

## 정밀농업을 위한 트랙터-작업기의 최적 경로계획

# Optimal Path Planning of a Tractor-implement for Precision Farming

정 선 옥*	박 우 풍*	장 영 창**	여 운 영***
정회원	정회원	정회원	
S. O. Chung	W. P. Park	Y. C. Chang	W. Y. Yeo

### ABSTRACT

Path planning for field operation of agricultural machinery is an indispensable part for precision farming or autonomous field operation. In this study, two algorithms(I, II) of generating a time-based shortest operation path were suggested to plan an optimal operation of an agricultural tractor-implement in a rectangular shaped field. The algorithms were based on modification of a minimum spanning tree algorithm, and applied for tractor-implement operations. The generated path was consisted of round operation and returning operation sections. The number of round operation was determined from the condition that a tractor can turn smoothly at headlands. The performance of the algorithms was evaluated by the calculation number for path generation and the total path length generated. Their stability was affected by the number of returning operation, but the algorithm II was considered to be more stable. In addition, the performances of the developed algorithms were compared with those of the conventional field operations at selected field sizes and shapes. The results showed that the algorithms could reduce field operation time greatly. For a 100m×40m field, the reduced path length was 78m. The study also included an user interface program for implementing the algorithms and generating GPS coordinates that could be used in GIS softwares for precision farming.

**주요용어(Key Words):** 정밀농업(Precision farming), 농작업경로(Farm operation path), 경로계획 알고리즘(Path planning algorithm), 지구위치시스템(GPS)

### 1. 서 론

농기계의 무인자동화 연구가 점차 늘어나면서 포장 내에서 효율적인 농작업 경로를 찾는 것은 중요한 요인으로 간주되고 있다. 또한 효율적인 농작업

경로는 최적의 농업경영을 목적으로 하는 정밀농업의 구현에 직접적으로 응용될 수 있다는 관점에서 매우 중요하다.

우리나라에서는 정밀농업이나 농기계 무인자동화와 관련하여 농작업 최적경로를 찾고자 하는 연구는

\* 농촌진흥청 농업기계화연구소

\*\* 서울대학교 농업생명과학대학 농업개발연구소

\*\*\* 서울대학교 대학원 농업기계전공

없었으며 설정된 작업경로를 추종하며 농기계를 운영하는 자율주행 방식이 제안되고 있는 실정이다. 조성인 등(1997)은 과수원용 스피드 스프레이어의 자율주행을 위하여 작업경로가 일정하게 정해진 직진구간과 회전구간의 각 목표점을 GPS 경위도 좌표로 입력하고 이를 추종하는 방식을 사용하였다.

농작업의 경로탐색에 대해 일본의 Torisu 등(1997)은 수도작 작업에서 트랙터의 최단선회모형을 고찰하였으며 Matsuo 등(1998)은 포장전체에 대한 농작업 경로계획을 수행하였다. 그러나 Torisu는 모서리 부근에서의 트랙터 최적선회에 대한 문제만을 다루었으며 Matsuo의 작업계획은 작업열을 순차적으로 왕복하면서 작업하는 방식을 바탕으로 하고 있어 농작업 경로계획이 최적화 되었다고 할 수 없다.

본 연구에서는 직사각형 포장에서 작업하는 트랙터-작업기의 최적 작업경로를 계획하고자 최소 확장트리 알고리즘(minimum spanning tree algorithm)을 응용한 2가지 경로탐색 알고리즘을 제안하였고 알고리즘의 성능과 안정성을 평가하였으며 임의 크기의 포장에 대하여 제안된 경로와 기존 농작업 경로를 비교, 분석하였다. 또한, 계획된 경로를 GPS 좌표계로 변환하여 GIS 프로그램에서 입력받을 수 있는 포맷으로 출력할 수 있는 경로계획 프로그램을 개발하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 최적경로탐색의 기본방향

농작업을 수행할 때 작업시간은 줄어들면서 작업정밀도와 작업효과는 높이는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 경로계획의 기본방향으로 사용연료와 농기계에 의한 토양다짐을 줄이면서 마지막 부분이 발생하지 않고 최단시간에 작업하여 농기계의 작업능률을 높일 수 있는 경로를 계획하였다.

