

관개용수로 수리시뮬레이션을 통한 농업용수조직 거동 분석

Analysis on Canal System for Daily Irrigation Simulation

박기욱*

Ki Wook Park

요 지

본 연구에서는 관개용수로에서의 용수공급에 따른 용수분배 현상을 모의하고, 개선방안을 제시하기 위한 시뮬레이션 모형을 개발하였다. 관개용수로와 같은 인공적인 수로에서는 흐름의 상태가 취수공, 분수공, 수문 등과 같은 수리시설의 조작에 의해 흐름이 시간적, 공간적으로 변하게 되는 비정상류가 주가 된다. 이러한 비정상류 해석은 농업용수 관리를 위한 관개계획 수립, 농업용수리시설물의 설계 및 관리에 있어서 중요한 요인이 된다.

용수로의 부정류 해석을 위한 유한차분식으로 구성되는 모형을 개발하여 용수로를 일정구간으로 분할하여 각 구간별 수위와 유속의 변화를 계산하게 된다. 계산된 결과는 현장에서 실측된 수위 모니터링 자료와 현장 유량측정자료로 비교하여 모형의 적정성을 검증하였다.

용수로내의 흐름에 대하여 각 구간의 용수도달시간, 관개블록에 대한 분수유량을 산정한 결과는 현장 측정자료와 잘 일치하고 있는 것으로 나타나 관개계획을 수립하는 데 이용할 수 있을 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 관개용수로, 관개블록, 수리해석

1. 서 론

우리나라의 전체 수자원에 대한 용수수요는 1998년을 기준으로 연간 331억 m^3 에 이르며, 이 중 약 48%를 차지하는 농업용수는 자연적, 사회적 및 인위적인 요인에 의해 가용수자원의 공급비율이 감소하는 추세에 있으며, 이러한 현상은 앞으로 더욱 가속화될 전망이다.

우리나라의 농업용수관리는 답작을 주된 대상으로 한해를 방지하고, 효율적인 용수공급을 위하여 새로운 수자원의 개발에 주력해 왔으나 근래에 들어 신규 수자원의 개발에는 막대한 비용이 투자되어야 하고, 또한 개발 가능지역도 기존의 개발지역과 비교해 볼 때 개발여건이 상대적으로 불리한 상태이다. 따라서 이러한 문제를 개선하기 위하여 농업용수의 실제사용량에 대한 효율성을 평가, 관리방식의 개선, 시설물의 현대화 및 효율적인 물관리에 의한 종합적인 관리의 필요성이 강조되고 있는 실정이다.

농업용수의 관리는 용수의 과부족, 지형, 토양 등의 자연조건 이외에 물이용의 우선순위와 물이용상의 권익 배분까지 포함하여 오랜 기간 동안 지역의 특성에 맞게 정착되었으며 현재까지 관행물관리로 유지되고 있다. 관행에 의한 물관리는 관련 농민들간의 용수이용에 대한 의견조정과 농민들의 공동 노동제공 등으로 유지 관리되어 왔으나, 최근 인구의 감소, 고령화 등으로 농업수리시설의 관리를 위한 노동력을 얻기 어려워지고 있으며, 물수요의 증가로 수자원의 합리적 이용과 수리시설의 효율적인 관리가 가능한 물관리시설의 현대화가 시급한 과제로 대두되고 있다.

용수로에서의 물관리를 위해서는 용수로내의 유황에 대한 현황파악이 필요하며, 용수로내의 수리해석을 통

* 정회원 · 농어촌연구원 수리시험연구실 · E-mail : pku@ekr.or.kr

한 거동을 분석하기 위한 연구가 진행된 바 있다. 김(1988)은 관개용수로의 점진변화류를 계산하여 수면곡선을 추정할 수 있는 전산모형을 개발한 바 있다. 이 모형을 통해 잠관, 가통, 낙차공, 제수문 등의 수리구조물에서 발생하는 수리현상을 모의하였고, 관개용수로의 수리현상에 영향을 미치는 매개변수의 예민도 분석을 통해 조도계수, 마찰경사의 산정, 에너지보정계수, 계산간격 등에 따른 거동을 분석하였다. 白石英彦(1993)은 관개용수로 내에서의 수리현상을 유한차분모형에 의한 기본 모형을 구성하고 분지수로, 합류수로, 낙차공, 잠관, 수문 등의 각종 구조물이 있는 경우 발생하는 수로내의 거동분석을 실시하였다.

