Journal of Wetlands Research, Vol. 16, No. 1, pp. 113-124 (2014)

강우관측소의 설치고도를 고려한 강우관측망 평가방안

이지호 · 전환돈+

서울과학기술대학교 건설시스템디자인

A Methodology for Rain Gauge Network Evaluation Considering the Altitude of Rain Gauge

Ji Ho Lee · Hwan Don Jun+

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

요 약

강우량은 관측소의 설치고도에 따라 관측량의 편차가 심하며, 이로 인해 도시지역과 산지지역의 강우발생 특성이 다르다. 산지효과로 인해 고도가 높아질수록 강우 관측시 불확실성이 커지는 것을 감안하면 산지지역에서의 강우관측소 밀도는 커야한다. 이러한 관측소의 고도특성이 반영된 관측망 평가는 산지효과를 반영하기 위한 것으로 산악지역에서 발생하는 돌발홍수의 효과적인 예측 및 레이더 자료의 보정에 있어 중요한 과정이 된다. 이에 본 연구에서는 강우관측소의 설치고도를 고려한 강우관측망의 평가방법론을 제안하였다. 강우관측소의 고도별 설치밀도 파악을 위해 고정간격의 고도를 이용하는 등고도비별 설치밀도 산정방법과 유역의 면적비를 이용하는 등면적비별 설치밀도 산정방법을 적용하였다. 그 결과 등면적비를 이용하는 경우가 고도별 강우관측망의 평가에 보다 유리함을 확인하였다. 아울러 타유역과의 비교를 위해 등면적별 관측소 설치밀도의 변동계수를 이용하여 고도별 분포를 정량화 하였다. 이는 강우관측소의 설치고도분포의 균등함을 평가하는 정량적 지표가 되며, 제시된 방법론을 5대강 유역에 적용하였다. 그 결과, 설치밀도의 변동계수가 작은 유역에서는 고도별 강우설치밀도가 일정함으로 인해 보다 균등한 분포를, 반면 변동계수가 큰 유역에서는 상대적으로 고도별 설치밀도가 불균등함을 확인하였다.

핵심용어 : 강우관측망, 강우관측소 설치밀도, 변동계수, 산지효과

Abstract

The observed rainfall may be different along with the altitude of rain gauge, resulting in the fact that the characteristics of rainfall events occurred in urban or mountainous areas are different. Due to the mountainous effects, in higher altitude, the uncertainty involved in the rainfall observation gets higher so that the density of rain gauges should be more dense. Basically, a methodology for the rain gauge network evaluation, considering this altitude effect of rain gauges can account for the mountainous effects and becomes an important step for forecasting flash flood and calibrating of the radar rainfall. For this reason, in this study, we suggest a methodology for rain gauge network evaluation with consideration of the rain gauge's altitude. To explore the density of rain gauges at each level of altitude, the Equal-Altitude-Ratio of the density of rain gauges, which is based on the fixed amount of elevation and the Equal-Area-Ratio of the density of rain gauges, which is based on the fixed amount of basin area are designed. After these two methods are applied to a real watershed, it is found that the Equal-Area-Ratio generates better results for evaluation of a rain gauge network with consideration of rain gauge's altitude than the Equal-Altitude-Ratio does. In addition, for comparison between the soundness of rain gauge networks in other watersheds, the Coefficient of Variation (CV) of the rain gauge density by the Equal-Area-Ratio is served as the index for the evenness of the distribution of the rain gauge's altitude. The suggested method is applied to the five large watersheds in Korea and it is found that rain gauges installed in a watershed having less value of the CV shows more evenly distributed than the ones in a watershed having higher value of the CV.

Keywords *: Coefficient of variation, Density of rain gauges, Mountainous effects, Rain gauge network*

+ Corresponding author : hwjun@seoultech.ac.kr

1. 서 론

우리나라는 전 국토의 65%가 산악지형인 지형적 특성으로 인해 강우의 계절적 불균형이 심해 강우의 예측이 어려운 조건을 가지고 있다(Yun et al., 2009). 따라서 강우량은 관측소의 설치고도에 따라 관측량의 편차가 심하며, 이로 인해 도시지역과 산지지역의 강우발생 특성이 다르다. 산지지역처럼 시공간적 변동성이 큰 경우에는 산지지역의 강우관측망의 밀도가 높아야 한다. 해외에서는 산지지역에 대해 고도에 따라 강우관측소의 설치기준을 다르게 하고 있다. 일본의 경우 산지지역과 평지지역의 강우분포가 다를 경우 두 지역의 평균표고가 되는 지점에 추가적으로 관측소를 설치하고 있다. 그러나 이 기준은 이론적인 근거보다는 경험에 의존하는 것으로 판단된다. 국내에서는 접근성의 이유로 산지의 강우관측망의 밀도가 평지에 비해 오히려 작은 실정이며(Yoo et al., 2003), 이에 대한 기준 역시 미비한 편이다. 산지효과로 인해 고도가 높아질수록 강우 관측시 불확실성이 커지는 것을 감안하면 산지지역에서는 강우관측소의 추가설치가 필요하다. 이러한 관측소의 고도특성이 반영된 관측망 평가는 산지효과가 반영된 것으로 산악지역에서 발생하는 돌발홍수의 효과적인 예측 및 레이더 자료의 보정에 있어 중요한 과정이 된다.

반면 산지효과에 관련된 연구는 고도가 고려된 강우관측망 평가보다는 대부분이 지형 고도에 따른 산악효과의 연관성을 분석하는 연구가 대부분이다. 즉, 강우와 지형적 영향을 산지지역에 대해 파악하는 정도이다. 대표적으로 고도의 증가에 따른 강우량 변화를 파악하는 것으로, 강우와 고도의 관계를 선형으로 가정한 연구이다. 이러한 연구는 Donley and Mitchell (1939), Rodda(1951), Stidd and Leopold(1951)등의 문헌에서 찾아볼 수 있다. 이후 강우형태에 대한 지형인자의 영향을 GIS를 적용하여 물리적 관계성을 분석한 연구가 수행되었다(Daly et al, 1994; Naoum and Tasanis, 2004; Peck and Schaake, 1990). 국내에서도 주로 산지효과와 강우량의 관계를 지형학적 인자를 이용하여 설명하는 연구가 대부분이다. 국내는 Kim and Chun(2000)과 Seo and Lee(1996)는 수치해석 기법을 통해 지형성 강우의 특성 파악을, Kim and Lee(1998)은 산악효과에 영향을 미치는 인자들을 분석하였다. Yoo et al.(2004a, 2004b)와 Kim et al. (2004)은 고도와 강우량과의 관계를 회귀분석, EOF(Empirical Orthogonal Function), Varimax method를 이용하여 산지효과를 추정하였으며, Yun et al. (2009)는 다중회귀분석을 통해 산악형 강우 특성을 해석하였다.

