

면적평균강우량 산정을 통한 강우관측망 평가 및 추정오차

이지호 · 전환돈⁺

서울과학기술대학교 건설시스템디자인

Evaluation of Raingauge Network using Area Average Rainfall Estimation and the Estimation Error

Ji Ho Lee · Hwan Don Jun⁺

Department of Civil Engineering, Seoul Nation University of Science and Technology

요 약

면적평균강우량의 산정은 가용 수자원의 정확한 양을 파악하고 강우-유출해석에 필수적인 입력자료이기 때문에 매우 중요하다. 이와 같은 면적평균강우량의 정확한 산정을 위한 필수적인 조건은 강우관측망의 균일한 공간적 분포이다. 본 연구에서는 보다 향상된 유역 면적평균강우량 산정을 위한 강우관측망의 공간분포 평가방법론을 제시하고, 이를 한강 및 금강 유역에 적용하였다. 강우관측소의 공간적 분포 특성은 최근린 지수(nearest neighbor index)를 이용하여 정량화하였다. 유역별 강우관측소의 공간적 분포가 면적평균강우량 산정에 미치는 영향을 평가하기 위하여 2013년의 강우사상에 대해 산술평균법, 티센가중법, 추정이론을 이용하여 면적평균강우량을 산정하고 각 경우에 대해 추정오차를 평가하였다. 그 결과 공간분포가 우수한 유역은 면적평균강우량의 추정오차가 상대적으로 작으며, 반대로 공간분포가 왜곡된 유역의 경우는 상대적으로 추정오차가 큼을 확인하였다.

핵심용어 : 면적평균강우량, 추정오차 분석, 최근린 지수, 강우관측망, 공간분포

Abstract

Area average rainfall estimation is important to determine the exact amount of the available water resources and the essential input data for rainfall-runoff analysis. Like that, the necessary criterion for accurate area average rainfall estimate is the uniform spatial distribution of raingauge network. In this study, we suggest the spatial distribution evaluation methodology of raingauge network to estimate better area average rainfall and after the suggested method is applied to Han River and Geum River basin. The spatial distribution of rainfall network can be quantified by the nearest neighbor index. In order to evaluate the effects of the spatial distribution of rainfall network by each basin, area average rainfall was estimated by arithmetic mean method, the Thiessen's weighting method and estimation theory for 2013's rainfall event, and evaluated the involved errors by each cases. As a result, it can be found that the estimation error at the best basin of spatial distribution was lower than the worst basin of spatial distribution.

Keywords : Area average rainfall, Estimation error analysis, Nearest neighbor index, Raingauge network, Spatial distribution

1. 서 론

국내의 수문조사는 1441년 청계천의 수위측정과 측우기 발명으로 시작되었다고 할 수 있으며, 근대적인 수문조사는 1911년 일제강점기부터 시작되었다. 그러나 100년이라는 짧은 시간은 우리나라 수문조사 역사에 비해 2005년 이전에는 수문조사를 체계적이고 효율적으로 추진하기 위한 중장기 계획 등이 수립되지 않았다. 과거의 수문관측소는 치수목적에 치중되어 있어 최근 기후변화에 따른 물관리 여건 및

패러다임 변화에 부응하지 못하였다. 특히 명확한 관측망 구축 계획 없이 당해 연도 예산에 따라 수문관측소 설치개소수와 위치를 선정하는 등 체계적이지 못하였으며, 관할기관별 필요 목적에 따라 수문관측소가 설치·운영됨에 따라 일부 지역에 편중되거나 자료의 공동 활용이 원활하지 않아 측정이 중복되는 등 많은 문제가 발생하였다. 이에 국토교통부에서는 전국의 주요지점에서 다양한 수문정보를 실시간으로 생산·제공하기 위한 계획을 수립하고 하천법을 개정(2007.4)하는 등 많은 노력을 기울였다. 아울러 국토

⁺ Corresponding author : hwjun@seoultech.ac.kr

해양부에서는 효율적인 수문조사를 위해 국가유량측정망(2007) 및 국가수문관측망(2012)을 구축하였으며, 각 기관별로 필요에 의해 관측소가 신설되었다. 이러한 수문관측망은 크게 수위관측망, 유량관측망, 강우관측망으로 분류할 수 있다.

이중 강우관측망 평가는 가용한 수자원의 정확한 양을 파악하기 위해, 또한 강우-유출의 해석에 있어서 입력자료로 사용되는 면적평균강우량의 적절한 추정을 위해 중요하다(Yoo et al., 2003; Yoo et al., 2011; Lee et al., 2013). 강우관측망의 평가와 보완은 유역의 전반에 걸쳐 내린 면적평균강우량을 산정하기 전에 반드시 고려되어야 할 부분이다. 적절한 수준의 강우관측망을 확보하지 못할 경우 면적평균강우량의 오차는 이를 입력으로 하는 강우-유출의 결과에서 더 큰 오차를 발생시키게 된다. 궁극적으로 강우를 입력으로 하는 해석의 정도를 크게 저하시킨다(MLIT, 2004). 현재 여러 관할기관에서 악기상의 감시, 홍수예경보, 다목적댐의 관리 및 운영을 목적으로 강우관측소를 설치 운영 중에 있다. 이와 같이 특정한 목적에 의해 설치된 강우관측소는 엔트로피이론, 주성분회귀 분석, 상관성 분석 등에 의해 평가되고 있다(Al-Zahrani and Husain, 1998; Caselton and Husain, 1980; Chapman, 1986; Krstanovic and Singh, 1992; Mogheir et al., 2004).

