

임의시간 환산계수에 대한 Weiss 모형의 개선

Improvement of Weiss Model on the Conversion Factor of Fixed- to True-Interval Rainfall

유철상* · 전창현**

Yoo, Chulsang · Jun, Chang Hyun

Abstract

This study reviewed the Weiss model, probably the only theoretical study available on the fixed- to true-interval rainfall conversion factor (CF), and implemented to propose a modified Weiss model. Also, the characteristics of the temporal distribution of rainfall were considered in the estimation of CF to overcome the problem of these two models, whose results were compared with those estimated empirically. As results, the CF was found to be differently estimated depending on the temporal distribution of rainfall. Especially, the theoretical CF estimate for the center-concentrated rainfall distribution was found to be very similar to that of empirical results of domestic and foreign studies.

Keywords : conversion factor, weiss model, modified weiss model, temporal distribution of rainfall

요 지

본 연구에서는 임의시간 환산계수(Conversion Factor, CF)와 관련하여 거의 유일한 이론적 연구인 Weiss 모형을 자세히 검토하고, 그 문제점을 보완한 수정 Weiss 모형을 제안하였다. 아울러 강우의 특성을 반영하지 못하는 이들 모형의 한계를 극복하는 시도의 하나로서 강우의 시간분포 특성을 고려하여 CF를 추정하고 이를 실제 관측 자료에 근거한 CF와 비교하였다. 그 결과 수정 Weiss 모형을 근거로 산정한 CF 값은 강우 시간분포의 형태에 따라 다양한 값으로 나타났다. 특히, 중앙으로 집중된 강우 시간분포 형태에 대한 이론적인 CF 값이 실측 자료에 근거한 국내·외 CF 값들과 매우 유사한 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 임의시간 환산계수, Weiss 모형, 수정 Weiss 모형, 강우 시간분포

1. 서 론

수공구조물의 설계를 위한 확률강우량은 연 최대치 시간강우량 또는 일강우량 자료를 분석한 연 최대치 강우자료를 빈도해석하여 산정하는 것이 일반적이다. 그러나 일반적으로 관측된 자료가 고정시간 간격으로 제공되기 때문에 임의시간의 시간단위로 설계 강우량을 산정하기는 어렵다. 임의시간 환산계수는 바로 임의시간 연 최대치 강우량 자료의 확보가 어려운 강우 관측의 한계를 보완하기 위한 개념으로, 고정시간 연 최대치 강우자료에 대한 임의시간 연 최대치 강우량의 비율을 정의하는 용어이다(본 연구에서는 임의시간 환산계수를 간단히 Conversion Factor의 첫 글자를 따서 CF로 표현하기로 한다). 국내의 경우, 자동우량관측시스템(Automatic Weather System)의 1분 강우 자료를 직접 활용하여 임의시간 자료를 획득하고자 하는 연구가 진행되고 있음에도 불구하고(서애숙 등, 2001), 관측년수가 짧고 또한

결측 자료가 많아 이를 이용하여 유도한 CF에는 아직 한계가 있는 상황이다. 따라서 현재 설계 강우량은 고정시간으로 제공되는 강우자료에 임의시간 환산계수를 적용한 결과로 나타난 임의시간 강우자료를 이용하여 산정하는 실정이다(정중호와 윤용남, 2002).

그러나 그 정의가 간단함에도 불구하고, 임의시간 환산계수의 이론적 해석은 간단하지 않다. 유철상과 전창현(2010)이 정리한 것과 같이, 임의시간 환산계수에 대한 특성들은 아직 정확히 규명되어 있지 않다. 특히 강우 시간분포 특성이나 지속기간 특성이 CF에 어떻게 반영되어 모형화되어야 하는지가 불분명하다. 이로 인해 지역별로 또는 시간적으로 다른 강우 특성이 CF에 어떤 영향을 끼치고 있는지를 명확하게 증명하지 못하고 있다. 또한 고정시간 1시간과 1일의 CF가 같을 수 있는지 또는 다른지에 대한 특성도 명확하지 않다. 이는 기본적으로 이런 해석을 가능하게 하는 CF의 이론적 해석 모형이 가용하지 않기 때문이다. 실제 발견할 수

*정회원 · 교신저자 · 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 교수 (E-mail : envchul@korea.ac.kr)

**정회원 · 고려대학교 대학원 건축사회환경공학부 석사과정 (E-mail : luckys286@naver.com)

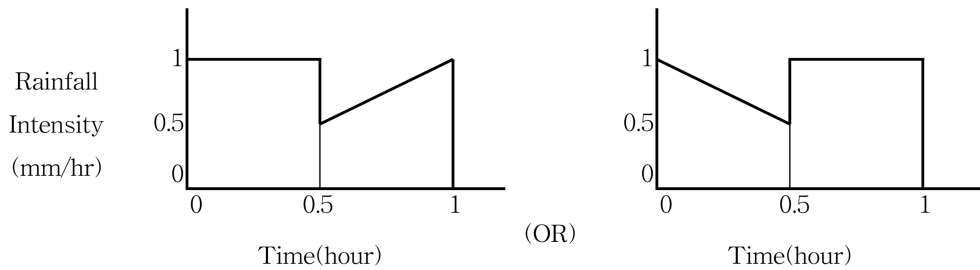


그림 1. 무작위 변수를 따르는 고정시점의 균등분포 개념도(임의시간 1시간 기준)

있는 거의 유일한 모형으로는 Weiss(1964)가 있다. Weiss(1964)는 강우의 자료구조가 동일한 경우, 동일한 CF가 결정되는 구조를 가진 모형을 제시하고 있다. 기본적으로 강우는 주어진 지속기간 동안만 지속되고, 아울러 이 기간 동안 강우강도가 일정하다는 가정을 함으로서 지역에 따라 다를 수 있는 강우 시간분포의 가능성을 배제하였다. 추가로, 무한히 긴 강우 지속기간이 가능하게 함으로서 역시 지역마다 다를 수 있는 강우특성을 배제하였다. 결과적으로 고정시간 1시간 또는 고정시간 1일의 CF는 동일하게 결정되며, 지역이나 계절의 변화에 따른 강우 특성의 차이에 무관한 것이 된다. 그럼에도 불구하고 Weiss(1964) 모형의 결과가 실측자료를 근거로 추정된 CF와 상당히 유사하다는 점은 매우 놀라운 일이다.

