

선형 배수로에 대한 부등류 해석

Varied Flow Analysis for Linear Drainage Channels

김진수^{*} · 박형섭^{**} · 전경수^{***} · 이만석^{****} · 김흥래^{*****}

Kim, Jin Soo · Park, Hyung Seop · Jun, Kyung Soo · Lee, Man Seok · Kim, Heung Rae

1. 서론

그림 1은 전형적인 노면배수 시스템을 나타내고 있다. 노면으로부터의 유출수가 수로(다이크 측구)로 유입됨에 따라 수로의 유량은 하류로 갈수록 선형적으로 증가하게 된다. 유량이 수로의 통수능을 초과하지 않도록 주어진 간격으로 유출구(outlet)를 두어 종배수로 등으로 배수시키게 되는데, 이 때 유출구 사이의 간격이 노면 배수의 설계변수가 된다. 이와 같이 노면에 내리는 우수의 배수를 위한 배수로는 연속적으로 유입되는 횡유입량에 의하여 유량이 선형적으로 증가하는 선형 배수로(linear drainage channel)이다. 또한 길어깨를 두지 않고 노면의 우수가 종배수로로 연속적으로 유입하게 할 수도 있는데, 이 경우에는 종배수로 자체가 선형 배수로가 된다. 현재 노면배수를 위한 설계기준은 등류해석을 기반으로 하고 있는 반면, 선형 배수로에서의 흐름은 유량이 연속적으로 증가하는 부등류이다. 이와 같이 유량이 변화하는 경우에 대한 부등류 해석은 유량이 일정한 흐름의 경우에 비하여 매우 복잡하다. 이러한 부등류 해석에 기초한 노면배수 설계가 실용화되어 있지는 않은 반면 부등류 해석이론은 그러한 설계가 가능할 만큼 충분히 연구, 정립되어 있다(Escaramela 등, 2001; Naqvi, 2003). 본 연구에서는 선형 배수로 흐름해석을 위한 전산모형을 수립하고, 궁극적으로는 이러한 모형을 사용하여 부등류 기반의 노면배수 설계기법을 개발하고자 한다.

2. 계산모형

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

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f - (2Q/gA^2)(dQ/dx)}{1 - (Q^2/gA^2D)} \quad (1)$$

여기서 Q 는 유량, y 는 수심, A 는 통수단면적, D 는 평균수심, S_0 는 수로 종단경사, g 는 중력가속도이며, x 는 종방향 위치를 나타내는 변수이다. S_0 는 에너지 경사로서 Manning의 식으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 n 은 Manning의 조도계수이고 R 은 동수반경이다. 식 (1)과 (2)에서 유량과 유량의 공간변화율은 기지의 값이고, 통수단면적, 평균수심 및 동수반경은 수심의 함수이므로, 식 (1)은 수심에 관한 1계 상미분 방정식으

* 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정 · 공학석사 · 031-290-7642 (E-mail: sue0851@skku.edu)

** 대림산업 토목사업부 팀장 · 공학석사 · 02-2011-8598 (E-mail: dic21@daelim.co.kr)

*** 성균관대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사 · 031-290-7515 (E-mail: ksjun@yurim.skku.ac.kr)

**** (주)평화엔지니어링 기술연구원 선임연구원 · 박사수료 · 031-420-7332 (E-mail: msasa@korea.com)

***** (주)평화엔지니어링 부사장 · 도로 및 공항기술사 · 031-420-7920 (E-mail: hrkpro@hanmail.net)

로서 지배단면에서의 수심값을 경계조건으로 하여 상미분 방정식에 대한 전형적인 수치해법인 4계의 Runge-Kutta 방법에 의하여 각 지점에서의 수심을 계산하게 된다(Naqvi, 2003).

