

RCP 기후변화시나리오를 이용한 미래 북한지역의 수문순환 변화 영향 평가 I. 미계측유역의 장기유출모형 매개변수 추정식 개발

정세진·강동호·김병식[†]

강원대학교 방재전문대학원 도시환경&재난관리전공

Impacts assessment of Climate change on hydrologic cycle changes in North Korea based on RCP climate change scenarios

I. Development of Long-Term Runoff Model Parameter Estimation for Ungauged Basins

Se Jin Jeung·Dong Ho Kang·Byung Sik Kim[†]

Department of Urban Environment & Disaster Management, Kangwon National University, Samcheok, Korea

(Received : 05 October 2019, Revised: 22 November 2019, Accepted: 22 November 2019)

요약

한반도의 기후변화는 전 세계 평균보다도 빠르게 진행되고 있다. 최근 빈발하고 있는 태풍 및 극한 강우, 폭설과 한파, 온난화 현상 등이 그 예이다. 특히 북한지역은 오랜 식량난과 에너지난 그리고 무분별한 산림벌목과 개발로 인해 산림생태계가 훼손되어 홍수 및 이수와 같은 기후변화 관련 자연재해에 매우 취약하다. 또한 북한지역은 정치적·사회적인 영향으로 미계측 지역으로 분류되어 있어 수문분석에 필요한 충분한 수문자료를 구하기 어려운 지역이다. 또한 기후변화에 대한 관심이 높아지면서 각종 수리시설물 및 재해대책에 기후변화를 고려한 연구가 한반도를 대상으로 활발히 진행되고 있지만 북한을 대상으로 수행된 연구사례는 극히 드물다. 따라서 본 연구에서는 관측 수문자료를 획득하기 어려운 북한지역을 대상으로 지역화 모형을 적용기 위해 획득하기 쉬운 유역특성변수를 선정하고 남한의 16개 댐 유역의 기상학적, 지형적 특성을 기반으로 매개변수 추정식을 산정하였다. 그리고 오십천, 강릉남대천, 남강댐, 영강유역에 적용하여 산정된 매개변수 추정식의 적용성을 검토한 결과 북한지역에 매개변수 추정식의 적용성이 매우 높을 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 북한, M-RAT, 매개변수 지역화

Abstract

Climate change on the Korean peninsula is progressing faster than the global average. For example, typhoons, extreme rainfall, heavy snow, cold, and heatwave that are occurring frequently. North Korea is particularly vulnerable to climate change-related natural disasters such as flooding and flooding due to long-term food shortages, energy shortages, and reckless deforestation and development. In addition, North Korea is classified as an unmeasured area due to political and social influences, making it difficult to obtain sufficient hydrologic data for hydrological analysis. Also, as interest in climate change has increased, studies on climate change have been actively conducted on the Korean Peninsula in various repair facilities and disaster countermeasures, but there are no cases of research on North Korea. Therefore, this study selects watershed characteristic variables that are easy to acquire in order to apply localization model to North Korea where it is difficult to obtain observed hydrologic data and estimates parameters based on meteorological and topographical characteristics of 16 dam basins in South Korea. Was calculated. In addition, as a result of reviewing the applicability of the parameter estimation equations calculated for the fifty thousand, Gangneungnamdaechon, Namgang dam, and Yeonggang basins, the applicability of the parameter estimation equations to North Korea was very high.

Key words : North Korea, M-RAT, Parameter Localization

[†] To whom correspondence should be addressed.

Department of Urban Environment & Disaster Management, Kangwon National University, Samcheok, Korea
E-mail: hydrokbs@kang.ac.kr

• Sejin Jeung Kangwon National University / Research fellow (climate@kangwon.ac.kr)
• Dongho Kang Kangwon National University / Graduate student (kdh@kangwon.ac.kr)
• Byungsik Kim Kangwon National University / Professor (hydrokbs@kangwon.ac.kr)

1. 서 론

한반도의 기후변화는 전 세계 평균보다도 빠르게 진행되고 있다. 최근 빈발하고 있는 태풍 및 극한 강우, 폭설과 한파, 온난화 현상 등이 그 예이다. 특히 북한지역은 오랜 식량난과 에너지난 그리고 무분별한 산림벌목과 개발로 인해 산림생태계가 훼손되어 홍수 및 이수와 같은 기후변화 관련 자연재해에 매우 취약하다. 또한 북한지역은 정치적·사회적인 영향으로 미계측 지역으로 분류되어 있어 수문분석에 필요한 충분한 수문 자료를 구하기 어려운 지역이다. 또한 기후변화에 대한 관심이 높아지면서 각종 수리시설물 및 재해대책에 기후변화를 고려한 연구가 한반도를 대상으로 활발히 진행되고 있지만 북한을 대상으로 수행된 연구사례는 전무하다. 한반도를 대상으로 한 대표적인 사례로는 An et al.(2011)은 기후변화 탐지와 원인 규명을 위한 방법론을 제시하고, 특히 몬순과 엘니뇨의 영향을 진단하여 기후변화에 따른 한반도의 도시화 효과를 정량적으로 평가하였다. Korea Meteorological Administration(2011)은 21세기 한반도 기후변화에 대한 상세 전망을 제공함으로써, 미래에 발생할 수 있는 대규모 자연재해에 대비하고 분야별 및 행정단위별, 그리고 지방자치단체의 대응 및 적응 정책 수립을 지원하기 위한 연구를 진행하였다. Jang(2012)는 RCP 기후변화시나리오를 기반으로 하여 한반도의 미래 기후변화 분석을 통해 기후변화시나리오 자료의 활용성을 고찰하였다. Yu and Kim(2013)에서는 한반도에서 기후변화로 인한 부정적인 영향이 초래되는 것을 막고, 남북협력 방안을 찾아 기후변화라는 위기를 남과 북이 상생하는 길을 모색하는 새로운 계기를 만드는 것을 목적으로 연구를 수행하였다. Kwon et al.(2015)은 RCP기후변화 시나리오를 활용하여 한반도 연 최대 일강우 분석을 통해 기후변화 시나리오에서 전망하는 극한 강우의 정도를 확인하였다.

최근 연구동향을 살펴본 결과 기후변화의 관점에서의 미래 전망은 많이 찾아볼 수 있었지만, 장기적인 관점에서의 기후변화에 따른 수문순환의 변화 전망에 대한 연구는 미비한 것으로 파악되었다. 그 이유는 관측 유출량 자료를 획득하기 어려운 지역특성 때문인 것으로 판단된다. 따라서 기후변화에 따른 유출 변화를 전망하기 위해 관측유출량을 대신할 수 있는 방법을 모색하는게 첫 번째 단계이다. 본 논문에서는 유출모형의 매개변수 최적화를 통해 관측 유출량 자료를 대신하고자 한다. 매개변수 최적화는 일반적으로 관측유출량과 모의유출량의 통계적 비교를 통해 진행되지만 유출량자료의 획득이 어려운 북한지역의 경우 유출모형의 매개변수 추정을 하여야한다. 매개변수 추정을 위해 각 유역의 유역특성변수를 선정해야한다. 유역특성변수 선정의 경우 유출량과 상관관계가 높은 변수들을 선정하기 위해 다양한 방법이 제시되어 왔다. Merz and Blöschl (2004)는 저수지를 반영하기 위해 lake index를 사용하였으며, Parajka et al.(2005)은 전문가들의 조언을 통해 기상, 물리적인 변수들을 선택하였다. Mohamoud.(2008)는 단계적 회귀분석(stepwise regression)을 이용하여 지형, 기후 변수들을 선택하였고, Oudin et al.(2008)은 물리적 유사성을 고려하기 위해 기존의 지형 및 기후 변수들에 이어 건조 지수를 추가하였다. Samuel et al.(2011)은 특성변수로 증발산량 등을 고려하기 위해 유역의 위도, 경도를 추가하여 사용하였다. 이를 정리하면 과거 연구에서는 주로 유역면적, 평균경사, 배수 밀도, 연평균강수량, 평균 및 최대기온, 토지이용, 하천길이, 증발산량, 토양특성, 지질학적 특성등의 유역 특성변수를 기반으로 필요한 변수들을 추가하여 사용하였다. 미계측유역의 수문모형 매개변수 추정에 가장 많이 사용되는 모형은 계측유역의 추정된 수문모형 매개변수와 유역 특성변수 간의 관계식을 도출하여 미계측유역에 적용하는 방법이다. Hwang et al.(2007)은 abcd 모형을 금강 소유역에 적용하기위해 지역회

