북한의 지역별 기상학적 가뭄의 평가와 유형분류

Assessment and Classification of Meteorological Drought Severity in North Korea

유승환* · 남원호* · 장민원** · 최진용***,†

Yoo, Seung-Hwan* · Nam, Won-Ho* · Jang, Min-Won** · Choi, Jin-Yong***,†

Abstract

North Korea is one of the most vulnerable countries of the world for drought but still it is difficult to find scientific researches for understanding of the drought characteristics. This study analyzed the temporal and spatial distribution of meteorological drought severity and classified the drought development types in North Korea. All eleven drought indices were tested such as seasonal rainfall, PDS, SPI and so on, and then drew the drought risk map by each indicator using frequency analysis and GIS(Geographic Information Systems) for twenty one meteorological stations. In addition meteorological drought characteristics in North Korea was classified to six patterns on Si/Gun administrative units using cluster analysis on the drought indicators. The cluster III has the strongly drought-resistant area due to sufficient rainfall and the cluster V was considered as the most drought-vulnerable area, Pungsan and Sinpo, because of the severest drought condition for eight drought indicators. The results of this study are expected to be provided for the basic understanding of regionalized drought severity and characteristics confronting the risk of drought from climate variations in North Korea.

Keywords : drought indicator, SPI, PDSI, cluster analysis, North Korea

I. 서 론

북한은 전 세계적으로 가뭄에 가장 취약한 국가들 중의 하나로써 수자원 부존량이 많지 않고 관개기반도 열악하기 때문에 가뭄이 발생하면 치명적 피해를 입을 수밖에 없었다. 특히 북한지역에서 발생했던

1999년과 2001년의 장기가뭄은 농작물 수확량의 감소와 심각한 식량부족을 불러왔고(FAO/WFP, 2001), 우리나라가 북한의 농업과 생산기반에 대한 실태 파악에 적극적인 관심을 갖는 계기가 되었다. 그러나 아직도 북한지역 가뭄위험과 피해에 대한 체계적인 조사와 분석이 제대로 이루어지지 못하는 실정이다. 북한의 기상, 수문, 토양, 그리고 통계 등과 같은 자료의 접근이나 품질에 있어서 제한이 있기 때문이기도 하지만 북한 재해에 대한 우리의 접근 방식이 여전히 대외 의존적이고 거시적 수준에 머물렀기 때문이다. 실질적인 가뭄대책을 수립하고 대응 전략을 만들기 위해서는 조금 더 구체적으로 북한 가뭄 발생의 특성과 피해에 대한 이해가 필요하다. 따라서 이

* 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 대학원

** 경상대학교 농업생명과학연구원 책임연구원

*** 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 조교수

† Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4583

Fax: +82-2-873-2087

E-mail address: iamchoi@snu.ac.kr

2008년 1월 13일 투고

2008년 6월 11일 심사완료

2008년 6월 11일 게재확정

를 위한 연구가 무엇보다 우선되어야 한다.

Wilhite와 Glantz(1985)는 가뭄을 기상학적 가뭄, 기후학적 가뭄, 농업적 가뭄, 대기학적 가뭄, 수문학적 가뭄, 사회경제적 가뭄 등의 6개 범주로 구분하였는데, 우리나라에서는 강수량 등의 기상조건을 분석하는 방법에서부터 저수량과 유역 유출량, 그리고 토양수분 등의 수문학적 조건들로 가뭄을 분석하는 방법들까지 가용수자원에 영향을 미치는 조건들을 중심으로 많은 연구들을 진행하여 왔고 다양한 정보들을 생성하고 농업수리기반 관련 정책과 관리에 반영하고 있다(장민원 등, 2003). 박성우 등(1982)은 한 발 기준년 재조정의 연구에서 과우량과 과우일수란 개념을 적용하여 가뭄의 빈도표와 과우량에 따른 빈도별 등우량 일수도를 제시하였다. 윤용남 등(1997)은 우리나라 지역별 특성을 반영하기 위해 PDSI와 기후 특성인자의 선공공식을 국내 기상자료를 이용하여 수정하고 적용하여 전국적인 가뭄지수도를 작성한 바 있다. 또한 김상민과 박승우(1998)는 자료기간 25년 이상의 54개 기상관측소의 기상자료를 이용하여 주요 가뭄기간에 대해 시간 간격에 따라 SPI와 PDSI를 적용하고 각각의 통계적 특성을 고찰하였다. 박기욱 등(2006)은 PDSI(Palmer Drought Severity Index), CMI(Crop Moisture Index), SPI(Standardized Precipitation Index), Percent of Normal, Deciles, Percent of Median 등의 6가지 가뭄지수에 대한 과거 가뭄 발생 상황과 적정성을 검토하고, 이를 통하여 농업가뭄지표를 선정하고 적용성을 살펴보았다. 또한 이주현 등(2006)은 PDSI, SPI 및 MSWSI(Modified Surface Water Supply Index)의 가뭄지수들이 가뭄 감시를 위한 가뭄지표로 활용할 수 있는가를 판단하기 위하여 가뭄에 대한 재현정도, 가뭄단계의 일치성 및 상관관계를 분석하였다.

북한에 대해서는 일부 원격탐사기술을 적용하는 연구가 있을 뿐 FAO나 UNEP 등과 같은 국제기구 등이 NGO에 의존하여 피해 상황에 대한 단편적인 보도를 하는 수준에서 그치고 있다. 신수현(2005)이 NOAA NDVI 합성영상을 사용하여 남북한으로 나누어진 한반도를 대상으로 각각의 식생현황을 파악 및

비교하고, 산림, 농지, 도시지역별로 NDVI와 강수량과의 상관관계를 통해 가뭄을 평가한 바 있으나 가뭄의 시간적, 공간적 변화나 패턴에 대한 정보를 주지는 못하였다. 다행히 현재 우리나라 기상청에서는 북한 전 지역의 기상자료를 세계기상통신망 GTS(Global Telecommunication System)을 통하여 구득하여 배포하고 있다. 따라서 이를 이용하면 다양한 기상학적 가뭄지수를 산출, 비교할 수 있게 되어 보다 구체적이고 면밀한 북한 가뭄 정보를 생성할 수 있을 것으로 판단된다.

