

# 원격탐사자료를 활용한 지표면 조도계수 통합의 영향:

## 홍수유출 변화를 중심으로

### Impacts of Surface Roughness Integration using Remote Sensing Data: Concentration of Flood Flow Variation

강신욱\*, 유승엽, 이길하, 황만하

Shin-uk Kang\*, Seung-yup Rieu, Kil-ha Lee, Man-ha Hwang

한국수자원공사 수자원연구원

sukang@kwater.or.kr

#### 요약

원격탐사 자료를 이용한 토지피복도로부터 유역의 식생상황을 고려한 지표면 조도계수를 추정하기 위한 물리적 기반의 지표면 조도계수 추정방법을 제안하였다. 사전 연구로써 지표면 조도계수의 변화에 따른 침투유량, 유출체적, 침투시간에 대한 반응을 분석하기 위하여 NWS-PC 모형을 사용하였다. predominant, arithmetic mean, aggregation 방법으로 구해진 지표면 조도계수가 강우-유출 모형의 매개변수에 미치는 영향을 분석하였다. 지표면 조도계수에 대한 민감도 분석에서는 침투유량이 약 10%의 변화를 나타내었고, 유출체적의 경우 약 2%의 변화를 나타내었다. 침투시간은 지표면 조도계수에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

#### 1. 서론

원격탐사자료는 보통은 2차원 토지피복도로부터 강우-유출 모형이 필요로 하는 지표면 조도계수 값을 간접적으로 얻게 된다(Vieux, 2004). 그러나 강우-유출 모형이 사용하는 수치격자 크기가 토지피복도의 격자크기와 반드시 일치하지는 않으므로 적절한 방법을 사용하여 내삽·외삽하여 유역의 대표값을 찾아줄 필요가 있는데, 이러한 과정은 흔히 주관적이나 직관적으로 이루어진다. 강우-유출 모형에서 식생의 공간적 이질성을 나타내는 유역 대표값을 찾는 방법에 따라 하천의 유출량은 차이를 보인다. 따라서 식생의 공간적 이질성을 나타내는 대표값을 찾는 방법에 대해 연구할 필요가 있다.

본 연구에서는 원격탐사 자료를 이용한 토지피복도로부터 유역의 식생상황을 고려한 지표면 조도계수를 추정하기 위한

물리적 기반의 지표면 조도계수 추정방법을 제안하였다. 사전 연구(preliminary study)로써 소유역별 지표면 조도계수의 변화에 따라 침투유량, 유출체적, 침투시간 등에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하였다. 그리고 목시적으로 사용해 온 2가지 방법과 Manning 식과 같은 물리적 기반의 방법으로 구한 유역 지표면 조도계수가 강우-유출 모형의 매개변수에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 분석을 위해 소양강 유역에 개념적 강우-유출 모형인 NWS-PC 모형(Tabios III et al., 1986)을 적용하였다. NWS-PC 모형을 사용한 이유는 지표 흐름 추적법으로 운동파 추적법을 사용할 수 있기 때문이다. 이 연구는 강우-유출 모형에서 식생과 관련된 지표면 조도계수의 유역 대표값을 계산할 때 그 방법의 선택에 있어 공학적 직감을 제공함으로써 강우-유출 모형의 거동을 이

해하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

## 2. 강우-유출 모형 및 매개변수 최적화

### 1. NWS-PC 모형

NWS-PC 모형은 토양 함수상태 계산(SAC-SMA) 모형과 유역 및 하도 흐름에 대한 추적 모형으로 구분된다. SAC-SMA의 모형 분류는 확정론적, 집중입력, 집중매개변수 모형에 속하며, 이는 수문순환과정의 토지부분에서 입력된 강우를 하도흐름의 유입량으로 변환시킨다. 흐름에 대한 추적모형의 기능은 하도 유입량을 유역 또는 소유역 출구의 유출로 추적하며, 운동파 추적법이나 단위도-Muskingum 방법의 조합을 사용한다. 일반적으로 운동파 추적법은 수리학적 방법중에서 가장 간단한 하도추적법으로 분류될 수도 있고, 단위도-Muskingum 방법은 대표적인 수문학적 추적법이다. 따라서 운동파 추적법은 보다 정확한 방법이라고 말할 수 있다. 한편 정확성에 반하여 요구되는 '입력자료는 그만큼 많아지게 된다(한국수자원공사, 1995).

