

2차원 유한체적 수치모형을 이용한 대구획 논의 용배수 특성해석

An Analysis of Irrigation and Drainage Characteristics at Large-Sized Paddy Fields Using a Two-Dimensional Numerical Model

박종민(농림부) · 박승우(서울대) · 강문성(서울대) · 강민구*(서울대)

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

Abstract

A two-dimensional numerical model based on a finite volume method was formulated to solve the shallow water equations and applied for evaluating irrigation and drainage characteristics at large-sized paddy fields. Manning roughness coefficient was calibrated using the observed inundating depths at drainage tests and used for validating the model with the results from irrigation and drainage test. The simulated results were in good agreement with the observed inundating depths.

I. 서 론

우리나라에서는 경지정리된 농경지중 구획의 규모가 0.2~0.3 ha이고 농로가 협소하여 대형 기계화 영농에 적합하지 않은 농경지 200천 ha를 대상으로 구획의 규모를 1 ha이상으로 확대하는 대구획경지정리사업을 추진하고 있다. 1999년 6월말까지 전국적으로 67천 ha에 대한 대구획경지정리를 완료하였으며, 이는 목표면적의 34 %에 해당한다(신, 1999).

이러한 대구획 경지정리사업으로 농기계 작업효율이 크게 향상되는 등 영농의 편의성이 높아졌으나, 단위필지의 확대로 인하여 논에 일정 담수위까지 관개용수를 공급하는 시간이 많이 소요되고, 구획의 크기가 커짐에 따라 답면의 상태가 불량해 지고 배수로의 간격이 넓어져 소구획에 비하여 신속한 담수의 처리가 어려워지며, 기계의 주행에 필요한 지내력의 확보를 위해 지하수위를 낮추는데 문제점을 갖고 있다(송 등, 1994).

논의 물관리에 미치는 인자로는 구획의 크기, 관개량, 토양의 종류, 작물 소비수량, 취입구 및 배수구의 크기와 개수 등이 있다. 이러한 인자들이 물관리에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 관개와 배수에 관련된 현장실험이 필요하지만, 다양한 크기의 구획과 토양 종류를 구비하기 어렵고, 여러 가지 관개 및 배수 조건에 대한 반복적인 실험이 어려우며, 많은 시간이 소요된다. 그러나, 수치모형에 의한 모의분석은 빠른 시간 내에 다양한 분석결과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 예측도 가능하기 때문에 현장 실험분석과 수치모형에 의한 모의분석을 병행하는 것이 바람직하다(정 등, 1997).

본 연구에서는 대구획 논외 용배수 특성을 분석하기 위한 2차원 수치모형을 구성하고, 현장 시험자료를 이용하여 모형의 보정 및 검정을 통한 모형의 적용성을 평가하였다. 또한, 개발된 모형을 이용하여 대구획 논에서 물꼬의 수, 물꼬 폭, 구획형태에 따른 배수시간을 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.

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

$$\mathbf{U} = [h, hu, hv]^T, \quad \mathbf{E} = [hu, hu^2 + gh^2/2, huv]^T$$

$$\mathbf{G} = [hv, hvw, hv^2 + gh^2/2]^T, \quad \mathbf{S} = [-(q_i + q_e), gh(S_{0x} - S_{fx}), gh(S_{0y} - S_{fy})]^T$$

여기서, h 는 수심(m), u 는 x 방향의 유속(m/s), v 는 y 방향의 유속(m/s), q_i 는 침투량(m), q_e 는 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.

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

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, 이 등, 1998).

3. 경계조건

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

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (3)$$

여기서, \mathbf{u} 는 경계에 직각방향인 흐름벡터, \mathbf{n} 은 경계에 직각인 방향벡터이다.

물꼬를 통한 배수량은 물꼬의 수위에 영향을 받으므로 수위-유량관계가 설정되어 있으면 수위에 따라 유량을 계산할 수 있다. 물꼬의 흐름을 웨어를 통한 월류형태로 가정하면, 수위에 따른 배수량은 식 (4)와 같다(Hayase, 1993).

