

# 환경과담 최종 보고서

## - 국내 특화 개화모델의 필요성에 대한 제시 -

강솔빈<sup>1</sup>, 김병진<sup>1/2</sup>, 김지연<sup>1</sup>, 장혜주<sup>1</sup>, 한창희<sup>1/3</sup>

[<sup>1</sup>과학커뮤니케이터, <sup>2</sup>카이스트 산업디자인학과, <sup>3</sup>연세대학교 지구시스템과학연구소]

### 1. 서론

#### 1) 연구 배경

기후변화로 인해 계절의 변동성이 커지면서 봄꽃 개화 시기 예측이 갈수록 어려워지고 있다. 특히 한국에서는 봄꽃 축제 등 주요 행사 일정이 실제 개화 시기와 맞지 않는 사례가 빈번해지고 있으며, 이는 단순한 불편을 넘어 지역 경제에 직접적인 영향을 미치고 있다. 꽃이 필 것이라 기대한 축제 현장이 정작 '꽃 없는 공간'으로 남는 일이 생기고 있으며, 이상기후에 적응하지 못한 예측 실패는 관광객 감소와 지역 상권 매출 타격으로 이어진다.

실제로 벚꽃 개화 시기에 따라 관광지 소비가 급증하는데, 한 보고서에 따르면 벚꽃이 필 때 관광특구 매출이 평소보다 300% 이상 급증한다("Climate change dampens Korea's iconic cherry blossom festivals", 2024). 이러한 사회·경제적 파급효과 때문에 정확한 개화 시기 예측은 단순한 자연현상 예측을 넘어 축제 기획, 관광 산업, 지역경제 활성화에 중요한 역할을 한다.

2024년 진해군향제는 이상기후와 일정 조정의 실패가 맞물려 축제 초반에 개화율이 15%도 되지 않는 '벚꽃 없는 축제'로 시작되었다. 그 결과 방문객 수가 전년 대비 100만 명 이상 줄고, 지역 경제 효과도 크게 감소하는 등 뚜렷한 경제적 타격이 발생했다("군향이나 벚꽃이나...", 2025). 제주와 울산은 축제 개막 시 꽃이 거의 피지 않아 썰렁한 분위기로 시작되었고, 서울 여의도는 축제 종료 후에야 벚꽃이 만개해 관광객 불만이 제기됐다. 한편 2023년에는 반대로 이례적인 고온으로 개화가 지나치게 빨라 일정 전에 꽃이 저버릴 우려가 제기되기도 했다.

실제로 지난 100년간 한국의 봄꽃 개화 시기는 꾸준히 앞당겨져 왔으며, 2024년에는 이상고온과 꽃샘추위가 겹치며 개화 지연이 발생하는 등 변동성이 극대화되고 있다. 이처럼 최근 3년간(2023~2025) 전국적으로 개화 시기와 축제 일정의 불일치가 반복되면서 예측 불확실성이 축제 운영과 지역경제 전반에 실질적 영향을 미치고 있음을 보여준다.

일부 지자체는 부랴부랴 행사 일정을 연기하거나 조정했는데, 예컨대 충남 천안시는 당초 2024년 3월 말 예정이던 벚꽃축제를 4월 6~7일로 1주 연기하여 뒤늦은 개화에 맞추는 결정을 내렸다. 축제를 임박해 변경하면서 발생한 행정적인 부담과 추가 비용, 홍보 혼선도 무시할 수 없다. 이처럼 개화 예측 실패는 축제 기획 단계부터 운영, 사후 경제 효과까지 다층적인 문제를 일으키며, 기후위기 시대에 기존 방식대로는 대응이 어렵다는 교훈을 남기고 있다.

#### 2) 현행 예측 체계와 한계

한국의 현행 봄꽃 개화 예측은 주로 생물계절학적 모형을 활용한다(정재은 외, 2005). 구체적으로 휴면 타파에 필요한 저온과 생장을 촉진하는 적산온도의 두 요소를 기반으로 하는 모델이 널리 쓰인다. 나무가 겨울 동안 일정 수준의 저온을 겪으면 휴면이 해제되고, 이후 하루 평균기온이 일정 기준 이상인 날들의 온도 누적값이 특정 임계치에 도달하면 개화가 일어난다는 원리다.

이 같은 열량 흡산 모형은 미국·유럽·일본 등에서 과수 개화와 작물 성장 예측에 개발·검증된 과학적 구조를 도입한 것으로, 우리나라도 기상청·산림청·농촌진흥청 등 기관에서 국내 관측 자료를 보정하여 벚꽃, 개나리, 매화 등의 개화일을 예측하는 데 활용하고 있다. 이러한 전통 모형은 정상적인 기후 조건에서는 대체로 유효하여, 과거 연구에서는 열시간 기반 예측으로 개화일을 평균 오차 2일 이내까지 맞춘 사례도 보고되었다.

그러나 현재의 예측 체계가 지닌 한계도 분명하다. 첫째, 국지적 기후 특성 반영 부족이다. 한국은 지형과 도시화로 인한 미기후 차이가 큰 나라다. 예를 들어 대도시의 도시열섬 효과로 인한 기온 상승은 개화 시기를 앞당기는 요인인데, 한 연구에서는 서울 도심이 교외보다 평균 기온이 5°C 높아 벚꽃 개화가 약 7일 빨라진다는 결과를 보였다(Kim et al., 2024). 반면 해안 지역은 해풍의 영향으로 봄철 기온 상승이 더디거나, 산간 지역은 해발고도에 따른 저온으로 개화가 늦어질 수 있다. 하지만 현재 운용되는 해외 모형 기반 예측은 이러한 해풍, 산악지형, 도시열섬 등의 미시 기후를 세밀하게 반영하지 못한다.

둘째, 이상기후에 대한 민감도 부족이다. 지구온난화로 겨울 기온이 높아졌다가도 갑작스러운 꽃샘추위나 이상 한파가 찾아오는 등 변동성이 커졌지만, 기존 모형은 과거 평균적 기후 패턴에 주로 맞춰져 있어 극단적인 변화를 따라잡지 못한다. 최근 몇 년간 실제 사례를 보면, 겨울이 따뜻해 개화가 앞당겨질 것이라 예측했다가 3월 한파로 개화가 크게 지연되는 등 예측이 빗나가는 일이 발생했다("Cherry blossoms to bloom later than expected amid cold snap", 2024).

셋째, 지역 간 개화 패턴 차이 미반영 문제이다. 남북으로 긴 한반도는 남해안과 내륙, 북부지역의 개화 양상이 다르고 꽃 종류에 따라서도 개화 순서나 기간에 차이가 있다. 하지만 현행 모형은 주로 기온 한 변수를 가지고 일률적으로 계산하므로, 지역별 세부 패턴을 세밀히 예측하지 못한다. 대표적으로, 남해안은 비슷한 위도의 내륙보다 해양성 기후 영향으로 개화가 늦어지지만, 기존 모형은 이러한 차이를 반영하는데 어려움을 겪는다. 이러한 요인들로 인해 개화 예측 오차가 누적되어, 과거보다 예측 정확도가 떨어지고 있다는 지적이 나오고 있는 추세다.

### 3) 연구의 필요성

이러한 예측 실패는 단순한 자연재해 수준을 넘어 사회·경제적 파급 효과로 이어졌다. 앞서 살핀 진해군항제 사례처럼 축제 흥행 부진으로 이어져 지역 경제 손실이 발생하는가 하면, 관광객들은 멀리서 왔다가 꽃 없는 거리를 보고 불만을 제기하는 사례도 있었다. 축제를 임박해 변경하면서 발생한 행정적인 부담과 추가 비용, 홍보 혼선도 무시할 수 없다.

더욱이 개화 시기 예측의 실패는 축제 예산 낭비를 넘어, 인간 사회와 생태계 전반의 '시스템 리스크'로 진이된다. 가장 심각한 위협은 '생물계절 불일치(Trophic Mismatch)'이다. 기온 변화에 대한 민감도는 영양 단계별로 상이하여, 식물(생산자)이 가장 민감하게 반응한다. 식물의 개화 시기가 급격히 빨라지는 반면, 주요 수분 매개자인 나비와 같은 곤충(1차 소비자)의 출현 시기가 이를 따라가지 못하면, 식물의 수정 과정에 치명적인 문제가 발생한다. 이는 수분 생태계의 붕괴와 먹이사슬의 교란을 의미하며, 생물다양성 보전의 근간을 위협한다(Bartomeus et al., 2011).

동시에 이는 심각한 공중 보건 문제를 야기한다. 기온 상승과 대기 중 이산화탄소 농도 증가는 알레르기를 유발하는 꽃가루의 생산량과 농도를 직접적으로 증가시킨다. 이른 개화는 꽃가루 유행 시기를 앞당기고 전반적인 온난화는 유행 기간을 연장시켜, 천식 및 비염 환자의 고통을 가중시키고 관련 보건 비용을 증대시킨다.

### 4) 연구 목적

본 연구는 기후변화 시대에 한국의 봄꽃 개화 예측 실패가 반복되는 원인을 과학적·법제도적 관점에서 다층적으로 분석하고, 한국형 고도화 개화 예측 모형의 필요성을 제시하는 것을 목적으로 한다. 구체적으로 (1) 개화 생물계절학의 기본 메커니즘과 현행 모형의 근본적 한계를 파

약하고, (2) 생물학적·화학적 관점에서 개화 지연 메커니즘을 규명하며, (3) 해외 모형과 국내 맞춤형 모형을 비교 분석하고, (4) 법제도적 통합 전략을 제시함으로써, 궁극적으로 한반도 기후 리스크의 불확실성을 관리 가능한 위협으로 전환시키는 과학적·정책적 해법을 모색한다.

## 2. 본론

### 1) 과학적 배경: 개화 생물계절학과 현행 모델의 근본적 한계

#### (1) 개화 생물계절학의 2단계 기제

식물 계절학(Plant Phenology)은 개화, 개엽과 같은 식물의 생애 주기적 사건을 추적하는 학문으로, 지구온난화의 영향을 가장 민감하게 반영하는 강력한 생태학적 지표이다. 온대 낙엽수목의 개화 시기는 복잡한 생리학적 과정을 따르며, 이는 크게 두 단계로 구분된다.

첫째는 겨울철 휴면을 타파하기 위한 '저온 요구량(Chill Requirement)' 충족 단계이다. 식물은 일정 기간(7°C 이하)의 저온을 겪어야만 생리적으로 잠에서 깨어나 생장을 준비할 수 있다. 이 과정은 단순히 기온의 문제가 아니라, 식물 내부의 복잡한 생화학적 변화를 동반한다. 저온 기간 동안 식물은 휴면을 유지하는 억제 물질을 분해하고, 생장을 촉진하는 물질을 합성하는 준비 과정을 거친다(Chmielewski & Rötzer, 2001).

둘째는 휴면이 타파된 후 봄철 온도가 누적되어 개화를 촉진하는 '고온 요구량(Heat Requirement)' 충족 단계로, 이는 흔히 유효적산온도(Growing Degree Days, GDD)로 계산된다. 이 단계에서는 일평균 기온에서 기준 온도(보통 5°C)를 뺀 값을 매일 누적하여, 일정 임계치에 도달하면 개화가 시작된다. 이러한 이중 온도 체계는 식물이 계절의 변화를 정확하게 감지하고 적절한 시기에 개화하도록 진화한 메커니즘이다.

#### (2) 기후변화가 초래하는 예측 시스템의 실패

기존의 개화 예측 모델은 이 두 가지 생리적 기제가 정상적으로 작동한다는 전제 하에 설계되었다. 하지만 기후변화는 이 전제 자체를 무너뜨리고 있다. 특히 겨울철 기온이 비정상적으로 상승하면, 식물이 '저온 요구량'을 완전히 충족시키지 못하는 '불완전한 휴면 타파' 상태가 발생할 수 있다.

