韓國水資源學會論文集
第44卷 第3號・2011年 3月
pp. 231 ~ 248

DOI: 10.3741/JKWRA.2011.44.3.231

기후변화를 고려한 홍수취약성지표의 개발

Development of Flood Vulnerability Index Considering Climate Change

손 민 우* / 성 진 영** / 정 은 성*** / 전 경 수****

Son, Minwoo / Sung, Jin-Young / Chung, Eun-Sung / Jun, Kyung-Soo

Abstract

This study aims to develop the Flood Vulnerability Index (FVI) and apply it to the Bukhan River Basin. A1B and A2 scenarios of CGCM3 of IPCC were adopted and SDSM (Statistical Downscaling Model) was used to downscale the original data to the daily data. Driver-Presure-State-Impact-Response (DPSIR) model was introduced to select all appropriate indicators for FVI and the daily rainfall-runoff model was simulated using HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran). Since FIV proposed in this study has a capability to quantify the potential flood vulnerability considering both present and future climate conditions, it is expected to be used for the comprehensive water resources and environmental planning.

Keywords : Climate Change, Flood Vulnerability Index, DPSIR, SDSM

요 지

본 연구에서는 기후변화 요소를 반영하여 홍수취약성지표(Flood Vulnerability Index, FVI)를 개발하였고 이를 북한강 유역의 6개 중권역에 적용하였다. 기후변화 요소를 고려하기 위해 IPCC의 CGCM3 모형의 A1B와 A2 시나리오를 이용하였고 일단위로 축소화하기 위해 SDSM (Statistical Downscaling Model) 모형을 이용하였다. 홍수취약성 인자를 선정하기 위해 지속가능성 평가모형인 추진력-압력-상태-영향-반응 (Driver-Pressure-State-Impact-Response, DPSIR) 모형을 이용하였고 기후변화로 인한 홍수유출의 특성분석은 연속유출모의모형인 HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran)를 이용하였다. 본 연구에서 개발된 홍수취약성지수는 유역의 현상태 및 기후변화의 영향으로 인한 잠재적 취약성을 정량적인 하나의 지수로 간결하게 표현할 수 있어서 장기 수자원 및 유역관리 정책수립에 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 기후변화, 홍수취약성지표, DPSIR, SDSM

* 인하대학교 해양과학기술연구소, 연구교수, 공학박사 (e-mail: minwooson@gmail.com)
Research Professor, Ph.D., Inha University, Ocean Science Technology Institute
** 롯데건설 사원, 공학석사 (e-mail: blackleo83@naver.com)
MS, Lotte Construction
*** 교신저자, 서울과학기술대학교 건설공학부 조교수, 공학박사 (e-mail: eschung@seoultech.ac.kr)
Corresponding Author, Assistant Professor, Ph.D, Seoul National University of Science & Technology, School of Civil Engineering
**** 성균관대학교 사회환경시스템공학부 교수, 공학박사 (e-mail: ksjun@skku.edu)
Professor, Ph.D., Sungkynkwan University, Department of Civil and Environmental Engineering

1. 서 론

유역관리 상태의 평가는 수량, 수질 등과 같은 단일 지표만으로는 평가하기 어렵기 때문에 유역 시스템을 구성하는 요소들을 종합적으로 평가할 수 있는 통합지수(Index)와 다양한 지표(Indicator)가 필요하다(강민구 등, 2008). 현재 국제기구에서 널리 사용되고 있는 지속가능한 수자원 및 환경 평가 지수로는 WPI(Water Poverty Index), SWSI(Social Water Stress/Scarcity Index), ESI(Environmental Sustainability Index) 등이 있다(Sullivan, 2002). 국내에서 최시중과 이동률(2005)이 지속가능한 수자원 개발과 관리를 평가하기 위한 지수를 개발한 바 있고, 강민구와 이광만(2006)은 수자원 지속가능성 지수(Water Resources Sustainability Index, WRSI)를 개발하였고, 정은성과 이길성(2007)은 유역 상태를 평가하기 위한 홍수피해잠재능(Potential Flood Damage, PFD), 건천화잠재능(Potential Streamflow Depletion, PSD), 수질오염잠재능(Potential Water Quality Deterioration, PWQD) 등을 개발하여 유역의 종합적인 수문학적 취약도를 산정하기 위해 유역평가지수(Watershed Evaluation Index, WEI)를 개발한 바 있다. 이동률 등(2009)은 압력(Pressure), 현상(State), 대책(Response) 구성체계를 기반으로 홍수위험지수(Flood Risk Index, FRI)를 개발하여 유역간 홍수의 취약성을 비교, 분석하였다. 이러한 지수들은 지속가능성(Sustainability), 이수, 치수, 수질 및 생태계 보존, 사회·경제학적 자료 등은 고려하고 있지만 최근 지구온난화와 맞물려 큰 이슈가 되고 있는 기후변화 관련 요소는 거의 반영하지 않는다. 또 정일원 등(2009)은 기후변화영향을 반영하여 홍수취약성을 민감도(Sensitivity), 노출(Exposure), 적응능력(Adaptation)의 함수로 정의하고 각 유역별 지표들을 이용하여 상대적인 취약도 정도를 평가하였지만 사용된 10개의 지표가 모두 공학적인 인자들로만 선택되어 최근 지수개발의 핵심 요소인 사회, 경제학적 자료와의 통합은 고려하지 않았다.

기후변화는 20세기 이후 인류에게 가장 중요한 안건 중 하나가 되었다. 이에 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)와 국제연합 환경프로그램(United Nations Environment Programme, UNEP)은 1988년 정부간 기후변화협의회(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)를 조직하였다. IPCC의 4차 보고서(IPCC, 2007)에 의하면 지구는 지난 100여 년 동안 지구 온난화로 인하여 평균기온이 약 0.7℃ 상승하였으며 이러한 추세는 1990년 이후 더욱 급해지는 것으로 보고되었다. 지구온난화로 인한 지구평균기온 상승은 생태계의 변화와 기상이변으로 이어지게 되며, 평균기온이 1.5℃에서 2.5℃ 상승하면 20~30%의 생물종이 사라질 우려가 있다. 특히 3℃ 상승하게 되면 아시아에서는 연간 700만 명이 홍수의 위험에 직면하고 전 세계의 약 1억 명 이상이 식량부족에 시달릴 것으로 예상되고 있으며, 해수면이 상승하여 상대적으로 지반이 낮은 곳에 위치한 해안 도시들이 침수될 것으로 보고되고 있다(IPCC, 2007). 최근 50년 동안 우리나라 강수량을 분석한 결과 전국적으로 강우일수는 감소하고 일강우량 80 mm 이상인 호우발생빈도는 증가하는 경향이 있는 것으로 나타났다(기상연구소, 2004; Jung et al., 2010). 또한 남부지방에서는 연강수량이 7% 증가하고 연강우일수는 14% 감소하며 강우강도는 18% 증가하는 것으로 알려져 있다(Choi, 2002). 즉 기후변화의 영향으로 강우발생일수의 감소, 연강우량 증가, 강우강도 증가현상이 나타남을 예상할 수 있으며 각각 홍수와 가뭄의 발생가능성을 증가시킨다고 할 수 있다(Bae et al., 2008). 이에 본 연구는 기후변화로 인한 홍수피해의 증가 여부를 정량적으로 제시할 수 있는 홍수취약성지수(Flood Vulnerability Index, FVI)를 개발하였다. 이때 지표의 산정은 세계적으로 지속가능성에 대한 정량화를 위해 가장 많이 사용되고 있는 Driving force-Pressure-State-Impact-Response(DPSIR; EEA, 1999) 개념을 사용하였다.

2. 이론적 배경

2.1 연구방법

본 연구의 과정은 Fig. 1과 같이 크게 5단계로 구분될 수 있다. 1단계는 기후변화를 고려한 홍수취약성지수의 정의 및 지표선정, 2단계는 각 지표들에 대한 가중치 결정, 3단계는 유역의 수문자료 및 인문자료의 수집, 4단계는 기후변화 전·후 홍수관련 물 순환 요소에 대한 영향 분석, 5단계는 홍수취약성지수의 산정으로 구성된다.

홍수에 대한 유역의 취약성을 정량화하기 위해서는 홍수관련 수문학적 구성요소와 유역의 인구수와 같은 기초통계 자료가 필요하다. 수문학적 구성요소로 입력되는 유출량 등은 기온 및 증발산량 등 기후변화에 따른 여러 기상요소를 고려하여 모의 할 수 있는 연속 강우-유출 모형인 HSPF(Hydrological Simulation Program for Fortran; Bicknell et al., 2001)를 이용하여 산정되었다. 기초 인문통계자료는 유역내 속한 행정구역의 통계 연보를 활용하여 면적별 비율을 고려하여 유역별로 계산하였다.

기후변화에 따른 홍수관련 물 순환 요소에 대한 영향 분석 연구는 다음과 같이 3단계로 이루어졌다. 1단계는 대기순환모형(General Circulation Model, GCM) 자료의 수집으로 IPCC Data Distribution Center(http://www.ipcc-data.org)의 자료를 이용하였다. 본 연구에서 사용한

