creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

농학석사 학위논문

국유림의 지속가능한 경제적·공익적 기능을 고려한 적정 목재생산량 추정

Estimation of Optimal Timber Production for Sustainable Economic and Public Functions of Korea's National Forest

2023년 2월

서울대학교 대학원

농림생물자원학부 산림환경학 전공

정 유 진

국유림의 지속가능한 경제적·공익적 기능을 고려한 적정 목재생산량 추정

지도교수 한 희

이 논문을 농학석사 학위논문으로 제출함
2023년 2월

서울대학교 대학원
농림생물자원학부 산림환경학 전공
정 유 진

정유진의 석사 학위논문을 인준함
2023년 2월

위 원 장 임 상 준 (인)

부위원장 한 희 (인)

위 원 곽 두 안 (인)

국문초록

국유림은 민유림에 비해 높은 수준의 자본, 기술, 노동력 등을 투입할 수 있기 때문에 산림의 다양한 기능을 안정적으로 발휘할 것으로 기대된다. 이에 따라 국유림 확대를 위한 국가적 차원의 노력이 이루어지고 있으며, 산림에 대한 다양한 수요를 충분히 반영할 수 있는 국유림 경영이 요구된다. 하지만 현재 우리나라 국유림은 4영급 이상인 임분이 대부분을 차지하는 등 영급이 불균형한 상태에서 목재수확기에 도달하고 있다. 이 때 체계적인 경영계획에 의한 벌채가 이루어지지 않으면 국유림의 지속가능성을 보장하기 어렵다. 이에 본 연구는 국유림의 지속가능한 경제적·공익적 기능을 고려한 적정 목재생산량을 추정하였다.

이를 위해 먼저 우리나라 국유림에서 목재생산이 가능한 지역을 분석하였다. 목재생산 가능 지역은 법적·지리적·기술적 제약조건을 고려하였을 때 현실적으로 목재생산이 가능한 곳을 의미한다. 국유림의 목재생산 가능 지역을 분석하기 위해 수치 임상도와 토지소유구분도를 중첩한 뒤, 산지구분도, 하천망도, 수치표고모델, 도로망도, 임도망도를 순차적으로 추가하여 하나의 공간자료로 융합하였다. 목재생산 가능 지역을 분석한 결과, 우리나라의 잠재적 목재생산 가능 지역은 2,613천ha로 전체 산림면적의 43%를 차지하며 그 중 국유림의 목재생산 가능 지역은 488천ha이다. 다음으로 다목적 선형계획법을 이용하여 산림경영계획모델을 구축하였다. 다목적 선형계획법은 여러 경영 목표를 하나의 목적함수로 나타낼 수 있는 방법으로, 경영 목표는 산림의 경제적 기능과 공익적 기능의 종합적 발휘로 설정하였다. 경제적 기능으로 목재생산기능을, 공익적 기능은 데이터 취득과 정량화 가능성을 고려하여 탄소저장·수원함양·대기정화기능을 선정하였다. 제약조건은 목재생산의 보속성, 영급별 면적 비율, 수종별 면적 비율, 침엽수와 활엽수의 면적 비율을 포함하였고, 제약조건에 대한 구체적인 수치는 국유림의 지역산림계획을 참고하여 설정하

였다. 마지막으로 개발한 모델을 국유림 목재생산 가능 지역에 적용하여 100년 장기경영계획을 고려한 적정 목재생산량을 추정하였다. 모델 실행 결과로 분기별 수확 및 갱신 계획, 경제적 및 공익적 기능의 총량, 경제적 가치, 순현재가치 등을 확인할 수 있었다. 경영목적에 따른 산림경영계획의 변화를 분석하기 위해 목적함수의 가중치 조합을 달리하는 대안을 수립하였다. 여러 가중치 조합 중 목재생산, 탄소저장, 수원함양, 대기정화 기능을 동일하게 고려하는 경우와 각각의 기능을 최대화하는 경우를 비교하였다. 그 결과, 네 가지 기능을 동일하게 고려할 때 순현재가치의 총합이 가장 높게 나타나 여러 기능을 종합적으로 고려할 경우 경제적 가치가 높음을 알 수 있었다.

본 연구는 경제적·공익적 기능을 고려한 다목적 산림경영계획모델을 개발하여 현재 국유림의 목재생산 잠재량을 바탕으로 향후 100년간 국유림의 적정 목재생산량을 추정하였다. 개발된 모델을 이용하여 국유림의 산림경영 문제를 정량적으로 분석할 수 있으며, 산림의 경제적·공익적 가치를 동시에 고려한 경영계획을 수립할 수 있다. 또한 의사결정자의 정책적 판단 혹은 사회적 수요 변화에 따라 경영목적의 가중치를 변화시킬 수 있어 산림의 다양한 기능에 대한 고려가 가능하다.

주요어 : 국유림, 목재생산 잠재량, 산림의 공익적 기능, 영급 구조, 다목적 선형계획법, 장기 산림경영계획

학 번 : 2020-21813

목 차

국문초록 ····· i
목차 ····· v
표목차 ····· ix
그림목차 ····· x

제 1 장 서론 ····· 1
제 1 절 연구배경 및 목적 ····· 1
1. 연구배경 ····· 1
2. 연구목적 ····· 3
제 2 절 연구사 ····· 4
1. 목재 자원량 추정 ····· 4
2. 다목적 선형계획법 ····· 6
제 3 절 연구체계 ····· 8

제 2 장 국유림의 목재생산 잠재량 추정 ····· 9
제 1 절 목재생산 가능 지역 분석 ····· 9
1. 법적·지형적·기술적 제약조건 ····· 10
2. 목재생산 가능 지역 추출 과정 ····· 12
제 2 절 목재생산 잠재량 추정 ····· 13
제 3 절 결과 및 고찰 ····· 15

1. 소유별 목재생산 가능 지역 분석 ····· 15
2. 지역별·제약조건별 목재생산 가능 지역 분석 ····· 18
3. 제약조건 고려 수준에 따른 목재생산 가능 지역 비교 ····· 20
제 4 절 결론 ····· 22

제 3 장 국유림의 다목적 산림경영계획모델 구축 ····· 23
제 1 절 산림경영 문제정의 ····· 23
1. 경영목적 ····· 23
2. 제약조건 ····· 25
제 2 절 수식모형의 구성 ····· 26
1. 목적함수 ····· 30
2. 제약조건 ····· 30
2.1. 벌채 및 조림면적 ····· 30
2.2. 수확량 및 잔존재적, 비부조건 ····· 30
2.3. 공익적 기능의 총량 ····· 31
2.4. 분기별 목재수확량의 변화율 ····· 31
2.5. 영급별 면적 비율 ····· 31
2.6. 수종별 면적 비율 ····· 32
2.7. 침엽수·활엽수의 면적 비율 ····· 32
제 3 절 모델 내 함수 ····· 33
1. 산림기능의 정량화 ····· 33
1.1. 생장량 ····· 33
1.2. 탄소저장량 ····· 34
1.3. 수원함양량 ····· 37

1.4. 미세먼지 흡수량 ····· 38
2. 산림기능의 경제적 가치 분석 ····· 39
2.1. 목재생산의 경제적 가치 ····· 39
2.2. 탄소저장의 경제적 가치 ····· 40
2.3. 수원함양의 경제적 가치 ····· 40
2.4. 대기정화의 경제적 가치 ····· 41
2.5. 순현재가치 ····· 41

제 4 장 국유림의 적정 목재생산량 추정 ····· 42
제 1 절 경영구역 구분 ····· 42
제 2 절 산림경영 문제 분석 ····· 45
1. 임분 및 경영 정보 ····· 45
1.1. 임분 현황 ····· 45
1.2. 시업 체계 ····· 47
1.3. 계획기간 ····· 50
1.4. 기타 ····· 51
1.4.1. 생장량 ····· 51
1.4.2. 탄소저장량 ····· 51
1.4.3. 수원함양량 ····· 52
2. 제약조건 기준값 설정 ····· 52
제 3 절 결과 및 고찰 ····· 54
1. 적정 목재생산량 추정 ····· 54
2. 공익적 기능의 총량 및 순현재가치 추정 ····· 55
3. 영급 및 수종 분포의 변화 ····· 58

4. 가중치 분석 ····· 59
제 4 절 결론 ····· 61

제 5 장 종합결론 ····· 62

참고문헌 ····· 64
부 록 ····· 68
Abstract ····· 75

표 목 차

표 2-1. 목재생산 잠재량 추정을 위한 공간자료 목록 ····· 11
표 2-2. 지역별·수종별 임분재적 추정식 ····· 14
표 2-3. 소유별 산림면적 및 목재생산 가능 지역의 면적 ····· 15
표 2-4. 지역별·제약조건별 산림 면적 비율 ····· 19
표 3-1. 산림경영문제의 수식 모형 구성 ····· 27
표 3-2. 산림경영문제의 수식 모형 내 변수 및 함수 ····· 28
표 3-3. 수종별 탄소배출계수 ····· 36
표 3-4. 영급별·임상별·토양층별 조공극률 ····· 37
표 4-1. 경영구역별(A~E) 면적 및 축적 ····· 43
표 4-2. 대상지의 대표 수종과 포함 수종 ····· 46
표 4-3. 경영구역별(A~E) 주기능의 면적 ····· 47
표 4-4. 경영구역별(A~E) 부기능의 면적 ····· 48
표 4-5. 경영구역별(A~E)·산림기능별·수종별 시업체계 ····· 50
표 4-6. 경영구역별(A~E)·토양층별 평균 토심 ····· 52
표 4-7. 국유림 목재생산 가능 지역 경영의 제약조건 ····· 53
표 4-8. 각 기능별 총량과 순현재가치 ····· 56
표 4-9. 대안별 경영목적의 가중치 ····· 60
표 4-10. 대안별 순현재가치 ····· 60

그 림 목 차

그림 1-1. 연구체계 ····· 8
그림 2-1. 목재생산 가능 지역 분석 과정 ····· 9
그림 2-2. 전체 산림의 목재생산 가능 지역 분포 ····· 16
그림 2-3. 국유림의 목재생산 가능 지역 분포 ····· 17
그림 2-4. 지역별·소유별 목재생산 가능 지역의 면적 비율 ····· 19
그림 2-5. 지역별·대안별 목재생산 가능 지역의 면적 ····· 21
그림 3-1. 생장량 계산 과정 ····· 34
그림 3-2. 탄소저장량 계산 과정 ····· 35
그림 3-3. 수원함양량 계산 과정 ····· 37
그림 3-4. 미세먼지 흡수량 계산 과정 ····· 38
그림 4-1. 대상지의 경영구역(A~E) 구분 ····· 44
그림 4-2. 대상지의 영급 분포 현황 ····· 46
그림 4-3. 대상지의 분기별 목재생산량 ····· 55
그림 4-4. 대상지의 분기별 탄소저장량 ····· 56
그림 4-5. 대상지의 분기별 수원함양량 ····· 57
그림 4-6. 대상지의 분기별 미세먼지 흡수량 ····· 57
그림 4-7. 대상지의 영급 분포 변화 ····· 58
그림 4-8. 대상지의 수종 분포 변화 ····· 59

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경 및 목적

1. 연구배경

2020년 우리나라 국유림의 면적은 1,653천ha로 전체 산림의 약 26%를 차지하며, ha당 임목축적은 182m^3로 전국 평균인 165m^3를 상회한다(산림청, 2022b). 이는 국유림이 민유림에 비해 높은 수준의 자본, 기술, 노동력 등을 투입할 수 있고(장철수, 1995), 상대적으로 집약적인 관리가 이루어졌기 때문이다. 따라서 국유림은 장기적인 목재 수요에 대비한 산림자원의 비축기지 역할을 할 뿐 아니라, 산림에 요구되는 다양한 기능을 안정적으로 발휘할 수 있다. 이러한 이유로 산림청은 국유림을 확대하기 위해 「국유림의 경영 및 관리에 관한 법률」 제18조에 따라 10년마다 국유림확대계획을 수립하고 있으며, 2030년까지 국유림 비율을 32%까지 증가시키는 것을 목표로 설정하였다(김다민, 2015). 또한 산림분야 최상위 산림계획인 제6차 산림기본계획에서 향후 산림경영의 8대 전략 중 하나로 국유림 확대 및 집단화를 선정하였다. 즉, 국유림 확대의 중요성을 인식하여 국가적 차원의 노력이 이루어지고 있다.

한편 법과 제도를 통해 우리나라 국유림의 경영·관리 목표가 목재생산 중심에서 점차 넓어짐을 확인할 수 있다(김외정, 2003). 1919년 가시업안 편성규정에서는 국유림 경영의 목표로 '수확의 보속원칙'을 제시하였다. 이후 1939년 국유림시업안규정에서는 목재수확의 보속과 함께 전시경제를 대비하여 목재수확을 통한 수익 증가를 국유림 경영의 목표로 내

세웠다. 광복 이후 제정된 산림법은 당시 산림의 황폐화를 고려하여 산림자원의 증식을 생산보다 우선시하는 것을 산림관리의 목표로 설정하였다. 이렇듯 1960년대까지 국유림의 산림관리 목표는 산림자원 증식 및 목재생산에 국한되었다. 1970년대 치산녹화의 성공으로 충분한 산림자원을 축적함에 따라 산림관리의 방향이 변화하기 시작하였다. 목재생산이라는 산림의 전통적인 기능을 넘어 산림의 다양한 기능에 대한 수요가 증가하였고, 이에 따라 1980년 전문 개정된 산림법에서는 목재생산기능에 치중했던 산림관리의 목표를 공익적 기능의 증진으로까지 확장시켰다. 1992년에 열린 유엔환경개발회의(United Nations Conference on Environment and Development, UNCED)에서 환경적으로 건전하고 지속가능한 개발의 개념을 바탕으로 산림관리의 기본 원칙인 '산림원칙'을 채택하였다. 국제적 흐름에 발맞춰 우리나라는 2001년 산림기본법을 제정하여 산림관리의 목표를 한 세대만을 위한 목재생산에서 미래세대를 위한 지속가능한 산림경영으로 전환하였다. 이러한 산림관리의 목표는 현재까지 이어졌으며, 국유림 경영 시 산림의 다양한 기능이 지속가능하게 발휘할 수 있도록 관리할 필요가 있다.

우리나라 국유림은 1970년대 치산녹화 사업의 성공과 집약적인 관리로 풍부한 산림자원을 보유하고 있어 산림의 기능 발휘를 위한 기반을 갖춘 상태이다. 하지만 대부분의 임분이 4영급 이상에 분포하여 영급구조가 매우 불균형하다. 영급 불균형은 지속적인 목재생산을 저해할 뿐 아니라, 산림의 노령화로 인한 탄소흡수 능력 감퇴와 생물다양성 감소 등 산림의 다양한 기능을 저하시킨다. 즉, 영급 구조를 전환하지 않으면 국유림에 요구되는 지속가능한 산림경영을 실현할 수 없으므로 이에 대한 체계적·장기적인 경영계획이 필요하다. 영급구조를 전환하기 위해서는 현재 국유림의 상태와 미래 목표를 고려한 목재수확계획이 요구된다.

이에 본 연구는 현재 국유림의 이용가능한 목재 자원량을 파악하고, 국유림의 경제적·공익적 기능을 동시에 고려할 수 있는 산림경영계획모델을 개발하여 국유림의 미래 적정 목재생산량을 추정하고자 한다.

2. 연구목적

본 연구의 목적은 국유림의 지속가능한 경제적·공익적 기능을 고려한 적정 목재생산량을 추정하는 것이다. 이를 위한 세부 연구목표는 다음과 같다.

첫째, 현재 국유림의 이용 가능한 목재 자원량을 파악하기 위해 법적·기술적·지리적 제약조건을 고려하여 소유별로 목재생산 가능 지역을 분석한다.

둘째, 다목적 선형계획법을 이용하여 국유림의 목재생산·탄소저장·수원함양·대기정화 기능을 동시에 고려한 산림경영계획모델을 구축한다.

셋째, 개발한 모델을 국유림의 목재생산 가능 지역에 적용하여 100년 장기경영계획을 고려한 적정 목재생산량을 추정한다.

제 2 절 연구사

1. 목재 자원량 추정

이용 가능한 산림 자원이 어디에, 얼마나 분포하고 있는가를 파악하는 것은 산림정책 수립의 기초가 된다. 원현규 등(2011), 김영환 등(2020)이 벌채 제약조건을 고려하여 이용 가능한 목재 잠재량을 추정하였고, 손영모 등(2007)은 우리나라 산림 시업지의 바이오매스 자원량과 관련된 정보를 제공하는 프로그램을 개발하였다. 해당 연구들은 이용 가능한 산림 자원량을 추정했다는 공통점이 있지만, 추정에 사용한 방법은 서로 다르다. 목재 자원량 추정 방법은 크게 비공간적 분석과 공간적 분석으로 나눌 수 있다.

비공간적 분석은 분석 결과를 공간자료와의 연계 없이 수치로 제시하는 방법으로, 산업자원부(2007)와 이준표와 박순철(2016)은 산림통계자료를 바탕으로 산림 바이오매스의 공급 자원량을 비공간적으로 추정하였다. 하지만 자원량 추정 시 자원의 공간특성 기반의 이용 가능성에 대한 고려가 미흡하여 자원량이 과평가될 소지가 있었다. 이에 원현규 등(2011)은 목재생산 대상지를 자연적, 이론적, 지리적, 기술적 대상지로 세분하여 보다 현실적인 목재생산 잠재량을 예측하였다. 먼저 입목지를 추출하여 자연적 목재생산지를 구분하였고, 다음으로 보전산지, 경사도, 도로여건을 고려하여 이론적, 지리적, 기술적 목재생산지를 추출하였다. 김영환 등(2020)은 법적·물리적·환경적·기술적 제약조건을 고려하여 일본잎갈나무림의 목재생산 잠재량을 분석하고 미래 공급량을 예측하였다. 법적 제약조건은 산림보호법에 따라 법적으로 산림 경영이 제한되는 구역, 물리적 조건은 경사도 40도 이상인 구역, 환경적 조건은 수계로부터

30m 이내 구역, 기술적 제약조건은 임도로부터 300m 이상 떨어진 구역을 의미한다.

공간적 분석은 목재 자원량의 수치를 공간적 분포를 함께 제시하는 방법으로, 손영모 등(2007)과 곽두안 등(2012)의 연구가 있다. 손영모 등(2007)은 우리나라 산림 바이오매스의 공간적 분포를 제공하는 산림 바이오매스 관리 프로그램 제작하였다. 전체 산림, 시업지, 경제림 단지를 대상으로 바이오매스를 추정하였으며, 그 결과로 시군구별 바이오매스와 10년 주기별 바이오매스 변화량에 대한 정보를 제공한다. 곽두안 등(2012)은 HyTAG(Hydrology and Thermal Analogy Group) 모델을 통해 수종의 최적분포범위를 예측하여 이를 기반으로 수종 변화에 따른 재적량을 추정하였따. 4차 임상도의 임상분포에 생장모델식을 적용하였고, 그 결과 10년 단위로 총 100년 동안의 수종분포변화에 따른 재적량을 공간상에 제시하였다.

