

## 기계화 농작업 성능의 수학적 모델링

### The Mathematical Modelling of the Field Performance of Machines

김학규\*      정창주\*

정희원      정희원

H. K. Kim   C. J. Chung

#### ABSTRACT

An assessment of the field performance of machines for varied farming conditions may be essential to the development of mechanization program and rational machinery management. The field performance of machines is largely affected by the field capacity of machinery selected, physical size and shape of field plots and their scatterness, farming functions and conditions, and labor requirement and constraints.

The study was to develop the mathematical model for the field performance of machines and time requirement of the rice farming systems, considering those factors which affect the field performance of machines. The mathematical models developed were simulated to determine field efficiency and capacity of the different sizes of major machinery for a various size of paddy field plot and for prevailing conditions of farming operations. The effects of the sizes of machinery and the plot geometry on the efficiency and field capacity were compared for major rice farming functions.

**주요 용어(Key Words)** : 기계화(Mechanization), 농작업(Farm operation), 포장작업량 (Field capacity), 포장효율(Field efficiency)

#### 1. 서론

농기계의 작업 성능은 기계 이용 비용과 함께 기계화 계획을 수립·평가하는데 기본적인 요소로, 그 사용 목적과 용도에 따라 이론작업량, 포장작업량, 1일 작업량, 부담면적 등으로 나타낸다. 포장작업량, 부담면적 등의 작업 성능은 기계의 작업폭, 작업속도 등 기계적인 요인과 포장의 형상, 크기, 토성, 배수 등의 포장 여건, 작물 조건, 재배 양식, 기상 조건, 운전자의 숙련도 등 아주 다양한 요인에 의하여 영향을 받는다. 이러한 여러 요인중 포장조건 및 기계의 작업속도, 작업폭의 영향은 대단히 크다. 그 동안 국내에서는 이에 대한 연구가 이루어지지 못하였으며, 연

구 논문이나 실무에서는 포장작업량, 부담면적 등의 작업 성능으로 일부 특정 조건하에서의 실측치 내지 경험 값을 사용하거나 외국의 포장효율, 실작업률 등의 자료를 그대로 인용 사용하여 온 실정이다. 따라서 국내 영농 실정에 적합한 포장성능 산출 방법을 정립하고 작업효율, 실작업률 등 기본적인 자료의 표준화가 절실히 요망된다.

본 연구는 기계화 포장작업성능 산출 방법 정립의 일환으로 포장구획의 변화에 따른 포장작업량과 포장효율에 대한 수학적 모델을 개발하고, 이를 이용하여 포장구획, 기계의 크기, 작업속도 등의 관계를 고찰할 목적으로 수행되었다.

+ 농촌진흥청 농업기계화 연구소

\*\* 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과

## 2. 수학적 해석 모델 개발

다양한 포장작업 수학적 해석하기 위하여 포장작업 모형을 왕복작업형, 회행작업형 및 농로선회작업형으로 단순화하고, 각각에 대하여 주행·선회·자재보충 등 작업 공정 분석을 통하여 작업 소요 시간을 유효 작업시간과 선회 시간, 자재 보급·배출 시간 등 손실시간으로 구분하여 수식 모형화 하였다. 포장작업시간에 영향을 미치는 요인에는 포장의 크기, 주행성 등과 같은 포장의 구조적인 요인, 작업폭, 작업속도 등과 같은 기계적인 요인, 운전자의 기술 등과 같은 인적인 요인이 있으나, 본 연구에서는 포장구획의 크기와 작업폭 및 작업 속도를 고려하여 포장작업 포장효율의 수학적 모델을 개발하였다.

### 가. 기계화 포장작업 모형

#### (1) 포장작업모형 설정

다양한 포장작업을 수학적 해석하기 위하여 다음과 같은 가정 하에서 작업모형을 포장 내에서 선회하는 往復作業形(I)과 回行作業形(II) 및 농로 위에서 선회하는 農路旋回作業形(III)으로 그림 1과 같이 단순화하였다.

#### 〈포장작업 조건에 대한 가정〉

포장의 형태는 長方形이며, 1구획의 포장에는 하나의 진입로를 둔다. 다만, 농로 선회 작업형 포장에는 별도의 진입로를 두지 않는다.

① 주 작업은 포장의 길이(장변)를 따라서 수행하고 새머리 작업은 양쪽의 새머리에서는 폭(단변)을 따라 작업하며, 그 순서에는 관계하지 않는다.

② 주 작업은 포장의 길이(장변)를 따라서 수행하고 새머리 작업은 양쪽의 새머리에서는 폭(단변)을 따라 작업하며, 그 순서에는 관계하지 않는다.

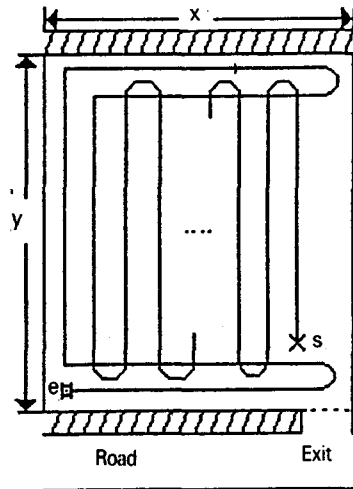
③ 작업속도, 180°선회 시간, 90°선회 시간은 포장 내의 기계 위치에 관계없이 각각 일정한

것으로 가정한다.

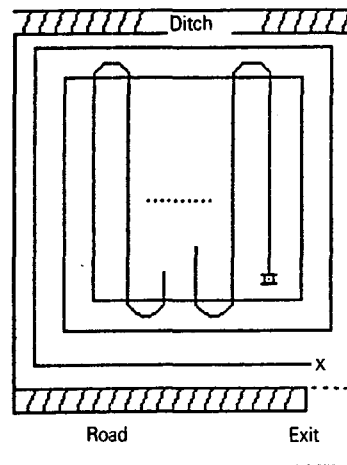
④ 작업 시작 전에 필요한 연료 및 윤활유는 가득 채우고, 충분히 점검 정비하여 포장작업 중에는 연료 보충이나 점검 정비가 필요하지 않는 것으로 가정한다.

⑤ 이론작업속도는 유효 작업속도와 같은 것으로 가정한다.

⑥ 작업기는 작업 완료후 진입 지점을 통하여 포장에서 벗어난다.



Continuous pattern(I)



Circuitous pattern(II)

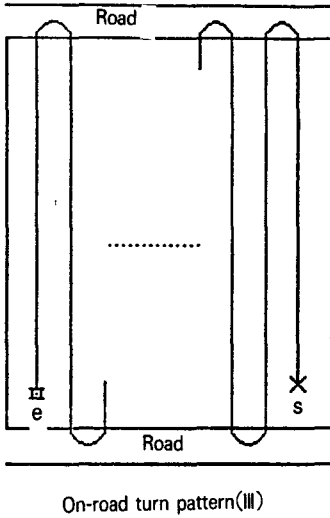


Fig. 1. Patterns of field operation.