국내에서는 Yoo and Jung(2002)이 혼합분포를 엔트로피 이론에 적용하여 강우관측망을 평가한 바 있으며, Yoo et al.(2003)은 강우의 공간상관구조를 이용하여 남한강 유역의 강우관측망을 평가하였다. 아울러 Kim et al.(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 있으나, 강우관측망의 공간적 분포는 고려되지 못하고 있다(Yoo et al., 2011). 아울러 현재로서는 강우관측망 설계를 위한 정량화된 이론적 방법은 없으며 최적의 설계를 위해서는 지역별, 사례별로 경험에 의존하여 강우관측소의 설치하고 있다.

국토교통부의 경우는 강우-유출해석 및 홍수예경보의 목적으로 강우관측소를 운영 중에 있으며, 따라서 이에 대한 목적에 부합되도록 강우관측망이 평가되어야 한다. 즉, 적절한 면적평균강우량 산정은 국토교통부의 강우관측 목적에 있어 중요한 부분이며, 이 목적을 부합하도록 관측망이 평가되어야 할 것이다. 아울러 면적평균강우량의 정도 있는 추정을 고려하면 강우관측소는 공간적으로 균등하게 설치된 경우가 가

장 이상적이다(Lee et al., 2013; Yoo et al., 2011). Lee et al.(2013)은 강우관측소의 공간분포를 최근린지수를 이용하여 정량적으로 평가하는 연구를 수행한 바 있다. 최근린 지수는 임의의 점에 가장 가까운 인접 점들 간의 거리 특성을 이용하는 방법으로 점의 분포를 보다 지리적으로 파악할 수 있다. 아울러 강우관측망의 공간분포 특성을 파악하고 이들의 공간분포 특성이 면적평균강우량 산정에 있어 어느 정도의 추정오차를 가지고 있는지에 대한 연구는 찾아보기 힘들다. 이에 본 연구에서는 기존의 방법론을 바탕으로 한강 및 금강 유역에 대해 강우관측망의 공간적 특성을 파악하고 강우-유출해석 시 입력자료인 면적평균강우량의 추정오차를 산정하고자 한다. 면적평균강우량 산정방법으로는 산술평균법, 티센가중법, 추정이론을 적용하였다. 이는 최종적으로 보다 향상된 유역 면적평균강우량 산정에 목적이 있다.

2. 공간적 분포특성 파악을 위한 이론적 배경

2.1 정방구역 방법

점의 공간적 특성은 정방형 격자 기법, 최근린 지수, 특화도 및 집중도지수 등을 이용하여 평가할 수 있다. 정방구역 방법(quadrat method)은 Grieg(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 공간분포특성을 파악하는 것이다. 일반적으로 쓰이는 방법은 간단히 각 격자 내 분포하는 점의 개수들의 분산을 가정한 확률분포함수를 따르는 이론적 분산과 비교하여 평가하는 방법이다(Getis and Boots, 1978; Jung and No, 2007; Kim et al., 2005; KRIHS, 2004; Thomas, 1977). 이 때 각각의 격자는 목적에 따라 원, 직사각형, 정사각형 등으로 구성할 수 있으나, 격자 크기 결정이 주관적으로 주로 경험적으로 결정하고 있다. 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 무작위할 것이므로 큰 분산을 유도할 것이다. 일양 분포(uniform distribution)의 경우

는 그 중간정도가 될 것이다. 일반적으로 자연현상의 경우는 포아송 분포를 따르는 것으로 알려져 있으며 (Getis, 1964), 강우관측망의 경우는 그 목적인 주로 면적평균강우량의 추정에 있으므로 일양분포를 따르도록 하는 것이 일반적이다.

정방구역 방법을 적용하기에 위해서는 적절한 크기의 격자를 결정하여야 한다(Getis, 1964; Thomas, 1977). 이는 격자크기가 분석 결과에 영향을 주기 때문이며, 여러 자료를 비교할 경우에는 특히 중요하다. 격자크기를 적게 한 경우 자료의 분포 패턴이 모호해지며, 너무 큰 격자크기를 설정할 경우 높은 빈도 및 낮은 빈도로 구성된 불규칙한 자료의 분포를 파악하기 힘들어 진다(Sturges, 1926). 따라서 공간적 분포특성을 정량화하기 어려워 본 연구에서는 배제하였다.

2.2 최근린 방법

자연현상의 경우는 대부분 포아송 분포로 가정하며, 이는 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; Yoo et al., 2011).

