

중규모 하천유역에서 임계지속기간 특성 분석

A Characteristic Analysis of Critical Duration of Design Rainfall in Medium Sized Catchment

이정식* · 박종영** · 김석동***

Lee, Jung Sik · Park, Jong Young · Kim, Seok Dong

Abstract

The objective of this study is to examine the effect of hydrological factors on critical durations, and to analyze the relationship between the watershed characteristics and the critical duration of design rainfall in the medium sized catchments. Hydrological factors are used to return period, probable intensity formula, hydrograph method, effective rainfall and temporal pattern of design rainfall. Hydrologic analysis has done over the 44 medium sized catchments with 50~5,000 km^2 . Watershed characteristics such as catchment area, channel length, channel slope, catchment slope, time to peak, concentration of time and curve number were used to simulate correlation analysis. All of hydrological factors except return period influence to the critical duration of design rainfall. Also, it is revealed that critical duration is influenced by the watershed characteristics such as area, channel length, channel slope and catchment slope. Multiple regression analysis using watershed characteristics is carried out for the estimation of relationship among these. And the 7 type equations are proposed by the multiple regression using watershed characteristics and critical duration of design rainfall. The determination coefficient of multiple regression equations shows 0.96~0.97.

key words : Critical duration, Medium sized catchment, Watershed characteristics, Correlation analysis

요 지

본 연구에서는 대표단위도가 작성되어 있는 중규모 하천유역을 대상으로 침투유량을 발생시키는 임계지속기간을 결정하고 임계지속기간과 관련된 수문요소들에 대한 평가를 수행하였다. 임계지속기간과 유역특성인자, 유역응답시간 특성인자 그리고 단위도 특성인자들과의 상관분석을 실시하였다. 분석결과, 재현기간을 제외한 나머지 수문요소(확률강우강도식, 유출량 산정방법, 유효우량 산정방법, 강우시간분포)이 임계지속기간에 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 상관분석을 통하여 유역면적, 유로연장, 유로경사, 유역경사가 임계지속기간과 상관성이 높은 것으로 나타났다. 상관성이 높은 유역특성인자와 임계지속기간과의 다중회귀 분석을 실시하고 7가지 형태의 회귀식을 제시하였으며, 유도된 회귀식의 결정계수가 모두 0.96~0.97으로 나타나 매우 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 임계지속기간, 중규모 하천유역, 유역특성인자, 상관성분석

1. 서 론

'90년대 후반부터 지속적으로 발생해 온 기상이변현상은 더 이상 논란거리가 아니며, 최근 집중강우로 인한 극심한 자연재해는 지역별로 막대한 인명과 재산적 피해를 입혀오고 있는 실정이다. 특히, 우리나라와 같이 토지나 수자원 등의 국토자원의 이용이 다른 나라에 비해 상대적으로 높은 상황에서의 기상 변화는 물순환과정에 민감한 영향을 미치게 되어 수자원 계획수립이나 국가 수자원 정책 수립 등의 반영에 상당한 어려움을 주고 있다.

수자원 계획수립 등에 있어 기본적으로 결정되어야 할 설계홍수량은 홍수특성, 홍수빈도와 함께 사회·경제적 요인

등을 동시에 고려하여 결정되어야 할 것이지만, 최근까지도 설계강우의 빈도를 채택하고, 도달시간에 따른 강우지속기간의 강우량을 시간분포시킨 후 유출모형을 통하여 설계홍수량이 결정되고 있다. 그러나 기후변화로 인한 강우집중 현상, 총강우량 증가 현상, 강우지속기간의 증가현상 등은 기존 수공구조물의 안전에 위협요인으로 작용하고 있으며, 자연재해로 인한 2차 피해를 유발할 가능성이 점진적으로 증대하고 있는 실정에서, 설계홍수량의 결정에 보다 세심한 검토는 필수적이라 할 수 있을 것이다. 국내에서는 임계지속기간의 개념이 도입되어 임계지속기간을 고려한 침투유량을 설계홍수량으로 산정하고 있으나 임계지속기간과 관련된 수문요소들에 관한 광범위한 검토를 통한 규명이 이루어진 바가 없으며, 아직까

*정회원 · 금오공과대학교 토목환경공학부 교수 (E-mail : jungsik@kumoh.ac.kr)

**정회원 · 금오공과대학교 토목환경공학부 겸임교수

***정회원 · 금오공과대학교 대학원 토목공학과 박사과정

지 세부적인 선정 기준이 제시되고 있지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 국내 중규모 하천유역을 통하여 임계지속기간과 관련된 수문요소들에 대한 평가를 수행한 후, 임계지속기간과 유역특성간의 상관분석을 실시하고, 상대적으로 높은 상관성을 지니는 인자들을 파악함으로써 실무에서 기초자료를 수집하는 경우 보다 정확성을 가져야 하는 인자를 설정하고자 한다. 또한 임계지속기간과 유역특성인자와의 회귀분석을 통하여 중규모 하천유역에서의 임계지속기간 산정식을 제시함으로써 중규모 하천유역에서 치수구조물 설계 및 재난방지계획 수립에 보다 합리적인 방안을 제시하는 기초연구를 수행하고자 한다.

본 연구는 장기간 수문자료를 통해 대표단위도가 작성되어 있는 44개의 중규모 하천유역을 대상으로 재현기간, 확률강우강도식, 유출량 산정방법, 유효우량 산정방법, 강우 시간분포모형의 5가지 수문요소를 선정한다. 수문요소별로 임계지속기간을 결정하고 수문요소가 임계지속기간에 미치는 영향을 검토한 후 유역특성인자와의 상관분석을 실시한다. 또한 보다 양질의 수문자료가 확보되어 있는 16개 유역을 통하여 수문곡선상의 실측 도달시간을 산정하고 실측도달시간과 임계지속기간의 상관성을 검토한다. 최종적으로 상관성이 높게 나타난 유역특성인자를 통하여 임계지속기간과의 다중회귀분석을 실시함으로써 중규모 하천유역에서의 임계지속기간 산정식을 유도하고 회귀식을 제시한다.

2. 대상유역 및 수문요소

2.1 대상유역

중규모 하천유역은 유역면적의 크기만으로 판단하기는 어려우나 Ponce(1989)는 유역특성에 따라 100~5,000 km²의 면적을 가지는 유역으로 정의하였고, 국내 실무에서는 25~1,000 km²으로 간주하기도 한다. 본 연구에서는 중규모 하천유역의 범위를 50~5,000 km²로 설정하였으며, 이를 기준으로 국제수문개발계획 대표시험유역인 위천, 보청천, 평창강의 16개 유역과 낙동강의 14개, 금강의 3개, 영산강의 6개, 섬진강의 5개 유역 등 총 44개 유역을 대상유역으로 선정하였다.

