

설계강우의 임계지속기간 산정을 위한 수문요소의 영향분석

An Analysis on Effect of Hydrologic Factors for Estimation of Critical Storm Duration

박상우*, 전병호**, 이신재***, 박양래****, 김명수*****

Sang Woo Park, Byung Ho Jun, Sin Jae Lee, Yang Rae Park, Myung Soo Kim

요 지

최근 일련의 기상이변현상은 과거의 기상현상과 달리 국지성 호우 발생과 강우량의 증가현상으로 나타나고 있으며, 이러한 집중호우로 인해 발생하는 홍수규모는 기존의 수공구조물들을 위협할 수준에까지 이르러 기존 수공구조물의 안전성에 대한 재검토 필요성과 신규 구조물에 대한 안전성 확보대책이 강구되고 있다. 이에 따라 수문관련의 실무에서는 설계홍수량의 산정시 설계강우에 대한 임계지속기간의 개념이 적용되고 있으나, 아직까지 설계지침에는 이에 대한 명확한 기준이 구체적으로 제시되어 있지 못한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 수공구조물의 설계에 필요한 임계지속기간의 결정에 도움을 주고자 설계홍수량 산정시 설계강우로부터 홍수량을 산정하기 위한 일련의 과정에서 이용되는 유역 및 기상 특성인자 등의 제반 수문요소에 따른 임계지속기간의 변동양상을 파악하고, 임계지속기간과 재현기간, 유역특성인자, 단위도 단위시간과의 관계 및 임계지속기간에 대한 강우지속기간과 첨두홍수량의 변화 등을 분석하여 설계강우의 임계지속기간 산정을 위한 기초연구자료를 제시하고자 하였다.

핵심용어 : 임계지속기간, 설계강우, 수문요소

1. 서 론

온난화 현상으로 인한 지구의 기온상승은 전 세계적으로 기상이변현상을 유발하고 있으며, 이러한 기상이변현상은 이전의 기상현상과는 다른 국지성 호우발생과 강우량의 증가현상으로 나타나고 있다. 국내에서도 1996년 이후부터 국지성 집중호우로 인한 피해가 빈번하게 발생하고 있으며, 그 홍수규모 또한 기존의 수공구조물을 위협할 수준에까지 이르러 기존 수공구조물의 안전성에 대한 재검토 필요성과 더불어 신규 구조물의 안전성 확보를 위한 대책이 강구되고 있다. 이에 따라 수문관련의 실무에서는 설계홍수량의 산정시 설계강우에 대한 임계지속기간, 즉 설계강우의 지속기간 변화에 따라 가장 큰 첨두홍수량을 나타내는 강우지속기간의 개념이 적용되고 있으나, 아직까지 설계지침에는 이에 대한 명확한 기준이 구체적으로 제시되어 있지 못한 실정이다. 또한 임계지속기간은 유역조건이나 강우조건 등에 따라 큰 편차를 보일 수 있으므로, 이에 대한 영향들을 검토하여 정량화할 필요가 있다. 본 연구에서는 수공구조물의 설계에 필요한 임계지속기간의 결정에 도움을 주고자 한강유역의 지류인 섬강 유역을 대상으로 설계강우의 지속기간 변화에 따른 첨두유량의 변화를 연구하였으며, 설계홍수량 산정시 설계강우로부터 홍수량을 산정하기 위한 일련의 과정에서 이용되는 유역 및 기상 특성인자 등의 제반 수문요소에 따른 임계지속기간의 변동양상을 파악하고 그 관계를 분석함으로써 설계강우의 임계지속기간 산정을 위한 기초연구자료를 제시하고자 한다.

* 정회원·서남대학교 토목공학과 교수·E-mail : psw0232@seonam.ac.kr
** 정회원·육군사관학교 토목공학과 교수·E-mail : bhjun@kma.ac.kr
*** 정회원·서남대학교 토목공학과 박사과정·E-mail : hydrosnu@seonam.ac.kr
**** 정회원·전라북도청 건설교통방재국·E-mail : p0538@hanmail.net
***** 정회원·건설교통부 서울지방국토관리청 하천공사과·E-mail : msk2k@moct.go.kr

2. 대상유역 및 기본자료

2.1 유역특성인자

본 연구의 대상유역은 한강의 제 1지류인 섬강 유역으로써 유역면적 1,479km², 유로연장 101.2km이며, 태백사맥과 인접하고 있어 지세가 험준한 편이며 하도경사가 1/398~1/764로써 비교적 급하고 유로형성이 유역의 중심부를 관류하고 있다. 섬강 유역에는 10개의 지류가 흐르고 있어 본 연구의 홍수량 산정지점은 그림 1과 같이 주요 지류의 합류점·후점을 선정하였으며, 각 홍수량 산정지점에 대한 유역면적, 유로연장, 유역평균폭, 형상계수, 하도경사 등의 유역특성인자는 표 1과 같다.