2. 다목적 선형계획법

산림은 시공간적 범위가 넓고 경영 시 고려할 요소가 많기 때문에 산림경영 문제는 복잡하고 방대하며, 이를 효과적으로 다룰 수 있는 도구가 요구되었다. 이에 1950년대 후반부터 산림경영분야에 수리계획법이 사용되기 시작하면서 다양한 산림경영계획모델이 제시되었다. 수리계획법(mathmatical programming)은 의사결정문제를 수학적 모형으로 작성하여 해를 구하는 방법으로, 선형계획법, 비선형계획법, 동적계획법 등이 있다(우종춘, 1991).

초기의 산림경영계획모델은 하나의 목적함수만을 가지는 간단한 형태로 구성되었다. 당시에는 목재생산이 산림의 가장 중요한 핵심 기능이었기 때문에 대부분의 모델은 목재생산의 극대화를 목적함수로 가졌으며, 대표적인 연구로는 Navon(1971)과 Clutter et al.(1978)가 있다(우종춘, 1991). 국내에서는 권오복(1969)이 임목수확량 조절을 위해 처음으로 선형계획법을 이용하였으며 우종춘(1991), 정주상과 박은식(1993)은 선형계획법을 적용하여 산림수확조절 계획을 수립하였다.

한편 1990년대 이후 산림경영의 패러다임이 지속가능한 산림경영(Sustainable Forest Management, SFM)으로 전환되고 산림을 둘러싼 사회적 요구가 다양해지면서, 경영계획 수립 시 목재생산뿐 아니라 다양한 기능을 반영할 수 있는 새로운 산림경영모델의 개발이 요구되었다. 이러한 흐름에 발맞춰 해외에서는 경영계획 수립에 야생동물 서식지(Roise et al., 1990), 생물다양성(Louise et al., 1997), 탄소저장(Kershaw et al., 1993)과 같은 산림의 생태적·공익적 기능을 고려한 연구들이 이루어졌다(박은식과 정주상, 2000). 국내에서도 산림경영 패러다임의 변화에 따라 다목적 선형계획법(Multi Objective Linear

Programming, MOLP)을 산림경영에 적용하기 시작하였다. 다목적 선형계획법은 선형 제약식에 다수의 선형 목적함수가 있어 이를 동시에 최적화하는 방법으로, 해를 구하는 방법에는 가중치법(weighting method), 제약조건법(constraint method), NISE법(noninferior set estimation method), 다목적단체법(multi-objective simplex method) 등이 있다(박은식과 정주상, 2000). MOLP를 이용하여 박은식과 정주상(2000)은 목재생산과 탄소저장을 동시에 고려한 최적 산림경영계획을 수립하였고, 김다영 등(2021)은 목재생산·탄소저장·수원함양의 극대화를 달성하는 다목적 산림경영계획모델을 개발하였고, 가중치법을 이용하여 각 기능의 중요도 혹은 선호도에 따라 가중치를 조절하여 그에 따른 산림경영계획의 변화를 비교분석하였다.

제 3 절 연구체계

본 연구는 현재 국유림의 목재생산 잠재량을 분석하는 단계와 다목적 산림경영모델을 구축하는 단계, 그리고 두 과정을 토대로 향후 국유림의 적정 목재생산량을 추정하는 단계로 구분할 수 있다(그림 1-1).

첫 번째로 산림공간정보 DB를 구축하여 전국의 목재생산 가능 지역을 분석하였다. 이 때 소유구분에 대한 정보를 융합하여 국유림의 목재생산 가능 지역을 선택할 수 있도록 제작하였다. 다음으로 국유림의 경제적·공익적 기능을 모두 고려한 다목적 산림경영계획모델을 개발하였다. 국유림의 산림경영문제를 파악하여 현실의 문제를 정량적으로 분석이 가능한 수식 모형으로 표현하였다. 마지막으로 국유림의 목재생산 가능 지역을 대상으로 모델을 적용하여 100년 장기경영계획을 고려한 적정 목재생산량을 추정하였다.

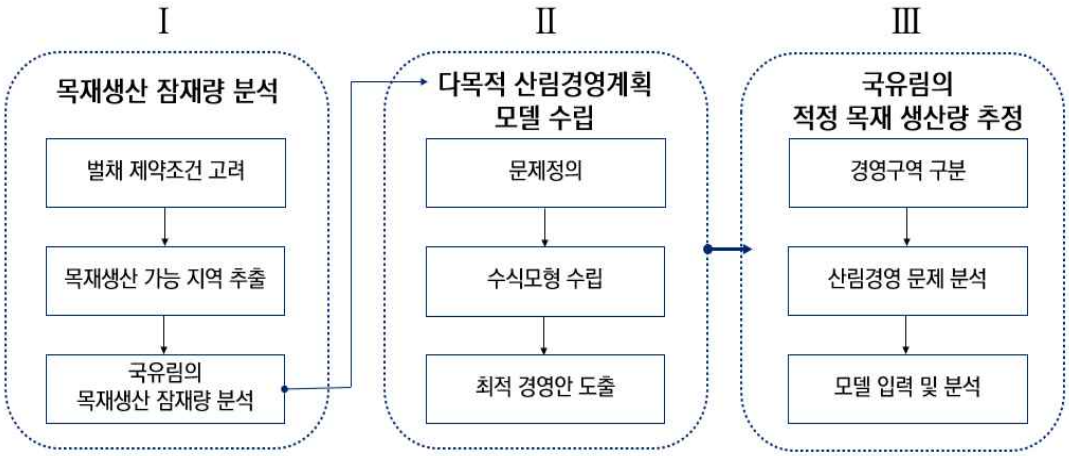

그림 1-1. 연구체계

제 2 장 국유림의 목재생산 잠재량 추정

목재생산 잠재량은 목재생산과 관련된 다양한 여건을 고려하였을 때 현실적으로 생산 가능한 목재 자원량을 의미한다(원현규 등, 2010). 산림경영계획을 수립하거나 목재 공급량을 예측하는 등 목재 자원의 이용적 측면을 고려하기 위해서는 전체 목재 자원량이 아닌 목재생산 잠재량에 대한 분석이 요구된다.

국유림의 미래 목재생산량을 예측하기 위해 먼저 현재 국유림의 목재생산 잠재량을 추정할 필요가 있다. 따라서 제 2장에서는 법적·지형적·기술적 벌채 제약조건을 고려하여 전체 산림 중 목재생산이 가능한 지역을 공간상에서 파악하고(그림 2-1), 이를 기반으로 목재생산 잠재량을 추정하였다. 이를 위해 임상도, 산지구분도, 하천망도, 수치표고모델, 도로망도, 임도망도를 하나의 공간자료로 융합했으며, 토지소유구분도를 추가하여 소유별로 목재생산 가능 지역을 구분할 수 있도록 하였다.

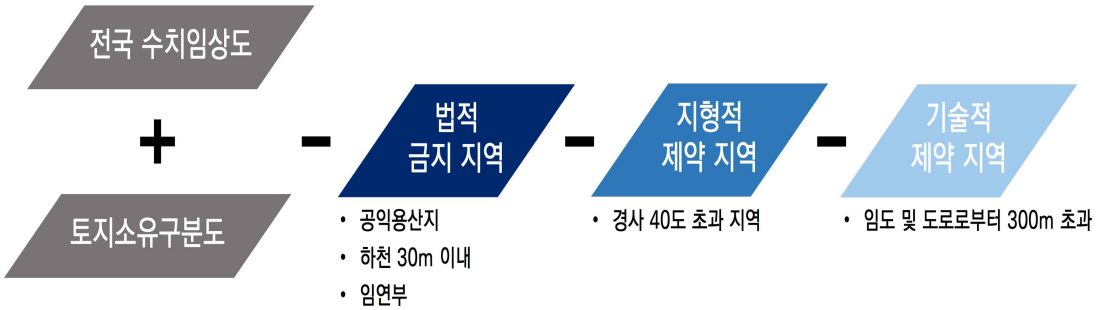

그림 2-1. 목재생산 가능 지역 분석 과정

제 1 절 목재생산 가능 지역 분석

1. 법적·지리적·기술적 제약조건

모든 산림에서 벌채가 가능한 것은 아니므로, 벌채가 제한되는 경우를 고려하여 목재생산이 가능한 지역을 추출할 수 있다. 벌채가 제한되는 구역은 법적 제약으로 인한 벌채 금지구역과 지형적·기술적 제약으로 인한 벌채 곤란구역으로 나눌 수 있다.

벌채 금지구역은 「산지관리법」상 공익용 산지와 「지속가능한 산림자원 관리지침」의 수확을 위한 벌채금지 구역으로 구성하였다. 공익용 산지에는 산림유전자원보호구역, 백두대간보호구역 등이 있으며, 일부 공익용산지에서는 허가·신고제도로 벌채가 가능하다. 하지만 대부분 타 부처 소관의 국유림으로 지정목적을 훼손하지 않는 범위에서의 최소 벌채만 가능하므로, 본 연구에서는 공익용산지를 모두 벌채금지구역으로 설정하였다. 수확을 위한 벌채금지 구역은 수변 만수위로부터 30m 이내와 임연부[1)]를 포함한다.

벌채 곤란구역은 법적으로 벌채가 금지된 것은 아니지만, 지형적·기술적 제약으로 인해 현실적으로 벌채가 어려운 구역이다. 지형적 제약은 경사 40도를 초과하는 것으로, 이 기준은 국내에서 개발된 타워야더 HAM300의 집재 최대 경사가 45도, 임업용 트랙터의 최대 경사가 40도라는 점과 芝正己(1993)의 연구에서 가선계를 이용한 임목반출 영역이 최대 40도로 보고된 점에 근거하여 설정하였다. 기술적 제약은 임도 및 도로로부터 300m를 초과한 것으로, 이는 가장 최신의 가선집재 기계인

1) 산림과 산림이 아닌 지역의 경계지점으로부터 산림 구역 방향으로 30m 내외까지의 거리(지속가능한 산림자원 관리지침)

HAM300의 최대 집재거리가 300m인 것에 근거한다(김민규 등, 2017).

위와 같은 법적, 지리적, 기술적 제약조건을 고려한 국유림의 목재생산 잠재량을 분석하기 위해 산림자원 현황, 소유구분, 산지구분, 수계분포, 지형적 입지, 접근성과 관련된 최신의 공간자료를 수집하였고(표 2-1), 공간분석도구인 ArcMap 10.4.1과 QGIS Desktop 3.22.5를 이용하여 산림공간정보 DB를 구축하였다.

표 2-1 . 목재생산 잠재량 추정을 위한 공간자료 목록

공간자료	구축연도	관할기관
수치임상도	2020	산림청
토지소유구분도	2022	국토교통부
산지구분도	2022	산림청
하천망도	2021	환경부
수치표고모델	2020	국토교통부
도로망도	2020	국토교통부
임도망도	2019	산림청

2. 목재생산 가능 지역 추출 과정

임상도와 토지소유구분도를 중첩한 뒤 벌채 제약조건을 순차적으로 추가하여 목재생산 가능 지역을 추출할 수 있는 공간자료를 제작하였다.

첫 번째로, 법적 제약조건을 적용하기 위해 산지구분도에서 공익용산지를 구성하는 24개의 용도지역·지구[3]를 선택하여 추출하였다. 또한 하천망도를 이용하여 국가하천, 지방하천, 소하천에 대해 30m buffer를 설정하였고, 임상도에서 산림 방향으로 30m buffer를 설정하여 임연부를 구하였다.

두 번째로, 지형적 제약조건을 적용하기 위해 수치표고모델에서 경사도 분석을 실시하였다. 「국유림경영계획작성 및 운영요령」에 따르면, 산림 경영의 최소단위인 소반의 면적을 최소 1ha 로 규정하고 있다. 따라서 경사도 분석의 단위를 1ha로 설정했으며, 수치표고모델의 공간해상도는 5m×5m 이기 때문에 100m×100m로 해상도를 리샘플링하여 1ha 단위로 경사도 분석을 실시하였다.

마지막으로, 기술적 제약조건을 적용하기 위해 임도망도와 도로망도를 에 대해 300m buffer를 설정하였다. 도로망도의 경우, 임목수확작업과 직접적 관련이 있는 도로만 고려하기 위해 산림 내부에 위치한 도로를 사용하였다.

---

3) 자연휴양림, 사찰림, 산지전용·일시사용제한지역, 야생동물보호구역, 공원구역, 문화재보호구역, 상수원보호구역, 개발제한구역, 보전녹지지역, 생태·경관보전지역, 습지보호지역, 특정도서, 백두대간보호지역(완충지역,핵심지역), 산림보호구역(보안림, 산림유전자원보호구역), 기타공익용산지, 자연환경보전지역, 방재지구, 자연관광지구, 역사문화환경보호지구, 생태계보호지구, 도시자연공원구역, 수산자원보호구역(산지관리법 제4조)

제 2 절 목재생산 잠재량 추정

목재생산 잠재량은 목재생산 가능 지역에 분포하는 임목축적량을 기준으로 추정할 수 있다. 본 연구에서는 지역에 따른 현실 임분의 생장 특성을 고려하기 위해 원현규 등(2010)이 개발한 지역별 임분재적 추정식을 이용하여 목재생산 잠재량을 산출하였다. 해당 식은 국내 6개의 주요 수종(소나무, 잣나무, 낙엽송, 리기다소나무, 활엽수, 혼효림)에 대해 지역별(도 단위)로 작성되었다. 아래 식에서 Vol 은 ha당 재적(m^3), Age는 영급, a,b 는 회귀계수를 의미한다. 회귀계수는 국가산림자원조사 자료에 기반하여 개발되었으며(표 2-2) 제주도의 경우 별도로 추정식이 개발되지 않았기 때문에, 지리적으로 가장 근접한 전라남도의 추정식을 적용하여 분석하였다.

$$Vol = a + b \times Age$$

표 2-2. 지역별·수종별 임분재적 추정식(원현규 등, 2010)

지역	수 종	회 귀 식	지역	수 종	회 귀 식
강원도	소나무	Y = 63.409X − 37.519	전라남도	소나무	Y = 49.358X − 17.9
	잣나무	Y = 68.681X − 67.668		잣나무	Y = 63.658X − 63.331
	낙엽송	Y = 50.261X − 2.2349		낙엽송	Y = 58.850X − 38.981
	리기다	Y = 60.577X − 3.2896		리기다	Y = 66.256X − 47.963
	활엽수	Y = 37.380X + 3.0649		활엽수	Y = 44.670X − 21.006
	혼효림	Y = 60.795X − 45.833		혼효림	Y = 52.656X − 32.501
경기도	소나무	Y = 51.020X − 18.414	전라북도	소나무	Y = 46.583X − 10.233
	잣나무	Y = 64.854X − 58.107		잣나무	Y = 65.630X − 52.956
	낙엽송	Y = 40.858X + 23.908		낙엽송	Y = 50.880X − 4.4751
	리기다	Y = 58.098X − 20.3		리기다	Y = 62.345X − 36.37
	활엽수	Y = 39.891X + 0.9597		활엽수	Y = 37.500X − 1.0875
	혼효림	Y = 58.712X − 40.769		혼효림	Y = 56.243X − 40.125
경상남도	소나무	Y = 49.434X − 21.596	충청남도	소나무	Y = 44.131X − 6.2369
	잣나무	Y = 62.312X − 44.09		잣나무	Y = 58.696X − 42.51
	낙엽송	Y = 52.589X − 15.39		낙엽송	Y = 47.798X − 7.3562
	리기다	Y = 57.766X − 27.816		리기다	Y = 55.158X − 22.32
	활엽수	Y = 40.252X − 9.0643		활엽수	Y = 37.167X − 3.6029
	혼효림	Y = 45.103X − 15.693		혼효림	Y = 51.003X − 30.027
경상북도	소나무	Y = 51.757X − 27.696	충청북도	소나무	Y = 48.167X - 16.337
	잣나무	Y = 66.129X − 68.206		잣나무	Y = 50.389X - 26.762
	낙엽송	Y = 49.357X − 8.2539		낙엽송	Y = 48.751X - 4.8984
	리기다	Y = 54.482X − 21.319		리기다	Y = 60.341X - 28.426
	활엽수	Y = 36.319X + 2.9693		활엽수	Y = 39.747X + 0.2826
	혼효림	Y = 52.683X − 31.89		혼효림	Y = 56.087X - 32.564

*X는 영급, Y는 ha당 재적(m^3)을 의미함

제 3 절 결과 및 고찰

1. 소유별 목재생산 가능 지역 분석

전국 산림 중 목재생산이 가능한 면적은 2,614천ha로 전체 산림면적인 6,135천ha의 43%를 차지하며(그림 2-2), 그 중 국유림은 488천ha로 목재생산 가능 지역의 19%를 차지한다(그림 2-3). 2022년 산림임업기본통계에 따르면 2021년 기준 우리나라 산림면적은 6,294천ha로 본 연구의 산림면적과 차이가 있는데, 이는 본 연구에서 사용한 임상도에 민간인 통제선 이북지역(민북 지역)이 포함되지 않았고, 임상도 제작 시 FAO(2015)에서 제시한 산림정의 기준을 적용하여 0.5ha 이하인 산림은 반영하지 않았기 때문이다. 목재생산 가능 지역을 소유별로 구분하면 국유림이 488천ha(19%), 공유림이 322천ha(12%), 사유림이 1,803천ha(69%)이다. 국유림의 목재생산 잠재량은 87,639천m^3으로, 우리나라 전체 목재 자원량의 약 8%를 차지한다(표 2-3).

