

FLUS 모델을 활용한 탄소저장량 변화 예측 -세종시 마을습지를 중심으로-

염택욱* · 구본학** · 박미옥***

*상명대학교

**상명대학교

***나사렛대학교

Prediction of Carbon Storage Changes Using the FLUS Model —Focusing on Village Wetlands in Sejong City—

Zexu Lian* · BoonHak Koo** · Miok Park***

*SangMyung University, Korea, ***Korea Nazarene University

(Received : 21 October 2025, Revised : 17 November 2025, Accepted : 19 November 2025)

요약

본 연구는 FLUS 모델을 활용하여 세종시와 세종시내 41개 마을습지 생활권(반경 1,000m)의 토지피복과 탄소저장량 변화를 2050·2100년까지 예측하였다. FLUS는 거시 수요(Top-down)와 미시 경쟁·패치 성장(Bottom-up)을 결합하고, ANN 기반 전이잠재력(PoO)·자기적응형 관성계수로 목표면적을 동적으로 조정한다. 입력자료는 2010·2015·2019·2024년 토지피복(대분류)과 토양도, DEM, 경사, 도시/하천과의 거리, 인구 등 요인으로 구성했으며, 예측 전 FLUS KAPPA 검증을 2회 수행하였다. 본 연구에서 예측은 2100년 SSP1은 시가화 119.65km² (25.73%), 습지 7.89km² (1.70%), SSP5는 시가화 121.18km² (26.06%), 습지 6.36 km² (1.37%)로 나타나 고배출 시나리오에서 습지 축소가 심화되었다. 41개 마을습지의 생활권에서도 FLUS는 SSP5-2100에서 시가화 비중 확대와 함께 습지 비중이 0.1% 수준까지 하락하는 취약성을 제시하였다. 탄소지표 측면에서 FLUS는 SSP5-2100에서 총 탄소저장량이 18.6% 감소하는 하향 위험을 보여, 장기 도시성장관리와 연계된 습지·산림 보전이 없을 경우 탄소저장 기능 약화가 불가피함을 시사한다. 이에 따라 우선보전 구역 지정, 습지-초지 완충대 확충, 개발가이드라인의 시나리오 필요하며, 예측 산출물은 2050, 2100년 도시공간구상과 기후적응 전략의 정량 근거로 활용될 수 있다.

핵심용어 : 기후변화 시나리오(SSP), 토지피복 변화, 공간 시뮬레이션 모형, 마을습지, 탄소흡수 기능

Abstract

This study employed the FLUS model to project changes in land cover and carbon storage in Sejong City and the 41 village wetland living zones (within a 1,000 m radius) through 2050 and 2100. The FLUS model integrates top-down macro demand with bottom-up patch competition and growth dynamics. It dynamically adjusts target areas using an ANN-based transition potential (PoO) and a self-adaptive inertia coefficient. Input data included land-cover maps (2010, 2015, 2019, 2024; major categories), soil maps, DEM, slope, distances to urban areas and rivers, and population distribution. Model performance was validated twice using KAPPA accuracy assessment prior to prediction. Under the 2100 scenarios, FLUS projections show that in SSP1, urbanized areas expand to 119.65 km² (25.73%) and wetlands decline to 7.89 km² (1.70%), whereas in SSP5, urbanized areas reach 121.18 km² (26.06%) and wetlands shrink further to 6.36 km² (1.37%). This indicates intensified wetland loss under the high-emission scenario. Within the 41 village wetland living zones, SSP5-2100 simulations reveal growing urban shares and a severe decline in wetland proportion—down to around 0.1%—indicating high vulnerability. From the

† All authors equally contributed

To whom correspondence should be addressed.

Sang Myung University, Seoul, Korea

E-mail : lianzexu0429@naver.com

• MiOk Park Korea Nazarene University, Seoul, Korea/Professor(ecoflower@kornu.ac.kr)

• Zexu, Lian Sang Myung University, Graduate School, Seoul, Korea/Student(lianzexu0429@naver.com)

• BonHak Koo Sang Myung University, Seoul, Korea/Professor(ecoculture@smu.ac.kr)



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

carbon-storage perspective, FLUS predicts an 18.6% reduction in total carbon stock under SSP5-2100, highlighting a substantial downward risk if wetland and forest conservation are not integrated into long-term urban growth management. Accordingly, the study recommends designating priority conservation zones, expanding wetland-grassland buffer areas, and establishing development guidelines aligned with scenario outcomes. The predictive outputs provide quantitative evidence to support the formulation of Sejong City's 2050 and 2100 spatial planning frameworks and climate-adaptation strategies.

Key words : Shared Socioeconomic Pathways, land-cover change, spatial simulation model, village wetlands, carbon sequestration function

1. 서론

전 지구적 기후변화는 폭염, 폭우, 가뭄 등 극한기후의 빈도와 강도를 높이며 인명·재산 피해를 증대시키고 있다. 국제사회는 파리협정 이후 2050 탄소중립과 국가온실가스감축목표(NDC)를 통해 감축 이행을 가속화하고 있으며, 배출저감과 더불어 산림·갯벌·습지 등 자연자산의 흡수·저장 기능을 강화하는 자연기반해법(NbS)의 중요성이 높아지고 있다. 습지는 수분포화 토양과 특수한 식생구조를 통해 유기탄소의 분해를 지연시키며, 단위면적당 탄소저장 잠재력이 높고 수질정화·홍수조절·서식처 제공 등 다양한 생태계서비스를 제공한다. 특히 마을습지는 생활권 내에 분포하여 지역주민의 일상 이용과 영농활동의 기반이 되며, 지역사회 회복탄력성 증진에 기여하는 다기능 생태자원으로 평가된다(Comín et al., 2001; 박미옥 등, 2023; 박미옥 등, 2024).

그러나 신도시 확장과 토지이용 변화는 마을습지의 면적 축소와 단편화를 유발하고, 주변 농업·초지·시가지의 재편과 함께 습지의 탄소저장량 기능을 약화시킬 위험이 있다. 세종시는 장기적인 도시개발이 진행된 대표 지역으로, 향후 도시성장 경로와 기후·사회경제 불확실성을 고려한 공간적으로 명시적(spatially explicit) 예측과 정량평가가 요구된다. 특히 마을습지 주변 생태영향권(반경 1,000 m)에서의 토지피복 변화와 탄소저장량 변화를 장기 시계(2050-2100)로 전망하고, 시나리오별 정책 대응을 도출하는 연구가 필요하다.

