

부등류 해석에 의한 노면배수시설 설계

Design of Road Surface Drainage Facilities

Based on Varied Flow Analysis

구혜진*, 전경수**

Hye Jin Ku, Kyung Soo Jun

요 지

노면배수 시설의 설계를 위하여 부등류 해석을 기반으로 한 설계모형을 수립하고 등류 해석을 기반으로 한 설계결과와 비교하였다. 노면배수시설을 설계하기 위해서는 지속시간을 가정하여 설계강우를 결정하고 설계변수인 유출구 간격을 가정하여, 호우에 응답하여 발생하는 홍수의 도달시간이 가정된 지속시간과 유사할 때까지 계산을 반복하여 유출구 간격을 결정한다. 부등류 해석에 의한 수로 흐름 해석은 수로 양단에 유출구를 갖는 수로의 분수계의 위치를 결정하는 과정과 발생하는 최대수심이 허용수심을 초과하지 않도록 수로길이를 산정하는 과정을 포함하므로 등류 해석에 비해 계산과정이 복잡하게 된다. 가상의 노면배수 체계를 설정하고 다양한 수로경사에 대해 노면배수 설계모형을 적용한 결과, 등류 해석의 경우 유출구 간격은 수로경사가 증가할수록 증가하였지만, 부등류 해석의 경우 수로경사가 증가할수록 감소하였다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 수로경사가 작은 경우 등류 해석보다 부등류 해석을 기반으로 노면배수 시설을 설계하는 것이 합리적인 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 노면배수, 부등류, 분수계, 유출구 간격

1. 서 론

노면배수 시설의 경우 등류 해석을 기반으로 설계되고 있으나, 노면배수 시설의 수로는 선형 배수로로서 흐름은 유량이 연속적으로 증가하는 부등류이다. 등류 해석을 기반으로 한 설계에서 모든 배수시설물은 최대 유량을 기준으로 설계되도록 하고 있어 과대하게 설계되는 경향이 있지만, 유량이 변화하는 경우에 대한 부등류 해석은 유량이 일정한 흐름에 대한 등류 해석에 비하여 매우 복잡하기 때문에 부등류 해석에 기초한 노면배수 설계는 실용화되어 있지 않는 실정이다(건설교통부, 2003). 반면 부등류 해석이론은 그러한 설계가 가능할 만큼 충분히 연구, 정립되어 있다(Escarameia 등, 2001; Naqvi, 2003). 이에 본 연구에서는 부등류 기반의 노면배수 설계기법을 개발하고 등류 기반의 설계결과와 비교하였다.

2. 일반적인 노면배수 체계

노면배수는 도로부지내(노면 및 비탈면)에 강우 또는 강설에 의해 발생한 우수를 원활히 처리하기 위해 설치하며, 지표면을 흐르는 물을 배제하는 것을 의미한다. 그림 1은 전형적인 노면배수 체계를 나타내고 있다. 노면에서 발생한 강우로 인한 유출수는 수로(다이크 측구)로 유입되고, 수로에 유입된 유량은 하류로 갈수록 선형적으로 증가하게 된다. 그 유량이 수로의 통수능을 초과하지 않도록 주어진 간격으로 유출구(outlet)를 두어 종배수로 등으로 배수시키므로 노면배수 시설은 상류단과 하류단에 각각 한 개씩의 유출구를 갖는 선형 배수로가 된다. 이때 유출구 사이의 간격(outlet spacing)이 노면배수의 설계변수가 된다. 이와 같이 노면에 내리는 우수의 배수를 위한 배수로는 연속적으로 유입되는 평균유입량에 의하여 유량이 선형

* 정회원 · 성균관대학교 공과대학 건설환경시스템공학과 박사후과정 · E-mail : skyjina@skku.edu

** 정회원 · 성균관대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 부교수 · E-mail : ksjun@yurim.skku.ac.kr

직으로 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. 수로 양단에 유출구를 갖는 선형 배수로내의 일반적인 흐름 형태는 그림 2에 나타나 있다. 그림 2에서 O지점은 분수계(water dividend)를 기준으로 상류 쪽에서 유입된 유량(Q_A)은 상류단(A지점)을 통하여, 하류 쪽에서 유입된 유량(Q_B)은 하류단(B지점)을 통하여 유출된다. 이러한 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 상류 쪽으로 이동하게 되고, 최대 수심 발생지점은 하류단 쪽으로 이동하게 된다.

