

降雨의 時間 分布模型 算定에 의한 降雨-流出 解析 Rainfall-Runoff Analysis by Calculation of the Time Distribution Models for Storms

閔 丙 亨* · 李 榮 大** · 徐 鎮 濤*** · 閔 一 圭****
Min, Byung-Hyung · Lee, Young-Dae · Seo, Jin-Ho · Min, Ill-Kyu

Abstract

The main objective of this study is to determine the time distribution models of rainfall in Korea for estimating design floods and to suggest new runoff model(Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph ;GIUH) in order to be easily use the rainfall-runoff model put rainfall models practice to be suitable for the regional characteristics of hydrologic situation by practicing engineers. As a result, the reappearance of triangular hyetograph and GIUH runoff model showed promising. The historical data from about 13,000 event-rainfalls and 73 rainfall-runoff measuring data during 12 years in International Hydrological Program(IHP) basins have been used to determine the statistical factors of the time distribution for rainfalls by the Yen-Chow, Huff, Pilgrim-Cordery and Mononobe models. The Rational, Kajiyama, Nakayasu and Clark model and GIUH model that this study runoff model were used for the purpose of application limit for basin area against design concept by the estimation of flood runoff and the derivation of empirical equations to estimate the parameters for ungaged basins.

요 지

본 연구는 우리나라에 적합한 강우의 시간 분포모형을 산정하고, 지역의 지형학적 특성을 고려한 강우-유출 모형인 GIUH 모형을 제시함으로써 설계자가 가장 적절하게 실무에 적용하도록 도움을 주는데 있다. 연구결과, 우리나라의 강우는 삼각형 분포의 적용성이 가장 높았으며 강우-유출 모형중에서는 지형학적 순간단위도(GIUH) 모형의 우수성이 입증되었다. 분석을 위한 기초자료는 IHP 대표시험유역의 12년간 13,000개 강우사상과 73개의 강우-유출 관측자료를 이용하였으며, 이 자료들을 이용하여 유역면적별 5가지 강우의 시간 분포모형을

-
- * 동아대학교 토목공학과 교수
 - ** 부경대학교 토목공학과 부교수
 - *** (주)삼영건설기술공사 수공부 이사
 - **** 동아대학교 건설기술연구소 특별연구원

산정, 실무에 적용할 수 있도록 제시하고 이를 GIUH로서 적용성을 검증하였다. 또한, 우리나라 실무에 주로 적용되는 4가지 강우-유출모형인 합리식, Kajiyama 공식, Nakayasu 합성단위도와 Clark 순간단위도와 본 연구의 GIUH를 통하여 유역면적별 각 강우-유출 모형의 매개변수, 적용한계 및 비유량 함수식을 제시하여 미계측유역의 설계홍수량 산정의 기준을 마련하고자 한다.

1. 서 론

1.1 연구의 배경

과거의 경우 강우를 근거로 설계홍수량을 추정할 때 침투유량만이 필요한 관계로 매우 간편한 강우-유출모형이 주로 사용되었다. 그러나 최근에 이르러 많은 수문 모형의 개발과 함께 강우와 유출의 시간 및 분포형태도 중요한 위치를 차지하게 되었다. 수공구조물 설계를 위한 강우의 표현방법으로 실제 강우의 분포현상을 충실하게 표현할 수 있는 강우의 시간분포형이 필요하게 되었다. 유출해석에 있어서 그 입력자료인 강우의 특성은 복잡 다양하여 강우의 시간분포를 합성의 형태로 나타내기에는 매우 어렵기 때문에 많은 학자들에 의해 여러 가지 방법이 개발되어 왔다.

Huff(1967)는 관측강우를 4구간법으로 시간분포하여 해석하였고, Pilgrim과 Cordery(1975)는 평균이동법을 이용하여 강우를 분석하였고, Yen과 Chow(1977)는 무차원 1, 2차 모멘트를 이용하여 삼각형과 사다리꼴 우량주상도의 형태로 단순화하여 시간분포를 분석하였다. 국내에서는 서승덕(1965)이 강우의 시간분포 개념을 처음 고찰하였고, 서병하와 김남원(1989)은 전국적인 시간분포 특성치를 제시하여 적용의 기초를 마련한 바 있다. 최근에는 서진호 등(1995)이 국제수문개발계획(IHP)의 위천유역을 중심으로 실제 강우사상에 의해 적용성이 검증된 강우의 시간 분포 특성치를 제시한 바 있다.

또한 강우에 대한 유역의 반응인 유출에 대한 분석 방법에 있어서 신뢰성 있는 장기간의 유출량 자료가 부족한 관계로 구조물의 중요도에 관계없이

소규모에는 주로 합리식이, 중·대규모에는 설계 강우-단위도법이 주로 이용되고 있다. 그러나 이는 원래 일본과 미국 등에서 사용되는 것을 여과없이 국내의 유역에 적용하여 그 절차에 대한 타당성 평가가 미흡한 실정이기 때문에 유역의 물리적 특성을 고려한 새로운 유출모형의 정립과 기존 모형의 장·단점에 대한 보완이 필요하다.

한편, 유출의 근원지인 사면과 홍수량의 수송을 담당하는 하도망과의 연관된 공간적 구조특성은 수문응답과 밀접하게 연관되어 있다고 알려져 있다. 유역의 수문인자들이 시·공간적으로 다양하게 분포하고 있기 때문에 수문응답 예측은 대단히 복잡하고 어려운 문제이다. 유역에서 발생하는 홍수 유출량을 정확하게 예측하기 위해서 물리적인 특성을 고려하는 지형학적 강우-유출모형의 적용이 보다 효율적인 것으로 판단된다. 근래 컴퓨터의 발달과 함께 유역을 일종의 시스템으로 간주하여 강우를 입력으로 유출을 출력으로 하는 계분식이 수행되었으며, 이를 통해 강우와 유출과의 관계를 해석하는 지형학적 인자를 고려한 순간단위도 개념모형이 개발되어 현재까지 널리 이용되고 있다. 순간단위도 개념모형은 Zoch(1934)가 처음으로 제시하였다. Horton(1945)은 하천차수(stream order)에 의하여 수로를 분류하는 하천 형태학을 최초로 제안하였고, Strahler(1957)는 체계화하였다. 본 연구의 지형학적 강우-유출모형은 Kirkby(1976)가 제안한 GIUH(Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph)이다. 최근에는 유역의 수문응답과 지형학적 구조를 직접 결합시킨 GIUH가 Rodríguez-Iturbe와 Valdés(1979)에 의해 유도되었으며, 지형인자와 동적특성인 유속을 이용해 수문응답의 매개변수를 결정함으로써 GIUH를 유도하였다.

