

## 일차원 kinematic wave 모형을 이용한 고속도로 강우 유출수의 동적 거동 예측

강주현 · 김이형<sup>\*†</sup>

Dept. of Civil and Environ. Engr., University of California, Los Angeles

<sup>\*</sup>공주대학교 공과대학 건설환경공학부 방재연구센터

### Predicting Dynamic Behaviors of Highway Runoff using A One-dimensional Kinematic Wave Model

Joo-Hyon Kang · Lee-Hyung Kim<sup>\*†</sup>

Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Los Angeles, USA

<sup>\*</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University

(Received 4 September 2006, Accepted 21 November 2006)

#### Abstract

A one-dimensional kinematic wave model was used to calculate temporal and spatial changes of the highway runoff. Infiltration into pavement was considered using Darcy's law, as a function of flow depth and pavement hydraulic conductivity ( $K_p$ ). The model equation was calculated using the method of characteristics (MOC), which provided stable solutions for the model equation. 22 storm events monitored in a highway runoff monitoring site in west Los Angeles in the U.S. were used for the model calculation and evaluation. Using three different values of  $K_p$  ( $5 \times 10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ , and  $2 \times 10^{-5}$  cm/sec), total runoff volume and peak flow rate were calculated and then compared with the measured data for each storm event. According to the calculation results,  $10^{-5}$  cm/sec was considered a site representative value of  $K_p$ . The study suggested a one-dimensional method to predict hydrodynamic behavior of highway runoff, which is required for the water quality prediction.

**keywords** : Highway runoff, Kinematic wave equation, Method of characteristics

## 1. 서론

고속도로와 같은 불투수 토지이용 지역으로부터의 강우 유출수는 높은 유출율로 인해 홍수문제를 야기할 뿐만 아니라, 큰 차량통행량으로 인해 건조기간 중 오염물질 축적량이 다른 토지 이용지역에 비해 상대적으로 높아, 강우시 각종 중금속, oil & grease, 그리고 poly cyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) 등 환경유해물질이 다량 유출되는 것으로 알려져 있다(Roger et al., 1998; Furumai et al., 2002; Kayhanian et al., 2003).

강우 유출수로 인한 오염물질을 저감하기 위한 방안(best management practices, BMPs)으로는 각종 입법 및 공공교육 등 발생원을 사전에 제어하는 방법, 그리고 처리시설의 설치와 같은 강우의 유출이 일어난 후 처리하는 방법이 있다. 이중에서도 처리시설의 설치와 같은 사후 처리방법은 가장 직접적이고 효과적인 방법이라고 할 수 있는데, 효율적인 처리시설의 설계를 위해서는 해당 지역 강우 유출수의 수량 및 수질의 정확한 예측이 선행되어야 한다.

특히 강우 유출수내의 오염물질 농도 및 유출량은 강우

유출수의 유속 및 유량과 같은 수리학적 특성에 크게 좌우하게 되므로, 수질의 예측을 위해서는 수량뿐만 아니라 흐름의 동적거동(유속 및 수심의 시공간적 변화)의 파악이 필수적이다. 더욱이 고속도로 유출수의 큰 특징 중 하나인 초기유출현상(first flush phenomenon)을 규명하기 위해서는 흐름의 시공간적 변화의 특성 예측이 필요하다.

강우 유출수의 시공간적 변화의 특성은 강우특성(예. 타입, 강도, 지속시간) 및 유역의 지형조건(예. 크기, 경사)의 함수이며, 결정론적 모형을 이용하여 예측할 수 있다. 고속도로 구조물은 차량통행의 안전을 고려하여 강우 유출수의 신속한 배출이 필수적이므로 비교적 높은 경사도(도로 종단경사  $\geq 0.3\%$ )를 가지도록 설계된다(건설교통부, 2002; California department of transportation, 2006). 따라서 강우시 고속도로 노면에 형성되는 유출수의 수심은 매우 작아 얇은 수심을 갖는 흐름의 문제로 해석할 수 있으며, 이러한 문제에 주로 사용되는 Saint-Venant 식 또는 그 식의 간략화 된 형태인 diffusion wave 식 또는 kinematic wave 식 등이 고속도로 강우 유출수의 계산에 적용될 수 있다(Tomanovic et al., 1996; Graf, 1998; Singh, 2002a, 2002b; Cristina et al., 2003a).

본 연구에서는 길이방향으로 연장된 형태의 구조물인 고속도로의 특성을 감안하여 일차원 흐름의 문제로 간략화

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
leehyung@kongju.ac.kr

하고, kinematic wave 식을 이용하여 고속도로 강우 유출수의 시공간적 변화 및 수량을 계산하고자 한다.

## 2. 연구배경

강우시의 오염물질의 배출특성은 주로 초기유출현상의 정도으로써 특징지을 수 있는데, 초기유출현상이란 강우유출의 초기부분에 오염물질의 농도 또는 배출량이 집중되어 나타나는 현상을 말하며(Ma et al., 2002; Kim et al., 2005), 주로 유역면적이 비교적 작고 고속도로나 주차장등의 불투수 지역에서 흔히 나타나는 것으로 보고되고 있다(Ma et al., 2002; Sansalone et al., 2004).

초기유출현상은 수리학적인 조건 및 유역의 지형조건에 의해 크게 영향을 받게 된다. 따라서 많은 연구자들이 초기유출현상과 강우강도, 강우 지속시간, 유출수의 유속, 진행건조기간, 유역면적, 또는 유역의 경사도간의 함수관계를 규명하기 위하여 주로 측정자료를 이용한 통계적 분석을 실시하여 왔다(Gupta et al., 1996; Deletic et al., 1998; Cristina et al., 2003b). 그러나 현재까지는 명확하고도 일관성 있는 상관관계는 규명되지 않고 있다.

