

스케일 성질을 이용한 확률강우량의 추정

Rainfall Quantile Estimation Using Scaling Property in Korea

정영훈* / 김수영** / 김태순*** / 허준행****

Jung, Younghun / Kim, Sooyoung / Kim, Taesoon / Heo, Jun-Haeng

Abstract

In this study, rainfall quantile was estimated using scale invariance property of rainfall data with different durations and the applicability of such property was evaluated for the rainfall data of South Korea. For this purpose, maximum annual rainfall at 22 recording sites of Korea Meteorological Administration (KMA) having relatively long records were used to compare rainfall quantiles between at-site frequency analysis and scale invariance property. As the results, the absolute relative errors of rainfall quantiles between two methods show at most 10 % for hourly rainfall data. The estimated quantiles by scale invariance property can be generally applied in the 8 of 14 return periods used in this study. As an example of down-scaling method, rainfall quantiles of 10~50 minutes duration were estimated by scale invariance property based on index duration of 1 hour. These results show less than 10 % of absolute relative errors except 10 minutes duration. It is found that scale invariance property can be applied to estimate rainfall quantile for unmeasured rainfall durations.

keywords : scaling property, scaling exponent, quantile, rainfall data

요 지

본 연구에서는 서로 다른 지속기간을 가지는 강우자료간의 스케일 성질을 이용하여 확률강우량을 추정하는 방법을 알아보고, 국내 강우자료에 대해서 그 적용성을 살펴보고자 하였다. 기상청 지점중에서 기록기간이 비교적 장기간인 22개 지점에 대해서 지점빈도해석을 통한 확률강우량과 스케일 성질을 활용한 확률강우량간의 정확도를 비교해 본 결과, 시간단위자료를 사용할 경우 대부분 절대상대오차가 10 % 미만인 결과를 얻을 수 있었고, 각각의 지속기간별로 적용가능한 재현기간을 살펴본 결과 연구에 사용된 총 14개의 재현기간 중에서 대부분 8개 이상의 재현기간에 대해서 적용이 가능한 것으로 나타났다. 적용예로서 대구지점의 지속기간 1시간 강우자료를 바탕으로 지속기간 10분~50분까지의 확률강우량자료를 스케일 성질을 이용하여 산정한 결과 지속기간 10분을 제외하고는 모두 절대상대오차 10 % 내외의 정확도를 가지는 것으로 나타났다. 따라서 스케일 성질을 이용하여 미계측 강우지속기간의 확률강우량을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 스케일 성질, 스케일 지수, 확률강우량, 강우자료

* 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정

Ph.D student, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea
(e-mail: yhjung2000@yonsei.ac.kr)

** 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정

Ph.D student, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea

*** 연세대학교 사회환경시스템공학부 BK21 연구교수

BK21 Lecturer, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea

**** 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea

1. 서론

대상지역에 적합한 확률분포형으로부터 산정되는 확률강우량은 수공구조물을 설계하는데 있어서 가장 기본이 되는 설계량 중의 하나이다. 국내에는 확률강우량을 산정하기 위해서 개발된 FARD2002(국립방재연구소, 2002)를 비롯하여 여러 가지 기법을 활용한 확률강우량 도식이 개발되어 있으며(김태순 등, 2007; 신주영 등, 2007; 이원환 등, 1993; 허준행 등, 1999) 관련 연구 또한 활발히 진행되고 있다. 확률강우량을 산정하기 위해서는 강우자료를 이용한 빈도해석을 실시하는데, 우선 대상지역에서 장기간 관측된 강우자료를 바탕으로 연최대치 강우자료를 원하는 지속기간별로 구축한 후에, 여러 가지 확률분포형에 대한 적합성검토와 적합도검정을 실시하여 적정 확률분포형을 선정하고, 채택된 확률분포형의 역함수를 이용하여 원하는 빈도에 해당하는 확률강우량을 산정하는 방법을 사용하고 있다.

빈도해석을 이용한 확률강우량의 산정을 위해서는 최소 30년 이상의 강우자료가 구축되어 있어야 비교적 정확한 확률강우량을 산정할 수 있는 것으로 알려져 있지만, 국내 자료중 가장 신뢰도가 높다고 할 수 있는 기상청 지점 강우자료 중에서도 여러 가지 지속기간에 걸쳐서 30년 이상의 기록을 가지고 있는 지점은 그리 많지 않은 실정이며, 원하는 지속기간에 해당하는 관측자료가 존재하지 않는 경우에 빈도해석을 이용하여 신뢰할만한 확률강우량을 추정하는 것은 불가능하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 이와 같이 관측되지 않은 지속기간에 대한 확률강우량을 추정하는 방법중의 하나로, 여러 개의 지속기간별로 구축된 강우자료를 이용하여 계산된 확률강우량이 가지는 스케일 성질(scaling property)을 활용하여 확률강우량을 추정하는 방법을 살펴보고, 국내 기상청 자료를 바탕으로 그 적용성을 알아보려고 한다.

강우에 대한 기하학적 통계분석을 위해 제안된 스케일 성질(Lovejoy, 1982; Lovejoy and Mandelbrot, 1985; Lovejoy and Schertzer, 1985)은 시·공간적 특성을 고려한 강우량의 추정을 비롯한 다양한 분야에 적용되고 있다. Waymire(1985)는 넓은 지역에 대한 강우 빈도의 스케일 한계를 설명하기 위해 lognormal 분포를 따르는 강우자료에 대해 단일 스케일 성질(simple scaling)을 적용하였다. 또한, 기존에 제시된 단일 스케일 성질만으로 설명할 수 없는 강우 특성을 통계학적으로 설명하기 위해 다중 스케일 성질(multiscaling)을 이용하는 연구도 진행되고 있다(Gupta and Waymire, 1990; Schertzer and Lovejoy, 1987). Olsson and Burlando

(2002)는 단일 스케일과 다중 스케일의 적용을 구분할 수 있도록 95 % 신뢰구간의 적용을 제안한 바 있으며, Burlando and Ross(1996)은 단일 및 다중 스케일 성질과 빈도계수법을 이용하여 이탈리아 지역의 확률강우량을 추정하기도 하였다.

Nguyen(2000)은 서로 다른 지속기간의 강우량 자료에 단일 스케일을 적용하여 최대 강우량 자료의 특성을 분석하였고, Nguyen *et al.*(2002)은 GEV 분포를 따르는 강우 자료에 스케일 성질과 지역빈도해석 기법을 적용하여 확률강우량을 추정한 바 있다. Bougadis and Adamowski(2006)는 Nguyen(2000)의 방법을 GEV 분포와 Gumbel 분포에 적용하여 IDF 곡선을 유도하였고, Baldassarre *et al.*(2006)은 1시간 이상 지속기간의 강우 자료에 스케일 성질을 적용하여 1시간 이하 지속기간의 확률강우량을 산정하여 DDF(Depth-Duration-Frequency) 곡선을 유도한 바 있다. 또한, 최근에는 다양한 분야에서 이용되고 있는 원격탐사영상(Remote sensing precipitation image)과 시·공간적 스케일 성질을 결합하여 강우량을 추정한 연구가 진행되고 있다(Deidda *et al.*, 2006).

