

# 부등류 해석을 기반으로 한 노면배수시설 설계

## Design of Road Surface Drainage Facilities Based on Varied Flow Analysis

구 혜 진\* / 김 진 수\*\* / 박 형 섭\*\*\* / 전 경 수\*\*\*\*

Ku, Hye Jin / Kim, Jin Soo / Park, Hyung Seop / Jun, Kyung Soo

### Abstract

The design methods of the road surface drainage facilities were compared for the improvement of design method. We have developed four computational design models classified by the methods to determine the duration of design rainfall and to analyze the flow of a linear drainage channel. The critical duration was determined by assuming the critical duration to be 10 minutes or by finding the duration of design storm being similar to the travel time of flow by trial and error. The flow of a linear drainage channel was analyzed as the uniform flow or the varied flow. The design models were applied to the artificial road surface drainage facilities with various channel slopes and road shoulder slopes. If the rainfall intensity of the 10 minutes duration was applied, the outlet spacing obtained from the design based on the varied flow analysis was larger than the uniform flow analysis only when the channel slope and the road shoulder slope was small. On the other hands, if the duration of design rainfall was determined by calculating the travel time, the varied flow analysis brought about larger outlet spacing than the uniform analysis for all conditions. However, the model of the critical duration concept and the varied flow analysis resulted in smaller outlet spacing than the current design method employing the rainfall of 10 minutes duration and the uniform flow analysis.

**keywords** : road surface drainage, linear drainage channel, varied flow, critical duration, outlet spacing

### 요 지

노면배수시설의 설계방법을 임계지속시간의 고려 여부와 등류 및 부등류의 해석 방법에 따라 4가지로 구분하고, 각 방법에 따른 설계결과를 비교·검토하였다. 임계지속시간을 고려하지 않는 방법에서 설계강우는 10분 지속시간의 강우강도로 정하나, 임계지속시간을 고려할 경우 설계강우는 강우의 지속시간과 유출의 도달시간이 유사해지는 경우를 시산적으로 찾아 결정한다. 4가지 설계방법으로 수립된 설계모형을 다양한 수로의 종단경사 및 길어깨 횡단경사를 가지는 노면배수시설에 적용하고, 그 설계결과를 비교·검토하였다. 10분 지속시간의 강우강도를 이용하는 경우,

\* 교신저자, 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 공과대학 건설환경시스템공학과 박사과정  
Graduate Res. Asst., Dept. of Civil and Envir. Engrg., Sungkyunkwan Univ., Suwon 440-746, Korea  
(e-mail: sue0851@skku.edu)

\*\*\* 대림산업(주) 토목설계팀 팀장  
General Manager, Civil Design Team, Daelim Industrial Co., Ltd., 146-12, Susong-Dong, Jongro-Gu, Seoul, 110-732, Korea  
(e-mail: dic21@daelim.co.kr)

\*\*\*\* 성균관대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 교수  
Prof., Dept. of Civil and Envir. Engrg., Sungkyunkwan Univ., Suwon 440-746, Korea  
(e-mail: ksjun@skku.edu)

부등류 해석을 기반으로 설계한 유출구 간격은 종단경사와 길어깨 횡단경사가 작은 경우에만 등류 해석보다 크게 산정되었다. 반면 도달시간을 산정하여 임계지속시간을 결정하는 경우에는 본 연구에서 고려된 모든 조건에서 부등류 해석을 기반으로 설계한 유출구 간격이 등류 해석보다 크게 산정되었다. 그러나 도달시간을 산정하여 임계지속시간을 결정하고 부등류 해석을 기반으로 설계한 유출구 간격은 10분 지속시간의 강우강도를 적용하고 등류 해석을 기반으로 설계한 값보다 항상 작은 것으로 조사되었다.

**핵심용어** : 노면배수, 선형 배수로, 부등류, 임계지속시간, 유출구 간격

## 1. 서 론

현재 도로배수시설과 관련한 설계지침의 내용을 살펴보면 상당 부분이 명확한 수리·수문학적 이해가 부족한 상태에서 외국 지침서의 일부를 그대로 기술된 것으로 단편적인 서술에 그치는 경우가 많은 것이 사실이다. 또한 외국에는 설계지침 뿐만 아니라, 전산프로그램 등의 설계도구가 잘 갖추어져 있는 반면, 한국은 그렇지 못한 실정이다. 따라서 발전된 수리·수문 해석기술을 반영하는 동시에 설계 실무에 실질적인 도움이 될 수 있도록 설계지침을 개선하고, 그에 따른 설계가 가능하도록 전산프로그램 등의 설계도구들을 개발할 필요가 있다.

도로배수시설 중 노면배수는 도로부지 내의 강우에 의해 발생한 우수를 배제하는 것을 의미한다. 노면에서 발생한 강우로 인한 유출수는 수로로 유입되고, 수로로 유입된 유량은 하류로 갈수록 증가하게 된다. 이 때, 수로로 유입된 유량이 수로의 통수능을 초과하지 않도록 하는 간격으로 유출구(outlet)를 두어 종배수로 등으로 배수시킬 필요가 있다. 그러므로 노면배수시설의 설계는 유출구 사이의 간격(outlet spacing)을 결정하는 것으로서, 유출구 사이의 구간을 하나의 수로로 간주하면 수로의 길이(channel length)를 결정하는 것이 된다. 이러한 노면배수시설의 설계에 영향을 미치는 요소는 홍수 재현기간과 그에 대응하는 강우강도, 시설체계의 형상, 경사, 조도계수 등과 같은 물리적 특성, 유출구의 위치 또는 간격이다(Mays, 2001).

노면배수시설과 관련하여 도로 횡단·종단경사, 집수정 형식 등에 따른 차집효율, 집수정 간격 등에 관한 연구들이 있다(Brown *et al.*, 1996; Brune *et al.*, 1975; Burgi and Gober, 1977; Pugh, 1980; Wong, 1994; Wong and Moh, 1997). 국내에서 수행된 연구에서도 주로 노면 수리모형 실험을 실시하여 다양한 조건에 따른 차집효율의 변화를 조사하였다(류택희, 2002; 이상국, 2002; 이종태 등, 2003; 임동환, 2003). 이러한 연구들 대부분 수리실험을 통하여 횡단·종단경사, 유출구

간격 등에 따른 차집효율을 분석하여 경험식을 제시하는데 초점을 두고 있다.

노면배수시설의 수로에서 흐름은 유량이 연속적으로 증가하는 부등류이지만, 노면배수 시설과 관련한 연구들은 대부분 흐름을 등류로 간주하여 분석하였으며, 현재 국내의 노면배수시설의 설계에서도 도로배수를 위한 다른 시설들과 마찬가지로 등류 해석에 기반하여 이루어지고 있다(건설교통부, 2003). 이에 본 연구에서는 충분히 연구, 정립되어 있는 부등류 해석 이론(Chaudhry, 1993; Chow, 1959; Escarameia *et al.*, 2001; Naqvi, 2003)에 기반하여 유량이 연속적으로 증가하는 선형 배수로의 흐름을 해석하고자 한다.

설계강우는 강우 지속시간과 그 강우로 인하여 발생하는 홍수량이 최대가 되는 강우강도로 정하며, 외국에서는 설계강우량 산정에 강우 지속시간을 필연적으로 포함시켜 설계홍수량은 도달시간을 미지의 변수로 두고 시산법적 반복과정으로 산정하도록 하고 있다(AASHTO, 1999; AASHTO, 2005; Escarameia *et al.*, 2001, 2002; McCuen *et al.*, 2001; Naqvi, 2003; Schall *et al.*, 2001). 홍수 도달시간이 설계강우의 지속시간을 결정하는 요소임을 감안한다면 이는 당연하고도 합리적인 수문설계의 과정이라 할 수 있다. 반면 국내 도로배수시설 설계지침의 설계홍수량 산정 과정에는 강우 지속시간을 결정하는 내용이 전혀 언급되지 않고 있다(건설교통부, 2003). 현재 국내에서 사용되는 확률강우강도(건설교통부, 2000)는 최소 지속시간 10 분으로 유도된 것으로, 도로배수시설의 설계에서도 그 확률강우강도를 이용하고 있으며 도달시간을 최소 지속시간인 10 분으로 가정하여 지속시간이 10 분인 강우강도를 설계에 적용하고 있다. 그러므로 본 연구에서는 노면배수 설계기법을 개선하기 위하여 설계 홍수량을 결정하는데 임계지속시간의 개념을 반영하고자 한다.

