

ARTICLE

텍스트마이닝과 동시출현단어 분석을 통한 임도 관련 국제 연구동향 파악

이상인^{1†} · 이진호^{1†} · 김범수² · 권형근³ · 서정일^{2*}

¹국립공주대학교 생태복원연구소, ²국립공주대학교 산림과학과, ³국립한국농수산대학교 작물·산림학부

Identifying the Trends of International Research on Forest Roads using Text-Mining and Co-Word Analysis

Sang-In Lee^{1†}, Jinho Lee^{1†}, Beom-su Kim², Hyeongkeun Kweon³, Jung Il Seo^{2*}

¹Institute of Ecological Restoration, Kongju National University, Yesan 32439, Korea

²Department of Forest Sciences, College of Industrial Sciences, Kongju National University, Yesan 32439, Korea

³Department of Crops and Forestry, Korea National University of Agriculture and Fisheries, Jeonju 54874, Korea

Received: April 22, 2026

Revised: April 27, 2026

Accepted: June 02, 2026

[†] These authors contributed equally to this work.

*Corresponding author :

Jung Il Seo
Department of Forest Sciences, College
of Industrial Sciences, Kongju National
University, Yesan 32439, Korea
Tel : +82-41-330-1302
E-mail : jungil.seo@kongju.ac.kr

Copyright © 2026 Resources Science
Research Institute, Kongju National University.
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.

ORCID

Sang-In Lee
<https://orcid.org/0000-0002-6604-1441>

Jinho Lee
<https://orcid.org/0000-0002-7236-2364>

Beom-su Kim
<https://orcid.org/0009-0003-6141-3060>

Hyeongkeun Kweon
<https://orcid.org/0000-0002-9039-0158>

Jung Il Seo
<https://orcid.org/0000-0002-5494-2306>

Abstract

Research trends on forest roads, despite their essential role in forest management, have not been systematically synthesized. This study examined spatio-temporal trends in international forest-road research through text mining and co-word analysis of 9,244 SCI(E)-indexed papers from Web of Science using VOSviewer. Publication output increased sharply after 2012, with China (1,588 papers) and the United States (1,534 papers) leading. Co-word analysis identified four major research areas: (i) wildlife habitat fragmentation and landscape connectivity; (ii) soil and hydrological impacts of road operations; (iii) road detection, classification, and safety analysis using machine learning and remote sensing; and (iv) landslide susceptibility assessment near forest roads. The second area dominated in 1991-1999 (about 37%), whereas the fourth became dominant in 2020-2025 (about 30%). The third area exhibited the largest growth, from about 11% to 24%. Although South Korea showed low shares across all areas, domestic research exhibited distinctive characteristics: predominantly site-specific in scale, limited in machine-learning applications, and closely tied to national forest-road expansion policy. These findings provide baseline information for future research on forest roads in South Korea, particularly toward broader-scale analyses and integration of advanced analytical techniques.

Keywords

Habitat fragmentation, Landscape connectivity, Remote sensing, Landslide susceptibility, Hazard mapping

I. 서론

임도(林道, forest road)는 「산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률」 제2조 1에서 명시한 것과 같이 산림자원의 경영 및 관리를 목적으로 산림 내에 개설되는 도로로서(Korea Ministry of Government Legislation, 2026), 목재의 생산 및 운반, 조림 및 숲가꾸기 등 산림사업의 수행, 산불 진화를 위한 진입로 및 방화선의 확보, 산림 병해충 방제, 산림휴양 활동의 지원 등 산림의 다원적 기능을 발현시키기 위한 핵심 기반시설이다(Choi *et al.*, 2013; Jeon, 2015; Ji *et al.*, 2015). 우리나라에서는 1965년 광릉임업시험림에 6.5 km의 임도를 개설한 것을 시작으로 임도의 건설이 본격화되었으며, 이후 지속적인 확충을 통해 2024년 말 기준으로 전국의 임도 총연장은 약 26,784 km, ha당 임도밀도는 4.31 m에 이르고 있다(Korea Forest Service, 2026a).

그러나 우리나라의 임도밀도는 주요 임업 선진국과 비교하면 여전히 낮은 수준에 머물러 있다. 산림청에 따르면 독일(54.0 m/ha), 오스트리아(50.5 m/ha), 일본(24.1 m/ha), 미국(9.6 m/ha) 등 주요국의 임도밀도에 비해 우리나라는 상당한 격차를 보이고 있다(Korea Forest Service, 2026b). 이에 산림청은 제5차 전국임도기본계획(2021-2030년)을 수립하여 2030년까지 전국 임도밀도를 ha당 6.8 m 수준으로 향상시키고, 경제림 육성단지의 경우 ha당 25.3 m의 임도밀도 목표를 설정하는 등 체계적인 임도망 확충 방안을 추진하고 있다(Korea Forest Service, 2021).

임도에 대한 관심은 비단 우리나라에만 국한되지 않는다. 전 세계적으로 산림은 목재 생산, 탄소 흡수, 생물다양성 보전, 수자원 함양 등 다양한 생태계 서비스를 제공하는 공간으로서의 가치가 재조명되고 있으며, 이러한 산림의 기능을 효과적으로 관리하고 발현시키기 위한 임도의 역할이 지속적으로 강조되고 있다(Boston, 2016; Croke and Hairsine, 2006; Hayati et al., 2013; Lugo and Gucinski, 2000; Robinson et al., 2010). 그와 동시에 임도의 건설과 이용이 야생동물의 서식환경 및 경관 연결성에 미치는 영향, 토양 침식 및 수질 오염 등의 환경 문제, 기후변화에 따른 산사태 위험성의 증가 등 임도와 관련된 다양한 학술적·정책적 과제가 대두되고 있다(Dimitrakopoulos, 2000; Forman and Alexander, 1998; Thompson et al., 2021). 최근에는 기계학습, 원격탐사, GIS 등 첨단 기술의 발전에 힘입어 임도의 계획, 설계, 관리 및 환경영향 평가에 이르기까지 연구의 범위와 방법론이 급속히 확장되고 있는 추세이다(Acosta et al., 2023; Bugday, 2022; Ring et al., 2024).

이와 같이 임도를 둘러싼 연구 주제가 다양해지고 그 규모가 확대되고 있음에도 불구하고, 임도 관련 연구동향을 체계적으로 분석한 연구는 극히 제한적이다. Jeon et al.(2024)은 텍스트마이닝 기법을 활용하여 2014년부터 2023년까지의 임도 관련 국내 언론보도를 분석함으로써, 임도에 대한 사회적 인식이 산림경영 중심에서 산불·산사태 등 재해 관련 주제로 변화하고 있음을 보고한 바 있다. 그러나 이 연구는 어디까지나 언론의 관심을 분석 대상으로 한 것이며, 학술논문을 기반으로 임도 관련 연구의 주요 영역을 분류하고 그 시·공간적 동향을 파악한 연구는 국내외를 막론하고 지금까지 수행된 바 없다.

최근 키워드 네트워크 분석은 연구논문과 같은 대규모의 텍스트 자료를 정량적으로 분석하여 연구동향을 파악하는 데 있어 유용한 분석기법으로 활용되고 있다(Van Eck and Waltman, 2010). 이 기법은 단순 빈도분석과는 달리, 단어 간의 구조적 관계와 연관성을 고려하므로 연구 주제 간의 상호관련성을 탐색하는 데 적합하다. 실제로 산림 분야에서도 VOSviewer 프로그램을 활용한 연구동향 분석이 수행된 바 있다. Ko and Eo(2017)가 국내 포유류 연구논문 392편을 대상으로 텍스트마이닝과 동시출현단어 분석을 수행하여 진화·계통·유전학·생태학 등 11개 세부 연구영역을 도출하고, 최근 생태학 연구가 가장 활발히 수행되고 있음을 보고하였다. 이후 Lee et al.(2017)은 지진 유발 산지토사재해와 관련된 국제 연구논문 415편을 분석하여, 재해발생의 메커니즘, 강우인자, 위험지 예측, 재해위험지도 작성의 4개 연구영역을 도출하였으며, Lee et al.(2019)은 산지하천과 관련된 국제 연구논문 2,722편과 국내 연구논문 199편을 비교 분석하여 4개 연구영역을 도출하고, 국내 연구가 국제 연구에 비해 초보적인 단계에 있음을 보고하였다. 또한, Kim et al.(2025)은 숲길 관련 국내 연구논문 383편을 대상으로 키워드 네트워크 분석을 수행하여 4개 연구영역을 도출하고 연구주제의 시간적 변화를 파악하였다. 따라서 텍스트마이닝과 동시출현단어 분석을 통해 산림자원의 경영·관리를 위한 핵심 기반시설인 임도 분야의 연구동향을 파악하는 데에도 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

