

# 빈도해석과 스케일 성질을 이용한 확률강우량의 비교

## Comparison of Rainfall Quantile using At-site Frequency Analysis and Scale Invariance Property

정영훈\*, 김수영\*\*, 김태순\*\*\*, 허준행\*\*\*\*

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

### 요 지

일반적으로 확률강우량은 관측지점에서 관측된 연최대 강우량자료를 바탕으로 빈도해석을 적용하여 산정한다. 그러나 국내에서는 매시각별로 관측된 자료가 대부분이기 때문에 단기간 혹은 장기간의 지속기간에 대한 확률강우량을 산정하는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 매시각단위의 지속기간 강우자료를 바탕으로 다양한 지속기간에 대한 확률 강우량을 산정할 수 있는 스케일 성질을 적용하여 확률강우량을 산정하여 정확성을 판단하였다. 강우자료는 비교적 신뢰성이 높고 자료기간이 긴 기상청 지점 22개 자료를 사용하였으며, 2003년까지의 관측된 자료를 이용하여 확률강우량을 산정한 후 지점빈도해석 프로그램인 FARD2006과 비교하여 지점빈도해석의 결과 값을 참값으로 절대상대오차를 산정하여 비교하였다. 산정한 방법은 기준이 되는 확률강우량을 산정한 후 그보다 긴 지속기간에 대한 확률강우량을 산정하는 방법인 상향스케일링(Up-scaling)과 그 보다 짧은 지속기간에 대한 확률강우량을 산정하는 방법인 하향스케일링(Down-scaling)의 두 가지 방법으로 확률강우량을 산정하였다. 두 방법 모두 1시간~24시간의 지속기간에 대한 확률강우량을 2년~500년의 재현기간에 대하여 확률강우량을 산정하였으며, 빈도해석으로 산정한 FARD2006의 결과값과 비교하여 절대상대오차를 산정하였다. 그 결과, 시간단위자료를 사용할 경우 대부분 절대상대오차가 10% 미만인 결과를 얻을 수 있었으며, 14개의 재현기간 중에서 8개 이상의 재현기간에 대해 적용이 가능한 것으로 나타났다. 지속기간 1시간 강우자료를 기준 지속기간으로 1시간 미만의 지속기간에 대한 확률강우량을 추정할 결과 10분을 제외하고는 대부분 절대상대오차가 10% 내외의 정확도를 가지는 것으로 나타났다. 따라서 스케일 성질을 이용하여 미계측 강우지속기간의 확률강우량을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 스케일링, 빈도해석, 상향스케일링(Up-scaling), 하향스케일링(Down-scaling), 절대상대오차

## 1. 서 론

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. 선행연구들은 주로 단일 혹은 멀티 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 알아보고자

\* 정회원 · 연세대학교 대학원 사회환경시스템공학부 토목공학과 박사과정 · E-mail: yhjung2000@yonsei.ac.kr

\*\* 정회원 · 연세대학교 대학원 사회환경시스템공학부 토목공학과 박사과정 · E-mail: sykim79@yonsei.ac.kr

\*\*\* 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목환경공학과 BK21교수 · 공학박사 · E-mail: chaucer@yonsei.ac.kr

\*\*\*\* 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목환경공학과 교수 · E-mail: jhheo@yonsei.ac.kr

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 살펴보았다.

## 2. 기본이론

### 2.1 스케일링(Scaling)성질의 정의

극한강우사상에 대한 빈도해석은 일반적으로 일정한 기간  $\tau$  동안 관측된 최대강우량  $H_T$ 를 고려해야 하며  $H_T$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(Gupta and Waymire, 1990).

$$H_T = \max(Z_T(t); t_0 \leq t \leq t_0 + \tau) \quad (1)$$

여기서,  $t_0$ 는 임의의 시간이며, 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  $\xi_q$ 는 추정하고자 하는 지속기간  $T$ 에 따라 달라지므로 특정 빈도  $q$ 에 대한 확률강우량  $\xi_q$ 가 지속기간  $T$ 에 따라 어떻게 달라지는지 추정하는 것이 가능하게 된다. 이러한 특성은 지속기간별 확률강우량  $h = \xi_q(T)$ 의 성장곡선(growth curve) 추정에 이용되며, 수문학적 으로는 빈도  $q$ 에 대한 설계수문량 산정에 사용된다. 지속기간  $T$ 에 따른 확률강우량  $\xi_q(T)$ 는 식 (2)와 같은 형태로 표현할 수 있다(Gupta and Waymire, 1990).

$$h = \xi_q(T) = A_q T^{m_q} \quad (2)$$

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

좁은 의미의 단일 스케일의 개념을 서로 다른 지속기간의 강우량에 적용하여 나타내면 식 (3)과 같다.

$$Z_{\lambda T}(t) = \lambda^n Z_T(t) \quad (3)$$

여기서,  $\lambda$ 는 스케일 인자(scaling factor),  $n$ 은 스케일 지수(scaling exponent)로 일정한 값을 가지며, ' $d$ '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  $\lambda^n$ 으로 rescale한  $Z_{\lambda T}(t)$ 는 같은 확률분포형을 가지는 특성을 보인다.

