

# 분단위 강우강도-지속시간-재현기간 관계의 유도: 모포마 분포의 적용

## Derivation of Minutely Intensity-Duration-Frequency Curves: Applications of Moupfouma Distribution

유철상\*, 박창열\*\*, 김경준\*\*\*, 전경수\*\*\*\*

Yoo, Chulsang / Park, Changyeol / Kim, Kyoungjun / Jun, Kyung Soo

### 요    지

소유역의 배수시설물 설계를 위한 확률강우량 결정에는 일반적으로 건설교통부 (2000)에 의해 제시된 강우강도식을 이용하며, 강우의 지속시간이 10분이하인 경우에도 통상 제시된 강우강도식의 지속시간 최소단위인 10분을 그대로 적용하는 것이 일반적이다. 따라서 도달시간이 수 분 정도인 도로 배수시설물의 경우에는 상대적으로 과대설계가 될 가능성이 크다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하고자 모포마 분포를 시자료에 적용하여 분단위 연최대치 강우계열을 구성하고 이를 빙도해석하여 확률강우량을 추정하였다. 1분단위 강우자료(MMR 자료)를 이용하여 빙도해석을 수행한 결과 기존 건설교통부 (2000)에 의해 제시된 강우강도식은 분단위로 내삽할 수 없음을 확인하였다. 60분 집성자료를 모포마 분포에 적용하여 추정한 지속시간별 분단위 연최대치 강우계열은 관측된 분단위 연최대치 강우계열의 특성을 적절히 설명할 수 있는 것으로 파악되었다. 따라서 모포마 분포를 이용하는 경우 시단위 자료를 이용하여 1분단위 자료의 특성 재현이 가능한 것으로 판단된다. 60분 집성자료와 시단위 자료를 이용하여 모포마 분포에 각각 적용하여 IDF 관계를 유도한 경우 그 차이는 매우 미미한 것으로 나타났다. 아울러 사용된 자기상관함수에 따른 차이도 미미한 것으로 확인되었다. 따라서 모포마 분포는 시단위 자료로 부터 60분 이하의 지속시간에 대한 연최대치 강우계열을 적절히 재현할 수 있는 방법인 것으로 판단된다.

핵심용어 : 지속시간 10분이하, 모포마 분포, 1분단위 강우자료

### 1. 서 론

소유역의 배수시설물 설계를 위한 확률강우량 결정에는 일반적으로 건설교통부 (2000)에 의해 제시된 강우강도식을 이용하며, 강우의 지속시간이 10분이하인 경우에도 통상 제시된 강우강도식의 지속시간 최소단위인 10분을 그대로 적용하는 것이 일반적이다. 따라서 도달시간이 수 분 정도인 도로 배수시설물의 경우에는 상대적으로 과대설계가 될 가능성이 크다. 이러한 문제점을 피하기 위해서는 지속시간 10분 이하의 강우강도-지속시간-재현기간(IDF)의 개발이 필수적이다. 그러나 분단위 강우강도식의 개발을 위해서는 1분단위의 강우자료가 충분히 확보되어야 하나, 우리나라의 경우 그렇지 못한 것이 현실이다.

본 연구에서는 관측된 1분단위 강우자료가 사공간적으로 부족한 현실에서, 가능한 높은 정도의 1분단위 강우강도식 개발을 목적으로 한다. 이를 위해서는 상대적으로 품질이 좋고, 아울러 공간적으로 높은 관측밀도를 보이고 있는 시단위 강우자료의 이용이 절대적으로 필요하다. 이러한 목적으로 이용될 수 있는 방안으로는 가용한 분단위 강우자료를 직접 해석하여 강우강도식을 개발하는 방법, 시단위 강우자료를 분단위 자료로 변환하여 이용하는 방법(Random cascade 모형 등), 시단위 자료와 분단위 자료사이의 관계를 통계적으로 정량화하여 주어진 시단위 자료에 대한 분단위 자료의 특성을 추정하여 이용하는 방법(모포마 분포, Fractal 모형 등) 등이 있다. 본 연구에서는 이들 방법 중 세 번째 방법을 고려하였으며, 모포마 분포를 이용하는 방법을 선택하였다.