이러한 배경으로부터 이 연구에서는 임도 관련 국제 연구논문을 대상으로 VOSviewer 프로그램을 이용한 텍스트마이닝과 동시출현단어 분석을 수행하여 주요 연구영역을 분류하고, 각 연구영역의 시·공간적 동향을 파악함으로써 향후 국내 임도 연구의 방향성을 제시하기 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 국제 연구논문 수집

이 연구에서는 임도와 관련된 국제 연구논문을 수집하기 위하여 ‘forest road(s)’를 검색어로 설정하였다. ‘forest road(s)’는 임도를 가리키는 대표적인 복합명사(compound noun)로서, ‘logging road(s)’, ‘skid trail(s)’, ‘haul road(s)’ 등 임도의 특정 유형이나 기능에 한정된 용어와는 달리 임도 전반을 포괄하는 성격을 지닌다. 이에 따라 이 연구에서는 해당 용어를 단일 검색어로 사용하여 임도 관련 연구논문을 광범위하게 수집하고자 하였다.

분석 대상 논문은 2025년까지 발행된 Science Citation Index(SCI) 및 Science Citation Index Expanded(SCIE) 학술지에 등재된 연구논문으로 한정하였으며, Web of Science(<https://www.webofscience.com>)를 검색기반으로 활용하였다.

검색된 연구논문 중 임도와 관련 없는 논문은 데이터베이스에서 제외시켰으며, 중복 수집된 경우에는 1편만을 데이터베이스에 포함시켰다.

이와 같이 수집된 연구논문의 데이터베이스를 활용하여, 연구논문의 발행연도를 기준으로 발행편수와 변화 추이를 파악하였다. 또한, 각 연구논문의 연구대상지를 기준으로 국가별 발행편수를 파악하였으며, 이를 연도별로 구분하여 시간의 경과에 따른 국가별 연구논문의 점유율 추이를 확인하였다.

2. 국제 연구논문의 연구영역 분석

수집된 연구논문의 제목과 초록으로부터 연구주제를 나타내는 단어(구)를 추출하고, 이를 기초로 주요 연구영역을 분류하기 위해 VOSviewer 프로그램(version 1.6.20, Leiden University, Netherlands)을 이용하였다(Van Eck and Waltman, 2010). VOSviewer는 대량의 서지 데이터를 대상으로 텍스트마이닝(text-mining)을 수행하여 주제단어(구)를 추출하고, 추출된 주제단어(구) 간의 동시 출현 패턴에 기초하여 단어 간 연관관계를 파악하는 동시출현단어 분석(co-word analysis) 기능을 갖추고 있다. 아울러 네트워크 시각화, 밀도 시각화, 히트맵 등 복수의 시각화 방식을 지원하여 분석 결과를 다각도로 해석할 수 있다는 이점이 있다(Van Eck and Waltman, 2014).

분석의 입력 데이터는 연구주제와 관련된 키워드가 집중적으로 포함된 제목과 초록으로 한정하였다. 논문의 본문 전체를 입력할 경우, 연구주제와 직접적인 관련이 없는 서술적 표현이나 방법론적 용어 등이 다수 포함되어 주제단어 추출의 정밀도가 저하될 수 있기 때문이다(Van Eck and Waltman, 2011).

주제단어(구)의 추출 및 선별에는 다음의 세 가지 기준을 순차적으로 적용하였다. 첫째, 출현 빈도가 지나치게 낮아 연구동향의 파악에 기여하기 어려운 단어를 제외하기 위하여, 총 10편 이상의 논문에서 출현한 단어(구)만을 1차적으로 선정하였다. 둘째, 관사, 전치사, 접속사 등 내용적 의미를 지니지 않는 일반 어휘를 배제하기 위하여 VOSviewer에서 산출되는 주제단어 적정점수(relevance score)를 활용하였다. 적정점수는 특정 단어가 전체 문서 집합 내에서 갖는 상대적 중요도를 수치화한 것으로, 높은 적정점수를 가진 단어는 해당 문서 집합의 주제를 특징짓는 데 있어 기여도가 큰 단어임을 의미하며, 낮은 점수를 가진 단어들은 빈번히 사용되나 분석에 있어 유의미한 정보를 제공하지 못한다(Van Eck and Waltman, 2011). 이 연구에서는 VOSviewer 프로그램에서 자동으로 산출되는 적정점수를 사용하였으며, 초기 설정값인 상위 60%를 기준으로 적용하여 이에 해당하는 단어(구)만을 분석 대상으로 선별하였다. 셋째, 단어의 출현빈도를 산출함에 있어 ‘binary counting’ 방법을 채택하였다. 이 방법은 특정 단어가 하나의 논문 내에서 복수 회 출현하더라도 1회로만 산정하는 방식으로, 특정 논문에서의 반복적 사용이 출현빈도에 과도하게 반영되는 것을 억제하여 논문 단위의 출현 여부에

기반한 보다 균형 잡힌 빈도 산출이 가능하다. 즉, 한 논문 내에서 빈번히 사용되는 일반 어휘(예: ‘study’, ‘result’, ‘analysis’ 등)의 과대평가를 억제하고, 분야 고유의 주제단어(domain-specific terms)가 전체 코퍼스 내에서 차별적으로 부각될 수 있도록 설계된 산정 방식이다(Van Eck and Waltman, 2014). 더불어 앞서 적용한 relevance score 기반 선별 또한 단순 출현빈도가 아닌 특정 단어가 분석 대상 코퍼스 내에서 갖는 분야 특이성(domain specificity)에 기초하므로(Van Eck and Waltman, 2011), 이 두 절차가 결합됨으로써 주제단어는 분석 과정에서 유실되지 않고 오히려 안정적으로 보존된다.

위와 같은 기준으로 최종 선정된 주제단어(구)들을 대상으로 동시출현단어 분석을 진행하고, 네트워크 지도 시각화 및 단어 군집 분석(clustering)을 수행하였다(Waltman et al., 2010). 이를 통해 가장 안정적으로 유지되는 연구영역을 결정하였다. 군집 분석을 통해 도출된 각 클러스터에 할당된 주제단어(구)를 확인하고, 의미적으로 유사한 키워드를 그룹으로 묶어 중분류로 구분한 뒤, 이를 종합적으로 검토함으로써 각 클러스터가 대표하는 연구주제를 명명하였다.

3. 국제 연구논문의 연구영역별 발행연대 및 대상국가 분석

임도 관련 연구논문은 그 내용이 복수의 연구영역에 걸쳐 있는 경우가 빈번하므로, 개별 논문을 특정 연구영역에 배타적으로 할당하는 것은 적절하지 않다. 따라서 산술적인 계산 과정을 통하여 각 연구영역에 있어서 연구논문의 발행연대 및 대상국가의 비율을 산출할 수 없다. 그 대신 각 논문의 제목과 초록에서 출현하는 연구영역별 단어비율을 파악하여 각 연구영역에 있어서 발행연대별 점유율과 대상국가별 점유율을 산출하였다.

이때, 각 논문에서 출현한 연구영역별 단어(구)의 수를 해당 연구영역에 할당된 전체 단어(구)의 수로 나누어 연구영역별 단어출현빈도를 표준화하였다. 이어서, 표준화된 각 논문의 연구영역별 단어출현빈도를 해당 논문 내 모든 연구영역의 표준화된 단어출현빈도의 합으로 나누어 논문 단위의 연구영역별 기여비율을 산출하였다(Van Eck and Waltman, 2010, 2014). 이를 통해 하나의 논문이 각 연구영역에 대해 갖는 상대적 비중을 0에서 1 사이의 값으로 나타낼 수 있으며, 모든 연구영역에 대한 비중의 합은 1이 된다.