따라서 본 연구의 목적은 농업용수의 공급에 따른 용수로에서의 용수분배현상을 모의하기 위한 수리시뮬레이션 모형을 개발하는데 있다.

2. 용수로의 수리해석

관개 용수로와 같이 인공적인 수로에서는 흐름의 상태가 취수공, 분수공, 수문 등과 같은 수리시설의 조작에 의해 흐름이 시간적, 공간적으로 변하게 되는 비정상류가 주가 된다. 이러한 비정상류는 농업용수의 관리를 위한 계획수립, 농업용 시설물의 설계 및 관리에 있어 중요한 요인이 된다.

그러나, 현실적으로 비정상류에 대한 해석을 통하여 용수로에서의 관리 및 모형을 개발한 예는 많지 않으며, 지금까지는 용수로의 흐름해석을 위해서는 흐름의 상태를 정상상태의 등류로 생각하여 단순화한 모형의 개발이 주가 되고 있는 실정이다.

수원공에서 취수된 물은 용수간선, 용수지선, 용수지거를 유하하여 포장에 도달한다. 만약 용수간선에서 어떤 용수지선으로 분수할 필요가 없어졌거나, 어떤 시간에 용수간선에서 용수지선으로 분수를 시작하는 경우, 이러한 용수로의 조작환경 변화에 수반하는 용수로내의 유량 변동에 대한 용수로의 거동을 해석하기 위해서 수로내의 수리해석 모형을 필요로 한다.

1) 정상류의 기본방정식

수로의 설계에서는 유량, 조도계수 및 수로의 기울기를 결정할 수 있기 때문에 Manning의 등류공식을 일반적으로 많이 사용하고 있다. 등류의 기본방정식으로는 식(1)과 같은 Manning공식을 사용한다.

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

여기서, v 는 평균유속(m/sec), R 은 동수반경(hydraulic radius), S 는 수로의 기울기이다.

자연상태에서는 시간적으로는 수심과 유속은 일정하지만 위치에 따라서 수심과 유속이 변하게 되어 부등류 상태로 흐르게 되는 경우가 대부분이다. 부등류의 해석을 위해서는 다음과 같은 식(3-12)를 이용한다.

$$\frac{dh}{dx} = \frac{S - \frac{n^2 Q^2}{A^2 R^{4/3}} + \frac{\alpha Q^2}{g A^3} \frac{\partial A}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}}{1 - \frac{\alpha Q^2 T}{g A^3}} \quad (2)$$

여기서, h 는 수심(m), x 는 거리(m), S 는 수로의 기울기, Q 는 유량(m^3/sec), A 는 단면적(m^2), α 는 에너지 보정계수, g 는 중력가속도, T 는 수면폭(m)이다.

부등류의 기본방정식을 구형단면수로에 적용하면 같은 구간 내에서는 $\partial T / \partial x = 0$ 이므로 수면폭 T 대신에 수로폭 B 를 이용하여, 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dh}{dx} = \frac{S - \frac{n^2 Q^2}{A^2 R^{4/3}}}{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g A^3}} \quad (3)$$

2) 부정류의 기본방정식

개수로의 수리 설계에서는 수로의 제원 등을 결정하는 것이 주가 되기 때문에 정상류에 대한 해석으로도 충분하나 농업용수로 내에서의 물관리를 위한 관개계획의 수립에 있어서는 부정류에 대한 해석이 필요하다. 수로구간의 두 구간에서 생기는 질량보존의 법칙을 고려함으로써 부정류의 연속방정식(law of continuity)을 유도할 수 있다.