SAC-SMA 모형은 유역을 상층부와 하층부로 구분한다. 상층부는 상부 토양층과 차단 저류지를 나타내고, 하층부는 토양수분체나 지하수체를 표시한다. 이와 관련하여 모형에는 상층부에서의 지표면 유출, 하층부에서의 지표하 유출 2가지 주요 유출성분이 있다. 이러한 유출 과정을 효과적으로 묘사하기 위한 16개의 주요 매개변수를 가지고 있으며, 매개변수 추정을 위해 모형의 보정을 필요로 한다.

운동파 추적법에서의 운동량 방정식은 하상, 에너지경사항만을 고려한 경우이므로, 식 (1)과 같이 표시된다.

$$S_0 = S_f \quad (1)$$

여기서  $S_0$ 은 하상경사 또는 유역경사,  $S_f$ 는 에너지경사이다. 식 (1)을 유량의 항으로 나타내기 위해 Manning 공식으로 표시하면 식 (2)와 같다.

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_f^{1/2} = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_0^{1/2} \quad (2)$$

여기서  $Q$ 는 유량,  $n$ 은 Manning 조도계수,  $A$ 는 단면적,  $R$ 은 동수반경이다. 식 (2)는 하도의 형상과 조도계수에 따른 고유의 값  $\alpha$ ,  $m$ 을 써서 다음과 같이 단순화된다.

$$Q = \alpha A^m \quad (3)$$

그리고 연속방정식은 단면적  $A$ 와 유량  $Q$ 를 써서 식 (4)와 같이 나타내진다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (4)$$

Eqs. (3) and (4)에서  $Q$ 를 소거하면 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \alpha m A^{(m-1)} \frac{\partial A}{\partial x} = q \quad (5)$$

여기서  $q$ 는 보통 초과강우량(excess rainfall)으로 일컬어지는 총 하도유입량이거나 측방유입량이다.

식 (3)과 (4) 또는 (5)는 지표면 흐름이나 하도추적의 지배방정식이 된다. 이 식의 수치해는 유한차분 양해법을 사용한다(USACE, 1985). 총 하도유입량  $q$ 는 지표면 흐름요소를 통하여 추적되며, 이때 흐름요소는 넓은 사각형 하도록 취급되어  $m=5/3$ ,  $\alpha=S^{1/2}/n$ 이다. 그리고 지표면 흐름요소의 유출량은 집수하도가 있을 경우에 이 하도의 유입량이 되어 하도추적된다. 다시 집수하도의 유출량을 주하도의 유입량으로하여 하도추적하면 최종적으로 유역출구의 지표흐름 유출량이 된다.

### 2. 매개변수 최적화

SCE-UA 알고리즘(Duan, 1991)은 미국 국립기상국의 NWSRFS(National Weather Service River Forecasting System)의 보정모듈 중 하나이며, 최적해를 탐색하기 위해 4가지 중요한 개념을 포함하고 있다: 1)확정론적 및 확률론적 접근의 결합, 2)컴플렉스의 구조적 진화, 3)경쟁 진화(competitive evolution), 4)컴플렉스 혼합(complex shuffling). SCE-UA 알고리즘은 초기에 해가 존재하는 전체 매개변수 공간에서 표본을 생성하고 컴플렉스들로 분할한다. 각 컴플렉스는 downhill simplex 알고리즘을 사용하여 독립적으로 진화한다. 진화를 거친 컴플렉스들은 다시 혼합되고, 새로운 컴플렉스들이 생성된다.

진화와 혼합의 과정은 수렴조건이 만족될 때까지 반복된다.

### 3. 대상유역 및 입력자료

소양강댐 유역은 1974년부터 현재까지 양질의 수문자료가 축적되어져 있고, 과거부터 많은 연구들이 이루어져, 본 연구의 대상유역으로 선정하였다. 상류 유역면적은 2,703km<sup>2</sup>이며, 유로연장은 166.2km, 유역의 고도분포는 해발 146 ~ 1,687m 범위에 있다. 유역의 유출체계 구성을 위해 Figure 1과 같이 9개의 소유역으로 분할하였고 이는 수자원단위지도의 표준권역구분과 같다.