선행연구들이 주로 단일 혹은 다중 스케일 성질간의 정확도 차이가 IDF 혹은 DDF 곡선의 유도를 위해서 스케일링 성질을 활용한 것과는 달리, 본 연구에서는 서로 다른 지속기간에 대해서 산정된 확률강우량간에 존재하는 스케일 성질에 대해서 알아보려고 하였다. 이를 위해서 스케일 성질의 정의와 스케일 성질을 적용하기 위해서 필요한 스케일 지수(scaling exponent)의 산정절차를 알아보고, 기상청에서 관리하는 지점 중에서 비교적 장기간의 자료를 보유하고 있는 22개 지점에 대해서 스케일 성질을 이용하여 추정된 확률강우량의 정확도 및 적용범위를 살펴본 후, 기상청 관측지점 중 가장 긴 자료기간을 가지고 있는 대구지점에 대해서 실제로 스케일 성질을 적용하여 확률강우량을 추정하였다.

2. 기본 이론

2.1 스케일 성질(scaling property)

$X(t)$ 가 한 지점에서 관측되는 임의의 시간 t 에서의 강우강도라고 한다면 일정한 기간 τ 동안 발생한 강우강도는 지속적인 시간 축에 대해 Fig. 1과 같이 도시할 수 있다. Fig. 1의 시간 축을 따라 이동하는 지속기간 T 내의 강우강도의 연속적인 합은 구역 A, B와 같이 나타낼 수 있고, 이는 지속기간 T 에 대한 관측강우량 $Z_T(t)$ 를 뜻한다. 지속기간 T 동안 강우관측소에서 관측된 강우량 $Z_T(t)$ 는 Eq. (1)과 같다.

$$Z_T(t) = \int_{t-T/2}^{t+T/2} X(\xi) d\xi \quad (1)$$

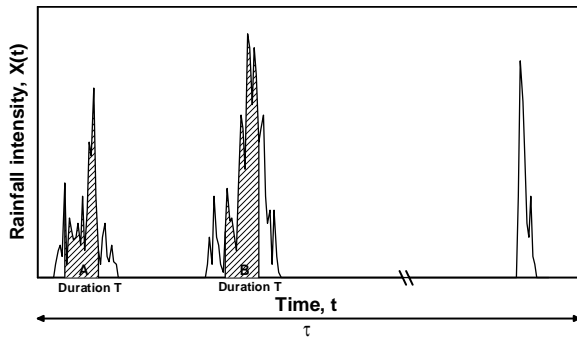


Fig. 1. Extracting Process of the Maximum Rainfall for a given Duration T from Continuous Time Series

극한강우사상에 대한 빈도해석은 일반적으로 일정한 기간 τ 동안 관측된 최대강우량 H_T 를 고려해야 하며 H_T 는 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다(Gupta and Waymire, 1990).

$$H_T = \max(Z_T(t) : t_0 \leq t \leq t_0 + \tau) \quad (2)$$

여기서, t_0 는 임의의 시간을 뜻한다. 즉, 최대강우량 H_T 는 $t_0 \leq t \leq t_0 + \tau$ 사이에서 계산된 $Z_T(t)$ 의 최대값을 나타낸다.

$F_T(h)$ 를 $F_T(h) = \Pr[H_T \leq h]$ 로 정의되는 H_T 의 확률밀도함수라고 하고, 빈도 q 에 대해 $F_T(\xi_q) = q$ 를 만족하는 확률강우량을 $\xi_q(T)$ 라고 하면, 확률강우량 ξ_q 는 추정하고자 하는 지속기간 T 에 따라 달라지므로 특정 빈도 q 에 대한 확률강우량 ξ_q 가 지속기간 T 에 따라 어떻게 달라지는지 추정하는 것이 가능하게 된다. 이러한 특성은 지속기간별 확률강우량 $h = \xi_q(T)$ 의 성장 곡선(growth curve) 추정에 이용되며, 수문학적으로는 빈도 q 에 대한 설계수문량 산정에 사용된다. 지속기간 T 에 따른 확률강우량 $\xi_q(T)$ 는 Eq. (3)과 같은 형태로 표현할 수 있다(Gupta and Waymire, 1990).

$$h = \xi_q(T) = A_q T^{m_q} \quad (3)$$

여기서, A_q 와 m_q 는 지속기간 T 에 따른 확률강우량의 산정에 필요한 매개변수이다. 강우가 scale invariance의 특성을 보인다면 빈도 q 에 독립적인 스케일 지수(scaling exponent) m_q 는 이론적으로 감소하는 형태를 보이게 되며, 이와 같은 특징을 좁은 의미의 단일 스케

일(strict sense simple scaling)이라 한다(Gupta and Waymire, 1990).

좁은 의미의 단일 스케일의 개념을 서로 다른 지속기간의 강우량에 적용하여 나타내면 Eq. (4)와 같다.

$$Z_{\lambda T}(t) \stackrel{d}{=} \lambda^n Z_T(t) \quad (4)$$

여기서, λ 는 스케일 인자(scaling factor), n 는 스케일 지수(scaling exponent)로 일정한 값을 가지며, ' $\stackrel{d}{=}$ '는 동일한 확률분포형 내에서 같다는 의미로 $X(t)$ 의 적분 과정에 적용되는 확률분포형은 스케일에 따라 변하지 않음을 나타낸다. 즉, $Z_T(t)$ 와 $Z_T(t)$ 를 λ^n 으로 rescale한 $Z_{\lambda T}(t)$ 는 같은 확률분포형을 가지는 특성을 보인다.

따라서, Eq. (4)와 같은 스케일 특성은 최대강우량 뿐만 아니라 빈도 q 에 대한 확률강우량과 강우량의 모멘트에도 적용할 수 있으며 이를 식의 형태로 나타내면 다음과 같다(Gupta and Waymire, 1990).

$$H_{\lambda T} \stackrel{d}{=} \lambda^n H_T \quad (5)$$

$$\xi_q(\lambda T) \stackrel{d}{=} \lambda^n \xi_q(T) \quad (6)$$

$$E[H_{\lambda T}^l] \stackrel{d}{=} \lambda^{ln} E[H_T^l] \quad (7)$$

여기서, l 은 모멘트 차수를 나타낸다. 이와 같은 모멘트에 대한 스케일 관계는 좁은 의미의 단일 스케일보다 넓은 의미의 단일 스케일(wide sense simple scaling)로 정의된다(Gupta and Waymire, 1990). 실제 확률분포형에 스케일 성질을 적용하는 것은 가용자료 기간의 제약으로 인해 어려움이 따르므로 넓은 의미의 단일 스케일을 이용하여 자료의 특성을 분석할 수 있다.