반면 산지효과가 반영된 강우관측망 평가에 관련된 연구는 찾아보기 힘들다. 단지 엔트로피이론, 주성분 회귀분석, 상관성 분석 등을 이용하여 강우관측망을 평가하는 정도이다(Al-Zahrani and Husain, 1998; Caselton and Husain, 1980; Chapman, 1986; Krstanovic and Singh, 1992). 그러나 이러한 방법론은 자료의 특성을 분석하여 관측망을 평가하는 것으로 강우관측소의 고도별 분포특성은 고려될 수 없다. 현재까지는 강우관측망 평가를 위한 정량화된 이론은 없으며, 지역별, 설치목적에 의해 경험적으로 관측망을 평가하고 있다. 특히 산지효과를 고려한 강우관측망 평가는 국내외에서 널리 수행되지 않고 있다. 산지효과에 관련된 관측망 평가는 Yoo et al.(2003)에 의해 WMO (World Meterological Organization, 1994)에서 제시한 강우관측망의 밀도가 국내에 적정한지를 검토한 정도이다. 이 역시 산지효과를 개략적으로 판단하는 것으로 고도의 영향은 고려되지 못하고 있다. 아울러 Yoo and Jung(2001)은 산악지역에서의 강우 변동성으로 인해 산술평균법이나 티센가중법은 많은 추정오차를 유발시키며, 강우의 변동성을 고려하기 위해 등우선법을 제안한바 있다. 따라서 산악지역의 강우관측소 밀도는 평지보다 설치밀도가 높아야 한다고 하였다. 이들의 연구를 종합해보면 산지효과는 주로 지형학적 인자에 의해 발생되며 따라서 산지지역에서의 설치밀도는 평지보다 높은 관측망이 구축되어 한다는 것이다. 아울러 강우관측망을 평가함에 있어 가장 중요하게 고려되어 할 사항이 대상유역내 관측소의 밀도가 충분히 확보되어 있는지와 이들의 공간적 분포가 적절 하느냐이다. 여기서 강우관측망의 공간적 분포는 관측소의 평면적 특성과 수직적 특성이 내포된 의미이다. Lee et al.(2013)은 관측소의 평면적 특성을 고려하기 위해 최근린 지수를 이용하여 평면적인 공간특성을 정량화한 바 있다.

본 연구는 이러한 연구의 연장으로 강우관측소의 설치고도가 고려된 관측망 평가방안을 제시하고자 한다. 강우관측소의 고도별 설치밀도 파악을 위해 고정간격의 고도를 이용하는 등고도비별 설치밀도와 유역의 면적비를 이용하는 등면적비별 설치밀도를 비교·평가하였다. 아울러 강우관측망의 고도 특성을 정량화하기 위해 변동계수(CV: Coefficient of Variation)를 이용하였다. 이는 강우관측소의 설치고도분포의 균등함을 평가하는 정량적 지표가 되며, 제시된 방법론을 5대강 유역에 적용하였다. 아울러 제안한 방법론으로

분석된 유역이 어느 정도의 산지효과를 보이는지는 본 연구의 범위를 벗어나므로 이 부분은 배제하였다. 다만, 산지효과를 반영하기 위해서는 평지와 산지지역에서의 고도별 설치밀도가 균등하게 설치되어야 한다는 가정하에 고도별 강우관측망의 균등함을 평가하는 것으로 한정한다.

2. 강우관측소 설치고도를 고려한 관측망평가 방법론

2.1 방법론의 이론적 배경

강우관측소의 설치고도를 고려한 강우관측망 평가는 단순히 설치밀도를 이용하여 판단하기는 어렵다. 즉 설치밀도는 관측소의 평면적 특성을 개략적으로 판단할 수는 있으나, 수직적 성분 즉, 고도의 특성은 반영되지 않는다. 일반적으로 설치밀도를 파악할 때 유역의 고도에 해당되는 면적과 관측소의 설치개수를 이용하여 설치밀도를 산정한다. 이 때 설치밀도를 산정하기 위해 등고도비별 설치밀도를 산정하는 방법(case 1)과 등면적비별로 설치밀도를 산정하는 방법(case2)을 고려할 수 있다.

먼저 등고도비별로 밀도를 산정하는 방법은 고정간격의 고도별 유역면적과 이에 해당되는 관측소의 설치개수가 이용된다. 즉, 일정한 간격의 고도비를 선정하여 이에 해당되는 면적과 설치된 강우관측소의 개수를 파악하여 강우관측소의 밀도를 산정하는 방법이다. 이 경우 유역의 특정 고도의 면적이 매우 작고 해당 고도에 관측소가 설치된 경우는 고도별 설치밀도가 비정상적으로 크게 산정될 수 있다. 따라서 고도별 특성에 따른 관측소의 설치밀도의 파악이 어렵게 된다. 반면 등면적비별로 설치밀도를 파악하는 경우는 고도별 면적이 일정하며, 이로 인해 특정고도의 면적이 작아 비이상적인 밀도가 산정되는 문제점이 배제된다.

등면적비별로 설치밀도가 산정되면 이를 유역별로 비교 및 평가가 필요하다. 본 연구에서는 설치밀도의 특성을 정량화하기 위해 설치밀도의 변동계수를 이용하였다. 변동계수는 자료의 표준편차와 평균의 비를 의미하며 표준편차를 평균으로 나누어 간단히 산정할 수 있다. 만약 변동계수가 작으면 자료의 분포 즉, 고도별로 설치된 관측망이 균일하다고 판단할 수 있으며, 반대로 변동계수가 크면 자료의 편차가 심해 고도별로 설치된 강우관측소의 밀도가 일정하지 않음을 의미한다. 이 과정을 도시적으로 나타내면 아래 Fig. 1과 같다.

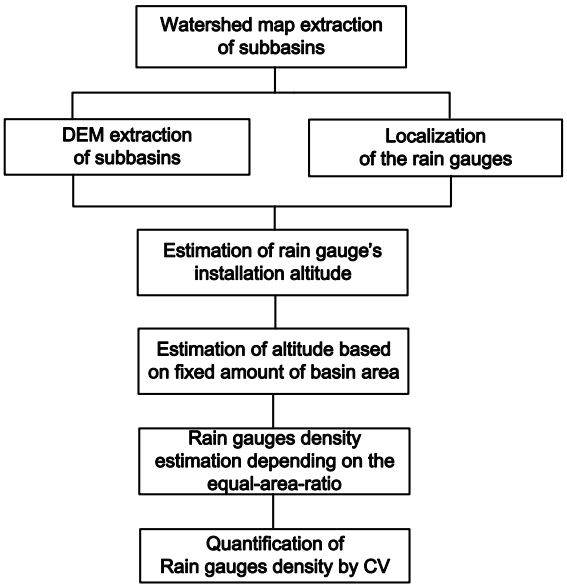


Fig. 1. Schematic diagram of a methodology for rain gauge network evaluation considering the altitude

2.2 방법론의 적용 예

2.1절에 기술된 등고도비별로 설치밀도를 파악방법과 등면적비별로 설치밀도를 파악하는 방법을 비교하면 다음과 같다. 먼저 아래 Table 1과 같은 가상의 유역이 있다고 가정하자. 가상 유역의 총 면적은 5000 km², 강우관측소의 개수는 30개로 설치밀도는 0.006 개수/km²이다. 가상유역을 등고도비와 등면적비를 이용하여 5개 구간으로 구분한 경우 등고도비는 100 m의 간격으로 동일한 고도로 구분된다. 반면, 등면적비로 고도를 구분한 경우는 총 면적이 5000 km²임으로 분할된 각각의 면적은 1000 km²된다(Table 1 참고).

