

기후변화로 인한 청미천유역의 기상학적 위협요인 규명

Identification of Meteorological Threats by Climate Change in the Cheongmicheon Basin

이 철 응* 김 상 옥**
Lee, Cheol-Eung Kim, Sang Ug

Abstract

In recent, the various methods to predict the hydrological impacts due to climate change have been developed and applied. Especially, the variability of the meteorological factors such as rainfall, temperature, and evaporation can impact on the ecosystem in a basin. The variability caused by climate change on the meteorological factors can be divided by a gradual and abrupt change. Therefore, in this study, the gradual change is detected by simple linear regression and Mann-Kendall trend test. Also, the abrupt change is detected by Bayesian change point analysis. Finally, the result using these methods can identify the meteorological threats in the Cheongmicheon basin.

키워드 : 기후변화, Mann-Kendall test, Bayesian change point analysis

Keywords : Climate change, Mann-Kendall test, Bayesian change point analysis

1. 서론

광범위한 산림 개발, 급속한 인구증가 및 도시면적 증대, 치수 및 이수 목적의 달성을 위한 댐 및 하천개발사업과 같은 인위적 요인과 이산화탄소농도 증가에 따른 전 지구적 기후변화와 같은 자연적 요인은 유역 내 물순환의 패턴을 급진적 또는 점진적으로 변화시킨다. 이러한 물순환 패턴의 변화는 특정 지점의 유량을 증가 또는 감소시켜 수생태계에 직접적인 영향을 미치고 물순환 과정에 포함된 각종 화학물질의 이동으로 인해 장기적이고 간접적인 영향을 발생시킨다. 특히 이로 인한 변화의 크기가 자연이 가지고 있는 회복탄력성(Resiliency)의

범위를 초과하는 경우 생태계의 지속 여건을 악화시키는 결과를 발생시켜 궁극적으로 유역 내 생물 다양성과 보전성을 감소시킬 수 있다. 특히 특정 유역 내에서 강우, 온도, 증발산과 같은 기상학적 요인은 물순환의 패턴에 가장 많은 영향을 미치는 요인으로써 기상학적 요인의 변화는 유역 내 존재하는 다양한 식물 및 동식물의 생태적 다양성 등에 영향을 미쳐 생물의 종이 변화되거나 멸종되는 문제가 발생될 수 있다.

최근 UNESCO IHP(International Hydrological Program)에서 본격적으로 다루어지기 시작한 생태수문학(Ecohydrology)은 물순환 과정의 변화에 따라 발생될 수 있는 생태 또는 생물학적인 반응을 분석하여 두 영역의 상호 관계를 수문학 및 생물학적인 학문의 영역 내에서 규명하기 위한 다학제적인 연구가 추진되고 있다. 특히 2014년부터 새롭게 시작되는 IHP-VIII(2014-2021) 단계 사업에서는 지속가능한 세계를 위한 공학적 조화의 수단으로 생

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

** 강원대학교 토목공학과 조교수, 공학박사, 교신
저자

태수문학을 제시하고 있으며, 특정 유역에 대한 생태수문학적 접근을 위하여 가장 먼저 유역 내 무생물적 요인인 기상학적 요인의 잠재적 위험요인을 분석할 것을 권고하고 있다.

따라서 본 연구에서는 청미천 유역을 대상으로 하여 기상학적 요인(강우, 온도, 증발산)의 변화를 정량적으로 나타낼 수 있는 방법을 개발하고 적용함으로써 유역 내 존재하는 잠재적 위험요인을 규명하는데 초점을 두고 연구를 진행하였다. 특히 기상학적 잠재적 위험요소를 규명함에 있어 본 연구에서는 크게 자료에 내포된 변화를 점진적 변화와 급진적 변화로 구분함으로써 특정 유역에서 관측되거나 미래에 발생할 수 있는 강우, 온도, 증발산 자료의 특징을 규명하였다.

2. 점진적 변화의 분석 이론

생태시스템은 기상, 수문, 환경요인의 변화에 따라 위협을 받을 수 있으며, 이러한 위협은 크게 변화요인의 점진적 변화 및 급진적 변화로 구분될 수 있음을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 청미천 유역의 기상학적 자료에 대한 점진적 경향의 분석을 위하여 먼저 단순선형회귀분석과 Mann-Kendall 비모수 경향성 검정(MK 검정)을 함께 수행하였다. 두 기법 모두 특정 자료의 점진적 변화를 탐색할 수 있다는 특징을 가지고 있으나, 회귀분석은 자료 분석의 초기단계에서 정성적 변화를 이해하기 쉽다는 장점을 제공하며, MK 검정은 통계적 가설검정 절차를 거쳐 경향성의 유무를 판정할 수 있다는 정량적 장점을 제공한다. 본 절에서는 단순선형회귀분석과 관련된 주요 이론은 일반화되어 있어 상세한 설명은 생략하였으며, MK 검정을 위한 이론만을 제시하였다.

