

다지역 인구이동 추계를 위한 도착지 인구가중 모형의 비교 연구 - CT-DPW 모형의 제안 -

이상일* · 조대현**

A Comparative Study of Destination Population-Weighted Models for Multiregional Migration Projection: Introducing the CT-DPW Model

Sang-Il Lee* · Daeheon Cho**

요약 : 본 연구는 다지역 인구이동 추계에서 지역별 인구분포의 변화를 전이확률에 반영하는 도착지 인구가중(destination population-weighted, DPW) 모형군을 비교하고, 새로운 CT-DPW(controlled-total destination population-weighted) 모형을 제안한다. 피니, 플레인 및 디온 모형은 각 추계 라운드에서 산출된 도착지 인구를 이용하여 전이확률을 갱신하지만, 총전이확률을 처리하는 방식과 인구분포-이동 간 되먹임의 강도에서 차이를 보인다. CT-DPW 모형은 출발지별 총전이확률을 통제하고, 그 총량을 변화한 도착지 인구분포에 따라 목적지별로 재배분한다. 따라서 “얼마나 이동하는가”와 “어디로 이동하는가”를 분리하여 모형화할 수 있다. 세 지역으로 구성된 가상 인구체계를 이용하여 고정 전이확률 모형과 네 가지 DPW 모형을 비교하고, 지역별 인구, 순이동량, 순이동률, 인구이동 유효도 지수 및 총전이확률의 장기적 변화를 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 플레인 모형은 강한 되먹임으로 급격한 인구집중을 초래하였고, 디온 모형은 집중 속도를 완화하였지만 장기적 집중을 방지하지는 못하였다. 피니 모형은 비교적 안정적인 결과를 산출하였으나 총전이확률을 명시적으로 통제하지 않는다. 반면 본 시뮬레이션에서 CT-DPW 모형은 도착지 인구변화에 반응하면서도 총전이확률과 이동지표의 극단화를 억제하여 안정적인 다지역 인구분포를 산출하였다. CT-DPW 모형은 전체 이동성과 도착지별 배분을 분리한다는 점에서 가정의 해석과 시나리오 설정이 용이하며, 향후 총전이확률의 변화 경로와 결합된 하이브리드 인구이동 추계 모형으로 확장될 수 있다.

주요어 : 다지역 인구추계, 인구이동 추계, 도착지 인구가중 모형, 전이확률, CT-DPW 모형

Abstract : This study compares destination population-weighted (DPW) models that incorporate changing regional population distributions into transition probabilities for multiregional migration projection and proposes a new controlled-total destination population-weighted (CT-DPW) model. The Feeney, Plane, and Dion models update transition probabilities using destination populations generated in each projection round, but differ in their treatment of total transition probabilities and the strength of population-migration feedback. The CT-DPW model controls the total transition probability for each origin and reallocates that total across destinations according to changes in destination populations. It thus separates the modeling of “how much migration occurs” from “where migrants move.” A deterministic simulation based on a hypothetical three-region system compares a fixed transition probability model with four DPW models and examines long-term changes in regional populations, net migration, net migration rates, the migration effectiveness index, and total transition probabilities. The Plane model produces rapid population concentration through strong feedback, whereas the Dion model slows but does not prevent long-term concentration. The Feeney model yields a relatively stable

본 논문은 국가데이터처의 2026년도 연구과제 「시군구 장래인구추계 방법론 개선 연구」의 지원을 받아 작성되었음.

* 서울대학교 지리교육과 교수(Professor, Department of Geography Education, Seoul National University), si_lee@snu.ac.kr

** 경북대학교 지리교육과 부교수(Associate Professor, Department of Geography Education, Kyungpook National University), dhncho@knu.ac.kr

distribution but does not explicitly constrain total transition probabilities. Under the simulation conditions, the CT-DPW model responds to changes in destination populations while limiting the endogenous amplification of total mobility and the divergence of migration indicators, thereby yielding a stable multi-regional population distribution. By separating overall mobility from destination allocation, the CT-DPW model improves interpretability and facilitates scenario specification. It can also be extended into a hybrid framework in which future paths of origin-specific total transition probabilities are set and then allocated across destinations through recursive population weighting.

Key Words : multiregional population projection, migration projection, destination population-weighted model, transition probability, CT-DPW model

1. 서론

한 국가나 지역의 인구 변동은 ‘인구학적 균형 방정식’(Rowland, 2003) 또는 ‘인구학적 계정 방정식’(Plane and Rogerson, 1994)을 구성하는 세 요소인 출생, 사망 및 인구 이동에 의해 결정된다. 따라서 미래 인구를 추계할 때 이들 요소를 개별적으로 다루는 코호트-요인법(cohort-component method)이 지배적인 방법론으로 자리 잡은 것은 자연스러운 결과라 할 수 있다(Smith *et al.*, 2013). 이 가운데 인구이동은 출생과 사망에 비해 경기변동, 주택시장 및 정책 변화에 민감하게 반응하기 때문에 인구추계의 구성요소 중 불확실성이 가장 큰 부문으로 평가된다(Wilson and Rees, 2005). 특히 한 국가 내부의 하위지역을 대상으로 하는 인구추계에서는 인구이동이 지역 간 인구를 직접 재분배하므로, 이동 가정과 추계 방법의 적절성이 지역별 추계 결과의 정확성에 결정적인 영향을 미친다(Cameron and Poot, 2024; Siriban *et al.*, 2026). 그럼에도 인구이동은 출산력과 사망력에 비해 상대적으로 적은 관심을 받아왔으며, 관련 방법론의 발전도 비교적 최근에 본격화되었다(이상일·조대현, 2012; Wilson and Rees, 2005).

정규 코호트-요인법은 인구이동을 처리하는 방식에 따라 크게 순이동 코호트-요인법과 총이동 코호트-요인법으로 구분된다(Smith *et al.*, 2013). 전자가 각 지역의 순이동 규모만을 추정하는 데 비해, 후자는 지역 간 인구이동 매트릭스 자체를 추정한다는 점에서 보다 정교한 추계 기법으로 평가된다(이상일·조대현, 2012; Wilson and Bell, 2004). 이러한 총이동 코호트-요인법을 둘 이상의 하위지역으로 이루어진 지역체계에 적용한 것을 다지역(multiregional) 코호트-요인법이라 부른다(이상일·조대현, 2012; Rogers, 1985; 1995). 이는 출발지-도착지별 이동을 또는 전이확률

을 이용하여 상호 연결된 하나의 지역체계 안에서 인구이동을 다루는 방법을 의미한다. 다지역 코호트-요인법은 전 세계적으로 하위지역 인구추계에 널리 활용되고 있으며(国立社会保障・人口問題研究所, 2024; Office for National Statistics, 2025; Statistics Canada, 2025; 2026), 우리나라의 시도 및 시군구 장래인구추계에도 적용되고 있다(국가데이터처, 2024a; 2024b).

다지역 코호트-요인법은 미래의 지역 간 전이확률을 어떻게 설정하느냐에 따라 다시 여러 세부 모형으로 구분될 수 있다. 우선 전이확률의 시간적 변동을 허용하는지에 따라 ‘고정’ 전이확률 모형과 ‘변동’ 전이확률 모형으로 나눌 수 있다(이상일·조대현, 2012; 전광희 등, 2014; 오진호, 2021; Plane and Rogerson, 1994; Dion, 2017). 고정 전이확률 모형은 일반적으로 마르코프 연쇄 모형(Markov chain model)으로 불리며,¹⁾ 출생과 사망을 제외한 채 인구이동의 연쇄적 작용만으로 지역 간 인구 재분포가 어떻게 이루어지는지를 분석할 수 있는 프레임워크이다(이상일·조대현, 2012). 이 모형의 핵심 가정은 지역 간 전이확률이 시간의 흐름에도 변하지 않는다는 것이다(Plane and Rogerson, 1994). 그러나 이러한 가정은 실제 인구이동의 변동성을 충분히 반영하기 어렵기 때문에, 미래 전이확률의 변화를 허용하는 다양한 모형이 검토될 필요가 있다.

변동 전이확률 모형은 다시 미래 전이확률의 변화가 어디에서 비롯되는가에 따라 ‘외생형(exogenous)’과 ‘내생형(endogenous)’으로 구분할 수 있다. 외생형은 경기, 고용, 주택 및 정책 등 인구추계 과정 외부의 사회경제적 변화를 전이확률 변동의 원인으로 설정하는 모형이다. 여기에는 전이확률과 사회경제적 변수 간의 통계적 관계를 모형화하는 여러 접근이 포함되며, 이른바 ‘비정상’ 마르코프 연쇄 모형이 대표적인 사례이다(김경수, 2004; 김홍배 등, 2009). 반면 내생형은 인구추계 과정에서 산출된 인구분포가 이

후의 전이확률에 다시 영향을 미치는 내부적 되먹임에 주목한다. 도착지 인구가중(destination population-weighted, DPW) 모형군이 이에 해당한다. DPW 모형군은 각 추계 라운드에서 산출된 지역별 인구 또는 인구비중을 이용하여 다음 라운드의 지역 간 전이확률을 계속 수정하는 모형들을 포괄한다. 이러한 방식은 직전 추계 결과를 이용하여 다음 라운드의 전이확률을 재귀적으로 결정한다는 점에서 ‘갱신형’으로 지칭할 수 있다. 이는 외산, 보간, 시나리오 또는 별도의 가정을 통해 추계 시작 시점에 미래 전이확률을 미리 결정하는 ‘사전설정형’과 구분된다.²⁾

본 연구는 이와 같은 ‘내생-갱신형’ 변동 전이확률 모형인 DPW 모형군의 방법론적 가능성에 주목한다. 여기에는 피니 모형(Feeney, 1973), 플레인 모형(Plane, 1982) 및 디온 모형(Dion, 2017)이 포함된다. 이들 모형은 도착지 인구의 변화를 반영하여 이후의 지역 간 전이확률을 갱신한다는 공통점을 지니지만, 구체적인 갱신 방식은 서로 다르며, 그에 따라 지역별 인구분포와 이동지표에 미치는 영향도 크게 달라진다. DPW 모형군의 발전은 변화하는 인구분포와 이동행태 간의 상호작용을 인구추계에 반영한다는 점에서 인구이동 추계 방법론의 중요한 진전으로 평가할 수 있다. 그러나 기존 모형들은 출발지별 총이동성을 처리하는 방식과 장기적인 되먹임의 강도에서 상당한 차이를 보이며, 일부 모형에서는 특정 지역으로의 과도한 인구집중이 나타날 가능성도 있다. 이에 본 연구는 기존 DPW 모형의 특성을 비교하고 그 한계를 보완할 수 있는 새로운 모형을 제안하고자 한다.

본 연구의 주된 목적은 출발지별 총전이확률을 통제하면서 도착지별 전이확률을 갱신하는 새로운 DPW 모형인 CT-DPW 모형을 제안하고, 그 작동 특성을 기존 모형과의 비교를 통해 밝히는 것이다. 이를 위해 가상 자료를 이용한 결정론적 시뮬레이션을 수행하고, 지역별 인구수, 순이동량, 순이동률, 인구이동 유효도 지수 및 출발지별 총전이확률의 변화에 초점을 맞추어 모형별 결과를 비교한다. 이러한 분석을 통해 CT-DPW 모형의 장점과 한계를 규명하고, 향후 보다 종합적인 다지역 코호트-요인법의 설계와 적용을 위한 기초를 마련하고자 한다.

2. DPW 모형군: 기존 모형의 검토와 새로운 모형의 제안

1) 기본 모형: 정상 마르코프 연쇄 모형

여기서는 정상 또는 시간동질적 마르코프 연쇄 모형을 기본 모형으로 설정하여 다른 도착지 인구가중 모형과 비교한다. 이를 기본 모형으로 삼는 이유는 정상 마르코프 연쇄 모형이 지역 간 전이확률이 시간에 따라 변하지 않는 고정 전이확률 모형을 대표하기 때문이다(이상일·조대현, 2012; Plane and Rogerson, 1994; Dion, 2017). 마르코프 연쇄 모형은 인구의 재분포가 오로지 인구이동만으로 이루어지는 상황을 검토할 수 있게 해주는 프레임워크이다. 특정 기간 동안의 이동 매트릭스를 행 표준화하면 다음과 같은 전이확률 매트릭스 $\mathbf{P}$ 를 구할 수 있다(Plane and Rogerson, 1994).

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{식 (1)}$$

여기서 비대각 요소인 p_{ij} 는 특정 기간 동안 i 지역에서 j 지역으로 이동할 전이확률이고, 대각 요소인 p_{ii} 는 비전이확률, 즉 이동하지 않거나 i 지역 내부에서 이동할 확률을 의미한다.

전이확률 매트릭스 $\mathbf{P}$ 와 추계 기준시점 t 의 지역별 인구수를 나타내는 행벡터 $\mathbf{p}(t)$ 가 주어지면, $t+1$ 시점의 지역별 인구는 다음과 같이 추계된다(Plane and Rogerson, 1994).

$$\mathbf{p}(t+1) = \mathbf{p}(t)\mathbf{P} \quad \text{식 (2)}$$

이 수식은 고정 전이확률 모형의 기본 원리를 미래의 임의 시점으로 일반화할 수 있다는 점에서 중요하다. 즉, 시점 t 로부터 u 개 기간이 경과한 시점의 추계 인구는 다음과 같이 주어진다(Plane and Rogerson, 1994).

$$\mathbf{p}(t+u) = \mathbf{p}(t)\mathbf{P}^u \quad \text{식 (3)}$$

수식 (3)은 추계가 진행되는 동안 기본 전이확률 매트릭

스 $\mathbf{P}$ 가 변하지 않으며, u 개 기간 후의 인구분포는 이 전이 확률 매트릭스를 u 회 반복 적용한 $\mathbf{P}^u$ 를 초기 시점의 인구 수 벡터에 곱함으로써 산출됨을 보여준다.

