

가뭄 위험도 평가기법 구축 및 정책적 활용에 관한 연구

On the Development
of the Methodological Framework
for Drought Risk Assessment

이상은



국토연구원
KRIHS

가뭄 위험도 평가기법 구축 및 정책적 활용에 관한 연구

On the Development of the Methodological Framework
for Drought Risk Assessment

이상은

- 연구진

이상은 책임연구원

- 외부연구진

윤선권 APEC기후센터 선임연구원

- 연구심의위원

김태환 국토연구원 선임연구위원

김종원 국토연구원 선임연구위원

한우석 국토연구원 책임연구원

이병재 국토연구원 책임연구원

주요 내용 및 정책제안

본 연구보고서의 주요 내용

- ① 기후변화로 극심한 수문현상이 일상화되고 가뭄에 따른 경제적 손실과 사회적 갈등이 증가되는 상황에서 수자원 개발 여건상의 지역 차이를 줄이도록 중앙정부 주도의 효과적인 가뭄저감대책 마련이 필요
- ② 가뭄 시 잠재적인 피해규모에 근거해 지역별 투자 우선순위를 확보하고, 위험가중 요인을 효과적으로 해소시키는 저감대책을 마련하며, 역할과 책임·비용분담·추진일정 등을 구체화할 필요가 있음
- ③ 효과적인 가뭄저감대책 수립을 위해 정책결정자, 담당자, 시민들이 투자의 필요를 체감할 수 있도록 위험도 평가에 대한 기술역량을 확보해야 함
- ④ 가뭄 시 생활용수 부족으로 인한 주민고충에 초점을 두고 최근 발전된 기상수문분석기술, 시스템분석기술, GIS 기술 등을 연계해 가뭄 위험도 평가기술을 시범적으로 적용한 결과 잠재적 피해규모 산정, 고위험지역 선정, 저감대책 방안 제시 등 상당한 정책지원 효과가 있는 것으로 확인됨

본 연구보고서의 정책제안

- ① (전 국토에 걸친 가뭄 위험도 평가 실시) 극심한 가뭄 발생 시 잠재적 피해 수준이 높은 고위험구역을 선제적으로 파악
- ② (지역맞춤형 가뭄 저감대책 수립을 위한 시범사업 추진) 위험도 평가 기술을 활용해 고위험구역의 위험가중요인에 맞는 저감대책을 마련하고 다양한 이해관계자들과 함께 저감대책 시범사업 추진
- ③ (가뭄 피해민감성 완화를 위한 대책 수립) 실제 가뭄 피해가 발생한 지역의 주민들과 함께 지역의 피해민감성을 낮추는 데 효과적인 대책을 조사하고 도시·환경·의료·복지 등 각종 개발계획에 반영해 체계적으로 대응
- ④ (가뭄 위험도 평가 역량 구축) 가뭄 위험도 평가 기술을 공업용수, 농업용수 등에도 적용할 수 있도록 하고, 이를 위한 R&D 투자 확대

C O N T E N T S

차례

주요 결론 및 정책제안	iii
제1장 연구의 개요 및 목적	1
1. 연구의 배경	3
2. 연구의 목적	5
3. 연구의 범위 및 수행방법	5
4. 선행연구 분석 결과	7
제2장 가뭄 위험도에 대한 개념 및 방법론체계 구축	15
1. 가뭄의 정의	17
2. 자연재해측면에서 가뭄의 특징	19
3. 가뭄 위험도	21
4. 가뭄 위험도 평가 방법론체계	28
제3장 가뭄 위험도 평가 기법	31
1. 재해특성 평가단계	33
2. 노출특성 평가단계	40
3. 취약성 평가단계	42
4. 위험도 산정단계	44
제4장 사례연구 적용 결과	45
1. 사례연구 대상지 기초조사	47
2. 재해특성 평가 결과	52

3. 노출특성 평가 결과	60
4. 취약성 평가 결과	62
5. 위험도 산정 결과	63
6. 방법론상의 유용성 검토	66
 제5장 결론	 69
1. 정책적 시사점	71
2. 추후 연구	76
 참고문헌	 79
SUMMARY	85
부록 1. 가뭄발생 진단에 활용가능한 지표	87
부록 2. 가뭄 위험도 산정 관련 선행연구	89
부록 3. 가뭄 위험도 저감의 국제동향 및 절차	99
부록 4. 사례연구 대상지 현장조사 사진자료	109
부록 5. 저수지 및 용수공급시설 관리 모의를 위한 시스템 모형	116
부록 6. 가뭄빈도분석 결과	119

	제 1 장 연구의 개요 및 목적	
--	----------------------	--

연구의 개요 및 목적

1. 연구의 배경

□ 이상가뭄 대처를 위한 대안적 접근법으로 위험도 저감대책 강조

- 일괄적인 수자원 시설용량 확보대책은 경제성이 저하되고 수요와 공급 모두 예측 불확실성이 증가해 대안적 접근법이 요구됨 (Gleick, 2003; Pahl-Wostl, 2007; Lee와 Park, 2010)
- High-Level Meeting on National Drought Policy (WMO와 UNCCD, 2012) 등 가뭄관련 국제회의에서 가뭄분야에도 위험도 관리의 도입 강조
 - 전통적인 시설중심의 안전도 전략을 보완함에 있어서 ‘잠재적으로 피해가 집중될 수 있는 생활 또는 경제활동 공간을 대상으로 한 저감대책’ 중시
 - 즉, 가뭄에 대한 고위험구역을 파악하고, 물부족 상황이 발생했을 때 주민과 경제활동이 피해를 덜 받을 수 있도록 이 공간이 가진 사회적, 경제적, 환경적, 기술적 불리함을 평상시에 해소하려는 전략을 의미

□ 가뭄분야 저감대책을 위해 수반되어야 할 세 가지 활동 (UNDP, 2011)

- 첫째는 위험도 평가로서 가뭄 발생시 물부족 피해가 집중될 수 있는 곳에 대해 신뢰할 수 있는 공간정보를 확보하는 것
- 둘째는 고위험구역에 적합한 다양한 저감대책을 선정 또는 발굴한 뒤 효과와 수용가능성을 평가하는 것
- 셋째는 메인스트리밍 (mainstreaming), 즉, 관계부처나 지자체의 각종 계획의 수립과 집행에 저감대책을 반영시키는 것
- 이 모든 활동을 위해 위험도에 대한 정보는 우선적으로 확보되어야 함

□ 저감대책에서 사용되는 위험도 정보의 요구조건

- 저감대책에서 사용되는 위험도 정보는 전문가들간의 학술적인 활용을 넘어, 정책결정자, 담당공무원, 개발은행, 심지어 주민 등 다양한 이해당사자들에게 저감대책 필요에 대한 확신을 제공할 수 있어야 함
- UNISDR (2011a), IHP (2012), ICHARM (2013), Sawano와 Lee (2014) 등의 물재난 관련 정책 논의들을 볼 때, 이해당사자들은 다음과 같은 질문을 갖는 것으로 판단됨
 - 질문 ① 정말 가뭄에 의해 재난이 발생할 수 있을 것인가?
 - 질문 ② 어느 지역에 가뭄 위험이 집중되어 있는가?
 - 질문 ③ 무슨 저감대책이 주민들을 효과적으로 보호할 수 있을 것인가?

□ 가뭄분야 저감대책을 위한 위험도 정보 개발 현황

- 지난 10여년 동안 UN차원의 이니셔티브 (대표적으로, UNISDR의 Global Platform for Disaster Risk Reduction)와 함께 여러 선도연구들 (예로서, BCPR, 2004; Dillei 외, 2005; ICHARM, 2013)이 추진되어 오고 있음
 - 이 연구들은 물재해에 대한 위험도 개념을 정립하였으며, 이용가능한 자료와 모형에 대해 방대하게 검토
 - 특히, 물재해 중에서 홍수분야의 경우 최근 발전된 수문기술들을 연계하고 사회취약성에 대한 통계분석 결과를 접목해 인적손실이나 경제적 피해를 예상할 수 있는 상당한 가능성이 제시됨 (예로써, Okazumi 외, 2014; Lee 외, 2015a)
- 가뭄의 위험도에 대해서는 시범사업들이 평가 방법론 개발과 관련해 아직 만족스러운 결과를 얻지 못했으며, 특히, 저감대책이라는 실무에 활용되기에는 여전히 위험도 정보의 설득력이 불충분하다고 알려져 있음 (UN-Water, 2012; UNISDR, 2011b)

2. 연구의 목적

□ 실무적인 저감대책에서의 활용을 고려한 가뭄 위험도 평가 방법론 제시

- 본 연구는 저감대책 과정에서 이해당사자들이 갖게 되는 질문들을 해소하려는 차원에서, 다음의 네 가지 요구조건을 충족할 수 있는 위험도 평가 방법론을 제시코자 함
- 첫째, (질문 ①에 대해) 가뭄으로 인한 피해규모 판단에 도움 제공
- 둘째, (질문 ①에 대해) 가뭄기록을 가지고 검증가능한 위험도 정보 제공
- 셋째, (질문 ②에 대해) 특정 가뭄 조건하에서 넓은 지역에 걸쳐 위험도가 집중된 지역을 명확히 설정
- 넷째, (질문 ③에 대해) 고위험지역의 기저요인 (underlying risk factors)에 대한 이해를 제공해 지역에 맞는 저감대책 선별이 가능토록 함