건조기간 중 유역내 축적된 오염물질의 침투율 및 이동속도는 유속(흐름에너지)에 비례하며(Singh, 2002a, 2002b) 유량이 많고 적음에 따라 유출수내 오염물질 농도의 회석효과가 달라지므로 단순한 통계적 분석으로는 오염물질 배출특성과 각 영향인자간의 연관성을 개별적으로 파악하기가 매우 힘들다. 따라서 앞서 설명한 여러 가지 영향인자의 복합적인 결과로 나타나는 초기유출현상을 이해하기 위해서는 이론적인 접근이 필요한데, 이를 위하여 수리모형과 수질모형으로 구성된 결정론적 모형을 이용할 수 있다. 특히 적절한 수리모형의 채택은 뒤따르는 수질모형 계산에 사용될 정확한 수리학적 정보(유속 및 수심의 시공간적 변화)를 얻기 위해서는 매우 중요하다.

수리모형의 가장 간단한 형태인 합리식은 주로 최대유량의 산정에만 이용되므로, 흐름의 시공간적 변화를 계산하기 위해서는 Saint-Venant 식 또는 이 식의 간략화된 형태인 diffusion wave 식 또는 kinematic wave 식을 사용하여야 한다. Saint-Venant 식은 두 개의 보존법칙(conservative laws)에 관련된 식들로 구성되어 있으며 주로 개수로의 흐름문제에 적용되고 있다(Graf, 1998). 얇은 수심을 갖는 흐름의 문제(예, overland flow)도 역시 Saint-Venant 식 등을 이용하여 해석할 수 있으나, 이중에서도 가장 간단한 형태의 kinematic wave 식은 흐름의 역확산 효과를 생략한 형태로서, 비교적 경사도가 높은 지역에서의 overland flow 문제에 있어서 간단한 계산 과정으로도 정확한 결과를 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다(Tomanovic et al., 1996; Singh, 2002a, 2002b; Cristina et al., 2003a). Kinematic wave 식은 Saint-Venant 식에서 흐름에 의한 가속도, 수체에 작용하는 중력과 압력에 대한 항목을 생략함으로써 얻을 수 있으며, 일차원 흐름의 경우 다음과 같은 관계식을 갖는다(Singh, 1996).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{5}{3} u \frac{\partial h}{\partial x} = 2.78 \times 10^{-8} I - 10^{-2} f \quad (1)$$

$$u = (\sqrt{S_0/n}) \cdot h^{2/3} : \text{매닝 유속공식} \quad (2)$$

$h$ 는 수심(m),  $t$ 는 시간(sec),  $i$ 는 강우강도(mm/hr),  $f$ 는 도로바닥으로의 침투율(cm/sec),  $u$ 는 평균유속(m/sec),  $S_0$ 는 바닥경사(-),  $n$ 은 Manning의 조도계수, 그리고  $2.78 \times 10^{-8}$  및  $10^{-2}$ 는 각각 단위환산 factor를 나타낸다.

식 (1)에서 초기조건 및 경계조건은 다음과 같다(Singh, 1996).

$$h(0, t) = 0, t \geq 0$$

$$h(x, 0) = 0, 0 \leq x \leq L$$

$L$ 은 유역의 길이(m)를 나타낸다.

Kinematic wave 식을 고속도로 강우유출수의 계산에 적용된 예로서, Cristina 등(2003a)은 길이 15 m, 너비 18.4 m의 비교적 소규모의 고속도로 유역으로부터의 발생되는 강우 유출수를 너비방향으로의 일차원 흐름으로 가정하고, 두 개의 유출사상에 대하여 최종 유출수를 계산하였다. 그들은 침투율의 고려 없이 kinematic wave 식을 이용하여 우선 유량을 계산한 후, 계산된 유량값에 대하여 일정한 비율의 침투율을 적용시켜 보정함으로써 측정값에 근접한 유출량의 변동을 계산하였다.

본 연구의 목적은 종방향으로 길게 뻗은 형태의 고속도로 토지이용 유역으로부터 강우시 발생하는 지표수 흐름의 시공간적인 변화량을 예측하기 위함이며, 기존의 연구와는 다음과 같은 차이점을 가지고 있다. 첫째, 대부분의 kinematic wave 식을 이용한 지표수 흐름의 연구는 침투율이 크고 경사도가 완만하며 주로 유역면적이 넓은 지역으로 지체시간(lag time)이 비교적 큰 유역에 대하여 이루어져 왔으나, 본 연구에 사용된 고속도로 유역은 경사도가 큰 불투수 토지이용 지역으로서 지체시간이 매우 짧아(<10 min) 강우 강도의 변화에 대한 유출수의 변동이 상대적으로 매우 민감한 지역이다. 둘째, 본 연구에서는 고속도로 유출수의 흐름을 종방향으로의 일차원적 흐름으로 가정하였으며 고속도로 바닥으로의 침투율을 고려하기 위하여 Darcy의 법칙을 적용한 수심에 관한 일차함수식을 적용하였다. 셋째, Cristina 등(2003a)의 연구가 정방형에 가까운 소규모 유역으로써 흐름길이가 매우 짧아서 흐름의 공간적 특성에 대한 중요도가 상대적으로 낮고 비교적 측정치에 근사한 결과를 얻기가 용이하다. 그러나 본 연구의 목적은 최종 유출수의 계산뿐만 아니라 흐름의 시간적 공간적 변화특성을 얻음으로써, 항우 수질계산의 기초자료로 사용하고자 함에 있다. 또한 본 연구에서는 흐름의 길이가 길고, 바닥 경사도가 상당히 높아(2%) kinematic wave 식과 같은 비선형 쌍곡선형 편미분 방정식의 특성상 안정된 해를 구하기가 비교적 어렵다.

