

구조방정식모형을 이용한 설마천 유역과 청미천 유역의 장기 수문순환 평가

김소은·유철상[†]·이문석·송성욱

고려대학교 건축사회환경공학부

Use of a Structural Equation Model for the Long-term Evaluation of Hydrological Cycles in the Seolmacheon and Cheongmicheon Basin

Soeun Kim·Chulsang Yoo[†]·Munseok Lee·Sunguk Song

School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Korea

(Received : 05 July 2021, Revised : 13 August 2021, Accepted : 13 August 2021)

요약

본 연구는 구조방정식모형을 사용하여 설마천 유역과 청미천 유역의 장기 수문순환을 비교하였다. 이 두 유역은 특히 토지이용에서 다른 특성을 보인다. 두 유역은 강우, 유출 자료뿐만 아니라 에디공분산방법으로 측정된 실제증발산량 자료를 보유하고 있다. 분석에 사용된 강수량, 유출고, 실제증발산량은 2010년부터 2018년까지의 총 9개년 자료이다. 구조방정식모형의 구조는 기존 수문지식과 자료들 사이의 상관분석을 기반으로 결정하였다. 결과적으로 총 세 개의 구조방정식모형을 순차적으로 적용해 가며 그 적합성을 분석하였다. 공교롭게도 적용된 모형에 따라 두 유역의 수문순환 특성이 유사한 것으로도, 상이한 것으로도 판단될 수 있음을 확인하였다. 특히, 강수-증발산 사이의 되먹임 과정을 고려하는 경우에는 두 유역이 상이하다는 결과를 얻을 수 있었다. 즉, 농지(논)의 비율이 40% 이상인 청미천 유역에서는 강우와 증발산 사이의 되먹임 과정이 유의한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 구조방정식모형, 설마천 유역, 수문순환, 청미천 유역

Abstract

This study compares the long-term hydrological cycles of the Seolmacheon and Cheongmicheon basin by applying the structural equation model (SEM). These two basins are found different especially in their land-use pattern. Both basins have the actual evapotranspiration data measured by the eddy-covariance method as well as the rainfall and runoff data. The length of the data considered in this study is nine years from 2010 to 2018. The structure of the SEM is determined by considering the correlations among the data as well as the general knowledge on the hydrological cycle. As a result, a total of three SEMs are applied sequentially to analyze their fittings. As irony would have it, two basins are found to be similar in the application of one SEM, but different in the application of another. Especially, when considering the feedback process between precipitation and evapotranspiration, two basins are found to be very different. That is, the feedback process between precipitation and evapotranspiration is found to be significant in the Cheongmicheon basin where the portion of agricultural area (i.e., paddy) is more than 40%.

Key words : Cheongmicheon basin, Hydrological Cycles, Seolmacheon basin, Structural equation Modeling

[†]To whom correspondence should be addressed.

School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea
E-mail: envchul@korea.ac.kr

- Soeun Kim School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Korea / Master's Course (rlathdms0297@korea.ac.kr)
- Chulsang Yoo School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Korea / Professor (envchul@korea.ac.kr)
- Munseok Lee School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Korea / Ph.D Candidate (ans918@korea.ac.kr)
- Sunguk Song School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Korea / Ph.D Candidate (ssu0103@korea.ac.kr)

1. 서 론

유역의 강우-유출 과정에서 토지이용이 차지하는 영향은 매우 크다. 예를 들어, 도시화로 인해 불투수층이 증가하게 되면, 결국 유역의 침투능은 급격히 감소하게 된다. 이로 인한 홍수 위험의 증가는 쉽게 추측된다(Walesh, 1991; Yoon, 2007). 그러나, 많이 주목받지는 못하고 있지만, 산림이 농경지로 (또는 농경지가 산림으로) 변하는 경우도 강우-유출 과정에 미치는 영향이 크다(Park and Kim, 1989; Anderson et al., 1976). 산림의 감소나 증가는 특히 증발산량의 변화와 연관이 크다. 이는 장기적인 측면에서의 하천 유출량 변화로 나타난다(Park et al., 2005). 우리나라에서는 농경지의 상당 부분을 차지하는 논이 영향도 중요하게 고려된다(Kim et al., 1998).

산림과 농경지, 특히 논이 가지는 증발산, 유출 특성의 차이는 매우 크다. 산림에서 강우가 발생하면 식물의 줄기나 잎에서 차단되고, 지면에 도달한 강우는 토양에 침투되거나 유출이 된다. 반면 논에서는 강우가 발생하면 논둑에 저장되고 저장된 강우가 논둑을 월류하면 유출이 발생한다. 결과적으로, 산림유역과 관개는 유역에서 직접유출량의 규모는 유사하게 나타나지만 침투유량은 산림유역에서 더 크게 나타나게 된다(Im et al., 2002). 유사한 연구로, Kim et al. (2005)은 유역 내 관개는 면적의 감소는 홍수의 저류 효과를 떨어뜨려 홍수유출량이 증대되고 도달시간은 단축된다는 결과를 보고하였다. 이에 반해 증발산량은 산림지역보다는 논에서 크게 나타나는데, 이는 논에서의 증발량이 큰 비중을 차지하기 때문인 것으로 보인다(Lee et al., 2014).

이러한 토지이용의 변화는 대부분의 강우-유출 모형에 그대로 반영할 수 있다. 토지이용상태를 입력으로 고려할 수도 있고(Neitsch et al., 2001), 모형 매개변수에 반영하여 고려할 수도 있다(HEC, 2021). 모형의 구조가 선형 또는 비선형의 인과관계에 근거하므로 토지이용 변화의 영향도 어렵지 않게 판단할 수 있다. 그러나 단순한 인과관계는 일방향의 관계만을 설명하므로 소위 되먹임(feedback) 과정을 설명하는 것은 불가능하다. 예를 들어, 강수량의 증가는 유출량의 증가로 나타나고 또한 증발산량의 증가도 가져올 수 있다. 그러나 증발산량의 증가가 강수량의 증가를 가져올 수 있는지는 판단하기 어렵다. 상대적으로 대규모 유역에서 관찰되는 결과이기도 하지만, 증발산량과 강수량 사이에는 유의한 되먹임 과정이 설정되어 있다(Brubaker et al., 1993). 이러한 되먹임 과정을 고려할 수 있는 모형으로 구조방정식모형이 있다.

구조방정식모형은 경로분석, 요인분석, 연립방정식 모형 등을 포함하는 상위개념으로 변수 간의 인과관계나 상관관계를 파악하기 위한 다변량 분석방법 중의 하나이다. 구조방정식모형은 단순회귀분석방법과 비교하여 경로분석을 포함하고 변수 간의 직접 혹은 간접적인 영향을 파악할 수 있다는 이점을 가지고 있다(Lee and Na, 2019). 회귀분석과의 가장 큰 차이는 분석의 대상이 공분산행렬이라는 점이다. 모수추정과정에 표본의 공분산행렬과 연구모형의 공분산행렬의 비교가 수반된다(Lee and Na, 2019). 즉 회귀분석에서는 회귀식으로 얻어진

예측값과 실제 관측값과의 차이를 최소화하는 회귀선을 찾는 기법이지만, 구조방정식모형은 관측된 변수로부터 얻어진 공분산행렬이 중점이 된다. 또한 구조방정식모형은 경로분석을 통해 여러 변수 간의 직접효과와 간접효과를 파악할 수 있다. 여기서 직접효과란 원인변수가 결과변수에 직접적인 영향을 주는 정도이고, 간접효과란 어떤 원인변수가 매개변수를 거쳐 결과변수에 영향을 미치는 정도이다. 직접효과와 간접효과와의 합이 총 효과로 파악된다.

