

## Simulated Annealing 휴리스틱 기법을 이용한 임분탄소 최적화 프로그램의 개발

전 어진\*, 김영환\*, 박지훈\*\*, 김만필\*\*

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

Eu-jin Jeon \*, Young-hwan Kim \*, Ji-hoon Park \*\*, Man-pil Kim \*\*

#### 요 약

본 연구에서는 동적 임분 생장모델과 Simulated Annealing 휴리스틱 기법을 적용하여 최적의 산림사업체계를 도출하기 위한 임분탄소 최적화 프로그램을 개발하였다. SA 휴리스틱 알고리즘은 다양한 경영목표를 다룰 때 비교적 짧은 시간 내에 만족할만한 수준의 경영안을 제공할 수 있는 최적화 기법으로서, 더 이상 최적해를 찾지 못하고 목표 값이 어떤 일정한 값(Local Optimum)에 계속 머무는 현상을 해결하기 위해 열균형 테스트를 이용하고 있다. 열균형 테스트에 적용되는 온도저감율 파라미터 값이 최적화 프로세스의 목적함수 값과 반복횟수에 미치는 영향을 분석하기 위해 본 연구에서는 온도저감율에 따른 민감도 분석을 실시하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 기존의 산림경영에 주로 적용되고 있는 사업체계(베이스라인), 목재수확량 최대와 탄소저장량 최대의 3가지 산림사업 시나리오에 대해 비교 분석을 한 결과, 목재수확량 최대를 목표로 한 시나리오가 3개 시나리오 가운데 목재수확량이 가장 높은 것으로 나타났으며, 또한 탄소저장량을 최대로 하는 시나리오가 탄소저장량이 가장 높은 것으로 나타나, 본 연구에서 개발된 프로그램이 최적화된 결과를 도출하는 것으로 판단됐다. 온도저감율 파라미터 값에 대한 민감도 분석에서는 온도저감율에 따라 목적함수의 최적 값과 최적화 프로세스 반복횟수가 뚜렷한 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 개발된 임분탄소 최적화 프로그램은 앞으로 우리나라 산림의 탄소 최적화 사업체계 개발에 활용 될 것으로 기대된다.

▶ Keywords : 시뮬레이티드 어닐링, 휴리스틱, 최적화 프로그램, 탄소경영

•제1저자 : 전어진      교신저자 : 김영환

•투고일 : 2013. 10. 16.    심사일 : 2013. 11. 1.    게재확정일 : 2013. 11. 20.

\* 국립산림과학원 기후변화연구센터(Center for Forest & Climate Change, Korea Forest Research Institute)

\*\* eLC(e-Library Center)

※ 본 연구는 2009-2013년도까지 국립산림과학원에서 수행한 연구의 결과입니다.

## Abstract

In this study, we developed a program of optimizing stand-level carbon stock using a stand-level yield model and the Simulated Annealing (SA) heuristic method to derive a optimized forest treatment solution. The SA is one of the heuristic algorithms that can provide a desirable management solution when dealing with various management purposes. The SA heuristic algorithm applied 'thermal equilibrium test', a thresholds approach to solve the phenomenon that does not find an optimum solution and stays at a local optimum value during the process. We conducted a sensitivity test for the temperature reduction rate, the major parameter of the thermal equilibrium test, to analyze its influence on the objective function value and the total iteration of the optimization process. Using the developed program, three scenarios were compared: a common treatment in forestry (baseline), the optimized solution of maximizing the amount of harvest(alternative 1), and the optimized solution of maximizing the amount of carbon stocks(alternative 2). As the results, we found that the alternative 1 showed provide acceptable solutions for the objectives. From the sensitivity test, we found that the objective function value and the total iteration of the process can be significantly influenced by the temperature reduction rate. The developed program will be practically used for optimizing stand-level carbon stock and developing optimized treatment solutions.

▶ Keywords : Simulated Annealing, heuristic, optimization program ,carbon management

## I. 서 론

산림은 목재 생산, 수원함양, 자연생태계보전, 탄소저장 등 다양한 기능을 가진다. 이러한 다양한 기능을 최적화하기 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 부각되고 있다. 산림활동을 통한 탄소 배출권을 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 입분 사업체계를 예측하는 기법이 요구되고 있다.

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.