이에 본 연구는 북한 기상자료를 이용하여 기존 기상학적 가뭄지수들 중에서 북한지역에 적용할 수 있는 가뭄평가 지표를 선정하고 이를 바탕으로 북한 내 지역별 가뭄 심도의 평가를 실시하고, 가뭄 우심지역에 대한 유형화를 실시하고 분석하였다. 궁극적으로 북한 가뭄 피해에 대한 제한적이고 수동적인 정보 습득 차원을 벗어나 정성적인 가뭄 정보가 아닌 정량적인 가뭄 정도를 파악할 수 있는 기준을 보여주고자 하였다.

II. 연구방법

본 연구에서는 북한의 지역별 기상학적 가뭄의 평가와 유형분류를 위하여 Fig. 1과 같이 5단계로 나누어 연구를 실시하였다.

- 제 1단계: 가뭄평가지표 선정
 - 제 2단계: 자료추출 및 가뭄평가지표 산정
 - 제 3단계: 가뭄평가지표의 빈도분석
 - 제 4단계: 가뭄지도작성 및 지역별 가뭄평가
 - 제 5단계: 가뭄 우심 지역 유형화 및 분석
- 각 단계별 연구방법을 살펴보면 다음과 같다.

1. 가뭄평가지표 선정 및 산정

기상학적 가뭄은 보통 정상치이거나 평균치와 비교한 건조 정도와 건조기간에 기초하여 정의된다. 기상학적 가뭄의 정의는 강수의 부족을 초래하는 대기 상태나 지역마다 아주 다를 가능성이 높으므로 대상 지역에 대해서만 고려되어야 한다. 예를 들면 기상학

Fig. 1 A procedure diagram for drought analysis in North Korea.

적 가뭄을 정의하는 방법으로서 어느 정해진 한계보다 적은 강수를 갖는 날의 일수 또는 주어진 기간 동안의 강수량 등으로 가뭄의 정도를 평가하는 것이다. 따라서 대표적인 기상학적 가뭄지수로는 표준강수지수(SPI), 파머가뭄지수(PDSI), 과우일수, 무강우일수 등이 있다. 따라서 본 연구에서는 기상학적 가뭄을 분석하기 위하여 연강수량, 생육기간강수량, 계절별강수량, PDSI, SPI 3, 6, 12 및 과우일수 등 모두 11개의 평가지표를 설정하였다. 각 평가지표에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

가. 강수량

기상학적 가뭄지수의 경우 강수량을 주요 인자로 사용하기 때문에 강수량에 의해 많은 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 각 지역별 강수량 경향을 살펴보기 위하여 연강수량과 생육기간(4~10월) 강수량, 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월) 및 겨울(12~2월) 강수량을 산정하여 기간별, 지역별에 따른 강수량의 분포를 살펴보고, 가뭄지수와 비교하였다.

나. 파머가뭄지수(PDSI, Palmer Drought Severity Index)

Palmer(1965)는 가뭄을 장기간 이상수분부족으로 정의하였으며, 이러한 가뭄의 정의를 통해 가뭄의 심도를 수분부족량과 수분부족기간의 함수로 나타내었다. Palmer의 가뭄지수는 물수지분석을 통하여 이용하여 되는데, 물수지분석을 위해 잠재증발산량, 잠재함양량, 잠재손실량, 잠재유출량의 4가지 변량을 이용한다. 잠재증발산량은 Thornthwaite method (Thornthwaite, 1948)로 산정되고, 잠재함양량은 토양수분이 포장용수량이 될 때까지의 토양수분량으로 정의되며, 잠재손실량은 강우가 없는 기간 동안 토양으로부터 사라지는 토양수분량의 정의된다. 또한 잠재유출량은 유효수분용량에서 잠재함양량을 뺀 값으로 계산되어진다. 과거 기상자료를 이용한 수분수지분석을 통해 기후학적으로 적당한 강수량을 계산하고, 해당 월의 실제 강수량을 뺀 값으로 수분편차가 계산된다. 수분편차에 기후특성인자를 곱한 값으로 월별 수분이상지수가 계산되며, 전월의 가뭄지수와 수분이상지수로부터 월별 가뭄지수가 계산된다. Table 1은 파머가뭄지수의 가뭄심도별 분류를 나타낸 것이다.

다. 표준강수지수(SPI, Standardized Precipitation Index)

가뭄은 상대적으로 물의 수요에 비해 물의 부족을 유발하는 강수량의 감소에 의해 시작되는데 착안하여 MaKee 등(1993)에 의해 표준강수지수(SPI)가 개발되었다. SPI는 지체 시간 단위를 3, 6, 12 및 24개월 등과 같이 임의의 시간으로 설정하고, 시간단위별로 강수 부족량을 지수화하여 산정하는 방법으로써 이를 제시하기 위해서는 장기간의 강수자료

가 필요하다. SPI의 계산 과정은 장기간의 강수량 자료로부터 적합한 확률밀도함수를 도출하고, 해당 확률 밀도함수의 누가확률분포함수를 통해서 실제 강수량의 누가확률을 계산한 후, 실제 강수량의 누가확률을 정규분포함수를 이용하여 해당 확률을 계산하는 것이다. Table 2는 SPI 지수의 가뭄심도별 분류를 나타낸 것이다. SPI는 다양한 시간단위에 대해서 계산될 수 있는데, 이는 실제로 가뭄의 평가에 있어서 시간단위가 중요한 변수로 작용하기 때문에 다양한 시간단위에 대한 가뭄지수 또는 가뭄평가를 내리는 것이 유용하다. 본 연구에서는 3, 6 및 12개월 SPI를 산정하였다.