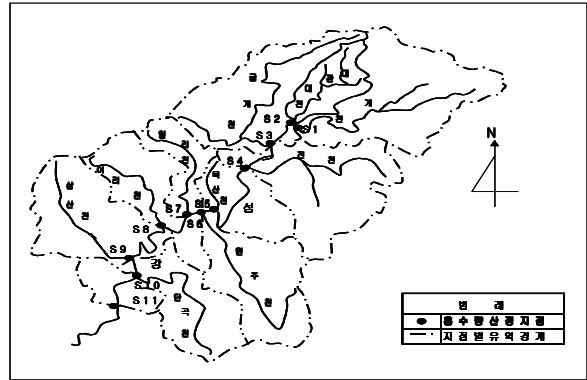


그림 1. 섬강유역의 홍수량 산정지점

표 1. 홍수량 산정지점별 유역특성인자

| 하천 | 기호 | 주요 지점 | 유역면적 A(km ²) | 유로연장 L(km) | 유역평균폭 A/L(km) | 형상계수 A/L ² | 하도경사 |
|----|-----|----------|-----------------------------|---------------|------------------|--------------------------|----------|
| 계천 | S1 | 대관대천 합류전 | 209.00 | 41.75 | 5.01 | 0.12 | 0.012676 |
| | S2 | 대관대천 합류후 | 269.07 | 41.75 | 6.44 | 0.15 | 0.012676 |
| | S3 | 금계천 합류후 | 439.79 | 45.92 | 9.58 | 0.21 | 0.011805 |
| | S4 | 진천 합류후 | 629.39 | 51.80 | 12.15 | 0.23 | 0.010601 |
| 섬강 | S5 | 원주천 합류전 | 721.59 | 66.64 | 10.83 | 0.16 | 0.008196 |
| | S6 | 원주천 합류후 | 869.88 | 66.64 | 13.05 | 0.20 | 0.008196 |
| | S7 | 일리천 합류후 | 929.07 | 68.74 | 13.52 | 0.20 | 0.008006 |
| | S8 | 이리천 합류후 | 1033.08 | 72.55 | 14.24 | 0.20 | 0.007717 |
| | S9 | 삼산천 합류후 | 1191.04 | 82.49 | 14.44 | 0.18 | 0.006864 |
| | S10 | 단곡천 합류후 | 1303.90 | 84.86 | 15.37 | 0.18 | 0.006700 |
| | S11 | 문막수위표 | 1350.35 | 90.87 | 14.86 | 0.16 | 0.006312 |

2.2 홍수량 산정방법

본 연구에서 이용한 홍수량 산정방법은 Clark의 유역추적법이다. 이 방법은 유역의 도달시간-누가면적 관계를 이용하여 강우로 인한 유수의 전이(translation)뿐만 아니라 유역의 저류효과도 고려할 수 있는 방법으로써 국내의 홍수량 산정실무에서 가장 많이 쓰이는 방법이라고 하겠다. Clark의 유역추적법을 적용하기 위해서는 유역의 도달시간과 저류상수가 필요하다. 본 연구에서는 도달시간의 산정을 위해 홍수파의 속도를 2~4m/sec로 가정하여 이에 가장 근접한 값을 보이는 식(1)의 Kraven공식을 이용하였으며, 저류상수의 공식으로는 도달시간과 유역형상계수를 매개변수로 하는 식(2)의 Sabol 공식을 이용하였다.

$$T_c = 0.444 L/S^{0.515} \text{ (min)} \quad (1)$$

$$T_r/K = 1.46 - 0.086/F \quad (2)$$

여기서, T_c : 도달시간(hr), K : 저류상수(hr), L : 유로연장(km), S : 하도경사, F : 형상계수

한편, 홍수량 산정을 위한 유효우량 산정방법은 SCS방법을 이용하였으며, 이때 최대의 유출상황을 고려하고자 유출곡선지수 CN은 AMC-III조건을 적용하였다.

