

선형 배수로에 대한 부등류 해석

Varied Flow Analysis for Linear Drainage Channels

구혜진* / 전경수**

Ku, Hye Jin / Jun, Kyung Soo

Abstract

The present study was carried out to examine flow properties in linear drainage channels such as road surface drainage facilities. The finite difference formulation for the varied flow analysis was solved for flow profiles in the channels. Starting the first step at the control section, the Newton-Raphson method was applied for producing numerical solutions of the equation. We considered two types of linear drainage channels, a channel with one outlet at downstream end and a channel with two outlets at both ends. Moreover, the flow analysis for various channel slopes was performed. However, we considered channels with the two outlets of slopes satisfying the condition that the both ends are the control section. The maximum of those slopes was decided from the relation between the channel slope and the location of control section. The flow of a channel with one outlet was calculated upward and downward from the control section existing in channel or upward from the control section at downstream end. The flow of a channel with two outlets at both ends were calculated for upstream and downstream channel segments divided by the water dividend, respectively and the flow analysis was completed when the water depth at the water dividend calculated from upstream end was equal to that calculated from downstream end. If the slope was larger than the critical slope, the channel with two outlets was likely to behave like the channel with one outlet. The maximum water depth was investigated and compared with that calculated additionally from the uniform flow analysis. The uniform flow analysis was likely to lead a excessive design of a drainage channel with mild slope.

keywords : road surface drainage, varied flow, water dividend, linear drainage channel, control section, channel slope

요지

본 연구는 노면배수시설에 이용될 수로 양단에 유출구를 가지며 유량이 연속적으로 증가하는 선형 배수로의 부등류 흐름의 해석 방법을 정립하기 위하여 수행되었다. 지배 방정식으로서 유한 차분 형태의 대수방정식을 사용하여 지배단면에서의 수심 값을 경계조건으로 Newton-Raphson 방법에 의하여 수면곡선을 계산하였다. 하류단에 유출구를 갖는 수로와 수로 양단에 유출구를 갖는 수로를 고려하고, 다양한 종단경사에 대하여 흐름 해석을 수행하였다.

* 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학과 BK21사업단 연구교수

Research Associate Prof., Global Leaders in Construction Engineering, Dept. of Civil, Envir. and Arch. Engrg., Korea Univ., Seoul, 136-701, Korea

(e-mail: skyjina@skku.edu)

** 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수

Prof., Dept. of Civil and Envir. Engrg., Sungkyunkwan Univ., Suwon 440-746, Korea

(e-mail: ksjun@skku.edu)

단, 양단에 유출구를 갖는 수로의 경우 양단을 지배단면으로 만드는 임계 종단경사를 조사하여 이보다 작은 종단경사에 대한 흐름 해석을 수행하였으며, 임계경사는 지배단면의 위치와 종단경사의 관계로부터 결정하였다. 하류단에 하나의 유출구를 갖는 수로의 경우 수로 상에 존재하는 지배단면의 위치를 조사하여 그 지점을 기준으로 상류 및 하류 방향으로 수심을 계산한다. 반면 양단에 유출구를 갖는 수로의 경우 지배단면이 수로 양단이라면 분수계를 가정하여 분수계를 기점으로 구분되어지는 상류측 및 하류측 수로에 대한 흐름 해석을 수행하고, 상류단에서 분수계 방향으로 그리고 하류단에서 분수계 방향으로 계산된 분수계 지점의 두 수심이 동일할 때까지 흐름 계산을 반복한다. 흐름 계산 결과 양단에 유출구를 갖는 수로가 임계경사보다 큰 경사로 설치된 경우에는 하류단에 유출구를 갖는 수로의 흐름 거동과 유사하는 것으로 판단되었다. 노면배수시설 설계의 중요한 요소인 최대수심은 종단경사가 작을 때 등류 해석으로 계산된 값이 부등류 해석보다 크게 산정되었으며, 이는 종단경사가 작을 때 등류 해석을 기반으로 한 설계가 과대설계가 되기 쉽다는 것을 의미한다.

핵심용어 : 노면배수, 부등류, 분수계, 선형 배수로, 지배단면, 종단경사

1. 서 론

노면배수는 도로부지내(노면 및 비탈면)에 강우에 의해 발생한 우수를 배제하는 것을 의미한다. 전형적인 노면배수 시스템은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 노면에서 발생한 강우로 인한 유출수는 수로(다이크 측구)로 유입되고, 수로에 유입된 유량은 하류측으로 갈수록 증가하게 된다. 즉, 노면에 내리는 우수의 배수를 위한 배수로는 연속적으로 유입되는 횡유입량에 의하여 유량이 선형적으로 증가하는 선형 배수로(linear drainage channel)가 된다. 길어깨를 두지 않고 노면의 우수가 종배수로로 연속적으로 유입하게 하는 경우에는 종배수로 자체가 선형 배수로가 된다. 노면으로부터 유입된 유량은 수로의 통수능을 초과하지 않도록 적절한 간격으로 유출구(outlet)를 두어 종배수로 등으로 배수시키게 되는데, 이때 유출구 사이의 간격(outlet spacing)이 노면 배수시설의 설계변수가 된다.

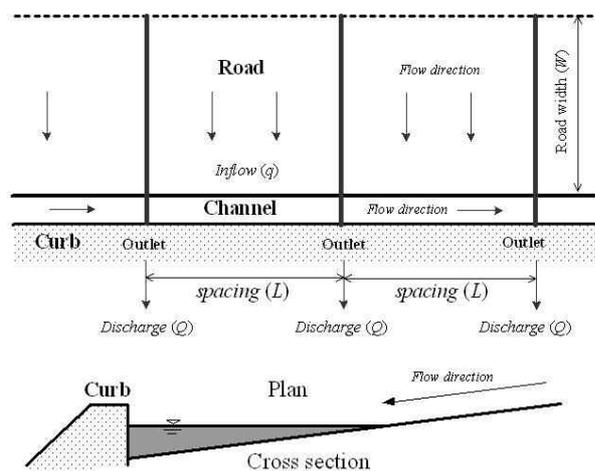


Fig. 1. A Conventional Drainage System (Naqvi, 2003)

노면배수시설과 관련된 국외연구로는 주로 수리학적 실험들을 통해 유입구(Grate Inlet)의 차집효율을 분석하는 연구들이 수행되었다(Burgi and Grober, 1977; Pugh, 1980; Brown *et al.*, 1996; Mays, 2001). Wong(1994) 및 Wong and Moh(1997)는 측구의 유량, 노면 종경사, 측구 횡경사와 지역상수를 이용하여 차집 유량을 산정하는 경험식을 제시하고, 다양한 조건하에서 차집유량의 변화를 조사하였다. 국내에서도 집수정의 덮개 형식 및 간격, 측구의 횡경사, 도로의 종방향 경사 등에 따른 차집효율에 관한 실험적 연구들이 수행되었으며, 이를 기반으로 집수정의 규모와 설치간격의 적정성이 분석되었다(이상국, 2002; 류택희, 2002; 임동환, 2003). 또한 이종태 등(2003)은 부등류 유출해석 모형(SWMM의 RUNOFF)으로 산정한 임계지속시간에 운동파식 및 Kerby 식에 의한 도달시간이 근사하도록 상관식으로 보정하고, 이를 합리식에 적용함으로써 적용 우수 유출량을 산정하는 방법을 제안하였으며, 추가적으로 도로 노면의 횡·종단 경사, 도로폭 등과 같은 형상에 따른 유출량의 변화를 분석하였다.