3. 연구의 범위 및 수행방법

- 본 연구는 다음과 같이 구성됨

□ (제2장) 가뭄 위험도에 대한 개념 및 방법론체계 구축

- 기존의 학술연구들을 토대로 본 연구에서 사용되는 주요 개념을 구체화
 - 가뭄의 정의와 특징
 - 가뭄 위험도 개념
- 정의된 위험도에 맞도록 가뭄 위험도 평가를 위한 전체 방법론체계 정립

□ (제3장) 가뭄 위험도 평가 기법

- 재해특성 평가단계
 - 특정 가뭄 조건에서 물이용가능량 분석 방법 제시
- 노출특성 평가단계
 - 특정 가뭄 조건에서 물부족 영향 분석 방법 제시

- 취약성 평가단계
 - 노출특성-주민피해 관계식 도출을 통한 가뭄 취약성 정량화 방법 제시
- 위험도 산정단계
 - 특정 가뭄 조건에서 위험도 정량화 및 위험도 지도 구축

□ (제4장) 사례연구 적용 결과

- 사례연구 대상지 기초조사
 - 방법론의 유용성을 실증적으로 검토하기 위한 사례연구 대상지 선정
 - 위험도 평가를 위한 사례연구 대상지 기초조사 수행
- 재해특성 평가 결과
 - 사례연구 대상지 물이용가능량 분석 결과 및 검토
- 노출특성 평가 결과
 - 사례연구 대상지 물부족 영향 분석 결과 및 검토
- 취약성 평가 결과
 - 사례연구 대상지 노출특성-주민피해 관계식 도출 결과 및 검토
- 위험도 산정 결과
 - 사례연구 대상지 위험도 산정 결과 및 검토
 - 위험도 지도 개발 결과 및 검토
- 사례연구 결과를 토대로 가뭄 위험도 평가 방법론의 저감대책 논의과정에서 유용성을 종합 검토

□ (제5장) 결론

- 본 연구를 통해 얻은 결과와 시사점을 토대로 제시된 방법론의 정책 지원 가능성 검토
- 전문가 자문회의, 실무자 면담, 학술논문 검토 등을 토대로 도출된, 방법론 개선과 연구확대에 필요한 추후 연구과제 항목 제안

4. 선행연구 분석 결과

□ 선행연구 검토 범위

- 가뭄 위험도 평가와 관련된 연구는 크게 두 가지 분야에서 수행되고 있음
- 첫째, 기후변화적응 (climate change adaptation) 및 지구환경변화 (global environment change) 분야 연구
 - 90년대 중후반 이후 사회학 또는 관리과학을 배경으로 발전된 연구분야
 - 연구자들은 외부 자극으로서의 가뭄 (기상수문의 극단사상)과 수용체로서의 특성 (지역의 사회경제지리환경)을 입체적으로 고려해 가뭄의 영향을 설명하기 위한 지표 제시
- 둘째, 자연재해관리 (natural hazard management) 분야의 연구
 - 20세기 중반 이후부터 자연과학 또는 응용공학을 배경으로 발전된 연구분야
 - 연구자들은 현재 다양한 자연재해에 대한 위험도 평가의 이론적 발전을 주도하고 있음
 - 2005년 효고행동강령 채택 이후 전통적인 기상수문학에서 가뭄 발생을 진단하는 것을 넘어 사회경제적 영향을 평가하는 연구가 발표되고 있음

1) 기후변화적응 및 지구환경변화 분야의 선행연구 조사

□ 검토된 선행연구

- Global Water System Partnership (Sullivan 외, 2006)의 가뭄분야 지표 산정법
- Asia-Pacific Water Forum (ADB-APWF, 2013)의 가뭄분야 지표 산정법
- 국립환경과학원 (2010)의 가뭄분야 지표 산정법
- 국토연구원 (심우배 외, 2011; 국토연구원, 2012)의 가뭄분야 지표 산정법

□ 선행연구의 특징

- 이 지표들은 규범적 개념모형 (axiomatic or conceptual model)에 근거해 가뭄 영향측면에서 개별공간을 특성화
 - 영향을 발생시키는 원인들을 임의의 카테고리, 예를 들어, 노출도, 민감도, 취약도로 구분하고 각 카테고리별로 수집가능한 자료들을 모아 표준화
 - 표준화 값을 산술조합해 종합지수 (composite index)를 기 선택한 공간단위별로 부여
- 이 지표들은 기후 등 지구환경변화가 특정 지역에 미치는 가뭄 영향에 대해 거시적인 추세를 파악하려는 목적 (즉, 낙관적 미래 vs. 비관적 미래)에 적합
- 가뭄위험도 저감대책 목적과는 잘 부합되지 않음 (Hinkel, 2011; Engle, 2011; Cha 외, 2012)
 - 모형의 구조라던지 카테고리에 포함될 자료의 선별이나 중요도가 모두 연구자의 주관에 의존
 - 최종적으로 제시된 종합지수의 물리적 의미가 모호해 실제 피해수준과의 관련성을 파악하기 힘들
 - 검증할 수단이 부족하며, 이해당사자들에게 고위험지역이나 저감대책 효과를 확신시키는 데에 어려움이 종종 발생

2) 자연재해관리 분야의 선행연구 조사

□ 검토된 선행연구¹⁾

- UNDP Disaster Risk Index (BCPR, 2004)의 가뭄분야 위험도 평가 기법
- 세계은행 (Dilley 외, 2005)의 가뭄분야 위험도 평가 기법
- UNEP/GRID PREVIEW의 가뭄분야 위험도 평가 기법
- Shahid와 Behrawan (2008), Shiau와 Hsiao (2012), Zhang 외 (2014) 등의 학술연구에서 제시된 가뭄 위험도 평가 기법

1) 자연재해관리 분야의 선행연구들은 본 연구와 관련성이 높아, 각 문헌에 대한 저자의 구체적인 비평을 [부록 2]에 포함시켰음

□ 선행연구의 특징

- 2005년 효고행동강령을 기점으로, 선행연구들은 UN 차원의 자연재해 저감방침에 따라 실무적인 지원이 가능토록 방법론 개발 방향이 정립되고 있음
 - 대표적으로, UNESCO International Hydrological Programme (IHP, 2012), UNISDR의 Scientific and Technical Advisory Group (2013) 등은 위험도 평가 방법론의 개발을 주도
- UNDP, 세계은행, 정부간 개발은행, 회원국 정부 등의 기관과의 실무적 논의를 배경으로, 특히 국제원조기금을 개발도상국가 물재난 저감사업에 활용하는 것을 정당화 하는 데에 필요한 개념적·방법론적 체계를 검토
 - 재해특성 분석: 수문모형과 기상관측영상 자료의 결합으로 재해특성을 고해상도로 분석
 - 노출특성 분석: 재해특성 분석 자료와 인구, 주거, 산업 등의 전자지도를 이용해 공간분석해 재해발생 지역에 위치한 객체들을 고해상도로 분석
 - 취약성 분석: 실제 재난 기록을 토대로 해당 국가나 사회가 갖는 피해 증감요인의 통계분석해 실증적인 대리변수 조사
 - 위험도 산정: 노출특성과 취약성 대리변수를 결합해 잠재적 피해 수준 제시
- 물재난 중에서 홍수분야에 대해서는 최근 발전된 수문기술들을 접목해 인적손실이나 경제적 피해의 잠재적인 수준을 적절히 평가함 (Okazumi 외, 2014)
- 하지만 여전히 가뭄의 위험도에 대한 대부분의 시범사업들이 아직 만족스러운 결과를 얻지 못했으며, 특히, 저감대책이라는 실무에 활용되기에는 여전히 지표값의 설득력이 불충분한 것으로 알려져 있음 (UNISDR, 2011b)
 - 아직, 학술적으로 해결해야 할 연구들이 많이 남아 있으며, 특히 가뭄 위험도는 공간분석시 다른 자연재해 보다 더욱 많은 사회인자들 (공간의 개발특성, 물수요, 공급시스템의 용량과 구조, 공급효율성 등)을 고려해야 한다는 점이 대두됨 (UN-Water, 2012)

3) 본 연구의 위험도 평가 방법론 개발 방향

□ 선행연구 조사 결과

- 기후변화적응/지구환경변화 분야 선행연구 (<표 1-1>의 [1])
 - 가뭄 위험과 관련된 요소들을 입체적으로 고려해 선택된 공간의 가뭄 영향을 예상하는 데에 시사점을 얻을 수 있는 지수를 제공하고 있음
 - 지수산정의 주관성, 지수의 물리적 개념 부족 등으로 인해 실무적인 저감대책 의사결정에서 적합한 분석방법이라고 보기는 힘들
- 자연재해관리 분야 선행연구 (<표 1-1>의 [2])
 - 재난위험도 개념체계를 따라 기상수문학 이론을 토대로 정량적인 분석 가능
 - 가뭄분야에 대해서는 아직 재해특성 조차 신뢰성있게 분석되지 못하고 있으며, 더 많은 사회적 요소들을 고려해 공간분석할 수 있는 방법론이 요구