### 3. 연구방법

#### 3.1. 연구대상 지역 및 모형공간

고속도로 강우 유출수로 인한 오염의 저감 방안을 연구하기 위하여, 캘리포니아 도로교통국(California department of transportation, Caltrans)은 미국 west Los Angeles에 위치한 세 개의 측정지점으로부터 고속도로 유출수 특성 파악에 대한 연구를 5년간(1999-2004) 수행하였다(Han et al., 2006). Fig. 1은 각 측정지점(Site 1, Site 2, Site 3)의 위치를 보여주고 있는데, 이 지역은 330 m의 연평균 강우량을 보이고 있으며, 각 측정지점의 유역면적은 각각 3900, 12,800, 16,900 m<sup>2</sup>이다. 연평균 일일교통량은 269,000 ~ 328,000 대로서 캘리포니아 지역 내에서도 상대적으로 높은 교통량을 보이는 지점이다. 각 측정지점에는 강우계 및 유량계(Model 950, American Sigma, Loveland, Colorado)가 설치되어 있으며, 샘플의 채취방법 및 측정지점에 관한 좀 더 자세한 정보는 이전에 발행된 연구논문들에 보고되어 있다(Kim et al., 2004; Han et al., 2006).



Fig. 1. Location of monitoring sites for highway runoff (west Los Angeles, CA, USA).

모형 공간으로 사용된 고속도로 유출수 측정지점은 Fig. 1에서 Site 3로 표기된 지점으로서 405 Freeway와 Santa Monica Boulevard 사이에 위치해 있으며, 길이 ( $L$ )가 178 m 너비( $W$ )가 21.9 m, 평균 바닥경사( $S_0$ )가 0.02로 하나의 배수구가 존재하고 있다. 또한, 바닥경사가 균일하고 단순한 지형적 조건(직사각형)을 가지고 있어 이상적인 모형 공간으로 판단하였다. Manning 조도계수( $n$ )는 매끄러운 콘크리트 또는 아스팔트에 해당되는 값인 0.011을 적용하였다. 콘크리트 및 아스팔트 포장지역에서의  $n$  값으로 적용 가능한 0.011~0.014의 범위(Bedient et al., 1992)내에서 모형의 계산결과는 비교적 민감도가 낮았으며, 문헌에서의 최대값인  $n = 0.014$ 를 적용했을 경우 상대적으로 좋지 않은 결과

를 보였다. 일차원 수리모형식으로 계산된 단위 너비당 유출유량은 너비(21.9 m)로 곱하여 산정함으로써 측정값과 비교하였다.

#### 3.2. 일차원 수리모형식

고속도로는 종방향으로 연장된 형태의 구조물로서 일차원 흐름의 문제로 간략화할 수 있다. Fig. 2은 실질적으로는 이차원적인 고속도로 강우 유출수의 흐름의 문제가 어떻게 일차원 흐름의 문제로 해석되는지를 보여주고 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 1차원 모형공간에 나타난 큰 화살표는 2차원 모형공간에서 대응되는 지역에서 형성되는 x방향으로의 속도벡터를 대표하게 되는 것이다.

Kinematic wave 식 (식 (1), (2))의 적용을 위하여 입력 자료로서 강우강도( $I$ ) 및 침투율( $f$ )이 필요하다.  $I$ 의 입력 값으로 미국 west Los Angeles 지역에 위치한 고속도로 강우 유출수 측정 사이트에서 2000-2003년 강우기 동안 얻어진 22개의 강우사상 자료를 이용하였고, 각 강우사상에 해당되는 측정 유출수 자료를 모형 계산 결과와 비교함으로써 모형의 유효성 평가를 수행하였다.

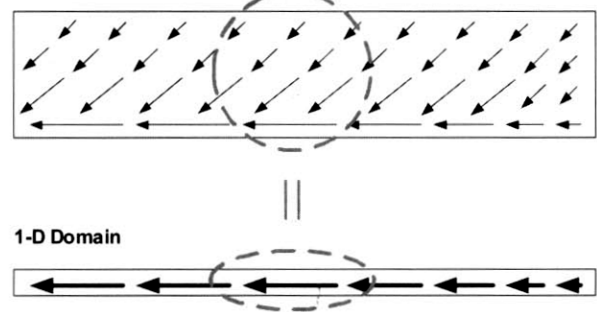


Fig. 2. Concept of 1-D flow vector corresponding to 2-D flow vectors in highway runoff.

고속도로와 같은 아스팔트 포장지역은 토지이용구분 방법에 따르면 불투수 지역으로 구분되고 있으나 실제로는 포장바닥으로의 침투가 존재하게 된다. 모형 계산 시 적절한 침투율의 적용을 위해 Darcy의 법칙을 적용하여 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$f = -K_p \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right) = -K_p \left( \frac{h + T_p - p_p}{T_p} \right) = -K_p \left( \frac{h - p_p}{T_p} \right) - K_p \quad (3)$$

$f$ 는 도로바닥으로의 침투율(cm/sec),  $K_p$ 는 도로바닥의 투수계수(cm/sec),  $z$ 는 수직방향으로의 길이(m),  $T_p$ 는 포장두께(m), 그리고  $p_p$ 는 포장층 아래의 압력수두(m)를 나타낸다.

