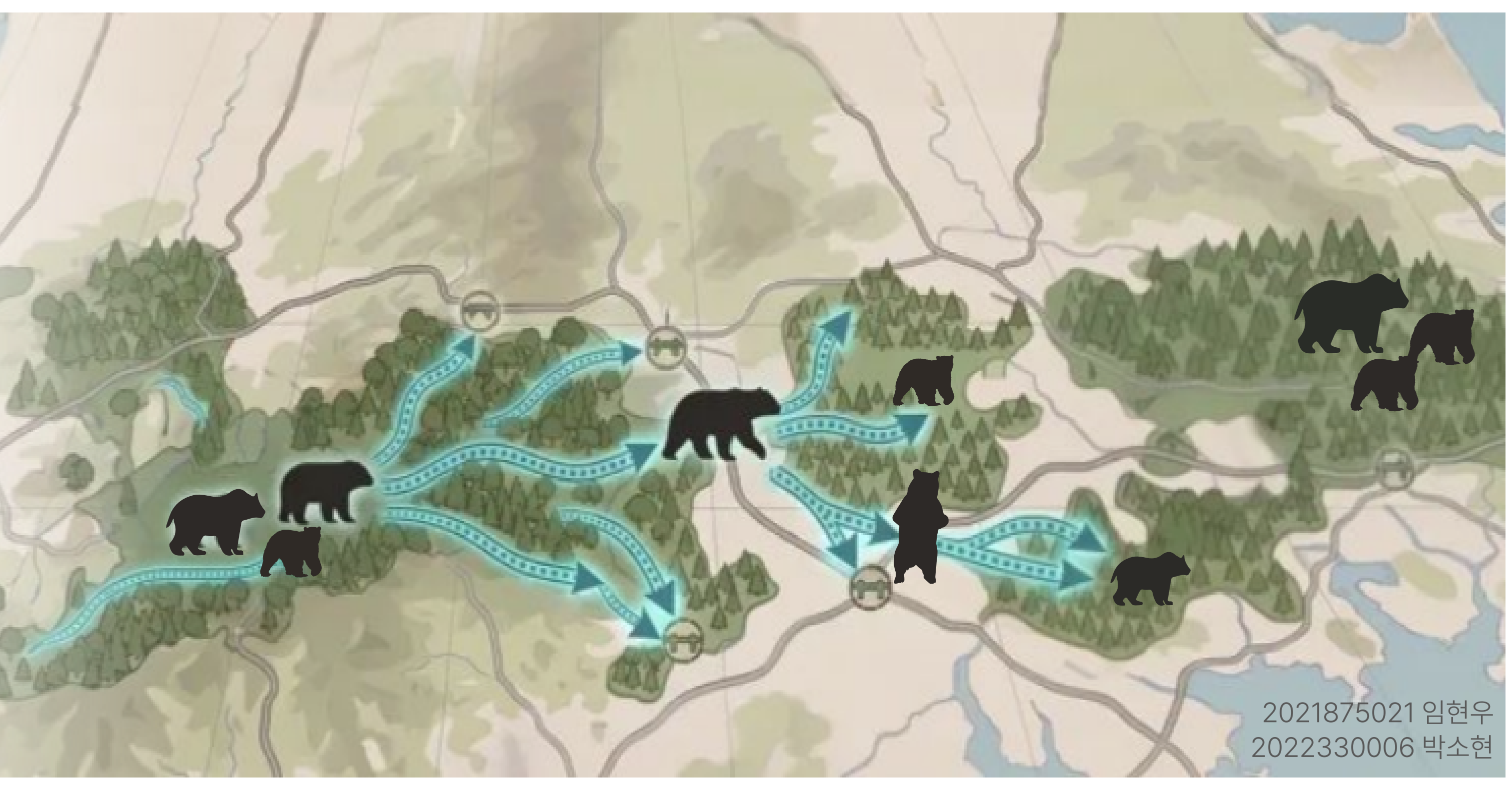
지리산 반달가슴곰의 서식지 확장을 위한 유도된 확산 경로 도출 및 생태통로 입지 분석

Delineating Induced Dispersal Routes and Analyzing Ecological Corridor Locations for the Habitat Expansion of Asiatic Black Bears in Mount Jiri

지리산 반달가슴곰 복원 사업이 성과를 거두며 개체수가 수용 가능 개체수를 초과함에 따라, 서식지 포화로 인한 무작위 확산 문제가 대두되고 있다.
이러한 무작위적 확산은 농가 피해와 인간과의 갈등 등 복원 사업의 사회적 수용성을 저해한다. 이에 본 연구는 기존의 무작위적 이동이 아닌,
생태적 연결성을 고려한 '유도된 확산' 경로를 도출하고 이동을 위한 생태통로 입지를 제안한다.
나아가 생태통로 가이드라인을 제시하여 안정적인 관리 전략을 마련하고자 한다.

With the success of the Asiatic black bear restoration project in Mount Jiri, the population has exceeded the regional carrying capacity, leading to the emergence of random dispersal caused by habitat saturation. Such indiscriminate dispersal undermines the social acceptance of the restoration project by causing agricultural damage and escalating human-wildlife conflicts. To address this issue, this study delineates "guided dispersal" routes that account for ecological connectivity rather than conventional random movements, and proposes optimal locations for eco-corridors. Furthermore, it aims to establish a foundation for stable habitat expansion by presenting specific eco-corridor guidelines.

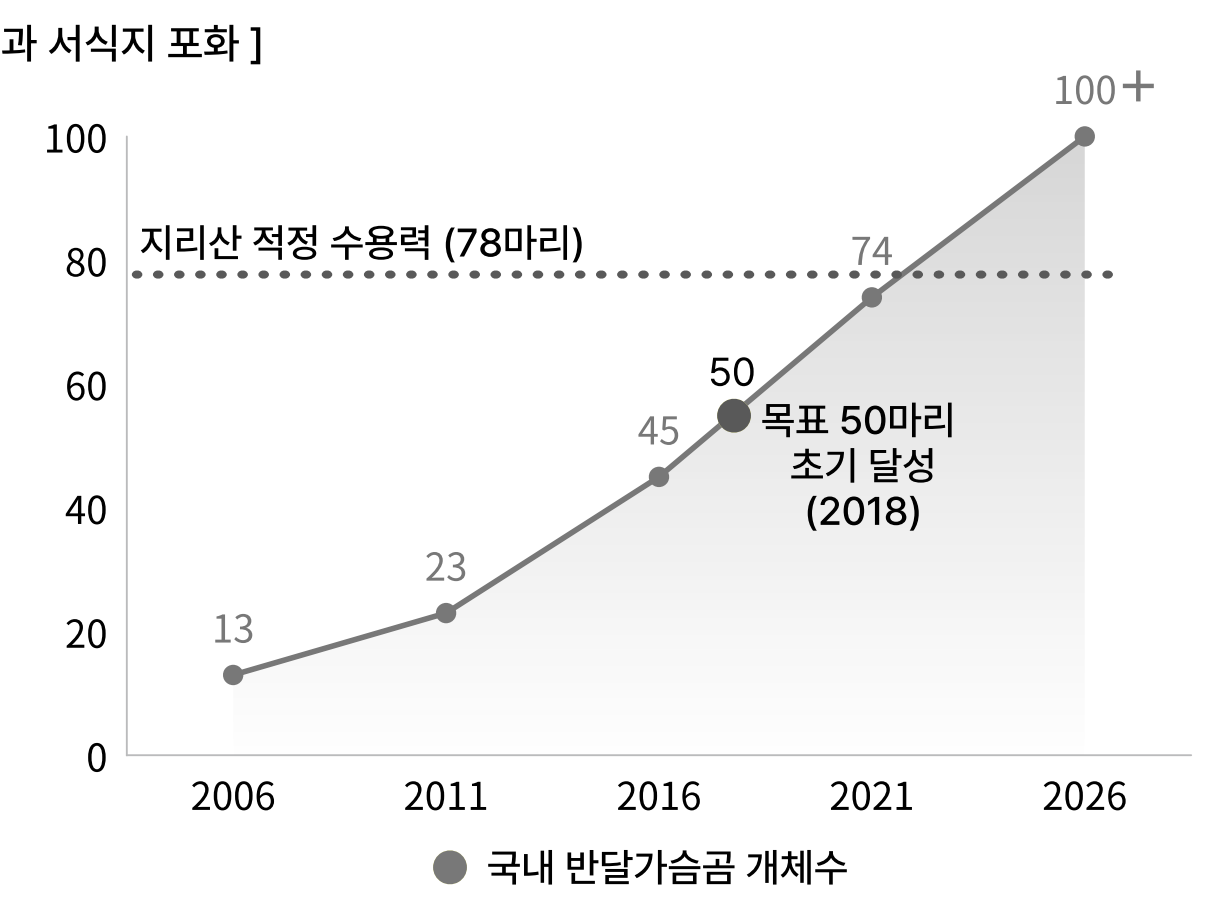


2021875021 임현우
2022330006 박소현

INTRO

[반달가슴곰 복원 사업의 성공과 서식지 포화]

복원 사업의 성과
서식지 수용 한계 도달
종내경쟁 발생
관리 한계



반달가슴곰 복원 사업은 성공적인 멸종위기종 복원 사례로 평가받고 있으나, 현재 지리산 내 반달가슴곰은 100마리 이상으로 추정되어 환경부가 제시한 적정 수용량인 78마리를 이미 넘어섰다. 곰은 먹이가 부족해지는 시기에 서열 체계를 형성하는데, 성체 수컷에게 밀린 하위 개체들이 서식지 외곽으로 밀려나는 종내경쟁 심화 현상이 나타나고 있으며, 야생에서 출생한 개체들은 GPS 단말기 부착이 어려워 전체 개체의 60% 이상이 위치 파악조차 되지 않고 있다. 결과적으로 서식지를 이탈한 개체들의 활동 범위를 예측하기 어려워, 인간-곰 갈등 예방 및 관리에 사각지대가 발생하고 있다.

[지리산 반달가슴곰의 무작위 확산]

" 반달가슴곰이 등산로에… 네가 왜 거기서 나와 "
지리산 · 덕유산 89마리 겨울잠 깨 짝짓기 위해 곳곳 출몰해 주의보
2024.05.31 조선일보

" 반달가슴곰, 상주 거쳐 충북 보은까지 이동 "
2022.06.09 환경부

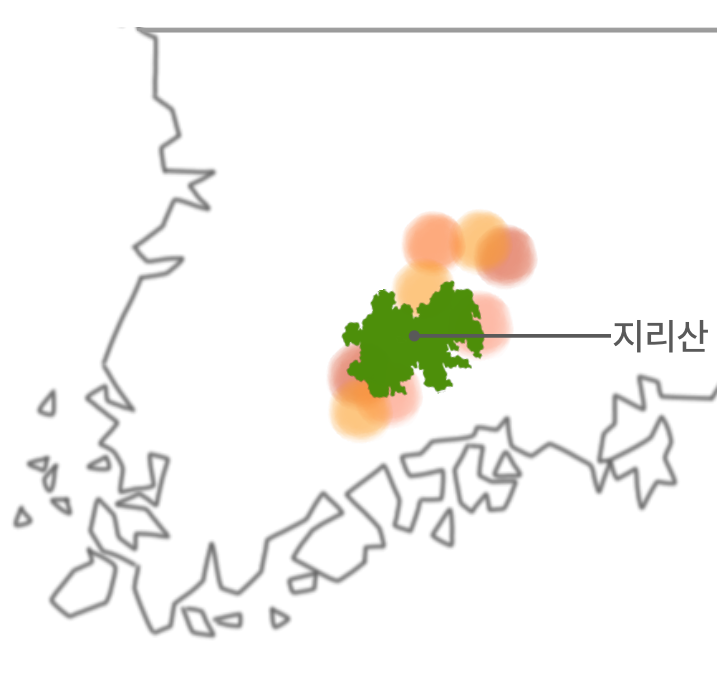
" 덕유산국립공원에서 미확인 반달가슴곰 포획…백두대간 신풍령 발신기 미부착 1마리 "
2020.08.06 국회종합뉴스

" 지리산서 3번 '탈출'한 반달가슴곰, 이번엔 금오산에 나타나 "
2019.06.09 중앙일보

" 반달가슴곰 KM-53, 수도산 및 가야산 일대 서식지 탐색중 "
2018.09.04 환경부

반달가슴곰이 기존 지리산 서식지를 벗어나, 인간의 관리망을 벗어난 예측 불가능한 경로로 내륙 곳곳에 확산되고 있다. 이에 환경부(2018.5.3)는 반달가슴곰의 개체 수가 증가하고 서식 지역 확대가 예상됨에 따라 개체 중심의 복원 사업을 '서식지 관리'로 전환함을 밝혔다.

