

습지의 체적-면적-깊이에 대한 관계식 추정

정 상 만* ○김 형 수** 김 준 권***

1 서론

습지 또는 늪은 육상과 수생 생태계의 전이지대로서 수문학적으로나 생태학적으로 매우 중요한 기능을 가지고 있다. 습지로 유입되는 유입수에는 용해된 다량의 영양물질 및 토사가 함께 섞여 오랜 과정을 통하여 다양한 생명체의 소멸과 생성을 조절함으로써 완벽한 생산과 소비의 균형을 갖춘 하나의 생태계로써 습지는 존재하게 된다.

수문학적 측면에서 습지는 물을 저장하는 저수지 역할을 하여 가뭄시에 용수를 제공할 수 있는 수원이 되기도 하며, 홍수시에는 물 흐름의 에너지를 감소시켜 홍수발생을 완화시키기도 한다. 자연습지는 댐이나 저수지, 관개시설의 건설을 감소시킬 수 있는 경제적 효과가 있으며, 습지에서 물은 비교적 안정된 양으로 유출되고, 생활용수나 농업용수, 공업용수로도 이용된다.

물의 흐름이 서서히 진행되는 동안, 습지로 유입되는 영양소는 습지 식물과 생물을 보존 및 번식시키며 농산물의 성장을 촉진시키기도 하고, 물의 흐름이 빠른 시기에는 영양물질이 습지로부터 유출되어 하류나 연안의 영양원이 되기도 한다.

이와 같이 습지는 여러 가지 기능을 가지고 있고, 또한 최근 환경에 대한 인식이 중요하게 대두되면서 습지의 가치를 인지하여 습지를 보호하고자 하는 운동이 일고 있다. 그러나 국내에서 습지에 대한 연구는 환경 및 생태학적 측면에서 주로 이루어져 왔다. 즉, 습지의 기본적인 요소는 수문학적으로 중요한 물이라 할 수 있는데 이에 대한 정량적인 평가나 연구가 이루어지지 않았다. 물의 정량적인 연구는 습지의 기능 및 가치 그리고 생태학적 연구에 있어 가장 기본적인 요소라 할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 습지 연구의 토대가 될 수 있는 내륙성 습지의 체적(volume, V)-면적(area, A)-수심(depth, h)에 대한 관계를 도출하고자 한다. 이와 관련된 연구동향을 살펴보면, 호수의 수학적 모델링을 연구한 Gates 와Dissendorf (1977)는 추계학적 힘의 상호작용에 의한 호수 수위의 변동을 모형화하기 위하여 체적이 면적에 비례한다고 가정하였으며, Bengtsson 과 Malm(1977)은 기후조건에 따른 호수 수위의 민감도 분석을 위해 면적이 수위의 제곱에 비례한다고 가정하였다. 또한 O'Connor(1989)는 호수와 저수지의 용존고형물에 대한 변동을 시뮬레이션 하기 위해, 가정한 체적이 수위에 m 승에 비례하고, 면적은 수위의 $m-1$ 승에 비례한다고 가정하였다. 국내에서는 박수영 등(2000)이 지형정보를 이용하여 우포늪의 수위별 면적 및 저수용량 곡선을 작성하였으나, 이는 습지의 수면 상부만을 고려하였다.

습지는 지구상에 육지가 존재하는 곳에는 습지가 존재한다. 습지의 정의는 우리나라 습지보전법 제2조의 정의와 람사협약에서 정의한 것을 살펴보면 크게 해안습지 와 내륙습지로 분류하여 정의하고 있으며, 습지의 분류는 물의 원천, 우점식생, 범람시기 등에 따라 다양하게 분류되기도 한다.

2 기본 이론

습지에 대한 체적-면적-수심의 관계를 파악하기 위해서는 습지의 모양이 중요할 것이다. 그러나 통상 습지는 비대칭일 뿐만 아니라 복잡한 모양을 가지고 있어 어느 한 단면으로 그 습지

* 공주대학교 토목환경공학부 부교수 (E-mail : smjeong@kongju.ac.kr)

** 선문대학교 토목공학과 조교수 (E-mail : sookim@email.sunmoon.ac.kr)

*** 공주대학교 토목환경공학과 석사과정 (E-mail : jun69kim@kongju.ac.kr)

의 형상을 정확히 표현할 수는 없다. 본 연구에서는 습지의 경사가 습지의 형상계수에 의해 영향을 받을 수 있는 깊이의 수심을 가지고 있으며, $A-h$ 및 $V-h$ 의 관계가 역함수로 표현될 수 있다고 가정하고, 이들 관계에 대한 1차 방정식을 유도하기 위하여 Hayashi와 Kamp(2000)가 수행한 연구를 근거로 수학적 기본이론을 전개하고자 한다. 여기서 $A-h$ 와 $V-h$ 관계는 상호 의존적이라 추론할 수 있으므로 이를 근거로 식을 유도하기로 한다.