본 연구에서는 실무적인 효율성을 높이기 위해 우리나라 미계측 중·소하천의 설계홍수량 산정에 필요한 강우의 시간 분포모형을 제안하고, 기존의 강우-유출모형과 물리적 강우-유출모형인 지형학적 순간단위도와와의 비교분석을 통하여 강우분포의 적용성을 검토하는데 주안점을 두었다. 또한 실무 적용에 필요한 모형별 면적의 적용한계 및 비유량을 제시하여 설계홍수량 산정의 기준을 마련하고자 한다. 분석을 위한 기초자료는 평창강, 보청천 및 위천의 측정자료를 이용하였다.

1.2 연구의 내용 및 범위

강우-유출모형의 중요한 입력 자료가 되어지는 강우의 시간 분포모형은 여러 가지로 연구되어 왔지만 다음의 4가지 즉, Yen-Chow, Huff, Pilgrim-Cordery 그리고 Mononobe에 의해 제안된 방법이 크게 대별될 수 있어, 이를 채택하여 본 연구의 시간 분포모형으로 선정하였다. 강우-유출모형 적용은 설계강우와 실제 강우사상에 적용하였다. 기존 강우-유출모형의 대부분이 설계 빈도개념을 포함하고 있으므로 이들과 본 연구모형인 GIUH에 설계강우를 입력하여 검토한 후, 가장 적용성이 뛰어난 강우-유출모형을 정한다. 그리고 정해진 강우-유출모형의 강우입력은 실제 강우사상을 시간분포시켜 적용시키는 순으로 연구한다. 설계강우의 적용은 Φ 및 W-지표를 구할 수 없으므로 SCS 방법에 의하고, 실제 강우사상의 적용은 Φ -지표법을 사용한다.

GIUH 모형의 응답함수는 2변수 Gamma 분포를 가진 확률밀도함수를 사용하여 Horton의 지형법칙에 의해 형상계수를 유도하고, 최소자승법을 이용하여 재현정도가 최대일 경우의 축적계수를 산정한다. 또한 추정된 매개변수들은 기본적으로 오차를 내포하고 있으므로, 민감도 분석을 행하여 모의결과에 많은 영향을 미치는 매개변수를 찾아내어 모형의 물리적 단점을 보완하여 모형의 적용성을 제시한다. 본 연구흐름을 간략하게 요약하면 Fig. 1과 같다.

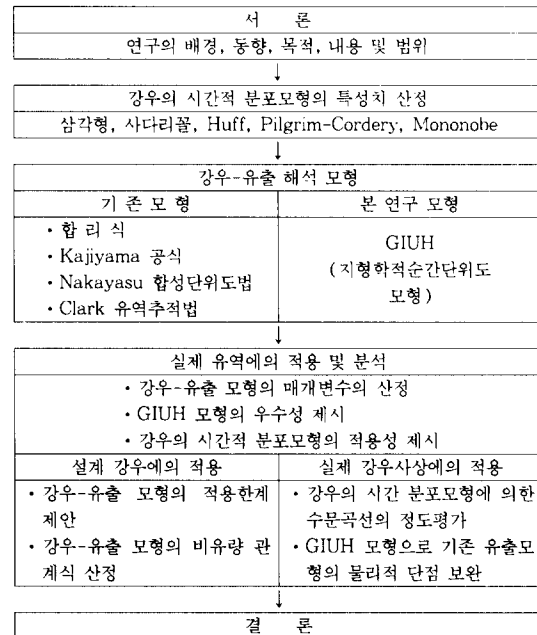


Fig. 1. Main Flow-Chart of This Study

Table 1. Number of Event Rainfall in IHP Basins.(1983~1993)

Rain Sta. No.	Pyungchang River		Bochong Stream		Wi Stream	
	Sta. Name	No.	Sta. Name	No.	Sta. Name	No.
1	Banglim	399	Myogeum	345	Kunwi	415
2	Gapyung	114	Cheongsan	315	Hyoreung	320
3	Sudong	459	Neungweol	395	Daeyul	340
4	Gyechon	534	jungnyul	446	Kome	387
5	Daehwa	447	Kwangi	352	Woobo	397
6	Shinlee	492	Pyeongon	414	Sanseung	399
7	Youchun	559	Samga	451	Shinreung	159
8	Dungmae	547	Songjug	298	Euiheung	157
9	Youngjun	413	Samsan	247	Hwasu	330
10	Gyebang	402	Dongjeong	402	Hwasan	369
11	Heungjun	581	Yiweon	418	Seuksan	277
12	-	-	Annae	370	-	-
Total		4,947		4,453		3,550

2. 강우의 시간 분포모형

2.1 자료 및 분석 방법

수문자료는 한국건설기술연구원 PCHISS 자료에 의한 지속시간 2시간 이상의 강우관측소별 단독 강우사상 12,950개를 Table 1과 같이 선별하였다.

2.2 자료의 선별기준

시우량을 이용하여 강우사상을 선별하는 기준은 최초 방법 제안시의 자료분류 기준에 따른다. 각 방법별 분리기준은 Yen-Chow와 Mononobe 방법이 지속시간 2시간 이상의 무강우가 전혀없는 연속강우로 정의되고, Huff 방법은 전후에 6시간 이상의 무강우가 시작되면 강우사상을 분리한다. Pilgrim-Cordery 방법에서는 무강우가 전혀없는 연속강우사상을 선별하여 그중 년최대치 하한치 이상만의 강우사상을 선택하였다.

2.3 분석방법의 이론적 고찰

시간분포 형태에 대한 기본이론은 국내의 문헌 및 서진호(1996)에 의해 자세히 제시되어 있으므로 생략하고 중요사항만 기술한다.

2.3.1 삼각형 분포

각 시간별 강우량을 d , 총강우량을 D 라하면 강우가 시작되는 시간에 관한 우량주상도의 도심까지의 시간 \bar{t} 를 구하면 식 (1)과 같다.

$$\bar{t} = \frac{\Delta t \left[\sum_{j=1}^n (j-0.5)d_j \right]}{D} \quad (1)$$

1차 모멘트에 의한 삼각형 우량주상도의 기하학적 무차원 변수는 다음과 같다.

$$a^\circ = a/t_d = 3t^\circ - 1 \quad (2)$$

$$b^\circ = b/t_d = 2 - 3t^\circ \quad (3)$$

$$h^\circ = h/(D/t_d) = 2 \quad (4)$$

2.3.2 사다리꼴 분포

우량주상도 도심까지 시간의 제곱인 G 를 같은 방법으로 구하면 식 (5)와 같이 된다.

$$G = (\Delta t)^2 \left[\sum_{j=1}^n (j-0.5)^2 d_j + \frac{1}{12} D \right] / D \quad (5)$$

2차 모멘트를 이용하여 무차원화 하면

$$a^\circ = a/t_d \quad (6)$$

$$b^\circ = b/t_d \quad (7)$$

$$c^\circ = c/t_d \quad (8)$$

$$h^\circ = 2/(1+c^\circ) \quad (9)$$

2.3.3 Huff 방법에 의한 분포

강우지속시간을 4등분하고 4구간으로 분류된 시간 분포와 강우량 분포를 무차원화 시키기 위하여 개별 강우시간의 누가강우시간에 대한 백분율과 임의 개별 강우시간까지의 누가강우량의 총 누가강우량에 대한 백분율 계산식은 다음과 같다.

$$TR(i) = \frac{T(i)}{T_d} \times 100(\%) \quad (10)$$

여기서 $TR(i)$ 는 임의 시간 $T(i)$ 에서의 누가 강우시간 백분율, $T(i)$ 는 i 번째 경과시간이며 T_d 는 총 강우지속시간이다.