$\mathbf{P}^u$ 매트릭스의 요소인 p_{ij}^u 는 추계 시작 시점에 지역 i 에 거주하던 사람이 u 개 기간 후 지역 j 에 존재할 확률, 즉 u 단계 전이확률을 의미한다. 전이확률 매트릭스가 정상상태로의 수렴 조건을 만족하는 경우 u 가 충분히 커짐에 따라 $\mathbf{P}^u$ 가 일정한 극한행렬로 수렴한다. 이 극한행렬의 모든 행은 동일한 정상상태 분포 벡터로 구성되며, 벡터의 각 원소는 장기적으로 각 지역이 차지하는 인구비중을 나타낸다.³⁾ 이는 인구추계의 관점에서 마르코프 연쇄 모형이 지니는 핵심적인 장기 속성을 함축한다. 즉, 충분히 먼 미래의 지역별 인구분포는 초기 인구분포와 무관하게 동일한 정상상태 분포로 수렴하며, 장기적인 지역별 인구비중은 전이확률 매트릭스에 내재된 전이구조에 의해 결정된다(Dion, 2017). 초기 인구분포는 단기 및 중기적인 수렴 경로에는 영향을 미치지만, 장기적으로 도달하는 인구분포에는 영향을 미치지 않는다. 따라서 고정 전이확률 모형의 한계는 미래의 전이확률을 일정하게 유지한다는 가정뿐 아니라, 장기적인 지역별 인구분포가 초기 전이확률 매트릭스의 수렴 특성에 의해 결정된다는 데에도 있다.

2) 기존 DPW 모형의 검토

DPW 모형은 기준시점의 전이확률을 고정하여 반복 적용하는 것이 아니라 각 추계 라운드에서 산출된 도착지별 인구규모 또는 인구비중을 가중치로 사용하여 다음 라운드의 출발지-도착지 간 전이확률을 다시 계산하는 갱신형 변동 전이확률 모형이다. 기본적으로 도착지의 상대적 인구비중이 증가하면 해당 지역으로 향하는 전이확률이 높아지고, 감소하면 낮아지는 방식으로 작동한다. 따라서 미래의 전이확률은 추계 시작 전에 모두 확정되는 것이 아니라, 각 라운드의 인구추계 결과에 반응하여 재귀적으로 갱신된다. Plane(1982)이 자신의 모형을 DPW 모형이라고 지칭하였으나, 본 연구에서는 DPW 모형을 특정 모형의 명칭이 아니라 도착지 인구를 전이확률 갱신의 핵심 가중 요소로 사용하는 갱신형 변동 전이확률 모형의 포괄적 범주로 사용하고자 한다. 이 DPW 모형군에는 피니 모형(Feeney, 1973), 플레인 모형(Plane, 1982), 디온 모형(Dion, 2017)이 포함된다.⁴⁾

(1) 피니 모형

피니 모형은 다음과 같이 주어진다(Feeney, 1973; Plane and Rogerson, 1994).

$$p_{ij}^t = p_{ij}^{ref} \frac{P_j^t / \sum_{k \neq i} P_k^t}{P_j^{ref} / \sum_{k \neq i} P_k^{ref}}, \quad i \neq j \quad \text{식 (4)}$$

여기서 p_{ij}^t 는 t 시점에서 다음 시점 사이의 i 지역에서 j 지역으로의 전이확률, p_{ij}^{ref} 는 준거시점(비교 기준시점)에서 그 다음 시점 사이의 i 지역에서 j 지역으로의 전이확률, P_j^{ref} 는 준거시점의 j 지역의 인구수, P_k^{ref} 는 준거시점의 임의의 도착지 k 지역의 인구수, P_j^t 는 t 시점의 j 지역의 인구수, P_k^t 는 t 시점의 임의의 도착지 k 지역의 인구수이다.⁵⁾

이 식의 기본 구조는 준거시점의 전이확률 p_{ij}^{ref} 을 출발점으로 삼고, 준거시점 대비 t 시점의 도착지 j 인구 변화율을 가중치로 적용하는 것이다. 즉, 수식 (4)의 뒤 부분은 도착지 j 의 인구가 잠재적 도착지 전체 인구에서 차지하는 비중에서의 변화를 나타내며, 이 값이 1보다 크면 지역 j 로의 전이확률이 준거시점보다 높아지고, 1보다 작으면 낮아진다. 잠재적 도착지에 지역 i 자신은 포함되지 않기 때문에 임의의 도착지의 상대적 인구비중 변화는 출발지에 따라 달리 계산된다.

따라서 피니 모형은 준거시점의 출발지-도착지 간 전이 구조를 기본 틀로 유지하면서, 추계 과정에서 변화하는 도착지별 인구규모를 반영하여 전이확률을 매 라운드 다시 계산하는 모형이다. 여기서 준거시점은 재귀적 갱신 메커니즘을 염두에 둘 때 직전시점($t-1$)으로 설정하는 것이 일반적이지만, 추계 시작시점(0)으로 설정할 수도 있다. 일정한 조건이 만족된다면, 두 경우는 대수적으로 동치이며 동일한 p_{ij}^t 를 산출한다.⁶⁾ 전자인 재귀형 표현에서는 직전 라운드의 전이확률과 인구변화를 이용하여 다음 라운드의 확률을 갱신하고, 후자인 누적형 표현에서는 추계 기준시점의 전이확률에 기준시점 이후 누적된 인구변화를 직접 반영한다. 그러나 결과는 동일하다.

비전이확률은 $p_{ii} = 1 - \sum_{k \neq i} p_{ik}$ 에 의거해 사후적으로 결정된다. 피니 모형의 중요한 구조적 한계는 지역 i 의 전이확률의 합, 즉 총전이확률 $\sum_{k \neq i} p_{ik}$ 를 합리적인 범위 안에서 직접 통제하는 수리적 장치가 없다는 점이다(Plane and Rogerson, 1994). 즉, 총전이확률이 1보다 커짐으로써 비전이확률이 음수가 되는 것과 같은 극단적 결과가 나타날 수 있는데, 실제 적용에서 그 가능성은 낮을 수 있으나, 조정계수의 부재는 여전히 모형의 잠재적 약점이다.

(2) 플레인 모형

플레인 모형은 다음과 같이 주어진다(Plane, 1982; Plane and Rogerson, 1994).

$$p_{ij}^t = a_i^t p_{ij}^{ref} (P_j^t / P_j^{ref}) \quad \text{식 (5)}$$

$$a_i^t = 1 / \sum_k [p_{ik}^{ref} (P_k^t / P_k^{ref})]$$

여기서 a_i^t 는 출발지 i 의 조정계수 또는 정규화 계수이다. 이 계수는 도착지 인구변화를 반영하여 잠정적으로 산출된 전이확률들을 출발지별로 다시 조정함으로써, 비전이 확률을 포함한 전이확률 행렬의 행합이 $\sum_k p_{ik} = 1$ 을 만족하도록 한다. 따라서 여기서 1로 유지되는 것은 지역 간 이동확률만을 합산한 총전이확률이 아니라, 대각원소 p_{ii}^t 를 포함한 전체 확률의 합이다.

수식 (5)의 기본 구조는 준거시점의 출발지 i 의 전이확률을 도착지 j 의 인구변화비 P_j^t / P_j^{ref} 로 가중한 다음, 이를 조정계수 a_i^t 를 이용하여 행별로 정규화하는 것이다. 따라서 준거시점에 비해 인구가 빠르게 증가한 지역은 모든 출발지에서 상대적으로 더 높은 가중치를 받으며, 반대로 인구가 감소하거나 상대적으로 느리게 증가한 지역은 더 낮은 가중치를 받는다. 피니 모형과 마찬가지로, 준거시점을 직전 시점으로 설정하는 재귀형 표현과 추계 기준시점으로 설정하는 누적형 표현은 대수적으로 동치이며 동일한 결과를 산출한다.

수식 (5)는 수식 (4)의 피니 모형과 유사하지만 두 가지 중요한 차이가 있다. 첫째, 피니 모형은 가능한 도착지들 사이에서 특정 도착지의 상대적 인구비중이 어떻게 변화했는지를 가중치로 사용하는 반면, 플레인 모형은 각 도착지 인구수의 변화비 P_j^t / P_j^{ref} 를 직접 사용한다. 다만 플레인 모형의 인구수 변화비를 각 시점의 전체 인구로 나눈 상대적 인구비중의 변화비로 대체하더라도 결과는 달라지지 않는다. 상대적 인구비중을 사용하면 모든 도착지에 공통으로 포함되는 전체 인구의 변화비가 조정계수의 분자와 분모에서 소거되기 때문이다. 둘째, 플레인 모형의 합산 범위에는 $k \neq i$ 라는 제한이 없다. 피니 모형은 서로 다른 두 지역 사이의 전이확률만을 인구가중 방식으로 갱신한 후 비전이확률을 잔차로 산출한다. 반면 플레인 모형은 출발지 i 자체도 하나의 잠재적 도착지로 포함하여 대각원소 p_{ii}^t 를 다른 전이확률과 동일한 방식으로 갱신한다. 즉, 지역 간 전이확률뿐 아니라 동일 지역에 남아 있을 확률도 도착지 인구변화의 영향을 받으며, 조정계수를 통해 이들 확률

의 합이 1이 되도록 제약된다. 이는 플레인 모형이 피니 모형의 개념적 한계를 보완하는 방식으로 동일 지역 잔류확률을 다른 도착지로의 이동확률과 같은 체계 안에서 처리한다는 것을 의미한다.

플레인 모형은 피니 모형과 마찬가지로 인구분포와 전이 확률 사이에 내생적 되먹임을 형성하는 갱신형 변동 전이 확률 모형이다. 특히 비전이확률까지 가중·갱신하기 때문에 이러한 비선형적 되먹임은 피니 모형보다 강하게 나타날 수 있으며, 특정 지역의 인구증가가 해당 지역으로의 전이확률을 다시 높이는 누적적 집중 현상을 초래할 수 있다. Dion(2017)도 이러한 구조로 인해 플레인 모형의 비선형적 되먹임이 피니 모형보다 강하게 나타날 수 있음을 지적하였다.

(3) 디온 모형

마지막으로 디온 모형은 다음과 같이 주어진다(Dion, 2017).

$$p_{ij}^t = p_{ij}^{ref} \frac{P_j^t / \sum_k P_k^t}{P_j^{ref} / \sum_k P_k^{ref}}, \quad i \neq j \quad \text{식 (6)}$$

수식 (6)은 수식 (4)에 제시된 피니 모형과 유사하다. 두 모형의 핵심적인 차이는 도착지의 상대적 인구비중을 산출하는데 사용되는 모집단의 범위에 있다. 피니 모형은 출발지 i 를 제외한 지역들의 인구를 기준으로 도착지 j 의 상대적 인구비중을 산출하는 반면, 디온 모형은 출발지를 포함한 전체 지역의 인구를 분모로 사용한다. 따라서 수식 (6)의 뒤에 곱해지는 도착지 j 의 상대적 인구비중 변화율은 출발지 i 와 관계없이, 동일한 도착지에 대해 모든 출발지에 공통적으로 적용된다. 다만 수식 (6) 자체는 서로 다른 두 지역 사이의 전이확률, 즉 $i \neq j$ 인 경우에만 적용되며, 비전이 확률은 갱신된 지역 간 전이확률의 합을 1에서 차감하여 산출한다. 피니 모형 및 플레인 모형과 마찬가지로, 준거시점을 직전 시점으로 설정하는 재귀형 표현과 추계 기준시점으로 설정하는 누적형 표현은 대수적으로 동치이며 동일한 결과를 산출한다.

디온은 자신의 모형을 NMRP 모형(Net Migration Rates Preservation Model, 순이동률 보존 모형)이라고 부른다. 이 모형의 목적은 순이동률을 완전히 고정하는 것이 아니라, 고정 전이확률 모형에서 지역별 인구비중의 변화로 인해 순이동률이 기계적으로 크게 변동하는 현상을 완화하

는 데 있다. 모든 지역의 순이동량 합은 0이어야 하므로 지역별 순이동량을 동시에 일정하게 유지하는 것은 일반적으로 가능하지 않으며, 디용 모형은 준거시점의 순이동량 구조에서 나타나는 변화를 가능한 한 억제하는 방식을 취한다(Dion, 2017). 디용 모형은 플레인 모형과 달리 비전이 확률을 도착지 인구변화에 따라 직접 가중하는 것이 아니라, 피나 모형과 마찬가지로 갱신된 지역 간 전이확률의 합에 따라 잔차로 결정한다.