섬강 지역의 각 홍수량 산정지점에 대한 도달시간 및 저류상수, CN값의 산정결과는 표 2와 같다.

표 2. 각 홍수량 산정지점별 도달시간과 저류상수

| 하 천 | 기 호 | 주 요 지 점 | 도달시간 T _c (hr) | 저류상수 K(hr) | CN값 (AMC-III) |
|-----|-----|-----------|-----------------------------|---------------|------------------|
| 계 천 | S1 | 대관대천 합류전 | 2.93 | 3.98 | 81 |
| | S2 | 대관대천 합류후 | 2.93 | 3.26 | 82 |
| 섬 강 | S3 | 금 계 천 합류후 | 3.34 | 3.20 | 82 |
| | S4 | 진 천 합류후 | 3.99 | 3.66 | 82 |
| | S5 | 원 주 천 합류전 | 5.85 | 6.32 | 82 |
| | S6 | 원 주 천 합류후 | 5.85 | 5.75 | 83 |
| | S7 | 일 리 천 합류후 | 6.11 | 6.00 | 83 |
| | S8 | 이 리 천 합류후 | 6.57 | 6.46 | 83 |
| | S9 | 삼 산 천 합류후 | 7.94 | 8.23 | 82 |
| | S10 | 단 곡 천 합류후 | 8.27 | 8.43 | 82 |
| | S11 | 문 막 수위표 | 9.13 | 9.82 | 82 |

2.3 확률강우강도식 및 시간분포모형

섬강 지역의 설계홍수량 산정을 위한 확률강우강도식으로는 식(3)과 같이 건설교통부(2000)에서 제안한 섬강 지역의 인근에 위치한 원주기상대의 확률강우강도식을 이용하였다.

$$I(T,t) = \frac{a + b \ln \frac{T}{t^n}}{c + d \ln \frac{\sqrt{T}}{t} + \sqrt{t}} \quad (3)$$

여기서, T 는 재현기간(년), t 는 강우지속기간(min)이고 a, b, c, d, n 은 상수 값으로 표 3과 같다.

표 3. 원주지점의 확률강우강도식 계수

| 지 점 | a | b | c | d | n | 비 고 |
|-----|----------|----------|--------|--------|--------|-----|
| 원 주 | 398.0955 | 126.2754 | 1.0182 | 0.1342 | 0.2777 | 전기간 |

또한, 설계강우의 시간분포모형은 Huff의 4분위법을 이용하였으며, 건설교통부(2000)에서 제시한 원주기상대의 분위별 적정 무차원 누가강우분포(50%)를 사용하여 식(4)와 같은 무차원 누가강우분포 다항식을 분석한 결과 각 분위별 회귀계수는 표 4와 같다. 여기서, Y 는 무차원 누가강우량, X 는 무차원 누가강우시간이다.

$$Y = C_0 + C_1 X + C_2 X^2 + C_3 X^3 + C_4 X^4 + C_5 X^5 \quad (4)$$

표 4. 원주기상대의 각 분위별 Huff 다항식 회귀계수

| 분위 \ 계수 | 계수 | | | | | | 결정계수 |
|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| | C ₀ | C ₁ | C ₂ | C ₃ | C ₄ | C ₅ | |
| 제 1 분위 | 0.000 | 2.795 | -3.495 | 1.782 | 0.000 | -0.074 | 0.998 |
| 제 2 분위 | 0.000 | 0.043 | 5.624 | -6.401 | 0.000 | 1.736 | 0.998 |
| 제 3 분위 | 0.000 | 0.382 | -0.787 | 3.271 | 0.000 | -1.877 | 0.998 |
| 제 4 분위 | 0.000 | 1.266 | -3.357 | 4.199 | 0.000 | -1.100 | 0.998 |

4. 분석결과

4.1 임계지속기간 및 적정분위 산정

임계지속기간이란 주어진 유역의 하도에서 최대의 첨두홍수량을 발생시키는 설계강우의 지속기간으로 정의할 수 있다. 본 연구에서는 설계강우의 시간분포에 따른 임계지속기간의 변화 양상을 파악하기 위하여 Huff의 4분위법에 의한 임계지속기간을 분석하였다. 그 결과 표 5와 같이 모든 홍수량 산정지점에서 3, 4, 2, 1분위 순으로 홍수량이 크게 나타났으며, 각 분위별 임계지속기간과 최대 첨두홍수량의 양상이 유사한 양상을 보이고 있다. 그러나 임계지속기간의 크기는 유역면적의 크기나 첨두유량의 크기 순서와 반듯이 일치하는 관계를 나타내지는 않았다.

