

공간수직회귀를 이용한 혁신도시 소재지 및 주변 지역의 인구 변화 효과 분석 : 경북김천혁신도시를 사례로

지리학과 곽지호 (2020-17530)

I. 서론

혁신도시는 지방의 인구 감소와 수도권 집중화 현상이 심화되면서 국가균형발전을 목표로 시행된 계획도시 사업이다. 사업의 주요 골자는 수도권 소재 공공기관의 지방 이전이다. 이전된 공공기관을 중심으로 산-학-연 클러스터를 조성하고, 인근에 주택 및 공공시설을 개발하여 혁신도시를 지역 발전의 거점으로 육성하고자 하는 것이 핵심 목표였다(혁신도시법, 2025). 현재는 2007년부터 2018년까지 '공공기관 이전 완료'를 추진 목표로 삼은 1기가 끝나고 '가족동반 이주율 제고, 삶의 질 만족도 향상, 지역인재 채용 확대, 기업입주 활성화' 등의 목표로 2기 사업을 추진 중에 있다(국토교통부, 2018).

정부에서 가족동반 이주율 제고와 같은 목표를 2기 사업의 중점으로 삼은 것은 1기 사업의 진행이 완료된 상황에서 혁신도시로 인한 실질적인 인구 증가 효과가 미진했다는 방증일 수 있다. 실제로 2021년 기준 전국 혁신도시 10곳 중 8곳이 계획된 목표 인구 달성에 실패한 것으로 나타났다(문윤상, 2021). 또한 수도권에서의 인구 유입보다는 주변 지역에서의 인구 유입 비중이 커 구도심이 공동화되는 등 역효과가 나타나고 있어 진정한 의미의 지역 발전과 거리가 멀다는 비판이 제기되고 있다(정광진, 2017). 지방의 인구 감소와 수도권 집중화의 흐름이 더욱 가속화되고 있는 바, 혁신도시 사업의 정책 기초를 재설정하기 위한 실증적 연구가 필요한 시점이다.

본 연구는 경상북도 김천시 울곡동에 소재한 경북김천혁신도시를 사례로, 혁신도시 건설이 인구 변화에 미친 인과적 영향을 실증적으로 분석한다. 혁신도시 소재지와 구도심 등 지역 내에서도 인과 효과의 이질성이 나타날 수 있다는 점에서 1997년부터 2024년까지의 읍면동 수준 주민등록인구 데이터를 이용한다. 인과 효과를 추정하는 방법으로는 혁신도시 건설이 처치 단위가 지역인 '공간적 처치'라는 점에서 통제집단합성법(Synthetic Control Method, SCM)에 기반하되 공간적 의존성 등을 고려할 수 있는 공간수직회귀(Spatial Vertical Regression, SVR)를 이용한다. 이는 처치군이 인접한 복수의 지역인 상황에서의 인과 효과를

구조적으로 추정할 수 있도록 하는 모형으로, 이를 통해 직접 처치 지역인 혁신도시 소재지뿐만 아니라 이를 둘러싼 주변 지역에 미친 효과를 파악할 수 있게 된다.

구체적인 분석 절차는 다음과 같다: 첫째, 행정구역 변동을 2024년 기준으로 정제한 읍면동 단위 주민등록인구 자료를 이용하여 통제집단을 '합성'하기 위한 후보 풀과 직접 처치 지역, 이를 둘러싼 파급 효과 클러스터를 구성한다. 둘째, SVR을 진행하여 혁신도시 건설로 인한 인구 변화 효과가 처치 지역 및 주변 지역에서 처치 시점인 2013년 이후로 어떻게 나타났는지 추정한다. 셋째, 결과를 단순선형회귀(OLS), 베이지안수직회귀(BVR), 이중차분법(DiD)을 이용한 분석 결과와 비교하여 공간적·비공간적 인과 추론 방식 간의 차이에 대해 설명하고 분석 결과를 해석한다.

II. 선행 연구 분석

혁신도시 정책 평가에 관한 선행연구는 다양한 결과 변인을 활용해 왔으나, 본 연구에서는 지역 발전의 동인이자 결과라 할 수 있는 인구 변수에 집중하고자 한다. 또한 이중차분법이나 통제집단합성법과 같은 준실험적 인과 추론 방법론에 관한 실증 연구 사례를 중심으로 살펴본다. 구체적인 연구 사례로 임태경(2021)은 이중차분법을 활용하여 충북혁신도시의 패널자료를 분석한 결과 수도권 지역으로부터의 순유입이 발생하였음을 확인하였으며, 장인수(2022)는 통제집단합성법을 이용하여 광주전남혁신도시에서 인구 규모 증가 효과가 나타났음을 밝혔으며, 추가적으로 처치 이후 기간의 말미에는 감소하는 경향을 보고하여 사후 관리의 시사점을 도출하였다. 본 연구와 동일하게 경북김천혁신도시를 연구 대상 지역으로 설정한 장인수·박승규(2021)는 통제집단합성법을 이용하여 김천시의 인구 규모, 순이동자 수 등이 처치 시점 이후 증가하였다가 지속 감소하는 경향을 확인하였다.

분석 결과의 일반화를 위해 여러 지역의 혁신도시를 동시에 분석 대상으로 설정한 연구도 다수 존재한다. 대표적으로 고정우 외(2023)는 대도시 입지형과 중소도시 입지형으로 구분하여 청년인구 순유입률의 효과를 이중차분법으로 추정하였는데, 중소도시 입지형에서만 유의한 청년 유입이 관찰되는 것으로 나타났으며, 각각의 유형별로 개별적인 모형을 적합하는 접근을 취하였다. 장인수·배호중(2025)는 전체 10개 혁신도시에 대해 통제집단합성법을 이용하여 인구 규모, 순이동 인구, 출생아수 등의 변화 양상을 분석하였다. 복수의 처치군과 상이한 처치시점을 다루고자 평균 처치효과로 요약하여 보고하는 Cavallo et al.(2013)의 방법론을 이용하였다. 한편, 본 연구의 경우 단일한 혁신도시를 분석 대상으로

하지만, 혁신도시가 소재한 김천시 울곡동 외 인접 지역까지 처치군으로 포함시킨다는 점에서 다중 처치군에 관한 연구들과 연관이 있다고 볼 수 있다.

한편, 혁신도시의 파급효과에 관한 연구들은 원도심의 인구 유출에 초점을 맞춘 바, 주로 종속변인으로 유출지-유입지 쌍이 정의된 순유입 인구수를 이용하여 이루어졌다. 이상원 외(2022)에서는 혁신도시가 속해 있거나 혁신도시에 연접한 도시를 모도시로 정의하여 모도시 여부를 더미변수화한 뒤 공간계량모형을 이용해 신도시형 혁신도시의 모도시에서 인구 유출 효과가 가장 큰 것으로 분석하였다. 임태경(2023) 또한 이중차분법을 이용하여 경상권역으로의 청년 순유입을 수도권, 비수도권, 같은 권역내 이동으로 구분하여 분석한 바 있다. 다만, 이러한 연구는 공간적 파급효과를 직접적으로 다루는 방식은 아니며, 엄밀한 의미에서는 인구 이동에 관한 효과로 한정될 수밖에 없다. 또한, 읍면동 단위 국내인구이동통계 자료의 시계열이 2021년부터 존재하여 시군구 내의 미시적 스케일에서 혁신도시 사업의 인과효과를 다루기에는 제한적인 측면이 있다.