이처럼 점차 복잡해지고 다양해지는 산림경영 목표들을 효과적으로 다루기 위해 여러 수학적 기법들이 적용되어 왔으

며, 최근에는 비교적 짧은 시간 내에 만족할만한 수준의 경영안을 제공할 수 있는 휴리스틱 기법의 적용 사례가 점차 증가하고 있다.

따라서 본 연구에서는 기후변화 대응을 위해 산림의 이산화탄소 흡수, 저장량을 최적화 할 수 있도록 간벌 강도, 시기, 횡수 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. 최적화 프로그램의 개발

### 1. Simulated Annealing 휴리스틱 알고리즘

Simulated Annealing(SA)은 휴리스틱 알고리즘의 일종으로써 Kirkpatrick 등(1983)이 Monte Carlo 휴리스틱 기법을 기반으로 개발한 최적화 기법이다.

우리나라에도 최근 들어 휴리스틱 기법을 적용한 여러 사례들이 보고되고 있는데 물류운송 분야의 최적운송경로나 중간물류기지 선정을 위한 적용사례들(3),(4)과, 전기, 전자분야의 최적 네트워크망 구축을 위한 적용사례들(5),(6), 이외에도 산업분야의 작업공정개선을 위한 사례가(7) 보고된 바 있으며 산림부문에서는 산림경영 의사결정지원시스템 구현을 위한 사례(8)가 보고 된 바 있다.

SA를 적용한 최적화 프로세스는 일반적으로 그림 1과 같은 흐름의 프로세스를 거친다. 우선 임의로 초기해를 작성하고, 이 해로부터 임의의 간벌시기 및 강도를 선택하여 사업안을 수정함으로써 새로운 해를 생성하게 된다. 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 이를 가운데 최적해를 찾는 과정을 거치는데, 이때 더 이상 최적해를 찾지 못하고 목표 값이 어떤 일정한 값(Local Optimum)에 계속 머무는 현상이 나타날 수 있다. 이러한 현상을 해결하기 위해 SA 알고리즘에서는 열균형(Thermal Equilibrium) 테스트를 이용하고 있다. 열균형 테스트는 SA알고리즘의 핵심으로써 목적함수 값이 Local

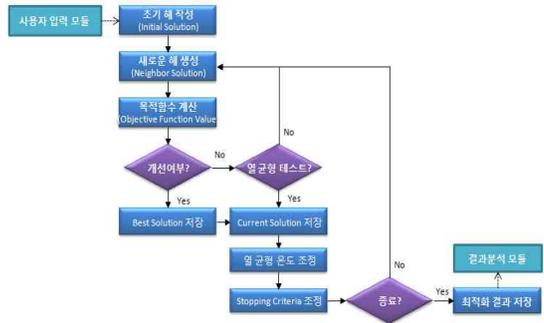


그림 1. Simulated Annealing 알고리즘 흐름도  
Fig. 1. Flowchart of Simulated Annealing algorithm

Optimum에 머무는 시간을 단축시켜 최적해(Best Solution)에 보다 빨리 도달할 수 있도록 열역학 이론인 Metropolis의 열균형 법칙을 적용한 것이다.

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

### 2. 최적화 프로그램의 설계

#### 1) 목적함수

본 프로그램에서는 사용자의 선택에 의해 목재수확량을 최대로 하는 것과 탄소저장량을 최대로 하는 2가지의 최적화가 가능하도록 하였으며 이를 위해 2개의 목적함수를 이용하였다. 임의의 사업안인 새로운 해와 최적해를 비교하는데 이용되는 목적함수 값(Objective Function Value)은 경우에 따라 다음의 수식(1), (2)에 의해 산출된다.

#### ① 목재 수확량 최대

사업기간 동안의 간벌과 주벌 등의 사업을 통해 얻어진 총 벌채량과 사업기간말의 잔존임목축적의 합을 총 목재수확량으로 하며 이를 극대화 시키도록 하였다.

#### Maximize

$$V = \sum Hi + R \dots\dots\dots(1)$$

- 여기서, V : 수확량
- Hi : 사업기간 i의 벌채량
- R : 사업기간 말 잔존임목축적

② 탄소저장량 최대

사업기간동안 수확된 목재가 목제품으로 생산된다고 가정하여 그 목제품에 저장된 평균탄소저장량과 산림의 평균탄소저장량의 합을 구하고 이를 극대화 하였다. 이때 목제품에 저장되는 탄소량은 국제 탄소상쇄표준인 VCS(Verified Carbon Standard)의 목제품 계정 방법론을 적용하여 100년간의 목제품 평균탄소저장량을 산정하였다.

