메가가뭍의 시공간적 확산 양상 분석과 예·경보 기준설정

Analysis of Spatio-Temporal Spread of Mega-Drought: Setting Forecast and Warning Criteria

이찬욱* · 문기훈** · 홍성진*** · 유도근****

Lee, Chan Wook*, Moon, Gihoon**, Hong, Sungjin***, and Yoo, Do Guen****

Abstract

In South Korea, drought disasters frequently occur due to the narrow area of the river basin and the concentration of rainfall in summer. In addition, climate change caused extreme droughts in 2015, levels that had never been experienced before. Thus, more severe droughts are expected in the future. To date, however, no countermeasures, such as preliminary warning standards for severe drought, have been prepared. In this study, we analyzed the degree of spatio-temporal spread of mega-drought entry situations and prepared the criteria for warnings based on the results. The results of the study can be used as basic data to prepare standards for responding to possible extreme droughts in the future.

Key words : Mega-drought, Spatio-temporal Spread of Mega-drought, Warning Criteria

요 지

대한민국의 경우 하천 유역의 면적이 좁고 여름철에 집중되는 강우 탓에 가뭄재해가 빈번히 발생한다. 게다가, 기후변화로 인하여 2015년도에는 이전에는 겪어보지 못한 수준의 극한 가뭄이 발생한 바 있다. 이러한 관점에서 향후 더욱 극심한 수준의 가뭄이 발생할 것으로 예상된다. 그러나 현재까지 극심한 가뭄에 대한 시공간적 확산을 고려한 예·경보 기준 등의 대응 대책이 마련되어 있지 않다. 본 연구에서는 기존문헌에서 정의된 바 있는 메가가뭄의 정의에 따라, 메가가뭄 진입상황별 시공간적 확산 정도를 전국적으로 분석하고 그 결과를 기반으로 실무적으로 활용가능한 예·경보의 기준을 마련하였다. 연구 결과는 향후 발생 가능한 극심한 가뭄에 대한 대응 기준마련의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 메가가뭄, 시공간적 가뭄 확산, 예·경보

1. 서 론

최근 전세계적으로 기후변화에 의한 이상징후가 자주 발생되곤 한다. 이 중에서도 가뭄재해는 장기간동안 여러 가지 원인으로 발생하므로 홍수, 지진 등에 비해 즉각적인 인지와 더불어 앞으로의 상황을 예측하기 어렵다. 대한민국의 경우 2014-2015년에 발생한 장기적인 가뭄은 최근 50년간

의 역사 속에서 가장 극심했던 가뭄으로 평가되고 있다(Jang et al., 2017). 일반적으로 매우 심한 가뭄은 극한가뭄, 대가뭄이라는 용어로 정의되고 있다. 정량적으로는 주요 가뭄 사건을 바탕으로 세기별 가뭄의 심각성, 지속 기간 및 공간 범위를 비교함으로써 극심한 가뭄을 정의(Woodhouse and Overpeck, 1998) 하거나 고기후 기록에 기초한 가뭄의 심각성과 지속시간을 정량화 방법(Stahle et al., 2000) 등이 활용되어 왔다.

*정회원, 한국종합기술 사원(E-mail: skyblue985@naver.com)

Member, Master of Engineering, Employee, Korea Engineering Consultants Corp

**정회원, 수원대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: godurum3@naver.com)

Member, Master Course, Department of Civil Engineering, The University of Suwon

***정회원, 수원대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: yd1163124@naver.com)

Member, Master Course, Department of Civil Engineering, The University of Suwon

****교신저자, 정회원, 수원대학교 토목공학과 조교수(Tel: +82-31-229-8676, Fax: +82-31-220-2522, E-mail: dgyoo411@suwon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, The University of Suwon

최근에는 지역 생태계(Mallya et al., 2013; Zhou et al., 2013; Knapp et al., 2015; Wolf et al., 2016; Sippel et al., 2018)와 농업 생산성(Boyer et al., 2013) 관점에서의 영향이 고려되곤 한다. 최근 Lee et al. (2020)은 다양한 가뭄관련 정량적 평가 지표를 활용한 메가가뭄 진입판단 절차를 제안한 바 있다. 이처럼 복합적이고 장기적인 가뭄재해 특성상 메가가뭄에 대한 정량적인 평가는 가뭄지수 뿐만이 아닌 다양한 방법에 의해 수행되고 있다.

