

설계홍수량에 영향을 미치는 매개변수의 민감도 분석: 자연유역을 중심으로

A Sensitivity Analysis for Parameters Effecting upon the Design Floods: Natural Watershed

윤 여 진*

Yoon, Yeo Jin

Abstract

Recently, it seems increasing trends that the design floods on the middle and small scale of urban regions and natural basins are evaluated with introducing to the concept of the critical storm duration. However the study of the critical storm duration is not sufficient and especially on the natural basins, it rarely performed. Therefore in this study, estimated the critical storm duration and peak discharge according to the rainfall distribution type, the position of peak rainfall intensity, and the frequency on the natural basins were evaluated using Clark model and the influence of each factors on the design floods was analyzed with sensitivity analysis on the parameters of the model.

Keywords: sensativity analysis, critical storm duration, design floods, Clark model

요 지

최근 중·소규모의 도시지역과 자연유역에서 임계지속기간의 개념을 도입하여 설계홍수량을 산정하는 사례가 늘어나고 있는 추세에 있다. 그러나, 임계지속기간에 관한 연구는 미흡한 상태이며 특히 자연유역에 대해서는 거의 없는 상태이다. 따라서, 본 연구에서는 자연유역을 대상으로 Clark모형을 이용하여 강우분포 형태, 침투강우 발생위치, 빈도에 따른 임계지속기간 및 침투유량을 산정하고, 적용모형의 매개변수들에 대한 민감도분석을 실시함으로써 각종 인자들이 설계홍수량에 미치는 영향을 분석하였다.

핵심용어 : 민감도분석, 임계지속기간, 설계홍수량, Clark 모형

* 대한주택공사 환경연구부 연구원

Researcher, Envir. Engrg. Div., Korea National Housing Corporation, Sungnam, Kyonggi 463-500, Korea

1. 서 론

수문학적 설계 또는 수문설계라는 것은 수자원시스템에 수문사상이 미치는 영향을 평가하고 적절히 실행될 수 있도록 주요 변수들의 기준치를 선택하는 과정이라고 할 수 있으며, 수자원시스템이 적절히 실행될 수 있도록 수공구조물을 선택하는 기준으로 설계홍수량을 선택하게 된다.

설계홍수량의 산정은 일반적으로 해당유역의 강우 및 유출기록을 사용하여 유역의 강우-유출 관계를 설정 및 결정하는 유출해석과 설정된 유출모형을 사용하여 강우량으로부터 유출량을 추정하는 유출예측의 두 가지로 이루어진다(건설부, 1993).

현재 국내에서는 수공구조물의 설계홍수량 산정시 수문자료의 빈곤 등으로 임의의 유역에 대한 대상유역별 대표단위유량도를 결정할 수가 없어서 주로 지형특성을 변수로 하여 그 유역의 단위유량도를 결정하는 합성단위도 방법을 사용하여 유출특성을 규명함으로써 설계홍수량을 산정하고 있다. 그러나, 유출모형, 특히 강우-유출모형은 여러 가지 불확실성이 내재하고 있을 뿐만 아니라 설계홍수량 산정시에는 적용조건에 따라 서로 홍수량에 큰 차이가 있어 많은 어려움이 뒤따른다. 따라서, 모형을 이용하여 설계홍수량을 산정시 무엇보다도 각종 모형의 특성 및 인자들이 설계홍수량에 미치는 영향을 정도를 파악함으로써 모의되는 물리적 과정과 모형사이의 관계를 이해하는 것이 필요하며, 이를 바탕으로 모형 및 수문자료 등의 불확실성에 따른 오차로 인해 발생할 수 있는 문제를 극복할 수 있다.

국내의 경우 설계홍수량 산정시 설계강우의 지속시간은 설계홍수량값에 큰 영향을 미침에도 불구하고 단순히 도달시간에 해당하는 강우를 지속시간으로 사용하여 왔다. 그러나 최근에 배수계통에 가장 큰 부하를 발생시키는 강우지속기간 즉, 임계지속기간에 대한 관심이 고조되고 있으나 이에 관한 연구는 미미한 상태이

다. 설계강우지속기간과 관련된 국내외의 연구를 살펴보면 Burke와 Gray(1980)는 지형학적 인자와 강우특성이 임계지속기간에 많은 영향을 미치며, Terstriep과 Stall(1974)은 ILLUDAS모형을 이용하여 다양한 유역면적($0.5 \text{ mi}^2 \sim 8.3 \text{ mi}^2$)에 대한 임계지속기간으로 60분이 사용되어 질 수 있음을 보여주었으며, Lemmer와 Rao(1983)는 도시배수시스템의 설계에서 강우분포가 임계지속기간에 미치는 영향과 설계강우지속시간을 결정하는 지침을 제안하였다. 또한 Chen과 Wong(1993)은 kinematic wave 방법을 통하여 IDF곡선의 특성과 임계지속기간 사이의 함수적인 수식을 유도한 바 있다. 또한 국내 연구로서는 중소 규모의 도시지역을 중심으로 배수계통에 최대의 부하를 야기시키는 임계지속시간의 개념을 적용하여 설계홍수량을 결정하는 예(이종태 등, 1993)와 도시유역을 중심으로 강우분포 형태에 따른 임계지속기간의 변화 연구(윤여진 등, 1998)가 있으며, 본 연구에서는 자연유역을 대상으로 Clark모형을 이용하여 각 강우분포 형태, 침투강우 발생위치, 빈도에 따른 임계지속기간 및 침투유량을 산정하고, 적용모형의 매개변수들에 대한 민감도분석을 실시함으로써 각종 인자들이 설계홍수량에 미치는 영향을 분석하고 그 적용성을 판단하고자 한다.

2. 대상유역 분석

2.1 지형인자 분석

연구대상유역으로는 경기도의 산본지구를 선정하였다. 산본지구의 유역면적은 8.108 km^2 이며 하천길이는 3.687 km, 유역평균경사 5.5% 정도이다. 유역내 최고표고는 EL. 485 m이며, 최저표고는 EL. 45 m이지만 표고 EL. 100 m이상인 지역이 전 유역면적의 40 %정도로 산지지역으로 현재 상류지역은 전부 산지이고 중·하류지역은 이미 개발이 완료된 지구로 개발 전 상태에 대하여 적용하였으며 유역도는 그림 1과 같다(대한주택공사, 1989).

개발전의 설계홍수량을 정확하게 산정하기 위해서는 무엇보다도 기본적인 지형인자 및 수문자료의 정확성이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 대상유역의 개발전 인자들에 대하여 지형정보시스템(Geographical Information System, GIS) 기법을 이용하였다. 최근 각광받고 있는 GIS는 수자원분야와 댐건설을 위한 유역조사, 광역상수도의 관로 및 시설계획, 시설관리 등에서 폭넓게 적용되어 지고 있으며 본

표 1. 각 도달시간 비교

| 산 정 식 | 도달시간(min) |
|---------|-----------|
| Kirpich | 34.41 |
| Linsley | 70.43 |
| Kraven | 7.64 |
| Rziha | 18.35 |
| Kerby | 92.43 |

