대한한의진단학회지 제30권 제1호 (2026년 10월)
The Journal of the Society of Korean Medicine Diagnostics. 2026;30(1):129-144.
[원저 Original Article]

AI 기반 데이터 융합을 통한 수면기록과 기상정보의 연계 분석: 융합 에이전트 개발 및 적용

손윤희[1]*, 김익태[1]
[1]한국한의학연구원

Integrative Analysis of Sleep Records and Meteorological Data Using AI-Based Data Fusion: Development and Application of a Fusion Agent

Yunhee Son[1]*, Icktae Kim[1]
[1]Korea Institute of Oriental Medicine

Abstract

Objectives : This study developed and applied an artificial intelligence (AI)-based data fusion agent to integrate repeated sleep records with public meteorological data and examine whether environmental context revealed additional sleep-related associations.

Methods : The analytic cohort included 811 participants with 13,728 daily chatbot-based sleep records. The agent performed local schema profiling, AI-based external-data recommendation, automated acquisition through a public API connector, and local data fusion. Daily observations from the Korea Meteorological Administration ASOS station in Daejeon were linked by survey date. Generalized estimating equations were used for repeated measures. Calendar month was additionally adjusted in sensitivity analyses, and false discovery rate correction was applied to exploratory constitution-by-weather interactions.

Results : All 13,728 records were exactly matched to meteorological data. In the primary model, each 5℃ increase in mean temperature was associated with a 2.13-minute decrease in sleep duration (95% CI -3.78 to -0.48, p=0.011), but this association was attenuated after month adjustment (p=0.227). The temperature-by-sex interaction remained significant after month adjustment (p=0.036). A precipitation-by-Sasang constitution interaction also remained significant (joint p=0.008; FDR-adjusted q=0.042). In Soyangin, sleep duration decreased by 3.35 minutes per 10-mm increase in precipitation (95% CI -5.31 to -1.40, p=0.001), whereas no significant slopes were observed in Soeumin or Taeeumin.

Conclusions : AI-assisted fusion of repeated sleep and public meteorological data enabled analysis of context-dependent sleep variation. The overall temperature association was sensitive to seasonal adjustment, whereas sex- and constitution-related interactions persisted and require independent replication.

Keywords : Artificial intelligence; Data fusion; Sleep diary; Meteorological data; Generalized estimating equations

---

* 교신저자 : Yunhee Son. KOREA INSTITUTE OF ORIENTAL MEDICINE. Room 206, Dasan Hall, 1672, Yuseong-daero, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea.
Tel: +82-10-3290-1120, E-mail: mellow211@kiom.re.kr
· 원고접수일 : 2026.09.13 / 심사완료일 : 2026.09.27 / 게재결정일 : 2026.10.03

1. 서론

수면은 건강상태를 단일한 시간량으로만 설명하기 어려운 다차원적 생활기능이다. 수면시간, 수면의 연속성, 수면의 시기, 주관적 만족도와 같은 요소는 서로 관련되면서도 각기 다른 정보를 제공하며, 개인의 수면을 이해할 때에는 평균 수준뿐 아니라 반복적으로 나타나는 변동과 생활 맥락을 함께 고려할 필요가 있다[1,2]. 챗봇 기반 수면일지는 이러한 정보를 일상생활에서 여러 날짜에 걸쳐 축적할 수 있어 일회성 설문보다 개인 내 변화를 관찰하는 데 유용하다. 특히 반복자료에서는 개인 간 차이와 개인 내 일별 변화를 구분하여 분석하는 것이 중요하다[3].

그러나 반복 수면자료만으로는 같은 사람이 서로 다른 날에 경험하는 수면 변화가 어떠한 외부 환경조건과 함께 나타나는지를 직접 평가하기 어렵다. 반복자료는 관측일이 명확하므로 동일 날짜의 공공 환경자료와 연결할 경우 개인 내 일별 변화와 외부 환경의 변화를 함께 분석할 수 있다. 따라서 수면자료의 분석 범위를 확장하기 위해서는 원자료에 포함되지 않은 외부 환경정보를 동일한 시간 기준에 따라 연결하는 데이터 융합 접근이 필요하다.

수면은 개인의 생리적·행동적 요인뿐 아니라 주변 환경의 영향을 받는다. 열환경은 체온조절과 수면-각성 조절에 관여하며, 고온 환경에서 각성과 수면구조가 변할 수 있다는 생리학적 근거가 보고되어 왔다[4,5]. 실제 생활환경을 대상으로 한 역학 연구에서도 야간 또는 외부 기온 상승과 수면시간 감소가 관찰되었다. 미국 자료를 이용한 연구는 높은 야간 기온과 수면부족의 관련성을 보고하였고[6], 68개국의 웨어러블 반복자료를 분석한 대규모 연구에서는 기온 상승이 수면시간 단축과 관련되며 일부 집단에서 그 관련성이 더 크게 나타날 수 있음을 제시하였다[7]. 2024년 체계적 문헌고찰 역시 실제 생활환경에서 높은 실내·외 기온이 전반적으로 수면의 양과 질 저하와 관련되는 경향을 정리하였다[8]. 반면 개인별 최적 온도와 반응 양상이 서로 다를 수 있다는 연구도 있어[9], 환경정보를 개인 반복자료와 직접 연결하여 분석할 필요가 있다.

연구자가 보유한 건강자료에 외부 공공데이터를 결합하는 과정은 단순한 파일 병합 이상의 작업을 요구한다. 원자료의 구조와 결합 가능한 시간·공간 키를 파악하고, 분석에 활용할 외부 데이터원을 탐색하며, 공식 출처의 API 사양을 확인하고, 서로 다른 자료구조를 대응시킨 뒤, 병합 결과의 품질을 검증해야 한다. 의료·건강 분야에서 인공지능(AI)은 예측모형뿐 아니라 정보교환과 업무흐름을 지원하는 기술로 활용될 가능성이 논의되어 왔다[10-13]. 동시에 건강데이터 활용에서는 재현성, 데이터 품질, 상호운용성 및 프라이버시가 중요하게 다뤄지고 있다[14,15,24]. 한의학 분야에서도 전자의무기록의 구조화와 진단·변증 정보를 활용한 인공지능 기반 표준화 환자 시스템 개발 등 데이터의 구조화와 활용 범위를 확장하려는 연구가 이루어지고 있다[22,23].

이에 본 연구에서는 로컬 데이터 구조 분석, AI 기반 외부 데이터 추천, 공식 공개 API를 통한 데이터 수집, 로컬 데이터 융합으로 이어지는 융합 에이전트(Fusion Agent)를 개발하였다. AI는 외부 데이터의 탐색과 융합 방법을 제안하는 단계에 활용하였으며, 실제 기상 관측값은 공식 공개 API에서 직접 수집하였다. 또한 원본 행 단위 데이터는 외부 AI 서비스로 전송하지 않고 데이터 구조를 요약한 정보만 AI 추천 단계에 사용하였다.