2.2 스케일 인자와 스케일 지수의 추정

임의의 지속기간 T 에 대한 확률강우량을 추정하기 위해서는 스케일 인자 및 스케일 지수의 추정이 필요하며, 이 중 스케일 인자 λ 는 스케일 성질을 적용하고자 하는 지속기간 사이의 비율을 이용하여 산정할 수 있다. 지속기간 T' 의 확률강우량에 스케일 성질을 적용하여 임의의 지속기간 T 의 확률강우량을 추정할 경우 스케일 인자는 Eq. (8)과 같이 산정된다.

$$\lambda = \frac{T}{T'} \quad (8)$$

스케일 지수는 넓은 의미의 단일 스케일에 근거하여 지속기간별 모멘트를 이용하여 추정한다. 우선 강우자료에 대한 지속기간별 모멘트를 모멘트 차수 $l = 1, 2, 3, \dots, m$ 에 대해 산정한다.

여기서는, 기상청에서 관리하는 통영지점을 대상으로 스케일 지수를 산정하는 과정을 나타내었다. Table 1은 통영지점의 지속기간(1, 3, 6, 12, 24시간)별 연최대강우량의 기본 통계값 및 $m=5$ 차까지의 모멘트를 계산하여 나타낸 것이다. 우선, 스케일 지수를 산정하기 위해서는 5차까지의 모멘트를 전대수지상에 지속기간별로 도시한 후에(Fig. 2), 다시 이 값들을 이용하여 차수별로 선형회귀선의 기울기를 도시하면 Fig. 3을 얻을 수 있고, 모멘트 차수 l 에 대한 모멘트의 기울기 ln 은 각 모멘트 차수별 스케일 지수가 되고, 넓은 의미의 단일 스케일에 의해 n 은 평균적인 스케일 지수가 된다.

또한, 모멘트 차수 l 에 대한 ln 이 선형인 경우는 단일 스케일을 적용하게 되며 비선형인 경우에는 다중 스케일을 적용하게 된다. 단일 스케일과 다중 스케일의

적용에 대한 구분을 위해 Olsson and Burlando(2002)는 95 % 신뢰구간을 기준으로 판단할 것을 제안하였는데, 이에 따르면 ln 이 95 % 신뢰구간 내에 존재할 경우 선형이라고 판단하여 단일 스케일을 적용하고, 95 % 신뢰구간을 벗어날 경우 비선형으로 간주하여 다중 스케일을 적용하게 된다.

통영 지점의 경우는 ln 이 95 % 신뢰구간 내에 존재하므로 단일 스케일을 적용할 수 있으며, Fig. 3의 직선의 기울기는 0.469로 계산된다. 따라서, 만약 지속기간 12시간에 해당하는 확률강우량을 기준으로, 지속기간 24시간에 해당하는 확률강우량을 스케일 성질을 이용하여 계산한다면 다음의 식과 같다.

$$\lambda = \frac{T}{T'} = \frac{24}{12} = 2 \quad (9)$$

$$H_{\lambda T} = H_{24} = \lambda^n H_T = 2^{0.469} H_{12} \quad (10)$$

Table 1. Sample Data and Statistics of Annual Maximum Rainfall for Each Duration from 1 to 24 Hour(Tongyoung Station, 0.1 mm)

Sample data	Duration(hour)				
	1	3	6	12	24
Sample size(N)	36	36	36	36	36
Summation	13990	24396	35829	47043	57464
Mean($E[H]$)	388.61	677.67	995.25	1306.75	1596.22
Variance	33532.96	80989.50	174518.35	329985.80	544443.01
Standard deviation	183.12	284.59	417.75	574.44	737.86
Coefficient of variation	0.47	0.42	0.42	0.44	0.46
2nd moment($E[H^2]$)	1.85E+05	5.40E+05	1.17E+06	2.04E+06	3.09E+06
3rd moment($E[H^3]$)	1.04E+08	4.98E+08	1.58E+09	3.81E+09	7.24E+09
4th moment($E[H^4]$)	6.59E+10	5.16E+11	2.45E+12	8.42E+12	1.98E+13
5th moment($E[H^5]$)	4.54E+13	5.85E+14	4.21E+15	2.12E+16	6.02E+16

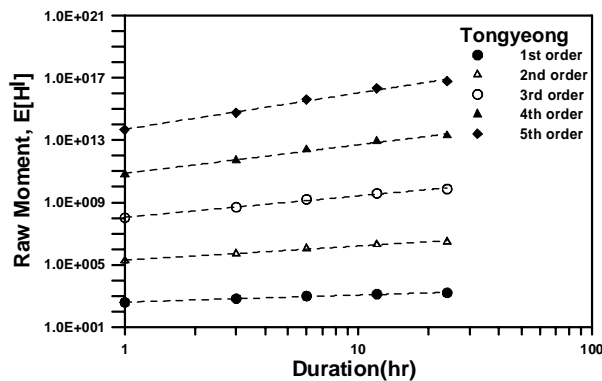


Fig. 2. Scaling of Raw Moments with Duration (Tongyoung Station)

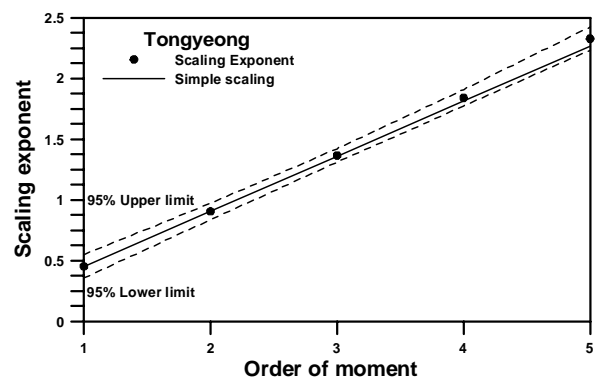


Fig. 3. Simple Scaling in the Growth of Slope with Respect to Order of the Moments (Tongyoung Station)

2.3 GEV 확률분포

본 연구에서는 국내의 강우자료가 GEV 분포를 따른다고 가정하였으며 확률강우량의 산정은 GEV 분포의 역함수를 이용하여 추정하였다. GEV 분포의 누가분포 함수(CDF)는 Eq. (11)과 같다(NERC, 1975).

$$F(x) = \exp\left[-\left(1 - \frac{\beta(x - x_0)}{\alpha}\right)^{1/\beta}\right] \quad (11)$$

여기서, x_0 는 위치 매개변수(location parameter), α 는 규모 매개변수(scale parameter), β 는 형상 매개변수(shape parameter)이다.

GEV 분포에 대한 확률강우량의 추정은 역함수를 이용하여 추정하게 되며 이를 이용하여 재현기간 T 에 대한 GEV의 확률강우량은 Eq. (12)를 적용하여 산정한다.

$$\begin{aligned} X_T &= x_0 + \frac{\beta}{\alpha} \{1 - [-\ln p]^\beta\} \\ &= x_0 + \frac{\beta}{\alpha} \left\{1 - \left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right]^\beta\right\} \end{aligned} \quad (12)$$

여기에서 p 는 초과확률로 비초과확률 q 와는 $p = 1 - q = 1 - \frac{1}{T}$ 의 관계를 보인다.

