

# Simulated Annealing 휴리스틱 기법을 이용한 임분탄소 최적화 프로그램의 개발

전어진<sup>0</sup>, 김영환<sup>\*</sup>

<sup>0</sup>국립산림과학원 기후변화연구센터

<sup>\*</sup>국립산림과학원 기후변화연구센터

e-mail : camanagement@forest.go.kr<sup>0</sup>, kyhpeniel@forest.go.kr<sup>\*</sup>

## Development of forest carbon optimization program using simulated annealing heuristic algorithm

Eo-Jin Jeon<sup>0</sup>, Young-Hwan Kim<sup>\*</sup>

<sup>0</sup>Center for Forest & Climate Change, Korea Forest Research Institute

<sup>\*</sup>Center for Forest & Climate Change, Korea Forest Research Institute

### ● 요약 ●

본 연구에서는 임분 단위에서 산림의 이산화탄소 흡수 및 저장 기능을 최적화 할 수 있는 최적의 산림사업체계를 도출하고자 하였고, 이를 위해 임분 성장모델과 Simulated Annealing 휴리스틱 기법을 적용하여 임분탄소 최적화 프로그램을 개발하였다. 휴리스틱 알고리즘에서 최적해를 찾기 위해 반복 실행 되는 과정에서 더 이상 최적해를 찾지 못하고 목표 값이 어떤 일정한 값 (Local Optimum)에 계속 머무는 현상을 해결하기 위해 임계치를 적용하며, SA 휴리스틱 기법에서는 열균형테스트를 이용하고 있다. 개발된 프로그램을 이용하여 3가지 산림 사업 시나리오에 대한 비교 분석을 실시하기 위해 프로그램을 실행한 결과, 목재 수확량의 경우 목재수확량을 최대를 목표로 한 대안이 3개 시나리오 가운데 목재수확량이 가장 높은 것으로 나타났으며, 또한 탄소저장량에서도 탄소저장량을 최적화한 대안이 탄소저장량이 가장 높은 것으로 나타나 프로그램이 목적에 맞게 개발된 것으로 판단됐다. 또한 열균형 테스트의 온도저감율을 조정하여 프로그램을 반복실행하여 온도저감율이 프로그램 실행 시에 미치는 영향을 분석한 결과 온도저감율에 따라 출력되는 목적함수의 최적값과 프로그램 반복횟수가 영향을 받는 것으로 나타나 프로그램 실행을 최적으로 하기위해 온도 저감율의 파라미터 값을 0.1로 설정하였다.

**키워드:** Simulated Annealing, 휴리스틱(heuristic), 최적화 프로그램(optimization), 탄소경영(carbon management), 산림사업(forest treatment)

## I. 서론

산림은 목재 생산, 수원함양, 자연생태계보전, 탄소저장 등 다양한 기능을 가진다. 이러한 다양한 기능을 최적화 하기 위해서는 주어진 자원을 시공간적으로 적절히 배분하고 활용하는 것이 중요하다.

또한 산림은 지구온난화를 유발하는 온실가스를 흡수하는 기능을 가지고 있어서 기후변화협약 등 국제적인 협상에서 그 의미와 중요성이 크게 부각되어 산림활동

을 통한 탄소배출권을 획득을 위한 각 활동들에 대한 정확한 변화량 측정법이 요구되고 있다.

이를 위해서는 산림활동에 따른 탄소흡수량 예측이 중요한데 산림경영에 의한 탄소흡수량의 변화 추정에는 매우 복잡한 과정이

요구된다. 또한 산림 경영에서 이루어지는 사업은 조림에서 벌채에 이르기까지 매우 다양하며, 동일한 사업이라도 그 강도와 방법에 따라 산림의 탄소흡수량은 매우 민감하게 반응하게 된다[1]. 따라서 다양한 경영목표 및 제한조건들을 고려하는 한편 탄소흡수량을 최적화할 수 있는 임분사업체계를 예측하는 기법이 요구되고 있다.