아래 Table 2는 등고도비와 등면적비를 적용하여 가상유역의 설치밀도를 산정한 경우를 비교한 것이다. Table 2의 case 1에서 확인할 수 있듯이 유역의 특정고도(400 m ~ 500 m)의 면적이 작고 여기에 관측소가 설치된 경우는 고도별 설치밀도가 비정상적으로 크게 산정됨을 확인할 수 있다. 해당고도의 유역면적은 50 km²이며 관측소는 1개가 설치되어 있어 설치밀도 0.02 개/km²로 가장 우수하게 보인다. 반면 등면적비를 적용할 경우는 이러한 문제점이 배제되며, 동일한 면적에서 강우관측망의 밀도를 고도별로 산정할 수 있게 된다.

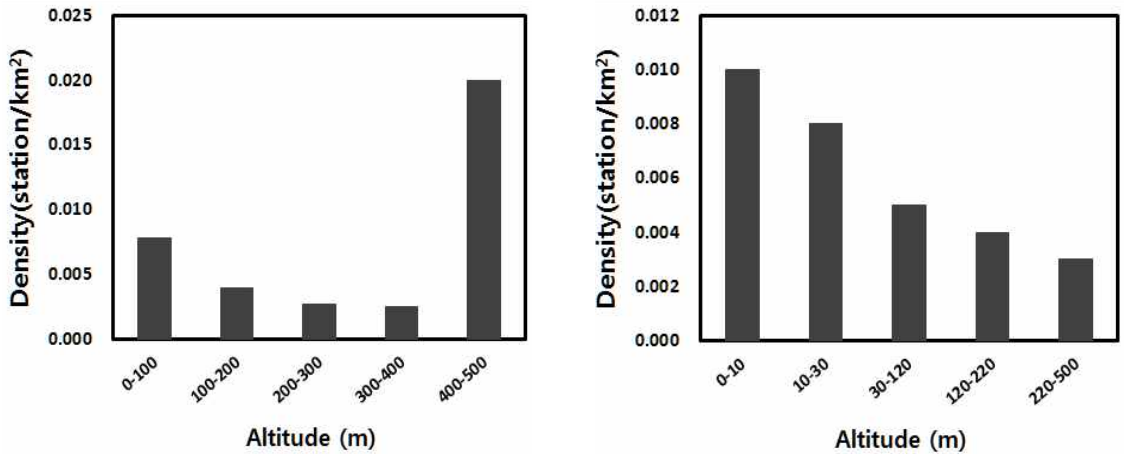
Table 1. Areas by altitude and the number of rain gauges in the sample watershed

Sample Watershed			Case 1 Altitude Criteria (m)		Case 2 Area Criteria (km²)	
Altitude(m)	Area (km²)	No. of rain gauges				
0-10	1000	10	class 1	0-10	1000	class 1
10-20	600	4		10-20	600	class 2
20-30	400	4		20-30	400	
30-70	500	2		30-70	500	class 3
70-100	300	2		70-100	300	
100-120	200	1	class 2	100-120	200	
120-160	400	1		120-160	400	class 4
160-180	200	1		160-180	200	
180-200	200	1		180-200	200	
200-220	200	1	class 3	200-220	200	
220-260	300	1		220-260	300	class 5
260-300	250	0		260-300	250	
300-350	200	1	class 4	300-350	200	
350-400	200	0		350-400	200	
400-450	30	1	class 5	400-450	30	
450-500	20	0		450-500	20	
Sum	5000	30				

Table 2. Rain gauge densities depending on the Equal-Altitude-Ratio and the Equal-Area-Ratio

Case 1				Case 2			
Equal Altitude Ratio	Area (km²)	# of rain gauges	Density (# R.G./ km²)	Equal Area Ratio	Area (km²)	# of rain gauges	Density (# R.G./ km²)
0-100	2800	22	0.0079	0-10	1000	10	0.0100
100-200	1000	4	0.0040	10-30	1000	8	0.0080
200-300	750	2	0.0027	30-120	1000	5	0.0050
300-400	400	1	0.0025	120-220	1000	4	0.0040
400-500	50	1	0.0200	220-500	1000	3	0.0030
	5000	30			5000	30	

이 두 방법을 적용한 결과를 도시적으로 표시하면 Fig. 2와 같다. Fig 2에서 확인할 수 있듯이 400 m ~ 500 m의 고도에서의 설치밀도가 크게 산정되어 타고도와의 비교가 어렵게 된다. 아울러 타 유역과 비교 시 등면적비를 이용하여 밀도를 산정한 경우는 면적비가 동일하여 이를 타고도와의 비교가 가능하다.



(a) Equal-Altitude-Ratio (b) Equal-Area-Ratio

Fig. 2. Comparison of rain gauge density by the Equal-Altitude-Ratio and the Equal-Area-ratio

3. 대상유역고도별 강우관측망 특성파악을 위한 유역구분

강우관측소의 고도특성이 반영된 강우관측소의 평가는 산지효과와 보다 나은 유역평균강우량 산정에 목적이 있다. 이러한 강우-유출해석을 위해서는 하천형상에 따른 유역분수령을 기준으로 유역을 분할하여야 한다. 즉, 유역분할은 상·하류 유역의 유기적인 상관관계가 고려되어야 하며, 이는 하천의 상·하류간의 유출특성을 반영하기 위해서이다. 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 유역분수령을 기준(국토교통부의 중권역 바탕)으로 한강과 낙동강을 5개의 중유역으로, 금강은 3개의 중유역으로 재분류하였다. 재분류된 중유역은 국토교통부의 대권역과 중권역의 중간정도의 유역크기에 해당된다. 아울러 영산강과 섬진강의 경우 유역의 면적이 작아 하나의 단일 유역(국토교통부의 대권역과 동일)으로 가정하였다.