MK 검정은 시계열 자료에서 나타나는 단조경향성이 통계적으로 유의한지를 확인할 수 있는 대표적인 기법으로 이미 많은 수문자료의 경향성 분석에서 널리 사용되어 왔다 (Abdul Aziz and Burn, 2006; Douglas et al., 2000; Novotny and Stefan, 2007). 시계열자료 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 의 x_j 와 x_k 가 통계적으로 독립일 때, 통계량 S 는 다음과 같이 정의된다(Mann, 1945; Kendall, 1975).

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

여기서 x_j 와 x_k 는 시계열자료 X 의 값으로 통계량 S 는 시계열자료 X 의 가능한 모든 두 값의 쌍에 대해 다음의 부호를 고려하여 계산된다.

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Mann (1945)과 Kendall (1975)은 n 이 10보다 클 경우 통계량 S 의 분포는 평균 $E[S] = 0$ 이고 다음과 같은 분산을 가지는 정규분포로 근사됨을 제안하였다.

$$\text{Var}[S] = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^g t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (3)$$

여기서, t_i 는 i 번째 중복그룹 내 중복자료의 개수이고 g 는 중복그룹의 개수이다. 통계량 S 가 점진적으로 정규분포를 따르므로 가설검정을 위한 표준정규변량 Z_{MK} 를 구하면 다음과 같다(Hirsch et al., 1984).

$$Z_{MK} = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}[S]} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}[S]} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

일반적으로 MK검정은 양측검정에 기반을 두고 가설검정을 하는데 유의수준 α 를 가정했을 때 식 (4)로부터 구한 표준정규변량 Z_{MK} 의 절대값이 $Z_{1-\alpha/2}$ 보다 클 경우 귀무가설을 기각하여 시계열 자료에 증가하거나 감소하는 단조경향성이 존재함을 나타내며, 유의확률이 유의수준 α 보다 작은 경우 귀무가설을 기각시킬 수도 있다.

3. 급진적 변화의 분석 이론

점진적 변화의 분석을 위해 사용된 가설검정 기반의 MK 검정기법은 경향성의 정량적 판단을 위해 매우 효율적인 방법이나, 가설검정을 위해 수립한 귀무가설(null hypothesis)을 '채택' 또는 '기각'할 것인지에 대한 결정 문제를 주어진 유의수준(significance level)안에서 검정하기 때문에 경향성의 시작시점이나 변동량 등과 같은 시계열자료 변화의 정량적 문제는 해결하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 따라서 자료의 급진적 변화를 탐색하기 위해서는 변동량에 대한 추가적 정보를 제공할 수 있는 별도의 탐색기법이 필요하다. 본 연구에서 적용하고자 하는 변동점 분석기법(change point analysis)은 변동점의 위치(location) 및 변동량의 크기(magnitude)를 정량적으로 제시할 수 있다는 점에서 기존의 경향성 분석 기법과 차별화된다고 볼 수 있으며, 특히 자료에 내포된 급진적 변동요인을 탐색할 수 있다는 점에서도 장점을 가진다.

먼저 n 의 길이를 가지는 특정 시계열자료 $[x]_{i=1}^n$ 가 관측되고 이 관측자료 안에 여러 개의 변동점이 존재한다고 가정하면, 가정한 여러 개의 변동점으로 인해 구분된 구간에 포함된 자료는 각각의 구간 내에서 특정 확률밀도분포함수들 $p_1(x), p_2(x), \dots, p_n(x)$ 에 의해 적절히 표현될 수 있

다. 따라서 변동점에 의해 구분된 각각의 구간은 확률변수 $\mathbf{X}=(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 에 대하여 다음과 같이 수학적으로 표현된다.

$$X_i \sim \begin{cases} p_1(x) = p(x_i | \theta_1), & 1 \leq i \leq \tau_1 \\ p_2(x) = p(x_i | \theta_2), & \tau_1 < i \leq \tau_2 \\ \vdots \\ p_n(x) = p(x_i | \theta_n), & \tau_{n-1} < i \leq n \end{cases} \quad (5)$$

여기서, $\theta_1, \dots, \theta_n$ 은 각각의 확률밀도함수에 포함된 모수이고, $\tau_1, \dots, \tau_{n-1}$ 은 탐색의 대상이 되는 변동점이며 이들은 모두 특정 기법을 통해 추정되어야 할 변수이다.

본 연구에서는 여러 가지의 변동점 분석기법 중에서 최근 많이 이용되고 있는 Bayesian 변동점 분석기법(Bayesian Change Point method, BCP)를 이용하여 변동점을 탐색하였다.

