공간적 분포특성과 엔트로피를 고려한 강우관측소 평가: 임하댐 유역을 중심으로

Evaluation of a Raingauge Network Considering the Spatial Distribution Characteristics and Entropy : A Case Study of Imha Dam Basin

이지호* · 변효섭** · 김형수*** · 전환돈****

Lee, Ji Ho · Byun, Hyosup · Kim, Hung Soo · Jun, Hwan Don

Abstract

Currently, several government agencies operate the rainfall station for monitoring of severe weather, flood forecasting and warning, and multi-purpose dam operation. The Entropy theory is usually adopted to evaluate rainfall station network (RSN) installed for special purpose. The Entropy theory, however, evaluates the RSN only by the amount of the total hydrological information, which means it considers only the characteristics of the data collected by an individual rainfall station. However, to obtain the area average rainfall properly which is one of the critical reasons to install rainfall stations, the spatial distribution of rainfall stations is also very important. In general, uniformly distributed rainfall stations produce better the area average rainfall than unevenly distributed rainfall stations do. In this study, the total hydrological information and the soundness of the spatial distribution are two different physical parameters, we adopt the Euclidean distance method to consider them simultaneously. An equation obtained by the Euclidean distance method is used as the objective function in the MOGA (Multi Objective Genetic Algorithm) to determine the optimal combination of the rainfall stations for satisfying the both criteria: the maximum total amount of the hydrological information and the soundness of the spatial distribution. The suggested method is applied to the Imha Dam basin in the Nakdong river basin and the optimal RSN obtained by the suggested method shows more spatially dispersed than an RSN obtain by the entropy theory only. This result implies that the optimal RSN by the suggested method can consider both important aspects which the RSN should have.

Key words : Rain station network, Entropy, Spatial distribution, MOGA

요 지

현재 여러 관할기관에서는 악기상의 감시, 홍수예경보, 다목적댐 관리 및 운영을 목적으로 강우관측소를 설치 운영 중에 있다. 이와 같이 특정한 목적에 의해 설치된 강우관측소는 주로 엔트로피이론을 적용하여 평가되고 있다. 그러나 엔트로피 이론을 통한 강우관측망 평가는 정보전달량의 크기만을 이용하여 강우관측망을 평가하는 방법으로, 단순히 관측자료의 특성만이 고려되는 한계가 있다. 아울러 관측소 설치의 다양한 목적 중 면적평균강우량의 정도 있는 추정을 고려하면 강우관측소는 공간적으로 균등하게 설치된 경우가 가장 이상적이다. 따라서 본 연구에서는 엔트로피의 최대 정보전달량 및 강우관측소의 공간적 분포특성을 동시에 고려하기 위해 유클리드 거리를 이용하여 2개의 목적함수를 통합하였으며, 이를 MOGA(Multi Objective Genetic Algorithm)를 이용하여 최적관측망을 선정하였다. 그 결과 MOGA를 이용하여 관측망을 평가한 경우, 엔트로피 이론만을 적용했을 때보다 선정된 최적관측소가 보다 공간적으로 분산됨을 확인하였다. 이는 강우관측소의 공간적 분포와 자료의 특성이 동시에 반영된 결과이다.

핵심용어 : 강우관측망, 엔트로피, 공간분포, MOGA

*정회원. 서울과학기술대학교 건설기술연구소(E-mail: kjihito@korea.ac.kr)

Member. Research Institute of Construction Technology, Seoul National University of Science and Technology

**서울과학기술대학교 공학대학 건설공학부 학부연구생

Undergraduate Student. Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

***인하대학교 공학대학 사회기반시스템 공학부 교수

Professor. Center for Hydrology and Ecology, Inha University

****교신저자. 서울과학기술대학교 공학대학 건설공학부 조교수(Tel: +82-000-0000, Fax: +82-000-0000, E-mail: hwjun@seoultech.ac.kr)

Corresponding Author. Professor. Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

1. 서론

강우계로부터 수집된 강우량 자료는 강우-유출 해석모형, 다양한 재해 예·경보시스템 등의 입력자료로 이용된다(유철상 등, 2003; 유철상과 이지호, 2011). 현재 여러 관할기관에서 악기상의 감시, 홍수예경보, 다목적댐의 관리 및 운영을 목적으로 강우관측소를 설치 운영 중에 있다. 아울러 강우관측망은 가용한 수자원의 정확한 양을 파악하기 위해, 또한 강우-유출의 해석 시 면적평균강우량의 적절한 추정을 위해 중요하다. 따라서 강우관측망의 평가는 유역의 전반에 걸쳐 내린 면적평균강우량을 산정하기 전에 반드시 고려되어야 할 부분이다. 적절한 수준의 관측망을 확보하지 못할 경우 면적평균강우량의 오차는 이를 입력으로 하는 유출 과정에서 오차를 크게 상회하게 된다. 궁극적으로 강우를 입력으로 하는 해석의 정도를 크게 저하시키게 된다(건설교통부, 2004).

이와 같이 특정한 목적에 의해 설치된 강우관측소의 평가는 주로 엔트로피이론, 주성분 회귀 분석, 상관성 분석 등이 있으나, 주로 엔트로피 이론을 적용하여 기존관측망을 평가하고 있다(Caseltan and Husain, 1980; Chapman, 1986; Krstanovic and Singh, 1992; Al-Zahrani and Husain, 1998). 이중 엔트로피의 개념은 많은 분야에 응용되고 있으며 특히 수문분야에서는 관측망을 평가하는데 주로 이용되어 왔다. 예를 들어, Caseltan and Husain(1980)은 수문관측망 설계에 정보전달의 개념을 적용한 예가 있고, Chapman(1986)은 엔트로피를 이용하여 수문학적 자료들이 가지고 있는 불확실성을 추정하고 모형에 적용시켜 불확실성의 감소정도를 평가한 바 있다. Krstanovic and Singh(1992)는 엔트로피를 이용하여 강우의 공간적인 변동성을 평가하고 루이지애나지역 관측망의 적합성을 검토하였으며, Yang and Burn(1994)은 엔트로피 방법을 이용하여 최적관측망 설계를 시도하였다. Al-Zahrani and Husain(1998)은 조밀한 관측망에서의 최적관측소 개수와 밀도가 낮은 관측망에서의 관측망 확장에 엔트로피 개념을 이용하였다.