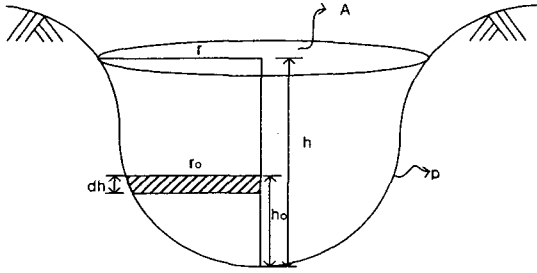


그림1. 습지의 모형

구할 수 있다. 여기에서 대칭적인 습지의 경사 단면을 구하는 방법은 그림 2에 의하여 나타낼 수 있으며 또한 식(2)에 의해 표현할 수 있다.

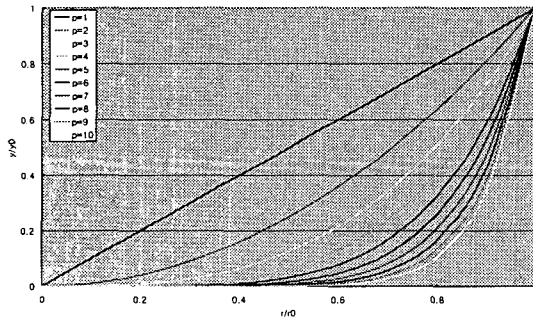


그림2. $\frac{y}{y_0} = \left(\frac{r}{r_0}\right)^p$ 에 의한 습지의 경사단면

따라서 $h_0 \pi r^2 = h \pi r_0^2$ 에서 식(3)을 유추할 수 있다.

$$\frac{r^2}{r_0^2} = \frac{h}{h_0} \quad (3)$$

또한 $\frac{r}{r_0} \propto \frac{y}{y_0}$ 이므로 식(2)과 (3)으로부터 $\frac{y}{y_0} = \left(\frac{r}{r_0}\right)^p \rightarrow \left(\frac{h}{h_0}\right)^{\frac{2}{p}}$ 의 관계와 식(4)을 얻을 수 있다.

$$r^2 \sim \left(\frac{h}{h_0}\right)^{\frac{2}{p}} \pi r_0^2 \quad (4)$$

식(4)을 이용하여 면적을 표시하면 식(5)와 같다.

$$A = \pi r^2 = \pi r_0^2 \left(\frac{h}{h_0}\right)^{\frac{2}{p}} \quad (5)$$

그러므로 경사에 따른 면적의 변화는 다음 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

따라서 V 는 습지 수심에 따른 면적을 적분하여 얻을 수 있고 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \int_0^h A(\eta) d\eta \quad (1)$$

여기서, η : 수심에 대한 임의의 변수

V : 습지의 체적

h : 습지의 최저점에서부터 수면까지 수심

h_0 : 습지의 단위 수심

A : 습지의 표면적

면적, A 는 표면적이 평평한 수면을 가지고 있다고 가정하고 dh 사이의 습지경사를 고려하여

$$y/y_0 = (r/r_0)^p \quad (2)$$

여기서 y : h 에 상응하는 지표의 고도

y_0 : 지표의 단위고도

r : h 에 상응하는 습지의 반경

r_0 : h_0 에 상응하는 반경

p : 습지의 측면 경사에 대한 형상 계수(shape factor)

습지의 경사를 고려하지 않고 일반적인 방법으로 면적을 구하면 $A = \pi r^2$ 이므로, 수심에 따른 면적의 변화는 $\pi r^2 \propto h$ 그림 1에서 $\pi r_0^2 \propto h_0$ 및 이다.

$$A = \pi r_0^2 \left(\frac{h}{h_0}\right)^{\frac{2}{p}} = S \left(\frac{h}{h_0}\right)^{\frac{2}{p}} \quad (6)$$

다음으로 습지 경사단면의 형상계수, p 를 적용한 체적을 구하는 식은 다음 식(7)과 같다.

