

미계측 결측 강수량을 위한 선형계획법의 검증

A Certification of Linear Programming Method for Estimating Missing Precipitation Values Ungauged

유 주 환*
Yoo, Ju-Hwan

Abstract

The amount and continuity of precipitation data used in a hydrological analysis may exert a big influence on the reliability of the analysis. It is a fundamental process to estimate the missing data caused by such as a breakdown of the rainfall recording machine or to expand a short period of rainfall data. In this study a linear programming method treated as a data-driven approach for estimating the missing rainfall data is compared with seven other methods widely used and its superiority is certified. The data used in this research are annual precipitation ones during 17 years at the Cheolwon station including an ungauged period of 15 years and its five surrounding stations. By use of this certified method the ungauged precipitation values at the Cheolwon station are estimated and the areal averages of annual precipitation data for 32 years at the Han River basin are calculated.

Keywords : Ungauged precipitation, Missing data estimation, Data-driven, Linear programming

요 지

강수량을 이용해 수문분석 할 경우 강수 자료의 양과 연속성은 분석의 신뢰성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 강수 자료가 짧거나 기계 고장 등으로 인하여 결측된 경우에 강수 자료기간을 늘리거나 결측 자료를 보완하는 것은 매우 기본적인 과정이다. 이에 본 연구에서는 결측 강수량을 보완하기 위해서 적용되는 자료구동(Data-driven) 방법인 선형계획법을 많이 사용되는 7개 기법을 비교 분석하고 우수성을 검증한다. 이를 위해서 적용한 자료는 한강 유역 내에 있는 기상청 관할 관측소 중에 미계측 기간 15년을 포함하는 철원 관측소와 5개 주변 관측소의 17년간 강수량 자료이다. 그리고 검증된 방법을 적용하여 철원 관측소의 미계측 강수량을 보완하고 한강 유역의 32년간 유역 평균 강수량을 산출한다.

핵심용어 : 미계측 강수, 결측자료 보완, 자료구동, 선형계획

1. 서 론

1.1 연구 목적 및 배경

하천에 흘러가는 홍수량이나 댐에 유입되는 홍수량

뿐만 아니라 국지적으로 발생하는 계곡 또는 지천의 홍수량을 산출하여 홍수를 예측하는 것은 재해 예방을 위해서 항상 중요하다. 이를 위한 수문 분석(Hydrological Analysis) 방법에는 유출량을 산출하기 위해서 유량을 실측하는 직접 방법이나 강우-유출 모형에 의한 간접

* 영동대학교 토목환경공학과 부교수
Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engrg., Youngdong Univ., Chungbuk 370-701, Republic of Korea.
(e-mail: jhyoo@youngdong.ac.kr)

적인 방법이 있다. 이 중 직접 방법은 비용이 많이 소요되거나 계측에 위험성이 크기 때문에 간접 방법을 많이 이용한다. 이 간접 방법은 강수량을 강우-유출 모형에 적용하여 홍수 수위나 유출량 등의 수문량을 산출한다. 특히 최근 편리하면서 다양한 강우-유출 모형이 개발되면서 실무적으로 많이 적용되고 있다. 그러나 이런 편리성의 이면에는 신뢰성 있는 강수량자료가 동반되어야 한다.

한편 홍수 방위와 같은 수문학적 방재로서 수방 대책을 포함한 유역 종합치수 계획이나 각종 사전제해영향성 평가에서도 수문분석이 이루어진다. 특히 분석지점의 유역 면적 평균 강수량을 위해서 유역 부근 관측소에 장기간의 강수량자료가 필요하다. 그런데 유역 부근 관측소들의 강수량자료에 결측치가 있기도 하고 설치년도가 모두 같지 않아서 관측 기간이 짧은 자료가 포함되는 경우도 있다. 이와 같은 경우 장기간의 면적평균 강수량 자료를 확보하기 위해서 자료 보완이 필요하다. 즉 자료 보완을 통하여 자료 기간을 늘려서 분석의 통계적 신뢰성을 높일 필요가 있다.

본 연구에서는 결측 자료 보완법을 이용하여 미계측 기간의 자료를 보완하는데 연구의 주안점을 둔다. 결측 자료를 보완하는 방법은 크게 3가지로 구분 지을 수 있다. 첫 번째는 역거리 (Inverse Distance)법과 같이 거리 또는 고도 등 공간적 요소를 고려한 공간 가중 (Spatial Weighting) 방법이고 두 번째는 년정상비 (Normal Ratio) 법, 선형계획 (Linear Programming)법과 같이 자료의 통계적 특성을 고려한 자료구동 (Data-driven) 방법이다 (Teegavarapu and Chandramouli, 2005). 그리고 세 번째는 수정년정상비 (Modified Normal Ratio)법과 같이 공간가중법과 자료 구동법을 조합한 방법이다.