국내에서의 연구를 살펴보면 유철상과 정광식(2002)이 혼합분포를 엔트로피 이론에 적용하여 강우관측망을 평가한 바 있으며, 유철상 등(2003)은 강우의 공간상관구조를 이용하여 남한강 유역의 강우관측망을 평가하였다. 아울러 김재복 등(2007)은 소양강 댐 유역의 강우관측망을 대상으로 공간상관 분석 및 엔트로피 방법을 적용하여 관측망 밀도, 공간분포의 적정성을 검토하였다.

이러한 엔트로피의 이론을 통한 강우관측망 평가는 정보전달량의 크기만을 이용하여 강우관측망을 평가하는 방법으로, 단순히 관측자료의 특성만이 고려되는 한계가 있다. 아울러 연구들은 단지 기존강우관측망의 최적 조합선정에 중점을 두고 있으며, 강우관측망의 공간적 분포는 고려하지 않았다. 경우에 따라 공간적으로 중요한 관측소가 단지 정보전달량이 작다는 이유로 최적 관측망에서 배제 될 가능성이 있다. 관측소 설치의 다양한 목적 중 하나인 면적평균강우량의 정도 있는 추정을 고려하면 강우관측소는 공간적으로 균등하게 설

치된 경우가 가장 이상적라 할 수 있다(유철상과 이지호, 2011). 아울러 강우관측망의 공간적 분포는 유역의 면적평균 강우량에 산정 시 고려되어야 할 중요한 요소이다. 이를 고려하기 위해 일반적으로 티센법이나 등우선법을 이용하여 유역의 면적평균강우량을 산정하고 있다. 만약 강우관측소의 공간적 분포가 바둑판 모양과 같이 균등하게 설치되어 있다면 단순히 산술평균으로 유역을 대표할 수 있는 면적평균강우량을 산정할 수 있다. 이는 유역내에 충분한 강우관측소가 설치되어 있는 경우에 해당된다.

본 연구에서는 낙동강 임하댐 유역을 대상으로 엔트로피 이론과 관측소의 공간적 분포특성을 동시에 고려하여 강우관측망을 평가하였다. 강우관측소의 공간적 분포특성은 최근린지수(nearest neighbor index)를 이용하여 평가하였다. 아울러 엔트로피의 최대 정보전달량과 강우관측소의 공간적 특성을 동시에 고려하기 위해 유클리디언 거리를 이용하여 2개의 목적함수를 통합하였으며, 이를 MOGA를 이용하여 최적관측망을 결정하였다.

2. 최적관측망 평가를 위한 이론적 배경

2.1 엔트로피의 이론을 이용한 관측망 평가

엔트로피와 관련된 정보량은 한계 엔트로피, 조건부 엔트로피, 결합 엔트로피, 상호 엔트로피 등이 있다. 두 개의 무작위 변량을 X , Y 라 한다면 한계 엔트로피 $H(x)$ (또는 $H(y)$)는 X , Y 가 가지는 잠재 엔트로피(potential entropy)로 정의된다. Shannon and Weaver(1994)는 이산무작위변량(discrete random variable) X 에 대한 한계 엔트로피를 다음과 같이 정의하였다.

$$H(x) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \ln(x_i) \quad (1)$$

여기서 $P(x_n)$ 은 x_n 의 발생확률이며, 한계엔트로피 $H(x)$ 는 X 가 가지고 있는 정보량 또는 불확실성을 의미한다. 만일 무작위 변량 x_n 과 관계있는 $y_m(m=1,2,...,N)$ 이 존재할 경우, y_m 으로부터 x_n 을 추정한다면 x_n 이 가지고 있는 불확실성을 감소시킬 수 있다. 이러한 원리에 의해 주어진 변량 Y 에 의해 무작위 변량 X 에 남아 있는 불확실성은 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$x(x|y) = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(x_i, y_j) \ln p(x_i|y_j) \quad (2)$$

여기서 i, j 는 각각 무작위 변량 X, Y 의 계급구간 수, $p(x_m, y_m)$ 은 $X=(x_n)$ 와 $Y=(y_m)$ 의 결합확률을, $P(x_n|y_m)$ 은 주어진 Y 에 대한 X 의 조건확률을 의미한다. 따라서 $H(X|Y)$ 는 주어진 Y 에 대한 X 의 조건엔트로피이며, 이는 X 와 Y 간의 정보전달 사이에 손실되는 정보량을 나타낸다(Yang and Burn, 1994). 즉, 조건부 엔트로피 $H(x|y)$ 는 무작위 변량 y 에서 포함되지 않는 x 의 정보량을 의미한다. 주어진 Y 에 대해서 X 가 가지고 있는 불확실성의 감소정도 또는 X 와 Y 사이의 정보전달량은 다음과 같다.

$$T(x,y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(x_i, y_j) \ln \left[\frac{p(x_i, y_j)}{p(x_i)p(y_j)} \right] \quad (3)$$

$$T(x,y) = H(x) - H(x|y) \quad (4)$$

여기서 i, j 는 각각 무작위 변량 X, Y 의 계급구간 수, $p(x_i)$ 및 $p(y_j)$ 는 한계확률을 나타낸다(Mogheir *et al.*, 2004a, b). 만약, 연속무작위변량(continuous random variable) X 가 확률밀도함수 $f(x)$ 를 따른다고 가정하면, 동일한 간격 Δx 에 대한 Y 에 대한 X 의 조건엔트로피는 다음과 같이 계산된다.