표 5. 각 홍수량 산정지점별 임계지속기간의 산정결과(100년 빈도)

| 구분 | 1분위 | | 2분위 | | 3분위 | | 4분위 | |
|-----|--------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|
| | 임계지속기간 (min) | 첨두홍수량 (m ³ /sec) | 임계지속기간 (min) | 첨두홍수량 (m ³ /sec) | 임계지속기간 (min) | 첨두홍수량 (m ³ /sec) | 임계지속기간 (min) | 첨두홍수량 (m ³ /sec) |
| S1 | 1140 | 1474.0 | 840 | 1707.1 | 810 | 1969.5 | 840 | 1909.9 |
| S2 | 990 | 2071.4 | 750 | 2392.6 | 690 | 2742.2 | 690 | 2632.1 |
| S3 | 990 | 3405.0 | 750 | 3930.3 | 690 | 4501.6 | 690 | 4318.1 |
| S4 | 1120 | 4594.6 | 800 | 5286.6 | 800 | 6042.9 | 760 | 5769.5 |
| S5 | 1740 | 4195.0 | 1260 | 4808.5 | 1320 | 5455.7 | 1260 | 5232.0 |
| S6 | 1620 | 5297.8 | 1200 | 6057.1 | 1200 | 6846.6 | 1140 | 6515.0 |
| S7 | 1620 | 5554.0 | 1320 | 6349.9 | 1260 | 7188.2 | 1200 | 6854.7 |
| S8 | 1740 | 5976.9 | 1380 | 6821.4 | 1320 | 7708.0 | 1260 | 7313.6 |
| S9 | 2160 | 6136.3 | 1710 | 7004.4 | 1710 | 7904.1 | 1530 | 7492.8 |
| S10 | 2160 | 6635.8 | 1710 | 7567.3 | 1710 | 8536.1 | 1530 | 8077.1 |
| S11 | 2610 | 6435.5 | 1890 | 7341.9 | 1980 | 8289.1 | 1800 | 7898.6 |

4.2 재현기간의 변화에 의한 영향

설계홍수량은 설계강우의 빈도에 따라 많은 영향을 받는다. 따라서 확률강우량의 설계빈도에 따른 임계지속기간의 영향을 파악하기 위하여 그림 2와 같이 섬강 유역의 홍수량 산정지점에 대한 임계지속기간을 재현기간별로 비교 도시하여 보았다. 그 결과 홍수량 산정지점의 유역규모별 임계지속기간의 차이는 있었으나, 모든 홍수량 산정지점에서 재현기간이 어느 정도 커지면 재현기간에 관계없이 일정한 임계지속기간을 가지며, 유역규모가 커질수록 재현기간의 영향이 작아짐을 알 수 있었다.

4.3 임계지속기간에 대한 강우지속기간과 첨두홍수량의 변화

본 연구에서는 섬강 유역의 100년 빈도 홍수량에 대하여 각 홍수량 산정지점별로 설계강우의 강우지속기간(t)과 임계지속기간(t_{cd})과의 비(t/t_{cd}), 그리고 각 강우지속기간에 따른 첨두홍수량(Q)과 임계지속기간의 최

대 침투홍수량(Q_{cd})과의 비(Q/Q_{cd})에 대한 변화를 분석하였다. 그 결과 그림 3에서와 같이 임계지속기간(t_{cd})과 이 때의 최대 침투홍수량(Q_{cd})을 각각 100%라고 할 때 침투홍수량의 비(Q/Q_{cd})는 강우지속기간비(t/t_{cd})의 10%에서 평균 37.67%의 증분을 보여 가장 높은 증분을 보였고, 강우지속기간비(t/t_{cd})가 50% 및 80%일 때 침투홍수량의 비(Q/Q_{cd})가 각각 88.26%와 98.32%로써 강우지속기간비(t/t_{cd})가 증가할수록 침투홍수량의 증분율은 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 특히 강우지속기간비(t/t_{cd})가 90%일 때 침투홍수량의 비(Q/Q_{cd})가 99.0%를 나타내고 있어, 이는 임계지속기간의 산정시 실제 임계지속기간보다 약 10% 작은 강우지속기간을 임계지속기간으로 간주하여도 침투홍수량에 미치는 영향은 약 1%로써 극히 적은 오차를 보임을 알 수 있었다.