본 연구에서는 국내의 강우자료가 GEV 분포를 따른다고 가정하였으며 확률강우량의 산정은 GEV 분포의 역함수를 이용하여 추정하였다. GEV 분포의 누가분포함수(CDF)는 식 (4)와 같다(NERC, 1975).

$$F(x) = \exp \left[ - \left( 1 - \frac{k(x-\xi)}{\alpha} \right)^{1/k} \right] \quad (4)$$

여기서,  $\xi$ 는 위치 매개변수(location parameter),  $\alpha$ 는 규모 매개변수(scale parameter),  $k$ 는 형상 매개변수(shape parameter)이다.

Bougadis and Adamowski(2006)에 의해 연구된 GEV 분포에 대한 확률강우량( $Q$ )은 다음과 같이 정의된다.

$$Q = \xi + \frac{\alpha}{k} \{ 1 - [-\ln(q)]^k \} \quad (5)$$

여기서  $q$ 는 비초과확률  $(1 - \frac{1}{T})$ 이고  $T$ 는 재현기간이다.

## 2.2 스케일링 인자와 스케일 지수의 추정

스케일 인자  $\lambda$ 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 식 (6)과 같이 산정된다.

$$\lambda = \frac{T}{T'} \quad (6)$$

스케일 지수는 넓은 의미의 단일 스케일(wide sense simple scaling)에 근거하여 지속기간별 모멘트를 이용하여 추정한다. 우선 강우자료에 대한 지속기간별 모멘트를 모멘트 차수  $l=1,2,3,\dots,m$ 에 대해 산정한다. 본 연구에서는 기상청에서 관리하는 통영지점을 대상으로 스케일 지수를 산정하는 과정을 나타내었다. 표 1은 통영지점의 지속기간(1, 3, 6, 12, 24시간)별 연최대강우량의 기본통계값 및  $m=5$ 차까지의 모멘트를 계산하여 나타낸 것이다.

표 1. 지속기간 1시간에서 24시간에 대한 연최대강우량의 기본통계량(통영)

Sample data	Duration(hr)				
	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

우선, 스케일 지수를 산정하기 위해서는 5차까지의 모멘트를 전대수지상에 지속기간별로 도시한 후에(그림 1), 다시 이 값들을 이용하여 차수별로 선형회귀선의 기울기를 도시하면 그림 2를 얻을 수 있고, 모멘트 차수  $l$ 에 대한 모멘트의 기울기  $ln$ 은 각 모멘트 차수별 스케일 지수가 되고, 넓은 의미의 단일스케일에 의해  $n$ 은 평균적인 스케일 지수가 된다.

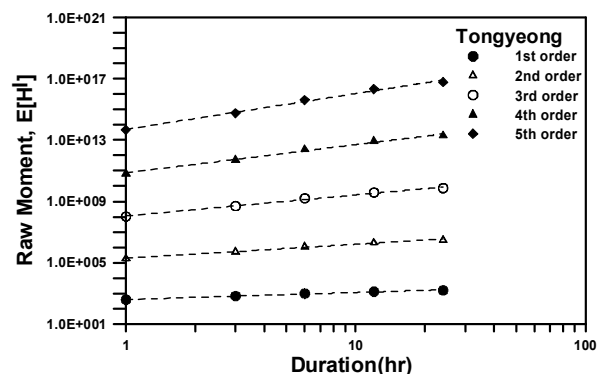
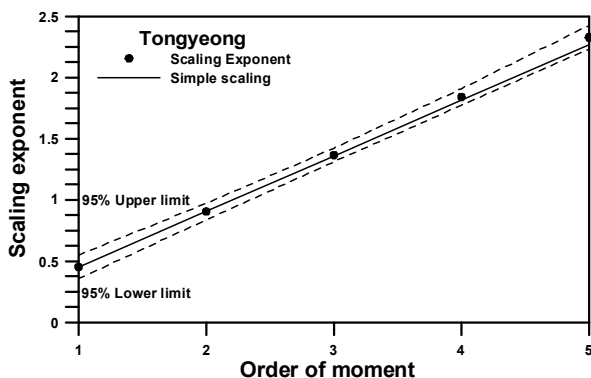


그림 1. 지속기간에 대한 모멘트별 스케일링(통영) 그림 2. 모멘트 차수에 따른 기울기의 신뢰구간

또한, 모멘트 차수  $l$ 에 대한  $ln$ 이 선형인 경우는 단일 스케일을 적용하게 되며 비선형인 경우에는 멀티 스케일을 적용하게 된다. 단일 스케일과 멀티 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 멀티 스케일을 적용하게 된다. 통영 지점의 경우는  $ln$ 이 95% 신뢰구간 내에 존재하므로 단일 스케일을 적용할 수 있으며, 그림 2의 직선의 기울기는 0.469로 계산된다.

