

암거 규격의 수리 설계 Hydraulic Design of Culvert Size

유 동 훈* / 김 종 희**

Yoo, Dong Hoon / Kim, Jong Hee

Abstract

The purpose of culvert design is to determine optimum size for a safe drainage of flood discharge. The present method of culvert design in Korea is generally carried out by using "Road Drainage Design" of Korea Expressway Corporation (1991), which is based on the manual of Federal Highway Association (FHWA) of USA. However, this method may result in subjective error because of using graphs and the usage of nomograph can be a major obstacle for computer modelling.

Some errors found in the previous works of culvert design are corrected, and a new logic has been developed for a simple determination of culvert size in this study. FHWA (1985) presents a nomograph to determine the critical water depth and the velocity head for a circular pipe, but in this study simple explicit equations have been developed to determine both respectively.

Keywords : Hydraulic design, Culvert size, Circular pipe, Box culvert, Critical depth, Nomograph

요 지

암거의 규격 설계는 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 것이다. 이 기법은 계산도표를 이용하여 설계하는 방법으로 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 효율적일 것으로 판단되는 새로운 방법을 개발하였다. 특히 원형 암거의 수리해석 시 한계수심과 한계조건 속도수두의 해를 미국도로성에서는 계산도표를 이용하여 구하는 기법을 제시한 반면에 본 연구에서는 양해적 산정식으로 구하는 기법을 개발하였다.

핵심용어 : 암거설계, 암거규격, 원형 암거, 사각형 암거, 한계수심, 계산도표

* 아주대학교 환경건설교통공학부 교수
Associate Prof., Dept. of Civil & Transportation Engrg., Ajou Univ., Suwon 443-749, Korea
(e-mail: dhyoo@ajou.ac.kr)

** 교신저자, 아주대학교 대학원 건설교통학과 석사과정
Associate Graduate Student, Dept. of Civil & Transportation Engrg., Ajou Univ., Suwon 443-749, Korea
(e-mail: kimjh80@ajou.ac.kr)

1. 서론

암거의 규격 설계는 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 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 손실수두와 한계수심을 산정한다. 그러나 이 방법은 주관적인 오차가 생길 수 있으며 전산해석에 있어서도 큰 장애요인이 될 수 있다.

한편, 현재 국내 암거연구에서는 이길성과 진락선(2003)이 사각형 암거 설계 프로그램을 개발하여 발표하였고, 구혜진과 전경수(2008)는 암거 설계 모형에 부등류 해석법을 적용하여 발표한 바 있다. 그러나 이 같은 프로그램과 모형도 최적의 암거 규격을 바로 산정하는데 있어 초기치 선정이 불명확하고 반복과정이 분명히 정립되어 있지 않다는 문제가 남아있다. 또한 원형관 해석에 있어서도 한계수심 산정이 명확하게 정립되어 있지 않다.

본 연구에서는 사각형 암거의 경우 적은 반복시산으로 암거의 폭과 높이를 산정하는데 있어 초기치를 설정하고 2회 정도의 반복시산하는 기법을 제시하였다. 원형 암거의 경우 원형관 한계수심을 간단히 구하는 양해적 산정식을 개발하고, 원형 암거의 규격을 비교적 간단히 추정하는 기법을 제시하였다.

2. 암거의 수리 특성과 흐름 분류

암거의 수리설계는 수문분석에 의해 결정되는 계획홍수량을 도로나 철도의 범람 없이 상류부의 수위를 과다하게 상승시키지 않는 상태에서 안전하게 하류로 소통시킬 수 있는 가장 경제적인 암거단면을 결정하는 것이다.