[지리산 인근 피해 사례]



구분	함양	구례	하동	산청	광양	김천	무주	영동	성주	합천	거창	합계
피해	1	2	1	2	2	8	1	8	10	2	4	41

(단위: 건/2021 멸종위기야생생물증식복원사업 연간보고서)

반달가슴곰이 인간 활동 영역과 빈번하게 접촉하면서 인간과의 갈등이 지속적으로 발생하고 있다. 특히 이들의 이동이 무작위적 양상을 띠고 있어, 향후 갈등이 발생할 관리 지역을 선제적으로 특정하기 어렵다.

[일본 불곰 사례]

개체수 증가
2012년 약 15,000마리로 추정되던 개체 수는 2025년 기준 약 54,000마리까지 급증함

인구감소와 사토야마 방치
인간 거주지와 숲 사이의 완충지대 역할을 하던 '사토야마(경작지 및 관리된 숲)'가 농촌 인구 감소로 방치되면서 곰의 서식지가 마을 근처까지 확장됨

어반 베어
도시 환경을 서식지의 일부로 인식하고 적응한 곰을 일컫는 'アーバン・ベア(Urban Bear)' 용어는 전문가들 사이에서 공식적으로 사용되고 있음

인명 및 농작물 피해
2025년 8개월간 곰 습격 사상자는 230명(사망 13명)으로 역대 최고치를 경신하였으며 홋카이도의 특정 농가는 곰에 의한 손실로 파산하기도 함

정부 대응 예산
2025년 곰 피해가 역대 최악으로 치솟자, 긴급 예산으로 약 323억원을 편성함

출처 : 홋카이도 사리초/시사통신 포토

출처 : 札幌市ヒグマ出没情報

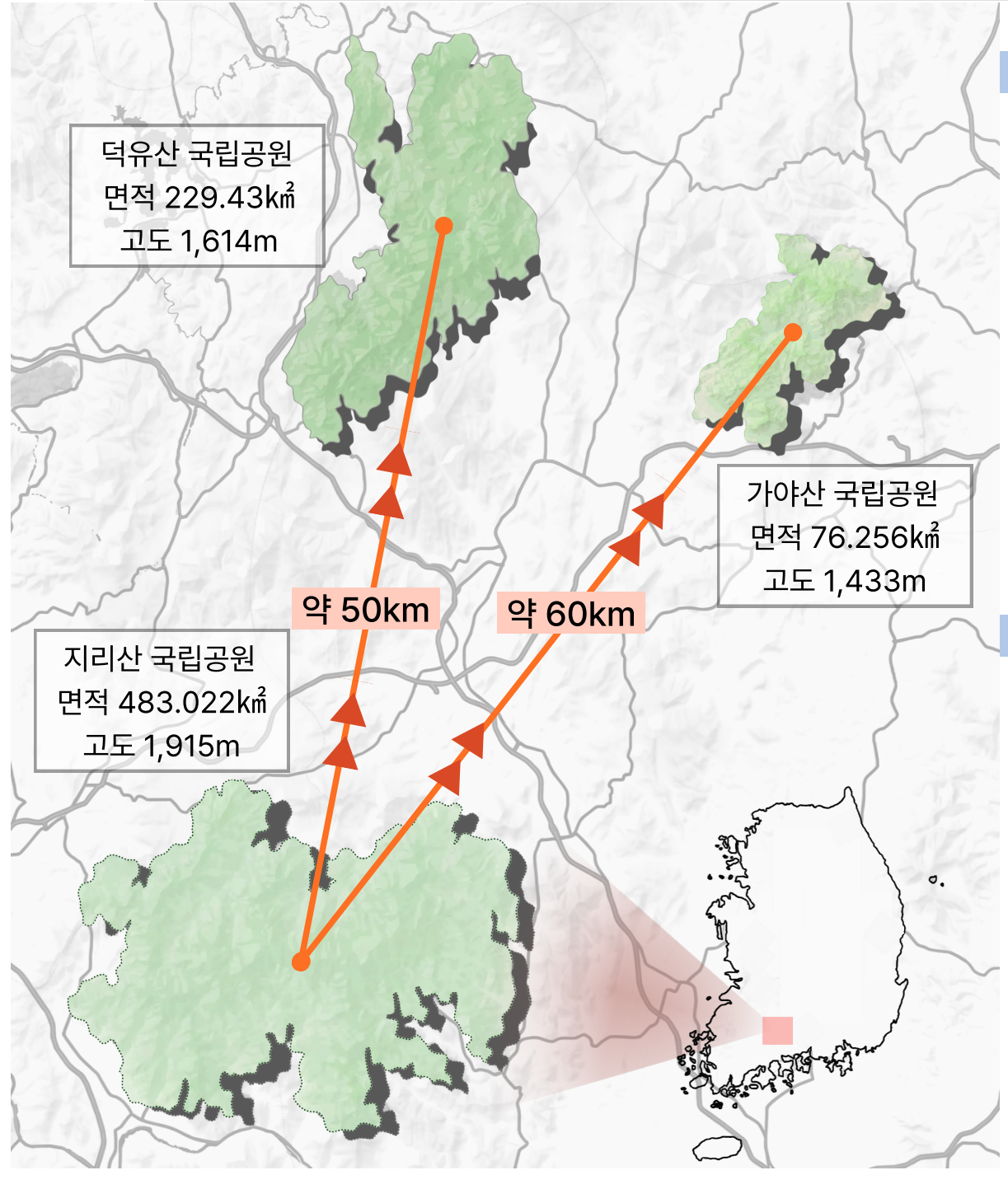
- 지속적인 피해와 막대한 예산이 투입되는 일본의 상황은 '확산 관리'에 주목해야 함을 시사함
- 반달가슴곰의 '성공적인 복원'을 넘어, '확산 관리 체계'로의 패러다임 전환이 필요함

PROCESS

[STEP 1] ………………… [STEP 2] ………………… [STEP 3] ………………… [STEP 4] ………………… [STEP 5]

[STEP 1]	[STEP 2]	[STEP 3]	[STEP 4]	[STEP 5]
대상지 선정	데이터 분석	서식지 확산 경로 도출	경로 내 생태통로 입지 분석	생태통로 조성 가이드라인 제시
국가 정책적 방향성 및 실질적 이동 사례에 기반한 대상지 검토	반달가슴곰의 출현 지점 및 환경 변수 간 상관 관계 분석	이동 저항 구간 산출을 통한 이동 경로 분석	도출된 반달가슴곰 선호 이동 경로와 도로망의 중첩 분석을 통한 생태통로 입지 선정	생태통로 활성화를 위한 구조적·식생적 조성 방안 제안

STEP 1 대상지 선정 : 지리산 - 덕유산 - 가야산 클러스터


덕유산 국립공원
면적 229.43㎢
고도 1,614m
가야산 국립공원
면적 76.256㎢
고도 1,433m
지리산 국립공원
면적 483.022㎢
고도 1,915m
약 50km
약 60km

국가 정책 연계형 확산 경로로 실현 가능성 확보

- 환경부(2018.5.3)에 따르면 반달가슴곰의 개체 수가 증가하고 서식 지역 확대가 예상됨에 따라 개체 중심의 복원 사업을 '서식지 관리'로 정책 전환을 실시한다고 밝힘
- 제 2차 반달가슴곰복원로드맵('21~'30)에 따르면, 반달가슴곰 복원에 있어 백두대간을 연결한 서식지 확장을 목표로 하고 있음

세부 내용 (제2차 반달가슴곰복원로드맵('21~'30))

- 현재 개체군이 확대되고 있는 경향으로 추정할 수 있으며 개체군 확산을 통해 백두대간 내 신규 개체군 조성 필요
- 국내 반달가슴곰의 근친 교배, 질병 등과 같은 개체군 위협에 대응하고 개체군 안정화 및 유전자 다양성 증진을 위한 백두대간 생태축 복원 및 서식지 확대 필요

실질적 이동 가능성

- 실제 개체들이 지리산에서 덕유산과 가야산으로 이동한 사례는 이 구간이 이론적인 통로가 아니라 실제 서식지로써 적합하다는 것을 보여줌(환경부 2019.12)

세부 내용 (대한민국 정책브리핑 보도자료)

" 반달가슴곰 KM-53, 수도산 및 가야산 일대 서식지 탐색중 "
2018.09.04 환경부

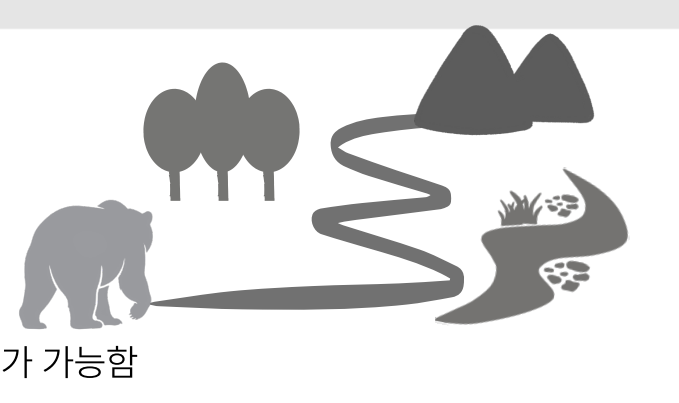
" 덕유산 일대에도 반달가슴곰이 산다 "
2019.12.05 환경부

" 덕유산국립공원에서 미확인 반달가슴곰 포획 "
2020.08.04 환경부

STEP 2 데이터 구축

STEP 2-1 반달가슴곰 선호 환경 데이터 수집

반달가슴곰이 본능적으로 머물고 싶어 하는 선호 환경을 파악할 수 있어야 생태통로로 유도할 수 있다.