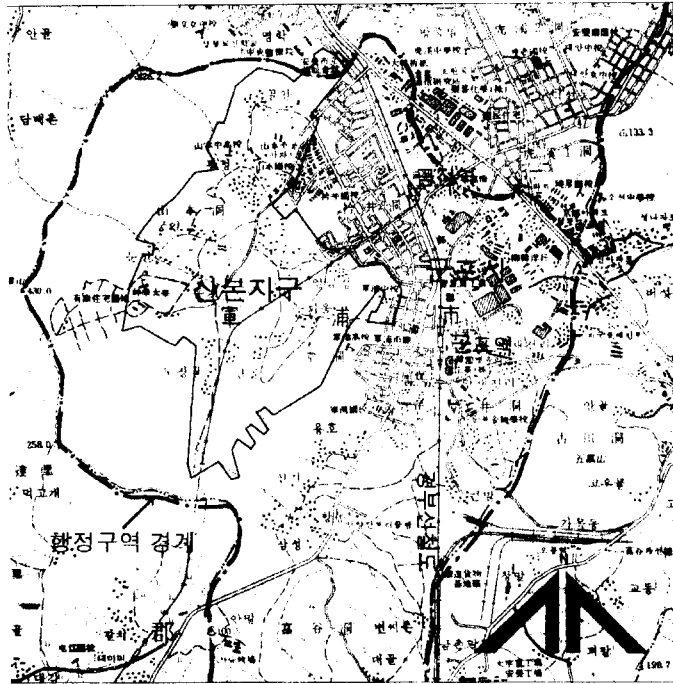


그림 1. 산본유역도

연구에서는 대상유역에 대한 지형분석, 경사도분석, 토지이용분석, 토양상태 분석 등을 통하여 기본 인자들을 산정하였다.

GIS에 사용되는 Software는 여러 가지가 있으나 기본적인 구성모듈은 영상 자료의 입력과 수정, 자료의 저장과 데이터 베이스의 관리, 자료의 변환 및 분석, 자료의 출력 등으로 이루어지고 있고 최근 많이 적용되고 있는 IDRISH 소프트웨어를 사용하였다. 기본지형도 및 유역구분, 토지이용상태, 배수형태에 따른 토양도 등의 자료를 획득하여 기본자료를 입력하였으며 이러한 일련의 작업순서도는 그림 2와 같고 표고분석, 배수상태에 따른 토양도분석 및 토지이용 분석결과는 그림 3~그림 5와 같이 나타났다.

2.2 유효우량 산정

지상에 도달한 강우량중 일부는 흙의 표면을 통하여 침투하고, 그 초과분은 흙의 표면으로 흘러 유출을 형성하게 되는데 이와 같이 강우량으로부터 침투에 의한 손실을 뺀 값을 유효우량이라 하며, 산정방법은 다양하다. 본 연구에서는 SCS방법을 사용하였으며, 유역의 평균유출 수문곡선번호 CN은 표 2와 같다. 본 연구에

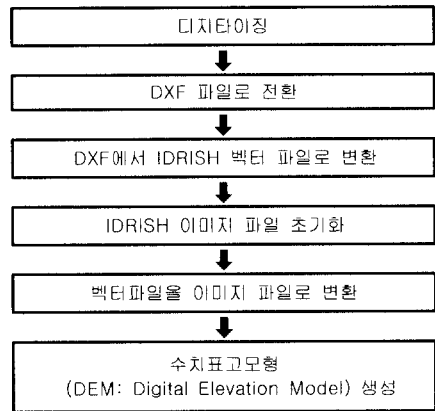


그림 2. GIS 작업절차 순서도

서는 산본 대상유역에 대한 정밀토양도를 구입(농어촌진흥공사, 1984)하여 대상유역의 배수계통에 따른 토지상태를 4등분으로 구분하여 적용하였다.

본 연구의 대상유역에서의 CN값은 앞에서 GIS 기법을 이용하여 분석한 토지이용별 면적으로서 유출률이 매우 높은 토양상태이므로 AMC-III 조건하에서 산정하였다.

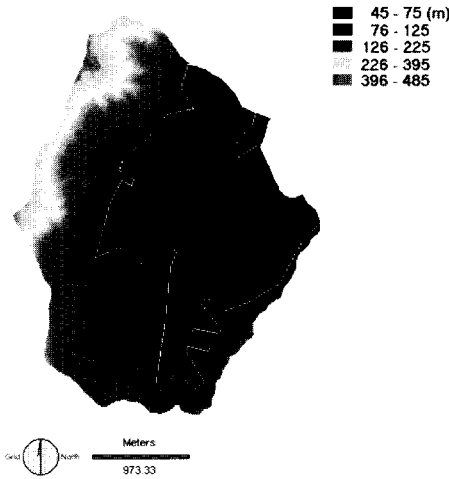


그림 3. 표고분석

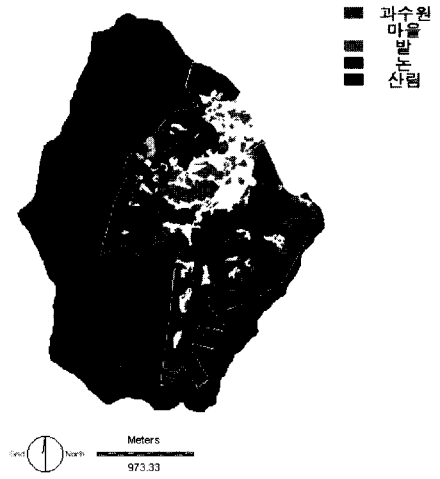


그림 5. 토지이용분석

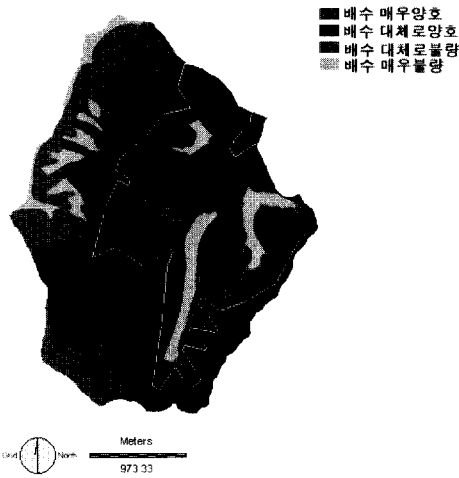


그림 4. 배수상태에 따른 토양도분석

기존의 일반적인 CN산정방법은 토지이용도나 토양도를 직접 중첩 비교하여 토양-파복형 분포도를 구해야 하므로 같은 축척의 두 종류의 지도가 필요하고, 다시 그 분포도의 면적을 구적기 등으로 산정해야 하므로 오차의 발생 비율이 높으며, 유역의 면적이 증가함에 따라 필요한 도엽의 개수가 크게 증가하여 산정에 많은 시간과 노력이 필요하게 된다.