본 연구는 챗봇 기반 반복 수면자료에 기상자료를 결합하여 수면기록과 개인특성만으로는

직접 검토하기 어려운 환경적 맥락을 분석하고자 하였다. 연구목적은 첫째, AI 기반 융합 에이전트의 구조와 실제 적용 과정을 제시하고, 둘째, 811명에서 수집된 13,728건의 반복 수면자료에 설문일을 기준으로 기상청 ASOS 일자료를 결합하며, 셋째, 기상자료가 추가되었을 때 수면 변화와 기상요인의 관련성을 탐색하는 것이다. 기온 상승과 수면시간 감소의 관련성이 보고되어 왔으며[6-9], 수면특성 자체에서도 성별에 따른 차이가 알려져 있다[20,21]. 이러한 근거를 바탕으로 평균기온과 수면시간의 관련성과 그 관계가 성별에 따라 달라지는지를 주요 분석으로 검토하였다. 사상체질의학은 개인의 체질적 특성을 바탕으로 건강상태를 이해하는 한의학의 개인맞춤적 접근으로 활용되어 왔다[16,17]. 본 연구에서는 기존 조사에서 분류된 소양인, 소음인, 태음인 정보를 개인특성 변수로 활용하였으며, 기상요인과 수면 변화의 관련성이 체질군에 따라 달라지는지를 탐색적으로 분석하였다.

2. 연구방법

1) 연구설계 및 분석대상

본 연구는 대전둔산한방병원 및 한국한의학연구원 기관생명윤리위원회의 승인을 받은 기존 연구에서 수집된 챗봇 기반 반복 수면자료에 기상청의 외부 기상 관측자료를 연계한 후향적 2차 분석 연구이다. 일별 수면자료와 성별, 연령 및 사상체질 정보가 대상자 ID를 기준으로 연결 가능한 811명을 최종 분석대상으로 하였으며, 이들에게서 수집된 일별 수면기록은 총 13,728건이었다. 설문일은 2020년 10월 16일부터 2024년 8월 31일까지 분포하였고, 대상자별 일별 수면기록 수의 중앙값은 15회(IQR 15-16회, 범위 1-195회)였다. 대상자 구성은 남성 243명, 여성 568명이었으며, 사상체질은 소양인 107명, 소음인 580명, 태음인 124명이었다.

사상체질은 원자료 수집 연구에서 KS-15 기반 설문도구를 통해 기존에 판별된 정보를 활용하였으며, 본 연구에서는 체질을 새롭게 판정하지 않았다. 기존에 분류된 소양인, 소음인 및 태음인 정보를 개인특성 변수로 사용하였다.

분석에 사용된 수면자료는 챗봇 인터페이스를 통해 일상생활 중 수면상태를 반복적으로 자가보고한 자료이다. 주요 일별 변수는 수면시간, 수면 중 각성 횟수, 수면의 질, 활동시간, 좌식시간 및 수면 관련 시각정보였다. 수면 중 각성 횟수는 설문 응답값이 1부터 시작하도록 설정되어 있어, 실제 각성 횟수를 반영하기 위해 모든 응답값에서 1을 차감하여 분석하였다. 수면의 질은 0점이 가장 양호하고 3점이 가장 불량한 방향의 4점 척도로 기록되었다. 자료 품질 관리를 위해 일별 수면시간은 0분 이하 또는 720분을 초과한 기록을 제외하였으며, 이 기준을 적용한 후 수면시간 GEE 분석에 이용 가능한 기록은 13,626건이었다. 일별 수면진입시간은 일부 기록에서 누운시간과 잠든시간의 전후 관계가 일관되지 않아 반복측정 환경분석에는 포함하지 않았다.

원자료 수집 연구는 대전둔산한방병원 및 한국한의학연구원 기관생명윤리위원회의 승인을 받아 수행되었으며(IRB No. DJDSKH-17-BM-12, I-1703/002-002), 모든 연구대상자에게 연구 내용을 설명하고 서면동의를 받았다.

Table 1. 분석자료 구성 및 최종 분석대상

항목	값	분석상 의미
분석대상자	811명	개인특성 정보와 일별 수면자료 연결
일별 수면자료	13,728건	동일 대상자 반복측정
설문일 범위	2020-10-16 ~ 2024-08-31	기상자료 연계 기간
기록 수	중앙값 15회	IQR 15-16회, 범위 1-195회
성별	남성 243명 / 여성 568명	성별 상호작용 분석
사상체질	소양인 107명 / 소음인 580명 / 태음인 124명	개인특성 변수
수면시간 유효기록	13,626건	0분 이하 또는 720분 초과 제외
기상자료 정확 일치	13,728/13,728건 (100%)	설문일 기준 연결

2) AI 기반 융합 에이전트 개발

융합 에이전트(Fusion Agent)는 연구자의 로컬 엑셀 데이터를 시작점으로 외부 공공데이터의 탐색, 수집 및 병합을 하나의 파이프라인으로 수행하도록 개발한 Python 기반 로컬 실행형 소프트웨어이다. 시스템은 (1) 원자료 구조의 로컬 분석, (2) AI 기반 외부 데이터 추천, (3) 공식 공개 API를 통한 외부 데이터 수집, (4) 로컬 데이터 병합 및 품질검증의 네 단계로 구성하였다. AI의 확률적 추천 결과와 연구에 실제 사용되는 관측값의 수집 경로를 분리하여, 정형 공공데이터는 가능한 경우 공식 API에서 직접 수집하도록 설계하였다.

제1단계의 로컬 데이터 구조 분석에서는 pandas를 이용하여 업로드된 엑셀 파일의 변수명, 자료형, 결측률, 고유값 수, 수치형 변수의 기초통계 및 범주형 변수의 대표값을 산출하고 날짜, 지역, 범주, 식별자, 수치, 텍스트 등의 의미 유형을 추정하였다. 제2단계의 AI 융합 추천에서는 이러한 구조 요약과 사용자가 입력한 데이터 설명을 LLM에 전달하여 결합할 경우 분석 범위를 확장할 수 있는 외부 데이터 후보와 결합 키(join key)를 우선순위화하였다. AI 기반 외부 데이터 추천에는 Google의 Gemini 3.5 Flash 모델(model ID: gemini-3.5-flash)을 사용하였다. LLM에는 원자료의 변수명, 자료형, 결측률, 요약통계 등 스키마 수준의 정보와 사용자가 입력한 데이터 설명을 제공하였으며, 이를 바탕으로 연계 가능한 외부 데이터 후보, 결합 키 및 융합 방법을 추천하도록 프롬프트를 구성하였다. 제3단계의 자동 데이터 수집에서는 추천 결과가 사전 등록된 공개 API 커넥터와 일치할 경우 해당 기관의 API를 직접 호출하도록 구현하였다. 본 연구에서는 기상청 ASOS 공개 API 커넥터를 사용하여 관측자료를 수집하였으며, AI 웹 탐색 경로는 사용하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 AI 웹 탐색을 통해 수집한 자료의 출처 정확성이나 데이터 품질을 실증적으로 검증하지 않았으며, 분석에 사용한 기상 관측값의 출처는 기상청 공식 공개 API로 한정하였다. AI 웹 탐색 경로를 통한 자료 수집 및 출처 검증의 타당성은 향후 별도의 검증이 필요하다. 제4단계에서는 외부 레코드를 로컬 원자료와 병합하고 정확 일치, 유사 일치 및 미일치 건수를 포함하는 품질 리포트를 생성하였다.