이상의 방법으로 측정된 각 연구논문의 연구영역별 비율을 동일 발행연대 또는 동일 대상국가로 합하여 연구영역별 발행연대 및 대상국가의 점유율을 산출하였다. 발행연대는 임도 관련 국제 연구논문이 최초로 확인된 시점 이후를 대상으로 하여, 1991~1999년, 2000~2009년, 2010~2019년, 2020~2025년의 4개 구간으로 설정하였으며, 이를 통해 연구영역별 연구비율의 시간적 변화를 분석하였다. 이때, 산출된 점유율은 각 시기 내부의 표준화된 단어출현빈도에 기반한 상대 비율이므로, 시기별 연구논문 발행 편수의 절대적 차이와는 독립적으로 비교가 가능하다. 또한, 각 연구논문의 연구영역별 연구비율을 동일 국가별로 합하여 연구영역별 대상국가의 비율을 산출하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 임도 관련 국제 연구논문 수집 및 일반특성 분석 결과

이 연구에서는 ‘forest road(s)’를 검색어로 하여 Web of Science로부터 총 9,252편의 연구논문을 수집되었으며, 이 중 중복 수집된 8편을 제외한 총 9,244편의 연구논문을 최종 분석 대상으로 하였다.

이들 연구논문의 연도별 발행 현황을 분석한 결과(Fig. 1), 임도 관련 국제 연구논문은 1991년부터 2011년까지는 연간 1-22편 수준으로 비교적 적은 수의 논문이 발행되었다. 그러나 2012년을 기점으로 발행 편수가 급격히 증가하기 시작하였으며, 이후 지속적인 증가 추세를 보여 2025년에는 1,184편이 발행되어 분석 기간 중 최대치를 기록하였다. 연대별로 살펴보면, 1991-1999년에 47편, 2000-2009년에 131편, 2010-2019년에 3,420편, 2020-2025년에 5,646편이 발행되어, 2010년대 이후 전체 논문의

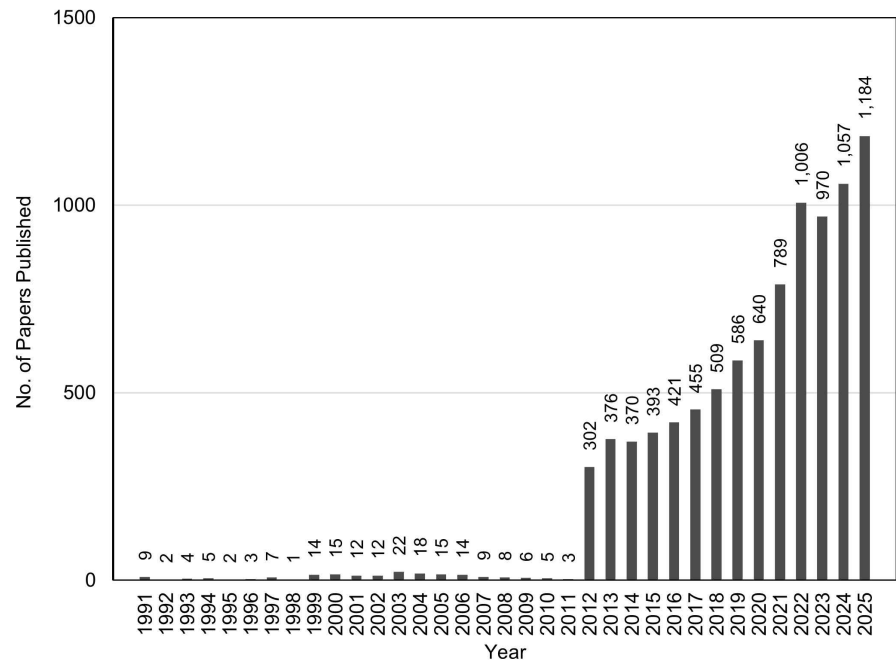


Fig. 1. Long-term distribution in number of international research papers related to forest roads.

약 98%가 집중적으로 발행된 것으로 나타났다.

한편, 이 연구에서 확인된 2012년 전후의 급격한 발행 편수 증가는 단일 요인으로 설명되기 어려우며, 데이터베이스 측면과 학문적 측면의 변화가 복합적으로 작용한 결과로 판단된다. 우선, Web of Science Core Collection은 2008년경부터 추진된 지역 학술지 등재 확대 정책(Regional Content Expansion)에 따라 비영어권 학술지의 등재를 큰 폭으로 확충해 왔으며, 2015년 Emerging Sources Citation Index의 도입을 비롯한 지속적인 등재 정책의 변화를 통해 검색 가능한 연구논문의 외연 자체가 크게 넓어진 것으로 보고된 바 있다(Birkle *et al.*, 2020; Testa, 2011). 이러한 데이터베이스 측면의 변화는 이 연구에서 확인된 발행 편수 증가의 일부를 설명할 수 있다. 다음으로, 학문적 측면에서는 Forman and Alexander(1998), Trombulak and Frissell(2000)로 대표되는 도로생태학 분야의 연구논문이 2010년대 이후 폭넓게 인용되며 후속 연구가 활성화되었고, 이와 더불어 기계학습, 원격 탐사, GIS 등 첨단 분석기술의 보급으로 임도 연구에 새로운 방법론이 적용되는 사례가 급증한 것 또한 발행 편수 증가의 주요 원인으로 작용한 것으로 판단된다. 아울러 중국을 비롯한 비영어권 국가의 임도 연구가 2010년대 이후 본격화된 점 역시 전체 발행 편수의 증가를 견인한 요인 중 하나로 볼 수 있다(Fig. 2). 따라서 2012년 전후의 급증 현상은 데이터베이스 등재 범위의 확대라는 외적 요인과 임도 관련 연구의 실질적 활성화라는 내적 요인이 함께 작용한 결과로 사료된다.

1991년부터 2025년까지 발행된 9,244편의 논문은 총 131개 국가를 연구대상지로 수행되었으며, 이 중에서 중국과 미국을 대상으로 한 연구논문이 각각 1,588편과 1,534편으로 전체의 약 34%를 차지하였다(Fig. 3). 두 국가의 연구 활성화 시점에는 뚜렷한 차이가 나타났는데(Fig. 2), 미국은 1991년부터 꾸준히 연구논문을 발행해 왔으며, 1991-2011년에는 대부분의 논문이 미국을 대상으로 수행되었다. 반면, 중국은 2003년 1편을 시작으로 2012년 이후 급격히 증가하여 2020년대에는 연간 200편 이상의 논문이 발행되며 미국을 추월하였다. 캐나다(511편)와 브라질(503편) 역시 2012년 이후 연간 20-50편 수준의 논문이 지속적으로 발행되고 있으며, 인도(381편)의 경우 2020년 이후 급격한 증가세를 보여 2024-2025년에는 연간 76-86편이 발행되어 향후 주요 연구 수행국으로 부상할 것으로 전망된다.

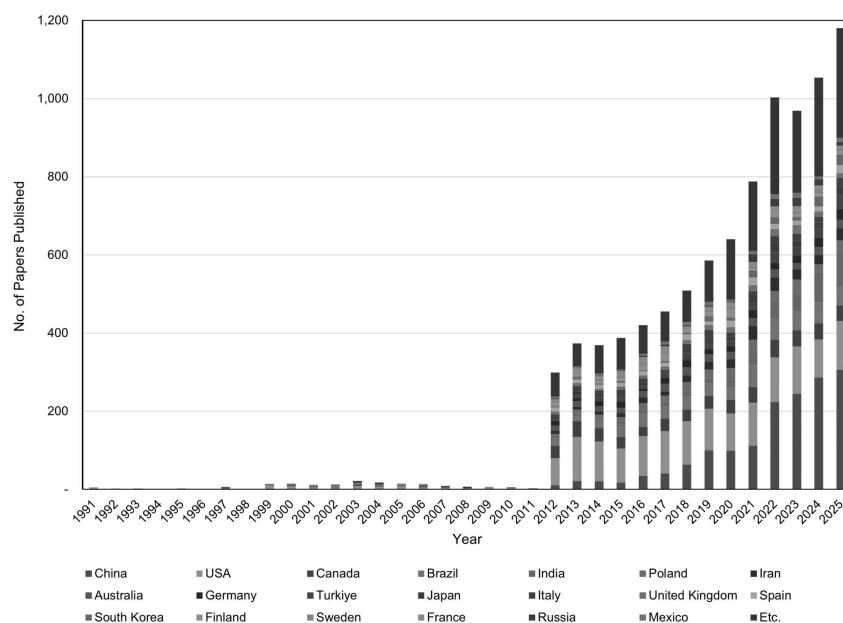


Fig. 2. Regional distribution in number of international research papers related to forest roads in each period from 1991 to 2025.