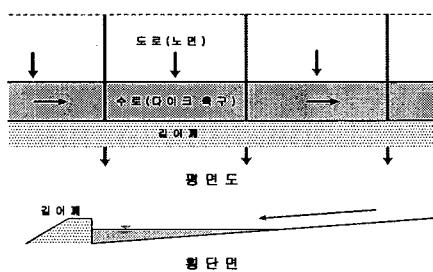


그림 1. 노면배수 체계에 대한 모식도

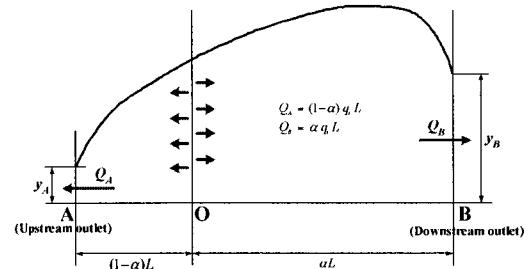


그림 2. 선형 배수로의 일반적인 흐름 형태

3. 해석절차

외국의 경우 설계홍수량 산정에 있어서 지속시간을 미지의 변수로 두고 시산법적 반복과정에 의하여 설계홍수량을 산정한다. 홍수 도달시간이 설계강우의 지속시간을 결정하는 요소임을 감안한다면 이는 당연하고도 합리적인 수문설계의 과정이라 할 수 있다. 노면배수의 경우 유출구 사이의 간격이 설계변수가 되며, 이를 결정하기 위한 흐름도는 그림 3과 같다. 노면배수를 설계하기 위해서 우선 지속시간(T_o)을 가정하여 그에 대한 설계강우(I)를 산정하고, 유출구 간격(수로길이)을 가정하여 호우에 응답하여 발생하는 노면 박류 흐름(surface sheet flow)의 유달시간(T_s)과 수로로 유입된 유량이 수로(channel)의 유출구로 유출되기까지 걸리는 유하시간(T_g)을 산정한다. 노면과 수로흐름에서의 도달시간($T_s + T_g$)이 가정된 지속시간(T_o)과 유사하다면, 산정된 최대수심 발생 지점에서의 통수능이 수로의 통수능을 초과하는지를 확인하는 과정을 통하여 유출구 간의 거리를 시산적으로 결정할 수 있다(McCuen 등, 2001). 노면배수시설의 설계를 위해서는 분 단위 강우강도식이 요구되지만 현재 개발되어 실용화 되어있는 분 단위 강우강도식은 없으므로, 본 연구에서는 『도로배수시설 설계 및 유지관리 지침(건설교통부, 2003)』을 참조하여 현재 일반적으로 사용되고 있는 강우강도식 중 건설교통부 식을 외삽하여 사용하였고, 유달시간은 운동파 공식을 이용하였다.

등류 해석에 의거할 경우, 주어진 호우사상에 의해 발생되는 유량의 유하시간은 개수로 평균 유속 공식인 Manning 공식을 이용하여 하도길이를 유속으로 나눔으로써 구할 수 있다. 유하시간은 유출량을 구하려는 지점에서 상류의 축구, 관 등의 최장연장의 평균속도로 나눈 것과 동일하다. 평균유속은 설계 시 주어지는 수로의 단면형상, 최대 허용수심 및 경사에 의해 산정된다.

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

$$T_g = \frac{L_g}{V} \quad (2)$$

여기서 V 는 단면 평균유속(m/s), n 은 Manning의 조도계수, R 은 동수반경, S_o 는 수로 종단경사, T_g 는 유하시간(min), L_g 은 수로길이(m)이다. 등류 해석에 의거하여 수로의 길이 및 유하시간을 산정하는 절차는 그림 4와 같다. 그림 4에서 B_d 는 수로흐름에 기여하는 노면의 폭을 나타낸다.

부등류 해석에 의거하여 유하시간을 산정할 경우, 단면형과 종단경사가 일정한 선형 배수로 흐름에 대한 지배 방정식으로서 다음 식 (3)과 같은 유한 차분 형태의 운동량방정식을 사용하였다.

$$\frac{1}{g} (Q_2 V_2 - Q_1 V_1) - \frac{1}{2} S_o (A_1 + A_2) dx + \frac{1}{2} (A_1 S_{f1} + A_2 S_{f2}) dx + \frac{1}{2} (A_1 + A_2) (y_2 - y_1) = 0 \quad (3)$$

