우리나라 가뭄 위험도 평가: 자료기반 가뭄 위험도 지도 작성을 중심으로

Assessment of Drought Risk in Korea: Focused on Data-based Drought Risk Map

박종용* · 유지영** · 이민우*** · 김태웅****

Park, Jong Yong · Yoo, Ji Young · Lee, Minwoo · Kim, Tae-Woong

Abstract

Once drought occurs, it results in the extensive affected area and considerable socio-economic damages. Thus, it is necessary to assess drought risk and to prepare its counterplans. In this study, using various observation data on meteorological and socio-economical factors, drought risk was evaluated in South Korea. To quantify drought risk, Drought Hazard Index (DHI) was calculated based on the occurrence probability of drought, and Drought Vulnerability Index (DVI) was computed to reflect socio-economic consequences of drought. Drought Risk Index (DRI) was finally suggested by combining DHI and DVI. These indices were used to assess drought risk for different administrative districts of South Korea. The overall results show that the highest drought risk area was Jeolla Province where agricultural practice is concentrated. The drought risk map proposed in this study reflects regional characteristics, thus it could be utilized as a basic data for the establishment of drought preventive measures.

Keywords: *drought, hazard, vulnerability, risk*

요 지

가뭄은 태풍이나 집중호우 등 다른 자연재해와는 달리 발생시점이 명확하지 않으며, 가뭄발생 시 피해지역이 광범위하기 때문에 사회·경제적으로 겪는 피해가 매우 크다. 따라서 미래에 발생할 수 있는 가뭄에 대한 평가 및 이에 대한 대응방안의 마련이 필요하다. 본 연구에서는 기후학적 인자와 사회경제적인 인자에 대한 여러 가지 통계자료를 이용하여 우리나라 가뭄 위험도를 평가하였다. 가뭄의 발생확률을 바탕으로 가뭄 노출성 지수(DHI)와 가뭄의 사회경제적인 영향을 반영하는 가뭄 취약성 지수(DVI)를 개발하고, 두 인자간의 상호관계를 분석하여, 최종적으로 가뭄 위험도 지수(DRI)를 개발하였다. 행정 구역별로 산정된 DRI를 바탕으로 우리나라의 지역적 가뭄 위험도를 평가할 수 있었으며, 가뭄 위험도가 가장 높은 지역은 농업 밀집지역인 전라도로 나타났다. 본 연구에서 제시한 가뭄 위험도 지도는 지역적 특성을 반영하여 가뭄대책을 수립할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

핵심용어: 가뭄, 노출성, 취약성, 위험도

1. 서 론

미래 기후에 대한 최근의 GCMs(Global Climate Models)의 결과를 살펴보면, 기온과 강수패턴에 있어서 많은 변화가 있을 것으로 예측되고 있다(Houghton *et al.*, 2001). 그 중 우리나라가 포함된 동아시아 지역은 최근 온난화가 가장 두드러진 지역 중 하나이다(Lal and Harasawa, 2001). 기후 학자들에 의해 예측된 지구 기온의 증가와 더불어 전 지구적인 수문 순환은 극한 현상이 빈번해지고, 더 강해질 것이

다(Hisdal *et al.*, 2001). 이 중 가뭄은 누적된 기후현상으로 부터 발생하는 극한 기후재해 중 하나이다(Oliver, 2005). 가뭄은 지속기간, 심도, 영향면적을 특징으로 하는 자연재해로 강수, 온도, 바람, 상대습도 등 기상학적 인자의 부족 또는 과잉으로 인해 발생되는데, 특히 주된 원인은 장기간 동안 강수의 부족이다. 가뭄은 분류하는 기준에 따라, 흔히 기상학적 가뭄, 수문학적 가뭄, 농업적 가뭄, 사회경제학적 가뭄 등으로 구별하기도 하며, 구분된 가뭄의 정의에 따라 가뭄을 정량적으로 평가하기 위한 가뭄지수가 개발되었다. 대

*정회원 · 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정 (E-mail : bajojang@hanyang.ac.kr)

**정회원 · 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (E-mail : 7924pooh@hanyang.ac.kr)

***한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정 (E-mail : mwlee1115@hanyang.ac.kr)

****정회원 · 교신저자 · 한양대학교 공학대학 건설환경공학과 부교수 · 공학박사 (E-mail : twkim72@hanyang.ac.kr)

표적인 가뭄지수로 Palmer(1965)에 의해 개발된 PDSI(Palmer Drought Severity Index)와 McKee *et al.*(1993)에 의해 개발된 SPI(Standardized Precipitation Index)가 있다.

가뭄은 특성상 시작과 끝이 분명하지 않고, 피해규모가 광범위한 특징이 있다. 따라서, 가뭄에 의한 피해를 줄이기 위해 전 세계적으로 가뭄에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 예를 들어, Goddard *et al.*(2003)은 가뭄 위험관리를 위한 의사결정을 지원하기 위해 가뭄지수와 공간적 데이터 베이스를 이용하여 가뭄위험에 노출된 정도를 파악하는 방법을 제시하였고, Wilhite(2000)은 가뭄관리를 위한 10단계를 제안하여, 효과적으로 가뭄에 대응할 수 있는 방안을 제시하였다.