본 연구는 세종시와 세종시내 41개 마을습지 생태영향권(반경 1,000m)을 대상으로, FLUS(Future Land Use Simulation) 모델을 적용하여 토지피복과 탄소저장량의 장래 변화를 예측한다. 구체적으로, (1) 2010-2024년 자료를 바탕으로 FLUS를 보정·검증하여 최근의 도시확장과 습지 변화 패턴을 재현하고, (2) SSP1-2.6과 SSP5-8.5 시나리오 하에서 2050-2100년 토지피복을 예측하며, (3) 예측 결과를 토지피복별 탄소저장량 계수와 연계해 총량·단위면적 지표를 산정하고, (4) 시나리오별 시가화 확대-습지·산림 축소, 탄소저장 저하의 연쇄를 비교·해석 장기 공간관리 전략에 정량 근거자료로 제시한다.

2. 연구 범위 및 방법

2.1 연구 범위

본 연구는 세종특별자치시와 세종시 내 41개 마을습지를

대상으로, 각 습지 생활권(1,000m)를 설정하여 토지피복 변화와 토지피복별 탄소저장량 변화를 정량적으로 분석·평가하였다.

1) 공간적 범위

본 연구는 세종특별자치시와 세종시 내 41개 마을습지 생활권(1,000m)를 예측 진행하였다. 41개 마을습지의 좌표는 <표 1>과 같다. 각 생활권 내에서 토지피복은 대분류(시가화건조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역)의 변동을 분석하였다.

2) 시간적 범위

기초 토지피복 자료는 1980, 1990, 2000, 2010, 2023, 2024년이며, 이 기간의 토지피복에 따른 탄소저장량 변화를 산출하였다. 미래 예측은 2050년과 2100년을 기준으로 수행하였다. 또한, 마을습지 판별과 분류·산정의 수행 기간은 2023년 10월~2024년 4월(판별), 2024년 5월~2025년 5월(분류·산정)이다.

2.2 연구방법

1) 연구대상지 선정

본 연구의 대상지는 세종특별자치시에 분포하는 마을습지 41개소로는 토지피복도 대분류(30 m)를 기반으로 '습지' 관련 분류를 1차 추출한 뒤 행정자료(소류지·둑·도심습지·목논습지 등 생활권 습지)와 최신 정사영상·기초지도를 교차 판독하여 후보지를 도출하고 경계를 정밀 보정하였다. 마을습지는 생활권 내 접근성이 높고 소규모·분산적으로 분포하는 생활권 습지로 정의하되, 유형 구분은 표본의 대표성 확보를 위한 층화 판단에만 활용하고 분석 단계에서는 '습지' 단일 범주로 취급하였다. 토지피복 해상도와 정합을 위해 최소면적 기준은 9픽셀(약 0.81 ha)로 설정하고, 경계가 불명확한 미소 패치는 영상 판독과 현지 정보에 따라 인접 패치와 통합 또는 제외하였다. 표본의 공간 대표성을 확보하기 위해 세종시 북·서·남·동부 권역을 균형 있게 고려하고, 주변 토지이용(농업·산림·시가화)과 인구·접근성 그라디언트를 반영하여 편중을 억제하였다. 모든 도형은 단일 좌표계와 30m 격자체계로 정합하고, 위상 오류(중복·슬리버·홀)를 제거하여 품질을 확보하였다. 확정된 각 습지에 대해서는 외곽 경계로부터 반경 1,000m의 버퍼를 계산하여 생태영향권을 정의하고 시 경계로 클리핑하여 분석 단위를 최종 확정하였다. 최종 선정된 41개 마을습지는 FLUS(Future Land

표 1. Coordinates of the 41 village wetland study sites in Sejong City

구분	좌표	구분	좌표	구분	좌표	구분	좌표	구분	좌표
1.	127.2994019 36.60853717	2.	127.2465202 36.61363485	3.	127.234468 36.66104443	4.	127.189372 36.66623296	5.	127.3723816 36.50279315
6.	127.3014714 36.58342285	7.	127.1831761 36.67503543	8.	127.2462031 36.67519327	9.	127.1965358 36.71187622	10.	127.2637979 36.46271184
11.	127.3245888 36.4349742	12.	127.3288466 36.44096427	13.	127.303914 36.43724186	14.	127.3235948 36.4359417	15.	127.3279779 36.48564282
16.	127.2405537 36.42034226	17.	127.2540629 36.44277538	18.	127.2673994 36.44211318	19.	127.199514 36.55258922	20.	127.2206116 36.51586473
21.	127.2091716 36.53770617	22.	127.2063708 36.4866566	23.	127.2382153 36.54011605	24.	127.209276 36.45288122	25.	127.2040542 36.44599189
26.	127.188768 36.53601035	27.	127.2259332 36.47073658	28.	127.3723816 36.50279315	29.	127.3778626 36.51696338	30.	127.3302022 36.552887
31.	127.3714183 36.49805054	32.	127.3706653 36.49814818	33.	127.20358819 36.70650021	34.	127.2091716 36.53770617	35.	127.17110999 36.61559572
36.	127.229431 36.641401879	37.	127.27388089 36.514969749	38.	127.37424869 36.54113514	39.	127.3709405 36.54719532	40.	127.3773312 36.541078519
41.	127.3061416 36.464187369								

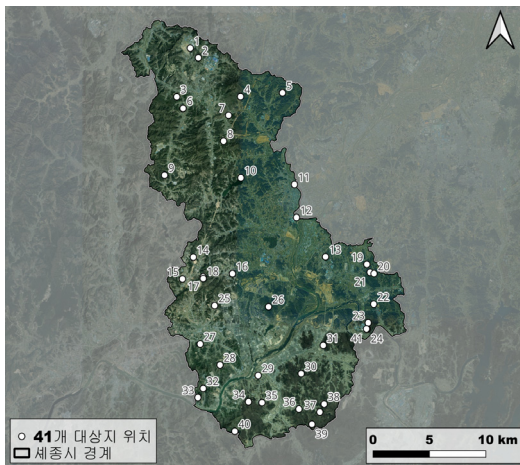


그림 1. Locations of the 41 village wetland study sites in Sejong City

Use Simulation) 모델의 학습·검증 시료로 사용되며, 예측 산출물의 집계 단위로도 활용되어 토지피복 변화와 탄소저장량 변화를 정량 평가하는 근거가 된다.

