

임분탄소 및 목재생산 경영을 위한 제주도 삼나무림의 최적 경영모델 개발

Development of an Optimal Carbon-and-Timber Management Model for Cryptomer japonica Forest Stands in Jeju Island

주관연구기관	서울대학교
연구책임자	장주상
발행년월	2012-09
주관부처	미래창조과학부
사업관리기관	한국연구재단
NDSL URL	http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/report/reportSearchResultDetail.do?cn=TRKO201400028307
IP/ID	14.49.138.138
이용시간	2017/11/03 09:27:11

저작권 안내

- ① NDSL에서 제공하는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, KISTI는 복제/배포/전송권을 확보하고 있습니다.
- ② NDSL에서 제공하는 콘텐츠를 상업적 및 기타 영리목적으로 복제/배포/전송할 경우 사전에 KISTI의 허락을 받아야 합니다.
- ③ NDSL에서 제공하는 콘텐츠를 보도, 비평, 교육, 연구 등을 위하여 정당한 범위 안에서 공정한 관행에 합치되게 인용할 수 있습니다.
- ④ NDSL에서 제공하는 콘텐츠를 무단 복제, 전송, 배포 기타 저작권법에 위반되는 방법으로 이용할 경우 저작권법 제136조에 따라 5년 이하의 징역 또는 5천만 원 이하의 벌금에 처해질 수 있습니다.

NRF-F00018

임분탄소 및 목재생산 경영을 위한
제주도 삼나무림의 최적 경영모델 개발

Development of an Optimal Carbon-and-Timber Management Model for
Crytomer japonica Forest Stands in Jeju Island

2012. 9. .

한국연구재단

제 출 문

한국연구재단 이사장 귀하

본 보고서를 2010년도 국제협력연구 결과보고서로 제출합니다.

2012 년 9월 일

과제번호 : NRF- F00018

연구과제명 : 임분탄소 및 목재생산 경영을 위한 제주도 삼나무림의
최적 경영모델 개발

연구 책임자 : 소속 서울대학교
성명 정 주 상 (인)

연구결과 요약문(국문)

분 야	산림측정평가	성 명	정 주 상
과제번호	NRF- F00018	소 속	서울대학교
중 심 어	탄소 및 목재생산 경영, 개체목 생장예측 시뮬레이터, 동적계획법, 최적 산림사업체계, 삼나무, 생태계서비스		
연구과제명	임분탄소 및 목재생산 경영을 위한 제주도 삼나무림의 최적 경영모델의 개발		

본 연구에서는 제주도 삼나무 임분의 개체목 생장예측 시뮬레이터를 개발하고, 이를 토대로 적정 산림사업체계를 결정함으로써 목재생산경영은 물론 생태계서비스 중 하나로 인식되는 탄소경영에 따른 효과를 극대화하기 위한 산림경영 의사결정지원시스템을 개발하고자 하였다. 이를 위해 삼나무 임분의 생장패턴을 정확히 평가·분석할 수 있는 개체목 생장예측 시뮬레이터를 개발하고, 개발된 시뮬레이터를 기반으로 수리적 최적화기법인 동적계획법(Dynamic Programming)을 적용하여 목재생산 효과 또는 탄소고정 효과를 극대화하기 위한 임분단위 최적화 모델을 개발하였다.

개발된 모델은 벌기령, 간벌 시기, 횃수 및 강도 등의 적정 산림사업체계를 결정함으로써 현실 임분을 구성하는 임목의 수종구성, 밀도, 경급구조 등의 임상특성이나 입지여건 등에 의해 달라지는 생장패턴은 물론 할인율이나 가격 및 비용함수에 따른 시장여건의 변화 등을 동시에 고려하여 목재생산경영 또는 탄소경영의 효과를 극대화할 수 있다. 특히 본 모델은 시간의 흐름에 따라 산림사업에 의해 영향을 받을 수 있는 임상특성의 변화나 임분의 동태구조 변화를 분석할 수 있고, 또한 주요 경영성과분석에 요구되는 다양한 인자들에 대한 민감도 분석과 산림경영목적에 따른 trade-offs 효과를 과학적으로 분석할 수 있는 의사결정시스템이다.

개발된 모델을 이용한 본 연구의 분석 결과, 무간벌 임분에 비해 간벌을 시행한 임분에서 탄소흡수 및 목재의 생산이 큰 것으로 나타났고, 최대 수익을 고려한 모델 시뮬레이션에서는 상대적으로 적은 간벌 횃수와 강한 간벌 강도를 실행한 임분이 그렇지 않은 임분에 비해 더 큰 수익을 나타내었다. 이는 약한 간벌 강도를 자주 실행하는 것보다 강한 간벌강도를 2회 정도 실행하는 것이 수익창출의 측면에서 보다 적절한 사업체계임을 제시하는 결과이다.

이처럼 본 연구에서 개발된 임분단위 최적화 모델은 산림의 생장예측에 있어 생태계의 생물적 요소 뿐 아니라 인간의 산림경영활동에 의한 효과를 반영하여 산림의 동태변화패턴을 정확히 예측할 수 있으며, 이로부터 경영목표와 산림사업의 시기·빈도·강도 등을 고려한 임분단위 최적 산림사업체계를 도출할 수 있다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 모델은 산림경영활동을 통해 다양한 생태·경제적인 경영목표들을 최적의 상태로 달성할 수 있도록 지원해주는 의사결정지원시스템으로서 산림경영계획에 활용될 수 있다.

연구결과 요약문(영문)

Field	Forest Measurement	Author	Chung, Joosang
Project No.	NRF- F00018	Organization	Seoul National University
Keywords	Carbon-and-timber management, individual-tree growth simulator, dynamic programming, optimal forest stand management regime, <i>Cryptomeria japonica</i> , Ecosystem service		
Title	Development of an Optimal Carbon-and-Timber Management Model for <i>Cryptomeria japonica</i> forest stands in Jeju Island		

The objective of this study was to develop a decision-supporting system (DSS) for providing the optimal stand management regimes for maximizing timber supply or carbon sequestration in *Cryptomeria japonica* forest stands in Jeju island. DSS provides the optimal solutions to maximize timber supply or carbon sequestration by simulating forest stand dynamics and analyzing the effects of forest management considering the characteristics of timber inventory including species mixture, stand density, diameter distribution, and timber growth patterns associated with site characteristics as well as the discount rate and market conditions including price and cost functions simultaneously.

DSS is capable of analyzing the forest stand dynamics or the changes in forest stand characteristics over time caused by management regimes. In addition, it is available in conducting sensitivity analyses for a number of forest management factors influencing the outcomes of forest management activities as well as trade-off analyses associated with the objectives of forest stand management.

In order to develop DSS, we developed an individual-tree growth prediction simulator capable of analyzing and assessing the growth patterns of *Cryptomeria japonica* forest stands elaborately. Then we applied dynamic programming to develop the DSS in solving for the optimal forest stand management regimes needed in timber and carbon management of *Cryptomeria japonica* forest stands in Jeju island.

Results showed that the proposed forest growth simulator was used well as the basic tool in interpreting the dynamics of forest stand growth and tree mortality influenced by forest management activities as well as natural process. We used this simulation model in estimating the contributions of *Cryptomeria japonica* stands in tons of carbon absorbed by the growth of forest stands as the function of stand management regimes. Also, the model was used in determining the optimal stand thinning regimes as well as the optimal rotation length to compromise between timber management and carbon management.

The results of this study will contribute to enhancing new technologies of forest science in Korea in terms of the statistical techniques for assessing the changes in stand biomass over time, the simulation techniques for predicting individual-tree-based growth, and mathematical programming algorithms to determine the optimal forest stand management regimes.

목 차

제1장 연구과제의 개요	7
제1절 연구의 배경 및 목적	8
1. 연구의 배경	8
2. 연구의 목적	9
제2절 연구의 내용 및 방법	10
1. 연구의 범위	10
2. 연구 방법	11
제2장 제주도 삼나무 임분의 개체목 생장예측 시뮬레이터 개발	12
제1절 개체목 생장예측 시뮬레이터 설계	13
1. 생장예측 시뮬레이터의 개념 및 국내외 연구현황	13
2. 생장예측 시뮬레이터의 구성 및 설계	16
가. 잠재직경생장함수	17
나. 수정을함수	18
다. 수관을함수	18
라. 고사을함수	19
제2절 개체목 생장예측 시뮬레이터 개발	20
1. 생장함수 모수의 추정	20
가. 임분 자료의 구축	20
나. 지위지수식 추정	21
다. 생장함수 모수 추정	22
2. 생장예측 시뮬레이션	23
가. 임분생장 시뮬레이션	23
나. 산림시업 시뮬레이션	25
다. 탄소흡수 시뮬레이션	26

제3장 제주도 삼나무 임분의 산림경영 최적화 모델 개발	27
제1절 임분단위 산림경영 최적화 모델 개발	28
1. 수리계획법을 적용한 임분단위 산림경영 최적화 모델	28
2. 임분단위 산림경영 최적화 모델의 개발	31
가. 동적계획법 알고리즘	31
나. 동적계획법을 적용한 임분단위 산림경영 최적화 모델 설계	33
제2절 탄소흡수를 고려한 임분관리 최적 사업체계 분석	34
1. 수익 최대화를 위한 최적 산림사업체계 분석	34
2. 탄소흡수 최대화를 위한 최적 산림사업체계 분석	35
제4장 결론 및 제언	38
제5장 참고문헌	40

표 차례

표 2-1. 국내 산림성장모델 관련 연구	14
표 2-2. 개체목 생장에측 시뮬레이션 모델의 구성함수 및 인자	17
표 2-3. 제주도 한남시험림 삼나무 임분 표준지 조사현황	20
표 2-4. 삼나무 개체목 수간석해 결과	21
표 2-5. 개체목 생장에측 시뮬레이터 구성함수별 모수추정 결과	22
표 2-6. 산림사업(간벌) 시나리오	25
표 2-7. 삼나무 탄소전환식 계수	26
표 3-1. 최적 사업체계분석에 활용된 삼나무 현실임분의 현황	33
표 3-2. 수익 최대화를 위한 최적 산림사업체계 분석결과	34
표 3-3. 탄소흡수 최대화를 위한 최적 산림사업체계 분석결과	35

그림 차례

그림 1-1. 연구추진체계도	11
그림 2-1. STEMS 모델의 구조	15
그림 2-2. 개체목 생장에측 시뮬레이터의 Flow chart	16
그림 2-3. 임분생장 및 고사, 임목벌채와 잠재직경생장량의 관계	18
그림 2-4. 연구대상지	20
그림 2-5. 제주도 삼나무 임분의 지위지수 곡선 추정결과	21
그림 2-6. 개체목 생장에측 시뮬레이터 구성함수별 추정 패턴	22
그림 2-7. 생장에측 시뮬레이션에 따른 개체목 분포비교	23
그림 2-8. 삼나무 임분의 생장에측에 따른 성장량 변화 추이	24
그림 2-9. 삼나무 임분의 간벌에 따른 성장량 변화 추이	25
그림 2-10. 생장에측 시뮬레이터를 이용한 탄소고정효과 분석결과	26
그림 3-1. 간벌에 따른 임분생장의 변화	29
그림 3-2. 동적계획법의 네트워크 예시	30
그림 3-3. 기존 알고리즘과 PATH 알고리즘 간 최적 path 탐색과정의 차이	32
그림 3-4. 수익 최대화를 위한 최적 산림사업체계 분석결과	35
그림 3-5. 탄소흡수 최대화를 위한 최적 산림사업체계 분석결과	36

제1장 연구과제의 개요

제1절 연구의 배경 및 목적

제2절 연구의 내용 및 방법

제1장 연구과제의 개요

제1절 연구의 배경 및 목적

1. 연구의 배경

최근 기후변화에 따른 지구 온난화 문제를 해결하기 위하여 온실가스 배출량 감축을 위한 전 세계적인 노력이 이루어지고 있다. 현재의 교토의정서 체제 하에서는 이러한 온실가스 이벤토리가 크게 에너지, 산업공정 및 제품, 산림 및 기타 토지이용, 폐기물 그리고 기타의 5개 카테고리로 구분되고 있으며(IPCC, 2006), 그 중에서 산림은 주요한 탄소 흡수원이자 배출원으로서 기후변화협약과 관련하여 많은 관심이 집중되고 있다. 특히 산림이 지니는 ‘탄소흡수원(Carbon sink)’으로서의 기능은 산림이 제공하는 주요한 생태계서비스(Ecosystem service) 중의 하나로서 오늘날 이를 정확히 계량하고 관리할 수 있는 방법에 관한 연구가 지역적·국가적인 차원에서 활발히 이루어지고 있다. 이러한 산림생장의 복잡한 과정을 이해하고 탄소고정 효과를 정확히 평가·예측하기 위해서는 효율적인 임분 성장예측 시뮬레이터(stand growth simulator)가 요구되는데, 이미 미국·캐나다를 비롯한 북미와 유럽의 임업선진국에서는 임분의 동태 및 성장효과를 평가분석할 수 있는 성장예측 시뮬레이터를 개발하여 임분단위 산림경영에 따른 탄소수지흐름을 평가하고 있다(Belcher 등, 1982; Kurz와 Apps, 1999).

