

직파재배 논 의 지표관개 수리특성

- 건답휴립직파 논을 중심으로 -

Hydraulic Characteristics of Surface Irrigation in Paddy Field of Direct Seeding Culture

- With paddy field of ridge direct dry seeding -

정 하 우* · 최 진 용** · 김 대 식***
Chung, Ha Woo · Choi, Jin Yong · Kim, Dae Sik
박 기 욱*** · 배 승 종***
Park, Ki Uk · Bae, Seung Jong

Summary

The purpose of this study is to analyze hydraulic characteristics of surface irrigation in a paddy field of direct seeding culture. Field experiment was performed in the paddy field of ridge direct dry seeding. Simulation by a numerical model was also accomplished with the data obtained from the field experiment. The model was developed by one dimensional zero-inertia equation and finite difference method. From the result of the field observation, the furrows of the experimental field were found to have various geometric characteristics. Advance distance and time were measured both in the field and by the model simulation for various furrow lengths and irrigation discharges. Roughness coefficients of each furrow were also estimated by the model.

I. 서 론

관개용수 절약에 대한 관심이 최근 고조됨에 따라 구획의 크기별, 영농 방식별 물관리

계획 수립을 위한 기초 연구의 필요성이 대두되기 시작하였다. 또한 생산비 절감을 위해 영농방식을 이앙재배에서 직파재배로 차츰 변화시키는 등 여러 가지 쌀 생산비 절감 방안

* 서울대학교 농업생명과학대학

** 서울대학교 농업개발연구소

*** 서울대학교 대학원

키워드 : 지표관개, 직파재배

이 강구되고 있다. 이러한 영농방식의 변화에 따라 직파재배에 대한 적절한 물관리 대책이 요구되고 있으며, 이를 위해서는 재배방식별 물 소비형태, 소비량 등의 특성 규명이 필요한 시점에 이르렀다. 직파재배는 답수직파와 건답직파로 분류되는데, 1992년에는 전국적으로 답수 319ha, 건답 92ha로 411ha의 직파재배가 실시되었으며, 1997년까지는 40만ha의 직파재배를 확대보급할 계획이다.^{1,2,3)}

직파재배에 따른 적정 관개량을 산정하기 위해서는 구획 크기, 관개 형태, 토성 종류 등의 다양한 소비수량 변화 요인에 대한 특성 분석이 필요하다. 이러한 특성을 규명하기 위해서는 현장실험이 절대적으로 필요한 것이지만 다양한 크기의 구획과 여러 가지 토성의 종류를 구비하기 어렵고, 다양한 관개조건에 대한 반복적 실험이 불가능하며, 많은 시간의 소요를 요구하는 한계성을 가지는 반면, 수치모형에 의한 모의 분석은 빠른 시간내에 다양한 분석 결과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 예측도 가능하게 한다. 그러므로 논에 대한 현장 실험 분석과 수치모형에 의한 모의 분석을 병행하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 현장 실험과 수치실험을 통하여 직파재배 논의 지표관개 수리특성을 규명하는데 그 목적을 두었으며, 이를 위하여 건답휴림직파 논의 고랑 조도계수의 추정, 구획의 크기 및 관개유량의 변화에 따른 물머리 진행 특성을 분석하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 포장실험

가. 포장 개요

본 연구의 실험포장은 경기도 화성군 양감면에 위치한 사질양토의 건답직파재배 논으로서 Fig. 1과 같이 96m×11m의 포장으로, 범

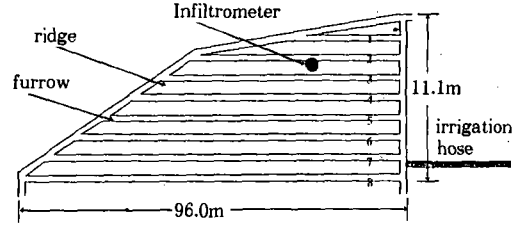


Fig. 1. Sketch of the experimental field

씨는 넓은 이랑인 휴림에 파종하고, 관개는 고랑을 통하여 흘려 보내도록 되어 있다. 관개시기는 벅잎이 3개인 3엽기에 1차로 관개토록 계획하였다. 고랑은 가로방향으로 8개로 구성되었고, 고랑의 형태는 기계에 의해 경운된 포물선형이었다. 관개용수는 인접 용수로로부터 낙차에 의해 호스로 월류되었다. 본 포장에 대하여 침투특성, 고랑특성 및 물머리 진행특성을 실측하였다. 관개를 실시하기 직전에 원통형 Infiltrometer를 설치하여 침투특성을 조사하였다.

나. 초기토양수분 및 관개유량

토양수분 조사를 위하여 실험지역 내부 6개의 임의지점에 대하여 실험시작 직전에 지표면에서 7cm 깊이에서 시료를 채취하여 분석한 결과, 중량백분을 평균 20.84%로 나타났다. 한편, 직파재배시의 관개용수는 파종된 씨앗에 피해가 가지 않도록 적은 유량과 낮은 유속으로 관개하였다. 특히 건답휴림직파의 관개는 물이 휴림표면 위로 올라오지 않도록 주의해야 하는데, 만약 물이 과다하게 이랑 위로 올라오면 식질토의 경우에는 표토가 굳어져 발아를 방해하게 된다. 또한 너무 적은 유량으로 관개하면 과다한 지하침투의 효과에 의해 관개효율이 떨어지게 된다. 본 실험에서는 논 고랑관개에서 물머리 진행특성을 분석하기 위해 현장조건을 고려하여 8개 고랑에 관개유량을 0.0024m³/s로 112분 동안 관개하였다.