$$V = \int_0^h A(\eta) d\eta \quad (7)$$

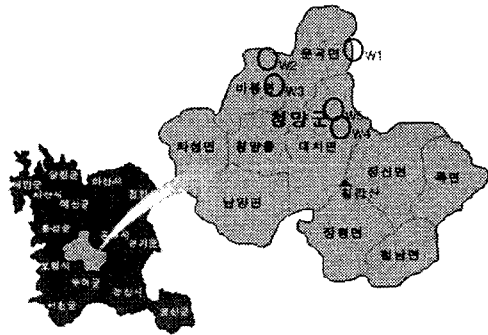
$A(\eta)$ 는 식(6)으로부터 도입 할 수 있으며 식(6)은 다음의 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{S}{(1+2/p)} \frac{h^{1+(2/p)}}{h_0^{2/p}} \quad (8)$$

3 실제습지에의 적용

3.1 대상습지의 현황 및 특성

본 연구의 대상습지들은 충청남도의 중앙에 위치한 청양군으로 동쪽은 공주시, 서쪽은 보령시, 남쪽은 부여군, 북쪽은 예산군과 인접하여 있다. 이 지역에 있는 5곳의 습지를 연구 대상지역으로 선정하였으며, 위치는 아래 그림3과 같다.



습지명	W1	W2	W3	W4	W5
소재지	운곡면 수석리	비봉면 느랭이못	비봉면 여습지	대치면 장수동제	대치면 타정제

그림3. 적용대상 습지명 및 위치도

본 연구의 대상습지들은 충남 중부에 위치해 있는 청양군으로 면적은 479.6 km²이다. 청양군은 내륙에 위치한 까닭에 기온의 교차가 심한 내륙성 기후이며 연 평균기온 12 °C, 1월 평균기온 -2.9 °C, 8월 평균기온 26.2 °C이며, 연 평균강수량은 1,195.9 mm이다(충청남도, 1999).

본 연구에서 선정된 습지들의 면적은 1,471.1~6,435.5 (m²)까지 비교적 작은 습지에 속하며 습지의 수심은 2.0 m ~4.2 m 까지 비교적 깊은 수심을 가지고 있고, 산악지형에 위치한 습지들이다. 또한 습지가 형성된 곳은 산악지형에서 하류부에 있는 지형으로 자연적으로 형성된 습지와 인공적으로 형성된 저수지형 습지형식이 존재한다.

3.2 대상습지의 모델링

대상습지의 모형화는 충남 청양에 대한 1/25,000의 수치지형도(Digital Elevation Maps)를 기초로 하였으며, 지형도내에서 등고선, 표고점, 수준점의 고도와 관련된 데이터만이 필요하므로 전체 지형도에서 고도와 관계된 레이어(layer)만을 추출하는 작업이 필요하다. DXF file 형식으로 구축된 벡터(vector) 데이터로부터 레스터(raster) 형식의 수치고도자료를 생성하기 위해서는 다음과 같은 단계를 거쳐야 한다. 즉, 본 연구에서 습지의 표현은 지형도상에서 EL.0 m로 표현되기 때문에 습지의 레이어에 고도를 삽입하고 지형도상에서 누락된 습지의 하부를 수심측량을 통하여 수치지형도에서 누락된 레이어를 삽입하였다.

또한 습지이외의 지형지물 및 고도값이 0을 가지고 있는 자료는 질의 고도(query elevation)에 의해 제거하였다. 습지의 측량은 다른 하천측량과 유사하나 다른점은 습지가 물로 덮여 있는 부분을 셀 형식의 격자망을 짜서 측량을 실시하였으며, 수심측량은 정밀도가 높은 광파 거리측정기(Total Station)로 측량하였다. 습지의 셀 간격은 5 m×5 m의 격자망을 짜서 측량하였으며, 수치지형도에서 ArcView를 통하여 추출한 X, Y, Z 지형자료와 측량자료를 기초로 하여 SURFER Program(Golden Software, 2001)을 이용, 그림 5~8과 같이 3D 모형을 생성하였다. 대상습지에 대한 모델링 절차를 간단히 정리하면 그림 4와 같다.

