

# 점 강우모형과 강우강도-지속기간-생기빈도 해석

○ 유철상<sup>1)</sup>, 김남원<sup>2)</sup>, 정광식<sup>3)</sup>

## 1. 서론

강우강도-지속기간-생기빈도곡선(Rainfall Intensity-Duration-Frequency Curve; I-D-F 곡선)은 수문설계 시 기준이 되는 중요한 정보를 제공한다. 이 관계곡선은 어떤 지역의 지속기간별 최대강우강도를 기록년한 동안의 자료로부터 추출하여 시계열을 만든 후 통계학적 처리과정을 통해 얻게 된다(윤용남, 1998). 그러나 이러한 관계곡선은 첫째, 기록년한에 크게 의존되어 상대적으로 긴 재현기간을 사용하는 중요구조물의 설계 시 정도있는 강우강도의 추정이 어렵다는 점과, 둘째, 상대적으로 아주 크거나 아주 작은 강우기록이 전체적인 결과에 너무 큰 영향을 미치게 된다는 단점을 가지고 있다(안재현 등, 2000). 최근 지구온난화에 따른 이상 집중호우는 과거의 관측기록을 근거로 하는 경우 거의 가능최대홍수량에 접근하는 것으로 나타나 이러한 접근방법의 문제점을 여실히 나타내고 있다.

본 연구는 이러한 문제점을 해결한다는 시도로서 비정상적으로 크거나 작은 강우기록에 대해 상대적으로 덜 민감하며, 아울러 과거 20-30년 정도의 기록으로도 어느 정도 신뢰도가 있으며, 또한 일관성 있는 I-D-F 곡선을 추출하는 것을 목표로 한다. 이러한 연구의 목적을 위해 본 연구에서는 모형의 구조가 상대적으로 간단한 구형펄스모형(Rodriguez-Iturbe 등, 1984)을 이용하여 서울 및 인천지점을 대상으로 I-D-F 곡선을 유도해 보고, 그 결과를 강우 자료로부터 추출한 I-D-F 곡선과 비교함으로써 그 적용성을 판단해 보고자 한다. 본 연구에서 고려하는 구형펄스모형은 강우의 군집특성을 고려하지 못함으로 유도된 I-F-D 곡선은 년최대치계열을 이용하여 추정하는 I-D-F 곡선에 비해 상대적으로 작은 강우강도를 나타낼 것임을 예상할 수 있다.

## 2. 구형펄스모형 (Rectangular Pulse Poisson Process Model)

수문분야에서 흔히 구형펄스모형이라고 불리는 모형은 Eagleson(1972), Waymire와 Gupta(1981)과 Rodriguez-Iturbe(1984) 등의 연구에서 그 출처를 살펴볼 수 있다. 이 모형은 이후 군집특성을 추가로 고려하는 여러 모형들로(Rodriguez-Iturbe 등, 1987; 1988; Entekhabi 등, 1989; Islam 등, 1990) 발전되어 왔으나 여전히 포아송과정을 기본으로 하는 점강우모형의 전형을 이루고 있는 모형이다. 이 모형의 구조 및 특성을 살펴보면 다음과 같다.

구형펄스모형은 개개 강우사상  $\xi(t)$ 의 발생을 나타내는 과정  $N(t)$ 는 매개변수  $\lambda$ 인 포아

- 1) 고려대학교 환경공학과 부교수 (envchul@tiger.korea.ac.kr)
- 2) 건설기술연구원 수자원환경연구부 책임연구원 (nwkim@kict.re.kr)
- 3) 고려대학교 환경공학과 대학원 석사과정 (edjks@hanmail.net)

송과정을 따르고 각 강우사상의 발생시간  $T_n$ 과 더불어 강우사상의 지속기간  $t_r^{(n)}$ 과 강도  $i_r^{(n)}$ 은 한 쌍으로서  $U_n = (t_r^{(n)}, i_r^{(n)})$ 으로 나타낸다. 따라서  $U_n$ 은 시간  $T_n$ 에 발생한 강우사상의 기본특성이 된다. 각 사상의 특성인  $U_n$ 은 상호 독립적이며 동일하게 분포되어 있고 (independent and identically distributed) 발생시간  $T_n$ 과도 역시 독립적이다. 일반적으로 각 강우사상의 강도와 지속기간은 독립적인 무작위 변수로서 각각 지수확률밀도함수를 따른다고 가정한다.

$$f(i_r) = \mu e^{-\mu i_r}, \quad \mu > 0 \quad (1)$$

$$f(t_r) = \eta e^{-\eta t_r}, \quad \eta > 0 \quad (2)$$

따라서

$$f(U) = f(i_r, t_r) = \mu \eta e^{-\mu i_r - \eta t_r} \quad (3)$$

여기서  $E[i_r] = 1/\eta$ 와  $E[t_r] = 1/\mu$ 는 각각 사상의 평균 지속기간과 평균강도를 나타낸다.

