

도로 표면 강우 유출 해석 알고리즘 개발

Development of Rainfall-runoff Analysis Algorithm on Road Surface

조준범¹ · 김정수^{2*} · 곽창재³¹구마모토대학교 광역환경보전공학 박사과정, ²부천대학교 토목과 조교수, ³국립재난안전연구원 방재연구실 책임연구원Jun Beom Jo¹, Jung Soo Kim^{2*} and Chang Jae Kwak³¹PhD Student, Department of Advanced Industrial Science, Kumamoto University, 860-8555, Japan²Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Bucheon University, 14632, Korea³Researcher, Officer, Disaster Information Research Division, National Disaster Management Research Institute, 44429 Korea

Received 8 November 2021, revised 5 December 2021, accepted 5 December 2021, published online 31 December 2021

ABSTRACT: In general, stormwater flows to the road surface, especially in urban areas, and it is discharged through the drainage grate inlets on roads. The appropriate evaluation of the road drainage capacity is essential not only in the design of roads and inlets but also in the design of sewer systems. However, the method of road surface flow analysis that reflects the topographical and hydraulic conditions might not be fully developed. Therefore, the enhanced method of road surface flow analysis should be presented by investigating the existing analysis method such as the flow analysis module (uniform; varied) and the flow travel time (critical; fixed). In this study, the algorithm based on varied and uniform flow analysis was developed to analyze the flow pattern of road surface. The numerical analysis applied the uniform and varied flow analysis module and travel time as parameters were conducted to estimate the characteristics of rainfall-runoff in various road conditions using the developed algorithm. The width of the road (two-lane (6 m)) and the slope of the road (longitudinal slope of road 1 – 10%, transverse slope of road 2%, and transverse slope of gutter 2 – 10%) was considered. In addition, the flow of the road surface is collected from the gutter along the road slope and drained through the gutter in the downstream part, and the width of the gutter was selected to be 0.5 m. The simulation results were revealed that the runoff characteristics were affected by the road slope conditions, and it was found that the varied flow analysis module adequately reflected the gutter flow which is changed along the downstream caused by collecting of road surface flow at the gutter. The varied flow analysis module simulated 11.80% longer flow travel time on average (max. 23.66%) and 4.73% larger total road surface discharge on average (max. 9.50%) than the uniform flow analysis module. In order to accurately estimate the amount of runoff from the road, it was appropriate to perform flow analysis by applying the critical duration and the varied flow analysis module. The developed algorithm was expected to be able to be used in the design of road drainage because it was accurately simulated the runoff characteristics on the road surface.

KEYWORDS: Road surface flow, Runoff analysis algorithm, Road drainage, Urban planning

요약: 일반적으로 도심지에서의 유출은 도로 노면을 따라 유출되어 빗물받이를 통해 우수관거로 배수된다. 따라서 적절한 도로 배수능력의 평가는 도로와 빗물받이 뿐만 아니라 우수관거의 설계에서도 필수적이다. 하지만 도시 도로부의 지형학적 및 수리학적 조건을 반영한 흐름해석 방안에 대한 명확한 기준이 제시되어 있지 못한 실정이다. 그러므로 기존에 적용되던 흐름해석 모형(등류/ 부등류) 및 도달시간 산정방법(임계/고정)을 분석하여 최적의 도로의 흐름해석 방안이 제시되어야 한다. 본 연구에서는 도로 표면 흐름해석을 위한 알고리즘을 개발하고 등류와 부등류 흐름해석 모형 및 도달시간 산정방법을 매개변수로 적용한

*Corresponding author: hydroguy@bc.ac.kr, ORCID 0000-0001-7327-1432

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

수치적 분석을 수행하여 다양한 도로조건에서의 강우 유출특성을 모의하였다. 도로조건은 국내의 설계기준을 고려하여 2차선 도로의 폭 (6 m)과 경사 (도로 종경사 1 - 10%, 도로 노면경사 2% 및 측구 횡경사 2 - 10%)가 고려되었다. 또한, 도로 표면의 흐름은 노면경사를 따라 측구에서 차집되어 하류부의 빗물받이를 통해 배수되도록 하였으며, 측구의 폭은 0.5 m로 선정하였다. 모의 결과 도로의 유출특성은 도로 경사 조건에 따라 민감하게 변화하였으며, 부등류 해석모형이 도로의 하류부로 강우가 차집되며 변화하는 측구부에서의 유출특성을 반영하여 등류 흐름해석 모형에 비해 최대 23.66%, 평균 11.80% 긴 도달시간과 최대 9.50%, 평균 4.73% 작은 도로 표면 총 유출량을 나타냈다. 따라서, 우수 유출량을 산정하기 위하여 도달시간을 강우의 지속시간으로 반영하는 임계지속시간을 적용한 부등류 흐름해석을 수행하는 것이 적합하다고 판단되었다. 개발된 알고리즘은 다양한 흐름해석 기법을 통합하여 도로 노면에서의 유출특성을 정밀하게 모의하고 있으므로 도로의 배수 설계에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