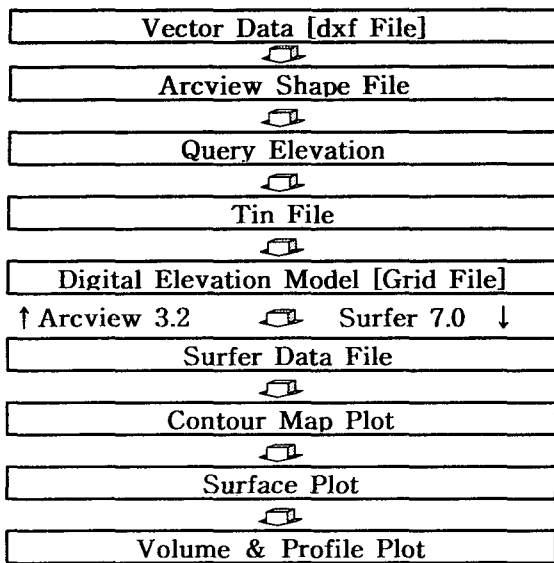


그림4. Data processing

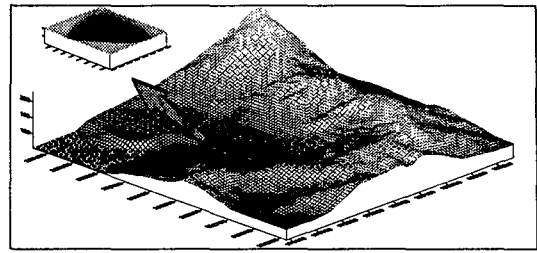


그림6. W2의 3D 모형화

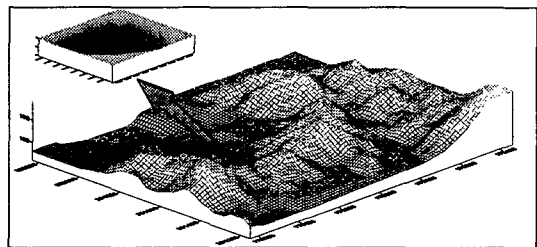


그림7. W3의 3D 모형화

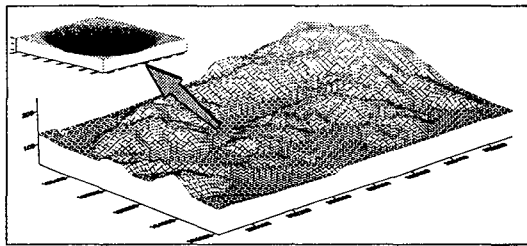


그림5. W1의 3D 모형화

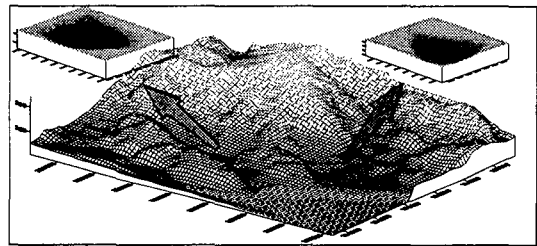


그림8. W4, W5의 3D 모형화

3.3 체적-면적-깊이 관계의 산정

본 연구에서 선정한 대상습지들을 그림 5~8과 같이 3D 모형화 한 후 0.2 m 간격으로 수위를 증가시켜 습지들의 체적과 면적을 산정 하였다. 체적과 면적을 산정하기 위하여 SURFER 프로그램을 이용하였다.

표 1은 수심이 최고일 때 즉, 습지의 월류전 수심(h_{max})을 기준으로 하여 p 와 S 를 산정한 것이다. p 는 최고수심일때의 수면 형상을 장반경 및 단반경으로 구분하고 각 반경에 대하여 산정하였다. 여기서 장·단반경 각각에 대한 평균 p 를 구할 때는 습지의 기하학적인 형상을 잘 표현할 수 있는 기하평균을 이용하고, 장·단반경 전체에 대한 평균 p 를 구할때는 장·단반경에 대한 길이의 비를 가장 잘 표현할 수 있는 조화평균을 이용하였다. 그림 9는 이론상의 측고법(Hypsometric curve)이며, 그림 10은 대상습지들의 측고법 이다. 그림 9와 10을 비교하여 보면 W1과 W2는 발달 초기 유역에 대한 커브와 유사함을 보이고 있고 W3과 W4와 W5는 성숙한 유역의 커브와 유사함을 보이고 있다. 또한 대상습지들의 수면형상을 장·단반경으로 절단한 모양을 그림 11~15에 나타내었다. 표 2에서 보여지는 대상습지의 체적에 대한 실측치와 계산치는 그림 11~15에서 보여지는 단면과 비교 검토해 보면 W1같은 경우는 습지의 형상이 좌우대칭이며, 완만한 경사일 경우 오차 비율이 다른 습지들에 비교하여 양호한 결과를 보였으나, 습지의 형상이 W2같이 비대칭인 경우와 경사부분에서 절곡부분이

나타난 W3, W4, W5와 같은 경우는 체적의 오차비율이 크게 나타났다. 따라서 표 3에서 보여지는 바와 같이 절곡부분을 기준으로 습지의 형상을 상하로 구분하여 V를 재산정 하였다. 재산정 결과 체적의 오차 비율이 1~8% 이내로 양호한 결과를 보여 주었다.