(2) 작업 모형별 특성

어떠한 작업에서 선택되는 작업모형은 작업기의 특성, 포장의 형상 등 포장조건, 작물의 식부 방식 및 상태 등을 종합적으로 고려하여 작업이 가능하고, 작업능률과 작업 정도를 높일 수 있는 방향으로 정해지게 된다. 각 작업 모형별 작업방법, 적용 가능 작업기, 선회 횟수 등의 특성을 정리하면 다음과 같다.

(가) 왕복작업형

작업방향에 제한을 받지 않는 작업기에 적용하는 방법으로서 새머리를 확보한 후 왕복으로 장변 방향의 작업을 먼저 실시한 다음, 새머리 부분에서는 단변 방향으로 작업하는 형태이다.

○적용 작업기 : 양용쟁기, 로타베이터, 이앙기, 직파기, 승용 방제기 등

○새머리 길이 지정 : 일반적으로 작업기 길이의 1~3배의 범위에서 작업폭의 정수배로 결정하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 작업폭의 2배로 가정하였다. 즉,

$$h=2w$$

여기에서, h=새머리 길이

w=작업기의 작업폭

○작업 행정수

-장변 방향의 작업 행정수 :  $N_y = \frac{x}{w}$

-새머리 작업 행정수 :  $N_x = 4$

○선회 횟수

$$n_{180} = (N_y - 1) + N_x - 2$$

$$= \left(\frac{x}{w} - 1\right) + 4 - 2 = \frac{x}{w} + 1$$

$n_{90} = 3$ 회

여기에서,

h=새머리 길이(m)

w=작업기의 작업폭(m)

x=포장의 폭(m)

$N_y$ =장변 방향의 작업 행정수

$N_x$ =단변 방향의 작업 행정수

$n_{180}$ =180°선회 횟수

$n_{90}$ =90°선회 횟수

(나) 회행작업형

모든 작업기에 적용이 가능하나, 주로 한쪽 방향으로만 작업이 가능한 작업기에 적용하는 방법이다. 수확작업과 같이 작물이 있는 경우는 포장 가장자리 부분부터 수회 회행법으로 시작하다가 작업기의 회전 공간이 확보되고 왕복 작업이 효율적일 때 왕복법 또는 중간분할왕복법으로 전환하며, 경운작업의 경우는 먼저 왕복법으로 시작하여 회행법으로 마무리하게 된다.

○적용 작업기 : 수확기(콤바인, 바인더), 단용 moldboard plow

○회행 횟수 : 기체 길이의 2배 정도까지 회행법으로 작업하여 작업기가 용이하게 180°회전할 수 있다면 왕복작업법으로 전환한다. 본 연구에서 회행 횟수,  $N_c$ 는 다음과 같이 단순화하였다.

$$N_c = 2INT\left(\frac{l_m}{w}\right)$$

여기에서,  $N_c$ =회행 횟수

$INT(x)$ =x를 넘지않는 최대 정수

$l_m$ =기체의 길이(m)

○왕복 작업 행정수( $N_y$ )

$$N_{sy} = \frac{x - 2N_c w}{w} = \frac{x}{w} - 4 \text{INT}\left(\frac{l_m}{w}\right)$$

○ 선회 횟수

$$n_{180} = N_{sy} - 2N_c - 1 = \frac{x}{w} - 8\text{INT}\left(\frac{l_m}{w}\right) - 1$$

$$n_{90} = 4N_c = 8\text{INT}\left(\frac{l_m}{w}\right)$$

(다) 농로선회 작업형

포장내에서는 직진으로만 작업하고 농로상에서 선회하는 방법이다. 이 방법은 특수한 農路構造를 갖는 농로선회형 포장에 적용되며, 일반 포장에서는 농로에서 선회가 가능한 휴대형 기계(동력분무기, 살분무기 등)와 항공기로 수행하는 작업을 농로선회형으로 할 수 있다.

○ 적용 작업기 : 모든 포장 주행작업기와 항공 살포작업기

○ 왕복작업 행정수

$$N_{sy} = \text{INT}\left(\frac{x}{w}\right) + 1$$

○ 선회 횟수

$$n_{180} = N_{sy} - 1 = \text{INT}\left(\frac{x}{w}\right)$$

$$n_{90} = 0$$

나. 수학적 해석 모델

(1) 포장작업량 및 포장효율

포장작업량은 한 포장 내에서의 평균작업량의 개념으로 단위 시간당 작업 면적(ha/h)으로 나타낸다. 이와 비교되는 개념으로 이론작업량은 이론(최대) 작업폭과 이론작업속도로 선회나 작업 중단에 따른 시간의 손실없이 작업하는 경우의 작업량으로 가상적인 최대작업량이 되며 식 (1)로 정의된다. 포장효율은 이론작업량에 대한 포장작업량의 비율로 실측이 어려운 포장작업량을 시산하는 중요 지표이다.

$$C_{th} = 0.36 W V \dots\dots\dots(1)$$

여기에서,

$C_{th}$  = 이론작업량(ha/h)

$W$  = 작업기의 이론작업폭(m)

$V$  = 작업기의 이론작업속도(m/s)

포장작업량에 영향을 미치는 요인에는 포장의 크기 및 형상, 주행성 등과 같은 포장의 구조적인 요인, 작업폭, 작업속도 등과 같은 기계적인 요인, 운전자의 기술, 기상조건 등의 요인이 있다. 본 연구에서는 연구 목적상 포장구획의 크기와 작업폭, 작업속도를 주요인으로서 하여 그에 따른 포장작업능률을 구명코자 하였다. 장변과 단변이 정해진 포장에서 포장작업량과 포장효율의 수학적 모델은 다음과 같이 표시된다.

$$C_{xy} = \frac{60x \cdot y}{10,000T} = 6 \times 10^{-3} \frac{x \cdot y}{T} \dots\dots\dots(2)$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{\epsilon_w \cdot x \cdot y}{60 v \cdot w \cdot T} \dots\dots\dots(3)$$

여기에서,

$C_{xy}$  = 폭과 길이가 x, y인 포장에서의 포장작업량(ha/h)

$\epsilon_{xy}$  = 폭과 길이가 x, y인 포장에서의 포장효율(소수)

$x$  = 포장의 길이(m)

$y$  = 포장의 폭(m)

$T$  = 포장작업 소요 시간(min)

$\epsilon_w$  = 유효작업폭률(소수)

$w$  = 작업기의 유효작업폭(m)