핵심어: 도로 표면 흐름, 유출 해석 알고리즘, 도로 배수, 도시 설계

1. 서론

도시화와 산업화에 따른 도시 유출환경의 변화로 인해 도심지에서 발생하는 대부분의 유출은 도로 표면을 따라 이동하고 도로변에 설치된 빗물받이에 의해 배수된다 (Wang et al. 2021). 도로 표면 유출이 빗물받이로 원활하게 배수되지 않으면 노면수가 정체되고, 이 노면수가 인근 주택지로 유입되어 침수 피해가 발생한다 (Kim et al. 2018, Lee and Kim 2020). 이러한 현상은 도로의 유출량이 집중되는 도심지 저지대에서 주로 발생하며 설계 한도를 초과하지 않는 정상적인 강우 조건에서도 빈번히 발생한다 (Jo et al. 2018). 이는 최근의 기후 변화로 인한 집중 호우 등을 고려하여 설계 기준이 지속적으로 조정되어야 함과 동시에 도로의 배수 능력 평가를 위한 실제적인 연구가 이루어져야 한다는 필요성을 나타내고 있다 (Li et al. 2019, Aranda et al. 2021, Lee et al. 2021). 특히 도로 유출에서의 배수에 상당한 역할을 하는 빗물받이의 배수능력은 주로 종경사와 횡경사 등의 도로 조건, 표면 유출 우수량 및 빗물받이의 형상 등의 영향을 받는다 (Kim et al. 2021). 그러므로 다양한 도로 조건 및 흐름해석 방안을 적용할 수 있는 도로 표면 흐름해석 알고리즘의 개발과 이를 이용한 도로 표면 유출특성의 분석이 반드시 수행되어야 한다.

도로 표면 흐름해석은 등류기반 흐름해석 연구와 부등류기반 흐름해석 연구로 구분된다. 등류기반 해석모형의 경우 모든 구간에서 최대유량을 기준으로 설계를 하도록 하여 계산절차와 해석방법이 비교적 간단하지만 전반적으로 유출량을 과대산정 하는 경향이 있다 (Graber 2013). 이러한 문제를 해결하기 위해 Escarameia et al. (2001)과 Naqvi (2003)은 유한 차분 형태의 대수 방정식을 적용한 수치해법을 통해 비에너지를 기초로

하는 부등류 해석을 제안하였다. 또한, 해석과정에서 FHWA (2013)와 AASHTO (2014)는 강우강도의 지속시간을 산정하기 위하여 유역의 최원점에서부터 차집부까지의 도달시간을 미지의 변수로 두고 시산법을 적용한 임계지속시간을 산정하여 흐름해석을 수행하였다. 이는 일정 도달시간을 가정하는 해석보다 적용이 어려우나 유역의 특성 등 실제 현상을 잘 반영해 준다는 장점이 있다.

본 연구에서는 합리적인 도로 표면 흐름해석을 위하여 기존에 고려되던 흐름해석 모형 (등류 흐름/부등류 흐름) 및 도달시간 산정방법 (고정 도달시간/임계 도달시간)을 매개변수로 적용할 수 있는 통합적인 흐름해석 알고리즘을 개발하였다. 또한, 개발된 알고리즘을 적용한 수치적 분석을 수행하여 도로 구간의 표면 흐름을 모의하였다. 도로 구간은 2차선 및 20 m의 길이를 선택하였고, 도로 횡경사는 2%로 고정하고, 도로 종경사는 1 - 10%로 변화하는 조건을 고려하였으며, 측구 횡경사는 2 - 10%로 변화하는 조건을 고려하였다. 이와 같이 도시 도로부에서의 지형학적 조건과 수리학적 매개변수를 반영한 수치적 분석을 통해 각각의 해석방법과 해석 조건에 따른 도로 표면 유출특성을 분석하였다.

2. 기본이론

2.1 도로 표면 흐름해석 모형

도로 표면의 흐름해석 알고리즘을 개발하기 위해 Manning 공식을 적용한 등류기반 흐름해석 모형과 운동과 방정식을 적용한 부등류기반 흐름해석 모형을 매개변수로 선정하였다. 등류기반 흐름해석은 도로 전체 구간에서의 흐름특성이 일정하다고 가정하여 적용 및

계산이 간단하다. 하지만 도로 표면을 따라 빗물이 유출되어 측구에서 선형적으로 유량이 증가하는 실제의 현상을 반영하지 못한다는 한계를 갖고 있다. 부등류기반 흐름해석은 도로의 종단경사, 횡단경사 및 우수 유출량을 이용하여 도로의 경사조건에 따른 지배단면의 위치 및 한계수심을 산정하고 이를 기준으로 하여 도로의 상·하단으로 흐름을 모의하는 흐름해석 모형이다.

2.1.1 등류기반 흐름해석

개수로에서 등류기반 유출해석은 Manning 공식이 대표적으로 사용되고 있으며 관련된 경험상수들을 보다 정확하게 산정하기 위해 지속적으로 보완된 수정 공식들이 개발되어 왔다. 기본적인 Manning 공식은 다음과 같다.

$$V = \frac{1}{n} R^{0.67} S_o^{0.5} \tag{Eq. 1}$$

$$Q = AV = \frac{1}{n} AR^{0.67} S_o^{0.5} \tag{Eq. 2}$$

여기서 V 는 단면의 평균유속, n 은 Manning 조도계수, R 은 동수반경, S_o 는 도로 종경사를 나타낸다. 이렇게 계산된 단면 평균유속에 도로 단면적 A 을 곱하여 평균 유량 Q 을 계산할 수 있다.

Izzard and Hicks (1947)은 도로의 유출량을 계산하기 위해 Manning 공식을 수정하여 Eq. 3과 같은 수정공식을 제안하였다.

$$Q = \frac{k}{n} S_x^{1.67} T^{2.67} S_o^{0.5} \tag{Eq. 3}$$

여기서, K 는 상수 0.367이며, S_x 는 도로 횡경사, T 는 흐름폭을 의미한다.