암거의 단면형은 주로 원형관(circular pipe)과 사각형관(box culvert)의 두 가지 형태로 나눌 수 있으며, 원형관은 유량이 비교적 작을 때 사용되는 완제품이고 사각형관은 유량이 클 경우에 현장에서 콘크리트를 타설하여 만드는 것이 보통이다. 원형 암거는 제작 및 운반의 제약 때문에 관경이 1.2m 이하인 경우에만 시공되며, 1.2m 이상인 경우에는 사각형 암거로 설계한다. 따라서 암거의 형상을 결정하기 위하여 관경이 1.2m일 때 유량을 산정하면 원형 암거로 설계할 수 있는 최대 유량이 되며, 배수해야 되는 유량과 비교하여 원형 암

거 최대 유량이 크면 원형 암거로 설계하고, 작으면 사각형 암거로 설계해야 한다.

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

미국도로성(1985)의 분류법에서는 개수로 조건을 I 그룹으로, 관수로 조건을 II그룹으로 분류하였는데 각 그룹에서 상류, 사류에 대한 소분류가 일관성이 없는 것으로 판단되어 본고의 분류에서는 혼동을 줄이기 위해 각 흐름 특징에 따른 영문자를 택하였다. $h_H < 1.2h$ 인 경우 개수로 흐름 상태로서 C(open channel flow)로 표기하고, $h_H > 1.2h$ 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. Table 1은 암거 흐름의 분류를 나타낸 도표이다. 미국도로성에서는 사류인 조건에서도 출구부 수심 조건에 따라 두 가지로 분류하였으나 실제에서는 특별히 다른 점이 없기 때문에 동일한 항목으로 다룬다.

3. 사각형 암거의 규격

사각형 암거의 규격 설계에 있어서 암거폭이나 암거높이를 수식유도를 통해 산정하는 것은 상당히 복잡하며 반복시산법을 피할 수 없다. 따라서 동수반경 H 를 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, $K_f = 2C \frac{L}{H}$, C 는 마찰계수, g 는 중력가속도이다.

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 암거높이, b 는 암거

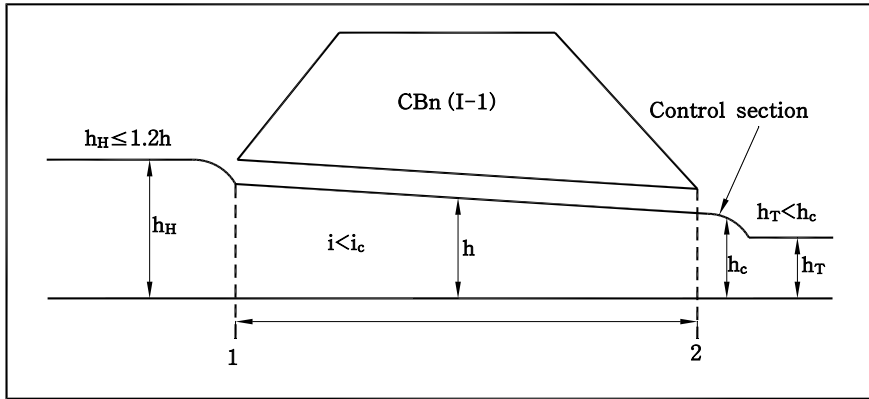


Fig. 1. Hydraulic Section of Culvert

Table 1. Classification of Culvert Hydraulics

Class	Type (FHWA)	Condition	Governing Equation (h_H)	Control Section		
C	$\frac{h_H}{h} \leq 1.2$	Bn (I-1)	$i < i_c$ $h_T < h_c$	$h_n + h_f + h_c + \frac{V_c^2}{2g} - iL$	Outlet	Mild-Slope Open Channel
		Ba (I-2)	$i < i_c$ $h_c < h_T$	$h_n + h_f + h_x + h_T - iL$	Downstream	
		R (I-3, 4)	$i_c < i$	$h_n + h_c + \frac{V_c^2}{2g}$	Entrance	Steep-Slope Open Channel
P	$\frac{h_H}{h} \geq 1.2$	Bn (II-2)	$i < i_c$ $h_T < h$	$h_n + h_f + h_x + \frac{h}{2} - iL$	Outlet	Pipe Flow
		Ba (II-3)	$i < i_c$ $h < h_T$	$h_n + h_f + h_x + h_T - iL$	Downstream	
		R (II-1, 4)	$i_c < i$	$h_n + \frac{V^2}{2g} + \frac{h}{2}$	Entrance	Inlet: Pipe Flow Outlet: Channel Flow