Table 1 Drought classification of PDSI Value (Palmer, 1965)

Palmer Index	Classifications
$4.00 \leq$	Extremely Wet
$3.00 \sim 3.99$	Very Wet
$2.00 \sim 2.99$	Moderately Wet
$1.00 \sim 1.99$	Slightly Wet
$0.50 \sim 0.99$	Incipient Wet Spelt
$0.49 \sim -0.49$	Near Normal
$-0.50 \sim -0.99$	Incipient Drought
$-1.00 \sim -1.99$	Mild Drought
$-2.00 \sim -2.99$	Moderate Drought
$-3.00 \sim -3.99$	Severe Drought
$-4.00 \geq$	Extreme Drought

Table 2 Drought classification of SPI Value (Mekee et al., 1993)

SPI Index	Classifications
$2.0 <$	Extreme Wet
$1.5 \sim 1.99$	Very Wet
$1.0 \sim 1.49$	Moderately Wet
$-0.99 \sim 0.99$	Near Normal
$-1.00 \sim -1.49$	Moderate Drought
$-1.50 \sim -1.99$	Severe Drought
$-2.0 >$	Extreme Drought

라. 과우일수

과우일수는 평균 강우량에 비해 강우량이 적게 왔

을 때 과우상태가 지속되는 기간이다(박성우 등, 1982). 이 과우상태는 기상학적인 가뭄을 평가하는데 유용하게 사용된다. 과우일수를 산정하기 위해서는 하한 과우량과 상한 과우량을 설정하여야 한다. 하한 과우량은 수문 및 농업에 아무런 영향을 미치지 않는 강우 즉, 무강우로 취급할 수 있는 강우량을 뜻한다. 반대로 상한 과우량은 가뭄의 해갈 여부를 결정할 수 있을 정도의 강우량을 말한다. 본 연구에서는 기존 연구 결과를 바탕으로 하한 강우량을 5mm로, 상한 강우량을 70mm 설정하였다. 또한 과우일수를 산정하기 위하여 5, 6, 7, 8월의 일강우량 자료로부터 하루 동안의 강우량이 5mm이하이거나 또는 연속 2일 이상의 강우량이 5mm 이하일 경우 무강우로 취급하고 일 강우량을 누가하고, 누가 강우량이 70mm에 도달할 때까지 과우일수를 계산하였다(김현영, 1994).

2. 가뭄평가지표의 빈도분석

21개 기상측후소에서 산정된 기간별 강수량 및 가뭄지수에 대하여 빈도분석을 실시하여 가뭄발생의 위험 정도를 재현기간과 크기로 추정하면 지역별 평가 및 비교가 가능하다(장민원 등, 2003). 본 연구에서는 농업 수리 시설 설계에 사용되는 한발 기준 10년 빈도에 해당하는 값을 산정하였다. 이를 위하여 기간별 강수량 및 가뭄지수에 대해서 21개 측후소별로 시계열을 작성하였다. 시계열 작성 시 가뭄의 자료치 계열은 가뭄이 홍수량처럼 순간적인 극치가 중요한 것이 아니라 지속되는 기간 동안의 총 부족량이 주된 관심사이므로 극치 계열보다는 부분기간치 계열을 선정해야 한다(배승중 등, 1999). 작성된 시계열 자료를 적절한 이론적 분포형에 맞춤으로써 그 현상의 특성을 구명하고, 앞으로의 발생양상을 예측할 수 있다. 따라서 작성된 시계열에 적합한 확률분포형을 찾기 위하여 Normal, Log Normal, Beta, Gamma, GEV, Weibull, Gumbel 등 7개 분포형에 대하여 K-S(Kolmogorov-Smirnov) 검정을 실시하여, 최적 확률분포형을 선정하였다. 가뭄 특성치를 분석하기 위한 빈도분석시 사용된 방법은 빈도계수법이며, 비 초과확률은 연 초과치 계열의 해석에 적합이 인정된

California 공식을 사용하였다(Lee 등, 1986).

3. 가뭄지도 작성

가뭄의 관리를 위해서 가장 필요한 요소는 가뭄상황을 시·공간적으로 나타내는 것이다. 즉, 시간적인 가뭄의 발생과 공간적인 가뭄의 분포를 파악하는 것이 가뭄관리를 위한 가장 중요한 요소이다(류재희 등, 2002). 따라서 본 연구에서는 빈도분석을 통하여 산정된 가뭄평가지표에 대하여 북한지역의 가뭄지도를 작성하였는데 기상학적 가뭄지수 및 강수량은 기상측후소를 중심으로 한 점(point)으로 산정되기 때문에 공간 데이터로의 보간(interpolation)이 필요하다. 공간 분포 추정을 위한 방법으로 역거리가중법(inverse distance weighting)을 사용하였다. 작성된 10년 빈도 가뭄지도를 바탕으로 하여 11개 평가지표(PDSI, SPI 3, 6, 12, 과우일수, 연강수량, 생육기간강수량, 각 계절별 강수량)에 대하여 170개 시·군 단위의 면적평균치를 산정하고 이를 바탕으로 지역별 가뭄평가를 실시하였다.

4. 가뭄지역 유형화를 위한 군집분석

작성된 가뭄지도를 바탕으로 군집분석을 시행하게 되면 가뭄우심지역을 수 개의 클러스터로 구분할 수 있고, 각 클러스터별 가뭄특성에 대한 검토가 가능할 것이다. 따라서 170개 시·군 단위의 면적평균치를 산정하고 군집분석을 실시하였다. 이러한 군집분석을 통하여 지역의 가뭄 취약 특성을 유형화 하였는데, 군집분석이란 관련 다변량적 특성이 그룹 내적으로 균일하고 타 그룹과는 이질적인 관측개체를 일정한 속성에 따라 몇 개의 군집으로 나눔으로써 대상 집단을 이해하고 군집을 효율적으로 활용하고자 하는 통계적 분석방법이다(박상우 등, 2003). 군집분석의 기본원리는 분석하고 하는 개체들의 여러 특성들을 유사성(similarity) 거리로 환산하여 유사성 거리가 상대적으로 가까운 개체들을 동질적인 집단으로 군집화하는 것이며, 이를 위해서 설명변수의 선정, 유사성 거리의 측정 및 군집화 방법을 거치게 된다. 본 연구에서는 비계층적 군집화 방법인 K-평균 군

집분석(K-mean cluster analysis)을 이용하였다. K-평균 군집방법은 군집의 수를 미리 정하고, 각 개체가 어느 군집에 속하는지를 분석하는 방법으로서 대량의 데이터의 군집분석에 유용하게 이용되는 방법이다(노형진, 2005).