일반적으로 도로는 Fig. 1과 같이 측구방향으로 일정한 경사를 갖고 있어 빗물이 유출된다. Eq. 3은 도로 횡경사와 측구 횡경사가 동일한 단순 삼각형 단면 (Fig. 1 (a))에서만 적용이 가능하다는 한계를 갖고 있다. 대부분의 도로에서는 강우 시에 빗물의 퍼짐이 너무 커지거나 흐름 속도가 너무 빨라지기 전에 빗물을 안전하게 차집하기 위하여 노면경사와 다른 경사를 갖는 측구 및 경계석을 구성한다. 따라서 빗물이 차집되는 도로 단면

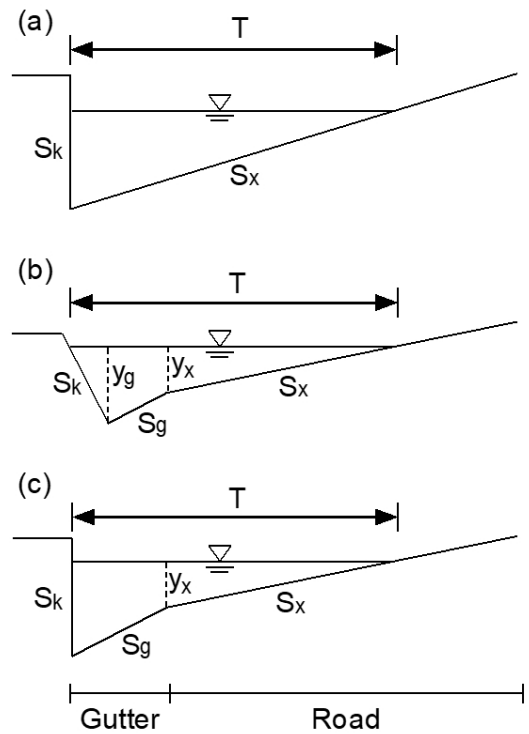


Fig. 1. Configuration of gutter sections: (a) uniform section, (b) V-shape section, and (c) composite section.

형상이 단순 삼각형 단면이 아닌 Figs. 1 (b) and (c)와 같은 복합 삼각형 단면을 구성한다.

IPWEA (2017)에서는 Izzard and Hicks의 수정공식을 복합 삼각형 단면에 적합하도록 수정하여 Eq. 4와 같은 평균유량 산정공식을 제안하였다.

$$Q = \frac{8}{3} \left[\frac{S_k}{n_k} \cdot y_g^{8/3} + \frac{S_g}{n_g} \cdot (y_g^{8/3} - y_x^{8/3}) + \frac{S_x}{n_x} \cdot y_x^{8/3} \right] \cdot S_o^{1/2} \tag{Eq. 4}$$

여기서 y 는 수심, S_k 는 도로 경계석 경사, S_g 는 측구 횡경사를 나타낸다.

2.1.2 부등류기반 흐름해석

도로에서의 흐름은 상류 부분부터 지속적으로 도로의 표면유출량이 측구로 유입되어 하류부로 갈수록 유출량이 증대되는 수리학적 특성을 가지고 있다. 이러한 흐름특성을 고려하기 위해서는 부등류기반의 점변류 흐름해석이 필요하다. Eq. 5는 부등류 미분방정식을 지

배방정식으로 해석하는 수리학적 흐름 계산 모형이다.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{s_o - s_f - \frac{2Q}{gA^2} \cdot \frac{dQ}{dx} + \frac{Q^2}{gA^3} \cdot \frac{\partial A}{\partial x}}{1 - \frac{Q^2 T}{gA^3}} \quad (\text{Eq. 5})$$

여기서 y 는 수심, x 는 상류부터의 거리, A 는 측구흐름의 단면적, Q 는 유량, g 는 중력가속도를 나타내며, S_f 는 마찰경사로 Eq. 6과 같이 나타낼 수 있다.

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

이 방정식은 수심에 대한 1계 상미분 방정식으로서 임의의 지점에서 수심이 알려진 경우 그 수심값을 경계조건으로 각 지점에서의 해를 구할 수 있다 (Smith 1967 and Naqvi 2003). 따라서 Eq. 5을 풀기 위해서는 지배단면의 위치를 찾고 지배단면에서의 한계수심을 계산해야 한다. 한계수심을 계산하기 위한 방식은 단면의 형상에 따라 달라진다. 직사각형, 삼각형, 또는 포물선 단면형상은 해석법을 이용하여 한계수심을 정확하게 결정할 수 있지만, 그 외의 단면형상의 경우 수치해법을 이용하여 한계수심을 계산해야 한다 (Chaudhry 2007). 따라서, 복잡한 단면형상들에서 한계수심을 계산하기 위해 적용할 수 있는 명시적 해석법에 관한 연구가 최근까지도 꾸준히 이루어 지고 있다 (Wang 1998, Vatankhah and Easa 2011, Liu et al. 2012).

국내의 경우 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MOLIT) (2021)에서 자동차 주행속도에 따라 측구 단면의 형상을 규정하고 있다. 일반적으로 설계속도 80 km h^{-1} 이상의 도로에서 Fig. 1 (b)와 같은 경사형 경계석을 권장하고 있으나, 주행속도가 낮은 도로 구간에서는 Fig. 1 (a) and (c)와 같은 수직형 경계석을 설치하도록 규정하였다. 따라서, 도심지 도로 표면 흐름해석을 위해 본 연구의 수치모의 단면은 도로 경계석 경사 (S_x)를 지표면과 수직으로, 도로 횡경사 (S_y)는 2%로 각각 고정하고, 측구 횡경사 (S_g)만을 2 - 7%로 변화시키며 Fig. 1 (c)와 같은 단면형상으로 구성하였으며, 측구 횡경사 2% 조건에서는 도로 횡경사와 측구 횡경사가 동일한 단순 삼각형 단면 (Fig. 1 (a))을 구성한다. 이와 같은 복합 삼각형 단면의 경우, 원형단면이나 평형

사변형 단면 및 아치형 단면 등과는 다르게 한계수심을 계산하기 위한 명시적 해석법에 대한 연구가 충분히 진행되지 못한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 Newton-Raphson 방정식에 의한 수치해법으로 한계수심을 계산하였으며, 수치모의를 통해 등류기반 해석모형 및 부등류기반 해석모형을 적용한 흐름해석을 각각 수행하여 그 결과를 비교하였다.

