우량계망의 공간분석: 일양분포와 포아송 분포의 적용

Spatial Analysis of Rain Gauge Networks: Application of Uniform and Poisson Distributions

유철상* · 이지호** · 양동민*** · 정재학****

Yoo, Chulsang · Lee, Jiho · Yang, Dongmin · Chung, Jaehak

Abstract

This study compared spatial distribution characteristics of three nationwide rain gauge networks of Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (MLTM), Korea Meteorology Agency (KMA), and local governments. As methodologies, both quadrat method and nearest neighbor method were applied along with Poisson and uniform probability distributions of interest. As results, the AWS network of KMA was found to show characteristics near the uniform distribution, and that of MLTM the Poisson distribution. That of local governments was found to be in between the other two. Among various purposes of operating rain gauge networks, those following the uniform distribution have an advantage of estimating the areal average rainfall, and others following the Poisson distribution an advantage of estimating the spatial correlation structure of rainfall field.

Key words : rain gauge network, spatial distribution, quadrat method, nearest neighbor method

요 지

본 연구에서는 전국적인 분포를 갖는 국토해양부, 기상청 AWS 및 지자체 우량계를 대상으로 그 공간분포 특성을 비교하였다. 방법론으로서 정방구역 방법과 최근린 방법을 모두 적용하였으며, 포아송 분포 및 일양분포를 대상 확률분포로 한정하였다. 그 결과, 기상청 AWS의 경우는 상대적으로 일양분포에 가까운 특성을, 국토해양부 우량계의 경우는 포아송 분포를 따름을 확인할 수 있었다. 마지막으로 지자체 우량계의 경우는 포아송 분포와 일양분포의 중간적 특성을 나타냄을 확인하였다. 우량계 설치의 다양한 목적 중 면적평균강우량의 정도 있는 추정을 고려하면 상대적으로 일양분포를 따르는 것이 유리하며, 반대로 포아송 분포를 따르는 경우에는 강우장의 공간상관특성을 파악하는데 유리하다.

핵심용어 : 우량계망, 공간분포, 정방구역 방법, 최근린 방법

1. 서 론

우량계로부터 수집된 강우량 자료는 강우-유출 해석모형, 다양한 재해 예경보시스템 등의 입력자료로 이용된다(유철상 등, 2003). 현재 우리나라에서는 기상청, 국토해양부, 한국수자원공사, 한국농어촌공사, 행정안전부 산하 각 지자체 등에서 특정목적에 의해 우량계를 설치 운영 중에 있다. 국토해양부의 경우에는 주로 홍수예警보를 목적으로, 기상청에서는 악기상의 감시 목적으로, 한국수자원공사의 경우에는 홍수예警보 및 주요 다목적댐의 관리 및 운영을 목적으로, 한국농어촌공사의 경우에는 농업용 저수지의 관리 및 운영을 목적으로 강우량을 관측하고 있다. 지자체에서의 강우관측은 관내 강우량의 파악을 목적으로 설치되었다. 따라서 우량계의 공간

분포는 관할기관이 어디냐에 따라 그 특성이 많이 다르다.

일반적으로 국토해양부의 우량계는 유역단위로 고려되어 설치되었고, 한국수자원공사나 한국농어촌공사의 경우에는 댐 및 저수지 유역을 대상으로 설치되었다. 기상청의 경우에는 전국적인 강우특성 파악을 목적으로 하므로 전국적으로 고른 분포를 보인다. 마지막으로 지자체에서의 강우관측은 지자체 청사 또는 사무소에서 수행되므로 지자체의 분포자체와 관련이 있고, 이는 궁극적으로 인구의 분포특성과도 밀접한 관련을 갖는다.

이와 같이 특정한 목적에 의해 설치된 강우관측소는 주로 엔트로피(entropy)이론을 적용하여 평가되고 있다(Caseltan and Husain, 1980; Chapman, 1986; Krstanovic and Singh, 1992; Al-Zahrani and Husain, 1998). 국내에서는 유철상과

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

**정회원 · 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학학과 박사수료

***노아솔루션(주) 소장

****소방방재청 국립방재연구소 연구기획팀 연구사

정광식(2002)이 혼합분포를 엔트로피 이론에 적용하여 강우 관측망을 평가한 바 있으며, 유철상 등(2003)은 강우의 공간 상관구조를 이용하여 남한강 유역의 강우관측망을 평가하였다. 아울러 김재복 등(2007)은 소양강 댐 유역의 강우관측망을 대상으로 공간상관분석 및 엔트로피 방법을 적용하여 관측망 밀도, 공간분포의 적정성을 검토하였다. 그러나 위 연구들은 기존강우관측망의 최적 부분집합 선정에 중점을 두고 있으며, 강우관측망의 공간적 분포는 고려하지 않았다.

이러한 공간분포의 유형은 크게 군집(clustered), 무작위(random), 비군집(anti-clustered)으로 세분화될 수 있다(Cole and King, 1968). 즉, 이러한 공간분포 분석에서의 주요 관심사는 점들의 속성이라기보다는 점들의 위치특성을 파악하는 것에 있다. 이러한 목적의 분석방법에는 여러 가지가 있으나 그 중 보편적으로 적용되는 것으로 정방구역 방법(Quadrat Method)과 최근린 방법(Nearest Neighbor Method)이 있다(국토연구원, 2004; 김성중 등, 2005). 기본적으로 점의 위치특성을 파악하기 위하여 가정한 확률밀도함수를 기준으로 분산 및 집중 정도를 파악하게 된다.

