

낙동강 유역 홍수의 공간 특성 분석 연구

Spatial Variability of Short Term Flood in Nakdong River Basin

신현석¹⁾ / 윤강훈²⁾ / 서봉철³⁾

1. 서 론

최근 들어 세계 각국에서 이상기후로 인한 풍수해의 발생이 빈번해지고 있으며 우리나라 또한 이러한 풍수해의 피해가 점점 증가하고 있는 실정으로 이 중 약 90% 정도가 6월~9월 사이에 발생하는 홍수에 의한 것이다. 우리나라는 이러한 홍수피해를 절감하기 위해 다목적 댐 및 하천체 방으로 홍수를 방어하는 시스템이 거의 대부분을 이루고 있으며 낙동강 유역은 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐 등 4개의 다목적 댐과 1987년 홍수통제소를 설치하여 홍수예경보 시스템을 운영해 오고 있다.

홍수에 대한 해석은 일차적으로 해당유역의 면적평균강우량에 의하여 평가되지만 일반적으로 얻을 수 있는 강우자료는 우량계에 의하여 측정된 지점우량이다. 강우의 일반적 특성을 고려해볼 때 일정 유역 면적을 가진 유역 전체에 균일한 강우가 발생될 경우는 드물고 강우 지속기간 동안의 강우 깊이는 호우 중심지역으로부터 면적이 증가할수록 점차로 감소하게 되므로 홍수량의 산정을 위해서는 지점우량을 유역면적에 따른 면적평균우량으로 환산해 주어야 하며 대상유역 면적 내에서 이와 같은 강우의 공간적 특성을 고려한 유역 평균강우량은 수자원 계획의 수립이나 여러 가지 수문학적 문제를 해결하기 위해서 매우 중요하다. 유역 평균강우량 값의 정밀도는 우량관측소의 밀도와 관측망 구조 및 산정기법에 따라 많은 편차를 갖게 되고 필요로 하는 정밀도를 갖는 평균강우량을 얻기 위해서는 강우량의 지역적 변화를 반영할 수 있는 적절한 우량관측망의 설치 및 운영이 필요하나 이는 관측망의 설치비용 및 입지조건 등으로 인하여 현실적으로 어려움이 많다.

본 연구에서는 우량관측자료의 결측치 및 유역 평균강우량 산정을 위해 토양의 분포특성 또는 지하수 오염농도분포에 대한 분석 등 수자원·환경 분야에서 광범위하게 사용되고 있는 지형통계학적(Geostatistics) 공간 강우분석 기법 들(Thiessen, RDS 및 Polynomial Method)중 크리깅(kriging) 기법을 사용하여 낙동강 유역 홍수에 대한 공간 강우의 특성 및 분포의 분석에 대하여 적용해 보았으며, 이를 이용한 결측 자료의 보완 및 유역평균 강우량 산정 기법을 제시하였다.

2. 공간분석기법

이차원 공간에서의 한 점 j 에서의 좌표를 (x_j, y_j) 라 하면 n 개의 관측지점 $j = 1, 2, \dots, n$ 에서의 관측값은 x_j 와 y_j 의 함수로써 h_j 로 나타낼 수 있고, 수문 변량 h_o 의 추정값은 가중된 관측값들의 선형조합으로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

1) 부산대학교 토목공학과 조교수(hsshin@pusan.ac.kr)

2) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원(khyoon@kict.re.kr)

3) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 연구원(bcseo@kict.re.kr)

$$h_o = \sum_{j=1}^n w_j h_j \quad (1)$$

여기서 w_j 는 관측지점 j 에서의 가중치이며 식(1)은 보간함수의 일반적인 형태로 가중치 w_j 를 결정하는 방법으로는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 크리깅 기법을 사용하였다.