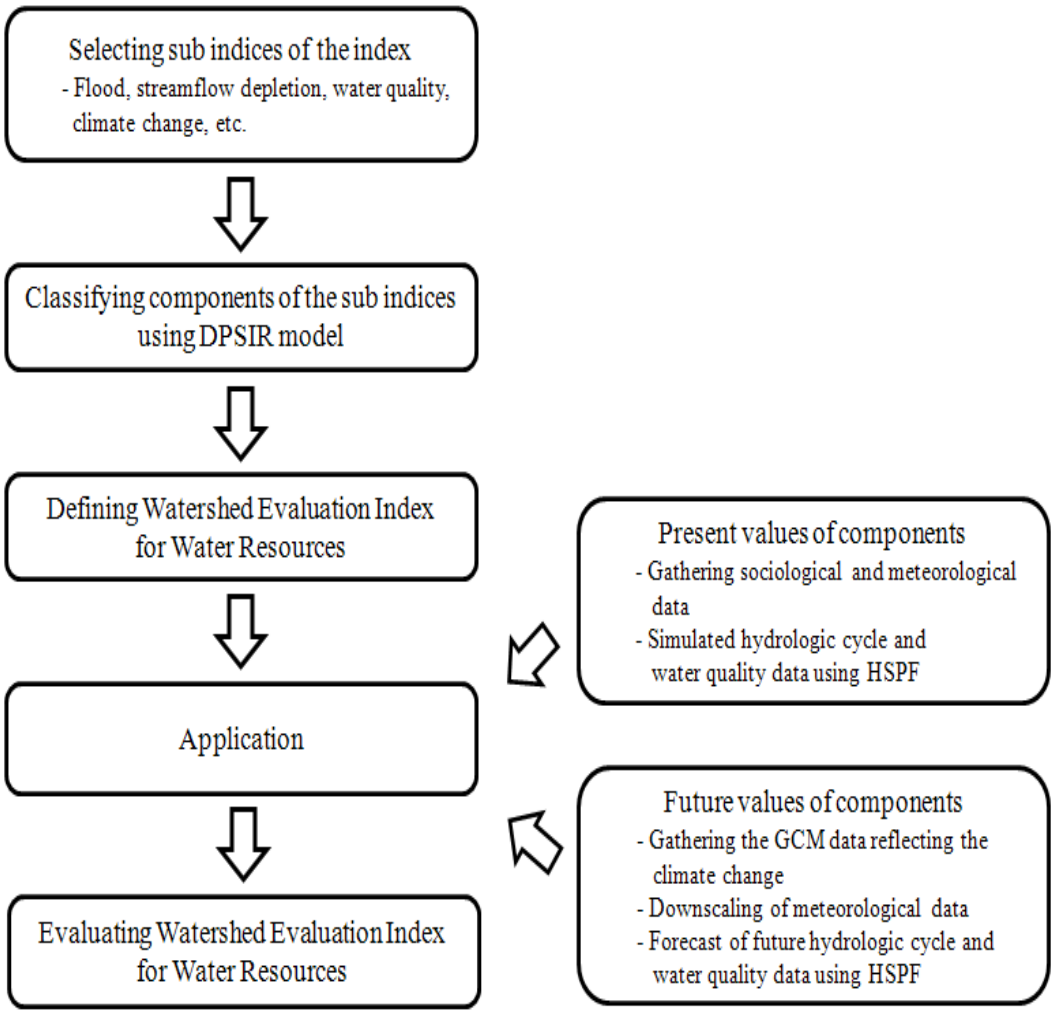


Fig. 1. Procedure of This Study

GCM은 IPCC 4차 보고서에 수록된 CCCma (Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis)의 CGCM3 (Canadian Global Coupled Model)이다. 온실가스 배출 시나리오는 IPCC의 온실가스 배출에 관한 특별 보고서 (Special Report Emission Scenario, SRES; IPCC, 2007)의 시나리오 중 A1B, A2 시나리오를 선택하였다. 2단계는 GCM 자료의 축소화 (Downscaling) 과정이다. 시·공간적으로 해상도가 큰 GCM 자료는 원하는 유역에 맞도록 축소화 과정을 거쳐야 한다. GCM 자료를 대상유역의 경·위도에 맞춰 내삽하여 자료를 생성하였고, 월 단위 자료로 생성된 GCM 자료의 일 단위 축소화를 위해 내삽된 자료를 바탕으로 통계학적 축소기법을 사용하여 일 단위의 시계열 시나리오를 생성하였다. 이때 축소화를 위해 SDSM (Statistical Downscaling Model; Wilby et al., 2002) 모형을 이용하였다. 마지막으로 과거 자료와 생성된 미래 기후자료 및 강우-유출 모형인 HSPF를 이용하여 현재와 미래의 유출 시나리오를 구축하였다.

2.2 DPSIR 개념

DPSIR 구조는 EEA (European Environment Agency, 1999)가 OECD의 PSR 구조를 개선하여 지속가능성을 지표화하기 위해 개발하였다. 기존의 PSR 구조는 복잡한 생태학적 과정과 인간 환경의 인과관계를 설명하지 못한다는 단점이 있다. 특히 상태의 변화로부터 생기는 영향 (impact)을 전혀 설명하지 못한다는 단점을 가지고 있을 뿐만 아니라 반응이 시스템에 영향을 미치는 상황을 반영하지 못한다. PSR 구조는 인간의 활동 (Pressure)이 환경 (State)에 영향을 미치고 환경은 다시 인간으로 하여금 압력을 줄이기 위한 활동 (Response)을 촉진하게 한다. DPSIR 구조는 이러한 PSR 구조에 두 가지 개념이 추가되었다. 인간의 행복은 환경의 질과 관계가 있고 사회의 활동과 경제적 압력은 환경과 인간의 행복에 영향을 미친다는 것이다. 이러한 개념은 추진력 (driving force)과 영향 (Impact)에 반영되어 PSR 구조에 추가되었다. 따라서 DPSIR 구조는 사회의 원동력이 인간 사회에 압력을 발생

시키고 압력이 상태에 영향을 미치고 상태가 반응을 야기하는 영향을 유발하며 다시 반응은 이상의 네 가지 요소에 각각 다시 영향을 미친다는 인과관계에 착안한다. 추진력은 환경에 영향을 미치는 사회·경제적 요소로 일반적으로 인구, 자원의 사용량, 교육수준, 거주자 수, 에너지 소비량 등이 있다. 압력은 환경의 상태에 직접적으로 영향을 미치는 자연적인 요소로 오염 부하량, CO_2 배출량 등이 있다. 상태는 환경의 질과 자연자원의 양을 정량적으로 측정하는 것으로 하천수질, 오존의 농도 등이 있다. 영향은 환경의 상태가 인간, 동물, 생화학적 과정에 미치는 영향으로 질병의 정도, 생태계에 환경오염물질 배출량 등이 있다. 반응은 환경에 대한 사회의 반응으로 환경개선을 위한 활동 등이 해당된다(정은성 등, 2008).

DPSIR 구조는 1999년 개발된 이래로 환경 문제의 연구에 광범위하게 적용되고 있다. 국외에서 DPSIR 구조를 채택하여 수자원 또는 유역 환경을 평가한 연구로는 Pirrone et al. (2005)이 유역과 해안 구역 관리를 위해 이탈리아의 Po River 유역과 Adriatic Sea 해안 구역에 적용하여 Po River 유역의 사회 경제적 발전과 Adriatic Sea 해안 구역의 부영양화 사이의 관계를 파악하였다. Hamouda et al. (2009)은 수단, 이집트, 이디오피아가 포함된 Eastern Nile Basin (ENB)의 수자원 시스템의 취약성 평가를 위해 DPSIR 구조를 사용하였다. Carter et al. (2009)은 영국에서의 홍수 위험 관리를 위해 강화된 공간 계획을 개발하기 위해 SA (Sustainability Appraisal) 도구를 개발하였다. 이 연구에서 DPSIR 구조는 홍수와 공간 계획, SA 사이의 관계를 설명하는데 사용되었다. D, P, S, I의 항목은 홍수를 분석하기 위한 지표로 구성되었고 이러한 홍수를 방어, 제어하기 위한 수단인 R 항목으로 SA를 지표로 사용하였다. Valenzuela Montes and Matarán Ruiz (2008)은 스페인의 Guadalfeo River Basin과 Granada coastal 영역을 대상으로 토지이용과 사회 경제학적 요인 같은 공간적 요소와 제한된 수자원 사이의 의존성과 상호작용 정도를 표현하고자 DPSIR 구조를 사용하였다. Skoulickidis (2009)는 동지중해로 유입하는 물의 80%를 차지하는 15개의 주요 Balkan River들의 환경적 상태를 DPSIR 구조를 적용하여 나타내었다.

국내에서 DPSIR 구조를 이용하여 지속가능한 개발 지표와 환경 지표 등을 적용한 연구들이 최근 늘어나고 있다. 김호석 등(2007)은 특정한 사회경제적 편익을 위해 시행되는 개발사업들로 인해 발생하는 환경적 영향을 사전에 평가하는 환경영향평가를 개선하기 위하여 DPSIR 구조를 사용하여 지속가능한 발전지표를 개발하였다. 최지연 등(2008)은 육역과 해역의 환경·사회경제적 영향이 상호 복합적으로 영향을 미치는 연안 지역을 대상으로 이질적인 환경을 개별요소로 세분하여 상호관계를 이해하고 전체 연안시스템을 분석하기 위해 DPSIR 구조를 적용하였다. DPSIR 구조를 수자원에 적용한 연구로는 정은성 등(2008)이 대안평가지수(Alternative Evalutaion Index, AEI)를 개발하고 이를 유역의 건전한 물 순환을 위한 대안들의 우선순위를 결정하는데 사용한 바 있다.

2.3 SDSM 모형

영국과 웨일즈 환경청의 지원을 받아 꾸준히 연구되고 있는 SDSM 모형은 다중회귀분석을 이용하여 미래의 기상자료를 생성한다. 원하는 지점의 미래 일단위 기상자료를 획득하기위해 SDSM 모형이 필요한 입력자료는 1961년부터 2000년까지의 예측하고자 하는 지점의 관측 자료와 미국의 국가 환경 예측센터(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)에서 제공하는 관측값을 토대로 작성된 설명변수, GCM을 기반으로 작성된 예측변수이다. SDSM 모형의 다중회귀분석은 예측하고자 하는 기상자료가 종속변수가 되고 NCEP의 자료는 보정을 위한 설명변수가 된다. 모형의 보정으로부터 얻은 매개변수를 이용하여 GCM 모형 결과를 기반으로 작성된 예측변수에 의해 기상자료를 생성하게 된다. NCEP와 CGCM3의 예측변수는 모두 일(日)단위의 변수로써 두 자료가 각각 설명하고 있는 기상요소의 분류는 같다(박경신 등, 2009).

SDSM에서 이용되는 통계학적 축소기법은 다중회귀분석으로 이루어진다. 다중회귀분석은 일반적으로 자연적, 사회적인 현상을 설명하는데 있어 적절한 두 개 이상의 독립변수를 조합하여 함수의 형태로 종속변수를 나타내는 방법이다. 다중회귀식은 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\epsilon}, \quad \boldsymbol{\epsilon} \sim N(0, \boldsymbol{\sigma}^2) \tag{1}$$

여기서, $\mathbf{Y}$는 종속변수로 SDSM에서는 일평균 기온과 강우량과 같은 기상인자들로 $n \times 1$ 벡터이고, $\mathbf{X}$는 독립변수 혹은 설명변수라고도 하며 SDSM 모형에서는 NCEP와 GCM으로부터 얻어진 예측변수로 $n \times m$ 행렬이다. $\boldsymbol{\beta}$는 회귀계수벡터로 $m \times 1$의 차원을 갖는다. $\boldsymbol{\epsilon}$은 오차를 나타내는 벡터로 $N(0, \boldsymbol{\sigma}^2)$를 따르는 확률변수이고, SDSM 모형에서 검정이 가능하다.

