복잡지형 고해상도 격자망에서의 PRISM 기반 강수추정법

정유란¹ · 윤경담² · 조경숙³ · 이재현¹ · 윤진일^{1*}

¹경희대학교 생태시스템공학과,

²한국과학기술연구원 영상미디어연구센터, ³기상청 기후정책과

(2009년 6월 2일 접수; 2009년 6월 15일 수정; 2009년 6월 22일 수락)

The PRISM-based Rainfall Mapping at an Enhanced Grid Cell Resolution in Complex Terrain

Uran Chung¹, Kyungdahm Yun², Kyung-Sook Cho³, JaeHyun Yi and Jin I. Yun^{1*}

¹Department of Ecosystem Engineering, Kyung Hee University

²Image Research Center Korea Institute of Science and Technology

³Climate Policy Division, Korea Meteorological Administration

(Received June 2, 2009; Revised June 15, 2009; Accepted June 22, 2009)

ABSTRACT

The demand for rainfall data in gridded digital formats has increased in recent years due to the close linkage between hydrological models and decision support systems using the geographic information system. One of the most widely used tools for digital rainfall mapping is the PRISM (parameter-elevation regressions on independent slopes model) which uses point data (rain gauge stations), a digital elevation model (DEM), and other spatial datasets to generate repeatable estimates of monthly and annual precipitation. In the PRISM, rain gauge stations are assigned with weights that account for other climatically important factors besides elevation, and aspects and the topographic exposure are simulated by dividing the terrain into topographic facets. The size of facet or grid cell resolution is determined by the density of rain gauge stations and a 5×5km grid cell is considered as the lowest limit under the situation in Korea. The PRISM algorithms using a 270m DEM for South Korea were implemented in a script language environment (Python) and relevant weights for each 270m grid cell were derived from the monthly data from 432 official rain gauge stations. Weighted monthly precipitation data from at least 5 nearby stations for each grid cell were regressed to the elevation and the selected linear regression equations with the 270m DEM were used to generate a digital precipitation map of South Korea at 270m resolution. Among 1.25 million grid cells, precipitation estimates at 166 cells, where the measurements were made by the Korea Water Corporation rain gauge network, were extracted and the monthly estimation errors were evaluated. An average of 10% reduction in the root mean square error (RMSE) was found for any months with more than 100mm monthly precipitation compared to the RMSE associated with the original 5km PRISM estimates. This modified PRISM may be used for rainfall mapping in rainy season (May to September) at much higher spatial resolution than the original PRISM without losing the data accuracy.

Key words : PRISM, Areal precipitation, Topography, Orographic effect, Rain shadow

* Corresponding Author : Jin I. Yun (jiyun@khu.ac.kr)

I. 서 론

강수현상은 시공간적으로 불연속적이어서 강수량의 공간변이는 다른 기상요소에 비해 훨씬 크다. 예컨대 댐의 저수량을 결정짓는 것은 지점이 아닌 유역강수량이므로 농업이나 수자원 관리 부문에서는 기존 관측망에서 얻을 수 있는 지점강수량자료로부터 면적강수량을 추정하거나 규칙적인 격자점의 값으로 변환하는 기법이 개발되어왔다. 이들을 정리해보면 등우량선도와 Thiessen network 같은 작도법(graphical method), 관측된 강수량과 고도, 경사방향 등 관측점의 지형특성 간 상관을 이용하는 지형통계법(topographical method), 거리역산가중(inverse distance weighting, IDW)과 Kriging으로 대표되는 공간내삽법(spatial interpolation) 등 크게 세 부류로 나눌 수 있다(Thiessen, 1911; Phillips *et al.*, 1992; Seino, 1993; Nalder and Wein, 1998). 하지만 최근 10여 년간 가장 널리 이용된 방법은 지형통계-공간내삽 하이브리드기법으로서 DEM(digital elevation model)과 산악강수모형을 결합한 PRISM(Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model)이 대표적이다(Daly *et al.*, 1994; Johnson *et al.*, 1999). 산악강수모형은 강수량에 미치는 해발고도의 영향을 단순회귀식으로 표현하되, 산악의 경사방향, 거리, 고도, 해양도 등에 의해 가중회귀계수를 지점마다 달리 추정하도록 한 것이다.