본 연구의 목적은 구조방정식모형을 사용하여 토지이용상태가 다른 두 유역의 강우-유출-증발산 관계를 분석하고 그 결과를 비교/평가하는 데 있다. 대상유역의 하나인 설마천 유역은 산지유역으로 분류되며, 또 다른 유역인 청미천 유역은 농경지의 비율이 50% 정도를 차지할 정도로 높다. 이 두 유역에서는 실제증발산량이 에디공분산방법으로 측정되고 있다는 특징이 있다. 본 연구에서는 연단위를 자료를 이용하였다. 이는 일단위 또는 월단위가 자료가 가지는 불연속성의 한계와 계절성의 개입으로 토지이용의 영향도출이 흐트러지는 것을 방지하기 위함이다. 그러나 연단위 자료를 이용함으로써 침투유량과 같은 홍수특성이 분석에서 배제된다는 단점이 있기도 하다. 이러한 단점은 추후의 연구를 통해 보완할 계획이다. 최종적인 결론은 두 유역에 대해 설정된 구조방정식모형 및 매개변수를 비교/평가함으로써 도출될 것이다.

2. 연구방법

2.1 구조방정식모형

구조방정식모형(structural equation modeling: SEM)은 인과관계를 분석하기 위한 다변량 분석방법 중의 하나이다. Wright (1918)의 경로분석을 시작으로 확인적 요인분석과 다중회귀분석이 결합하여 탄생하였다. 구조방정식모형은 교육학, 심리학 등 사회과학 등에서 활발히 사용되었고, 생태학과 유전학 등 자연과학 분야에서도 활발히 적용되고 있다. 구조방정식모형은 관측이 불가능한 잠재변수를 관측변수로 정의하여, 이들 사이의 인과관계를 파악하는 것이다. 또한 이는 사전적 통계기법으로 모형은 기존지식과 경험을 바탕으로 뒷받침되어야 한다.

구조방정식모형의 가장 큰 장점은 다양한 통계분석을 한 번에 수행할 수 있다는 것이다. 구조방정식모형은 경로분석과 요인분석을 포함하며, 분석결과를 통계적으로 평가할 수도 있다. 두 번째의 장점은 구조방정식모형에서 하나의 변수가 독립변수나 종속변수로 동시에 고려 가능하다는 점이다. 둘 이상의 잠재변수들이 복잡한 관계를 구성하고 있더라도 구조방정식모형을 통해 연구모형의 검증이 가능하다. 이는 여러 구성개념들 간의 관계를 밝히고자하는 행동과학 및 사회과학 관련 연구에서 구조방정식모형의 유용성이 확대되는 이유이다(Kim et al., 2007; Nelson et al., 2007). 또한 구조방정식모형은 여러 관찰변수로 잠재변수를 나타낼 수 있으므로, 복잡한 구조모형을 한 번의 분석을 통해 검증할 수도 있다(Kang, 2019).

구조방정식모형에서 관찰되지 않는 잠재변수는 관찰되는 변

수인 관찰변수에 의해 정의된다. 여기서 잠재변수(latent variable)는 창의성, 회복탄력성, 자기결정성 등과 같이 직접적인 관측이 불가능한 추상적인 개념이다. 따라서 잠재변수는 직접적으로 관측되거나 측정되지 않으며 간접적인 방법으로 관찰변수를 통해 측정될 수 있다. 잠재변수에는 외생 잠재변수(exogenous latent variable)과 내생 잠재변수(endogenous latent variable)가 있다. 외생 잠재변수는 모형 내에서 다른 잠재변수에게 영향을 미치는 변수로 독립변수의 역할을 한다. 반면에 모형에서 한 번이라도 다른 잠재변수로부터 영향을 받는다면(종속변수의 역할을 한다면), 이는 내생 잠재변수가 된다. 관찰변수(measured variable)는 직접적으로 관측이 가능한 변수이며 잠재변수를 간접적으로 측정하는 데 사용된다. 관찰변수 또한 두 가지로 구분되는데, 외생 잠재변수를 측정하는 외생 관측변수와 내생 잠재변수를 측정하는 내생 관측변수가 있다.

구조방정식모형의 분석 절차는 모형 설정, 모형 식별, 모수 추정, 모형 평가, 모형 수정의 5단계로 되어있다(Lee and Na, 2019). 첫 번째 단계인 모형 설정에서는 연구할 모형을 설정하고 수집한 데이터를 검토하는 단계이다. 구조방정식모형은 기본적으로 확증적인 기법이며, 따라서 데이터 수집에 앞서 연구모형을 설정해야 한다. 이후 구조방정식모형 분석에 사용되는 데이터에 대한 검토가 필요하다. 사용되는 데이터가 다변량 정규성 가정을 포함하여 구조방정식모형 분석에 필요한 가정들을 충족시키는지 검토해야 한다. 두 번째 단계인 모형의 식별은 모형이 과다식별, 적합식별, 또는 과소식별 되었는지를 확인하는 과정이다. 모형의 모수는 적합식별되거나 과도식별일 경우에만 추정이 가능하다.

세 번째 단계는 모수를 추정하는 단계이다. LISREL, AMOS, R 등의 구조방정식모형 프로그램에서는 다양한 모수 추정 방법을 선택할 수 있다. 관찰변수가 정규성을 나타내면 일반적으로 최대우도법(ML)을 선택한다. 이외에도 일반최소자승법(GLS), 비가중최소자승법(ULS), 가중모멘트법 등이 있다. 네 번째 단계는 연구모형의 적합도를 평가하는 단계이다. 만약 모형이 적합하지 않다면 수정지수를 토대로 특정 경로를 삭제 또는 추가하는 방법을 이용해 모형을 수정한다. 모형을 수정한 후에는 수정모형을 다시 평가한다.

적합도 평가란 연구모형이 실제 데이터에 의해서 얼마나 지지되는지를 파악하는 것이다. 이 과정은 연구모형의 공분산 행렬이 관측된 공분산 행렬에 얼마나 잘 부합하는지를 평가함으로써 수행된다. 모형의 적합도가 좋지 않다면 추정된 모수에 대한 해석은 당연히 의미가 없다.

모형을 평가하는 적합도지수로는 절대적합도지수(absolute fit index), 증분적합도지수(incremental fit index), 간명적합도지수(parsimonious fit index) 등이 있다(Cangur and Ercan, 2015, Lee and Na, 2019). 절대적합도지수는 연구모형이 자료와 얼마나 잘 부합되는지를 절대적으로 평가한다. 증분적합도지수는 관찰변수들 사이의 공분산이 모두 0이라고 가정하는 기초모델에 비하여 모형이 얼마나 데이터를 잘 설명하는지를 평가한다. 간명적합도지수는 모형의 간명성을 평가한다. 절대적합도지수에는 카이제곱 검정, GFI(goodness of fit index),

AGFI(adjusted GFI), RMSEA(root mean square error of approximation), RMR(root mean square residual), SRMR(standardized RMR) 등이 있고, 증분적합도지수에는 CFI(comparative fit index), TLI(tucker-lewis index), NFI(normed fit index) 등이 있다. 또한 간명적합도지수에는 PGFI(parsimony-adjusted GFI), PNFI(parsimony-adjusted NFI) 등이 있다.