미국의 경우, 국립가뭄경감센터(National Drought Mitigation Center(NDMC))에서 제공하는 Drought Monitor(DM)는 일반 대중 또는 언론, 정책입안자 등에게 가뭄과 관련된 정보를 제공하고 있다. DM은 미국 전역에 가뭄이 발생하는 위치와 강도를 나타내며, 가뭄 대응조치를 실행하는 시점을 판단하는 유용한 기준으로 사용되고 있다. 특히 물과 관련된 일을 하는 종사자 또는 기업의 의사 결정자들이 가뭄 재난을 대비하기 위하여 사용하고 있다.

가뭄에 대비하기 위해서는 가뭄의 지역적 위험도를 평가하여 지역적으로 적절한 가뭄대책을 수립할 필요가 있다. 현재 우리나라는 홍수와 지진해일, 산사태와 같은 자연재해에 대비하기 위한 재해위험지도 작성을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하지만, 가뭄과 관련된 재해지도를 작성하는 것과 관련된 연구는 농업 혹은 수문학적 가뭄평가를 통해 일부 지역에 국한된 가뭄위험지도를 작성하고 있다. 권형중과 김성준(2007)은 지하수 관측망의 지하수 자료와 MSWSI(Modified SWSI)와의 상관분석을 통해 지하수위의 임계값을 결정하고, 지하수위 자료의 확률분석을 통해 금강유역에 대한 가뭄평가를 수행한 바 있다. 안소라 등(2008)은 농업용 저수지의 수문학적 가뭄평가를 위해 SWSI(Surface Water Supply Index)를 보완하여 강수량, 저수지 유입량, 저수지 저류량을 입력 자료로 구축하고 ASWSI(Agricultural SWSI)를 산정하여, 금강유역의 농업가뭄지도를 작성하였다. 또한, 한국환경정책평가연구원(2007)은 가뭄 취약성을 노출과 민감도의 곱을 적응력으로 나눈 값으로 정의하여 기후변화를 고려한 유역별 가뭄 취약성 지도를 작성한 바 있다.

일반적으로 재해위험지도 작성을 위해서는 정량적 위험도 평가가 필요하다. Wu and Wilhite(2004)와 Wu *et al.*(2004)는 미국의 네브라스카 지역의 농업적 가뭄 위험도를 다변량 기법을 통해 평가한 후, 농업적 가뭄의 위험지역을 GIS를 통해 도시하였다. Shahid and Behrawan(2008)은 Hayes *et al.*(2004)이 제시한 가뭄 위험도 분석방법을 이용하여 방글라데시에 대한 가뭄 위험도를 평가하였다. 이 연구에서 가뭄 위험도를 평가하기 위해 3-month SPI, 6-month SPI를 이용하여 가뭄 발생확률을 산정하고, 가뭄으로 인한 영향범위를 사회, 건강, 경제, 환경으로 구분하여, 가뭄 위험도 지도를 작성하였다. 방글라데시의 경우, 높은 인구밀도와 낮은 재정도, 잦은 자연재해로 인해 극심한 피해를 겪고 있다. 특히 기후 특성상 우리나라와 비슷하게 여름의 강우가 연강우량의 대부분을 차지하기 때문에, 여름을 제외한 계절에 있어서

강우편차가 매우 커 가뭄의 발생이 빈번하며, 가뭄에 의해 발생하는 피해 또한 상당히 크다.

우리나라는 연강우량의 약 70%가 6~9월 사이에 집중되는 경향이 있다. 10~5월까지는 강우의 부족으로 가뭄이 발생하여 농작물의 피해 또는 용수부족으로 인한 사회적 피해를 가져오기도 한다. 가뭄의 피해를 최소화하기 위해 국민들의 가뭄에 대한 상황인식 제고와 가뭄관리자들의 효과적인 가뭄재해정책 수립이 필요하며, 이를 위해서는 지역적 가뭄평가로 통한 가뭄 위험도 지도의 개발이 필수적이다. 또한, 가뭄의 특성상 단기간의 강수로 인해 가뭄이 해갈되어질 수 있음을 고려해 볼 때, SPI와 PDSI와 같이 월별 모의 또는 주별 모의로 계산되어지는 기존의 가뭄지수보다는 일 가뭄의 상태 및 가뭄의 해갈 및 종료일을 계산할 수 있는 가뭄지수의 도입이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 EDI(Effective Drought Index)를 이용하여 가뭄의 심도를 정량화하고, 가뭄 취약정도를 나타내어 주는 사회경제적 인자를 선정하여 우리나라의 가뭄 위험도 평가를 수행하였다.

2. 가뭄 위험도의 정의

가뭄 위험도는 가뭄의 빈도와 심도, 공간적 범위의 재해 노출성(Hazard)과 가뭄재해의 영향으로 인간의 활동을 저해하는 취약성(Vulnerability)의 조합으로 정의한다. 재해 노출성은 잠재적 위험현상의 발생확률을 대표하며, 취약성은 위험현상 발생으로 인한 손실의 정도로 나타낼 수 있다. 따라서, 효과적인 가뭄 경감대책을 수립하기 위해서는 가뭄의 발생확률과 그로 인한 피해를 정량적으로 평가하는 것이 우선이다. 미국 NDMC에서는 가뭄에 대한 과학적 연구뿐만 아니라 가뭄 경감대책 수립 등 정부차원의 가뭄관리 기법에 대한 연구가 이루어지고 있다. 특히, Knutson *et al.*(1998)은 국가가뭄계획을 수립함에 있어 가뭄발생 전 잠재적인 가뭄의 영향을 저감시키기 위한 6단계의 절차를 제시하였다. 그 중 2단계와 3단계는 위험도의 정의를 바탕으로 가뭄 위험도가 높은 지역을 우선순위로 파악하여 가뭄 피해영향을 줄이고자 노력하였다.