식(1)에 의해 추정된 h_o 의 값을 \hat{h}_o 라 하면 보간오차의 분산 σ_e^2 은 식(2)와 같고 식(2)를 최소가 되도록 하여 가중치 w_j 를 결정한다.

$$\sigma_e^2 = var[h_o - \hat{h}_o] = var[h_o - \sum_{j=1}^n w_j h_j] \quad (2)$$

여기서 $var[\cdot]$ 은 오차의 분산을 나타내며 식(2)는 식(3)과 같다.

$$\sigma_e^2 = \sigma^2 - 2 \sum_{j=1}^n w_j cov(h_o, h_j) + \sum_{h=1}^n \sum_{j=1}^n w_h w_j cov(h, h_j) \quad (3)$$

여기서 σ^2 과 $cov(h, h_j)$ 은 수문변량 h_o 의 분산과 상호분산을 나타낸다.

크리깅 기법은 여러 가지 형태로 적용되어 있으며 보간을 위한 공간상관 함수로써 variogram을 사용하는데 그 가정은 평균, 분산, 상호분산 등이 동질하고 공간적인 상호분산의 구조가 등방성을 가진다는 것이다. 그러므로 지점자료의 분산은 $var(h_i) = \sigma^2$; $i = 1, \dots, n$ 이고 지점 i, j 사이의 상호분산은 $cov(h_i, h_j) = cov(d_{ij})$ 로 나타낼 수 있으며 동질성과 등방성을 갖는 semivariogram은 식(4)와 같이 정의된다.

$$\gamma(d_{ij}) = \frac{1}{2} var[h_i - h_j] \quad \text{or} \quad \gamma(d_{ij}) = \sigma^2 - cov(d_{ij}), \quad i, j = 1, \dots, n \quad (4)$$

$\gamma(d_{ij})$ 는 지점 i 와 j 사이의 거리의 함수로써 semivariogram이라고 하며 식(3)에 식(4)를 대입하고 lagrange multiplier, λ 를 사용해서 보간오차의 분산을 나타내면 식(5)와 같다.

$$\sigma_e^2 = \sigma^2 - 2 \sum_{j=1}^n w_j [\sigma^2 - \gamma(d_{oj})] + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n w_i w_j [\sigma^2 - \gamma(d_{ij})] - 2\lambda [\sum_{i=1}^n w_i - 1] \quad (5)$$

식(5)를 가중치 w_i 와 λ 에 대하여 최소가 되도록 풀면 식(6)과 같다.

$$\sum_{i=1}^n w_i \gamma(d_{oi}) + \lambda = \gamma(d_{oj}), \quad j = 1, \dots, n \quad (6a)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (6b)$$

식(6a), (6b)로써 가중치를 계산할 수 있고 보간오차의 분산은 식(7)과 같다.

$$\tilde{\sigma}_e^2 = \sum_{j=1}^n w_j \gamma(d_{oj}) + \lambda \quad (7)$$

수문변량의 평균과 분산이 동질하지 않을 때는 범용 크리깅(universal kriging)을 사용해야 하며 주어진 지점 (x_o, y_o) 에서의 평균 m_o 는 식(8)과 같이 관측지점의 평균 m_j 의 선형조합으로 나타낼 수 있다.

$$m_o = \sum_{j=1}^n w_j m_j \quad (8)$$

식(8)을 식(9)의 다항식 근사에 의해 나타내면 식(10)과 같다.

$$h_o = \sum_{k=1}^m a_k \phi_k(x_o, y_o) \quad (9)$$

여기서 a_k 는 k 번째 항의 계수이며 $\phi_k(x_o, y_o)$ 는 좌표 x_o 와 y_o 로 나타내지는 다항식의 k 번째 항이다.