최근린 방법은 정방구역 방법과 더불어 점 사상의 분포특성을 파악하기 위해 실시한다. 최근린 분석은 임의 점에 가장 가까운 인접 점들 간의 거리 특성을 이용하는 방법이다(KRIHS, 2004; Lloyd, 2006). 두 지점간의 거리를 측정하여 분포특성을 파악한다는 점에서 정방구역 방법에 비해 보다 지리적인 접근방법이라 할 수 있다(Choi, 2007). 각각의 지점에서 가장 가까운 점들의 평균거리를 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(Jung and No, 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. 만약 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.

$$NNI = \frac{d_{obs}}{d_{exp}} \quad (1)$$

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.

만약 공간의 모든 점들이 2차원 포아송 분포를 따른다고 가정하고, 이들의 분포가 포아송 분포를 완벽하게 따른다면 최근린 점들 사이의 평균 거리는 $1/(2\sqrt{\rho})$ 이 된다. 여기서 ρ 는 강우관측소 밀도(강우 관측소 총 개수/대상면적)를 나타낸다. 만일 관측자료를 이용하여 추정된 거리가 이 보다 작으면 더욱 집중된 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. 이에 대한 자세한 이론적 배경은 Lee et al.(2013)과 Yoo et al.(2011)와 등에서 찾아볼 수 있다.

3. 공간적 특성파악을 위한 유역구분

공간분포를 고려한 강우관측소의 평가는 강우-유출 해석시 보다 나은 유역평균강우량 산정에 목적이 있다. 강우-유출해석을 위해서는 하천형상에 따른 유역 분수령을 기준으로 유역을 분할하여야 한다. 즉, 유역 분할은 상·하류 유역의 유기적인 상관관계가 고려되어야 하며, 이는 하천의 상·하류간의 유출특성을 반영한 것이라 할 수 있다. 상·하류간의 유출특성이 반영되면 돌발홍수 및 집중호우 등의 유출해석에 있어 보다 유리하며, 따라서 강우관측망 역시 분할된 유역에 따라 평가되는 게 바람직하다

국토교통부에서는 하천의 형상을 기준으로 유역을 구분한 바 있으며, 본 연구에서는 국토교통부의 유역 분수령을 기준(국토교통부의 중권역 바탕)으로 한강은 5개의 중유역으로, 금강은 3개의 중유역으로 재분류하였다. 재분류된 중유역은 국토교통부의 대권역과 중권역의 중간정도의 유역크기에 해당된다. 하천의

상·하류 관계를 고려하여 한강 및 금강 유역에 대해 중유역으로 분할한 결과는 아래 Fig. 1(up)과 같다. 아래 Fig. 1(down)은 분할된 중유역에 위치해 있는 강우 관측소의 설치 현황을 나타낸 것이다. 또한 각 유역별 중유역의 현황은 Table 1과 같다.

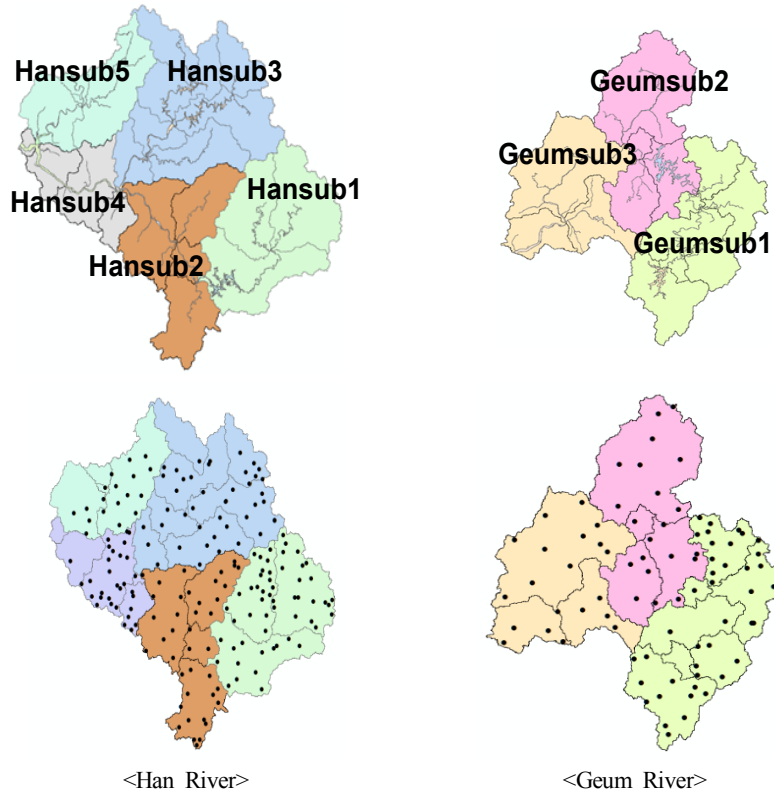


Fig. 1. Status of the installed rainfall stations in each basin

4. 강우관측망의 공간적 특성평가

중유역별 공간적 특성을 파악하기 위해 국토교통부에서 운영중인 강우관측소의 개수와 관측소의 위치 좌표를 수집하였다. 관측소의 좌표는 이들의 공간적 특성을 파악하기 위해 이용되며, 강우관측소 현황은 2012년 기준이다. WMO(1994)에서 제시하고 있는 설치밀도를 이용하여 강우관측망의 공간적 특성을 평가할 수 있다. WMO에서 제시하고 있는 설치밀도를 이용한 관측망 평가는 다양한 목적을 가지고 있는 관측망의 특성을 파악하기에는 한계성이 있다. 국토교통부의 강우관측망을 단순히 관측소의 설치밀도로 평가하기 보다는 관측소의 공간적 특성을 파악하여 평가하는 것이 관측소 설치목적에 부합한다. 이를 위해 강우관측망의 공간적 분포를 최근린지수를 이용하여 정량적으로 파악하였으며, 한강 및 금강 유역에 대해

최근린 지수를 산정한 결과는 아래 Table 1과 같다.