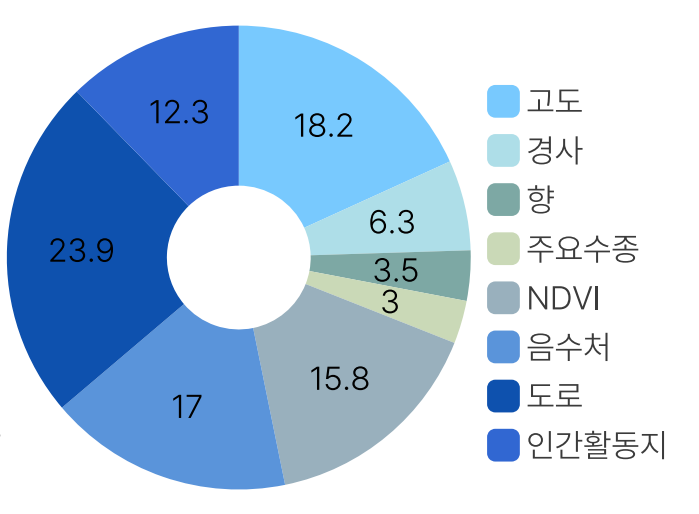
- 지리산에서 덕유산, 가야산 사이에는 약 50~60km의 거리가 존재하며, 반달가슴곰은 일평균 5km 이동함
- 반달가슴곰은 한 번에 목적지까지 직진하는 것이 아니기에 이동 경로 중, 먹이를 구하거나 휴식을 취할 수 있어야 안정적인 유도가 가능함

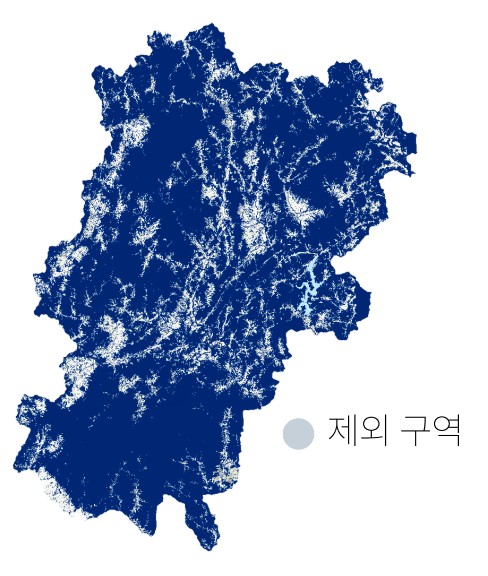
사용 데이터	선호 조건	사용 데이터	선호 조건	사용 데이터	선호 조건	사용 데이터	선호 조건
경사	23~42°	도로와의 이격거리	400~1165m 이상	NDVI	울창한 산림 선호	음수처와의 거리	0~750m
사면	50~180°	주거지, 농경지 등 인공시설과의 이격거리	300m 이상	수종	참나무류	고도	600~1400m

STEP 2-2 반달가슴곰 이동 선호 지도 구축

두 가지 시나리오 지도 설정 → KM-53(곰) 이동 데이터 및 반달가슴곰 선호 환경 데이터 세팅 → 각 데이터는 반달가슴곰의 선호도에 따라 가중치 차등 적용 → 인간 활동지와 같이 이용할 수 없는 구간 지도에서 삭제

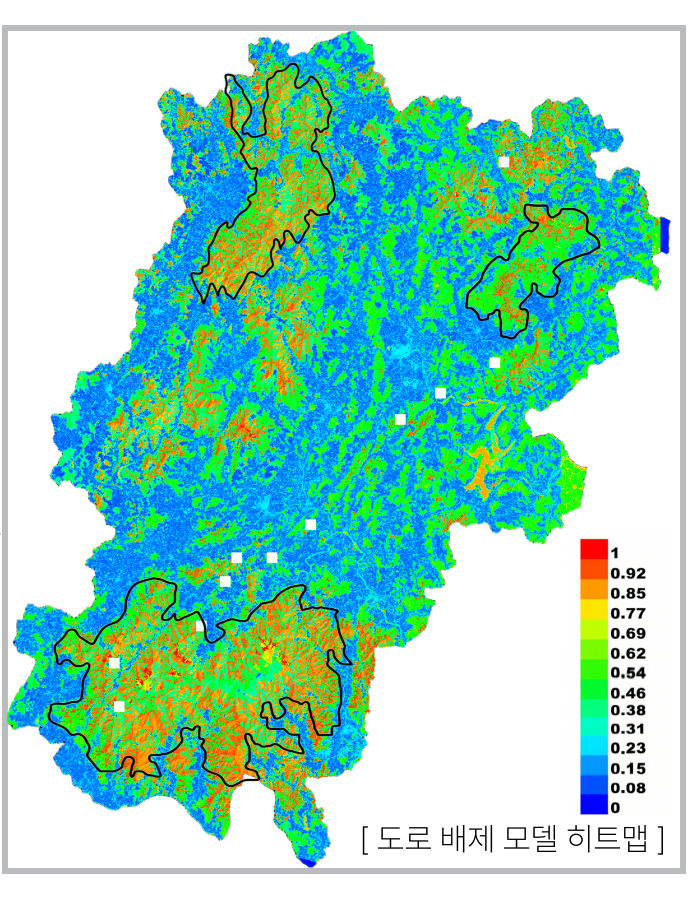
- 시나리오 설정
- [시나리오 A] 도로 배제 모델 :
  반달가슴곰의 환경적 선호도를 기저 데이터로 세팅 후, 도로로 인한 저항 효과 배제
- [시나리오 B] 도로 저항 반영 모델 :
  환경적 선호 데이터 세팅을 바탕으로 지상 도로부터의 거리에 따른 가중 저항값(근접할수록 저항값 증가)을 부여하여, 현실적인 도로의 물리적 저항을 반영한 모델
- 도로 데이터의 독립 변수 설정 이유 :
  완전히 고착화되어 극복이 불가능한 도심·농경지 등의 면적형 공간과 달리, 생태통로 도입을 통해 물리적 단절을 극복하고 생태적 연결성을 회복할 수 있는 선형 변수임





→ MaxEnt를 사용하여 두 시나리오에 대한 히트맵 도출

- 목적: MaxEnt 모델 기반의 잠재적 공간 이용 가능성 분석을 통한 연구 지역 내 반달가슴곰의 이동 선호 지도 도출
- 이동 선호지역 식별:
  본 지도는 도로 변수가 제외된 모델링 결과로, 생태통로로 극복할 수 있는 도로가 배제된 상태에서 환경적 요인으로 결정된 '잠재적 이동가능지역'을 보여줌
- 도로 기준으로 연구를 진행하는 이유:
  도로가 없을 때의 반달가슴곰의 잠재적 이동경로를 도출하고, 잠재적 이동경로를 실제 도로망과 중첩하여 생태통로의 입지를 도출하는 방식 채택


1
0.92
0.85
0.77
0.69
0.62
0.54
0.46
0.38
0.31
0.23
0.15
0.08
0

[도로 배제 모델 히트맵]

[변수 기여 분석]

Variable	Percent contribution	Permutation importance
forest	54	59.1
landuse	40.6	25
ndvi	5.5	15.9
slope	0	0
river	0	0
dem	0	0

주요 수종 · 토지피복 · NDVI가 중요 변수로 작용함

[모델성능평가지표 AUC : **0.726**]

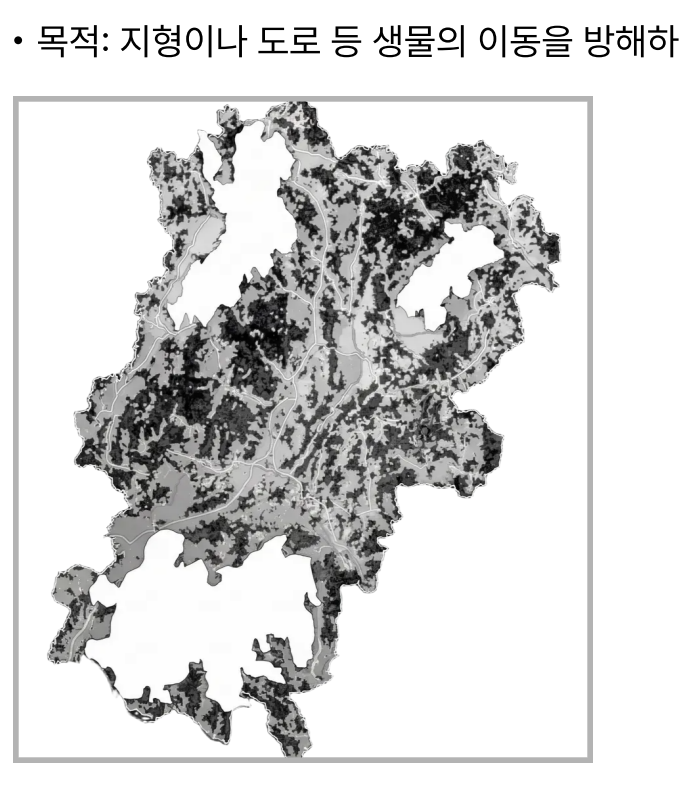
- ~0.5: 무작위 예측과 동일
- 0.7~0.8: 보통 또는 준수한 예측력
- 0.8~0.9: 우수한 예측력
- 0.9~1.0: 매우 우수한 예측력

STEP 2-3 이동저항지도 · 이동비용지도 구축

Step 2-2의 MaxEnt 히트맵의 픽셀별 격자 값을 바탕으로, 이동저항지도 구축

[이동저항지도(Resistance Raster)]

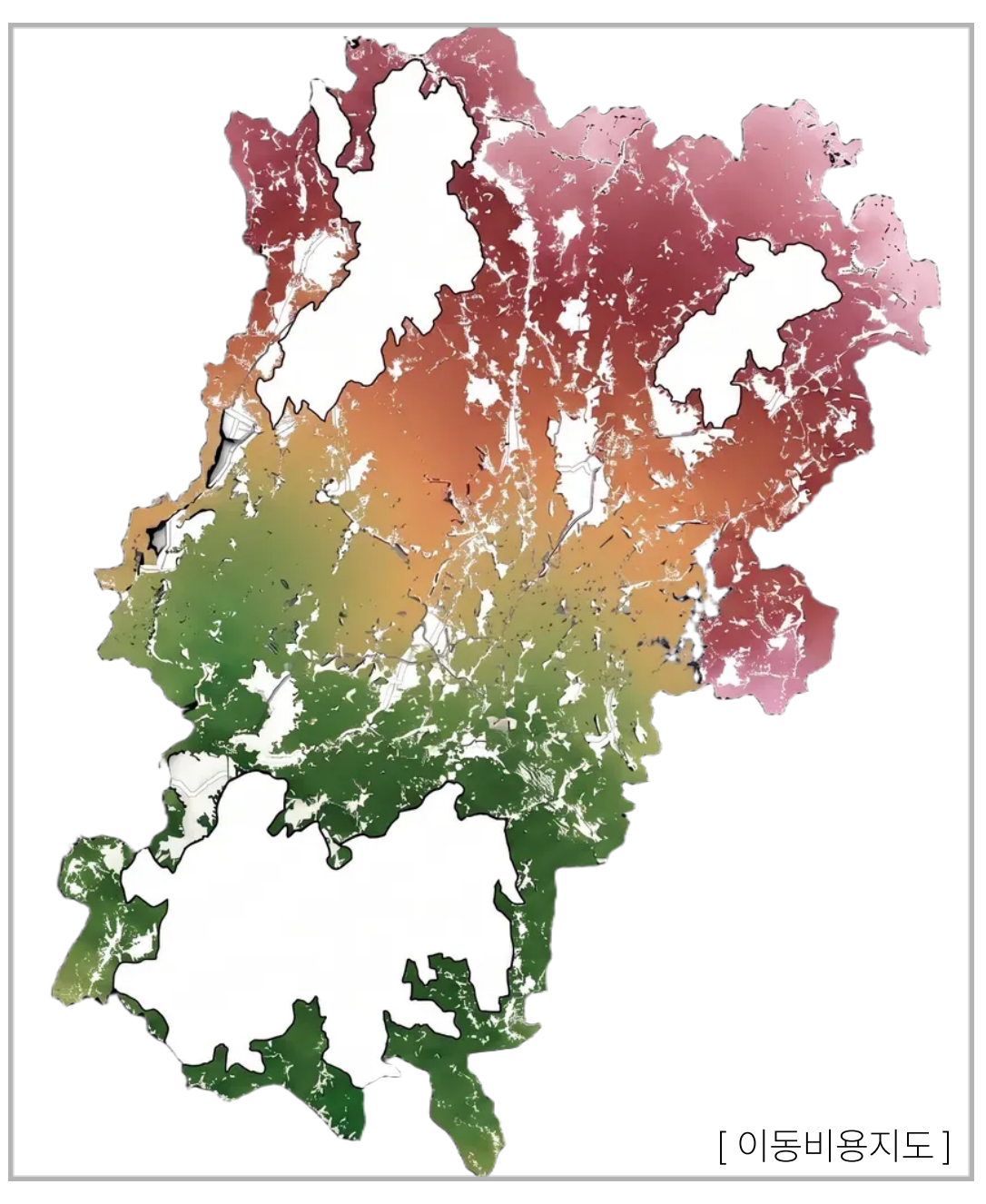
- 목적: 지형이나 도로 등 생물의 이동을 방해하는 요소 수치화



반달가슴곰의 포획지점, 동면지점 좌표를 이동 시작지점으로 지정
↓
DEM을 적용한 이동저항지도 적용
↓
환경 조건 · 이동거리에 따른 이동 비용 지도 도출