국내에서도 개체목 성장예측 시뮬레이터의 개발과 관련하여 1990년대 후반부터 지속적으로 연구가 이루어지고 있는데, 개체목간 경쟁지수 산정 및 흉고직경의 예측(이우균, 1996), 미국 농무성의 STEMS(Stand and Tree Evaluation and Modeling System)을 국내에 적합한 형태로 수정한 개체목 거리독립 성장함수의 개발(권순덕 등, 2003) 등을 대표적인 연구사례로 들 수 있다. 그러나 국내에서 개발된 개체목 중심의 성장예측 시뮬레이터들은 현실림의 성장을 정교하게 예측하는데 한계를 나타내고 있고, 최근 기후변화에 대응하기 위한 산림관리와 연계하여 요구되는 산림 내 탄소흐름을 평가 등에 어려움이 있어 이를 해결하기 위한 다양한 연구방법들이 모색되어야 한다.

한편, 산림의 생장은 생태계의 생물적 요소·비생물적 요소에 의하여 많은 영향을 받으며 변화하는데, 특히 인간의 산림경영활동은 산림의 동태를 변화시키며 성장에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 간벌·주벌과 같은 산림시업의 시기·빈도·강도를 다르게 적용함으로써 차별화된 산림성장패턴을 유도하고 이에 따라 다른 목재생산량과 탄소흡수량을 도출하는

등 산림경영활동을 통하여 다양한 생태·경제적인 경영목표들을 달성할 수 있다. 그러나 상충된 다양한 경영목표들을 효과적으로 달성하기 위해서는 시기별로 적용되는 경영활동들에 대한 합리적인 계획이 필요하며, 이를 위해 최적화 기법을 이용한 산림경영계획의 수립과 적용이 필수적이다.

이에 본 연구에서는 제주도 삼나무 임분을 대상으로 임분단위 개체목 성장예측 시뮬레이터를 개발하고, 이를 토대로 적정 산림사업체계를 도출함으로써 목재생산은 물론 생태계서비스로 인식되는 탄소흡수기능을 극대화하기 위한 산림경영 의사결정지원시스템을 개발하고자 하였다.

2. 연구의 목적

본 연구에서는 목재생산 및 탄소흡수 관리를 위한 임분단위 최적 산림경영모델을 개발하고자,

- 1) 제주도 삼나무 임분을 대상으로 개체목 성장예측 시뮬레이터를 개발하고,
- 2) 목재생산과 탄소경영을 위한 최적 산림경영모델을 개발하고,
- 3) 모델 시뮬레이션을 통해 도출된 최적 사업체계의 타당성을 검토하였다.

제2절 연구의 내용 및 방법

1. 연구의 범위

본 연구에서는 목재생산 및 탄소흡수 관리를 위한 임분단위 최적 산림경영모델을 개발하고자 다음과 같이 두 단계의 내용으로 연구를 진행하였다.

제주도 삼나무 임분의 개체목 성장예측 시뮬레이터 개발

- 제주도 삼나무 임분의 조사자료를 바탕으로 성장패턴을 파악하고 개체목 성장함수를 적용하여 성장예측모형의 모수를 추정하였다. 또한 STEMS 모델을 기반으로 성장예측 시뮬레이터를 설계하여 추정된 모수를 이용한 제주도 삼나무 임분의 성장예측 시뮬레이터를 개발하였다. 본 연구단계에서 수행한 세부 연구내용은 다음과 같다.

- 제주도 삼나무 임분 자료 구축
- 제주도 삼나무 임분의 지위지수식 추정
- 개체목 성장함수 추정
- 성장함수를 적용한 삼나무 임분 현실림의 성장예측 시뮬레이션

제주도 삼나무 임분의 산림경영 최적화 모델 개발

- 개발된 임분단위 성장예측 시뮬레이터를 이용하여 임분성장 및 다양한 임분시업의 이행에 따른 삼나무 임분의 목재생산 및 탄소고정효과를 분석하였다. 이를 토대로 수리계획 기법을 적용한 임분탄소 및 목재생산 경영의 최적화 모델을 개발하고 현지적용을 통해 최종적으로 목재생산 및 탄소고정효과를 고려한 최적의 산림시업체계를 제시하였다. 본 연구단계에서 수행한 세부 연구내용은 다음과 같다.

- 수리계획법을 이용한 임분단위 산림경영 최적화 모델 설계
- 동적 임분성장 시뮬레이션 모델의 개발
- 탄소흡수를 고려한 임분관리 최적 시업체계 분석

2. 연구 방법

본 연구에서는 1차년도에 제주도 삼나무의 생장예측 시뮬레이터를 개발하고, 이를 이용하여 임분생장 및 산림사업에 따른 탄소고정효과를 분석하였다. 그 다음으로 임분 탄소경영 최적화를 위한 수리계획기법(mathematical programming)의 적용방안을 도출하고, 임분탄소 및 목재 생산 경영의 최적화 모델을 개발하였다. 개발된 모델은 현지의 삼나무 경영림에 적용되어 해당 임분의 목재생산 및 탄소고정효과를 고려한 최적의 사업체계를 분석하는데 이용되었다. 본 연구에서 수행된 전체적인 연구체계는 그림 1-1에 제시되어 있다.

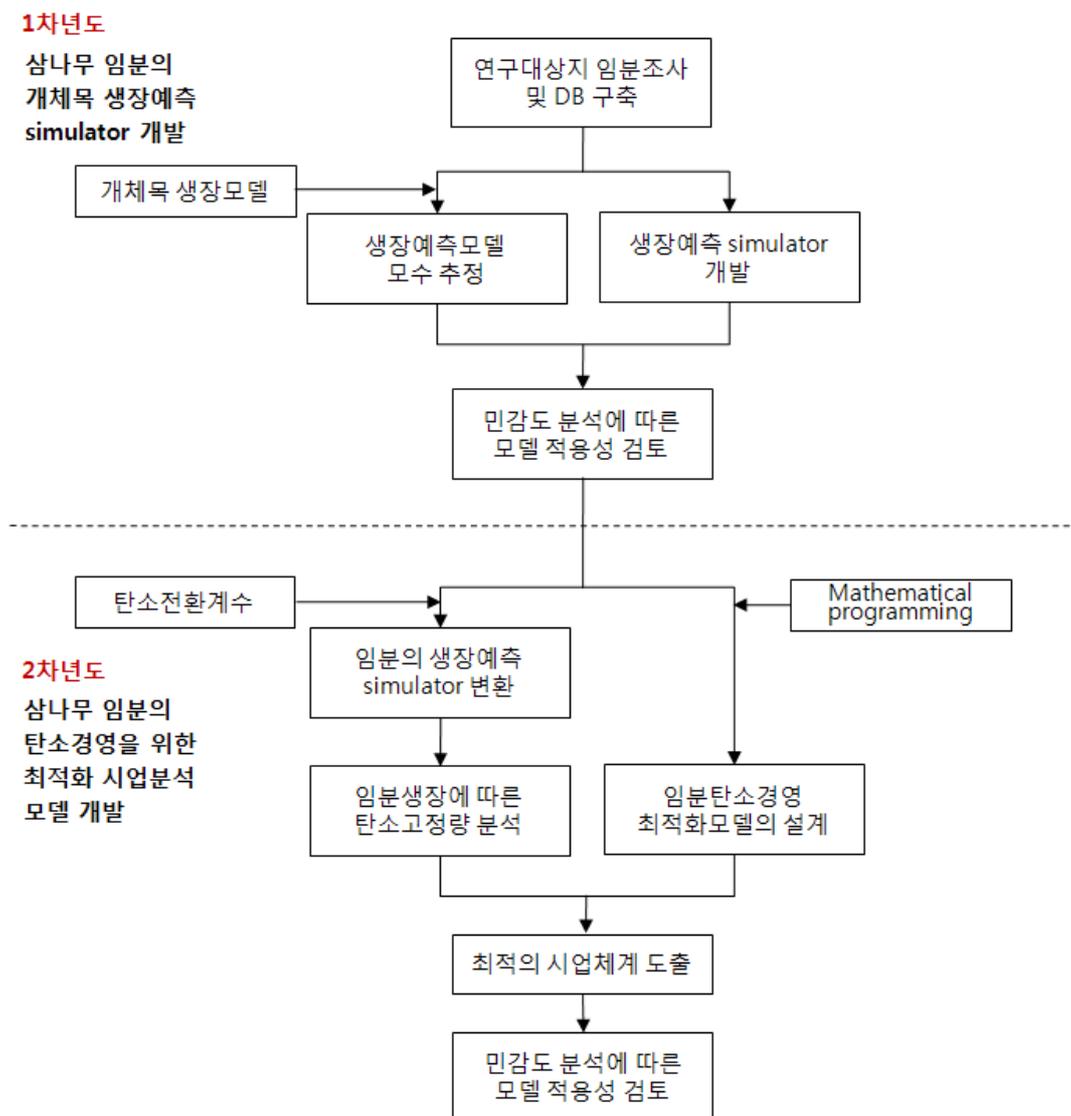


그림 1-1. 연구추진체계도

제2장 제주도 삼나무 임분의 개체목 생장예측 시뮬레이터 개발

제1절 개체목 생장예측 시뮬레이터 설계

제2절 개체목 생장예측 시뮬레이터 개발

제2장 제주도 삼나무 임분의 개체목 성장예측 시뮬레이터 개발

제1절 개체목 성장예측 시뮬레이터 설계

1. 개체목 성장예측 시뮬레이터의 개념 및 국내외 연구현황

임분의 성장과 관련하여 현재 국내에서 실무적으로 사용하고 있는 성장모델은 전임분 성장모델(whole stand growth model)이다. 이는 시간의 경과에 따른 임분의 성장 특성을 지위지수와 임령의 함수로 나타낸 것으로 수확표가 대표적인 예이다. 그러나 전임분 성장모델은 임령과 지위지수를 독립변수로 하여 임분의 평균적인 특성을 추정하기 때문에 현실 임분의 입지 및 임목의 특성을 제대로 반영하지 못하여 산림사업에 의한 성장효과를 추정하기에는 어려움이 있다(권순덕 등, 2003). 전임분 성장모델 보다 정밀한 임분성장예측을 할 수 있는 모형으로는 직경분토 성장모델을 들 수 있으나, 이 모델 또한 직경급별로 임목의 성장을 예측하기 때문에 개체목에 대한 정보가 충분히 반영될 수 없어 임분의 성장을 정밀히 예측하는 데에는 한계가 있다(이경학 등, 2002).

따라서 최근에는 전임분 성장모델이 지니는 한계를 극복하고, 보다 정밀한 임분성장예측을 수행하기 위하여 임분을 구성하는 개개의 임목 단위로 성장을 예측할 수 있는 개체목 단위 성장모델(individual-tree growth model)이 많이 이용되고 있다. 개체목 성장모델은 현실 임분을 구성하는 각 임목(개체목)의 특성과 임분 내에서 개별 임목의 경쟁상태를 근거로 개체목의 성장을 추정하고, 각 개체목의 성장을 합으로 임분생장을 추정하는 모델이다. 따라서 개체목 성장모델은 지위 지수와 임령의 함수 관계로 임분생장을 예측하는 전임분 성장모델에 비해 현실 임분의 임상특성을 충분히 반영하고, 간벌·고사 등에 의한 임분밀도 변화에 따른 성장효과를 측정할 수 있는 장점이 있다(권순덕, 2003).