미국의 경우 U.S. Drought Monitor를 통한 가뭄 모니터링 시스템이 구축되어 있으며 4단계의 강도로 가뭄 상황을 표현하고 있다. DM의 경우 다양한 가뭄 지수를 종합하여 하나의 지도로 알기 쉽게 표현되어 있지만 메가가뭄 단위의 극한 가뭄에 대한 단계는 명확히 제시되어 있지 않다. 가뭄이 빈번하게 발생하는 호주 역시 예외적인 상황(Exceptional Circumstance)이라는 단계로만 표출한다. 대한민국의 경우는 일반적 가뭄을 4가지(관심, 주의, 경계, 심각)으로 구분한다. 이처럼 전세계적으로 가뭄에 대한 최고 단계를 표현하기만 할뿐 메가 또는 극심한 가뭄에 있어서의 단계는 세부적으로 구분되어 제시된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 3단계 절차에 의한 메가가뭄 예·경보 기준을 제안하고자 한다. 첫 번째로, Lee et al. (2020)가 제안한 메가가뭄 진입판단 절차를 활용하여 대한민국을 기준으로 극심했던 2015년도 가뭄에 대한 시공간적 확산양상을 분석한다. 두 번째로, 확산양상에 따른 적절한 예·경보 기준을 설정한다. 마지막

으로 향후 발생 가능한 메가가뭄 수준의 시나리오를 가정하고 시공간적 확산양상을 분석함으로써 예·경보 기준에 대한 토론을 진행하고자 한다.

2. 방법론

2.1 메가가뭄 정량적 평가

본 연구에서는 수행하고자하는 메가가뭄의 시공간적 확산양상을 분석하기 위해서는 가장 먼저 메가가뭄에 대한 정량적인 평가 방법이 정의 되어야한다. 정량적인 평가방법으로는 Lee et al. (2020)이 제안한 방법을 활용하고자 하였다. Lee et al. (2020)이 제안한 방법은 다양한 지표를 활용함과 동시에 지역적인 가뭄 현황 특성을 반영할 수 있기 때문이다. 해당 방법론은 Fig. 1 (Phase 1)과 같다. A부터 E까지 총 5가지 지표에 의해 메가가뭄 상태에 대한 정량적 평가 수행된다. A의 경우 McKee et al. (1993)가 제안한 표준강수지수(Standard Precipitation Index, SPI) 기반의 극한 가뭄 기준인 $SPI6 < -2.0$ 이하가 메가가뭄의 기준이 되며, “알”을 기준으로 해당 기준이 30일 이상 지속되는 경우이다. 대한민국의 경우 기상가뭄의 평가에 있어 SPI6가 가뭄에 대한 대표적인 지수로 활용되므로 본 연구에서도 SPI6를 활용하였다. B는 반복년수로 일반가뭄의 기준이 되는 $SPI6 < -1.0$ 이하가 동일한 기간에 8년 이상 지속되는 경우, C는 수자원 활용 가능기간을 의미한다. C지표의 판단에 활용되는 용수공급능력은 Lee

Fig. 1. Analysis Procedure for Spatiotemporal Spread of Megadrought

and Kang (2006)에 의해 제안된 물수지 분석에 의해 계산되는 물공급능력지수(Water Supply Capacity Index, WSCI)를 활용하였다. D는 가뭄 재현기간으로서 50년 빈도 이상이 되었을 때 메가가뭄에 진입되었다고 판단된다. 마지막으로 E는 지역적 특성을 반영하기 위한 요소중 하나로 Lee et al. (2019)가 제안한 바 있는 가뭄 포락곡선을 통한 방법이다. 가뭄포락곡선은 대상 지자체가 과거에 경험했던 큰 심도와 지속기간을 갖는 가뭄사상을 포락곡선에 나타낸 후, 판단시점에서 그 사상을 초과하는지의 여부에 따라 판단하는 기법으로, 과거의 극심한 가뭄의 경험여부 및 초과여부가 지역적으로 고려될 수 있다는 특징이 있다.

