韓國水資源學會論文集
第36卷 第3號 · 2003年 6月
pp. 481 ~ 494

사각형 암거흐름의 양해적 해석

Explicit Analysis of Flows in Box Culvert

유 동 훈* / 엄 호 식**
Yoo, Dong Hoon / Uhm, Ho Sik

Abstract

Flow through the culvert is very complex depending on the characteristics of hydraulic conditions. A design method using a monograph is normally employed due to the wide range of flow characteristics and the difficulty of calculating inlet water depth. The present study suggests the method for determining the inlet water depth of box culvert using Bernoulli's equation. By employing the explicit equation of inlet water depth, a standard design method of box culvert is developed for a wide range of flow characteristics. Explicit solution techniques are proposed to determine the width and height, slope and discharge of box culvert.

Keywords : box culvert, inlet water depth, slope, discharge, width, height

요 지

암거흐름은 지형 및 수리조건에 따라 복잡하고, 다양한 흐름특성을 나타내고 있으며, 이로인해 암거설계는 주로 모노그래프를 이용한 설계방식을 채택하고 있는 실정이다. 이는 개수로 암거의 경우 입구부에서의 수심을 산정하여야 하는 어려움과 복잡한 흐름특성 때문인 것으로 사료된다. 본 연구에서는 사각형 암거 입구부에서의 수심을 베르누이 방정식을 이용하여 결정하였으며, 이를 적용하여 여러 가지 형태의 흐름특성에 따른 암거 설계기준식을 개발하였다. 또한 설계항목을 암거경사 · 유량 · 폭 · 높이로 구분하여 각각의 경우에 대하여 양해법 산정식을 개발하였다.

핵심용어 : 사각형 암거, 입구부 수심, 암거경사, 통과유량, 암거폭, 암거높이

* 아주대학교 환경도시공학부 교수
Professor, Department of Environment and Urban Engineering, Ajou University
(E-mail : dhyoo@madang.ajou.ac.kr)
** (주)지오시스템리서치부설 수환경연구소 연구원
Researcher Geosystem Research Corporation Hydro Environment Research Institute
(E-mail : hseum@geosr.com

1. 서 론

암거 수리설계에서는 상류부의 수위를 과다하게 상승시키지 않는 상태에서 안전하게 계획용수를 하류로 소통시킬 수 있도록 최적단면적, 암거경사, 입·출구부의 형상선택 등을 설계한다. 현재 국내 암거설계는 한국도로공사(1991)에서 발표한 "도로배수계획"을 이용하고 있으며, 이는 미국 도로성(FHWA, 1985)에서 발표한 설계기법을 그대로 인용한 것이다. 이 기법은 설계항목에 관련되는 설계유량, 암거의 길이, 경사, 상류부 수심, 입구부 모양을 결정한 다음, 경험적인 방법을 통하여 초기 단면을 가정하고, 지배단면(입구부, 출구부)을 결정하여 시행오차적인 방법으로 계획 상류부 수심을 산정하는 순서로 진행된다. 상류부의 수심을 결정하기 위해서는 손실수두(입구부 손실수두, 출구부 손실수두, 마찰 손실수두)와 임계수심을 산정하여야 하며, 미국 도로성의 기법을 이용할 경우에는 모노그래프를 이용하여 경험적인 값을 취한다. 모노그래프를 이용하는 이유는 입구부 손실수두를 산정할 경우 입구부에서의 수심을 결정하여야 하며, 그 과정은 간단치 않은 문제이기 때문인 것으로 사료된다. 윤용남(1995)의 "수리학-기초와 응용"과 미국 도로교통국(ASSHTO, 1991)의 "Model Drainage Manua""에서는 암거수리 해석에 관하여 깊이있게 다루고 있으며, 미국도로성의 설계기법을 따를 것을 권장하고 있다. 본고에서는 경험적 해석방식을 탈피하고 수리학적으로 명확한 수식전개 과정을 통하여 사각형 암거 수리를 해석하고자 한다. 또한 설계항목을 경사(설계유형 A), 유량(설계유형 B), 폭(설계유형 C-b), 높이(설계유형 C-h)로 구분하여 설계유형별 산정식을 제시하고, 반복과정이 수반되는 경우에는 양해법 산정식을 함께 개발하고자 한다.

경험적 반복과정에 의한 암거설계의 불편함을 해소하고자 Dasika(1995)는 원형암거 흐름을 개수로 흐름과 압력관로 흐름 두가지 Class로 구분하여 각각에 대하여 실험자료를 바탕으로 단일회귀식을 제시하였다. 또한 Hager(1998)는 암거 입구부에서의 흐름상태가 사류이며, 사류가 발생한 다음 바로 도수가 발생한다는 것을 실험에 의하여 관찰하였다. 본고에서는 입구부에서의 흐름상태가 암거내 흐름상태와는 무관하게 단면 급축소에 의한 사류가 발생한다는 것을 수식전개를 통하여 증명하였다. 암거흐름 단면도가 그림 1에 제시되어 있다. 암거흐름은 상류부 수심과 단면의 높이에 따라 크게 두가지(Class Ⅰ과 Class Ⅱ)로 분류할 수 있으며, 임계경사·수심, 등류수심, 상·하류부 수심 등의 조건에 따라 다시 각각 네가지로 소분류할 수 있다. 본고에서는 암거흐름 상태 분류를 미국 도로성의 분류와는 상이하게 표 1과 같이 분류하였으며, 이는 Class Ⅰ과 Calss Ⅱ의 상대적인 비교가 가능하다는 판단에서 분류된 것이다. 즉, 미국 도로성에서는 본고의 Type Ⅱ-3을 Type Ⅱ-1으로, Type Ⅱ-1을 Type Ⅱ-2로, Type Ⅱ-2를 Type Ⅱ-3으로 분류하고 있으나 본고에서는 표 1과 같이 분류하여 Ⅰ-1과 Ⅱ-1, Ⅰ-3과 Ⅱ-3이 서로 유사한 조건으로 대응하도록 분류하였다. 따라서 Ⅰ-1과 Ⅱ-1, Ⅰ-2와 Ⅱ-2, Ⅰ-3과 Ⅱ-3, Ⅰ-4와 Ⅱ-4의 지배방정식들은 서로 유사하게 구성된다.

암거의 경우 시공상의 이유로 인하여 대부분 사각형 또는 원형으로 설계되고 있으며, 원형암거에 대한 수리학적 특성 및 설계기준식은 국내학회지(유동훈, 2001년)에 발표된 바 있다. 본고에서는 사각형 암거에 대한 수리학적 특성과 설계기준식의 개발에 대하여 심도있는 논의를 하고자 한다.