아스팔트 포장재의 두께는 미국 west Los Angeles 지역 고속도로에서 일반적으로 보고되고 있는 10 cm 값으로 가정하고(California Department of Transportation, 2003), 포장 지지재(모래 또는 자갈)가 충분한 배수능력을 가지는 것을 감안하여  $p_p$ 값을 0으로 가정하면 침투율은 다음과 같이

수심에 대한 선형관계식으로 얻어진다.

$$f = -\frac{K_p}{T_p}h - K_p = -K_p(0.1h + 1) \quad (4)$$

아스팔트 포장재의 투수계수( $K_p$ )는 일반적으로  $< 10^{-5} \sim 10^{-3}$  cm/sec 범위의 값을 갖는 것으로 보고되고 있으므로(Allen, 2003; Allen Cooley, 2003), 본 연구에서는 세계의 다른  $K_p$ 값 (즉,  $5 \times 10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $2 \times 10^{-5}$  cm/sec)을 적용하여 유출수 계산 결과를 비교함으로써 최적의  $K_p$ 값을 얻고자 하였다.

### 3.3. 수리모형의 수치계산

얇은 수심을 갖는 흐름의 문제는 등간격 격자를 사용하는 유한차분법을 사용할 경우 모형식의 비선형 특성으로부터 야기되는 수치해의 진동문제를 해결하는 것이 매우 어려우므로(Govindaraju et al., 1988), 본 연구에서는 쌍곡선형 편미분 방정식의 해를 구하기 위하여 특성곡선방법(Method of Characteristics, MOC)를 사용하였다. 특성곡선 방법은 변동궤적(disturbance trajectories)을 따라 계산을 수행하므로, 수치해의 진동이 없고, 따라서 매우 정확한 해를 계산해 준다. 그러나 이 방법은 계산 수행후의 격자간격이 일정하지 않으므로 원하는 지점에서의 해를 얻기 위해서는 추가적인 내삽과정이 필요하게 된다.

Kinematic wave 식과 같은 쌍곡선형 편미분방정식의 특정한 위치 및 시점에 대한 해는 거리-시간 모형공간 내에서 특성곡선식을 따라서 이동하게 되는데(Fig. 3), 특성곡선식은 Kinematic wave wave 식의 계수 행렬의 행렬식을 계산함으로써 얻어지며 식 (5)와 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{5}{3}u = \frac{5}{3}(\sqrt{S_0/n})h^{2/3} = c \quad (5)$$

$c$ 는 파의 전달속도(m/sec)이며  $5/3u$ 와 같다. Fig. 2는 특성곡선방법에서 각 격자값의 계산 과정을 나타내고 있다. 각 격자에서 다음 시간간격으로의 특성곡선을 따른 격자값의 이동지점을 양해법으로 계산하였다. 예를 들어, 격자  $X_1$ 의 좌표( $x_1, t_1$ )와 값( $h_1$ )을 알고 있을 때, 격자  $X_2$ 의 좌표( $x_2, t_2$ )와 값( $h_2$ )는 다음의 식으로 계산된다.

$$\begin{aligned} (x_2, t_2) &= (x_1 + \Delta x_1, t_1 + \Delta t) \\ &= (x_1 + \frac{5}{3}(\sqrt{S_0/n})h_1^{2/3}\Delta t, t_1 + \Delta t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$h_2 = h_1 + I(t_1) \cdot \Delta t \quad (7)$$

$I(t_1)$ 은  $t = t_1$ 일 때의 강우강도를 나타낸다. 초기시간 ( $t = 0$ )에서는 등간격 격자로 시작하여, 계산이 진행되면서 격자간 간격이 불균등해지므로 최종적으로는 내삽과정을 거쳐 등간격 격자값들을 구하게 된다.

본 연구에서 적절한 수치해의 계산을 위해서 일련의 수치계산 시험을 수행한 후 최적의 시간간격( $\Delta t$ ) 및 격자크기( $\Delta x$ )를 결정하였으며, Table 1에 수치계산 시험에 적용된 모형 파라미터 값들을 나타내었다.

**Table 1.** Model parameters used in the numerical tests

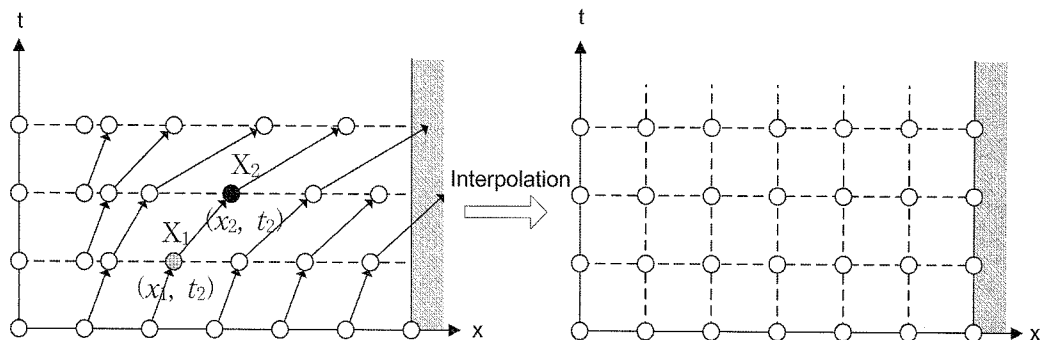
Parameters	Values
Rainfall intensity, $I$ (mm/hr)	6
Rainfall duration, $T$ (hr)	1
Pavement hydraulic conductivity, $K_p$ (cm/sec)	0
Bed slope, $S_0$ (m/m)	0.02
Manning's roughness coefficient, $n$	0.011
Catchment Length, $L$ (m)	250

