

2018년 토양수분 · 증발산량 관측소 운영 현황

Current State of the Ground Observations for Soil Moisture and Evapotranspiration in 2018

김기영*, 이연길**, 정성원***
Kiyoung Kim, Yeongil Lee, Sungwon Jung

요 지

국내 수자원 관리의 중요성이 대두되면서 선진화된 하천의 수위, 유량 및 유사량 자료들을 취득할 수 있게 되었으나 제약이 많은 수문 인자로서 인식된 토양수분량과 증발산량에 관한 연구는 비교적 더디게 진행되고 있는 실정이었다. 하지만 최근 토양수분·증발산량 같은 인자들은 대기과 지표 사이의 상호작용에 직접적으로 관여하여 가장 중요한 수문기상학적 인자로 인식되어오면서 많은 프로젝트와 연구들이 진행되고 있다. 2002년 이전 토양수분·증발산량은 학술연구 목적으로 측정하였으며, 그 후 2005년도까지 기관별로 특정 목적을 위해 제한적 측정을 수행하였다. 또한, 한국수자원조사기술원에서도 2007년 하천법에 따라 국가 물 관리에 활용되는 기초 수문 자료생산의 목적으로 증발산량 관측소 2개소, 토양수분량 관측소 2개소를 우선적으로 설치 및 운영을 하고 있었으며, 2015년 이후로 홍수통제소에서 증발산량 관측소를 지속적으로 추가 설치하여 관측망을 구축·운영하고 있다. 이러한 관측소들에서 정기적으로 산출된 데이터들을 측정 및 분석하는 연구들은 장기적인 수문학적 연구로서 중요한 가치이다.

본 연구에서는 2018년 청미천과 설마천 유역에 설치된 증발산량 관측소(Eddy covariance method)와 토양수분량 관측소(Time Domain Reflectometer method)에서 관측된 데이터의 특성을 분석하였다. 분석 결과는 유역의 물 순환을 규명하는데 가장 중요한 연구로써 활용될 것으로 기대 된다.

핵심용어 : 토양수분량, 증발산량, 수문조사, Eddy covariance, TDR

1. 서론

국내외적으로 극심한 기후의 변화로 인해 물 순환의 불균형이 심화하고 있으며, 이를 해소하기 위해 최우선적으로 수문요소들을 관측하고 분석하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 하천의 부존량을 판단하기 위해 유출량, 강수량, 증발산량, 토양수분량은 필수적인 요소이다. 그중 유출량과 강수량은 직접적인 측정이 가능하며 많은 발전이 이루어져 왔지만 증발산량과 토양수분량의 관측하는 분야에 있어서는 많은 제약과 한계를 가지고 있다.

국내에서는 2000년도 초반 국가차원에서 프론티어 사업을 통해 증발산량과 토양수분량 자료를 생산하기 위한 연구가 시작되어 그 기반을 통해 2005년 ‘수문조사선진화5개년계획’에 반영되어 조사의 기틀을 마련하였다. 이는 현재 ‘수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률’을 통해 국가 물 관리에 활용되는 기초 수문 자료생산의 목적으로 토양수분량과 증발산량 조사가 수행되고 있으며, 이는 한국수자원조사기술원을 통해 2007년부터 증발산량 관측소 2개소, 토양수분량 관측소 2개소를 우선적으로 설치 및 운영을 해오고 있다.

* 정회원 · 한국수자원조사기술원 연구개발실 연구1팀 팀장 · E-mail : kykim@kihs.re.kr

** 정회원 · 한국수자원조사기술원 연구개발실 실장 · E-mail : sugawon@kihs.re.kr

*** 정회원 · 한국수자원조사기술원 원장 · E-mail : swjung@kihs.re.kr

본 연구에서는 한국수자원조사기술원에서 운영하는 토양수분량·증발산량 관측소 각 2개소의 경년변화 특성을 분석하였다.