2. 암거 흐름분류

암거내 흐름은 암거 상류부 수심 h_H와 암거높이 h의 상대적인 크기에 따라 크게 두 가지로 분류할 수 있으며 표 1에 제시된 바와 같이 하류부 수심 hT, 임계경사 i_c, 암거경사 i_b 등의 조건에 따라 각각 네가지 형태

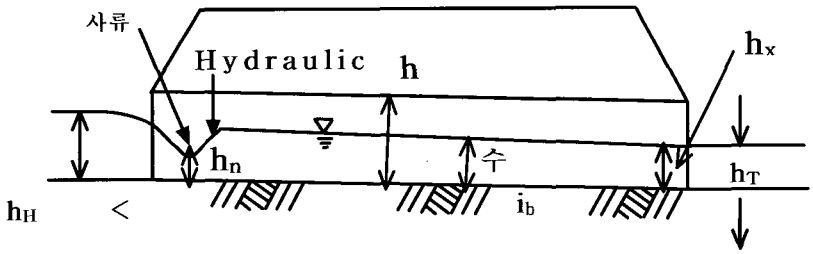

그림 1. 암거흐름 단면도

로 소분류된다. $h_H \leq \alpha h$ 8인 경우 개수로 흐름상태로서 Class Ⅰ으로, $h_H \geq \alpha h$ 인 경우 압력관로 흐름상태로서 Class Ⅱ로 분류한다. 여기서 α는 비례상수로서 $1.1 \leq \alpha \leq 1.4$이며, 통상적으로 1.2를 주로 적용한다. Class Ⅰ인 경우 $i_b < i_c$ 조건에서는 상류(常流)로서 하류부 수심에 상관없이 출구부가 지배단면이 되며, $i_c < i_b$ 일 때는 사류(射流)로서 전적으로 입구부가 지배단면이 된다. 지배단면의 결정은 마찰손실과 암거경사에 따른 손실수두항 포함 여부를 결정한다. Class Ⅱ인 경우 입구부에서는 전적으로 압력관로 흐름 특성을 나타낸다. $h_T < h$인 경우 등류수심과 암거높이의 대소에 따라 지배단면이 상이하게 결정되며, $h < h_T$일 때는 임계경사와 암거경사의 대소에 따라 지배단면이 달라진다. 각각의 경우에 대한 지배방정식은 표 1에 제시되어 있다. Type Ⅰ-1의 경우 M2곡선형의 상류가 발생하므로 흐름의 지배단면은 출구부가 되며 출구부에 임박한 지점에서는 임계조건에 도달한다. 즉 $h_x \simeq h_c$, $V_x \simeq V_c$이다. 이와 같은 흐름조건은 비교적 경사가 완만한 소하천의 경우와 유사하다. 상류부 유속은 무시할 수 있을 정도로 작으며, 상류부와 출구부 사이에 에너지 방정식을 적용하면 다음과 같은 관계식을 도출할 수 있다.

$$h_H = h_{Ln} + h_f + h_c + \frac{V_c^2}{2g} - i_b L \qquad (1)$$

여기서 h_{Ln}은 입구부 손실수두, h_f는 마찰손실수두, h_c는 임계수심, i_b는 암거경사, V_c는 임계유속, L은 암거길이, g는 중력가속도 이다. Type Ⅰ-2의 경우 $h_H \leq \alpha h$이고 $i_b < i_c$, $h_c < h_T$인 경우의 흐름으로, 지배방정식은 Type Ⅰ-1의 지배방정식 (1)에서 h_c를 h_T로, V_c를 출구부 단면 평균유속 V_x로 대치시킨 것과 동일하다. 지배단면은 출구부이며 이와 같은 흐름조건은 경사가 완만하고 폭이 좁으면서 수심이 깊은 하천에서 가끔 발생하나 흔하지 않은 경우이다. 입구부와 출구부에 대한 에너지 관계로부터 암거 상류부의 수심을 산정하면 다음과 같다.

$$h_H = h_{Ln} + h_f + h_T + h_{Lx} - i_b L \qquad (2)$$

여기서 h_{Lx}는 암거 출구부 손실수두이다. Type Ⅰ-3의 경우 $h_H \leq \alpha h$이고, $i_c \leq i_b$, $h_T \leq h_c \leq h$인 경우의 흐름으로서 h_c는 입구부 근처에 형성되어 임계지점까지의 길이 $L_c \simeq 0$이 되며, $i_b L_c$는 무시할 수 있다. 그러므로 지배방정식에는 $i_b L_c$이 포함되어 있지 않다. 즉, 암거내 흐름은 사류가 되고 입구부가 흐름의 지배단면이 된다. 이와 같은 흐름조건은 급경사의 산악지역에서 주로 발생하며, 에너지 방정식을 적용하면 다음과 같다.

$$h_H = h_{Ln} + h_c + \frac{V_c^2}{2g} \qquad (3)$$

또한 Type Ⅰ-4는 $h < h_T$로 출구부가 잠수되어 있는 경우로서 Type Ⅰ-3과 같이 h_c가 입구부 근처에 형성되어 h_f와 $i_b L_c$를 무시할 수 있다. 출구부 근처에서는 도수가 발생하고, 이 도수가 상류로 이동하여 입구부에 이르면 후술할 Type Ⅱ-3의 경우가 된다. 하류부의 수위가 암거 높이 이상으로 올라가는 경우는 거의 없으므로 Type Ⅰ-4와 같은 흐름은 거의 발생하지 않는다. Type Ⅰ-4의 지배방정식도 입구부가 지배단면이 되어 Type Ⅰ-3의 지배방정식 (3)과 동일하게 된다. Type Ⅱ-1의 경우는 $\alpha h < h_H$이고, $h_T < h$, $h < h_0$인 경우로서 암거 출구부에서는 만수상태가 아니지만, 암거내에서의 흐름상태는 만수상태를 유지한다. 이 경우에는 관수로 흐름으로 압력차에 의해 흐르게 되며, 완경사 조건이므로 출구부가 지배단면이 된다. 암거 상류부 단면과 출구부 단면 사이의 에너지관계로부터 상류부 수심을 산정하면 다음과 같다.

$$h_H = h_{Ln} + h_f + h_{Lx} + \frac{h}{2} - i_b L \qquad (4)$$

Type Ⅱ-2의 경우는 $\alpha h < h_H$ 이고, $h < h_T$인 경우로서 암거내 흐름은 상류와 하류의 수위차로 인해 흐르는 관수로 흐름이 되며, 흐름의 지배단면은 암거 하류부가 된다. 암거 상류부와 하류부의 에너지 관계로부터 다음과 같은 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$h_H = h_{Ln} + h_f + h_{Lx} + h_T - i_b L \qquad (5)$$

