

MODFLOW 모형의 WETLAND 모듈에 대한 소개

김형수¹⁾, 류재희²⁾, 윤용남³⁾, 김재형⁴⁾

1. 서론

자연과 인류의 발생 및 진행과정 중 중요한 부분들이 습지(Wetland)대에 그 기반을 두고 이루어져 왔으며 현재에도 습지의 중요성은 점차 확대되어 가는 추세이다. 따라서 지하수와 습지대의 상호관계에 따라 정확한 지표수 및 지하수의 거동을 모의 해석하는 능력을 가지는 것은 습지대 및 그 주변의 보호와 이용 측면에서 상당히 중요하다. 주변 환경의 변화(토지 이용의 다양화, 물 이용량의 변화 및 수질의 변화 등)는 습지대에 있어서 장기간의 모의와 보호 측면에서 아주 중요한 의미를 가지며, 이런 변화에 따른 모의 및 수치적 해석과 관련된 모델들은 서로 독립적으로 개발되어 왔으며, 서로간의 상호관계를 해석하는 부분에서도 단순화된 변수나 방정식을 이용함으로써 습지대가 갖는 복잡성을 그대로 표현하는 데에는 많은 한계가 있었다. 이에 따라 개발된 MODFLOW Wetland Module은 이러한 한계를 좀더 자연현상과 가까운 형태로 모의 해석하고 더 발전적인 이해를 위해 개발되어(Montoya, 1998) 왔으며 이를 통하여 습지대를 여러 가지 형태로 분류하여 이해하고 습지대가 갖는 면적의 수축과 팽창을 모의 해석할 수 있게 한다. Wetland란 물과 육지의 중간위치를 지칭하며, 습지, 강등의 가장자리, 해안선 주변 등을 모두 포함한다. Wetland는 1년 중 적어도 몇 일은 침수상태로 존재하며 흙은 물을 포함하고 있고 여러 가지 식생을 포함하고 있다. 또 이 지대는 계절의 변화에 따른 수위의 변화나 흙의 상태에 따라 서로 다른 특징을 가지며 홍수시 물의 저장장소로 이용되고 홍수량을 감소시키며 지하수 및 지표수의 수원으로 또 다양한 동·식물의 서식지로 이용된다. Wetland는 유기질 성분의 흙으로 구성되어 있으며 매우 낮은 투수성(황<중)을 가진다. Wetland의 저류량은 지하수와 지표수의 상태에 따라 큰 영향을 받고 지하수의 저류량은 강수 및 증발산에 의해, 지표수의 저류량은 침투 및 증발산에 따라 영향을 받는다.

-
- 1) 선문대학교 토목공학과 조교수
 - 2) 고려대학교 토목환경공학과 석사과정
 - 3) 고려대학교 토목환경공학과 교수
 - 4) 고려대학교 토목환경공학과 박사수료

2. 모형의 개요

MODFLOW(Modular Three- Dimensional Finite Difference Flow Model)모형은 미국 지질 조사국(U.S. Geological Survey)에서 개발한 모형으로 이 모형은 McDonald and Harbaugh(1988, 1991)에 의하여 개발되었고, 미국 콜로라도 광산대학 부설 국제 지하수 모델링센터가 배포하고 있다. 이 모형에서는 지하수 흐름에 대한 편미분 방정식을 유한차분법을 이용하여 격자중심(block-centerd)에 대하여 풀었으며, 자유수면지하수는 물론 피압 지하수의 유동도 해석할 수 있으며, 3차원 흐름에 대한 것으로 연직 방향은 여러 개의 지층으로 구분하였다. 이 모형은 모듈형식으로 구성되어 있어 필요한 부분만 선택적으로 사용할 수 있고, 추가로 필요한 부분을 더할 수도 있다. 이 모형은 우물, 지하배수, 지표면 함양, 하천흐름 및 증발산등을 포함하고 있다.