표 2-1은 우리나라에서 개발되어 사용되는 산림성장모델을 제시하고 있다. 표에서 확인할 수 있듯 과거에는 전임분을 대상으로 산림성장예측을 주로 하였으나 1990년를 전후로 하여 개체목 단위 성장모델의 개발이 보다 활발히 이루어지고 있다. 이는 개체목 성장모델이 현실 임분의 성장 특성 및 산림사업에 의한 영향을 보다 정밀하게 나타낼 수 있기 때문이며, 이러한 이유로 최근에는 개체목 성장모델이 전임분 모델에 비해 산림경영과 관련된 의사결정에 보다 널리 이용되고 있는 실정이다.

표 2-1. 국내 산림성장모델 관련 연구

참고문헌	내 용	성장모델 종류
임업시험장 (1960~70년대)	수확표 조제(12개 수종)	전임분모델
임업시험장 (1960~70년대)	임분표 조제(5개 수종)	직경급 모델
임업시험장 (1960~78년대)	지위지수표 조제(10개 수종)	전임분모델
임업시험장 (1970~80년대)	임분재적표 조제(7개 수종)	전임분모델
임업시험장 (1969~90년대)	입목간재적표(9개 수종)	개체목 성장모델
신준환과 이돈구 (1990)	잣나무의 임분성장모형	개체목 성장모델
장남기 등(1990)	벌채목의 그루터기 연륜 분석 후 흉고단면적 성장 분석	개체목 성장모델
이경학(1991)	낙엽송 임분구조 및 수확예측모델 개발	직경급모델
이우균(1996)	거리종속적 개체목간 경쟁지수 및 흉고직경 추정식 개발	개체목 성장모델
신만용 등(1997)	임분조사 자료분석을 위한 프로그램 개발(SIDAS)	개체목성장모델
이우균 등(2000)	강원도 소나무임분의 최대입목본수 및 고사모델 개발	임분성장모델
서정호(2001)	안면도 소나무림의 동적 임분성장모델 개발	임분성장모델
권순덕 등(2003)	잣나무림의 개체목 거리독립 성장모델 개발	개체목성장모델
신만용 등(2003)	거리독립 경쟁지수를 이용한 4개 침엽수종의 고사율 추정식 개발	개체목성장모델
신만용과 한승훈 (2004)	개체목 성장모델 및 생리적 모델 개발	개체목성장모델

국외의 경우 이미 1970년대 중반부터 개체목 성장모델에 관한 많은 연구가 진행되었는데, 대표적인 연구로 Daniels와 Burkhardt(1975)에 의해 미국 동남부 지역 테다소나무 인공림의 성장을 예측하기 위해 개발된 PTAEDA라는 모델이 있으며, 미국의 Douglas-fir의 성장 및 수확을 예측하기 위한 개체목 성장모델(Mitchell, 1975), 미국 서부지역의 혼효림을 대상으로 개발된 임분진단모델(stand prognosis model), 미국 농무성(1979)에서 개발한 FREP(Forest Resources Evaluation Program), Belcher 등(1982)에 의해 개발된 STEMS(Stand and Tree Evaluation and Modeling System) 등이 있다. 이 중에서도 STEMS 모델은 임목의 성장과 고사, 벌채 및 갱신을 종합적으로 시뮬레이션할 수 있는 모델로써 최근까지도 산림생장예측 및 산림경영과 관련된 다양한 분야에서 폭넓게 활용되고 있다.

STEMS 모델은 정확한 산림자원평가 실현을 위해 수행된 FREP(미국 농무성, 1979)의 GROW 모델(Brand, 1981)을 바탕으로, 임목의 고사, 벌채 및 갱신을 종합적으로 시뮬레이션할 수 있는 대표적인 개체목 중심의 임분생장예측 모델이다(권순덕과 정주상, 2004). 그림 2-1에 제시된 바와 같이 STEMS 모델은 크게 임분의 성장을 평가·예측할 수 있는 부분과 결과를 요약·보고해주는 부분으로 구성되어 있다(Belcher 등, 1982). 이 중 모델의 주요 역할을 담당하는 임분생장 평가·예측모듈은 임분의 성장과 갱신뿐만 아니라 다양한 산림사업 시나리오를 적용할 수 있어 보다 폭넓고 현실적인 임분생장예측을 가능케 한다. 이에 본 연구에서는 STEMS 모델의 활용가능성을 고려하여 STEMS 모델을 기반으로한 제주도 삼나무 임분의 개체목 단위 임분생장 시뮬레이터를 개발하고자 하였다.

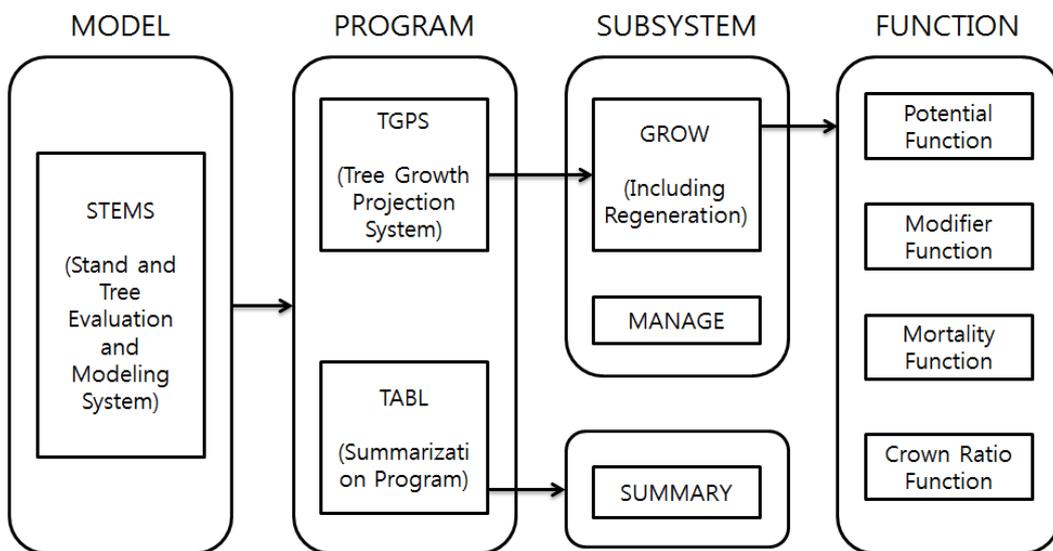


그림 2-1. STEMS 모델의 구조(Belcher 등, 1982)

2. 생장예측 시뮬레이터의 구성 및 설계

STEMS 모델에 요구되는 주요 생장관련 함수로는 잠재직경생장함수, 수정율함수, 수관율함수 및 고사율함수가 있다. 본 연구에서는 이를 반영하여 제주도 삼나무 임분 내 개체목의 생장예측을 위한 시뮬레이터의 전체 구성을 그림 2-2와 같이 설계하였다. 그림 2-2에서와 같이 본 연구에서 개발된 개체목 생장모델에서는 Tree list, 지위지수, 수관율함수를 잠재직경생장함수에 적용하여 경쟁이 없는 상태에서의 이상적인 개체목의 성장량을 예측하고, 수정율함수를 적용하여 경쟁효과를 고려한 개체목의 실제 직경성장량을 예측한다. 다음으로 고사율함수를 이용하여 해당 개체목의 활력도에 따른 고사확률을 예측하고, 고사되지 않고 생존한 개체에 대해 수고, 수관율, 재적에 대한 변화값을 추정함으로써 한 번의 시뮬레이션을 마치게 된다. 이러한 시뮬레이션을 시간의 흐름에 따라 반복적으로 적용함으로써 일정 시기 동안의 개체목, 더 나아가 임분의 성장을 예측할 수 있다. 표 2-2는 본 연구에서 이용된 개체목 생장예측 시뮬레이터의 구성함수와 각각의 인자를 나타낸다.

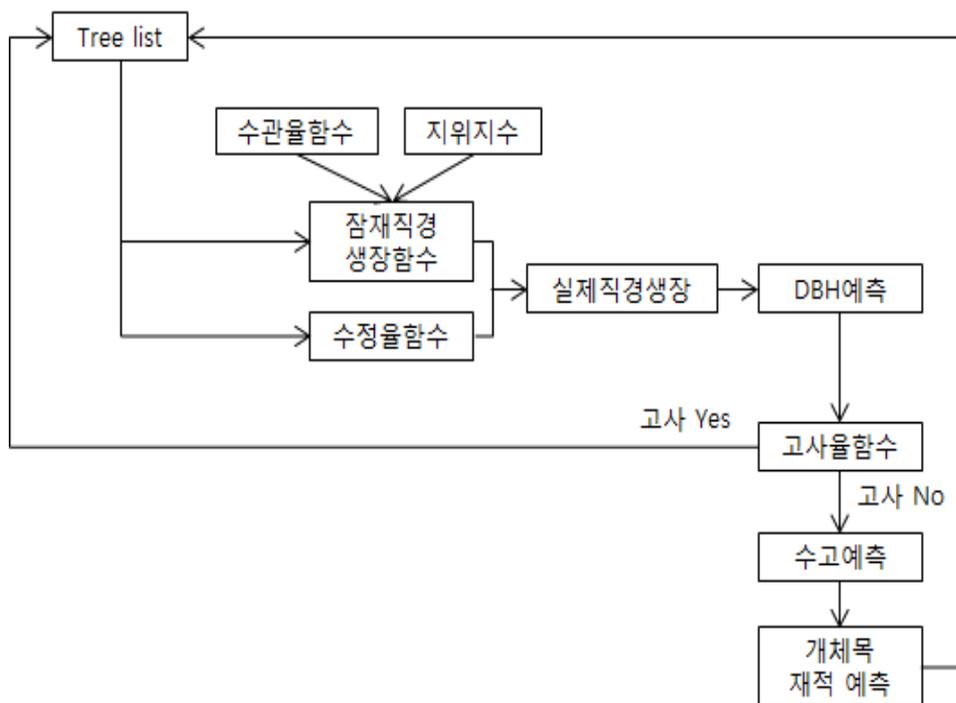


그림 2-2. 개체목 생장예측 시뮬레이터의 Flow chart

표 2-2. 개체목 생장예측 시뮬레이션 모델의 구성함수 및 인자

구성 함수	구조
잠재직경생장함수	$PG = b_0 - b_1 DBH^{b_2} + b_3 \times SI \times CR \times DBH^{b_4}$
수정율함수	$MOD = 1 - \exp(-[f(R) \times g(AD)] \times [\frac{BA_{max} - BA}{BA}]^{0.5})$ where, $f(R) = b_0 [1 - \exp(b_1 \times \frac{DBH}{AD})]^{b_2} + b_3$ $g(AD) = b_4 (AD + 1)^{b_5}$
수관율함수	$CR = b_0 [\frac{1}{1 + b_1 BA}] + b_2 [1 - \exp(-b_3 DBH)]$
고사율함수	$M = \frac{1}{1 + \exp(b_0 + b_1 (PG \times MOD)^{b_2} + b_3 DBH)} + b_4$

(SI: 지위지수, AD: 평균흉고직경, BA: 흉고단면적, BAm_{max}: 수종별 최대흉고단면적)

가. 잠재직경생장함수(PG)

잠재직경생장이란 임분 내 경쟁이 없다고 가정했을 때의 최대 연년직경생장량으로서 개념적으로 고안된 직경생장량이다. 개체목의 직경생장량은 잠재직경 생장량과 경쟁으로 인한 잠재력의 감소율을 곱하여 계산한다.

$$\text{실제직경생장량} = [\text{잠재직경생장량}] \times [\text{잠재직경생장이 실제로 발현되는 비율}]$$

Hahn과 Leary(1979)는 잠재직경생장량함수를 다음과 같이 제안하였는데 본 연구에서도 이 방법에 따라 제주도 삼나무 개체목의 잠재직경을 추정하였다.

$$\text{잠재 연년직경생장량}(PG) = \frac{\Delta D}{\Delta t} = b_1 + b_2 D^{b_3} + b_4 SI CR D^{b_5}$$

(ΔD=흉고직경 생장량, D=측정초기 흉고직경, SI=지위지수, CR=측정후기 수관율)

나. 수정율함수(MOD)

수정율함수는 개체목간 경쟁에 의한 독립수의 성장 즉 잠재직경성장량을 보정해주기 위해 개념적으로 고안된 함수로서 임분밀도가 높아 개체목간 경쟁이 치열할수록 생장이 불량하며, 반대로 임분밀도가 낮을수록 개체목의 생장이 양호하다는 일반적인 성장원리 하에 구성된 것이다(그림 2-3). 임분밀도는 자연고사와 임목벌채에 의해 낮아지며, 임목이 성장하면 높아진다. 따라서 수정율이 높을수록 실제직경성장량은 잠재직경생장에 가까운 큰 값으로 도출되고, 수정율이 낮으면 실제직경성장량은 잠재직경성장량에서 비율적으로 감소된 값으로 도출된다.