본 연구에서는 전국적인 분포를 갖는 국토해양부, 기상청 및 지자체 우량계의 공간분포 특성을 파악하고, 이를 비교하는 것을 목적으로 한다. 아울러 지자체 우량계의 경우 설치 밀도가 높음에도 불구하고 여러 가지 이유로 자주 활용되지 있지 못하고 있는 현실에서, 일단 그 분포특성이 타 우량계망과 비교하여 어떻게 다른지를 파악하고자 한다. 기상청에서 관리하는 우량계는 크게 기상관측소에서 관리하는 것과 무인 자동기상관측장비(AWS: Automatic Weather Station)의 것이 있으나 본 연구에서는 그 수가 많은 AWS를 고려하였다. 공간분포 특성을 파악하기 위해 정방구역 방법과 최근린 방법을 모두 적용하였으며, 고려한 확률분포형은 포아송 분포 및 일양분포로 한정하였다.

2. 정방구역 방법 및 최근린 방법의 기본 이론

공간에 위치한 점들의 공간의 분포 형태는 크게 규칙적 분포유형, 임의적 분포유형, 집중형 분포유형으로 구분할 수 있다(그림 1). 격자내의 사상의 수가 모든 격자에서 동일한 경우 규칙적인 분포형이며, 이 때 분포한 점에 대한 분산은 0이다. 반대로 각 격자에 분포한 점의 개수가 한 격자에 모이면 분산은 최대가 된다(정재준과 노영희, 2007).

2.1 정방구역 방법

정방구역 방법(Quadrat Method)은 Grieg-Smith(1952)에 의해 처음으로 제안되었다. 이는 기본적으로 대상 지역을 기 설정한 일정한 크기의 격자로 나누고 각 격자 내의 표본수를 추출한 후 그 표본수의 분포특성을 이용하여 원 자료의 공간 분포 특성을 파악하는 것이다. 일반적으로 쓰이는 방법은 간단히 각 격자 내 분포하는 점의 개수들의 분산을 가정한 확률분포함수를 따르는 이론적 분산과 비교하여 평가하는 방법이다(국토연구원, 2004; 김성준 등, 2005; 정재준과 노영희, 2007; Thomas, 1977; Getis and Boots, 1978). 각각의 격자는 원, 직사각형, 정사각형 등으로 구성할 수 있으나, 정사각형으로 분할된 정방구역이 주로 사용된다. 정방구역 내 점들의 관측빈도 특성은 당초 그 점들이 공간적으로 어떻게 분포되었는지에 따라 크게 다르다. 예를 들어 점들이 공간적으로 바둑판 모양으로 규칙적으로 분포되었다면 정방구역내의 관측빈도는 매우 일정할 수밖에 없고 따라서 매우 낮은 분산을 나타낼 것이며, 반대로 포아송 분포(Poisson Distribution)를 따른다면 정방구역 내 관측빈도가 상대적으로 무작위한 것이므로 큰 분산을 유도할 것이다. 일양분포(Uniform Distribution)의 경우는 그 중간정도가 될 것이다. 일반적으로 자연현상의 경우는 대부분 포아송 분포를 따르는 것으로 알려지고 있으며(Getis, 1964), 우량계의 경우는 그 목적이 주로 면적평균강우의 추정에 있으므로 일양분포를 따르도록 하는 것이 일반적이다.

포아송 분포는 불규칙하게 발생하는 확률을 표현하는 이산 확률분포이다. 포아송 분포는 거리, 면적, 체적 등 다른 값의 특정 간격 안에서 발생하는 사건들의 확률을 다루는 데도 쓰일 수 있다. 주로 시간, 거리, 또는 공간상에서 무작위로 드물게 발생하는 사건의 수를 묘사하는데 사용한다. 점이 무작위한 분포를 따른다면 점의 분포 형태는 점이 밀집된 지역과 점이 분산된 지역이 섞여 있는 경우일 것이다. 즉, 규칙성이 없는 점의 형태이며 포아송 분포는 이를 파악하는 기준이 될 수 있다. 따라서 포아송 분포를 따르는 무작위한 점의 분포는 자연현상에 의해 생성된 경우에 적용할 수 있다(Getis, 1964).

공간적으로 2차원 포아송 분포를 따르는 어떤 현상에 대해 정방구역 방법을 적용하여 추출한 정방구역 내 관측빈도의 분포는 역시 포아송 분포를 따른다. 즉,

$$P[X=x] = \frac{(\lambda a)^x e^{-\lambda a}}{x!} \quad (1)$$

그림 1. 격자 내 점 분포 유형(정재준과 노영희, 2007)

여기서, λ 는 원 자료의 평균 관측빈도, x 는 정방구역 내에서 관측되는 빈도, a 는 정방구역의 면적을 나타낸다. 위 포아송 확률분포의 경우 평균과 분산은 λa 로 같다. 만일 정방구역 내의 관측빈도가 포아송 분포를 따르는지는 간단히 평균과 분산이 같은지를 확인하여 파악할 수 있다. 또는 위 식 (1)로 주어진 분포를 따르는지를 여러 가지 확률적인 적합도 검정방법으로 확인할 수도 있다.

일양분포는 상대적으로 규칙적인 배열을 설명하는데 자주 이용한다. 따라서 자연적이라기보다는 인위적이다. 그러나 일양분포를 따른다고 하여 바둑판처럼 규칙적인 분포를 기대할 수 있는 것은 아니다. 우량계 밀도가 작을 경우 오히려 포아송 분포에 보다 가까운 느낌을 줄 수도 있다.