〈표 1-1〉 선행연구의 저감대책 목적에 대한 활용가능성

	가뭄분야 저감대책의 목적을 위한 활용성		
	질문 ①에 대한 가능성	질문 ②에 대한 가능성	질문 ③에 대한 가능성
기후변화적응/지구환경변화 분야 선행연구 [1]	낮음	중간	낮음
자연재해관리 분야 선행연구 [2]	중간	중간	낮음
[Note] - 질문 ①: 정말 가뭄에 의해 재난이 발생할 수 있을 것인가? - 질문 ②: 어느 지역에 가뭄 위험이 집중되어 있는가? - 질문 ③: 무슨 저감대책이 주민들을 효과적으로 보호할 수 있을 것인가? - [1]에 포함된 선행연구: Sullivan 외 (2006), ADBAPWF (2013), 국립환경과학원 (2010), 심우배 외 (2011), 국토연구원 (2012) 등 - [2]에 포함된 선행연구: BCPR (2004), Diley 외 (2005), UNEP/GRID PREVIEW, Shahid와 Behrawan (2008), Shiau와 Hsiao (2012), Zhang 외 (2014) 등			

□ 가뭄 위험도 평가 방법론의 개발 방향

- 가뭄분야 저감대책에 대한 정책적 논의와 선행연구에서 제시된 현재 기술의 발전수준을 고려해 다음과 같이 가뭄 위험도 평가 방법의 개선 방향을 제시
- (i) “정말 가뭄에 의해 재난이 발생할 수 있을 것인가?”의 질문에 답을 제공하기 위한 평가 방법론 개발 방향
 - (단기적 연구 목표) 가뭄으로 인한 피해규모 판단에 도움 제공
 - 위험도 정보는 해당분야 전문가 외에도 다양한 이해당사자들에 의해 활용되기 때문에 최대한 소통가능한 정보로 제공되어야 함
 - 특정지역이 가뭄으로 재난에 이르게 될 수 있다는 점을 설득하기 위해 주민들이 겪을 수 있는 고충이나 지역경제에 미칠 수 있는 손실에 대해 체감할 수 있는 정보 제공이 필요 (IHP, 2012)
 - (단기적 연구 목표) 검증 가능한 위험도 정보 제공
 - 개발된 위험도 정보에 대한 신뢰를 얻기 위해 유사한 가뭄 조건에서 발생한 과거 가뭄피해의 크기와 공간분포가 재현될 수 있음을 검증할 필요가 있음
 - 위험도 및 위험도 요소들을 평가할 때 물리적인 개념을 명확히 하고 기존 재난분야 이론체계와 잘 부합하도록 함
 - (중장기적 연구 목표) 장래 피해규모에 대한 통찰력 제공
 - 위험도는 본래 미래를 준비하기 위해 필요한 정보이기 때문에 기상수문과 사회경제적 변화 추세를 감안해 현재의 가뭄 위험도가 어떻게 증감 또는 확산되는 지를 설명할 수 있어야 함
 - 단기적으로는, 위험도 평가의 방법 선택시 장래 예측연구에서 활용가능한 기술과 자료를 우선시

(ii) “어느 지역에 가뭄 위험이 집중되어 있는가?”의 질문에 답을 제공하기 위한 평가 방법론 개발 방향

- (단기적 연구 목표) 특정 가뭄 조건하에서 넓은 지역에 걸쳐 위험도가 집중된 지역을 명확히 설정
 - 위험도 평가시 전 지역에 걸쳐 가뭄에 대해 일관된 확률 기준을 적용함으로써 추후 설정된 고위험구역의 객관성 확보
 - 국가 단위의 계획에서는 전국차원에서, 그리고 유역 단위의 계획에서는 대유역 차원에서 위험도 평가가 이루어져야 하므로 일반적인 평가에 비해 방대한 지역을 포괄해야 함을 의미
 - 동시에 높은 공간해상도를 유지해야 하는데, 고위험구역이 과도하게 넓게 설정될 경우 위험도의 공간적 불균일성을 간과해 ‘안전한 넓은 지역 내 소외된 좁은 지역’을 발견하기 힘들며, 불필요한 지역을 포괄하게 되어 저감대책의 비효율성을 초래 가능하기 때문임

(iii) “무슨 저감대책이 주민들을 효과적으로 보호할 수 있을 것인가?”의 질문에 답을 제공하기 위한 평가 방법론 개발 방향

- (단기적 연구 목표) 고위험지역의 기저요인 (underlying risk factors)에 대한 이해를 제공해 지역에 맞는 저감대책 선별을 가능토록 함
 - 저감대책은 해당 지역에 가뭄재해가 발생하는 것을 차단하는 것이 아니라, 사회경제에 미치는 피해를 줄이는 것을 목표함
 - 이를 위해서는 잠재적인 피해가 높은 이유를, 즉, 가뭄발생시 용수이용 가능성이 크게 저하되는 지, 물부족시 주민이나 산업활동의 영향이 클지, 아니면 가뭄발생과는 무관하지만 물부족시 피해를 증감시키는 특별한 사회작경제적환경적기술적 원인이 있는 지 등에 대한 이해를 요구함

- (중장기적 연구 목표) 저감대책 효과 정량화
 - 각종 개발계획에 저감대책을 반영하는 것은 정부부처나 지자체의 엄격한 검토와 실무적인 결정을 요구함
 - 즉, 정부의 예산과 노력이 얼마나 요구되는 지, 그리고 어느 정도 위험도 저감 효과가 있는 지에 대해 최대한 ‘실무적인 언어’로 표현되어야 함

〈표 1-2〉 가뭄 위험도 평가 방법론 개발 방향 설정

저감대책상 방법론의 필요성	개발 방향	비고
“정말 가뭄에 의해 재난이 발생할 수 있을 것인가”의 질문	가뭄으로 인한 피해규모를 판단에 도움 제공	단기
	검증 가능한 위험도 정보 제공	단기
	장래 피해규모에 대한 통찰력 제공	장기
“어느 지역에 가뭄 위험이 집중 되는가”의 질문	특정 가뭄 조건하에서 넓은 지역에 걸쳐 위험도가 집중된 지역을 명확히 설정	단기
“무슨 저감대책이 주민들을 효과적으로 보호할 수 있을 것인가”의 질문	고위험지역의 기저요인 (underlying risk factors)에 대한 이해를 제공해 지역에 맞는 저감대책 선별이 가능토록 함	단기
	저감대책의 효과 정량화	장기

- 설정된 방법론 개발 방향 가운데에서, 본 연구에서는 특별히 단기적으로 해결코자 한 네 가지 사항에 대해 초점을 두기로 함

	제 2 장 가뭄 위험도에 대한 개념 및 방법론체계 구축	
--	--	--

가뭄 위험도에 대한 개념 및 방법론체계 구축

본 장에서는 기존의 학술연구들을 토대로 본 연구에 필요한 기본 개념을 구체화하려는 목적이 있음

1. 가뭄의 정의

□ 통용되는 가뭄의 정의

- 흔히 가뭄은 강수량이 장기간에 걸쳐 평년에 비해 저조한 자연현상으로 인식됨
- 이 자연현상은 다양한 단계에 걸쳐 영향이 심화되면서 자연과 사회에 폭넓게 피해를 발생시킴
- 이처럼 가뭄은 포괄적인 자연현상을 지칭하기 때문에 선행연구들은 다음과 같이 가뭄의 세분화된 정의를 이용
 - 기상학적 가뭄 (meteorological drought): 특정 기간 동안 강수량 부족에 대한 세기나 지속시간이 일정 수준을 상회한 현상
 - 농업적 가뭄 (agricultural drought): 작물 재배나 식생에 필요한 토양수분 부족
 - 수문학적 가뭄 (hydrological drought): 호수, 저수지, 대수층, 하천의 계절별 또는 월별 수량 부족
 - 사회경제적 가뭄 (socio-economic drought): 강수량 부족으로 인해 사회의 물수요와 공급간의 불균형이 초래되는 현상

□ 강수량 부족의 지속기간에 따른 가뭄 확대

- 단계별로 영향이 확대되기 때문에, 장기간 강수량이 저조하게 되면 조정이나 농업활동이 제일 먼저, 그리고 가장 큰 피해를 받게 됨
- 계속해서 강수량 저조가 지속되면 어느 정도 지체시간을 거쳐 하천과 수자원의 수량감소로 이어져 물환경 생태 피해, 위락편익의 감소, 에너지 생산 감소를 발생시킴
- 사회경제적 가뭄은 다른 종류의 가뭄에 비해 상대적으로 잘 발생하지 않는 예외적인 현상이라 할 수 있음
 - 일반적으로 인간활동이 활발한 지역이라면 개발초기 상당히 큰 저수용량을 지닌 수자원 시설물을 확보하고 있음
 - 사회경제적 가뭄은 기상학적 가뭄이 상당히 긴 기간 지속될 경우에 한정해 강수량 부족이 수자원 이용가능량 이하로, 다시 용수수급 불균형을 일으킨 뒤 관광산업과 공장가동에 경제적 손실을 입히고 도시생활의 고난으로 이어짐