BCP는 Barry and Hartigan (1992, 1993)이 제안한 분리구간모형(Product Partition Model, PPM)을 Carlin et al. (1992)이 일반화시킴으로써 활용되기 시작하였는데, 관련 이론을 상세히 소개하기에는 지면상의 무리가 있어 이론 중 중요한 부분만을 다음에서 간략히 소개하였다. Barry and Hartigan (1992)은 연속된 시간의 순서에 따라 발생된 관측자료 X_1, X_2, \dots, X_n 에 대하여 각각의 관측치가 분할된 분리구간 i 에서 특정 θ 를 가지는 확률밀도분포함수로 표현될 수 있다는 개념과 $0 = i_0 < i_1 < \dots < i_b = n$ 을 만족시키는 각각의 분리구간 내의 확률이 정규분포를 따르는 확률 $\rho = (i_0, i_1, \dots, i_b)$ 로 결정될 수 있다고 가정하여 PPM 모형(Product Partition Model)을 개발하였다.

Carlin et al. (1992)은 PPM모형의 개념을 베이저안 통계기법을 이용하여 변동점 탐색을 위한 사후평균식을 구성하였다. 즉 PPM모형의 개념에 따라 b 개의 분리구간에서의 확률인 ρ 가 주어진다 것은 '블록 사전밀도(block prior density)'라 불리는 $f_{i_j - i_{j-1}}(\theta_{i_j})$ 형태의 확률밀도함수를 가지는 θ_{i_j} ($= \theta_{i_1}, \theta_{i_2}, \dots, \theta_{i_n}$)가 독립적으로 존재할 수 있다는 것이므로, Carlin et al. (1992)은 이를 활용하여 다음과 같은 베이저안 사후확률분포를 구성하였다.

$$f_{ij}(\theta_j | X_{ij}) = \frac{f_{ij}(X_{ij} | \theta_j) f(\theta_j)}{\int f_{ij}(X_{ij} | \theta_j) f(\theta_j) d\theta} \quad (6)$$

Barry and Hartigan (1993)은 식 (6)에서 제시된 사후분포확률을 계산함에 있어 관측자료가 정규분포인 $N(\mu_{ij}, \sigma^2)$ 을 따른다고 가정하였다. 또한 μ_{ij} 에 대한 사전분포로 $N(\mu_r, \sigma^2 / (j-i))$ 를 사용하였으며, 주어진 사후분포확률을 계산하기 위한 변수들

$\mu_0, \sigma^2, p, \omega$ 에 대한 무정보적 사전분포를 식 (7)~(10)과 같이 사용하였다.

$$f(\mu_0) = 1, \quad -\infty \leq \mu_0 \leq \infty \quad (7)$$

$$f(\sigma^2) = 1/\sigma^2, \quad 0 \leq \sigma^2 \leq \infty \quad (8)$$

$$f(p) = 1/p, \quad 0 \leq p \leq p_0 \quad (9)$$

$$f(\omega) = 1/\omega, \quad 0 \leq \omega \leq \omega_0 \quad (10)$$

여기서, 초모수에 해당되는 p_0, ω_0 는 0과 1 사이에 존재하는 임의의 값이나, 본 연구에서는 Barry and Hartigan (1993)이 사용한 선례를 따라 모두 0.2를 사용하였다.

위와 같은 구성을 통해 궁극적으로 분석되어야 하는 사후분포확률식인 식 (6)은 수학적인 해를 얻을 수 없어 추정될 모수를 간단히 추출할 수 없으므로, MCMC (Markov Chain Monte Carlo) 기법 기반의 알고리즘을 활용하여 추정대상이 되는 사후평균을 추출해야 한다. 본 연구에서는 Metropolis et al. (1953)이 제안한 Metropolis-Hasting 알고리즘을 코딩하여 최종 결과를 산정하였다.

4. 대상 유역 및 분석대상 자료

본 연구에서는 한국수자원학회 IHP 프로그램을 통해 다년간 시험유역으로 운영된 바 있는 청미천 유역을 대상으로 하여 연구를 수행하였다. 그림 1에 나타난 청미천 유역의 총 유역면적은 596.6km²이며 표 1에서 제시하는 바와 같이 6개의 표준유역으로 구성되어 있다.