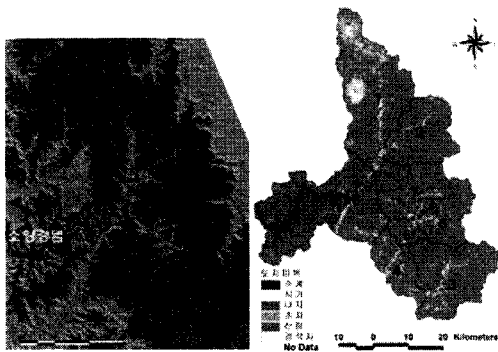


Figure 1. The Soyanggang basin located at east Korea. The Soyanggang basin was divided into 9 sub-basin in this study.

각 소유역에 대해 운동파 추적법으로 지표면 흐름을 모의하기 위해서는 유역면적, 주하도길이, 유역폭, 유역의 경사, 지표면 조도계수가 필요하고, 유역의 조도계수를 제외한 나머지 유역특성 인자들은 수치지도에서 구하였다. 유역의 조도계수는 토지피복도에서 각 소유역별 식생상태를 구하여, 4절에 제시하는 방법으로 산정하였다. 하도흐름을 모의하기 위해서는 단면형태, 하천 조도계수, 하도경사 등이 필요하다. 이 자료들은 기존 연구(한국수자원공사, 1995)와 건설교통부의 하천정비기본계획보고서 정보시스템에서 수집하였다.

모형수행에 필요한 면적평균강우량과 소양강댐 유입량은 한국수자원공사에서 수집하였고, 수집한 자료중 결측값이 없고 자료가 양호하다고 판단되는 2000년 8월 25일부터 30일까지의 시간단위 자료를 사

용하였다. 증발산량은 기상청 산하 인제 관측소의 기상자료를 사용하여 FAO-56 Penman-Monteith 식을 이용하여 계산하였다.

### 4. 원격탐사 자료를 이용한 지표면 조도계수 계산

유역 식생의 공간적 이질성 때문에 유역의 지표면 조도계수 대표값을 산정하는 것은 어려운 일이다. 지표면 조도계수는 토지이용과 토지피복에 따라 적절히 정할 수 있다. 지표면 조도계수는 항공사진이나 일반적인 토지이용도, 토지피복도, 식생 원격탐사 등을 포함한 다양한 소스로부터 얻어질 수 있으며, 각각의 자료들을 사용하여 하천유역과 같이 넓은 범위에서의 조도계수를 설정할 수 있다. 넓은 지역의 지표면 조도계수를 세부적으로 조사하는 것은 시간과 비용적인 측면에서 실용적이지 못하다. 따라서 토지이용도, 토지피복도와 같은 GIS 주제도로부터 지표면 조도계수를 구하는 것은 재분류 과정에서의 오차를 감안하더라도 보다 매력적이다(Vieux, 2004).

본 연구에서는 환경부의 토지피복도를 이용해 각 소유역의 지표면 조도계수를 구하였다. 이를 위해서는 적절한 방법이 필요하고, 현재까지 묵시적으로 사용되어 왔던 2가지 방법과 본 연구에서 제안하는 방법을 사용해 유역의 지표면 조도계수를 구하였다.

#### 1. Predominant 방법

소유역내에 포함되는 토지피복도의 격자 크기는 30m이고 이러한 격자를 많이 포함하고 있다. predominant 방법은 소유역의 토지피복 격자 중에서 가장 많이 나타나는 값을 유역의 대표값으로 사용하는 방법이다. 지리정보시스템을 통해 강우-유출 모형의 유역 지표면 조도계수를 산정하는데 자주 사용된다.

#### 2. Arithmetic mean 방법

산술평균 방법은 소유역내 격자의 토지피복형태에 따른 조도계수 값을 산술평균하는 방법이다. 소유역이  $N$ 개의 격자로

구성되어 있다면 산술평균 방법에 의한 지표면 조도계수 계산은 다음 식과 같다.

$$n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i n_i \quad (6)$$

여기서  $W$ 는 가중계수이고,  $n$ 은 지표면 조도계수, 아래첨자  $i$ 는 소유역의 각 격자 번호를 의미한다. 이 방법은 단순하지만 매우 직관적인 방법이다.