2.2 메가가뭄의 시공간적 확산 양상 분석

가뭄 예·경보 기준은 일반적으로 몇 개의 단계로 구분되게 된다. 본 연구에서는 기존 대한민국에서 모든 재난상황의 예·경보에 활용되는 4가지 단계(관심, 주의, 경계, 심각)를 준용하여 적용하고자 하였다. 이에따라 메가가뭄 진입판단 절차의 5가지 지표가 1가지 만족할 때마다 한 단계씩 증가하는 것으로 우선 정의하였다. 만약, 2가지 지표가 만족 된다면 Fig. 1 (Phase 2)과 같이 주의 단계가 될 것이다. 이를 위해서 가장 먼저 대상 지역을 선정하고 Phase 1의 방법론을 적용하여 메가가뭄 요소의 진입여부에 대한 분석을 수행한다. 다음으로 해당 결과를 단위 지역별로, 지도상에 표출하고 분석기간에 따라 표출한다. 최종적으로 시공간인 표출결과를 토대로 메가가뭄 예·경보 상황의 확산양상을 분석한다. 최종적으로 우선적으로 설정하여 고려한 예·경보 기준에 대한 적절성을 살펴보고, 실무적 기준마련을 위한 토론을 수행한다.

3. 적용 대상지역 및 시나리오

3.1 메가가뭄 확산 분석 대상지역

본 연구에서는 Fig. 2와 같은 도단위 및 전국단위의 적용 및 분석을 실시하였다. 대한민국의 경우 하천 유역의 면적이 좁고 여름철에 집중되는 강우 탓에 가뭄재해가 빈번히 발생한다. 게다가, 기후변화로 인하여 2014-2015년도에는 이전에는 겪어보지 못한 수준의 극한 가뭄이 발생한 바 있다. 이러한 관점에서 향후에는 더욱 극심한 수준의 가뭄이 발생할 것으로 예상된다. 그러나 현재까지 극심한 가뭄에 대한 예·경보 기준 등의 사전 대책이 마련되어 있지 않다. 본 연구에서는 메가가뭄 진입상황별 확산 정도를 분석하고 그 결과를 기반으로 예·경보의 기준을 마련하였다. 또한, 지역적 확산 정도에 따른 대비와 선제적 예·경보를 위한 방안을 제안하였다. 연구 결과는 향후 발생 가능한 극심한 가뭄에 대한 대응 기준마련의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 적용 시나리오

본 연구는 첫 번째로, 2015년 발생한 가뭄을 대상으로 시공간적인 확산양상을 분석하고, 두 번째로, 향후 메가가뭄이 발생할 경우를 가정하여 그에 대한 확산양상을 분석하고자 한다. 마지막으로 이에 대한 예·경보 기준을 적용해보는 것을 목표로 한다. 이를 위해 Table 1과 같은 2가지의 Case를 수립하였다. 첫 번째 목표에 대한 분석을 위해 2015년 대한민국에 발생한 가뭄에 대한 평가를 수행하고 확산양상을 분석하고자 하였다. 두 번째는 일정기간 동안 매년 반복되는

(a) 15 local governments in Chungcheongnam-do

(b) 160 local governments in the Republic of Korea

Fig. 2. Analysis of Spatiotemporal Spread Pattern of Megadrought Applied Area

Table 1. Scenario Settings for the Analysis of the Spread of Megadrought

Case Num.	Scenario	Data
1	Past drought case in 2015	Data on past drought in 2015
2	No rainfall during January-June for 10 years from 2005	Generation of drought data based on no rainfall (SPI6, dam data, etc.)

