

사각형 암거의 수리설계

Hydraulic Design of Box Culvert Size

유 동 훈*, 김 종 희**
Dong Hoon Yoo, Jong Hee Kim

요 지

암거 수리설계는 상류부의 수위를 과다하게 상승시키지 않는 상태에서 안전하게 계획홍수량을 하류로 소통시킬 수 있도록 최적의 단면을 결정하는 것이다. 현재 국내 암거 설계는 한국도로공사(1991)에서 발표한 “도로배수계획”을 이용하고 있는데, 이는 주로 미국도로성(FHWA)에서 발표한 설계기법을 따른 것이며, 이 기법은 설계항목과 관련되는 설계유량과 지배단면을 결정하여 시행오차적인 방법으로 계획 상류부 수심을 산정하는 순서로 진행된다. 상류부 수심을 결정하기 위해서 미국도로성의 기법은 계산도표를 이용하여 손실 수두와 한계수심을 산정한다. 그러나 계산도표를 이용하여 설계할 경우 주관적인 오차가 생길 수 있으며 전산해석에 있어서도 큰 장애요인이 될 수 있다.

본 연구에서는 기존 연구에서 기술된 암거 설계법을 전반적으로 재검토하여 일부 수식 전개 과정에서 발생한 오류를 수정하고, 암거의 규격 산정 시 암거의 형상을 미리 결정하여 암거 프로그램 개발 시 효율적인 것으로 판단되는 새로운 방법을 개발하였다.

핵심용어 : 암거설계, 암거규격, 사각형 암거, 한계수심, 계산도표

1. 서 론

암거 수리설계는 수문분석으로 결정된 계획홍수량으로부터 암거 상류부의 수위를 과다하게 상승시키지 않는 상태에서 안전하게 하류로 소통시킬 수 있는 가장 경제적인 암거의 단면을 결정하는 것이다. 현재 국내 암거 설계는 한국도로공사(1991)에서 발표한 “도로배수계획”을 이용하고 있는데, 이는 미국도로성(FHWA, 1985)에서 발표한 설계기법을 그대로 인용한 것이다. 이 기법은 설계항목에 관련되는 설계유량, 암거의 길이, 경사, 상류부 수심 및 입구부 모양 등을 결정한 다음, 초기 단면을 가정하고 계산도표를 이용하여 상류부 수심을 산정한다. 그러나 이 방법은 산정된 상류부 수심이 허용상류부 수심보다 크면 다시 초기 단면을 가정하여 산정해야 하는 단점이 있고, 계산도표를 사용시 주관적인 오차가 생길 수 있으며 전산해석에 있어서도 큰 장애요인이 될 수 있다.

본 연구에서는 기존 연구에서 기술된 암거 설계법을 전반적으로 재검토하여 일부 수식 전개 과정에서 발생한 오류를 수정하였으며 사각형 암거 설계 시 허용상류부 수심과 계획홍수량이 정해지면 바로 최적의 암거 규격을 산정할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 암거의 수리 특성과 흐름 분류

암거 내 흐름은 암거 상류부 수심 h_H 와 암거높이 h 의 상대적인 크기에 따라 크게 두 가지로 분류할 수 있으며 표 1에 제시된 바와 같이 하류부 수심 h_T , 한계경사 i_c , 암거경사 i 등의 조건에 따라 각각 세 가지

* 정희원 · 한국방재협회, 방재기술관리센터 선임연구위원 · 공학박사 · E-mail : dhyoo@ajou.ac.kr

** 정희원 · 아주대학교 대학원 건설교통공학과 석사과정 · E-mail : kimjh80@ajou.ac.kr

형태로 소분류 된다.

미국도로성(1985)의 분류법에서는 개수로 조건을 I 그룹으로, 관수로 조건을 II 그룹으로 분류하였는데 각 그룹에서 상류, 사류에 대한 소분류가 일관성이 없는 것으로 판단되어 본고의 분류에서는 혼동을 줄이기 위해 각 흐름 특징에 따른 영문자를 택하였다. $h_H \leq 1.2h$ 인 경우 개수로 흐름 상태로서 **C**(open channel flow)로 표기하고, $h_H \geq 1.2h$ 인 경우 관수로 흐름 상태로서 **P**(pressurized pipe flow)로 표기하였다. 그리고 상류(常流)와 사류(射流) 조건으로 **B**(sub critical flow)와 **R**(super critical flow)로 표기하였고, 상류 조건인 경우 출구부수심이 한계수심보다 작을 때 **n**(normal)으로 그렇지 않을 때는 **a**(abnormal)로 표기하였다. 표 1은 암거 흐름의 분류를 나타낸 도표이다. 미국도로성에서는 사류인 조건에서도 출구부 수심 조건에 따라 두 가지로 분류하였으나 실제계에서는 특별히 다른 점이 없기 때문에 동일한 항목으로 다룬다.

