

2차원 유한체적 수치모형을 이용한 논의 지표관개 수리특성 분석

An Analysis of Surface irrigation's Hydraulic Characteristics at a Paddy Field Using a Two-Dimensional Numerical Model

강민구* · 박승우** · 박종민***

Kang, Min Goo · Park, Seung Woo · Park, Jong Min

Abstract

A finite volume model is developed to simulate the surface irrigation at a paddy field. The model's capabilities are validated through comparison with the simulated results and the observed data obtained by various experimental tests, and the simulated results are in good agreement with the observed ponding depth. The result of surface irrigation simulation shows that the longer the paddy field's the length of long-sided becomes, the longer the advance and storage time is taken. To analyze surface irrigation performance with variable inflow rate, three patterns of flow variation-constant rate, initially high then low, and initially low then high-were studied. The results show that at the pattern with initially high followed by low during the latter half of the irrigation the advance time is shortest, but the ponding depth of irrigation completion and irrigation efficiency are the little difference between irrigation patterns.

Keywords: Finite volume method, Two-dimensional numerical model, Large-sized paddy fields, Irrigation characteristics, Surface irrigation

I. 서 론

지표관개는 투자비와 유지비가 적게 소요될 뿐만 아니라, 관개에 소요되는 에너지도 적게 소요되어

여러 가지 관개방법 중 가장 오래되고 광범위하게 사용되고 있는 관개방법이다(Playan 등, 1994). 논에서 지표관개는 원하는 수심까지 포장에 관개용수를 채운 다음, 토양에 침투되고, 벼의 증산과 대기의 증발에 의해 소모되는 양을 유지하는 것이다. 논에 대한 지표관개에서 고려해야 할 가장 중요한 요소들 중의 하나는 논에 대한 크기가 커질수록 물머리 도달 시간(advance time)과 일정 담수심까지 관개하는 저류시간(storage time)이 길어진다는 점이다. 그러나, 구획의 크기가 커질수록 농기계 작업

* 한국수자원공사 수자원연구원
** 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 교수
*** 농림부
* Corresponding author. Tel.: +82-42-860-0347
Fax: +82-42-860-0349
E-mail address: kmg90@kowaco.or.kr

효율이 크게 향상되는 등 영농의 편의성이 높아지는 장점이 있다 (송과 박, 1994).

지표관개를 모의할 수 있는 대부분의 모형들은 kinematic-wave나 zero-inertia 이론에 바탕을 둔 일차원 모형이며, 이들 모형들은 Froude 수가 매우 작은 고랑관개의 모의에 적용이 되어 왔다(정 등, 1997). 이들 1차원 모형들은 포장의 경계에서 발생하는 반사파를 모의할 수 없는 단점이 있다. 따라서, 지표관개를 설계하고 운영하기 위하여 2차원 모형이 개발되어 사용되고 있다(Playan 등, 1994; Singh 등, 1997). 2차원 관개 모의는 댐붕괴파와 같은 불연속적인 흐름의 편미분 방정식을 수치해석 기법을 이용하여 해석하며, 지배방정식을 이산화하는 방법으로는 특성법(MOC), 유한차분법(FDM), 유한요소법(FEM), 유한체적법(FVM) 등이 사용된다. 이들 수치해석 기법 중 유한차분법은 미분방정식의 형태에 따라 차분식이 항상 물리적 보존성을 갖는다고 할 수 없으며, 불규칙한 영역에 비정형 격자를 적용하기 어려운 단점이 있다. 유한요소법은 물리적 보존성을 만족하고 복잡한 계산영역에도 적용이 가능하나 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 최근에는 질량과 운동량 보존의 물리적 의미를 충실히 표현할 수 있고, 유한요소법과 같이 비구조적 격자에도 적용할 수 있는 유한체적법이 저수지 수문개방이나 댐붕괴와 같은 불연속적인 흐름 해석에 유용한 방법으로 알려져 있다(강과 박, 2003).