또한 디용 모형에는 플레인 모형과 같은 명시적인 행별 조정계수가 없으므로, 전이확률은 도착지 인구비중의 변화에 선형적으로 반응한다. 이러한 선형적 조정은 플레인 모형에서 나타나는 강한 비선형적 되먹임을 완화하고 순이동량을 비교적 안정적으로 유지하는 장점이 있다. 그러나 되먹임 효과 자체가 제거되는 것은 아니며, 추계기간이 충분히 길거나 극단적인 조건이 지속되면 특정 지역으로 인구가 집중되고 다른 지역의 인구가 소멸하는 결과가 나타날 수 있다. 따라서 Dion(2017) 자신도 지적한 바와 같이, 플레인 모형보다 집중 속도는 훨씬 완만하지만 장기적으로 극단적인 인구집중 가능성을 완전히 배제하지는 못한다. 또한 디용 모형에는 출발지별 확률합을 직접 제약하는 조정계수가 없으므로 지역 간 전이확률의 합이 이론적으로 1을 초과할 가능성도 배제할 수 없다. 실제 적용에서 전이확률과 지역별 인구비중의 변화가 크지 않은 경우에는 이러한 문제가 발생할 가능성이 낮지만, 장기 추계나 극단적인 시나리오에서는 출발지별 총전이확률과 인구집중의 진행 정도를 함께 점검하고, 필요한 경우 별도의 비례조정을 적용할 필요가 있다.

3) 새로운 DPW 모형의 제안: CT-DPW 모형

여기서는 DPW 모형군의 또 다른 형태로 'CT-DPW 모형 (controlled-total destination population-weighted model, 총전이확률 통제형 도착지 인구가중 모형)'을 제안한다. CT-DPW는 다음과 같이 주어진다.⁷⁾

$$p_{ij}^t = \alpha_i^t p_{ij}^{ref} (P_j^t / P_j^{ref}), \quad i \neq j \quad \text{식 (7)}$$

$$\alpha_i^t = q_i^{ref} / \sum_{k \neq i} [p_{ik}^{ref} (P_k^t / P_k^{ref})]$$

여기서 q_i^{ref} 은 준거시점에서 출발지 i 의 총전이확률로서, 출발지 i 에서 자신을 제외한 모든 지역으로 이동할 전이확률의 합으로 정의된다($q_i^{ref} = \sum_{k \neq i} p_{ik}^{ref}$). 수식 (7)의 전체

적인 구조는 수식 (5)의 플레인 모형과 유사하지만, 조정계수의 역할에는 중요한 차이가 있다. 플레인 모형의 조정계수는 비전이확률을 포함한 전체 행 합이 1이 되도록 정규화하는 반면, CT-DPW 모형의 조정계수는 지역 간 전이확률의 합이 준거시점의 총전이확률 q_i^{ref} 과 같도록 제약한다. 따라서 비전이확률도 $1 - q_i^{ref}$ 에 따라 일정하게 유지된다.

CT-DPW 모형은 이를 통해 출발지별 전체 이동성의 수준과 도착지별 배분구조를 분리한다. 출발지 i 에서 다른 지역으로 이동할 총전이확률 q_i^{ref} 은 통제하는 한편, 그 확률이 각 도착지에 어떻게 배분되는지는 도착지별 인구변화에 따라 갱신한다. 즉, 전체 이동성은 통제하면서 변화하는 인구분포를 도착지 선택에 반영하는 2단계 구조이다. 따라서 CT-DPW 모형 역시 추계 결과를 이용하여 다음 라운드의 전이확률을 재계산하는 갱신형 변동 전이확률 모형에 해당한다. 앞의 세 모형과 마찬가지로, 준거시점을 직전 시점으로 설정하는 재귀형 표현과 추계 기준시점으로 설정하는 누적형 표현은 대수적으로 동치이며 동일한 결과를 산출한다.

CT-DPW 모형의 가장 중요한 특징은 도착지 인구가중에 따른 되먹임으로 개별 지역 간 전이확률이 변화하더라도, 그 합인 출발지별 총전이확률은 의도적으로 통제된다는 점이다. 특정 도착지 j 의 인구가 증가하여 P_j^t / P_j^{ref} 가 커지더라도, p_{ij}^t 가 반드시 p_{ij}^{ref} 보다 커지는 것은 아니다. 수식 (7)로부터 다음 관계를 도출할 수 있다.

$$\frac{p_{ij}^t}{p_{ij}^{ref}} = \frac{P_j^t / P_j^{ref}}{\sum_{k \neq i} (p_{ik}^{ref} / q_i^{ref}) (P_k^t / P_k^{ref})} \quad \text{식 (8)}$$

즉, 지역 j 로의 전이확률이 증가하려면 지역 j 의 인구증가율이 단순히 양수인 것만으로는 충분하지 않으며, 출발지 i 의 준거시점 도착지 선택비중으로 가중한 다른 모든 도착지의 평균 인구증가율보다 커야 한다. 따라서 CT-DPW 모형은 도착지의 절대적 인구증감보다는 다른 도착지와 비교한 상대적 인구변화에 반응한다. 한 도착지로의 전이확률이 증가하면 고정된 총전이확률 안에서 다른 도착지로의 전이확률은 그만큼 감소한다.

이러한 구조는 기존 DPW 모형에서 총전이확률이 내생적으로 변하거나 경우에 따라 과도하게 커질 수 있는 문제를 통제한다. 또한 지역 간 전이확률의 합이 1을 초과할 가능성을 원천적으로 방지하며, 비전이확률도 항상 유효한 범위 안에서 유지한다. 실제 적용에서는 출발지별 총전이확률의 기준 수준을 과거의 평균값이나 별도의 가정에 따

라 설정하고, 도착지별 배분만 추계 과정에서 변화하는 인구분포에 반응하도록 할 수 있다는 장점이 있다. 다만 CT-DPW 모형이 도착지 인구가중에 따른 되먹임 자체를 제거하는 것은 아니다. 특정 지역의 인구증가가 그 지역으로의 전이확률을 높이고, 이것이 다시 인구증가를 유발하는 누적적 과정은 여전히 작동할 수 있다. 따라서 장기적으로 도착지별 이동비중이나 인구가 특정 지역에 집중될 가능성은 남아 있다. 다만 이러한 되먹임은 고정된 총전이확률의 범위 안에서 도착지 간 배분에만 작용하며, 출발지별 전체 이동확률 자체를 확대하거나 축소하지 못한다는 점에서 플레인 모형이나 디움 모형보다 통제된 형태로 작동한다.

3. 시뮬레이션을 통한 모형 간 비교 분석

1) 시뮬레이션 설계

본 장에서는 고정 전이확률 모형과 네 가지 도착지 인구가중 모형이 추계 과정에서 어떠한 차이를 나타내는지를 비교하기 위해 본 장에서는 고정 전이확률 모형과 네 가지 도착지 인구가중 모형의 작동 특성을 동일한 조건에서 비교하기 위해, 3개 지역으로 구성된 기존의 가상 인구체계를 이용하였다.⁸⁾ 분석 대상은 고정 전이확률 모형, 피니 모형, 플레인 모형, 디움 모형 및 본 연구에서 제안한 CT-DPW 모형이다. 시뮬레이션의 목적은 특정 모형의 예측 정확성을 경험적으로 평가하는 것이 아니라, 동일한 초기조건에서 각 모형의 전이확률 갱신 방식이 지역별 인구분포와 이동 지표의 장기적 변화에 어떠한 차이를 초래하는지를 규명하는 데 있다. 본 분석은 개인별 이동 여부를 확률적으로 추출하는 미시시뮬레이션이 아니라, 전이확률에 출발지 인구를 곱하여 산출한 기대이동량을 반복적으로 적용하는 결정론적 시뮬레이션이다. 따라서 동일한 초기 인구와 전이확률이 주어지면 항상 동일한 결과가 산출된다.

(1) 초기 인구와 전이확률

가상 지역체계는 A, B, C의 세 지역으로 구성된다. 추계 기준시점인 Step 0의 지역별 인구는 각각 2,000명, 6,000명, 10,000명이며, 전체 인구는 18,000명이다. 준거시점의 전이확률 매트릭스는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{P}^{ref} = \begin{bmatrix} 0.80 & 0.10 & 0.10 \\ 0.05 & 0.85 & 0.10 \\ 0.03 & 0.06 & 0.91 \end{bmatrix}$$

행은 출발지를, 열은 도착지를 나타낸다. 예를 들어 $p_{AB}^{ref} = 0.10$ 은 준거시점에서 A 지역 인구의 10%가 다음 시점에 B 지역으로 전이됨을 의미한다. 대각원소는 해당 지역에 계속 거주하는 비전이확률이며, 비대각원소는 서로 다른 지역 사이의 전이확률이다. 각 행의 합은 1이므로 모든 인구는 다음 시점에 세 지역 가운데 하나에 위치하게 된다. 출발지별 총전이확률은 비대각원소의 합으로 정의된다. 이에 따라 A, B, C의 총전이확률은 각각 0.20, 0.15, 0.09이다. 초기 인구가 가장 작은 A 지역의 총전이확률이 가장 높고, 초기 인구가 가장 큰 C 지역의 총전이확률이 가장 낮도록 설정되어 있다. 또한 지역 간 전이확률이 대칭적이지 않으므로 동일한 두 지역 사이에서도 이동 방향에 따라 전이확률이 다르다.

(2) 추계 과정과 모형 적용

추계는 Step 0을 기준시점으로 하여 Step 100까지 수행하였다. 각 Step은 동일한 길이의 하나의 추계 구간을 의미하며, 특정한 실제 연도와 직접 대응시키지는 않았다. 인구수는 Step 0부터 Step 100까지 산출되는 반면, 이동량과 이동률은 두 인접 시점 사이에서 발생하는 흐름이므로 Step 1부터 Step 100까지 산출하였다. 출생, 사망 및 분석대상 지역 체계 외부와의 이동은 고려하지 않았다. 이에 따라 시뮬레이션 전체에서 총인구는 18,000명으로 일정하게 유지되며, 모형 간 차이는 오직 지역 간 인구 재분배의 차이에서 발생한다. 이러한 설정은 각 모형의 전이확률 갱신 방식이 지역별 인구분포에 미치는 효과를 다른 인구변동 요인의 개입 없이 비교하기 위한 것이다.

모든 모형에는 동일한 초기 인구와 준거 전이확률 행렬을 적용하였다. 고정 전이확률 모형에서는 준거시점의 전이확률을 100개 추계 구간에 걸쳐 그대로 유지하였다. 반면 피니, 플레인, 디움 및 CT-DPW 모형에서는 각 Step에서 산출된 지역별 인구를 이용하여 다음 Step에 적용할 전이확률을 갱신하였다. 실제 계산에서는 준거시점을 직전 시점으로 설정하는 재귀형 표현을 사용하였다. 모형 간 차이는 이 과정에서 전이확률을 갱신하는 방식에 있다. 피니 모형은 출발지를 제외한 도착지들의 상대적 인구비중 변화를 반영하

고, 플레인 모형은 비전이확률을 포함한 모든 확률을 도착지 인구변화에 따라 갱신한다. 디용 모형은 전체 인구에서 각 도착지가 차지하는 비중의 변화를 지역 간 전이확률에 적용하며, CT-DPW 모형은 도착지별 배분구조를 갱신하되 출발지별 총전이확률을 준거시점 수준으로 고정한다.

(3) 비교 지표

모형별 시뮬레이션 결과는 지역별 인구분포의 변화, 이동에 의한 인구 재분배, 그리고 전이확률의 작동 특성이라는 세 측면에서 비교하였다. 이를 위해 지역별 인구수, 순이동량, 순이동률, MEI(migration effectiveness index, 인구이동 유효도 지수), 총전이확률의 다섯 가지 지표를 선정하였다. 인구수는 Step 0부터 Step 100까지 비교하였으며, 두 인접 시점 사이에서 발생하는 이동 및 전이 관련 지표는 Step 1부터 Step 100까지 비교하였다.

지역별 인구수는 각 모형이 반복적으로 적용되면서 지역별 인구분포를 어떻게 변화시키는지 보여주는 최종적인 결과지표이다. 본 시뮬레이션에서는 출생, 사망 및 분석대상 지역체계 외부와의 이동을 고려하지 않으므로 전체 인구는 일정하게 유지된다. 따라서 지역별 인구수의 변화는 전적으로 지역 간 이동에 따른 인구 재분배를 의미한다. 이 지표를 통해 각 모형이 장기적으로 일정한 지역별 인구분포에 수렴하는지, 특정 지역으로 인구를 집중시키는지, 그리고 그러한 집중의 속도와 정도가 어떻게 다른지를 평가하였다.

순이동량은 각 지역의 전입량에서 전출량을 차감한 값이다. 양의 값은 순유입을, 음의 값은 순유출을 의미한다. 순이동량은 한 추계 구간 동안 이동에 의해 실제로 어느 정도의 인구가 지역 간에 재분배되었는지를 절대적인 규모로 보여준다. 특히 지역별 인구규모가 장기적으로 크게 변화할 경우에는 순이동의 방향이 유지되더라도 순이동량이 증가하거나 감소할 수 있으므로, 모형별 인구 재분배의 규모와 지속성을 평가하는 데 사용하였다.