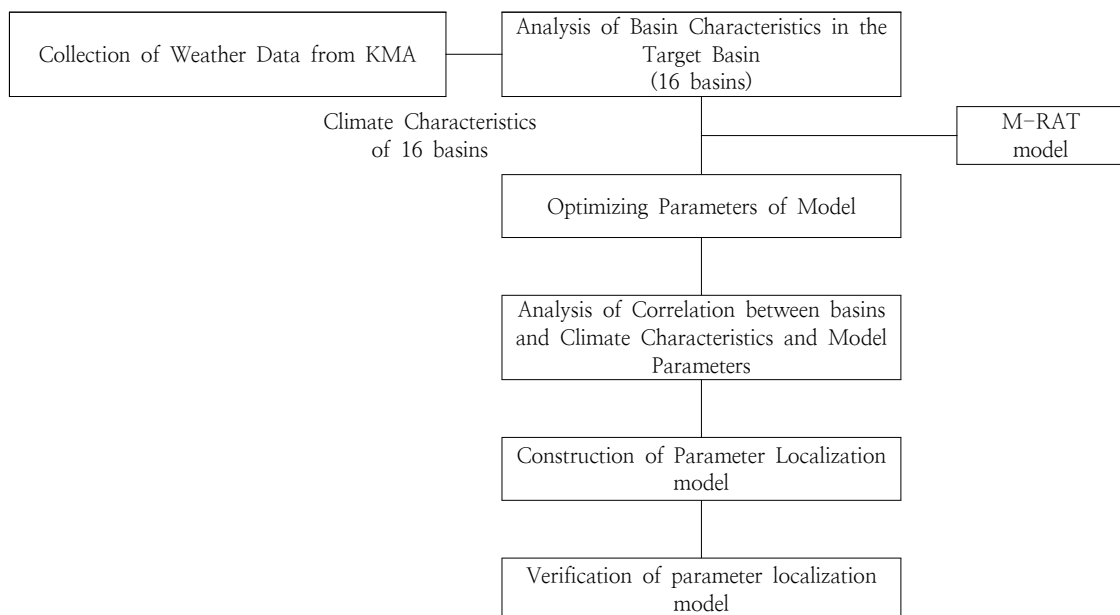


Fig. 1. Flowchart for Parameter Localization

귀모형을 통하여 매개변수를 추정하였으며 효율성계수가 최소 87%로 모의 능력이 우수함을 밝혔다. Kang et. al.(2013)은 탱크모형을 사용하여 지역회귀모형을 사용한 미계측지역 유출량을 모의한 결과 유출성분과 증발산성분이 개선되었음을 확인하였다. Kim et. al.(2015)는 Sacramento 모형을 기반으로 유역 특성변수와 매개변수 간 지역회귀모형을 진행하여 모의 정확성을 분석하였다. Abdulla and Lettenmajer(1997)은 VIC-2L 수문모형을 사용하여 34개 유역에 지역회귀모형의 적용성을 분석하였다. 유역 특성변수로 제곱근, 로그변환법을 적용한 결과 대부분 높은 적합성을 보였으나 건조한 지역에는 낮은 적합성을 보였다. Post and Jakeman(1999)는 일별 관측자료와 IHACRES 모형의 매개변수를 사용하여 다중회귀모형을 통한 미계측지역 유출량을 산출하여 높은 정확성을 얻었다. Seibert (1999)는 HBV(Hydrologiska Byråns Vattenavdelning) 모형의 매개변수를 사용한 회귀모형을 사용하여 매개변수 중 절반이 유역특성변수와 높은 상관관계를 가짐을 논하였다. Clark et al.(2017)은 지역회귀모형의 모의 정확성을 분석하였는데 KGE(Kling-Gupta Efficiency)를 목적함수로 적용한 결과 복잡한 모형이 단순한 모형보다 예측 정확성이 더 높았기에 지역화모형 적용 시 유역에 따라 수문모형의 선택이 중요하다고 하였다. Jafarzadegan and Merwade(2017)은 DEM(Digital Elevation Model)을 기반으로 미계측지역의 홍수량을 한정하기 위해 정사각형 형태의 유역의 특성 변수들과 수문모형 간 다중회귀모형을 구성하고, 10-fold crossvalidation을 통해 적합성을 분석하였는데, 자료의 분포가 클 경우 회귀모형의 정확도가 낮음을 논하였다.

본 연구에서는 관측 수문자료를 획득하기 어려운 북한지역을 대상으로 지역화 모형을 적용하고자 하며, 획득하기 쉬운 유역특성변수를 선정해야하는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 기상청에서 제공하고 기상자료와, 국가수자원관리종합정보시스템에서 제공하고 있는 16개 유역의 기상학적, 지형적 특성을 기반으로 지역화 모형을 구축하여, 미래 기후변화가 북한 유역규모의 수문순환에 미치는 영향을 전망 가능하게 하고자 한다. Fig 1은 전체적인 연구 흐름도를 나타낸 그림이다.

2. 이론적 배경

2.1 M-RAT(Monthly Runoff Assessment Tools)

M-RAT(Monthly Runoff Assessment Tool)모형은 Vandewiele et al.(1993)이 제시한 Temperature index function을 이용하여 강수를 강우과 강설로 구분하여 그 양을 산정하며, 월 유출은 주로 물수지 분석에 그 기초를 두고 있다. 유출은 기상 변수와 지형·지질 변수간의 복합적인 특성에 영향을 받고 있으나, 이를 일반화하면 다음과 같은 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$P = Q + ET + I + \Delta D + \Delta S + F \quad (1)$$

여기서 P : 강우량, Q : 유출량, ET : 증발산량, I : 차단량, ΔD : 지표저류량, ΔS : 유역저류수량, F : 침투량 이다.

장기간으로 볼 때 식 (1)은 차단량과 지표저류량은 증발산량 및 토양 수분변화량에 포함되므로 실질적으로 물수지식에서는 생략할 수 있으며 이 식을 적용하려는 단위시간에 대해 깊이 단위로 표시하여 변형하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$(Q = P - ET + \Delta S - F)_t \quad (2)$$

여기서 t : 단위시간

이 때 유출량은 직접유출과 기저유출 성분으로 나누어 생각할 수 있으며 토양수분 변화량은 전달의 토양저류수분과 그 달의 토양저류수분의 차이로 볼 수 있으므로 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$Q_{Dt} + Q_{Bt} = P_t - ET_t + S_{t-1} - S_t - F_t \quad (3)$$

여기서 Q_{Dt} : 직접유출, Q_{Bt} : 기저유출, S_{t-1} : 전 달의 유역저류수량, S_t : 현 달의 유역저류수량

강우의 약 2/3가 여름의 우기에 집중되어 홍수로 직접 유출되는 우리나라의 수문학적 특성상 이 기간의 유출에서 기저유출이 차지하는 비율은 그리 크지 않지만 그 외의 기간에 있어 기저유출은 유출량 추정에 무시할 수 없는 비중을 차지하고 있다. 따라서 기저유출량과 이에 관계되는 토양수분 변화량 및 침투량은 월 유출량 추정을 위한 물수지식에 꼭 포함되어야 할 요소로 식 (3)은 월 유출량 추정을 위한 기본이 된다고 할 수 있다. Fig 2는 M-RAT 모형의 개념도를 나타낸 것이다.