표 1. 암거 흐름의 분류

Class	Type(FHWA)	조건	조건식 (h_H)	지배 단면	비고	
C	$\frac{h_H}{h} \leq 1.2$	Bn(I-1)	$i < i_c$ $h_T < h_c$	$h_n + h_f + h_c + \frac{V_c^2}{2g} - iL$	출구	완경사 전구간 개수로
		Ba(I-2)	$i < i_c$ $h_c < h_T$	$h_n + h_f + h_x + h_T - iL$	하류	
	R (I-3, 4)	$i_c < i$	$h_n + h_c + \frac{V_c^2}{2g}$	입구	급경사 개수로	
P	$\frac{h_H}{h} \geq 1.2$	Bn(II-2)	$i < i_c$ $h_T < h$	$h_n + h_f + h_x + \frac{h}{2} - iL$	출구	전구간 관수로
		Ba(II-3)	$i < i_c$ $h < h_T$	$h_n + h_f + h_x + h_T - iL$	하류	
	R (II-1, 4)	$i_c < i$	$h_n + \frac{V^2}{2g} + \frac{h}{2}$	입구	입구:관수로 출구:개수로	

h_H : 상류부 수심, h_T : 하류부 수심, h_n : 입구부 손실수두, h_f : 마찰손실수두, h_x : 출구부 손실수두,
 V_c : 임계유속, i_c : 임계경사

3. 사각형 암거의 규격

사각형 암거의 규격 설계에 있어서 암거폭이나 암거높이를 수식유도를 통해 산정하는 것은 상당히 복잡하며 반복시산법을 피할 수 없다. 본 연구에서는 동수반경 H를 산정할 때는 근사식을 사용하여 복잡함을 피하고, 비교적 정확한 초기치를 제시하여 적은 반복시산으로 규격을 간단히 산정할 수 있도록 강구하였다.

3.1 사각형 암거의 폭

Type CBn(I-1)에 해당하는 식은 다음과 같다.

$$h_H = K_n \frac{V^2}{2g} + K_f \frac{V^2}{2g} + 1.5h_c - iL \quad (1)$$

여기서 K_n 은 입구부 손실계수, K_f 는 마찰손실계수, $K_f = 2C \frac{L}{H}$, C는 마찰계수, g는 중력가속도, h_c 는 한계수심, i는 수로기울기, L은 암거길이이고 V는 암거내 유속이다. 암거내 흐름은 일반적으로 부등류이기 때문에 암거내 유속은 위치에 따라 달라진다.

Manning식을 적용할 경우 마지막 항 iL 을 좌변으로 넘겨서 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta h = \frac{K_n}{2g} \left(\frac{Q}{hb} \right)^2 + \frac{n^2 L}{H^{4/3}} \left(\frac{Q}{hb} \right)^2 + 1.5 \left(\frac{Q^2}{b^2 g} \right)^{1/3} \quad (2)$$

여기서 $\Delta h = h_H + iL$ 이고, h 는 수심, b 는 암거폭, n 은 Manning 조도계수, H 는 동수반경이다.

한편, 동수반경 H 는

$$H = \frac{bh}{b+2h} = \frac{b}{2+s^{-1}} \quad (3)$$

여기서 $s = h/b$ (형상계수)이다. 이를 지수형 근사식으로 만들면 다음과 같다.

$$H = 0.33s^{0.33} \times b = 0.33h^{0.33}b^{0.67} \quad (4)$$

s 가 0.5일 때는 5%, s 가 2.0일 때는 4%의 오차가 발생한다. 그러나 암거 규격을 산정하는데 이 정도의 오차에 의한 영향은 미미하므로 무시하여도 상관없을 것으로 판단된다. 그림 1은 사각형관 동수반경의 정밀해와 근사해를 비교한 그래프이다.