논의 지표관개 수리특성에 관한 연구로는 정 등(1997)이 직파재배 논의 고랑관개시 고랑길이와 관개유량의 변화에 대한 물머리 진행 특성을 분석한 결과, 고랑의 길이가 증가함에 따라 총관개시간은 비선형적으로 증가하였으며, 관개 유량이 증가할 수록 물머리 진행시간은 지수함수적으로 감소한 결과를 나타냈다. Jifu 등(1995)은 고랑 관개에서 사용되는 Kostiakov 침투식과 Gardner와 Widtsoe 침투식을 이용하여 물머리 진행을 모의하여 실측자료와 비교하였으며, 논의 장변 길이를 100m,

125m, 150m로 할 경우 유입유량에 따른 물머리 도달시간을 비교한 바 있다.

본 연구에서는 논의 관개특성 분석을 위하여 유한체적법을 적용한 2차원 수치모형을 구성하고, 과거 시험자료가 있는 밭에 대한 지표관개 시험자료와 논에서 관개에 따른 현장 시험자료를 사용하여 모형의 적용성을 평가하였다. 또한, 개발된 모형을 이용하여 관개형태에 따른 관개특성을 모의하였으며, 구획의 장변길이에 따른 담수소요시간을 모의하여 비교하였다.

II. 모형의 구성

1. 지배방정식

본 모형에서는 Navier-Stokes 방정식을 수심적분한 이차원 천수방정식을 지배방정식으로 사용하였다. 지배방정식은 질량 보존식과 운동량 보존식으로 구성되어 있으며, 벡터형식으로 표현하면 식(1)과 같다(Playan 등, 1994; 이와 이, 1998; 강과 박, 2003).

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S \dots \dots \dots (1)$$

$$U = [h, hu, hv]^T, E = [hu, hu^2 + gh^2/2, huv]^T$$

$$G = [hv, huv, hv^2 + gh^2/2]^T,$$

$$S = [-(q_i + q_e), gh(S_{0x} - S_{fx}), gh(S_{0y} - S_{fy})]^T$$

여기서, h는 수심(m), u는 x 방향의 유속(m/s), v는 y 방향의 유속(m/s), q_i는 침투량(m), q_e는 증발산량(m), S_{0x}는 x 방향의 경사, S_{0y}는 y 방향의 경사, S_{fx}는 x 방향의 마찰경사, S_{fy}는 y 방향의 마찰경사를 나타내며, 식(2)와 같이 Manning의 조도계수(n)를 이용하여 계산한다(Playan 등, 1994; 이와 이, 1998; 강과 박, 2003).

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{(u^2 + v^2)}}{h^{4/3}}, S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{(u^2 + v^2)}}{h^{4/3}} \quad (2)$$

2. 수치기법

식 (1)의 2차원 천수방정식의 해를 구하기 위하여 비정규형 격자를 사용하는데 편리하고, 불연속적인 흐름의 모의에 효과적이라고 알려진 유한체적법을 이용하였다. 유한체적법은 지배방정식을 적분형 보존방정식으로 이산화하여 해를 계산하는 수치기법으로서 질량과 운동량 보존의 물리적 의미를 충실히 표현할 수 있어 유한요소법과 같이 비구조적인 격자에도 적용할 수 있으며, 저수지의 문비개방이나 댐 파괴시 발생하는 불연속적인 흐름의 모의에도 유용한 방법으로 알려져 있다(Singh 등, 1997; 이와 이, 1998; 장과 박, 2003).

3. 경계조건

경계조건은 논두렁의 폐경계조건과 취입부나 물꼬의 개경계조건으로 구분할 수 있다. 논두렁에서의 흐름은 논두렁 경계에 접선 방향인 흐름과 직각 방향인 흐름으로 구분할 수 있으며, 경계에 직각방향인 유속은 0이 되며, 이를 백터로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$u \cdot n = 0 \dots\dots\dots (3)$$

여기서, u 는 경계에 직각방향인 흐름백터, n 은 경계에 직각인 방향백터이다.