### 3. Aggregation 방법

위에서 설명한 2가지 방법은 이론적인 근거가 없다. 소유역 규모에서 식생에 관련한 지표면 조도계수는 물리적 근거에 의해 대표값이 정해지는 것이 필요하다. 픽셀 스케일의 식생관련 매개변수들을 조합하여 유역 스케일 면적평균 유량의 특성을 설명하는 관계식을 정의할 경우 다음과 같은 사항들에 유의해야 한다(McNaughton, 1994): 1) 면적평균 유량은 두 가지 스케일에서 일치해야 한다. 2) 사용한 모형이 두 가지 스케일 모두에서 동일한 유량을 보여주는 것이 편리하다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위해 여기서는 Manning 식을 연결식으로 사용하여 두 가지 스케일간의 관계식을 유도하였다. 이는 대부분의 물리적인 유출모형들이 Manning 식을 기반으로 하고 있으므로, 일반성의 극대화를 기대할 수 있을 것으로 생각된다. 유역 스케일과 픽셀 스케일에 적용된 Manning 식은 각각 다음과 같다.

$$Q = AC_1 R^{2/3} S^{1/2} / n \quad (7)$$

$$q_i = A_i C_1 R_i^{2/3} S_i^{1/2} / n_i \quad (8)$$

여기서  $Q$ 와  $A$ 는 유역 스케일에서의 평균 유량과 단면적을 나타낸다.  $C_1$ 은 SI 단위계에서 1.00이며 영국단위계로는 1.49에 해당한다.  $S$ 와  $R$ 은 유역 스케일에서의 경사와 수리반경이며,  $n$ 은 소유역 스케일에서의 Manning 계수이다.  $q_i$ 와  $A_i$ 는 픽셀 스케일에서의 평균유량과 단면적이다.  $S_i$ 와  $R_i$ 는 픽셀 스케일에서의 경사와 수리반경이며,  $n_i$ 는 픽셀 스케일에서의 Manning 계수이다.

유역 평균유량  $Q$ 는 다음과 같이 픽셀당 평균유량  $q_i$ 의 합으로 표현된다.

$$Q = \sum_{i=1}^N q_i \quad (9)$$

식 (7)와 (8)을 식 (9)에 삽입하면 스케일간의 관계식과 aggregation 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i \frac{1}{n_i} \quad (10)$$

여기서  $n$ 는 유역 스케일의 Manning 계수 또는 지표면 조도계수,  $n_i$ 는 픽셀 스케일의 Manning 계수 또는 지표면 조도계수이며, 본 연구에서는 동일한 가중치를 가정하였다.

### 4. 3가지 방법에 의한 소유역의 지표면 조도계수 산정

환경부의 토지피복도는 미국 USGS의 분류체계와 유사하게 7개로 분류되고, 시가화/건조지역, 농업지역, 산림지역, 녹지/초지, 습지, 나지, 수역으로 나누어진다. 7개의 지역들에 대한 조도계수는 Vieux의 문헌(2004)에서 참고하였다. 4.1절에서 4.3절에 걸쳐 설명한 3가지 방법을 사용하여 유역의 지표면 조도계수를 구하였다.

Table 1은 소양강 유역의 9개 소유역별로 구해진 통합 조도계수를 표시한 것이다. 방법별로 5 ~ 15%의 차이가 발생하였다. Predominant 방법은 토지피복 격자 중에서 가장 많이 나타나는 값을 유역의 대표값으로 사용하는 방법으로, 소양강 유역의 각 소유역의 산림지역은 소유역 1이 85.8%, 소유역 2가 97.7% 등이다. 그래서 이 방법에 의한 소유역별 조도계수는 모두 0.1이다. Arithmetic mean 방법은 소유역내 격자의 토지피복형태에 따라 조도계수 값을 산술평균하는 방법으로, 식 (6)을 사용하여 각 소유역의 지표면 조도계수를 계산하였다. 9개 소유역에서 계산된 값은 최소 0.091, 최대 0.097이었다. Aggregation 방법은 Manning 식과 같은 물리적 근거에 의해 대표값이 정하는 방법으로, 소양강 유역 9개의 소유역에 대해 식 (10)을 사용하여 지표면 조도계수를 구하였다. 계산된 값은 Table 3에서 보는 바와 같이 최하류 유역인 9번 소유역이 0.067로 최소값이었고, 상류 유역인 6번 소유역이 0.092로 최대값을 나타내었다.

Table 1. The integrated Manning's roughness coefficient by three different methods for each sub-basin in the Soyanggnag basin.