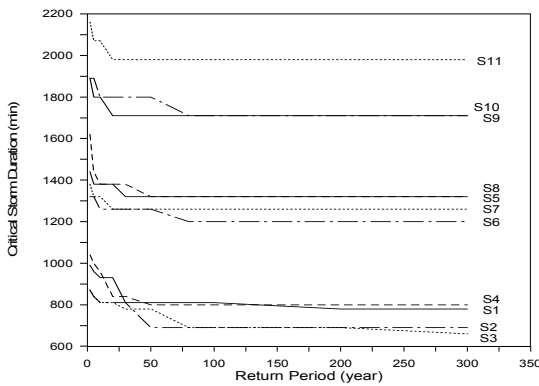


그림 2. 홍수량 산정지점별 재현기간별 임계지속기간의 변화

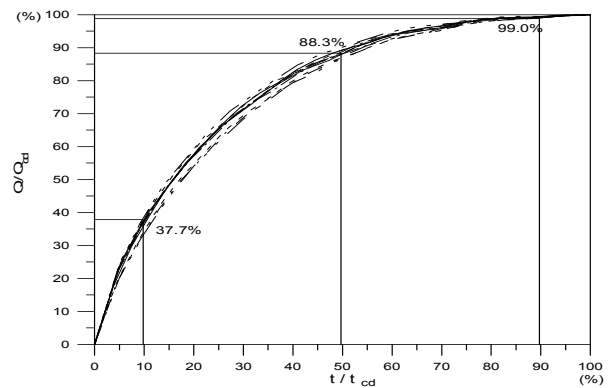


그림 3. 임계지속기간에 대한 강우지속기간과 침투홍수량의 무차원 누가곡선

4.4 유역특성인자와의 관계

본 연구에서는 여러 가지 유역특성인자와 임계지속기간과의 상관성을 검토하여 임계지속기간을 결정하기 위한 일반화된 관계식을 제시하고자 하였다. 이를 위한 유역특성인자로는 각 홍수량 산정지점별 유역면적, 하도연장, 하도경사, 형상계수 및 유역의 반응시간인 도달시간과 저류상수였으며, 임계지속기간은 Huff의 3분위에 대한 100빈도 최대 침투홍수량에 대한 강우지속기간이었다. 분석 결과 임계지속기간과 가장 밀접한 관계를 갖는 인자로는 표 6과 같이 저류상수였으며, 도달시간, 하도연장, 유역면적, 하상경사 순으로 상관성을 갖는 것으로 나타났으며, 이로부터 임계지속기간의 결정을 위한 관계식은 표 7과 같이 분석되었다.

표 6. 유역특성인자와 임계지속기간과의 상관분석

| 구 분 | 유역면적 (km ²) | 하도연장 (km) | 하상경사 | 형상계수 (A/L ²) | 도달시간 (hr) | 저류상수 (hr) |
|--------|-------------------------|-----------|--------|--------------------------|-----------|-----------|
| 임계지속기간 | 0.938 | 0.981 | -0.935 | -0.080 | 0.987 | 0.999 |

표 7. 임계지속기간의 결정을 위한 관계식

| 회귀식 | 결정계수 | 비고 |
|---------------------------|-------|-----------------------------------|
| $T_{cd} = 4.539K^{0.954}$ | 0.998 | T_{cd} 는 임계지속기간, K 는 저류상수(hr) |

4.5 단위도 단위시간의 변화에 의한 영향

단위도는 특정 단위시간동안 내린 단위 유효강우량에 의한 직접유출수문곡선이다. 따라서 동일한 유역에 대해서 강우의 단위시간이 다르게 되면 단위도 역시 달라지며, 이는 설계홍수량에도 영향을 미칠 것이다. 본 연구에서는 이러한 단위도 단위시간을 정수배로 증가시켜 첨두홍수량을 구하고 이에 따른 임계지속시간과 비교하였다. 그 결과 그림 4에서와 같이 단위도의 단위시간이 커지면 첨두홍수량은 감소하는 반면에 임계지속시간은 증가하는 경향을 보였다.