2차원 일양분포를 따르는 현상을 대해 정방구역 방법의 적용결과는 다음과 같이 설명할 수 있다. 먼저, 모든 격자에 대해 우량계가 포함될 확률은 동일하다. 그 확률은 간단히 격자수의 역수이다. 이 경우 격자 내 우량계 수의 분포는 Bernoulli 분포가 된다. 만일 우량계 수가 늘면 그 확률분포는 이항분포가 된다. 즉,

$$P[X=x] \sim B\left(n, \frac{a}{A}\right) \quad (2)$$

이 때 n 은 대상 구역 내 총 우량계의 개수, a 는 정방구역의 면적을 나타내고 A 는 대상 지역의 면적을 나타낸다. 아울러 중심극한정리에 의해 이항분포는 정규분포로 수렴하며, 그 때 평균과 분산은 다음과 같다.

$$\mu = n \times \frac{a}{A} \quad (3)$$

$$\sigma^2 = n \times \frac{a}{A} \left(1 - \frac{a}{A}\right) \quad (4)$$

위 식 (2)의 경우 그 확률(실제는 우량계의 밀도)이 매우 작다면 포아송 분포에 수렴하는 것은 당연하다. 그러나 그 밀도가 상대적으로 큰 경우, 또는 정방구역의 크기가 큰 경우에는 다음과 같은 다른 특성을 갖게 된다. 즉, 식 (2)로 표현된 이항분포를 다시 Bernoulli 분포의 형태로 바꾸면 다음과 같다.

$$P[X=x] \sim B\left(1, \frac{na}{A}\right) \quad (5)$$

위 식은 그 발생확률이 na/A 인 Bernoulli 분포가 된다. 이 경우의 평균은 이항분포의 경우와 동일하나, 분산은 다음과 같이 바뀌게 된다.

$$\sigma^2 = \frac{na}{A} \left(1 - \frac{na}{A}\right) \quad (6)$$

그러나 위 식은 발생확률이 1보다 큰 경우에는 적용될 수 없다. 따라서 평균이 0과 1사이에서 움직이는 경우에만 적용될 수 있는 식이며, 평균이 1/2인 경우 분산이 평균의 제곱인 1/4의 최댓값을 갖게 된다. 평균이 0.5 주변인 경우 이 관계가 어느 정도 유효하다고 할 수 있다. 그러나 발생확률

우량계망의 공간분석: 일양분포와 포아송 분포의 적용

이 1보다 크게 되면, 즉 평균이 1보다 크게 되면, 다시 이항 분포를 통해 그 특성을 파악할 수밖에 없다. 즉, 일양분포를 따르는 우량계의 공간분포를 정방구역 방법으로 확인하는 것은 포아송 분포의 경우처럼 단순하지 않다. 우량계 밀도에 따라 두 경우는 같은 결과를 유도할 수도 있다. 일양분포를 따르는 경우나 포아송 분포를 따르는 경우나 정방구역 방법 적용상의 평균은 동일하나 분산이 상이할 뿐이다. 따라서 만일 우량계의 공간분포를 확인하고자 한다면 정방구역 내 우량계 수의 분산과 비교되어야 한다.

2.2 최근린 방법

최근린 방법(Nearest Neighbor Method)은 정방구역 방법과 더불어 점 사상의 분포특성을 파악하기 위해 실시한다. 최근린 분석은 임의의 점에 가장 가까운 인접 점들 간의 거리 특성을 이용하는 방법이다(국토연구원, 2004; Lloyd, 2006). 두 지점간의 거리를 측정하여 분포특성을 파악한다는 점에서 정방구역 방법에 비해 보다 지리적인 접근방법이라 할 수 있다(최미애, 2007). 각각의 지점에서 가장 가까운 점들의 평균 거리를 산정한 후, 이를 점의 밀도를 이용하여 산정된 모형의 평균 기대거리와 비교하는 방법이다. 즉, 실제의 점 분포에서 가장 가까운 주변 지점까지의 평균 최근린 거리와 모형에 따라 기대되는 평균 기대거리의 비율을 이용하는 방법이다. 실제 점 분포 특성이 이론적인 점 분포 특성에 비해 어느 정도 벗어났는가를 파악한다면 집중 및 분산 정도를 판단할 수 있다(정재준과 노영희, 2007). 점의 공간특성이 군집 특성을 가진다면 주변 점들 간의 거리는 짧게 되며, 반대로 분산 특성을 가지면 주변 점들 간의 거리는 멀게 된다. 따라서 관측치에서의 최근린 거리의 평균과 모형에서의 평균기대 거리의 비를 이용하면 점의 분산 및 집중 정도를 파악할 수 있다.

공간의 모든 점들이 2차원 포아송 분포를 따른다고 가정할 경우 평균 기대거리는 다음과 같이 산정한다. 먼저, 공간에 분포된 점들의 평균 최근린 거리를 구하기 위해 반경이 r 인 원의 면적으로 가정하면 2차원 포아송 확률밀도함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P[X(A)=k] = \frac{(\rho\pi r^2)^k e^{-\rho\pi r^2}}{k!}, \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

여기서 ρ 는 우량계 밀도(우량계 총수/대상면적)를 나타낸다. 위 식의 누가확률분포함수는 다음과 같다.

$$F(r) \equiv P[D \leq r] = 1 - P[D > r] = 1 - P[X(A)=0] \quad (8)$$

위 식에서 $P[X(A)=0]$ 는 $A = \pi r^2$ 인 원 내에 점이 하나도 존재하지 않을 확률이다. 그 확률은 식 (7)에서 간단히 계산할 수 있다. 즉,

$$P[X(A)=0] = e^{-\rho\pi r^2} \quad (9)$$

따라서 식 (8)의 누가확률분포함수와 이를 미분하여 구할 수

있는 확률밀도함수는 각각 다음과 같이 간단히 유도된다.

$$F(r) \equiv 1 - e^{-\rho\pi r^2} \quad (10)$$

$$f(r) = \frac{d}{dr}F(r) = 2\rho\pi r e^{-\rho\pi r^2} \quad (11)$$

위 식은 Rayleigh 확률밀도함수 형태로 다음과 같은 일반적인 형태로 나타낼 수 있다.

$$y = f(x|b) = \frac{x}{b^2} e^{\left(\frac{-x^2}{2b^2}\right)} \quad (12)$$

위 Rayleigh 확률밀도함수는 매개변수 b 를 매개변수로 하며 그 평균은 $b\sqrt{\pi/2}$ 이다. 따라서 식 (11)은 $1/\sqrt{2\rho\pi}$ 를 매개변수로 하는 Rayleigh 확률밀도함수가 되고, 그 평균은 $1/(2\sqrt{\rho})$ 가 된다.

