



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이 학 석 사 학 위 논 문

동아시아 가뭄의
모니터링 시스템 구축과
특징분석 및 예측실험



2011년 2월

부경대학교 대학원

환경대기과학과

오수빈

이 학 석 사 학 위 논 문

동아시아 가뭄의
모니터링 시스템 구축과
특징분석 및 예측실험

지도교수 변희룡

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함.

2011 년 2 월

부경대학교 대학원

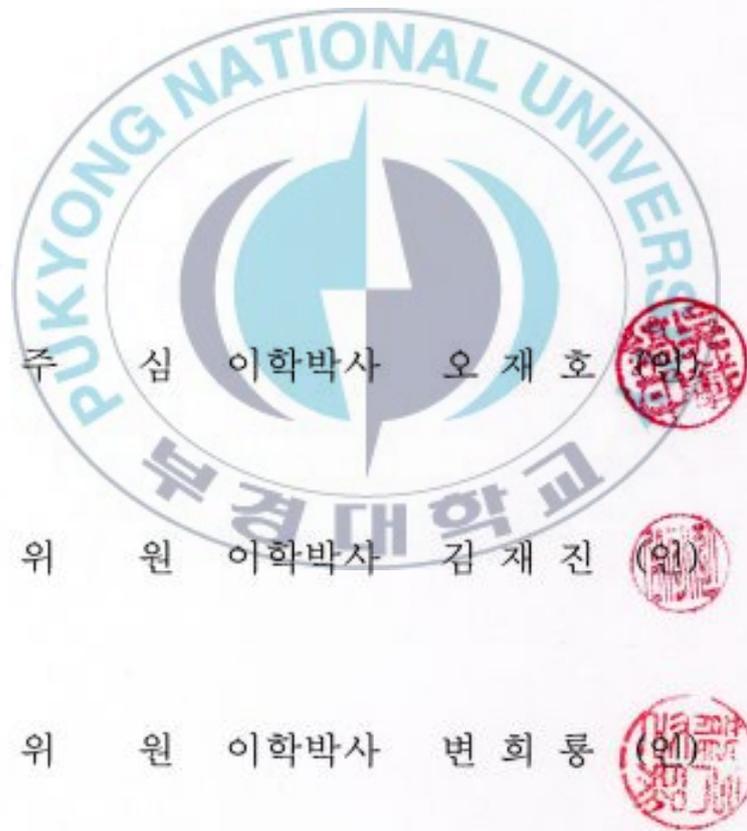
환경대기과학과

오수빈



오수빈의 이학석사 학위논문을 인준함.

2011년 2월 25일



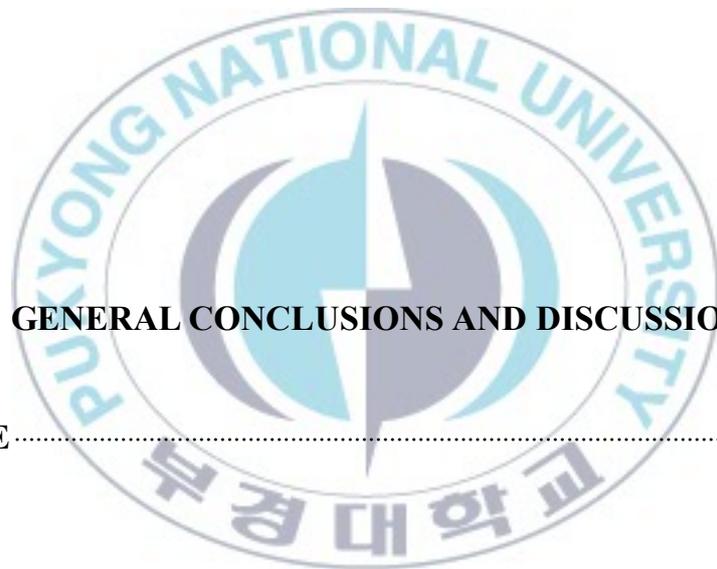
CONTENTS

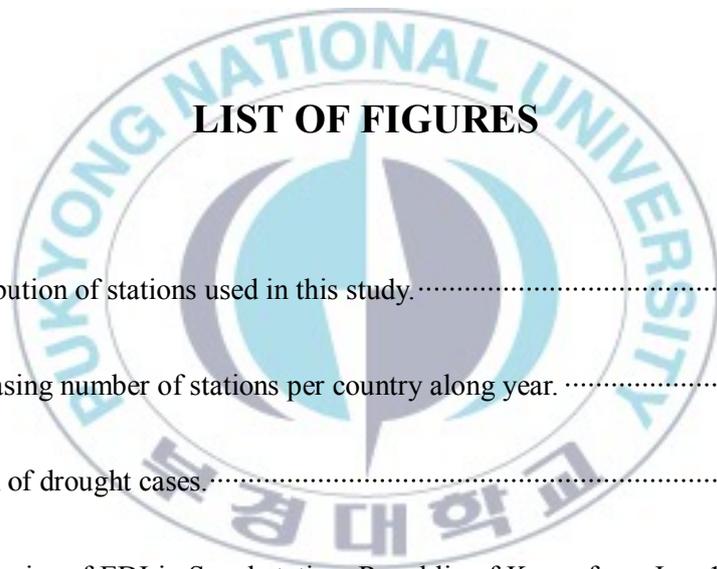
CONTENTS	i
LIST OF FIGURES	iv
LIST OF TABLES	vii
Abstract	i
CHAPTER 1. GENERAL INTRODUCTION	1
CHAPTER 2. DATA AND METHODOLOGY	4
2.1. Precipitation data	5
2.1.1. Station data	5
2.1.2. Grid data	5
2.2. 가뭄의 정의	7
2.3. Cluster analysis	10
2.4. Rotated Empirical Orthogonal Function (REOF)	11
2.5. Wavelet analysis	11
2.6. Analog method	11
CHAPTER 3. 동아시아 가뭄 모니터링 시스템 구축 소개	13
3.1. 서론	13
3.2. 가뭄 모니터링 시스템	17
3.3. 실제 사례에 대한 응용	17

CHAPTER 4. 동아시아 가뭄의 지역 별 특성 분석	23
4.1. 서론	23
4.2. 가뭄 지역 구분	27
4.2.1. Cluster analysis 이용	27
4.2.2. REOF 분석을 이용한 검증	32
4.3. 가뭄 지역들의 시공간적인 특성	34
4.3.1. 연 강수 사이클	34
4.3.2. 가뭄의 시공간적 분포 지도	36
4.3.3. 가뭄 지속 기간	38
4.3.4. 가뭄 시작일과 지속 기간의 관계	43
4.3.5. 동시에 가뭄이 발생하는 지역과 이후 진행	47
4.3.6. 가뭄의 발생 주기	50
CHAPTER 5. 유사법을 이용한 한국의 지역적 가뭄 예측	53
5.1. 서론	53

5.2. 한국 가뭄의 시공간적 패턴	56
5.3. 유사법을 이용한 가뭄 예측 실험	58
5.3.1. 가뭄 코드 설계	58
5.3.2. 예시 사례 선택	59
5.3.3. 유사 사례 선택	60
5.3.4. 실험 결과	61

CHAPTER 6. GENERAL CONCLUSIONS AND DISCUSSION	66
REFERENCE	73



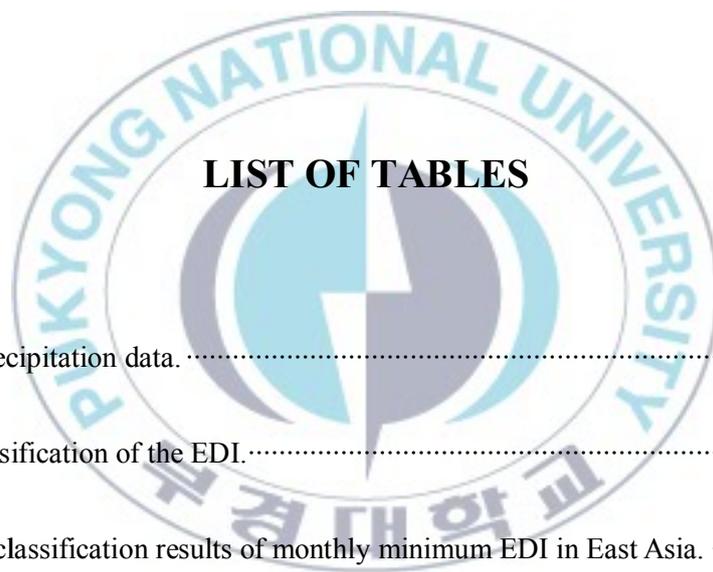


LIST OF FIGURES

Fig. 1. The distribution of stations used in this study.....	6
Fig. 2. The increasing number of stations per country along year.	7
Fig. 3. Definition of drought cases.....	10
Fig. 4. Monthly series of EDI in Seoul station, Republic of Korea from Jan. 1778 to Dec. 2009.	20
Fig. 5. Monthly series of (a) EDI in the 1990's, (b) EDI from Jan. 1993 to Dec. 1995, (c) PCN in the 1990's, and (d) AWRI in the 1990's in Seoul station, Republic of Korea.	20
Fig. 6. The spatial distributions of (a) EDI and (b) precipitation in Jul. 1994.	21
Fig. 7. Same as Fig. 5 except for Aug. 1995.....	22
Fig. 8. Variation of Pearson correlation coefficient between merged clusters. The number of	

cluster is from 2632 to 1.	30
Fig. 9. Clustering process of monthly mean EDI from (a) 2-area division, (b) 3-area division, (c) 4-area division, (d) 5-area division, and (e) 6-area division.	31
Fig. 10. Eigen vectors of (a) first, (b) second, (c) third, (d) fourth, and (e) fifth REOF modes for monthly mean EDI of 1962-2004 (43years).	33
Fig. 11. The variation of 15-day running mean precipitation averaged from 1962 to 2004 through sites in (a) D1, (b) D2, (c) D3, (d) D4, (e) D5, and (f) D6. The bars denote monthly mean daily precipitation, and the dotted lines denote daily mean precipitation of East Asia (2.21mm).	35
Fig. 12. Spatiotemporal distribution of daily EDI of sub-regions from 1962 to 2004.	38
Fig. 13. Boxplots of drought duration of all division. ‘x’ denote the number of drought.	41
Fig. 14. Histograms of frequency of drought duration.	42
Fig. 15. Scatter plot of drought onset date against drought duration. Droughts defined by (a) all cases (minimum EDI ≤ -0.7), (b) moderate drought, (c) severe drought, (d) extreme drought over all grids from 1962 to 2004. The axis of duration (days) is in log scale. Each radial axis denotes the first day of the moth.	45
Fig. 16. Scatter plot of drought onset date against drought duration of (a) D1, (b) D2, (c) D3, (d) D4, (e) D5, and (f) D6 from 1962 to 2004. The axis of duration (days) is in log scale. Each	

radial axis denotes the first day of the month.	46
Fig. 17. The matrixes of the coincidence ratio of drought of each division and their change after 1 year.	49
Fig. 18. Wavelet power spectrum for monthly mean EDI of (a) D1, (b) D2, (c) D3, (d) D4, (e) D5, and (f) D6. The dotted area designate the 10% significance level against red noise and the cone of influence (COI) where edge effects might distort the picture is shown as checked pattern.	51
Fig. 19. Hierarchical clustering analysis from the EDI for period 1974–2008. (a) Variation of Pearson correlation coefficient between merged clusters. The number of clusters is from 1 to 59. (b) Spatial distribution of five drought clusters: 1-Central part, 2-Southern part, 3-Eastern part, 4-Jeju Island and 5-Ulung Island. Topography higher than 500m is shaded. ..	57
Fig. 20. The time series of the annual minimum EDI (solid line) and deviation of annual precipitation (dotted line) from 1979 to 2008 over 60 stations in Korea.	60
Fig. 21. Time series of daily EDI for subject drought cases (1988, 1994, and 2001; black line) and its analogous drought cases (gray line). Vertical dashed line denotes the start date of applying analog method.	64
Fig. 22. Root Mean Square Error (RMSE) of 7 years analog forecast.	65
Fig. 23. Mean RMSE of 7 years analog forecast form 75 droughts from 1962 to 2008.	65



LIST OF TABLES

Table 1. Used precipitation data.	6
Table 2. The classification of the EDI.	9
Table 3. Cluster classification results of monthly minimum EDI in East Asia.	29
Table 4. Results of PCA analysis from EDI series.	32
Table 5. The longest drought cases of each divisions.	40
Table 6. Meaning of j.	47
Table 7. The dominant periodic variation of each divisions.	52
Table 8. The explanation of each part of the daily drought code.	59



Establishment of Monitoring System, Analysis of Characteristics,
and Experiment of Prediction of Drought over East Asia

Su-Bin Oh

Department of Environmental Atmospheric Sciences, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

This study is to develop measures to deal with droughts occurring in East Asia and provide fundamental data.

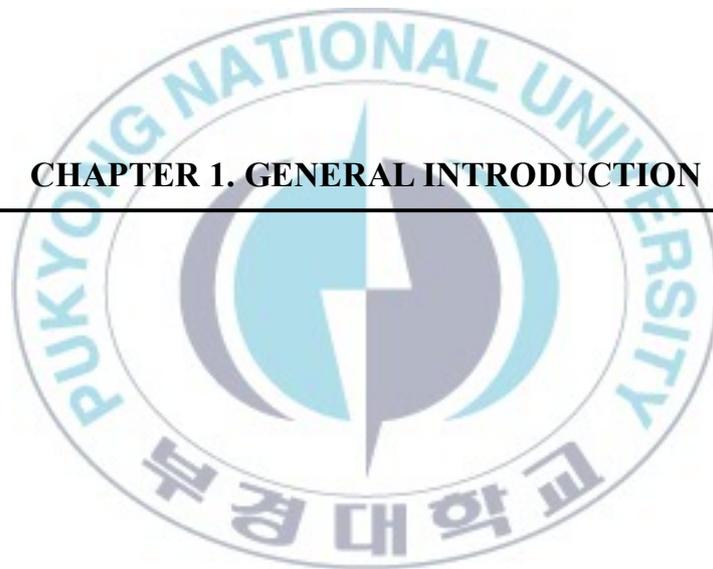
First, drought monitoring system was established to detect early and warn against droughts. Monthly precipitations during all periods of time in North and South Korea, Japan and China in East Asia were used, and spatial distribution and time series of Effective Drought Index (EDI), Available Water Resources Index (AWRI), and precipitation in Seoul, Korea since as early as 1778 were provided. In addition, text and calculation program for each were provided as well.

Second, spatiotemporal statistics were organized to be used as basic information for the study on droughts. East Asia is divided into six drought regions and spatiotemporal characteristics for each region (starting date, duration, periodicity, and simultaneity) were verified.

Third, drought prediction tests were conducted using analog method to predict drought predictability. As part of a preliminary stage for predictability, Korea was the study subject. Korea was divided into five drought regions and daily drought codes to indicate spatial temporal drought status were made. By selecting dates when actual drought and daily drought codes correspond the most similarly and monitoring drought progress, it turned out that there is about one year predictability.

Key words: Drought, drought monitoring system, drought characteristics, drought prediction

CHAPTER 1. GENERAL INTRODUCTION



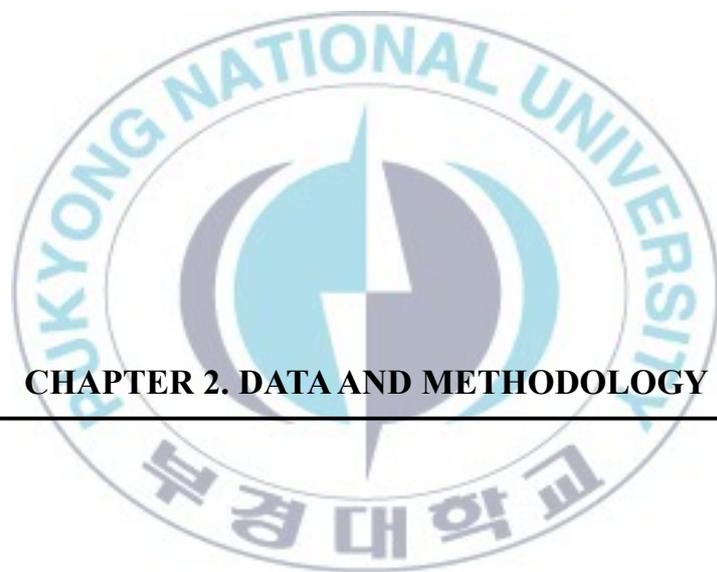
가뭇은 인류 역사 상 끊임없이 발생하여 왔으며, 사회, 경제적으로 많은

피해를 유발하는 자연재해이다. National Drought Mitigation Center (NDMC)의 발표에 의하면, 재해 유형별 연평균 피해액 중 가뭄으로 인한 피해액이 가장 큰 것으로 조사되었다. 또한 National Oceanic and Atmospheric Administration에서 선정한 20세기 최대의 자연재해 중에서, 세계 각국에서 발생한 4개의 가뭄이 상위 5위에 속한 바 있다 (NOAA, 1999). 최근 Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report에서는, 중위도 지역과 반 건조성 저위도 지역에서의 가뭄이 강도나 빈도 면에서 계속 증가하고 있다고 밝혔으며, 이와 더불어 가뭄과 관련된 질병률과 사망률 또한 증가하고 있다고 하였다 (IPCC, 2007).

이와 같이 가뭄과 그로 인한 피해가 대형화되어 가는 추세임에도 불구하고, 이에 대한 연구는 소홀하다. 지금까지의 연구들은 가뭄 발생 이후에 사례 분석을 통해서 원인을 규명하고 발생 이전에 징후를 발견하는 것에 한정되어 있으며, 이 또한 축적된 연구가 많지 않다. 이는 기초적인 통계치의 부족을 큰 원인으로 들 수 있다. 오랜 기간의 가뭄을 정량화하고 이를 바탕으로 가뭄 특성에 관하여 정리를 한다면 이후 연구에서 기초 자료

로 활용할 수 있을 것이다. 또한, 가뭄은 다른 자연 재해와는 달리 그 진행 속도가 느리고 피해 또한 점차적으로 나타나기 때문에 발생 초기에 이를 탐지한다면 대책을 마련하여 충분히 대비를 할 수 있는 재해이다. 따라서 가뭄을 주시하는 모니터링 시스템을 구축하거나, 가뭄 초기에 이후의 진행을 예측한다면 가뭄의 방재에 많은 도움이 될 것이다. 이에 본 연구에서는 동아시아 가뭄을 대상으로 가뭄 대비를 위한 모니터링 시스템 구축과 기초적인 통계치를 정리하고자 한다. 또한 예측 실험을 진행하고자 한다.