표 2-3. 소유별 산림면적 및 목재생산 가능 지역의 면적

소유 구분	전체			목재생산 가능 지역		
	산림면적 (천ha)	임목축적 (천m^3)	ha당 축적 (m^3/ha)	산림면적 (천ha)	임목축적 (천m^3)	ha당 축적 (m^3/ha)
국유림	1,839	357,742	195	488	87,639	179
공유림	717	128,814	180	322	55,365	172
사유림	3,579	595,710	166	1,803	286,952	159
합계	6,135	1,082,266	176	2,614	429,956	165

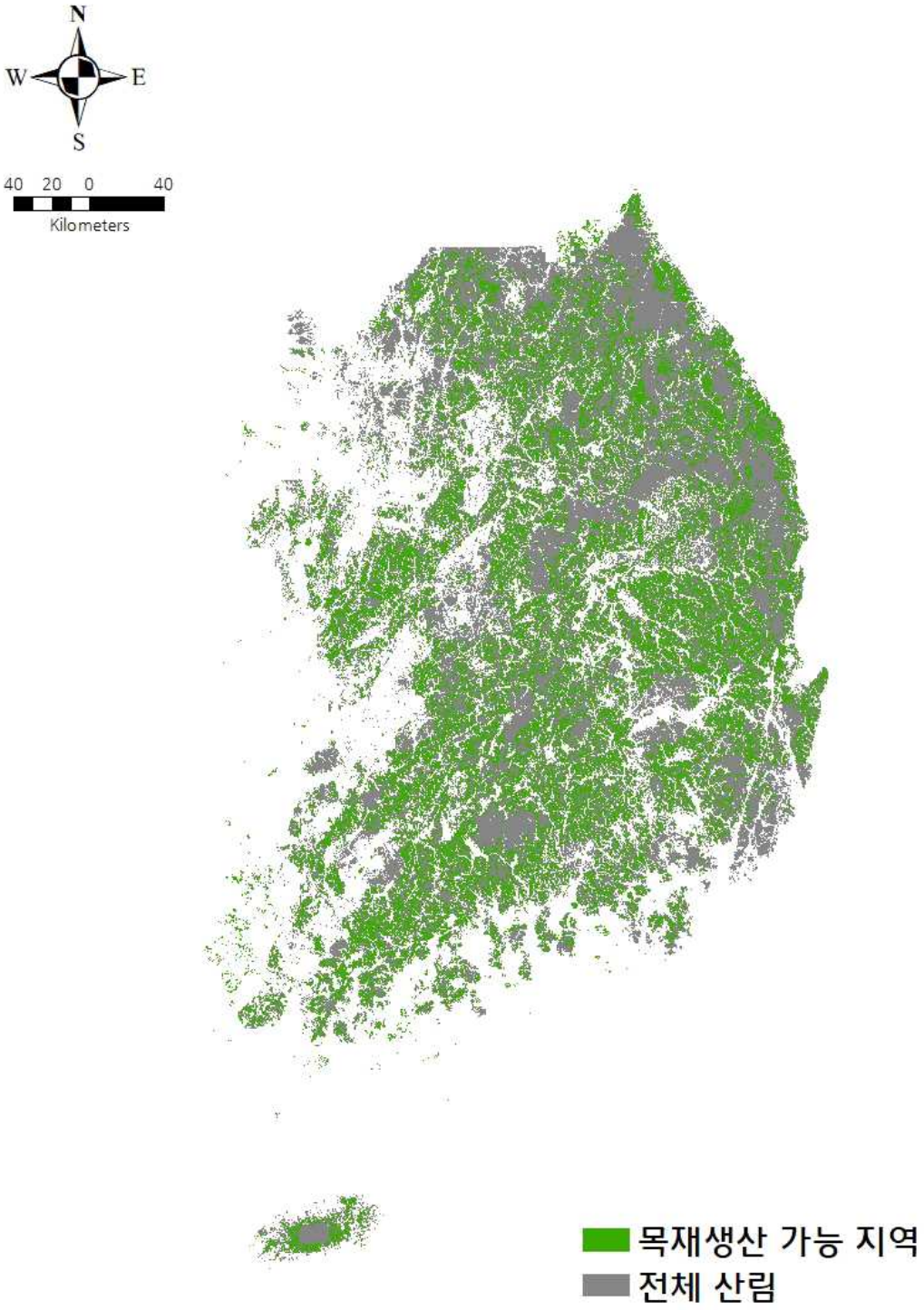

그림 2-2. 전체 산림의 목재생산 가능 지역 분포

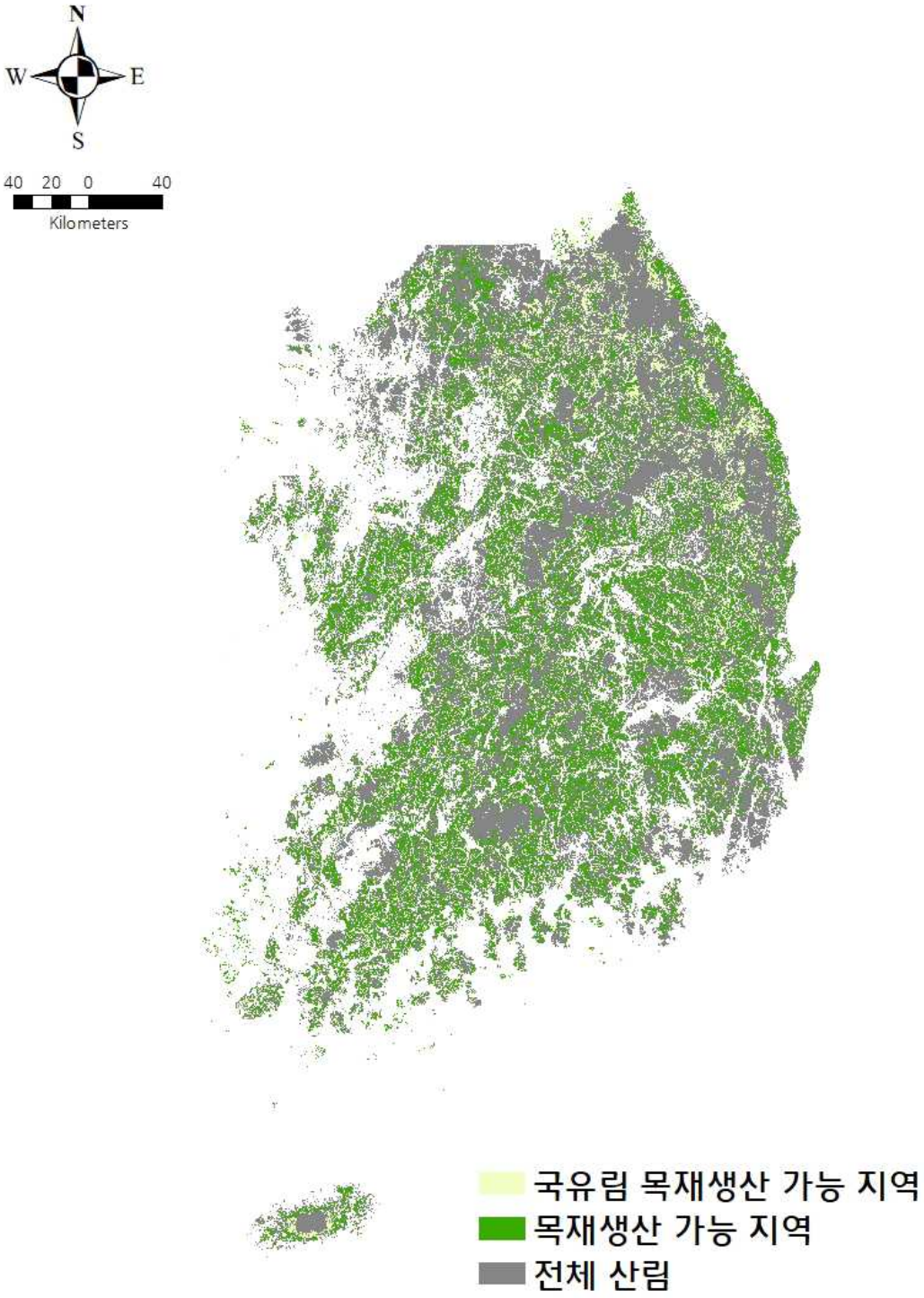

그림 2-3. 국유림의 목재생산 가능 지역 분포

2. 지역별·제약조건별 목재생산 가능 지역 분석

지역별로 목재생산 가능 지역의 면적 비율을 비교한 결과, 충청남도가 57%로 가장 높았으며 8개의 특·광역시는 22%로 가장 낮았다(그림 2-4). 지역별로 목재생산 가능 지역 비율에 차이가 나는 원인을 분석하기 위해 5가지 제약조건에 따른 벌채제한구역(공익용산지, 하천 양안 30m 이내, 임연부, 경사 40도 초과 지역, 임도 및 도로로부터 300m 초과 지역)이 전체 산림에서 차지하는 비율을 계산하였다(표 2-4).

그 결과, 충청남도의 공익용산지 비율은 13%로 전국 중 가장 낮았고 경사 40도 이상의 비율은 2%로 전국 평균인 8%에 비해 낮았다. 또한 도로로부터 300m를 초과하는 비율은 10%로 전국 중 가장 낮았다. 즉, 충청남도의 목재생산 가능 지역 비율이 높은 이유는 공익용산지와 급경사지가 적고, 도로가 많기 때문으로 추측된다. 반면, 특·광역시의 경우 다른 제약조건은 평균치와 비슷했지만 공익용산지 비율은 55%로 전국 평균이 25%에 비해 현저히 높았다. 즉, 특·광역시의 목재생산 가능 지역 비율이 낮은 이유는 공익용산지가 많기 때문으로 추측된다.

그림 2-4. 지역별·소유별 목재생산 가능 지역의 면적 비율

표 2-4. 지역별·제약조건별 산림 면적 비율

제약조건	공익용산지	하천 30m 이내	임연부	경사 40도 이상	도로 300m 초과
경기	27%	3%	20%	18%	31%
강원	32%	2%	8%	24%	47%
충북	26%	3%	16%	6%	29%
충남	13%	3%	24%	2%	10%
전북	29%	4%	15%	5%	21%
전남	18%	3%	17%	3%	15%
경북	21%	2%	13%	6%	26%
경남	24%	3%	14%	5%	24%
제주	6%	2%	21%	1%	16%
8개 특·광역시	55%	2%	18%	8%	25%
평균	25%	3%	17%	8%	24%

3. 제약조건 고려 수준에 따른 목재생산 가능 지역 비교

목재생산 가능 지역 면적에 가장 큰 영향을 주는 제약조건을 분석하기 위해 제약조건의 고려 수준을 달리하는 대안을 수립하였다. 기준 대안은 5가지 제약조건을 모두 고려한 경우이고, 기준 대안에서 제약조건을 하나씩 제외하여 5개의 대안을 구성하였다(표 2-5). 즉 대안 1은 공익용 산지, 대안 2는 하천 30m 이내, 대안 3은 경사 40도 이상, 대안 4는 임연부, 대안 5는 도로로부터 300m 초과지역을 제외한 것이다.

전국을 대상으로 분석한 결과 경기도, 전라북도, 8개 특·광역시는 대안 1이, 충청남도, 전라남도, 제주도는 대안 3이, 강원도, 충청북도, 경상북도, 경상남도는 대안 5가 기준대안과의 차이가 가장 컸다(그림 2-5). 대안 1,3,5는 순서대로 법적, 지형적, 기술적 제약조건과 관련이 있다. 법적 제약조건의 영향력이 가장 큰 경우는 개선의 가능성이 매우 낮지만, 지형적·기술적 제약의 경우 임업기계의 선진화와 임도망 확충 등을 통해 개선이 가능하다. 특히 우리나라는 제5차 전국임도기본계획에서 2030년까지 전국 임도밀도의 목표를 5.5m로 설정했기 때문에, 임도망 확충에 따른 목재생산 가능 지역의 변화를 분석할 필요가 있다.

표 2-5. 대안별 제약조건 고려 수준

대안	제약조건별 고려 여부				
	공익용 산지	하천 30m 이내	임연부	경사 40도 초과	도로 300m 초과
기준	O	O	O	O	O
1	X	O	O	O	O
2	O	X	O	O	O
3	O	O	X	O	O
4	O	O	O	X	O
5	O	O	O	O	X

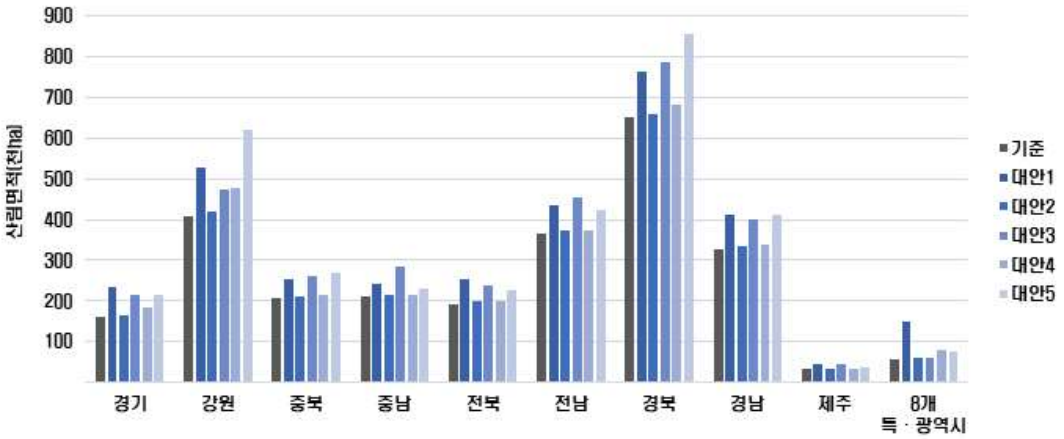

그림 2-5. 지역별·대안별 목재생산 가능 지역의 면적

제 4 절 결론

국유림의 미래 목재생산 잠재량을 분석하기 위해서는 먼저 현재 국유림의 목재생산 잠재량을 추정할 필요가 있다. 이에 본 연구는 소유구분을 고려하여 우리나라 산림의 목재생산 가능 지역을 분석하였다. 벌채 제약조건으로 법적·지리적·기술적 제약을 고려하였고, 제약조건과 관련된 공간자료와 소유구분도, 임상도를 하나로 융합하였다. 이를 기반으로 목재생산 가능 지역을 지역별·소유별로 분석한 결과, 우리나라 산림 중 목재생산이 가능한 지역은 2,614천ha로 전체 산림의 43%를 차지했으며 그 중 국유림은 488천ha를 차지하였다.

지역별로 목재생산 가능 지역의 비율을 비교한 결과, 충청남도가 57%로 가장 높았으며 8개의 특·광역시는 22%로 가장 낮았다. 지역 간 차이가 나는 원인을 분석하기 위해 지역별로 각 제약조건이 차지하는 산림 면적을 계산하였다. 그 결과, 충청남도는 전국 평균에 비해 공익용산지와 경사 40도를 초과하는 면적의 비율이 낮았고, 도로로부터 300m를 초과하는 비율이 전국 중 가장 낮았다. 반면 특·광역시는 공익용산지의 비율이 전국 중 가장 높았다.

마지막으로 한 지역 내에서 목재생산 가능 지역에 가장 영향력이 큰 제약조건을 분석하기 위해 제약조건의 고려수준을 달리한 대안을 수립하였다. 그 결과, 각 지역별로 가장 영향력이 큰 제약조건을 분석할 수 있었으며, 이를 참고하여 지역별로 목재생산 가능 지역을 확대 방안을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

제 3 장 국유림의 다목적 산림경영계획모델 구축

국유림의 목재생산량 추정을 위한 첫 단계로 제 2장에서 현재 국유림의 목재생산 잠재량을 분석하였다. 제 3장에서는 국유림의 미래 목재생산량을 추정하기 위해 다목적 선형계획법을 이용하여 산림경영계획모델을 구축하였다. 일반적으로 산림경영계획모델의 구축은 문제정의, 모형수립, 분석의 단계를 거친다(박은식, 1998). 문제정의 단계에서 대상지의 경영목적과 제약조건을 정의하고, 모형수립 단계에서 이를 수식으로 표현한다. 마지막으로 분석 단계에서는 수식 모형에 자료를 입력하여 목적함수와 제약조건을 만족하는 최적 경영안을 도출한다.

모델 작성 및 최적해 도출 도구로는 Microsoft Excel 2019을 이용했으며, 최적화 모듈로는 OpenSolver 2.9.3의 CBC Linear solver를 사용하였다.

제 1 절 산림경영 문제정의

1. 경영목표 설정

산림경영계획모델 구축의 첫 단계는 경영목표와 제약조건을 정의하는 것이며, 경영목표는 산림경영의 기본 방향이자 수식모형 내의 목적함수를 선정하는 기반이 된다(박은식, 1998).

본 모델의 목표는 국유림의 경제적, 공익적 기능의 발휘이며 경제적 기능으로 목재생산을, 공익적 기능으로 탄소저장, 수원함양, 대기정화기능을 선정하여 네 가지 경영목표를 동시에 달성하고자 하였다. 공익적

기능은 데이터 취득 용이성과 정량화 가능성을 고려하여 선정하였다.

목재생산은 산림의 기본적이고 필수적인 기능으로, 산림은 양질의 목재를 지속적으로 생산·공급해야 한다. 특히 우리나라 산림은 대부분 목재수확기에 도달하고 있으며, 2018년 발표된 제6차 산림기본계획에서 목재자급률 30% 달성을 기대효과로 선정하는 등 목재 생산 증대가 요구된다. 따라서 산림경영계획 수립시 목재생산 기능에 대한 고려가 필수적이다.

탄소저장은 기후변화가 심화됨에 따라 전 세계적으로 가장 주목받는 산림의 기능 중 하나이다. 교토 체제에서는 산림을 기반으로 한 온실가스 저감 조치에 인센티브가 주어지지 않은 반면, 신기후체제[5]에서는 조림, 재조림, REDD+와 같은 산림사업이 인정을 받게 되었다(안현진 등, 2017). 이에 따라 온실가스 감축을 위한 수단으로서 산림의 역할이 어느 때보다 강조되고 있으며, 산림 경영 시 탄소 흡수 및 저장기능에 대한 중요도가 커질 것으로 전망된다.

산림기능의 우선순위에 대한 국민의식조사와 산림분야 전문가의 의견에 따르면, 수원함양기능은 6대 산림기능중 자연환경보전기능과 산림재해방지기능에 이어 3위를 차지하였다(산림청, 2014). 또한 우리나라는 지형적, 기후적 특징으로 인해 수자원 관리에 불리한 조건을 지니고 있어 수자원 확보를 위한 대책이 필요한 실정인데(김선주, 2012), 이에 대한 대안으로 산림의 수원함양기능이 주목받고 있다. 즉, 산림의 수원함양기능은 중요성과 수요가 높으므로 산림 경영 시 이에 대한 고려가 필요하다.

마지막으로 산림의 대기정화기능은 이산화탄소 흡수, 산소 생산, 대기오염물질(SO_X, NO_X, PM10, PM2.5) 흡수로 구분할 수 있으며, 본 연구

5) 지구 온난화의 규제 및 방지를 위한 국가간 국제협약으로, 2020년 만료 예정인 교토의정서(Kyoto Protocol)를 대체할 새 기후변화 체제에 대한 국제적 합의문(안현진 등, 2017)

에서는 미세먼지(PM10) 흡수에 주목하였다. 미세먼지는 눈으로 식별이 어려운 가늘고 작은 먼지 입자로, 호흡 과정에서 폐로 들어가 폐의 기능을 저하시키고 면역 기능을 떨어뜨리는 대기오염물질이다(길태규와 신원섭, 2020). 이에 따라 국제암연구기관(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 미세먼지를 1군 발암물질로 분류하고 있다(길태규와 신원섭, 2020). 2013년부터 미세먼지에 대한 국민적 관심이 급증하였고, 이와 함께 미세먼지 피난처로서 산림의 역할이 주목받기 시작하였다(여민주와 김용표, 2019). 이러한 사회적 요구를 반영하여 산림 경영을 통해 대기정화기능을 증진시킴으로써 국민건강 진흥에 기여할 수 있다.