$$H(X; \Delta x) \cong - \int_0^\infty \int_0^\infty f(x,y) \ln f(x|y) dx dy - \ln \Delta x \quad (5)$$

혼합 대수정규분포를 따르는 X 와 Y 의 한계엔트로피와 조건 엔트로피는 다음과 같이 정의할 수 있으며(Chapman, 1986), 일반적으로 혼합분포를 이용하는 강우관측망 평가는 연속분포를 이용하는 경우 비해 강우의 시공간적 간헐성을 고려할 수 있다는 장점이 있다(Yoo *et al.*, 2008).

$$H(X; \Delta x/x) = -(1-k_x) \ln(1-k_x) - k_x \ln k_x + k_x 0.5 \ln(2\pi e \sigma_x^2) - k_x \ln(\Delta x/x) \quad (6)$$

$$H(X|Y; \Delta x/x) = -(1-k_x-k_{xy}+k_{xy}) \ln(1-k_x-k_{xy}+k_{xy}) - (k_x-k_{xy}) \ln(k_x-k_{xy}) + (1-k_y) \ln(1-k_y) - (k_y-k_{xy}) \ln(k_y-k_{xy}) + k_y \ln k_y - k_{xy} \ln k_{xy} + k_{xy} 0.5 \ln[(2\pi e \sigma_y^2)(1-\rho_{zw}^2)] - k_{xy} \ln(\Delta x/x) \quad (7)$$

여기서, k_x 는 X 가 0이 아닌 확률, 즉 무강우 확률, k_y 는 Y 가 0이 아닌 확률을 의미하며, k_{xy} 는 X 와 Y 가 동시에 0이 아닌 확률을 나타낸다. 유역 내 존재하는 관측망의 최적화는 관측 소간의 중복되는 정보가 최소가 되도록 관측소의 수를 줄이고, 아울러 유지되는 관측소들로부터 유역의 정보를 최대한 얻을 수 있어야 함을 의미한다. 즉, 최소의 관측소로부터 유역의 정보를 최대한 얻을 수 있어야 하며, 따라서 최적화의 목적함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Al-Zahrani and Husain, 1998).

$$\text{Max} T(X_1, X_2, \dots, X_m; X_k, X_p, \dots, X_p) \quad (8)$$

여기서, m 은 현재 유역내에 있는 관측소의 총 개수이며, p 는 유지되어야 할 관측소 개수를 의미한다. 따라서 $T(X_1, X_2, \dots, X_m; X_k, X_p, \dots, X_p)$ 는 p 개의 관측소로부터 얻을 수 있는 유역의 정보를 의미한다. 즉, 선택된 관측소의 수가 증가할수록 얻을 수 있는 정보량은 증가할 것이며, 어느 시점 이후에는 관측소로부터 얻을 수 있는 정보량이 감소하게 된다. 따라서 최적의 관측망이란 유역에 대한 정보량을 최대한 얻을 수 있는 관측소 조합을 의미한다.

2.2 최근린 방법

일반적으로 자연현상의 경우는 대부분 포아송 분포를 따르는 것으로 알려지고 있으며(Getis, 1964), 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; 유철상과 이지호, 2011).

이러한 점의 공간적 특성은 정방형 격자 기법, 최근린 지수, 특화도 및 집중도지수 등을 이용하여 평가할 수 있다. 정방형 격자 기법은 기본적으로 대상 지역을 기 설정한 일정한 크기의 격자로 나누고 각 격자 내의 표본수를 추출한 후 그 표본수의 분포특성을 이용하여 원 자료의 공간분포 특성을 파악하는 방법이다. 이 때 각각의 격자는 목적에 따라 원, 직사각형, 정사각형 등으로 구성할 수 있으나, 격자 크기 결정이 주관적으로 주로 경험적으로 결정하고 있다. 일반적으로 쓰이는 방법은 간단히 각 격자 내 분포하는 점의 개수들의 분산을 가정한 확률분포함수를 따르는 이론적 분산과 비교하여 평가하는 방법이다(국토연구원, 2004; 김성준 등, 2005; Thomas, 1977; Getis and Boots, 1978). 정방형 격자 기법의 경우 격자크기의 결정이 주관적이며, 따라서 공간적 분포 특성을 정량화하기 어려워 본 연구에서는 배제하였다.

반면 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 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 판단 할 수 있다.

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.

$$NNI = \frac{d_{obs}}{d_{exp}} \quad (9)$$

여기서 d_{obs} 는 관측 평균 최근린 거리, d_{exp} 은 이론적 평균

최근린 거리이다. 일반적으로 $NMI=1$ 이면 가정한 모형과 동일, $NMI<1$ 은 가정한 모형보다 집중성향, $NMI>1$ 은 가정한 모형보다 분산성향을 보이는 것으로 판단한다.

만약 공간의 모든 점들이 2차원 포아송 분포를 따른다고 가정하고, 이들의 분포가 포아송 분포를 완벽하게 따른다면 최인접 점들 사이의 평균 거리는 $1/(2\sqrt{\rho})$ 이 된다. 여기서 ρ 는 강우관측소 밀도(강우관측소 총개수/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 유철상과 이지호(2011)에서 찾아볼 수 있다.