표1. 대상습지의 h_{max} 일때의 S, ρ

습지명	h_{max} (m)	S(m ²)	ρ
W1	2.2	4,618.6	3.42
W2	3.4	4,539.8	3.40
W3	2.0	6,435.5	3.02
W4	4.2	1,471.1	4.23
W5	3.8	4,129.2	2.36

표2. 대상습지의 실측치와 계산치의 비교

습지명	실측치(m ²)	계산치(m ²)	오차비율(%)
W1	6,366.2	6,509.0	2.0
W2	9,244.7	8,175.0	11.6
W3	5,841.3	7,745.0	32.6
W4	2,643.3	2,920.8	10.5
W5	5,656.2	4,989.0	11.8

표3. 수정된 습지경사에 의한 결과치

습지명	부 분	기하 평균	실측치 (V)	계산치 평균	오차 비율 (%)
w3	장반경상부	1.66	3,540.4	3,517.9	0.01
	단반경상부	1.67			
	장반경하부	5.09			
	단반경하부	4.63			
w4	장반경상부	2.07	888.1	811.6	0.04
	단반경상부	1.99			
	장반경하부	300			
	단반경하부	300			
w5	장반경상부	9.44	4,457.6	4,300.2	0.04
	단반경상부	9.54			
	장반경하부	7.99			
	단반경하부	7.67			

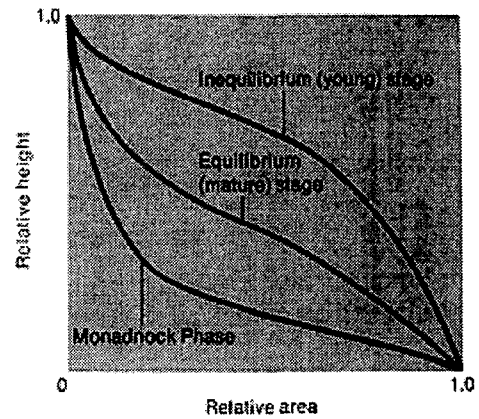


그림9. Hypsometric curve (Bras, 1990)