그림 1 청미천 유역의 표준유역 현황

표 1 청미천 유역 내 표준유역의 구성

표준유역 명칭	유역 면적 (km ²)	표준유역 구분
청미천 상류(1)	116.17	청미천-죽산천하구
죽산천(2)	54.16	죽산천-죽산천하구
청미천 중류(3)	126.21	죽산천하구-웅천하구
웅천(4)	103.06	웅천-웅천하구
청미수위표(5)	119.91	웅천하구-청미수위표
청미천 하류(6)	77.09	청미수위표-청미천하구

청미천 유역에는 설성, 삼죽, 생극 강우관측소에 서 각각 1990년, 1990년, 1970년부터 강우자료가 측정되고 있고, 이천측후소에서 1973년부터 온도자료가 측정되고 있다. 본 질에서 검토되어지는 강우, 온도 및 증발산 자료는 크게 과거 관측자료와 미래 예측자료로 구분된다. 관측 강우자료는 3개 강우관측소(설성, 삼죽, 생극)의 개시년도부터 2013년까지의 일강우자료를 취득하여 연구에 사용하였으며, 관측 온도자료는 이천 측후소의 개시년도부터 2013년까지의 일평균온도자료를 취득하여 연구에 사용하였다. 또한 미래 예측자료는 RCP 4.5 및 8.5 시나리오에 따라 GCM모형 중 HadGEM2-AO 모형(135 km×135 km)에서 생성된 2011년부터 2100년까지의 자료를 12.5 km×12.5 km 크기의 격자로 변환시키는 RCM 모형인 HadGEM3-RO의 생성 자료를 청미천 유역에 대해 환산하여 사용하였다. 미래 예측자료는 2개의 RCP 시나리오에 따라 일강우자료, 일평균온도로 구분되어 환산되었다.

취득된 과거 강우자료와 온도자료는 위와 같은 방식을 거쳐 산정된 2100년까지의 미래 강우자료 및 온도자료와 함께 급진적 변화와 점진적 변화의 탐색을 위해 시기적으로 다시 구분되었다. 강우자료는 월별 강우총량, 분기별(1분기: 1월-3월, 2분기: 4월-6월, 3분기: 7월-9월, 4분기: 10월-12월), 년별 강우총량으로 변환되었으며, 온도자료는 월평균온도, 분기별 평균온도, 년평균온도로 변환되었다. 증발산 자료를 생성하기 위해서는 가장 간단한 잠재 증발산량의 산정기법인 Thornthwaite 방법을 적용하였으며 RCP 4.5 및 8.5 온도자료를 활용하여 2011년-2100년의 증발산 자료를 생성하였다. 각각의 분석자료 특성을 간단히 요약하면 표 2와 같다.

표 2 분석대상 자료의 구성

구분	위치 및 년도	분석시기
과거 관측강우	설성(1990~2013)	월별 강우총량(12)
	삼죽(1990~2013)	분기별 강우총량(4)
	생극(1970~2013)	년별 강우총량(1)
과거 관측온도	이천(1973~2013)	월 평균온도(12)
		분기별 평균온도(4)
		년 평균온도(1)
과거 관측증발산	청미천 유역 (2012~2013)	월평균 증발산(1)
		월별 강우총량(12)
미래 예측강우	청미천 유역 (2011~2100)	분기별 강우총량(4)
		년별 강우총량(1)
		월 평균온도(12)
미래 예측온도	청미천 유역 (2011~2100)	분기별 평균온도(4)
		년 평균온도(1)
		월 평균증발산(12)
미래 예측증발산	청미천 유역 (2011~2100)	분기별 평균증발산(4)
		년 증발산(1)

5. 점진적 및 급진적 변화의 분석결과

본 연구에서는 위에서 산정된 136종의 기상자료를 이용하여 점진적 변화 가능성을 탐색하기 위하여 선형회귀분석 및 비모수 경향성 분석을 수행하였다. 그림 2는 과거 및 미래 강우자료에 대한 시기별 회귀분석 결과를 나타낸다. 단, 월별 및 년별 분석 결과는 그림의 개수가 많고 시기별 분석결과와 크게 다르지 않아 생략하였다. 먼저 시기별 과거 관측강우는 S1에서 감소하는 경향을 나타냈으며, S3에서는 증가하는 경향을 보였고, 년별 과거 관측 강우총량은 약간 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 또한 미래 예측 강우의 경우 RCP 4.5는 S3에서 일부 증가하는 경향을 나타내었고, RCP 8.5는 S1에서 뚜렷하게 증가하는 경향을 나타냈다. 특히 년별 강우총량의 경우 RCP 4.5 및 RCP 8.5는 모두 약간 증가하는 경향이 있는 것을 탐색할 수 있었다. 따라서 정성적인 측면에서만 살펴보면, S1(1월-3월)에 RCP 8.5의 증가경향이 뚜렷하므로 겨울철 강우가 점진적으로 증가될 가능성이 있다고 볼 수 있으며 이에 따른 생태계의 변화가능성이 높을 것으로 판단된다.

