韓國水資源學會論文集
第37卷 第9號 · 2004年 9月
pp. 695~706

중규모 하천유역에서 설계강우의 임계지속기간에 관한 연구

A Study on the Critical Duration of Design Rainfall in Midsize Catchment

박 종 영* / 신 창 동** / 이 정 식***
Park, Jong Young / Shin, Chang Dong / Lee, Jung Sik

Abstract

This study is to propose the temporal pattern of design rainfall which causes maximum peak discharge, and to analyze the relation of catchment characteristics and critical durations for gauged midsize catchment. Hydrologic analysis has done over the 44 midsize catchments with 50~5,000㎢. The type of temporal pattern of design rainfall which causes maximum peak discharge has resulted in Huff's 4 quartile distribution method for effective rainfall(AMC Ⅲ). The peak discharges of 24hr rainfall duration are similar to those of critical duration for 50~600㎢, and the peak discharges of 48hr rainfall duration are similar to those of critical duration for 600~5,000㎢. Therefore, if the proper rainfall intensity formula is selected, 24hr or 48hr rainfall duration may be regarded as the critical duration of midsize catchment. A simple regression equation is derived by using a catchment area and critical duration with high correlation for the case of effective rainfall(AMC Ⅲ). Therefore, it can be used to determine the critical duration of ungauged catchment with 50~5,000㎢. Also, dimensionless regression equation is derived by using characteristic values of unit hydrograph.

Keywords : time of concentration, critical duration, temporal pattern of design rainfall, 24hr rainfall duration

요 지

본 연구는 실측자료가 확보된 중규모 하천유역에서 최대 첨두유량을 발생시키는 설계강우의 시간분포모형을 밝혀내고, 결정된 시간분포모형을 바탕으로 하여 유역특성과 임계지속기간의 관계를 규명하는 것이다. 50~5,000㎢의 44개 유역을 통하여 수문분석을 실시하였으며, SCS 유효우량 산정방법으로 결정된 유효우량을 사용하여 최대 첨두유량을 발생시키는 시간분포모형은 Huff의 4분위 시간분포모형으로 나타났다. 유역면적 50~600㎢인 유역에서는 24시간 강우지속기간의 첨두유량과 임계지속기간의 첨두유량은 유사한 값을 보이며, 유역면적 600~5,000㎢인 유역에서는 48시간 강우지속기간의 첨두유량과 임계지속기간의 첨두유량이 유사한 값을 보였다. AMC Ⅲ 조건의 유효우량에 대하여 높은 상관성을 지니는 유역면적과 임계지속기간의 관계식을 유도하였으며, 유역면적 50~5,000㎢의 중규모 하천유역에서 임계지속기간을 결정하는데 유용한 식으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 단위도 특성치를 이용한 무차원 회귀식을 유도하였다.

핵심용어 : 도달시간, 임계지속기간, 설계강우의 시간분포, 24시간 강우지속기간

* 금오공과대학교 대학원 토목공학과 박사과정
Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Gyeongbuk 730-701, Korea (E-mail : hydro@kumoh.ac.kr)
** 금오공과대학교 대학원 토목공학과 박사과정
Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Gyeongbuk 730-701, Korea
*** 금오공과대학교 토목환경공학부 교수
Prof. School of Civil and Environmental Engrg., Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Gyeongbuk 730-701, Korea

1. 서 론

온난화 현상으로 인한 지구의 기온상승은 전 세계적으로 기상이변현상을 유발하고 있으며, 이러한 기상이변현상은 이전의 기상현상과는 다른 국지성 호우 발생과 강우량의 증가현상으로 나타나고 있다. 국내에서는 1997년 이후부터 국지성 호우로 인한 피해가 빈번하게 발생하였으며, 국지성 호우로 인해 발생한 홍수량의 규모 또한 기존의 시설물들을 위협할 수준에 이르기까지 하였다. 따라서 기존의 시설물들의 안정성 여부와 더불어 신규 구조물의 안정성을 확보하기 위해 소규모에서 대규모에 이르는 수공구조물들의 빈도가 새롭게 제시되어야 한다는 주장이 제기되었고, 실제로 PMP 규모에 해당하는 2002년 8월 강릉지방의 홍수규모를 통해 수공구조물의 빈도조정에 관한 사항은 보다 설득력을 얻게 되었다. 또한, 설계홍수량의 결정에 있어 보다 세심한 주의가 필요한 것으로 인식되었다.

설계홍수량을 결정하는 과정은 최근까지도 하천규모에 따라 적절한 설계강우의 빈도를 채택하고, 채택된 빈도에 대하여 유역에서의 도달시간인 강우지속기간에 따라 강우량을 시간적으로 분포시킨 후 유출모형이나 단위도를 통하여 설계홍수량을 결정하고 있다. 그러나 최근의 기상이변현상으로 인한 해당유역의 홍수량 증가는 수공구조물의 안전에 크나큰 위험요소가 되므로, 최근의 경우에는 설계홍수량의 규모를 결정하는데 있어 강우 지속기간별로 최대 첨두유량을 나타내는 임계치의 설계홍수량 즉, 임계지속기간을 고려하여 결정된 설계홍수량을 적용하거나 혹은 설계강우의 시간분포모형에서 과거에 단순히 50% 누가확률곡선을 일률적으로 적용하는데서 벗어나 90%의 누가확률곡선을 적용하는 등 설계수문량 결정을 위한 새로운 방안들이 다각적으로 제시되고 있다. 이중 임계지속기간을 고려한 첨두유량을 적용하는 것이 현재로는 가장 바람직한 설계홍수량 추정방법으로 여겨지고 있다. 그러나 최대 첨두유량을 발생시키는 설계강우의 시간분포모형, 유효우량 분리에 따른 임계지속기간의 변화, 재현기간에 따른 임계지속기간, 임계지속기간과 기존 도달시간 산정식과의 관계 등 임계지속기간과 관련된 많은 부분들이 명확하게 규명된 바가 없어 수문 설계에 있어 가장 근간이 되는 설계강우량 결정에 아직도 많은 혼란이 야기되고 있는 실정이다.

설계강우의 지속기간을 선정하는 기준으로 호주(Pilgrim, 1987)에서는 설계강우의 지속기간 변화에 따라 가장 최대 첨두유량을 보이는 강우지속기간을 결정하도록 하고 있으며, 영국(Houghton-Carr, 1999)의 경우는 4단계별 설계기준에 근거하여 단위도 첨두시간과 표준 연평균강우량으로 표현되는 설계강우 지속기간식을 이용하고 있다. 미국(ASCE, 1992)에서는 설계강우의 지속기간 결정에 유역의 수문학적 시간응답특성이 고려되어야 하며, 역시 다양한 지속기간에 대하여 최대유량을 발생시키는 설계강우의 지속기간을 결정하도록 권고하고 있다. 그러나 국내의 경우 설계강우의 지속기간을 선정하는 기준으로 부분적이나마 임계지속기간의 개념이 도입되고 있지만 아직까지 구체적인 기준이 제시되어 있지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 중규모 하천유역을 대상으로 최대 첨두유량을 발생시키는 설계강우의 시간분포모형을 결정하고, 결정된 시간분포모형을 이용하여 지속기간의 변화에 따른 첨두유량의 변동성을 파악한 후 중규모 하천유역에서의 임계지속기간을 규명하고자 한다. 또한, 24시간 강우지속기간과 임계지속기간의 첨두유량 변화율을 이용하여 국내 실무에서 정확한 검증없이 이용되고 있는 24시간 강우지속기간의 유효성을 검토하며, 유역특성과 임계지속기간과의 관계를 밝히고 단위도 특성치를 이용한 무차원 회귀식을 유도함으로써 향후 중규모 하천유역에서의 수문량 산정에 기초연구자료를 제시하고자 한다.

