

## 습지 설계의 수문/수리 분석에 대한 개요

김 형 수 (선문대학교 토목공학과 조교수)

### 1. 서론

습지는 그동안 버려진 땅으로 인식되어 왔으나 최근 자연생태계의 중요성이 대두되고 일반인들의 관심이 증폭되면서 습지에 대한 생각 또한 바뀌어 가고 있다. 습지는 지구 표면의 약 6%를 차지하고 있으며 지구상에 골고루 분포되어 있다. 우리 나라는 수문 및 기후 특성상 양호한 습지가 서해안과 내륙지역에 다수 분포하고 있으며, 그 생태적 중요성과 보존의 필요성을 재인식하고 있다.

따라서 습지에 대한 생태계와 환경오염 측면에서 많은 연구가 진행되어 왔고 현재도 관심과 연구 노력을 기울이고 있다. 그러나 습지의 생성 조건에서 가장 중요하게 고려하여야 할 것은 습지에 제공되는 물이다. 즉, 수문학적인 조건이 갖추어질 경우에 습지가 조성될수 있고, 습지 생태계가 보존될수 있는 것이나 우리 나라에서는 현재 습지에 대한 수문 및 수리학적인 관측이나 연구가 상당히 미진한 것으로 사료된다. 이는 장래 수자원 종사자들의 많은 관심과 연구가 습지 분야에서도 이루어지기를 요구하고 있는 대목이라 할수 있다. 본 논고에서는 이미 수자원 종사들에게는 익숙한 분석 방법론을 습지에서 어떻게 활용하는지를 간단히 서술하고자 한다.

### 2. 습지의 수문학적 조건

습지의 복원이나 설계를 수행할 때 대상지역에 대한 물의 시공간적인 분포와 같은 수문학적 조건을 조사하여야 한다. 통상적으로 수문설계시 조사하는 수

문학적 특성들과 비슷하며, 여기에는 하천유량, 조수의 영향, 유효유량, 강우-유출, 강설과 같은 지표수와 온천수, 중간유출, 대수층과 같은 지하수 등을 고려하고, 침투, 증발산 등과 같은 손실, 그리고 습지 시스템에 대한 홍수, 침식, 유속등에 영향을 끼치는 유역에 대한 정보를 조사하는 것이다.

#### 2.1 수문순환

습지 시스템에 대한 수문순환은 대상지점의 경계내에서 발생하는 강수, 침투, 증발산, 지하수, 그리고 지표 유출로 이루어 진다. 습지 유역을 통하여 강수는 습지로 흘러 들어가나 침투, 증발산 및 분류 등으로 손실이 발생하게 되며 이는 습지의 저류량을 감소시키는 결과를 가져온다. 침투는 토양, 지질, 선행강우지수, 강우강도 등의 함수이며, 수직적인 과정으로 측방향 경계에 대한 물의 교환은 크게 중요한 메카니즘은 아닌 것으로 간주할 수 있을 것이다. 그러나 습지 내의 등적인 물의 분포를 분석할 때 중요한 요소로 작용한다. 침투수(seepage)는 침투와 관련이 있으며 지표수로부터 지하수로의 손실을 의미한다. 호소, 저수지, 하천유량에 대한 침투수는 배수유역에 대한 장기간의 유량 기록이 있을 때 추정되어질수 있을 것이고, 유입량에서 유출량 및 저류량의 변화와 증발산 및 기타 손실을 빼줌으로써 침투수가 계산된다. 지하수 유출은 수위가 지표면과 만나는 곳에서 발생하며, 습지의 물 수지에 있어서 중요한 요소이다. 경우에 따라서는 지하수가 습지의 주요 수원일 수도 있다. 증발산은 일반 수문현상과 마찬가지로 습지에서도 중요한 손실로 간주된다. 습지는 종종 지하수위와 지표면이

만나는 곳에 존재하기도 하는데 이때 토양은 포화상태이고 침투는 억제된다. 지표유출은 하도나 습지로 유입되는 유효강우량을 의미한다.