표 1. 암거흐름 분류

Class (군)		Type (형)	조건	조건식 (hH)	지배단면	비고
I	$\frac{h_H}{h} \le \alpha$	1	$i_b<i_c$ $h_T<h_C$	$h_{Ln}+h_f+h_c+\frac{V_c^2}{2g}-i_bL$	출구	완경사 전구간 개수로
		2	$i_b<i_c$ $h_c<h_T$	$h_{Ln}+h_f+h_{Lx}+h_T-i_bL$	하류	
		3	$i_c<i_b$ $h_T<h_c$	$h_{Ln}+h_c+\frac{V_c^2}{2g}$	입구	급경사
		4	$i_c<i_b$ $h<h_T$	$h_{Ln}+h_c+\frac{V_c^2}{2g}$	입구	
II	$\frac{h_H}{h} \ge \alpha$	1	$h<h_0$ $h_T<h$	$h_{Ln}+h_f+\frac{h}{2}+h_{Lx}-i_bL$	출구	입구:관수로 출구:개수로
		2	$i_b<i_c$ $h<h_T$	$h_{Ln}+h_f+h_T+h_{Lx}-i_bL$	하류	전구간 관수로
		3	$h_0<h$ $h_T<h$	$h_{Ln}+\frac{h}{2}+\frac{V^2}{2g}$	입구	
		4	$i_c<i_b$ $h<h_T$	$h_{Ln}+\frac{h}{2}+\frac{V^2}{2g}$	입구	

h_H : 상류부 수심, h_T : 하류부 수심

h_{Ln} : 입구부 손실수두, h_f : 암거내 마찰손실수두, h_{Lx} : 출구부 손실수두

V_c : 임계유속, i_c : 임계경사, $1.1 \le \alpha \le 1.4$(통상적으로 1.2를 주로 적용)

h_c : 임계수심, i_b : 암거경사, L : 암거길이

*본 표는 미국 도로교통국의 분류기준을 약간 수정하였음.

Type II-3의 경우는 $\alpha h<h_H$ 이고, $h_T<h$, $h_0<h$ 인 경우로서 입구부에서 흐름은 수문 아래로 흐르는 흐름과 같이 오리피스류가 되며 급경사 조건이 되어 입구부가 지배단면이 된다. 상류수심 h_H는 암거의 조도와 무관하며 입구부와 상류부간 에너지 관계로부터 식 (4)와 같이 된다. Type II-4는 $\alpha h<h_H$이고, $h<h_T$인 경우로 암거내 유속이 빨라 암거 출구부가 잠수되지 않으므로 지배단면은 입구부가 되어 지배방정식은 Type II-3과 동일하게 다음과 같다.

$$h_H = h_{Ln} + \frac{V^2}{2g} + \frac{h}{2} \tag{6}$$

이상에서 설명한 바와 같이 암거흐름은 개수로 흐름과 관수로 흐름의 특성을 가지고 있으며, 지배단면에 따라 서로 상이한 지배방정식을 갖는다. 이에 본고에서는 설계항목을 암거경사, 유량, 단면으로 나누어 각각의 항목에 따른 설계기준식을 개발하였다. 표 1에 제시된 산정식에서 마찰손실수두는 Darcy-Weibach식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$h_f = \int f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}dx = K_f\frac{V_n^2}{2g} \tag{7}$$

여기서 V_n은 입구부에서의 유속이며, 식 (7)에서도 볼 수 있듯이 마찰손실수두는 계산의 편의를 위하여 입구부 유속의 함수로 표기한다. 마찰손실계수는 암거길이가 규격에 비하여 짧기 때문에 일반적으로 입구부 손실계수와 비교하여 약 $0.01K_n$~$0.1K_n$로 추정되며, 후술할 설계유형별 산정에서는 $0.1K_n$을 적용하여 수식유도에 간편을 기하였다. 입구부 손실수두는 다음과 같은 산정식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$h_{Ln} = K_n\frac{V_n^2}{2g} \tag{8}$$

입구부에서의 손실은 단면 급축소에 따른 것이며, 단면 급축소에 따른 손실계수는 0.1-0.5 정도이다. 이에 본고에서는 후술할 설계유형별 산정에서 $K_n=0.1$~0.5의 범위에 대하여 해석하였다. 출구부에서의 손실은 다음과 같은 산정식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$h_{Lx} = K_x \frac{V_x^2}{2g} \approx \frac{V_x^2}{2g} \quad (9)$$

입구부에서의 손실이 단면 급축소에 따른 것이라면, 출구부에서의 손실은 단면 급확대에 따른 것이다. 단면 급확대 손실계수는 1.0이며, 본고에서도 1.0을 적용하여 수식을 전개하였다. 출구부에서의 손실계수가 1.0이 아닌 경우에 대하여도 본고의 수식전개 방식을 따를 경우 쉽게 산정식을 유도할 수 있다. 암거의 유입부와 유출부를 여러 가지 형상으로 설계하여 손실계수를 줄일 수도 있으나, 본고에서는 전술한 수치를 적용하여 수식을 유도하였다. 각각의 손실수두를 계산하기 위해서는 손실계수와 입구부 유속을 결정하여야 하며, 유속을 결정하기 위해서는 입구부에서의 수심을 결정하여야 한다. 입구부에서 수심을 결정하는 방법은 다음 절에서 논하기로 한다.

3. 입구부 수심 산정식

암거내 흐름이 압력관로 흐름(Class Ⅱ)인 경우에는 입구부에서의 수심이 암거의 높이와 동일하지만, 개수로 흐름(Class Ⅰ)인 경우 입구부에서의 수심은 암거의 높이와 동일하지 않다. 후술할 설계유형별 산정식 개발을 위하여 입구부에서의 수심 산정은 반드시 필요하다.

암거 상류부 임의점과 암거 입구부에서 베르누이 방정식을 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{V_H^2}{2g} + \frac{p_H}{\rho g} + h_H = \frac{V_n^2}{2g} + \frac{p_n}{\rho g} + K_n \frac{V_n^2}{2g} + h_n \quad (10)$$

여기서 첨자 H는 암거 상류부, n은 암거 입구부를 지칭한다. 식 (10)에서 암거 상류부의 속도수두 $\frac{V_H^2}{2g}$는 무시할 수 있을 정도로 작으며, 압력수두 $\frac{p_H}{\rho g}$와 $\frac{p_n}{\rho g}$는 자유표면을 가지고 있으므로 zero이다. 식 (10)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{2}(1+K_n)\frac{V_n^2}{gh_H} + \frac{h_n}{h_H} - 1 = 0 \quad (11)$$

입구부 수심산정식을 무차원수 $F_b\left(=Q/b\sqrt{gh_H^3}\right)$로 표현할 경우 후술할 설계유형별 산정식 개발이 용이하며, 식 (11)의 $\frac{V_n}{\sqrt{gh_H}}$항을 F_b의 관계로 표현할 경우 다음과 같다.

$$\frac{V_n}{\sqrt{gh_H}} = \frac{Q}{b\sqrt{gh_H^3}} \frac{h_H}{h_n} = F_b N^{-1} \quad (12)$$