$v$  = 작업기의 유효작업속도(m/s)

(2) 포장작업 소요 시간

포장작업 소요 시간 한 포장 내에서 작업 시작부터 완료까지 총 소요시간이다. 포장작업시간은 유효 작업시간과 선회 등의 공운전 시간, 포장 내 이동시간, 포장 내에서 기계 조정 시간, 고장 시간, 쉬는 시간 및 대기 시간, 자재 등의 보급배출 시간, 보조작업 시간 등 손실 시간을 포함한다. 한편 포장 밖에서의 소요 시간 즉, 농가에서 포장까지의 기계 이동, 기계 운반 후 조정

및 작업기 착탈 수리에 소요되는 시간 등은 포장작업시간에는 포함되지 않는다.

$$T = T_e + T_{loss} \dots\dots\dots(4)$$

- 여기에서,  $T$ =포장작업 시간(min)
- $T_e$ =유효작업 시간(min)
- $T_{loss}$ =손실 시간(min)

(가) 유효 작업시간

유효 작업시간은 작업기가 목적하는 작업을 수행하는데 소요되는 시간으로서 유효작업폭과 유효작업속도로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{xy}{60vw} \dots\dots\dots(5)$$

유효 작업시간에는 작업폭의 중복에 따른 추가시간이 포함되기 때문에 이론작업시간보다 크게 나타난다. 이론 작업시간은 선회 등의 손실은 고려하지 않고 작업폭의 중복없이 이론작업폭으로 연속 전진 작업만을 가정한 것으로 다음과 같이 표시된다. 여기에서 이론작업속도와 유효

작업속도는 같은 것으로 가정하였다.

$$T_{th} = \frac{xy}{60vW} = \frac{\epsilon_w xy}{60vW} = \epsilon_w T_e \dots\dots\dots(6)$$

포장작업 소요 시간과 이론 작업시간으로써 포장작업효율을 나타내면 다음과 같다.

$$\epsilon_{fxy} = \frac{T_{th}}{T} = \frac{\epsilon_w T_e}{T} \dots\dots\dots(7)$$

(나) 손실시간

포장 내에서 작업 준비, 선회, 자재보충 등으로 발생하는 작업 손실시간은 다음과 같이 표현된다.

$$T_{loss} = T_{turn} + T_{idl} + T_{pf} + T_{io} + T_{sm} + T_{ad} \dots\dots(8)$$

- 여기에서,
- $T_{turn}$ =선회 시간(min)
- $T_{idl}$ =공주행 시간(min)
- $T_{pf}$ =선행 및 후행 작업 시간(min)
- $T_{io}$ =포장 진출입 시간(min)
- $T_{sm}$ =자재 보급·배출 시간(min)
- $T_{ad}$ =조정 및 정비 시간(min)

Table 1. Time losses in field influencing on the field efficiency

Operations and machine	Time losses				
	Turn	Idle travel	Charging and discharging	Getting field in and out	Maintenance
<b>Tillage</b>					
· Plow	R	R	NR	R	R
· Rotavator	R	R	NR	R	R
<b>Planting</b>					
· Transplanter	R	R	R	R	R
· Seeder	R	R	R	R	R
<b>Disease and insect controlling, fertilizing</b>					
· Sprayer(walking type)	R	R	R	NR	R
· Boomsprayer, broadcaster (riding type)	R	R	R	R	R
<b>Harvesting</b>					
· Combine, sack type	R	R	NR	R	R
· Combine, grain tank type	R	R	R	R	R

R=related factor

NR=not related factor

각 작업별로 사용 작업기에 관계되는 손실시간의 유형은 표 1과 같다.

1) 선회 시간

포장 내에서 작업기는 방향을 전환할 필요로 한다. 선회 형태를 선회 완료후의 방향으로 분류하면 90° 선회와 180° 선회법이 있으며, 선회 궤적으로 분류하면 α선회, β선회, γ선회, Q선회, U선회 등으로 구분된다. 농작업별 선회 방법 및 각 방법별 적용 회수 및 선회 소요 시간에는 다소 차이가 있다. 선회 궤적에 의한 분류는 선회 유형을 상세하게 표현할 수 있으나 각각의 선회 방법의 적용 회수를 감안할 때 성능에 미치는 효과는 낮다. 본 연구에서는 선회 방법을 90° 선회와 180° 선회로 단순화하여 분석하였다. 선회 소요 시간 선회 횟수와 1회 선회 소요 시간 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_{turn} = (N_{180} \cdot t_{180} + N_{90} \cdot t_{90}) / 60 \dots\dots\dots(9)$$

여기에서,

$T_{turn}$  = 선회소요시간(min)

$N_{180}$  = 180° 선회횟수

$N_{90}$  = 90° 선회횟수

$t_{180}$  = 180° 선회에 소요되는 평균시간(s/회)

$t_{90}$  = 90° 선회에 소요되는 평균시간(s/회)

선회횟수는 작업모형에 따라 변화된다. 농기계는 작업 행정을 마치면 변속하여 정지, 전진 또는 후진 등으로 다음 작업 행정을 위하여 방향을 전환한다. 작업 모형별 선회횟수는 표 2와 같다.

선회 소요 시간은 기계의 크기, 주행 속도, 작업자의 숙련 정도, 포장의 조건 등에 따라서 변화된다. 특히 콤팩트이나 트랙터는 포장의 침하 정도와 작업 숙련도에 따라 큰 영향을 받는다. 정창주 등(1993)의 연구 결과에 의하면 대형 기계가 소형 기계보다 선회가 빠르고 작업속도가 빠를수록 선회시간이 적게 소요되는 경향이 있다. 이는 기계가 커질수록 선회반경이 커지는 영향보다는 작업속도 증대의 영향이 큰 것으로 판단된다. 본 연구에 사용된 1회 선회 소요 시간의 자료는 정창주 등(1993)의 시험 결과와 국립농업자재검사소의 시험 결과를 이용하였다.

2) 공주행 시간

왕복작업형과 선회작업형에서는 작업 완료 후 작업 종료 지점에서 포장 입구까지 작업을 하지 않고 돌아오기 때문에 이 때의 空走行 시간을 고려하였다. 농로선회형에서는 어느 쪽에서나 포장 진출입이 가능하기 때문에 공주행시간을 무시할 수 있다. 공주행 시간은 공주행 거리와 공주행 속도로부터 계산을 할 수 있으나 작업 종류, 작업 방법, 포장조건 등에 따라서 차이가 있다. 본 연구에서는 이를 단순화하기 위하여 포장의 장변 길이를 공주행 거리로 하고, 평균 작업속도를 공주행 속도로 가정하여 공주행 시간 ( $T_{id}$ )을 다음 식으로 산출하였다.

$$T_{id} = \frac{y}{60v} \dots\dots\dots(10)$$

여기에서,  $y$  = 포장의 길이(m)

$v$  = 평균 작업속도(m/s)

Table 2. Number of Turns by operation patterns.