III. 결과 및 고찰

1. 자료 수집 및 처리

현재 우리나라 기상청에서 제공하고 있는 북한지역의 기상 자료는 세계기상통신망을 통하여 구득된 자료로서 현재 북한 전역 27개 지점을 대상으로 제공하고 있다. Fig. 2는 북한지역의 기상측후소를 나타낸 그림이다. 선봉, 청진 등 13개 지역은 1973년부터, 삼지연, 풍진 등 14개 지역은 1981년부터 제공되고 있다. 하지만 중강, 김책, 장진, 희천, 신계, 평강 지역은 자료의 결측이 있기 때문에 본 연구에서는 위 지역(중강 등 6개 지역)을 제외한 21개 지역의 1976년(또는 1981년)부터 2005년까지 기상자료(강수량 및 평균기온)를 이용하였다.

Fig. 2 Meteorological stations in North Korea.

2. 가뭄평가지표 산정

기상측후소 21개 지역에서 추출한 강수량과 평균

기온을 바탕으로 11개의 가뭄평가지표를 산정하였다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 21개 기상측후소 중 신포와 원산 지역에 대하여 1994년부터 2003년까지의 PDSI, SPI 3 및 월별 강수량을 함께 각각 나타낸 그림이다. 신포와 장전은 연강수량의 평균이 각각 636.2mm, 1421.0mm로 북한의 대표적인 과우 및 다우 지역이다. 신포의 SPI 3 결과를 살펴보면 1994년 초반, 1998년 후반, 1999년 후반, 2002년 후반~2003년 초반을 제외한 모든 기간 동안 가뭄이 지속되는 것으로 나타났다. 즉 이는 평년에 비하여 강수량이 많이 부족함을 의미하는 것으로써, PDSI를 살펴보면 위 기간 동안 강수량이 많이 부족함을 확인할 수 있다. 1994년 7월부터 가뭄이 시작되어 2002년 8월까지 지속되는 되는데, 1995년에 큰 가뭄을

(a) Sinpo

(b) Changjon

Fig. 3 PDSI, SPI 3 and monthly rainfall from January 1994 to December 2003 showing inconsistent variation among those drought indices such as in case of Changjon where the minimum PDSI was observed in 1997 but the severest drought was distinguished in 2003 in terms of SPI 3.

나타내고, 그 후 조금씩 회복되다가 1997년과 1998년에 다시 큰 가뭄을 나타내었다. 이후 가뭄이 해소되어 가는 경향을 나타내지만 2000년 6월부터 다시 악화되어 큰 가뭄 지속되다가 2002년 8월이 되어서야 가뭄이 해갈되는 것으로 나타났다. 반면에 장전의 SPI 3와 PDSI 경향을 살펴보면 1995년 말부터 1998년 중반까지 일부 기간을 제외한 대부분 기간 동안 가뭄이 지속되어 1999년 6월부터 2002년 7월까지 큰 가뭄을 나타내었다. 하지만 신포와 비교하여 가뭄 심도가 낮았는데, 이는 신포보다 강수량이 상대적으로 많기 때문인 것으로 판단된다. 위 가뭄지수 결과를 보면 1998년, 1999년, 2003년을 제외한 모든 기간 동안에 가뭄이 지속되는 것을 알 수 있는데, 위 3개년 제외한 7개년 동안 연강수량의 평균을 살펴보면 신포는 422.4mm, 장전은 1070.7mm로, 평년대비 각각 66.4%, 75.3%로 매우 부족하였다. 특히 신포지역은 1997년에 140.1mm(평년 대비 22.0%), 장전의 지역은 2000년에 831.5mm(평년 대비 58.5%)로써 매우 적은 강수량을 나타내어 가뭄이 매우 심했음을 알 수 있는데, 실제로 위 기간 동안에 큰 가뭄이 발생했던 기록을 확인할 수 있다(농촌경제연구원, <http://www.krei.re.kr/>).

3. 빈도분석

산정된 11개 가뭄평가지표 결과에 대한 빈도분석을 실시하기 위하여 연초과치 계열의 시계열을 작성하고, 각 확률분포형에 대한 매개변수를 확률가중모멘트법에 의해 추정하였다. 각 확률분포형에 대하여 K-S 검정(5% 유의수준)을 실시하여 각 지수별 최적확률분포형을 선정하였다. PDSI와 SPI의 최적확률분포형은 GEV 분포형으로 선정되었다. GEV는 가뭄이나 홍수 같은 사상의 빈도분석에 많이 사용되는 분포함수로서 본 연구에 있어서 적합할 것으로 판단된다. 또한 강수량의 경우 Weibull 분포형으로 선정되었는데, 이 분포형은 수문량의 최소값 특히 갈수량의 빈도분석에 많이 사용되는 분포이다. 또한 과우일수의 경우 선행 연구(김현영, 1994)와 같이 Gumbel 분포형을 최적확률분포형으로 선정하였다.

Table 3 Results of drought indices and seasonal rainfall by stations (10-year return period) supposing that the regions such as Sinpo, Nampo, and Pungsan must largely be most vulnerable to meteorological drought regarding eleven evaluations.