순이동률은 순이동량을 해당 추계 구간 시작 시점의 지역 인구로 나누고 100을 곱한 값이다. 순이동률이 인구 재분배의 절대적인 규모를 나타낸다면, 순이동률은 순이동이 해당 지역의 인구규모에 비해 어느 정도의 영향을 미치는지를 나타낸다. 따라서 인구규모가 서로 다른 지역이나 시간이 지나면서 인구규모가 크게 변화하는 지역을 비교하는 데 적합하다. 특히 디용 모형은 순이동률의 급격한 변화를 완화하기 위해 제한되었으므로, 순이동률은 디용 모형의 특성을 평가하는 핵심 지표이다.

MEI는 순이동량을 총이동량으로 나누고 100을 곱한 값으로, 전입과 전출이 실질적인 인구 재분배로 이어지는 정도 혹은 인구이동의 편향성을 평가한다(이상일·이소영, 2023; 이상일 등, 2024; Plane, 1994; Plane and Rogerson, 1994; Kim and Lee, 2025). MEI는 -100에서 100 사이의 값을 갖는데, 양의 값은 순유입, 음의 값은 순유출을 의미하며, 절댓값이 클수록 이동이 어느 한 방향으로 편중되어 인구 재분배 효과가 크다는 것을 뜻한다. 반대로 0에 가까울수록 전입과 전출이 서로 상쇄되어 총이동 규모에 비해 실질적인 인구 재분배 효과가 작다는 것을 의미한다. 전입량과 전출량이 모두 0인 경우에는 MEI를 산출할 수 없으므로 결측값으로 처리하였다. MEI는 순이동률과 밀접하게 관련되지만, 특정 지역의 전입과 전출이 얼마나 일반적인지를 나타내는 이동의 방향적 편향 지표라는 점에서 순이동률과 다른 특성을 보일 수 있어 비교 지표에 포함하였다.

총전이확률은 출발지 인구가 자신이 거주하던 지역을 제외한 다른 모든 지역으로 이동할 확률을 합한 값이다. 이는 인구수나 순이동량과 같은 결과지표라기보다, 각 모형이 출발지별 전체 이동성을 어떻게 처리하는지를 보여주는 내부 작동지표이다. 고정 전이확률 모형에서는 준거시점의 총전이확률이 그대로 유지되지만, 피니, 플레인 및 디용 모형에서는 도착지 인구의 변화와 확률 갱신 방식에 따라 총전이확률이 변화할 수 있다. 반면 CT-DPW 모형에서는 개별 도착지로의 전이확률이 변화하더라도 그 합은 준거시점의 총전이확률로 고정된다. 따라서 이 지표를 통해 각 모형이 도착지별 이동배분만 변화시키는지, 아니면 출발지별 전체 이동성까지 함께 변화시키는지 평가하였다.

이상의 지표들은 각각 서로 다른 측면을 평가한다. 인구수는 모형이 산출하는 최종적인 지역별 인구분포를, 순이동량은 인구 재분배의 절대적 규모를, 순이동률은 지역 인구에 대한 순이동의 상대적 영향을 나타낸다. MEI는 지역 간 인구이동의 편향성을 보여주며, 총전이확률은 모형 내부에서 출발지별 이동성이 어떻게 변화하거나 통제되는지를 나타낸다. 전출량, 전입량, 총이동량과 이에 대응하는 이동률도 시뮬레이션 과정에서 산출하였다. 그러나 이들은 순이동량, 순이동률 및 MEI를 구성하거나 해석하는 기초지표의 성격을 가지므로, 본문에서는 위의 다섯 지표를 중심으로 모형을 비교하고 나머지 지표는 필요한 경우 결과 해석을 보조하는 데 사용하였다.

2) 비교 분석 결과

(1) 지역별 인구수

그림 1은 동일한 초기 인구와 준거 전이확률을 적용하더라도 전이확률의 갱신 방식에 따라 지역별 인구의 변화경로와 장기적 분포가 크게 달라짐을 보여준다. 초기 전이구조에서 A는 순유입 지역이고 B와 C는 순유출 지역이므로 모든 모형에서 A의 인구는 증가하고 B와 C의 인구는 감소한다. 그러나 인구변화의 속도와 최종적인 지역별 분포는 모형마다 현저한 차이를 보인다.

고정 전이확률 모형에서는 세 지역의 인구가 초기 몇 Step 동안 완만하게 변한 뒤 비교적 빠르게 일정한 분포에 수렴한다. A의 인구는 약 2,800명으로 증가하고, B와 C의 인구는 각각 약 5,700명과 9,500명으로 감소한다. 이는 동일한 전이확률 행렬을 반복 적용한 결과이며, 인구변화가 가장 제한적으로 나타난다. 그러나 변화된 지역별 인구규모가 이후 전이확률에 반영되지 않는다는 점에서 인구분포와 이동행태 사이의 상호작용을 고려하지 못한다.

피니 모형에서는 A의 인구가 약 5,500명까지 증가하고 B와 C는 각각 약 3,900명과 8,600명으로 감소한다. 고정 전이확률 모형보다 A로의 인구 재분배가 강하게 나타나지만,

특정 지역으로 전체 인구가 집중되지는 않는다. 이는 출발지를 제외한 다른 지역들의 상대적 인구비중 변화에 따라 지역 간 전이확률을 갱신하면서도 비전이확률을 직접 가중하지 않기 때문이다. 따라서 피니 모형은 인구변화에 대한 반응성과 장기적 안정성을 어느 정도 함께 유지하는 것으로 볼 수 있다.

플레인 모형에서는 가장 강한 인구집중이 나타난다. A의 인구는 약 15~20 Step 만에 전체 인구인 18,000명에 거의 도달하고, B와 C의 인구는 같은 기간에 0에 가까워진다. 플레인 모형은 도착지 인구변화에 따라 지역 간 전이확률뿐 아니라 비전이확률까지 직접 갱신한다. 이에 따라 A의 인구 증가는 A로의 전이확률과 A에 머무를 확률을 동시에 높이고, B와 C의 인구감소는 이들 지역으로의 전이 및 잔류 가능성을 동시에 낮춘다. 이러한 되먹임이 반복되면서 초기의 지역 간 차이가 단기간에 극단적으로 확대된다. 인구분포의 변화에 민감하게 반응한다는 장점은 있으나, 장기 인구추계에서는 현실성이 낮은 지역 소멸과 단일 지역 집중을 초래할 가능성이 크다.

디옹 모형에서도 장기적으로 A가 전체 인구를 거의 흡수하고 B와 C의 인구가 0에 접근한다. 다만 이러한 변화는 플레인 모형보다 완만하게 진행되어, A의 인구가 전체 인구

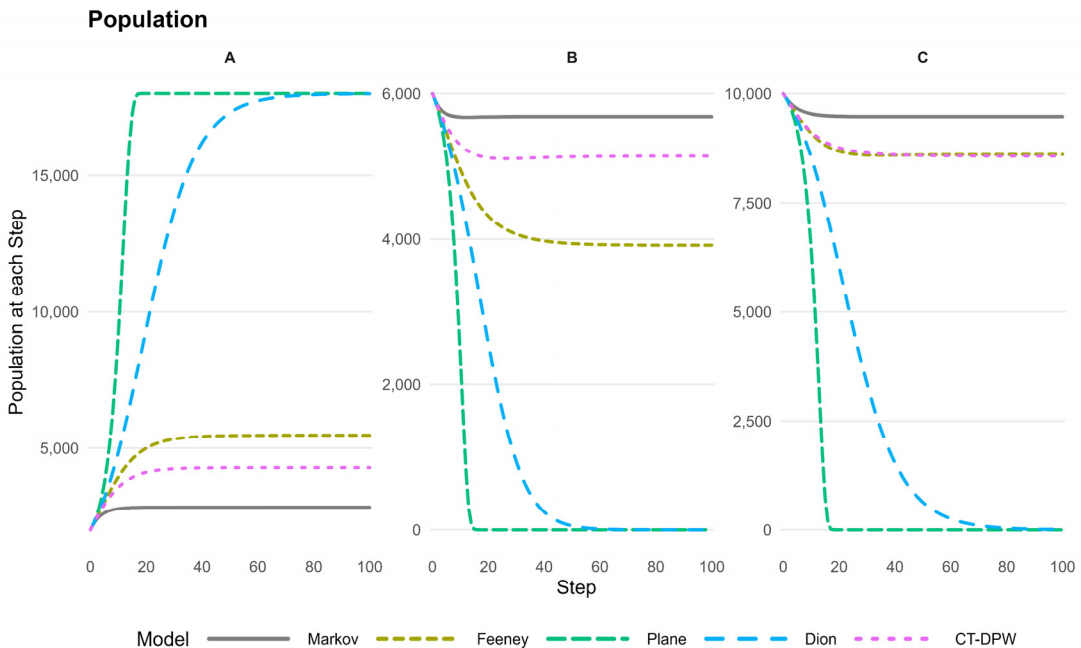


그림 1. 모형별 지역 인구의 변화, Step 0-100

에 가까워지는 데 약 70~80 Step이 소요된다. 이는 디옴 모형이 비전이확률을 직접 갱신하지 않고, 전체 인구에서 각 도착지가 차지하는 비중의 변화만을 지역 간 전이확률에 반영하기 때문이다. 따라서 플레인 모형의 급격한 되먹임은 상당히 완화되지만, 인구가 증가한 지역으로의 전이확률이 다시 높아지는 누적적 과정 자체는 제거되지 않는다. 이 결과는 디옴 모형이 극단적 집중을 지연시킬 수는 있지만 장기적으로 방지하지는 못한다는 점을 보여준다.

CT-DPW 모형에서는 A의 인구가 약 4,300명으로 증가하고 B와 C의 인구는 각각 약 5,100명과 8,600명으로 감소한 뒤 안정된다. 네 가지 DPW 모형 가운데 가장 완만한 인구 재분배를 산출하며, 결과는 고정 전이확률 모형과 피니 모형 사이에 위치한다. CT-DPW 모형에서는 도착지별 인구 변화에 따라 개별 전이확률의 배분은 달라지지만, 출발지별 총전이확률은 준거시점 수준으로 고정된다. 따라서 특정 지역의 인구증가가 해당 지역으로의 전이확률을 높이더라도 그 변화는 고정된 총전이확률 안에서 다른 도착지와의 상대적 배분을 조정하는 방식으로만 나타난다.

종합하면 인구집중의 강도와 속도는 대체로 플레인, 디옴, 피니, CT-DPW, 고정 전이확률 모형의 순서로 나타난다. 플레인 모형과 디옴 모형은 인구분포의 변화에 강하게

반응하지만, 장기적으로 특정 지역에 전체 인구가 집중되는 극단적인 결과를 보인다. 피니 모형은 이러한 되먹임을 상당히 완화하고, CT-DPW 모형은 총전이확률을 통제함으로써 보다 안정적인 지역별 인구분포를 산출한다. 다만 CT-DPW 모형의 안정성은 출발지별 전체 이동성이 시간에 따라 달라질 가능성을 제한하는 데서 비롯되므로, 이는 반응성을 일부 희생한 보수적 특성으로 해석할 필요가 있다.

(2) 순이동량

그림 2는 각 모형에서 지역별 순이동량이 시간에 따라 어떻게 변화하는지를 보여준다. 순이동량은 전입량에서 전출량을 차감한 값이므로, 특정 시점에 이동을 통해 실제로 어느 정도의 인구 재분배가 이루어지고 있는지를 절대적 규모로 보여준다. 모든 모형에서 A는 양(+)의 순이동을, B와 C는 음(-)의 순이동을 나타내지만, 그 크기와 지속기간은 모형에 따라 상당히 다르다.

고정 전이확률 모형에서는 A의 순이동량이 초기에는 비교적 크게 나타나지만 빠르게 감소하여 0에 수렴한다. B와 C의 순유출도 같은 방식으로 단기간에 축소된다. 이는 전이확률이 고정된 상태에서 인구분포가 점차 정상상태에 접근함에 따라 지역 간 순이동의 여지가 빠르게 줄어들기

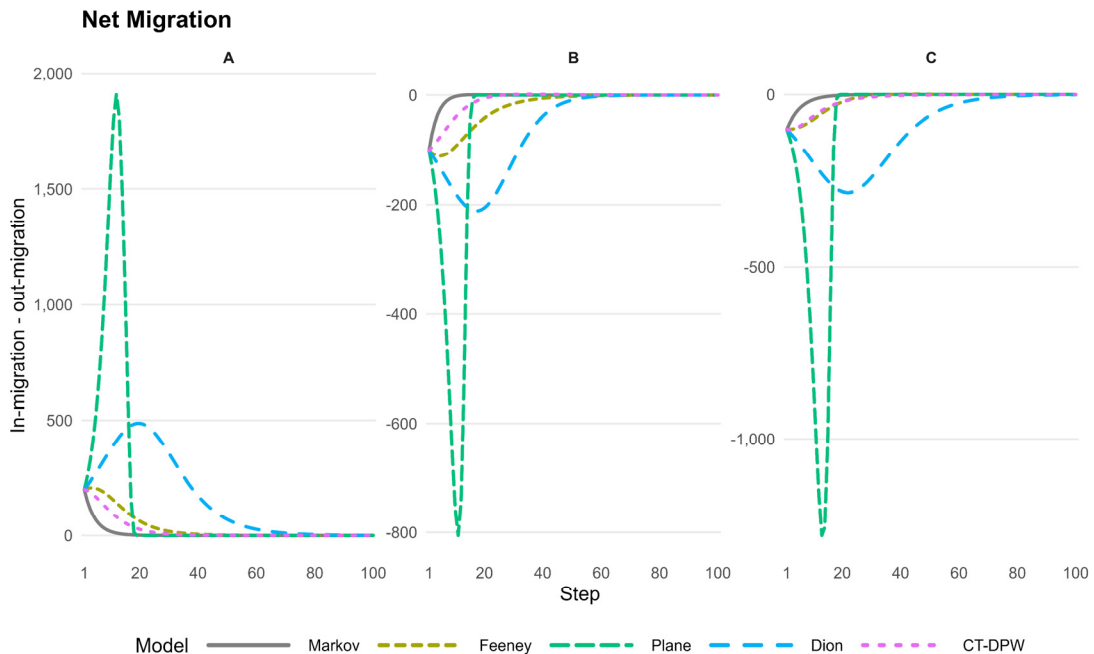


그림 2. 모형별 지역 순이동량의 변화, Step 1~100

때문이다. 따라서 이 모형은 장기적으로 순이동이 소멸하는 가장 전형적인 경로를 보여준다.