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 수치계산 시험

앞서 설명한 바와 같이 특성곡선방법은 수치해의 진동이 없으므로 수렴성을 만족하지만, 정확한 해의 계산을 위한 적절한 시간간격( $\Delta t$ )과 격자크기( $\Delta x$ )의 결정을 위해 일련의 수치계산 시험을 실시하였다. 먼저 초기의  $\Delta x$ 값( $\Delta x_0$ )을 고정 후  $\Delta t$ 을 변화 시켜가면서 유출수 계산 결과를 관찰하였다.

Fig. 4는 각각  $\Delta x_0 = 1$  m와 2 m 값에 대한  $\Delta t$  값에 따른 유출수 계산 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이  $\Delta t$  값이 감소함에 따라 유출수의 수치해는 점점 정확한 값에 근접하게 된다. 반대로, 큰  $\Delta t$  값일수록 유출수에 대한 수치 해는 과대평가되는데, 이는 이전 격자값으로부터 다음 시간간격의 격자 위치계산 시 특성곡선의



**Fig. 3.** Procedure of the node value calculation in method of characteristics.

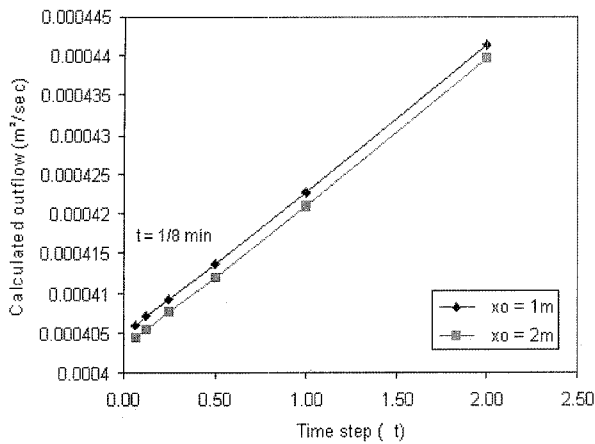


Fig. 4. Calculated outflow with respect to values of  $\Delta t$  for different  $\Delta x_0$ : (a)  $\Delta x_0 = 1$  m; (b)  $\Delta x_0 = 2$  m.

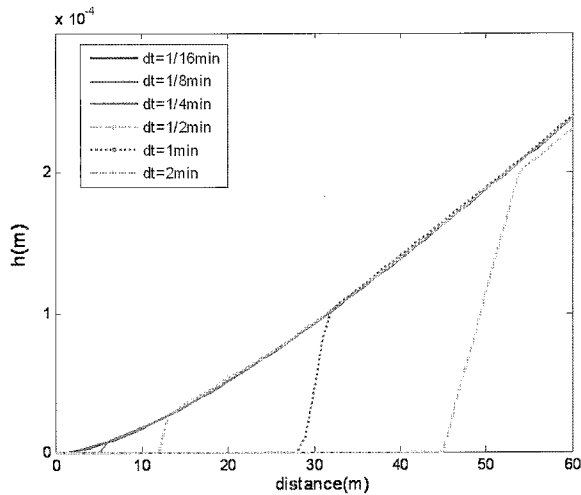


Fig. 5. Water depth profile (0~60 m in distance) at  $t = 70$  min using different values of  $\Delta t$  with  $\Delta x_0 = 1$  m.

선형가정으로부터 오는 에러 값이, 큰  $\Delta t$  값을 적용할 경우 더욱 커지게 되기 때문이다. 또한  $\Delta x_0 = 1$  m와 2 m에서의 결과값을 비교해 볼 때, 초기 격자간격이 클수록 유출수 유량값은 다소 커지게 되는데, 이는 내삽 과정으로 인한 에러에 기인하며, 격자간격이 적을수록 그 오차값은 줄어들게 될 것이다.

Fig. 5에 주어진  $\Delta x_0$  값에서 각기 다른  $\Delta t$ 를 적용했을 때,  $t = 70$  min에서의 모형공간의 길이방향 (0~60 m)에 따른 수심의 변화를 나타내었다. Fig. 4에 나타난 공간의 변화에 따른 급격한 수심의 변화는 쌍곡선형 편미분 방정식에서의 파의 전달을 나타낸다.  $\Delta t$ 값이 작을수록 수심 변화의 폭이 줄어들므로, 더욱 정확한 해의 계산이 가능하다. Fig. 4와 5에 나타난 결과로 미루어 볼 때, 시간간격 및 격자간격이 적으면 적을수록 더욱 정확한 계산 결과를 얻을 수 있으나, 계산의 효율성과 계산 결과의 상대적인 정확도를 감안하여 모형의 계산을 위한  $\Delta x_0$  및  $\Delta t$  값으로써 각각 1 m, 1/8 min을 사용하였다.