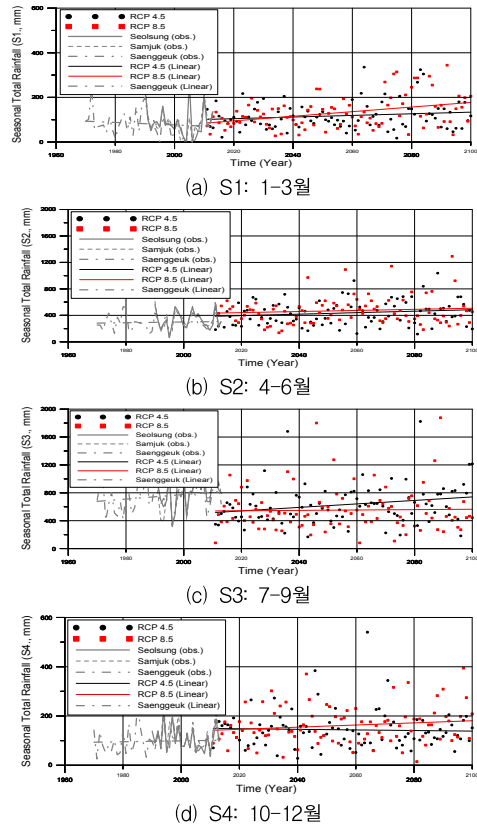


그림 2 과거 및 미래강우의 점진적 분석결과

그림 3은 과거 및 미래 온도자료에 대한 시기별, 년별 회귀분석 결과를 나타낸다. 과거 온도의 경우 S4 및 년별 평균온도에서 약간 증가하는 경향이 나타났다. 미래 온도의 경우는 RCP 8.5가 RCP 4.5에 비해 확연하게 증가되는 경향을 보이는 것을 알 수 있었다. 따라서 미래 온도의 경우 RCP 8.5에서 증가하는 측면이 있으므로 이에 따른 생태계의 점진적이고 지속적인 변화가 발생할 가능성이 클 것으로 판단된다.

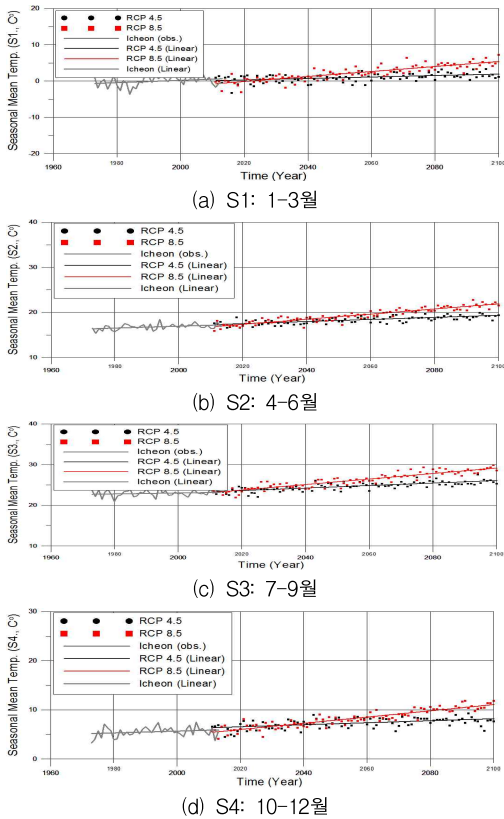


그림 3 과거 및 미래온도의 점진적 분석결과

그림 4는 과거 및 미래 증발산자료에 대한 시기별, 년별 회귀분석 결과를 나타낸다. 과거 자료의 경우 2년치의 자료뿐이므로 경향성을 판단하기는 무리가 있으나, Thornthwaite 기법으로 산정한 미래 증발산 자료에 비해 S1을 제외한 모든 자료에 대하여 관측 증발산값이 미래 예측 증발산값보다 적게 측정된 것을 알 수 있다. 증발산의 경우 온도 자료의 영향을 많이 받으므로 온도자료의 경향과 유사한 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있으며, RCP 8.5가 RCP 4.5보다 높은 기온기로 증가되어짐을 볼 수 있다. 따라서 미래 증발산의 경우 RCP 8.5에서 증가하는 측면이 있으므로 이에 따른 생태

계의 점진적이고 지속적인 변화가 발생할 가능성을 클 것으로 판단된다. 특히 증발산의 증가추세는 동물 생태시스템보다는 식물 생태시스템에 높은 영향을 미칠 것으로 판단되므로 청미천 유역의 경우 증발산으로 인한 식물 생태계의 변화가 미래에 발생할 가능성이 높을 것으로 판단된다.