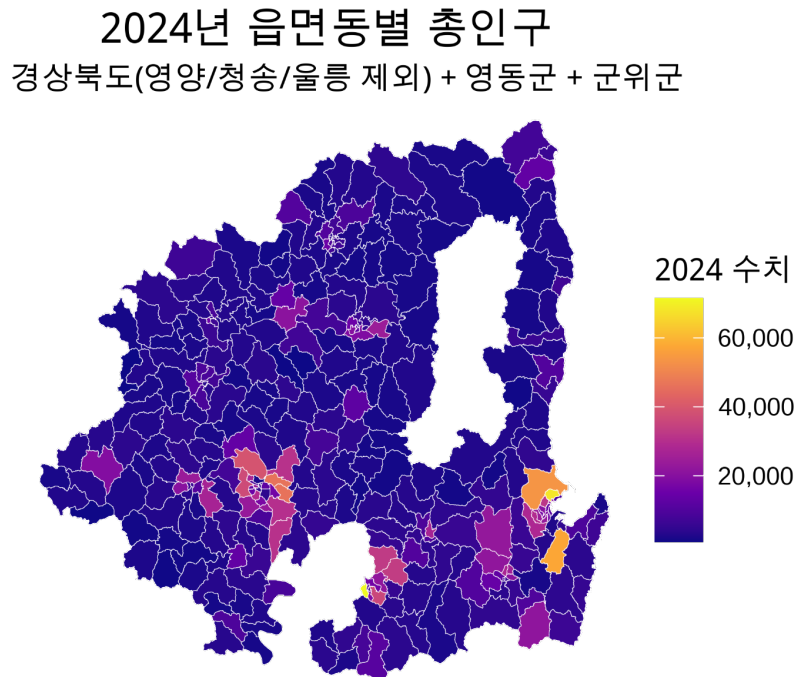
기존 연구를 분석한 결과, 본 연구가 가지는 주요한 차별점은 다음과 같다. 첫째, 읍면동별 주민등록인구 자료를 이용하여 인구 변화 효과를 세부적으로 밝힌다. 둘째, 공간수직회귀를 이용하여 공간적으로 인접하여 간섭이 발생하는 복수의 처치군에 관한 인과효과를 계량화한다. 셋째, 공간적 상호의존성을 직접적으로 모형에 반영함으로써 인구 이동뿐 아니라 동태(출생, 사망)적 측면에서의 파급효과를 실증적으로 파악할 수 있다.

III. 사례 지역 개관 및 연구 설계

경북김천혁신도시는 경상북도 김천시에 위치한 혁신도시로, 기존 농소면 일부와 남면 일부를 병합하여 신설된 울곡동에 소재하고 있다. 도로교통 부문 2개, 농업지원 부문 3개, 기타 기관 7개로 총 12개 기관이 이전대상 기관이며, 계획 이전 근무 인원은 5,561명으로 전체 10개 혁신도시 가운데 세 번째로 큰 규모이다. 2005년 혁신도시 입지선정위원회에 의해 입지 선정이 완료된 이후 '이전 공공기관 정착단계'인 1단계 기간(2007-2015년)과 '산·학·연 정착단계'인 2단계 기간(2015-2020년)을 지나 2024년 기준 26,547명이 거주하고 있다.

기존에 인구 밀도가 낮았던 농촌 지역에 입지하였고 경상북도에서 인구 규모가 6위에 해당하는 김천시 일원이라는 점에서 혁신도시 입지 유형 중 '신도시형-중소도시 배후형'에

해당한다(산업연구원, 2025). 처치 이전·이후 기간과 처치 대상이 명확하게 나뉜다는 점에서 공간적 인과추론 방법을 적용하기에 적합한 입지 특성이라고 할 수 있다.



Data Source: 행정안전부, 「주민등록인구현황」

[그림 1] 2024년 분석 대상 지역의 읍면동별 총인구

본 연구에서는 1997년부터 2024년까지 28개년을 분석 기간으로 삼으며, 공공기관 이전이 시작된 2013년을 처치 시점으로 설정해 이를 기준으로 사전 처치 기간과 사후 처치 기간을 구분한다. ($T_0 = 16$) 분석에 이용된 공간 단위는 읍면동 수준으로, 처치군과 통제군 풀을 구성하기 위한 읍면동 후보는 경상북도의 20개 시·군(울릉군, 영양군, 청송군 제외), 충청북도 영동군, 대구광역시 군위군에 속한 읍면동이었으며 행정구역 변동(명칭 변경, 통합, 분리, 기타) 유형별로 데이터 정제를 진행하였다. 특히 처치군 중 울곡동의 경우 앞서 언급하였듯 2014년 농소면 일부와 남면 일부를 병합하여 신설된 행정구역으로 이전 기간에 대해 결측치가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 농소면, 남면, 울곡동 데이터를 합산하여 '울곡동'으로 가정하여 전체 기간에 대한 데이터가 존재하도록 조치하였다. 울곡동의 인구 수 변동은 [표 1]에 나타나 있다.

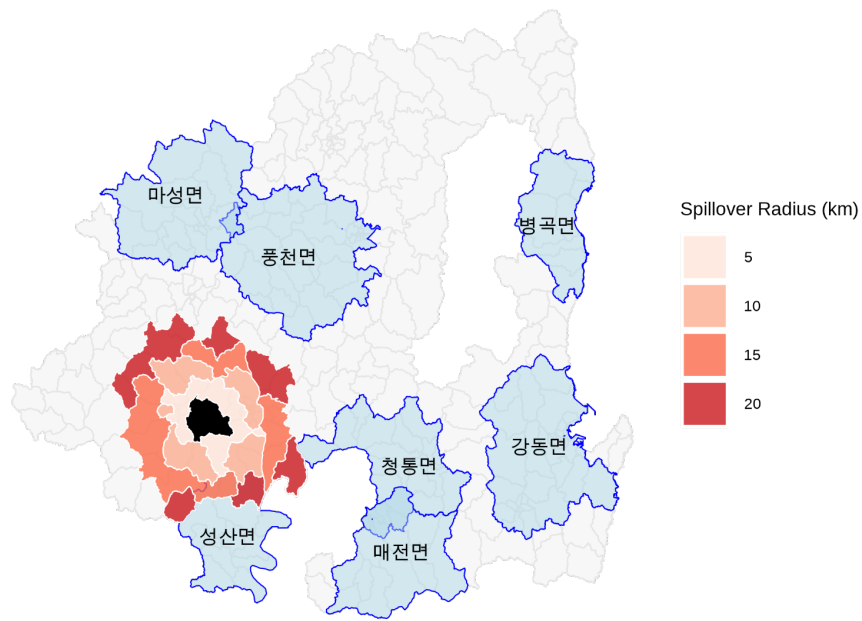
1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
8958	8915	8728	8463	8441	7994	8187	7808
2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
7618	7552	7459	7319	6880	7004	7038	6945
2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
7427	8834	16144	23130	26253	27675	28097	28658
2021	2022	2023	2024				
29048	29469	29715	29463				