Type of turn	Number of turns by operation patterns		
	Continuous	Circuitous	On-road turn
180° turn	$\frac{x}{w} + 1$	$\frac{x}{w} - 8INT(\frac{Lm}{w}) - 1$	$INT(\frac{x}{w})$
90° turn	3	$8INT(\frac{Lm}{w})$	0

3) 자재 보급 및 배출 시간

이양 작업에서 모를 보급하고 곡물 탱크형 수확기에서 수확된 벼를 배출하는 것과 같이 자재, 수확물의 보급과 배출에 소요되는 시간은 작업 능력의 감소 요인이 된다. 기계화 작업시간에 영향을 주는 자재 보급 및 배출 내용은 표 3과 같다. 작업 중 연료와 오일을 보충하는 경우도 있으나 대부분의 농기계는 하루 사용량 정도의 연료통 용량을 가지고 있어 작업 개시 전에 가득 채운다면 작업 중간에 보충할 필요는 거의 없게 된다. 따라서, 본 연구에서는 포장작업량 산출에서 이를 고려하지 않았다.

$t_1$  = 논둑에서의 모 보급 소요시간(s/회)  
 $n_2$  = 포장 내에서의 예비모 보급 횟수  
 $t_2$  = 포장내에서의 예비모 탑재 소요시간(s/회)

나) 모 보급 횟수의 결정

모 보급 횟수는 모 1상자의 식부가능거리, 포장의 길이와 선회 횟수, 모판의 사전 배치 방법에 따라서 변화된다. 모 보급 횟수를 모형화를 위하여 다음과 같은 가정을 설정하였다.

- ① 승용 이양기의 조당 모 탑재량은 탑재판에

Table 3. Supplying or unloading of material during the operation

Operation	Machine	Supplying or unloading
Planting	Transplanter	Seedling supply to the seedling board on-levee and in-field
	Seeder	Supplying seed to the hoppe
Spraying and broadcasting	Sprayer, mist and duster, boom sprayer, broadcaster	Supplying chemicals or fertilizer to the hopper
Harvesting	Combine (grain tank type)	Unloading harvested grain from the tank

가) 이양 작업의 모 보급 시간

이양 작업에서 모 보급 시간은 작업 성능에 큰 영향을 미치므로 정확한 추정이 필요하다. 모 보급은 논둑까지 운반하여 놓은 모판을 이양기의 모탑재판과 예비모탑재대에 적재하는 방법과 포장 내에서 예비모 탑재대의 모를 모탑재판으로 이동시키는 방법으로 구분하여 생각할 수 있다. 모 보급 시간은 모를 탑재하기 위하여 이양기를 정지시킨 시간부터 작업을 재개할 때까지의 시간으로, 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$T_{sm} = \frac{1}{60} (n_1 \cdot t_1 + n_2 \cdot t_2) \dots\dots\dots(11)$$

여기에서,

$T_{sm}$  = 모 보급시간(min)

$n_1$  = 논둑에서의 모 보급횟수

2상자, 예비모 탑재대에 1상자로 모두 3상자로 한다.

② 모 1상자의 식부가능거리는 어린모의 경우 중모의 2배로 한다.

③ 모 보급은 포장의 폭쪽 논둑의 한쪽 또는 양쪽에서 이양기가 선회할 때하고, 포장 중간에서 논둑의 모를 운반하여 보급하는 경우는 고려하지 않는다.

④ 예비모판의 모는 포장 내에서 보급할 필요가 있는 경우만 사용한다.

⑤ 새머리 작업시에는 1회의 모 보급으로 한쪽 새머리 작업이 가능한 것으로 한다.

위와 같은 전제 조건에서 모 보급 방법 및 횟수를 그림 2와 같이 모형화하여 수식으로 일반화할 수 있다. 다음 수식은 승용이양기에서 모판을 한쪽 방향으로 배치할 경우 포장의 장변 길이와

Arrangement of seeding tray	Spare seedling	Supply position <sup>1)</sup>	No. of supply per stroke	
			On-leeve	In-field
One of short sides	- no use		1/4	0
			1/2	0
	- use		1/2	1/2
Both of short side	- no use		1	0
	- use		1	1

<sup>1)</sup>o : On-leeve supply position, △ : In-field supply position of spare seeding

Fig. 2. Supplying methods and frequencies of seeding trays.

모 1상자의 식부 가능거리에 따라 모보급횟수를 일반화 한 것이다.

$$\left. \begin{aligned}
 & \textcircled{1} \ y \leq \frac{a}{2} \text{ 이면} \\
 & \quad n_1 = INT\left(\frac{x}{4w} + 2\right), \quad n_2 = 0 \\
 & \textcircled{2} \ \frac{a}{2} < y \leq a \text{ 이면} \\
 & \quad n_1 = INT\left(\frac{x}{2w} + 2\right), \quad n_2 = 0 \\
 & \textcircled{3} \ a < y \leq 1.5a \text{ 이면} \\
 & \quad n_1 = INT\left(\frac{x}{2w} + 2\right), \quad n_2 = INT\left(\frac{x}{2w} + 2\right)
 \end{aligned} \right\} (12)$$

여기에서,  
 a=모 1상자의 식부가능거리(m)  
 y=포장의 길이(m)  
 x=포장의 폭(m)  
 n<sub>1</sub>=논둑에서 모를 보급하는 횟수  
 n<sub>2</sub>=포장 중간에서 모를 보급하는 횟수

현재의 이앙 및 육묘 방법에서 모 1상자당 식부 거리는 중묘 100m, 어린모는 200m정도이므로 1 회의 모 공급으로 한 방향에 모를 배치할 경우 각각 150m, 300m의 거리를 작업할 수 있으며, 양방향 배치시는 그 거리가 2배로 늘어난다.

다) 자재의 보급 및 배출 시간

파종기, 방제기, 비료살포기 등의 파종, 살포 작업에서 종자, 농약, 비료의 보충 시간은 호퍼(탱크)의 용량, 단위살포량과 주행거리에 영향을 받게 되고, 보통형 콤바인과 곡물탱크형 콤바인의 곡물 배출 작업에 소요되는 시간은 탱크용량과 粗穀의 단위수량에 영향을 받는다. 이들 기계의 자재 보급 및 배출 소요 시간을 다음 식으로 산출하였다.

$$T_{sm} = \frac{\eta \cdot q \cdot x \cdot y \cdot t_{sm}}{60Q} \dots\dots\dots (13)$$

여기에서,  
 T<sub>sm</sub>=자재보급시간 또는 배출시간(min)  
 q=단위면적당 살포량 또는 수확량(kg/m<sup>2</sup>)  
 x, y=포장의 폭, 길이(m)  
 t<sub>sm</sub>=1회 보급 또는 배출시간(s)  
 Q=호퍼 또는 탱크의 적재적량(kg)  
 η=보급 또는 배출계수(소수)

라) 기타 손실시간

기타 손실시간으로는 先行 및 後行 작업시간, 포장진출입 시간을 고려하고, 포장 내에서의 간단한 조정 및 정비 시간과 짧은 휴식 시간, 운전



자의 私的인 시간처럼 발생 여부의 不確實性이 큰 항목은 별도로 고려하지 않았다.