본 연구에서는 이상과 같은 문제점들에 착안하여 Weiss(1964) 모형을 보다 자세히 검토하고, 보완하여 수정 모형을 제시해 보고자 한다. 아울러 이들 모형이 가지는 한계를 극복할 방안으로 강우특성의 고려 방안에 대해 살펴보았다. 특히 중요한 것이 강우의 시간분포 및 지속기간으로서, 본 연구에서는 이 중 강우의 시간분포특성에 초점을 맞추고자 한다. 이는 강우의 시간분포 특성이 간단한 기하학적 형태로 표현됨으로써 그 해석이 상대적으로 용이하기 때문이다. 본 연구에서의 결과는 여러 국가의 CF 추정치와의 비교를 통해 평가될 수 있도록 하였다.

2. Weiss 모형의 검토

CF와 관련된 이론적 해석은 Weiss(1964)의 경우가 유일하다. 물론 CF를 산정하기 위해 확률밀도함수나 fractal이론을 이용한 경우들이 있으나(Dwyer와 Reed, 1994), 이는 일종의 경험적인 방법으로 관측 자료를 직접 분석한 것은 아니지만 여전히 관측 자료에 근거한 분석 결과들이다.

Weiss(1964)는 강우의 특성을 고려하지 않고, 제공되는 자료의 형태만을 반영하여 CF가 계산될 수 있도록 하였다. 이렇게 하기 위해서는 물론 몇 가지 가정이 필요한데, 가장 중요한 것은 주어진 강우동안(임의시간) 강우강도가 일정하다는 것이다. 아울러 강우는 주어진 지속기간(임의시간)동안만 지속된다. 마지막으로 어떤 강우 지속기간도 가능하여 대상으로 하는 강우 지속기간 중에 강우가 중단될 수는 없다. 2일 또는 3일의 경우도 마찬가지이다.

Weiss(1964)의 연구를 보다 간단히 해석하면 다음과 같다. 먼저, 가장 간단한 경우로서, 시 자료가 주어지는 경우 고정시간 한 시간 강우의 CF를 계산하는 과정을 살펴보기로 하자. 일 년 중 임의시간으로 어느 한 시간 동안 연 최대강우

가 발생하였다고 가정하면, 최대강우는 단 한 시간 동안만 동일한 강도로 지속된다. 그 전후에는 강우가 없다. 강우강도도 간단히 '1'로 가정하자. 그러나 강우자료는 고정시간으로 제공되므로 임의시간 한 시간으로 정의되는 최대강우의 시점과 고정시간 한 시간의 시점이 일치할 가능성은 매우 적다. 임의시간 한 시간을 기준으로 고정시간 한 시간의 시점은 일종의 무작위 변수(random variable)로서 균등분포(uniform distribution)를 따르는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 최대강우를 기준으로 고정시간의 시점이 임의시점 x 에 위치할 확률은 '1'로 일정하게 된다. 즉, 확률밀도함수는 '1'이다. 고정 시간 한 시간이 최대 강우에 중첩되어 가질 수 있는 강우량은 이 확률밀도를 고려한 기댓값과 같게 된다. 이렇게 단순히 계산하면 기댓값은 0.5가 되고, CF 값은 '2'가 된다. 그러나 x 가 0.5 이하일 경우에는 다음 고정시간에 더 많은 강우량이 기록되고, 아울러 x 가 0.5 이상일 경우에는 전 고정시간에 더 많은 강우량이 기록된다. 따라서 어떤 경우라도, 0.5는 확보하게 되고, 나머지 부분이 어떻게 되는지의 문제로 변하게 된다(그림 1).

이 점을 고려하면 기댓값은 다음과 같이 계산된다.

$$E[R_{fixed}] = 0.5 + \int_{0.5}^1 x dx \quad (1)$$

사실, 위 식을 계산하면 그 값은 0.875이다. 따라서 CF는 다음과 같이 결정된다.

$$CF = \frac{R_{true}}{E[R_{fixed}]} = \frac{1}{0.5 + \int_{0.5}^1 x dx} \approx 1.143 \quad (2)$$

여기서, R_{fixed} 는 실제 가용한 고정시간 자료의 시간 단위가 최대 강우에 중첩되어 가질 수 있는 강우량이며, $E[R_{fixed}]$ 는 R_{fixed} 의 확률밀도를 고려한 기댓값을 의미한다. 또한 R_{true} 는 임의시간 자료의 시간 단위 동안 최대 강우가 발생한 경우에 대한 강우량으로서 강우강도가 '1'로 동일한 경우, 최대 강우가 발생한 강우 지속기간에 따라 쉽게 결정될 수 있다. 위 CF는 시간 강우에만 한정되지 않는다. 고정시간 일 자료를 이용하여 임의시간 일 자료를 추정하는 경우에도 동일하게 적용된다.

보다 복잡한 경우로서, 예를 들어, 시 자료로부터 추정된 12시간 고정시간 최대강우의 CF도 유사하게 유도할 수 있다. 이 경우에도 강우는 12시간의 임의시간동안 일정한 강도로 지속된다고 가정한다. 강우강도도 앞서와 동일하게 '1'로 가정한다. 물론 강우는 12시간 후 멈추게 된다. 이러한 상황을 앞의 경우와 비교하면 12개의 시간 구간 중 11개의 시간 구간은 임의시간과 고정시간에서 중복된다. 나머지 한 시간의 경우는 앞서 살펴본 예와 같게 나타난다. 따라서 고정

시간 12시간 동안의 강우량에 대한 기댓값은 다음과 같게 된다.

$$E[R_{fixed}] = 11 + \left(0.5 + \int_{0.5}^1 x dx\right) \quad (3)$$

위 식을 일반식의 형태로 바꾸면 다음과 같다. 예를 들어 고정시간이 n 인 강우의 CF를 추정하는데 사용된 자료의 지속기간이 '1'이라면, 그 기댓값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[R_{fixed}] = (n-1) + \left(0.5 + \int_{0.5}^1 x dx\right) \quad (4)$$

지속기간이 n 인 임의시간 강우량은 당연히 n 이 된다. 따라서 CF는 다음과 같이 결정된다.

$$CF = \frac{n}{(n-1) + \left(0.5 + \int_{0.5}^1 x dx\right)} = \frac{n}{n - 0.5 + \int_{0.5}^1 x dx} = \frac{n}{n - 0.125} \quad (5)$$

위 CF가 바로 Weiss(1964)의 결과이다. 지역에 관계없이, 지속기간에 관계없이 자료의 구조만 일정하면 동일한 CF를 갖는다. 여기서 자료의 구조란 실제 가용한 자료의 시간 단위와 CF를 구하고자 하는 강우의 시간 단위를 의미한다. 예를 들어, 시 자료가 가용한 상황에서 일 자료에 대한 CF를 추정하는 것이라면, 가용한 자료의 시간단위는 '시'가 되고, CF를 구하고자 하는 시간 단위는 '일'이 된다. 따라서 시 자료를 이용하여 추정하는 경우(1 시간=1 단위), 1시간 강우의 경우($n=1$) CF=1.143, 6시간 강우의 경우($n=6$)에는 CF=1.022, 24시간 강우의 경우($n=24$)에는 CF=1.005이다. 일 자료를 이용하여 추정하는 경우, 일 강우의 CF=1.143으로 시 자료의 경우와 동일하다. 앞서도 이미 언급했지만, 이렇게 추정된 CF는 미국에서 관측 자료를 이용한 연구와 수% 이내의 오차만을 가질 정도로 매우 유사하다. 이 결과는 당초 Weiss(1964) 연구에서 가정했던 것처럼 지역 및 지속기간 등에 대한 영향도 없다. 단지 자료구조에만 영향을 받을 뿐이다.