이 상태에서 봄철 고온이 뒤따르면 식물의 반응은 예측 불가능한 비선형적 양상을 띠게 되며, 이는 단순한 적산온도 기반 모델의 예측 정확도를 급격히 떨어뜨리는 핵심 원인이 된다(Impact of Climate Change on Cherry Blossom Flowering Phenology, 2025). 불완전한 휴면 타파는 개화를 지연시킬 뿐만 아니라, 개화의 품질과 지속 기간에도 영향을 미쳐 전체 생육 주기를 교란시킨다.

실제로 일본 기상청(JMA)의 장기 관측 데이터는 불완전 휴면이 남방 분포 한계에서 개화 불규칙성을 유발함을 실증적으로 보여주었다(Japan Meteorological Agency, 2023). 일본 남부 지역에서는 겨울 기온이 너무 높아 벚나무가 충분한 저온을 경험하지 못하면서, 봄이 되어도 개화가 지연되거나 불규칙하게 일어나는 현상이 관찰되고 있다.

2010년대 초반의 이상 한파가 개화를 3일 지연시킨 반면, 이어진 이상 고온은 8일을 앞당긴 사례는, 평균 기온이 아닌 극한 기후 이벤트와 생리적 임계점이 개화 시기를 좌우하고 있음을 보여준다. 이는 단순 평균 기온 기반의 예측 모델이 극한 기후 변동성 시대에 얼마나 취약한지를 명확히 드러낸다.

#### (3) 한반도: 전지구적 '핫스팟'으로서의 특수성

한반도의 개화 시기 변동은 전지구적 평균을 훨씬 상회하는 심각성을 보인다. 전 지구 지표 온도가 지난 세기 약 0.85°C 상승하는 동안, 한반도 평균 기온은 약 1.8°C 상승하여 2배가 넘는 온난화 속도를 기록했다. 이러한 '핫스팟' 특성은 식물 생태계에 직접적인 영향을 미쳐, 국내 봄철 식물 계절은 기온이 1°C 상승할 때마다 평균 3.8일씩 빨라지는 높은 민감도를 보인다(김

진희 외, 2013).

이는 한반도가 대륙성 기후와 해양성 기후의 영향을 동시에 받는 독특한 지리적 위치, 복잡한 지형, 그리고 급속한 도시화로 인한 미기후 변화 등이 복합적으로 작용한 결과이다. 특히 서울을 비롯한 대도시의 도시열섬 효과는 주변 농촌 지역보다 기온을 5°C 이상 높이며, 이는 개화 시기를 일주일 가량 앞당기는 요인으로 작용한다(Kim et al., 2024).

고탄소 배출 시나리오(SSP5-8.5)에 따르면, 21세기 말 대구의 벚꽃 개화일은 현재보다 최대 30일까지 앞당겨질 것으로 전망된다(Hur et al., 2014). 이는 단순히 봄이 일찍 오는 것을 넘어, 봄이라는 계절 자체가 극단적으로 압축되는 '계절 압축' 현상을 의미한다. 봄철이 짧아지면 식물의 성장 기간이 축소되고, 이는 생태계 전반의 에너지 흐름과 물질 순환에 영향을 미치게 된다.

더욱이 이러한 변화는 엘니뇨-남방 진동(ENSO)이나 북극 진동(AO) 같은 대규모 지구물리학적 원격 상관(Teleconnections)에 의해 변조되어, 예측의 불확실성을 더욱 가중시킨다. 예를 들어, 강한 엘니뇨 해에는 한반도의 겨울이 평년보다 따뜻해지는 경향이 있으나, 북극 진동의 부(-)의 위상이 겹치면 오히려 이상 한파가 발생할 수 있다. 이처럼 복잡한 기후 변동성은 단순한 통계 모델로는 포착하기 어려운 비선형적 패턴을 만들어낸다.

#### (4) 생태계와 공중 보건의 시스템 리스크

개화 시기 예측의 실패는 축적 예산 낭비를 넘어, 인간 사회와 생태계 전반의 '시스템 리스크'로 전이된다. 가장 심각한 위협은 '생물계절 불일치(Trophic Mismatch)'이다. 기온 변화에 대한 민감도는 영양 단계별로 상이하여, 식물(생산자)이 가장 민감하게 반응한다.

식물의 개화 시기가 급격히 빨라지는 반면, 주요 수분 매개자인 나비와 같은 곤충(1차 소비자)의 출현 시기가 이를 따라가지 못하면, 식물의 수정 과정에 치명적인 문제가 발생한다. Bartomeus 등(2011)의 연구는 기후 관련 개화 시기 변화가 벌과 식물 사이의 시간적 일치성을 교란하며, 이는 수분 효율성을 저하시킬 수 있음을 경고하였다. 이는 수분 생태계의 붕괴와 먹이사슬의 교란을 의미하며, 생물다양성 보전의 근간을 위협한다.

철새의 경우 문제는 더욱 심각하다. 장거리 이동 조류는 주로 일장(낮 길이)에 반응하여 이동 시기를 결정하는 반면, 그들의 먹이가 되는 곤충의 출현 시기는 주로 온도에 반응한다. 기후변화로 온도가 상승하면 곤충의 출현 시기는 빨라지지만, 철새의 도착 시기는 상대적으로 덜 변화하여 시간적 불일치가 발생한다. Both 등(2006)의 연구는 이러한 생물계절 불일치가 장거리 이동 조류 개체군의 감소로 이어질 수 있음을 보여주었다.

동시에 이는 심각한 공중 보건 문제를 야기한다. 기온 상승과 대기 중 이산화탄소 농도 증가는 알레르기를 유발하는 꽃가루의 생산량과 농도를 직접적으로 증가시킨다. 이른 개화는 꽃가루 유행 시기를 앞당기고 전반적인 운난화는 유행 기간을 연장시켜, 천식 및 비염 환자의 고통을 가중시키고 관련 보건 비용을 증대시킨다. 특히 도시 지역에서는 대기 오염 물질과 꽃가루가 상호작용하여 알레르기 증상을 더욱 악화시키는 것으로 알려져 있다.

#### (5) 지구 시스템 피드백

식물 계절의 변화는 단순히 기후변화의 '결과'에 그치지 않고, 기후변화를 다시 '가속'시키는 피드백 요인으로 작용한다. 이른 개화와 개엽으로 인한 성장 기간 연장은 단기적으로 식물의 광합성(GPP, Gross Primary Production)을 증진시켜 대기 중 이산화탄소 흡수량을 늘릴 수 있다.

하지만 동시에, 기온 상승은 식물과 토양의 호흡(Respiration)을 통한 이산화탄소 배출량을 더 가파르게 증가시킨다. 식물의 호흡은 온도에 대한 민감도가 광합성보다 높아, 기온이 상승할수록 호흡량의 증가 폭이 광합성량의 증가 폭을 초과하게 된다. 만약 호흡 증가 효과가 광합성 증진 효과를 능가하게 되면, 육상 생태계는 이산화탄소 흡수원에서 배출원으로 전환될 수 있다.

며, 이는 지구온난화를 더욱 가속하는 치명적인 양성 피드백이 될 수 있다.

또한 토양 유기물의 분해 속도도 온도 상승에 따라 빨라진다. 토양에는 대기 중보다 훨씬 많은 양의 탄소가 저장되어 있는데, 기온 상승으로 미생물의 활동이 활발해지면 이 탄소가 이산화탄소 형태로 대기 중으로 방출된다. 이는 또 다른 양성 피드백 고리를 형성하여 기후변화를 가속화시킨다.

## 2) 생물학적 관점: 개화 지연의 생리·분자 메커니즘

### (1) 식물 생리학적 개화 조절의 이중 온도 체계

온대 낙엽수목의 개화는 복잡한 생리학적 과정을 거쳐 이루어지며, 크게 두 단계로 구분된다. 첫 번째는 겨울철 휴면을 타파하기 위한 저온 요구량(Chill Requirement) 충족 단계이다. 식물은 일정 기간 7°C 이하의 저온을 경험해야만 생리적으로 휴면 상태에서 벗어나 생장을 준비할 수 있다.

이 과정은 단순히 기온의 문제가 아니라 식물 세포 내부의 복잡한 생화학적 변화를 동반한다. 저온 기간 동안 식물은 휴면을 유지하는 ABA(앱시스산) 같은 억제 호르몬을 분해하고, 생장을 촉진하는 GA(지베렐린) 같은 호르몬을 합성하는 준비 과정을 거친다. 이러한 호르몬 균형의 변화는 수백 개의 유전자 발현 패턴을 조절하며, 이는 궁극적으로 개화 타이밍을 결정한다(Chmielewski & Rötzer, 2001).

두 번째는 휴면이 타파된 후 봄철 온도가 누적되어 개화를 촉진하는 고온 요구량(Heat Requirement) 충족 단계로, 이는 유효적산온도(Growing Degree Days, GDD)로 계산된다. 이 단계에서는 세포 분열과 생장이 활발히 일어나며, 꽃눈이 팽대하고 최종적으로 개화에 이른다.

그러나 기후변화는 이러한 이중 온도 체계의 정상적인 작동을 교란하고 있다. 겨울철 기온이 비정상적으로 상승하면 식물이 저온 요구량을 완전히 충족시키지 못하는 불완전한 휴면 타파 상태가 발생할 수 있다. 이 상태에서 봄철 고온이 뒤따르면 식물의 반응은 예측 불가능한 비선형적 양상을 띠게 되며, 이는 단순한 적산온도 기반 모델의 예측 정확도를 급격히 떨어뜨리는 핵심 원인이 된다(Impact of Climate Change on Cherry Blossom Flowering Phenology, 2025).

JIRCAS(일본 국제농림수산산업연구센터)의 2025년 연구는 냉각 요구량과 적산온도의 상호작용을 분석하여, 남방 분포 한계에서 불완전 개화가 실측됨을 보고하였다. 이 연구는 겨울 온난화가 계속될 경우 현재 벚꽃이 잘 피는 지역에서도 미래에는 개화 불규칙성이 증가할 수 있음을 경고한다.

실제로 일본 기상청(JMA)의 장기 관측 데이터는 불완전 휴면이 남방 분포 한계에서 개화 불규칙성을 유발함을 실증적으로 보여주었다(Japan Meteorological Agency, 2023). 일본 남부 규슈 지방과 오키나와에서는 이미 겨울 기온 상승으로 인한 개화 지연 현상이 관찰되고 있으며, 이는 한반도 남부 지역에도 시사하는 바가 크다.

### (2) 호르몬 신호 체계: ABA-GA 축의 정밀 조절

벚꽃 개화의 분자생물학적 메커니즘은 식물 호르몬의 정밀한 조절을 통해 이루어진다. 특히 ABA(앱시스산, Abscisic Acid)와 GA(지베렐린, Gibberellin)의 상호작용이 핵심적이다. 겨울 동안 꽃눈은 ABA 우세 상태로 휴면을 유지하다가, 적절한 저온 충족 후 ABA가 감소하면 GA의 상대적 우세로 전환되어 개화 준비에 들어간다.

최근 연구에서는 ABA INSENSITIVE 2 유전자가 OST1(Open Stomata 1) 단백질을 억제함으로써 개화 타이밍을 촉진한다는 사실이 밝혀졌으며, 이 과정에서 ROS(활성산소종, Reactive Oxygen Species) 신호가 중요한 역할을 한다는 것이 확인되었다(ABA INSENSITIVE 2 promotes flowering..., 2024). ROS는 단순한 스트레스 부산물이 아니라, 세포 내 신호 전달 물질로서 개화 타이밍 결정에 핵심적인 역할을 한다.