2. 제약조건 설정

산림경영에는 다양한 경제적, 사회적, 생태적 요인들이 제약조건으로 작용하며, 현실성 있는 경영계획을 수립하기 위해 이러한 제약들을 명확히 분석하여 모델에 반영하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 국유림 경영의 지속 가능성 달성에 필요한 목재생산의 보속성, 영급별 면적 비율, 수종별 면적 비율, 침엽수·활엽수의 면적비율을 제약조건으로 선정하였다.

제 2 절 수식모형의 구성

산림경영문제의 수식모형은 의사결정변수의 정의 방법에 따라 ModelⅠ과 ModelⅡ로 구분할 수 있다. ModelⅠ은 현존 임분에서 정의된 의사결정변수가 전체 계획기간 동안 동일하게 유지되는 형태로 모형을 구현하였다(권오복과 장철수, 1988). 반면 ModelⅡ 에서는 현존 임분의 의사결정변수가 해당 구역의 벌채 전까지만 유지되며, 벌채 이후에는 새로운 의사결정변수가 정의된다(권오복과 장철수, 1988). 즉, ModelⅡ는 ModelⅠ과 달리 벌채 이후 의사결정변수가 새롭게 정의되기 때문에 시업 조건과 수종을 변화시킬 수 있다. 본 연구에서는 경제적·공익적 기능 발휘를 위해 시업 변화와 수종 갱신이 필요하므로 ModelⅡ를 채택하였다. 의사결정변수는 ModelⅡ의 방식을 적용하여 X_{ijkl} 로 정의했으며, X는 경영구역, i는 조림분기, j는 기존수종, k는 벌채분기, l은 갱신수종을 의미한다. 즉, 의사결정변수 X_{ijkl}는 경영구역 X에서 i분기에 조림한 j수종을 k분기에 벌채하고, l수종으로 갱신한 면적을 의미한다.

이를 기반으로 개발한 수식모형은 표 3-1과 같고, 모형에 사용된 함수와 변수는 표 3-2에 정리하였다.

표 3-1. 산림경영문제의 수식 모형 구성

$$Max\ w_h(\sum_p\sum_i\sum_j\sum_k\sum_l(tr_p \times TV_p - tc_p) \times X_{ijkl}$$
$$+\sum_p\sum_i\sum_j\sum_k\sum_l(hr_p \times HV_p - hc_p) \times X_{ijkl}) + w_c\sum_p\sum_i\sum_j\sum_k\sum_l C_p \quad (1)$$
$$+w_w\sum_p\sum_i\sum_j\sum_k\sum_l W_p \times X_{ijkl} + w_m\sum_p\sum_i\sum_j\sum_k\sum_l M_p \times X_{ijkl}$$

$subject\ \ to$

$$\sum_i\sum_j\sum_{k=p}\sum_{l=r}X_{ijkl} - \sum_{i=q}\sum_{j=r}\sum_k\sum_l X_{ijkl} = 0 \quad (p < q) \quad (2)$$

$$\sum_i\sum_j\sum_k\sum_l(hv_{Xijkp} \times X_{ijkl}) - HV_p = 0 \quad (3)$$

$$\sum_i\sum_j\sum_k\sum_l(tv_{Xijkp} \times X_{ijkl}) - TV_p = 0 \quad (4)$$

$$HV_p + TV_p - H_p = 0 \quad (5)$$

$$\sum_i\sum_k\sum_l(v_{Xirkp} \times X_{ijkl}) - V_{rp} = 0 \quad (6)$$

$$\sum_r(c_r \times 0.5 \times 3.66 \times V_{rp}) - C_p = 0 \quad (7)$$

$$\sum_i\sum_j\sum_k\sum_l(w_{Xijp} \times X_{ijkl}) - W_p = 0 \quad (8)$$

$$\sum_r(m_r \times V_{rp}) - M_p = 0 \quad (9)$$

$$(1-\alpha)H_{p-1} \le H_p \le (1+\beta)H_{p-1} \quad (10)$$

$$AC_{np} \ge \gamma_{np} \times Area \quad (11)$$

$$\delta_{rp} \times XA \le A_{Xrp} \le \epsilon_{rp} \times XA \quad (12)$$

$$\zeta_p \times Area \le CA_p \le \eta_p \times Area \quad (13)$$

$$\theta_p \times Area \le BA_p \le \iota_p \times Area \quad (14)$$

$$X_{ijkl} \ge 0 \quad (\forall\ i,j,k,l) \quad (15)$$

표 3-2. 산림경영문제의 수식 모형 내 변수 및 함수

w_h	목재생산의 가중치
w_c	탄소저장의 가중치
w_w	수원함양의 가중치
w_m	대기정화의 가중치
TV_p	p분기의 간벌 수확량
HV_p	p분기의 주벌 수확량
tr_p	p분기일 때 간벌 수익의 순현재가치
tc_p	p분기일 때 간벌 비용의 순현재가치
hr_p	p분기일 때 주벌 수익의 순현재가치
hc_p	p분기일 때 주벌 비용의 순현재가치
C_p	p분기일 때 탄소저장량의 순현재가치
W_p	p분기일 때 수원함양량의 순현재가치
M_p	p분기일 때 미세먼지 흡수량의 순현재가치
X_{ijkl}	경영구역 X에서 i분기에 조림한 j수종을 k분기에 벌채하고, l수종을 조림한 면적
hv_{Xijkp}	경영구역 X에서 i분기에 조림한 j수종을 k분기에 벌채할 때, p분기의 단위면적당 주벌 재적
tv_{Xijkp}	경영구역 X에서 i분기에 조림한 j수종을 k분기에 벌채할 때, p분기의 단위면적당 간벌 재적
HV_p	p분기의 주벌 수확량
TV_p	p분기의 간벌 수확량

v_{Xijp}	경영구역 X에서 i분기에 조림한 j수종의 p분기의 잔존 재적
V_{rp}	p분기 수종 r의 재적
c_r	수종 r의 탄소배출계수의 곱 (목재기본밀도×바이오매스 확장계수×(1+뿌리함량비))
w_{Xijp}	경영구역 X에서 i분기에 조림한 j수종의 p분기의 수원함양량
m_r	수종 r의 미세먼지 흡수량
α	목재수확량의 허용감소율
β	목재수확량의 허용증가율
AC_{np}	p분기 n영급의 면적
γ_{np}	p분기 n영급인 면적의 최소비율
$Area$	대상지의 전체 면적
δ_{rp}	p분기 r수종인 면적의 최소비율
ϵ_{rp}	p분기 r수종인 면적의 최대비율
A_{Xrp}	경영구역 X에서 수종 r의 p분기 면적
XA	경영구역 X의 면적
ζ_p	p분기 침엽수 면적의 최소비율
η_p	p분기 침엽수 면적의 최대비율
CA_p	p분기 침엽수의 면적
θ_p	p분기 활엽수 면적의 최소비율
ι_p	p분기 활엽수 면적의 최대비율
BA_p	p분기 활엽수의 면적

1. 목적함수

목적함수는 목재생산, 탄소저장, 수원함양, 대기정화기능의 가중치가 반영된 종합적 순현재가치를 최대화하는 것으로, 표 3-1의 식(1)과 같이 표현된다. 각 기능의 순현재가치를 산출하기 위해서 먼저 기능별 총량을 구했고, 이를 경제적 가치로 환산하였다. 계수인 w_h, w_c, w_w, w_m은 각 기능의 가중치이며, 중요도에 따라 가중치를 달리할 수 있다.

2. 제약조건

2.1. 벌채 및 조림면적

ModelⅡ의 의사결정변수는 갱신부터 주벌까지 유지되어 주벌 이후 해당 의사결정변수는 다른 의사결정변수로 나뉘거나 새로운 의사결정변수로 변환된다(김다영 외, 2021). 따라서 식(2)와 같이 p분기에 벌채되어 r수종으로 갱신된 면적이 q분기에 r수종을 조림한 면적과 같다는 제약조건이 필요하다.

2.2. 수확량 및 잔존재적, 비부조건

식(3), 식(4), 식(5)는 각각 p분기의 주벌수확량, 간벌수확량, 총 수확량을 구하는 식이며, 식(6)은 벌채 후 남아있는 재적을 구하는 식이다. 주벌 및 간벌 수확량은 임분수확표를 기반으로 산출된 단위면적 당 벌채량에 총 벌채 면적을 곱하여 구할 수 있다. 식(15)는 의사결정변수가 부의 값을 가질 수 없다는 비부조건을 나타내는 식이다.

2.3. 공익적 기능의 총량

본 모델에서 공익적 기능은 탄소저장, 수원함양, 대기정화 기능을 고려했으며, 각 기능의 양은 탄소저장량, 수원함양량, 미세먼지 흡수량을 통해 산출하였다. 식(7), 식(8), 식(9)는 각각 p분기의 탄소저장량, 수원함양량, 미세먼지 흡수량을 계산한 식이다.

2.4. 분기별 목재수확량의 변화율

식(10)은 목재생산의 보속성과 관련된 제약조건으로, 목재생산의 보속성은 매년 목재 수확량이 균등한 경영체계를 의미한다. 보속성 조건을 통해 인접분기 사이의 수확량을 일정하게 유지시켜 목재공급의 안정성을 유도할 수 있다. 현실적인 여건을 고려할 때 목재수확량을 완전히 일정하게 유지하는 것은 어렵기 때문에 분기별 목재수확량의 변화율을 제한하여 산림경영의 안정성을 유지하고자 했다. 식(10)에서 H_p는 p분기의 목재수확량, α는 허용감소율, β는 허용증가율을 의미한다.

2.5. 영급별 면적 비율

불균형한 영급구조를 개선하는 것은 지속가능한 산림경영원칙을 달성하기 위한 필수조건이다. 또한 계획기간 이후 상황에 대한 조건을 설정하지 않을 경우, 목적함수 값을 극대화하기 위해 계획기간 말에 벌기령에 도달한 모든 산림을 벌채하는 것을 최적해로 채택할 가능성이 있다(설아라, 2014). 따라서 식(11)과 같이 계획기간 말에 각 영급에 대한 기준을 설정할 필요가 있다. 이론적으로는 모든 영급의 임분이 동일한

면적을 차지할 때, 법정영급균형이라 말할 수 있지만 이는 현실적으로 불가능 할뿐 아니라 비용을 고려하였을 때 최적의 상태라 확신할 수 없다(안현진, 2017). 따라서 법정림 개념을 도입하되, 동일한 면적보다는 각 영급이 차지하는 면적에 균형을 맞추는 것이 중요하다.

2.6. 수종별 면적 비율

수종에 따라 생장률, 벌기령, 탄소흡수량 등이 다르기 때문에 수종에 대한 제약조건을 설정하지 않으면 경영 목적에 따라 특정 수종 위주의 갱신이 일어날 수 있다. 또한 기후와 지역적 특성 등의 이유로 지방청에 따라 확대 혹은 축소하고자 하는 수종이 서로 다르므로 이러한 점을 반영하기 위해 식(12)와 같이 수종별·경영구역별로 최소, 최대 면적 비율을 설정할 필요가 있다.

2.7. 침엽수·활엽수의 면적 비율

임상에 따라 수원함양량, 미세먼지 흡수량 등에 차이가 있기 때문에 제약조건을 설정하지 않으면 임상이 단순화될 가능성이 있다. 이를 방지하기 위해 식(13), 식(14)와 같이 침엽수와 활엽수의 최소, 최대 면적 비율을 설정할 필요가 있다.

제 3 절 모델 내 함수

1. 산림기능의 정량화

1.1. 생장량

강진택 등(2021)이 개발한 현실림 임분수확표를 이용하여 벌채에 따른 수확량과 잔존 임분의 생장량을 예측하였다. 현실림 임분수확표는 제 5~6차 국가산림자원조사의 자료를 기반으로 14개의 수종(강원지방소나무, 중부지방소나무, 해송, 리기다소나무, 잣나무, 낙엽송, 삼나무, 편백, 상수리나무, 굴참나무, 졸참나무, 신갈나무, 자작나무, 백합나무)에 대해 임분단위의 생장과 수확을 추정하기 위한 표이다. 해당 임분수확표를 이용하여 임령과 지위지수에 따라 평균 직경, 흉고 단면적, 평균 수고, 본수, 재적, 정기평균생장량, 정기평균생장률, 연평균 생장량 등에 대한 정보를 얻을 수 있다.

현재 존재하는 임분의 경우 임상도에서 수종과 영급별로 재적을 산출하고 임분수확표의 정기평균생장률을 적용하여 미래의 벌채량과 수확량을 예측할 수 있다. 미래 임분의 경우 수확표 상의 수종별·영급별 재적과 정기평균생장률을 이용하여 미래의 벌채량과 수확량을 예측할 수 있다(그림 3-1). 수확표의 재적은 15년 또는 20년부터 정보가 제공되어 있기 때문에 임령 10년의 재적은 15년 재적의 0.7배, 20년 재적의 0.5배를 적용하여 추정하였다.

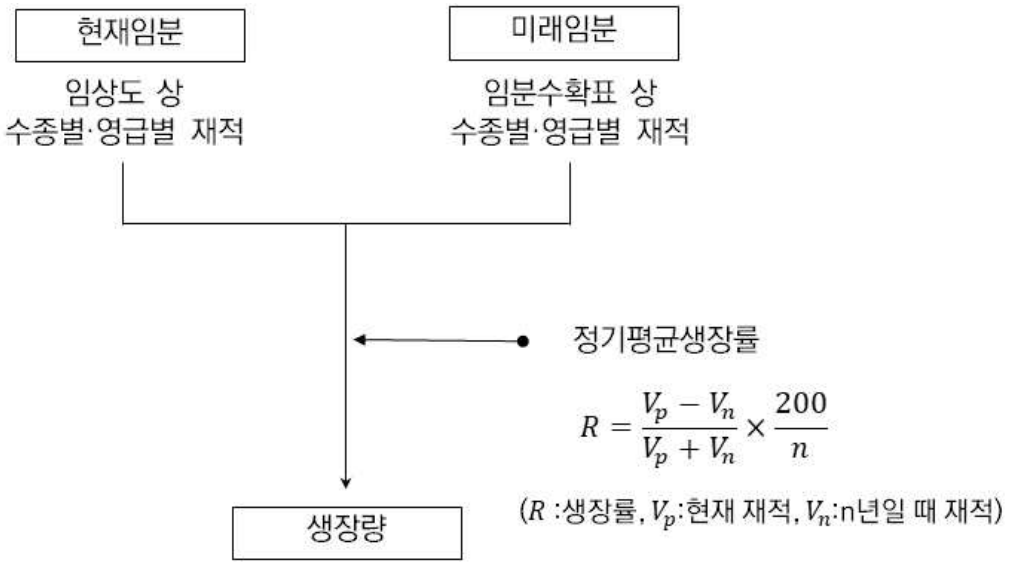

그림 3-1. 생장량 계산 과정

1.2. 탄소저장량

탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률 제2조에 따르면 산림 부문의 탄소흡수원은 탄소를 흡수하고 저장하는 입목, 죽, 고사유기물, 토양, 목제품 및 산림바이오매스 에너지를 포함한다. 본 연구에서는 산림경영활동에 영향을 받는 입목 바이오매스에 의한 탄소흡수만을 고려하였으며, 입목 바이오매스는 지상부 바이오매스(수간,가지,잎)과 지하부 바이오매스(뿌리)로 구성된다.

탄소저장량(tCO_2)은 임목재적에 탄소배출계수인 목재기본밀도, 바이오매스 확장계수, 뿌리함량비와 탄소 전환계수, 이산화탄소 전환계수를 적용하여 산출할 수 있다(산림청, 2013). 손영모 등(2014)은 우리나라 22개 주요 수종에 대해 탄소배출계수를 개발한 바 있으며, 이를 통해 부피 단위의 임목재적을 중량 단위의 임목 바이오매스로 전환할 수 있다. 탄소 전환계수는

바이오매스를 탄소로 전환하는 계수로, 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서 제시하는 기본값 0.5를 적용하였다(손영모 등, 2014). 이와 같은 과정을 통해 탄소저장량(tC, 탄소톤)을 산출할 수 있고, 이 값에 이산화탄소 배출계수를 곱하면 탄소저장량(tCO_2, 이산화탄소톤)을 구할 수 있다. 산림의 탄소저장량을 표현할 때 탄소톤과 이산화탄소톤을 모두 사용할 수 있지만, 본 연구에서는 이후 탄소저장의 경제적 가치를 계산할 때의 단위가 이산화탄소톤임을 고려하여 이산화탄소톤을 채택하였다.

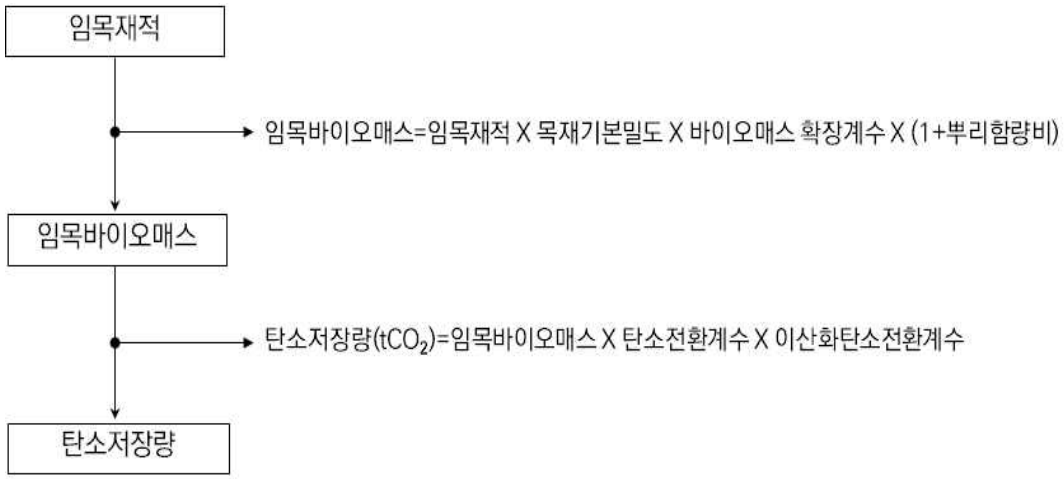

그림 3-2. 탄소저장량 계산 과정

표 3-3. 수종별 탄소배출계수(손영모 등, 2014)

수종	목재기본밀도	바이오매스 확장계수	뿌리함량비
강원지방소나무	0.419	1.483	0.258
중부지방소나무	0.472	1.413	0.254
리기다소나무	0.504	1.325	0.362
곰솔	0.481	1.524	0.290
잣나무	0.408	1.812	0.283
일본잎갈나무	0.453	1.335	0.291
삼나무	0.347	1.313	0.233
편백	0.427	1.349	0.203
상수리나무	0.721	1.450	0.313
굴참나무	0.721	1.338	0.324
신갈나무	0.663	1.603	0.388
졸참나무	0.658	1.566	0.438
아까시나무	0.613	1.558	0.461
자작나무	0.558	1.388	0.349
서어나무	0.614	1.693	0.262
튤립나무	0.458	1.260	0.234
밤나무	0.510	2.459	0.419
현사시나무	0.363	1.174	0.164
구실잣밤나무	0.583	1.393	0.625
붉가시나무	0.833	1.467	0.214
동백나무	0.657	2.621	0.356
종가시나무	0.763	2.123	0.229

1.3. 수원함양량

김종호 등(2010)의 연구에 따르면 산림의 수원함양량은 토양층별(A층, B층) 평균토심과 조공극률의 곱으로 구할 수 있다(그림 3-3). 평균토심은 산림입지도에서 구할 수 있으며, 조공극률은 김종호 등(2010)이 제시한 조공극률 계산식을 이용하여 도출하였다(표 3-4).