먼저, CHAPTER 2에서는 본 연구에서 사용되는 데이터와 방법에 관하여 정리하였다. CHAPTER 3에서는 동아시아 지역의 가뭄 모니터링 시스템을 구축하고자 한다. CHAPTER 4에서는 동아시아의 가뭄을 바탕으로 기후적 지역 구분을 할 것이다. 또한 각 가뭄 기후 지역이 가지는 가뭄 발생 특성을 정리하고자 한다. 특히, 가뭄 발생을 한눈에 살펴볼 수 있는 가뭄 지도는 이후 가뭄 연구에서 기초 자료로서의 활용도가 높을 것으로 보인다. CHAPTER 5에서는 가뭄 예측 실험을 진행하고자 한다. 일단은 시험적인 단계로 한국을 대상으로 시행하고자 한다.



CHAPTER 2. DATA AND METHODOLOGY

2.1. Precipitation data

2.1.1. Station data

동아시아에 속하는 4개 국가(한국, 북한, 일본, 중국)의 298개 지점의 월 강수 데이터를 이용하였다. 각 지점의 분포는 Fig. 1과 같다. Table 1은 국가 별 관측 시작 년도와 지점 수, 그리고 제공 처를 보여준다. Fig. 2는 각 년도마다 존재하는 지점 수를 나타낸 것이다. 각 지점마다 관측이 시작된 년도가 다르다. 한국, 북한, 일본, 그리고 중국은 각각 최고 1777년, 1973년, 1877년, 그리고 1842년에 강수량의 관측이 시작되었다. 가장 장기간 데이터가 존재하는 한국 서울의 1777-1907년까지의 자료는 고대 강수량 측정기인 측우기를 이용하여 측정되었다.

2.1.2. Grid data

Asian Precipitation Highly Resolved Observational Data Integration Towards the Evaluation of Water Resources (APHRODITE; Yatagai et al., 2009)에서 제공하는 1961-2004년(44년) 동안의 일 강수 데이터를 사용하였다. 이 데이터는 rain gauge data를 위·경도 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 의 격자 데이터로 만든 것이다. 본 연구에서는 동아시아 영역($105-150^{\circ}\text{E}$, $20-50^{\circ}\text{N}$)에 있는 2632개 격자의 강수 데이터를

사용하였다.

Table 1. Used precipitation data.

	ROK	DPRK	Japan	China
Start years	1777-1973	1973-1981	1877-1901	1842-1952
Number of stations	61	26	51	160
Source	KMA	KMA	JMA	BCC
Time scale	Monthly, Daily	Monthly	Monthly	Monthly

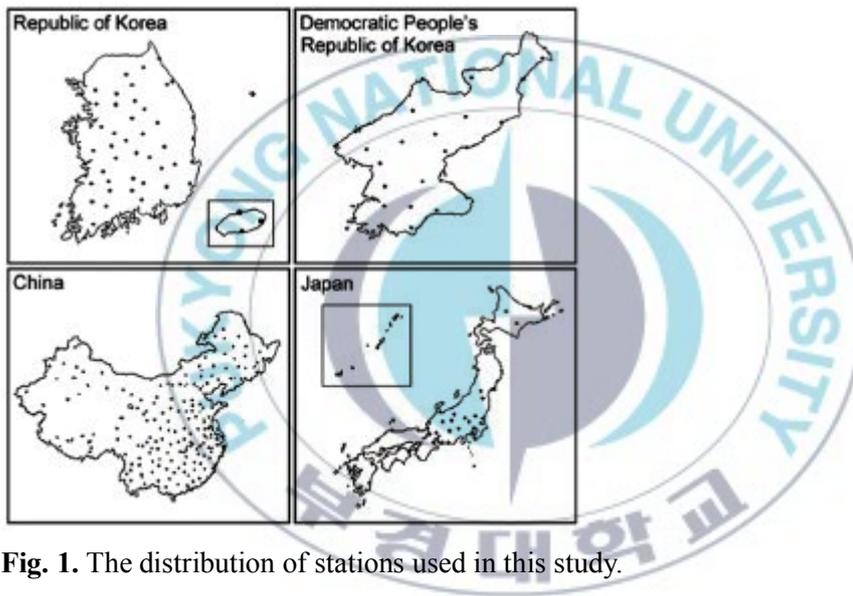


Fig. 1. The distribution of stations used in this study.

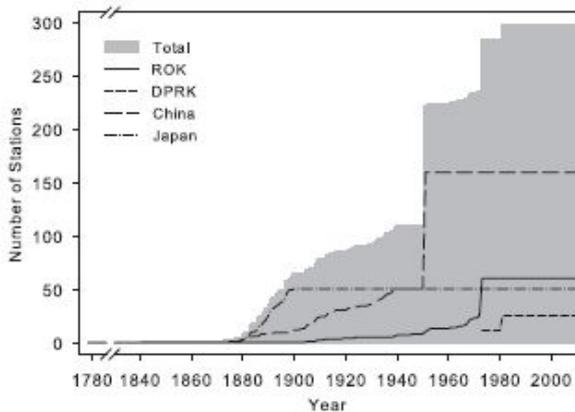


Fig. 2. The increasing number of stations per country along year.

2.2. 가뭄의 정의

가뭄 연구에 앞서 가뭄을 정확히 판단할 필요가 있다. 여기서 중요한 것은 가뭄과 물부족의 구별이다. 지금까지 가뭄과 물 부족을 구별하지 않고 혼용했음은, 가뭄 연구가 체계적으로 발전하지 못한 가장 큰 원인이 된다. 본 연구에서 사용하고자 하는 기상학적 가뭄은 강수로 인하여 생긴 수자원이 평균치에 미달하여 피해를 생기는 것이다. 하루의 호우로 10년의 가뭄이 해갈될 수도 있으므로, 기후학적 가뭄이라 하기보다는 기상학적 가뭄이라고 하는 것이 더 바람직하다. 반면에 물부족은 수요에 대한 공급의 부족이라고 볼 수 있다. 사막지방에서 물이 부족한 것은 그 지역의 평균적 자연이지, 재해가 따로 생긴 것은 아니다. 가뭄은 평소에 없던 재해가 유발되었을 때로 정의를 한다. 따라서 사막에는 가뭄이 없다고 해야 한다.

Effective drought index (EDI; Byun and Wilhite, 1999)를 이용하여 가뭄을 측

정하였다. EDI의 계산 방법은 다음과 같다.

$$EP_i = \sum_{n=1}^i \left[\frac{(\sum_{m=1}^n P_m)}{n} \right] \quad (\text{eq.1})$$

(eq. 2)

$$EDI = \frac{DEP}{ST(DEP)} \quad (\text{eq. 3})$$

(i) 강수로 인해 생긴 수자원을 시간에 따른 손실을 감안하면서 1년 이상의 기간 동안 누적한다 (eq. 1). 여기서, EP는 일 누적 유효 강수량을 의미하고, P_m은 m일 이전의 강수량을 의미한다. i는 강수량이 합산되는 기간으로, 여기서는 최소 365일부터 시작한다. 때문에 실제 가뭄 지수는 강수 시작일의 1년 이후부터 계산된다. EDI는 이와 같이 적어도 1년 이상의 기간 동안 누적된 일 EP를 이용하여 가뭄을 계산하였기 때문에, 하루의 건조가 아닌 장기간의 건조로 인하여 발생하는 가뭄의 특성을 잘 나타낸다.

(ii) 평년의 EP(MEP)로부터 Deviation of EP (DEP)를 구한다 (eq. 2). 만약 DEP가 음인 경우가 연속되면 eq. 1에서의 i는 연속된 만큼 늘어난다. 예를 들어 음의 DEP가 3일 연속되면 i는 368이 되어 다시 (i)부터 계산된다.

(iii) DEP를 표준화 시킨다. ST(DEP)는 standard deviation of each day's EP를 나타낸다. EDI의 장점은 다음과 같다. 1) 시간 누적 함수를 이용하여 현존 강수량을 효과적으로 측정하였다. 2) 가뭄 기간을 먼저 결정한 다음 가뭄 강도를 계산하여 단기가뭄뿐만 아니라 장기 가뭄도 효과적으로 표현할 수 있다. 3) 표준화된 지수이기 때문에 각각의 기후적 특성에 대해 독립적이다.

따라서 어떠한 기후 지역에서도 적용이 가능하다. 4) 일 단위를 사용하기 때문에, 가뭄의 시작, 종료, 그리고 지속 기간을 정확하게 정의할 수 있다. EDI의 의미는 Table2에서 보여준다.

Fig. 3은 가뭄 사례의 정의를 도식화한 것이다. 가뭄 사례는 음의 EDI가 연속적으로 나타난 기간 중에서 최소 EDI 값이 가뭄 기준 이하를 나타내었을 때로 정의하였다.



Table 2. The classification of the EDI.

Effective Drought Index	Classification
$EDI > 2.5$	Extremely wetter
$1.5 < EDI \leq 2.5$	Severely wetter
$0.7 < EDI \leq 1.5$	Moderately wetter
$0 < EDI \leq 0.7$	Weak wet (Normal)
$-0.7 < EDI \leq 0$	Weak drought (Normal)
$-1.5 < EDI \leq -0.7$	Moderate drought
$-2.5 < EDI \leq -1.5$	Severe drought

$EDI \leq -2.5$

Extreme drought

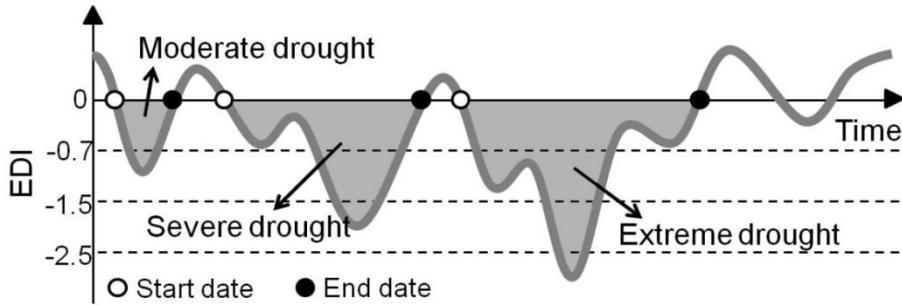


Fig. 3. Definition of drought cases.



2.3. Cluster analysis

가뭄 division 구분을 위하여 Statistical Package for Social Science (SPSS)를 이용한 군집 분석을 시행하였다. 본 연구에서 사용된 군집 분석 방법은 계층적 군집 분석 방법 중 하나인 within group linkage method이다. 이는 유사성이 가까운 순서대로 개체들을 군집화하는 방법으로, 새 개체를 기존 군

집에 포함시킬 때, 새 개체를 포함한 모든 개체간의 평균 유사성이 최대가 되는 군집에 포함한다. 이때, 유사한 정도는 각 개체간의 Pearson correlation coefficient를 계산함으로써 측정하였다.

2.4. Rotated Empirical Orthogonal Function (REOF)

Empirical Orthogonal Function (EOF)는 주어진 현상을 서로 독립적인 모드로 분해하는 방법으로, 시공간장이 직교성을 가지도록 분리함으로써 선형적으로 독립적인 패턴과 시계열을 제공한다. 하지만 패턴에 대한 물리적인 설명이 증명되지 않기 때문에 노이즈에 의한 패턴이 추출될 수도 있다. 따라서, 초기 EOF 분석의 고유 벡터에 회전을 고려하여 새로운 모드를 제공하는 Rotated Empirical Orthogonal Function (REOF)가 필요하다. REOF는 패턴을 설명하는 물리적 메커니즘이 간단하고, 지역적인 분해를 하는데 적합하다 (Horel, 1984; Richmann, 1986).

2.5. Wavelet analysis

Wavelet analysis는 주기 신호를 분석하기 위한 방법이다. 이는 시계열에서 신호의 시간에 따른 진폭과 진동수에 따른 진폭이 어떻게 변화하는지에 관한 정보를 얻음으로써 주기를 분석할 수 있다.

2.6. Analog method

Analog method는 통계적인 예측 방법 중 하나로, 현재의 기후 상태가 특정한 과거의 기후 상태와 유사하다면, 앞으로의 진행 또한 유사할 것이라는 이론에 기초하는 방법이다. 흔히 발생 원인에 대한 이해는 빈약하나 예측의 필요는 절실할 때 사용되어 온 방법이다.



CHAPTER 3. 동아시아 가뭄 모니터링 시스템 구축 소개



3.1. 서론

가뭄의 원인과 예측에 대해 연구함으로써 가뭄의 대책을 마련하려는 관심이 높아지고 있다. 하지만 가뭄의 원인은 지역과 계절마다 다르다. 그리고 가뭄의 예측에 관한 연구 중에서도 과학적으로 입증된 이론은 거의 없다. 그러므로 대부분의 국가들은 가뭄에 대비하는 가장 효과적인 방법으로 가뭄 모니터링 시스템을 통해 조기에 가뭄을 탐지하고 경보를 내리는 방법을 주로 사용하고 있다.

미국은 NDMC (www.drought.unl.edu)와 department of commerce NOAA's drought information center (www.drought.noaa.gov)에서 미국 가뭄의 공간적인 분포를 제공하고 있다. 가뭄의 강도는 Palmer Drought Severity Index (PDSI; Palmer, 1965), Standardized Precipitation Index (SPI; McKee et al., 1993), Crop Moisture Index 등을 통하여 얻어진다. 영국은 Global Drought Monitoring system (www.drought.mssl.ucl.ac.uk)을 통해 전 지구의 가뭄 현황을 제공한다. PDSI와 SPI를 이용하여 가뭄의 강도를 계산하였다. 호주는 Bureau of Meteorology (www.bom.gov.au/silo/)에서 deciles를 이용하여 호주의 water deficiency maps를 제공하고 있다. 중국은 Beijing Climate Center (www.bcc.cma.gov.cn)에서 SPI, Precipitation anomaly percent를 이용하여 중국의 가뭄 현황을 공간분포로 제공한다. 또한 전 지구와 동아시아 지역의 drought index와 flood index의 공간분포를 제공하고 있다. 이 외에도 Boken et al. (2005)에서 각 국의 가뭄 모니터링 시스템을 소개하고 있다.

하지만 지금까지의 가뭄 모니터링 시스템은 많은 한계점을 가지고 있다.

첫째, 현존하는 가뭄 모니터링 시스템들은 제한적인 자료만을 제공한다. 대부분의 시스템들은 현재 가뭄의 공간분포만을 제공한다. 이들은 가뭄의 시계열이나 지수 값을 제공하고 있지 않아서 각 지점의 정확한 가뭄 지수 값을 알 수 없다. 따라서 이용자가 각 지점의 변동성을 살펴보는데 무리가 있다. 또한 가뭄 연구자들이 연구를 하기 위해서는 다시 가뭄 지수를 계산하는 수고를 해야 한다.

둘째, 모니터링 시스템마다 다른 가뭄 지수가 이용된다. 더욱이 계산된 지수 값들이 동일하지 않다. 가뭄을 모니터링 하기 위해서는 가뭄을 정량화하는 기술이 가장 중요하다. 하지만 현재 가장 많이 쓰이고 있는 PDSI와 SPI에서도 문제점이 발견된다. 가장 많이 쓰이는 PDSI는 미국 대 평원을 기준으로 개발되어 다른 지역에 그대로 적용하는데 무리가 있다. 그리고 이것의 계산에는 강수량뿐만 아니라 증발산량, 유출량 또한 이용되기 때문에 계산이 복잡하다. 다음으로 많이 쓰이고 있는 SPI는 계산되는 기간이 연구자의 주관에 따라 달라져서 같은 날짜라도 모니터링 시스템마다 가뭄의 상태가 달라진다는 단점이 있다. 이점에 대해 Kim et al. (2009)가 면밀한 비교분석을 제시한 바 있다.

셋째, 현존하는 시스템은 단기간의 자료만을 제공한다. 대부분의 가뭄 모니터링 시스템은 2000년 이후부터의 가뭄 강도를 보여주고 있고, 실시간만을 제공하는 시스템도 있다. 이는 장기간의 데이터를 요구하는 가뭄 연구

의 특성에 맞지 않다.

본 연구에서는 위와 같은 현존하는 가뭄 모니터링 시스템의 단점을 보완하는 새로운 시스템을 만들었다. 먼저 이 시스템은 이용 가능한 모든 기간의 강수량을 이용하여 최고 1778년(한국, 서울)부터의 가뭄 지수를 표출하였고, 가뭄의 공간 분포뿐만 아니라 시계열과 지수 값을 제공한다. 가뭄의 강도는 Effective Drought Index (EDI; Byun and Wilhite, 1999)를 이용하여 계산하였다. 모든 가뭄은 강수량의 부족으로 인하여 발생하는 것이므로, EDI는 강수량만을 이용하여 계산된다. 다른 가뭄 지수와는 다르게 가뭄의 duration을 계산에 이용하고 있으며, 과거의 강수량보다 현재의 강수량에 더 가중치를 주어 정량화하였다. 그러므로 이 지수를 이용하면 가뭄을 더욱 정밀하게 측정할 수 있다. 또한 EDI는 표준화된 지수이므로 어느 기후 지역에서나 적용이 가능하다. 이러한 장점들은 앞선 연구들을 통해서 타당성이 증명되었다 (Byun and Lee, 2002; Yamaguchi and Shinoda, 2002; Morid et al., 2006; Smakhtin and Hughes, 2007; Akhtari et al., 2008). 이 뿐만 아니라 수문학적 지수인 Available Water Resources Index (AWRI; Byun and Lee, 2002)와 강수량 또한 같은 형식으로 제공한다. PGI FORTRAN(90)을 scripting languages로 이용하는 계산 프로그램도 제공하고 있어 연구자들이 쉽게 가뭄 지수를 계산할 수 있도록 하였다. 아직은 동아시아 범위에서 가뭄 모니터링을 시작하였지만 점차 영역을 확대할 예정이다.

3.2. 가뭄 모니터링 시스템

이 시스템은 가뭄과 관련된 지수들의 공간적 분포뿐만 아니라 시간적인 분포도 제공한다. EDI의 공간분포는 가뭄이 언제 어디에서 발생하였는지, 그리고 동시에 발생한 지역은 어디인지를 보여준다. 각 지점 별 EDI 시계열을 제공하고 있으므로 가장 심한 가뭄은 언제였는지, 가뭄이 어떤 추세로 변화하고 있는지 알 수 있다. 이 시스템에서 제공하는 각 지점의 지수값을 이용하여 통계적인 분석도 가능하다.

보조 자료로 AWRI와 강수량의 시공간적인 분포도 제공한다. 그러므로 이 시스템은 얼마만큼의 강수 부족으로 인하여 가뭄이 발생하였고, 이용 가능한 수자원 양은 얼마만큼 인지와 같은 수문학적 정보를 제공한다. 또한 이러한 지수를 계산하는 프로그램을 제공하고 있다. 이 프로그램은 PGI FORTRAN(90)을 scripting languages로 이용하고 있으며, 일별/월별 EDI와 AWRI의 계산이 가능하다. 그러므로 이 시스템에서 표출되지 않는 지점도 강수량만 있다면 지수를 쉽게 계산할 수 있다.