결측 강수량 보완법에 관한 연구 사례를 살펴보면 우선 국외 동향으로 강우량의 이상치나 결측치의 보완법으로 역거리법을 적용했던 사례 (Wei and Mc Guinness, 1973; Simanton and Osborn, 1980)와 결측 보완법 5개 방법을 적용하여 년정상비법과 선형계획법이 산술평균법, 역거리법, 수정역거리법보다 우수함을 보였던 사례 (Tung, 1983) 이후 최근 Teegavarapu and Chandramouli (2005)에 의해서 인공신경망 (Artificial Neural Network)과 크리깅 (Kriging)법을 적용하여 결측 강수량을 보완하는 연구 등이 있어 왔다. 그리고 국내에서는 김응석 등 (1995)은 산악지역을 고려한 점강우량의 결측치 보정방법에 관하여 연구했고 김응석 등 (1999)은 산술평균 (Arithmetic Average)법, 년정상비법, 역거리법, 선형계획법, 크리깅법 등 7개 방법을 적용하여 선형계획법에서 가장 적은 오차를 보였지만 상대적으로 쉽고 오차가 적은 역거리

법을 권장하였다. 안상진 등 (2003)은 미계측 지점의 강수량을 산정하기 위해서 역거리법과 크리깅법을 적용하였다. 그리고 김충수, 김형섭 (2006)은 강우량의 이상치와 결측치를 보정하기 위해서 산술평균법, 역거리법, 수정역거리법, 인근관측소와의 관계식법, 크리깅법 등을 적용하였고 이명우 등 (2006)은 선형회귀분석 (Linear Regression Analysis)법을 적용하여 강우량의 결측치를 보완하였다. 그러나 기존 연구 (Tung, 1983; 김응석 등, 1999)에서와 같이 선형계획법의 적용 결과가 좋게 나타나고는 있지만 방법의 우수성이 조명되지 못하고 있다. 이에 본 연구에서는 결측 보완법으로서 선형계획법에 대해 좀 더 다각적인 측면과 평가 기준을 고려하여 방법의 수행 능력을 평가하여 비교 검정하였다.

1.2 연구범위 및 제한점

선형계획법을 검정하기 위해서 강수량의 결측치 보완법으로 널리 이용되는 7가지의 다른 방법을 적용하고 비교한다. 여기서 7가지 방법은 산술평균법, 년정상비법, 수정년정상비법, 역거리법, 수정역거리법, 선형회귀분석법, 크리깅법 등이다. 검정 대상인 선형계획법은 결측 보완하고자 하는 관측소 (Base Station)와 주변 관측소 또는 지표 관측소 (Surrounding Station or Index Station)의 강수량자료가 일정기간 동안 확보되어야 하고 관측치와 계산치 간의 오차를 최소화하는 방법이다 (Singh, 1989). 적용 자료는 한국 내 관측전문기관인 한국기상청 (Korea Meteorological Administration)이 관리하는 강수량 자료이다. 이 적용 자료는 유역치수 계획에서 검토되어 보고된 한강유역 내 관측소별, 연도별 강수량 자료 (국토해양부, 2008)이다. 강수량 결측치의 시간 단위는 자료의 사용 목적에 따라 결정된다. 대개 시간 (Hour), 일 (Day), 월 (Month), 년 (Year) 단위의 강수량 자료이다. 본 연구에 적용한 강수량은 년 단위 강수량이다. 이 때 적용된 강수량 관측소의 티센 (Thiessen) 지배 면적은 2천 km^2 이 넘는 광역 범위를 갖는다. 비록 동일 유역 내에 있지만 상당한 거리를 가지므로 본 연구 결과에 의한 미계측 보완 결과는 방법 검정 과정의 결과이므로 대체적 수문정보에 국한되며 실무적 사용에는 제한한다. 즉 본 연구는 방법론적 평가에 초점을 두고 있기 때문에 실무상 소규모 시간단위를 갖거나 조밀한 관측 밀도를 갖는 경우에는 세심한 검토와 적용이 요구된다.

2. 적용방법

본 장에서는 검정하기 위한 선형계획법과 비교 대상

Table 1. Descriptions of Symbols for Methods Applied in this Study

Mark	Description
c_i	Weighting factor or factor of contribution for the index station i to the base station having missing data
p_{ji}	Precipitation amount value at the j th time observed at the index station i
p_{xj}	Precipitation amount value at the j th time observed at the base station having missing data
U_i	Nonnegative slack variable for the i th precipitation event needed in the linear programming method
V_i	Nonnegative surplus variable for the i th precipitation event needed in the linear programming method
m	Number of the index stations (5 in this study)
n	Number of the precipitation events (17 in this study)
M_x	Normal precipitation at the base station (Cheolweon station in this study)
M_i	Normal precipitation at the index station i
D_i	Distance between the base station and the index station i
b	Constant value by which the distance is weighted. Normally the value may vary from 1.5 to 2.0 (2 used in this study)
ΔE_i	Elevation difference between the base station and the index station i
\hat{p}_{xj}	Precipitation value at the j th time estimated at the base station
λ	Lagrange multiplier for the Lagrangian function

의 7가지 방법을 요약한다. 먼저 적용 방법에 포함된 수식의 기호는 Table 1과 같다.

