

강우자료의 공간분석을 위한 GIS 모듈 개발

채효석¹⁾, 고덕구²⁾, 맹승진³⁾, 김우구⁴⁾

1. 서론

유역의 강우 자료를 정확히 측정하는 것은 수자원 분석과 관측망 평가 등 많은 관련 문제에 대해서 중요한 자료를 제공할 수 있다. 예를 들어 강우 자료의 공간적인 변화를 정확히 예측할 수 있는 능력은 홍수나 집중 호우로 야기될 수 있는 국부적인 폭우의 분석을 위해서 중요하다. 강우 자료의 공간적인 변화를 정확히 평가하기 위해서는 강우 관측망의 밀도를 높이는 노력이 필요하며, 이러한 계측 장비를 설치하고 운영하기 위해서는 많은 비용이 수반되어야 한다. 또한, 관측 장소를 직접 방문해야 할 필요성이 있는 관측자의 실수나 고의적 파괴로 낮은 관측 밀도를 초래할 수 있게 된다. 따라서, 주변 관측소로부터 측정된 값을 이용하여 미계측 지역에 대한 강우 자료를 평가할 수 있는 기법의 필요성이 제기된다.

본 연구에서는 GIS 기법을 이용하여 강우자료의 공간적인 분포 양상을 분석하기 위한 모듈을 개발하였다. 모듈 개발에 이용된 소프트웨어는 Arc View 3.1이며, Avenue Scripts를 이용하였다. 또한, 강우자료 뿐만 아니라 지하수 오염 관측자료 등과 같은 점자료(point data)로 획득되는 수자원관련 자료들을 분석하기 위해서 많이 사용되고 있는 Thiessen 망에 의한 방법, 역거리가중법(IDW; Inverse Distance Weighting), Spline 방법, Isohytal 방법, 추이분석(Trend Surface Analysis) 및 Kriging 기법 등에 대한 기법을 이용할 수 있도록 하였다. 아울러, 사용자의 편의성을 위해서 GUI를 기본적으로 지원할 수 있도록 개발하였다.

2. 이론

2-1. Thiessen Network

Thiessen 망은 일반적으로 유역의 평균강우량을 산정하는 경우에 전통적으로 가장 많이 이용되고 있는 방법으로, Voronoi 폴리곤 혹은 Dirichlet 격자라고 한다. 티센 폴리곤(Thiessen polygon)은 샘플링되지 않은 위치의 속성값을 가장 가까운 한 개의 자료 점의 값으로 예측하는 분류모델이라 할 수 있다. Thiessen 폴리곤은 자료 점들을 전체적으로 한 개의 격자당 한 개의 관측값을 가지는 영역으로 나눈다. 만약 자료가 규칙적인 정사각형 격자상에 있다면 Thiessen 폴리곤은 모든 한 변의 길이가 격자 간격과 같은 길이의 규칙적 격자가 된다. 만약 자료가 불규칙적으로 분포되었다면 불규칙한 형태의 다각형이 된다. 자료 점들을 연결하는 선을 이으면 Delaunay 삼각형이 만들어지며, TIN과 같은 위상관계를 가지게 된다.

Thiessen 폴리곤은 점 자료를 공간적으로 연결시키는 가장 빠른 방법으로서 자주 사용되지만, 임의의 대상지역에서 기상 자료는 가장 가까운 기상 관측소로부터 구한다는 것을 가정하고 있다. 즉, 만약 많은 관측 자료가 없다면, 이 가정은 강우량, 온도 및 기압 같은 점진적으로 변하는 관측값에는 적용하기 어렵다.

-
- 1) 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원
 - 2) 한국수자원공사 수자원연구소 책임연구원
 - 3) 한국수자원공사 수자원연구소 연구원
 - 4) 한국수자원공사 수자원연구소 소장

Thiessen 폴리곤의 생성은 인접한 두 관측소를 연결한 후 연결된 선의 중심에서 수직으로 이동분하여 연장선을 긋는다. 이와 같은 방법으로 모든 관측점들에 대해서 동일한 과정을 적용하면 폴리곤이 생성되게 되며, 이 폴리곤은 하나의 속성값을 가지게 된다. 이때 속성값은 0을 가지게 되며, 관측소 위치가 서로 등간 격일 경우에는 동일한 크기를 가지는 폴리곤이 생성되게 된다.