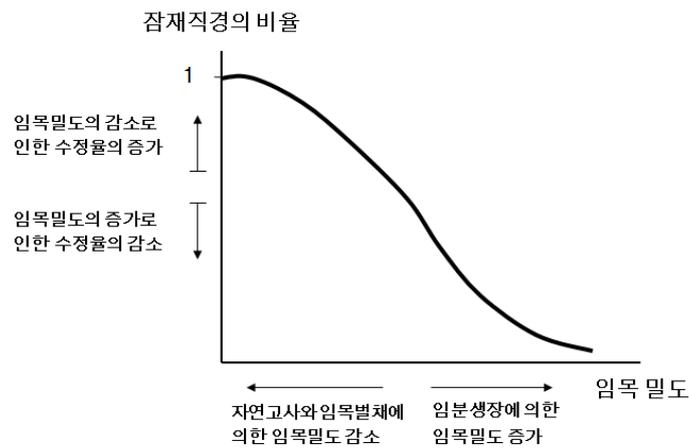


그림 2-3. 임분생장 및 고사, 임목벌채와 잠재직경성장량의 관계

본 연구에서는 수정율 함수로 Holdaway(1984)가 Hahn과 Leary(1979)가 개발했던 임분단위 수정율함수의 문제점을 보완하여 다음의 형태로 변형한 식을 이용하였다.

$$\text{수정율} = 1 - e^{-B_o \left[\frac{(BA_{\max} - BA)}{BA} \right]^{0.5}}$$

$$B_o = f(R)g(AD)$$

다. 수관율함수(CR)

일반적으로 수관의 크기와 모양은 이용가능한 빛의 양과 생육공간을 위한 경쟁정도 간의 상호작용으로 결정된다고 알려져 있다. 또한 임분이 발달함에 따라 수관이 밀폐되면 개체목간 빛 경쟁이 심화되고, 수관율이 감소하게 된다. Holdaway(1986)는 수관율이 주변목들과의 빛

경쟁과 임분 내 우점도에 따른 개체목의 경쟁력에 영향을 받는다고 규정하고, 다음과 같이 임분과 개체목 수준의 영향인자를 결합하여 수관율모형을 설계하였다. 본 연구에서 사용된 수관율추정함수는 아래와 같다.

$$\text{수관율} = b_1 / (1 + b_2 BA) + b_3 (1 - \exp(-b_4 DBH))$$

라. 고사율함수(MF)

Buchman(1979)는 개체목의 빛, 수분 및 양료 획득을 위한 경쟁으로 인해 발생하는 정상적인 고사(regular mortality)를 추정하기 위해 임분 내 개체목의 고사가 개체목의 크기 및 활력도에 영향을 받는다고 가정하고, 다음과 같은 형태의 함수식을 구성하였다.

$$\text{고사율} = \left[1 + e^{(b_1 + b_2 DGR^{b_3} + b_4 D)} \right]^{-1} + b_5$$

DGR =실제 연년직경생장량

특히 STEMS 모델에서 추정되는 직경의 실제 성장량은 잠재직경성장함수와 수정율의 곱으로 도출되므로, 수정율에서 반영하게 되는 개체목간 경쟁효과가 고사율에까지 적용되는 구조를 가지고 있다. 본 연구에서는 고사율을 1년 동안 개체목이 고사할 확률로 정의하고, 개체목의 현재 흉고직경과 연년흉고직경성장량의 독립변수로 구성하였다.

제2절 개체목 성장예측 시뮬레이터 개발

1. 성장함수 모수의 추정

가. 임분자료의 구축

본 연구에서는 제주도 삼나무 임분의 개체목 성장모델을 개발하기 위하여 국립산림과학원 난대산림연구소 한남시험림에 위치한 40년생 삼나무 임분을 연구대상지로 지정하였다(그림 2-4). 임분의 성장량을 개체목 단위로 정밀하게 추정하기 위해서는 고정표본점을 통해 정기적으로 조사된 매목조사자료, 목편채취를 통한 성장량조사자료, 벌채를 통한 수간석해자료와 같은 임분의 자연성장 및 인위적 간섭에 의한 성장변화 등에 대한 다양한 자료가 요구된다. 그러나 아직 국내에서는 고정표본점을 통한 임분조사자료가 부족한 실정이기 때문에 본 연구에서는 수간석해를 수행하여 시간에 따른 임분 내 개체목의 성장을 추정하였다. 이를 위해 연구대상지 내 총 13개 표준지로부터 130본의 표준목 자료를 분석하고(표 2-3), 각 표준지별 소·중·대 경급의 대표목을 선정하여 총 39본에 대한 수간석해를 수행하였다(표 2-4).

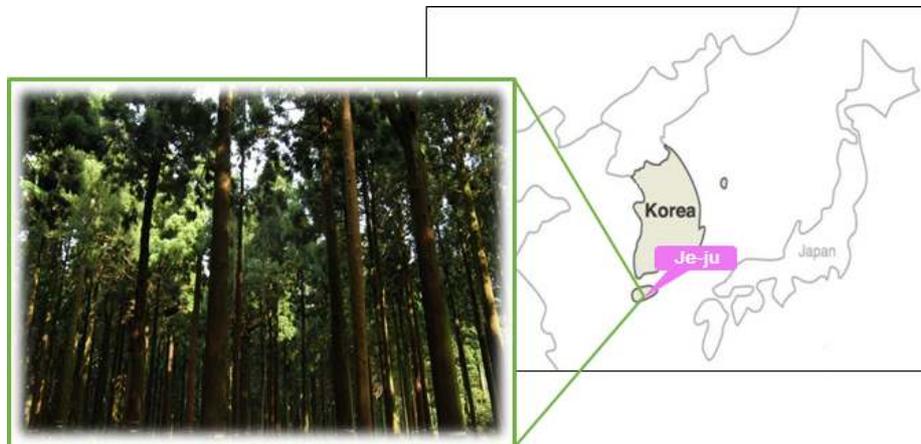


그림 2-4. 연구대상지(국립산림과학원 난대산림연구소 한남시험림)

표 2-3. 제주도 한남시험림 삼나무 임분 표준지 조사 현황

	평균흉고직경(cm)	ha당 본수(본/ha)	흉고단면적(m ² /ha)	임령(년)
최소	16.3	550.0	27.1	24.0
최대	45.0	2100.0	90.5	66.0
평균	25.9	1150.8	56.1	36.5

표 2-4. 삼나무 개체목 수간석해 결과(총 39본)

	흉고직경(cm)	수 고(m)	수 령(년)	직경변화(cm/년)
최소	11.8	8.3	23	0.12
최대	49.5	24.3	68	1.69
평균	24.8	15.2	37.3	0.71
표준편차	9.7	3.7	11.2	0.34

나. 지위지수식 추정

개체목 성장예측 시뮬레이터를 구성하는 주요 함수 중 잠재직경성장함수의 경우, 해당 함수를 추정하는데 임지의 지위정보가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 각각의 세부 함수의 모수 추정에 앞서 연구대상지의 수간석해자료를 바탕으로 지위지수를 추정하였다. 지위지수의 추정에는 수간석해로부터 수집된 개체목의 연령별 수고자료가 이용되었으며, 지위지수를 추정하기 위한 수식모형은 다음과 같은 Chapman-Richards식을 이용하였다(그림 2-5).

$$SI_0 = H \left(\frac{1 - \exp(-0.0396 T_0)}{1 - \exp(-0.0396 T)} \right)^{1.6909}$$

(SI₀: 지위지수, H: 수고, T₀: 기준임령, T: 현재임령)

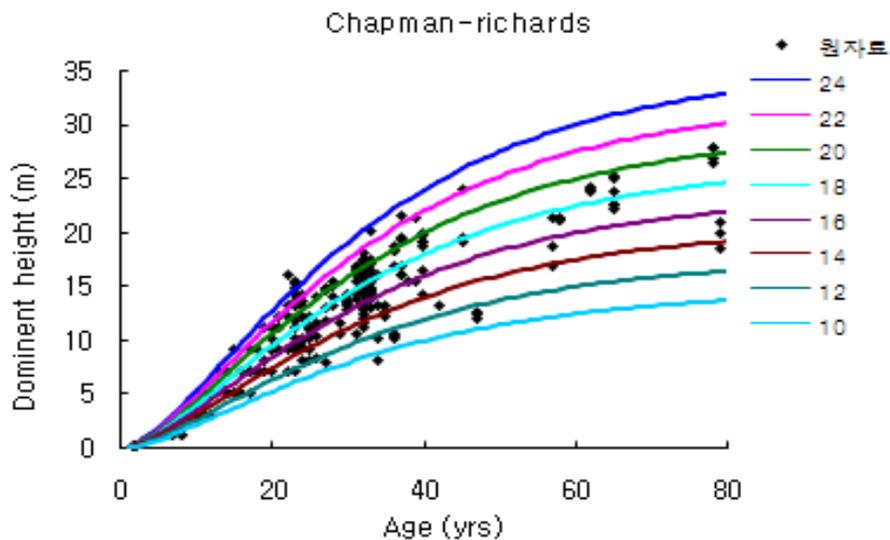


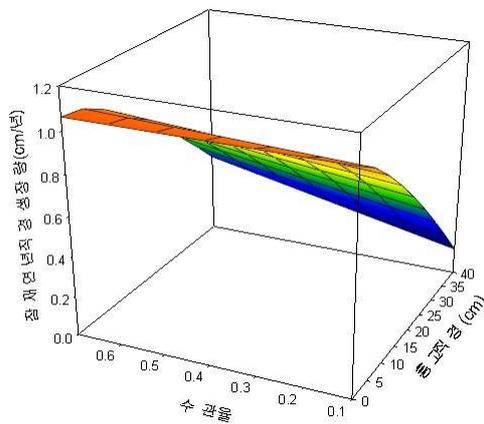
그림 2-5. 제주도 삼나무 임분의 지위지수 곡선 추정결과(기준임령: 40년)

다. 성장함수 모수 추정

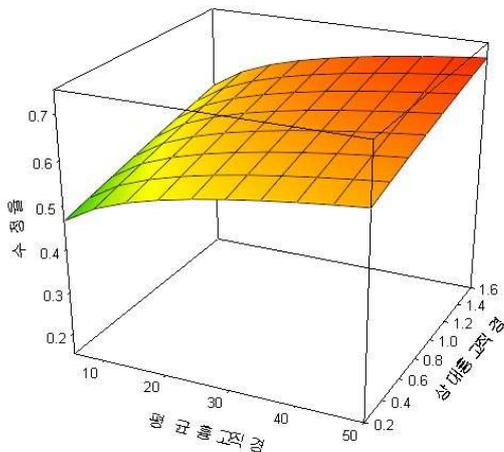
본 연구에서는 제주도 삼나무 임분의 개체목 성장예측 시뮬레이터를 개발하기 위하여 각 구성함수에 대한 모수를 다음과 같이 추정하였다. 모수의 추정에는 SAS 9.3의 비선형회귀분석이 이용되었다. 표 2-5는 본 연구를 통해 추정된 성장예측 시뮬레이터의 구성함수별 모수를 나타낸다.