[이동비용지도(Accumulated Cost-Distance Surface)]

- 목적: 이동저항지도의 저항을 반영해 특정 목적지까지 도달하는 데 소요되는 누적된 물리적 노력 계산
- 출발지로부터 각 지점에 도달하기까지의 누적된 생태적 저항과 에너지 소모량을 공간적으로 정량화함으로써, 서식지 간의 기능적 연결성을 평가하고 최단이동경로(Least-Cost Path) 도출을 위한 통계적 기반 마련

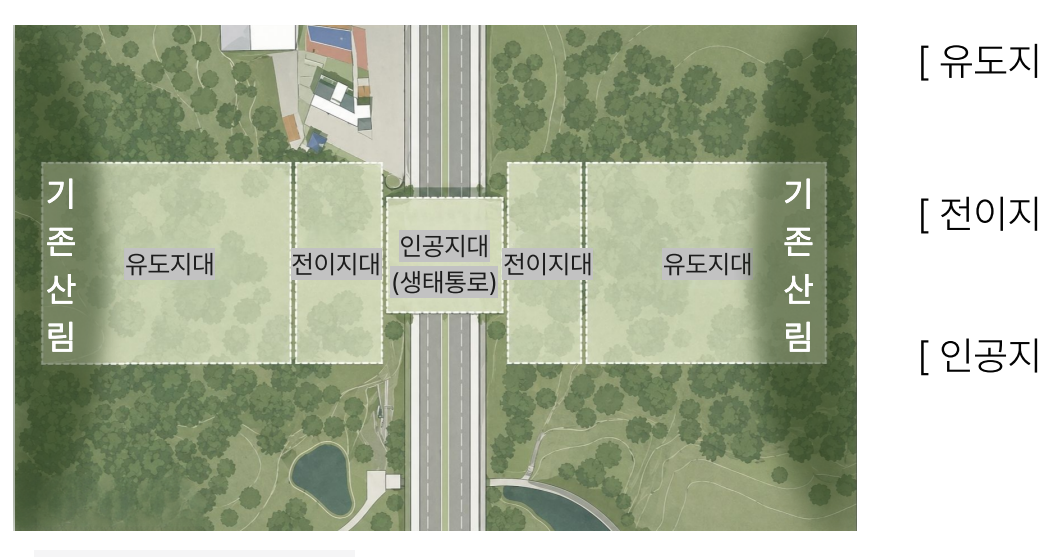


[이동비용지도]

STEP 5 생태통로 조성 가이드라인 제시

- 국내 생태통로는 대상지 생태계와 '목표 종'에 대한 세밀한 고려 없이 형식적으로만 조성되어 왔음
  그 결과 야생동물의 이용률이 극도로 저조하여, 실제 기능은 수행하지 못하고 사실상 방치된 형식적 시설물에 그치고 있음

STEP 5-1 생태통로 식재 가이드라인


기존 산림
유도지대
전이지대
인공지대
(생태통로)
전이지대
유도지대
기존 산림

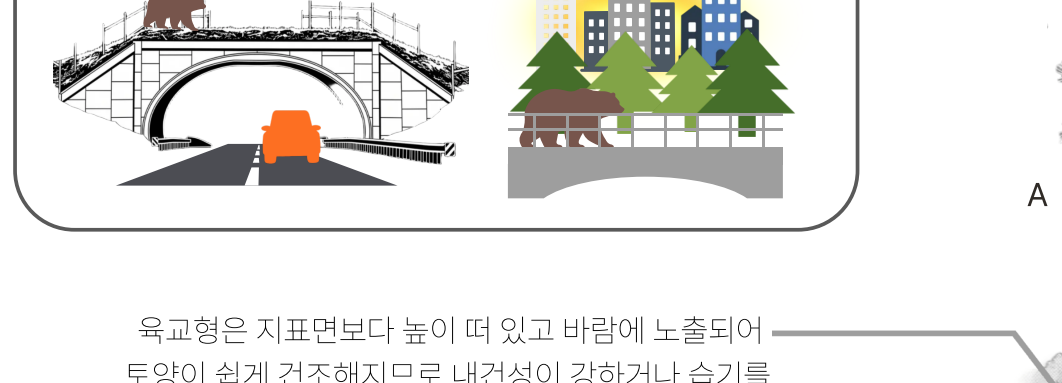
[유도지대] 기존 산림지대와의 식생 연결성을 강화하기 위해 교목층과 아교목층의 보강을 통한 수관층 형성
참나무류(먹이원)를 배치하여 기존 산림으로부터 생태통로로 유도

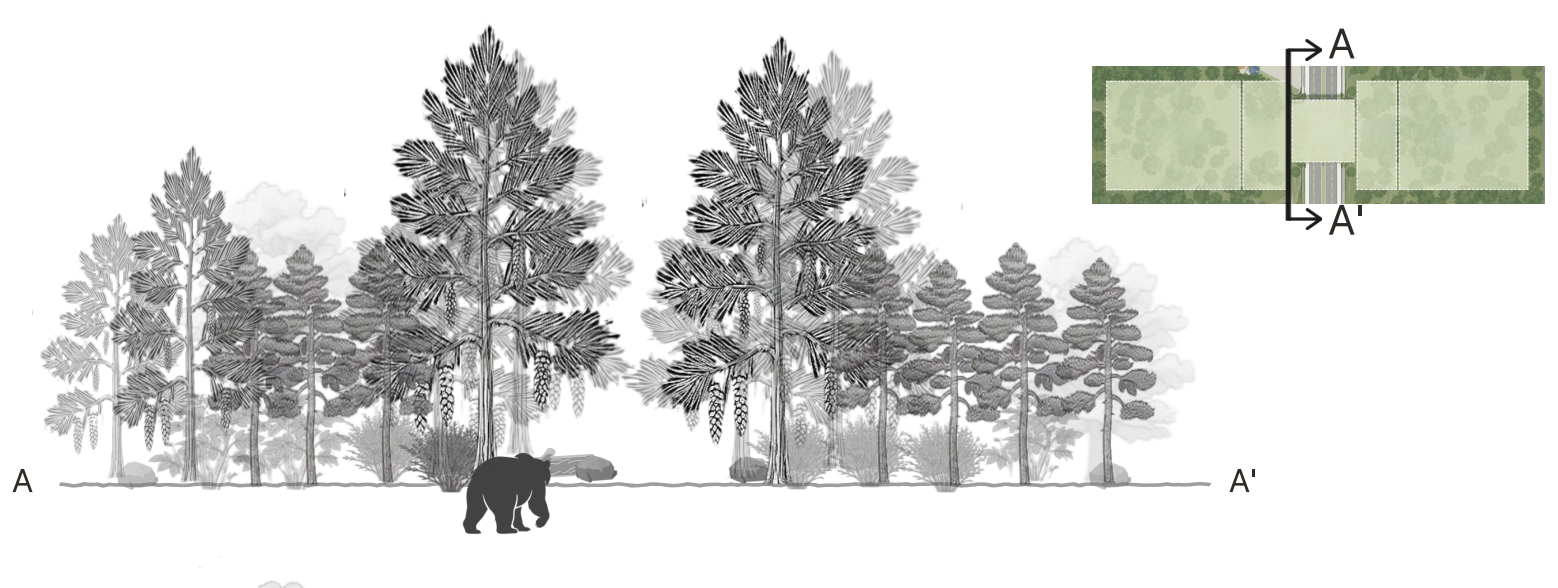
[전이지대] 곰이 이동 중에 군락 내부에 몸을 숨긴 채 전방(생태통로 내부)의 안전 여부를 확인할 수 있는 시야 · 은신처를 제공하고 먹이원을 활용하여 생태통로까지 유도

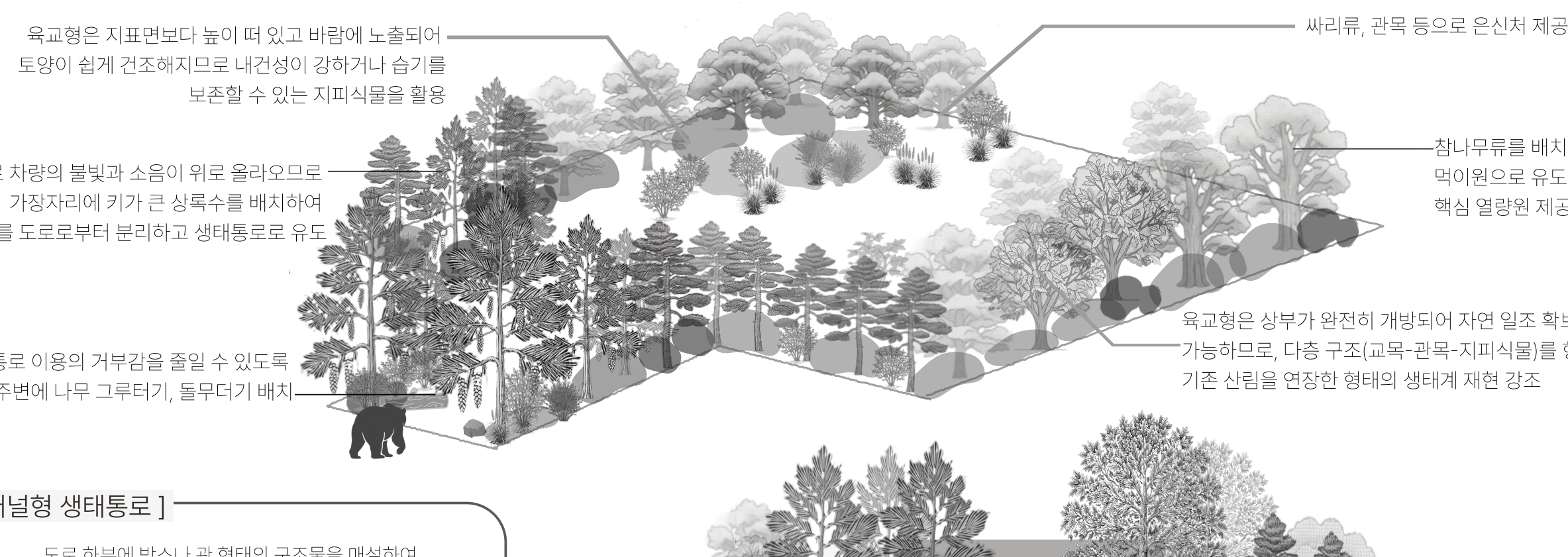
[인공지대] 가장자리는 키가 큰 나무를 심어 외부 시선을 차단하되 통로가 막혀 있다는 느낌을 주지 않도록 배치
중앙 이동 동선에는 키가 작은 초본류와 관목을 배치하여 은신처 제공

[육교형 생태통로]