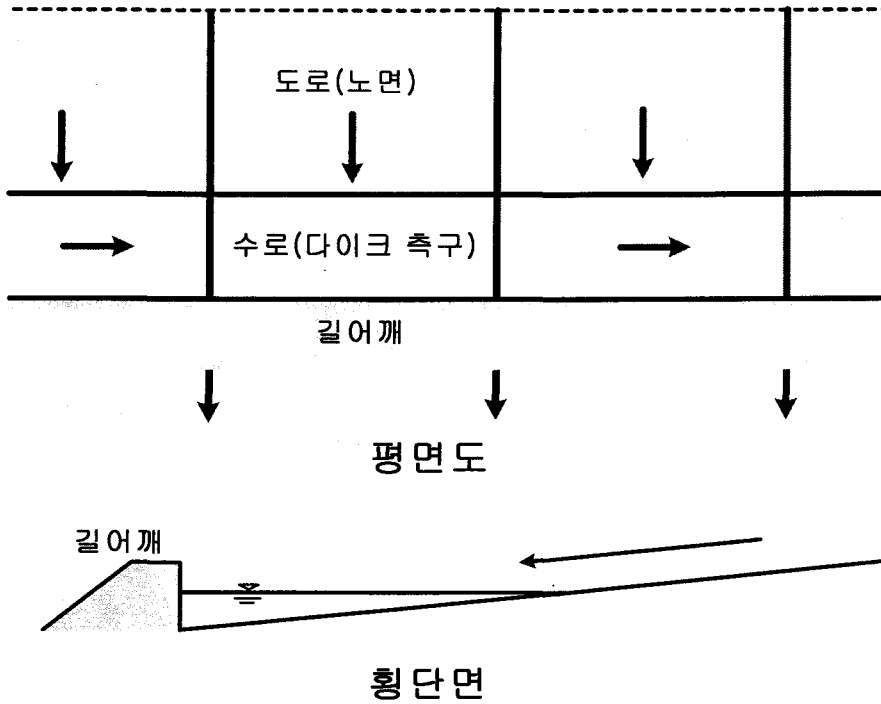


그림 1. 노면배수 체계에 대한 모식도

선형 배수로 흐름에 대한 지배 방정식으로서 다음 식 (3)과 같은 유한 차분 형태의 대수방정식을 사용할 수도 있다.

$$\frac{1}{g}(Q_2V_2 - Q_1V_1) - \frac{1}{2}S_o(A_1 + A_2)dx + \frac{1}{2}S_o(A_1S_{f1} - A_2S_{f2})dx + \frac{1}{2}(A_1 + A_2)(y_2 - y_1) = 0 \quad (3)$$

여기서 dx 는 지점 1과 2 사이의 거리이며, V 는 단면평균 유속이다. 아래첨자가 1인 변수들은 기지의 값을 가지며, 하첨자 2인 변수들은 모두 수심의 함수로서 표현이 가능하다. 따라서 식 (3)은 결국 y_2 에 대한 비선형 방정식이 되며, Newton-Raphson 방법에 의하여 해를 구할 수 있다(Chaudhry, 1993; Naqvi, 2003). 지배단면 지점부터 시작해서 식 (3)을 축차적으로 풀어서 수로 내 각 지점에서의 수심을 계산한다.

3. 양단에 유출구를 갖는 선형배수로 흐름계산

3.1 흐름 양상 및 계산방법

그림 2는 횡유입량에 의하여 유량이 연속적으로 증가하는, 수로의 상류단과 하류단에 각각 한 개씩의 유출구(outlet)를 갖고 있는 선형배수로에서의 일반적인 흐름형태를 나타내고 있다. 수로의 종방향 경사가 영인 경우 수면곡선은 수로 중앙에 위치한 분수계(water dividend)를 중심으로 좌우 대칭이 되며, 최대유량은 수로의



양단인 유출구 지점에서 발생한다. 그림 2에서 a 는 수로에 유입되는 횡유입량 중 하류측 유출구로 유출되는 유량의 비율을 나타낸다. 종방향 경사가 커짐에 따라 하류측 유출구를 통하여 유출되는 수량이 증가하게 된다. 따라서 분수계는 수로 중앙보다 상류 쪽으로 이동하게 되고, 최대 수심 발생지점은 하류단 방향으로 이동하게 되며(그림 2 참조), 최대유량은 하류단의 유출구 지점에서 발생하게 된다.

이러한 선형 배수로에서는 부등류 계산은 우선 a 의 값을 가정하고, 한계수심을 갖는 수로 양단으로부터 분수계까지의 수심을 각각 계산한다. 상류단으로부터 계산된 분수계 지점의 수심과 하류단으로부터 계산된 수심이 일치하면 흐름계산이 종료되며, 그렇지 않은 경우에는 a 의 값을 다시 가정하고, 선형 배수로에 대한 부등류 계산을 반복한다.