2.1 선형계획법

선형계획 (Linear Programming, LP)법은 목적함수 Eq. (1a)와 제약조건 Eqs. (1b) and (1c)로 나타낼 수 있다.

$$\text{Min } X_l C_o X_l \tag{1a}$$

$$\text{st. } A_l X_l = B_l \tag{1b}$$

$$X_l \geq 0 \tag{1c}$$

여기서 $C_o = [0 \dots 0.1 \dots 1]$, $A_l =$

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1m} & 1-1 & 0 & 0 & \dots \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2m} & 0 & 0 & -1 & 1 & \dots \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nm} & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \dots \end{bmatrix},$$

$$X_l = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_m \ U_1 \ V_1 \ \dots \ U_n \ V_n]^T,$$

$B_l = [p_{x1} \ p_{x2} \ \dots \ p_{xn} \ 1]^T$ 이다. 이 때 X_l 는 미지의 결정벡터로서 영향 계수 $[c_1 \ c_2 \ \dots \ c_m]$ 을 포함한다.

2.2 비교 대상의 방법

선형계획법의 비교 대상이 되는 산술평균법, 년정상

비법, 수정년정상비법, 역거리법, 수정역거리법, 선형회귀분석법, 크리깅법은 다음과 같이 정리될 수 있다. 우선 산술평균법은 Eq. (2)와 같다.

$$p_{xj} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m p_{ji} \quad j = 1, 2, \dots, n \tag{2}$$

년정상비 (Normal Ratio, NR)법은 다음 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{xj} = \frac{M_x}{m} \sum_{i=1}^m \frac{p_{ji}}{M_i} \quad j = 1, 2, \dots, n \tag{3}$$

위 방법에 거리를 고려한 수정년정상비 (Modified Normal Ratio, MNR)법은 다음 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{xj} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{M_x p_{ji}}{M_i D_i^b}}{\sum_{i=1}^m D_i^{-b}} \quad j = 1, 2, \dots, n \tag{4}$$

역거리 (Inverse Distance, ID)법은 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{xj} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{p_{ji}}{D_i^b}}{\sum_{i=1}^m D_i^{-b}} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

지형의 기복이 심한 산지 지형에 적용하기 위해서 고도차를 반영한 수정역거리 (Modified Inverse Distance, MID)법은 다음 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{xj} = \frac{\sum_{i=1}^m \left(\frac{D_i}{\Delta E_i}\right)^{-b} p_{ji}}{\sum_{i=1}^m \left(\frac{D_i}{\Delta E_i}\right)^{-b}} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

선형회귀분석 (Linear Regression Analysis, LRA)법은 Eqs. (7a) and (7b)와 같이 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$A_r X_r = B_r \quad (7a)$$

$$\text{여기서 } A_r = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nm} \end{bmatrix},$$

$X_r = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_m]^T$, $B_r = [p_{x1} \ p_{x2} \ \dots \ p_{xn}]^T$ 이다.

이 때 결정 벡터 X_r 은 다음 Eq. (7b)와 같이 산출된다.

$$X_r = [A_r^T A_r]^{-1} A_r^T B_r \quad (7b)$$

그리고 크리깅법 (Kriging Method, KM)에 따라서 관측치와 주변관측소에 의한 계산치의 차이에 대한 기대치 (Expectation, E)가 최소화 되도록 정식화하면 다음 Eqs. (8a)~(8b)와 같다.

$$\text{Min } E\left[\left(\sum_{i=1}^m c_i p_i - p_x\right)^2\right] \quad (8a)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^m c_i - 1 = 0 \quad (8b)$$

위의 Eqs. (8a)~(8b)에 라그랑지 승수 (Lagrange Multiplier)를 도입하여 최소화하면 다음 Eq. (8c)와 같은 해를 얻을 수 있다.

$$X_k = A_k^{-1} B_k \quad (8c)$$

$$\text{여기서 } A_k = \begin{bmatrix} \sum p_1^2 & \sum p_1 p_2 & \dots & 1 \\ \sum p_2 p_1 & \sum p_2^2 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum p_m p_1 & \sum p_m p_2 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

$X_k = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_m \ \lambda]$, $B_k = [\sum p_x p_1 \ \sum p_x p_2 \ \dots \ 1]^T$, \sum 는 강수 전체 기간의 누계를 나타낸다. 행렬에 표시된 윗첨자 -1과 T 는 각각 역행렬 (Inverse Matrix)과 전치행렬 (Transposed Matrix)을 표시한다.