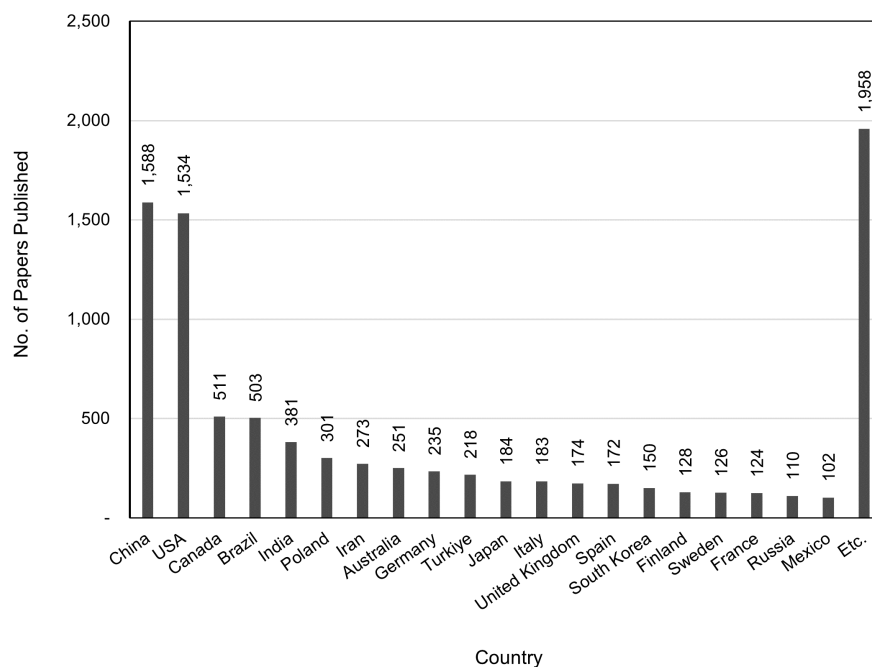


Fig. 3. Regional distribution in number of international research papers related to forest roads.

한편, 우리나라를 대상으로 한 연구논문은 총 150편으로 상위 15위에 해당하였으나, 2012년 이전에는 1편에 불과하였고 2020년 이후에 연간 9~26편 수준으로 증가하여 비교적 최근에 연구가 본격화된 것으로 나타났다.

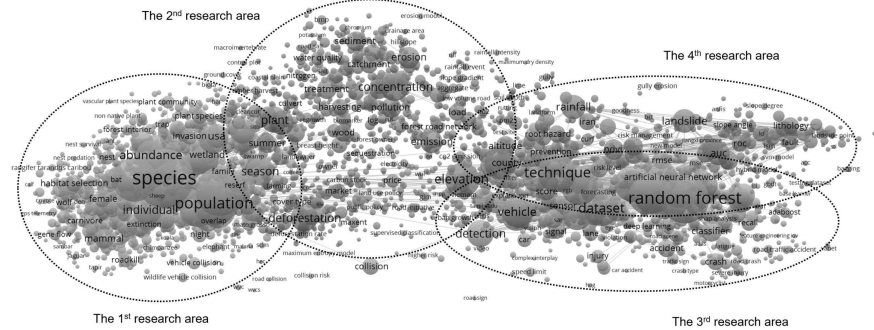


Fig. 4. A thematic map displaying networks of four research areas classified by text mining and co-word analysis.

2. 임도 관련 국제 연구논문의 연구영역 분석 결과

VOSviewer 프로그램을 통한 텍스트마이닝을 실행하여 9,244편의 연구논문의 영문 제목과 초록으로부터 총 188,809개의 주제단어(구)를 추출하였다. 이 중에서 10편 이상의 연구논문에서 출현한 주제단어(구)는 총 5,368개로 나타났으며, 이후 주제단어 적정점수(relevance score)가 상위 60%에 해당하는 총 3,221개의 주제단어(구)를 최종적으로 추출하였다.

최종 추출된 3,221개의 주제단어(구)를 대상으로 동시출현단어 분석을 진행한 결과(Fig. 4), 임도 관련 국제 연구는 4개의 주된 연구영역으로 구분되었다. 4개의 연구영역별로 출현빈도가 높은 주제단어(구)를 Table 1에 기재하였다.

제1연구영역에는 1,171개의 주제단어(구)가 포함되었다. 이 중 species(1,983회), habitat(1,134회), population(1,102회), wildlife(343회), animal(340회), bird(246회), mammal(222회) 등 야생동물의 종구성 및 서식환경에 관한 키워드가 높은 빈도로 출현하였다. 또한, landscape(1,358회), connectivity(356회), fragmentation(354회), edge(342회) 등 임도의 건설로 인한 서식지 단편화 및 경관 구조의 변화에 관한 키워드와, conservation(726회), biodiversity(573회), protected area(345회) 등 생물다양성 보전에 관한 키워드도 다수 출현하였다. 아울러 mortality(245회), movement(435회) 등 임도가 야생동물 개체의 이동 및 생존에 미치는 영향과 관련된 키워드도 확인되었다. 도로생태학(road ecology) 분야에서 도로의 건설은 서식지의 단편화를 초래하고, 이에 따른 경관 연결성의 저하는 야생동물의 이동 제한 및 개체군 고립으로 이어지는 것으로 보고되고 있다(Coffin, 2007; Trombulak and Frissell, 2000). 이상의 주제단어

Table 1. Top 20 most frequent words in each research area classified by text mining and co-word analysis

Research area	Top 20 most frequent words
1st	Species, landscape, habitat, population, conservation, biodiversity, abundance, disturbance, season, individual, diversity, movement, composition, connectivity, fragmentation, protected area, wildlife, edge, animal, usa
2nd	Concentration, deforestation, plant, stand, emission, erosion, pollution, transportation, content, sediment, watershed, treatment, biomass, wood, logging, catchment, tropical forest, load, runoff, harvesting
3rd	Random forest, accuracy, technique, algorithm, prediction, performance, dataset, machine, vehicle, classification, image, machine learning, detection, technology, support vector machine, svm, speed, imagery, machine learning model, random forest model
4th	Elevation, aspect, rainfall, landslide, auc, logistic regression, curve, county, ndvi, altitude, normalized difference vegetation index, training, validation, sensitivity, rf model, lithology, iran, hazard, susceptibility, roc

(구)는 이러한 인과관계를 반영하고 있는 것으로 판단되며, 이를 종합하여 제1연구영역을 ‘임도에 의한 서식지 단편화가 야생동물 및 경관 연결성에 미치는 영향’에 관한 연구영역으로 판단하였다.

제2연구영역에는 939개의 주제단어(구)가 포함되었다. 이 중 erosion(271회), sediment(229회), runoff(164회), soil erosion(154회), catchment(180회), watershed(229회) 등 임도의 건설 및 이용이 토양 침식과 수계에 미치는 영향에 관한 키워드가 높은 빈도로 출현하였다. 또한, logging(183회), harvesting(163회), timber(160회), truck(132회), transportation(239회), road surface(127회) 등 임도를 활용한 산림수확 및 목재 운반에 관한 키워드와, deforestation(431회), emission(301회), pollution(246회), concentration(470회) 등 임도 이용에 수반되는 광범위한 환경 영향에 관한 키워드도 다수 출현하였다. 이는 임도가 산림수확 및 목재 운반을 위한 핵심 인프라로서 기능하는 동시에, 그 건설과 이용 과정에서 토양 유실, 수질 오염, 탄소 배출 등 다양한 환경 문제를 유발할 수 있다는 점을 반영하는 것으로 판단된다. 이를 종합하여 제2연구영역을 ‘임도 기반 산림작업에 따른 토양·수계 환경 영향’에 관한 연구영역으로 판단하였다.

제3연구영역에는 756개의 주제단어(구)가 포함되었다. 이 중 random forest(1,358회), accuracy(905회), algorithm(834회), prediction(775회), machine learning(435회), support vector machine(356회), decision tree(225회), xgboost(221회) 등 기계학습 기법에 관한 키워드가 높은 빈도로 출현하였다. 또한, vehicle(582회), speed(290회), safety(260회), accident(180회), crash(173회), collision(165회) 등 임도 상에서의 차량 운행 및 사고 위험과 관련된 키워드와, image(485회), classification(485회), detection(424회), LiDAR(132회), imagery(276회), sensing(261회) 등 원격탐사 기술을 활용한 임도의 탐지 및 노면 상태 분류에 관한 키워드도 다수 출현하였다. 이는 기계학습과 원격탐사 기술이 임도의 자동 탐지, 노면 상태 평가, 임목 운반 차량의 운행 경로 최적화 및 안전성 분석 등에 광범위하게 적용되고 있음을 보여준다. 이를 종합하여 제3연구영역을 ‘기계학습 및 원격탐사 기술을 활용한 임도 탐지·분류 및 안전성 분석’에 관한 연구영역으로 판단하였다.