실제 강우자료는 누가된 형태로 존재하므로 모형의 적용을 위해서는 즉, 매개변수를 추정하거나 주어진 시간축척에 대한 모형의 특성을 시험하기 위해서는 주어진 기간  $T$ 에 대해 다양한 시간간격의 누가강수량에 대한 고려가 필요하게 된다. 먼저  $Y_i$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$Y_i = \int_{(i-1)T}^{iT} \xi(s) ds, \quad i = 1, 2, \dots \quad (4)$$

$\xi(t)$ 의 정상성 때문에  $Y_i$ 도  $U_n$ 과 마찬가지로 동일하게 분포됨을 알 수 있다.  $Y_i$ 의 평균, 분산 및 공분산은 다음과 같다.

$$E[Y] = T\lambda/\mu\eta \quad (5)$$

$$\text{Var}[Y] = \frac{4\lambda}{\eta^3 \mu^2} (\eta T - 1 + e^{-\eta T}) \quad (6)$$

$$\text{Cov}[Y_1, Y_k] = \frac{2\lambda}{\eta^3 \mu^2} (1 - e^{-\eta T})^2 e^{-\eta(k-2)T}, \quad k \geq 2 \quad (7)$$

여기서  $Y_i$ 의 상관구조가  $\eta$ 와  $T$ 에만 의존된다는데 주목할 필요가 있다.

구형펄스모형의 매개변수  $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $\eta$ 의 추정은 식 (5) - (7)을 이용하여 수행될 수 있다. 일반적으로 모형의 매개변수는 관측 자료의 평균, 분산 및 lag-1 상관계수가 보전되도록 추정된다. 또한 구형펄스모형은 그 특성상 개개 강우사상이 어떤 확률을 가지고 중첩되게 되며 만일 중첩이 전혀 발생하지 않는다면 추정되는 I-D-F 곡선은 지수분포를 이용한 I-D-F 해석 결과와 유사한 형태를 갖게 된다.

### 3. 적용 예

#### 3.1 강우자료 특성

본 연구에서는 한강하류에 위치한 기상청 산하의 서울 및 인천지점 우량관측소 자료를 이용하여 본 연구의 결과를 평가하였다. 각 지점의 시우량 자료 보유기간은 대략 40년 정도이며(1961년 6월 1일~2000년 5월 31일), 특히 건기에는 결측자료가 많으나 우기의 경우는 자료가 대체로 양호하므로 본 연구에서도 우기인 6~9월의 자료를 이용하였다.

관측자료를 이용한 빈도해석을 위하여 매년의 최대치로 구성된 년최대치계열(Annual

Maximum Series)을 지속시간별로 작성하였으며, 초과확률은 Weibull공식을 사용하였다. 표 1은 각 지속시간에 따라 작성된 년최대치계열의 평균, 분산 및 1차 상관계수를 나타내고 있다. 표 1에서 살펴볼 수 있듯이 지속시간의 증가에 따라 평균과 분산은 증가하며, 1차 상관계수는 대체로 유의수준이하로 평가할 수 있다.

표 1. 지속시간별 최대치계열의 통계특성

지속시간 (hr)	서울			인천		
	평균	분산	1차 상관계수	평균	분산	1차 상관계수
1	43.40	338.73	0.08	39.03	191.47	-0.05
6	110.89	1765.48	0.00	100.46	2104.42	-0.17
12	138.66	2929.48	-0.11	126.00	4157.53	-0.22
24	166.56	7173.40	-0.14	148.97	6777.68	-0.24

### 3.2 구형펄스모형의 매개변수 추정

구형펄스모형의 매개변수 추정은 앞에서 언급한 것과 같이 모형으로부터 유도된 통계특성과 관측된 강우의 통계특성을 비교함으로써 수행될 수 있다. 본 연구에서는 김남원(1998)에 의해 추정된 모형의 매개변수를 이용하였다. 이 매개변수는 6~9월의 우기자료만을 이용하여 추정된 것으로, 이는 건기의 경우 결측된 자료가 많을뿐더러 우리나라의 경우 주요 호우사상은 대체로 우기인 6~9월에 분포되기 때문이다. 월별로 각각 매개변수를 추정할 경우는 각 월별로 추정된 I-D-F 곡선을 해석하는데 어려움이 있으므로 본 연구에서는 우기인 6~9월의 평균적인 강수특성을 모형의 매개변수 추정에 이용하였다.