3. 스케일 성질을 활용한 확률강우량 추정

서로 다른 지속기간에 대해서 관측된 강우량 자료를 활용하여 계산된 확률강우량간에 스케일 성질을 적용하는 것이 가능한지를 알아보기 위해서, 1) 기상청에서 관리하는 지점 중에서 비교적 장기간의 자료를 보유하고 있는 22개 지점을 선정한 후, 2) 임의의 기준 지속기간(index duration)을 이용하여 상향스케일링(up-scaling; 기준 지속기간보다 장기간에 해당하는 지속기간의 확률강우량을 산정하는 경우)과 하향스케일링(down-scaling; 기준 지속기간보다 단기간에 해당하는 지속기간의 확률강우량을 산정하는 경우)을 적용하여 구한 확률강우량과 지점빈도해석을 이용하여 구한 확률강우량과의 오차를 비교하여, 3) 오차가 10% 미만인 경우를 대상으로 스케일 성질을 적용하는 것이 가능한지를 알아보려고 하였다.

3.1 대상지점

대상지점은 기상청에 관리하고 있는 지점 중에서 비교적 장기간의 자료를 보유하고 있는 22개 지점으로,

가장 단기간의 자료를 보유하고 있는 지점은 원주로서 2003년까지 관측된 32년간의 자료를 보유하고 있으며 가장 장기간의 자료는 대구 지점에서 관측된 88년간의 자료이다.

22개 지점별로 분단위자료의 경우 자기우량기록지로부터 독출한 1999년까지의 자료를 활용하여 지속기간 10분, 20분, 30분, 40분, 50분에 해당하는 매년 최대치 자료를 구축하였으며, 시간단위자료는 2003년의 자료를 활용하여 지속기간 1시간, 2시간, 3시간, 6시간, 9시간, 12시간 15시간 18시간, 그리고 24시간에 해당하는 매년 최대치 자료를 구축하였다. Table 2는 본 연구에서 사용된 22개 지점의 기상청관리 코드명, 지점명, 자료기간과 스케일 지수를 나타낸 것이다.

3.2 스케일 성질을 이용한 확률강우량의 추정

각 지점의 확률강우량에 대해서 스케일 성질을 적용하는 절차는 앞선 2장에서 통영 지점을 예로 들어서 설명한 것과 같이 Table 1, Figs. 2 and 3은 같은 순서로 각각 스케일 지수를 산정한 후, Eq. (10)과 같은 방법으로 스케일 성질을 이용하여 기준 지속기간에 대한 확률강우량을 구하는 방법을 사용하였다.

본 연구에서는 지속기간 10분, 20분, 30분, 40분, 50분, 60분에 해당하는 분단위 자료와 지속기간 1시간, 2시간, 3시간, 6시간, 9시간, 12시간, 15시간, 18시간, 24시간의 시간단위자료를 각각 기준 지속기간을 이용하여, 재현기간 2년, 3년, 5년, 10년, 20년, 30년, 50년, 70년, 80년, 100년, 150년, 200년, 300년, 500년에 해당하는 확률강우량 자료를 스케일 성질을 이용하여 추정하였다. 모든 경우에 대해서 기준 지속기간보다 단기간인 지속기간에 대한 확률강우량을 구하는 경우를 하향스케일링으로 표시하였고, 장기간인 경우에는 상향스케일링으로 표시하였다.

지점빈도해석을 이용한 확률강우량과 스케일 성질을 활용한 확률강우량의 정확도 비교를 위한 절대상대오차(absolute relative error)는 Eq. (13)과 같이 계산한다.

$$ARE(\%) = \left| \frac{Scaling\ Q - At\ site\ Q}{At\ site\ Q} \times 100 \right| \quad (13)$$

여기서, $Scaling\ Q$ 는 스케일 성질을 이용하여 추정된 확률강우량(mm), $At\ site\ Q$ 는 지점빈도해석을 이용하여 계산된 확률강우량(mm)을 나타낸다.

다음의 Tables 3 and 4는 각각 시간단위자료를 이용하여 지점빈도해석을 이용하여 구한 확률강우량과 스케일 성질을 이용하여 계산한 확률강우량간의 절대상대오

Table 2. Scaling Exponent and Rainfall Recording 22 Sites of Korea Meteorological Administration used in this Study

Site NO.	Code	Site name	Record length	Scaling exponent(HR)
1	90	Sokcho	36	0.606
2	101	Chuncheon	37	0.506
3	105	Gangneung	46	0.711
4	108	Seoul	75	0.382
5	112	Incheon	51	0.426
6	114	Wonju	32	0.485
7	119	Suwon	40	0.513
8	129	Seosan	36	0.485
9	131	Cheongju	37	0.429
10	133	Daejeon	35	0.443
11	135	Chupungyeong	49	0.492
12	138	Pohang	50	0.502
13	140	Gunsan	36	0.484
14	143	Daegu	88	0.364
15	146	Jeonju	63	0.391
16	152	Ulsan	57	0.513
17	156	Gwangju	65	0.430
18	159	Busan	61	0.448
19	162	Tongyeong	36	0.469
20	165	Mokpo	81	0.514
21	168	Yeosu	61	0.442
22	170	Wando	33	0.509

Table 3. Absolute Relative Errors of Rainfall Quantile using Scaling Property for Hourly Durations

	Index duration	1HR	2HR	3HR	6HR	9HR	12HR	15HR	18HR	24HR
Down scaling	24 HR	11.51	11.05	11.59	12.16	11.50	<u>8.89</u>	<u>6.80</u>	<u>4.24</u>	×
	18 HR	10.44	<u>9.19</u>	<u>9.22</u>	<u>9.63</u>	<u>8.37</u>	<u>5.41</u>	<u>3.32</u>	×	×
	15 HR	11.26	<u>8.45</u>	<u>8.06</u>	<u>8.38</u>	<u>6.35</u>	<u>3.09</u>	×	×	×
	12 HR	10.58	<u>7.61</u>	<u>6.60</u>	<u>6.20</u>	<u>4.02</u>	×	×	×	×
	9 HR	12.18	<u>7.36</u>	<u>6.17</u>	<u>3.63</u>	×	×	×	×	×
	6 HR	12.33	<u>7.01</u>	<u>4.17</u>	×	×	×	×	×	×
	3 HR	10.02	<u>3.94</u>	×	×	×	×	×	×	×
	2 HR	<u>7.70</u>	×	×	×	×	×	×	×	×
	1 HR	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Up scaling	1 HR	×	<u>7.81</u>	<u>9.13</u>	10.95	10.71	10.12	10.31	11.68	11.57
	2 HR	×	×	<u>3.74</u>	<u>6.49</u>	<u>6.90</u>	<u>7.45</u>	<u>8.61</u>	<u>9.93</u>	12.89
	3 HR	×	×	×	<u>4.06</u>	<u>6.02</u>	<u>6.77</u>	<u>8.56</u>	10.32	13.86
	6 HR	×	×	×	×	<u>3.66</u>	<u>6.42</u>	<u>8.95</u>	10.81	14.61
	9 HR	×	×	×	×	×	<u>4.08</u>	<u>6.65</u>	<u>9.16</u>	13.35
	12 HR	×	×	×	×	×	×	<u>3.18</u>	<u>5.76</u>	<u>9.98</u>
	15 HR	×	×	×	×	×	×	×	<u>3.44</u>	<u>7.49</u>
	18 HR	×	×	×	×	×	×	×	×	<u>4.53</u>
	24 HR	×	×	×	×	×	×	×	×	×