3.3. 실제 사례에 대한 응용

Fig. 4는 1778-2009년 (232년) 동안의 한국 서울 지점의 monthly EDI 시계

열을 나타낸 것이다. 1860년대 말과 1900년대 초에 EDI가 -4이하인 심한 가뭄이 있었다. 특히 1900년대에 발생한 가뭄은 EDI -4 이하의 가뭄이 1년 이상 지속되는 대 가뭄이었다.

Fig. 5a는 1990년대 한국 서울의 EDI를 나타낸다. 동아시아에서 심하게 발생했던 가뭄의 하나인 1994-1995년 가뭄이 한국 서울에서도 발생하였음을 확인할 수 있다 (Park and Schubert, 1997). 1993년 1월에서 1995년 12월까지의 한국 서울의 EDI 시계열에서 1993년 7월에 0 이하의 값을 나타내기 시작하여 26개월 동안 지속되었고, 1995년 8월에 0 이상의 값을 나타냈음을 볼 수 있다 (Fig. 5b). 이 가뭄은 한국과 일본 전역, 그리고 중국 중동부 지역에서 동시에 발생하였다 (Fig. 6a). 이 가뭄은 1994년 여름(JJA)의 강수 부족에 기인한 것으로, 가뭄이 발생한 1994년의 경우 다른 해와 비교하였을 때 여름 강수가 눈에 띄게 적었다 (Fig. 5c). 그러므로 1993년 겨울 동안의 건조함이 가뭄으로 이어졌고 1995년 여름 강수 전까지 가뭄이 심화되었다. 1994년 7월의 강수량 공간분포를 살펴보면 가뭄이 발생한 지역에 70mm 이하의 월 강수가 나타났음을 볼 수 있다 (Fig. 6b). 1990년대 한국 서울 AWRI 시계열에서도 1994년에 이용 가능한 수자원량이 적었음을 확인 할 수 있다 (Fig. 5d).

이 가뭄은 1995년 7월까지 지속되다가 1995년 8월 한국 중부지방에 700mm 이상의 월 강수가 발생하여 해갈되었다 (Figs. 4c, 7b). 하지만 Fig. 7a에서 한국 남부 해안 지방과 중국 중부 내륙 지방에서는 가뭄이 계속되고

있음을 볼 수 있다.



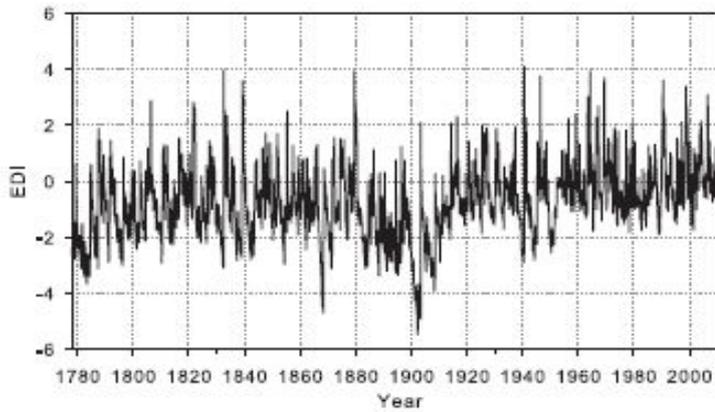


Fig. 4. Monthly series of EDI in Seoul station, Republic of Korea from Jan. 1778 to Dec. 2009.

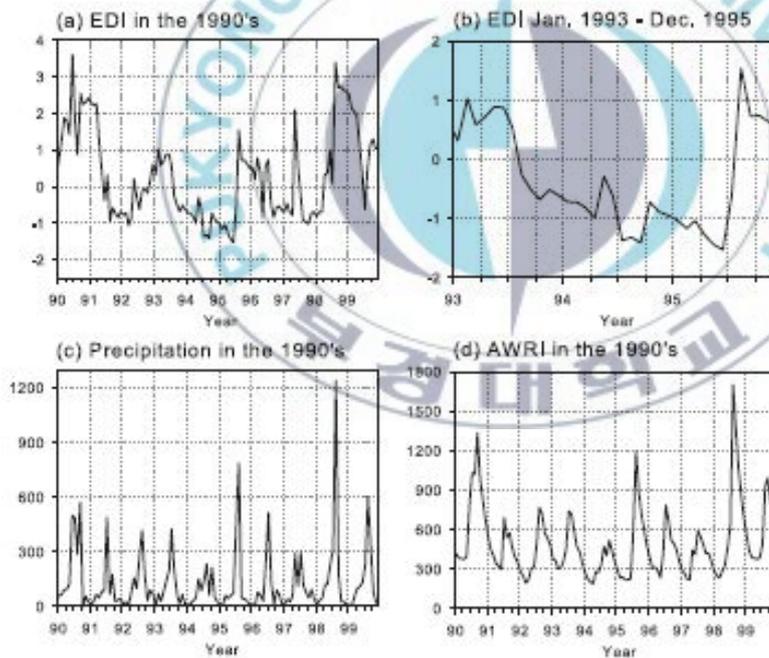


Fig. 5. Monthly series of (a) EDI in the 1990's, (b) EDI from Jan. 1993 to Dec. 1995, (c) PCN in the 1990's, and (d) AWRI in the 1990's in Seoul station, Republic of Korea.

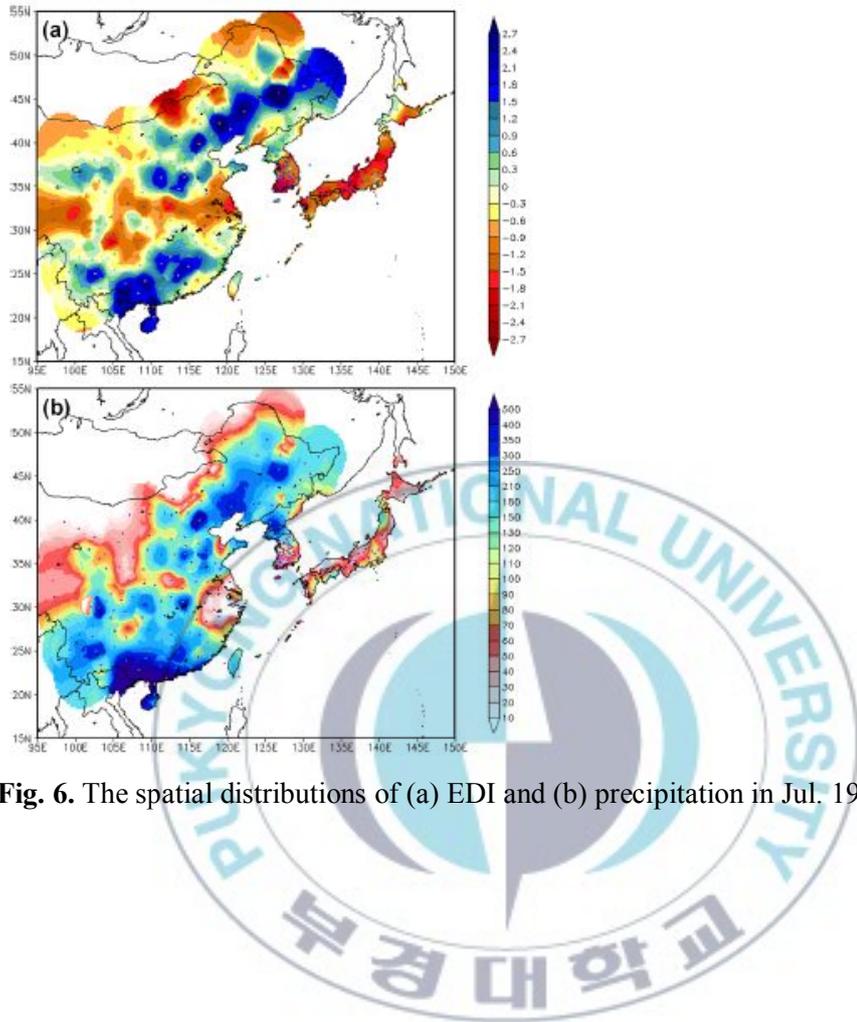


Fig. 6. The spatial distributions of (a) EDI and (b) precipitation in Jul. 1994.

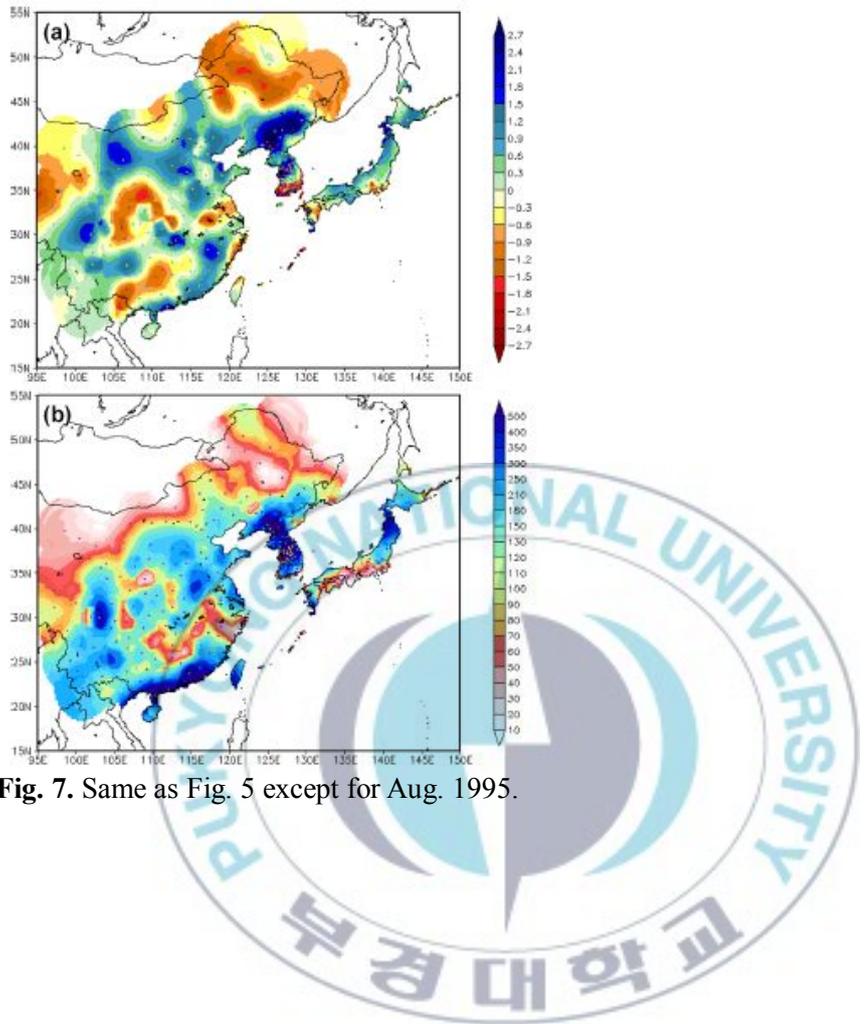


Fig. 7. Same as Fig. 5 except for Aug. 1995.

CHAPTER 4. 동아시아 가뭄의 지역 별 특성 분석



4.1. 서론

가뭄은 인류 역사 상 끊임없이 발생하여 왔으며, 사회, 경제적으로 많은 피해를 유발하는 자연재해이기 때문에, 그 피해를 최소화하기 위한 다양한 연구가 필요하다. 그럼에도 불구하고, 지금까지의 가뭄 연구는 특정 사례를 분석함으로써 원인을 찾고, 발생 이전에 징후를 발견하는 것에 한정되어 있다. 이러한 연구마저 축적된 양이 많지 않아 가뭄의 발생 원인에 대한 공통적인 결론을 내기는 쉽지 않다. 이는 가뭄에 대한 시공간적인 통계치의 부족을 큰 원인으로 볼 수 있다. 과거에 발생한 가뭄을 정량화하고, 이를 바탕으로 가뭄의 발생 특성을 총괄적으로 정리한다면, 가뭄의 원인을 분석하는데 뿐만 아니라 다가올 가뭄을 이해하는데 도움이 될 것이다.

가뭄 발생 특성을 다루는 연구는 이전에도 있어왔다. 먼저, 가뭄 발생하였을 때의 종관장을 분석함으로써 원인이나 이전 징후를 밝히고자 한 연구가 있다. 그런데, 이들은 특정 해의 가뭄 사례를 연구하거나 (Park and Schubert, 1997; Kang and Byun, 2004), 특정 계절의 가뭄 사례를 분석하는데 (Kim and Byun, 2006) 치중되어 있다. 가뭄 발생의 원격 상관에 관한 연구도 있었다. ENSO와 AO 등의 기후 지수들을 강수나 가뭄과 연관 시켜 상관성을 구하는 연구가 있었다 (Trenberth et al., 1988; Trenberth and Branstator, 1992; Lyon and Dole, 1995; Chen and Newman, 1998). 하지만 아시아의 경우 가뭄 지수와의 상관에서 부정적인 견해도 많았다 (Byun et al., 2001; Lau and Weng, 2002; Xu et al., 1994; Kim et al., 2005). 가뭄의 발생 주기에 관하여 접근한 연

구도 있었다 (Mooley, 1981; Nicholson, 1983; Meshcherskaya and Blazhevich, 1997; Byun et al, 2008). 그런데 이들은 주기성에만 초점을 맞춘 연구로서 가뭄의 시공간적 발생 특성을 정리했다고 하기엔 무리가 있다. 이렇듯 대부분의 연구들은 가뭄 발생에 관해서 시간적, 혹은 공간적으로 제한된 연구만을 진행하였다. 또한, 가뭄 그 자체에 관하여 통계적으로 정리한 연구는 찾기 어려웠다. 따라서 본 연구는 장기간 동안의 가뭄 기후를 살펴봄으로써, 가뭄의 시공간적인 발생 특성을 정리하고자 한다.

가뭄 기후를 연구하기 위해서는 먼저 가뭄을 정확히 측정하는 기술이 가장 중요하다. 하지만 현재 가장 많이 쓰이고 있는 Palmer Drought Severity Index (PDSI; Palmer, 1965)와 Standardized Precipitation Index (SPI; McKee et al., 1993)에서도 문제점이 발견된다. 가장 많이 쓰이는 PDSI의 경우, 미국 대평원을 기준으로 개발되어 다른 지역에 그대로 적용하는데 무리가 있다. 그리고 이것의 계산에는 강수량뿐만 아니라 증발산량, 유출량 등도 이용되기 때문에 계산과정의 수식이 복잡하여 명쾌하지 않고 실용성이 낮다. 다음으로 많이 쓰이는 SPI는 계산과정은 단순하지만, 가뭄 기간을 고려하지 않고 만들어졌다. 계산되는 시간이 연구자의 주관에 따라 달라지므로, 같은 가뭄 사례라 할지라도 다른 상태를 나타내곤 한다. 이점에 대해 Kim et al. (2009)가 면밀한 비교분석을 제시하였다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해, Effective Drought Index (EDI; Byun and Wilhite, 1999)를 이용하

여 가뭄을 측정하였다. 모든 가뭄은 강수량의 부족으로 인하여 발생하므로, EDI는 강수량만을 이용하여 계산된다. 다른 가뭄 지수와는 다르게 가뭄 기간을 계산에 이용하고 있으며, 과거의 강수량보다 현재의 강수량에 더 가중치를 주어 정량화하였다. 그러므로 이 지수를 이용하면 가뭄을 더욱 정밀하게 측정할 수 있다. 또한, EDI는 표준화된 지수이기 때문에 어느 기후 지역에서나 적용이 가능하므로, 동아시아 지역과 같이 광범위한 지역의 가뭄을 측정하는데 효과적이다. 이러한 장점들은 앞선 연구들을 통해서 타당성이 증명되었다 (Akhtari et al., 2008; Morid et al., 2007; Pandey et al., 2007, Ajayi and Olufayo, 2007; Smakhtin and Hughes, 2007; Morid et al., 2006; Usman et al., 2006; Boken, et al., 2005; Byun and Lee, 2002; Yamaguchi and Shinoda, 2002).

다음, 가뭄의 특징에 따른 기후 지역 구분이 필요하다. 기후 연구에서 동질성을 가진 군집들을 분류하는 것은 연구의 시작이기도 하고 그 자체가 목적이 되기도 한다. 특히, 기후적인 측면에서 동일한 기후 특성을 갖는 지역을 구분하는 연구가 많이 이루어져 왔다. 기후 지역의 분류에는 주로 통계적인 방법이 이용되는데, 최근 주로 쓰이는 방법은 군집 분석과 principal component analysis이다. 군집 분석은 어떤 대상을 객관적으로 분류하여 유사한 특성을 가지는 지역을 구분하는데 용이한 방법으로, 이전 연구들에서 기후 지역의 경계를 정의하는데 주로 이용되었다 (Moon, 1990; Fovell and Fovell, 1993; Gong and Richman, 1995; Lee and Park, 1995; Qian and Qin, 2008). principal component analysis는 자료가 가진 특성을 단순화 함으로써, 각 성분

이 가진 구조를 파악하여 기후 지역을 구분하는데 이용되었다 (Fernandez, 1995; Andrew and Glenn; 1998). 한편 군집분석과 principal component analysis를 모두 이용하여 지역 구분을 시도한 연구들도 있다 (Ronberg and Wang; 1987; Periago et al., 1991). 이 두 가지의 방법을 모두 이용하면, 기후 지역 구분의 타당성을 객관적으로 입증할 수 있다. 그런데 앞선 연구들은 모두 강수량을 이용하여 기후 지역을 구분한 것으로, 가뭄 기후 지역에 그대로 적용하기에는 무리가 있다. 이에 본 연구에서는 각 격자의 강수량을 이용하여 가뭄 지수를 계산하고, 이를 바탕으로 가뭄 기후 지역을 구분하고자 한다. 군집 분석을 이용하여 지역 구분을 한 뒤, principal component analysis를 통해 올바르게 기후 지역이 구분되었는지 확인하려 한다.

본 연구에서는 이와 같이 나누어진 가뭄 기후 지역을 기준으로, 가뭄이 언제 어디에서 발생하였는지, 얼마나 심화되었는지 한눈에 파악할 수 있는 가뭄의 시공간적인 분포 지도를 작성하였다. 이후, 각 지역들이 가지는 가뭄의 특성 (지속기간, 발생일, 동시 발생성, 주기성 등)을 살펴보았다.

4.2. 가뭄 지역 구분

4.2.1. Cluster analysis 이용

1962-2004년 (43년) 동안의 2632개 격자의 월 평균 EDI를 이용하여 군집

분석을 시행하였다. 이때, 적절한 군집 개수는 군집 수에 따른 상관 계수의 변화가 급격하게 감소하기 시작하는 구간으로 정의한다. 본 연구에서는 군집 수가 6개에서 5개가 될 때 Pearson correlation coefficient가 급격히 감소하므로, 6개를 적정 군집 수로 정의하였다 (Fig. 8).