① 선행 및 후행 작업시간

기계화 작업에서는 콤바인 작업 전 귀자르기 와 귀자르기한 예취물의 탈곡, 이앙 후 보식 등 본 작업 전 또는 후에 추가 작업 과정을 필요로 하는 경우가 있다. 여기에서는 콤바인 작업에서 사전 귀자르기, 이앙작업 후의 보식 등 기계가 동과 별도로 인력으로 수행하는 과정은 제외하고 기계의 가동을 구속하는 콤바인의 귀자르기 한 예취물의 추가 탈곡작업만 고려 하였다. 추가 탈곡작업은 작업 초기에 포장의 가장자리를 수 확하면서 수행하는 방법과 작업 마지막 부분에 가장자리를 추가로 선회하면서 수행하는 방법이 있다. 본 연구에서는 콤바인 작업에서 추가 탈곡 작업시간으로 포장 주위를 1회 더 선회하는 것

으로 하였다.

② 포장 진출입시간

주행형 농기계에서 농로에서 포장으로 진입하 는 시간과 한 포장에서 작업을 끝낸 후 농로 또는 인접 포장으로의 탈출에 요하는 시간을 고려하 였다. 포장 진출입시간은 진입로의 위치, 형태와 지역의 경사도, 논두렁 높이 등에 따라 편차가 크나 평균소요시간과 진출입횟수로 나타낼 수 있다. 포장 진출입횟수는 포장당 1회로 하고 1회 당 평균소요시간은 전국 농업협동조합연합회의 수도작 기계화계획(1975) 자료를 인용하여 5분 으로 하였다.

앞에서 모형화한 포장작업시간을 정리하면 표 4와 같으며, 이를 식 2와 3에 대입하여 포장작업 량과 포장효율을 산출할 수 있다. 여기에서 작업 소요시간 구성 요소는 포장의 장단변 길이와 밀

Table 4. Mathematical model of operation time

Time requirement	Patterns of operation		
	Continuous	Circuitous	On-road turn
Effective operating ( $T_e$ )	$\frac{xy}{60vw}$	$\frac{xy}{60vw}$	$\frac{xy}{60vw}$
Turning ( $T_{turn}$ )	$\left(\frac{x}{w} + 1\right) \frac{t_{180}}{60}$ $+ \frac{3t_{90}}{60}$	$\left[\frac{x}{w} - 8INT\frac{l_m}{w}\right] \frac{t_{180}}{60}$ $+ \left[8INT\frac{l_m}{w}\right] \frac{t_{60}}{60}$	$\left(INT\frac{x}{w}\right) \frac{t_{180}}{60}$
Idle travel ( $T_{id}$ )	$\frac{v}{60v}$	$\frac{v}{60v}$	-
Supplying or discharging of material( $T_{sm}$ )	$\frac{1}{60}(n_1 \cdot t_1 + n_2 \cdot t_2)$ : (seedling supply) $\frac{\eta \cdot q \cdot x \cdot y \cdot t_{sm}}{60Q}$ : (charging & discharging hopper)		
Preliminary or finishing operation( $T_{pf}$ )		$T_{pf}$	
Entering and getting out field( $T_{io}$ )		$T_{io}$	
Total time requirement ( $T$ )		$T_e + T_{turn} + T_{id} + T_{sm} + T_{pf} + T_{io}$	
Theoretical time		$\frac{\epsilon_w xy}{60vw}$	

접하게 관계됨을 알 수 있다. 또한 정해진 포장 및 작업기에서는 유효작업시간은 작업속도와 실작업폭 크기에 종속되며, 선회시간은 실작업폭과 포장의 단변 길이에 종속된다. 따라서 포장작업량과 포장효율도 포장의 장단변 길이와 작업속도 및 실작업폭에 종속됨을 알 수 있다.

(2) 소요 노동력 해석 모델

기계화 작업에서 노동력은 농기계의 운전 노동력과 이양 작업시의 모 공급, 콤바인 수확시의 벼자루의 취급 등 보조 노동력을 필요로 하게 된다. 표 5는 주요 포장작업에 소요되는 소요 인력과 작업 횟수를 나타낸다. 실제 작업에서 일정 규모의 면적을 작업하는데 운전자와 보조 작업자의 노동 소요 시간이 다를 수 있으나 이를 동일한 것으로 간주하면 단위면적(ha)당 노동소요시간은 다음과 같이 산출된다. 여기에는 육묘장으로부터 포장까지 모 운반 및 비료, 종자 등 자재의 포장까지의 운반시간 등은 포함하지 않았다. 노동소요 시간은 실제 노임지급 및 고용이 최소 1일단위로 정해지고, 1일 작업시간에는 휴식시간, 포장간 이동시간, 작업 대기시간 등과 같은 포장작업 시간에는 포함되지 않는 손실시간이 포함되는 것을 감안하여 포장작업시간을 실작업률로 나눈 값으로 하였다.

$$HR_{xy} = \frac{NOP + NAU}{C_{xy} \cdot \epsilon_u} \dots\dots\dots(14)$$

여기에서,

HR<sub>xy</sub>=폭과 길이가 x,y인 포장에서의 ha당 소요노동시간(h/ha)

NOP=농기계 운전자수(인)

NAU=보조 작업자수(인)

ε<sub>u</sub>=실작업률

또한 작업별 최대 작업 소요 인원과 작업소요인수는 다음 식으로 표시된다.

$$NLMAX = NM(NOP + NAU) \dots\dots\dots(15)$$

여기에서,

NLMAX=기계작업시 최대 소요 인원(인)

NM=동일 시기에 작업하는 기계 대수(대)

$$D_w = \frac{AR \cdot N}{\epsilon_u \cdot \epsilon_d \cdot C_{xy} \cdot U} \dots\dots\dots(16)$$

여기에서,

D<sub>w</sub>=작업소요일수(day)

AR=작업대상면적(경영면적) (ha)

N=작업횟수

U=1일 작업시간(h/day)

Table 5. Number of the machine-operators and operation for different farming functions