그림 1은 일반적인 사각형 모양의 포장과 농작업을 수행하는 트랙터-작업기의 궤적을 개략적으로 보여주고 있다. 총 농작업경로(L)는 회행작업구간(L<sub>ro</sub>)과 왕복작업구간(L<sub>rw</sub>)으로 크게 나눌 수 있으며 이외에도 출입지점에서 작업시작점까지 이동경로(L<sub>1</sub>), 왕복작업-회행작업 전환경로(L<sub>2</sub>), 모서리 회전

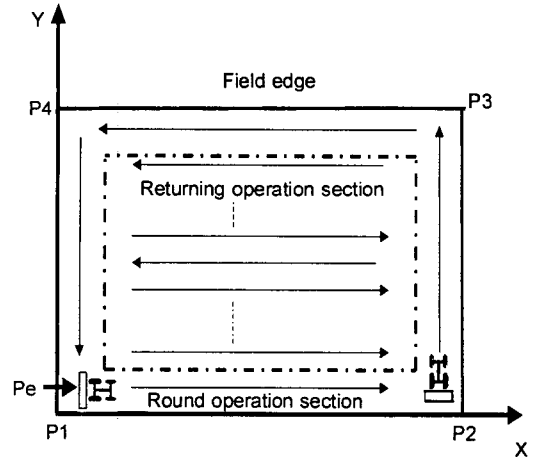


Fig. 1 A rectangular paddy field and farm operation trajectory.

경로(L<sub>3</sub>), 작업 후 출입지점까지의 이동경로(L<sub>4</sub>)가 포함된다.

농작업을 수행하는 동안에 트랙터-작업기의 작업속도는 거의 일정하므로 여러가지의 이동경로를 합한 총 농작업경로의 길이가 가장 짧아진다는 것은 작업능률이 최적의 상태에 있음을 나타내며 이를 경로계획의 목적함수로 설정하였다. 특히, 회행작업구간과 왕복작업구간의 경로가 결정되면 나머지 작업구간(L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub>, L<sub>4</sub>)에 대한 경로의 길이는 단순계산에 의해 결정되므로 경로계획 목적함수는 식 1로 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{Min}(L) &= \text{Min}(L_{ro} + L_{rw} + L_1 + L_2 + L_3 + L_4) \\ &= \text{Min}(L_{ro} + L_{rw}) + \text{Sum}(L_1 + L_2 + L_3 + L_4) \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

### 나. 최단시간 선회모형

트랙터-작업기의 최단시간 선회모형은 Torisu 등(1997)이 직사각형 포장에서 트랙터의 최단시간 선회를 위해 제시한 작업모형을 사용하였다. 작업폭을 W, 트랙터-작업기의 최소 선회반경을 R이라 하면, 작업모형과 회전하는 거리는 표 1과 같이 요약된다.

Table 1 Turning patterns and their lengths of a tractor with farm implements (Torisu, 1997)

Classification	Turning patterns	Turning length
$W < 2R$		$\pi R + 4R\beta$
$W = 2R$		$\pi R$
$W > 2R$		$\pi R + d$

다. 회행작업수 결정

회행작업수를 증가시키면 왕복작업수는 감소하나 모서리 선회수가 증가하여 총 경로는 길어진다. 따라서 총 경로를 줄이기 위해서는 회행작업수를 가능한 줄여야 한다. 그러나 왕복작업시 포장의 경계 내에서 트랙터-작업기가 원활하게 선회하여야 하므로 본 연구에서는 회행작업수를 트랙터-작업기의 선회공간을 확보할 수 있는 최소수준에서 결정하였다.

그림 2는 기하학적으로 최소 회행작업수를 결정하는 방법을 보여주고 있는데 그림에서 보는 바와 같이 선회직경이 작업열 간격보다 큰 경우에 선회는 가장 크게 된다. 따라서 이 경우를 기준하여 왕복작업구간에서 트랙터-작업기가 선회할 공간을 확보할 수 있는 최소 회행작업수( $N_{ro}$ )는 식 2로 결정된다.

$$N_{ro} = G \left[ \frac{R(1 + 2\sin \angle A)}{We} + 1 \right] \dots \dots \dots (2)$$