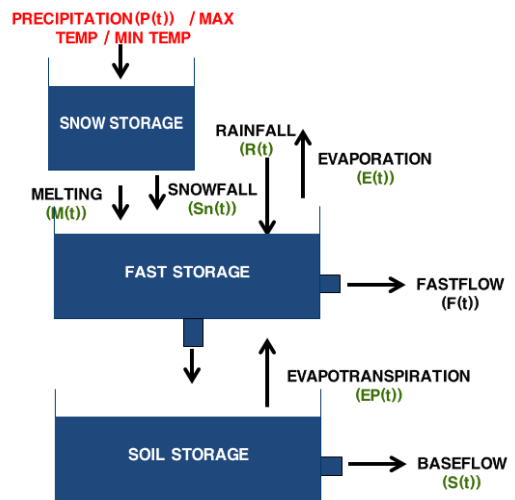


Fig. 2. Basic Concept of M-RAT Model

2.2 지역회귀기법

지역화 방법으로 가장 많이 사용되는 것은 지역회귀모형으로(Young, 2006), 주로 유역 특성 변수와 수문모형의 매개변수 사이의 관계식으로 회귀식을 구성한다. 종속변수(Response variables, 반응변수)인 수문모형의 매개변수에 독립변수(Predictor variables, 예측변수)인 유역 특성변수들이 대응하게 되는데, 각 유역별로 유역 특성변수들이 다양하기 때문에

하나의 종속변수에 두 개 이상의 독립변수가 대응되는 다중회귀분석이 사용되며 선형적 관계를 기반으로 하기에 다중선형 회귀분석이 주로 사용된다. 일반적으로, 종속변수인 Y 와 k 개의 독립변수들로 구성된 회귀식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (4)$$

$$= \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \varepsilon$$

자료의 수인 n 의 크기가 k 보다 크다고 가정할 때, Y 는 종속변수로 수문모형의 매개변수, β_0 는 intercept, β 는 독립변수의 계수, x_k 는 유역특성변수, ε 는 오차항(Error term)을 의미한다. 따라서, 수문모형 매개변수마다 회귀식이 만들어지며, 오차는 서로 상관관계가 없는 $E(\varepsilon) = 0, Var(\varepsilon) = \sigma^2$ 를 따름을 가정한다.

회귀분석에서 독립변수 간 상관관계가 높을 경우 다중공선성이 있다고 말한다. 이 경우 회귀모형의 설명력이 떨어지며 입력 자료의 변화에 따라 변동성이 높아지게 된다. 예를 들어, 두 개의 독립변수만 가지는 회귀모형을 통해 다중공선성의 영향을 분석해보면 식 (5)와 같다.

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \quad (5)$$

위 식을 사용하여 다시 나타내 보면 식 (6)과 같다.

$$(X'X)\hat{\beta} = X'y \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & r_{12} \\ r_{12} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{1y} \\ r_{2y} \end{bmatrix}$$

여기서, r_{12} 는 x_1 과 x_2 사이 상관관계를 말하며, r_{jy} 는 j 가 1, 2일 때 x_j 와 y 의 상관관계를 말한다. 그 다음 왼쪽 항에 있는 $(X'X)$ 의 역행렬을 구하면 식 (7)과 같다.

$$C = (X'X)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-r_{12}^2} & \frac{-r_{12}}{1-r_{12}^2} \\ \frac{-r_{12}}{1-r_{12}^2} & \frac{1}{1-r_{12}^2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

(식 6)과 (식 7)을 이용하여 최소 제곱 추정량을 구하면 식 (8)과 같다.

$$\hat{\beta}_1 = \frac{r_{1y} - r_{12}r_{2y}}{1 - r_{12}^2}, \hat{\beta}_2 = \frac{r_{2y} - r_{12}r_{1y}}{1 - r_{12}^2} \quad (8)$$

x_1 과 x_2 사이 상관관계가 높을 경우 r_{12} 이 커지게 되고, r_{12} 이 1에 가까워지면 $VAR(\hat{\beta}_j) = C_{jj}\sigma^2$ 는 $+\infty$, $Cov(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2) = C_{12}\sigma^2$ 는 $\pm\infty$ 로 가게 되므로 자료의 추가 및 변화에 따라 회귀모형이 민감하게 변동한다. 이는 독립변수가 추가되어도 같은 현상이 일어나게 되므로, 회귀식을 구할 때 독립변수들간의 상관관계를

모두 확인하여야 하며, 높은 상관관계를 보이는 변수는 분석 간에 제거하여야 한다. 다중공선성 분석 방법은 Correlation matrix, VIF(Variance Inflation Factors), Eigen system analysis 등이 있으나, 본 연구에서는 다중회귀모형에 많이 사용되고 있는 VIF(식 (9))를 사용하였다

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2} \quad (9)$$

여기서 R_j^2 는 j 번째 독립변수 계수의 상관관계를 의미한다. Table 1은 다중공선성의 정도를 나타낸다.

Table 1. Multi-collinearity analysis by range

VIF	Degree of Multi-collinearity
VIF=1	None
1<VIF<10	Moderate
VIF>10	High

3. 매개변수 추정식 개발을 위한 M-RAT모형의 구축

3.1 대상유역 현황

기후변화시나리오를 적용하여 수문순환 변화를 전망하기 위해서는 먼저 유출모형의 매개변수에 대한 검증이 필요하다. 일반적으로 유출모형의 매개변수 검토정은 관측자료와 모의 자료와의 통계적인 비교를 통해 수행된다. 하지만 본 연구의 대상지역인 북한지역은 미계측 유역으로 분류되어 관측유량을 확보하기 어려운 지역이다. 이를 극복하기 위해 북한지역을 대신할 수 있는 유출모형의 매개변수가 필요하며 주로 지역화 방법이 사용된다. 따라서 본 연구에서는 남한의 16개 계측유역을 대상으로 매개변수를 검토정 하였고, 유출모형의 매개변수와 유역특성변수와의 지역회귀분석을 통해 미계측 유역에 적용 가능한 매개변수 추정식을 제시하였다. Fig 3(a)는 유출모형의 매개변수에 대한 검토를 위한 16개 유역의 현황이다.