부정류는 시간과 거리에 따라서 흐름의 특성이 변하므로 두 구간 사이의 유량의 변화는 $\partial Q / \partial x$ 가 되고, 한 구간에서의 시간에 따른 수심의 변화는 $\partial y / \partial t$ 이다. 또한 dt 시간 동안 발생하는 구간 사이의 유량의 변화는 $(\partial Q / \partial x)dxdt + Tdx(\partial y / \partial t)dt$ 가 되고, 두 구간 사이의 체적의 변화는 $Tdx(\partial y / \partial t)dt$ 가 되는 데, 물은 비압축성 유체이므로 두 구간에서의 시간에 따른 유량의 변화량과 체적의 변화량을 합한 값은 "0"이 되어야 한다. 따라서 이로부터 부정류의 연속방정식은 다음 식(4)와 같이 표현된다.

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) dx dt + T dx \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) dt = 0 \quad (4)$$

식(1)은 $dA = Tdy$ 이므로, 다시 정리하면 식(5)의 부정류의 연속방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

일정구간에서 생기는 유량의 유출입은 수로의 입구에서만 생기는 것이 아니고 횡유입량 q 도 고려한다. 따라서 부정류의 연속방정식에 횡유입량을 고려한 식(6)을 이용한다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (6)$$

3) 연속방정식의 차분화

식(6)의 연속방정식에서 첫째 항은 다음 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial A}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = W \times \frac{\partial h}{\partial t} \quad (7)$$

여기서, W 는 이 구간에서 저류되는 평균 수면폭이다. 두 번째 항은 다음 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} (A_{i+1}v_{i+1} - A_{i-1}v_{i-1}) \quad (8)$$

따라서, 수로폭이 일정한 구형단면수로에서는 연속방정식을 다음 식(9)와 같이 표시할 수 있다.

$$W \frac{\frac{n}{n-2}h_i - \frac{n-2}{n}h_i}{\Delta t} + \frac{W}{\Delta x} \left(\frac{\frac{n-2}{n}h_{i+2} + \frac{n-2}{n}h_i}{2} v_{i+1} - \frac{-\frac{n-2}{n}h_{i-2} + \frac{n-2}{n}h_i}{2} v_{i-1} \right) - q = 0 \quad (9)$$

4) 운동방정식의 차분화

운동방정식의 1항, 2항, 3항, 즉, $\partial v / \partial t$, $\partial v^2 / \partial x$, $\partial h / \partial x$ 에 대해 차분형식으로 표시를 한다면 식(10),

식(11), 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{n v_i - n-2 v_i}{\Delta t} \quad (10)$$

$$\frac{\partial v^2}{\partial x} = \frac{n-2 v^2_{i+2} - n-1 v^2_{i-2}}{2 \Delta x} \quad (11)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{n-1 h_{i+1} - n-1 h_{i-1}}{\Delta x} \quad (12)$$

여기서, z 는 수로 바닥의 표고(m)이다. 이상의 과정에서 식(3-32)에서 미지유속 v 를 쓰지 않고 이전 구간의 기지유속 $n-2 v_i$ 로 대체하여 근사치를 구함으로써, 현재구간의 유속 $n v_i$ 만 미지수로 남길 수 있어 해를 구하는 계산을 간편화하였다. 구해진 각 성분을 식(13)에 대입해서 정리하면 수로의 미지유속 $n v_i$ 을 구하는 식(13)을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{g} \frac{n v_i - n-2 v_i}{\Delta t} + \frac{1}{2g} \frac{n-2 v^2_{i+2} - n-2 v^2_{i-2}}{2 \Delta x} + \frac{z_{i+1} - z_{i-1}}{\Delta x} \\ & + \frac{n-1 h_{i+1} + n-1 h_{i-1}}{\Delta x} + \frac{n^2 |n-2 v_i|}{\left(\frac{R_{i+1} + R_{i-1}}{2}\right)^{3/4}} \frac{n v_i + n-2 v_i}{2} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