논에서 관개시 담수심 변화를 모의할 때 유입구에 접하는 접촉면에서의 수위가 개경계조건이 된다. 논에 공급되는 관개용수는 용수로에서 관로를 통하여 공급되며, 유입구의 위치가 논바닥에서 0~10 cm 정도 위에 설치되므로 용수로의 수위나 유입량을 이용하여 논의 유입부분의 담수위를 계산하기에는 어려움이 있다. 따라서, 유입부분 담수위에 대한 경계조건이 필요한데, Playan 등(1994)과 Singh 등(1996)은 지표관개 모의를 위한 모형개발에서 일정유량이 유입되도록 하였으며, 유입부분

담수위는 식 (4)와 같이 한계수심보다 크게 유지되도록 하였다.

$$h_{in} = \max(h_c, h_m) \dots\dots\dots (4)$$

여기서, h_{in} 은 유입구의 수심, h_c 는 유입구를 포함하는 유한체적 중앙의 수심, h_m 은 식 (5)와 같이 한계수심에 여유를 두어 상류흐름이 발생하도록 하였다.

$$h_m = \alpha \left(\frac{p^2 + q^2}{g} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (5)$$

여기서, p 와 q 는 각각 x 축, y 축 방향의 단위유량 (m^2/s), g 는 중력가속도($9.81m/s^2$)를 나타내며, α 는 한계수심에 대한 보정계수로 Playan 등(1994)은 유한차분법을 적용할 때 1.05를 적용하였고, Singh 등(1996)은 유한체적법을 적용할 때 1.01을 적용하였다. 본 연구에서는 유입량을 일정하게 하고, α 는 Singh 등(1996)과 같이 1.01을 적용하였다.

논의 유입구를 여러 개의 격자로 나눌 경우, 유입구에 해당되는 격자의 단위 유량은 식 (6)과 같다.

$$p = \frac{Q}{n \Delta y} \dots\dots\dots (6)$$

여기서, p 는 단위폭당 유량(m^2/s)이고, Q 는 유입 유량(m^3/s)이며, n 은 유입구의 격자수, Δy 는 유입구의 격자길이(m)를 나타낸다.

III. 모형의 보정 및 검증

1. 시험포장의 관개 시험

모형의 적용성을 평가하기 위하여 보은농지개량 조합 학림지구의 포장과 서울대학교 농업생명과학 대학 실습농장의 포장을 시험포장으로 선정하였다. Fig. 1은 선정된 포장의 모식도를 나타낸 것이다.