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^m a_k \phi_k(x_o, y_o) &= \sum_{j=1}^n w_j \left[\sum_{k=1}^m a_k \phi_k(x_j, y_j) \right] \text{ or} \\ \sum_{k=1}^m a_k \phi_k(x_o, y_o) &= \sum_{j=1}^n a_k \left[\sum_{k=1}^m w_j \phi_k(x_j, y_j) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

그러므로 점 (x_o, y_o) 에서의 k 번째 항은 식(11)과 같다.

$$\phi_k(x_o, y_o) = \sum_{j=1}^n w_j \phi_k(x_j, y_j); \quad k = 1, \dots, m \quad (11)$$

보간오차의 분산을 lagrange multiplier를 사용해서 나타내면 다음의 식(12)와 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_e^2 &= \sigma^2 - 2 \sum_{j=1}^n w_j [\sigma^2 - \gamma(d_{oj})] + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n w_i w_j [\sigma^2 - \gamma(d_{ij})] \\ &\quad - 2 \sum_{k=1}^m \lambda_k \left[\sum_{j=1}^n w_j \phi_k(x_j, y_j) - \phi(x_o, y_o) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)를 lagrange multiplier, λ 와 가중치 w_i 에 대해서 최소가 되도록 풀면 식(13)과 같고 식(13)으로부터 가중치 w_i 를 구할 수 있다.

$$\sum_{j=1}^n w_j \gamma(d_{ij}) + \sum_{k=1}^m \lambda_k \phi_k(x_j, y_j) = \gamma(d_{oj}); \quad j = 1, \dots, n \quad (13a)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (13b)$$

여기서 n 은 다항식의 항 수이며 보간오차 분산의 추정값은 식(14)와 같다.

$$\hat{\sigma}_e^2 = \sum_{j=1}^n w_j [\gamma(d_{oj}) + \sum_{k=1}^m \lambda_k \phi(x_j, y_j)] \quad (14)$$

이상의 크리깅 기법에서 사용되는 공간상관 함수인 semivariogram의 유형은 다음과 같다.

- Linear model

$$\gamma(d) = \omega d$$

- Polynomial model

$$\gamma(d) = \omega d^\alpha, \quad 0 < \alpha < 2$$

- Exponential model

$$\gamma(d) = \omega [1 - \exp(-\alpha d)], \quad \alpha > 0$$

- Gaussian model

$$\gamma(d) = \omega [1 - \exp(-\alpha d^2)], \quad \alpha > 0$$

- Spherical model

$$\gamma(d) = \frac{1}{2} \omega [3d/\alpha - (d/\alpha)^3], \quad d \leq \alpha$$

$$\gamma(d) = \omega, \quad d > \alpha$$

여기서, ω 와 α 는 산정되어야 할 상수값, d 는 두 지점간의 거리이고 semivariogram 모형에 적합하기 위한 표본자료의 semivariogram은 식(15)와 같다.

$$\widehat{\gamma}(d_{ij}) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \{ [h_i(t) - \widehat{m}_i] - [h_j(t) - \widehat{m}_j] \}^2 \quad (15)$$

여기서, $h_k(t)$ 는 지점 k 에서의 시계열 관측값, \widehat{m}_k 는 추정된 자료의 평균, N 은 총 관측자료의 개수를 나타낸다.

3. 낙동강유역에 대한 적용

낙동강 유역은 유역면적이 $23,817 \text{ km}^2$, 유로연장이 521.5 km에 달하는 우리나라 제2의 하천유역으로 1987년 이후부터 현재까지 홍수통제소가 설치·운영되어 있으며 홍수예측 및 유출량 계산을 위하여 그림 1과 같이 106개소의 TM 우량관측소가 운영 중에 있다. 본 연구에서는 우량자료의 공간분석을 위하여 1987~2000년까지 106개소의 TM 시우량자료를 수집하여 그림 2의 절차에 따라 수집된 우량자료를 39개의 단일호우사상으로 분리하고 그 원인에 따라 분류한 결과 기압형 11회, 전선형 13회, 태풍형이 15회로 3가지 유형의 강우에 대한 빈도는 비슷하였다.