본 연구에서는 NDMC에서 제안한 위험도의 정의를 바탕으로 가뭄 위험도를 노출성(Hazard)과 취약성(Vulnerability)의 곱으로 정의하였다. 이러한 개념을 정량적으로 구현하기 위해 그림 1과 같은 산정절차를 통해 가뭄 노출성과 가뭄 취약성을 각각 정량적으로 표현할 수 있는 지수를 산정하였

그림 1. 가뭄 위험도 지수 산정절차

그림 2. 행정구역구분과 기상청 산하 53개 강우관측지점

다. 즉 가뭄 노출성 지수(Drought Hazard Index(DHI))와 가뭄 취약성 지수(Drought Vulnerability(DVI))를 통해 식 (1)과 같이 가뭄 위험도 지수(Drought Risk Index(DRI))를 산정하였다.

$$DRI = DHI \times DVI \quad (1)$$

첫 번째로 가뭄 노출성을 평가하기 위해서는 가뭄 심도별 발생확률을 산정하고, 이를 하나의 지표로 표현하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 기상청에서 제공하는 대한민국 내 53개 강우관측소(그림 2)의 1974년부터 2007년까지의 일강우량을 이용하여 Byun and Wilhite(1999)가 개발한 EDI(Effective Drought Index)를 산정하였다. 가뭄연구에서 보통 사용되는 PDSI와 SPI의 시간 단위가 월 단위인데 비하여 EDI는 일별 모의가 가능하며, 가뭄의 시작과 끝을 명확히 제시할 수 때문에 가뭄의 발생확률을 평가하는데 효과적으로 적용될 수 있다. 특히 가뭄은 매일 변하는 강수나 증발과 같은 수문기상학적 요인에 의해 영향을 받는 수자원(지하수 또는 지표수)의 부족으로 인해 발생하기 때문에, 시간에 대한 '지속성'의 개념으로 접근하는 것이 바람직하다.

EDI는 강우의 발생으로 생긴 수자원을 일 년 이상의 지속적인 기간 동안 누적하여, 이를 평년치와 비교하는 방법으로 가뭄심도를 계산한다. 이는 강우량을 이용하여 일별 가뭄의 정도를 파악할 수 있고 계산과정이 간단한 장점이 있다. 산정절차는 식 (2)와 같다.

$$EP = \sum_{n=1}^i \left[\left(\sum_{m=1}^n P_m \right) / n \right] \quad (2a)$$

$$DEP = EP - MEP \quad (2b)$$

$$EDI = DEP / ST(DEP) \quad (2c)$$

여기서, EP는 유효누적강우량으로 365일 혹은 그 이상 동안

누적된 강우량을 의미하고, P_m 은 특정일로부터 m일 전의 강우량을 의미하며, 일별로 다른 값을 갖는다. MEP는 EP의 30년간 평균이고, DEP는 MEP로부터 EP의 편차를 의미한다. ST(DEP)는 평년기간 동안의 DEP의 표준편차이다.

예를 들어, 2011년 12월 31일의 EDI를 구하기 위해 먼저 2011년 1월부터 12월 31일까지의 365일 강수량을 이용하여 식(2a)를 통해 EP를 구한다. 다음 단계로 30년 또는 그 이상의 12월 31일 EP 값들의 평균을 구한 뒤, 식(2b)를 통해 DEP를 산정한다. 2011년 12월 31일의 DEP가 음이면 평년보다 건조함을 의미하며, 양의 값이면 습윤함을 의미한다. 이 후 표준화 과정인 식 (2c)를 통해 EDI를 계산하게 되는데 ST(DEP)는 평년기간 동안(30년 혹은 그 이상의 값) 12월 31일의 DEP 값들의 표준편차를 의미한다. 결과적으로 2011년 12월 31일의 유효강수량이 평년에 비해 얼마나 부족했는지를 표준화된 값으로 나타내게 된다. 특히 DEP가 음인 날의 수가 2일 이상 지속되면 그 날의 유효강수량을 365+지속일수 동안의 강수량을 사용하여 다시 계산하여 MEP, DEP, ST(DEP) 값을 다시 계산하게 된다. 결과적으로 365+지속일수 동안의 강수량을 고려한 EDI 값을 산출하게 된다. 보다 자세한 EDI의 계산과정에 대해서는 Byun and Wilhite (1999)를 참고하기 바란다.

가뭄의 발생확률을 분류하기 위해 표 1과 같이 가뭄심도를 EDI 범주에 따라 구분하였으며, 값이 작을수록 가뭄의 정도가 심해짐을 의미한다. 본 연구에서는 EDI 값에 따른 심도별 가중치(Weights)를 부여하고, 심도별 발생확률을 산정하여, 등급(Rating)을 부여할 수 있기 때문에, 가뭄심도의 크기 특성 및 가뭄심도의 발생빈도 특성을 모두 고려할 수 있다. DHI의 자세한 계산과정은 3.1절에 설명되어진다.