2.2 도달시간 산정방법

도달시간은 강우강도를 결정할 때 강우 지속시간으로 적용하여 최대 설계강우를 선택하는데 필수적인 요소이다. 도달시간 산정방법으로 이전까지는 일정 시간을 동일하게 가정하는 방법을 채택하였으며, 도로 설계의 경우 2분이나 5분의 도달시간을 적용하는 경우가 있었다. 이는 사용이 간편하고 설계강우량의 조정에 유리하나, 유역의 지형 특성 및 실제 흐름의 반영이 어려워 최근에는 권장되지 않고 있다.

FHWA (2013)에서는 도달시간을 유역의 최원점에서 측구의 시작점까지 표면류 흐름의 도달시간과 측구 시작점에서 종점까지 측구 흐름의 도달시간의 합으로 정의하며, 표면류 흐름의 도달시간과 측구 흐름의 도달시간을 각각 산정하여 Eq. 7과 같이 계산한다.

$$T_f = T_s + T_g \quad (\text{Eq. 7})$$

여기서 T_f 는 총 도달시간, T_s 는 표면류 흐름의 도달시간, T_g 는 측구 흐름의 도달시간을 의미한다 (Fig. 2).

표면류 흐름의 도달시간 산정방법으로는 SCS 공식, Kerby 공식 (자연유역, 도시유역) 등과 같은 경험식에 의한 산정 방법이 다양하게 개발되어 검증이 이루어졌다. 특히, 국내의 경우 Lee and Ju (2014)는 도시 유역에서 Kerby 공식을 이용한 도달시간 산정방법이 적합하다고 분석하였으며, MOLIT (2020)에서도 일반적으로 Kerby 공식을 사용을 권장하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 표면류 흐름의 도달시간을 산정하기 위해 Eq. 8과 같은 도시지역 Kerby 공식을 채택하였다.

$$T_s = 1.445 \left(n \times \frac{B}{s_o} \right)^{0.467} \quad (\text{Eq. 8})$$

측구 흐름의 도달시간의 경우 측구에서의 흐름해석

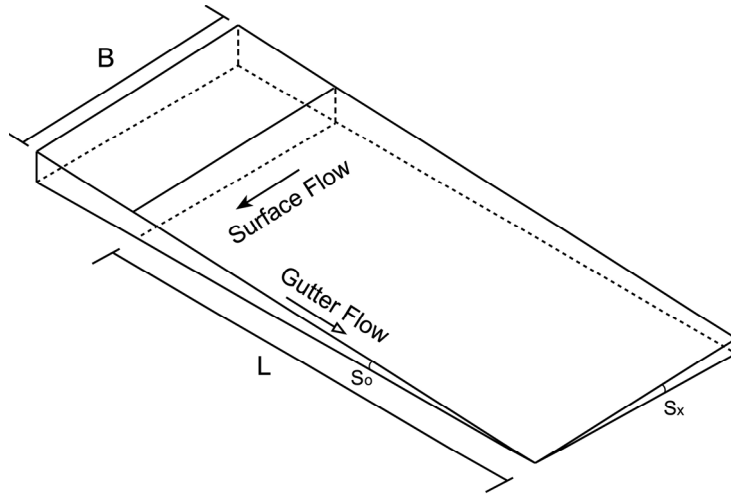


Fig. 2. Diagram for road flow path.

방법에 따라 산정방법이 달라진다. 등류기반 해석의 경우 모든 측구 구간에 걸쳐 동일한 흐름특성을 갖고 있으므로 도로 전체 길이 (L)를 평균 유속 (V)으로 나누어 계산한다. 반면, 부등류기반 해석의 경우 측구의 위치에 따라 흐름특성이 달라지므로 축차적으로 계산지점 사이의 도달시간을 산정하고 이를 합산하여 계산한다.

최근 많은 연구들이 실제 도달시간을 강우강도 지속 시간으로 적용하는 임계지속시간을 흐름해석에 반영하고 있으며, 이를 보다 정밀하게 계산하기 위한 연구가 이루어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 도달시간 산정방법을 흐름해석 알고리즘의 매개변수로 선정하여, 임의의 시간을 입력 받거나 계산된 도달시간을 임계지속시간으로 적용할 수 있도록 하였다.

3. 수치모의 조건 선정

2.1절에서 언급하였듯이 도로 표면 흐름해석 모형은 등류기반 해석과 부등류기반 해석으로 나뉜다. 등류기반 해석의 경우 도로측구의 임의의 지점에서의 흐름특성이 도로 전반에 걸쳐 동일한 값을 나타내고 부등류기반 해석의 경우 도로 상류부에서 하류부 도로 끝단으로 진행될수록 도로 표면유량이 측구로 유입되어 측구의 수심 및 유속을 변화시킨다. 또한, 2.2절에서 언급하였듯이 도달시간은 강우 지속시간으로 고려되는 중요한 변수이다. 따라서, 본 연구에서는 흐름해석 모형 및 도

달시간 산정방법을 매개변수로 하는 도로 표면 흐름해석 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘을 이용한 수치적 분석을 수행하여 각각의 매개변수에 따른 도로 표면 유출특성을 분석하기 위하여 다음과 같은 수치모의 조건을 선정하였다.