2. 수치모형 실험

가. 모형의 기본 방정식

고랑내의 흐름은 연속방정식과 운동량방정식으로 해석이 가능하다. 운동량방정식은 Saint-Venant 방정식에서 가속도항을 소거한 형태의 방정식을 사용하며 다음과 같은 가정을 기초로 한다. 첫째, 흐름은 1차원으로 생각하고, 둘째, 가속도는 무시할 만큼 작고, 셋째, Manning계수 n 은 전 고랑에 대해 일정하다. 이로부터 방정식을 구하면 다음과 같다⁷⁾.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_o - S_f \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서, A 는 흐름의 단면적(L^2), Q 는 유량(L^3T^{-1}), z 는 단위길이당 부피로 나타낸 침투량(L^2), t 는 시간(T), y 는 흐름의 깊이(L), x 는 거리(L), S_o 는 고랑의 경사, S_f 는 수면의 마찰경사이다. 위의 운동량방정식은 가속도항이 모두 소거 되었으므로 Zero-Inertia 방정식이라 한다. 한편 논은 경사가 없기때문에 식 (2)는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial y}{\partial x} = -S_f \quad \dots\dots\dots (3)$$

식 (1)과 식 (3)에서 A , y 의 관계를 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y = bA^h \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서, b , h 는 상수이다. 식 (3)의 마찰경사 S_f 는 매닝 공식으로부터 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$S_f = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R^{4/3}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서, n 은 조도계수, R 은 동수반경(m)

이다. 식 (5)의 분모는 다음과 같이 간략화할 수 있다.

$$A^2 R^{4/3} = dA^f \quad \dots\dots\dots (6)$$

여기서, d , f 는 상수이다.

위의 식 (4)~(5)를 운동량 방정식 (3)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial (bA^h)}{\partial x} = -\frac{Q^2 n^2}{dA^f} \quad \dots\dots\dots (7)$$

위의 식 (1)과 식 (7)을 지배방정식으로 하여 논에서의 물의 흐름을 해석할 수 있다.

나. 유한차분식의 전개

관개가 진행되는 동안 고랑으로 들어간 모든 물은 고랑내 또는 토양내에 저장된다. 이 유입된 물의 부피는 통제역(control volume)을 변화하게 하는 일련의 움직임으로 고려될 수 있다. Fig. 2는 t_{i-1} 과 t_i 두 개의 계산시각에 대한 통제역을 나타내고 있다. 이 시간동안 좌측의 경계는 하류측으로 x_{k-2} 에서 x_{k-1} 까지 Δx_{k-1} 만큼 이동하고 우측의 경계는 x_{k-1} 에서 x_k 까지 Δx_k 만큼 이동한다. 아래측 침차 J , M 은 t_{i-1} 시각의 좌측과 우측 절점을 나타내고 L , R 은 t_i 시각의 좌측과 우측 절점을 나타낸다. 각각의 시각에 대한 새로운 통제역이 고랑의 처음에서 형성되고 다른 통제역은 하류측으로 이동한다. 이것에 대한 계산격자를 $x-t$ 평면상에 나타낸 것이 Fig. 3이다. 지배방정식의 변수는 x 와 t 방향으로 증가하여 유한차분 격자는 경계를 나타내게 된다. Fig. 3에서 각 절점은 특정시간에 대한 통제역의 경계를 나타낸다. 결국 어떤 시간 t 에 대한 격자의 개수는 i 와 같다. 시간의 진행에 따른 새로운 시각 t_i 에 대한 절점 L 과 R 에서의 면적 A 와 유량 Q 의 값은 바로 전 시각 t_{i-1} 의 절점 J 와 M 에서의 값에 의해 구해진다. 물머리의 진행거

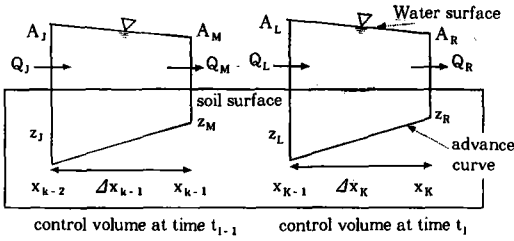


Fig. 2. Control volume at two times during advance

리 Δx 는 각 시각에 대한 해로서 얻어지며, 이로부터 물머리의 위치를 구할 수 있다. 각 시간에서 모든 격자에 대한 방정식은 동시에 풀어야 하며, 그 해는 음해법에 의해 구할 수 있다. 그리고 시간간격도 한 개의 변수이지만 모형개발의 단순화를 위해서 상수로 취급한다. 시간간격 Δt 동안 질량보존법칙에 따라 통제역내의 순수 유입량은 고랑과 토양에 저장된 물의 부피증가와 같다. 이는 격자 내부의 각 격자에 대해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 & [(A_L + z_L)\phi + (A_R + z_R)(1 - \phi)]\Delta x_k \\
 & - [(A_J + z_J)\phi + (A_M + z_M)(1 - \phi)]\Delta x_{k-1} \\
 = & \Delta t \left[\theta \left\{ [Q_L - (A_L + z_L)\frac{\Delta x_{k-1}}{t}] \right. \right. \\
 & \left. \left. - [Q_R - (A_R + z_R)\frac{\Delta x_k}{t}] \right\} \right. \\
 & + (1 - \theta) \left\{ [Q_J - (A_J + z_J)\frac{\Delta x_{k-1}}{t}] \right. \\
 & \left. \left. - [Q_M - (A_M + z_M)\frac{\Delta x_k}{t}] \right\} \right] \dots \dots (8)
 \end{aligned}$$

