

## Tabu Search 휴리스틱 알고리즘을 이용한 산림경영 의사결정지원시스템 구현

박지훈\*, 원현규\*\*, 김영환\*\*, 김만필\*

### Development of a decision supporting system for forest management based on the Tabu Search heuristic algorithm

Ji-hoon Park\*, Hyun-kyu Won\*\*, Young-hwan Kim\*\*, Man-pil Kim\*

#### 요약

최근 산림경영의 목표가 다양해지고 환경적인 기능을 고려한 공간적인 요소들이 고려되는 등 경영계획을 수립하는 것이 점차 복잡해지고 있다. 따라서 다양한 목표와 조건을 만족시킬 수 있는 최적화 경영기법의 개발이 요구되고 있다. 본 연구에서는 복잡한 경영목표를 다루거나 공간적인 인자들을 다루는데 효과적인 Tabu Search(TS) 휴리스틱 알고리즘을 이용하여, 최적화된 경영계획을 수립할 수 있도록 산림경영 의사결정지원시스템을 개발하였다. 이를 위해 TS 알고리즘의 논리적 흐름을 분석하여 여러 세부 프로세스를 설계하였다. 또한 시스템의 효율성을 높이기 위해서, 각 세부 프로세스의 운영시간 및 작업부하를 최소화하고 시스템 자원의 활용을 극대화하기 위한 방안들을 검토하였다. 이를 토대로 본 연구에서는 TS 알고리즘의 논리적 흐름을 일부 변형한 모델과 원형 알고리즘에 기반한 모델을 적용하여 최적화 모델링을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 그 결과 본 연구를 통해 개발된 의사결정시스템은 주어진 경영목표 및 제한조건을 만족시키는 해를 제공하는 것이 가능하였으며, 특히 변형된 TS 알고리즘을 적용하는 경우 보다 안정적인 최적화 모델링이 가능한 것으로 나타났다. 앞으로 우리나라 산림의 최적화된 경영계획을 수립하는데 본 연구에서 개발된 의사결정시스템의 활용이 가능할 것으로 기대된다.

#### Abstract

Recently, forest management objectives become more complex and complicated, and spatial constraints were necessarily considered for ecological stability. Now forest planning is required to provide an optimized solution that is able to achieve a number of management objectives and constraints. In this study, we developed a decision supporting system based on the one of dynamic planning techniques, Tabu Search (TS) heuristic algorithm, which enable one to generate an optimized solution for given objectives and constraints. For this purpose, we analyzed the logical flow of the algorithm and designed the subsequence of processes. To develop a high-performance computing system, we examined a number of strategy to minimize execution time and workloads in each process and to maximize efficiency of using system resources. We examined two model based on the original TS algorithm and revised version of TS algorithm and compared their performance in optimization process. The results showed high performance of the developed system in providing

• 제1저자 : 박지훈    교신저자 : 김영환

• 투고일 : 2010. 05. 28, 심사일 : 2010. 06. 08, 게재확정일 : 2010. 07. 06.

\* 강원대학교 컴퓨터과학과    \*\* 국립산림과학원 탄소경영연구과

※ 본 연구는 2007-2009년도까지 국립산림과학원과 공동으로 수행한 연구의 결과입니다.

feasible solutions for several management objectives and constraints. Moreover, the revised version of TS algorithm was appeared to be more stable for providing results with minimum variation. The developed system is expected to use for developing forest management plans in Korea.

▶ Keyword : 타부 서치(Tabu Search), 휴리스틱(Heuristic), 산림경영(forest management), 의사결정지원시스템

## I. 연구배경 및 목적

목재생산, 수원함양, 자연생태계보전 등 산림이 가지는 다양한 기능을 최적화하기 위해서는 주어진 자원을 시공간적으로 적절히 배분하고 활용하는 것이 필요하다. 특히 최근에는 산림의 생태적 지속가능성을 유지하기 위해 벌채가 이루어지는 경영단위들의 크기 및 인접거리를 제한하는 등, 다양한 공간적인 제한조건들이 제시되고 있다. 따라서 이러한 다양한 경영목표 및 공간적 제한조건들을 고려하여 최적화된 산림경영계획을 수립할 수 있는 경영 모델링 기법이 요구되고 있다.

경영 모델링에서 공간적 인자들을 다루는 접근법으로는 일반적으로 외부 접근법(exogenous approach)과 내부 접근법(endogenous approach)의 두 가지를 들 수 있다[1]. 외부 접근법은 최적화 프로세스 밖에서, 즉 최적화 프로세스를 수행하기 이전에 전체 경영단위들에 대해서 공간적 제한조건을 검사하는 접근법이다. 예를 들어 생태보전산림의 경우 산림경영활동이 원천적으로 규제되므로, 최적화 프로세스를 수행하기 전에 미리 전체 경영단위를 대상으로 해당여부를 검사하는 것이다. 따라서 최적화 프로세스에서는 보전산림에 해당되는 경영단위를 제외한 나머지 경영단위를 대상으로 사업대상지를 선정하게 된다. 반면 내부 접근법은 최적화 프로세스 내에서 공간적인 제한조건들을 검사하는 것으로서, 주로 사업대상지로 선정된 경영단위들 간의 공간적인 관계를 다루기 위한 접근법이다. 예를 들어 개벌(clear-cutting)이 이루어지는 사업대상지들의 시공간적인 연속성이나 인접거리 등을 제한조건으로 다루는 경우에 해당된다. 최적화 경영 모델링의 전통적 기법인 선형계획법 및 정수계획법은 주로 외부 접근법을 이용하여 공간적 제한조건들을 다루어 왔으며, 내부 접근법을 적용하는 데에는 한계를 보여 왔다. 따라서 최근에는 내부 접근법을 이용하여 공간적인 제한조건들을 다루는데 효과적인 휴리스틱(Heuristic) 기법이 많이 적용되고 있다.