모형의 매개변수 추정에 이용된 서울 및 인천지점의 강수특성은 표 2(김남원, 1998)와 같다. 아울러 이러한 특성치를 이용하여 추정된 매개변수는 표 3과 같으며, 추정된 매개변수를 사용하는 경우 모형의 통계특성은 표 4에 정리하였다. 표 2와 4의 비교를 통해 살펴볼 수 있듯이 모형의 매개변수 추정은 적절히 수행된 것으로 판단할 수 있다.

표 2. 관측자료의 통계특성

지속 시간 (hr)	서울				인천			
	평균	분산	1차 상관계수	2차 상관계수	평균	분산	1차 상관계수	2차 상관계수
1	0.3262	4.0242	0.5434	0.3363	0.2691	3.0561	0.5412	0.3295
6	1.9571	68.3526	0.3390	0.1261	1.6146	52.2142	0.3522	0.1270
12	3.9142	186.7920	0.2332	0.0509	3.2293	146.0323	0.2272	0.0483
24	7.8284	455.6035	0.1414	0.0335	6.4585	353.4306	0.1441	0.0342

표 3. 추정된 구형펄스모형의 매개변수

지속 시간 (hr)	서울			인천		
	$E[t_i] = 1/\mu$ (mm/hr)	$E[t_i] = 1/\eta$ (hour)	STORMS/ 4MONTH	$E[t_i] = 1/\mu$ (mm/hr)	$E[t_i] = 1/\eta$ (hour)	STORMS/ 4MONTH
1	8.3816	1.0011	113.8	7.7311	0.9939	102.5
6	5.0487	3.0996	61.0	4.5810	3.2392	53.1
12	4.2270	4.2201	53.5	4.0646	4.1178	47.1
24	3.4626	5.4047	51.0	3.2175	5.4896	44.6

표 4. 추정된 매개변수에 대한 구형펄스모형의 통계특성

지속 시간 (hr)	서울				인천			
	평균	분산	1차 상관계수	2차 상관계수	평균	분산	1차 상관계수	2차 상관계수
1	0.3262	4.0242	0.54340	0.20011	0.2691	3.0561	0.54122	0.19788
6	1.9571	68.3526	0.33896	0.04892	1.6146	52.2142	0.35219	0.05525
12	3.9142	186.7920	0.23319	0.01358	3.2293	146.0323	0.22720	0.01233
24	7.8284	455.6035	0.14143	0.00167	6.4585	353.4306	0.14415	0.00183

3.3 구형펄스모형을 이용한 I-D-F 해석

구형펄스모형을 이용하여 I-D-F 해석을 실시하기 위해서는 먼저 중첩확률  $\mu$ 와 중첩에 의해 증가되는 강우강도의 증가정도  $\alpha$ 를 구해야 한다. 지속기간 1, 6, 12, 24시간에 대한 중첩확률 및 강우강도의 증가정도는 서울 및 인천 지점에 대해 각각 표 5와 같이 계산된다. 먼저, 지속기간에 따른 중첩확률의 변화를 살펴보면 지속기간이 길어짐에 따라 중첩확률은 아주 크게 증가함을 파악할 수 있다. 그러나, 반대로 중첩에 따른 강우강도의 증가정도는 지속기간이 증가함에 따라 완만하게 감소하는 추세를 나타내고 있다. 이러한 결과는 물리적으로도 타당한 것으로 지속기간이 길어짐에 따라 개개 강우사상이 중첩될 가능성은 커지나, 그 중첩이 완벽하게 이루어 질 가능성은 오히려 작아짐을 나타낸다.

이렇게 계산된 중첩확률 및 강우강도의 증가정도는 추정된 구형펄스모형의 매개변수에 영향을 받는다. 특히, 상대적으로 작은 매개변수의 차이가 (대체로 10% 정도; 표 3 참조) 큰 중첩확률의 차이로 나타난다는 것에 주목할만하다. 계산 결과 서울 및 인천지점의 중첩확률은 그 절대값이 작기는 하나 약 5배까지의 차이를 주는 것으로 나타나고 있다. 이러한 차이는 구형펄스모형을 이용한 I-D-F 해석 결과에도 큰 영향을 미치게 된다.