두 번째로 가뭄 취약성 지수(DVI)를 산정하기 위해서, 그림

그림 3. 과거 가뭄피해 현황

3과 같이 과거 가뭄발생으로 인한 피해현황을 바탕으로 가뭄의 피해정도를 가중시킬 수 있는 사회경제학적 특성을 반영하는 7가지 인자를 선정하였다. 그림 3은 국가수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr/>)에서 제시한 과거(1994-1995년, 2001년)에 발생한 가뭄에 대한 피해현황을 지역별로 나타낸다. 물 부족으로 기인된 피해사례는 그림 3과 같이 대부분 산업 및 경제 전반의 용수부족, 생활용수부족, 그리고 농업분야의 용수부족으로 야기된다는 점을 고려하여 사회경제적 인자를 선정하였다.

서로 다른 단위와 성질을 가진 여러 변수들을 집계하여 하나의 지표로 결합하는 과정에는 표준화(Normalization) 과정이 필요하다. 본 연구에서는 각 지표들이 갖는 단위와 규모 다르기 때문에 표준화 방법 중 단위를 무차원화 시키는 스케일 재조정 방법(Re-scaling Method)을 이용하였다. 스케일 재조정 방법은 표준편차보다 지표의 범위에 기반을 둔 변환 방법으로 값을 0~1 범위를 갖도록 하며 식 (3)과 같이 계산한다. 이는 전체 자료범위 내에서 등수에 따른 순위를 일렬로 세우는 방법으로 자료의 상대적 크기의 비교가 가능하다는 장점이 있다. 따라서 한반도 전체에 대한 표준화 과정을 수행하여 지역별 가뭄 위험도 순위를 평가할 수 있다. DVI의 자세한 계산과정은 3.2절에 설명되어진다.

$$\text{Normalized value} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3)$$

3. 가뭄 위험도 평가

3.1 가뭄 노출성 지수

가뭄 노출성 지수(DHI)는 가뭄 발생확률을 대표하는 지수로써 EDI의 심도별 발생확률에 따른 등급을 부여하여 산정된다. 현재의 가뭄 및 미래의 발생 가능한 가뭄을 평가하기 위하여 그림 2와 같이 기상청 산하 53개 강우관측소의 1974-2007년까지 일강우량 자료를 이용하여 EDI를 산정하고, EDI의 범주(표 1)에 따라 발생확률을 백분율로 나타내었다.

표 1. EDI 가뭄심도 구분

가뭄심도	EDI
Near-Normal	-1.0 < EDI < 1.0
Moderate	-1.5 < EDI ≤ -1.0
Severe	-2.0 < EDI ≤ -1.5
Extreme	EDI ≤ -2

그림 4. EDI의 누적분포함수를 통한 가중치와 등급

가뭄의 심도와 발생빈도를 정량화하기 위해 그림 4와 같이 가뭄지수 EDI의 심도에 따라 가중치(Weight)와 등급(Rating)을 부여하였다. 표 1에서 제시한 EDI 심도에 따라 가중치를 1에서 4까지로 부여하였으며, 각 심도에 따른 Rating을 부여하였다. Weight의 경우 EDI 심도에 따라 Near-Normal=1, Moderate=2, Severe=3, Extreme=4로 부여하였다. Rating의 경우 EDI 심도에 따라 분류된 각 상태의 최대발생확률과 최소발생확률을 4등분하여 1에서 4등급으로 부여하였다.

강우관측소는 지점에 대한 강우량만을 나타내지만 자연재해에 대한 관리 주체는 지방자치단체이기 때문에, 가뭄 발생확률을 행정구역별로 분포시키기 위하여 티센다각형법을 이용하였다. 전국 229개 행정구역에 대해 53개 강우관측소가 각 행정구역에 영향을 미치는 면적비율을 고려하여 식 (4)와 같이 가뭄 노출성 지수를 산정하였다.

$$DHI = (NNDr \times NNDw) + (MDr \times MDw) + (SDr \times SDw) + (EDr \times EDw) \quad (4)$$

가뭄 노출성 지수(DHI)는 EDI로 분류된 가뭄심도에 따라 식 (4)와 같이 각 가뭄상태에 따른 가중치와 등급을 결정하고 연산과정을 통해 계산된다. 표 2는 식 (4)에 약어로 표기된 인지들에 대한 명칭을 정리한 것이며, 표 3은 가중치와 등급을 부여하여 DHI를 계산하는 과정을 예로 설명한 것이다.

예를 들어, 경기도 시흥시의 경우, 서울, 수원, 인천 강우관측소의 영향을 받는데, 영향을 받는 비율은 각각 2%, 22%, 75%이다. 또한, 서울, 수원, 인천 강우관측소에 의해

표 2. DHI 산정 인자 명칭

가뭄심도	가중치(Weight)	등급(Rating)
Near-Normal Drought	NNDw (Near-Normal Drought Weight)	NNDr (Near-Normal Drought Rating)
Moderate Drought	MDw (Moderate Drought Weight)	MDr (Moderate Drought Rating)
Severe Drought	SDw (Severe Drought Weight)	SDr (Severe Drought Rating)
Extreme Drought	EDw (Extreme Drought Weight)	EDr (Extreme Drought Rating)

표 3. DHI 산정과정 (Ex 서울·경기 지역)