[표 1] 김천시 율곡동¹의 주민등록인구 추이

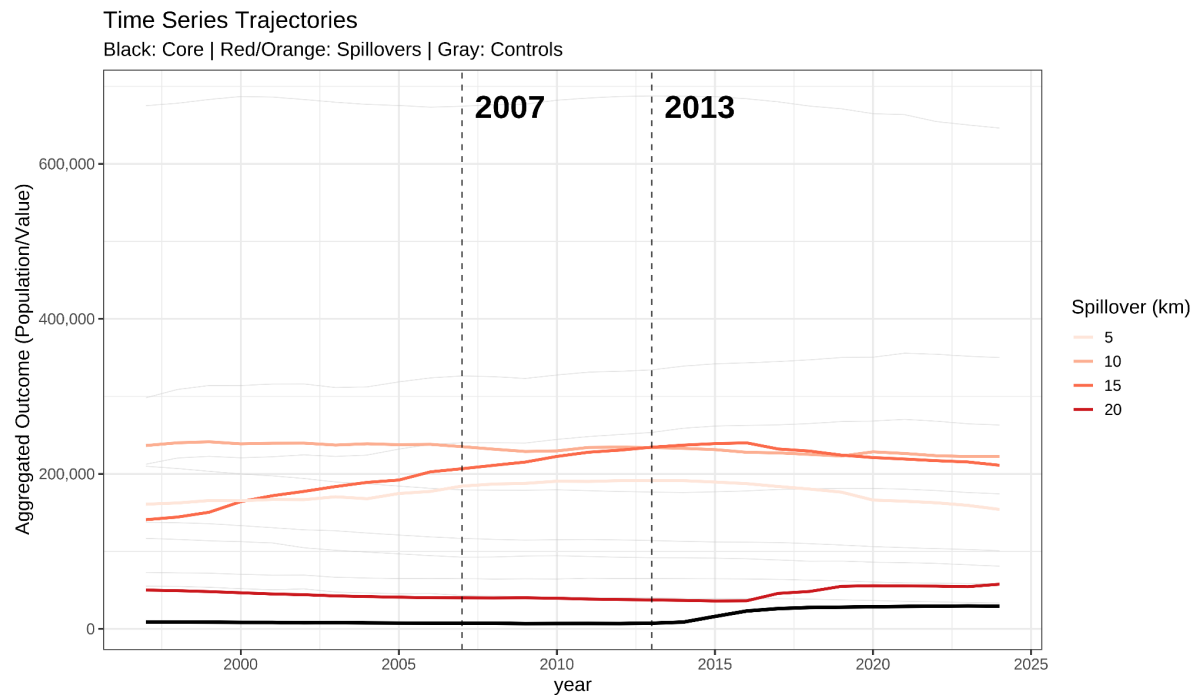
본 연구의 처치군으로는 직접 처치 지역인 율곡동과 파급 효과 지역인 4개의 읍면동 클러스터를 설정하였다. 파급 효과 지역은 율곡동의 중심점을 기준으로 5km, 10km, 15km, 20km 내에 중심점이 위치한 읍면동을 합역하여 밴드(band)와 같이 구성하였다. 결과적으로 5개의 처치군이 만들어졌으며, 각각은 상호배제 및 전체포괄(MECE)한다.

본 연구의 통제군 풀을 구성할 때는 다음과 같은 과정을 거쳤다. 첫째, 처치군에 포함된 읍면동이 있는 6개의 시군구, 김천시, 구미시, 성주군, 칠곡군, 영동군, 상주시를 제외하고 16개 시·군을 얻는다. 이는 처치 효과가 통제군에는 영향을 미치는 간섭(interference) 문제를 방지하기 위함이다. 둘째, 각 시·군별로 2005년 기준 읍면동의 인구밀도를 순서대로 나열한 뒤, 당시 김천시 율곡동(농소면+남면)의 분위수인 0.509과 가장 유사한 '대표 읍면동'을 선택한다. 셋째, 선택된 읍면동의 위치를 확인하여, 버퍼를 그렸을 때 최대한 겹치지 않는 대표 읍면동 8곳을 선정한다. 넷째, 해당 읍면동을 기준으로 20km 반경에 중심점이 존재하는 읍면동을 합역한 뒤, 최종 통제군 후보 풀을 마련한다. 이러한 통제군 선정 방식은 경상북도 혁신도시 입지선정위원회가 2005년 입지 선정 당시 경상북도 내 19개 시·군에서 각각 유치 신청을 하였던 점에서 착안한 것이다. 당시 신청된 실제 읍면동에 관한 정보를 찾지 못하여, 위와 같이 가상의 방법을 통해 구성하였으며, 최종 처치군과 통제군의 공간적 분포 및 인구수 시계열은 [그림 2]와 [그림 3]에 나타나 있다. 각 처치군과 통제군을 구성하는 읍면동 정보는 부록에 기재하였다.

¹ 2014년 이전 농소면 + 남면, 2014년 이후 농소면 + 남면 + 율곡동



[그림 2] 최종 설정된 처치군 밴드와 통제군 후보(donor pool)



[그림 3] 분석 기간 내 처치군 및 통제군의 주민등록인구 시계열

IV. 연구 방법론: 통제집단합성법과 공간수직회귀

통제집단합성법은 인과성을 확인하기 위한 준실험설계 방법의 일종으로, 특정 집단에 대해서만 어떤 정책이 시행되었을 때 정책 효과를 정교하게 밝힐 수 있다(Abadie et al., 2010; Abadie et al., 2015). 정책이 시행된 집단을 처치군이라 하면, 통제군(혹은 대조군)이 될 수 있는 여러 개의 후보(donor pool) 중에서 처치 이전 기간과 관측변수의 추세가 최대한 유사한 가상의 통제군을 선형결합으로 합성하여 생성하는 것이 핵심이다. 즉, 각 $i = 1, 2, \dots, N_1$ 에 대해 다음의 회귀식을 적합하여 $\beta^{(i)} = (\beta_0^{(i)}, \beta_c^{(i)})$ 를 추정한다.

$$Y_{it}^{(0)} = \beta_0^{(i)} + \sum_{c=N_1+1}^{N_1+N_0} \beta_c^{(i)} Y_{ct} + \epsilon_{it} \quad \text{for } t = 1, 2, \dots, T_0$$

N : 전체 관측지 수 = 처치군(N_1) + 통제군(N_0)

T : 전체 분석 시점 수 ($T_0 + 1$: 처치 시점)

합성된 통제군의 처치 이후 기간 값들은 ‘처치가 이루어지지 않았을 경우 예상되는 관측값’으로 이는 반사실적 결과(counterfactual outcome) $\hat{Y}_{it}^{(0)}$ 에 해당한다. 따라서 처치 효과 혹은 인과 효과 τ_{it} 는 처치가 이루어져 나타난 실제 관측값과 반사실적 결과값의 차이로 계산하게 된다.

$$\hat{Y}_{1t}^{(0)} = \hat{\beta}_0 + \sum_c \hat{\beta}_c Y_{ct}$$

$$\tau_{1t} = Y_{1t} - \hat{Y}_{1t}^{(0)}$$

공간수직회귀는 Grossi et al.(2025)에 의해 제안된 통제집단합성법의 변형이다. 해당 논문은 피렌체 시에서 트램 건설이 상업 활성화에 미친 인과효과를 추정하고자 트램 정류장으로부터 도보로 2, 4, 6, 8, 10분 거리의 밴드 내에 위치한 가게의 수를 처치군으로 설정하고 가상의 통제군을 합성하였으며 그 과정에서 트램 건설이라는 ‘처치’의 효과가 주변 지역으로 전파되는지 여부를 실증적으로 추정하고자 하였다. 다수의 처치군이 공간적으로 연결된 이와 같은 상황에서 하나의 대처 방안은 각 처치군별로 상이한 통제집단합성모형을 적합하는 것인데, 이 경우 처치군 간의 공간적 연관성을 무시하게 된다. 그러나 공간수직회귀에서는 처치 영역들이 서로 가까울수록 통제군을 조합하는 방식이 비슷할

것이라는 가정을 추가로 부여한다. 이를 통해 공간적 상호의존성을 반영하여 추정치의 편향을 줄이고, 특히 본 연구에서와 같이 사전 처치 기간이 짧은 경우 효율성의 손실을 줄일 수 있다.