### 2.2 물 수지

물 수지는 한 배수구역에 영향을 끼치는 수문 요소들을 정량화하는데 유용한 방법이다. Fischenich et al.(1995)에 의한 물 수지 방정식을 이용하면 다음과 같다.

$$\Delta S = (P + I_r + I_s + I_f + G_i + T_i + P_i) - (E + T + O_s + O_f + O_i + G_o + T_o + P_o)$$

- 여기서  $\Delta S$ : 습지의 저류량 변화
- $P$ : 습지의 유효강우
- $I_r$ : 지표 흐름을 통해 습지로 유입하는 유출량
- $I_s$ : 습지로 유입되는 하천유량
- $I_f$ : 홍수범람에 의한 유입량
- $G_i$ : 지하수로부터 습지로 유입되는 유입량
- $T_i$ : 조수 유입량
- $P_i$ : 펌핑, 분류 또는 기타 인위적인 수원에서부터 오는 습지 유입량
- $E$ : 습지 표면의 증발량
- $T$ : 습지의 증산량
- $O_s$ : 습지에서 하천으로의 유출량
- $O_f$ : 습지 범람에 의한 지표 유출량
- $G_o$ : 토양수대 아래의 지하수 침투
- $T_o$ : 조수 유출량
- $P_o$ : 펌핑, 분류 또는 기타 인위적인 함몰에 의한 유출량

물 수지는 물 공급 문제, 예비설계 조사 등을 확인하고 제안된 공학적 대안들의 영향을 평가하는 데 유용하게 이용할 수 있으며, 또한 지하수 흐름이나 침투 손실량 등과 같은 미지의 수문학적 요소들의 크기를 추정하는 데도 이용할 수 있다. 그러나 물 수지 분석

을 위하여 모든 자료를 수집할 수는 없고 설계과정에서 어떤 결정을 할수 있는 자료들만을 필요로 한다. 물론 어떤 결정이라는 것 자체도 쉬운일은 아니므로 수문학적 조건에 대한 조사와 자료 분석이 통상적으로 설계단계를 통하여 지속적으로 이루어진다. 적절한 자료의 부족은 수문분석에 있어 불확실성을 증대시키는 것은 사실이다. 불확실성의 허용범위내에서 필요한 자료가 불충분할 경우는 필요한 자료의 양과 질을 얻을 수 있도록 설계전에 자료의 감시(monitoring) 프로그램이 구축되어야만 할 것이나 비용, 시간, 노력이 요구된다.

### 2.3 수문 조사

어떤 지점이 습지 시스템을 구성할 수 있는 잠재성을 지니고 있는지의 여부를 결정하기 위해서는 그 지점에 대한 수문학적인 초기 조사가 이루어져야 한다. 수문 조사는 기존에 측정된 강수, 하천유량, 지하수 자료 등을 검토하는 것이나 수원과 수자원의 함몰(sinks) 등을 포함한 기존의 수문 조건들을 검토할 필요가 있다. 초기 조사에서 대상지점이 습지 구성에 적절한 평가를 받았다면 습지화의 고려 대상이 되는 것이다.

상세한 습지 구성요소를 검토하기 위하여 필요한 수문 정보는 습지의 수문학적 기능이며, 이는 유역에 대한 분석을 통하여 잠재적 유출 성분과 강우와 유출 형태에 영향을 끼치는 기후 조건이다. 일반적으로 대상지점에 대한 호우 빈도와 지속기간 곡선이 필요하며 기존의 측정 자료들로부터 구할수 있을 것이다. 하천유량자료가 있다면, 특정 호우 사상에 대한 유출 특성을 결정하기 위하여 대상지점에 대한 강우-유출 분석을 수행할 수 있다. 하천유량이나 조수에 의한 습지는 침식과 퇴적의 형태를 결정하기 위하여 하천이나 조수의 흐름 특성을 신중하게 분석할 필요가 있다. 특히, 하천유량에 의한 습지의 경우는 습지 시스템에 영향을 미칠수 있는 홍수범람을 고려하여야만 한다.