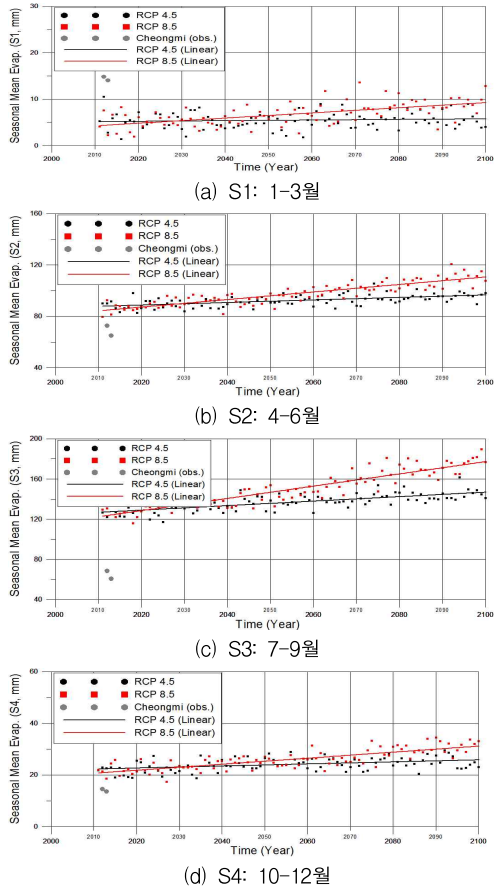


그림 4 과거 및 미래증발산량의 점진적 분석결과

위에서 제시된 회귀분석결과의 정량적 경향성 유무를 판단하기 위하여 MK 검정기법을 각각의 자료에 대해 수행하고 그 결과를 요약하였다. 먼저 과거에 관측된 강우와 온도에 대한 분석결과를 알아보면 과거 강우총량의 경우 1월-12월과 모든 시기별 및 년별 강우총량에 대하여 5%와 1% 모두 통계적으로 유의한 경향성이 검출되지 않았다. 따라서 과거 강우는 모든 분석자료 대상에 대해 증가 또는 감소 경향이 없다고 볼 수 있었다. 또한 과거 평균온도에 대한 분석 결과에서는 5월, 6월의 평균온도는 과거 기간에서 증가되는 경향이 있었던 것으로 판단되며, 시기별 구분에 있어서도 1분기는 5% 유의수준에서 경향성이 검출되었다. 즉 강우총

량과 달리 평균온도는 일부 경향성이 증가되었고 특히 과거 5월과 6월 온도 증가로 인한 생태시스템의 변화가 있었을 것으로 추정해볼 수 있다.

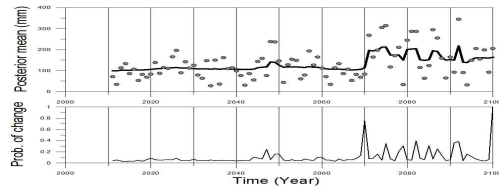
미래의 RCP 4.5에 대한 강우총량의 분석결과는 3분기(5%)와 년별 강우총량(5% 및 1%)에서 경향성이 검출되었으며, RCP 8.5에 대한 강우총량 분석결과는 2월(5% 및 1%), 1분기(5% 및 1%)에서 각각 경향성이 검출되었고 나머지 분석대상 자료에서는 모두 경향성이 검출되지 않았다. 따라서 RCP 4.5의 경우 3분기(4월-5월)의 강우증가 경향으로 인한 생태시스템의 점진적 변화가 예측되고 RCP 8.5의 경우는 2월을 포함한 1분기(1월-3월)에서 강우증가로 인한 생태시스템의 점진적 변화가 예측된다고 할 수 있다.

강우총량의 분석결과와 달리 평균온도의 증가경향은 매우 뚜렷하게 나타났다. RCP 4.5에 대한 경향성 분석결과는 2월과 12월을 제외한 전체 자료에 대해 경향성이 검출되었으며, RCP 8.5에 대한 경향성 분석결과는 모든 자료에 대해 경향성이 검출되었다. 따라서 청미천 유역의 경우 평균온도의 증가경향에 따른 생태시스템의 점진적 변화 가능성이 매우 높다고 평가할 수 있으므로, 온도의 변화에 따른 생태시스템의 변화에 보다 주목할 필요가 있음을 제시할 수 있었다.

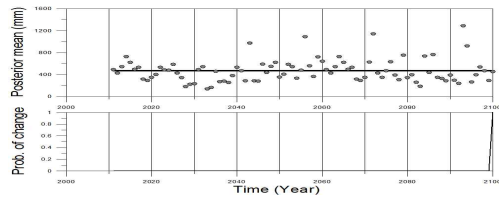
증발산의 분석결과는 RCP 4.5의 경우 1월, 2월, 3월, 12월 및 1분기를 제외한 전체 자료에 대하여 경향성이 검출되었고, RCP 8.5의 경우 모든 자료에 대하여 경향성이 검출되었다. 이러한 결과로부터 향후 청미천 유역은 증발산의 변화에 민감할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었으며, 특히 이로 인한 식물의 성장 등에 많은 영향을 미칠 것으로 판단된다.

