

Supplementary Material 1.

본 연구의 시스템 다이내믹스 모델(stock-flow diagram)은 시간 연속적 변화를 모사하기 위해 상미분방정식을 기반으로 구축되었다. 인과 지도상의 주요 거시적 환경요인(병원 재정 악화, 보상 감소 등)은 정량적 시뮬레이션을 위해 아래와 같은 수학적 함수 및 파라미터 추정 알고리즘으로 산출하였다.

1. 간호사 근무 만족도(job satisfaction) 및 업무 부하(workload)의 비선형 함수 추정

근무 만족도는 개별 변수의 단순 가중합(weighted sum)이 아닌, 각 변수의 동태적 변화의 곱을 사용하는 비선형 승수 함수(non-linear multiplier function)로 정의

- 기준 대비 업무 부하 지수($W_{ratio, t}$): 시점(t)의 병상 수를 간호사 수와 생산성으로 나눈 업무 부하를 초기 기준값 대비 비율로 정규화(normalization)
- 동태적 근무 만족도($S_{i,t}$): 초기 근무 만족도 기준($S_{i,0}$)에 업무 부하의 역수함수와 정규 급여 수준($Wage_{ratio,t}$) 함수를 승수 작용하여 산출

$$S_{i,t} = S_0 \times \left(\frac{1}{W_{ratio,t}} \right)^{\alpha_1} \times (Wage_{ratio,t})^{\alpha_2}$$

- 신규 간호사 유입의 비선형적 의사결정 구조: 본 모델에 적용된 비선형 테이블 함수(lookup table)인 지원 거부 비율 함수는 지역 선호도가 특정 임계값(0.5) 이하로 하락할 때 신규 인력의 유입이 기하급수적으로 감소하는 비선형적 의사결정 구조를 모사하도록 설계되었다. 구체적으로 x축(선호도)과 y축(거부율)의 좌표값 [(0,1), (0.25, 0.88), (0.4, 0.7), (0.5, 0.5), (0.6, 0.3), (0.75, 0.12), (1,0)]을 통해 구현된 S-자형(sigmoid-like) 비선형 곡선은, 지역 간 격차가 일정 수준을 넘어설 때 발생하는 정책 저항과 심리적 진입 장벽을 구현하였다.

2. 간호사 저장-유량(stock-flow) 적분 구조 및 이직(turnover) 파라미터 산출

시스템 내 활동 간호사 수($N_{i,t}$)는 유입(inflow)과 이직(turnover) 간의 1차 지수 감소 및 적분(integral) 방정식으로 추정

- 간호사 저장변수 적분식:

$$N_{i,t} = N_{i,t_0} + \int_{t_0}^t (Inflow_s - Turnover_s) ds$$

- 이직 유량 및 동태적 근무연수($T_{i,t}$): 이직자 수는 현재 간호사 수를 평균 근무연수($T_{i,t}$)로 나누어 산출되며, 평균 근무연수는 산출된 상대적 근무 만족도($Relatives - S_{i,t}$)에 민감도(β)를 지수화하여 매 시점 변동하도록 설계

$$Turnover_{i,t} = \frac{N_{i,t}}{T_{i,t}}, \quad T_{i,t} = T_0 \times (Relatives - S_{i,t})^\beta$$

3. 지역 선호도(preference) 및 지원 거부 비율(rejection rate) 테이블 함수

지역 선호도가 임계점 이하로 하락할 경우 구인난 현상으로 인해 간호사 유입이 기하급수적으로 차단되는 동학을 모사하기 위해 비선형 테이블 함수(look-up table function, f_{lookup})를 적용

- 지원 거부 비율 함수:

$$Rejection_{i,t} = Max - Rejection \times f_{lookup}(Preference_{i,t})$$

4. 예산 제약 및 임금(wage) 추정 로직

지역별 임금 수준($Wage_{i,t}$)은 초기 임금을 저장(stock)으로, 연간 임금 인상액을 유량(flow)으로 하는 적분식으로 산출

$$Wage_{i,t} = Wage_{i,t_0} + \int_{t_0}^t (Wage_{i,s} \times Increase - Rate_{i,s}) ds$$

(정책 도입 후 예산 확정 시점(t_{limit})) 이후의 예산은 과거 평균 건강보험 수가 인상률을 고려하여 $Budget_{tlimit} \times (1 + \gamma \times \Delta t)$ 의 선형 제약식으로 억제되며, 최대 인상률 한계(γ)는 보수적으로 4%로 추정함)

행태 재현성 검증(behavioral validity test)

개발된 모델이 실제 시스템의 동태적 변화를 얼마나 유사하게 재현하는지 평가하기 위해, 모델의 시뮬레이션 결과와 실제 통계 데이터를 비교 분석하였다. 검증에는 본 연구의 핵심 변수인 간호사 수(명) 등의 주요 지표가 활용되었다. 17개 시도 중 대표 시도인 서울(시도 1)과의 비교결과, 모델이 예측한 시간 흐름에 따른 변화 패턴은 실제 데이터의 추세와 매우 높은 수준의 일치도를 보였다.