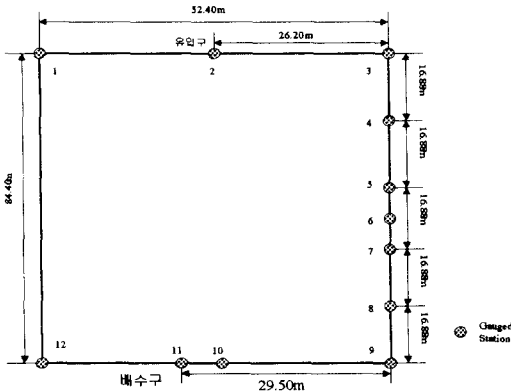
$$q = CH_0^{3/2} \quad (4)$$

여기서, q 는 물꼬를 통한 단위배수량(m^2/sec), H_0 는 월류수심(m), C 는 유량계수를 나타낸다.

III. 모형의 적용

1. 시험포장의 용배수 시험

모형의 적용성을 평가하기 위하여 보은농지개량조합의 학림지구를 시험지구로 선정하였으며, 시험지구는 1995년에 대구획 경지정리사업이 시행되었다. <그림 1>은 시험포장의 모식도를 나타낸 것으로 시험포장의 크기는 52.40×84.40 m²이다. 관개와 배수시 담수심의 변화는 측정지점에 측정자를 설치하여 측정하였으며, 관개량은 유입구의 유량을 측정하였고, 배수량은 <그림 2>와 같이 웨어를 설치하여 측정하였다. 증발산량은 보은기상관측소의 기상자료를 이용하여 수정 Penmann식에 따라 계산하였으며, 침투량은 직경 300mm의 단일원통을 포장에 설치하여 감수심을 실측하고, 감수심에서 증발산량을 감한 값으로 계산하였다.



<그림 1> 시험포장 모식도와 측정지점

<그림 2> 웨어를 이용한 배수량 측정

2. 조도계수의 결정

논의 조도계수(n)은 Masato 등(1995)이 2차원 수치모형을 이용하여 논 배수상황을 모의할 때 0.15를 적용한 바 있다. 본 연구에서는 배수시험 자료를 이용하여 조도계수(n)를 산정하였으며, 실측치와 모의치의 비교는 실측치와 모의치의 통계적인 상관성을 판단하기 위한 기준으로 결정계수(R²)와 식 (5), (6)의 Nash와 Sutcliffe의 모형의 효율(E²), RMSE를 사용하였다.

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

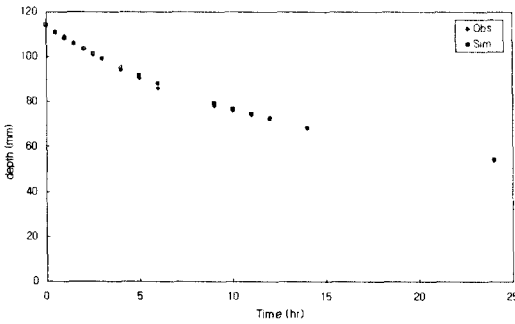
$$RMSE = \sqrt{\frac{(H_0 - H_s)^2}{n}} \quad (6)$$

여기서, H₀는 실측치, $\overline{H_0}$ 는 실측치의 평균, H_s는 모의치, n은 자료의 수를 나타낸다.

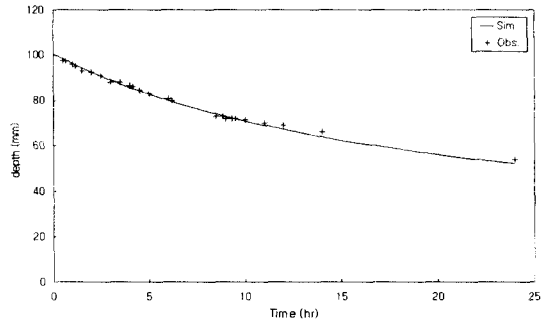
<표 1>은 Manning 조도계수를 0.13으로 적용하였을 때, 배수시험시 각 지점별 실측치와 모의치의 상관성을 나타낸 것이다. 각 측정지점의 RMSE는 0.82~2.44 mm, R²는 0.9941~0.9984, E²는 0.981~0.998로 실측치와 모의치의 상관성이 매우 높음을 알 수 있다. <그림 3>은 측정지점 9번의 시간별 담수심 변화에 대한 실측치와 모의치를 나타낸 것이며, <그림 4>는 배수구에 설치한 웨어 수심의 실측치와 모의치를 비교한 것이다.