국토교통부의 강우관측망은 모든 중유역에서 최근린 지수가 1 이상으로 강우관측망의 공간분포는 분산된 형태이다. 아래 Fig. 2는 각 중유역별로 최근린지수를 이용하여 공간분포를 비교한 것이다. 이중 Geumsub3는 강우관측망의 공간분포가 가장 우수한 중유역이며, 반면 Hansub4는 강우관측소가 설치가 안된 지역으로 인해 상대적으로 공간분포가 떨어진 중유역으로 판단된다(Fig. 3 참고). 이들의 최근린 지수를 살펴보면 Geumsub3은 1.550이며, Hansub4은 1.063이다. 이는 Hansub4가 타 중유역에 비해 공간적 분포가 떨어진다는 의미이지 본 중유역이 강우관측망의 공간분포에 문제가 있다는 의미는 아니다. 아울러 Geumsub3 중유역의 최소 및 최대 최근린 거리는 각각 4.639 km, 15.228 km이며, Hansub4 중유역은 1.592 km, 17.338 km이다. Geumsub3의 경우 Hansub4

에 비해 최소와 최대 최근린 거리의 차이가 작아 상대적으로 강우관측소간의 거리가 일정하며, 이는 Hansub4 유역에 비해 보다 균등하게 강우관측소가 설치되었다는 것을 미루어 짐작할 수 있다.

중유역중 공간분포가 우수한 Geumsub3 경우와 공간적 분포가 상대적으로 떨어지는 Hansub4 경우를 비교하면 아래 Fig. 3과 같다. Geumsub3의 경우는 상대적으로 공간적 분포가 매우 우수한 유역으로 설치된 관측소가 고르게 분포되어 있음을 도시적으로도 확인할 수 있다. 반면 Hansub4은 일부지역의 관측소의 개수가 작아 상대적으로 공간적 분포가 떨어지는 것으

로 판단된다.

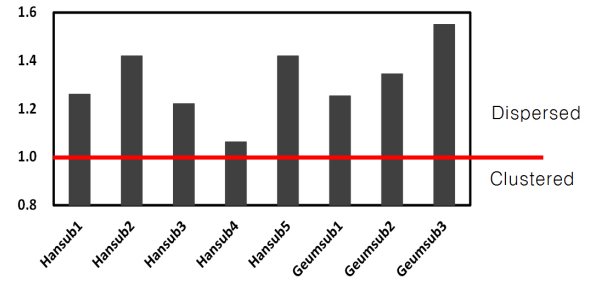


Fig. 2. Comparison of NNIs of each basin

Table 1. Spatial distribution of raingauge stations using NNI

River Basins	Basins	Area (km ²)	No. of Raingauge Station	Expected Distance (km)	Observation Dist. (km)	NNI	Variance	Min. observation dist. (km)	Max. observation Dist. (km)
Han River	Hansub1	6705.0	55	6.963	5.521	1.261	9.625	2.565	14.858
	Hansub2	5702.6	40	8.478	5.970	1.420	13.585	2.532	15.619
	Hansub3	7543.2	43	8.086	6.622	1.221	18.461	0.252	19.142
	Hansub4	3114.9	31	5.328	5.012	1.063	8.333	1.592	17.338
	Hansub5	3199.2	18	9.674	6.814	1.420	3.378	7.704	14.839
Geum River	Geumsub1	3566.2	41	5.848	4.663	1.254	7.065	0.736	13.468
	Geumsub2	3302.1	21	8.434	6.270	1.345	7.772	2.533	15.16
	Geumsub3	3046.7	20	9.563	6.171	1.550	9.757	4.639	15.228



<Best : Geumsub3>



<Worst : Hansub4>

Fig. 3. Examples of spatial distribution of raingauge network (Best and Worst) based on NNI

5. 면적평균강우량의 추정오차 분석

5.1 추정오차 산정을 위한 이론적 배경

일반적으로 면적평균강우량을 산정을 위해 산술평

균법, 티센가중법, 등우선법이 사용된다(Yoon, 2007). 먼저 산술평균법은 유역내 강우관측소의 지점강우량을 산술평균하여 유역의 평균강우량을 산정하는 방법으로 유역내 강우관측소의 분포가 일양분포일 때 사용할 수 있다. 티센가중법은 유역내 강우관측소가 불

균등하게 분포되었을 경우 유역면적에 대한 각 강우 관측소의 지배면적을 가중인자로 이용하는 방법이다. 아울러 등우선법은 티센가중법에서 고려할 수 없는 산악의 영향을 반영할 수 있는 장점이 있으나 등우선의 작성이 주관적이라 국내에서는 제한적으로 사용되고 있다. 추정이론은 강우의 변동성을 고려할 수 있는 장점이 있으며, 최적가중치를 이용하여 유역의 면적평균강우량을 산정하는 방법이다. 각 방법론에 대한 이론적 배경은 Bell(1986), Hegerl and North(1997), North and Stevens(1998) 및 Yoo and Jung(2001)의 연구를 참고하여 정리하였다.