도로 상부에 교량 형태의 구조물을 설치하고 그 위에 토양을 복토하여 주변 지형과 유사한 식생을 조성한 통로

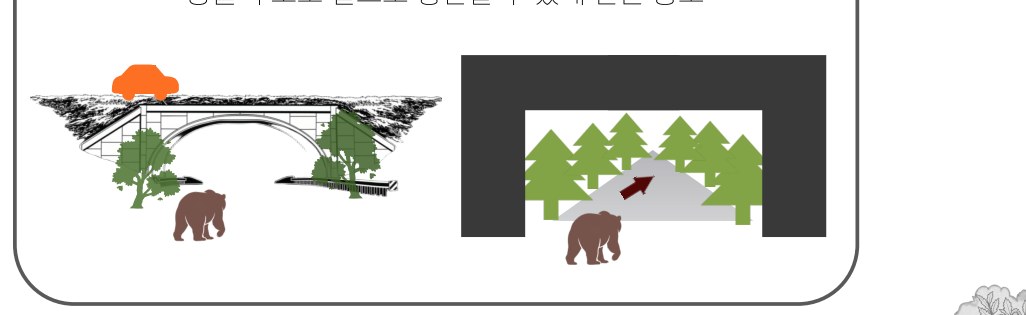


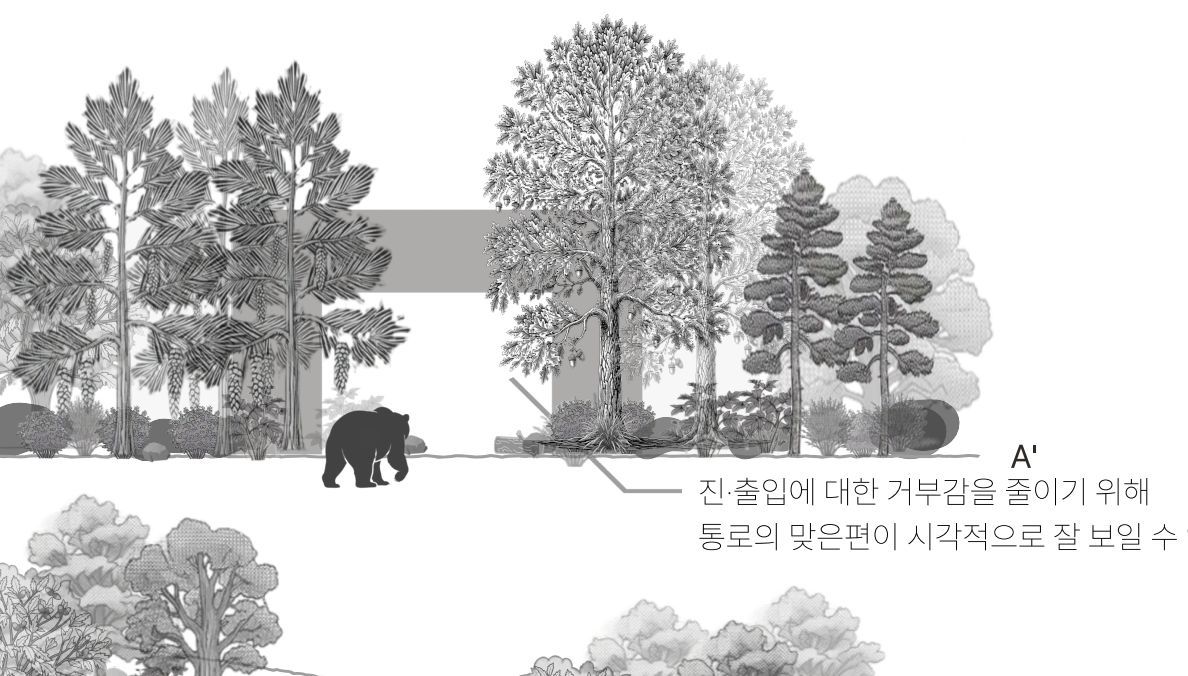


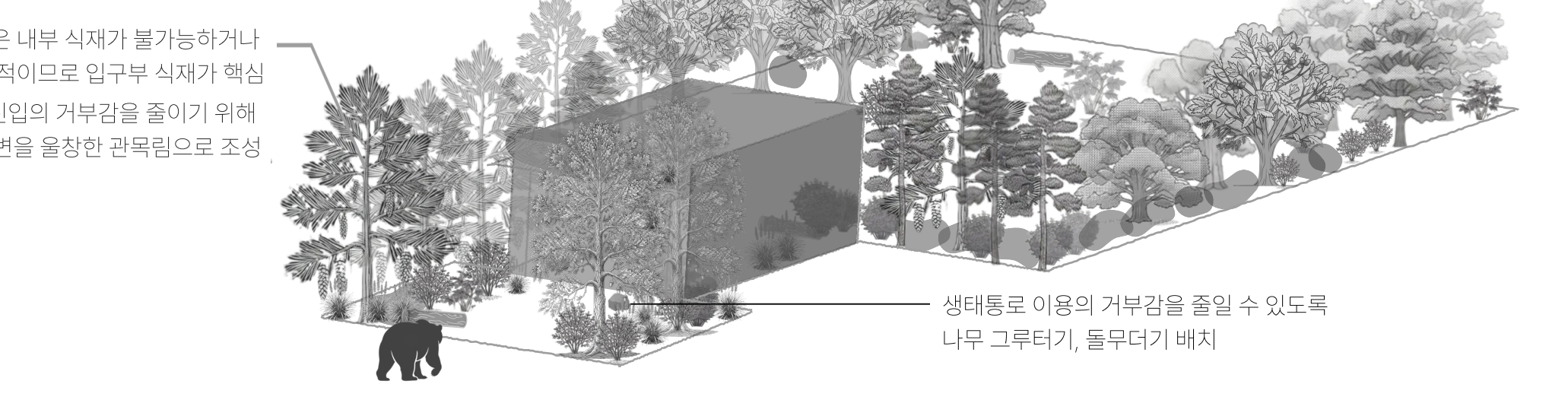

육교형은 지표면보다 높이 떠 있고 바람에 노출되어 토양이 쉽게 건조해지므로 내건성이 강하거나 습기를 보존할 수 있는 지피식물을 활용
싸리류, 관목 등으로 은신처 제공
하부 도로 차량의 불빛과 소음이 위로 올라오므로 가장자리에 키가 큰 상록수를 배치하여 시야를 도로로부터 분리하고 생태통로로 유도
참나무류를 배치하여 먹이원으로 유도하고 핵심 열량원 제공
육교형은 상부가 완전히 개방되어 자연 일조 확보가 가능하므로, 다층 구조(교목-관목-지피식물)를 형성하여 기존 산림을 연장한 형태의 생태계 재현 강조
생태통로 이용의 거부감을 줄일 수 있도록 주변에 나무 그루터기, 돌무더기 배치

[터널형 생태통로]

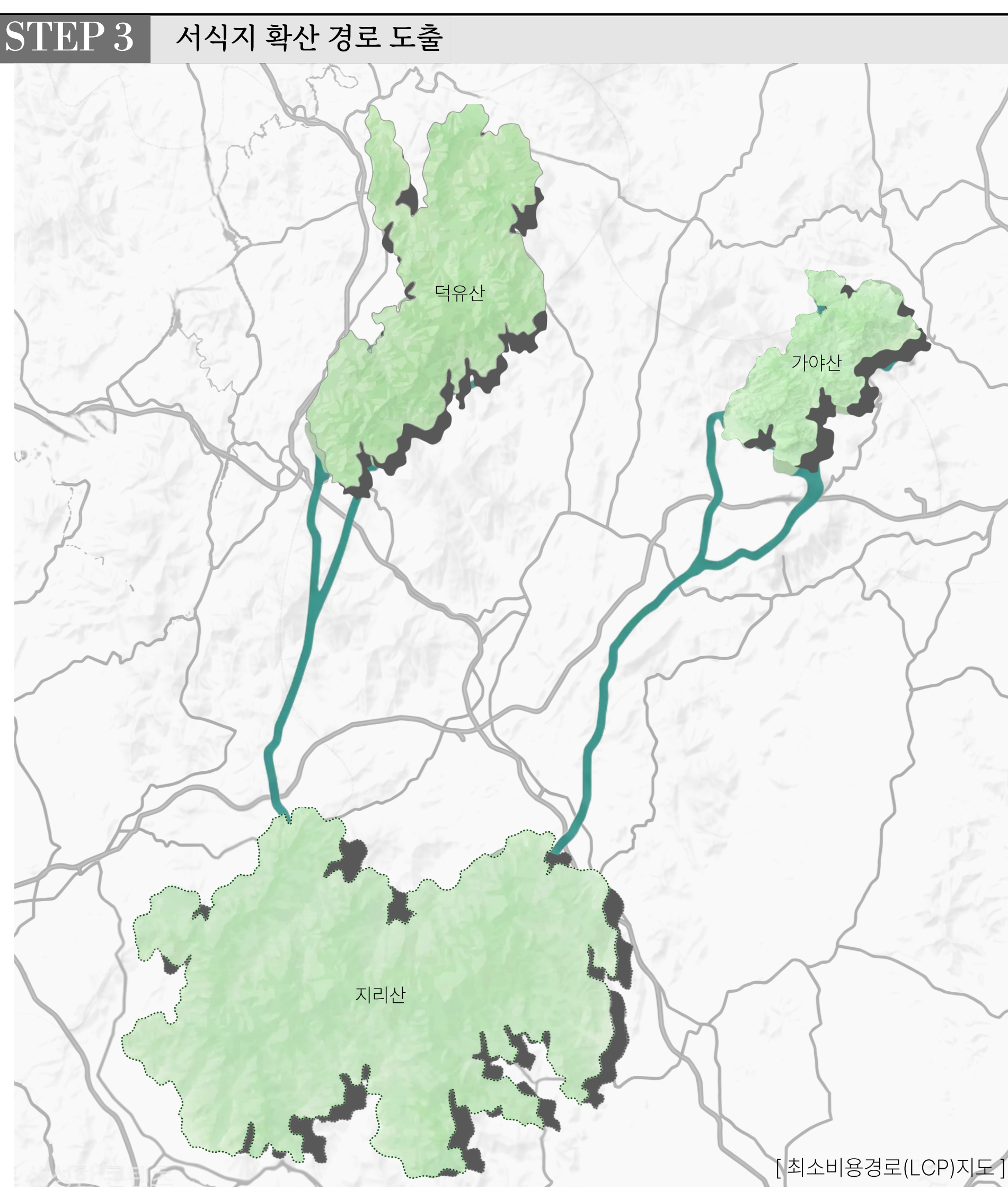
도로 하부에 박스나 관 형태의 구조물을 매설하여 동물이 도로 밑으로 횡단할 수 있게 만든 통로




A
A'
진·출입에 대한 거부감을 줄이기 위해 통로의 맞은편이 시각적으로 잘 보일 수 있도록 계획


터널형은 내부 식재가 불가능하거나 매우 제한적이므로 입구부 식재가 핵심 터널 진입의 거부감을 줄이기 위해 입구 주변을 울창한 관목림으로 조성
생태통로 이용의 거부감을 줄일 수 있도록 나무 그루터기, 돌무더기 배치

STEP 3 서식지 확산 경로 도출



[최소비용경로(LCP)지도]