이를 위하여 3개 국제수문개발계획 대표시험유역과 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강유역의 44개 지점에서 설계강우량을 구하고 Yen과 Chow의 시간분포모형과 Huff의 시간분포모형을 대표단위도에 적용하여 유출수문곡선을 구한 후 강우특성과 유출특성을 비교 분석한다. 그리고 임계지속기간의 수문학적 특성을 규명하기 위하여 유역면적과 임계지속기간, 단위도의 특성치와 임계지속기간과의 회귀분석을 실시한다.

2. 대상유역 및 기본자료

본 연구에서는 중규모 하천유역을 대상으로 설계강우의 수문학적 분석을 실시하고자 한다. 중규모 하천유역은 유역면적의 크기만으로 판단하기는 어려우나 Ponce(1989)가 제시한 바와 같이 유역특성에 따라 100~5,000㎢의 면적을 가지는 유역으로 정의하거나, 국내 실무에서 적용하는 바와 같이 25~1,000㎢으로 간주하기도 한다. 본 연구에서는 중규모 하천유역의 범위를 50~5,000㎢로 설정하였으며, 이를 기준으로 국제수문개발계획 대표시험유역인 위천, 보청천, 평창강의 16개 지점과 낙동강의 14개, 금강의 3개, 영산강의 6개, 섬진강의 5개 지점 등 총 44개 지점을 대상유역으로 선정하였

다. 대상유역의 특성은 표 1에 제시된 바와 같다.

유출곡선지수 CN은 최대의 유출상황을 고려하고자 유출곡선지수는 AMC-Ⅲ 조건으로 적용하였으며, CN값은 건설교통부(1995), 건설부(1989, 1991a, 1991b)와 한국건설기술연구원(2001)의 연구결과에 제시되어 있는 CN값을 면적별 가중치를 고려하여 대상지점별로 산정하였다.

강우지속기간의 변화에 따른 첨두유량을 산정하기 위하여 건설교통부(2000a)에서 제안한 식 (1)과 같은 확률강우강도식을 이용하였으며, 이재준 등(2001)에 의해 제시된 바와 같이 강우의 동질성이 인정되는 권역별로 대구, 청주, 원주, 대전, 전주, 광주지방을 대표지점으로 선정하였다. 지속기간은 1시간부터 96시간까지 1시간 간격으로 적용하였으며, 확률강우량의 재현기간은 50년으로 하였다.

표 1. 대상유역의 특성

유역명		유역 면적 (㎢)	유로 연장 (㎞)	도달 시간 (min)	Curve Number (AMC-Ⅲ)	유역명		유역 면적 (㎢)	유로 연장 (㎞)	도달 시간 (min)	Curve Number (AMC-Ⅲ)
위천	무 성	472.5	42.83	420	82	낙동강	예림교	1,360.5	83.63	420	76
	병 천	302.1	40.65	300	82		밀 양	1,265.0	76.64	360	77
	미 성	171.3	30.90	300	84		독 산	2,298.0	111.72	540	73
	고 노	109.7	18.90	300	86		합 천	1,042.0	77.71	540	74
	효 령	151.0	21.80	360	81		개 진	856.0	59.45	540	71
보청천	산 계	475.7	49.00	540	89		동 촌	1,544.0	85.70	660	72
	기 대	346.5	30.32	480	85		금 호	1,002.0	58.78	540	72
	탄 부	72.5	19.20	360	84		선 산	977.3	68.92	660	71
	이 평	79.5	16.81	360	83		용 곡	1,317.8	103.53	1,080	73
	산 성	53.7	13.01	300	83		점 촌	608.0	57.90	540	75
평창강	방 림	519.7	51.85	480	82		월 포	1,134.5	83.17	780	74
	하반정	84.0	19.30	300	81		안동 1	3,530.1	169.77	900	71
	상안미	396.3	44.20	420	82		임하 1	1,917.0	101.46	780	70
	백옥포	142.3	22.95	360	83		봉 화	712.5	101.57	660	73
	장 평	103.6	25.95	360	82	금강	석 화	1,590.4	64.55	600	80
	이목정	55.9	16.55	240	84		옥 천	2,942.6	167.13	960	75
영산강	회 진	2,249.7	80.11	1,260	85		용 담	989.5	64.16	600	75
	나 주	2,058.7	69.56	900	91	섬진강	송 정	4,255.7	175.48	840	72
	남 평	576.2	43.01	480	81		구 례	3,805.4	161.91	540	72
	본 동	1,288.2	61.62	840	86		광 천	1,019.3	95.31	720	71
	선 암	521.1	46.68	660	85		압 록	2,447.5	153.27	720	72
	마 륵	684.0	52.75	600	89		적 성	1,350.8	110.09	420	72

표 2. 대상유역의 확률강우강도식 회귀계수

유역명 (대표지점)	기 간	*a*	*b*	*c*	*d*	*n*	장·단분리 경계시간
위 천 (대구)	단기간	147.9781	98.0911	0.2046	0.1725	-0.0518	90분
	장기간	310.0363	66.9800	-1.8327	-0.0354	0.4384	
보청천 (청주)	단기간	206.9811	93.6890	0.1992	0.1380	-0.0266	60분
	장기간	194.5685	67.0847	-1.7755	0.0855	0.0791	
평창강 (원주)	전기간	368.0955	126.2754	1.0182	0.1342	0.2777	-
낙동강 (대구)	단기간	147.9781	98.0911	0.2046	0.1725	-0.0518	90분
	장기간	310.0363	66.9800	-1.8327	-0.0354	0.4384	
금 강 (대전)	단기간	157.7852	98.5065	0.1822	0.1356	-0.2843	90분
	장기간	521.6633	101.0004	-0.1721	-0.0005	0.5153	
섬진강 (전주)	단기간	412.1723	138.2680	1.9288	0.3150	0.3174	180분
	장기간	351.8756	82.1814	-2.3994	0.0696	0.3885	
영산강 (광주)	단기간	185.4785	97.5953	0.5941	0.1531	-0.1131	60분
	장기간	354.2587	78.4099	-0.6737	-0.0313	0.3859	

$$I(t,\ T) = \frac{a + b \ln \frac{T}{t^n}}{c + d \ln \frac{\sqrt{T}}{t} + \sqrt{t}} \qquad (1)$$

여기서 $I(t, T)$는 강우강도(㎜/hr), t는 강우지속기간(min), T는 재현기간(년)이며, a, b, c, d, n은 각 지점마다 산정되는 회귀계수이다. 대상유역의 회귀계수는 표 2와 같다.