ABA는 식물의 스트레스 호르몬으로 알려져 있으며, 가뭄, 고온, 염분 등의 환경 스트레스에

반응하여 증가한다. 흥미롭게도 ABA는 개화에 대해 이중적인 역할을 한다. 적절한 수준의 ABA는 휴면 유지에 필수적이지만, 과도한 ABA는 개화를 지연시킨다. 반대로 GA는 성장 촉진 호르몬으로, 줄기 신장, 종자 발아, 그리고 개화를 촉진한다.

지구온난화와 불완전 저온 충족이 반복될 경우, ABA 농도가 충분히 저하되지 못하여 이후 봄철 적산온도가 동일하더라도 실제 개화 개시는 지연되거나 분산될 수 있다(Revising the role of ABA as regulator of flowering..., 2025). 특히 가뭄, 고온, 염분 등의 환경 스트레스는 ABA의 이중적 메커니즘을 활성화시켜 개화를 연기하는 방향으로 작용한다. 이는 식물이 불리한 환경 조건에서 생식보다 생존을 우선시하는 진화적 전략으로 해석된다.

ROS와 항산화 시스템의 균형 역시 꽃눈의 휴면 해제와 개화 타이밍 결정의 핵심적 허브이다(Barba-Espín et al., 2022). 휴면 기간 동안 꽃눈은 낮은 대사 활동을 유지하지만, 휴면 타파 과정에서는 ROS 생성이 급격히 증가한다. 이 ROS는 신호 분자로 작용하여 휴면 관련 유전자의 발현을 억제하고 성장 관련 유전자의 발현을 촉진한다. 그러나 과도한 ROS는 세포 손상을 일으킬 수 있으므로, 항산화 시스템이 ROS 수준을 적절히 조절해야 한다. 한랭, 건조, 오존 등의 환경 스트레스가 산화 스트레스를 유발하면 이 균형이 깨지고, 당 대사 및 호르몬 신호가 교란되어 개화 지연이 일어난다.

### (3) 유전자 네트워크와 전사체 수준의 조절

일본 Somei-Yoshino(왕벚나무) 품종을 대상으로 한 전사체 연구에서는 개화 전후 30,000개 이상의 유전자 발현 패턴을 분석하여, 특정 유전자의 활성이 개화 임계점과 직결됨을 규명하였다(Cherry Blossom Forecast Based on Transcriptome..., 2022). 이 연구는 개화 과정을 여러 단계로 나누고, 각 단계에서 특이적으로 발현되는 유전자 세트를 식별하였다.

예를 들어, 휴면 단계에서는 휴면 유지 관련 유전자들이 높게 발현되며, 휴면 타파 단계에서는 이들 유전자의 발현이 급격히 감소하고 대신 세포 분열 관련 유전자들이 활성화된다. 개화 임박 단계에서는 꽃 발달 관련 전사 인자들과 호르몬 합성·신호 전달 관련 유전자들이 급증한다. 이러한 전사체 수준의 변화 패턴을 추적하면 개화 시기를 수일 전에 정확히 예측할 수 있다.

FLM(Flowering Locus M), SVP(Short Vegetative Phase), PWR 단백질 등 개화 타이밍 관련 유전자들의 상호작용이 밝혀지면서, 온도 감응성과 개화 지연의 다층유전자 네트워크가 실험적으로 검증되었다("개화 타이밍 유전자 - 단백질 상호작용", 2025). 특히 FLM 유전자는 온도에 따라 서로 다른 스플라이싱 변이체를 생성하며, 이들 변이체의 비율이 개화 시기를 조절한다는 것이 밝혀졌다. 저온에서는 개화 촉진 변이체가, 고온에서는 개화 억제 변이체가 우세하게 생성된다.

SVP는 MADS-box 전사 인자로서 개화 억제체로 작용한다. 겨울 동안 SVP는 높게 발현되어 조기 개화를 방지하지만, 봄이 되어 온도가 상승하면 SVP 발현이 감소하고 개화가 진행된다. PWR 단백질은 이러한 MADS-box 전사 인자들의 활성을 조절하는 보조 인자로 작용한다.

이러한 분자 수준의 이해는 개화 임박 신호를 예측하는 정밀한 도구로 활용될 수 있다. 예를 들어, 꽃눈 조직에서 특정 유전자의 발현 수준을 측정하면, 현재 개화 진행 단계를 정확히 파악하고 최종 개화일을 예측할 수 있다. 이는 기상 데이터만으로는 불가능한 생리적 상태의 직접적인 측정이다.

### (4) 환경 요인의 복합 작용: 온도, 광주기, 냉각 요구량

개화 시기는 단순히 온도만의 함수가 아니라 광주기(낮 길이), 냉각 요구량, 열 누적량의 복합적 상호작용에 의해 결정된다. 한국의 7개 목본종을 대상으로 한 연구에서는 온도와 광주기의 상대적 중요도가 종별로 다르게 나타났으며, 일부 종에서는 광주기가 온도만큼이나 중요한 예측 변수임이 확인되었다(Quantifying the importance of day length..., 2022).

이 연구는 부분 최소 제곱(Partial Least Squares) 회귀 분석을 사용하여 각 환경 변수의 상대적 기여도를 정량화하였다. 흥미롭게도 일부 종에서는 광주기가 온도보다 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 식물이 단순히 온도만을 감지하는 것이 아니라, 여러 환경 신호를 통합하여 개화 시기를 결정한다는 것을 의미한다.

광주기는 식물이 계절을 인식하는 가장 정확한 신호이다. 낮 길이는 매년 일정한 패턴으로 변화하므로, 기후변화의 영향을 받지 않는다. 따라서 광주기에 민감한 식물은 기후변화에도 불구하고 상대적으로 안정적인 개화 패턴을 유지할 수 있다. 반면 온도에만 민감한 식물은 기온 변동성이 커지면 개화 시기의 변동성도 크게 증가한다.

동아시아 벚나무를 대상으로 한 장기 연구는 적산온도와 냉각 요구량 조합의 변화에 따라 지역별 개화일 특성이 크게 달라짐을 실증하였다(Variable warming effects on flowering phenology..., 2023). 이 연구는 중국, 한국, 일본의 여러 지역에서 30년 이상의 개화 데이터를 분석하여, 각 지역의 기후 특성에 따라 벚꽃의 반응이 다르게 나타남을 보여주었다.

예를 들어, 겨울이 상대적으로 추운 북부 지역에서는 온난화가 개화를 앞당기는 효과가 뚜렷하게 나타난다. 충분한 저온이 보장되는 상황에서 봄철 기온 상승은 개화를 촉진하기 때문이다. 반면 겨울이 따뜻한 남부 지역에서는 온난화가 오히려 개화를 지연시킬 수 있다. 저온 요구량이 충족되지 않으면 아무리 봄철 기온이 높아도 정상적인 개화가 일어나지 않기 때문이다.

냉각 요구량과 열 누적량의 균형이 깨지면 개화 시기의 변동성이 증가한다. 특히 겨울이 따뜻해져 냉각 요구량이 불완전하게 충족된 상태에서는, 이후 봄철 열 누적이 동일하더라도 개화가 지연되거나 불규칙해질 수 있다(Impact of Climate Change on Cherry Blossom..., JIRCAS, 2025). 이는 식물 생리학적 메커니즘이 단순한 선형 모델로는 포착할 수 없는 복잡한 비선형성을 가지고 있음을 의미한다.

#### (5) 대기 화학 물질의 생리적 영향

대기 중 오존(O<sub>3</sub>)과 질소산화물(NOx)은 식물의 생리적 기능에 직접적인 영향을 미친다. 오존은 강력한 산화제로서 식물의 잎 표면에 있는 기공을 통해 조직 내부로 침투한다. 오존은 기공 폐쇄를 유도하고 광합성을 저해하여 개화 시기와 꽃의 수를 변화시킬 수 있다(Hoshika et al., 2015).

Hoshika 등의 연구는 오존에 민감한 포플러 품종에서 야간 기공 폐쇄 기능이 손상되는 것을 발견하였다. 흥미롭게도 이 효과는 질소 영양 상태에 따라 달라졌는데, 질소가 풍부한 조건에서는 오존의 부정적 효과가 더 심했다. 이는 오존 스트레스와 영양 상태의 복잡한 상호작용을 시사한다.

특히 오존과 질소산화물은 꽃 향기 성분(Floral VOC, Volatile Organic Compounds)을 빠르게 분해하여 수분 매개 곤충의 탐지 범위와 선호도를 급격히 감소시킨다(Effects of ozone air pollution..., 2022). 식물은 꽃 향기를 통해 수분 매개자를 유인하는데, 대기 오염 물질이 이 향기 분자들을 산화시켜 분해하면 꽃과 수분 매개자 사이의 화학적 의사소통이 단절된다.

한 연구에서는 깨끗한 공기 조건에서 꽃 향기가 최대 800미터까지 도달하지만, 오존 농도가 높은 조건에서는 200미터 이내로 감소함을 보여주었다. 이는 단순한 개화일 변화를 넘어 수분 성공률 저하와 같은 생태계 리스크를 초래할 수 있다. 결과적으로 식물은 정상적으로 개화하더라도 결실률이 크게 감소할 수 있으며, 이는 다음 세대의 번식 성공도에 직접적인 영향을 미친다.

더욱이 대기 오염 물질은 식물 자체에도 산화 스트레스를 유발한다. 오존은 잎 조직에서 ROS 생성을 급격히 증가시키며, 이는 광합성 기구의 손상, 조기 낙엽, 생장 억제 등을 초래한다. 만성적인 오존 노출은 식물의 전체적인 건강 상태를 악화시켜 개화 능력 자체를 저하시킬 수 있다(Agathokleous et al., 2020).

## (6) 토양 환경과 균근균의 역할

토양의 질소, 인, 염분 함량은 식물의 호르몬 균형과 대사 과정에 영향을 미쳐 개화 시기를 조절한다. 질소 공급량 증가는 경우에 따라 개화를 소폭 앞당기기도 하지만, 발아부터 생장, 성숙 단계까지의 전반적인 지연을 유발할 수 있다. 이는 질소가 영양 생장(줄기와 잎의 생장)을 촉진하여 생식 생장(꽃과 열매의 생장)으로의 전환을 지연시키기 때문이다.

질소는 식물 생장에 필수적인 영양소이지만, 과도한 질소는 탄소/질소 비율의 불균형을 초래한다. 식물은 탄소/질소 비율을 감지하여 영양 생장과 생식 생장 사이의 균형을 조절하는데, 질소가 과도하면 영양 생장이 우세해지고 개화가 지연된다. 반대로 질소가 부족하면 식물은 조기에 생식 생장으로 전환하려는 경향을 보인다.

염분 스트레스 역시 개화에 복잡한 영향을 미친다. 해안 지역이나 도로변 제설염에 노출된 환경에서 식물은 삼투 스트레스와 이온 불균형을 경험한다. 염분은 토양 수분 포텐셜을 낮춰 식물이 물을 흡수하기 어렵게 만들고, 나트륨과 염소 이온의 과도한 축적은 세포 기능을 교란한다(Atta et al., 2023; Bouzroud et al., 2023).

염분 스트레스는 ABA 합성을 증가시켜 기공을 폐쇄하고 수분 손실을 줄이는 방향으로 작용한다. 그러나 동시에 이는 광합성을 억제하고 전체적인 생장을 저해한다. 만성적인 염분 스트레스는 개화를 지연시키고, 꽃의 수와 크기를 감소시키며, 불임 물을 증가시킬 수 있다. 특히 한국처럼 해안선이 길고 겨울철 제설염 사용이 많은 지역에서는 이러한 영향이 무시할 수 없는 수준이다.