선형 배수로에서 흐름은 유량이 연속적으로 증가하는 부등류 임에도 불구하고, 지금까지 수행된 연구들은 수로의 흐름을 등류 이론을 기반으로 해석해왔으며, 또한 국내의 노면배수시설들을 설계하는데 있어서 등류 해석만이 이용되고 있는 실정이다. 이러한 등류 해석을 기반으로 한 설계는 모든 배수시설물을 최대유량을 기준으로 설계되도록 하고 있어 과대 설계하는 경향이 있지만, 유량이 변화하는 경우에 대한 부등류 해석은 유량이 일정한 흐름에 비하여 매우 복잡하기 때문에 부등류 해석에 기초한 노면배수 설계는 실용화되어 있지 않는 실정이다(건설교통부, 2003). 반면 부등류 해석 이론은 그러한 설계가 가능할 만큼 충분히 연구, 정립되어

있다(Chow, 1959; Escarameia *et al.*, 2001; Naqvi, 2003).

본 연구는 부등류 해석을 기반으로 한 노면배수시설의 설계 모형을 개발하기 전에 노면배수시설의 선형 배수로의 흐름 거동을 살펴보기 위하여 수행되었다. 그 선형 배수로는 적절한 간격으로 유출구(outlet)를 두어 설치되므로 수로 양단에 유출구를 갖는 수로로 볼 수 있다. 이러한 선형 배수로에 대한 흐름 모의를 수행하기 전에 보다 단순한 구조를 갖는 수로 하류단에 하나의 유출구를 갖는 선형 배수로를 먼저 고려하여 흐름 거동을 살펴보고, 다양한 종단경사를 고려하여 흐름 특성의 변화 및 수로에서 발생하는 최대수심을 조사하였다. 아울러 부등류 해석으로 얻어진 최대수심을 등류 해석으로 얻어진 결과와 비교하여, 현재의 등류 해석을 기반으로 한 노면배수시설의 설계의 문제점을 확인하고 설계기법의 개선 방향을 설정하였다.

2. 선형 배수로 부등류 해석모형

2.1 일반적인 흐름 형태 및 해석과정

Fig. 1의 선형 배수로에서 수로로 유입되는 총유량(Q)은 Eq. (1)을 이용하여 산정할 수 있다.

$$Q = q_i L \quad (1)$$

여기서 q_i 는 수로 단위길이당 횡유입 유량이며, L 은 수로의 길이이다.

하류단에 하나의 유출구가 있는 선형 배수로의 경우, 수로로 유입된 물은 모두 하류단을 통하여 유출되며 그 유출되는 유량은 Eq. (1)의 총유량과 같다. 선형 배수로의 흐름해석에서 수심 계산의 시작이 되는 기지점, 즉 지배단면의 위치 및 그 지점의 수심인 한계수심은 미리 산정하여야 한다. 지배단면의 위치는 수로의 종단경사에 따라 달라지는데, 수평으로 놓여진 수로의 경우 비에너지가 최소가 되는 지배단면은 수로의 끝단이 되며, 어떤 임계경사에 도달하기 전까지 지배단면은 변하지 않는다. 그러나 종단경사가 어떤 임계값 보다 커지면 지배단면은 수로의 상류측으로 이동하여 수로 내에 존재하게 된다. 지배단면이 수로 내에 존재하는 경우, 흐름 모의는 지배단면의 위치 및 수심을 결정한 후 그 지배단면을 기준으로 상류 및 하류 방향으로 각각 수행하게 된다. 이 때 수로 흐름은 상류측에 상류(sub-critical flow), 하류측에 하류(super-critical flow)가 혼재하여 나타난다. 수심 계산을 위한 지배방정식과 지배단면의 위치 및 수심을 결정하는 방법은 다음 절

에 기술하였다.

노면배수시설과 같이 상류단과 하류단에 각각 한 개씩의 유출구를 갖는 선형 배수로의 경우, 수로로 유입된 물은 상류단 또는 하류단을 통하여 유출되므로 유량이 분기되는 지점(분수계, water dividend)에 따라 상류단 및 하류단으로 유출되는 유량의 비율이 달라진다. 이러한 수로 양단에 유출구를 갖는 선형 배수로 내의 일반적인 흐름 형태는 Fig. 2에 나타나 있으며, 분수계 지점(O 지점)을 기준으로 상류측으로 유입된 우수는 상류단(A 지점)을 통하여, 하류측으로 유입된 우수는 하류단(B 지점)을 통하여 유출된다. 수로 양단으로 유출되는 유량 및 총유량은 다음 식들과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_A = (1 - \alpha)q_i L \quad (2)$$

$$Q_B = \alpha q_i L \quad (3)$$

$$Q = Q_A + Q_B = q_i L \quad (4)$$

여기서 Q_A 는 상류단을 통하여 유출되는 유량, Q_B 는 하류단을 통하여 유출되는 유량, Q 는 수로로 유입되는 총유량 또는 유출되는 총유량이며, α 는 분수계의 위치를 나타내는 변수이다.

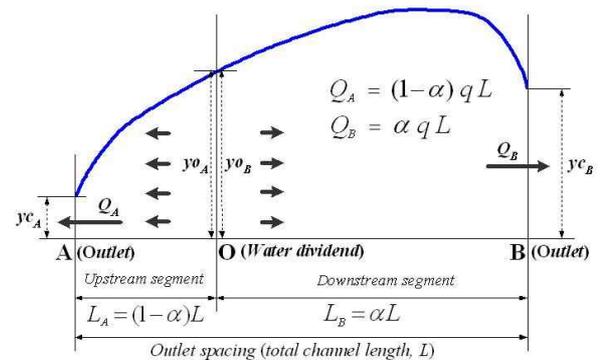


Fig. 2. Flow Depth Profile for a Drainage Channel with Outlets at Both Ends(Naqvi, 2003)

수로 양단에 유출구를 갖는 선형 배수로의 종단경사가 영이라면 수면곡선은 수로 중앙에 위치한 분수계를 중심으로 좌우 대칭이 되며 최대수심은 수로 중앙에서 발생한다. 그러나 종단경사가 커짐에 따라 하류측 유출구를 통하여 유출되는 수량이 증가하게 된다. 따라서 분수계는 수로 중앙보다 상류측으로 이동하게 되고, 최대수심 발생지점은 하류측으로 이동하게 된다. 그러므로 노면배수시설처럼 수로 양단에 유출구를 갖는 선형 배수로의 흐름을 모의하기 위해서는 분수계의 위치를

나타내는 α 의 값을 결정하는 과정이 포함되어야 한다.

본 연구에서는 실용적인 측면을 고려하여 수로 양단이 지배단면이 되는 수로만을 고려하였다. 이러한 선형 배수로에 대한 흐름 해석은 우선 α 를 가정하고 한계수심을 갖는 양단으로부터 분수계까지의 수심을 각각 계산한다. 다음 단계에서 상류단으로부터 하류 방향으로 축차적으로 계산된 분수계 지점의 수심(Fig. 2의 y_{0A})과 하류단으로부터 계산된 분수계 지점의 수심(Fig. 2의 y_{0B})이 일치하면 흐름계산이 종료되며, 그렇지 않은 경우에는 α 의 값을 다시 가정하여 선형 배수로에 대한 부등류 계산을 반복한다. 반복 계산에서 가정되는 α 는 이분법적 방법으로 결정하였으며, y_{0A} 과 y_{0B} 의 차이가 0.01 mm 이하로 되면 계산을 종료하였다. 모형의 계산 과정에 대한 전체적인 흐름도는 Fig. 3에 제시하였다.