3.1 지형조건

일반적으로 도로의 흐름해석을 위해서는 빗물받이가 설치된 위치를 기준으로 도로를 구분하여 각 구간의 도로 표면 흐름해석을 각각 수행한다. 본 연구에서는 도로조건에 따른 도로 표면의 흐름을 분석하기 위하여 Table 1과 같은 도로조건을 선정하였다. 도로의 폭은 국내의 도로 현황을 고려하여 2차선 (6 m)을 선택하였으며, 도로의 길이는 Ministry of Environment (MOE) (2018)에서 제시된 도로 경사조건 및 도로 차선별 적정 빗물받이 설치간격을 고려하여 20 m로 선정하였다. 또한, 도로 표면의 빗물을 차집하고 빗물받이로 유출시키며 주요 표면 흐름이 형성되는 측구부의 폭을 0.5 m로 선정하였다. 도로의 종경사 및 측구 횡경사조건은 MOE (2018)와 MOLIT (2020)에서 제시하고 있는 최대 경사조건 10%를 넘지 않도록 도로 종경사는 1 - 10%, 측구 횡경사는 2 - 10%로 각각 선정하였으며, 도로 횡경사는 2차선 (6 m)을 기준으로 표준 횡경사인 2%로 선정하였다.

Table 1. Road conditions

Condition	Value
Road width B (m)	6
Road length L (m)	20
Gutter width (m)	0.5
Longitudinal slope of road S_o (%)	1 - 10
Transverse slope of road S_x (%)	2
Transverse slope of gutter S_g (%)	2 - 7

Table 2. List of numerical experiments

Case	Flow analysis module	Flow travel time
1	Uniform flow	2 min
2	Uniform flow	Critical duration
3	Varied flow	2 min
4	Varied flow	Critical duration

3.2 강우조건

MOE (2018)의 우수배재계획 및 MOLIT (2020)의 도로배수시설 설계 및 유지관리 지침에서는 Eq. 9와 같은 합리식을 이용하여 우수유출량을 산정하도록 권고하고 있다.

$$Q_m = 2.778CIA \quad (\text{Eq. 9})$$

여기서 C 는 도로표면 유출계수, I 는 강우강도, A 는 배수면적을 나타낸다.

도로표면 유출계수는 아스팔트 도로의 최대 유출계수인 0.95를 사용하였으며, 강우강도는 서울강우관측소 (37°34'15"E, 126°57'57"N, 관측소코드 10181108)의 강우빈도별 6차 다항식을 적용하였다. 또한, 강우빈도는 최근의 상향된 설계빈도를 반영하여 30년 빈도 강우를 선정하였다.

3.3 도로 표면 흐름해석 모의조건

개발된 도로 표면 흐름해석 알고리즘의 매개변수를 조합하여 Table 2와 같은 도로 표면 흐름해석 모의조건을 선정하였다. 흐름해석 모형에 따른 유출특성의 변화를 비교하기 위하여 등류기반 해석모형과 부등류기반 해석모형이 고려되었으며, 도달시간 산정방법에 따른 유출특성의 변화를 비교하기 위하여 2분의 임의의 도

달시간을 가정한 조건과 임계도달시간을 계산하여 적용한 조건을 각각 선정하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 도로 표면 흐름해석 알고리즘을 개발하고 기존의 연구들에서 개별적으로 분석되던 매개변수를 통합하여 수치적 분석을 통한 흐름해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 4.1절에서는 4가지 모의조건에서 계산된 도달시간을 비교하였으며, 4.2절에서는 계산된 도달시간을 강우강도의 지속시간으로 반영한 도로 표면의 총 유출량을 계산하였다. 또한, 도로의 길이를 0.1 m 간격으로 증가시키며 최대 20 m 구간에서 각 모의조건에 따른 수심 및 유속을 계산하여 4.3절에 제시하였다.

4.1 도달시간

Fig. 3은 도로의 종경사 및 측구 횡경사에 따른 각 모의조건에서 계산된 도달시간을 나타내고 있다. Case 1과 Case 3은 실제의 도로 흐름과 상관없이 2분의 고정된 도달시간을 사용하고 있어 모든 경사조건에서 동일하게 2분의 도달시간이 계산되었다. Case 2와 Case 4는 흐름해석 모형에 따라 각기 다른 도달시간이 계산되었다. 도달시간은 도로 종경사 및 측구 횡경사가 커질수록 감소하는 것으로 모의되었다. 가장 긴 도달시간은 도로 종경사 1% 및 측구 횡경사 2% 조건에서 나타났으며, 등류기반 흐름해석을 수행한 Case 2의 경우 2.033분, 부등류기반 흐름해석을 수행한 Case 4의 경우 2.514분으로 모의되었다. 가장 짧은 도달시간은 도로 종경사 10% 및 측구 횡경사 10% 조건에서 나타났으며, Case 2와 Case 4에서 각각 1.441분과 1.579분으로 모의되었다. 특히, 경사조건에 따른 도달시간의 변화는 도로 종경사에 대해서는 급격하게 변화하는 것으로 나타났으며, 측구 횡경사 변화에 대해서는 다소 작은 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 도로의 종경사가 커질수록 하류부 방향으로 빠르게 유출되는 흐름특성이 도달시간에 지배적인 영향을 미치며, 측구 횡경사가 커질수록 증가하는 횡방향 유속은 큰 영향을 미치지 못하기 때문으로 판단된다. 또한, 흐름해석 모형에 따른 도달시간을 비교하여 부등류기반 흐름해석 모형을 적용한 Case 4에서 등류기반 흐름해석 모형을 적용한