여기서, ϕ 와 θ 는 공간과 시간에 대한 가중치이다. 첫 번째의 격자($k=1$)에 대해 식 (8)은 다음과 같이 단순화 될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & [(A_L + z_L)\phi + (A_R + z_R)(1 - \phi)]\Delta x_1 \\
 = & \Delta t \left[\theta \left\{ Q_L - Q_R - (A_R + z_R)\frac{\Delta x_1}{\Delta t} \right\} \right. \\
 & \left. + (1 - \theta)(A_M + z_M)\frac{\Delta x_k}{\Delta t} \right] \dots \dots (9)
 \end{aligned}$$

첫 번째 격자와 모든 내부 격자에 대해서 식 (7)의 좌변과 우변을 유한차분식으로 나타내면 다음과 같다.

$$bA_R^h - bA_L^h = -\Delta x_k \left\{ \frac{Q_L^2 n^2}{dA_L^3} \phi + \frac{Q^2 n^2}{dA_R^3} (1 - \phi) \right\} \dots \dots (10)$$

각시간에 따른 마지막 격자에서의 A와 z는 다른 것들에 비해 1개 격자내에서 변화가 심하며, 편미분은 물머리 끝에서 경계가 없이 증가하게 된다. 그러므로 유한차분에서의 공간과 시간의 가중치를 사용하는 것은 적당하지 않다. 따라서 이 격자에서는 다른 접근방법으로서, 토양과 고랑에서의 수면곡선과 침투곡선의 모양을 가정하여 사용한다. 이 곡선의 모양은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{A}{A_{N-1}} = \left(\frac{x_N - x}{x_N - x_{N-1}} \right)^\beta \dots \dots (11)$$

$$\frac{z}{z_{N-1}} = \left(\frac{x_N - x}{x_N - x_{N-1}} \right)^\alpha \dots \dots (12)$$

여기서, α 와 β 는 이미 정해진 상수이며, N 은 마지막 계산격자의 번호이다. 지점 x 에서의 A는 유적(flow area)이며, z는 침투된 유량으로 단위 길이당 체적이다.

이러한 가정을 마지막 격자에 적용할 때 α

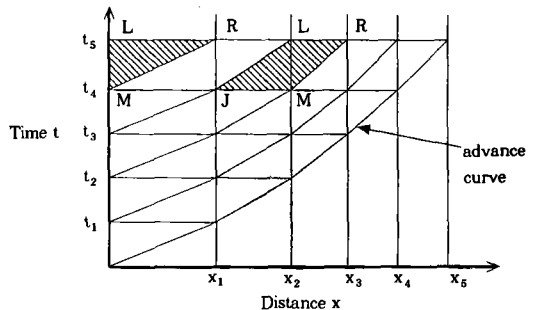


Fig. 3. Network of computational cells in x-t plane after five time steps

와 β 는 침투방정식의 상수와 고랑형상의 계수로 표현되고 식 (1)은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{A_L}{1+\beta} + \frac{z_L}{1+\alpha} \right) \Delta x_N - \left(\frac{A_J}{1+\beta} + \frac{z_J}{1+\alpha} \right) \Delta x_{N-1} \\ & = \Delta t \left\{ \theta \left[Q_L - (A_L + z_L) \frac{\Delta x_{N-1}}{\Delta t} \right] \right. \\ & \quad \left. + (1-\theta) \left[Q_J - (A_J + z_J) \frac{\Delta x_{N-1}}{\Delta t} \right] \right\} \quad (13) \end{aligned}$$

한편, 식 (11)을 x 에 관해 미분하면 다음 식 (14)와 같이 된다.

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{-\beta A_{N-1}}{x_N - x_{N-1}} = \frac{-\beta A_L}{\Delta x_N} \quad (14)$$

그러므로 절점 x_{N-1} 에서 식 (7)은 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{-\beta h b A_L^4}{\Delta x_N} = \frac{Q_L^2 n^2}{d A_L^5} \quad (15)$$

결국 계산 격자 각각에 대해서 두 개의 방정식이 성립된다. 첫 번째 격자에 대해서는 식 (9)와 (10)이 있으며, 마지막 격자에 대해서는 식 (13)과 식 (15)가 있고, 중간 격자에 대해서는 식 (8)과 식 (10)이 있다. 각 시간에 대해 $N+1$ 개의 절점이 있고, N 개의 격자가 있게 되며 결국 $2N$ 개의 방정식이 성립된다. 미지수는 첫 번째 절점에서의 A 와 내부 격자에서의 A , Q 그리고 진행거리의 증가량 δx 이다. 그러므로 미지수의 개수는 역시 $2N$ 개가 된다. 첫 번째 절점의 유량 Q 는 경계조건에서 주어지며 z 값은 절점에서의 침투가능 시간이 결정되므로 계산할 수 있다. 그러나 $2N$ 개의 비선형 방정식의 해를 얻기는 불가능하므로 그 해는 선형화된 방정식을 이용하여 얻어진다.