2) FLUS 모델

FLUS는 거시적 수요 배분(Top-down)과 미시적 공간경쟁·패치성장(Bottom-up)을 결합한다. 우선 과거 추세와 시나리오 가정을 반영하여 2050·2100년 분류별 면적 수요를 산정하였다. 다음으로 인공신경망(ANN)으로 구동요인-토지피복 간 관계를 학습하여 전이잠재력(PoO) 지도를 생성하고, 자기적응형 관성계수를 통해 목표면적을 동적으로 충족하도록 셀룰러 오토마타를 반복 갱신하였다. 이웃영향은 Moore 창(예: 3×3/5×5)을 적용하고, 패치 최소면적·형상계수를 통해 실제적 공간형태를 재현하였다. 전환허용행렬

을 정의하여 비현실적 전환을 차단하였다.

FLUS 모델에서 예측을 위한 주요 요인은 지형·입지·인문 요인을 포괄하기 위해 DEM에서 경사·향을 도출하고, 하천·도로·도심까지의 거리와 토양·지형 정보, 인구, 주거지 밀도 변수를 구축하였다. 연속형 변수는 0-1 정규화하였고, 상관계수 및 VIF로 다중공선성을 점검한 뒤 예측력·독립성이 확보된 최소 변수집합을 확정하였다. 수역, 법정보호구역 등 불가변 용지는 제약마스크로 처리하였다.

FLUS 모델에서 2010과 2015, 2015과 2019, 2019과 2024의 시계열을 이용해 파라미터를 보정하고, Kappa로 재현성을 평가하였다. ANN의 성능은 학습·검증 데이터를 분할하여 AUC/정확도로 보고하였다. 검증 결과를 바탕으로 크기, 관성계수, 패치 성장계수 등을 설정하여 최적 조합을 확정하였다.

3) SSP시나리오 설계와 예측

사회·경제·기후 경로의 차이를 반영하기 위해 SSP1-2.6과 SSP5-8.5 두 시나리오를 구성하였다. 시나리오별 도시화 압력, 보전 제약 강도 등을 수요표와 제약·가중치에 내재화하고, 2050·2100년 토지피복 지도를 예측하였다. 산출물은 분류별 면적(km²/ha) 및 비율(%), 공간분포도로 제시하였다.

4) 탄소저장량 산정

예측된 토지피복 결과에 분류별 탄소저장량 계수(Kt CO₂eq/km²/yr)를 적용하여 전역 및 생태영향권의 총량(Kt CO₂eq/km²/yr)과 단위면적당(Kt CO₂eq/km²/yr)지표를 산정하였다. 기준연도(2010·2015·2019·2024)와 예측연도(2050·2100) 모두에 동일한 계수를 적용하되, 단위·환산을 명시하였다. 변화 분석은 절대변화(Δ), 증감률(%), 연평균 변화율(CAGR)로 수행하였다.

표 2. Annual carbon storage by land-cover type

연간 탄소저장량 단위: Kt CO₂eq/km²/yr

구분	연간 탄소저장량	근거자료
시가화지역	0.5	IPCC(2019)
농업지역	1	농촌진흥청(2020)
산림지역	2.5	국립산림과학원(2022)
초지	1.5	한국환경정책평가연구원(2021)
습지	15	wetlands. Mitsch & Gosselink (2015)
나지	0.2	환경부(2020)
수역	0.1	IPCC(2019)

CO₂eq (Carbon Dioxide Equivalent): 이산화탄소(CO₂)를 기준으로 다양한 온실가스의 지구온난화 영향력을 통일한 단위.
 1 tC/ha = 0.3667 Mg CO₂eq/km²=0.03667Kt CO₂eq/km²

표 3. Changes in land-cover area in Sejong City from 1980 to 2024

구분	시가화 건조지역	농업지역	산림지역	초지	습지	나지	수역	
1980	면적(km ²)	6.81	127.32	272.81	37	0.05	14.91	6.09
	비율	1.46%	27.38%	58.67%	7.96%	0.01%	3.21%	1.31%
1990	면적(km ²)	6.81	127.49	272.68	36.95	0.05	14.93	6.12
	비율	1.46%	27.42%	58.64%	7.95%	0.01%	3.21%	1.32%
2000	면적(km ²)	15.08	112.38	278.46	30.49	0.19	19.27	9.16
	비율	3.24%	24.17%	59.88%	6.56%	0.04%	4.14%	1.97%
2010	면적(km ²)	32.26	95.81	267.56	30.44	11.38	17.72	9.85
	비율	6.94%	20.60%	57.54%	6.55%	2.45%	3.81%	2.12%
2023	면적(km ²)	36.93	118.1	203.3	65.54	8.62	23.28	9.25
	비율	7.94%	25.40%	43.72%	14.09%	1.85%	5.01%	1.99%
2024	면적(km ²)	54.61	86.66	194.18	81.49	8.51	30.41	9.15
	비율	11.74%	18.64%	41.76%	17.52%	1.83%	6.54%	1.97%
합계	465.02km ²							

표 4. Preparation of data for future land-cover prediction

구분	출처	
1	세종시 2010년 토지피복도	환경공간정보서비스
2	세종시 2015년 토지피복도	환경공간정보서비스
3	세종시 2019년 토지피복도	환경공간정보서비스
4	세종시 2020년 토지피복도	환경공간정보서비스
5	세종시 2023년 토지피복도	환경공간정보서비스
6	세종시 2024년 토지피복도	환경공간정보서비스
7	ssp시나리오 강우량 예측	세종특별자치시 기후변화 전망보고서(2023)
8	ssp시나리오 평균온도 예측	세종특별자치시 기후변화 전망보고서(2023)
9	ssp시나리오 인구 예측	IIASA(국제 응용 시스템 분석 연구소) SSP Database
10	도로 근접도	환경공간정보서비스
11	도시 근접도	환경공간정보서비스
12	수역 근접도	환경공간정보서비스
13	세종시 DEM	국토지리정보원
14	세종시 경사도	국토지리정보원