수문량 산정에 이용되는 대표단위도는 위천, 보청천, 평창강유역의 경우 한국건설기술연구원(2000)의 연구결과를 이용하였으며, 낙동강, 금강, 영산강과 섬진강유역의 대표단위도는 건설부(1993)의 연구결과를 이용하였다.

3. 설계강우의 시간분포모형 분석

3.1 설계강우의 시간분포모형

설계강우의 시간분포는 중규모 하천유역의 수문학적 응답에서 주된 역할을 하는 인자로 대상유역에서 적정 시간분포를 선택함으로써 첨두유량, 첨두시간, 유출용적 등을 정확히 산정할 수 있다. 국내에서 검토된 바 있는 시간분포모형으로는 Mononobe의 시간분포모형, Yen과 Chow의 시간분포모형, Huff의 시간분포모형, Keifer와 Chu의 시간분포모형 등이 있으나 본 연구에서는 국내 실무에서 널리 사용하고 있는 Yen과 Chow의 시간분포모형과 Huff의 시간분포모형을 이용하였으며, 각 방법에 대해 기술하면 다음과 같다.

3.1.1 Yen과 Chow의 시간분포모형

Yen과 Chow(1980)는 모멘트를 이용한 통계학적 분석방법으로 무강우가 없는 연속호우의 시간분포를 삼각형과 사다리꼴 우량주상도로 단순화하였다. 본 연구에서는 Yen과 Chow의 삼각형 우량주상도를 이용하였으며 첨두강우강도는 다음과 같다.

$$i_P = \frac{2P}{t_D} \qquad (2)$$

여기서 i_P는 강우강도(㎜/hr), P는 총 강우량(㎜), t_D는 강우지속기간(hr)이다.

Yen과 Chow의 시간분포모형에서는 첨두강우강도의 위치를 호우진행계수 $a°$로 정의하였으며, 첨두강우의 위치는 평균적으로 약 $0.375\,t_D$인 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 Yen과 Chow의 시간분포모형의 적용을 위하여 이정식 등(2001)이 검토한 바와 같이 무차원 호우진행계수 $a°$값을 강우지속기간의 중앙에서 25%씩 가감한 위치에서 첨두강우 위치를 발생시켰으며, 각각 전방집중형, 중앙집중형, 후방집중형이라고 하였다.

3.1.2 Huff의 시간분포모형

Huff(1967)는 미국 Illinois주의 강우기록을 통계학적으로 분석하여 강우의 시간분포를 나타내는 무차원 시간분포곡선을 제시하였으며, 강우의 누가곡선을 이용하여 전 지속기간을 4등분 하였을 때 각 분류된 구간의 우량의 최대부위가 어느 부분에서 나타나는지 조사하였다. 즉, 강우지속기간을 4등분 하였을 때 강우초기에 해당하는 처음 1/4구간을 제1분위호우, 다음 2/4구간에 있으면 제2분위호우, 다음 3/4구간에 있으면 제3분위호우, 그리고 마지막 구간일 경우는 제4분위호우로 하였다.

Huff의 시간분포모형은 첨두우량이 발생하는 위치를 지속시간을 축으로 4개 분위로 나누고, 각 분위마다 해당 지점의 관측자료로부터 회귀분석을 통하여 분포시키는 방법이기 때문에 해당 지점의 강우특성을 고려할 수 있다는 장점이 있다. 이 모형은 개념상 비교적 단순하면서도 물리적으로도 의미를 가지고 있으며, 대량의 강우자료에 대해서도 짧은 시간내에 계산이 가능하기 때문에 많이 사용되고 있다. Huff의 시간분포모형은 지역의 통계치로부터 산정되어야 하나 Huff의 시간분포모형의 특성상 발생 첨두위치는 4분위 중 어느 한 분위에 속하게 되는 점과 기존의 권역별 강우강도식의 유도에 관한 연구결과에서 해당 유역들이 동질성을 지니는 동일권역에 속하는 점 등을 감안하므로 본 연구에서는 대상유역에 대하여 대구, 청주, 원주, 대전, 전주, 광주지방의 50% 무차원확률곡선을 이용하여 첨두강우 위치를 선정하였다(건설교통부, 2000b).

3.2 최대 첨두유량을 발생시키는 설계강우의 시간분포모형

3.2.1 설계강우의 시간분포모형에 따른 유출변화

본 연구에서는 중규모 하천유역에서 설계강우의 시간분포모형별로 유출량의 변화를 분석하기 위하여 SCS 유효우량산정법으로부터 결정된 유효우량을 입력강우로 하였으며, 대표단위도에 의거하여 유출수문곡선을 구하였다.

이 때 설계강우의 시간분포모형이 유출량에 미치는 영향을 파악하기 위한 인자로는 첨두유량, 첨두유량 변화율, 첨두시간 변화율을 선정하였으며, 기준값으로는 강우지속기간 동안 일정한 강우강도인 유효우량의 균등강우강도 적용시의 결과를 사용하였다. 첨두유량과 첨두시간의 변화율을 식으로 나타내면 각각 식 (3)과 (4)와 같다.

$$\Delta Q_{pk}(\%) = \frac{(Q_{pk} - Q_{pr})}{Q_{pr}} \times 100 \quad (3)$$

여기서 ΔQ_{pk}는 방법 k의 첨두유량의 변화율, Q_{pk}는 방법 k의 첨두유량, Q_{pr}은 균등강우강도 적용시의 첨두유량이다.

$$\Delta t_{pk}(\%) = \frac{(t_{pk} - t_{pr})}{t_{pr}} \times 100 \quad (4)$$

여기서 Δt_{pk}는 방법 k의 첨두시간의 변화율, t_{pk}는 방법 k의 첨두시간, t_{pr}은 균등강우강도 적용시의 첨두시간이다.

본 연구에서는 대상유역에서 대표단위도를 이용하여 시간분포별 유출변화를 분석하였으며, 표 3과 4는 위천유역과 금강유역의 분석결과이다. 그림 1~8은 44개 지점중 8개 지점에서의 시간분포모형별 지속기간에 따른 첨두유량의 변화를 도시한 결과이다.