피니 모형에서는 A의 순이동이 고정 전이확률 모형보다 더 오랫동안 유지되며, B와 C의 순유출도 보다 완만하게 감소한다. 그러나 시간이 지나면서 순이동량은 결국 0에 접근한다. 이는 A의 상대적 매력도가 높아지더라도 B와 C의 인구가 감소함에 따라 이들 지역에서 A로 이동할 수 있는 인구의 절대 규모가 점차 줄어드는 반면, A 자체의 인구증가는 A의 전출확률을 직접 낮추지 않으므로 A에서도 상당한 규모의 전출이 계속 발생하기 때문이다. 그 결과 A의 순유입 우위는 점차 약화되고 지역별 인구분포는 장기균형에 접근한다(Plane and Rogerson, 1994, 216-217; Dion, 2017). 따라서 피니 모형은 고정 전이확률 모형보다 인구분포의 변화에 민감하게 반응하지만, 순이동의 확대가 무한히 지속되지 않는 비교적 안정적인 경로를 나타낸다.

플레인 모형에서는 순이동량의 극단적 변동이 가장 뚜렷하다. A의 순이동량은 초기 몇 Step 동안 급격히 증가하여 매우 큰 값을 기록한 뒤, B와 C의 인구가 거의 소멸함에 따라 갑자기 0으로 떨어진다. B와 C의 경우에도 순유출 규모가 단기간에 급증하였다가 역시 급속히 0에 접근한다. 이는 비전이확률까지 포함한 전체 행이 도착지 인구변화에 따라 갱신되면서 A로의 집중이 매우 빠르게 증폭되기 때문이다. 순이동량 그래프는 플레인 모형의 높은 반응성을 잘 보여주지만, 동시에 그 반응성이 지나치게 강하여 단기간에 비현실적인 인구집중을 초래할 수 있음을 시사한다.

디용 모형에서도 A의 순이동량은 초기 이후 한동안 증가하여 상당한 수준에 도달한 뒤 점차 감소한다. B와 C의 순유출 역시 초기에는 확대되지만 이후 점차 축소되며, 장기적으로 0에 접근한다. 이 경로는 플레인 모형과 같은 방향의 되먹임이 존재하되 그 강도는 훨씬 약하다는 점을 보여준다. 즉, 디용 모형은 순이동량의 확대를 통해 도착지 인구가중의 효과를 분명히 드러내지만, 플레인 모형처럼 즉각적이고 폭발적인 집중으로 나아가지는 않는다. 그럼에도 장기적으로는 순이동량이 한 방향으로 상당 기간 유지되면서 특정 지역으로의 누적적 집중이 계속된다는 점에서, 보다 완만한 형태의 집중 모형으로 해석할 수 있다.

CT-DPW 모형에서는 A의 순이동량이 초기 이후 빠르게 감소하되, 고정 전이확률 모형보다는 다소 큰 수준을 일정 기간 유지한 뒤 0에 접근한다. B와 C의 순유출도 같은 방식으로 완만하게 축소된다. 전체적으로 보면 CT-DPW의 순이동량 경로는 피니 모형보다도 더 안정적이며, 플레인 및

디용 모형에서 나타나는 장기적 확대 현상은 나타나지 않는다. 이는 도착지별 전이확률의 배분은 갱신하되 출발지별 총전이확률 자체는 고정하기 때문에, 인구증가가 전체 이동성의 증대로 이어지지 못하기 때문이다. 따라서 CT-DPW 모형은 순이동량의 방향성은 반영하면서도 절대 규모의 확대를 통제하는 효과를 가진다.

종합하면, 순이동량의 변화는 각 모형의 되먹임 강도를 잘 보여준다. 플레인 모형은 가장 크고 급격한 순이동을 발생시켜 강한 집중 경향을 보이며, 디용 모형은 그보다 완만하지만 상당 기간 큰 순이동을 유지한다. 피니 모형은 중간 수준의 반응성을 보이고, CT-DPW 모형은 총전이확률을 통제함으로써 순이동량의 확대를 안정적으로 억제한다. 고정 전이확률 모형은 가장 빠르게 순이동량이 0에 수렴하는 기준 사례로 이해할 수 있다. 이러한 결과는 CT-DPW 모형이 도착지 인구가중의 효과를 유지하면서도, 장기 추계에서 과도한 순이동 누적을 완화하는 보다 보수적인 대안임을 보여준다.

(3) 순이동률

그림 3은 순이동량을 각 추계 구간 시작 시점의 지역 인가로 나누고 100을 곱하여 산출한 순이동률의 변화를 보여준다. 순이동률이 실제 인구 재분배의 절대적 규모를 나타낸다면, 순이동률은 순이동이 해당 지역의 인구규모에 비해 얼마나 강하게 작용하는지를 나타낸다. 특히 인구가 급격히 감소하는 지역에서는 순이동률이 작아지더라도 순이동률은 높은 수준을 유지하거나 오히려 확대될 수 있으므로, 그림 2의 순이동량과는 상당히 다른 변화경로가 나타난다.

고정 전이확률 모형에서는 A의 양(+)의 순이동률과 B와 C의 음(-)의 순이동률이 모두 빠르게 0으로 수렴한다. 고정된 전이확률 행렬 아래에서 지역별 인구분포가 정상상태에 가까워지면서 전입과 전출이 점차 균형을 이루기 때문이다. 이는 장기적으로 순이동량뿐 아니라 지역 인구에 대한 순이동의 상대적 영향도 소멸한다는 것을 의미한다.

피니 모형에서도 세 지역의 순이동률은 궁극적으로 0에 접근하지만, 고정 전이확률 모형보다 그 과정이 완만하다. A의 순유입률은 일정 기간 높은 수준을 유지하고, B와 C의 순유출률도 보다 천천히 감소한다. 이는 도착지 인구변화를 반영한 전이확률 갱신이 기존의 인구 재분배 방향을 일정 기간 강화하기 때문이다. 그러나 되먹임의 강도가 제한적이어서 순이동률이 지속적으로 확대되거나 일정한 음의 수준에 고착되지는 않는다.

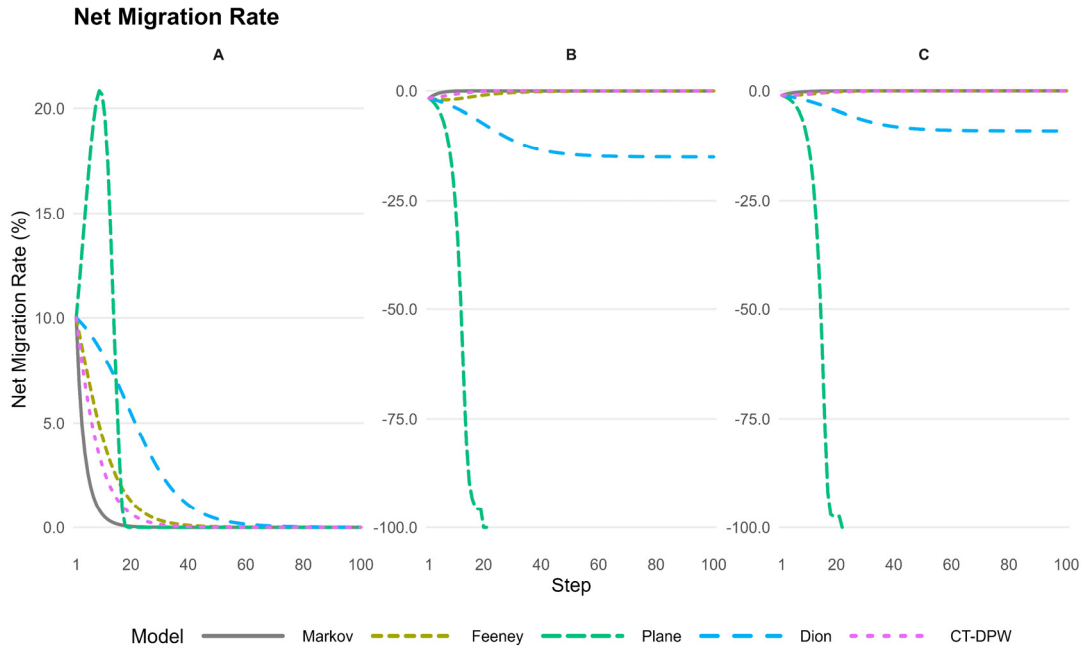


그림 3. 모형별 지역 순이동률의 변화, Step 1~100

플레인 모형에서는 가장 극단적인 변화가 나타난다. A의 순이동률은 초기의 인구증가와 전이확률 증가가 상호 강화되면서 인구 100명당 20명을 넘는 수준까지 상승한다. 반면 B와 C의 순이동률은 급격히 하락하여 약 -100에 이른다. 이는 한 추계 구간에 기간 초 인구와 거의 동일한 규모의 순유출이 발생한다는 뜻으로, 해당 지역의 잔존인구가 사실상 모두 다른 지역으로 이동하는 극단적인 상태를 나타낸다. 이후 B와 C의 인구가 소멸하고 전체 인구가 A에 집중되면 더 이상 지역 간 순이동이 발생하지 않으므로 A의 순이동률도 0으로 떨어진다. 따라서 플레인 모형의 순이동률 경로는 강한 되먹임이 단기간의 지역 소멸로 연결되는 과정을 가장 분명하게 보여준다.

디옹 모형의 결과는 순이동량 그래프와 순이동률 그래프의 차이를 특히 잘 보여준다. 그림 2에서는 B와 C의 순이동량이 인구감소와 함께 장기적으로 0에 가까워지지만, 그림 3에서는 두 지역의 음의 순이동률이 0으로 수렴하지 않고 각각 상당한 수준에서 유지된다. 이는 순유출의 절대량은 작아지더라도 그 분모가 되는 지역 인구가 함께 감소하기 때문이다. 따라서 B와 C에서는 매 Step마다 잔존인구의 일정한 비율이 계속 순유출되고, 이러한 과정이 누적되어 인구가 점진적으로 0에 접근한다. 디옹 모형은 플레인 모형

과 같은 급격한 -100 수준의 순유출률은 피하지만, 상당한 음의 순이동률이 장기간 지속되면서 궁극적으로 특정 지역의 소멸을 초래한다. 이는 순이동률의 급격한 변동을 완화하는 것만으로는 장기적인 인구집중을 방지할 수 없음을 보여준다.

CT-DPW 모형에서는 A의 순이동률이 고정 전이확률 모형보다 다소 완만하게 감소하고, B와 C의 순유출률도 점차 0으로 수렴한다. 변화경로는 대체로 고정 전이확률 모형과 피니 모형 사이에 위치하며, 플레인 모형과 디옹 모형에서 나타나는 순이동률의 극단화 또는 지속적인 음의 순이동률은 나타나지 않는다. 이는 출발지별 총전이확률을 고정함으로써 도착지 인구가중이 전체 이동확률의 확대 또는 축소로 이어지지 않도록 통제한 결과이다. 다만 CT-DPW 모형이 순이동률 자체를 고정하는 것은 아니며, 도착지별 전입배분의 변화에 따라 순이동률은 시간에 따라 조정된다.

종합하면 고정 전이확률 모형, 피니 모형 및 CT-DPW 모형에서는 순이동률이 점차 0에 수렴하여 안정적인 지역별 인구분포가 형성된다. 반면 플레인 모형은 순이동률을 단기간에 극단화하여 급격한 지역 소멸을 초래하고, 디옹 모형은 변화 속도는 완화하지만 음의 순이동률을 장기간 지속시켜 보다 점진적인 지역 소멸로 이어진다. CT-DPW 모

형은 순이동률의 방향과 변화는 허용하면서도 총전이확률을 통제함으로써 과도한 되먹임을 억제한다는 점에서, 순이동률의 안정성과 도착지 인구변화에 대한 반응성 사이의 절충적 특성을 보여준다.

(4) MEI

그림 4는 모형별 MEI의 변화 경로를 보여준다. 순이동률이 순이동의 지역 인구에 대한 상대적 영향을 나타낸다면, MEI는 발생한 전입과 전출이 어느 정도 한 방향으로 편중되어 있는지를 나타낸다.