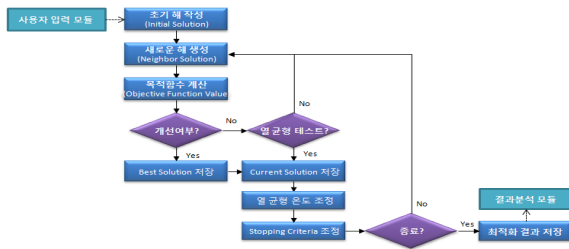
따라서 본 연구에서는 기후변화 대응을 위해 산림의 이산화탄소 흡수, 저장량을 최적화 할 수 있도록 간벌 강도, 시기, 횃수 및 벌기령 등 최적의 산림사업체계를 도출하고자 하였다. 이를 위해 임분 성장모델과 Simulated Annealing (SA)휴리스틱 기법을 적용하여 탄소저장량을 최적화할 수 있는 임분 단위의 최적화 프로그램을 개발하였다.

## II. 관련연구

1960년대부터 최근까지 산림경영 모델링 분야에서 보고된 연구들의 경향을 분석한 바에 따르면[2], 1960년대에는 주로 선형계획법을 적용하여 목재 생산 등의 경제적 목표를 고려한 경영계획을 수립하였으며, 1970년대에는 다목적 경영을 위한 모델링 기법으로 목표계획법이 많이 적용되었다. 1980년대에는 벌채 등 경영활동의 영향을 다루기 위해 정수계획법, 휴리스틱 기법, 시뮬레이션 기법 등 다양한 기법들이 적용되기 시작했으며, 1990년대에 들어서는 산림경영활동의 시공간적인 최적화 및 야생동물 서식지의 분포 등을 경영목표로 고려하기 위해 휴리스틱 기법을 적용한 사례들이 두드러지게 증가하고 있다[3].

이처럼 점차 복잡해지고 다양해지는 산림경영 목표들을 효과적으로 다루기 위해 여러 수학적 기법들이 적용되어 왔으며, 최근에는 비교적 짧은 시간 내에 만족할만한 수준의 경영안을 제공할 수 있는 휴리스틱 기법의 적용 사례가 점차 증가하고 있다.

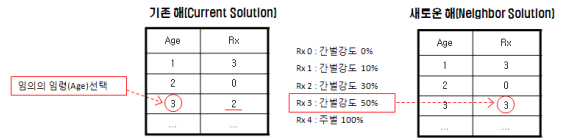
우리나라에도 최근 들어 휴리스틱 기법을 적용한 여러 사례들이 보고되고 있는데 불류운송 분야의 최적운송경로나 중간물류기지 선정을 위한 적용사례들[4][5]과, 전기, 전자분야의 최적 네트워크 망 구축을 위한 적용사례들[6][7], 이외에도 산업분야의 작업공정 개선을 위한 사례가[8] 보고된 바 있으며 산림부문에서는 산림경영 의사결정지원시스템 구현을 위한 사례가 보고된바 있다[1].



〈그림 1〉 Simulated Annealing 알고리즘 흐름도  
(fig.1) Flowchart of Simulated Annealing algorithm

## III. 프로그램의 설계

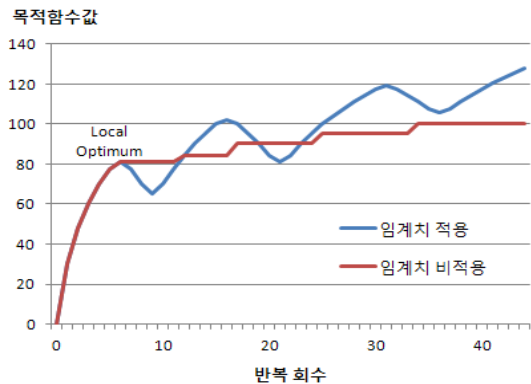
SA를 적용한 최적화 프로세스는 일반적으로 그림 1과 같은 흐름의 프로세스를 거친다. SA기법은 휴리스틱 알고리즘의 일종으로써 열역학 이론인 Metropolis의 열균형(Thermal Equilibrium) 법칙을 적용한 최적화 기법이다. 개발된 최적화 프로세스에서는 우선 임의로 간벌 사업안을 작성하여 초기해로 설정하고, 이 해로부터 임의의 간벌시기 및 강도를 선택하여 사업안을 수정함으로써 새로운 해를 생성하게 된다.