극심한 가뭄 시나리오를 추가하여 분석하고 그 결과를 제시한다. 무강우 시나리오 분석을 위해 활용되는 메가가뭄과 관련한 5가지(A-E) 판단지표에 대한 필요 자료로는 무강우에 따른 SPI6, 댐의 평균 수위이다. SPI6의 경우 R프로그램에 포함되어있는 SPI 패키지를 토대로 SPI6를 도출하여 활용하였으며 무강우 기간동안에는 댐에 유입되는 유량이 전혀 없는 것으로 가정하였다. 이를 토대로 메가가뭄에 대한 Phase 1 단계의 분석이 수행되고 그 결과에 따른 확산양상이 표출되게 된다.

4. 적용 및 결과

4.1 Case 1 적용 결과

대한민국 160개 지자체에 대한 메가가뭄 진입 판단절차를 적용하고 이를 시공간적으로 표출한 결과는 Fig. 3과 같다. 앞서 언급한 바와 같이 본 예·경보 기준(1인)은 1개 만족일 경우 파란색(관심), 2개 만족인 경우 노란색(주의), 3개 만족인 경우 주황색(경계), 그리고 4-5개 만족인 경우 빨간색(심각)으로 구분하였다. 2015년 1월부터 5월까지의 메가가뭄 진입판단 절차 중 한 가지의 지표도 만족하지 않은 것으로 나타났다. 이후 6월경 북동부 지방을 기점으로 점차 남하하면서 가뭄이 확산되었다. 이후로는 충청남도지역에 3가지 지표를 만족하면서 10월경에는 가장 극심한 가뭄이 발생하는 것으로 나타났다. 만족한 지표들을 확인해보면 A기준인 지속기간에 있어서 가장 먼저 만족되는 것으로 나타났다. 또한, 8월경부터는 A기준이 지속적으로 만족되는 것으로 나타났다. 이 결과와 더불어 C기준인 가뭄 재현기간이 점차 만족되면서 공간적으로 확대되게 되었다. 다만, 8년 연속으로 SPI6가 -1.0 이하가 되는 기준인 B기준은 어느 시점에도

만족하지 않은 것으로 나타났다. 결과적으로 2015년 가뭄은 경기도, 강원도와 같은 북부지방에서부터 남하하여 충청남도, 경상남도 지역까지 가뭄이 확산되었다. 이후에는 충청남도지역에 극심한 가뭄을 초래했으나 결국 본 연구에서 판단 기준으로 활용되는 메가가뭄 요소 모두를 만족하는 단계는 진입하지 않은 것으로 확인되었다.

충청남도지역을 확대하여 동일한 시점으로 메가가뭄에 대한 확산양상을 확인해보면 Fig. 4와 같다. 1월부터 6월까지의 모든 판단요소 중 만족되는 항목이 하나도 나타나지 않았다. 충청남도를 기준으로 서부지역부터 점차 A지표에 만족하는 것으로 나타났으며 10월경부터는 3가지 지표까지 만족되어 극심한 가뭄이 발생한 것으로 나타났다. 이후에도 서부지역에는 12월까지 지속적으로 가뭄 상황이 유지되었다.

4.2 Case 2 적용 결과

Case 2는 2005년부터 2015년까지 10년간 매년 1월부터 6월까지 무강우가 지속적으로 반복되는 것으로 가정하였다. 이를 토대로 SPI6 및 댐자료를 생성하고 적용한 결과는 Fig. 5와 같다. 앞서 Case 1과는 다르게 전국적으로 가뭄이 동시다발적으로 확산 되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 상대적으로 단기간(6개월)의 무강우가 반복되는 시나리오를 활용하였으므로, 무강우와 강우가 반복적으로 나타나게 되어, SPI6지수의 심도와 가뭄포락곡선의 진입측면에서 오히려 2015년 발생한 가뭄과 비교하였을 경우 충남지역의 경우 메가가뭄 상태의 정도가 오히려 완화됨을 확인할 수 있다. 그러나 여기서 고려되어야 할 사항은 극심한 가뭄 또는 메가가뭄은 1-2개 지역에 매우 심한 심도와 기간으로 지속되는 경우도 있지만, 극심한 가뭄이 공간적으로 전국적으로