본 연구에서 적용하고자 하는 모포마 분포(Moupfouma distribution)는 주로 무선통신 분야에서 적용되어 왔다(Hosoya, 1988; Karasawa and Matsudo, 1991; 기상연구소, 1998; Lee et al., 2000; 한국전자통신연구원, 2001). 순간적으로 발생하는 큰 강우강도는 고주파 무선통신의 통화 품질에 가장 큰 악영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 따라서 전파통신출력 설계를 위해서는 강우에 의한 전파 감쇠량을 정확히 추정해야 한다. 이를 위해서는 1분 또는 그 이하로 관측된 강우 자료를 이용하여야 하나, 관측자료의 미비로 인하여 부득이 시단위 자료를 이용하여 분단위 자료의 특성을 추정하는 방법론의 개발로 이어지게 된 것이다. 이런 목적으로 유도된 것이 모포마 분포이며, Karasawa and Matsudo (1991), Lee et. al. (2000) 등은 이를 보다 적용하기 좋은

\* 유철상 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수 · E-mail : envchul@korea.ac.kr

\*\* 박창열 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 · E-mail : changyeol@korea.ac.kr

\*\*\* 김경준 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 · E-mail : guitar77@korea.ac.kr

\*\*\*\* 전경수 · 성균관대학교 토목환경공학과 교수 · E-mail : ksjun@yrim.skku.ac.kr

형태로 변환하여 제시한 바 있다. 특히 이들의 연구에서는 관측 시간단위에 무관하게 강우량의 분포형이 특수한 형태를 따름을 보여주고 있다.

## 2. 모포마 분포의 배경 이론

### 2.1 강우강도의 확률분포

강우강도의 확률분포로 널리 이용되는 것으로 감마분포(Gamma distribution), 대수정규 분포(Log-normal distribution), 모포마 분포(Moufouma distribution) 등이 있다. 특히 본 연구에서 적용하고자 하는 모포마 분포는 시간율(사용되는 시간단위를 동일한 단위의 전체 자료기간으로 나눈 값) 0.01% 이하의 강우강도에서는 대수정규분포와, 시간율 0.01% 이상의 강우강도에서는 감마분포와 잘 일치하는 것으로 알려져 있다(Moufouma, 1982; Hosoya, 1988; 한국전자통신연구원, 2001).

### 2.2 모포마 분포

Hosoya (1988), 기상연구소 (1998), Akimoto et. al. (2003), Ito and Hosoya (2006) 등에 의하면 모포마 분포의 누적분포함수(cumulative distribution function)는 Eq. (1)과 같이 정의된다.

$$F(R) = \frac{r}{R} e^{-uR}, (R^* \leq R < \infty) \quad (1)$$

여기서  $R$ 은 강우강도,  $F(R)$ 은 강우강도에 대한 시간율,  $u$ 와  $r$ 는 누적분포함수의 매개변수이다. 이 매개변수는 일반적으로 시계열 강우자료의 평균값과 분산에 의하여 정해진다. Eq. (1)에서  $R^*$ 은  $F(R)=1$ 일 때의  $R$ 값으로 정의되므로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$r = R^* e^{(uR^*)} \quad (2)$$

모포마 분포의 평균( $m$ )과 분산( $\sigma^2$ )은 매개변수  $u$ ,  $r$  그리고  $R^*$ 을 이용하여 표현될 수 있다. 즉,

$$m = r[e^{-uR^*} + E_i(uR^*)] \quad (3)$$

$$\sigma^2 = r\left(R^* + \frac{2}{u}\right)e^{-uR^*} - m^2 \quad (4)$$

여기서  $E_i(uR^*)$ 는 아래와 같은 지수함수(exponential function)의 적분형태로 표현되는 적분계수이다.

$$E_i(x) = \int_1^\infty \frac{e^{-xt}}{t} dt \quad (5)$$

분단위 강우강도와 시단위 강우강도의 경우, 각각의 평균과 분산은 아래 관계식을 이용하여 쉽게 결정할 수 있다. 일반적으로 시단위 자료에 대한 통계특성을 가지고 분단위 강우자료에 대한 통계특성을 유도하는데 이용된다.