Maximize

$$C = \sum Pi + \sum Si / t \dots\dots\dots(2)$$

여기서, C : 평균탄소저장량  
 Pi : 사업기간 i에 생산된 HWP의 평균탄소저장량  
 Si : 사업기간 i의 임분탄소저장량  
 t : 사업기간

2) 초기해 작성 모듈

초기해(Initial Solution)을 작성하고, 작성된 초기해로부터 새로운 해를 작성하여 목적함수 값을 비교하여 최적해로 저장하는 프로세스는 SA 휴리스틱 알고리즘의 중요한 부분이라고 할 수 있다.

먼저 임의로 간벌 사업안을 작성하여 초기해(Initial Solution)로 설정하고, 초기해의 목적함수 값을 계산하여 최적해와 현재해로 저장한다(그림 2).

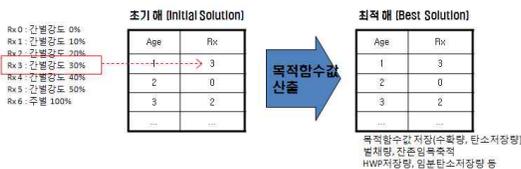


그림 2. 초기해 생성 및 목적함수 값 계산  
 Fig. 2. The generation of the initial solution

3) 새로운 해 생성 모듈

기존 해로부터 임의의 간벌시기와 간벌강도를 선택하여 사업안을 수정함으로써 새로운 해를 생성하게 된다(그림 3). 본 연구에서는 새로운 해 생성 시, 현실적인 사업여건을 고려하여 5가지 제한조건을 두었다. 사업이 시작된 후 10년생이 되기 이전에는 간벌을 시행 할 수 없도록 하였고, 이후의 간벌 주기는 최소 10년 이상, 최대 간벌 횟수는 3회로 제한하였다. 또한 벌기령은 기존의 법정 벌기령에서 ±10년 범위 내외로

결정하고, 최종 간벌과 벌기령의 간격은 최소 10년 이상으로 제한하였다.

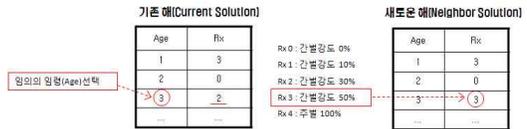


그림 3. 새로운 해 생성  
 Fig. 3. The generation of the neighboring solution

4) 목적함수 값의 계산 및 최적 해와의 비교

위 과정으로 생성된 새로운 해의 목적함수 값(목재수확량 혹은 탄소저장량)을 계산하고 기존 최적 해의 목적함수 값과 비교하는 과정을 거치게 된다. 새로운 해의 목적함수 값이 기존 최적해 보다 큰 경우(개선)에는 이 해를 새로운 최적해 및 현재 해로 저장하게 되고, 새로운 해의 목적함수 값이 기존 최적해 보다 작은 경우(비개선)에는 열균형 테스트를 시행하여 수락/누락 여부를 결정하게 된다(그림 4).

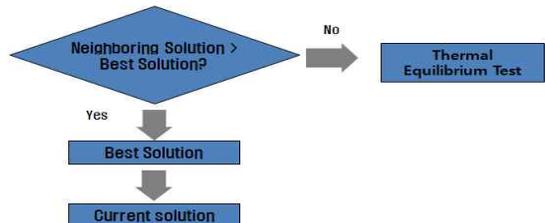


그림 4. 새로운 해와 최적해의 목적함수 값 비교  
 Fig. 4. The comparison of objective function value

5) 열균형 테스트 모듈

휴리스틱기법은 최적 해의 목적함수 값이 어떤 Local Optimum 값에 오랫동안 머무르지 않고 보다 빨리 최적해(Global Optimum)에 도달할 수 있도록, 새로운 해가 종전에 저장된 해보다 개선되지 않았더라도 일정 범위 내에서 수락하도록 임계치(Threshold)를 적용한다. SA기법에서는 열균형 테스트를 통해 임계치를 적용한다.