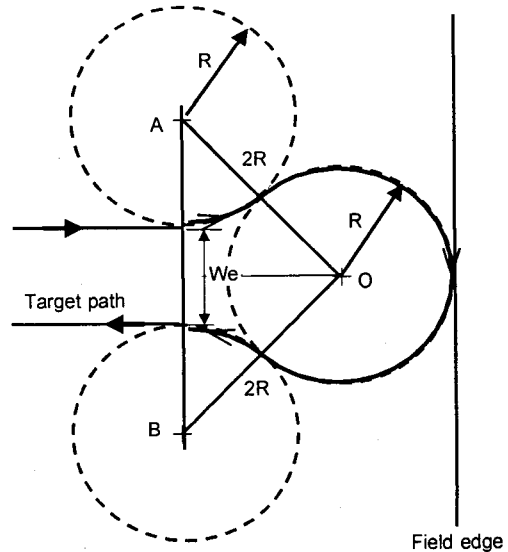


Fig. 2 Determination of the round operation number based on the effective turning radius of a tractor.

식 2에서  $G[ ]$ 는 가우스 함수를 의미하며  $\angle A$ 는  $\cos \left( \frac{2R + We}{4R} \right)$ 로 구해진다.

라. 최적경로계획 알고리즘

회행작업수가 결정되면 최적경로는 왕복작업의 순서를 적절히 조절하여 왕복작업경로를 최소화함으로써 구해진다. 그림 3에 왕복작업구간의 각 작업열에 대한 번호와 좌우의 작업시작점·종료점을 나타내었다. 왕복작업은 포장의 장변방향으로 수행되고 왕복작업의 최초 시작점은 포장 진입점에서 가장 가까운 점으로 설정하였다.

선회모형에서 보는 바와 같이 각 작업열 끝에서 다음 작업열을 어느 것으로 선택하느냐에 따라 작업열 변경에 필요한 경로의 길이가 달라진다. 나아가 순차적으로 각 열을 작업하는 것은 최단경로를 보장하지 않으며 인접열 진입을 위한 급격한 회전에 의해 토양의 다짐이 심화된다.

최단경로를 보장하는 작업열의 순서를 구하기 위해서 모든 경우의 작업순서에 대하여 총 경로길이를 구하고 각 경우의 값을 비교하는 방법(brute-force

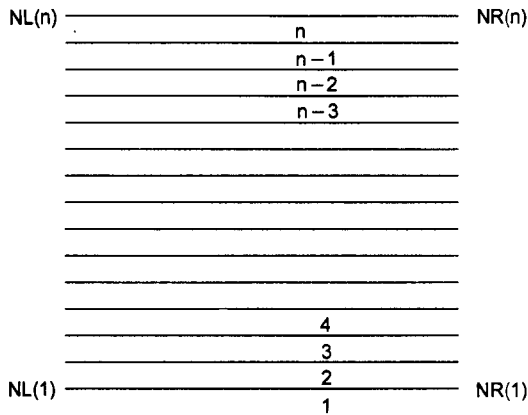


Fig. 3 Notation of operation lines and nodes.

algorithm)이 필요하다. 그러나 이러한 경우에 비교되어야 할 총 경우의 수는 왕복작업 횟수에 대한 순열값,  $n!$ 이 된다. 따라서 왕복작업열의 수가 증가하면 경우의 수가 급격하게 증가하여 비교를 위한 계산횟수가 너무 많다는 문제점을 갖게 된다.

최단경로를 찾는 일반적인 알고리즘으로는 Dijkstra 알고리즘, 세일즈맨 여행경로 찾기 알고리즘 등 다수가 제안되고 있으나(박정호, 1997) 본 연구에서는 최소확장트리(shortest spanning tree) 알고리즘의 하나인 Prim 알고리즘(박정호, 1997)을 응용하여 두 가지 알고리즘을 개발하였다. Prim 알고리즘은 경로 상에 있는 정점의 전체집합에서 임의의 정점을 선택하고 그 정점에서 가장 가까운 거리에 있는 정점을 추가해 나가는 알고리즘이다.

