Budyko framework과 지면-대기 상호작용

김 대 하
전북대학교
토목환경자원에너지공학부 조교수
daeha.kim@jbnu.ac.kr

1. Budyko framework

연평균강수량(P)과 연평균증발량(E)의 비율(Evaporative fraction; EF)은 하천평균유출에 대한 기본 정보일 뿐만 아니라 (Berghuijs et al., 2017; Gao et al., 2016) 생태계 생산성(Gao et al., 2016)과 대기 수문순환에 영향을 미치기 때문에 (Seneviratne et al., 2010) 수자원관리에 있어 매우 중요한 변수이다. 지면과정이 상당히 복잡하기 때문에 예측이 어려울 것으로 예상되지만 1년 이상의 긴 시간규모에서 EF는 P와 잠재증발산량(E_0)의 비율(Aridity Index; AI)로 간단히 예측된다 (Budyko, 1974, 1958).

EF를 AI로 예측하는 접근법은 20세기 초 Oldekop (1911)이 Schreiber (1904)이 제시한 유출률과 강수 사이의 지수적 관계를 구체화하면서 시작되었다. 하지만 유사한 방법을 최초로 영문으로 출판한 러시아 기후학자 Budyko의 이름을 따 Budyko framework으로 현재 불리고 있는 것으로 보인다 (Zhang and Brutsaert, 2021). EF와 AI 사이의 관계식은 지난 100년동한 지속적으로 제시되어 왔고 (e.g., Greve et al., 2016; Wang and Tang, 2014; Yang et al., 2008; Fu, 1981), 아래와 같이 에너지 방정식과 Bowen ratio (B)를 이용해 Budyko framework의 물리적 근거는 쉽게 확인된다.

$$Q_n = \lambda E + H \tag{1}$$

$$\frac{Q_n}{P} = \frac{\lambda_v E}{P} + \frac{H}{P} \tag{2}$$

$$\frac{\lambda E_0}{P} = \frac{\lambda E}{P} + \frac{BE}{P} = \frac{\lambda E}{P}(1+B) \tag{3}$$

$$\frac{E}{P}=\frac{E_0}{P}\frac{1}{(1+B)} \tag{4}$$

여기서, λ는 증발 잠열(latent heat of vaporization), Q_n은 지면순복사량, H는 현열(sensible heat flux)이다. 지면에 물이 충분할 때는 지면순복사량이 증발을 제한하기 때문에 Q_n과 잠재증발량 E_0에 필요한 잠열은 동일한 것으로 볼 수 있고 이 유도과정에서 P와 E_0는 서로 독립이다.

2. 잠재증발산(E_0)과 대기증발요구량(E_p)의 차이

Budyko frameowork을 사용할 때 연구자들이 E_{0r}를 자주 대기증발요구량(E_p)으로 가정하는데 사실 이 둘은 다른 개념이다. E_0는 지면에 수분이 충분할 때 지면에서 대기로 증발되는 양으로 지면포화라는 특별한 조건에서의 대기증발요구량(E_p)이고 Oldekop (1911)의 정의 "possible maximum evaporation"에 부합한다. 반면 E_p는 지면포화를 가정하지 않는 대기증발요구량이며 토양수분이 작아질 경우 현열이 증가하기 때문에 E_p는 E_0보다 커지게 된다. 토양수분은 P와 함께 증가하기 때문에 E_p와 P는 일반적으로 음의 상관을 갖는다 (Zhou et al.,, 2019).

일부 습지를 제외하면 지면은 통상 포화상태가 아니기 때문에 E_p는 일반적으로 E_0보다 크고 AI를 산정할 때 E_0가 아닌 E_p를 사용할 경우 Budyko framework으로 예측되는 EF가 달라지거나 EF를 관측에 적합 시킬 경우 지면특성을 나타내는 매개변수가 달라질 수밖에 없다.

3. 유출의 기후변화 민감도와 지면-대기 상호작용

Kim and Chun (2021)은 Budyko framework의 기본 가정에 부합하도록 지면-대기 상호작용 때문에 달라지는 E_p를 E_0로 수정하는 방법을 제시했다. Figure 1은 Kim and Chun (2021)이 Yang et al. (2008)의 Budyko equation으로 분석한 유출의 기후변화와 지