본 연구에서 모형의 적합성을 판단하기 위해 사용한 적합도지수는, SRMR, TLI, CFI이다. 카이제곱 검정은 '표본의 공분산행렬과 연구모형의 공분산행렬이 같다'라는 영가설을 검정한다. 여기서 p 값은 0.05보다(유의수준 5%) 커야 모형의 적합도를 확보하게 된다. 하지만 카이제곱 검정은 표본크기, 정규분포성에 대하여 민감하다는 한계를 가지고 있다. SRMR에 대한 경험적인 기준은 0.05보다 작거나 같으면 좋은, 0.05보다 크고 0.08보다 작거나 같으면 괜찮은, 0.1보다 크면 나쁜 정도이다. TLI와 CFI는 일반적으로 0.9 이상이면 모형의 적합도가 확보되는 것으로 본다.

경로분석(path analysis)이란 변수들 사이의 인과관계를 규명하는 분석방법으로써 공분산이나 상관계수를 이용한다(Kang, 2019). 경로분석은 여러 변수 간의 인과관계를 설명할 수 있고, 변수가 다른 변수로 직접 혹은 간접적으로 영향을 미치는 정도를 파악할 수 있다. 경로분석에서 잠재변수는 고려하지 않고 관찰변수들 간의 구조적 관계만을 분석한다. 이런 이유로 잠재변수가 존재하지 않는 구조방정식모형을 경로분석모형이라 부르기도 한다. Fig. 1은 구조방정식 모형의 사례를 보여준다.

경로계수는 인과관계를 나타내는 수치로서 두 변수 사이의 인과관계의 강도를 나타낸다. 만약 A→B에 해당하는 경로계수가 0.8이라면 이는 변수 A가 1단위 증가하면 변수 B가 0.8단위 증가한다는 것을 의미한다(Kline, 2011). 두 변수 사이의 직접적인 인과관계를 나타내는 경로계수를 직접효과라고 한다. 경우에 따라서는 변수 A가 변수 B를 거쳐 변수 C에게 영향을 미칠 수도 있다(A→B→C). 이처럼 어떤 원인변수(변수 A)가 매개변수(변수 B)를 통해 결과변수(변수 C)에 영향을 미치는 정도를 매개효과라고 한다. 매개효과는 관련된 경로들에 대한 경로계수들의 곱으로 나타낼 수 있다. 매개효과들의 합을 직접효과와 구별해 간접효과라고 부른다(Kline, 2011). 직접효과와 간접효과를 더한 것이 총효과이다. Fig 1에 예시한 모형을 각 내생변수에 대한 식으로 표현하면 다음과 같은 연립방정식으로 표현할 수 있다.

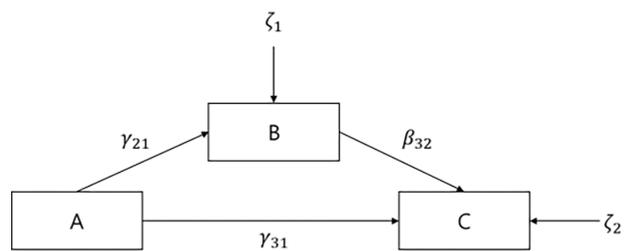


Fig. 1. An example of the structural equation model.

$$B = \gamma_{21}A + \zeta_1 \tag{1}$$

$$C = \gamma_{31}A + \beta_{32}B + \zeta_2$$

여기서 A, B, C 는 잠재변수, $\gamma_{21}, \gamma_{31}, \beta_{32}$ 는 경로계수를 의미한다.

2.2 대상유역

본 연구의 대상유역으로 설마천 유역과 청미천 유역을 선정하였다. 두 유역을 선정한 이유는 유역의 토지이용 특성이 크게 다르다는 점과 유역 내에서 실제증발산을 측정하고 있어 강우, 유출뿐만 아니라 실제증발산까지도 비교/분석이 가능하였기 때문이다. 기본적으로 설마천 유역은 산지가 많고, 청미천은 농지가 많은 유역이다. 설마천 유역은 경기도 파주시 적성면의 마지리와 설마리에 위치한 유역이다. 설마천은 임진강의 제 1지류인 지방 2급 하천이며, 설마천 중류부에 위치한 영국군 전적비교를 출구로 하는 상류 유역이다. 아울러 설마천 유역은 전형적인 급경사 산지 사행하천의 형태를 보인다. 설마천 유역의 면적은 8.5 km², 유로연장 5.8 km에 달한다. 유역의 평균 폭은 1.5 km, 유역평균표고는 해발 247.6 m 정도로 나타난다(KICT, 2013). 설마천 유역은 대부분 산악 지형이며, 유역 평균 경사는 34% 정도이다.

청미천 유역은 경기도 여주군에 위치한 유역이다. 청미천은 서쪽의 산지로부터 발원, 동쪽으로 흘러 하류의 남한강으로 유입된다. 청미천 유역의 면적은 569.6 km²(유량관측지점을 기준으로 보면 519.5 km²), 유로연장은 60.9 km에 달한다. 유역의 평균 폭은 9.2 km, 유역평균표고는 해발 141.0 m 정도로 나타난다(MOLIT, 2017). 청미천 유역의 상류부와 하류부는 산악 지형이나, 중하류부는 농경지로 구성되어 있다. 유역 평균 경사는 설마천 유역보다 낮은 17% 정도이다.

Fig. 2은 설마천 유역과 청미천 유역의 위치를 나타내 주고 있다. 이 그림에서 속빈 원은 우량계의 위치를 나타내며 속이 검은 원은 유출관측지점을 나타낸다. 또한 그림에서 세모는 예

다공분산 방법으로 유역의 실제증발산량을 측정하는 플렉스 타워이다. 설마천 유역과 청미천 유역의 토지이용 구성을 비교하면 설마천 유역은 산지의 비율이 92.7%로 매우 크며, 청미천 유역은 산지 48.5%, 농지 43.1%로 비교적 농업지역의 비율이 크게 나타난다(MLTM, 2008). 설마천 유역은 대부분 산림으로 구성되나 청미천 유역은 산지와 농지가 비슷한 비율로 존재하는 유역이다.

2.3 연구자료

본 연구에서는 가용한 우량계 자료를 이용하여 티센망을 구축한 후 면적평균강수량을 산정하였다. 먼저, 설마천 유역 내에는 6개의 우량계와 2개의 수위관측계가 존재한다. 본 연구에서는 건설기술연구원에서 제공하는 10분 단위 수위, 강우 자료를 사용하였다.

청미천 유역에는 유역 내외에 다수의 우량계가 존재한다. 본 연구에서는 국토교통부 산하 총 9개의 우량관측소 자료를 이용하였다. 이들 중 3개는 유역 내에 나머지 6개는 유역 인근에 위치한다. 본 연구에서는 이들 총 9개의 우량관측소를 고려하여 티센망을 작성하고 면적평균강수량을 산정하였다. 우량자료는 한강홍수통제소(<http://www.hrfco.go.kr/>)로부터 수집하였다. 자료 기간은 모두 가용한 실제증발산량의 자료기간과 동일한 2010년부터 2018년 사이로 하였다. 두 유역의 강우는 10분 단위 자료를 연단위 자료로 계산하였다(연단위 자료이므로 이하 강수라는 용어를 사용함).