각 유역별 기상자료는 기상청에서 제공하고 있는 55개의 기상관측소의 월 강수와 월 평균기온을 수집하여 적용하였다. M-RAT모형에서 유출량 산정을 위한 입력자료인 강수량, 평균기온, 잠재 증발산량과 평균기온 자료는 대상유역 내에 기상관측소가 존재하거나 또는 대상유역 내에 기상관측소가 없는 경우 티센 면적망 방법을 통해 해당유역에 영향을 주는 기상관측소의 측정된 값을 이용하였다. 관측 수문 자료의 기간은 최장 1962년부터 2017년까지지만 검토정 기간의 통일성을 위해 1976년부터 2015년까지로 하였다. 또한 유역의 평균 강수량을 산정하는 방법 중 하나인 티센 면적망 방법을 적용하여 유역평균 월강수량을 산정하였다. Fig 3(b)는 선정유역의 티센 면적망을 도시한 그림이다. 잠재증발산량은 Thornthwaite식을 이용하였다. 각 유역별 월 유출량 자료는 일 평균 수위자료를 WAMIS에서 제공하고 있는 수위-유량 관계 곡선식에 의해

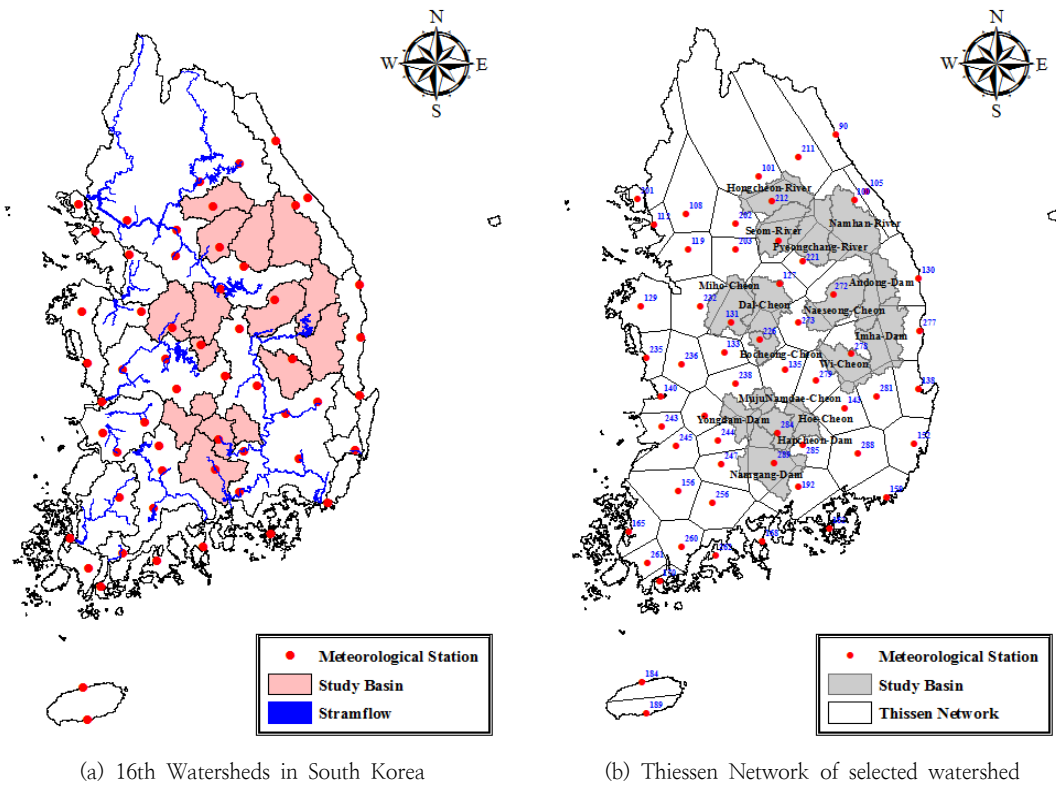


Fig. 3. 16th Watersheds and Thiessen Network in South Korea

Table 2. Watershed Status and Watershed Characteristic Variables

No.	Basin	Area (km ²)	Average elevation (m)	Average slope (°)	Coefficient of Form	Highest altitude (m)	Total length of the stream (km)	Annual precipitation (mm)	Annual min temperature (°C)	Annual max temperature (°C)	Total annual potential evaporation (mm)	Amount of available water resource (P-E)	Ratio of available water resource (%)
1	Namhangang-River	2448	748	51	1.3	1565	4415	1191	-27.6	32.3	629	561.6	0.5
2	Pyeongchang-River	1773	592	46	0.6	1575	3056	1260	-27.6	38	830	430.6	0.3
3	Seom-River	1491	309	41	0.8	1280	2961	1279	-27.6	38	830	449.2	0.4
4	Dal-Cheon	1614	299	38	2.0	1059	3805	1196	-25.3	36.5	791	404.8	0.3
5	Hongcheon-River	1566	367	49	1.5	1191	2337	1278	-25.6	36.8	831	447	0.4
6	Andong-Dam	1629	548	49	2.5	1570	5381	1074	-20.4	38	849	225.1	0.2
7	Imha-Dam	1976	387	47	0.7	1215	5741	951	-20.4	38	849	101.3	0.1
8	Naeseong-Cheon	1816	318	34	1.1	1438	5478	1143	-18	37.2	834	309.3	0.3
9	Wi-Cheon	1406	208	34	0.7	1213	4393	1014	-20.4	38	839	174.8	0.2
10	hoe-Cheon	782	349	42	2.1	1430	2364	1203	-19.2	37.4	869	333.2	0.3
11	Hapcheon-Dam	924	504	41	0.6	1498	3352	1270	-16.7	39.2	880	389.5	0.3
12	Namgang-Dam	2282	428	40	0.4	1915	6841	1468	-16.7	39.2	880	587.9	0.4
13	Yongdam-Dam	930	510	43	1.2	1590	2131	1315	-16	38.3	896	418.9	0.3
14	Bocheng-Cheon	554	264	37	1.3	1057	1689	1210	-25.3	36.5	791	419.6	0.4
15	Miho-Cheon	1855	137	24	0.4	655	4420	1213	-22.1	37.8	876	337.6	0.3
16	Muju Namdae-Cheon	464	583	50	1.9	1611	696	1173	-22	37.5	820	352.7	0.3

일 평균 유출량으로부터 산정하였다. Table 2에 16개 유역의 유역특성 및 기상특성을 나열하였다.

3.2 M-RAT모형의 구축

본 연구에서는 M-RAT모형의 모의능력을 검토하기 위해

16개 계측유역을 선정하였고, 수집된 수문-기상 자료를 이용하여 M-RAT모형의 최적 매개변수를 결정하고자 한다. 최적 매개변수를 결정하기 위하여 1976년부터 2000년 기간을 대상으로 모형을 보정하였으며, 2001년부터 2015년 기간을 대상으로 매개변수를 검증하였다. 또한 평균제곱근오차(RMSE)와

Table 3. Parameter calibration result of M-RAT

No.	Basin	Calibration(1979yr~2000yr)		Validation(2001yr~2015yr)	
		RMSE	NSE	RMSE	NSE
1	Namhangang-River	32.54	0.77	43.33	0.87
2	Pyeongchang-River	30.86	0.84	42.62	0.95
3	Seom-River	29.19	0.85	43.05	0.95
4	Dal-Cheon	26.99	0.79	61.44	0.91
5	Hongcheon-River	29.13	0.89	77.99	0.79
6	Andong-Dam	34.36	0.64	40.25	0.91
7	Imha-Dam	38.27	0.54	46.42	0.89
8	Naeseong-Cheon	29.57	0.75	42.30	0.89
9	Wi-Cheon	20.62	0.70	37.36	0.88
10	Hoe-Cheon	28.57	0.81	44.59	0.91
11	Hapcheon-Dam	25.16	0.83	46.34	0.88
12	Namgang-Dam	24.36	0.91	41.24	0.95
13	Yongdam-Dam	24.70	0.79	46.62	0.92
14	Bocheng-Cheon	25.21	0.76	44.71	0.87
15	Miho-Cheon	24.38	0.67	41.29	0.88
16	Muju Namdae-Cheon	26.97	0.70	46.09	0.91