본 연구에서는 점진적 변화의 탐색과 함께 BCP를 사용하여 급진적 변화의 탐색도 함께 수행하였다. 그림 5는 RCP 8.5에 대한 미래 강우총량에 대한 베이지안 변동점 분석 결과로 S1은 2070년 이후 급진적 위협요인으로 작용할 수 있으며, S3도 2045년 및 2087년 인근에서 매우 급진적 강우총량의 증가가 탐색되어 잠재적 위협요인으로 작용할 수 있음을 알 수 있었다.

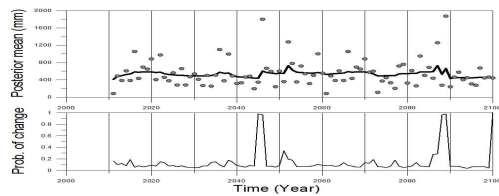
그림 6은 RCP 8.5 미래 평균온도에 대한 베이지안 변동점 분석결과를 제시한 것으로 S2는 2040년 및 2072년을 시점으로 평균온도가 급진적으로 변동하는 위협요인이 될 수 있고, S3는 2043년 및 2073에 평균온도가 급진적으로 증가되는 위협요인이 발생할 수 있음을 알 수 있었다. 특히 평균온도는 년별 평균온도에서도 2043년을 시점으로 급진적인 증가가 발생하는 것으로 규명되어 2040년 이후 평균온도의 급진적 변화에 따른 변화가 발생할 수 있음을 알 수 있어 2040년 이후 청미천 유역에 대한 생태관리가 필요함을 제시할 수 있었다.