직접유출은 일단위 강우-유출 자료에서 수평직선분리법을 이용하여 계산하였다. 여기서 유출량과 직접유출량의 차이는 기저유출이다. 설마천 유역과 청미천 유역에서 2010년부터 2018년까지 직접유출고의 평균은 각각 560.3 mm와 293.4 mm로 청미천 유역의 평균이 더 크다. 직접유출고가 가장 높은 해는 두 유역 모두 2011년도이며, 가장 낮은 해는 설마천 유역은 2014년, 청미천 유역은 2015년이다. 기저유출의 평균은 설마천 유역에서 334.5 mm, 청미천 유역에서 368.1 mm

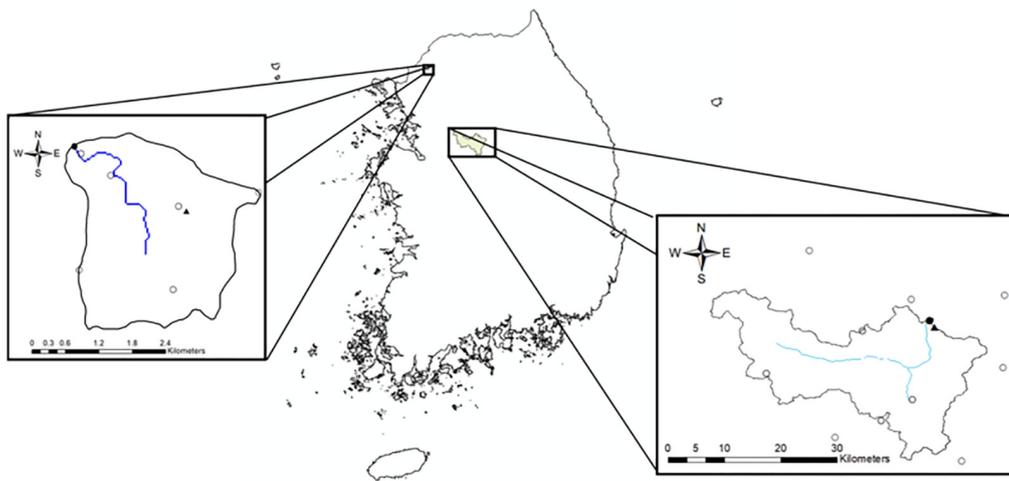


Fig. 2. Location of Seolmacheon basin (left) and Cheongmicheon basin (right) (empty circles indicate the precipitation gages, solid circles the runoff gages, and solid triangle the flux tower)

Table 1. Basic statistics of the data measured in the Seolmacheon and Cheongmicheon basin (the unit mm is used for all data)

Year	Seolmacheon Basin				Cheongmicheon Basin			
	Precipitation	Direct Runoff	Base Flow	Evapotranspiration	Precipitation	Direct Runoff	Base Flow	Evapotranspiration
2010	1,936.2	1035.3	548.5	489.4	1,434.5	348.6	410.4	650.6
2011	2,044.7	1235.5	490.6	387.0	1,920.7	966.1	568.1	523.9
2012	1,553.0	464.7	549.8	323.8	1,445.2	331.6	456.9	509.8
2013	1,477.1	790.8	312.1	293.8	1,267.8	221.4	462.0	467.9
2014	652.7	77.6	130.8	360.9	946.7	99.4	249.9	533.9
2015	835.8	139.0	162.5	419.6	944.7	74.3	245.4	600.5
2016	1,152.1	410.4	247.4	566.9	877.4	97.7	188.1	588.0
2017	1,004.5	353.8	292.6	591.3	1,186.9	213.3	286.6	441.0
2018	1,402.4	535.6	276.4	431.1	1,425.0	198.4	445.7	415.5
Mean	1,339.8	560.3	334.5	429.3	1,272.1	283.4	368.1	525.7
Max	2,044.7	1235.5	549.8	591.3	1,920.7	966.1	568.1	650.6
Min	652.7	77.6	130.8	293.8	877.4	74.3	188.1	415.5
Standard Deviation	446.5	368.2	149.4	97.1	331.0	258.3	121.4	77.5
Skewness	0.08	0.25	0.25	0.31	0.47	1.6	0.01	0.11
Kurtosis	-1.50	-1.68	-1.68	-1.47	-0.91	1.37	-1.67	-1.46

이다. 기저유출의 평균은 직접유출과 반대로 청미천 유역에서 조금 더 크지만 비슷하다. 기저유출이 가장 높은 해는 설마천 유역에서 2012년, 청미천 유역에서 2011년이다. 반면 가장 낮은 해는 설마천 유역에서 2014년, 청미천 유역에서 2016년이다.

설마천 유역과 청미천 유역은 에디공분산방법을 통해 실제 증발산량을 측정하고 있다. 에디공분산방법은 난류의 연직 플럭스와 수증기 농도를 측정하고 보존방정식에 근거하여 증발산량을 계산하는 방법이다. 에디공분산방법은 관측 장소가 수평적으로 균질하고 편평하여 이류의 효과를 무시할 수 있으며, 측정변수의 시간에 따른 변화를 무시할 수 있다는 가정을 전제로 한다(Baldocchi et al., 1988; Burba and Anderson, 2007; Allen et al., 2011). 본 연구에서는 플렉스 타워에서 에디공분산방법을 적용하여 관측한 실제증발량자료를 사용하였다. 설마천의 플렉스 타워는 경기도 파주시 적성면의 마지리와 설마리에 위치하고 있고, 청미천의 플렉스 타워는 경기도 여주군 점곡면의 경기도 농업기술원 종자관리소의 눈에 위치하고 있다. 증발산 역시 일단위 자료를 연단위로 합산하여 분석에 사용하였다.

구조방정식모형에서는 각 변수의 정규성이 충족되지 않을 경우 왜곡된 결과가 도출될 수 있다. 모형에서 정상분포 조건은 왜(곡)도 < 3, 첨도 < 10을 고려했을 때(Kline, 2011), 기술통계량에 나타난 결과를 보면, 왜(곡)도는 0.08 ~ 1.60, 첨도는 -1.68 ~ 1.37로 정규분포를 만족한다는 것으로 나타났다(Table 1).

2.4 기본모형의 설정 및 평가

유역에 내린 강수 중 일부는 식생 등으로 차단되고, 나머지가 지면에 도달한다. 차단된 강수 중 일부는 증발로 손실되며,

나머지는 다시 수간류(stemflow) 등의 형태로 지면에 도달한다. 지면에 도달한 강수 중 일부는 침투되며, 토양의 침투능을 초과한 강수는 지표면을 통해 유출된다. 침투된 강수 중 일부는 증발산으로 손실되고 나머지는 침투, 지하수 흐름의 긴 과정을 거쳐 다시 하천으로 유출된다. 이러한 수문순환 과정을 고려하면 강수와 직접유출, 강수와 기저유출, 강수와 증발산 사이의 인과관계를 가정할 수 있다.