Table 4. Parameter estimation of M-RAT model

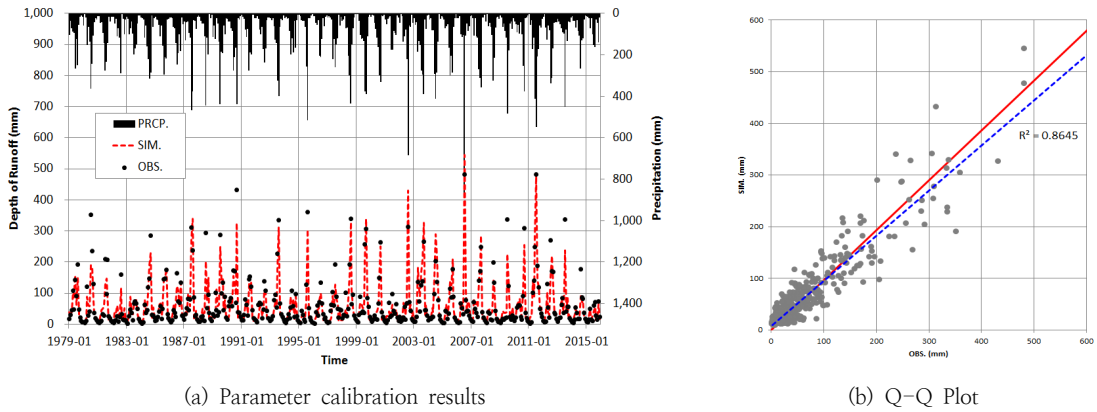
No.	Basin	a1	a2	a3	a4	a5	a6	snow	Soil Low-water
1	Namhangang-River	8.41	-3.57	-1.78	-5.82	0.06	0.04	7.95	408.77
2	Pyeongchang-River	14.84	-2.58	-2.02	-574.98	0.04	24.44	9.60	383.59
3	Seom-River	34.16	-2.10	-1.43	-239.13	-0.13	0.01	3.30	307.97
4	Dal-Cheon	33.42	-1.37	-1.35	-83.30	-0.13	0.01	9.94	279.32
5	Hongcheon-River	17.61	-0.32	-2.15	-163.77	0.01	0.03	11.01	319.62
6	Andong-Dam	14.06	-2.55	-1.14	-0.12	1.5	120.44	12.43	213.67
7	Imha-Dam	39.11	-2.92	-2.24	0.17	0.95	68.08	10.61	175.95
8	Naeseong-Cheon	31.45	-1.29	-1.25	0.30	-0.7	26.02	11.11	246.64
9	Wi-Cheon	31.40	-1.81	-1.25	83.02	1.04	62.73	4.68	241.26
10	hoe-Cheon	32.23	-1.93	-1.05	94.17	0.02	0.10	14.96	242.01
11	Hapcheon-Dam	72.52	-2.38	-1.48	0.15	-0.02	13.16	9.93	349.56
12	Namgang-Dam	39.46	-1.74	-1.74	89.12	-0.4	31.05	1.42	423.44
13	Yongdam-Dam	43.22	-2.23	-1.48	88.76	-1.09	37.33	6.14	335.03
14	Bocheng-Cheon	35.40	-1.64	-0.85	81.70	-1.32	34.93	6.91	337.60
15	Miho-Cheon	8.93	-1.25	-1.53	-64.97	0.03	0.03	6.87	318.79
16	Muju Namdae-Cheon	41.51	-2.02	-1.59	95.73	0.04	0.05	4.58	340.88

NSE를 통해 모형의 적용성을 확인하였다. NSE는 0.6보다 클 경우 높은 효율성, 0.5~0.6의 경우 적절한 효율성, 0.5이하의 경우 낮은 효율성을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 NSE가 0.6이상을 검보정 기준으로 구분하였다.

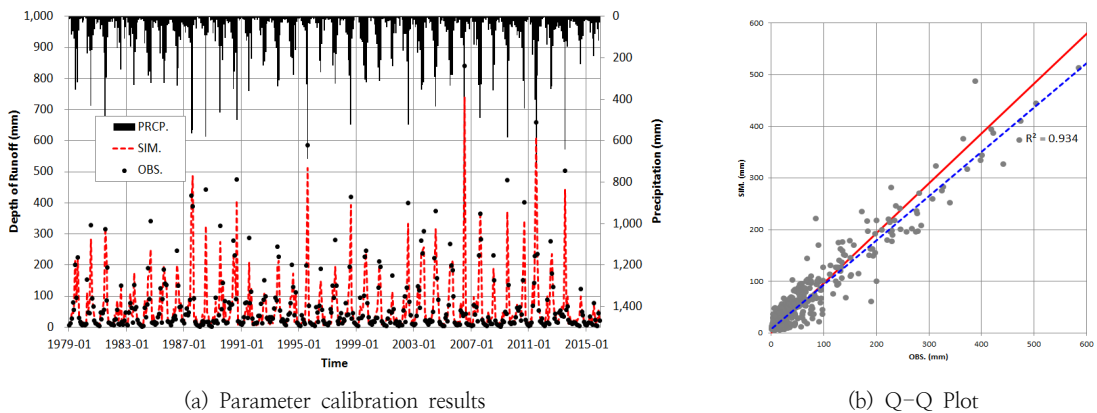
Table 3은 M-RAT모형의 매개변수 보정과 검증에 따른 통계치 결과이며, 보는 바와 같이 대부분의 유역에서 높은 NSE값을 보였지만 임하댐유역의 경우 0.54로 낮은 NSE값을 보였고, RMSE는 1,114.56mm를 보였다. 매개변수 검증 결과 모든 유역에서의 NSE가 0.8이상으로 매우 높은 효율성을 보였다.

각 유역의 최적화한 매개변수 값은 Table 4와 같다. Table 4

의 a1과 a2는 강설과 용설에 관한 매개변수로 기온이 모형의 매개변수 a2보다 큰 경우에는 용설이 시작되며, a1과 a2사이 일 경우에는 강설과 용설이 동시에 발생하며, 모형의 매개변수 a1보다 클 경우에는 강설이 중단된다. a3 매개변수는 잠재증발산량에 기여하는 매개변수이고 a4 매개변수는 실제증발산량에 기여하는 매개변수이며, a5 매개변수는 유역의 기저 유출량에 기여하는 매개변수이고 a6매개변수는 지표유출량에 기여하는 매개변수이다. 또한 Snow와 토양저류수분은 각각의 모형의 초기 값이며 이는 시계열자료의 전반부 3년의 자료로 산정된다.



(a) Parameter calibration results (b) Q-Q Plot
 Fig. 4. Parameter calibration results for the upstream watershed (Namhan River)



(a) Parameter calibration results (b) Q-Q Plot
 Fig. 5. Parameter calibration results for the upstream watershed (Nam River)

4. 지역회귀분석을 이용한 매개변수 추정식 개발

본 연구에서는 M-RAT모형을 북한 미계측 유역에 적용하기 위해 모형변수의 초기치 설정, 과거 관측자료를 통한 최적 매개변수를 결정하였다. 하지만 북한 같은 미계측 유역을 대상으로 적용하기란 관측자료의 부재로 인해 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 모형의 매개변수를 관측된 유출량과의 검정에 의해 산정하는 것이 아니라 유역의 유역특성변수와와의 상관분석을 통하여 추정하였다. 본 연구에서는 Table 2에서 보는 바와 같이 유역의 물리적 특성을 반영하기 위해 유역면적(A), 유역평균표고(H), 유역평균경사(S), 형상계수(C), 유역최고고도(Hx), 하천총길이(L)를 선정하였고, 기상학적변수로 연 강수량(P), 연최저기온(Tn), 연최고기온(Tx), 연 총 잠재증발산량(PET), 수자원부존량(Ab), 수자원부존량비율(Ar)을 선정하였다.