한편, 각 강우지속시간에 해당하는 시간에서의 누가우량과 총 강우량의 백분율은 다음과 같다.

$$RR(i) = \frac{R(i)}{T_R} \times 100(\%) \quad (11)$$

발생확률은 Weibull 도시위치공식을 이용하여 분석하고 Standard distribution coefficients로 Fitting하여 발생확률의 중간값을 산정하여 구한다.

2.3.4 Pilgrim-Cordery 방법에 의한 분포

평균이동법(Average variability method) 이라고 불리는 이 방법은 먼저 강우사상의 지속시간을 동일구간으로 나누고, 각 시간구간에 내린 강우량의 크기에 따라 순위를 정한 뒤 각 시간구간별로 순위를 평균하여 평균순위를 정한다. 그리고 각 시간구간에서 총강우량에 대한 구간강우량의 백분율을 순위별로 나열하고 각 시간 구간별로 평균하여 강우백분율을 결정한다. 이를 평균순위에 따라 재배열하여 시간 분포를 결정한다.

IHP 위천 우보(No.5)의 지속시간 3시간을 대상으로한 분석절차를 Table 2에 한 예로 나타내었다. 자세한 분석절차에 대해서는 서진호(1996)에 언급되어 있으므로 생략한다.

Table 2. Pattern of Rainfall Duration 3 hr.

R. No. (1)	Total (mm) (2)	Rain in Period (mm)			Rank of Period's Rainfall			Rain in Period Each Rank (%)		
		1hr (3)	2hr (4)	3hr (5)	1 (6)	2 (7)	3 (8)	1 (9)	2 (10)	3 (11)
		1	57.8	45.0	6.0	6.8	1.0	3.0	2.0	77.8
2	25.5	5.0	19.0	1.5	2.0	1.0	3.0	74.5	19.6	5.9
3	22.4	1.0	9.8	11.6	3.0	2.0	1.0	51.8	43.7	4.5
4	21.5	5.7	7.9	7.9	3.0	1.5	1.5	36.7	36.7	26.6
5	20.3	6.1	7.2	7.0	3.0	1.0	2.0	35.5	34.5	30.0
Average					2.4	1.7	1.9	55.3	29.2	15.5
Assigned Rank					3	1	2			
Final Pattern(%)					15.5	55.3	29.2			

Table 3. Triangular Parameter in P

Bas - ins	event rainfall No.	Parameter						
		\bar{i}°	a°	b°	h°	H	D	t_s
P1	448	0.50	0.49	0.51	2.0	5.0	16.1	5.5
P2	470	0.49	0.48	0.52	2.0	4.8	15.3	5.5
P3	469	0.50	0.49	0.51	2.0	5.2	16.2	5.4
P4	430	0.50	0.49	0.51	2.0	5.2	15.9	5.6
P5	469	0.50	0.50	0.50	2.0	5.2	15.7	5.2
P6	426	0.50	0.50	0.50	2.0	5.1	15.6	5.2

Table 4. Triangular Parameter in B

Bas - ins	event rainfall No.	Parameter						
		\bar{i}°	a°	b°	h°	H	D	t_s
B1	367	0.49	0.47	0.53	2.0	4.7	15.2	5.4
B2	366	0.49	0.47	0.53	2.0	4.8	15.3	5.4
B3	404	0.48	0.46	0.54	2.0	4.7	14.9	5.5
B4	366	0.49	0.48	0.52	2.0	4.7	14.1	5.1
B5	411	0.49	0.48	0.52	2.0	4.6	13.7	5.2

2.3.5 Mononobe 방법에 의한 분포

현재 국내 실무에서 가장 널리 사용되고 있는 방법으로 식 (12)에 의해 시간별 강우량이 결정된다.

$$R_t = \frac{R_T}{T} \left(\frac{T}{t}\right)^{(2/3)} \times t \quad (12)$$

2.4 시간 분포형의 작성 및 특성분석

2.4.1 삼각형 분포

Table 3~5는 각 강우관측소별 산정결과에 티센가중계수를 적용하여 재산정한 소유역별 전체 강우사상에 대한 최종특성치 분석결과이다. H 는 관측된 강우 삼각형 분포의 높이이고 t_s 는 관측 강우의 지속시간이고 D 는 관측강우량이다.

Table 5. Triangular Parameter in W

Bas - ins	event rainfall No.	Parameter						
		\bar{i}°	a°	b°	h°	H	D	t_s
W1	328	0.49	0.47	0.53	2.0	4.7	16.1	6.1
W2	314	0.49	0.47	0.53	2.0	4.5	15.6	6.0
W3	277	0.50	0.49	0.51	2.0	4.5	14.9	5.8
W4	306	0.50	0.49	0.51	2.0	4.2	14.5	6.0
W5	277	0.50	0.49	0.51	2.0	4.1	13.4	6.7
W6	356	0.48	0.46	0.54	2.0	4.9	17.0	6.1

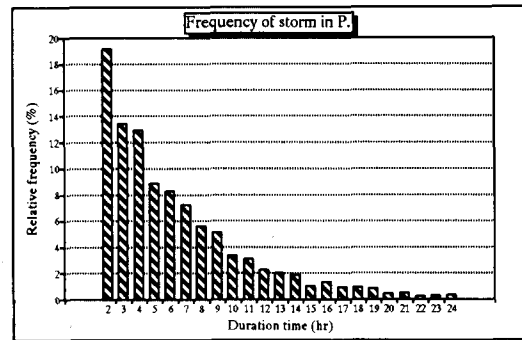


Fig. 2. Frequency for Storms Selected in P

Table 6. Trapezoidal Parameter P

Bas - ins	event rainfall No.	Parameter					
		G°	a°	b°	c°	h°	H
P1.	448	0.32	0.26	0.25	0.49	1.42	3.82
P2.	470	0.32	0.24	0.26	0.50	1.40	3.58
P3.	469	0.32	0.26	0.25	0.49	1.42	3.95
P4.	430	0.32	0.26	0.25	0.49	1.41	3.88
P5.	469	0.32	0.26	0.25	0.49	1.42	3.97
P6.	426	0.32	0.27	0.26	0.47	1.44	3.90

Fig. 2에 평창강의 지속시간-상대빈도 관계를 나타내었고, 2시간 강우가 20% 내외이고 5시간까지의 강우가 총 강우수의 약 50% 정도를 유지하고 13시간까지의 강우가 약 90%를 나타내고 있다.