하천의 상·하류 관계를 고려하여 5대강 유역에 대해 중유역으로 분할한 결과는 아래 Fig. 3(up)과 같다. 아래 Fig. 3(down)은 분할된 중유역에 위치해 있는 강우관측소의 설치 현황을 나타낸 것이다. 여기서 국토교통부의 강우관측소는 한국수자원공사의 강우관측소가 포함된 경우이다. 아울러 한강유역의 경우 북한에 설치된 강우관측소의 현황파악이 어려워 남한에 설치된 강우관측소만 분석에 고려하였으며, 관측소 현황은 2012년 기준이다.

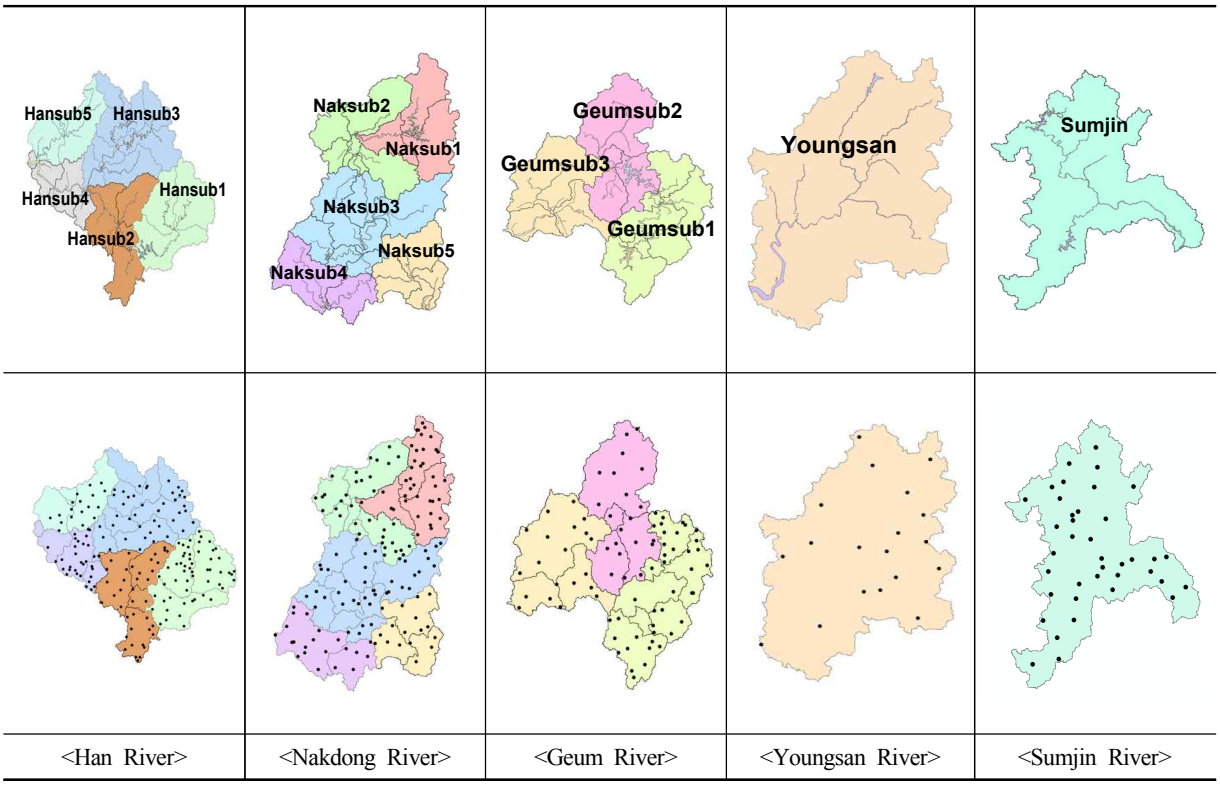


Fig. 3. The installed rain gauges in each subbasin in the five large basin

4. 대상유역의 통계적 특성

4.1 강우관측소의 설치밀도 평가

강우관측망을 평가하기 위해서 우선적으로 고려되어야 할 사항은 대상유역에 충분한 강우관측소가 설치되어 있는지와 강우관측의 목적에 부합되도록 관측망이 배치되어 있는가이다. 대상유역에 충분한 강우관측소가 설치되어 있는지의 기준으로 WMO에서 제시한 관측소의 설치밀도가 주로 이용된다. 먼저 대상유역내 강우관측소의 설치 개수와 설치밀도를 정리하면 Table 3과 같다.

Table 3. Subbasin characteristics and the density of rain gauges

Five large river basins	Subbasins	Area (㎢)	# of Rain Gauges	Density	
				(km²/# R.G.)	(# R.G./km²)
Han River	Hansub1	6705.0	55	121.9	0.0082
	Hansub2	5702.6	40	142.6	0.0070
	Hansub3	7543.2	43	175.4	0.0057
	Hansub4	3114.9	31	100.5	0.0100
	Hansub5	3199.2	18	177.7	0.0056
Nakdong River	Naksub1	4584.8	37	123.9	0.0081
	Naksub2	4972.9	37	134.4	0.0074
	Naksub3	7322.9	47	155.8	0.0064
	Naksub4	3478.5	33	105.4	0.0095
	Naksub5	3342.8	21	159.2	0.0063
Geum River	Geumsub1	3566.2	41	87.0	0.0115
	Geumsub2	3302.1	21	157.2	0.0064
	Geumsun3	3046.7	20	152.3	0.0066
Youngsan River	Youngsan	3469.4	19	182.6	0.0055
Sumjin River	Sumjin	4914.3	39	126.0	0.0079
Sum/Ave.		68265.5	502	136.0	0.0074

중유역에는 총 502개의 강우관측소가 설치되어 있으며, 평균적인 설치밀도는 136.0 km²/관측소/이다. 설치밀도를 각각의 중유역에 대해 비교하면 중유역 Geumsub1이 87.0 km²/관측소로 가장 설치 밀도가 우수하며, 중유역 Youngsan 유역이 182.6 km²/관측소로 상대적으로 설치밀도가 떨어진다. 이를 WMO(1994)의 기준과 비교하면 다음과 같다. WMO에서는 강우관측소의 종류 및 지형에 따라 강우망의 관측밀도를 제시하였으며, 보통강우관측소의 경우가 자기강우관측소의 기준보다 보다 엄격하다. 보통강우관측소의 경우 산지지역이 250 km²/관측소, 평야 지역과 구릉지역이 575 km²/관측소, 도서지역 25 km²/관측소 정도이다. 국내의 경우 대부분의 강우관측소가 자기강우관측소이지만 보다 엄격한 기준을 적용하더라도 국내 관측소의 설치밀도는 도서와 산지지역의 중간정도가 된다. 국내 지형의 대부분이 산지지역이라 가정하더라도 관측망의 밀도는 상당히 조밀하다. WMO의 기준은 국외의 지형특성을 반영하는 것으로 국내의 산지와 국외의 산지를 절대적으로는 비교할 수는 없다. 그러나 지형특성이 다르더라도 WMO에서 제시한 최소한의 관측소 밀도는 확보하고 있다는 것은 명백하다. 아울러 단순히 설치밀도만으로는 유역에서 설치된 강우관측망이 우수하다고 단정할 수는 없다. 특히 WMO가 제시한 관측망의 최소밀도는 고도별 특성을 파악하기 어려우며, 단지 대상유역의 특성을 반영한 기준정도가 될 것이다.