4.1 유역특성변수 간 상관관계 분석

회귀분석에서 독립변수 간 상관관계가 높을 경우 다중공선성이 있다고 말한다. 이 경우 회귀모형의 설명력이 떨어지며 입력 자료의 변화에 따라 변동성이 높아지게 된다. 따라서 본 연구에서는 유역특성변수들간의 상관 분석을 통해 다중공선성을 확인하였다. Table 5은 각 유역별 유역특성변수 간의 상호간의 상관관계를 계산하여 나타낸 상관관계수행렬이다. 1:1선

윗부분은 상관계수를, 아랫부분은 유의확률을 도시하였다. 이 상관관계행렬을 살펴보면 유역면적(A)는 하천총길이(L)와 0.81로 높은 상관성을 보였으며, 유역평균표고(H)는 유역평균경사(S), 유역최고고도(Hx)와 높은 상관성을 보였다. 연강수량(P)과 수자원부존량비율(Ar)이 서로 높은 상관성을 나타내었으며, 연최저기온(Tn), 연최고기온(Tx)과 연총잠재증발산량(PET)와 서로 간 높은 상관성을 나타내었다. 수자원부존량(Ab)와 수자원부존량비율(Ar)도 서로 높은 상관성을 보였다.

4.2 단계적 회귀분석

본 연구에서는 M-RAT모형의 매개변수 검보정 결과를 지역회귀모형에 적용하기 위해 16개의 계측유역을 대상으로 유역특성변수 간 상관관계를 분석하였다. 하지만 Table 5의 결과 중 유역면적(A)와 하천총길이(L)처럼 입력변수들 간의 상관관계가 존재하게 되면 회귀계수의 분산이 증가하기 때문에 회귀분석 시 신뢰성이 떨어지는 문제가 발생하게 된다. 이러한 다중공선성(Multicollinearity)을 측정하기 위한 방법은 분산팽창인수(Variance Inflation Factor), 공차한계(Tolerance), 상태지수를 조사하는 방법 등이 있다. 또한 다중공선성 문제를 해결하기 위해서는 문제를 일으키는 설명변수를 제거하거나 주성분 분석(PCA), 능형회귀분석(Ridge Regression) 또는 단계적 회귀분석(Stepwise Regression)이 있다. 본 연구에서는 단계적

Table 5. Correlation coefficient matrix between watershed characteristic variables(16)s

		correlation coefficient										
P-Value	A	0.11	-0.01	-0.33	0.06	0.81	0.00	-0.18	-0.27	-0.32	0.16	0.14
	0.34	H	0.82	0.24	0.74	-0.09	0.14	-0.08	-0.33	-0.42	0.34	0.38
	0.48	0.00	S	0.44	0.61	-0.20	-0.04	-0.21	-0.26	-0.34	0.13	0.16
	0.10	0.19	0.05	C	0.12	-0.30	-0.23	-0.08	-0.30	-0.20	-0.12	-0.02
	0.41	0.00	0.01	0.33	Hx	0.13	0.35	0.34	0.11	0.00	0.33	0.27
	0.00	0.37	0.22	0.13	0.32	L	-0.15	0.30	0.10	0.04	-0.16	-0.22
	0.50	0.30	0.45	0.20	0.09	0.29	P	0.04	0.16	0.16	0.88	0.77
	0.25	0.38	0.22	0.38	0.10	0.13	0.44	Tn	0.58	0.66	-0.28	-0.39
	0.15	0.11	0.16	0.13	0.34	0.36	0.28	0.01	Tx	0.94	-0.30	-0.47
	0.11	0.05	0.10	0.23	0.50	0.44	0.28	0.00	0.00	PET	-0.33	-0.49
	0.28	0.10	0.32	0.33	0.10	0.27	0.00	0.15	0.13	0.10	Ab	0.98
0.30	0.07	0.28	0.47	0.16	0.20	0.00	0.07	0.03	0.03	0.00	Ar	

Table 6. Summary of regression models

Parameter	Model	R	R2	standard error of estimated value	P-Value
a1	1	0.51	0.26	14.31	0.04
	2	0.70	0.49	12.34	0.03
a2	1	0.68	0.46	0.58	0.004
a3	1	0.51	0.26	0.35	0.04
a4	1	0.62	0.39	140.48	0.01
	2	0.78	0.61	116.98	0.02
a5	1	0.63	0.40	0.58	0.009
a6	1	0.62	0.38	27.53	0.01
snow	1	0.62	0.39	3.6	0.01
Soil low-water	1	0.90	0.80	32.36	0.00
	2	0.93	0.86	28.42	0.04
	3	0.95	0.90	24.85	0.04

회귀분석을 이용하여 공차한계를 통해 다중공선성을 측정하고, 단계적 회귀분석을 통해 회귀분석을 위한 적절한 변수를 선택하였다.

Table 6는 각 매개변수와 각 유역특성변수와의 단계적 회귀분석결과에 따른 회귀모형이다. a1매개변수의 경우 2개의 회귀모형이 생성되었으며, 각각의 상관계수는 0.51, 0.70, 결정계수는 0.26, 0.49, 표준오차는 14.31, 12.34로 분석되었으며, 유의확률을 확인한 결과 2개 모형 모두 유의한 회귀모형임을 확인하였다. a3매개변수의 경우 1개의 모형이 생성되었으며, 상관계수는 0.51, 결정계수는 0.26, 표준오차는 0.35로 분석되었으며, 생성된 모형이 통계적으로 유의한 모형임을 확인하였다. a4매개변수의 경우 2개의 회귀모형이 생성되었으며, 각각의 상관계수는 0.62, 0.78, 결정계수는 0.39, 0.61, 표준오차는 140.48, 116.98로 분석되었으며, 유의확률을 확인한 결과 2개 모형 모두 유의한 회귀모형임을 확인하였다. a6 매개변수의 경우 1개의 모형이 생성되었으며, 상관계수는 0.62, 결정계수는 0.38, 표준오차는 27.53로 분석되었으며, 생성된 모형의 유의한 모형임을 확인하였다. 생성된 모형이 통계적으로 유의한 모형임을 확인하였다. 토양저류수분매개변수의 경우 총 3개의

회귀모형이 생성되었으며, 3개의 모형 모두 상관계수는 0.9이상, 결정계수는 0.8이상으로 분석되었으며, 3개의 모형 모두 통계적으로 유의한 모형임을 확인하였다.