3. 결과 및 고찰

3.1 세종시 1980년~2024년 토지피복 연도별 변화

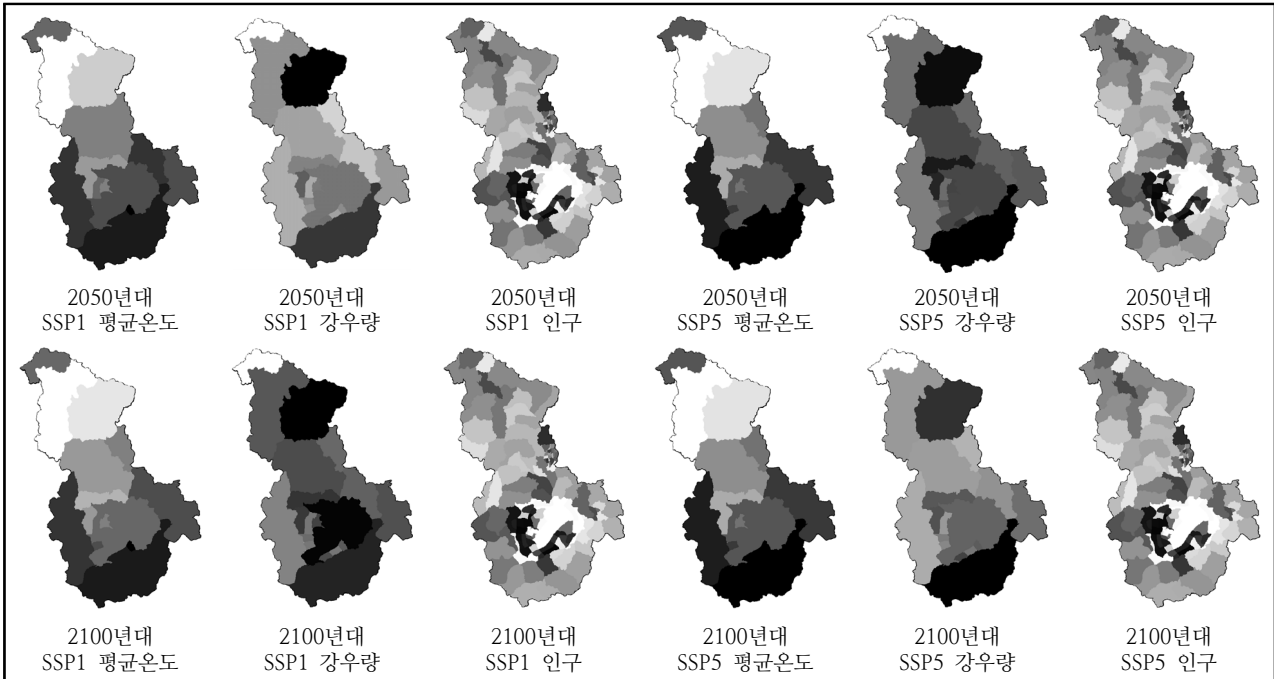
세종시는 1980년 이후 도시화가 지속 확대되며 토지피복 구조가 크게 재편되었다. 1990년 시가화 비율은 1.46%였으나 2024년에는 11.74%로 상승했고, 같은 기간 산림·농업의 비중이 낮아지며 초지의 비중이 높아졌다. 2024년 시가화

54.61 km², 농업 86.66 km², 산림 194.18 km², 초지 81.49 km², 습지 8.51 km², 나지 30.41 km², 수역 9.15 km². 이러한 기초 시계열은 FLUS 예측의 보정과 해석의 기준이 된다.

3.2 토지피복 변화 예측을 위한 GIS/DB 구축 및 변후 선정

세종시 미래 토지피복 변화 예측을 위하여 환경공간정보서비스, 국가정보플랫폼, 등 공개된 공간정보서비스의 자료

표 5. Variables for future land-cover prediction in Sejong City



를 활용하여 QGIS에서 자료를 FLUS 모델에 예측을 위한 근접도를 작성하였다. 각 연도의 토지피복도는 모델이 기존 토지피복을 학습하는 기준 시점으로서 전이 확률을 계산하는 데 사용한다. 도로 근접도는 도로에 가까울수록 개발 압력이 높아 주로 도시화, 산업지 확산의 가능성을 판단한다.

본 연구에서 FLUS 모형의 변수로 활용한 미래 기후-인구 요인은 <표 5>에 제시하였다. <표 5>는 SSP1-2.6과 SSP5-8.5 시나리오를 적용하여 산정한 2050년대와 2100년대의 평균 기온, 강우량, 인구 분포를 세종시 공간 단위별로 시각화한 것이다. 이를 통해 각 시나리오-시점별로 기후 조건과 인구 집중도의 상대적 차이를 한눈에 비교할 수 있으며, 이후 토지피복 전환 확률을 설정할 때 이러한 공간 패턴을 반영하였다. 각 변수의 자료원, 전처리 과정, 통계값 등 상세한 내용은 부록(부록1, 부록2, 부록3)에 정리하였다.

3.3 FLUS 모델 예측 검증

FLUS 모형은 2019년 자료로 2023년을 예측했을 때 Kappa=0.805, 2015년 자료로 2023년을 예측했을 때 Kappa=0.756으로 “상당-매우 높음” 수준의 일치도를 보였다. 가용한 읍면동 GDP 데이터가 없었음에도 검증 성능은 예측 적용에 충분한 수준으로 확인되었다.

표 6. Kappa coefficient validation of the FLUS model

입력 토지피복도	예측 년도	실제 토지피복과 비교한 KAPPA계수
2015년 토지피복도	2023년	0.756
2019년 토지피복도	2023년	0.805

3.4 FLUS 모델을 활용한 예측 결과

1) 세종시 SSP1-2.6과 SSP5-8.5 예측 결과

세종시의 SSP1-2.6 및 SSP5-8.5 시나리오별 토지피복 예측 결과는 <표 8>과 같다. 두 시나리오 모두 2050년과 2100년으로 갈수록 시가지 지역은 크게 확대되고, 농업·산림 지역은 지속적으로 감소하는 반면, 초지는 일시적인 증가 후 2100년에 다소 안정되는 경향을 보인다. 2024년 시가지 면적은 54.65km² 수준이지만, SSP1-2.6에서는 2050년 83.56km²(약 18%), 2100년 119.67km²(약 26%)까지 증가하고, SSP5-8.5에서도 2050년 약 84.06km², 2100년 약 121.2km²로 유사하게 확대된다. 이에 대응하여 농업 지역은 두 시나리오 모두 2050년에 약 19% 내외, 2100년에는 약 29%까지 감소하며, 산림 지역 또한 2050년 약 10%, 2100년 약 22% 감소해 도시화의 주요 공급원으로 작용한다.