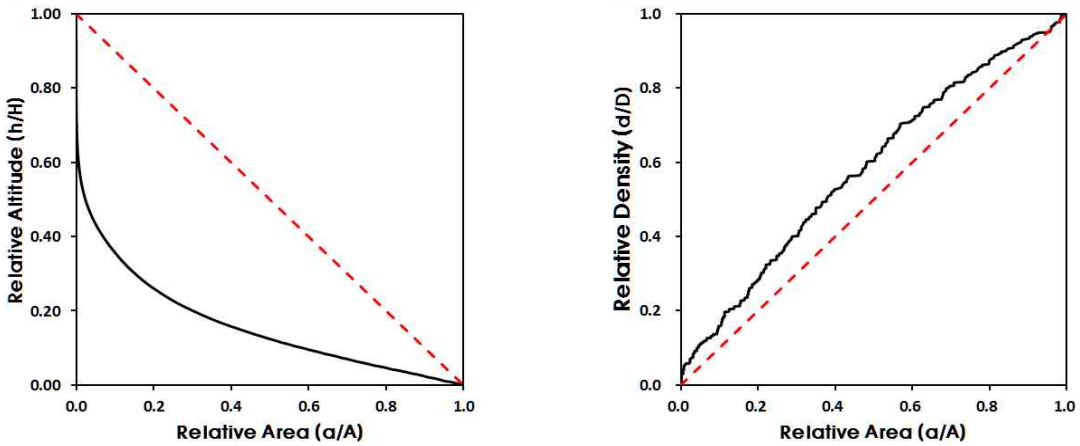
4.2 대상유역의 지형 및 설치고도별 특성

Langbein(1947)은 유역의 특성을 면적-고도곡선(hypsometric curve)을 이용하여 분석한바 있다. 이 무차원 곡선은 각 고도별(h)로 면적(a)을 구한 후 전체 유역면적(A)으로 나눈 상대면적(a/A)을 x축에, 각 고도(h)를 유역 전체의 최대 고저차(H)로 나눈 상대고도(h/H)을 y축에 표시하여 작성한 것이다(Lee, 2006; Yoon, 2007). 면적-고도곡선의 또 다른 의미는 곡선의 형태가 지각의 상승 및 침식활동에 있어서 유역의 상대적인 평형정도를 나타낸다는 것이다(Lee, 2006).

면적-고도곡선을 대상유역에 적용하면 아래 Fig. 4(a)같다. 일반적으로 Fig. 4(a)에서 점선의 상단에 곡선이 형성되면 유년기 유역(young basin)으로 원래 지표면이 침식면에 비해 많이 남아 있는 시기로 하천은 V자형이다. 점선의 하단에 곡선이 형성되면 노년기 유역(old basin)으로 침식이 더욱 진행되어 준평원에 가깝다. 만약 점선 근거에 곡선이 형성되면 장년기 유역(mature basin)으로 원래 지표면을 거의 상실한 단계로 하천은 U자형을 이루게 된다. 대상유역은 Fig 4(a)의 점선 아래쪽 형성되어 노년기 유역이다. 이 유

역은 침식에 저항하여 바위가 노출되어 유역의 침식 및 비침식 부분의 고도 간에 분명한 대조를 초래할 때 나타난다(Lee, 2006). 이와 같은 상대고도-상대면적 곡선을 통해 유역의 형성과정을 설명할 수는 있지만 유역의 유출특성과는 상관시키기는 어렵다. 그러나 일반적으로 노년기 유역이 유출의 도달시간이 길고 첨두발생시간은 느리고 첨두유출량은 작다고 알려져 있다(Yoon, 2007).

다음으로 Fig. 4(b)의 경우는 상대밀도-상대면적을 나타낸 것이다. Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)와 동일하게 각 설치밀도(d)별 면적(a)을 구한 후 전체 유역면적(A)으로 나눈 상대면적(a/A)을 x축에, 면적별 설치밀도(d)를 유역의 설치밀도(D)으로 나눈 상대밀도(d/D)을 y축에 표시한 것이다. 상대면적은 저지대부터 누가된 면적비로 대상유역의 경우 상대면적이 증가함에 따라 상대밀도는 점선의 위쪽에 위치해 있다. 만약 고도에 따라 등분포로 강우관측소가 설치되어 있다면 점선과 같은 곡선의 형태를 보일 것이다. 아울러 강우관측소가 주로 저지대에 설치되면 점선의 위쪽에, 반대로 산지지역에 주로 설치되어 있다면 점선의 아래쪽에 곡선이 형성되게 된다. 국내의 경우 주로 저지대 강우관측소가 설치되어 있어, 점선의 위쪽에 곡선이 위치해 있다. 반면 고도별 분포가 저지대 밀집되어 있는 경우는 더욱 더 점선의 위쪽으로 멀어지게 된다. 따라서 점선과의 편차는 고도별 강우관측소의 불균등을 도시적으로 파악할 수는 근거가 된다. 이 후 기술될 유역별 설치밀도의 결과에서도 저지대에 강우관측소가 설치된 경우는 이와 같은 형태의 곡선이 형성될 거라는 것을 짐작할 수 있다. 아울러 외국의 일부 지역과 같이 고지대에 도시가 형성된 경우에는 강우관측소가 고지대에 설치될 가능성이 커 점선의 아래쪽에 곡선이 위치하게 된다.



(a) Relative area - Relative altitude (b) Relative altitude - Relative density

Fig. 4. Examples of the Hypsometric curves

5. 대상유역에의 적용

강우관측망 평가를 위해 단순히 설치밀도를 이용하는 경우는 유역의 개략적인 특성을 파악할 수 있지만 설치고도의 특성은 고려되기 어렵다. 따라서 이러한 관측소의 고도특성이 반영된 관측망평가는 산지효과가 반영된 것으로 산악지역에서 발생하는 돌발홍수의 효과적인 예측 및 레이더 자료의 보정에 있어 중요한 과정이 된다. 고도를 고려한 강우관측망 평가는 관측소의 설치고도 파악으로부터 시작된다. 강우관측소의 설치고도가 반영된 강우관측소 설치밀도파악은 등고도비를 이용하는 방법(case 1)과 등면적비(case 2)를 이용할 수 있다. 등고도비는 일정한 고도를 기준으로 각각의 고도에 해당하는 설치밀도를 파악하는 방법이며, 등면적비는 유역의 전체면적을 설정한 유역비를 기준으로 설치밀도를 파악하는 방법이다. 본 절에서는 이 두 방법론을 5대강 유역을 대상으로 적용한 후, 변동계수를 이용하여 각각의 중유역에 대한 설치밀도를 정량화 하였다.