등온조건에서 3차원 지하수 부정류는 다음의 편미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (Kx \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (Ky \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (Kz \frac{\partial h}{\partial z}) - W = Ss \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 Kx, Ky, Kz : x, y, z 축 방향의 투수계수(LT⁻¹)

h : 총수두(L), t : 시간(T)

W : 대수층 단위체적당 sink 또는 source 유량(T⁻¹)

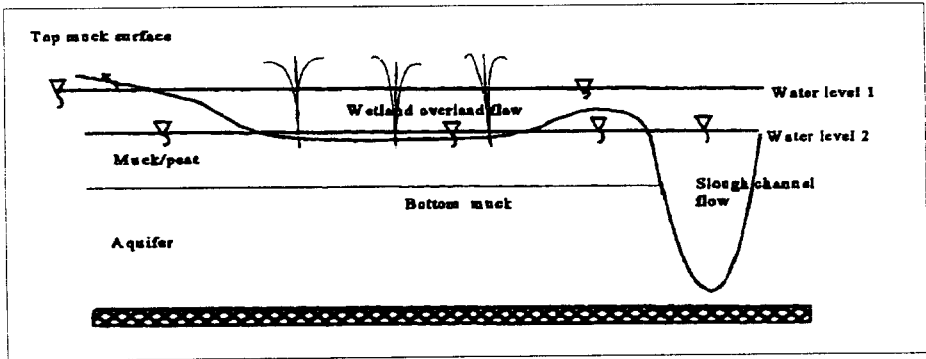
Ss : 대수층의 비저류계수(specific storage coefficient)(L⁻¹)

이 식에서 시간과 위치에 따른 수위는 $h(i,j,k,t)$ 로 표시되고 여기서 i, j, k는 격자망의 행, 열, 층을 나타내고 t는 시간을 나타낸다. 유한차분 격자망의 각 격자마다 유한차분 방정식이 한 개씩 만들어지며 전 격자망에서는 격자망의 개수와 같은 숫자의 차분방정식이 있게 되며 매 시간단위 마다 이 식들을 연립으로 풀어야 한다.이 연립방정식을 풀기 위해서 MODFLOW모형에서는 SIP(Strongly Implicit Procedure) 또는 SSO (Slice-Successive Overrelaxation)방법을 이용하고 있다. Wetland module은 MODFLOW 중 많은 부분이 보완된 MODFLOW96에 module을 첨가하고 증발산에 관련된 module(evta.f) 등을 수정하여 습지의 다양한 양상을 해석적으로 모의할 수 있게 한 것으로 기존의 습지해석 방법의 한계(지표수와 대수층의 상호작용 및 slough channel의 개념적 접근 등)를 극복할 수 있다. 또한 단면의 다양한 형태를 분류하여 해석함으로써 실제 존재 가능한 형태를 모의할 수 있다(Montoya, 1997)

3. MODFLOW WETLAND MODULE의 구성

Wetland 모의 모델은 표면 흐름, 표면 수위의 변화, 증발산 및 Wetland와 대수층간의 상호작용등을 표현할 수 있으며 식생을 통한 층류 및 진흙수로(Slough network)를 통한 흐름과 이들 상호간의 흐름을 고려하여 개발되었다. 상대적으로 Slough network을 통한 흐름은 식생을 통한 흐름에 비해 유속이 빠르면 식생을 통한 흐름은 지형의 경사에 의해 그 방향이 정해지는 반면 Slough network을 통한 흐름의 경우 기존에 형성된 Slough network의 방향에 따라 흐름이 지배된다. 따라서 비등방성 요소를 첨가함으로써 그 방향을 조정할 수 있다.

<그림 1>은 Wetland에서의 수위변화를 나타내고 있는데 수위가 낮아지는 경우 Wetland의 상단이 노출되며 이 곳은 Wetland의 대수층의 상단부분으로 간주되어진다. 이 것은 다시 수위가 회복되는 과정을 나타내기 위함이고 이로 인해 Wetland에서 중요하게 나타나는 Wetland와 대수층간의 유량의 이동을 모의할 수 있다. 또한 Wetland와 지하수의 흐름은 따로 모의되지 않는다. 즉 표면을 공극율이 1인 대수층의 연속으로 간주하여 모의한다.



<그림 2> 수위변동에 따른 wetland의 종단면

MODFLOW WETLAND MODULE의 수학적 구성을 살펴보면 다음과 같다.