날짜형 결합 키에는 유사 일치(fuzzy matching)를 적용하지 않았다. 예를 들어 2020-10-17과 2020-10-18은 문자열 형태가 유사하더라도 서로 다른 노출 날짜이므로, 날짜는 표준화한 후 정확 일치(exact matching) 방식으로만 연결하였다. 텍스트형 지역명과 같이 표기 차이가 발생할 수 있는 경우에만 유사 일치를 선택적으로 사용할 수 있도록 구현하였다. 또한 AI가 변수명을 실제 스키마와 다르게 반환하는 경우 문자열 유사도를 이용해 가장 가까운 실제 변수명으로 보정하고, 구조화된 출력의 해석 과정에서 오류가 발생하는 경우 재시도 및 오류 처리 절차를 적용하였다.

데이터 프라이버시 측면에서 제1단계와 제4단계는 네트워크를 사용하지 않으며, 제2단계에서 AI로 전달되는 정보는 변수명, 추정 자료형, 결측률, 요약통계 및 제한된 샘플값으로 구성된 스키마 수준의 요약이다. 이름, 연락처, 이메일, 상세주소 등 개인정보 가능성이 높은 변수는 샘플값 전송 대상에서 제외하였고, 원본 행 단위 수면기록은 AI API로 전송하지 않았다. 공개 API 호출 시 외부로 전달되는 값도 날짜범위와 관측지점 등 수집에 필요한 최소 정보로 제한하였다. 이에 따라 외부 AI 서비스로 전송되는 건강정보를 최소화하였다[14,15,24].



Figure 1. 융합 에이전트의 4단계 데이터 융합 파이프라인과 공공 API 커넥터 관리 화면

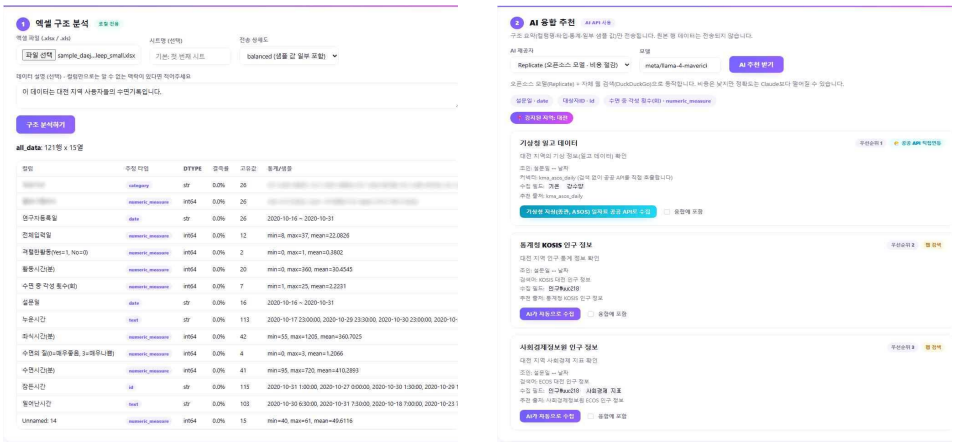


Figure 2. 융합 에이전트의 로컬 데이터 구조 분석 및 AI 기반 융합 추천

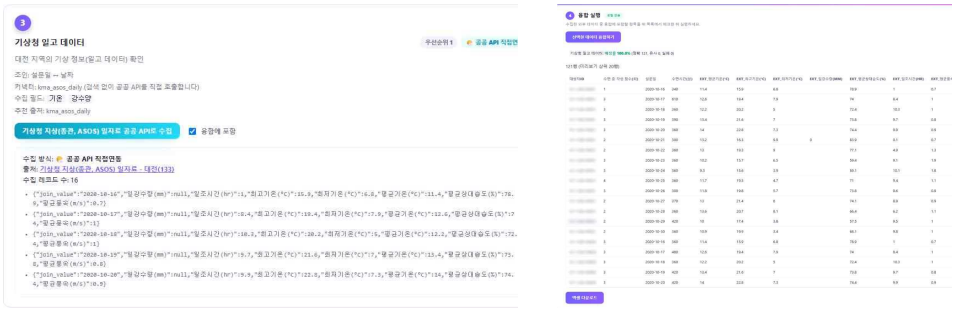


Figure 3. 융합 에이전트의 데이터 자동 수집 및 융합 결과

3) 기상청 자료의 자동 수집 및 데이터 융합

기상자료 융합을 수행하기 위해 데이터 설명에 '대전 지역에서 수집된 수면기록'이라는 지역정보를 입력하였다. 융합 에이전트는 설문일을 날짜형 결합 키로 식별하고, 해당 지역과 날짜정보를 바탕으로 기상자료를 우선 융합 대상으로 제시하였다. 추천 결과가 내장된 기상청 ASOS 일자료 커넥터와 일치함에 따라 공공데이터포털의 「기상청_지상(종관, ASOS) 일자료 조회서비스」를 직접 호출하여 대전 관측지점(지점번호 133)의 일별 자료를 수집하였다[18]. 수집 대상 기간은 수면자료 범위와 동일한 2020년 10월 16일부터 2024년 8월 31일까지였으며, 평균기온, 최고기온, 최저기온, 일강수량, 평균상대습도, 일조시간, 평균풍속의 7개 변수를 사용하였다.

원자료와 기상자료는 설문일을 기준으로 좌측 결합(left join)하였다. 최종 분석대상 811명의 13,728건 일별 수면기록은 모두 설문일 기준으로 정확 일치하였으며, 유사 일치 및 미일치 기록은 없었다. 분석용 데이터셋에는 수면 및 개인특성 변수에 7개의 기상변수가 추가되었다. 공개 API 응답에서 일강수량이 공란으로 반환된 값은 분석 과정에서 0 mm로 변환하였으며, 일조시간이 제공되지 않은 일부 기록은 해당 변수를 포함하는 다변량 모형에서 완전사례 방식으로 제외하였다[18].

논문에 제시한 에이전트 화면은 개인정보 노출을 최소화하기 위해 축소된 시연용 표본을 이용하여 캡처하였으며, 대상자 식별값은 이미지에서 블러 처리하였다. 화면의 행 수는 시스템 동작을 설명하기 위한 시연값이며, 통계분석 결과는 모두 최종 분석대상 811명의 13,728건 일별 수면기록에서 산출하였다.

4) 연구변수와 분석전략

주요 결과변수는 일별 수면시간, 수면 중 각성 횟수 및 수면의 질로 설정하였다. 수면시간은 분 단위 연속형 변수, 수면 중 각성 횟수는 원래 응답값에서 1을 차감하여 0회부터 시작하도록 재코딩한 계수형 변수, 수면의 질은 0-3점 순서형 변수로 다루었다. 주요 환경 노출 변수로 일평균기온을 설정하고 이후 평균기온으로 표기하였으며, 해석의 편의를 위해 5℃ 증가 단위로 제시하였다. 평균상대습도는 10% 증가 단위, 일강수량은 10 mm 증가 단위로 변환하였고 일조시간과 평균풍속은 원 단위를 사용하였다. 성별, 사상체질 및 연령은 개인특성 변수

로 포함하였다.