h_H : Headwater depth, h_T : Tailwater depth, h_n : Entrance headloss, h_f : Friction headloss, h_x : Outlet headloss, V_c : Critical velocity, i_c : Critical slope

폭, n 은 Manning 조도계수, L 은 암거길이, 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 암거의 규격을 결정하는데 관여하는 바는 미미하므로 무시하여도 상관없을 것으로 판단된다. Fig. 2는 사각형관 동수반경의 정밀해와 근사해를 비교

한 그래프이다.

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

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

$$\text{여기서, } A = 1.5 \frac{Q^{0.67}}{g^{0.33} \Delta h}, \quad B = \frac{K_n}{2g} \frac{Q^2}{h^2 \Delta h},$$

$$C = 4.4 \frac{n^2 L}{h^{2.44}} \frac{Q^2}{\Delta h} \text{이다.}$$

Eq. (5)와 같이 암거의 폭을 구하기 위해서는 반복시산을 해야 하기 때문에 본 연구에는 적은 반복시산으로 비교적 정확한 해를 구하도록 초기치를 도출하였다.

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

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

Eq. (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 Table 2와 같다.

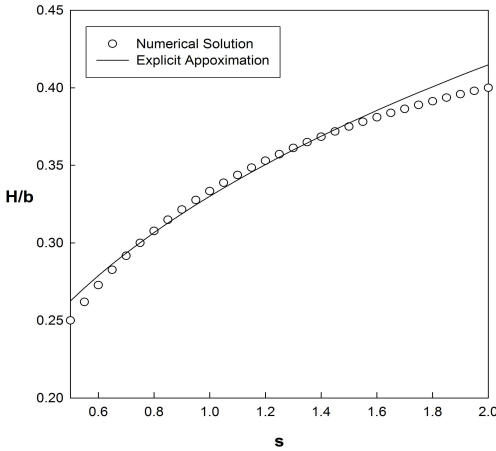


Fig. 2. Comparison between the Numerical Solutions and the Explicit Approximations of Hydraulic Radius of Box Culvert

3.2 사각형 암거의 높이

Type CBn (I-1)에 해당하는 식은 다음과 같다.

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

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. Eq. (7)에 Manning 식을 적용하고 동수반경 H 에는 Eq. (4)를 대입하면,

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

폭 b 를 기지수로 설정하고 Eq. (8)을 h 에 관한 식으로 정리하면 다음과 같이 유도된다.

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

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.

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 산정되므로 초기치 산정식에서 α 값을 개수로 유형보다 작게 선정하여 계산해야 한다. 이와 같은 방법으로 사각형 암거의 높이 산정식을 정리하면 Table 3과 같다.

Table 2. Governing Equations of the Width of Box Culvert

Type (FHWA)	Governing Equation (b)	Δh	Initial Value (b_i)
CBn (I-1)	$(Ab_i^{2.22} + Bb_i^{0.89} + C)^{0.35}$	$h_H + iL$	$\alpha A^{1.6}$
CBa (I-2)	$(B_x b_i^{0.89} + C)^{0.35}$	$h_H - h_T + iL$	$\alpha B_x^{0.5}$
CR (I-3, 4)	$(Ab_i^{1.33} + B)^{0.5}$	h_H	$\alpha A^{1.5}$
PBn (II-2)	$(B_x b_i^{0.89} + C)^{0.35}$	$h_H - 0.8h + iL$	$\alpha B_x^{0.5}$
PBa (II-3)	$(B_x b_i^{0.89} + C)^{0.35}$	$h_H - h_T + iL$	$\alpha B_x^{0.5}$
PR (II-1, 4)	$B_x^{0.5}$	$h_H - 0.8h$	-