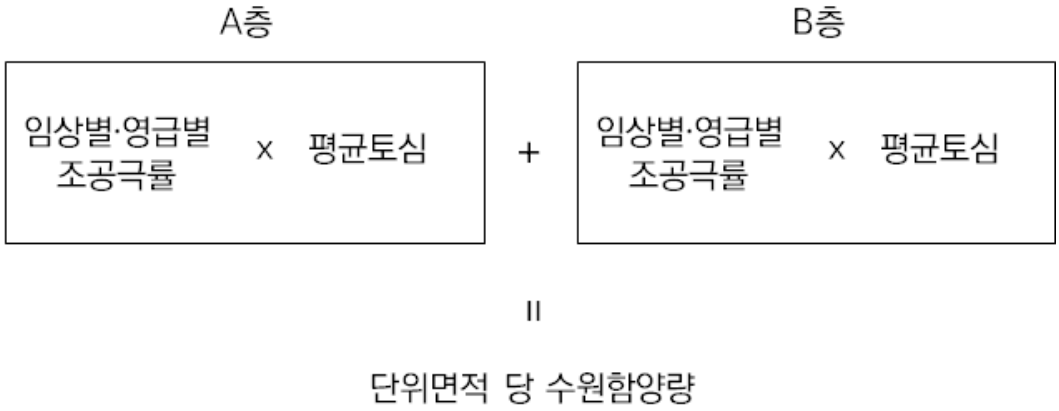

그림 3-3. 수원함양량 계산 과정

표 3-4. 영급별·임상별·토양층별 조공극률

영급		0	1	2	3	4	5	6	7
침엽수	A층	25.00	26.37	28.93	31.16	33.05	34.61	35.86	36.85
	B층	28.00	28.27	28.80	29.29	29.75	30.18	30.58	30.95
활엽수	A층	38.75	39.18	40.01	40.78	41.51	42.19	42.83	43.42
	B층	28.12	29.16	31.15	32.99	34.67	36.17	37.50	38.67

1.4. 미세먼지 흡수량

김종호 등(2010)은 소나무림의 미세먼지 흡착특성이 침엽수림의 대표한다고 가정하여 침엽수림과 활엽수림의 미세먼지 흡수량을 계산하였다. 해당 연구에 따르면 소나무 한 그루가 흡착할 수 있는 분진량은 19.22g/본이다. 현실림 임분수확표에 따르면 소나무림의 ha당 평균 본수는 1,269본/ha 이므로 소나무림의 연간 분진 흡착량은 0.024ton/ha/yr 이다. 이 값에 총 부유분진량 대비 미세먼지 배출량의 상대비율 73%와 연간 강수율 28.5%를 적용하면 침엽수림의 ha당 연간 총 미세먼지 흡수량을 구할 수 있으며, 그 값은 0.005ton/ha/yr 이다. 활엽수림의 연간 총 미세먼지 흡수량은 침엽수의 연간 총 미세먼지 흡수량에 침엽수와 활엽수의 분진흡착잠재능력(Potential Dust-Retaining Capacity,PDRC) 상대비율인 0.44를 곱하여 산출할 수 있다.

2. 산림기능의 경제적 가치 분석

다목적 산림경영계획모델에서 네 가지 기능을 하나의 목적함수로 표현 및 평가하기 위하여 측정 단위를 경제적 가치로 통일하였다. 목재생산, 탄소저장, 수원함양, 대기정화 기능의 가치를 화폐가치로 평가한 뒤 순현재가치로 환산하였다.

2.1. 목재생산의 경제적 가치

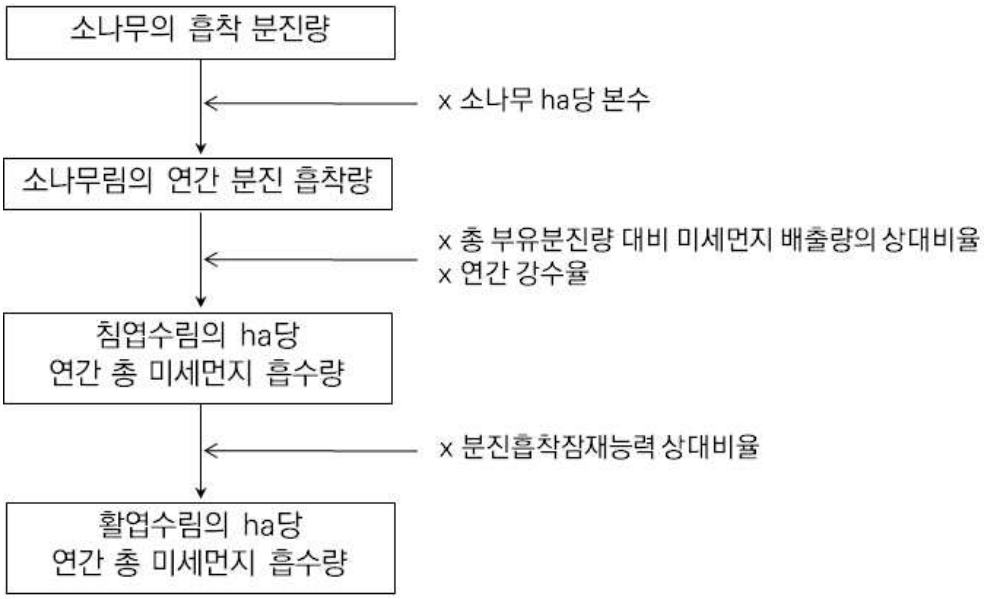

그림 3-4. 미세먼지 흡수량 계산 과정

목재생산은 간벌과 주벌로 구분할 수 있으며, 목재생산의 경제적 가치는 목재로부터 얻는 수익에서 목재생산에 소요되는 비용을 제한 순수익으로 구할 수 있다. 간벌의 순수익은 간벌 목재의 판매 수익에서 간벌 비용을 제하여 계산하였다. 주벌은 간벌과 달리 벌채 후 지존작업과 조림이 수반되기 때문에, 주벌의 순수익은 주벌 목재의 판매 수익에서 주벌 비용과 지존작업 및 조림 비용을 제하여 계산하였다.

원목산지가격은 매분기마다 산림청이 고시하므로 주벌 목재의 판매 수입은 2021년 4분기 원목산지가격 조사 데이터에 기반하여 산출하였다. 원목의 산지가격은 권역별, 수종별, 등급별로 구분된다. 재종은 특용재급, 1~3등급, 원주재급, 원료재급으로 구분되며 이 때, 특용재는 직경이 매우 크고 결점이 적은 재종으로, 매우 희귀하고 가격이 높기 때문에 이를 제외하고 평균값을 계산하였다. 16년부터 21년까지 원목산지가격의 평균값을 계산하였다.
그 외 공식적으로 고시되지 않는 간벌 비용, 주벌 비용, 지존작업 비용, 조림 비용, 간벌 목재의 가격은 홍천 국유림 관리소의 국유임산물 매각상황 데이터와 숲가꾸기 사업 추진내역을 기반으로 산출하였다.

2.2. 탄소저장의 경제적 가치

탄소저장의 경제적 가치는 탄소저장량(tCO_2)에 탄소배출권 거래가격을 곱하여 산정하였다. 배출권시장 종목에는 할당배출권(KAU), 상쇄배출권(KCU), 외부사업감축량(KOC)가 있으며 그 중 KOC는 사업장 밖에서 감축한 온실가스 감축 실적을 정부가 인증한 것으로, 산림을 통한 온실가스 감축이 이에 해당한다. 따라서 탄소배출권 거래가격은 KOC를 기준으로 선정하였으며, 2016년부터 2021년까지 KOC의 평균 가격인 27,900원/tCO_2를 적용하여(배출권시장 정보플랫폼, 2022) 탄소저장의 경제적 가치를 산정하였다.

2.3. 수원함양의 경제적 가치

김종호 등(2010)은 수원함양의 경제적 가치를 대체비용법을 이용하여 추정하였다. 이 방법은 환경자원의 손상을 방지하거나 원래 상태로 복원하는데 드는 비용을 지불하고자 할 때, 다른 수단으로 환경자원의 기능을 대체하는 비용을 통해 환경의 경제적 가치를 평가한다(윤여창, 1995). 즉, 수원함양의 경제적 가치를 산림의 수원함양량과 동일한 양의 물을 댐에 저장할 때 소요되는 비용으로 계산하였다. 김종호 등(2010)에 따르면 댐 건설비는 959.91원/ton, 댐 저수량당 유지비는 9.59원/ton이므로, 수원함양의 경제적 가치로 969.5원/ton을 적용하였다.

2.4. 대기정화의 경제적 가치

대기정화의 경제적 가치는 산림의 미세먼지 흡수량에 대한 미세먼지 처리비용에 근거하여 결정하였다. 김종호 등(2010)의 연구에 의하면 미세먼지 처리비용은 4,967,000원/ton 이므로, 이 값을 대기정화의 경제적 가치로 간주하였다.

2.5. 순현재가치

순현재가치는(Net Present Value, NPV)는 투자기간 동안 발생하는 순편익의 합을 현재가치로 환산한 값으로, 산림경영과 같이 장기적인 분석에서는 순현재가치법과 같은 방법을 통해 화폐의 시간적 가치를 고려할 필요가 있다(우종춘 등, 2017). 따라서 각 기능의 경제적 가치를 순현재가치로 환산하였으며, 아래 식에서 R_t 는 수익, C_t 는 비용, i 는 이자율, t 는 기간(년)을 의미한다.

$$NPV = \sum_{t=0}^{n} \frac{R_t - C_t}{(1+i)^t}$$

제 4 장 국유림의 적정 목재생산량 추정

제 2장에서 분석한 국유림의 목재생산 가능 지역을 대상으로 제 3장에서 개발한 모델을 적용하여 경제적·공익적 기능을 동시에 고려한 적정 목재생산량을 추정하였다.

제 1 절 경영구역 구분

산림을 경영할 때 경영구역을 구분하여 구역 간 서로 다른 임상 조건, 입지특성, 사회적 요구 등을 반영할 수 있다. 즉, 경영구역에 따라 각기 다른 경영 목표를 적용할 수 있으므로 보다 실용적인 경영계획을 수립할 수 있다. 본 연구에서는 지방 산림청의 관할지역을 기준으로 경영구역을 구분하였다. 우리나라 국유림은 5개의 지방 산림청(북부지방산림청, 동부지방산림청, 서부지방산림청, 중부지방산림청, 남부지방산림청)에 의해 관리되며, 각 지방 산림청은 20년 단위로 지역산림계획을 발표한다. 지역산림계획은 지방 산림청 단위의 국유림 최상위 산림계획으로, 산림기본계획의 취지를 반영하면서 구역의 특수성을 고려하여 국유림 경영·관리의 비전과 목표를 제시하는 전략 계획이다(남부지방산림청, 2018). 지역산림계획을 통해 각 지방 산림청의 비전과 목표를 파악할 수 있으며, 이를 산림경영모델에 반영함으로써 현실성과 실용성을 높일 수 있다. 따라서 지방 산림청의 관할지역을 기준으로 대상지를 5개로 구분하였으며, 각각 A(북부), B(동부), C(서부), D(중부), E(남부) 로 명명하였다(표 4-1, 그림 4-1). 즉, 경영구역 A는 국유림의 목재생산 가능 지역 중

북부지방 산림청 관할지역에 해당하는 구역을 의미한다.

표 4-1. 경영구역별(A~E) 면적 및 축적

경영 구역	지방 산림청	관할지역	면적(ha)	축적(m^3)
A	북부	강원(영서)	64,930	12,481,044
		경기	26,630	4,918,761
		서울	560	99,902
		인천	622	110,418
		합계	92,742	17,610,125
B	동부	강원(영동)	97,607	19,423,501
		합계	97,607	19,423,501
C	서부	전북	28,559	4,557,179
		전남	59,064	9,693,500
		경남	16,613	2,808,961
		광주	748	92,986
		제주	9,783	1,913,953
		합계	114,766	19,066,578
D	중부	충북	27,842	4,581,306
		충남	18,485	2,905,549
		대전	602	103,691
		세종	1,356	202,540
		합계	48,285	7,793,086
E	남부	경북	125,145	21,949,546
		경남	6,385	1,181,049
		대구	609	93,810
		부산	1,620	295,573
		울산	1,246	226,003
		합계	135,005	23,745,981
총계			488,405	87,639,272

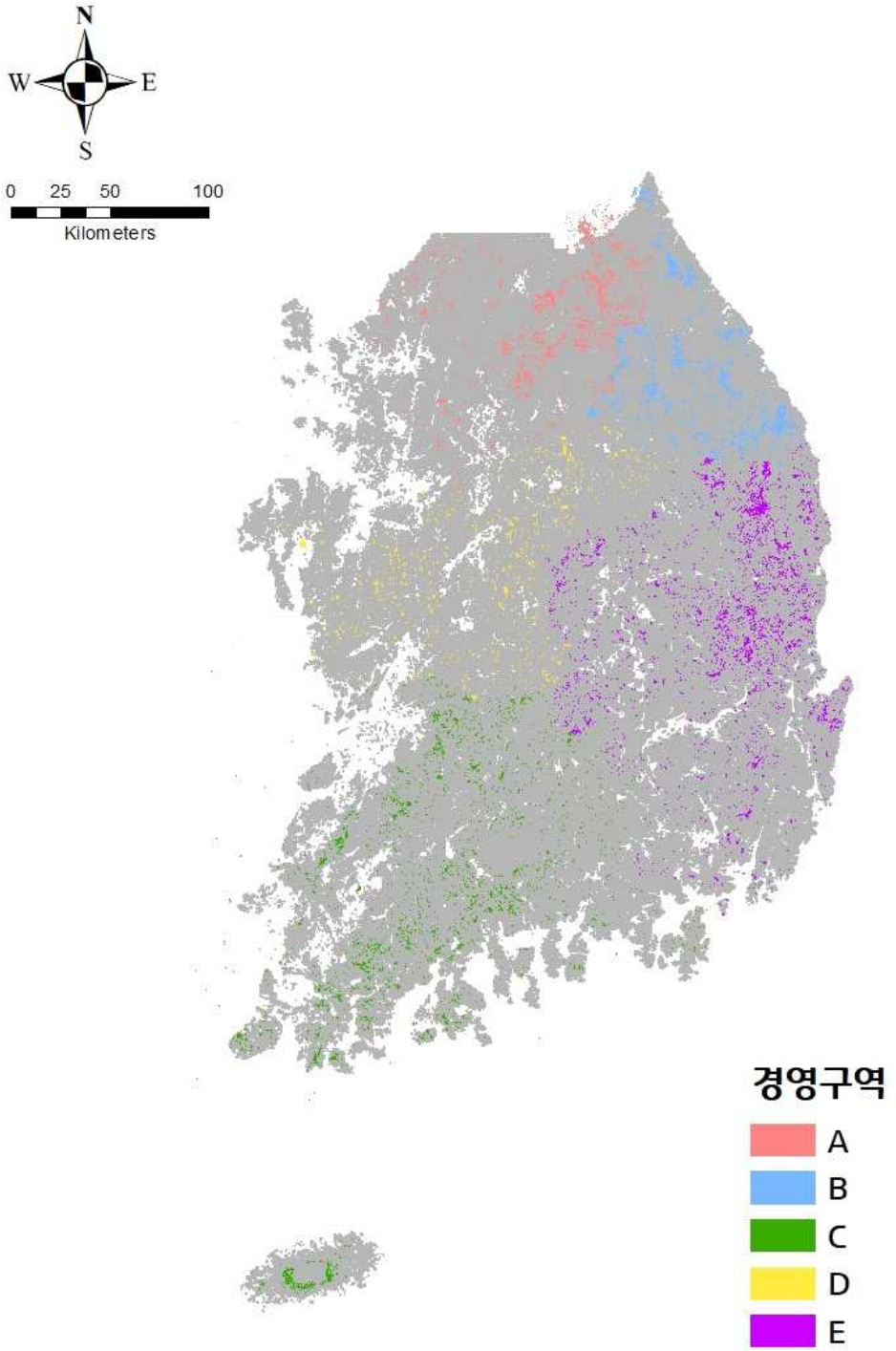

그림 4-1. 대상지의 경영구역(A~E) 구분

제 2 절 산림경영 문제 분석

1. 임분 및 경영 정보

1.1. 임분 현황

시업체계를 수립하고 제약조건의 기준값을 결정하기 위해 대상지의 임분 현황을 파악하였다. 대상지의 영급 분포를 살펴보면 4영급이 이상이 전체 임분의 76%를, 3영급 이하가 23%를 차지하여 불균형한 영급 구조를 보인다(그림 4-2). 임상을 살펴보면 침엽수림 38%, 활엽수림 50%, 혼효림 12%로 구성되어있다. 침엽수 중에서는 소나무, 낙엽송, 리기다소나무, 곰솔, 편백나무 순으로 넓은 면적을 차지하며, 활엽수는 참나무류(갈참,떡갈,졸참), 신갈나무, 상수리나무가 대부분을 차지한다.

수종은 총 41종류가 존재하였고, 수종별 점유 면적과 지역산림계획을 참고하여 대표 수종을 선정하였다. 그 결과 대표수종은 소나무, 낙엽송, 편백, 리기다소나무, 기타침엽수, 특수활엽수, 기타활엽수의 7가지로 구분하였다(표 4-2). 소나무와 낙엽송은 단일 수종 중 점유 면적이 첫 번째와 두 번째로 넓은 주요 수종이므로 따로 분류하여 분석할 필요가 있다. 편백은 서부지방산림청의 주요 수종으로 선정되어 구체적인 확대계획이 있으며, 리기다소나무는 다른 침엽수와 달리 벌기령이 30년으로 짧기 때문에 경영계획에 영향을 미칠 수 있어 따로 구분하였다. 특수활엽수는 탄소흡수력이 높아 모든 지방산림청에서 확대계획이 있는 상수리나무와 신갈나무를 포함한다.