이상과 같은 결과는 대상 지역 내 점들의 분포가 포아송 분포를 완벽하게 따르는 경우 최인접 점들 사이의 평균 거리가 $1/(2\sqrt{\rho})$ 이 되는 것이다. 만일 관측자료를 이용하여 추정 한 거리가 이 보다 작으면 더욱 군집된 형태를 의미하고, 더 크면 보다 균등하게 분산된 형태를 의미한다.

만일 대상 지역 내 점들이 완벽하게 분산된 형태로 존재한다면 이는 바둑판 형태의 배열이 된다. 이 경우 임의의 점에서 최근린 점까지의 평균거리는 간단히 $1/\sqrt{\rho}$ 가 되고 포아송 분포를 따르는 경우의 2배가 된다. 이 경우와 유사하게 대상 지역 내 점들이 일양분포를 따라 분포되어 있다면 임의의 점에서 최근린 점까지의 평균거리는 $1/\sqrt{\rho}$ 에 더 가깝게 된다.

추가로, 임의의 확률밀도함수를 적용하여 기대거리를 산정한 후, 관측자료로부터의 평균 최근린 거리와 비교하면 점의 분산 및 집중 정도를 상대적으로 판단할 수 있다. 이 비를 최근린 지수(NNI)라 하며, 다음과 같이 정의된다.

$$NNI = \frac{d_{obs}}{d_{exp}} \quad (13)$$

여기서 d_{obs} 는 관측 평균 최근린 거리, d_{exp} 은 이론적 평균 최근린 거리이다. 일반적으로 $NNI=1$ 이면 가정한 모형과 동일, $NNI<1$ 은 가정한 모형보다 집중성향, $NNI>1$ 은 가정한 모형보다 분산성향을 보이는 것으로 판단한다.

3. 사용된 자료 및 기초통계 특성

3.1 자료현황

1916년 한강, 대동강, 낙동강 유역조사를 위하여 15개소의 자기우량계 설치를 시작으로 현재 기상청, 국토해양부, 한국수자원공사, 한국농어촌공사, 지자체 등에서 특정 목적을 위하여 수문관측을 실시하고 있다(소방방재청, 2004). 기상청 AWS는 소규모 돌발성 악기상을 연속적으로 감시하여 방재기상지원 능력을 향상시키고, 국지적 상세예보모형의 개발·운영 시 필요로 하는 기초자료를 확보하는 목적으로 설치되었다. 1988년 서울올림픽 기상지원용으로 처음으로 15대를 도입하여 운용한 것이 계기가 되어 539개소(2008년 현재)가 설치 운영 중이다(기상청, 2009).

지자체 우량계는 1994년도에 당시 내무부 주관으로 신속한 기상 및 홍수정보 제공 등의 목적으로 기상청 및 홍수 통제소의 관측시설이 없는 읍면동을 대상으로 설치하였다(소방방재청, 2004). 2002년 기준으로 전국적으로 1,576개의 우량계가 설치 운영되고 있다. 그러나 그 자료의 수집 및 보관, 자료의 검증, 기타 활용측면에서 개선의 여지가 큰 것으로 알려져 있다.

아울러 국토해양부 우량계는 주로 홍수예警보를 위한 강우·유출 해석목적으로 설치되어 운영 중이다. 이용 목적이 홍수 예警보에 있으므로 그 위치도 유역의 출구보다는 유역 안쪽에 집중되어 있다. 따라서 해안가에는 국토해양부의 우량계가 거의 위치하고 있지 않다. 아울러 접근성이 불량한 산악지역의 우량계 밀도도 낮은 편이다. 현재 전국적으로 595개(한국수자원공사 우량계 포함)의 우량계가 운영 중이다.

3.2 분석에 사용된 자료 및 공간분포

기상청 AWS와 국토해양부 우량계 및 지자체 우량계의 공간분포 특성분석에 앞서 각 기관별 우량계들의 분포현황을 파악하였다. 이를 위해 각 기관별 관측소의 좌표값을 이용하였다. AWS 우량계 및 국토해양부 우량계의 위치는 2006년 기준이며, 지자체 우량계의 경우 2002년 기준이다. 지자체 우량계의 설치현황을 타 관측소에 다르게 적용한 이유는 지자체 우량계의 설치현황을 파악하기 어려웠기 때문이다. 본 분석에는 육지지역에 설치된 우량계만을 고려하였으며, 해양 및 섬 지역에 설치된 우량계는 분석에서 제외하였다. 다음 그림

그림 2. 관할 기관별 우량계 분포(육지 지역의 경우)

표 1. 관할 기관별 우량계 밀도(육지 지역의 경우)

우량계	우량계 개소	현황 년도	밀도	
			개소기준 (km ² /개)	면적 기준 (개/km ²)
AWS	400	2006	235.58	0.0042
국토해양부	595	2006	158.37	0.0063
지자체	1,368	2002	68.88	0.0145

2는 각 관할 기관별로 육지 지역에 설치된 우량계의 분포를 비교한 것이다.

관할 기관별 우량계 밀도를 비교한 결과, 지자체 우량계의 경우 다른 관할기관에 비해 밀도는 좋으나 강원도 등 산악지역에서 낮은 밀도를 보인다. 반면, AWS 우량계는 주요 도시 지역의 고밀도를 제외하면 전 지역에 균일하게 분포되어 있으며, 국토해양부 우량계의 경우는 유역단위로 설치 관리되고 있어 유역의 출구부인 해안지역에서의 우량계의 밀도가 상대적으로 낮은 편이다. 다음 표 1은 관할 기관별로 우량계 밀도를 비교한 것이다.