5) 연산격자의 구성

개수로의 부정류 해석에 있어서 각 수로구간에 대해 구간별로 일정한 거리로 분할을 실시하고, 계산방향은 수로의 하류방향에서 상류방향으로 계산을 진행한다. 여기서는 각 구간은 계산에 필요한 하나의 점이기 때문에 일정한 간격을 갖는 노드(node)로 표시할 수 있다. 각 노드의 구간간격은 Δx , 계산시간간격을 Δt 로 한다. 거리와 시간에 대한 노드의 연산격자를 만들면 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

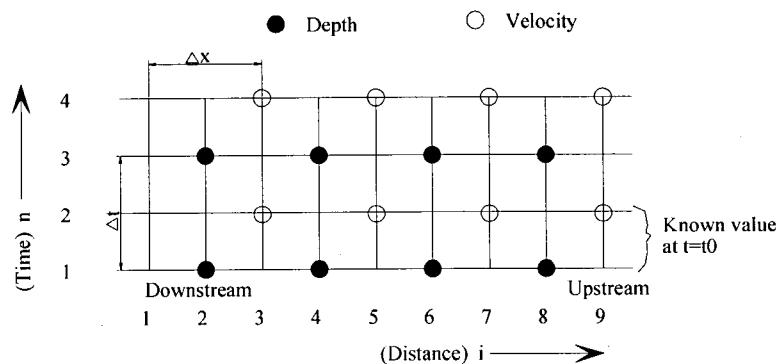


Fig. 1 Conceptual diagram of FDM mesh.

각 노드는 4개의 값을 가지고 있다. 이 값은 각 노드의 기지의 값과 현재시간에 계산되어 저장되는 미지의 값을 저장하는 공간으로 구성된다. 현재시간 t 에서 계산된 미지의 값은 다음 시간 $t + \Delta t / 2$ 에서 다시 기지의 값으로 읽어 들여 다음 단계의 계산을 수행한다. 한 구간 Δx 사이의 노드에 수위값과 유속값이 있는 테, 이것

은 부정류 방정식의 연속방정식에서 얻어지는 수위값과 운동방정식으로부터 얻어지는 유속값이다.

여기서 각 노드의 Δx 와 Δt 사이에는 계산이 진행되면서 실제의 수리현상의 전달을 잘 반영할 수 있도록 하기 위해서 다음과 같은 식(14)를 만족해야 한다.

$$\Delta t \leq \left| \frac{\Delta x}{v_{\max} \pm \sqrt{g h_{\max}}} \right| \quad (14)$$

여기서, v_{\max} 는 수로 내에서 수리해석 중 발생하는 최대유속(m/sec)이며, h_{\max} 는 계산과정 중 발생하는 최대수심(m)이다.

6) 경계조건

모형 내에서 유황이 생기게 하는 조건, 다시 말해서 수로 내에서 유황에 관계없이 입력자료로 주어지는 조건을 경계조건이라고 한다. 수로내의 수리해석을 위해서 연속방정식과 운동방정식을 해석하고자 할 때 상류, 하류 끝 지점의 수위 또는 유량이 주어진다면 다음 구간으로의 계산이 가능해진다. 본 연구에서는 저수지나 양수장 같은 수원공에서 방류량을 수로에 유하하는 형식이므로 주어진 방류량을 상류쪽의 경계조건으로 이용하고, 하류쪽의 경계조건은 초기수심을 0.001m로 설정하여 모형의 경계조건으로 입력하는 유량경계조건 및 수위경계조건을 가진다.

3. 자료수집 및 분석

1) 대상지구

대상지구인 매호지구는 경상북도 상주시 사벌면 덕가리에 위치한 덕가저수지와 상주시 사벌면 매호리에 위치한 매호양수장을 주 수원공으로 하고 있으며, 저수지 유역에 1개 용수간선, 양수장 지구에 2개의 용수간선을 가지고 있는 수도작을 주된 영농형태로 하는 관개지구이다. 매호지구는 경상북도 동북부에 위치하고 있으며, 동쪽으로 낙동강이 흐르고 있어 오래 전부터 논농사를 중심으로 한 농업이 발전한 전형적인 농촌지역이다.