열균형 테스트에서는 우선 0-1사이의 임의의 확률(p(θ))을 결정하고, 이를 수식(3)으로 구한 열균형 확률(p(ΔE))과 비교한다. 임의의 확률이 열균형 확률보다 작은 경우(p(ΔE))p(θ)에는 새로운 해를 수락하고 온도 T를 일정비율로 저장하고, 반면 임의의 확률이 열균형 확률과 같거나 큰 경우(p(ΔE))<p(θ)에는 새로운 해를 누락하고 온도 T를 유지한다. 따

라서 새로운 해의 목적함수 값이 기존 최적 해와 가까울수록, 즉 ΔE 값이 작을수록 새로운 해가 수락될 확률이 높아진다.

$$P(\Delta E) = \exp \frac{(-\Delta E)}{kT} \dots\dots\dots (3)$$

여기서, P(ΔE): 열균형확률  
 ΔE: 에너지변화량  
 k: Boltzmann 상수  
 T: 온도

6) 최적화 프로세스 종료 및 저장

앞서 설명된 최적화 프로세스는 일정한 종료기준에 도달하기 전까지 반복 시행되는데, 본 연구에서는 최대반복횟수와 열균형 온도의 두 가지 종료기준을 적용하였다. 프로세스가 1회 진행되고 나면 열균형 온도를 조정하고 총 반복횟수를 1회 증가시키게 된다. 최적화 프로세스의 총 반복횟수(Total Iteration)가 주어진 최대 반복횟수에 도달하는 경우, 혹은 열균형 온도(가 최저 온도에 도달하는 경우) 최적화 프로세스가 종료되며 마지막으로 저장된 최적해의 정보를 저장하게 된다(그림 5).

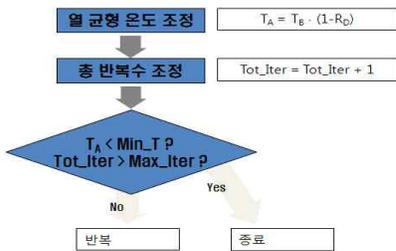


그림 5. 종료기준 조정 및 검사  
 Fig. 5. Check and Adjustment of exit criteria

는 새로운 해를 나타낸다. 각각의 해들은 비교 및 열균형 테스트를 통해 조건에 따라 교체되며 최적해 해를 탐색하게 된다.

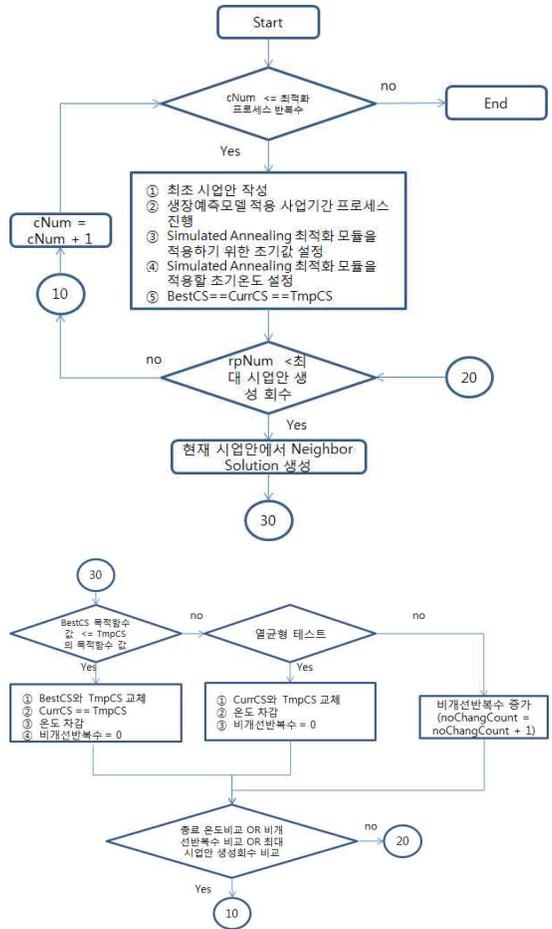


그림 6. 최적화 프로세스의 흐름도  
 Fig. 6. Optimization process of flowchart

III. 결과

1. Simulated Annealing 시뮬레이터 구현

SA 시뮬레이터를 구현하기 위해 프로세스 진행을 위한 입분 자료 입출력모듈, 입분 생장 예측모듈, 벌채 시나리오 적용모듈, SA 최적화 모듈 등을 각각의 객체로 설계하였다. 그림 6은 SA 휴리스틱 알고리즘에 따른 최적화 프로세스의 흐름도로 흐름도 내의 BestCS는 최적 해, CurrCS는 현재 해, TmpCS