$$m_n = n \cdot m_1 \quad (6)$$

$$\sigma_n^2 = \sigma_1^2 [n + 2 \sum_{\tau=1}^{n-1} (n-\tau) \rho(\tau)] \quad (7)$$

여기서  $n$ 은 집성시간단위(분),  $\tau$ 는 지체시간(lag time),  $\rho(\tau)$ 는  $\tau$ 분 동안의 1분 우량사이의 자기상관계수이다. Hosoya (1988)에 의하면 분단위 강우강도 자료에 대한 자기상관함수는 다음 Eq. (8)에 의해 가장 잘 표현되는 것으로 알려져 있다.

$$\rho(t) = \exp(-\alpha \sqrt{t}) \quad (8)$$

## 3. 대상 자료

### 3.1 분단위 강우자료

우리나라에서 사용한 1분단위 강우자료는 자기기록지를 분단위로 독취한 강우자료(Minutely data using the Magnetic Recording; MMR), 강우강도계 강우자료(Minute Rainfall Intensity; MRI), AWS(Automatic Weather System; AWS) 관측소에서 측정되고 있는 강우자료, 광학강우강도계 강우자료(Optic Rain Gauge; ORG) 등으로 나눌 수 있다(기상연구소, 1998; 한국전자통신연구원, 2001; 기상청, 2004; 2006).

Table 1. The characteristics for types of data

characteristics (available)	Types of data			
	MMR	MRI	AWS	ORG
The resolution of data(mm/min)	0.1	0.017	0.5	0.017
The observed interval(second)	60	60	60	5
The longest observed period(year)	69	12	-	-
The number of stations	75	12	460	-
The continuity of observed period	○	○	×	×

Table 1은 대상 자료의 특성을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 상대적으로 높은 정도와 많은 관측 지점을 확보하고 있는 MMR과 MRI 자료를 선정하여 검토하고자 한다. 또한 대상 지점으로는 우리나라에서 가장 장기

간의 관측연한을 보유한 서울지점을 선정하였다.

우리나라의 1분단위 강우자료의 특성은 먼저, MRI 자료의 경우는 기상연구소 (1998) 및 한국전자통신연 구원 (2001)에서 검토된 바 있고, MMR 자료의 경우는 기상청 (2004)에 의해 검토된 바 있다. Fig. 1은 서울 지점의 1시간단위 강우자료와 1분단위 강우자료를 60분 집성하여 만든 1시간단위 자료와의 관계를 산포도로 나타낸 것이다. 이 그림은 동일기간 1961년 ~ 1999년을 대상으로 하고 있으며, 두 자료 중 하나의 강우량이 '0'으로 나타난 경우는 제외한 것에 해당한다.

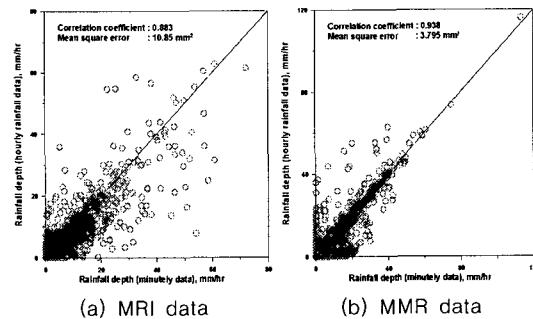


Fig. 1. Scatter plot for hourly data accumulated minutely data versus hourly data at Seoul station

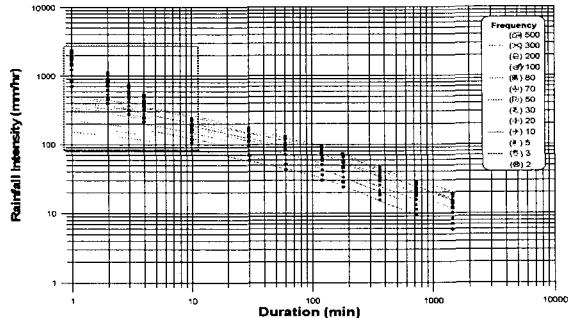


Fig. 2. Comparison of IDF curves using MMR data with the interpolation of probable rainfall intensity formulas(건설교통부, 2000)

