

불투수층 사면에서의 도달시간 Time of Concentration on Impervious Overland

유 동 훈* / 전 우 용**

Yoo, Dong Hoon / Jun, Woo Yong

Abstract

Many types of factors were devised to calculate time of concentration. Singh(1976) derived time of concentration of overland flow using kinematic wave theory for plane, converging, and diverging geometric configurations. The present paper investigated the time of concentration for particularly plane geometric configuration. A theoretical equation of time of concentration is derived based on the assumption of impervious overland flow as in the open channel flow. The study characterized the overland flow by many types of characteristic flow such as rough turbulent flow, smooth turbulent flow, laminar flow, and then suggested a theoretical equation on each flow condition. The present paper further considered the rainfall intensity as a main factor and devised an approximate composite equation reflecting the effect of rainfall intensity given at various return periods.

Keywords: time of concentration, geometric configurations, open channel flow, overland flow, rainfall intensity, approximate composite equation

요 지

도달시간 산정에 있어 고려되어야 할 요소에는 유역형상과 흐름상태, 유출특성 등이 있다. 한편 Singh(1976)은 지표면흐름을 Kinematic Wave 이론으로 해석하였으며 유역형상을 평면형상과 수렴형상, 발산형상으로 분류하여 유역형상에 따른 도달시간 산정식을 제시하였다. 본 논문에서는 Singh이 제시한 평면형상에서의 도달시간 산정식에 기초하여 불투수 지표면 유출에서의 도달시간 산정을 다루었다. 이를 위한 이론식 유도는 흐름을 개수로 흐름(층류, 완난류, 전난류)으로 파악하여 수행하였고 각 개수로 흐름상태에 대한 이론식을 제시하였다. 또한 강우강도를 주요 인자로 고려하여 재현기간별 강우강도를 포함한 근사식 즉 복합형 도달시간 산정식을 개발하였다.

핵심용어 : 도달시간, 유역형상, 하도흐름, 지표면흐름, 재현기간별 강우강도, 복합형 산정식

* 아주대학교 환경·도시공학부 교수

Professor, School of Envir. and Urban Engrg., Ajou Univ., Suwon, Kyonggi 441-749, Korea
(dhyoo@madang.ajou.ac.kr)

** 아주대학교 건설교통공학과 대학원 (현 대영엔지니어링 연구실)

MS, Dept. of Civil and Traffic Engrg., Ajou Univ., Suwon, Kyonggi 441-749, Korea

1. 서 론

홍수유출은 흐름특성에 따라 불투수층과 투수층을 포함한 지표면흐름과 하도흐름으로 분류할 수 있으며 유역형상에 따라 평면형유역, 수렴형유역 그리고 발산형유역 등의 흐름으로 분류할 수 있다. 지표면흐름의 주된 흐름인 불투수층 흐름의 경우 유출이 커질수록 수심이 증가하는 특징이 있고, 투수층 흐름의 경우 유출량에 따라 포화율이 달라지는 특징이 있다. 한편 하도흐름은 수로의 형상과 조면상태, 경사에 따라 유출율이 결정된다. 따라서 홍수유출에 큰 영향을 미치는 인자인 도달시간에도 흐름특성과 유역형상에 따른 영향이 미치게 된다.

도달시간 산정에 있어 고려되어야 할 요소에는 유역형상과 흐름상태, 강우강도, 유출특성 등이 있다. 도달시간의 개념이 도입된 초기 Mulvaney(1850)는 유역형상에 의한 영향을 도달시간 산정에 반영하였지만 공간과 시간에 따라 달라지는 강우의 특성을 적절히 고려하지 못하였다. 반면 현재 널리 알려진 공식인 Kirpich 산정식은 이러한 점을 보완하여 강우 특성에 대한 여러 요소를 반영하였다. 그러나 Kirpich 산정식은 매우 제한적인 조건에서 적용해야 하는 단점이 있는 산정식이다. 또한 최근에 Izzard 산정식을 개선하여 Bulter(1977)가 제시한 산정식은 다양한 흐름상태와 강우에 의한 영향을 도달시간 산정식에 반영하였으나 유역형상에 의한 영향은 고려하지 않았다. 이와 같이 기존 도달시간 산정식들은 도달시간 산정에 고려되어야 하는 여러 요인들을 분석적이지고 정량적으로 파악하여 고려하지 않았다. 따라서 기존 산정식들을 실무에 적용할 경우 혼돈의 우려가 많으며 각 산정식의 산정결과에 많은 차이를 보일 수 있다.

한편 Singh(1976)은 지표면흐름을 Kinematic Wave 이론으로 해석하였으며 유역형상을 평면형상과 수렴형상, 발산형상으로 분류하여 유역형상에 따른 도달시간 산정식을 제시하였다. 본 논문에서는 도달시간에 영향을 미치는 여러 요인들을 분석적이고도 정량적으로 파악하기 위한 제1단계로 평면형상 불투수층 표면에서의 유출특성을 집중적으로 검토하였다. 불투수 지표면유출의 도달시간을 Singh이 제시한 평면형상에서의 도달시간 산정식에 기초하여 다루었으며 이론식 유도는 흐름을 개수로 흐름으로 파악하여 수행하였고 층류, 완난류, 전난류 등으로 분류되는 개수로의 각 흐름상태에 대하여 이론식을 제시하였다. 또한 강우강도

의 크기가 강우의 유출특성에 매우 중요한 요인으로 작용하는 것으로 확인되었으며 이를 주요 인자로 고려하여 제형기간별 강우강도를 포함한 근사식 즉 복합형 도달시간 산정식을 개발하였다.

2. 도달시간의 이론적 해석

도달시간의 이론적 해석은 일반형 도달시간 산정식을 기초로 층류, 완난류, 전난류 등으로 분류되는 개수로 흐름상태에 따라 시행한다. 개수로 흐름상태에 따른 분석은 지표면 유출이 수로조건 및 조도상태에 따라 흐름이 좌우되는 개수로 흐름과 유사하기 때문이다. 이를 위하여 유역의 형상을 직사각형의 2차원 공간으로 가정하였으며 강우는 전 유역에 걸쳐 일정하게 내린다고 보았고 본연구에서는 불투수층 지표면흐름에서의 도달시간을 산정하였다. 가정된 공간에 강우가 시작되어 장시간 계속되면 유량은 평형상태에 이르게 되고 전유역의 강우가 총유출에 기여하는 상태에 이른다. 즉, 유역의 가장 먼 지점의 유량이 출구까지 도달한 상태에 이르게 되며 이때의 전 유역시간을 도달시간이라 칭한다.