하지만 GIS 기법을 사용한 산정 방법은 GIS Tool 내에서 자유로이 축척의 변환이 가능하므로 원시 데이터의 크기 등에 구애받지 않으며 Grid 모듈에 의한 속성 값의 분석이 가능하므로 토양특성을 쉽게 파악할 수 있다. 또한 자료의 습득에 있어 기존의 지도를 사용할 수 있을 뿐만 아니라 인공위성 자료와 같은 거의 실시간의 원격탐사 자료를 사용하여 현재상태에 더욱 근접한 자료를 취득할 수 있다. 그리고 이렇게 작성된

표 2. 유역의 평균유출 곡선번호 CN의 산정(AMC-III 조건하)

| 토지이용 | 토 양 형 | | | | | | | | 토 지 이용별 면 적 | 유역평균 CN |
|------|-----------------------|----|-----------------------|----|-----------------------|----|-----------------------|----|-------------|---------|
| | A | | B | | C | | D | | | |
| | 면적 (km ²) | CN | 면적 (km ²) | CN | 면적 (km ²) | CN | 면적 (km ²) | CN | | |
| 산림 | 1.269 | 74 | 4.102 | 88 | 0.034 | 94 | 0.404 | 96 | 5.809 | 85.53 |
| 논 | 0.006 | 82 | 0.376 | 91 | 0.162 | 94 | 0.301 | 96 | 0.845 | 93.29 |
| 밭 | 0.003 | 82 | 0.599 | 88 | 0.022 | 91 | 0.016 | 94 | 0.640 | 88.22 |
| 농가 | 0.000 | 78 | 0.637 | 88 | 0.020 | 91 | 0.013 | 94 | 0.670 | 88.20 |
| 복장 | 0.000 | 70 | 0.023 | 85 | 0.000 | 91 | 0.000 | 94 | 0.023 | 85.00 |
| 과수원 | 0.000 | 55 | 0.124 | 78 | 0.000 | 88 | 0.000 | 91 | 0.124 | 78.00 |
| 면적총계 | 1.278 | | 5.861 | | 0.238 | | 0.734 | | 8.111 | 86.37 |

표 3. 재현기간별 확률강우강도 공식

| 구 분 | 20년 | 30년 | 50년 | 100년 |
|---------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 강 우 강도식 | $I = \frac{415.33}{t^{0.45}}$ | $I = \frac{418.55}{t^{0.43}}$ | $I = \frac{423.17}{t^{0.42}}$ | $I = \frac{427.32}{t^{0.41}}$ |

토양도나 토양 피복상태등은 다른 수문모형에서 필요한 매개변수를 추출하는데 사용 가능하다는 장점이 있다.

2.3 강우분석

강우자료는 본 연구의 대상유역인 산본지구와 가장 가까운 수원기상대의 1964년부터 1996년까지의 36년간 자기우량기록지로부터 지속기간별, 재현기간별 확률강우량을 산정하기 위하여 지속기간별 연최대치 강우자료(10, 20, 30, 60, 120, 180, 360, 720, 1440 min)를 대상으로 빈도해석을 실시하였다. 확률분포형으로는 Normal, Lognormal-2, Lognormal -3, Gamma-2, Gamma 3, Log Pearson-type III, Extremal 1, Extremal 3분포 등 8가지 분포형을 적용하였다. 적합도 검증은 Kolmogorov-Smirnov 검정과 x^2 방법을 이용하였으며 검증한 결과 지속기간별 강우량 자료계열은 Log-Pearson type III 분포가 가장 적합한 것으로 판정되었다. 따라서, Log-Pearson type III 분포에 의해 산정된 강우량을 확률강우량으로 결정하였다. 확률강우강도식은 강우강도-지속시간-재현기간 관계를 나타내는 식으로서 산정된 빈도별 지속기간별 확률강우량을 강우강도로 변환시킨 후 최소자승법을 이용하여 확률 년별 강우강도-지속시간 관계식을 구한다. 이때 최적화시킨 다양한 형태의 강우강도공식으로부터 구하여진 값과 원래 자료치와의 편차를 계산하여 편차가 최소가 되는 식을 그 지점의 확률강우강도식으로 정하고 가장 편차가 적은 결과를 나타낸 Sherman형을 채택하였다. 산정된 재현기간별 확률강우강도공식은 표 3과 같다.

3. Clark 모형 매개변수 산정

홍수량을 산정하기 위한 방법으로 일반적으로 많이 적용하는 모형으로는 나카야스(中案)의 종합단위도법, SCS 합성단위도법, Clark 모형 등이 있다. 그 중에서 본 연구에서는 Clark 모형(1945)을 사용하였는데 이 방법의 기본개념은 유역의 홍수 도달시간 누가면적 관계를 사용하여 자연하천유역에 순간적으로 내리는 단위 유출량으로 인한 유역출구에서의 직접유출 수문곡선인 순간단위유출도를 유도하는 방법으로 강우로 인한

유역의 전이(translation) 뿐만 아니라 저류효과까지 고려하는 방법이다. Clark모형 적용시 주요 매개변수는 도달시간(T_c), 시간-면적주상도(Time-Area Diagram), 저류상수(K)이다.

3.1 도달시간(T_c)

현재 국내에서 적용하고 있는 도달시간 산정식은 거의 외국에서 사용되어지는 경험공식들로서 적용시에는 적용식들에 따라서 총유출량의 차이가 크게 나타날 수 있으므로 각종 여건에 따라 세심한 주의를 요한다(윤여진과 김재한, 1995).

본 연구에서는 하천시설기준에서 제시한 각종 도달시간 산정식들 중 자연하천 유역에 적용되어지는 Kirpich식의 34.41을 이용하였다. 각 경험식들에서 구한 도달시간 결과는 표 1과 같다.

3.2 시간-면적 주상도

유역 출구점에서의 유출량에 공헌하는 시간구간별 배수면적을 표시하는 주상도를 시간-면적주상도라 하며, 이는 유역출구까지의 홍수 도달시간이 동일한 점을 연결하는 등시간선(isochrone)을 그려 전 유역을 몇 개의 소유역을 몇 개의 소유역으로 구분한 후 작성하게 된다.

본 연구에서는 도달시간-누가면적간의 관계는 HEC-1 Program(1988)에서 제공하고 있는 식(1)과 식(2)를 이용하였으며, 그림 6과 같다.

$$AI = 1.414 T^{1.5} \quad 0 < T \leq 0.5 \quad (1)$$

$$1 - AI = 1.414 (1 - T^{1.5}) \quad 0.5 \leq T < 1.0 \quad (2)$$

여기서 AI는 등유하시간선으로 구분된 소유역의 무차원 누가 집수면적 백분율(%)이며, T는 등유하시간선으로 구분된 소유역의 도달시간 백분율(%)이다. 시간-면적곡선의 종거는 단위유출량에 대해서 유출량으로 계산되어지고, 시간간격에 따라 내삽되며 전이된 수문곡선은 유역의 저류효과를 고려하기 위해 선형 저수지를 통과해 추적된다.

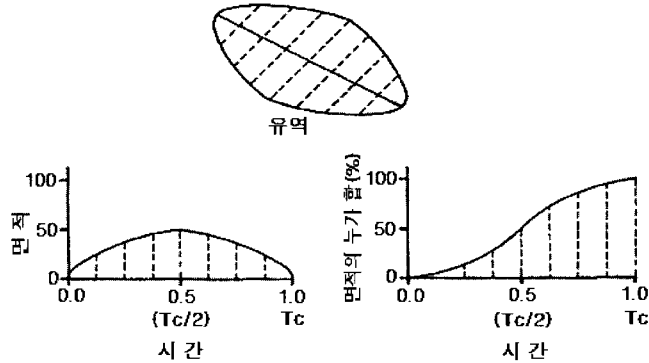


그림 6. HEC-1에서 사용하고 있는 시간-면적 곡선

3.3 저류상수(K)

Clark의 홍수추적에 필요한 저류상수 K는 유역출구에 대한 홍수수문곡선 실측 자료가 있을 경우와 없을 경우 각각 상이한 방법으로 추정한다. 본 산본유역은 실측자료가 없으므로 지체시간과 같은 것으로 보고 기존의 연구결과($t_1 = T_c/1.670$)를 이용하였다 (Overton과 Meadows, 1976).