표 2-5. 개체목 성장예측 시뮬레이터 구성함수별 모수추정 결과

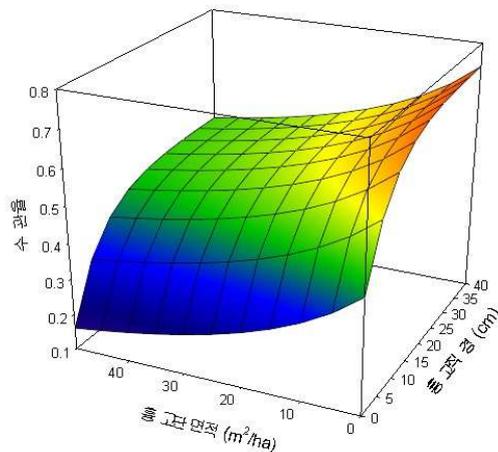
	추정된 회귀계수					
	b1	b2	b3	b4	b5	b6
수관율함수	0.6246	0.0663	0.6382	0.0318		
잠재직경성장함수	1.2	-0.016	1.1092	0.0014	1	
수정율함수	3.8847	-1.281	10.0669	0.8003	0.2897	0.4224
고사율함수	1.1973	0.5397	-0.9719	0.0691	0.0115	



(a) 잠재직경성장함수



(b) 수정율함수(BA=20)



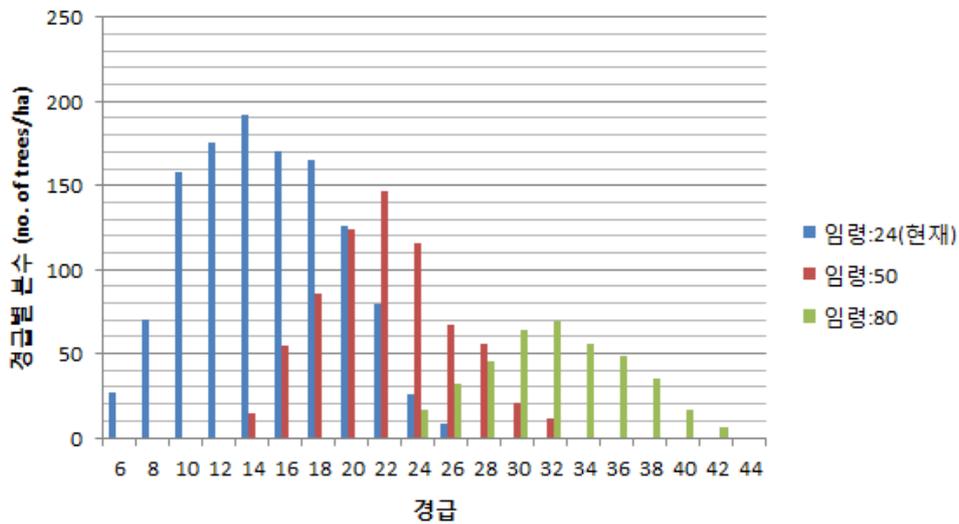
(c) 수관율함수

그림 2-6. 개체목 성장예측 시뮬레이터 구성함수별 추정 패턴

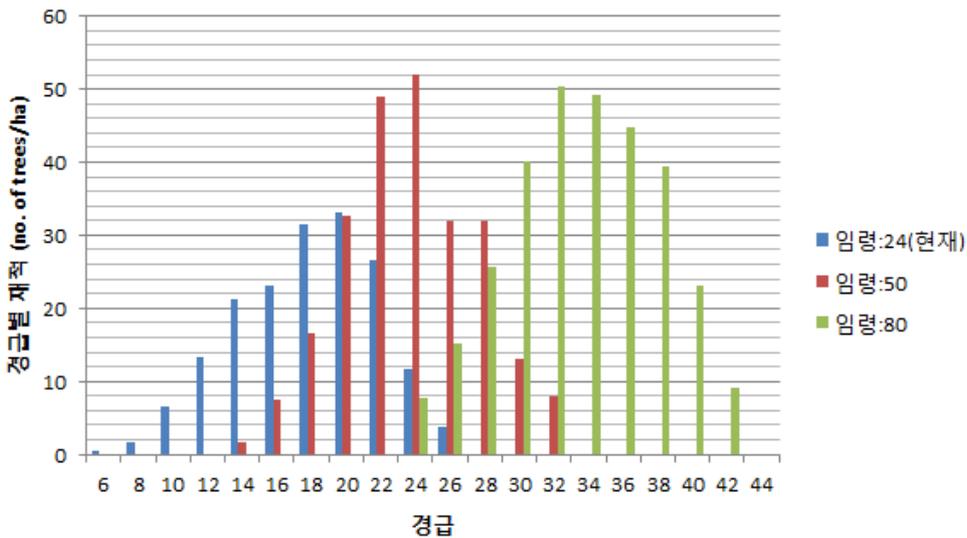
2. 성장예측 시뮬레이션

가. 임분성장 시뮬레이션

추정된 삼나무 임분의 성장함수를 이용하여 임령 24년, 지위지수 14인 제주도 한남시험림의 삼나무 현실임분에 적용하여 임분연령 80년까지 성장예측 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 2-7은 본 연구를 통해 개발된 성장예측 시뮬레이터를 이용하여 현재 20년생인 삼나무 임분을 임령 80년까지 성장시켰을 때의 결과를 나타내고 있다. 그림에서 제시된 바와 같이 시간의 흐름에 따라 삼나무가 성장하면서 임분의 경급별 분수 및 재적분포가 우측으로 이동하는 것을 알 수 있다.



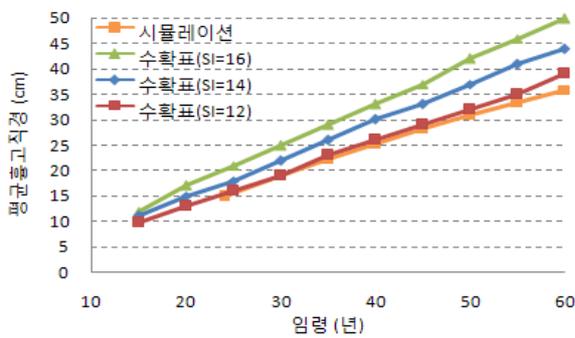
(a) 경급별 분수변화



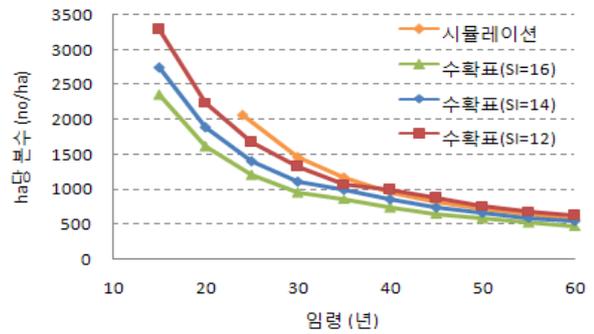
(b) 경급별 재적변화

그림 2-7. 성장예측 시뮬레이션에 따른 개체목 분포비교

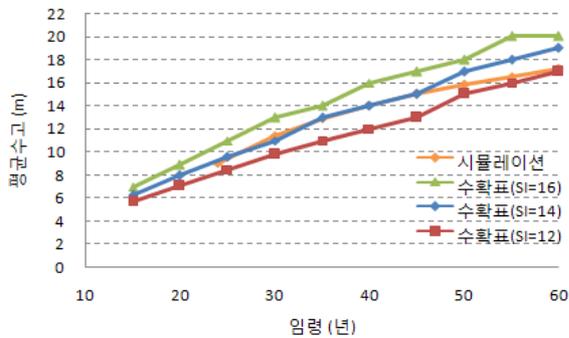
예측결과의 타당성 검토는 해당 임분의 축적된 산림조사자료를 통해 비교할 수 있겠으나, 본 연구에서는 현실적인 자료의 부족으로 인해 지위지수 및 임령별 평균임분의 성장결과를 표로 나타낸 수확표를 이용하여 성장결과에 대한 타당성을 분석하였다. 한편, 타당성 검토는 연구대상지 임분의 지위와 동일한 지위지수 14의 삼나무 임분 수확표를 기준으로 수행하였다. 그림 2-8은 삼나무 임분의 성장예측에 따른 성장량 변화 추이를 나타내는데 대체로 성장예측 결과가 현실임분의 지위(SI=14)를 고려한 변화선과 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 성장예측 시뮬레이터는 삼나무 현실임분의 성장변화를 적절히 나타낼 수 있는 것으로 판단된다.



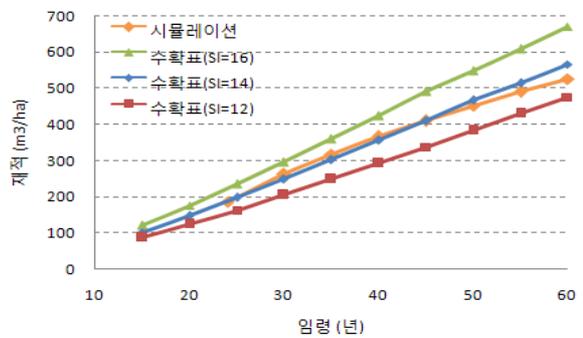
(a) 평균흉고직경 변화



(b) ha당 본수 변화



(c) 평균수고 변화



(d) 임분재적 변화

그림 2-8. 삼나무 임분의 성장예측에 따른 성장량 변화 추이

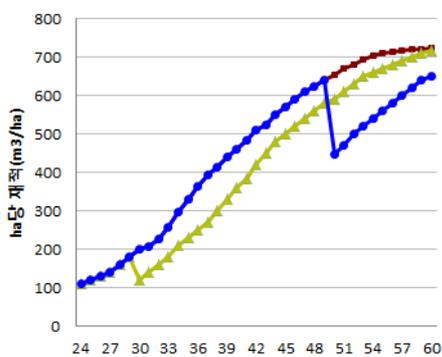
나. 산림사업 시뮬레이션

임분의 생장은 간벌이나 가지치기 등 인간의 산림경영활동에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서는 산림사업에 의한 임분생장의 변화를 임분경영활동에 고려하고자, 간벌에 의한 임분의 성장패턴을 파악하였다. 이를 위해 본 연구에서 사용된 산림사업(간벌) 시나리오는 표 2-6과 같다. 간벌사업에 따른 임분의 성장패턴 분석에는 앞서 이용된 임령 24년의 제주도 한남시험림의 삼나무 임분자료를 이용하였다.

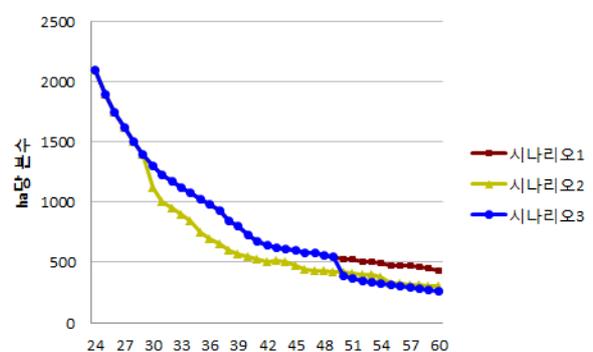
표 2-6. 산림사업(간벌) 시나리오

시나리오	간벌시기 (임령)	간벌강도 (임목본수 대비 %)	간벌빈도 (횟수)	별기령 (년)
1	-	-	-	60
2	30	20	1	60
3	50	30	1	60

그림 2-9는 개발된 성장예측 시뮬레이터를 이용하여 분석한 제주도 삼나무 현실임분의 산림사업(간벌)에 따른 임분성장량 변화추이를 나타낸 그래프이다. 그림 2-9a는 간벌에 따른 임분재적의 변화를 나타낸 것인데, 시나리오1(무간벌)에 비해 간벌을 시행한 시나리오2, 3에서는 간벌에 따른 재적감소와 함께 간벌의 영향이 반영된 임분성장곡선이 도출되었다. 특히 상대적으로 빠른 시기에 간벌을 시행한 경우(시나리오2) 별기령에 도달하였을 때의 재적이 간벌을 시행하지 않은 임분과 비교적 동일한 값을 나타낸 것에 비하여 늦은 시기에 간벌을 한 경우(시나리오3)에는 별기령에 도달한 임분의 재적량에서 무간벌의 임분과 차이가 나타났다.