Table 4. Absolute Relative Errors of Rainfall Quantile using Scaling Property for 10~60 Minutes Durations

	Index duration	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
Down scaling	60 min	25.84	13.97	<u>9.81</u>	<u>5.23</u>	<u>3.58</u>	×
	50 min	22.82	11.71	<u>7.47</u>	<u>2.94</u>	×	×
	40 min	21.26	<u>9.58</u>	<u>5.06</u>	×	×	×
	30 min	17.04	<u>5.27</u>	×	×	×	×
	20 min	12.68	×	×	×	×	×
	10 min	×	×	×	×	×	×
Up scaling	10 min	×	11.25	14.40	17.19	18.60	20.37
	20 min	×	×	<u>4.98</u>	<u>8.75</u>	10.82	12.43
	30 min	×	×	×	<u>4.86</u>	<u>7.27</u>	<u>8.97</u>
	40 min	×	×	×	×	<u>2.96</u>	<u>4.84</u>
	50 min	×	×	×	×	×	<u>3.35</u>
	60 min	×	×	×	×	×	×

차와, 10분~60분간의 분단위자료를 활용하여 구한 경우의 절대상대오차를 나타낸 것이다. 두 가지 경우 모두 전체 재현기간(2년, 3년, 5년, 10년, 20년, 30년, 50년, 70년, 80년, 100년, 150년, 200년, 300년, 500년)에 대해서 절대상대오차를 비교하였고, 대상지점은 Table 2에서 언급한 기상청 관리 22개 지점이다. 예를 들어, Table 3의 하향스케일링 경우를 살펴보면, 기준 지속기간 24시간에 해당하는 확률강우량을 활용하여 지속기간 1시간, 2시간, 3시간, 6시간, 9시간, 12시간, 15시간, 18시간까지의 하향스케일링이 가능함을 알 수 있고, 이때의 절대상대오차가 10 % 미만인 지속기간은 12시간, 15시간, 그리고 18시간으로 기준 지속기간 24시간의 50 %에 해당하는 지속기간인 12시간까지는 절대상대오차 10 % 범위 내에서 추정이 가능한 것을 알 수 있다. Tables 3 and 4에서 제시된 값은 14개의 지속기간과 14개의 재현기간을 사용하여 각각의 경우에 대한 확률강우량을 비교하여 절대상대오차를 구하고, 이 결과값을 이용하여 전체 재현기간에 대해서 평균한 결과값을 나타낸 것이다.

Table 3에 의하면, 시간단위자료를 사용하는 경우 하향과 상향스케일링 모두 대부분의 확률강우량에 관한 오차가 10 % 미만인 것을 볼 수 있으며, 하향스케일링의 경우는 최대 12.33 %의 오차(기준 지속기간 6시간이고 1시간에 해당하는 확률강우량을 추정하는 경우)가 발생하며, 상향스케일링의 경우는 최대 14.61 %의 오차(기준 지속기간 6시간이고 24시간에 해당하는 확률강우량을 추정하는 경우)가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라

서 시간단위자료를 사용하는 경우 지속기간 24시간 범위 내에서 하향 및 상향스케일링을 적용 시 최대 절대상대오차가 15 % 범위 이내인 것으로 나타났다. 반면, Table 4에 의하면 10분~60분 사이의 분단위 강우량 자료를 이용하여 계산된 확률강우량자료를 활용하는 경우, 시간단위자료를 활용하는 경우보다는 상대적으로 큰 절대상대오차가 발생하는 것을 볼 수 있으며 최대오차 역시 하향스케일링의 경우 25.84 %의 오차가 발생하며 상향스케일링의 경우 20.37 %의 오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 이 경우에도 하향스케일링의 경우 기준 지속기간의 50 %까지 지속기간에 대하여, 상향스케일링의 경우 60분 범위까지 기준지속기간의 약 2배정도까지 절대상대오차가 10 % 미만인 것으로 나타났다.

Fig. 4는 각 재현기간별로 나타난 정확도를 살펴보기 위해서 각각의 기준 지속기간별로 절대상대오차를 도시한 것이다. Fig. 4에서 각각 하향스케일링의 경우에는 기준 지속기간이 24시간, 12시간, 그리고 60분인 경우에 대한 결과이며, 상향스케일링인 경우에는 1시간, 6시간, 그리고 10분인 경우에 대한 결과를 나타내고 있다. 하향스케일링의 경우, 기준 지속기간 24시간에 대해서는 24시간→1시간, 6시간, 9시간을 제외한 다른 모든 경우에 대해서 절대상대오차가 재현기간 500년까지 10 %내외인 것으로 나타났으며, 기준 지속기간 12시간에 대해서도 1시간, 2시간인 경우를 제외하고는 모두 10 %미만의 절대상대오차를 가지는 것으로 나타났다. 반면, 분단위 자료를 사용한 경우에는 기준 지속기간 60분에 대해서 10분, 20분, 30분, 40분, 50분의 자료를 하향스케일

링하여 추정할 경우 20분과 50분의 경우를 제외하고는 재현기간 70년 이상부터는 절대상대오차가 10 %이상인 것으로 나타났다. 상향스케일링의 경우에는 전반적으로 하향스케일링에 비해서 절대상대오차가 큰 것으로 나타

났는데, 특히 기준 지속기간 10분을 사용하여 20분, 30분, 40분, 50분, 60분에 해당하는 확률강우량을 추정하는 경우의 절대상대오차가 다른 경우에 비해서 상당히 높은 것으로 나타났다.

