

암거 설계 모형의 개발

Development of a culvert design model

구혜진*, 진경수**
Hye Jin Ku, Kyung Soo Jun

요 지

노모그래프 또는 간략식을 이용하여 암거 설계를 하는 경우 암거 흐름이 자유수면을 가지는 개수로라면 정확한 흐름 해석을 할 수 없다. 특히 암거는 수리학적으로 짧기 때문에 암거 흐름에서 등류수심이 발생하지 않을 가능성이 높다. 이에 부등류(점변류) 해석을 이용하여 암거의 흐름 해석을 수행하도록 흐름 해석 모형을 개발하여 검증하고, 이를 기반으로 암거의 단면규격을 결정하는 설계모형을 개발하였다. 암거의 수리설계는 고려하고 있는 모든 단면에 대하여 흐름 해석을 수행하고, 산정된 상류수위(HWE)와 암거높이에 대한 상류수심의 비(H/D)가 허용치를 초과하지 않는 최적 단면을 설계 단면으로 결정한다.

핵심용어 : 부등류, 상류수위, 설계모형, 암거, 흐름해석

1. 서론

암거의 수리설계는 수문분석에 의하여 결정되는 설계홍수량을 도로나 철도로 범람되지 않는 상태, 즉 암거 상류부의 수위를 과다하게 상승시키지 않은 상태에서 안전하게 하류로 소통시킬 수 있는 최적단면, 암거 경사, 입출구 형상 등을 결정하는 것이다. 현재 국내 암거설계에서 암거의 최적단면의 설계는 지형 또는 현장 여건에 따라 암거 흐름의 8형식 중 하나의 형식을 결정하고, 그 형식에 따라 도표(노모그래프)를 이용한 반복시산법 또는 도식에 의한 방법을 적용하여 유입부 상류수위를 산정함으로써 수행된다(건교부, 2003; 이재수, 2007; AASHTO, 1999; Normann *et al.*, 1985; Normann *et al.*, 2001). 그러나 암거 흐름이 자유수면을 가지는 개수로인 경우 도표 또는 간략화된 식을 이용하여 정확한 흐름해석을 할 수 없다. 특히 암거는 수리학적으로 짧아 암거 내에 등류수심이 발생하지 않을 가능성이 높기 때문에, 수리형태에 따라 등류수심을 가정하여 설계하는 방법들은 오차를 포함하게 된다. 따라서 본 연구에서는 부등류 흐름을 수행하여 보다 정확한 흐름해석을 기반으로 하여 암거 수리설계가 가능하도록 모형을 개발하였다.

2. 암거 흐름 해석

암거의 흐름은 흐름 통제를 유입부 통제(Inlet control)와 유출부 통제(Outlet control)로 가정하여 해석하게 된다. 유입부 통제로 가정하는 경우 암거내의 마찰력과 미소 손실을 무시하고 상류수심을 산정하는 반면, 유출부 통제로 가정하는 경우 유입 및 유출손실뿐 아니라 마찰손실도 고려하여 전통적인 수리학적 방법으로 상류수심을 산정한다. 우선 유입부 통제 및 유출부 통제 수로로 가정하여 상류수심을 각각 산정하고, 상류수심이 크게 산정된 경우가 흐름을 통제하는 것으로 결정한다. 암거 설계 모형에 적용하기 위하여 선행적으로 개발된 흐름 해석 모형은 상류수위(HWE), 암거 직경(높이)에 대한 상류수심의 비(HW/D), 유출부 유속(V_{out})을 산정한다.

* 정희원 · 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 BK21 사업단 연구교수 · E-mail : skyjina@skku.edu

** 정희원 · 성균관대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 교수 · E-mail : ksjun@skku.edu

2.1 유입부 통제

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 정상부동류로서 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 대신 하여 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, Δx 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.

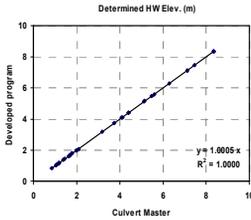


그림 1. 상류수위(HWE, m)

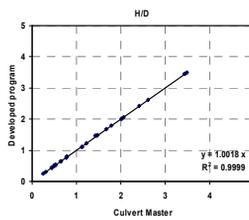


그림 2. 높이에 대한 상류수심의 비율(H/D)

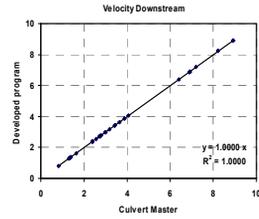


그림 3. 유출유속(V_{out} , m/s)

표 1. 암거 단면규격

종분류	단면형상	소분류
1련, 2련 횡단배수관	원형	φ300, φ450, φ600, φ800, φ1,000, φ1,200, φ1,500, φ2,000, φ2,500, φ3,000
1련 수로암거	사각형	1.5 × 1.5, 2.0 × 1.5, 2.0 × 2.0, 2.5 × 2.0, 2.5 × 2.5, 3.0 × 2.5, 3.0 × 3.0
2련 수로암거		2.0 × 2.0, 2.5 × 2.0, 2.5 × 2.5, 3.0 × 2.5, 3.0 × 3.0, 3.5 × 3.0, 3.5 × 3.5
3련 수로암거		2.0 × 2.0, 2.5 × 2.0, 2.5 × 2.5, 3.0 × 2.5, 3.0 × 3.0, 3.5 × 3.0, 3.5 × 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.

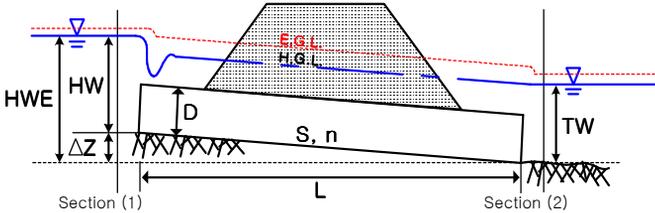


그림 4. 암거 설계모형 적용대상

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)	련수	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)	련수	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 실정으므로 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.