2.3 유클리디언 거리를 이용한 목적함수의 통합

본 연구에서는 엔트로피의 최대 정보전달량 및 강우관측소의 공간적 특성을 동시에 고려하기 위해 유클리디언 거리를 이용하여 2개의 목적함수를 통합하였으며, 이를 MOGA (Multi Objective Genetic Algorithm)를 이용하여 최적관측망을 선정하였다. 먼저 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)은 다목적(Multi Objective) 최적화에 적합하다. 전역에서의 최적 조건을 찾아내는 한편 불연속 함수에도 대처할 수 있어서, 공학 및 관련 분야의 응용에 많이 사용되고 있다. 유전자 알고리즘은 John Holland에 의해 처음 소개되었으며, 다윈의 자연선택설과 유전 진화론에 그 기반을 둔 탐색기법이다. 염색체들의 집합인 개체군을 이용하여, 적용하고자 하는 문제의 잠재적인 해를 동시에 제시하며, 선택과 재생산 과정을 통하여 탐색공간 내에서 새로운 지역을 탐색하는 동안 축적된 지식을 개발한다. 즉, 여러 개의 개체가 동시에 병렬적으로 주어진 환경에 따라서 최적의 상태로 향하며 적자생존의 방식으로 진화하여 최적의 상태에 도달한다. 유전자 알고리즘을 적용하는데 있어서 고려할 점은 문제 영역의 발생 가능한 해와 구속 조건을 유전자 알고리즘의 부호화 영역의 염색체로 표현하는 것과 재생산을 위한 유전 연산자 개발, 문제 영역의 최적 해의 기준을 부호화 영역에 적용할 평가함수와 이를 통해 우수한 후보 해가 생산되도록 선택방법을 결정하는데 있다.

기존의 유전자 알고리즘은 모두 단 한 개의 목적 함수를 가진 경우에 주로 적용하고 있다. 이 다수의 함수를 독립적으로 최적화 할 수 있다하여도 A라는 목적에 잘 맞는 해가 B라는 목적에 반드시 잘 맞지 않는다면 이들을 모두 고려하는 것은 쉽지 않은 일이 된다. 이것은 OR 분야에서는 오래 전부터 문제가 되어 왔던 주제로 모든 목적 함수에 대해 최적인 해는 근본적으로 존재하지 않는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 2개 이상의 목적함수를 갖는 유전자 알고리즘 즉, MOGA 사용시 다수의 목적함수를 하나로 통합시키는 방안으로 거리 측정기법을 사용하였다. 이에 대한 적용과정을 나타내면 Fig. 1과 같다.

Fig. 1. Integration Procedure to combine the two objective functions

일반적으로 거리 측정(Distance Measure) 기법은 Data Mining 기법인 군집분석을 위한 객체간의 유사성의 정도를 정량적으로 나타내는데 사용된다. 거리 측정 기법 종류에는 Euclidean, City Block, Chebyshev, Minkowski, Quadratic, Canberra 등이 있으며 본 연구에서는 가장 보편적으로 쓰이고 있는 유클리디언 거리(Euclidean Distance)를 사용하였다. 유클리디언 거리는 다차원적 공간 내 기하학적인 거리를 의미하며 다음과 같이 간단히 계산할 수 있다.

$$d_e = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (10)$$

3. 대상유역 및 적용 자료

본 연구에서는 낙동강 상류부에 위치한 임하댐을 대상으로 강우관측망을 평가하였다. 임하댐은 낙동강의 지류인 반변천의 임하호 유역으로 주요 유입하천으로는 반변천, 용전천, 길안천 등이 있으며 반변천 유역면적이 임하댐 면적의 63%를 차지하고 있다(이혜숙 등, 2008). 반변천은 경북 영양군의 일월산에서 발원하여 남류하다가 영양읍 북쪽에서 장군천과 합류 후 남류한다(www.naver.com). 대상유역의 면적은 1,976

km²이며, 유로연장은 112.8 km, 유로경사는 0.00351정도이다. 대상유역의 수치 지도는 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)으로부터 제공된 자료를 이용하였으며, 공간해상도는 30 × 30 m²을 갖는다. 아래 Fig. 2는 대상유역의 유역도와 강우관측소의 위치를 나타낸 것이다. 대상유역에 설치된 강우계의 밀도 152 km²/관측소 (0.0066개/km²) 정도로 대상유역이 산악지역이라 가정하면 세계기상기구(WMO)에서 권장한 기준보다 상당히 상회한다(Table 1 참고).

Fig. 2. Imha-dam basin and locations of the rainfall stations

강우계의 공간분포 특성은 관측소의 경·위도값을 중부원점을 기준으로 x, y 좌표로 변환하여 분석에 적용하였으며, 이는 x, y 좌표를 이용하면 상대적으로 쉽게 두 관측소간의 거리를 산정할 수 있기 때문이다. 이 과정에서 약간의 거리오차는 발생할 수 있으나 이는 미소한 값으로 분석결과에 있어 큰 영향을 주지는 않는다. 아울러 각 관측소간의 강우량 자료는 국토해양부와 한국수자원공사에서 설치 운영중인 13개의 시강우 자료(1990~2010년)를 분석에 적용하였다. 이중 부동, 수비2, 진보2 지점은 2000년부터 관측을 시작하였지만, 시강우 자료는 2002년 이후부터 측정하여 이들 관측소의 경우는 2002년 이후의 시자료만을 이용하였다. 적용한 강우자료에 대한 검보정 과정이 필요하나, 수집된 자료들은 공신력 있는 기관에서 제공된 것으로 이와 같은 과정은 수행하지 않았다. 분석에 적용한 강우관측소의 시강우자료 및 강우관측소의 위치는 아래 Table 2에 정리하였다.

