

Culvert에서의 유입수두-유량 관계식의 일반화에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Head-Discharge Relations for Inlet control flow in Culvert

지운* / 강준구** / 여운광***

1. 서론

암거(culvert)는 도로나 제방을 지나는 중요한 수리학적 배수구조물로서 암거의 흐름은 유입부의 형상, 경사, 단면 크기, 조도, 유입수두 및 하류수심 조건 등과 같은 여러 가지 수리학적 변수에 의해 좌우되며, 특히 수심과 유속 등의 흐름 변수가 비교적 짧은 구간 내에서 크게 변하는 급변류(Rapidly varied flow)이기 때문에 이론적으로 접근하기는 매우 어렵다. 따라서 현재 수리해석을 위한 암거 흐름의 결정은 주로 실험실이나 현장 자료의 단순한 분석을 통해 이루어진다. 암거의 설계는 일정한 허용상류수심 하에서 안전하게 설계홍수량을 하류로 소통시킬 수 있도록 하는데 그 목적이 있으며 암거의 잘못된 수리학적 설계는 제방이나 도로가 홍수로 인해 범람하는 결과를 초래하며 많은 경제적 손실을 야기한다. 그러므로 이와 같이 중요한 암거의 수리설계는 수리해석에 의한 결과를 바탕으로 다양한 수리학적 변수들을 충분히 고려하여 수행되어야 한다.

현재의 암거 수리설계는 미국 도로청(FHWA, 1985)에서 제안한 방법을 사용하고 있으며 국내에서도 한국 도로공사(1991)가 미국 도로청의 설계기법을 인용하여 발표한 "도로배수계획"을 이용하고 있다. 그러나 최근 Australia의 La Trobe University의 실험(Ref.(5))을 통해 미국도로청의 Design chart와 실험 데이터 간의 유입수두-유량과의 관계가 차이가 있음이 확인되었으며 수리모형실험을 통한 유입수두-유량과의 관계에 대한 새로운 일반화의 필요성이 제기되었다. 이에 Dasika(1995)는 Inlet control 상태에서의 원형 암거 흐름을 개수로 흐름과 압력관로 흐름 두 가지로 구분하여 실험 자료를 바탕으로 한 유입수두-유량 관계식을 제시하였다.

본 연구에서는 기저단면이 입구부에 존재하며 비교적 흐름에 관련된 변수가 적은 Inlet control 상태에서의 유입수두와 유량과의 관계식을 수리모형실험을 통해 차원해석과 명확한 이론식의 전개를 기본으로 원형 암거와 사각형 암거에 대해 각각 일반화하고 Design chart와 실험 데이터 간의 차이를 확인하였다. 또한 실험식과 nomograph 간의 차이를 발생 시키는 원인에 대해 지금까지 유입수두-유량 관계식의 일반화에서 고려되지 않았던 조건들을 고찰해봄으로써 기존의 실험식과는 다른 새로운 변수 조건을 고려한 경험식을 제시하였다.

2. 암거에서의 흐름

암거흐름은 크게 유입구가 개수로 흐름인 Class I (Free-surface Inlet flow : FI)과 유입구가 만수된 상태인 Class II (Submerged Inlet flow : SI)로 나눌 수 있으며 이는 다시 각각 Inlet control과 Outlet control 흐름으로 구분되어진다. 유입수두를 H_w , 암거 단면 높이를 D 라고 했을 때 FI는 개수로 흐름상태인 경우이고

*정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 박사과정 · 공학석사 · 031-330-6808 (E-mail:jiuncivil@mju.ac.kr)

**정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 공학박사 · 031-330-6808 (E-mail:drwtjkj@mju.ac.kr)

***정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사 · 031-330-6808 ((E-mail:yeo@mju.ac.kr)

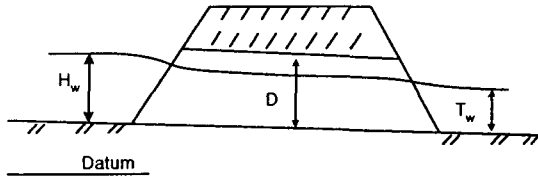


그림 1. 암 거 (Culvert)

Class I : $H_w/D \leq \alpha$ (Free-surface Inlet flow:FI)

Class II : $H_w/D > \alpha$ (Submerged Inlet flow:SI)