지난 반세기동안 산림경영 모델링 분야에서는 대단위 산림면적의 경영계획 수립을 위한 연구기술 개발에 많은 노력을 기울여왔다. 전통적으로 이용되어 온 선형계획법을 비롯하여, 정수계획법, 목표계획법(Goal Programming) 등 여러 수학적 기법들이 개발되어 산림경영 모델링에 적용되어 왔다.

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 다목적경영을 위한 모델링기법으로 목표계획법이 많이 적용되었다. 1980년대에는 벌채 등 경영활동의 영향을 다루기 위해 정수계획법, 휴리스틱 기법, 시뮬레이션 기법 등 다양한 기법들이 적용되기 시작했다. 1990년대에 들어서는 산림경영활동의 시공간적인 최적화 및 야생동물 서식지의 공간적 분포 등을 경영목표로 고려하기 위해 휴리스틱 기법을 적용한 사례들이 두드러지게 증가하였다.

이처럼 지난 50년간 점차 복잡해지고 다양해지는 산림경영 목표들을 효과적으로 다루기 위해 여러 수학적 기법들이 적용되어왔으며, 최근에는 비교적 짧은 시간 내에 만족할 만한 수준의 경영안을 제공할 수 있는 휴리스틱 기법의 적용사례가 점차 증가하고 있다. 하지만 공간적 제약조건이 고려되지 않는 경우나 비교적 단순한 형태의 경영목표를 최적화하는 경우에는 선형계획법이 여전히 강점을 보이고 있다.

본 연구에서는 지속가능한 산림경영을 위해 요구되는 여러 경영목표와 공간적인 제한 조건들을 종합적으로 고려할 수 있는 의사결정지원시스템을 개발하고자 하였으며, 이를 위해 Tabu Search (TS) 휴리스틱 알고리즘을 적용하였다. 또한 보다 효율적인 시스템의 개발을 위해 TS 알고리즘의 흐름을 일부 변형하였으며, 변형된 모델의 효율성을 검증하기 위해서 기본 알고리즘을 적용한 모델과 비교·분석하였다.

## II. 의사결정시스템의 개발

### 1. Tabu Search 휴리스틱 알고리즘

Tabu Search(TS)는 휴리스틱 알고리즘의 일종으로, Glover(1989, 1990)에 의해 처음 소개되었으며[3][4][5], Salesman Problem, Flow Shop Problem, Quadratic Assignment Problem 등 다양한 모델링 문제를 해결하는데 강점을 보여 왔다. 산림경영 분야에는 1990년대 중반부터 적용 사례들이 보고되고 있다[6][7][8].

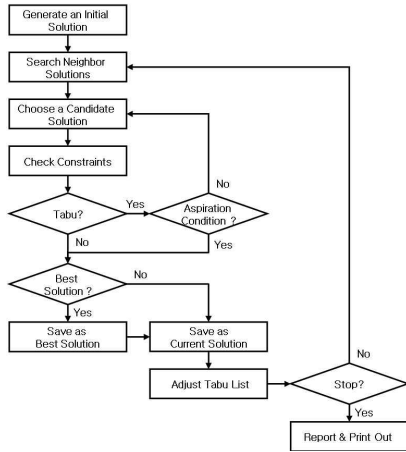


그림 1. 타부서치 알고리즘원형의 흐름도  
 Fig. 1. Flowchart of original Tabu Search algorithm

우리나라에도 최근 들어 휴리스틱 기법을 적용한 여러 사례들이 보고되고 있는데, 물류운송 분야의 최적운송경로나 중간물류기지 선정을 위한 적용 사례들과[9][10], 전기·전자분야의 최적 네트워크 망 구축을 위한 적용 사례들이[11][12] 보고되었으며, 이외에도 산업분야의 작업공정 개선을 위한 사례가[13] 보고된 바 있다. 산림경영 분야에는 아직까지 적용된 사례가 없으며, 특히 사용자의 의사결정을 지원할 수 있는 시스템으로 상용화 된 사례는 매우 드문 실정이다.

TS을 적용한 최적화 프로세스는 일반적으로 그림 1과 같은 흐름의 프로세스를 거친다. 우선 임의의 초기안(Initial Solution)을 작성하고, 이 초기안을 토대로 각 경영단위에 적용되는 사업에 변화를 주어 여러 인접안(Neighbor Solution)들을 작성한다. 작성된 인접안 가운데 가장 우수한 안을 후보안(Candidate Solution)으로 선택하고 이 후보안을 기존의 최적인(Best Solution)과 비교하여 개선되었으면 저장하고 그렇지 않을 경우에는 누락시킨다.