<표 1> 배수시험시 측정지점별 실측치와 모의치의 상관성

측점	RMSE (mm)	R ²	E ²
1	2.06	0.9941	0.986
2	1.81	0.9954	0.989
3	1.52	0.9942	0.992
4	2.44	0.9956	0.981
5	1.49	0.9959	0.992
7	2.17	0.9949	0.983
8	1.67	0.9960	0.990
9	1.18	0.9954	0.995
11	0.82	0.9984	0.998
12	2.15	0.9951	0.984



<그림 3> 배수시험시 담수심 변화 비교(St. 9)



<그림 4> 시간별 웨어 수심변화 비교

3. 모형의 검증

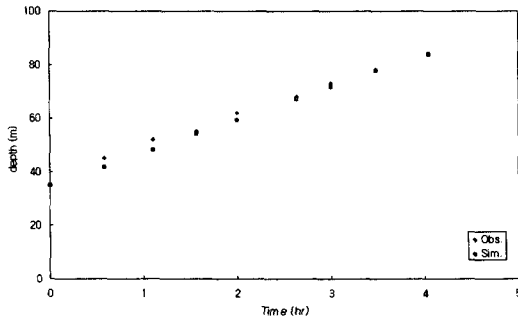
(1) 관개

담수상태 논에 대한 관개시 담수심의 변화에 대한 실측치와 모의치를 이용하여 관개시험에 대한 모형의 적용성을 평가하였다. <표 2>는 시험포장의 담수심에 대하여 실측치와 모의치의 상관성을 나타낸 것이다. 각 측정지점의 RMSE는 0.99~3.34 mm, R²는 0.9897~0.9984, E²는 0.953~0.996으로 실측치와 모의치의 상관성이 매우 높음을 알 수 있다.

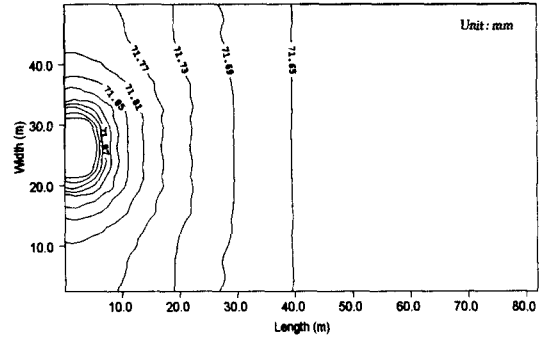
<그림 5>는 측정지점 10번의 시간에 따른 담수심의 변화를 도식적으로 비교한 것이며, 관개시의 담수심의 변화는 시간에 따라 거의 선형적인 형태를 나타내고 있다. <그림 6>은 관개시작 후 3시간이 경과했을 때 각 지점 수위의 모의결과를 등수위선으로 나타낸 것이다.

<표 2> 관개시험시 측정지점별 실측치와 모의치의 상관성

측점	RMSE (mm)	R ²	E ²
1	1.55	0.9938	0.990
3	2.11	0.9916	0.980
6	0.99	0.9984	0.996
9	3.34	0.9897	0.953
10	2.03	0.9933	0.982
12	2.62	0.9932	0.973



<그림 5> 관개시 시간별 담수심 변화(St.10)