다중회귀분석에서의 검정 절차는 1) 가설의 설정, 2) 유의수준 결정, 3) 검정통계량 계산, 4)유의확률(p-value)의 계산, 5) 판정으로 이루어진다. 단순회귀분석의 절차와 같지만 독립변수의 개수 차이에 의한 자유도가 다르므로 검정통계량(F)의 값이 달라지고 유의확률도 다르게 계산된다.

단순회귀분석과 가장 큰 차이라고 볼 수 있는 것은 검정을 통해 귀무가설이 기각되어 회귀관계가 있다고 판단되면 각각의 회귀계수에 대한 추론을 하는 점이다. 이 과정은 다중공선성(Multicollinearity)과 분산팽창계수(Variance Inflation Factor, *VIF*), 수정결정계수(Adjusted R^2)에 대해 분석하여 독립변수의 사용여부를 판단하게 된다.

2.4 경향성 분석

수문시계열자료에 대한 경향성 분석은 자료를 도시하여 나타내는 방법과 통계기법을 이용하여 파악하는 방법이 있다. 통계기법을 이용하는 방법으로는 연자료 분석 시 t Test(선형회귀분석), Hotelling-Pabst Test, Mann-Kendall Test, Sen Test, Spearman's Rho Test 등이 있다. 경향성 분석은 검정결과의 객관성을 확보하기 위해 세 가지 검정기법 중 두 가지 이상에 대해 경향성이 있다고 판정될 경우 해당 시계열 자료는 경향성을 지닌다고 판정한다. 이에 본 연구에서는 Mann-Kendall test(Mann, 1945), Spearman's Rho Test(Gibbons, 1971)를 실시하였다. Mann-Kendall Test와 Spearman's Rho Test는 각각 이재준 등(2010), 정은성과 이길성(2007)에 상세하게 설명되어 있다.

2.5 HSPF 모형

2.5.1 개요

HSPF 모형은 유역에서 발생하는 유출수의 양과 질을 모의하기 위해 설계된 종합적(Comprehensive), 개념적(Conceptual), 연속적(Continuous) 유역 모의 모형으로 1966년 개발된 스탠포드 유역 모형(Stanford Watershed Model)에 기원을 두고 있다. 현재의 HSPF 모형은 1980년 미국 환경청에서 개발한 것으로 기존의 HSP(Hydrocomp Simulation Programming), ARM(Agricultural Runoff Management), NPS(NonPoint Source), SERATRA(SEdiment and RAdionuclides TRAnsport) 모형들에서 수행되는 다양한 모의 모듈을 새롭게 수정하여 보완한 프로그램이다.

2.5.2 모형의 입력자료

HSPF 모형의 실행에는 많은 양의 자료가 필요하게 되는데 이는 크게 기상자료와 GIS 자료로 구분할 수 있다.

① 기상자료

HSPF 모형의 모의를 위해서는 기온, 강우, 증발산, 풍속, 일사량, 이슬점온도, 일 최대·최저기온과 같이 다양한 기상자료가 필요하다. 모의에 사용된 기상자료는 1973년 1월 1일부터 2008년 12월 31일까지 춘천, 대관령, 홍천, 인제, 양평 기상관측소의 실측 자료를 바탕으로 티센망을 작성하여 각 중권역별 면적평균기상자료로 수정하여 사용하였다.

② GIS 자료

HSPF 모형에 입력하기 위한 유역의 특성 자료로는 수치표고모형(Digital Elevation Model, DEM)과 토지이용도, 토양도가 있다. BASINS(Better Assessment Science Integrating point and Nonpoint Sources)에서는 DEM을 이용하여 기본적인 하천을 추출하고 추출된 하천과 사용자의 입력에 의한 제어점을 기준으로 유역을 구분하게 된다. 하천을 추출하는 과정에서 DEM의 특성에 따라 실제 하천이 아닌 지역도 하천으로 추출하는 경우가 있기 때문에 실제 하천의 위치를 알 수 있는 하천의 형상 자료를 사용하여 실제하천을 구분하여 유역을 나눌 수 있게 된다. 본 연구에서는 1999년도 수치지도를 기반으로 작성된 국토지리정보원의 DEM을 이용하였다.

3. 대상유역

본 연구의 대상 유역은 Fig. 2와 같이 북한강 유역 중 북한에 속한 금강산댐 중권역(1008)과 평화의 댐 중권역(1009)를 제외한 춘천댐 중권역(1010)에서 남한강과 합류하게 되는 청평댐 중권역(1015)에 이르는 6개 중권역이다.

기상자료는 1973년부터 2008년까지 37년의 자료기간을 갖는 북한강 유역의 인제, 춘천, 대관령, 양평, 홍천 관측소의 자료를 이용하였다. 강우 자료는 각 기상관측소를 이용하고 Fig. 3과 같이 티센망을 구성하여 각 유역평균 강우량을 산정하였다.

한강의 제1지류인 북한강은 유역면적 10,761.2 km^2, 유로연장 291.3 km로 한강 전체 유역면적의 약 41.3%에 해당되며, D.M.Z. 이북에 위치하고 있는 단발령(EL. 1,241 m)에서 발원하여 양구서천, 금강천, 수입천, 소양강, 가평천 및 홍천강 등의 많은 대소 지천들과 합류하여 유역을 형성하면서 남서류하다 경기도 양평군 양서면 양수리 부근에서 남한강과 합류하며 서류하다 팔당호로 유입된다.

본 연구는 춘천댐, 인북천, 소양강, 의암댐, 홍천강, 청평댐 중유역을 포함하고 있다. 춘천댐 유역은 유역면적이 1,587.4 km^2, 유로연장이 57.6 km, 유역평균표고는 468.2 m, 유역평균경사는 42.2%이다. 인북천 유역은 유역면적이 931.3 km^2, 유로연장이 77.8 km, 유역평균표고는 693.7 m, 유역평균경사는 44.9%이다. 소양강 유역의 유역면적은 1,852.0 km^2, 유로연장은 156.5 km, 유역평균표고는 608.5 m, 유역평균경사는 45.7%이다. 의암댐 유역은 유역면적이 721.7 km^2, 유로연장이 40.9 km, 유역평균표고는 333.1 m, 유역평균경사는 39.1%이다. 홍천강 유역은 유역