산악경관이 혼한 우리나라에서도 PRISM에 기초하여 5km 공간해상도로 입력자료를 준비하고 모든 격자점에 대한 가중회귀계수로부터 월평균 면적강수량을 추정할 수 있는 방법(K-PRISM)이 제시된 바 있다(Shin *et al.*, 2008). 강수관측망의 분해능(평균 25km)보다 훨씬 높은 5km 격자점 단위의 강수량 분포도를 만들 수 있다는 것이 K-PRISM의 장점이라 할 수 있다. 하지만 단위격자의 크기가 5km이므로 만약 지형특성이 5km×5km 격자점으로 표현할 수 없을 만큼 작다면 강수량 추정에 아무 영향도 미칠 수 없다. 우리나라와 같이 복잡한 산악지형은 공간해상도 5km 안에서도 아주 다양한 지형특성을 보이기 때문에 K-PRISM으로는 정확한 강수분포를 표현하기 어려울 수도 있다. 그렇다고 단위격자점의 크기를 줄여서 공간해상도를 높일 경우 기존 관측망으로는 관측밀도가 낮아져 가중회귀직선의 기울기가 고도에 따른 강수량의 증가효과를 반영하지 못하는 문제가 생길 수도 있다.

최근 농작물의 재배적지, 병해충 발생의 지리적 분포, 봄꽃 개화일의 단축 등 기후변화에 따른 육상생태계의 영향평가 및 취약성 분석에 쓰이는 기후자료의 공간해상도가 점차 향상되어 경관규모에 이르고 있다(Chung *et al.*, 2009). 앞으로 모든 기후변화와 학정보가 고분해능의 디지털지도 형태로 수요자에게 공급될 것임을 감안한다면 다른 기후요소에 비해 미흡한 강수량 분포도의 분해능 개선작업이 반드시 필요하다. 본 연구는 우량관측망의 밀도가 동일한 조건에서 단위격자점의 크기만 줄일 경우 PRISM 방식에 의해 추정된 강수량 분포가 단위격자점의 크기를 줄이기 전에 비해 개선되는지를 확인함으로써 향후 우리나라와 같은 복잡지형에 적용할 수 있는 고분해능 강수분포도 제작기술 개발에 기여하기 위해 수행하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. PRISM 모형의 수정

2.1.1. 자료준비

입력자료의 공간해상도는 최종 출력물의 공간분해능을 결정한다. 따라서 PRISM 구동을 위해 필요한 입력자료인 DEM의 공간해상도가 강수량분포도의 분해능을 결정하게 된다. 본 실험에서는 기온, 일사 등 다른 기후요소의 경관규모 표출에 사용되고 있는 270m×270m를 단위격자점의 해상도로 설정하였다. 수치표고모형은 환경지리정보시스템(<http://www.egis.go.kr>)으로부터 수집한 30m DEM을 바탕으로 하여 9×9=81개 격자점값의 공간평균을 270m DEM으로 사용하였다.

PRISM의 특징은 영역 내 모든 격자점에 동일한 회귀식이 적용되는 일반모형과는 달리 각 격자점의 강수량 추정에 사용되는 고도-강수량 회귀모형이 격자점마다 독립적으로 도출된다는 점이다. 회귀모형 도출에 필요한 관측점의 수는 최소 3개이므로 PRISM에서는 원래 각 격자점을 중심으로 반경을 30, 40, 50km 등으로 늘리면서 이 범위 안에 최소 3개 관측소가 들어오도록 결정한다. 본 실험에서는 270m DEM의 각 격자점 좌표로부터 432개 기상청 자동기상관측소 포함 격자점까지의 상대적인 거리를 계산한 다음, 최소 5개 이상의 강수량 관측소가 이 격자점의 회귀식 도출에 이용되도록 하였다.