Method	Sub. 1	Sub. 2	Sub. 3	Sub. 4	Sub. 5	Sub. 6	Sub. 7	Sub. 8	Sub. 9
Predominant	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
Arithmetic mean	0.091	0.097	0.096	0.095	0.092	0.097	0.096	0.093	0.091
Aggregation	0.078	0.091	0.089	0.086	0.081	0.092	0.088	0.081	0.067

## 5. 적용 결과

### 1. 지표면 조도계수에 대한 민감도 분석

#### ① 민감도 분석 방법

사전 연구(preliminary study)로써 지표면 조도계수로 설정된 값들의 범위에 따른 하천유량의 민감도를 분석해야 할 필요가 있으며, 이 절에서는 지표면 조도계수에 대한 유량의 민감도 분석을 수행하였다. 조도계수의 변화에 따라 첨두유량, 유출체적, 첨두시간의 변화를 검토하였다. 이를 위해 2000년 8월 25일부터 30일까지의 시간단위 수문자료와 모형 수행에 필요한 유역특성자료들을 이용해 입력 자료를 생성하였다. 그리고 각 소유역별 지표면 조도계수는 모두 동일하다고 가정하고, 0.01 ~ 0.12까지 0.005 단위로 변화시키면서 23번의 모의를 수행하였다. 이때 모의에 사용한 NWS-PC 모형의 매개변수는 predominant 방법에서 얻은 지표면 조도계수를 각 소유역별로 할당하고, 관측유량과 모의유량의 편차를 최소화하는 목적함수와 SCE-UA 전역최적화 방법을 사용하여 구한 것이다.

#### ② 민감도 분석 결과

Figure 2는 조도계수를 변화시켜 23번 모의한 결과를 관측유량과 함께 나타내었다. 검은 실선은 지표면 조도계수 0.01로 할당했을 때의 유량수문곡선이며, 점선은 조도계수를 0.12로 했을 때의 유량수문곡선이다. 나머지 회색실선은 그 사이의 값을 할당했을 때 유량수문곡선이다. 그림에서 보는 바와 같이 지표면 조도계수가 증가함에 따라 첨두시간이 늦어지고, 첨두유량이 줄어드는 것을 볼 수 있다.

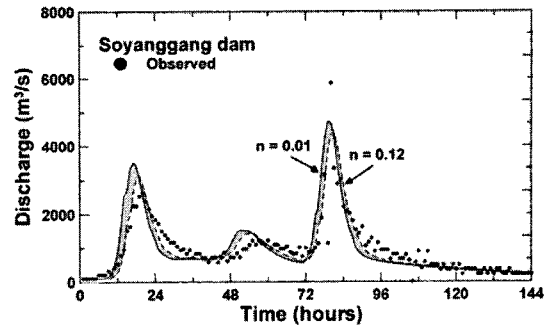


Figure 2. Simulated discharge hydrograph for a range of values of the surface roughness coefficient,  $n$ .

조도계수 변화에 따른 첨두유량의 변화량을 Figure 3에 나타내었으며, 지표면 유출의 저항을 결정하는 조도계수에 반비례하는 결과를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 첨두유량은 조도계수의 설정에 따라 약 10%의 유량 차이를 나타내었다.

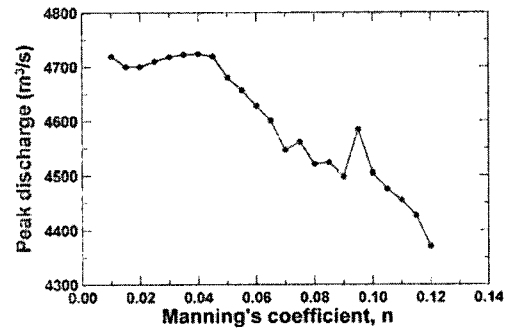


Figure 3. Simulated peak discharge for a range of values of the surface roughness coefficient,  $n$ .

Figure 4는 주어진 기간동안 관측유량의 총체적에 대한 모의유량의 총체적의 비를 지표면 조도계수  $n$ 의 함수로 표현한 것이다. 조도계수 0.01 ~ 0.12의 범위에서 상대 총체적의 차이는 약 2%로 작은 변화를 나타내었다. NWS-PC 모형은 개념적인 모형으로 완전히 물리적인 설명이 쉽지 않으므로 이에 대한 일반적인 해석을 내리지는 않았다. 이 차이는 모형 선택, 강우 사상, 유역 특성에 따라 매우 달라질 것이다. 그림의 유량모의 결과에서 나타나는 약간의 진동은 모형의 특성으로 생각된다. 이는 Figure 5에서 보는 바와 같이 조도계수 0.02 ~ 0.115 범위에서 80시간동안 첨두시간이 일정하기 때문에, SAC-SMA 모형이 모형의 물수지를 맞추기 위해 나타난 현상이라 판단된

다.