본 연구의 최종 목표로서 개발하고자 하는 노면배수 설계모형은 임계지속시간을 고려하고 부등류 해석을 기반으로 한 모형이며, 현재 임계지속시간을 고려하지 않고 등류 해석을 기반으로 한 실시설계 방법과 비교·검

Table 1. Design Models of Road Surface Drainage Facilities

Design model	Flow analysis	Duration of design rainfall
Model I	Uniform flow	10 minutes
Model II	Uniform flow	Variables
Model III	Varied flow	10 minutes
Model IV	Varied flow	Variables

도한다. 아울러 임계지속시간의 고려 여부와 흐름 해석 방법에 따른 설계 결과의 변화를 살펴보기 위하여, Table 1과 같은 4가지 유형의 노면배수 설계 모형을 구성하여 적용한다. 이와 함께 수로의 종단경사와 수로의 통수능과 관련되어 있는 길어깨 횡단경사의 변화에 따른 설계 결과를 검토한다. 본 연구는 궁극적으로 노면 배수시설의 설계 방법을 개선시키고 실무에서 쉽게 이용할 수 있는 설계 도구를 실무자들에게 제공하기 위함으로, 임계지속시간을 고려하고 부등류 해석을 기반으로 한 개선된 방법으로 설계한 결과가 실시설계와 어떠한 차이를 갖는지 이해하고자 한다.

## 2. 임계지속시간의 개념을 반영한 설계

Fig. 1과 같은 전형적인 노면배수 시설체계에서 흐름은 노면의 표면 박류 흐름과 선형 배수로의 흐름으로 구분되므로, 도달시간은 노면 박류 흐름(surface sheet flow)에 대한 도달시간(유달시간)과 수로 흐름(channel flow)에 대한 도달시간(유하시간)의 합으로 산정한다. 임계지속시간을 고려한 설계를 위해서는 설계홍수량을 설계변수로 고려하여 지속시간을 유달시간과 유하시간의 합인 도달시간과 비교하여 결정하여야 한다. 이러한 임계지속시간을 고려한 노면배수시설의 설계절차는 다음과 같다.

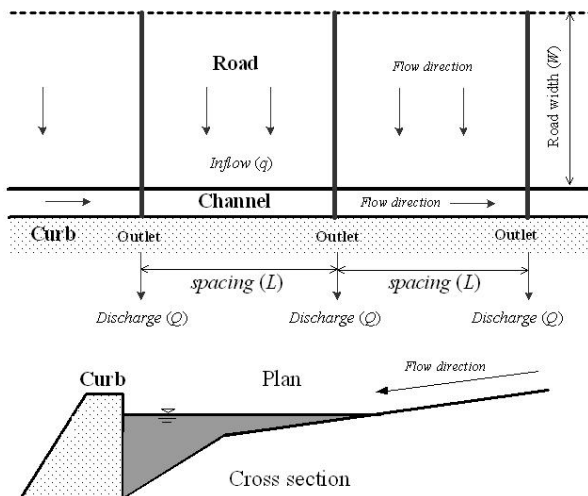


Fig. 1. A conventional Drainage System (Modified from Naqvi, 2003)

우선 강우의 지속시간( $T_i$ )을 가정하여 강우강도공식으로부터 그 지속시간에 대한 강우강도( $I$ )를 산정하고, 그 호우에 응답하여 발생하는 노면 박류 흐름의 유달시간( $t_s$ )과 수로로 유입된 유량이 수로의 유출구로 유출되기까지 걸리는 유하시간( $t_c$ )을 산정한다. 노면과 수로 흐름에 대한 총 도달시간( $T_f = t_s + t_c$ )이 가정한 지속시간( $T_i$ )과 유사하다면, 그 때의 지속시간 및 강우강도를 임계지속시간 및 설계 강우강도로 결정한다(Fig. 2 참조).

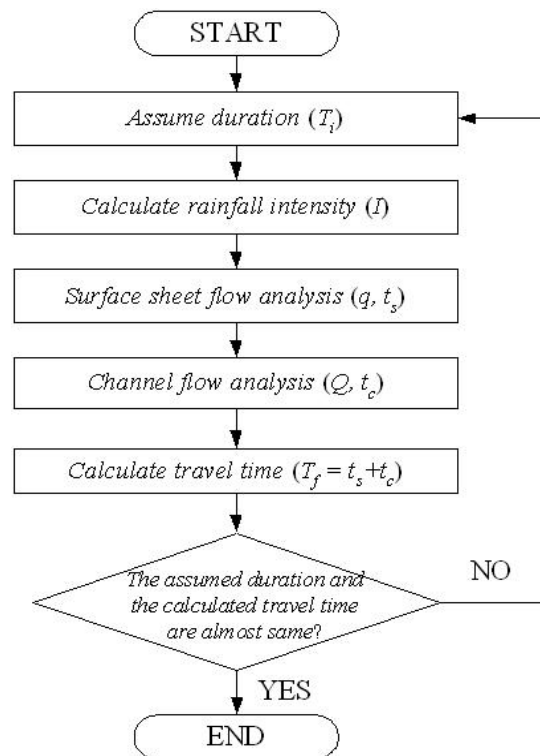


Fig. 2. Road Surface Drainage Design under the Consideration of the Critical Duration

### 2.1 노면 박류 흐름의 도달시간

도로의 횡단면은 도로 노면, 길어깨 부분, 측구로 구성될 수 있으며, 길어깨 부분은 지표 또는 수로의 역할을 하게 된다. 길어깨 부분이 지표로서 역할하게 되면 수로로 유입되는 유량에 기여하는 배수구역은 2개의 지표로 구성되는 것으로 간주할 수 있다(Fig. 3 참조). 노면으로부터 수로로 유입되는 유량은 다음과 같이 합리식으로 결정된다.

$$Q_s = CIA_s = CIWL \quad (1)$$

여기서  $Q_s$ 는 노면으로부터 유입되는 유량,  $C$ 는 유출 계수,  $I$ 는 강우강도,  $A_s$ 는 배수 노면의 면적,  $W$ 는 지표의 흐름 길이로서 도로 폭,  $L$ 은 수로 길이(유출구 간격)이다.

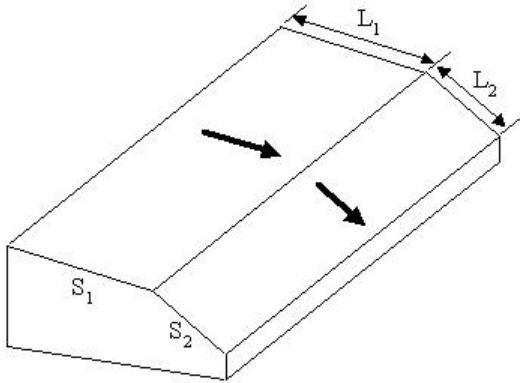


Fig. 3. Road Surface Configuration (Modified from Akan, 1985)

노면의 표면 박류 흐름의 도달시간은 외국에서 개발된 각종 도달시간 공식들 중 지표의 경사 변화를 고려하는 운동과 공식인 Overton and Meadows (1976)의 식을 이용하여 도달시간을 산정하였다(Eqs. (2) and (3) 참조).

$$t_s = \frac{(n_1 I / \sqrt{S_1})^{0.6} (Z_1^{1.6} - Z_0^{1.6}) + (n_2 I / \sqrt{S_2})^{0.6} (Z_2^{1.6} - Z_1^{1.6})}{(Z_1 - Z_0) + (Z_2 - Z_1)} \quad (2)$$

$$Z_j = \sum_{m=1}^j L_m \quad (3)$$

여기서  $t_s$ 는 노면의 표면 박류 흐름에 대한 도달시간,  $n$ 은 조도계수이며,  $I$ 는 강우강도,  $S_j$ 는 경사,  $L_j$ 은 지표의 흐름길이, 아래첨자 1과 2는 각 지표요소를 나타낸다.