2. 관측소 운영 및 자료 현황

2.1 관측소 운영

표 1. 증발산량 관측소 현황

분류	관측소	위치	관측방식	관측주기(hr)	관측개시일
증발산량	설마천	경기도 파주시 적성면 설마리(산)	에디공분산	0.5	2007.7
	청미천	경기도 여주시 점동면 뇌곡리(논)	에디공분산	0.5	2008.9

표 1. 토양수분량 관측소 현황

분류	관측소	위치	관측방식	관측주기(hr)	센서수	관측개시일
토양수분량	설마천	경기도 파주시 적성면 설마리(산)	TDR	2	51	2007.7
	청미천	충청북도 음성군 생극면 차곡리 수례의산	TDR	2	56	2008.9

3. 2018년도 자료

3.1 토양수분량

3.2 증발산량

4. 요약 및 결과

유입부 통제 상태의 수로일 경우 유입부가 잠겨있는지 여부에 따라 다른 계산식을 이용하여 상류수심을 산정한다. 유입부 잠수 여부는 $Q/AD^{0.5}$ 의 값으로 판정하며, 3.5보다 작으면 잠수되지 않은 것으로 4.0보다 크면 잠수된 것으로 구분한다. $Q/AD^{0.5}$ 가 3.5보다 크고 4.0보다 작은 경우에는 3.5와 4.0에 대한 수심을 보간하여 산정한다. 유입부 통제 가정시 상류수위를 결정하는 방정식 및 매개변수는 암거의 유형에 따라 달라진다.

유입부가 잠수되어 있지 않은 경우라면, 상류수심은 단면 형상과 재질에 따라 식 (1a) 또는 식 (1b)로 구한다. 연귀이음을 한 유입부인 경우에는 경사보정계수로서 $-0.5S$ 대신 $+0.7S$ 를 사용한다. 유입부가 잠수되어 있는 경우에는 식 (2)로 구한다.

$$\text{Form 1 : } \frac{HW_i}{D} = \frac{H_c}{D} + K \left(\frac{Q}{AD^{0.5}} \right)^M - 0.5S \quad (1a)$$

$$\text{Form 2 : } \frac{HW_i}{D} = K \left(\frac{Q}{AD^{0.5}} \right)^M \quad (1b)$$

$$\frac{HW_i}{D} = c \left(\frac{Q}{AD^{0.5}} \right)^2 + Y - 0.5S \quad (2)$$

여기서 HW_i 는 유입부 통제 수로의 상류수심(ft), H_c 는 한계수두(ft), Q 는 유량(ft^3/s), A 는 만관일 때의 단면적(ft^2), D 는 암거의 높이 또는 관경(ft), S 는 암거가 설치된 경사, K , M , c 와 Y 는 단면 형상과 재료에 따른 상수이다. 한계수두는 한계수심과 그 때의 속도를 이용하여 구할 수 있다.

2.2 유출부 통제

유출부 통제 수로로 가정한 경우 암거의 흐름이 개수로인 경우 상류수위는 식 (3)의 에너지 방정식을 이용하여 구한다. 이는 개수로의 정상부등류로서 흐름특성이 점진적으로 변하는 점변류(gradually varied flow)에 대한 기본식이다(Chaudhry, 2007; Chow, 1959).

$$HW_o + \frac{V_u^2}{2g} = TW + \frac{V_d^2}{2g} + H_L \quad (3)$$

여기서 HW_o 는 유출부 통제 수로의 상류수위, TW 는 유출부에서의 하류수위, V_u 는 유입유속, V_d 는 유출유속, H_L 은 유입손실(H_e), 유출손실(H_o), 마찰손실(H_c) 등을 포함한 총 손실수두, g 는 중력 가속도이다. 유입손실, 유출손실 및 마찰손실은 식 (4), (5), (6)으로 구할 수 있다.