여기서

$$F_b = \frac{Q}{b\sqrt{gh_H^3}} \quad (13)$$

$$N = \frac{h_n}{h_H} \text{ 이다.} \quad (14)$$

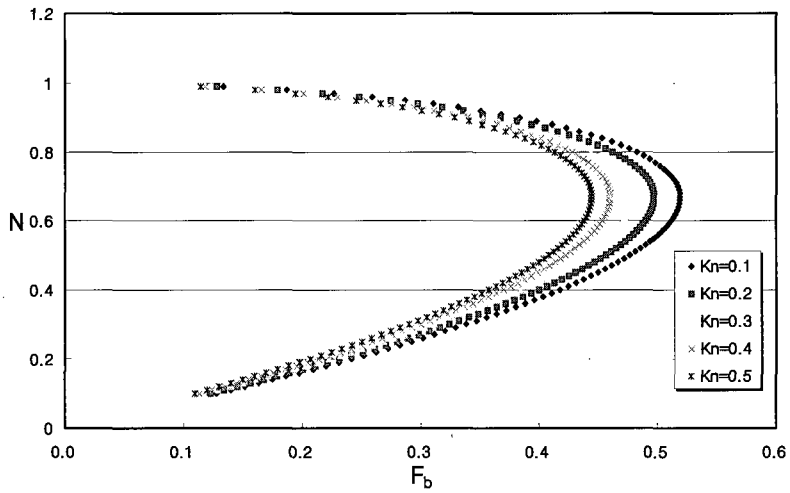

그림 2. 입구부 수심 산정

이다. 식 (12)의 관계를 이용하여 식 (11)을 정리하면 다음과 같다.

$$N^3 - N^2 + \frac{1}{2}(1+K_n)F_b^2 = 0 \qquad (15)$$

식 (15)는 하나의 음근과 두 개의 양근을 갖는 N에 대한 3차 방정식이며, K_n에 따른 F_b와 N의 관계그래프가 그림 2에 도시되어 있다. 그림 1에서도 볼 수 있듯이 입구부 손실계수 K_n에 따라 F_b의 한계값이 존재하며, N=0.64을 기준으로 F_b의 증가에 따라 N이 증가하는 구간과 감소하는 구간으로 나누어 진다. 입구부에서의 Froude Number $F_n(=V_n/\sqrt{gh_n})$과 무차원수 F_b는 $F_n = F_b/N^{3/2}$ 의 관계를 가지며, $N > 0.64$인 경우 常流흐름, $N < 0.64$인 경우 射流흐름이 된다.

여기서 주목할 만한 사항은 암거 내부에서의 흐름상태가 상류 흐름이라 할지라도, 암거 입구부에서는 단면이 급격히 축소되므로 흐름상태가 사류 흐름이 된다는 것이다. 이와 같은 암거 내부에서의 흐름상태를 그림 2에 제시하였으며, 그림에서 볼 수 있듯이 입구부에서는 단면축소 효과로 인해 사류가 형성되며, 일정 구간을 지나 바로 도수(hydraulic jump)가 발생된다. 즉, 입구부에서의 흐름은 사류이며, 후술할 설계유형별 산정에서 입구부 수심을 $N > 0.64$를 적용할 경우 에너지 경사가 역경사 분포가 되어 수리학적으로 타당하지 못한 흐름이 된다. 즉, F_b의 증가에 따라 N이 감소하는 구간이 수리학적으로 타당한 구간이며, $N < 0.64$ 구간에 대하여 입구부 수심 양해법 산정식을 개발하여 다음과 같이 제시한다.

$$N = 0.0695\,(174.45\,K_n + 48.123)^{F_b} \qquad (16)$$

입구부 손실계수 K_n과 무차원수 F_b가 주어지면 입구부에서의 수심은 회귀식 (14)를 통하여 양해적으로 산정할 수 있으며, 그림 3에 N의 근사해를 정밀해와 비교하여 제시하였다. 도시된 바와 같이 오차율은 ±5% 이내이다. 후술할 설계유형별 산정에서 유량산정의 경우 F_b값을 산정하고, 산정된 F_b값을 유량 Q로 환산한다. 즉 유량산정을 위해서는 N값이 주어져야 하는데 N값이 F_b의 함수가 되어 양해적으로 유량을 산정할 수 없다. 본고에서는 입구부 수심 산정식과 후술할 유량산정식을 동시에 만족시키는 사각형 암거 유량 양해법 산정식을 개발하였다.

4. 설계유형별 산정

4.1 경사 산정(설계유형 A)

암거경사 산정은 상류부의 수위, 유량, 암거의 폭·높이, 입구부의 형상 등이 결정되면 바로 양해적으로 산정할 수 있는 설계항목이다. Type I-3,4와 Type

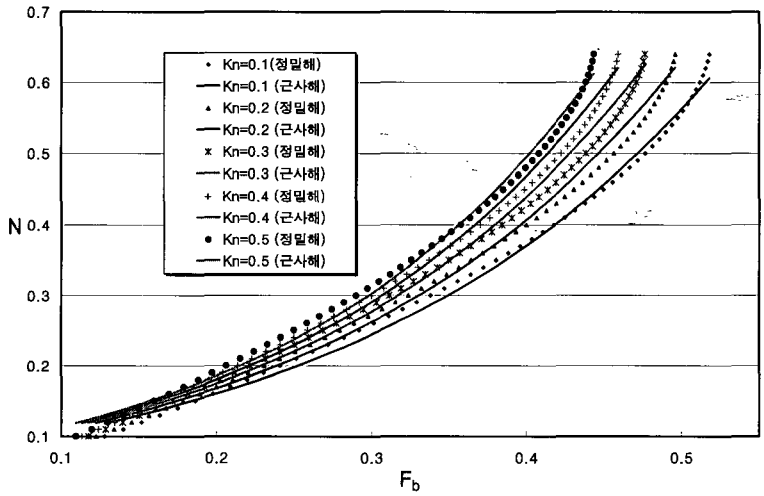

그림 3. 입구부 수심 산정식의 정밀해와 근사해

Ⅱ-3,4는 흐름의 지배단면이 입구부인 흐름이며, 입구부 지배단면을 갖는 흐름은 경사와 무관한 흐름특성을 나타낸다. 흐름이 임계경사를 가질 때의 수심을 임계수심 h_c라 하며, 임계 속도수두 $V_c^2/2g$는 임계수심의 1/2이다. 또한 임계수심과 무차원수 F_b와는 다음과 같은 관계가 있다.

$$h_c = F_b^{\frac{2}{3}} h_H \tag{17}$$

식 (17)의 관계를 이용하여 Type Ⅰ-1의 지배방정식 (1)을 암거경사 i_b에 대하여 정리하면 다음과 같은 암거경사 양해법 산정식이 도출된다.

$$i_b = \frac{K_{nf} H_L}{2N^2} F_b^2 + \frac{3H_L}{2} F_b^{\frac{2}{3}} - H_L \tag{18}$$

여기서

$$K_{nf} = K_n + K_f \tag{19}$$

$$H_L = h_H / L \tag{20}$$

이며, 어떤 물리적인 의미를 가지는 무차원수가 아니라 수식을 간략하게 표기하기 위한 무차원수이다. 또한 후술할 설계유형별 기준식에도 동일한 의미의 무차원수를 도입하여, 수식 표기의 간략화를 기하였다.