## 2.2 수로 흐름의 도달시간

도달시간의 산정방법은 수로의 흐름 해석 방법에 따라 달라진다. 등류 해석에서 도달시간은 유출량을 구하려는 지점에서 상류의 측구, 관 등의 최장연장을 평균속도로 나눈 것으로서 Eq. (4)를 이용하여 산정한다.

$$t_c = \frac{L}{V} \quad (4)$$

여기서  $t_c$ 는 도달시간,  $V$ 는 평균유속,  $L$ 은 수로 길이이다.

부등류 해석에서 도달시간은 흐름 계산에서 구분된 각 계산지점 사이의 유하시간을 산정하고 이를 모두 합산하여 구할 수 있다. 노면배수 시설의 수로처럼 양단에 유출구가 있는 수로의 경우, 유량은 분수계 지점을 기준으로 상류단과 하류단을 통하여 유출된다. 이 때 도달시간은 선형 배수로를 상류측과 하류측에 해당하는 수로로 구분하여, 상류단과 하류단으로 유하되는 도달시간을 각각 계산하여야 하며, 그 중 큰 값을 수로의 도달시간으로 취한다.

$$t_i = \frac{dx}{v_i} \quad (5)$$

$$t_c = \sum t_i \quad (6)$$

여기서  $t_i$ 는 각 계산지점 사이의 유하시간,  $dx$ 는 각 계산지점 사이의 거리,  $v_i$ 는 각 계산지점의 평균유속이다.  $t_c$ 는 수로로 유입된 유량이 상류단 또는 하류단으로 유출되는데 걸리는 총 유하시간이다.

## 3. 선형 배수로의 흐름 해석에 따른 설계

노면배수시설의 선형 배수로 흐름에 영향을 미치는 요소는 수로로 유입되는 유량, 수로의 단면형상, 조도계수 및 종단경사 등이며, 이러한 수로의 설계는 수로 내에서 발생하는 최대 수심이 허용수심을 초과하지 않도록 유출구의 간격, 즉 수로의 길이를 결정하는 것이다.

### 3.1 등류 해석을 기반으로 한 설계

#### 3.1.1 계산 모형

수로 흐름을 등류로 해석하는 경우 단면 평균유속은 Eq. (7)의 Manning 공식으로 산정하며, 유량은 Eq. (8)로 결정한다.

$$V_c = \frac{1}{n} R_c^{2/3} S_o^{1/2} \quad (7)$$

$$Q_c = V_c A_c \quad (8)$$

여기서  $Q_c$ 는 수로의 허용유량,  $A_c$ 는 수로 단면적,  $V_c$ 는 평균유속,  $n$ 은 Manning의 조도계수,  $R_c$ 는 동수반경,  $S_o$ 는 수로 종단경사이다.

#### 3.1.2 설계 절차

등류 해석으로 설계하는 경우 허용수심을 직접 이용하여 통수단면적을 산정하고 Eqs. (7) and (8)로부터 평균유속 및 유량을 산정한다. 노면으로부터 수로로 유입

되는 유량은 수로의 허용유량과 동일해야 하므로, 다음의 Eq. (9)가 성립한다. 이로부터 유출구 간격( $L$ )은 Eq. (10)으로 산정한다(Fig. 4 참조).

$$Q_c = Q_s \quad (9)$$

$$L = \frac{V_c A_c}{C I W} \quad (10)$$

여기서  $L$ 은 수로 길이(유출구 간격),  $A_c$ 는 수로 단면적,  $V_c$ 는 평균유속,  $C$ 는 유출계수,  $Q$ 는 수로의 허용유량,  $I$ 는 강우강도,  $W$ 는 지표 흐름 길이로서 도로 폭이다.

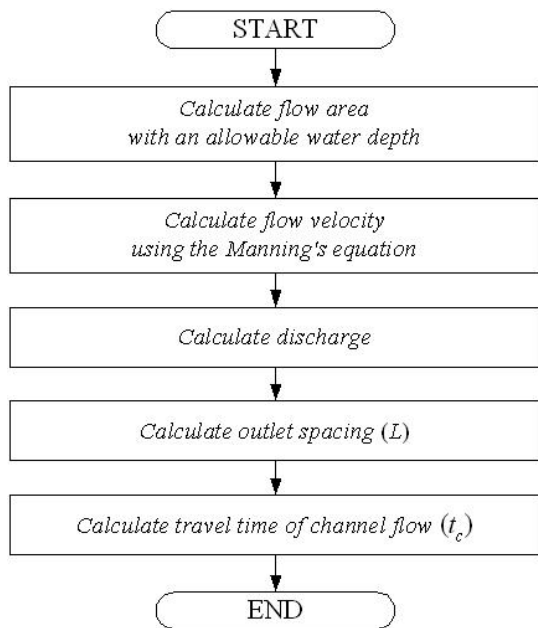


Fig. 4. Design Based on Uniform Flow Analysis

### 3.2 부등류 해석을 기반으로 한 설계

#### 3.2.1 계산 모형

부등류로 해석하는 경우, 선형 배수로의 흐름에 대한 지배 방정식으로서 다음과 같은 유한 차분 형태의 대수 방정식을 사용할 수 있다.

$$\frac{1}{g} (Q_2 V_2 - Q_1 V_1) - \frac{1}{2} S_o (A_1 + A_2) dx + \frac{1}{2} (A_1 S_{f1} + A_2 S_{f2}) dx + \frac{1}{2} (A_1 + A_2) (y_2 - y_1) = 0 \quad (11)$$

여기서  $Q$ 는 유량,  $V$ 는 평균유속,  $A$ 는 통수단면적,  $S_o$ 는 수로의 종단경사,  $S_o$ 는 마찰경사,  $g$ 는 중력가속도,  $y$ 는 수심,  $x$ 는 종방향 위치를 나타내는 변수로서  $dx$ 는 지점 1과 2 사이의 거리이다. 아래첨자가 1인 변수들은 지지

의 값을 의미하며, 아래첨자 2인 변수들은 모두 수심의 함수로서 표현이 가능하다. 따라서 Eq. (11)은  $y_2$ 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. (11)을 순차적으로 풀어서 계산할 수 있다.

종단경사가 영일 때 분수계의 위치는 수로 중앙이 되므로, 유입된 유량의 반은 상류단을 통하여, 나머지 반은 하류단을 통하여 유출된다. 이 때, 수로 양단이 지배단면이 되므로 수로 내의 수심은 상류단과 하류단으로부터 분수계 방향으로 계산하여야 한다. 수로 양단이 지배단면이면서 종단경사가 0%가 아닌 경우에는 분수계의 위치를 찾는 과정이 요구되며, 상류단과 하류단으로부터 축차적으로 계산한 분수계 지점에서의 두 수심이 유사한가를 비교하여 분수계의 위치를 결정하게 된다(Naqvi, 2003; 구혜진과 전경수, 2008). 그러나 주어진 수로 길이에 대하여 종단경사가 어떤 임계값보다 커지면 지배단면은 상류단 측으로 이동하게 되고, 양단에 유출구가 있더라도 수로는 하류단에 하나의 유출구가 있는 수로처럼 거동하기 쉽다. 즉, 수로로 유입된 유량 대부분이 수로의 하류단을 통하여 유출되게 된다. 종단경사가 임계값보다 커져 지배단면이 수로 내에 위치하는 경우, 지배단면의 위치를 결정한 후 그 단면으로부터 상류 방향과 하류 방향으로 각각 수심을 산정하게 된다. 수로 양단에 유출구가 있는 수로처럼 거동하는 수로의 흐름을 부등류로 해석하는 과정은 Fig. 5에 제시하였고, 수로 한 단에 유출구가 있는 수로처럼 거동하는 경우의 해석과정은 Fig. 6에 제시하였다. 이러한 부등류 해석을 위한 절차는 Eq. (7)의 평균유속공식을 적용하는 등류 해석 절차보다 복잡함을 알 수 있다.