먼저 산술평균법은 면적평균강우량 산정시 모든 강우관측소의 가중치가 동일하다고 가정하는 경우로 강우관측소의 서로 상관성이 작은 경우에 사용할 수 있다. 산술평균법의 면적평균강우량 산정방법 및 이에 대한 추정오차는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_m = P_{mA}^* + \epsilon_A \quad (2)$$

$$P_{mA} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n P_k + \sqrt{\frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n \sigma_k^2} \quad (3)$$

$$= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n P_m + \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}$$

여기서 P_m 은 면적평균강우량, P_{mA}^* 은 산술평균법으로 산정된 면적평균강우량, ϵ_A 는 산술평균법의 추정오차, σ^2 는 각 지점별 강우의 분산의 평균이다.

다음으로 티센가중법은 유역면적에 대한 각 강우 관측소의 지배면적을 가중인자로 이용하는 방법으로 유역면적평균강우량 및 추정오차는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_m = P_{mT}^* + \epsilon_T \quad (4)$$

$$P_m = \sum_{k=1}^n a_k P_k + \sqrt{\sum_{k=1}^n a_k^2 \sigma_k^2} \quad (5)$$

여기서 P_{mT}^* 은 티센가중법으로 산정된 면적평균강우량, ϵ_T 는 티센가중법의 추정오차, a_k 는 각 강우관측소의 면적가중치이며, 각 강우관측소의 지배면적을 유역면적(A_k/A)으로 나누어 산정할 수 있다. 유역내 강우 관측소가 균등하게 분포되어 있다면 a_k 는 일정한 값을 갖게 되며 산술평균법과 같이 가중치가 $1/n$ 이다.

최적가중치를 이용하여 유역의 면적평균강우량을 산정하는 추정이론은 다음과 같다. 추정이론은 강우의 변동성을 고려할 수 있는 장점이 있으며, 이러한 추정이론은 강우관측소가 균등하게 분포되어 있다는 가정에 근거한다. 강우관측소가 서로 독립적이라는 가정 하에 추정이론의 면적평균강우량은 다음과 같이 계산된다(North and Stevens, 1998; Stevens and North, 1996).

$$P_m = P_{mE}^* + \epsilon_E \quad (6)$$

$$P_m = \frac{1}{\eta^2} \sum_{k=1}^n \frac{P_k}{\sigma_k^2} + \sqrt{\frac{1}{\eta^2}} \quad (7)$$

여기서 P_{mE}^* 은 추정이론으로 산정된 면적평균강우량, ϵ_E 는 추정이론의 추정오차이며, $\eta^2 = \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sigma_k^2}$ 이다. 이

위 식은 산술평균법과 동일하게 강우관측자료의 독립이 가정되는 경우에 유효하다. 만일 강우관측소 사이에 상관성이 존재하는 경우는 관측오차는 작아지게 된다. 이를 정량적으로 추정하기 위해서는 EOF(Empirical Orthogonal Function)와 SVD(Singular Value Decomposition)과 같은 방법을 통해 분석이 가능하다(North, 1984; Shen et al., 1994; Yoo and Jung, 2001).

5.2 방법론의 적용

5.2.1 추출된 강우사상의 특성

본 연구에서는 각 중유역별로 평가된 공간분포의 결과를 바탕으로 가장 공간분포가 좋은 경우(case1: Geumsub3)와 공간분포가 상대적으로 떨어지는 경우(case 2: Hansub4)에 대해 산술평균법, 티센가중법 및 추정이론을 이용하여 면적평균강우량의 추정오차를 평가하였다. 먼저 case1의 경우는 유역면적과 유역내 관측소 개수가 각각 3046.7 km², 20개며 case 2는 3114.9 km², 31개이다. 실제 호우사상을 통해 면적평균강우량의 추정오차를 산정하기 위해 실제 관측된 호우사상을 추출하였다. 일반적으로 면적평균강우량이 클수록 분산 역시 큰 값이 되며 따라서 변동계수의 변화는 상대적으로 작게 된다. 따라서 case 별로 2013년 7월의 강우사상중 평균강우량이 비슷한 두 호우사상을 분석에 적용하였다.

Case 별로 추출된 강우사상은 다음과 같다. 시간적 변동성을 보다 자세히 고려하기 위해 국토교통부의

10분 단위의 강우사상을 선택하였으며, case 1의 경우는 7월 2일 16:00 ~ 7월 9일 21:50이며, case 2는 7월 7일 12:00 ~ 7월 9일 07:40이다. 먼저 이 기간 동안 발생된 각 관측소에서 측정된 총강우량의 평균은 case 1은 89.4 mm, case 2는 90.2 mm로 평균강우량이 비슷한 호우사상이다. 그러나 이 두 경우의 case 별 변동계수(표준편차/평균)는 각각 0.125, 0.436으로 상대적으로 case 1의 각 관측소별 표준편차가 작다. 이는 관측소별 공간적 변동성으로 인한 것으로 이 후 기술될 추정오차분석에서 case 2의 추정오차가 크게 산정될 거라는 것을 짐작할 수 있다.