(a) 임분재적 변화



(b) ha당 본수 변화

그림 2-9. 삼나무 임분의 간벌에 따른 성장량 변화 추이

다. 탄소흡수 시뮬레이션

한편 본 연구에서는 개발된 성장예측 시뮬레이터를 이용하여 제주도 삼나무 임분의 탄소고정효과를 분석하였다. 임목의 탄소흡수량 분석에는 다음에 제시된 식을 이용하여 산출하였고, 이 때 사용된 삼나무의 탄소전환식 계수는 표 2-7과 같다.

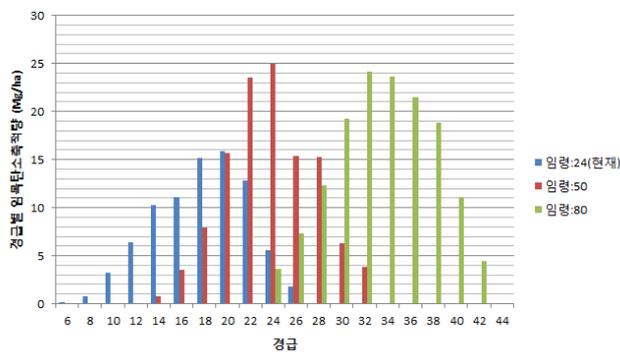
$$W^C = \rho_0 \times V_{stem} \times E \times C_0$$

W^C : 탄소흡수량(Ct) ρ_0 : 목재기본밀도(g/cm³)
 V_{stem} : 수간재적(m³) E : 바이오매스 확장계수
 C_0 : 탄소함량비

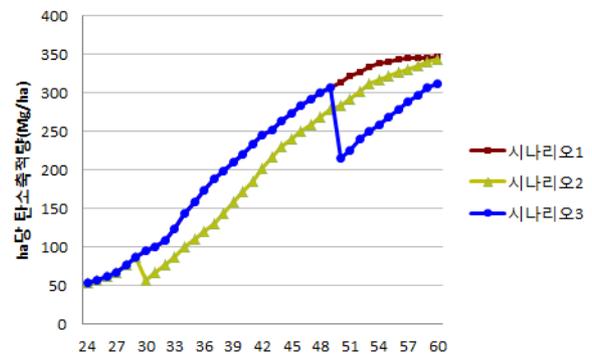
표 2-7. 삼나무 탄소전환식 계수(국립산림과학원, 2010)

구 분	목재기본밀도(g/cm ³)	바이오매스 확장계수	탄소함량비
값	0.35	1.31	0.5

그림 2-10은 임분 성장예측 시뮬레이터를 이용하여 탄소고정효과를 분석한 결과를 나타낸다. 그림에 제시되어 있듯 시간에 따른 경급별 임목의 탄소축적량 변화와 간벌 시나리오에 따른 ha당 탄소축적량은 임분의 성장과 간벌의 유무에 따라 다른 결과를 나타내고 있다. 따라서 목재생산과 탄소흡수를 고려한 임분의 시업체계를 작성하기 위해서는 임분의 성장패턴 및 산림시업의 영향을 효율적으로 고려할 수 있는 성장예측 시뮬레이터가 요구되며, 본 연구를 통해 개발된 시뮬레이터는 이와 같은 목적달성에 적절히 이용될 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 경급별 임목탄소축적량 변화



(b) 간벌에 따른 ha당 탄소축적량 변화

그림 2-10. 성장예측 시뮬레이터를 이용한 탄소고정효과 분석결과

제3장 제주도 삼나무 임분의 탄소경영 최적화 모델 개발

제1절 임분단위 탄소경영 최적화 모델 개발

제2절 탄소흡수를 고려한 임분관리 최적 사업체계 분석

제3장 제주도 삼나무 임분의 탄소경영 최적화 모델 개발

제1절 임분단위 산림경영 최적화 모델 개발

1. 수리계획법을 적용한 임분단위 산림경영 최적화 모델

상충되는 다양한 산림경영목표들을 효과적으로 달성하기 위해서는 시기별로 적용되는 경영 활동들에 대한 합리적인 계획이 필요하며, 이를 위해 임업에서는 최적화 기법을 이용한 산림 경영계획의 수립과 적용이 필요하다. 예로부터 임업에서는 경영계획의 수립 시 임분(stand)단 위와 산림(forest)단위의 두 가지의 공간적 스케일로 구분하여 각 공간적 수준에 맞는 산림경 영계획을 작성하고 있다. 임분단위의 경영계획모델에서는 임분을 기반으로 시간의 흐름에 따 른 다양한 시업의 목적을 극대화하기 위한 임분 시업체계를 제시하는 반면, 산림단위의 경영 계획모델에서는 보다 큰 공간적 스케일에서 대면적의 산림의 관리·경영하기 위한 분석모델을 제시한다(정주상 등, 2009).

일반적으로 산림단위의 경영계획의 작성에는 선형계획법(Linear Programming)이 많이 적용 되는데, 선형계획법은 산림경영분야에서 가장 널리 사용되는 수리계획기법(Mathematical Programming) 중 하나로서 모형자체가 비교적 단순하고 많은 양의 입력자료를 처리할 수 있기 때문에 산림과 같이 큰 면적을 대상으로 하는 대규모 문제에 많이 적용된다(박은식과 정주상, 2000). 그러나 선형계획법은 전체 산림의 수확량 조절이나 수종·영급분포, 특정 용도의 산림 면적 유지 등 목재수확조절을 위주로 하는 전략적인 산림경영계획의 수립에는 적합하나, 임분 관리에 필요한 간벌시기, 간벌강도, 벌기령의 결정과 같은 문제를 해결하기에는 본질적으로 어려움이 있다.

따라서 임분단위에서 간벌과 같은 산림시업을 고려한 최적 임분관리 시업체계를 도출하기 위해서는 임분의 성장패턴과 간벌에 의한 임분성장변화를 효과적으로 반영할 수 있는 수리계 획기법이 요구된다. 이러한 문제를 해결하는데 가장 적합한 방법으로는 동적계획법(Dynamic Programming)이 있다. 동적계획법이란 연속적 의사결정 문제를 해결하기 위한 순환적 최적화 접근법으로서, 순환적 최적화 절차에 의해 의사결정의 선행단계로부터 자료를 이용하여 매 단 계별로 최적의사결정을 내리면서 전체 단계에 대한 최적해를 도출해내는 방법이다. 동적계획 법에서 하나의 단일단계는 선행단계와 연속적으로 관련되어 있으며, 단일단계는 그 단계의 최 적해는 되지만 전체단계에 대한 최적해는 아니다(우종춘과 장재영, 2009).

따라서 동적계획법은 연속적으로 상호 의존된 의사결정을 필요로 하는 문제 등에 응용되고 있다. 동적계획법의 계산방법은 최적화의 원리(principle of optimality)로 알려진 순환 최적원리에 그 기초를 두고 있다. 최적화의 원리란 어떤 상태의 최적의사결정 규칙은 주어진 현재의 상태 하에서 남아 있는 단계들의 최적상태의 결정이 이전의 모든 단계에서 채택되어진 정책들에 종속되어지는 것이 아니라 바로 전 단계의 정책에 의해서만 최적화되어야 한다는 원리이다. 즉, 다단계의 의사결정문제에서 어떤 상태의 최적 정책이 어떻게 하여 이 상태에 도달되었는가에 관계없이 독립적으로 현재의 상태에만 의존한다는 것을 의미한다(Miranda와 Feakler, 2002).

그림 3-1에서는 일반적으로 임분관리에 요구되는 의사결정의 문제를 보여준다. 예를 들어 최대의 목재생산이라는 목표를 달성하려는 임분의 관리책임자는 어느 시점에서 얼마만큼의 간벌을 시행해야 계획된 목표에 맞게 임분을 관리할 수 있을지에 대한 정보가 필요할 것이다. 이 관리자는 어떤 시점(T1)에서 간벌을 시행하거나(B와 C) 또는 안하거나(A), 간벌을 시행한다면 어떤 강도로 시행해야할지(B와 C)를 결정해야한다. 이 시점(T1)에서의 관리자의 선택에 따라 미래의 임분성장패턴이 달라지고(D, E, F), 결국 목표로 하는 목재생산량이 달라질 수 있으므로 임분관리자는 최대의 목표달성을 가능케 하는 최적의 산림사업체계를 파악해야만 할 것이다.

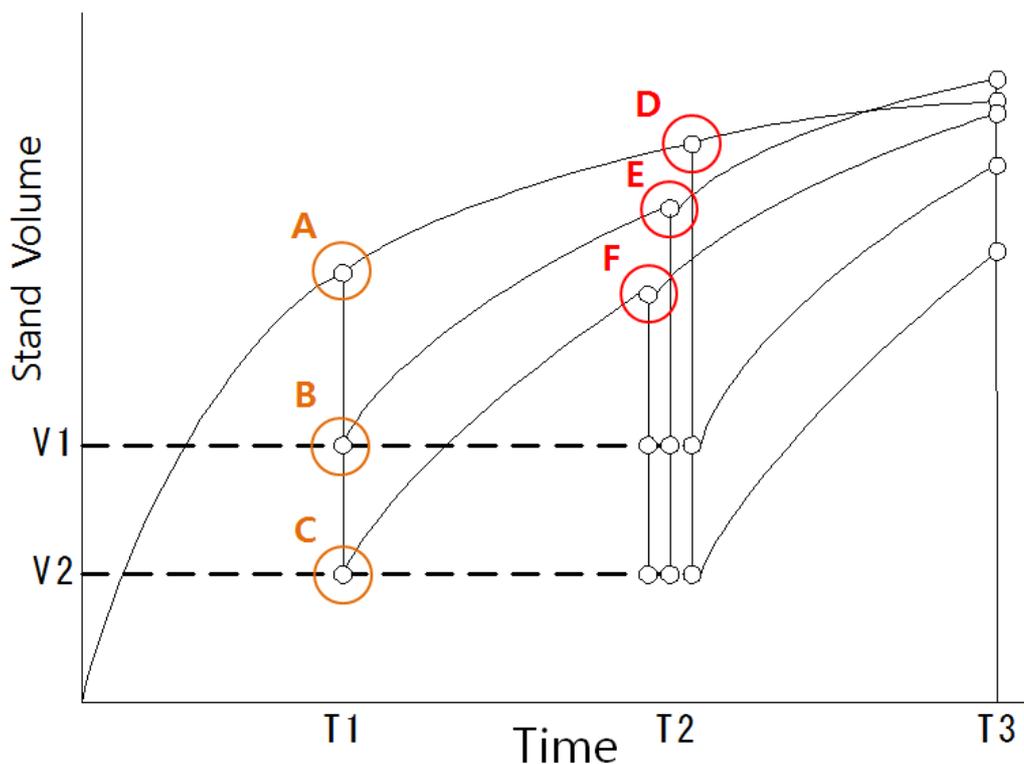


그림 3-1. 간벌에 따른 임분생장의 변화

이와 같이 순환적으로 연결된 의사결정문제에서 동적계획법은 계획된 목표를 최대로 달성할 수 있는 최적의 의사결정경로(optimal path)를 도출할 수 있다. 그림 3-2는 동적계획법의 네트워크 안에서 선택된 최적의 의사결정을 나타내는 경로(path)를 나타낸다.

