

월악산국립공원

생태통로 조성 최적 후보지 분석 결과

AI 기반 다기준 의사결정 분석(MCDM) 결과 보고서

2026. 08.

Executive Summary

월악산국립공원 관통 도로(국도·지방도)의 로드킬 핫스팟과 야생동물 서식지·이동 연결성을 AI 파이프라인으로 분석하여, 생태통로 조성 최적 후보지 20 개소를 도출하고 5 개 평가기준(로드킬밀도·연결성·서식적합도·지형타당성·보호구역중요도)과 13 개 규제 레이어를 종합한 다기준 의사결정 분석(MCDM)으로 최종 우선순위를 결정하였다.

핵심 결론

A 등급(즉시 추진 가능) 후보지 3 개소, B 등급(협의 후 추진) 3 개소, C 등급(장기 검토) 14 개소를 도출하였다. A 등급 3 개소는 백두대간·문화재·자연재해위험지구·상수원보호구역과 중첩하지 않아 인허가 리스크가 낮고, 그 중 4 위 후보지(318035, 477244)는 서식적합도 1 위·경사도 최저(7.6°)·생태자연도 가점으로 법적 근거와 시공 적합성이 동시에 확보된 최우선 추진 지점이다.

1. 분석 개요

1.1 배경 및 목적

월악산국립공원은 충북 제천시·충주시, 경북 문경시에 걸쳐 총면적 약 288km²의 산악형 국립공원으로, 백두대간 마루금이 통과하는 생태적 핵심 지역이다. 공원을 관통하는 국도 및 지방도로 인해 야생동물 서식지가 단절되어 있으며, 2006~2025년 20년간 총 1,229건의 로드킬이 보고되었다.

본 분석은 AI 기반 자동화 파이프라인을 구축하여, ① 로드킬 공간 패턴 분석, ② 7종 목표종 서식지 적합성 모형, ③ Circuitscape 회로이론 연결성 분석, ④ 13개 법정 규제구역 중첩 분석을 통합하여, 현장 검증·전문가 자문에 즉시 활용 가능한 생태통로 후보지와 우선순위를 과학적으로 도출하는 것을 목적으로 한다.

1.2 분석 대상 및 범위

항목	내용
대상 공원	월악산국립공원 (면적 약 288km ²)
분석 대상 도로	공원 관통 국도·지방도 (총 연장 약 37.7km)
로드킬 데이터	2006~2025년, 1,229건
목표종	7종 (고라니·멧돼지·삾·너구리·수달·다람쥐·큰산개구리)
좌표계	EPSG:5186 (중부원점 TM)
분석 해상도	50m x 50m 격자

1.3 분석 체계

6단계 분석 파이프라인으로 구성된다.

단계	내용	방법론
Phase 1	데이터 수집 및 전처리	좌표계 통일, 이상값 정제, 50m 리샘플링
Phase 2	로드킬 핫스팟 분석	KDE + Moran's I + Getis-Ord Gi*
Phase 3	서식지 적합성 모형(HSM)	MaxEnt 근사 (Presence-Background LR)
Phase 4	저항면 구축	토지피복·HSM·도로 3레이어 가중합산
Phase 5	연결성 분석	Circuitscape 회로이론 (Julia)
Phase 6	다기준 우선순위 평가	MCDM 5기준 + 규제 13레이어 중첩

2. 주요 분석 결과

2.1 로드킬 현황 (Phase 2)

20년간 총 1,229건의 로드킬을 100m 단위 3,766개 구간으로 분석한 결과, Getis-Ord Gi* 통계 검증 ($z \geq 1.96$, $p < 0.05$)을 통과한 유의미한 핫스팟 구간은 48개로 확인되었다. 전역 Moran's I는 $+0.279$ ($p=0.001$)로 로드킬이 무작위 분포가 아닌 유의한 공간 군집을 형성하고 있음이 검증되었다.