Machine	Number of operator(persons)			Number of operation (turn)
	Machine operator	Assistant	Total	
Plow	1	-	1	1
Rotavator	1	-	1	1~2
Transplanter	1	1	2	1
Seeder	1	1	2	1
Sprayer (walking type)	1	2~5	3~6	2~4
Mist & duster				
- misting	1	-	1	
- dusting	1	1	2	
Boom sprayer	1	1	2	1
Broadcaster	1	1	2	
Combine				1
- grain tank type	1	-	1	
- sack type	1	1~2	2~3	

3. 결과 및 고찰

가. 포장구획과 포장 성능

앞에서 모델링한 수식에 의해 표 6과 같은 주요 농기계에 대한 포장구획별 포장효율을 산출하여 표 7에 나타내었다. 그중 경운작업(8련 모듈드보드 플라우)에 대하여 포장의 폭과 길이 변화에 따른 포장작업량 및 포장효율의 예를 그

림 3에 나타내었다. 그림 3은 장변길이 100, 150, 200, 300m를 파라미터로하여, 단변폭을 20m 단위로 증가하면서 횡축에 표시하고, 포장효율과 작업량을 종축에 표시한 것이다. 그림 3에서 포장효율과 포장작업량의 변화를 살펴보면, 장변이 100m이고 단변 20, 40, 60m의 경우 각각 50, 61, 65%로 증가한 것과 같이 단변 증대 초기에는

포장효율이나 포장작업량이 급격히 증가되나, 단변이 어느 정도 이상(여기서는 100m)되면 그 증가는 완만해지며, 장변 증대에 대하여도 같은 경향으로 나타났다.

일반적으로 포장의 장단변 길이가 커짐에 따라 작업량과 효율이 증대되며, 그 증대 정도는 처음에는 급격하나 차차 완만해진다. 경운, 정지,

Table 6. Machine and its specifications analyzed in the study

Model code	Machine	Work- ing Width	Work- ing speed	Machine length	Opera- tion pattern
		m	m/s	m	
Plow					
PL1	• 32×8+tractor(over 70ps)	2.56	1.2	6.0	cir
PL2	• 32×6+tractor(over 50ps)	1.90	1.2	5.5	cir
PL3	• 30×4+tractor(over 40ps)	1.18	1.2	5.2	con
Leveller					
LEA1	• Rotavator, 2.55m+tractor(over100ps)	2.55	1.1	6.4	con
LEA2	• Rotavator, 2.20m+tractor(over 70ps)	2.20	1.1	6.1	con
LEA3	• Harrow, 3.25m+tractor(over 40ps)	3.25	1.0	4.0	con
LEB4	• Harrow, 4.17m+tractor(over 50ps)	4.17	1.0	5.0	con
Transplanter, riding type					
TRA1	• 6-row, rotary transplanting device	1.8	1.1	2.9	con
TRA2	• 6-row, crank transplanting device	1.8	0.6	2.9	con
TRB3	• 8-row, rotary transplanting device	2.4	1.1	3.4	con
Seeder					
DSA1	• 8-row, 7ps, self driving	2.4	0.84	3.1	con
DSA2	• 6-row, 4.1ps, self driving	1.8	0.84	2.7	con
DSA3	• 8-row+tractor(over 45 ps)	2.4	0.9	4.0	con
DSB4	• 20-row+tractor(over 80ps)	6.0	0.9	5.0	con
Combine					
					cir
Self feeding type					
HSA1	• 4-row, grain tank type	1.2	1.3	4.3	cir
HSA2	• 4-row, sack type	1.2	1.3	4.3	cir
HSA3	• 3-row, grain tank type	0.9	1.3	3.6	cir
HSA4	• 3-row, sack type	0.9	0.5	3.6	cir
HSB5	• 6-row, grain tank type	1.8	1.3	5.2	cir
Common type					
HCB6	• 2.1m, grain tank	2.1	0.9	5.8	cir
HCB7	• 5.0m, grain tank	5.0	0.9	7.0	cir

Operation patterns : con=continuous pattern, cir=circuitous pattern

Source : Agricultural Machinery Inspection Yearbook. 1988~1995. NAMIO

Table 7. Field efficiency by different plot sizes, working width and speed.

Machine	working speed (m/s)	Plot sizes										Remarks
		0.2 ha		0.4 ha		1 ha		2 ha		4 ha		
		100×20m	100×40 m	100×100 m	200×100 m	200×200 m	100×20m	100×40 m	100×100 m	200×100 m	200×200 m	
working width	$\epsilon_{fsy}$	Index	$\epsilon_{fsy}$	Index	$\epsilon_{fsy}$	Index	$\epsilon_{fsy}$	Index	$\epsilon_{fsy}$	Index		
<b>Plow</b>												
30×4cm	1.2	60.6	100	67.8	112	73.0	120	84.0	139	85.4	141	two-way plow
32×6cm	1.2	58.8	100	68.3	116	75.6	129	85.4	145	87.5	149	one-way plow
32×8	1.2	50.3	100	60.8	121	69.6	138	81.2	161	84.0	1167	〃
<b>Leveller</b>												
2.55 m	1.1	38.6	100	46.3	120	52.6	136	59.5	154	61.4	159	rotavator
2.20	1.1	36.6	100	44.9	123	51.9	142	59.0	161	61.1	167	〃
3.25	1.0	57.3	100	71.0	124	82.9	145	89.3	156	92.8	162	harrow
4.17	1.0	51.6	100	66.5	129	80.3	156	87.5	170	91.8	178	〃
<b>Transplanter</b>												
1.2 m	0.6	68.1	100	74.8	110	79.6	117	82.6	121	83.6	123	walking type
1.8	0.6	63.2	100	71.2	113	77.6	123	81.6	129	83.1	131	riding type, LS
1.8	1.1	50.2	100	58.7	117	66.1	132	71.5	142	73.2	146	〃, HS
2.4	1.1	41.7	100	51.9	124	60.8	146	67.6	162	69.8	167	〃, HS
<b>Seeder</b>												
1.8 m	0.84	64.0	100	73.3	115	80.3	125	86.8	136	88.6	138	self driving
2.4	0.84	59.0	100	69.9	118	78.6	133	86.6	145	88.0	149	〃
2.4	0.9	58.4	100	69.7	119	78.9	135	86.5	148	89.1	153	tractor attached
6.0	0.9	39.4	100	54.3	138	70.2	178	80.2	204	86.0	218	〃
<b>Combine</b>												
0.9 m	0.5	82.9	100	86.7	105	89.2	108	94.3	114	94.8	114	self feeding, LS
0.9	1.3	65.5	100	72.0	110	76.5	117	84.2	129	85.2	130	self feeding, HS
1.2	1.3	60.2	100	68.2	113	74.2	123	82.1	136	83.5	139	〃
1.8	1.3	51.5	100	61.5	119	69.5	135	77.8	151	79.8	155	〃
5.0	0.9	33.6	100	45.0	134	56.4	168	65.7	196	69.1	206	common type