Fig. 1에서 볼 수 있는 것과 같이 MRI 자료의 경우 상대적으로 자료가 넓은 영역에 퍼져 있으므로 큰 평균제곱오차를 갖게 될 것이다. 이에 반해 MMR 자료는 상대적으로 좁은 영역에 분포되어 있으므로 MRI 자료의 경우보다 더 높은 상관관계를 갖는다고 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 특성 이외에 기록연수가 긴 관측 자료를 보유한 지점의 수, MRI 자료의 경우 순간 강우강도가 100 mm/hr 이상일 때 관측할 수 없다는 점 등을 고려하여 MMR 자료를 위주로 하여 분석하기로 결정하였다.

### 3.2 1분단위 강우자료를 이용하여 유도한 강우강도식

Fig. 2에서 보는바와 같이 건설교통부 (2000)에 의해 제시된 강우강도식과 1분단위 강우자료를 이용하여 유도한 IDF 곡선은 특히 지속시간 10분 이하에서 크게 차이가 난다. 따라서 건설교통부 (2000)에서 제시한 식은 10분 이하의 지속시간에 해당하는 강우강도를 추정하는데 사용될 수 없다. 이러한 차이의 원인은 강우강도식을 유도하는데 사용한 자료의 차이일 수도 있기는 하나, 10분 이상의 지속시간에 대해서는 유사한 특성을 보이는 것으로 볼 때 1분단위 강우자료 자체의 특성이 반영 안 된 결과로 판단할 수 밖에 없다.

## 4. 모포마 분포의 적용

### 4.1 1분 강우강도의 분포함수 유도

Hosoya (1988)와 기상연구소 (1998)에 의한 방법론은 모포마 분포의 적용에 있어 자기상관함수를 기본으로 하고 있다. Fig. 3은 MMR 자료를 이용하여 자기상관함수를 Eq. (8)로 적합시킨 것이다. 또한  $\rho_2(t)$ 로 정의된 것은 우리나라 1분단위 강우자료의 특성을 파악하기 위해 시도된 것이다. 두 회귀식의 경향은 유사하게 나타났다. 그러나 우리나라 전역을 대상으로 추가 연구가 필요할 것이다. 또한 Fig. 3에 최대 관측기간을 16년으로 산정한 것은 서울 지점의 MRI 자료에서 자료의 이상치로 인해 회귀식에 크게 영향을 미치는 해를 제외하였기 때문이다.

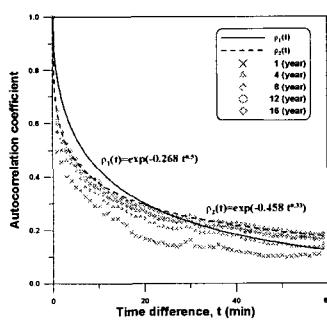


Fig. 3. Variation of autocorrelation coefficient for minutely rainfall due to observation period

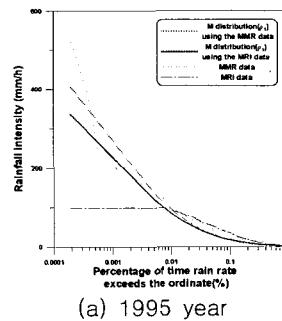


Fig. 4. Comparison for approximation of minutely rainfall distribution by Moupfouma distribution

Table 2. Parameters for Moupfouma distribution( $\rho_1(t)$ )