습지는 초기 면적이 약 8.5 km²로 크지 않지만, 시나리오별 감소 양상에 차이가 나타난다. SSP1-2.6에서는 2050년 8.02km²(1.72%), 2100년 7.88km²(1.70%)로 2024년 대비 약 7% 감소하는 데 그치는 반면, SSP5-8.5에서는 2050년 약 7.69km²(1.65%), 2100년 약 6.35km²(1.37%)까지 줄어 감소 폭이 약 25% 수준에 이른다. 동일 연도 기준에서 SSP5-8.5의 습지 점유율은 2050년과 2100년 모두 SSP1-2.6보다 낮고, 시가지 점유율은 반대로 더 높게 나타난다. 이는 고배출-고성장 경로일수록 ‘시가지 확대-습지 축소’의 결합이 강화되는 도시화 패턴을 보여주며, 다음에서 제시하는 탄소 저장량 감소와도 직결된다.

초지는 두 시나리오 모두 2024년 81.19km²에서 2050년 약 90km²(약 19%)까지 일시적으로 확대된 뒤 2100년 약 88.35km²

표 7. Visualization of future land-cover changes in Sejong City using the FLUS model

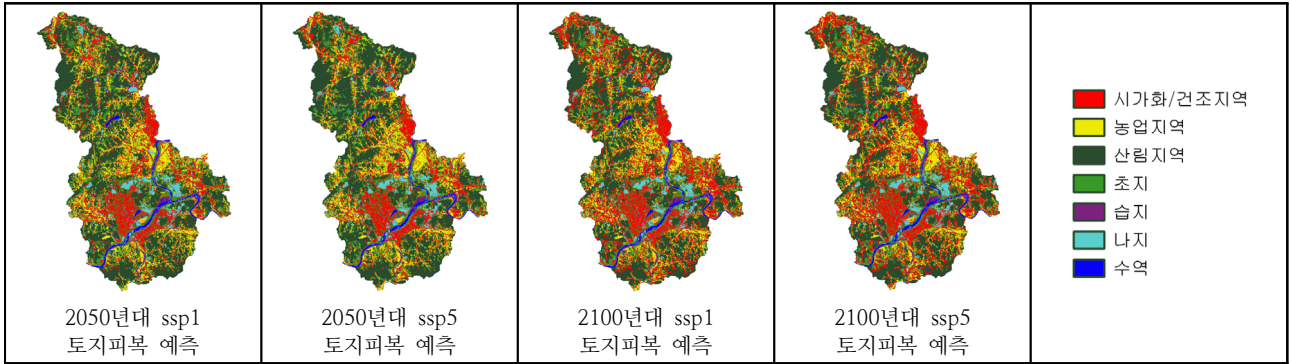


표 8. FLUS model-based land-cover projections in Sejong City under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios through 2100

면적 단위: km²

구분	2024	2050-SSP1		2100-SSP1		2050-SSP5		2100-SSP5	
	면적	면적	변화	면적	변화	면적	변화	면적	변화
시가화/건조지역	54.65	83.56	28.91	119.67	65.02	84.06	29.41	121.20	66.55
농업지역	87.06	70.40	-16.66	61.29	-25.77	70.40	-16.66	61.29	-25.77
산림지역	194.13	175.77	-18.36	151.00	-43.13	175.77	-18.36	151.00	-43.13
초지	81.19	89.97	8.78	88.35	7.16	89.97	8.78	88.35	7.16
습지	8.50	8.02	-0.48	7.88	-0.62	7.69	-0.81	6.35	-2.15
나지	30.33	28.12	-2.21	27.59	-2.74	28.12	-2.21	27.59	-2.74
수역	9.16	9.18	0.02	9.24	0.08	9.01	-0.15	9.24	0.08
총 면적					465.02				

수준으로 안정화된다. 이는 농업·산림에서 초지로의 전환과 더불어, 습지 주변 완충대 형성 및 복원 가능 공간이 일정 부분 유지되고 있음을 시사하며, 향후 습지-초지 연계 보전 전략 수립 시 활용될 수 있다.

2) 세종시 41개 마을습지 생활권 토지피복 예측 결과

세종시 41개 마을습지 생활권(1,000 m 버퍼)의 FLUS 예측 결과 <표 9>를 보면, 두 시나리오 모두 시가화/건조지역 확대와 농업·산림 축소, 초지 소폭 증가, 습지 감소가 공통 패턴으로 나타난다. 시가화/건조지역 면적은 2024년 13.26 km²에서 SSP1-2.6 기준 2050년 20.54km², 2100년 32.48km²로, SSP5-8.5에서는 2050년 20.95km², 2100년 31.65km²로 증가하여 두 시나리오 모두 2100년에 약 2.4배 수준까지 확대된다. 이에 대응하여 농업은 22.13km²에서 SSP1 15.51km², SSP5 15.17km²로 줄고, 산림 역시 65.26km²에서 SSP1 51.90 km², SSP5 52.95km²로 감소하여 도시화 확장의 주요 공급원으로 기능한다. 초지는 21.79km²에서 2050년에 약 24km²까지 증가한 뒤 2100년에 23km² 안팎에서 안정화되며, 수역과 나지는 두 시나리오 모두에서 변화 폭이 크지 않다.

시나리오 간 차이는 습지에서 가장 뚜렷하게 나타난다. SSP1-2.6에서는 습지가 2024년 1.77km²에서 2100년 1.65km²로 약 0.12km² 감소하는 데 그치지만, SSP5-8.5에서는 2050년 1.57km², 2100년 1.26km²로 줄어 총 감소량이 0.50km²에 이른다. 즉, 고배출·고성장 경로일수록 생활권 내 도시화 속도

가 비슷하거나 다소 빠른 수준으로 유지되는 동시에, 습지 손실이 더 집중적으로 발생하여 장기적인 탄소저장 기반의 약화 위험이 커진다. 이러한 결과는 시나리오와 무관하게 41개 마을습지 생활권에서 습지와 주변 초지의 완충대를 우선 확보하고, 고탄소 피복에 대한 우선보전·복원 및 개발 전환 억제 규칙을 토지이용계획에 내재화할 필요성을 시사한다.