<p>Step 1. 강우관측소별 EDI 산정</p> <ul style="list-style-type: none"> · 행정구역내에 위치한 강우관측소의 1974-2007년까지 강우자료를 바탕으로 일별 EDI 계산 · 강우관측소별 4등급의 EDI 심도에 따른 발생빈도 산정
<p>Step 2. 강우관측소에 의한 티센망도 작성</p> <ul style="list-style-type: none"> · 강우관측소가 각 지역에 미치는 영향의 정도를 결정하기 위해 티센망도 작성
<p>Step 3. 강우관측소가 각 행정구역에 영향을 미치는 비율을 계산</p> <ul style="list-style-type: none"> · 티센망은 행정구역상 경계가 아니기 때문에, 강우관측소가 행정구역에 영향을 미치는 비율을 계산
<p>Step 4. 가뭄 노출성 지수(DHI) 계산</p> <ul style="list-style-type: none"> · 행정구역별 발생확률 계산 · 가뭄상태에 대한 가중치와 등급 부여 · 가중치와 등급이 결정되면 식 (4)에 의해 DHI를 산정

산정된 EDI에 의해 Near-Normal(Weight=1)의 발생확률은 각각 69.8%, 64.2%, 68.3%이다. 따라서, 시흥시의 Near-Normal의 발생확률은 $69.8 \times 0.02 + 64.2 \times 0.22 + 68.3 \times 0.75 = 66.75\%$ 이다. 같은 방법으로 Moderate(Weight=2), Severe(Weight=3), 그리고 Extreme(Weight=4)의 발생확률은 각각 12.56%, 51.42%, 1.44%이다. 또한, 서울·경기 지역의 65개 행정구역에 대한 Near-Normal($-1.0 \leq \text{EDI} < 1.0$)의 발생확률(Probability of Occurrence, PO)의 최소값은 60.56%이고 최대값은 74.96%이므로, 그림 4에 나타난 방법에 따라 4개의 동일한 구간으로 나누어 Rating을 부여하였다. 즉, $60.56\% \leq \text{PO} < 64.16\%$ 에 속하는 지역은 Rating=1, $64.16\% \leq \text{PO} < 67.76\%$ 에 속하는 지역은 Rating=2, $67.76\% \leq \text{PO} < 71.36\%$ 에 속하는 지역은 Rating=3, $71.36\% \leq \text{PO} < 74.96\%$ 에 속하는 지역은 Rating=4로 부여하였다. 같은 방법으로 Moderate, Severe, 그리고 Extreme에 대한 Rating을 표 4와 같이 부여하였다. Weight와 Rating이 결정되면 식 (4)에 의해서 계산된 값을 식 (3)에 의해서 표준화를 시

키면 최종적으로 DHI가 산정된다.

3.2 가뭄 취약성 지수

본 연구에서는 지역적 가뭄피해 취약정도에 따라 가뭄으로 인한 피해가 경제적, 환경 및 사회적으로 큰 영향 및 파급 효과를 가질 수 있다는 점을 가뭄 위험도 분석에 반영하기 위해 가뭄발생으로 인한 피해에 영향을 미치는 지표들 선정 하였다. 과거 가뭄피해현황을 살펴보면, 도시지역의 인구밀 집지역에서는 생활용수의 부족으로 극심한 피해가 발생하였으며, 농업지역에서는 농업용수의 부족으로 인한 농작물 피해가 크게 발생하였다. 또한 기상학적인 가뭄이 지속되면 토양수분의 감소를 촉진시켜 농업활동에 직접적인 피해가 발생되고, 하천의 기저유량과 저수지의 저수량을 감소시켜 수문학적 가뭄으로 이어지면서 용수 부족을 초래한다. 이는 결국 수자원 공급능력을 떨어뜨려 관개농업과 생활 및 공업 분야에까지 가뭄피해가 확산된다. 또한 농작물의 생산량 감

표 4. 서울·경기 지역의 가뭄심도별 가중치(Weight) and 등급(Rating)

가뭄심도	Weight	발생확률(%)	Rating
Near-Normal	1	≤ 64.16	1
		64.16-67.76	2
		67.76-71.36	3
		$71.36 \leq$	4
Moderate	2	≤ 9.11	1
		9.11-11.46	2
		11.46-13.82	3
		$13.82 \leq$	4
Severe	3	≤ 2.01	1
		2.01-3.18	2
		3.18-4.35	3
		$4.35 \leq$	4
Extreme	4	≤ 0.60	1
		0.60-0.91	2
		0.91-1.22	3
		$1.22 \leq$	4

소로 이어져 농작물 가격이 폭등하여 사회와 경제 전반에 많은 영향을 미친다. 따라서 농업부문의 피해지표의 선정은 장기적인 관점에서 다른 부문에까지 영향을 끼친다는 점을 감안할 때 매우 중요한 지표이다.

도시지역이나 인구밀집지역의 경우, 가뭄으로 인한 가용수 자원양의 감소로 인해 제한급수와 같은 불편을 겪게 되는 경우도 있다. 한국환경정책평가연구원(2009)은 가뭄에 대해 취약한 기반시설을 파악하여, 기후변화 민감도와 적응능력 및 위험수준이 모두 높게 나온 기반시설을 상수시설, 하천시설, 관개시설별로 분류하였다. 상수시설 및 하천시설의 경우, 급수를 위한 직접적인 시설이므로 가뭄에 의해 급수의 제한을 받는 인구밀도와 직접적인 영향을 미칠 수 있으며, 관개시설은 농업부분에 많은 영향을 미친다.