4.3 매개변수 지역화식 선정

본 연구에서는 Table 6의 회귀모형의 결과를 이용하여 각 매개변수별 적합한 모형을 선정하였으며, 그 기준은 결정계수와 표준오차로 하였다. Table 7은 Table 6의 결과를 이용하여 선정한 각 매개변수의 통계 결과이다. a1모형의 경우 유역면적(A), 연최저기온(Tn)이 독립변수로 적용 되었으며, 두 변수 모두 1.03의 VIF값을 보인결과 다중공선성이 미약하다고 볼 수 있다. a2매개변수의 경우 유역평균고도(Ha)가 독립변수로 적용 되었으며, 독립변수 1개이기 때문에 다중공선성은 없으며, a3매개변수의 경우 유역면적(A)이 독립변수로 적용 되었으며, 독립변수가 1개이기 때문에 다중공선성은 없다. a4매개변수의 경우 연최저기온(Tn)과 연최고기온(Tx)이 독립변수로 적용 되었으며, 두 변수 모두 1.51의 VIF값을 보인 결과 다중공선성이 미약하다고 볼 수 있다. a5매개변수의 경우 연강수량(P)이 독립변수로 적용 되었으며, 독립변수가 1개이기 때문에

Table 7. Regression coefficient calculation result

Parameter	Model	nonstandardization factor		t	P-value	95.0% Confidence Interval		Multicollinearity Statistics		
		β	standard error			lower value	upper value	tolerance	VIF	
a1	2	k	89.92	18.01	4.99	0.00	51.02	128.83	-	-
		A	-0.01	0.01	-2.10	0.04	-0.02	0.00	0.97	1.03
		Tn	1.91	0.79	2.41	0.03	0.20	3.61	0.97	1.03
a2	1	k	-0.67	0.41	-1.65	0.00	-1.54	0.20	-	-
		Ha	-0.003	0.001	-3.45	0.00	-0.01	-0.00	1.00	1.00
a3	1	k	-1.03	0.24	-4.27	0.00	-1.54	-0.51	-	-
		A	-0.001	0.001	-2.22	0.04	0.00	0.00	1.00	1.00
a4	2	k	3212.08	1010.24	3.18	0.01	1,029.59	5,394.57	-	-
		Tn	40.41	9.05	4.46	0.00	20.86	59.97	0.66	1.51
		Tx	-63.16	23.55	-2.68	0.02	-114.04	-12.27	0.66	1.51
a5	1	k	5.08	1.49	3.02	0.01	1.30	7.68	-	-
		P	-.004	.001	-0.63	0.01	0.01	-0.01	0.00	1.00
a6	1	k	98.64	25.60	3.85	0.00	43.74	153.55	-	-
		Ar	-239.64	81.51	-2.94	0.01	-414.46	-64.82	1.00	1.00
snow	1	k	74.013	21.932	3.375	0.01	26.973	121.053	-	-
		Tn	-1.752	.586	-.624	0.02	.010	-3.008	-0.50	1.00
Soil low-water	3	k	146.47	25.10	5.84	0.00	91.79	201.15	-	-
		Ab	0.43	0.05	7.86	0.00	0.31	0.55	0.85	1.18
		C	-32.73	10.41	-3.14	0.01	-55.42	-10.04	0.90	1.11
		Ha	0.10	0.04	2.24	0.04	0.00	0.20	0.81	1.24

다중공선성은 없다. a6매개변수의 경우 수자원부존량비율(Ar)이 독립변수로 적용 되었으며, 독립변수가 1개이기 때문에 다중공선성은 없다. snow매개변수의 경우 연최저기온(Tn)이 독립변수로 적용 되었으며, 독립변수가 1개이기 때문에 다중공선성은 없다. 토양저류수분매개변수의 경우 수자원부존량(Ab), 형상계수(C), 유역평균고도(Ha)가 독립변수로 적용 되었으며, VIF결과 다중공선성은 미약하다. 각 매개변수의 회귀식은 아래와 같다(식 10 ~ 식 17).

$$a1 = 89.92 - 0.001 \times A + 1.91 \times Tn \quad (10)$$

$$a2 = -0.67 - 0.03 \times Ha \quad (11)$$

$$a3 = -1.03 - 0.001 \times A \quad (12)$$

$$a4 = 3,212.08 + 40.41 \times Tn - 63.16 \times Tx \quad (13)$$

$$a5 = 5.08 - 0.004 \times P \quad (14)$$

$$a6 = 98.64 - 239.64 \times Ar \quad (15)$$

$$Snow = 74.013 - 1.752 \times Tn \quad (16)$$

$$Storage = 146.47 + 0.43 \times Ab - 32.73 \times C + 0.1 \times Ha \quad (17)$$

4.4 매개변수 지역화식의 검증

본 연구에서는 추정된 회귀식의 적용성을 검토하기 위해 오십천, 강릉남대천, 용담댐, 영강유역을 미계측유역으로 가정하고 산정된 회귀식을 적용하였다. Table 8는 각 유역의 매개변수 추정 결과이다. Table 9은 각 유역의 검증결과로 오십천유역의 RMSE는 41.48mm, NSE가 0.80, 강릉남대천의 RMSE는 30.15, NSE가 0.90, 용담댐유역의 RMSE는 31.78mm, NSE가 0.88, 강릉남대천의 RMSE는 30.16, NSE가 0.88로 네 유역 모두 높은 효율성을 보였다. Fig 6~Fig 7은 각 유역의 추정 매개변수 검증결과 이다. 일반적으로 유역면적이 클수록 유출량과 강수량의 상관도는 높아진다. 이 연구의 지역회

Table 8. Model parameters and estimated parameters

Basin	a1	a2	a3	a4	a5	a6	snow	Storage
Osip-Cheon	52.93	-12.82	-2.02	295.02	-0.34	-15.69	9.01	222.78
Gangneung namdae-cheon	52.30	-9.66	-2.08	295.02	-0.64	-30.80	9.01	257.91
Yongdam-Dam	38.60	-15.98	-1.96	30.35	-1.28	10.83	10.42	235.73
Yeong-Gang	48.31	-10.77	-1.94	245.03	0.62	16.68	10.77	268.92

Table 9. Verification results of estimated parameters

Basin	Validation(1979yr~2015yr)			
	OBS(mm)	SIM(mm)	RMSE(mm)	NSE
Osip-Cheon	780.21	784.21	41.48	0.80
Gangneung namdae-cheon	870.33	847.42	30.15	0.90
Yongdam-Dam	798.60	758.51	31.78	0.88
Yeong-Gang	716.42	663.57	30.06	0.88

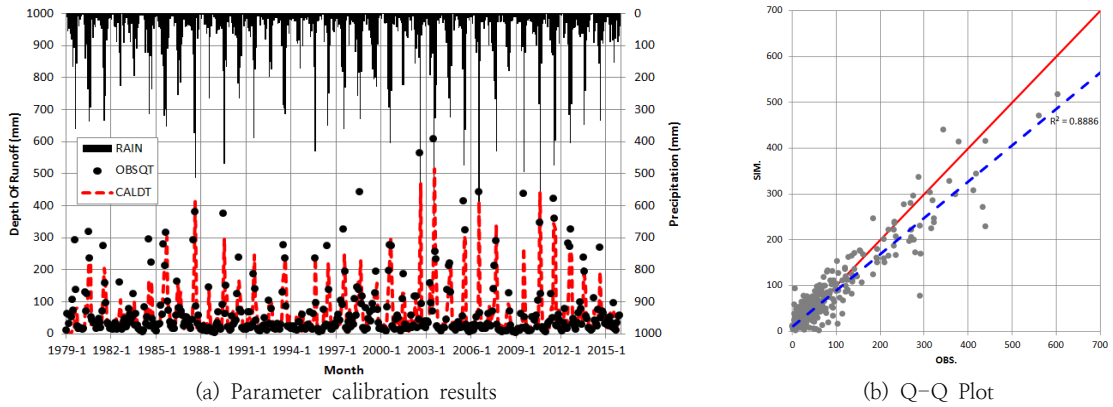


Fig. 6. Estimated parameter verification results(Yongdam dam)