본 연구에서는 년 단위의 강수, 증발산 및 직접유출, 기저유출을 구분하여 고려하고 있다. 먼저 이들 사이의 상관특성은 산점도를 통해 확인할 수 있다(Fig. 3). 이 그림에서 살펴볼 수 있는 것처럼, 강수는 직접유출과 강한 상관을, 기저유출과는 유의한 상관을 보여준다. 직접유출과 기저유출 사이에도 유의한 상관이 나타난다. 그러나 증발산은 다른 변수들과 뚜렷한 상관을 보여주지 못하고 있다. 증발산이 강수량의 크기와 전혀 상관없이 나타나는 것은 의외의 결과이다. 직접유출과 증발산, 기저유출과 증발산 사이의 상관도 유의하지 않는 것으로 나타난다. 사용한 자료 사이의 상관계수는 Table 2에 정리하였다.

이와 같이 수문순환의 지식과 상관분석의 결과를 바탕으로 본 연구에서는 강수, 직접유출, 기저유출 및 증발산 사이의 인과관계를 최대한 고려하였다. 즉, 뚜렷한 인과관계를 보이는 강수와 직접유출, 강수와 기저유출 사이의 인과관계뿐만 아니라, 강수와 증발산 사이의 인과관계도 고려하였다. 추가로 직접유출과 증발산, 기저유출과 증발산 사이의 관계도 인과관계로 가정하여 기본 모형에 포함시켰다. 즉, 본 연구의 구조방정식모형은 관찰변수인 강수, 직접유출, 기저유출, 증발산을 이용하여 설정되었으며, 잠재변수는 포함되지 않은 모형이다. 강수는 외생관찰변수로 다른 변수에 영향을 주는 독립변수의 역할을 한다. 이외 직접유출, 기저유출, 증발산은 내생관찰변수로 설정되었다.

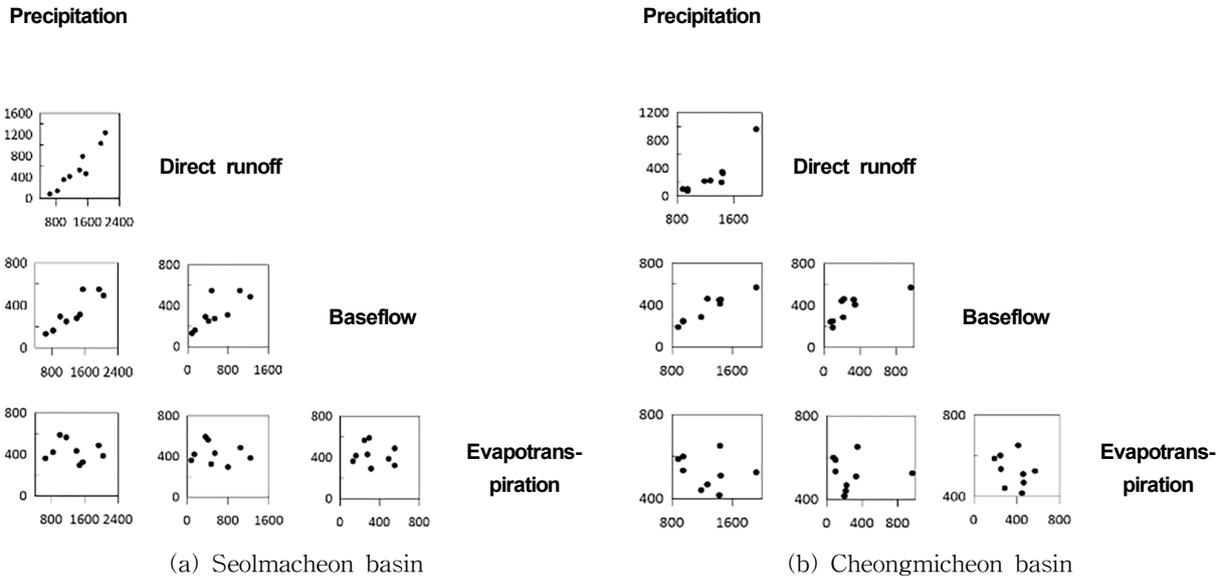


Fig. 3. Scatter plots developed for the data observed (the unit of mm is used for all data)

Table 2. Comparison of correlation coefficients among the observed data in the Seolmacheon basin (left value) and in the Cheongmicheon basin (right value) (* indicates $p < 0.05$)

	Precipitation	Direct Runoff	Base Flow	Evapotranspiration
Precipitation	1			
Direct Runoff	0.95* / 0.90*	1		
Base Flow	0.89* / 0.94*	0.76* / 0.77*	1	
Evapotranspiration	-0.16 / -0.22	-0.12 / -0.02	-0.13 / -0.31	1

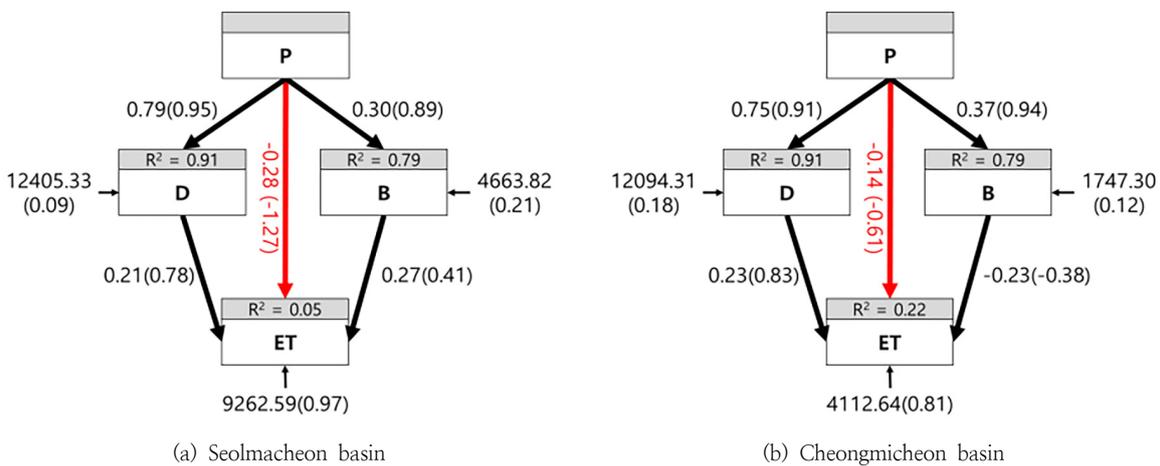


Fig. 4. Application results of the base SEM model (ET represents Evapotranspiration, P precipitation, D direct runoff, and B baseflow).

