 가상의 사례를 병치하여 주관적인 졸음 평가만 고려하면 지속적인 수면 부족의 장기적인 결과와 낮잠의 장기적인 이점을 드러내지 못할 수 있음을 보여주었습니다. 다시 말해, 24시간 운영되는 사람들이 만성 수면 부족으로 인한 피로 누적과 따라잡기 낮잠의 피로 대책 가능성을 주관적으로 과소평가할 가능성을 보여줍니다. 한편으로는 피로 교육과 모범 사례 보급(예: 현장 따라잡기 수면을 촉진하는 프로그램 (Rangan et al., 2020))의 필요성을 강조하고, 다른 한편으로는 피로 위험 관리에서 주관적인 졸음 추정치에만 의존하지 않는 것의 중요성을 강조합니다. 이 논문에 설명된 확장된 모델의 한 가지 장점은 주관적인 졸음과 피로로 인한 객관적인 성과 저하 사이의 격차를 원활하게 메우는 새로운 도구를 제공한다는 것입니다.

다양한 앙상블 데이터 세트에 대한 교정 및 후속 검증에서, 확장된 모델은 KSS 졸음에 대해 높은 예측 정확도를 보였으며, PVT 성능 저하에 대해서도 높은 예측 정확도를 유지하는 것으로 나타났습니다. 그러나 3일간의 완전한 수면 부족 후 도달한 최고 수준의 피로 또는 7일 이상 하루 4시간으로 수면 제한을 한 후 도달한 최고 수준의 피로에서 KSS 졸음이 설명되지 않는 감소가 나타났습니다 (그림 3). 실제 적용에서는 중요성이 제한적일 수 있지만, 수면 손실량이 증가함에 따라 이러한 예상치 못한 졸음 감소는 수면 조절의 생물학적 과정에 근거하여 이해할 수 없으며, 대신 높은 수준의 졸음에서 KSS 척도 사용의 편차를 반영할 수 있습니다. 졸음에 대한 자가 평가는 이전 활동, 동기 요인, 사회적 바람직성 (Skeiky et al., 출판 예정)과 같은 다양한 외부 요인의 영향을 받기 쉬운데, 이는 확장된 모델에서는 포착되지 않습니다.

전반적으로 우수한 예측 정확도 (그림 3-6)에도 불구하고, 이전 수면 손실 후 회복 수면 기간과 낮잠이 KSS 졸음에 미치는 회복 효과와 관련하여 확장된 모델의 정밀도는 개선의 여지가 있는 것으로 보입니다. 즉, 이 모델은 비교적 긴 회복 수면 기간의 회복 잠재력을 다소 과소평가할 수 있고 (그림 5, 왼쪽; 그림 6), 비교적 짧은 낮잠의 회복 잠재력을 다소 과대평가할 수 있습니다 (그림 5, 가운데; 그림 6). 또한 이 모델은 낮잠의 회복 잠재력에 대한 다소 더 강한 일주기 조절을 통해 이점을 얻을 수 있습니다 (그림 5, 가운데). 일주기 타이밍 외에도, 이전 수면 손실에서 회복되는 용량-반응 역학은 수면/각성 이력의 단기 및 장기 측면 모두에 따라 달라지므로 (McCauley et al., 2009; Rupp et al., 2009), 이러한 문제를 조사하는 것은 어렵습니다.

본 논문에서 제시된 확장 모델은 현재 이용 가능한 대부분의 생물수학적 피로 모델과 마찬가지로 집단 평균 데이터를 기반으로 검증되었습니다. 따라서, 본 모델은 높은 변동성을 고려한 개별 예측을 제공하지 않습니다.