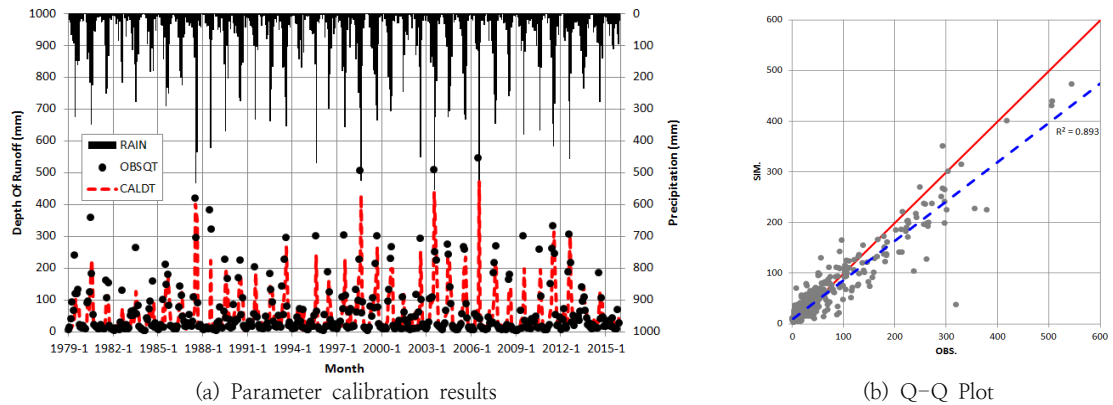


Fig. 7. Estimated parameter verification results(Yonggang)

귀식에 강수량이 주요변수로 입력되고 그 영향 또한 매우 크다. 검증된 4개 유역의 면적은 각각 오십천 294km², 남대천 258km², 용담댐 930km², 영강 914km²로 오십천과 강릉남대천 유역은 다른 유역에 비해 작은 편으로 상관도가 낮을 수밖에 없다. 북한은 4개 유역 모두 900km² 이상으로 대규모 유역으로써 회귀식의 적용성이 매우 높을 것으로 판단되었다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 관측 수문자료를 획득하기 어려운 북한지역을 대상으로 지역화 모형을 적용하고자 하였으며, 획득하기 쉬운 유역특성변수를 선정하고, 남한의 16개 유역의 기상학적, 지형학적 변수를 이용하여 북한과 같은 미세측유역에 적용 가능한 매개변수 회귀식을 산정하였다. 매개변수 회귀식 산정결

과에 대한 통계분석 결과 선정된 모형 모두 상관도가 0.6 이상으로 통계적으로 유의한 모형을 확인하였다.

또한 오십천, 강릉남대천, 용담댐, 영강 유역을 대상으로 매개변수를 검증한 결과 오십천과 강릉 남대천에서 상대적으로 낮은 상관도를 보였다. 일반적으로 유역면적이 클수록 유출량과 강수량의 상관도는 높아지며, 본 연구에서는 지역회귀식에 유역면적과 강수량이 주요변수로 입력되므로 그 영향 또한 매우 크다. 검증된 4개 유역의 면적은 각각 오십천 294km², 남대천 258km², 용담댐 930km², 영강 914km²로 오십천과 강릉 남대천 유역은 다른 유역에 비해 작은 편으로 상관도가 낮을 수밖에 없다. 이러한 결과를 보완하기 위해 다양한 유역면적을 대상으로 지역회귀식을 산정할 필요가 있으며, 이에 본 연구에서는 추천 유역면적을 800km² ~ 10,000km²로 제시하고자 한다.

사 사

This work was supported by Korea Environment Industry & Technology Institute(KEITI) through Advanced Water Management Research Program, funded by Korea Ministry of Environment(MOE). (83091)

References

- Abdulla, F.A., Lettenmaier, D.P.(1997). Development of regional parameter estimation equations for a macroscale hydrological model. *Journal of Hydrology*. 197, pp.230–257
- An SI, Ha KJ, Seo KH, Yeh SW, Min SK, Ho CH(2011). A review of recent climate trends and causes over the Korean peninsula. *Korean Meteorological Society Journal (atmosphere)*, Korean Meteorological Society, 2(4), pp.237–251 (in Korean).
- Clark, G. E., Ahn, K. H., Palmer, R. N.(2017). Assessing a Regression-Based Regionalization Approach to Ungauged Sites with Various Hydrologic Models in a Forested Catchment in the Northeastern United States. *Journal of Hydrologic Engineering*. 22(12).
- Hwang JS, Jeong DI, Lee JK, Kim YO(2007). Application of Monthly Water Balance Models for the Climate Change Impact Assessment. *Journal of Korea Water Resources Association*. 40(2), pp.147–158.
- Jafarzadegan, K., Merwade, V.(2017). A DEM-based approach for large-scale floodplain mapping in ungauged watersheds. *Journal of Hydrology*. 550, pp.650–662.
- Jang YJ(2012). Analysis of future climate characteristic of Korean peninsula under RCP scenario. Master degree, Korea University.
- Kang MG, Lee JH, Park KW(2013). Parameter Regionalization of a Tank Model for Simulating Runoffs from Ungauged Watersheds. *Journal of Korea Water Resources Association*. 46(5), pp-519–530.
- Kim TJ, Jeong GI, Kim KY, Kwon HH(2015). A study on regionalization of parameters for sacramento continuous rainfall-runoff model using watershed characteristics. *Journal of Korea Water Resources Association*, 48(10), pp.793–806.
- Korea Meteorological Administration (2011). Climate change prospect report on the Korean peninsula. Korea Meteorological Administration.
- Kwon MS, Lee GM, Jun KS(2015). Analysis of annual maximum daily rainfall using RCP climate change scenario in Korean peninsula. *Korean Society of Hazard Mitigating Journal*, Korean Society of Hazard Mitigation, 15(1) (in Korean). [10.9798/KOSHAM.2015.15.1.99](https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2015.15.1.99)
- Merz, R. and Blöschl, G. (2004). Regionalisation of catchment model parameters. *J. Hydrol.* 287, pp.95–123.
- Mohamoud, Y. M. (2008). Prediction of daily flow duration curves and streamflow for ungauged catchments using regional flow duration curves. *Hydrol. Sci. J.* 53(4), 706–724.
- Oudin, L., V. Andréassian, C. Perrin, C. Michel, and N. Le Moine (2008). Spatial proximity, 762 physical similarity and ungauged catchments: confrontation on 913 French catchments, 763 *Water Resour. Res.*, 44, W03413, doi:03410.01029/02007WR006240.
- Parajka, J., Merz, R., Blöschl, G. (2005). "A Comparison of regionalisation methods for catchment model parameters". *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 2(2). pp.509–542.
- Post, D.A., Jakeman, A.J.(1999). Predicting the daily streamflow of ungauged catchments in S.E. Australia by regionalising the parameters of a lumped conceptual rainfall-runoff model. *Ecolog. Modelling*. 123, pp.91–104.
- Samuel, J., Coulibaly, P., and Metcalfe, R. A. (2011). Estimation of continuous streamflow in Ontario ungauged basins: Comparison of regionalization methods. *Journal of Hydrologic Engineering*. 16(5), pp. 447–459.
- Seibert J.(1999). Estimation of Parameter Uncertainty in the HBV Model. *Hydrology Research*. 28(4), pp.247–262
- Vandewiele, G. L., Xu, C-Y. and Win, N.-L. (1992). "Methodology and comparative study of monthly water balance models in Belgium, China and Burma." *Journal of Hydrology*. Vol. 134, pp. 315–347.
- Young, A. R.(2006). Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 320(1), pp.155–172.
- Yu GY, Kim IH(2013). Development and introduction of indicators to assess vulnerability of climate change. Korea Environment Institute.