Fig. 8는 2개에서 6개까지의 sub-regions로 나누는 군집 과정을 나타낸 것이다. 2개의 군집으로 나눈 경우, 서쪽이 동쪽보다 남쪽으로 기울어진 형태의 남북 패턴이 보인다 (Fig. 9a). 3개의 군집으로 나눈 경우, 동아시아 북부 지역이 2개의 지역, 즉 North China와 North Japan을 포함하는 동아시아의 북동부 지역 (numbered “3” in Fig. 9b)과 나머지 지역 (numbered “2” in Fig. 9b)으로 나누어 진다 (Fig. 9b). 4개의 군집으로 나눈 경우, 동아시아의 남부 지역이 South China (numbered “1” in Fig. 9c)와 Lower region of the Yangtze River, South Korea, Central/South Japan (numbered “2” in Fig. 9c)로 나누어 진다 (Fig. 9c). 5개의 군집으로 나눈 경우, Central China와 North Korea (numbered “3” in Fig. 9d)가 분리되었다 (Fig. 9d). 적정 군집 수인 6개의 군집으로 나눈 결과는 Fig. 9e에 나타난다. 각 군집에 속한 지역은 다음과 같이 정리된다; (D1) South China, (D2) Lower region of the Yangtze River, South Korea, and Central/South Japan, (D3) Central China and North Korea, (D4) Northwest China and middle region of the Yangtze River, (D5) North China, (D6) Northeast China and North Japan. 이때, 타이완은 작은 지역에서 여러 개의 가뭄 군집이 나타나므로, 어떠한 한 군집에 포함시키기 어려워 이후 연구에서 제외하였다. 또

한, 어떤 군집의 경계 내에 5개 이하의 다른 군집 격자가 속해 있을 경우에도 제외하였다. 최종적으로 각 군집에 속한 격자 수는 Table 3에서 정리하였다.



Table 3. Cluster classification results of monthly minimum EDI in East Asia.

Division	Grids	Distributions
D1	325	South China

D2	382	Lower region of the Yangtze River, South Korea, Central/South Japan
D3	435	Central China, North Korea
D4	381	Northwest China, middle region of the Yangtze River
D5	581	North China
D6	495	Northeast China, North Japan
Total	2599	

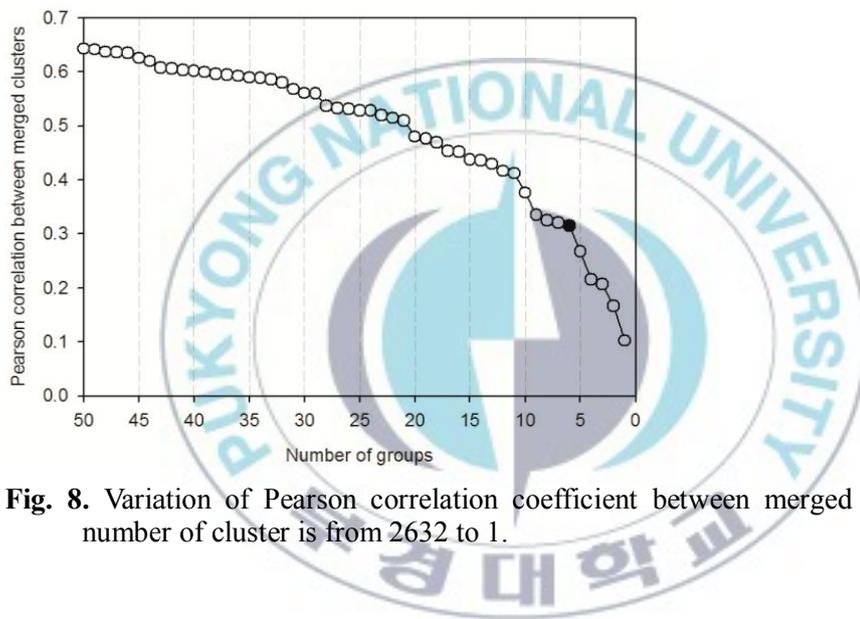


Fig. 8. Variation of Pearson correlation coefficient between merged clusters. The number of cluster is from 2632 to 1.

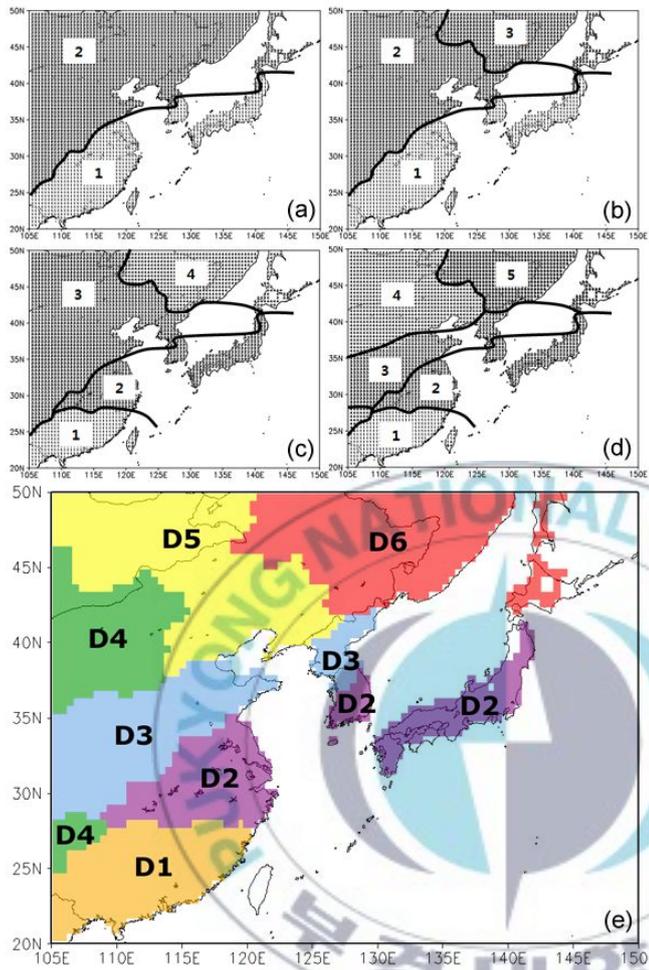


Fig. 9. Clustering process of monthly mean EDI from (a) 2-area division, (b) 3-area division, (c) 4-area division, (d) 5-area division, and (e) 6-area division.

4.2.2. REOF 분석을 이용한 검증

1962-2004년 (43년) 동안의 2632개 격자의 월 평균 EDI를 이용하여 REOF분석을 시행하였다 (Fig. 10). 전체 분산의 45.20%를 설명하는 1st에서 5th mode까지의 결과를 살펴보았다. 각 components가 설명하는 변동성과 누적된 변동성은 Table 4에서 나타난다. REOF의 결과를 이용하여, 앞서 군집 분석을 통해 나뉜 division들의 타당성 여부를 살펴보려고 한다.

D1은 3rd mode와 4th mode에서 양의 loading을 보이며 주변 지역과 구분됨을 볼 수 있다. D2와 D3은 3rd mode에서 강한 음의 loading을 보이는데, D2는 5th mode에서 음의 loading을 보임으로써 D3과 구분된다. D4는 1st mode에서 음의 loading을 보이며, middle region of the Yangtze River과 Northwest China가 같은 양상을 나타냄이 확인된다. D5와 D6은 2nd mode에서 강한 양의 loading을 나타내는데, 1st mode를 통해 서로 구분되는 지역임을 볼 수 있다.

이와 같은 결과를 통해, 군집 분석을 이용한 가뭄 division 구분이 타당성이 있음을 확인하였다. 이후 연구에서는 이 가뭄 division들을 바탕으로 동아시아의 시공간적인 가뭄 특성을 정리하고자 한다.

Table 4. Results of PCA analysis from EDI series.

Components	Explained variance	Accumulated variance
1	12.32	12.32
2	10.33	22.65
3	7.95	30.60

4	7.70	38.30
5	6.90	45.20

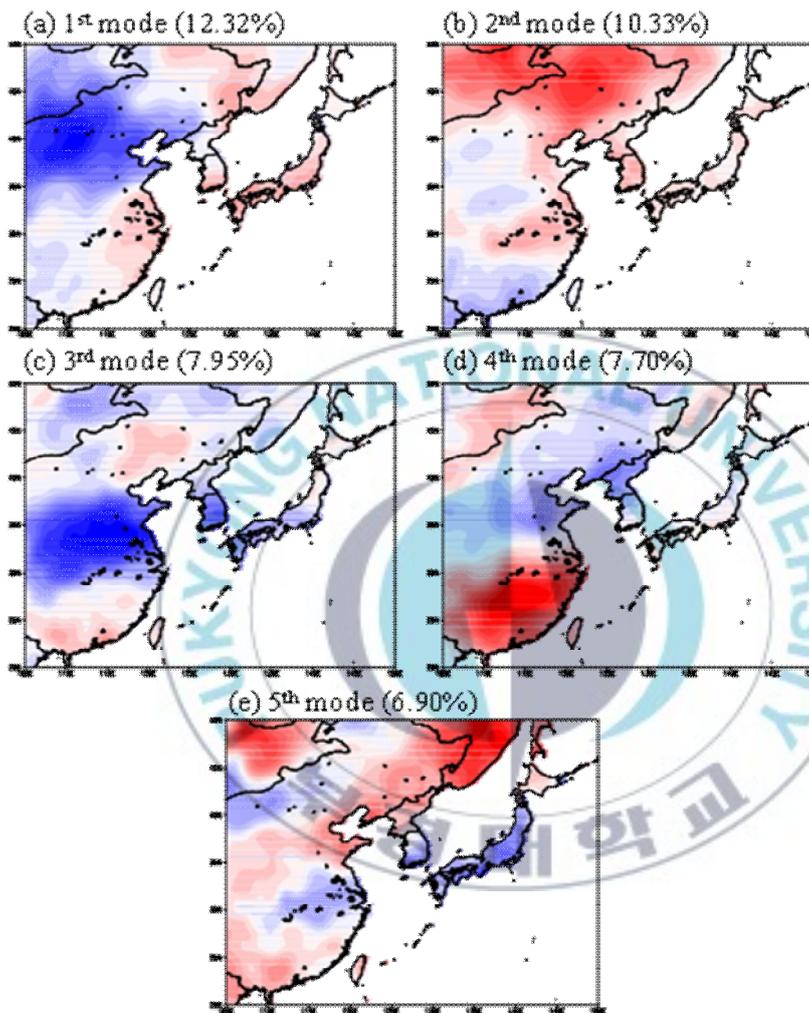


Fig. 10. Eigen vectors of (a) first, (b) second, (c) third, (d) fourth, and (e) fifth REOF modes for monthly mean EDI of 1962-2004 (43years).

4.3. 가뭄 지역들의 시공간적인 특성

4.3.1. 연 강수 사이클

Fig. 11은 1962-2004년 (43년) 동안 각 가뭄 지역에 속한 격자들의 일 평균 강수량의 연 사이클이다. 실선은 15일 이동 평균한 일 평균 강수량이고, 막대는 월별 일 평균 강수량을 나타낸다. 점선은 동아시아 전체 지역에서 평균된 일 평균 강수량 (2.21mm)이다.

모든 지역에서 공통적으로 나타나는 강수 특성을 살펴보면, 연중 강수량은 여름 (June, July, and August)에 가장 집중되어 있고, 겨울 (December, January, and February)에 가장 적게 나타났다. 그런데, 지역에 따라 강수의 양이나 피크의 개수, 피크가 나타나는 기간 등은 다르게 나타났다. 가장 뚜렷하게 구분되는 강수 피크의 특성에 따라 크게 2개로 지역들을 분류하였다.

먼저, 연중 3개의 강수 피크가 나타나는 D1, D2, D3 지역을 살펴보았다. D1과 D2의 경우, 3개의 강수 피크가 뚜렷하게 나타났다. 첫 번째 강수 피크는 4월과 5월에 각각 나타났고, 두 번째 피크는 6월, 그리고 세 번째 피크는 8월에 나타났다. 이들 두 지역은 다른 지역에 비해 겨울 강수량이 많았다. D3의 경우, D1과 D2보다 뚜렷하지는 않지만 5월, 7월, 9월에 약한 강

수 피크가 나타났다.

이후, 연중 1개의 강수 피크만이 나타나는 D4, D5, D6 지역을 살펴보았다. 이 지역들에서 강수 피크는 여름인 7월에 나타났다. 이외의 계절에서는 강수가 적게 나타났는데, 특히 D4와 D5에서는 겨울에 거의 강수가 없었다.

가뭄은 궁극적으로 강수의 부족으로 인하여 발생하기 때문에, 이러한 지역 별 강수 특징은 이후 가뭄 발생 특성을 비교하는데 영향을 줄 것으로 보인다.

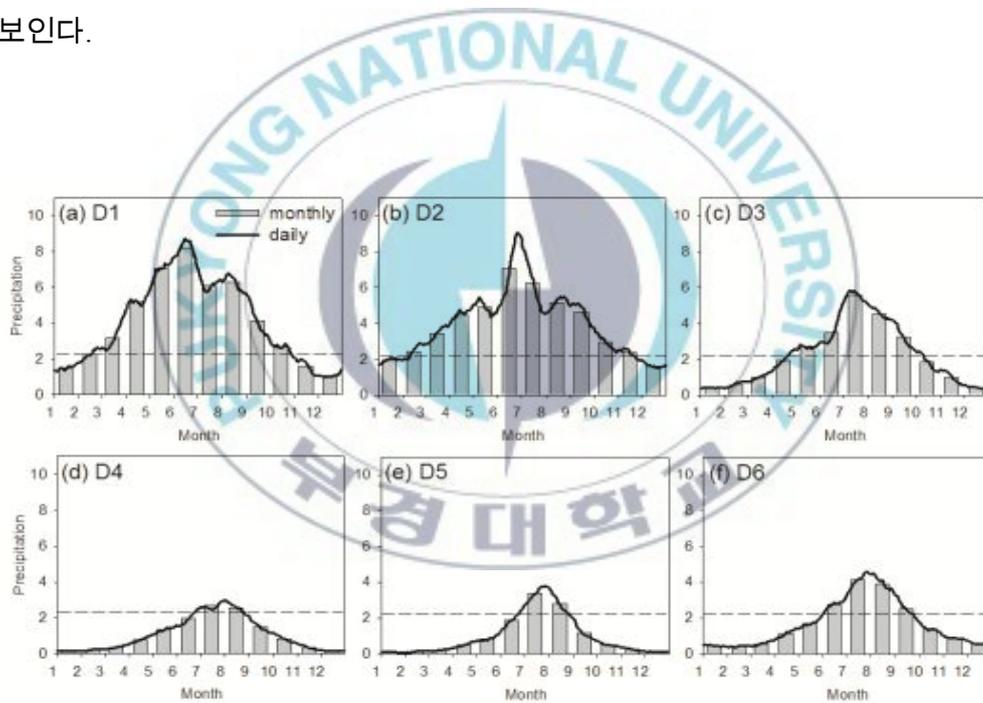


Fig. 11. The variation of 15-day running mean precipitation averaged from 1962 to 2004 through sites in (a) D1, (b) D2, (c) D3, (d) D4, (e) D5, and (f) D6. The bars denote monthly mean daily precipitation, and the dotted lines denote daily mean precipitation of East Asia (2.21mm).

4.3.2. 가뭄의 시공간적 분포 지도

가뭄 발생 특성을 살펴보기에 앞서, 동아시아에서 발생한 가뭄들을 한눈에 볼 수 있는 가뭄 분포 지도를 작성하였다. Fig. 12은 각 가뭄 지역들의 EDI값을 이용하여 1962-2004년 (43년) 동안의 가뭄 발생을 나타낸 분포지도이다. 이때, 각 가뭄 지역들의 EDI값은 지역에 속한 격자들의 일 평균 강수량을 이용하여 계산하였다. 본 연구에서는 여기서 정의된 가뭄 사례들을 이용하여 본 연구를 진행하고자 한다.

이 가뭄 지도는 그 자체만으로도 의미가 있는데, 여기서 정리된 가뭄의 시공간적인 분포는 이후의 다른 연구에서도 좋은 기초자료가 될 수 있다. 이를 이용하면 가뭄이 언제, 어디에서 발생하였으며, 얼마만큼 지속되었는지에 관한 정보를 얻을 수 있다. 또한, 특정 사례를 분석함에 있어서 이용한다면, 그 가뭄이 어느 지역에서 먼저 시작되어 어느 지역이 먼저 해결되

었는지, 가뭄이 동시에 발생한 지역은 어디인지 등을 한눈에 파악할 수 있다.

예를 들어, 동아시아 지역에서 발생한 가뭄 중에서 여러 연구자들에 의해 분석되고 있는 1982년, 1994년, 2001년의 가뭄 사례를 살펴보고자 한다. 1982년 가뭄은 동아시아 전체 지역에서 나타났는데, D1, D2, D3의 가뭄은 1982년 여름에 해결되었지만, D4, D5, D6의 가뭄은 점점 심화되어 1983년 여름에 해결되었다. 1994년에 발생한 가뭄은 D6를 제외한 나머지 지역에서 나타났다. D1, D4, D5에서 발생한 건조는 moderate drought까지 심화되었는데 1994년 여름에 바로 해결되었다. 반면에 D2와 D3에서 발생한 가뭄은 이때 해결되지 못하고 이듬해 여름이 되어서야 해결되었다. 2001년에 발생한 가뭄은 D1을 제외한 나머지 지역에서 발생하였다. D4와 D5는 1999년 여름부터 이미 가뭄이 시작되었다. 특히, D5에서는 severe drought가 약 2년 정도 지속되다가 2001년 여름에 잠시 해결되는 듯 하였지만 다시 심화되어 2002년 여름에 해결되었다. 이와 같이 가뭄 분포 지도는 각 가뭄 사례의 가뭄 발생 특성을 살펴보는 데도 유용하게 사용할 수 있다.

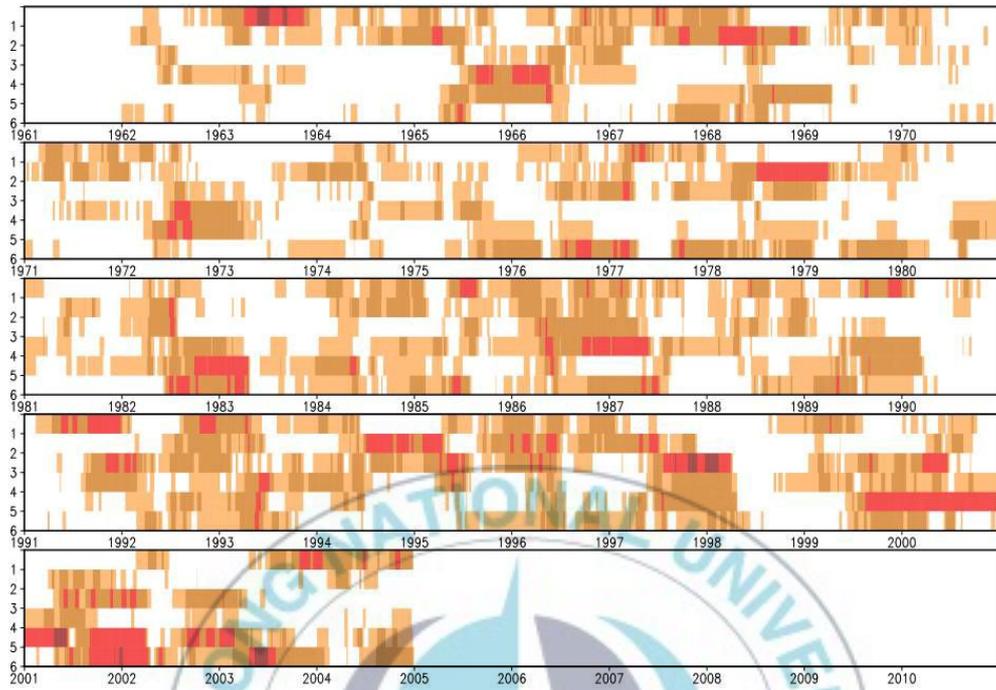


Fig. 12. Spatiotemporal distribution of daily EDI of sub-regions from 1962 to 2004.