본 연구에서 선택된 중규모 하천유역의 특성은 한국건설기술연구원(2000)과 건설부(1993)의 문헌의 내용을 인용하였으며 유역특성은 표 1과 같다.

2.2 임계지속기간에 영향을 미치는 수문요소

2.2.1 재현기간

Levy와 McCuen(1999)은 홍수빈도해석과 홍수 위험도 추정에 기본자료로 이용되는 연최대유출량을 발생시키는 강우지속기간을 설계강우의 지속기간으로 결정하는 것이 합리적인 방법이라고 언급한 바 있다. 이와 같이 장기간의 홍수량자료가 확보되어 있는 유역의 경우는 홍수빈도해석을 통한 설계홍수량 산정이 가능하나 이는 계측유역에 국한되며, 미계측유역에서의 설계홍수량 산정은 입력인자인 설계강우의 빈

표 1. 중규모 하천유역의 지점별 유역특성

유역명		유역면적 (km ²)	유로연장 (km ²)	유역경사 (%)	CN (AMC-III)	유역명		유역면적 (km ²)	유로연장 (km)	유역경사 (%)	CN (AMC-III)	
위천	무성	472.5	42.83	1.36	82	낙동강	예림교	1,360.5	83.63	1.23	76	
	병천	302.1	40.65	1.42	82		밀양	1,265.0	76.64	1.33	77	
	미성	171.3	30.90	1.80	84		독산	2,298.0	111.72	1.32	73	
	고노	109.7	18.90	2.70	86		합천	1,042.0	77.71	1.53	74	
	효령	151.0	21.80	4.88	81		개진	856.0	59.45	2.06	71	
보청천	산계	475.7	49.00	0.81	89		동촌	1,544.0	85.70	0.83	72	
	기대	346.5	30.32	1.20	85		금호	1,002.0	58.78	1.16	72	
	탄부	72.5	19.20	4.44	84		선산	977.3	68.92	1.24	71	
	이평	79.5	16.81	2.00	83		용곡	1,317.8	103.53	0.60	73	
	산성	53.7	13.01	2.49	83		점촌	608.0	57.90	1.68	75	
평창강	방림	519.7	51.85	2.32	82		월포	1,134.5	83.17	1.39	74	
	하반정	84.0	19.30	3.75	81		안동 1	3,530.1	169.77	0.62	71	
	상안미	396.3	44.20	2.64	82		임하 1	1,917.0	101.46	0.89	70	
	백옥포	142.3	22.95	3.49	83		봉화	712.5	101.57	0.93	73	
	장평	103.6	25.95	3.93	82		금강	석화	1,590.4	64.55	0.36	80
	이목정	55.9	16.55	5.70	84			옥천	2,942.6	167.13	0.64	75
영산강	회진	2,249.7	80.11	0.66	85	용담		989.5	64.16	1.47	75	
	나주	2,058.7	69.56	0.76	91	섬진강	송정	4,255.7	175.48	0.65	72	
	남평	576.2	43.01	0.78	81		구례	3,805.4	161.91	0.69	72	
	본동	1,288.2	61.62	0.85	86		광천	1,019.3	95.31	0.63	71	
	선암	521.1	46.68	1.30	85		압록	2,447.5	153.27	0.73	72	
	마륵	684.0	52.75	0.98	89		적성	1,350.8	110.09	0.97	72	

도와 설계홍수량의 빈도는 동일한 것으로 가정하여 설계홍수량을 결정하고 있는 것이 일반적이다. 그러므로 설계홍수량 산정에 일반적으로 적용되고 있는 설계강우량과 설계홍수량의 동일 빈도를 가정할 경우에 재현기간에 따른 임계지속기간의 변동성은 명확히 파악되어야 할 사항으로 여겨진다.

2.2.2 확률강우강도식

강우지속기간과 강우강도의 관계 정도는 비선형적인 반비례 관계를 가지므로 강우의 지속기간을 단시간 · 중시간 · 장시간의 확률강우강도식이나 I-D-F 곡선으로 구분하여 강우지속기간-강우강도 관계가 제시되고 있다. 이는 확률강우강도식의 형태에 따라 총강우량과 지속기간별 확률강우량의 차이가 발생함을 의미한다. 따라서 단일형태의 확률강우강도식을 적용한 경우와 단시간 · 장시간을 고려한 장 · 단시간 구분형태

의 확률강우강도식을 적용한 경우에 대하여 확률강우강도식별 강우량과 지속기간별 강우량의 차이로 인한 임계지속기간의 변화성을 파악하고자 한다.

유역별로 단일형태의 강우강도식(Case I-II)과 장 · 단시간 구분형태의 강우강도식(Case III-IV)으로 각각 구분하여 유출량 산정에 이용하였다. 확률강우강도식의 형태는 표 2에 제시된 바와 같다.

표 2에서 I 는 강우강도(mm/hr), t 는 강우지속기간(min), T 는 재현기간(년)이며 a, b, c, d, n 은 각 지점마다 산정되는 회귀계수이다.

지속기간은 1시간부터 96시간까지 1시간 간격으로 적용하였으며, 대상유역별, 확률강우강도식의 형태별 50년 빈도의 확률강우강도식의 계수값은 표 3과 같다.

표 2. 각 Case별 확률강우강도식의 형태

Case	Case I	Case II	Case III	Case IV
확률강우강도식	$I = \frac{b}{t^a}$	$I = \frac{c}{t^a + b}$	$I(t, T) = \frac{a + b \ln \frac{T}{t^n}}{c + d \ln \frac{\sqrt{T}}{t} + \sqrt{t}}$	$I = \frac{c}{(t+a)^b}$
참고문헌	건설교통부 (1989)	이재준과 이정식 (1999)	건설교통부 (2000a)	이재준 등 (2001)

표 3. 확률강우강도식 계수 (50년 빈도)

구분	지점명	확률강우강도식 계수값					장단분리 경계치	
		a	b	c	d	n		
Case I	위 천(대구)	0.417	402.0	-	-	-	-	
	보청천(청주)	0.412	407.7	-	-	-		
	평창강(원주)	0.450	346.8	-	-	-		
Case II	위 천(대구)	0.579	1.375	708.758	-	-	-	
	보청천(청주)	0.518	0.808	604.305	-	-		
	평창강(원주)	0.464	0.148	524.371	-	-		
Case III	위 천(대구)	단	147.9781	98.0911	0.2046	0.1725	-0.0518	90분
		장	310.0363	66.9800	-1.8327	-0.0354	0.4384	
	보청천(청주)	단	206.9811	93.6890	0.1992	0.1380	-0.0266	60분
		장	194.5685	67.0847	-1.7755	0.0855	0.0791	
	평창강(원주)	전	368.0955	126.2754	1.0182	0.1342	0.2777	-
	낙동강(대구)	단	147.9781	98.0911	0.2046	0.1725	-0.0518	90분
		장	310.0363	66.9800	-1.8327	-0.0354	0.4384	
	금 강(대전)	단	157.7852	98.5065	0.1822	0.1356	-0.2843	90분
		장	521.6633	101.0004	-0.1721	-0.0005	0.5153	
	섬진강(전주)	단	412.1723	138.2680	1.9288	0.3150	0.3174	180분
		장	351.8756	82.1814	-2.3994	0.0696	0.3885	
	영산강(광주)	단	185.4785	97.5953	0.5941	0.1531	-0.1131	60분
장		354.2587	78.4099	-0.6737	-0.0313	0.3859		
Case IV	위 천(대구)	단	-3.038	0.445	344.364	-	-	360분
		장	14.637	0.555	625.628	-	-	
	보청천(청주)	단	-1.808	0.431	398.320	-	-	360분
		장	75.725	0.711	2161.669	-	-	
	평창강(원주)	단	-7.042	0.297	246.923	-	-	120분
		장	65.692	0.693	2280.641	-	-	