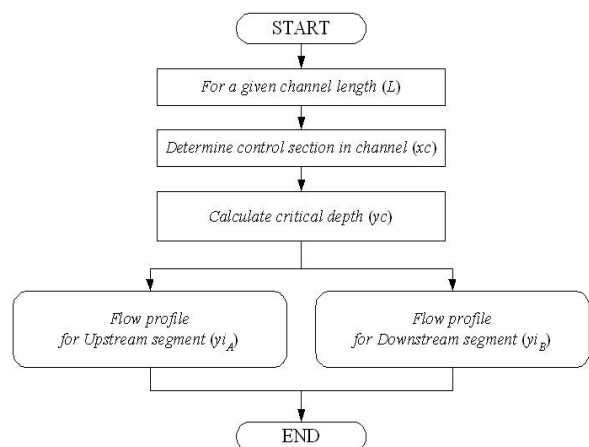


Fig. 5. Varied Flow Analysis for a Channel with One Outlet

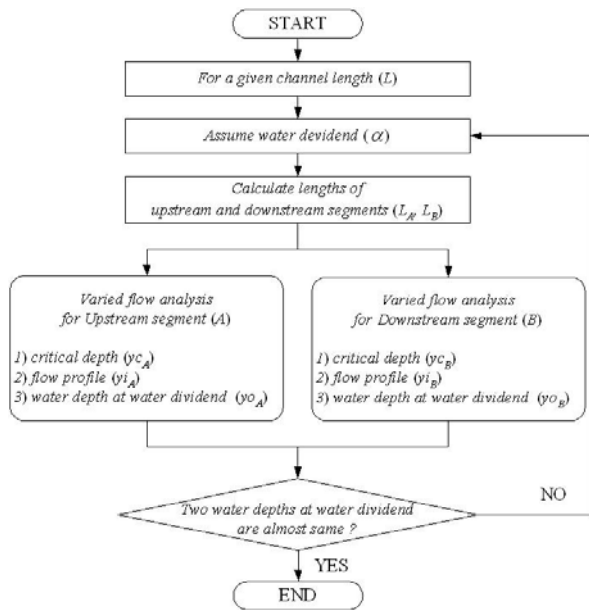


Fig. 6. Varied Flow Analysis for a Channel with Two Outlets

### 3.2.2 설계 절차

등류 해석으로 설계하는 경우 통수능은 허용수심을 이용하여 결정되므로 유출구 간격을 결정하는데 수로 길이를 가정할 필요가 없다. 그러나 부등류 해석으로 설계하는 경우, 수로 길이를 가정한 후 부등류 해석을 수행하여 수로 내에서 발생하는 최대수심을 조사하고, 그 최대수심이 허용수심을 초과하지 않을 때의 수로 길이를 유출구 간격으로 결정하게 된다. 3.2.1절에서 논의한 바와 같이 양단에 유출구가 있는 수로는 양단에 유출구가 있는 선형 배수로처럼 거동할 것인지 한단에 유출구가 있는 선형배수로처럼 거동할 것인지 판단해야 한다. 따라서 가정한 수로 길이  $L$ 을 가지는 수로에 대하여 한계수심이 발생하는 위치, 즉 지배단면의 위치 ( $x_c$ , 상류단으로부터 지배단면까지의 거리)와 그 때의 경사의 관계를 조사하는 과정이 선행되어야 한다. Fig. 7은 부등류 해석으로 설계하는 경우 설계 절차를 나타낸다.

## 4. 모형의 적용 및 결과

### 4.1 모형의 적용

Table 1의 각 설계 방법에 따른 결과를 비교·검토하기 위하여, 건설교통부(2005)의 '성토부 L형측구 도수로 설치 간격 계산'에 적용된 도로 및 L형측구의 특성을 이용하였다(Fig. 8 and Table 2 참조). 수리계산서에서는 강우관측소 부안의 10년 재현기간, 10분 지속시간의 강우강도 201 mm/hr를 적용하고 있으나, 지속시간을 설계 변수로 두는 설계방법에서는 강우강도식이 요

구된다. 그러나 부안 지점에 대한 분단위 강우강도식의 부재로 인하여 서울 지점에 대한 분단위 강우강도식 중 10년 재현기간의 Japanese 강우강도식을 사용하였다 (Table 3 참조). 이 분단위 강우강도식은 시단위 강우자료를 분단위로 변환하는 방법 중 Random cascade 모형을 이용하여 유도된 것이다(박창열 등, 2007). 각 설계방법에 따른 설계결과의 차이를 비교·검토하기 위해서는 동일한 지점에서의 분단위 강우강도식을 고려해야 하기 때문에, 임계지속시간을 고려하지 않는 Model I과 Model III의 적용에는 서울지점의 분단위 강우강도식으로부터 10분 지속시간에 대한 강우강도 121 mm/hr를 이용하였고, Model II와 Model IV의 적용에는 서울지점의 분단위 강우강도식을 직접 이용하였다.

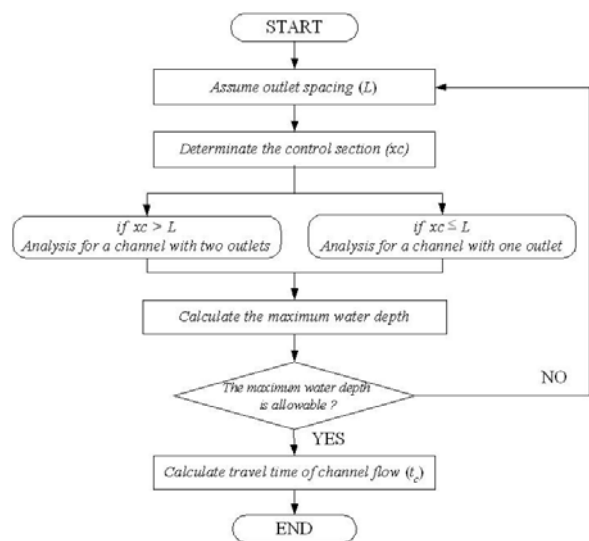


Fig. 7. Design Based on Varied Flow Analysis

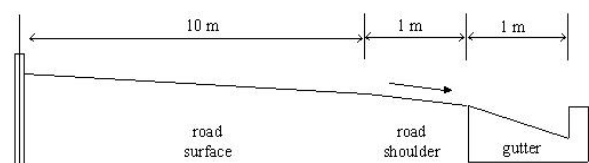


Fig. 8. A Drainage System for Model Application

수로의 종단경사와 길어깨 횡단경사에 따른 설계 결과의 차이를 알아보기 위하여 0.0~8.5%의 종단경사, 1~6%의 길어깨 경사를 고려하였으나, 등류 해석의 Model I과 Model II의 적용시 0.0%의 종단경사는 제외하였다. 이는 등류 해석에서 사용되는 Eqs. (7) and (8)에서 종단경사가 0.0%가 되면 유량이 0이 되어 수로에 대한 설계가 불가능하기 때문이다. 국내 설계 실무에서 수로의 허용수심은 허용통수면을 이용하여 결정하므로 본 연구에서 1.5m의 허용통수면을 고려하여 허

**Table 2. Road Property for Model Application**

classification		value
longitudinal slope (channel slope, %)		0.0~8.5
runoff coefficient		0.9
width (m)	road	10
	road shoulder	1
	gutter	1
cross slope (%)	road	2
	road shoulder	1~6
	gutter	10

※ 「격포~하서 도로 확장공사 실시설계 수리계산서(건설교통부, 2005)」의 ‘성토부 L형측구 도로로 설치 간격 계산’에 적용된 도로 및 L형측구의 특성

**Table 3. Rainfall Intensity Equation (return period : 10 yrs)**

type	Japaneses ( $I = \frac{a}{\sqrt{t+b}}$ )
coefficient a	310.773
coefficient b	-0.596

**Table 4. Available Width and Depth According to Each Cross Slope**

road shoulder cross slope (%)	Available width (m)	Available depth (m)
1	1.5	0.105
2	1.5	0.110
3	1.5	0.115
4	1.5	0.120
5	1.5	0.125
6	1.5	0.130

용수심을 산정하도록 하였다. 허용수심은 수로의 통수 단면을 결정하는 측구의 횡단경사와 길어깨 횡단경사에 따라 다르므로, 길어깨 경사에 따른 허용수심을 조사하였다. Table 4로부터 동일한 통수면에 대하여 길어깨 경사가 커질수록 허용수심이 증가함을 알 수 있다.