〈그림 2〉 새로운 해 생성  
(fig. 2) The creation of the neighboring solution

이때 현실적인 사업 여건을 고려하여 간벌간격, 간벌횟수, 벌기령 등에 대해 제한 조건을 두었다. 새로운 해가 생성되면 목적함수 값(목재수확량 혹은 탄소저장량)을 산정하게 되고, 이를 기존 해의 목적함수 값과 비교하게 된다. 만일 새로운 해의 목적함수 값이 기존 최적해 보다 높은 값을 제공하는 경우, 이 해가 최적 해로 저장된다. 반대로 새로운 해의 목적함수 값이 기존 최적해 보다 낮은 경우에는 열균형 테스트를 통해 수락 혹은 누락 여부를 결정하게 된다.

휴리스틱 알고리즘은 일반적으로 일정 횟수동안 임의의 새로운 해를 생성하고 이들 가운데 최적해를 찾는 과정을 거치는데, 이때 이 나타날 수 있다. 이러한 현상을 해결하기 위해 새로운 해가 종전에 저장된 해보다



〈그림 3〉 임계치를 적용에 의한 목적함수값의 변화 비교  
(fig.3) The comparison of objective function value by the threshold applied

개선되지 않았더라도 일정범위 내에서 수락하도록 임계치(Threshold)를 적용하는데(그림 3) SA 알고리즘에서는 열균형(Thermal Equilibrium) 테스트를 이용하고 있다.

열균형 테스트는 SA알고리즘의 핵심으로써 목적함수 값이 Local Optimum에 머무는 시간을 단축시켜 최적해(Best Solution)에 보다 빨리 도달할 수 있도록 열역학 이론인Metropolis의 열균형 법칙을 적용한 것이다.

열균형 테스트에서는 우선 0-1사이의 임의의 확률( $p(\theta)$ )을 결정하고, 이를 아래의 수식으로 구한 열균형 확률( $p(\Delta E)$ )과 비교한다. 임의의 확률이 열균형 확률보다 작은 경우( $p(\Delta E) > p(\theta)$ )에는 새로운 해를 수락하고 온도 T를 일정비율로 저감하고, 반면 임의의 확률이 열균형 확률과 같거나 큰 경우( $p(\Delta E) \leq p(\theta)$ )에는 새로운 해를 누락하고 온도 T를 유지한다. 새로운 해의 목적함수 값이 기존 최적 해와 가까울수록, 즉  $\Delta E$  값이 작을수록 새로운 해가 수락될 확률이 높아진다.

$$P(\Delta E) = \exp \frac{(-\Delta E)}{kT}$$

여기서,  $P(\Delta E)$ : 열균형확률  
 $\Delta E$ : 에너지변화량  
 k: Boltzmann 상수  
 T: 온도

최적화 프로세스에서는 이와 같은 과정이 반복적으로 시행되는데, 최대 반복회수에 도달하거나 열균형 온도가 최저 온도에 도달하는 경우 최적화 프로세스가 종료되고, 마지막으로 저장된 최적 해의 정보가 사용자에게 출력된다.