1) 지표상의 식생을 통한 층류의 흐름

Wetland Module에서의 지표수의 흐름은 Manning Type에서 유도된 Kadlec equation을 사용하며 이 방정식은 다음과 같다(Kadlec, 1990).

$$q = Kh^\beta S_f^\alpha \quad (2)$$

여기서, α, β : 수두와 관련된 계수

K : 투수계수

여기서 단위폭당의 방향별 유량은 다음과 같이 표시된다.

$$qx = Tx \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3)$$

$$qy = Ty \frac{\partial h}{\partial y} \quad (4)$$

여기서 q : 유량($m^2 s^{-1}$)

위에서 언급한 식(2)와 (3),(4)를 같게 놓고 풀면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$Tx = \frac{1}{n_x S \frac{1}{h^\beta}} (h - h_b)^\beta \quad (5)$$

$$Ty = \frac{1}{n_y S \frac{1}{h^\beta}} (h - h_b)^\beta \quad (6)$$

여기서, T : 투과율($m^2 s^{-1}$)

h : 지표수 상단의 표고(m)

h_b : 점토 상단의 표고(m)

따라서 편미분(2차원)방정식에 위의 식을 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (Tx \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (Ty \frac{\partial h}{\partial y}) = Sy \frac{\partial h}{\partial t} \quad (7)$$

여기서, Sy : 비산출량

언급된 식을 토대로 Wetland module에서의 해석적 특징을 살펴보면 우선 수위의 변화에 따라 투과율이 변함을 알 수 있는데 이것은 계절적 변화 및 습지의 시간적인 팽창이나 수축을 모의할 수 있다는 것을 의미한다.

$$T = \left[\frac{1}{nS_f^{(1-a)}} (h - h_b)^a \right]_{surf. water} + [K_b(h_b - h_z)]_{muck} \quad \text{for } h_b < h \quad (8)$$

$$T = [K_b(h - h_z)]_{muck} \quad \text{for } h_z \leq h \leq h_b \quad (9)$$

$$T = 0 \quad \text{for } h < h_z \quad (10)$$

2) 습지상의 진흙수로 통한 흐름

진흙수로(slough channel)상의 흐름은 식생 사이로 흐르는 흐름보다 일단 빠른 유속을 가질 것이며(마찰이 적기 때문) 수로가 가지는 방향에 따라 흐름을 해석하여야 한다. 따라서 흐름의 방향을 결정해 주어야 하며 이 것은 비등방성 요인을 각 cell에 입력함으로써 획득될 수 있다.

3) 습지대의 증발산

습지대는 많은 식생을 포함하며 수분은 기타 다른 지역에 비해 충분한 편이므로 많은 양의 증발산을 이룬다. Wetland module에서는 기존의 증발산을 계산하는 개념에서 모세관 현상이 많이 이어나는 점을 감안하여 증발산량의 최고치가 기존의 해석방법보다 빠르게 도달한다고 보았으며 이 값을 조정함으로써 증발산을 계산한다. 이 것을 식으로 표현하면 다음과 같고 <그림 2>는 증발산의 양을 수위에 따라 나타낸 것이다.

$$ET = ET_{max} \quad \text{for } h_b - H_s' < h \quad (11)$$

$$ET = 0 \quad \text{for } h < h_b - H_s \quad (12)$$

$$ET = ET_{max} \frac{h - h_b + H_s}{H_s - H_s'} \quad \text{for } h_b - H_s \leq h < h_b - H_s' \quad (13)$$