Strelkoff와 Katopodes⁹⁾에 의해 제시된 Zero-Inertia 방정식은 다음과 같이 선형화할 수 있는데, 이를 위하여 식 (16)~(22)을 정

의할 수 있다

$$A_L = A_J + \Delta A_L (1 < k \leq N) \quad (16)$$

$$A_R = A_M + \Delta A_R (1 < k \leq N) \quad (17)$$

$$Q_L = Q_J + \Delta Q_L (1 < k \leq N) \quad (18)$$

$$Q_R = Q_M + \Delta Q_R (1 < k \leq N) \quad (19)$$

$$\Delta x_N = \Delta x_{N-1} + \Delta \Delta \quad (20)$$

$$A_L = A_M + \Delta A_L (k=1) \quad (21)$$

$$Q_L = Q_M + \Delta Q_L (k=1) \quad (22)$$

위 식들로부터 연속방정식은 다음 식 (23), (24), (25)와 같이 유도 될 수 있다.^{7,9)}

$$\begin{aligned} & [(1-\phi)w_k - \theta w_k] \Delta A_R + \theta \Delta Q_R \\ & = -(\phi w_k + \theta w_{k-1} \Delta A_L + \theta \Delta Q_L \\ & \quad + [\phi w_k + (1-\phi)w_{k-1}](A_M + z_M - A_L - z_L) \\ & \quad + Q_J - Q_M \quad (23) \end{aligned}$$

식 (23)은 $1 < k < N$ 의 경우에 대해 성립한다. $k=1$ 인 경우는 식 (24)가 성립한다.

$$\begin{aligned} & (1-\phi-\theta)w_1 \Delta A_R + \phi \Delta Q_R \\ & = -w_1 \phi \Delta A_L + \theta \Delta Q_L + w_1 \phi (z_L z_M) \dots \quad (24) \end{aligned}$$

마지막 격자에 대해서는 다음 식이 유도된다.

$$\begin{aligned} & [0] \Delta A_R + [0] \Delta Q_R - \left(\frac{A_J}{1+\beta} + \frac{z_L}{1+\alpha} \right) \frac{1}{\Delta t} \Delta \Delta \\ & = - \left[\left(\frac{1}{1+\beta} + \theta \right) w_{N-1} \right] \Delta A_L \\ & \quad + \theta \Delta Q_L + Q_J - w_{N-1} (A_J + z_J) \quad (25) \end{aligned}$$

여기서, $w_k = \frac{\delta x_k}{\Delta t}$, $w_{k-1} = \frac{\Delta x_{k-1}}{\Delta t}$,

$w_{N-1} = \frac{\Delta x_{N-1}}{\Delta t}$ 이다.

한편, 운동량방정식의 유한차분식 식 (10) 은 식 (26)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}
 & [bhA_M^{k-1} - (1-\phi)f \frac{S_{fj}}{A_M} \Delta x_k] \Delta A_k \\
 & - [bhA_J^{k-1} + f\phi \frac{S_{fj}}{A_M} \Delta x_k] \Delta A_L \\
 & + 2\phi \frac{S_{fj}}{Q_J} \Delta x_k \Delta Q_L + 2(1-\phi) \frac{S_{fM}}{Q_M} \Delta x_k \Delta Q_R \\
 & = b(A_J^k - A_M^k) + \Delta x_k [-\phi S_{fj} - (1-\phi) S_{fM}] \dots\dots\dots (26)
 \end{aligned}$$

식 (26)은 $1 < k < N$ 에 대하여 성립하며 $k = 1$ 인 경우는 식 (27)과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 & [bhA_M^{k-1} - (1-\phi)f \frac{S_{fM}}{A_M} \Delta x_1] \Delta A_R \\
 & + 2\phi \frac{S_{fM}}{Q_M} \Delta x_1 \Delta Q_L \\
 & - [bhA_M^{k-1} + \phi f \frac{S_{fM}}{A_M} \Delta x_1] \Delta A_L \\
 & + 2(1-\phi) \frac{S_{fM}}{Q_M} \Delta x_1 \Delta Q_R \\
 & = -\Delta x_1 S_{fM} \dots\dots\dots (27)
 \end{aligned}$$

마지막 격자인 경우는 다음 식과 같이 유도 된다.

$$\begin{aligned}
 & [0] \Delta A_R + [0] \Delta Q_R - \left(\frac{S_{fj}}{x_{N-1}} \right) \Delta \Delta \\
 & = \left[\frac{fS_{fj}}{A_J} + \frac{BhbhA_J^{k-1}}{x_{N-1}} \right] \Delta A_L \\
 & - \frac{2S_{fj}}{Q_J} \Delta Q_L + \frac{BhbhA_J^k}{x_{N-1}} S_{fj} \dots\dots\dots (28)
 \end{aligned}$$

여기서, $S_{fj} = \frac{Q_J^2 n^2}{dA_J^3}$, $S_{fM} = \frac{Q_M^2 n^2}{dA_M^3}$ 이다.