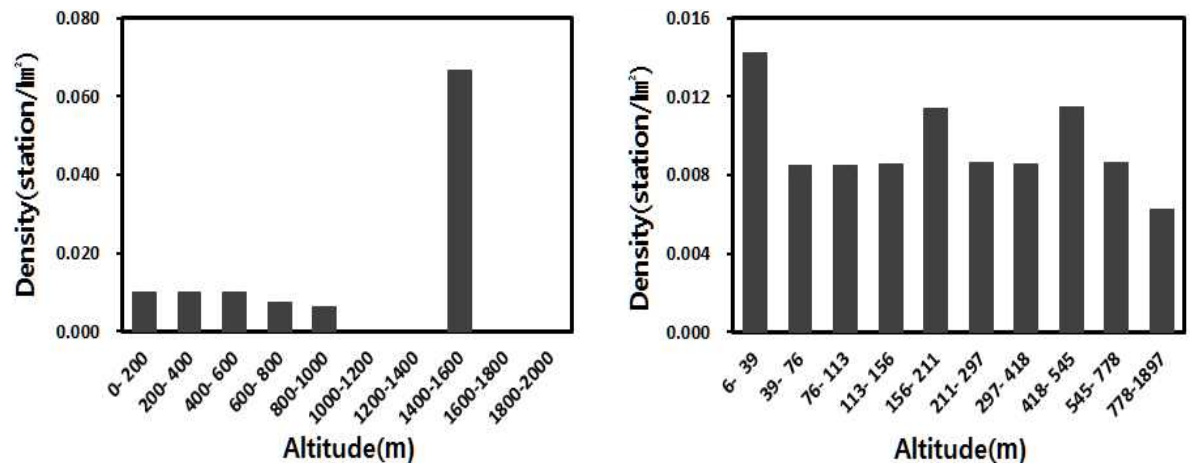
먼저 등고도별로 밀도를 산정하는 경우 특정 고도의 면적이 작고 여기에 관측소가 설치되면 설치밀도가 비정상적으로 크게 산정된다. 대표적인 경우가 중유역 Naksub4이다. 반면 등면적비로 고도를 분류하면 고도분포가 등간격이 아닌 면적비에 따라 고도의 간격이 달라진다. 본 연구에서는 등고도비를 이용한 경우는 200 m의 고도 간격으로, 등면적비를 이용한 경우는 전체면적을 10등분하여 각각의 면적비에 해당되는 고도에 대해 설치밀도를 산정하였다. 이때 등면적

비 경우 저지대로부터 고지대쪽으로 누가하여 전체 면적의 1/10이 됐을 때의 고도의 변위를 의미한다. 따라서 전체적인 전체면적을 10등분 하였으므로 고도별 면적비는 약 10%가 된다.

이 두 방법론을 중유역 Naksub4에 대해 적용한 것이 Table 4와 Fig. 5이다. Table 4에서 확인할 수 있듯이 등고도비는 200 m 간격으로 일정하며, 등면적비는 유역면적의 10%에 해당되는 고도를 산정하였음으로 각각의 면적비별로 고도가 달리 산정됨을 확인할 수 있다. 이때 면적비는 저지대에서 고지대 방향으로 산정하였으며, 고도가 높아질수록 면적비에 의해 계산된 고도의 변위는 커지게 된다. 등고도비를 이용한 경우 1400 m~1600 m의 고도에서 설치밀도가 0.067 관측소/km²(14.99 km²/관측소)로 우수해 보인다. 이는 상대적으로 해당고도에 대한 유역면적이 매우 작고, 해당유역에 관측소가 설치되어 있어 설치밀도가 크게 산정된 것이다. 아울러 타유역과 비교시 고도별로 유역면적이 달라 이를 서로 정량적으로 비교하기 힘들게 된다. 반면 등면적비를 이용한 경우는 면적비가 동일하여 비상식적인 설치밀도가 산정되지 않는다. 이와 같은 결과는 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 등면적비를 이용하여 관측소의 설치밀도를 파악하였다.

Table 4. Examples of rain gauge density depending on the Equal-Altitude-Ratio and the Equal-Area-Ratio (Naksub4)

Case 1						Case 2					
Altitude (m)	Altitude Diff.(m)	Area (km²)	Area Ratio (%)	# of Rain gauges	Density	Altitude (m)	Altitude Diff.(m)	Area (km²)	Area Ratio (%)	# of Rain gauges	Density
0-200	200	1703.74	49.0	17	0.0100	6- 39	33	352.15	10.1	5	0.0174
200-400		706.61	20.3	7	0.0099	39-76	37	353.93	10.2	3	0.0108
400-600		503.8	14.5	5	0.0099	76-113	37	353.52	10.2	3	0.0065
600-800		268.32	7.7	2	0.0075	113-156	43	350.53	10.1	3	0.0109
800-1000		159.04	4.6	1	0.0063	156-211	55	351.62	10.1	4	0.0043
1000-1200		81.5	2.3	0	0.0000	211-297	86	347.89	10.0	3	0.0043
1200-1400		36	1.0	0	0.0000	297-418	121	349.04	10.0	3	0.0087
1400-1600		14.99	0.4	1	0.0667	418-545	127	349.15	10.0	4	0.0044
1600-1800		4.29	0.1	0	0.0000	545-778	233	348.88	10.0	3	0.0109
1800-2000		0.2	0.0	0	0.0000	778-1897	1119	321.79	9.3	2	0.0023
		3478.49	100.0	33	0.0094	계		3478.5	100.0	37	0.0094



(a) Equal-Altitude-Ratio (b) Equal-Area-Ratio

Fig 5. Comparison of the rain gauge density by the Equal-Altitude-Ratio and the Equal-Area-Ratio (Naksub4)

위 절차와 동일하게 각 중유역별에 대해 관측소 설치밀도를 산정 후 이들의 변동계수를 산정하였다. 이를 정리한 것이 Table 5이며, 변동계수를 각각의 중유역별로 도시적으로 비교한 것이 Fig. 6이다. 그 결과 중유역 Naksub4가 설치밀도의 변동계수가 가장 작아 고도별 분포가 가장 우수하다고 판단할 수 있으며, 반면 중유역 Sumjin은 상대적으로 고도별 분포가 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

Table 5. The values of the CV for each subbasin using the Equal-Area-Ratio

Subbasins	CV
Hansub1	0.709
Hansub2	0.650
Hansub3	0.749
Hansub4	0.749
Hansub5	0.777
Naksub1	0.570
Naksub2	0.668
Naksub3	0.594
Naksub4	0.237
Naksub5	1.005
Geumsub1	0.681
Geumsub2	1.060
Geumsub3	0.969
Youngsan	0.961
Sumjin	1.095
Max. CV	1.095
Min. CV	0.237
Ave. CV	0.765