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

Table 3. Governing Equations of the Height of Box Culvert

Type (FHWA)	Governing Equation (h)	Δh	Initial Value (h_i)
CBn (I-1)	$0.95(Ah_i^{2.44} + Bh_i^{0.44} + C)^{0.29}$	-	αh_c
CBa (I-2)	$0.95(A_T h_i^{2.44} + B_x h_i^{0.44} + C)^{0.29}$	-	
CR (I-3, 4)	$0.95(1.5h_c h_i^2 + B)^{0.33}$	-	
PBn (II-2)	$\left[\frac{1}{\Delta h} (0.8h_i^{3.44} + B_x h_i^{0.44} + C) \right]^{0.41}$	$h_H + iL$	
PBa (II-3)	$\left[\frac{1}{\Delta h} (B_x h_i^{0.44} + C) \right]^{0.41}$	$h_H - h_T + iL$	
PR (II-1, 4)	$\left[\frac{1}{\Delta h} (0.8h_i^3 + B_x) \right]^{0.5}$	h_H	

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

4. 원형 암거의 규격

원형 암거의 규격을 산정하기 위해서 원형단면의 한계수심 h_c 를 구해야 한다. 그러나 원형관은 사각형관과는 달리 한계수심의 표현이 간단하지 않아 산정식이 매우 복잡하다. 미국도로성에는 계산도표를 이용하여 한계수심을 구할 것을 권하고 있으나 이는 사용자에게 따르는 정도 주관적인 오차가 생길 수 있으며 전산해석에 있어서도 큰 장애요인으로 작용한다. 본 연구에서는 원형관 한계수심 간편식을 소개하고 이를 이용하여 원형 암거의 규격 산정을 위한 약산식을 개발하였다.

일반 단면의 한계수심을 산정할 경우 최소 비에너지를 구하여 도출하는 것이 편리하다. 수로바닥을 기준면으로 설정하였을 때 단위무게당의 에너지를 비에너지 (specific energy) h_s 라 한다. 이것은 수로바닥과 에너지선 사이의 수직거리로 정의되며 다음과 같다.

$$h_s = h + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (11)$$

여기서 Q 는 유량, A 는 유수 단면적이다. 한계수심은 비에너지가 최소일 때 발생하므로 Eq. (11)을 h 에 관하여 미분하고 그 결과가 0일 때 발생한다. 그 결과는 다음과 같다.

$$\frac{dh_s}{dh} = 1 + \frac{Q^2}{2g} \left(-\frac{2}{A^3} \frac{dA}{dh} \right) = 0 \quad (12)$$

dA 와 dh 간의 관계는 $dA = Tdh$ 와 같으며, T 는 수면폭이다. 이들의 관계로부터 정리하면 다음과 같은 단면계수 산정식을 유도할 수 있다.

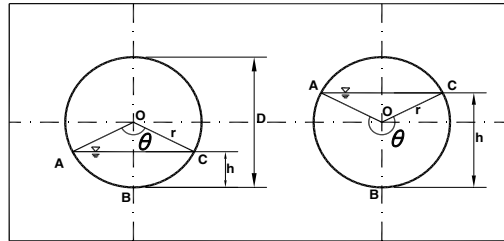


Fig. 3. Cross Section of Circular Pipe

$$\sqrt{\frac{Q^2}{g}} = \sqrt{\frac{A_c^3}{T_c}} = Z_c \quad (13)$$

여기서 Z_c 를 단면계수라 칭하는데 무차원수는 아니다. 등류이고 정상류인 경우 Q 는 일정하므로 단면계수 Z_c 는 일정하다. 한계수심은 이 방정식을 만족해야 한다. Eq. (11)에 Eq. (13)을 대입하여 Q 를 소거하면 다음과 같다.