5.2.2 추정오차 분석

본 절에서는 case 별 산술평균법, 티센가중법 및 추정이론에 근거하여 면적평균강우량의 오차를 산정하였다. 아래 Table 2는 각 추정방법에 사용된 가중치를 비교한 것이다. 먼저 case 1의 티센가중법의 변동계수는 0.35로 case 2보다 작다. 추정이론의 가중치 역시 각 면적평균강우량별 가중치의 변동계수도 작다. 이는 case 1의 관측소의 공간분포가 보다 균등하게 분포되어 있어 각 관측소가 지배하는 가중치가 일정하기 때문이다. 아울러 산술평균법은 강우관측소의 개수를 고려하여 동일한 가중치로 인해 변동계수는 0이 된다.

Table 2. Weighting Factor and the estimation error of each raingauge station depending on the estimation method of the area-average Rainfall

Case 1				Case 2							
Station	Methods of Area-Ave. Rainfall			Station	Methods of Area-Ave. Rainfall			Station	Methods of Area-Ave. Rainfall		
	Arith-matic Mean	Thiessen	Estima-tion Theory		Arith-matic Mean	Thiessen	Estima-tion Theory		Arith-matic Mean	Thiessen	Estima-tion Theory
강경	0.050	0.061	0.083	경안	0.032	0.052	0.047	산성	0.032	0.018	0.020
공주	0.050	0.050	0.037	과천	0.032	0.026	0.032	상계	0.032	0.015	0.021
규암	0.050	0.088	0.072	광주	0.032	0.025	0.037	성남	0.032	0.024	0.028
미륵산	0.050	0.028	0.039	괴안	0.032	0.044	0.017	송정	0.032	0.051	0.027
반포	0.050	0.052	0.048	구로	0.032	0.060	0.042	안양	0.032	0.023	0.020
방동	0.050	0.028	0.054	구미	0.032	0.029	0.035	용인	0.032	0.009	0.030
복룡	0.050	0.082	0.066	군포	0.032	0.013	0.021	우이	0.032	0.051	0.035
양촌	0.050	0.025	0.056	금곡	0.032	0.038	0.031	운학	0.032	0.009	0.244
연산	0.050	0.043	0.053	김포	0.032	0.174	0.013	의정부	0.032	0.049	0.007
유구	0.050	0.065	0.019	낙생	0.032	0.017	0.019	인덕원	0.032	0.010	0.024
은진	0.050	0.051	0.049	남곡	0.032	0.016	0.016	장암	0.032	0.036	0.012
장기	0.050	0.038	0.029	남한산성	0.032	0.027	0.021	진접	0.032	0.032	0.027
장선	0.050	0.068	0.084	내리	0.032	0.015	0.013	퇴계원	0.032	0.023	0.036
정산	0.050	0.041	0.037	내촌2	0.032	0.008	0.011	팔당댐	0.032	0.031	0.024
정안	0.050	0.045	0.042	대장	0.032	0.015	0.022	포곡	0.032	0.018	0.037
청양	0.050	0.055	0.027	모현	0.032	0.043	0.032				
하구연	0.050	0.023	0.057								
한산	0.050	0.060	0.058								
함열	0.050	0.038	0.040								
홍산	0.050	0.058	0.050								
Ave.	0.050	0.050	0.050					Ave.	0.032	0.038	0.026
Variance	0.000	0.017	0.017					Variance	0.000	0.039	0.011
Coeff. of variation	0.000	0.348	0.339					Coeff. of variation	0.000	1.050	0.436
Estimation Error	0.132	0.137	0.122					Estimation Error	0.216	0.334	0.176

Fig. 4는 Table 2에서 제시된 가중치에 근거하여 산술평균법, 티센가중법, 추정이론을 이용하여 면적평균 강우량을 case별로 나타낸 것이다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 case 1은 위 세 방법론으로 추정된 면적평

균강우량의 차이가 큰 차이를 보이지 않으나 case 2의 경우는 상대적으로 산정된 방법론에 따라 산정된 면적평균강우량의 차이가 큼을 도시적으로 확인할 수 있다.