한편, 침투량 계산식은 Kostiakov 방정식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z = k\tau^a \dots\dots\dots (29)$$

여기서, z 는 누가침투량(mm), τ 는 침투시

간(min), k, a 는 상수이다. 정상상태의 침투율을 고려한 수정 Kostiakov 방정식은 다음과 같다.

$$z = k\tau^a + c \dots\dots\dots (30)$$

여기서, c 는 정상상태의 침투율(mm/min)이다.

다. 수치모형의 구성

유도된 식으로부터 Table-1과 Fig. 4와 같이 7개의 하부프로그램으로 수치모형을 구성하였다. 본 모형은 $N=1$ 에서 A 와 Δx 를 구하기 위해 Newton-Raphson방법을 사용하였으며, 선형화된 방정식을 해석하기 위해서 Preissmann의 Double Sweep Algorithm을 사용하

Table-1. Contents and names of subroutine

name	contents
dtrdwt	read and write input data
fc	$A_1, \delta x_1$ computation of first cell ($n=1$) by Newton-Raphson
preiss	$Q, A, \delta x$ computation by Preissmann scheme
matcoe	components computation of five diagonal matrix and double sweep
infiltr	infiltration computation by Kostiakov equation
ara	dimension arrange for next time step
prt	print of results

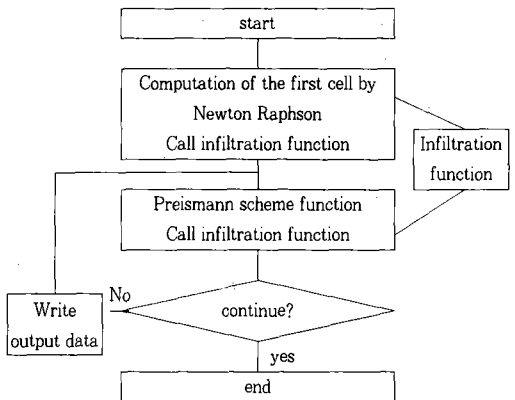


Fig. 4. Flow chart of the numerical model

였다. 이 알고리즘은 ΔQ_1 , ΔA_1 과 ΔA_N 이 경계조건으로 주어진다.

라. 모형의 입출력 자료

모형의 입력자료와 출력자료는 Table-2와 Table-3과 같다.

Table-2. Input data of numerical model

variable	type	definition
soil	a20	soil name
crop	a15	crop name
dt	f10.2	size of time step
fleng	f10.2	furrow length
pi	f10.2	φ
theta	f10.2	θ
b	f10.5	b in bAh
h	f10.5	h in bAh
d	f10.5	d in dAf
f	f10.5	f in dAf
s0	f10.6	slope of furrow
cn	f10.6	manning n
q1	f10.6	irrigation discharge(x=0)
ak	f10.6	k in Kostiakov eq.
aa	f10.6	a in Kostiakov eq.
cc	f10.6	c in Kostiakov eq.

Table-3. Output data of numerical model

variable	type	contents
time	f8.2	advance time
aleng	f10.2	advance distance per each time
i	i3	node number
at	f6.2	arrival time at node i
as	f9.4	distance to node i
q(1,i)	e12.4	discharge at node i
a(1,i)	e12.4	section area of node i
z(1,i)	e12.4	infiltration at node i
dx(i)	e12.4	length of cell i

III. 결과 및 고찰

1. 포장실험 결과

가. 고랑의 특성

진답직파는 경지정리가 이루어진 논에서 농

기계에 의해 경운되고 파종되는 것으로서 건담휴림직파가 직파재배의 이점을 가지면서 영농관리에 편리한 점을 많이 가진다. 또한 이것을 관계·배수 측면에서 보면 고랑관개의 특성을 가지면서 어느 정도 담수가 될 때까지 관개하므로 밭의 고랑관개와는 다른 특성을 가진다. 고랑의 단면은 농기계에 의해 경운될 경우 일반적으로 포물선형이며, 경사가 없고 고랑별로 대부분 균일한 특성을 가지는 것이 보통이다. 본 실험에서는 대표단면을 선정하여 전체 고랑을 조사한 결과, 깊이는 최소 6.5cm, 최대 12.6cm로서 평균 9.0cm와 표준편차 1.5cm로 나타났으며, 고랑너비는 최소 25cm, 최대 55cm로서 평균 32cm와 표준편차 5.6cm로 조사되었다. 이는 경운시에 고랑별로 형태가 불규칙적으로 형성되는 것으로 판단되었다. 고랑 단면을 수심에 대한 면적의 일반식으로 식 (4)의 형태로 유도해 보면, 식 (4)의 각 계수는 Table-4와 같다. Table-4는 8개의 고랑에 대한 단면자료를 정리한 것이다. 이들로부터 윤변을 계산하는 공식을 식 (31)와 같이 유도할 수 있다.

$$P = w + \left(\frac{8y^2}{3w} \right) \dots\dots\dots (31)$$

여기서, P는 윤변(cm), w는 나비(cm), y는 수심(cm)이다.