홍수유출의 도달시간 산정식은 연속방정식으로부터 추정할 수 있으며, 지표면흐름에서 단위폭당 유량을 고려하면 연속방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다 (Singh, 1976).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} = I(x, t) \quad (1)$$

$$q = uh = \eta(x) h^m \quad (2)$$

$$u = \eta(x) \cdot h^{m-1} \quad (3)$$

여기서 h 는 수심, u 는 평균유속, q 는 단위폭당 유출량, $I(x, t)$ 는 유효강우강도이다. $h(x, t) = 0$, $h(0, t) = 0$ 의 경계조건에서 식 (2)를 식 (1)에 대입하고 특성곡선법(method of characteristics)을 적용하면

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{m\eta(x)h^{m-1}} \quad (4)$$

한편 단위폭당 유출량 q 는 다음과 같은 적분식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$q = \eta(x) h^m = \int_0^x I(\xi, t(\xi)) d\xi \quad (5)$$

$$h(x) = \left[\frac{1}{\eta(x)} \int_0^x I(\xi, t(\xi)) d\xi \right]^{\frac{1}{m}} \quad (6)$$

마찰관계항(η)와, 강우강도(I)를 일정하다고 가정하고 식 (6)을 식 (4)에 대입하고 0 ~ L_0 구간에서 적분하면 다음과 같은 일반형 도달시간 산정식이 유도된다

$$t_c = I^{\frac{1-m}{m}} \left(\frac{L}{\eta} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (7)$$

일반형 도달시간 산정식은 강우강도(I), 유역길이(L), 마찰관계항(η)로 표현된다. 한편 마찰관계항(η)는 유역경사(S)를 포함하고 있으므로 일반형 도달시간 산정식은 강우강도(I), 유역길이(L), 유역경사(S)를 포함하

고 있다.

2.1 개수로 마찰계수 지수함수식

일반형 도달시간 산정식을 이용한 도달시간 산정에 있어 흐름을 개수로 흐름으로 판단하고 분석하였으므로 먼저 개수로 마찰계수 산정식에 대하여 살펴보자. 개수로흐름에서 Chezy의 평균유속 공식은 다음과 같다.

$$u = \sqrt{\frac{gHS}{C_f}} \quad (8)$$

여기서 H는 동수반경, S는 수로경사, C_f 는 마찰계수이다.

그림 1에 제시된 바와 같이 Bazin이나 Varwick의

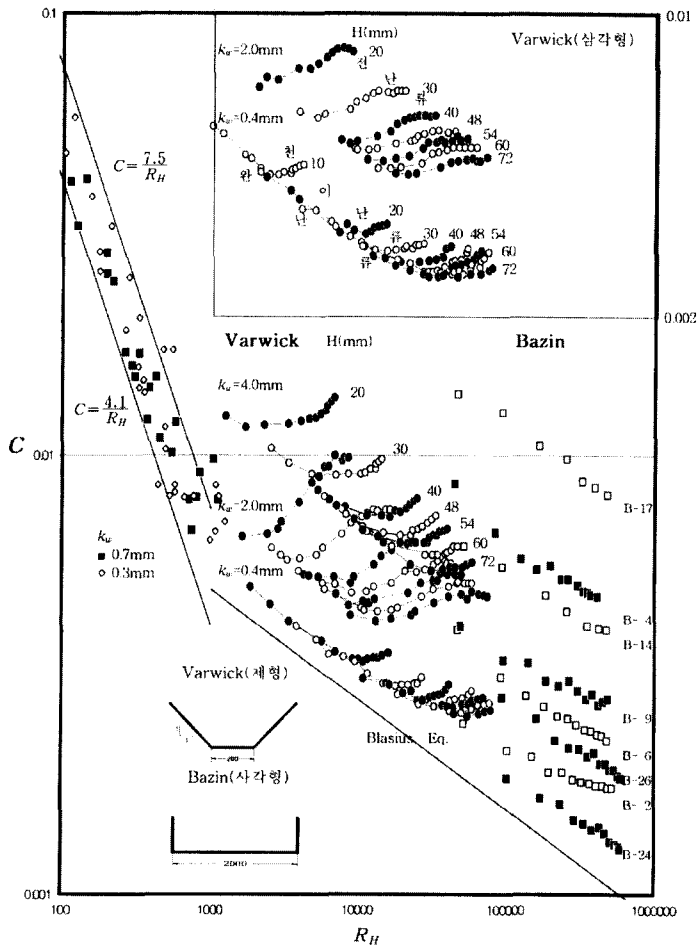


그림 1. 개수로 마찰계수 분포

개수로 관측자료를 검토하면 Reynolds수에 대한 마찰 계수 분포가 관수로의 완난류 마찰계수 분포 경향과 마찬가지로 일정한 기울기를 가지며 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 조도 또는 조고에 따라서 평행이동하고 있음을 알 수 있다. 따라서 기울기에 해당하는 지수를 구간별로 고정하고 비례상수를 조고의 함수로 정하여 마찰계수를 결정할 수 있다.

유역의 형상을 직사각형의 2차원 공간으로 가정하였기 때문에 광폭수로에서의 흐름과 같이 등수반경 H를 수심 h와 같다고 가정하고, 층류 또는 완난류 흐름의 경우 레이놀즈수 R_H 의 함수로 표기하여

$$C_f = \alpha R_H^\beta, \quad R_H = \frac{uh}{\nu} \quad (9)$$

를 도입한다. 여기서 α 는 조도에 따라 변이하는 조도 상수이다. 전난류 흐름의 경우에는 조고비 H_r 의 함수로 다음과 같은 지수함수 형태의 마찰계수 산정식을 도입할 수 있다.