Year	Statistics of hourly data		Parameter r	Duration(min)								
	mean			u								
	variance	r		1	2	3	4	5	10	30	60	
1969	0.1351	2.5164	0.018	0.005	0.006	0.006	0.007	0.007	0.008	0.011	0.015	
1984	0.1356	1.9936	0.018	0.007	0.008	0.008	0.008	0.009	0.011	0.014	0.019	
1985	0.1116	1.6842	0.015	0.007	0.007	0.008	0.008	0.009	0.010	0.013	0.018	
1986	0.1234	1.5994	0.017	0.008	0.009	0.009	0.010	0.010	0.012	0.016	0.021	
1987	0.1754	3.0678	0.024	0.006	0.007	0.007	0.007	0.008	0.009	0.012	0.015	
1988	0.0739	0.5527	0.010	0.013	0.015	0.016	0.017	0.018	0.020	0.027	0.036	
1989	0.1225	1.4571	0.017	0.009	0.010	0.010	0.011	0.011	0.013	0.018	0.023	
1991	0.1023	1.2491	0.014	0.008	0.009	0.010	0.010	0.011	0.012	0.017	0.022	
1992	0.1225	1.9239	0.017	0.007	0.007	0.008	0.008	0.009	0.010	0.013	0.018	
1993	0.1086	1.2643	0.015	0.009	0.010	0.011	0.011	0.012	0.013	0.018	0.024	
1994	0.0624	0.5875	0.008	0.010	0.011	0.012	0.013	0.013	0.015	0.021	0.027	
1995	0.1664	2.3292	0.023	0.007	0.008	0.009	0.009	0.010	0.011	0.015	0.020	
1996	0.1117	1.4807	0.015	0.007	0.008	0.009	0.009	0.010	0.011	0.015	0.020	
1997	0.0770	0.8536	0.010	0.009	0.010	0.010	0.011	0.011	0.013	0.018	0.023	
1998	0.2085	3.8001	0.029	0.006	0.006	0.007	0.007	0.007	0.008	0.012	0.015	
1999	0.1653	2.3992	0.023	0.007	0.008	0.009	0.009	0.009	0.011	0.014	0.019	

Table 2는 Eq. (8)를 이용한 매개변수 추정결과이다. 모포마 분포는 매개변수  $u$ ,  $r$ 에 따라 강우강도의 분포형을 표현하게 된다. 매개변수  $r$ 값은 평균값에 의해 결정되며  $u$ 값은 분산에 반비례하는 것으로 알려져 있다(기상연구소, 1998). Fig. 4와 Table 2를 비교했을 때 분산이 크면  $u$ 의 값이 작아지고 시간율에 따른 강우강도의 값이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한  $r$ 의 값의 크면 평균적인 강우강도는 증가하지만 상대적으로 변화가 적은 것으로 판단된다. 이러한 특성은 분산이 큰 자료일수록 점에도(kurtosis)가 크게 나타나는 현상과 유사하다(기상연구소, 1998).

Fig. 4는 Table 2의 매개변수를 적용한 모포마 분포와 1분단위 관측자료를 비교한 것이다. Fig. 4에서 보는바와 같이 모포마 분포는 1분단위 관측자료의 분포를 적절하게 설명할 수 있는 것으로 파악된다. 그러나 모포마 분포가 연속된 자료에 대한 시간율을 표현하는 것이 아님으로 다양한 지속시간에 대한 결과를 얻기 위해서는 Eqs. (6), (7)을 이용하여 지속시간별로 특성치를 산정하여 모포마 분포에 반복 적용하여야 한다.

#### 4.2 지속시간별 연최대치 계열 추정

모포마 분포의 적용성을 검토하기 위해서는 1분단위 강우자료를 60분으로 집성하여 그 통계 특성치를 이용하여 모포마 분포에 다시 적용하여야 한다. 이를 통해 산정된 연최대치 계열은 실제 관측치에 대한 연최대치 계열을 적절히 설명할 수 있는지에 대한 검토가 필요하다. Fig. 5는 MMR 자료를 60분으로 집성한 자료(즉, 시단위 강우자료)에 대해 모포마 분포를 적용한 결과를 나타낸다.