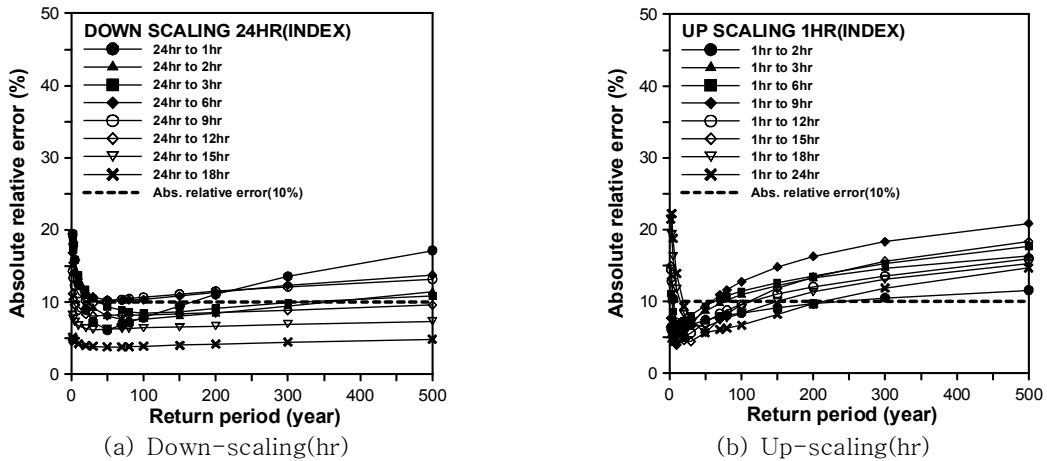
### 3. 스케일 성질을 이용한 확률강우량의 추정

#### 3.1 스케일 성질을 이용한 확률강우량의 추정

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 식 (7)과 같이 계산한다.

$$ARE(\%) = \left| \frac{Scaling\ Q - At\ site\ Q}{At\ site\ Q} \right| \times 100 \quad (7)$$

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



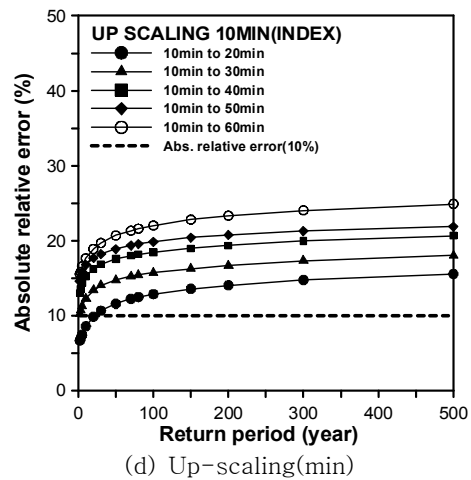
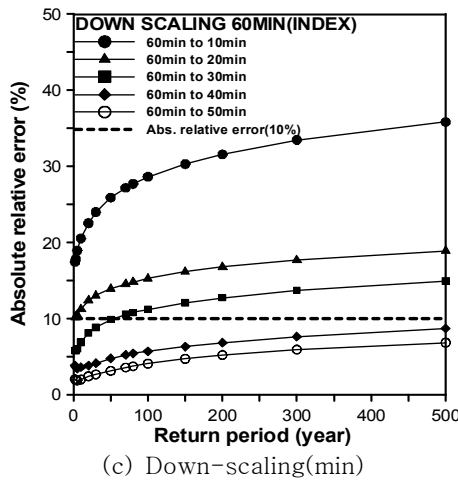


그림 3. 하향·상향스케일링에 따른 기준지속기간별 절대상대오차(14개의 재현기간)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 각각 기준 지속기간보다 단기간의 확률강우량을 추정하는 경우를 하향스케일링으로, 장기기간의 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. 본 연구결과를 이용하면, 미계측된 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.

#### 감 사 의 글

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

#### 참 고 문 헌

1. Bougadis, J. and Adamowski, K. (2006). Scaling model of a rainfall intensity-duration-frequency relationship, *Hydrological Processes*, No 20, pp. 3747-3757.
2. 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.
3. N.E.R.C. (1975). *Flood studies report*. Natural Environment Research Council, London.
4. Olsson, J., and Burlando, P. (2002). "Reproduction of temporal scaling by a rectangular pulse rainfall model." *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 611-630.