사람들의 피로 감수성 (Olofsen et al., 2010). 모델 개별화를 위한 발표된 알고리즘 (Cochrane, Ba, Klerman, & St. Hilaire, 2020; Liu, Ramakrishnan, Laxminarayan, Balkin, & Reifman, 2017; Van Dongen et al., 2007) 과 계산 능력의 지속적인 향상은 해결책을 제시하지만, 운영 환경에서는 일반적으로 생물수학적 모델 예측이 스케줄링 대안 간의 상대적 비교에 사용되므로 모델 개별화는 거의 무의미합니다 (Van Dongen & Belenky, 2012). 즉, 우리의 확장된 모델은 최근 발표된 다변량 베이저안 예측 접근법 (Kogan, Kalachev, & Van Dongen, 2016)을 통해 PVT와 KSS 데이터 중 하나 또는 둘 다를 기반으로 개별화될 수 있는데, 이는 두 결과의 뚜렷한 차등적 역할을 동시에 포착하는 모델을 갖는 또 다른 이점입니다. 피로 측정을 위한 다른 모델리티, 예를 들어 안구 측정 (Ahlström, Anund, Fors, & Åkerstedt, 2018; Fitzharris, Liu, Stephens, & Lenné, 2017) 및 다양한 다른 생리적 매개변수 (Sparrow, LaJambe, & Van Dongen, 2019) 의 가용성이 증가함에 따라, 이러한 매개변수는 PVT와 KSS 모두와 다른 개별화 특성을 가질 가능성이 높습니다 (Oonk, Tucker, Belenky, & Van Dongen, 2008). 이 접근법을 더욱 발전시키면 개별화된 피로 예측의 정확도를 더욱 향상시킬 수 있습니다.

확장된 생물수학적 피로 모델에 대한 향후 연구는 회복 수면 후 KSS 줄음 예측을 더욱 개선하는 데 중점을 둘 것입니다. 또한, 기존에 개발된 미분 방정식을 모델에 적용하여 PVT 수행에 대한 작업 부하의 영향을 포착하고 (Honn, Satterfield, McCauley, Caldwell, & Van Dongen, 2016), KSS로의 확장을 가능하게 할 것입니다. 또한, 수면 관성으로 인해 각성 직후 빠르게 사라지는 피로에 대한 KSS 및 PVT 결과 예측을 통합할 것입니다 (Dinges, 1990). 그러나 현재 모델은 이 부분을 다루지 않습니다. 또한, 시간대 변화 및 기타 일정에 대한 동적 조정을 포착하기 위해 일주기 과정을 개선할 계획입니다. 이는 일주기 과정이 고정된 명암 주기에 동조된다는 가정 (Stone et al., 2019)에 위배될 수 있습니다. 마지막으로, 현재 모델은 예정된 수면 시간을 기반으로 예측을 수행하지만, 실제 수면 시간을 측정하는 응용 분야에서 추가적인 예측 정확도를 제공하기 위해 수면 시간을 기반으로 모델을 재조정할 수 있습니다 (Riedy et al., 출판 예정). 모델 개발에 있어 이러한 계획된 추가 단계는 객관적 피로와 주관적 피로의 시간적 동역학 차이를 동시에 포착하는 현재의 유용한 발전을 유지하는 데 중점을 둘 것입니다.

경쟁 이해관계 선언

모델 확장은 Federal Express Corporation(FedEx)의 지원을 받았습니다. SR은 FedEx의 유급 직원이었습니다. PM, SMR 및 HPAVD는 과학적 조언과 연구를 위해 FedEx로부터 자금 지원을 받았습니다.

본 자료는 월터 리드 육군 연구소에서 검토되었습니다. 자료의 제시 및/또는 출판에 이의가 없습니다. 본 자료에 포함된 의견이나 주장은 저자의 개인적인 견해이며, 공식적인 것으로 해석되거나 육군성 또는 국방부의 견해를 반영하는 것으로 해석되어서는 안 됩니다.

감사의 말

교정 및 검증에 사용된 데이터 세트는 미국 국립보건원(NIH) 보조금 NR04281, 공군 과학연구국(AFSR) 보조금 F49620-95-1-0388, 그리고 NASA NCC 9-58을 통해 DFD에 수여된 국립우주생물의학연구소(National Space Biomedical Research Institute) 보조금, 연방자동차운송안전청(Federal Motor Carrier Safety Administration) 보조금 DTMC75-07-D-00006(HPAVD), 그리고 의회지시 의학연구프로그램(Congressionally Directed Medical Research Program) 보조금 W81XWH-05-1-0099(워싱턴 주립대학교(WSU))의 지원을 받은 연구에서 추출되었습니다. 매개변수 추정치는 WSU Health Sciences Spokane의 고성능 컴퓨팅 클러스터에서 실행되었습니다. 모델 확장은 Federal Express Corporation의 지원을 받았습니다. 본 논문의 내용은 반드시 해당 회사의 견해를 반영하는 것은 아닙니다.