4.3.3. 가뭄 지속 기간

Fig. 13는 각 지역들의 가뭄 사례 중에서 최소 EDI가 -0.7 이하를 나타내는 사례들의 가뭄 기간을 box plot으로 나타낸 것이다. Box plot에서 상자의

아래 경계는 제1사분위수 (Q1), 위 경계는 제3사분위수 (Q3)를 나타내고, 상자내의 수평 실선과 점선은 각각 중앙값 (제2사분위수, Q2)과 평균값을 의미한다. 상자의 위 아래에 뻗어 나와있는 두 개의 수직선은 whisker이라고 부른다. 아래쪽 whisker은 Q1에서 이상치(outlier)가 아닌 자료의 값을 나타내고, 위쪽 whisker은 Q3에서 이상치가 아닌 자료의 값을 나타낸다. 원들은 이상치를 나타낸다. x는 각 군집의 가뭄 횟수를 나타낸다. 또한, 가뭄 기간의 빈도(%)를 히스토그램으로 나타내었다 (Fig. 14).

가뭄 기간을 비교한 결과에서도 D1, D2, D3와 D4, D5, D6를 구분할 수 있었다. 중앙값은 가뭄 사례들이 어느 가뭄 기간에 치중되어 있는지 알 수 있는데, 각 지역들의 가뭄 기간의 중앙값을 비교해보면, D1, D2, D3보다 D4, D5, D6에서 더 큰 값을 가짐을 볼 수 있다. 이는 D1, D2, D3에서 발생한 가뭄이 D4, D5, D6에서 발생한 가뭄 보다 짧은 가뭄 기간을 가짐을 뜻한다. 특히, 가장 많은 가뭄 사례가 나타난 D1의 경우, 대부분의 가뭄이 200일 이하의 규모를 가짐을 볼 수 있다. 가장 적은 가뭄 사례를 나타내는 D4의 경우에는 가뭄 사례의 절반 이상이 250-300일 정도의 규모에 집중되어 있음을 볼 수 있다. 평균값의 경우, EDI가 표준화된 수치이기 때문에 지역별로 차이가 크진 않지만, 중앙값과 같이 D1, D2, D3의 평균 지속 기간이 D4, D5, D6보다 짧게 나타났다.

히스토그램에서도 유사한 결론을 얻을 수 있다. 50일 단위의 히스토그램을

살펴보면, 모든 가뭄 지역의 가뭄 기간들은 약 100일과 300일 정도에 빈도가 많이 나타남으로써 bimodal distribution을 보인다. 정도의 차이가 있기는 하지만 동아시아 전체 지역에서 동시에 나타나는 특징이었다. 그런데, 어느 가뭄 기간에 더 집중되어 있는 지에서 차이를 보였다. 200일 단위의 히스토그램을 살펴보면, D1, D2, D3는 200일 이하의 가뭄 기간이 이후보다 더 많은 빈도를 보였다. 특히, D1의 가뭄 기간은 약 78.0%의 가뭄 사례가 200일 이하에 집중되어 있었다. 그런데 D4, D5, D6의 가뭄 기간은 200일 전후가 비슷한 빈도로 나타났다. D4의 경우, 200-399일의 가뭄 기간이 1-199일의 가뭄 기간보다 더 많이 나타남을 볼 수 있다.

각 지역에서 나타난 가뭄 중에서 가장 장기간 발생한 가뭄은 Table 5에서 정리하였다. 가장 장기간 가뭄은 D5에서 발생하였는데 1999년 6월 4일부터 2001년 6월 22일까지 총 747일 동안 지속되었고, 이 기간 동안의 최저 EDI는 -2.97을 나타냈다. 그런데, 앞서 살펴본 가뭄 지도를 보면 (Fig. 12), 이 가뭄은 이후에 16일 정도 해갈되는 듯하다가 2001년 7월 8일부터 2002년 4월 10일까지 277일 동안 더 지속됨으로써 실제로는 3년 정도 지속되었다.

Table 5. The longest drought cases of each divisions.

Division	Onset date	Termination date	Drought duration	Minimum EDI
D1	1966-08-13	1968-04-04	598	-1.64
D2	1967-07-11	1969-01-23	560	-2.34

D3	1986-01-26	1987-04-26	454	-1.62
D4	1985-10-24	1987-06-18	601	-2.39
D5	1999-06-04	2001-06-22	747	-2.97
D6	2002-09-01	2004-02-18	534	-2.97

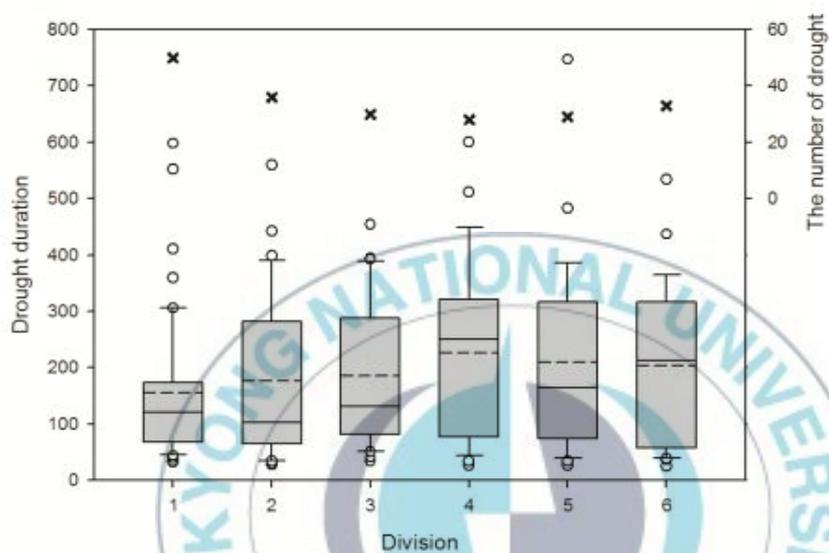


Fig. 13. Boxplots of drought duration of all division. 'x' denote the number of drought.

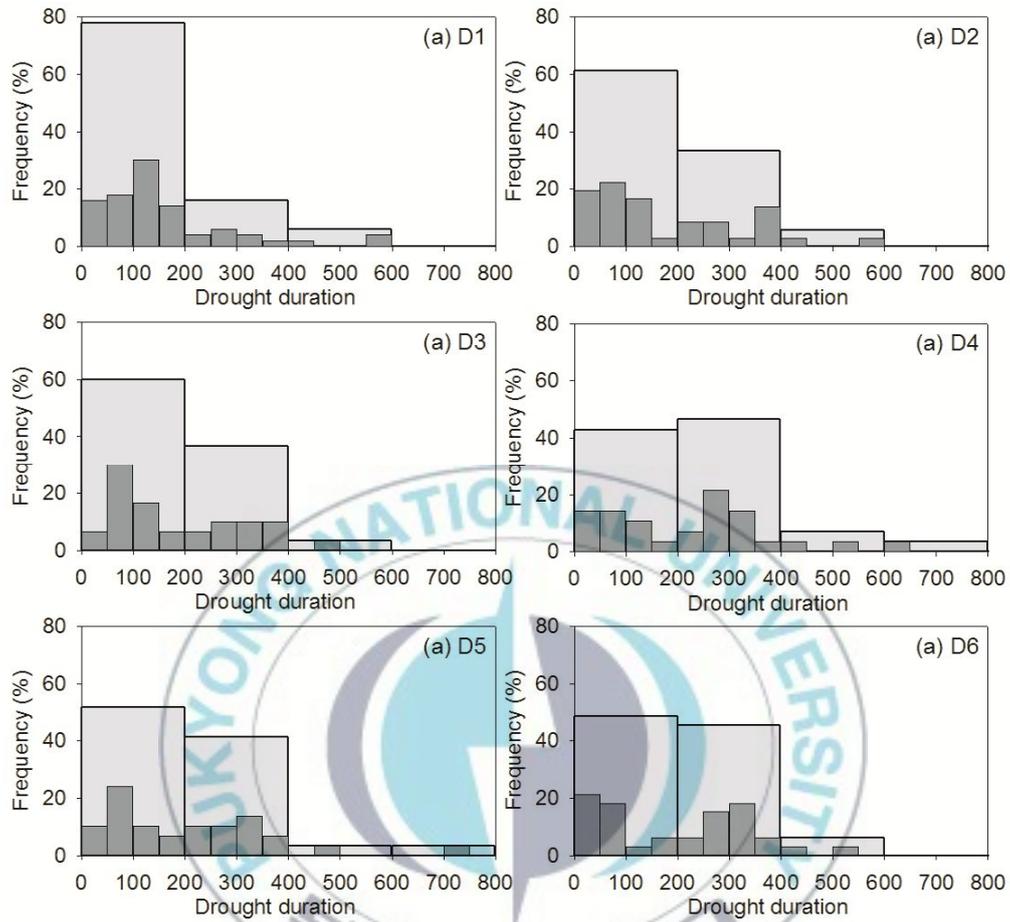


Fig. 14. Histograms of frequency of drought duration.

4.3.4. 가뭄 시작일과 지속 기간의 관계

각 가뭄 지역의 특성을 살펴보기에 앞서, 모든 가뭄 지역에서 나타나는 가뭄 발생일과 지속 기간의 특징을 살펴보았다. Fig. 15는 동아시아 내에 위치한 격자들의 EDI값을 이용하여 가뭄 사례를 정의하고, 각 가뭄 사례의 시작일과 지속 기간을 scatter plot으로 나타낸 것이다. 여기서, 반지름은 지속기간을 log-scale로 나타낸 것이고, 둘레는 가뭄의 시작일을 나타낸 것이다.

Fig. 15a는 최소 EDI가 -0.7 이하를 나타내는 가뭄 사례들의 경우이다. winter에서 early spring까지에 발생한 가뭄은 주로 100-200일의 시간 규모로 발생하였고, 100일 이하로는 매우 적게 발생하였다. mid-spring에서 late spring으로 갈수록 가뭄 기간이 점점 짧아 지는 것을 볼 수 있다. summer에서 autumn까지 발생한 가뭄들은 상당수가 100일 이하의 가뭄 기간을 가졌고, 200-400일의 가뭄 시간에서도 많은 사례들이 나타났다. 가뭄 강도에 따라 가뭄 시작일과 지속 기간을 살펴보면, moderate drought ($-0.7 \geq \text{minimum EDI} > -1.5$)는 주로 여름과 가을에 100일 이하의 시간 규모로 발생하였다 (Fig. 15b). severe drought ($-1.5 \geq \text{minimum EDI} > -2.5$)는 약 300일 정도로 발생하며 (Fig. 15c), extreme drought ($\text{minimum EDI} \leq -2.5$)는 여름에 100일 이하 또는 300일 정도로 가뭄이 지속되었다 (Fig. 15d).

각 가뭄 지역이 가지는 특징을 살펴보면 다음과 같다 (Fig. 16). D1의 경우,

moderate drought가 연중 고루 발생하였는데, 겨울과 봄에 발생하였을 경우에는 100일 이상으로, 여름과 가을에 발생하였을 경우에는 100일 이하로 지속되었다 (Fig. 16a). severe drought는 봄, 여름, 가을에 발생하였으며, 모두 100일 이상 지속되었다. Extreme drought는 1번 발생하였는데 2월에 발생하여 400일 정도 지속되었다. D2의 경우, 대부분의 moderate drought는 봄과 여름에 100일 이하로 발생하였고, severe drought는 여름과 가을에 200일 이상으로 발생하였다 (Fig. 16b). D3의 경우, 대부분의 moderate drought는 여름에 100일 이하 규모로 발생하였고, severe drought는 봄, 여름, 가을에 발생하였는데 모두 100일 이상 지속되었다 (Fig. 16c). Extreme drought는 여름에 200일 이상으로 발생하였다. D4의 경우, moderate drought가 여름에 발생하면 100일 이하로 지속되지만 가을에 발생할 경우 200일 이상의 규모를 나타내었다 (Fig. 16d). 5회 발생한 severe drought는 여름에 주로 발생하였으며, 100일 이상의 규모를 보였다. D5의 경우, moderate drought는 여름에 100일 이하로 나타났고, severe drought는 여름과 가을에 100일 이상으로 나타났다 (Fig. 16e). 1회 발생한 extreme drought는 여름에 800일의 규모로 발생하였다. D6의 경우, 여름에 발생한 moderate drought는 주로 100일 이하로 발생하였지만, 가을에 발생하였을 경우, 200일 이상 지속되는 것으로 보인다 (Fig. 16f). Severe drought는 대부분이 200일 이상의 규모로 여름과 가을에 발생하였다. 2회 발생한 extreme drought는 여름과 가을에 400일 이상의 규모로 발생하

였다.

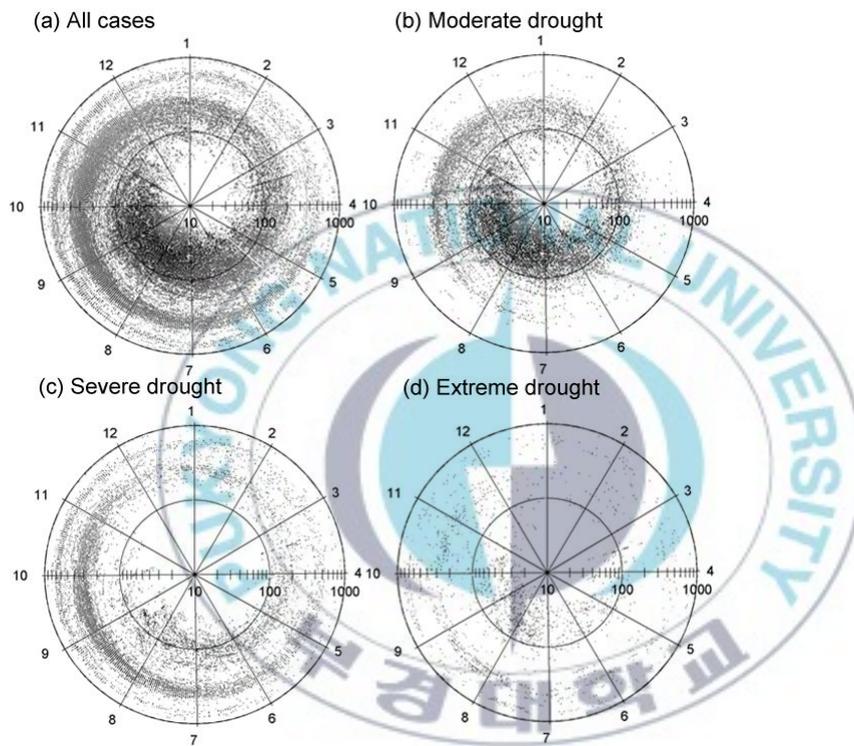


Fig. 15. Scatter plot of drought onset date against drought duration. Droughts defined by (a) all cases (minimum EDI ≤ -0.7), (b) moderate drought, (c) severe drought, (d) extreme drought over all grids from 1962 to 2004. The axis of duration (days) is in log scale. Each radial axis denotes the first day of the month.

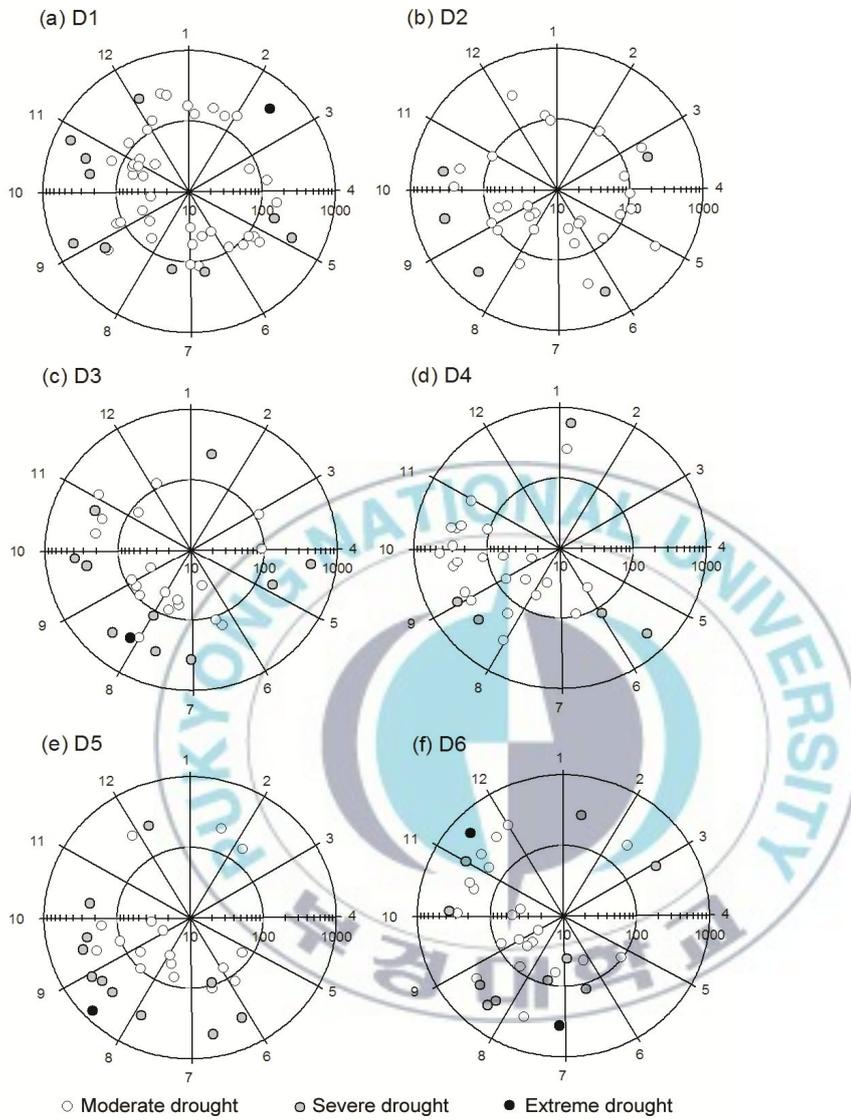


Fig. 16. Scatter plot of drought onset date against drought duration of (a) D1, (b) D2, (c) D3, (d) D4, (e) D5, and (f) D6 from 1962 to 2004. The axis of duration (days) is in log scale. Each radial axis denotes the first day of the month.