균근균(Mycorrhizal fungi)은 식물 뿌리와 공생 관계를 맺으며 식물의 영양 흡수와 스트레스 저항성을 증진시킨다. 균근균은 식물이 접근하기 어려운 토양 영역에서 인과 기타 미량 원소를 흡수하여 식물에 공급하고, 그 대가로 식물이 광합성으로 생산한 탄수화물을 받는다(Mohan et al., 2014).

기후변화는 토양 온도와 수분 조건을 변화시켜 균근균의 활동과 군집 구성에 영향을 미친다. 균근균의 변화는 다시 식물의 영양 상태와 스트레스 반응을 조절하여 간접적으로 개화 타이밍에 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 가뭄 조건에서 균근균은 식물의 수분 흡수를 도와 가뭄 스트레스를 완화시킨다. 반면 균근균 군집이 교란되면 식물의 영양 상태가 악화되고 개화 능력이 저하될 수 있다.

## (7) 한반도 실증 연구: 장기 관측과 지역별 차이

한국의 장기 벚꽃 개화 데이터(1990~2023)를 분석한 연구에서는 기온 상승과 함께 개화 시기가 전반적으로 앞당겨지는 추세를 보이지만, 최근 들어 변동성이 증가하고 있음을 확인하였다(기온 변화에 따른 벚꽃 개화시기의 변화 경향, 2024). 34년간의 데이터를 분석한 결과, 평균적으로 10년당 약 3일씩 개화가 빨라졌으나, 2010년대 이후 연도별 편차가 급격히 증가하였다.

특히 2020년대 들어 겨울철 이상 고온과 꽃샘추위가 교차하면서 예측 오차가 커지고 있다. 어떤 해에는 역대 가장 이른 개화를 기록하는가 하면, 다음 해에는 평년보다 늦은 개화를 보이는 등 불규칙성이 두드러진다. 이는 평균 기온 상승만으로는 설명할 수 없는 복잡한 기후 변동성을 반영한다.

지역 간, 종별 개화 차이를 분석한 연구에서는 동일한 위도에서도 해안과 내륙, 도시와 농촌 간 개화일 차이가 최대 7일 이상 발생함을 보고하였다(벚나무류 개화시기 변화에 관한 연구, 2013). 이 연구는 전국 주요 도시의 벚꽃 개화 데이터를 비교 분석하여 미기후 요인의 중요성을 강조하였다.

예를 들어, 서울과 춘천은 위도 차이가 크지 않지만 개화일 차이가 1주일 이상 날 수 있다. 서울은 대도시 열섬 효과로 기온이 높고, 춘천은 분지 지형으로 야간 복사 냉각이 강해 아침 기온이 낮기 때문이다. 부산과 대구는 비슷한 위도에 있지만, 부산은 해양성 기후의 영향으로

온도 변화가 완만하고 대구는 내륙성 기후로 일교차가 크다. 이러한 미기후 차이는 개화 시기 뿐만 아니라 개화 기간에도 영향을 미친다.

1976년부터 2019년까지 한국의 장기 데이터를 분석한 연구에서는 생산자(식물), 1차 소비자(곤충) 단계별로 기후 민감도가 다르게 나타나며, 생물계절 불일치(Phenological Mismatch) 현상이 발생하고 있음을 확인하였다(Phenological Response in the Trophic Levels..., 2021). 이 연구는 44년간의 생물계절 데이터를 영양 단계별로 분석하여, 식물은 기온 상승에 빠르게 반응하지만 곤충의 반응은 상대적으로 느림을 보여주었다.

구체적으로, 식물의 개화 시기는 10년당 약 4.5일 빨라진 반면, 나비의 첫 출현 시기는 10년당 약 2.5일만 빨라졌다. 이러한 속도 차이는 식물과 수분 매개자 사이의 시간적 불일치를 증가시키며, 이는 수분 효율성 저하와 생태계 교란으로 이어질 수 있다. 특히 전문적 수분 관계(specialist pollination)를 맺는 식물-곤충 쌍에서 이러한 불일치의 영향이 더 심각하게 나타났다.

한국형 생물계절 모델은 열량 합산(적산온도, chill requirement) 기반으로 전국 단위 예측을 시도해왔다(생물계절모형을 이용한 벚꽃 개화일 예측, 2005). 이 모델은 1970년대부터 축적된 개화 관측 데이터와 기상 데이터를 바탕으로 개발되었으며, 정상적인 기후 조건에서는 평균 오차 2일 이내의 정확도를 보였다.

그러나 이 모델은 이상기후 발생 시 예측 오차가 급증하는 한계를 보인다(벚꽃 개화일의 시공간 변이, 2006). 2010년 이후 빈번해진 이상 기후 이벤트에서 예측 오차가 5일 이상으로 확대되는 경우가 증가했다. 이는 단순 온도 기반 모델이 복합적인 환경 요인과 생리적 반응을 충분히 반영하지 못하기 때문이다. 특히 불완전 휴면, 극한 기온 이벤트, 대기 화학 물질의 영향, 토양 수분 변동 등의 요인들이 고려되지 않아 예측력이 제한적이다.

### 3) 화학적 관점: 대기·토양 화학과 식물 호르몬 동역학

#### (1) 식물 내부(내인성) 화학 조절: ABA - GA 축과 ROS 신호

한국의 최근 봄꽃 개화 지연 현상은 기온, 수분, 대기 화합물, 토양 환경, 그리고 식물 내부의 정밀한 생리·화학적 신호의 종합적 상호작용에 의해 발생한다는 것이 최신 연구와 현장 보고, 기상청·산림청 공식 자료에 의해 반복적으로 확인되고 있다(생태계 장기모니터링 지역의 기후 변화 영향; 산림청, 2024; 기상청, 한국 기후위기 평가보고서 2025).

내인성(식물 내부 신호)에서 가장 중요한 축은 ABA(압시스산) - GA(지베렐린) 호르몬계와 ROS(활성산소종)·항산화 조절이다. 겨울 동안 꽃눈은 ABA 위주로 휴면 상태를 유지하다, 적절한 저온 충족 이후 ABA가 감소하면 GA의 상대적 우세로 전환되어 개화 준비에 들어간다.

ABA는 세포막에 있는 수용체와 결합하여 일련의 신호 전달 경로를 활성화한다. 이 경로는 단백질 인산화 연쇄 반응을 통해 유전자 발현을 조절하는 전사 인자들을 활성화시킨다. 주요 전사 인자로는 ABF(ABA-responsive element binding factor) 계열이 있으며, 이들은 수백 개의 하위 유전자들의 발현을 조절한다.

반대로 GA는 DELLA 단백질을 분해시켜 성장을 촉진한다. DELLA 단백질은 성장 억제제로 작용하는데, GA가 없으면 DELLA가 축적되어 생장이 억제된다. GA가 존재하면 GA 수용체가 활성화되고, 이는 유비퀴틴-프로테아좀 시스템을 통해 DELLA 단백질을 분해하도록 신호를 보낸다. DELLA가 제거되면 성장 관련 유전자들이 활성화되어 세포 분열과 신장이 일어난다.

하지만 지구온난화, 겨울 온난 및 불완전 저온 충족이 반복될 경우, ABA 농도가 충분히 저하되지 못하여 이후 봄철 적산온도가 동일해도 실제 개화 개시는 지연·분산될 수 있다. 이는 ABA-GA 균형이 깨지면서 개화를 촉진하는 신호 경로가 제대로 작동하지 않기 때문이다. 특히 환경 스트레스가 지속되면 ABA 합성이 계속 유지되어 개화 억제 상태가 연장된다.

ROS·항산화계의 균형 역시 꽃눈의 휴면 해제와 개화 타이밍 결정의 핵심적 허브이다

(Barba-Espín et al., 2022). ROS는 과산화수소( $H_2O_2$ ), 슈퍼옥사이드( $O_2^-$ ), 하이드록실 라디칼( $\cdot OH$ ) 등을 포함하며, 이들은 세포 내 신호 분자로 작용한다. 적절한 수준의 ROS는 휴면 타파에 필수적이지만, 과도한 ROS는 세포 손상을 일으킨다.

항산화 시스템은 슈퍼옥사이드 디스뮤타제(SOD), 카탈라제(CAT), 아스코르베이트 퍼옥시다제(APX) 등의 효소와 글루타치온, 아스코르브산 같은 비효소적 항산화제로 구성된다. 이들은 ROS 수준을 적절히 조절하여 신호 전달 기능은 유지하면서 산화 손상을 방지한다.

한랭·건조·오존 등 환경 스트레스가 산화 스트레스를 유발하면 당대사 및 호르몬 신호가 교란되어 추가 지연이 일어난다. 예를 들어, 오존 노출은 잎에서 ROS 생성을 급증시키고, 이는 광합성 억제와 탄수화물 생산 감소로 이어진다. 탄수화물은 개화에 필요한 에너지원이므로, 그 공급이 부족하면 개화가 지연되거나 불완전해질 수 있다.

### (2) 대기화학 스트레스(외인성): 오존·NOx·산화능

외인성(대기·토양 등 외부 환경) 측면의 영향도 점점 중요해지고 있다. 도시 및 교외권의 봄철 지상 오존( $O_3$ )·NOx·기타 산화물 노출은 광합성 저해 및 꽃 수·개화시점 변동에 주요한 역할을 한다. 오존은 대기 중에서 질소산화물과 휘발성 유기화합물(VOC)의 광화학 반응으로 생성되며, 맑고 햇볕이 강한 날 농도가 높아진다.

최근 연구에서는 오존·NOx·OH(하이드록실 라디칼)가 꽃 향기 성분(Floral VOC)을 빠르게 분해하여 수분 곤충의 탐지 범위 및 선호도가 급격히 감소하는, "만개 시점의 체감 저하 및 결실 불일치" 상황을 현장 실험으로 뒷받침했다(Agathokleous et al., 2020; Agathokleous, 2022). 즉, 단순한 개화일 변화뿐 아니라 "수분 성공률 저하" 같은 생태계 리스크까지 초래될 수 있다.

식물이 방출하는 꽃 향기 분자들은 대부분 휘발성 유기화합물이다. 이들은 테르펜류(terpenes), 벤젠노이드류(benzenoids), 지방산 유도체 등으로 구성되며, 각 식물 종마다 독특한 향기 프로필을 가진다. 수분 매개 곤충은 이러한 화학 신호를 감지하여 꽃을 찾아간다.

그러나 오존과 질소산화물은 이 향기 분자들을 산화시켜 분해한다. 오존은 이중 결합을 가진 화합물과 빠르게 반응하며, 많은 꽃 향기 성분이 이중 결합을 포함하고 있어 오존에 취약하다. 분해된 향기 분자는 수분 매개자를 유인하는 능력을 상실하거나, 심지어 기피 반응을 일으킬 수도 있다.

AOT40(Accumulated Ozone exposure over a Threshold of 40 ppb)는 식생 보호를 위한 오존 노출 지수로, 40 ppb를 초과하는 오존 농도의 누적 시간을 나타낸다("AOT40(식생보호) 정의 및 임계수준", 2025; "Exposure of Europe's ecosystems to ozone", 2025). 유럽 환경청(EEA)의 기준에 따르면 AOT40이 3,000 ppb·시간을 초과하면 식생에 유해한 영향이 나타나기 시작한다. 한국의 많은 도시 및 근교 지역에서 봄철 AOT40 값이 이 임계치를 초과하고 있어, 식물과 생태계에 대한 오존의 영향이 우려된다.

### (3) 토양·영양·염분·CO<sub>2</sub>의 복합 효과

토양 영양(질소·염분 등)도 중대한 변수로 부상한다. 질소 공급량 증가는 때로 개화를 소폭 앞당기나, 발아~생장~성숙 단계 지연 등 복합 반응이 추적 연구에서 반복 보고된다. 한국처럼 토양 무기질·탄소:질소비 편차가 큰 지역에선 이 영향이 더욱 크다.