참고문헌

Ahlström, C., Anund, A., Fors, C., & Åkerstedt, T. (2018). 운전자 졸음에 대한 일광과 어둠의 영향: 운전 시뮬레이터 연구. *Journal of Sleep Research*, 27 e12642.

Åkerstedt, T., Anund, A., Axelsson, J., & Kecklund, G. (2014). 주관적 졸음은 수면 부족과 각성 기능 저하를 나타내는 민감한 지표입니다. *수면 연구 저널*, 23, 242–254.

Åkerstedt, T., & Gillberg, M. (1990). 활동적인 개인의 주관적 및 객관적 졸음. *International Journal of Neuroscience*, 52, 29–37.

Banks, S., Van Dongen, HPA, Maislin, G., & Dinges, DF (2010). 만성 수면 제한 후 신경행동 역학: 회복을 위한 하룻밤의 용량-반응 효과. *Sleep*, 33, 1013–1026.

Belenky, G., Wesensten, NJ, Thorne, DR, Thomas, ML, Sing, HC, Redmond, DP, ... Balkin, TJ (2003). 성능 저하 패턴 및 수면 제한 중 회복 및 이후 회복: 수면 용량-반응 연구. *Journal of Sleep Research*, 12, 1–12.

Borbély, AA (1982). 수면 조절의 두 과정 모델. *Human Neurobiology*, 1, 195–204.

Cochrane, C., Ba, D., Klerman, EB, & St. Hilaire, MA (2020). 수면 손실과 수행 능력의 양상을 혼합 효과 모델. *이론 생물학 저널*, 509, 110497.

Daan, S., Beersma, DGM, & Borbély, AA (1984). 인간 수면의 타이밍: 일주기 삼박조율기에 의해 조절되는 회복 과정. *미국 생리학 저널(American Journal of Physiology)*, 246, R161–R178.

Dawson, D., Noy, YI, Härmä, M., Åkerstedt, T., & Belenky, G. (2011). 피로 모델링 및 작업 환경에서 피로 모델 활용. *사고 분석 및 예방*, 43, 549–564.

Dinges, DF (1990). 깨어 있습니까? 최면 상태에서의 인지 수행과 몽상. RR Bootzin, JF Kihlstrom, & DL Schacter (편), 『수면과 인지』(159-175쪽). 워싱턴 D.C.: 미국심리학회.

Dinges, DF (2004). 피로 및 성능에 대한 생물수학적 모델 개발의 주요 연구 쟁점. *항공, 우주 및 환경 의학*, 75, A181–A191.

Dinges, DF, & Powell, JW (1985). 지속적 작업 중 휴대용 단속 시각 RT 작업의 성능에 대한 마이크로컴퓨터 분석. *행동 연구 방법, 기기 및 컴퓨터*, 17, 652–655.

Doran, SM, Van Dongen, HPA, & Dinges, DF (2001). 수면 부족 중 지속적 주의력 수행은 상태 불안정성의 증거. Archives Italiennes de Biologie, 139, 253–267.

Fitzharris, M., Liu, S., Stephens, AN, & Lenné, MG (2017). 실시간 피로 관리에 있어 운전석 내 실시간 피드백과 외부 피드백의 상대적 중요성
세계 상업 운송 운영. 교통사고 부상 예방, 18, S71–S78.

Gander, P., Lamp, A., Nesthus, T., Mangie, J., Wykoff, D., Wu, L., & Belenky, G. (출간 예정) 피로 위험 관리에서 안전 사례 및 규제 준수를 위한 대안적 수단 평가. MH Kryger, T. Roth, & WC Dement (편). 수면 의학의 원리와 실제 (7판). 필라델피아, 펜실베이니아: Elsevier.