$$h_s = h_c + \frac{A_c}{2T_c} \quad (14)$$

이 방정식으로부터 속도수두가 평균수심 A/T 의 1/2일 때 최소에너지가 일어남을 알 수 있다. 이를 원형단면을 포함한 불규칙한 단면에 적용하면 다음과 같다 (Fig. 3).

$$f(h) = \frac{Q^2 T}{gA^3} \quad (15)$$

Eq. (15)을 도시함으로써 시행오차법으로 해를 얻을 수 있는데, 한계수심은 $f(h) = 1$ 일 때 발생한다. 원형단면의 내경을 D 라 하고 수면과 단면의 중심이 이루는 각을 θ (단위: radian)라 하면, 단면적 A , 수면폭 T 는 다음과 같다.

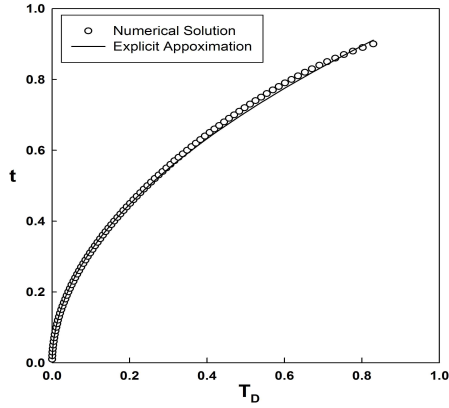


Fig 4. Comparison of Critical Water Depth of Circular Pipe between Exact Solutions and Approximate Solutions

$$A = \frac{D^2}{8}(\theta - \sin\theta), \quad T = D \sin \frac{\theta}{2} \quad (16)$$

이들을 Eq. (13)에 적용하면 단면계수는 다음과 같다.

$$Z_c^2 = \frac{A^3}{T_c} = 2^{-9} D^5 \frac{(\theta - \sin\theta)^3}{\sin^3(\theta/2)} \quad (17)$$

한편, 무차원수 $T_D = Q / (D^2 \sqrt{gD})$ 를 도입하여 한계수심을 구하며, 단면계수 Z_c 와 무차원수 T_D 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$Z_c^2 = \frac{Q^2}{g} = D^5 T_D^2; \quad T_D = Z_c / D^2 \sqrt{D} \quad (18)$$

각각의 변수들의 상호관계는 다음과 같다.

$$h = \frac{D}{2} \left(1 - \cos \frac{\theta}{2} \right), \quad \cos \frac{\theta}{2} = 1 - 2t, \quad t = \frac{h_c}{D} \quad (0 < t < 1)$$

$$\theta = 2 \cos^{-1}(1 - 2t), \quad \sin \frac{\theta}{2} = \sqrt{1 - (1 - 2t)^2} = 2\sqrt{t(1-t)}$$

$$\sin\theta = 2 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} = 2^2(1 - 2t) \sqrt{t(1-t)}$$

이들의 관계를 Eq. (17)에 적용하여 Eq. (18)의 단면계수 Z_c 를 정리하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$2^7 \sqrt{t(1-t)} T_D^2 - [\cos^{-1}(1 - 2t) - 2(1 - 2t) \sqrt{t(1-t)}]^3 = 0 \quad (19)$$

Eq. (19)는 매우 복잡한 형태를 취하였으나 t 는 T_D 만의 함수라는 것이 분명해졌고 T_D 는 오로지 첫째항에서만 나타남을 알 수 있다. 따라서 t 가 $0 < t < 1$ 의 범위를 가질 T_D 에 관하여 정리하면 t 와 T_D 의 관계를 쉽게 구할 수 있다. Eq. (19)를 T_D 에 관하여 정리하면 다음과 같다.