4.3.5. 동시에 가뭄이 발생하는 지역과 이후 진행

Fig. 17는 지역과 계절에 따라 가뭄이 동시에 발생한 비율과 이후 1년간의 진행을 매트릭스로 나타낸 것이다. 이를 이용하면, 어떤 계절에 어떤 지역들에서 동시에 가뭄이 발생하는지, 또한 이후 1년 동안 가뭄이 어떻게 변화하였는지 알 수 있다.

각 매트릭스를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{ij} = \begin{cases} E_{ij} & \text{if } E_{ij} < -0.7 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

여기서, i 는 지역을 나타내고, j 는 계절을 나타낸다. j 의 의미는 Table 6이다. E_{ij} 는 i -지역에서 j 계절에 최저 EDI가 -0.7 이하로 나타나 경우 (즉, 가뭄일 경우)를 뜻한다. P_{ij} 는 E_{ij} 가 가뭄일 경우 각각의 i -지역과 j 계절에 가뭄이 나타나는 비율을 나타낸다.

Table 6. Meaning of j .

j	Meaning
1	Spring
2	Summer
3	Autumn
4	Winter

5	Following spring
6	Following summer
7	Following autumn
8	Following winter

먼저, 각 지역의 가뭄 발생 특징을 살펴보았다. D1과 D6에서 발생한 가뭄은 다른 지역과는 연관성이 없는 것으로 보였다. D2에서 발생한 가뭄은 D1과 D3과 주로 동시에 발생하였다. D3에서 발생한 가뭄은 봄을 제외하고는 대부분의 계절에서 전 지역들과 동시에 발생하였다. D4에서 가뭄이 발생한 경우, D5에서도 가뭄이 발생하는 경향을 보였다. D5에서 여름에 가뭄이 발생한 경우에는 D1을 제외한 모든 지역에서 동시에 가뭄이 발생하였다. 그 외 계절에서는 D3과 D4에서 가뭄이 동시에 발생하였다.

다음, 계절 별 가뭄 발생 특징을 살펴보았다. 봄 가뭄은 대부분이 그 해 여름에 바로 해결되나, D2에서는 여름에 해결되는 듯 보였다가 이후 다시 가뭄이 지속되었으며, D5에서는 여름 강수로 해결되지 못하고 계속해서 가뭄이 지속되었다. 여름 가뭄은 3계절 이상 지속되고, 대부분이 이듬해 봄에 해결되었다. 가을 가뭄은 2계절 이상 지속되며, 이듬해 봄 또는 여름에 해결되었다. 겨울에 발생한 가뭄은 D2의 경우 이듬해 봄까지 지속되었지만, 다른 지역에서는 봄에 해결된 것을 볼 수 있다.

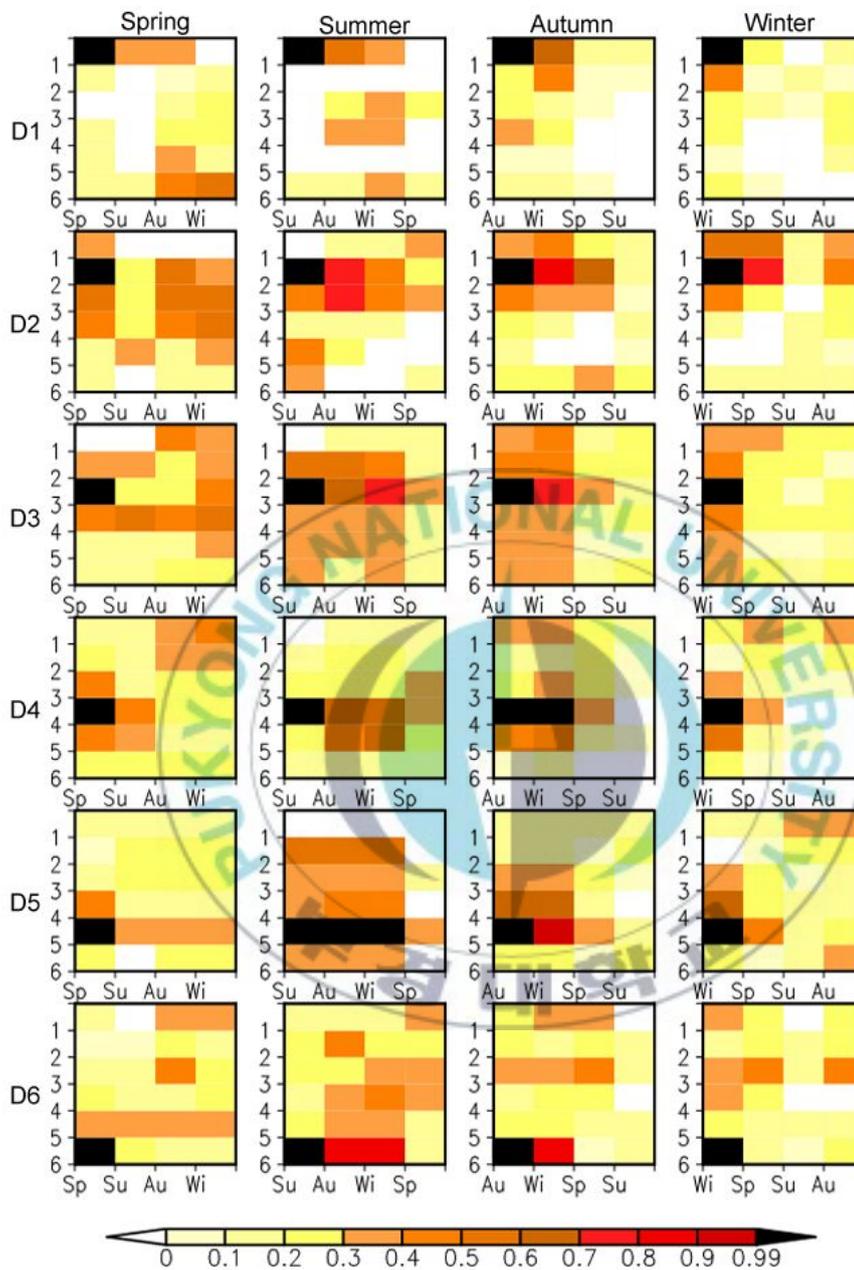


Fig. 17. The matrixes of the coincidence ratio of drought of each division and their change after 1 year.

4.3.6. 가뭄의 발생 주기

가뭄의 발생에 관하여 객관적으로 입증된 연구는 많이 부족하기 때문에 다양한 방법을 이용하여 가뭄 발생 특성에 대해 접근할 필요가 있다. 본 연구에서는 이에 대한 한 방법으로 wavelet analysis를 이용하였다. wavelet analysis를 통하여 지역들에서 발생하는 가뭄의 주기적 특성을 찾고자 하였다. Fig. 18은 1962-2004년 동안 각 지역의 월 평균 EDI값을 이용하여 wavelet analysis를 시행한 것이다. 아래쪽의 color bar는 스펙트럼의 강도를 나타내며, 그림 가운데 U자 모양의 선은 the cone of influence (COI)로 시계열을 분석할 때 자료의 처음과 끝에 생기는 오차를 표현하였다.

모든 지역에서 2-3년의 주기가 뚜렷하게 발견되었다. 이 주기가 우세하게 나타난 시기는 Table 7에서 정리하였다. 대부분의 지역에서 mid-1960s에서 mid-1970s까지와 early 1990s에서 early 2000s까지에 2-3년의 주기 성분이 뚜렷하게 나타났다. D1, D2, and D6에서는 early 1980s에서도 이 주기가 우세하게 나타났다. D2와 D6에서는 8-10년 주기의 가뭄 성분이 각각 mid-1980s에서 mid-1990s까지와 early 1970s에서 early 1980s까지 우세하게 나타났다.

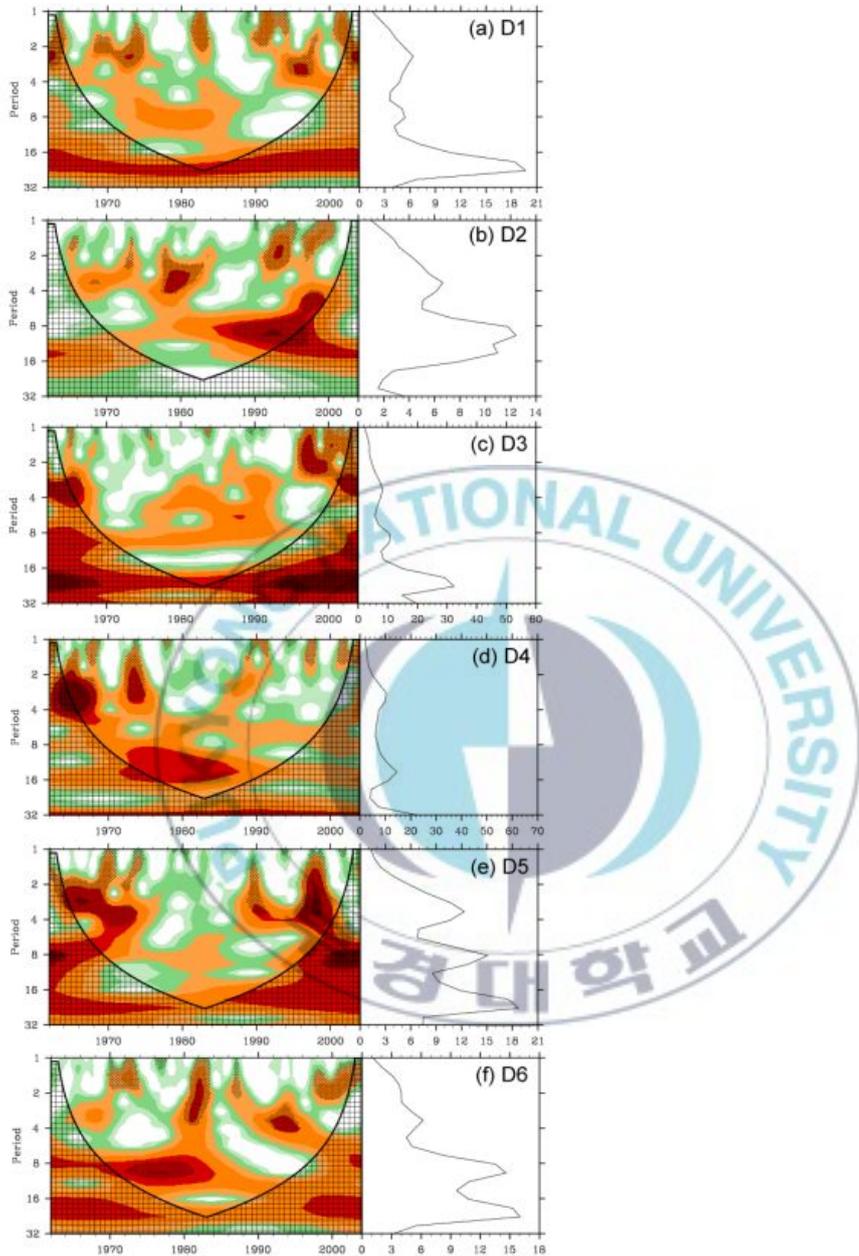


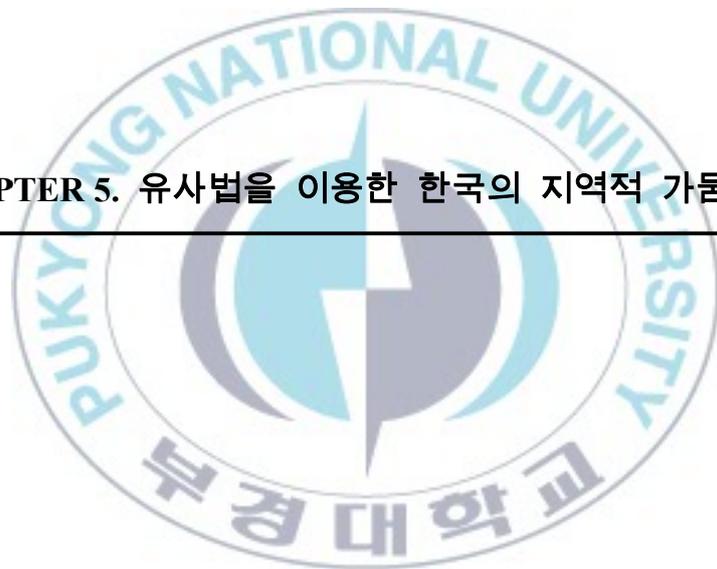
Fig. 18. Wavelet power spectrum for monthly mean EDI of (a) D1, (b) D2, (c) D3, (d) D4, (e) D5, and (f) D6. The dotted area designate the 10% significance level against red noise and the cone of influence (COI) where edge effects might distort the picture is shown as checked pattern.

Table 7. The dominant periodic variation of each divisions.

	D1	D2	D3	D4	D5	D6
2-3 years	1968-1974	1967-1969				
	1981-1983	1972-1973	1964-1967	1964-1968	1964-1973	1980-1983
	1994-1997	1977-1983	1996-2000	1972-1974	1988-1991	1990-1995
		1990-1995			1996-2000	
8-10 years		1984-1996				1972-1981



CHAPTER 5. 유사법을 이용한 한국의 지역적 가뭄 예측



5.1. 서론

가뭄은 다른 자연 재해와는 달리 진행속도가 느리고 피해 또한 점차적으로 나타나기 때문에 대비할 시간 여유가 많다. 그래서 예보 및 경보 체제가 확립되면 피해를 경감할 수 있는 여지가 많다. 그러나 아직까지 가뭄의 예측 방법으로 충분히 인정받는 이론은 없는 실정이다. 가뭄의 발생원인에 대한 연구 축적도 대단히 미흡하다. 지금까지의 가뭄 연구는 주로 사례 분석을 통해 원인을 찾고 발생 이전에 징후를 발견하는 것에 한정되는 경향이 있었다. 이러한 연구마저 축적된 양이 많지 않아 가뭄의 발생 원인에 대한 공통적인 결론을 내기는 쉽지 않다. 따라서 가뭄의 발생 사례마다 다른 원인 및 결과가 제시되며 때로는 상반된 이론이 나오기도 했다. 예를 들면, 한국의 1994년 가뭄에 관한 세 사례 연구 (Park and Schubert, 1996; Guan and Yamagata, 2003; Yoo et al., 2004)는 가뭄의 발생원인으로 각각 서로 다른 결론을 제시하고 있다. 또한 미국의 1988년 가뭄에 대한 많은 사례 연구들(Trenberth et al., 1988; Palmer and Brankovic, 1989; Qu et al., 1994; Namias, 1991)도 각기 다른 각도로 가뭄 원인을 조명하였다.

이런 상황임에도 가뭄을 예측하려는 시도는 있었다. 이는 가뭄 예측의 필요성이 절실하였기 때문이다. 하지만 가뭄 발생 원인에 대한 연구가 미흡하기 때문에 통계적인 방법이 주로 이용되었다. 구체적으로 확률 분포 (Yevjevich, 1967), markov chain model (Lohani and Loganathan, 1997; Canelliere et al., 2007), neural network (Kim and Valdes, 2003; Morid et al., 2006), low-order discrete autoregressive moving average models (Chung and Salas, 2000), seasonal autoregressive integrated moving average model (Mishra and Desai, 2005), rotated

empirical orthogonal function (Kim et al., 2005) 등의 통계로 가뭄을 예측하고자 하는 시도였다. 하지만 이 방법들도 실질적으로 가뭄 예보에 사용되었다기 보다는 연구결과를 보고하는 수준이었다.

본 연구도 통계적 방법인 Analog method로 가뭄을 예측하려는 시도이다. 이 방법은 현재의 기후 상태가 특정한 과거의 기후 상태와 유사하다면, 앞으로의 진행 또한 유사할 것이라는 이론에 기초한다. 흔히 발생원인에 대한 이해는 빈약하나 예측의 필요는 절실할 때 사용되어 온 방법이다. 이 방법은 특히 태풍의 진로예측에서 오래 전부터 사용되어 왔고, 대기 순환, 강수량, 기온 등의 장기 예보 수단으로도 활용되고 있다 (Radinovic, 1975; Christensen et al., 1981; Bergen and Harnack, 1982; Gutzler and Shukla, 1984). 그리고 이 방법은 단기예보보다 중장기 예보에서 유용함이 제시된 바 있다 (Park and Lee, 2003; Xavier and Goswami, 2007). 그래서 중장기적으로 서서히 발달하는 가뭄의 특성상 analog method는 가뭄 예측을 시작하는 한 돌파구가 될 수 있을 것이다.

지금까지 가뭄 예측에서 analog method를 이용하여 시도한 사례는 발견되지 않는다. 이는 가뭄의 기간, 공간성 등의 정의가 명확하지 않기 때문에 과거 자료들을 객관적으로 정량화하기가 힘들기 때문이었다. 본 연구에서는 이 문제를 Effective Drought Index (EDI; Byun and Wilhite, 1999)를 이용하여 부분적으로 해결하였다. 따라서 본 연구는 EDI가 다른 가뭄지수들 보다 정밀하

고 정확하다는 점 (Kim et al, 2009)에 크게 의존한다. 그러나 과거와 완전히 같은 사례가 다시 발생하는 경우는 기대하기 어렵기 때문에 analog method에 의한 가뭄의 예측은 과학적으로 신뢰성이 높은 결과를 얻기는 어렵다. 이는 지금까지 수행된 모든 analog method들이 가지는 공통된 문제점이다. 그러나 analog method의 실용적인 가치는 클 것으로 평가된다. 이 때문에 지금까지 여러 방면에서 이 방법이 사용되며 계속 유지되고 있는 것이다.

5.2. 한국 가뭄의 시공간적 패턴

가뭄의 공간적인 패턴을 살펴보기 위한 기초 자료로 가뭄 sub-regions를 정의하였다. 이를 위해 Statistical Package for Social Science (SPSS)를 이용하여, 유사성이 가까운 순서대로 개체들을 묶어서 군집화하는 방법인 hierarchical clustering analysis를 시행하였다. 유사성의 척도로는 pearson correlation을 이용한 between-group linkage method가 사용되었다. 적절한 군집의 수는 61개 지점들을 군집화 할 때 군집 수에 따른 pearson correlation coefficient의 변화가 급격하게 감소하기 시작한 구간으로 선정한다. Fig. 19(a) 에서 나타나듯이 군집 수가 5개에서 4개로 감소할 때 pearson correlation coefficient의 변화가 크므로, 본 연구에서는 5개를 적정 군집 수로 선정하였다. 61개 지점의 강수데이터가 모두 존재하는 1974년부터 2008년까지(35년)의 월별 최소 EDI를 이용하여 한국을 5개의 가뭄 군집으로 나눈 결과는 Fig. 19(b)와 같

다. 한국의 가뭄 sub-regions는 A-중부(군집1), B-남부(군집2), C-동부(군집3), D-제주도(군집4), E-울릉도(군집5)로 나타났다.