표 5. 중첩확률  $\mu$  및 중첩에 의한 강우강도의 증가정도  $\alpha$

지속기간 (hr)	서울		인천	
	$\mu$	$\alpha$	$\mu$	$\alpha$
1	0.689E-11	1.000	0.330E-12	0.996
6	0.188E-06	0.739	0.405E-07	0.750
12	0.233E-05	0.671	0.278E-06	0.668
24	0.244E-04	0.640	0.646E-05	0.640

표 6은 구형펄스모형을 이용한 I-D-F 해석 결과를 중첩을 고려한 경우와 중첩을 고려하지 않은 경우로 나누어 비교한 것이다. 앞서서도 언급한 바와 같이 중첩을 고려하는 경우, 특히 지속기간과 재현기간이 긴 경우에 강우강도의 증가가 두드러짐을 확인할 수 있다. 이는 강우강도의 계산 시 추정된 중첩확률과 재현기간을 함께 고려함으로써 생기는 당연한 결과이다. 아울러, 서울과 인천지점의 비교에서는 서울지점의 경우가 중첩의 효과가 더욱 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이는 앞서 설명한 중첩확률의 차이로 설명될 수 있다.

표 6. 구형펄스모형을 이용한 I-D-F 해석결과에 대한 중첩의 영향 (계산된 강우강도는 각각 중첩을 고려하지 않은 경우와 중첩을 고려한 경우를 나타냄)

재현기간 (year)	서울				인천			
	지속기간(hour)				지속기간(hour)			
	1	6	12	24	1	6	12	24
2	9.2/9.2	24.5/24.6	37.4/37.8	58.4/63.7	8.5/8.5	22.6/22.6	35.8/35.9	54.3/55.6
5	15.0/15.0	40.1/40.2	61.0/62.4	95.2/116.9	13.8/13.8	36.9/37.0	58.4/58.6	88.6/93.9
10	20.1/20.1	53.6/53.8	81.6/85.4	127.5/185.6	18.5/18.5	49.4/49.5	78.2/78.6	118.5/132.9
20	25.5/25.5	68.1/68.8	103.6/113.2	161.8/309.5	23.4/23.4	62.7/62.9	99.2/100.3	150.5/187.0
40	31.1/31.1	83.1/84.5	126.4/149.6	197.4/557.6	28.6/28.6	76.5/76.8	121.1/123.7	183.6/272.5

그림 1과 2는 구형펄스모형을 이용하여 서울 및 인천지점에 대해 각각 I-D-F 곡선을 유도하고 이를 관측된 년최대치계열과 비교하여 나타낸 것이다. 표 6에서 이미 살펴본 바와 같이 중첩을 고려하지 않은 경우의 I-D-F 곡선은 중첩을 고려한 경우에 비해 일관적으로 작은 강우강도를 나타내고 있고 그 정도는 지속기간이 길수록 아울러 재현기간이 길수록 크게 나타나고 있다. 서론에서도 언급한 바와 같이 구형펄스 모형은 강우의 군집특성을 고려하지 못함으로 유도된 I-D-F 곡선도 전체적으로 년최대치를 이용한 I-D-F 곡선에 비해 작은 강우강도를 나타내고 있다. 그러나 각 곡선의 전체적인 형태는 유사함을 확인할 수 있으며 강우의 군집특성을 고려하는 강우모형을 사용할 경우 보다 나은 결과를 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

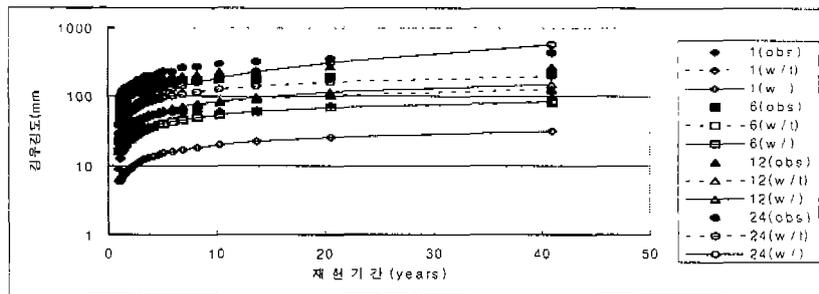


그림 1. 구형펄스모형을 이용한 I-D-F 해석 결과 (서울지점). 그림에서 obs는 관측치열, w/t는 중첩을 고려하지 않는 경우를, w/는 중첩을 고려한 경우를 나타낸다.