3.2 계산예

도로폭이 40 m이고 유출구 사이의 간격이 50 m인 도로에 강우강도 40 mm/hr의 강우가 계속되는 경우에 대한 흐름계산을 수행하였다. 선형배수로의 단면은 축 150 mm인 직사각형 단면이고, 조도계수는 0.015인 것으로 하였다. 그림 3과 4는 다양한 종단경사에 대하여 계산된 수심 및 수위분포를 나타낸 것이다. 그림 3으로부터 도로의 종단경사가 증가할수록 최대수심 발생지점이 하류방향으로 이동함을 나타내고 있다. 또한 경사가 증가할수록 분수계가 상류쪽으로 이동함을 그림 4에서 볼 수 있다. 그림 5는 Froude 수의 분포를 나타낸 것으로서 종단경사가 2%에 이르게 되면 수로 내의 모든 지점에서의 Froude 수가 거의 1에 근접하게 된다. 그림 6은 종단경사에 따른 a 값의 변화를 나타낸 것이고, 그림 7은 상류단 및 하류단에 각각 유출구가 있는 경우와 하류단에만 유출구가 있는 경우에 대하여 수로 내의 최대수심의 값을 구한 것이다. 그림 6에서 종단경사가 증가할수록 a 의 값은 1에 가까워지며, 경사가 2%에 이르면 a 의 값이 거의 1에 도달함을 알 수 있다. 이는 종단경사가 2% 이상이 되면 수로로 횡유입되는 모든 물이 하류단의 유출구를 통하여 유출됨을 의미하며, 이는 그림 7에서도 마찬가지로 나타나고 있다. 이는 수로의 종단경사가 2% 이상이 되면 부등류 기반의 배수설계가 등류 기반의 설계와 결과적으로 동일한 결과를 나타냄을 의미한다.

4. 결론 및 향후 연구과제

도로배수를 위한 배수로와 같이 시설과 같이 유량이 선형적으로 증가하는 수로에서의 흐름을 해석하는 전산모형을 수립하였다. 가상의 도로 및 수로조건에 대하여 모형을 적용하여, 선형 배수로에서 발생할 수 있는 수리학적 현상들이 잘 모의됨을 확인할 수 있었다.