지체시간 t_1 은 유효유량 중심에서 첨두유량까지의 시간으로 정의되며 유역의 형상, 본류의 하도경사, 하도의 형상, 그리고 호우형상에 의해 달라지는 특성을 갖고 있다. 이러한 유역 반응시간은 흐름영역과 하도가 어떠한 형상을 하고 있는가에 따라 입력자료가 달라지게 되고, 통상 지표면 유출시스템이나 도시지역과 같은 우수관망 시스템, 그리고 하도와 같은 수로시스템으로 구분하여 경험적으로 개발되어 왔다.

4. 임계지속시간 및 첨두유량 변화

4.1 강우분포형태에 따른 임계지속시간 및 첨두유량 분석

설계강우의 시간적 분포 양상은 대상지역의 과거 강우자료로부터 강우 지속기간동안에 총강우량이 시간이 경과함에 따라 어떻게 분포되었는지를 통계학적으로 분석하여 그 지역에 적합한 시간분포 모형을 만들면 수공구조물의 설계조건에 따라 결정할 수 있다. 설계강우의 시간분포를 결정할 수 있는 방법은 여러 가지가 있으나 국내에서 비교적 알려진 것으로는 등분포, Yen-Chow 분포, Huff 분포, Keifer-Chow 분포, 모노노베(物部) 분포, 강우강도식을 이용한 중앙집중분포

등이 있다.

설계강우를 등분포로 가정하는 방법은 고려대상 유역에 강우지속기간동안 일정하게 강우가 내린다는 가정으로 실제 호우현상과는 거리가 멀지만, 그 단순성 때문에 널리 사용되고 있다. Yen-Chow 분포는 모멘트를 이용한 통계학적 분석방법으로 호우의 시간적 분포를 삼각형과 사다리꼴 우량추상도로 단순화하여 표현하였으며, 또한 호우는 무강우가 없는 연속강우로 정의하였다. Huff 분포는 미국 일리노이주의 강우기록을 통계학적으로 분석하여 강우량의 시간적 분포를 나타내는 무차원 시간분포곡선을 제시하였다. 이는 강우의 누가 곡선을 이용하여, 전 지속기간을 4분위로 구분하였을 때 각 분위별 우량의 합이 나타나는 형태를 비교하여 최대 우량이 나타나는 분위에 따라 호우를 분류하는 방법이다.

Chicago 방법이라고도 부르는 Keifer-Chu 분포는 IDF의 평균강우강도와 지속기간의 관계식을 이용하여 시간구간별 강우강도를 구하는 방법으로 첨두강우의 발생위치에 따라 총강우량이 달라지는 특성이 있다. 모노노베 분포는 일최대우량을 가지고 모노노베 강우강도 공식에 대입하여 총강우량을 최대강우강도가 발생하는 위치에 따라 전방위형, 중앙집중형, 그리고 후방위형으로 나누어 시간별로 분포시키는 방법이다. 본 방법은 소규모 유역에서는 다른 방법에 비해 홍수량이 과다하게 산정되는 것으로 알려져 있다. IDF를 이용한 중앙집중 분포는 IDF곡선으로부터 지속기간별로 강우강도를 구한 후, 이를 시간강우량으로 환산, 시간구간별 강우량을 구하여 이를 중앙집중형태로 분포시킴으로써 설계우량추상도를 작성하는 방법이다. 이 방법은 강우의 지속기간에 관계없이 동일한 첨두강우강도를 갖는 특성

표 4. 강우분포 형태별 임계지속시간 및 첨두유량(산본, 개발전)

(단위: 임계지속시간 (min), 첨두유량 (m³/sec))

| 빈도(년) | 강우분포 형태 | 등분포 | 삼각형분포 | 사다리꼴분포 | Huff 분포 |
|-------|---------|------|-------|--------|---------|
| 20 | 임계지속시간 | 110 | 180 | 140 | 220 |
| | 첨두유량 | 88.2 | 109.4 | 102.0 | 118.8 |

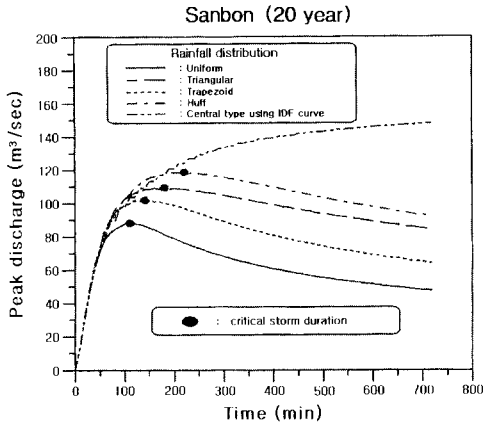


그림 7. 강우분포 형태별 임계지속시간 및 첨두유량

이 있다.

개발전 산본유역을 대상으로 하여 Clark모형으로 20년 빈도에 대하여 각 강우분포 형태별로 임계지속시간과 첨두유량을 계산하였다. 임계지속시간 및 첨두유량은 첨두강우 발생위치에 따라 다르므로 강우 분포형태별(삼각형분포, 사다리꼴분포, Huff 분포)로 대표강우분포를 선정하기 위하여 산본유역과 가장 가까운 수원지역의 기존 연구결과를 이용하였다(한국건설기술연구원, 1989).

기존 연구결과에 의하면 수원지역의 지배적인 강우분포 형태는 삼각형분포의 경우는 $a=0.4$, $b=0.6$ 이고 사다리꼴분포는 $a=0.19$, $b=0.35$, $c=0.46$ 이고 Huff 분포의 경우는 2분위인 것으로 제시되고 있다. 이에 대한 계산결과는 표 4와 그림 7과 같이 나타났는데, 강우강도공식을 이용한 중앙집중형의 경우는 첨두유량이 강우지속시간이 증가함에 따라 계속 증가하는 것으로 나타나 임계지속시간을 결정할 수가 없었다.

개발전 산본유역의 강우분포 형태에 따른 임계지속시간 및 첨두유량의 크기는 Huff 분포, 삼각형분포, 사다리꼴분포, 등분포의 순서로 나타났으며, 각 분포형태

별 임계지속시간 및 첨두유량의 크기도 그 차이가 큼을 알 수 있다. 첨두유량과 임계지속시간이 가장 작게 나타난 등분포와 가장 크게 나타난 Huff 분포와의 차이를 비교해보면, 임계지속시간은 Huff 분포가 등분포보다 110 min 늦게 나타났으며, 첨두유량의 차이는 30.6 m³/sec인 것으로 나타나 최소치를 기준으로 보면 34.6 %의 많은 첨두유량 차이가 나타났다.

4.2 첨두강우 발생위치에 따른 임계지속시간 및 첨두유량 분석

첨두강우 발생위치에 따른 영향을 알아보기 위해 20년 빈도에서 삼각형분포 4가지 경우와 Huff 분포 4가지 분위에 대하여 적용한 결과는 표 5와 그림 8로 나타났다.

표 5에서 보는 바와 같이 삼각형분포에서는 첨두강우 발생위치에 따른 임계지속시간의 범위는 180~190 min 사이로 큰 차이가 없었으나 첨두유량은 26.2 m³/sec로 많은 차이가 있었으며, Huff 분포의 4가지 경우에 대해서는 임계지속시간의 범위는 190~320 min 사이로 많은 차이가 났으며 첨두유량도 최고 26.9 m³/sec의 차이가 나타났다.

산본유역의 대표적인 삼각형분포 ($a=0.4$, $b=0.6$)와 Huff 분포 2분위를 상대적으로 비교해보면 임계지속시간은 40 min의 차이가 났으며 첨두유량은 9.4 m³/sec의 차이가 났으며, 첨두유량이 가장 크게 난 삼각형분포 ($a=0.8$, $b=0.2$)와 Huff 분포의 3분위에 대한 상대적인 비교로서는 10 min의 임계지속시간의 차이와 첨두유량은 11.8 m³/sec의 차이를 보였다.