Table-4. The geometric characteristics of furrows

furrow	1	2	3	4	5	6	7	8
b	0.30	0.32	0.31	0.30	0.27	0.27	0.24	0.28
h	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
A(cm ²)	209.99	153.33	131.67	128.33	181.86	130.67	186.68	311.66
w(cm)	30.00	25.00	25.00	25.00	31.00	28.00	35.00	55.00
y(cm)	10.50	9.20	7.90	7.70	8.80	7.00	8.00	8.50
P(cm)	39.80	34.03	31.66	31.32	37.66	32.67	39.88	58.50

나. 포장의 침투특성

침투능은 원통형 Infiltrometer를 포장에 설

치하여 흑계이지로 측정하였다. 측정자료를 분석한 결과, 초기침투능은 9.30mm/min으로 측정되었으며 측정된 침투능의 시간적 변화를 Kostiaikov 침투방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$z = 0.0155r^{0.205} \dots\dots\dots (32)$$

다. 물머리 진행특성

물머리 진행실험은 고랑에 3m 간격의 표식을 설치한 후 초기 40분까지는 5분 간격으로 측정하고, 40분에서 112분까지는 10분 간격으로 측정하였다. 각 고랑별 분배 유량은 전체 관개유량을 각 고랑별 총관개유량으로 환산하여 추정하였으며, 112분간 측정한 결과 8개 고랑중에서 진행 거리가 최소 8m, 최대 74m로 나타났다.

고랑에 관개용수가 유입되면 물머리가 초기에는 급속히 전파되다가 점차적으로 전파되는 속도가 감소하게 되는 경향을 보이는데 고랑 관개에서 시간에 대한 물머리 진행거리는 일반적으로 시간에 대한 지수함수 식 (33)과 같

이 구성된다.

$$x = f(Q)t^r \dots\dots\dots (33)$$

여기서, x 는 는 진행거리(m), Q 는 유량(l/min), t 는 관개시간(min), r 은 침투의 물리적 특성에 관계되는 지수로서 $0 < r < 1.0$ 의 범위를 가진다.

식 (33)으로부터 고랑관개에 대하여 제시된 경험식은 식 (34)와 같이 구성된다

$$x = \mu Q t^{0.53} \dots\dots\dots (34)$$

여기서, μ 는 고랑경사, 조도와 흐름의 수리특성에 의해 결정되는 계수이다. 건답직파인 경우 초기는 발 관개와 같은 토양조건이므로 식 (34)와 같은 일반식을 적용할 수 있다. 논에서는 경사가 없기 때문에 본 연구에서는 별도로 μ 를 산정하였다. 실측자료로부터 각 고랑에 대한 μ 값을 선형회귀분석에 의해 유도하면 Table-5와 같다. 결과에서 보면 μ 은 각 고랑의 특성에 따라 다른 값을 보이지만 0.105 ~ 0.307까지의 범위로 평균 0.222로 나타났다.

Table-5. Advance data and coefficient of empirical equation at each furrow

ditch no.	1	2	3	4	5	6	7	8	average
discharge	13.01	6.63	2.46	9.90	25.92	6.57	24.43	53.89	17.85
μ	0.154	0.231	0.292	0.307	0.216	0.260	0.213	0.105	0.222
R^2	0.96	0.99	0.98	0.93	0.96	0.99	0.92	0.97	0.96

2. 수치모형 분석결과

가. 모형의 검정

본 연구에서 모형의 검정에 사용한 자료들은 1979년 Colorado 주립대 연구진의 실험에 의한 것으로써 Table-6에서와 같이 옥수수 밭에서 실측되었다.⁷⁾ 이들 자료에 대해서는 바닥경사를 고려하여 모형을 검정하였다. 시간과 공간에 대한 가중치 ϕ 와 θ 가 1.0에서 빨리 수렴하며 안정된 값을 나타내어 본 연구에서

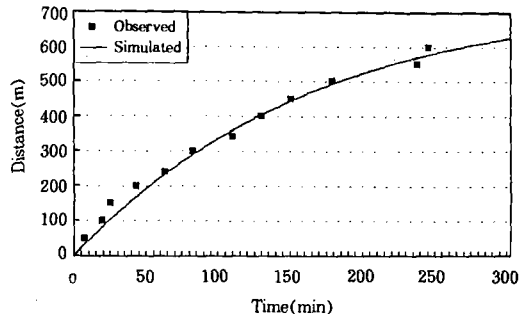


Fig. 5. Comparison of observed and simulated distance with data T1

Table-6. Input data for model verification

data name	T1	T2	T6
Clay Loam	Clay Loam	Crop	fleng(m)
Crop	corn	corn	corn
fleng(m)	625	625	350
ql(1/s)	2.78	1.17	2.77
S0	0.0044	0.0044	0.0025
cn	0.03	0.02	0.02
b	0.92	0.72	1.13
h	0.65	0.64	0.75
d	0.46	0.34	0.73
f	2.86	2.84	2.98
ak	0.0252	0.0173	0.0161
aa	0.02	0.01	0.02
cc	0.00023	0.00008	0.00040
pi	1.0	1.0	1.0
theta	1.0	1.0	1.0

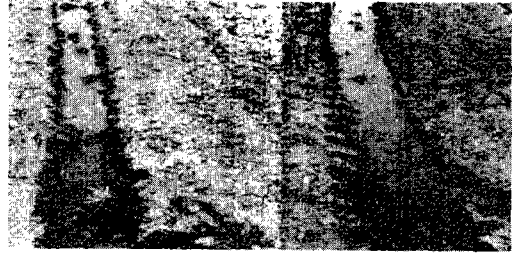


Fig. 6. Photograph of rough and smooth furrow(furrow 1 and 7)

는 ϕ 와 θ 를 각각 1.0으로하였다. Fig. 5의 T1에 대한 결과를 보면 초기와 끝부분에서는 실측치와 차이를 보였으나 결정계수는 T1, T2, T6에 대하여 각각 0.996, 0.997, 0.996으로 매우 잘 일치함을 보였다.