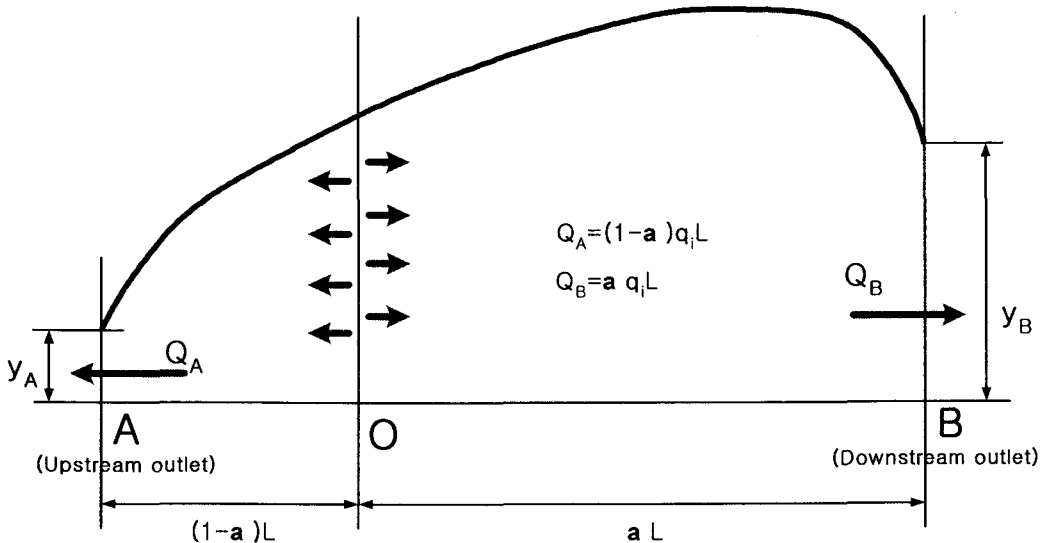


그림 2. 수로 양단에 유출구가 있는 선형 배수로

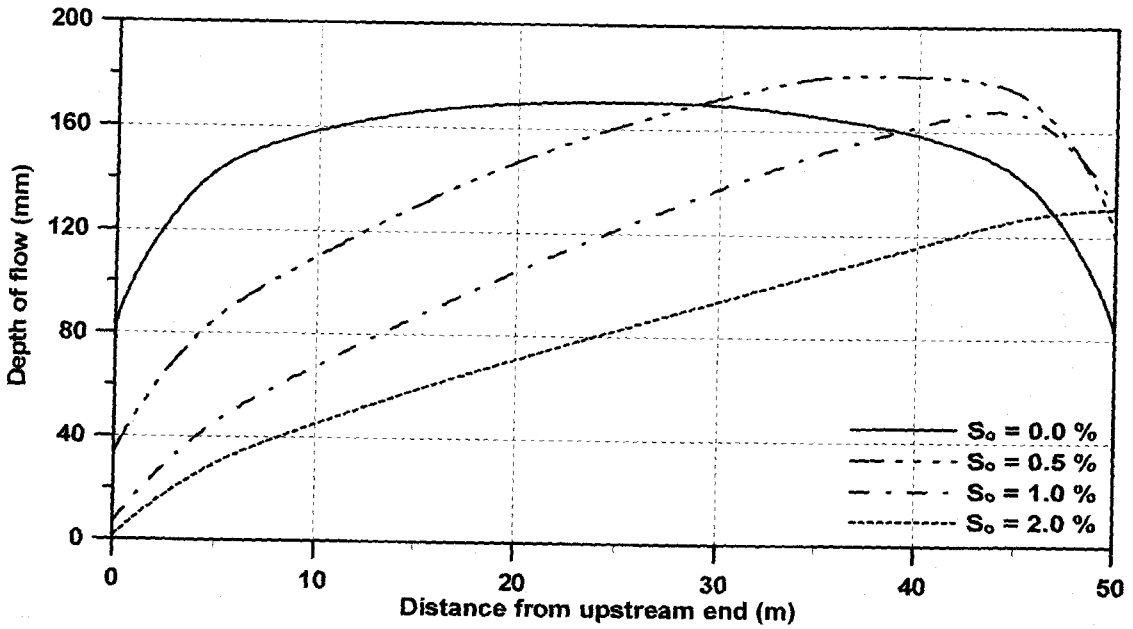


그림 3. 수심 분포

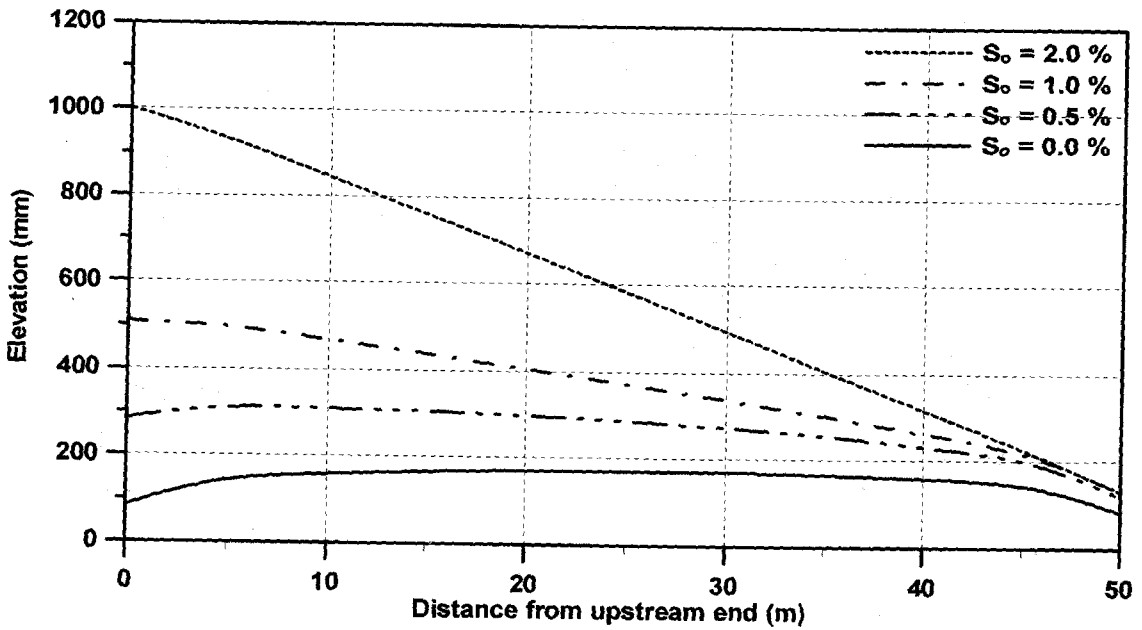


그림 4. 수위 분포

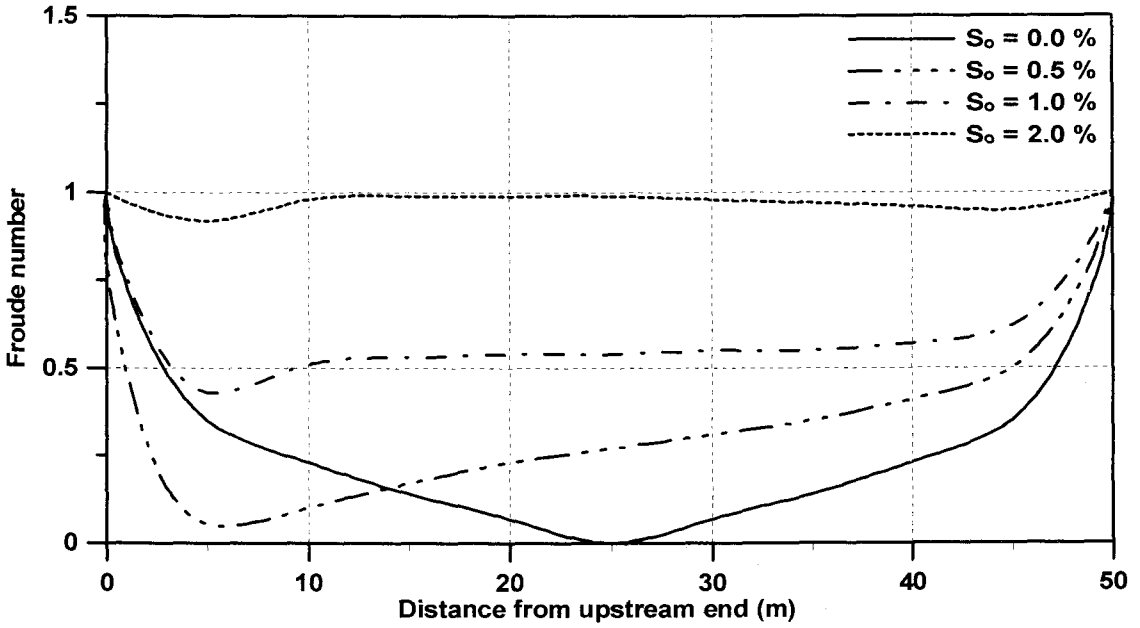


그림 5. Froude 수 분포

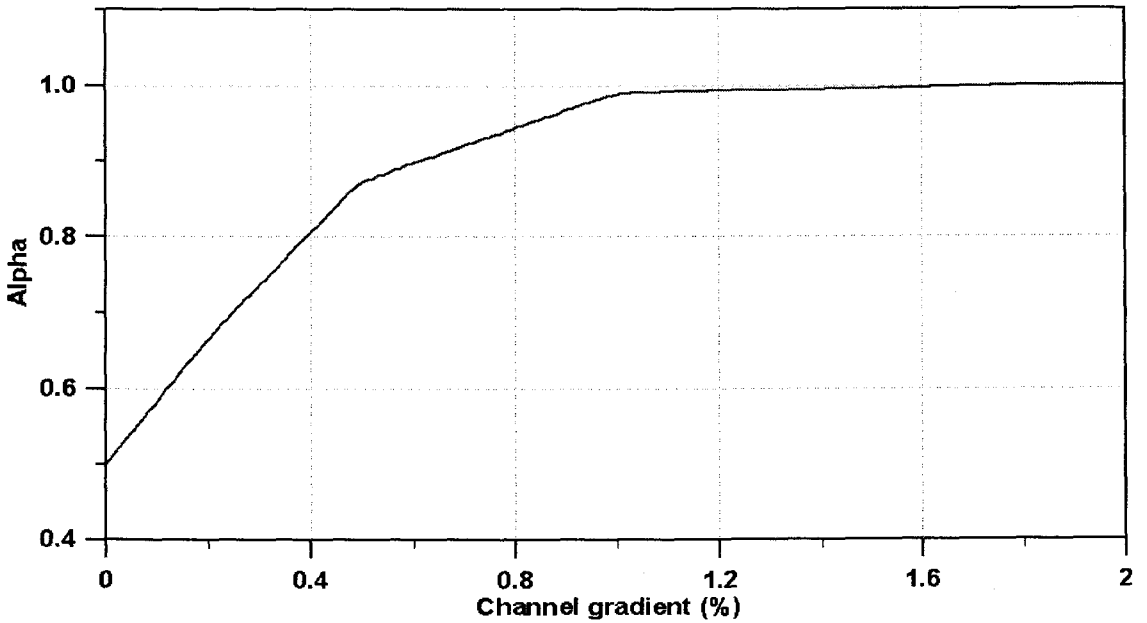


그림 6. 수로의 종단경사에 따른 α 값의 변화

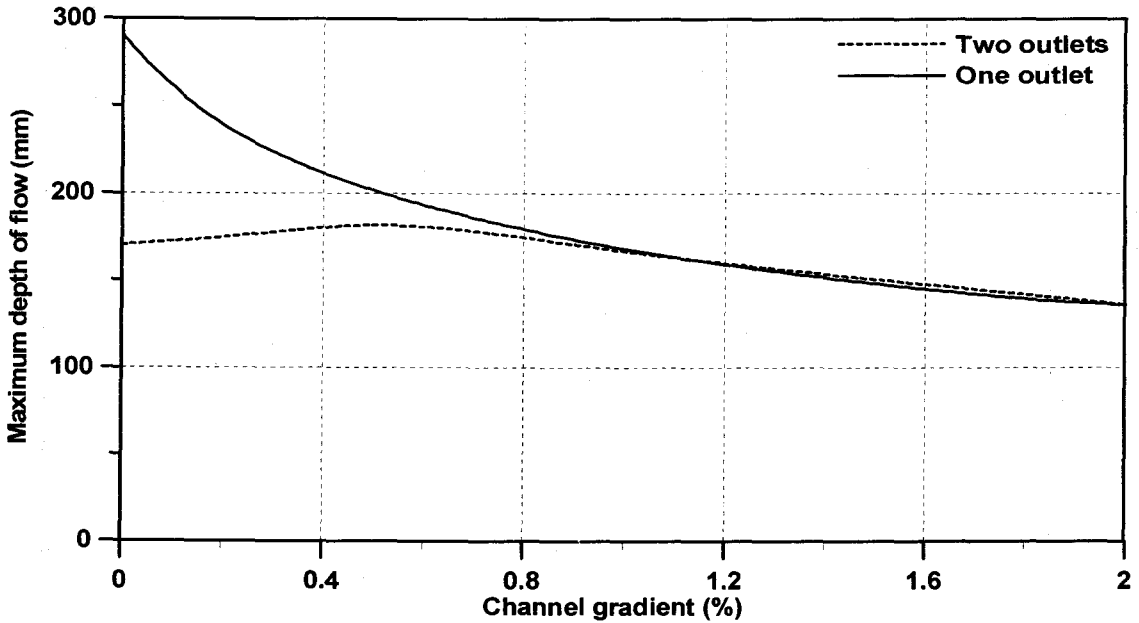


그림 7. 수로의 종단경사에 따른 수로 내 최대수심의 변화