4. 엔트로피 및 공간분포 특성을 고려한 강우관측망 평가

4.1 엔트로피 이론의 적용

엔트로피를 이용한 최적 강우관측망 평가는 유역내의 관측소로부터 유역의 강우정보를 최대로 얻을 수 있는 경우를 의미한다. 따라서 최적강우관측망은 관측소간의 중복되는 정보

Table 1. Raingauge Density Recommended by WMO(WMO, 1994)

Region	Min. Raingauge Density (km ² /raingauge)		Min. Raingauge Density (Raingauge/km ²)	
	Normal Raingauge	TM Raingauge	Normal Raingauge	TM Raingauge
Coastal areas	900	9,000	0.00111	0.00011
Mountainous areas	250	2,500	0.00400	0.00040
Flat areas	575	5,750	0.00174	0.00017
Small mountainous areas	575	5,750	0.00174	0.00017
Islands	25	250	0.04000	0.00400
City	-	10-20	-	0.005-0.10000
Arid and polar zones	10,000	100,000	0.00010	0.00001

Table 2. Raingauge data for analysis

No	Rain gauges	Operation body	Observation start date	Period	Locations	
					Longitude	Latitude
1	길안	국토해양부	1964-08-01	1990-2010	128-54-40	36-25-54
2	도평	국토해양부	1998-03-01	1999-2010	129-03-09	36-18-28
3	부남	한국수자원공사	1987-09-30	1990-2010	129-03-58	36-19-52
4	부동	한국수자원공사	2000-01-01	2002-2010	129-08-32	36-22-43
5	석보	한국수자원공사	1987-09-30	1990-2010	129-08-36	36-32-33
6	수비2	한국수자원공사	2000-01-01	2002-2010	129-12-06	36-41-51
7	안동	국토해양부	1916-11-01	1995-2010	128-43-09	36-33-31
8	영양	한국수자원공사	1987-09-30	1990-2010	129-06-23	36-39-11
9	일월	한국수자원공사	1992-06-30	1993-2010	129-05-19	36-44-54
10	임동	국토해양부	1969-07-01	2006-2010	128-55-07	36-33-53
11	진보2	한국수자원공사	2000-01-01	2002-2010	129-03-59	36-31-51
12	청송	한국수자원공사	1987-09-30	1992-2010	129-02-30	36-25-48
13	현서	국토해양부	1961-08-01	1990-2010	128-53-45	36-16-33

가 최소가 되어야 하며, 선택된 관측소들로부터 유역의 정보를 최대로 얻을 수 있어야 한다. 본 연구에서는 강우자료의 계급구간을 100, 200, 300, 400, 500인 경우(식 6과 7의 $\Delta x/x$)에 대해 평가했으며, 이 경우에 대해 엔트로피 정보행렬

을 산정하면 아래 Table 3과 같다. 이는 각 지점간의 정보전달량을 의미하며, 총합은 해당지점을 선택할 경우, 선택된 지점으로부터 얻을 수 있는 유역에 대한 총 정보전달량을 의미한다.

Table 3. Matrix Array of Entropy of each gauge (Class Interval 300)

Gauge	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	5.58	5.44	5.42	5.42	5.43	5.42	5.42	5.42	5.45	5.46	5.46	5.42	5.42
2	5.40	5.57	5.40	5.39	5.40	5.39	5.39	5.39	5.41	5.42	5.41	5.39	5.39
3	5.38	5.40	5.58	5.38	5.39	5.37	5.37	5.37	5.41	5.42	5.42	5.37	5.37
4	5.39	5.40	5.38	5.58	5.39	5.38	5.38	5.38	5.42	5.43	5.42	5.38	5.38
5	5.37	5.39	5.37	5.37	5.57	5.36	5.37	5.37	5.40	5.41	5.40	5.37	5.37
6	5.43	5.45	5.42	5.43	5.43	5.64	5.42	5.42	5.46	5.48	5.47	5.42	5.42
7	5.36	5.38	5.35	5.35	5.36	5.35	5.57	5.35	5.39	5.40	5.40	5.35	5.35
8	5.40	5.41	5.39	5.39	5.40	5.38	5.39	5.58	5.43	5.44	5.43	5.39	5.39
9	5.51	5.52	5.51	5.51	5.51	5.51	5.51	5.51	5.58	5.52	5.52	5.51	5.51
10	5.48	5.48	5.48	5.48	5.48	5.48	5.48	5.48	5.48	5.58	5.48	5.48	5.48
11	5.57	5.51	5.57	5.57	5.53	5.57	5.56	5.57	5.56	5.55	5.62	5.55	5.56
12	5.36	5.37	5.34	5.35	5.36	5.34	5.34	5.35	5.39	5.40	5.39	5.58	5.35
13	5.37	5.38	5.35	5.36	5.37	5.35	5.35	5.36	5.40	5.41	5.40	5.36	5.57
Total	65.02	70.7	70.56	70.58	70.62	70.54	70.55	70.55	70.78	70.92	70.82	70.57	70.56

Table 4. Maximum Information Content depending on the number of raingauges (Class Interval 300)

No. of raingauges	No. of possible combinations	Max Information Content	Optimal Combination of raingauges
1	13	70.91	10
2	78	130.70	9, 10
3	286	179.56	2, 5, 10
4	715	217.83	5, 7, 12, 13,
5	1,287	245.48	3, 5, 7, 12, 13
6	1,716	262.36	3, 4, 5, 7, 12, 13
7	1,716	268.43	3, 4, 5, 7, 8, 12, 13
8	1,287	263.66	2, 3, 4, 5, 7, 8, 12 13
9	715	247.93	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 13
10	286	221.32	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 13
11	78	183.15	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 10, 12, 13
12	13	133.66	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13
13	1	72.40	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13

Fig. 3. Variation of the Maximum Information Content in accordance with the number of raingauges and the optimal raingauge combination (Only Entropy considered)