2-2. IDW(역거리가중법)

역거리가중법은 추이면(trend surface)의 점진적 변화를 Thiessen 폴리곤의 근접성 개념과 결합한 것으로, 이동평균법(moving average)라고도 한다. 미계측 지역에서 관측값 Z 는 이웃 또는 미계측 지역 주변의 윈도우 내 있는 관측소 사이의 거리에 거리가중평균(distance-weighted average)이라고 가정한다. 관측소는 전형적으로 규칙적인 격자 상에 위치하거나 또는 불규칙적으로 분포하게 된다. 그리고 지도를 만들기 위해서 정밀한 규칙적인 격자상의 위치로 보간된다.

역거리가중법은 주변 관측소의 값들을 이용하여 임의의 지점에 대한 값을 추정하는 데 있어 거리에 따른 가중치를 부여하여 계산하게 된다. 이때, 윈도우라는 개념을 도입하여 범위를 정하게 되며, 이 윈도우의 이동에 따라 중앙지점에 대한 값을 계산하게 된다(그림 4.2). 일반적으로 윈도우를 이용하여 중앙값을 계산할 때 가장 단순한 방법은 주변 값에 대한 합을 구한 후 격자수로 나누어주는 방법이다. 그러나, 이러한 방법은 윈도우의 크기가 결과에 큰 영향을 주게 되며, 윈도우가 작은 경우에는 가까운 관측소의 영향을 많이 받게 되는 단점이 있다.

따라서, 이상적인 분석을 위해서는 거리의 영향을 고려한 값의 추정이 필요하다. 식 (1)과 같이 윈도우내의 평균값을 취하는 것보다는 거리에 따른 가중치를 부여하여 전체의 합이 1이 되도록 하는 것이 보다 현실적이다. 따라서, 거리에 따른 가중치를 부여하기 위해서는 다음과 같은 식을 이용하게 된다.

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z(x_i), \quad \sum \lambda_i = 1 \quad (1)$$

여기서, 가중치 λ_i 는 $\Phi(d(x_0, x_i))$ 에 의하여 계산되며, 필요조건은 $d \rightarrow 0$ 에 따라 $\Phi(d) \rightarrow 0$ 이다. 이것은 통상 사용되는 거리함수가 d^{-r} , e^{-d} 그리고 e^{-d^2} 를 사용한다. $\Phi(d)$ 의 가장 일반적인 함수로는 거리의 자승에 반비례하는 가중치를 부여하게 되는 역거리가중 함수로 다음과 같다.

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n z(x_i) \cdot d_{ij}^{-r} / \sum_{i=1}^n d_{ij}^{-r} \quad (2)$$

여기서, x_j 는 계산되는 점들이고, x_i 는 관측값들이다. 가장 단순한 보간형태는 선형보간(linear interpolator)이며, 가중치는 관측점과 계산되는 점들 사이의 거리에 대한 선형함수로 계산된다.

2-3. Spline

Spline 함수는 운형자의 수학적 표현이라고 할 수 있으며, 소구간별 함수를 이용하여 약간의 자료 점들을 정확하게 일치시키게 된다. 또한, 곡선의 한 부분과 다른 부분 사이의 이음부분을 연속적이게 만들게 된다. 이는 곧 Spline으로서 전체를 다시 계산하지 않고서도 곡선의 한 부분만을 수정할 수 있음을 뜻하며, 추이분석(trend surface analysis)을 이용할 경우에는 불가능하다.

소구간 다항식 함수 $p(x)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$p(x) = p_i(x) \quad x_i < x < x_{i+1} \quad i = 0, 1, \dots, k-1 \quad (3)$$

$$p'(x_i) = p'_{i+1}(x_i) \quad j = 0, 1, \dots, r-1 \quad i = 1, 2, \dots, k-1 \quad (4)$$

GIS를 이용한 보간법 중에서 정밀한 Spline 방법이 공통적으로 이용된다. 자료가 2차원 혹은 3차원 공간상에서 측정되었을 경우에 자연적인 변화량 및 관측값에 포함된 오차의 효과는 측정된 값보다 과도하게 높거나 낮은 국부적인 인위적 값을 생성할 수 있다. 이러한 인위적인 값들은 'thin plate spline'을 사용하여 제거되며, 국부적으로 평활화된 평균값으로 대체된다. 선형 보간처럼 면 보간의 Spline 방법은 근사함수가 가능한 가깝게 관측점을 지나도록 하며, 가능한 평활화해져야 한다고 가정한다.