□ 본 연구에서 가뭄의 조작적 정의

- 본 연구는 가뭄의 자연재해측면에 관심을 갖고 있음
 - 즉, 가뭄이 주민, 경제 등에 있어서 방대한 손실을 가져다주며 커뮤니티나 사회 기능의 심각한 훼손을 발생시킬 잠재력을 분석해야 함
 - 기상학적 가뭄, 농업적 가뭄, 또는 수문학적 가뭄은 자연재해측면을 고려하기 힘들
- 이에 본 연구에서는 가뭄을, 사회경제적 가뭄의 차원에서 ‘장기간 강수량 저조로 악화된 물이용가능성이 해당 지역의 물수요에 미치지 못하고 또한 그 불균형을 극복하지 못해, 주민생활이나 산업활동에 심각한 영향을 미치는 현상’으로 정의

2. 자연재해측면에서 가뭄의 특징

□ 발생 시점의 불명확성과 초기 대응 어려움

- 가뭄은 홍수기 말부터 서서히 심화되기 때문에 시작과 종료 시점을 정확히 결정하기가 힘들
- 이로 인해 담당부처, 지자체, 수자원관리기관, 재난관리기관들은 높은 경각심을 갖지 않는 경향이 있음 (Wilhite와 Pulwarty, 2005)
 - 더 큰 영향을 받지 않기 위해 초기에 시기적절하게 대응하기 보다는, 한 두 차례 강우 발생으로 물부족이 해소될 가능성을 기다리는 것을 선호
 - 저수지 고갈과 같이 심각한 위기상황을 맞이했을 때에야 경각심을 갖게 되며, 이 때는 사후 대책을 위해 값비싼 비용을 치루어야 하는 단계로 넘어감
- 위기상황 직전까지 특별한 대책이 투입되지 않았기 때문에, 급수 제한 또는 중단으로 인해 수많은 주민들이 고충을 겪는 상황이 되면 사회에 큰 혼란과 함께 책임소재 갈등이 쉽게 발생됨

□ 피해의 비가시성

- 아무리 심각한 가뭄 피해를 겪더라도, 건축물, 가옥 등의 구조물이 붕괴된다던지 사람의 생명에 직접적으로 피해를 주지 않음²⁾
- 그 결과 홍수, 호우, 지진, 산사태 등 타 자연재해에 비해 높은 관심을 받기 힘들 (Wilhite와 Pulwarty, 2005; Pulwarty와 Sivakumar, 2014)
 - 미국, 호주, 아프리카 등 가뭄이 매우 심각한 지역도 최근에는 가뭄분야 위험도관리의 필요성 인식

□ 피해기록 수집의 어려움

- 피해가 가시적이지 않아 집계가 쉽지 않을 뿐만 아니라 행정상의 관심이 낮아, 대부분 국가에서 가뭄 피해는 정기적으로 조사되지 않음 (Wilhite, 1996)

2) 전 세계적으로 볼 때 가뭄으로 많은 사망자가 발생한 경우도 종종 있지만, 이때 사망자는 순수한 가뭄 피해라하기 보다는 내전, 독재 등과 같이 해당국가의 정치 상황과 밀접하게 결부되어 있음

- 국가비상상태를 선포 (state of national emergency)해 재난관리기관이 공식적인 상황보고서를 발표하거나 국제기구에 구호요청을 하지 않는 한, 일부 선진국들을 제외하고, 가뭄발생기록이나 위치는 비공식적인 자료조차 수집하기 어려움

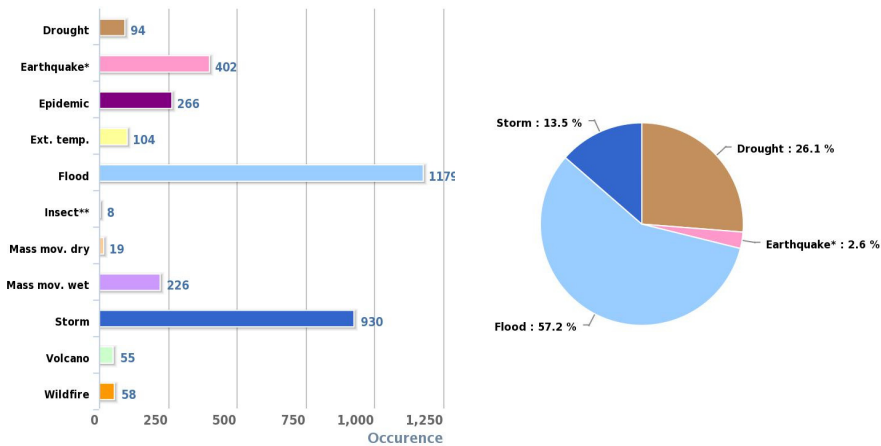
□ 발생빈도는 낮지만 사회영향은 높음

- 아프리카 대륙을 제외하고, 다른 자연재해에 비해 발생빈도가 낮음
- 하지만 일단 발생하게 되면, 몇 주, 몇 달, 심지어는 다년간 동안 방대한 지역과 방대한 분야에 걸쳐 물부족을 초래함
 - 미리 가뭄 발생을 예상하더라도 타 자연재해와는 달리 일시적으로 회피할 수도 없고, 주민들과 경제활동은 가뭄이 해소될 때까지 지속적으로 피해를 받게 됨
- 2009년 UN Global Assessment Report (UNISDR, 2009a)의 자연재해 통계
 - 1980년에서 2008년의 기간 동안 각 대륙별로 각종 자연재해 기록 집계
 - <그림 2-1>에 제시된 아시아 대륙 통계를 보면, 가뭄은 3,341건의 자연재해 중 94건으로 발생횟수상 3% 미만이지만, 영향인구수상 전체의 26%를 상회
 - 홍수를 제외하고, 아시아 지역에서 가뭄은 주민생활에 가장 큰 영향을 미치며, 가장 과소평가되고 있는 자연재해라 할 수 있음

□ 정책, 실무, 연구의 관심 부족

- 발생빈도도 낮고 가시적이지 않으므로 과거의 피해가 정책결정자나 주민들의 기억에서 오랫동안 지속되기 힘들
 - 실제로 재난관리차원에서 실무나 정책에 있어서 가뭄이 중요시되는 국가는 그리 많지 않음
- 그 결과 기상, 토양수분, 수문 등의 자연현상을 관측하고 모의하는 것을 넘어 사회경제적 가뭄에 대한 학술 연구는 다른 자연재해에 비해 크게 부진 (Hamdy 와 Trisorio-Liuzzi, 2008)

〈그림 2-1〉 UNISDR의 아시아대륙 자연재해 기록 집계 결과

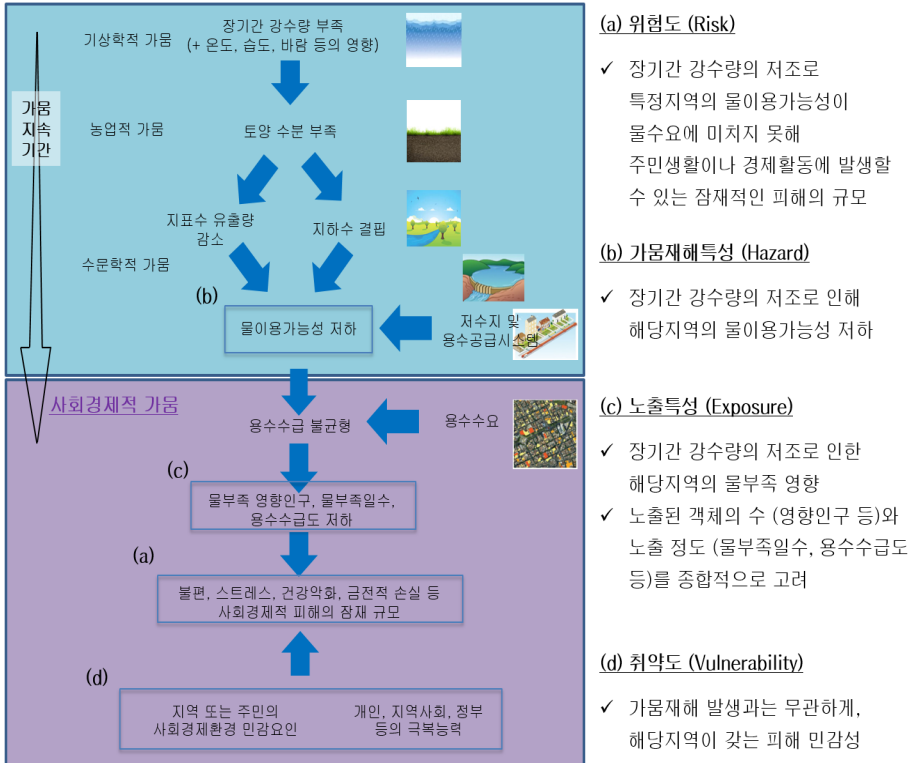


출처: http://www.preventionweb.net/english/countries/statistics/index_region.php?rid=4

3. 가뭄 위험도

- 자연재해관리분야에서 위험도는 본래 홍수나 지진과 같이 짧은 시간 동안 치명적인 피해를 유발하는 재해를 중심으로 개념이 정립되어 왔기 때문에, 가뭄과 같이 장기간 서서히 피해가 축적되는 재해에 대해서는 기존의 위험도 개념이 잘 부합되지 않음
- 본 장에서는 가뭄 고유의 특징들을 반영할 수 있도록, 동시에 쉽게 이해가 가능토록 가뭄 위험도를 정의하고자 함
 - 가뭄 위험도와 위험도 구성요소들은 〈그림 2-2〉와 같이 도식화됨

〈그림 2-2〉 본 연구에서의 가뭄 위험도 정의



1) 위험도

□ 일반적인 위험도 개념

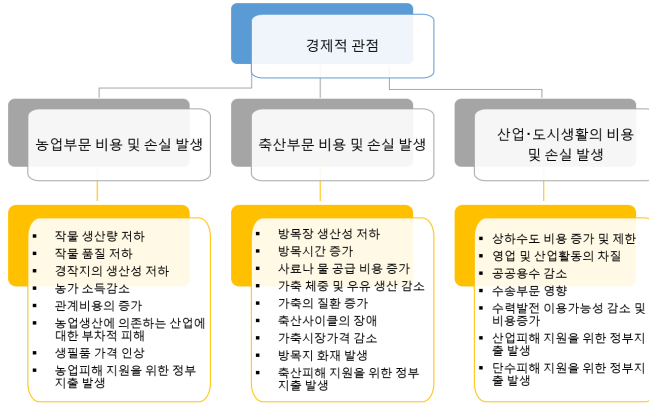
- 자연재해분야에서 연구자들은 위험도 (Risk)를 특정 공간에서 특정기간 동안 재해에 의해 발생할 수 있는 잠재적인 피해 규모로 간주 (UNDRO, 1979)
- 국제적으로 합의된 용어 정의 (UNISDR, 2009b): “The potential disaster losses, in lives, health status, livelihoods, assets and services, which could occur to a particular community or a society over some specified future time period.”