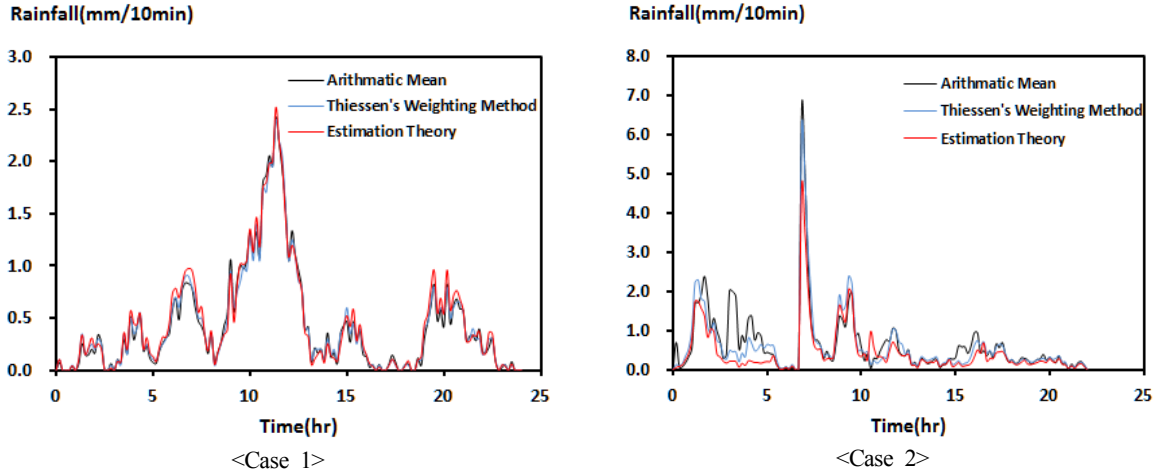


Fig. 4. Comparison of the area-average rainfall between the cases

면적평균강우량의 산정방법론에 따라 추정된 오차 역시 위 결과를 뒷받침해 준다(Fig. 5 참고). Case별 로 추정된 오차를 비교하면 case 1의 추정오차는 case 2에 비해 상대적으로 작다. 즉, case 1은 공간적 변동성이 작음으로 인해 유역의 면적평균강우량 산정에 있어 보다 유리하여 이로 인해 면적평균강우량의 산정에 작은 오차가 포함되게 된다. 일반적으로 산술평균법은 500 km²의 소유역에, 티센가중법은 500~5000 km²의 중유역에 적용이 적절하다고 알려져 있다(Yoon, 2007). 그러나 강우관측소의 공간분포가 우수한 경우는 중규모

이상의 유역에서 산술평균을 제한적으로 사용하여도 무방해 보인다. 아울러 특이할만한 점은 공간분포가 떨어지는 유역의 경우(case 2)는 티센가중법의 오차가 산술평균법보다 크다는 것이다. 이는 어떤 강우관측소가 상대적으로 큰 면적을 대표하는 경우 그 추정오차 쉽게 줄어들지 않게 되기 때문인 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 한강 및 금강유역에 대해 강우관측망의 공간적 특성을 파악하고 강우-유출해석 시 입력자료인 면적평균강우량의 추정오차를 평가하였다. 강우관측소의 공간적 분포 특성은 최근된 지수를 이용하여 정량화하였다. 이를 바탕으로 공간분포가 우수한 중유역과 상대적으로 공간분포가 떨어지는 유역에 대해 면적평균강우량의 추정오차를 산정하였다. 면적평균강우량 산정방법으로는 산술평균법, 티센가중법, 추정이론을 적용하였다. 이들의 결과를 정리하면 다음과 같다.

먼저, 적용 유역에 대해 수문학적 유사성을 고려하여 분할된 중유역을 바탕으로 강우관측소의 공간적 특성을 평가한 결과 국토교통부의 강우관측망은 최근된 지수가 1이상으로 공간적 분포가 상당히 분산되어 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 국토교통부의 강우관측소 설치 목적인, 즉, 강우-유출 해석의 입력자료인 면적평균강우량을 정도 있게 추정하기 위한 목

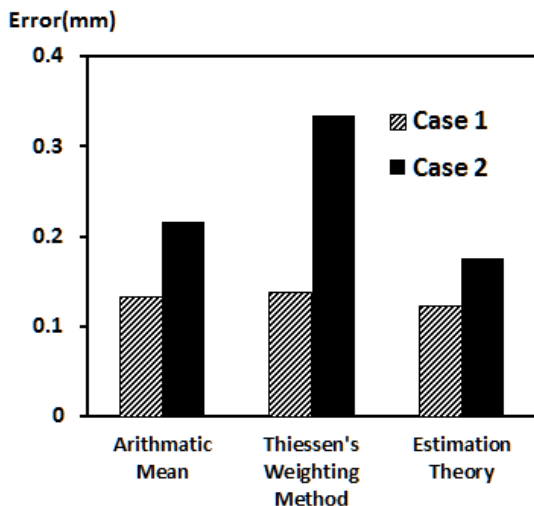


Fig. 5. Comparison of the estimation error between the cases

적에 상당히 배치된다. 아울러 면적평균강우량의 추정오차를 공간분포가 우수한 중유역과 상대적으로 떨어지는 중유역에 대해 산정한 결과 공간분포가 떨어지는 중유역에서 상대적으로 면적평균강우량의 오차가 더욱 크게 산정됨을 확인하였다. 이는 공간적 변동성이 클수록 인해 면적평균강우량의 추정에 큰 오차가 포함되기 때문이다. 면적평균강우량 산정 방법별 가중치를 산정한 결과 공간분포가 우수한 유역에서는 가중치의 편차가 작아 공간적 변동성이 작음을 재확인하였다. 향후 관할 기관별 목적에 의해 강우관측망을 평가한다면 보다 설득력이 있는 관측망 평가가 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