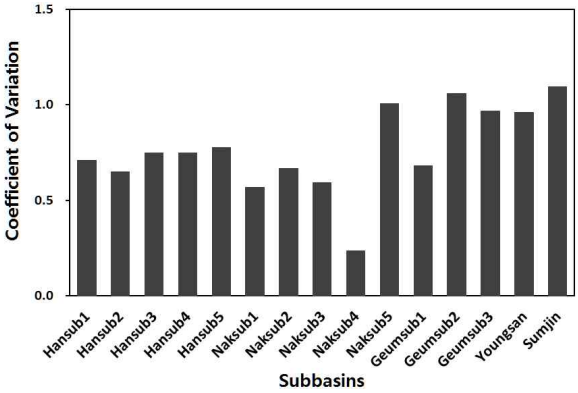
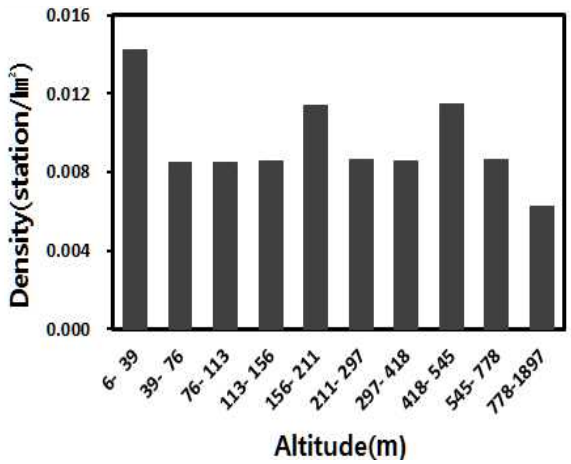
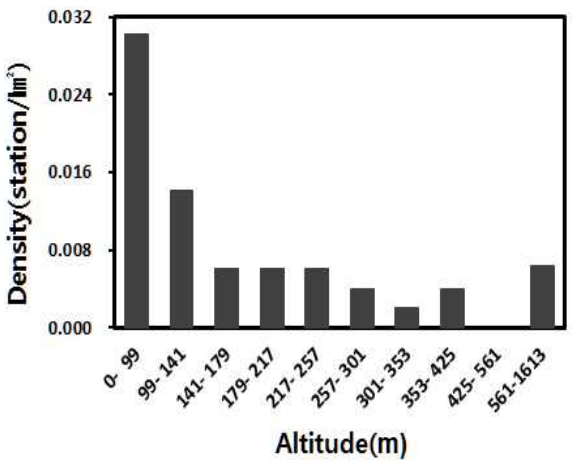


Fig. 6. Comparison of the rain gauge densities between the subbasins using the CV

Fig. 7은 고도별 분포가 가장 우수한 경우(중유역 Naksub4)와 상대적으로 고도별 분포가 떨어지는 경우(중유역 Sumjin)를 비교한 것이다. Fig. 7(a)은 고도별 분포가 우수한 중유역 Naksub4로 Fig. 6(b)의 경우보다 고도별 설치밀도가 상대적으로 균등함을 도시적으로 확인할 수 있다. 중유역 Sumjin 의 경우 타 지역에 비해 인구밀도가 낮아 이의 대한 중요성이 간과되었기 때문인 것으로 판단된다. 반면 중유역 Naksub4는 남강댐유역으로 집중호우로 인한 돌발홍수가 자주 발생되는 지역이다. 남강댐 유역내 지리산이 위치해 있어 돌발홍수발생 시 인명피해가 자주 발생되는 지역이기도 하다. 대표적인 사례가 1998년 7월의 집중호우로 인해 324명의 실종사망과 1조 500억의 재산피해가 발생한 경우이다(NEMA, 1999). 이로 인해 산지지역 및 댐 상류부의 홍수예경보를 위해 보다 많은 강우관측소가 설치되었기 때문인 것으로 판단된다.



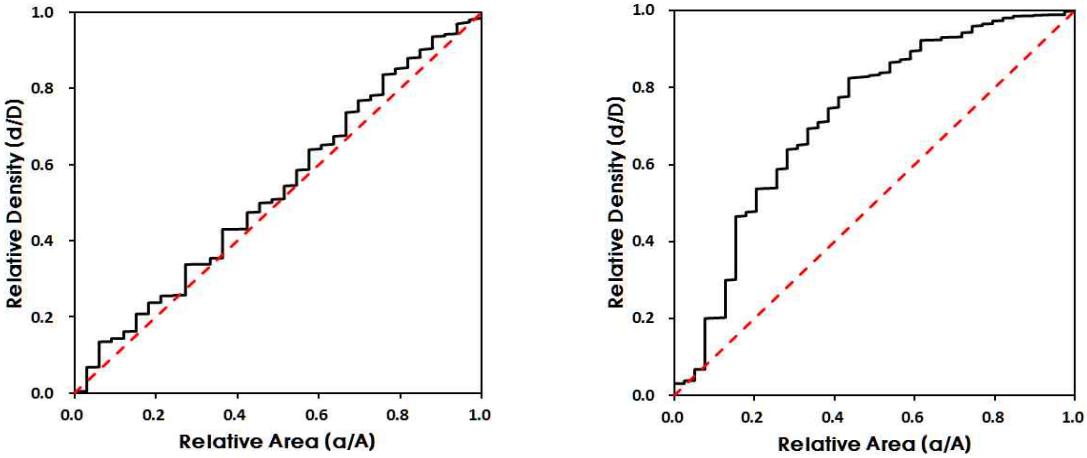
(a) Good distribution : Naksub4



(b) Poor distribution : Sumjin

Fig. 7. Comparison of rain gauge density by the altitude

상대고도-상대면적 곡선도 위 결과를 뒷받침해 준다. 국내의 경우 주로 저지대에 도시가 형성되어 있다. 이로 인한 저지대의 중요성 때문에 강우관측소는 주로 저지대에 설치되어 있다. 따라서 상대고도-상대면적 곡선은 점선의 위쪽에 형성되게 된다. Fig. 8의 경우도 저지대의 높은 설치밀도로 인해 점선의 위쪽에 위치에 있다. 그러나 Fig. 8(a)의 경우 고도별 강우관측소의 밀도가 균등하여 점선으로부터 보다 가까운 곳에 위치해 있다. 이는 변동계수를 이용하여 평가한 결과와 동일한 것으로 강우관측소의 설치밀도가 우수함을 재확인 할 수 있다. 반면 Fig. 8(b)는 고도별 강우관측소의 설치밀도가 상대적으로 불균등한 경우로 저지대의 관측소의 밀도가 높은 경우이다. 따라서 상대고도-상대면적 곡선의 점선에서 더욱 더 멀어지게 된다. 이 유역은 강우관측소의 설치 목적 및 유역의 특성을 고려하여 관측망의 적정성을 재고할 필요가 있을 거라 판단된다.