SI는 압력관로의 흐름상태임을 의미한다. 따라서 α 는 개수로와 관수로 흐름으로 구분되는 값으로

서 연구자에 따라 Table 2.1 에서처럼 다양한 값을 가지나 대체적으로 $1.1 \leq \alpha \leq 1.5$ 의 값을 나타낸다고 알려져 있다. (Ref.(4))

3. Inlet control 상태에서의 이론적 유량산정식

Inlet control 상태인 경우 암거 흐름에 있어 중요한 요소는 주로 유입구의 조건 즉, 암거의 단면형상, 단면크기, 유입구 모양 및 측벽과의 각도 등이 된다. Inlet control 상태에서의 유량은 유입부가 만수되지 않은 상태와 만수되어 흐르는 상태 두 가지로 분류하여 생각할 수 있다. 유입부가 만수되지 않은 경우에는 한계수심이 유입구에서 발생되며 이 같은 사실로부터 유량은 계산될 수 있다. 즉, 유입부 상류수심과 유입구 사이의 손실이 무시된다는 가정하에 한계수심이 발생하는 곳에서의 에너지식을 이용하면 Inlet control의 이론적 유량산정식을 원형과 사각형 암거에 대해 각각 유도할 수 있으며 표 1과 같다. 각각의 식을 살펴보면 Inlet control 흐름에서는 Q 가 D , g 그리고 H_w 의 영향만 받는 것을 알 수 있다.

표 1. Inlet control 상태에서의 이론적 유량산정식

| | Free-surface Inlet flow | Submerged Inlet flow |
|--------|---|--|
| 원형 암거 | $Q = \frac{(\theta - \frac{\sin 2\theta}{2})}{4} D^2 \sqrt{2g(H_w - CD)}$ | $Q = C \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2g(H_w - C_c D)}$ |
| 사각형 암거 | $Q = 0.544 g^{0.5} B H_w^{1.5}$ | $Q = C_c B D (2g(H_w - C_c D))^{0.5}$ |

4. 수리모형실험

Inlet control 상태에서의 유입수두-유량 관계식을 원형 암거와 사각형 암거에 대해 각각 실험적으로 도출하기 위해서는 수리학적 이론 뿐 아니라 차원해석을 통해 유도된 유량산정식의 무차원 계수들을 수리모형실험을 통해 결정해야 한다. Inlet control 흐름에서는 Q 가 D , g 그리고 H_w 의 영향을 받는다는 사실을 기본으로 Π 정리를 이용하여 원형 암거의 유입수두-유량 공식을 유도하면 다음과 같다.

$$Q = kg^{0.5} H_w^b D^{2.5-b} \quad (1)$$

여기서 k 와 b 는 무차원 상수이다. 식(1)은 실험 자료의 일반화를 위해 차원해석을 통해 유도된 원형암거의 유량산정식이며 무차원 상수값 k 와 b 는 실험을 통해 구하는 값이다. 정사각형 암거에는 원형단면의 단면형상을 대표하는 반경 D 대신 정사각형 단면의 한 변의 길이를 이용하였다. 실험장치의 기본 모형은 그림 2와 같으며 아크릴을 이용하여 모형을 제작하였다. 단면 모양은 원형과 정사각형이며 단면 크기는 각각 두 가지 경우에 대해 모형이 제작되었다. 암거의 길이는 대략 원형 단면의 지름 또는 정사각형 단면의 한 변의 20배의 길이로 하였으며 경사조절이 가능하도록 하였다. 실험과정은 먼저 Inlet control 흐름이 되도록 경사를 조정하여 일정하게 유지시킨 후 유입수두 값을 변화시켜가면서 이때의 통과 유량을 측정하였다. 다음으로는 위의 과정을 경사를 다양하게 변화시켜가며 반복하였다.