2) 관개조직의 구성

매호지구의 관개조직은 Fig. 2 에 나타낸 바와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 덕가저수지로부터 덕담용수간선이 이어져 있으며, 낙동강 변에 위치하여 하천에서 용수를 양수하여 공급하도록 설치된 매호양수장으로부터 매호1용수간선 및 매호2용수간선이 각 수해지역으로 연결되어 있다. 대상지구의 관개조직에 대한 수로구간별 수로제원, 수로재질, 바닥경사, 수로구조물의 유무 및 관개면적 등의 변수에 따라 세부적으로 용수계통을 분석하여 이용한다.

대상지구의 간선수로의 수로경사를 조사한 결과 바닥경사가 1/2,000~1/2,500인 구간이 가장 많은 5,785m에 달했으며, 바닥경사가 1/1,000~1/500인 구간이 5,114m였다.

3) 관개모니터링 자료

계측장치를 통한 현장 수집자료는 주기적인 현장 실측을 통해 이용 가능한 자료를 확보하고, 수집 자료의 보정을 통해 발생 가능한 오류를 제거하는 것이 필요하다. 특히 본 연구에서는 대상지구에 설치된 물관리자동화 시스템의 운영초기부터 수집된 자료를 이용하므로 시스템의 불안정 및 각종 에러에 의해 발생하는 오류 자료를 제거하기 위해 자료의 보정(Data reduction) 및 자료의 이용가능성에 대한 분석을 실시하고 이로부터 관개 현황을 분석하기 위한 자료를 얻고자 하였다.

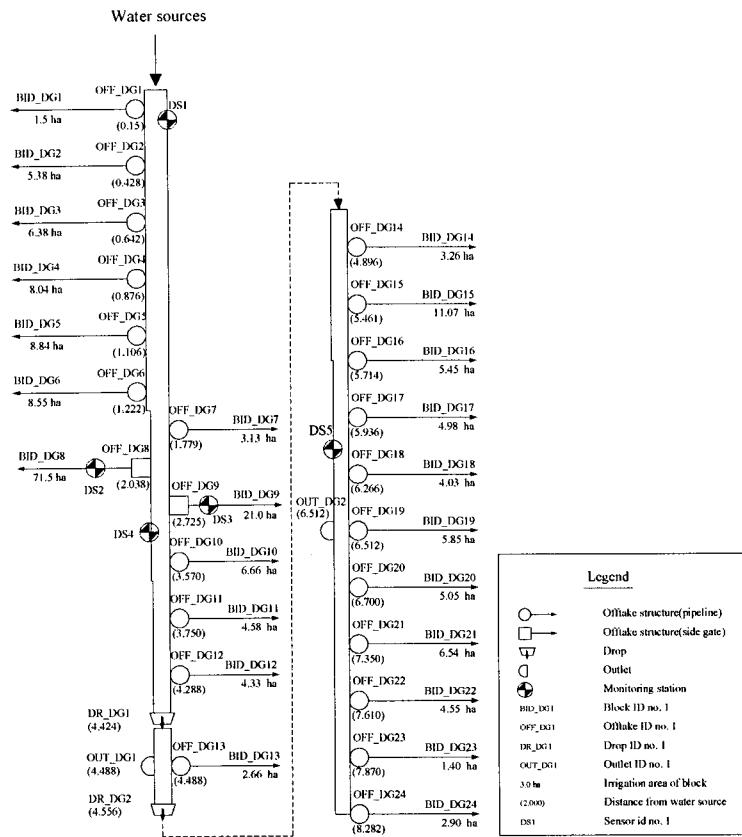


Fig. 2 Schematic diagram of Duckdam main canal(reservoir).