2.2.3 유출량 산정방법

본 연구에서는 대표단위도법, Nakayasu 종합단위도법, NRCS 합성단위도법과 Clark 유역추적법에 의거하여 유출량을 산정하였다. 대표단위도는 위천, 보청천, 평창강 유역의 경우 한국건설기술연구원(2000)의 연구결과를 이용하였으며, 낙동강, 금강, 영산강과 섬진강유역의 대표단위도는 건설부(1993)의 연구결과를 이용하였다.

2.2.4 유효우량 산정방법

본 연구에서는 강우기간 동안의 손실률이나 침투능이 일정하다고 가정하는 일정손실률법과 토양특성과 식생피복상태에 관한 자료를 이용하는 SCS 유출곡선지수법(1975)을 이용하여 유효우량을 산정하였으며, 이를 이용하여 임계지속기간의 변화를 검토하였다.

2.2.5 강우 시간분포모형

Pilgrim(1987)이 설계강우의 시간분포에 따라 침투유량과 수문곡선 형상은 50%까지 차이를 보인다고 지적한 바와 같이 다양하게 제시되어 있는 설계강우 시간분포는 침투유량과 수문곡선의 형상뿐만 아니라 최대침투유량과 임계지속기간에도 상당한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 설계강우의 시간분포에 따른 임계지속기간의 변화양상을 파악하고자 Yen과 Chow 시간분포(1980)와 Huff 4분위 시간분포(1967)를 이용하였다.

3. 임계지속기간 산정 및 분석

3.1 재현기간별 임계지속기간 분석

본 절에서는 확률강우량의 재현기간에 따른 임계지속기간의 영향을 검토하고자, 2, 10, 20, 50, 100, 200년의 총 6개 재현기간을 이용하여 임계지속기간을 산정하였다.

고노, 산성지점에 대한 Huff 4분위를 적용한 경우의 재현기간에 따른 지속기간별 침투유량의 변화를 도시한 결과는 그림 1과 2와 같으며, 재현기간에 따른 지속기간별 침투유량의 변화 양상은 나머지 유역에서도 동일하게 나타났다. 또한, Yen과 Chow 시간분포와 Huff 1, 2, 3분위를 적용한 경우

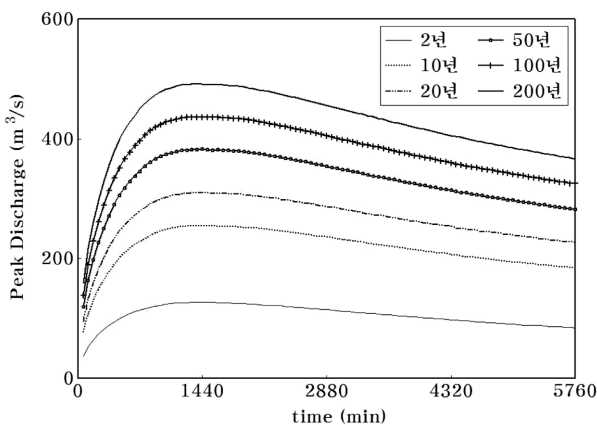


그림 1. 재현기간별 임계지속기간, 고노 (Huff 4분위)

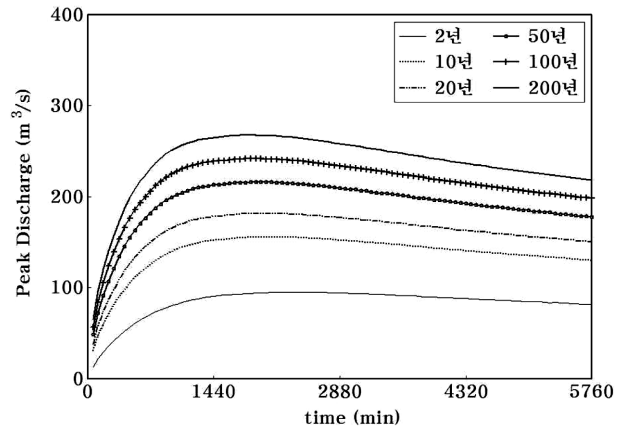


그림 2. 재현기간별 임계지속기간, 산성 (Huff 4분위)

역시 재현기간에 따른 지속기간별 침투유량의 변화양상은 그림 1과 2의 결과와 거의 유사한 형태로 나타났다.

재현기간에 따른 임계지속기간의 영향을 정량적인 값으로 나타내고자 식 (1)과 같은 임계지속기간 변화율을 통하여 재현기간과 임계지속기간의 상관성을 검토하였다.

$$\Delta t_{pi}(\%) = \frac{(t_{pi} - t_{pm})}{t_{pm}} \times 100 \quad (1)$$

여기서 Δt_{pi} 는 재현기간 i 의 임계지속기간 변화율, t_{pi} 는 재현기간 t_{pm} 의 임계지속기간, 은 전체 재현기간의 평균 임계지속기간이다.

재현기간별 임계지속기간 변화율은 표 4와 같으며, 표 4를 살펴보면, 재현기간 2년에서 Huff 1분위가 17.2%로 가장 큰 변화율을 나타낸 점을 제외하고는 설계강우의 시간분포와 재현기간의 차이에도 불구하고 평균 7% 미만의 변화율을 나타내었다. 또한 재현기간 2년에서 임계지속기간 변화율의 폭이 나머지 재현기간에서 보다 크게 나타나긴 했으나 대체적으로 재현기간에 따라서 임계지속기간의 변화율은 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 이후에 이루어지는 임계지속기간에 대한 영향 분석은 50년 빈도에 국한하여 계산을 수행하였다.

3.2 확률강우강도식 형태별 임계지속기간 분석

본 절에서는 확률강우강도식의 형태에 따른 임계지속기간의 영향정도를 검토하기 위하여 4가지 경우의 확률강우강도식을 위천, 보청천, 평창강의 16개 유역에 적용하였다.