2.2 지배방정식 및 수치해법

단면형과 종단경사가 일정한 선형 배수로 흐름에 대한 지배 방정식은 운동량 보존법칙으로부터 다음과 같은 미분방정식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f - (2Q/gA^2)(dQ/dx)}{1 - (Q^2/gA^2D)} \quad (5)$$

여기서 Q 는 유량, y 는 수심, A 는 통수단면적, D 는 평균수심, S_o 는 수로 종단경사, g 는 중력가속도이며, x 는 종방향 위치를 나타내는 변수이다. S_f 는 마찰경사로서 Manning의 식으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_f = \frac{n^2 Q^2}{A^2 R^{4/3}} \quad (6)$$

여기서 n 은 Manning의 조도계수이고 R 은 동수반경(m)이다. Eqs. (5) and (6)에서 유량과 유량의 공간변화율은 기지의 값이고, 통수단면적, 평균수심 및 동수반경은 수심의 함수이므로, Eq. (5)는 수심에 관한 1계 상미분 방정식으로서 지배단면에서의 수심값을 경계조건으로 하여 상미분 방정식에 대한 전형적인 수치해법인 4계의 Runge-Kutta 방법에 의하여 각 지점에서의 수심을 계산할 수 있다(Naqvi, 2003).

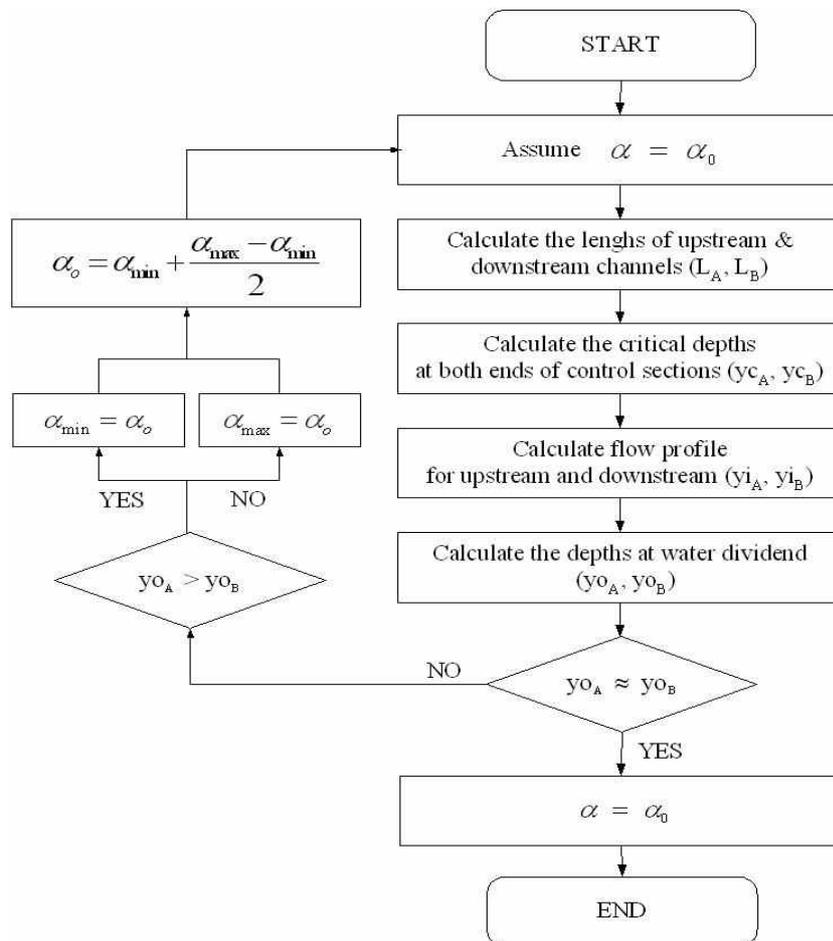


Fig. 3. Flow Chart for a Drainage Channel with Outlets at Both Ends

선형 배수로 흐름에 대한 지배 방정식으로서 Eq. (7)과 같은 유한 차분 형태의 대수방정식을 사용할 수도 있다.

$$\frac{1}{g}(Q_2 V_2 - Q_1 V_1) - \frac{1}{2} S_o (A_1 + A_2) dx + \frac{1}{2} (A_1 S_{f1} + A_2 S_{f2}) dx + \frac{1}{2} (A_1 + A_2) (y_2 - y_1) = 0 \quad (7)$$

여기서 dx 는 지점 1과 2 사이의 거리이며, V 는 단면평균 유속(m^2/s)이다. 아래첨자가 1인 변수들은 기지의 값을 의미하며, 아래첨자 2인 변수들은 모두 수심의 함수로서 표현이 가능하다. 따라서 Eq. (7)은 y 에 대한 비선형 방정식이 되며, Newton-Raphson 방법에 의하여 해를 구할 수 있다(Rhodes, 1998; Naqvi, 2003). 수로 내 각 지점에서의 수심은 지배단면의 수심을 기지의 값으로 하여 Eq. (7)을 축차적으로 풀어서 계산할 수 있다.

2.3 지배단면의 위치 및 수심 결정

수면곡선의 계산에서 지배단면의 위치와 그 지점의 수심은 기지값으로 주어져야 한다. 즉, 어떤 수로내의 수심을 계산하기 위해서는 지배단면의 위치 및 수심 결정이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 우선 고려하고 있는 선형 배수로에 대하여 지배단면의 위치와 종단경사의 관계를 구하고, 그 관계로부터 지배단면의 위치를 결정하였다. 즉, 수로상의 어떤 지점을 지배단면으로 만드는 종단경사를 구하는 식을 이용하여 수로상의 각 지점을 지배단면이 되도록 하는 종단경사를 각각 구하고, 이러한 지배단면의 위치와 종단경사의 관계로부터 고려하고 있는 수로의 종단경사에 대한 지배단면의 위치를 결정하였다.

선형 배수로에 대하여 수로의 어떤 지점이 지배단면이 되도록 하는 종단경사를 구하는 식은 다음과 같이 유도할 수 있다. 지배단면이 되는 지점($x = x_c$)에서 운동량 방정식의 미분방정식인 Eq. (5)의 분모는 0이 되므로, 다음 식이 성립한다.

$$V^2 = \frac{Q^2}{A^2} = gD \quad (8)$$

$$\frac{Q^2}{A^2} = g \frac{A}{T} \quad (9)$$

$$A = \left(\frac{Q^2 T}{g} \right)^{1/3} \quad (10)$$

또한 Eq. (5)로부터 다음 Eq. (11)이 성립한다.

$$S_o - S_f = \frac{2Q(dQ/dx)}{gA^2} \quad (11)$$

선형 배수로에서 유량은 x 가 증가함에 따라 선형적으로 증가하며, $x = 0$ 인 지점에서 측면에서 유입되는 유량은 없으므로 유량변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Fig. 2 참조).