습지 복원이나 새로운 습지 구성을 위한 설계 기준은 습지 지표수의 양 및 분포와 관련이 있으며, 이는 범람사상의 깊이와 지속기간, 최소 홍수파의 감쇠, 또

는 최대 홍수기간 등에 대한 설명을 포함한다. 지표수는 수위관측 및 하천 측량으로부터 얻을 수 있으나 실제 습지 구성을 위한 자료가 충분치 않을 경우가 많을 것이다. 따라서 미계측 지역이나 자료가 불충분할 경

우는 측정과 측량에 의해 자료를 얻어야 하는데 습지의 지표수 분포는 계절과 사상에 따라 변하므로 최소 1년 이상의 조사가 필요하다.

대상지점에 대한 기존 수문학적 조건들의 철저한

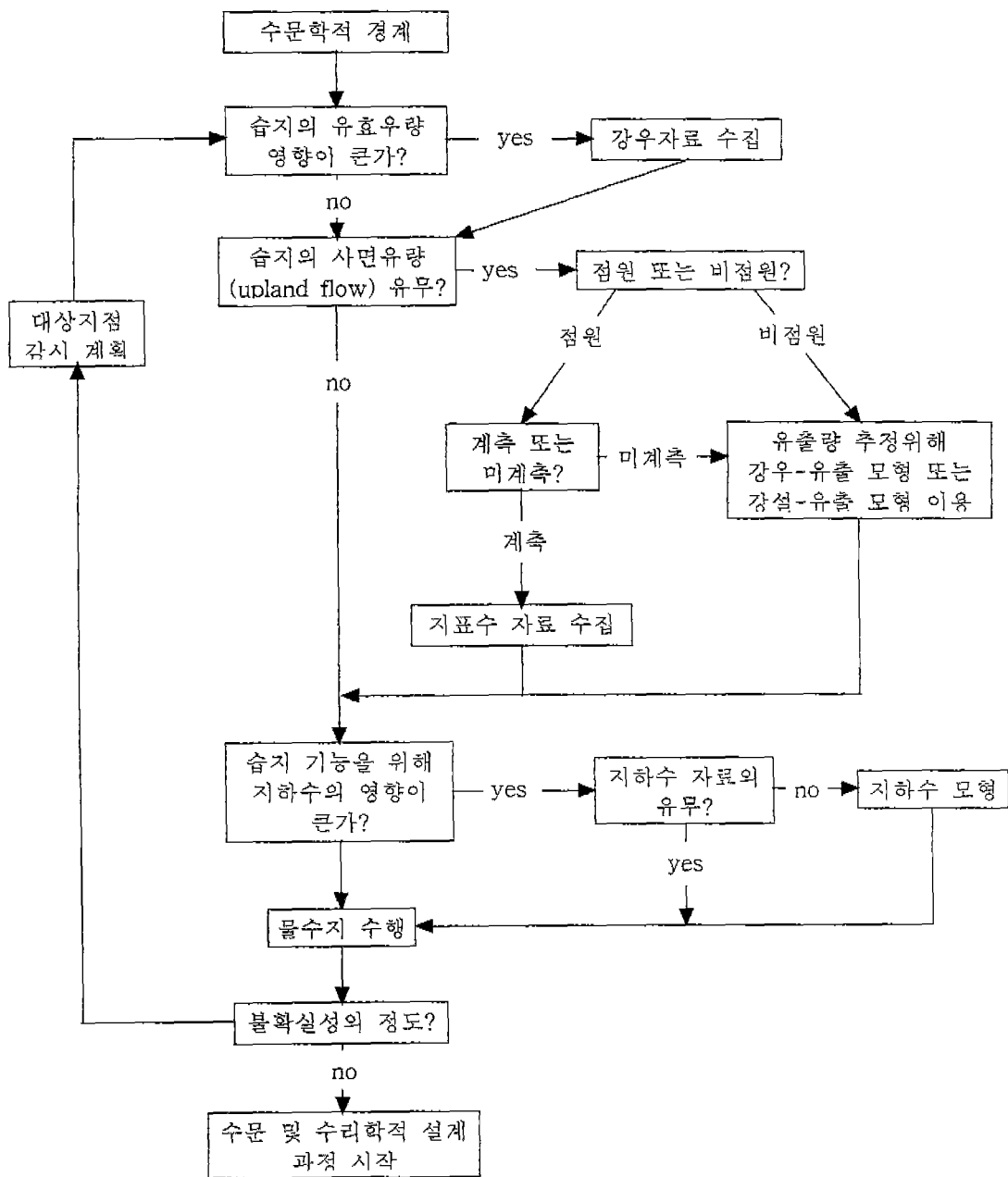


그림 1. 습지의 기초 수문분석

**특집**

습지 설계의 수문/수리 분석에 대한 개요

분석은 유량 조절 구조물, 저류 시설, 기타 공학적인 작업의 설계를 위하여 필요하다. 또한 수문학적 경계에 대한 결정이 중요한 요소일 수 있다. 즉, 행정구역에 대한 경계와 수문학적 영역의 경계가 통상 다르므로

습지를 포함하고 있는 유역에 대한 수문분석도 중요하지만 경계를 넓혀 행정구역의 경계까지도 분석을 요구할 지도 모르기 때문이다.