위천유역의 무성지점에 대한 확률강우강도식별 임계지속기간의 분석 결과는 그림 3과 4와 같으며, 그림 3과 4를 살펴보면, Case II, III, IV의 확률강우강도식을 적용한 경우 지속기간별 침투유량의 변화양상은 유사하며 최대 침투유량 또한 상당한 차이를 보이지 않으나, Case I의 경우 임계지속기간과 침투유량 모두 나머지 Case와 비교해 볼 때 상당한 차이를 나타내었다. 그러나 임계지속기간에서의 침투유량이 상대적으로 크게 나타난 Case I의 경우는 '80년대 후반에 120분 미만의 단기간 강우자료를 분석하여 제시된 확률강우강도

표 4. 재현기간별 임계지속기간의 변화율

(단위: %)

시간분포형 \ 재현기간	2년	10년	20년	50년	100년	200년	평균
Yen과 Chow 전방위	6.7	2.5	2.2	3.1	3.1	3.2	3.5
Yen과 Chow 중방위	5.4	3.9	2.6	2.7	2.7	3.1	3.4
Yen과 Chow 후방위	6.5	3.9	2.5	2.5	3.2	4.9	3.9
Huff 1분위	17.2	4.1	3.3	5.0	4.7	5.6	6.6
Huff 2분위	5.4	2.4	2.3	1.9	3.2	3.5	3.1
Huff 3분위	5.0	2.7	2.6	1.9	2.2	3.5	3.0
Huff 4분위	6.6	3.4	2.5	2.1	3.0	4.2	3.6

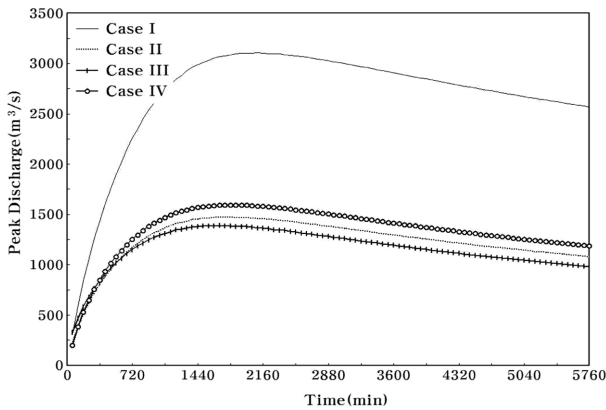


그림 3. 확률강우강도식별 임계지속기간 (위천 무성지점, Yen과 Chow 후방위)

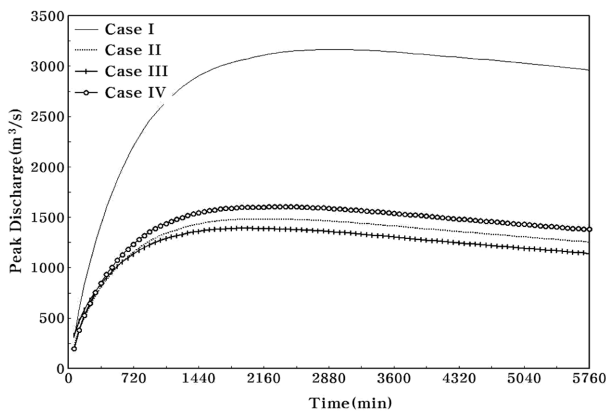


그림 4. 확률강우강도식별 임계지속기간 (위천 무성지점, Huff 4분위)

임을 감안하고, ‘90년대 후반에 비교적 양호한 강우자료분석을 통하여 제시된 Case II, III, IV만을 비교한 경우에 확률강우강도식의 형태차이로 인해 임계지속기간은 다소 영향을 받는 것으로 판단된다.

확률강우강도식 형태에 따른 임계지속기간의 변화양상을 정량적으로 판단하고자 가장 최근의 연구결과인 Case III의 경우를 기준으로 임계지속기간의 비를 산정하였으며, 임계지속기간 평균 비율은 표 5와 같다. 표 5를 살펴보면, 단일형태의 확률강우강도식인 Case I, II를 적용한 경우가 장·단시간 구분형태의 확률강우강도식인 Case III, IV를 적용한 경우에 비해 대체적으로 임계지속기간이 크게 산정되는 것으로 나타났다. 또한 권역별 확률강우강도식으로 제시된 Case IV를 제

외하고 동일지점의 점빈도해석을 통하여 결정된 Case II와 III만을 비교해 볼 때에도 평균 17%의 차이를 보였다.

3.3 유출량 산정방법별 임계지속기간 분석

본 절에서는 유출량 산정방법에 의한 임계지속기간의 영향을 검토하고자 대표단위도법, Nakayasu 종합단위도법, NRCS 합성단위도법 그리고 Clark 유역추적법의 4가지 유출량 산정방법을 이용하였다.

산정된 결과를 바탕으로 설계강우의 시간분포에 상관없이 각 유출량 산정방법에 따른 임계지속기간의 범위를 표 6과 같이 나타내었다. 표 6을 살펴보면, 대상유역에서 임계지속기간은 대표단위도법, NRCS 합성단위도법, Clark 유역추적법 그리고 Nakayasu 종합단위도법 순으로 감소하고 있어 유출량 산정방법에 따라 임계지속기간은 상당한 차이를 나타내고 있다. 따라서 임계지속기간을 고려하여 설계를 수행하게 될

표 5. 확률강우강도식의 형태에 따른 임계지속기간 평균 비율

시간분포형 \ 구분	Case I	Case II	Case III	Case IV
Yen과 Chow 전방위	1.50	1.23	1.00	0.89
Yen과 Chow 중방위	1.37	1.16	1.00	0.90
Yen과 Chow 후방위	1.28	1.13	1.00	0.90
Huff 1분위	1.69	1.27	1.00	0.83
Huff 2분위	1.29	1.13	1.00	0.91
Huff 3분위	1.26	1.12	1.00	0.92
Huff 4분위	1.36	1.14	1.00	0.85

표 6. 유출량 산정방법에 따른 임계지속기간의 변화범위

구분 \ 유역명	대표 단위도법	Nakayasu 종합단위도법	NRCS 합성단위도법	Clark 유역추적법
위 천	960~2,100	420~1,260	480~1,380	480~1,260
보청천	1,200~2,280	360~1,320	600~1,620	600~1,620
평창강	1,200~2,340	240~1,140	180~1,260	420~1,320
낙동강	1,440~3,900	900~3,060	600~3,420	700~3,420
금 강	1,440~3,780	960~2,400	420~2,760	1,020~2,640
영산강	1,260~3,540	780~1,860	420~3,060	900~3,060
섬진강	1,440~3,840	1,140~3,000	960~3,000	900~2,700
전 체	960~3,900	240~3,060	180~3,420	420~3,420

경우 유출량 산정방법별로 동일한 임계지속기간을 고려하는 것은 적절하지 못한 결과를 얻게 될 것으로 판단된다.