3. 방법 적용

3.1 적용 대상 및 자료

한강의 유역치수계획 (국토해양부, 2008)에서 한강 유역권내 기상 관측소의 티센 강수 관측망은 Fig. 1과 같다. 이 관측소의 연도별 강수량 (Fig. 2)을 살펴보면 철원 관측소의 앞부분에 누락 부분이 보인다. 이는 철원 관측소의 관측 개시가 다른 관측소보다 늦었기 때문에 미계측된 것이다. Fig. 2의 표를 보면 철원의 관측 개시년도만 1988년이고 나머지는 모두 1973년이다. 이 때문에 철원의 관측 기간만은 17년이고 나머지는 32년이다. 본 연구에서는 철원의 미계측 강수 기간 (1973~1987년)의 자료를 보완하기 위해서 그 주변의 5개 기상 관측소인 서울, 춘천, 홍천, 양평, 인제의 연평균 강수량 자료를 선택한다.

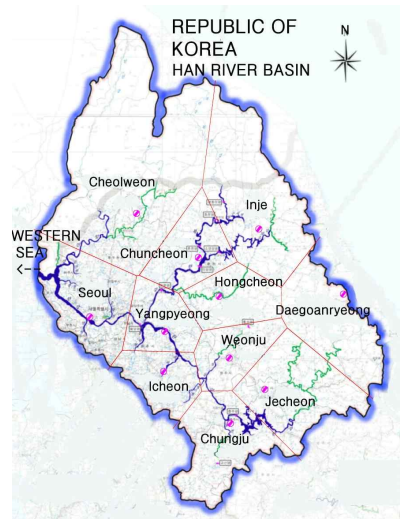


Fig. 1. Meteorological Station in Thiessen Network of the Han River Basin

단위 : mm

연도	월	사흘	순진	원주	홍천	양평	이천	연제	재천	충주	대관령	평균
1973		928.1	984.8	956.4	955.5	1,060.5	1,180.7	719.0	750.7	880.1	1,145.3	928.6
1974		1,250.7	1,102.7	1,161.1	1,137.3	1,157.9	1,182.7	982.0	1,162.4	1,030.5	1,265.1	1,130.9
1975		1,067.4	1,300.5	1,215.2	1,223.0	1,280.6	1,315.3	1,161.8	1,210.0	1,171.0	1,296.7	1,260.3
1976		1,109.5	1,071.9	1,272.8	1,230.5	1,130.6	1,234.9	1,081.1	925.7	1,069.9	1,133.7	1,120.2
1977		1,147.6	936.9	1,092.0	1,091.0	975.1	1,031.1	822.7	1,029.3	847.3	1,175.0	994.2
1978		1,160.9	1,347.8	1,242.5	1,242.4	1,214.5	1,138.4	1,301.0	1,435.7	1,348.2	1,605.2	1,318.3
1979		1,279.4	1,384.1	1,376.2	1,121.0	1,181.1	1,373.9	1,183.2	1,405.7	1,234.3	1,192.7	1,287.6
1980		1,242.4	1,037.5	1,382.9	1,150.6	1,149.3	1,441.0	984.0	1,630.9	1,353.3	1,626.2	1,218.9
1981		1,216.2	1,630.8	1,381.2	1,635.1	1,575.8	1,445.8	1,510.9	1,275.7	980.0	1,529.6	1,434.6
1982		949.3	927.6	899.6	1,038.0	1,258.4	954.7	999.7	850.3	822.9	1,252.6	974.6
1983		1,205.1	1,153.7	1,182.0	1,030.3	1,182.5	949.0	911.6	1,023.5	906.3	1,270.3	1,089.6
1984		1,249.5	1,342.2	1,463.3	1,495.2	1,415.6	1,198.5	1,469.2	1,234.5	1,086.5	1,699.3	1,356.7
1985		1,544.6	1,191.5	1,289.8	1,365.2	1,341.4	1,402.6	1,092.0	1,358.3	1,393.3	1,744.7	1,330.3
1986		1,247.4	1,021.6	1,180.8	1,058.3	1,165.1	1,194.1	942.5	1,175.9	974.5	1,476.1	1,113.5
1987		1,751.4	1,439.5	1,662.6	1,356.8	1,498.1	1,869.8	1,255.6	1,873.3	1,358.9	1,990.7	1,534.0
1988		971.3	762.5	1,068.1	967.3	864.2	769.0	1,012.1	669.9	1,306.7	872.6	1,007.5
1989		1,283.4	1,437.1	1,219.2	1,274.3	1,305.1	1,446.7	1,452.2	1,048.2	1,574.6	1,399.1	1,219.9
1990		2,192.8	2,355.9	2,069.2	2,088.0	2,375.0	2,254.9	2,313.3	1,689.9	1,928.3	1,834.9	2,316.6
1991		994.6	1,158.2	1,298.0	1,303.5	1,323.0	1,286.8	1,379.1	751.7	1,343.1	1,412.7	1,246.5
1992		1,120.0	1,454.9	1,101.5	1,185.4	1,325.8	1,282.1	1,207.0	1,128.7	1,108.1	917.2	1,218.9
1993		1,094.4	1,271.4	1,159.1	1,261.5	1,293.1	1,194.1	1,250.0	1,053.7	1,497.4	1,145.9	1,251.0
1994		1,140.3	1,055.8	930.9	1,126.3	1,032.4	1,057.5	1,118.8	759.9	1,198.7	1,091.4	1,087.1
1995		1,534.4	1,598.6	1,593.1	1,317.1	1,598.0	1,630.3	1,423.9	1,402.3	1,447.9	1,223.1	1,537.6
1996		1,374.6	1,256.6	1,185.7	1,053.1	1,056.8	1,088.9	1,122.1	927.0	987.2	933.0	1,439.1
1997		1,202.8	1,210.2	1,154.9	1,437.8	1,235.2	1,436.9	1,282.9	1,420.5	1,384.8	1,219.7	1,760.5
1998		1,652.8	2,349.1	1,707.6	1,450.8	1,682.8	1,948.7	1,807.5	1,451.1	1,581.4	1,652.5	2,998.3
1999		1,679.6	1,733.1	1,586.9	1,614.9	1,624.8	1,499.3	1,675.3	1,537.1	1,453.4	1,288.3	2,199.2
2000		1,125.2	1,186.5	1,154.9	1,228.6	1,184.3	959.6	1,264.9	1,101.6	1,149.1	1,269.6	1,599.4
2001		1,277.6	1,386.0	1,108.0	775.7	1,135.9	1,034.1	884.9	860.5	849.3	798.1	1,551.7
2002		1,289.3	1,388.0	1,177.7	1,481.7	1,365.5	1,333.1	1,394.6	1,243.2	1,509.4	1,469.6	2,697.6
2003		1,249.6	2,012.0	1,865.8	1,745.0	1,974.2	1,825.8	1,715.2	1,705.9	1,876.6	1,641.2	2,685.4
2004		1,499.1	1,493.1	1,404.0	1,425.3	1,357.0	1,347.8	1,174.4	1,350.2	1,630.8	1,425.2	1,815.5
평균		1,319.5	1,358.3	1,270.1	1,299.2	1,317.8	1,311.3	1,324.8	1,135.8	1,318.1	1,186.8	1,277.4