개발전 산본유역에 대해서는 첨두강우 발생위치가 뒤로 갈수록 첨두유량은 증가하는 경향은 개발후와 같은 양상을 보이고 있으나 임계지속시간의 경우에는 삼각형분포에서는 첨두강우 발생위치에 상관없이 거의 일정한 경향을 보였으며, Huff 분포에서는 첨두강우 발생위치별로 최고 130 min의 많은 차이가 발생하였다.

표 5. 첨두강우 발생위치별 임계지속시간 및 첨두유량

(단위 : 임계지속시간(min), 첨두유량 (m³/sec))

| 강우분포 형태 | | 삼각형분포 | | | | Huff 분포 | | | |
|---------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------|-------|-------|-------|
| | | a=0.2 b=0.8 | a=0.4 b=0.6 | a=0.6 b=0.4 | a=0.8 b=0.2 | 1분위 | 2분위 | 3분위 | 4분위 |
| 20 | 임계지속시간 | 180 | 180 | 180 | 190 | 320 | 220 | 200 | 190 |
| | 첨 두 유 량 | 99.5 | 109.4 | 119.1 | 125.7 | 110.6 | 118.8 | 137.5 | 134.6 |

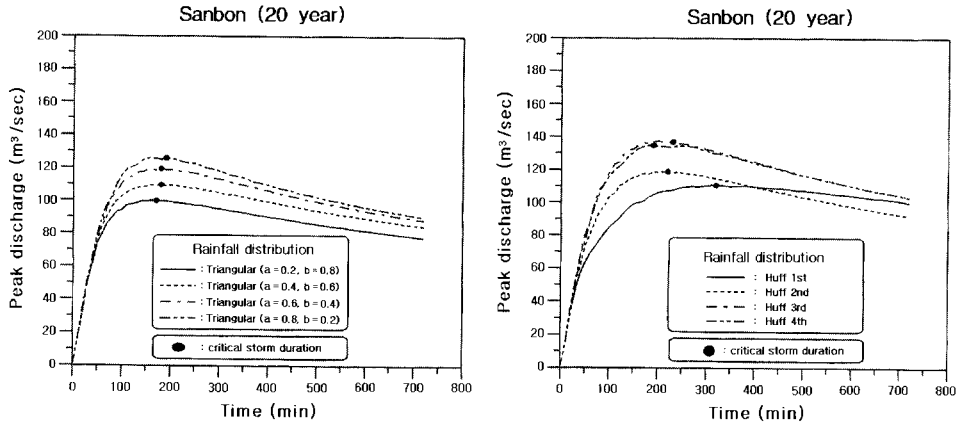


그림 8. 첨두강우 발생위치별 첨두유량 변화(삼각형분포, Huff 분포)

4.3 빈도에 따른 임계지속시간 및 첨두유량 분석

강우분포형태별, 총강우량(빈도)이 임계지속시간 및 첨두유량에 미치는 영향을 알아보기 위하여 각 강우분포에 대해 빈도별(20, 30, 50, 100년) 임계지속시간과 첨두유량을 산정하여 표 6에 나타내었다.

또한 첨두강우 발생위치가 다른 경우 빈도에 따른 영향을 파악하기 위해 삼각형분포의 4가지 경우와 Huff 분포의 각 분위에 대해 빈도별 임계지속시간 및

첨두유량을 산정한 결과는 표 7에 나타내고 산본유역의 대표강우 분포인 삼각형분포 a=0.4, b=0.6과 Huff 분포 2분위의 경우에 대하여 빈도별 첨두유량변화는 그림 9로 나타내었다.

표 6에서 보는 바와 같이 임계지속시간 및 첨두유량 크기순서는 Huff 분포, 삼각형분포, 사다리꼴분포, 등분포의 순서로 나타났지만 임계지속시간은 각 강우분포별 임계지속시간은 빈도에 관계없이 동일한 결과를 나타내었다.

표 6. 빈도별, 강우분포 형태별 임계지속시간 및 첨두유량

(단위 : 임계지속시간(min), 첨두유량 (m³/sec))

| 빈도(년) | 강우분포 형태 | 등분포 | 삼각형분포 | 사다리꼴분포 | Huff 분포 |
|-------|---------|-------|-------|--------|---------|
| 20 | 임계지속시간 | 110 | 180 | 140 | 220 |
| | 첨 두 유 량 | 88.2 | 109.4 | 102.0 | 118.8 |
| 30 | 임계지속시간 | 100 | 180 | 140 | 220 |
| | 첨 두 유 량 | 100.5 | 126.3 | 117.0 | 137.4 |
| 50 | 임계지속시간 | 110 | 180 | 140 | 220 |
| | 첨 두 유 량 | 108.2 | 136.8 | 126.3 | 148.9 |
| 100 | 임계지속시간 | 110 | 180 | 140 | 220 |
| | 첨 두 유 량 | 116.3 | 147.7 | 136.0 | 160.9 |

표 7. 빈도별, 침투강우 발생위치별 임계지속시간 및 침투유량

(단위 : 임계지속시간 (min), 침투유량 (m³/sec))

| 강우분포 형태 | | 삼각형분포 | | | | Huff 분포 | | | |
|---------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------|-------|-------|-------|
| | | a=0.2 b=0.8 | a=0.4 b=0.6 | a=0.6 b=0.4 | a=0.8 b=0.2 | 1분위 | 2분위 | 3분위 | 4분위 |
| 20 | 임계지속시간 | 180 | 180 | 180 | 190 | 320 | 220 | 200 | 190 |
| | 침 투 유 량 | 99.5 | 109.4 | 119.1 | 125.7 | 110.6 | 118.8 | 137.5 | 134.6 |
| 30 | 임계지속시간 | 170 | 180 | 180 | 160 | 320 | 220 | 200 | 260 |
| | 침 투 유 량 | 115.3 | 126.3 | 137.1 | 144.1 | 129.8 | 137.4 | 153.9 | 168.8 |
| 50 | 임계지속시간 | 170 | 180 | 180 | 160 | 330 | 220 | 200 | 260 |
| | 침 투 유 량 | 125.0 | 136.8 | 148.1 | 155.3 | 141.7 | 148.9 | 166.2 | 182.0 |
| 100 | 임계지속시간 | 180 | 180 | 180 | 190 | 330 | 220 | 200 | 260 |
| | 침 투 유 량 | 135.1 | 147.7 | 159.7 | 167.1 | 154.3 | 160.9 | 179.1 | 195.1 |