3. Weiss 모형의 개선

3.1 강우의 시간분포를 고려하지 않는 경우

전 절에서 설명한 방법으로 유도한 CF가 실제 관측 자료의 분석결과와 매우 유사하다는 것은 놀라운 일이다. 사실, Weiss(1964)의 연구는 그 결과가 실제와 너무 유사하여, 그 이론적인 전개에 아무런 의심을 가지지 않았던 것으로 보인다. 가장 중요한 문제점은 임의시간 간격으로 발생한 최대강우에 고정시간이 중첩되는 확률을 계산하는 과정이다. 즉, Weiss(1964)는 고정시간의 시점 x 가 0.5 이하일 경우, 다음 고정시간에 더 많은 강우량이 기록되므로 이 경우에 기댓값 '0.5'를 확보하는 것으로 가정하였다. 그러나 실재는 그렇지 않다. 예를 들어, x 가 0이라면(즉, 고정시간 시점과 임의시간 시점이 일치), 고정시간 1시간이 확보하는 강우량은 '1'이 된다. 만일 x 가 0.2라면 고정시간 1시간이 확보하는 강우량은 '0.8'로 떨어지게 되고, 이 값은 x 가 0.5일 때 '0.5'로 최하가 된다. 이후 이 값은 다시 증가하여 x 가 1이 될 때 다시 '1'이 된다(그림 2).

따라서 고정시간 1시간 동안의 기댓값은 다음과 같이 계산되어야 한다.

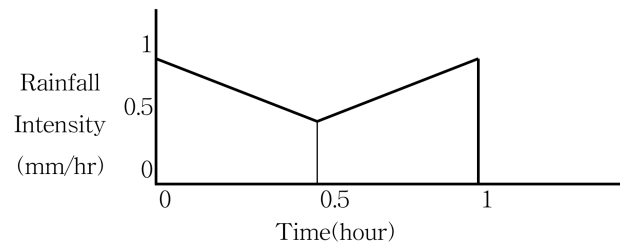


그림 2. 무작위 변수를 따르는 고정시점의 수정된 균등분포 개념도 (임의시간 1시간 기준)

$$E[R_{fixed}] = \int_0^{0.5} (1-x) dx + \int_{0.5}^1 x dx = 2 \times \int_{0.5}^1 x dx \quad (6)$$

위 식을 계산하면 0.75이다. 이 값이 Weiss(1964)의 경우에는 0.875로 계산되었다. 따라서 CF의 일반식도 다음과 같이 수정되어야 한다.

$$CF = \frac{n}{(n-1) + \left(2 \times \int_{0.5}^1 x dx\right)} = \frac{n}{n - 0.25} \quad (7)$$

위 식을 적용하여 시 자료에 대한 CF 값을 추정하면, 1시간 강우의 경우 CF=1.333, 6시간 강우의 경우에는 CF=1.043, 24시간 강우의 경우에는 CF=1.011이다. 물론, 일 자료를 근거로 추정하는 경우, 일 강우의 CF=1.333으로 시 자료의 경우와 동일하다.

이상의 결과를 보면 본 연구에서 제시한 수정 모형의 결과가 당초 Weiss가 제시한 결과보다 열등해 보이기도 한다. 그러나 이러한 결과는 강우 특성을 전혀 반영하지 않고, 단순히 강우가 주어진 지속기간 동안 일정한 강도로 유지된다고 가정했기 때문에 발생한다. 이러한 가정 하에서는 본 연구에서 제안된 모형의 결과가 당초 Weiss가 제시한 결과보다 정확한 것으로, 단지 주어진 가정에 보다 충실한 값일 뿐인 것이다.

3.2 강우의 시간분포를 고려하는 경우

Weiss(1964)는 주어진 강우 지속기간동안(임의시간) 강우강도가 일정하다고 가정함으로써 CF를 이론적으로 산정하였다. 즉, Weiss 모형에서의 강우 시간분포는 주어진 강우 지속기간에 대한 균등분포(uniform distribution)로 설명된다. 그러나 실제 강우의 시간분포는 Weiss 모형에서와 같이 일정하지 않으며 각각의 독립 호우사상에 따라 다양한 형태로 나타난다. 이러한 강우의 시간분포 특성은 강우-유출 모형의 입력 자료로 적용되어 유출수문곡선의 모양과 수공구조물 설계 시 사용되는 설계홍수량 산정에 중요한 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 개념상으로 비교적 단순하면서도 물리적인 의미를 갖는 Yen과 Chow(1980)의 방법을 근거로 삼각형, 사각형, 오각형 등의 시간분포 형태를 고려하였다(그림 3). 이는 Weiss 모형에서와 달리 강우의 시간분포를 기하학적 형태로 단순화하여 표현한 것을 의미한다. 그림 3에 제시된 시간분포 모형들은 가상의 시간분포로서 CF를 산정하기 위해 고려되어야 할 강우 시간분포 특성의 영향을 살펴보는 데 그 목적이 있다.