본 연구에서 개발한 첫 번째 알고리즘(알고리즘 I)은 그림 3과 같이  $n$ 개 작업열의 좌우정점을  $NL(k)$ ,  $NR(k)$ 로 나누고 Torisu 등(1997)의 선회모형을 기반으로 각 정점에서 선택할 수 있는 다음 목표점까지의 경로길이를 가중치로 부여한 후, 시작점부터 가중치가 가장 짧은 정점으로 이동하고, 지나온 정점의 가중치를 제거하는 과정을 정점이 하나 남을 때까지 반복하는 방식이다. 정점에 부여되는 가중치는 식 3의 형태로 구해진다. 특히  $i = k$ 일 경우에는 직진작업의 경우로써 가중치가 0이 된다.

$$NL(k) = [LW_{k1}, \dots, LW_{ki}, \dots, LW_{kn}]$$

$$NR(k) = [RW_{k1}, \dots, RW_{ki}, \dots, RW_{kn}] \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $k : 1 \sim n$   
 $NL(k) : k$ 번째 왼쪽 노드  
 $NR(k) : k$ 번째 오른쪽 노드  
 $LW_{ki}, RW_{ki} : k$ 노드에서  $i$ 노드로 이동하는 경로가중치

두 번째 알고리즘(알고리즘 II)은 알고리즘 I에 “작업열의 순서를 선택하는 과정에서 상하의 이동방향을 설정하기 전에 가중치가 크더라도 최상 또는 최하 작업열을 우선적으로 선택한다”는 조건을 추가한 알고리즘이다. 이는 알고리즘 I이 포장 단변방향으로 오르내리면서 최단경로에 근사한 왕복작업 순서를 제시하였으나 왕복작업 횟수가 변화되면 경로 계획의 중반부로 갈수록 작업 종료점에서 멀리 떨어진 작업열을 선택하는 경우가 발생하여 왕복작업수에 민감한 경로탐색의 가능성을 제거하기 위해 개발되었다.

마. 사용자 인터페이스 프로그램

본 연구에서 개발된 알고리즘을 바탕으로 트랙터-작업기의 작업경로를 탐색하고 탐색된 작업경로를 GIS 소프트웨어나 트랙터 제어기 등에서 사용할 수 있도록 출력해주는 사용자 인터페이스 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 트랙터 크기, 작업기 폭, 선회반경, 작업중첩률, GPS 안테나와 작업기 간의 거리를 입력받아 포장전체에 대한 작업경로와 각 구간별 작업유무를 출력하며 AutoCAD R14의 내장 언어인 AutoLISP를 사용하여 구현되었다.

바. 경로계획 성능평가

알고리즘의 성능은 직사각형 포장의 단변 길이를 변화시키면서 탐색속도, 탐색된 경로의 길이를 비교함으로써 평가하였다. 경로계획 알고리즘의 속도는 brute-force 알고리즘의 계산횟수에 대한 개발된 알고리즘의 계산횟수의 비로 평가하였으며, 탐색된 경로의 길이는 Matsuo(1998)가 개발한 경로로봇 왕복작업의 순서결정 계획법의 결과와 비교하였다.

포장의 크기는 농림부와 농어촌진흥공사에서 (1994) 제시한 경지의 표준크기를 기준하여 경지정

리에서 가장 많이 제시되고 있는 100m×40m 포장과 김학규(1995)가 대형 일관 기계화를 위한 적정 포장규모로 제시한 200m×100m 포장을 성능평가 포장으로 설정하였다.

경로계획 알고리즘의 안정성은 100m×40m 포장에서 100m×80m 포장까지 단변의 크기를 2m씩 증가시켜 왕복작업열의 수를 20회에서 40회까지 1회씩 증가시키면서 왕복작업경로에 대한 길이변화의 추이로 검증하였다. 트랙터-작업기의 선회반경과 작업폭은 농가에서 많이 사용하고 있는 트랙터를 기준으로 3m와 2m로 각각 설정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 경로계획 알고리즘의 성능

본 연구에서 개발한 알고리즘 I, II는 작업 시작점을 정해주고, 작업 정점을 지날 때마다 그 점을 제외시켜 다음 작업점을 찾는 계산횟수가 1번씩 줄어들게 되므로 총 계산횟수는  $n^2$ 이 되며 Brute-force 알고리즘에 대한 계산횟수비는  $n/(n-1)!$ 로 구해진다.

Matsuo의 방법(인접열 순차작업방식)과 알고리즘 I, II를 100m×40m, 200m×100m 포장에 적용하여 각 방법에 대한 왕복작업구간 경로길이와 그 비율을 표 2에 나타내었다. Matsuo는 모서리선회와 포장 진출입 방법은 언급하지 않았으므로 다른 구간은 비교대

상에서 제외하였다.