- ‘피해 규모’로서의 위험도
 - 일상에서 통용되는 구체적인 표현
 - 위험도를 분석하기 위해서는 주민, 경제활동, 자산 등과 같이 피해를 받는 객체를 구체적으로 명시하고 이 객체가 입을 수 있는 피해의 종류를 사망, 부상, 생산성 감소, 자산 손실 등과 같이 구체적으로 정의하는 것이 요구됨
- 위험도 구성요소
 - 1970년대 O’keefe 외 (1976)에서 위험도는 단순히 자연재해라고 하는 물리적 특성치 외에도 다양한 사회경제적 요인들에 의해 크게 영향을 받는다는 점을 발견한 이후, 위험도는 통상 재해특성 (hazard), 노출특성 (exposure), 그리고 취약도 (vulnerability)의 세 가지 요소들에 의해 결정되는 것으로 간주됨

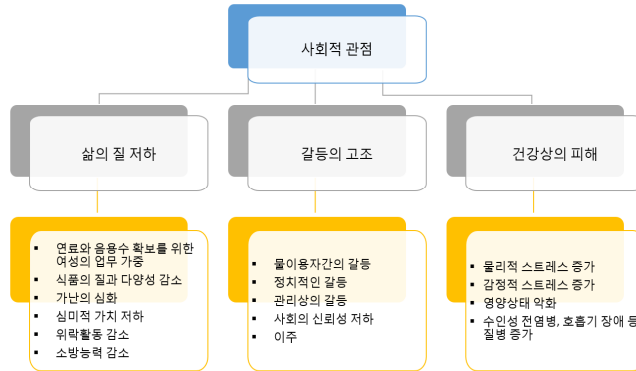
□ 본 연구에서의 가뭄 위험도 정의

- 가뭄의 사회경제적 측면을 고려해, “장기간 강수량 저조로 해당지역의 물이용가능성이 물수요에 미치지 못해 주민생활이나 경제활동에 발생할 수 있는 잠재적인 피해의 규모”로 간주
- <그림 2-3>과 같이 가뭄으로 인해 피해를 받는 객체의 종류는 방대하고 피해 방식 또한 다양함
 - 이 모든 객체와 피해의 종류를 한꺼번에 고려하는 것은 불가능함
 - 저감대책 대상을 명확히 해서 위험도의 정의를 최대한 좁혀야 함
- 가뭄 위험도 개념 구체화의 예
 - 농업부문 저감대책을 위한 가뭄 위험도: “장기간 강수량 저조로 인해, 특정 지역의 토양수분과 관개용수 이용가능성 부족으로 초래될 수 있는 농가의 잠재적인 소득 감소”
 - 도시 용수공급부문 저감대책을 위한 가뭄 위험도: “장기간 강수량 저조로, 특정 지역의 생활용수 수급불균형이 초래할 수 있는 주민들의 잠재적인 고충”

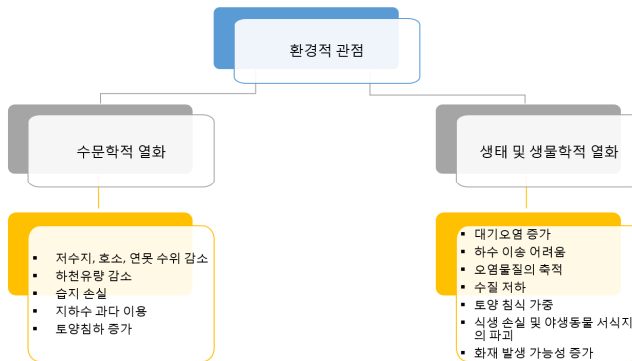
〈그림 2-3〉 가뭄으로 인한 피해의 범위



(a) 경제적 피해



(b) 사회적 피해



(c) 환경적 피해

2) 가뭄재해특성

□ 일반적인 재해특성 개념

- 재해특성 (Hazard)이란 자연현상에 의해 촉발된 위협으로, 일반적으로 세기, 심도, 발생속도, 지속시간, 면적 등과 같은 물리적 측도로 표현
- 재해특성을 정의하기 위해서는 자연적 현상에 의해 발생되지만 해당 지역에 실질적으로 위협이 되는 물리적 속성이 무엇인지를 결정하는 것이 중요함
 - 국제적으로 합의된 용어 정의 (UNISDR, 2009b): “A dangerous phenomenon, substance, human activity or condition that may cause loss of life, injury or other health impacts, property damage, loss of livelihoods and services, social and economic disruption, or environmental damage”

□ 본 연구에서의 가뭄 재해특성 정의

- 홍수의 경우 침수심, 범람속도 등이 쉽게 선택될 수 있음
- 가뭄의 경우 강수량 부족의 세기, 지속기간 등의 전통적인 분석대상은 재해특성으로 간주하기 힘들
 - 가뭄이 장기간의 강수량 부족에 의해 촉발되는 것은 사실이지만, 강수량 부족은 대기의 건조함에 대한 기상현상에 불과하며 반드시 사회에 위협을 제공하지 않음 (UNISDR, 2011b)
- 이 보다는 강수량의 세기와 지속기간에 대한 특정 조건하에서 해당지역 물이용가능성에 주목할 필요가 있음
 - 가뭄이 사회에 위협이 된다는 것은 기상현상이 해당 지역의 물이용가능성을 떨어뜨릴 때에 성립되기 때문
- 이에 본 연구에서 가뭄재해특성은 “장기간 강수량의 저조로 인한 해당지역의 물이용가능성”으로 정의

3) 노출특성

□ 일반적인 노출특성 개념

- 노출특성 (Exposure)은 재해에 의해 특정 공간에 사람, 자산, 생산활동 등 객체들이 영향을 받는 정도를 의미
- 노출특성은 일반적으로 재해에 대해 사회의 지리공간적 근접성이라고 인식되어, 단순히 재해발생 지역에 포함된 객체의 수로 간주
 - 국제적으로 합의된 용어 정의 (UNISDR, 2009b): “People, property, systems, or other elements present in hazard zones that are thereby subject to potential losses”

□ 본 연구에서의 가뭄 노출특성 정의

- 다른 자연재해와는 달리, 가뭄에 대해서는 단순히 정의되지 않음
- 물이용가능성이 악화된 지역의 가뭄 영향은 다음의 예와 같이 다양한 요소들을 동시에 고려해야 함
 - 재해에 대한 객체들의 지리공간상 근접성: 즉, “여기에 얼마나 많은 인구와 생산활동이 포함되어 있는가?”
 - 해당 공간의 물수요: 즉, “인구와 생산활동이 얼마나 많은 용수를 필요로 하는가?”
 - 용수공급 시스템의 범위 및 운영방식: 즉, “인구와 생산활동이 수원에 어떤 방식으로 연결되어 있는가?” 등
- 이에 본 연구에서 가뭄의 노출특성은 “장기간 강수량의 조조로 인한 해당지역의 물부족 영향”으로 정의
- 또한 이 물부족 영향은 “물부족을 겪는 객체의 수 (영향인구, 영향 농지, 영향 생산액 등)와 함께 물부족 정도 (물부족일수, 물부족 기간의 용수수급도 등)”를 종합적으로 고려

- 객체의 수가 동일하다고 해도 그 영향은 물부족 정도에 따라 크게 달라질 수 있음
- 즉, 하루 동안 1-2시간 단수로 인해 생활에 약간의 불편을 발생시키는 수준일지, 수주에 걸쳐 1-2시간만 공급해 정상적인 생활이 불가능하게 되는 상황일지에 따라 물부족 영향은 다르게 평가되어야 함

4) 취약성

□ 일반적인 취약성 개념

- 취약도 (Vulnerability)란, 재해특성과는 무관하게, 해당 지역에서 노출된 객체의 피해 민감성으로 사회, 경제, 환경, 문화, 기술 등 관련 속성들을 총칭
 - 국제적으로 합의된 용어 정의 (UNISDR, 2009b): “The characteristics and circumstances of a community, system or asset that make it susceptible to the damaging effects of a hazard.”