2.4.2 사다리꼴 분포

Table 6~8은 티센가중계수를 적용한 3대 유역의 전체 강우사상에 대한 최종특성치 분석결과이다. 표에서 t_s 와 D 는 삼각형 분포와 동일하다.

Fig. 3은 사다리꼴 주상도의 지속시간별 무차원 특성변수의 변화를 나타낸 것으로, 전체적으로 안

Table 7. Trapezoidal Parameter B

Basins	Parameter						
	event rainfall No.	G°	a°	b°	c°	h°	H
B1.	367	0.31	0.23	0.28	0.49	1.43	3.64
B2.	366	0.31	0.24	0.27	0.49	1.42	3.67
B3.	404	0.31	0.24	0.28	0.48	1.43	3.64
B4.	366	0.32	0.24	0.26	0.50	1.40	3.55
B5.	411	0.32	0.24	0.26	0.50	1.40	3.43

Table 8. Trapezoidal Parameter W

Basins	Parameter						
	event rainfall No.	G°	a°	b°	c°	h°	H
W1.	328	0.31	0.21	0.25	0.54	1.37	3.51
W2.	314	0.31	0.22	0.25	0.53	1.37	3.44
W3.	277	0.32	0.23	0.23	0.54	1.37	3.42
W4.	306	0.32	0.23	0.24	0.53	1.38	3.15
W5.	277	0.32	0.24	0.24	0.52	1.39	3.14
W6.	356	0.31	0.20	0.25	0.55	1.37	3.68

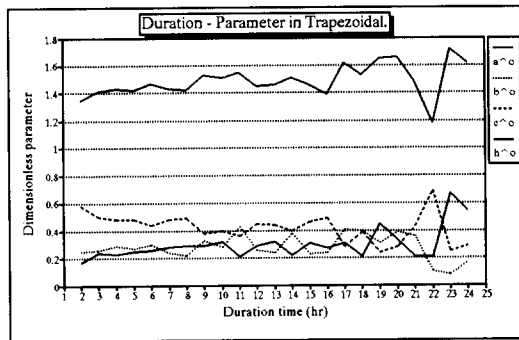


Fig. 3. Influence of Dimensionless Parameter for Duration

정된 결과를 나타내었고, 지속시간이 길어질수록 h° 는 증가하고 a° 는 감소되는 경향을 보였다.

2.4.3 Huff 방법

선별된 강우사상의 수는 6,109개이며, 전체강우의 빈도분석 결과를 Table 9에 백분율의 형태로 나타내었다. 제2분기형 강우가 가장 많이 출현하고 제3분기형 강우가 가장 적게 출현함을 알 수 있다. 이는 Huff가 Illinois에서 분석한 제2구간 강우가 우세한 것과 비슷한 결과로 나타났다.

Table 9. Huff Percentage Frequency

Basins	Quartiles (%)				Storm No.
	1-st	2-nd	3-rd	4-th	
Pyung-Chang	21.5	32.2	17.6	28.7	2,245
Ro-Cheong	22.7	34.1	18.3	24.9	2,129
Wi Stream	21.3	33.9	18.7	26.1	1,735

Table 10. Huff Distribution in P

Probability (%)	Sub-basins (unit : %)					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
10	3.9	4.1	3.9	4.0	3.9	3.6
20	10.7	10.2	10.9	11.6	9.8	9.0
30	24.6	20.7	25.7	27.4	24.5	23.4
40	43.1	34.0	45.5	48.1	45.3	44.1
50	60.1	46.7	63.7	66.9	64.4	63.2
60	67.9	53.9	71.6	74.7	72.5	71.5
70	74.4	61.0	77.9	80.7	79.1	78.3
80	79.9	68.9	82.6	84.7	83.7	83.2
90	89.5	82.9	91.1	92.1	91.8	91.7
100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Table 11. Huff Distribution in B

Probability (%)	Sub-basins (unit : %)				
	B1	B2	B3	B4	B5
10	4.3	4.3	4.6	4.7	4.5
20	11.0	10.9	11.1	11.2	11.1
30	25.5	25.1	24.2	26.7	26.4
40	44.8	44.3	41.6	48.3	47.7
50	62.8	62.2	58.1	68.7	67.7
60	70.6	70.2	65.3	76.6	75.8
70	77.4	77.0	71.9	83.2	82.4
80	82.8	82.8	78.5	87.3	86.8
90	91.1	91.1	89.0	93.9	93.6
100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Table 12. Huff Distribution in W

Probability (%)	Sub-basins (unit : %)					
	W1	W2	W3	W4	W5	W6
10	4.3	4.2	4.1	3.9	3.7	4.4
20	11.4	11.5	11.6	11.8	12.1	11.1
30	24.6	25.5	24.8	26.7	27.1	22.8
40	41.8	43.6	41.7	46.0	46.1	37.9
50	57.6	60.0	56.9	63.2	62.7	52.3
60	66.2	68.7	65.5	72.6	72.3	60.4
70	73.7	76.1	72.7	80.0	79.5	68.2
80	80.2	82.1	79.2	85.5	84.9	76.0
90	89.6	90.4	88.6	92.2	91.6	87.6
100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

각 강우관측소별 누가확률 백분율 산정결과에 티센계수를 적용하여 소유역별로 재산정하였고, 각 빈도계열 중에서 Table 10~12에 나타난 50(%) 누가계열은 중앙값은 실무 적용시 채택되어 지는 최종특성치 산정결과이다.

2.4.4 Pilgrim-Cordery 방법

평창강 2,319개 보청천 1,901개, 위천 1,842개 총 6,062개를 선별하여 지속시간별 분포를 산정한 결과, 그 양이 방대하므로 서진호(1996)의 부록(A.4)에 제시하였고, 본 연구에서는 평창강 지속시간 6시간 최종특성치 경우를 Table 13에 제시하였다.

Table 13. Pilgrim-Cordery Distribution in P(Rainfall Duration : 6 hr.)

Duration Time(hr)	Sub-basin (unit : %)					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	21.5	19.3	22.8	23.4	20.6	17.5
2	13.1	19.2	11.8	11.2	7.3	7.7
3	9.3	9.1	9.0	6.8	11.4	12.5
4	20.2	23.3	20.2	19.5	20.3	23.3
5	15.9	23.4	14.0	11.1	19.1	8.1
6	20.0	5.6	22.1	28.0	21.3	30.8
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

2.5 분석결과의 비교 및 고찰

각 방법에 따라 구해진 특성변수들은 서병하와 김남원(1989)에서 제시한 특성치들과 비슷하거나 약간 후방위 성향을 보였으며, 부분적으로 자료의 수가 부족한 관측소의 특성치는 자료년수가 긴 지점보다 큰 무차원 특성변수값의 영향으로 큰 값을 제시하고 있다. 이상에서 고찰한 각 방법의 연구결과를 이용하여 평창강 유역의 무차원 우량주상도를 구축하여 보면 Fig. 4와 같다.