4. 우량계의 공간분포 특성해석

4.1. 정방구역 방법의 적용

정방구역 방법을 적용하기 전에 적절한 크기의 격자를 결정하여야 한다(Getis, 1964; Thomas, 1977). 이는 격자크기가 분석 결과에 영향을 주기 때문이며, 특히 여러 자료를 비교할 경우에는 특히 중요하다. 일반적으로 격자의 크기를 너무 적게 한 경우 자료 형태의 패턴이 모호해 지며, 너무 큰 격자를 설정할 경우 높은 빈도 및 낮은 빈도로 구성된 불규칙한 자료의 형태를 파악하기 힘들다.

격자 크기의 결정과 관련된 연구를 살펴보면 먼저, Greigh-Smith(1952)가 제시한 16 × 16로의 분할을 살펴볼 수 있다. 이 기준에 대한 이론적인 근거는 희박하며 경험적인 것으로

판단된다. 그러나 이러한 형태의 분할이 모든 경우에 획일적으로 적용될 수는 없었고, 이에 시행착오적인 방법의 제시가 따르게 된다. 예를 들어 Getis(1964)는 3개 정도의 격자크기를 다르게 하여 분석 후 최근린 방법과 비교함이 적절하다고 제안하였고, Ward(1991)는 임의로 크기가 다른 5개의 격자를 구성하여 비교 평가할 것을 제안한 바 있다. 그러나 최근에는 대상유역의 면적을 점들의 총 개수로 나눈 값의 2배를 적용하는 방법이 주로 사용되는 것으로 보인다(Boots and Getis, 1988; Bigwood and Inouye, 1988; Lloyd, 2006; 김성준 등, 2005). 즉, 격자의 한 변의 길이를 $\sqrt{(2A/N)}$ 로 결정하는 방법이다. 물론 이 방법도 이론적인 근거를 갖춘 것은 아니며 경험적인 방법(rule of thumb)이라고 판단할 수 있다(Boots and Getis, 1988).

분야에 따라서도 다른 기준이 적용되기도 한다. 예를 들어 생태학자들은 격자 한 변의 길이로 $\sqrt{(2A/N)}$ 을 선호하는 경향이 있으며, 지리학자들의 경우에는 $\sqrt{(A/N)}$ 을 보다 선호하는 것으로 보인다(정재준과 노영희, 2007; 이희연, 1989). 따라서 정형화된 격자크기의 결정방법은 없으며, 다양한 격자크기를 적용하고 그 결과를 비교하여 적절한 결론을 유도하여야 한다(Lloyd, 2006). 특히, 포아송 분포를 대상으로 하는 경우와 일양분포를 대상으로 하는 경우에 동일한 격자크기가 적용되기 어려울 가능성이 있다. 따라서 어느 한 격자크기를 대상으로 하여 그 특성을 파악하기 보다는 다양한 격자크기를 적용하여 그 결과가 어떻게 나타나는지를 판단하는 것이 보다 현명해 보인다.

본 연구에서는 $\sqrt{(2A/N)}$ 에 의해 산정된 격자크기를 기준으로, 이의 1/2정도에서부터 2배 정도까지를 적용하여 검토하는 방식을 취하였다. 그러나 지자체 우량계의 경우 초기 격자크기가 타 기관의 격자크기에 비해 매우 작으므로 기준 크기에서부터 이의 약 3배 정도까지를 적용해 보는 것으로 하였다. 즉, AWS 우량계망에 대해서는 10 × 10 km² - 40 × 40 km²의 격자크기를 고려하였고, 국토해양부 우량계망의 경우에는

그림 3. 격자 구성 형태와 격자구성 형태에 따른 우량계의 분포의 예

표 2. 격자크기에 따른 격자 내 우량계 수의 통계적 특성 변화 (AWS)

격자크기 (km × km)	평균	분산	격자수	우량계 개수	총 격자 면적 (km ²)	면적비 (%)
10 × 10	0.410	0.374	821	337	82,100	87.06
12 × 12	0.586	0.637	555	325	79,920	84.75
14 × 14	0.795	0.866	405	322	79,380	84.18
16 × 16	1.043	1.192	300	313	76,800	81.44
18 × 18	1.324	1.680	238	315	77,112	81.77
20 × 20	1.622	1.991	180	292	72,000	76.35
22 × 22	1.925	3.056	147	283	71,148	75.45
24 × 24	2.320	3.905	122	283	70,272	74.52
26 × 26	2.728	2.906	103	281	69,628	73.84
28 × 28	3.209	4.826	86	276	67,424	71.50
30 × 30	3.833	8.986	72	276	64,800	68.72
32 × 32	4.125	13.000	64	264	65,536	69.50
34 × 34	4.855	8.275	55	267	63,580	67.42
36 × 36	5.192	9.217	52	270	67,392	71.47
38 × 38	5.718	8.418	39	223	56,316	59.72
40 × 40	6.026	5.107	38	229	60,800	64.48

표 3. 격자크기에 따른 격자 내 우량계 수의 통계적 특성 변화(국토해양부)

격자크기 (km × km)	평균	분산	격자수	우량계 개수	총 격자 면적 (km ²)	면적비 (%)
8 × 8	0.419	0.377	1,320	553	84,480	89.59
10 × 10	0.665	0.621	821	546	82,100	87.06
12 × 12	0.978	0.870	555	543	79,920	84.75
14 × 14	1.333	1.188	405	540	79,380	84.18
16 × 16	1.767	1.477	300	530	76,800	81.44
18 × 18	2.235	2.003	238	532	77,112	81.77
20 × 20	2.817	2.977	180	507	72,000	76.35
22 × 22	3.415	3.683	147	502	71,148	75.45
24 × 24	4.139	4.551	122	505	70,272	74.52
26 × 26	4.883	4.202	103	503	69,628	73.84
28 × 28	5.686	5.583	86	489	67,424	71.50
30 × 30	6.486	7.239	72	467	64,800	68.72
32 × 32	7.313	7.615	64	468	65,536	69.50
34 × 34	8.564	15.251	55	471	63,580	67.42
36 × 36	9.250	12.230	52	481	67,392	71.47

8 × 8 km² - 36 × 36 km², 마지막으로 지자체 우량계망의 경우에는 4 × 4 km² - 30 × 30 km²의 격자크기를 고려하였다. 다음 그림 3은 각 경우에 대한 격자망의 예를 보여준 것이다.