2.1.2. 가중치 계산과정 수정

임의 격자점의 최적회귀모형 도출시 사용되는 주변 관측자료의 가중치는 다음 식으로 결정된다(Shin *et al.*, 2008).

$$W = \sqrt{F_d W(d)^2 + F_z W(z)^2 W(f)} \quad (1)$$

위 식에서 $W(d)$ 는 거리의 가중치로서 추정격자점과 관측격자점이 일치하면 최대가중치(즉 1)를 부여하고 멀어질수록 거리제곱의 역수에 비례하여 줄인다.

$$W(d) = \frac{1}{(0.05d)^a} \quad (2)$$

주의할 점은 여기서 거리의 단위는 m나 km가 아니라 격자점의 개수로 표현된다는 것이다. 우리나라에 적용한 K-PRISM의 격자간격이 5km이므로 추정격자점으로부터 반경 5km 이내에 포함되는 관측소의 강수량은 가중치가 1이라는 뜻이다. 본 연구에서는 5km 격자점 대신 270m 해상도를 사용하므로 분모의 d 에 0.05를 곱해서 반경 5km보다 멀리 떨어진 관측소에만 이 식이 적용되도록 하였다. 거리가중지수(distance weighting exponent) a 는 통상적으로 많이 쓰는 2를 사용했으므로 거리가중역산가중(inverse distance squared weighting, IDSW)과 동일하다. F_d 와 F_z 는 가중치 중 거리와 고도가 차지하는 중요도로서 각각 0.8과 0.2이다.

$W(z)$ 는 고도의 가중치를 의미하는데 거리와 마찬가지로 고도차가 커지면 두 지점 간 강수량의 유사성이 점차 줄어들어 어느 수준에 도달하면 상호 관련이 없어진다. 고도차가 얼마만큼 벌어져야 가중치가 달라지기 시작하며 고도차가 계속 증가하여 어느 수준에 도달하면 전혀 무관한 값이 되는지는 경험적으로 결정되는 최소 및 최대 임계고도차로 표현한다.

$$\begin{aligned} W(z) &= 1 \quad \text{for } \Delta z \leq \Delta z_m \\ W(z) &= \frac{\Delta z_m}{\Delta z^b} \quad \text{for } \Delta z_m < \Delta z < \Delta z_x \\ W(z) &= 0 \quad \text{for } \Delta z \geq \Delta z_x \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 Δz 는 관측소와 해당 격자점의 고도차(단위 m)이고 Δz_m , Δz_x 는 최소 및 최대 임계고도차로서 각각 100m와 500m를 사용하였다. 고도가중지수(elevation weighting exponent) b 는 일차원 IDW와 같이 1로 두었다.

$W(f)$ 는 지향면(facet)의 가중치로서 격자점의 지향면(경사방향)이 관측소가 위치한 토지의 지향면과 차이가

클수록 감소한다. 경사방향은 8방위로서 북향(330~30도)으로부터 30도 간격의 시계방향으로 1, 2, 3, ..., 8(북서, 300~330도)로 수치화 하였다.

$$\begin{aligned} W(f) &= 1 \quad \text{for } \Delta f \leq 1 \quad \text{and } B \leq 20 \\ W(f) &= \frac{1}{(\Delta f + 0.05B)^c} \quad \text{for } \Delta f > 1 \quad \text{or } B > 20 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 Δf 는 격자점과 관측점 사이의 지향면 경사방향 편차(0~4)이다. 두 지점의 경사방향이 서로 다를수록 강수량의 유사성이 줄어든다는 의미이다. B 는 해당 격자점과 강수량관측소 사이에 존재하는 '장애물'(barrier)의 수인데 두 지점을 직선으로 잇고 이 직선에 놓여있는 격자점의 경사방향과 해당격자점 경사방향을 비교하여 그 편차가 2이상인 격자점의 개수이다. 이 값에 0.05를 곱한 것은 K-PRISM의 격자간격이 5km인데 본 연구에서는 270m 격자점을 사용한 점을 고려한 것이다. 지향면 가중지수(facet weighting exponent) c 의 값은 해안산악의 경우 2.0, 내륙산악의 경우 대체로 1.5로 둔다.

원래 PRISM에는 이 밖에도 해안선으로부터 거리(coastal proximity), 연직대기의 층위(vertical layer) 등을 가중치로 사용하고 있지만, 국내조건에 맞지 않거나 영향력이 적어서 제외해도 큰 문제는 없는 것으로 보고되었다(Shin *et al.*, 2008). 따라서 앞에서 언급한 거리, 고도, 지향면의 가중치만 고려하여 격자점별 해당 우량관측자료의 최종가중치를 계산하였다. 이들 가중치는 관측강수량에 적용하여 가중강수량자료를 만드는데 사용되었다.