동일한 대상자에서 여러 날짜의 수면자료가 반복 수집되었으므로 개인 내 반복측정 간 상관을 고려하기 위해 generalized estimating equations(GEE)를 사용하였다[19]. 먼저 성별, 사상체질 및 연령만을 포함한 개인특성 기본모형을 적합하였다. 이후 기상자료 융합모형에서는 평균기온, 평균상대습도, 일강수량, 일조시간, 평균풍속을 추가하고 주말 여부와 달력연도를 보정하였다. 기온의 계절적 변동에 따른 잔여 교란 가능성을 확인하기 위해 달력월을 추가한 민감도 분석을 수행하였다. 수면시간은 Gaussian 분포와 identity link, 수면 중 각성 횟수는 Poisson 분포와 log link를 적용한 GEE로 분석하였고, 수면의 질에는 순서형 GEE를 사용하였다. 반복측정 간 상관구조는 교환가능 상관구조(exchangeable working correlation structure)로 설정하였다. 순서형 GEE에서 OR>1은 더 높은, 즉 더 불량한 수면의 질 점수에 속할 오즈가 증가함을 의미한다. 각성 횟수에서는 분포 가정에 따른 영향을 확인하기 위해 음이항 GEE(negative binomial GEE)를 이용한 민감도 분석도 수행하였다.

평균기온과 수면시간의 관련성이 성별에 따라 달라지는지를 확인하기 위해 평균기온×성별 상호작용항을 포함한 GEE 모형을 적합하였다. 모형의 추정계수와 공분산행렬을 이용하여 남성과 여성에서 평균기온 변화에 따른 수면시간 변화량을 각각 산출하였고, 연속형 가정에 대한 민감도를 확인하기 위해 평균기온의 사분위수를 이용한 범주형 분석도 수행하였다. 또한 기상요인과 수면시간의 관련성이 사상체질에 따라 달라지는지를 탐색하기 위해 평균기온, 일강수량, 평균상대습도, 일조시간 및 평균풍속 각각에 대해 기상요인×사상체질 상호작용을 별도의 GEE 모형으로 검토하였다. 체질군 간 기울기 차이는 공동 Wald 검정(joint Wald test)으로 평가하였고, 5개의 체질×기상 상호작용 검정에는 Benjamini-Hochberg 방식의 false discovery rate(FDR) 보정을 적용하였다. 유의한 상호작용이 확인된 경우 선형결합을 이용하여 체질별 변화량과 95% 신뢰구간을 산출하였다.

통계적 유의수준은 양측 $p<0.05$로 설정하였다. 평균기온과 수면시간의 관련성 및 평균기온×성별 상호작용을 주요 분석으로 설정하였고, 그 밖의 기상요인 주효과와 체질×기상 상호작용은 탐색적 분석으로 구분하였다. 체질×기상 상호작용에서는 FDR 보정 q값을 함께 제시하였다. 효과크기와 95% 신뢰구간(confidence interval, CI)을 함께 제시하였으며, 달력월을 추가한 민감도 분석의 결과도 주요 결과와 함께 검토하였다. 통계분석은 Python 3.11 환경에서 pandas와 statsmodels를 이용하여 수행하였다.

Table 2. 융합 에이전트의 4단계 구조와 연구 적용

단계	기능	본 연구에서의 수행
1. 로컬 구조 분석	변수 자료형·결측률·고유값·요약통계 파악	설문일을 날짜형 결합 키로 식별
2. AI 융합 추천	스키마 요약을 기반으로 외부 데이터 후보 추천	대전 지역 기상 일자료를 우선 후보로 추천
3. 자동 수집	등록된 공식 공개 API 커넥터 직접 호출	기상청 ASOS 대전(133) 일자료 수집
4. 로컬 데이터 융합	자료 결합·매칭률 계산·품질 리포트 생성	13,728/13,728건 정확 일치

3. 연구결과

1) 융합 에이전트의 데이터 융합 결과

설문일과 연구지역 정보를 바탕으로 대전 지역의 기상 일자료가 외부 융합자료로 제시되었다. 이후 등록된 기상청 ASOS 커넥터를 통해 실제 관측값을 수집하고 설문일을 기준으로 원자료와 결합하였다. 최종 분석대상 811명의 13,728건 기록은 모두 정확 일치하였으며, 유사일치 및 미일치 기록은 없었다. 최종 융합자료에서는 각 일별 수면기록에 동일 날짜의 대전 ASOS 평균기온, 최고기온, 최저기온, 일강수량, 평균상대습도, 일조시간 및 평균풍속이 연결되었다.

100% 매칭률은 임상적 타당성을 의미하는 지표가 아니라, 연구에서 정의한 결합 키를 기준으로 원자료와 외부자료가 누락 없이 연결되었음을 의미한다. 실제 기상 관측값은 생성형 AI가 생성한 것이 아니라 공식 공개 API에서 직접 수집하였고, 설문일을 기준으로 정확 일치 방식으로 병합하였다. 따라서 동일한 원자료와 동일한 API 관측값을 이용할 경우 같은 데이터 융합 절차를 반복할 수 있다.

2) 융합자료의 기술통계

13,728건의 전체 일별 기록에서 수면시간은 평균 384.66±103.17분, 재코딩된 수면 중 각성 횟수는 1.09±1.91회, 수면의 질 점수는 1.18±0.68점이었다. 수면시간 자료 품질 기준(0분 초과, 720분 이하)을 적용한 13,626건의 평균 수면시간은 383.48±87.71분이었다. 일별 평균기온은 14.68±9.99℃, 최고기온 20.33±9.80℃, 최저기온 9.85±10.50℃, 평균상대습도 67.86±13.82%, 일조시간 6.72±3.90시간, 평균풍속 1.64±0.70 m/s였다.

평균기온을 사분위수로 구분한 단순 기술통계에서는 Q1의 평균 수면시간이 389.53분, Q2 389.49분, Q3 380.37분, Q4 374.41분으로 나타났다. 가장 높은 기온 사분위에서 가장 낮은 기온 사분위보다 관찰된 평균 수면시간이 약 15분 짧았으나, 이는 보정 전 기술적 비교이므로 인과관계로 해석하지 않았다. 이후 반복측정 GEE에서는 개인특성과 다른 기상요인 및 시간변수를 함께 보정하였다.