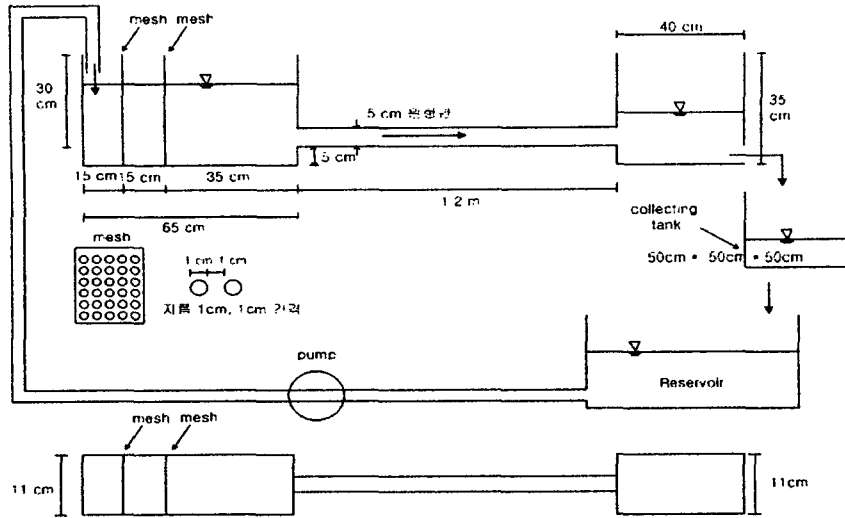


그림 2. 원형암거 실험장치의 모식도

5. 실험 결과 및 분석

수리모형실험을 통해 획득된 자료는 3회 이상의 검증된 반복 실험과 필터링을 통해 분석 자료로 선정되었다. 먼저 원형 실험에 수행된 7가지 case의 모든 데이터 값을 이용하여 무차원 형태의 그래프를 도시하였으며 유입구의 개수로서 관수로 흐름으로의 변화를 나타내는 상수 α 는 1.22로 나타났다. 유입수두-유량 관계식의 산정에는 이 상수 α 값을 기준으로 유입구가 만수된 경우와 만수되지 않은 경우 두 영역으로 구분하여 식을 산정하였다.

$$Q = 0.399 g^{0.5} H_w^{1.723} D^{0.777} \quad , H_w/D \leq 1.22 \quad (2)$$

$$Q = 0.475 g^{0.5} H_w^{0.805} D^{1.695} \quad , H_w/D > 1.22 \quad (3)$$

원형 실험 결과와 마찬가지로 정사각형 암거도 정사각 단면의 한변의 길이를 D 라고 하고 3가지 case의 모든 데이터 값을 이용하여 무차원 형태의 그래프로 도시하였으며 이때의 상수 α 는 1.3 이었고 α 값을 기준으로 유입구가 만수된 경우와 만수되지 않은 경우 두 영역으로 구분하여 식을 산정하면 다음과 같다.

$$Q = 0.49 g^{0.5} H_w^{1.505} D^{0.995} \quad , H_w/D \leq 1.3 \quad (4)$$

$$Q = 0.57 g^{0.5} H_w^{0.856} D^{1.644} \quad , H_w/D > 1.3 \quad (5)$$

수리모형실험을 통해 산정된 본 연구의 원형 암거에 대한 Inlet control 흐름에서의 유입수두-유량 관계식을 그림 3과 같이 기존의 실험식 및 Design chart의 nomograph와 비교하였다. 결과 분석에서 기존의 실험식으로는 Dasika(1995)의 회귀식을 이용하였으며 Design chart의 nomograph에 관한 식은 Australia의 Wollongong University의 Boyd(1987)가 nomograph를 일반화한 식을 이용하였다. 본 원형 실험에서의 동일한 유입수두(H_w)에 대한 통과 유량 값이 nomograph에서의 값과 구간에 따라 상이함을 알 수 있으며 $H_w/D > \alpha$ 조건에서 그 차이가 더욱 두드러짐을 알 수 있다. 또한 결과 값들의 차이 또는 데이터가 분산되는 원인에 대해 규명하기 위해 원형 암거의 해석에 지금까지 고려되지 않은 유입수로 폭(W)과 암거단면 폭(D)의 비(D/W)에 대해 그림 4와 같이 고찰해 보았다. 추가로 실시된 3가지 case에 대한 결과 값들을 분석하여 각각의 회귀식을 산정하고 비교하였으며 3가지 case는 D/W 의 값이 0.1, 0.2 그리고 0.5인 경우이다. 또한 본 논문의 일반화 식에 D/W 의 새로운 변수를 적용시키기 위해 각각의 산정된 회귀식을 이용하여 D/W 에 대한 계수 값(k_d)을 산정하고 이에 대한 회귀식을 제시하였다.