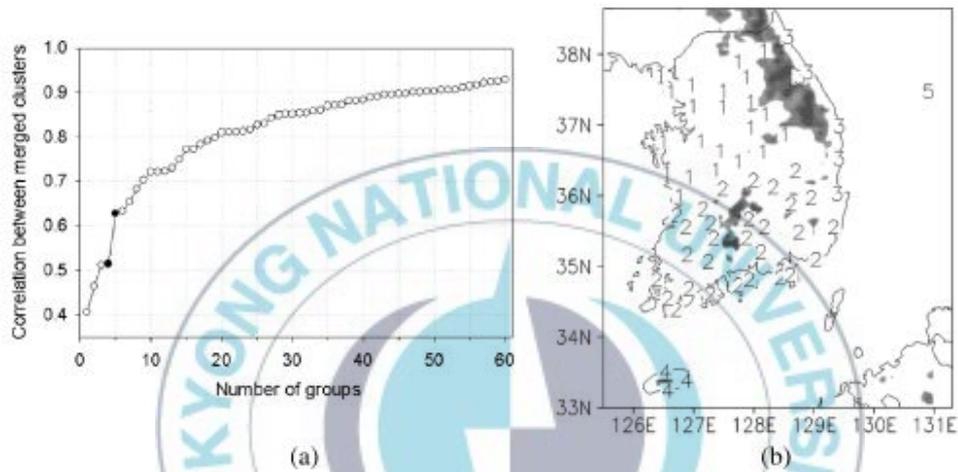


Fig. 19. Hierarchical clustering analysis from the EDI for period 1974–2008. (a) Variation of Pearson correlation coefficient between merged clusters. The number of clusters is from 1 to 59. (b) Spatial distribution of five drought clusters: 1-Central part, 2-Southern part, 3-Eastern part, 4-Jeju Island and 5-Ulung Island. Topography higher than 500m is shaded.

5.3. 유사법을 이용한 가뭄 예측 실험

5.3.1. 가뭄 코드 설계

EDI로 산출된 가뭄의 강도, 지속 기간, 공간 분포 등을 고려하여 일별 가뭄 코드를 생성하였다. 가뭄 코드에서 시간적인 특징은 전 지점 평균 EDI와 가뭄의 지속일을 통해서 얻어졌으며, 공간적인 특징은 군집 별 가뭄 등급을 이용하여 얻어졌다. 코드의 형태는 $\pm E_m C_0 A_n B_n C_n D_n$ 이며 각각의 의미는 Table 8와 같다. 이때 군집 E는 지점수가 율령도 하나만 존재하여 가뭄 군집으로서 해석에 어려움이 있어 제외하였다.

예를 들어 2008년 12월 31일의 가뭄 코드는 -1.60 131 A2B3C2D1으로 나타난다. 이는 전 지점 평균 EDI가 -1.60이고 가뭄 지속일이 131일 이며 A와 C군집은 moderate drought, B군집은 severe drought, D군집은 weak drought를 나타냄을 알 수 있다.

이때 남한의 전 지점 강수 자료는 1973년부터 존재하기 때문에 그 이전의 군집 별 가뭄 지수는 multiple regression analysis를 이용하여 1926년 1월 1일

부터 2008년 12월 31까지 얻어졌다.

Table 8. The explanation of each part of the daily drought code.

Code	Meaning
$\pm Em$	Mean EDI of total station
Co	Drought duration ($\pm Em \leq 0$)
$AnBnCnDn$	Drought class of cluster A, B, C, D Weak drought : $n=1$ Moderate drought: $n = 2$ Severe drought : $n=3$ Extreme drought : $n=4$

5.3.2. 예시 사례 선택

Fig. 20는 최근 30년(1979-2008년)동안 4개 군집(A, B, C, D) 중에서 나타나는 연중 최소 EDI와 60개 지점 전체로 평균된 연강수량의 평균 편차를 나타낸 것이다. 이때 최소 EDI와 연강수량 평균 편차의 값이 동시에 극소값을 나타내는 1988년, 1994년, 2001년을 사례 년도로서 선정하였다. 1988년의 경우 12월 30일에 B군집에서 -2.10의 최소 EDI를 나타내었다. 1994년은 1994년 10월 10일에 C군집에서 -2.35의 최소 EDI를 나타내고, 2001년은 6월 11일에 A군집에서 -2.14의 최소 EDI를 나타냈다. 사례일은 EDI 최소값이 나타나기 직전에 -1.0이하로 내려갔던 날짜를 선정하였다. 최종적으로 1988년 8월 19일, 1992년 7월 23일 그리고 2001년 5월 10일이 사례일로 선택되었다.

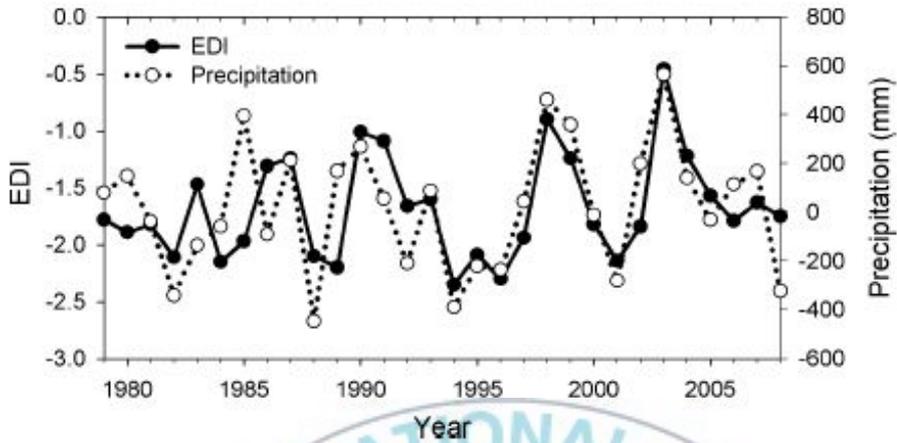


Fig. 20. The time series of the annual minimum EDI (solid line) and deviation of annual precipitation (dotted line) from 1979 to 2008 over 60 stations in Korea.

5.3.3. 유사 사례 선택

다음과 같은 3단계를 순차적으로 진행함으로써 일별 가뭄 코드에서 나타나는 시공간적인 패턴이 가장 유사한 1개의 유사사례만을 추출하였다.

Step 1) 실제사례와 공간 분포 및 발생 계절이 유사한 사례를 선택한다.

1-1) 실제사례와 군집 별 가뭄 단계($A_n B_n C_n D_n$)가 같은 사례들을 선택

1-2) 실제사례의 Julian day와 ± 30 일 이내가 차이 나는 사례들을 선택

Step 2) 같은 해에 여러 개의 유사사례가 나타나는 경우 가뭄 강도와

지속일을 고려하여 한 해 중에서 가장 유사한 하루만 선택한다.

2-1) 전 지점 평균 EDI(E_m)가 가장 유사한 사례를 선택

2-2) 가뭄 지속일(C_0)이 가장 유사한 사례를 선택

Step 3) 여러 해의 유사사례가 나타나는 경우 이전 1년 동안의 시계열을 비교하여 가장 상관계수가 높은 해를 선택한다. (본 논문에서는 언급하지 않았지만 다양한 기간을 비교하였을 때 1년이 가장 좋은 결과를 나타냈다.)

앞선 선정된 실제 가뭄 사례에 대해 analog method를 적용한 결과, 최종적으로 1988년 8월 19일(-0.93 023 A2B2C1D1)과 유사한 사례는 1992년 7월 23일(-1.14 049 A2B2C1D1), 1994년 8월 12일(-0.96 076 A2B2C2D0)과 유사한 사례는 1937년 9월 11일(-1.30 082 A2B2C2D0), 그리고 2001년 5월 10일(-0.94 036 A2B1C2D1)과 유사한 사례는 1996년 6월 7일(-0.95 034 A2B1C2D1)로 선정되었다.

5.3.4. 실험 결과

실제사례와 시공간적 패턴이 가장 유사한 사례가 이후 얼마나 유사하게 진행되는지 살펴보았다. Fig. 21는 실제 가뭄 사례에서 최소 EDI값이 나타났

던 sub-regions의 실제사례(black line)와 유사사례(gray line)의 시계열을 비교한 것이다. 1988년 8월 19일 사례는 검증일 직후 연말까지 유사연도와는 달리 가뭄이 악화된 사례이다. 이것을 제외하면 약 1년 동안 유사하게 진행되었다. 1994년 8월 12일 사례는 약 2년 동안, 그리고 2001년 5월 10일의 사례는 약 3년 동안 유사하게 진행되었음을 육안으로 확인할 수 있다. 그 이후에는 6개월 이상 다른 진행을 보였기 때문에 부분적으로 유사한 시계열이 나타났다고 할지라도 의미가 없다.

시간이 경과함에 따른 예측 가능성의 변화를 살펴보기 위하여 Root mean squared error(RMSE)를 계산하였다. RMSE는 실제사례와 예측 사례 사이의 오차를 살펴보는 데 널리 사용되는 방법으로 구하는 식은 다음과 같다.

(eq. 5)

여기서 o 는 실제로 관측된 결과값, f 는 예측된 결과값을 의미한다. n 은 예측 실험을 진행한 기간이다. RMSE의 값이 클수록 실제 값과 예측 값의 오차가 큼을 의미한다.

본 연구에서는 실제사례와 유사사례의 월 최소 EDI를 이용하여 1년씩 증가하는 기간에 따른 RMSE의 변화를 살펴보았다(Fig. 22). 1988년 8월 19일 사례의 경우 1년 이후부터, 1994년 8월 12일 사례의 경우 2년 이후부터 예측 오차가 급격히 커졌다. 2001년 5월 10일 사례의 경우 다른 사례일에

비해 전반적으로 낮은 오차를 보였지만, 이 또한 기간이 늘어남에 따라 오차가 증가하였다.

선택된 가뭄 사례 이외에도 1926년부터 2001년까지의 75개 가뭄 사례에 대해서도 예측 실험을 진행하였다. 가뭄 기간 내 최소 EDI값이 -1 이하인 사례들 중에서 처음 -1 이하를 나타낸 날짜에 대해 analog method을 적용하였다. 75개 지점의 평균 RMSE를 구한 결과 2년 이상부터 예측 오차가 급격히 커짐을 확인할 수 있다 (Fig. 22). 즉, analog method의 예측은 2년을 넘길 수 없다는 결론이다.



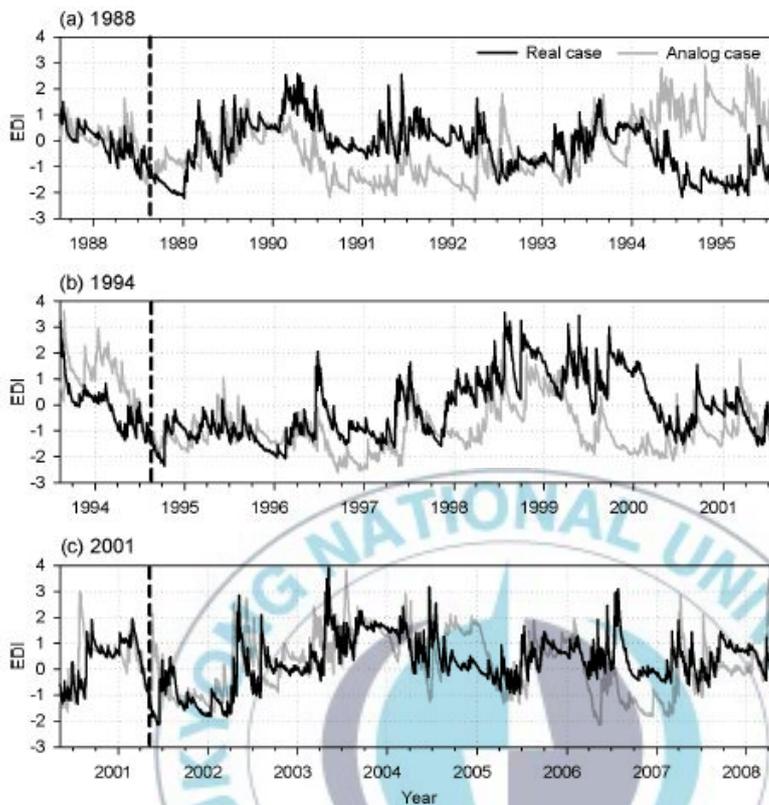


Fig. 21. Time series of daily EDI for subject drought cases (1988, 1994, and 2001; black line) and its analogous drought cases (gray line). Vertical dashed line denotes the start date of applying analog method.

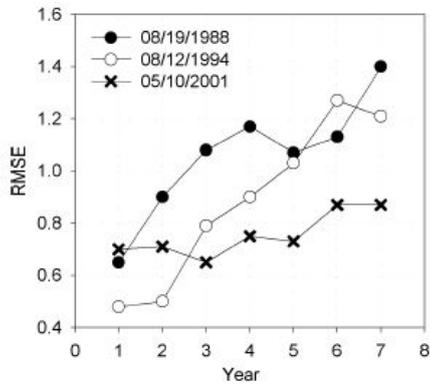


Fig. 22. Root Mean Square Error (RMSE) of 7 years analog forecast.

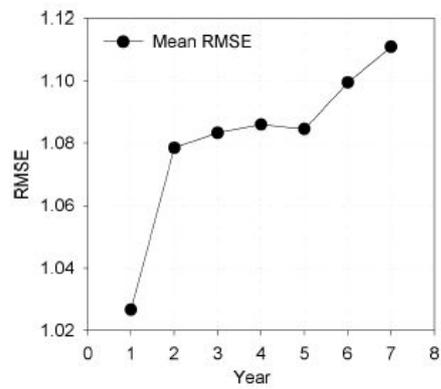
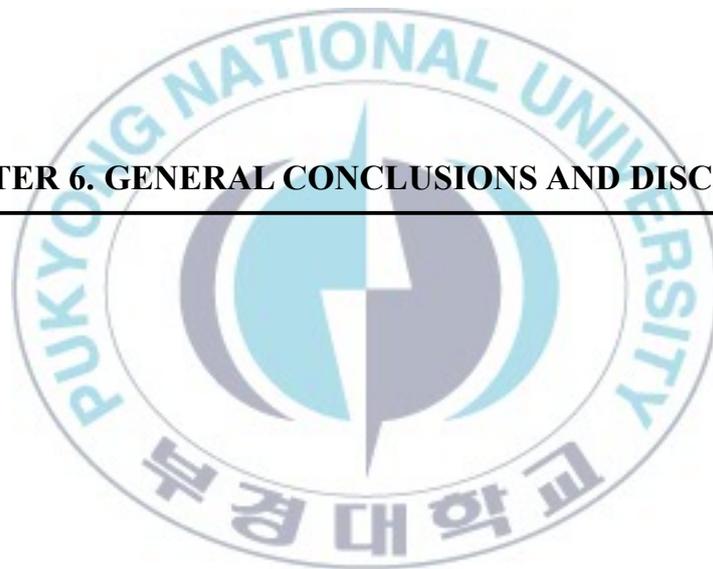


Fig. 23. Mean RMSE of 7 years analog forecast from 75 droughts from 1962 to 2008.



CHAPTER 6. GENERAL CONCLUSIONS AND DISCUSSION



본 연구에서는 먼저, 새로 개발된 동아시아 가뭄 모니터링 시스템을 소개하였다. 이는 최고 1778년부터 자료를 제공하고 있으며, 기후학적 가뭄 지

수인 EDI와 수문학적 지수인 AWRI의 시공간적 분포를 보여준다. 이 시스템의 주 장점은 다음과 같다: 1) 동아시아에서 언제 어디서 가뭄이 발생하며, 가뭄 상황이 어떻게 진행되는지 탐지하는 것을 돕는다. 2) 장기간 데이터를 사용하기 때문에, 강수 기후의 변화를 감지하는데 있어 유용하다. 3) 이후의 가뭄 연구에서 사례 선정을 돕고, 기초 자료로 이용될 것이다. 4) 매달 업데이트를 통해 얻어지는 가뭄의 진단과 평가로 동아시아 지역의 가뭄 방재에 기여할 것이다. 앞으로 이 가뭄 모니터링 시스템은 수정 및 보완될 것이다. EDI는 원래 일별 가뭄 지수이기 때문에 일 강수량을 이용하여 일별 EDI를 계산한다면 가뭄의 시작, 종료, 그리고 기간을 명확히 판단할 수 있을 것이다. 지금은 동아시아 범위에서 시스템을 구축하였지만 더욱 범위를 확장할 것이다.

둘째, 1962-2004년 (43년) 동안의 동아시아 지역 (105-150°E, 20-50°N)에서 발생한 가뭄을 EDI를 이용하여 정량화하였다. 이를 바탕으로 계층적 군집 분석을 시행하여, 동아시아를 유사한 가뭄 특성을 가지는 6개의 가뭄 지역으로 구분하였다. 이후, 지역별 EDI값을 이용하여 가뭄 분포 지도를 작성

하고, 발생일과 지속 기간 등의 특징을 살폈다.

여기서 시행된 각 지역 별 가뭄 특성 (발생일, 지속 기간 등) 분석에서는 대체로 D1, D2, D3와 D4, D5, D6가 서로 구분됨을 보였다. 가뭄은 궁극적으로 강수가 평균보다 부족하기 때문에 발생하는 것이므로, 가뭄 특성의 해석에 있어 강수 특성을 비교하는 것은 하나의 실마리가 될 것이다. 실제로, 본문에서 살펴보았듯이 D1, D2, D3와 D4, D5, D6이 연 강수 사이클은 큰 차이를 보인다. D1, D2, D3가 위치한 동아시아 남부의 경우, 동아시아 여름 몬순의 영향을 받으며, 장마 전선이 남북진동을 하는 위치이기도 하다. 때문에, 북부 지역에 비해 전체적으로 강수가 많고 연중 3개의 강수 피크가 나타나기도 한다. 그런데 D4, D5, D6가 위치한 동아시아 북부의 경우에는 여름에만 1개의 강수 피크가 나타나고 겨울 강수량은 거의 없다.

동아시아 북부와 남부의 지속 기간의 특성 비교에서 동아시아 북부가 남부보다 장기간의 가뭄 기간을 가짐을 볼 수 있는데, 이에 대해 다음과 같은 해석을 할 수 있다. 평균 강수량이 적은 곳과 많은 곳에서 같은 양의 강수가 평균보다 적게 나타났다면, 강수가 적은 곳에서 더 심한 가뭄이 발

생한다. 때문에 평균 강수량이 적은 동아시아 북부에서는 어떤 해에 평균보다 약간의 강수가 부족하면 가뭄이 심하게 발생하게 된다. 이렇게 심하게 발생한 가뭄이 해결되기 위해서는 충분한 강수가 필요한데, 원래 평균 강수량이 적기 때문에 가뭄을 해결할 만한 강수가 잘 나타나지 않는다. 따라서 장기간 지속되게 된다. 반면에 남부 지역에는 북부지역보다 전체적으로 강수량이 많기 때문에, 평년보다 약간 강수가 부족하다면 약한 가뭄이 발생하게 된다. 이런 약한 가뭄을 해결시키기 위해서는 그다지 많은 강수가 필요하지 않는데, 남부지역은 원래 강수가 많은 지역이기 때문에 평균 상태로 되돌리기 위한 강수가 충족되기 쉽다. 따라서 단기간의 가뭄이 많이 발생하는 것으로 보인다.