#### 4.2. 유량계산 및 최적 $K_p$ 의 결정

Fig. 6에 22개의 강우 사상상에 대하여 계산된 총유출량 및

침투유량을 측정값과 비교하였다. 세 개의 각각 다른  $K_p$  값을 적용한 결과를  $R^2$  값과 함께 나타내었다.  $R^2$  값은 모형의 효율성 평가를 위해 선형 회귀선 대신 등가 직선을 기준으로 계산(즉, Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient)하였다(Nash et al., 1970). 표에서와 같이 평가된  $K_p$  범위 내에서 계산된 총유출량 및 침투유량 값들은 비교적 낮은 민감도를 나타냈으나,  $K_p = 10^{-5}$  cm/sec 일 때 가장 측정값에 가장 근접한 결과를 보였으며 이때의  $R^2$  값은 총유출량 및 침투유량에 대하여 각각 0.99, 0.44로 계산되었다. 총유출량에 대한 계산값은 비교적 높은 상관도( $R^2 = 0.99$ )를 보여주었으나, 상대적으로 침투유량의 예측값이 측정치와 다소 차이가 나는데, 고속도로 노면의 지역적인 경사도의 변화, 굴곡 및 갈라진 틈 등으로 인해 국부적으로 형성되는 지표수의 저장효과는 최종 유출수의 유량변화에 영향을 미칠 수 있으며, 또한 강우시 도로상에 이동하는 차량에 의한 교란등도 하나의 영향인자로 판단된다.

Fig. 7은  $K_p = 10^{-5}$  cm/sec 적용 시, 22개 강우사상에 대하여 계산된 유출계수와 측정된 유출계수를 총 강우량의 함수로서 나타낸 그래프이다. 계산치와 측정치 모두 0.60~0.96의 범위 내에서 공통적으로 총 강우량이 증가할수록 유출계수의 값이 증가하는 경향을 나타냈다.

Fig. 8은 세 개의 강우 사상상에 대하여, 최적  $K_p$  값인  $10^{-5}$  cm/sec을 적용하여 계산된 유출수의 시간적 변화를 예시하였다. 모형의 계산으로부터 얻어진 유출수의 동적 변화패턴이 측정값과 비교적 잘 일치함을 볼 때, 일차원 kinematic wave 모형으로 고속도로 강우 유출수의 시공간적 변화를 효과적으로 예측할 수 있다. 또한, 수질의 계산이 이러한 동적 유출수의 변화와 밀접한 관계가 있음을 고려할 때, 향후의 고속도로 유출수내의 오염물질의 동적 거동 연구에 필수적인 수리학적 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

일차원 kinematic wave 모형을 이용하여 고속도로 유출수의 시공간적 변화를 계산하였다. 모형식은 수치해의 안정성을 위하여 특성곡선방법을 이용하였다. 보다 정확한 해를 구하기 위하여 일련의 수치해석 시험을 통해, 적절한 시간간격 및 격자크기로서 각각 1/8 min, 1 m를 적용하였다. 고속도로 바닥으로의 침투율은 Darcy의 법칙을 이용하여 수심과 도로바닥의 투수계수( $K_p$ )의 함수로서 나타낼 수 있었다. 모형의 계산 및 평가는 미국 west Los Angeles에 위치한 고속도로 강우 유출수 측정지점에서 측정된 22개 강우사상을 이용하였고, 세 개의 각각 다른  $K_p$  값을 적용한 결과  $10^{-5}$  cm/sec이 최적 값으로 이용되었다. 계산된 총 유출량 및 최대유량, 그리고 흐름의 동적 변화 특성은 측정치와 비교하여 보았을 때 비교적 정확한 결과를 보여줌으로써, 고속도로 유출수의 예측에 있어 일차원 해석이 간단한 계산과정을 통하여 정확한 결과를 제공해 줄 수 있을 것으로 판단되었다. 본 연구에서 제안한 방법을 통하여 고속도로 유출수의 시공간적 변화를 정확히 예측함으로써, 항