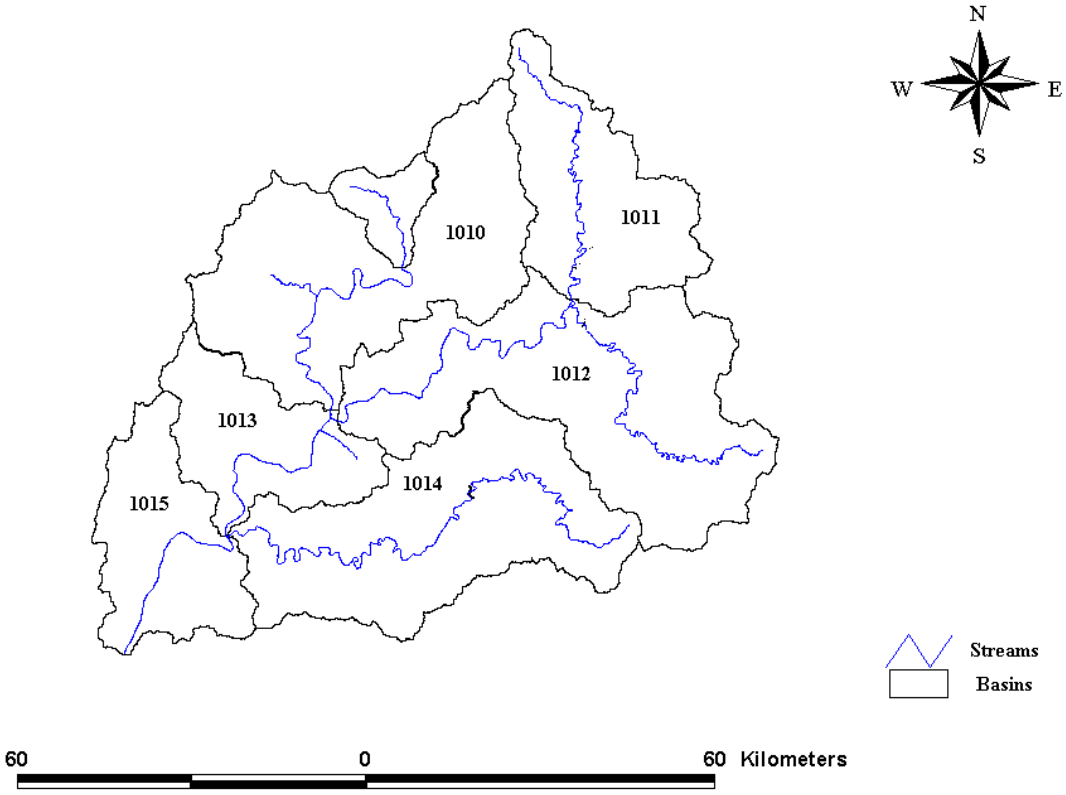


Fig. 2. Map of the North Han River Basin

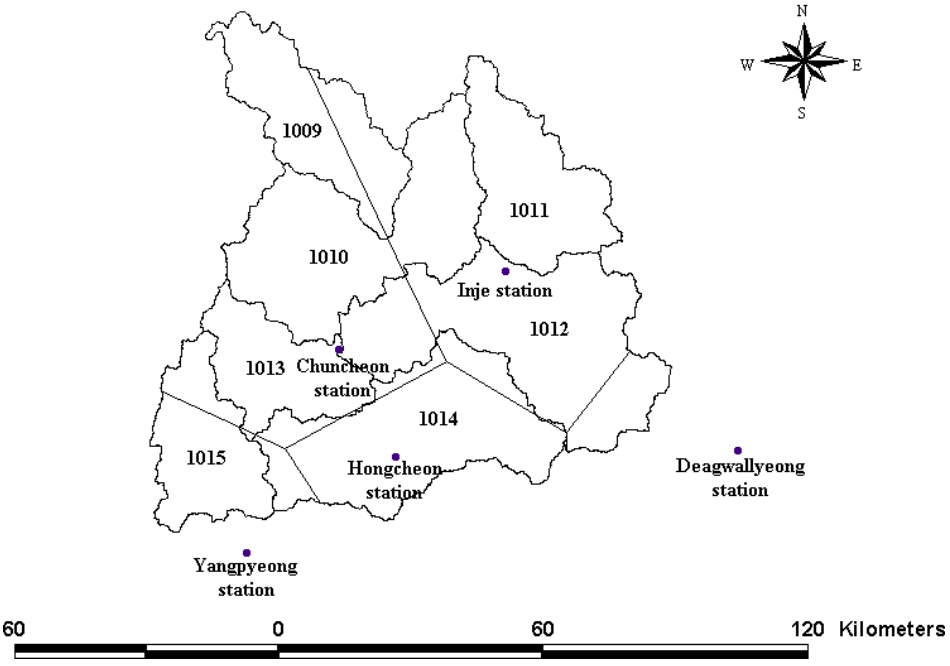
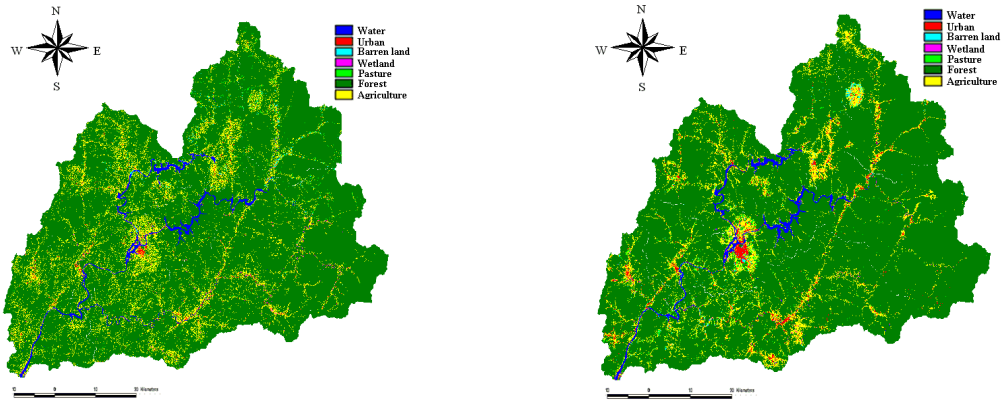


Fig. 3. Meterological Stations and Thiessen Network of North Han River Basin

면적이 1,566.0 km^2, 유로연장이 107.7 km, 유역평균표고는 366.4 m, 유역평균경사는 39.3%이다. 청평댐 유역은 유역면적이 760.6 km^2, 유로연장이 77.8 km, 유역평균표고는 278.2 m, 유역평균경사는 36.7%이다.

도시지역비율은 2000년 기준으로 Fig. 4와 같이 춘천댐 유역이 1.19%, 인북천 유역이 1.01%, 소양강 유역이 0.77%, 의암댐 유역이 3.66%, 홍천강 유역이 1.30%, 청평댐 유역이 1.87%로 나타났다.



(a) 1975 (b) 2000

Fig. 4. Landuse Change of the Study Watershed

4. 결 과

4.1 DPSIR 구성

4.1.1 DPSIR 지표의 결정

기후변화를 고려한 홍수취약성지수 산정을 위해 사용된 DPSIR의 인자 중 추진력(Driver)의 경우 인구증가율, 불투수면적 변화율, 유역경사, 유역평균고도, 압력지표의 구성요소로 인구밀도, 재화가치, 삼림 중 침엽수림 면적, 자동차 등록수를 이용하고, 상태(State)의 경우 일최대 강우량, 3일 연속 강우량, 연평균 유출량, 일최대 유출량, 풍수량, 연최대 유출량 변화율(미래), 영향력의 경우 연평균 홍수 피해액, 반응의 경우 내수 배재시설, 개수율, 치수관련 공무원수로 구성되어 있다(Table 1).

4.1.2 가중치 결정

Table 1의 인자들에 대한 가중치는 사용하는 전문가마다 달라질 수 있으므로 본 연구에서는 치수관련 연구자들을 대상으로 실시된 설문조사로부터 결정된 값을 사용하였다. 또한 DPSIR 항목에 대한 가중치는 기존에 이를 연구한 경험이 풍부한 3인을 대상으로 실시하였다. 보다 보편적인 결론을 도출하기 위해서는 보다 많은 전문가들에 대한 설문조사나 다기준 의사결정기법(Multi-Criteria Decision Making Techniques) 중 가중치 산정에 대한 과학적인 접근법의 사용에 대한 연구가 요구된다. 모든 지수들에 대한 가중치는 Table 1과 같다.

분석 결과 DPSIR 요소 중에는 상태에 대한 비중이 가장 크며 반응, 압력의 순으로 나타났고 마지막으로 추진력과 영향이 같은 값을 보였다. 각 인자별로 보면 연평균 홍수피해액이 전체의 15%를 차지하며, 제방안전도가 9.9%, 치수관련 공무원 수가 7.3%, 일최대 강우량이 6.9%를 보였고 3일간 강우량, 일최대 유출량, 풍수량, 인구증가율, 불투수 면적비율, 인구밀도, 자산 가치가 5% 이상의 비중을 보였다.

Table 1. Weights of Indicators

Component	Weights	Indicator	Weights
Driving force	0.15	Population Growth Rate	0.35
		Impervious Area Increase ratio	0.37
		Watershed Slope	0.13
		Ave. Watershed El.	0.12
Pressure	0.18	Population Density	0.31
		Property Value	0.29
		Coniferous Forests	0.15
		Number of Cars	0.25
State	0.30	Max. Daily Prec.	0.19
		3-day-Prec.	0.21
		Ave. annual Prec.	0.10
		High Flow	0.19
		Max Daily Runoff	0.23
		Max. Annual Runoff	0.08
Impact	0.15	Ave. Annual Flood Damage	1.00
Response	0.22	Stability of Levee Inundation	0.45
		Number of Pumping Station	0.22
		Number of Managers for Flood Damage Prevention	0.33

4.2 기후변화 시나리오 생성

4.2.1 SDSM 구축

미래 기후변화에 대한 자료는 GCM 및 SRES의 종류별로 다른 양상을 나타내게 된다. IPCC의 4차 보고서(IPCC, 2007)에 따르면 모의된 모든 GCM의 결과에서 지구온난화가 나타난다고 보고하였다. 본 연구에서 사용하는 통계학적 축소기법 모형인 SDSM 모형에 적용 가능한 GCM 중 IPCC 4차 보고서에 수록된 CGCM3를 이용하여 기후변화 시나리오를 작성하였다.

기후 시나리오는 현재 가장 많이 사용되고 있는 IPCC의 SRES를 이용했다. IPCC SRES는 인구변동, 경제발전, 기술발전 등을 바탕으로 미래 사회발전방향에 따른 온실가스의 변화를 반영하여 크게 4개의 시나리오를 제시하고 있다. 본 연구에서는 A1B와 A2 시나리오를 사용하였다. A1B는 최근 IPCC AR4에서 제시하고 있는데 현실에 가장 잘 부합되는 시나리오로 그 적용사례가 늘고 있다. 2100년까지 CO_2가 720 ppm에 도달할 것으로 예상하며 에너지 공급원이 균형을 이루게 된다(안소라 등, 2009). A2 시나리오는 CO_2 배출농도가 급격히 증가하여 2100년에는 820 ppm에 이르는 배출시나리오로 온실가스가 급격히 증가할 경우 수자원에 미치는 영향을 평가하는 것이 안정성 측면에서 의미가 있는 것으로 판단되어 선정하였다(배덕효 등, 2007).

춘천, 대관령, 홍천, 인제, 양평의 기상관측소에 대해 각각의 시나리오를 생성하였다. 대상유역인 북한강 유역에 영향을 미치는 기상관측소의 자료를 겹선형보간법을 이용하여 각각 4개의 GCM 예측인자가 존재하는 격자점으로부터 보간하였다. 본 연구에서 사용된 GCM 예측인자는 SDSM 모형에 입력할 수 있도록 변환된 자료로 박경신 등(2009)에서 설명한 인자들이 이용된다. 본 연구에서 사용된 CGCM3의 격자크기는 약 350×350 km이며 NCEP의 자료 역시 같은 크기의 해상도를 가지고 있기 때문에 보다 합리적인 분석을 위하여 NCEP와 CGCM3의 예측변수를 서울과 수원관측소의 위치로 보간하였다. 이 과정에서 간단한 내삽법인 겹선형보간법을 이용하였다. NCEP와 CGCM3의 격자점 위치는 박경신 등(2009)에 제시되어 있다. 보간된 인자들과 춘천과 대관령, 홍천, 인제, 양평 기상관측소의 1973년부터 2000년까지의 자료를 토대로 2001년부터 2100년까지 통계학적인 축소화를 수행하여 일평균 기온과 일평균 강수량 자료를 생성하였다.

CGCM3의 결과가 반영된 예측변수로부터 미래의 일단위 기온 및 강수량 자료를 생성하기 위해 1973년부터 2008년까지 36년간의 일단위 기온 및 강수량 자료를 수집하였다. 다중회귀분석을 위한 종속변수로는 수집한 기온 및 강수량 관측자료를 이용하였고 독립변수로는 NCEP Reanalysis의 자료를 이용하였다. 각각의 인자는 박경신 등(2009)에 제시되어있다. 독립변수 간의 높은 상관관계는 다중공선성의 문제를 일으킬 수 있기 때문에 독립변수 간의 상관계수를 구하여 0.85를 초과하는 상관계수의 쌍 중 한 가지의 변수를 선택적으로 제외하였다.

통계학적 축소기법 도구인 SDSM 모형을 이용하면 변수의 선택 및 상관관계분석, 유의확률의 계산이 가능하지

Table 2. Selected Independent Variables, *VIF*, and p-value

Dependent variable	Independent variable	p-value	*VIF*
Air Temperature	mslpas	0.007	3.080
	p5_uas	0.000	4.130
	p5_zas	0.000	3.612
	p5thas	0.006	4.411
	p8_uas	0.000	1.523
	p8thas	0.000	2.442
	s500as	0.000	3.823
	tempas	0.000	1.786
Precipitation	mslpas	0.048	2.029
	p_thas	0.024	3.447
	p500as	0.000	1.729
	p8thas	0.045	1.607
	shumas	0.000	3.249

만 다중공선성의 존재여부를 알아볼 수 있는 분산팽창계수를 계산할 수 없다. 또한 변수의 선택과정에서 변수의 진입과 제거에 따른 신뢰성 있는 결정계수와 검정통계량을 계산하여 SDSM 모형에서 문제가 될 수 있는 부분에 대해 보완하였다. 변수선택 방법은 단계선택방법을 택하였으며, 분산팽창계수가 10 이상인 변수 중 종속변수와 상관관계가 작은 것부터 제외하였다. 최종적으로 선택된 독립변수들과 종속변수간의 유의확률(p-value)을 계산하여 모든 독립변수가 유의수준 이하일 때까지 반복 수행하였다. 이와 같은 과정을 거쳐서 선택된 최종 예측변수와 분산팽창계수는 Table 2와 같다.