고정 전이확률 모형에서는 A의 양의 MEI와 B, C의 음의 MEI가 모두 빠르게 0으로 수렴한다. 이는 지역별 인구가 정상상태 분포에 접근하면서 전입과 전출의 차이가 점차 줄어들고, 발생하는 이동이 더 이상 순인구 재분배로 이어지지 않기 때문이다. 피니 모형에서도 같은 방향의 변화가 나타나지만, 도착지 인구변화가 전이확률에 반영되기 때문에 이동의 방향적 편향이 고정 모형보다 오래 지속된다.

CT-DPW 모형의 MEI도 장기적으로 0에 수렴한다. 변화 속도는 대체로 고정 전이확률 모형과 피니 모형 사이에 위치한다. 이는 도착지 인구가중에 따라 전입의 지역별 배분은 변화하지만 출발지별 총전이확률이 고정되어 있으며

로, 특정 방향의 이동이 계속 확대되는 현상이 제한되기 때문이다. 따라서 CT-DPW 모형에서는 초기의 순유입·순유출 구조가 일정 기간 유지되지만, 장기적으로는 전입과 전출이 다시 균형을 이루는 방향으로 조정된다.

플레인 모형에서는 MEI가 가장 극단적으로 변화한다. A의 MEI는 빠르게 100에 접근하고 B와 C의 MEI는 -100으로 하락한다. 이는 A에서는 전출에 비해 전입이 압도적으로 커지고, B와 C에서는 전입이 거의 사라진 채 전출이 지배하게 됨을 의미한다. 즉, 강한 되먹임이 총이동의 규모뿐 아니라 이동의 방향성까지 극대화하여, 상호적인 지역 간 이동을 사실상 일방향의 인구가전으로 전환한다. 이후 B와 C의 인구가 소멸하여 전입과 전출이 모두 발생하지 않으면 MEI를 계산할 수 없으므로 곡선도 더 이상 나타나지 않는다.

다용 모형은 순이동량 및 순이동률과 비교할 때 MEI에서 가장 특징적인 결과를 보인다. A의 MEI는 약 20으로 거의 일정하게 유지되고, B와 C의 MEI는 점차 약 -20으로 수렴한다. A의 순이동량과 순이동률은 시간이 지나면서 감소하지만, 총이동 가운데 순유입이 차지하는 비중은 거의 변하지 않는 것이다. B와 C에서도 이동의 절대 규모는 인구감소와 함께 줄어들지만, 총이동 가운데 순유출이 차지하는 비중은 일정하게 유지된다. 이는 다용 모형이 순이동의 규모

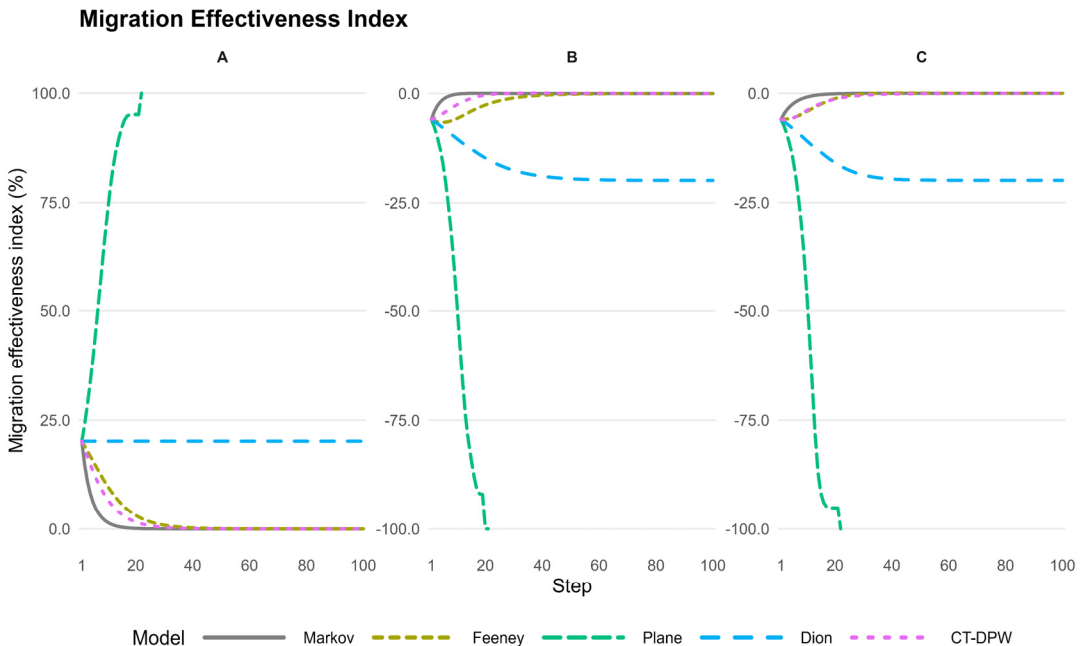


그림 4. 모형별 지역 MEI의 변화, Step 1-100

를 완화하더라도 전입과 전출 사이의 방향적 비대칭성 자체는 해소하지 않는다는 것을 보여준다. 어떤 의미에서는 디용 모형이 가장 잘 보존하는 것은 순이동이나 순이동을 자체라기보다 인구이동의 편향 정도라고 볼 수 있다.

종합하면 고정 전이확률 모형, 피니 모형 및 CT-DPW 모형에서는 MEI가 0으로 수렴하여 장기적으로 전입과 전출이 균형을 이루는 반면, 플레인 모형과 디용 모형에서는 이동의 방향적 편향이 지속된다. 플레인 모형은 그 편향을 ± 100 까지 극대화하고, 디용 모형은 약 ± 20 의 비교적 일정한 수준으로 유지한다. CT-DPW 모형은 초기의 이동 방향성을 반영하면서도 그 편향이 누적적으로 강화되는 것을 억제한다는 점에서, 플레인 및 디용 모형보다 안정적인 이동교환 구조를 산출한다.

(5) 총전이확률

그림 5는 각 모형에서 출발지별 총전이확률이 시간에 따라 어떻게 변화하는지를 보여준다. 총전이확률은 출발지 i 에서 자신을 제외한 다른 모든 지역으로 이동할 확률의 합으로, 개별 도착지로의 이동배분뿐 아니라 해당 지역의 전체 이동성이 모형 안에서 어떻게 변화하는지를 나타낸다. 그림 1~4가 이러한 확률변화의 인구학적 결과를 보여주었

다면, 그림 5는 그 결과를 발생시킨 모형 내부의 작동방식을 직접 보여준다.

고정 전이확률 모형에서는 정의상 총전이확률이 준거시점의 값으로 유지된다. 따라서 A, B, C의 총전이확률은 각각 0.20, 0.15, 0.09로 일정하다. CT-DPW 모형에서도 세 지역의 총전이확률이 이와 동일하게 고정된다. 다만 두 모형의 의미는 서로 다르다. 고정 전이확률 모형에서는 개별 출발지-도착지 전이확률 자체가 변하지 않는 반면, CT-DPW 모형에서는 개별 도착지로의 전이확률은 인구변화에 따라 갱신되지만 그 합만 준거시점 수준으로 유지된다. 즉, CT-DPW 모형은 전체 이동성은 고정하면서 도착지별 배분 구조는 변화시키는 모형이다.

피니 모형에서는 총전이확률이 변화하지만 그 폭은 비교적 작다. A의 총전이확률은 0.20에서 소폭 감소하고, B와 C의 총전이확률은 다소 증가한 뒤 안정된다. 이는 출발지를 제외한 다른 지역들의 상대적 인구비중 변화가 지역 간 전이확률에 반영되기 때문이다. A에서는 잠재적 도착지인 B와 C의 인구가 감소하므로 이들 지역으로 이동할 전체 확률이 다소 낮아진다. 반면 B와 C에서는 인구가 빠르게 증가하는 A가 잠재적 도착지에 포함되므로 총전이확률이 상승한다. 그러나 출발지별로 가능한 도착지 사이의 상대적 인구

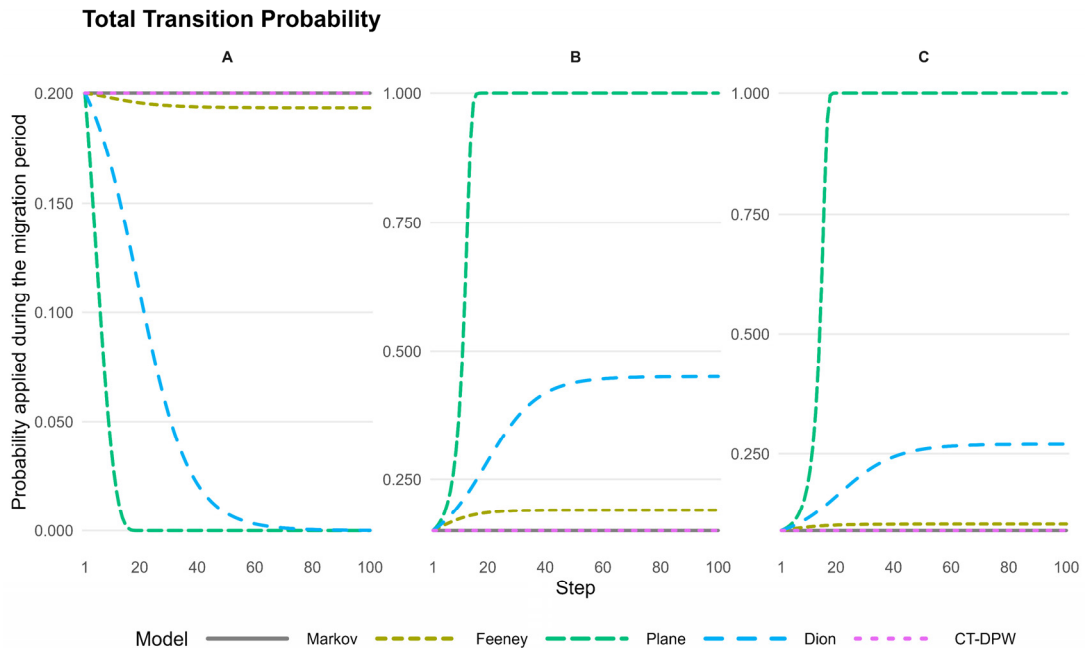


그림 5. 모형별 총전이확률의 변화, Step 1~100

구조만을 반영하므로 변화는 제한적이며, 플레인이나 디용 모형과 같은 극단적인 이동성 변화는 나타나지 않는다.

플레인 모형에서는 지역별 총전이확률이 정반대 방향으로 급격하게 변화한다. A의 총전이확률은 빠르게 0으로 감소하는 반면, B와 C에서는 약 20 Step 이내에 1로 상승한다. 이는 플레인 모형이 비전이확률을 포함한 모든 확률을 도착지 인구변화에 따라 갱신하기 때문이다. A의 인구가 증가하면 A에 계속 남을 확률이 높아지고, 그 결과 다른 지역으로 이동할 총확률은 0에 접근한다. 반대로 B와 C의 인구가 감소하면 해당 지역에 남을 확률이 0에 가까워지고, 총전이확률은 1에 접근한다. 결국 A의 인구는 거의 모두 그 지역에 남고, B와 C의 잔존인구는 다음 Step에 사실상 모두 다른 지역으로 이동하는 구조가 형성된다. 이는 그림 1에서 나타난 급격한 A 지역 집중과 B와 C 지역의 소멸을 직접적으로 설명한다.

디용 모형에서도 A의 총전이확률은 점차 0으로 감소하고, B와 C의 총전이확률은 각각 약 0.45와 0.27 수준까지 증가한다. 변화의 방향은 플레인 모형과 같지만 그 정도는 훨씬 완만하다. A에서는 잠재적 도착지인 B와 C의 인구비중이 지속적으로 감소하므로 이들 지역으로의 전이확률과 총전이확률이 함께 낮아진다. 반면 B와 C에서는 인구비중이 증가하는 A로의 전이확률이 높아지면서 총전이확률도 상승한다. 디용 모형은 비전이확률을 직접 가중하지 않기 때문에 총전이확률이 즉시 0이나 1로 극단화되지는 않지만, 출발지별 전체 이동성의 차이는 장기적으로 계속 확대된다. 이러한 구조가 플레인 모형보다 느리지만 궁극적으로는 동일한 방향의 인구집중을 발생시킨다.

그림 5는 CT-DPW 모형이 기존 도착지 인구가중 모형과 구별되는 핵심을 가장 직접적으로 보여준다. CT-DPW 모형에서는 A, B, C의 총전이확률이 각각 0.20, 0.15, 0.09로 유지되므로, 특정 지역의 인구증가가 그 지역의 잔류확률을 계속 높이거나 인구감소 지역의 전체 이동확률을 확대하는 과정이 차단된다. 그러나 개별 목적지에 배분되는 확률은 계속 변화하므로 도착지 인구가중의 효과 자체가 제거되는 것은 아니다. 이러한 제약은 지역별 전체 이동성이 내생적으로 극단화되는 것을 방지하면서도 변화된 인구분포를 도착지 선택에 반영한다.

종합하면 플레인 모형은 총전이확률을 0 또는 1로 급격히 극단화하고, 디용 모형은 같은 방향의 변화를 보다 완만하게 발생시킨다. 피니 모형은 총전이확률을 제한적으로 변화시키는 반면, CT-DPW 모형은 이를 명시적으로 고정한다.