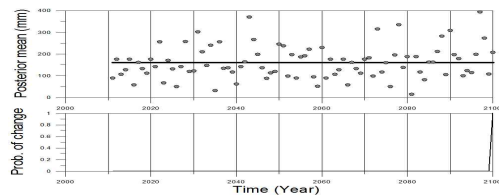
(a) S1: 1-3월



(b) S2: 4-6월

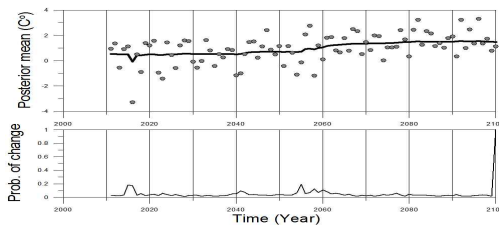


(c) S3: 7-9월

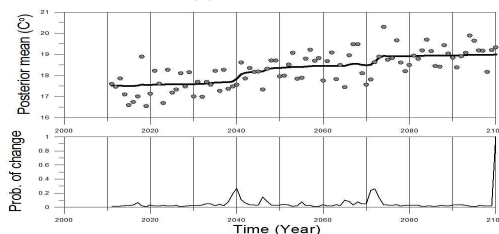


(d) S4: 10-12월

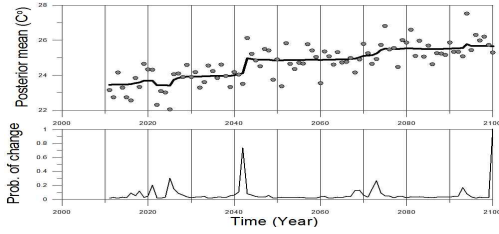
그림 5 미래강우량의 급진적 분석결과: RCP 8.5



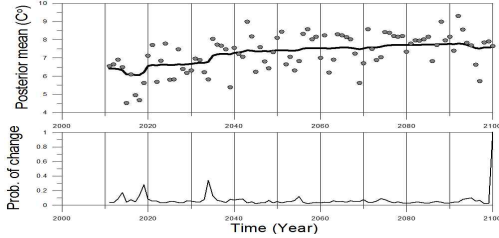
(a) S1: 1-3월



(b) S2: 4-6월



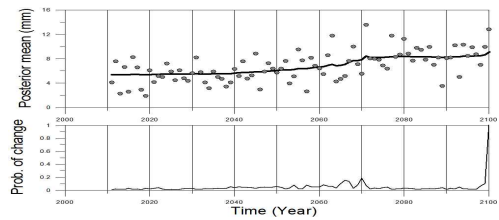
(c) S3: 7-9월



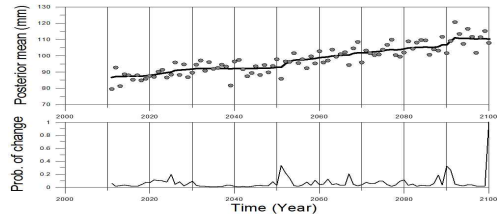
(d) S4: 10-12월

그림 6 미래온도의 급진적 분석결과: RCP 8.5

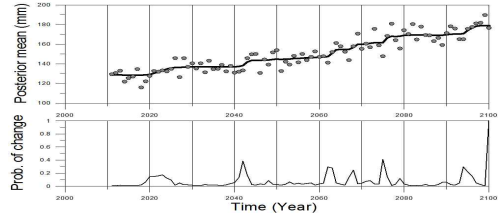
그림 7은 RCP 8.5에 따른 평균증발산의 급진적 증가에 대한 분석을 위해 베이지안 변동점 분석기법을 적용한 결과이다. 분석결과를 보면, S3는 2043년과 2060년, S4는 2036년과 2073년, 그리고 년별 평균증발산은 2020년, 2068년, 2076년, 2090년에 각각 급진적인 평균증발산의 증가가 발생됨을 알 수 있다. 따라서 RCP 8.5 시나리오에 따라 평균온도가 증가되어지면, 평균증발산은 2020년, 2070년, 2090년 인근에서 급진적으로 증가되어 생태시스템에 잠재적 위협을 미칠 수 있음을 알 수 있었다.



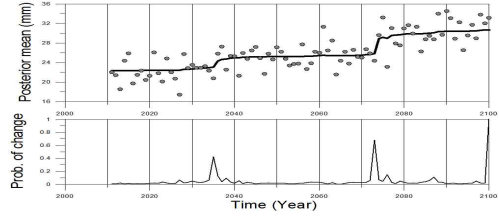
(a) S1: 1-3월



(b) S2: 4-6월



(c) S3: 7-9월



(d) S4: 10-12월

그림 7 미래증발산량의 급진적 분석결과: RCP 8.5

6. 결론

본 연구에서는 생태시스템에 영향을 미치는 무생물적인 잠재적 위협요인을 크게 점진적 변화요인과 급진적 변화요인으로 구분하고, 무생물적 요소를 강우총량, 평균온도, 평균증발산으로 구분하여 각각의 변화요인을 알아보았다. 개략적으로 볼 때, 청미천 유역은 과거 강우총량 및 평균온도에 의해서는 대부분의 기간자료에서 크게 위협적인 요인이 발생되지 않았다고 추정할 수 있었다. 그러나 미래 강우총량의 경우 RCP 4.5 및 8.5 시나리오 모두에서 일부 구간 점진적 및 급진적 위협요인이 발생됨을 알 수 있었으며, 미래 평균온도의 경우 RCP 4.5 및 8.5 모두 경우보다 높은 점진적 위협요인과 급진적 위협요인으로 발현될 수 있는 가능성이 있음을 알 수 있었다. 또한 증발산의 경우에 있어서도 특정 기간에 대해 생태시스템에 점진적 및 급진적 위협요인이 될 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 청미천 유역의 경우 평균온도가 가장 생태시스템에 위협적인 요인이 될 수 있는 인자임을 추정할 수 있었으며, 강우총량은 생태시스템에 영향을 미치는 정도가 온도에 비해 적음을 추정할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] Abdul Aziz, O., and Burn, D.H. "Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie river basin", *Journal of Hydrology*, Vol.319, No.1-4, pp.282-294, 2006.

- [2] Barry, D., and Hartigan, J.A. "Product partition models for change point problems", *The Annals of Statistics*, Vol.20, No.1, pp.260-279, 1992.
- [3] Barry, D., and Hartigan, J.A. "A Bayesian analysis for change point problems", *Journal of the American Statistical Association*, Vol.88, No.421, pp.309-319, 1993.
- [4] Burn, D.H. "Hydrologic effects of climatic change in West Central Canada", *Journal of Hydrology*, Vol.160, No.1-4, pp.53-70, 1994.
- [5] Carlin, B.P., Gelfand, A.E., and Smith, A.F.M. "Hierarchical Bayesian analysis of changepoint problems", *Applied Statistics*, Vol.41, No.2, pp.389-405, 1992.
- [6] Douglas, E.B., Vogel, R.M., and Knoll, C.N. "Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation", *Journal of Hydrology*, Vol.240, No.1-2, pp.90-105, 2000.
- [7] Hirsch, R.M., Slack, J.R., and Smith, R.A. "Techniques of trend analysis for monthly water quality data", *Water Resources Research*, Vol.18, No.1, pp.107-121, 1984.
- [8] Kendall, M.G. *Rank correlation methods*. Charles Griffin, London, 1982.
- [9] Mann, H.B. "Nonparametric tests against trend", *Econometrica*, Vol.33, pp.245-259, 1945.
- [10] Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Teller, A.H., and Teller, E., "Equations of state calculations by fast computing machines", *The Journal of Chemical Physics*, Vol.21, No.6, pp.1087-1092, 1953.
- [11] Novotny, E.V., and Stefan, H.G. "Stream-flow in Minnesota: indicator of climatic change", *Journal of Hydrology*, Vol.334, No.3-4, pp.319-333, 2007.