최종선택 된 변수를 이용하여 춘천과 대관령, 홍천, 인제, 양평 기상관측소의 2001년 1월 1일부터 2100년 12월 31일까지의 기온 및 강수량 자료를 생성하였다. 강수와 기온은 각각 SRES의 A1B와 A2 시나리오를 생성하였으며, 2001년부터 2008년까지의 기온과 강수를 실측값과 비교하여 통계학적 축소기법에 사용된 다중회귀분석 모형을 검증하였다. 목적함수로는 모형의 효율계수(R^2)와 RMSE (Root Mean Square Error)를 이용하였다.

$$\max\ R^2 = \frac{F_o^2 - F^2}{F_o^2} \tag{2}$$

$$F_o^2 = \sum_{i=1}^{n}(M_{ob} - Q_{ob,i})^2,\ F^2 = \sum_{i=1}^{n}(Q_{sm,i} - Q_{ob,i})^2$$

$$\min \mathrm{SE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_{sm,i} - Q_{ob,i})^2} \tag{3}$$

여기서, $Q_{ob,i}$는 i번째 관측값, M_{ob}는 관측값의 평균, $Q_{sm,i}$는 i번째 모의 값이고 n은 자료의 수이다.

강수의 경우 아직까지 기온을 일단위 자료로 축소하는 기법에 비해 일자료에 대한 정확성이 떨어진다. 이에 기존 연구자들은 강우를 크기순으로 정렬하여 초과확률에 대한 강수의 크기로 이를 검증하였다 (Hay et al. 1991; Wilby, 1994). 하지만 향후 1, 2, 3차 모멘트와 같은 다른 통계지표를 검토하여 분석하는 연구도 필요하다고 생각된다.

모형의 검증을 위해 모의된 2001년부터 2008년까지의 기온과 같은 기간 동안 실측된 기온자료를 수집하여 분석한 결과는 Table 3에 제시된 바와 같다. 춘천관측소는 R^2 값이 A1B와 A2의 경우 각각 0.69와 0.70으로 계산되었으며, RMSE는 각각 5.8℃, 5.9℃를 나타났다. 같은 기간 동안 대관령 관측소의 기온의 R^2값은 A1B와 A2의 경우 각각 0.67과 0.68로 계산되었으며, RMSE는 모두 5.7℃를 나타났고, 홍천관측소의 R^2값은 A1B와 A2의 경우 각각 0.71과 0.73으로 계산되었으며, RMSE는 각각 5.7℃, 5.6℃를 나타났다. 인제관측소는 R^2값이 A1B와 A2의 경우 각각 0.71과 0.72로 계산되었으며, RMSE는 각각 5.5℃, 5.4℃로 나타났고, 양평관측소는 R^2값은 A1B와 A2의 경우 각각 0.68과 0.70으로 계산되었으며, RMSE는 각각 5.8℃, 5.9℃를 나타났다.

위에서 언급한 바와 같이 강수자료의 검증을 위해서는 8년간의 일평균 강수 자료를 내림차순으로 정리한 후 각 시나리오 별로 초과확률에 관하여 실측값과 모의값을 Fig. 5와 같이 비교하였다. 그 결과 춘천 관측소의 R^2값이 A1B와 A2의 경우 각각 0.82와 0.88로 계산되었으며,

Table 3. Accuracy of Values of Objective Functions for Verification

Name of Station	A1B		A2	
	R^2	RMSE (℃)	R^2	RMSE (℃)
Temperature				
Chuncheon	0.69	5.8	0.70	5.9
Daegwallyeong	0.67	5.7	0.68	5.7
Hongcheon	0.71	5.7	0.73	5.6
Inje	0.71	5.5	0.72	5.4
Yangpyeong	0.68	5.8	0.70	5.9
Precipitation				
Chuncheon	0.82	2.4	0.88	1.9
Daegwallyeong	0.77	3.1	0.81	2.8
Hongcheon	0.85	3.0	0.87	2.8
Inje	0.85	2.4	0.80	2.8
Yangpyeong	0.89	2.5	0.88	2.4

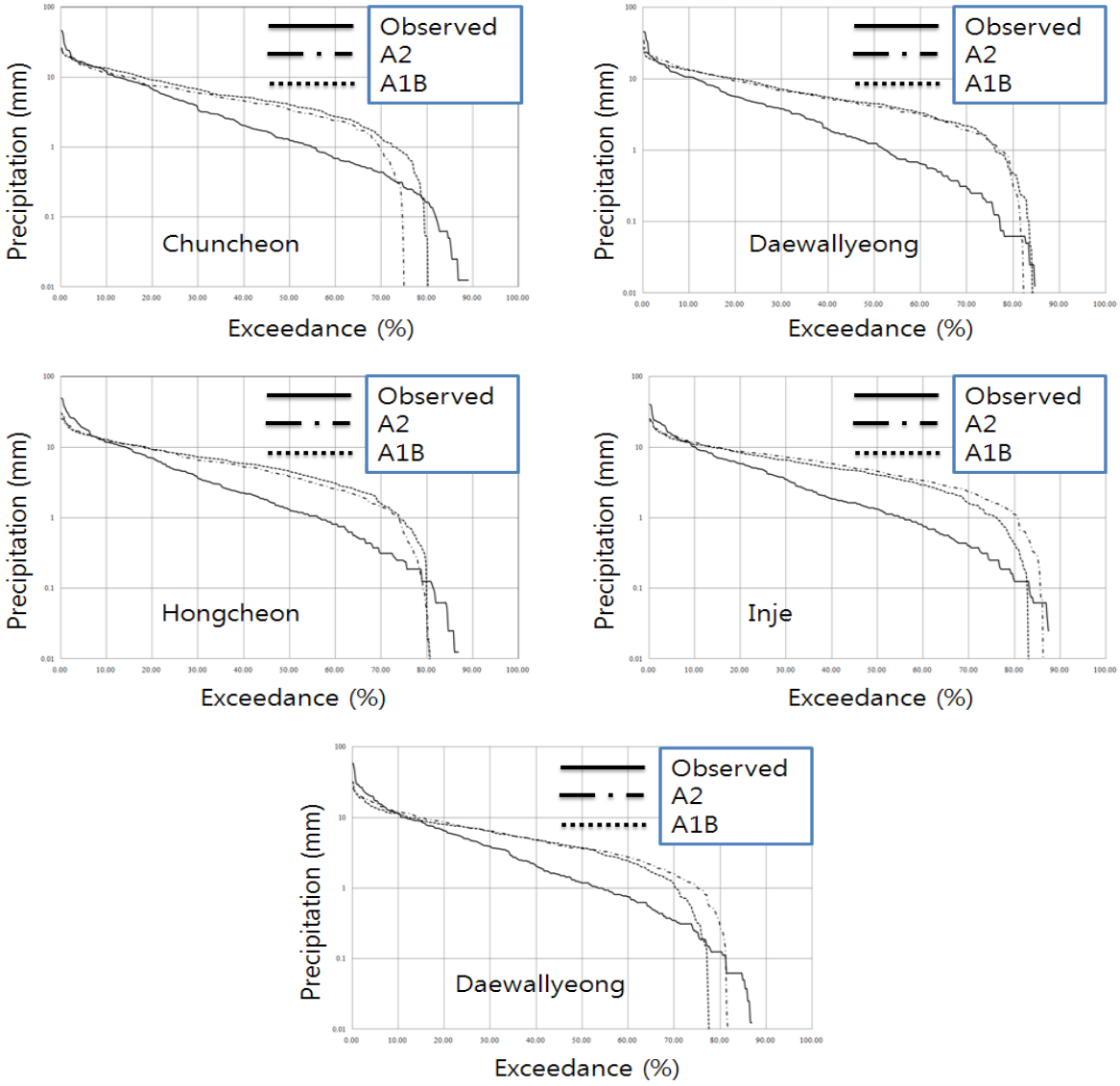


Fig. 5. Verification for Precipitation

RMSE는 각각 2.4 mm, 1.9 mm로 나타났다. 같은 기간 동안 대관령 관측소 기온의 R^2 값은 A1B와 A2의 경우 각각 0.77과 0.81로 계산되었으며, RMSE는 각각 3.1 mm와 2.8 mm로 나타났고, 홍천 관측소기온의 R^2 값은 A1B와 A2의 경우 각각 0.85와 0.87로 계산되었으며, RMSE는 각각 3.0 mm, 2.8 mm를 나타났다. 인제관측소는 R^2 값이 A1B와 A2의 경우 각각 0.85와 0.80으로 계산되었으며, RMSE는 각각 2.4 mm, 2.8 mm로 나타났고, 양평 관측소는 R^2 값이 A1B와 A2의 경우 각각 0.89와 0.88로 계산되었으며, RMSE는 각각 2.5 mm, 2.4 mm로 나타났다.

기후변화 시나리오를 축소화하여 사용할 경우 모형의 단순화와 여러 입력자료를 구축하는 과정에서 일정 정도의 편이(Bias)가 내재되어 있으며, 이로 인해 계통오차(Systematic Discrepancy)가 포함된 결과를 얻을 수 있다. 이러한 계통오차를 제거하는 방법 중 하나로 Quantile Mapping 방법(Panofsy and Brire, 1963)이 있으며 기후변화 분야에서 여러 차례 사용된 바 있다(Palmer et al., 2004; Wood et al., 2004; 김병식 등, 2008). 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 계통오차가 일정하지 않고 수치도 비교적 크지 않으므로 생략하였다. 향후 실무에 적용할 경우 Quantile Mapping 방법을 사용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

4.2.2 미래의 기온 및 강수 예측

CGCM3 자료로부터 모의된 춘천과 대관령, 홍천, 인제, 양평 5곳의 기상관측소의 기온 및 강수자료는 2001년 1월 1일부터 2100년 12월 31일까지 총 100년의 일평균자료이

Table 4. Result of Precipitation Trend Analysis (Future)

Name of Station	Mann-Kendall test		Spearman's rho test	
	τ	p-value	ρ_s	p-value
Chuncheon	5.701	3.1E-04	3.959	5.98E-4
Daegwallyeong	4.012	6.01E-05	3.524	2.22E-10
Hongcheon	4.363	7.71E-04	2.968	6.24E-05
Inje	5.489	4.85E-04	3.482	4.24E-07
Yangpyeong	10.815	4.08E-04	6.248	3.15E-06

다. 경향성 분석을 위해 Mann-Kendall Test와 Spearman's Rho Test를 실시한 결과 Table 4와 같이 모든 관측소의 기온 및 강수량 자료가 모두 경향성을 갖고 있는 것으로 나타났다.