제4연구영역에는 355개의 주제단어(구)가 포함되었다. 이 중 elevation(686회), aspect(539회), rainfall(346회), altitude(229회), lithology(171회) 등 산사태 발생에 영향을 미치는 지형·지질·기상 인자에 관한 키워드가 높은 빈도로 출현하였다. 또한, landslide(327회), susceptibility(163회), hazard(165회), landslide susceptibility mapping(114회) 등 산사태 감수성 평가 및 위험지도 작성에 관한 키워드와, AUC(313회), logistic regression(267회), NDVI(236회), validation(205회), AHP(116회), ROC(155회) 등 평가 모델의 구축 및 검증에 활용되는 통계·공간 분석 기법에 관한 키워드도 다수 출현하였다. 임도는 산지사면의 절토 및 성토를 수반하여 건설되므로, 임도의 건설 자체가 사면의 안정성에 영향을 미칠 수 있으며, 기후변화에 따른 극한 강수의 빈도 증가는 임도 주변 지역의 산사태 위험성을 더욱 높이는 요인으로 작용하고 있다. 이를 종합하여 제4연구영역을 ‘임도 주변 지역의 산사태 감수성 평가 및 재해위험지도 작성’에 관한 연구영역으로 판단하였다.

비록 이상에서 본 바와 같이 임도 관련 국제 연구는 총 4개의 독립된 연구영역으로 구분되었지만, 이들 연구영역 간에는 내용상 밀접한 상호 연관성이 존재한다. 제1연구영역(임도에 의한 서식지 단편화가 야생동물 및 경관 연결성에 미치는 영향)과 제2연구영역(임도 기반 산림작업에 따른 환경 영향)은 임도의 건설과 이용이 산림생태계에 미치는 생물학적·물리적 영향을 각각 다룬다는 점에서 상호 보완적이다. 제3연구영역(기계학습 및 원격탐사 기술을 활용한 임도 탐지·분류 및 안전성 분석)은 제1·제2·제4연구영역에서 수행되는 연구에 분석 도구 및 기법을 제공하는 방법론적 성격을 동시에 지닌다. 실제로 기계학습 기법은 산사태 감수성 평가(제4연구영역)에서 예측 모델로, 원격탐사 기술은 서식지 분석(제1연구영역) 및 토양 침식 모니터링(제2연구영역)에서 데이터 수집 수단으로 광범위하게 활용되고 있다. 제4연구영역(임도 주변 지역의 산사태 감수성 평가 및 재해위험지도 작성)은 임도의 건설에 수반되는 지형적 불안정성을 평가한다는 점에서 제2연구영역의 토양 침식 관련 연구와 깊은 연관성을 지니고 있다.

3. 국제 연구논문의 연구영역별 발행연대 및 대상국가 분석 결과

4개 연구영역이 전체 연구논문 중에서 점유하고 있는 비율을 연대별로 분석한 결과(Fig. 5), 연구영역별 점유율에 뚜렷한 시간적 변화가 확인되었다.

1990년대에는 제2연구영역이 약 37%로 가장 높은 점유율을 차지하였으며, 제1연구영역이 약 30%, 제4연구영역이 약 22%, 제3연구영역이 약 11%의 순으로 나타났다. 이 시기에는 임도의 건설 및 이용이 토양 침식과 수질에 미치는 영향, 그리고 목재 운반 효율성에 관한 연구가 주를 이루었음을 알 수 있다.

2000년대에는 제2연구영역이 약 35%로 여전히 가장 높은 점유율을 유지하였으나, 1990년대에 비해 소폭 감소하였다. 제1연구영역은 약 28%, 제4연구영역은 약 25%, 제3연구영역은 약 12%로 나타나, 1990년대와 유사한 분포를 보였다. 다만, 제4연구영역의 점유율이 22%에서 25%로 증가하여 산사태 감수성 평가에 대한 관심이 점차 높아지고 있음을 확인할 수 있었다.

2010년대에는 연구영역별 점유율의 분포에 변화가 나타나기 시작하였다. 제1연구영역이 약 32%로 가장 높은 점유율을 차지하였으며, 제4연구영역이 약 27%, 제2연구영역이 약 26%, 제3연구영역이 약 15%로 나타났다. 주목할 만한 점은 1990년대 이후 가장 높은 점유율을 유지해 왔던 제2연구영역의 점유율이 제1연구영역보다 낮아졌다는 것이며, 이는 임도 연구의 관심이 산림작업에 수반되는 환경 영향에서 도로생태학 분야로 점차 확장되고 있음을 보여준다.

2020년대에는 연구영역별 점유율의 분포가 이전 시기와는 뚜렷이 구별되는 양상을 보였다. 제4연구영역이 약 30%로 전체 연구영역 중 가장 높은 점유율을 기록하였으며, 제3연구영역이 약 24%로 1990년대(11%) 대비 2배 이상 증가하여 가장 큰 폭의 성장을 나타냈다. 반면, 제1연구영역은 약 23%, 제2연구영역은 약 22%로 감소하여, 4개 연구영역의 점유율이 과거에 비해 상대적으로 균등한 분포를 보이는 것으로 나타났다. 제3연구영역의 급격한 성장은 최근 기계학습, 딥러닝, LiDAR, UAV 등 첨단 기술의 발전에 따라 이들 기술을 임도 연구에 적용하는 사례가 급증한 것과 밀접한 관련이 있을 것으로 판단되며, 제4연구영역의 성장은 기후변화에 따른 극한 강수 사상의 빈도 증가와 이에 수반되는

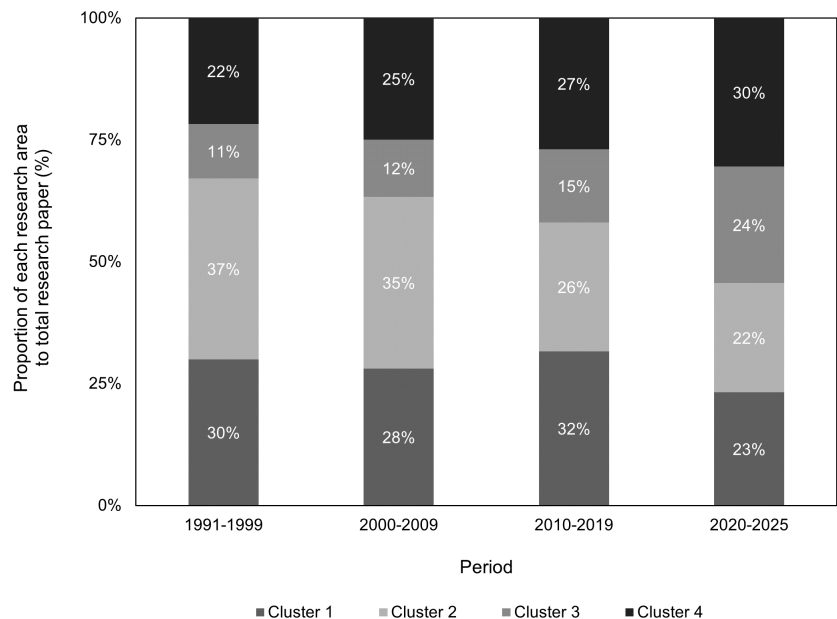


Fig. 5. Changes in proportions of research areas including the international research papers related to forest roads in the periods of 1991-1999, 2000-2009, 2010-2019, and 2020-2025.

산사태 피해의 심화가 임도 주변 지역의 재해위험성 평가에 대한 학술적·정책적 수요를 높인 결과로 사료된다. 이와 더불어, 2020년 전후의 COVID-19 팬데믹은 현장 조사가 제한된 연구 환경 속에서 원격탐사·UAV·기계학습 기반의 비접촉적 분석 방법이 한층 광범위하게 채택되도록 작용함으로써, 제3연구영역에 해당하는 연구의 성장을 일부 가속한 외적 요인으로 해석할 수 있다. 다만, 제3연구영역의 점유율 증가는 2012년 전후부터 이미 진행되어 온 기술적 전환의 연장선에 있으므로, 팬데믹은 주요 원인이라기보다 기존 흐름을 가속한 부수적 요인으로 보는 것이 적절하다.

연구영역별 대상국가의 점유율을 분석한 결과(Table 2), 각 연구영역을 주도하는 국가에 뚜렷한 차이가 확인되었다.