이러한 가정은 베이지안 회귀를 이용하여 구체적으로 두 가지 방식으로 모형에 반영된다. 첫째는 계수, 즉 가중치 벡터가 거리를 기준으로 매끈하게 나타나도록 모델링하는 것이다. 각 통제군의 계수들을

$$\beta_c = (\beta_c^{(1)}, \dots, \beta_c^{(N_1)})^\top$$

$$\beta_c \sim GP(b_c \mathbf{1}, \Sigma_\beta), \quad \Sigma_\beta = \sigma_\beta^2 K(D, \rho_\beta^2)$$

처럼 벡터로 묶고, 이 벡터에 가우시안 프로세스 사전분포를 둔다. 커널함수로는 제곱 지수 커널(quadratic exponential kernel)를 이용하며, 공분산행렬 Σ_β 의 (i, i') 원소는 아래와 같다.

$$\text{Cov}(\beta_c^{(i)}, \beta_c^{(i')}) = \sigma_\beta^2 \exp\left(-\frac{D_{ii'}^2}{2\rho_\beta^2}\right)$$

둘째는 오차항에도 공간 의존을 허용하는 것이다. 계수에 대해서 설정했던 것과 유사하게 잔차벡터의 사전분포로

$$\epsilon_t = (\epsilon_{1t}, \dots, \epsilon_{N_1t})^\top \sim \text{MVN}_{N_1}(\mathbf{0}_{N_1}, \Sigma_e)$$

를 가정하고, 공분산행렬 Σ_e 의 (i, i') 원소는 아래와 같이 설정하여 공간적으로 상관된 성분과 IID 성분의 가중 합으로 나타낸다.

$$\text{Cov}(\epsilon_{it}, \epsilon_{i't}) = \sigma_e^2 \left[w \exp\left(-\frac{D_{ii'}^2}{2\rho_e^2}\right) + (1 - w) \right]$$

베이지안 회귀를 이용하면 이러한 정보를 '사전분포'로 직접적으로 모형에 반영할 수 있다는 장점을 지닌다. 사전분포의 하이퍼파라미터는 Grossi et al.(2025)와 동일하게 다음과 같이 설정하였다:

$$\begin{aligned}
\sigma_\beta^2 &\sim \text{Inverse-Gamma}(a_\beta, \eta_\beta), \quad \rho_\beta^2 \sim \text{Gamma}(a_{\rho_\beta}, \eta_{\rho_\beta}), \\
\beta_0^{(i)} &\sim N(\mu_0, \sigma_0^2), \quad i = 1, \dots, N_1, \\
\sigma_e^2 &\sim \text{Inverse-Gamma}(a_e, \eta_e), \\
\rho_e^2 &\sim \text{Gamma}(a_{\rho_e}, \eta_{\rho_e}), \\
w &\sim \text{Uniform}(0, 1).
\end{aligned}$$

where $\mu_b = 0, \sigma_b^2 = 1, \mu_0 = 0, \sigma_0^2 = 1, a_\beta = 2.7, \eta_\beta = 0.3, a_{\rho_\beta} = 0.5, \eta_{\rho_\beta} = 2, a_e = 2, \eta_e = 0.35, a_{\rho_e} = 0.5, \text{ and } \eta_{\rho_e} = 1.5.$

사후분포는 스탠(Stan)의 해밀토니안 몬테 카를로(Hamiltonian Monte Carlo) 방식으로 계산되었으며, 이때 4번의 체인(chain), 4000번의 반복(iteration), 그리고 2000번의 워업(warm-up)을 이용하여 총 8000번 샘플링이 진행되었다. 각 드로우(draw)에서 추정된 파라미터를 얻은 뒤 2.5 백분위수와 97.5 백분위수를 이용하여 불확실성을 95% 신용 구간(credible interval)의 형태로 계량화하여 나타낼 수 있다. 그밖의 인과 효과 추정량(estimand) 등은 통제집단합성법에서와 동일하다.

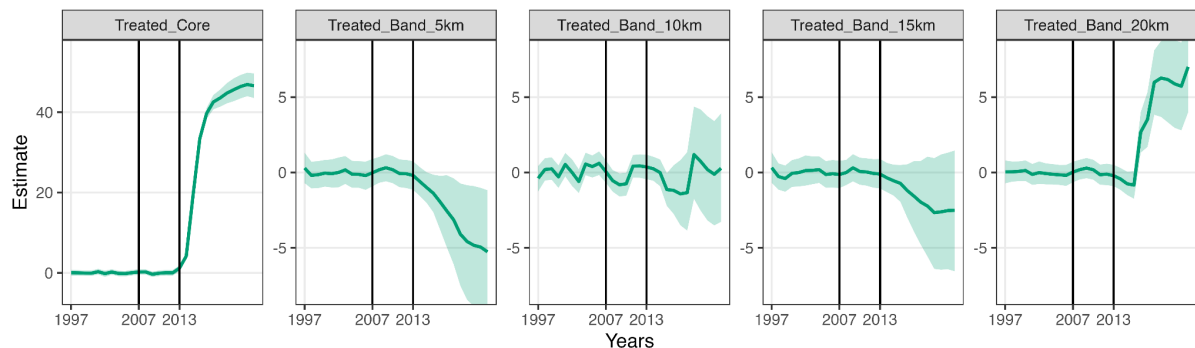
추가적으로, 계수 추정이 규모에 의존하는 것을 방지하고자 모형 적합에 앞서 결과변수를 사전 처치 기간의 표본평균과 표본표준편차로 표준화를 진행하며, t 시점의 통제군의 평균을 추세(trend)로 계산하여 기존 값에서 감산함으로써 전체적인 추세를 제거한 뒤 이를 결과변수로 상정한다.

본 연구에서는 공간수직회귀를 이용한 분석 결과를 이용하여 직접 처치 지역 및 주변 지역에서 혁신도시 건설의 인과효과를 추정한다. 이와 더불어 비공간 모형인 단순회귀와 일반적인 통제집단합성법(베이지안수직회귀)을 이용한 분석 결과와의 비교를 통해 해당 모형의 방법론적 장점을 입증하고자 한다.

V. 분석 결과: 공공기관 이전의 인구 효과 추정

먼저, [그림 4]와 [표 2]는 공간수직회귀를 이용한 인과 효과 τ_{it} 의 추정 결과를 나타낸다. $\hat{Y}_{it}^{(0)}$ 는 사후분포의 중앙값으로 선택되었으며, [그림 4]는 인과효과 추정값과 95% 사후 신용구간을 시각화한 것이다. 2007년은 공사 시작 단계를 의미하고, 2013년이 처치가