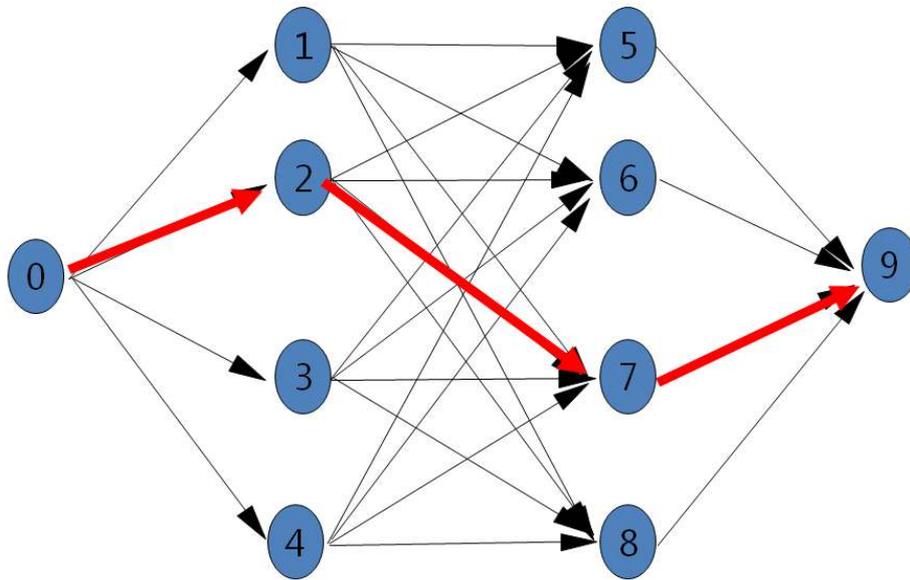


그림 3-2. 동적계획법의 네트워크 예시(붉은색 화살표: 최적 path)

2. 임분단위 산림경영 최적화 모델의 개발

가. 동적계획법 알고리즘

동적계획법은 Amidon과 Akin(1968)에 의해 처음 제안된 이래로 다양한 산림경영문제에 적용되어 왔다(Schreuder, 1971; Brodie와 Kao 1979; Brodie와 Haight, 1985). 그러나 동적계획법은 문제가 복잡해질 경우 최적해를 도출하기 위한 계산시간이 기하급수적으로 늘어나게 된다(Hann과 Brodie, 1980). 이러한 문제를 해결하기 위하여 Paredes와 Brodie (1987)는 PATH (Projection Alternative Technique) 알고리즘을 개발하여 복잡한 동적계획 문제에서 요구되는 계산시간을 효과적으로 줄였다. PATH 알고리즘에서 최적해를 도출하기 위한 수식은 다음과 같다.

$$f_i^* = \max\{f_i(T_i)\}$$

$$f_i(T_i) = \Pi_i(T_i) + V(T_i) - \Pi_{i-1}^*(T_{i-1}) + f_{i-1}^*$$

$$T_i = T(t_i) \quad : \text{시점 } t_i \text{에서의 간벌량}$$

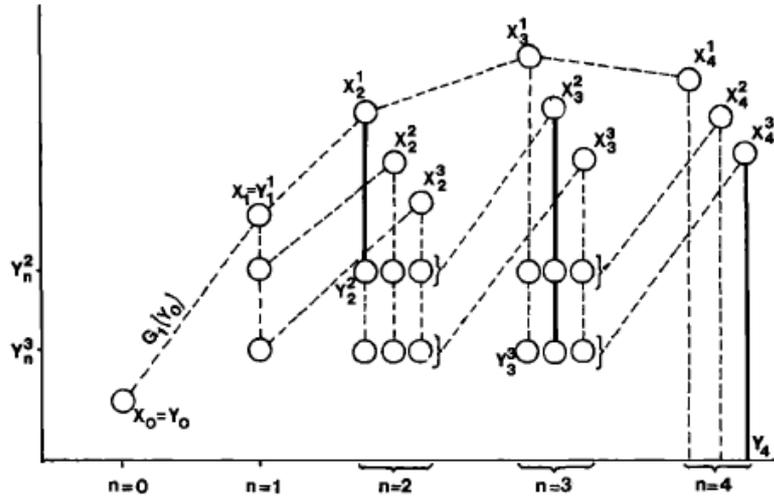
$$\Pi_i(T_i) = \Pi(x(t_{i+1}), T(t_i), t_{i+1}) \quad : \text{간벌이 시행된 시점 } t_i \text{에서 잔존임분의 가치}$$

$$V(T_i) = V(T(t_i)) \quad : \text{시점 } t_i \text{에서 시행된 간벌로 인한 가치}$$

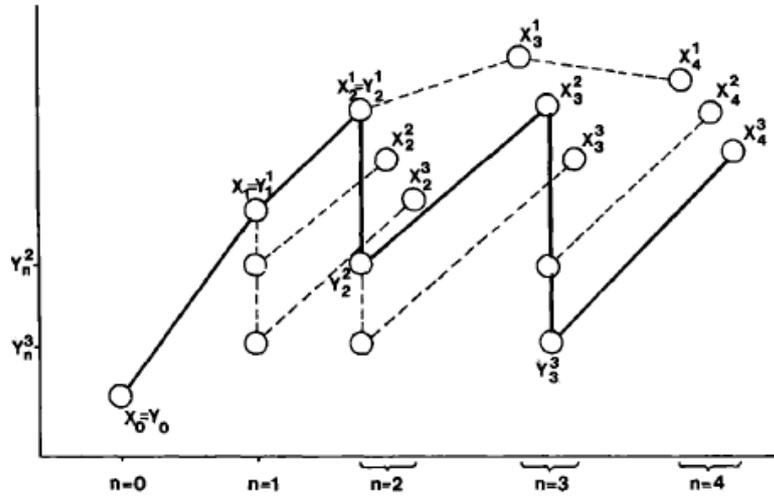
$$\Pi_i^* = \Pi_i(T_i^*) \quad : \text{시점 } t_i \text{에서 임분의 최적 가치}$$

$$f_i^* \quad : \text{시점 } t_i \text{에서의 목적함수의 최적해}$$

라그랑지안 승수를 이용하여 증명되는 위의 식(Paredes와 Brodie, 1987)은 복잡한 동적 네트워크 상에서 목적함수의 최대값을 도출하는 최적 PATH를 매우 빠른 시간 안에 탐색할 수 있도록 문제를 구조화한다. 이를 좀더 간단히 설명하면 순환적 문제에서의 각 단계의 최적해는 바로 전단계의 최적해와 다음 단계의 최적해의 조합에 의해 달성될 수 있다는 의미이다. 그림 3-3은 기존 동적계획법에서 사용하는 알고리즘과 PATH 알고리즘에서 최적해를 찾는 기본 원리를 비교하여 나타내고 있다. 본 연구에서는 최적해를 도출하는데 매우 효율적인 PATH 알고리즘을 적용하여 임분단위 산림경영 최적화 모델을 개발하였다.



(a) 기존 알고리즘을 이용한 최적 path의 탐색



(b) PATH 알고리즘을 이용한 최적 path를 탐색

그림 3-3. 기존 알고리즘과 PATH 알고리즘 간 최적 path 탐색과정의 차이
(Paredes와 Brodie, 1987)

나. 동적계획법을 적용한 임분단위 산림경영 최적화 모델 설계

본 연구에서는 동적 네트워크 상 최적의 path를 매우 효율적으로 탐색할 수 있는 PATH 알고리즘과 STEMS 기반의 임분단위 생장예측 시뮬레이터를 결합하여 임분의 목재생산과 탄소흡수를 고려한 최적의 산림사업체계를 작성하였다. 분석의 목적함수는 목재생산에 의한 수익 최대화와 임분의 탄소흡수 최대화의 두 가지로 설정하였고 간벌시기와 간벌횟수, 간벌강도의 조절을 통한 각 목적별 최적의 산림사업체계를 도출하였다. 의사결정변수인 간벌강도의 경우 10%의 간격을 이용하였고, 간벌시기의 경우 5년 간격을 이용하였다. 또한 삼나무 임분의 벌기령은 국유림 기준 벌기령인 60년을 적용하였다. 표 3-1은 분석에 활용된 연구대상지 내 삼나무 현실임분의 기본 임황정보를 나타낸다.

표 3-1. 최적 사업체계분석에 활용된 삼나무 현실임분의 현황

구분	임령(년)	본수(본/ha)	평균 DBH(cm)	평균 수고(m)	임분 재적(m ³ /ha)
값	31	1,225	18.04	13.32	207.8

한편, 간벌 및 주벌을 통해 수확되는 입목으로부터 얻을 수 있는 수익은 순현재가(NPV: Net Present Value)를 이용하여 계산하였으며 다음과 같은 식에 의하여 산출되었다.

$$NPV = V_{stem} \times P / (1+i)^{n-n_0} - V_{stem} \times C / (1+i)^{n-n_0}$$

NPV : 순현재가(원) P : 입목매매가(원/m³)
 V_{stem} : 수간재적(m³) C : 벌채비용(원/m³)
 n_0 : 현재임령 n : 벌채임령

입목 매매가의 경우 체재소 기준 현재 판매가격인 80,000원/m³을 적용하였으며, 간벌비용은 산림조합에서 제시하고 있는 단위재적 당 표준비용인 57,461원/m³을 적용하였다. 단, 주벌의 경우 일반적으로 간벌에 비해 적은 비용이 소요된다는 점을 감안하여 간벌비용의 80%를 적용하여 산출하였다.

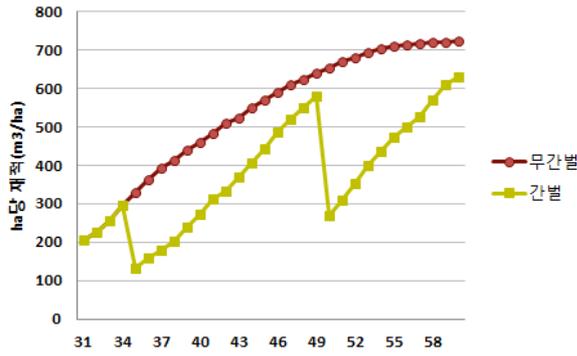
제2절 탄소흡수를 고려한 임분관리 최적 시업체계 분석

1. 수익 최대화를 위한 최적 산림시업체계 분석

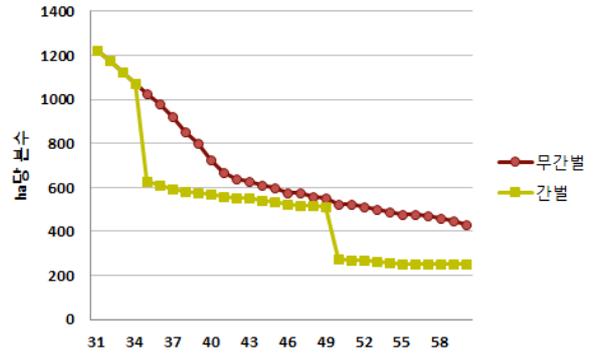
수익 최대화를 위한 최적의 산림시업체계 분석결과는 표 3-2, 그림 3-4와 같다. 수익 최대화 시뮬레이션의 경우, 임령 35년과 50년에서 각각 40%, 50%의 강도로 총 2회의 걸쳐 간벌을 시행하는 것이 최대의 수익을 발생시킬 수 있는 최적 산림시업체계로 분석되었다. 또한 간벌을 시행하지 않은 임분(대조군)과 비교해보면, 수익 최대화를 목표로 산림시업을 시행한 임분은 간벌을 시행하지 않은 임분에 비해 주벌 시점에서의 임목분수는 적었으나, 평균 DBH와 수고는 더 큰 값을 나타내었다. 이는 간벌과 같은 산림시업이 임목 및 임분의 성장에 미치는 영향을 나타내는 것으로서, 간벌시업으로 인해 목재가치가 우수한 양질의 임목이 생산될 수 있음을 의미한다. 간벌과 주벌을 합한 총 벌채재적의 경우에는 간벌을 시행하지 않은 임분보다 간벌을 시행한 임분에서 약 65%가량 더 많은 재적을 생산할 수 있었다. 이에 따라 목재판매에 따른 수익 역시 간벌의 시행한 임분에서 더 큰 값을 나타내었다. 그림 3-4에서는 무간벌의 경우와 수익 최대화 간벌에 따른 임분재적, ha당 분수의 변화를 그래프로 확인할 수 있다.