표 2에서 보는 바와 같이 두 개의 포장에 대해 알고리즘 I, II의 총 경로길이와 선회 경로길이와 모두 관행방법보다 작게 나타났다. 또한, 단변이 길어져 왕복작업 횟수가 증가하면 회전에 필요한 경로길이가 더욱 감소하는 바람직한 결과를 보였다. 알고리즘 I은 100m×40m 포장에서, 알고리즘 II는 200m×100m 포장에서 최단길이를 제시하였지만 그 차이는 크지 않았다.

#### 나. 경로계획 알고리즘의 안정성

알고리즘 I과 II의 경로탐색 안정성은 단변크기 변화에 영향을 받았다. 알고리즘의 안정성을 비교하기 위하여 왕복작업 횟수 증가에 따른 길이변화를 왕복 경로 길이변화율 ( $r_v$ )로 나타내고 식 4와 같이 구하였으며 각 알고리즘에 대한 길이변화율의 RMS(root mean square)를 비교하였다. 왕복작업 횟수가 증가함에 따라 경로의 길이가 직선적인 비례관계로 길어지면 왕복경로 길이변화율은 1에 가깝게 된다.

$$r_v = \frac{L_{i+2} - L_{i+1}}{L_{i+1} - L_i} \dots\dots\dots (4)$$

식 4에서  $i$ 는 20부터 38까지의 값을 취하며  $L_i$ 는 왕복작업열의 수가  $i$ 일 때 왕복작업 경로길이를 나

Table 2 The comparison of total path length, turning length and related ratios for line to line, algorithm I and II

Classification		Line to line	Algorithm I	Algorithm II
100m×40m (Field size)	Path length(m)	819.23	742.93	752.56
	Turning length(m)	188.99	112.69	122.32
	Length ratio	1.0	0.91	0.92
	Length ratio for turning	1.0	0.60	0.65
200m×100m (Field size)	Path length(m)	7,672.58	7,190.83	7,179.14
	Turning length(m)	998.94	517.19	505.50
	Length ratio	1.0	0.94	0.94
	Length ratio for turning	1.0	0.52	0.51

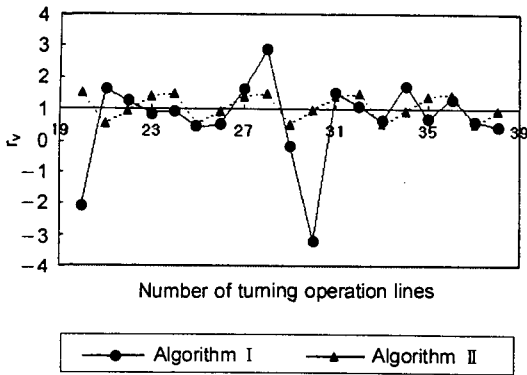


Fig. 4 The ratio of the length change in total path with increasing the number of returning operation.

타낸다.

그림 4는 100m×40m 포장에서 100m×80m 포장까지 왕복작업열의 수가 20회에서 38회로 증가될 때 알고리즘 I과 II의 왕복경로 길이변화율의 변동추세를 보여주고 있다. 알고리즘 I의 왕복경로 길이변화율은 특정 왕복작업횟수에서 갑자기 크게 변하는 경우가 발생하지만 알고리즘 II의 경우에는 일정한 값이 반복되는 것을 알 수 있다. 특히 변화율의 RMS 값도 알고리즘 I과 II에 대해 각각 1.35, 0.40로 나타나 알고리즘 II가 왕복작업횟수 변화(포장의 크기변화)에 대하여 안정적인 경로탐색을 수행하는 것으로 판단되었다. 그러나 표 2에서 나타난 바와 같이 총경로의 길이는 왕복작업횟수가 작을 때는 알고리즘

I의 결과가, 왕복작업횟수가 커지면 알고리즘 II의 결과가 각각 짧게 나타났다.

#### 다. 농작업 전역경로 계획

그림 5는 100m×40m 포장에 대해 알고리즘 I을 이용하여 포장의 진입점에서부터 작업 후 출구지점까지 트랙터-작업기가 추종해야 할 최적경로의 탐색결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 관행방법과는 달리 작업은 인접열 순서로 수행되지 않고 임의의 열을 따르나 관행방법에 비교하여 대략 78m의 경로가 단축되는 것으로 나타났다. 이러한 경로는 무인트랙터가 추종해야 할 좌표로 저장되어 농작업 자율주행에 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 작물이 없는 포장상태에서 트랙터-작업기의 전역경로를 다루었으나 개발된 경로계획 알고리즘은 작물의 유무와 관계없이 포장작업기의 기준경로생성 알고리즘으로 확대될 수 있다.