Reference

- Al-Zahrani, M and Husain, T (1998). An algorithm for designing a precipitation network in the south-western region of Saudi Arabia, *J. of Hydrology*, 205, pp. 205-216.
- Bell, TL (1986). Theory of optimal weighting of data to detect climate change, *J. of the Atmospheric Science*, 43, pp. 1694-1710.
- Caselton, WF and Husain, T (1980). Hydrologic networks: Information transmission, *J. of Water Resources Planning and Management Division*, 106, pp. 503-529.
- Chapman, TG (1986). Entropy as a measure of hydrologic data uncertainty and model performance, *J. of Hydrology*, 85, pp. 111-126.
- Choi, MH (2007). *A Study on spatial distribution of cultural assets using point-pattern analysis*, Mater's Thesis, University of Seoul. [Korean Literature]
- Getis, A (1964). Temporal land-use pattern analysis with the use of nearest neighbor and quadrat methods. *Annals of the Association of American Geographers*, 54(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.
- Hegerl, GC and North, GR (1997). Comparison of statistically optimal approaches to detecting anthropogenic climate change, *J. of Climate*, 10(5), pp. 1125-1133.
- Jung, JJ and No, YH (2007). A study on spatial distribution pattern of urbanized area using GIS analysis: Focused on urban growth of Seoul metropolitan, *J. of the Economic Geographical Society of Korea*, 10(3). pp. 319-331. [Korean Literature]
- Kim, JB, Bae, YD, Park, BJ and Kim, JH (2007). Evaluation of raingauge networks in the Soyanggang dam river basin, *Proceedings of the 2007 Conference of the Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, pp. 178-182. [Korean Literature]
- Kim, SJ, Kim DS, Kim C, Bae, DH, Sin, SC, Cho, MH and Cho, JS (2005). *Concepts & techniques in geographic information systems*, Sigmaplus Publisher. [Korean Literature]
- Korea Research Institute for Human Settlements (KRIHS). (2004). *Spatial analysis*, Hanul Publisher. [Korean Literature]
- Krstanovic, P.F. and Singh, V.P. (1992). Evaluation of rainfall networks using entropy: II. Application, *J. of Water Resources Management*, 6, pp. 295-314.
- Lee, JH, Byun, HS, Kim, HS and Jun, HD (2013). Evaluation of a raingauge network considering the spatial distribution characteristics and entropy : A case study of Imha dam basin, *J. of Korea Society of Hazard Mitigation*, 13(2). pp. 217-226. [Korean Literature]
- Lloyd, CD (2006). *Local models for spatial analysis*. CRC Press.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT). (2004). *Hangang Watershed Research III, Hydraulic and Hydrological Research Report*. [Korean Literature]
- Mogheir, Y, de Lima, JLM and Singh, VP (2004). Characterizing the spatial variability of groundwater quality using the entropy theory: I. Synthetic data, *Hydrological processes*, 18, pp. 2165-2179.
- North, GR (1984). Empirical orthogonal functions and

- normal modes, *J. of the Atmospheric Sciences*, 41(5), pp. 879-887.
- North, GR and Stevens, MJ (1998). Detecting climate signals in the surface temperature record, *J. of Climate*, 11(4), pp. 563-577.
- Shen, SSP, North, GR and Kim, KY (1994). Spectral approach to optimal estimation of the global average temperature, *J. of Climate*, 7(12), pp. 1999-2007.
- Stevens, MJ and North, GR (1996). Detection of the climate response to the solar cycle, *J. of the Atmospheric Sciences*, 53(18), pp. 2594-2608.
- Sturges, H (1926). The choice of a class-interval. *J. of the American Statistical Association*, 21, pp. 65-66.
- Thomas, RW (1977). *An introduction to quadrat analysis*, 2nd edition, Geo Abstracts Ltd., University of East Anglia.
- World Meteorological Organization (WMO). (1994). *Guide to hydrological practices*, Fifth edition, WMO-No.168.
- Yoo, CS and Jung, KS(2001). Estimation of area average rainfall amount and its error, *J. of Korea Water Resources Association*, 34(4), pp. 317-326. [Korean Literature]
- Yoo, CS and Jung, KS (2002). Evaluation of raingauge networks using entropy theory: Comparison of mixed and continuous distribution applications, *J. of Korea Society of Civil Engineers*, 22(4-B). pp. 447-457. [Korean Literature]
- Yoo, CS, Kim, IB and Ryu, SR (2003). Evaluation of raingauge density and spatial distribution: A case study for Nam Han river basin, *J. of Korea Water Resources Association*, 36(2), pp. 173-181. [Korean Literature]
- Yoo, CS, Lee, JH, Yang DM and Jung JH (2011). Spatial analysis of rain gauge networks: Application of uniform and Poisson distributions, *J. of Korea Society of Hazard Mitigation*, 11(4). pp. 179-187. [Korean Literature]
- Yoon, YN (2007). *Hydrology*, Chungmoongak Publisher. [Korean Literature]

- 논문접수일 : 2013년 12월 22일
- 심사의뢰일 : 2014년 01월 09일
- 심사완료일 : 2014년 02월 05일