<그림 6> 관개시작후 3시간 경과시 등수위선

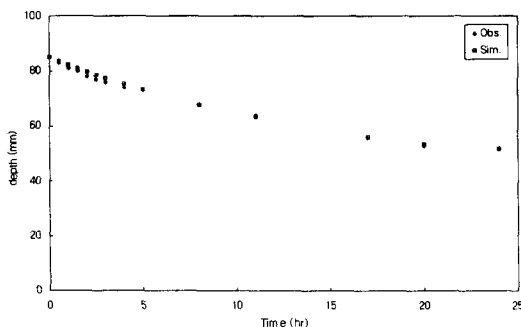
(2) 배수

논의 배수에 따른 담수심 변화에 대한 실측치와 모의치를 이용하여 배수시험에 대한 모형의 적용성을 평가하였다. <표 3>은 시험포장의 담수심에 대하여 실측치와 모의치의 상관성을 나타낸 것이다. 각 측정지점의 RMSE는 0.69~1.73 mm, R^2 는 0.9922~0.9977를 E^2 는 0.971~0.996으로 실측치와 모의치의 상관성이 매우 높음을 알 수 있다.

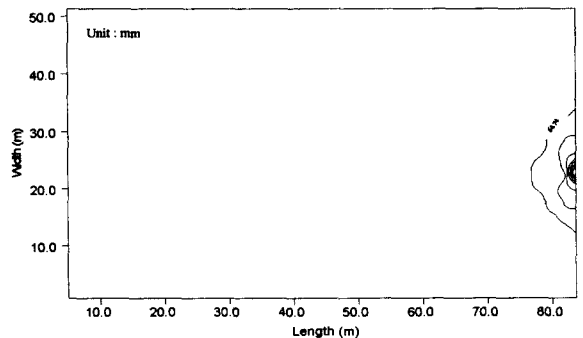
<그림 7>은 측정지점 9번의 시간에 따른 감수심의 실측치와 모의치를 도식적으로 나타내어 비교한 것이며, <그림 8>은 배수개시후 10시간이 경과했을 때 등수위선을 나타낸 것으로, 배수구 부근에서 수위의 변화가 뚜렷하게 나타나고 있다.

<표 3> 배수시험시 측정지점별 실측치와 모의치의 상관성

Station No.	RMSE (mm)	R^2	E^2
1	1.29	0.9952	0.984
2	1.73	0.9922	0.971
3	1.29	0.9952	0.984
6	1.00	0.9967	0.991
9	0.92	0.9969	0.993
10	0.90	0.9957	0.993
11	1.71	0.9955	0.974
12	0.69	0.9977	0.996



<그림 7> 배수시 시간별 담수심 변화(St.9)



<그림 8> 배수시작 후 10시간 경과시 등수위선

IV. 모형의 응용

구성된 모형을 이용하여 대구획 논에 물꼬 수, 물꼬 폭, 구획의 형상에 따른 배수특성을 모의분석하였다. 배수시간은 담수심이 50 mm에서 5 mm로 감소하는데 소요되는 시간으로 하였으며, 논에 침투량은 4 mm/day, 증발산량은 6 mm/day로 일정하게 적용하였다.

1. 물꼬 수와 배수시간

물꼬 수에 따른 배수시간의 변화를 모의하기 위하여 100X100 m² 크기의 구획에 폭이 200 mm인 물꼬를 1~4 개 설치하여 배수시간을 모의하였다. <표 4>는 물꼬 수에 따른 배수시간을 나타낸 것으로 배수구 2 개 설치시 배수시간은 43.25 시간, 배수구 4개 설치시에는 30.2 시간이 소요되는 결과를 나타냈다.

<표 4> 물꼬 수에 따른 배수시간

물꼬 수	1	2	3	4
배수시간(hr)	58.40	43.25	35.31	30.20

2. 물꼬 폭과 배수시간

물꼬 폭에 따른 배수시간의 변화를 모의하기 위하여 100X100 m² 크기의 구획에 폭 200~500 mm인 물꼬를 2 개 설치하여 배수시간을 모의하였다. <표 5>는 물꼬 폭에 따른 배수시간을 모의한 결과이며, 물꼬 폭이 300 mm인 경우 배수시간은 36.26 시간, 물꼬 폭이 500 mm인 경우 배수시간은 29.63 시간이 소요되는 결과를 나타냈다.