아래는 최적화 프로세스를 구현한 모듈이며 .Net4.0 프레임워크 기반으로 구현하였다.

```
// 최적화 프로세스에 사용할 옵션
otOption = OptimizerOptions.CreateInstance();

// 최적화 프로세스에 사용할 옵션중에서 초기온도 설정
otOption.SetTemperature();

// 최적화프로세스를 여러번 반복했을때 제일 좋은 것을 찾기 위한 임시저장
CutScenario ComparCS = new CutScenario();

// 최적화 프로세스의 시작부분으로 최적화 프로세스의
```

```

최대반복횟수만큼 진행한다
for (int cNum = 1; cNum <=
otOption.GettotalProgressNum(); cNum++)
{ // 휴리스틱 알고리즘 중 imulated Annealing
  최적화 모듈을 적용하기 위한 부분
  CutScenario InitCS = new CutScenario();
  CutScenario BestCS = new CutScenario();
  CutScenario CurrCS = new CutScenario();
  CutScenario TmpCS = new CutScenario();

// 최초 시업 시나리오를 작성한다
  InitCS.InitScenario(opEnvdata);
  InitCS.SetSi(opEnvdata.GetSi());
  InitCS.SetTreeName(opEnvdata.GetTrVName());
  InitCS.SetName();

// 생장예측모델이 적용한 사업기간
  tsProcess.Progress3(InitCS);

// Simulated Annealing 최적화 모듈을 적용하기 위한 초기값 설정
  BestCS.CopyAllProperty(InitCS);
  CurrCS.CopyAllProperty(InitCS);
  TmpCS.CopyAllProperty(InitCS);

// Simulated Annealing 최적화 모듈을 적용할 초기온도 설정
  otOption.SetTemperature();

// 최적화 모듈을 적용된 최대사업안 생성횟수만큼 반복 진행
for (rpNum = 0; rpNum <
otOption.GetEndRepeatNumber(); rpNum++)
{ // 쓰레드로 동작하므로 취소 이벤트가 발생하면
  프로세스를 중단하기 위한 부분
if(backgroundWorker1.CancellationPending == true)
{ break }

// 현재사업안에서 Neighbor Solution 생성단계
  TmpCS.CopyAllProperty(CurrCS);
  TmpCS.NeighborScenario(opEnvdata);
// Neighbor Solution으로 생장예측모델 진행
  tsProcess.Progress3(TmpCS);

// Neighbor Solution으로 생장예측모델값과 Best Solution의
  생장예측모델값 비교
if (BestCS.GetOFV(numVal) <= mpCS.GetOFV(numVal))
{ // Neighbor Solution 값이 좋아 Neighbor
  Solution을 Best Solution으로설정
  BestCS.CopyAllProperty(TmpCS);
  BestCS.SetName();
  CurrCS.CopyAllProperty(TmpCS);
  CurrCS.SetName();
  otOption.DecreaseTemperature();
  noChangCount = 0;
} else {
  // Best Solution 값이 좋아 열균형 테스트
  deltaE = BestCS.GetOFV(numVal) -
  TmpCS.GetOFV(numVal);
  comparProb = Math.Exp(-deltaE /
  (otOption.GetKValue() * otOption.GetTemperature()));
  tmpProb = otOption.GetTmpProb();
  
```

```

// 수용여부를 결정
if (comparProb > tmpProb) { // 수용
  CurrCS.CopyAllProperty(TmpCS);
  CurrCS.SetName();
  otOption.DecreaseTemperature();
  noChangCount = 0;
} else {
// 비개선 사업안 생성회수 증가
  noChangCount += 1;
}
}

// Simulated Annealing 최적화 모듈종료 조건
if (otOption.GetMinimumTemperature() >
otOption.GetTemperature() || noChangCount >=
otOption.GetCurRepeatNumber() || rpNum ==
otOption.GetEndRepeatNumber())
{
  progressFile.Flush();
  progressFile.Close();
  break
}
}

BestCS.SetName();
// 최적화 모듈의 best Solution과 비교
if (BestCS.GetOFV(numVal)
ComparCS.GetOFV(numVal))
{
  bestIndex = cNum;
  ComparCS.CopyAllProperty(BestCS);
}
}
  
```

그림 7은 위의 모듈을 이용하여 개발된 프로그램의 모습이다.