□ 본 연구에서의 가뭄 취약성 정의

- 사실 타 자연재해에 대해서도 취약도 연구는 아직 초기 단계에 머물러 있음
 - 비교적 연구가 활발한 홍수분야조차, 어떠한 속성이 취약도를 결정하는 지에 대해 실증 연구는 매우 제한적으로 수행 (Lee 외, 2015b; Lee와 Vink, 2015)
- 특히나 가뭄의 위험도는 주민생활의 불편함, 경제활동의 제약, 농사 실패, 건강악화, 환경영향 등과 같이 쉽게 드러나지 않아, 특정지역이 물부족을 겪을 때 피해의 민감성을 결정하는 요인들을 찾는 것을 더욱 어렵게 함
- 이에 본 연구에서는 가뭄 취약도를 “가뭄재해 발생과는 무관하게, 해당지역이 갖는 피해 민감성”으로 넓게 정의함
 - 추후 실증연구를 통해 취약도 개념을 더욱 구체화하도록 제안

4. 가뭄 위험도 평가 방법론체계

□ 평가대상의 한정

- 앞서 언급한 바와 같이, 가뭄 위험도 평가를 위해서는 우선적으로 피해객체와 피해종류를 명확하게 선별해야 함
- 시범적으로 가뭄 위험도의 한 단면인, “생활용수 공급불균형으로 주민들이 갖는 피해”에 초점을 둠
 - 즉, 피해객체는 주민이며 피해종류는 생활용수 물부족에 의한 고충으로 한정
- 이에 따라 위험도 개념을 다음과 같이 구체화 함
 - 가뭄 재해특성: 장기간 강수량 저조와 관련된 특정 가뭄 조건³⁾에서 해당지역의 물이용가능성 ($\text{m}^3/\text{월}$)
 - 가뭄 노출특성: 장기간 강수량의 저조와 관련된 특정 가뭄 조건에서 해당지역의 물부족 영향으로서, 물부족을 겪는 영향인구 (명/월), 물부족일수 (일/월), 물부족 기간 동안의 용수수급도 (월평균 %)로 구성됨
 - 가뭄 취약성: 해당지역이 갖는 피해 민감성 (원/명/일/%저하)
 - 가뭄 위험도: 장기간 강수량 저조와 관련된 특정 가뭄 조건에서 해당지역의 생활용수 공급불균형이 초래할 수 있는 주민들의 잠재적인 고충 크기 (원/월)

□ 방법론체계의 구성

- 위의 가뭄 위험도를 평가하기 위해 방법론체계를 <그림 2-4>와 같이 구성함
- 재해특성 평가단계
 - 강수량의 장기시계열 분석, 저수지 운영 및 급수계통 물수지 분석 등을 통해 특정 가뭄 조건에서 최종 수용가인 급수지역에 수자원의 도달가능량, 즉, 용수이용가능량의 저하를 분석키로 함

3) 여기서 “특정 가뭄 조건”이라 함은 전체 적용대상지에 걸쳐 강수량 부족의 세기와 지속기간에 대한 일관된 수준을 적용한다는 의미이다.

○ 노출특성 평가단계

- 특정 가뭄 조건에서 용수 이용가능량과 주민들의 용수수요에 대한 시계열 자료를 비교해 매월 단위로 용수수급에 주민들이 위협받는 지 확인
- 해당 월에 특정 급수지역에 수급불균형이 발생할 때에는 용수수급도 시계열 자료로부터 물부족을 겪는 영향인구, 물부족일수, 물부족 기간 동안의 평균적인 용수수급도를 각각 산정

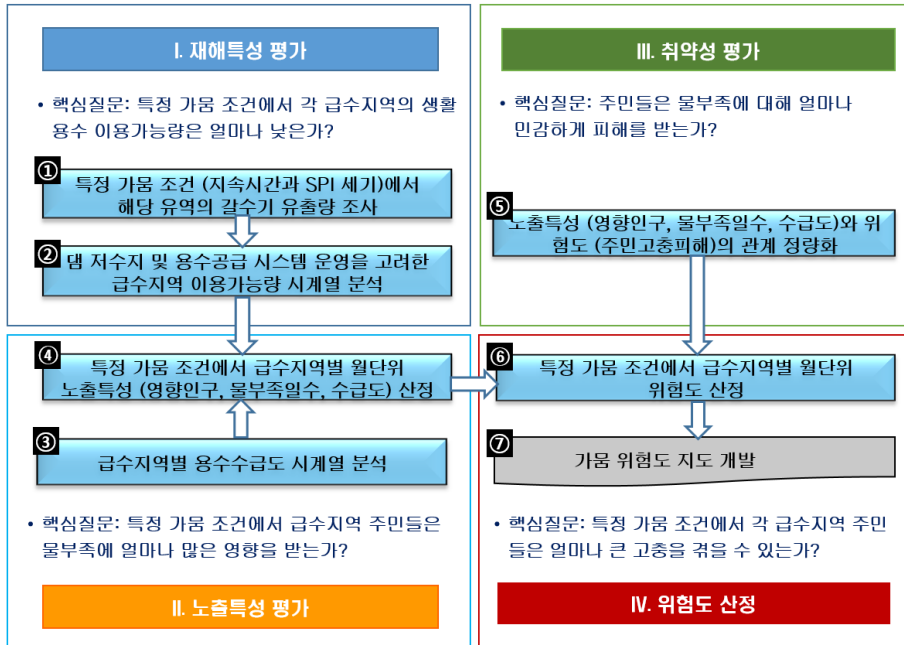
○ 취약성 평가단계

- 선행연구가 충분치 않아 취약성 요소들에 대한 심도있는 분석은 힘들 것으로 판단되었음
- 대안적으로, “물부족 영향이 동일하다면 (동일한 영향인구, 동일한 물부족일수, 물부족시 동일한 용수수급도) 일정한 피해를 겪게 된다”는 가정하에 과거 피해기록으로부터 노출특성-피해비용 곡선을 도출해 피해민감도 정의
- 즉, 주민들은 물부족에 대해 얼마나 민감하게 피해를 받는가에 대한 답으로, 주민 1인당 용수수급도 1% 저하시 1일 동안의 피해비용을 추계

○ 위험도 산정단계

- 해당 단계는 모든 분석절차를 종합해, 특정 가뭄 조건에서 각 급수지역 주민들은 얼마나 큰 고충을 겪을 수 있는 지를 분석키로 함
- 먼저 취약성 평가단계에서 정량화된 피해민감도 자료를 이용해 매월 집계된 노출특성을 피해비용으로 환산해 급수지역별 위험도를 월단위로 정량화
- 고해상도 전자인구분포지도를 이용해 급수지역별 위험도는 다시 격자수준으로 공간상제화 한 뒤 위험도 지도 개발 및 고위험구역 선정

〈그림 2-4〉 가뭄 위험도 평가를 위한 전체 방법론체계



제 3 장

가뭄 위험도 평가 기법

가뭄 위험도 평가 기법

3장에서는 앞에서 정의한 가뭄 위험도 평가 방법론체계의 각 단계별로 자료, 분석기법, 모형 등을 자세히 설명키로 함

1. 재해특성 평가단계

1) 특정 가뭄 조건에서 해당 유역의 갈수기 유출량 조사

- 특정 지역 용수 이용가능성 분석을 위해서는, 가뭄 조건에서 관심유역이 어떤 영향을 받는 지에 대해 먼저 분석되어야 함
- 이를 위해 본 연구에서는 해당유역의 강수량 시계열 대표값을 얻은 뒤, 장기간 강수량 저하와 관련된 특정 조건하에서 해당유역의 갈수기 유출량 대표값을 조사하기로 함

(i) 관심유역의 월단위 면적평균강수량 시계열 자료 도출

□ 관심유역의 강수량 대표 시계열 도출

- 관심유역의 수문해석시 유역 인근 관측소로부터 측정된 강수량은 서로 일치하지 않기 때문에 관심유역의 강수량의 대표값을 산정할 필요성이 있음
- 이를 위해서는 공간적으로 평균된 강수량, 즉, 면적평균강수량 (mean areal precipitation)을 구해야 함

- 여기에는 산술평균법, 티센방법, 등우선법, 고도-면적곡선법, 격자점법, 유한 요소법, 역거리가중평균법, 크리깅방법 등 다양한 방법이 활용가능함 (각 방법에 대한 간략한 설명에 대해서는 [부록 1]에 제시)
- 이 중 본 연구에서는 산술평균보다 정확도가 높고 수문분석 실무에서 활용도가 높은 티센방법을 사용해 면적평균강수량을 산정기로 함
- 티센방법은 우량관측소별로 다각형 삼각망을 구축하여 각 우량계에 대표되는 면적을 산정하는 방법임
- 식(3.1)처럼 이 면적은 총면적에 대한 비로 나타내게 되며, $a_i = A_i/A$ 가 각 관측소 강수량에 대한 가중인자가 됨

$$\bar{P} = \frac{\sum P_i A_i}{\sum A_i} = \sum \frac{A_i}{A} P_i = \sum a_i P_i \quad (3.1)$$