전 절에서는 최대강우를 발생시킨 임의시간이 고정시간과 중

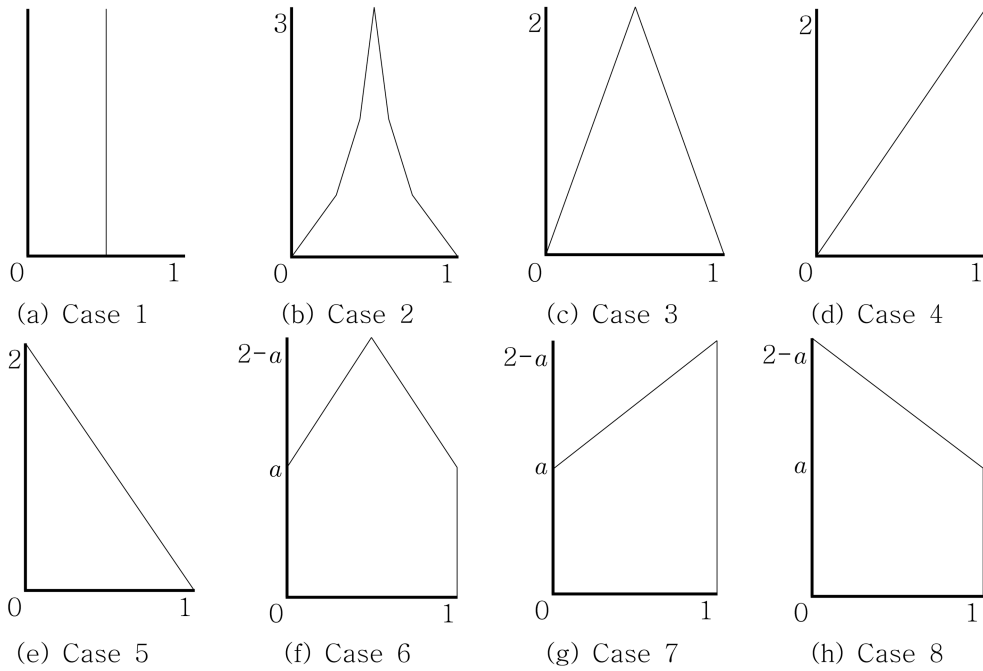


그림 3. 본 연구에서 고려한 기하학적 형태의 강우 시간분포

칩되는 확률을 계산하는 과정에서 Weiss 모형이 갖는 문제점을 제시하고, 이를 보완한 수정 Weiss 모형을 제안하였다(그림 2). 이를 근거로 본 연구에서는 그림 3에서 제시한 기하학적 형태의 시간분포를 고려하여 각각의 경우에 해당하는 CF를 결정해보았다.

1) Case 1

Case 1의 경우는 강우가 순간적으로 내릴 때(즉, impulse의 형태로), 즉, 강우 지속기간이 0에 가까운 상황을 표현한 것으로 이러한 가정은 실제로 있을 수 없는 가상의 개념이다. 이 경우, 0-1시간의 구간 내에서 x 의 위치에 관계없이 고정시간 1시간이 확보하는 강우량은 '1'이 된다. 이는 고정시간 1시간 동안의 기댓값이 항상 '1'임을 의미한다. 따라서 CF는 시 강우, 일 강우 자료에 상관없이 그 결과가 항상 1로 일정하게 결정된다.

2) Case 2

Case 2의 경우, 고정시간 0-0.5시간에 해당하는 구간의 기댓값을 고려하여 산정한 고정시간 1시간이 확보하는 강우량으로부터 나머지 구간의 특성까지 반영한 수정 Weiss 모형을 구성할 수 있다(그림 4). 즉, 0-0.5시간의 구간을 고려해보면, x 가 원점에서 우측으로 이동함에 따라 넓게 되는 면적이 $4x^3$ 이므로 x 가 0이라면(즉, 고정시간 시점과 임의시간 시

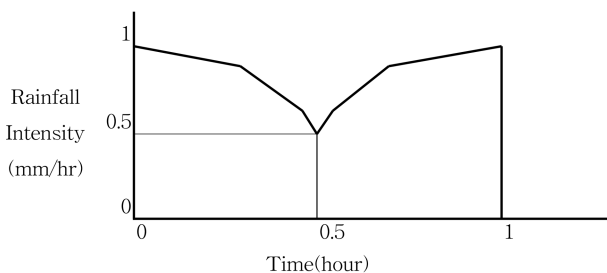


그림 4. 강우 시간분포를 고려한 수정 Weiss 모형(Case 2)

점이 일치), 고정시간 1시간이 확보하는 강우량은 '1'이 된다. 만일 x 가 0.2라면 고정시간 1시간이 확보하는 강우량은 '0.968'로 떨어지게 되고, 이 값은 x 가 0.5일 때 '0.5'로 최하가 된다. 이후 이 값은 다시 증가하여 x 가 1이 될 때 다시 '1'이 된다.

따라서 고정시간 1시간 동안의 기댓값은 다음과 같이 계산되어야 한다.

$$E[R_{fixed}] = 2 \times \left(0.5 - \int_0^{0.5} 4x^3 dx \right) \quad (8)$$

위 식을 계산하면 0.875이다. 따라서 CF는 다음과 같이 결정된다.

$$CF = \frac{R}{E[R_{fixed}]} = \frac{1}{1 - 2 \int_0^{0.5} 4x^3 dx} \approx 1.143 \quad (9)$$

고정시간이 n 인 강우의 CF를 추정하는데 사용된 자료의 지속기간이 '1'이라면, 그 기댓값은 다음과 같다.

$$E[R_{fixed}] = (n-1) + \left(1 - 2 \int_0^{0.5} 4x^3 dx \right) \quad (10)$$

지속기간이 n 인 임의시간 강우량은 당연히 n 이므로 CF의 일반식은 다음과 같이 결정된다.

$$CF = \frac{n}{(n-1) + \left(1 - 2 \int_0^{0.5} 4x^3 dx \right)} = \frac{n}{n - 2 \int_0^{0.5} 4x^3 dx} = \frac{n}{n - 0.125} \quad (11)$$

위 식을 적용하여 시 자료에 대한 CF 값을 추정하면, 1시간 강우의 경우 $CF=1.143$, 6시간 강우의 경우에는 $CF=1.021$, 24시간 강우의 경우에는 $CF=1.005$ 이다. 물론, 일 자료를 근거로 추정하는 경우, 일 강우의 $CF=1.143$ 로 시 자료의 경우와 동일하다.

3) Case 3

Case 3의 경우, Case 2의 경우와 동일하게 고정시간 0-0.5시간의 구간을 고려함으로써 수정 Weiss 모형을 구성할

수 있다. 즉, 0-0.5시간의 구간을 고려해보면, x 가 원점에서 우측으로 이동함에 따라 넓게 되는 면적이 $2x^2$ 이므로 x 가 0 이라면, 고정시간 1시간이 확보하는 강우량은 '1'이 된다. 만일 x 가 0.2라면 고정시간 1시간이 확보하는 강우량은 '0.92'로 떨어지게 되고, 이 값은 x 가 0.5일 때 '0.5'로 최하가 된다. 이후 이 값은 다시 증가하여 x 가 1이 될 때 다시 '1'이 된다.