다. 따라서 CT-DPW 모형의 안정적인 인구분포는 단순히 도착지 인구가중 효과가 약해서 나타난 것이 아니라, 도착지별 배분의 변화와 출발지별 전체 이동성의 변화를 분리하여 후자를 통제된 결과로 해석할 수 있다. 다만 실제로 출발지별 전체 이동성이 장기간 변화할 것으로 예상되는 경우에는 총전이확률을 고정하는 가정이 지나치게 보수적일 수 있으므로, 경험적 근거 또는 별도의 시나리오에 따라 그 수준을 변화시키는 확장도 고려할 필요가 있다.

3) 종합 토론

앞의 다섯 지표는 개별적으로 해석하기보다 모형의 내부 작동방식-이동과정-누적적 인구결과로 이어지는 하나의 평가체계 안에서 종합할 수 있다. 총전이확률은 각 모형이 출발지별 전체 이동성을 어떻게 처리하는지를 보여주는 내부 작동지표이고, 순이동량, 순이동률 및 MEI는 이러한 확률구조가 만들어내는 이동과정의 규모와 방향성을 나타낸다. 지역별 인구수는 이 과정이 반복적으로 누적된 최종 결과이다.

이러한 관계를 바탕으로 네 가지 DPW 모형은 세 가지 핵심 차원에서 비교할 수 있다. 첫째는 지역별 인구변화가 전이확률에 반영되는 정도인 반응성이다. 둘째는 출발지별 총전이확률을 내생적으로 변화시키는 지 또는 별도로 통제하는지에 관한 총전이확률의 처리 방식이다. 이는 도착지별 배분과 출발지별 전체 이동성을 분리하여 설정할 수 있는지, 그리고 모형의 가정과 결과를 얼마나 명확하게 해석할 수 있는지와 관련된다. 셋째는 초기의 순유입 및 순유출 구조가 반복과정에서 얼마나 강화되는지에 관한 되먹임의 강도와 장기적 안정성이다. 표 1은 이 세 차원에 따른 모형별 특성을 제시하고, 마지막 행에서 각 모형의 장점과 한계를 종합적으로 평가한다.

피니 모형은 네 모형 가운데 비교적 중간적인 위치를 차지한다. 변화된 인구분포를 전이확률에 반영하므로 고정전이확률 모형보다 강한 인구 재분배를 산출하지만, 플레인과 디용 모형에서 나타난 완전한 인구집중은 발생하지 않았다. 순이동률과 MEI도 장기적으로 0에 수렴하여 이동의 방향적 편향이 점차 해소된다. 다만 이러한 안정성은 총전이확률을 직접 제약한 결과가 아니므로, 다른 초기조건에서도 동일하게 유지된다고 단정하기는 어렵다.

플레인 모형은 반응성이 가장 높지만 안정성은 가장 낮다. 그 핵심 원인은 도착지 인구가중을 비전이확률에까지

표 1. 도착지 인구가중 모형의 종합 비교

비교 준거	DPW 모형군			
	피니	플레인	디옹	CT-DPW
인구변화에 대한 반응성	중간	매우 높음	높음	중간 또는 비교적 낮음
총전이확률의 처리	내생적으로 변하나 변화 폭은 비교적 제한적	비전이확률과 함께 크게 변하여 0 또는 1에 접근 가능	도착지 인구비중 변화에 따라 상당히 변동	준거시점 수준으로 명시적으로 고정
되먹임과 장기적 결과	인구 재분배가 강화되지만 안정적인 다지역 분포에 수렴	초기 차이를 급격히 증폭하여 특정 지역 집중과 다른 지역 소멸을 초래	플레인보다 완만하지만 이동편향이 지속되어 장기적으로 인구집중 가능	도착지별 배분은 변하지만 이동성의 확대가 차단되어 안정적 분포에 수렴
주요 평가	반응성과 안정성의 균형이 비교적 양호하나 총전이확률이 명시적으로 통제되지 않음	높은 반응성을 가지지만 장기추계에서는 되먹임이 지나치게 강할 수 있음	극단화 속도는 완만하지만 장기적 집중 가능성을 제거하지 못함	통제와 해석이 용이하지만 전체 이동성의 실제 변화를 충분히 반영하지 못할 수 있음

적용함으로써 인구증가 지역에서는 잔류확률을 높이고, 인구감소 지역에서는 총전이확률을 1에 가깝게 끌어올린다는 데 있다. 순이동률과 MEI의 극단화는 이러한 구조가 단순히 인구 재분배의 규모만 확대하는 것이 아니라, 상호적인 이동을 일방향의 인구이전으로 전환한다는 것을 보여준다. 따라서 단기적인 충격이나 강한 집중 시나리오를 탐색하는 데에는 유용할 수 있으나, 장기 기준추계에는 신중하게 적용할 필요가 있다.

디옹 모형은 플레인 모형보다 완화된 형태의 되먹임을 제공한다. 순이동량은 인구감소와 함께 줄어들지만 순이동률과 MEI의 편향은 상당 기간 유지되며, 그 결과 인구집중이 보다 느린 속도로 계속된다. 이는 순이동률의 급격한 변화를 억제하는 것과 장기적인 지역별 인구분포를 안정시키는 것이 동일한 문제가 아님을 보여준다. 디옹 모형은 단기·중기적으로는 플레인 모형보다 현실적인 경로를 제공할 수 있지만, 장기적으로는 여전히 누적적 집중에 취약하다.

CT-DPW 모형은 총전이확률을 고정함으로써 되먹임의 작동범위를 도착지별 배분으로 제한한다. 따라서 인구분포의 변화는 이동 목적지의 선택에는 영향을 미치지지만, 출발지 인구가 다른 지역으로 이동하는 전체 확률 자체를 확대하지는 않는다. 이러한 구조는 순이동률과 MEI의 극단화를 방지하고 안정적인 다지역 인구분포를 유지한다는 장점이 있다. 또한 총이동성에 관한 가정과 도착지 배분에 관한 가정을 구분할 수 있어 모형의 해석과 시나리오 설정이 상대적으로 명확하다.

그러나 CT-DPW 모형의 안정성을 곧바로 예측력의 우월성으로 해석해서는 안 된다. 실제로 특정 지역의 경제·주

택·노동시장 변화가 출발지별 전체 이동성까지 변화시킨다면 총전이확률을 고정하는 가정은 지나치게 보수적일 수 있다. CT-DPW 모형의 의의는 전체 이동성이 변하지 않는다고 주장하는 데 있기보다, 총이동성의 변화와 도착지별 배분의 변화를 분리하여 모형화할 수 있는 구조를 제공한다는 점에 있다. 총전이확률은 과거 추세나 외생적 시나리오에 따라 별도로 설정하고, 그 총량을 CT-DPW 방식으로 도착지에 배분하는 확장도 가능하다.

종합하면 네 모형의 차이는 반응성과 안정성 사이의 단순한 우열이라기보다, 도착지 인구변화가 전체 이동체계에 영향을 미치도록 허용하는 범위의 차이로 이해할 수 있다. 플레인과 디옹 모형은 이동성 자체를 내생적으로 변화시키는 반응성이 높은 모형이고, 피니 모형은 그 효과가 상대적으로 제한된 중간적 모형이다. CT-DPW 모형은 전체 이동성을 별도로 통제하면서 도착지별 배분만 갱신하는 모형으로서, 장기 인구추계에서 가정의 투명성과 결과의 안정성을 증시할 때 유용한 대안을 제공한다.

4. 결론

인구이동은 지역별 인구추계의 결과를 좌우하는 핵심 요소이지만, 미래의 지역 간 전이확률을 어떻게 설정할 것인가는 여전히 중요한 방법론적 과제로 남아 있다. 고정 전이확률 모형은 적용과 해석이 간단하다는 장점이 있으나, 추계 과정에서 변화하는 지역별 인구분포가 이후의 이동행

태에 미치는 영향을 반영하지 못한다. 이러한 한계를 보완하기 위해 제안된 DPW 모형군은 각 추계 라운드에서 산출된 인구분포를 이용하여 다음 라운드의 전이확률을 갱신한다. 그러나 도착지 인구를 반영하는 방식과 총전이확률을 처리하는 방식에 따라 장기적인 인구분포와 이동지표가 크게 달라질 수 있다.

본 연구는 피니 모형, 플레인 모형 및 디옴 모형을 DPW 모형군이라는 공통 범주에서 검토하고, 출발지별 총전이확률을 목적지 배분과 독립적으로 설정·통제하면서 도착지별 배분구조를 갱신하는 CT-DPW 모형을 제안하였다. CT-DPW 모형은 출발지에서 다른 지역으로 이동하는 전체 확률인 총전이확률과, 그 확률이 개별 도착지에 배분되는 구조를 분리한다. 이에 따라 출발지별 전체 이동성을 별도로 설정된 총전이확률의 범위 안에서 통제하면서도, 변화한 도착지 인구분포를 개별 전이확률에 반영할 수 있다.

가상 인구체계를 이용한 시뮬레이션 결과, 플레인 모형과 디옴 모형에서는 도착지 인구가중에 따른 되먹임이 총전이확률의 변화로까지 확대되면서 장기적으로 특정 지역에 인구가 집중되는 결과가 나타났다. 피니 모형은 이러한 집중을 상당히 완화하였지만 총전이확률을 직접 통제하지는 않는다. 반면 CT-DPW 모형에서는 개별 도착지로의 전이확률이 변화하면서도 출발지별 총전이확률이 일정하게 유지되었으며, 순이동률과 MEI도 장기적으로 0에 수렴하여 안정적인 다지역 인구분포가 형성되었다.

CT-DPW 모형의 강점은 도착지 인구변화에 대한 반응성을 유지하면서도, 전체 이동성을 별도로 설정된 총전이확률에 맞추어 통제함으로써 목적지 배분의 갱신이 전체 이동성의 내생적 확대나 극단화로 이어지는 것을 억제한다는 데 있다. 또한 “얼마나 이동하는가”에 관한 총전이확률과 “어디로 이동하는가”에 관한 도착지별 배분을 구분함으로써 모형의 가정을 명확하게 해석하고 시나리오를 체계적으로 설정할 수 있다. 따라서 CT-DPW 모형은 장기 인구추계에서 안정성, 가정의 투명성 및 시나리오 설정의 유연성을 증시할 때 유용한 대안이 될 수 있다.

마지막으로, 본 연구에서 제안한 CT-DPW 모형의 시뮬레이션 설정은 가능한 여러 형태 가운데 가장 제한적인 기본형에 해당한다. 본 연구에서는 모형 간 작동원리의 차이를 명확히 비교하기 위하여 출발지별 총전이확률을 준거 전이확률 행렬에서 산출된 수준으로 고정하였다. 따라서 시뮬레이션에서 나타난 CT-DPW 모형의 상대적으로 완만한 반응성은 도착지 인구가중 방식 자체의 필연적인 결과

라기보다, 총전이확률을 고정한 보수적 설정에서 비롯된 측면이 크다.

CT-DPW 모형에서 총전이확률은 반드시 초기값으로 고정될 필요가 없다. 출발지별 총전이확률을 미래의 각 시점에 대해 서로 다르게 설정할 수 있으며, 지역별로 상이한 변화경로를 부여하는 것도 가능하다. 예를 들어 특정 지역의 총전이확률을 기준시점보다 10% 높은 수준까지 일정한 기간 선형적으로 증가시킨 후 고정하거나, 반대로 장기적으로 감소시키는 시나리오를 설정할 수 있다. 이 경우 CT-DPW 모형은 각 시점에 설정된 총전이확률을 통제값으로 삼아, 그 범위 안에서 도착지별 전이확률을 갱신하게 된다. 이에 따라 본 연구의 시뮬레이션에서 나타난 상대적 둔감성은 완화될 수 있으며, 지역별 인구수, 순이동량, 순이동률 및 MEI의 변화경로도 총전이확률의 설정에 따라 달라질 수 있다. 즉, CT-DPW 모형의 반응성은 고정된 속성이 아니라 총전이확률의 미래경로를 어떻게 설정하는가에 따라 조절할 수 있다.

이러한 확장은 CT-DPW 모형을 사전설정형과 갱신형이 결합된 본격적인 하이브리드 인구이동 추계 모형으로 발전시킬 수 있음을 의미한다. 첫 번째 단계에서는 과거 추세의 외삽, 서로 다른 기간 사이의 보간, 정책·개발계획에 근거한 시나리오 또는 전문가 가정 등을 이용하여 출발지별 미래 총전이확률을 사전에 설정한다. 두 번째 단계에서는 매 추계 라운드에 새롭게 산출된 도착지 인구분포를 이용하여, 사전 설정된 총전이확률을 각 도착지에 재배분한다. 이와 유사한 하이브리드 접근은 캐나다의 주·준주 인구추계에서도 확인된다(Statistics Canada, 2025; 2026). 캐나다 통계청은 미래의 OD 전이확률을 사전에 설정한 뒤, 각 추계 라운드에서 앞에서 살펴본 디옴 모형을 적용하여 이를 갱신한다. 이는 사전설정형과 갱신형을 결합한다는 점에서 확장형 CT-DPW 모형과 유사하다.