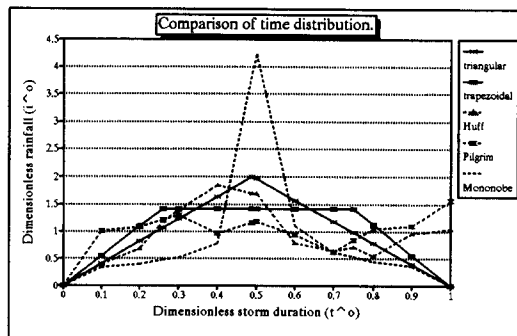


Fig. 4. Dimensionless Hyetographs in P

3. 유출해석 모형

3.1 합리식

유역에 시간과 공간적으로 일정한 강우강도를 지닌 강우가 도달시간과 같은 지속시간동안 내린다면 유출은 평형상태에 도달하게 되고 그때의 유출량이 설계홍수량이 된다는 것이 기본이론이다. 침투현상에 의한 강우량의 손실이 필연적이므로 유출계수를 곱하여 침투유량을 산정하게 된다. 기본식은 식(13)과 같다. 수정 합리식의 유출계수 재현기간은 2~10년이므로 높은 재현기간에서는 빈도보정계수를 사용하여 증가시킨다.

$$Q_p = 0.2778 C_r CIA \quad (13)$$

C는 빈도보정계수이고, I는 강우강도이다.

3.2 Kajiyama 공식

梶山(1922)은 1915년부터 1922년까지 전국 31개 지점에 대하여 유역면적과 홍수량과의 관계를 사용하여 유역면적의 멱승에다 유로연장 및 최대우량 등의 유역특성 인자의 함수로써 표현하였다. 실무에서 사용되는 일반식은 (14)~(15)와 같다.

$$A < 42.91 km^2$$

$$Q_{max} = F(310 + r) \times \left(4 + \frac{A}{L^2}\right) A^{(1.016 - 0.1135 \log A)} \quad (14)$$

$$A \geq 42.91 km^2$$

$$Q_{max} = 1.886 F(310 + r) \times \left(4 + \frac{A}{L^2}\right) A^{(0.6784 - 0.0101 \log A)} \quad (15)$$

3.3 Nakayasu(1956)의 합성단위도법

지속시간이 $t_R(hr)$ 이고 유효강우량이 $R_o(mm)$ 인 단위유량도의 총 면적인 직접유출수문곡선의 용적

은 적분하면 구할 수 있고 총 유효우량과 같게 놓을 수 있다.

$$\int_0^{\infty} Q dt = Q_p(0.3t_p + t_k) = 0.2778 R_o A \quad (16)$$

$$Q_p = \frac{0.2778 R_o A}{0.3t_p + t_k} \quad (17)$$

따라서 식 (17)을 사용하면 유효우량으로 인한 단위도의 침투유량을 얻고 무차원 수문곡선을 이용하여 단위도를 합성할 수 있다. 대상유역 합성단위도의 주요 특성인자 산정결과는 Table 14와 같으며 단위 지속시간은 1시간으로 하였고 단위 유효강우량은 1(mm)로 산정하였다.

Table 14. Nakayasu UH in IHP

Basins	Sub	L (km)	Q_p	t_p	t_r	t_k
P.	P1	51.9	22.7	4.21	3.407	5.111
	P2	19.3	7.8	2.32	1.519	2.279
	P3	44.2	19.8	3.76	2.964	4.445
	P4	22.9	11.8	2.53	1.731	2.597
	P5	25.9	7.8	2.71	1.905	2.858
	P6	16.6	5.8	2.16	1.360	2.040
B.	B1	49.0	21.8	4.04	3.242	4.863
	B2	30.3	23.3	2.96	2.159	3.238
	B3	19.2	6.8	2.31	1.514	2.270
	B4	16.8	8.1	2.17	1.375	2.062
	B5	13.0	5.9	2.07	1.265	1.898
W.	W1	42.8	24.2	3.68	2.884	4.326
	W2	40.7	16.1	3.56	2.758	4.137
	W3	30.9	11.4	2.99	2.192	3.288
	W4	18.9	10.4	2.30	1.496	2.244
	W5	8.0	5.0	1.70	0.900	1.350
	W6	21.8	13.0	2.46	1.664	2.497

3.4 Clark 유역 추적법

Clark(1945) 방법에서는 순간단위유량도를 구하기 위하여 두개의 매개변수($K, \Delta t$)와 도달시간-누가면적 관계를 이용한다. 저류상수 K 를 구하는 방법은 강우-유출 자료가 없는 경우 유역지체시간(T_L)과 같다고 보고 경험공식을 사용하여 구하고, 강우-유출 자료가 있을 경우는 직접유출 수문곡선의 하강부 변곡점에서의 유량을 그 시간에서의 유량변화율(dQ/dt)로 나누어 산정한다.

동시간거리는 Clark-Johnstone이 제안한 식 (18)을 사용하였다.

$$L_{ISoch}(km) = 3.6V \Delta t \quad (18)$$

유역에 순간적으로 내리는 단위 유효우량으로 인해 유역출구에 도달하는 유출량은 다음 식 (19)로 얻을 수 있다.

$$I_i = 0.2778 \times \frac{A_i}{\Delta t} \quad (19)$$

각 소구간을 통한 추적은 식 (20)으로 한다.

$$O_2 = m_0 I_2 + m_1 I_1 + m_2 O_1 \quad (20)$$

3.5 지형학적 순간단위도 모형

수문학적 선형계에 있어서 강우-유출 관계는 단위 충격함수를 이용하면 식 (21)과 같은 회선적분 함수로 표현된다.

$$Q(t) = \int_0^t u(t-\tau) i(\tau) d\tau \quad (21)$$

$u(t)$ 는 핵함수로 순간단위도, $i(\tau)$ 는 유효우량이며 $Q(t)$ 는 직접유출량이다. 자연하천에서의 강우-유출 현상을 해석하기 위해서는 핵함수 $u(t)$ 의 적절한 표현이 주된 내용이 된다. Rosso(1984)는 $u(t)$ 를 식 (22)의 감마 분포함수로 가정하였다.

$$u(t) = [1/k\Gamma(n)](t/k)^{n-1} \exp(-t/k) \quad (22)$$

Rosso는 식 (22)의 형상계수 n 과 축적계수 k 에 대해 회귀분석을 실시하여 다음 식으로 나타내었다.