이는 가뭄 발생일과 지속 기간의 관계를 나타낸 scatter plot (Fig. a)에서 spiral 형태가 나타나는 이유에 대한 설명이기도 하다. 여름에는 강수가 많이 발생하는 계절이기 때문에, 약간의 강수 부족으로 인하여 발생한 가뭄이 해결되기 위한 조건이 충족되기 쉽다. 따라서 이 시기에 발생한 가뭄은 그 계절 안에 해결되어 단기간 동안만 지속되기 쉽다. 만약, 많은 강수 부

족으로 인하여 심한 가뭄이 발생하였을 경우에는 바로 해결되지 못하고, 물이 충분한 이듬해 여름직전까지 진행되기 때문에, 200-300일정도의 가뭄 기간을 나타낸다. 겨울에 강수 부족으로 인하여 발생한 가뭄은 물이 충분한 여름이 돼서야 해결되는 경우가 많기 때문에 100-200일 정도의 가뭄 기간을 주로 가지게 된다. 이러한 특징은 결과적으로 spiral 형태의 분포를 보여준다.

가뭄 발생일의 계절적인 특징을 살펴보면, 겨울에 강수가 거의 없는 지역에서는 가뭄 또한 거의 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 겨울에는 수자원이 부족하기 때문에 가뭄이라고 생각하여, 본 연구 결과에 대해 의문점을 가질 수도 있다. 가뭄 발생일의 계절적인 특징을 살펴보면, 겨울에 강수가 거의 없는 지역에서는 가뭄 또한 거의 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 가뭄에는 수자원이 부족하기 때문에 가뭄이 발생한 것이라 생각할 수 있으므로, 본 연구 결과에 대해 의문점을 가질 수도 있다. 하지만 이는 수자원 부족과 가뭄 발생의 정의가 분명히 다름을 인지하지 못했기 때문이다.

가뭄 발생은 평균보다 강수가 부족할 때 생기는 것으로, 한 예로 사막에서는 가뭄이 발생하지 않는다. 원래 강수가 부족한 겨울에는 가뭄이 잘 발생하지 않는 것도 이러한 이유다. 하지만 3번째 문단에서 설명하였듯이 원래 강수가 적은 곳에서는 평년에 비해 약간의 강수가 부족해도 가뭄이 쉽게 심화된다.

이와 같이, 본 연구에서는 가뭄 지역을 나누고 각 특성을 살펴보았다. 여기서 정리된 동아시아 지역의 시공간적인 가뭄 특성은 이후 가뭄 연구의 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다. 특히, 여기서 나누어진 가뭄 지역은, 사례 연구 등에 있어 가뭄 영역을 정의하는데 유용할 것이다. 이를 바탕으로 정리된 가뭄 분포 지도는 가뭄의 발생을 한눈에 보여줌으로써 가뭄 사례를 선정에 이용될 것이다. 또한, 시공간적으로 비슷한 유형을 가지는 가뭄들을 분류함으로써, 가뭄의 발생과 해갈 분석에도 도움을 줄 것이다. 앞서 본문에서 살펴보았던 3개의 가뭄 사례 (1982, 1994, and 2001)을 살펴보면, 각 가뭄 사례마다 시공간적인 발생 특성이 다르게 나타나는데, 가뭄이 심하게 나타난 지역을 대상으로 다양한 기후 지수들과 상관성을 구해보거나 종관

분석을 시행한다면, 각 사례들의 가뭄 원인을 파악하는데 용이할 것이다.

셋째, analog method를 이용하여 가뭄 예측을 시도하였다. 이 방법은 비록 통계적 방법이라는 한계성 내에 있기는 하지만, 1년 정도의 가뭄을 예측하는 데는 유용하다는 결과를 얻었다. 본 연구에서는 비록 EDI의 시계열을 이용하여 유사연도를 찾았지만, 가뭄의 시공간적인 분포, 종관 상태의 시공간적인 분포 등, 가뭄과 상관성이 높은 기후적 인자 등을 모두 고려하여 analog method를 적용한다면 좀 더 좋은 예측 결과를 가져올 것으로 보인다. 또 유사연도와 유사성이 급격히 변하는 날짜를 추적하는 데도 본 연구의 결과는 사용될 수 있다. 이는 가뭄의 발생원인을 찾는 데도 도움이 될 것이다. 본 연구에서 사용된 한국 가뭄의 sub-regions와 일별 가뭄 코드는 이후의 가뭄 연구에서 패턴 분류나 사례 선정 등의 기초자료로써 활용 가능성이 크다. 가뭄 코드를 기반으로 가뭄의 시공간적인 패턴에 따른 유사 가뭄 사례들을 분류하고, 사례들이 가지는 공통적인 원인과 특징을 규명한다면, 가뭄 예측에 더욱 긴요하게 이용할 수 있을 것이다.

REFERENCE

- Ajayi, A. E., Olufayo, A. A., 2007: Quantification of drought occurrence, severity and duration in some cities in Nigeria. *Geophysical Research Abstracts* 9, 10696. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-10696.
- Akhtari, R., S. Morid, M. H. Mahdian, and V. Smakhin, 2008: Assessment of areal interpolation methods for spatial analysis of SPI and EDI drought indices. *Int. J. Climatol.*, pp. 135-145.
- Andrew, C. C., and E. C. Glenn, 1998: Principal component based regionalization of precipitation regimes across the southwest United States and northern Mexico, with an application to monsoon precipitation variability. *Clim. Res.*, **10**, 201-215.
- Bergen, R. E., and R. P. Harnack, 1982: Long-range temperature prediction using a simple analog approach. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 1083–1099.
- Boken, V. K., A. P. Cracknell, and R. H. Heathcote, 2005: *Monitoring and Predicting Agricultural Drought: A Global Study*. Oxford University Press, New York.
- Byun, H. R., and D. H. Wilhite, 1999: Objective quantification of drought severity. *J. Climate*, **12**, 2747-2756.
- _____, and D. K. Lee, 2002: Defining three rainy seasons and the hydrological summer monsoon in Korea using available water resources index. *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 33-44.
- _____, K. A. Kang, and K. H. Kim, 2001: Correlations between Nino-3 anomalies and Asian Drought-Flood. *J. Kor. Met. Soc.*, **37**, 453-464.
- _____, S. J. Lee, S. Morid, K. S. Choi, S. M. Lee, and D. W. Kim, 2008: Study on the Periodicities of Droughts in Korea. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **44**, 417-441.
- Cancelliere A., G. Di Mauro, B. Bonaccorso and G. Rossi, 2007: Drought forecasting using the Standardized Precipitation Index. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, **21**, 801-819.

- Chen, P., and M. Newman, 1998: Rossby wave propagation and the rapid development of upper-level anomalous anticyclones during the 1988 U. S. drought. *J. Climate*, **11**, 2491-2504.
- Christensen, R. A., R. F. Eilbert, O. H. Lindgren, and L. L. Rans, 1981: Successful hydrologic forecasting for California using an information theoretic model. *J. Appl. Meteor.*, **20**, 706-713.
- Chung C. H. and J. D. Salas, 2000: Drought occurrence probabilities and risks of dependent hydrological processes. *J. Hydrol. Eng. ASCE*, **5(3)**, 259-268.
- Fernandez, M. G., 1995: Principal component analysis of precipitation and rainfall regionalization in Spain. *Theor. Appl. Climatol.*, **50**, 169-183.
- Fovell, R. G., and M. Y. C. Fovell, 1993: Climate Zone of the conterminous United States defined using cluster analysis. *J. Climate*, **6**, 2103-2135.
- Gong, X., and M. B. Richman, 1995: On the application of cluster analysis to growing season precipitation data in North America east of Rockies. *J. Climate*, **8**, 897-931.
- Guan Z, Yamagata T. 2003. The unusual summer of 1994 in East Asia: IOD teleconnections. *Geophysical Research Letters* 30: 1544–1547.
- Gutzler, D. S., and J. Shukla, 1984: Analogs in the wintertime 500 mb height field. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 177-189.
- Horel, J. D., 1984: Complex principal component analysis: theory and examples. *J. Appl. Meteorol.*, **23**, pp. 1660-1673.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis*, edited by S. Solomon, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.
- Kang, K. A., and H. R. Byun, 2004: On the developing processes of the climatological drought over the East Asia in 1982. *J. Kor. Met. Soc.*, **40**, 467–483

- Kim, D. W., H. R. Byun, and K. S. Choi, 2009: Evaluation, Modification, and Application of the Effective Drought Index to 200-Year Drought Climatology of Seoul, Korea. *J. Hydrol.*, **378**, 1-12.
- Kim, S., C. K. Park and M. K. Kim, 2005: The Regime Shift of the Northern Hemispheric Circulation Responsible for the Spring Drought in Korea. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **41**, 571-585.
- Kim, T. and J. B. Valdes, 2003: Nonlinear model for drought forecasting based on a conjunction of wavelet transforms and neural networks. *J. Hydrol. Eng. ASCE*, **8(6)**, 319-328.
- Kim, Y. W., and H. R. Byun, 2006: On the cause of summer droughts in Korea and their return to normal. *J. Kor. Met. Soc.*, **42**, 237-251.
- Lau, K. M., and H. Weng, 2002: Recurrent teleconnection patterns linking summertime precipitation variability over East Asia and North America. *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 1309-1324.
- Lee, D. K., and J. G. Park, 1999: Regionalization of Summer Rainfall in South Korea Using Cluster Analysis. *J. Korean Meteor. Soc.*, **25**, 203-215.
- Lohani V. K. and G. V. Loganathan, 1997: An early warning system for drought management using the Palmer drought index. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, **33(6)**, 1375-1386.
- Lyon, B., and R. M. Dole, 1995: A diagnostic comparison of the 1980 and 1988 U. S. summer heat wave-droughts. *J. Climate*, **8**, 1658-1675.
- McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist., 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, CA. American Meteorological Society. pp.179-184.
- Meshcherskaya, A. V., and V. G. Blazhevich, 1997: The Drought and Excessive Moisture Indices in a Historical Perspective in the Principal Grain-Producing Regions of the Former Soviet Union, *J. Climate*, **10**, 2670-2682.

- Mishra A. K. and V. R. Desai, 2005: Drought forecasting using stochastic models. *Stochastic Environ. Res. Risk Assess.*, **19**, 326-329.
- Mooley, D. A., 1981: Probability Model for Droughts in Ancient China, *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 191-194.
- Moon, Y. S., 1990: Division of precipitation regions in Korea through the cluster analysis. *J. Korean Meteor. Soc.*, **26**, 203-215.
- Morid, S., V. Smakhtin, and K. Bagherzadeh, 2007: Drought forecasting using artificial neural networks and time series of drought indices. *Int. J. Climatol.*, **27**, 2103-2111.
- _____, V. Smakhtin, and M. Moghaddasi, 2006: Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *Int. J. Climatol.*, **26**, 971-985.
- Min S. K., W. T. Kwon, E. H. Park, and Y. Choi, 2003: Spatial and temporal comparisons of droughts over Korea with east Asia. *Int. J. Climatol.*, **23**, 223-233.
- Namias, J., 1991: Spring and summer 1988 drought over the contiguous United States-Causes and prediction. *J. Climate*, **4**, 56-65.
- Nicholson, S. E., 1983: Sub-Saharan Rainfall in the Years 1976-80: Evidence Continued Drought, *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 1646-1654.
- Palmer, T. N., and C. Brankovic, 1989: The 1988 United States drought linked to anomalous sea surface temperature. *Nature*, **338**, 54-57.
- Pandey, R. P., B. B. Dash, S. K. Mishra, and R. Singh, 2007: Study of indices for drought characterization in KBK districts in Orissa (India). *Hydro. Proce.*, **22**, 1895-1907.
- Park, C. K., and S. D., Schubert, 1997: On the Nature of the 1994 East Asian Summer Drought. *J. Climate*, **10**, 1056-1070.
- Park, W. H. and J. G. Lee, 2003: Long-range Forecast using Analog/Anti-analog Method with GDAPS Forecasts. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **39**, 491-501.

- Periago, M. C., X. Lana, C. Serra, and G. F. Mills, 1991: Precipitation regionalization: An application using a meteorological network in Catalonia. *Int. J. Climatol.*, **11**, 529-543.
- Qian, W., and A. Qin, 2008: Precipitation division and climate shift in China from 1960 to 2000, *Theor. Appl. Climatol.*, **93**, 1-17.
- Qu, J., M. L. Sestak, A. R. Riebau, L. R. Smith and D. Ouren, 1994: A study of El Nino and Southern Oscillation (ENSO) impact on drought and wetness in the Western United States. *6th Conf. on Clim. Var.*, Nashville Tennessee, January **23-28**, 101-104.
- Radinovic, D., 1975: An analogue method for weather forecasting using the 500/1000 mb relative topography. *Mon. Wea. Rev.*, **103**, 639—649.
- Richman, M. B., 1986: Review article, rotation of principal components. *J. Climate*, **6**, 293-355.
- Ronberg, B., and W. C. Wang, 1987: Climate patterns derived from Chinese proxy precipitation record: An evaluation of station networks and statistical techniques. *J. Climate*, **7**, 391-416.
- Smakhtin, V. U., and D. A. Hughes, 2007: Automated estimation and analyses of meteorological drought characteristics from monthly rainfall data. *Environ. Model. Software.*, **22**, 880-890.
- Trenberth, K. E., G. W. Branstator, and P. A. Arkin, 1988: Origins of the 1988 North American drought. *Science*, **242**, 1640-1645.
- _____, _____, and P. A. Arkin, 1988: Origins of the 1988 North American drought. *Science*, **242**, 1640-1645.
- Usman, M., E. Archer, P. Johnston, and M. Tadross, 2006: A conceptual framework for enhancing the utility of rainfall hazard forecasts for agriculture in marginal environments. *Natural Hazards*, **34**, 111-129.
- Xavier, P. K., and B. N. Goswami, 2007: Analog method for realtime forecasting of summer monsoon subseasonal variability, *Mon. Weather Rev.*, **135**, 4149-4160.
- Xu, Z. X., K. Takeuchi, and H. Ishidaira, 2004: Correlation between El Nino-

- Southern Oscillation (ENSO) and precipitation in South-east Asia and the Pacific region. *Hydrol. Process*, **18**, 107-123.
- Yamaguchi, Y., and M. Shinoda, 2002: Soil moisture modeling based on multiyear observations in the Sahel. *J. Appl. Meteo.*, **41**, 1140-1146.
- Yatagai A., O. Arakawa, K. Kamiguchi, H. Kawamoto, M. I. Nodzu, A. Hamada, 2009: A 44-year daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. *SOLA*, **5**, 137-140.
- Yevjevich V., 1967: An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. Hydrology Papers Colorado State University, Fort Collins.
- Yoo, S. H., C. H. Ho, S. Yang, H. J. Choi, and J. G. Jhun, 2004: Influences of tropical western and extratropical Pacific SST on East and Southeast Asian climate in the summers of 1993-94. *J. Climate*, **17**, 2673-2687.



감사의 글

석사 생활을 마무리하며 지난 시간들을 돌아보니 많은 아쉬움과 후회가 남습니다. 학업적 성취에 있어서의 아쉬움뿐만 아니라, 고마운 분들께 마음을 제대로 전하지 못했기에 더욱 그러한 것 같습니다. 이 작은 지면을 빌어 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저, 제 인생에 있어 방향을 잡아주시고, 세심한 지도와 많은 격려로 이끌어주신 변희룡 교수님께 진심으로 감사 드립니다. 제가 학문적으로나 인성적으로 성장하고 도전할 수 있는 자극과 가르침을 주셨습니다. 교수님의 말씀을 항상 가슴에 새기고 앞으로의 연구와 삶에서 항상 노력하며 살겠습니다. 또한 논문 심사 과정에서 아낌없는 지도로 많은 가르침을 주신 오재호 교수님, 김재진 교수님께도 감사 드립니다. 매 학기마다 큰 열정으로 심도 있는 강의를 해주신 정형빈 교수님, 이동인 교수님, 권병혁 교수님, 옥곤 교수님께도 감사 드립니다.

다음으로, 7년의 세월을 같이 보낸 방재기상연구실의 선후배님들께 감사의 마음을 전하고자 합니다. 병환선배, 장호선배, 혜영선배, 모랑선배, 명주선배, 상은선배, 기선선배, 기훈선배, 동일선배, 경아언니, 민선언니, 기철선

배, 상민선배, 태희언니, 도우선배, 유원언니, 영임언니, 갑영선배, 순주언니, 성호선배 모두 감사 드립니다. 또한, 언급하지 못한 방재기상연구실을 이끌어주셨던 많은 선배님들께도 감사 드립니다. 같이 졸업을 앞둔 호성선배와 지선이에게도 감사의 마음을 전합니다. 고마운 동기와 후배 - 진아, 지윤, 보라, 민규, 소라, 태웅, 상아, 하림, 수정이에게도 고마움을 전합니다. 모든 방재기상연구실 식구들의 앞날에 좋은 일만 가득하기를 기원합니다.

힘든 시간들을 같이해준 동기와 친구들에게도 고마움을 전합니다. 가장 큰 힘이 되어준 고마운 친구 유진이와 보고만 있어도 든든한 동기들 희경, 정현, 수현, 자린, 수재, 신우, 윤성이 오빠, 희욱이, 호진이, 민성이에게도 고마움을 전합니다. 평생을 같이 해온 사랑하는 친구 민아, 은정이, 미소, 생각만해도 힘이 나는 친구들 은리, 은혜, 미현, 현택이, 창윤이, 윤민이에게도 고마움을 전합니다. 힘든 시기에 활력이 되어준 으뜸지기 식구들에게도 감사의 마음을 전합니다.

과학에 대한 흥미와 하늘에 대한 동경을 저에게 심어주신 전부희 선생님께 진심으로 감사 드립니다. 부족한 제자를 잊지 않고 보듬어주시는 구명술 선생님께도 감사 드립니다. “가슴이 따뜻한 과학자가 될 것이라 믿어 의심치 않는다.”- 동환쌤께도 진심으로 감사 드립니다.

사랑하는 가족들에게도 감사의 마음을 전합니다. 항상 믿어주시고 응원 해주시는 어머니, 아버지, 착한 동생 예빈이, 따뜻한 응원을 아끼지 않으시는 큰이모, 큰이모부, 서울이모, 서울이모부, 작은 삼촌, 그리고 조카의 졸업을 누구보다도 기뻐하셨을 하늘에 계신 큰 삼촌께 작은 결실인 이 논문을 바칩니다.

마지막으로 지면을 통해서 언급하지는 못했지만, 저를 아끼고 사랑해주신 모든 분들께 다시 한번 진심으로 감사 드립니다.