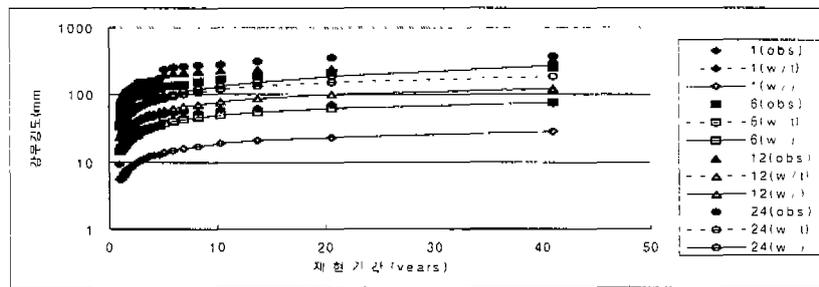


그림 2. 그림 1과 동일 (인천지점)

#### 4. 결론

본 연구에서는 모형의 구조가 상대적으로 간단한 구형펄스모형을 이용하여 I-D-F 곡선을 유도할 수 있는 이론적 방법론을 제시하였다. 이러한 연구는 관측자료만을 이용한 I-D-F 곡선이 자료기간 뿐만 아니라 비정상적으로 크거나 작은 강우기록에 대해 매우 민감하다는 단점을 보완하고자 하는 시도로 이루어 졌으며, 구형펄스모형을 이용하여 유도되는 I-D-F 곡선은 이러한 단점을 어느 정도 해결할 수 있는 것으로 판단할 수 있었다. 즉, 모형의 매개변수가 관측된 강우의 1차원 및 2차원 통계특성을 이용하여 추정되므로 비정상적으로 크거나 작은 소수의 강우사상은 전체적인 강우특성에 큰 영향을 미치지 못하며, 따라서 추정된 매개변수를 이용하여 유도되는 I-D-F 곡선도 년최대치계열을 이용하여 추정하는 I-D-F 곡

선에 비해 상대적으로 덜 민감하게 되는 것이다. 본 연구는 서울 및 인천지점에 적용되었으며 이때 유도된 I-D-F 곡선은 년최대치계열을 이용하여 유도된 I-D-F 곡선과 비교함으로써 그 적용성을 판단해 보았다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 지속기간이 길어짐에 따라 중첩확률은 아주 크게 증가한다. 그러나, 중첩에 따른 강우강도의 증가정도는 지속기간이 증가함에 따라 완만하게 감소하는 추세를 나타내고 있다. 이러한 결과는 물리적으로도 타당한 것으로 지속기간이 길어짐에 따라 개개 강우사상이 중첩될 가능성은 커지나, 그 중첩이 완벽하게 이루어 질 가능성은 오히려 작아짐을 나타낸다.

2. 중첩을 고려하는 경우, 특히 지속기간 및 재현기간이 긴 경우에, 강우강도의 증가가 두드러짐을 확인할 수 있었다. 이는 강우강도의 계산 시 추정된 중첩확률과 재현기간을 함께 고려함으로써 생기는 당연한 결과이다.

3. 본 연구에서 사용한 구형펄스 모형은 강우의 군집특성을 고려하지 못함으로 유도된 I-D-F 곡선도 전체적으로 년 최대치를 이용한 I-D-F 곡선에 비해 작은 강우강도를 나타내었다. 그러나 각 곡선의 전체적인 형태는 유사함을 확인할 수 있었으며 강우의 군집특성을 고려하는 강우모형을 사용할 경우 보다 나은 결과를 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 참고문헌

- 김남원 (1998). 강우의 시·공간 분포특성: 점 강우모형 매개변수 추정, 한국건설기술연구원.
- 안재현 김태용, 유철상, 윤용남 (2000). "자료기간 증가에 따른 확률강우량의 거동특성 분석." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제 33권, 제5호, pp. 569-580.
- 윤용남 (1998). 공업수문학. 청문각.
- Eagleson, P. S. (1972). "Dynamics of flood frequency." *Water Resources Research*, Vol. 8, No. 4, pp. 878-898.
- Islam, S., Entekhabi, D., and Bras, R.L. (1990). "Parameter estimation and sensitivity analysis for the modified Bartlett-Lewis rectangular pulses model of rainfall." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, No. D3, pp. 2093-2100.
- Rodriguez-Iturbe, I., Gupta, V.K., and Waymire, E. (1984). "Scale consideration in the modeling of temporal rainfall." *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 11, pp. 1611-1619.
- Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D.R., I., and Isham, V. (1987). "Some models for rainfall based on stochastic point processes." *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. A410, pp. 269-288.
- Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D.R., I., and Isham, V. (1988). "A point process model for rainfall: Further developments." *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. A417, pp. 283-298.
- Waymire, E., and Gupta, V.K. (1981). "The mathematical structure of rainfall representation 1. A review of the stochastic rainfall models." *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 5, pp. 1261-1272.