시작된 시점이다. 또한, 직접 처치 지역인 율곡동의 경우 인과 효과의 크기가 커 y축의 스케일이 상의함을 주의하여야 한다. 우선 처치 이전 기간의 신용 구간을 살펴보면 그 폭이 작고 0을 포함하고 있는 것을 확인할 수 있는데, 이는 공간수직회귀의 적합도(goodness of fit)가 높다는 사실을 방증하는 것이다. 처치 이후 기간의 추정값을 처치군별로 살펴보면, 먼저 신시가지형 혁신도시라는 사실에 부합하게 소재지인 율곡동에서는 매우 높은 인구 증가 효과가 나타났다. 다만, 건설이 완료된 직후에 비해 2020년 이후로는 인구 증가의 속도가 완화되고 있음이 뚜렷하게 나타났다. 첫번째 밴드(5km 반경 내 위치)의 읍면동에서는 인구 감소 효과가 나타났으며, 두번째 밴드(5km-10km 반경 내 위치)의 읍면동에서는 처치 직후에는 감소하였다가 2020년대 이후로 소폭 증가하는 추세가 확인된다. 세번째 밴드(10-15km 반경 내 위치)의 읍면동에서는 신용구간이 0을 포함하기는 하나 감소 경향을 보이고 있고, 2020년경부터는 인구 감소의 속도는 정체된 것으로 나타났다. 네번째 밴드(15-20km 반경 내 위치)의 읍면동에서는 유의미한 인구 증가 효과가 나타났는데, 거리가 먼 처치군에서 인과효과가 역전되는 사전에 다소 예측하기 힘든 결과였다. 다만 이는 산동읍 등에 구미국가산업단지 4단지 등이 유치되면서 나타난 교란(confounding)의 결과일 수 있으므로 해석에 주의가 요구된다.

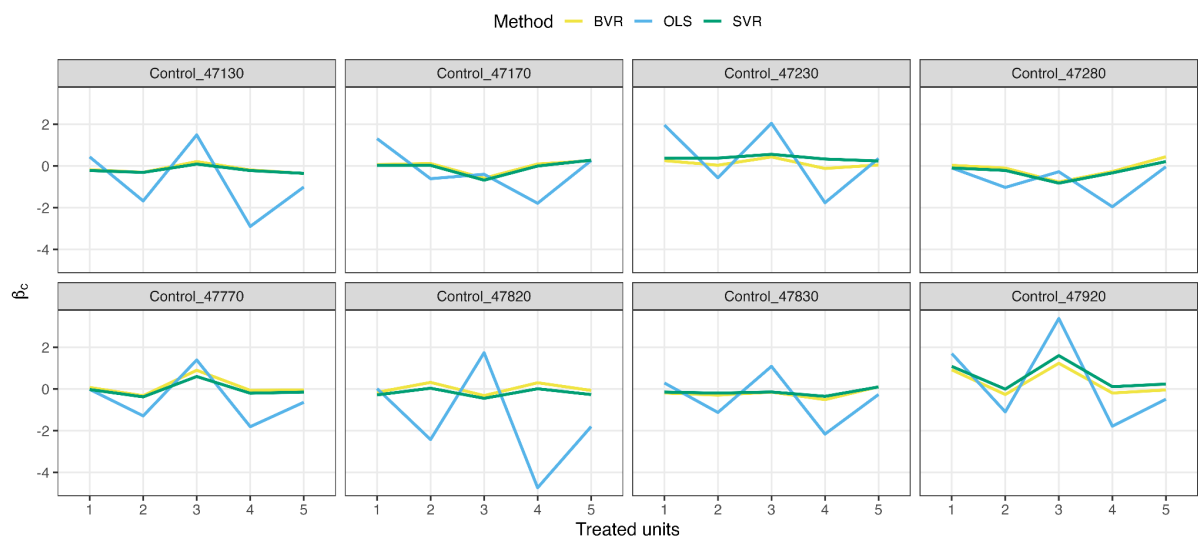


[그림 4] 공간수직회귀를 이용하여 추정한 인과 효과 및 신용구간

	Treated_Core	Treated_Band_5km	Treated_Band_10km	Treated_Band_15km	Treated_Band_20km
Median	34.316	-2.241	-0.520	-1.127	3.298
(LB, UB)	(32.462, 36.059)	(-4.258, -0.614)	(-2.393, 1.471)	(-2.907, 0.652)	(1.424, 5.100)

[표 2] 처치 이후 기간의 평균 인과 효과 및 신용구간

[표 2]는 분석 결과를 요약하고자 처치 이후 기간의 평균(intertemporal average)를 각 드로우별로 계산하고 이에 해당하는 95% 사후 신용구간을 나타낸 것이다. 선행연구에서 보고된 것과 유사하게 첫번째 밴드, 즉 원도심 지역을 포함하는 인접 시군구에서의 전체적으로 인구 감소 효과가 나타남을 본 연구에서도 확인할 수 있었다. 한편, 직접 처치군과 첫번째 밴드, 네번째 밴드를 제외하고는 신용구간이 0을 포함하므로 해당 지역에 대해서는 확고한 결론을 내릴 수는 없음에 주의해야 할 것이다.



[그림 5] 단순선형회귀, 베이지안수직회귀, 공간수직회귀를 이용해 추정된 회귀계수

[그림 5]는 모형별로 추정된 회귀계수 값의 차이를 나타낸 것이다. 단순선형회귀에 비해 베이지안수직회귀나 공간수직회귀의 회귀계수 추정값은 공간적으로 인접한 처치군(x축)에 대해 비교적 일정하게 분포하고 있음을 확인할 수 있었다. 인접 시군구임에도 불구하고 회귀계수의 차이가 극명하다는 것은 모형이 과적합되었음을 함의하며, 실제 신용구간을 계산해 보면 공간선형회귀의 우수성을 확인할 수 있었다.

	OLS	BVR	SVR
MAE	4.159	3.846	3.834
RMSE	11.190	11.286	11.285
Mean CI Width	4.473	3.895	2.797

[표 3] 단순선형회귀, 베이지안수직회귀, 공간수직회귀 모형의 평가 지표

[표 3]은 모형별 평가지표로 전체 처치군에 대한 MAE, RMSE와 95% 신용구간의 길이의 평균을 나타낸 것이다. RMSE 측면에서는 단순선형회귀의 성능이 가장 높았지만, 이는 과적합에 의한 결과일 가능성이 높으며, MAE와 RMSE 측면에서는 공간수직회귀가 비공간적 베이지안수직회귀에 비해 높은 성능을 나타내어 처치군이 공간적으로 인접한 경우에 대해 공간적 인과추론 방법 적용의 필요함을 입증하였다.

VI. 결론

본 연구는 공간수직회귀를 적용하여 경북김천혁신도시가 혁신도시 소재지인 김천시 울곡동과 주변 지역의 인구 변동에 미친 영향을 실증적으로 확인하였다. 주요 분석 결과는 다음과 같다. 첫째, 혁신도시 소재지인 울곡동에서는 매우 높은 인구 증가 효과를 확인하였다. 다만, 혁신도시 건설(처치) 직후에 가파르게 인구가 증가하였다가 2020년경부터는 추세가 둔화되는 모습 또한 관찰되었다. 둘째, 혁신도시가 소재지 5km 반경 내의 원도심에서는 반대로 인구 감소 효과가 확인되었다. 해당 클러스터는 김천시 평화남산동, 대신동 등 김천시의 전통적인 구도심 지역으로, 혁신도시가 구도심에서 떨어진 지역에 위치하면서 배후도시의 구도심에서는 공동화가 이루어졌을 가능성을 나타낸다. 셋째, 5-15km 내에 위치한 읍면동에서는 약한 부(-)의 관계가 나타났으나, 인과성은 통계적으로 유의미하다고 볼 수 없었다. 넷째, 15-20km에 위치한 읍면동에서는 인구 증가 효과가 관찰되었으나, 해당 지역에 다른 교란 변수가 존재했는지 여부에 대한 고찰이 추가적으로 필요할 것으로 보인다. 다섯째, 방법론적 측면에서는 공간수직회귀가 비공간적 모형인 단순선형회귀나 베이지안수직회귀에 비해 통제집단을 합성함에 있어서 편향과 분산 모두 더 낮은 것으로 나타났다. 이는 공간적으로 인접한 처치 지역에 대한 모형을 적합할 때 공간 정보를 반영함으로써 짧은 사전 처치 기간, 즉 적은 표본 수에서 보다 효율성이 높은 추정량을 도출할 수 있음을 의미한다.