$$C_f = \alpha H_r^\beta, \quad H_r = \frac{h}{k_w} \quad (10)$$

그림 1의 마찰계수 분포에서 기울기에 해당하는 지수 β 는 관련변수 R_H 또는 H_r 의 크기에 따라서 결정되는데 층류 흐름에서 $\beta = -1$, 완난류 흐름에서 $\beta = -0.25 \sim -0.1$ 이고, 전난류 흐름에서는 $\beta = -0.5 \sim -0.25$ 가 된다. 또한 수로형상과 입경에 따라 결정되는 조도상수 α 의 분포는 층류 조건 ($\beta = -1$)에서 입경 0.3mm와 0.7mm인 모래로 덮힌 개수로의 실험 자료를 분석한 결과 4.1~7.5이며, 완난류 조건($\beta = -0.25$)에서는 입경 0.4mm와 2.0mm인 모래로 덮힌 제형수로에서 0.03과 0.04, 삼각형수로에서 0.03과 0.05의 수치로 나타난다. 완난류 조건의 개수로 흐름에서 벽면이 아주 매끄러운 경우는 지수형의 Blasius 공식으로 표시하는데 이때의 조도상수 α 는 완난류 조건의 조도상수중 가장 작은 값인 0.028로 산정된다. 즉 조도가 증가함에 따라 마찰계수 분포가 상향으로 평행이동하므로 조도상수 α 를 조고 k_w 또는 조도에 관한 함수로 결정하여 분포경향을 반영할 수 있다.

2.2 층류조건 일반형 도달시간 산정식

층류일 때 개수로 마찰계수 산정식의 지수 $\beta = -1$ 로서

$$C_f = \frac{\alpha}{R_H} \quad (11)$$

Chezy의 평균유속 공식 (8)과 식 (11)을 연립하여

$$u = \sqrt{\frac{ghS}{\alpha \left(\frac{uh}{\nu}\right)^{-1}}} = \left(\frac{gS}{\alpha\nu}\right) \cdot h^2 = \eta \cdot h^{m-1}$$

식 (3)과 비교하여 정리하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\eta = \frac{gS}{\alpha\nu}, \quad m = 3 \quad (12)$$

식 (12)를 일반형 도달시간 산정식 (7)에 대입하여 정리하면 층류조건 일반형 도달시간 산정식을 구할 수 있다.

$$t_c = I \frac{1-m}{m} \left(\frac{L}{\eta}\right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{\alpha\nu}{g}\right)^{0.33} \cdot I^{-0.67} \cdot L^{0.33} \cdot S^{-0.33} \quad (13)$$

층류조건 일반형 도달시간 산정식은 앞에 상수항이 있고 강우강도(I), 유역길이(L), 유역경사(S)를 포함하는 식으로 표현되며 이것은 기존의 도달시간 산정식 중 ARS공식과 형태면에서는 가장 유사하다.

2.3 완난류조건 일반형 도달시간 산정식

완난류흐름에서 개수로 마찰계수 C_f 는 식 (9)로 산정되며 식 (8)의 Chezy의 평균유속 공식에 대입하여 정리하면

$$u = \sqrt{\frac{ghS}{\alpha \left(\frac{uh}{\nu}\right)^\beta}} = \sqrt{\frac{g\nu^\beta S}{\alpha}} \cdot h^{\frac{1-\beta}{2}} \cdot u^{-\frac{\beta}{2}} \quad (14)$$

식 (14)에서 양변의 u를 정리하면 다음 식을 유도할 수 있다.

$$u = \left(\frac{g\nu^\beta S}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2+\beta}} \cdot h^{\frac{1-\beta}{2+\beta}} = \eta \cdot h^{m-1} \quad (15)$$

식 (14)와 식 (15)에서 다음과 같은 관계가 도출된다.

$$\eta = \left(\frac{g\nu^\beta S}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2+\beta}}, \quad m = \frac{3}{2+\beta} \quad (16)$$

식 (16)을 일반형 도달시간 산정식 (7)에 대입하면, 완 난류조건 일반형 도달시간 산정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} t_c &= I^{\frac{1-m}{m}} \left(\frac{L}{\eta} \right)^{\frac{1}{m}} \\ &= \left(\frac{g\nu^\beta}{\alpha} \right)^{-\frac{1}{3}} \cdot I^{\frac{\beta-1}{3}} \cdot L^{\frac{2+\beta}{3}} \cdot S^{-\frac{1}{3}} \end{aligned} \quad (17)$$

2.4 전난류조건 일반형 도달시간 산정식

전난류흐름에서 개수로 마찰계수 C_f 는 식 (10)으로 산정되며 식 (8)의 Chezy의 평균유속 공식에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} u &= \sqrt{\frac{ghS}{C}} = \sqrt{\frac{ghS}{\alpha \left(\frac{h}{k_w} \right)^\beta}} \\ &= \left(\frac{gS k_w^\beta}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot h^{\frac{1-\beta}{2}} = \eta \cdot h^{m-1} \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)에서 다음과 같은 관계를 도출할 수 있다.

$$\eta = \left(\frac{gS k_w^\beta}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad m = \frac{3-\beta}{2} \quad (19)$$

식 (19)를 일반형 도달시간 산정식 (7)에 대입하면, 전 난류조건 일반형 도달시간 산정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} t_c &= I^{\frac{1-m}{m}} \left(\frac{L}{\eta} \right)^{\frac{1}{m}} \\ &= \left(\frac{gk_w^\beta}{\alpha} \right)^{-\frac{1}{3-\beta}} \cdot I^{\frac{\beta-1}{3-\beta}} \cdot L^{\frac{2}{3-\beta}} \cdot S^{-\frac{1}{3-\beta}} \end{aligned} \quad (20)$$

한편, $\beta = -\frac{1}{3}$ 일 때 식 (19)의 η 는 다음과 같은 관계로 유도할 수 있다.

$$\eta = \left(\frac{gS k_w^\beta}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{g}{\alpha k_w^{\frac{1}{3}}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

차원이 일치된 Manning(Hagen)식 $gn^2 = \alpha k_w^{1/3}$ 를 식 (21)에 적용하면 다음과 같은 관계를 도출할 수 있다.

$$\eta = \left(\frac{g}{\alpha k_w^{\frac{1}{3}}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot S^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{1}{n^2} \right) \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

식 (19)의 η 를 식 (22)로 치환하여 일반형 도달시간 산정식 (7)에 대입하면, 전난류조건(Manning 계수) 일반형 도달시간 산정식을 구할 수 있다.