#### 라. 인터페이스 프로그램

그림 6과 7은 직사각형 포장에서 트랙터-작업기의 최단시간 작업경로를 탐색하고 출력하는 프로그램의 입력화면과 출력된 경로계획을 보여주고 있다. 프로그램은 사용자가 AutoCAD의 기능을 이용하여 직사각형 모양의 포장을 그린 후 트랙터 치수, 작업기 폭, 트랙터-작업기 선회반경, 회행작업 횟수, 작

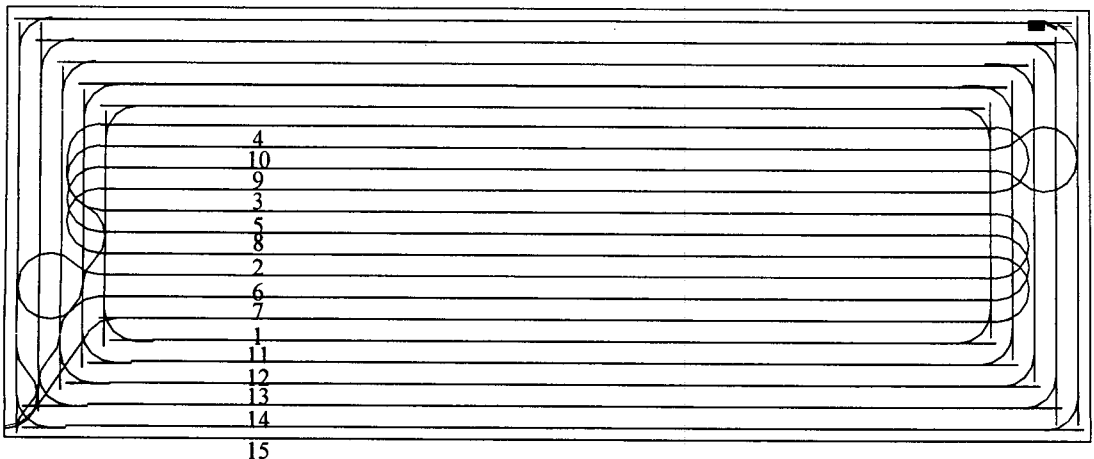


Fig. 5 An optimal operation path of a tractor generated by algorithm II for an 100m×40m field.

업 중첩률 등을 입력하면, 이 값들의 상관관계를 이용하여 화면상에 경로의 궤적을 순차적으로 출력하고 텍스트 파일로 작업경로의 좌표와 각 작업구간의

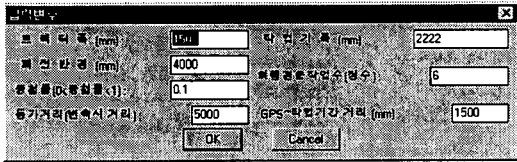


Fig. 6 The input pop-up menu of the operation path planning program.

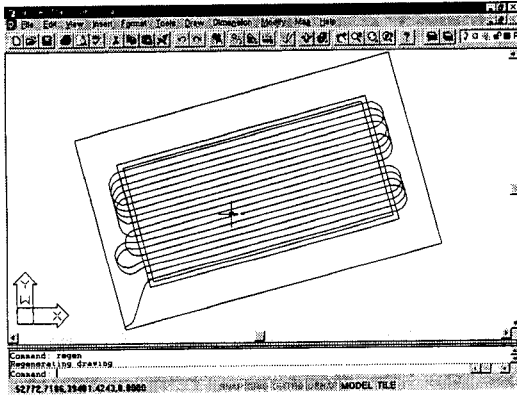


Fig. 7 An optimum operation path generated by the path planning program.