앞서 제시한 다양한 격자크기에 대해 격자 내에 위치한 우량계 개수를 산출하였다. 그러나 이 과정에서 바다와 접하는 부분의 격자는 완벽한 사각형을 이루지 못하며, 따라서 이를 고려하는 경우 왜곡된 결과를 유도할 가능성이 있어 분석에서 제외하였다. 그 결과 분석에 사용된 격자의 수에 격자의 크기를 곱한 값은 국토의 면적에 비해 작아지게 된다. 참고

표 4. 격자크기에 따른 격자 내 우량계 수의 통계적 특성 변화(지자체)

격자크기 (km × km)	평균	분산	격자수	우량계 개수	총 격자 면적 (km ²)	면적비 (%)
4 × 4	0.235	0.252	5,595	1314	89,520	94.93
6 × 6	0.523	0.579	2,409	1259	86,724	91.97
8 × 8	0.930	1.117	1,320	1228	84,480	89.59
10 × 10	1.430	2.031	821	1174	82,100	87.06
12 × 12	2.077	3.364	555	1153	79,920	84.75
14 × 14	2.822	5.394	405	1143	79,380	84.18
16 × 16	3.617	7.682	300	1085	76,800	81.44
18 × 18	4.597	10.427	238	1094	77,112	81.77
20 × 20	5.628	13.330	180	1013	72,000	76.35
22 × 22	6.789	20.565	147	998	71,148	75.45
24 × 24	8.164	24.022	122	996	70,272	74.52
26 × 26	9.447	29.171	103	973	69,628	73.84
28 × 28	11.000	36.965	86	946	67,424	71.50
30 × 30	12.694	50.835	72	914	64,800	68.72

로, 격자의 크기 20 × 20 km², 18 × 18 km², 12 × 12 km²의 경우, 총 격자의 수는 각각 180개, 238개, 555개가 되고, 이를 면적으로 계산하면 각각 72,000, 77,112, 79,920 km² 전체 육지면적의 76.45%, 81.77%, 84.75%가 된다. 표 2, 3, 4는 고려한 격자별로 추정된 격자 내 우량계 수의 평균, 분산 및 고려한 총 격자수, 총면적 및 전체 육지 면적에 대한 비율을 정리한 것이다. 표 5는 이중 분산의 변화를 포아송 분포 및 일양분포를 따르는 경우의 이론적 분산과 비교한 것이다. 이를 그림으로 나타내면 그림 4와 같다.

그림 4에서는 특히 격자의 크기에 따른 우량계 수의 거동을 포아송 분포 및 일양분포의 이론적 거동특성과 비교하여 잘 살펴볼 수 있다. 먼저, AWS의 경우는 상대적으로 일양분포에 가까운 특성을 나타낸다. 격자가 아주 작은 경우 및 아주 큰 경우에 포아송 분포 쪽으로 가우는 모습을 보여주기도 하지만 이는 다분히 경계효과 및 격자의 크기 증가에 따른 격자수의 감소의 영향으로 판단된다. 대체로 격자 크기 28 km × 28 km에서 32 km × 32 km 정도가 두 분포를 비교할 때 적절한 규모로 판단된다. 이는 경험적으로 정하는 격자 크기보다는 다소 큰 격자크기로, 특히 격자 내 우량계의 수가 '0' 또는 '1' 경우를 상당히 배제하게 된다.

국토해양부 우량계의 경우는 의심할 여지없이 포아송 분포를 따른다고 할 수 있다. 이러한 결과는 강우-유출 해석의 입력자료인 면적평균 강우량을 정도 있게 확보하기 위한 목적에 상당히 배치된다. 이는 우량계의 공간적 분포가 포아송 분포쪽에 가까울 경우 일양분포에 가까운 경우에 비해 면적 평균강우의 불확실성이 더 커지게 되기 때문이다(Yoo et al., 2008). 마지막으로 지자체 우량계의 경우는 포아송 분포와 일양분포의 중간적 특성을 나타내는 결과로 상대적으로 우량계 수가 많음으로 해서 경계효과 없이 대부분의 격자크기에서 일관된 결과를 보여주고 있다.

표 5. 격자 크기에 따른 우량계 수의 분산과 포아송 분포 및 일양분포를 따르는 경우의 이론적 분산 비교

격자크기 (km × km)	AWS			국토해양부			지자체		
	포아송 분포	관측 자료	일양 분포	포아송 분포	관측 자료	일양 분포	포아송 분포	관측 자료	일양 분포
4 × 4	-	-	-	-	-	-	0.235	0.252	0.055
6 × 6	-	-	-	-	-	-	0.523	0.579	0.273
8 × 8	-	-	-	0.419	0.377	0.176	0.930	1.117	0.865
10 × 10	0.410	0.374	0.168	0.665	0.621	0.442	1.430	2.031	2.045
12 × 12	0.586	0.637	0.343	0.978	0.870	0.957	2.077	3.364	4.316
14 × 14	0.795	0.866	0.632	1.333	1.188	1.778	2.822	5.394	7.965
16 × 16	1.043	1.192	1.089	1.767	1.477	3.121	3.617	7.682	13.080
18 × 18	1.324	1.680	1.752	2.235	2.003	4.997	4.597	10.427	21.129
20 × 20	1.622	1.991	2.632	2.817	2.977	7.934	5.628	13.330	31.672
22 × 22	1.925	3.056	3.706	3.415	3.683	11.662	6.789	20.565	46.092
24 × 24	2.320	3.905	5.381	4.139	4.551	17.134	8.164	24.022	66.650
26 × 26	2.728	2.906	7.443	4.883	4.202	23.849	9.447	29.171	89.238
28 × 28	3.209	4.826	10.300	5.686	5.583	32.331	11.000	36.965	121.000
30 × 30	3.833	8.986	14.694	6.486	7.239	42.070	12.694	50.835	161.149
32 × 32	4.125	13.000	17.016	7.313	7.615	53.473	-	-	-