$$t_c = (nL)^{0.6} \cdot I^{-0.4} \cdot S^{-0.3} \quad (23)$$

여기서 주목할 것은 전난류조건(Manning 계수) 일반형 도달시간 산정식 (23)은 기존의 도달시간 산정식 중 Kinematic Wave 공식과 경험상수항을 제외하고 모든 부분이 일치한다는 점이다. 즉, Kinematic Wave 모형의 도달시간 산정식은 다음과 같다.

$$t_c = 7.0(nL)^{0.6} \cdot I^{-0.4} \cdot S^{-0.3} \quad (24)$$

그러므로 Kinematic Wave공식은 흐름을 전난류라고 가정하고 Manning(Hagen)식을 도입하여 유도한 공식이며 앞의 경험상수항 7.0은 도달시간 실측치를 회귀분석하여 얻어진 것이다. 또한 Kinematic Wave공식을 이용하는데 있어 Manning계수 n 을 0.8까지 적용할 것으로 추천하였는데 이를 식 (22)에 적용하여 등가조고 k_w 로 환산하면 100m가 넘게 추정된다. 이러한 수치는 매우 비현실적인 것으로 전난류형태 개수로 산정식의 단순적용에 많은 문제점이 내재되어 있고 실제 유역유출에 있어 투수층을 통한 복류수유출의 영향도 무시할 수 없음을 추론할 수 있다. 이러한 불확실성이 상당히 내재되어 있기 때문에 본 연구에서는 불투수층 사면에서의 유출문제에 제한을 두고 있다.

3. 복합형 도달시간 산정식

흐름 조건별로 유도된 일반형 도달시간 산정식은 강우강도(I), 유역길이(L), 유역경사(S)와 조도관련 상수(α)로 이루어져 있음을 확인하였다. 강우강도와 유역

길이, 유역경사는 실측이나 기존 관측자료에 의하여 결정되는 인자이지만 조도관련 상수는 지표면 상태와 흐름 조건에 따라 다르게 결정되는 인자이다. 1950년 Los Angeles District of the Corps of Engineers & U.S. Army 는 미리 적신 콘크리트 표면에 강우강도와 유역길이, 유역경사를 적절히 변화시켜 도달시간을 실측하는 실험을 수행하였다(Butler, 1977). 콘크리트로 포장된 유역에서의 도달시간을 분석하기 위한 것으로 각 실험 조건들과 이들을 레이놀즈수에 따라 층류조건 일반형 도달시간 산정식 (13)과 완난류조건 일반형 도달시간 산정식 (17), 전난류조건 일반형 도달시간 산정식 (20)에 적용하여 산정한 조도상수(α) 및 Manning 계수(n)를 표 1에 제시하였다. 여러 조건의 피복상태에 대한 도달시간 실측자료가 부족하여 우선 콘크리트 표면에서의 조도상수(α), Manning 계수(n)만을 제시한다. 실제 지표면과 유사한 조건으로 실험을 실시하여 도달시간을 산정하고 각 조건을 일반형 도달시간 산정식과 복합형 도달시간 산정식에 대입하여 회귀분석하면 조건별 조도상수(α)를 구할 수 있다. 한편 표 1에 제시한 각 흐름 조건별 재현기간은 복합형 도달시간 산정식의 검증에 위하여 결정한 것으로 자세한 산정과정은 다음 절에 제시하였다.

그림 1에 도시한 바와 같이 층류 조건 ($\beta = -1$)에서의 조도상수(α)는 3.0~7.5이며, 완난류 조건 ($\beta = -0.25$)의 제형수로에서 0.03~0.04의 수치로 나타난다. 그러나 표 1에 제시된 콘크리트 표면에서의 조도상수(α)는 층류 구간에서 4~5, 완난류 구간에서 0.04~0.05의 분포로 일반 개수로 조도상수와 비교하여 약 20~50% 정도의 증분을 보이고 있다. 또한 콘크리트면의 일반 개수로 Manning 계수(n)

는 0.011~0.015로서 표 1에 제시된 난류 구간에서의 Manning 계수(n) 분포인 0.011~0.016 보다 약 10% 정도의 증분을 보이고 있다. 이는 지표면 유출이 강우에 의해서 이루어지고 수면에서 발생하는 강우혼입이 마찰력을 증대시키기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 지표면 유출에서의 조도상수(α)와 Manning 계수(n) 결정시 강우의 영향까지 고려하여야 하며 실제로 Shen and Li(1973)은 마찰계수 산정식 (9)의 조도상수(α)를 산정하는데 있어 강우강도를 도입하여 다음과 같은 관계식을 도출하였다.

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot I^{0.41} \quad (25)$$

여기서 α_1 은 일반 개수로 조도상수이고 α_2 는 강우강도에 따른 상수이며 강우강도의 단위는 mm/hr 이다(Singh, 1996). 층류일 때의 α_1 을 3, 완난류일 때의 α_1 을 0.03으로 가정하고 표 1의 강우강도와 마찰상수(α)를 적용하여 산정한 상수 α_2 를 표 2에 제시하였다. 제시된 바와 같이 상수 α_2 의 수치가 일정치 않음을 알 수 있고 특히 층류조건에서 상당한 변이폭을 보임을 알 수 있다. 따라서 식 (25)의 마찰상수(α) 산정식을 적용하는데 문제점이 있으리라 판단된다. 강우강도에 따른 α_2 의 산정치가 일관성이 없는 것은 주어진 조건이 다른 점도 있고 관측자체에 문제가 있을 수도 있지만 본 연구의 목적이 조도상수(α)를 다루려는 것은 아니기 때문에 후술할 복합형 도달시간 산정식의 검증에는 표 1에 제시된 콘크리트면에서의 조도상수(α)를 그대로 적용하였다.