2.1.3. 최적 회귀모형 도출

다음에는 가중강수량을 종속변수, 관측소의 고도값을 독립변수로 두고 각 격자점별 고유 회귀모형을 도출해야 하는데 이를 위해 다음과 같은 가중최소자승법(weighted least square method)을 사용하였다. 즉 최적회귀모형의 형태가 다음과 같을 때,

$$\hat{y} = \beta_1 x + \beta_0 \quad (5)$$

여기서 $\beta_1 = \frac{\sum W_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum W_i (x_i - \bar{x})^2}$, $\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x}$, 이때

$$\bar{x} = \frac{\sum W_i x_i}{\sum W_i}, \quad \bar{y} = \frac{\sum W_i y_i}{\sum W_i}$$

x_i 는 관측소 고도, y_i 는 관측소의 월강수량이다.

도출된 회귀모형에 의해 추정된 강수량이 비현실적으로 낮거나 높아지는 경우를 방지하기 위해서는 유효가울기의 범위를 설정하는 것이 필요하다. 우선 최소가울기가 0보다 작은 경우를 방지하기 위해 도출된 β 값이 0보다 작으면 β 를 0으로 두고 계산된 β 이 2 이상일 경우 값을 2로 대체하였다.

2.2. 모형검증

PRISM의 단위격자점 해상도를 270m로 높인 경우 추정값의 상대적인 정확도를 기존의 5km 단위격자에서 추정된 강수량과 비교하였다. 이를 위해 남한 전역의 고해상도 수치표고모델은 환경부 환경지리정보서비스로부터 수집하였으며, 입력 강수량자료로는 기상청 무인기상관측소 432개에서 2007년 1월 1일부터 12월 31일까지 관측한 강수량자료로부터 월별로 적산강수량을 계산하였다. 식 (1)에 의해 각 격자점의 근린 우량관측소별 가중치를 월별로 계산하고 식 (5)에 의해 각 격자점의 최적 회귀모형을 역시 월별

로 유도하였다. 이렇게 해서 전국 1,275,274개 격자점(사방 270m)에 대하여 작성한 월별 최적회귀모형에 격자점의 DEM 고도를 입력시켜 격자점의 강수량을 추정하였다. 이 방법에 의해 추정된 2007년 월별 강수량분포도로부터 같은 해 한국수자원공사 166개 강수량 관측소에 해당하는 격자점의 추정값을 추출하고 이를 같은 장소에서 실측한 강수량과 비교하였다. 한국수자원공사의 166개 우량관측소의 평균 해발고도는 313m이고 이들 가운데 44%는 해발 300m 이상의 고지대에 분포하며 100m 이하의 평야지에는 12%만이 분포한다. 따라서 관측지점을 포함하는 270m×270m 격자점의 경사도 역시 평균 7도에 이른다. 대부분 백두대간에 분포하고 있어 우리나라의 복잡한 지형특성이 잘 반영된 강수량기록이다. 특히 강수량 추정에 사용된 기상청 자동기상관측망과는 전혀 겹치지 않으므로 해상도를 높인 PRISM의 성능검증을 위해서 적합한 독립자료라고 할 수 있다 (Fig. 1). 이 때 성능비교의 기준으로서 기존 5km 해상도의 K-PRISM 방식에 의한 강수량추정값을 사용하였다.

Fig. 1. Location map of 432 automated weather stations operated by the Korea Meteorological Administration (white circle) and 166 rain gauge stations maintained by Korea Water Corporation (black circle) in South Korea. Background shade level indicates elevation contour.