따라서 고정시간 1시간 동안의 기댓값은 다음과 같이 계산되어야 한다.

$$E[R_{fixed}] = 2 \times \left(0.5 - \int_0^{0.5} 2x^2 dx \right) \quad (12)$$

위 식을 계산하면 0.83이다. 따라서 CF는 다음과 같이 결정된다.

$$CF = \frac{R_{true}}{E[R_{fixed}]} = \frac{1}{1 - 2 \int_0^{0.5} 2x^2 dx} \approx 1.2 \quad (13)$$

고정시간이 n 인 강우의 CF를 추정하는데 사용된 자료의 지속기간이 '1'이라면, 그 기댓값은 다음과 같다.

$$E[R_{fixed}] = (n-1) + \left(1 - 2 \int_0^{0.5} 2x^2 dx \right) \quad (14)$$

지속기간이 n 인 임의시간 강우량은 당연히 n 이므로 CF의 일반식은 다음과 같이 결정된다.

$$CF = \frac{n}{(n-1) + \left(1 - 2 \int_0^{0.5} 2x^2 dx \right)} = \frac{n}{n - 2 \int_0^{0.5} 2x^2 dx} = \frac{n}{n - 0.167} \quad (15)$$

위 식을 적용하여 시 자료에 대한 CF 값을 추정하면, 1시간 강우의 경우 CF=1.2, 6시간 강우의 경우에는 CF=1.029, 24시간 강우의 경우에는 CF=1.007이다. 물론, 일 자료를 근거로 추정하는 경우, 일 강우의 CF=1.2로 시 자료의 경우와 동일하다.

4) Case 4

Case 4의 경우, x 가 원점에서 우측으로 이동함에 따라 넓게 되는 면적이 x^2 이므로 x 가 0이라면, 고정시간 1시간이 확보하는 강우량은 '1'이 된다. 이는 고정시간 0-0.5시간의 구간만을 고려하여 고정시간 1시간 동안의 기댓값을 계산한 앞선 경우들과 달리 x 가 $1/\sqrt{2}$ 일 때 고정시간 1시간이 확보하는 강우량의 값이 '0.5'로 최하가 된다는 특징이 있다. 이후 이 값은 다시 증가하여 x 가 1이 될 때 다시 '1'이 된다.

따라서 고정시간 1시간 동안의 기댓값은 다음과 같이 계산되어야 한다.

$$E[R_{fixed}] = \int_0^{1/\sqrt{2}} (1-x^2) dx + \int_{1/\sqrt{2}}^1 x^2 dx \quad (16)$$

위 식을 계산하면 0.805이다. 따라서 CF는 다음과 같이 결정된다.

$$CF = \frac{R_{true}}{E[R_{fixed}]} \approx 1.243 \quad (17)$$

고정시간이 n 인 강우의 CF를 추정하는데 사용된 자료의 지속기간이 '1'이라면, 그 기댓값은 다음과 같다.

$$E[R_{fixed}] = (n-1) + \int_0^{1/\sqrt{2}} (1-x^2) dx + \int_{1/\sqrt{2}}^1 x^2 dx \quad (18)$$

지속기간이 n 인 임의시간 강우량은 당연히 n 이므로 CF의 일반식은 다음과 같이 결정된다.

$$CF = \frac{n}{(n-1) + \int_0^{1/\sqrt{2}} (1-x^2) dx + \int_{1/\sqrt{2}}^1 x^2 dx} = \frac{n}{n - 0.195} \quad (19)$$

위 식을 적용하여 시 자료에 대한 CF 값을 추정하면, 1시간 강우의 경우 CF=1.243, 6시간 강우의 경우에는 CF=1.034, 24시간 강우의 경우에는 CF=1.008이다. 물론, 일 자료를 근거로 추정하는 경우, 일 강우의 CF=1.243으로 시 자료의 경우와 동일하다.

5) Case 5

Case 5의 경우는 Case 4와 비교했을 때, x 가 0.5시간을 기준으로 대칭인 형태이므로 앞선 방법들을 그대로 적용하면 그 결과가 식 (16)-식 (19)와 동일하게 나타난다. 즉, Case 5에 해당하는 시간분포를 적용하여 CF를 산정한 결과는 1시간, 6시간, 24시간 강우에 대해 각각 1.243, 1.034, 1.008의 값으로 나타난다. 또한 Case 4의 결과와 동일하게 일 자료를 근거로 CF를 추정할 결과도 역시 1.243임을 알 수 있다.

6) Case 6

Case 6의 경우, Case 2와 Case 3의 경우와 동일하게 고정시간 1시간이 확보하는 강우량을 산정하기 위해 0-0.5시간에 해당하는 구간의 기댓값을 고려함으로써 수정 Weiss 모형을 구성할 수 있다. 즉, 0-0.5시간의 구간을 고려해보면, x 가 원점에서 우측으로 이동함에 따라 넓게 되는 면적이 $((2-2a)x+a)x$ 이므로 x 가 0이라면, 고정시간 1시간이 확보하는 강우량은 '1'이 된다. 고정시간 1시간이 확보하는 강우량은 $0 < a < 1$ 범위에서 계산가능하며, 이 값은 x 가 0.5일 때 0.5로 최하가 된다. 이후 이 값은 다시 증가하여 x 가 1이 될 때 다시 '1'이 된다.

따라서 고정시간 1시간 동안의 기댓값은 다음과 같이 계산되어야 한다.

$$E[R_{fixed}] = 2 \times \int_0^{0.5} (1 - 2((2-2a)x+a)x) dx \quad (20)$$

만약 a 의 값을 0.25, 0.5, 0.75로 가정하면 각각의 경우에 대한 고정시간 1시간 동안의 기댓값은 0.824, 0.792, 0.771로 계산된다. 따라서 Case 6의 경우, CF는 앞선 경우들과 서와 마찬가지로 산출된 기댓값의 역수를 취함으로써 결정되며, 그 결과는 각각 1.231, 1.263, 1.297로 나타난다. 또한 고정시간과 임의시간 강우량의 지속기간이 n 인 경우에 대한 CF의 일반식은 앞선 방법들을 동일하게 적용하여 결정할 수 있으며, 대표적으로 a 의 값이 0.5인 경우에 대한 결과를 나타내면 다음과 같다.

$$CF = \frac{n}{(n-1) + 2 \int_0^{0.5} (1-x^2-0.5x) dx} = \frac{n}{n - 0.208} \quad (21)$$

7) Case 7

Case 7의 경우, x 가 원점에서 우측으로 이동함에 따라 넓게 되는 면적이 $((1-a)x+a)x$ 이므로 x 가 0이라면, 고정시간

1시간이 확보하는 양수량은 '1'이 된다. 그림 3에 제시되어 있는 사각형 형태의 시간분포를 고려할 경우, $0 < a < 1$ 범위에 대한 각각의 기댓값을 계산할 수 있으며, 이 값은 x 가 $(-a + \sqrt{a^2 - 2a + 2}) / (2 - 2a)$ 일 때 '0.5'로 최하가 된다. 이후 이 값은 다시 증가하여 x 가 1이 될 때 다시 '1'이 된다.