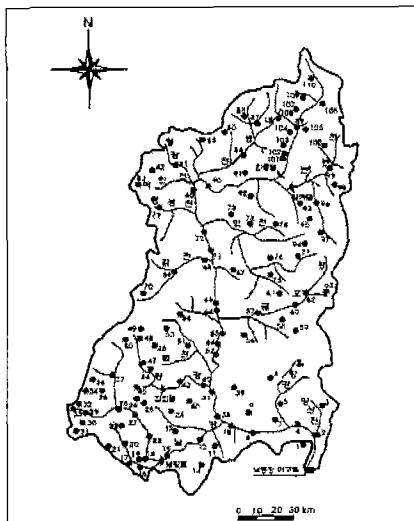


그림 1. 낙동강유역 TM 우량관측소

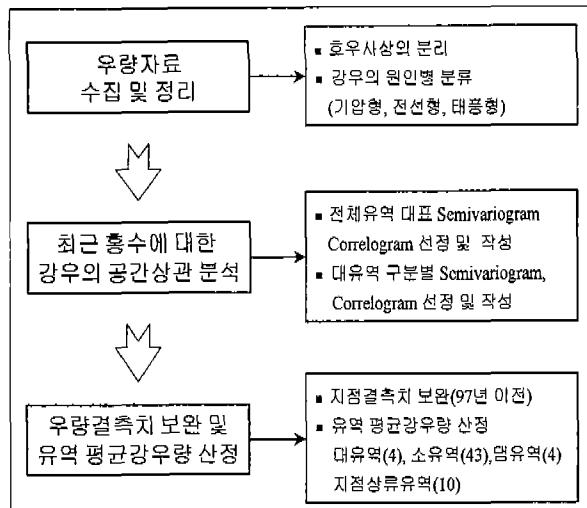


그림 2. 우량자료의 수집 및 분석 절차

최근 홍수에 대한 공간상관 분석으로 유역전체를 대상으로 하는 강우의 분석에서는 결측치의 보완 없이 사용할 수 있는 97년 이후 자료를 사용하여 그림 3과 같이 semivariogram 및 correlogram을 선정 및 작성하였다. 또한 유역의 지역적인 특성을 파악하기 위해 홍수예경보('87) 상에서 구분하고 있는 4개의 대유역에 대해서도 공간적인 특성을 분석한 결과 그림 4와 같이 유역2와 유역4에서는 semivariogram이 "sill"을 갖는 것으로 나타났으며 이는 관측소간 거리가 약 60km 이상으로 증가하면 관측소간의 상관성이 거의 없음을 알 수 있었다.

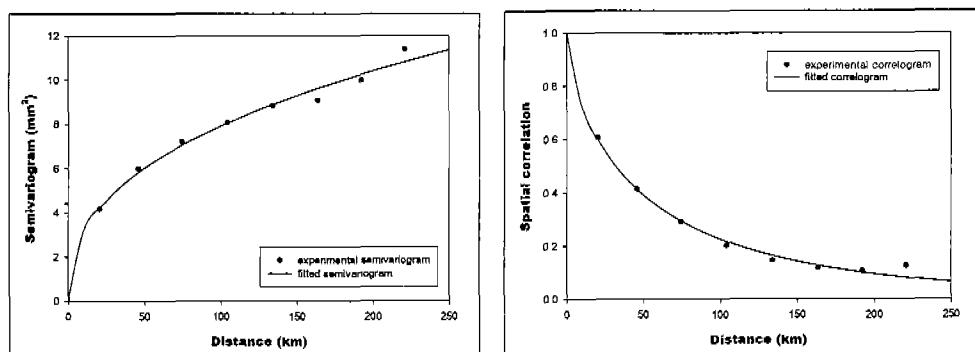


그림 3. 낙동강유역 전체에 대한 대표 Semivariogram(좌) 및 Correlogram(우)