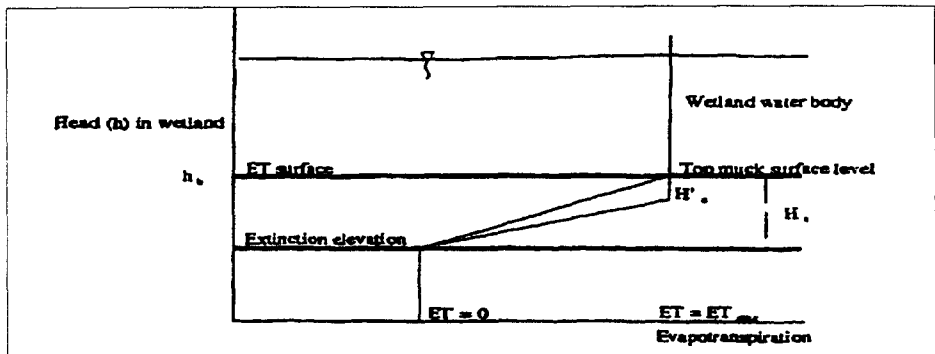
여기서, h_b : 점토 표면 표고

h : 습지 표고

H_s : extinction depth

H_s' : capillary fringe

ET_{max} : 증산의 최고치



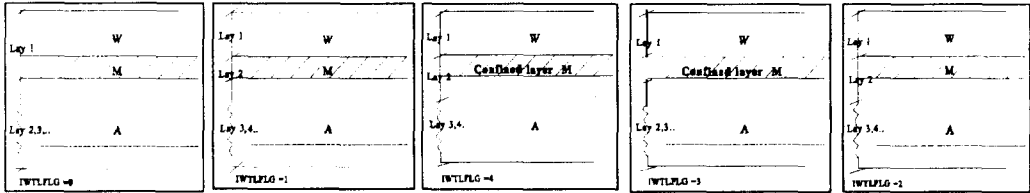
<그림 2> 수위에 따른 증발산의 변화

4. WETLAND MODULE에서의 습지의 개념적 접근

Wetland module은 다음과 같은 5개의 개념적 단면을 택할 수 있으면 사용자는 적절한 선택을 통해 Wetland를 해석해야 한다.

- 1) 상단의 층이 물과 점토를 같이 포함하는 경우

- 2) 상단은 물로만 이루어지고 상단 밑의 층이 점토인 경우
 - 3) 점토를 포함하는 층이 물과 같이 공존하며 피압인 상태인 경우
 - 4) 피압인 상태의 점토층이 상단과 하단의 경계로서 얇은 층을 형성하고 있는 경우
 - 5) 물과 공존하는 점토층이 비피압의 상태인 경우
- 이상의 5가지의 형태의 Wetland 시스템은 <그림 3>에 나타나 있다.



<그림 3> Wetland 시스템의 개념적 모형단면

5. WETLAND MODULE의 적용

위에 언급한 MODFLOW Wetland Module을 이용하는데에는 우선 변수의 추정이 중요하다.

여기서는 α , β 의 추정이 주가된다. α 의 경우는 대략 1의 값을 갖는데 이것은 동수경사가 매우 작다는 생각에서 출발한다. β 는 주로 Wetland위의 식생에 의해 결정되어지고 그 값의 변동에 따라 위치수두에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

Wetland Module에서는 기존의 BCF Module을 수정하여 쓰게되어 있으며 여기에는 새로운 즉 Wetland를 모델화 하는데 필요한 새로운 변수들을 입력하게 되어 있다.

새로운 변수들을 살펴보면 우선 위에서 언급한 α , β 가 이에 속하며, 그밖에 습지를 이루고 있는 층의 높이와 층보다 높은 즉 율류상태의 수두 높이 등이 이에 속한다.

<그림 4>는 가상의 Wetland의 초기 가정 수두를 나타낸 것이며 <그림 5> 가상의 Wetland에 Module을 적용한 결과를 나타낸 것으로 가상의 Wetland는 면적인 $162\text{km} \times 162\text{km}$ 의 섬으로 중앙의 수두가 가장 높으며 Cell의 크기는 1072m 로 가로와 세로의 Cell수는 151개가 되며 초기 수두는 다음과 같은 식에 의해 표현되는 경우이다.

$$h = 0.4575 + 0.1525 \times \cos \frac{(\pi r)}{r_{\max}} \quad \text{for } r < r_{\max} \quad (14)$$

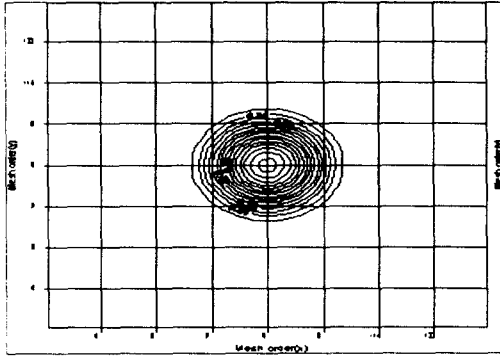
$$h = 0.305 \quad \text{for } r \geq r_{\max} \quad (15)$$