Table 2. Regional proportions of international research papers related to forest roads in each research area

The 1st research area ¹⁾		The 2nd research area ²⁾		The 3rd research area ³⁾		The 4th research area ⁴⁾	
Study country	Proportion (%)	Study country	Proportion (%)	Study country	Proportion (%)	Study country	Proportion (%)
USA	19	USA	18	China	25	China	22
China	13	China	16	USA	13	USA	13
Canada	8	Canada	5	India	6	India	6
Brazil	7	Brazil	5	Canada	4	Iran	6
India	4	India	4	Iran	4	Canada	4
Australia	3	Poland	4	Brazil	3	Brazil	4
Poland	3	Iran	3	Turkiye	3	Turkiye	3
Germany	3	Germany	3	Poland	2	Australia	2
United Kingdom	2	Australia	3	Australia	2	Poland	2
Iran	2	Turkiye	2	South Korea	2	Germany	2
Spain	2	Italy	2	Germany	2	Italy	2
Italy	2	Japan	2	Spain	2	South Korea	2
Japan	2	United Kingdom	2	Italy	2	Japan	2
France	2	Spain	2	United Kingdom	2	Spain	2
Mexico	2	Finland	2	Japan	1	United Kingdom	2
Turkiye	1	Sweden	2	Finland	1	France	1
South Korea	1	Russia	1	France	1	Sweden	1
Sweden	1	South Korea	1	Sweden	1	Finland	1
Russia	1	France	1	Russia	1	Mexico	1
Finland	1	Mexico	1	Mexico	1	Russia	1
Etc	21	Etc	21	Etc	22	Etc	22
Total	100	Total	100	Total	100	Total	100

¹⁾ The 1st research area: Impacts of forest road-induced habitat fragmentation on wildlife and landscape connectivity.

²⁾ The 2nd research area: Soil and hydrological environmental impacts of forest road-based operations.

³⁾ The 3rd research area: Forest road detection, classification, and vehicle operation safety analysis using machine learning and remote sensing technologies.

⁴⁾ The 4th research area: Landslide susceptibility assessment and hazard mapping in areas adjacent to forest roads.

제1연구영역에서는 미국이 약 19%로 가장 높은 점유율을 차지하였으며, 중국(13%), 캐나다(8%), 브라질(7%)이 그 뒤를 이었다. 미국과 캐나다의 점유율이 다른 연구영역에 비해 상대적으로 높게 나타났는데, 이는 양국에서 임도가 야생동물의 이동 및 서식에 미치는 생태적 영향에 관한 연구가 오랜 기간에 걸쳐 활발히 수행되어 온 것과 관련이 있을 것으로 판단된다.

제2연구영역에서는 미국이 약 18%로 가장 높은 점유율을 보였으며, 중국(16%), 캐나다(5%), 브라질(5%)이 그 뒤를 이었다. 이 연구영역에서는 상위 국가들의 점유율 차이가 비교적 작게 나타났으며, 폴란드(4%), 이란(3%), 호주(3%) 등 다양한 국가에서 비교적 고르게 연구가 수행되고 있는 것으로 나타났다.

제3연구영역에서는 중국이 약 25%로 가장 높은 점유율을 차지하여 다른 연구영역에 비해 압도적인 비중을 나타냈다. 미국(13%), 인도(6%), 캐나다(4%)가 그 뒤를 이었다. 중국의 높은 점유율은 최근 중국에서 기계학습 및 원격탐사 기술을 산림 분야에 적용하는 연구가 급격히 활성화되고 있음을 반영하는 것으로 사료된다.

제4연구영역에서는 중국이 약 22%로 가장 높은 점유율을 차지하였으며, 미국(13%), 인도(6%), 이란(6%)이 그 뒤를 이었다. 인도와 이란이 다른 연구영역에 비해 이 연구영역에서 상대적으로 높은 점유율을 보인 것은, 양국의 산악 지형과 강우 특성에 기인한 산사태 위험성이 관련 연구의 수요를 높인 결과로 판단된다.

전반적으로 미국은 제1·제2연구영역에서, 중국은 제3·제4연구영역에서 상대적으로 높은 점유율을 보여, 미국은 임도의 생태적·환경적 영향에 관한 연구를 주도해 온 반면, 중국은 첨단 기술의 적용 및 재해위험성 평가 분야에서 최근 급격한 성장을 이루고 있는 것으로 나타났다.

한편, 우리나라는 모든 연구영역에서 약 1-2%의 점유율을 보여 국제 학술지 기준으로는 전체적으로 낮은 수준에 머물러 있었다. 그러나 이러한 낮은 점유율이 곧 국내 연구의 부재를 의미하는 것은 아니다. 한국학술지인용색인(Korea Citation Index, <https://www.kci.go.kr>)에서 ‘임도’를 검색어로 하여 국내 연구논문을 수집한 결과 총 57편이 확인되었다. 이는 국제 연구논문 9,244편에 비해 매우 적은 수로, VOSviewer 프로그램을 활용한 동시출현단어 분석을 통해 연구영역을 분류하기에는 주제단어의 출현 빈도가 충분하지 않아 정량적 분석이 불가능하였다. 따라서 이 연구에서는 한국학술지인용색인에 등재된 임도 관련 국내 선행연구를 4개 연구영역별로 살펴보고, 국제 연구의 핵심 동향과 비교하여 국내 연구의 특성을 연구 스케일, 방법론적 정교화 수준, 연구 동기의 세 가지 측면에서 고찰하였다.

먼저, 제1연구영역과 관련하여 민주지산 임도를 대상으로 개설 전·후 장기간에 걸친 식물상 및 식생 변화를 추적하여 임도 조성이 식생 군집구조와 종 조성에 미치는 영향을 분석한 연구가 수행되었고(Han *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2023), 조류의 행동권 변화 및 소형 설치류의 개체군 특성 차이를 비교함으로써 임도가 야생동물의 공간 이용과 서식지 이용 양상에 미치는 생태적 영향을 검토한 연구도 보고된 바 있다(Han *et al.*, 2019; Lim *et al.*, 2007). 또한, 제2연구영역과 관련해서도 국내에서는 인공강우실험을 통해 임도 노면의 식생 피복 및 토양수분조건이 지표유출량과 토양유실량에 미치는 영향을 평가한 연구가 있었으며(Yu *et al.*, 2015), 임도 시설 전·후의 접근성 변화와 조림 및 숲가꾸기 작업비용 절감효과를 실증적으로 분석한 연구도 수행되었다(Hwang *et al.*, 2015). 아울러 임도 배수시설 규격 산정 프로그램을 개발하여 유역 유출량과 배수구조물의 적정 배치를 지원하고자 한 연구와(Choi *et al.*, 2011), 횡단배수구 유출구의 피해 예측을 통해 유지관리상의 취약요인을 도출한 연구도 보고되어(Kim *et al.*, 2018), 국내 임도 연구가 산림작업 기반시설의 효율성 제고와 환경영향 저감을 함께 다루어 왔음을 보여준다.

제3연구영역은 우리나라가 타 연구영역에 비해 상대적으로 높은 점유율을 보인 분야로, 국내에서도 기계학습 및 원격탐사 기술을 임도에 적용하려는 시도가 최근 증가하고 있다. 실제로 드론 LiDAR를 활용하여 임도 노선 계획과 시공 검측을 위한 지형자료 구축 및 토공량 산정의 활용성을 평가한 연구가 있었고(Park and Eom, 2024), 모바일 맵핑 시스템 및 레이저 스캐닝 기술을 활용하여 포인트

클라우드 기반의 시공간리 데이터와 산림공간정보를 구축한 연구도 수행되었다(Park and Lee, 2023a, 2023b). 이와 함께 GIS와 다기준의사결정기법을 결합하여 임도시공 우선지역과 최소비용경로를 도출한 연구는 국내에서도 공간정보 기반의 임도 계획·설계 연구가 진전되고 있음을 보여준다(Lee and Lim, 2022). 마지막으로 제4연구영역과 관련해서는 구조방정식 모형과 로지스틱 회귀분석을 이용하여 임도비탈면 산사태의 주요 영향인자를 규명한 연구가 수행되었고(Kim et al., 2022a), GIS 기반 재해위험지 지도를 구축함으로써 재해 취약구간의 공간적 분포를 제시한 연구도 보고되었다(Park et al., 2016). 또한 로지스틱 회귀모형을 이용하여 임도 붕괴 위험도를 평가한 연구와(Back et al., 2016), 집중호우 시 임도 산사태의 발생 원인을 물리·역학적 및 지형학적 특성 측면에서 분석한 연구도 수행되어(Kim et al., 2022b), 국내에서도 임도 재해위험의 예측과 공간적 진단을 위한 연구가 꾸준히 축적되어 왔음을 보여준다.