Table 3. 융합된 일별 수면 및 기상변수의 기술통계

변수	N	평균±표준편차	중앙값	범위
수면시간 (분)	13,728	384.66±103.17	390.00	0-1490
수면시간 (유효범위)	13,626	383.48±87.71	390.00	1-720
수면 중 각성 횟수 (회)	13,728	1.09±1.91	1.00	0-25
수면의 질 (0=좋음, 3=나쁨)	13,728	1.18±0.68	1.00	0-3
평균기온 (℃)	13,728	14.68±9.99	14.40	-13.5-30.8
최고기온 (℃)	13,728	20.33±9.80	21.10	-8.3-36.6

변수	N	평균±표준편차	중앙값	범위
최저기온 (℃)	13,728	9.85±10.50	9.20	-17.7–27.7
평균상대습도 (%)	13,728	67.86±13.82	69.00	25.8–97.0
일조시간 (hr)	13,463	6.72±3.90	7.70	0–13.7
평균풍속 (m/s)	13,728	1.64±0.70	1.50	0.3–5.2

3) 개인특성 기본모형과 기상정보 융합 후 분석

기상변수를 투입하기 전에 성별, 사상체질 및 연령만 포함한 개인특성 기본모형을 적합하였다. 유효 수면시간 13,626건을 이용한 Gaussian GEE에서 여성의 수면시간 효과는 유의하지 않았다(p=0.438). 소음인과 태음인의 수면시간도 소양인과 유의한 차이가 없었다(p=0.246, p=0.634). 반면 Poisson GEE에서 여성의 일별 수면 중 각성 빈도는 남성보다 높았으며 IRR=1.43 (95% CI 1.20–1.71, p<0.001)으로 나타났다. 이 결과는 기상자료가 추가되기 전 개인특성과 수면지표의 관련성을 제시하는 기준모형으로 사용하였다.

기상변수를 추가한 기본 융합모형에서 평균기온은 수면시간과 유의한 음의 관련성을 보였다. 다른 기상요인, 성별, 사상체질, 연령, 주말 여부 및 달력연도를 함께 보정한 상태에서 평균기온이 5℃ 증가할 때 수면시간은 2.13분 감소하였다(beta=-2.13, 95% CI -3.78 to -0.48, p=0.011). 그러나 달력월을 추가하여 계절적 변동을 더 엄격하게 고려한 민감도 분석에서는 효과크기가 -1.36분/5℃로 감소하였고 통계적 유의성도 유지되지 않았다(95% CI -3.55 to 0.84, p=0.227). 따라서 평균기온의 전체 주효과는 계절 보정 방식에 민감한 결과로 해석하였다. 기본 융합모형에서 평균상대습도 10% 증가와 수면시간의 관련성은 통계적 유의성에 도달하지 않았고(beta=1.82분, p=0.066), 강수량과 일조시간도 유의하지 않았다. 평균풍속은 1 m/s 증가당 2.25분 증가하는 관련성이 관찰되었으나(p=0.046), 달력월 추가 보정 후에는 p=0.060으로 약화되어 탐색적 결과로 해석하였다.

재코딩된 수면 중 각성 횟수를 이용한 Poisson GEE에서는 평균기온, 평균상대습도, 일강수량, 일조시간 및 평균풍속 모두 통계적으로 유의한 관련성을 보이지 않았다. 음이항 GEE를 적용한 민감도 분석에서도 모든 기상변수의 관련성이 통계적으로 유의하지 않아 Poisson GEE와 일관된 결과를 보였다. 수면의 질에 대한 순서형 GEE에서도 개별 기상변수는 통계적으로 유의한 관련성을 보이지 않았다. 본 자료에서는 주요 기상요인과 수면 중 각성 횟수 또는 주관적 수면의 질 사이의 뚜렷한 관련성은 확인되지 않았다.

Table 4. 기상요인과 일별 수면결과의 다변량 GEE 분석

노출변수	수면시간 β (95% CI)	*p*	각성 IRR (95% CI)	*p*	수면의 질 OR (95% CI)	*p*
평균기온 +5℃	-2.13 (-3.78, -0.48)	0.011	0.976 (0.905–1.053)	0.535	1.020 (0.977, 1.065)	0.366
상대습도 +10%	1.82 (-0.12, 3.75)	0.066	0.989 (0.957–1.023)	0.526	0.989 (0.946, 1.033)	0.615
강수량 +10 mm	-0.24 (-1.61, 1.14)	0.737	1.013 (0.993–1.033)	0.202	1.005 (0.976, 1.034)	0.761

노출변수	수면시간 β (95% CI)	*p*	각성 IRR (95% CI)	*p*	수면의 질 OR (95% CI)	*p*
일조시간 +1 hr	0.24 (-0.27, 0.75)	0.358	0.993 (0.983-1.003)	0.150	1.002 (0.991, 1.013)	0.761
평균풍속 +1 m/s	2.25 (0.04, 4.45)	0.046	0.989 (0.948-1.032)	0.622	0.980 (0.933, 1.029)	0.413

Table 4의 수면시간 모형은 성별, 사상체질, 연령, 기상변수, 주말 여부 및 달력연도를 동시에 보정한 기본 융합모형의 결과이다. 각성 횟수는 Poisson GEE, 수면의 질은 순서형 GEE 결과이다. 일조시간 결측을 제외한 각성 횟수 분석에는 810명의 13,463건이 사용되었으며, 수면시간 모형은 일조시간 결측과 수면시간 유효범위 기준을 모두 적용한 기록을 대상으로 하였다. 달력월을 추가한 민감도 분석에서 평균기온의 수면시간 효과는 beta=-1.36분/5℃(95% CI -3.55 to 0.84, p=0.227)로 약화되었다.

4) 평균기온과 수면시간의 성별 상호작용

평균기온과 성별의 상호작용을 포함한 기본 융합모형에서는 기온과 수면시간의 관련성이 성별에 따라 유의하게 달랐다. 평균기온 5℃ 증가에 대한 남성의 변화량은 0.17분(95% CI -2.49 to 2.83, p=0.899)으로 유의하지 않았고, 평균기온×여성 상호작용항은 -3.27분/5℃ (95% CI -6.41 to -0.12, p=0.042)였다. 선형결합으로 계산한 여성의 변화량은 5℃ 증가당 -3.09분(95% CI -5.01 to -1.17, p=0.002)이었다. 달력월을 추가한 민감도 분석에서도 평균기온×성별 상호작용은 유의하게 유지되었다(interaction beta=-3.30분/5℃, p=0.036). 이때 남성의 변화량은 +0.97분/5℃(p=0.536), 여성의 변화량은 -2.32분/5℃(95% CI -4.71 to 0.06, p=0.056)로 추정되었다.

개인특성 기본모형에서 여성과 남성의 평균적인 일별 수면시간 차이는 유의하지 않았지만, 기상자료 융합모형에서는 기온 변화와 수면시간의 관련성이 성별에 따라 다르게 나타났다. 즉 개인특성 기본모형은 성별에 따른 평균 수준의 차이를 검토한 반면, 상호작용 모형은 서로 다른 기온에 노출된 날짜들의 정보를 이용하여 기온 변화에 따른 수면시간의 변화 양상이 성별에 따라 다른지를 검토하였다. 달력월 추가 보정에서도 상호작용항이 유의하게 유지된 점은 성별 차이가 단순한 연도 또는 월별 구성 차이만으로 설명되지는 않을 가능성을 보여준다.