III. 결과 및 고찰

3.1. 격자점별 가중치 분포

전국 1,275,274개 격자점(사방 270m)에 대하여 각각의 강수량에 미치는 최근린 강수관측소 5개의 영향을 가중치로 표현하였다. Fig. 2는 이 가운데 경기도 북부 퇴계원수위표 표준유역을 대상으로 270m 해상도의 격자점별 종합가중치를 관측소별로 계산한 것을 보여준다. 이 관측소별 종합가중치는 격자점과 우량관측소 간의 거리, 고도의 편차, 경사방향(지향면)의 편차를 각각 추정하여 식 (1)에 의해 종합한 것으로서 해당 격자점의 고도-강수량 간 회귀계수 추정에 쓰이는 가중평균강수량을 얻는데 사용된다. 퇴계원수위표 유역에는 5개의 강수관측소가 있는데 각 격자점의 가중평균강수량 추정에 미치는 관측소별 영향 정도가 거리는 물론 고도편차, 지향면편차 등 주요지형의 특성과 함께 반영되어있다. 예를 들어 주어진 격자점에 대한 관측소별 강수량은 Fig. 2의 각 패널로 표현된 0에서 1 사이의 가중치가 곱해진 상태로 회귀계수 추정에 사용된다.

Fig. 2. Location map of the 5 rainfall stations in a small watershed (Toegyewon Watermark). Panels A to E show the cell-based integrated weighting factors for each station, which were used in deriving optimum regression coefficients for each grid cell.

3.2. 추정강수량의 분포와 신뢰성

퇴계원수위표 표준유역에 대해 2007년 1월부터 12월까지 매일 강수량분포를 PRISM 모형에 의해 5km

격자와 270m 격자 기반으로 추정한 것이 Fig. 3이다. 5km 해상도로 표현할 경우 이 유역은 모두 23개의 격자점으로 구성되며 그만큼 지형특성도 단순화 될 수

Fig. 3. Annual precipitation distribution over Toegyewon Watermark watershed estimated by the original 5km-(left) and the modified 270m-(right) PRISM.

Table 1. Root mean square errors (RMSE) associated with the PRISM-estimated monthly total rainfall at 166 rainfall measurement sites in mountainous areas in South Korea in 2007. With the higher resolution (i.e., smaller cell spacing), the estimation error seems to diminish especially in rainy months

		Month											
		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
		Mean of measured precipitation (mm)											
		8	41	113	31	107	104	232	374	390	42	13	24
		RMSE of PRISM estimated precipitation (mm)											
Cell Spacing (m)	5,000	7.7	8.5	27.4	10.1	27.9	30.7	51.0	97.3	79.3	16.7	13.9	6.4
	270	6.4	9.0	24.7	10.2	23.6	27.6	43.6	89.3	68.3	16.0	14.1	6.3
		Coefficient of Variation (%)											
Cell Spacing (m)	5,000	96	21	24	33	26	30	22	26	20	40	107	27
	270	80	22	22	33	22	27	19	24	18	38	108	26
RMSE reduction (%)		-16.9	5.9	-9.9	1.0	-15.4	-10.1	-14.5	-8.2	-13.9	-4.2	1.4	-1.6

밖에 없다. 따라서 강수량 분포 역시 단순화 된 지형 효과(예, 고도)만이 반영되었다. 하지만 270m 해상도에서는 이 영역이 7,867개의 격자점으로 구성되며 5km 해상도에서 보이지 않았던 정밀한 지형효과(예, 고도, 경사향, 지형장애물)가 강수량에 반영된 것으로 나타난다.

격자점의 크기를 270m로 줄임에 따라 강수량 추정 값에 반영될 것으로 기대되는 미세지형효과는 대부분

산악지역에 설치된 166개 한국수자원공사 우량관측소의 실측 강수량에 의해 제한적으로 확인할 수 있다. 이들 관측소의 자료에 의하면 2007년 전국적으로 8mm(1월)~390mm(9월)의 비가 내려 연간으로는 1,455mm가 기록되었다(Table 1).

먼저 기존의 5km×5km 격자점에 근거한 PRISM 추정강수량은 실측값과의 편차가 RMSE로 표현했을 때 12월의 6.4mm로부터 8월의 97.3mm까지 폭넓게

분포한다. 하지만 월별 RMSE를 그 달의 실측강수량으로 표준화 시켜 변이계수를 구해보면 100%에 달하는 1월과 11월을 제외할 경우 월별 변동폭이 평균 27%로 크게 줄어든다. 즉 PRISM에 의한 강수추정치는 월별로 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

동일한 방법으로 강수량을 추정하되 공간분해능을 5km에서 270m로 높이면 추정오차는 RMSE로 표현해서 12월의 6.3mm로부터 8월의 89.3mm까지 변동한다. 실측 강수량에 의해 표준화시키면 역시 강수량이 매우 적은 1월과 11월을 제외할 경우 월별로 25% 수준의 오차변이계수가 계산된다.