위와 같이 국내에서도 4개 연구영역 전반에 걸쳐 연구가 수행되어 왔으나, 이 연구에서 도출된 국제 연구의 핵심 동향과 비교할 때 다음과 같은 질적 차이가 확인된다. 첫째, 연구 스케일 측면에서 국제 연구는 국가·대륙 또는 전 지구 단위의 광역 분석이 주류를 이루는 반면, 국내 연구는 민주지산(Han et al., 2018; Kim et al., 2023), 상산마을(Kim et al., 2022b), 전라북도 일원(Park et al., 2016) 등 특정 임도 또는 특정 지역을 대상으로 한 사례연구가 중심을 이룬다. 이는 우리나라의 임도가 비교적 좁은 산림 권역 내에서 집중적으로 개설되어 있다는 지리적 특성과, 임도 연구가 상대적으로 최근에 본격화되어 광역적 데이터 축적이 충분치 않은 상황에 기인한 것으로 판단된다. 둘째, 방법론적 측면에서 국제 연구의 제3·제4연구영역은 Random Forest, XGBoost, SVM 등의 기계학습 앙상블 기법과 LiDAR·UAV 기반 원격탐사가 결합된 형태로 고도화되고 있는 반면, 국내 연구는 동일한 기술적 도구(드론 LiDAR, 모바일 맵핑 시스템)를 활용하더라도 시공 검측·측량 보조 등의 적용 목적이 우세하며(Park and Eom, 2024; Park and Lee, 2023a, 2023b), 산사태 평가에 있어서도 로지스틱 회귀모형이나 구조방정식 모형 등 전통적 통계 기법이 주를 이루고 있다(Back et al., 2016; Kim et al., 2022a). 셋째, 연구 동기 측면에서 국제 연구가 임도의 생태적·환경적 영향 평가 및 위험 예측 등 학술적 관심에 기반하는 경우가 많은 반면, 국내 연구는 제5차 전국임도기본계획(2021-2030년)에 따른 임도망 확충 정책과 연계되어 시공 효율화, 재해 저감, 작업비용 절감 등 정책 수요와 결합된 응용 연구의 비중이 높다(Choi et al., 2011; Hwang et al., 2015). 이상의 비교는 국내 임도 연구가 단순히 국제 연구의 양적 축소판이 아니라, 우리나라의 산림 인프라 정책 환경과 결합된 차별적 연구 지향을 형성해 왔음을 보여준다. 향후 국내 연구가 광역 스케일의 분석과 첨단 기계학습 기법의 적극적인 도입을 통해 국제 연구동향과 보완적으로 결합될 경우, 학술적·정책적 기여도가 한층 높아질 것으로 기대된다.

IV. 요약

이 연구에서는 임도 관련 국제 연구의 동향을 파악하기 위한 연구의 일환으로 Web of Science에 등재된 SCI(E)급 연구논문 9,244편을 대상으로 VOSviewer 프로그램을 활용한 텍스트마이닝과 동시출현단어 분석을 수행하여 연구동향의 시·공간적 변화를 파악하였다.

그 결과, 임도 관련 국제 연구논문은 1991년 최초 발행 이후 2012년을 기점으로 급격히 증가하여, 전체 논문의 약 98%가 2010년 이후에 발표된 것으로 나타났다. 연구대상 국가의 분석 결과, 총 131개 국가에서 연구가 수행되었으며, 중국(1,588편)과 미국(1,534편)이 최상위를 차지하였다. 미국은 초기부터 꾸준히 연구를 수행해 온 반면, 중국은 2012년 이후 급격히 증가하여 최근에는 미국을 추월하였다. 대한민국은 총 150편으로 15위에 해당하였으나, 2012년 이전에는 1편에 불과하여 비교적 최근에 연구가 본격화된 것으로 나타났다.

동시출현단어 분석을 통해 임도 관련 국제 연구는 (i) 임도에 의한 서식지 단편화가 야생동물 및

경관 연결성에 미치는 영향, (ii) 임도 기반 산림작업에 따른 토양·수계 환경 영향, (iii) 기계학습 및 원격탐사 기술을 활용한 임도 탐지·분류 및 안전성 분석, (iv) 임도 주변 지역의 산사태 감수성 평가 및 재해위험지도 작성의 총 4개 연구영역으로 구분할 수 있었으며, 이들 연구영역은 상호 간에 밀접한 연관성을 지니고 있는 것으로 판단된다.

연구영역별 발행연대 점유율의 변화를 연대별로 분석한 결과, 1990년대에는 제2연구영역이 약 37%로 가장 높은 비중을 차지하여, 임도 연구의 초기에는 토양 침식, 수질 오염, 목재 운반 등 산림작업에 수반되는 환경 영향에 관한 연구가 주를 이루었음을 확인할 수 있었다. 2010년대에 들어서는 제1연구영역이 약 32%로 가장 높은 점유율을 차지하여 도로생태학 분야로 연구의 관심이 확장되었음을 알 수 있었다. 2020년대에는 제4연구영역이 약 30%로 가장 높은 점유율을 기록하였으며, 제3연구영역이 약 24%로 1990년대(11%) 대비 2배 이상 증가하여 가장 큰 폭의 성장을 보였다. 이는 기후변화에 따른 산사태 피해의 심화와 기계학습·원격탐사 등 첨단 기술의 급속한 발전이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

연구영역별 대상국가 점유율의 분석에서는 연구영역을 주도하는 국가에 뚜렷한 차이가 확인되었다. 미국은 제1·제2연구영역에서 상대적으로 높은 점유율을 보여 임도의 생태적·환경적 영향에 관한 연구를 오랜 기간 주도해 온 반면, 중국은 제3연구영역(25%)과 제4연구영역(22%)에서 압도적인 점유율을 보여 첨단 기술의 적용 및 재해위험성 평가 분야에서 최근 급격한 성장을 이루고 있는 것으로 나타났다. 대한민국은 모든 연구영역에서 1-2%의 낮은 점유율에 머물러 있었으나, 이는 국내 연구의 절대적 부족이라기보다 SCI(E)급 국제학술지 중심의 자료 수집 범위에 따라 국내 연구성과의 국제적 가시성이 제한된 결과로 판단된다. 실제로 KCI에 등재된 임도 관련 국내 연구논문에서는 4개 연구영역 모두에서 국내 연구가 수행되어 왔음을 확인할 수 있었다. 다만, 국제 연구와 비교할 때 국내 연구는 단일 임도 단위의 사례연구 중심이며, 첨단 기계학습 기법의 활용 또한 상대적으로 제한적이고, 임도망 확충 정책과 결합된 응용 연구의 비중이 높다는 점에서 차별적인 연구 지향을 보이고 있다.

우리나라의 경우 국토 면적의 약 63%가 산지로 이루어져 있으며, 제5차 전국임도기본계획(2021~2030년)에 따라 임도망의 체계적 확충이 추진되고 있는 상황에서, 임도의 건설 및 이용이 산림생태계에 미치는 영향에 대한 과학적 근거의 축적은 더욱 중요해지고 있다. 이 연구에서 파악된 국제 연구동향, 특히 기계학습·원격탐사 기술의 적용과 산사태 감수성 평가 분야의 급격한 성장, 그리고 4개 연구영역 간의 밀접한 상호 연관성은 향후 국내 임도 연구의 방향성을 설정하는 데 유용한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 아울러 향후 국내 연구가 광역 스케일의 분석과 첨단 기계학습 기법의 적극적 도입을 통해 국제 연구동향과 보완적으로 결합되고, 동시에 국내 연구성과가 지속적으로 축적된다면, 이 연구에서 적용한 텍스트마이닝과 동시출현단어 분석기법을 활용하여 국제 연구동향과 국내 연구동향을 정량적으로 비교하는 후속 연구가 가능할 것으로 사료된다.

V. 감사의 글

이 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(RS-2026-25506084)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

VI. 참고문헌

1. Acosta FC, Rengifo SP, García ML, Matricardi EAT, Briceño Castillo G. 2023. Road network planning in tropical forests using GIS. *Croat J For Eng* 44:153-169.