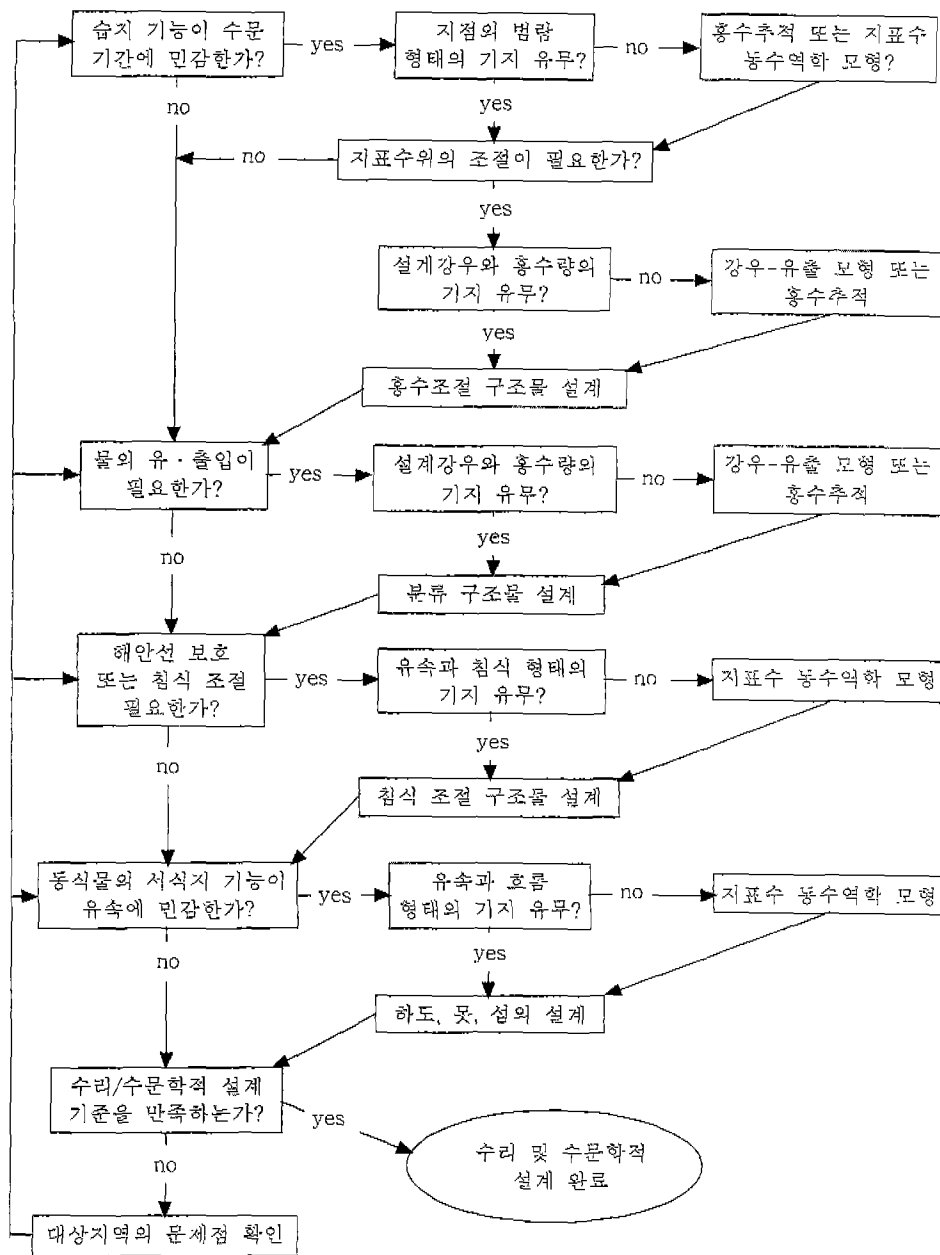


그림 2. 습지의 수문 및 수리학적 설계 과정

습지 설계의 수문/수리 분석에 대한 개요

### 3. 습지 조성의 수문 및 수리학적 분석

습지 복원의 성공은 물의 수문 및 수리학적인 측면에 달려있다. 습지의 수원은 지표수가 강수, 유출, 하천흐름을 통하여 습지로 유입하여 얻어지거나 또는 지하수나 자연 온천수로부터 수자원을 확보할 수 있다. 습지로 유입하는 물은 지표 습지, 지하수 그리고 유입수 사이에서 계속적인 교환이 이루어진다.

#### 3.1 수문 및 수리학적 설계

습지의 수문학적인 설계와 분석과정은 주로 강우, 유출, 수위변화 및 조수의 시공간적인 분포를 설명하는 것이고, 습지에 영향을 끼치는 수문과정은 유효수량, 유출, 하천유량, 침투, 지표수 및 지표하 저류량 및 지하수 흐름으로 이루어진다. 습지의 지표수 동수역학인 지표수 순환은 습지의 설계 및 물의 교환과 같은 공학적 목적, 습지내의 조류와 설계 기준을 위하여 중요하다. 