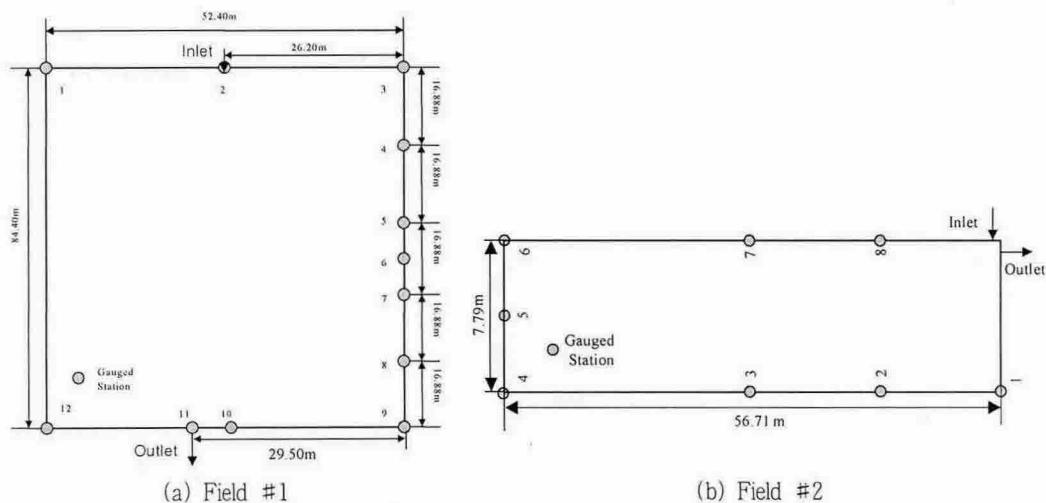


Fig. 1 Schematic diagram of the tested fields

학림지구의 포장은 1995년에 대구획 경지정리사업이 시행되었으며, 포장의 크기는 0.44 ha 정도이며, 침투량은 4.0 mm/day이며, 배수구는 말단에 1개가 설치되어 있다. 서울대학교 실습농장의 포장은 포장의 크기가 0.04 ha로 학림지구 시험포장보다 10 % 정도 작은 포장으로 소규모 포장에서 모형의 적용성을 평가하기 위하여 선정하였으며, 일침투량은 학림지구의 포장 보다 10.3 배 정도 큰 41.04 mm/day로서 관개후 침투가 빠른 특성을 갖고 있다. 관개시 담수심의 변화는 Fig. 1에 나타난 측정지점에 Fig. 2와 같은 측정자를 설치하여 측정하였다. 증발산량은 측정지점과 근접한 곳인 보은기상관측소과 수원기상대의 기상자료를 이용하여 수정 Penman식에 따라 계산하였으며, 침투량은 직경 300 mm의 단일원통을 포장에 설치하여 감수심을 실측하고, 감수심에서 증발산량을 감한 값으로 계산하였다. 학림지구 포장의 배수시험은 1999년 8월 17일에 실시하였으며, 서울대학교 실습농장 포장의 배수시험은 2000년 8월 9일에 실시했다. 두 개 시험 포장의 벼 생육단계는 출수개화에 해당하는 시기였다.



Fig. 2 Measurement of ponding depth

2. 모형의 보정 및 검증

가. 초기담수 상태

논에서 관개에 따른 담수심의 모의를 위하여 조도계수(n)은 0.13을 적용하였다. Masato 등(1995)은 2차원 모형을 이용하여 논 의 배수상황을 모의할 때 논 의 조도계수(n)로 0.15를 적용한 바 있다. 실측치와 모의치의 비교는 실측치와 모의치의 통계적인 상관성을 판단하기 위한 기준으로 식 (5), (6)의 Nash와 Sutcliffe의 모형의 효율(E^2), RMSE를

사용하였다.

$$E^2 = \frac{\sum(\overline{H_0} - H_0)^2 - \sum(H_s - H_0)^2}{\sum(\overline{H_0} - H_0)^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{(H_0 - H_s)^2}{n}} \dots\dots\dots (6)$$

여기서, H_0 는 실측치, $\overline{H_0}$ 는 실측치의 평균, H_s 는 모의치, n 은 자료의 수를 나타낸다.

Table 1은 Manning 조도계수를 0.13으로 적용하였을 때, 포장 #1에서 관개시험시 각 지점별 실측치와 모의치의 상관성을 나타낸 것이다. 각 측정 지점의 RMSE는 1.0~3.0 mm, E^2 는 0.95~0.99로 실측치와 모의치의 상관성이 매우 높음을 알 수 있다. Fig. 3은 측정지점 1번의 시간별 담수심 변화

Table 1 Statistical test results between simulated and observed values in irrigation test at the field #1

Station No.	RMSE(mm)	E^2
1	2.0	0.99
3	2.0	0.98
6	1.0	0.99
9	3.0	0.95
10	2.0	0.98
12	3.0	0.97

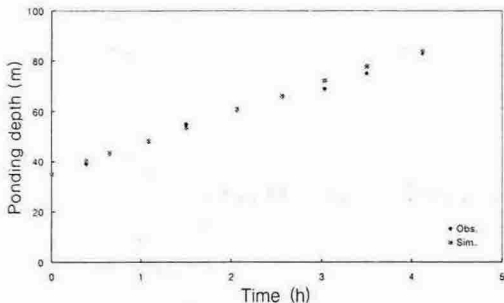


Fig. 3 Comparison of the simulated and observed ponding depth at station #1 of the tested field #1