표 3과 4을 살펴보면, 첨두유량 변화율은 Yen과 Chow 시간분포모형의 경우 후방집중형, Huff 시간분포모형의 경우 4분위가 가장 크게 나타났다. 첨두유량은

표 3. 설계강우의 시간분포모형별 유출분석결과의 비교(위천)

방법 \ 항목			첨두유량		첨두시간		균등강우강도		
			Q_{pk} (㎥/s)	ΔQ_{pk} (%)	t_{pk} (min)	Δt_{pk} (%)	Q_{pr} (㎥/s)	t_{pr} (min)	I_{pr} (㎜/hr)
무성	Yen과 Chow	전	1,224.9	21.2	1,380	91.7	1,010.4	720	10.6
		중	1,318.3	30.5	1,500	108.3	1,010.4	720	10.6
		후	1,389.5	37.5	1,680	133.3	1,010.4	720	10.6
	Huff	1	1,123.0	11.1	1,860	158.3	1,010.4	720	10.6
		2	1,303.5	29.0	1,500	108.3	1,010.4	720	10.6
		3	1,299.3	28.6	1,380	91.7	1,010.4	720	10.6
		4	1,388.5	37.4	2,100	191.7	1,010.4	720	10.6
병천	Yen과 Chow	전	832.6	20.7	1,140	72.7	689.9	660	11.1
		중	895.2	29.8	1,260	90.9	689.9	660	11.1
		후	948.3	37.5	1,500	127.3	689.9	660	11.1
	Huff	1	760.1	10.2	1,620	145.5	689.9	660	11.1
		2	887.6	28.7	1,260	90.9	689.9	660	11.1
		3	883.1	28.0	1,260	90.9	689.9	660	11.1
		4	963.0	39.6	1,920	190.9	689.9	660	11.1
미성	Yen과 Chow	전	497.6	23.5	1,140	72.7	402.8	660	11.1
		중	534.5	32.7	1,260	90.9	402.8	660	11.1
		후	564.2	40.1	1,320	100.0	402.8	660	11.1
	Huff	1	455.4	13.1	1,500	127.3	402.8	660	11.1
		2	528.8	31.3	1,140	72.7	402.8	660	11.1
		3	526.6	30.7	1,200	81.8	402.8	660	11.1
		4	566.4	40.6	1,740	163.6	402.8	660	11.1
고노	Yen과 Chow	전	342.5	17.6	960	60.0	291.2	600	12.8
		중	366.7	25.9	1,200	100.0	291.2	600	12.8
		후	384.5	32.0	1,200	100.0	291.2	600	12.8
	Huff	1	314.6	8.0	1,380	130.0	291.2	600	12.8
		2	363.6	24.9	1,080	80.0	291.2	600	12.8
		3	361.0	24.0	1,020	70.0	291.2	600	12.8
		4	384.1	31.9	1,440	140.0	291.2	600	12.8
효령	Yen과 Chow	전	423.2	8.3	1,200	100.0	390.8	600	12.8
		중	456.3	16.8	1,380	130.0	390.8	600	12.8
		후	482.7	23.5	1,440	140.0	390.8	600	12.8
	Huff	1	395.7	1.3	1,560	160.0	390.8	600	12.8
		2	451.5	15.5	1,200	100.0	390.8	600	12.8
		3	449.6	15.0	1,200	100.0	390.8	600	12.8
		4	488.0	24.9	1,860	210.0	390.8	600	12.8

위천유역의 무성과 고노지점에서는 Yen과 Chow 시간분포모형의 후방집중형이 가장 큰 값을 보였으며 병천, 미성, 효령은 Huff 시간분포모형의 4분위가 가장 큰 값을 나타났다. 금강유역은 전체적으로 Huff 시간분포모형의 4분위가 가장 큰 값을 나타냈다.

첨두시간은 전반적으로 균등강우강도 적용시보다 길어지고 있으며, 첨두시간 변화율은 Yen과 Chow의 시간분포모형의 경우 전방집중형에서 후방집중형으로 감에 따라 증가하고 있으나 Huff의 시간분포모형은 2분위와 3분위에서 감소하였다가 4분위에서 다시 증가하는 양상을 나타내었다.

보청천, 평창강, 낙동강, 영산강과 섬진강유역에서의 분석 결과도 위천유역과 금강유역의 결과와 동일하게 나타났다. 따라서 설계강우의 시간분포모형별 첨두유량과 첨두시간 변화율을 검토한 결과 설계 강우주상도의 첨두위치가 후반부에 위치하는 설계강우의 시간분포모형이 최대 첨두유량을 발생시키는 것으로 나타났다. 또한 그림 1~8에서도 첨두위치가 후반부에 위치한 Huff의 4분위모형이 최대 첨두유량을 보이고 있음을 알 수 있다.

표 4. 설계강우의 시간분포모형별 유출분석결과의 비교(금강)

방법 \ 항목			첨두유량		첨두시간		균등강우강도		
			Q_{pk} (㎥/s)	ΔQ_{pk} (%)	t_{pk} (min)	Δt_{pk} (%)	Q_{pr} (㎥/s)	t_{pr} (min)	I_{pr}(㎜/hr)
석화	Yen과 Chow	전	5,190.8	13.5	1,920	88.2	4,573.3	1,020	14.5
		중	5,532.2	21.0	1,980	94.1	4,573.3	1,020	14.5
		후	5,764.8	26.1	2,280	123.5	4,573.3	1,020	14.5
	Huff	1	4,910.6	7.4	2,340	129.4	4,573.3	1,020	14.5
		2	5,452.7	19.2	1,860	82.4	4,573.3	1,020	14.5
		3	5,493.0	20.1	1,920	88.2	4,573.3	1,020	14.5
		4	5,891.0	28.8	3,060	200.0	4,573.3	1,020	14.5
옥천	Yen과 Chow	전	7,841.1	15.0	2,580	72.0	6,816.7	1,500	11.0
		중	8,371.7	22.8	2,940	96.0	6,816.7	1,500	11.0
		후	8,732.8	28.1	3,240	116.0	6,816.7	1,500	11.0
	Huff	1	7,397.9	8.5	3,420	128.0	6,816.7	1,500	11.0
		2	8,246.8	21.0	2,700	80.0	6,816.7	1,500	11.0
		3	8,306.4	21.9	2,700	80.0	6,816.7	1,500	11.0
		4	8,949.6	31.3	3,780	152.0	6,816.7	1,500	11.0
용담	Yen과 Chow	전	3,608.8	17.8	1,440	84.6	3,064.3	780	15.2
		중	3,873.6	26.4	1,740	123.1	3,064.3	780	15.2
		후	4,056.0	32.4	1,800	130.8	3,064.3	780	15.2
	Huff	1	3,405.3	11.1	2,040	161.5	3,064.3	780	15.2
		2	3,805.6	24.2	1,500	92.3	3,064.3	780	15.2
		3	3,835.2	25.2	1,680	115.4	3,064.3	780	15.2
		4	4,191.3	36.8	2,280	192.3	3,064.3	780	15.2

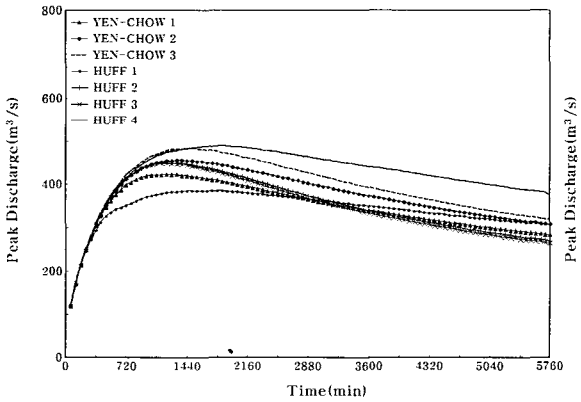

그림 1. 시간분포모형별 지속시간에 따른 첨두유량의 변화(효령지점)