#### IV. 결론

##### 1. 최적 사업체계별 예측결과 비교(개발 결과)

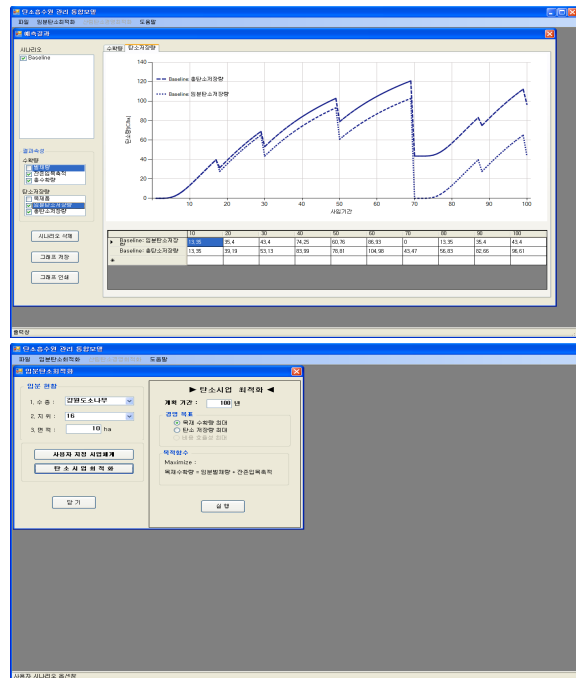
본 연구에서는 개발된 프로그램을 이용하여 3가지 산림 사업 시나리오에 대한 비교 분석을 실시하였다. 우선 베이스라인 시나리오로 기존 산림경영에서 주로 참고하는 ‘지속가능한 산림자원관리 표준 매뉴얼[9]’의 사업체계를 적용하여 목재수확량 및 탄소저장량을 산출하였다. 또한 본 연구에서 개발된 프로그램을 이용하여 목재수확량 최적화를 위한 사업체계(대안1)와 탄소저장량 최적화를 위한 사업체계(대안2)를 구하고, 각각에 대한 목재수확량과 탄소저장량을 베이스라인 시나리오와 비교하였다.

그 결과 목재수확량의 경우 목재수확량을 최대로 목표로 한 대안 1이 3개 시나리오 가운데 목재수확량이 가장 높은 것으로 나타났다(표 1 및 그림 4 참조).

〈표 2〉 목재수확량 및 탄소저장량의 비교 - 강원지방소나무 예시 (tab.1) The Comparison of timber yield and carbon storage

구분		베이스라인 (기존사업체계)	대안 1 (목재수확량최대)	대안 2 (탄소저장량최대)
목재 수확량	별채량	584.4 m3/ha	683.6 m3/ha	691.1 m3/ha
	잔존임목	116.2 m3/ha	151.8 m3/ha	60.0 m3/ha
	합계	700.6 m3/ha	835.4 m3/ha	751.1 m3/ha
탄소 저장량	HWP평균	20.0 tC/ha	28.1 tC/ha	24.1 tC/ha
	임분평균	47.7 tC/ha	35.6 tC/ha	44.4 tC/ha
	합계	67.7 tC/ha	63.7 tC/ha	68.5 tC/ha

또한 탄소저장량에서도 탄소저장량을 최적화한 대안 2가 가장 높은 것으로 나타났다(표 2 및 그림 5 참조). 이처럼 프로그램 실행결과 사용자가 선택한 경영목표에 따라 최적의 대안을 제시하는 것으로 보이며 위와 같은 결과로 볼때 본 연구에서 개발한 임분탄소 최적화 프로그램은 프로그램의 개발 목적에 부합하게 성공적으로 개발된 것으로 판단된다.

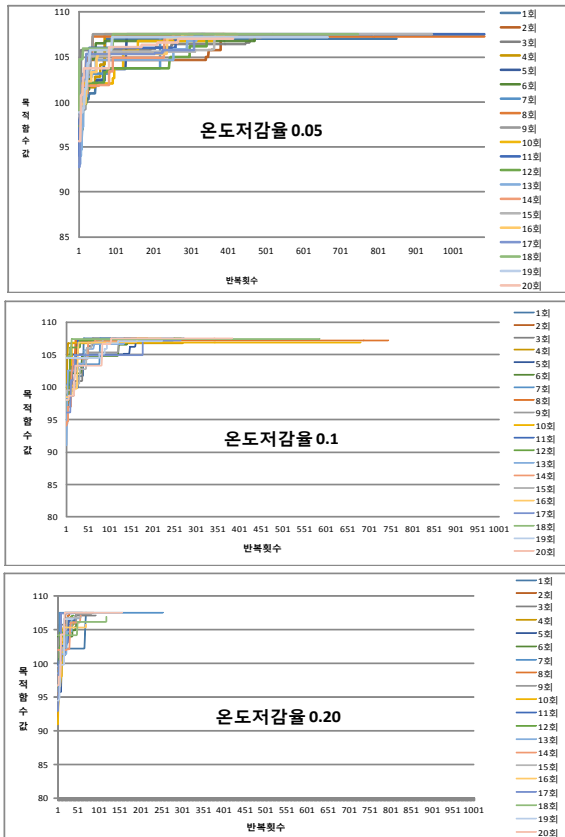


〈그림 4〉 개발된 임분탄소 최적화 프로그램의 화면 1 (fig.4) Screen of the forest carbon optimization program developed