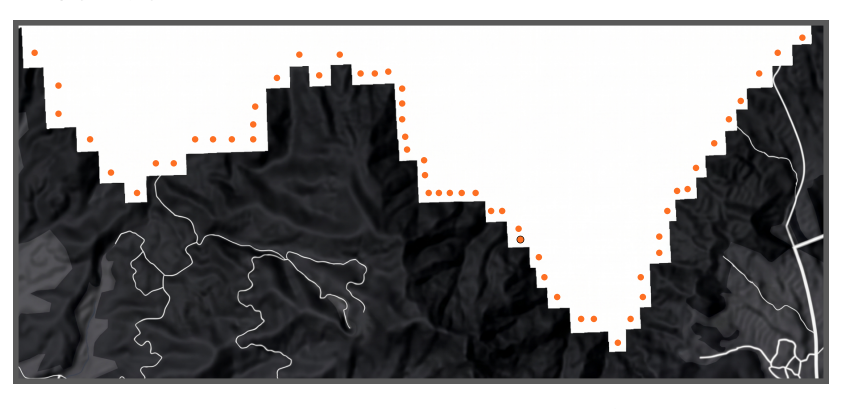
STEP 3-1 최소비용경로(LCP) 구축

[최소비용경로(LCP) ArcGIS- Optimal Path as Line]

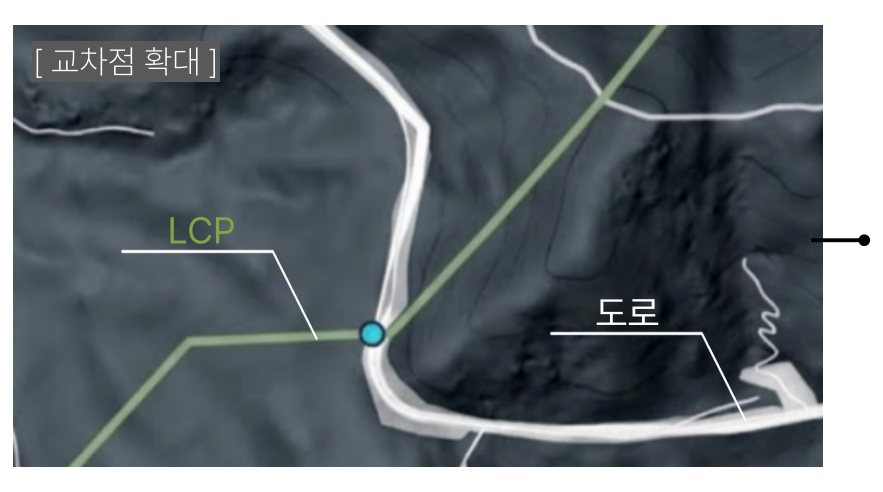
- 이동 저항이 가장 낮은 지점들을 연결하여,
  출발지 ~ 목적지까지 가장 적은 비용을 들여 갈 수 있는 하나의 최적 경로
- 목적 : 반달가슴곰의 이동 경로 분석 및 생태통로 입지 선정을 위한 기반 마련

이동비용지도를 베이스맵으로 설정 — 덕유산, 가야산을 100m x 100m 단위의 픽셀로 구성
↓
반달가슴곰 동면지 좌표, 반달가슴곰 포획 좌표를 출발지로 설정 덕유산 · 가야산을 도착지로 설정 — 산의 외곽을 이루는 모든 픽셀의 중앙에 potint 생성 : 덕유산 · 가야산에 도착하는 것을 목표로 하므로 산 외곽을 전부를 도착 가능 지점으로 설정하여 모든 이동 가능성 염두
↓
Path Type을 Each Cell로 설정
↓
LCP 도출
↓
LCP와 도로를 중첩하여 교차점 추출

*Each Cell

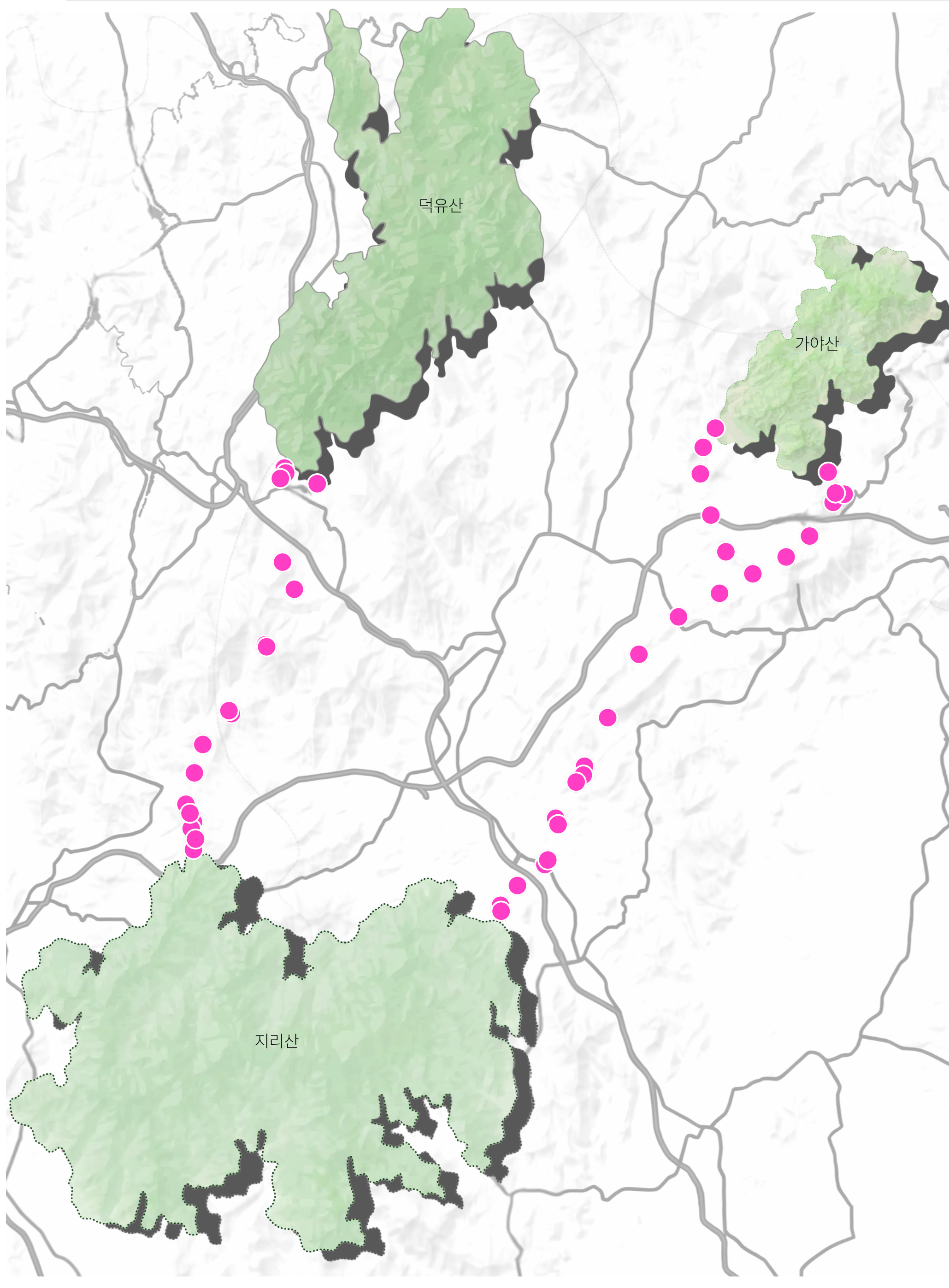


- 목적지로 구성된 구역 내의 모든 픽셀에서 출발지까지의 경로를 모두 계산
- 해당 구역 내의 모든 지점에서 곰이 출발할 때의 모든 경로의 가능성 도출


[교차점 확대]
LCP
도로

서식지 확산 경로 도출을 통한 생태통로 입지 도출 방법

STEP 4 경로 내 생태통로 입지 분석

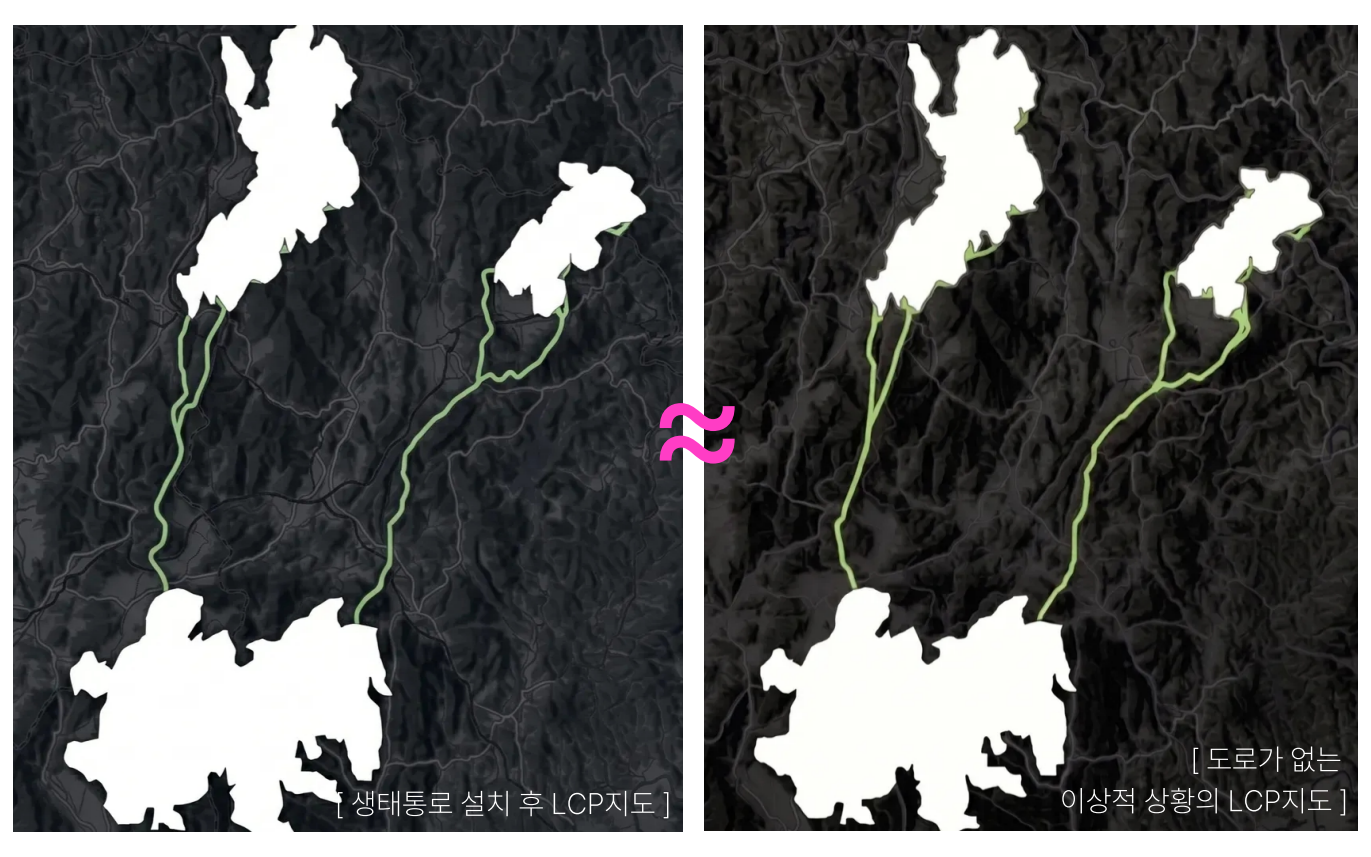


STEP 4-1 생태통로 입지 선정

교차점 중 비포장 1차선 도로를 제외하고 총 66개의 생태통로 입지 도출 →

STEP 4-2 최소비용경로 변화 확인

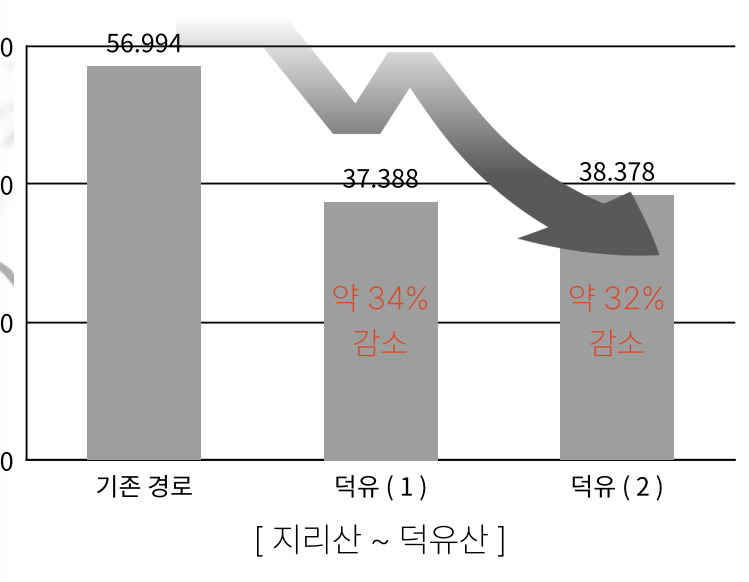
66개의 지점에 생태통로를 설치했다고 가정하고 도로 저항값 제거
↓
도로 저항값을 제거한 최소비용경로(LCP) 재도출 — 생태통로가 설치 후, 도로를 극복 가능한 환경으로 간주