특히 주요 지표인 서울 지역 간호사 수의 시뮬레이션 예측치와 실제 데이터(2020-2024년)를 비교한 결과는 Table S2 및 Figure S1과 같다. 검증결과, 실제 간호사 수와 모델 예측치 간의 일치율은 98.65%로 나타나 매우 높은 수준의 적합도를 보였다. 이를 통해 본 모델이 간호사 인력 지역불균형 문제의 현실적 동학을 성공적으로 반영하고 있음을 확인하였다.

Category	Key variable name	Data source (raw data)	Operational definition & key formula
Stock	Number of active nurses ($N_{i,t}$)	Healthcare Big Data Hub (HIRA), Korean Statistical Information Service (KOSIS)	Estimated as an integral equation between inflow and turnover within the system: $N_{i,t} = N_{i,t_0} + \int_{t_0}^t (Inflow_s - Turnover_s) ds$
	Number of active hospital beds ($Beds_{i,t}$)	HIRA, KOSIS	Dynamic cumulative amount of hospital beds by region: $Beds_{i,t} = Beds_{i,t_0} + \int_{t_0}^t Bed_Increase_{i,s} ds$
Flow	Inflow of new nurses ($Inflow_{i,t}$)	[Graduates] KESS, [Mobility Patterns] GOMS (KEIS)	Sum of graduates staying in the local region and those moving in from other regions: $Inflow_{i,t} = (Graduates_{i,t} \times \alpha_{i,i}) + \sum_{j \neq i} Graduates_{j,t} \times \beta_{j \rightarrow i}$ (※ α : Local retention rate, β : Inflow rate from other regions based on GOMS)
	Turnover and retirement ($Turnover_{i,t}$)	Endogenously determined	Flow calculated by dividing the current number of nurses by the dynamic average tenure ($T_{i,t}$) $Turnover_{i,t} = \frac{N_{i,t}}{T_{i,t}}$
	Regional wage level ($Wage_{i,t}$)	Hospital Nurses Association (Survey on the Status of Hospital Nursing Workforce)	Calculated by an integral formula where the initial wage is the stock and the annual increase is the flow: $Wage_{i,t} = Wage_{i,t_0} + \int_{t_0}^t (Wage_{i,s} \times Increase_Rate_{i,s}) ds$
Parameter	Dynamic tenure ($T_{i,t}$)	Survey on the Status of Health and Medical Personnel, Endogenous	Designed to fluctuate based on the sensitivity(β) to relative job satisfaction ($Relatives_S_{i,t}$): $T_{i,t} = T_0 \times (Relatives_S_{i,t})^\beta$
	Dynamic job attractiveness ($S_{i,t}$)	Literature review, endogenous	Non-linear multiplier function based on the reciprocal of workload and the normalized wage level ($Wage_{ratio,t}$): $S_{i,t} = S_0 \times \left(\frac{1}{W_{ratio,t}}\right)^{\alpha_1} \times (Wage_{ratio,t})^{\alpha_2}$
	Regional population ($Pop_{i,t}$)	KOSIS	Input of projected dynamic population data for each region (2009–2035).

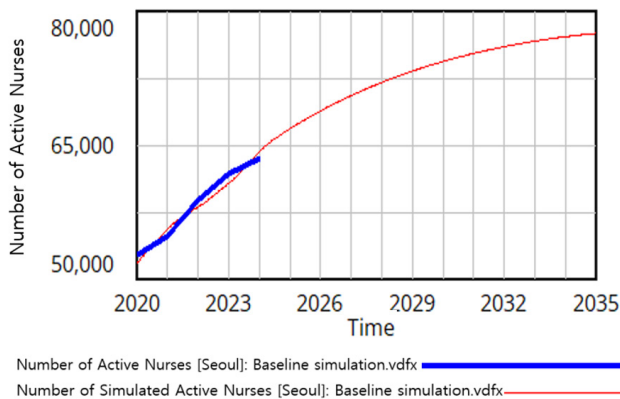


Figure S1. Comparison of actual and simulated nurse population in Seoul.

Table S2. Behavioral validity test: number of active nurses in Seoul (2020–2024)

Year	Actual data (persons)	Simulated value (persons)	Error rate (%)
2020	52,727	52,480	−0.47
2021	54,778	55,210	+0.79
2022	58,773	58,310	−0.79
2023	61,743	61,150	−0.96
2024	63,480	63,920	+0.69