##### 2. 열균형 테스트의 온도저감을 조정

본 연구에서는 목적 값이 로컬 옵티멈에 머무르는 현상을 해결하기 위한 임계치 적용을 위해 열균형 테스트를 이용하였다. 열균형 테스트에서 임계치값에 영향을 주는 파라미터는 온도 저감율이다. 프로그램 개발 후 프로그램의 최적 실행 조건을 설정하기 위해 온도저감율에 대하여 민감도 분석을 실시 하였다.

온도저감율을 0.2, 0.1, 0.05로 변경하여 목적함수 값과 프로그램 실행 시간에 대한 민감도 분석을 실시한 결과 온도 저감율 0.2로 설정할 경우 0.05보다 프로그램 실행 시간은 짧아졌으나 결과로 출력되는 목적함수 값이 0.1과 0.2보다 낮게 나타났다. 온도저감율을 0.05로 설정한 경우에는 프로그램 실행시간은 0.2나 0.1보다 길어졌으나 목적함수 값은 0.2보다 높은 것으로 나타났다. 한편 0.1로 온도저감율을 설정한 경우에는 프로그램 실행시간에서는 0.2로 설정했을때와 비슷하며, 출력되는 목적 값 또한 0.05의 온도 저감율과 비슷하게 나타났다. 따라서 본 프로그램에서는 사용자가 짧은 프로그램 실행시간에 최적의 목적함수 값을 얻을수 있도록 열균형 테스트에서의 온도저감율 파라미터 값을 0.1 설정하였다.



〈그림 5〉 온도저감율에 따른 목적함수값의 변화  
 (fig. 5) Temperature reduction due to changes in the objective function value

### 참고문헌

- [1] 서정호, 손영모, 이경학, 이우균, 손요환, “동적 임분생장모델을 이용한 임분 바이오매스 및 탄소흡수량 추정,” 산림바이오 에너지학회 제 24권, 제2호, 37-45쪽, 2005년.
- [2] Bettinger, P. and W. Chung, “The key literature of , and trends in, forest-level management planning in North America 1950 - 2001,” International forestry Review 6(1) : 40-50, 2004.
- [3] 박지훈, 원현규, 김영환, 김만필, “Tabu Search 휴리스틱 알고리즘을 이용한 산림경영 의사결정 지원시스템 구현,” 한국컴퓨터정보학회 논문지 제 15권, 제 10호 229-237쪽 2010년 10월.
- [4] 이성렬, COMSOAL “휴리스틱을 이용한 최적 운송경로 탐색,” 경영과학 20(1) : 141-148쪽, 2003년.
- [5] 정승주, “Hub-and-spoke 운송전략을 고려한 철도화물 서비스 네트워크디자인모형의 개발,” 대한유통학회지 22(3) : 167-177 쪽, 2004년.
- [6] 전진호, 이계성, “휴리스틱 탐색을 통한 동적시스템 분석을 위한 모델링 방법과 CRM위한 인터페이스 설계,” 한국컴퓨터정보학회논문지 제 14권, 제 4호, 179-187쪽, 2009년 4월.
- [7] 정균락, “케이블TV망에서 노드 선택을 위한 휴리스틱 연구,” 한국컴퓨터정보학회논문지 제13권, 제4호, 133-140쪽, 2008년 7월.
- [8] 이석환, 박승현, “검사공정의 작업배분을 위한 휴리스틱 알고리즘 개발,” 대한안정경영과학회지 10(3) : 253-265쪽 2008년.
- [9] 산림청, “국립산림과학원, 지속가능한 산림자원관리 표준 매뉴얼,” 289쪽, 2005년.
- [10] 김영환, 김태욱, 원현규, 이경학, 신만용. “동적 임분생장모델을 이용한 간벌시나리오별 목재수확량 예측,” 한국임학회 제 101권 제4호, 592-599쪽, 2012년.