3.4 유효우량 산정방법별 임계지속기간 분석

본 절에서는 일정손실률법과 SCS 유출곡선지수법을 이용하여 유효우량 산정방법에 의한 임계지속기간의 영향을 검토하였으며, 일정손실률을 고려한 유효우량주상도는 총우량주상도와 분포양상이 동일한 점을 감안하여 총우량주상도를 일정손실률이 고려된 우량주상도로 가정하여 적용하였다. 임계지속기간에 대한 유효우량 산정방법별 영향을 파악하고자 유출량 산정방법과 확률강우강도식의 형태는 대표단위도와 Case III를 이용하였으며, 44개 중규모 하천유역의 수문학적 조건을 고려하였다.

일정손실률법과 SCS 유출곡선지수법에 따른 대상유역에서의 임계지속기간의 범위는 표 7과 같다. 표 7을 살펴보면, 유역별로 일정손실률법을 이용한 경우가 임계지속기간이 가장 빠르게 나타났으며, SCS 유출곡선지수법의 AMC-II 조건을 이용한 경우가 임계지속기간이 가장 늦게 발생하였다.

3.5 강우 시간분포별 임계지속기간 분석

본 절에서는 설계강우의 시간분포에 따른 임계지속기간의 변화양상을 파악하고자 Yen과 Chow 시간분포와 Huff 4분위 시간분포에 대하여 각각 임계지속기간이 가장 빠르게 나타나는 Yen과 Chow 전방위와 Huff 2분위를 기준으로 설계강우의 시간분포에 따른 임계지속기간을 비교하였으며, NRCS 합성단위도법과 Clark 유역추적법에 의한 결과는 그림 5와 6과 같다.

그림 5와 6을 살펴보면, Yen과 Chow 시간분포는 전방위에서 후방위로 진행해감에 따라 임계지속기간이 증가하는 경향을 보였으나, Huff 4분위 시간분포에서는 1분위에서 큰 값을 보이다가 2분위와 3분위에서 임계지속기간이 작아졌다 다시 4분위에서 가장 큰 임계지속기간의 값을 나타내는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 유출량 산정방법에 관계없이 동일한 양상을 나타내었다.

4. 임계지속기간과 유역특성인자와의 상관분석

본 연구에서는 박종영 등(2004)이 제시한 최대 침투유량을

표 7. 일정손실률법과 SCS 유출곡선지수법에 따른 임계지속기간 (단위: min)

유역명 \ 구분	일정손실률법	SCS 유출곡선지수법	
		AMC-II	AMC-III
위 천	780~1,260	1,320~2,880	960~1,920
보청천	900~2,280	1,560~3,720	1,200~3,000
평창강	960~1,920	1,560~3,180	1,200~2,520
낙동강	960~2,100	2,040~5,640	1,440~3,720
금 강	1,080~2,640	1,920~4,920	1,440~3,720
영산강	1,020~3,780	1,620~5,160	1,260~4,800
섬진강	960~2,220	1,920~5,160	1,440~3,600
전 체	780~3,780	1,320~5,640	960~4,800

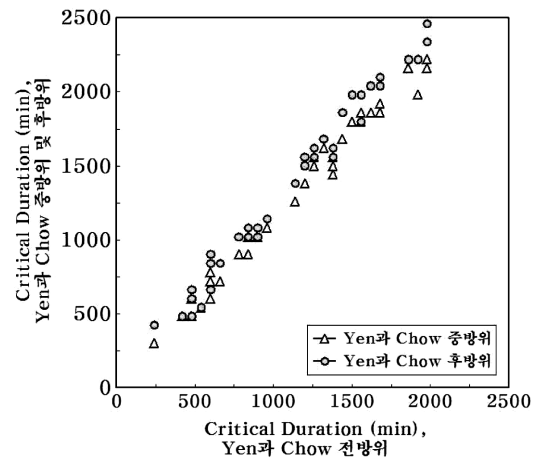


그림 5. Yen과 Chow의 임계지속기간 분석(NRCS 합성단위도법)

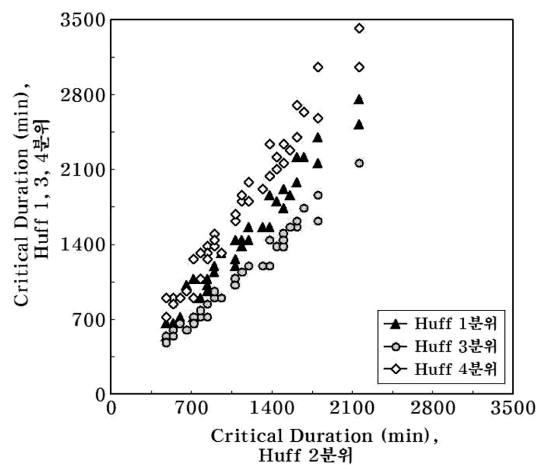


그림 6. Huff 4분위의 임계지속기간 분석(Clark 유역추적법)

발생시키는 시간분포인 Huff 4분위를 대상으로 각 유출량 산정방법별로 임계지속기간과 유역특성인자, 유역응답시간특성인자 그리고 단위도 특성인자들과 상관분석을 실시하였으며, 상관분석을 통하여 상대적으로 높은 상관성을 지니는 인자를 파악하고 이로부터 임계지속기간에 관한 회귀식을 제시하였다.

임계지속기간과의 상관분석을 위한 유역특성인자는 유역면적, 유로연장, 유로경사, 유역경사, 형상계수, 유출곡선지수 등의 6가지 인자를 고려하였고, 유역 응답시간특성인자는 도달시간을 고려하였으며, 단위도 특성인자는 단위도 침투시간을 고려하였다. 유역특성인자와 단위도 특성인자의 상관분석에는 44개의 중규모 하천유역을 이용하였으며, 유역응답 시간특성인자와의 상관분석에는 위천, 보청천, 평창강유역의 16개 지점만을 이용하였다.

4.1 임계지속기간 산정

44개 대상유역에서 Huff의 4분위 모형에 의해 확률강우량을 시간분포시킨 후 SCS 유효우량(1975) 산정법으로 최대 침투유량을 나타내는 강우지속기간을 해당유역에서의 임계지속기간으로 산정하였으며, 해당유역별 대표단위도를 이용하여 결정된 임계지속기간과 최대 침투유량은 표 8과 같다.