휴리스틱 알고리즘은 일반적으로 일정 횟수동안 임의의 후보안을 작성하고 이들 가운데 최적인을 찾는 과정을 거치는데, 이때 더 이상 최적인을 찾지 못하고 목표 값이 어떤 일정한 값(Local Optimum Value)에 계속 머무는 현상이 나타날 수 있다. 이러한 현상을 해결하기 위해 TS 알고리즘에서는 Tabu List라는 빈도 메모리(Recency Based Memory)를 이용하고 있다[5]. 즉 최적으로 선택된 후보안을 Tabu로 정의하여 Tabu List에 그 정보를 저장하고, 일정 시간동안 이 후보안이 반복적으로 선택되는 것을 막는 것이다.

또한 TS에서는 Tabu로 정의된 후보안의 경우에도 새로운 최적인을 생성하는 경우(열망조건, Aspiration Condition)에는 예외적으로 선택될 수 있도록 탐색의 유연성을 보장하고 있다.

이처럼 임의의 후보안으로부터 최적인을 찾는 과정을 반복적으로 수행하다가 후보안을 작성하는 횟수가 제한된 총 반복수에 도달하거나, 혹은 더 이상 최적인을 탐색하지 못하고 제한된 비개선 반복수에 도달하는 경우, 전체 프로세스가 종료되고 결과가 출력된다.

2. 의사결정시스템의 설계

1) 목적함수

작성된 후보 안들과 최선 안을 비교하는데 이용되는 목적함수 값(Objective Function Value)은 다음의 수식(1)에 의해 산출된다.

Minimize  
 $Z = W_1 \times H_{GAP} + W_2 \times H_{COST} \dots\dots\dots (1)$

- 여기서, Z: 목적함수 값
- W<sub>1</sub>, W<sub>2</sub>: 목적함수에 대한 가중치
- H<sub>GAP</sub>: 목표수확량과 실제 수확량과의 편차
- H<sub>COST</sub>: 총 벌채수확 비용

H<sub>GAP</sub>은 분기별로 목표로 하는 벌채수확량과 실제 수확량과의 편차를 구한 뒤 이를 합산한 값이다. 목표수확량은 사용자 입력으로부터, 실제 수확량은 사업대상지로 선택된 경영단위에서 벌채되는 재적으로부터 합산된다. 따라서 H<sub>GAP</sub>은 다음의 수식(2)에 의해 계산된다.

$H_{GAP} = \sum_{i \in I} (\sum_{j \in J} H_{ij} - T) \dots\dots\dots (2)$

- 여기서, i : 사업분기에 대한 index
- j : 경영단위의 index
- H<sub>ij</sub> : 사업분기 i에 경영단위 j로부터 수확되는 재적
- T: 목표수확량
- I : 총 사업분기(10년)
- J : 사업대상지로 선택된 경영단위

수식(1)의 목적함수식에서 총 벌채수확 비용, H<sub>COST</sub>는 사업대상지로 선택된 경영단위에서 벌채를 시행하는데 소요되는 비용의 총 합계로서 다음의 수식(3)에 의해 계산된다.

$H_{COST} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij} \dots\dots\dots (3)$

- 여기서, C<sub>ij</sub> : 사업분기 i에서 경영단위 j의 벌채비용

최적화 프로세스에서는 위 수식들에 의해 산출된 후보안들의 목적함수 값을 최적인의 목적함수 값과 비교하고, 더 낮은 목적함수 값을 제공하는 안을 최적인으로 저장한다.

2) 인접안 작성 및 후보안의 검색

인접안(Neighboring Solution)을 작성하고, 작성된 인접안들로부터 후보안(Candidate Solution)을 검색하는 프로세스는, TS 휴리스틱 알고리즘의 핵심적인 부분이다. 인접안은 주어진 현재안(Current Solution)를 토대로 각 경영단위별로 적용되는 사업 유형에 변화를 줌으로써 작성된다. 최초 인접안 작성 시에는 현재안이 존재하지 않으므로 임의의 현재안을 만든 후 인접안을 작성한다.

벌채수확을 위해 각 경영단위에 적용되는 사업(Rx)은 그 강도에 따라 강도, 중도, 약도, 개별 등으로 유형이 구분된다. 최적화 프로세스에서는 현재안을 토대로 하나 혹은 두개 경영단위의 사업유형을 변화시킴으로써 인접안을 작성하게 된다. 따라서 현재안로부터 다수의 인접안을 작성하는 것이 가능하다. 작성된 다수의 인접안들에 대해서는 목적함수 값을 계산하여 임의의 메모리에 해당정보를 저장한다.

일정한 수의 인접안들이 작성되고 나면, 인접안들의 목적함수 값을 검색하여 가장 작은 값을 제공하는 인접안을 후보안(Candidate Solution)으로 선택한다(그림 2).