표 1에 제시된 바와 같이 유역조건이 동일하더라도 강우강도가 다르면 관측된 도달시간이 상당히 다를

표 1. 도달시간 관측치와 조도상수(α)의 산정치

조건 구분	경우	강우강도	유역경사	유역길이	도달시간	레이놀즈수	조도상수	Manning	재현기간
		I (mm/hr)	S (m/m)	L (m)	관측치 (min)	(Re)	α	계수 n	T (year)
층류 흐름	1	14.99	0.005	51.22	10.45	180	4.09		0.11
	2	9.91	0.005	76.83	19.50	180	7.73		0.10
	3	6.6	0.005	152.45	24.40	240	3.39		0.09
	4	25.4	0.01	51.22	6.53	310	5.73		0.13
난류 흐름	5	44.7	0.005	102.45	10.20	1100	0.07	0.016	0.27
	6	200.91	0.005	152.45	5.65	7400	0.04	0.011	3.15
	7	190.25	0.01	152.45	4.70	6950	0.04	0.011	1.97
	8	188.72	0.02	102.45	3.20	4600	0.05	0.012	1.10
	9	188.98	0.02	152.45	3.98	6900	0.05	0.012	1.50

표 2. 강우강도에 따른 마찰상수

조건 구분	개수로 마찰상수 α_1	강우강도 I (mm/hr)	마찰상수 α	강우강도에 따른 상수 α_2
충류 흐름	3	14.99	4.09	0.3592
		9.91	7.73	1.8458
		6.60	3.39	0.1797
		25.40	5.73	0.7241
난류 흐름	0.03	44.70	0.07	0.0084
		200.91	0.04	0.0011
		190.25	0.04	0.0012
		188.72	0.05	0.0023
		188.98	0.05	0.0023

알 수 있다. 그 예로 경우 ③과 경우 ⑥의 지역조건은 $S = 0.005$, $L = 152.45$ m로 동일한데 강우강도가 $I = 6.6$ mm/hr 일 때 $t_c = 24.4$ 분이었으며 $I = 200.91$ mm/hr 일 때 $t_c = 5.65$ 분이였다. 이같이 동일한 지형조건에서 도달시간의 상당한 차이는 강우강도의 증가가 지표면 유출의 수심을 증가시키고 동시에 유속을 증가시키기 때문이다. 즉 강우강도 변화는 도달시간 산정의 중요한 요소로 작용하고 이러한 영향을 반영하지 않은 도달시간의 산정은 부정확한 값으로 결정된다. Kinematic Wave 공식, ARS 공식 등의 기존 도달시간 산정식과 일반형 도달시간 산정식은 강우강도를 포함하는 산정식들이다. 그러나 기존 산정식들은 여러 요인들이 복합적으로 혼재하여 있는 실측자료나 기존 관측자료에 의하여 추정되었기 때문에 강우강도의 영향을 명확하게 파악할 수 없고 강우강도 자체가 지속시간의 함수이기 때문에 반복계산 과정이 필요하다.

홍수유출량을 산정하고자 할 때 대부분의 경우 강우강도가 주어지는 것이 아니라 재현기간이 조건치로 주어지며 강우강도는 재현기간과 지속시간의 함수로 산정된다. 한편 제한된 유역에서 최대홍수유출은 지속시간이 도달시간과 동일할 때 발생하며 지속시간이 도달시간 보다 길어져도 더 이상 홍수유출의 증가는 발생치 않는다. 따라서 길이가 제한된 중소유역에서 홍수유출량을 산정코자 할 때 강우강도식의 지속시간을 도달시간으로 대치하고 강우강도를 산정하게 된다. 그러나 본고에서 정밀 검토한 바와 같이 도달시간 자체가 강우강도의 함수일 때는 여러번의 반복과정을 거쳐야만 두 관련식의 해인 도달시간과 강우강도를 구할 수 있다.

이러한 문제점을 개선하고자 강우강도 자료가 없는 지역에서 도달시간을 산정할 수 있는 복합형 도달시간 산정식을 개발하였다. 복합형 도달시간 산정식은 $I = f(t_R)$ 에서 강우지속시간 t_R 이 도달시간 t_c 와 같다고 가정하고 여기에 직접 해를 구할 수 있는 양해법을 적용하여 도달시간을 산정하기 때문에 재현기간과 강우강도의 크기를 도달시간 산정에 적절히 고려할 수 있다. 충류조건 일반형 도달시간 산정식 (13)과 완난류조건 일반형 도달시간 산정식 (17), 전난류조건 일반형 도달시간 산정식 (20)에 강우강도식을 도입하여 충류, 완난류, 전난류 조건에서의 복합형 도달시간 산정식을 제시한다.

3.1 충류조건 복합형 도달시간 산정식

충류조건 일반형 도달시간 산정식은 다음과 같다.

$$t_c = \left(\frac{\alpha \nu}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot I^{\frac{2}{3}} \cdot L^{\frac{1}{3}} \cdot S^{\frac{1}{3}} \quad (26)$$

한편, 강우지속시간 t_R 이 도달시간 t_c 와 같다고 가정하고 일반형 강우강도식을 다음과 같이 표기한다.

$$I = \frac{M}{t_c^j + N} \quad (27)$$

여기서 상수 M과 N은 재현기간 T의 함수로 알려져 있으며 지수 j는 지역 즉 공간의 함수이나 그 변이는 크지 않은 것으로 알려져 있다.

이원환, 박상덕, 최성열(1993)은 식 (27)의 j를 전국에 걸쳐 계산하였으며 그 범위는 0.5~0.7인 것으로 제시하였다. 한편 차원 일치식으로 표현한 일반형 강우강도식은 다음과 같다.

$$I = \frac{M}{\left(\frac{t_c}{t_0} \right)^j + N} \cdot I_0 \quad (28)$$

여기서 $I_0 = 1$ mm/hr, $t_0 = 1$ hr 이다. 상기식에서 단위강우강도 I_0 와 단위시간 t_0 를 도입한 이유는 이후의 수식유도과정에서 차원일치를 기하고 수식전개의 명료성을 확보하기 위함이다. 유역조건이 주어졌을 때 식 (26)과 식 (27)에서 α , ν , g , S , L 등은 주어진 조건치들이며 구하고자 하는 변수는 강우강도와 도달시간이다. 두 산정식은 다소 복잡한 형태를 갖

고 있기 때문에 반복과정을 거쳐야만 이들의 정밀해를 구할 수 있다. 그러나 M과 N의 수치에 따라 직접 해를 구할 수 있는 양해법 근사식 개발이 가능하다.