자료가 임의의 오차를 포함할 때 즉,

$$y(x_i) = z(x_i) + \varepsilon(x_i) \quad (5)$$

여기서, z 는 점 x_i 에서의 속성에 대한 측정값이고, ε 은 관련된 임의오차이다. Spline 함수 $p(x)$ 는 자료값으로부터 너무 멀지않게 지나가야 하며, 따라서 평활화된 Spline 함수는 다음과 같은 식을 최소화하는 함수이다.

$$A(f) + \sum_{i=1}^n w_i^2 [f(x_i) - y(x_i)]^2 \quad (6)$$

여기서, $A(f)$ 는 함수 f 의 평탄도이며, 두 번째 항은 자료의 근접성 또는 충실성을 나타낸다.

2-4. Isohyetal

Thiessen 방법은 관측소 평균 방법(Station-Average Method)보다 다소 정확히 평균 강우량을 계산할 수 있는 방법이지만, 유역에서 관측 인자에 영향을 줄 수 있는 지형인자와 같은 인자를 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다. Isohyetal 방법은 이러한 단점을 보완할 수 있는 내삽 방법이다. 특히, 등강우선을 작성함으로써 각 관측소에서 유역과 관련 있는 지역의 경계를 연결하게 된다. 인접한 등강우선 내의 지역은 근접한 등강우선과 관련 있는 평균 강우량에 따른 가중치를 부여하게 된다. A 유역에서 계산되는 평균 강우량을 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\bar{A} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i}{A} \right) \bar{P}_i \quad (7)$$

여기서, A_i 는 등강우선 i 와 $i+1$ 사이의 유역 면적, \bar{P}_i 는 등강우선 i 와 $i+1$ 에 대한 평균강우량이며, n 은 등강우선 간격수이다. A_i/A 는 가중치이다.

가중치를 만들기 위해서 각 강우관측소에서 유역에 영향을 미치는 인자들에 대한 지식을 포함시킬 수 있는 것이 Isohyetal 방법의 장점이다. 그러나, 관측망의 밀도가 낮은 경우에 등강우선의 작성이 다소 주관적일 수 있다는 것이 단점이 있으며, 등강우선을 작성하는 작성자에 따라 여러 가지의 강우 분포형태가 작성될 수 있다. 따라서, 동일한 가중치를 부여할 수 없게 되며, Isohyetal 방법의 정확도는 등강우선을 작성하는 작성자의 지식과 훈련 정도 및 관측망의 밀도에 따라 크게 달라지게 된다. 유역내에 관측망의 밀도가 낮은 경우에는 등강우선을 정확하게 연결하기 어렵게 된다.

2-5. 추이분석(Trend Surface Analysis)

속성의 변화가 대상지역 전체에 걸쳐 연속적이고 장기적인 변화를 나타내는 경우 다항식의 회귀분석에 의해서 모델화할 수 있으며, 모델화 방법에는 몇 가지가 있다. 이러한 모델들은 관측점에서 관측값에 대한 다항식의 형태와 일치시키게 되며, 미계측 지역에서 값들이 관측점에 대한 좌표들로부터 계산될 수 있다.

넓은 범위의 공간변화를 모델화하는 가장 간단한 방법은 속성값 대 좌표로 된 자료를 가지고 다중회귀법을 이용하는 것이다. 이 방법은 자료의 공간적인 형태에 따라 다항식을 선 혹은 면으로 일치시키게 된다.

즉, 1차원일 경우에는 선으로, 2차원일 경우에는 면으로 일치시키게 된다. 이때 $\hat{z}(x_i) - z(x_i)$ 의 제곱의 합이 최소가 되도록 하는 최소자승법을 사용하게 된다. 공간좌표 (x, y) 는 독립변수, z 는 속성이며 종속변수는 정규 분포되어 있다고 가정한다. 또한 회귀오차는 위치에 독립적이라고 가정한다.

2차원의 경우에 x, y 좌표계 상의 다중회귀(multiple regression)에 의해 유도된 다항식은 다음과 같은 형태의 추이면(trend surface)이 된다.

$$f(x, y) = \sum_{r+s \leq p} (b_{rs} \cdot x^r \cdot y^s) \quad (8)$$

2-6. Kriging

Kriging 기법은 매우 강력하고 정교한 격자 내삽 기술이며, 이 기법을 사용하기 위해서는 상당한 지식을 가지고 있어야 한다. Spline, IDW 및 GRID 등과 같은 내삽 기법과 마찬가지로 통계적인 기법에 의해서 최적 fitting이 이루어질 때까지 반복적으로 수행된다.