Remark) Data Correction of Cheolweon in 2003 : 1249.6→1718.3

Fig. 2. Ungauged Annual Precipitation at Han River Basin (MLTM, 2008)

Table 2. Spatial Informations of Meteorological Observation Stations

Station	Cheolweon	Seoul	Chuncheon	Hongcheon	Yangpyeong	Inje
East longitude	127° 18 ' 0 "	126° 58 ' 4 "	127° 44 ' 16 "	127° 52 ' 57 "	127° 29 ' 48 "	128° 10 ' 9 "
North latitude	38° 9 ' 0 "	37° 34 ' 7 "	37° 53 ' 60 "	37° 40 ' 51 "	37° 29 ' 9 "	38° 3 ' 26 "
Distance (Km)	Origin	71.4	48.0	73.8	76.2	78.2
Elevation (EL.m)	152.4	85.5	76.8	140.6	49	198.6

Table 3. Comparison between Observed Data and Estimated Values at Cheolweon Station

Year	Observed data	Estimated values by 8 methods (mm)							
		AA	NR	MNR	ID	MID	LRA	KM	LP
1988	971.3	826.7	822.5	877.5	881.9	801.0	944.7	867.6	970.6
1989	1283.4	1291.3	1279.2	1268.0	1279.9	1192.7	1233.9	1280.7	1282.1
1990	2192.8	2148.9	2126.9	2119.6	2140.8	2010.7	2055.4	2125.2	2135.5
1991	994.6	1163.5	1148.7	1185.7	1198.8	1047.0	1177.8	1181.7	1262.7
1992	1120.0	1258.6	1248.9	1218.1	1228.6	1210.0	1171.3	1227.6	1185.9
1993	1094.4	1194.3	1186.4	1181.4	1189.9	1157.9	1155.3	1182.3	1180.8
1994	1140.3	963.3	953.7	950.8	960.1	895.7	925.3	955.4	962.8
1995	1534.4	1564.5	1556.6	1564.1	1573.3	1511.0	1553.0	1567.9	1594.3
1996	1374.6	1103.0	1094.3	1117.1	1125.9	1042.5	1171.6	1122.6	1181.9
1997	1202.8	1291.5	1294.5	1256.4	1257.2	1306.8	1177.7	1267.1	1201.5
1998	1652.8	1827.9	1806.2	1792.0	1812.8	1657.7	1829.8	1822.7	1846.3
1999	1679.6	1596.2	1590.0	1589.4	1597.7	1586.2	1603.9	1591.7	1600.2
2000	1125.2	1117.4	1114.3	1123.3	1128.2	1136.1	1148.0	1118.1	1135.1
2001	1277.6	1104.9	1091.6	1101.0	1113.7	1030.3	1142.5	1107.0	1144.2
2002	1289.3	1301.5	1295.7	1268.7	1276.2	1279.2	1215.0	1274.9	1233.9
2003	1718.3	1876.7	1866.3	1867.3	1879.4	1835.2	1860.7	1868.8	1883.0
2004	1249.6	1431.6	1425.3	1420.7	1428.6	1426.2	1400.3	1417.6	1412.1
AV	1347.1	1356.6	1347.1	1347.1	1357.2	1301.5	1339.2	1351.7	1365.5
SD	317.0	347.5	344.2	336.2	339.6	330.2	327.5	339.6	333.9
CC	Datum	0.914	0.913	0.918	0.919	0.897	0.924	0.918	0.921
RMSE	Datum	137.3	136.5	129.4	130.5	149.8	122.4	130.5	127.7
MAE	Datum	115.45	114.39	108.09	108.08	118.42	102.86	109.39	100.58
MRE	Datum	0.0912	0.0901	0.0845	0.0848	0.0916	0.0778	0.0855	0.0775