따라서 CT-DPW 모형의 의의는 총전이확률을 항상 고정하는 하나의 폐쇄적인 모형을 제안하는 데 있지 않다. 보다 중요한 의의는 출발지별 전체 이동성을 별도로 설정된 총전이확률에 맞추어 통제하고, 도착지별 배분은 변화하는 인구분포에 따라 갱신함으로써, 전체 이동성과 도착지별 배분이라는 두 요소를 분리하여 설정하면서도 이를 하나의 추계 체계 안에서 결합할 수 있는 유연한 모형 구조를 제공한다는 데 있다. 다만 본 연구는 CT-DPW 모형의 기본형을 제안하고 그 작동 특성을 기존 모형과 비교하는 데 초점을 두었으므로, 총전이확률의 미래경로를 사전에 설정하

는 확장형 모형의 구체적인 설계와 검증까지는 다루지 않았다. 또한 각 모형의 작동 원리를 명확하게 비교하기 위해 전체 인구를 하나의 집단으로 처리하고 출생과 사망을 제외한 폐쇄적 지역체계를 가정하였다는 한계가 있다. 따라서 실제 적용에서는 성·연령별 차이와 출산력·사망력을 함께 고려하는 다지역 코호트-요인 체계 안에서 CT-DPW 모형의 성능을 검증할 필요가 있다. 실제 시도 및 시군구 자료에 적용할 경우, 관측된 지역 간 이동자료에 기초하여 지역별·성별·연령별 총전이확률을 추정하고, 이를 과거 추세의 외삽·보간이나 다양한 정책·개발 시나리오와 결합할 수 있다. 이를 통해 전체 이동성의 변화와 도착지별 이동배분의 변화를 분리하여 설정했을 때 지역별 인구집중과 감소 경로가 어떻게 달라지는지, 그리고 CT-DPW 모형이 기존 모형에 비해 어떠한 추계 특성을 보이는지를 경험적으로 평가할 수 있을 것이다. 이러한 실제 자료를 이용한 모형의 적용과 추계 성능 평가는 별도의 후속 연구에서 본격적으로 다룰 필요가 있다.

주

- 1) 엄밀히 말하면 마르코프 연쇄 모형 자체가 전이확률의 시간적 불변성을 전제하는 것은 아니다. 전이확률 행렬이 시간에 따라 동일하게 유지되는 시간동질적(time-homogeneous) 마르코프 연쇄와 시간에 따라 변화하는 비동질적(time-inhomogeneous 또는 non-homogeneous) 마르코프 연쇄가 모두 존재한다. 국내 관련 문헌에서는 전자를 흔히 ‘정상’ 마르코프 연쇄 모형, 후자를 ‘비정상’ 마르코프 연쇄 모형으로 지칭하므로, 본 연구에서도 이러한 용어를 사용한다.
- 2) 우리나라를 비롯한 대부분의 국가에서는 지역 단위 인구가 동 추계에 ‘사전설정형’ 방식을 적용하고 있다(국가데이터처, 2024a; 2024b; 国社会保障・人口問題研究所, 2024; Australian Bureau of Statistics, 1999; 2023; U.S. Census Bureau, 2004; IBGE, 2025; Office for National Statistics, 2025; Statistics Denmark, 2026; Statistics Norway, 2026). ‘갱신형’이 적용된 사례는 극히 드물며, 캐나다의 주·준주 추계가 대표적인 사례이다(Statistics Canada, 2025; 2026).
- 3) 정상상태 분포는 고유벡터를 이용하여 직접 도출할 수도 있다(Seabrook and Wiskott, 2023). 전이확률 매트릭스의 전지행렬에 대해 고유값-고유벡터 분해를 실시한 후, 고유값 1에 해당하거나 수치적으로 1에 가장 가까운 고유값의 고유벡터를 선택한다. 이를 각 성분의 합이 1이 되도록 정규화하면 정상상태 분포를 얻을 수 있다.

- 4) 이하에서 제시하는 수식은 각 원 논문의 표기와 수식을 그대로 옮긴 것이 아니라, 모형 간 공통 구조와 차이를 명확히 비교할 수 있도록 일관된 표기체계에 따라 재구성한 것이다.
- 5) 인구수를 나타내는 P 와 전이확률을 나타내는 p_{ij} 는 시간 첨자의 의미가 서로 다름에 유의할 필요가 있다. 예를 들어 P_j^t 는 시점 t 에서 관측되거나 추계된 지역 j 의 인구수를 의미하는 반면, p_{ij}^t 는 시점 t 의 인구를 다음 시점 $t+1$ 로 추계할 때 적용되는 전이확률을 의미한다. 따라서 Dion(2017)의 표기처럼 전이확률의 적용구간을 명시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{ij}^{t,t+1} = p_{ij}^{\text{ref}, \text{ref}+1} \frac{P_j^t / \sum_{k \neq i} P_k^t}{P_j^{\text{ref}} / \sum_{k \neq i} P_k^{\text{ref}}}$$

여기서 $p_{ij}^{t,t+1}$ 는 시점 t 에서 $t+1$ 로의 추계에 적용되는 전이확률이고, $p_{ij}^{\text{ref}, \text{ref}+1}$ 는 준거시점 ref에서 그 다음 시점 ref+1 사이에 적용된 준거 전이확률이다. 다만 이러한 구간 표기는 수식의 시간적 의미를 보다 엄밀하게 드러내는 반면 표기를 다소 복잡하게 만든다. 이에 따라 본문에서는 수식의 간결성과 가독성을 위해 각각을 p_{ij}^t 와 p_{ij}^{ref} 로 축약하여 표시하며, 이후에 제시하는 모든 수식에도 동일한 표기 방식을 적용한다.

- 6) 매 추계 라운드에 동일한 갱신식을 연속적으로 적용하고, 모형 자체에 포함된 조정 또는 정규화 이외에 전이확률의 상·하한 설정, 추가적인 재조정·재정규화, 반올림이나 기타 별도의 보정을 실시하지 않는다면 재귀형과 누적형은 대수적으로 동치이며 동일한 p_{ij}^t 를 산출한다. 따라서 다음의 관계가 성립한다.

$$p_{ij}^t = p_{ij}^{t-1} \frac{P_j^t / \sum_{k \neq i} P_k^t}{P_j^{t-1} / \sum_{k \neq i} P_k^{t-1}} = p_{ij}^0 \frac{P_j^t / \sum_{k \neq i} P_k^t}{P_j^0 / \sum_{k \neq i} P_k^0}$$

재귀형 표현에서 시점별 인구비중 변화비를 연속적으로 곱하면 중간 시점의 항들이 서로 소거되므로, 추계 시작시점을 준거로 하는 누적형 표현과 동일한 결과가 산출된다. 이 원리는 피니 모형뿐 아니라 플레인 모형, 디용 모형 및 새로 제안된 CT-DPW 모형에도 각 모형에 내재된 조정계수와 정규화 규칙을 일관되게 적용하는 경우 동일하게 성립한다.

- 7) 이 모형의 기본 아이디어는 전광희 등(2014)의 국가데이터처 연구과제 보고서에서 ‘통합적 수정 피니 모형’이라는 명칭으로 처음 제안되었다. 당시 제시된 수식은 비전이확률을 제약하는 형태였으며, 본 연구에서는 이를 총전이확률을 제약하는 형태로 변형하여 CT-DPW 모형으로 다시 제시한다.
- 8) 이 가상자료는 Plane and Rogerson(1994)에서 제시되었으며, Dion(2017)도 모형 간 비교에 동일한 자료를 사용하였다. 본 연구에서 이를 다시 사용하는 것은 기존 연구와의 직접적인 비교 가능성을 확보하는 동시에, 동일한 초기 인

구분포와 전이확률 구조 아래에서 각 모형의 갱신 방식이 초래하는 차이를 분리하여 평가하기 위해서이다. 따라서 이 시뮬레이션은 특정 현실 지역의 재현이나 예측 정확도의 평가보다는 기존 DPW 모형과 CT-DPW 모형의 작동 원리 및 장기적 귀결을 비교하는 통제된 벤치마크의 성적을 갖는다.

참고문헌

- 국가데이터처, 2024a, 장래인구추계 통계정보보고서, 대전.
- 국가데이터처, 2024b, 2022년 기준 시군구 장래인구추계 지침서, 대전.
- 김경수, 2004, “비정상 마르코프 연쇄모형에 의한 부산권 인구분포 예측 연구,” 국토계획, 39(4), 19-30.
- 김홍배·김재구·임병철, 2009, “조성법과 Markov Chain 모형을 결합한 지역 인구예측모형에 관한 연구,” 국토계획, 44(6), 139-146.
- 오진호, 2021, “변동 전이확률을 이용한 국내이동 예측,” 한국인구학, 44(1), 1-23.
- 이상일·이소영, 2023, “인구이동이 인구재분포에 미치는 영향력의 시공간적 역동성 탐색: 우리나라 국내 인구이동에의 적용,” 한국지도학회지, 23(1), 1-19.
- 이상일·이소영·김세창, 2024, “우리나라의 연령-특수적 인구이동 편향성에 대한 다중스케일 분석,” 대한지리학회지, 59(5), 656-672.
- 이상일·조대현, 2012, “지역간 인구이동의 예측을 통한 우리나라 시도별 장래 인구 추계: 다지역 코호트-요인법의 적용,” 대한지리학회지, 47(1), 98-120.
- 전광희·이상일·박민규·계봉오, 2014, 등록센서스 기반 주요 인구통계의 일관성과 시의성 확보방안 연구, 국가데이터처, 대전.
- 国立社会保障・人口問題研究所, 2024, 日本の地域別将来推計人口 - 令和 2(2020)~32(2050) 年 -, 令和 5 年推計, 東京.
- Australian Bureau of Statistics, 1999, *Demographic Estimates and Projections: Concepts, Sources and Methods*, Canberra.
- Australian Bureau of Statistics, 2023, *Population Projections for Australia, States and Territories and Capital Cities*, Canberra.
- Cameron, M. P. and Poot, J., 2024, Modelling and forecasting interregional migration for multiregional population projections, *Population Research and Policy Review*, 43(4), 57.
- Dion, P., 2017, An alternative to fixed transition probabilities for the projection of interprovincial migration in Canada, *Population Research and Policy Review*, 36(6), 871-901.
- Feeney, G., 1973, Two models for multiregional population dynamics, *Environment and Planning A: Economy and Space*, 5(1), 31-43.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), 2025, *Projeções da População Brasil e Unidades da Federação*, Rio de Janeiro.
- Kim, S. and Lee, S.-I., 2025, An extension of migration effectiveness indices: Accounting for the impact of migration on population structure, *Population, Space and Place*, 31(5), e70049.
- Office for National Statistics, 2025, *Methodology Used to Produce the 2022-based Subnational Population Projections for England*, Newport.
- Plane, D. A., 1982, An information-theoretic approach to the estimation of migration flows, *Journal of Regional Science*, 22(4), 441-456.
- Plane, D. A., 1994, The wax and wane of interstate migration patterns in the USA in the 1980s: A demographic effectiveness field perspective, *Environment and Planning A: Economy and Space*, 26(10), 1545-1561.
- Plane, D. A. and Rogerson, P. A., 1994, *The Geographical Analysis of Population With Applications to Planning and Business*, John Wiley & Sons, New York.
- Rogers, A., 1985, *Regional Population Projection Models*, SAGE Publications, Beverly Hills.
- Rogers, A., 1995, *Multiregional Demography: Principles, Methods and Extensions*, John Wiley & Sons, New York.
- Rowland, D. T., 2003, *Demographic Methods and Concepts*, Oxford University Press, New York.
- Seabrook, E. and Wiskott, L., 2023, A tutorial on the spectral theory of Markov chains, *Neural Computation*, 35(11), 1713-1796.
- Siriban, C., Bernard, A., Poot, J., Wilson, T., Raymer, J. and Wiśniowski, A., 2026, A review and evaluation of internal migration forecasting models, *Population Studies*, 1-18. doi: 10.1080/00324728.2026.2645544
- Smith, S. K., Tayman, J. and Swanson, D. A., 2013, A

- Practitioner's Guide to State and Local Population Projections*, Springer, Dordrecht.
- Statistics Canada, 2025, *Technical Guide on Demographic Estimates at Statistics Canada*, Statistics Canada, Ottawa.
- Statistics Canada, 2026, *Population Projections for Canada (2025 to 2075), Provinces and Territories (2025 to 2050): Technical Report on Methodology and Assumptions*, Ottawa.
- Statistics Denmark, 2026, *Documentation of Statistics for Population Projections 2026*, Copenhagen.
- Statistics Norway (Statistisk sentralbyrå), 2026, *Befolkningsframskrivinger for Kommunene 2026*, Oslo.
- U.S. Census Bureau, 2004, *Interim Population Projections for States by Age and Sex: 2004 to 2030*, Washington.
- Wilson, T. and Bell, M., 2004, Comparative empirical evaluations of internal migration models in subnational population projections, *Journal of Population Research*, 21(2), 127-160.
- Wilson, T. and Rees, P., 2005, Recent developments in population projection methodology: A review, *Population, Space and Place*, 11(5), 337-360.
- 교신: 조대현, 41566 대구광역시 북구 대학로 80, 경북대학교 사범대학 지리교육과(이메일: dhcho@knu.ac.kr, 전화: 053-950-5861)
- Correspondence: Daeheon Cho, Department of Geography Education, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Korea (e-mail: dhcho@knu.ac.kr, Phone: +82-53-950-5861)
- 최초투고일 2026. 7. 31
수정일 2026. 8. 11
최종접수일 2026. 8. 14