Kriging 기법은 Z 값에 의해서 표현되는 현상에 있어서 공간변화가 통계적으로 지표면내에서 균일하다는 지역변수(regionalized variable) 이론을 전제로 한 것이다. 즉, 공간 변수가 가지는 변이의 크기는 일정한 평균값으로서 나타낼 수 있는 공간상의 구조적 성분, 무작위로 공간상의 위치와 연관성을 가지고 달라지게 되는 요소, 그리고 무작위로 발생하는 오차나 잡음에 해당하는 요소 등 세가지 성분으로 구성된다.

Kriging 기법에서는 다음과 다음과 같은 모델이 사용된다.

- 구형 모델(spherical model)

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= c_0 + c_1 \left\{ \frac{3h}{2a} - (1/2) \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right\} && \text{for } 0 < h < a \\ &= c_0 + c_1 && \text{for } h \geq a \end{aligned} \quad (9)$$

$$\gamma(0) = 0$$

- 지수모델(exponential model)

$$\gamma(h) = c_0 + c_1 \{1 - \exp(-h/a)\} \quad (10)$$

- Gaussian 모델

$$\gamma(h) = c_0 + c_1 \{1 - \exp(-h/a)^2\} \quad (11)$$

- 선형 모델

$$\gamma(h) = c_0 + b \cdot h \quad (12)$$

- Circular 모델

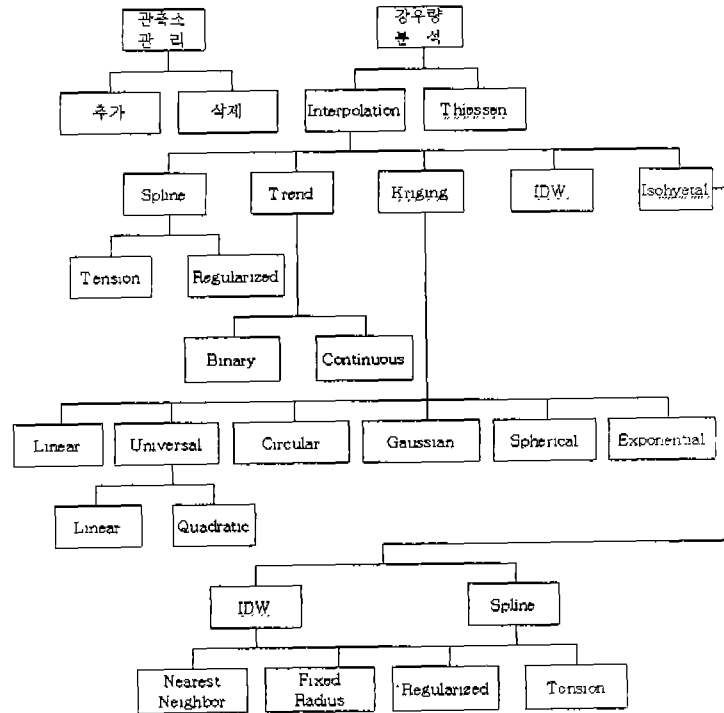
$$\begin{aligned} \gamma(h) &= c_0 + c_1 \left\{ 1 - \frac{2}{\phi} \cos^{-1} \frac{h}{a} + \sqrt{1 - \frac{h^2}{a^2}} \right\} && \text{for } 0 \leq h \leq a \\ \gamma(h) &= c_0 + c && \text{for } h \geq a \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$\gamma(0) = 0$$

3. 프로그램 구성

프로그램은 GIS 패키지인 Arc View 3.1의 Avenue Script를 이용하여 작성하였다. 프로그램의 구성은

크게 강우관측소의 관리와 강우량 자료를 공간분석하기 위한 모듈로 구성되어 있다. 강우관측소의 관리에서는 강우관측소의 추가, 삭제 기능 및 강우자료연결 기능을 가지고 있다. 추가 기능에서는 강우관측소의 기본적인 속성인 위치와 주소, 관리자, 관측시작 년월일 등에 대한 정보를 사용자가 추가할 수 있도록 구성하였다. 분석 기능에서는 지금까지도 많이 사용하고 있는 Thiessen망을 작성할 수 있는 모듈과 강우량 자료를 보간하기 위한 모듈들이 포함되어 있다. 본 연구에서 고려한 보간방법에는 Spline, 추이분석(Trend Surface Analysis), 역거리가중법(IDW : Inverse Distance Weight), Isohyetal 및 Kriging 기법 등이다.