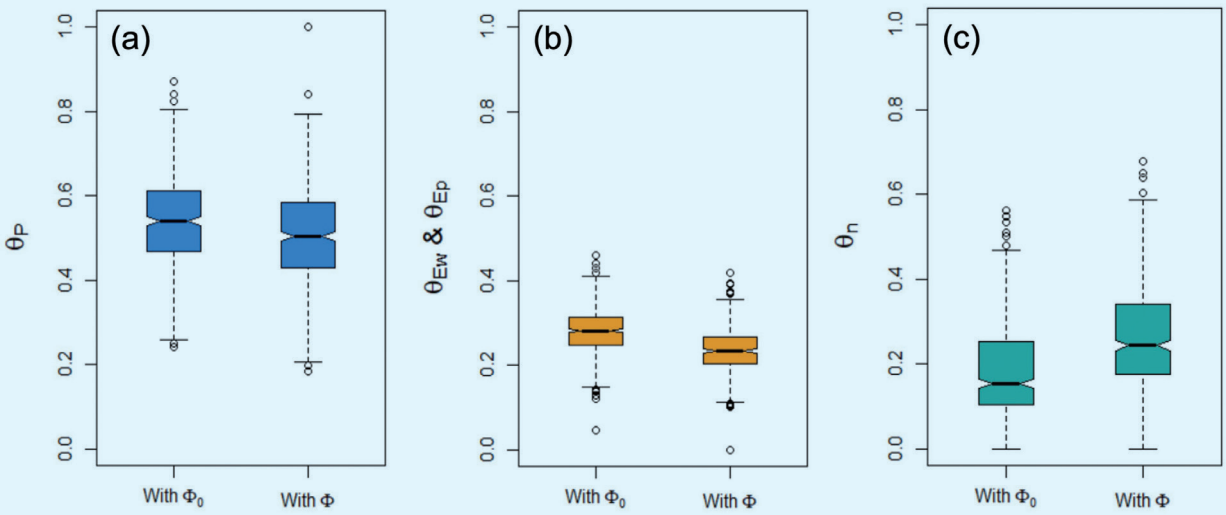

Figure 1. Distributions of the runoff sensitivities (a) to changes in P (Θ_P), (b) to change in to E_p and E_0 (Θ_{EP} & Θ_{EW}, respectively), and (c) to changes in land surface properties (Θ_n) in 513 global river basins (adapted from Kim and Chun (2021)), Φ_0 and Φ are defined as E_0/P and E_p/P, respectively.

면변화에 대한 민감도를 나타낸다. E_p를 E_0로 수정했을 때 Budyko framework으로 얻어진 유출의 기후변화에 대한 민감도는 상대적으로 커지고 지면특성변화에 대한 민감도는 작아짐을 알 수 있다. Budyko framework에 E_p를 사용할 경우 P변화에 대한 유출변화가 과소추정 될 수 있음을 의미한다.

복잡한 장기유출모의를 이용할 때에도 동일한 결과가 나타날 수 있다. Penman (1948) 계열의 방정식으로 지면 위의 E_p를 산정하고 이를 유출모의에 사용한다면 증폭된 대기증발요구량을 잠재증발량으로 가정하기 때문에 유출을 과소 산정할 가능성이 상당하다. 기후스트레스 테스트 (e.g., Brown et al., 2012)에 만약 동일한 방법이 적용된다면 모의 유출량이 강수량이나 지면에너지 변화에 상대적으로 덜 민감하게 나타날 가능성이 있다. 기후변화 적응정책의 공간적 우선순위 결정에 상당히 영향을 줄 수 있는 부분이다.

참고문헌

Berghuijs, W. R., Larsen, J. R., van Emmerik, T. H. M., and Woods, R. A. (2017). A global assessment of runoff sensitivity to changes in precipitation, potential evaporation, and other factors. Water Resources Research, 53, 8475-8486.

Brown, C., Ghile, Y., Laverty, M., and Li, K. (2012). Decision scaling: Linking bottom-up vulnerability analysis with climate projections in the water sector. Water Resources Research, 48, W09537.

Budyko, M. I. (1958). The heat balance of the Earth's surface. National Weather Service, U.S. Department of Commerce.

Budyko, M. I. (1974). Climate and life (508 p.). New York, NY, Academic Press.

Fu, B. P. (1981). On the calculation of evaporation from land surface. Scientia Atmospherica Sinica, 1, 23-31.

Gao, G., Fu, B., Wang, S., Liang, W., and Jiang, X. (2016). Determining the hydrological responses to climate variability and land use/cover change in the Loess Plateau with the Budyko framework. Science of the Total Environment, 557-558, 331-342.

Greve, P., Gudmundsson, L., Orlowsky, B., and Seneviratne, S. I. (2016). A two-parameter Budyko function to represent conditions under which evapotranspiration exceeds precipitation. Hydrology and Earth System Sciences, 20, 2195-2205.

Kim, D., and Chun, J. A. (2021). Revisiting a two-parameter Budyko equation with the complementary evaporation principle for proper consideration of surface energy balance. Water Resources Research, 57, e2021WR030838.

Oldekop, E. (1911). On evaporation from the surface of river basins. (In Russian: Ob Isparenii s Poverkhnosti Rechnykh Basseinov), (with abstract in German, pp. 201-209). Collection of the Works of Students of the Meteorological Observatory (p. 209). University of Tartu-Jurjew-Dorpat.

Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bares soil, and grass. Proceedings of the Royal Society, London, Ser. A, 193, 120-146.

Schreiber, P. (1904). Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa. Meteorologische Zeitschrift, 21, 441- 452.

Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B., and Teuling, A.

J. (2010). Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. Earth-Science Reviews, 99, 125-161.

Wang, D., and Tang, Y. (2014). A one-parameter Budyko model for water balance captures emergent behavior in Darwinian hydrologic models. Geophysical Research Letters, 41, 4569-4577.

Yang, H., Yang, D., Lei, Z., and Sun, F. (2008). New analytical derivation of the mean annual water balance equation. Water Resources Research, 44, W03410.

Zhang, Y., Peña-Arancibia, J., McVicar, T., Chiew, F. H. S., Vaze, J., Liu, C. et al. (2016). Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components. Scientific Reports, 6, 19124.

Zhou, S., Williams, A. P., Berg, A. M., Cook, B. I., Zhang, Y., Hagemann, S. et al. (2019). Land-atmosphere feedbacks exacerbate concurrent soil drought and atmospheric aridity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 116, 18848-18853.