1)  $\epsilon_{fsy}$  : Denotes the field efficiency in percentage at the plot geometry of  $x \times y$  m

2) The reference indices, 100, are given at the plot geometry of  $100 \times 20$  m

3) LS : low speed, HS : high speed

수확작업에서는 장변(작업방향의 길이) 증대의 효과가 단변(작업방향의 폭) 증대의 효과보다 현저하게 나타나나 이양작업에서는 모보급의 영향으로 장변이 어느 한계를 넘어서면 그림 4와 같이 효율이 갑자기 감소하다가 다시 증가하게 된다. 그림 4는 6조 승용이양기로 단변이 100m

인 포장에서 모 1상자의 식부가능거리가 200m 인 어린모를 이양하는 경우의 장변 변화에 따른 포장효율의 변화 추세를 나타낸 것이다. 장변을 100m에서 300m까지 변화시키면 100m와 200m를 넘어 서면서 포장효율이 갑자기 감소된다. 이는 그림 2에 나타낸 바와 같이 포장 길이에 따라

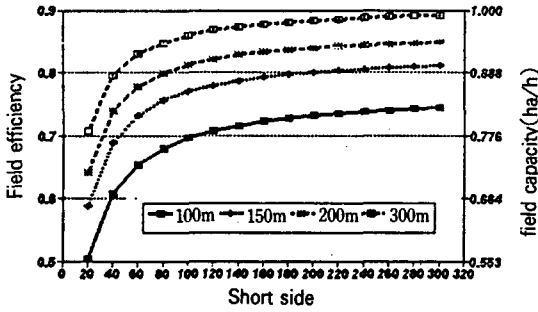


Fig. 3. Relationship between plot sizes and field efficiency (plow).

모보급 주기가 변동되어 모보급으로 인한 손실 시간이 증가하기 때문에 이양작업의 효율 향상을 위해서는 모상자당 식부 거리의 증대 등 육묘 및 모공급 체계의 개선이 요망된다.

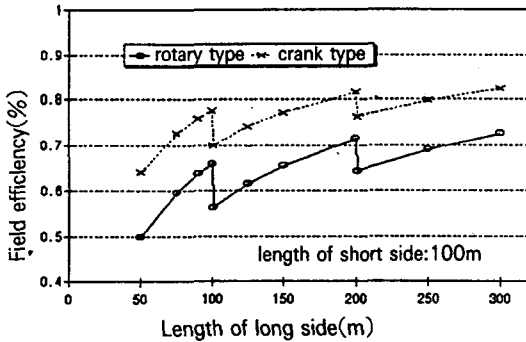


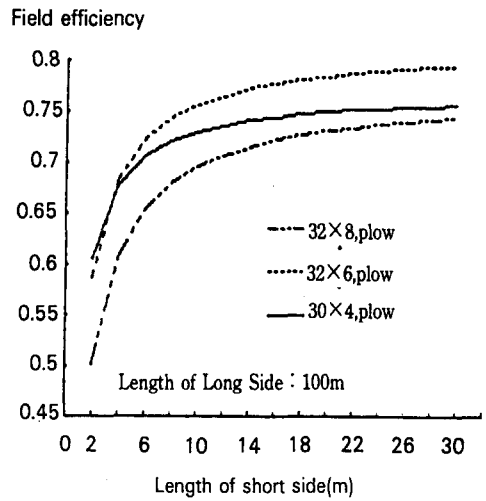
Fig. 4. Relationship between length of plot and field efficiency for two different types of the transplanters.

나. 작업폭 · 작업속도와 포장 성능

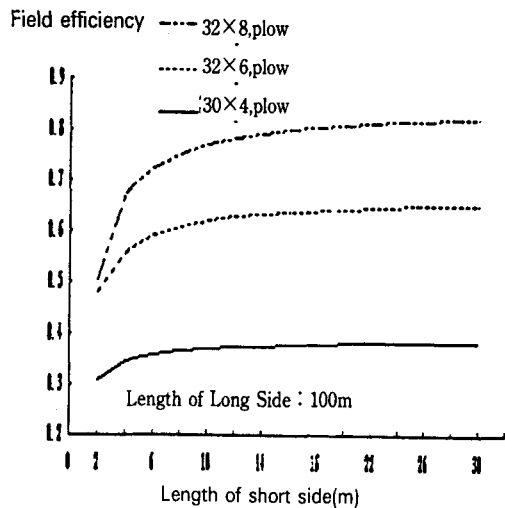
(1) 작업폭의 영향

포장작업 기계에서 일반적으로 작업폭과 작업 속도가 증대되면, 즉 고성능화되면 포장작업량은 증가한다. 그러나 포장효율은 오히려 감소하는 경향이 있다. 이러한 경향은 표 7에서 작업기의 크기별 포장효율의 변화 추세를 비교하므로써 알 수 있다. 플라우 32×6과 32×8, 이앙기1.2

m(보행4조)와 1.8m(승용 저속형 6조), 콤파인 0.9m(3조 고속형) 및 1.2m(4조 고속형), 1.8m(6조 고속형) 등과 같이 작업속도와 작업 방법이 같은 경우에는 동일 규격의 포장에서 작업폭이 증가(대형화)할수록 포장효율은 오히려 감소하는 것으로 나타났다(그림 5.a의 예와 같이 작업 방법이 달라지는 경우에는 일반적인 경향이 아님). 이는 기계 작업폭의 증가에 따른 이론 작업 시간의 감소분 만큼 선회시간, 자재 보급 및 배출



a. Field efficiency



b. Field capacity

Fig. 5. Relations between plot and machine size

시간 등 손실시간의 감소가 상대적으로 적기 때문이다.

포장의 크기별로 대형화에 따른 포장효율 차이는 소구획 포장에서 더 크고, 대구획화 될수록 그 차가 좁아진다. 그림 5는 4련 양용 플라우와 6련 및 8련 단용 플라우에서 동일한 작업속도(1.2m/s) 조건에서 포장효율과 포장작업량을 나타낸 것이다. 여기에서 양용플라우(6련 및 8련)는 회행작업형, 단용플라우(4련)는 왕복작업형으로 작업을 한 것이다. 작업 방법이 같은 6련 및 8련 단용플라우를 비교하면 작업폭이 증대함에 따라 작업효율은 감소하지만 작업량은 증가하는 결과가 나타난다. 그러나, 왕복작업형의 4련 양용플라우와 회행작업형의 6련 단용플라우를 비교하면 작업폭이 큰 6련에서 더 높은 작업효율을 나타내, 작업 방법이 다를 경우에는 작업폭이 증가하여도 효율이 반드시 감소하는 것은 아님을 알 수 있다. 여기에서 주목할 것은 작업폭이 클수록 포장구획 확대 효과가 크다는 것이다. 그 예로 0.2ha 포장에 대한 2ha 포장에서의 포장 성능(작업량 및 효율)의 증대율을 비교하면, 6련 플라우는 45%로 나타나는 반면, 8련 플라우는 61%로 나타나며, 콤바인 3조와 6조는 각각 29%와 51%로 나타난다(표 6). 이와 같은 이유로 대형기계는 대구획 포장에서 사용되는 것이 효율적이라 하는 것이다.