본 연구는 혁신도시 정책의 명과 암을 실증적으로 확인할 수 있었다는 점에서 의의를 지닌다. 혁신도시 소재지에서의 인구 증가가 나타나는 것은 고무적이지만, 사실 이는 공공기관의 이전으로 인해 필연적으로 발생할 수밖에 없는 결과이기도 하다. 장기적인 측면에서는 오히려 주변 지역을 비롯하여 권역 전체의 인구 증가 효과가 나타나는 것이 바람직하다. 그러나 실증적으로는 그와 반대로 구도심에서의 인구 공동화 현상이 관측되었으며, 이는 지역 전체로 보았을 때 인구 증가 효과가 상쇄되는 한편 오히려 도시의

기능이 분리됨으로써 집적 효과를 약화시킬 가능성이 존재한다. 실제로 경북김천혁신도시에 본사가 소재한 공공기관에서 근무하고 있는 인터뷰이는 혁신도시법에서 의무적으로 규정하고 있는 '지역인재전형'으로 채용된 직원들에 비해 기존 수도권 본사에서 근무하던 직원들은 거주지를 옮기지 않는 경향이 더 높다고 답했다. 따라서 혁신도시 소재지뿐만 아니라 주변 지역의 인구 변화 효과를 실증적으로 검증한 본 연구의 결과는 향후 정책 방향성을 조정할 때 참고가 되어야 할 것이다.

한편, 본 연구에서 보완할 점은 다음과 같다: 먼저, 본 연구에서 결과변수로 채택한 주민등록인구는 읍면동 수준으로 구득할 수 있다는 장점이 있으나 해당 지역으로 전입신고한 인원만 집계된다는 점에서 실제 도시의 활력 징후를 측정하는 데는 한계가 존재한다. 둘째, 경북김천혁신도시에 한정된 연구로, 해당 결과를 다른 혁신도시로 일반화하는 데에는 어려움이 있다. 다만 본 연구에서는 혁신도시별로 인과성이 다소 이질적일 수 있다는 측면에서 분석을 진행하지 않았는데, 이전 공공기관의 근무 인원 수 대비 유입 인구 등으로 변수를 조작하여 추가 연구를 진행할 수 있을 것으로 기대된다. 셋째, 연구 설계와 관련하여 현재는 유클리드 거리를 기준으로 처치군의 밴드를 설정하였는데, 보다 유의미한 결과를 얻고자 이를 이동 시간을 기준으로 등시선(isochrone)을 만들어 설정하거나, 구도심이나 농업 중심 지역 등의 특성을 처치군 선정에 반영하도록 할 수 있을 것이다. 차후 연구에서 이를 보완하여 정책적 측면에서 현실유관성을 제고하고, 방법론적으로는 공간 데이터에 기반한 '공간적 인과 추론'을 정초하는 데 기여할 수 있기를 기대한다.

참고 문헌

국토교통부. (2018). 혁신도시 시즌2 추진방안. 국토교통부 보도자료.

https://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_72/dtl.jsp?lcmspage=9&id=95080319. 2025년 12월 16일 접속.

고정우, 이주림, 구자훈. (2023). 대도시 및 중소도시 입지별 혁신도시의 청년인구 유입효과 비교분석. 한국지역개발학회지, 35(2), 45-68.

문윤상. (2021). 공공기관 지방이전의 효과 및 정책방향. 한국개발연구원.

https://www.kdi.re.kr/research/subjects_view.jsp?pub_no=17228. 2025년 12월 15일 접속.

이상원, 구한민, 김갑성. (2022). 혁신도시가 모도시의 인구유출에 미치는 영향: 신시가지형과 신도시형 혁신도시의 비교. 한국도시지리학회지, 25(3), 27-40.

임태경. (2021). 혁신도시 개발정책이 청년인구 유입에 미치는 영향에 관한 연구 : 충북혁신도시 사례를 중심으로. 지방행정연구, 35(4), 247-274.

임태경. (2023). 인구감소시대 혁신도시 개발정책의 인구 분산효과에 대한 논의: 수도권·비수도권·같은권역내 청년인구 순유입효과의 비교분석을 중심으로. 지방정부연구, 26(4), 235-259.

장인수, 박승규. (2021). 경북혁신도시의 인구 변화 효과 실증분석. 대구경북연구, 20(3), 23-47.

장인수. (2022). 혁신도시 정책이 인구감소지역 인구 재성장에 미치는 영향. 지역정책연구, 33(2), 21-38.

장인수, 배호중. (2025). 한국의 혁신도시 정책에 따른 인구변동 분석과 정책적 시사점: 준실험설계로부터의 실증적 증거. 도시연구, (27), 283-321.

정광진. (2017). [혁신도시 10년, 내일을 묻다] 구도심 쇠퇴 부르는 '블랙홀'... 멀어지는 균형발전. 한국일보. <https://www.hankookilbo.com/News/Read/201709050469966292>. 2025년 12월 15일 접속.

혁신도시 조성 및 발전에 관한 특별법. (2025). <https://www.law.go.kr/법령/혁신도시조성및발전에관한특별법>. 2025년 12월 15일 접속.

Abadie, A., Diamond, A., & Hainmueller, J. (2010). Synthetic control methods for comparative case studies: Estimating the effect of California's tobacco control program. *Journal of the American Statistical Association*, 105(490), 493–505.

Abadie, A., Diamond, A., & Hainmueller, J. (2015). Comparative politics and the synthetic control method. *American Journal of Political Science*, 59(2), 495–510.

Cavallo, E., Galiani, S., Noy, I., & Pantano, J. (2013). Catastrophic natural disasters and economic growth. *The Review of Economics and Statistics*, 95(5), 1549–1561.

Grossi, G., Mattei, A., & Papadogeorgou, G. (2025). Spatial vertical regression for spatial panel data: Evaluating the effect of the Florentine tramway's first line on commercial vitality [Preprint]. *arXiv*.

Sun, L., & Abraham, S. (2021). Estimating dynamic treatment effects in event studies with heterogeneous treatment effects. *Journal of Econometrics*, 225(2), 175–199.

코드 및 데이터

분석에 활용된 코드 및 데이터는 https://github.com/jihography/innocity_causal에 업로드되어 있습니다.