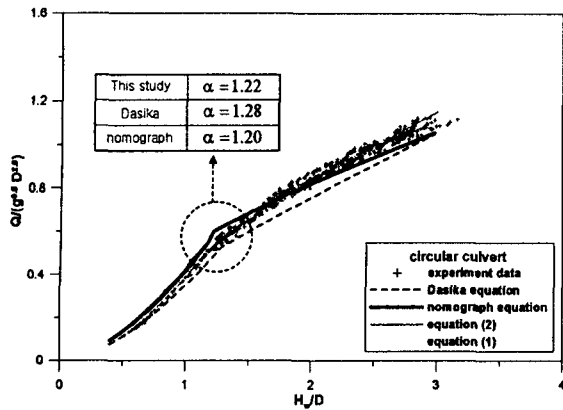


그림 3. Inlet control 상태에서의 유량산정식 비교

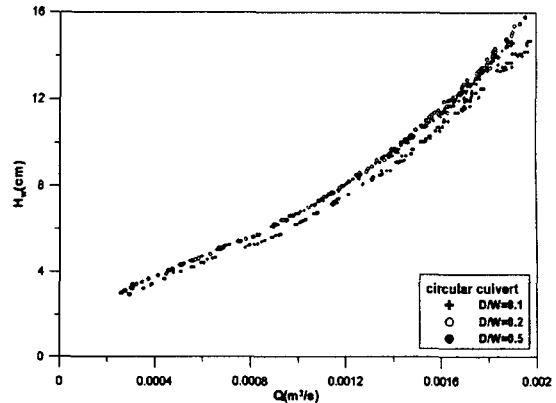


그림 4. D/W 에 따른 $H_w - Q$ 의 관계

6. 결 론

본 연구는 수리모형실험을 통해 기저단면이 입구부에 존재하며 비교적 흐름에 관련된 변수가 적은 Inlet control 상태에서의 유입수두와 유량과의 관계식을 원형 암거와 정사각형 암거에 대해 각각 일반화하였고 실험 결과와 nomograph와의 차이를 확인하였으며 그 결론은 다음과 같다.

첫째, 차원 해석과 이론식을 바탕으로 Inlet control 상태에서의 유입수두와 유량과의 관계식을 원형 암거와 정사각형 암거에 대해 각각 도출하였다.

둘째, 본 연구에서 제시한 식과 nomograph를 일반화한 식을 비교한 결과 α 값은 본 연구의 실험식에서는 1.22, Dasika(1995)의 실험식에서는 1.28, nomograph의 일반화된 식에서는 1.20 임을 알 수 있었으며 유량 값에 대한 차이는 $H_w/D \leq \alpha$ 범위에서는 동일 유입수두에 대해 유량 값이 nomograph 보다 전반적으로 적게 산정됨을 알 수 있었으며 $H_w/D > \alpha$ 범위에서는 구간별로 유량 값이 nomograph 보다 적거나 혹은 크게 나타남을 알 수 있었다. 차이는 $H_w/D > \alpha$ 영역에서 더 크게 발생되었다.

셋째, 원형 암거 실험의 결과 분석을 통해 유입수두의 단면 폭과 암거 단면 폭(지름)의 비(D/W)에 따라 동일 유입수두 값에서 유량차가 최대 10% 정도 발생됨을 알 수 있었다.

마지막으로 본 연구를 통해 일반화된 식에 이러한 D/W 에 대한 새로운 변수를 적용하기 위해 D/W 에 대한 계수 k_d 를 산정하고 회귀분석을 통하여 다음과 같은 유입수두-유량과의 관계식을 제시하였다.

$$Q = 0.399 k_d g^{0.5} H_w^{1.723} D^{0.777} \quad , \quad \text{for } H_w/D \leq 1.22 \quad (6)$$

$$Q = 0.475 k_d g^{0.5} H_w^{0.805} D^{1.695} \quad , \quad \text{for } H_w/D > 1.22 \quad (7)$$

$$\text{where } k_d = -0.196 (D/W) + 1.064$$

7. 참고문헌

- 1) 윤용남 (1989), 수리학-기초와 응용, 청문각, pp.450-462.
- 2) 한국도로공사 (1991), 도로배수계획.
- 3) Boyd, M. J. (1987), "Generalised head-discharge equations for culverts.", 4th nat. Local Government Engrg. Conf., Local Government Engrs. Assoc.(LGEA), pp.161-165.
- 4) Chanson, H. (1999), The Hydraulics of Open Channel Flow, ARNOLD
- 5) Dasika, B. (1995), "New approach to design of culverts", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 121(3) pp.261-264.
- 6) Federal Highway Administration (1985), Hydraulics Design of Highway Culvert.