두 가지 격자점 크기에서 발생한 추정오차를 단순 비교해 보면 2월, 4월, 11월을 제외하고는 모든 달에서 월별 강수량 추정오차가 270m 해상도에서 줄어드는 것을 볼 수 있다. 특히 월 강수량이 100mm가 넘는 경우 5km 해상도에 비해 추정오차를 상당부분 줄일 수 있는데 감소폭은 8.2%에서 최대 15.4%로서 평균 10%에 달한다. 반면 월 강수량이 50mm 이하인 경우에는 추정오차의 변화에 일관성이 없거나 개선 효과가 나타나지 않았다. 관측망의 밀도를 그대로 둔 채 DEM의 해상도만 변경함으로써 이 정도의 오차감소효과를 얻은 것은 당초 기대했던 대로 PRISM 추정강수량에 미세지형의 효과가 반영된 것으로 해석할 수 있다.

적 요

관측밀도가 동일한 조건에서 단위격자점의 크기를 줄일 경우 PRISM 방식에 의해 추정된 강수량 분포가 단위격자점의 크기를 줄이기 전에 비해 개선되는지 확인하기 위해 PRISM 코드를 수정하여 270m×270m 격자점 단위로 구동할 수 있도록 하였다. 남한 전역의 지형자료를 270m DEM으로부터 준비하고 432개 기상청 자동기상관측소의 2007년 월별 적산강수량 자료를 입력자료로 하여 각 격자점의 PRISM 회귀식을 도출하였다. 회귀모형과 DEM 고도에 의해 각 격자점의 월별 적산강수량을 추정한 다음, 추정된 강수량분포도로부터 한국수자원공사 우량관측소 166개소에 해당하는 격자점의 자료를 추출하여 해당관측소의 실측값과 비교하였다. 동일한 강수자료를 이용하되 이번에는 5km 격자점의 PRISM 회귀모형을 유도하여 강수

량 분포도를 작성하고 166개 지점 추정강수량을 추출하여 실측자료와의 차이를 RMSE로 표현하였다. 5km 대신 270m 분해능의 DEM을 사용할 경우 월 강수량이 100mm 이상인 경우 평균 10%의 오차 감소효과가 확인되었다.

감사의 글

논문의 품위를 크게 향상시켜주신 세 분 심사위원의 지적에 대해 깊이 감사드립니다. 본 연구는 농림수산식품부 농림기술개발사업(전자기후도 기반 유역단위 농업기상예보시스템)의 지원에 의해 이루어진 것이다.

REFERENCES

- Chung, U., J. E. Jung, H. C. Seo, and J. I. Yun, 2009: Using urban effect corrected temperature data and a tree phenology model to project geographical shift of cherry flowering date in South Korea. *Climatic Change* **93**, 447-463.
- Daly, C., R. P. Neilson, and D. L. Phillips, 1994: A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology* **33**, 140-158.
- Johnson, G. L., P. A. Pastories, G. H. Taylor, and C. Daly, 1999: Spatial climate products - a new dimension for climate applications. Preprints, *11th Conference on Applied Climatology*, Dallas, Texas, American Meteorological Society, 107-113.
- Nalder, I. A., and R. W. Wein, 1998: Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **92**, 211-225.
- Phillips, D. L., J. Dolph, and D. Marks, 1992: A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. *Agricultural and Forest Meteorology* **58**, 119-141.
- Seino, H., 1993: An estimation of distribution of meteorological elements using GIS and AMEDAS data. *Journal of Agricultural Meteorology (Japan)* **48**, 379-383.
- Shin, S. C., M. G. Kim, M. S. Suh, D. K. Rha, D. H. Jang, C. S. Kim, W. S. Lee, and Y. H. Kim, 2008: Estimation of high resolution gridded precipitation using GIS and PRISM. *Atmosphere* **18**, 71-81. (In Korean with English abstract)
- Thiessen, A. H., 1911: Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review* **39**, 1082-1084.