Gander, PH, Mangie, J., Van den Berg, MJ, Smith, AA, Mulrine, HM, & Signal, TL (2014). 피로 위험에 대한 승무원 피로 안전 성과 지표
관리 시스템. 항공, 우주 및 환경 의학, 85, 139–147.

Haario, H., Laine, M., Mira, A., & Saksman, E. (2006). DRAM: 효율적인 적응형 MCMC. 통계 및 컴퓨팅, 16, 339–354.

Honn, KA, Satterfield, BC, McCauley, P., Caldwell, JL, & Van Dongen, HPA (2016). 지역 항공사의 다중 이차적 피로 효과
운영. 사고 분석 및 예방, 86, 199–208.

Ingre, M., Van Leeuwen, W., Klemets, T., Ullvetter, C., Hough, S., Kecklund, G., ... Åkerstedt, T. (2014). 세 가지 프로세스 모델의 검증 및 확장
항공 운영의 경계 테세. PLoS ONE, 9 e108679.

Kogan, C., Kalachev, L., & Van Dongen, HPA (2016). 다변량 반복 측정 베이저안 예측 모델의 예측 정확도. 의학계산 및 수학적 방법, 4724395.

Lim, J., & Dinges, DF (2008). 수면 부족과 주의력 결핍. 뉴욕 과학 아카데미 연보, 1129, 305–322.

Liu, J., Ramakrishnan, S., Laxminarayan, S., Balkin, TJ, & Reifman, J. (2017). 통합 수행 모델의 실시간 개인화. Journal of Sleep
연구, 26, 820–831.

McCauley, P., Kalachev, LV, Mollicone, DJ, Banks, S., Dinges, DF, & Van Dongen, HPA(2013). 생물수학적 모델에서의 동적 일주기 조절
수면 및 수면 부족이 각성 시 신경행동 기능에 미치는 영향에 대한 모델. Sleep, 36, 1987–1997.

McCauley, P., Kalachev, LV, Smith, AD, Belenky, G., Dinges, DF, & Van Dongen, HPA (2009). 항상성 효과에 대한 새로운 수학적 모델
수면 부족이 신경행동 기능에 미치는 영향. 이론생물학 저널, 256, 227–239.

Mollicone, DJ, Van Dongen, HPA, Rogers, NL, Banks, S., & Dinges, DF (2010). 만성 수면 제한 시 시간대가 신경행동 기능에 미치는 영향. 항공우주환경의학, 81, 735–744.

Mollicone, DJ, Van Dongen, HPA, Rogers, NL, & Dinges, DF (2008). 신경행동학적 수행의 반응 운영 매핑: 우주 작전을 위한 분할 수면 스케줄의 타당성 검증. Acta Astronaut., 63, 833–840.

Olofsen, E., Van Dongen, HPA, Mott, CG, Balkin, TJ, & Terman, D. (2010). 개인 맞춤형 수면 발달에 대한 현재 접근 방식과 과제
및 성과 예측 모델. Open Sleep Journal, 3, 24–43.

Oonk, M., Tucker, AM, Belenky, G., & Van Dongen, HPA (2008). 과도한 졸음: 결정 요인, 결과 및 맥락. 국제 수면 저널
그리고 Wakefulness, 1, 141–147.

Rangan, S., Bowman, JL, Hauser, WJ, McDonald, WW, Lewis, RA, & Van Dongen, HPA (2013). 승무원 배치 및 운용에서의 통합 피로 모델링. Can Aeron Space Journal, 59, 1–6.

Rangan, S., Riedy, S.M., Bassett, R., Klinck, Z.A., Hagerty, P., Schek, E., ... Van Dongen, HPA (2020). 예측적 및 선제적 피로 위험 관리
상업 항공에서의 접근 방식. Chronobiology International, 37, 1479–1482.

Raslear, TG, Hursh, SR, & Van Dongen, HPA (2011). 인지 장애 및 사고 위험 예측. 뇌 연구 진전, 190, 155–167.