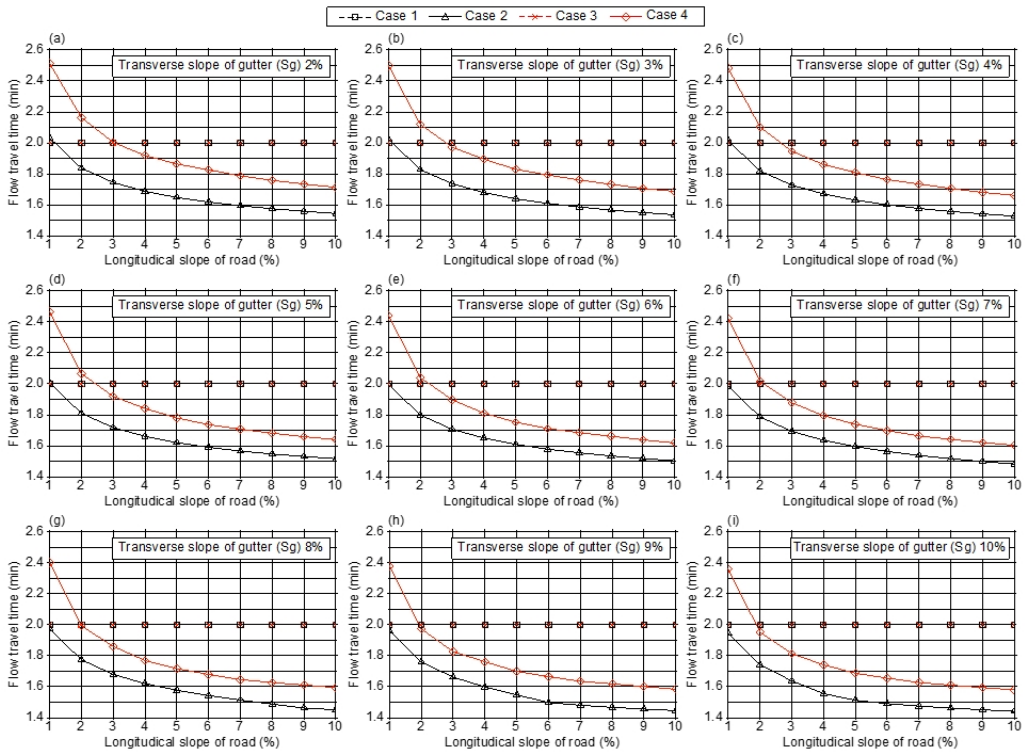


Fig. 3. Flow travel time on the 20 m length road with the changes in the slope conditions.

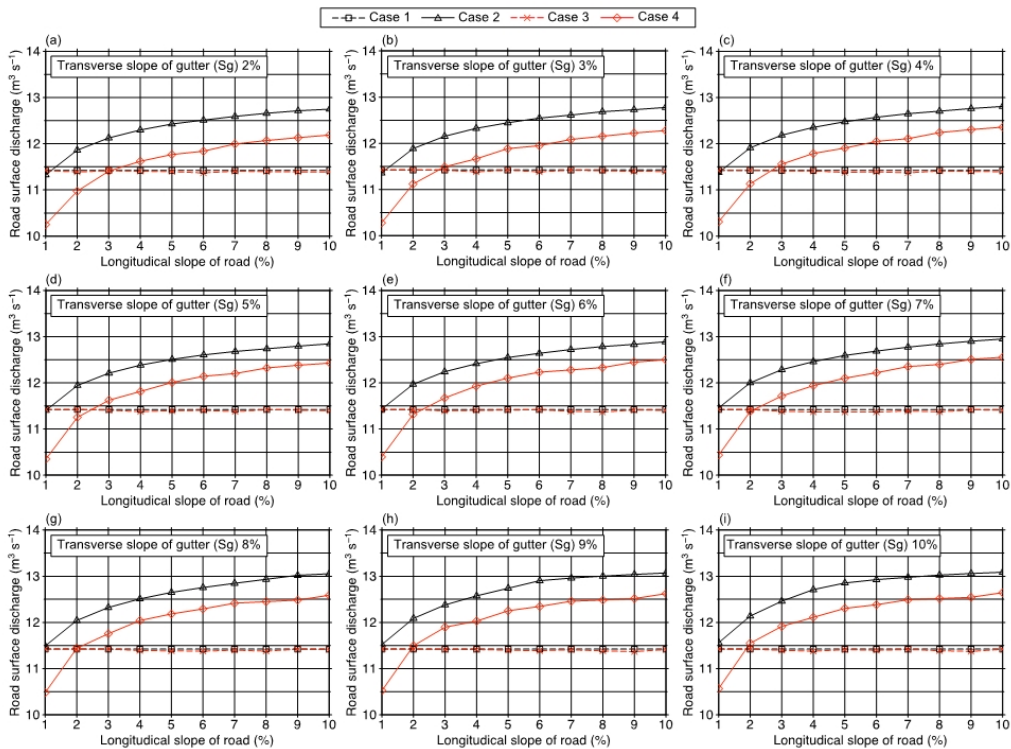


Fig. 4. Road surface discharge on the 20 m length road with the changes in the slope conditions.

Case 2에 비해 최대 23.66%, 평균 11.80% 긴 도달시간이 모의되었다. 이는 부등류기반 흐름해석 모형에서 유출이 시작되는 도로 상류부의 작은 유속 및 유량을 반영하여 실제의 도로 흐름과 유사하게 표면 흐름을 모의하였기 때문으로 판단된다.

4.2 도로 표면 총 유출량

4.1절에서 모의된 도달시간을 적용하여 도로 표면의 총 유출량을 Fig. 4와 같이 모의하였다. 도달시간은 강우강도를 계산할 때, 강우의 지속시간으로 고려되는 중요한 요인이다. 특히 가파른 도로 경사에 의해 짧아진 도달시간은 설계강우강도를 커지게 하여 많은 양의 도로 표면 유출을 야기한다. 따라서 도로 표면의 총 유출량은 가장 긴 도달시간이 모의되었던 도로 종경사 1% 및 측구 횡경사 2% 조건에서 가장 작은 유량이 모의되었으며, 도달시간이 가장 짧았던 도로 종경사 및 측구 횡경사 10% 조건에서 가장 큰 유량이 모의되었다. 또한, 동일한 도달시간 2분을 적용한 Case 1과 Case 3에서는 도로 경사조건과 상관없이 11.422 m³ s⁻¹의 유량이 모의되었다. 흐름해석 모형에 따른 도로 표면 유출

량의 차이는 부등류기반 흐름해석 모형에서 최대 9.50%, 평균 4.73%의 작은 유량이 모의되었다.