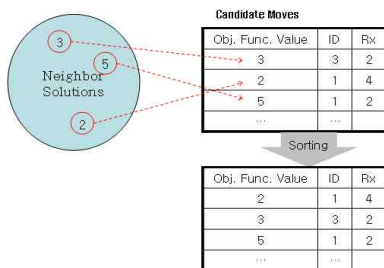


그림 2 인접안 검색  
Fig. 2 Searching neighbor solutions

3) 제한조건의 검사

선택된 후보안에 대해서는 공간적 제한조건에 대한 검사를 시행하게 된다. 본 연구에서는 산림청의 '지속가능한 산림자원 관리 표준매뉴얼'[14]에 따라, 개별작업이 시행되는 경영단위들의 크기를 5ha 이하로 제한하고, 개별작업이 시행되는 경영단위들의 거리도 최소한 20m 이상을 유지하도록 제한하였다.

이러한 공간적 제한조건의 검사를 위해 그림 3과 같이 각 경영단위별로 중심점(Centroid)를 구성하는 원의 반지름을 구하고, 이를 다음의 수식(4)에 적용하여 제한조건에 대한 검사를 수행하였다. 선택된 후보안이 수식(4)의 조건을 만족시키는 경우에는 다음 단계로 진행되며, 만족시키지 못하는 경우에는 제한조건을 만족시키는 다른 인접안을 후보안으로 선택한다.

$$C_{Dist} \geq Skid_{Dist1} + Skid_{Dist2} + 20 \dots\dots\dots (4)$$

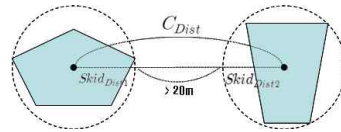


그림 3. 공간적 제약조건  
Fig. 3. Spatial constraint

4) 최적안과의 비교

제한조건 검사를 통해 최종적으로 후보안이 선택되고 나면, 선택된 후보안을 최적안(Best Solution)과 비교하게 된다. 선택된 후보안이 기존 최적안보다 개선된 경우, 즉 후보안의 목적함수 값이 기존 최적안보다 낮은 경우 이 후보안을 새로운 최적안으로 저장하고 새로운 현재안으로 저장한다. 만일 선택된 후보 해가 기존 최선 해보다 개선되지 않은 경우에는 다음 단계로 이동하여 Tabu List 검사를 수행한다.

5) Tabu List의 검사

선택된 후보안이 기존 최적안보다 개선되지 않은 경우, 최적화 프로세스는 후보안이 Tabu List에 등록되어 있는지의 여부를 검사한다. TS 알고리즘에서는 한번 선택되었던 후보안을 Tabu로 정의하여 일정횟수동안 선택되지 않도록 함으로써 보다 빠른 시간 내에 최적의 안을 찾도록 하고 있다.

Tabu List에는 기존에 선택되었던 후보안들을 생성시킨 현시(顯示)가 저장되어 있다. 즉 후보안을 생성시키기 위해서는 현재안으로부터 임의의 경영단위(ID)를 선택하고 그 사업유형(Rx)에 변화를 주게 되는데, 이때 변화가 이루어진 경영단위와 사업유형에 대한 정보를 Tabu List에 저장하는 것이다. 따라서 새로운 후보안을 생성시킨 현시(경영단위와 사업유형)가 기존에 이미 한번 선택되었던 현시가 아닌지 Tabu List를 검사하는 것이다.

후보안을 생성시킨 현시가 Tabu List의 어느 한 항목과 일치하는 경우 후보안은 Tabu가 되어 누락된다. 반대로 후보 해가 Tabu가 아닌 경우, 즉 기존에 선택된 적이 없는 해인 경우 새로운 현재안으로(Current Solution)로 저장된다(그림 4).

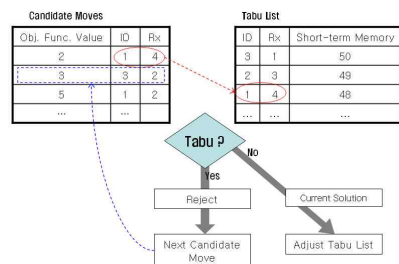


그림 4. 타부 리스트 검사  
Fig. 4. Process checking Tabu List

6) Tabu List의 갱신

선택된 후보안이 최적안보다 개선된 경우, 혹은 개선되지 않았더라도 Tabu가 아닌 경우에는 현재안으로 저장되어 다른 후보안을 생성하는데 이용된다. 후보안이 현재안으로 저장되는 경우, 이 후보안의 현시는 Tabu List에 새로운 항목으로 등록이 된다. 이때 Tabu List에 있는 기존 항목들의 Short-term Memory 값은 -1씩 감소하게 되고, Short-term Memory 값이 0이 되는 항목이 새로 등록되는 후보안의 현시로 대체된다.

7) 최적화 프로세스의 종료

앞서 설명된 최적화 프로세스는 일정한 종료기준에 도달하기 전까지 반복 시행되는데, 본 연구에서는 최대 반복수와 최대 비개선반복수의 두 가지 종료기준을 적용하였다. 즉 최적화 프로세스의 총 반복수(Total Iteration)가 주어진 최대 반복수에 도달하는 경우, 혹은 더 이상 후보안으로부터 최적이 발생되지 않는 비개선 반복수(Non-Improved Iteration)가 주어진 최대 반복수에 도달하는 경우 최적화 프로세스가 종료된다.