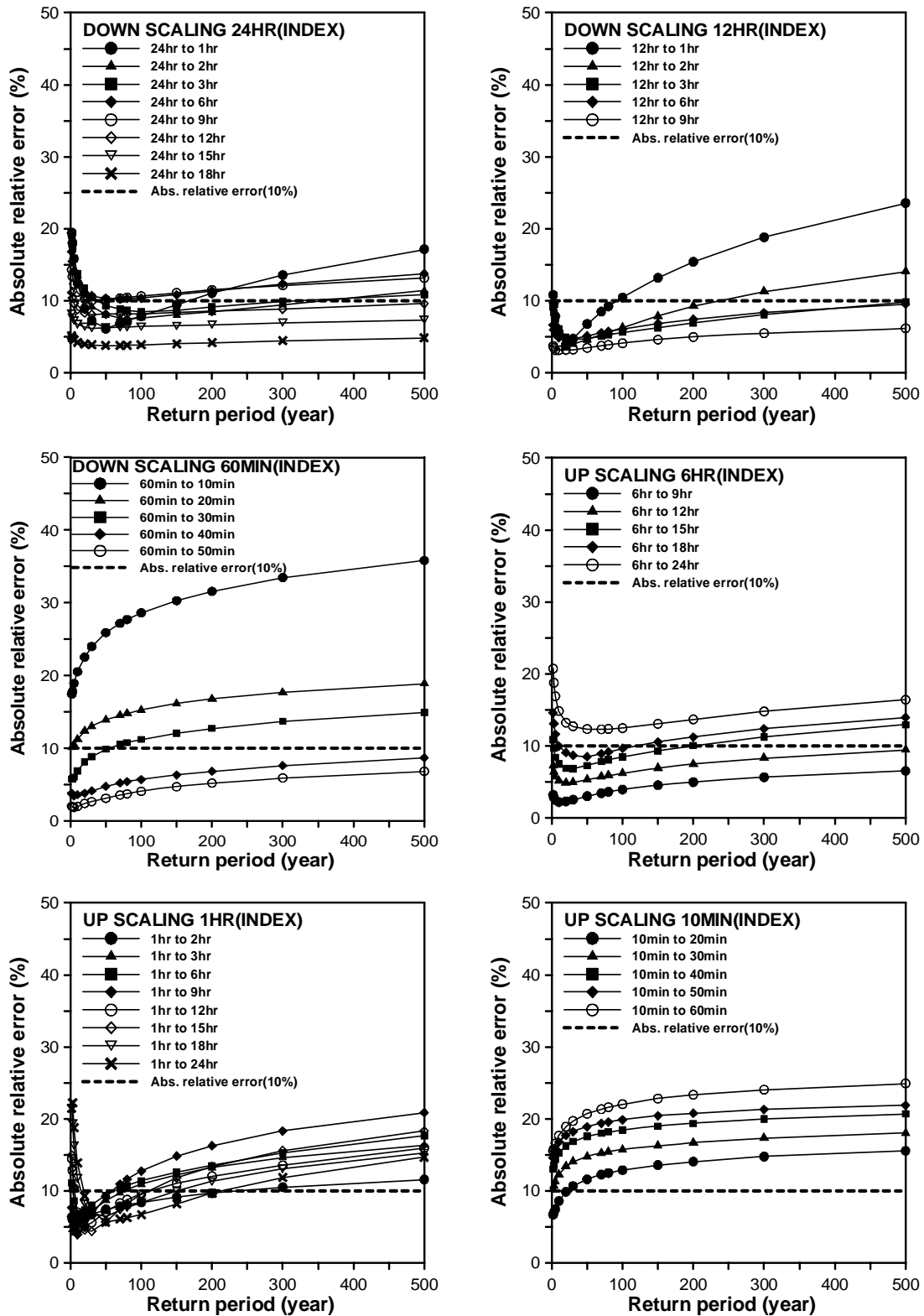


Fig. 4. Absolute Relative Errors of several Index Durations for Down and Up-scaling Methods using 14 Different Return Periods

Table 5. Return Periods with less than Overall 10 % ARE for the Corresponding Index Durations based on Down and Up-scaling Methods

	Index duration	Return periods with less than overall 10 % ARE		Index duration	Return periods with less than overall 10 % ARE
Down scaling	24HR	20 ~ 200 (8)	Up scaling	1HR	20 ~ 80 (5)
	18HR	10 ~ 150 (8)		2HR	30 ~ 300 (8)
	15HR	5 ~ 100 (8)		3HR	50 ~ 500 (8)
	12HR	2 ~ 100 (10)		6HR	5 ~ 200 (10)
	9HR	2 ~ 80 (9)		9HR	2 ~ 500 (14)
	6HR	2 ~ 70 (8)		12HR	3 ~ 500 (13)
	3HR	2 ~ 100 (10)		15HR	2 ~ 500 (14)
	2HR	2 ~ 200 (12)		18HR	2 ~ 500 (14)
	60min	2 ~ 10 (4)		10min	× (0)
	50min	2 ~ 70 (8)		20min	2 ~ 30 (6)
	40min	2 ~ 300 (13)		30min	2 ~ 200 (12)
	30min	2 ~ 500 (14)		40min	2 ~ 500 (14)
	20min	2 ~ 30 (6)		50min	2 ~ 500 (14)

Table 5는 하향스케일링과 상향스케일링을 적용했을 때, 각각의 기준 지속기간별로 어느 범위의 재현기간까지의 값이 대략 10 % 정도의 절대상대오차를 보여주는 지를 나타낸 표이다. 앞서 정확도를 비교할 때의 결과는 정확하게 10 %미만의 절대상대오차를 나타내는 경우를 비교한 것이나, 여기서는 하향스케일링하거나 상향스케일링한 전체지속기간에 대한 결과를 살펴보기 위해서 10~12 % 미만의 절대상대오차를 가지는 경우를 대상으로 하였다. 또한, 하향스케일링한 경우 기준 지속기간 60분~20분까지의 경우는 지속기간 10분에 대해서 하향스케일링할 경우 절대상대오차가 너무 크게 나오기 때문에 결과에서 제외하였으며, 상향스케일링의 경우 기준 지속기간 6시간, 9시간의 경우 지속기간 24시간에 대한 결과 역시 절대상대오차가 너무 크게 나오므로 결과분석에서 제외하였다. Table 5의 결과에 의하면 전체 14개의 재현기간에 대해서, 하향스케일링이나 상향스케일링 모두 시간단위자료를 활용한 확률강우량의 경우 대부분 8개 이상의 재현기간에 대해서 12 % 미만의 절대상대오차를 보이는 것으로 나타났으며, 분단위자료를 활용할 경우에는 기준 지속기간의 선택에 따라서 스케일 성질을 적용할 수 있는 재현기간의 범위에 차이가 있는 것으로 나타났다.

결과적으로 스케일 성질을 활용하여 서로 다른 지속기간의 확률강우량 자료를, 스케일 성질을 활용하여 추정하는데 있어서 지속기간별 정확도 측면이나 적용 가능한 재현기간의 범위측면에서 모두 활용이 가능한 것으로 나타났다.

4. 스케일 성질을 활용한 미계측 확률강우량의 추정

Tables 6 and 7에서, 절대상대오차 10 % 미만은 굵은 글씨와 함께 밑줄로 표시하였고, 절대상대오차 10~15 %는 이탤릭체와 함께 밑줄로 표시하였다. 지속기간 1시간을 기준시간으로 사용하여 하향 스케일링한 결과를 보여주는 Table 6에서, 지속기간 10분에 해당하는 값은 전체 재현기간에 대해서 모두 절대상대오차 15 % 이상을 보여주었지만 나머지 지속기간에 대해서는 3가지 경우를 제외하고는 모두 절대상대오차 15 % 미만임을 나타내고 있다. 또한, Table 6에서 실제로 계산된 확률강우량과 스케일 성질을 이용한 확률강우량의 값을 비교해 보면, 지속기간 10분인 경우를 제외하고 절대상대오차가 가장 큰 경우인 지속기간 20분, 재현기간 2년의 경우를 비교해 보더라도 그 절대값의 차가 3.55 (mm)에 불과한 것을 알 수 있다.