산정된 유역의 정보전달 행렬을 이용하여 관측소의 조합에 따른 최대 정보전달량의 변화를 나타내면 Table 4와 같다. 이들의 조합에 따른 총 정보전달량의 변화를 도시적으로 나타내면 Fig. 3(좌)이 된다. Table 4와 Fig. 3(좌)에서 확인할 수 있듯이 총 13개의 관측소 중에서 7개의 관측소가 선택되었을 때 최대 정보전달량을 주는 것을 확인할 수 있다. 이는 전체 관측소에서 제공하고 있는 수문학적 정보를 얻으려면 최소 7개의 관측소를 운영해야 함을 의미한다. 아울러 각 계급구간이 증가함에 따라 정보전달량은 증가하지만, 최종적으로 선택되는 최적 관측망의 개수와 위치는 동일하였으며, 이들의 위치를 나타낸 것이 Fig. 3(우)이다. 이 경우는 단순히 정보전달량의 변화만을 고려하여 최적관측망을 구축한 것이며, 이는 수문학적 자료제공 목적에서의 최적관측망이다. 따라서 치수적 측면, 이수적 측면, 환경적 측면 등의 다양한 목적을 만족시키기 위한 강우관측망의 구축은 아니다. 아울러 이들의 결과는 최종적으로 결정할 최적강우관측망의 첫 번째 목적함수로 이용된다.

4.2 강우관측소의 등급화 결정

강우관측소의 등급화 결정에 앞서 강우관측소 간의 최근린 거리의 특성을 파악하였다. 대상유역내 강우관측소의 평균 최근린 거리는 약 9.809 km이며, 최대 최근린 거리와 최소 최근린 거리는 각각 3.189 km, 18.698 km 정도이다. 만약 이론적으로 공간분포가 포아송 확률밀도함수를 따른다고 가정할 경우 이론적인 최근린 평균거리는 $1/(2\sqrt{\rho})$ 이며, 이를 계산하면 6.164 km이다. 반면 임하댐 유역에 실제로 설치되어 있는 관측소의 최근린 평균거리는 9.809 km로 가정된 모형보다 상당히 분산되어 있음을 확인할 수 있다. 아래 Table 5는 대상유역의 강우관측소에 대한 최근린 거리에 대한 기초 통계량이다.

강우관측소의 공간적 중요도를 결정하기 위해 관측소를 하나씩 제거한 후, 제거된 관측소가 공간분포에 어느 정도 영향을 주는지를 파악하였다. 만약 임의의 관측소를 제거함으로 인해 공간적 집중도가 높아지면 해당 관측소는 공간적 분산성 향상에 중요함을 의미한다. 반면에 임의의 관측소를 제거함으로 인해 공간적 분산도가 높아진다면 해당 관측소는 분산성에 위배된 거라 판단할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 위 방법론을 이용하여 2번째 목적함수인 강우관측소의 공간적 중요도를 평가하였다. 유역 내에 위치한 강우관측소의 공간적 분포를 최근린 지수로 평가할 수 있으며, 이들의 결과를 바탕으로 강우관측소의 중요도를 결정하였다.

즉, 강우관측소를 제거함으로 인해 공간적 분포가 보다 균일하게 된다면 제거된 관측소는 공간적 분포를 왜곡시키는 관측소임을 의미한다. 현재로서는 균일한 공간분포의 유지에 필요한 관측소(상위등급)와 공간적 분포를 왜곡시키는 관측소

(하위등급)로만 결정하였다. 강우관측소를 제거하기 전의 NNI 지수에 비해, 제거 후 NNI 지수를 작아지게 하는 관측소를 상위등급(1등급, 2등급)으로 분류하였으며, 반대로 NNI 지수를 커지게 하는 관측소를 하위등급(3등급, 4등급)으로 분류하였다. 보다 정량적인 분석을 위해 강우관측소의 중요도를 세분화하여야 하나, 방법론의 부재로 인해 상·하위 등급의 50%를 각각 적용하여 상위등급인 1등급과 2등급, 하위등급인 3등급과 4등급으로 분류하였다. Table 6은 관측소를 제거 시 관측소별로 NNI 지수의 변화를 나타낸 것이며, Table 6에서 확인할 수 있듯이 NNI 지수를 작아지게 하는 관측소를 상위등급(1, 2등급), NNI 지수를 커지게 하는 관측소를 하위등급(3, 4등급)으로 분류하였으며, 이를 도시적으로 표현한 것이 Fig. 4이다. 아울러 본 연구에서 사용한 관측소의 등급은 단

Table 6. Variation of NNI by each eliminated raingauge and the importance class of raingauge

Removed raingauge	d_{obs} (km)	d_{exp} (km)	NNI	Importance Class
1	9.068643	6.415752	1.413496	1 Class
2	9.947103		1.550419	2 Class
3	11.24372		1.752519	4 Class
4	10.00101		1.558821	2 Class
5	11.01387		1.716692	4 Class
6	9.621749		1.499707	1 Class
7	9.482339		1.477978	1 Class
8	9.707213		1.513028	1 Class
9	9.798341		1.527232	1 Class
10	10.69529		1.667036	3 Class
11	9.908019		1.544327	2 Class
12	10.41437		1.623251	3 Class
13	10.05792		1.567691	2 Class

Fig. 4. Procedure for the determination of the raingauge importance class

Table 5. Characteristics of the Nearest Neighbor Index on the raingauge data

d_{obs} (km)	d_{exp} (km)	NNI	Min. NN I (km)	Max. NNI (km)	Average of NNI (km)	Variance of NNI	Standard Deviation of NNI
9.809	6.164	1.591	3.189	18.698	9.809	17.152	4.079

순히 관측소의 공간적 중요도에 따라 분류된 것이며, 국토해양부 및 기상청에서 다양한 목적을 위해 분류한 강우관측소의 등급과는 다른 의미이다.