본 연구에서는 가뭄 취약성 지수 산정을 위해 사회경제적 지표를 229개 행정구역에 대한 농작물 경지면적(Irrigated Land, IL), 농가인구(Agricultural Occupation, AO), 작물생산량(Food Production, FP), 인구밀도(Population Density, PD), 생활용수 공급량 비율(Residential Water, RW), 공업용수 공급량 비율(Industrial Water, IW), 농업용수 공급량 비율(Agricultural Water, AW)로 선정하였다. 각 인자별 축적

그림 5. 행정구역별 가뭄 위험도 지도

재조정(Re-scaling) 방법을 통해 단위를 무차원화 하였으며, 가뭄 취약성지수 DVI를 식 (5)에 의해 산정하였다.

$$DVI = \frac{IL_r + AO_r + FP_r + PD_r + RW_r + IW_r + AW_r}{N} \quad (5)$$

여기서, IL_r 은 농작물 경지면적 비율, AO_r 은 농가인구 비율, FP_r 은 작물생산량 비율, PD_r 은 인구밀도 비율, RW_r 은 생활용수 공급량 비율, IW_r 은 공업용수 공급량 비율, AW_r 은 농업용수 공급량 비율, 그리고 N 은 지표의 수($N=7$)를 나타낸다. 농작물 경지면적, 농가인구, 작물생산량, 인구밀도의 경우 통계청(<http://kostat.go.kr/portal/korea/index.action>)의 통계자료를 이용하였으며, 생활용수, 공업용수, 농업용수의 공급량 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr/>)을 이용하였다.

3.3 가뭄 위험도 지수

가뭄 위험도 지수(DRI)는 가뭄 노출성 지수(DHI)와 가뭄 취약성 지수(DVI)의 곱으로 산정하였다. DHI와 DVI 중 하나라도 “0”값을 가지게 되면 DRI는 “0”이 되며, 이는 그 지역은 가뭄으로 인한 위험이 없음을 의미한다. 또한 DHI와 DVI 중 하나의 값이라도 커지면 커질수록 DRI는 커지게 되므로 가뭄 위험도의 정도를 나타내는 데 있어 두 지수는 양의 상관관계를 갖고 있음을 알 수 있다.

4. 결과 및 토의

본 연구에서는 EDI를 바탕으로 전국 229개 시군구에 대하여 가뭄 노출성 지수(DHI), 가뭄 취약성 지수(DVI), 가뭄 위험도 지수(DRI)를 산정하여 그림 5와 같이 행정구역별로 가뭄 노출성 지도(Drought Hazard Map), 가뭄 취약성 지도(Drought Vulnerability Map), 가뭄 위험도 지도(Drought Risk Map)로 나타냈다. 본 연구에서 각 지수의 값이 0-0.25이

면 가뭄에 의한 위험이 낮은 LOW 등급으로, 0.25-0.5이면 가뭄에 의한 위험이 보통 수준인 Moderate 등급으로, 0.5-0.75이면 가뭄에 의한 위험이 높은 High 등급으로, 0.75-1이면 가뭄에 의한 위험이 가장 높은 Very High 등급으로 구분하였다. 이러한 구분을 바탕으로 각 행정구역에 대한 가뭄 노출성, 취약성 및 위험도를 평가한 결과를 표 5-7에 정리하였다.

가뭄 발생빈도를 대표하는 가뭄 노출성 지수는 경상남도 창원시가 가장 높은 것으로 나타났으며, 가뭄발생 시 취약성을 대표하는 가뭄 취약성 지수는 전라북도 익산시가 가장 높은 것으로 나타났다. 우리나라 전체 가뭄 위험도 지수를 표준화한 결과, 229개 시군구 중 $0 \leq DRI \leq 0.25$ 인 지역이 144곳, $0.25 < DRI \leq 0.50$ 인 지역이 59곳, $0.50 < DRI \leq 0.75$ 인 지역이 15곳, $0.75 < DRI \leq 1.00$ 인 지역이 11곳으로 나타났다. 가뭄 위험도 지수가 $0 \leq DRI \leq 0.25$ 인 Low 등급에 해당되는 지역의 비율이 가장 높은 지역은 서울경기 지역으로 총 65개 시군구 중 62개 시군구로 그 비율은 95.4%로 나타났다. $0.25 < DRI \leq 0.50$ 인 Moderate 등급의 비율이 가장 높은 지역은 충청북도 지역으로 총 12개 시군구 중 8개 시군구가 차지하였으며, 66.7%로 나타났다. $0.50 < DRI \leq 0.75$ 인 High 등급에 속하는 비율이 가장 높은 지역은 충청남도 지역으로 총 16개 시군구 중 7개 시군구, 즉 43.8%로 나타났다. 마지막으로 $0.75 < DRI \leq 1.00$ 로 가장 취약한 등급인 Very High에 속하는 비율이 가장 높은 지역은 전라북도 지역으로 총 14개 시군구 중 4개 시군구 즉 28.6%로 나타났다. 특히 가뭄 노출성 지수와 가뭄 취약성 지수를 모두 고려하였을 때 가뭄 위험도가 가장 높은 지역은 충청남도 당진군으로 나타났다.

본 연구의 결과를 토대로 가뭄 위험도가 높게 나타난 지역은 지역별 강수량 및 저수율을 파악과 농작물 등의 생육 상황을 파악하여 가뭄에 보다 효과적으로 대응할 수 있도록 해야 한다. 또한 상습가뭄발생지역과 용수 부족지역을 파악하여 관정 또는 보 등을 조기 개발할 수 있도록 해야 한다.