Table 7은 김태순 등(2007)과 신주영 등(2007)이 제안한 강우강도식을 이용해서 Table 6과 똑같이 지속기간 10~60분 사이에 해당하는 확률강우량 값을 자료가 미계측인 상태라고 가정하고 추정한 것으로, 스케일링 성질을 활용한 Table 6과는 상이하게 비교적 짧은 재현기간에 대한 절대상대오차가 상대적으로 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. Tables 6 and 7의 결과를 전체적으로 비교해 보면, 절대상대오차 15 % 미만인 경우의 수는 전체 70가지 경우 중에서 Table 6은 75.7 %, Table 7 역시 75.7 %로 나타났으며, 절대상대오차 10

% 미만인 경우의 수는 Table 6에서는 54.3 %, Table 7에서는 64.3 %로 나타나서 IDF곡선을 이용해서 추정된 확률강우량 값이 더 정확한 결과값인 것으로 나타났다. 전체적으로, 두 가지 방법 모두 기준지속기간과 큰 차이가 나는 지속기간(10분)에서 오차가 커진다거나(스

케일 성질을 이용하는 경우), 짧은 재현기간에서 오차가 커지는 단점(IDF 곡선을 이용하는 경우) 등을 가지고 있지만 전체적인 오차를 고려한다면 두 가지 방법 모두 충분히 적용가능함을 알 수 있다.

Table 6. Rainfall Quantiles Computed by at-site Frequency Analysis and Scaling Property at Daegu

Duration (min)		Return period (year)													
		2	3	5	10	20	30	50	70	80	100	150	200	300	500
10	Scaling	16.59	19.54	22.92	27.33	31.71	34.31	37.64	39.88	40.77	42.28	45.06	47.07	49.95	53.66
	At site	11.60	13.90	16.40	19.80	23.10	25.10	27.70	29.40	30.00	31.20	33.30	34.80	37.00	39.90
	ARE(%)	43.01	40.57	39.77	38.01	37.29	36.71	35.90	35.64	35.91	35.51	35.32	35.26	35.00	34.49
20	Scaling	21.45	25.27	29.64	35.34	41.01	44.37	48.68	51.56	52.72	54.67	58.27	60.87	64.59	69.39
	At site	17.90	21.50	25.60	30.90	36.20	39.40	43.50	46.20	47.30	49.20	52.60	55.10	58.70	63.30
	ARE(%)	19.84	17.51	15.78	<u>14.35</u>	<u>13.29</u>	<u>12.62</u>	<u>11.90</u>	<u>11.61</u>	<u>11.46</u>	<u>11.12</u>	<u>10.78</u>	<u>10.47</u>	<u>10.03</u>	<u>9.62</u>
30	Scaling	24.93	29.36	34.45	41.07	47.66	51.57	56.58	59.93	61.28	63.54	67.72	70.74	75.07	80.65
	At site	22.90	27.30	32.20	38.30	44.30	47.80	52.20	55.10	56.20	58.10	61.60	64.10	67.60	72.10
	ARE(%)	<u>8.87</u>	<u>7.56</u>	<u>6.99</u>	<u>7.23</u>	<u>7.59</u>	<u>7.89</u>	<u>8.38</u>	<u>8.77</u>	<u>9.03</u>	<u>9.37</u>	<u>9.94</u>	<u>10.36</u>	<u>11.05</u>	<u>11.85</u>
40	Scaling	27.74	32.67	38.33	45.69	53.03	57.38	62.95	66.68	68.18	70.70	75.35	78.71	83.52	89.72
	At site	27.00	31.90	37.40	44.20	50.80	54.60	59.40	62.50	63.70	65.80	69.50	72.20	75.90	80.60
	ARE(%)	<u>2.73</u>	<u>2.42</u>	<u>2.48</u>	<u>3.38</u>	<u>4.39</u>	<u>5.09</u>	<u>5.97</u>	<u>6.69</u>	<u>7.03</u>	<u>7.44</u>	<u>8.42</u>	<u>9.01</u>	<u>10.04</u>	<u>11.32</u>
50	Scaling	30.13	35.49	41.64	49.63	57.60	62.33	68.38	72.43	74.06	76.80	81.85	85.50	90.72	97.47
	At site	29.90	35.20	41.10	48.80	56.20	60.60	66.10	69.70	71.20	73.60	78.10	81.30	85.80	91.60
	ARE(%)	<u>0.77</u>	<u>0.82</u>	<u>1.30</u>	<u>1.71</u>	<u>2.50</u>	<u>2.85</u>	<u>3.44</u>	<u>3.92</u>	<u>4.01</u>	<u>4.34</u>	<u>4.80</u>	<u>5.16</u>	<u>5.74</u>	<u>6.40</u>

Table 7. Rainfall Quantiles Computed by at-site Frequency Analysis and IDF Curve at Daegu

Duration (min)		Return period (year)													
		2	3	5	10	20	30	50	70	80	100	150	200	300	500
10	IDF	17.07	18.37	20.07	22.49	25.05	26.61	28.65	30.04	30.61	31.56	33.35	34.66	36.56	39.06
	At site	11.60	13.90	16.40	19.80	23.10	25.10	27.70	29.40	30.00	31.20	33.30	34.80	37.00	39.90
	ARE(%)	47.12	32.16	22.40	<u>13.59</u>	<u>8.42</u>	<u>6.00</u>	<u>3.43</u>	<u>2.19</u>	<u>2.03</u>	<u>1.17</u>	<u>0.16</u>	<u>0.40</u>	<u>1.19</u>	<u>2.11</u>
20	IDF	23.57	25.45	27.88	31.29	34.85	37.00	39.78	41.67	42.43	43.71	46.09	47.82	50.30	53.54
	At site	17.90	21.50	25.60	30.90	36.20	39.40	43.50	46.20	47.30	49.20	52.60	55.10	58.70	63.30
	ARE(%)	31.69	18.37	<u>8.90</u>	<u>1.27</u>	<u>3.74</u>	<u>6.10</u>	<u>8.54</u>	<u>9.81</u>	<u>10.30</u>	<u>11.16</u>	<u>12.38</u>	<u>13.22</u>	<u>14.30</u>	15.43
30	IDF	37.00	39.01	41.59	45.20	48.95	51.20	54.10	56.06	56.85	58.17	60.62	62.39	64.94	68.23
	At site	22.90	27.30	32.20	38.30	44.30	47.80	52.20	55.10	56.20	58.10	61.60	64.10	67.60	72.10
	ARE(%)	61.57	42.88	29.16	18.03	<u>10.49</u>	<u>7.11</u>	<u>3.65</u>	<u>1.74</u>	<u>1.15</u>	<u>0.12</u>	<u>1.59</u>	<u>2.66</u>	<u>3.93</u>	<u>5.37</u>
40	IDF	41.71	44.03	47.01	51.16	55.44	58.01	61.32	63.54	64.43	65.93	68.70	70.70	73.56	77.25
	At site	27.00	31.90	37.40	44.20	50.80	54.60	59.40	62.50	63.70	65.80	69.50	72.20	75.90	80.60
	ARE(%)	54.48	38.02	25.69	15.75	<u>9.14</u>	<u>6.25</u>	<u>3.23</u>	<u>1.66</u>	<u>1.14</u>	<u>0.20</u>	<u>1.15</u>	<u>2.08</u>	<u>3.08</u>	<u>4.16</u>
50	IDF	45.63	48.22	51.55	56.18	60.95	63.80	67.46	69.92	70.90	72.56	75.61	77.81	80.96	85.00
	At site	29.90	35.20	41.10	48.80	56.20	60.60	66.10	69.70	71.20	73.60	78.10	81.30	85.80	91.60
	ARE(%)	52.60	37.00	25.34	15.13	<u>8.45</u>	<u>5.28</u>	<u>2.06</u>	<u>0.31</u>	<u>0.42</u>	<u>1.41</u>	<u>3.19</u>	<u>4.29</u>	<u>5.65</u>	<u>7.21</u>