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{Q}{x} = q_i \quad (12)$$

Eq. (12)를 이용하여 Eq. (11)를 정리하면 다음과 같다.

$$S_o - S_f = \frac{2(q_i x)q_i}{gA^2} = \frac{2q_i^2 x}{gA^2} \quad (13)$$

Eq. (10)과 (12)로부터 A^2 은 Eq. (14)와 같이 나타낼 수 있으며, 이를 이용하여 Eq. (13)을 정리하면 Eq. (15)가 성립한다.

$$A^2 = \frac{Q^{4/3} T^{2/3}}{g^{2/3}} = \frac{q_i^{4/3} x^{4/3} T^{2/3}}{g^{2/3}} \quad (14)$$

$$S_o - S_f = \frac{2q_i^{2/3}}{g^{1/3} T^{2/3} x^{1/3}} \quad (15)$$

Eq. (15)로부터 수로 내 어떤 지점(x)이 지배단면이 되도록 하는 종단경사는 Eq. (16)과 같이 나타낼 수 있다. 이 때 아래첨자 x_c 는 임의의 지점(x)이 지배단면이 되는 경우를 의미하며, $S_{o,x}$ 는 그 때 요구되는 종단경사이다.

$$S_{o,x} = S_{f,x} + 2 \left(\frac{q_i^2}{g T_{c,x}^2 x} \right)^{1/3} \quad (16)$$

여기서 x_c 지점은 지배단면으로서 수심은 한계수심이 되므로 다음 Eq. (17)이 성립한다.

$$\begin{aligned} \frac{q_i^2}{g T_{c,x}^2 x} &= \frac{Q^2}{g T_{c,x}^2 x^3} = \frac{V_{c,x}^2 A_{c,x}^2}{g T_{c,x}^2 x^3} \\ &= \frac{V_{c,x}^2 D_{c,x}^2}{g x^3} = \frac{D_{c,x}^3}{x^3} \end{aligned} \quad (17)$$

Eq. (17)를 이용하여 Eq. (16)을 정리하면 다음과 같다.

$$S_{o,x} = S_{f,x} + 2 \frac{D_{c,x}}{x} \quad (18)$$

여기서 마찰경사는 Eq. (19)를 이용하여 산정할 수 있다.

$$S_{f,x} = \frac{n^2 g D_{c,x}}{R_{c,x}^{4/3}} \quad (19)$$

그러므로 주어진 선형 배수로에서 수로의 임의 지점이 지배단면이 되도록 하는 종단경사 및 마찰경사는 Eq. (18) 과 (19)를 이용하여 산정할 수 있다. 이 때 수로 각 지점이 지배단면이 되는 가정을 만족시키는 종단경사를 산정하게 되므로 Froude 수는 1이 된다.

지배단면의 수심인 한계수심(y_c)은 다음 식을 만족하여야 한다. 여기서 A_c 와 T_c 는 한계수심인 y_c 의 함수로 나타낼 수 있다. 따라서 Eq. (20)은 y_c 에 대한 비선형 방정식이 되며, Newton-Raphson 방법에 의하여 한계수심을 구할 수 있다(Chaudhry, 1993).

$$F = gA_c^3 - Q^2 T_c = 0 \quad (20)$$

사다리꼴 수로인 경우 A_c 와 T_c 는 다음과 같다.

$$A_c = [B + 0.5(m_1 + m_2)y_c]y_c \quad (21)$$

$$T_c = B + (m_1 + m_2)y_c \quad (22)$$

여기서 B는 수로 바닥폭, y_c 는 한계수심, m_1 과 m_2 는 단면의 측면경사이다.

3. 모형의 적용

수로 하류단에 하나의 유출구를 갖는 수로 및 수로 양단에 유출구를 갖는 수로에 대하여 선형 배수로 부동류 해석을 수행하기 위해서는 선형적으로 지배단면의 위치를 결정하여야 한다. 수로 하류단에 하나의 유출구를 갖는 수로에 대해서는 지배단면이 하류단이 되는 경우뿐만 아니라 수로 내에 위치하는 경우에 대한 흐름 해석도 수행하였으며, 수로 양단에 유출구를 갖는 수로에 대해서는 지배단면이 수로 양단인 경우의 흐름 해석을 수행하였다. 지배단면의 위치는 수로의 종단경사를 다양하게 적용함으로써 변화시켰다. 아울러 노면배수시설의 설계에 있어서 중요한 요소인 최대수심을 조사하

고, 이를 Manning의 평균유속 공식을 이용한 등류 해석으로 얻어진 결과와 비교하였다. 흐름해석은 임의로 구성된 하나의 노면배수시설물을 대상으로 하였으며, 횡 유입량 (q_i)은 0.4444 l/s/m, 수로 길이는 50 m, 조도계수는 0.015, 사다리꼴 수로 단면의 바닥폭은 0.15 m, 단면의 양쪽 측면경사는 0.5이라고 설정하였다.

3.1 지배단면 위치의 결정

양단에 유출구를 가지는 수로인 경우 분수계를 기준으로 상류측 및 하류측의 수로에 대하여 흐름 해석을 각각 수행하게 되므로, 지배단면의 위치에 따른 종단경사 및 마찰경사의 변화는 하류단에 하나의 유출구를 가지는 수로만을 고려하여 조사하였다. 즉, 50 m의 하류단에 유출구를 가지는 선형 배수로를 대상으로 지배단면의 위치(x_c , 상류단으로부터 지배단면까지의 거리)를 0.01 m 간격으로 변화시켜 가며, Eq. (18) 및 Eq. (19)를 이용하여 수로의 임의 지점이 지배단면이 되도록 만드는 종단경사 및 마찰경사를 구하였다(Fig. 4 참조). 지배단면이 상류측에 위치할수록(x_c 가 0에 근접할수록) 종단경사와 마찰경사는 점차 증가하며 거의 상류단이 되면 경사는 무한대로 커진다. 반면 지배단면이 하류측에 위치할수록(x_c 가 증가할수록) 경사는 감소하며 그 변화량은 점차 감소한다. 예로서 지배단면의 위치가 5 m에서 0.1 m로 변할 때 종단경사는 1.96에서 5.88로 증가하며, 지배단면이 5 m에서 50 m로 변할 때 종단경사는 1.96에서 1.23으로 감소한다.

Fig. 4의 종단경사는 수로 끝단이 지배단면이 되도록 하는 종단경사의 임계값을 수로 길이($L = x$)별로 나타낸 것이기도 하다. 예로서 50 m의 수로가 1.23 %보다 작은 종단경사로 설치되면 수로 끝단이 지배단면이 되며, 10 m의 수로가 1.66 %보다 작은 종단경사로 설치되면 수로 끝단이 지배단면이 된다. 이 경우 수로 내 수

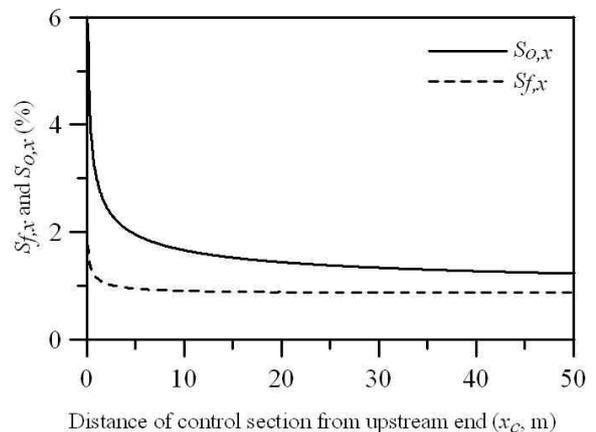


Fig. 4. Channel and Friction Slopes for Various Control Sections

심은 수로 끝단을 시작점으로 하여 상류 방향으로 축차적으로 계산하게 된다. 만약 각 수로가 그러한 임계경사보다 크게 설치된다면 수로 내에 존재하는 지배단면을 시작점으로 하여 상류 및 하류 방향으로 흐름 계산을 하여야 한다.