Table 1 Monitoring data and collection interval

	No. of station	Collection interval	Monitoring period	No. of data
Reservoir stage	1	10 min	1997.5.1~9.30	18,549
		10 min	1998.4.1~9. 2	19,558
		10 min	1999.4.1~8.24	15,163
Water depth in canal	5	10 min	1997.5.1~9.30	92,745
		10 min	1998.4.1~9. 2	97,790
		10 min	1999.4.1~8.24	75,815

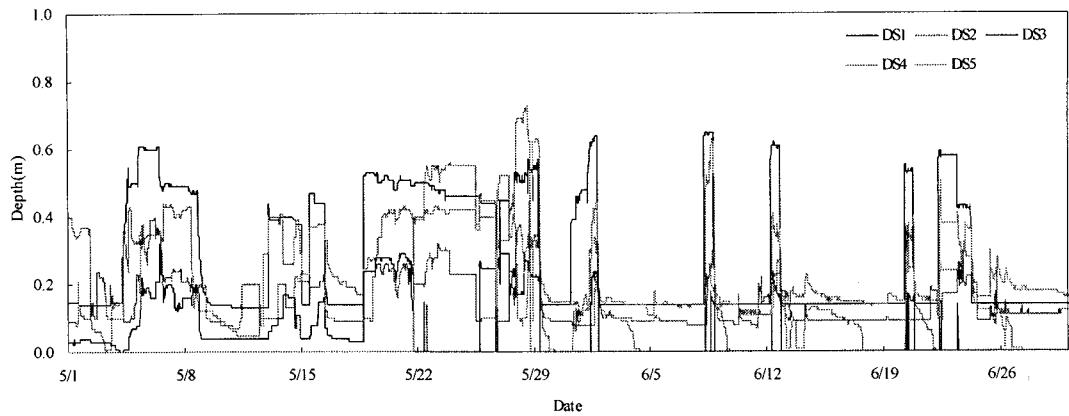


Fig. 3 Results of data reduction (DS1~DS5, 1998).

4. 모형의 적용

1) 모형의 보정

본 모형의 매개변수의 보정은 수원공, 용수로 및 포장의 현장 수집자료에 의해 매개 변수를 쉽게 결정할 수 있으므로 시행착오법에 의해 Table 2와 같은 매개변수를 보정하였다. 매개변수는 저수지의 기타손실량을 계산하기 위한 LRatio, 용수로의 주요 분수시설물인 분수공의 유량계수(C), 수로의 제체를 통한 손실량(Closs), 구간별 Manning의 조도계수(Mn) 및 포장의 배수물꼬높이(RH)로 분류하였다.

Table 2 Description of the parameters for this model

Parameters		Description
Irrigation canal	C	Coefficient of discharge
	Closs	Loss in canal body
	Mn	Manning's roughness coefficient

관제조직의 운영자료를 이용하여 용수로 시점에서 저수지로부터의 방류량의 모의 결과를 비교한 것은 Fig. 4와 같다. 모의 결과 실측치와 모의치의 결정계수(R^2)는 0.94로 높은 상관성이 있음을 보여주었다.

Table 3 Calibration results for 98SET-1(1998/5/4)

Station	Travel time(hr)		RMSE	R^2	E^2
	Observed	Simulated			
DS1	0.50	0.50	0.092	0.97	0.96
DS4	1.83	2.05	0.025	0.65	0.16
DS5	18.83	23.67	0.074	0.46	0.20