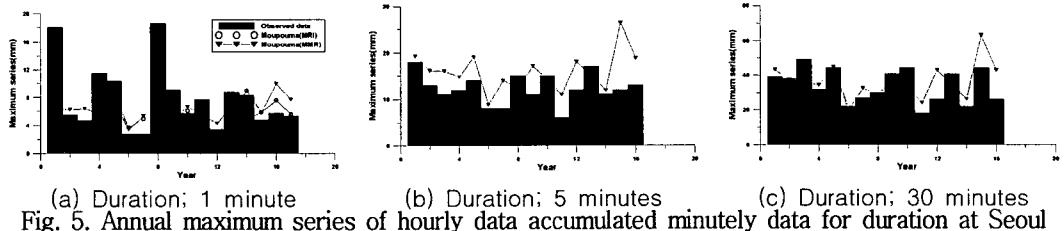


Fig. 5. Annual maximum series of hourly data accumulated minutely data for duration at Seoul station.

Fig. 5에서 보는바와 같이 모포마 분포는 실측된 1분단위 자료(MMR)의 지속시간별 연최대치 값을 적절히 설명할 수 있는 것으로 파악된다. 그러나 경우에 따라 과도하게 큰 이상치들이 발견되기도 하는데(Fig. 5(a)와 같이), 이러한 부분에 대한 정량적 판단은 쉽지 않다. 관측된 1분단위 강우자료의 신뢰도 문제일 수도 있으며, 또는 상관함수로 정량화된 1분단위 강우자료의 특성에 대한 불확실성이 원인일 수도 있다. 이에 대한 해답은 추후의 연구로 미룬다.

Fig. 5(b), (c)에서 살펴볼 수 있는 것과 같이 전체적으로 보면 모포마 분포의 적용성은 뛰어난 것으로 판단된다. 따라서 1분단위 강우자료가 매우 제한적이며, 아울러 그 신뢰도를 장담할 수 없는 국내현실을 고려할 때, 모포마 분포는 양질의 시단위 강우자료로 부터 분단위 강우강도의 연최대치 계열 추정을 가능하게 해주는 유효한 방법으로 판단된다.

#### 4.3 지속시간 10분 이하의 IDF 관계 유도

본 절에서는 3.1절 및 4.2절의 결과를 바탕으로 시단위 관측 강우자료의 평균, 분산을 모포마 분포에 적용함으로서 분단위 강우강도의 연최대치 계열을 구성하고, 이를 분석하여 지속시간 10분 이하의 IDF 관계를 유도하였다.

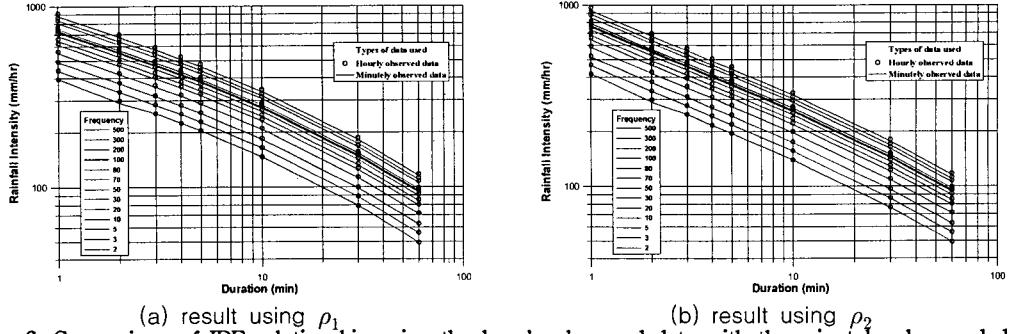


Fig. 6. Comparison of IDF relationship using the hourly observed data with the minutely observed data

Fig. 6의 각 그림은 시단위 강우자료와 60분 집성자료의 평균, 분산을 이용하여 유도한 IDF 관계를 비교하고 있으며, Fig. 6(a)와 6(b)는 적용한 자기상관함수의 적합식에 따른 결과를 구분하여 비교한 것이다. 먼저, 시자료를 사용한 경우나 60분 집성자료를 이용한 경우의 차이는 매우 미미한 것으로 나타났다. 특히, 60분 집성자료의 대상 기간은 16년인데 반해 시자료의 경우에는 39년(1961년 ~ 1999년)임에도 불구하고 매우 유사한 결과가 유도되었다. 두 자료에 대한 결과의 차이는 재현기간이 커질수록 크게 나타나기는 하나 그 차이가 Fig. 6(a)에서는 0.00% ~ 3.78%, Fig. 6(b)에서 0.00% ~ 3.73%로 매우 작은 것으로 확인되었다. 즉, 시자료를 이용한 분단위 강우의 IDF 관계 유도에 신뢰도가 있음을 나타내는 결과로 이해할 수 있다.