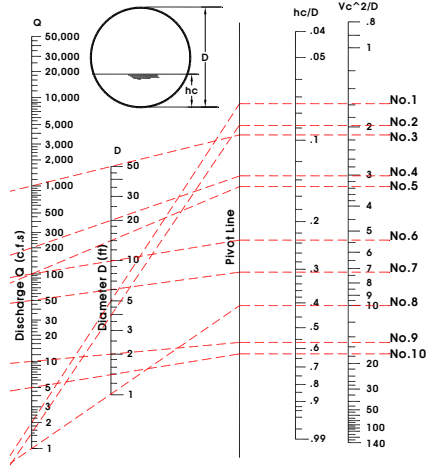


Fig. 5. Nomograph of Flow Discharge Water Depth and Velocity Head

$$T_D = \frac{2^{-7/2} [\cos^{-1}(1 - 2t) - 2(1 - 2t) \sqrt{t(1-t)}]^{3/2}}{[t(1-t)]^{1/4}} \quad (20)$$

원형관 한계수심 양해적 산정식은 $t(0 < t < 1)$ 를 대입하여 무차원수 T_D 를 산정한 다음 Fig. 4와 같이 $t - T_D$ 의 관계 그래프를 회귀분석하여 개발되었다. 유동훈과 노정수(2003)는 2차 다항식 또는 3차 다항식 형태의 약산식으로 개발하였는데, 본 연구에서 개발된 식은 더욱 간단한 형태의 산정식으로 다음과 같다.

$$h_c = \sqrt{T_D} \cdot D \quad (t = \sqrt{T_D}) \quad (21)$$

여기서 $T_D = \frac{Q}{D^2 \sqrt{gD}}$ 이다. 따라서 $h_c = \left(\frac{Q}{\sqrt{gD}} \right)^{1/2}$

로 간단히 구해진다.

Fig. 4는 원형관 한계수심 양해적 산정결과 그래프이고, Fig. 5는 원형관 한계수심 계산도표이다. Table 4는 계산도표에서 10개의 예를 임의로 선정하여 계산도표의 한계수심을 구한 수치와 Eq. (21)로 구한 수치와 비교한 도표이다. 여기서 F_r 은 후루드수로서 1에 가까울수록 정밀도가 높다. 제시된 바와 같이 후루드수를 비교하였을 때 대부분의 경우 오차는 5% 내외이다.

암거수리에서 가장 흔히 발생하는 Type CBn (I-1)에 해당하는 식은 다음과 같다.

$$h_H = K_n \frac{V^2}{2g} + K_f \frac{V^2}{2g} + 1.5h_c - iL \quad (22)$$

Eq. (22)에서 개수로 조건의 최대치인 h_H 에 $1.2D$ 를 대입하고, h_c 에는 Eq. (21)을 대입하면,

Table 4. Comparison between the Values given by Nomograph and Eq. (21) respectively about Critical Depth

No.	Discharge (Q)		Diameter (D)		h _c by the Nomograph			h _c by Eq. (21)		
	ft ³ /s	m ³ /s	ft	m	ft	m	F _r	ft	m	F _r
1	2.0	0.06	5.0	1.52	0.36	0.11	1.07	0.39	0.12	0.93
2	1.5	0.04	4.0	1.22	0.33	0.10	1.07	0.36	0.11	0.94
3	1000.0	28.32	50.0	15.24	4.76	1.45	1.04	4.99	1.52	0.94
4	200.0	5.66	20.0	6.10	2.69	0.82	1.02	2.82	0.86	0.95
5	100.0	2.83	14.0	4.27	2.07	0.63	1.04	2.16	0.66	0.95
6	100.0	2.83	10.0	3.05	2.30	0.70	1.01	2.36	0.72	0.96
7	50.0	1.42	6.0	1.83	1.87	0.57	1.02	1.90	0.58	0.98
8	1.0	0.03	1.0	0.30	0.39	0.12	1.05	0.43	0.13	1.00
9	10.0	0.28	2.0	0.61	1.12	0.34	1.02	1.12	0.34	1.03
10	5.0	0.14	1.4	0.43	0.85	0.26	1.02	0.85	0.26	1.03

$$1.2D = \frac{K_n}{2g} \left(\frac{Q}{A}\right)^2 + \frac{n^2 L}{H^{4/3}} \left(\frac{Q}{A}\right)^2 + 1.5 \left(\frac{Q}{\sqrt{gD}}\right)^{0.5} - iL \quad (23)$$