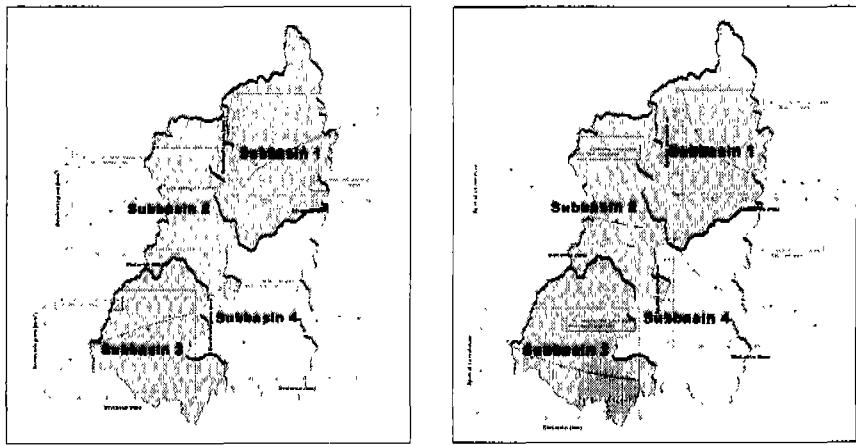


그림 4. 4개 대유역별 Semivariogram(좌) 및 Correlogram(우)

낙동강은 97년 이후 현재와 같은 106개의 우량관측소 체제로 운영되어 왔으며 현재의 106개 관측소 체제를 기준으로 유역 평균강우량을 산정하기 위해 주변관측소에 의해 지점 결측치를 보완하고 97년 이전에는 존재하지 않았던 관측소를 반경 30km 내의 주변관측소 값에 의해 보완, 삽입하였다.

유역 평균강우량의 산정은 유역 전체를 500m 크기의 격자로 하는 327×527 개로 나누어 현재 시점의 106개 지점 강우량을 면적강우량으로 보간하여 대유역 4개, 소유역 43개, 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐의 댐유역 4개, 또한 낙동강 본류의 수위지점인 낙동, 왜관, 현풍, 사벌, 진동, 삼랑진 지점의 상류유역과 댐하류 및 지류 지점인 임하, 화원, 합천, 정암 등 10개의 지점 상류유역을 선정하여 각 유역마다 격자를 생성하고 평균강우량을 산정하였다. 그림 5는 소유역 33에 대한 2000. 9. 11 ~ 2000. 9. 16일의 호우사상을 Kriging 기법과 홍수예경보 상의 Thiessen 방법에 의해 산정한 평균강우량을 비교하였다. 또한 그림 6은 전체유역에 대한 강우의 공간 분포성향을 파악하기 위해 2000. 9. 16. 06:00 ~ 07:00까지 106개 지점 강우량에 의해 500m 격자단위로 생성된 격자 산정 강우량 및 보간의 분산을 나타내고 있다.

이와 같은 홍수시 단시간 강우량의 공간적인 분포 및 상관 분석을 시간 별 강우량의 공간적인 분포의 정량적인 파악 및 유역 평균강우량 산정에 따른 분산 오차를 제공하고, 홍수 예경보 상의 공간 강우 특성에 따른 결정과정에 도움을 줄수 있을 뿐만아니라, 홍수기 후 홍수의 분석에 유용한 자료가 될 수 있을 것이다.