그림 4. 격자크기에 따른 격자 내 우량계 수의 분산과 포아송 분포 및 일양분포의 이론적 분산의 비교

4.2 최근린 방법의 적용

4.1절에서 적용한 정방구역 방법은 격자 내에 점의 개수만을 대상으로 분석하는 방법으로 점들간의 거리 분포에 대해서는 설명하기 힘들다. 따라서 정방구역 방법과 더불어 최근린 방법을 분석하여 점 사상의 분포특성을 비교하였다. 최근린 방법은 지점간의 거리를 측정하여 분포특성을 파악한다는 점에서 정방구역 방법에 비해 보다 지리적 분석 방법이라 할 수 있다(최미애, 2007). 2.2절에서의 언급한 최근린 지수 산정에 앞서 각각의 우량계의 최근린 분포특성을 분석하였다. 다음 표 6은 최근린 거리에 대한 기초 통계량이며, 그림 5는 최근린 거리분포를 히스토그램(계급구간 2 km)으로 도시한 것이다.

그 결과 AWS 우량계와 국토해양부 우량계는 평균 최근린 거리에 대해 대칭적인 형태를 보인다. 지자체 우량계의 경우 평균을 기준으로 평균이하의 거리에서보다 평균이하의 거리에서 높은 빈도를 보였다. 따라서 AWS는 최근린 거리의 평균을 기준으로 서로 가까운 거리와 서로 먼 거리가 대체적으로 일정하게 분포되었다 볼 수 있다. 그러나 지자체 우량계

는 평균이하의 점의 발생빈도가 높으므로 점의 형태는 집중된 형태라고 도시적으로 추측할 수 있다.

최근린 지수는 최근린 점간의 평균거리와 모형으로부터 산정된 평균거리를 이용하여 점의 분산 및 집중 정도를 판단할 수 있는 방법이다. 포아송 분포와 일양분포를 이용하여 최근린 지수를 산정한 결과를 다음 표 7에 정리하였다. 이를 시각적으로 표현하면 그림 6과 같다.

표 7 및 그림 6에 나타난 결과는 앞의 정방구역 방법의 적용결과와 일치한다. 먼저, 포아송 분포를 적용한 결과를 살펴보면, 국토해양부의 우량계의 경우가 포아송 분포에 가장 가깝게 나타난다. 지자체 우량계의 경우도 국토해양부 보다는 덜하지만 역시 포아송 분포에 근접한 특성을 나타내고 있다. 그러나 AWS 우량계의 경우에는 포아송 분포에서 멀리 떨어져 있음을 확인할 수 있다. 일양분포를 적용한 결과도 포아송 분포의 적용 결과와 일치한다. 먼저 AWS 우량계 분포가 일양분포에 가장 가깝게 나타나고, 반대로 국토해양부의 우량계가 가장 멀다. 지자체 우량계의 경우는 국토해양부의 우량계 분포와 유사한 특성을 보인다.

표 6. 관할 기간별 우량계 자료에 대한 최근린 거리의 특성

우량계	최소 최근린 거리 (km)	최대 최근린 거리 (km)	최근린 거리의 평균 (km)	최근린 거리의 분산	최근린 거리의 표준편차
AWS	1.480	21.346	10.734	18.946	4.353
국토해양부	0.095	31.229	7.017	15.109	3.887
지자체	0.039	17.874	4.532	5.202	2.281

점선 : 관할 기간별 최근린 거리의 평균

그림 5. 관할 기간별 우량계 자료에 대한 최근린 거리의 히스토그램

표 7. 각 우량계 자료에 대한 최근린 방법의 적용결과

우량계	포아송 분포			일양분포		
	d_{obs}	d_{exp}	NNI	d_{obs}	d_{exp}	NNI
AWS	10.734	7.674	1.399	10.734	15.348	0.699
국토해양부	7.017	6.457	1.087	7.017	12.914	0.543
지자체	4.532	4.150	1.092	4.532	8.300	0.546

그림 6. 분포형에 따른 최근린 방법의 적용 결과

5. 결 론

본 연구에서는 전국적인 분포를 갖는 국토해양부, 기상청 AWS 및 지자체 우량계를 대상으로 그 공간분포 특성을 비교하였다. 아울러 지자체 우량계의 경우 설치밀도가 높음에도 불구하고 여러 가지 이유로 자주 활용되지 있지 못하고 있는

현실에서, 일단 그 분포특성이 타 우량계망과 비교하여 어떻게 다른지를 파악하였다. 방법론으로 정방구역 방법과 최근린 방법을 모두 적용하였으며, 고려한 확률분포형은 포아송 분포 및 일양분포로 한정하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

먼저, 정방구역 방법의 적용 결과, 기상청 AWS의 경우는 상대적으로 일양분포에 가까운 특성을 나타낸다. 국토해양부 우량계의 경우는 포아송 분포를 따른다고 할 수 있으며, 마지막으로 지자체 우량계의 경우는 포아송 분포와 일양분포의 중간적 특성을 나타냄을 확인하였다.