#### 4.2 설계방법별 설계결과 비교

설계결과로서 도달시간, 강우강도, 유출유량 및 유출구 간격을 산정하였으며, 길어깨 경사가 1.0 %와 6.0 %일 때 종단경사에 따른 결과는 Figs. 9 and 10에 제시하였고, 종단경사가 0.3 %와 8.5 %일 때 길어깨 경사에 따른 결과는 Figs. 11 and 12에 제시하였다. 여기서 강우강도는 임계지속시간을 고려하는 Model II와 Model IV의 경우에 설계결과로서 얻어진다.

##### 4.2.1 수로의 종단경사에 따른 설계결과

등류 해석에서 Eqs. (4) and (10)으로부터 유하시간( $t_c$ )은 강우강도( $I$ ), 도로 폭( $W$ ), 수로 단면( $A_c$ )의 함수가 되므로, 강우강도가 일정하다면 유하시간도 일정한

값을 갖게 되며 종단경사의 변화에 영향을 받지 않는다. 따라서 Model I를 적용한 경우 121 mm/hr의 일정한 강우강도에 대하여 유하시간은 종단경사에 상관없이 일정한 값을 갖는다. 유달시간과 유하시간의 합인 도달시간( $T_p$ )은 길어깨 경사가 1 %일 때 6.28 분, 6 %일 때 6.87 분으로 산정되었다. Model II를 적용한 경우 임계지속시간을 고려하여 강우강도를 결정하더라도 종단경사는 강우강도 결정에 영향을 미치지 않았으며, 길어깨 경사가 1 %일 때 201 mm/hr, 6 %일 때 190 mm/hr으로 산정되었다. 이 때 도달시간은 길어깨 경사가 1 %일 때 4.60 분, 6 %일 때 4.97 분으로 산정되었다.

길어깨 경사가 1 %인 경우 Model III를 적용한 경우 121 mm/hr의 강우강도에 대하여 도달시간은, 종단경사가 0.3 %일 때 6.85 분, 8.5 %일 때 4.99 분으로 산정되었으며, Model IV의 경우 강우강도는 139 mm/hr, 183 mm/hr으로 121 mm/hr보다 크게, 도달시간은 8.03 분과 5.30 분으로 10 분보다 작게 산정되었다. 부등류 해

석으로 설계한 결과, 종단경사가 커질수록 도달시간은 감소하는 경향을 보였으며, 종단경사가 어느 값(약 3.5 %) 이상 커지면 도달시간은 거의 일정한 값에 수렴하였다. Model IV의 강우강도는 도달시간의 변화 추이로부터 예측할 수 있듯이 종단경사가 커질수록 증가하다가 일정한 값에 수렴하였다.

유출유량은 각 설계방법에 상관없이 종단경사가 커질수록 증가하는 경향을 보였다(Figs. 9(c) and 10(c) 참조). 등류 해석의 경우 통수능은 주어진 허용통수면에 따라 결정되고, 부등류 해석의 경우 수로에서 발생하는 최대수심이 허용수심을 초과하지 않도록 설계하게 되므로 유출구로 유출되는 총유량은 설계방법에 따라 크게 변하지 않는 것으로 나타났다. 유출구 간격은 0 % 경사를 제외하고 설계 방법에 상관없이 종단경사가 커질수록 증가하였다(Figs. 9(d) and 10(d) 참조). 임계지속시간을 고려하는 경우(Model IV와 Model II)보다 임계지속시간을 고려하지 않는 경우(Model III와 Model I)가 유출구 간격이 크게 산정되었으며, 길어깨 경사가 커지면서 Model I과 Model III의 차이는 감소하는 것으로 나타났다.

부등류 해석으로 설계하는 경우, 0 % 경사의 수로, 즉 수평으로 설치된 수로에 대한 설계가 가능하다. 수평 수로에 대하여 Model III의 도달시간은 길어깨 경사가 1 %일 때 19.18 분, 6 %일 때 28.44 분으로 산정되었으며, Model IV의 도달시간은 길어깨 경사가 1 %일 때 44.9 분, 6 %일 때 106.66 분으로 산정되었다. 종단경사가 0 %일 때, 다른 종단경사에 비하여 도달시간은 크게 증가하며, 임계지속시간을 고려하는 경우에 크게 증가함을 알 수 있다. 노면배수시설과 같이 양단에 유출구를 가지는 선형 배수로에 대한 부등류 해석에서, 종단경사의 변화에 따른 수로에서 발생하는 최대수심을 조사한 결과(구혜진과 전경수(2008)의 Fig. 12 참조)로부터, 최대수심은 종단경사가 커질수록 증가하다가 어떤 경사를 기점으로 감소한다. 이러한 특성을 지닌 선형 배수로의 유출구 간격은 수로에서 발생하는 최대수심이 허용가능한 수심을 초과하지 않는 최대수심을 가지는 유출구 간격으로 설정된다(국내 설계에서 허용 통수능의 개념으로 판단). 따라서 최대수심이 종단경사가 커질수록 증가하다가 어떤 경사를 기점으로 감소한다면, 유출구 간격은 감소하다가 증가하는 경향을 가지게 된다. 본 연구에서도 이러한 경향을 확인할 수 있으며, 유출구 간격이 종단경사가 0 %인 경우보다 0.3 %일 때 작고, 경사가 0.3 %보다 큰 경우에는 경사가 커질수록 유출구 간격도 증가하는 것으로 나타났다(Figs. 9(d) and 10(d) 참조).

#### 4.2.2 길어깨 횡단경사에 따른 설계결과

길어깨 횡단경사가 커질수록 도달시간은 다소 감소하다가 증가하는 경향을 가졌으며 설계 방법에 따른 차이는 미소하였다. 단, Model IV에 대한 도달시간은 다른 설계모형보다 길어깨 경사에 민감한 것으로 나타났다. 길어깨 경사와 도달시간의 관계로부터 길어깨 경사가 증가할수록 강우강도는 다소 증가하다가 감소함을 예측할 수 있으며, 이는 Figs. 11(b) and 12(b)의 Model II와 Model IV의 결과로부터 확인할 수 있다.

Figs. 11(a) and 11(b)로부터 Model I과 Model III의 도달시간은 6~7 분 사이로 산정되었으며, 이는 강우강도(121 mm/hr) 산정에서 가해진 지속시간 10 분과 다름을 확인할 수 있다. 임계지속시간을 반영하여 설계하는 경우 이러한 지속시간과 도달시간의 차이를 해결할 수 있다. Model II의 지속시간은 약 4.5 분으로 산정되었으며 이에 대한 강우강도는 190~207 mm/hr로서 10 분 지속시간인 121 mm/hr보다 크게 산정되었다. Model IV의 경우, 약 8~9.5 분의 지속시간에 대한 강우강도는 125~140 mm/hr로 산정되었다. 종단경사가 8.5 %인 Figs. 12(a) and 12(b)로부터 종단경사가 커질수록 각 설계방법에 따른 도달시간과 강우강도의 차이는 감소하는 것으로 나타났다.