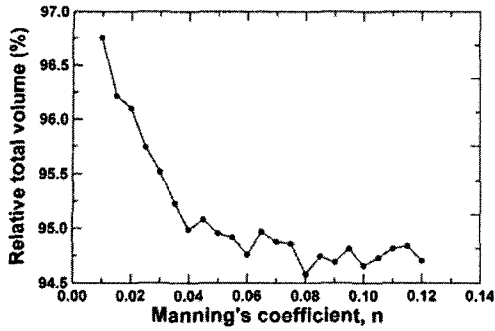


Figure 4. Relative total volume (simulated volume divided by observed volume) in percentage for a range of values of the surface roughness coefficient,  $n$ .

Figure 5는 지표면 조도계수의 변화에 따른 모의 유량의 첨두시간을 나타내었다. 첨두시간은 조도계수  $n$ 에 비례하여 증가하였다. 그러나 첨두시간은 0.02 ~ 0.115의 범위에서의 80 시간 동안 일정하였으나, 모형의 최소시간 단위가 1시간인 점을 고려한다면 일반적으로 증가한다고 판단된다. 지표면 조도계수의 선택에 따라 첨두시간은 2시간 차이가 발생함을 알 수 있다. 설계나 계획측면에서는 첨두시간 2시간의 차이는 중요하게 여겨지지 않을 수도 있지만, 호우기간 동안의 홍수조절 측면에서는 중요한 사안이 된다.

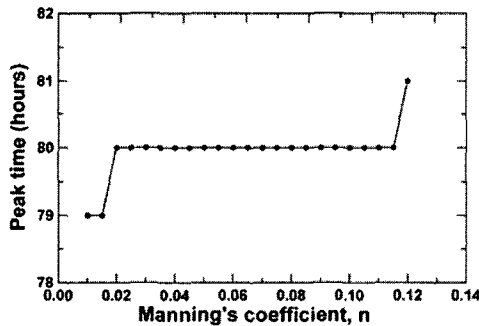


Figure 5. A time course of the simulated streamflow for a range of values of the surface roughness coefficient,  $n$ . The figure shows about 2 hour difference in peak time depending on the surface roughness coefficient.

## 6. 요약 및 결론

본 연구는 유역의 식생상황을 표현하는 지표면 조도계수를 원격탐사 자료를 기반으로 만들어진 토지피복도에서 Manning 식과 같은 물리적 기반의 방법으로 구하는 방안을 제시하였다. 사전 연구로써

소유역별 지표면 조도계수의 변화에 따라 첨두유량, 유출체적, 첨두시간 등에 어떠한 영향을 미치는 지를 분석하였다.

소양강댐 유역에서 지표면 조도계수 0.01 ~ 0.12의 범위에서 첨두유량은 약 10%의 유량 차이를 나타내었고, 유출체적의 차이는 약 2%로 작은 변화를 나타내었다. 첨두시간은 조도계수  $n$ 에 비례하여 증가하였다. 그러나 첨두시간은 0.02 ~ 0.115의 범위에서의 80시간 동안 일정하였으나, 모형의 최소시간 단위가 1시간인 점을 고려한다면 일반적으로 증가한다고 생각된다.

이 연구는 강우-유출 모형에서 식생과 관련된 지표면 조도계수의 유역 대표값을 계산할 때 그 방법의 선택에 있어 공학적 직감을 제공함으로써 강우-유출 모형의 거동을 이해하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

1. 한국수자원공사, 1995, 한강수계 다목적댐 하류 연속유출 모형과 동역학적 하도추적 모형 연구(2차년도), 수자원연구소 WRII-WR-95-2.
2. Duan, Q., 1991, *A global optimization strategy for efficient and effective calibration of hydrologic Models*, Ph. D. dissertation, Dept. of Hydrol. and Water Resour., Univ. of Arizona, Tucson.
3. Tabios III, G., Obeysekera, J.T. and Salas, J.D., 1986, *National weather service model -PC version*, Colorado State Univ., Ft. Collins, Colorado.
4. U.S. Army Corps of Engineers, 1985, *HEC-1 Flood Hydrograph Package User's Manual(Revised Edition)*, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
5. Vieux, B.E., 2004, *Distributed hydrologic modeling using GIS*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.