평균기온 사분위 분석에서도 기본 융합모형에서는 유사한 양상이 나타났다. Q1(7.1℃ 이하)을 기준으로 Q4(23.6℃ 이상)는 전체적으로 10.94분 짧은 수면시간과 관련되었고 (beta=-10.94, 95% CI -19.07 to -2.81, p=0.008), Q4×여성 상호작용은 -13.75분(p=0.026)이었다. 여성의 Q4 대 Q1 차이는 -15.01분(95% CI -23.68 to -6.33, p<0.001)이었으며 남성에서는 유의하지 않았다(p=0.837). 달력월을 추가한 민감도 분석에서도 Q4×여성 상호작용은 유의하였으나(p=0.028), 여성의 Q4 대 Q1 차이는 -11.63분(95% CI -23.27 to 0.02, p=0.050)으로 경계 수준까지 약화되었다. 따라서 고온 사분위 결과 역시 계절 보정에 따른 불확실성을 함께 고려하였다.

Table 5. 평균기온과 수면시간의 성별 상호작용 및 민감도 분석

분석	남성 효과	여성 효과	상호작용항	p	해석
평균기온 +5℃ (기본)	0.17분 (p=0.899)	-3.09분 (95% CI -5.01, -1.17; p=0.002)	-3.27분	0.042	성별 차이 유의
평균기온 +5℃ (월 추가 보정)	0.97분 (p=0.536)	-2.32분 (95% CI -4.71, 0.06; p=0.056)	-3.30분	0.036	상호작용 유지
Q4 vs Q1 (기본)	-1.26분 (p=0.837)	-15.01분 (95% CI -23.68, -6.33; p<0.001)	-13.75분	0.026	성별 차이 유의
Q4 vs Q1 (월 추가 보정)	6.43분 (p=0.446)	-11.63분 (95% CI -23.27, 0.02; p=0.050)	-18.05분	0.028	여성 효과 경계 수준

5) 사상체질에 따른 기상요인과 수면시간의 관련성 탐색

기본 융합모형에서 평균기온×사상체질 상호작용은 유의하지 않았고(joint p=0.143), 평균상대습도, 일조시간 및 평균풍속과 사상체질의 상호작용도 각각 유의하지 않았다(joint p=0.103, p=0.148, p=0.519). 반면 일강수량×사상체질 상호작용은 수면시간에서 유의하였으며(joint p=0.007), 5개의 체질×기상 상호작용 검정에 대한 FDR 보정 후에도 유의성이 유지되었다(q=0.035). 달력월을 추가한 민감도 분석에서도 강수량×사상체질 상호작용은 유지되었다(joint p=0.008, FDR q=0.042). 월 추가 보정 모형에서 일강수량이 10 mm 증가할 때 소양인의 수면시간은 3.35분 감소하였고(95% CI -5.31 to -1.40, p=0.001), 소음인은 -0.19분(95% CI -2.07 to 1.69, p=0.841), 태음인은 +1.50분(95% CI -1.11 to 4.11, p=0.259)으로 유의하지 않았다.

Table 6. 일강수량과 수면시간의 사상체질별 상호작용 분석

사상체질	10 mm 강수 증가당 수면시간 변화	95% CI	p
소양인	-3.35분	-5.31 to -1.40	0.001
소음인	-0.19분	-2.07 to 1.69	0.841
태음인	+1.50분	-1.11 to 4.11	0.259

Table 6은 달력월을 추가 보정한 민감도 모형의 체질별 변화량을 제시하였다. 해당 모형은 성별, 연령, 평균기온, 평균상대습도, 일조시간, 평균풍속, 주말 여부, 달력연도 및 달력월을 보정하였다. 체질×강수량 전체 상호작용은 joint p=0.008이었고, 5개 체질×기상 상호작용에 대한 FDR 보정 q=0.042였다. 활동시간과 좌식시간을 추가 보정한 분석에서도 상호작용은 유지되었다(joint p=0.008).

4. 고찰

본 연구에서는 AI 기반 융합 에이전트를 이용하여 반복 수면자료에 기상청 ASOS 일자료를

결합하고, 융합된 자료를 이용해 기상요인과 일별 수면 변화의 관련성을 분석하였다. 최종 분석대상 811명의 13,728건 수면기록은 모두 설문일 기준으로 기상자료와 연결되었다. 기본 융합모형에서는 평균기온 상승과 수면시간 감소의 관련성이 나타났으나, 달력월을 추가한 민감도 분석에서는 전체 평균기온 주효과가 약화되었다. 반면 평균기온×성별 상호작용은 월 추가 보정 후에도 유지되었고, 탐색적 분석에서 확인된 강수량×사상체질 상호작용 역시 월 추가 보정과 FDR 보정 후 유의하였다. 이러한 결과는 데이터 융합을 통해 개인특성과 기상요인의 상호작용을 일별 반복자료에서 검토할 수 있음을 보여준다.

평균기온×성별 결과는 여성이 평균적으로 더 짧게 잔다는 의미가 아니라, 기온 변화와 수면시간의 관련성이 성별에 따라 다르게 나타났음을 의미한다. 개인특성 기본모형에서는 여성의 수면시간 효과가 유의하지 않았으며(p=0.438), 재코딩된 각성 횟수를 이용한 분석에서 여성의 각성 빈도는 남성보다 높았다(IRR=1.43). 기본 융합모형에서는 평균기온 5℃ 증가에 따른 여성의 수면시간 감소가 약 3.1분으로 나타났고 남성에서는 유의한 변화가 없었다. 달력월을 추가한 민감도 분석에서는 여성의 개별 기울기 자체는 경계 수준(p=0.056)으로 약화되었지만, 평균기온×성별 상호작용은 유의하게 유지되었다(p=0.036). 따라서 성별에 따른 차이는 단일 모형의 주효과만으로 판단하기보다 상호작용과 민감도 분석을 함께 고려하여 해석할 필요가 있다.

기온과 수면의 관련성은 기존 연구에서도 보고되어 왔다. Obradovich 등은 높은 야간 기온이 주관적 수면부족과 연관될 수 있음을 보였고[6], Minor 등은 대규모 웨어러블 자료에서 야간 기온 상승이 수면시간 감소와 관련되며 일부 집단에서 그 관련성이 더 크게 나타날 수 있음을 보고하였다[7]. 최근 체계적 문헌고찰에서는 실제 생활환경 연구 전반에서 높은 실내·외 온도가 수면의 양과 질 저하와 관련되는 경향을 확인하였다[8]. Baniassadi 등의 연구는 침실 온도와 수면의 관계가 비선형일 수 있고 개인 간 반응 차이가 상당함을 제시하였다[9]. 본 연구에서 성별 상호작용이 관찰된 것은 이러한 개인차의 가능성과 맥락을 같이하지만, 외부 ASOS 기온을 개인의 침실 온도와 동일한 노출로 해석해서는 안 된다.

효과크기의 해석에도 주의가 필요하다. 기본 융합모형에서 평균기온 5℃ 증가당 전체 수면시간 감소량은 약 2.1분이었으나, 달력월을 추가하자 이 주효과는 통계적으로 유의하지 않았다. 이는 평균기온과 수면시간의 전체 관련성이 계절적 요인과 일부 중첩될 가능성을 보여준다. 따라서 기온 자체의 독립적인 인과효과를 단정하기보다, 월 추가 보정 후에도 유지된 평균기온×성별 상호작용을 포함하여 결과의 견고성과 불확실성을 함께 해석하는 것이 적절하다. 또한 에어컨 사용, 주거환경, 침실 온도, 근무 형태, 스트레스, 건강상태 등 측정되지 않은 요인이 기온과 수면의 관계를 수정하거나 교란했을 수 있다.