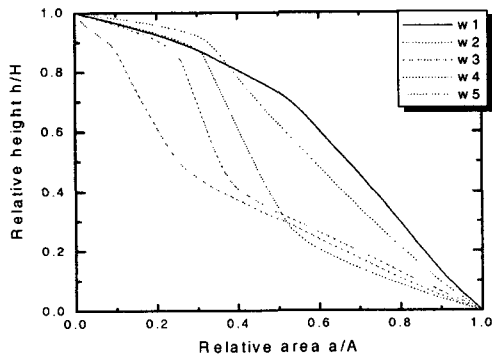


그림10. 대상습지들의 측고법

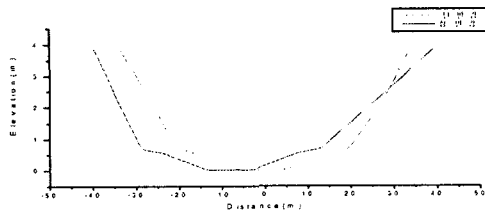


그림12. W2의 장·단반경

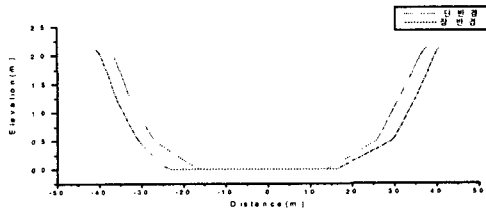


그림11. W1의 장·단반경

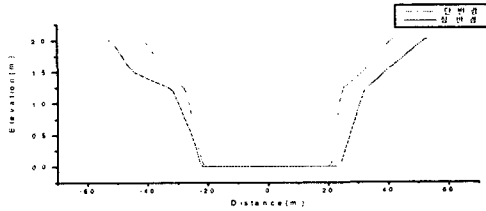


그림13. W3의 장·단반경

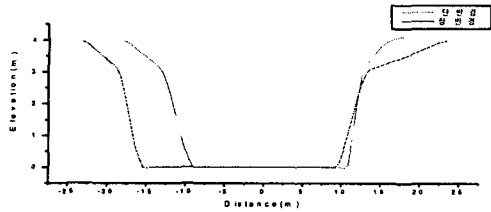


그림14. W4의 장·단반경

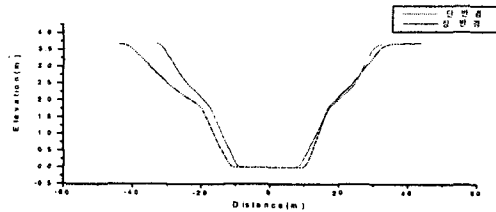


그림15. W5의 장·단반경

5. 결론

본 연구에서 습지들의 체적(V)과 면적(A) 그리고 깊이(h) 사이의 관계를 조사하였다. 본 연구는 국내의 전체 습지를 대상으로 하기보다는 특정지역 습지들의 체적-면적-깊이에 대한 관계를 규명하고자 하였다. 대상습지의 체적(V)-면적(A)-깊이(h)관계를 조사하여 국내 내륙습지에 적용할 수 있는 β 의 계수들을 산출하여 적용성을 검토하여 보았다. 표 2와 그림 11~15에서 보여지는 단면과 비교 검토해 보면 W1과 같은 경우는 습지의 형상이 좌우대칭이며, 완만한 경사일 경우 오차 비율이 다른 습지들에 비교하여 양호한 결과를 보였으나, 습지의 형상이 W2와 같이 비대칭인 경우와 경사부분에서 절곡부분이 나타난 W3, W4, W5와 같은 경우 체적의 오차비율이 크게 나타난 것은 처음 가정한 습지의 형상이 대칭적인 경우에 위배되었기 때문으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 절곡부분을 기준으로 습지의 형상을 상하로 구분하여 V 를 재산정 하였다. 재산정 결과 오차 비율이 1~8% 이내로 양호한 결과를 보여 주었다. 형상계수의 경우 상기의 숫자 범위가 국내 습지를 대표하는 것은 아니나 연구 대상 습지에 대한 습지 형상의 복잡성 정도를 표시하고 있다. 습지 지형의 발달 정도는 측고법을 통하여 검토하였는데, 그림 9의 이론적인 측고법에 의해 습지 지형의 발달 정도를 알 수 있는 측고법은 W1과 W2는 발달 초기 유역에 대한 커브와 유사함을 보이고 있다. 그리고 W3과 W4와 W5는 성숙한 유역의 커브와 유사함을 보이고 있어 발달초기 및 성숙한 형태가 혼합되어 있음을 알 수 있었다. 국내에서는 습지를 수문학적으로 분류한 사례가 전무한 실정이어서 본 연구에서 연구대상 습지의 수가 충분한 해석과 결론을 내리기에는 많은 문제점과 한계점이 있으나, 우리나라 습지의 수문학적 측면에 대한 기초 연구로 향후 습지의 정량적인 연구의 방향을 제시하고자 하였다. 차후 우리나라의 전체 습지에 대한 연구 및 토사와의 관계 등을 연계하여 습지의 생성과 소멸에 관한 연구 등이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 박수영, 윤성윤, 이기철, 김귀곤, 배덕효, 김형수, 경남발전연구원(2000). 습지학원론, 은혜기획 충청남도 (1999). 충남통계연보.
- Golden Software (1999). "SUFER for Windows user's Guide".
- Hayashi, M and Kamp, G.V. (2000). "Simple equations to represent the volume-area -depth relations of shallow wetlands in small topographic depressions". *Journal of Hydrology*, 237, pp.74~85.
- Bengtsson, L. and Malm, J. (1997). "Using rainfall -runoff modeling to interpret lake level data". *Journal of Paleolimnology*, 18, pp.235~248.
- Bras, R.L. (1990) "Hydrology An Introduction to Hydrologic science". Addison-Wesley Publishing company, pp.584~586.
- Gates, D.J. and Diessendorf, M. (1977). "On the fluctuations in levels of closed lakes". *Journal of Hydrology*, 33, pp.267~285.
- O'Connor, D.J. (1989). "Seasonal and long-term variations of dissolved solids in lakes and reservoirs". *Journal of Environmental Engineering*, 115, pp.1213~1234.