Stations	Annual rainfall	Growing season rainfall	Spring rainfall	Summer rainfall	Autumn rainfall	Winter rainfall	PDSI	SPI 3	SPI 6	SPI 12	Dry day
Senbong	418.4	356.6	37.6	219.4	40.1	6.2	-3.499	-2.038	-1.840	-1.689	74
Samjiyon	622.2	499.9	113.0	269.8	89.4	35.4	-4.092	-2.042	-2.196	-2.119	54
Chongjin	413.0	342.6	30.2	197.2	44.5	12.0	-3.208	-2.031	-1.937	-1.754	75
Hyesan	410.6	353.6	66.6	204.2	50.2	10.7	-4.928	-2.090	-2.001	-2.169	64
Kanggye	576.5	491.4	89.3	298.7	74.9	19.0	-4.138	-1.962	-2.013	-1.977	57
Pungsan	319.0	277.2	44.0	180.5	37.3	6.3	-5.315	-2.357	-2.227	-2.145	73
Supung	579.3	521.0	59.3	308.7	86.1	3.6	-5.000	-2.377	-2.030	-2.194	63
Sinuiju	635.7	562.1	64.7	341.0	78.4	10.1	-3.281	-2.146	-1.960	-1.839	61
Kusong	622.6	545.6	70.7	332.6	66.8	6.8	-3.592	-2.291	-2.057	-1.732	58
Hamhung	556.3	459.4	57.6	229.1	72.6	9.5	-3.518	-2.234	-2.212	-2.020	67
Sinpo	291.5	221.5	31.9	127.1	55.8	11.7	-6.618	-2.607	-2.757	-3.143	84
Anju	562.8	485.2	63.4	258.3	64.0	8.2	-3.755	-2.184	-2.129	-1.897	68
Yangdok	521.9	451.3	65.4	265.3	73.5	13.3	-5.056	-2.300	-2.215	-2.112	69
Wonsan	959.5	785.1	66.2	396.4	154.6	25.9	-2.527	-2.317	-2.221	-2.430	62
Pyongyang	558.1	459.6	53.7	275.6	70.1	16.8	-3.993	-2.211	-2.062	-2.205	68
Nampo	390.2	305.3	31.9	166.1	45.6	11.6	-3.426	-2.112	-2.054	-1.768	77
Changjon	957.5	747.2	100.3	337.8	168.7	22.8	-2.923	-1.993	-1.861	-1.971	56
Sariwon	470.3	379.1	44.5	203.0	56.8	14.7	-3.573	-2.025	-1.958	-2.106	71
Yongyon	473.0	379.4	43.7	217.7	49.1	11.9	-4.047	-2.206	-1.652	-1.626	72
Haeju	619.8	509.9	59.3	315.3	40.8	13.8	-3.094	-2.101	-1.936	-1.871	63
Kaesong	784.3	665.7	63.5	388.0	67.8	12.5	-2.880	-2.047	-2.051	-1.934	58
Average	559.2	466.6	59.8	263.4	70.8	13.5	-3.927	-2.175	-2.065	-2.033	66
Maximum	959.5	785.1	113.0	396.4	168.7	35.4	-6.618	-2.607	-2.757	-3.143	84
Minimum	291.5	221.5	30.2	127.1	37.3	3.6	-2.527	-1.962	-1.652	-1.626	54

※ bold font: the severest drought condition

각각의 최적확률분포형을 이용하여 한발기준 10년 빈도 기간별 강수량 및 가뭄지수별, 산정한 결과는 Table 3과 같다. 먼저 기간별 강우량의 결과를 살펴 보면, 연강수량은 291.5(신포)~959.5mm(원산), 생육기간 강수량은 221.5(신포)~785.1mm(원산), 봄강수량은 30.2(청진)~113.0mm(삼지연), 여름강수량은 127.1(혜산)~396.4mm(원산), 가을강수량은 37.3(풍산)~168.7mm(장진), 겨울강수량은 3.6(수풍)~35.4mm(삼지연)의 범위를 나타내었다. 또한 가뭄지수의 경우, PDSI는 -6.618(신포)~-2.527(원산), SPI 3은 -2.607(신포)~-1.962(강계), SPI 6은 -2.757(신포)~-1.652(용연), SPI 12는 -3.143(신포)~-1.626(용연)의 분포를 각각 나타내었다. 마지막으로 과우일수는 신포지역에서 84일로 가장 큰 값을, 삼지연 지역에 54일로 가장 작은 값을 나타내었다.

4. 가뭄지도 작성 및 지역별 가뭄평가

공간적인 가뭄의 분포를 파악하기 위하여 11개 가뭄평가지표의 한발기준 10년 빈도 결과를 바탕으로 공간분포를 추정하여 가뭄지도를 각각 작성하였다. 각 가뭄지도를 이용하여 북한 170개 시군별 평균을

Fig 4. Drought risk by administrative boundaries in North Korea demonstrating how differently the spatial distribution of drought risk could be changed according to the meteorological drought evaluation methods.

Fig 4. Drought risk by administrative boundaries in North Korea demonstrating how differently the spatial distribution of drought risk could be changed according to the meteorological drought evaluation methods.(continued).

Table 4 Average of drought indices and seasonal rainfall by Si or Do administrative units showing the southern areas such as Gaeseong and Gangwon-do are relatively drought-free regarding just meteorological conditions.