여기서, $r_{\max} = 32188\text{m}$

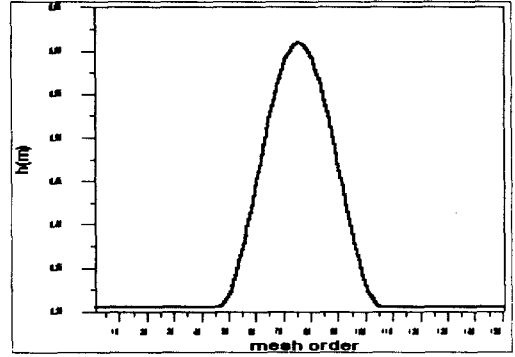
<표 1>은 Wetland model과 Diffusion flow model의 입력 매개변수와 최고수두치를 나타낸 것으로 매개변수 α 의 값에 의한 수두차이는 조도계수를 조정함으로써 그 차이를 없앨 수 있다.

<표 1> 모델의 입력자료 및 산정결과(after 12days)

Model	α (exponent)	β (exponet)	roughness	$h_{\max}(\text{m})$	<그림 5>
Wetland model	1.00	1.66	0.06	0.4400	mesh system
Diffusion flow model	0.50	1.66	1.0	0.4400	bold line

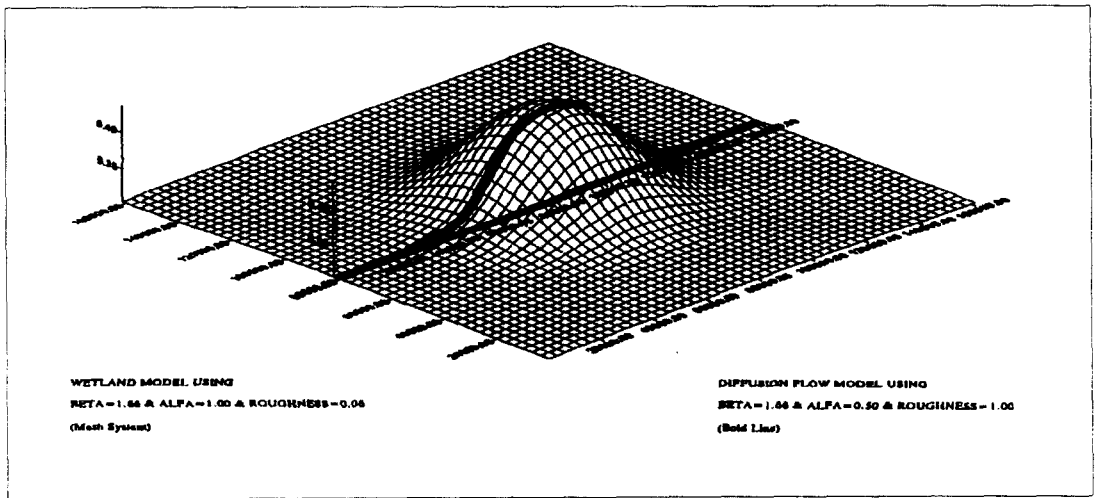


a) Plan view



b) Side view

<그림 4> 초기 수두의 형태



<그림 5> 모델링 후의 수두 변화(after 12 days)

6. 참고문헌

- Angela M. Montoya, 1997, *MODFLOW WETLAND MODULE WHICH RELATES INTERACTIONS WITH AQUIFERS AND SLOUGHS*. A Thesis Submitted to the Faculty of The College of science, Florida Atlantic University.
- Kadlec, R.H. 1990. *Overland flow in wetland: Vegetation resistance*. Journal of Hydraulic Engineering 116, 691.
- McDonald, M.G., and A.W. Harbaugh. 1988. *A modular three-dimension finite difference ground-water flow model*. USGS Techniques of Water Resources Investigations Report, Book 6, Chapter A1.
- McDonald, M.G., and A.W. Harbaugh. 1991. *MODFLOW : A modular three-dimension finite difference ground-water flow model*. IGWMC Ground Water Modeling Software, International Ground Water Modeling center. Colorado, USA.
- Jorge I. Restrepo, Angela M. Montoya, and Jayantha Obeysekera. 1998. *A Wetland Simulation Module for the MODFLOW Ground Water Model*. Ground Water. Vol. 36, No.5.
- Hammer, D.E. and Kadlec, R.H., 1986. *A model for wetland surface water dynamics*. Water Resorces Reserch. 22(13), pp. 1951-1958.