$$n = 3.29(R_B/R_A)^{0.78} R_L^{0.07} \quad (23)$$

$$k = 0.7[R_A/(R_B R_L)]^{0.48} V^{-1} L \quad (24)$$

지형학적 순간단위도의 적절한 해석을 위해 각

하천의 응답특성을 식 (22)의 지수분포와 감마분포로 가정하였지만, 실제해석에 있어서는 식 (24)에 포함된 유하속도 V 의 적절한 해석방법이 문제로 남는다. 유출속도를 수치적으로 표현할 수 있는 적절한 수단이 선택되면 축적계수 k 를 결정할 수 있다. 본 연구에서는 불안전 감마함수를 이용한 최소자승법을 사용하여 매개변수 k 의 최적해를 결정하였다. 최소자승법에 대한 목적함수는 다음과 같다.

$$S^2 = \sum_j \epsilon_j^2 \quad (25)$$

여기서 $\epsilon_j = q_j - \hat{q}_j$, q_j = 관측값, \hat{q}_j = 모의값

또한, 유도되어진 순간단위도의 적용성과 재현성을 판단하기 위해 식 (26)을 이용할 수 있으며, 이는 순간단위도의 적합성 정도를 밝혀주는 방법으로 제시될 수 있다. 이 값은 모의치와 실측치가 잘 일치할수록 100(%)에 가까워진다.

$$E(\%) = [1 - \frac{\sum (q_j - \hat{q}_j)^2}{\sum (q_j - \bar{q}_j)^2}] \times 100 \quad (26)$$

여기서 \bar{q}_j 는 평균 관측직접유출량이다.

4. 실제유역에 대한 적용 및 분석

4.1 대상유역의 현황

IHP 대표시험유역인 한강수계의 평창강 6개 소유역과 11개 우량관측소, 금강수계의 보청천 5개 소유역과 12개 우량관측소 그리고 낙동강 수계의 위천 6개 소유역과 11개 우량관측소 등 총 17개 소유역과 34개 우량관측소를 연구대상으로 선정하였다. 1/50,000 지형도를 이용하여 구한 지형학적 인자는 Table 15와 같다.

4.2 적 용

4.2.1 설계강우에의 적용

(1) 설계강우량의 산정

Table 15. Geomorphologic Factor in IHP

Bas-ins	Sub	Water stage gauge	R_H	R_A	R_L	Ω
P.	P1	Banglim	4.47	5.26	2.63	5
	P2	Habanjung	4.09	5.00	2.17	4
	P3	Sanganmi	4.24	5.00	2.56	5
	P4	Baekokpo	3.27	3.85	1.82	5
	P5	Jangpyung	4.65	5.56	2.94	4
	P6	leemokjung	3.88	4.55	2.38	4
B.	B1	Sangye	3.40	3.77	1.88	6
	B2	Gidae	3.13	3.47	1.14	6
	B3	Tanbu	4.17	5.02	2.31	4
	B4	Yipyong	3.49	4.14	2.39	4
	B5	Samseung	3.79	4.67	2.10	4
W.	W1	Museung	4.88	4.72	2.18	5
	W2	Byeungchun	4.46	5.17	2.07	5
	W3	Miseung	4.05	4.67	1.27	5
	W4	Gono	4.57	5.39	2.56	4
	W5	Dongkok	3.05	3.70	1.62	4
	W6	Hyoreung	5.40	6.58	2.72	4

설계강우량은 일반적으로 과거의 일강우량 자료를 확률론적 수문분석기법을 사용하여 구하지만, 본 연구에서는 설계개념보다는 실제강우사상에 의한 적용성 검토에 주된 관심이 있으므로 T 년의 빈도를 가진 강우는 T 년의 빈도를 가진 유출을 야기시킨다고 가정하고 고재용(1980)의 일우량의 빈도 공식을 사용하였다. 또한 초과강우량의 산정은 미토양보존국(SCS)의 방법을 사용하였다.

(2) 홍수빈도 분석

확률분포는 부분계열 홍수자료를 이용하여 해석하였고 확률분포형의 검토를 위해 K - S 검정과 χ^2 검정을 실시하였다. 그 결과 최대편차가 대체로 적게 나타났고, 수문학에서 널리 사용되고 있는 Log - $Pearson$ 3 parameter를 확률분포로 채택하였다.

(3) 홍수량 빈도분석 결과

홍수량은 Log - $Pearson$ 3 parameter 분포를 이용하여 자료년한의 2배를 채택하여 3개 유역별로 지역빈도분석을 실시하고 그 계산 결과를 Table 16에 나타내었다. 재현기간은 일반적으로 사용하는 2, 5, 10, 20, 50 및 100년을 선정하여 분석하였고, 그중 50년과 100년은 자료년한의 문제로 신뢰범위를 벗어난 것으로 볼 수 있지만 현재 하천실무에서 주로 채택되어지는 재현기간이므로 포함시켜 적용하였다.

Table 16. Measured Qp for return period in IHP Basins. (Unit : CMS)

Sub	Return period (years)					
	2	5	10	20	50	100
P1	780.9	1315.7	1595.2	1826.1	2085.9	2259.1
P2	139.7	319.0	437.6	551.5	698.8	809.2
P3	637.6	1086.5	1321.2	1515.0	1733.1	1878.5
P4	228.7	381.1	525.9	707.6	1023.8	1338.3
P5	195.8	370.4	486.0	596.9	740.5	848.0
P6	121.6	243.0	323.5	400.6	500.5	575.3
B1	315.1	567.5	824.8	1166.0	1796.5	2460.4
B2	335.4	695.3	933.5	1162.1	1457.9	1679.6
B3	88.6	154.2	229.6	340.1	570.7	845.2
B4	80.1	140.4	214.0	327.4	579.2	897.9
B5	59.8	117.7	188.2	296.5	534.5	831.5
W1	805.9	1183.7	1381.2	1544.3	1727.9	1850.2
W2	465.6	726.9	899.8	1065.8	1280.6	1441.5
W3	231.3	372.3	500.1	654.7	912.8	1159.8
W4	180.0	290.1	383.6	491.1	660.4	813.5
W5	75.2	112.3	157.6	226.1	374.3	558.3
W6	220.5	359.2	489.3	650.9	929.0	1203.1

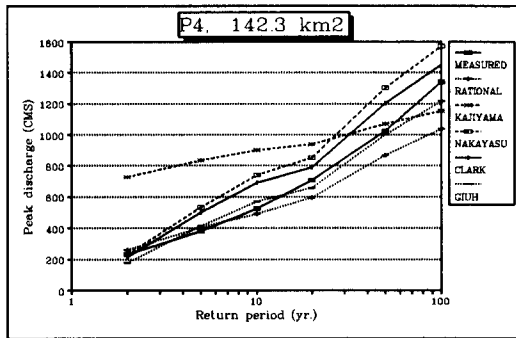


Fig. 5. Comparison of Models in P4

Table 17. Results of Error (%) in IHP

Bains	Rati-onal	Kaji-yama	Naka-yasu	Clark	GIUH
P.	18.3	101.8	22.8	26.3	14.2
B.	36.3	183.5	58.3	57.3	29.1
W.	32.3	113.2	47.8	65.8	31.5

(4) 적용 및 결과분석

대상유역에 대하여 산정한 각종 매개변수 및 특성인자를 사용하여 기존 유출모형과 GIUH 모형에 적용시켜 유출해석을 실시하였다. 그중에서 평창강 P4 백옥포 소유역을 한 예로 나타내었다.