4.3 도로 측구 수심 및 유속 분포

앞서 4.1절 및 4.2절에서 분석한 것과 같이 도로 표면 흐름의 유출특성은 도로의 경사조건에 의해 크게 달라지는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구의 도로 경사조건 중 가장 작은 경사를 갖는 도로 종경사 1% 및 측구 횡경사 2% 조건과 가장 큰 경사를 갖는 도로 종경사 및 측구 횡경사 10% 조건을 선정하여, 도로 측구의 수심 및 유속 분포를 Fig. 5와 같이 나타냈다. Figs. 5 (a) and (b)는 도로 종경사 1% 및 측구 횡경사 2%에서의 측구 수심 (Fig. 5 (a))과 유속 (Fig. 5 (b))을 도로 상류부터 최대 20 m까지 모의한 결과이다. Figs. 5 (c) and (d)는 도로 종경사 및 측구 횡경사 10%에서의 측구 수심 (Fig. 5 (c)) 및 유속 (Fig. 5 (d)) 분포를 나타내고 있다. 등류기반 흐름해석 모형을 적용한 Case 1과 Case 2의 경우, 도로 전반에 걸쳐 동일한 흐름특성이 모의되었다. 이는 등류 흐름의 특성을 반영한 결과라고 판단된다. 부등류 흐름해석 모형을 적용한 Case 3과 Case 4의 경우, 도로의 상류부에서부터 하류로 빗물이 유출되며 변화하는

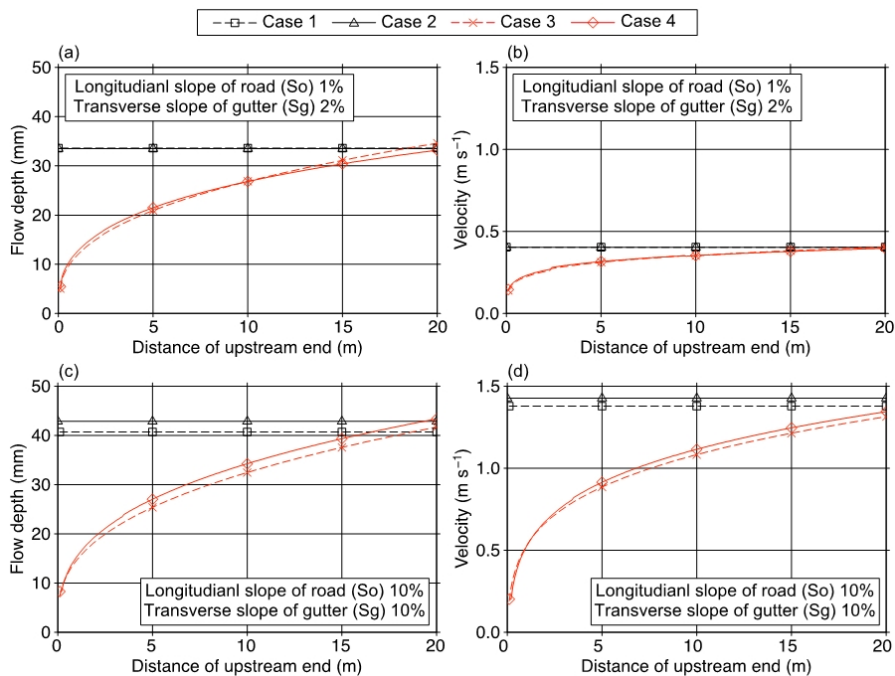


Fig. 5. Gutter flow profile with mild slope ((a) and (b)) and steep slope ((c) and (d)) conditions.

흐름특성을 반영하여 보다 실제 유출과 유사한 수심 및 유속 분포가 모의되었다. 또한, 도달시간 산정방법에 따른 유출특성의 차이는 도로의 경사가 급해질 수록 크게 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 도로의 배수능력 평가를 위한 최적의 흐름해석 방안을 도출하기 위해 우선적으로 기존에 적용되던 매개변수를 모두 포함하는 도로 표면 흐름해석 알고리즘을 개발하고 이를 직선도로에 적용한 수치적 분석을 수행하였다. 도로 조건은 도로의 폭(6 m)과 경사(도로 종경사 1 - 10%, 도로 노면경사 2% 및 측구 횡경사 2 - 10%) 조건을 고려하였으며, 서울강우관측소의 30년 빈도 강우강도를 선정하고 이를 합리식에 적용하여 우수 유출량을 산정하였다. 개발된 알고리즘에 적용된 매개변수를 조합한 4가지 모의조건을 선정하여 도로의 흐름해석을 수행하였으며, 각 조건에 따른 유출 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실제 도로의 배수능력을 판단할 수 있는 도로 표면 흐름해석 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘의 주요 매개변수로 흐름 해석모형(등류 및 부등류)과 도달시간 산정방법이 반영되었다.
- 2) 도달시간은 도로의 경사가 커질수록 감소하였다. 특히, 종경사의 변화에 민감하게 영향을 받았으며, 측구 횡경사 변화에 의해서도 약간의 도달시간이 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 부등류 흐름해석 모형에서 모의된 도달시간이 등류 흐름해석 모형에서의 도달시간보다 최대 23.66%, 평균 11.80% 길게 모의되었다.
- 3) 도로 표면 총 유출량은 산정된 도달시간에 따라 달라지므로 2분의 동일한 도달시간을 적용한 모의조건에서는 항상 $11.422 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 의 동일한 유출량이 모의되었다. 임계지속시간을 적용한 모의조건에서는 부등류 흐름해석 모형에서 모의된 유출량이 등류 흐름해석 모형의 유출량보다 최대 9.50%, 평균 4.73% 작게 모의되었다.
- 4) 경사조건에 따른 도로 측구 수심 및 유속 분포를 모의한 결과, 부등류 흐름해석 모형을 적용한 경우 도로의 상류에서 하류로 빗물이 유출되며 변화하는 흐

름특성이 반영되는 것을 확인하였다. 이는 도로 전반에 걸쳐 동일한 흐름특성으로 가정하는 등류 흐름 해석 모형에 비해 합리적으로 실제 도로 표면 흐름을 해석하는 것으로 판단된다.