통상 습지에서 고려하는 설계 형태는 물을 조절하는 구조물, 대상지점의 경사, 준설하도, 분류구조물, 암거와 침식조절에 대한 대안들이다. 이들의 설계시 필요한 수문분석은 설계강우 또는 설계조위, 최대 및 최저 수위, 순환의 형태 및 최대 유속, 풍파의 전파, 범람사상의 지속기간, 최저유입량 또는 최대가

능 유출량 등과 같은 요소들중에서 필요한 요소들을 결정하는 것이다.

습지 설계에 있어 요구되는 수문분석은 통상 두 가지 측면으로 나눌수 있는데 첫 번째는 대상지점에 대한 기초 수문분석이고 둘째는 수문/수리학적 설계 및 분석이다. 기초 수문분석은 타당성 조사와 비슷한 개념으로 수원 및 크기 그리고 물 흐름의 분포와 같은 정보를 제공하기 위한 것이다 (그림 1). 수문/수리학적 설계 및 분석은 상세한 설계와 분석을 포함한다 (그림 2).

#### 3.2 수문 및 수리학적 분석

수문 및 수리학적 분석은 수문자료를 수집, 관리 및 응용하는 과정이라 할수 있을 것이며, 분석의 목적은 대상지점에 대한 물의 분포, 양 및 동적인 거동을 이해하기 위한 것이다.