Fig. 3. Spatiotemporal Spread of Megadrought (160 Local Governments, January to December 2015): Prediction/Warning 1 Criteria

Fig. 4. Spatiotemporal Spread of Mega-Drought (Chungcheongnam-do, January-December 2015)/Warning 1 Criteria

Fig. 5. Spatiotemporal Spread of Megadrought (160 Local Governments, January to December 2015)/Warning 1 Criteria

동시에 발생하는 경우도 매우 중요하게 관리되어야 한다. 따라서 다음절에는 메가가뭍의 공간적 상대 분포와 확산정도를 고려한 예·경보 기준을 제안하고 그에 대한 고찰을 수행하고자 한다.

4.3 메가가뭍 예·경보 기준 설정

앞서 적용된 실제 가뭍사상과 무강우시나리오에 따른 가뭍의 시·공간적 확산양상을 고려하여, 보다 실무적인 예·경보 기준 마련을 위해 크게 2가지 안을 마련하여 검토하였다. 1안은 앞서 분석결과와 동일한 기준으로 1개 만족일 경우 파란색(관심), 2개 만족인 경우 노란색(주의), 3개 만족인 경우 주황색(경계), 그리고 4~5개 만족인 경우 빨간색(심각)으로 구분하는 방법이다. 2안은 1~2개 만족인 경우 파란색

(관심), 3개 만족인 경우 노란색(주의), 4개 만족인 경우 주황색(경계), 그리고 5개 만족인 경우 빨간색(심각)으로 구분하는 방안이다. 1안과 2안 모두 진입판단 요소의 개수에 따라 예·경보의 단계를 구분하는 방법으로, 1안은 2안에 비하여 상대적으로 선제적 예·경보를 설정하며, 2안은 상대적으로 보수적 예·경보 운영 방안이라 할 수 있다.

예·경보 1안의 결과인 Fig. 3을 다시 살펴보면, 2015년 가뭍에 따라 전체 167개 지자체 중, 10개 지자체에 “경계” 단계가 발령되고, 도 단위 확산 정도를 살펴보면, 7월 경남, 강원, 충남지역에서 시작된 가뭍이 9월 경기, 강원, 경남, 경북, 충남, 전남, 전북 등으로 확산되며, 충남의 경우 “경계” 단계, 경기 및 강원, 충북의 경우 “주의” 단계가 발령된다. 상대적으로 보수적인 예·경보인 2안의 결과를 표출하여

나타내면 Fig. 6과 같다. 2안의 결과에 의하면, 2015년 가뭄에 따라 전체 167개 지자체 중, 11개 지자체에 “주의” 단계가 발령된다. 도 단위 확산 정도를 살펴보면, 7월 경남, 강원, 충남 지역을 시작으로, 9월 경기, 강원, 경남, 경북, 충남, 충북, 전남, 전북 등으로 확산되나, 충남지역의 “주의” 단계를 제외하고는 모두 “관심” 단계가 발령됨을 확인할 수 있다.

1안과 2안에 의한 예·경보 기준의 장단점을 충남지역의 결과 중심으로 살펴보면, 2015년 충남 가뭄에 따라 전체 16개 지자체 중, 9개 지자체에 “경계” 단계가 발령된다. 과거 일반가뭄의 예·경보 수준과 본 기준을 비교하였을 경우 3개 지표가 만족되는 메가가뭄 “경계” 단계는 일반 가뭄단계의 “심각” 단계와 유사한 것으로 판단되었다. 즉,