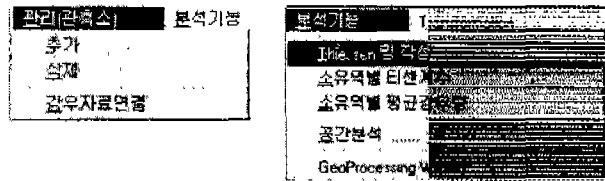


<그림 1> 프로그램 구성도

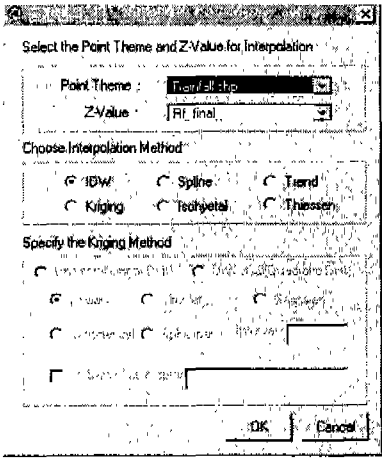
4. 프로그램

본 연구에서 작성한 “강우자료의 공간분석을 위한 GIS 모듈” 프로그램의 주요 기능별 화면 구성은 <그림 1>과 같다. 강우자료의 공간분석을 위한 모듈에서는 기본적으로 강우관측소에 대한 “추가”나 “삭제” 등과 같은 관리 기능을 가지고 있으며, 강우관측소에 대한 각종 속성값을 부여할 수 있도록 하였다. “강우자료 연결”에서는 마이크로소프트의 엑셀 파일 형태로 되어 있는 자료를 강우관측소의 속성값으로 부여할 수 있도록 하여 공간분석 기능에서 활용할 수 있도록 하였다.

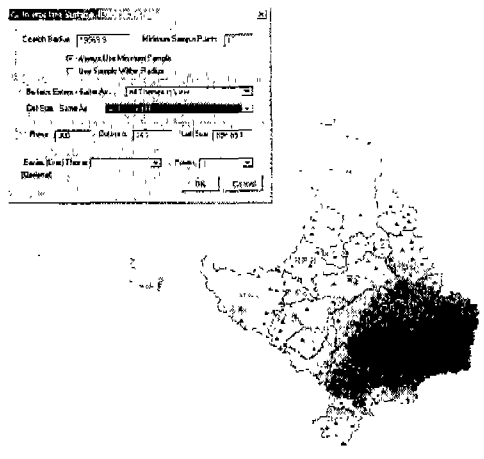
“Thiessen망 작성”은 유역의 평균 강우량 자료 계산에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 Thiessen 망을 작성하는 기능으로, 강우관측소에 대한 점 커버리지(point coverage)만을 이용하여 간단하게 작성할 수 있도록 구현하였다. “소유역별 티센계수”는 소유역에 포함되어 있는 강우관측소 자료를 이용하여 각 강우관측소의 계수를 계산하는 것이며, “소유역별 평균강우량”은 앞서 계산된 “소유역별 티센계수”를 이용하여 소유역에 대한 평균강우량을 계산하는 기능을 갖도록 하였다.



<그림 2> 강우분석을 위한 GIS 모듈 기본메뉴



<그림 3> 공간분석 기능 화면



<그림 4> IDW를 이용한 강우자료의 공간분석 예

<그림 3>는 "공간분석"의 화면을 나타낸 그림으로, 강우자료의 공간분석은 역거리가중법, Spline, 추이분석, Kriging, Isohyetal 등과 같은 공간분석 알고리즘을 이용할 수 있도록 하였다. <그림 4>는 역거리가중법을 이용하여 한강유역에 대한 강우자료의 공간분석을 실시한 결과를 나타내고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 강우관측소의 관리와 강우 및 지하수와 같은 수자원 관련 점자료를 공간적으로 분석할 수 있는 모듈을 GIS를 이용하여 개발하였다. 본 모듈은 사용자가 사용하기 쉽고 현재 사용되고 있는 공간분석 기법을 모두 포함하고 있어 사용자의 다양성을 가질 수 있는 장점을 가지고 있다. 향후에도 유역의 하도경사나 도달거리 등과 같은 수문모델에서 이용될 수 있는 인자를 자동적으로 추출할 수 있는 GIS 모듈을 지속적으로 개발할 예정이다.

참고문헌

김계현, 2000, GIS 개론, 2nd ed, 대영사
 Burrough, P. A. & Mcdonnell, R. A., 1998, Principles of Geographical Information Systems, Chapter 5:Creating continuous surfaces from point data, Oxford Press.
 McCuen, 1998, "Hydrologic Analysis and Design", Prentice Hall, 2nd ed, Englewood Cliffs, NJ.
 Razavi, A. H., 1999, ArcView GIS/Avenue Developer's Guide, Onword Press.