수문분석은 습지의 설계 단계마다 다른데 초기에 지점에 대한 자료수집과 평가, 지점 선정, 개념적인 설계, 공학적 설계 단계에 따라 분석의 정도를 결정하여야 한다. 습지 지점과 유역을 서술하기 위한 수문분석은 한번이 필요하나 대상지역의 수문현상과 습지 하류 유역에대한 수문현상의 영향에 대한 분석은 각 설계 단계와 설계 기준에 따른 계절적 수문 조건들에 대하여 반복되어 진다. 가장 일반적인 수문 분석 방법들을 표 1.에서 설명하고 수문분석의 형태에 따라 필요한 자료는 표 2.에 나타내었다.

수문 분석 방법을 선택할 때 고려하여야 할 특성이 있는데 첫째는 습지 설계 기준이고 둘째는 설계될 조절 구조물들의 형태와 과업의 비용이다. 간단히 설명하면 다음과 같다.

#### ① 습지 설계 기준

표 3.은 수문설계 기준의 예와 이에 상응하는 수문 분석 및 설계 대안들에 대한 예를 보여주고 있다. 특정 지점에 대한 적절한 설계 선정은 지점의 특

표 1. 수문 분석

수문 분석 방법	목 적
물 수지	증발 또는 침투수 정량화 수문학적 단위 구역내의 모든 수원과 합물에 대한 파악 적정 용수공급 결정
강우 유출 모형	강우사상에 의한 유출량의 정량화 호우사상에 대한 출구의 침투유량 결정 호우사상에 대한 출구의 침투시간 결정 호우사상에 대한 감수시간 결정
강설 유출 모형	강설사상에 의한 유출량의 정량화 강설기간에 대한 유출량의 정량화
빈도분석	홍수사상의 재현기간 결정 설계 구조물의 신뢰도 결정
홍수 추적	하도망 홍수파의 시공간적 이동 예측
지하수 모형	1-, 2-, 3-차원적인 지하수의 시공간적 분포 예측
지표수 동수역학 모형	1-, 2-, 3-차원적인 지표수의 시공간적 분포 예측

**특집**

습지 설계의 수문/수리 분석에 대한 개요

**표 2. 습지 수문 분석을 위한 자료 조건**

수문 분석 방법	필요 자료	자료 기간	빈도
불 수지	강수, 하천유량, 지하수 저류량, 지표수 저류량 점원 및 양수량, 토지이용 및 식생 유역 특성	≥1년 ≥1년 ≥1년 ≥1년 ≥1년 한번	일(daily) 주(weekly) 일 일 계절
강우-유출 모형	강수, 하천유량, 유역 특성, 토지이용 및 식생, 선행도양함수	호우기간 유역반응시간에 의존 한번 ≥1년 호우사상전에 한번	유역반응시간에 의존 유역반응시간에 의존 한번 계절 한번
강설-유출 모형	평균기온, 강설두께, 강설수분, 강설표면 반사율, 태양복사, 강수	강설 용해 계절 강설 용해 계절 강설 용해 계절 강설 용해 계절 강설 용해 계절 강설 용해 계절	일 일 일 일 일 일
빈도분석	강수 시계열, 하천유량 시계열, 조위 시계열	≥1년 ≥1년 년(year)	유역반응시간에 의존 유역반응시간에 의존 최소 시간단위
홍수 추적	유역유입량 시계열, 하도 단면, 길이, 경사, 하상 조도	호우사상 지속기간 안정하도에서 한번 안정하도에서 한번	유역반응시간에 의존 안정하도에서 한번 안정하도에서 한번
지하수 모형	대수층 및 투수계수, 유역에서의 초기수두, 지표하 흐름 경계조건, 지하수 수원과 함몰	한번 모의 사상당 한번 모의 사상당 한번 모의 사상의 기간	한번 모의 사상당 한번 모의 사상당 한번 유역반응시간에 의존
지표수 동수역학 모형	유역수심과 하상조도, 초기수위와 유속장, 지표수 경계조건, 지표수의 수원과 함몰	안정하도에서 한번 모의 사상당 한번 모의 사상당 한번 모의 사상의 기간	안정하도에서 한번 모의 사상당 한번 모의 사상당 한번 유역반응시간에 의존

성과 기초 수문 분석의 결과를 바탕으로 한다.