1안은 일반 가뭄의 “심각” 단계에 준하여 메가가뭄에 대한 선제적 예·경보를 수행하는 것으로 2안에 비해 선제적 예·경보가 가능하나 많은 행정적 투자가 필요한 방안이라 할 수 있다. 2안의 경우 2015년 충남 가뭄에 따라 전체 16개 지자체 중, 9개 지자체에 “주의” 단계가 발령된다. 2안은 1안에 비해 상대적으로 보수적인 예·경보 방안으로, 본 기준에 의해 3개 지표가 만족되는 메가가뭄 “주의” 단계는 일반 가뭄단계의 “심각” 단계와 유사함을 확인하였다. 이것은, 메가가뭄의 “주의” 단계의 개념이 일반가뭄의 “심각”과 체감도측면에서 상충되는 결과를 제시할 수 있다는 점에서 본 안을 선택할 경우 메가가뭄의 단계 표현을 관심-주의-경계-심각이 아닌 1단계-2단계-3단계-4단계 정도의 형태로 표현하는 것이 합리적이라 판단된다.

Fig. 6. Result of Spatiotemporal Expression of Local Government Mega-Drought Entry Determination Procedure (6-Month No Rainfall Scenario)

Table 2. Final Megadrought Forecast and Warning Criteria

Warning Level	Mega-drought forecast/warning standards
Attention	When one or two of the five judgment items are satisfied
	When 3 out of 5 judgment items are satisfied
Caution	When an “Attention” level Warning is issued to two or more special/metropolitan cities (“Caution” level is raised)
	When two or more provinces each issue an “Attention” level warning for two or more local governments (“Caution” level upgrade)
Watch	When 4 out of 5 judgment items are satisfied
	When two or more provinces each issue an “Caution” level warning for two or more local governments (“Watch” level upgrade)
	When two or more provinces each issue an “Caution” level warning for two or more local governments (“Watch” level upgrade)
Serious	When 5 out of 5 judgment items are satisfied
	When two or more provinces each issue an “Watch” level warning for two or more local governments (“Serious” level upgrade)
	When two or more provinces each issue an “Watch” level warning for two or more local governments (“Serious” level upgrade)

이와 같이 1안과 2안의 예·경보 방안은 서로 장단점이 존재하나, 예·경보는 선제적이며 능동적으로 재난에 대비한다는 측면에서 1안의 기준과 같은 선제적 예·경보 방안을 우선적으로 고려하는 것이 바람직하다 판단된다. 그러나, 빈번한 예·경보는 행정적, 인력적 재정의 낭비또한 발생할 소지가 있으므로, 본 연구에서는 앞서 기술한 바와 같이 전국적 메가가뭄 확산상황과 같은 공간적 대응을 위한 장치를 예·경보 기준에 반영하여 2안을 보완하는 형태로 최종안을 제시하였다. 즉, 특·광역시 및 도단위에서 2개 이상의 지자체에서 동시다발적인 확산이 발생하는 경우를 반영한 예·경보 기준의 상향을 위한 항목을 마련하여 추가하였다. 최종적인 메가가뭄 예·경보 기준은 Table 2와 같다. 최종 제안된 메가가뭄 예·경보 기준(안)은 일반가뭄에 대한 예·경보기준이 기운용 되고 있는 측면에서, 1안에 비해 상대적으로 보수적인 예·경보 방안이나 일반가뭄과의 상이성을 줄 수 있는 2안을 기본 기준으로 설정하고, 추가적으로 지역적 확산정도에 따른 선제적 예·경보가 가능한 항목(2개 이상 특·광역시, 2개 이상 도에서 메가가뭄 경보 발생시 경보등급 상향조정)을 마련하여 보완하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 최근 이상기후로 인해 발생가능성이 있는 메가가뭄에 대한 시공간적인 확산양상 분석을 수행했다. 이를 위해 대한민국 160개 지자체를 대상으로 메가가뭄 진입판단 절차에 포함된 5가지 요소에 대한 평가를 수행하였으며 그 결과를 기반으로 시간에 따른 확산양상을 표출하였다. 그 결과 대한민국에서 발생된 2015년 가뭄에 대한 이동 동향을 파악할 수 있었으며 충청남도 지역이 가장 극심했던 것을 알 수 있었다. 또한, 메가가뭄 수준의 시나리오가 발생한다면 전국적으로 동시다발적으로 확산되는 것으로 나타났다. 이 결과를 기반으로 현재까지 제안된 바 없는 메가가뭄에 대한 예·경보 기준을 제안하였다.