이러한 구조방정식모형을 설마천 유역과 청미천 유역에 적용한 결과는 Fig. 4와 같다. 그 적용 결과는 앞선 상관분석 결과를 그대로 반영하고 있다. 그러나 적용결과는 최종적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 설마천 유역의 카이제곱 값은 4.898로 자유도가 1인 점을 고려하며 p-값은 0.027에 불과하다. SRMR도 0.043으로 매우 작게 나타난다. p-값이 0.05보다 작으므로 연구모형의 공분산행렬과 표본의 공분산

행렬이 같다는 영가설이 기각된다. 즉, 본 연구에서 가정한 기본모형은 설마천 유역에 적합하지 않다는 것을 나타낸다. 이러한 결과는 청미천 유역에도 유사하게 나타난다. 청미천 유역의 카이제곱 값은 3.003이며, p-값은 0.083이다(SRMR은 0.036). 청미천 유역의 카이제곱 검정결과도가 영가설은 기각시키지는 않지만 그렇다고 설명력이 있다고 판단할 수준은 아니다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기본모형의 수정 및 평가

본 연구에서는 기본 모형을 수정하여 보다 다양한 구조의 모형을 고려하고 평가하였다. 먼저, 기본 모형에서 유의하지 않은 경로를 제거하였다. 즉, 유의하지 않는 직접유출과 증발산, 기저유출과 증발산 경로를 기본모형에서 삭제하였다. 결과적으로 수정모형은 모든 적합도 지수를 만족하였다. Table 3에서 살펴볼 수 있듯이, 설마천 유역의 경우 적합도지수는 $\chi^2=5.232$ 로 자유도가 3이므로 $p=0.156$ 로 나타났다. 청미천 유역의 경우에는 $\chi^2=4.914$ 로 $p=0.178$ 로 나타났다. p -값이 아주 크지는 않지만 이 수정모형이 유효하다는 결과는 얻을 수 있었다. 다른 지표들도 유사한 결과를 보여주었다. 설마천 유역의 경우 SRMR=0.031, TLI=0.873, CFI=0.936이며, 청미천 유역의 경우는 SRMR=0.070, TLI=0.887, CFI=0.944이다.

본 연구에서는 이 수정모형에 직접유출의 오차와 기저유출의 오차사이에 상관관계를 추가로 설정하였다(Fig. 5; 수정모

형 1), 이 수정모형 1은 모든 적합도 지수를 만족하는 것으로 나타났다. 즉, 설마천 유역의 경우 $\chi^2=0.335$ 로 자유도가 2이므로 $p=0.846$ 이다. 청미천 유역의 경우에는 $\chi^2=1.911$ 로 $p=0.385$ 로 나타났다. 두 오차 사이의 상관관계를 추가한 것이지만 그렇지 않은 모형에 비해 상당히 향상된 적합도를 보여준다. 다른 지표들도 유사한데, 먼저 설마천 유역의 경우 SRMR=0.012, TLI=1.142, CFI=1.000 등이다. 청미천 유역의 경우 SRMR=0.065, TLI=1.008, CFI=1.000로 나타났다.

본 연구에서는 연 단위의 자료를 분석하고 있으므로, 특히 강수와 증발산 사이의 되먹임 고리가 존재할 가능성이 있다. 앞서 강수와 증발산 자료 사이의 상관계수 자체는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났지만, 구조방정식모형 분석을 통해 다른 결과가 도출될 수 있는지를 검토하였다. 이를 위해 위 수정모형 1에 '증발산→강수'의 경로를 추가하였다. 본 연구에서는 이를 수정모형 2로 명명하였다(Fig. 6).

이 수정모형 2도 모든 적합도 지수를 만족하는 것으로 나타났다. 즉, 설마천 유역의 경우 $\chi^2=0.325$ (자유도 1)로 $p=0.569$

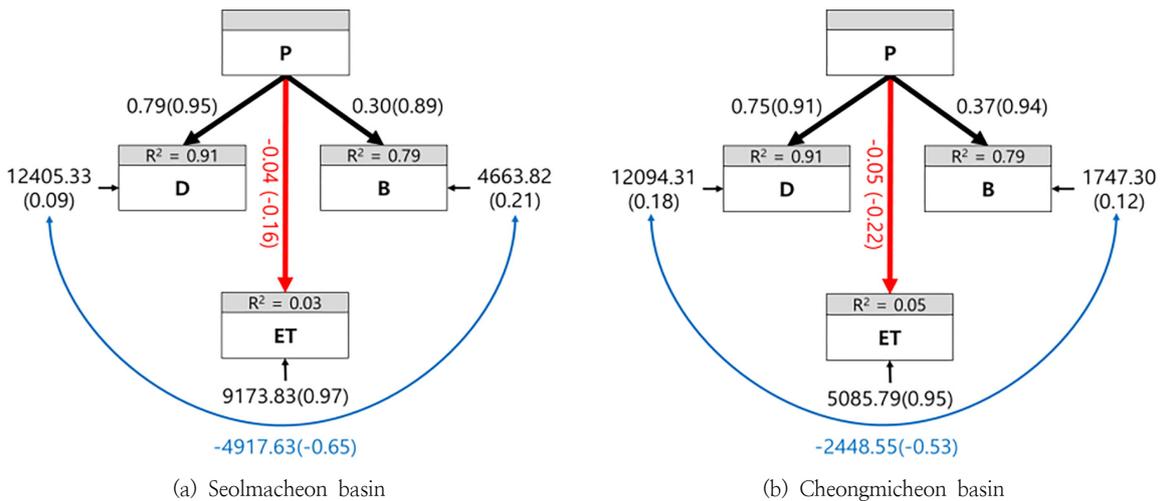


Fig. 5. Application results of the modified SEM model.

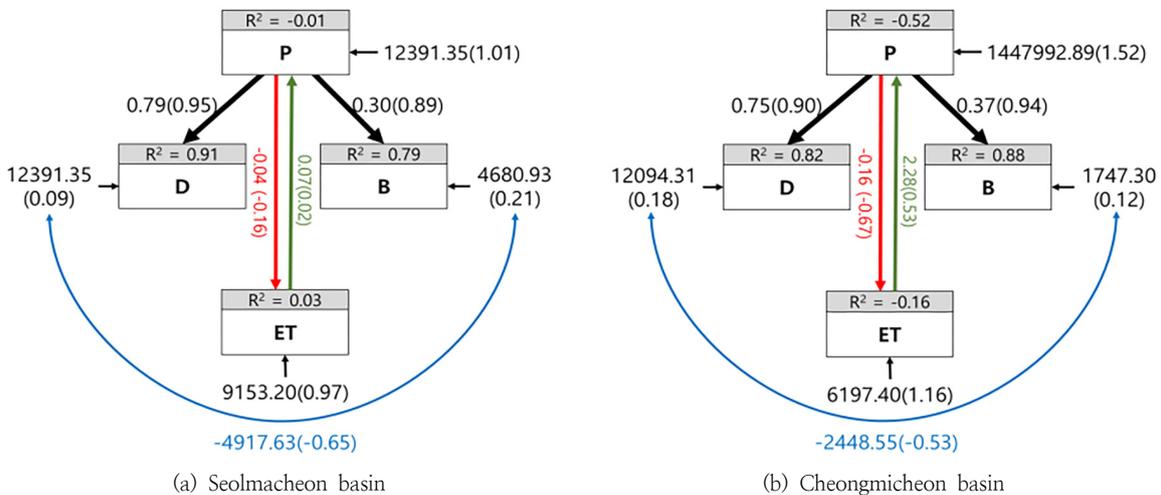


Fig. 6. Application results of the modified SEM model

Table 3. Results of model goodness-of-fit test (Seolmacheon basin/Cheongmicheon basin)

	Significance	Basic Model	Modified Model 1	Modified Model 2
Chi-square	-	4.898/3.003	0.335/1.911	0.325/1.911
p-value	>0.05	0.027/0.083	0.846/0.385	0.569/0.165
SRMR	>0.05	0.043/0.036	0.012/0.065	0.012/0.065
TLI	<0.9		1.142/1.008	1.116/0.839
CFI	<0.9		1.000/1.000	1.000/0.975

이다. 청미천 유역의 경우에는 $\chi^2=1.911$ 로 $p=0.165$ 로 나타났다. 수정모형 1에 비해서는 적합도가 약간 떨어지지만 여전히 유효한 적합도를 보여주고 있다. 다른 지표들도 살펴보면, 먼저 설마천 유역의 경우 SRMR=0.012, TLI=1.116, CFI=1.000 등이다. 청미천 유역의 경우 SRMR=0.065, TLI=0.839, CFI=0.973으로 나타났다.