토양 질소는 주로 질산염( $NO_3^-$ )과 암모늄( $NH_4^+$ ) 형태로 존재하며, 식물은 뿌리를 통해 이를 흡수한다. 질소는 아미노산, 단백질, 핵산, 엽록소 등 모든 주요 생체 분자의 구성 성분이므로 식물 성장에 필수적이다. 그러나 과도한 질소는 영양 성장을 과도하게 촉진하여 생식 생장으로의 전환을 지연시킨다.

또한 토양 탄소:질소(C:N) 비율은 토양 미생물 활동과 영양소 순환에 영향을 미친다. C:N 비율이 높으면 미생물이 질소를 고정하여 식물이 이용할 수 있는 질소가 감소한다. 반대로 C:N 비율이 낮으면 질소가 과도하게 공급되어 앞서 언급한 문제가 발생한다. 한국의 토양은 지역과

토지 이용 형태에 따라 C:N 비율의 편차가 크므로, 이를 고려한 예측 모델이 필요하다.

해안(염분)·도로변(제설염) 환경에서 삼투·이온 불균형, 호르몬 교란 또한 지연 개화와 불임을 증가로 이어질 수 있다(Atta et al., 2023; Bouzroud et al., 2023). 염분은 토양 수분 포텐셜을 낮춰 식물이 물을 흡수하기 어렵게 만드는 삼투 스트레스를 유발한다. 또한 나트륨( $\text{Na}^+$ )과 염소( $\text{Cl}^-$ ) 이온이 과도하게 축적되면 칼륨( $\text{K}^+$ ), 칼슘( $\text{Ca}^{2+}$ ), 마그네슘( $\text{Mg}^{2+}$ ) 같은 필수 양이온의 흡수가 억제된다.

나트륨은 특히 세포 내에서 칼륨과 경쟁하며, 칼륨은 많은 효소의 활성화와 삼투 조절에 필수적이므로 나트륨의 과도한 축적은 세포 대사를 교란한다. 염소 이온 역시 고농도에서는 독성을 나타낸다. 염분 스트레스는 ABA 합성을 증가시켜 개화를 억제하는 방향으로 작용한다.

한국의 경우 서해안과 남해안의 간척지, 도시 도로변 녹지대, 제설염이 많이 사용되는 중부 지역 도로변 등에서 염분 스트레스가 식물에 영향을 미칠 수 있다. 특히 겨울철 제설염은 봄철까지 토양에 잔류하여 벚꽃 개화기에 영향을 줄 수 있다.

대기  $\text{CO}_2$  증가는 상호작용성 변수로서, 단독 효과는 미미하나 고온·가뭄·오존 등과 결합시 예측 불확실성이 높아지는 점이 지속적으로 지적된다.  $\text{CO}_2$  농도 상승은 광합성을 촉진할 수 있지만( $\text{CO}_2$  시비 효과), 동시에 기공 개도를 감소시켜 증산을 억제한다. 이는 단기적으로는 수분 이용 효율을 높이지만, 장기적으로는 식물의 냉각 능력을 저하시켜 고온 스트레스에 취약하게 만들 수 있다.

또한  $\text{CO}_2$  농도 상승은 식물 조직의 C:N 비율을 증가시킨다. 광합성이 증가하면 탄수화물 축적이 늘어나지만, 질소 흡수는 상대적으로 증가하지 않기 때문이다. 이는 식물의 영양 품질을 저하시키고, 식식성 곤충을 포함한 상위 영양 단계에 영향을 미칠 수 있다.

#### 4) 해외 모형과 국내 맞춤형 모형 비교

##### (1) 해외 기반 모형의 구조와 한계

현재 한국에서 운영되는 해외 기반 생물계절 모형은 주로 적산온도와 냉각량에 기초한 기온 중심의 단순한 구조를 가지고 있다. 대표적인 모델로는 유효적산온도(GDD) 모델, 냉각량(Chilling Hours) 모델, 그리고 이 둘을 결합한 Sequential 모델 등이 있다.

유효적산온도 모델은 일평균 기온에서 기준 온도(보통  $5^{\circ}\text{C}$ )를 뺀 값을 매일 누적하여, 누적값이 특정 임계치에 도달하면 개화가 일어난다고 가정한다. 냉각량 모델은  $7^{\circ}\text{C}$  이하의 온도를 경험한 시간을 누적하여 일정 냉각량이 충족되면 휴면이 타파된다고 가정한다. Sequential 모델은 먼저 냉각량 요구를 충족한 후 유효적산온도를 계산하는 2단계 접근법이다.

이 방식은 미국, 유럽 등지에서 과수와 벚꽃을 대상으로 이미 검증된 표준적 모델로, 과거 평균적인 기후 패턴에서는 비교적 잘 들어맞는다는 장점이 있다. 특히 과수 산업에서는 이러한 모델을 바탕으로 개화기 예측, 냉해 위험 평가, 수확 시기 예측 등을 수행해왔다. 한국에서도 오랜 기간 관측된 데이터를 일부 보정하여 사용하면서 일정 수준의 예측력을 확보해왔다.

Luedeling 등(2013)의 연구는 부분 최소 제곱 회귀(Partial Least Squares Regression)를 사용하여 캘리포니아 호두나무의 생물계절을 분석하였다. 이 연구는 다양한 기후 변수들 중에서 개화에 가장 큰 영향을 미치는 요인을 통계적으로 식별하였으며, 온도뿐만 아니라 강수량과 일사량도 중요한 변수임을 발견하였다.

하지만 이러한 해외 모델은 미세기후 요소를 정밀하게 반영하지 못하는 한계를 지닌다. 예를 들어 도심과 교외, 해안과 내륙, 평지와 산지 등 지역 간 기후 차이를 세밀하게 고려하지 못하며, 기후변화로 인한 비정상적인 기온 변동이 발생하는 해에는 예측 오차가 커질 수밖에 없다.

또한 다양한 품종과 지역 특성을 일괄적으로 처리하는 획일성 때문에 최근 몇 년 사이 예측 정확도가 떨어지고, 현장에서의 신뢰도 역시 낮아지고 있는 상황이다. 특히 극한 기후 이벤트(이상 고온, 한파, 가뭄 등)가 빈번해지면서 평균값 기반의 모델은 점점 더 현실을 반영하지 못

하고 있다.

## (2) 국내 맞춤형 모형의 설계 방향

국내 맞춤형 개화 예측 모형은 이러한 문제를 보완하는 방향으로 설계될 필요가 있다. 우선 전국을 지역별 기후 특성에 따라 세분화하고, 해풍 영향권, 고산지대, 대도시 등의 권역별로 보정 인자를 적용해 미세기후 차이를 반영할 수 있다.

예를 들어 도시 지역에는 열섬 지수를 고려해 개화 임계치를 조정하고, 해안 지역에는 해양성 기후의 완충 효과를 반영하는 방식이다. 서울의 경우 도심, 부도심, 교외를 구분하여 각 지역의 열섬 강도에 따른 보정 계수를 적용할 수 있다. 부산과 같은 해안 도시는 해풍의 냉각 효과와 해양의 열용량 완충 효과를 고려해야 한다.

산간 지역은 고도에 따른 기온 체감률(약 100m당 0.6°C 감소)을 적용하고, 지형에 의한 국지 기후(계곡풍, 산곡풍 등)를 고려해야 한다. 또한 같은 고도라도 사면 방향(남향, 북향)에 따라 일사량과 기온이 크게 다르므로 이를 반영해야 한다.

또한 단일 기온 변수에 의존하지 않고 일조시간, 강수량, 토양 수분, 전년도 기후 등 다양한 환경 변수를 통계적으로 분석해 모델에 포함함으로써, 보다 정교한 예측이 가능해진다. 실제로 2024년 제주에서는 일조량 부족이 개화 지연 요인으로 작용했다는 점이 이러한 다변수 접근의 필요성을 보여준다.

일조시간은 광합성과 직접 연결되어 식물의 에너지 생산에 영향을 미친다. 흐린 날이 계속되면 광합성이 억제되어 개화에 필요한 탄수화물 축적이 지연된다. 강수량은 토양 수분을 결정하며, 극심한 가뭄이나 과습은 모두 식물 스트레스를 유발하여 개화에 영향을 줄 수 있다.

전년도 기후, 특히 전년 여름과 가을의 기후 조건은 꽃눈 형성과 휴면 준비에 영향을 미친다. 전년도에 가뭄이나 고온 스트레스가 심했다면, 꽃눈의 품질이 저하되어 다음 해 개화가 불량할 수 있다. 따라서 당해년도 기후뿐만 아니라 전년도 기후도 예측 변수에 포함해야 한다.

여기에 한국의 촘촘한 AWS(Automatic Weather Station) 기상관측망과 산림청 개화 모니터링 시스템을 결합해 실시간 데이터를 연동하면, 발표 이후에도 상황에 따라 예측값을 지속적으로 갱신하는 동적 예측 체계를 구현할 수 있다. 한국은 전국에 약 600개의 AWS가 설치되어 있어 고밀도 기상 관측이 가능하다.

산림청은 주요 산림 지역에 생물계절 모니터링 지점을 운영하고 있으며, 시민 과학자들의 참여를 통해 개화 관측 네트워크를 확장하고 있다. 이러한 실시간 관측 데이터를 예측 모델에 통합하면, 모델이 현재 상황을 반영하여 예측을 수정할 수 있다. 예를 들어, 예측 시점 이후 갑작스러운 한파가 발생했다면, 이를 감지하여 개화 예측일을 자동으로 조정할 수 있다.

더 나아가 과거 수십 년간 축적된 개화일과 기상 데이터를 머신러닝으로 학습해 비선형 패턴이나 잠재적 영향 요인을 모델에 반영하는 것도 유효한 전략이다. 농업 분야에서는 이미 이러한 AI 기반 생육 예측 기술이 활용되고 있으며, 벚꽃이나 진달래 등 자연경관 수종에도 이를 접목하면 정확도를 크게 높일 수 있을 것으로 기대된다.

머신러닝 기법 중에서는 랜덤 포레스트(Random Forest), 그래디언트 부스팅(Gradient Boosting), 인공신경망(Neural Networks) 등이 생물계절 예측에 적용되고 있다. 이들 기법은 복잡한 비선형 관계와 변수 간 상호작용을 학습할 수 있으며, 전통적인 통계 모델보다 높은 예측 정확도를 보이는 경우가 많다.

또한 한국 고유의 품종과 생육 환경에 특화된 파라미터 보정 과정을 통해 모델을 현지화하고, 해마다 예측값과 실제 개화일을 비교·분석하는 피드백 루프를 마련하면 모델 신뢰성을 지속적으로 개선할 수 있다. 한국의 왕벚나무(*Prunus × yedoensis*)는 일본의 Somei-Yoshino와 유전적으로 다르며, 자생지 환경도 다르므로 별도의 파라미터 설정이 필요하다.

피드백 루프는 적응형 학습(adaptive learning) 체계를 구현하는 핵심이다. 매년 예측과 실제

관측값의 차이를 분석하여 모델의 가중치를 조정하고, 새로운 패턴이 발견되면 이를 모델에 반영한다. 이를 통해 모델은 기후변화에 따라 변화하는 식물 반응을 지속적으로 추적할 수 있다. 이처럼 국내 맞춤형 예측 모형은 지역성·다변수성·실시간성·AI 기반 학습·지속적 피드백을 핵심으로 삼아, 단순한 국제 모델의 보정 수준을 넘어선 한국형 개화 예측 체계로 발전할 수 있다.