메가가뭄에 대한 예·경보 기준으로 단순 메가가뭄진입 판단 절차의 개수에 의한 평가보다 다양한 지자체의 연쇄작용에 의한 공간적 확산과 관련된 추가적인 지표를 생성하였다. 향후에는 이러한 예·경보 기준에 있어서 활용될 수 있는 대응 방안에 대한 수립이 필요하다. 연구 결과는 현재까지 발생하지 않은 극심한 재해에 대한 예·경보 기준마련의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 한 예로, 추후 연구를 통해 시군 단위 이외에 중권역 단위로 예·경보 기준을 제안할 수 있으며 이 결과는 다양한 국가계획(국가물관리기본계획, 수계별 유역물관리종합계획, 지자체별 도시기본계획 등)의 근거자료로 활용이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한재난대응기반기술개발사업의 연구비 지원(2019-MOIS31-010)에 의해 수행되었습니다.

References

- Boyer, J.S., Byrne, P., Cassman, K.G., Cooper, M., Delmer, D., Greene, T., et al. (2013). The US drought of 2012 in perspective: A call to action. *Global Food Security*, Vol. 2, No. 3, pp. 139-143.
- Jang, H.W., Cho, H.W., Kim, T.W., and Lee, J.H. (2017). Developing extreme drought scenarios for seoul based on the long term precipitation including paleoclimatic data. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 4, pp. 659-668.
- Knapp, A.K., Carroll, C.J., Denton, E.M., La Pierre, K.J., Collins, S.L., and Smith, M.D. (2015). Differential sensitivity to regional-scale drought in six central US grasslands. *Oecologia*, Vol. 177, No. 4, pp. 949-957.
- Lee, C.W., Jung, D., Park, M.J., and Yoo, D.G. (2019). Application of envelope curve method for quantitative definition of extreme drought conditions. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 5, pp. 245-251.
- Lee, C.W., Park, M.J., and Yoo, D.G. (2020). Quantitative determination procedures for regional extreme drought conditions: Application to historical drought events in South Korea. *Atmosphere*, Vol. 11, No. 6, 581.
- Lee, S.H., and Kang, T.U. (2006). An evaluation method of water supply reliability for a dam by firm yield analysis. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 39, pp. 467-478.
- Mallya, G., Zhao, L., Song, X.C., Niyogi, D., and Govindaraju, R.S. (2013). 2012 Midwest drought in the United States. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 18, No. 7, pp. 737-745.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Vol. 17, No. 22, pp. 179-183.
- Sippel, S., Reichstein, M., Ma, X., Mahecha, M.D., Lange, H., Flach, M., and Frank, D. (2018). Drought, heat, and the carbon cycle: A review. *Current Climate Change Reports*, Vol. 4, No. 3, pp. 266-286.
- Stahle, D.W., Cook, E.R., Cleaveland, M.K., Therrell, M.D., Meko, D.M., Grissino-Mayer, H.D., et al. (2000). Tree-ring data document 16th century megadrought

over North America. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Vol. 81, No. 12, pp. 121-125.

Wolf, S., Keenan, T.F., Fisher, J.B., Baldocchi, D.D., Desai, A.R., Richardson, A.D., et al. (2016). Warm spring reduced carbon cycle impact of the 2012 US summer drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 113, No. 21, pp. 5880-5885.

Woodhouse, C.A., and Overpeck, J.T. (1998). 2000 years of drought variability in the central United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 79, No. 12, pp. 2693-2714.

Zhou, S., Duursma, R.A., Medlyn, B.E., Kelly, J.W., and Prentice, I.C. (2013). How should we model plant responses to drought? An analysis of stomatal and non-stomatal responses to water stress. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 182, pp. 204-214.

Received	September 3, 2021
Revised	September 6, 2021
Accepted	September 13, 2021