입구부 수심을 결정하기 위한 무차원수 N은 암거 상류부 수심, 유량, 입구부 손실계수, 암거의 폭이 결정되면 기지의 값이므로 식 (16)을 이용하여 N을 산정하고, 이 산정치를 식 (18)에 대입하면 암거경사는 양해적으로 산정할 수 있다. Type Ⅰ-2의 경우 임계수심을 암거 하류부에서의 수심으로, 임계속도수두를 암거 출구부에서의 속도수두로 대치시킨 경우이다. 암거경사 산정식은 다음과 같다.

$$i_b = \frac{H_L}{2}\left[K_{nf} N^{-2} + T^{-2}\right] F_b^2 - (H_L - T_L) \tag{21}$$

여기서

$$T_L = h_T / L \tag{22}$$

이다. Type Ⅱ-1,2의 경우도 Class Ⅰ의 방법과 동일하게 적용하면 암거경사 산정식을 도출할 수 있다. 산정식의 기본형태를 $i = \alpha F_b^2 + \beta F_b^{2/3} - \gamma$ 으로 취하였을 때, 각각의 산정식을 표 2에 제시하였다.

표 2. 경사 산정(설계유형 A)

		α	β	γ
사각형암거	Ⅰ-1	$\frac{K_{nf} H_L}{2N^2}$	$\frac{3H_L}{2}$	H_L
	Ⅰ-2	$\frac{H_L}{2}\left[K_{nf} N^{-2} + T^{-2}\right]$	0	$H_L - T_L$
	Ⅰ-3	무 관		
	Ⅰ-4	무 관		
	Ⅱ-1	$\frac{K_{nf}+1}{2} H_L H_h^2$	0	$H_L - \frac{1}{2}\frac{h}{L}$
	Ⅱ-2	$\frac{K_{nfx}}{2} H_L H_h^2$	0	$H_L - T_L$
	Ⅱ-3	무 관		
	Ⅱ-4	무 관		

$$i = \alpha F_b^2 + \beta F_b^{\frac{2}{3}} - \gamma, \qquad N^3 - N^2 + \frac{1}{2}(1 + K_n) F_b^2 = 0$$

$$F_b = \frac{Q}{b\sqrt{g h_H^3}}, \quad N = \frac{h_n}{h_H}, \quad H_L = \frac{h_H}{L}, \quad H_h = \frac{h_H}{h}, \quad T_L = \frac{h_T}{L}$$

4.2 유량 산정(설계유형 B)

임의의 암거 단면이 주어졌을 때 그 단면을 통과할 수 있는 최대유량을 산정하는 것은 암거설계의 중요한 항목이다. 암거내의 통과유량 산정은 유량 Q를 포함하는 무차원수 F_b를 산정하고, F_b를 유량 Q로 환산하도록 하였다. 수식전개의 간편성을 위하여 입구부 손실계수와 마찰손실계수의 합을 K_{nf}라 하고, 식 (12)의 관계를 도입하여 Type I-1의 지배방정식을 F_b의 2차 함수의 형태로 표기할 경우 다음과 같다.

$$F_b^2+\frac{3N^2}{K_{nf}}F_b^{\frac{2}{3}}-\frac{2N^2}{K_{nf}}(1+Z)=0 \qquad (23)$$

여기서

$$Z=\frac{\Delta z}{h_H} \qquad (24)$$

$$\Delta z=i_bL \qquad (25)$$

이다. 임계수심 h_c와 무차원수 F_b와는 식 (17)의 관계가 있으며, 식 (23)의 둘째항은 임계수심 h_c항에서 연유한 것이다. 다른 Type의 지배방정식은 표 3에 제시되어 있다. 식 (23)의 해인 F_b를 산정하기 위해서는 N을 산정하여야 하며, N을 산정하기 위해서는 F_b를 산정하여야 한다. 즉, F_b를 가정하고 식 (15) 또는 (16)을 이용하여 N을 산정한 다음, 계산된 N을 식 (23)에 대입하여 다시 F_b를 산정한다. 식 (23)을 통하여 산정된 F_b의 값이 초기에 가정한 F_b와 동일할 때까지 반복시산하여 F_b를 산정하게 된다. 이와같이 기존의 모노그래프를 이용하지 않고, 수리학적으로 명확히 유도된 수식을 통하여 유량을 산정할 경우 상당한 반복 과정이 수반된다. 본 연구에서는 이와같은 음해적 시산과정을 통하지 않고, 양해적으로 유량을 산정할 수 있는 양해법 산정식을 개발하였다. 양해법 산정식은 암거의 규격, 상류·하류부 수심, 입·출구부 손실계수, 암거내 마찰손실 등을 일반적인 암거가 취하는 범위로 단순화하고, 각각의 경우에 대하여 반복법을 이용하여 해를 산정하였다. 일반적으로 암거가 취하는 변수들의 단순화 구간은 전술한 바와 같이 $0.1\le K_n\le 0.5$, $K_x=1.0$, $K_f=0.1K_n$, $0.1\le T\le 0.6$이다. 구하고자 하는 변수는 F_b이나 임의의 F_b를 대입하여 Z를 산정한 다음, Z에 따른 F_b를 그림 4와 같이 도시하여, 각각의 경우에 대하여 회귀분석하여 양해법 산정식을 개발하였다. 이러한 방법을 통하여 개발된 양해법 산정식을 표 4에 제시하였다. 그림 4에는 양해법 산정식으로 산정된 근사해와 반복법으로 산정된 정밀해를 함께 제시하였으며, 오차율은 전구간에 걸쳐 ±5% 정도이다. Type I-2는 임계수심항을 포함하고 있지 않으므로 산정식의 형태가 다음과 같이 표현된다.

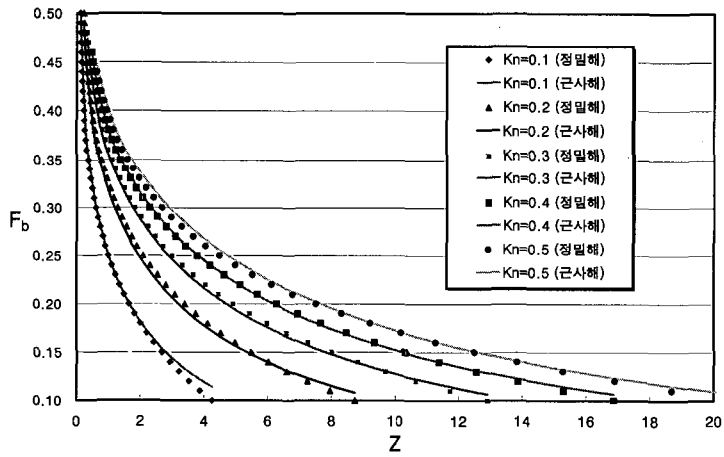

그림 4. Type I-1의 유량산정식 비교

표 3. 유량산정 (설계유형 B)

		α	β
사각형 암거	I-1	$\frac{3N^2}{K_{nf}}$	$\frac{2N^2}{K_{nf}}(1+Z)$
	I-2	$F_b=\sqrt{\frac{2(1-T+Z)N^2T^2}{K_{nf}T+N}}$	
	I-3	$F_b=\left[\frac{2}{3+K_n}\right]^{2/3}$	
	I-4	$F_b=\left[\frac{2}{3+K_n}\right]^{2/3}$	
	II-1	$F_b=\sqrt{\frac{2H^2}{K_{nf}+1}\left(1-\frac{H}{2}+Z\right)}$	
	II-2	$F_b=\sqrt{\frac{2H^2}{K_{nfx}}(1-T+Z)}$	
	II-3	$F_b=\sqrt{\frac{2H^2}{K_{nx}}\left(1-\frac{H}{2}\right)}$	
	II-4	$F_b=\sqrt{\frac{2H^2}{K_{nx}}\left(1-\frac{H}{2}\right)}$	