구분	수치	해석
분석 구간	3,766개	도로 전체를 100m 단위로 분할
핫스팟 구간	48개	통계적으로 유의한 사고 집중 구간
최대 밀도	705.7건/km	가장 위험한 구간의 사고 밀도
1위 종	다람쥐 (91건)	소형 포유류 사고가 가장 빈번

구분	수치	해석
2 위 종	큰산개구리 (84 건)	양서류 사고 집중 (우기 계절성)

2.2 서식지 적합성 (Phase 3)

7 종 목표종에 대해 MaxEnt 근사 모형으로 서식적합도를 산출하였다. 삵(AUC 0.752), 너구리(0.757), 수달(0.769), 큰산개구리(0.851) 4 종은 양호한 예측력을 보였으며, 고라니(0.647), 멧돼지(0.673), 다람쥐(0.663) 3 종은 월악산 전역에 분포하는 일반종 특성상 환경변수 기반 변별이 제한적이었다. 이는 생태학적으로 타당한 결과로, 해당 3 종은 로드킬 실측 데이터로 보완하였다.

2.3 연결성 분석 (Phase 5)

Circuitscape 회로이론 기반으로 야생동물 이동 연결성을 분석하였다. HSM 핵심부에서 자동 선정한 5 개 전원점(최소 5km 간격)을 사용하였으며, 저항면은 토지피복($\times 0.4$) + HSM($\times 0.4$) + 도로($\times 0.2$) 가중합산으로 구성하였다. 전류밀도가 높은 지점은 동물이 집중적으로 이동하는 병목 구간을 의미한다.

3. 최종 후보지 평가 결과 (Phase 6 MCDM)

3.1 평가 기준 및 가중치

평가기준	가중치	평가 내용	높은 점수의 의미
로드킬 밀도	30%	KDE 밀도 + 핫스팟 근접성	사고가 많아 설치 시급성이 높은 구간
연결성(전류밀도)	25%	Circuitscape 전류밀도	동물 이동이 집중되는 생태적 병목 구간
서식적합도	20%	HSM 7 종 평균	주변에 양질의 서식지가 분포
지형타당성	15%	DEM 경사도 (26.5° 기준)	완만한 경사로 시공이 용이
보호구역중요도	10%	13 개 규제 레이어 중첩	법적 설치 근거 강화 vs 시공 제한

3.2 규제 중첩 분석

20 개 후보지 주변 200m 버퍼 내에서 13 개 법정 규제구역과의 중첩 여부를 자동 진단하였다.

구분	규제구역	중첩	영향
가점	생태자연도 1 등급	5/20	자연환경보전법 시행규칙 법정 설치대상지역
가점	야생생물보호구역	9/20	보호종 서식 확인 = 설치 정당성 강화
리스크	백두대간보호구역	9/20	산림청장 사전협의 필수
리스크	국가지정유산보호구역	3/20	국가유산청 현상변경허가 협의 필요
리스크	자연환경보전지역	20/20	국립공원 전체 해당 (실질 리스크 낮음)
해당없음	상수원·재해·보전산지 등	0/20	모든 후보지가 해당 구역 밖에 위치

3.3 최종 순위표 (20 개소)

5 개 평가기준의 가중합산 종합점수로 정렬한 최종 순위이다. 점수는 모두 0~1 범위로 정규화되었다.

순위	좌표(X, Y)	종합	로드킬	연결	서식	지형	보호	경사°	핵심 규제
1	314753, 474586	0.592	0.330	1.000	0.582	0.428	0.625	15.1°	도로
2	296511, 470077	0.576	0.999	0.000	0.753	0.589	0.375	10.9°	백두대간,야생생물
3	295842, 470548	0.558	0.912	0.000	0.923	0.415	0.375	15.5°	백두대간,야생생물
4	318035, 477244	0.497	0.341	0.002	1.000	0.712	0.875	7.6°	생태자연도(가점)
5	295068, 470807	0.442	0.720	0.000	0.611	0.439	0.375	14.9°	백두대간,야생생물
6	316941, 477300	0.435	0.453	0.003	0.630	0.568	0.875	11.5°	생태자연도(가점)
7	297655, 471731	0.410	0.857	0.001	0.345	0.306	0.375	18.4°	백두대간,야생생물
8	296767, 475275	0.402	0.962	0.001	0.041	0.533	0.250	12.4°	백두대간
9	293754, 480772	0.391	0.255	0.006	0.611	0.603	1.000	10.5°	생태자연도,야생생물