표 5. 가뭄 노출성 지수 산정결과 등급별 시군구 개수

지역	LOW		MODERATE		HIGH		VERY HIGH		TOTAL
	개수	비율	개수	비율	개수	비율	개수	비율	
서울·경기(인천포함)	55	84.6	10	15.4	0	0	0	0	65
강원도	5	27.8	12	66.7	1	5.6	0	0	18
경상도	41	56.9	28	38.9	0	0	3	4.2	72
대구	0	0	8	100	0	0	0	0	8
울산	5	100	0	0	0	0	0	0	5
부산	16	100	0	0	0	0	0	0	16
경상북도	12	52.2	11	47.8	0	0	0	0	23
경상남도	8	40.0	9	45.0	0	0	3	15.0	20
전라도	4	9.8	24	58.5	13	31.7	0	0	41
광주	0	0	5	100	0	0	0	0	5
전라북도	0	0	4	28.6	10	71.4	0	0	14
전라남도	4	18.2	15	68.2	3	13.6	0	0	22
충청도	0	0	9	27.3	24	72.7	0	0	33
대전	0	0	0	0	5	100	0	0	5
충청북도	0	0	3	25.0	9	75.0	0	0	12
충청남도	0	0	6	37.5	10	62.5	0	0	16

표 6. 가뭄 취약성 지수 산정결과 등급별 시군구 개수

지역	LOW		MODERATE		HIGH		VERY HIGH		TOTAL
	개수	비율	개수	비율	개수	비율	개수	비율	
서울·경기 (인천포함)	50	76.9	8	12.3	5	7.7	2	3.1	65
강원도	8	44.4	10	55.6	0	0	0	0	18
경상도	34	47.2	23	31.9	9	12.5	6	8.3	72
대구	8	100	0	0.0	0	0	0	0	8
울산	4	80.0	0	0.0	0	0	1	20.0	5
부산	16	100	0	0.0	0	0	0	0	16
경상북도	5	21.7	8	34.8	6	26.1	4	17.4	23
경상남도	1	5.0	15	75.0	3	15.0	1	5.0	20
전라도	2	4.9	17	41.5	14	34.1	8	19.5	41
광주	0	0	3	60.0	2	40.0	0	0	5
전라북도	0	0	2	14.3	6	42.9	6	42.9	14
전라남도	2	9.1	12	54.5	6	27.3	2	9.1	22
충청도	8	24.2	12	36.4	9	27.3	4	12.1	33
대전	5	100	0	0	0	0	0	0	5
충청북도	2	16.7	8	66.7	1	8.3	1	8.3	12
충청남도	1	6.3	4	25.0	8	50.0	3	18.8	16

표 7. 가뭄 위험도 지수 산정결과 등급별 시군구 개수

지역	LOW		MODERATE		HIGH		VERY HIGH		TOTAL
	개수	비율	개수	비율	개수	비율	개수	비율	
서울·경기 (인천포함)	62	95.4	3	4.6	0	0	0	0	65
강원도	14	77.8	4	22.2	0	0	0	0	18
경상도	49	68.1	18	25.0	2	2.8	3	4.2	72
대구	8	100	0	0	0	0	0	0	8
울산	5	100	0	0	0	0	0	0	5
부산	16	100	0	0	0	0	0	0	16
경상북도	11	47.8	11	47.8	1	4.3	0	0	23
경상남도	9	45.0	7	35.0	1	5.0	3	15.0	20
전라도	10	24.4	20	48.8	6	14.6	5	12.2	41
광주	2	40.0	3	60.0	0	0	0	0	5
전라북도	0	0	5	35.7	5	35.7	4	28.6	14
전라남도	8	36.4	12	54.5	1	4.5	1	4.5	22
충청도	9	27.3	14	42.4	7	21.2	3	9.1	33
대전	5	100	0	0	0	0	0	0	5
충청북도	3	25.0	8	66.7	0	0	1	8.3	12
충청남도	1	6.3	6	37.5	7	43.8	2	12.5	16

상습가뭄재해지역 해소를 위한 중·장기대책 수립 지원 및 가뭄관리대책을 예방, 대비, 대응, 복구 단계별로 각 중앙부처별 가뭄대책업무를 추진하고 지방자치단체의 가뭄예방업무를 규정하여 단계별 가뭄대책 수립에 힘써야 한다.

5. 결 론

본 연구는 우리나라 가뭄 발생특성을 고려한 가뭄 노출성과 가뭄 취약성을 복합적으로 고려하여 가뭄 위험도 지도를

작성하였다. 또한 기상청 산하 53개 강우관측소 일강우량을 이용하여 EDI를 산정하고, 이에 대한 가뭄 발생특성을 행정구역별로 도시하였다. 또한, 가뭄 취약성을 나타낼 수 있는 7가지 인자를 선정하고 이를 지수화하여 가뭄 취약성 지수를 산정하였다. 그 후, 가뭄 노출성 지수와 가뭄 취약성 지수를 이용하여 가뭄 위험도 지수를 계산하여 전국 229개 행정구역별 가뭄 위험도를 지도로 도시하였다. 그 결과 과거 가뭄 발생빈도와 가뭄발생으로 예상되는 피해인자들의 비율이 높을수록 가뭄 위험도가 커짐을 확인할 수 있었다. 현재 우리

나라의 가뭄평가는 가뭄지수의 산정결과로 가뭄 위험도를 평가하고 있어 지역적 대책을 수립하기에는 실제 피해요인을 반영하지 못하는 현실이다. 각 가뭄의 정의에 의해 구분되는 SPI, PDSI, SMI, MSWSI 등 가뭄지수의 산정결과는 수문 및 기상학적 요인에 따른 가뭄의 크기를 나타낼 뿐 가뭄에 의한 취약성이 내포되지 못한 결과로 도출된다. 또한 Tsakiris *et al.*(2006), Shahid and Behrawan(2008)이 제시한 가뭄 위험도 평가방법은 지점의 강우자료를 이용하여 가뭄평가를 실시한 후 지역적으로 나타낸다. 수문기상학적 지점 관측자료를 이용하여 가뭄평가를 수행한 결과로 지역의 가뭄 위험도를 평가하는 것은 확대 해석 등의 오류가 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 행정구역별 평가 자료를 변환하는 방법을 적용하여 가뭄 위험도 평가를 수행한다면 가뭄재해에 대비한 지역적 대책수립을 위한 우선순위를 반영할 수 있을 것이라 판단된다.