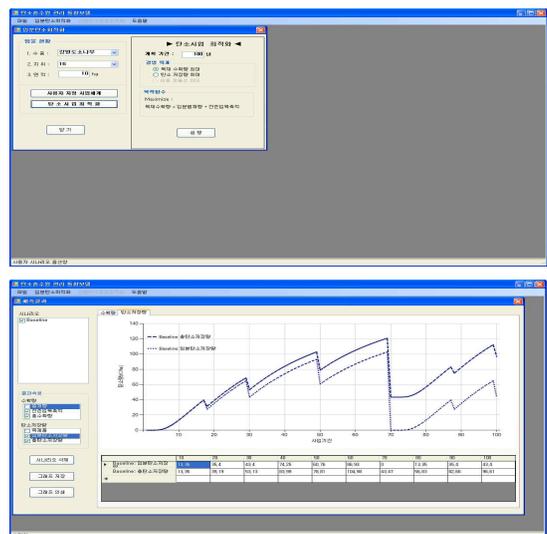


그림 7. 개발된 임분탄소 최적화 프로그램의 화면  
 Fig. 7. Screen of the forest carbon optimization program developed

2. 프로세스의 효율성 및 안정성

SA 알고리즘에서는 목적 값이 Local Optimum에 머무르는 현상을 해결하기 위한 임계치 적용을 위해 열균형 테스트를 이용한다. 열균형 테스트에서 임계치 값에 영향을 주는 파라미터는 온도저감율이다. 본 연구에서는 프로그램 개발 후 프로세스의 최적 실행을 위한 온도저감율의 파라미터 값을 결정하기 위해 온도저감율을 0.05, 0.1, 0.2로 설정하여 온도저감율이 목적함수 값과 반복횟수에 미치는 영향에 대하여 민감도 분석을 실시하였다.

위와 같이 온도저감율을 0.05, 0.1, 0.2로 하여 반복횟수와 목적함수 값을 비교 분석한 결과(그림 8)를 볼 때, 온도저감율 0.2로 설정할 경우 반복횟수는 적어 프로그램 실행 시간은 짧아졌으나 결과로 출력되는 목적함수 값이 0.1과 0.2보다 상대적으로 낮게 출력되는 것으로 나타났다. 반면 온도저감율을 0.05로 설정한 경우에는 목적함수 값이 3가지의 경우 중 최상으로 나왔으나 프로그램 실행시간이 0.2나 0.1보다 오래 걸리는 것으로 분석되었다.

따라서 본 연구에서는 프로그램의 효율성 및 안정성을 모

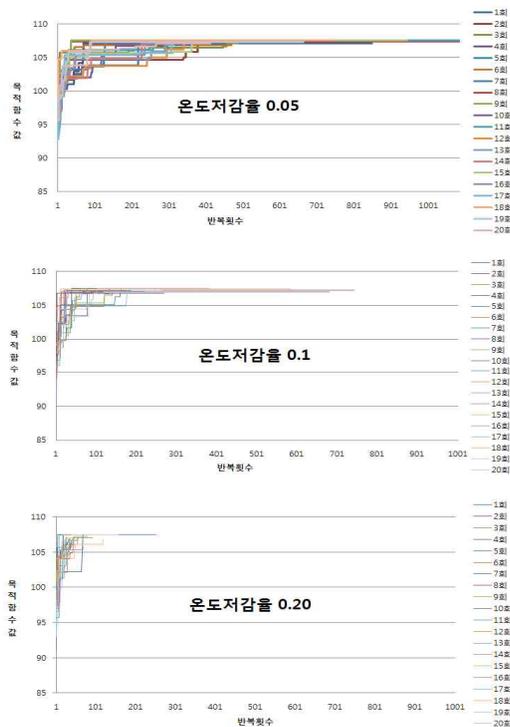


그림 8. 온도저감율에 따른 반복횟수와 목적함수 값의 변화  
 Fig. 8. Temperature reduction due to changes in the objective function value and iteration

두 고려하여 프로그램의 사용자가 비교적 짧은 프로그램 실행 시간 안에 최적의 목적함수 값을 얻을 수 있도록 열균형테스트의 온도저감율 파라미터 값을 0.1로 설정하였다.