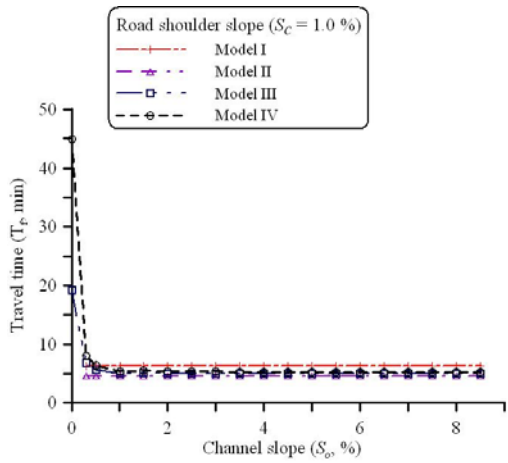
길어깨 경사는 수로의 통수단면 산정에 기여하며 길어깨 경사가 커질수록 수로의 통수단면이 커진다. 이에 따라 유출유량은 길어깨 경사가 커질수록 증가하였다. 그러나 설계 방법에 따른 차이는 거의 나타나지 않았다. Model IV의 경우, 길어깨 경사가 1~6 %일 때 유출유량은 0.0197~0.0361 m<sup>3</sup>/s(종단경사 0.3 %), 0.09952~0.1915 m<sup>3</sup>/s(종단경사 8.5 %) 사이의 값을 갖는 것으로 산정되었다. Model IV의 경우 유출유량은 종단경사가 커지면 길어깨 경사의 변화에 더 민감한 것으로 나타났다.

유출구 간격은 설계 방법에 상관없이 길어깨 경사가 커질수록 증가하였다. Model I과 Model III의 경우 유출구 간격은 거의 유사하였으며 부등류 해석 및 임계지속시간을 고려하는 Model IV의 경우 종단경사가 작을 때는 Model III에 근접하였으나, 종단경사가 증가하면 Model II의 결과와 유사해지는 경향을 나타냈다. 길어깨 경사에 따른 Model IV의 유출구 간격은 종단경사가 0.3 %일 때 56.66~115.38 m, 8.5 %일 때 218.6~486.64 m로 산정되었다.

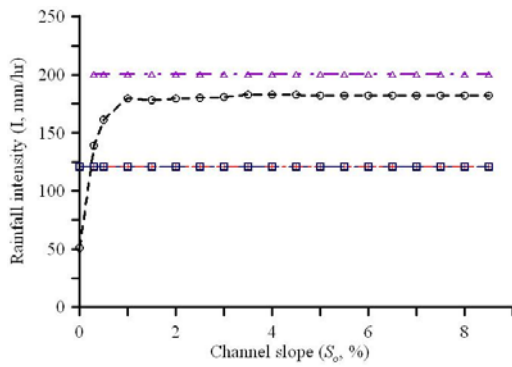
#### 4.2.3 설계방법별 비교

종단경사 및 길어깨 횡단경사의 모든 조건에 대하여 수행된 설계결과 중 유출구 간격을 10분 강우강도를 적

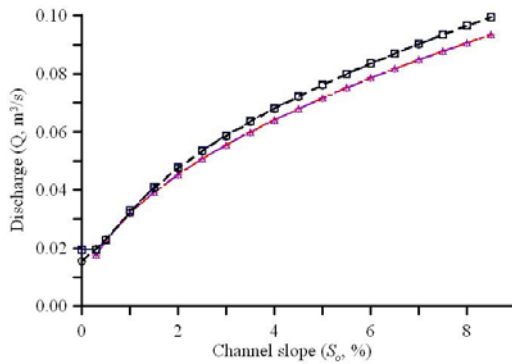




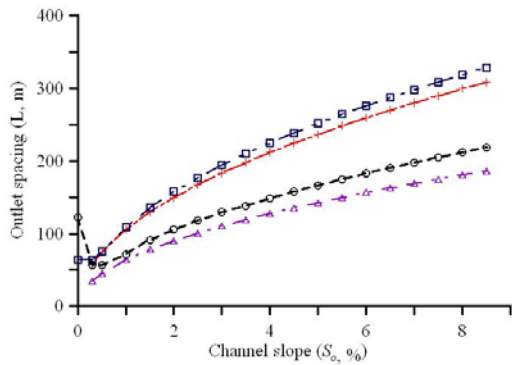
(a) Travel time ( $T_f$ , min)



(b) Rainfall intensity ( $I$ , mm/hr)

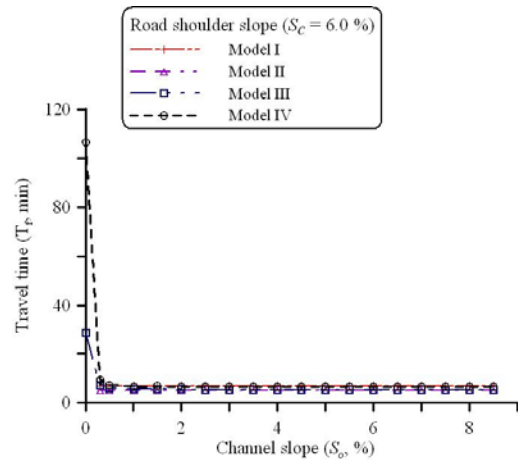


(c) Discharge ( $Q$ ,  $m^3/s$ )

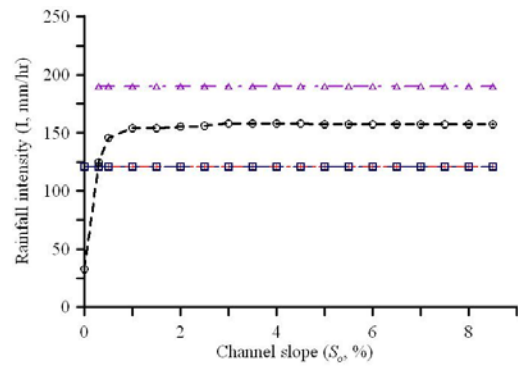


(d) Outlet spacing ( $L$ , m)

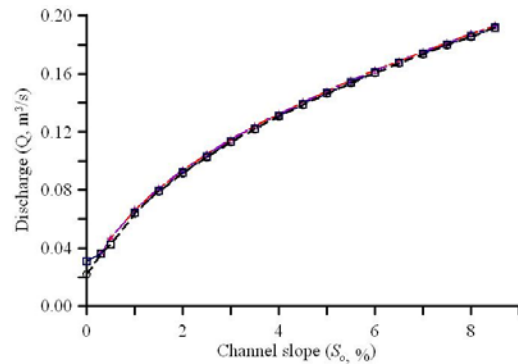
Fig. 9. Design Results under the Change of  $S_o$  ( $S_c = 1.0\%$ )



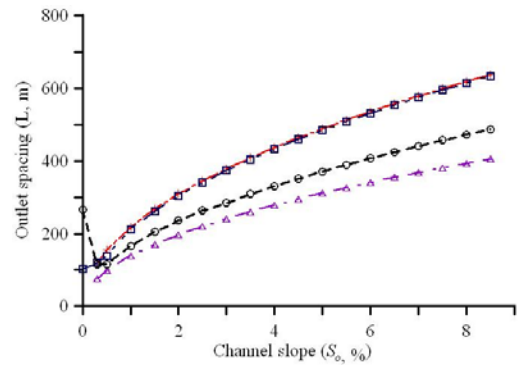
(a) Travel time ( $T_f$ , min)



(b) Rainfall intensity ( $I$ , mm/hr)

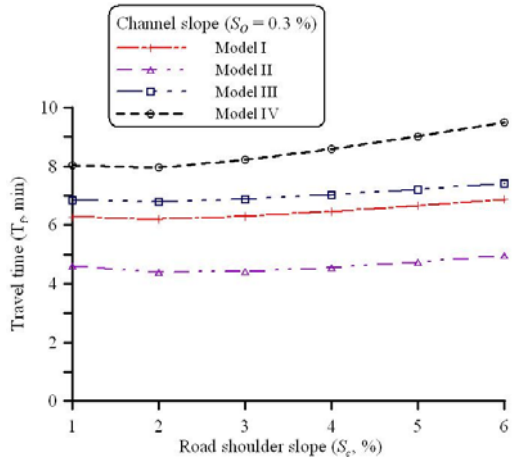


(c) Discharge ( $Q$ ,  $m^3/s$ )