(a) Good distribution : Naksub4 (b) Poor distribution : Sumjin

Fig. 8. Examples of rain gauge densities based on the hypsometric curves

6. 결 론

관측소의 고도특성이 반영된 관측망평가는 산지효과가 반영된 것으로 산악지역에서의 효과적인 돌발홍수 예측 및 레이더 자료의 보정에 있어 중요한 과정이 된다. 강우관측망 평가를 위해 단순히 설치밀도를 이용하는 경우는 유역의 개략적인 특성을 파악할 수 있지만 설치고도의 특성은 고려되기 어렵다. 이에 본 연구에서는 강우관측소의 설치고도를 고려한 강우관측망 평가방법론을 제시하였다. 강우관측소의 고도별 설치밀도 파악을 위해 고정간격의 고도를 이용하는 등고도비별 설치밀도와 유역의 면적비를 이용하는 등면적비별 설치밀도를 비교・평가하였다. 아울러 타유역과의 비교를 위해 고도별 설치밀도의 변동계수를 이용하여 정량화 하였다. 이는 강우관측소의 설치고도분포의 균등함을 평가하는 정량적 지표가 되며, 제시된 방법론을 5대강 유역에 적용하였다.

그 결과 등면적비를 이용하는 경우가 보다 고도별 강우관측망의 평가에 보다 유리함을 확인하였다. 5대강 유역에 대해 적용한 결과, 중유역 Naksub4는 설치밀도의 변동계수가 가장 작았으며, 중유역 Sumjin은 상대적으로 설치밀도의 변동계수가 크게 산정되었다. 일반적으로 변동계수가 작으면 자료의 분포가 균일(고도별로 설치된 관측소가 일정)하다고 판단하며, 반대로 변동계수가 크면 자료의 편차가 심해 고도별로 설치된 강우관측소의 밀도가 일정하지 않다고 판단할 수 있다. 이 두 유역에 대해 고도별 설치밀도를 확인할 결과, 중유역 Naksub4은 변동계수가 작음으로 인해 고도별 설치밀도가 일정함을, 반면 중유역 Sumjin은 변동계수가 커 고도별로 설치된 강우관측소의 밀도가 불균등함을 도시적으로도 확인하였다. 아울러 대상유역에 대한 상대면적-상대밀도 관계곡선으로도 이와 동일한 결과를 보였다.

본 연구는 설치고도를 고려한 강우관측망 평가방안을 제안한 논문으로 이는 최종적으로 산지효과를 반영한 강우관측망 평가에 목적이 있다. 그러나 강우관측소는 다양한 목적에 의해 설치 운영되고 있으며, 따라서 유역의 특성 및 관측소 설치목적에 따라 평가되어야 한다. 아울러 제시된 방법론으로 평가된 관측망이 어느 정도의 산지효과를 보이는지는 본 연구의

범위를 넘는 부분이라 이는 추후 연구과제로 남긴다. 향후 관할 기관별 설치목적에 부합되도록 강우관측망이 평가된다면 보다 현실적인 강우관측망 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.

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.

Daly, C, Neilson, RP and Phillips, DL (1994). A statistical topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain, *J. of applied meteorology*, 33(3), pp. 140-158.

Donley, DE and Mitchell, RL (1939). The relation of rainfall to elevation in the southern appalachian region, *Transactions of the American Geophysical Union*, 20, pp. 711-721.

Kim, DK and Chun, HY (2000). A numerical study of the orographic effects associated with a heavy rainfall event, *J. of the Korean Meteorological Society*, 36(4), pp. 441-454. [Korean Literature]

Kim, KW, Yoo CS and Jun, KS (2004). Orographic effect estimation of rainfall in han river basin - 3. Regionalization, *J. of Korea Society of Civil Engineers*, 24(5B), pp. 461-468. [Korean Literature]

Kim, MJ and Lee, DK (1998). The study on local circulation and orographic precipitation over the southwestern Korean peninsula, *J. of the Korean Meteorological Society*, 34(1), pp. 128-146. [Korean Literature]

Krstanovic, PF and Singh, VP (1992). Evaluation of rainfall networks using entropy: Ⅱ. Application, *J. of Water Resources Management*, 6, pp. 295-314.

Langbein, WB (1947). Topographic characteristics of drainage basins, *U.S. Geological Survey*, Water-Supply Paper 968-C, pp. 125-157.

Lee, JH, Byun, HS, Kim, HS and Jun, HD (2013). Evaluation of a rain gauge 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]

Lee, JS (2006). *Hydrology*, Gumi Publisher. [Korean Literature]

Naoum, S and Tsanis, IK (2004). A multiple linear regression GIS module using spatial variables to model orographic rainfall, *J. of hydroinformatics*, 6(1), pp. 39-56.

National Emergency Management Agency (NEMA). (1999). *Disaster annual report*. [Korean Literature]

Peck, EL and Schaake, JC (1990). Network design for water supply forecasting in the west, *Water Resources Bulletin*, 26, pp. 87-99.

Rodda, J.C. (1951) An objective method for the assessment of areal rainfall amounts, *Weather*, Vol. 17, pp. 54-59.

Seo, KH and Lee DK (1996). Analysis and simulation of orographic rain in the middle part of the Korean peninsula, *J. of the Korean Meteorological Society*, 32(4), pp. 512-533. [Korean Literature]

Stidd, CK and Leopold, LB (1951). The geographic distribution of average monthly rainfall, Hawaii, *American Meteorological Society,* 1(3): pp. 24-33.

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, Jun, KS and Kim, KW (2004a). Estimation of orographic effect on precipitation in the Han river basin - Ⅰ. Regression analysis-, *J. of Korea Society of Civil Engineers*, 24(1B), pp. 33-39. [Korean

Literature]

Yoo, CS, Jun, KS and Kim, KW (2004b). Estimation of orographic effect on precipitation in the Han river basin -Ⅱ. EOF analysis-, *J. of Korea Society of Civil Engineers*, 24(1B), pp. 41-46. [Korean Literature]

Yoo, CS, Kim, IB and Ryu, SR (2003). Evaluation of rain gauge 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]

Yoon, YN (2007). *Hydrology*, Chungmoongak Publisher. [Korean Literature]

Yun, HS, Um, MJ, Cho, WC and Heo, JH (2009). Orographic precipitation analysis with regional frequency analysis and multiple linear regression, *J. of Korea Water Resources Association*, 42(6). pp. 465-480. [Korean Literature]

○ 논문접수일 : 2014년 01월 01일
○ 심사의뢰일 : 2014년 01월 09일
○ 심사완료일 : 2014년 02월 05일