따라서 철원 관측소를 포함한 6개 관측소의 공간 정보는 Table 2와 같고 공통적으로 가용한 강수 자료는 Fig. 2에 있는 17년(1988~2004년)간 자료이다. 이 정보는 선형계획법을 포함한 8개 결측 보완 방법의 수행 (Performance) 능력을 평가하는데 이용된다.

3.2 적용 결과 검토

8개 결측 강수 보완법을 적용하여 산출한 철원 관측소의 계산치와 관측치는 Table 3 및 Fig. 3과 같다. Fig. 3은 전체적으로 계산치의 시계열이 관측치를 따라가고 있음을 보여준다. 이 방법들의 평가 지표로서 6가지 수행 척도 (Performance Measure)를 적용하였다. 우선 방법을 적용한 계산 결과에 대하여 잘 알려진 3가지 통계치인 평균값 (Average Value, AV), 표준편차 (Standard Deviation, SD) 그리고 상관계수 (Correlation Coefficient, CC)를 산

출하여 관측치의 값과 비교하여 접근 정도를 평가하였다. 그리고 오차 평가 방법 3가지로서 Eq. (9)와 같은 평균제곱 오차 제곱근 (Root Mean Squared Error, RMSE), Eq. (10)과 같은 평균절대오차 (Mean Absolute Error, MAE), Eq. (11)과 같은 평균상대오차 (Mean Relative Error, MRE)를 적용하여 평가하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\hat{p}_{xj} - p_{xj})^2} \quad (9)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \|\hat{p}_{xj} - p_{xj}\| \quad (10)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left\| \frac{(\hat{p}_{xj} - p_{xj})}{p_{xj}} \right\| \quad (11)$$

결과의 수행 척도별로 가장 좋은 4가지 (Best 4)를 순위별로 고르면 Table 4와 같다. 여기서 보는 바와 같이 선형회귀분석법과 선형계획법의 결과가 우수하다.

한편 자료구동 방법 중 선형회귀분석법, 크리깅법, 선형계획법에서는 주변관측소가 결측 관측소에 미치는 영향 계수가 산출되는데 정리하면 Table 5와 같다. 여기서 특히 c_2 값이 가장 두드러진 값을 보인다. 이는 철원관측소에 가장 영향력 있는 관측소는 가장 가까운 춘

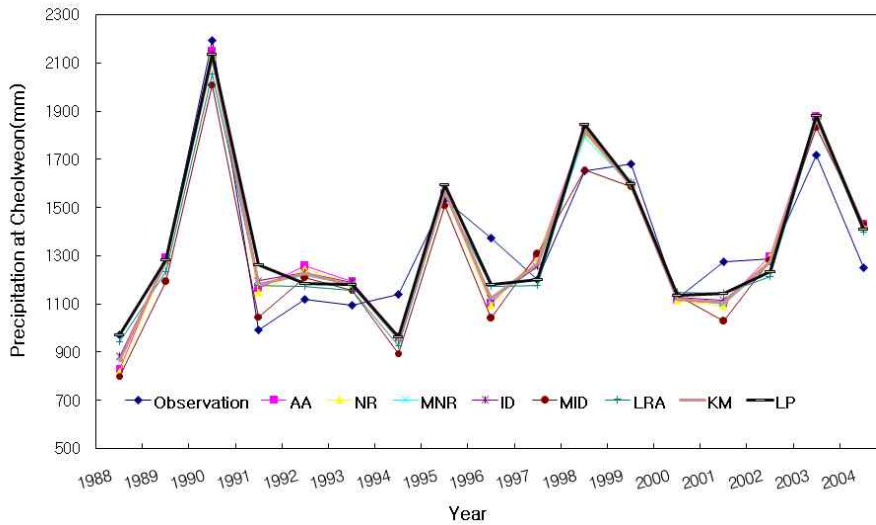


Fig. 3. Trajectories of Estimation and History of Observation Data at Cheolweon Station