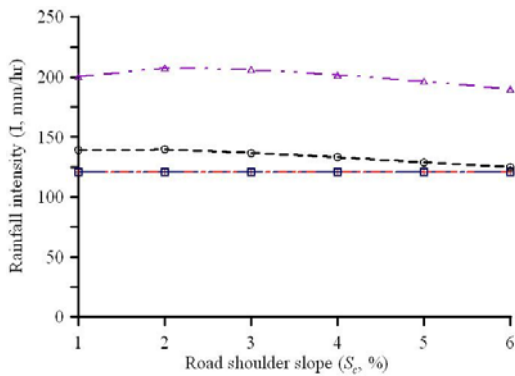


(d) Outlet spacing ( $L$ , m)

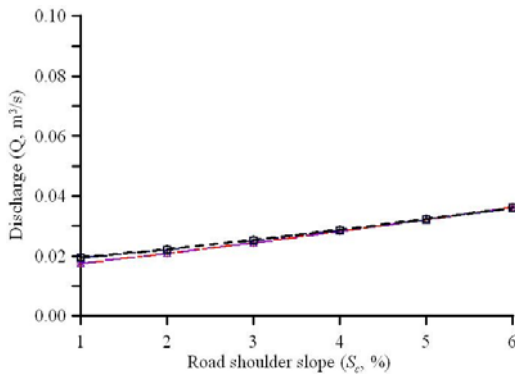
Fig. 10. Design Results under the Change of  $S_o$  ( $S_c = 6.0\%$ )



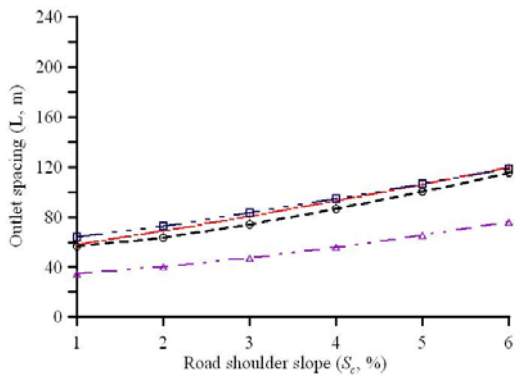
(a) Travel time ( $T_c, \text{min}$ )



(b) Rainfall intensity ( $I, \text{mm/hr}$ )

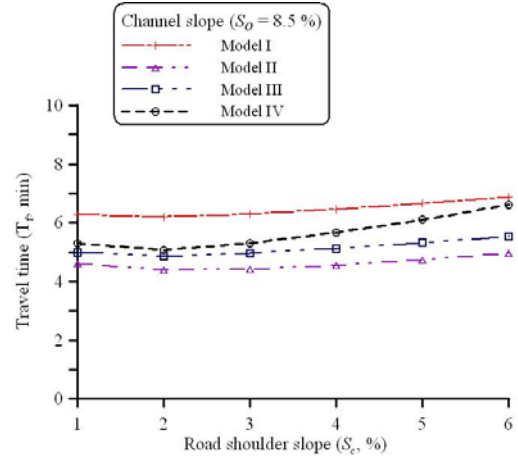


(c) Discharge ( $Q, \text{m}^3/\text{s}$ )

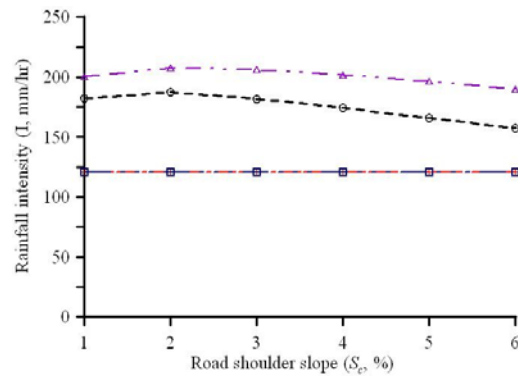


(d) Outlet spacing ( $L, \text{m}$ )

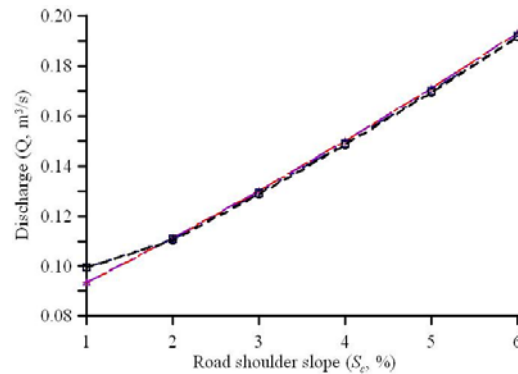
Fig. 11. Design Results under the Change of  $S_o$  ( $S_c = 0.3\%$ )



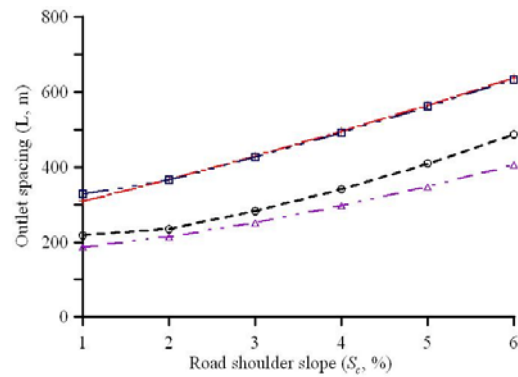
(a) Travel time ( $T_c, \text{min}$ )



(b) Rainfall intensity ( $I, \text{mm/hr}$ )



(c) Discharge ( $Q, \text{m}^3/\text{s}$ )



(d) Outlet spacing ( $L, \text{m}$ )

Fig. 12. Design Results under the Change of  $S_o$  ( $S_c = 8.5\%$ )

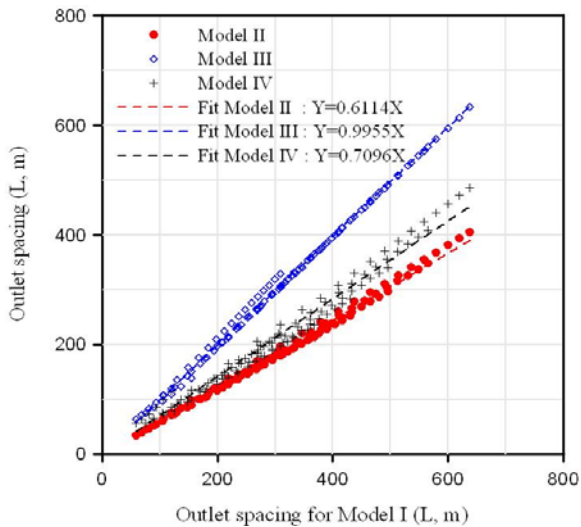


Fig. 13. Comparison of Outlet Spacing for Each Design Model

용하고 등류 해석으로 설계하는 방법(Model I)을 기준으로 나머지 설계방법들(Model II, Model III, Model IV)을 비교하였다(Fig. 13 참조). Model III에 대한 추세선의 기울기는 0.9955로, 임계지속시간을 고려하지 않을 경우 등류 해석과 부등류 해석에 의한 유출구 간격의 차이는 크지 않음을 확인할 수 있다. 그러나 임계지속시간을 고려하는 설계방법인 Model II와 Model IV에 대한 추세선의 기울기는 0.6114와 0.7096으로서 유출구 간격이 Model I의 경우보다 작은 것으로 나타났다. 또한 임계지속시간을 고려하여 설계한다면 적용한 흐름 해석 방법에 따른 유출구 간격의 차이가 커짐을 알 수 있다.