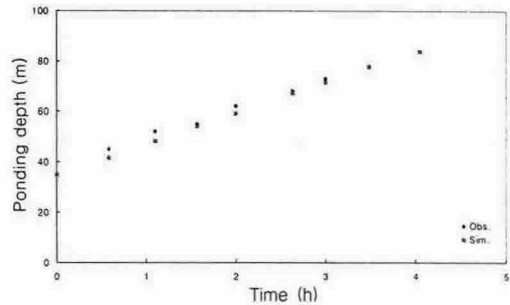


Fig. 4 Comparison of the simulated and observed ponding depth at station #10 of the tested field #1

화에 대한 실측치와 모의치를 나타낸 것이며, Fig. 4는 측정지점 10번의 시간별 담수심 변화에 대한 실측치와 모의치를 나타낸 것으로, 초기 감수심이 있는 상태에서 관개를 시작했으므로 담수심이 선형적으로 변하고 있음을 알 수 있다.

나. 초기건답 상태

포장의 규모가 작고 담수심이 없는 건답상태에 대한 모형의 적용성을 평가하기 위하여 포장면적이 0.04 ha인 소규모 포장에 대해서 모형을 적용하였다. Table 2는 시험포장 #2에서 관개시 측정된 담수심의 실측치와 모의치의 상관성을 나타낸 것이다. 각 측정점에서 실측치와 모의치간의 RMSE는 1.0~2.0 mm, E^2 는 0.94~0.97로 실측치와 모의

Table 2 Statistical test results between computed and observed values in irrigation test at the field #2

Station No.	RMSE (mm)	E^2
1	2.0	0.97
2	2.0	0.95
3	2.0	0.94
4	1.0	0.97
5	2.0	0.97
6	1.0	0.97
7	2.0	0.97
8	2.0	0.95

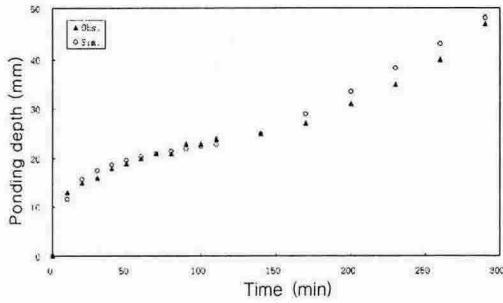


Fig. 5 Comparison of the simulated and observed ponding depth at station #1 of the tested field #2

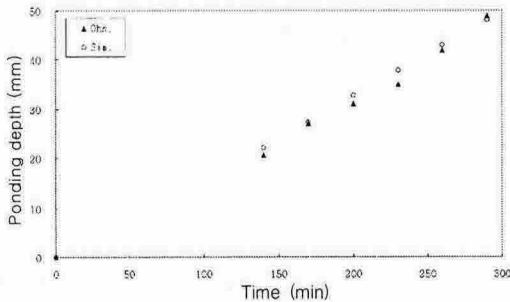


Fig. 6 Comparison of the simulated and observed ponding depth at station #6 of the tested field #2

시간의 상관성이 매우 높은 결과를 나타냈다. Fig. 5와 Fig. 6은 각각 시험포장 #2의 1번과 6번 측정지점에서 감수심의 실측치와 모의치를 도식적으로 비교한 것이다. 두 그림을 비교해 보면 시험포장의 유입구 부근에 위치한 1번지점은 초기 관개시 비선형적으로 담수심이 증가하고 있음을 알 수 있으며, 시험포장의 말단에 있는 6번지점은 물머리가 도달한 후부터 담수심이 선형적으로 증가하

고 있음을 알 수 있다.

IV. 모형의 적용

1. 건답상태의 지표관개

본 연구에서 구성한 모형을 Playan 등(1994)이 실험한 관개조건과 동일한 조건으로 모의발생한 값과 Playan 등이 실험한 값을 비교하였다. Playan 등(1994)이 시행한 건답상태 밭에 대한 관개시험의 조건은 Table 3과 같으며, 시험조건중 line 관개는 일차원적 흐름에 대한 모형의 평가를 위하여 포장 한 변의 전단면에서 관개용수가 유입되는 조건으로 실험한 것이며, corner 관개는 포장의 한쪽 모서리에서 관개수가 유입되는 조건으로 실험한 것이다. 대상 포장의 침투식은 식 (9)와 같이 Kostiakov-Lewis 식을 사용하였다.

$$i = k a \tau^{a-1} + f_0 \dots \dots \dots (9)$$

여기서, i 는 침투율, k , a , f_0 는 실험계수, τ 는 침투 시간을 나타낸다.