향후 가뭄에 대응하기 위해서는 강우와 같은 기상학적인 자연적 요인은 쉽게 변화시킬 수 없지만, 가뭄관리나 행정 및 제도, 수자원 관리와 같은 인위적인 요소의 발전으로도 가뭄피해에 대해 저감시킬 수 있음은 자명한 사실이다. 그러므로 본 연구에서 제시한 가뭄취약인자로 이용한 7가지 인자(인구밀도, 농업종사자 인구, 경작지면적, 작물생산량, 생활용수 공급량, 공업용수 공급량, 농업용수 공급량)와 더불어 보다 지역적 특성을 반영하여 다양한 가뭄취약인자를 추가로 구축할 필요성이 있다. 이를 통해 기상학적 원인인 강우 부족에 의한 실제 가뭄이 발생하더라도, 가뭄취약지역에 대한 사전대응방안이 마련되어 있다면, 가뭄으로 인한 피해를 보다 저감시킬 수 있을 것이라고 기대된다. 또한 가뭄에 대해 보다 효율적인 관리가 이루어지기 위해서는 지역별 가뭄특성 파악과 더불어 상습가뭄피해지역에 대한 중점적인 관리도 지속되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청의 자연재해저감기술개발사업[NEMA-자연-2011-40]과 한국연구재단의 기초연구사업(과제번호: 2010-0016717)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

권형중, 김성준 (2007) 국가 지하수 관측망 자료를 이용한 가뭄 평가 방법 연구. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제2호, pp.197-199.
 안소라, 권형중, 박종윤, 김성준 (2008) 금강유역 용수구역 단위의 농업가뭄지도 작성. **대한토목학회 정기학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 3576-3579.
 한국환경정책평가연구원 (2007) **기후변화 영향평가 및 적응 시스템 구축III**.

한국환경정책평가연구원 (2009) **기후변화 적응 강화를 위한 사회 기반시설의 취약성 분석 및 대응방안 연구**.
 Byun, H.R. and Wilhite, D.A. (1999) Objective quantification of drought severity and duration, *Journal of Climate*, Vol. 12, Issue 9, pp. 2747-2756.
 Goddard, S., Harms, S.K., Reichenbach, S.E., Tadesse, T., and Waltman, W.J. (2003) Geospatial decision support for drought risk management. *Communications of the ACM*, Vol. 46, Issue 1, pp. 35-37.
 Hayes, M.J., Wilhelmi, O.V., and Knutson, C.L. (2004) Reducing drought risk: bridging theory and practice, *Natural Hazards Review*, Vol. 5, No. 2, pp. 106-113.
 Hisdal, H., Stahl, K., Tallaksen, L.M., and Demuth, S. (2001) Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent? *International Journal of Climatology*, Vol. 21, Issue. 3, pp. 317-333.
 Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., and Xiaosu, D. (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, Vol. 57, Issue 8, pp. 267-269.
 Knutson, C., Hayes, M., and Phillip, T. (1998) *How to Reduce Drought Risk. A Guide Prepared by the Preparedness and Mitigation Working Group of the Western Drought Coordination Council*. National Drought Mitigation Center, Lincoln, Nebraska.
 Lal, M. and H., Harasawa (2001) Future climate change scenarios for Asia as inferred from selected coupled atmosphere-ocean global climate models. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Vol. 79, No.1, pp. 219-227.
 McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1995) Drought monitoring with multiple time scales. *AMS 9th Conference on Applied Climatology*, Dallas, Texas.
 Oliver, J.E. (2005) *Encyclopedia of World Climatology*. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp. 855.
 Palmer, W.C. (1965) *Meteorological Drought*. Research paper No. 45, U.S. Department of commerce weather bureau, Washington, D.C.
 Shahid, S. and Behrawan, H. (2008) Drought risk assessment in the western part of Bangladesh, *Natural Hazards*, Vol. 46, No. 3, pp. 391-413.
 Tsakiris, G., Pangalou, D., and Vangelis, H. (2006) Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, Vol. 21, No. 5, pp. 821-833.
 Wilhite, D.A. (2000) Drought as a natural hazard: concepts and definitions. *Drought: A global assessment*, Routledge Publishers, UK.
 Wu, H. and Wilhite, D.A. (2004) An operational agricultural drought risk assessment model for Nebraska. *Natural Hazards*, Vol. 33, No. 1, pp. 1-21.
 Wu, H., Hubbard, K.G., and Wilhite, D.A. (2004) An agricultural drought risk-assessment model for corn and soybeans. *International Journal of Climatology*, Vol. 24, No. 6, pp. 723-741.

(접수일: 2012.2.24/심사일: 2012.4.22/심사완료일: 2012.6.11)