노면배수 시설의 설계에서 유출구 간격이 크게 설계되는 것은, 동일한 도로 구간에 대하여 설치해야 할 유출구의 개수가 적어지는 것을 의미한다. 본 연구에서 고려하고 있는 노면배수 시설의 조건에서 10 분 도달시간을 가정하여 설계하는 방법(Model I, Model III)이 임계지속시간을 고려하여 설계하는 방법(Model II, Model IV)보다 유출구 간격이 더 크게 산정되었으며, 이에 따라 설치해야 할 유출구의 개수는 더 적어지는 것으로 나타났다. 즉, 설계 대상구역인 노면배수 시설에 대하여 실제 도달시간이 10 분 이하로 산정된다면, 임계지속시간을 고려하지 않고 지속시간을 10 분으로 가정하여 설계하는 방법이 유출구 간격을 크게 산정하게 되므로, 이를 근거로 설계한다면 배수불량과 같은 문제가 발생할 가능성이 커질 수 있음을 알 수 있다.

임계지속시간을 고려하지 않는 경우, 본 연구에서 고려된 대부분의 조건에서 부등류 해석(Model III)의 유출구 간격은 등류 해석(Model I)의 유출구 간격보다 약

0.9955배로 더 작게 산정되는 것으로 나타났다. 그러나 Figs. 9(d) and 11(d)에서 보는 바와 같이 길어깨 경사가 1 %이거나, 종단경사가 0.3 %일 때 길어깨 경사가 1~5 %라면 부등류 해석으로 설계한 유출구 간격이 더 커짐을 알 수 있다. 반면 임계지속시간을 고려하는 경우에 부등류 해석(Model IV)으로 설계한 유출구 간격이 등류 해석(Model III)의 유출구 간격보다 약 1.1615 배로 더 크게 산정되었으며, 이는 고려된 경사 크기에 상관없이 성립하는 것으로 나타났다. 단, 두 흐름 해석 간의 차이는 종단경사가 커질수록, 길어깨 경사가 커질수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. 두 흐름 해석 간의 차이는 임계지속시간을 고려할 경우 상당한 차이가 있다. 즉, 임계지속시간을 고려하지 않는 경우에는 조건에 따라서 등류 해석으로 설계하는 방법이 합리적일 수 있으나, 임계지속시간을 고려한다면 부등류 해석으로 설계하는 방법이 바람직하다고 할 수 있다.

## 5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 현재 국내의 노면배수시설의 설계 방법을 개선하기 위하여, 기존의 임계지속시간 개념을 반영하지 않고 등류 해석을 기반으로 한 설계방법에서 임계지속시간을 고려하고 부등류 해석을 기반으로 한 설계방법으로의 전환을 목표로 한다. 이에 임계지속시간의 고려 여부와 등류 및 부등류 해석을 기반으로 한 설계 방법을 조합한 4가지 유형의 설계모형을 수립하고 설계결과를 비교·검토하였으며, 수로의 종단경사와 길어깨 횡단경사에 따른 설계결과를 변화를 조사하였다.

유출유량은 설계방법에 따라 큰 차이를 보이지 않았으며, 이는 수로의 허용수심, 즉 통수량이 설계방법에 상관없이 일정하게 유지되기 때문이라고 판단된다. 즉, 노면배수 시설의 유출구 간격은 수로에서 허용가능한 측구의 통수능을 초과하지 않도록 설계하므로, 강우강도의 변화는 유출구 간격(수로길이)의 산정에 반영되어, 유량은 대부분 유사하게 산정되었다. 유출구 간격은 임계지속시간을 고려하여 설계하는 방법을 적용한 결과, 도달시간은 10 분 이하로 산정되어 강우강도가 증가하였기 때문에 최소지속시간 10 분을 이용하여 설계하는 방법보다 크게 산정되었다.

도달시간을 10 분으로 가정하는 설계에서, 부등류 해석을 수행하는 경우 대부분의 종단경사 및 길어깨 횡단경사에 대하여 등류 해석을 수행하는 경우보다 다소 작게 산정되었으나, 종단경사와 길어깨 횡단경사가 작은 경우에는 더 크게 산정되었다(Model I과 Model III의 비교). 반면 도달시간을 산정하여 임계지속시간을

결정하는 설계에서 부등류 해석을 수행하는 경우 고려된 모든 경사에 대해서 유출구 간격은 등류 해석보다 크게 산정되었다(Model II와 Model IV의 비교). 그러나 임계지속시간을 시산적으로 찾아 결정하고 부등류 해석을 기반으로 설계한 유출구 간격은 10 분의 강우강도를 적용하고 등류 해석을 기반으로 한 결과보다 항상 작게 산정되었다(Model I과 Model IV의 비교). 이로부터 국내 도로배수 시설의 설계방법처럼 10 분 도달시간을 가정하고 등류 해석을 기반으로 한 설계가 유출구 간격을 크게 산정하는 경향이 있으므로, 배수불량과 같은 문제를 일으킬 가능성이 더 높음을 알 수 있다. 이러한 문제는 임계지속시간을 고려하고 부등류 해석을 기반으로 한 설계방법을 적용함으로써 일부 해결할 수 있을 것이다.

본 연구의 궁극적인 목적은 기존보다 나은 수리·수문학적 해석을 도입하여 보다 과학적이고 합리적인 노면배수설계에 기여하는 것이며, 실무에 활용될 수 있는 편리한 설계 도구를 실무자들에게 제공하고자 하는 것이다. 본 연구에서 수립된 노면배수 설계모형은 임계지속시간 개념과 수로의 흐름 해석 방법을 개선하는데 초점을 두었으며, 노면의 표면 박류 유출 흐름 및 유달시간에 대해서는 추가적인 검토가 요구된다. 아울러 설계 실무에 실질적으로 도움이 되도록 지침을 개선하기 위한 근거를 마련하는데 사용될 수 있도록 다양한 노면배수 시설체계에 적용하여 비교 및 검토할 필요가 있다. 이러한 노면배수 설계 프로그램은 도로배수시설의 설계를 위한 통합 배수프로그램에 활용될 수도 있을 것이다.

### 감사의 글

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

### 참고 문헌

건설교통부 (2003). 도로배수시설 설계 및 유지관리 지침 연구.  
 건설교통부 (2000). “한국 확률강우량도 작성.” 1999년도 수자원관리기법개발연구조사 보고서, 제1권  
 구혜진, 전경수 (2008). “선형 배수로에 대한 부등류 해석.” 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제41권, 제8호, pp. 773-784.  
 류택희 (2002). “우수받이 차집능력에 관한 실험적 연

구.” 석사학위논문, 경기대학교.  
 박창열, 김경준, 유철상, 전경수 (2007). “분단위 강우강도-지속시간-재현기간 관계의 유도 : 모포마 분포와 Random Cascade 모형의 적용.” 제33회 대한토목학회 정기학술대회 발표논문 초록집, 대한토목학회, Vol. B, pp. 62.  
 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.  
 AASHTO (1999). “Highway drainage guidelines. American Association of State Highway and Transportation Officials.” Washington, D.C., USA.  
 AASHTO (2005). “2005 Model drainage manual: SI Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials.” Washington, D.C., USA.  
 Akan, A.O. (1985). “Kinematic-Wave Method for peak runoff estimates”, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 111, pp. 419-425.  
 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, D.C., USA.  
 Brune W., Graf W.H., Appel E., and Yee P.P. (1975). “Performance of Pennsylvania highway drainage inlets.” *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 101, No. 12, pp. 1519-1536.  
 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, D.C., USA.  
 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 581*, HR Wallingford, UK.
- Escarameia, M., Gasowski, Y., May, R.W.P., and Bergamini, L. (2002). "Hydraulic design of paved areas." *Report SR 606*, 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.
- Overton, D.E., and Meadows, M.E. (1976). *Stormwater modeling*. Academic Press, New York.
- 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, D.C., USA.
- 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.
- Schall, J.D., Richardson, E.V., and Morris, J.L. (2001). "Introduction to highway hydraulics." *FHWA-NHI-01-019, HDS No. 4*, Federal Highway Administration, USA.
- 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:08-62/접수:2008.05.06/심사완료:2008.10.28)