4.3 MOGA 방법을 이용한 최적 강우관측망 결정

관측자료의 정보전달량을 고려한 엔트로피 결과와 공간적 특성을 고려한 관측소의 등급을 동시에 고려하기 위해 MOGA를 이용하였으며, 유클리디언 거리를 통해 이 두 목적 함수를 통합하였다. 이를 위해 관측소의 모든 조합에 대한 총 정보전달량 및 관측소 공간적 중요도를 산정후 이들의 순위를 기준으로 0~1까지 분류하였다(Fig. 5 참고). 즉, 각각의 관측소의 조합은 총 정보전달량에 대한 순위와 공간적 중요도의 순위를 갖게 된다. 각각의 조합에 따라 총 정보전달량(x축)의 순위와 공간적 중요도의 순위(y축)로 나타내면 각 조합은 고유한 좌표값 갖게 되며 하나의 점의 형태로 표시된다. 이들의 점의 형태를 살펴보면 다음과 같다.

먼저 case 1은 공간적 분포는 우수하나 정보전달량 값이

Fig. 5. Integration of the two objective functions by the Euclidean Distance

작은 경우이며, case 4는 정보전달량은 우수하나 공간적 분포가 떨어지는 경우에 해당된다. 즉, case 1은 공간적 분산성은 크나, 자료의 정보전달량이 작아 충분한 유역의 정보를 얻기 힘들다. 반면 case 4는 유역의 정보는 잘 전달하나 유역의 면적평균강우량 산정에 있어 관측소의 집중성이 커서 유역을 대표할 수 있는 면적평균강우량을 산정하기 어렵다. Case 3은 정보전달량과 공간적 분포 둘 다 좋지 않은 경우로 가장 좋지 않은 경우이다. 아울러 case 2는 정보전달량과 공간적 특성이 모두 우수한 경우로 가장 이상적이 경우이나, 현실적으로 이 둘의 목적을 완벽히 만족하기는 쉽지 않다. 따라서 차선의 방법으로 case 2와 가장 유사한 관측소의 조합을 최적관측망으로 결정하는게 바람직하며, case 2와 가장 가까운 위치를 유클리디언 거리로 결정할 수 있다.

Fig. 5에서의 방법론을 이용하여 대상유역에 적용한 결과가 아래 Table 7이며, 이는 관측소 개수에 따른 모든 관측소의 조합 중 최소 유클리디언의 거리에 해당되는 경우를 나타낸 것이다. 아울러 Table 8은 엔트로피 이론만을 적용하여 최적관측망을 결정할 경우와 MOGA를 이용하여 최적관측망을 결정한 경우를 비교한 것이다. 먼저 정보전달량의 경우는 당연히 엔트로피 이론만을 이용하여 결정한 조합이 가장 높은 정보전달량을 보인다. 반면 공간적 분산성 측면에서 살펴보면 엔트로피 이론을 적용한 경우는 상대적으로 MOGA를 이용한 경우에 비해 공간적 분산성이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 엔트로피 이론만을 적용시, 경우에 따라 집중도가 높은 공간적 특성을 가지는 조합(관측소 개수: 2, 5개)을 최적관측망으로 산정하게 된다. 따라서 유클리디언 거리를 이용하여 두 목적함수를 통합하는 방법은 정보전달량과 공간적 특성, 이 두개 목적을 만족하는 경우라 할 수 있다. 아울러 엔트로피 이론만을 적용한 경우와 MOGA를 이용한 경우 모두 관측소 개수가 7개인 경우에 최대 정보전달량을 보였으며, 따라서 본 대상유역에서는 최적관측소를 7개로 결정하는게 바람직하다고 판단된다.

최종적으로 7개의 관측소 조합에 대해 엔트로피 이론 및 MOGA를 비교한 것이 Fig. 6이다. 아울러 MOGA를 이용한

Table 7. The results of the optimal raingauge network by MOGA

No. of raingauges	No. of possible combinations	Max Information Content	Optimal Combination of raingauges
1	13	0.172	9
2	78	0.178	2, 9
3	286	0.188	2, 7, 13
4	715	0.098	2, 7, 8, 13
5	1,287	0.085	2, 4, 7, 8, 13
6	1,716	0.074	4, 6, 7, 8, 12, 13
7	1,716	0.046	1, 4, 6, 7, 8, 12, 13
8	1,287	0.031	1, 2, 4, 6, 7, 8, 12, 13
9	715	0.094	1, 2, 4, 6, 7, 8, 10, 12, 13
10	286	0.06	1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 13
11	78	0.126	1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13
12	13	0.201	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13
13	1	0	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13

Table 8. Comparison of the optimal raingauge networks by Only-Entropy and MOGA

No. of raingauges	Entropy		MOGA		Difference	
	Information Content	NNI	Information Content	NNI	Information Content	NNI
1	70.911	-	70.787	-	-0.124	
2	130.674	0.850	130.552	1.804	-0.122	0.954
3	179.558	1.051	179.404	2.079	-0.154	1.028
4	217.825	1.174	217.646	1.608	-0.179	0.434
5	245.476	0.902	245.180	1.332	-0.296	0.430
6	262.355	1.030	262.000	1.429	-0.355	0.399
7	268.430	1.118	267.800	1.699	-0.630	0.581
8	263.656	1.172	262.927	1.740	-0.729	0.568
9	247.932	1.285	246.552	1.810	-1.380	0.525
10	221.324	1.534	219.924	1.809	-1.400	0.275
11	183.154	1.478	181.652	1.713	-1.502	0.235
12	133.656	1.544	133.656	1.667	0.000	0.123
13	72.40	1.591	72.40	1.591	0.000	0.000