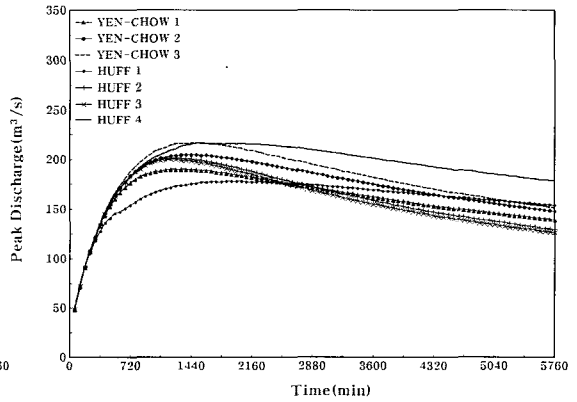

그림 2. 시간분포모형별 지속시간에 따른 첨두유량의 변화(산성지점)

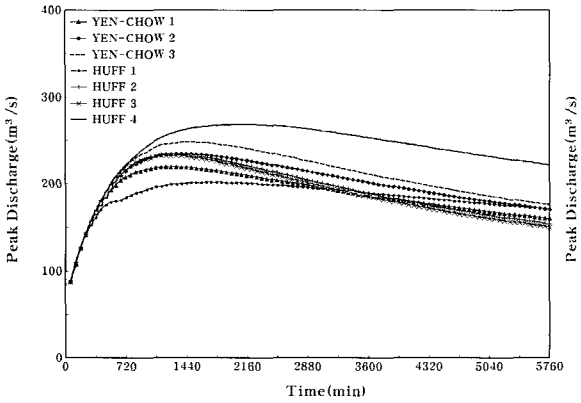

그림 3. 시간분포모형별 지속시간에 따른 첨두유량의 변화(이목정지점)

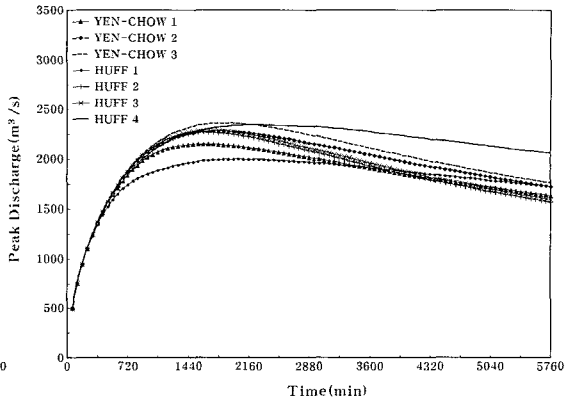

그림 4. 시간분포모형별 지속시간에 따른 첨두유량의 변화(마륵지점)

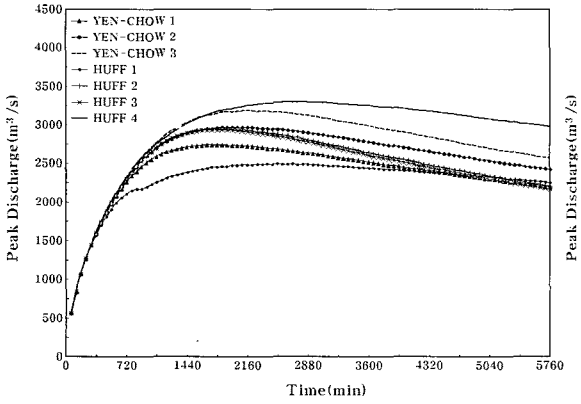

그림 5. 시간분포모형별 지속시간에 따른 첨두유량의 변화(예림교지점)

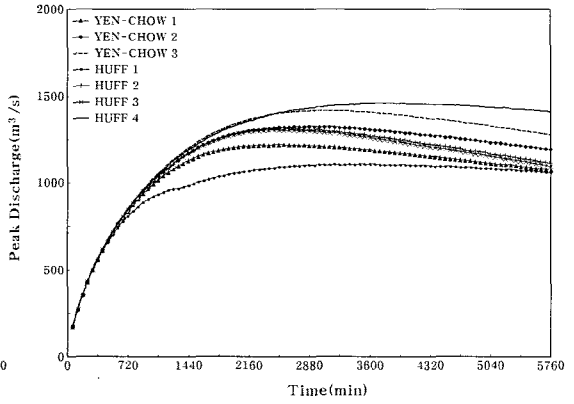

그림 6. 시간분포모형별 지속시간에 따른 첨두유량의 변화(봉화지점)

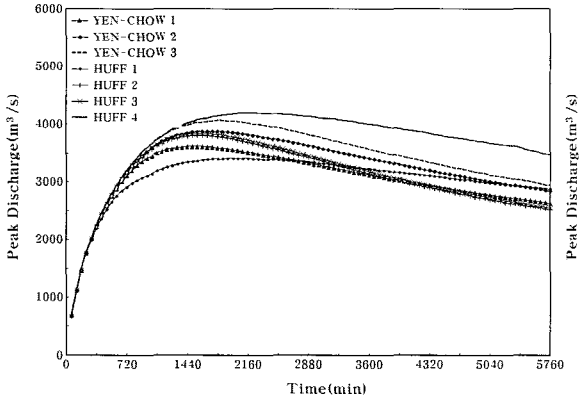

그림 7. 시간분포모형별 지속시간에 따른 첨두유량의 변화(용담지점)

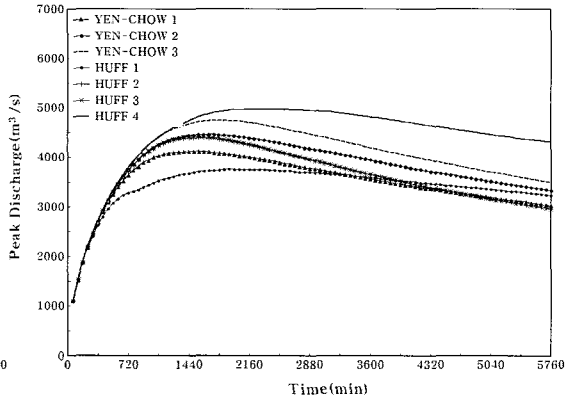

그림 8. 시간분포모형별 지속시간에 따른 첨두유량의 변화(적성지점)

3.2.2 최대 첨두유량을 발생시키는 설계강우의 시간분포모형 결정

본 연구에서는 대상유역에서 분석한 결과를 바탕으로 최대 첨두유량을 발생시키는 시간분포모형을 결정하기 위하여 첨두유량과 첨두시간 변화율을 비교·검토하였다. 설계수문량의 관점에서 보면 첨두유량 변화율이 최대를 보이는 시간분포모형이 최대 첨두유량을 발생시키는 것이 되며, 저류능력의 관점에서 보면 첨두시간이 지연되면서 첨두유량 변화율이 최대를 보이는 시간분포모형이 최대 첨두유량을 발생시키는 것이 된다. 본 연구에서는 설계수문량을 최대로 발생시키는 설계강우의 시간분포모형을 결정하고자 하므로 판단기준으로는 첨두유량 변화율이 최대를 보이는 시간분포모형을 최대 첨두유량을 발생시키는 설계강우의 시간분포모형으로

결정하였다.