Stations	Annual rainfall	Growing season rainfall	Spring rainfall	Summer rainfall	Autumn rainfall	Winter rainfall	PDSI	SPI 3	SPI 6	SPI 12	Dry day
Gaeseong	763.8	646.2	62.8	375.3	68.1	12.8	-2.95	-2.06	-2.05	-1.94	59.0
Gangwon-do	793.0	645.5	71.0	330.3	120.7	19.7	-3.29	-2.19	-2.10	-2.17	62.8
Nampo	449.7	361.1	40.0	202.7	52.9	12.8	-3.57	-2.13	-2.04	-1.89	73.6
Hwanghaebuk-do	571.3	471.6	53.5	265.4	65.4	14.3	-3.59	-2.12	-2.03	-2.03	67.5
Hwanghaenam-do	544.5	444.9	50.1	259.1	51.2	13.2	-3.46	-2.12	-1.92	-1.86	68.1
Pyeongyang	548.2	452.8	53.2	261.8	67.2	14.9	-3.85	-2.18	-2.06	-2.09	68.5
Pyeonganbuk-do	595.2	519.8	64.1	305.9	72.4	8.4	-3.82	-2.23	-2.04	-1.91	62.7
Pyeongannam-do	555.0	467.3	58.2	262.3	69.8	12.4	-3.96	-2.21	-2.12	-2.03	68.0
Jagang-do	556.6	476.0	75.3	281.2	72.3	14.5	-4.23	-2.12	-2.08	-2.03	61.4
Yanggang-do	456.7	382.7	70.9	220.5	59.8	16.2	-4.69	-2.16	-2.13	-2.15	64.5
Hamgyeongbuk-do	443.8	370.2	48.0	214.9	52.2	12.4	-3.84	-2.09	-2.00	-1.91	70.9
Hamgyeongnam-do	489.3	402.9	53.9	218.6	70.6	12.3	-4.65	-2.32	-2.32	-2.35	70.8
Average	564.9	472.7	59.9	267.6	70.3	13.4	-3.88	-2.17	-2.08	-2.03	66.2

※ bold font: the severest drought condition

산정하였는데, 그 결과는 Fig. 4와 같다. Table 4는 시군별 평균을 시도별로 나타낸 것이다. 전체 지역의 가뭄지수 평균을 살펴보면, PDSI는 -3.88, SPI 3은 -2.17, SPI 6은 -2.08, SPI 12는 -2.04로써 PDSI의 경우 「심한 가뭄(Severe Drought)」 단계에, SPI는 「극심한 가뭄(Extreme Drought)」 단계에 해당

되었다.

개성 및 강원도의 경우, 전체 평균에 비하여 강수량이 많고, PDSI와 파우일수의 경우 전체 지역 중 가장 가뭄 심도가 낮은 것으로 나타났다. 또한 SPI 지수도 가뭄 심도가 비교적 낮았는데, 장기간 가뭄보다는 단기간 가뭄에 더 취약한 것으로 나타났다. 황

해도는 강수량이 전체 평균과 비슷한 양상을 보였지만, SPI와 PDSI에서는 전체 평균보다 가뭄 심도가 낮았다. SPI의 경우 단기간에서 장기간으로 갈수록 호전되는 경향을 나타내었는데, 이러한 경향은 강수가 특정 기간에 집중되지 않고, 월별로 비교적 고르게 분포하기 때문인 것으로 판단된다.

한편 남포 지역의 경우 주변 지역과는 달리 강수량이 많이 부족한 것으로 나타났는데, 과우일수를 제외한 다른 가뭄지수는 전체 평균보다 더 낮거나 비슷한 경향을 보였다. 하지만 강수량이 많지 않다는 것은 그 지역의 수자원 부존량 자체가 부족하다는 의미하는 것으로서 적절한 수리 시설이 필요할 것으로 판단된다. 평양 및 평안도의 강수량 및 가뭄지수는 전체 평균과 비슷한 경향을 보였다.

자강도의 경우 PDSI와 과우일수를 제외한 모든 결과에서 평안남도과 비슷한 경향을 보였다. 평안북도는 평안남도과 비교하여 강수량도 더 풍부하고, 가뭄지수의 심도도 낮은 것으로 나타났는데, 인근지역과 비교하여 여름강수량이 더 많은 반면에 겨울강수량은 다소 부족한 것으로 나타났다. 한편 과우일수의 경우 평양과 평안남도과 비교하여 평안북도와 자강도 지역에서 더 작은 값을 보였다. 이는 여름철 강수량이 상대적으로 풍부하기 때문인 것으로 판단된다.

양강도와 함경남도의 경향을 살펴보면, 함흥 이남 지역은 강원도 지역과 비슷한 경향을 나타낸 반면, 그 외 함경남도 및 양강도 지역은 전체 평균과 비교하여 강수량이 많이 부족하였는데, 이로 인해 대부분 가뭄지수 결과에 있어서도 북한 내에서 가장 큰 가뭄 심도를 나타내었다. 다만 봄과 겨울 강수량이 비교적 풍부한 삼지연 지역은 비교적 가뭄 심도가 낮은 것으로 나타났다. 함경북도의 경우 연강수량에 있어서는 전체 평균보다 많이 부족하지만, 과우 일수를 제외한 다른 지수의 경우 가뭄 심도가 높지 않은 것으로 나타내었다.

5. 가뭄지역 유형화

평가지표로 선정된 가뭄지수 및 기간별 강수량의 시·군별 평균을 이용하여 군집분석을 실시하였다.

Table 5 The distance between cluster centers by cluster analysis

Cluster	I	II	III	IV	V	VI
I		3.881	7.294	3.164	8.410	4.909
II	3.881		4.632	2.843	9.241	3.513
III	7.294	4.632		5.622	10.621	5.057
VI	3.164	2.843	5.622		6.631	3.413
V	8.410	9.241	10.621	6.631		9.113
VI	4.909	3.513	5.057	3.413	9.113

Fig. 5 Six patterns of meteorological drought statistically clustered on Si/Gun administrative units

군집분석 결과 6개 유형으로 나뉘었는데, 각 유형별 군집중심간 거리는 Table 5와 같고, 모든 평가지표가 유의확률 5%에서 군집간의 차이를 나타내었다. 그 결과 I 유형은 38개 지역으로, II 유형은 48개 지역으로, III 유형으로 15개 지역으로, IV 유형은 33개 지역으로, V 유형은 14개 지역으로, VI 유형은 22개 지역으로 구분되었는데, 각 유형에 해당하는 시·군을 Fig. 4에 나타내었다.