3. 의사결정시스템의 적용성 검토

1) Tabu Search 알고리즘의 변형

위에서 설명된 최적화 프로세스는 앞서 언급된 Tabu Search 알고리즘을 일부 변형한 모델이다. 본래의 TS 알고리즘(그림 1)에서는 후보안을 최적안과 비교하기 이전에 Tabu List 검사를 먼저 시행하도록 하고 있으며, Tabu로 정의된 후보안의 경우에도 최적안과 비교하여 개선된 경우(Aspiration Condition)에는 예외적으로 선택할 수 있도록 하였다.

그런데 실제 알고리즘을 구현하는 과정에서, 후보안이 기존 최적안보다 개선된 경우에는 Tabu 여부에 상관없이 새로운 최적안으로 저장된다는 점에 착안하여, 본 연구에서는 최적안과의 비교를 먼저 수행한 후, Tabu List를 검사하도록 알고리즘을 변형하였다(그림 5). 이러한 알고리즘의 변형이 실제 시스템의 효율성을 높이는데 효과가 있는 지 분석하기 위해서 TS 알고리즘 원형을 적용한 모델과 변형된 알고리즘을 적용한 모델을 각각 개발하여 최적화 모델링 결과를 비교하였다.

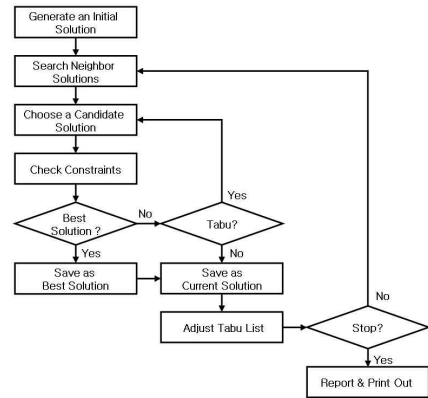


그림 5. 변형된 타부서치 알고리즘 흐름도  
Fig. 5. Flowchart of revised Tabu Search algorithm

2) 의사결정시스템의 개발환경

Tabu Search 휴리스틱 알고리즘에 기반한 의사결정시스템의 개발을 위해 Microsoft Visual Basic 6.0을 개발언어로 이용하였으며, 표 1과 같이 Dual core 2.4GHz의 PC 환경에서 모델링을 수행하였다. 최적화 모델링을 위한 대상지는 충청북도 영동군의 산림으로서, 연구 대상지의 총 경영단위수는 19,100개였다. TS 알고리즘 원형에 기반한 모델과 변형된 모델의 비교를 위해서 동일한 PC 환경에서 각 모델 별로 최적화 모델링을 15회 반복하였다.

표 1. 모델링 환경  
Table 1. Modeling Environment

Classification	Descriptions
CPU	Dual core 2.4GHz
Memory	20 Gigabyte
Language	Visual Studio v6.0
Database	Microsoft Access 2003
GIS Interface	ESRI Map Object v2.0

III. 결과 및 고찰

충북 영동군의 산림을 대상으로 Tabu Search 알고리즘 원형을 적용한 모델과 변형된 알고리즘을 적용한 모델을 이용하여 각각 15회씩 최적화 모델링을 수행하였다 (표 2). 또한 두 모델의 효율성을 검증하기 위해서, 경영목표에 대한 성취도, 모델링 시간, 시업유형 등에 대한 차이를 통계적으로 비교·분석하기 위해서, 정규성 검정, t-검정, 변이분석 등을 실시하였다.

표 2. 타부서치 원형 알고리즘과 변형 알고리즘에 의한 최적화 결과  
Table 2. The simulation results from the original Tabu Search model and the revised model

Variable	Model	Replication														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
OFV1) (thousand)	Or2)	21,816	24,877	32,418	31,690	32,054	33,101	29,134	30,274	27,456	29,059	32,130	31,455	27,532	39,920	21,391
	Rv3)	30,002	29,988	29,101	32,242	30,674	28,340	30,210	31,571	30,291	29,972	31,076	29,329	29,204	29,347	29,454
Cost (million)	Or	20,381	24,531	32,059	31,343	31,455	32,897	28,966	30,209	26,894	28,557	32,071	31,311	27,514	23,647	21,348
	Rv	29,988	29,982	28,939	32,111	30,587	28,174	30,021	31,050	29,396	29,539	30,798	29,067	28,837	29,016	29,318
Harvest Volume(m3)	Or	48,306	49,168	49,153	49,167	48,906	49,360	49,420	50,359	48,940	48,998	49,655	49,464	50,194	55,705	49,705
	Rv	49,915	49,887	49,431	49,487	49,582	49,424	49,385	51,021	48,662	49,070	49,253	49,275	49,144	49,186	49,478
Harvest Area(m3)	Or	1,776	2,105	2,620	2,629	2,639	2,692	2,403	2,518	2,350	2,445	2,701	2,493	2,364	2,195	1,812
	Rv	2,505	2,503	2,480	2,661	2,573	2,413	2,510	2,527	2,472	2,448	2,616	2,404	2,394	2,418	2,482
Total Iteration	Or	770	797	1,001	1,001	999	1,001	1,001	1,001	762	1,001	1,001	1,001	808	840	768
	Rv	989	980	977	1,001	992	992	972	1,001	939	990	1,001	950	899	1,001	1,001
Simulation Time(sec)	Or	5,226	5,042	7,901	6,669	6,752	6,664	6,803	6,633	5,152	6,740	6,779	7,000	5,884	6,068	5,343
	Rv	6,911	6,765	6,467	6,296	6,246	6,232	6,295	6,386	6,101	5,878	5,963	6,640	6,216	6,531	6,532