3.2.1절에서 분석한 결과를 바탕으로 하여 각 지점별로 최대 첨두유량을 보이는 설계강우의 시간분포모형을 정리하면 표 5와 같다. 표 5에서 살펴보면 보청천과 영산강의 일부지점에서 Yen과 Chow 시간분포모형의 후방집중형이 최대 첨두유량을 발생시키는 시간분포모형으로 나타나고 있으나 대체적으로 Huff의 4분위모형이 최대 첨두유량 발생 시간분포모형으로 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서는 중규모 하천유역에 대하여 최대 첨두유량을 발생시키는 시간분포모형으로 Huff의 4분위모형을 결정하였다.

4. 임계지속기간 분석

임계지속기간이란 설계강우에 의해 발생하는 유출량이 강우의 시간적 분포에 따라 변화되는 점을 고려하여 기존의 홍수도달시간을 강우의 지속기간으로 설정하는 고전적인 개념에서 벗어나, 설계하고자 하는 수공구조물의 특성에 따른 설계 유출량을 파악하고자 하는 시도에서 비롯된 개념이다(심재현과 조원철, 1998). 수공구조물의 설계는 구조물에 최대의 부하를 걸리게 하는 상황에 대한 안전도가 보장되도록 하는 것이며, 최대 부하를 발생시키는 임계지속기간의 결정은 수공구조물의 특성에 따라 달라진다. 하천의 하도나 도시유역의 하수관거의 경우 배수구역의 첨두유량을 안전하게 소통시킬 수 있도록 설계가 이루어져야 되므로, 임계지속기간의 결정기준으로는 첨두유량의 크기가 최대가 되는 지속기간을 택하여야 하며, 유출량을 저류하는 저류지의 경우 총유출용적의 크기가 최대가 되는 지속기간을 선정하여야 한다. 따라서 임계지속기간은 수공구조물의 특성에 따라 첨두유량과 유출용적이 최대로 발생하는 강우지속기간으로 선정되어야 하며, 치수목적의 수공구조물 설치의 경우 첨두유량이 최대가 나타나는 지속기간을 임계지속기간으로 보고 있다. 본 연구에서 논의하는 임계지속기간은 치수목적의 수공구조물 설치에 기준을 두어 첨두유량이 최대로 발생하는 지속기간을 임계지속기간으로 정의한다.

4.1 임계지속기간의 산정

본 연구에서는 중규모 하천유역에 대하여 최대 첨두유량을 발생시키는 시간분포모형으로 Huff의 4분위모형으로 결정되었다. 따라서 44개 대상유역에서 Huff의 4분위모형에 의해 확률강우량을 시간분포시킨 후 SCS 유효우량산정법으로 최대 첨두유량을 나타내는 강우지속기간을 해당유역에서의 임계지속기간으로 산정하였다. 해당유역별 임계지속기간과 최대 첨두유량은 표 6과 같다.

표 5. 최대 첨두유량을 발생시키는 시간분포모형

유역명		시간분포모형	유역명		시간분포모형
위천	무 성	Huff 4분위/YC후방집중	낙동강	예림교	Huff 4분위
	병 천	Huff 4분위		밀 양	Huff 4분위
	미 성	Huff 4분위		독 산	Huff 4분위
	고 노	Huff 4분위/YC후방집중		합 천	Huff 4분위
	효 령	Huff 4분위		개 진	Huff 4분위
보청천	산 계	YC후방집중		동 촌	Huff 4분위
	기 대	YC후방집중		금 호	Huff 4분위
	탄 부	Huff 4분위/YC후방집중		선 산	Huff 4분위
	이 평	Huff 4분위/YC후방집중		용 곡	Huff 4분위/YC후방집중
	산 성	Huff 4분위/YC후방집중		점 촌	Huff 4분위
평창강	방 림	Huff 4분위		월 포	Huff 4분위
	하반정	Huff 4분위		안동 1	Huff 4분위
	상안미	Huff 4분위		임하 1	Huff 4분위
	백옥포	Huff 4분위		봉 화	Huff 4분위
	장 평	Huff 4분위	금강	석 화	Huff 4분위
	이목정	Huff 4분위		옥 천	Huff 4분위
영산강	회 진	YC후방집중		용 담	Huff 4분위
	나 주	Huff 4분위/YC후방집중	섬진강	송 정	Huff 4분위
	남 평	Huff 4분위		구 례	Huff 4분위
	본 동	YC후방집중		광 천	Huff 4분위
	선 암	Huff 4분위/YC후방집중		압 록	Huff 4분위
	마 륵	Huff 4분위/YC후방집중		적 성	Huff 4분위

표 6. 임계지속기간에서 최대 첨두유량(Huff 4분위모형)

유역명		임계 지속기간 (min)	최대 첨두유량 (㎥/s)	유역명		임계 지속기간 (min)	최대 첨두유량 (㎥/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 촌	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		점 촌	2,340	1,564.4
평창강	방 림	2,340	2,183.3		월 포	3,120	2,422.4
	하반정	1,860	389.3		안동 1	3,900	7,352.6
	상안미	2,220	1,733.6		임하 1	3,060	4,563.0
	백옥포	2,160	623.6		봉 화	3,180	1,443.8
	장 평	1,980	456.4	금강	석 화	3,060	5,891.0
	이목정	1,680	266.1		옥 천	3,780	8,949.6
영산강	회 진	3,540	4,996.6		용 담	2,280	4,191.3
	나 주	3,480	5,315.0	섬진강	송 정	3,840	12,183.8
	남 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 륵	2,280	2,346.7		적 성	2,700	4,964.7

표 6을 살펴보면, 대상유역별로 최대 첨두유량은 상이하게 나타나고 있으며, 임계지속기간은 전체적으로 1,440~3,900분의 범위내에 존재하고 있다. 유역별로 임계지속기간을 살펴보면, 위천유역이 1,440~2,100분, 보청천유역이 1,500~2,280분, 평창강유역이 2,040~3,540분, 낙동강유역이 2,340~3,900분, 금강유역이 2,280~3,780분, 영산강유역이 2,040~3,540분, 섬진강유역이 2,400~3,840분으로 나타났다. 전체적으로 유역면적이 비교적 작은 위천, 보청천, 평창강유역의 임계지속기간은 1,440~2,340분으로 나타났으며, 유역면적이 비교적 큰 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강 유역의 임계지속기간은 2,040~3,900분으로 나타나 유역면적의 크기에 따른 임계지속기간의 변화를 알 수 있었다.

4.2 기준강우지속기간의 첨두유량과 임계지속기간의 첨두유량과의 관계

현재까지 국내 실무에서는 수문량 산정시 설계강우의 지속기간으로 유역의 도달시간 또는 24시간 강우지속기간을 사용하여 왔으나 이에 대한 정확한 검증이 이루어지지 않고 사용되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 중규모 하천유역에 대해 실무에서 사용하는 지속기간과 임계지속기간의 첨두유량을 비교하고자 한다.