3.2 하류단에 유출구를 갖는 선형 배수로

본 절에서는 0 %, 0.2 %, 0.8 %, 1.23 %, 2.0 %, 5.0 %의 경사로 설치된 50 m의 수로에 대하여 흐름해석을 수행하였다. 각 종단경사에 따른 지배단면의 위치 및 Eq. (20)을 만족시키는 한계수심은 Table 2와 같다. 1.23 %이하의 종단경사에 대한 지배단면은 하류단 지점($x = 50$ m)으로 동일하며, 그 지점의 한계수심은 114.39 mm으로 산정되었다. 종단경사가 그 임계경사보다 크다면 Fig. 4의 관계로부터 주어진 종단경사에 대한 지배단면의 위치를 결정할 수 있다. 2.00 %의 경우 지배단면은 상류단을 기준으로 4.58 m 떨어진 지점에 25.81 mm의 한계수심을 가지며, 5.00 %의 경우 0.17 m 떨어진 지점에서 2.95 mm의 한계수심을 가지는 것으로 조사되었다. 5.00 % 보다 큰 종단경사를 가지는 수로에 대해서 지배단면은 보다 상류측으로 이동하며 한계수심은 감소할 것이다.

앞서 기술한 바와 같이 하류단($x = 50$ m)이 지배단

면이 되기 위해서 종단경사는 1.23 %보다 작아야 하므로, 1.23 %보다 작은 경사의 경우 수심은 수로 끝단을 시작점으로 상류 방향으로 축차적으로 계산하고, 큰 경우에는 그 지점을 시작점으로 하여 상류 및 하류 방향으로 각각 계산한다. 이러한 하류단에 유출구를 갖는 선형 배수로에 대한 흐름해석 결과로서 수심, 수위 및 Froude 수의 분포를 Fig. 5, 6 및 7에 각각 나타내었다. Fig. 5의 수심 분포에서 종단경사가 0 %인 경우(수평 수로) 최대수심은 상류단에서 발생하며, 종단경사가 커짐에 따라 최대수심 발생위치는 하류측으로 이동하여 1.23 % 보다 큰 경우 최대수심은 하류단에서 발생하였다. 또한 수로 내에서 발생하는 최대수심은 종단경사가 커짐에 따라 작아졌다. 수로 끝단에서의 표고를 0.0으로 가정하여 표고에 수심을 더한 수위(EI)의 분포를 나타낸 Fig. 6에서, 최대수위는 종단경사에 상관없이 상류단 지점에서 발생하였다. 이는 수로로 유입된 우수가 모두 하류단을 통하여 유출됨을 의미한다. 경사를 갖지 않는 수평 수로의 경우 상류단과 하류단의 수위차는 수심의 차와 동일하다. Fig. 7에서 경사가 1.23 % 보다 작은 경우, Froude 수는 상류단 지점에서는 0이고 하류측으로 갈수록 지배단면인 하류단 지점에서는 1이 됨을 볼 수 있는데, 이는 수로 내의 모든 흐름이 상류임을 의미한다. 반면 1.23 % 보다 큰 경우, 지배단면(Froude = 1)을

Table 1. Locations of Control Section and Critical Depths to Various Channel Gradients

Channel gradient ($S_{o,x}$, %)	Distance of control sections from the upstream end (x_c , m)	Critical depth ($y_{c,x}$, mm)
0.0, 0.2, 0.8, 1.23	50.00	114.39
2.00	4.58	25.81
5.00	0.17	2.95

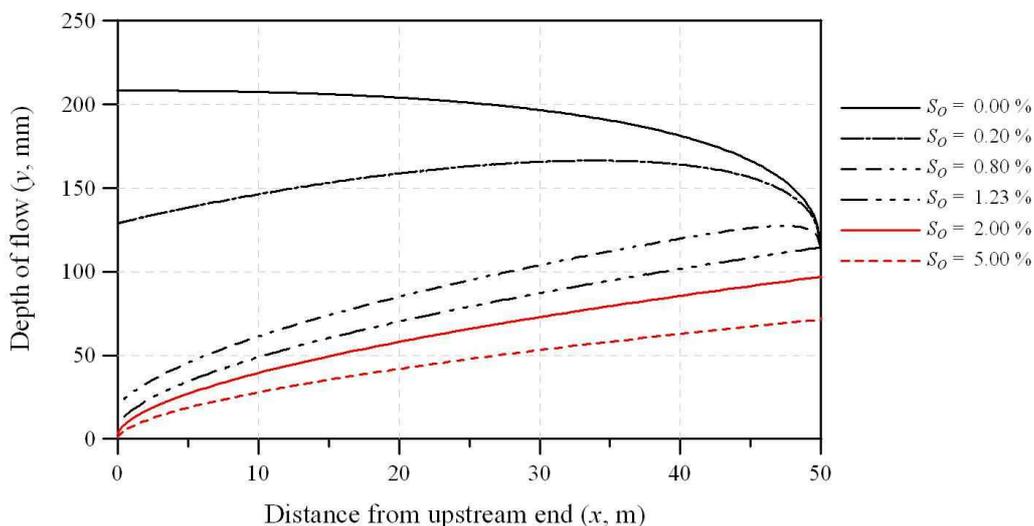


Fig. 5. Flow Depth Profiles for the Trapezoidal Channel with an Outlet at Downstream End

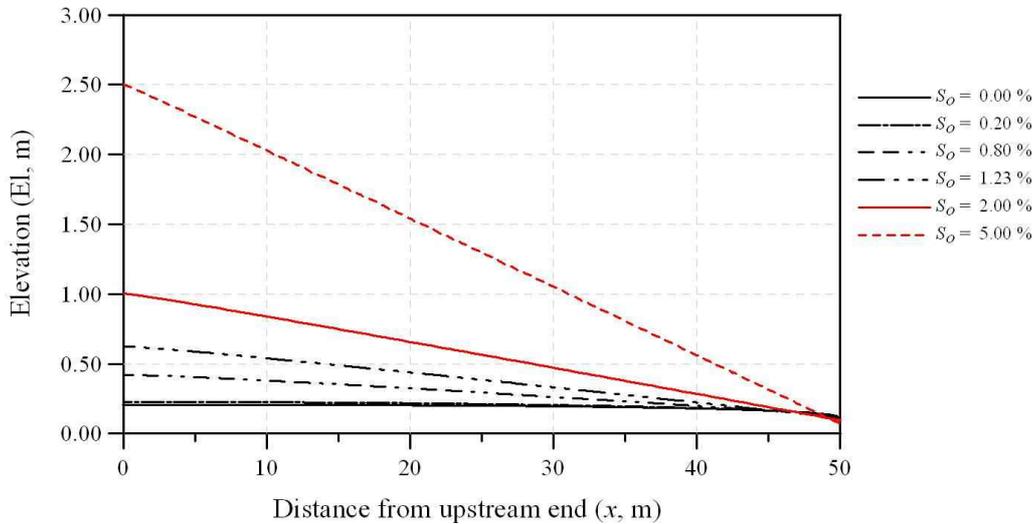


Fig. 6. Water Surface Profiles for the Trapezoidal Channel with an Outlet at Downstream End