기존 유출모형과 GIUH 모형의 설계 첨두홍수량

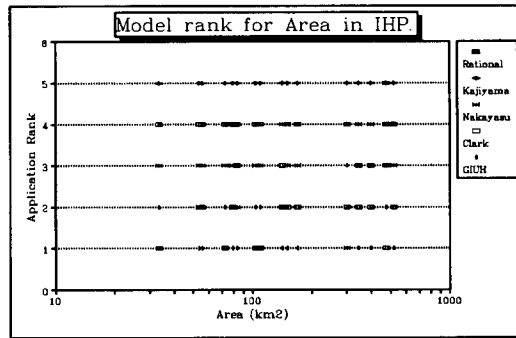


Fig. 6. Rank of Models for Area in IHP

Table 18. Application Limit of Models

Model	Application area(km ²)					
	0	100	200	300	400	500
Rational						
Kajiyama						
Naka.						
Clark						
GIUH						

Note) Kajiyama was attention to application because of inadequacy.

의 변동정도를 확인하기 위하여 계산치와 관측치의 오차율을 다음의 식 (27)을 사용하여 Table 17에 나타내었다.

$$\text{오차율}(\%) = \frac{\text{Cal } Q_p - \text{Obs } Q_p}{\text{Obs } Q_p} \times 100 \quad (27)$$

이상의 결과에서 유역면적의 대소에 따른 관측치와의 재현성 순위를 전 유역에 대해 나타내면 Fig. 6과 같고 이를 면적에 대한 적용한계로 나타내면 Table 18과 같다. Kajiyama 공식은 전체적으로 부적합하지만, 타방법과 비교목적 등으로 150(km²) 이내에서 주의를 하여 적용하여야 할 것이라 판단된다.

또한, 재현기간별 비유량과 유역면적의 관계를 각 방법에 따라 수식화한다면 실무 적용시 유출해석에 중요한 수단을 제공할 것으로 판단되어 식

(28)과 같이 수식화하여 빈도에 따른 각 유역별 계수를 구하면 Table 19와 같다.

$$Q_s = (a + b/A)^2 \quad (28)$$

여기서 Q_s (CMS/km²)는 비유량이다.

Table 19. Coefficient of Specific Discharge

Basins	Pyung-chang River		Bo-cheung Stream		Wi Stream		
	10	100	10	100	10	100	
Obs.	a	1.52	1.99	1.31	2.07	1.67	2.05
	b	43.06	101.2	47.98	73.87	17.06	74.75
Rational	a	1.59	2.25	1.57	2.20	1.80	2.56
	b	31.53	52.74	28.89	48.62	25.21	42.31
Kajiyama	a	1.81	1.99	2.06	2.28	1.95	2.16
	b	73.83	89.25	56.35	69.98	65.59	79.71
Nakaya.	a	1.47	2.17	1.79	2.47	1.65	2.44
	b	74.02	109.4	53.75	89.90	64.88	88.95
Clark	a	1.38	2.04	1.57	2.18	1.41	2.09
	b	85.69	125.1	74.69	117.4	98.37	136.1
GIUH	a	1.39	2.02	1.54	2.11	1.47	2.15
	b	61.20	92.50	54.88	91.12	54.99	78.18

4.2.2 실제 강우사상의 적용

강우의 시간 분포모형을 실제 강우사상에 적용하여 관측수문곡선과 비교함으로써 적용성을 평가한다. 모의를 위한 유출모형은 앞장에서 재현성이 검증된 바있는 GIUH 모형을 사용한다.

(1) 강우-유출 자료

산정된 강우의 시간 분포모형의 적용성 검토를 위한 강우-유출 자료는 국제수문개발계획보고서(1984~1994)에 수록된 자료의 신뢰성을 인정하고 사용한다. 신뢰성이 인정되는 자료를 선별한 결과 평창강 24개, 보청천 17개 그리고 위천 32개 총 73개의 자료이다. 유효강우는 ϕ -index, 기저유출은 수평직선법으로 분리하였다.

(2) 강우의 시간 분포형의 산정

설계 우량추상도를 작성하기 위해서는 먼저 재현기간과 지속기간에 해당하는 빈도별 강우량을 결정한 후, 각 방법에 따라 우량추상도를 작성한다. 미계측 유역도 유역면적에 따라 본 연구에서 제안한 근사면적의 특성치를 사용하여 확대 적용할 수 있다.

유역면적이 142km²인 평창강 백옥포(P4) 수위

표 지점에 1987년 7월 21일 강우사상의 지속시간은 10시간, 유효 강우량은 159(mm)인 경우의 시간분포 산정결과를 예로서 Fig. 7에 나타내었다.

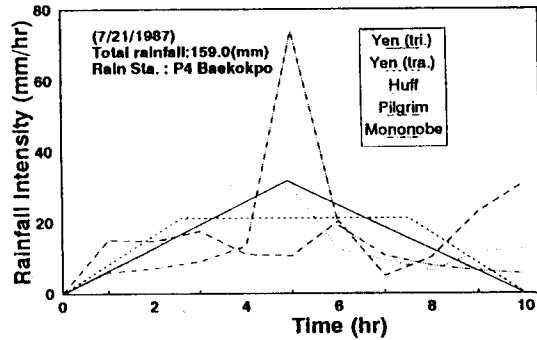


Fig. 7. Sample of Effective Hyetographs

(3) 적용 및 고찰

73개의 강우-유출 자료에 의해 강우의 시간분포형 5개를 각각 적용시켜서 총 365개의 홍수수문곡선을 모의하였으며 각 유역별 전체평균값은 Table 20에 제시하였고, 17개 소유역의 수문곡선의 결과 중 대표성이 인정되어지는 평창강 백옥포 소유역의 강우사상을 Fig. 8에 한 예로 나타내었다.

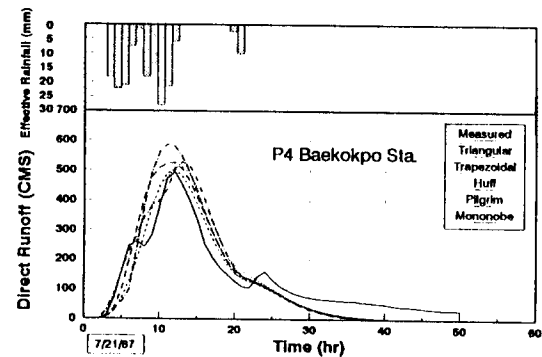


Fig. 8. Hydrographs in P4

3개유역의 첨두유량의 오차율이 평균 20% 내이고, 수문곡선 재현정도를 나타내는 E_s 는 보청천의 일부 소유역을 제외하고는 평균 25%내로 나타내 재현정도가 양호하다고 할 수 있다.