<표 5> 물꼬 폭에 따른 배수시간

물꼬 폭(mm)	200	300	400	500
배수시간(hr)	43.25	36.26	32.27	29.63

3. 구획형태와 배수시간

구획의 형태에 따른 배수시간의 변화를 모의하기 위하여 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 ha 구획의 길이와 폭을 다르게 하고, 폭 200 mm의 물꼬 2개를 설치하여 배수시간을 모의하였다. <표 6>은 구획 형태에 따른 배수시간을 나타낸 것으로 구획의 크기가 클수록 배수시간은 길어지고, 동일한 구획크기에서 길이와 폭을 다르게 할 때 배수시간은 비슷한 결과를 나타냈다.

<표 6> 구획형태에 따른 배수시간

구획크기(ha)	0.6		0.8		1.0		1.2	
구획형태(길이×폭)	100×60	60×100	100×80	80×100	200×50	100×100	100×120	120×100
배수구 간격(m)	30	50	40	50	25	50	60	50
배수시간(hr)	33.37	33.27	38.75	38.71	43.59	43.25	47.13	47.15

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 대구획 논외 용배수 특성을 해석하기 위한 2차원 수치모형을 유한체적법을 이용하여 구성하고, 대구획 경지정리된 시험포장에서 관개와 배수시험을 통한 현장자료를 이용하여 모형의 적용성을 평가하였다. 또한, 개발된 모형을 이용하여 대구획 논에서 물꼬의 수, 물꼬 폭, 구획형태에 따른 배수시간을 모의하여 비교하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

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

② 모형의 보정을 위하여 대구획 경지정리된 시험포장에서 배수시험을 실시하고, 답수심 변화에 대한 실측치와 모의치의 비교를 통해서 Manning 조도계수를 0.13으로 산정하였다.

③ 모형의 검정은 관개와 배수시 각각 실시하였으며, 관개시 각 측정지점의 RMSE는 0.99~3.34 mm, R^2 는 0.9897~0.9984, E^2 는 0.953~0.996, 배수시 각 측정지점의 RMSE는 0.69~1.73 mm, R^2 는 0.9922~0.9977, E^2 는 0.971~0.996으로 실측치와 모의치의 상관성이 매우 높은 결과를 나타냈다.

④ 구성된 모형을 이용하여 대구획 논외 답수심 50 mm를 5 mm까지 배제하는데 소요되는 시간을 물꼬 수, 물꼬 폭, 구획의 형태에 따라 모의한 결과, 배수시간은 물꼬 수, 물꼬 폭, 구획의 크기의 증가에 따라 지수함수 형태로 감소되는 경향을 나타냈다.

참 고 문 헌

1. 송창섭, 박승우, 1994, 답포장구획 크기에 따른 지표 및 지하 배수수리특성, 서울대농학연구지, 19(2), pp. 49-62.
2. 신민식, 1999, 차세대 경지정리사업에 바란다, 한국농공학회지, 41(5), pp. 3-6.
3. 이길성, 이성태, 1998. 충격과 모의를 위한 이차원 유한체적 비정상 흐름 모형, 한국수자원학회지, 31(3), pp. 279-290.
4. 정하우, 최진용, 김대식, 박기욱, 배승종, 1997, 직파재배 논외 지표관개 수리특성 - 건답휴립 직파 논외 중심으로, 한국농공학회지, 39(4), pp. 64-74.
5. Hayase Y. and Kadoya M., 1993, Study on the applicability of the diffusive tank model - Runoff analysis by the diffusive tank model in low-lying drainage(II), Trans. of the JSIDRE, 165, pp. 85-92.
6. Masato Seino, Masataka Kobayashi, Chikara Kominami, 1995, Planning of enlarged paddy field block and improvement level, JSIDRE, 63(9), pp. 931-936.
7. Singh V., and Bhallamudi S. M., 1997, Hydrodynamic modeling of basin irrigation, Journal of irrigation and Drainage Engineering, 123(6), pp.407-414.