2. Baek SA, Jo GH, Hwang JS, Jung DH, Park JW, Choi BG, Cha DS. 2016. Assessment of slope failures potential in forest roads using a logistic regression model. *J Korean Soc For Sci* 105:429-434.
3. Birkle C, Pendlebury DA, Schnell J, Adams J. 2020. Web of Science as a data source for research on scientific and scholarly activity. *Quant Sci Stud* 1:363-376.
4. Boston K. 2016. The potential effects of forest roads on the environment and mitigating their impacts. *Curr For Rep* 2:215-222.
5. Bugday E. 2022. A GIS based landslide susceptibility mapping using machine learning and alternative forest road routes assessment in protection forests. *Şumarski list* 146:137-147.
6. Choi YH, Lee JW, Kim MJ. 2011. A study on development standard calculation program of forest road drainage facilities. *J Korean Soc For Sci* 100:25-33.
7. Choi YH, Park BJ, Lim HJ, Kim GW, Joung DW, Lee JW, Miyazaki Y. 2013. Optimum walk speed for health promotion in forest road: Target heart rate control to use walk speed. *J Korean Inst For Recreat* 17:27-32.
8. Coffin AW. 2007. From roadkill to road ecology: A review of the ecological effects of roads. *J Transp Geogr* 15:396-406.
9. Croke JC, Hairsine PB. 2006. Sediment delivery in managed forests: A review. *Environ Rev* 14:59-87.
10. Dimitrakopoulos AP. 2000. Preliminary distribution of forest fires and burned area according to initial attack time in Greece, during the decade 1986-1995. *Dasike Ereuna Nea Seira* 13:26-36.
11. Forman RTT, Alexander LE. 1998. Roads and their major ecological effects. *Annu Rev Ecol Syst* 29:207-231.
12. Han SW, Jin SD, Lim EH, Choi SH, Lee JW. 2019. Change of bird's home range according to forest road construction in Mt. Minjujisan. *Korean J Ornithol* 26:116-121.
13. Han SW, Kweon HK, Lee SM, Kim HS, Lee JW. 2018. A comparative study of flora and vegetation change before and after forest road construction in the research site of Minjujisan. *Korean J Environ Ecol* 32:392-412.
14. Hayati E, Majnounian B, Abdi E, Sessions J, Makhdom M. 2013. An expert-based approach to forest road network planning by combining Delphi and spatial multi-criteria evaluation. *Environ Monit Assess* 185:1767-1776.
15. Hwang JS, Ji BY, Jung DH, Cho MJ. 2015. Effect of forest road network on accessibility and cost reduction for forest operations (I): Silvicultural operations. *J Korean Soc For Sci* 104:615-621.
16. Jeon H, Choe YJ, Kwon H, Hwang YI, Lee JW. 2024. Analyzing changes in media coverage of forest roads from 2014 to 2023: A text mining approach. *Korean J Agric Sci* 51:655-668.
17. Jeon HC. 2015. Estimating public benefits of forest roads in natural recreation forests using DBCV: An example of forest recreation and activities. *J Transp Res* 22:77-91.
18. Ji BY, Hwang JS, Jung DH, Kweon HK. 2015. Preference analysis of administrator group for public forest road use (1): Problems of forest road use and standards and suggestions for future improvement. *Korean J Agric Sci* 42:341-346.

19. Kim C, Han S, Lee SI, Seo JI, Song C. 2025. Analysis of domestic research trend on forest trails using keyword network analysis. *J Korean Soc For Sci* 114:73-83.
20. Kim HS, Lee JW, Lee SM. 2023. Analysis of change in flora and vegetation in the research sites before and after the forest road construction in Minjujisan in Korea: Focused on the forest road at Jeollabuk-do Muju-gun Seolcheon-myeon Micheon-ri Minjujisan area. *Korean J Environ Ecol* 37:367-391.
21. Kim HS, Moon SW, Seo YS. 2022a. Major factors influencing landslide occurrence along a forest road determined using structural equation model analysis and logistic regression analysis. *J Eng Geol* 32:585-596.
22. Kim HS, Seo YS, Moon SW. 2022b. Analysis of factors influencing landslide occurrence along a forest road near Sangsan Village, Chungju, Korea. *J Eng Geol* 32:73-83.
23. Kim MH, Hwang JS, Yu YM, Cha DS. 2018. A study on outlet damage prediction of pipe culverts in forest road. *J Korean Soc For Sci* 107:278-286.
24. Ko BJ, Eo SH. 2017. Mammalian research topics and trends in Korea. *Korean J Environ Ecol* 31:30-41.
25. Korea Forest Service. 2021. The 5th National Forest Road Basic Plan (2021-2030). Korea Forest Service, Daejeon, Korea.
26. Korea Forest Service. 2026a. Forest road density of major countries. Available from: https://www.forest.go.kr/kfsweb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?cmsId=FC_000812&mn=AR01_06_01. Accessed at Apr 2. 2026.
27. Korea Forest Service. 2026b. Press release. Available from: https://www.forest.go.kr/kfsweb/cop/bbs/selectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR_1036&mn=NKFS_04_02_01&nttId=3181077. Accessed at Apr 2. 2026.
28. Korea Ministry of Government Legislation. 2026. Creation and management of forest resources act. Available from: https://elaw.klri.re.kr/eng_service/lawView.do?hseq=67072&lang=ENG. Accessed at Apr 2. 2026.
29. Lee SI, Seo JI, Kim JH, Ryu DS, Seo JP, Kim DY, Lee CW. 2017. International research trend on mountainous sediment-related disasters induced by earthquakes. *J Korean Soc For Sci* 106:431-440.
30. Lee SI, Seo JI, Lee YH, Kim SW, Chun KW. 2019. Analysis of research trends on mountain streams in the Republic of Korea: comparison to international research trends. *J Ecol Environ* 33:216-227.
31. Lee SW, Lim CH. 2022. Exploring the priority area of policy-based forest road construction using spatial information. *J Korean Assoc Geogr Inf Stud* 25:94-106.
32. Lim SJ, Lee JY, Kim MJ, Park SJ, Lee EJ, Lee WS. 2007. Differences in small rodent populations between forest and forest road areas. *J Korean Soc For Sci* 96:245-250.
33. Lugo AE, Gucinski H. 2000. Function, effects, and management of forest roads. *For Ecol Manag* 133:249-262.
34. Thompson MT, Gannon BM, Caggiano MD. 2021. Forest roads and operational wildfire response planning. *Forests* 12:110.
35. Park JG, Eom DY. 2024. Utilization of drone LiDAR for route planning of forest road and construction inspection. *J Korea Acad Ind Coop Soc* 25:767-772.

36. Park JG, Lee GW. 2023a. Generation of forest road construction management data using mobile mapping system. *J Korea Acad Ind Coop Soc* 24:371-376.
37. Park JG, Lee GW. 2023b. Usability evaluation of laser scanning technology in establishing forest geospatial information for forest road construction. *J Korea Acad Ind Coop Soc* 24:41-46.
38. Park JH, Park JM, Oh KW. 2016. A GIS-based map construction of the danger-prone zones in forest roads in Jeollabuk-do. *J Agric Life Sci* 50:21-29.
39. Ring E, Wallgren M, Marald E, Westerfelt P, Djupström L, Davidsson A, Sonesson J. 2024. Forest roads in Sweden: Infrastructure with multiple uses and diverse impacts. *Silva Fenn* 58:article id 24021.
40. Robinson C, Duinker PN, Beazley KF. 2010. A conceptual framework for understanding, assessing, and mitigating ecological effects of forest roads. *Environ Rev* 18:61-86.
41. Testa J. 2011. The globalization of Web of Science 2005-2010. Thomson Reuters, Philadelphia, PA, USA.
42. Trombulak SC, Frissell CA. 2000. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conserv Biol* 14:18-30.
43. Van Eck NJ, Waltman L. 2010. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics* 84:523-538.
44. Van Eck NJ, Waltman L. 2011. Text mining and visualization using VOSviewer. *arXiv:1109.2058*.
45. Van Eck NJ, Waltman L. 2014. Visualizing bibliometric networks. In *Measuring scholarly impact: Methods and practice*. Ding Y, Rousseau R, Wolfram D (eds). pp 285-320. Springer, New York, NY, USA.
46. Waltman L, Van Eck NJ, Noyons ECM. 2010. A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks. *J Informetr* 4:629-635.
47. Yu S, Li Q, Lee EJ, Lim SJ. 2015. Predicting surface runoff and soil erosion from an unpaved forest road using rainfall simulation. *J Korea Soc Environ Restor Technol* 18:13-22.