[생태통로 설치 후 LCP지도]
≈
[도로가 없는 이상적 상황의 LCP지도]

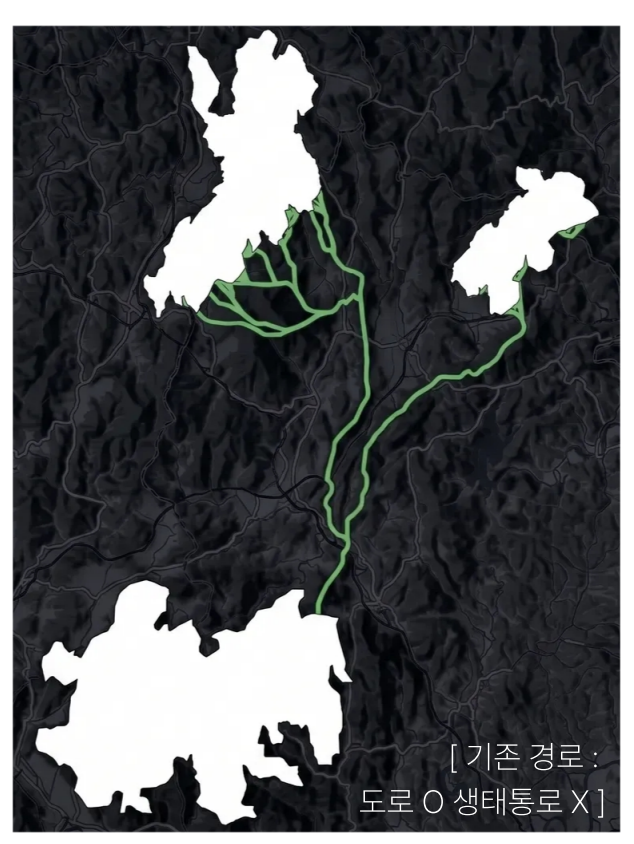
도로가 존재하지 않는 이상적 조건에서의 최소비용경로(LCP) 결과와 도로가 있는 현실 여건에 생태통로 설치를 가정한 결과가 매우 유사한 양상을 띰
이는 본 계획에서 도출한 '유도된 확산 경로'와 해당 경로에 배치한 '생태통로의 입지'가 도로로 인한 단절을 효과적으로 극복하며, 야생동물의 이동성을 실질적으로 회복시킬 수 있음을 보임

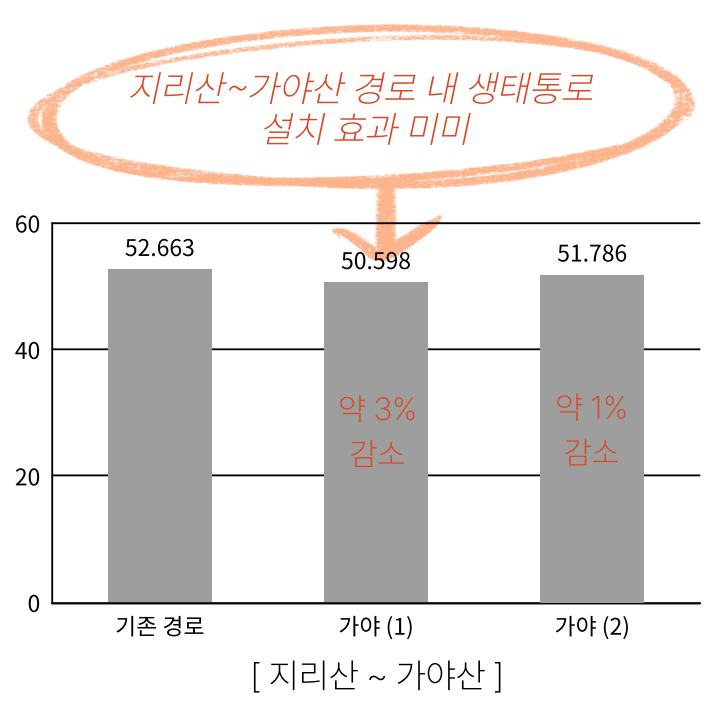
STEP 4-3 생태통로 설치 가정 후 최소비용경로 변화 확인

- 생태통로는 없고 도로가 있어 우회할 수 밖에 없던 기존 상황과 달리, 생태통로 설치 후에는 지리산 ~ 덕유산 · 지리산 ~ 가야산 구간을 지나친 우회 없이 이동할 수 있는지 LCP를 도출하여 각 경로마다 거리 비교

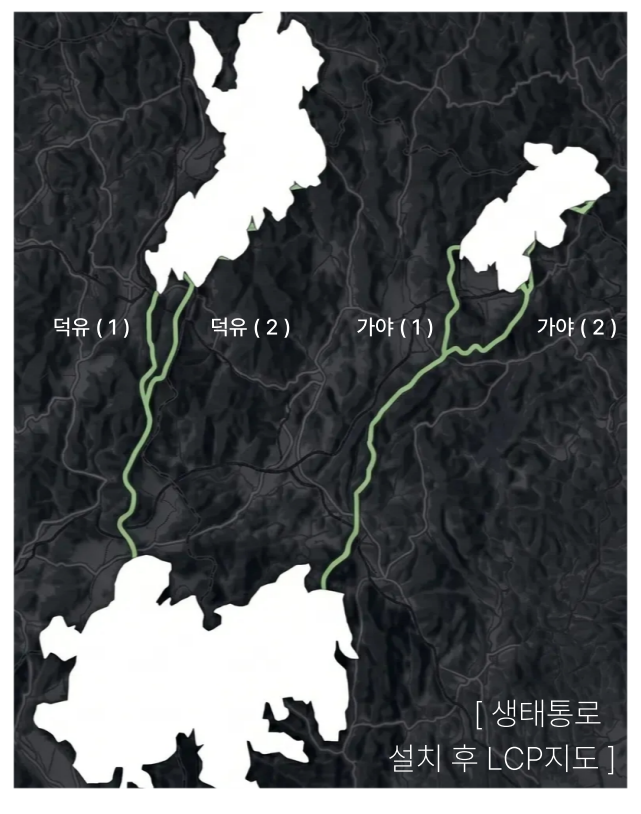


[지리산 ~ 덕유산]

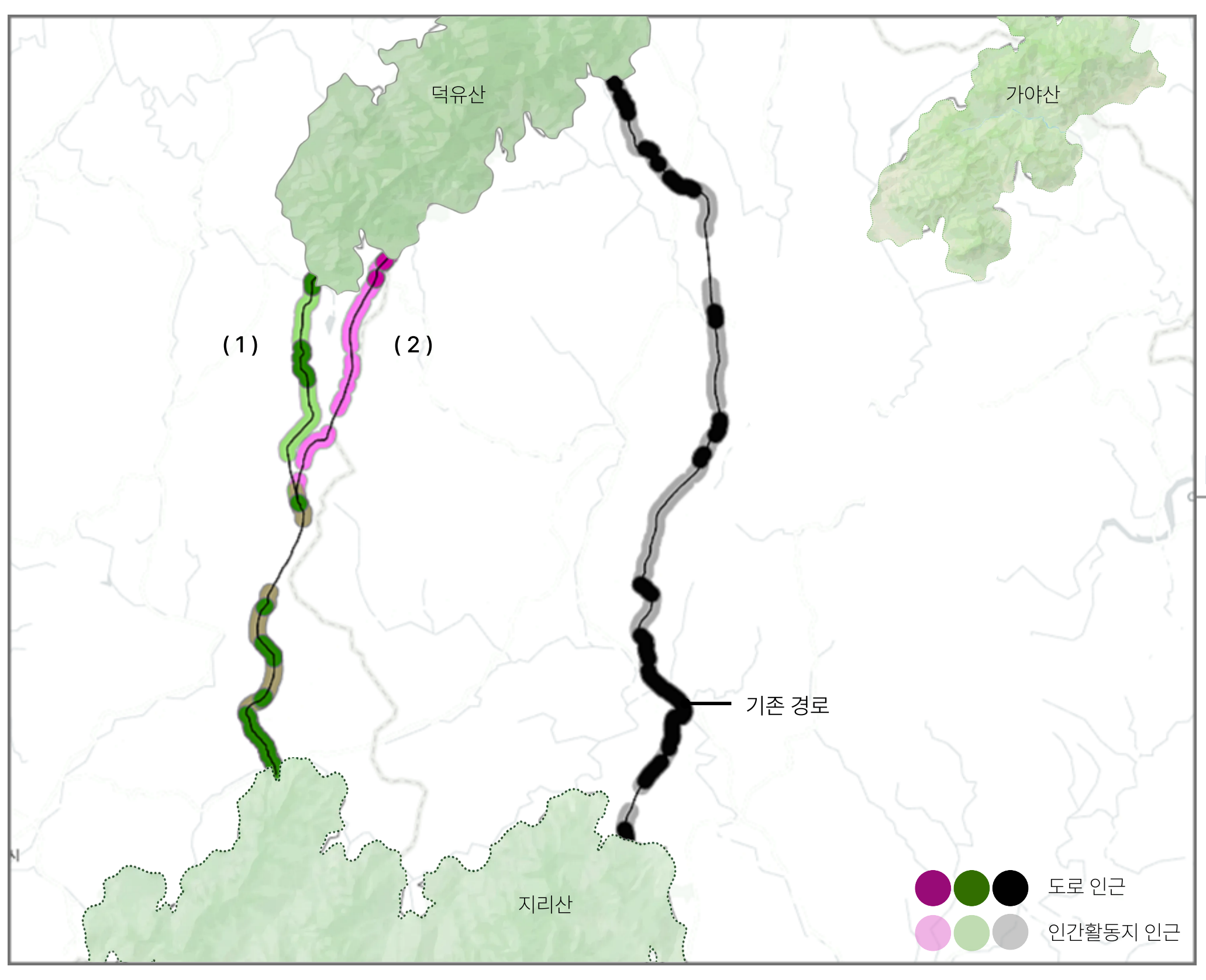

[기존 경로 : 도로 O 생태통로 X]



[지리산 ~ 가야산]