1)Objective Function Value; 2)Original TS model; 3)Revised TS model

1) 정규성 검정

TS 원형모델과 변형모델의 최적화 결과에 대한 정규성 검정을 위해 Kolmogorov-Smirnov와 Shapiro-Wilk 통계량 분석을 실시한 결과(표 3), 두 모형 모두 목적함수 값, 벌채 비용, 벌채면적, 모델링 시간 등에서 정규성을 보이는 것으로 나타났다.

표 3. 정규성 검정  
Table 3. Results of Normality Test

Variable	Model	Kolmogorov-Smirnov		Shapiro-Wilk	
		Statistic	p-value	Statistic	p-value
OFV	Or	0.162	0.200	0.939	0.367
	Rv	0.141	0.200	0.961	0.710
Cost	Or	0.177	0.200	0.896	0.084
	Rv	0.143	0.200	0.956	0.629
Harvest Volume	Or	0.314	0.000	0.566	0.000
	Rv	0.228	0.035	0.839	0.012
Harvest Area	Or	0.189	0.154	0.879	0.045
	Rv	0.151	0.200	0.935	0.328
Total Iteration	Or	0.377	0.000	0.694	0.000
	Rv	0.234	0.026	0.770	0.002
Simulation Time	Or	0.252	0.011	0.900	0.094
	Rv	0.128	0.200	0.983	0.985

2) 경영목표에 대한 성취도 비교

두 모델의 경영목표에 대한 성취도를 비교하기 위해서 t-검정을 통해 목적함수 값, 총 벌채비용, 목표 수확량과의 차이 등을 분석하였다(표 4).

표 4. 타부서치 원형 모델과 변형 모델의 최적화 결과 비교

Table 4. Comparison of simulated results from the original Tabu Search model and the revised model

Variable	Model	Mean	SD	p-value
OFV	Or	29,621	4,683	0.731
	Rv	30,054	1,020	
Cost	Or	28,213	4,065	0.165
	Rv	29,789	1,020	
Harvest Volume	Or	49,767	1,720	0.542
	Rv	49,480	527	
Harvest Area	Or	2,383	296	0.179
	Rv	2,494	77	

우선 목적함수 값의 경우 원형 TS 알고리즘에 기반한 모델이 변형 모델에 비해 비교적 낮은 값을 보였으나 통계적으로는 큰 차이가 나타나지 않았다(p-value = 0.731). 마찬가지로 벌채량에 있어서도 두 모델 모두 목표 벌채량인 50,000m3에 매우 근접한 값을 보였으며, 모델간의 큰 차이는 없었다(p-value = 0.542). 벌채비용과 벌채면적에서도 두 모델간의 뚜렷한 차이를 찾아볼 수 없었으며, 따라서 경영 목표에 대한 성취도에 있어서 TS 원형모델과 변형모델 간의 큰 차이는 없는 것으로 분석되었다.

3) 모델링 시간의 비교

모델의 효율성을 검증하는 데에는 모델링 시간의 비교가 중요하다. TS 원형 모델과 변형 모델에 의한 최적화 프로세스의 소요시간을 비교한 결과, 표 5와 같이 원형 모델의 경우 평균 6,310초(1시간 45분)으로 변형모델의 6,364초(1시간

46분 4초)에 비해 다소 적은 모델링 시간이 소요되었으나 통계적으로는 큰 차이가 없었다. 하지만 총 반복수에 있어서는 원형모델이 평균 917회로 변형모델의 979회에 비해 적은 반복수 만에 최적안에 도달하는 것으로 나타났다(p-value = 0.047). 이러한 결과는 원형모델의 경우 비개선 반복수가 최대한계에 도달하는 경우가 더 많았던 데에 기인하는 것으로 판단된다.

표 5. 타부서치 원형 모델과 변형 모델의 최적화 소요시간 비교

Table 5. Comparison of simulation time resulted from the original Tabu Search model and revised model

Variable	Model	Mean	SD	p-value
Total Iteration	Or	917	108	0.047
	Fv	979	29	
Simulation Time	Or	6,310	824	0.815
	Fv	6,364	284	

4) 모델의 안정성 비교

TS 원형 모델과 변형 모델의 안정성을 비교하기 위해서 등분산 검정을 통해 각 결과 값들의 변이에 대한 분석을 실시하였다. 그 결과, 표 6과 같이 벌채량을 제외한 모든 항목들에서 두 모델 간의 뚜렷한 차이를 볼 수 있었다. 즉 TS 원형 모델을 사용한 경우가 변형된 모델을 사용한 경우보다 결과 값들의 분산이 큰 것으로 나타났다. 따라서 변형모델을 이용하는 것이 최적화 결과의 안정성 측면에서는 보다 유리한 것으로 분석되었다.