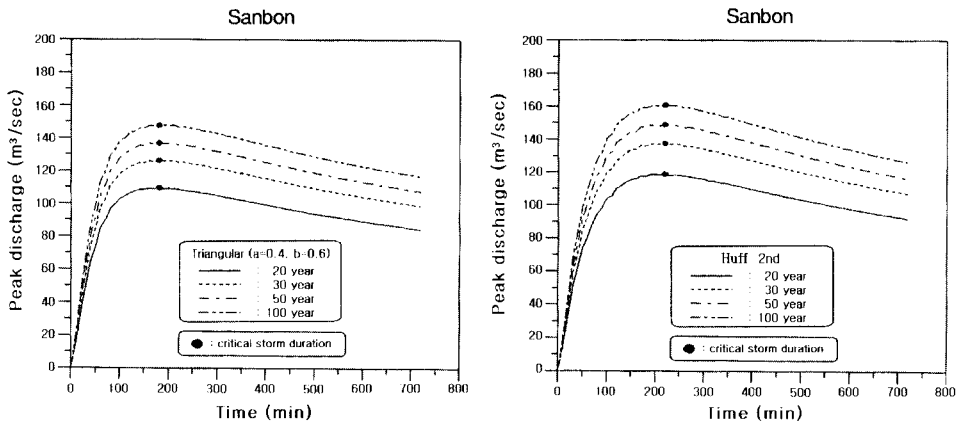


그림 9. 빈도에 따른 임계지속시간 및 침투유량

침투강우 발생위치별, 빈도별 임계지속시간 및 침투유량 결과는 표 7에서 보는 바와 같이 침투강우 발생위치별로는 임계지속시간 및 침투유량의 차이는 있으나 각 분포에서 빈도별은 차이가 없는 것으로 나타났다. 여기서, 특이한 사항으로는 기존 연구에서 분석한 도시지역에서의 산본유역에서는 침투강우 발생위치별로 볼 때 발생위치가 뒤에 위치할수록 임계지속시간 뿐만 아니라 침투유량도 크게 나타난 것과는 달리 각 빈도에서 삼각형분포의 경우는 침투유량은 발생위치가 가장 뒤에 위치하는 경우 즉 a=0.8, b=0.2에서 가장 컸지만 임계지속시간은 a=0.4, b=0.6에서 공히 180 min으로 나타나 그 경향성을 찾을 수 없었다(윤여진 등, 1998).

Huff 분포에서는 각 빈도별로 4분위에서 침투유량이 가장 컸지만 임계지속시간은 각 빈도별 1분위에서 가장 길게 나타났고 삼각형분포에서는 발생위치가 뒤에

있을수록 침투유량은 컸으나 임계지속시간은 차이가 크지 않았다.

5. 매개변수에 따른 민감도분석

5.1 유출곡선지수(CN)에 따른 분석

Clark모형 작용시 CN, K, T_c가 임계지속시간과 침투유량에 미치는 영향을 파악하기 위하여 산본유역에 대해서 삼각형분포 4가지 경우와 Huff 분포의 4가지 분위를 모두 적용하였다. 각각의 항목에 대한 임계지속시간과 침투유량의 변화를 분석시 앞에서 산정된 매개변수를 기준으로 이미 획득한 2개의 변수를 고정해 놓고 나머지 변수를 변화시켜 민감도분석을 실시하였다.

CN의 변동범위는 산정된 AMC-I에서의 값인 55를 최소값으로 하고 AMC-III에서의 값인 86을 최대

표 8. CN에 따른 임계지속시간과 첨두유량

(단위 : 임계지속시간(min), 첨두유량 (m³/sec))

| 강우분포 형태 | | 20년 빈도, K=25 min, T _c =35 min | | | | | | | |
|---------|--------|--|----------------|----------------|----------------|---------|-------|-------|-------|
| | | 삼각형분포 | | | | Huff 분포 | | | |
| | | a=0.2 b=0.8 | a=0.4 b=0.6 | a=0.6 b=0.4 | a=0.8 b=0.2 | 1분위 | 2분위 | 3분위 | 4분위 |
| CN | 임계지속시간 | | | | | | | | |
| | 첨두 유량 | | | | | | | | |
| 55 | 임계지속시간 | 590 | 650 | 630 | 580 | 1160 | 680 | 600 | 520 |
| | 첨두 유량 | 39.7 | 45.7 | 54.1 | 62.9 | 46.3 | 52.8 | 66.3 | 73.9 |
| 64 | 임계지속시간 | 400 | 420 | 420 | 380 | 730 | 450 | 410 | 400 |
| | 첨두 유량 | 52.3 | 59.6 | 69.9 | 78.2 | 60.3 | 67.8 | 83.4 | 90.6 |
| 72 | 임계지속시간 | 290 | 310 | 300 | 270 | 540 | 370 | 330 | 300 |
| | 첨두 유량 | 66.1 | 74.5 | 84.5 | 93.5 | 75.2 | 83.5 | 100.7 | 106.2 |
| 79 | 임계지속시간 | 230 | 230 | 240 | 210 | 460 | 280 | 260 | 270 |
| | 첨두 유량 | 80.6 | 89.9 | 100.1 | 108.5 | 90.7 | 99.4 | 117.6 | 120.5 |
| 86 | 임계지속시간 | 180 | 180 | 180 | 190 | 320 | 220 | 200 | 190 |
| | 첨두 유량 | 99.6 | 109.4 | 119.1 | 125.7 | 110.6 | 118.8 | 137.5 | 134.6 |

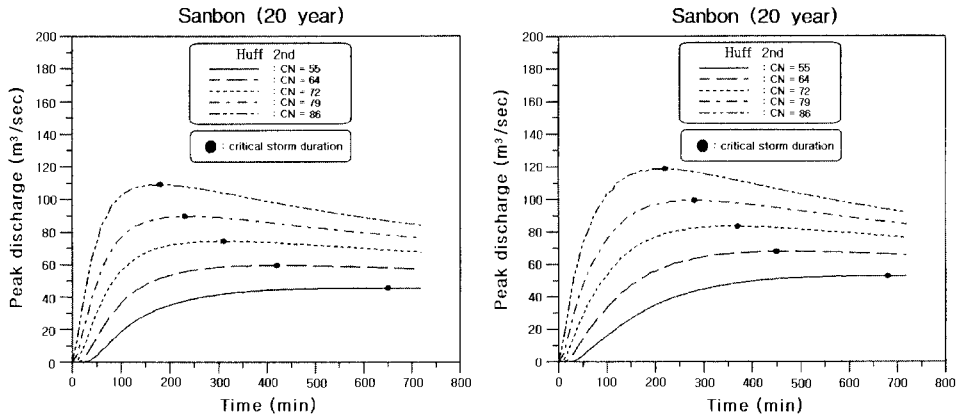


그림 10. CN에 따른 임계지속시간과 첨두유량

값으로 하여, 그 사이에서의 CN의 변화에 따른 임계지속시간 및 첨두유량을 산정하였으며 그 결과를 표 8, 그림 10으로 나타내었다. 이 결과에서 보는 바와 같이 모든 강우분포에 대해 CN이 증가함에 따라 첨두유량이 증가하는 이유는 CN이 증가하면 유효우량이 증가하기 때문이며, 임계지속시간이 감소하는 이유는 첨두 발생시간이 빨라지기 때문인 것으로 판단된다.

또한 CN에 따른 임계지속시간과 첨두유량의 변화를 알아보기 위해 산본지역의 첨두강우 발생위치별 삼각형 분포 4가지와 Huff 분포 4분위를 기준으로 Y 축은 CN=55, 64, 72, 79, 86에서 산정된 첨두유량을 CN=86에서의 첨두유량으로 나눈 값(Q_c/Q_{max})으로 축을 설정하고 X 축에는 각각의 CN을 대표값인

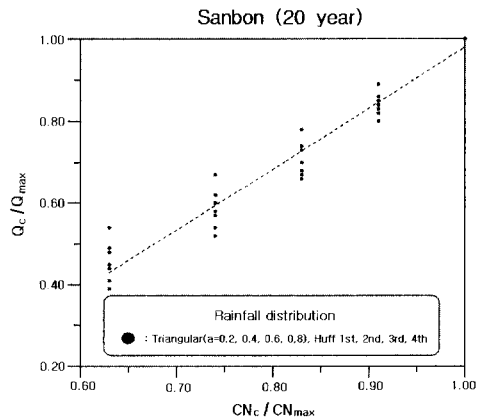


그림 11. CN에 대한 첨두유량의 무차원화

CN=86으로 나눈 값 (CN_c/CN_{max})으로 하여 무차원 화시킨 결과는 그림 11과 같다. 이때 그림에서의 기울기는 상대적인 민감도를 나타내며 삼각형분포와 Huff 분포를 적용한 20년 빈도의 산본유역 CN에 대한 상대 민감도 크기는 1.48이었다. 각 강우분포 형태마다 상대 민감도는 차이가 있으며, 본 연구에서는 제한된 범위내에서 각 매개변수값들이 임계지속시간 및 침투유량에 미치는 영향의 상대적 크기를 파악하기 위하여 CN의 변화에 대하여 삼각형분포와 Huff 분포의 침투강우 발생위치에 따른 침투유량의 변화를 분석하였다.