5. 결 론

본 연구에서는 강우량 자료가 가지는 스케일 성질을 이용하여 확률강우량을 추정할 때의 정확도를 살펴보고, 기상청 22개 지점에서 관측된 자료를 바탕으로 각각의 기준 지속기간별로 어느 정도 범위까지의 재현기간에 대해서 확률강우량을 추정할 수 있는지를 살펴보았다.

각각 기준지속기간보다 단기간의 확률강우량을 추정하는 경우를 하향스케일링으로, 장기간의 확률강우량을 추정하는 경우를 상향스케일링으로 정의하고 22개 지점을 대상으로 전체 재현기간에 대해서 지속기간별로 정확도를 살펴본 결과, 시간단위자료를 사용할 경우 기준 지속기간이 24시간과 1시간인 경우를 제외하고는 대부분의 경우에 대해서 절대상대오차가 10 % 미만인 것으로 나타났지만, 분단위자료를 사용할 경우에는 시간단위자료에 비해서 절대상대오차가 큰 것으로 나타났다.

또한, 각각의 기준 지속기간별로 하향스케일링이나 상향스케일링을 할 때 전체지속기간에 대해서 어느 정도의 재현기간까지에 대해서 스케일 성질을 적용할 수 있는지를 살펴본 결과 시간단위자료를 사용할 경우에는 전체 14개 재현기간 중 대부분의 경우에서 8개 이상의 재현기간에 대해서 적용이 가능한 것으로 나타났으며, 분단위자료를 사용할 경우에는 기준 지속기간별로 재현기간의 적용범위에 차이가 있는 것으로 나타났다.

스케일 성질을 활용할 수 있는 적용예로서, 대구지점에 대해서 1시간, 2시간, 3시간에 해당하는 확률강우량 자료를 이용하여 스케일 지수를 구한 후, 지속기간 1시간을 기준 지속기간으로 사용하여 지속기간 10분, 20분, 30분, 40분, 50분에 해당하는 확률강우량 자료를 추정할 결과 지속기간 10분에 해당하는 결과를 제외하고는 대부분 절대상대오차 15 % 미만의 정확도를 가지는 확률강우량 값을 추정할 수 있었다.

본 연구결과를 이용하면, 미세측된 지속기간에 대한 확률강우량 자료가 필요한 경우에 비교적 높은 정확도를 가지는 자료를 얻을 수 있을 것으로 기대되며, 향후에는 확률강우량 자료가 아닌 강우자료에 직접 스케일 성질을 이용하여 강우량 자료를 발생시키는 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설기술혁신사업(03 산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참 고 문 헌

- 국립방재연구소 (2002). **FARD2002 사용자설명서**, 연세대학교.
- 김태순, 신주영, 김수영, 허준행 (2007). "유전자알고리즘을 이용한 강우강도식 매개변수 추정에 관한 연구 (I): 기존 매개변수 추정방법과의 비교." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제10호, pp. 811-821.
- 신주영, 김태순, 김수영, 허준행 (2007). "유전자알고리즘을 이용한 강우강도식 매개변수 추정에 관한 연구 (II): 장단기간 구분 방법의 제시." **한국수자원학회 논문집**, 제40권, 제10호, 한국수자원학회, pp. 823-832.
- 이원환, 박상덕, 최성열 (1993). "한국 대표확률강우강도식의 유도." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제13권, 제1호, pp. 115-120.
- 허준행, 김정덕, 한정훈 (1999). "지속기간별 강우자료의 적정분포형 선정을 통한 확률강우강도식의 유도." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제3호, pp. 247-254.
- Baldassarre, G. D., Brath, A., and Montanari, A. (2006). "Reliability of different depth-duration-frequency equations for estimating short-duration design storms." *Water Resources Research*, Vol. 42, W12501.
- Bougadis, J., and Adamowski, K. (2006). "Scaling model of a rainfall intensity-duration-frequency relationship." *Hydrological Processes*, Vol. 20, pp. 3747-3757.
- Burlando, P., and Rosso, R. (1996). "Scaling and multiscaling models of depth-duration-frequency curves for storm precipitation." *Journal of Hydrology*, Vol. 187, pp. 45-64.
- Deidda, R., Badas, M. G., and Piga, E. (2006). "Space-time multifractality of remotely sensed rainfall fields." *Journal of Hydrology*, Vol. 322, pp. 2-13.
- Gupta, V. K., and Waymire, E. (1990). "Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95(D3), pp. 1999-2009.
- Lovejoy, S. (1982). "Area-perimeter relation for rain and cloud areas." *Science*, Vol. 216, pp. 185-187.
- Lovejoy, S., and Mandelbrot, B. B. (1985). "Fractal

- properties of rain and a fractal model." *Tellus*, Vol. 37A, pp. 209-232.
- Lovejoy, S., and Schertzer, D. (1985). "Generalized scale invariance in the atmosphere and fractal models of rain." *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 8, pp. 1233-1250.
- Nguyen, V.-T.-V. (2000). "Recent advances in modeling of extreme rainfall and floods." *International European-Asian Workshop on Ecosystems*, Hanoi, Vietnam, pp. 52-59.
- Nguyen, V.-T.-V., Nguyen, T.-D., and Ashkar, F. (2002). "Regional frequency analysis of extreme rainfalls." *Water Science and Technology*, Vol. 45, No. 2, pp. 75-81.
- N.E.R.C. (1975). *Flood studies report(five volumes)*. Natural Environment Research Council, London.
- Olsson, J., and Burlando, P. (2002). "Reproduction of temporal scaling by a rectangular pulse rainfall model." *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 611-630.
- Schertzer, D., and Lovejoy, S. (1987). "Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative processes." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92(D8), pp. 9693-9714.
- Waymire, E. (1985). "Scaling limit and self-similarity in precipitation fields." *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 8, pp. 1271-1281.
- (논문번호:08-13/접수:2008.01.24/심사완료:2008.06.26)