수립된 해석모형을 기반으로 하여 노면배수 설계기법을 위한 전산모형을 개발하는 것이 최종적인 연구 목표이다. 이를 위해서는 유출구 간의 간격을 가정하여, 3.1절에서 기술된 바와 같은 해석모형에 의한 계산을 수행하고, 최대수심 발생 지점에서의 통수능이 수로의 통수능을 초과하는지를 확인하는 과정에 의하여 유출구 간의 간격을 시산적으로 결정하도록 하는 것이 필요하다. 또한 노면에 내린 강우가 유출구에 이르기까지의 지속 시간을 고려하여 강우강도를 결정하는 시산적인 과정이 필요하며(McCuen 등, 2001), 이를 위해서는 노면 박류 흐름의 수로 도달시간이 고려되어야 하며, 분 단위 지속시간에 대한 강우강도식의 개발이 요구된다.

감사의글

본 연구는 친환경·지능형 도로설계 기술개발 연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구사업에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Chaudhry, M.H (1993). *Open-channel flow*, Prentice-Hall.
2. Escarameia, M., Gasowski, Y., May, R.W.P., and Lo Cascio, A. (2001). "Hydraulic capacity of drainage channels with lateral inflow." *Report SR 581*, HR Wallingford, UK.
3. McCuen, R.H., Johnson, P.A., and Ragan, R.M. (2001). "Highway hydrology." *FHWA-NHI-02-001*, HDS No. 2, Federal Highway Administration, USA.
4. Naqvi, M. (2003). *Design of linear drainage systems*. Thomas Telford.