#### 5) 법제도 관점: 기후변화 대응 법률 체계의 통합

##### (1) 기후위기 대응의 법제도적 필요성

기후위기는 더 이상 환경 부문에만 국한된 문제가 아니라, 국가 경제 및 사회 시스템 전반에 영향을 미치는 복합적인 위기로 확산되고 있다. 급격한 온난화와 기후 변동성 증대로 인해 계절성 지표(개화·개엽, 꽃가루 확산, 농업 생육 주기 등)의 예측 불확실성의 증가는 축제·관광, 농업 생산성, 보건 리스크 관리 등 여러 정책 영역의 의사결정에 직접적인 부담을 주고 있다 (양산산 & 남현동, 2024; 조진우, 2024).

이러한 상황에서 "과학적 예측력의 고도화"와 "법·제도적 정합성 확립"을 병행하는 통합 전략이 필요하다. 핵심 목표는 (1) 국내 맞춤형 고도화 모델(한국형 기후·생물 계절 예측 체계)의 구축과 (2) 감측 - 감시·예측 - 일반기상으로 이어지는 3단계 법체계의 정립을 통해, 감시→예측→정책→이행의 선순환을 제도화하는 것이다.

기후변화 대응은 과학적 근거에 기반한 정책(Evidence-Based Policy)이 필수적이다. 그러나 아무리 정교한 과학적 예측이 있더라도, 이를 정책에 반영하고 실행하는 법제도적 틀이 없다면 실효성을 갖기 어렵다. 반대로 법제도만 있고 과학적 근거가 부족하면 정책의 정당성과 효율성이 떨어진다. 따라서 과학과 법제도의 통합적 접근이 필요하다.

##### (2) 근거 기반 정책(EBP)을 위한 법적 기반

정확하고 시의성 있는 예측 정보를 정책 현장에 효과적으로 연결하기 위해 데이터의 생산 - 검증 - 활용 절차가 법률로 명료하게 규정되어야 한다. 「기후변화감시예측법」을 중심으로 (a) 기후정보의 표준화 및 품질 관리, (b) 공공·민간·시민 과학 데이터의 결합과 저작권·개인정보·공공데이터 개방 원칙의 조화, (c) 예측 산출물의 정책 의무 반영 절차를 규정할 필요가 있다 (현대호, 2024).

기후정보의 표준화는 서로 다른 기관과 시스템에서 생산된 데이터를 통합하고 비교할 수 있게 한다. 이를 위해 데이터 형식, 메타데이터 구조, 품질 지표, 불확실성 표현 방법 등에 대한 표준을 법적으로 규정해야 한다. 세계기상기구(WMO)와 같은 국제 표준을 따르되, 한국의 특수성을 반영한 국가 표준도 개발해야 한다.

공공·민간·시민 과학 데이터의 결합은 관측 네트워크를 확장하고 데이터 밀도를 높이는 효과적인 방법이다. 그러나 이를 위해서는 데이터 소유권, 개인정보 보호, 데이터 품질 보증 등의 법적 쟁점을 해결해야 한다. 공공데이터 개방 원칙에 따라 정부가 생산한 기후 데이터는 원칙적으로 개방하되, 국가안보나 개인정보 보호가 필요한 경우 예외를 둘 수 있다.

특히 대응량 관측·재분석·원격탐사·현장 생태 데이터의 결합을 전제로, 기계 학습을 포함한 통계적·계산 과학적 방법론을 법적으로 "정규 의사결정 도구"로 인정하는 근거가 필요하다(정종업 외, 2021). 이는 특정 사건이나 연도에 한정된 단편적 증거가 아니라, 다년도의 누적 관측과 메타데이터를 바탕으로 한 증거 기반 의사결정(EBP)을 제도화함으로써 달성될 수 있다.

전통적으로 정책 결정은 전문가의 판단이나 제한된 통계 분석에 의존해왔다. 그러나 기후 시스템의 복잡성과 데이터 규모를 고려할 때, 인공지능과 빅데이터 분석 같은 현대적 방법론을 공식 의사결정 도구로 인정할 필요가 있다. 이를 위해 AI 모델의 투명성, 검증 가능성, 책임 소재 등에 대한 법적 기준을 마련해야 한다.

결국, 데이터 수집·정제·모형화·검증·배포 전 단계에 대한 표준 운영 절차(SOP)와 책임 소재

를 법률 및 하위 법령(고시, 지침)으로 명확히 해야 한다. SOP는 각 단계에서 누가, 무엇을, 어떻게, 언제 수행해야 하는지를 명확히 규정한다. 책임 소재를 명확히 하면 문제 발생 시 신속한 대응과 개선이 가능하다.

### (3) 「탄소중립기본법」의 실효성 강화

감축 정책의 성패는 목표의 명확성, 이행 수단의 구속력, 점검과 피드백의 엄정성에 달려 있다. 현행 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」(이하 「탄소중립기본법」)은 2050 탄소중립 달성과 중장기 감축 목표 제시라는 방향성을 제시하지만, 부문(전력·산업·수송·건물·농축수산)별 연도별·산업별 정량 목표의 법적 구속력과 미달 시 제재·보정 장치가 미흡하다는 지적이 계속되고 있다(함태성, 2022).

「탄소중립기본법」은 2030년 국가 온실가스 감축목표(NDC)를 2018년 대비 40% 감축으로 설정하고, 2050년 탄소중립을 국가 비전으로 제시하였다. 또한 탄소중립위원회 설치, 기후위기 대응 기본계획 수립, 온실가스 감축 및 적응 대책 마련 등을 규정하고 있다. 그러나 부문별 감축 경로와 책임, 목표 미달 시 대응 방안이 구체적이지 않아 실효성에 의문이 제기된다.

독일의 「연방기후보호법(Bundes-Klimaschutzgesetz)」과 같이 부문별 탄소 예산, 연례 점검, 미달 보정 계획의 자동 발동(automaticity)을 도입하여 예측 가능성과 책임성을 높여야 한다. 독일 법은 에너지, 산업, 교통, 건물, 농업, 폐기물 부문별로 연도별 배출 허용량을 명시하고, 실제 배출량이 허용량을 초과하면 해당 부처가 3개월 이내에 즉시 조치 프로그램을 제출하도록 의무화하고 있다.

이러한 자동 발동 메커니즘은 정치적 논란이나 지연 없이 신속한 대응을 가능하게 한다. 한국도 유사한 제도를 도입하여 부문별 감축 목표 미달 시 자동으로 보정 절차가 시작되도록 해야 한다. 이는 기후 목표의 강제성과 예측 가능성을 높여 정책 신뢰도를 증진시킬 것이다.

동시에 중앙과 지방 간 정합성 강화를 위해 지방자치단체 기후 계획과 예산 편성에 감축 성과를 의무적으로 반영하도록 하고, 공공 조달·규제 샌드박스·녹색 금융 연계를 통해 기술 혁신(예: 저탄소 공정·CCUS(탄소 포집·활용·저장)·디지털 최적화)을 촉진하는 조항을 확충해야 한다.

지방자치단체는 국가 목표를 지역 실정에 맞게 구체화하여 이행하는 주체이다. 그러나 현재는 지방 기후 계획이 법적 구속력이 약하고 예산 반영이 불충분하다. 지방자치법을 개정하여 기후 대응을 지방자치단체의 필수 사무로 명시하고, 기후 예산을 일정 비율 이상 확보하도록 의무화해야 한다.

공공 조달에서 저탄소 제품과 서비스에 가점을 부여하면 시장을 선도하는 효과가 있다. 규제 샌드박스는 혁신적이지만 기존 규제에 맞지 않는 기술을 시범적으로 허용하여 기술 개발을 촉진한다. 녹색 금융은 환경 친화적 프로젝트에 유리한 조건으로 자금을 공급하여 민간 투자를 유도한다.

### (4) 기후변화 대응 법률의 삼단 구조

정책 혼선을 최소화하려면 역할과 개념을 분명히 구획한 3단 구조가 필요하다(문태훈 & 김희석, 2022; 최승훈, 2024).

감축 - 「탄소중립기본법」: 온실가스 배출원 제거와 에너지·산업 구조 전환을 관장하는 최상위 실체법. 부문별 목표, 규제·인센티브, 성과 점검·보정의 전 주기를 규정. 한국은 2020년 7월 범정부 차원의 '한국판 그린뉴딜 종합계획'을 발표했으며, 2021년 7월에는 '탄소중립기본법'이 제정되었다. 이 법은 감축의 법적 근거와 추진 체계를 제공한다.

감시·예측 - 「기후변화감시예측법」: 적응 전략의 과학적 근거를 공급하는 법률로, 장기 관측·예측, 위험 평가, 기후 서비스(관광·농업·보건·재난) 전달 체계를 규정. 데이터 표준·품질 관리·접근권, 예측 산출물의 정책 반영 의무, 전문 인력(예: 기후변화과학교육사) 양성·자격·윤리

기준이 포함된다.

「기후변화감시예측법」은 기후변화를 과학적으로 감시하고 미래를 예측하여 정책에 필요한 정보를 제공하는 것을 목적으로 한다. 기존에는 이러한 기능이 「기상법」에 포함되어 있었으나, 기후변화의 중요성이 커지면서 독립된 법률로 분리되었다(현대호, 2024).

이 법은 국가 기후변화 감시·예측 종합계획 수립, 감시·예측 인프라 구축, 기후 정보 서비스 제공, 국제 협력 등을 규정한다. 또한 기후변화 전문 인력 양성을 위한 교육과 자격 제도를 마련하여 인적 역량을 강화한다. 이를 통해 기후 과학이 정책과 긴밀히 연계되도록 한다.

일반기상 - 「기상법」: 일상적인 관측·예보·기상 서비스를 담당하되, 장기 기후변화 기능은 「기후변화감시예측법」에 이관하여 정합. 개념 중복('기후' 정의)의 정비를 통해 해석 혼선 방지 필요.

「기상법」은 단기 기상 현상의 관측과 예보에 집중한다. 일기예보, 특보, 기상 관측 장비 관리, 기상산업 진흥 등이 주요 내용이다. 기후변화 기능을 분리함으로써 「기상법」은 본연의 역할에 더욱 충실할 수 있고, 기후변화 대응은 전문화된 법률로 체계적으로 관리할 수 있다.

세 법률 간 역할 분담을 명확히 하여 중복과 공백을 방지해야 한다. 예를 들어, '기후'의 정의를 통일하여 법률 간 해석 차이를 없애야 한다. 또한 기관 간 협력 체계를 법제화하여 정보 공유와 공동 대응이 원활하게 이루어지도록 해야 한다.

### 3. 결론

#### 1) 연구 결과 요약 및 종합

본 연구는 한반도의 봄꽃 개화 예측 실패가 반복되는 원인을 과학적·법제도적 관점에서 다층적으로 분석하였다. 기존의 해외 기반 단순 기온 모델은 한반도 고유의 복잡한 미기후, 기후변화로 인한 식물의 비선형적 생리 반응(불완전 휴면, ABA-GA 호르몬 불균형), 그리고 극한 기후의 변동성을 반영하는 데 명백한 한계를 노출하고 있다.

과학적 관점에서 개화 생물계절학의 2단계 기제(저온 요구량과 고온 요구량)는 기후변화에 의해 교란되고 있다. 겨울철 온난화는 불완전한 휴면 타파를 유발하며, 이는 봄철 적산온도만으로는 예측할 수 없는 비선형적 개화 반응을 초래한다. 한반도는 전지구적 평균의 2배 이상 빠르게 온난화되고 있는 기후변화 핫스팟으로, 식물 계절의 민감도가 매우 높다.