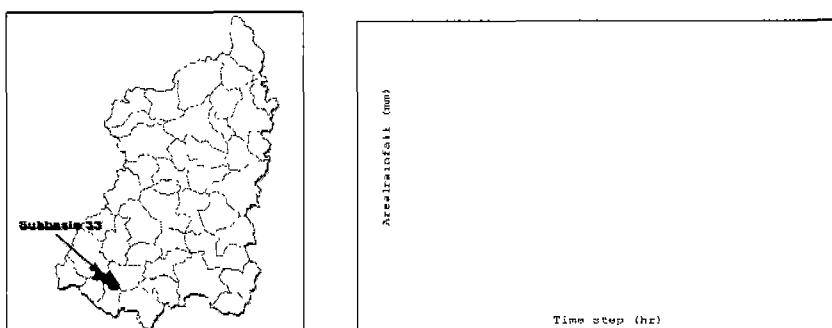


그림 5. Kriging과 Thiessen방법에 의한 유역 평균강우량 비교

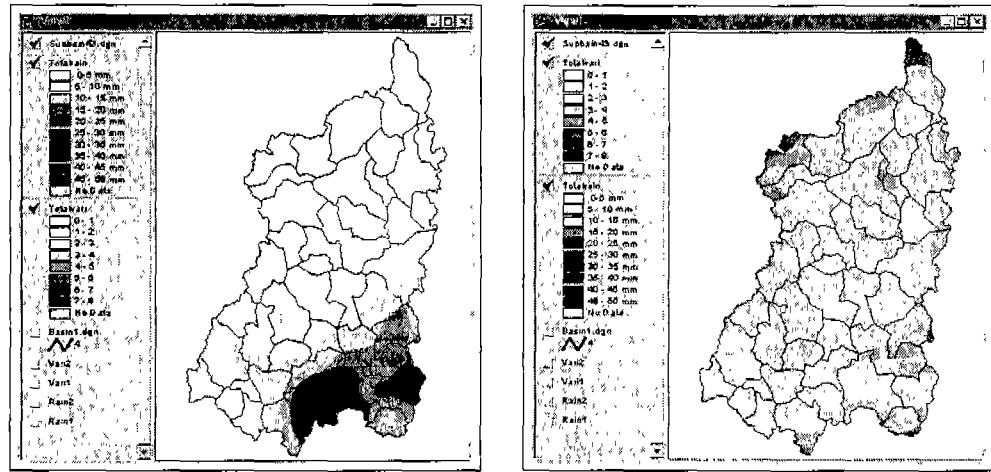


그림 6. 2000. 9.16. 06:00 - 07:00 의 강우(좌) 및 보간오차(우)의 변동 분포

4. 결 론

본 연구에서는 홍수시 단기 강우의 공간적인 상관 관계를 지형 통계학을 사용하여 분석하였으며, 또한 이를 이용한 현 홍수 예경보상의 단기 강우의 결측 보완 및 유역 평균강우량 산정 기법을 제안하였다. 이는 공간 강우 분석이 홍수 관리에 가장 중요한 인자인 점에서 전통적인 개략 기법보다는 통계학적으로 유의한 강우의 해석 모들을 제시하였다는 점에서 가치가 있을 것이다. 이는 차후 홍수의 공간적인 불확실성(uncertainty) 분석 및 그들 통한 홍수 의사결정을 위한 통계적인 자료를 제시할 수 있었으며, 또한 다양한 홍수 강우의 공간 분석을 통하여, 차후 RS 및 기상 Radar를 통하여 제공될 수 있는 공간 강우의 분석을 위한 기초적인 연구가 될 수 있을 것이다.

5. 참고문헌

- 1) 한국건설기술연구원 (1991). 면적우량과 강우의 공간변화해석 - 면적우량 환산계수를 중심으로, pp.1-97
- 2) Guillermo Q. Tabios III and Jose D. Salas (1985). "A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation", *Water Resources Bulletin*, Vol.21, No.3, pp.365-380
- 3) Lebel, T., G. Bastin, C. Obled and J. D. Creutin (1987) "Accuracy of areal rainfall estimation: A case study", *Water Resources Research*, Vol.23, No.11, pp.2123-2134
- 4) W. Abtew, J. Obeysekera, and G. Shih (1993). "Spatial analysis for monthly rainfall in south Florida", *Water Resources Bulletin*, Vol.29, No.2, pp.179-188
- 5) H.-S. Shin (1997). "Uncertainty of Hydrological and Environmental Data Based on Spatial Analysis and Neural Network Modeling". Dissertation. CSU, USA.
- 6) 신현석, 박무종 (1999). "신경망 기법을 이용한 연평균 강우량의 공간 해석", *한국수자원학회지*, 32권, 1호.