따라서 고정시간 1시간 동안의 기댓값은 다음과 같이 계산되어야 한다.

$$E[R_{fixed}] = \int_0^1 \frac{(-a + \sqrt{a^2 - 2a + 2})}{(2 - 2a)} (1 - (1-a)x^2 - ax) dx + \int_1^{\frac{(-a + \sqrt{a^2 - 2a + 2})}{(2 - 2a)}} \frac{((1-a)x^2 + ax)}{(2 - 2a)} dx \quad (22)$$

Case 6의 경우와 동일하게 a 를 0.25, 0.5, 0.75의 특정 값으로 가정하고 고정시간 1시간 동안의 기댓값을 산정하면, 그 결과는 각각 0.782, 0.765, 0.754의 값으로 계산된다. 따라서 식 (22)로부터 산출된 기댓값으로부터 결정되는 CF는 각각 1.278, 1.307, 1.326으로 나타난다. 또한 고정시간과 임의시간 양수량의 지속기간이 n 인 경우에 대한 CF의 일반식을 구하기 위해 a 의 값이 0.5인 경우를 고려하면, 그 결과는 다음과 같다.

$$CF = \frac{n}{(n-1) + \int_0^{\frac{(\sqrt{5}-1)}{2}} (1 - 0.5x^2 - 0.5x) dx + \int_{\frac{(\sqrt{5}-1)}{2}}^1 (0.5x^2 + 0.5x) dx} = \frac{n}{n - 0.235} \quad (23)$$

8) Case 8

Case 8의 경우는 Case 4와 Case 5의 관계와 마찬가지로 0.5시간을 기준으로 Case 7의 경우와 대칭인 형태를 갖는다. 따라서 Case 7에서 CF를 산정한 방법들을 그대로 적용하면 그 결과가 식 (22), 식 (23)으로 나타난다. 즉, Case 8에 해당하는 시간분포를 적용하여 CF를 산정한 결과는 a 값에 따라 다양하게 나타나며, 각각의 경우에 대한 CF의 결과 값은 앞선 Case 7의 경우에서 살펴본 바와 동일하다.

4. 국내 · 외 임의시간 환산계수와의 비교

CF와 관련된 연구들은 대부분 실제로 관측한 연 최대치 고정시간(1시간, 1일) 및 임의시간(60분, 140분) 강우자료의 비교를 통해 수행되었다. 일반적으로는 GEV 및 EVI와 같은 확률밀도함수를 이용하여 년, 월 최대 관측강우를 정량화하고, 고정시간 및 임의시간에 해당하는 값들을 비교함으로써 CF를 산정하였으며, 최근에는 fractal 이론을 이용하여 CF를 산정한 연구도 살펴볼 수 있다.

미국의 경우, 시 강우 및 일 강우에 대한 CF로서 1.13을 제시하고 있다(U.S. Weather Bureau, 1956; Wilson과 Hershfield, 1958; Hershfield, 1961; Miller 등, 1973; Frederick 등, 1977; Huff와 Angel, 1992). 특히 Young과 McEnroe(2003)는 정밀도 높은 ALERT-type 우량계 자료를 이용하여 CF를 추정하였으며, 이를 기존 연구들과 비교함으로써 앞선 연구들의 결과가 유의하다는 점을 보여주고 있다. 영국의 경우, 일 강우에 대한 CF로 1.167을 제시하고 있으며, 이는 1.14~1.19

의 범위를 갖는 CF 값들의 평균인 대표 CF 값이다(Dwyer와 Reed, 1994). 추가적으로 Fowler 등(2005)은 4개의 강우 관측소로부터 측정한 1961-1990년 일 강우자료를 이용하여 지속기간 1일, 2일, 5일, 10일에 대한 CF로 1.16, 1.11, 1.035, 1.005를 제시하기도 하였다. 호주의 경우, 일 강우의 CF는 1.1에서 1.19의 범위를 갖으며(Pierrehumbert, 1972), Flood Estimation Handbook(Institute of Hydrology, 1999)에서 제시한 1.16을 대푯값으로 사용하였다. 또한 Dwyer와 Reed(1995)는 CF 값이 기상 조건의 영향을 받을 수 있음을 언급하며 1.15에서 1.16의 범위를 제시하였다. 하지만 최근 Hydrology Report Series(Jakob 등, 2005)는 호주의 7개 주요 도시(Melbourne, Sydney, Brisbane, Darwin, Perth, Hobart, Adelaide)의 강우자료를 근거로 산정한 1.15를 대표 CF 값으로 제시하였다. 마지막으로 뉴질랜드의 경우, van Montfort(1990)는 일 강우에 대한 대표 CF 값으로 1.137을 제시하였으며 GEV 및 EVI 확률밀도함수를 이용하여 월별로 CF를 추정한 특징을 갖는다.

본 연구에서 고려한 미국(US), 영국(UK), 호주(AU), 뉴질랜드(NZ)의 경우, 시 강우, 일 강우에 대한 CF는 평균적으로 1.146의 값으로 나타난다. 이는 본 연구에서 수정한 Weiss 모형 중 Case 2의 시간분포를 고려하여 계산된 CF 값인 1.143과 상당히 유의한 결과이다. 이상과 같은 결과를 정리하면 다음 그림 5와 같다. 이 그림에서 Impulse는 Case 1을 의미하고, Uniform은 주어진 지속기간 동안 강우 강도가 일정하게 유지되는 경우를 의미한다.

국내에서 수행된 CF와 관련한 대부분의 연구들은 실측한 분, 시간 및 일 단위 강우자료를 근거로 지속시간별로 CF를 산정한 공통점을 지닌다. 국내에서 대표적으로 사용하고 있는 임의시간 환산계수의 산정절차를 보면, 고정시간과 임의시간의 연 최대치 계열을 점 빈도 해석하여 확률강우량을 산정하고, 강우관측소별로 구축한 각각의 확률강우량을 선형 회귀 분석하여 기울기를 살펴봄으로써 고정시간 1시간, 3시간, 6시간, 24시간, 1일에 대한 CF로 1.129, 1.033, 1.013, 1.005, 1.161을 제시하였다(건설교통부, 2000). 김규호 등(1988)은 EVI 분포를 이용하여 고정시간 및 임의시간 연 최대강우량을 빈도 해석하여 비교하는 방법으로 CF를 산정하였으며 일 강우의 경우에는 1.161, 시 강우의 경우에는 1.129의 값을 제시하였다.