표 6. 타부서치 원형 모델과 변형 모델의 최적화 결과 값 변이 비교

Table 6. Comparison of variance resulted from the original TS model and revised model

Variable	Model	Mean	SD	F	p-value
OFV	Or	29,621	4,683	11.741	0.002
	Fv	30,054	1,020		
Cost	Or	28,213	4,065	19.100	0.000
	Fv	29,789	1,020		
Harvest Volume	Or	49,767	1,720	2.422	0.131
	Fv	49,480	527		
Harvest Area	Or	2,383	296	12.072	0.002
	Fv	2,494	77		
Total Iteration	Or	917	108	82.845	< 0.001
	Fv	979	29		
Simulation Time	Or	6,310	824	15.886	< 0.001
	Fv	6,364	284		

5) 사업유형의 비교

산림경영계획을 수립하는데 있어서, 적용되는 사업의 유형이 중요한 고려인자가 되기도 한다. 따라서 TS 원형 모델과 변형 모델에 의해 최적화된 결과가 사업유형에 따라 어떤 차이를 보이는지 비교할 필요가 있다.

본 연구에서는 사업강도에 따라 사업유형이 구분되는데, 두 모델에 의해 사업대상지로 선정된 경영단위들의 수를 사업강도에 따라 분석한 결과, 사업강도에 따른 뚜렷한 차이가 나타나지는 않았으나, 전반적으로 원형 TS 모델을 적용하는 경우 더 많은 수의 경영단위들이 사업대상지로 선정되는 경향을 보였다(표 7).

표 7. 사업 대상지의 경영단위 간벌 강도 분포

Table 7. Number of management units scheduled for management activities with different intensity

Model	Harvest Intensity					
	5%	10%	15%	20%	30%	100%
Or	51	176	70	130	102	1
Fv	54	148	55	93	105	0

4) 대상지의 분포

본 연구에서 개발된 의사결정시스템은 TS 휴리스틱 알고리즘에 의한 최적화 결과를 도면으로 보여줄 수 있도록 GIS 출력도들을 제공하고 있다. 그림 6과 그림 7은 원형 모델과 변형 모델에 의한 최적화결과를 의사결정시스템 상에서 출력한 결과로서, 그림에서 보는 바와 같이 두 모델 모두 사업대상지로 선택된 경영단위들이 연구 대상지 전체에 고르게 분포하는 것을 볼 수 있었다. 따라서 의사결정시스템의 최적화 프로세스에서 개별이 이루어지는 경영단위들 간의 크기와 거리를 규정하는 공간적 제한조건들이 반영되고 있음을 확인할 수 있었다.

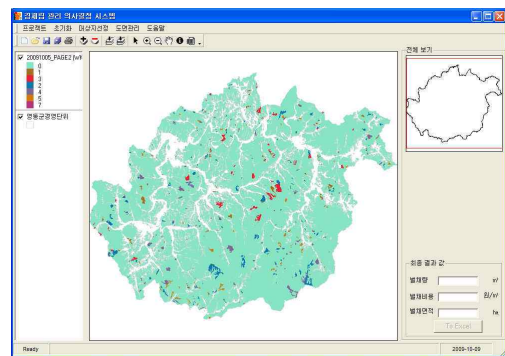


그림 6. 타부서치 원형 모델에 의해 선정된 최적 사업대상지  
Fig. 6. Harvest units resulted from the original Tabu Search model

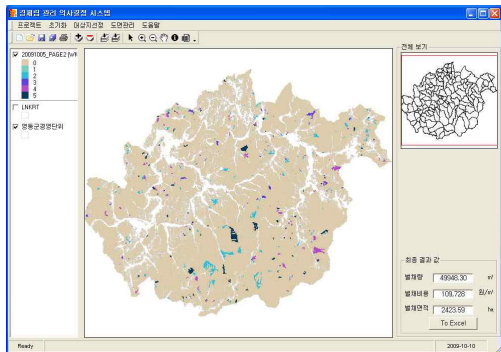


그림 7. 타부서치 변형 모델에 의해 선정된 최적 사업대상지  
Fig. 7. Harvest units resulted from the revised Tabu Search model

#### IV. 결 론

본 연구에서는 복잡한 경영목표를 다루거나 공간적인 인자들을 다루는데 효과적인 Tabu Search(TS) 휴리스틱 기법을 이용하여, 산림경영 분야의 의사결정을 지원할 수 있는 시스템을 개발하였다. 이를 위해 TS 알고리즘의 논리적 흐름을 분석하여 여러 세부 프로세스를 설계하였다.

최적화 프로세스의 효율성을 높이기 위하여, 각 세부 프로세스의 운영시간 및 작업부하를 단계별로 점검하여 시스템 자원의 활용을 극대화하기 위한 방안들을 모색하였다. 이를 토대로 Tabu Search 원형 알고리즘에 기반한 모델과 일부 프로세스를 변형한 모델을 개발하였으며, 각각의 모델에 의한 최적화 결과를 비교 검토함으로써 최적화 프로세스의 효율성 및 안정성을 검증하였다.