Fig. 6. The optimal raingauge network by each method

우 강우계의 공간적 분포가 엔트로피만을 적용했을 때보다 강우관측소가 보다 분산된 형태임을 도시적으로도 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 낙동강의 임하댐 유역을 대상으로 엔트로피 이론과 관측소의 공간적 분포를 동시에 고려하여 강우관측망을 평가하였다. 엔트로피 이론을 통한 강우관측망 평가는 정보전달량의 크기만을 이용하여 강우관측망을 평가하는 방법으로, 단순히 관측자료의 특성만이 고려되는 한계가 있다. 아울러 관측소 설치의 다양한 목적 중 면적평균강우량의 정도 있는 추정을 고려하면 강우관측소는 공간적으로 균등하게 설치된 경우가 가장 이상적이다. 따라서 본 연구에서는 엔트로피의 최대 정보전달량 및 강우관측소의 공간적 분포특성을 동시에 고려하기 위해 유클리디언 거리를 이용하여 2개의 목

함수를 통합하였으며, 이를 MOGA(Multi Objective Genetic Algorithm)를 이용하여 최적관측망을 선정하였다. 강우관측소의 공간적 특성을 파악하기 위해 최근린 지수를 이용하여 강우관측소 간에 공간적 분포를 평가하였다.

그 결과 MOGA를 이용하여 관측망을 평가한 경우 엔트로피 이론만을 적용했을 때보다 최적관측소가 보다 공간적으로 보다 분산된 형태임을 확인하였으며, 대상유역내의 총 13개 강우관측소 중 7개의 조합을 최적관측소로 선정하였다. 이는 강우관측소의 공간적 분포와 자료의 특성이 동시에 반영된 결과이다. 향후 강우관측소의 중요도를 결정하기 위해 설치목적에 따라 다양한 인자들이 고려되어야 한다. 중요도 평가를 위해 관측소의 접근성, 침수 위험지구 등에 대한 검토 및 이들의 기중치에 대해서는 추후 연구가 필요한 부분이다. 아울러 본 연구의 방법론은 다양한 강우관측망의 설치목적에 부합할 수 있는 최적관측망 구축에 관련된 기본 자료로 활용될 수 있다.

감사의 글

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

References

- 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.
- Caseltan, 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.
- Choi, M.A. (2007) A study on spatial distribution of cultural assets using point-pattern analysis, Master Thesis, University of Seoul.
- 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.
- Kim, J.B., Bae, Y.D., Park, B.J. and Kim, J.H. (2007) Evaluation of the soundness of the raingauge network in the Soyang-dam basin. *Korean Water Resources Association Annual Conference*, KWRA, pp. 178-182.
- Kim, S.J., Kim, D.S., Kim, C., Bae, D.H., Shin, S.C., Cho, M.H. and Cho, G.S. (2005) GIS Concept and Methods. Sigma Plus Ltd.
- Korea Research Institute for Human Settlements (2004) Spatial Data Analysis, Haul Academy.
- Korea Meteorology Agency (2009). <http://www.kma.go.kr/index.html>.
- Krstanovic, P.F. and Singh, V.P. (1992). Evaluation of rainfall networks using entropy: II. Application, *Water Resources Management*, Vol. 6, pp. 295-314.
- Lee, H.H. (1989) Geological Statistics. Bummoonsa.
- Lloyd, C.D. (2006) Local models for spatial analysis. CRC Press.
- Ministry of Construction and Transport (2004) Survey Report on Han-rive basin III, Hydraulic and Hydrology Survey Report.
- Mogheir, Y., de Lima, J.L.M. and Singh, V.P. (2004a) Characterizing the spatial variability of groundwater quality using the entropy theory: I. Synthetic data, *Hydrological processes*, Vol. 18, pp. 2165-2179.
- Mogheir, Y., de Lima, J.L.M. and Singh, V.P. (2004b) Characterizing the spatial variability of groundwater quality using the entropy theory: II. Case study from Gaza Strip, *Hydrological processes*, Vol. 18, pp. 2579-2590.
- National Emergency Management Agency (2004) Development of a Flash Flood Early Response System(III).
- Naver Portal (2013) www.naver.com.
- Shannon, C.E. and Weaver, W. (1963) *The Mathematical theory of communication*, The University of Illinois Press, Urbana, Ill.
- Thomas, R.W. (1977) *An Introduction to Quadrat Analysis*, 2nd edition, Geo Abstracts Ltd., University of East Anglia.
- Yang, Y. and Burn, D.H. (1994) An entropy approach to data collection network design, *Journal of Hydrology*, Vol. 157, pp. 307-324.
- Yi, H.S., Kim, J.K. and Lee, S.U. (2008) Development of Turbid Water Prediction Model for the Imha Dam Watershed Using HSPF. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers, KSSEE*, Vol. 30, No. 8, pp. 760-767.
- Yoo, C.S., Kim, I.B. and Ryu, S. (2003) Evaluation of the raingauge density and spatial distribution : Case Study for the NamHan-river basin. *Journal of KWRA, KWRA*, Vol. 36, No. 2, pp. 173-181.
- Yoo, C.S. and Lee, J.H. (2011) Spatial Analysis for the raingauge network : Application of Ilyang and Poison Distributions. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, KOSHAM*, Vol. 11, No. 4, pp. 179-187.
- Yoo, C.S. and Jung, G.S. (2002) Evaluation of a raingauge network using Entropy Theory: Comparison between Mixed and Continuous Distributions. *Journal of Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 22, No. 4-B, pp. 447-457.
- Yoo, C., Jung, K. and Lee, J. (2008) Evaluation of rain gauge network using entropy theory: comparison of mixed and continuous distribution function applications. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 226-235.
- WAMIS (2013) <http://www.wamis.go.kr>.
- WMO (1994) *Guide to Hydrological Practices-Fifth Edition*, WMO-No.168.

© Received August 7, 2012

© Revised August 8, 2012

© Accepted August 21, 2012