생물학적 관점에서 개화 시기는 이중 온도 요구량, ABA-GA 호르몬 동역학, ROS 신호, 유전자 네트워크, 광주기, 대기 화학 물질, 토양 환경의 복합적 상호작용에 의해 결정된다. 일본 Somei-Yoshino 품종의 전사체 연구는 30,000개 이상의 유전자 발현 패턴이 개화 타이밍을 조절함을 보여주었다. 한국의 장기 관측 데이터는 기온 상승과 함께 개화가 앞당겨지지만 최근 변동성이 급증하고 있음을 확인하였다. 생물계절 불일치는 수분 생태계 붕괴와 공중 보건 문제를 야기할 수 있다.

화학적 관점에서 식물 내부의 ABA-GA 호르몬 축과 ROS-항산화 시스템이 개화 타이밍의 핵심 조절자이다. 외부 환경에서는 오존·NOx 등 대기 화학 물질이 광합성을 저해하고 꽃 향기 분자를 분해하여 수분 성공률을 저하시킨다. 토양의 질소·염분과 대기 CO<sub>2</sub>의 복합 효과도 개화에 영향을 미친다. 이러한 화학적 변수들은 전통 모델에서 고려되지 않았으나, 현대의 복잡한 환경에서는 필수적인 요소이다.

해외 모형과 국내 모형 비교에서 해외 기반 단순 기온 모델은 평균 기후 조건에서는 유효하나 미세기후 반영 부족, 이상기후 대응 미흡, 지역별 차이 미반영 등의 한계를 지닌다. 국내 맞춤형 모형은 지역별 세분화, 다변수 통합, 실시간 데이터 연동, AI 기반 학습, 지속적 피드백을 통해 이러한 한계를 극복할 수 있다.

법제도적 관점에서는 감측 - 감시·예측 - 일반기상으로 구획된 3단 법체계를 통한 감시→예측→정

책→이행의 선순환 제도화가 필요하다. 「탄소중립기본법」의 실효성 강화, 「기후변화감시예측법」의 근거 기반 정책 지원, 「기상법」과의 역할 분담 명확화가 요구된다. 독일의 사례처럼 부문별 탄소 예산과 자동 보정 메커니즘을 도입하여 책임성과 예측 가능성을 높여야 한다.

## 2) 한국형 고도화 모델 개발 제언

앞서 분석한 내용을 종합하여, 본 연구는 다음과 같은 요소를 통합한 차세대 개화 예측 모델 개발을 제언한다.

첫째, 식물의 생리적 과정을 명시적으로 반영하는 과정 기반 모형(Process-based Model)을 근간으로 해야 한다. 단순히 경험적 관계식에 의존하지 않고, 식물의 생리·생화학적 메커니즘을 모델에 명시적으로 포함한다. 이는 이중 온도 요구량 체계(저온과 고온 요구량의 순차적 충족), ABA-GA 호르몬 동역학(휴면과 생장의 호르몬 조절), ROS 신호(산화환원 신호 전달), 광주기 반응(낮 길이 감지), 대기·토양 화학 변수(오존, 질소, 염분 등), 생물계절 불일치 리스크(수분 매개자와의 시간적 일치성)를 통합적으로 반영한다.

과정 기반 모형은 기후 조건이 변화하더라도 식물의 생리적 반응 원리는 유지되므로, 과거에 경험하지 못한 새로운 기후 조건에서도 합리적인 예측이 가능하다. 또한 특정 생리 과정이나 환경요인의 변화가 최종 개화 시기에 미치는 영향을 추적할 수 있어, 정책 시나리오 분석에도 유용하다.

둘째, 1km 이하의 고해상도 기상 및 지형 데이터를 적용하여 도시열섬, 해풍, 산간지형 등 국지적 미기후 편차를 반영한다. 한반도는 복잡한 지형과 해안선을 가지고 있어 지역 간 기후 차이가 크다. 고해상도 모델은 이러한 미세 규모의 기후 특성을 포착할 수 있다.

현재 기상청의 수치 예보 모델은 점차 해상도를 높이고 있으나, 개화 예측에는 더욱 세밀한 공간 해상도가 필요하다. 특히 도시 지역의 열섬 효과, 해안의 해풍 순환, 산악의 지형풍 등을 정확히 모의하려면 100m~1km 해상도의 미기상 모델이 필요하다. 이는 대규모 기후 모델의 결과를 역학적 또는 통계적 상세화(downscaling) 기법으로 고해상도화함으로써 달성할 수 있다.

셋째, 기온뿐 아니라 일조시간, 강수량, 토양 수분, 대기 화학 지수(MDA8, AOT40, NO<sub>2</sub>), 토양 질소·염분 등 다변수를 복합적으로 고려한다. 각 변수는 독립적으로 작용하지 않고 상호작용하므로, 이들의 복합 효과를 모델에 반영해야 한다.

예를 들어, 오존은 단독으로도 식물에 스트레스를 주지만, 가뭄과 결합하면 그 영향이 증폭된다. 질소 영양 상태에 따라 오존 감수성이 달라진다. 이러한 상호작용을 포착하려면 다변수 통계 모델이나 기계 학습 기법이 유용하다.

또한 변수 간 인과 관계를 파악하여 모델의 해석 가능성을 높여야 한다. 단순히 예측 정확도만 높이는 것이 아니라, 왜 그러한 예측이 나왔는지 설명할 수 있어야 정책 입안자와 일반 대중의 신뢰를 얻을 수 있다.

넷째, 복잡한 비선형적 관계를 학습하고 최적의 보정 계수를 도출하기 위해 기계 학습(AI) 기법을 융합한다. 랜덤 포레스트, 그래디언트 부스팅, 심층 신경망 등의 기법은 전통적인 통계 모델이 포착하기 어려운 복잡한 패턴을 학습할 수 있다.

특히 심층 학습은 시계열 데이터의 장기 의존성을 학습하는 데 강점이 있다. LSTM(Long Short-Term Memory)이나 트랜스포머(Transformer) 같은 구조는 과거의 기후 조건이 현재의 식물 상태에 미치는 영향을 효과적으로 모델링할 수 있다.

그러나 AI 모델의 '블랙박스' 특성은 문제가 될 수 있다. 따라서 설명 가능한 AI(Explainable AI, XAI) 기법을 활용하여 모델의 의사결정 과정을 투명하게 만들어야 한다. SHAP(SHapley Additive exPlanations)나 LIME(Local Interpretable Model-agnostic Explanations) 같은 기법으로 각 변수의 기여도를 정량화할 수 있다.

다섯째, AWS 기상관측망과 산림청 개화 모니터링 시스템을 결합한 실시간 데이터 연동과 동적

예측 체계를 구현하며, 예측값과 실제 개화일을 지속적으로 비교·분석하는 피드백 루프를 마련한다.

실시간 데이터 동화(data assimilation)는 모델 예측과 최신 관측값을 결합하여 현재 상태를 정확히 추정하고 미래 예측을 개선하는 기법이다. 기상 예보에서 널리 사용되는 이 기법을 개화 예측에도 적용할 수 있다.

예를 들어, 개화 전 단계의 꽃눈 발달 상태를 현장에서 관측하거나 위성 영상으로 식생 지수를 모니터링하여, 이를 모델에 실시간으로 반영한다. 모델은 이 정보를 바탕으로 예측을 수정하여 정확도를 높인다.

피드백 루프는 매년 예측과 실제의 차이를 분석하여 모델을 개선한다. 특히 예측 실패 사례를 집중 분석하여 모델의 약점을 파악하고 보완한다. 이는 지속적 학습(continual learning) 체계를 구축하여 모델이 변화하는 환경에 적응하도록 한다.

### 3) 기대 효과 및 정책적 함의

한반도의 기후위기 대응은 "예측의 과학"과 "집행의 법"이 만나는 지점에서 비로소 실효성을 가질 수 있다. 한국형 고도화 모델을 중심으로 한 과학 인프라와 감측-감시-예측-일반기상으로 구축된 3단 범체계를 결합할 때, 감시→예측→정책→이행의 선순환이 작동할 것이다.

이는 축제·관광 산업의 의사결정을 정밀화하여 경제적 손실을 줄인다. 정확한 개화 예측은 축제 일정을 최적화하고 관광객 만족도를 높여 지역 경제를 활성화한다. 2024년 진해군향제 같은 예측 실패로 인한 100만 명 이상의 관광객 감소와 지역 경제 타격을 방지할 수 있다.

농업·임업 분야에서는 과수 개화 예측, 수분 시기 관리, 냉해 위험 평가 등에 활용하여 생산성을 향상시킨다. 정확한 생물계절 예측은 농작업 일정을 최적화하고 기후 리스크를 줄여 농가 소득을 증대시킨다.

보건 분야에서는 꽃가루 확산 예측으로 알레르기 질환자에게 조기 경보를 제공하여 건강 피해를 최소화한다. 천식과 비염 환자는 고농도 꽃가루 시기를 피하거나 사전에 약물을 복용하여 증상을 관리할 수 있다. 이는 의료 비용 절감과 삶의 질 향상으로 이어진다.

재난·환경 거버넌스에서는 생태계 변화 모니터링, 생물다양성 보전 전략 수립, 기후 적응 정책 설계에 활용한다. 생물계절 불일치 같은 생태계 리스크를 조기에 감지하여 대응 전략을 마련할 수 있다.

전체적으로 사회적 비용을 줄이고 정책 효율성을 높이며, 시민이 체감하는 정책 신뢰를 회복하는 경로이다. 과학 기반 정책은 정책의 정당성과 투명성을 높여 사회적 합의를 용이하게 한다.

### 4) 향후 연구 과제 및 로드맵

기후위기는 장기전이며, 예측 실패를 허용하지 않는 체계적 학습과 제도적 자동성이 국가 적응 역량을 좌우한다. 국내 맞춤형 과학 모형의 조기 실전 배치와 법·제도의 확정적 통합 전략은 한반도 기후 리스크의 불확실성을 관리 가능한 위협으로 전환시키는 가장 현실적이고 지속 가능한 해법이 될 것이다.

향후 연구에서는 다음을 진행할 계획이다.

첫째, 전국 권역별 미세기후 보정 계수 산출: 한반도를 기후 특성에 따라 10~20개 권역으로 세분화하고, 각 권역의 도시열섬 강도, 해풍 효과, 지형 영향 등을 정량화한다. 이를 위해 과거 30년 이상의 고해상도 기상 데이터와 개화 관측 데이터를 분석한다. 권역별 보정 계수는 전국 단위 예측 모델의 정확도를 크게 향상시킬 것이다.

둘째, 실시간 대기·토양 화학 변수 통합 플랫폼 구축: 환경부의 대기질 측정망, 농촌진흥청의 토양 조사 데이터, 산림청의 산림 환경 데이터를 통합하는 플랫폼을 구축한다. 오존, 질소산화물, 토양 질소, 염분 등의 데이터를 실시간으로 수집하고 표준화하여 예측 모델에 제공한다. 이는 화학적 변수의 영향을 정량적으로 평가하고 모델에 반영하는 기반이 된다.

셋째, AI 기반 예측 모델 프로토타입 개발 및 검증: 과정 기반 모형과 기계 학습을 결합한 하이브리드 모델을 개발한다. 먼저 소수 지역에서 파일럿 테스트를 수행하여 모델의 성능을 평가하고, 점진적으로 전국으로 확대한다. 모델 검증은 독립적인 데이터셋을 사용하여 과적합을 방지하고, 여러 해에 걸쳐 실제 예측 정확도를 평가한다.

넷째, 지자체 및 관련 기관과의 협력 체계 구축: 기상청, 산림청, 농촌진흥청, 환경부, 지방자치단체, 관광 공사 등 관련 기관들과 협력 네트워크를 구축한다. 정기적인 워크숍과 협의체 운영으로 모델 개발 방향을 조율하고, 예측 정보의 활용 방안을 논의한다. 또한 예측 정보를 대중에게 효과적으로 전달하는 커뮤니케이션 전략을 개발한다.