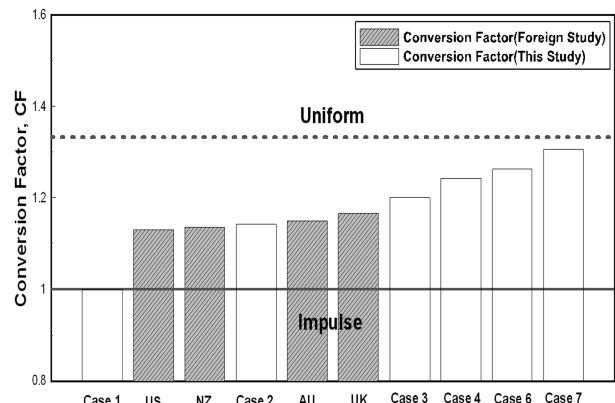


그림 5. 국외 연구와 다양한 시간분포를 고려한 수정 Weiss 모형의 비교

그러나 다른 연구들에서는 고정시간과 임의시간의 연 최대 강우량을 직접 비교하는 방법으로 CF 값을 산정하였다(조한성 등, 2006; 문영일 등, 2008; 오태석 등, 2008; 오태석과 문영일, 2008). 조한성 등(2006)은 서울 지역 7개의 지점에서 관측된 분 단위 강우자료를 근거로 시 강우에 대한 CF로 1.126을 제시하였고, 문영일 등(2008)은 국내 37개 지점의 분 단위 강우자료를 이용하여 일 강우의 CF로 1.173을 제시하였다. 오태석 등(2008)은 시 단위 강우자료를 분 단위 강우자료로 보정한 후 임의시간 환산계수를 산정했다는 특징이 있으며, 일 강우에 대한 CF로 1.184를 제시하였다. 마지막으로 오태석과 문영일(2008)은 세 가지의 방법을 이용하여 임의시간 환산계수를 추정하였는데, 먼저 국내 37개 지점의 지속시간별 CF를 산정하였고, 시 강우의 CF로 1.124, 일 강우의 CF로 1.158을 제시하였다. 다음으로 각 지속시간별로 산정한 37개 지점의 고정시간과 임의시간 연 최대 강우량을 평균하여 CF를 추정하였고, 시 강우의 CF로 1.135, 일 강우의 CF로 1.169를 제시하였다. 마지막으로 연구한 방법은 각 지속시간에 대해 37개 지점 자료 전체에 대한 고정시간과 임의시간 연 최대 강우를 모두 반영하여 CF를 추정하였고, 시 강우의 CF로 1.122, 일 강우의 CF로 1.156을 제시하였다.

이상과 같이 임의시간 환산계수와 관련한 국내 연구들은 지속시간별로 즉, 시 강우와 일 강우에 대해 CF가 다르게 추정되었다는 점에 주목할 수 있다. 이상과 같은 국내 연구 결과들을 수정 Weiss 모형의 결과와 비교하면 다음 그림 6과 같다.

위 그림 5, 6에 나타난 결과를 보면 본 연구에서 제안된 수정 Weiss 모형의 결과 중 강우 시간분포를 고려하지 않은 경우(그림에서 Uniform으로 표기된 경우는 국내·외 연구들에서 기존에 제시한 CF에서 상당히 벗어난 큰 값으로 결정됨을 확인할 수 있다. 강우의 분포를 impulse로 가정한 경우(Case 1)도 국내 CF에서 벗어난 작은 값을 주는 것으로 나타난다. 그러나 강우 시간분포 특성을 반영한 경우의 수정 Weiss 모형은 국내·외에서 추정된 실제 CF와 매우 유사한 결과를 제시할 수 있음을 보여주고 있다. 특히 강우 지속기간 중앙을 중심으로 대칭인 2차 함수 형태의 시간분포를 가정한 경우(Case 2)에 대해 추정된 CF가 실측자료에 근거한 CF와 매우 유사한 값으로 나타났다(표 1).

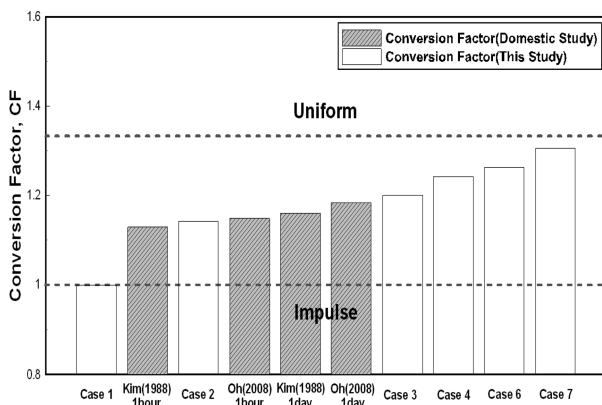


그림 6. 국내 연구와 다양한 시간분포를 고려한 수정 Weiss 모형의 비교

표 1. 시간 분포를 고려한 수정 Weiss 모형과 국내·외 CF의 비교(1시간의 경우)

This study		Other studies	
Cases	CF	Researchers	CF
Case 1 (Impulse)	1	Young and McEnroe (2003)	1.13
Case 2	1.143	Montfort (1990)	1.137
Case 3	1.2	Jakob <i>et al.</i> (2005)	1.15
Case 4, Case 5	1.243	Dwyer and Reed (1994)	1.167
Case 6 ($a=0.5$)	1.263	Kim <i>et al.</i> (1988)	1.129
Case 7, Case 8 ($a=0.5$)	1.307	Oh <i>et al.</i> (2008)	1.148
Uniform Distribution	1.333	Moon <i>et al.</i> (2008)	1.149

이상의 결과는 CF에 미칠 수 있는 강우 시간분포의 영향을 검토한 것에 불과하다. Weiss 모형과는 달리 강우의 시간분포를 적절히 고려하는 본 연구의 수정 Weiss 모형이 보다 정확한 CF를 산정할 수 있게 해 준다는 것을 확인한 정도이다. 그러나 이러한 결과만을 가지고도 CF와 관련된 몇 가지 질문에 답할 수 있다. 첫 번째는 국가적으로 또는 지역적으로 CF가 같은지 다른지의 문제로, 만일 비교하는 두 지점의 강우 시간분포가 같다면 CF는 같을 수 있다. 두 번째는 1시간 강우 자료의 CF와 1일 강우자료의 CF가 같을 수 있느냐의 문제이다. 이 경우 두 경우의 시간분포가 같다면 역시 CF는 같게 나오게 된다. 계절별로 동일한 CF를 적용할 수 있느냐 하는 문제도 역시 동일한 답으로 해결된다.

5. 결 론

본 연구에서는 임의시간 환산계수(CF)와 관련하여 거의 유일한 이론적 연구인 Weiss 모형을 자세히 검토하고, 그 문제점을 보완한 수정 Weiss 모형을 제안하였다. 아울러 강우의 특성을 반영하지 못하는 이들 모형의 한계를 극복하는 시도의 하나로써 다양한 강우의 시간분포를 가정하여 CF를 유도하고, 이를 실제 관측 자료에 근거한 CF와 비교하였다. 그 결과 수정 Weiss 모형을 근거로 산정한 CF 값은 강우 시간분포의 형태에 따라 1, 1.143, 1.2, 1.243, 1.263, 1.307, 1.333과 같이 다양한 값으로 나타났다. 이러한 결과는 강우의 시간분포 특성이 CF에 큰 영향을 미치고 있음을 의미한다. 특히, 강우 시간분포가 중앙으로 집중된 형태의 경우(Case 2)에 대한 CF 값은 1.143으로 실측 자료에 근거한 국내·외 CF 값들과 그 결과가 유사함을 확인할 수 있었다.