춘천 관측소의 모의 자료를 분석한 결과 대상기간동안 A1B시나리오에서 연평균 기온이 약 2.4℃ 증가한 13.9℃를 나타났고 A2 시나리오에서는 약 4℃ 증가한 15.2℃로 나타났다. 대관령 관측소의 모의 자료를 분석한 결과 대상기간 동안 A1B 시나리오에서 연평균 기온이 약 2.3℃ 증가한 9.2℃를 나타났고 A2 시나리오에서는 약 2.7℃ 증가한 13.2℃로 나타났다. 홍천 관측소의 모의 자료를 분석한 결과 대상기간 동안 A1B 시나리오에서 연평균 기온이 약 2.5℃ 증가한 13.2℃를 나타났고 A2 시나리오에서는 약 4.3℃ 증가한 14.6℃로 나타났다. 인제 관측소의 모의 자료를 분석한 결과 대상기간 동안 A1B 시나리오에서 연평균 기온이 약 2.5℃ 증가한 13.2℃를 나타났고 A2 시나리오에 서는 약 4.3℃ 증가한 14.6℃로 나타났다. 양평 관측소의 모의 자료를 분석한 결과 대상기간 동안 A1B 시나리오에서 연평균 기온이 약 1.8℃ 증가한 13.9℃로 나타났고 A2 시나리오에서는 약 3.8℃ 증가한 14.9℃를 나타냈다.

모의된 온도 자료의 분석은 2010년부터 2100년까지 총 91년간의 일평균 자료를 이용하여 수행하였고 결과는 Fig. 6과 같다. 분석결과 강수량의 경우 기온에 비하여 증가하는 추세가 더 커졌다. 춘천 관측소의 경우 A1B 시나리오에서 약 300 mm 정도 증가한 2,201.3 mm로 나타났고, A2 시나리오의 경우 약 500 mm 정도 증가한 2,256.3 mm로 나타났다. 대관령 관측소는 A1B 시나리오에서 약 100 mm 정도 증가한 2,211.3 mm로 나타났고, A2 시나리오의 경우 약 430 mm정도 증가한 2,432.3 mm로 나타났다. 홍천관측소는 A1B 시나리오에서 약 440 mm 정도 증가한 2,321.0 mm로 나타났고, A2 시나리오의 경우 약 480 mm 정도 증가한 2,456.8 mm로 나타났다. 인제관측소는 A1B 시나리오에서 약 90 mm 정도 증가한 1,964 mm로 나타났고, A2 시나리오의 경우 약 360 mm 정도 증가한 2,183.5 mm로 나타났다. 양평관측소는 A1B 시나리오에서 약 230 mm 정도 증가한 1,980 mm로 나타났고, A2 시나리오의 경우 약 420 mm 정도 증가한 2,208.1 mm로 나타났다.

미래의 기온과 강수량을 분석한 결과, '고성장 사회' 시나리오인 A1B의 시나리오에 비해 '다원화 사회'를 가정하고 있는 A2 시나리오에서 더 큰 변동을 살펴볼 수 있었다. A2 시나리오는 개별적인 국가나 민족의 발전이 독립적으로 이루어진다는 가정을 갖는 시나리오이다. 따라서 환경문제는 지역적으로만 해결하는 노력을 기울이고, 전 지구적인 문제에 대한 노력은 기울이지 않는다는 가정이 반영되어 있기 때문에 기후변화의 양상이 A1B 시나리오에 비해 더 크게 나타났다.

4.3 HSPF 모형의 적용

HSPF 모형의 수량 매개변수 중 AQUA TERRA (2004)에서 수량의 보정 시 주요 매개변수로 제안하는 7가지의 변수 중 AGWRG, INFILT, INTFW, IRC, LZSN, UZSN을 이용하여 민감도 분석을 실시하였으며, 전체유량(Total Flow)과 첨두유량(Peak Flow)에서 이들 매개변수의 변화가 유출에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 매개변수 검보정에 사용된 매개변수들에 대한 설명과 결정된 HSPF 모형의 매개변수들의 값은 Table 5에 제시되어 있다. 보정과 검증을 위한 목적함수로는 Eqs. (2) and (3)과 같이 모형의 효율성계수(R^2)와 RMSE를 이용하였다. 보정결과 모형의 효율계수는 0.79이고, RMSE는 10.8 m^3/s로 계산되었다. 모형의 보정과 검증결과는 Fig. 7과 Table 6과 같다. 검증결과는 R^2와 RMSE가 각각 0.62, 13.2 m^3/s로 나타났다.

수량의 보정과 검증을 통해 얻어진 모형의 매개변수를 이용하여 대상 유역에 대하여 수량 모의를 실시하였다. 모의기간은 1973년 1월 1일부터 2008년 12월 31일까지 36년이다. 각 유역별 주요 유황값은 Table 7과 같다.

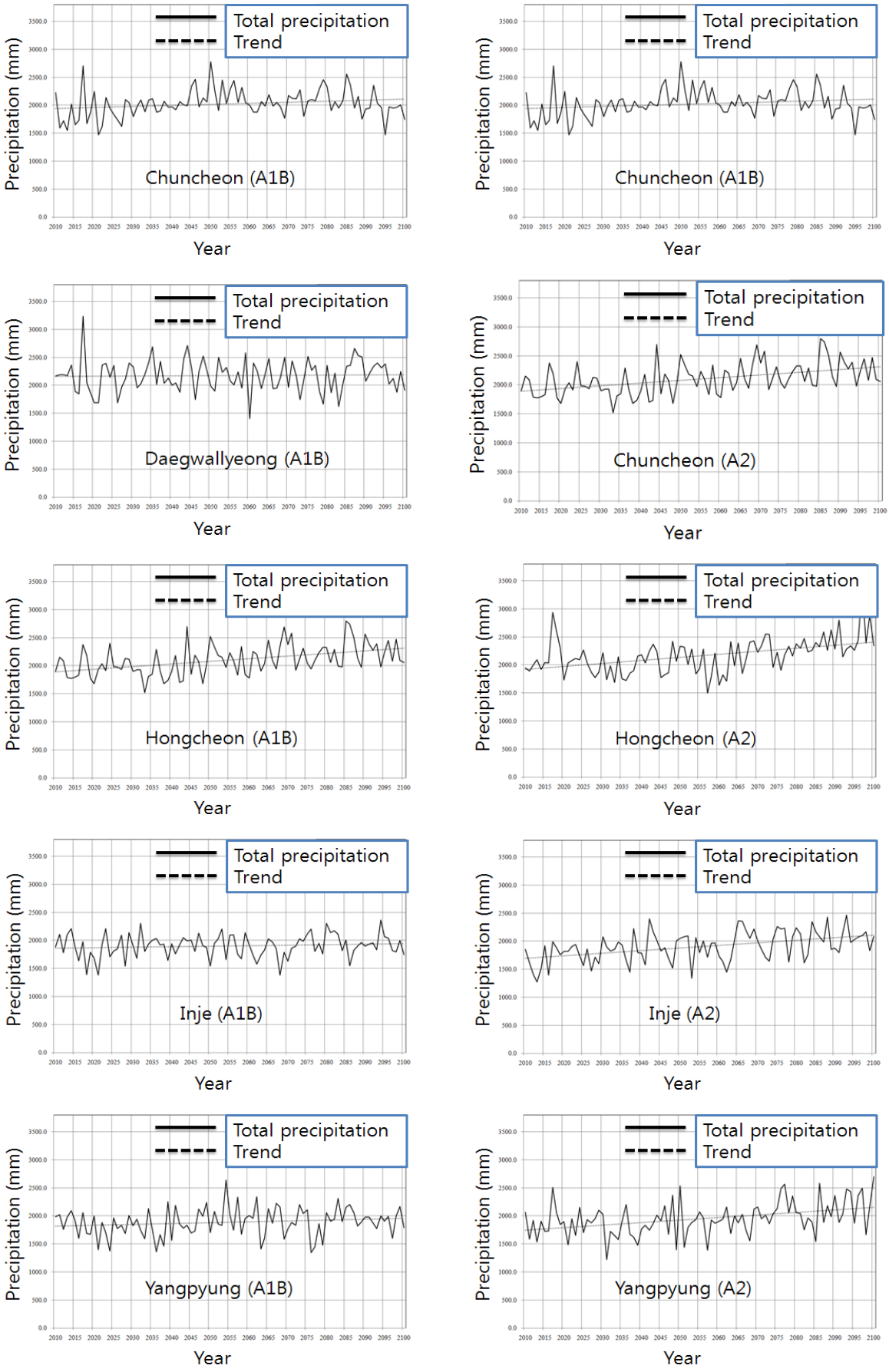


Fig. 6. Annual Mean of A1B Scenario (Future)

Table 5. Hydrological Parameters for HSPF Model

Classification of parameter			Parameter	Definition	Value
PERLND	PWATER	PWAT-PARM2	LZSN (in)	Lower zone nominal soil moisture storage	8.5
			INFILT (in/hr)	Index to the infiltration capacity of the soil	0.9022
			AGWRC (L/day)	Basic groundwater recession rate (when KVARY is zero)	0.9245
		PWAT-PARM4	UZSN (in)	Upper zone nominal soil moisture storage	0.83
			INTFW	Interflow inflow parameter	2
			IRC (L/day)	Interflow recession parameter, i.e., the ratio of interflow outflow rate today / rate yesterday	0.575

Table 6. Results of Calibration and Verification

Criteria	Calibration	Verification
R^2	0.79	0.62
RMSE	10.8 m^3/s	13.2 m^3/s

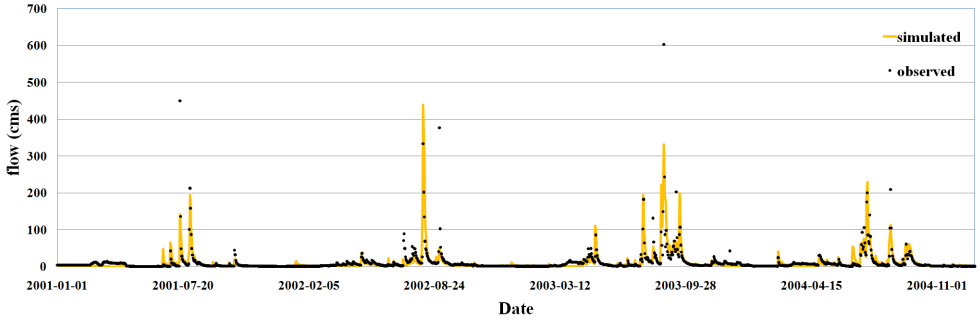
4.4 홍수취약성지수 산정

홍수취약성지수를 북한강 유역의 춘천댐, 인북천, 소양강, 의암댐, 홍천강, 청평댐 중권역에 적용하였다. 지형 및 수문학적 지표들은 유역 단위의 자료를 취득하여 손쉽게 사용할 수 있지만 사회·경제적 인자의 경우는 유역별 통계자료를 취득하기가 쉽지 않다. 이에 본 연구에서는 중권역별 편입비율을 이용하여 사회·경제적 인자의 각 시군별 자료를 중권역별 자료로 수정하여 활용하였다. 북한강 유역에는 7개의 군(양구군, 화천군, 고성군, 인제군, 홍천군, 가평군, 양평군)과 3개의 시(춘천시, 남양주시, 포천시)가 편입되어 있다. 본 연구에서 산정한 중권역별 편입비율은 Table 8과 같다. 사회·경제적 자료는 2008년 기준의 각 시군별 통계연보를 통하여 취득하였다.