순위	좌표(X, Y)	종합	로드 킬	연결	서식	지형	보호	경사°	핵심 규제
10	297411, 472572	0.3 80	0.8 28	0.0 01	0.1 94	0.3 66	0.3 75	16. 8°	백두대간,야생생물
11	297024, 473292	0.3 72	0.9 75	0.0 01	0.2 38	0.2 16	0.0 00	20. 8°	유산보호,백두대간
12	292348, 480467	0.3 68	0.1 43	0.0 04	0.6 05	0.6 86	1.0 00	8.3°	생태자연도,야생생물
13	316905, 479307	0.3 59	0.3 87	0.0 03	0.4 42	0.6 08	0.6 25	10. 4°	도로
14	294534, 479794	0.3 26	0.3 33	0.0 04	0.2 23	0.5 37	1.0 00	12. 3°	생태자연도,야생생물
15 ~2 0	(6 개소)	0.1 9~0 .30	—	—	—	—	—	14~ 22°	복합 리스크/급경사

※ 전체 20 개소는 자연환경보전지역에 해당하나, 이는 국립공원 전체 속성이므로 표에서 생략함.

4. 등급별 상세 분석 및 권고

4.1 A 등급 — 즉시 추진 가능 (3 개소)

A 등급 기준

백두대간·문화재·자연재해·상수원보호구역 미중첩 + 종합점수 상위 + 지형 적합

최우선 추천: 4 위 (318035, 477244)

종합점수 0.497 로 4 위이지만, 시공 타당성 측면에서 20 개 후보지 중 가장 우수하다.

항목	수치	해석
서식적합도	1.000 (1 위)	주변 서식지 품질이 가장 높아 통로 이용 가능성 극대화
경사도	7.6° (최저)	2023 환경부 지침 경사 기준(1:2=26.5°) 넉넉히 충족
보호구역	0.875 (2 위)	생태자연도 가점 → 법정 설치대상지역 해당
백두대간	미중첩	산림청 협의 불필요 → 인허가 기간 단축
문화재	미중첩	국가유산청 협의 불필요
통로 형식	육교형·터널형 모두 가능	완만한 지형으로 형식 선택 자유도 높음

다만 도로구역과의 중첩이 확인되지 않아(200m 버퍼 기준), QGIS 에서 도로와의 실제 이격 거리를 확인할 필요가 있다.

1 위 (314753, 474586)

종합점수 0.592 로 전체 1 위이며, Circuitscape 전류밀도 1.000 으로 동물 이동 병목 구간으로서의 생태적 의미가 가장 크다. 도로구역과 중첩하여 점용허가 대상이지만, 백두대간·문화재와는 중첩하지 않아 인허가 리스크가 상대적으로 낮다. 경사도 15.1°로 지침 기준 이내이다.

6 위 (316941, 477300)

종합점수 0.435. 생태자연도 가점(법정 설치대상지역) + 경사도 11.5°로 양호한 지형 조건을 갖추고 있다. 서식적합도 0.630 으로 안정적이며, 백두대간·문화재 미중첩으로 A 등급에 해당한다.

4.2 B 등급 — 협의 후 추진 (3 개소)

B 등급 기준

로드킬 밀도 상위(생태통로 시급성 높음)이지만 백두대간보호구역 중첩으로 산림청장 사전협의 필요, 또는 높은 보전 가치 구간

2 위 (296511, 470077) · 3 위 (295842, 470548)

로드킬 밀도 0.999·0.912 로 전체 1·2 위이며, 실제 야생동물 사고가 가장 빈번한 구간이다. 서식적합도도 0.753·0.923 으로 상위권이어서, 생태통로 설치의 시급성과 효과성 모두 높다. 그러나 백두대간보호구역과 중첩되어 산림청장 사전협의(백두대간보호법 제 8 조)가 필수이다.

참고로, 백두대간보호법 제 7 조에 따라 핵심구역과 완충구역 모두에서 생태통로·자연환경보전시설의 설치에 예외적으로 허용된다. 다만 협의 과정에서 공사 중 토석 처리 계획과 멸종위기종 서식지 훼손 여부를 엄격히 검토하므로 인허가 소요 시간이 A 등급보다 길어질 수 있다.