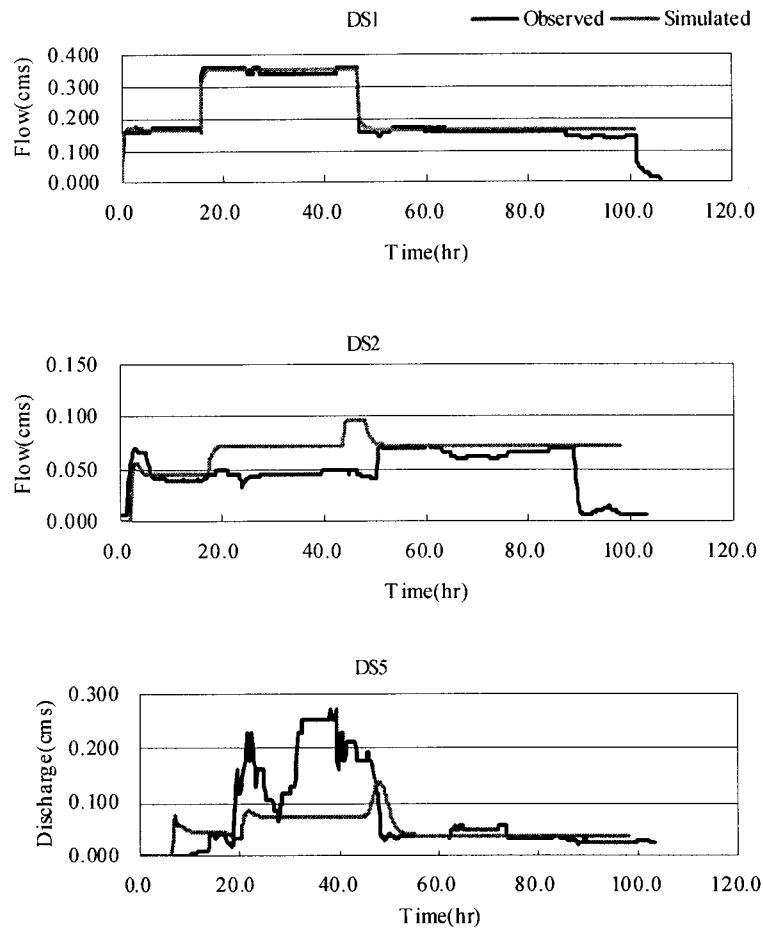


Fig. 4 Observed and simulated discharge(98SET-1).

2) 모형의 검정

모형의 검정을 위하여 매개변수의 추정에 이용되지 않은 자료를 이용하여 모형의 일관성을 검토하였다. 대상자료는 1999년의 물관리자동화 운영자료 중 매개변수의 보정에 사용된 기간과 비슷한 시기에 측정된 1999년 6월 1일부터 6월 15일까지의 자료를 선정하였다. 매개변수의 보정에 사용된 자료는 6월 1일부터 6월 30일까지의 자료이었으나 1999년의 운영 중 6월 중순부터는 자료의 수집상태가 좋지 못하여 이 기간의 자료는 제외하였다.

모형의 검정기간 중 1999년 6월 8일의 관개현황자료에 대하여 실측치와 모의치를 비교한 결과는 Table 4 및 Fig. 5와 같다. 검정결과 3개의 구간에서 DS1, DS4, DS5지점의 RMSE는 0.141, 0.096 및 0.064, R^2 는 각각 0.87, 0.52 및 0.36으로 나타났고, E^2 은 0.87, 0.46 및 0.97의 값을 보여 모형에 의한 모의치의 유용성을 확인해 주었다.

Table 4 Verification results for 99SET-1(1999/6/8)

Station	Travel time(hr)		RMSE	R^2	E^2
	Observed	Simulated			
DS1	1.00	0.67	0.141	0.87	0.87
DS4	3.33	3.17	0.096	0.52	0.46
DS5	5.67	5.50	0.064	0.36	0.97