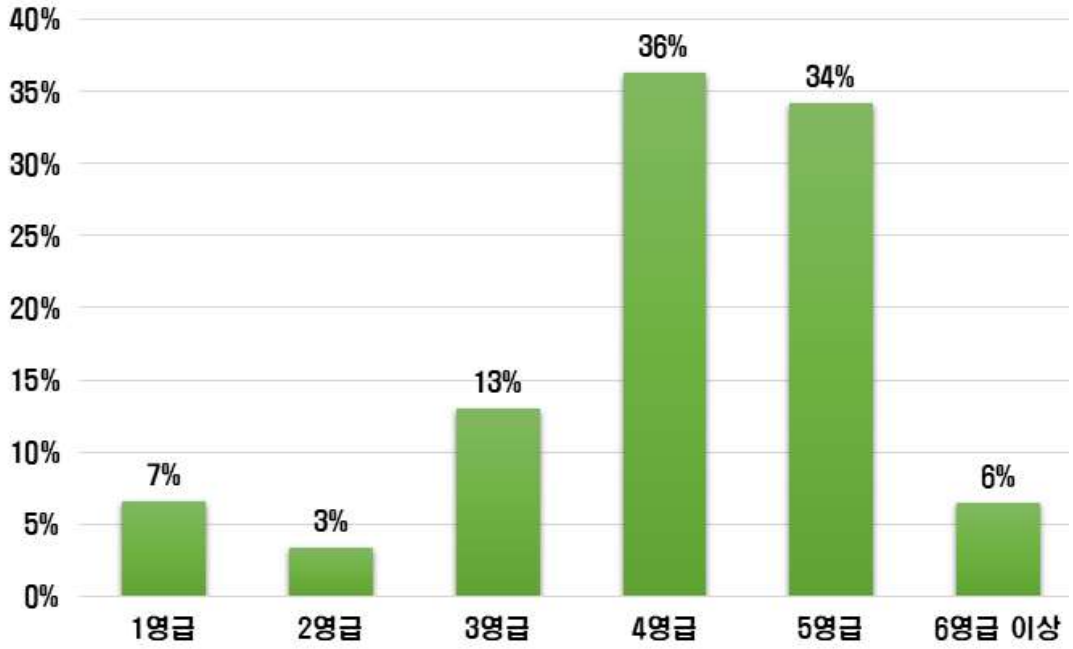

그림 4-2. 대상지의 영급 분포 현황

표 4-2. 대상지의 대표 수종과 포함 수종

대표 수종	기호	포함 수종
소나무	D	잣나무 , 곰솔
낙엽송	L	-
편백	C	-
리기다	R	-
기타침엽수	K	상기 수종 외 침엽수
특수활엽수	O	상수리나무 , 신갈나무
기타활엽수	B	상기 수종 외 활엽수

1.2. 시업 체계

전국 산림은 입지조건, 사회·경제적 여건 등을 고려하여 수원함양림, 산지재해방지림, 자연환경보전림, 목재생산림, 산림휴양림, 생활환경보전림의 6가지 기능으로 구분되며, 산림자원법 제8조에서 산림기능에 따라 관리 목표 및 시업체계를 달리할 것을 권고하고 있다(산림청, 2014).

따라서 본 연구에서는 경영구역별로 산림 기능을 구분하고, 각 기능별로 차별화된 시업을 적용하고자 하였다. 이를 위해 산림기능구분도를 기반으로 경영구역 별로 주기능과 부기능의 면적을 계산하였다(표 4-3, 표 4-4). 대상지는 벌채 관련 제약조건을 적용하여 목재생산가능 지역으로 추출되었기 때문에, B를 제외한 모든 구역에서 주기능이 목재생산기능인 면적이 가장 컸다. B의 경우 수원함양기능이 36,968ha, 목재생산기능이 36,415ha로, 수원함양기능이 주기능인 면적이 가장 컸다. 부기능의 경우 B, C, D는 수원함양림이, A,E는 산지재해방지림이 가장 넓은 면적을 차지했다.

표 4-3. 경영구역별(A~E) 주기능의 면적

산림기능 (주기능)	면적 (ha)				
	A	B	C	D	E
산림휴양	5,746	2,778	10,290	8,609	9,161
생활환경보전	3,434	6,270	1,812	1,249	4,561
목재생산	38,898	36,415	52,298	21,826	83,447
산림재해방지	17,581	11,430	11,856	5,651	17,218
자연환경보전	2,954	2,296	2,233	864	2,947
수원함양	15,789	36,968	22,714	7,800	16,552

표 4-4. 경영구역별(A~E) 부기능의 면적

산림기능 (부기능)	면적 (ha)				
	A	B	C	D	E
산림휴양	5,380	2,753	4,667	3,238	5,978
생활환경보전	6,198	16,950	8,320	2,823	8,071
목재생산	22,572	18,298	16,000	10,587	13,410
산림재해방지	29,782	20,340	32,016	14,111	53,540
자연환경보전	2,954	2,296	2,233	864	2,947
수원함양	17,515	35,520	37,967	14,376	49,940

여러 시업 중 간벌과 주벌, 조림에 국한하여 시업체계를 수립하였으며, 아래의 네 가지를 가정하였다.

첫째, 수종별 벌기령은 「산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률 시행규칙」에 따른 국유림의 기준벌기령을 적용한다.
둘째, 벌기령이 30년인 리기다소나무는 간벌을 실시하지 않는다.
셋째, 현실적 여건을 고려하여 모든 수종의 최대 간벌 횟수는 3회로 제한한다.
넷째, 조림은 벌채 직후 곧바로 실시한다.

시업은 수종과 산림기능에 따라 달라지므로 경영구역별·수종별로 간벌 시기와 횟수, 간벌 강도, 주벌 시기를 결정하였다. 대상지의 산림기능(주기능)은 대부분 목재생산림이기 때문에 목재생산림의 시업체계를 기준 시업으로 설정하고, 이에 따라 수원함양림과 산지재해방지림의 시업

체계를 결정하였다. 목재생산림의 시업체계는 6개의 주요 수종(강원지방소나무, 중부지방소나무, 잣나무, 낙엽송, 상수리나무, 신갈나무)의 간벌 시업에 따른 임분 생장변화와 수확량을 예측한 연구(김영환, 2012)를 참고하였다. 해당 연구에 따르면 강원지방소나무와 잣나무, 신갈나무는 20년, 40년에 30% 강도로 간벌을 시행할 때, 중부지방소나무와 낙엽송은 20년, 30년, 40년에 20% 강도로 간벌을 시행할 때 가장 수확량이 높았다. 따라서 상기의 시업을 기준 시업으로 설정하였다.

지속가능한 산림자원 관리지침에 따르면 수원함양림은 그 기능을 유지 및 증진하기 위해 수관울폐도를 50~80% 수준으로 유지하는 것을 원칙으로 한다. 또한 배상원(2012)의 연구에 따르면 잣나무는 임령 20년부터 60년까지 매 10년마다 강도 30~33%로, 낙엽송은 임령 15년부터 65년까지 매 10년마다 강도 23~30%로 간벌할 때 수관울폐도 70% 이하를 기준으로 수원함양 기능을 지속적으로 유지할 수 있다. 즉, 이론적으로는 수원함양기능의 증진을 위해 10년마다 약 30% 강도로 간벌을 실시해야 되지만, 현장 적용성을 고려하면 현실성이 매우 떨어진다. 따라서 수원함양림의 시업은 기준 시업에 간벌을 1회 추가하고, 간벌 강도는 30%로 결정하였다.

지속가능한 산림자원 관리지침에 따르면 산지재해방지림은 그 기능을 위해 뿌리 발달과 하층식생의 생육 촉진이 요구되므로 3영급 이상의 산림에 대해 약도의 솎아베기를 5년 이상의 간격으로 실시하는 것을 권장한다. 수원함양림과 마찬가지로 10년 이하를 주기로 간벌을 실시하는 것은 비현실적이므로 기준 시업에 간벌을 1회 추가하고, 기준 시업의 간벌 강도가 30%인 수종은 15%로, 20%인 수종은 10%의 간벌 강도를 적용하였다.

표 4-5. 경영구역별(A~E)·산림기능별·수종별 시업체계

경영 구역	기능	수종	벌기령 (년)	벌채시기 (년)	간벌 강도
A,E	산지 재해	소나무(강원지방, 중부지방), 편백나무, 특수활엽수, 기타활엽수	60	20,30,40,60	30%
		낙엽송, 기타침엽수	50	20,30,40,50	30%
		리기다소나무	30	30	-
B,C,D	수원 함양	강원지방소나무, 편백나무, 특수활엽수, 기타활엽수	60	20,30,40,60	15%
		중부지방소나무	60	20,30,40,60	10%
		낙엽송, 기타침엽수	50	20,30,40,50	10%
		리기다소나무	30	30	-

1.3. 계획기간

후계림의 임상변화를 분석하고자 수종별로 최소 1회 이상 벌채가 가능하도록 최장 벌기령의 약 1.5배인 100년으로 설정하였다. 계획기간을 10년 단위로 나누어 총 10분기로 구성하였고, 모든 경영활동은 각 분기의 중간에 실시하는 것으로 가정하였다.

1.4. 기타

1.4.1. 생장량

대표수종이 임분수확표 상에 있는 소나무, 낙엽송, 편백, 리기다는 수확표의 값을 그대로 적용하였다. 수확표 상에 없는 기타침엽수와 특수활엽수, 기타활엽수는 점유 면적을 기반으로 적용 수종을 결정하였다. 기타침엽수는 삼나무의 점유면적이 가장 넓기 때문에 삼나무의 수확표를 적용하였다. 특수활엽수인 신갈나무와 상수리나무의 점유면적은 각각 25,719ha, 4,802ha이므로 신갈나무의 수확표를 적용하였다. 마지막으로 기타활엽수는 참나무류의 점유면적이 넓기 때문에 졸참나무의 수확표를 적용하였다.

1.4.2. 탄소저장량

수종별로 탄소배출계수가 다르기 때문에 같은 재적이어도 수종이 다르다면 저장하는 탄소의 양도 달라진다. 앞서 언급했듯이, 국내 22개 수종에 대해 탄소배출계수가 개발되어 있으므로 이를 수종별 잔존재적에 적용하여 탄소저장량을 구할 수 있다. 대표수종 중 소나무, 낙엽송, 편백, 리기다소나무는 동일 수종의 탄소배출계수를 적용하였다. 생장량과 같은 기준에 의해 기타침엽수는 삼나무, 전략활엽수는 신갈나무, 기타활엽수는 졸참나무의 탄소배출계수를 적용하였다.

1.4.3. 수원함양량

수원함양량 계산 시 경영구역별 평균 토심에 대한 값이 필요하다. 산림입지도를 통해 대상지의 평균토심을 구했으며, 이를 경영구역별로 구분하였다(표 4-6).

표 4-6. 경영구역별(A~E)·토양층별 평균 토심

경영구역	A	B	C	D	E
A층(cm)	13.0196	14.0655	15.3687	13.5455	12.1170
B층(cm)	45.0396	44.7118	48.0691	46.5059	48.1565

2. 제약조건 기준값 설정

대상지의 현재 임분 상태와 각 지방산림청의 지역산림계획을 바탕으로 제약조건의 기준값을 결정하였다(표 4-7). 현재 대상지는 4영급 이상인 임분이 대부분을 차지하여 영급 구조가 불균형한 상태이므로 적극적인 벌채를 통한 영급구조의 전환이 필요하다. 법정영급구조는 각 영급이 약 16%씩 존재하는 것이므로, 이 기준을 완화하여 1~6영급이 각각 10% 이상 분포하도록 설정하였다.

각 지방청은 지역산림계획에서 탄소흡수력이 높은 신갈나무, 상수리나무, 낙엽송의 조림을 확대하고 수종의 다양화를 통해 건강한 산림을 조성하겠다는 공통적인 목표를 제시하였다. 또한 소나무재선충을 예방하기 위해 소나무를 축소하고, 서부청의 경우 편백을 대표 수종으로 선정하여 매년 최소 300ha를 조림하겠다는 목표를 수립하였다. 이러한 계획과 현재 각 수종의 면적 비율을 토대로 수종별 면적 비율을 설정하였다.

목재생산의 보속성을 위한 수확량의 허용 증가율과 감소율은 각각 30%를 적용하였으며, 각 구역의 임상 단순화를 방지하기 위해 침엽수와 활엽수의 면적 비율은 각각 25% 이상을 적용하였다.

표 4-7. 국유림 목재생산 가능 지역 경영의 제약조건

제약조건	경영구역	내용		
목재생산의 보속성	전체	$0.7H_{p-1} \leq H_p \leq 1.3H_{p-1}$ (H_p : p분기의 수확량)		
영급별 면적 비율	전체	1-6영급	최소	10%
경영구역별·수종별 면적비율	전체	낙엽송	최소	30%
		특수활엽수		10%
	C	편백		300ha/년
	전체	소나무	최대	20%
침엽수·활엽수 면적 비율	전체	침엽수	최소	25%
		활엽수		25%

제 3 절 결과 및 고찰

1. 적정 목재생산량 추정

본 연구에서 사용한 모델은 목적함수를 구성하는 목재생산·탄소저장·수원함양·대기정화 기능에 대한 가중치를 달리하여 경영목적의 중요도를 변화시킬 수 있다. 경제적·공익적 기능을 동시에 고려하기 위해 각 기능에 대해 동일한 가중치를 설정하여 모델을 실행하였다.

모델 실행 결과, 의사결정변수인 X_{ijkl}의 값을 통해 경영구역별·분기별·수종별 수확 및 갱신에 대한 수치를 알 수 있으며 이를 통해 분기별 적정 목재생산량을 산출할 수 있다(그림 4-3). 계획기간 동안 국유림 목재생산 가능지역의 총 목재생산량은 200,026천m^3으로, 분기별 평균 목재생산량은 20,003천m^3이다. 이를 2021년 기준 최근 10년간 국내재 공급량인 45,020천m^3과 비교하면 국내 목재 수요의 약 44%를 대상지에서 담당할 수 있음을 알 수 있다(산림청, 2022b). 대상지의 면적이 목재생산 가능 지역 면적의 19%임을 감안하면 대상지의 목재공급 능력이 매우 높다고 평가할 수 있다. 하지만 이는 양적인 측면만 고려하여 비교한 것이므로, 추후 수종을 고려한 목재 수급 분석이 필요하다.

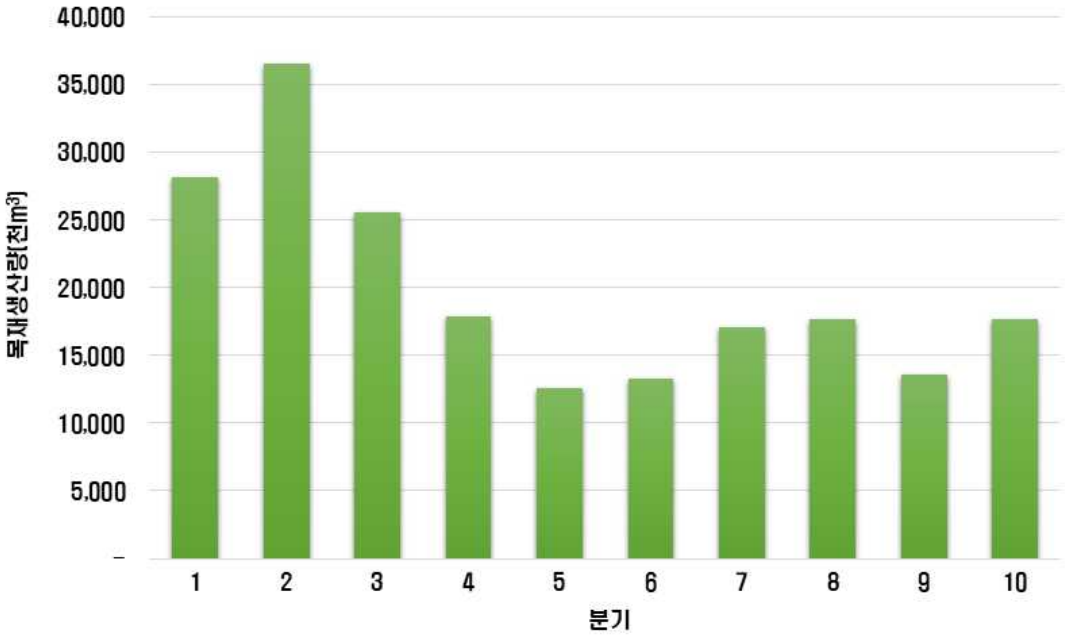

그림 4-3. 대상지의 분기별 목재생산량

2. 공익적 기능의 총량 및 순현재가치 추정

모델 실행의 결과로 각 기능의 총량과 순현재가치에 대한 수치가 산출되며(표 4-8), 목재생산량과 마찬가지로 분기별 탄소저장량, 수원함양량, 미세먼지 흡수량의 변화를 파악할 수 있다(그림 4-4, 4-5, 4-6).

2019년 기준으로 우리나라 산림의 탄소저장량은 약 1,930,000천tCO_2이다. 모델 분석 결과 계획기간 말인 10분기에 대상지의 탄소저장량은 88,121천tCO_2으로, 2019년 기준 탄소저장량의 약 4%를 차지한다. 계획기간인 100년 후에는 산림의 탄소저장량이 증가하므로 대상지의 탄소저장량이 차지하는 비율은 4% 이하로 예상된다. 대상지가 전체 산림 면적의 약 8%를 차지하지만, 모델 실행 시 탄소저장 기능에 가중치 0.25를

부여했다는 점을 감안하면 대상지의 탄소저장 기능이 충분히 발휘되었다고 판단할 수 있다. 보다 정밀한 분석을 위해서는 100년 후 예상되는 탄소저장량을 예측하고, 탄소저장 기능에 대한 가중치 변화에 따른 탄소저장량을 분석할 필요가 있다.