3.2 결과 분석

수정모형 1에서 설마천 유역과 청미천 유역의 결과는 유사한 것으로 나타났다. 먼저, 강수와 직접유출 사이의 강한 상관관계를 확인할 수 있다. 두 유역에서 강수와 직접유출의 경로계수는 각각 0.79와 0.75로 양(+)의 값을 갖는다. 이는 강수가 증가할수록, 직접유출이 이에 비례하여 증가한다는 것을 의미한다. 강수와 기저유출의 관계는 강수와 직접유출의 관계보다는 약하지만 역시 양의 상관관계를 확연히 보여주었다. 두 유역에서의 경로계수는 각각 0.30과 0.37로 역시 양(+)의 값을 갖는다. 그러나 강수와 증발산의 경로는 각각 0.04, 0.05로 유의수준 0.05에서 유의하지 않은 것으로 나타났다. 증발산에 대한 강수의 영향은 매우 미미한 것으로 파악되며, 증발산 변동의 대부분의 오차항에 포함되는 것으로 나타난다. 그러나 이 오차항은 관측오차라기 보다는 강수와의 독립적인 관계를 표현한다고 판단함이 적절하다.

각 변수의 결정계수는 내생관측변수에 대한 설명력을 나타낸다. 참고로, Chin (1998)은 결정계수에 대한 평가 기준으로 '0.19 이상은 설명력 약함', '0.33 이상은 중간', '0.67 이상은 설명력 큼' 등으로 제시한 바 있다. 분석결과, 설마천 유역에서 직접유출의 결정계수는 91%, 기저유출은 79%, 증발산은 3%로 나타난다. 청미천 유역에서 직접유출의 결정계수는 82%, 기저유출은 88%, 증발산은 5%이다. Chin (1998)의 기준에 따르면 두 유역 모두에서 직접유출과 기저유출에 대한 강수의 설명력은 매우 큰 것으로 확인된다. 그러나 증발산에 대한 강수의 설명력은 거의 없다고 판단할 수 있다. 강수가 증발산을 설명하지 못한다는 것은 강수의 증감이 증발산의 규모에 영향을 미치지 못한다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 두 유역에서 강수량이 가장 적었던 2014년과 2016년에도 증발산량에 유의한 변화가 없었다는 점에서도 확인할 수 있다. 연 강수량이 대략 1,000 mm 이상일 경우 두 유역의 증발산량은 강수량과 무관하게 일정한 수준일 것으로 추정된다(Kim et al., 2017).

수정모형 2는 수정모형 1에 '증발산→강수'를 추가한 것일 뿐 나머지 구조는 동일하다. 그러나 이 경로를 추가한 후의 분

석 결과는 두 유역에서 크게 다르게 나타난다. 먼저, 산지유역인 설마천 유역의 경우에는 새로운 경로의 추가가 다른 경로에 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 경로계수도 수정모형 1과 동일한 수준으로 추정되었다. 증발산→강수의 경로계수도 0.07로 통계적으로 유의하지 않다. 그러나 청미천 유역에서는 새로운 경로의 영향이 매우 크게 나타난다. 일단 증발산→강수의 경로계수가 2.28로 통계적으로 유의하게 나타난다. 강수, 증발산에 대한 설명력이 증가한 것도 주목할 만한 변화이다.

위와 같은 결과는 두 유역의 수문순환을 비교함에 있어 모형의 구조가 얼마나 중요한 역할을 하는지를 보여준다. 수정모형 1을 적용하는 경우에는, 설마천 유역과 청미천 유역이 다른 특성의 유역임에도 불구하고, 그 수문순환 특성이 유사하게 나타난다. 그러나 수정모형 2를 적용하는 경우에는 두 유역이 다른 수문순환 특성을 보이는 것으로 나타난다. 특히, 강수-증발산 사이의 되먹임 과정이 설마천 유역에서는 찾아보기 어렵고 반대로 청미천 유역에서는 유의하다는 결과가 나타났다. 앞서 설명한 것처럼, 설마천 유역은 대부분 산지로 이루어져 있고, 청미천 유역은 농지, 특히 논이 비율이 상당히 높다. 이러한 유역의 특성을 반영하면 수정모형 2의 결과가 유역의 실제상황을 잘 나타내고 있는 것으로 판단할 수도 있다. 그러나 청미천 유역의 경우도 유역면적이 그리 큰 편은 아니다. 즉, 유역의 규모가 그리 크지 않아 유역 내 되먹임 과정이 실제로 유의한 것인지를 추후의 연구를 통해 확인할 필요가 있다. 본 연구의 결과는 그러한 추후 연구의 필요성을 제시해 준다.

4. 결 론

구조방정식모형은 변수의 인과관계를 분석하기 위한 다변량 분석방법으로, 다양한 통계분석을 한 번에 수행할 수 있어 수문순환 구조를 살펴보기에 유리하다. 본 연구에서는 특성이 다른 설마천 유역과 청미천 유역을 대상으로 구조방정식모형을 이용한 수문순환 과정을 분석하였다. 본 연구에서는 설마천 유역과 청미천 유역에서 관측한 2010년에서 2018까지 총 9개년 자료를 이용하였다. 분석에 사용된 자료는 연단위의 강수량, 기저유출량, 직접유출량, 실제증발산량이다. 먼저 강수량 자료는 면적평균강수량을 사용하였고, 직접유출과 기저유출은 일 단위 강우-유출자료를 수평직선분리법을 적용하여 분리하였다. 증발산은 에다공분산방법으로 관측한 실제증발산량 자료이다. 구조방정식모형의 구조는 기존 수문지식과 상관분석을 기반으로 설정하였으며, 최종모형은 구조방정식모형에 대한

유의성 평가과정을 통해 수정과정을 거쳐 확정하였다. 본 연구의 주요 결과들을 요약하면 다음과 같다.

관찰변수인 강수, 증발산 및 직접유출, 기저유출에 대한 산점도 분석과 상관분석을 수행하였다. 강수와 직접유출, 강수와 기저유출, 직접유출과 기저유출 사이에는 유의한 상관을 확인하였다. 하지만, 증발산은 다른 변수들과 유의한 상관을 나타내지 않았다.

본 연구에서는 기존 수문지식과 상관분석 결과를 반영하여 구조방정식모형을 제시하였다. 이 모형은 강수가 직접유출, 기저유출 및 실제증발산에 영향을 주며, 기저유출이나 직접유출도 실제증발산에 영향을 주는 형태이다. 그러나 이 모형의 검증결과에서 유의성이 확보되지 않아 수정모형을 제시하였다. 먼저, 수정모형 1은 직접유출, 기저유출에서 증발산으로의 경로는 제거하고, 직접유출과 기저유출 사이의 상관성을 추가한 형태이다. 수정모형 2는 수정모형 1에 증발산→강수의 경로를 추가하여 강수와 증발산 사이의 되먹임 과정이 가능하게 한 모형이다. 이 두 수정모형은 모두 통계적으로 유의한 것으로 확인되었다.