본 연구를 통해 개발된 의사결정시스템은 주어진 경영목표 및 공간적 제한조건을 만족시키는 경영안을 제공하는 것이 가능하였다. 최적화 결과 값들과 모델링 소요시간을 비교 분석한 결과, TS 원형 알고리즘에 기반한 모델과 변형 알고리즘에 기반한 모델간의 큰 차이가 나타나지 않았으나, 원형 알고리즘에 기반한 최적화 모델의 경우 결과 값들의 변이 폭이 더 큰 것으로 나타났다. 따라서 최적화 프로세스의 효율성 측면에서는 모델 간의 뚜렷한 차이를 찾을 수 없었으나, 보다 안정적인 결과 값을 얻을 수 있다는 측면에서 변형된 모델을 사용하는 것이 더 유리한 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 충북 영동군의 산림을 대상으로 한 최적화 결과이므로, 산림조건이 상이한 다른 지역의 산림을 대상으로 적용할 경우, 최적화 결과 값에 차이가 나타날 수 있을 것이다. 따라서 TS 원형 모델과 변형 모델의 효율성 및 안정성에 대한 보다 객관적인 비교를 위해서는 산림 조건이 다른

타 지역 산림에 대해서도 모델적용이 필요할 것이다.

본 연구를 통해 개발된 산림경영 의사결정지원시스템은 앞으로 산림경영 일선 담당자들이 별채대상지의 선정 등 산림경영 의사결정을 지원하는데 크게 기여할 것으로 기대되며, Tabu Search 이외에 Simulated Annealing, Threshold Accepting 등 다른 휴리스틱 알고리즘과의 비교를 통해 보다 효율적인 의사결정시스템으로 개선 발전해 나갈 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- [1] Bettinger, P. and Y.-H. Kim, "Spatial optimisation - computational methods. In : Gadov, K. v. and T. Pukkala (eds.)," *Designing Green Landscape*, pp. 111-135, 2008.
- [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] Glover, F. *Tabu Search - Part I*, *ORSA Journal on Computing* 1:190-206, 1989.
- [4] Glover, F. *Tabu Search - Part II*. *ORSA Journal on Computing* 2:4-32, 1990.
- [5] Glover, F. and M. Laguna, "Tabu Search. In : Reeves, C. R (ed). *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*, pp. 70-150, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1993.
- [6] Bettinger, P., K. Boston, and J. Session, "Combinatorial optimization of elk habitat effectiveness and timber harvest volume," *Environmental Modeling and Assessment* 4:143-153, 1999.
- [7] Laroze, A. and B.J. Greber, "Using Tabu Search to generate stand-level, rule-based bucking patterns," *Forest Science* 43(2):157-169, 1997.
- [8] Richard, E.W. and E.A. Gunn, "A model and Tabu Search method to optimize stand harvest and road construction schedules," *Forest Science* 46(2): 188-203, 2000.
- [9] 이성렬, COMSOAL "휴리스틱을 이용한 최적 운송경로 탐색," *경영과학* 20(1): 141-148쪽, 2003.
- [10] 정승주, "Hub-and-spoke 운송전략을 고려한 철도화물 서비스 네트워크디자인모형의 개발," *대한유통학회지* 22(3): 167-177쪽, 2004.



- [11] 전진호, 이계성, “휴리스틱 탐색을 통한 동적시스템 분석을 위한 모델링 방법과 CRM위한 인터페이스 설계,” 한국컴퓨터정보학회논문지 제 14권, 제 4호, 179-187쪽, 2009년 4월.
- [12] 정균락, “케이블 TV 망에서 노드 선택을 위한 휴리스틱 연구,” 한국컴퓨터정보학회논문지 제 13권, 제4호, 133-140 쪽, 2008년 7월
- [13] 이석환, 박승현. “검사공정의 작업배분을 위한 휴리스틱 알고리즘 개발,” 대한안정경영과학회지 10(3): 253-265 쪽, 2008년.
- [14] 산림청, “국립산림과학원, 지속가능한 산림자원관리 표준매뉴얼,” 289쪽, 2005년.

## 저 자 소개



### 박 지 훈

2004년: 강원대학교 컴퓨터과학과 석사  
 2008년: 강원대학교 컴퓨터과학과 박사  
 관심분야: 운영체제, 시스템보안,  
 시스템프로그래밍



### 김 영 환

1996년: 경희대학교 입학과 학사  
 1998년: 국민대학교 산림자원학과 석사  
 2006년: Oregon State University  
 산림자원학과 박사  
 현재: 산림청 국립산림과학원  
 기후변화연구센터



### 김 만 필

2003년: 강원대학교 컴퓨터과학과 석사  
 2009년: 강원대학교 컴퓨터과학과 박사  
 관심분야: GIS, 이미지 프로세싱,  
 시스템프로그래밍



### 원 현 규

1993년: 강원대학교 산림경영학과 학사  
 1994년: 강원대학교 산림경영학과 석사  
 2001년: 강원대학교 산림경영학과 박사  
 현재: 산림청 국립산림과학원  
 기후변화연구센터