표 4-8. 각 기능별 총량과 순현재가치

총량			
목재생산(천m^3)	탄소저장(천tCO_2)	수원함양(천ton)	대기정화(천ton)
200,026	794,292	10,367,154	172
순현재가치(억원)			
목재생산	탄소저장	수원함양	대기정화
8,035	12,495	4,843	328

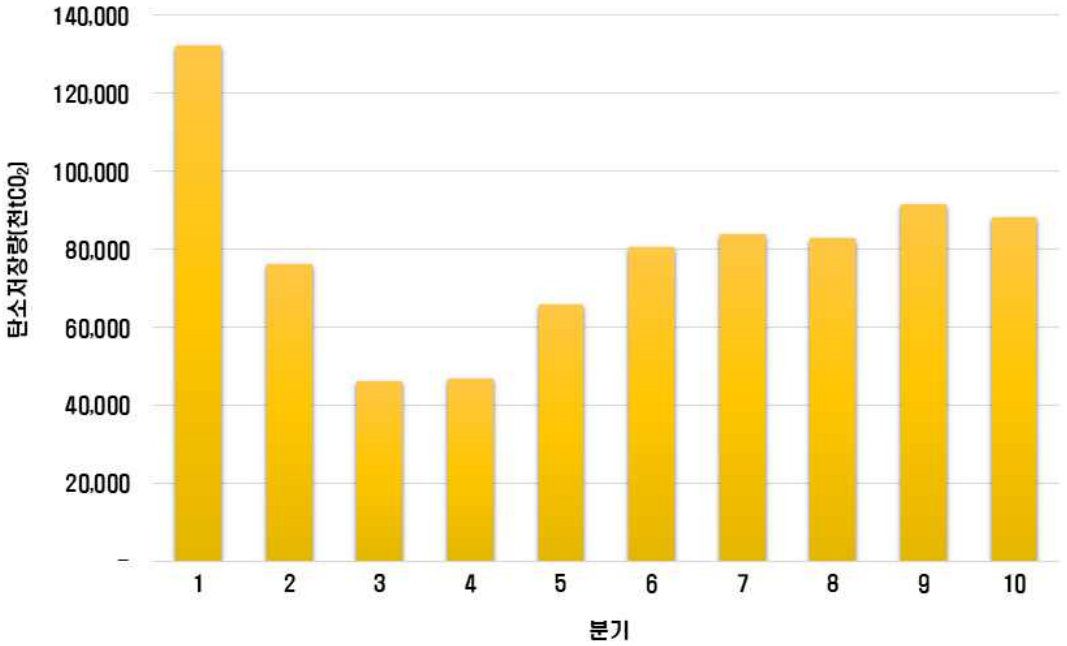

그림 4-4. 대상지의 분기별 탄소저장량

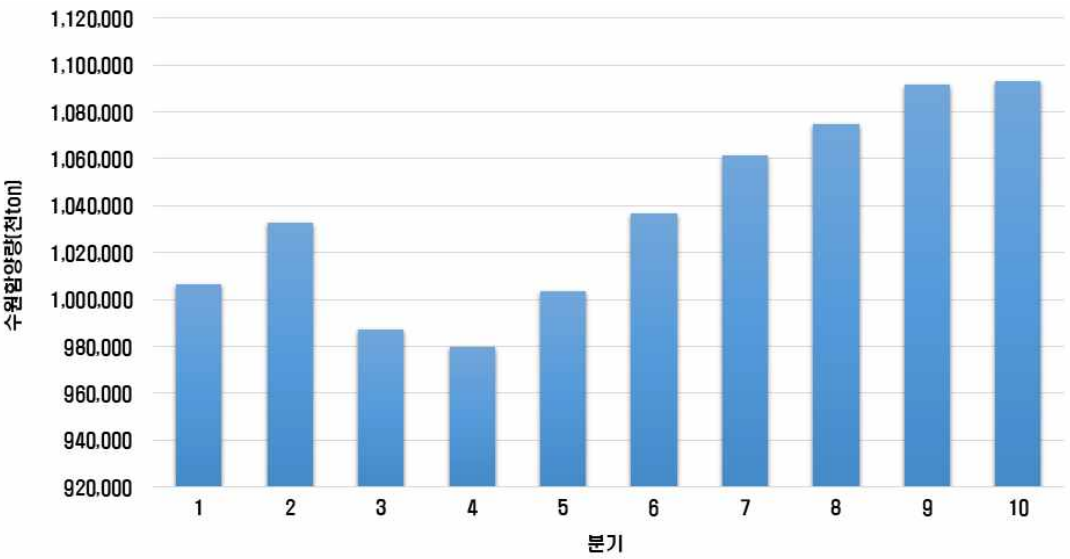

그림 4-5. 대상지의 분기별 수원함양량

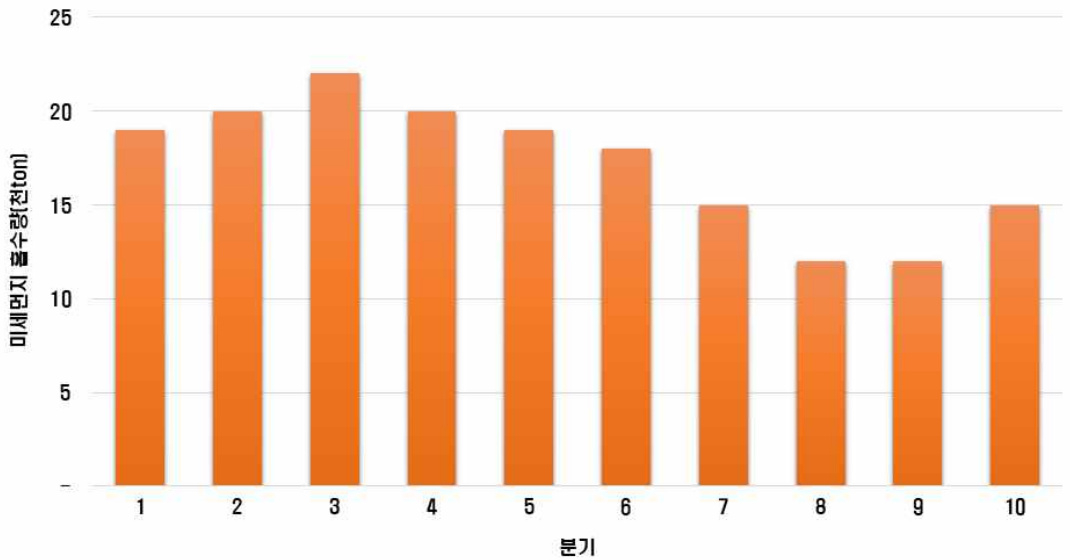

그림 4-6. 대상지의 분기별 미세먼지 흡수량

3. 영급 및 수종 분포의 변화

국유림 목재생산 가능 지역의 영급 균형을 위해 영급별 면적이 10% 이상 차지하도록 제약조건을 설정하였고, 그 결과 6분기 이후로 영급 구조가 안정적으로 변화함을 확인할 수 있다. 그림 4-7에서 현재와 계획기간 말의 영급 분포를 비교하면, 현재는 4영급 이상이 약 77%를 차지하는 반면 10분기에는 각 영급의 비율이 10~20% 로 균형 잡힌 구조를 보인다. 수종 분포 또한 설정한 제약조건에 따라 변화하며, 계획분기 말에는 현재에 비해 소나무는 감소하며, 낙엽송과 특수활엽수는 증가한다(그림 4-8). 리기다소나무의 경우 9분기 이후로 존재하지 않는데, 이는 리기다소나무에 대한 조건을 설정하지 않았기 때문이다. 따라서 특정 수종이 반드시 필요하다면 제약조건에서 최소 비율을 설정할 필요가 있다.

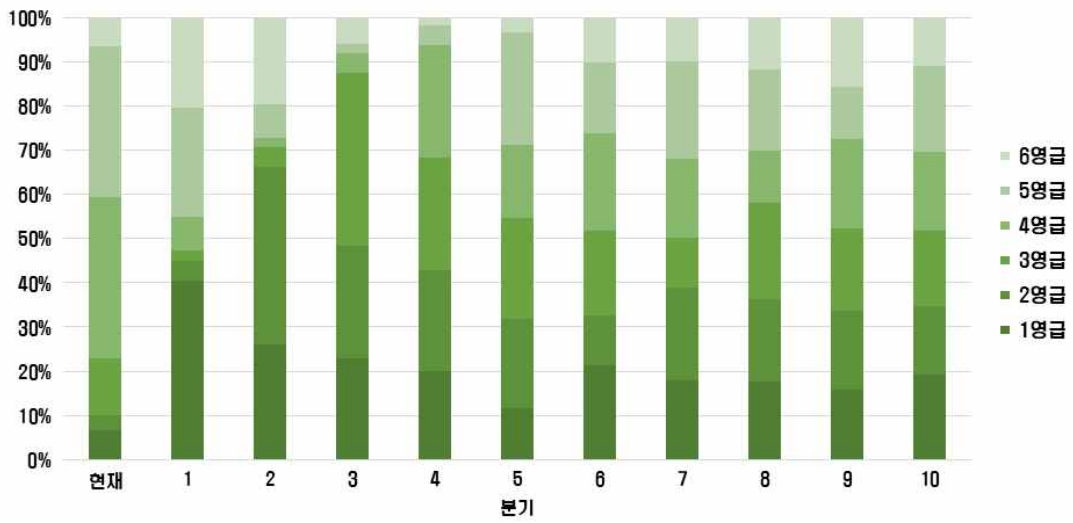

그림 4-7. 대상지의 영급 분포 변화

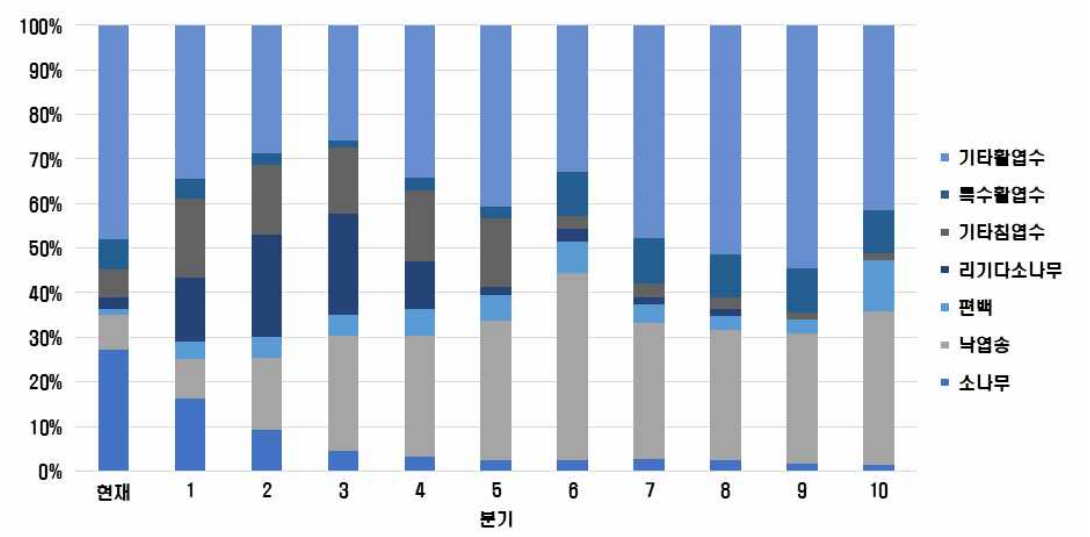

그림 4-8. 대상지의 수종 분포 변화

4. 가중치 분석

가중치 변화에 따른 결과를 비교하기 위해 서로 다른 경영목적을 갖는 5가지의 대안을 설정하였다. 대안Ⅰ은 4가지 경영목적에 동일한 가중치를 부여한 경우이며, 대안 Ⅱ~Ⅴ는 각각을 단일목적으로 갖는 경우이다(표 4-9). 경영목적별로 순현재가치를 비교한 결과, 총 순현재가치는 대안Ⅰ이 가장 높았으며, 개별 경영목적에 대한 순현재가치는 각각 해당 목적의 최대화를 목적함수로 갖는 대안 Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ, Ⅴ에서 가장 높게 분석되었다(표 4-10). 이를 통해 한 가지 기능을 고려하는 것보다 다양한 기능을 종합적으로 고려할 때 경제적으로 가치가 높음을 알 수 있다.

표 4-9. 대안별 경영목적의 가중치

대안	가중치			
	목재생산	탄소저장	수원함양	대기정화
Ⅰ	0.25	0.25	0.25	0.25
Ⅱ	1	0	0	0
Ⅲ	0	1	0	0
Ⅳ	0	0	1	0
Ⅴ	0	0	0	1

표 4-10. 대안별 순현재가치

대안	순현재가치(억원)				
	목재생산	탄소저장	수원함양	대기정화	합계
Ⅰ	8,035	12,495	4,843	328	25,701
Ⅱ	9,945	8,808	4,439	550	23,743
Ⅲ	8,004	12,518	4,847	325	25,693
Ⅳ	7,476	10,154	4,849	324	22,803
Ⅴ	8,384	8,190	4,436	559	21,569

제 4 절 결론

국유림의 경제적·공익적 기능을 고려한 적정 목재생산량을 추정하기 위해 산림의 다양한 기능을 고려할 수 있는 산림경영계획모델을 수립하였다. 본 모델은 목재생산·탄소저장·수원함양·대기정화 기능의 종합적 순현재가치 최대화를 목적함수로 가지며, 각 기능의 상대적 중요도에 따라 가중치를 부여할 수 있다. 제약조건은 목재생산의 보속성, 영급별 면적비율, 수종별 면적 비율, 침엽수·활엽수의 면적비율을 고려하였다.

개발한 모델을 국유림 목재생산 가능 지역에 적용하기 위해 먼저 경영구역을 구분하였다. 경영구역은 5개의 지방 산림청 관할지역을 기준으로 구분하였으며, 각 경영구역의 산림기능을 고려하여 이에 적합한 시업체계를 수립하였다. 모델 실행 결과, 분기별·경영구역별·수종별로 수확계획을 분석할 수 있으며 이를 토대로 적정 목재생산량을 추정할 수 있었다. 목재생산량 외에도 탄소저장량, 수원함양량, 미세먼지 흡수량의 총량과 각 기능의 순현재가치에 대한 정보도 얻을 수 있었다. 영급과 수종분포는 모델에서 설정한 제약조건에 따라 변화할 것으로 예측되었다. 마지막으로 경영목적에 따른 산림경영계획의 변화를 비교하기 위해 각 기능으 가중치를 달리한 대안을 수립하였다. 네 가지 기능을 동일하게 고려하는 경우와 각각의 단일 기능을 최대화하는 경우를 비교하였고, 그 결과 순현재가치의 총합은 네 기능을 종합적으로 고려할 경우 가장 높았다.

제 5 장 종합결론

산림의 공익적 기능에 대한 수요가 증가함에 따라 산림의 전통적 기능인 목재생산과 함께 공익적 기능을 고려할 수 있는 산림경영의 중요성이 커지고 있다. 특히 국유림은 민유림에 비해 높은 수준의 자본, 기술, 노동력 등을 투입할 수 있는 장점이 있으며 집약적 관리가 이루어졌다는 점에서 산림의 다양한 기능을 안정적으로 발휘할 가능성이 높다고 평가된다. 따라서 산림의 다양한 기능을 고려한 국유림 경영이 요구되며 국유림 확대를 위한 국가적 차원의 노력이 이루어지고 있다. 하지만 우리나라 국유림은 4영급 이상의 임분이 대부분을 차지하여 영급이 불균형한 상태로 목재수확기에 도달하고 있으며, 이러한 상태에서는 국유림의 지속가능성을 보장하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 영급 구조의 전환이 필요하며 장기적 관점에서 체계적인 수확 계획이 요구된다. 이에 본 연구는 우리나라 국유림의 경제적·공익적 기능을 동시에 고려할 수 있는 산림경영계획모델을 수립하여 적정 목재생산량을 추정하였다.

국유림의 미래 목재생산 잠재량 추정을 위해 먼저 현재 우리나라 국유림의 목재생산 잠재량을 분석하였다. 목재생산 가능 지역 분석에 필요한 공간자료를 수집하였고, 중첩 및 가공을 통해 산림공간정보 DB를 구축하였다. 이를 통해 소유별·지역별로 목재생산 가능 지역을 분석하고 목재생산 잠재량을 추정할 수 있었다. 또한 지역별·제약조건별로 목재생산 가능 지역의 면적을 비교하였으며, 이는 지역별로 목재생산 가능 지역 확대 방안을 수립하는데 활용될 수 있다.

다음으로 다목적 선형계획법을 이용하여 국유림의 경제적·공익적 기능을 동시에 고려할 수 있는 산림경영계획모델을 구축하였다. 경제적 기능으로 목재생산을, 공익적 기능으로 탄소저장, 수원함양, 대기정화 기능을

선정하여 목적함수를 구성하였다. 제약조건으로는 목재생산의 보속성, 영급별 면적 비율, 수종별 면적 비율, 침엽수·활엽수의 면적비율을 포함하여 지속 가능성을 고려하고자 하였다. 개발한 모델을 국유림의 목재생산 가능 지역에 적용하기 위해 지방 산림청의 관할구역에 따라 경영구역을 구분했고, 현재 임분상태와 지역산림계획을 반영하여 모델에 적용하였다. 목적함수는 목재생산·탄소저장·수원함양·대기정화 기능의 종합적 순현재가치 최대화이며, 각 기능에 동일한 가중치를 설정하였다. 모델 실행 결과, 분기별로 경제적·공익적 기능의 총량 및 경제적 가치, 순현재가치에 대한 수치를 얻을 수 있었다.

국유림의 경제적·공익적 기능을 고려한 적정 목재생산량 추정을 위해 현재 국유림의 목재생산 잠재량을 추정하였고, 산림의 여러 기능을 동시에 고려할 수 있는 산림경영계획모델을 개발하였다. 목재생산 잠재량 추정을 통해 지역별·소유별로 목재생산 가능 지역을 파악할 수 있었으며, 지역별·제약조건별 목재생산 가능 지역을 비교하여 각 지역에 가장 영향력이 큰 벌채 제약조건을 분석할 수 있었다. 이를 참고하여 지역별로 목재생산 가능 지역 확대 방안을 수립할 수 있다. 또한 개발한 모델을 국유림뿐 아니라 사유림 경영에도 활용하여 목재를 안정적으로 생산하면서 다양한 공익 기능을 발휘할 수 있는 산림경영 의사결정에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

강진택, 임종수, 고치웅, 박정묵, 윤준혁, 신중훈, 유중원, 문가현, 이지원, 원명수. 2021. 「2021」 입목재적·바이오매스 및 임분수확표. 국립산림과학원 연구자료 제979호. 273p.

길태규, 신원섭. 2020. 청태산 자연휴양림 산림치유 환경인자 분석. 한국산림휴양학회지 24(1): 47-57.

김다민, 임철희, 이우균, 송철호. 2015. 국유림경영계획 실행평가 제도 개선방안에 관한 연구. 한국임학회지 104(4): 640-648.

김다영, 한희, 정주상. 2021. 가리산 선도산림경영단지의 경제적·공익적 기능 증진을 위한 산림관리 최적화 방안. 한국산림과학회지 110(4): 665-667.

김민규, 백승안, 조구현, 정도현. 2017. 타워야더를 이용한 전간집재작업의 생산성 및 비용과 적정 노망밀도 분석. 한국임학회지 106(3): 300-309.

김선주. 2012. 주요 국가의 수자원 확보·이용현황과 정책방향. 한국농촌경제연구원 해외농업·농정 포커스. 1p.

김영환, 김태욱, 원현규, 이경학, 신만용. 2012. 임분 수확예측 모델을 이용한 간벌 시나리오별 목재수확량 예측. 한국산림과학회지 101(4): 592-598.

김영환, 유중원, 임종수, 이승현, 박주원. 2020. 국내 일본잎갈나무림의 자원량 및 목재생산 잠재량 분석. 한국산림과학회지 109(4): 454-460.

김외정. 2003. 21세기 국유림의 역할 및 관리강화방안. 국립산림과학원. 12p.

김종호, 김기동, 김래현, 윤호중, 이승우, 최형태, 김재준, 박찬열. 2010. 산림의 공익기능 계량화 연구. 국립산림과학원 연구보고 제10-26호. 17p.