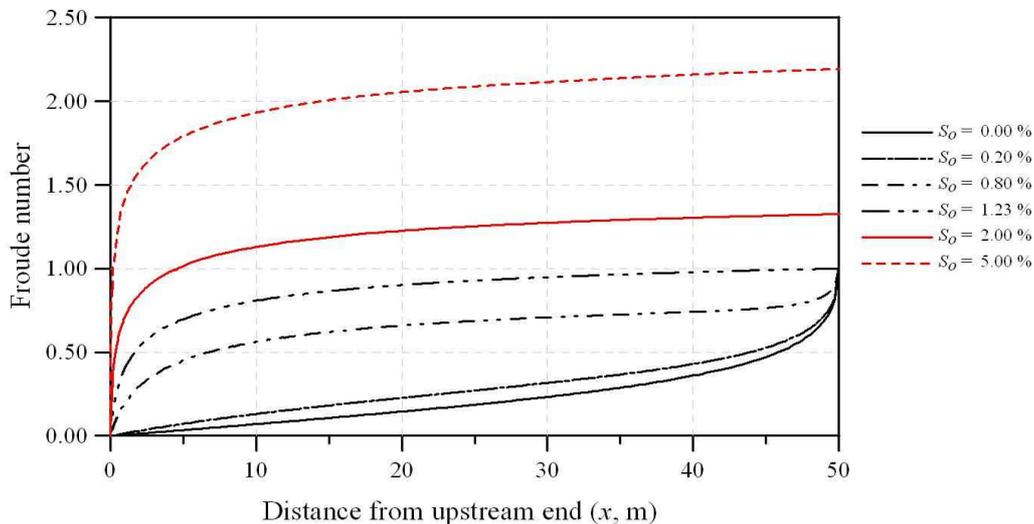


Fig. 7. Froude Number Profiles for the Trapezoidal Channel with an Outlet at Downstream End

기준으로 상류측에서는 1보다 작고 하류측에서는 1보다 큰 것으로 나타나고 있다. 즉, 종단경사가 임계경사인 1.23%보다 큰 경우 수로 내의 흐름은 상류와 사류가 혼재되어 나타나며, 또한 경사가 클수록 사류 구간이 상류측으로 확장됨이 잘 나타나고 있다.

3.3 양단에 유출구를 갖는 선형 배수로

3.2절과 마찬가지로 수로 양단에 유출구를 갖는 선형 배수로를 대상으로 수로의 종단경사를 변화시켜가며 흐름형태를 조사하였다. 단, 실용적인 측면을 고려하여 수로 양단이 지배단면이 되는 경우만을 고려하였다. 본 연구에서 대상으로 하는 50 m 수로의 경우 3.1절에서 논의된 임계경사 1.23% 보다 작은 종단경사만을 고려하여야 수로 양단이 지배단면이 되는 조건을 만족하게 된다. 이에 본 절에서는 0.0%, 0.20%, 0.80%, 1.23%의 경사를 가지는 양단에 유출구를 갖는 선형 배수로의

부동류 해석을 수행하였으며, 흐름해석 결과로서 수심, 수위 및 Froude 수의 분포를 Fig. 8, 9 및 10에 각각 나타내었다.

수로 내의 수심분포를 살펴보면(Fig. 8 참조) 종단경사가 0%인 경우 수심은 수로 중앙에서 최대가 되며, 이를 기준으로 좌우대칭을 이룬다. 종단경사가 증가할수록 하류단을 통하여 유출되는 유량의 수량이 증가함으로써 상류측 수심은 감소하며 하류측 수심은 증가한다. 이에 따라 최대수심 역시 하류측에서 발생하게 된다. Fig. 9에서 종단경사가 0%인 경우 수위 분포는 수심 분포처럼 수로 중앙을 기준으로 좌우대칭이 된다. 종단경사에 상관없이 최대수위 지점은 분수계 지점에서 발생하며, 분수계보다 상류측에서 유입된 우수는 상류단을 통하여, 하류측에서 유입된 우수는 하류단을 통하여 유출된다. 종단경사가 커질수록 최대수위 지점은 상류측으로 이동하며, 이는 하류단을 통하여 유출되는 유

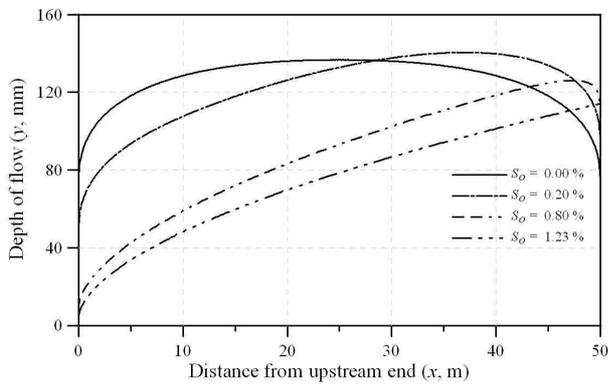


Fig. 8. Flow Depth Profiles for the Trapezoidal Channel with Outlets at Both Ends

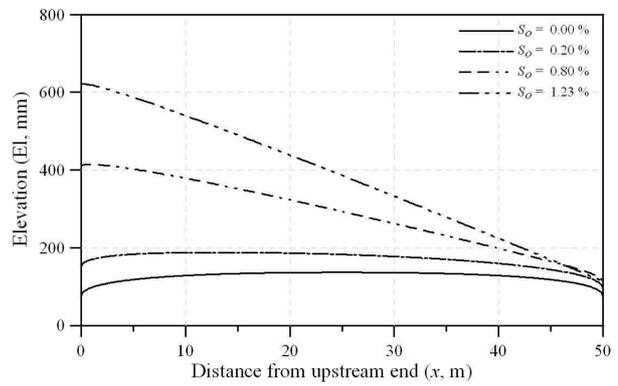


Fig. 9. Water Surface Profiles for the Trapezoidal Channel with Outlets at Both Ends

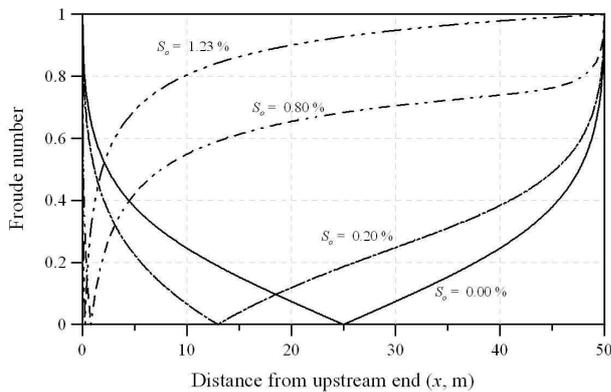


Fig. 10. Froude Number Profiles for the Trapezoidal Channel with Outlets at Both Ends

량이 증가함을 의미한다. Fig. 10에서 Froude 수는 종단경사에 상관없이 분수계 지점에서 0, 지배단면인 상류단 및 하류단 지점에서 1로서, 수로 내의 흐름은 모두 상류이다. 종단경사가 커질수록 분수계 위치가 상류측으로 이동하고 있음을 잘 나타내고 있다.