개수로에서 최대유량이 흐르는 조건으로 관내의 수심이 0.9h 인 상태로 흐른다고 가정하면,

$$1.2D = \frac{K_n}{2g} \left(\frac{Q}{0.745D^2}\right)^2 + \frac{n^2 L}{(0.298D)^{4/3}} \left(\frac{Q}{0.745D^2}\right)^2 + 1.5 \left(\frac{Q}{\sqrt{gD}}\right)^{0.5} - iL \quad (24)$$

Eq. (24)를 D에 관한 식으로 정리하여 표기하면 다음과 같다.

$$D = (aD^{5.08} + bD^{4.33} + c - 0.83iLD^{5.33})^{0.16} \quad (25)$$

여기서 $a = 1.25g^{-0.25}Q^{0.5}$, $b = 0.75g^{-1}K_nQ^2$, $c = 7.54n^2LQ^2$ 이다.

원형 암거도 사각형 암거와 같이 초기치 산정식을 유도하기 위해 입구부 손실수두항과 마찰손실수두항, 암거경사를 생략하여 정리하면,

$$1.2D = 1.5 \left(\frac{Q}{\sqrt{gD}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

Eq. (26)을 직경 D에 관한 식으로 정리하고 계수를 α라고 칭하면 다음과 같은 식이 도출된다.

$$D = \alpha g^{-0.2} Q^{0.4} \quad (27)$$

여기서 α는 1.3~1.4를 사용할 것을 추천한다.

관수로 유형의 식은 개수로 유형의 식과는 약간 다르게 유도되는데 그 이유는 개수로 유형은 h_H가 1.2D인 상태를 유지되도록 설계해야 최적의 설계가 되기 때문이다. 그러나 관수로 유형의 식은 최대 h_H에 따라 관경 D는 달라지며 관경 D는 h_H에 관한 함수가 된다.

원형 암거의 조건으로 Type PBn (II-2)에 해당하는 식은 다음과 같다.

$$h_H = K_{nx} \frac{V^2}{2g} + K_f \frac{V^2}{2g} + \frac{D}{2} - iL \quad (28)$$

여기서 우변에 있는 항 D/2는 중위축까지의 높이이며 이론적으로 타당하나 설계 시에는 흐름조건외 보장을 위해 원형관의 경우는 0.75h, 사각형관의 경우는 0.80h를 사용하도록 권장하고 있다(윤용남, 2004). 관수로 형태는 만관으로 물이 통수되므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta h = \frac{K_{nx}}{2g} \left(\frac{Q}{0.784D^2}\right)^2 + \frac{n^2 L}{(0.25D)^{4/3}} \left(\frac{Q}{0.784D^2}\right)^2 + 0.75D \quad (29)$$

여기서 Δh = h_H + iL이다.

Eq. (29)를 D에 관한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$D = (wD^{6.33} + xD^{1.33} + y)^{0.19} \quad (30)$$

여기서 $w = \frac{0.75}{\Delta h}$, $x = \frac{0.81K_{nx}Q^2}{g\Delta h}$, $y = \frac{10.33n^2LQ^2}{\Delta h}$ 이다.

원형 암거의 관경의 범위는 대개 0.5~1.2m이며, Table 5는 원형 암거의 규격 산정식을 정리한 것이다. 원형 암거도 사각형 암거의 높이 산정할 때와 마찬가지로 같은 유량에 대해 관수로 유형은 개수로 유형보다 관경이 작게 산정되므로 초기치 산정식에서 α 값을 개수로 유형보다 작게 선정하여 계산해야 한다.