3.5 세종시와 세종시 41개 마을습지 미래 연간 탄소저장량 예측

세종시와 세종시 내 41개 마을습지 생활권(1,000 m)을 대상으로 FLUS 모델 예측 결과를 이용해 연간 탄소저장량(단위: Kt CO₂ eq/km² /yr)의 장래 변화를 통합 비교하였다. 생활권 합계는 2024년 252.8 Kt에서 SSP1 기준 2050년 241.8 Kt(-10.98 Kt, -4.34%), 2100년 222.8 Kt(-30.00 Kt, -11.87%)로 감소한다. SSP5에서는 2050년 240.8 Kt(-11.99 Kt, -4.74%), 2100년 219.8 Kt(-33.04 Kt, -13.07%)로 감소 폭이 더 크다. 전체 세종시는 2024년 856.0 Kt에서 SSP1 기준 2050년 813.4 Kt(-42.59 Kt, -4.98%), 2100년 755.8 Kt(-100.20 Kt, -11.71%)로 줄고, SSP5에서는 2050년 808.7 Kt(-47.31 Kt, -5.53%), 2100년 733.6 Kt(-122.39 Kt, -14.30%)까지 감소한다. 두 구분 모두 2050년까지는 SSP1과 SSP5의 감소 폭이 비슷하지만, 2100년에는 SSP5가 SSP1 대비 생활권에

서 약 3.0 Kt, 전역에서 약 22.2 Kt 추가 감소하여 고배출·고성장 경로의 누적 손실이 더욱 크게 나타난다. 원인은 시가화 확대에 따른 산림·농업 축소와 소면적 습지의 지속적 손실로, 특히 습지는 단위면적당 저장 효율이 높아 작은 면적 감소도 총량 저하에 크게 기여한다. 시사점은 명확하다. 장래 시나리오와 무관하게 생활권에서 습지·산림 우선 보전

과 습지·초지 완충대 확보를 제도화하고, 전역 차원에서는 밀도·혼합용도 중심의 도시 성장 관리와 토지이용 전환 억제 규칙을 계획에 내재화해야 한다. FLUS 결과는 2050·2100년 공간구상과 지역 탄소중립 로드맵 수립을 위한 정량적 근거로 활용될 수 있다.

표 9. FLUS model-based land-cover projections around the 41 village wetlands in Sejong City under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios through 2100

면적 단위: km²

구분	2024	2050-SSP1		2100-SSP1		2050-SSP5		2100-SSP5	
	면적	면적	변화	면적	변화	면적	변화	면적	변화
시가화/건조지역	13.26	20.54	7.28	32.48	19.22	20.95	7.69	31.65	18.39
농업지역	22.13	18.10	-4.03	15.51	-6.62	17.58	-4.55	15.17	-6.96
산림지역	65.26	60.35	-4.92	51.90	-13.37	60.48	-4.79	52.95	-12.31
초지	21.79	24.08	2.29	23.35	1.56	24.32	2.54	23.99	2.20
습지	1.77	1.66	-0.10	1.65	-0.12	1.57	-0.20	1.26	-0.50
나지	7.12	6.57	-0.55	6.41	-0.71	6.46	-0.66	6.26	-0.85
수역	2.34	2.36	0.02	2.37	0.03	2.31	-0.03	2.37	0.04
총 면적	133.67								

표 10. FLUS model-based projections of annual carbon storage in Sejong City under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios through 2100

단위: Kt CO₂eq/km²/yr

구분	2024	2050-SSP1		2100-SSP1		2050-SSP5		2100-SSP5	
	저장량	저장량	변화	저장량	변화	저장량	변화	저장량	변화
시가화/건조지역	27.33	41.78	14.46	59.84	32.51	42.03	14.71	60.60	33.275
농업지역	87.06	70.40	-16.66	61.29	-25.77	70.40	-16.66	61.29	-25.77
산림지역	485.33	439.43	-45.90	377.50	-107.825	439.43	-45.90	377.50	-107.825
초지	121.79	134.96	13.17	132.53	10.74	134.96	13.17	132.53	10.74
습지	127.50	120.30	-7.20	118.20	-9.3	115.35	-12.15	95.25	-32.25
나지	6.07	5.62	-0.44	5.52	-0.548	5.62	-0.44	5.52	-0.548
수역	0.92	0.92	0.002	0.92	0.008	0.90	-0.02	0.92	0.008
총 저장량	856	813.41	-42.568	755.8	-100.185	808.69	-47.29	733.61	-122.37

표 11. FLUS model-based projections of annual carbon storage for the 41 village wetlands in Sejong City under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios through 2100

단위: Kt CO₂eq/km²/yr

구분	2024	2050-SSP1		2100-SSP1		2050-SSP5		2100-SSP5	
	저장량	저장량	변화	저장량	변화	저장량	변화	저장량	변화
시가화/건조지역	6.63	10.27	3.64	16.24	9.61	10.48	3.85	15.83	9.195
농업지역	22.13	18.10	-4.03	15.51	-6.62	17.58	-4.55	15.17	-6.96
산림지역	163.15	150.88	-12.28	129.75	-33.4	151.20	-11.95	132.38	-30.775
초지	32.69	36.12	3.43	35.03	2.34	36.48	3.80	35.99	3.3
습지	26.55	24.90	-1.65	24.75	-1.8	23.55	-3.00	18.90	-7.65
나지	1.42	1.31	-0.11	1.28	-0.142	1.29	-0.13	1.25	-0.172
수역	0.23	0.24	0.002	0.24	0.003	0.23	-0.003	0.24	0.003
총 저장량	252.8	241.82	-10.998	222.8	-30.009	240.81	-11.983	219.76	-33.059

4. 결론 및 제언

본 연구는 세종시와 41개 마을습지를 대상으로 FLUS 기반 시뮬레이션을 수행하여, SSP1-SSP5 하에서의 미래 토지 피복 변화와 이에 따른 탄소저장량 변화를 예측하였다. 분석 결과, 세종시 전체 연간 탄소저장량은 2024년 856.0 Kt CO₂ eq/km² /yr에서 SSP5-2100 기준 733.6 Kt CO₂ eq/km² /yr로 약 14.3% 감소하였고, 41개 마을습지 생활권 합계도 252.8 Kt에서 219.8 Kt으로 약 13.1% 감소하는 것으로 나타났다. 같은 기간 세종시 습지 면적은 8.51 km² 에서 6.36 km² 로 줄어 약 25.3% 감소한 반면, 시가화 면적은 54.61 km² 에서 121.18 km² 로 약 122% 증가하였다. 즉 도시화와 농경지·산림 축소가 결합하면서, 마을습지 주변의 탄소저장 기능이 정량적으로도 뚜렷하게 약화되는 경향이 확인되었다. 특히 장기·고배출 시나리오(SSP5-2100)에서 FLUS는 SSP1-2100 대비 세종시 전체 약 22.2 Kt, 생활권 약 3.0 Kt의 추가 감소를 추정하여, 정책 선택과 공간계획의 경로 의존성이 탄소저감 잠재력에 중대하게 작용함을 보여준다. 이는 비교 모델 대비 FLUS가 토지이용 수요와 정책·공급 제약을 보다 강하게 반영하는 모형이라는 점을 시사한다.