표 8. 임계지속기간에서 최대 침투유량 (Huff 4분위)-대표단위도

유역명		임계 지속기간 (min)	최대 침투유량 (m ³ /s)	유역명		임계 지속기간 (min)	최대 침투유량 (m ³ /s)
위천	무 성	2,100	1,388.5	낙동강	예림교	2,880	3,296.2
	병 천	1,920	963.0		밀 양	2,400	3,535.3
	미 성	1,740	566.4		독 산	3,480	5,155.2
	고 노	1,440	384.1		합 천	3,000	2,168.6
	효 령	1,860	488.0		개 진	2,640	2,062.7
보청천	산 계	2,160	1,670.7		동 춘	3,180	3,602.4
	기 대	2,280	1,085.1		금 호	2,880	2,393.4
	탄 부	1,680	281.5		선 산	2,940	2,255.0
	이 평	1,800	298.5		용 곡	3,240	2,863.8
	산 성	1,500	213.2		접 춘	2,340	1,564.4
평창강	방 립	2,340	2,183.3		월 포	3,120	2,422.4
	하반정	1,860	389.3		안 동1	3,900	7,352.6
	상안미	2,220	1,733.6		임 하1	3,060	4,563.0
	백옥포	2,160	623.6		봉 화	3,180	1,443.8
	장 평	1,980	456.4		석 화	3,060	5,891.0
	이목정	1,680	266.1	금강	옥 천	3,780	8,949.6
	영산강	회 진	3,540		4,996.6	용 담	2,280
나 주		3,480	5,315.0		송 정	3,840	12,183.8
납 평		2,100	2,157.0	구 례	3,660	11,329.0	
본 동		3,120	3,718.8	광 천	2,400	3,830.8	
선 암		2,040	2,057.8	압 록	3,540	7,147.9	
마 립		2,280	2,346.7	적 성	2,700	4,964.7	

4.2 유역특성인자와의 상관분석

대상지점별 유역특성인자들을 이용하여 임계지속기간과의 관계를 분석하였다. 분석방법은 유역면적, 유로연장, 유로경사, 유역경사, 형상계수, 유출곡선지수 등의 6가지 인자들에 대하여 임계지속기간과 각 유역특성인자들을 전대수지에 도시하여 경향성을 파악하고, 상관계수를 산정하여 상관성을 파악하였다.

유출량 산정방법별로 산정된 임계지속기간과 유역특성인자간에 산정된 상관계수는 표 9와 같으며, 대표단위도를 적용한 경우의 임계지속기간과 일부 유역특성인자들을 전대수지에 도시한 결과는 그림 7과 8과 같다. 표 9와 그림 7과 8을 살펴보면, 임계지속기간과 유역특성인자의 결정계수가 대표단위도법은 0.07~0.79, Nakayasu 종합단위도법은 0.21~0.90, NRCS 합성단위도법은 0.12~0.50, Clark 유역추적법은 0.07~0.56의 범위로 나타나고 있으며, 유역면적, 유로연장, 유로경사의 결정계수가 나머지 유역특성인자 보다 크게 나타났다. 또한, 유출량 산정방법에 관계없이 형상계수의 결정계수가 0.26~0.46으로 가장 약한 상관성을 나타내었고, 유로연장

의 결정계수가 0.50~0.90으로 가장 강한 상관성을 나타내었다. 따라서 임계지속기간은 다양한 유역특성인자 중 유역면적, 유로연장과 강한 상관을 보이며, 형상계수나 유출곡선지수와는 상관성이 없는 것으로 나타났다.

4.3 유역응답시간과의 상관분석

본 절에서는 비교적 양질의 수문자료가 확보되어 있는 위천, 보청천, 평창강유역의 16개 유역을 대상으로 하여 유역응답시간인 도달시간을 관측 강우-유출자료를 이용하여 결정하고, 결정된 도달시간으로부터 임계지속기간과의 상관계수를 산정하여 중규모 하천유역에서 임계지속기간과 도달시간과의 상관성을 규명코자 하였다.

4.3.1 유역응답시간의 유도

1983년에서 2002년 동안에 걸친 강우-유출 자료로부터 얻은 유출수문곡선을 해석하기 위하여 유효우량은 ϕ -index 방법, 기저유출분리는 경사급변점법을 이용하였다. 분리된 유효우량과 직접유출수문곡선으로부터 각 호우사상별 도달시간을 결

표 9. 임계지속기간과 유역특성인자와의 상관분석 결과 (결정계수)

유출량 산정방법	유역면적	유로연장	유로경사	유역경사	형상계수	유출곡선지수 (AMC-III)
대표단위도법	0.79	0.77	0.53	0.44	0.07	0.30
Nakayasu 종합단위도법	0.81	0.90	0.53	0.48	0.21	0.55
NRCS 합성단위도법	0.40	0.50	0.40	0.35	0.12	0.34
Clark 유역추적법	0.50	0.56	0.50	0.45	0.07	0.26

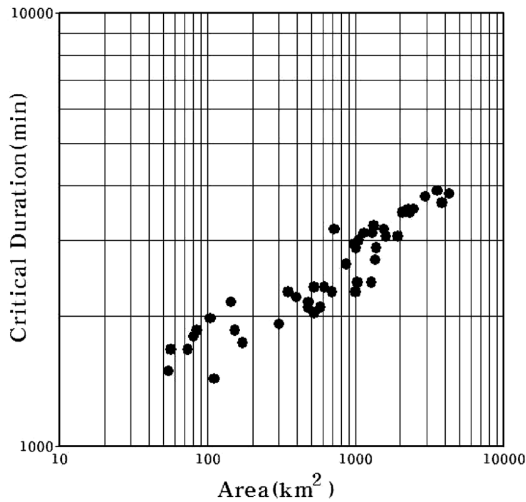


그림 7. 유역면적-임계지속기간 관계(대표단위도법)

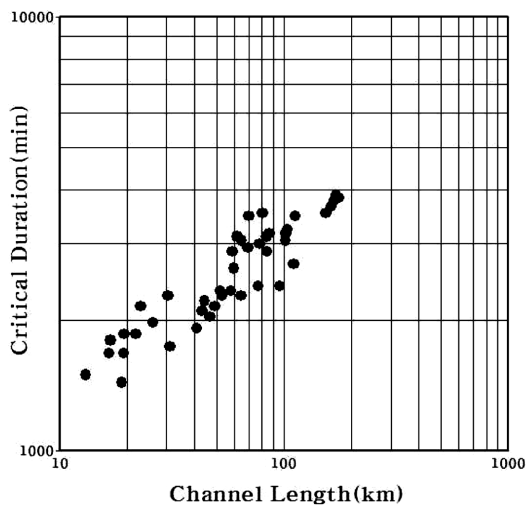


그림 8. 유로연장-임계지속기간 관계(대표단위도법)

정하기 위하여 유효우량 중심에서 직접유출수문곡선의 변곡점 사이의 시간으로 도달시간을 정의하였다.

도달시간 정의에 따라 각 지점별로 도달시간을 결정하였으며, 분석에 이용된 호우사상의 수와 각 유역별 평균도달시간은 표 10과 같다. 표 10을 살펴보면, 위천유역은 387.0~668.4분, 보청천유역은 422.0~931.2분, 평창강유역은 483.6~699.0분으로 도달시간이 나타났다.