양단에 유출구를 갖는 선형 배수로에서 분수계를 기준으로 상류단 또는 하류단을 통하여 유출되는 유량에 기여하는 수로의 길이 및 한계수심은 종단경사에 따라 달라진다(Table 2 참조). 분수계를 기준으로 상류측에 해당하는 수로의 길이는 Fig. 2의 O 지점과 A 지점 사이 구간의 길이($L_A = (1-a)L$), 하류측에 해당하는 수로의 길이는 O 지점과 B 지점 사이 구간의 길이($L_B = aL$)를 의미한다. 이러한 하류측의 수로 길이는 종단경사가 커질수록 증가하며, 이에 따라 하류단으로 유출되는 유량이 증가함으로써 지배단면인 하류단 지점에서의 한계수심도 증가한다. 이와 반대로 상류측의 수로 길이는 종단경사가 커질수록 감소하므로, 지배단면인 상류단 지점에서의 한계수심은 감소한다. 즉, 수로 양단에 유출구를 갖는 수로의 경우 종단경사에 따라 분수계의 위치는 변하게 되고, 이에 따라 상류측 및 하류측에 해당하는 수로 길이가 변하여 각 유출구에 기여하는 유량이 달라짐으로써, 수로 양단의 한계수심은 Table 2에서 제시된 바와 같이 감소하거나 혹은 증가한다.

Table 2. Water Dividend, Upstream and Downstream Channel Lengths, Critical Depths for the Trapezoidal Channel with Outlets at Both Ends

Channel gradient ($S_{o,s}$, %)	α	Upstream		Downstream	
		channel length ($(1-a)L$, m)	Critical depth at $x_c = 0$ (mm)	channel length (aL , m)	Critical depth at $x_c = L$ (mm)
0.00	0.5000	25.00	75.43	25.00	75.43
0.10	0.6260	18.70	63.07	31.30	86.48
0.20	0.7404	12.98	50.21	37.02	95.68
0.50	0.9410	2.95	19.38	47.05	110.36
0.80	0.9838	0.81	8.30	49.19	113.30
1.00	0.9915	0.43	5.41	49.58	113.82
1.23	0.9953	0.24	3.63	49.77	114.08

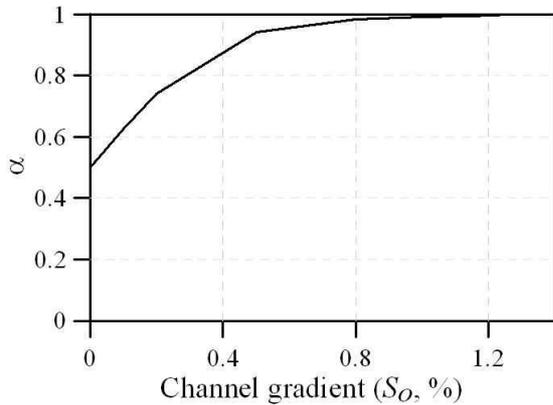


Fig. 11. Fraction of the Total Length(L) Contributing to the Flow through the Outlet at Downstream End(α)

분수계 지점의 위치를 나타내는 변수, a 의 종단경사에 따른 변화는 Table 2 및 Fig. 11에 나타내었다. 종단경사가 증가함에 따라 a 는 증가하였으며, 이는 분수계 지점이 상류측으로 이동함을 나타낸다. 종단경사가 0 %인 경우 분수계는 수로 중앙에 위치하게 되므로 a 는 0.5가 되며, 수면곡선은 분수계를 중심으로 좌우대칭이 된다. 이 경우에 상류단과 하류단의 지배단면에서의 한계수심은 75.43 mm로서, 하류단에 하나의 유출구를 갖는 25 m의 길이의 선형 배수로에 대한 하류단(지배단면)의 한계수심과 일치하게 된다. 종단경사가 1.23 %인 경우 a 는 0.9953으로서 거의 1에 근접하였으며, 하류단의 수심은 114.08 mm로서 하류단에 하나의 유출구를 갖는 50 m의 길이의 선형 배수로에 대한 하류단의 한계수심인 114.39 mm에 근접하였다. 그러므로 수로 양단에 유출구를 갖는 수로가 1.23 %이상의 종단경사로 설치될 경우, a 는 거의 1에 근접하게 되며 수로로 유입된 대부분의 물은 하류단을 통하여 유출될 것이다. 그러므로 분수계가 상류단에 거의 근접하게 되는 수로 양단에 유출구를 가지는 선형 배수로는 한단에 유출구를 갖는 수로처럼 거동할 것이다. 그러므로 종단경사가 임계경사 값보다 큰 경우 양단에 유출구를 갖는 수로일지라도 분수계의 위치를 결정하는 과정을 생략하고 한단에 유출구를 갖는 수로의 흐름해석을 수행하는 것이 합리적이라 할 수 있다.

3.4 최대수심의 비교

수로 하류단 및 양단에 유출구를 갖는 선형 배수로의 부등류 해석으로부터 산정된 최대수심은, Eq. (23)과 같은 Manning의 평균 유속공식을 이용한 등류 해석으로부터 산정된 최대수심과 비교하였다.

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_o^{1/2} \quad (23)$$

여기서 V 는 단면 평균유속, n 은 Manning의 조도계수, R 은 동수반경, S_o 는 수로 종단경사이다.

종단경사에 따른 최대수심의 변화는 Fig. 12에 나타내었다. 등류 해석 및 하류단에 유출구를 갖는 선형 배수로에 대하여 부등류 해석을 수행한 경우 종단경사가 증가할수록 최대수심은 감소하였지만, 양단에 유출구를 가지는 선형 배수로에 대하여 부등류 해석을 수행한 경우 최대수심은 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보였다. 등류 해석 결과로 얻어진 최대수심은 약 0.4 % 보다 작은 종단경사일 때는 하류단에 유출구를 갖는 수로에 대한 부등류 해석 결과로 얻어진 최대수심보다 크게 산정되었으며, 약 0.5 % 보다 작은 종단경사의 경우 양단에 유출구를 갖는 수로에 대한 부등류 해석 결과로 얻어진 최대수심보다 크게 산정되었다. 그러므로 수로의 종단경사가 작다면 등류해석을 기반으로 할 경우 과대 설계될 가능성이 있다. 특히 노면배수시설의 선형 배수로처럼 양단에 유출구를 갖는 수로를 등류 해석으로 설계한 경우 과대 설계될 가능성이 더욱 커진다. 반면 종단경사가 커질수록 등류 해석을 기반으로 산정된 수심이 작은 것으로 나타났으며, 부등류 해석과 큰 차이가 없으므로 최대수심만을 고려하여 설계할 경우 등류 해석도 유용한 것으로 판단되었다.