분석 결과, 강수는 직접유출과 기저유출에 유의한 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났고, 그 중 직접유출에 대한 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 직접유출과 기저유출 사이의 상관관계를 고려한 것이 구조방정식모형 자체의 유의성을 확보하는 데 중요한 역할을 하는 것으로 확인되었다.

적용된 모형에 따라 두 영역의 특성이 유사하게도, 또한 다르게도 나타나는 것이 확인되었다. 수정모형 1을 적용한 경우에는 두 영역이 유사한 특성을 보였다. 그러나 강수와 증발산 사이의 되먹임 과정을 고려한 수정모형 2를 적용하게 되면 두 영역의 특성이 크게 다른 것으로 나타난다. 즉, 산지유역인 설마천 유역에서는 되먹임 과정이 유의하지 않으나, 농지, 특히 논지의 비율이 높은 청미천 유역에서는 강수와 증발산 사이의 되먹임 과정이 유의한 것으로 나타난다.

본 연구에서는 관찰변수만을 사용하여 구조방정식모형을 구축하였다. 그러나 이러한 모형의 구조는 실제 상당한 한계를 가질 수밖에 없다. 기본적으로 사용된 관찰변수에 오차가 없다는 점을 가정하고 있기 때문이다. 이는 분명 사실이 아니며, 결과적으로 최종모형의 신뢰도를 하락시키게 된다. 따라서 추후 연구에서는 관찰변수로 설명되는 잠재변수를 따로 정의하고, 이들 잠재변수들 사이의 인과관계가 설정되는 형식으로 구조방정식모형이 구축되어야 할 것이다. 이렇게 구축된 구조방정식모형은 본 연구에서의 모형과 비교하면 보다 정교한 설명력을 가질 수 있을 것이다. 되먹임 과정에 대한 부분도 이러한 추후의 연구를 통해 좀 더 명확히 규명해 볼 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2021 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1A2C2008714).

References

- Allen, RG, Pereira, LS, Howell, TA and Jensen, ME (2011). Evapotranspiration information reporting: I. factors governing measurement accuracy, *Agricultural Water Management*, 98(6), pp. 899–920. [DOI:10.1016/j.agwat.2010.12.015]
- Anderson, HW, Hoover, MD and Reinhart, KG (1976). *Forests and Water: Effects of Forest Management on Floods, Sedimentation, and Water Supply*, PSW-018, USDA Forest Service, Berkeley, California.
- Baldocchi, DD, Hincks, BB and Meyers, TP (1988). Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods, *Ecology*, 69(5), pp. 1331–1340. [DOI:10.2307/1941631]
- Brubaker, KL, Entekhabi, D and Eagleson, PS (1993). Estimation of continental precipitation recycling, *J. of Climate*, 6(6), pp. 1077–1089. [DOI: 10.1175/1520-0442(1993)006<1077:EOCPR>2.0.CO;2]
- Burba, G and Anderson, D (2007). *Introduction to the Eddy Covariance Method: General Guidelines and Conventional Workflow*, LI-COR Biosciences, Lincoln, NE.
- Cangur, S and Ercan, I (2015). Comparison of model fit indices used in structural equation modeling under multivariate normality, *J. of Modern Applied Statistical Methods*, 14(1), pp. 152–167. [DOI:10.22237/jmasm/1430453580]
- Chin, WW (1998). Commentary: issues and opinion on structural equation modeling, *MIS Quarterly*, 22(1), pp. vii–xvi. [Korean Literature]
- Hydrologic Engineering Center (HEC). (2021). *HEC-HMS Technical Reference Manual*, CPD-74B, Hydrologic Engineering Center, Davis, California.
- Im, SJ, Park, SW and Kang, MS (2002). A comparative study of storm runoff characteristics for irrigated paddy fields and forest watershed. *J. of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 44(3), pp. 65–72. [Korean Literature]
- Kang, HC (2019). *Causal Model and Structural Equation Model Analysis Using R*, freeca. [Korean Literature]
- KICT (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology). (2013). *Hydrological Survey for Flood Forecasting of the Mountainous River Basin*, KICT. [Korean Literature]
- Kim, HY, Hawng, CS, Kang, SM and Lee, KY (1998). Development of flood analysis system(FAS) based on runoff characteristics of paddy basin. *J. of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 5(1), pp. 8–19. [Korean Literature]

- Kim, JH, Kang, BS and Kim, JG (2017). Validation of complementary relationship hypothesis for evapotranspiration in multipurpose dam basins. *J. of The Korean Society of Civil Engineers*, 37(3), pp. 549–559. [Korean Literature] [DOI:10.12652/Ksce.2017.37.3.0549]
- Kim, JH, Hong, SH and Choo, BD (2007). Applications of structural equation modeling in management studies: A critical review, *Korean Management Review*, 36(4), pp. 897–923. [Korean Literature]
- Kim, SJ, Park, GA and Chun, MK (2005). Analysis of runoff impact by land use change –using grid based kinematic wave storm runoff model (KIMSTORM)–, *J. of Korea Water Resources Association*, 38(4), pp. 301–311. [Korean Literature]
- Kline, RB (2011). *Principles and practice of structural equation modeling*, Guilford Press, New York, NY.
- Lee, GJ and Na, JM (2019). *Structural Equation Model: Principles and Application*. Hakjisa. [Korean Literature]
- Lee, YG, Jeng, SW, Beak, CH and Jo, HS (2014). Characteristics of evapotranspiration in forest and agricultural land(rice fields), *Water for future*, 47(4), pp. 26–33. [Korean Literature]
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (2008). *Streamflow Investigation Report in 2008*, MLTM. [Korean Literature]
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport). (2017). *Hydrological Survey Report, MOLIT*. [Korean Literature]
- Neitsch, SL, Arnold, JG, Kiniry, JR and Williams, JR (2001). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2000*, Texas Water Resources Institute, Temple, TX.
- Nelson, TD, Aylward, BS and Steele, RG (2007). Structural equation modeling in pediatric psychology: Overview and review of applications, *J. of Pediatric Psychology*, 33(7), pp. 679–687. [DOI:10.1093/jpepsy/jsm107]
- Park, MJ, Kwon, HJ and Kim, SJ (2005). Analysis of impacts of land cover change on runoff using HSPF model, *J. of Korea Water Resources Association*, 38(6), pp. 495–504. [Korean Literature] [DOI:10.3741/JKWRA.2005.38.6.495]
- Park, SW and Kim, BJ (1989). Effects of forest reclamation activities on storm runoff, *J. of Korea Water Resources Association*, 31, pp. 47–53. [Korean Literature]
- Walesh, SG (1991). *Urban Surface Water Management*, Wiley, New York, NY.
- Wright, S (1918). On the nature of size factors. *Genetics*, 3(4), pp. 367–374.
- Yoon, YN (2007). *Hydrology – Basic and Application*, Cheongmoongak. [Korean Literature]