4.3.2 실측 유역응답시간과의 상관분석

본 절에서는 도달시간과 임계지속기간과의 상관성을 규명코자 표 11과 같이 유출량 산정방법별로 상관분석을 실시하였다. 대표단위도법, NRCS 합성단위도법을 적용한 경우에 도달시간과 임계지속기간을 전대수지에 도기한 결과는 그림 9와 10과 같다.

임계지속기간과 도달시간의 결정계수가 대표단위도법은 0.49, Nakayasu 종합단위도법은 0.61, NRCS 합성단위도법은 0.53, 그리고 Clark 유역추적법은 0.55로 나타났다.

표 10. 도달시간 결정에 이용된 강우-유출 자료와 결정된 평균 도달시간

유역명		호우사상수	평균도달시간 (min)
위 천	무 성	60개	668.4
	병 천	60개	538.2
	미 성	60개	503.4
	고 노	60개	406.8
	효 령	60개	387.0
보청천	산 계	63개	931.2
	기 대	64개	552.6
	탄 부	61개	508.2
	이 평	65개	547.8
	산 성	62개	422.4
평창강	방 립	54개	699.0
	하반정	47개	523.2
	상안미	46개	687.0
	백옥포	40개	545.4
	장 평	39개	491.4
	이목정	50개	483.6

표 11. 임계지속기간과 실측도달시간과의 상관분석 결과

시간분포	유출량 산정방법	결정계수
Huff 4분위	대표단위도법	0.49
	Nakayasu 종합단위도법	0.61
	NRCS 합성단위도법	0.53
	Clark 유역추적법	0.55

4.4 단위도 특성인자와의 상관분석

본 절에서는 단위도의 특성인자인 단위도의 침투시간과 임계지속기간의 상관성을 분석하였다. 임계지속기간과 단위도 침투시간과의 상관계수는 표 12와 같으며, 유출량 산정방법별 단위도 침투시간과 임계지속기간을 전대수지에 도기한 결과는 그림 11과 12와 같다.

임계지속기간과 단위도 침투시간의 결정계수가 대표단위도법은 0.79, Nakayasu 종합단위도법은 0.90, NRCS 합성단위도법은 0.86, 그리고 Clark 유역추적법은 0.90으로 나타나 높은 상관관계를 나타내었다.

4.5 임계지속기간 산정식의 유도

앞서 수행한 상관분석의 결과를 통하여 임계지속기간은 유출량 산정방법에 관계없이 유역면적, 유로연장, 유로경사, 유역경사와 단위도 침투시간, 도달시간과 높은 상관성을 보이는

표 12. 임계지속기간과 단위도 침투시간과의 상관분석 결과

유출량 산정방법	결정계수
대표단위도법	0.79
Nakayasu 종합단위도법	0.90
NRCS 합성단위도법	0.86
Clark 유역추적법	0.90

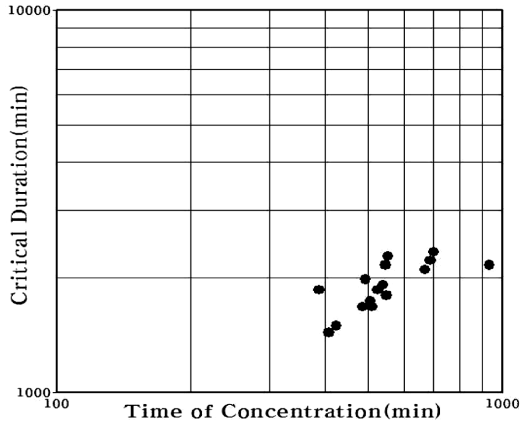


그림 9. 도달시간-임계지속기간 관계(대표단위도법)

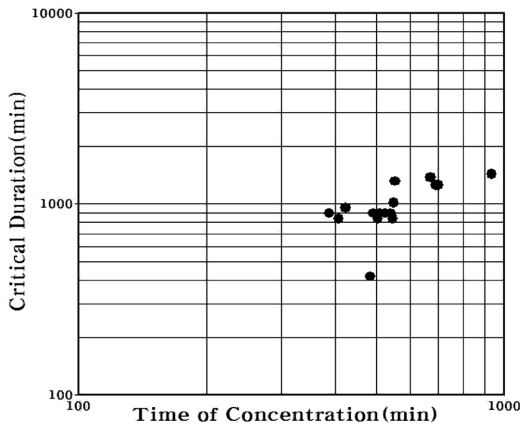


그림 10. 도달시간-임계지속기간 관계(NRCS 합성단위도법)

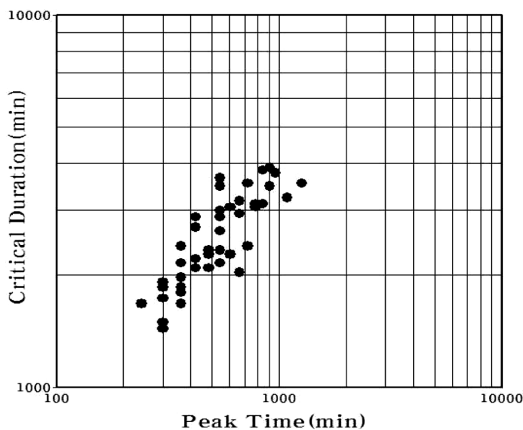


그림 11. 단위도 첨두시간-임계지속기간관계(대표단위도법)

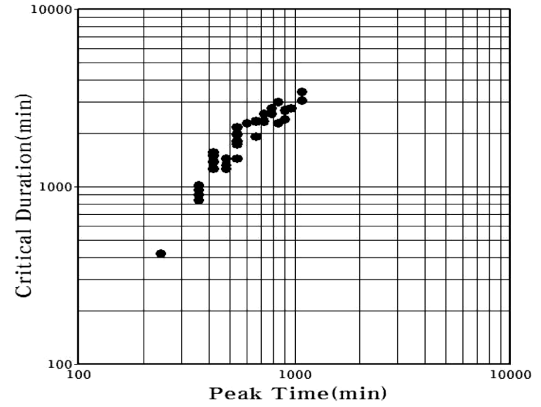


그림 12. 단위도 첨두시간-임계지속기간 관계(NRCS 합성단위도법)

표 13. 다중회귀분석 결과

독립변수	회귀식	표준오차	결정계수
A	$CD = 657.63A^{0.21}$	0.045	0.96
A, L	$CD = 624.49A^{0.15}L^{0.11}$	0.045	0.96
A, S	$CD = 651.69A^{0.21}S^{-0.01}$	0.046	0.96
L, S	$CD = 568.5L^{0.29}S^{-0.06}$	0.048	0.96
A, L, S	$CD = 614.35A^{0.13}L^{0.11}S^{-0.02}$	0.045	0.96
A, L, S_c	$CD = 558.17A^{0.17}L^{0.10}S_c^{0.04}$	0.045	0.97
A, L, S, S_c	$CD = 496.33A^{0.15}L^{0.11}S^{-0.04}S_c^{0.06}$	0.045	0.97

와 임계지속기간과의 다중회귀분석을 실시하였으며, 다중회귀 분석 결과는 표 13과 같다.