- 단, A_i 는 i 관측소의 면적이고 A 는 유역면적, a_i 는 가중인자

(ii) 광동댐 표준유역에 대한 3개월과 6개월 SPI 시계열 자료 도출

□ SPI를 통한 가뭄 특성치 분석 방법

- SPI (Standard Precipitation Index)
- McKee 외 (1993)에 의해 제시된 기상학적 가뭄 지수
- 가뭄이 평년에 비해 강수량이 장기간 감소할 때 발생한다는 점에 착안해 개발되었으며, <표 3-1>과 같이 월단위로 가뭄의 세기를 판단하는 국제 표준 (WMO, 2012)

<표 3-1> 가뭄 세기 판단에 사용되는 SPI 값 기준

SPI 값	-1.0 이하	-1.5 이하	-2.0 이하
등급 해석	Moderate (약간)	Severe (심각한)	Extreme (극단적인)

○ SPI 산정 방법

- SPI는 특정한 기간 동안 확률분포상의 누적 강수량 평균치와 실제 누적 강수량의 차를 확률분포상의 누적 강수량 표준편차로 나누어 계산
- 누적 강수량의 평균치와 표준편차는 월단위 누적 강수량 시계열 자료로 산정

○ 월단위 누적 강수량 시계열 자료 및 확률분포함수 특성치 도출

- 누적 강수량 시계열 자료를 도출하기 위해서는 특정 가뭄 지속기간 동안의 월 강수량을 이동누가에 의한 방법으로 연속적으로 중첩한 뒤 누가된 월수로 나누어 월에 따른 이동 평균 강수 시계열을 획득
- 이 시계열이 구성되면 월별 누적강수량에 대한 적정 확률분포를 도출
- 일반적으로 누적강수형태는 Gamma 분포를 따르므로 최우도법 (maximum likelihood method)으로 Gamma 분포의 확률밀도함수 추정 작업이 필요
- 확률 밀도 함수 추정상의 계산의 부담을 줄이기 위해 McKey 외 (1993)에서 제시된 다음의 근사식을 이용할 수 있음

$$SPI = Z = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \quad \text{for } 0 < H(x) \leq 0.5$$

$$SPI = Z = +\left(t - \frac{c_0 + c_1 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \quad \text{for } 0.5 < H(x) \leq 1.0$$

$$t = \sqrt{\lim\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \quad \text{for } 0 < H(x) \leq 0.5$$

$$t = \sqrt{\lim\left(\frac{1}{(1.0 - H(x))^2}\right)} \quad \text{for } 0.5 < H(x) \leq 1.5$$

$$c_0=2.515517, \quad c_1=0.802853, \quad c_2=0.010328, \quad d_0=1.432788, \quad d_1=0.189267, \quad d_2=0.001308$$

$$H(x) = q + (1 - q)G(x), \quad q = m/n \quad (3.2)$$

- 단, $H(x)$ 는 누가확률, $G(x)$ 는 Gamma함수, m 은 무강수일수, n 은 강수관측 일수를 의미

○ SPI 산정시 지속기간의 선택

- SPI를 산정하기 전, 누적 강수량을 산정할 기간, 즉, 지속기간의 선택이 필요
- SPI값을 기준으로, 3개월 미만의 짧은 지속기간은 기상학적 가뭄 또는 농업적 가뭄을 판단할 때, 그리고 3개월 이상의 긴 지속기간은 사회경제적 가뭄을 판단할 때 적합하다는 WMO (2012)의 권고사항을 따름
- 본 연구에서는 사회경제적 가뭄에 관심이 있기 때문에 3개월과 6개월의 두 가지 지속기간을 적용해 SPI 시계열 자료를 얻은 뒤, 과거 가뭄피해기록과 비교해 해당유역에서 사회경제적 가뭄을 평가하는 데에 적합한 지속기간을 선택하는 방법을 이용함

(iii) 특정 SPI 값에 해당되는 갈수기 유출량 관측치 조사

□ SPI 기준의 가뭄 조건 선정

- 장기간 강수량 저하에 대한 가뭄 조건을 고정하기 위해 6개월 SPI에 근거한 두 가지 가뭄 세기 조건, 즉, 심각한 (severe) 조건인 $SPI = -1.5$ 와 극단적인 (extreme) 조건인 $SPI = -2.0$ 을 고려하기로 함

□ 두 가지 가뭄 조건의 유출량 대표 시계열 조사

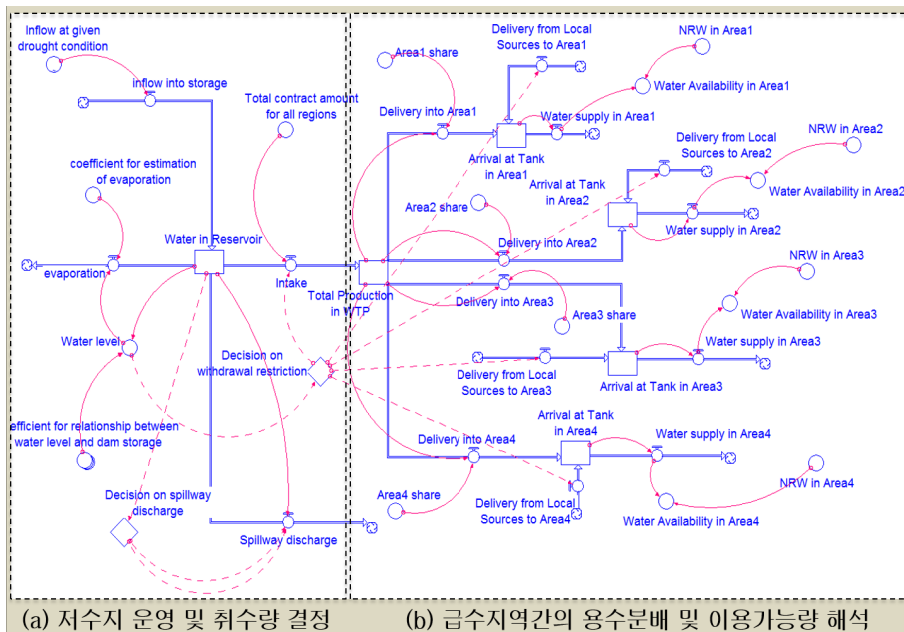
- 두 가지 가뭄 조건에 대해 가장 최근에 발생한 시점을 확인
- 각 시점에 부합하는 관심유역의 일단위 유출량 시계열 자료를 국가수자원관리종합정보 시스템 (WAMIS)을 통해 확보

2) 특정 가뭄 조건에서 급수지역 생활용수 이용가능량 분석

□ 댐 저수지 및 용수공급시설 운영관리 모형: GRDM2 물관리 시뮬레이션 모형

- 특정 가뭄 조건에 대한 관심구역의 갈수기 유출량 대표값으로부터 급수지역별 생활용수 이용가능량 분석을 위해 시뮬레이션 모형 활용
- GRDM2 시뮬레이션 모형
 - Lee 외 (2012)는 과거 가뭄의 원인을 조사하는 가운데, 다양한 저수지 관리자의 운영방식과 지자체의 응급대책에 대한 시나리오 분석을 손쉽게 수행하기 위해 High Performance Systems, Inc.의 Stella ver.8.0을 이용해 개발
 - 이후 Cha 외 (2012), 차동훈 (2012), 이현경 (2014) 등의 연구에서 기후변화로 인한 상수도 서비스 영향 분석에 활용되고 있음
 - 해당모형에 대한 자세한 수식은 [부록 5]를 참고

〈그림 3-1〉 GRDM2의 Stock-and-Flow 모식도



- GRDM2의 저수지 물수지 모의
 - 〈그림 3-1(a)〉에 제시된 모형의 첫번째 부분
 - 주어진 유출량 시계열 자료에 대해 〈표 3-2〉의 유량변동 요인들을 고려해 저수지 물수지 산정

〈표 3-2〉 GRDM2의 저수지 물수지 변동 요인

구 분	규 칙
저수지 물량 증가	해당 집수역의 하류 유출량
저수지 물량 감소	갈수기 취수량과 증발량 홍수위 도달시에 한해 여수로 방류
저수지 평시 운영	급수지역들과의 계약량 합만큼 매일 취수
저수지 긴급 운영 조건	저수지 수위가 임계 수준 이하로 저조할 경우
긴급 운영 방식	수위에 따라 미리 설정된 비율만큼 취수량을 단계적으로 감소 저수위 도달시 해당 일부터 취수 중단

- 〈표 3-3〉에 제시된 것처럼 과거 가뭄발생시 실제 저수지 운영자의 판단규칙을 결정이론에 근거해 정량화함으로, 수위조건에 따라 평시 또는 비상시 운영에 대한 저수지 운영자의 결정과정을 묘사하고, 취수량을 현실적으로 해석

- GRDM2의 용수공급 해석
 - 〈그림 3-2(b)〉에 제시된 모형의 뒷 부분
 - 취수된 물량이 정수, 송수, 급수의 과정에서 물량의 배분, 이동, 타 수계 추가 공급, 물손실 등을 종합적으로 고려해 최종적으로 급수지역 각각에 할당되는 생활용수 이용가능량 해석
 - 저수지에 대한 비상 운영 조건에서는 저수지에서 취수량이 제한되는 대신 타 수계의 공급량이 극대화되는 규칙을 반영