Table 4. Best 4 among the Results in 6 Criteria by 8 Methods

Mark	Best 4				
	Order	1	2	3	4
Performance Measurement	AV	AA	MNR	KM	LRA
	SD	LRA	MID	LP	MNR
	CC	LRA	LP	ID	KM
	RMSE	LRA	LP	MNR	KM
	MAE	LP	LRA	ID	KM
	MRE	LP	LRA	MNR	KM

Table 5. Results of Weighting Coefficients by 3 Methods (LRA, KM and LP)

Station	Seoul	Chuncheon	Hongcheon	Yangpyeong	Inje
Mark	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
LRA	0.275	0.681	-0.063	-0.026	0.122
KM	0.253	0.707	-0.101	-0.014	0.155
LP	0.179	0.685	0.000	0.121	0.014

천 관측소임을 보여 준다.

Table 5에서 보는 바와 같이 선형계획법에 의해서 산출된 계수는 음수치가 발생하지 않았다. 이는 방법상 결정 변수의 제약 조건으로 음수가 되지 않도록 한 결과이다. 이 계수는 주변 관측소들의 강수가 결측 관측소에 주는 영향의 정도를 나타내므로 음수치의 의미는 주변 관측소의 강수가 증가하면 반대로 중심 관측소의 강수가 감소하는 것인데 특별한 경우가 아니면 동일 유역 내에 있는 관측소 간에 이와 같은 현상은 물리적으로 희소하다. 이런 음의 계수가 선형회귀분석법과 크리깅법에 의한 결과에서 발생되었으므로 선형계획법이 이런 측면에서 강점이 있다.

요컨대 Best 4를 선정한 결과에서 선형회귀분석법과

선형계획법이 가장 우수한 것으로 나타났는데 음수 계수 발생을 고려하면 선형계획법이 가장 권장할 수 있는 방법이다. 선형계획법을 적용하여 철원관측소의 1973~1987년 동안 미계측 연간 강수량을 산출하면 Table 6과 같다. 이와 같이 철원의 미계측 강수량을 보완함으로써 자료 연한을 17년에서 32년(1973~2004년)으로 연장하였다. 이를 바탕으로 Thiessen법(ASCE, 1996)을 이용하면 32년간 한강 유역의 면적평균 강수량은 Table 6과 같고 연평균치는 1,315mm가 된다.

4. 결론

본 연구에서 결측 강수량을 보완하는 자료구동(Data-

Table 6. Annual Areal-Average Precipitation Data for 32 Years in Han River Basin Expanded by this Method

Station	Cheol-weon	Seoul	Chun-cheon	Weonju	Hong-cheon	Yang-pyeong	Icheon	Inje	Je-cheon	Chungju	Daegoan-ryeong	Total
Thiessen ratio	0.279	0.102	0.057	0.047	0.052	0.048	0.047	0.121	0.09	0.077	0.08	1.000
Year 1973	979	928	985	956	956	1061	1181	719	751	880	1145	939
1974	1133	1251	1103	1161	1137	1158	1183	982	1162	1031	1265	1135
1975	1253	1067	1301	1313	1223	1281	1315	1162	1210	1171	1797	1265
1976	1084	1110	1072	1273	1240	1131	1235	1008	926	1069	1535	1124
1977	977	1148	937	1092	1091	975	1031	823	1029	847	1175	998
1978	1296	1161	1348	1243	1342	1215	1138	1301	1436	1348	1605	1316
1979	1337	1279	1384	1376	1121	1181	1374	1183	1406	1234	1193	1287
1980	1085	1242	1038	1383	1151	1149	1441	884	1651	1355	1626	1226
1981	1547	1216	1631	1381	1635	1576	1446	1511	1276	980	1530	1438
1982	972	949	928	900	1038	1258	955	1000	850	823	1253	983
1983	1162	1205	1154	1182	1030	1183	949	912	1024	906	1270	1097
1984	1335	1250	1342	1463	1493	1416	1199	1469	1235	1087	1699	1356
1985	1270	1545	1192	1290	1365	1341	1403	1093	1358	1309	1745	1337
1986	1077	1247	1022	1181	1058	1165	1194	943	1176	975	1476	1122
1987	1498	1751	1440	1663	1357	1498	1870	1256	1873	1359	1591	1540
1988	971	763	1068	967	864	769	1012	670	1307	873	1971	1008
1989	1282	1437	1219	1274	1305	1447	1452	1048	1575	1399	2194	1391
1990	2136	2356	2069	2068	2375	2255	2313	1690	1928	1835	2317	2096
1991	1263	1158	1298	1304	1323	1287	1379	752	1343	1413	2462	1319
1992	1186	1455	1102	1185	1326	1282	1207	1129	1108	917	2188	1267
1993	1181	1271	1159	1262	1293	1194	1250	1054	1497	1146	2351	1306
1994	963	1056	931	1126	1032	1038	1119	760	1199	1091	1444	1038
1995	1594	1599	1593	1318	1598	1630	1424	1402	1448	1223	1338	1490
1996	1182	1257	1186	1053	1057	1089	1122	927	987	933	1439	1123
1997	1201	1210	1155	1438	1235	1437	1283	1421	1385	1220	1761	1317
1998	1846	2349	1708	1451	1683	1949	1808	1451	1581	1653	2998	1871
1999	1600	1733	1587	1615	1625	1499	1675	1537	1453	1298	2199	1617
2000	1135	1187	1155	1229	1184	960	1265	1102	1149	1270	1559	1188
2001	1144	1386	1108	776	1136	1034	885	861	849	798	1552	1077
2002	1234	1388	1178	1482	1366	1333	1395	1243	1500	1470	2698	1438
2003	1883	2012	1866	1745	1974	1826	1715	1706	1877	1641	2685	1906
2004	1412	1499	1404	1425	1557	1348	1177	1350	1631	1425	1816	1460
Average	1288	1358	1271	1299	1318	1311	1325	1136	1318	1187	1777	1315