A. 부록 1: 다른 인과 추론 방법과의 비교

1. 사건 연구 이중차분법(Event-Study DiD)을 이용한 분석 결과

이중차분법은 II장에서 고찰한 바와 같이 정책 영향을 평가하기 위해 활발히 활용되는 인과 추론 방법 중 하나이다. 다른 식별 가정(identification assumption) 하에서 본 연구 설계 상황의 인과 효과가 어떻게 추정되는지를 살펴보기 위함이며, V장의 분석 결과와 완전히 대응한다고 보기는 어렵고 보조적인 자료로 이용될 필요가 있다.

$$Y_{it} = \alpha_i + \lambda_t + \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{k \neq -1} \beta_{b,k} (\mathbf{1}\{i \in b\} \cdot \mathbf{1}\{t - T_0 = k\}) + \varepsilon_{it}$$

$\mathcal{B}$: 처치군 $(1, \dots, N_1)$

α_i : 지역별 고정효과

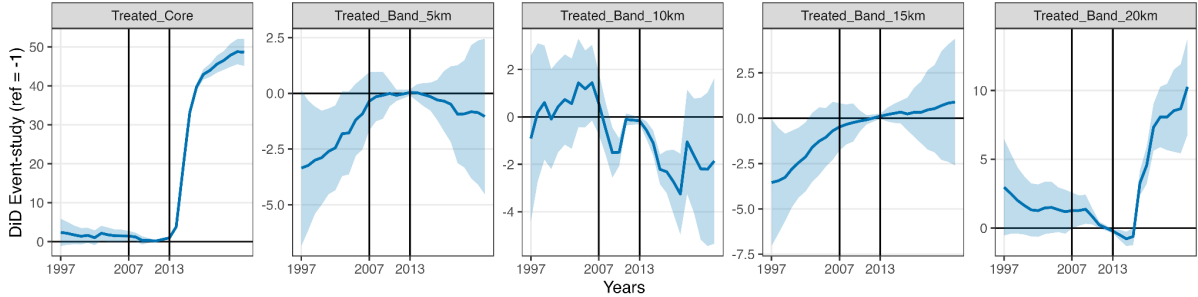
λ_t : 연도별 고정효과

본 연구에서는 처치 시점 이후 인과 효과의 변화에도 관심을 두기 때문에 사건 연구 이중차분법을 활용하여 분석을 진행하였다. 이는 일반 이중차분법 모형에서 더미변수를 처치군과 시점별로 나누어 처치시점 직전 연도를 기준으로 각 상대시간 k 에서 계수 β_k 를 추정하는 방식이다(즉, $t = T_0 - 1$ 일 때 $k = 0$). 이때 계수는 “처치군과 통제군의 결과 격차가 기준 시점 대비 β_k 만큼 변화”한 것으로 해석된다(Sun-Abraham, 2021). 본 절에서는 공간수직회귀에서 정의한 처치군과 통제군 구분을 그대로 유지하여 처치군별로 사건 연구 이중차분법의 계수를 추정하였다. 다만 추정 과정에서 공간적 의존성은 고려되지 않았다.

이중차분법의 핵심 가정은 평행 추세 가정(parallel trend assumption)이다. 이는 정책이 시행되지 않았을 경우 처치군과 통제군의 결과변수가 시간에 따라 동일한 기울기로 변화했을 것이라는 반사실적 가정이다. 사건 연구 이중차분법에서 평행 추세 가정이 충족되는지를 확인하는 방법은 사전 처치 기간의 계수들이 0에 가깝고 통계적으로 유의미하지 않게 나타나는지를 확인하는 것이다.

[그림 A1]은 사건 연구 이중차분법을 적용한 분석 결과를 나타낸 것이다. 우선 일부 기간 및 일부 처치군에서는 신뢰구간이 0을 포함하고 있지 않다는 점에서 평행 추세 과정을 엄밀하게 만족한다고 보기 어렵다는 점을 밝힌다. 처치 이후 기간의 누적된 인과효과를

살펴보면 소재지인 울곡동에서는 V장의 분석 결과와 유사하게 우상향하는 패턴이 관측된다. 반면, 첫번째 밴드는 음의 효과가 나타나지만 신뢰구간이 0을 포함하여 V장의 분석 결과와 달리 인과성이 유의미하게 나타나지는 않았다. 두번째 밴드에서는 V장에 비해 음의 효과가 더욱 뚜렷하게 나타났고, 세번째 밴드에서는 인과효과가 0에 가까운 양수의 값으로 나타났다. 네번째 밴드에서는 대체로 유의미한 양의 효과가 나타났다. 전체적인 경향성은 공간수직회귀와 조응하는 결과가 나타났지만, 앞서 언급한 가정의 차이와 공간성의 미고려로 인해 일부 처치군에서는 인과 효과의 양상이 다르게 관측되었다. 공간적 의존성이 반영된 이중차분법 등을 이용하는 등의 추가 연구를 통해 방법론적 차이가 분석 결과에 어떠한 영향을 미치는지에 관한 세부적인 대조 분석이 필요해 보인다.



[그림 A1] 사건-연구 이중차분법을 이용하여 추정한 인과 효과 및 신뢰구간

B. 부록 2: 데이터 정제 및 연구 설계 과정

1. 분석 대상 지역 내 읍면동 행정구역 변동 내역 및 반영 방식

1) 명칭 변경 / 행정구역 병합

변경 전	변경 후	변경 연도	변경 전	변경 후	변경 연도
홍해읍	홍해읍	1998	산동면	산동읍	2021
용흥1동, 용흥2동	용흥동	1998	원평2동, 원평3동	원평2동	1999
덕수동, 대흥동, 중앙동, 동빈동, 대신동, 학산동, 항구동	*중앙동(= 학산동, 중앙동)	1998/2009	원평1동, 원평2동	원평동	2021

장양동	장량동	1998	선주동, 원남동	선주원남동	1999
대보면	호미곶면	2010	상모동, 사곡동	상모사곡동	1999
상대1동, 상대2동	상대동	2009	하망1동, 하망2동, 하망3동	하망동	1998
해도1동, 해도2동	해도동	2009	교동	서부동	1998
죽도1동, 죽도2동	죽도동	2009	주남동, 봉작동, 영도동	남부동	1998
성내동, 중앙동	중부동	1996	명산동, 대전동	중앙동	1998
성동동, 황오동	황오동	2009	중앙동, 동문동	동문동	1998
탑정동, 황남동	황남동	2009	신기동, 대성동	신평동	1999
인교동, 도동동, 보황동	월성동	1996	점촌동	점촌1동	2003
정래동, 불국동	불국동	1996	중앙동	점촌2동	2003
용호동, 모암동	용암동	1996	신흥동	점촌3동	2003
용암동	자산동	2008	신평동	점촌4동	2003
성내동, 남산동	성남동	2000	모전동	점촌5동	2003
평화동, 성남동	평화남산동	2008	고로면	삼국유사면	2021
신음동, 금산동, 대응동	대신동	1998	북삼면	북삼읍	2003
미곡동, 부곡동	대곡동	1998	석적면	석적읍	2006
양천동, 양금동	양금동	1998	*영주1동, 영주2동, 영주3동	영주1동	1998
동구동, 중구동	중구동	1998	*영주4동	영주2동	1998
용성동, 송천동	용상동	1998			

[표 B1] 행정구역 명칭이 변경되거나 행정구역이 병합된 경우 최종 행정구역을 기준으로
인구 합산

2) 행정구역 분리 / 분리 후 병합

- 해당 유형의 경우 2024년 기준으로 읍면동 .shp 파일 합역 진행 후 임의로 1개 지명 할당

변경 전	변경 후	변경 연도	합역 후 지명
농소면, 율곡동, 남면	율곡동	2014	율곡동
강남동, 서구동, 법상동	강남동, 서구동	2005	강남동
서부동	서부1동, 서부2동	2004	서부1동