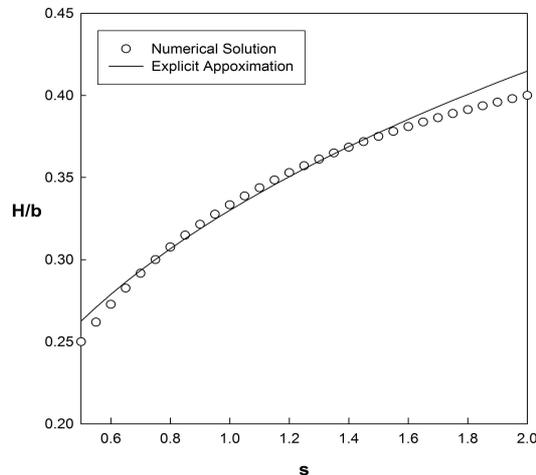


그림 1. 사각형관 동수반경의 정밀해와 근사해의 비교

높이 h 를 기지수로 설정하고 식 (4)를 식 (2)에 대입하여 b 에 관한 식으로 정리하면 다음과 같이 유도된다.

$$b = (Ab^{2.22} + Bb^{0.89} + C)^{0.35} \quad (5)$$

여기서 $A = 1.5 \frac{Q^{0.67}}{g^{0.33} \Delta h}$, $B = \frac{K_n}{2g} \frac{Q^2}{h^2 \Delta h}$, $C = 4.4 \frac{n^2 L}{h^{2.44}} \frac{Q^2}{\Delta h}$ 이다.

식 (5)와 같이 암거의 폭을 구하기 위해서는 반복시산을 해야 하기 때문에 본 연구에는 적은 반복시산으로 비교적 정확한 해를 구할 수 있도록 초기치를 도출하였다.

식 (5)에서 입구부 손실수두항인 $Bb^{0.89}$ 과 마찰손실수두항인 C 를 생략하고 정리하면 다음과 같다.

$$b = \alpha A^{1.60} \quad (6)$$

식 (6)은 사각형 암거의 폭을 산정하기 위한 초기치이며, 입구부 손실수두항과 마찰손실수두항이 생략되어 실제 값보다 작게 산정된다. 따라서 α 를 곱하여 식을 보완하였으며 α 는 1.15~1.25를 사용할 것을 추천한다. 이와 같은 방법으로 각 Type의 초기치를 정리하고 사각형 암거의 폭을 구하는 산정식을 정리하면 표 2와 같다.

표 2. 사각형 압거의 폭 산정식

Type(FHWA)	폭 산정식(b)	Δh	초기치(b _t)
CBn(I-1)	$(Ab_t^{2.22} + Bb_t^{0.89} + C)^{0.35}$	$h_H + iL$	$\alpha A^{1.6}$
CBa(I-2)	$(B_x b_t^{0.89} + C)^{0.35}$	$h_H - h_T + iL$	$\alpha B_x^{0.5}$
CR (I-3, 4)	$(Ab_t^{1.33} + B)^{0.5}$	h_H	$\alpha A^{1.5}$
PBn(II-2)	$(B_x b_t^{0.89} + C)^{0.35}$	$h_H - 0.8h + iL$	$\alpha B_x^{0.5}$
PBa(II-3)	$(B_x b_t^{0.89} + C)^{0.35}$	$h_H - h_T + iL$	$\alpha B_x^{0.5}$
PR (II-1, 4)	$B_x^{0.5}$	$h_H - 0.8h$	-

Note: $A = 1.5 \frac{Q^{0.67}}{g^{0.33} \Delta h}$, $B = \frac{K_n}{2g} \frac{Q^2}{h^2 \Delta h}$, $B_x = \frac{K_{nx}}{2g} \frac{Q^2}{h^2 \Delta h}$, $C = 4.4 \frac{n^2 L}{h^{2.44}} \frac{Q^2}{\Delta h}$, $\alpha = 1.15 \sim 1.25$

3.2 사각형 압거의 높이

Type CBn(I-1)에 해당하는 식은 다음과 같다.

$$h_H = K_n \frac{V^2}{2g} + K_f \frac{V^2}{2g} + 1.5h_c - iL \tag{7}$$

Type CBn(I-1)은 상류흐름이기 때문에 하류부 수심 h_T 가 한계수심 h_c 보다 작으면 출구부 수심 h_x 는 한계수심 h_c 와 같다고 가정할 수 있다. 식 (7)에 Manning식을 적용하고 동수반경 H에는 식 (4)를 대입하면,

$$1.2h = \frac{K_n}{2g} \left(\frac{Q}{bh} \right)^2 + 4.4 \frac{n^2 L}{b^{0.89} h^{0.44}} \left(\frac{Q}{bh} \right)^2 + 1.5h_c - iL \tag{8}$$

폭 b를 기지수로 설정하고 식 (8)을 h에 관한 식으로 정리하면 다음과 같이 유도된다.

$$h = 0.95(Ah^{2.44} + Bh^{0.44} + C)^{0.29} \tag{9}$$

여기서, $A = 1.5h_c - iL$, $B = \frac{K_n}{2g} \frac{Q^2}{b^2}$, $C = 4.4 \frac{n^2 L Q^2}{b^{2.89}}$ 이다.