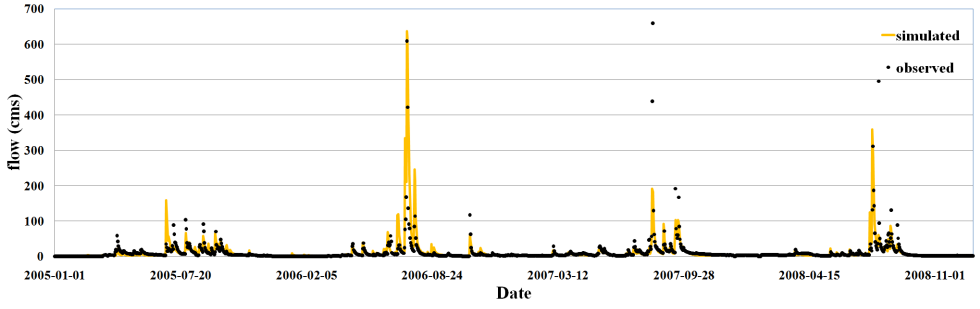
사전 조사를 통하여 얻어진 일련의 자료들은 모든 항목의 단위가 다르기 때문에 통합 지수를 만들기 위해서는 무차원화과정이 필요하다. 본 연구에서는 일반적인 표준화 방법들 중 다음과 같은 Re-scaling 방법을 사용하였다.

$$I_{qc}^{t} = \frac{x_{qc}^{t} - \min_c(x_q^{t_c})}{\max_c(x_q^{t_c}) - \min_c(x_q^{t_c})} \tag{4}$$

여기서, x_{qc}^{t}는 t시점에서 c지점의 지표, q의 값이다.



(a) Calibration



(b) Verification

Fig. 7. Calibration and Verification of Flowrate

Table 7. Comparison of Flow Duration Curve among Sub-watersheds (unit: m^3/s)

Flow duration	1010	1011	1012	1013	1014	1015
High flow (Q_{95})	45.4	23.7	75.7	146.7	50.0	45.4
Median flow (Q_{185})	19.1	9.3	29.3	57.0	19.4	19.1
Low flow (Q_{275})	9.4	4.6	14.4	27.8	9.5	9.4
Drought flow (Q_{355})	4.1	1.9	6.1	11.9	4.2	4.1

Table 8. Administration area Ratio Belonging Sub-watersheds

Sub-watershed	No. of Sub-watershed	Sub-watershed area (km^2)	Administration belonging ratio (%)
Chuncheon dam	1010	1,587.36	yanggu (70.2), Chuncheon (19.9), Hwacheon (84)
Inbookcheon	1011	931.22	Gosung (1.5), Yanggu (8.5), Inje (44.0)
Soyang River	1012	1.852.04	Yanggu (12.1), Inje (55.9), Chuncheon (34.0), Hongcheon (24.7)
Uiam dam	1013	721.70	Chuncheon (31.1), Gapyeong (44.6)
Hongcheon River	1014	1,566,05	Chuncheo (15.1), Hongcheon (73.4) Gapyeong (1.2), Yangpyeong (6.4)
Chungpyeong dam	1015	760.61	Gapyeong (54.2), Namyangju (40.6), Yangpyeong (13.5), Pocheon (0.1)

Table 9. Comparison of FVIs and Rankings Between with and without Climate Change Impacts

Name of watershed	FVI with climate change	FVI w/o climate change	Ranking with Climate change	Ranking w/o Climate change
1010	0.475	0.506	6	6
1011	0.526	0.573	5	3
1012	0.567	0.538	3	4
1013	0.559	0.533	4	5
1014	0.574	0.597	2	2
1015	0.704	0.743	1	1

이렇게 무차원화된 값은 Fig. 8에 나타난 바와 같다. Table 1의 가중치를 이용하여 각 중유역별 기후변화를 고려한 경우 홍수취약성지수 및 관리우선순위와 고려하지 않는 경우의 결과를 비교하여 제시하면 Fig. 9 및 Table 9와 같다. 분석결과 기후변화의 고려 여부와 상관없이 춘천댐 유역이 홍수에 대해 가장 안전한 유역으로 나타났고

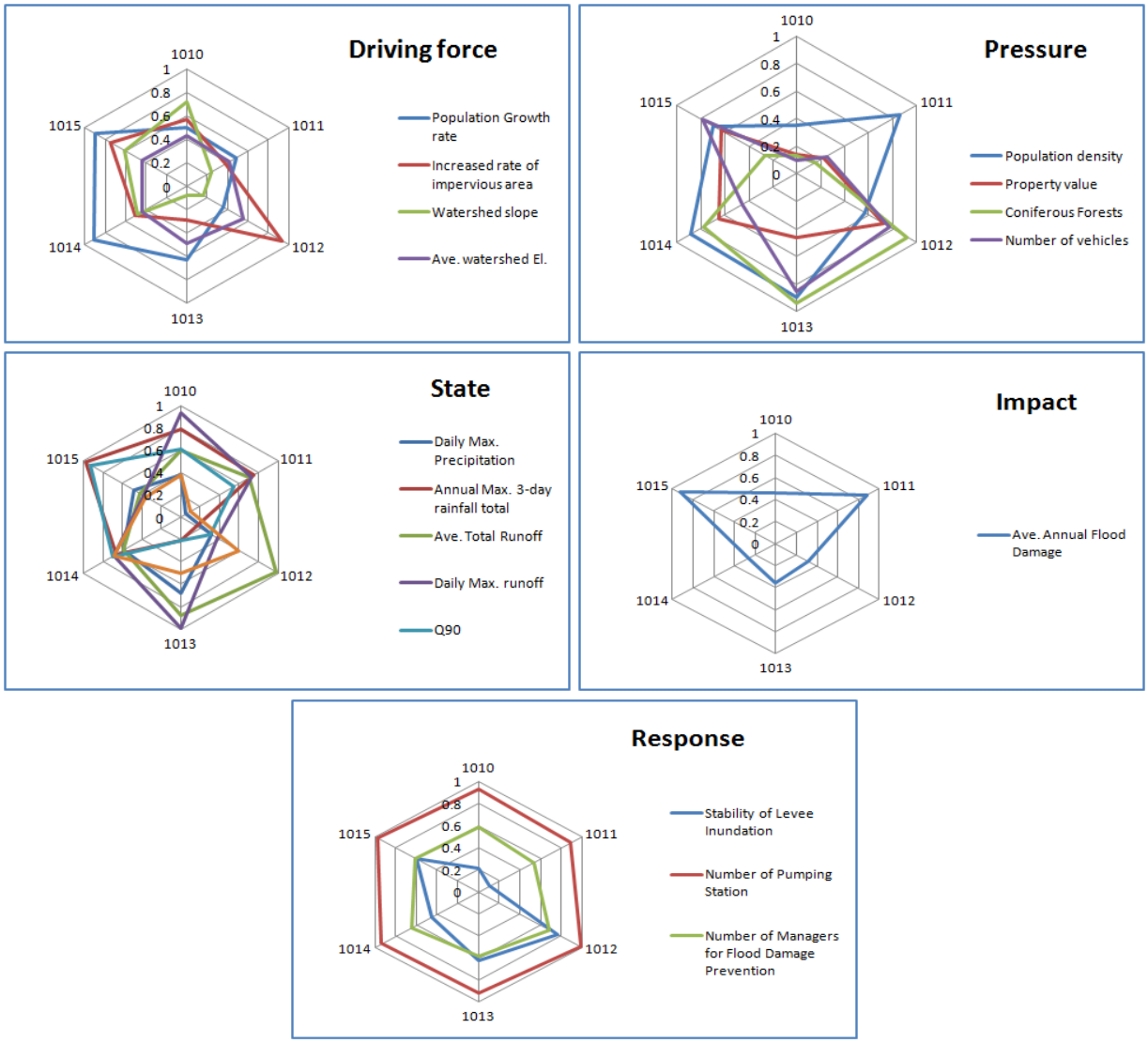


Fig. 8. Rescaled Data for FVI Calculation

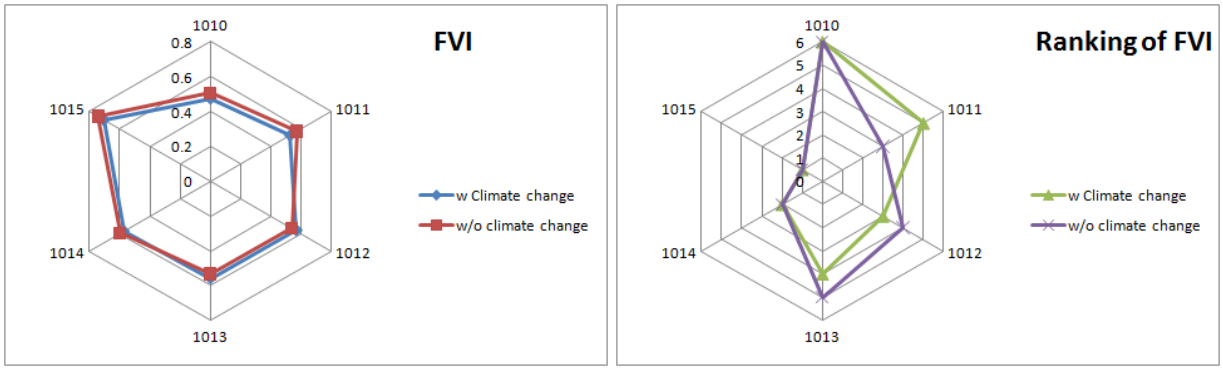


Fig. 9. FVI and Priority Ranking of All Sub-watersheds

청평댐 유역이 가장 좋지 않은 것으로 나타났다.