나. 모형의 응용

건담휴립직파 논외의 고랑은 기계작업에 의해 만들어지는 것이지만 조사결과 고랑의 너비, 깊이 그리고 조도특성에 있어서 매우 다양한 결과를 보였다. 그러나 조도특성은 경운시에 생긴 흠덩이들이 고랑에 남아 있는 정도에 의해 결정되는 것으로서 그 측정이 불가능하다. 그러므로 본 연구에서는 검정된 수치모형으로 초기토양수분 21%에서 실측된 Kostiakov 방정식의 계수를 사용하여 조도계수를 구하였다. 또한 고랑길이와 관개유량의 변화에 따른 물머리 진행에 대해서도 모형을 응용하였다.

1) 조도특성 분석

고랑의 조도계수를 추정하기 위하여 수치모형의 입력자료에서 조도계수를 변수로하고 나머지 고랑의 기하 형상에 관련된 b, h, d, f와 침투식에 관련된 매개변수 ak, aa, cc는

실측에 의한 값으로 고정하였다. 조도계수의 추정에서는 목적함수를 R^2 로 하였다. 8개의 고랑에 대하여 실측한 모형의 입력자료는 Table-7과 같은데 이로부터 조도계수를 추정한 결과를 Table-7에 나타내었다. Fig. 6은 1번과 7번 고랑의 형상을 나타낸다. 결과에서 보면 실험대상 고랑의 조도계수가 2, 4, 5, 6, 7번 고랑은 평균 0.21로 비슷한 결과를 보였으나 1, 3, 8번 고랑은 각각 0.81, 0.65, 0.76으로 매우 높은 값을 보였다. 이는 Fig. 6에서 처럼 같은 포장내에서도 고랑마다 단면 형상이 많은 차이를 보이고, 같은 고랑내에서도 고랑의 단면이 일정하지 않고 불규칙적이며, 경운의 결과로 생긴 흠덩이들이 고랑을 매우 고 있었는 데 이들의 영향을 모두 조도계수에 포함시켰기 때문이라 판단되었다. Fig. 7은 8번 고랑에서 조도계수가 0.76일 때 모의발생결과와 실측 물머리 진행 결과를 나타낸 것이다.

2) 물머리 진행 특성

건담휴립직파 논외의 고랑관개 특성을 분석해보기 위하여 실험한 고랑중에서 b가 0.28, h가 0.67로 8개 고랑의 평균값을 가지며, 단면적과 윤변이 가장 큰 여덟 번째 고랑을 대상으로 구획의 크기와 관개유량에 따른 물머리 진행 특성에 대한 수치실험을 실시하였다. 모형의 응용결과는 Fig. 8과 같이 고랑의 길이가 증가함에 따라 총관개시간은 지수함수 형태로 증가하였는데 구획크기가 100m일 때 전체 물머리 진행시간은 164분이 소요되는 것

Table-7. Input data and calibrated roughness coefficient

No.	furrow							
	1	2	3	4	5	6	7	8
soil	sandy	sandy	sandy	sandy	sandy	sandy	sandy	sandy
type	loam	loam	loam	loam	loam	loam	loam	loam
crop	rice	rice	rice	rice	rice	rice	rice	rice
dt	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
fleng	26.50	18.50	8.00	33.00	61.00	21.50	56.00	74.00
S ₀	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
φ	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
θ	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
p	0.30	0.32	0.31	0.30	0.27	0.27	0.24	0.28
h	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
d	1.54	1.39	1.31	1.30	1.44	1.25	1.37	1.37
f	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33
q ₀	0.22	0.11	0.04	0.17	0.43	0.11	0.41	0.90
ak	0.0155	0.0155	0.0155	0.0155	0.0155	0.0155	0.0155	0.0155
aa	0.2050	0.2050	0.2050	0.2050	0.2050	0.2050	0.2050	0.2050
ac	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
cn	0.81	0.25	0.65	0.20	0.20	0.18	0.23	0.76
R ²	0.99	0.97	0.97	0.93	0.90	0.98	0.97	0.99

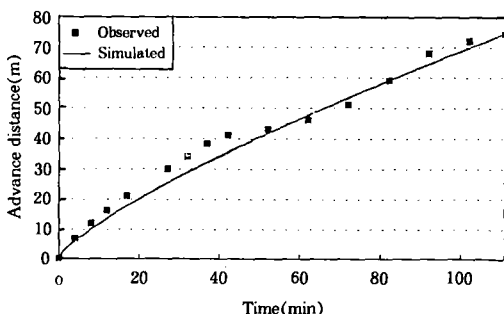


Fig. 7. Advance trajectory by furrow length (furrow 8)

으로 나타났으며, Fig. 9와 같이 관개유량의 증가에 따라 관개되는 시간은 지수함수로 감소하였는데 관개유량 0.11/s에서 515분이 소요되었고 관개유량 1.51/s에서 78분이 소요되어 관개유량에 총 관개시간은 많은 차이를 보였다.