[표 B2] 행정구역이 분리되거나 분리 후 병합된 경우 전 행정구역 합산 후 합역 및 인구 합산

3) 기타

- 출장소 자료는 연도 구분없이 해당 면/읍에 합산
- 1998년 포항시 코드 변동: 명칭 기준으로 연결

2. Treated, Control 시군구 구성 목록

중심 읍면동	반경(km)	읍면동 수(개)	합역된 읍면동
율곡동	5	13	감천면, 개령면, 대신동, 북삼읍, 선주원남동, 아포읍, 양금동, 자산동, 지좌동, 초전면, 평화남산동, 형곡1동, 형곡2동
율곡동	10	20	감문면, 고아읍, 공단동, 광평동, 기산면, 대곡동, 도량동, 벽진면, 비산동, 상모사곡동, 송정동, 신평1동, 신평2동, 약목면, 어모면, 원평동, 월항면, 임오동, 조마면, 지산동
율곡동	15	14	구성면, 금수강산면, 대가면, 대항면, 무을면, 봉산면, 석적읍, 선산읍, 성주읍, 양포동, 왜관읍, 인동동, 지례면, 진미동

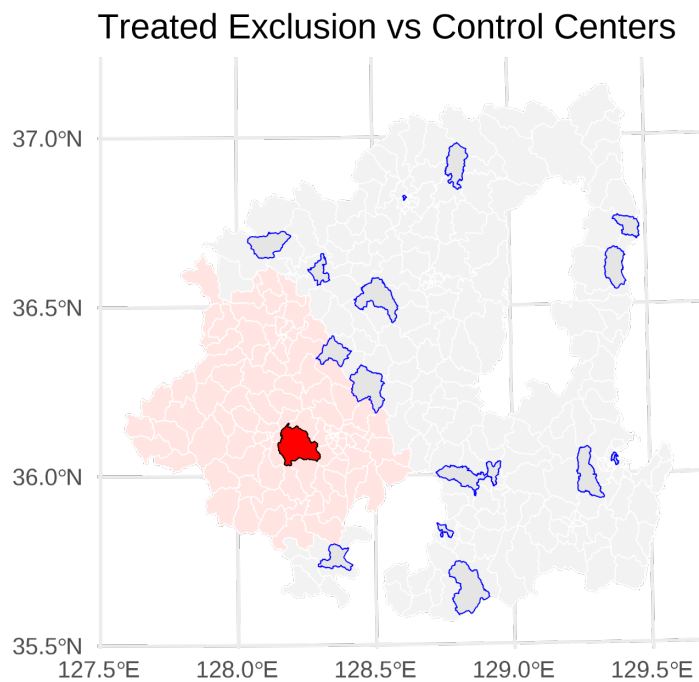
율곡동	20	10	가천면, 공성면, 매곡면, 산동읍, 선남면, 옥성면, 지천면, 청리면, 추풍령면, 해평면
-----	----	----	--

[표 B3] 처치군 합역 내역

중심 읍면동	반경(km)	읍면동 수(개)	합역된 읍면동
강동면	20	50	감포읍, 강동면, 건천읍, 고경면, 구룡포읍, 기계면, 기북면, 대송면, 대이동, 동천동, 동해면, 두호동, 문무대왕면, 보덕동, 불국동, 상대동, 서면, 선도동, 성건동, 송도동, 송라면, 신광면, 안강읍, 양학동, 연일읍, 오천읍, 용강동, 용흥동, 우창동, 월성동, 임고면, 자양면, 장기면, 장량동, 제철동, 죽도동, 죽장면, 중부동, 중앙동, 천북면, 청림동, 청하면, 해도동, 현곡면, 환여동, 황남동, 황성동, 황오동, 효곡동, 흥해읍
풍천면	20	44	감천면, 강남동, 개포면, 구천면, 남선면, 남후면, 다인면, 단밀면, 단북면, 단촌면, 명륜동, 보문면, 봉양면, 북후면, 비안면, 사벌국면, 산양면, 서후면, 송하동, 신평면, 안계면, 안기동, 안사면, 안평면, 영순면, 예천읍, 옥동, 용궁면, 용문면, 용상동, 유천면, 은풍면, 의성읍, 일직면, 점곡면, 중구동, 중동면, 지보면, 태화동, 평화동, 풍산읍, 풍양면, 풍천면, 호명면
청통면	20	38	가산면, 고경면, 금호읍, 남부동, 남부동, 남산면, 대창면, 동명면, 동부동, 동부동, 부계면, 북부동, 북안면, 산성면, 삼국유사면, 서면, 서부1동, 서부동, 신녕면, 압량면, 와촌면, 완산동, 용성면, 우보면, 의흥면, 임고면, 자양면, 자인면, 중방동, 중앙동, 중앙동, 진량읍, 청통면, 하양읍, 화남면, 화북면, 화산면, 효령면
마성면	20	25	가은읍, 개포면, 공검면, 농암면, 동로면, 마성면, 문경읍, 사벌국면, 산북면, 산양면, 영순면,

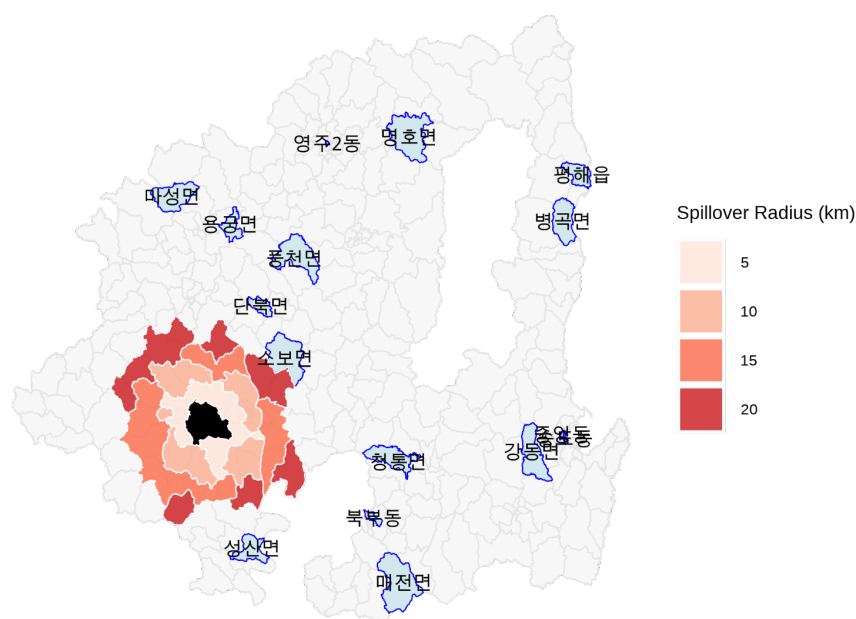
			외서면, 용궁면, 용문면, 유천면, 은척면, 이안면, 점촌1동, 점촌2동, 점촌3동, 점촌4동, 점촌5동, 함창읍, 호계면, 화북면
병곡면	20	11	강구면, 기성면, 병곡면, 영덕읍, 영해면, 온정면, 지품면, 창수면, 축산면, 평해읍, 후포면
매전면	20	24	각남면, 각북면, 금천면, 남부동, 남산면, 남천면, 대창면, 동부동, 매전면, 북부동, 산내면, 서부1동, 압량면, 용성면, 운문면, 이서면, 자인면, 중방동, 중앙동, 진량읍, 청도읍, 풍각면, 하양읍, 화양읍
성산면	20	16	각북면, 개진면, 다산면, 대가면, 대가야읍, 덕곡면, 선남면, 성산면, 성주읍, 수륜면, 쌍림면, 용암면, 우곡면, 운수면, 월항면, 풍각면

[표 B4] 통제군 합역 내역



[그림 B1] 진한 빨간색 지역이 직접 처치 지역, 연한 빨간색 지역은 파급 처치 지역과 겹치는 시군구 영역을 표시한 것

Treated & Control Candidates



[그림 B2] 통제군 합역 전 시군구별 통제군의 중심 읍면동 선정