또한, 본 연구는 마을습지 생활권(완충·완충 외연) 단위에서 토지피복과 탄소저장량을 함께 추적함으로써, 도시확장 과정에서 습지·농경지·산림으로 이루어진 자연 탄소저장 구조가 붕괴할 때 탄소저장량이 10% 이상 체계적으로 감소한다는 점을 수치로 제시하였다. 세종시 차원의 SSP1-SSP5 예측 결과와 마을습지 주변 분석을 결합하면, 습지 면적이 25% 이상 줄어드는 구역과 같이 탄소저장 손실이 큰 공간을 선별하여 보전·복원 및 토지이용 전환의 우선순위를 지정할 수 있다.

1) 정책 시나리오 기반의 단계적 보전전략

FLUS 예측에서 확인된 장기 시나리오 민감도—SSP5-2100 기준 탄소저장량 약 14% 감소, 습지 면적 약 25% 감소—를 고려할 때, 도시기본계획·지구단위계획 단계에서 저배출(SSP1형) 토지이용 대안을 기본안으로 설정하고, SSP5형 고배출 경로로 수렴하지 않도록 시가화 한계 설정, 용도지역 관리, 개발밀도 규제 등을 병행하는 단계적 보전전략이 필요하다.

2) 생활권 지정 및 습지·농경지·산림 연계 복원

마을습지 반경 1,000 m 내에서 시가화 비율이 20% 이상으로 증가하거나(SSP5-2100 기준) 습지 면적이 20% 이상 감소하는 취약지역을 우선 식별하여, 해당 구역을 완충지대로 지정하고 법정·행정계획에 반영할 필요가 있다. 이와 동시에 습지-농경지-인접 산림의 연속성을 보전·복원하는 공간모델을 도입함으로써, 마을습지의 탄소저장과 수문·생물다양성 서비스(홍수저감, 서식지 제공 등)를 함께 확보할 수 있다.

3) 통합 모니터링 체계 구축

토지피복, 탄소저장량, 생태계서비스 보조지표(수질, 홍수저감, 생물다양성)를 통합하는 모니터링 체계를 구축하고, 핵심 마을습지에 대해서는 5년 주기 이상으로 토지피복·탄소저장량 변화를 재평가하는 것을 제안한다. 마을 단위 참여 모니터링을 병행하면 자료의 시계열 신뢰도가 향상되어, 본 연구와 같은 FLUS 분석을 주기적으로 갱신하고 정책-모니터링-재계획의 선순환을 구현할 수 있다.

세종시 마을습지의 탄소저장 기능을 지키기 위한 최선의 전략은, FLUS 기반 정책 시나리오 관리(SSP1형 저배출 경로 유지)와 생활권 공간구조(습지·농경지·산림)의 유지·복원을 결합하는 것이다. FLUS 모델은 SSP5-2100 기준 탄소저장량 약 14% 감소, 습지 면적 약 25% 감소와 같은 수치를 통해 장기 정책대안의 효과를 공간적으로 가시화하는 데 유효하므로, 보전계획 수립과 사업 우선순위 결정을 위한 상시 의사결정 도구로 정착시킬 것을 권고한다.

사 사

이 논문은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 탄소축적 목논습지 조성복원 관리기술 사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2022003630004).

This Work was supported by Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI) through Wetland Ecosystem Value Evaluation and Carbon Absorption Value Promotion Technology Development Project, funded by Korea Ministry of Environment (MOE) (2022003630004).

References

- Amgoth, A., Rani, H. P. and Jayakumar, K. V. (2023). "Exploring LULC changes in Pakhal Lake area, Telangana, India using QGIS MOLUSCE plugin." *Spatial Information Research*, Vol. 31(4), pp. 429-438.
- Alshari, E. A. and Gawali, B. W. (2021). "Development of classification system for LULC using remote sensing and GIS." *Global Transitions Proceedings*, Vol. 2(1), pp. 8-17.
- Alshari, E. A. and Gawali, B. W. (2022). "Analysis of machine learning techniques for Sentinel-2A satellite images." *Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 2022, Article ID 9092299, 16 pp.
- Comín, F. A., Romero, J. A., Hernández, O. and Menéndez, M. (2001). "Restoration of wetlands from abandoned rice fields for nutrient removal, and biological community and landscape diversity." *Restoration Ecology*, Vol. 9(2), pp. 201-208.
- Cylinder, P. D., Bogdan, K. M., Davis, E. M. and Herson, A. I. (1995). *Wetlands Regulation: A Complete*