**② 구조물 형상**

어떤 구조물 형상은 그 형상에 맞는 설계 변수들을 결정하기 위하여 특정한 수문 분석이 필요할 수도 있으나 일반적인 분석은 설계 강우 또는 설계 조위를 결정하는 것이다. 설계강우는 어떤 구조물이 공학적으로 가장 안전하게 그 기능을 수행할 수 있는 최대 호우사상을 말한다. 습지의 복원에 있어서 설계 강우에 상

응하는 유출량은 출구 구조물의 크기, 유역의 저류용량, 압거의 최소 차원, 하도의 최소 통수능력 등을 결정하기 위하여 이용한다. 설계 조위도 마찬가지로 공학적 기능을 안전하게 수행할 수 있는 최고 수위를 갖는 조위를 말하며, 설계 강우와 설계 조위는 통상 빈도분석에 의하여 결정한다.

설계 강우에 의한 침투유량은 암거나 수문설계에 유용한 정보를 제공한다. 만약 계속유역이라면 유량 시계열은 침투유량을 결정하기 위하여 이용되어질 수

1. 습지 수문 분석을 위한 자료 조건

2. 습지 수문 분석을 위한 자료 조건

표 3. 설계 기준에 따른 수문 분석의 예

설계기준의 예	필요한 수문 분석	설계 구조물의 예
습지의 특정 최대수위를 초과하지 않는 설계 홍수량	1. 설계 강우사상의 결정 2. 설계 사상으로부터 유출량 추정 3. 습지를 통한 수문곡선의 추적 4. 통제점에서 최대 유량 결정 5. 설계기준 만족위한 구조물 설계	월류형 구조물, 암거, 수문, 벨브, 플러그, 펌프 등
설계 홍수량 기간동안 최대 수위 결정	1. 설계 강우사상의 결정 2. 설계 사상으로부터 유출량 추정 3. 습지를 통한 수문곡선의 추적 4. 최고 수위 결정	하천제방, 월류형 구조물, 입구부 구조물
특정 범위내에서 수위 유지	1. 설계 홍수 및 가뭄 사상 결정 2. 지점특성과 기초 수문분석에 의한 여러 가지 가능 설계치들의 제안 3. 제안된 설계치들에 대한 홍수와 가뭄하의 지표수량과 분포의 정량화 4. 설계기준과 제안된 설계치들 하의 수위 비교 5. 최상의 설계치를 재설정하고 분석 반복	월류형 구조물, 암거, 웨어, 수문, 벨브, 플러그, 펌프
습지에서 특정 유속을 초과하지 않는다	1. 설계 홍수사상 결정 2. 지점특성과 기초 수문분석에 의한 여러 가지 가능 설계치들의 제안 3. 제안된 설계치들에 대한 지표수 흐름 동수역학의 예측 4. 설계기준과 제안된 설계치들 하의 유속 비교 5. 최상의 설계치를 재설정하고 분석 반복	지표면 경사 변화와 하도 준설, 암거, 유입구와 출구 구조물
100년 빈도 호우에 의한 침투홍수량을 20%까지 감소시킨다	1. 100년 홍수사상 결정 2. 습지 또는 하도망을 통해 100년 호우 추적 3. 침투유량 결정 4. 여러 가지 가능 설계치 제안 5. 제안된 하도망 통해 100년 호우 추적 6. 설계 기준 만족하는 설계치 선정 7. 최상의 설계치를 재설정하고 분석 반복	지표면 경사 변화와 하도 준설, 암거, 유입구와
복원된 습지에서 지하수 주입을 20%까지 증가시킨다	1. 침투율, 침투수율, 지점 지하수의 시공간적 분포 결정 2. 다른 지표면 저류와 저류용량에 따라 여러 가지 설계치를 제안 3. 제안된 계획하에 지하수 주입과 분포 예측 4. 설계기준 만족하는 설계치 선정 5. 최상의 설계치를 재설정하고 분석 반복	지표면 경사 변화, 출구 구조물, 벨브, 수문, 플러그