각 유형별 특징을 살펴보기 위하여 먼저 각 시·군별로 가뭄지수 또는 강수량의 평균에 대한 정규화(평균 0, 표준편차 1)를 실시하여 유형별 평균을 도

출하였다. 각 유형별 평균을 나타낸 그림이 Fig. 5이다. 정규화를 실시하면 단위가 서로 다른 지수 또는 강수량과의 상대적인 비교가 가능하게 되는데, 음의 값을 가지면 평균 이하의 값을, 양의 값을 가지면 평균 이상의 값을 가진다는 것을 의미한다. PDSI 및 SPI는 정규화 결과가 작아질수록 가뭄 심도가 높은 것을 의미하게 되고, 과우일수는 반대로 값이 커질수록 가뭄 심도가 작아지는 것을 의미한다. 또한 강수량의 경우에는 정규화 결과가 크면 강수량이 많은 것을 의미한다. 이러한 결과는 각 유형별 상대적인 비교를 나타내는 것으로써, 각 유형별 특징을 살펴보면 다음과 같다.

I 유형의 경우 PDSI가 0.365, SPI가 0.706~0.889로써 가뭄 심도는 비교적 작지만, 과우일수는 1.049로 가뭄 심도가 비교적 큰 것으로 나타났다. 또한 모든 기간별 강수량(-0.148~-1.170)이 북한지역 내 평균보다 작았는데 봄강수량은 특히 부족한 경향을 보였다. 이 유형은 계절별 강수량이 모두 부족하지만 SPI와 PDSI 가뭄지수의 심도는 비교적 낮

은 특징을 나타내고 있다.

II 유형은 PDSI(0.502), SPI(-0.011~0.551) 및 과우일수(-0.732)의 심도는 비교적 낮은 것으로 나타났다. SPI의 경우 단기기간에서 장기기간으로 갈수록 심도가 낮아지는 경향을 보였다. 대부분 기간의 강수량이 북한지역 내 평균보다 높게 나타났지만 또한 가을강수량(-0.069)과 겨울강수량(-0.642)이 상대적으로 부족한 것으로 나타났다. 이 유형은 가뭄지수의 심도가 비교적 낮고 비교적 강수량이 풍부한 지역으로 가뭄의 내한 능력이 비교적 높은 유형으로 평가할 수 있다.

III 유형의 특징을 살펴보면, PDSI (1.083)의 심도는 비교적 작고, SPI(-0.883~-0.277)와 과우일수(-0.749)의 심도가 약간 높은 지역으로 모든 강수량이 북한지역 내 평균보다 크게 상회하는데, 특히 가을강수량이 많은 것으로 나타났다. 이 유형은 6가지 유형 중에서 풍부한 강수량을 바탕으로 가뭄 내한 능력이 높은 지역으로 구분될 수 있다. III 유형의 경우 북한 내 가장 풍부한 강수량을 바탕으로 가뭄

Fig. 6 Factor scores of each cluster comparing the strongly drought-resistant areas of Cluster III and the most drought-vulnerable areas of Cluster V including Pungsan and Sinpo.

심도가 제일 낮은 유형이다.

IV 유형은 PDSI(-0.174)의 심도는 약간 높고, 과우일수(-0.261)의 심도는 비교적 낮지만, SPI(-0.524~-0.218)의 우심 정도가 높은 지역이다. 또한 가을과 겨울강수량을 제외한 모든 강수량이 북한지역 내 평균과 거의 비슷한데, 가을강수량은 평균과 비교하여 조금 많고, 겨울강수량이 조금 적은 경향을 나타내는 지역이다. 이 유형은 모든 요인이 북한의 평균에 해당하는 지역으로 북한지역 내에서 가뭄 심도가 중간 정도로 평가되는 유형으로 구분되었다.

V 유형의 경우 -2.134(PDSI), -1.763(SPI 3), -2.013(SPI 6), -1.982(SPI 12), 1.416(과우일수), -1.385(연강수량), -1.448(생육기간강수량), -0.815(봄강수량), -1.552(여름강수량), -0.576(가을강수량), -0.508(겨울강수량)이다. 이와 같이 V 유형은 모든 가뭄지수의 심도가 매우 높은 지역으로써 강수량도 다른 유형과 비교하여 매우 적은 지역이다. 따라서 이 유형은 북한지역 내에서 대표적인 과우 지역으로써 가뭄에 가장 취약한 지역으로 구분할 수 있다.

마지막으로 VI 유형의 요인별 평균을 살펴보면, PDSI(-0.846)의 가뭄 우심 정도가 비교적 높고, 과우일수(-0.996)의 심도는 비교적 낮은 지역이다. SPI의 경우 단기간에서 장기간으로 갈수록 가뭄 심도가 악화되는 경향을 보였다. 또한 봄과 겨울강수량을 제외한 모든 강수량(-0.406~-0.116)이 북한지역 내 평균보다 낮지만, 상대적으로 봄 강수량(1.465)과 겨울강수량(0.982)은 다른 지역과 비교하여 풍부한 것으로 나타났다. 이 유형은 봄과 겨울강수량이 상대적으로 풍부한 지역으로, PDSI의 심도가 특히 낮고, 단기간보다 장기간 가뭄에 취약한 지역으로 구분할 수 있다.

기간별 강수량 및 가뭄지수로 작성된 가뭄지도를 바탕으로 군집분석 실시하고, 각 클러스터별 가뭄 특성을 살펴보았다. 그 결과 풍산과 신포를 중심으로 한 V 유형에 속한 14개 지역들이 가뭄에 가장 취약한 지역으로 나타났고, 원산과 정전을 중심으로 한 III 유형에 속한 15개 지역이 내한 능력이 가장 높은 것으로 나타났다.

IV. 결 론

본 연구는 자연재해에 취약한 북한에서 가뭄에 대비할 수 있는 기반 연구로써 북한지역의 기상학적 요인과 가뭄의 특성을 고려한 가뭄평가를 실시하고 군집분석을 통하여 가뭄지역을 유형화하여, 각 유형별 가뭄특성을 살펴보았다.