다중회귀분석 결과 유도된 회귀식의 결정계수는 모두 0.96 이상으로 나타나 매우 높은 상관성을 지니는 것으로 나타났다. 표 9에서 대표단위도의 임계지속기간과 유역특성인자 상관분석결과 유로경사, 유역경사 등은 낮은 상관성을 보이는 것으로 나타나 독립변수의 수가 증가함에도 결정계수값은 큰 차이를 보이고 있지 않는 것으로 나타났다. 표 13에서 CD 는 임계지속기간(min), A 는 유역면적(km²), L 은 유로연장(km), S 는 유로경사(m/m), S_c 는 유역경사(%)를 의미한다. 표 13에 제시한 다중회귀분석 결과는 유역면적의 증가에 따라 최대 첨두유량을 발생시키는 설계강우의 지속기간은 비례적으로 증가함을 의미하며, 제한적이지만 50~5,000 km²의 중규모 하천 유역에서 임계지속기간을 결정하는데 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 중규모의 하천유역을 대상으로 최대 유출상황을 발생시키는 강우지속기간을 밝혀내고 수문학적 특성에 따른 임계지속기간의 변화를 규명하였다. 이를 위하여 재현기간, 확률강우강도식 형태, 유출량 산정방법, 유효유량 산정방법, 시간분포별 임계지속기간을 분석하여 정성적, 정량적 평가를 수행하였다. 이상의 과정을 통하여 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 확률강우량의 재현기간에 따른 임계지속기간의 영향을

것으로 나타나 이들 인자를 포함하는 임계지속기간 회귀식을 제시하는 것이 가능할 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 일반화된 임계지속기간 산정식의 유도를 위해 시간특성인자는 제외하고 유역특성인자만을 독립변수로 고려하여 다중회귀분석을 제시하고자 한다. 이 때 유역특성인자의 변수선택은 모든 가능한 방법을 통하여 회귀분석을 실시하였다.

따라서 최대의 유출을 발생시키는 모형으로 결정된 Huff 4 분위와 대표단위도법을 통하여 상관성이 높은 유역특성인자

검토하고자, 2, 10, 20, 50, 100, 200년의 총 6개 재현기간을 이용하여 임계지속기간을 산정하였으며, 대체적으로 재현기간에 따라서 임계지속기간의 변화율은 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

- (2) 확률강우강도식의 형태에 따른 임계지속기간의 영향 정도는 단일형태의 확률강우강도식인 Case I, II를 적용한 경우가 장·단시간 구분형태의 확률강우강도식인 Case III, IV를 적용한 경우에 비해 대체적으로 임계지속기간이 크게 산정되는 것으로 나타났다. 특히 단일형태의 확률강우강도식이나 장·단시간 구분형태의 확률강우강도식에 의해 임계지속기간의 차이는 다소 발생하는 것으로 나타났다.
- (3) 유출량 산정방법과 유효우량 산정방법에 의한 임계지속기간의 영향 정도는 유출량 산정방법의 경우 대표단위도법, NRCS 합성단위도법과 Clark 유역추적법 그리고 Nakayasu 종합단위도법 순으로 감소하고 있으며, 유효우량 산정방법의 경우 일정손실률법, SCS 유출곡선지수법 AMC-III, AMC-II 순으로 증가하는 것으로 나타나 유출량 산정방법과 유효우량 산정방법이 임계지속기간의 결정에 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- (4) 강우 시간분포의 경우 Yen과 Chow 시간분포는 후방위에서 Huff 4분위 시간분포에서는 4분위에서 최대 임계지속기간을 나타내었다.
- (5) 중규모 하천유역에서 임계지속기간과 유역특성인자와 상관분석을 실시한 결과 유역특성인자 중에서 유역면적, 유로연장, 유로경사와 임계지속기간은 밀접한 상관성을 나타냈으나, 형상계수나 유출곡선지수와는 무작위성을 보였다. 또한, 단위도 침투시간과 임계지속기간 역시 상당히 밀접한 상관성을 나타내었다.
- (6) 중규모 하천유역에서 대표단위도법을 이용하여 유역특성인자와 임계지속기간과의 다중회귀분석을 실시한 결과 임계지속기간은 다양한 유역특성인자들의 직접적인 지배를 받으며, 특히 유역면적과 높은 상관관계를 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의해서 연구된 논문으로 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 건설교통부 (1989) 금강 홍수에경보 프로그램 개발 최종보고서.
 건설교통부 (1995) 낙동강수계 유출 프로그램 개선.
 건설교통부 (2000a) 한국 확률강우량도 작성, 수자원관리기법개발 연구조사 보고서, 제1권.
 건설부 (1983~2002) 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서.
 건설부 (1993) 수자원관리기법개발연구조사 보고서 별책부록 설계 홍수추정지침서.
 건설부 (1988) 섬진강 홍수에경보 프로그램 개발 최종보고서.
 건설부 (1991) 영산강 홍수에경보 프로그램 개발 최종보고서.
 박종영, 신창동, 이정식 (2004) 중규모 하천유역에서 설계강우의 임계지속기간에 관한 연구. 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제37권, 제9호, pp.695~706.
 이재준, 이정식 (1999) 우리나라 도시배수시스템 설계를 위한 확률강우강도식의 유도. 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제32권, 제4호, pp.403-415.
 이재준, 이정식, 박종영 (2001) 계획강우량 설정을 위한 권역별 확률강우강도식의 유도. 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제21권, 제1-B호, pp.1~10.
 한국건설기술연구원 (2000) 시험유역의 운영 및 수문특성 조사 및 P³-합성단위도 개발을 중심으로.
 Huff, F. A. (1967) Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research*, Vol.3, No.4, pp.1007~1019.
 Levy, B., and McCuen, R. (1999) Assessment of storm duration for hydrologic design, *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol.4, No.3.
 Ponce, V. M. (1989) *Engineering Hydrology Principles and Practices*, Prentice Hall.
 Pilgrim, D. H. (1987) *Australian Rainfall and Runoff - A Guide Flood Estimation-*, Institution of Engineers.
 Soil Conservation Service (1975) Urban Hydrology for Small Watersheds, *Technical Release No.55*, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
 Yen, B. C., and Chow, V. T. (1980) Design hyetographs for small drainage structures. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol.106, No.HY6, pp.1055~1076.

- ◎ 논문접수일 : 08년 11월 11일
- ◎ 심사의뢰일 : 08년 11월 11일
- ◎ 심사완료일 : 09년 2월 12일