- 5) 최적의 도로 표면 흐름해석을 위하여 도로의 흐름 변화를 실제와 유사하게 모의할 수 있는 부등류 흐름해석 모형과 실제 도달시간을 계산하여 강우의 지속시간으로 반영하는 임계지속시간을 적용한 흐름해석 방법이 적합하다고 판단된다.

본 연구는 기존에 적용되던 매개변수를 모두 고려할 수 있는 도로 표면 흐름해석 알고리즘을 개발하고 이를 적용한 수치적 분석을 수행하여 모의 조건에 따른 유출 특성을 분석한 것이다. 보다 정밀한 흐름해석을 위해서는 도로 경사조건을 반영한 배수구역 산정 방법 및 빗물받이가 연속적으로 설치된 도로 구간의 빗물받이 차집 효율 등의 기존에 고려되지 못한 매개변수들을 고려할 수 있는 알고리즘의 개발 및 실제 실험을 통한 실증연구 등의 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21CTAP-C163760-01).

References

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2014. Drainage Manual, AASHTO, Washington, D.C.
- Aranda, J.Á., Beneyto, C., Sánchez-Juny, M. and Bladé, E. 2021. Efficient Design of Road Drainage Systems. *Water* 13(12): 1661.
- Chaudhry, M.H. 2007. Open-channel flow. Springer Science & Business Media.
- Escarameia, M., Gasowski, Y., May, R. and Lo Cascio, A. 2001. Hydraulic capacity of drainage channels with lateral inflow.
- Federal Highway Administration (FHWA). 2013. Urban drainage design manual. Hydraulic engineering circular No. 22, 4-47.
- Graber, S.D. 2013. Numerical Investigation of Flow in Triangular Gutters. *Journal of irrigation and drainage engineering* 139(2): 165-172.
- Institute of Public Works Engineering Australasia (IPWEA)

2017. Queensland Urban Drainage Manual (QUDM). Queensland Government.
- Izzard, C.F. and Hicks, W.I. 1947. Hydraulics of runoff from developed surfaces. In Highway Research Board Proceedings (Vol. 26).
- Jo, J.B., Kim, J.S. and Yoon, S. E. 2018. Experimental estimation of the head loss coefficient at surcharged four-way junction manholes. *Urban Water Journal* 15(8): 780-789.
- Kim, J.S., Jo, J.B. and Yoon, S.E. 2018. Head loss reduction in surcharged four-way junction manholes. *Water* 10(12): 1741.
- Kim, J.S., Kwak, C.J. and Jo, J.B. 2021. Enhanced method for estimation of flow intercepted by drainage grate inlets on roads. *Journal of Environmental Management* 279: 111546.
- Lee, J.Y. and Jun, K.W. 2014. Analysis of Runoff Based on Unit Hydrograph Using XP-SWMM. *Crisisonomy* 10(8): 51-62. (in Korean)
- Lee, S.H., Kim, J.S. and Kim, S.J. 2021. Analysis of Applicability of the Detention in Trunk Sewer for Reducing Urban Inundation. *Ecology and Resilient Infrastructure* 8(1): 44-53. (in Korean)
- Lee, J.Y. and Kim, J.S. 2020. ROC Analysis of Topographic Factors in Flood Vulnerable Area considering Surface Runoff Characteristics. *Ecology and Resilient Infrastructure* 7(4): 327-335. (in Korean)
- Li, X., Fang, X., Chen, G., Gong, Y., Wang, J. and Li, J. 2019. Evaluating curb inlet efficiency for urban drainage and road bioretention facilities. *Water* 11(4): 851.
- Liu, J.L., Wang, Z.Z., Leng, C.J. and Zhao, Y.F. 2012. Explicit equations for critical depth in open channels with complex compound cross sections. *Flow Measurement and Instrumentation* 24: 13-18.
- Ministry of Environment (MOE). 2018. Design criteria of sewer facilities. (in Korean)
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2020. The Guideline of Design and Maintenance Management for Drainage Facilities of Roads. (in Korean)
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2021. Pedestrian Road Installation and Management Guideline. (in Korean)
- Naqvi, M.M. 2003. Design of linear drainage systems. Thomas Telford.
- Rhodes, D.G. 1998. Gradually varied flow solutions in Newton-Raphson form. *Journal of irrigation and drainage engineering* 124(4): 233-235.
- Smith, K.V. 1967. Control point in a lateral spillway channel. *Journal of the Hydraulics Division* 93(3): 27-34.
- Vatankhah, A.R. and Easa, S.M. 2011. Explicit solutions for critical and normal depths in channels with different shapes. *Flow Measurement and Instrumentation* 22(1): 43-49.
- Wang, Z. 1998. Formula for calculating critical depth of trapezoidal open channel. *Journal of Hydraulic Engineering* 124(1): 90-91.
- Wang, J., Zhao, M., Tu, N., Li, X., Fang, X., Li, J., ... and Su, D. 2021. Curb Inlet Efficiency Evaluation under Unsteady Rainfall Situations Based on Full-Scale Rainfall-Runoff Experiments. *Journal of Hydrologic Engineering* 26(2): 04020061.