여기서 Q 는 유량(m^3/s), V 는 단면평균 유속(m/s), y 는 수심(m), A 는 통수단면적(m^2), D 는 평균수심(m), S_o 는 수로 종단경사, g 는 중력가속도이며, x 는 종방향 위치를 나타내는 변수이며, dx 는 지점 1과 2 사이의 거리이다. S_f 는 마찰경사로서 Manning의 식으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

식 (3)에서 아래첨자가 1인 변수들은 기지의 값을 의미하며, 아래첨자 2인 변수들은 모두 수심의 함수로서 표현이 가능하다. 따라서 식 (3)은 y_2 에 대한 비선형 방정식이 되며, Newton-Raphson 방법에 의하여 해를 구할 수 있다(Chaudhry, 1993; Naqvi, 2003). 수로 내 각 지점에서의 수심은 지배단면의 수심(한계수심)을 기지의 값으로 하여 식 (3)을 축차적으로 풀어서 계산할 수 있다. 유하시간은 각 계산격자 사이의 유하시간을 적분하여 결정할 수 있다.

주어진 설계강우에 대하여 유출구 간격은 그림 5와 같은 절차를 통하여 산정된다. 우선 유출구 간격을 가정하여 수심 계산을 수행하고, 최대 수심 발생지점에서의 통수능이 수로의 통수능을 초과하는지를 확인하는 과정에 의하여 주어진 설계강우에 대한 유출구 간격을 시산적으로 결정한다. 특히 노면배수를 위한 수로처럼 양단에 유출구를 갖는 경우, 부등류 해석을 하기 위해서는 그림 2에 제시된 것처럼 분수계의 위치를 결정하여야 한다. 분수계의 위치 및 수로의 수면곡선을 산정하기 위한 절차는 그림 6과 같다. 우선 분수계의 위치를 가정한 후 상류단과 하류단의 수면곡선을 각각 산정하여, 양방향에서 계산한 분수계 지점에서의 두 수심이 유사할 때까지 일련의 과정을 반복한다. 이러한 부등류 해석을 기반으로 한 계산과정은 수로의 전 구간에 최대유량이 흐르는 것으로 보고 설계하는 등류 해석을 기반으로 한 경우보다 복잡하다.

4. 모형의 적용 및 검토

수로흐름을 부등류 해석에 의거하여 산정된 노면배수시설의 설계변수인 유출구 간격이 등류 해석에 의거한 결과와 어떻게 다른지 알아보기 위하여, 수립된 노면배수 설계모형을 가상적으로 설정된 노면배수 체계에 적용하고 그 결과를 비교하여 보았다. 또한, 수로경사가 유출구 간격에 어떠한 영향을 주는가도 살펴보았다. 가상의 노면배수 체계로서, 수로흐름에 기여하는 도로의 폭은 10 m, 조도계수는 0.017, 횡단배수 경사 2%, 수로경사는 0.1% ~ 0.9%, 수로단면은 각각 삼각형으로 가정하고 옆경사는 1/40인 것으로 설정하였다. 수로 내의 허용수심은 25 mm이고 통수능은 $10 \times 10^{-3} m^3/s$ 인 것으로 가정하였고, 강우강도는 춘천지점의 지역상수를 이용하여 건설교통부 식(건설교통부, 2000)으로 산정하였고, 유달시간은 운동파 공식을 이용하였다.

표 1은 등류 및 부등류 해석을 기반으로 하여 노면배수 설계를 수행한 결과를 보여주고 있다. 등류 해석을 통하여 결정된 유출구 간격은 수로경사가 커질수록 커지는 반면, 부등류 해석을 통하여 결정된 유출구 간격은 수로경사가 커질수록 감소하다가 커지는 경향을 가졌다(그림 7 참조). 0.1%의 수로경사에 대해 등류 기반인 경우 1.41 m, 부등류 기반인 경우 6.39 m로 설계되었다. 이는 수로경사가 수평에 가까울수록, 등류 해석을 기반으로 한 유출구 간격이 과대하게 설계될 수 있음을 보여주는 것이다. 등류 해석에서 수로경사가 커질수록 식 (1)에 의해 결정되는 단면 평균유속을 증가하였으며, 이에 따라 유량도 증가하게 되고 유출구 간격도 증가하는 것으로 나타났다. 반면 등류 해석에서 수로경사의 변화는 설계 강우강도에 영향을 끼치지 않으므로 유달시간 및 유하시간 역시 동일한 것으로 나타났다.