Table 20. Results of Error (%)

Item	Model	Basins		
		P.	B.	W.
Q _p	Triangular	19.5	18.5	14.3
	Trapezoidal	21.7	19.1	15.0
	Huff	23.4	19.0	19.6
	Pilgrim	24.7	19.2	21.9
	Mononobe	21.2	19.7	14.7
t _p	Triangular	13.0	18.5	11.4
	Trapezoidal	13.5	19.0	13.1
	Huff	14.5	20.5	14.6
	Pilgrim	15.1	22.3	17.9
	Mononobe	14.6	21.3	13.9
E _c	Triangular	19.4	37.0	15.6
	Trapezoidal	19.5	38.0	15.7
	Huff	22.1	37.1	26.9
	Pilgrim	22.3	37.7	26.2
	Mononobe	23.9	38.1	27.2

Note) E_c: 100-E(Coefficient of Efficiency)

유역면적이 적어질수록 오차가 적어 소유역에서 높은 재현성을 보인다. 또한 짧은 지속시간의 경우가 긴 지속시간의 경우보다 양호한 결과를 얻었고, 복합 호우사상도 비교적 잘 재현하는 것으로 나타났다. 중방위가 비교적 잘 재현되었고, 후방위 강우형은 정도가 떨어졌다. 전체적으로 위천 유역의 오차율이 적었고, 이는 위천 유역이 타 유역보다는 하천에 인공구조물이 없고 사면의 유출을 급변시키지 않는 지형관리가 되어서 모의가 잘 이루어졌기 때문으로 판단된다. 강우의 시간 분포에 가장 많이 영향을 주는 인자는 강우 지속시간이며 강우량 및 유역면적도 수문곡선의 재현에 많은 영향을 나타내고 있다.

5. 결 론

본 연구는 실무 효율성을 높인다는 관점에서 우리나라 미계측 중소하천의 설계홍수량 산정에 적합한 강우의 시간 분포모형을 제안하고, 물리적 강우-유출모형인 지형학적 순간단위도 이론으로서 그 적용성을 검토하는데 주안점을 두었다. 이 연구결과인 강우의 시간 분포모형과 유출모형인 GIUH의 실무적용성은 매우 높기 때문에 기존 모형의 적용면적에 대한 한계성을 뛰어넘어 장래 미계측유역의 수문량을 파악하는데 학문적·실용적으로 대단히 유용하다고 판단되며, 이상에서 연구된 결론은 다

음과 같다.

- (1) 실무적용에 필요한 우리나라 강우의 시간 분포모형의 특성치를 도표와 참고문헌에 제시하였다.
- (2) 강우의 시간 분포의 오차율은 전체평균 20% 내외로 자료년한에 비해 안정적이라 할 수 있으며, 삼각형 분포가 높은 정도를 나타내었고 Pilgrim-Cordery 방법과 Mononobe 방법은 낮은 정도를 나타내었다.
- (3) Huff 방법의 분석결과, 17개 소유역을 통하여 서병하와 김남원(1989)의 연구결과와 같은 제 2구간 강우가 지배적이고 제 3구간 강우가 가장 적은 빈도를 나타냈다.
- (4) 실무에서 주로 사용되는 Mononobe 방법은 다른 시간분포와 비교하여 볼 때 상대적으로 첨두유량의 부분만을 크게 부각시키기 때문에, 수문곡선의 재현성의 정도가 떨어지므로 실무적용시 이에 대한 개선이 요망된다.
- (5) 기존 강우-유출모형과 본 연구의 GIUH모형을 빈도별로 전체분석하여 평균한 결과, 첨두유량 평균 오차율이 29.0%, 132.8%, 43.0%, 49.8% 및 24.9%의 순으로 GIUH의 재현성이 가장 양호한 상태를 보였다.
- (6) 유역면적에 대한 강우-유출모형들의 적용한계를 Table 18에 제시하였다. 본 연구의 합리식 적용결과, 적용가능 유역면적은 150(km²) 이내로 나타났다.
- (7) 실무적용을 위한 강우-유출모형들의 각 유역면적에 대한 빈도별 비유량의 함수식을 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 동아대학교 학술연구조성비 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서. (1983~1994). 건설부.
- 고재용 (1980). "우리나라 지역 최대일우량의 빈도분

- 석에 관한 연구.” 한국수문학회지, 제13권, 제1호, pp. 39~48.
- 서병하, 김남원 (1989). “지역별 설계강우의 시간 분포.” 연구보고서, 한국건설기술연구원.
- 서승덕 (1965). “폭우의 시간분포에 관한 고찰.” 한국농공학회지, 제7권, 제2호, pp. 792~797.
- 서진호 (1996). “강우의 시간 분포모형 산정에 의한 강우-유출해석,” 박사학위논문, 동아대학교.
- 서진호, 이상배, 조홍제, 민병형 (1995). “설계강우의 시간 분포모형 적용성 연구.” 한국수문학회지, 제28권, 제5호, pp. 205~217.
- 梶山淺次郎 (1922). “朝鮮ニ於ケル最大洪水量公式.” 日本土木學會誌, Vol. 8, No. 4, pp. 831~860.
- 中安米藏 (1956). “本邦河川洪水の Unit Graph について.” 建設省直轄工事 第7回 技術研究報告.
- Clark, C.O. (1945). “Storage and the unit hydrograph.” *Transactions*, ASCE, Vol. 110, pp. 1419~1446.
- Horton, R.E. (1945). “Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysycal approach to quantitative morphology.” *Bulletin, Amer.*, Vol. 56, pp. 275~370.
- Huff, F.A. (1967). “Time distribution of rainfall in heavy storms.” *Water Resour. Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 1007~1019.
- Kirkby, M.J. (1976). “Tests of the random network model and its application to basin hydrology.” *Earth Surface Process*, Vol. 1, pp. 197~212.
- Pilgrim, D.H., and Cordery, I. (1975). “Rainfall temporal patterns for design floods.” *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 101, No. HY1, pp. 81~95.
- Rodríguez-Iturbe, I., and Valdés, J.B. (1979). “The geomorphologic structures of hydrologic responses.” *Water Resour. Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 1422~1434.
- Rosso, R.L. (1984). “Nash model relation to horton order ratio.” *Water Resour. Research*, Vol. 20, No. 7, pp. 914~920.
- Strahler, A.N. (1957). “Quantitative analysis of watershed geomorphology.” *Transactions, Amer. Geoph. Union*, Vol. 38, No. 6, pp. 913~920.
- Yen, B.C., and Chow, V.T. (1977). “Feasibility study on research of local design storms.” *Report No. FHWA-RD-78-65*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Zoch, R.T. (1934). “On the relation between rainfall and stream flow.” *Monthly Weather Review*, Vol. 62, pp. 315~322.

〈접수 : 1996년 7월 15일〉