3. 최적 시업체계별 예측결과 비교(개발 결과)

본 연구에서는 개발된 프로그램을 이용하여 3가지 산림 시업 시나리오에 대한 비교 분석을 실시하였다. 우선 베이스라인 시나리오로 기존 산림경영에서 주로 참고하는 '지속가능한 산림자원관리 표준 매뉴얼(9)'의 시업체계를 적용하여 목재수확량 및 탄소저장량을 산출하였다. 또한 본 연구에서 개발된 프로그램을 이용하여 목재수확량 최적화를 위한 시업체계(대안 1)와 탄소저장량 최적화를 위한 시업체계(대안 2)를 구하고, 각각에 대한 목재수확량과 탄소저장량을 베이스라인 시나리오와 비교하였다.

그 결과 목재수확량의 경우 목재수확량을 최대를 목표로 한 대안 1이 3개 시나리오 가운데 목재수확량이 가장 높은 것으로 나타났으며(표 1 및 그림 8), 또한 탄소저장량에서도 탄소저장량을 최적화한 대안 2가 가장 높은 것으로 나타났(표 1 및 그림 9).

표 1. 목재수확량 및 탄소저장량의 비교 - 강원지방소나무 예시  
 Table 1. The Comparison of timber yield and carbon storage

구분		베이스라인 (기존시업체계)	대안 1 (목재수확량최대)	대안 2 (탄소저장량최대)
목재 수확량	벌채량	584.4 m <sup>3</sup> /ha	683.6 m <sup>3</sup> /ha	691.1 m <sup>3</sup> /ha
	잔존입목	116.2 m <sup>3</sup> /ha	151.8 m <sup>3</sup> /ha	60.0 m <sup>3</sup> /ha
	합계	700.6 m <sup>3</sup> /ha	<b>835.4 m<sup>3</sup>/ha</b>	751.1 m <sup>3</sup> /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	<b>68.5 tC/ha</b>

프로그램 실행결과 사용자가 선택한 경영목표에 따라 최적의 대안을 제시하는 것으로 보이며 위와 같은 결과로 볼 때 본 연구에서 개발한 임분탄소 최적화 프로그램은 프로그램의 개발 목적에 부합하게 최적화된 결과를 도출하는 것으로 판단된다.

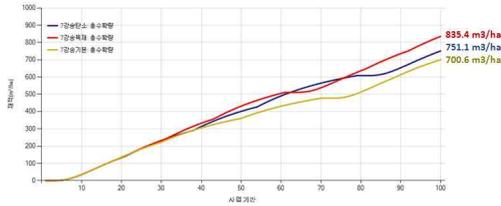


그림 9. 시나리오별 목재수확량의 비교 - 강원지방소나무 예시  
 Fig. 9. Comparison of timber yield by scenarios - Pinus densiflora in Gangwon regional

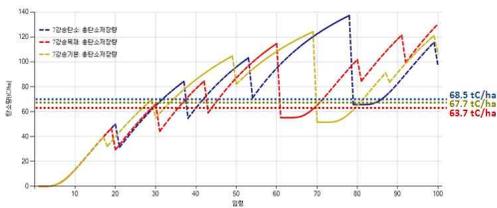


그림 10. 시나리오별 탄소저장량의 비교 - 강원지방소나무 예시  
 Fig. 10. Comparison of carbon storage by scenarios - Pinus densiflora in Gangwon regional

#### IV. 결론

본 연구에서는 기후변화 대응을 위해 산림의 이산화탄소 흡수, 저장량을 최적화 할 수 있도록 다양한 경영목표 및 제한조건들을 고려하여 임분 시업체계를 도출할 수 있는 프로그램을 개발하고자 하였다. 이를 위해 임분 생장모델과 SA 휴리스틱 기법을 적용하여 탄소저장량을 최적화 할 수 있는 임분 단위의 산림탄소 최적화 프로그램을 개발하였다.