5.2 저류상수 (K)에 따른 분석

K에 따른 민감도분석에서도 상기 CN에 대한 민감도 분석과 마찬가지로 그 경향성이 뚜렷이 나타나고 있다. Clark 모형의 홍수추적에 필요한 K는 유역출구에

대한 홍수수문곡선 실측자료가 있을 경우와 없을 경우 각각 상이한 방법으로 추정하는데 유역출구에 대한 실측자료가 없으므로 이 때의 K는 유역의 지체시간과 같다고 가정하여 적용하고자 하였다.

그러나 많이 적용되어지는 지체시간 산정식인 Linsley식과 Kerby식을 적용하였을 경우 앞에서 적용한 Kirpich식에 의해 산정된 도달시간 $T_c = 34.41\text{min}$ 보다 훨씬 초과하는 값이 나와 이식들을 제외하고 기존의 연구결과($t_1 = T_c/1.670$)를 이용하여 구하여진 20 min을 최소값으로 하고 Kirpich식으로 산정한 도달시간 35 min을 최대값으로 하여 그 사이에서 5 min 간격으로 변화시켜 가면서 민감도분석을 실시하였다.

그 결과 K가 일정한 상태에서 삼각형분포의 경우 침투강우 발생위치별로는 임계지속시간의 차이는 작으

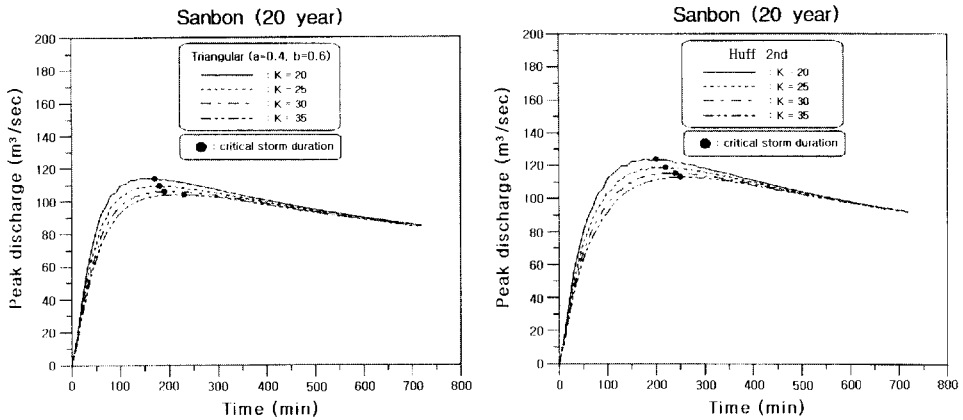


그림 12. K에 따른 임계지속시간과 침투유량

표 9. K에 따른 임계지속시간과 침투유량

(단위 : 임계지속시간(min), 침투유량 (m^3/sec))

| 강우분포 | | 20년 빈도, $T_c=35$ min, CN=86 | | | | | | | |
|------|--------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|---------|-------|-------|-------|
| | | 삼각형분포 | | | | Huff 분포 | | | |
| | | a=0.2 b=0.8 | a=0.4 b=0.6 | a=0.6 b=0.4 | a=0.8 b=0.2 | 1분위 | 2분위 | 3분위 | 4분위 |
| 20 | 임계지속시간 | 150 | 170 | 150 | 150 | 280 | 200 | 160 | 170 |
| | 침투유량 | 103.6 | 113.7 | 124.2 | 131.1 | 115.1 | 123.8 | 142.9 | 140.7 |
| 25 | 임계지속시간 | 180 | 180 | 180 | 190 | 320 | 220 | 200 | 190 |
| | 침투유량 | 99.6 | 109.4 | 119.1 | 125.7 | 110.6 | 118.8 | 137.5 | 134.6 |
| 30 | 임계지속시간 | 190 | 190 | 190 | 200 | 360 | 240 | 230 | 260 |
| | 침투유량 | 96.9 | 106.2 | 115.7 | 122.5 | 107.4 | 115.3 | 133.0 | 130.3 |
| 35 | 임계지속시간 | 200 | 230 | 220 | 210 | 400 | 250 | 240 | 270 |
| | 침투유량 | 95.2 | 104.1 | 113.3 | 120.1 | 105.4 | 113.0 | 130.1 | 127.2 |

나 K 가 증가할수록 임계지속기간은 증가하고 첨두유량은 작아지는 경향을 볼 수 있다. 또한 Huff 분포에서의 결과에서는 K 가 증가할수록, 첨두강우 발생 위치가 앞에 위치할수록 첨두유량은 작아지는 경향은 삼각형분포와 같은 경향을 보였으나, 임계지속기간은 다른 분위에 비해 1분위가 가장 길게 산정되었고 첨두유량은 3분위에서 가장 크게 산정되었다. K 에 대한 민감도분석 결과는 표 9, 그림 12로 나타났으며 K 의 변화에 따른 첨두유량의 변화를 알아 보기 위해 CN의 첨두유량 무차원화 방법과 동일하게 적용한 결과는 그림 13과 같고 그 결과 상대민감도의 크기는 -0.21이었다.

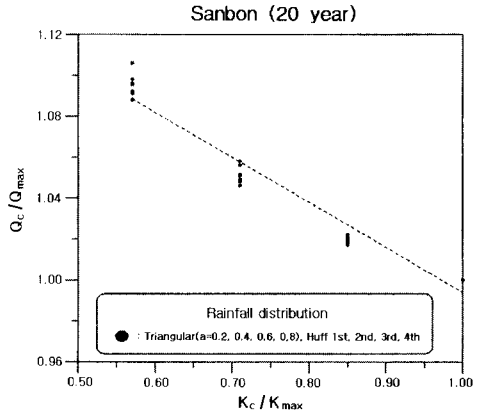


그림 13. K에 대한 첨두유량의 무차원화

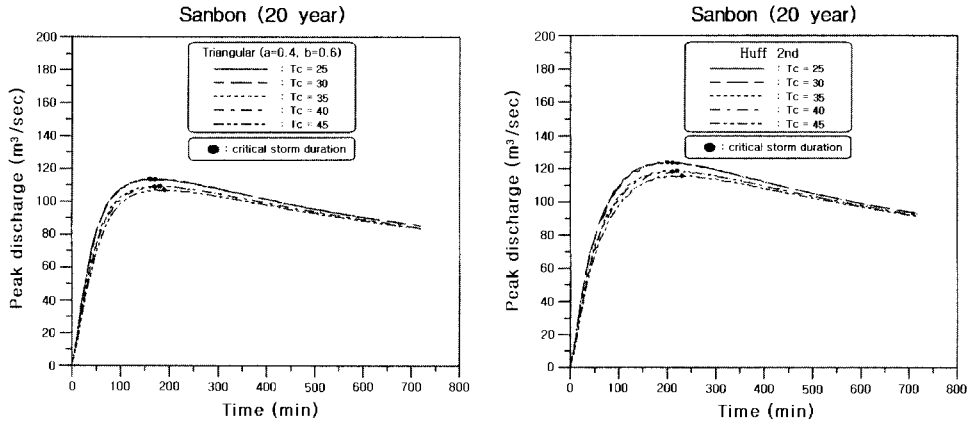


그림 14. Tc에 따른 임계지속기간과 첨두유량

표 10. Tc에 따른 임계지속기간과 첨두유량

(단위 : 임계지속기간 (min), 첨두유량 (m³/sec))