또한 하류 유역인 청평댐, 홍천강 유역이 상류인 춘천댐, 인북천 유역보다 홍수에 대해 상대적으로 취약한 것으로 나타났다. 또 두 유역이 기후변화영향을 고려할 경우 FVI 값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 소양강, 의암댐 유역의 경우 기후변화로 인해 홍수취약도가 증가할 것으로 예상된다. 이로 인해 춘천댐, 홍천강댐, 청평댐 유역은 FVI 값으로 인한 관리우선순위에 변화가 없

었지만 인북천, 소양강댐, 의암댐의 경우 변화가 발생하였다. 따라서 홍수취약도를 고려하여 유역관리에 대한 계획을 수립하기 위해서는 반드시 기후변화 요소를 고려되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 지속가능성 평가모형인 DPSIR 개념을 토대로 기후변화 요소를 반영하여 인문, 사회, 경제, 환경 인자를 모두 사용한 홍수취약성지표를 개발하였고 이를 북한강 유역의 춘천댐 중권역(1010), 인북천 중권역(1011), 소양강 중권역(1012), 의암댐 중권역(1013), 홍천강 중권역(1014), 청평댐 중권역(1015)에 적용하였다. 홍수취약성지수의 산정은 크게 6단계로 구성되어 있는데 1단계는 기후변화를 고려하여 홍수취약성지수의 정의 및 DPSIR 모형을 이용한 지표의 선정, 2단계는 각 지표들에 대한 가중치 결정, 3단계는 유역의 수문자료 및 인문자료의 수집, 4단계는 기후변화에 따른 기상자료(온도, 강우량)의 예측, 5단계는 기후변화에 따른 유출양상의 변화 분석, 6단계는 홍수취약성지수의 산정이다.

적용 결과, 기후변화 고려 여부와 상관없이 춘첨댐 유역이 홍수에 대해 가장 안전한 유역으로 나타났고 청평댐 유역이 가장 좋지 않은 것으로 나타났다. 또한 하류 유역인 청평댐, 홍천강 유역이 상류인 춘천댐, 인북천 유역보다 홍수에 대해 상대적으로 취약한 것으로 나타났다. 또두 유역이 기후변화영향을 고려할 경우 FVI 값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 즉 소양강, 의암댐 유역의 경우 기후변화로 인해 홍수취약도가 증가할 것으로 예상된다. 이로 인해 춘천댐, 홍천강댐, 청평댐 유역은 FVI 값으로 인한 관리우선순위에 변화가 없었지만 인북천, 소양강댐, 의암댐의 경우는 변화가 발생하였다. 따라서 홍수취약도를 고려하여 유역관리에 대한 계획을 수립하기 위해서는 반드시 기후변화 요소를 고려해야한다.

본 연구에서 개발한 홍수취약성지수는 유역의 인문, 사회, 경제, 환경 자료를 모두 고려한 현재 상태 및 기후변화에 따른 잠재적 취약성을 정량적인 지수로 간결하게 표현할 수 있다는 장점이 있다. 또한 지수를 구성하는데 DPSIR 개념을 사용하여 수문현상의 원인과 결과를 나타내는 요인들로 나누었기 때문에 향후 수자원 및 유역 관리의 방향을 제시할 수 있다고 판단된다. 다만 지표의 산정과 이에 대한 가중치의 결정은 지수 산정관련 연구에서 가장 중요하면서 취약한 부분이므로 후속연구 또는 관련 프로젝트를 통해 상세한 분석과 조사를 통한 정확한 산정이 필요하고 생각된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원(70%)과 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원을 한국연구재단의 기초연구사업(2010-0010609)의 지원(30%)을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

강민구, 이광만(2006). “수자원의 지속가능성 평가 지수 개발과 구성 요소의 중요도 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제1호, pp. 59-68.

강민구, 이광만, 고익환, 정찬용(2008). “요인분석을 이용한 수계 관리 맥락에서 유역관리 상태를 평가하기 위한 통합지수 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제3호, pp. 277-291.

기상연구소(2004). **기후변화대응 지역기후 시나리오 산출기술개발(III).**

김병식, 김보경, 경민수, 김형수(2008). “기후변화가 극한강우와 I-D-F 분석에 미치는 영향 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제4호, pp. 379-394.

김호석, 송영일, 김이진, 임영신. (2007). **환경평가와 지속가능발전지표 연계운용 방안에 관한 연구.** 한국환경정책·평가연구원.

박경신, 정은성, 김상욱, 이길성(2009). “기후변화 및 도시화에 따른 유황곡선 및 BOD 농도지속곡선 변화.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제12호, pp. 1091-1102.

배덕효, 정일원, 권원태(2007). “수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산(I): 유역별 기후시나리오 구축.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 191-204.

안소라, 박민지, 박근애, 김성준(2009). “기후변화가 경안천 유역의 수문요소에 미치는 영향 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제1호, pp. 33-50.

이동률, 임광섭, 최시중(2009). “치수특성평가를 위한 홍수위험지수 개발.” **한국수자원학회 2009년 학술발표회**, 한국수자원학회, pp. 342-346.

이재준, 장주영, 곽창재(2010). “각종 수문기상인자의 경년별 특성변화분석(I): 기본통계량, 경향성을 중심으로.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권,

제4호, pp. 409-419.

정은성, 이길성 (2007). "다기준 의사결정기법을 이용한 공간위험 순위산정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제12호, pp. 969-983.

정은성, 이길성, 박경신 (2008). "다기준 의사결정기법을 이용한 대안평가지수 개발." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제1호, pp. 87-100.

정일원, 이병주, 김광천, 배덕효 (2009). "기후변화에 따른 홍수피해 취약성 평가." **한국수자원학회 2008년 학술발표회**, 한국수자원학회, pp. 289-293.

최시중, 이동률 (2005). "지속가능한 수자원 개발과 관리를 평가하기 위한 지표." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제9호, pp. 779-790.

최지연, 정지호, 정명국, 최희정 (2008). "DPSIR 구조에 의한 태안군 연안관리 여건과 통합관리 방향." 대**한지리학회논문집**, 대한지리학회, 제7권, 제1호, pp. 64-66.

AQUA TERRA (2004). *BASIN/HSPF Training Handbook*. U.S. EPA.

Bae, D.H., Jung, I.W., and Chang, H. (2008). "Long-term Trend of Precipitation and Runoff in Korean River Basins." *Hydrological Processes*, Vol. 22, No. 14, pp. 2644-2656.

Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L. Jr., Jobes, T.H., and Donigian, A.S. Jr. (2001). *Hydrologic Simulation Program-Fortran (HSPF) User's Manual for Version 12*. U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, GA.

Carter, J.G., White, I., and Richards, J. (2009). "Sustainability Appraisal and Flood Risk Management." *Environmental Impact Assessment Review*, Vol. 29, No. 1, pp. 7-14.

Choi, Y. (2002). "Changes on Frequency and Magnitude of Heavy Rainfall Events in Korea." *Journal of the Korean Data Analysis Society*, Vol. 4, No. 3, pp. 269-282.

European Environment Agency (1999). *Environmental Indicators: Typology and Overview*. Copenhagen, Denmark.

Gibbons, J.D. (1971). *Nonparametric Statistical Inference*. McGraw-Hill, New York.

Hay, L.E., McCabe, G.J., Wolock, D.M., and Ayers, M.A. (1991). "Simulation of Precipitation by Weather Type Analysis." *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 4, pp. 493-501.

Hamouda, M.A., Nour El-Din, M.M., and Moursy, F.I. (2009). "Vulnerability Assessment of Water Resources Systems in the Eastern Nile Basin." *Water Resources Management*, Vol. 23, No. 13, pp. 2697-2725.

IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, UK.

Jung, I.W., Bae, D.H., and Kim, G. (2010). "Recent Trends of Mean and Extreme Precipitation in Korea." *International Journal of Climatology*. DOI:10.1002/joc.2069.

Mann, H.B. (1945). "Nonparametric Tests Against Trend." *Econometrica*, Vol. 13, pp. 245-259.

Palmer, R., Wiley, M., and Kameenui, A. (2004). *Will Climate Change Impact Water Supply and Demand in the Puget Sound?* Department of Civil and Environmental Engieering, University of Washington, Seattle, WA.

Panofsy, H.A., and Brire, G.W. (1963). *Some Application of Statistics to Meteorology*. Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, p. 224.

Pirrone, N., Trombino, G., Cinnirella, S., Algieri, A., Bendoricchio, G., and Palmeri, L. (2005) "The Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) Approach for Integrated Catchment-coastal Zone Management: Preliminaty Application to the Po Catchment-Adriatic Sea Coastal Zone System." *Regional Environmental Change*, Vol. 5, No. 2-3, pp. 111-137.

Skoulickidis, N.Th. (2009). "The Environmental State of Rivers in the Balkans-A Review Within the DPSIR Framework." *Science of the Total Environment*, Vol. 407, pp. 2501-2516.

Sullivan, C.A. (2002). "Calculating a Water Poverty Index." *World Development*, Vol. 30, No. 7, pp. 1195-1210.

Valenzuela Montes, L.M., and Matáran Ruiz, A. (2008). "Environmental Indicators to Evaluate Spatial and Water Planning in the Coast of Granada (Spain)." *Land Use Policy*, Vol. 25, No. 1, pp. 95-105.

Wilby, R.L. (1994). "Stochastic Weather Type Simulation for Regional Climate Change Impact Assessment." *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 12, pp. 3395-3403.

Wilby, R.L., Dawson, C.W., and Barrow, E.M. (2002).

"SDSM-A Decision Support Tool for the Assessment of Regional Climate Change Impacts." *Environmental and Modelling Software*, Vol. 17, pp. 145-157.

Wood, A.W., Leung, L.R., Sridhar, V., and Lettenmaier, D.P. (2004). "Hydrologic Implications of Dynamical and Statistical Approaches to Downscaling Climate Model Outputs." *Climatic Change*, Vol. 62, Issue 1-3, pp. 189-216.

논문번호: 11-001	접수: 2011.01.03
수정일자: 2011.02.11/03.14	심사완료: 2011.03.14