수면 중 각성 횟수와 주관적 수면의 질에서는 일관된 기상효과가 나타나지 않았다. 이는 기상요인과 수면의 관련성이 수면의 모든 차원에서 동일하게 나타나지 않을 수 있음을 보여준다. 본 자료의 각성 횟수는 야간 각성의 빈도를 자가보고한 값으로 각성 지속시간이나 객관적 wake after sleep onset을 직접 측정하지 않았으며, 0-3점의 수면의 질 척도도 변화폭이 제한되어 작은 환경효과를 포착하기 어려웠을 수 있다. 반면 수면시간은 분 단위 연속값으로 기록되어 일별 환경변화와의 관련성을 상대적으로 세밀하게 평가할 수 있었다. 수면건강이 여러 구성요소를 포함하는 다차원 개념이라는 점을 고려하면[1], 향후 연구에서는 웨어러블 기반 수면효율, 심박, 체온, 수면단계 등을 함께 융합할 필요가 있다.

사상체질에 따른 분석에서는 평균기온과 사상체질의 상호작용이 유의하지 않아 특정 체질에서 기온과 수면시간의 관련성이 더 크다고 해석할 근거는 확인되지 않았다. 반면 강수량에서는 체질에 따른 수면시간 변화 양상의 차이가 확인되었고, 달력월 추가 보정 및 FDR 보정 후에도 상호작용이 유지되었다(q=0.042). 특히 소양인에서는 일강수량 10 mm 증가당 수면시간이 약 3.35분 감소한 반면, 소음인과 태음인에서는 유의한 변화가 없었다. 이 결과는 체질군의 평균 수면시간 차이를 의미하는 것이 아니라 동일한 기상요인과 수면시간의 관련성이 체질군에 따라 다르게 나타날 가능성을 보여준다. 사상의학에서 소증은 발병 이전부터 지속되는 개인의 평상시 기능상태를 이해하는 정보로 다뤄지며[17], 수면 역시 이러한 생활기능 정보의 한 요소로 볼 수 있다. 본 연구에서 사상체질은 진단 예측을 위한 변수가 아니라 개인특성 변수로 활용하였으며, 강수량×사상체질 상호작용은 탐색적 분석에서 확인된 결과이므로 독립 자료에서의 재현이 필요하다.

방법론적으로 융합 에이전트에서는 생성형 AI를 연구데이터의 값 생성에 사용하지 않았다. LLM은 원자료의 구조와 연구 맥락을 바탕으로 외부 데이터원을 추천하고 데이터 결합 방법을 제안하는 단계에 활용하였으며, 실제 기상 관측값은 기상청 공개 API에서 직접 수집하였다. 이를 통해 AI 기반 추천 기능과 공식 관측자료의 출처 및 처리 경로를 분리하였다. 의료 AI의 활용에서는 데이터 품질, 상호운용성, 프라이버시와 투명성이 강조되어 왔으며[10-15,24], 특히 2차 자료분석에서는 데이터의 출처와 변환과정을 추적할 수 있어야 한다. 본 시스템은 매칭률과 미일치 값을 별도 리포트로 남기고 날짜형 결합 키에서 유사 일치를 차단하여 데이터 연결 오류를 줄이도록 설계하였다.

이 구조를 이용하면 특정 외부 데이터원을 미리 고정하지 않고도 원자료의 구조와 연구 맥락에 따라 융합 후보를 탐색할 수 있다. 향후 미세먼지·대기오염, 일조·자외선, 지역 인구사회지표, 감염병 유행, 이동·활동환경 등의 커넥터를 추가하면 동일한 반복 건강자료를 다양한 관점에서 분석할 수 있다. FAIR 원칙이 강조하는 재사용성과 상호운용성[14]의 관점에서도 표준화된 키와 메타데이터를 통해 검증된 외부자료와 연결할 수 있는 구조는 연구데이터의 활용 범위를 확장할 수 있다. 다만 외부 데이터가 많아질수록 우연한 상관관계와 다중검정 문제가 커질 수 있으므로, AI 추천만을 근거로 모든 외부 변수를 검정하기보다 연구가설과 분석 우선순위를 명확히 설정할 필요가 있다.

본 연구는 반복적으로 수집된 수면자료에 동일 날짜의 외부 기상자료를 결합함으로써 개인의 수면특성뿐 아니라 기상 변화와 일별 수면 변화의 관련성을 함께 분석하였다는 데 의미가 있다. 811명에게서 수집된 13,728건의 수면기록에 기상자료를 모두 연결하였으며, 이를 바탕으로 평균기온과 수면시간의 관련성뿐 아니라 성별에 따른 관련성의 차이도 검토할 수 있었다. 또한 AI를 외부 데이터의 탐색과 융합 방법을 제안하는 단계에 활용하고 실제 기상 관측값은 공식 공개 API에서 직접 수집하도록 분리하였다. 이를 통해 생성형 AI를 활용하면서도 연구에 사용된 데이터의 출처와 처리과정을 구분하고 원본 행 단위 건강자료가 외부 AI 서비스로 전달되지 않도록 하였다.

다만 본 연구의 결과를 해석할 때에는 몇 가지 제한을 고려해야 한다. 사용한 기상자료는 대전 ASOS 관측소의 지역 대표값으로 각 대상자가 실제로 경험한 침실 온도나 체감온도를 직접 측정한 값은 아니다. 실내 냉난방 여부와 주거환경도 확인할 수 없었으므로 결과는 외부 기상조건과 수면의 관련성으로 제한하여 해석해야 한다. 또한 설문일 단위의 일자료를 사용하였기 때문에 전날 밤부터 다음 날 아침까지 이어지는 실제 수면시간대와 기상 노출 시간이 완

전히 일치하지 않을 수 있다. 향후에는 시간별 기상자료를 이용하여 각 대상자의 실제 수면구간에 해당하는 기온과 습도 등의 노출값을 산출할 필요가 있다. 수면자료 역시 자기보고에 기반하므로 수면효율이나 수면단계와 같은 객관적 지표를 포함하지 못하였으며, 연구대상 지역이 대전으로 제한되어 다른 지역으로 결과를 일반화할 때에도 주의가 필요하다.

평균기온과 성별의 상호작용은 주요 분석으로 다루었으나 습도, 강수량, 일조시간, 풍속 및 사상체질과 기상요인의 상호작용은 탐색적으로 분석하였다. 특히 체질×강수량 상호작용은 월 추가 보정과 다중검정 보정 후에도 통계적으로 유의하였지만 여러 기상요인을 대상으로 한 탐색적 분석에서 확인된 결과이므로 독립 자료에서 다시 검증할 필요가 있다. 평균기온의 전체 주효과와 기온 사분위 결과가 달력월 추가 보정 후 약화된 점 역시 계절적 교란 가능성을 고려해야 함을 보여준다. 또한 AI 기반 외부 데이터 추천 결과는 사용한 LLM과 프롬프트 구성에 따라 달라질 가능성이 있다. 본 연구에서는 추천 단계와 실제 데이터 수집 단계를 분리하여 이러한 차이가 기상 관측값 자체에 영향을 주지 않도록 하였으나, 향후 다양한 데이터와 AI 모델을 대상으로 외부 데이터 추천의 일관성과 정확성을 별도로 평가할 필요가 있다.