5. 결론

암거흐름의 분류는 일반적으로 미국도로성의 분류체계를 따르고 있으나, 본 연구에서는 관수로와 개수로, 상류와 사류로 나누어 명확하게 구분하였다. 사각형 암거의 규격 산정 시 동수반경 근사식을 사용하여 암거의 규격산정식을 간단히 표기하였고, 비교적 정확한 초기

Table 5. Governing Equations of Pipe Diameter of Circular Culvert

Type (FHWA)	Governing Equation (D)	Δh	Initial Value (D_i)
CBn (I-1)	$(aD_t^{5.08} + bD_t^{4.33} + c - 0.83iLD_t^{5.33})^{0.16}$	-	$\alpha g^{-0.2} Q^{0.4}$
CBa (I-2)	$[b_x D_t^{1.33} + c + 0.83(h_T - iL)D_t^{5.33}]^{0.16}$	-	
CR (I-3, 4)	$(aD_t^{3.75} + b)^{0.2}$	-	
PBn (II-2)	$(wD_t^{6.33} + xD_t^{1.33} + y)^{0.19}$	$h_H + iL$	
PBa (II-3)	$(xD_t^{1.33} + y)^{0.19}$	$h_H - h_T + iL$	
PR (II-1, 4)	$(wD_t^5 + x)^{0.25}$	h_H	

note : $a = 1.25g^{-0.25}Q^{0.5}$, $b = 0.75g^{-1}K_n Q^2$, $b_x = 0.75g^{-1}K_{nx} Q^2$, $c = 7.54n^2 L Q^2$, $\alpha = 1.3 \sim 1.4$

$$w = \frac{0.75}{\Delta h}, \quad x = \frac{0.81K_{nx} Q^2}{g\Delta h}, \quad y = \frac{10.33n^2 L Q^2}{\Delta h}$$

치를 제시하여 적은 반복시산으로 암거의 폭과 높이를 구할 수 있도록 강구하였다. 기존의 원형관 한계수심 산정은 계산도표를 이용하는 방법을 취하였으나, 본 연구에서는 수리학적인 수식유도를 통하여 원형관 한계수심 양해적 산정식을 도출하였고, 원형관 한계수심 산정식을 이용하여 원형 암거의 관경 산정식을 개발하였다.

지금까지의 암거설계법은 초기단면을 가정하여 계산도표를 이용하여 상류부 수심을 결정한 후 허용상류부 수심을 초과하면 다시 단면을 가정하여 암거의 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.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업 (03-산학연C03-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참고 문헌

건설교통부 (2003). 도로배수시설 설계 및 유지관리 지침.

구혜진, 전경수 (2008). “암거 설계 모형의 개발”. **2008년도 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 645-649.

유동훈, 오윤창 (1999). “원형수로의 등류수심”. **1999년도 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 620-625.

유동훈, 엄호식 (2000). “사각형 암거의 간편설계”. **2000년도 대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 141-144.

유동훈, 엄호식 (2001). “원형 암거의 간편설계”. **한국관개배수**, 제8권, 제1호, pp. 88-101.

유동훈, 노경수 (2003). “개수로 흐름의 임계수심 산정식”. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제1B호, pp. 19-23.

유동훈 (2006). **고급수리학**. 도서출판 새문, pp. 386-417.

윤용남 (2004). **수리학-기초와 응용**. 청문각, pp. 524-538.

이길성, 진택선 (2003). “사각형 암거 설계를 위한 프로그램의 개발”. **2003년도 대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 2686-2689.

한국도로공사 (1991). **도로배수계획**.

논문번호: 09-137	접수: 2010.01.12
수정일자: 2010.02.11	심사완료: 2010.02.11