Fig. 7는 Playan 등이 line 관개 조건에서 관개 시험한 물머리 진행상태에 대한 실측치와 본 연구에서 구성한 모형의 모의결과와 비교한 것이다. 본 연구에서 구성한 모형의 모의치와 실측치의 R^2 는 0.9981로서 잘 일치하는 결과를 보이고 있다.

Fig. 8은 corner 관개 조건의 시간별 물 진행상황에 대해서 Playan 등이 시험한 실측치와 본 연구에서 구성한 모형의 모의결과를 비교한 것이다.

Table 3 Characteristics of the experimental fields for basin irrigation

Experiment	length (m)	width (m)	k (m/min)	a	f_0 (m/min)	n	irrigation type	irrigation discharge (m ³ /s)	irrigation time (min)
line irrigation	465.0	100.0	0.00893	0.406	0.0	0.1	line	0.183	660
corner irrigaiton	216.1	183.2	0.01680	0.397	0.0	0.1	corner	0.270	540

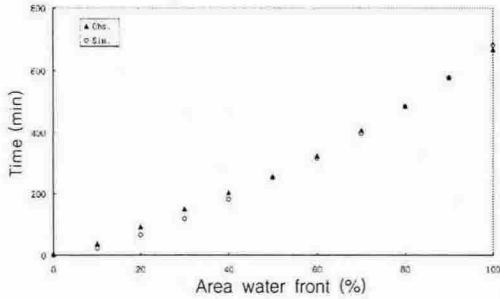


Fig. 7 Advance trajectory for experiment 1 (line irrigation)

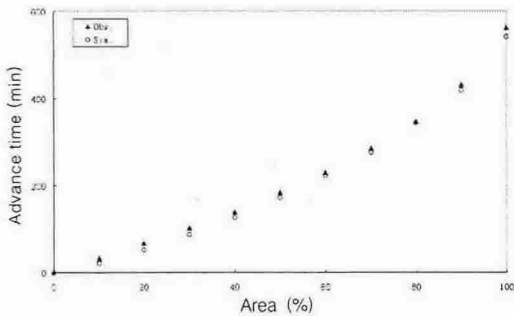


Fig. 8 Advance trajectory for experiment 2 (corner irrigation)

본 연구에서 구성한 모형의 모의치와 실측치의 R^2 는 0.999로서 잘 일치한 결과를 나타내고 있다.

2. 관개형태에 따른 비교

논관개에서 Fig. 9와 같은 관개형태로 관개할 경우 담수침변화를 모의하여 비교하였다. 관개형태는 관개기간동안 일정한 관개량을 관개하는 경우 (Type I), 관개 초기에는 많은 양을 관개한 다음 적은 양을 관개하는 경우 (Type II), 관개초기에 적은 양을 관개한 다음 많은 양을 관개하는 경우 (Type III) 등 3가지로 구분하였다.

Table 4는 관개형태별로 물머리 도달시간, 담수심, 관개효율 등을 비교한 것이다. 각 관개형태별 물머리 도달시간은 초기에 많은 양을 관개하는 Type II가 2.9 시간으로 가장 짧은 결과를 나타냈