식 (28)을 층류조건 일반형 도달시간 산정식 (26)에 적용하면

$$t_c = \left(\frac{1}{M} \left(\frac{t_c}{t_o} \right)^j + \frac{N}{M} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot t_L \quad (29)$$

$$t_L = \left(\frac{\alpha \nu}{L I_o} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot t_o \quad (30)$$

$$t_o = \left(\frac{L^2}{g I_o S} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (31)$$

여기서 식 (30)의 t_L 은 층류조건 고유도달시간 (intrinsic time of concentration for laminar flow condition)이라 칭한다. 고유도달시간은 특정지역의 고유치인 유역길이, 유역경사, 조도상수 등을 종합해 놓은 것으로 유역별 지형학적 특성을 나타내는 인자이다. 한편 식 (29)는 다음과 같이 정리되고

$$t_c^{1.5} - \frac{1}{M} \left(\frac{t_L}{t_o} \right)^j t_L^{\frac{3-2j}{2}} \cdot t_c^j - \frac{N}{M} t_L^{1.5} = 0 \quad (32)$$

상기식의 정밀해는 반복법으로 구해야 된다. 강우강도를 포함한 기존 도달시간 산정식 중 ARS공식에서 재현기간 2년의 강우강도를 적용한 이유는 이러한 반복과정의 문제점 때문인 것으로 판단된다. 그러나 진정 강우강도의 영향을 적절히 고려하려면 재현기간에 따라 변이하는 상수 M과 N을 도달시간 산정식에 적용시켜야 한다. N의 크기는 미소한 수치이다. 따라서 다음과 같이 근사치를 구할 수 있다.

$N = \epsilon$ 일 경우 (ϵ 는 미소수치) 아래의 식 (33)과 같은 층류조건 복합형 도달시간의 1차 근사식으로 유도된다.

$$t_c = \left(\frac{1}{M} \left(\frac{t_L}{t_o} \right)^j \right)^{\frac{2}{3-2j}} \cdot t_L \quad (33)$$

이를 다시 식 (32)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 층류조건 복합형 도달시간의 2차 근사식으로 유도된다.

$$t_c = \left[\left(\frac{1}{M} \left(\frac{t_L}{t_o} \right)^j \right)^{\frac{3}{3-2j}} + \frac{N}{M} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot t_L \quad (34)$$

3.2 완난류조건 복합형 도달시간 산정식

층류조건 복합형 도달시간 산정식의 유도과정과 같은 과정으로 진행된다. 완난류조건 일반형 도달시간 산정식은 다음과 같다.

$$t_c = \left(\frac{g \nu^\beta}{\alpha} \right)^{-\frac{1}{3}} \cdot I^{\frac{\beta-1}{3}} \cdot L^{\frac{2+\beta}{3}} \cdot S^{-\frac{1}{3}} \quad (35)$$

식 (28)을 완난류조건 일반형 도달시간 산정식 (35)에 적용하면

$$t_c = \left(\frac{1}{M} \left(\frac{t_c}{t_o} \right)^j + \frac{N}{M} \right)^{\frac{1-\beta}{3}} \cdot t_s \quad (36)$$

$$t_s = \left[\alpha \left(\frac{L I_o}{\nu} \right)^\beta \right]^{\frac{1}{3}} \cdot t_o \quad (37)$$

여기서 식 (37)의 t_s 는 완난류조건 고유도달시간 (intrinsic time of concentration for smooth turbulent flow condition)이라 칭하고 식 (30)으로 표기되는 층류조건 고유도달시간(t_L)과 밀접한 관계가 있다. 한편 식 (36)은 다음과 같이 정리되고

$$t_c^{\frac{3}{1-\beta}} - \frac{1}{M} \left(\frac{t_s}{t_o} \right)^j t_s^{\frac{3-j+\beta}{1-\beta}} \cdot t_c^j - \frac{N}{M} t_s^{\frac{3}{1-\beta}} = 0 \quad (38)$$

$N = \epsilon$ 일 경우 (ϵ 는 미소수치) 아래의 식 (39)와 같은 완난류조건 복합형 도달시간의 1차 근사식으로 유도된다.

$$t_c = \left(\frac{1}{M} \left(\frac{t_s}{t_o} \right)^j \right)^{\frac{1-\beta}{3-j+\beta}} \cdot t_s \quad (39)$$

이를 다시 식 (38)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 완난류조건 복합형 도달시간의 2차 근사식으로 유도된다.

$$t_c = \left[\left(\frac{1}{M} \left(\frac{t_s}{t_o} \right)^j \right)^{\frac{3}{3-j+\beta}} + \frac{N}{M} \right]^{\frac{1-\beta}{3}} \cdot t_s \quad (40)$$

3.3 전난류조건 복합형 도달시간 산정식

층류조건 복합형 도달시간 산정식의 유도과정과 같은 과정으로 진행된다. 전난류조건 일반형 도달시간 산정식은 다음과 같다.

$$t_c = \left(\frac{gk_w^\beta}{\alpha} \right)^{-\frac{1}{3-\beta}} \cdot I^{\frac{\beta-1}{3-\beta}} \cdot L^{\frac{2}{3-\beta}} \cdot S^{-\frac{1}{3-\beta}} \quad (41)$$

식 (28)을 전난류조건 일반형 도달시간 산정식 (41)에 적용하면

$$t_c = \left(\frac{1}{M} \left(\frac{t_c}{t_o} \right)^j + \frac{N}{M} \right)^{\frac{1-\beta}{3-\beta}} \cdot t_R \quad (42)$$

$$t_R = \left[\alpha \left(\frac{I_o}{k_w} \right)^\beta \right]^{\frac{1}{3-\beta}} \cdot t_o^{\frac{3}{3-\beta}} \quad (43)$$

여기서 식 (43)의 t_R 은 전난류조건 고유도달시간 (intrinsic time of concentration for rough turbulent flow condition)이라 칭한다. 한편 식 (42)는 다음과 같이 정리되고

$$t_c^{\frac{3-\beta}{1-\beta}} - \frac{1}{M} \left(\frac{t_R}{t_o} \right)^j t_R^{\frac{3-j-\beta(1-j)}{1-\beta}} \cdot t_c^j - \frac{N}{M} t_R^{\frac{3-\beta}{1-\beta}} = 0 \quad (44)$$

$N = \epsilon$ 일 경우 (ϵ 는 미소수치) 아래의 식 (45)와 같은 전난류조건 복합형 도달시간의 1차 근사식으로 유도된다.