이를 위하여 Huff 4분위모형, SCS 유효우량산정법의 AMC-III조건으로 유출분석을 실시하였으며, 도달시간, 24시간과 48시간 강우지속기간의 첨두유량을 기준으로 임계지속기간의 첨두유량 변화율을 식 (5)와 같이 구하여 비교하였다.

$$\Delta Q_{pm}(\%) = \frac{Q_{pc} - Q_{pm}}{Q_{pc}} \times 100 \qquad (5)$$

여기서 ΔQ_{pm}은 첨두유량의 변화율, Q_{pc}은 임계지속기간에서의 첨두유량, Q_{pm}은 도달시간, 24시간과 48시간 강우지속기간에서의 첨두유량이다.

표 7은 임계지속기간의 첨두유량과 도달시간, 24시간과 48시간 강우지속기간에서의 첨두유량의 변화율을 나타내고 있다. 표 7을 살펴보면 도달시간을 기준강우지속기간으로 한 경우는 19.0~48.3%, 24시간을 기준강우지속기간으로 한 경우는 0.0~19.8% 그리고 48시간을 기준강우지속기간으로 한 경우는 0.0~8.6%의 첨두유량 변화율을 나타내고 있어 도달시간의 임계지속기간 적용성은 부적합한 것으로 판단된다.

그림 9는 유역면적에 따른 임계지속기간과 기준 강우지속기간 첨두유량 변화율을 도시한 결과이다. 표 7과 그림 9를 통하여 24시간과 48시간 강우지속기간의 첨두유량 변화율을 유역면적의 크기를 고려하여 검토한

표 7. 임계지속기간과 기준강우지속기간 첨두유량의 변화율(Huff 4분위모형)

유역명		ΔQ_{pm}(%)			유역명		ΔQ_{pm}(%)		
		도달시간	24시간	48시간			도달시간	24시간	48시간
위천	무 성	35.2	1.9	2.0	낙동강	예림교	46.9	8.6	0.0
	병 천	41.9	1.8	4.3		밀 양	46.0	4.3	1.0
	미 성	38.8	0.3	5.2		독 산	46.3	13.9	0.4
	고 노	34.8	0.0	7.7		합 천	48.3	16.1	0.3
	효 령	36.9	1.4	5.1		개 진	43.6	10.5	0.1
보청천	산 계	27.0	2.8	6.4		동 촌	37.8	11.7	0.1
	기 대	39.5	5.0	7.2		금 호	43.1	10.6	0.0
	탄 부	38.6	1.5	2.6		선 산	38.0	12.1	0.1
	이 평	44.0	1.4	1.5		용 곡	23.0	13.9	0.4
	산 성	43.1	0.1	1.7		점 촌	36.8	6.6	0.3
평창강	방 림	38.3	5.1	8.6		월 포	35.1	14.7	0.6
	하반정	45.2	2.7	3.2		안동 1	33.1	16.9	1.2
	상안미	38.4	4.1	6.3		임하 1	32.6	10.9	0.0
	백옥포	41.5	3.4	6.9		봉 화	44.2	17.8	1.1
	장 평	43.3	3.2	4.1	금강	석 화	33.6	7.7	0.1
	이목정	46.4	1.3	1.7		옥 천	31.1	17.2	1.5
영산강	회 진	23.8	19.8	2.6		용 담	30.0	4.3	1.5
	나 주	29.0	14.8	1.2	섬진강	송 정	32.7	14.5	0.7
	남 평	36.2	3.1	3.5		구 례	43.6	13.3	0.4
	본 동	25.1	9.7	0.1		광 천	22.3	3.6	1.5
	선 암	19.0	1.3	3.2		압 록	35.3	13.6	0.6
	마 륵	26.9	4.2	0.8		적 성	40.9	4.8	0.5

결과 유역면적이 50~600㎢인 유역에서는 임계지속기간과 24시간 강우지속기간의 첨두유량의 변화율이 0.0~5.1%에 해당하고 있으며, 유역면적이 600~5,000㎢인 유역에서는 임계지속기간과 48시간 강우지속기간의 첨두유량 변화율이 0.0~2.6%에 해당하고 있는 것을 알 수 있다.

Huff 4분위모형을 적용한 경우 임계지속기간은 유역면적 크기에 따라 24시간 또는 48시간 강우지속기간 이후에 위치하였으나, 유역면적이 50~600㎢인 유역에서는 24시간 강우지속기간의 첨두유량과 임계지속기간의 첨두유량은 유사한 값을 나타내고 있으며, 유역면적이 600~5,000㎢인 유역에서는 48시간 강우지속기간의 첨두유량과 임계지속기간의 첨두유량은 유사한 값을 나타내고 있다. 24시간 기준강우지속기간의 경우 유역면적이 600㎢를 초과함에 따라 첨두유량의 변화율이 크게 증가하고 있으며, 48시간 기준강우지속기간의 경우 유역면적이 600㎢ 보다 감소함에 따라 첨두유량의 변화율이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 유역면적이 50~5,000㎢인 중규모 하천유역에서 유역면적이 600㎢ 보다 작은 유역에서는 24시간 강우지속기간을 임계지속기간으로 사용하고, 유역면적이 600㎢ 보다 큰 유역에서는 48시간 강우지속기간을 해당유역의 임계지속기간으로 간주하여도 큰 무리는 없을 것으로 생각된다.

4.3 임계지속기간과 유역면적과의 회귀분석

본 연구에서는 여러 가지 유역특성인자 중 유역면적과 임계지속기간의 상관성을 검토하여 임계지속기간을 결정하기 위한 일반화된 회귀식을 제시하고자 한다. 회귀식을 결정하는데 이용된 대상유역은 44개 지점이며, 확률강우강도식의 형태는 건설교통부(2000)의 연구결과를 이용하였고, 유효우량은 AMC-Ⅲ 조건, 설계강우의 시간분포모형은 Huff의 4분위모형을 이용하였다.

그림 10과 같이 중규모 하천의 유역면적과 임계지속기간의 상관성을 검토하였으며 유도된 회귀식은 식 (6)과 같다.

$$CD = 657.45A^{0.21} \tag{6}$$

여기서 CD는 임계지속기간(min), A는 유역면적(㎢)이다. 최대 첨두유량을 발생시키는 Huff의 4분위모형을 이용한 임계지속기간과 유역면적과의 회귀분석에서 결정계수는 0.86으로 나타났다. 따라서, 유역면적과 임계지속기간의 관계는 상관성이 높은 것으로 판단되며, 식 (6)은 제한적이지만 유역면적 50~5,000㎢인 중규모 하천유역에서 임계지속기간을 결정하는데 있어 유용한 식

으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

4.4 무차원 회귀식의 유도

본 연구에서는 단위도의 특성치와 임계지속기간과의 관계를 파악하고자 단위도의 첨두시간과 임계지속기간의 비, 단위도의 첨두유량과 임계지속기간에서의 첨두유량 비를 이용하여 식 (7)과 같은 무차원 회귀식을 유도하였다. 유도된 회귀식은 결정계수가 0.81로 나타나 비교적 상관성이 높은 것으로 나타났다.

$$\left(\frac{Q_{pc}}{Q_p}\right) = 0.774 \left(\frac{t_{pc}}{t_p}\right)^{0.458} \quad (7)$$

여기서 Q_{pc}는 임계지속기간에서의 첨두유량(㎥/s), Q_p는 단위도의 첨두유량(㎥/s), t_{pc}는 임계지속기간(min), t_p는 단위도 첨두시간(min)이다.