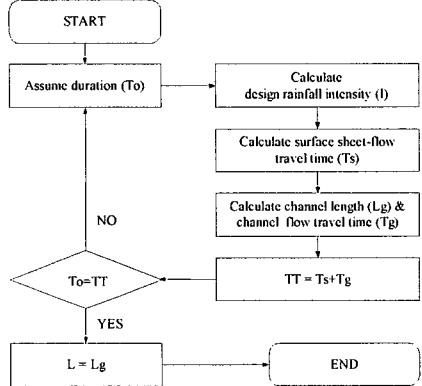


그림 3. 도달시간을 고려한 노면배수시설 설계 흐름도

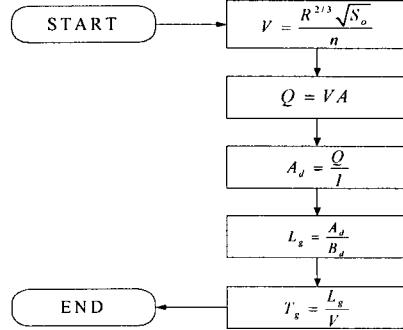


그림 4. 유출구 간격의 산정절차(등류)

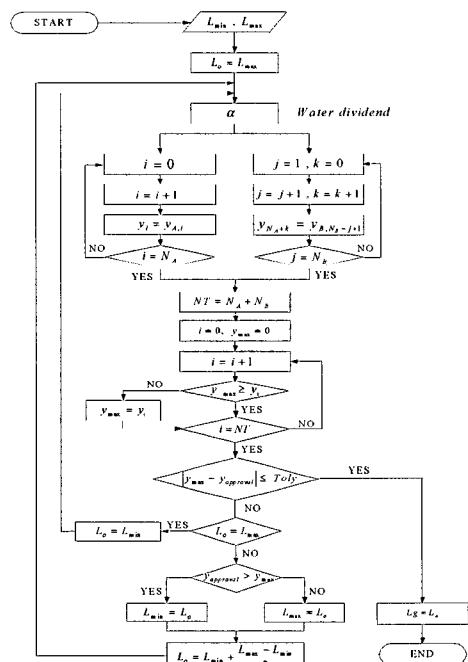


그림 5. 유출구 간격의 산정절차(부등류)

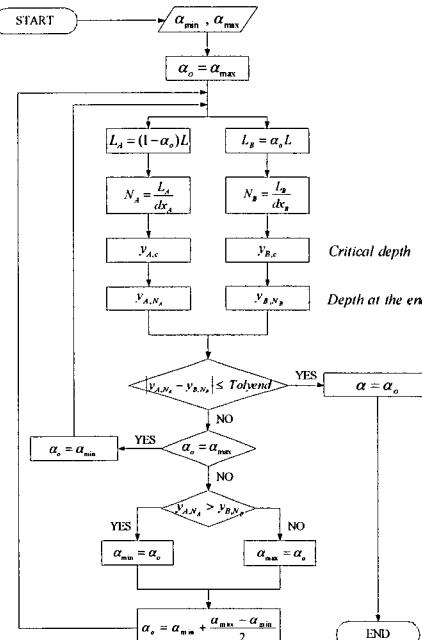


그림 6. 양단에 유출구를 갖는 선형 배수로에서 분수계 위치(α)의 산정절차

수로 양단에 유출구를 갖는 수로 중 길이는 같으나 경사가 다른 수로들에 대한 흐름 해석을 부등류 해석에 의거할 경우, 경사가 커질수록 수로 내에서 발생하는 최대 수심은 증가하다가 감소하는 경향을 갖는데, 이는 유출구 간격을 결정하는 과정에도 반영되어 경사가 커질수록 유출구의 간격은 감소하다가 증가하는 경향을 갖는다. 설계 강우강도 및 유량은 수로경사가 커짐에 따라 증가하였고 유달·유하시간은 감소하였다. 부등류 해석에 의거하여 수심을 계산하는 경우에 분수계의 위치를 결정하는 것이 선행되어야 하는데, 본 연구에서 고려된 가상의 수로에 대하여 수로경사에 따른 α 의 변화는 그림 9에 제시되어 있다. 0.9%의 수로경사를 가지는 수로에 대해 분수계의 위치를 나타내는 α 는 0.95로 산정되었다. 즉, 경사가 커질수록 수로로 유입되는 대부분의 유량은 하류단에 위치한 유출구를 통하여 유출된다. 이러한 사실은 부등류 해석에 의거한 계산의 복잡성을 감소시키기 위하여, 경사가 급한 수로에 대한 설계를 수행할 경우에는 기존의 등류 가정에 의한 설계방법을 적용하는 것이 합리적일 수 있음을 제시하는 결과라 할 수 있다.