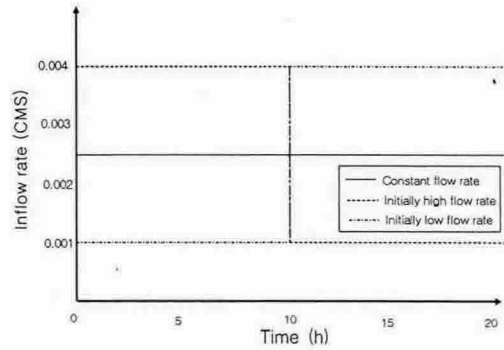


Fig. 9 Inflow rate variability patterns

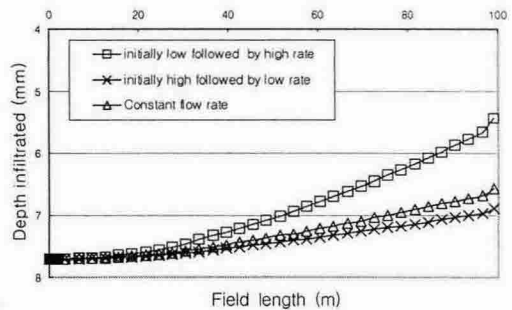


Fig. 10 Subsurface water distribution profile as to different flow rate

Table 4 Performance of irrigation system under variable flow rate

Type of irrigation flow rate	advanced time (h)	ponding depth (mm)	Irrigation efficiency (%)
Type I*	3.9	53.0	88.3
Type II**	2.9	52.8	88.0
type III***	7.7	54.5	90.8

* : constant irrigation rate (0.0025 CMS)

** : Initially high (0.004 CMS) followed by low (0.001CMS) during the latter half of the irrigation

***: Initially low (0.001 CMS) followed by high (0.004 CMS) during the latter half of the irrigation

고, 초기에 적은 양을 관개하는 Type III는 7.7 시간으로 가장 긴 결과를 나타냈다. 관개형태별 관개효율은 공급된 관개용수에 대한 포장에 담수된 양의 비율로 정의했으며, TypeIII가 90.8 %로 가장 큰 결과를 나타냈다. 이는 Fig. 10에 나타낸 관개

형태별 침투량 때문에 판단된다. 침투량이 상대적으로 적은 Type III가 관개 종료후 담수심은 크게 나타나므로 결과적으로 관개효율은 높게 나타나는 것으로 판단된다.

3. 장변길이에 따른 비교

구획의 장변길이에 따른 관개 소요시간을 비교하기 위하여 단변길이는 30m, 장변길이는 80m, 100m, 120m, 150m 증가시키면서 물머리 도달

Table 5 Advance time and storage time under different length of longer side

Length of longer side (m)	Advanced time (h)	Storage time (h)
80	2.0	25.3
100	2.9	31.9
120	3.8	39.1
150	5.3	50.9

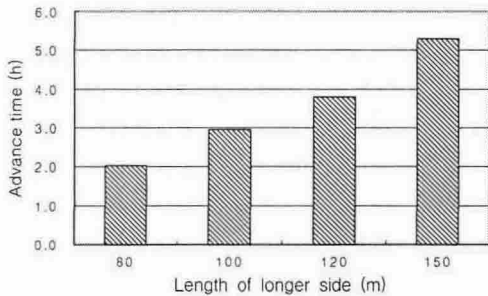


Fig. 11 Advance time as to the length of longer side

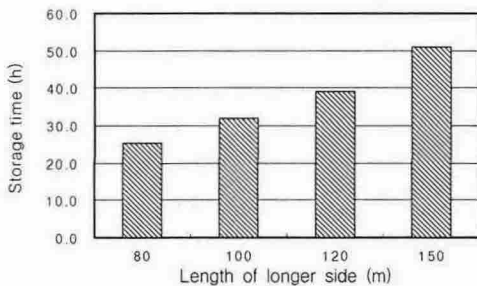


Fig. 12 Storage time as to the length of longer side

시간과 담수심이 140 mm가 될 때까지 소요시간을 모의하였다.

Table 5와 Fig. 11, Fig. 12는 장변길이에 따른 물머리 도달시간과 담수소요시간을 나타낸 것이다. 물머리 도달시간과 담수소요시간은 장변길이가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈다.

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 담수논의 관개특성 분석을 위하여 유한체적법을 적용한 2차원 수치모형을 구성하고, 과거 시험자료가 있는 밭에 대한 지표관개 시험자료와 논에서 관개에 따른 현장 시험자료를 사용하여 모형의 적용성을 평가하였다. 또한, 개발된 모형을 이용하여 관개형태에 따른 관개특성을 모의하여 분석하였으며, 구획의 장변길이에 따른 담수소요시간을 모의하여 비교하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 수심평균 이차원 천수방정식을 지배방정식으로 하고, 유한체적법의 수치기법을 적용하여 논의 관개 특성해석이 가능한 2차원 수치모형을 구성하였다.