(2) 작업속도의 영향

그림 6은 0.4ha(100×40m) 포장에서 경운, 정지, 이앙, 수확작업에서 작업속도 변화에 따른 포장효율의 변화를 나타낸 것이다. 포장 작업에서 작업속도가 증대될수록 포장효율은 저하된다. 이는 이론작업시간은 작업속도 증대에 비례하여 감소하나 손실시간의 감소는 발생하지 않거나 상대적으로 적기 때문이다. 그러나 작업속도의 증대에 따라 포장작업량은 증대되기 때문에 작업속도를 가능한 한 증대시키는 것이 요망된다 여기에서도 주목할 것은 작업속도가 빠를수록 포장 확대의 효과가 크다는 것이다. 작업속

도가 0.5 m/s와 1.3 m/s인 콤바인(3조식)의 경우, 0.2 ha 포장에 대한 2ha 포장에서의 포장작업성능 증가율은 각각 14%와 30%로 대구획 포장에서 높게 나타났다. 이를 저속의 3조식 콤바인(0.5m/s)은 0.2 ha 포장에서 사용하고 고속의 6조식 콤바인을 2 ha 포장에서 사용할 때의 성능(포장작업량)을 비교하면 각각 0.13 ha/h와 0.67 ha/h로 515%의 성능 증대 효과가 나타났다.

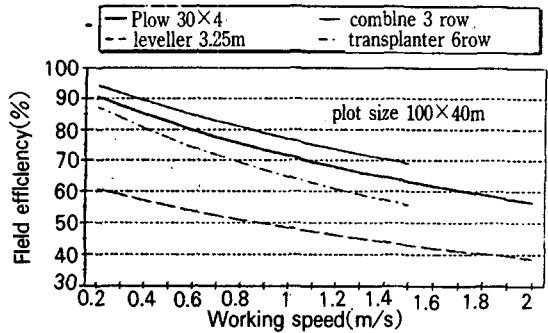


Fig. 6. Field efficiency for varying working speed.

다. 작업모형과 작업 성능

작업모형별 특성을 비교하기 위하여 장변이 100m이고 단변이 40m에서 120m까지 변화하는 포장에서의 포장효율을 산출한 결과 표 8과 같이 나타났다.

작업 모형별로는 모든 작업기에서 농로선회형 작업 방법이 왕복작업이나 회행작업보다 포장효율이 높게 나타나는데, 단변 길이가 짧을수록 효율의 차이가 크고, 단변이 길어지면 그 차이도 좁아진다. 농로선회형 방법에서는 단변 크기에 영향을 거의 받지 않는데 이는 새머리 작업을 하지 않기 때문이다. 왕복작업형과 회행작업형 사이에는 작업효율에 큰 차이가 없으나 플라우와 로터베이터, 이앙기에서는 왕복작업형이 다소 유리하고 콤바인에서는 회행작업이 다소 유리한 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

기계화 영농을 계획 및 평가하는데 중요 지표인 포장작업량과 포장효율, 소요 노동력을 작업 세부 공정의 수학적 해석을 통하여 모델링 하였다. 동 수학적 모델을 이용 주요 작업에 대하여 포장의 장단변 길이, 기계의 크기(작업폭) 및 작업속도와 포장작업량 및 포장효율의 관계를 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다. 이 연구 결과는 기계화 계획 수립 및 기계화를 고려한 포장정비사업 계획 수립에 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 전망된다.

① 포장구획이 확대되면 포장작업량과 포장효율은 증가한다. 또 일반적으로 단변의 증대 보

다 장변의 증대 효과가 크다.

② 일정한 포장에서는 작업폭과 작업속도가 증대되면 농기계의 포장작업량은 증가한다. 그러나 포장효율은 작업폭 및 작업속도가 증가하면 오히려 감소하는 경향이 있다.

③ 작업 모형을 포장효율은 농로선회형 작업이 왕복작업이나 회행작업보다 포장효율이 높게 나타나며, 단변 길이가 짧을수록 효율의 차이가 크고, 단변이 길어지면 그 차이도 좁아진다.

참고 문헌

Table 8. Comparison of the field efficiency by operation patterns

Machine and plot size	Field efficiency (%)		
	Operation patterns		
	Continuous	Circuitous	On-road turn
Plow, 4×32cm			
100×40m	67.8	67.5	77.4
100×60	70.6	70.4	77.2
100×100	73.0	72.9	77.1
100×120	73.6	73.5	77.0
Rotavator, 2.55m			
100×40	44.9	43.6	58.3
100×60	48.5	47.5	58.1
100×100	51.9	51.2	58.0
100×120	52.8	52.2	57.9
100×120	52.8	52.2	57.9
Transplanter, 6-row			
100×40	58.7	58.2	70.6
100×60	62.2	61.8	70.6
100×100	66.1	65.9	71.6
100×120	66.8	66.6	71.4
Combine, 4-row			
100×40	65.8	68.2	81.5
100×60	69.6	71.4	80.4
100×100	73.0	74.2	79.6
100×120	73.9	74.9	79.4

1. 김학규. 1995. 대구획 포장의 벼농사 일관기 계화 체계에 관한 연구. 서울대학교(박사학위논문)
2. 정창주, 류관희, 장동일, 조성인, 이중용. 1993. 농업기계 이용 효율 제고를 위한 경지정리의 기초 설계기술 개발에 관한 연구. 농림수산부. 농어촌진흥공사.
3. 剛村俊民. 1991. 農業機械化の基礎. 北海島大學 研究報告.
4. 小中俊雄. 1989. 農業システム工學. 朝倉書店.
5. 全國農業協同組合聯合會 農業機械部. 1975. 水田作の機械化計劃.
6. Ahn D. H. 1992. Relationship between farmland structure and machinery operation : The case study for Korea. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand
7. Hunt, D. R. 1986. Engineering models for agricultural production. The AVI Publishing Co., INC.
8. Hunt, D. R. 1983. Farm Power and Machinery Management. eighth edition. Iowa State University Press, Ames, Iowa