먼저 SA 알고리즘의 논리적 흐름을 분석하여 여러 세부 모듈을 설계하였고, 개발된 프로그램의 효율성과 안정성을 확보하기 위하여 열균형 테스트의 온도저감을 파라미터 값이 목적함수 값과 반복수에 미치는 영향에 대하여 민감도 테스트를 실시하였다. 그 결과 목적함수 값과 반복수 모두 온도저감에 따라 차이가 나는 것으로 나타났다. 이 결과를 바탕으로 본 연구에서는 프로그램의 안정성과 효율성 모두를 고려하여 열균형 테스트의 온도저감을 파라미터 값을 0.1로 결정하여 적용하였다.

개발된 최적화 프로그램은 주어진 경영목표를 만족시키는 경영안을 제공하는 것이 가능하였다. 목재수확량 최대를 최대 로 설정한 경우 3가지 시나리오 중 목재 수확량이 높은 시업 체계를 제시했으며, 탄소저장량 최대로 하는 최적화를 설정한 경우에는 시나리오 중 탄소저장량이 가장 높은 시업체계를 제시하였다.

본 연구를 통해 개발된 임분탄소 최적화 프로그램은 산림 경영 담당자들과 산주들이 탄소흡수량을 증대시키기 위한 시업체계를 결정할 때 활용할 수 있을 것으로 기대 된다. 한편 이 프로그램은 개별 임분 단위에서 탄소흡수량을 최적화 하여 보여주는데, 현실에서는 다수의 임분을 대상으로 산림계획을 수립하게 된다. 따라서 본 연구에서 개발된 프로그램을 토대로 다수의 임분을 대상으로 탄소흡수량을 최적화 할 수 있는 프로그램의 개발이 가능할 것으로 기대 된다.

#### 참고문헌

- [1] jsseo, "The Estimation of Stand Biomass and Net Carbon Removals Using Dynamic Stand Growth Model," Korea Forest Bioenergy Society, Vol. 24, NO. 2, pp.37-45, 2005.
- [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] sylee, "Applying the COMSOAL heuristic to the Optimal Vehicle Routing Selection," The Korean Operations Research and Management Science Society, Vol. 20, No. 1, pp. 141-148, 2003.
- [4] sijeung, "A Service Network Design Model for Rail Freight Transportation with Hub-and-spoke Strategy," Korean Society of transportation, Vol. 22, No. 3, pp. 167-177, 2004.
- [5] jhjeon, "A Modeling Methodology for Analysis of Dynamic Systems Using Heuristic Search and Design of Interface for CRM," Korea Society of Computer and Information, Vol. 14, No. 4, pp.179-187, Apr. 2009.
- [6] krchong, "Heuristics for Selecting Nodes on Cable TV Network," Korea Society of Computer and Information, Vol. 13, No. 4, pp.133-140, July, 2008.
- [7] shlee, "Heuristic algorithm to assign job in inspection process," Korea Safety Management & Science, Vol. 10, No. 3, pp 253-265, 2008.
- [8] jhpark, "Development of a decision supporting system for forest management based on the Tabu

Search heuristic algorithm,” Korea Society of Computer and Information, Vol. 15, NO. 10, pp. 229-237 Oct. 2010.

- [9] Korea Forest Service, “Korea Forest Research Institute, Sustainable forest resource management standard manual,” pp. 289, 2005.

### 저자 소개



#### 전 어 진

2006: 국민대학교 산림자원학과 학사.  
 2008: 국민대학교 산림자원학과 석사.  
 현 재: 산림청 국립산림과학원  
 기후변화연구센터  
 관심분야: 산림경영, 산림탄소경영  
 Email : camanagement@forest.go.kr



#### 김 영 환

1996: 경희대학교 임학과 학사  
 1998: 국민대학교 산림자원학과 석사  
 2006: Oregon State University  
 산림자원학과 박사  
 현 재: 산림청 국립산림과학원  
 기후변화연구센터  
 관심분야: 산림탄소경영, 산림모델링  
 Email : kyhpeniel@forest.go.kr



#### 박 지 훈

2004: 강원대학교 컴퓨터과학과 석사  
 2008: 강원대학교 컴퓨터과학과 박사  
 현 재: eLC  
 관심분야: 운영체제, 시스템보안,  
 시스템프로그래밍  
 Email : if93014@nate.com



#### 김 만 필

2003: 강원대학교 컴퓨터과학과 석사  
 2009: 강원대학교 컴퓨터과학과 박사  
 현 재: eLC  
 관심분야: GIS, 이미지 프로세싱,  
 시스템프로그래밍  
 Email : unclekim@nate.com