$F_b^2+\alpha F_b^{\frac{2}{3}}-\beta=0, \quad N^3-N^2+\frac{1}{2}(1+K_n)F_b^2=0$

$F_b=\frac{Q}{b\sqrt{gh_H^3}}, \quad N=\frac{h_n}{h_H}, \quad Z=\frac{\Delta z}{h_H}, \quad T=\frac{h_T}{h_H}, \quad H=\frac{h}{h_H}$

표 4. 사각형 암거 유량 양해법 산정식

	양해법 산정식	제 계수	
Type I-1	$F_b=\frac{1+aZ}{1+bZ+cZ^2}$	$a=2.41K_n^{-0.49}, \quad b=5.93K_n^{-0.572}, \quad c=0.43K_n^{-1.39}$	
Type I-2	$F_b=\frac{a+bZ}{1+cZ+dZ^2}$	$a=x_aT^2+y_aT+z_a$ $x_a=-2.738K_n^2+1.283K_n-1.13$ $y_a=1.766K_n^2-1.055K_n+1.577$ $z_a=-0.244K_n^2+0.048K_n-0.017$	$b=x_bT^2+y_bT+z_b$ $x_b=161.06K_n^2-47.923K_n+7.236$ $y_b=-104.18K_n^2+35.345K_n-3.03$ $z_b=15.126K_n^2-5.302K_n+0.515$
		$c=x_cT^2+y_cT+z_c$ $x_c=241.7K_n^2-77.49K_n+8.826$ $y_c=-151.12K_n^2+53.367K_n-4.65$ $z_c=28.369K_n^2-10.914K_n+1.039$	$d=x_dT^2+y_dT+z_d$ $x_d=-90.839K_n^2+27.867K_n-3.37$ $y_d=57.403K_n^2-18.058K_n+1.971$ $z_d=-8.509K_n^2+2.7933K_n-0.3$
Type I-3,4	$F_b=\frac{0.5373}{1+0.4495K_n}$		

$$F_b=\sqrt{\frac{2(1-T+Z)N^2T^2}{K_{nf}T+N}} \quad (26)$$

식 (26)은 F_b의 함수인 N이 포함되어 있으므로 양해적으로 해를 도출할 수 없다.

Class Ⅱ는 압력관로의 특성을 가지고 있으므로, 암거 입구부에서의 수심은 암거의 높이와 동일하게 되며, 지배방정식에는 임계수심 항이 포함되어 있지 않다. 즉, 산정식의 형태가 식 (23)과 동일한 형태의 산정식이 된다. 하지만 식 (26)은 무차원수 N이 포함되어 있어 음해법으로 F_b를 산정하여야 하며, 양해법 근사식을 개발하여 표 4에 제시하였다. Class Ⅱ의 경우는 입구부에서의 수심이 암거의 높이와 동일하므로 무차원수 N을 포함하지 않는 형태의 산정식이 되며, 양해적으로 해를 도출할 수 있다. Type Ⅱ-1의 산정식을 제시하면 다음과 같다.

$$F_b=\sqrt{\frac{2H^2}{K_{nf}+1}\left(1-\frac{H}{2}+Z\right)} \quad (27)$$

여기서 $H=h/h_H$, $K_{nx}=K_n+K_x$이며, K_x는 암거 출구부에서의 손실계수이다. Class Ⅱ의 4가지 유형이 모두 식 (27)과 동일한 형태의 산정식이 되며, 암거 유량산정식의 기본형태를 $F_b^2+\alpha F_b^{2/3}-\beta=0$으로 취하였을 때, 각각의 산정식을 표 3에 제시하였다.

4.3 암거폭 산정(설계유형 C-b)

설계홍수량을 통수시키기 위한 단면크기의 결정은 암거의 설계에서 중요한 항목이며, 사각형 암거의 경우 단면 크기를 결정하기 위해서는 암거의 폭과 높이가 결정되어야 한다. 이중 어느 한가지가 지형조건상 제약을 받는다면 제약받는 요소를 기지의 값으로 설정하고 나머지 요소를 산정하여야 한다. 본고는 사각형 암거의 규격산정을 폭과 높이 두가지 설계항목으로 나누어 설계기준식을 개발하였다. 암거폭을 산정할 경우 통과유량, 암거높이, 상·하류부 수심은 기지수이며, 미지수는 오직 암거폭 뿐이라는 가정하에 유량산정식에서 도입한 무차원수 F_b와 역수의 관계가 있는 무차원수 Y_b를 이용하여 암거의 폭을 산정할 수 있다. Type I-1 유량산정식 (23)의 양변에 Y_b^2을 곱하여 정리하면 다음과 같다.

$$Y_b^2+\frac{3}{2(1+Z)}Y_b^{\frac{4}{3}}-\frac{K_{nf}}{2N^2(1+Z)}=0 \quad (28)$$

여기서

$$Y_b=\frac{b\sqrt{g\,h_H^3}}{Q} \quad (29)$$

이며, 무차원수 F_b와는 역수의 관계에 있다. 동일한 방법으로 표 3에 제시된 유량산정식에 Y_b^2을 곱하여 정리하면, 암거폭 산정식을 도출할 수 있다. 암거폭 산정식의 기본형을 $Y_b^2-\alpha Y_b^{4/3}-\beta=0$으로 취하였을 때, 각각의 산정식을 표 5에 제시하였다. 표 5에 제시된 Class I의 모든 경우는 유량산정식과 마찬가지로 무차원수 N이 수식에 포함되어 있어 양해적으로 Y_b를 산정할 수 없다. 본고는 전처리과정으로 N의 양해적 근사식 (16)을 도입하여 암거폭을 양해적으로 산정할 수 있는 암거폭 산정식을 개발하였으며, 표 6에 제시하였다. 암거폭 양해법 산정식은 통과유량 양해법 산정식과 정확히 역수의 관계가 있음을 알 수 있다.