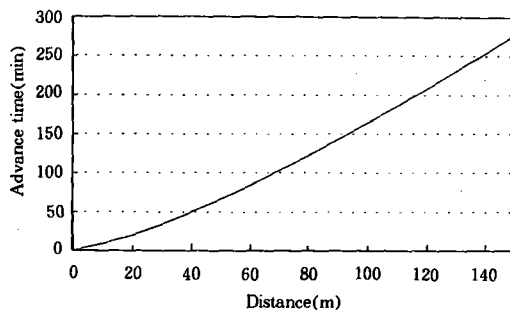


Fig. 8. Advance trajectory by furrow length (furrow 8)

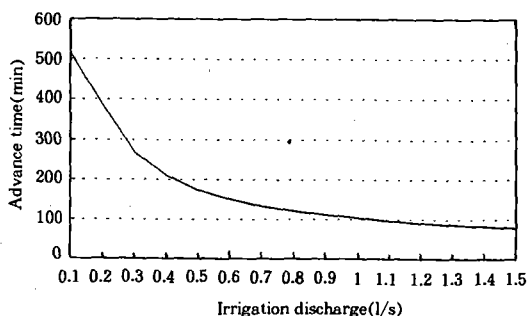


Fig. 9. Total advance time per irrigation discharge (furrow 8)

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 실제 재배되고 있는 건답휴림직파 논을 대상으로 1차 관개시 지표관개의 물머리 진행과 고랑의 특성 그리고 침투특성에 관하여 조사·분석하였으며, Zero-inertia 모형에 의한 수치실험을 통하여 고랑별 조도 계수를 추정하였고, 고랑길이와 관개유량의 변화에 대한 물머리 진행 특성을 분석하였다. 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 실험대상은 96m×11m 크기의 사질양토 논으로 관개유량은 112분간 균일하게 0.0024m³/s이었고, 초기토양수분은 21%로 나타났다. 고랑은 포물선형으로 실험포장에 대표단면을 설정하여 조사한 결과 깊이는 최소 6.5cm, 최대 12.6cm, 평균 9.0cm로 비교

적 균일하지 못한 것으로 분석되었고, 넓이는 최소 25cm, 최대 55cm, 평균 32cm로 다양한 분포를 보였다. 물머리 진행실험 결과 실험대상 8개 고랑에 대하여 112분간 관개에 최소 8m에서 최대 74m로 고랑별로 많은 차이를 보였으며, 논의 고랑관개에서 시간에 대한 물머리 진행거리는 $x = \mu Q t^{0.53}$ 으로 μ 는 0.105~0.307범위에 평균 0.222의 값을 얻었다.

2) 수치모형에 의한 조도계수의 추정결과 실험대상 8개 고랑중에서 단면 형상이 비교적 균일한 5개의 고랑은 평균 0.21로 비슷하게 나타났으며, 단면 형상이 불규칙하고 흙덩이들이 많이 있는 나머지 3개의 고랑은 각각 0.65, 0.76, 0.81로 나타났는데 이들은 실제 실험에서 물이 거의 흘러가지 않는 현상을 보였다. 고랑의 길이에 대한 물머리 도달시간의 분석 결과는 고랑의 길이가 증가함에 따라 총관개 시간은 비선형적으로 증가하였으며, 관개유량의 변화에 대한 물머리 진행 시간은 지수함수의 형태로 감소하여 분석대상 고랑의 경우에 관개유량 0.1l/s에서 515분이 소요되었고 관개유량 1.5l/s에서 78분이 소요되어 총 관개 시간은 관개유량에 따라 상대적으로 많은 차이를 보였다.

참 고 문 헌

1. 김상수 외, 1994, 벼 무논골뿌림 재배에서 파종방법과 파종후 담수시기가 임도 및 생육에 미치는 영향, 한국작물학회지, 제

39권 제5호

2. 농어촌진흥공사, 1995, 영농방식 변화에 따른 필요수량 변화 연구(I)
3. 이변우, 명을재, 1994, 건답직파에서 토양 수분조건에 따른 벼 품종의 출아특성, 한국작물학회지, 제39권, 제5호
4. Abbott, M. B., 1980, Computational hydraulics, Pitman advancing publishing program, London, pp182-188
5. Bruce N. Wilson and Ronald L. Elliott, 1988, Furrow advance using simple routing models, ASCE, J. of Irri. and Drain. Eng., vol.114, no.1
6. Carlos Julian Grassi, 1972, Infiltration characteristics of furrow irrigation in a heavy-textured soil, Wageningen
7. Elliot, R. L., W. R. Walker and G. V. Skogerboe, 1982, Zero-Inertia modeling of furrow irrigation advance, J. of the Irri. and Drain. Div., Proc. of the ASAE, Vol.108, No. IR3, pp 179-195
8. Jensen, M. E. 1983, Design and operation of farm irrigation systems, ASAE Monograph, No. 3, ASAE, Michigan, USA
9. Strelkoff, T. and N. D. Katopodes, 1977, Border irrigation hydraulics with Zero-Inertia, J. of the Irri. and Drain. Div., Proc. of the ASAE, Vol.103, No. IR3

(접수일자 : 1997년 3월 7일)