| T _C (분) | | 강우분포 | | 20년 빈도, K=25분, CN=86 | | | | | | | |
|--------------------|--------|----------------|----------------|----------------------|----------------|-------|-------|---------|-------|--|--|
| | | | | 삼각형분포 | | | | Huff 분포 | | | |
| | | a=0.2 b=0.8 | a=0.4 b=0.6 | a=0.6 b=0.4 | a=0.8 b=0.2 | 1분위 | 2분위 | 3분위 | 4분위 | | |
| 25 | 임계지속기간 | 150 | 170 | 170 | 170 | 290 | 210 | 180 | 210 | | |
| | 첨두 유량 | 103.4 | 113.6 | 124.3 | 132.4 | 114.8 | 123.8 | 143.6 | 142.1 | | |
| 30 | 임계지속기간 | 150 | 160 | 170 | 150 | 330 | 200 | 190 | 230 | | |
| | 첨두 유량 | 103.7 | 113.8 | 124.4 | 131.7 | 115.1 | 124.1 | 143.6 | 140.8 | | |
| 35 | 임계지속기간 | 180 | 180 | 180 | 190 | 320 | 220 | 200 | 190 | | |
| | 첨두 유량 | 99.6 | 109.4 | 119.1 | 125.7 | 110.6 | 118.8 | 137.5 | 134.6 | | |
| 40 | 임계지속기간 | 160 | 170 | 170 | 170 | 360 | 210 | 210 | 210 | | |
| | 첨두 유량 | 99.4 | 109.0 | 118.4 | 125.0 | 110.2 | 118.3 | 136.5 | 133.4 | | |
| 45 | 임계지속기간 | 180 | 190 | 190 | 180 | 340 | 230 | 210 | 220 | | |
| | 첨두 유량 | 97.6 | 107.0 | 115.9 | 121.8 | 108.2 | 115.8 | 133.4 | 130.2 | | |

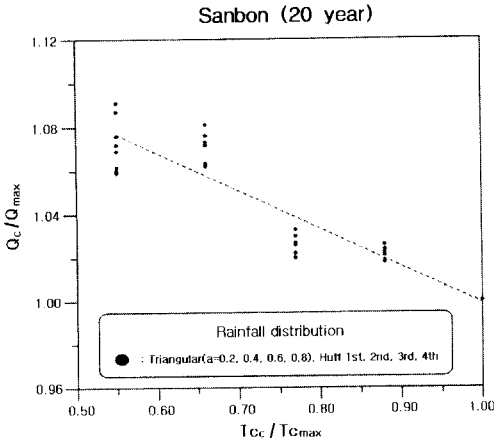


그림 15. T_c 에 대한 첨두유량의 무차원화

5.3 도달시간(T_c)에 따른 분석

도달시간은 Kirpich식의 35 min을 기준으로 하고, 다양한 공식에 의해 산정된 도달시간을 감안하여 최소 25 min에서 최고 45 min까지 변동한 결과 T_c 가 클수록 당연히 임계지속시간은 늘어나고 첨두유량은 작아지는 경향이 뚜렷이 나타났다. T_c 에 따른 임계지속시간과 첨두유량변화는 표 10과 그림 14로 나타났으며 이에 대한 무차원화는 그림 15와 같고 이때 상대민감도의 크기는 -0.17이었다.

6. 결 론

중·소규모 자연유역에서 많이 적용되고 있는 Clark 모형을 이용하여 설계홍수량에 영향을 미치는 여러 매개변수들을 변화해 가면서 설계홍수량에 미치는 영향을 파악하였고 각 강우분포 형태에 따른 임계지속시간과 첨두유량에 대한 변화를 알아보았다. 그 결과 각 강우분포형태 뿐만 아니라 첨두강우 발생위치에 따라 임계지속시간과 첨두유량이 차이가 나타남 알 수 있으나 빈도에 따른 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. Clark 모형의 주요 매개변수에 대한 민감도분석을 실시한 결과 도달시간이 작을수록, 저류상수가 작을수록, 유출곡선지수가 클수록 첨두유량이 증가하며 각 매개변수에 대한 상대민감도를 검토한 결과 홍수량에 영향을 미치는 정도는 유출곡선지수, 저류상수, 도달시간의 순서로 나타났다.

또한 모든 경우의 임계지속시간은 도달시간보다 큰 강우지속시간에서 발생되었으므로 자연유역에서도 설계

홍수량을 산정할 때는 임계지속시간의 도입이 필요한 것으로 사료된다. 그러나 임계지속시간은 설계목적에 따라 다르게 정의될 수 있으므로 추후 이에 대한 연구가 계속적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 건설부 (1993). 하천시설기준.
 농어촌진흥공사 (1984). 정밀토양도.
 대한주택공사 (1989). 산본지구 실시설계 보고서.
 윤여진, 김재한 (1995). "도달시간 산정식의 비교 연구" 1995년도 추계학술발표회논문집, 대한토목학회, pp. 57-60.
 윤여진, 정순우, 전병호, 김재한 (1998). "강우분포 형태에 따른 임계지속시간의 변화 연구 : 산본유역을 중심으로." 한국수자원학회논문집, 제31권, 제4호, pp. 375-384.
 이종태, 윤세의, 이재준, 윤용남 (1993). "유수지 설계를 위한 계획강우의 임계지속시간", 한국수문학회논문집, 제 26권, 제 1호, pp. 115-124.
 한국건설기술연구원 (1989). 지역별 설계강우의 시간적 분포.
 Burke, C.B., and Gray, D.D. (1980). "Duration and temporal distribution of storms in urban drainage design." *International Symposium on Urban Storm Runoff*.
 Chen C.-N., and Wong, T.S.W. (1993). "Critical rainfall duration for maximum discharge from overland plane." *J. of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No. 9, ASCE, pp. 1040-1045.
 Clark, C.O. (1945). "Storage and the unit hydrograph." *Transactions of the ASCE*, Vol. 110, pp. 1419-1446.
 HEC (1988). *General guideline for comprehensive flood warning/preparedness studies*, U.S. army corps of engineers, Research Reoprt No. RD-30.
 Lemmer, H.R., and Rao, A.R. (1983). *Critical duration analysis and parameter estimation in ILLUDAS*. Purdue University, Water Resource Research Center, West Lafayette Indiana.
 Overton, D.E., and Meadows, M.E. (1976).

Stormwater modeling. Academic Press, New York, N.Y.

Terstriep, M.L. and Stall, J.B. (1974). *The Illinois urban drainage area simulator*.

ILLUDAS, Bulletin 58, State Wat. Surv., Urbana, Illinois.

(논문번호:98-052/접수:1998.08.05/심사완료:1998.10.22)