9 위 (293754, 480772)

보호구역 점수 1.000 으로 전체 최고이며, 생태자연도 + 야생생물보호구역이 동시에 중첩되어 보전 가치가 매우 높은 구간이다. 로드킬 밀도는 중간 수준이나, 서식적합도 0.611·경사도 10.5°로 양호하며 백두대간 미중첩이다.

4.3 C 등급 — 장기 검토 (14 개소)

종합점수 0.3 미만이거나, 경사도 20° 이상(시공 곤란), 또는 문화재보호구역+백두대간 복합 리스크에 해당하는 14 개소이다. 특히 11 위(리스크 -6: 유산보호구역+백두대간)와 16 위(리스크 -6: 동일)는 인허가 난이도가 매우 높다. Phase 8(현장 모니터링) 결과를 반영하여 재평가한다.

5. 인허가 추진 로드맵

5.1 A 등급 추진 시 인허가 절차

2026 년 변산반도국립공원 생태통로 설치공사(터널형, L14×W5.0×H2.5m, 총사업비 653 백만원)의 실제 인허가 일정을 참고하여 월악산 A 등급 후보지의 추진 로드맵을 제시한다.

순서	인허가 항목	관할기관	소요시기	비고
①	도로점용(굴착) 허가 심의	지방국토관리청/도청	착공 3~4 개월 전	변산반도: '26.6.2 완료
②	기본 및 실시설계 용역	설계업체	약 80 일	변산반도: 47,500 천원
③	설계 안전성 검토	국토안전관리원	설계 완료 후	건설기술진흥법 제 62 조
④	디자인 검토(승인)	본사 생태디자인실	설계 완료 후	내부 절차
⑤	도로공사 시행 허가 신청	도청/지자체	착공 2~3 개월 전	개발행위허가 같음 가능
⑥	공원사업 시행허가	국립공원공단(내부)	착공 전	자연공원법
⑦	착공 전 안전관리계획	시공사	착공 전	건설재해예방기술지도
⑧	도로공사 신고	관할 경찰서	착공 3 일 전	교통안전 확보 계획서
⑨	시공 및 준공	시공사	약 3 개월	변산반도: '26.9~11 월

5.2 B 등급 추가 절차

B 등급(백두대간 중첩) 후보지는 위 절차에 더해 산림청장 사전협의(백두대간보호법 제 8 조)가 선행되어야 한다. 협의 시 산림청장은 환경부장관의 의견을 청취하며, 백두대간 생태축 단절 여부, 멸종위기종 서식지 훼손 여부, 토석 처리 계획 등을 검토한다. 협의 기간은 사안에 따라 2~6 개월 소요될 수 있어, A 등급 대비 전체 사업 기간이 연장될 가능성이 있다.

6. 후속 조치 권고

구분	조치 사항	담당	시기
즉시	A 등급 3 개소(1·4·6 위) 현장답사 실시	자원보전과	2026. 8~9 월
즉시	4 위 후보지 도로 이격거리 QGIS 확인	자원보전과	2026. 8 월
단기	B 등급 서쪽 그룹 백두대간 핵심/완충구역 구분 확인	자원보전과	2026. 9 월
단기	A 등급 후보지 전문가 자문 (생태학·토목공학)	자원보전과	2026. 10 월
중기	B 등급 해당 시 산림청장 사전협의 착수	자원보전과	2026. 하반기
중기	기본 및 실시설계 용역 발주	시설관리과	2027. 상반기
장기	Phase 8 현장 모니터링 (무인카메라·트랙패드)	자원보전과	시공 후
장기	C 등급 후보지 모니터링 결과 기반 재평가	자원보전과	2028 년

7. 분석 산출물

산출물	파일	활용
최종 순위 SHP	corridor_final_ranked.shp	QGIS 에서 순위별 시각화, 현장답사 지도 출력
상세 점수표	mcdm_report.csv	5 기준 점수 + 규제 중첩 목록 열람·편집
전류지도	current_map_raw.tif	동물 이동 병목 구간 시각화

산출물	파일	활용
로드킬 핫스팟	hotspot_list.csv + segments_100m.shp	사고 다발 구간 현장 점검
서식적합도 7 종	hsm_*.tif	종별 서식지 분포 확인
경과 보고서	월악산_생태통로_분석결과보고서.docx	기술적 상세 (Phase 1~6 전체)

끝.