이러한 결과는 CF와 관련한 몇 가지 중요한 의문을 해소 하는데 도움이 된다. 먼저, 국가적으로 또는 지역적으로 CF가 같은지 다른지의 문제는 다름 아닌 강우의 시간분포특성이 같은지 다른지의 문제로 귀결된다는 점이다. 1시간 강우 자료의 CF와 1일 강우자료의 CF가 같을 수 있느냐의 문제도 역시 동일한 차원의 문제이고, 계절별로 동일한 CF를 적용할 수 있느냐 하는 문제도 역시 동일한 문제이다. 즉, 강우의 시간분포가 CF 결정에 중요한 역할을 하는 것이다.

그럼에도 불구하고 본 연구에서 추정된 CF는 아직 실제 강우의 시간분포를 적용한 결과가 아니라는 한계를 가지며, 아울러 강우의 또 다른 중요한 특성인 강우의 지속기간 특

성도 적절히 반영하지 못했다는 한계를 갖는다. 사실 첫 번째 한계는 실제 강우의 시간분포를(사실은 대표 시간분포를) 어떻게 결정하느냐의 문제와도 관계가 있어 간단한 문제만은 아니다. 두 번째 한계는 강우의 지속기간 특성을 어떻게 정량화하여 CF의 산정에 반영하느냐의 문제로 역시 간단하지 않다. 그러나 이러한 한계가 극복된 후에야 CF의 특성 및 Weiss 모형에 대한 평가를 보다 정교하게 수행할 수 있음은 자명하다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것입니다 (KRF-2008-313-D01083). 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

건설교통부(2000) 1999년도 수자원관리법개발연구조사 보고서 : 제1권 한국 확률강우량도 작성. 건설교통부.
 김규호, 김양수, 이진원, 김승(1988) 고정시간 간격과 임의의 지속기간 최대강우량간의 환산계수. **대한토목학회 학술발표회 개요집**, 대한토목학회, pp. 216-219.
 문영일, 오테석, 오근택, 전시영(2008) 분단위 강우자료를 활용한 임의고정시간 환산계수의 추정. **한국방재학회 2008년 정기 학술대회 논문집**, 한국방재학회, pp. 679-682.
 서애숙, 송명현, 김미자(2001) 전국 분 단위 강우강도 DB 구축. **한국수자원학회 학술발표회논문집(1)**, 한국수자원학회, pp. 134-139.
 오테석, 문영일(2008) 고정시간과 임의시간에 따른 우리나라 연 최대 강우량의 환산계수 산정. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권 제5B호, pp. 515-524.
 오테석, 오근택, 문영일, 박래건(2008) 시단위 강우자료를 활용한 분단위 강우자료의 보정과 임의시간 환산계수의 추정. **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1215-1219.
 유철상, 전창현(2010) 임의시간 환산계수에 대한 소고. **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제43권 제9호, pp. 123-129.
 정중호, 윤용남(2002) 수자원설계실무. 구미서관.
 조한성, 엄명진, 조원철, 조주영(2006) 서울지방 1분 자료를 이용한 강우자료의 환산계수 산정. **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1506-1510.
 Dwyer, I.J. and Reed, D.W. (1994) Effective fractal dimension and corrections to the mean of annual maxima. *Journal of Hydrology*, Vol. 157, No. 1-4, pp. 13-34.
 Dwyer, I.J. and Reed, D.W. (1995) Allowance for discretization in

hydrological and environmental risk assessment (ADHERE). Report 123, Institute of Hydrology, Wallington, UK.
 Fowler, H.J., Ekström, M., Kilsby, C.G., and Jones, P.D. (2005) New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 1. Assessment of control climate. *Journal of Hydrology*, Vol. 300, No. 1-4, pp. 212-233.
 Frederick, R.H., Myers, V.A., and Auciello, E.P. (1977) *Five- to 60-minute precipitation frequency for the eastern and central United States*. NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO-35, Silver Spring, Md, pp. 36.
 Hershfield, D.M. (1961) *Rainfall frequency atlas of the United States for durations from 30 minutes to 24 hours and return periods from 1 to 100 years*. US weather Bureau Technical Paper No. 40 (TP-40), U.S. Dep. Commerce, Washington, DC.
 Huff, F.A. and Angel, J.R. (1992) *Rainfall frequency atlas of the United States for durations from 30 minutes to 24 hours and return periods from 1 to 100 year*. Technical Paper No. 40, Weather Bureau, U.S. Dept. of Commerce, Washington, D.C.
 Institute of Hydrology (1999) *Flood Estimation Handbook*. Institute of Hydrology, Wallingford
 Jakob, D., Taylor, B., and Xuereb, K. (2005) *A pilot study to explore methods for deriving design rainfalls for australia - part 1*. HRS Report No. 10, Australian Government Bureau of Meteorology, Melbourne, pp. 5-14.
 Miller J.F., Frederick R.H., and Tracey R.J. (1973) *Precipitation-Frequency Atlas of the Western United States*. U.S. Department of Commerce.
 Pierrehumbert, C.L. (1972) Short Period Rainfall Intensity Analysis. Working Paper 156, *Bureau of Meteorology*, Melbourne, Australia.
 U.S. Weather Bureau (1956) *Rainfall Intensities for Local Drainage Design in Western United States*. Technical Paper No. 28, U.S. Dept. of Commerce, pp. 46.
 van Montfort, M.A.J. (1990) Sliding Maxima. *Journal of Hydrology*, Vol. 118, No. 1/4, pp. 77-85.
 Weiss, L.L. (1964) Ratio of true to fixed-interval maximum rainfall. *Journal of Hydraulic Engineering*, Div. Proc. ASCE Vol. 90(HY1), pp. 77-82.
 Wilson, W.T. and Hershfield, D.M. (1958) Frequency analysis of rainfall intensity data. *Agricultural Engineering*.
 Yen, B.C. and Chow, V.T. (1980). Design hyetographs for small drainage structures. *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 106, No. HY6, pp. 1055-1076.
 Young, C.B. and McEnroe B.M. (2003) Sampling adjustment factors for rainfall recorded at fixed time intervals. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 8, No. 5, pp. 294-296.

(접수일: 2010.10.4/심사일: 2010.12.6/심사완료일: 2011.4.18)