우선 북한지역의 기상학적 가뭄을 평가하기 위하여 연강수량, 생육기간, 계절별 강수량, PDSI, SPI 3, 6, 12 및 과우일수 등 총 11개의 가뭄평가지표를 선정하였다. 기상측후소 21개 지역의 기상 자료를 바탕으로 선정된 가뭄평가지표에 대하여 각각을 산정하였다. 이를 바탕으로 연초과치 시계열을 작성하고, 최적확률분포형으로 선정된 GEV, Weibull 및 Gumbel 분포형을 이용하여 한발기준 10년 빈도 강수량 및 가뭄지수를 산정하였다. 한발기준 10년 빈도 결과를 이용하여 가뭄지도를 작성하고, 시·군별 가뭄지수 및 강수량의 평균을 산정하여, 지역별 가뭄평가를 실시하였다.

또한 시군별 평균치를 이용하여 가뭄지역의 분류를 위한 군집분석을 실시하였는데 총 6개 유형으로 구분되었다. 각 유형별 특징을 살펴보면, I 유형은 비교적 강수량은 부족하지만 SPI와 PDSI 가뭄지수의 심도가 비교적 낮은 특징을 나타내고 있으며, II 유형은 가뭄지수의 우심 정도 비교적 낮으면서, 비교적 강수량이 풍부한 지역으로 가뭄 우심 정도가 비교적 낮은 유형으로 평가할 수 있다. III 유형은 전체 유형 중에서 풍부한 강수량을 바탕으로 가뭄 내한 능력이 높은 특징을 나타내었다. IV 유형의 경우, 북한지역 내에서 가뭄 심도가 중간 정도로 평가되는 유형으로 모든 요인이 평균에 가까운 값을 나타내었다. V 유형은 모든 가뭄지수의 심도가 매우 높고, 강수량도 다른 유형과 비교하여 매우 적은 지역으로 가뭄에 가장 취약한 지역으로 구분할 수 있다. 마지막으로 VI 유형은 봄과 겨울강수량이 상대적으로 풍부한 지역으로, PDSI의 가뭄 심도가 특히 낮고, 단기간보다 장기간 가뭄에 취약한 특징을 나타내었다.

본 연구에서는 북한 지역에서의 정성적인 가뭄 정보가 아닌 정량적인 가뭄 정도를 파악할 수 있는 기

준을 제시하고, 이를 이용하여 가뭄평가를 실시하였다. 도출된 결과는 기상학적 인자만을 반영하였기 때문에 하천 유량, 관개 시설 또는 수자원 시설을 반영하지 못하는 한계가 있을 수 있다. 하지만 본 연구 결과는 지구 온난화와 이상기후로 인하여 가뭄과 홍수의 발생이 빈번해지고 그 피해도 커지는 상황에서 북한의 가뭄특성 파악과 이해를 위한 기초 자료로써 활용이 가능할 것이다. 또한 북한의 농업재해예측 및 대응 및 북한의 가뭄발생 빈도에 따른 농업생산기반조성 사업 등의 기초 자료로도 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 『북한 가뭄 특성 분석 및 가뭄 우심지도 작성』 과제의 일환으로 서울대학교 통일연구소의 연구지원으로 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. FAO/WFP, 2001, Special Report, FAO/WFP Crop and Food Supply Assessment Mission to the Democratic People's Republic of Korea
2. Lee, K.S., Sadeghipour, J., Dracup, J.A., 1986, An approach for frequency analysis of multiyear drought durations, *Water Resources Research*, 22 (5), pp. 655~662
3. McKee, T.B., N.J. Doesken, and J. Kleist, 1993, The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, January 17~22, Anaheim, pp.179~184.
4. Palmer, W.C., 1965, Meteorological drought, Research paper, Vol.45, U.S. Weather Bureau
5. Thornthwaite, C.W., 1948, An approach toward a rational classification of climate, *Geographic Review*, Vol.38, pp.55~94.
6. Wilhite, D.A. and M.H. Glantz., 1985, Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International* 10, pp.111~120
7. 김상민, 박승우, 1999, 우리나라 주요 지점에 대한 가뭄지수의 산정과 비교, *한국농공학회지*, 41 (5), pp.43~52
8. 김현영, 1994, 과우량과 과우일수, *한국관개배수*, 1 (2), pp.235~237
9. 노형진, 2005, (Excel 및 SPSS를 활용한) 다변량분석 : 이론과 실제, 형설출판사
10. 류재희, 이동률, 안재현, 윤용남, 2002, 가뭄평가를 위한 가뭄지수의 비교 연구, *한국수자원학회 논문집*, 35 (4), pp.397~410
11. 박상우, 전병호, 장석환, 2003, 다변량 분석기법에 의한 지점강우의 권역화 연구, *한국수자원학회 논문집*, 36 (5), pp.879~892
12. 박기욱, 김진택, 주옥중, 이용직, 2006, 농업가뭄의 평가를 위한 가뭄지수의 적용성 분석, *한국관개배수*, 13 (1), pp. 72~81
13. 박성우, 안재숙, 이기춘, 1982, 한발기준년 재조정, 농업개발시험연구, 서울대학교 농업개발연구소
14. 배승중, 정하우, 최진용, 1999, 토양수분 물수지 모형과 GIS를 이용한 가뭄 분석, *한국농공학회지*, 41 (6), pp.33~43
15. 신수현, 2005, 다중시기 정규식생지수(NDVI)를 이용한 가뭄지수의 한반도 적용성 분석, *인하대학교 석사학위논문*
16. 윤용남, 안재현, 이동률, 1997, Palmer의 방법을 이용한 가뭄의 분석, *한국수자원학회논문집*, 30 (4), pp.317~326
17. 이주현, 정상만, 김성준, 이명호, 2006, 가뭄모니터링 시스템 구축: I. 정량적 가뭄모니터링을 위한 가뭄지수의 적용성 분석, *한국수자원학회 논문집*, 39 (9), pp.787~800
18. 장민원, 정하우, 박기욱, 2003, 가뭄대책 행정지원을 위한 지역논가뭄평가모형 ADEM의 개발, *농촌계획*, 9 (2), pp.29~37
19. 한국농촌경제연구원 북한농업정보 http://www.krei.re.kr/kor/info/infor01_nklist.php