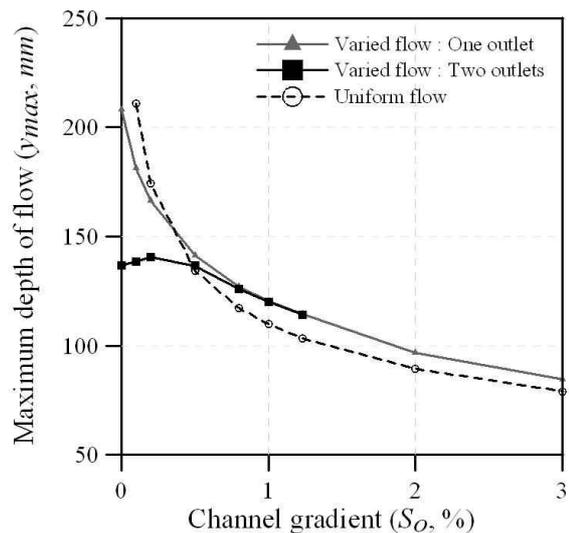


Fig. 12. Depth of Uniform Flow and Maximum Depth of Flow in a Trapezoidal Channel with One or Two Outlets

양단에 유출구를 갖는 수로에서 임계경사인 1.23 %

이상의 종단경사가 사용될 때 분수계는 거의 상류단 지점에 위치하게 되므로, 그 때의 최대수심은 한단에 유출구를 갖는 수로에서의 최대수심과 거의 일치하였다. 이는 양단에 유출구를 가지는 수로일지라도 종단경사가 커짐에 따라 수로로 유입된 유량은 하류단을 통하여 유출되는 비율이 증가하기 때문이다. 그러므로 3.3절에서 논의된 것처럼 종단경사가 임계값보다 큰 경우 양단에 유출구를 갖는 수로를 한단에 유출구를 갖는 수로로 해석하는 것이 계산 절차를 줄이는 측면에서 합리적이라 할 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 노면배수시설의 설계에 기반이 되는 흐름 해석 방법을 정립하기 위하여, 도로배수를 위한 배수로와 같은 시설물처럼 유량이 선형적으로 증가하는 선형 배수로에 대하여 흐름 해석을 수행하였다. 특히 노면배수시설처럼 양단에 유출구를 갖는 수로 뿐만 아니라 하류단에 하나의 유출구를 갖는 수로를 대상으로 수리학적 현상들을 모의하였다. 흐름 계산에서 계산의 기지점이 되는 지배단면의 위치는 수로 내의 각 위치가 지배단면이 되도록 하는 종단경사를 조사하여 결정할 수 있었다. 하류단에 유출구를 가지는 수로의 경우 지배단면이 하류단 지점이 되거나 수로 내에 위치하도록 하는 0% ~ 5%의 종단경사를 고려하고, 양단에 유출구를 가지는 수로의 경우 양단이 지배단면이 되도록 만족시키는 임계경사인 1.23%보다 작은 경사들을 고려하여 부등류 해석을 수행하였다. 흐름해석 결과는 수심, 수위 및 Froude 수의 분포로 제시하여 비교하였다.

양단에 유출구를 가지는 수로에 대한 부등류 해석으로부터 얻어진 최대수심은, 종단경사가 임계경사보다 작은 경우에는 하류단에 유출구를 가지는 수로보다 작았으나, 그보다 큰 경우에는 거의 일치함을 알 수 있었다. 즉, 양단에 유출구를 가지는 수로는 종단경사가 커질수록 하류단 지점을 통하여 유출되는 유량이 증가하며, 하류단에 유출구를 가지는 수로의 거동과 거의 일치하게 된다. 이는 노면배수시설의 배수로처럼 수로 양단에 유출구를 갖는 수로일지라도 임계경사를 찾아 그보다 경사가 작을 경우에는 분수계의 위치를 찾아 흐름 해석을 수행하고, 그보다 큰 경우에는 수로상에 존재하는 지배단면의 위치 및 한계수심을 시작으로 흐름 해석을 수행하는 것이 합리적임을 나타내준다. 양단에 유출구를 가지는 수로에 대한 최대수심은 0.5% 이하의 종단경사에 대해서 등류해석의 수심보다 작았으나, 그 이상의 경사에 대해서 큰 것으로 나타났다. 이는 종단경

사가 작은 경우 등류 해석을 기반으로 한 설계가 과대 설계 될 가능성이 있음을 시사한다. 노면배수시설의 선형 배수로에 대한 부등류 해석 방법은 현재 등류 해석을 기반으로 노면배수 설계기법을 개선하는데 이용될 수 있을 것이다.

노면배수시설의 설계에서 유출구 간격은, 흐름해석 결과 조사된 최대수심이 설계를 위하여 주어진 허용수심을 초과하지 않도록 시산적으로 결정하도록 하는 것이 필요하다. 또한, 노면에 내린 강우가 유출구에 이르기까지의 지속시간을 고려하여 강우강도를 결정하는 시산적인 과정이 요구되며(McCuen *et al.*, 2001), 이를 위해서는 노면 박류 흐름의 수로 도달시간이 고려되어야 한다. 아울러 노면배수시설과 같이 도달시간이 짧은 경우, 분 단위 지속시간에 대한 강우강도식을 개발할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 친환경·지능형 도로설계 기술개발 연구단(건설핵심D05-01)을 통하여 지원된 건설교통부 건설기술혁신사업에 의하여 수행되었음. 연구지원에 감사드립니다.

참고 문헌

건설교통부 (2003). 도로배수시설 설계 및 유지관리 지침 연구.

류택희 (2002). “우수받이 차집능력에 관한 실험적 연구.” 석사학위논문, 경기대학교.

이상국 (2002). “노면 배수 집수정의 유입효율 분석.” 석사학위논문, 연세대학교.

이종태, 김영란, 김갑수, 윤세의, 박영민 (2003). “도로 노면의 형상과 강우의 임계 지속시간을 고려한 적정 우수 유출량 산정 및 영향분석.” 상하수도학회지, 상하수도학회, 제17권, 제2호, pp. 291-298.

임동환 (2003). “빗물받이 차집능력 분석을 위한 수리 모형실험.” 석사학위논문, 경기대학교.

Brown, S.A., Stein, S.M., and Warner, J.C. (1996). “Urban drainage design manual.” *Hydraulic Engineering Circular No. 22, FHWA-SA-96-078*, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, DC.

Burgi, P.H., and Gober, D.E. (1977). “Bicycle-safe grate inlets study; Volume 1. Hydraulic and safety characteristics of three selected grate inlets on continuous grades.” *FHWA-RD-77-24*, Federal

- Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, DC.
- Chaudhry, M.H. (1993). *Open-channel flow*. Prentice Hall.
- Chow, V.T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.
- Escarameia, M., Gasowski, Y., May, R.W.P., and Lo Cascio, A. (2001). "Hydraulic capacity of drainage channels with lateral inflow." *Report SR 58I*, HR Wallingford, UK.
- Mays, L.W. (2001). *Stormwater collection systems design handbook*. McGraw-Hill.
- McCuen, R.H., Johnson, P.A., and Ragan, R.M. (2001). "Highway hydrology." *FHWA-NHI-02-001, HDS No.2*, Federal Highway Administration, USA.
- Naqvi, M. (2003). *Design of linear drainage systems*. Thomas Telford.
- Pugh, C.A. (1980). "Bicycle-safe grate inlets study; Volume 4. Hydraulic characteristics of slotted drain inlets." *FHWA-RD-79-106*, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, DC.
- Rhodes, D.G. (1998). "Gradually varied flow solutions in Newton-Raphson form." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 124, No. 4, pp. 233-235.
- Wong, T.S.W. (1994). "Kinematic wave method for determination of road drainage inlet spacing." *Advances in Water Resources*, Vol. 17, pp. 329-336.
- Wong, T.S.W., and Moh W.H. (1997). "Effect of maximum flood width on road drainage inlet spacing." *Water Science and Technology*, Vol. 36, No. 8-9, pp. 241-246.

(논문번호:07-35/접수:2007.04.10/심사완료:2008.06.04)