있다. 그러나 통상 복원된 습지는 미계축지역의 함몰된 곳, 홍수터 그리고 하도 주변 등에 위치하며, 이러한 소유역은 국지 배수와 도시유출로부터 유량을 얻는다. 미계축 유역의 침투유량은 설계 강우에 의한 유출을 계산함으로써 결정되어진다.

대상지점에 대한 자료가 없을 때 항만 또는 정박지 주변에서 측정된 조위 자료는 종종 설계조위를 결정하기 위하여 이용되어진다. 설계조위에 의한 최고 조위는 제방고, 섬, 웨어등을 결정하고, 조석파고는 입구의 지형학적 조건에 따라 증감을 한다. 대규모의 습

## 특집

습지 설계의 수문/수리 분석에 대한 개요

지 복원 지점에 대해서는 조위의 위상과 진폭등을 결정하기 위하여 감시체계가 구축되어야만 하며, 만약 국지적 자료가 없을 경우는 동수역학 모형을 이용하여야 할 것이다.

### ③ 과업 비용

과업에 대한 모든 비용은 수문 분석의 범위내에서 추정되어진다. 물수지, 강우-유출 모형, 강설-유출 모형 및 빈도분석은 저비용의 절차로써 보다 정교한 모형 기법보다는 정확성에서 떨어질수 있다. 즉, 수리학적 홍수 추적, 지하수 모형, 지표수 동수역학 모형은 비용면에서 고비용이고 시간이 걸리는 절차이나 습지 복원 과업이 대상지점에서 광범위한 구조물적 개선을 요구한다면 정확하고 고비용의 절차가 보다 합리적일 것이다. 이러한 모형의 이용은 설계 변수들의 불확실성을 감소시켜 좀 더 효과적인 설계 구조물의 결과를 얻을수 있을 것이다. 특히, 대규모 과업을 수행할 경우, 설계 단계에서 적절한 모형의 이용은 실

제 구조물의 축조과정과 재료의 비용면에서 큰 절약을 할수 있을 것이다. 정확성면에서 떨어지고 저비용인 모형은 비교적 소규모의 과업에 이용할 수 있을 것이나 보다 높은 안전적인 요소가 필요할 것이다.

### 4. 맺음말

습지를 조성하거나 복원할 목적으로 공학적인 분석을 수행하는 것은 일반적으로 수문 및 수리학적인 해석을 토대로 이루어지는 것이며, 이는 습지에 대해 수문 및 수리학적인 측면에서의 꾸준한 관측과 분석 및 연구를 필요로 하고 있음을 말해주고 있다. 자연생태계의 중요성과 습지가 인류사회에 미치는 가치에 대한 인식이 변하고 있는 시점에서 습지 분석을 위하여 가장 기본적이고 중요한 수문 및 수리학적인 관심과 감시체계가 구성될수 있도록 하여야 하겠고, 이수과 치수측면에서도 습지에 대한 수자원 분야 종사자들의 관심과 접근을 필요로 하고 있다. ●

### 〈참고문헌〉

1. Fischenich, J.C., Franklin, J.S., and Dardeau, E.A. (1995). "Wetland hydrology assessment for siting and design," Proceedings, National Wetlands Engineering Workshop, St. Louis, MO.
2. Hayes, D.F., Olin, T.J., Fischenich, J.C., Palermo, M.R. (2000). "Wetlands Engineering Handbook," USACE.