$$H_e = k_e \frac{V_e^2}{2g} \quad (4)$$

여기서 H_e 는 유입손실수두, V_e 는 암거 입구에서의 유속, k_e 는 유입손실계수이다.

$$H_o = 1.0 \left(\frac{V_o^2}{2g} - \frac{V_d^2}{2g} \right) \approx 1.0 \frac{V_e^2}{2g} \quad (5)$$

여기서 H_o 는 유출손실수두, V_o 는 암거 출구에서의 유속, V_d 는 암거 하류측 수로에서의 유속, V_e 는 암거 유입구에서의 유속이다. 본 연구에서는 유출손실수두는 암거 유입부에서의 속도 수두로 대신하여 하류측 수로의 유속을 무시한다.

점변류에 대하여 마찰손실수두(h_f)는 계산간격과 등류 마찰경사와의 곱으로 산정할 수 있으며, 본 연구에서는 마찰경사 관계식이 평균마찰경사(S_f)에 도달할 때까지 다음 단면에서의 수심을 변화시키는 표준축차방법(Standard step method)을 이용하여 산정한다.

$$h_f = S_f \Delta x = \frac{1}{2} (S_1 + S_2) \Delta x \quad (6)$$

여기서 S_1 는 마찰경사, dx 는 계산간격, S_1 과 S_2 는 각 계산 단면에서의 마찰경사이다.

3. 암거 흐름 해석 검증

개발된 암거 흐름 해석 모형은 임의로 설정한 암거에 적용하고, 암거흐름해석 및 설계를 위한 소프트웨어인 CulvertMaster(Bentley Systems, Inc.)의 모의결과와 비교하여 검증하였다. 모형을 적용할 대상은 원형과 사각형 단면의 1련 암거로서 유량, 하류측 수심, 암거경사 등을 다양하게 조합하여 흐름 형식이 ‘도로배수시설 설계 및 유지관리 지침(건교부, 2003)’에서 제시하고 있는 8가지 형식이 되도록 설정하였다. 아울러 선정된 조건에서 련수가 2인 경우에도 모의하여 흐름 해석을 수행하였다. 단면형상, 련수 및 흐름 형식에 따라 48회 모형을 적용한 결과로서 상류수위, H/D, 유출유속을 그림 1~그림 3에 제시하였다. 이로부터 개발된 암거 흐름 해석 모형이 CulvertMaster와 거의 같은 정도(accuracy)로 흐름 해석을 수행하고 있음을 확인할 수 있다.

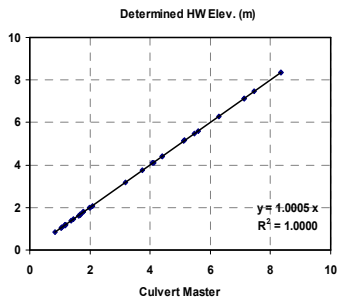


그림 1. 상류수위(HWE, m)

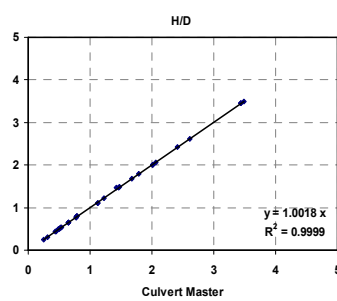


그림 2. 높이에 대한 상류수심의 비율(H/D)

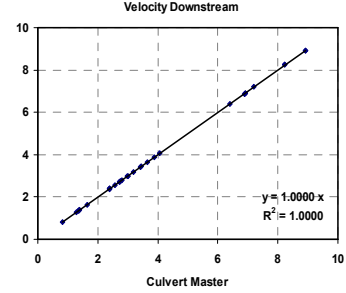


그림 3. 유출유속(V_{out} , m/s)