최근린 방법의 적용결과도 정방구역 방법과 유사한 것으로 나타났다. 그 중 기상청 AWS 우량계와 국토해양부 우량계는 평균 최근린 거리에 대해 대칭적인 형태를 보인다. 지자체 우량계의 경우 평균을 기준으로 평균이상의 거리에서보다 평균이하의 거리에서 높은 빈도를 보임을 확인하였다. 평균이하의 점의 발생빈도가 높으므로 점은 공간적으로 집중된 형태를 나타내게 된다. 반대로 기상청 AWS는 최근린 거리의 평균을 기준으로 서로 가까운 거리와 서로 먼 거리가 대체적으로 일정하게 분포되었다고 판단할 수 있다.

이러한 결과는 특히 국토해양부의 우량계 설치 목적인, 즉, 강우-유출 해석의 입력자료인 면적평균 강우량을 정도 있게 추정하기 위한 목적에 상당히 배치된다. 이는 우량계의 공간적 분포가 포아송 분포쪽에 가까울 경우 일양분포에 가까운 경우에 비해 면적평균강우의 불확실성이 더 커지게 되기 때문이다(Yoo et al., 2008). 이러한 문제점은 상대적으로 관리가 어려운 산간지역의 우량계 밀도 및 공간분포가 적절하지 않은데서 발생하는 것으로 판단된다. 아울러 기상청 AWS 우량계와 국토해양부 우량계의 중간적 특성을 보이는 지자체 우량계망은 강우자료의 이용 목적에 따라 중요한 장점으로, 예를 들어 강우장의 공간특성 파악 등, 차별화된 가치가 있다. 추가로 관할기관별 면적평균강우의 불확실성 검토와 평가

된 강우자료를 이용한 유출해석이 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 국립방재연구소 산지돌발홍수에측시스템 고도화 및 의사결정지원 시스템 개발(NIDP 2008-12)의 지원으로 수행된 것입니다. 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 국토연구원 (2004) **공간분석기법**, 한울아카데미.
- 기상청 (2009) **기상청 홈페이지**, <http://www.kma.go.kr/index.html>.
- 김재복, 배영대, 박봉진, 김재한 (2007) 소양강댐 유역의 강우관측망 적정성 평가, **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 178-182.
- 김성중, 김대식, 김철, 배덕효, 신사철, 조명희, 조기성 (2005) **GIS 개념과 기법**. 시그마 플러스(주).
- 소방방재청 (2004) **국지성 집중호우의 조기대응시스템 개발(III)**.
- 유철상, 김인배, 류소라 (2003) 우량계의 밀도 및 공간분포 검토 : 남한강 유역을 중심으로, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제2호, pp. 173-181.
- 유철상, 정광식 (2002) 엔트로피 이론을 이용한 강우관측망 평가; 혼합분포와 연속분포의 적용 비교, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제22권, 제4-B호, pp. 447-457.
- 이희연 (1989) **지리통계학**, 법문사.
- 정재준, 노영희 (2007) GIS분석기법을 이용한 도시화 지역의 공간적 분포패턴에 관한 연구: 수도권 지역의 도시성장을 중심으로, **한국경제지리학회지**, 제10권, 제3호, pp. 319-331.
- 최미애 (2007) **점패턴 분석기법을 이용한 문화재의 공간분포특성 연구**, 석사학위논문, 서울시립대학교.
- Al-Zahrani, M. and Husain, T. (1998) An algorithm for designing a precipitation network in the south-western region of Saudi Arabia, *Journal of Hydrology*, Vol. 205, pp. 205-216.
- Bigwood, D.W. and Inouye, D.W. (1988) Spatial pattern analysis of seed banks : An improved method and optimized sampling.

- Ecology*, Vol. 69, No. 2, pp. 497-507.
- Boots, B.N. and Getis, A. (1988) *Point pattern analysis*. SAGE Publication.
- Casleton, W.F. and Husain, T. (1980) Hydrologic networks: Information transmission, *Journal of Water Resources Planning and Management Division*, Vol. 106, pp. 503-529.
- Chapman, T.G. (1986). Entropy as a measure of hydrologic data uncertainty and model performance, *Journal of Hydrology*, Vol. 85, pp. 111-126.
- Cole, J.P. and King, C.A.M. (1968) *Quantitative geography: Techniques and theories in geography*, London : John Wiley and Sons Ltd.
- Getis, A. (1964) Temporal Land-Use Pattern Analysis with the Use of Nearest Neighbor and Quadrat Methods. *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 54, No. 3, pp. 391-399.
- Getis, A. and Boots, B. (1978) *Models of spatial process : An approach to the study of point, Line and area patterns*, Cambridge : Cambridge University Press.
- Grieg-Smith, P. (1952) The use of random and contiguous quadrat in the study of the structure of plant communities. *Annals of botany(London)* 16, pp. 293-316.
- Krstanovic, P.F. and Singh, V.P. (1992). Evaluation of rainfall networks using entropy: . Applicatio, *Water Resources Management*, Vol. 6, pp. 295-314.
- Lloyd, C.D. (2006) *Local models for spatial analysis*. CRC Press.
- Thomas, R.W. (1977) *An Introduction to Quadrat Analysis*, 2nd edition, Geo Abstracts Ltd., University of East Anglia.
- Ward, D. (1991) Triangular tessellation: a new approach to forest inventory. *Forest Ecology and Management*, Vol. 44, No. 2-4, pp. 285-290.
- Yoo, C., Kim, U., Kim, K., and Kim, K. (2008) Inter-station correlation and estimation error of areal average rain rate, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 22, No. 2, pp. 143-157.

© 논문접수일 : 11년 03월 30일

© 심사의뢰일 : 11년 04월 07일

© 심사완료일 : 11년 06월 14일