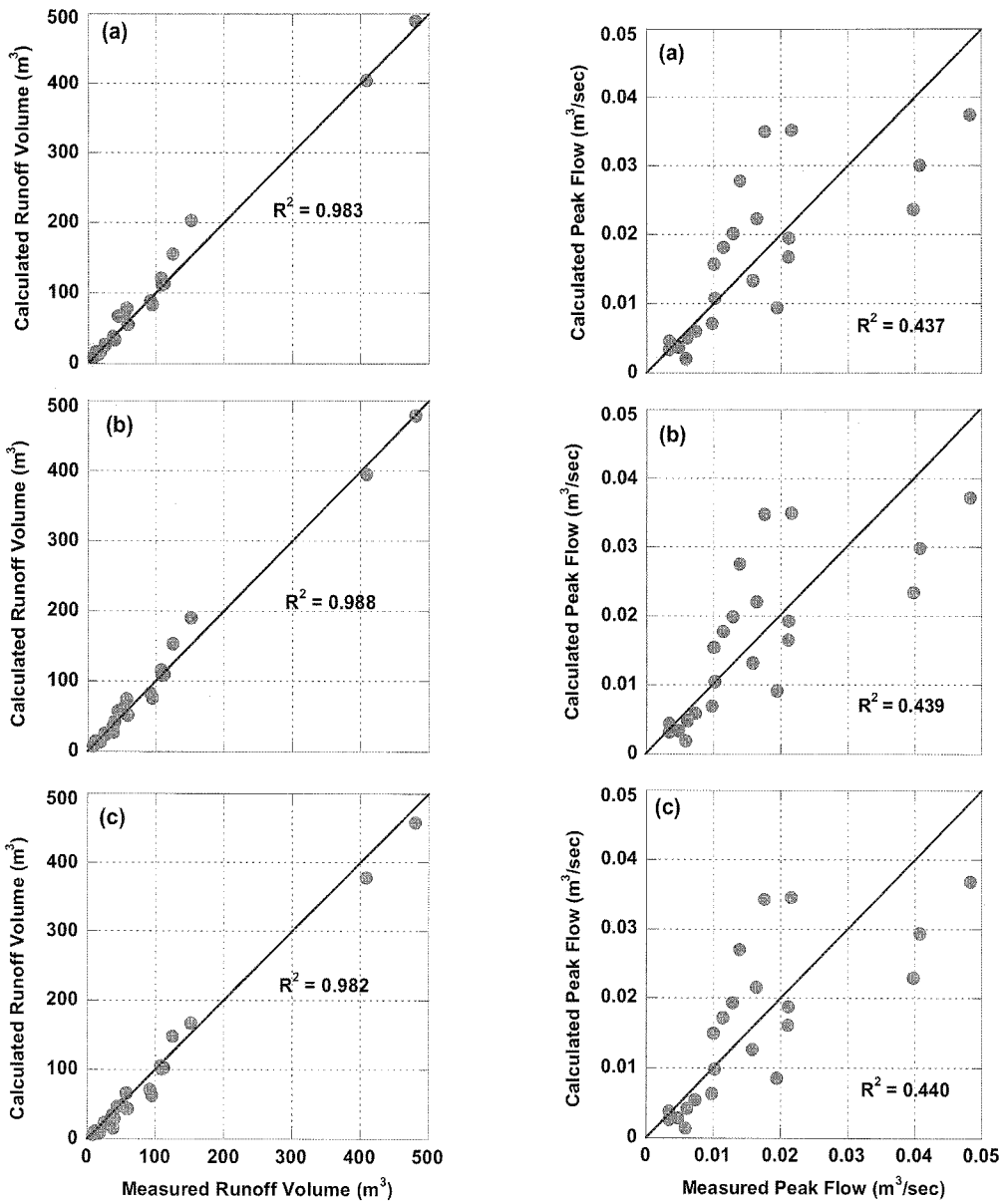


Fig. 6. Relationships between measured and calculated flow volume and peak flows with different values of pavement hydraulic conductivity: (a)  $5 \times 10^{-6}$  cm/sec; (b)  $10^{-5}$  cm/sec; (c)  $2 \times 10^{-5}$  cm/sec.

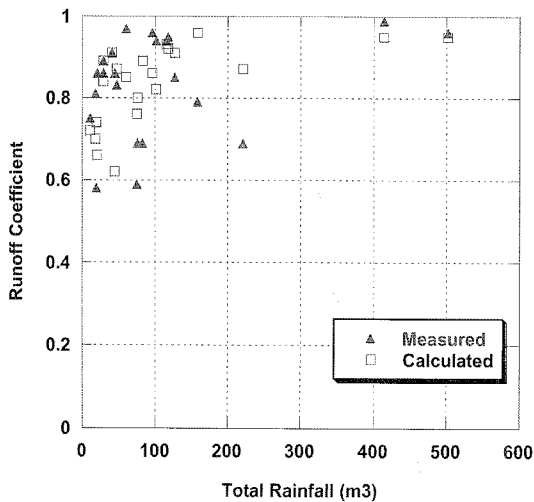


Fig. 7. Runoff coefficient variation with respect to the total rainfall volume at  $K_p = 10^{-5}$  cm/sec.

후 고속도로 강우 유출수내의 오염물질의 동적 거동 해석에 필수적인 수리학적 정보를 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

## 사 사

지속적인 지원을 보내주신 Caltrans(California department of transportation)에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 건설교통부, 도로의 구조·시설에 관한 규칙 (2002)
- Allen Cooley, L., Jr., Evaluation of Pavement Permeability in Mississippi, National Center of Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, Alabama, USA (2003).

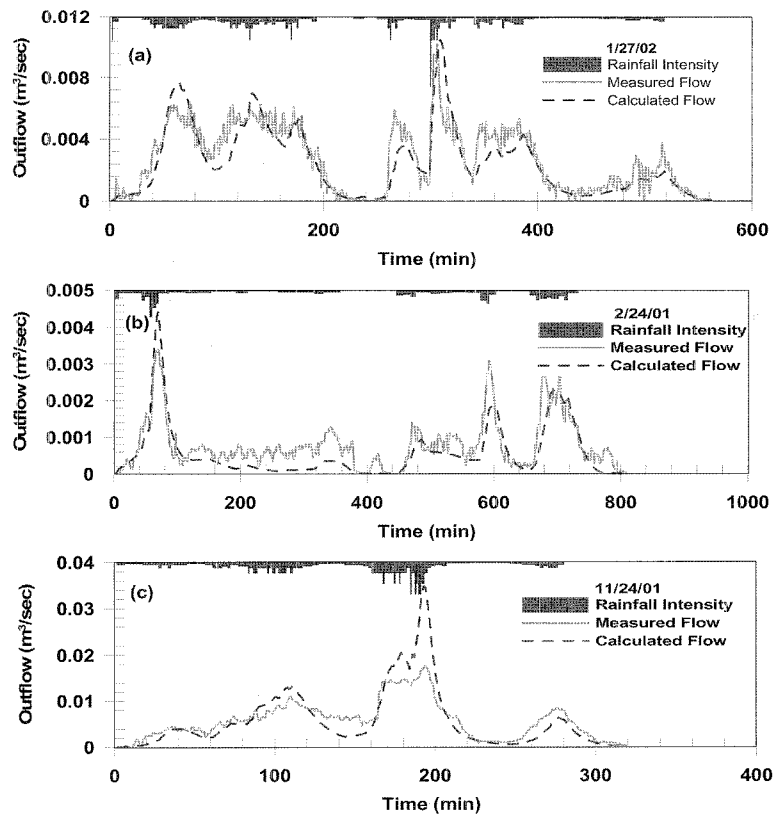


Fig. 8. Measured and calculated hydrographs for three storm events: (a) 1/27/2002; (b) 2/24/2001; (c) 11/24/2001.