표 1. 암거 단면규격

중분류	단면형상	소분류
1련, 2련 횡단배수관	원형	$\phi 300, \phi 450, \phi 600, \phi 800, \phi 1,000, \phi 1,200, \phi 1,500, \phi 2,000, \phi 2,500, \phi 3,000$
1련 수로암거	사각형	$1.5 \times 1.5, 2.0 \times 1.5, 2.0 \times 2.0, 2.5 \times 2.0, 2.5 \times 2.5, 3.0 \times 2.5, 3.0 \times 3.0$
2련 수로암거		$2.0 \times 2.0, 2.5 \times 2.0, 2.5 \times 2.5, 3.0 \times 2.5, 3.0 \times 3.0, 3.5 \times 3.0, 3.5 \times 3.5$
3련 수로암거		$2.0 \times 2.0, 2.5 \times 2.0, 2.5 \times 2.5, 3.0 \times 2.5, 3.0 \times 3.0, 3.5 \times 3.0, 3.5 \times 3.5$

표 2. 암거 유형별 매개변수

분류	유입부 형상	Chno	Nomoscale	Form	K	M	c	Y
횡단배수관	Square edge w/headwall	1	1	1	0.0098	2.0	0.0398	0.67
	Groove end w/headwall	1	2	1	0.0078	2.0	0.0292	0.74
	Groove end projecting	1	3	1	0.0045	2.0	0.0317	0.69
수로암거	30° to 75° wingwall flares	8	1	1	0.26	1.0	0.0385	0.81
	90° to 15° wingwall flares	8	2	1	0.061	0.75	0.0400	0.80
	0° wingwall flares	8	3	1	0.061	0.75	0.0423	0.82

4. 암거 설계 모형

4.1 설계절차

개발된 암거 설계 모형은 다음과 같은 설계과정을 통하여 최적의 단면규격을 결정한다. 우선, 횡단배수관 또는 수로암거의 모든 표준단면규격에 대하여 흐름해석을 수행하여, 설계변수인 상류 수위(HWE), 상류수심의 암거높이에 대한 비율(H/D)을 산정한다. 산정된 각 설계변수가 허용치(입력변수)를 초과하지 않는 단면 중 가장 경제적인 단면을 설계단면으로 결정한다. 아울러 유출유속(V_{out})을 검토하여 유출유속이 2.5 m/s 이상인 경우 감쇄공을 설치하도록 권장한다. 개발된 암거 설계 모형에서 고려하고 있는 표준단면은 1련, 2련의 횡단배수관 및 수로암거로서 표 1과 같다. 유입부 통제 가정할 경우 상류수심을 산정하는 방정식 및 매개변수는 암거유형에 따라 달라진다(표 2 참조, Bentley Systems, Inc., 2007).

4.2 암거 설계 모형 적용

암거 설계 모형을 표 3의 특성을 가지는 횡단배수관의 단면규격을 결정하기 위하여 적용하였다 (그림 4 참조). 설계결과는 표 4에 제시된 것처럼 고려하고 있는 각 단면규격별 흐름해석 결과, 설계조건과 비교한 결과를 제시하고, 결정된 최적단면을 제시하고 있다. 주어진 특성을 가지는 암거의 경우, 직경 1.5 m의 1련이 최적으로 결정되었고 유출유속은 감소시켜야 하는 것으로 산정되었다.