- Guide to Federal and California Programs. Solano Press Books, Point Arena, CA.
- Das, S. and Sarkar, R. (2019). "Predicting the land use and land cover change using Markov model: A catchment level analysis of the Bhagirathi–Hugli River." *Spatial Information Research*, Vol. 27(4), pp. 439–452.
- Environmental Geographic Information Service (EGIS). (2024). Land cover maps and environmental GIS data. Available at: <https://egis.me.go.kr> (accessed 2024).
- Hamad, R., Balzter, H. and Kolo, H. (2018). "Predicting land use/land cover changes using a CA–Markov model under two different scenarios." *Sustainability*, Vol. 10(10), p. 3421.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2003). Good Practice Guidance for Land Use, Land–Use Change and Forestry. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Hayama, Japan.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2008). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4 – Agriculture, Forestry and Other Land Use. IGES, Hayama, Japan.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2014). 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Hong, I. K., Kim, J. H., Cho, Y. U., Park, S.–Y. and Kim, S. J. (2016). "Clinicopathological factors increased the risk of malignancy in thyroid nodules with atypical or follicular lesions of undetermined significance (AUS/FLUS)." *Annals of Surgical Treatment and Research*, Vol. 90(4), pp. 201–206.
- Khawaldah, H., Farhan, I. and Alzboun, N. (2020). "Simulation and prediction of land use and land cover change using GIS, remote sensing and CA–Markov model." *Global Journal of Environmental Science and Management*, Vol. 6(2), pp. 215–232.
- Liang, X., Liu, X., Li, D., Zhao, H. and Chen, G. (2018). "Urban growth simulation by incorporating planning policies into a CA–based future land–use simulation model." *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 32(11), pp. 2294–2316.
- Lin, W., Sun, Y., Nijhuis, S. and Wang, Z. (2020). "Scenario–based flood risk assessment for urbanizing deltas using future land–use simulation (FLUS): Guangzhou Metropolitan Area as a case study." *Science of the Total Environment*, Vol. 739, p. 139899.
- Liu, X., Liang, X., Li, X., Xu, X., Ou, J., Chen, Y., Li, S., Wang, S. and Pei, F. (2017). "A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects." *Landscape and Urban Planning*, Vol. 168, pp. 94–116.
- Liu, X., Chen, Y., Zhang, H., Zhang, X. and Wu, X. (2023). "Spatial heterogeneity of sustainable land use in the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area in the context of the carbon cycle: GIS–based big data analysis." *Sustainable Cities and Society*, Vol. 95, p. 104691.
- Liu, Y., Tian, J., Fu, Y., Zhu, B., He, X., Gao, M., Odamtten, M. T., Kong, R. and Zhang, Z. (2022). "Will the arid and semi–arid regions of Northwest China become warmer and wetter based on CMIP6 models?" *Hydrology Research*, Vol. 53(1), pp. 29–48.
- Muhammad, R., Zhang, W., Abbas, Z., Guo, F. and Gwiazdzinski, L. (2022). "Spatiotemporal change analysis and prediction of future land use and land cover changes using QGIS MOLUSCE plugin and remote sensing big data: A case study of Linyi, China." *Land*, Vol. 11(3), p. 419.
- Saharkar, U. R. and Shahapure, S. S. (2024). "Identification of land use/land cover (LULC) changes using geo–spatial tools for Indrayani River Basin." *SSRG International Journal of Civil Engineering*, Vol. 11(4), pp. 65–79.
- Wang, Y., Shi, Y., Zhang, C. and Chen, D. (2023). "The response of carbon stocks to land use/cover change and a vulnerability multi–scenario analysis of the Karst region in Southern China based on PLUS–InVEST." *Land Use Policy*, Vol. 131, p. 106561.
- Zhang, L., Wang, Z., Li, J. and Sun, J. (2022). "Long–term land use/land cover change and its impact on ecosystem services." *Ecological Indicators*, Vol. 142, p. 109180.
- Rural Development Administration. (2020). Greenhouse Gas Emission and Absorption Factors in the Agriculture Sector. Rural Development Administration, Wanju, Jeollabuk–do, Republic of Korea.
- National Institute of Forest Science. (2022). Greenhouse Gas Emission and Absorption Factors in the Forest Sector. National Institute of Forest Science, Seoul, Republic of Korea.
- Korea Environment Institute. (2021). Greenhouse Gas Emission and Absorption Statistics in the Land–Use Sector. Korea Environment Institute, Sejong, Republic of Korea.
- Ministry of Environment. (2020). National Greenhouse Gas Emission and Absorption Factors. Ministry of Environment, Sejong, Republic of Korea.

〈부록 1〉 Projected annual precipitation (mm) in Sejong City for 2050 and 2100 under SSP scenarios

구분	SSP1		SSP5	
	2050년대	2100년대	2050년대	2100년대
세종시	1352.3	1247.7	1296.1	1414.8
고운동	1306.8	1258.7	1308.8	1425.8
금남면	1315.6	1264.6	1318.7	1448.1
다정동	1298.1	1243.7	1295.4	1413.6
대평동	1303.2	1252.5	1304.5	1430.4
도담동	1300.9	1255.6	1301.4	1421.3
보람동	1292.1	1241.1	1291.9	1415.6
부강면	1293.6	1251.5	1295.4	1418.3
새롬동	1294.5	1240.5	1290.3	1411.4
소담동	1297.0	1249.3	1298.2	1422.6
소정면	1271.0	1201.4	1249.6	1377.6
아름동	1289.8	1240.8	1289.9	1405.9
연기면	1298.5	1259.5	1312.4	1424.0
연동면	1283.6	1247.2	1293.2	1408.0
연서면	1292.4	1253.0	1300.0	1405.2
장군면	1289.3	1237.3	1285.4	1400.9
전동면	1327.5	1274.7	1316.3	1435.4
전의면	1296.2	1249.5	1289.2	1406.2
조치원읍	1281.3	1244.7	1291.3	1398.8
종촌동	1289.8	1240.8	1289.9	1405.9
한솔동	1301.9	1246.5	1300.1	1420.6

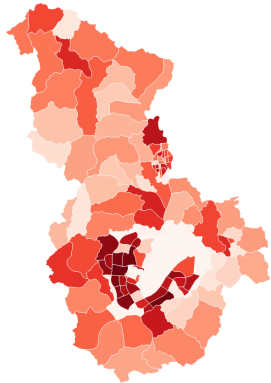
출처: 세종특별자치시 기후변화 전망보고서

〈부록 2〉 Projected mean annual temperature (°C) in Sejong City for the 2050s and 2100s under SSP scenarios

구분	SSP1		SSP5	
	2050년대	2100년대	2050년대	2100년대
세종시	13.9	14.7	15.5	19.2
고운동	13.7	14.4	15.3	18.9
금남면	14.2	15.0	15.8	19.5
다정동	14.0	14.7	15.5	19.2
대평동	14.2	15.0	15.8	19.5
도담동	13.8	14.6	15.4	19.1
보람동	14.2	15.0	15.8	19.5
부강면	14.0	14.8	15.6	19.3
새롬동	14.0	14.8	15.6	19.3
소담동	14.3	15.0	15.9	19.5
소정면	13.9	14.7	15.5	19.2
아름동	13.9	14.7	15.5	19.2
연기면	13.7	14.4	15.2	18.9
연동면	14.1	14.8	15.6	19.3
연서면	13.8	14.5	15.3	19.0
장군면	14.1	14.9	15.7	19.4
전동면	13.5	14.2	15.0	18.7
전의면	13.3	14.1	14.9	18.6
조치원읍	13.8	14.6	15.4	19.1
종촌동	13.9	14.7	15.5	19.2
한솔동	14.0	14.7	15.5	19.2

출처: 세종특별자치시 기후변화 전망보고서

〈부록 3〉 Current population of Sejong City and population projections under SSP scenarios through 2100

구분	한국		세종		국토통계_세종시 인구정보
	ssp1	ssp5	ssp1	ssp5	
인구(백만)					
2023(현재)	51,71		0.3828		
2050년대	48.351	51.336	0.3018	0.3205	
2100년대	31.937	42.484	0.1994	0.2652	

출처: IIASA, ssp database

출처: 국토교통부 국토지리정보원