$$t_c = \left(\frac{1}{M} \left(\frac{t_R}{t_o} \right)^j \right)^{\frac{1-\beta}{3-j-\beta(1-j)}} \cdot t_R^{\frac{5-\beta}{2(3-j-\beta(1-j))}} \quad (45)$$

이를 다시 식 (44)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 전난류조건 복합형 도달시간의 2차 근사식으로 유도된다.

$$t_c = \left[\left(\frac{1}{M} \left(\frac{t_R}{t_o} \right)^j \right)^{\frac{3-\beta}{3-j-\beta(1-j)}} + \frac{N}{M} \right]^{\frac{1-\beta}{3-\beta}} \cdot t_R^{\frac{5-\beta}{2(3-j-\beta(1-j))}} \quad (46)$$

4. 복합형 도달시간 산정식 검증

층류와 완난류, 전난류 조건의 일반형 도달시간 산정식에 재현기간별 강우강도를 적용하여 복합형 도달시간 산정식을 유도하였다. 강우강도 자료가 없는 지역의 도달시간을 보다 정확하게 산정하기 위한 것으로 재현기간에 따른 강우의 특성까지 고려하였다.

복합형 도달시간 산정식에 적용된 강우강도 산정식 (27)은 재현기간 T 의 함수로 이루어진 상수 M 과 N 을 포함하고 있다. 따라서 복합형 도달시간 산정식의 검증을 위해서는 임의지역의 특정강우에 대한 재현기간 결정이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 임의의 강우강도식을 선정하여 표 1에 제시된 강우강도와 도달시간 관측치를 적용하여 재현기간을 결정하였다. 임의의 강우강도식은 다음과 같으며 표 1의 실험조건과 특별한 상관관계가 있어서 선택된 것은 아니다. 다만 복합형 도달시간 산정식의 재현기간 항에 특정지역의 재현기간을 도입하여 정확도와 적용성을 검증하기 위해서 선택하였다. 상수 M 과 N 은 각각 $M = 34.30 + 12.73 \ln T$ 이고 $N = -0.0409 - 0.0197 \ln T$ 이다.

$$I = \frac{34.30 + 12.73 \ln T}{\sqrt{t_R - 0.0409 - 0.0197 \ln T}} \quad (47)$$

표 1에 제시된 조건들을 강우강도식 (47)에 적용하게 되면 재현기간, 강우강도, 지속시간 중 지속시간과 재현기간이 미지항으로 남게된다. 하지만 최대홍수유출은 지속시간이 도달시간과 동일할 때 발생하기 때문에 강우강도식의 지속시간을 도달시간으로 대치하면 재현기간을 산정할 수 있다. 재현기간이 매우 작은 수치로 산정된 것은 관측된 도달시간이 매우 짧기 때문이다. 즉 강우강도가 $I = 200.91 \text{ mm/hr}$ 인 경우 도달시간이 5.65분밖에 되지 않으므로 실제로 내린 강우의 양은 18.92mm이고 이 때의 강우량에 의해 산정된 재현기간은 약 3년이다. 이 수치는 거의 모든 국내 지역에서도 발생 가능성이 높은 수치인 것으로 판단된다. 만약 도달시간이 30분이라면 재현기간은 약 390년이 된다. 강우강도 $I = 200.91 \text{ mm/hr}$ 의 지속시간이 30분이나 한다면 재현기간 390년은 가능한 수치일 수 있으나 강우량 18.92mm의 재현기간이 390년이라는 것은 납득

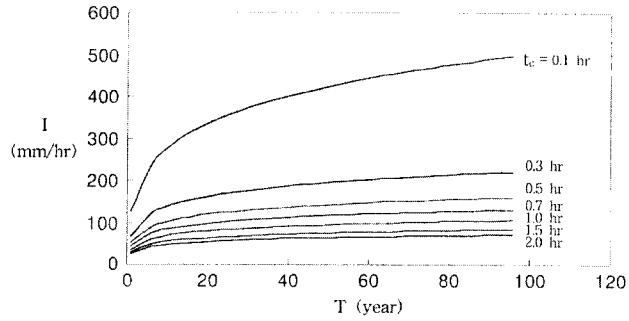


그림 2. 도달시간(t_c)과 재현기간(T)에 따른 강우강도(I) 분포

할 만한 수치가 아니다. 강우강도의 크기에 의해 결정된 재현기간이 아닌 실제 강우량에 의해 결정된 재현기간으로 1년이하의 수치가 산정되는 것은 당연한 결

과이다. 그림 2는 강우강도식 (47)에 의해 결정되는 도달시간과 재현기간에 따른 강우강도 곡선으로 강우강도가 $I = 200 \text{ mm/hr}$ 이상으로 분포하는 경우에도

표 3. 복합형 도달시간 근사해의 정확성 비교

경우	종류 구분	재현기간 (year)	M	N	유역 경사	유역 길이(m)	도달시간(t_c)			오차율(%)										
							관측해	정밀해	근사해	관측해비교	정밀해비교									
1	층 류	0.11	6.29	0.002	0.005	51.22	10.45	10.45	1차식	10.39	-0.58	-0.58								
									2차식	10.43	-0.19	-0.19								
									2	0.10	5.68	0.003	0.005	76.83	19.50	19.49	1차식	19.38	-0.63	-0.59
																	2차식	19.45	-0.24	-0.20
3	0.09	4.24	0.006	0.005	152.45	24.40	24.43	1차식	24.22	0.75	-0.87									
								2차식	24.36	-0.17	-0.29									
4	0.13	8.36	0.001	0.01	51.22	6.53	6.53	1차식	6.55	0.28	0.23									
								2차식	6.54	0.12	0.08									
5	완 난 류	0.27	17.74	-0.015	0.005	102.45	10.20	9.67	1차식	9.87	-3.23	2.06								
									2차식	9.71	-4.77	0.44								
									6	3.15	48.90	-0.063	0.005	152.45	5.65	5.41	1차식	6.13	8.51	13.32
																	2차식	5.59	-1.06	3.3
7	1.97	42.93	-0.054	0.01	152.45	4.70	4.36	1차식	4.90	4.33	12.56									
								2차식	4.49	-4.43	3.11									
8	1.10	35.51	-0.043	0.02	102.45	3.20	2.96	1차식	3.32	3.65	11.91									
								2차식	3.05	-4.67	2.92									
9	1.50	39.44	-0.049	0.02	152.45	3.98	3.75	1차식	4.21	5.70	12.12									
								2차식	3.86	-2.92	2.98									
5	전 난 류	0.27	17.74	-0.015	0.005	102.45	10.20	10.05	1차식	10.24	0.38	1.92								
									2차식	10.09	-1.12	0.40								
									6	3.15	48.90	-0.063	0.005	152.45	5.65	5.58	1차식	6.27	11.05	12.38
																	2차식	5.75	1.75	2.97
7	1.97	42.93	0.054	0.01	152.45	4.70	4.63	1차식	5.16	9.86	11.47									
								2차식	4.76	1.24	2.72									
8	1.10	35.51	-0.043	0.02	102.45	3.20	3.13	1차식	3.47	8.39	10.93									
								2차식	3.21	0.22	2.57									
9	1.50	39.44	-0.049	0.02	152.45	3.98	3.99	1차식	4.43	11.41	11.07									
								2차식	4.09	2.92	2.61									