Riedy, SM, Hursh, SR, Dawson, D., Balkin, TJ, & Van Dongen, HPA (출간 예정). 수면, 졸음, 그리고 수행 예측 모델링. MH Kryger,
T. Roth, & WC Dement (편). 수면의학의 원리와 실제(7판). 필라델피아, 펜실베이니아: Elsevier.

Romig, E., & Klemets, T. (2009). 승무원 스케줄링에서의 피로 위험 관리. 항공, 우주 및 환경 의학, 80, 1073–1074.

Rupp, TL, Wesensten, NJ, Bliese, PD, & Balkin, TJ (2009). 수면 제한 후 회복 과정에서의 이점 실현. 수면,
32, 311–321.

Samn, SW, & Perelli, LP (1982). 승무원 피로도 추정: 공수 작전에 적용되는 기법. 보고서 SAM-TR-82-21. 브록스 공군 기지.

Satterfield, BC, & Van Dongen, HPA (2013). 작업성 피로, 수면 및 일주기 기전의 기저, 그리고 피로 위험 관리 접근법. 피로: 생물학, 건강 및 행동, 1, 118–136.

Skeiky, L., Hudson, AN, & Van Dongen, HPA (출간 예정). 졸음, 각성, 그리고 수행 능력에 미치는 일주기 리듬. MH Kryger, T. Roth, WC
치메(편집). 수면의학의 원리와 실제(7판). 필라델피아, 펜실베이니아: 엘스비어.

Sparrow, AR, LaJambe, CM, & Van Dongen, HPA (2019). 상업용 차량 운행 시 졸음 측정. 사고 분석 및 예방,
126, 146–159.

스페로우, AR, 몰리콘, DJ, 칸, K., 바텔스, R., 새터필드, BC, 리디, SM, ... Van Dongen, HPA (2016). 미국 상용차 운전자의 재시동 브레이크에 대한 자연주의적 현장 연구: 트럭 운
전, 수면 및 피로. 사고 분석 및 예방, 93, 55–64.

Stone, JE, Phillips, AJK, Ftouni, S., Magee, M., Howard, M., Lockley, SW, ... Postnova, S. (2019). 실제 환경에서 일주기 위상 예측을 위한 신경망 모델의 일반화 가능성. Scientific Reports, 9, 11001.

Strogatz, SH, Kronauer, RE, & Czeisler, CA (1987). 일주기 삼박 조율기는 매일 특정 시간에 수면 시작을 방해한다: 불면증에서의 역할. 미국
생리학 저널, 253, R172–R178.

Tucker, AM, Whitney, P., Belenky, G., Hinson, JM, & Van Dongen, HPA (2010). 수면 부족이 실행 기능의 해리된 구성 요소에 미치는 영향
기능. 수면, 33, 47–57.

Van Dongen, HPA, & Belenky, G. (2012). 모델 기반 피로 위험 관리. G. Matthews, PA Desmond, C. Neubauer, & PA Hancock (편), The
운전자 피로 핸드북(487–506쪽). 영국 파넘: 애쉬게이트 출판사.

Van Dongen, HPA, Belenky, G., & Vila, BJ (2011). 최적의 성능을 위한 재시작 휴식의 효능은 일주기 리듬에 크게 좌우된다.
타이밍. 수면, 34, 917–929.

Van Dongen, HPA, & Dinges, DF(2003). 수면부채와 누적된 과도한 각성. 수면, 26, 249.

Van Dongen, HPA, Maislin, G., Mullington, JM, & Dinges, DF (2003). 추가적인 각성 상태의 누적 비용: 용량-반응 효과
만성 수면 제한 및 완전 수면 박탈에 따른 신경행동 기능과 수면 생리. Sleep, 26, 117–128.

Van Dongen, HPA, Mott, CG, Huang, JK, Mollicone, DJ, McKenzie, FD, & Dinges, DF (2007). 개인의 인지 기능 장애에 대한 생물수학적 모델 예측 최적화: 항상성 및 일주기 과정에서 알려지지 않은 특성과 불확실
한 상태 고려. Sleep, 30,
1129년–1143년.