② 논의 관개특성을 조사하기 위하여 충청북도 보은군 학림지구의 포장과 서울대학교 실습농장의 포장 등 2개의 포장을 선정하여 유입구를 통한 관개에 따른 담수심을 측정하였다.

③ 모형의 보정을 위하여 대구획 경지정리된 시험포장에서 관개시험을 실시하고, 담수심 변화에 대한 실측치와 모의치의 비교를 통해서 Manning 조도계수를 0.13으로 산정하였다.

④ 모형의 검정은 학림지구의 시험포장과 서울대학교 실습농장의 관개시험결과와 모형의 모의결과를 사용하여 비교하였다. 학림지구의 실측자료와 모의자료간의 RMSE는 1.0~3.0 mm, E^2 는 0.95~0.99를 나타냈으며, 서울대학교 실습농장의 실측자료와 모의자료간의 RMSE는 1.0~2.0 mm, E^2

는 0.94~0.97를 나타냈으며, 실측치와 모의치가 유사한 경향을 나타내는 결과를 보였다.

⑤ 밭의 지표관개에 대한 시험자료를 사용하여 물머리 진행상태에 따른 실측치와 모의치를 비교한 결과, line 관개에서는 실측치와 모의치간의 R^2 는 0.998, corner 관개에서는 R^2 는 0.999로서 실측치와 모의치가 잘 일치하는 결과를 나타냈다.

⑥ 일정한 유입량으로 관개하는 형태, 초기에는 많은 양을 보내고 관개 중반이후에는 적은 양을 보내는 관개 형태, 초기에는 적은 양을 보내고 관개 중반이후에는 많은 양을 보내는 관개 형태 등 3가지 관개 형태에 따른 변화를 모의한 결과, 물머리 도달시간은 초기에 많은 양을 보내고 중간부터 적은 양을 보낼 경우에 가장 작게 소요됐으나 관개종료후의 담수심과 관개효율은 관개형태에 따라 큰 차이를 나타내지 않았다.

⑦ 장변길이에 따른 물머리 도달시간과 담수소요시간을 모의한 결과, 장변길이가 길수록 소요시간이 많이 소요되고 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈다.

References

1. Chung, H. W., J. Y. Choi, D. S. Kim, K. U. Park, and S. J. Bae. 1997. Hydraulic characteristics of surface irrigation in paddy field of direct seeding culture. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 39(4) : 64-74. (in Korean)
2. Jifu Y., Anyoji H, and Tada A. 1995. Relationship between length of paddy field and inlet flow rate. *Transaction of The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering* 179 : 57-68. (in Japanese)
3. Kang, M. G. and S. W. Park. 2003. A finite volume model using ENO scheme for 2d unsteady flows. *Journal of Korea Water Resources Association* 36(1) : 1-11. (in Korean)
4. Lee, K. S. and S. T. Lee. 1998. Two-dimensional finite volume unsteady-flow model for shorks. *Journal of Korea Water Resources Association* 31(3) : 279-290. (in Korean)
5. Masato S., Masataka K., Chikara K., 1995, Planning of enlarged paddy field block and improvement level, *Journal of The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering* 63(9) : 931-936(in Japanese).
6. Playan, E., Walker, W. R., and Merkle, G. P. (1994), Two-dimensional simulation of basin irrigation. I: theory, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(5) : 837-856.
7. Playan, E., Walker, W. R., and Merkle, G. P. (1994), Two-dimensional simulation of basin irrigation. II: application, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(5) : 857-870.
8. Singh V., and Bhallamudi S. M., 1997, Hydrodynamic modeling of basin irrigation, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(6) : 407-414.
9. Song, C. S. and S. W. Park. 1994. Surface and subsurface drainage characteristics of a paddy field. *Seoul National University Journal of Agricultural Sciences* 19(2) : 49-62. (in Korean)