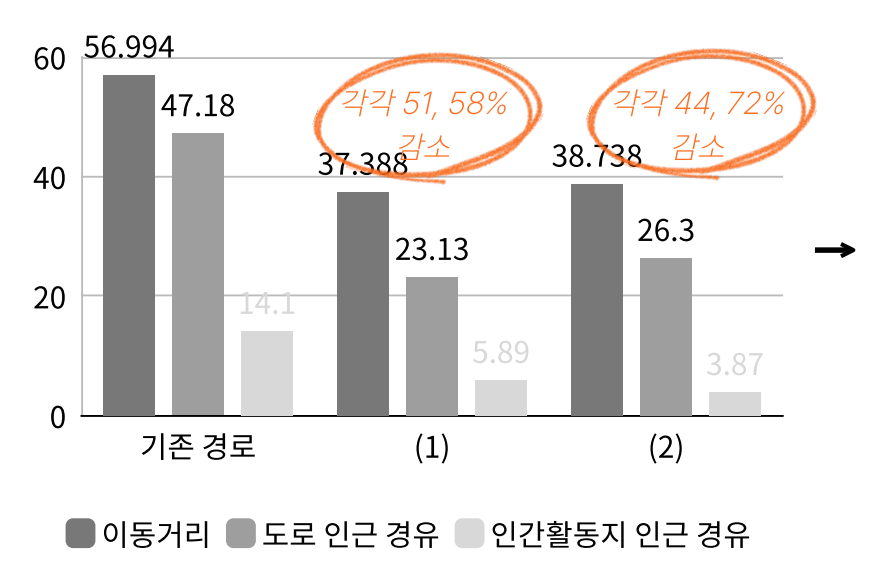

덕유 (1)
덕유 (2)
가야 (1)
가야 (2)
[생태통로 설치 후 LCP지도]

- 지리산 ~ 가야산 구간은 유의미한 연결성 확보가 어려움
  지리산-덕유산 구간을 우선 대상지로 선정하여 집중적인 생태통로 확충을 수행하는 것이 효과적임
- 도출된 66개소의 생태통로 입지 중 지리산 ~ 가야산 구간을 제외하고
  지리산 ~ 덕유산 구간을 분석 대상지로 설정하여 총 19개소의 생태통로 입지를 최종 선정함


덕유산
가야산
(1)
(2)
기존 경로
지리산
도로 인근
인간활동지 인근

STEP 4-4 '지리산 ~ 덕유산' 경로의 변화 분석

생태통로를 설치한 후 도출한 지리산 ~ 덕유산 LCP 최종 결과를 분화점을 기준으로 1(왼) · 2(오)로 구분 → 이동경로 중 도로 · 인간활동지 인근을 경유하는 구간 도출



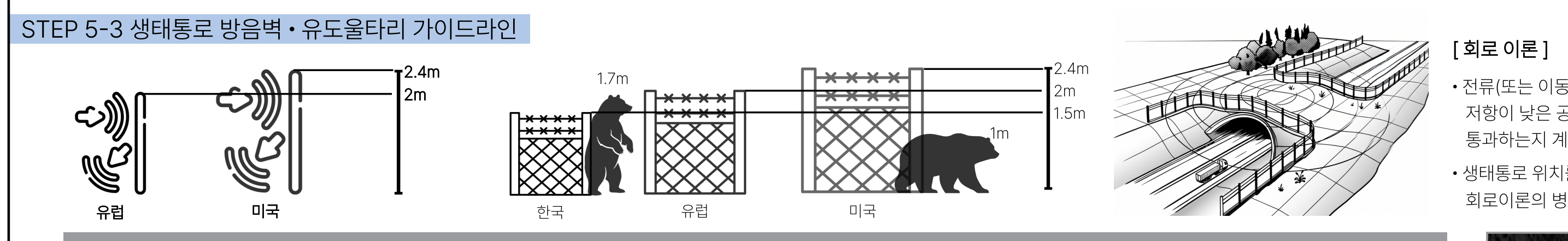
→ 반달가슴곰의 이동 경로가 단축되었을 뿐만 아니라 인간과의 접촉 면적도 줄어 안전에 대해서도 긍정적인 영향을 확인할 수 있었음

STEP 5-2 생태통로 폭 · 개방도 가이드라인

대형 포유류의 생태통로 교차율은 생태통로 폭과 양의 상관관계, 구조물 길이와는 음의 상관관계를 보임	곰은 20m 이상의 육교형 생태통로를 선호하며 20m~50m 폭에서는 야생동물의 횡단 속도가 증가함	폭 50m 이상의 육교형 생태통로는 곰 가족 단위의 중요한 통로 역할을 하여 개체군 생존에 중요함	북미에서 고속도로에서 권장되는 생태통로 폭은 50–70m	개방도: 야생동물이 통로를 지날 때 느끼는 심리적 개방감 수치화 *개방도 (폭 X 높이) / 길이 유럽 COST 341: 최소 높이: 3.0~3.5m, 개방도: 0.9 이상	곰 서식이 활발한 미국•캐나다 환경부의 생태통로 지침 최소 폭: 15~30m, 최소 높이: 3~4m, 개방도 1.5이상

→ 육교형 생태통로 폭 50m · 터널형 생태통로 개방도 1.5이상 · 높이 3~4m이상 적용 제안

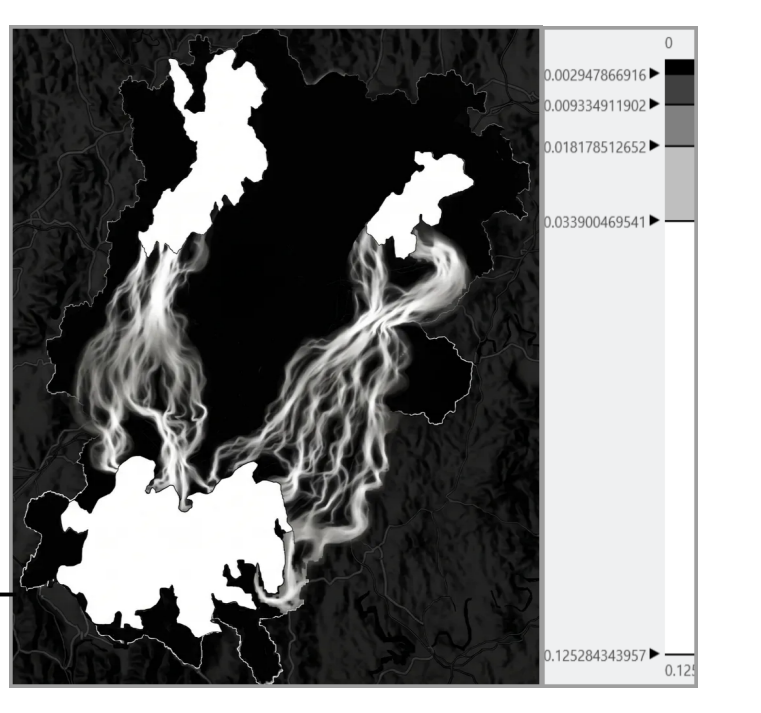
STEP 5-3 생태통로 방음벽 · 유도울타리 가이드라인


2.4m
2m
유럽
미국
1.7m
2.4m
2m
1.5m
1m
한국
유럽
미국

국가	방음벽 높이 기준	유도울타리 높이 기준	유도울타리 길이 기준
한국	방음벽 설치 높이 기준 없음	높이 1.5m 이상	생태통로 기준 양방향 1km 이상
미국 · 캐나다	생태통로 진입 10~20m 이전부터 설치. 캐나다의 경우 2.4m의 높이 적용	대형동물(2~2.5m) 중형동물(1.5~1.8m)	생태통로 기준 양방향 1.6km 이상
유럽	생태통로 진입 이전부터 2m로 설치	높이 2.4m 이상	생태통로 기준 양방향 0.5~1km 이상

[회로 이론]

- 전류(또는 이동하는 생물)를 하나의 '흐름'으로 보고, 저항이 낮은 공간을 따라 어디로 얼마나 많은 양이 통과하는지 계산하여 이동 경로와 병목 지점을 찾아내는 이론
- 생태통로 위치를 중심으로, 회로이론의 병목값을 활용하여 유도울타리 설치 범위 산정


0
0.002947866916
0.009334911902
0.018178512652
0.033900469541
0.125284343957
0.125

- 한국의 유도울타리 높이는 고라니의 도약 높이가 기준으로 설정됨
- 반달가슴곰이 일어섰을 때의 신장이 1.7m이므로
- 현재 유도울타리 기준인 1.5m보다 높으므로 부적합함

→

- 유도울타리 높이 2.4m이상
- 방음벽높이 2.4m이상
- 유도울타리 길이는 기존의 국내 가이드라인을 기본으로 양방향 1km설치하되, 많은 이용이 예상(병목값이 0.018 이상)되는 구간까지 확충할 수 있도록 제안

STEP 5-4 단계별 설치 가이드라인

본 계획에서 도출된 19개소의 생태통로 동시 구축은 현실성을 고려할 때 한계가 있으므로 6가지 조건을 기준으로 [초기 - 중기 - 후기]의 단계별 설치 로드맵을 제안함

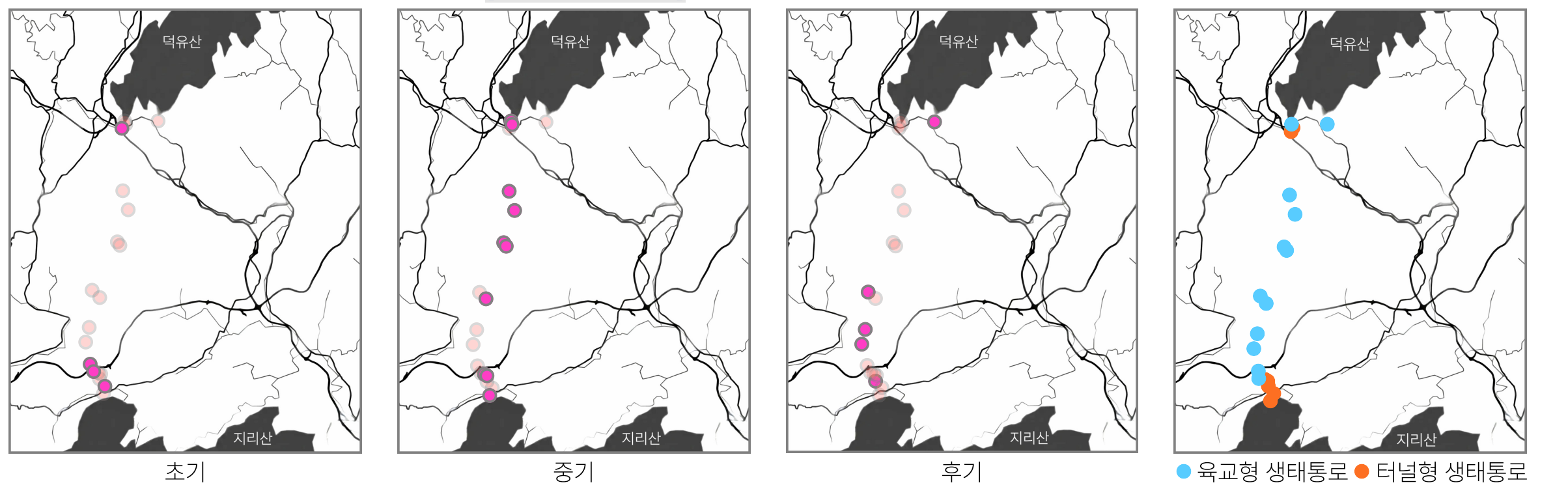
[중요도 선정 요소]

- 회로이론 상위 10% 병목구간
- MaxEnt 상위 10% 구간
- 산림패치 파편화 정도
- 4차선 도로 여부
- 비포장 도로 여부
- 기존 생태통로의 유무

[계층화 분석법(AHP)]

$$Priority(P) = \frac{w_1X_1 + w_2X_2 + \cdots + w_6X_6}{CI}$$

w_n: AHP로 도출된 각 요소의 고유 벡터(Weight)
X_n: 해당 지점의 데이터 값
CI: 일관성 지수


덕유산
지리산
초기
중기
후기
육교형 생태통로
터널형 생태통로