5. 결론

본 연구는 AI 기반 데이터 융합 에이전트를 개발하여 기존의 챗봇 기반 반복 수면자료와 공공 기상정보를 연계하고, 기상요인과 개인특성에 따른 수면 변화의 관련성을 분석하였다. 특히 AI 기반 외부 데이터 추천과 공식 공개 API를 통한 관측자료 수집을 분리하고, 원본 건강자료의 외부 전송을 최소화함으로써 데이터 출처의 투명성과 개인정보 보호를 고려한 융합 방법을 제시하였다.

기상정보의 추가를 통해 기존 수면자료만으로는 확인하기 어려웠던 환경요인과 개인특성 간의 상호작용을 탐색할 수 있었다. 평균기온과 수면시간의 전체적인 관련성은 계절 보정에 따라 약화되었으나, 기온과 성별의 상호작용 및 강수량과 사상체질의 탐색적 상호작용은 추가 보정 후에도 유지되었다. 이러한 결과는 수면과 환경의 관련성을 이해할 때 개인특성을 함께 고려할 필요가 있음을 시사한다.

본 연구는 기존 건강자료를 공공데이터와 연계하여 새로운 분석 가능성을 확장하였다는 데 의의가 있다. 다만 관찰된 관련성을 인과관계로 해석할 수 없으며, 특히 사상체질 관련 결과는 독립 자료를 통한 재현이 필요하다. 향후 실내환경, 시간별 기상정보, 생체신호 및 한의 임상·소증 정보를 함께 연계한다면 개인과 환경의 상호작용을 고려한 맞춤형 건강정보 분석의 기반을 확장할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국한의학연구원의 ‘기혈순환-장부기능 연계 시스템한의학 모델링 기술 개발(KSN25120212)’ 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Buysse DJ. Sleep health: can we define it? Does it matter? Sleep. 2014;37(1):9-17. doi:10.5665/sleep.3298.
2. Carney CE, Buysse DJ, Ancoli-Israel S, et al. The Consensus Sleep Diary: standardizing prospective sleep self-monitoring. Sleep. 2012;35(2):287-302. doi:10.5665/sleep.1642.
3. Bei B, Wiley JF, Trinder J, Manber R. Beyond the mean: a systematic review on the correlates of daily intraindividual variability of sleep/wake patterns. Sleep Medicine Reviews. 2016;28:108-124. doi:10.1016/j.smrv.2015.06.003.
4. Okamoto-Mizuno K, Mizuno K. Effects of thermal environment on sleep and circadian rhythm. Journal of Physiological Anthropology. 2012;31:14. doi:10.1186/1880-6805-31-14.
5. Harding EC, Franks NP, Wisden W. The temperature dependence of sleep. Frontiers in Neuroscience. 2019;13:336. doi:10.3389/fnins.2019.00336.
6. Obradovich N, Migliorini R, Mednick SC, Fowler JH. Nighttime temperature and human sleep loss in a changing climate. Science Advances. 2017;3(5):e1601555. doi:10.1126/sciadv.1601555.
7. Minor K, Bjerre-Nielsen A, Jonasdottir SS, Lehmann S, Obradovich N. Rising temperatures erode human sleep globally. One Earth. 2022;5(5):534-549. doi:10.1016/j.oneear.2022.04.008.
8. Chevance G, Minor K, Vielma C, Campi E, O'Callaghan-Gordo C, Basagaña X, Ballester J, Bernard P. A systematic review of ambient heat and sleep in a warming climate. Sleep Medicine Reviews. 2024;75:101915. doi:10.1016/j.smrv.2024.101915.
9. Baniassadi A, Manor B, Yu W, Travison TG, Lipsitz LA. Nighttime ambient temperature and sleep in community-dwelling older adults. Science of the Total Environment. 2023;899:165623. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.165623.
10. Davenport T, Kalakota R. The potential for artificial intelligence in healthcare. Future Healthcare Journal. 2019;6(2):94-98. doi:10.7861/futurehosp.6-2-94.
11. Topol EJ. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. Nature Medicine. 2019;25(1):44-56. doi:10.1038/s41591-018-0300-7.
12. Rajkomar A, Dean J, Kohane I. Machine learning in medicine. New England Journal of Medicine. 2019;380(14):1347-1358. doi:10.1056/NEJMra1814259.
13. Borna S, Maniaci MJ, Haider CR, et al. Artificial Intelligence Models in Health Information Exchange: A Systematic Review of Clinical Implications. Healthcare. 2023;11(18):2584. doi:10.3390/healthcare11182584.

14. Wilkinson MD, Dumontier M, Aalbersberg IJJ, et al. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. Scientific Data. 2016;3:160018. doi:10.1038/sdata.2016.18.

15. Kahn MG, Callahan TJ, Barnard J, et al. A harmonized data quality assessment terminology and framework for the secondary use of electronic health record data. eGEMs. 2016;4(1):1244. doi:10.13063/2327-9214.1244.

16. Kim JY, Pham DD. Sasang constitutional medicine as a holistic tailored medicine. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine. 2009;6(Suppl 1):11-19. doi:10.1093/ecam/nep100.

17. Shin S, Kim YH, Hwang MW. Diagnosis and treatment principle in Sasang medicine: original symptom. Integrative Medicine Research. 2016;5(2):99-104. doi:10.1016/j.imr.2016.03.005.

18. 기상청. 기상청_지상(종관, ASOS) 일자료 조회서비스. 공공데이터포털. Available from: https://www.data.go.kr/data/15059093/openapi.do. Accessed September 27, 2026.

19. Liang KY, Zeger SL. Longitudinal data analysis using generalized linear models. Biometrika. 1986;73(1):13-22. doi:10.1093/biomet/73.1.13.

20. Zhang B, Wing YK. Sex differences in insomnia: a meta-analysis. Sleep. 2006;29(1):85-93. doi:10.1093/sleep/29.1.85.

21. Mallampalli MP, Carter CL. Exploring sex and gender differences in sleep health: a Society for Women's Health Research report. Journal of Women's Health. 2014;23(7):553-562. doi:10.1089/jwh.2014.4816.

22. 이종란, 오용택. 난임 환자의 한의전자 의무기록 구조화를 위한 항목 연구. 대한한의진단학회지. 2022;26(1):1-10.

23. 서수민, 김안나, 오용택. 진단·변증 스키마 기반 인공지능 표준화 환자 시스템 (CURA) 개발. 대한한의진단학회지. 2025;29(1):251-263.

24. Price WN II, Cohen IG. Privacy in the age of medical big data. Nature Medicine. 2019;25(1):37-43. doi:10.1038/s41591-018-0272-7.