곽두안, 남기준, 이우균, 김문일, 유항남, 정동준, 정진현, 김성호. 2012. 기후변화에 따른 산림수종 및 재적분포 변화 예측에 관한 연구. 한국임학회 학술발표논문집. 67-70.

권오복, 장철수. 1988. 삼림경영계획모델의 적용성 연구-Model Ⅰ대 Model Ⅱ-. 한국산림과학회지 77(4): 389-400.

남부지방산림청. 2018. 제6차 지역산림계획. 41p.

동부지방산림청. 2018. 제6차 지역산림계획. 11p.

박은식. 1998. 다목적 산림경영을 위한 산림정보시스템의 개발과 적용. 서울대학교 박사학위논문.

박은식, 정주상. 1999. 다목적 산림경영계획을 위한 선형계획법의 응용. 한국산림과학회지 88(2): 273-281.

박은식, 정주상. 2000. 탄소저장 및 목재생산효과 중심의 산림경영계획을 위한 다목적 선형계획법의 응용. 한국산림과학회지 89(3): 335-341.

북부지방산림청. 2018. 제6차 지역산림계획. 25p.

배상원, 박영규, 이경재, 이상태, 정준모, 박재현, 장석창, 서경원. 2012. 보안림의 관리제도 및 관리방안. 국립산림과학원 연구보고 12-13. 174p.

배출권시장 정보플랫폼. 2022. 2021년 배출권시장 운영리포트. 3p.

산림청. 2022a. 2021년 4분기 국산재 원목 시장가격 동향. 79p.

산림청. 2022b. 2022 산림임업통계연보. 44p.

산림청. 2021. 2050 탄소중립 달성을 위한 산림부문 추진전략. 5p.

산림청. 2018. 제6차 산림기본계획. 42p.

산림청. 2014. 전국 산림기능구분도. 2p.

산림청. 2013. 「탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률」 이행을 위한 사회공헌형 산림탄소상쇄 운영표준 별표3

산업자원부. 2007. 목질계 바이오매스의 에너지 활용방안-우드칩을 이용한 에너지 생산설비를 중심으로. 산업자원부 최종보고서. 526p.

서부지방산림청. 2018. 제6차 지역산림계획. 4p.

설아라. 2014. 제주시험림의 야생조류 서식지를 고려한 생태적 산림경영 의사결정모델의 개발. 서울대학교 박사학위논문.

손영모, 이경학, 김래현. 2007, 우리나라 산림 바이오매스 추정. 한국임학회지 96(4): 477-482.

손영모, 김래현, 이경학, 표정기, 김소원, 황정순, 이선정, 박현. 2014. 한국 주요 수종별 탄소배출 계수 및 바이오매스 상대생장식. 국립산림과학원. 44p.

안현진, 석현덕, 최준영, 김동훈. 2017. 신기후체제 대응을 위한 산림관리. 한국농촌경제연구원 기타연구보고서. 220p.

여민주, 김용표. 2019. 우리나라 미세먼지 농도 추이와 고농도 발생 현황. 한국대기환경학회 35(2): 249-264.

우종춘. 1991. Linear Programming 에 의한 삼림경영계획-잣나무임분의 삼림수확계획을 중심으로-. 한국산림과학회지 80(4): 427-435.

우종춘, 김세빈, 김형호, 박주원, 송병민, 안기완, 이상현, 이영진, 이우균, 이정수, 이주형, 최수임, 최정기. 2017. (신고)산림경영학. 향문사. 342p.

윤여창. 1995. 산림의 환경보전기능에 대한 평가. 한국자원경제학회지 5(1): 137-164.

윤준혁, 배은지, 손영모, 전형국, 이광수, 정수영. 2021. 종가시나무 임분의 솎아베기에 따른 흉고직경 및 재적생장 모니터링. 농업생명과학연구 55(4): 71-75.

이준표, 박순철. 2016. 바이오매스 자원 잠재량 산정. 한국태양에너지학회 36(1): 19-26.

원현규, 김형호, 정세경, 우종춘. 2006. 정수계획법을 이용한 산림경영계획 수립방안 연구. 한국임학회지 95(6): 729-734.

원현규, 이경학, 김영환, 장광민, 김종찬, 김경민, 진선필, 송경호, 안의섭. 2010. 국내 목재생산 잠재력 예측. 국립산림과학원 연구보고 10-04. 9p.

원현규, 장광민, 김영환, 이경학, 김형호. 2011. 지리 및 임업경영 여건을 고려한 유형별 목재공급 잠재량 추정. 농업생명과학연구 45(3): 35-41.

장철수, 석현덕. 1995. 국유림 목재자원관리 모델 연구. 농촌경제 18(2): 31-44.

중부지방산림청. 2018. 제6차 지역산림계획. 35p.

FAO. 2015. Guide for country reporting for FRA 2015. Appendix1.

Roise, JP, Chung, J., Lanical, R. and Lennartz, M. 1990. Red cockaded woodpecker habitat and timber management: Production possibilities. Southern Journal of Applied Forestry 14(1): 6−12.

Kershaw, JA, Oliver, CD and Hincely T.M. 1993. Effect of harvest of old growth douglas−fir stands and subsequent management on carbon dioxide levels in the atmosphere. Journal of Sustainable Forestry 1(1): 61−77

Louise, MT, Gary, LW. 1997. Evaluating biodiversity of land units: scale, diversity, types, and stakes. Integrating Social Science and Ecosystem Management Proceeding. 108−111pp.

芝正己. 1993. 代案比較による林內路網計劃と評價法の最適化について(Ⅴ)−利用價値分析による三重大學演習林の代案路網計劃評價.日本林學會誌 75(5): 431−439.

부록1. 시·도별·소유별·임종별 목재생산 가능 지역 및 목재생산 잠재량

시도	목재생산 구역구분		전체			인공림			천연림			비산림
			산림 면적 (천ha)	임목 축적 (천m^3)	ha당 축적 (m^3/ha)	산림 면적 (천ha)	임목 축적 (천m^3)	ha당 축적 (m^3/ha)	산림 면적 (천ha)	임목 축적 (천m^3)	ha당 축적 (m^3/ha)	면적 (천ha)
전국	전체		6,135	1,082,266	176	1,077	151,807	141	4,816	930,459	193	241
	벌채제한구역		3,521	652,310	185	490	76,590	156	2,927	575,720	197	104
	목재 생산 가능 구역	소계	2,614	429,956	165	587	75,218	128	1,889	354,738	188	138
		국유림	488	87,639	179	104	14,713	142	369	72,926	198	16
		공유림	322	55,365	172	56	8,047	143	253	47,318	187	13
		사유림	1,803	286,952	159	427	52,458	123	1,267	234,494	185	109
경기	전체		489	89,339	183	133	23,263	175	340	66,075	195	17
	벌채제한구역		329	60,735	185	80	14,164	177	239	46,571	195	10
	목재 생산 가능 구역	소계	161	28,604	178	53	9,099	172	101	19,504	193	7
		국유림	27	4,919	185	9	1,526	176	17	3,393	197	1
		공유림	12	2,336	202	3	571	191	8	1,765	214	0
		사유림	123	21,349	174	41	7,002	170	76	14,347	190	6
강원	전체		1,342	268,301	200	237	35,592	150	1,073	232,709	217	32
	벌채제한구역		933	194,678	209	122	20,302	167	798	174,376	219	13
	목재	소계	409	73,623	180	115	15,290	132	275	58,333	212	19

	생산	국유림	163	31,905	196	41	6,250	151	117	25,654	219	4
	가능	공유림	28	5,403	196	5	868	164	21	4,534	212	1
	구역	사유림	219	36,316	166	69	8,171	119	137	28,144	206	14
충북	전체		482	82,158	170	112	15,499	139	346	66,659	193	25
	벌채제한구역		276	49,707	180	49	7,540	155	216	42,167	195	11
	목재	소계	206	32,451	158	63	7,959	126	130	24,492	189	13
	생산	국유림	28	4,581	165	8	982	120	19	3,600	194	1
	가능	공유림	27	5,052	187	6	1,072	168	20	3,980	201	1
	구역	사유림	151	22,818	151	49	5,906	122	91	16,912	185	11
충남	전체		369	54,103	146	101	11,808	117	243	42,294	174	25
	벌채제한구역		158	24,064	152	37	4,708	128	112	19,356	173	9
	목재	소계	211	30,039	142	64	7,101	111	132	22,939	174	16
	생산	국유림	18	2,906	157	4	468	121	14	2,438	176	1
	가능	공유림	11	1,750	166	2	279	135	8	1,472	185	1
	구역	사유림	182	25,383	139	58	6,354	109	110	19,029	173	14
전북	전체		421	66,884	159	100	11,735	118	297	55,148	185	24
	벌채제한구역		228	38,688	169	40	5,613	141	177	33,075	187	11
	목재	소계	193	28,196	146	60	6,122	102	120	22,074	183	12
	생산	국유림	29	4,557	160	7	799	115	20	3,759	184	1
	가능	공유림	10	1,663	163	2	260	119	8	1,404	185	0
	구역	사유림	154	21,975	143	51	5,064	100	92	16,911	183	11

전남	전체		662	105,136	159	127	15,713	123	503	89,423	178	32
	벌채제한구역		297	48,505	163	42	5,627	134	242	42,878	177	14
	목재 생산 가능 구역	소계	365	56,631	155	86	10,086	118	261	46,546	178	18
		국유림	59	9,693	164	11	1,413	127	46	8,281	182	2
		공유림	67	10,528	158	16	1,915	123	48	8,613	179	3
		사유림	240	36,410	152	59	6,758	115	168	29,652	177	13
경북	전체		1,345	236,760	176	108	14,912	138	795	146,214	184	36
	벌채제한구역		694	126,709	182	22	3,527	161	260	47,547	183	7
	목재 생산 가능 구역	소계	650	110,051	169	86	11,385	132	535	98,666	184	29
		국유림	125	21,950	175	18	2,354	133	104	19,596	189	4
		공유림	144	24,584	171	18	2,620	142	120	21,964	183	5
		사유림	381	63,518	167	50	6,412	128	312	57,106	183	19
경남	전체		690	121,061	175	78	10,366	133	589	110,695	188	23
	벌채제한구역		363	65,373	180	31	4,313	139	324	61,060	189	9
	목재 생산 가능 구역	소계	327	55,688	171	47	6,053	128	265	49,635	187	14
		국유림	23	3,990	173	4	472	133	19	3,518	187	1
		공유림	17	2,861	169	2	263	121	14	2,598	184	1
		사유림	287	48,837	170	41	5,317	128	232	43,519	187	13
제주	전체		75	12,109	162	6	1,143	176	58	10,966	190	11
	벌채제한구역		41	7,347	178	3	473	180	35	6,874	198	4
	목재	소계	33	4,762	143	4	670	174	23	4,092	178	6

	생산 가능 구역	국유림	10	1,914	196	2	308	189	8	1,606	207	0
		공유림	3	447	129	1	92	152	2	356	171	1
		사유림	20	2,401	119	2	270	167	13	2,131	162	5
8개 특광 역시	전체		259	46,414	179	33	5,801	176	216	40,613	188	10
	벌채제한구역		201	36,503	181	24	4,348	181	170	32,156	189	7
	목재 생산 가능 구역	소계	58	9,911	172	9	1,454	165	46	8,457	184	3
		국유림	7	1,225	166	1	142	151	6	1,083	175	0
		공유림	4	741	176	1	109	173	3	632	187	0
		사유림	46	7,945	173	7	1,203	166	36	6,742	186	2

부록2. 특·광역시별·소유별·임종별 목재생산 가능 지역 및 목재생산 잠재량

시도	목재생산 구역구분		전체			인공림			천연림			비산림
			산림 면적 (ha)	임목 축적 (m^3)	ha당 축적 (m^3/ha)	산림 면적 (ha)	임목 축적 (m^3)	ha당 축적 (m^3/ha)	산림 면적 (ha)	임목 축적 (m^3)	ha당 축적 (m^3/ha)	면적 (ha)
서울	전체		6,135	1,082,266	176	1,077	151,807	141	4,816	930,459	193	241
	벌채제한구역		3,521	652,310	185	490	76,590	156	2,927	575,720	197	104
	목재생산가능구역	소계	2,614	429,956	165	587	75,218	128	1,889	354,738	188	138
		국유림	488	87,639	179	104	14,713	142	369	72,926	198	16
		공유림	322	55,365	172	56	8,047	143	253	47,318	187	13
		사유림	1,803	286,952	159	427	52,458	123	1,267	234,494	185	109
인천	전체		489	89,339	183	133	23,263	175	340	66,075	195	17
	벌채제한구역		329	60,735	185	80	14,164	177	239	46,571	195	10
	목재생산가능구역	소계	161	28,604	178	53	9,099	172	101	19,504	193	7
		국유림	27	4,919	185	9	1,526	176	17	3,393	197	1
		공유림	12	2,336	202	3	571	191	8	1,765	214	0
		사유림	123	21,349	174	41	7,002	170	76	14,347	190	6
대전	전체		1,342	268,301	200	237	35,592	150	1,073	232,709	217	32
	벌채제한구역		933	194,678	209	122	20,302	167	798	174,376	219	13
	목재	소계	409	73,623	180	115	15,290	132	275	58,333	212	19

	생산 가능 구역	국유림	163	31,905	196	41	6,250	151	117	25,654	219	4
		공유림	28	5,403	196	5	868	164	21	4,534	212	1
		사유림	219	36,316	166	69	8,171	119	137	28,144	206	14
세종	전체		482	82,158	170	112	15,499	139	346	66,659	193	25
	벌채제한구역		276	49,707	180	49	7,540	155	216	42,167	195	11
	목재 생산 가능 구역	소계	206	32,451	158	63	7,959	126	130	24,492	189	13
		국유림	28	4,581	165	8	982	120	19	3,600	194	1
		공유림	27	5,052	187	6	1,072	168	20	3,980	201	1
		사유림	151	22,818	151	49	5,906	122	91	16,912	185	11
광주	전체		369	54,103	146	101	11,808	117	243	42,294	174	25
	벌채제한구역		158	24,064	152	37	4,708	128	112	19,356	173	9
	목재 생산 가능 구역	소계	211	30,039	142	64	7,101	111	132	22,939	174	16
		국유림	18	2,906	157	4	468	121	14	2,438	176	1
		공유림	11	1,750	166	2	279	135	8	1,472	185	1
		사유림	182	25,383	139	58	6,354	109	110	19,029	173	14
대구	전체		421	66,884	159	100	11,735	118	297	55,148	185	24
	벌채제한구역		228	38,688	169	40	5,613	141	177	33,075	187	11
	목재 생산 가능 구역	소계	193	28,196	146	60	6,122	102	120	22,074	183	12
		국유림	29	4,557	160	7	799	115	20	3,759	184	1
		공유림	10	1,663	163	2	260	119	8	1,404	185	0
		사유림	154	21,975	143	51	5,064	100	92	16,911	183	11

부산	전체		662	105,136	159	127	15,713	123	503	89,423	178	32
	벌채제한구역		297	48,505	163	42	5,627	134	242	42,878	177	14
	목재생산가능구역	소계	365	56,631	155	86	10,086	118	261	46,546	178	18
		국유림	59	9,693	164	11	1,413	127	46	8,281	182	2
		공유림	67	10,528	158	16	1,915	123	48	8,613	179	3
		사유림	240	36,410	152	59	6,758	115	168	29,652	177	13
울산	전체		1,345	236,760	176	108	14,912	138	795	146,214	184	36
	벌채제한구역		694	126,709	182	22	3,527	161	260	47,547	183	7
	목재생산가능구역	소계	650	110,051	169	86	11,385	132	535	98,666	184	29
		국유림	125	21,950	175	18	2,354	133	104	19,596	189	4
		공유림	144	24,584	171	18	2,620	142	120	21,964	183	5
		사유림	381	63,518	167	50	6,412	128	312	57,106	183	19

Abstract

Estimation of Optimal Timber Production for Sustainable Economic and Public Functions of National Forest in Korea

JEONG, YU JIN
Major in Forest Environmental Sciences
Department of Agriculture, Forestry and Bioresources
The Graduate School
Seoul National University

National forests are expected to serve as a timber stockpile base for long-term wood demand and to stably perform various functions required for forests. Since the demand for forests is expected to become more diverse in the future, efforts are being made at national level to expand national forests to cope with this. However,

national forests in Korea are currently in a state of age-class imbalance with over 31 years stands accounting for most of the total forest. At this time, it is difficult to guarantee the sustainability of the national forest unless harvesting is carried out according to a systematic management plan. Therefore, this study aims to estimate the optimal timber production of national forests considering both economic and public functions.

To this end, the area where timber production is possible in Korea's national forests was first analyzed. The 'timber production area' refers to a place where timber production is practically possible considering legal, geographical, and technical conditions. In order to analyze the timber production area, the information of the forest type map, land ownership classification map, mountain division map, river network map, digital elevation model, road network map, and forest road network map were integrated into a single spatial data. As a result of the analysis, the timber production area is 2,613,000ha, accounting for 43% of the total forest area, and the timber production area of the national forest is 488,000ha.

Next, a forest management planning model was established using MOLP(Multi-objective Linear Programming) that can handle multiple goals within one objective function. The management goal was set as the exercise of sustainable economic functions and public functions. At this time, the economic function was evaluated by timber production, and the public function was evaluated by carbon storage, water conservation, and air purification. Constraints include

the rate of change in timber production, the percentage of each age-class area, the percentage of each tree species area, and the percentage of conifers and broad-leaved trees area. And specific values of the constraints were set by referring to the Local Forest Plan.

Lastly, the optimal amount of timber production was obtained considering the 100-year long-term management plan by applying to the national forest timber production area. As a result of the model implementation, harvest and regeneration plans were presented, and accordingly, the expected total amount of economic and public functions, economic value, and NPV(net present value) could be confirmed in the case of forest management. As a result, the total timber production during the planning period was calculated as 200,025,543m^3, and the average was 20,002,554m^3. This is 44% of Korea's domestic supply and it can be seen that the timber supply capacity of the national forest timber production area is very high. Finally, in order to analyze the change in the forest management plan according to the management objectives, an alternative was established by varying the weight combination of each objective function. Among the multiple weight combinations, the case where four functions are considered equally and the case where each function is maximized was compared. As a result, when the four functions are considered equally, the sum of the net present value was the highest, indicating that the economic value is high when various functions are comprehensively considered.

This study developed a multi-purpose forest management plan model considering economic and public functions to estimate the optimal timber production of national forests for the next 100 years. As the results of implementing the model, figures for plans for harvesting are provided, which can be useful in establishing and implementing long-term management plans for national forests. In addition, it is possible to consider the various functions of forests because the weight of management objectives can be changed according to the decision maker's policy judgment or changes in social demand.

keywords : National Forest, Timber Production Potential, Public Functions of Forests, Age Class Structure, Multi-objective Linear Programming, Long-term Forest Management Planning
Student Number : 2020-21813