식 (7)에서 단위도의 첨두유량과 첨두시간이 결정된다면 본 연구에서 제안한 식 (6)을 이용하여 설계강우의 시간분포 과정을 무시하고도 개략적으로 임계지속기간에서의 첨두유량을 간단하게 산정할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구는 수문 관측자료가 확보된 중규모 하천유역을 통하여 최대 첨두유량을 발생시키는 설계강우의 시간분포모형을 결정하고, 결정된 시간분포모형을 바탕으로 하여 유역특성과 임계지속기간의 관계를 규명하고자 하였으며, 다음과 같은 결론은 얻었다.

(1) 중규모 하천 유역에서 Yen과 Chow의 시간분포모형과 Huff의 시간분포모형을 적용한 결과 AMC-Ⅲ 조건의 유효강우량으로부터 최대 첨두유량을 발생시키는 시간분포모형은 Huff 4분위 모형으로 나타났다.

(2) 임계지속기간과 기준강우지속기간과의 첨두유량의 비교를 통해 유역면적이 50~600㎢인 유역에서 24시간 강우지속기간, 유역면적이 600~5,000

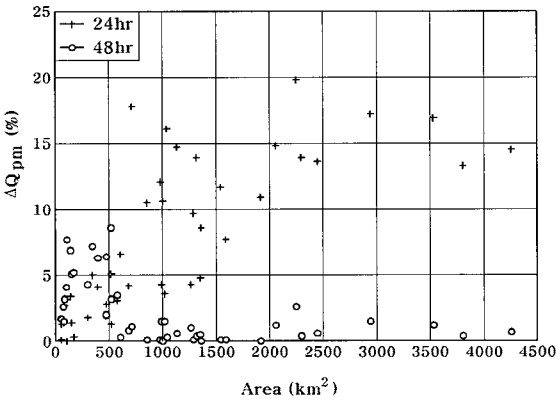

그림 9. 유역면적과 24시간 및 48시간 첨두유량변화율

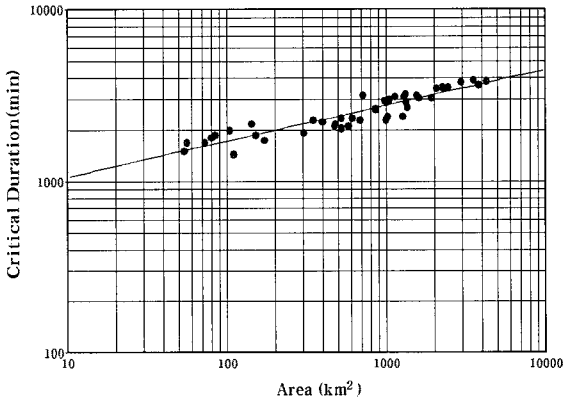

그림 10. 임계지속기간과 유역면적과의 상관관계(Huff 4분위모형, AMC III)

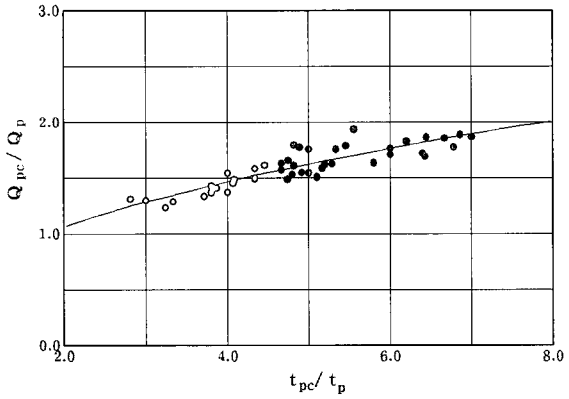

그림 11. Q_{pc}/Q_P와 t_{pc}/t_P를 이용한 무차원곡선

㎢인 유역에서 48시간 강우지속기간을 임계지속기간으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 임계지속기간과 유역면적과의 회귀식을 유도하였으며, 제한적이지만 중규모 하천유역의 임계지속기간을 결정하는데 유용한 식으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 단위도의 첨두시간과 임계지속기간의 비, 단위도의 첨두유량과 임계지속기간에서의 첨두유량 비를 이용하여 무차원 회귀식을 유도하였다.

감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의해서 연구된 논문으로 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

건설교통부 (1995), **낙동강수계 유출프로그램개선방안.**

건설교통부 (2000a). **한국 확률강우량도 작성, 수자원관리기법개발연구조사 보고서**, 제1권.

건설교통부 (2000b). **지역적 설계 강우의 시간적 분포, 수자원관리기법개발연구조사 보고서**, 제2권.

건설부 (1989), **금강홍수예경보 프로그램개선 최종보고서.**

건설부 (1991a), **영산강홍수예경보 프로그램개발 최종보고서.**

건설부 (1991b), **섬진강홍수예경보 프로그램개발 최종보고서.**

건설부 (1993). **설계홍수 추정지침서, 수자원관리기법개발연구조사 보고서.**

이재준, 이정식, 박종영 (2001). 계획강우량 설정을 위한 권역별 강우강도식의 유도, 대한토목학회, **대한토목학회논문집**, 제21권, 제1-B호, pp.1～10.

이정식, 이재준, 박종영 (2001). 수공구조물 설계를 위한 설계강우의 수문학적 특성분석, **한국수자원학회 논문집**, 제34권, 제1호, pp.49～57.

심재현, 조원철(1998), 홍수도달시간과 임계지속기간의 개념 비교(Ⅱ), 한국수자원학회지, 제31권, 제6호, pp.60～67.

한국건설기술연구원 (2000). **시험유역의 운영 및 수문특성 조사·연구-합성단위도 개발을 중심으로-**, 건기연 2000-092.

한국건설기술연구원 (2001). **시험유역의 운영 및 수문특성 조사·연구**, 건기연 2001-083.

American Society of Civil Engineers (1992). *Design and construction of urban stormwater management systems*, ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice No.77.

Houghton-Carr, H. (1999). *Flood Estimation Handbook*, Vol.4, Restatement and application of the flood studies report rainfall-runoff method, Institute of Hydrology

Huff, F.A. (1967). "Time distribution of rainfall in heavy storms," *Water Resources Research*, Vol.3, No.4, pp.1007～1019.

Pilgrim, D. H. (1987). *Australian rainfall and runoff - a guide flood estimation-,* Institution of Engineers.

Ponce, V. M. (1989). *Engineering Hydrology Principles and Practices*, Prentice Hall.

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.

(논문번호:04-41/접수:2004.04.22/심사완료:2004.07.27)