주: 오차율(%)은 $\left(\frac{\text{근사해} - \text{관측해}}{\text{관측해}} \right) \times 100(\%)$ 또는 $\left(\frac{\text{근사해} - \text{정밀해}}{\text{정밀해}} \right) \times 100(\%)$ 로 정의.

도달시간에 따라 5년 미만의 재현기간이 분포함을 보여준다.

표 1에 적용된 지형조건과 임의 지점의 지역상수 및 이를 통하여 산정한 재현기간을 총류와 완난류, 전난류 조건 복합형 도달시간의 1차 또는 2차 근사식에 적용하여 산정한 도달시간을 표 3에 제시하였으며 같은 조건으로 식 (32)와 식 (38), 식 (44)의 정밀식에 적용하여 반복적으로 산정한 도달시간과 비교하였다. 관측해와 비교하였을 때 총류조건 근사식의 경우 오차율은 1% 미만이고 완난류조건 근사식의 경우 최대 8.5%를 나타내고 있으며 전난류조건 근사식의 경우 최대 11.4%를 나타내고 있다. 정밀해 또는 관측해와 비교한 총류조건 1차 근사해의 오차율은 1% 정도이기 때문에 1차 근사해를 그대로 이용해도 된다. 반면 완난류와 전난류조건 1차 근사해의 최대 오차율은 12%에 이르므로 완난류 또는 전난류 조건인 경우에는 2차 이상의 근사해를 이용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

표 3의 오차율을 분석하면 조건별 복합형 도달시간 근사식을 실제 실무에 이용해도 될 것으로 판단된다. 물론 콘크리트면에서의 조도상수(α)만을 적용하여 얻은 결과이지만 근사해의 오차가 최대 13% 정도이기 때문에 실제 지형과 맞는 조도상수(α)를 적용한다 하더라도 같은 결과를 얻을 수 있을 것이다. 보다 정확한 도달시간을 산정하기 위해서는 여러 조건의 실험을 실시하여 조도상수(α)를 결정하고 이를 도달시간 산정에 적용해야 할 것이다.

5. 결 론

총류, 완난류, 전난류 등으로 분류되는 각각의 흐름 조건별로 도달시간 산정식의 유도과정을 재검토하였다. 먼저 흐름분석은 개수로 마찰계수를 도입하고, 강우가 전유역에 영향을 미치는 평형조건으로 가정하고 도달시간을 산정하였다. 강우강도가 주어진 경우에는 기존 산정식들과 유사한 형태인 일반형 도달시간 산정식을 적용하고 강우강도 대신 재현기간이나 그 밖의 조건이 주어진 경우에 적용할 수 있는 복합형 도달시간 산정식을 개발하였다.

복합형 도달시간 산정식은 기존의 도달시간 산정식과는 많은 차이를 보이고 있다. 먼저 기존산정식에서 사용한 Manning의 조도계수를 대신하여 지표면흐름 조건에 따른 조도상수(α)를 도입하여 보다 객관적으로 도달시간을 산정할 수 있게 유도하였으며 각 지역별 강우특성까지 고려하였기 때문에 도달시간 산정에 일

반적인 기준이 될 수 있다. 특히 지역별 빈도별로 변이하는 강우특성의 고려는 동일 유역이라도 강우강도의 크기가 커짐에 따라 도달시간의 차이가 크게 달라지는 것을 반영하기 위한 것으로 강우지속시간 t_R 이 도달시간 t_c 와 같다고 가정하고 여기에 직접 해를 구할 수 있는 양해법 산정식을 개발하였다. 일부 기존 산정식들은 강우강도에 포함된 지속시간의 향으로 인한 복잡한 유도과정 때문에 강우강도를 적극적으로 고려치 않은 것으로 판단된다.

지표면흐름 조건에 따른 조도상수와 빈도별로 변이하는 강우강도의 영향을 적절히 고려하기 위하여 제 관련상수와 고유도달시간 개념을 도입하고 총류와 완난류 조건에서의 1차 또는 2차의 복합형 도달시간 근사식을 개발하였으며 정밀해와의 비교를 통하여 총류 조건에서는 1차 근사식을 적용하고 완난류 조건에서는 2차 근사식을 적용할 것을 권장한다.

복합형 도달시간 산정식에 적용한 지표면흐름 조건에 따른 조도상수는 콘크리트면에서의 실험을 통하여 결정된 수치로 실제 흐름에 적용하기에는 다소 무리가 있다. 보다 정확한 도달시간을 산정하기 위해서는 실제 지표면과 유사한 조건으로 실험을 실시하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 1999년 건설교통부 연구과제인 “지표수-지하수 연계운영 시스템 개발”의 일환으로 이루어진 것이며, 이에 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

- 이원환, 박상덕, 최성열 (1993). 한국 대표확률강우강도식의 유도, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제13권, 제1호, pp. 115-120.
- Singh, V.P (1976). Derivation of time of concentration, *Journal of Hydrology*, Vol. 30, pp. 147-165.
- Singh, V.P (1996). Kinematic Wave modeling in water resources, Wiley. Interscience
- Butler, Stanley S. (1977). Overland-flow travel time versus Reynolds number, *Journal of Hydrology*, Vol. 32, pp. 175-182.

(논문번호:99-082/접수:1999.10.01/심사완료:1999.01.03)