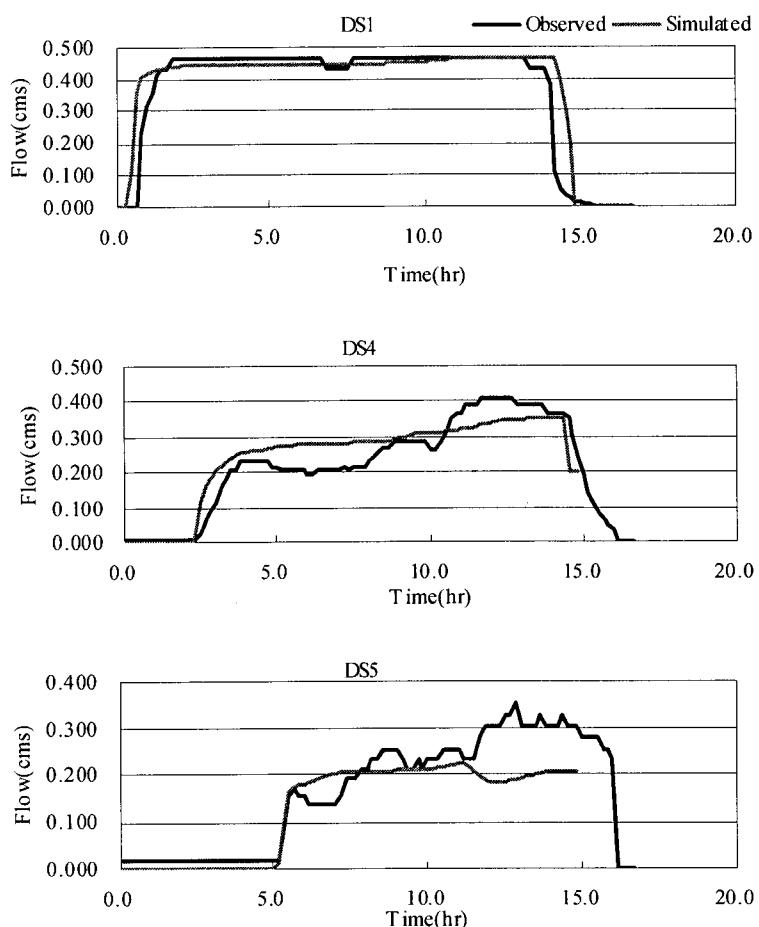


Fig. 5 Observed and simulated discharge(99SET-1).

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 관개용수로에서의 용수공급에 따른 용수분배 현상을 모의하고, 개선방안을 제시하기 위한 시뮬레이션 모형을 개발하였다. 관개용수로와 같은 인공적인 수로에서는 흐름의 상태가 취수공, 분수공, 수문 등과 같은 수리시설의 조작에 의해 흐름이 시간적, 공간적으로 변하게 되는 비정상류가 주가 된다. 이러한 비정상류 해석은 농업용수 관리를 위한 관개계획 수립, 농업용 수리시설물의 설계 및 관리에 있어서 중요한 요인이다.

용수로의 부정류 해석을 위한 유한차분식으로 구성되는 모형을 개발하여 용수로를 일정구간으로 분할하여 각 구간별 수위와 유속의 변화를 계산하게 된다. 계산된 결과는 현장에서 실측된 수위 모니터링 자료와 현장 유량측정자료로 비교하여 모형의 적정성을 검증하였다.

용수로내의 흐름에 대하여 각 구간의 용수도달시간, 관개블록에 대한 분수유량을 산정한 결과는 현장 측정 자료와 잘 일치하고 있는 것으로 나타나 관개계획을 수립하는 데 이용할 수 있을 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 김현준, 박승우, 1988, 관개용수로에서의 수면곡선 계산, 한국농공학회지, 30(3), pp. 114~120.
2. 박기욱, 1997, 농업용수조직내 관개단위별 용수분배의 최적화, 서울대학교 석사학위논문.
3. 白石英彦, 中道宏, 1993, 농업수리계획을 위한 수리모델 시뮬레이션 기법, 토지개량기술정보센타, 日本.
4. 이남호, 정하우, 박승우, 1990, 관개조직의 일별 모의조작, 한국농공학회지, 32(3), pp. 67~78.
5. Chow, V. T., 1959, "Open Channel Hydraulics", MaGraw-Hill.
6. Misra Rajeev, L. Sriharan and M. S. mohan Kumar, 1992, Transients in Canal Network, J. of Irri. Drain. Engrg., ASCE, 118(5), pp. 690~707.
7. Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970, River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of Principles, Journal of Hydrology, Vol. 10, pp. 282~290.
8. Pleban Shlomo, Dale F. Heermann, John W. Labadie, and Harlod R. Duke, 1984, Real Time Irrigation Scheduling via "Reaching" Dynamic Programming, Water Resources Research, 30(7), pp. 887~895.
9. Zimbelman Darell D. and David D. Bedworth, 1983, Computer Control for Irrigation-Canal System, J. of Irri. Drain. Engrg., ASCE, 109(1), pp. 43~59.