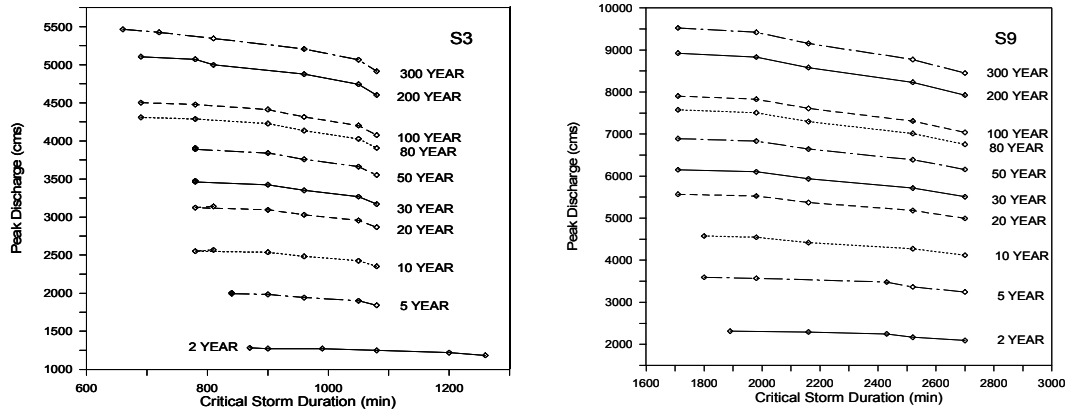


그림 4. 단위도 단위시간에 따른 홍수량과 임계지속시간의 변화

5. 결 론

본 연구에서는 수공구조물의 설계에 필요한 임계지속시간의 결정에 도움을 주고자 섬강 유역을 대상으로 제반 수문요소에 따른 임계지속시간의 변동양상을 파악하고 그 관계를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 임계지속시간은 모든 홍수량 산정지점에서 3, 4, 2, 1분위 순으로 홍수량이 크게 나타났으며, 각 분위별 임계지속시간과 최대 첨두홍수량의 양상이 유사한 양상을 보였다.
- 2) 홍수량 산정지점의 유역규모별 임계지속시간의 차이는 있었으나, 모든 홍수량 산정지점에서 재현기간이 어느 정도 커지면 재현기간에 관계없이 일정한 임계지속시간을 가짐을 알 수 있었다.
- 3) 임계지속시간의 산정시 실제 임계지속시간보다 약 10% 작은 강우지속시간을 임계지속시간으로 간주하여도 첨두홍수량에 미치는 영향은 약 1%로써 극히 적은 오차를 보임을 알 수 있었다.
- 4) 임계지속시간과 가장 밀접한 관계를 갖는 인자는 저류상수이었으며, 이를 이용하여 임계지속시간의 결정을 위한 높은 결정계수를 갖는 상관관계식이 분석되었다.
- 5) 단위도의 단위시간이 커지면 첨두홍수량은 감소하는 반면에 임계지속시간은 증가하는 경향을 보였다.

참 고 문 헌

1. 문장원, 정성원, 김동필(2000). 설계강우의 임계지속시간에 대한 수문요소별 영향 분석, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, 86-91.
2. 윤여진, 정순우, 전병호, 김재한(1998). 강우분포형에 따른 임계지속시간의 변화 연구: 산본유역을 중심으로, 한국수자원학회논문집, 31(4), 한국수자원학회, 375-384.
3. 이정규, 양희성, 장기환(2004). 설계강우의 임계지속시간에 미치는 수문요소들의 영향에 관한 연구-위천을 중심으로, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회.
4. 이재준, 이정식, 전병호, 이종태(1993). 우수관거설계를 위한 계획강우의 임계지속시간, 한국수자원학회논문

문집, 26(2), 한국수자원학회, 49-57.

5. *Burke, C.B. and Gray, D.D.(1980). Duration and temporal distribution of storms in urban drainage design, International Symposium on Urban Storm Runoff.*
6. *Chen, C.N., Wong, T.S.W.(1994). Critical Rainfall Duration for Maximum Discharge from Overland Plane : Closure, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 120(12), 1484-1486.*
7. *Debo, T. N. and Reese, A. J.(1995). Municipal Storm Water Management, CRC Press, Inc, 212.*
8. *Meynink, W.J.C. and Cordery, I.(1976). Critical Duration of Rainfall for Flood Estimation, W.R.R 12(6), 1209-1214.*