표 1. 노면배수 설계 결과

| 수로 경사 (S_o , %) | 강우강도 (I , mm hr) | | 유달시간 (T_s , min) | | 유하시간 (T_g , min) | | 도달시간 (T , min) | | 유출유량 (Q , 10^{-3} m ³ /s) | | 유출구 간격 (L , m) | |
|-----------------------|------------------------|-----|------------------------|------|------------------------|------|----------------------|------|--|------|----------------------|------|
| | 등류 | 부등류 | 등류 | 부등류 | 등류 | 부등류 | 등류 | 부등류 | 등류 | 부등류 | 등류 | 부등류 |
| 0.1 | 300 | 117 | 0.79 | 1.00 | 0.24 | 2.34 | 1.03 | 3.34 | 1.23 | 2.96 | 1.41 | 6.39 |
| 0.3 | 300 | 192 | 0.79 | 0.94 | 0.24 | 1.57 | 1.03 | 2.51 | 2.13 | 2.97 | 2.45 | 5.56 |
| 0.5 | 300 | 216 | 0.79 | 0.90 | 0.24 | 1.09 | 1.03 | 1.99 | 2.75 | 3.10 | 3.16 | 5.17 |
| 0.7 | 300 | 234 | 0.79 | 0.87 | 0.24 | 0.83 | 1.03 | 1.70 | 3.25 | 3.31 | 3.73 | 5.10 |
| 0.9 | 300 | 246 | 0.79 | 0.85 | 0.24 | 0.68 | 1.03 | 1.53 | 3.69 | 3.55 | 4.24 | 5.20 |

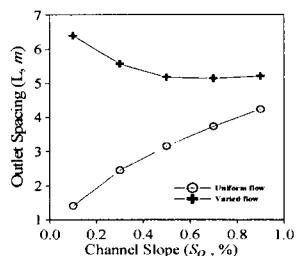


그림 7. 수로경사에 따른
유출구 간격

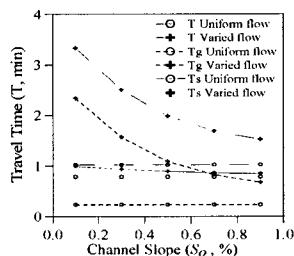


그림 8. 수로경사에 따른
유달·유하시간 및 지속시간

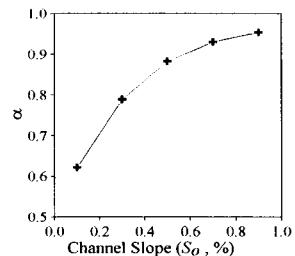


그림 9. 수로경사에 따른
a의 변화

5. 결 과

합리적인 노면배수 설계를 위하여 부등류 해석을 기반으로 한 노면배수 시설의 설계모형을 수립하고 가상의 노면배수 체계에 적용하여, 노면배수 시설의 설계변수인 유출구 간격을 산정하여 등류 해석을 기반으로 한 설계 결과와 비교하였다. 등류 해석을 기반으로 한 경우 유출구 간격은 수로경사가 증가할수록 증가하였으나, 부등류 해석을 기반으로 한 경우 수로경사가 증가할수록 감소하였다가 다시 증가하는 경향을 가졌다. 수로경사가 작은 경우 수로의 전 구간에 최대유량이 흐르는 것으로 보고 설계하는 등류 해석보다 부등류 해석을 기반으로 설계하는 것이 보다 합리적인 것으로 판단되었다. 설계결과에서 지속시간은 4분 미만으로 산정되었으나 현재 사용되고 있는 강우강도식의 최소 지속시간은 10분이다. 그러므로 지속시간은 짧은 노면배수 시설의 설계를 위해서는 분 단위 강우강도식의 개발이 요구된다.

감 사 의 글

본 연구는 친환경·지능형 도로설계 기술개발 연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구사업에 의하여 수행되었으며, 이에 사의를 표한다.

참 고 문 헌

- 건설교통부(2003), 도로배수시설 설계 및 유지관리 지침 연구.
- 건설교통부(2000), 1999년도 수자원관리기법개발연구조사보고서: 제1권 한국 확률강우량도 작성.
- Chaudhry, M.H (1993). *Open-channel flow*, Prentice-Hall.
- 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.
- 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.