표 3-2. 수익 최대화를 위한 최적 산림시업체계 분석결과(임령 60년 기준)

구 분	무간벌	수익 최대화
간벌임령(강도)	-	35(40%), 50(50%)
분수(본/ha)	475	250
Basal area(m ²)	86	79
평균 DBH(cm)	50.0	59.2
평균 수고(m)	21.2	22.7
간 주벌 재적(m ³)	723	1,193
순수익 현재가(원)	9,430,070	16,409,095
탄소흡수량(Ct)	165.7	257.1



(a) 임분재적 변화



(b) ha당 본수 변화

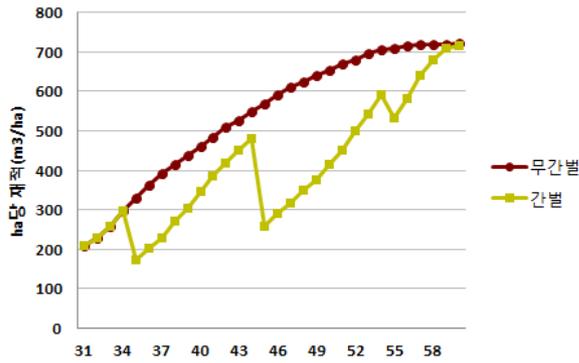
그림 3-4. 수익 최대화를 위한 최적 산림시업체계 분석결과

2. 탄소흡수 최대화를 위한 최적 산림시업체계 분석

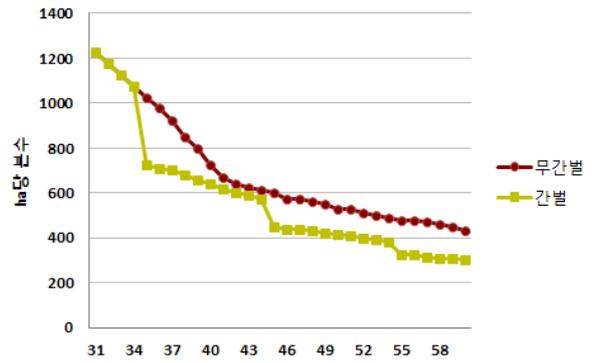
임분의 탄소흡수를 최대화하기 위한 최적의 산림시업체계 분석결과는 표 3-3, 그림 3-5와 같다. 탄소흡수 최대화 시뮬레이션의 경우, 임령 35년과 45년, 55년에서 각각 30%, 40%, 10%의 강도로 총 3회의 걸쳐 간벌을 시행하는 시업체계가 도출되었다. 그림 3-5에서는 무간벌의 경우와 탄소흡수 최대화 간벌에 따른 임분재적, ha당 본수 변화를 그래프로 확인할 수 있다.

표 3-3. 탄소흡수 최대화를 위한 최적 산림시업체계 분석결과(임령 60년 기준)

구 분	무간벌	탄소흡수 최대화
간벌임령(강도)	-	35(30%), 45(40%), 55(10%)
본수(본/ha)	475	300
Basal area(m ²)	86	78
평균 DBH(cm)	50.0	54.3
평균 수고(m)	21.2	22.3
간 주별 재적(m ³)	723	1,205
탄소흡수량(Ct)	165.7	276.2
순수익 현재가(원)	9,430,070	15,879,805



(a) 임분재적 변화



(b) ha당 분수 변화

그림 3-5. 탄소흡수 최대화를 위한 최적 산림시업체계 분석결과

한편, 두 목적함수(수익 최대화 및 탄소흡수 최대화)에 따라 도출된 최적시업체계를 비교해 보면 수익 최대화의 경우에서 간벌횟수가 더 적고 대체로 간벌강도가 강한 것으로 나타났으며 주벌 시점에서의 평균 흉고직경과 수고가 더 큰 것으로 나타났다. 이는 수익을 최대화하기 위해서는 간벌을 자주 하는 것보다 임목을 일정시간 키운 후 강도의 간벌을 통해 임목을 생산하는 것이 유리함을 의미한다. 수익 최대화의 경우 비록 간·주벌재적량 및 탄소흡수량은 탄소흡수 최대화의 경우보다 적었으나 순수익은 더 크게 나타났고, 탄소흡수 최대화의 경우 수익은 적었으나 탄소흡수량과 간·주벌재적에서 큰 값을 나타내었다. 따라서 임분관리자의 입장에서는 계획된 경영목표에 따라 두 시업체계 분석결과를 고려하여 합리적인 의사결정을 할 수 있다. 이는 임분단위 산림경영에서 흔히 발생하는 의사결정의 문제로, 우리가 목표로 하는 산림 가치를 달성하기 위해서는 최적화 경영모델과 같은 의사결정지원도구를 기반한 합리적인 산림 시업체계의 선택이 요구된다.

제4장 결론 및 제언

제4장 결론 및 제언

본 연구에서는 제주도 삼나무 임분의 개체목 성장예측 시뮬레이터를 개발하고, 이를 토대로 적정 산림사업체계를 결정함으로써 목재생산경영은 물론 생태계서비스 중 하나로 인식되는 탄소경영에 따른 효과를 극대화하기 위한 산림경영 의사결정지원시스템을 개발하고자 하였다. 이를 위해 삼나무 임분의 성장패턴을 정확히 평가 분석할 수 있는 개체목 성장예측 시뮬레이터를 개발하고, 개발된 시뮬레이터를 기반으로 수리적 최적화기법인 동적계획법(Dynamic Programming)을 적용하여 목재생산 효과 또는 탄소고정 효과를 극대화하기 위한 임분단위 최적화 모델을 개발하였다.

개발된 모델은 벌기령, 간벌 시기, 횃수 및 강도 등의 적정 산림사업체계를 결정함으로써 현실 임분을 구성하는 임목의 수종구성, 밀도, 경급구조 등의 임상특성이나 입지여건 등에 의해 달라지는 성장패턴은 물론 할인율이나 가격 및 비용함수에 따른 시장여건의 변화 등을 동시에 고려하여 목재생산경영 또는 탄소경영의 효과를 극대화할 수 있다. 특히 본 모델은 시간의 흐름에 따라 산림사업에 의해 영향을 받을 수 있는 임상특성의 변화나 임분의 동태구조 변화를 분석할 수 있고, 또한 주요 경영성과분석에 요구되는 다양한 인자들에 대한 민감도 분석과 산림경영목적에 따른 trade-offs 효과를 과학적으로 분석할 수 있는 의사결정시스템이다.

개발된 모델을 이용한 본 연구의 분석 결과, 무간벌 임분에 비해 간벌을 시행한 임분에서 탄소흡수 및 목재의 생산이 큰 것으로 나타났고, 최대 수익을 고려한 모델 시뮬레이션에서는 상대적으로 적은 간벌 횃수와 강한 간벌 강도를 실행한 임분이 그렇지 않은 임분에 비해 더 큰 수익을 나타내었다. 이는 약한 간벌 강도를 자주 실행하는 것보다 강한 간벌강도를 2회 정도 실행하는 것이 수익 창출의 측면에서 보다 적절한 사업체계임을 제시하는 결과이다.

이처럼 본 연구에서 개발된 임분단위 최적화 모델은 산림의 성장예측에 있어 생태계의 생물적 요소 뿐 아니라 인간의 산림경영활동에 의한 효과를 반영하여 산림의 동태변화패턴을 정확히 예측할 수 있으며, 이로부터 경영목표와 산림사업의 시기·빈도·강도 등을 고려한 임분단위 최적 산림사업체계를 도출할 수 있다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 모델은 산림경영활동을 통해 다양한 생태·경제적인 경영목표들을 최적의 상태로 달성할 수 있도록 지원해주는 의사결정지원시스템으로서 산림경영계획에 활용될 수 있다.

제5장 참고문헌

제5장 참고문헌

- 국립산림과학원. 2010. 산림 온실가스 인벤토리를 위한 주요 수종별 탄소배출계수. 국립산림과학원 연구보고 10-25. pp.125
- 권순덕. 2003. 임분단위 산림경영을 위한 시뮬레이션 모델 개발. 서울대학교 박사학위 논문. pp.113
- 권순덕, 김형호, 정주상, 이경학. 2003. 잣나무 임분의 개체목간 거리독립 성장 및 고사 예측 함수의 개발. 한국임학회지 92: 590-597
- 권순덕, 정주상. 2004. 잣나무 임분 성장예측을 위한 거리독립 시뮬레이션 모델 개발. 한국임학회지 93: 43-49
- 박은식, 정주상. 탄소저장 및 목재생산효과 중심의 산림경영계획을 위한 다목적 선형계획법의 응용. 한국임학회지 89: 335-341
- 서정호, 이우균, 함보영, 손요환. 2001. 안면도 소나무 임분의 동적 성장모델. 한국임학회지 90: 725-733
- 신만용, 이민준, 안홍수. 2003. 거리독립 경쟁지수를 이용한 4개 침엽수종의 고사율 추정식의 개발. 한국임학회지 92: 581-589
- 신만용, 한승훈. 2004. 최적 경쟁지수의 추정을 위한 컴퓨터 프로그램의 개발. 한국임학회지 93: 339-348
- 신준환, 이돈구. 1990. 잣나무림에서 임목성장 모듈들의 계절적 생육반응. 한국임학회지 79: 431-434
- 우종춘, 장재영. 2009. 잣나무 임분의 간별 pathway 선정을 위한 동적계획법 적용에 관한 연구. 한국임학회지 98: 225-230
- 이경학, 손영모, 노대균, 권순덕. 2002. 우리나라 주요 6 수종의 수간중량 추정식. 한국임학회지 91: 206-212
- 이우균. 1996. 위치종속임분조사에 의한 개체목의 경쟁지수 및 흉고직경성장 추정. 한국임학회지 85: 539-551
- 이우균, 서정호, 배상원. 2000. 강원도지방 소나무 동령임분의 최대임목본수 및 고사모델. 한국임학회지 89: 634-644

- 정주상, 박필선, 김선영, 설아라, 송정은, 장광민, 한희, 조재창, 김경운, 이윤미. 2009. 임분과 경관수준의 임업경영평가모델 개발. 산림청 기술개발과제 최종보고서. pp141
- Amidon, E.L., Akin, G.S. 1968. Dynamic programming to determine optimum levels of growing stock. *Forest Science* 14: 287-291
- Belcher, D.M., Holdway, M.R., Brand, G.J. 1982. A description of STEMS- the stand and tree evaluation and modeling system. Gen. Tech. Rep. NC-79. pp.18
- Brand, G.J. 1981. "GROW"- A computer sub-routine that projects the growth of trees in Lake States forests. USDA Forest Service, Research Paper NC-207. pp.11
- Brodie, J.D., Kao, C. 1979. Optimizing thinning in Douglas-fir with three-descriptor dynamic programming to account for accelerated diameter growth. *Forest Science* 25: 665-672
- Brodie, J.D., Haight, R.G. 1985. Optimization of silvicultural investment for several types of stand projection systems. *Canadian Journal of Forest Research* 14: 188-191
- Daniels, A.N., Burkhart, H.E. 1975. Simulation of individual tree growth and development in managed loblolly plantations. Div. of Forest and Wildlife Resources, Va. Polytechnic Inst. and State University. pp. 134
- Hann, D.W., Brodie, J.D. 1980. Even-aged management: Basic managerial questions and available or potential techniques for answering them. USDA Forest Service Technical Report. INT-83. pp.29
- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. pp.326
- Kurz, W., Apps, M. 1999. A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector. *Ecological Application* 9: 526-547
- Mitchell, K.J. 1975. Dynamics and simulated yield of Douglas-for. *Forest Science Monograph* 17: 39
- Miranda, M.J., Fackler, P.L. 2002. *Applied Computational Economics and Finance*. MIT press, pp. 534
- Paredes, G.L., Brodie, J.D. 1987. Efficient specification and solution of the even-aged rotation and thinning problem. *Forest Science* 33: 14-29

Schreuder, G.F. 1971. The simultaneous determination of optimal thinning schedule and rotation for an even-aged forest. Forest Science 17: 333-339