표 3. 사각형 압거의 높이 산정식

Type(FHWA)	높이 산정식(h)	Δh	초기치(h _t)
CBn(I-1)	$0.95(Ah_t^{2.44} + Bh_t^{0.44} + C)^{0.29}$	-	αh_c
CBa(I-2)	$0.95(A_T h_t^{2.44} + B_x h_t^{0.44} + C)^{0.29}$	-	
CR (I-3, 4)	$0.95(1.5h_t^2 + B)^{0.33}$	-	
PBn(II-2)	$\left[\frac{1}{\Delta h} (0.8h_t^{3.44} + B_x h_t^{0.44} + C) \right]^{0.41}$	$h_H + iL$	
PBa(II-3)	$\left[\frac{1}{\Delta h} (B_x h_t^{0.44} + C) \right]^{0.41}$	$h_H - h_T + iL$	
PR (II-1, 4)	$\left[\frac{1}{\Delta h} (0.8h_t^3 + B_x) \right]^{0.5}$	h_H	

Note : $A = 1.5h_c - iL$, $A_T = h_T - iL$, $B = \frac{K_n}{2g} \frac{Q^2}{b^2}$, $B_x = \frac{K_{nx}}{2g} \frac{Q^2}{b^2}$, $C = 4.4 \frac{n^2 L Q^2}{b^{2.89}}$, $\alpha = 1.15 \sim 1.25$

개수로 유형에서 상류부 수심을 결정하는데 가장 크게 관여하는 요소는 $1.5h_c$ 이다. 이를 이용하여 사각형 암거의 초기치를 유도하면,

$$h = \alpha h_c \quad (10)$$

여기서 α 는 1.15~1.25를 사용할 것을 추천한다. 같은 유량에 대하여 관수로 유형은 개수로 유형보다 관경이 작게 선정되므로 초기치 선정식에서 α 값을 개수로 유형보다 작게 선정하여 계산해야 한다. 이와 같은 방법으로 사각형 암거의 높이 선정식을 정리하면 표 3과 같다.

6. 결 론

암거흐름의 분류는 일반적으로 미국도로성의 분류체계를 따르고 있으나 본 연구에서는 관수로와 개수로, 상류와 사류로 나누어 명확하게 구분하였다. 사각형 암거의 규격 선정시 동수반경 근사식을 사용하여 암거의 규격산정식을 간단히 표기하였고, 비교적 정확한 초기치를 제시하여 적은 반복시산으로 암거의 폭과 높이를 산정할 수 있도록 강구하였다.

지금까지의 암거설계법은 초기단면을 가정하고 계산도표를 이용하여 상류부 수심을 결정한 후 허용상류부 수심을 초과하면 다시 단면을 가정하여 암거 규격을 설계하였다. 그러나 본 연구에서는 허용상류부 수심이 결정되면 최적의 암거 규격을 바로 산정할 수 있도록 강구하였으며, 이는 앞으로 암거의 규격을 산정하는 프로그램을 개발하는데 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감 사 의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술 연구개발사업(03-산학연C03-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과이다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(2003). 도로배수시설 설계 및 유지관리 지침.
2. 구혜진, 진경수(2008). 암거 설계 모형의 개발. **2008년도 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 645-649.
3. 이길성, 진락선(2003). 사각형 암거 설계를 위한 프로그램의 개발. **2003년도 대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 2686-2689.
4. 유동훈, 오윤창(1999). 원형수로의 등류수심. **1999년도 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 620-625.
5. 유동훈, 엄호식(2000). 사각형 암거의 간편설계, **2000년도 대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 141-144.
6. 유동훈, 엄호식(2001). 원형 암거의 간편설계. **한국관개배수**, 제8권, 제1호, pp. 88-101.
7. 유동훈, 노정수(2003). 개수로 흐름의 임계수심 선정식. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제1B호, pp. 19-23.
8. 유동훈(2006). 고급수리학. 도서출판 새론, pp. 386-417.
9. 윤용남(2004). 수리학-기초와 응용. 청문각, pp. 524-538.
10. 한국도로공사(1991). 도로배수계획.
11. Federal Highway Administration(1985). *Hydraulic Design of Highway Culvert*.