- Allen, D. L., Analysis of Field Permeability and Laboratory Shear Stresses for Western Kentucky Parkway Milepost 18.240 to Milepost 25.565 Caldwell-Hopkins Counties, Research Report, KTC-03-05/SPR245-02-II, Kentucky Transportation Center, University of Kentucky, Lexington, Kentucky, USA (2003).
- Berdient, P. B. and Huber, W. C., Hydrology and Floodplain Analysis, Addison-Wesley Publishing Company, USA (1992).
- California department of transportation, 204.3 Standards for Grade, Highway Design Manual, Sacramento, California, USA (2006).
- California department of transportation, Non-Destructive Measurement of Pavement Layer Thickness, Final Report, Caltrans No. 65A0074, Sacramento, California, USA (2003).
- Cristina, C. M. and Sansalone, J. J., Kinematic Wave Model of Urban Pavement Rainfall-runoff Subject to Traffic Loadings, *J. of Environ. Engr.*, **129**(7), pp. 629-636 (2003a).
- Cristina, C. M. and Sansalone, J. J., First Flush, Power Law and Particle Separation Diagrams for Urban Storm-water Suspended Particulates, *J. of Environ. Engr.*, **129**(4), pp. 298-307 (2003b).
- Deletic, A. B. and Maksimovic, C. T., Evaluation of Water Quality Factors in Storm Runoff from Paved Areas, *J. of Environ. Engr.*, **124**(9), pp. 869-897 (1998).
- Furumai, H., Balmer, H. and Boller, M., Dynamic Behavior of Suspended Pollutants and Particle Size Distribution in Highway Runoff, *Wat. Sci. & Tech.*, **46**(11), pp. 413-418 (2002)
- Govindaraju, R. S., Jones, S. E. and Kavvas, M. L., On the Diffusion Wave Model for Overland Flow, 1. Solution for Steep Slopes, *Water Resour. Res.*, **24**(5), pp. 734-744 (1988).
- Graf, W. H., Fluvial Hydraulics: Flow and Transport Processes in Channels of Simple Geometry, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA (1998).
- Gupta, K. and Saul, A. J., Specific Relationship for the First Flush Load in Combined Sewer Lows, *Wat. Res.*, **30**(5), pp. 1244-1252 (1996).
- Han, Y. -H., Lau, S. -L., Kayhanian, M. and Stenstrom, M. K., Correlation Analysis among Highway Stormwater Runoff Pollutants and Characteristics, *Wat. Sci. & Tech.*, **52**(2), pp. 235-243 (2006).
- Kayhanian, M., Singh, A., Suverkropp, C. and Borroum, S., Impact of Annual Average Daily Traffic on Highway Runoff Pollutant Concentrations, *J. of Environ. Engr.*, **129**(11), pp. 975-990 (2003).
- Kim, L. -H., Kayhanian, M. and Stenstrom, M. K., Event Mean Concentrations and Loadings of Litter from Highways during Storms, *Sci. of Total Environ.*, **330**(1-3), pp. 101-113 (2004).
- Kim, L. -H., Kayhanian, M., Zoh, K. -D. and Stenstrom, M. K., Modeling of Highway Stormwater Runoff, *Sci. of Total Environ.*, **348**, pp. 1-18 (2005).
- Ma, M., Khan, S., Li, S., Kim, L. -H., Ha, S., Kayhanian, M. and Stenstrom, M. K., First Flush Phenomena for Highways: how it can be meaningfully defined, Proceedings of ninth International Conference on Urban Drainage, September, Portland, Oregon (2002).
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V., River Flow Forecasting

- through Conceptual Models Part I-A Discussion of Principles, *J. of Hydrology*, **10**(3), pp. 282-290 (1970).
- Roger, S., Montréjaud-Vignoles, M., Andral, M. C., Herremans, L. and Fortune, J. P., Mineral, Physical and Chemical Analysis of the Solid Matter Carried by Motorway Runoff Water, *Wat. Res.*, **32**(4), pp. 1119-1125 (1998).
- Sansalone, J. J. and Cristina, C. M., First Flush Concepts for Suspended and Dissolved Solids in Small Impervious Watersheds, *J. of Environ. Engr.*, **130**(11), pp. 1301-1314 (2004).
- Singh, V. P., Kinematic Wave Modeling in Water Resources: Surface Water Hydrology, Wiley, New York, USA (1996).
- Singh, V. P., Kinematic Wave Solutions for Pollutant Transport by Runoff over an Impervious Plane with Instantaneous of Finite-period Mixing, *Hydrol. Process.*, **16**, pp. 1831-1863 (2002a).
- Singh, V. P., Kinematic Wave Solutions for Pollutant Transport by Runoff over an Infiltrating Plane with Finite-period Mixing and Mixing Zone, *Hydrol. Process.*, **16**, pp. 2441-2477 (2002b).
- Tomanovic, A. and Maksimovic, C., Improved Modeling of Suspended Solids Discharge from Asphalt Surface during Storm Event, *Wat. Sci. & Tech.*, **33**(4-5), pp. 363-369 (1996).