다섯째, 장기 모니터링과 모델 지속 개선: 개화 예측 모델은 일회성 개발로 끝나는 것이 아니라 지속적인 모니터링과 개선이 필요하다. 매년 예측 성능을 평가하고, 새로운 과학적 지식과 데이터를 반영하여 모델을 업데이트한다. 기후가 변화함에 따라 식물의 반응도 변할 수 있으므로, 모델 파라미터를 주기적으로 재조정한다.

여섯째, 국제 협력 및 지식 공유: 한국의 개화 예측 모델 개발 경험을 국제 사회와 공유하고, 다른 나라의 우수 사례를 학습한다. 특히 일본, 중국과는 동아시아 몬순 기후를 공유하므로 지역 협력이 유용하다. 세계기상기구(WMO), 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC) 등 국제 기구와 협력하여 표준화와 기술 이전을 추진한다.

일곱째, 시민 과학 프로그램 확대: 일반 시민들이 자발적으로 개화 관측에 참여하는 시민 과학 프로그램을 확대한다. 스마트폰 앱을 통해 누구나 쉽게 개화 관측 데이터를 제출할 수 있게 하고, 이를 모델 검증과 개선에 활용한다. 시민 참여는 관측 네트워크를 확장하고, 대중의 기후변화 인식을 높이는 효과도 있다.

여덟째, 교육 및 인력 양성: 기후변화와 생물계절학에 대한 전문 인력을 양성한다. 대학에 관련 교육 과정을 개설하고, 기존 연구자와 실무자를 대상으로 재교육 프로그램을 운영한다. 「기후변화감시예측법」에서 규정한 기후변화과학교육사 같은 자격 제도를 활성화하여 전문성을 인증한다. 이러한 종합적이고 장기적인 접근을 통해, 한국은 기후변화 시대에 적응하는 선도적인 개화 예측 체계를 구축하고, 이를 바탕으로 지속 가능한 사회·경제·환경 발전을 이룰 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- 국내문헌
- 기온 변화에 따른 벚꽃 개화시기의 변화 경향, 2024, 한국농림기상학회지, 26(2), 89-102
- 기상청, 한국 기후위기 평가보고서 2025, 한국환경정책·평가연구원, 1-425
- 문태훈 & 김희석, 2022, 기후위기 대응 환경정책과 환경거버넌스 정합성 제고를 위한 발전방향, 한국행정연구, 31(3), 112-138
- 벚나무류 개화시기 변화에 관한 연구, 2013, 한국농림기상학회지, 15(4), 245-258
- 벚꽃 개화일의 시공간 변이, 2006, 한국농림기상학회지, 8(3), 178-189
- 산림청, 2024, 기후변화가 산림 생태계 기능에 미치는 영향 평가, 산림청 연구보고서, 1-238
- 생태계 장기모니터링 지역의 기후변화 영향, 국립생태원 연구보고서, 1-189
- 양산산 & 남현동, 2024, 기후 변화와 글로벌 위기 대응을 위한 정부의 미래 전략 모색: WEF 보고서를 통한 혁신과 협력의 방향성 탐색, 한국행정논집, 36(2), 87-115
- 정재은, 권은영, 정용룡, & 윤진일, 2005, 생물계절모형을 이용한 벚꽃 개화일 예측, 한국농림기상학회지, 7(2), 91-99
- 정종엽, 진대용, 조윤량, 한국진, & 김도연, 2021, Data Science 기반 기후변화 대응 지원 플랫폼 구축을 위한 전략 마련 연구 (II), 기후환경정책연구, 연구보고 2021-12, 1-245
- 조진우, 2024, 지역단위 기후변화 대응에 대한 그린인프라의 기여수준 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문, 1-178
- 최승훈, 2024, 기후변화영향평가의 법제 개선방안-기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법'등 관계 법령의 검토를 중심으로, 저스티스, 199, 45-89
- 함태성, 2022, 우리나라 탄소중립 법정정책의 몇 가지 쟁점과 과제에 대한 고찰-EU의 탄소중립법제와의 비교를 통하여, 공법학연구, 23(3), 215-248
- 현대호, 2024, [기후변화감시예측법] 등의 제정·개정과 시사점, 극지와 세계, 33(1), 12-28

- 국외문헌
- Agathokleous, E., 2022, An improved ozone exposure index based on AOT40, *Forestry Research*, 2, article 15, <http://dx.doi.org/10.48130/FR-2022-0015>
- Agathokleous, E., Saitanis, C. J., Savvides, C., Sicard, P., Agathokleous, I., De Marco, A., & Paoletti, E., 2020, Ozone affects plant, insect and soil microbial communities: A threat to terrestrial ecosystems and biodiversity, *Science Advances*, 6(33), eabc1176, <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.abc1176>
- Atta, K., Mondal, S., Gorai, S., Singh, A. P., Kumari, A., Ghosh, T., Roy, A., Hembram, S., Gaikwad, D. J., Mondal, S., & Hossain, A., 2023, Impacts of salinity stress on crop plants: improving salt tolerance through genetic and molecular dissection, *Frontiers in Plant Science*, 14, 1241736, <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2023.1241736>
- Barba-Espín, G., Baboota, R. K., Medina-Puche, L., Ravšelj, D., Škalič-Gruden, M., Aznar-Moreno, J. A., Hernández, J. A., & Krause-Sakate, R., 2022, Antioxidant system: The hub of bud dormancy regulation in plants, *Scientia Horticulturae*, 306, 111449, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111449>
- Bartomeus, I., Ascher, J. S., Wagner, D., Danforth, B. N., Colla, S., Kornbluth, S., & Winfree, R., 2011, Climate-associated phenological advances in bee pollinators and bee-pollinated plants, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(51), 20645-20649, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1115559108>
- Both, C., Bouwhuis, S., Lessells, C. M., & Visser, M. E., 2006, Climate change and population declines in a long-distance migratory bird, *Nature*, 441, 81-83, <http://dx.doi.org/10.1038/nature04539>
- Bouzroud, S., Gasparini, K., Hu, G., Barbosa, M. A. M., Rosa, B. L., Fahr, M., Bendaou, N., Bouzayen, M., Zsögön, A., Smouni, A., & Zouine, M., 2023, Salt stress responses and alleviation strategies in legumes: A critical review, *AoB Plants*, 15(4), plad024, <http://dx.doi.org/10.1093/aobpla/plad024>
- Cherry Blossom Forecast Based on Transcriptome of Floral Organs, 2022, *Frontiers in Plant Science*, 13, 825-845
- Chmielewski, F. M., & Rötzer, T., 2001, Response of tree phenology to climate change across Europe, *Agricultural and Forest Meteorology*, 108(2), 101-112, [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00233-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00233-7)
- Effects of ozone air pollution on crop pollinators and pollination, 2022, *Science of the Total Environment*, 832, 154981, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154981>
- Forrest, J. R., & Thomson, J. D., 2011, An examination of synchrony between insect emergence and flowering in Rocky Mountain meadows, *Ecological Monographs*, 81(3), 469-491, <http://dx.doi.org/10.1890/10-1885.1>
- Hoshika, Y., Carrari, E., Mariotti, B., Martini, S., De Marco, A., Sicard, P., & Paoletti, E., 2015, Ozone-induced impairment of night-time stomatal closure in O<sub>3</sub>-sensitive poplar clone is affected by nitrogen but not by phosphorus enrichment, *Science of the Total Environment*, 692, 713-722, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.288>
- Hur, J., Ahn, J.-B., & Shim, K.-M., 2014, The change of cherry first flowering date over South Korea projected from downscaled IPCC AR5 simulation, *International Journal of Climatology*, 34(7), 2308 - 2319, <http://dx.doi.org/10.1002/JOC.3839>
- Kim, A. R., Seol, J., Lim, B. S., Lim, C. H., Kim, G. S., & Lee, C. S., 2024, Response of plant phenology on microclimate change depending on land use intensity in Seoul, central Korea, *Forests*, 15(4), 718, <http://dx.doi.org/10.3390/f15040718>
- 김진희, 천경화, & 윤진일, 2013, Outlook on Blooming Dates of Spring Flowers in the Korean Peninsula under the RCP8.5 Projected Climate, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 15(1), 50 - 58, <http://dx.doi.org/10.5532/KJAFM.2013.15.1.050>
- Komoto, H., et al., 2023, The transcriptional changes underlying the flowering phenology shift of *Arabidopsis halleri* in response to climate warming, *Plant, Cell and Environment*, 46(11), 3425-3440, <http://dx.doi.org/10.1111/pce.14716>
- Luedeling, E., Guo, L., Dai, J., Leslie, C., & Blanke, M. M., 2013, Partial Least Squares Regression for analyzing walnut phenology in California, *Agricultural and Forest Meteorology*, 178-179, 15-23, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.06.019>
- Mohan, J. E., Cowden, C. C., Baas, P., Dawadi, A., Frankson, P. T., Helmick, K., Hughes, E., Khan, S., Machmuller, M. B., Taylor, M., Todd-Brown, K., Wallenstein, M. D., & Witt, C. A., 2014, Mycorrhizal fungi mediation of terrestrial ecosystem responses to global change: mini-review, *Fungal Ecology*, 10, 3-19, <http://dx.doi.org/10.1016/j.funeco.2014.01.005>
- Phenological Response in the Trophic Levels to Climate Change, 2021, *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 578362, <http://dx.doi.org/10.3389/fevo.2021.578362>
- Quantifying the importance of day length in process-based models for the prediction of temperate spring flowering phenology, 2022, *Science of the Total Environment*, 823, 153877, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153877>
- Revising the role of ABA as regulator of flowering and seed development, 2025, *Plant Science*, 340, 112147, <http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2024.112147>
- Shifting spring ephemeral pollination windows under climate change, 2025, *New Phytologist*, 245(2), 487-501, <http://dx.doi.org/10.1111/nph.70373>

- Variable warming effects on flowering phenology of cherry species across East Asia, 2023, *Agricultural and Forest Meteorology*, 338, 109526, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109526>
- Wang, X., et al., 2025, Shifts in plant reproductive phenology induced by multiple global change factors depend on phenological niche and pollination mode, *Journal of Plant Ecology*, 18(3), rtaf048, <http://dx.doi.org/10.1093/jpe/rtaf048>
- Zhang, J., et al., 2025, Climate warming reshapes seasonal flowering but stabilizes species interactions in a Tibetan alpine grassland, *New Phytologist*, 248(1), 123–138, <http://dx.doi.org/10.1111/nph.70537>
- 공식 보고서
- Impact of Climate Change on Cherry Blossom Flowering Phenology, 2025, JIRCAS Research Highlights, 1–45
- Japan Meteorological Agency, 2023, Japan Phenological Network: Annual Report 2022, JMA Climate Change Monitoring Report, 1–156
- 신문기사
- "Cherry blossoms to bloom later than expected amid cold snap", *The Korea Herald*, 2024년 3월 25일
- "Climate change dampens Korea's iconic cherry blossom festivals", *The Korea Times*, 2024년 3월 24일
- "균형이나 벚꽃이나... '유례화 저울질' 진해군향제 과제는", *이도민넷*, 2025년 10월 13일
- 인터넷 자료
- "AOT40(식생보호) 정의 및 임계수준(UNECE/LRTAP)", <https://unece.org>, (2025년 10월 25일)
- "Exposure of Europe's ecosystems to ozone – AOT40 운용지표(EEA)", <https://www.eea.europa.eu>, (2025년 10월 25일)
- "개화 타이밍 유전자 - 단백질 상호작용", *매일경제*, <https://www.mk.co.kr/news/it/11287517>, (2025년 10월 25일)