4.4 암거높이 산정(설계유형 C-h)

사각형 암거높이 산정식 개발을 위하여 미지수 h를 포함하는 무차원수 Y_h를 도입하여 설계식을 개발하였다. Type I-1의 지배방정식 (1)을 무차원수 Y_h, C, B, Z 등을 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\left[\frac{3CB^2}{K_{nf}}-\frac{2B^2(1+Z)}{K_{nf}}\right]Y_h^2+1=0 \quad (30)$$

여기서

$$Y_h=\frac{h\sqrt{gh_H^3}}{Q} \quad (31)$$

$$C=\frac{h_c}{h_H} \quad (32)$$

$$B=\frac{b}{h_H} \quad (33)$$

$$Z=\frac{\Delta z}{h_H} \quad (34)$$

이다. 전술한 Type I-1의 유량산정식과 암거폭 산정

표 5. 규격산정 - 암거폭 (설계유형 C-b)

		α	β
사각형 암거	I-1	$\frac{3}{2(1+Z)}$	$\frac{K_{nf}}{2N^2(1+Z)}$
	I-2	$Y_b=\sqrt{\frac{K_{nf}T+N}{2(1-T+Z)N^2T^2}}$	
	I-3	$Y_b=\left[\frac{3+K_n}{2}\right]^{3/2}$	
	I-4	$Y_b=\left[\frac{3+K_n}{2}\right]^{3/2}$	
	II-1	$Y_b=\sqrt{\frac{K_{nf}+1}{H_H^2(2-H_H+2Z)}}$	
	II-2	$Y_b=\sqrt{\frac{K_{nfx}}{2H_H^2(1-T+Z)}}$	
	II-3	$Y_b=\sqrt{\frac{K_{nx}}{H_H^2(2-H_H)}}$	
	II-4	$Y_b=\sqrt{\frac{K_{nx}}{H_H^2(2-H_H)}}$	

$$Y_b^2-\alpha Y_b^{\frac{4}{3}}-\beta=0,\quad Y_b^2\left[\left(\frac{h_n}{h_H}\right)^3-\left(\frac{h_n}{h_H}\right)^2\right]+\frac{1}{2}(1+K_n)=0$$

$$Y_b=\frac{b\sqrt{gh_H^3}}{Q},\quad N=\frac{h_n}{h_H},\quad Z=\frac{\Delta z}{h_H},\quad T=\frac{h_T}{h_H},\quad H_H=\frac{h}{h_H}$$

표 6. 사각형 암거폭 양해법 산정식

	양해법 산정식	제 계수	
Type I-1	$Y_b=\frac{1+bZ+cZ^2}{1+aZ}$	$a=2.41K_n^{-0.49},\quad b=5.93K_n^{-0.572},\quad c=0.43K_n^{-1.39}$	
Type I-2	$Y_b=\frac{1+cZ+dZ^2}{a+bZ}$	$a=x_aT^2+y_aT+z_a$ $x_a=-2.738K_n^2+1.283K_n-1.13$ $y_a=1.766K_n^2-1.055K_n+1.577$ $z_a=-0.244K_n^2+0.048K_n-0.017$	$b=x_bT^2+y_bT+z_b$ $x_b=161.06K_n^2-47.923K_n+7.236$ $y_b=-104.18K_n^2+35.345K_n-3.037$ $z_b=15.126K_n^2-5.302K_n+0.515$
		$c=x_cT^2+y_cT+z_c$ $x_c=241.7K_n^2-77.49K_n+8.826$ $y_c=-151.12K_n^2+53.367K_n-4.656$ $z_c=28.369K_n^2-10.914K_n+1.039$	$d=x_dT^2+y_dT+z_d$ $x_d=-90.839K_n^2+27.867K_n-3.374$ $y_d=57.403K_n^2-18.058K_n+1.971$ $z_d=-8.509K_n^2+2.7933K_n-0.3$
Type I-3,4	$Y_b=\frac{1+0.4495K_n}{0.5373}$		

표 7. 규격산정 - 암거높이 (설계유형 C-h)

		Y_h
사각형암거	I-1	$\left[\frac{K_{nf}}{2(1+Z)-3C}\right]^{1/2} B^{-1}$
	I-2	$\left[\frac{K_{nf}}{2(1-T+Z)-F_{bT}^2}\right]^{1/2} B^{-1}$
	I-3	$\left[\frac{K_n}{2-3C}\right]^{1/2} B^{-1}$
	I-4	$\left[\frac{K_n}{2-3C}\right]^{1/2} B^{-1}$
	II-1	$Y_h^3-(2Y_H+Y_Z)Y_h^2+(K_{nf}+1)Y_H B^{-2}=0$
	II-2	$\left[\frac{K_{nfx}}{2(1-T+Z)}\right]^{1/2} B^{-1}$
	II-3	$Y_h^3-2Y_H Y_h^2+(K_n+1)Y_H B^{-2}=0$
	II-4	$Y_h^3-2Y_H Y_h^2+(K_n+1)Y_H B^{-2}=0$

$Y_h=\frac{h\sqrt{gh_H^3}}{Q}$, $Y_H=\frac{h_H\sqrt{gh_H^3}}{Q}$, $Y_Z=\frac{\Delta z\sqrt{gh_H^3}}{Q}$, $B=\frac{b}{h_H}$, $T=\frac{h_T}{h_H}$

$Z=\frac{\Delta z}{h_H}$, $C=\frac{h_c}{h_H}$, $F_{bT}=\frac{Q}{bh_T\sqrt{gh_H}}$

표 8. 사각형 암거높이 양해법 산정식

	양해법 산정식	제 계수
Type II-1	$Y_h=a\alpha+b$	$a=0.0165\beta+1.025$ $b=-0.0114\beta^2+0.203\beta+0.089$
Type II-3,4	$Y_h=\frac{1}{a+b\ln\alpha}$	$a=\frac{5.91-4.68\beta}{1+13.38\beta-0.362\beta^2}$ $b=\frac{3.94+3.48\beta}{1+4.67\beta+0.184\beta^2}$

표 9. 기존 설계방식과의 상호비교

	통과유량(Q)	암거높이(h)	암거폭(b)	암거경사(i_b)
기존	2.71m^3/s	1m	1m	0.05%
본 연구	3.43m^3/s	1m	1m	0.05%
	2.71m^3/s	0.79m	1m	0.05%
	2.71m^3/s	1m	0.82m	0.05%

설계조건 : 유입부 조절(지배단면이 입구부가 되도록 설계)
입구부 만수상태 유지, 입구부 손실계수 : 0.2, 출구부 손실계수 : 1.0
계획상류부 수심 : 1.22 m, 암거길이 : 200m

*기존 설계방식의 예는 도로공사 배수구조물 설계법에서 발췌한 것임.

식에는 암거 입구부에서의 수심이 포함되어 있으며, 암거높이 산정의 경우에는 구하고자 하는 무차원수 Y_h에 암거높이 h가 포함되어 있다. 즉 Class Ⅰ의 경우 높이 산정식은 암거의 높이를 산정하는 것이 아니라, 엄밀히 말하자면 암거 입구부에서의 수심을 산정하는 것이 된다. 개수로 흐름으로 암거설계를 하고자 할 경우 식 (30)을 통하여 사각형 암거의 입구부 수심을 산정하고, 산정된 수치에 설계지침서 상의 안전율을 고려하면 가장 경제적인 단면을 설계할 수 있다.