37.27405451	126.98324357	L1	37.27408933	126.98323189	0
37.27407826	126.98327482	L1			0
37.27416441	126.98330887	L1	37.27415334	126.98335180	0
37.27418466	126.98332379	L2			1
37.27436840	126.98418190	L2	37.27440322	126.98417023	0
37.27443804	126.98415855	L2			0
37.27427170	126.98329461	L3	37.27423688	126.98330628	0
37.27420149	126.98329772	L3	37.27421025	126.98332105	0
37.27417543	126.98333272	L4			0
37.27433734	126.98327843	L4			1
37.27416407	126.98333653	L4			0
37.27420309	126.98332345	L4	37.27400812	126.98298763	0
37.27417771	126.98337846	L4			0
37.27417471	126.98321623	L5			0
37.27414651	126.98322569	L5	37.27415584	126.98326926	0

Fig. 8 A text data output of operation path by the path planning program.

이름, 작업유무를 출력한다.

GIS 소프트웨어나 트랙터 제어기 등에서 이용할 수 있는 텍스트 문자열로 된 경로출력 결과를 그림 8에 예시하였다. 각 수치는 좌로부터 구간별 시작점의 위도, 경도, 해당구간 표시, 경로의 회전중심 위도, 경도, 작업유무를 나타낸다. 본 연구에서는 작업 경로를 직진구간과 회전구간으로 나누어 직진구간은 회전중심을 표시하지 않았다. 따라서 그림 8에 나타난 각 출력 행에서 회전중심의 좌표가 없는 것은 직진구간을 의미한다. 그림 8에서 해당구간 표시는 L1, L2, L3, L4, L5로 구분하였고 작업유무는 작업하지 않고 주행만 하는 구간은 0, 작업하는 구간은 1로 표시하였다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 직사각형 포장에서 작업하는 트랙터-작업기의 최적 작업경로를 계획하고자 최소 확장트리 알고리즘을 바탕으로 2가지 경로탐색 알고리즘(알고리즘 I, II)을 개발하였고 알고리즘의 성능과 안정성을 평가하였으며 제안된 경로와 기존 농작업 경로를 비교, 분석하였다. 또한, 계획된 경로를 GPS 좌표계로 변환하여 GIS 프로그램에서 입력받을 수 있는 포맷으로 출력할 수 있는 경로계획 프로그램을 개발하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 최단 작업경로를 구하기 위해 회행작업수는 왕복작업구간에서 작업열을 변경할 때 트랙터-작업기의 유효선회반경을 확보할 수 있는 최소 수준에서 결정하였다.

2. 두 알고리즘의 경로탐색 안정성은 포장 단변의 크기 변화에 영향을 받았으나 알고리즘 II가 보다 안정적인 경로탐색을 수행하는 것으로 판단되었다.

3. 왕복작업횟수가 작을 때는 알고리즘 I이 최단 작업경로를 탐색했으나 왕복작업횟수가 일정숫자 이상으로 커지면 알고리즘 II가 보다 최단경로를 계획하였다.

4. 관행방법에 의한 경로와 비교하여 개발된 알고리즘은 총 경로와 선회경로를 감소시켰으며 100m×40m 크기의 포장을 기준으로 관행방법에 비교하여 약 78m의 경로를 단축시키는 것으로 나타났다.

5. 경로탐색 프로그램은 직사각형 포장에서 트랙터-작업기의 최단시간 작업경로를 탐색하고 경로 궤적과 작업경로의 좌표, 작업구간의 이름, 작업유무를 텍스트 파일로 출력하여 GIS 소프트웨어나 트랙터 제어기 등에서 농작업 주행기준으로 이용할 수 있을 것으로 판단되었다.

### 참 고 문 헌

1. 서울대학교 농업개발연구소. 1994. 경지정리의 최적설계에 관한 연구. 농림수산부.
2. 김학규. 1995. 대구획 포장의 벼농사 일관기계화 체계에 관한 연구. 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
3. 박정호. 1997. 컴퓨터 알고리즘. 상조사.
4. 조성인, 이재훈, 정선옥. 1997. DGPS와 퍼지제어를 이용한 스피드스프레어의 자율주행(1) - 그래픽 시뮬레이션 -. 한국농업기계학회지 22(4): 487-496.
5. Yosike Matsuo, Osamu Yukumoto, Noboru Noguchi. 1998. Navigation systems and work performance of tillage robot. ASAE Paper No. 983192.
6. Ryo Torisu, Kenichi Tanaka, Joe Imae. 1997. Optimal path of headland for tractors by optimal control theory(Part I). The journal of Japanese society of agricultural machinery 59(4):3-10.