driven) 방법으로서 우수한 선형계획법을 통용되는 보완 법과 비교 검증한 주요 결과 및 결론은 다음과 같다.

- (1) 선형계획법을 비교 검증하는 대상으로서 산술평균 법, 년정상비법, 수정년정상비법, 역거리법, 수정역거리법, 선형회귀분석법, 크리깅법을 선택하였다. 비교 방법은 6개의 평가 기준 (performance measure)을 이용하였다.
- (2) 적용 자료로는 한강 유역내 기상청의 관측소로서 미계측 기간을 포함하는 철원 관측소와 그 주변 5개 관측소의 연간 강수 자료를 적용하였다.
- (3) 평가 기준별로 관측치에 접근한 결과를 내는 방법 중에 Best 4를 선정한 결과, 선형회귀분석법과 선형계획법이 가장 우수한 것으로 나타났다. 이중 주변관측소의 영향 계수에 음수가 발생하지 않는 선형계획법을 가장 권장할 수 있다.
- (4) 본 연구의 가치는 우선 선형계획법의 우수성을 검증하는 것이고 두 번째 검증하는 과정에서 평가 척도와 Best 4의 이용 등에서 찾을 수 있다.
- (5) 검증 과정에 적용된 자료가 대규모 유역과 시간 단위를 갖기 때문에 본 연구에서 산출된 강수 보완치는 대체적인 경향 파악 자료에는 사용할 수 있지만 정확성을 요하는 실무적 사용에는 제한한다.

감사의 글

본 연구는 한강권역 유역종합치수계획 보고서 (국토해양부, 2008)를 자문하는 과정에서 동기부여 되었고 이 과정에서 검토된 자료가 연구에 적용되었음을 밝힙니다. 연구의 동기부여와 자료를 제공해 준 관계기관에 사의를 표합니다.

참고 문헌

국토해양부 (MLTM, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2008). **한강2권역 유역종합치수 계획 보고서 (자문용 초안)**.

김응석, 김중훈, 김태훈 (1995). "산악지역을 고려한 점 강우량 결측시 보정방법". **대한토목학회 학술발표회**

논문집, 대한토목학회, pp. 169-172.

김응석, 김형수, 김중훈 (1999). "점 강우량 결측시 보정방법에 관한 비교 연구". **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 374-381.

김충수, 김형섭 (2006). "도시하천 소배수 구역의 결측 강우량 산정 방법 비교". **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 701-705.

안상진, 이종형, 윤석환, 광현구 (2003). "미계측 지점의 강우량 산정 방법 비교". **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 807-810.

이명우, 이봉희, 김형수, 심명필 (2006). "다중회귀분석을 이용한 강우량 결측치 보정". **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 701-705.

ASCE (1996). *Hydrology Handbook*, 2nd ed. American Society of Civil Engineers, New York.

Simanton, J.R., and Osborn, H.B. (1980). "Reciprocal-distance estimate of point rainfall." *Journal of Hydraulic Division*, Vol. 106, No. 7, pp. 1242-1246.

Singh, V. P. (1989). *Hydrologic Systems, Watershed Modeling*. Vol. II, Prentice-Hall, New Jersey.

Teegavarapu Ramesh, S.V., and Chandramouli, V. (2005). "Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records." *Journal of Hydrology*, Vol. 312, pp. 191-206.

Tung, Y.K. (1983). "Point-rainfall estimation for a mountainous region." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, No. 10, pp. 1386-1393.

Wei, T.C., and McGuinness, J.L. (1973). "Reciprocal distance squared method, a computer technique for estimating area precipitation." *Technical Report ARS-Nc-8. US Agricultural Research Service*, North Central Region, Ohio.

논문번호: 09-019	접수: 2009.02.17
수정일자: 2009.03.30/2010.02.01	심사완료: 2010.02.01