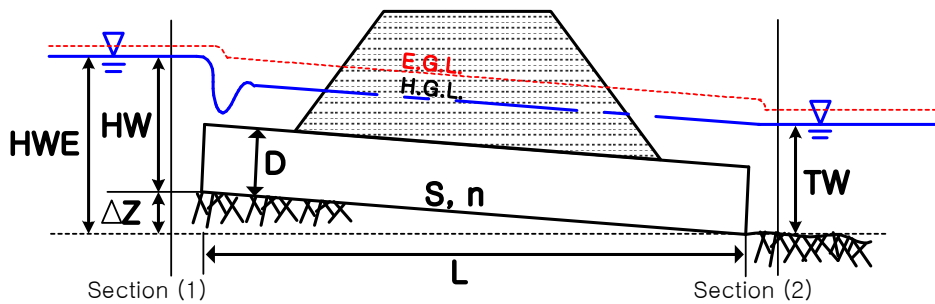


그림 4. 암거 설계모형 적용대상

표 3. 암거 설계 모형의 적용 예 : 암거 특성 및 흐름 조건

허용상류수위	10 m	암거경사	0.002	Upstream invert	0.02 m
허용 H/D	1.5	암거길이	10 m	Downstream invert	0.00 m
설계홍수량	5.0 m ³ /s	조도계수	0.013	CHNO	1
하류측수위(tw)	1.0 m	유입부손실계수	0.7	Nomyscale	1

표 4. 암거 설계 모형 적용 결과

(a) 단면규격별 흐름해석 결과

#	직경 (m)	련수	상류수위			흐름유형	통제유형
			유입부 통제	유출부 통제	선택된 값		
1	0.3	1	653.5667	702.0374	702.0174	PS	OUTLET
2	0.4	1	129.3771	117.4409	129.3571	PS	INLET
}	}	}	}	}	}	}	}
19	2.5	2	1.0000	1.1665	1.1465	M1	OUTLET
20	3.0	2	1.0000	1.1314	1.1114	M1	OUTLET

(b) 단면규격별 설계조건 비교

#	직경 (m)	런수	HWE (m)	판정	H/D	판정	유출유속 (m/s)	판정
1	0.3	1	702.0374	N.G.	2340.058	N.G.	70.7355	N.G.
2	0.4	1	129.3771	N.G.	287.4601	N.G.	31.438	N.G.
}	}	}	}	}	}	}	}	}
19	2.5	2	1.1665	O.K.	0.4586	O.K.	1.3635	O.K.
20	3.0	2	1.1314	O.K.	0.3705	O.K.	1.2121	O.K.

(c) 최적 단면규격

#	직경 (m)	단면폭 (m)	런수	HWE (m)	H/D	유출유속 (m/s)
7	1.5	1.5	1	2.1385	1.4124	3.3974

** PLEASE REDUCE DOWNSTREAM VELOCITY **

5. 결과

개발된 암거 설계 모형은 부등류 흐름 해석을 기반으로 하여 설계하므로 보다 합리적인 설계가 가능하다. 현재 국내 실무에서 사용되는 수리학적 해석을 기반으로 한 암거 설계 모형이 부재한 실정이므로 개발된 모형은 실무에서 간편하게 이용될 수 있을 것이다. 본 연구에서 개발된 암거 설계 모형은 설계홍수량을 산정하는 모형과 연계하여 적용될 것이며, 아울러 도로배수시설의 설계를 위한 통합 모형에 활용될 수도 있다.

감사의 글

본 연구는 친환경·지능형 도로설계 기술개발 연구단(건설핵심D05-01)을 통하여 지원된 건설교통부 건설기술혁신사업에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 건설교통부(2003), 도로배수시설 설계 및 유지관리 지침 연구.
2. 이재수 (2007). 수리학, chap. 12.4, pp. 485-499 구미서관.
3. AASHTO (1999). *Highway drainage guidelines*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA.
4. Bentley Systems, Inc., 2007. "CulvertMaster User's Guide".
(<http://www.bentley.com/en-US/Products/CulvertMaster/Overview.htm>)
5. Chaudhry, M.H (2007). *Open-channel flow*, Springer Verlag.
6. Chow, V.T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.
7. Normann, J.M., Houghtalen, R.J., and Johnston, W.J. (1985). Hydraulic Design of Highway Culverts. HDS No. 5, Federal Highway Administration (FHWA), USA.
8. Norman, J.M., Houghtalen, R.J., and Johnston, W.J. (2001). Hydraulic design of highway culverts. FHWA-NHI-01-020, HDS No. 5, Federal Highway Administration(FHWA), USA.