Type Ⅱ-1의 지배 방정식을 식 (30)과 같은 형태로 표기할 경우 다음과 같다.

$$\frac{2B^2}{K_{nf}+1}\left(1-\frac{H}{2}\right)Y_h^2-1=0 \qquad (35)$$

식 (30)과 (31)은 동일한 형태의 산정식처럼 보이지만, 식 (31)에는 구하고자 하는 h가 Y_h와 H에 모두 포함되어 있어 수심 h의 산정은 간단치 않다. 즉, H_H에 무차원수 Y_h가 포함되도록 산정식을 형태를 변형하여야 한다. 무차원수 H_H와 Y_h의 관계는 다음과 같다.

$$H=\frac{Y_hQ}{h_H\sqrt{gh_H^3}} \qquad (36)$$

식 (32)를 식 (30)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 Type Ⅱ-1의 암거높이 산정식을 얻을 수 있다.

$$Y_h^3-(2Y_H+Y_Z)Y_h^2+(K_{nf}+1)Y_HB^{-2}=0 \qquad (37)$$

여기서

$$Y_H=\frac{h_H\sqrt{gh_H^3}}{Q} \qquad (38)$$

이다. 즉, Type Ⅱ-1,3,4의 경우 지배방정식에 수심 h항이 포함되어 있으므로 암거높이 산정식은 식 (33)과 같이 Y_h의 3차 방정식의 형태가 된다. 암거높이 산정을 위한 설계 기준식을 표 7에 제시하였다. Type Ⅱ-1,3,4의 설계기준식 기본형을 $Y_h^3-\alpha Y_h^2+\beta=0$로 표기하였을 경우, 계수 α와 β에 따른 양해법 산정식을 개발하여 표 8에 제시하였으며, 오차율은 그림 5에서 제시된 바와 같이 ±5% 내외이다. 암거폭 양해법 산정식은 통과유량 양해법 산정식의 개발과정과 동일한 과정을 통하여 개발되었다. Type Ⅱ-1의 경우 $\alpha=2Y_H+Y_Z$, $\beta=(1+K_{nf})Y_HB^{-2}$이다.

본 연구에서의 설계방식을 따를 경우와 기존의 설계방식을 따를 경우에 대한 상호비교는 표 9에 제시하였으며, 표 9에서도 볼 수 있듯이, 기존 설계방식을 따를 경우 2.71m^3/s의 유량을 통과시키기 위하여 1m×1m의 단면적을 요구한다. 즉 이 수치는 안정치가 반영된 수치이며, 설계자는 이 수치에 얼마만큼의 안정치가 반영되었는지 알 수 없다. 즉 본 연구의 설계방식을 따를 경우 2.71m^3/s의 유량을 통과시키기 위한 요구단면적(0.79m×1m 또는 1m×0.82m)을 정확히 산정할 수 있

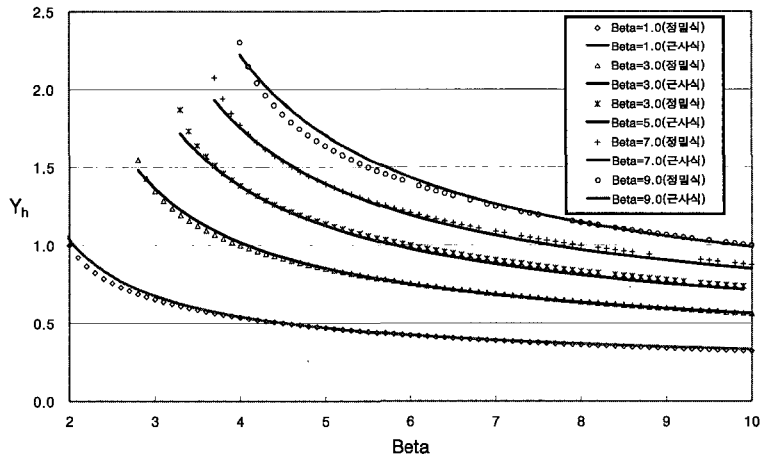

그림 5. 암거높이 산정식의 비교

으며, 이에 안정치를 반영하여 암거를 설계할 경우 가장 경제적이면서도 안정적인 암거를 설계할 수 있다. 또한 설계방식에 있어서도 기존의 시행오차적인 방식에서 탈피하여, 양해적으로 구하고자 하는 항목을 바로 산정할 수 있는 장점이 있다.

5. 결 론

암거흐름의 분류는 미국 도로성의 분류체계를 따르고 있으나, 본고에서는 Class Ⅰ과 Class Ⅱ의 상대적인 비교가 가능하도록 분류체계를 재정립하였다. 본고의 설계항목에 따른 각각의 설계유형별 산정식 개발을 위하여 입구부 수심 산정식을 개발하였으며, 음해적인 입구부 수심 산정식을 양해적으로 풀 수 있도록 입구부 수심을 결정하는 양해법 산정식을 제시하였다.

기존 암거설계는 모노그래프를 이용하여 경험적인 방법으로 수행하고 있는 실정이나, 본 연구에서는 명확한 수리학적인 수식유도를 통하여 암거흐름을 해석하였다. 수식유도를 통한 암거설계에서 반복 과정이 수반되는 경우에는 양해적으로 산정치를 산정할 수 있도록 양해법 근사식을 함께 개발하였다.이상의 연구결과는 사각형 암거설계에 있어 입구부 손실계수가 명확하게 주어지고 마찰손실이 입구부 부차손실에 비하여 과도하게 크지 않을 경우 암거 경사, 암거높이, 암거폭, 유량 등 여러 요소들을 명확하게 결정하여 주므로 실제 설계 특히, 전산모형 개발에 획기적인 기틀을 제공하여 줄 것으로 사료된다. 또한 기존의 설계방식은 안전율이 고려된 산정식으로 암거를 설계함으로써 얼만큼의 안전율이 고려되었는지를 설계자가 알 수 없는데 반하여, 본 연구의 설계방식은 수리학적으로 명확한 개념을 통하여 암거를 설계하고, 이에 안전율을 고려함으로써 설계자로 하여금 구조물의 중요도를 감안하여 안전율을 부과할 수 있다는 설계상의 장점이 있다.

본 연구에서 개발한 설계기준식은 암거설계프로그램(Culvert Analysis System : CULAS) 개발의 전과정으로 이루어진 것이며, CULAS는 수문해석 능력을 포함시켜 설계홍수량 산정하고, 산정된 설계홍수량을 통수시킬 수 있는 최적 암거설계를 목적으로 하고 있다. 또한 암거 출구부에서의 세굴문제에 대하여도 깊이있는 연구를 통하여 CLUAS에 포함할 예정이다.

참 고 문 헌

한국도로공사 (1991). **도로배수계획**.

유동훈, "원형암거의 간편설계." **한국관개배수논문집**, 한국관개배수, 제8권, 제1호, pp.88-101.

윤용남 (1989). **수리학-기초와 응용**, 청문각, pp. 450-462.

American Association of State Highway and Transportation Officials(1991). *Model Drainage Manual*.

Dasika, B., (1995). "New approach to design of culverts." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, pp. 261-264.

Federal Highway Administration(1985). *Hydraulic Design of Highway Culvert*.

Hager, W. H., (1998). "Generalized culvert design diagram." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, pp. 271-274.

(논문번호:03-26/접수:2003.03.13/심사완료:2003.05.17)