두 개의 다른 자기상관함수 적합식을 사용하는 경우에도 유도된 결과는 매우 유사한 것으로 나타났다. 그 차이는 최대 5% 정도로 어느 자기상관함수를 이용하여도 유사한 결과가 유도됨을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 적용한 모포마 분포는 시단위 통계 특성치를 이용하여 1분자료의 특성치를 재현할 수 있는 적절한 방법인 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다. (1) 1분단위 강우자료(MMR 자료)를 이용하여 빈도해석을 수행한 결과 기존 건설교통부 (2000)에 의해 제시된 강우강도식은 분단위로 내삽할 수 없음을 확인하였다. (2) 60분 집성자료를 모포마 분포에 적용하여 추정한 지속시간별 분단위 연최대치 강우계열은 관측된 분단위 연최대치 강우계열의 특성을 적절히 설명할 수 있는 것으로 파악되었다. 따라서 모포마 분포를 이용하는 경우 시단위 자료를 이용하여 1분단위 강우자료의 특성 재현이 가능한 것으로 판단된다. (3) 60분 집성자료와 시단위 자료를 이용하여 모포마 분포에 각각 적용하여 IDF 관계를 유도한 경우 그 차이는 매우 미미한 것으로 나타났다. 아울러 사용된 자기상관함수에 따른 차이도 미미한 것으로 확인되었다. 따라서 모포마 분포는 시단위 자료로부터 60분 이하의 지속시간에 대한 연최대치 강우계열을 적절히 재현할 수 있는 방법인 것으로 판단된다.

## 감 사 의 글

본 연구는 친환경·지능형 도로설계 기술개발 연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구사업에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 현

- 건설교통부 (2000). 1999년도 수자원관리기법개발연구 조사 보고서 : 제1권 한국화를강우량도 작성
- 기상연구소 (1998). 목표 시간율에 따른 국내 지역별 강우강도 분포 예측 모델 연구. 정보통신 연구개발사업 위탁 연구 보고서. p. 81.
- 기상청 (2004). 기후자료보존시스템 구축 2차년도 사업 완료보고서: 활용방안 조사서. 기상청. p. 47.
- 기상청 (2006). 2005 기후자료보존 현대화 기술노트: 역사기후자료 DB 구축사업. 기상청. p. 356.
- 한국전자통신연구원 (2001). 전국 지역별 분 강우강도 DB 구축 연구. p. 84.
- Akimoto, M., Harada, K., and Ichikawa, H. (2003) "Long-term changes of rainfall tendency and methods of estimation for the one-minute rain rate distribution in Japan." Transactions of IEICE, Vol. J86-B, pp. 2166-2173.
- Hosoya, Y. (1988). "An estimation method for one-minute-rain distributions at various locations in Japan." Annual of Telecommunity, Vol. J71-B, No. 2, pp. 256-262.
- Karasawa, Y.T., and Matudo, T. (1991). "One-minute rain rate distributions in Japan derived from AMeDAS one-hour rain rate data." IEEE Transactions on Geoscience, Vol. 29, No. 6, pp. 890-898.
- Lee, Joo-Hwan, Kim, Yang-Su, Kim, Jong-Ho and Choi, Yong-Seok (2000). "Empirical Conversion Process of Rain Rate Distribution for Various Integration Time." Microwave Conference, 2000 Asia-Pacific, pp. 1593-1597.
- Moufouma, P. (1982). "Rainfall rate statistics distribution and induced attenuation in equatorial and tropical climates." Annual of Telecommunity, Vol. 37, pp. 123-128.
- Ito, C., and Hosoya, Y. (2006). "Proposal of a Global Conversion Method for Different Integral Time Rain Rate by Using M Distribution and Regional Climatic Parameters." Electronics and Communications in Japan, Part 1, Vol. 89, No. 4, pp. 948-955.