〈표 3-3〉 GRDM2의 용수전용댐 갈수기 비상운영 결정규칙

- 갈수기 용수전용댐 운영의 특성
 - ✓ 다목적 댐과는 달리, 소규모 용수전용댐은 갑작스럽게 유입량이 집중되어 여수로 방류하는 것을 제외하고는 최대한 계약량 보전이 중시
 - ✓ 저수량에 대한 별다른 회계가 이루어지지 않기 때문에, 갈수기 동안 비상상황의 인식은 저수지 수위 정보에 의존 (즉, 수위가 저수위 (lowest level)에 가까운 임계수준에 도달할 때 비상상황이 결정)
- 수위-비상운영 결정함수의 도출
 - ✓ 저수지 수위정보를 통한 비상상황의 인식은 대표적인 결정 프로세스 모형으로서 무차원 효과 변수를 이용해 다음과 같이 단순화
 - ✓ 만일, 수위 X (EL.m)가 저수위 X^* (EL.m)에 가까워짐에 따라, $X = a_1 \times X^*$ 와 $X = a_2 \times X^*$ 의 두 시점에서 취수량에 대해 불연속적인 제한 k_1 과 k_2 의 결정을 각각 하게 된다면, 비상시 취수량 Y 와 평시 취수량 $\bar{Y}$ 간의 관계는 효과 변수 $f(X/X^*)$ 를 통해 다음과 같이 표현됨

$$Y = \bar{Y} \times f(X/X^*)$$

$$\begin{aligned} &\text{if } X/X^* < 1 \text{ then } f(X/X^*) = 0 \\ &\text{else if } 1 \leq X/X^* < a_1 \text{ then } f(X/X^*) = 1 - k_1 \\ &\text{else if } a_1 \leq X/X^* < a_2 \text{ then } f(X/X^*) = 1 - k_2 \\ &\text{else if } X/X^* \geq a_2 \text{ then } f(X/X^*) = 1 \end{aligned}$$

단, $1 < a_1 < a_2$ 그리고 $0 < k_1 < k_2 < 1$ (3.3)

- ✓ 필요한 모든 상수값들 a_1, a_2, k_1, k_2 는 해당 저수지의 과거 가뭄시 운영 기록을 토대로 얻을 수 있는 자료
- 무차원 효과 변수의 활용
 - ✓ 무차원 효과 변수 $f(X/X^*)$ 는 해당 저수지 뿐만 아니라 전체 용수관리 시스템이 비상상황인지 여부를 판별하는 데에 있어서 중요한 상태변수로 활용가능함
 - ✓ $f(X/X^*) = 1$ 인 경우에는 계약량을 원활히 보전하는 평시 상황을 의미
 - ✓ $f(X/X^*) < 1$ 인 경우에는 비상상황으로서 해당 저수지는 X/X^* 의 값에 따라 취수 제한이 진행되고, 전체 용수공급 시스템으로 볼 때에도 타 수계로부터 정수량 공급을 극대화시키는 데에 필요한 정보가 됨

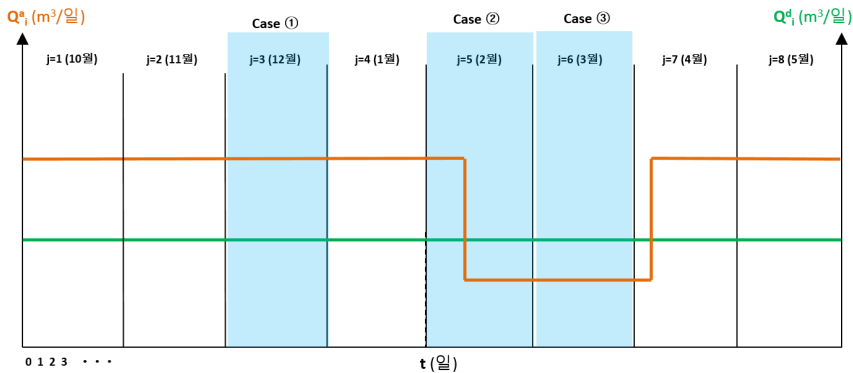
2. 노출특성 평가단계

- 노출특성의 평가는 특정 가뭄조건에서 구한 생활용수 이용가능량으로부터 각 급수지역별 물부족 영향을 파악
- 이 물부족 영향은 용수수급 불균형에 의해 발생되므로, 용수수요와 이용가능량을 비교하여 월단위로 물부족인구, 물부족일수, 물부족 기간동안의 수급도를 산정기로 함

□ 급수지역별 노출특성 분석 방법

- <그림 3-2>에서와 같이 급수지역별 용수수급에 대한 자료를 얻게 되면 월단위로 다음과 같이 노출특성을 평가

<그림 3-2> 임의의 i 번째 급수지역 용수수급 상황에 대한 예시



- 월단위 물부족 영향인구의 산정
 - 각 급수지역은 용수공급시설에 의해 연결되어 있음
 - 즉, 용수이용가능량이 수요에 미치지 못하게 되면, 해당 급수지역에 포함된 모든 주민들이 동시에 물부족을 경험하게 됨⁴⁾
 - 따라서 i 번째 급수지역의 주민의 수를 P_i 라고 하면, 이 지역의 j 번째 월에서 물부족에 영향받는 인구 E_{ij} 는 <표 3-4>와 같이 산정

4) 실제로 급수지역내에도 급수망의 말단에 위치해 수압이 낮은 구역의 공급이 먼저 위협받지만, 분석의 단순화를 위해 이 점은 제외기로 하였다.

〈표 3-4〉 물부족 영향인구의 계산

Case	계산 방법
Case ①: 항상 이용가능량이 수요를 상회한 경우	$E_{ij} = 0$ (명)
Case ②: 특정 기간 동안 수요에 미치지 못한 경우	$E_{ij} = P_i$ (명)
Case ③: 항상 이용가능량이 수요에 미치지 못한 경우	$E_{ij} = P_i$ (명)

○ 월단위 물부족일수의 산정

- i번째 급수지역의 j번째 월에서의 물부족일수 D_{ij} 는 〈표 3-5〉와 같이 산정
- 여기서, $d_{ij}[t]$ 는 일수를 집계하기 위한 변수로, $Q_i^a[t] < Q_i^d$ 의 경우 $d_{ij}[t] = 1$, $Q_i^a[t] \geq Q_i^d$ 의 경우 $d_{ij}[t] = 0$ 로 정의
- t_j^s 와 t_j^e 는 각각 j번째 월의 시작일과 종료일을 의미

〈표 3-5〉 물부족일수의 계산

Case	계산 방법
Case ①: 항상 이용가능량이 수요를 상회한 경우	$D_{ij} = 0$ (일)
Case ②: 특정 기간 동안 수요에 미치지 못한 경우	$D_{ij} = \sum_{t=t_j^s}^{t_j^e} d_{ij}[t]$ (일)
Case ③: 항상 이용가능량이 수요에 미치지 못한 경우	$D_{ij} = t_j^e - t_j^s + 1$ (일)

○ 물부족기간 동안의 용수수급도 산정

- i번째 급수지역의 j번째 월에서 물부족 기간 동안 용수수급도 R_{ij} 는 〈표 3-6〉과 같이 산정

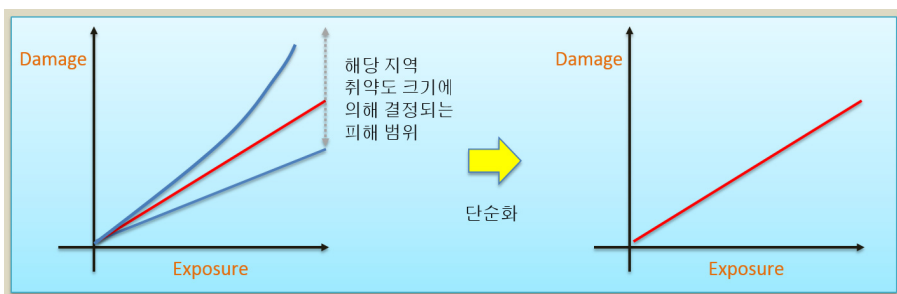
〈표 3-6〉 물부족기간 용수수급도의 계산

Case	계산 방법
Case ①: 항상 이용가능량이 수요를 상회한 경우	$R_{ij} = 100 (\%)$
Case ②: 특정 기간 동안 수요에 미치지 못한 경우	$R_{ij} = 100 \sum_{t=t_j^s}^{t_j^e} \{ d_{ij}[t] \times Q_i^a[t] / Q_i^d \} / \sum_{t=t_j^s}^{t_j^e} d_{ij}[t] (\%)$
Case ③: 항상 이용가능량이 수요에 미치지 못한 경우	$R_{ij} = 100 \sum_{t=t_j^s}^{t_j^e} \{ Q_i^a[t] / Q_i^d \} (\%)$

3. 취약성 평가단계

- 동일한 수준의 노출이 발생하였을 때 피해의 크기는 노출특성 외에도 해당공간의 취약성에 의해 크게 좌우되지만, 아직 가뭄 위험도와 관련해 어떤 사회경제적 요소들이 유의한 영향을 주는 지에 대해 이론적으로 정립되지 않고 있음
- 본 연구에서는 대안적으로 사례연구 대상지내 모든 공간에 있어서 노출특성과 위험도 (즉, 주민고충 피해)간의 관계는 일정하다는 가정하에, 과거 가뭄피해자료를 토대로 최대한 단순화된 노출특성-위험도 관계곡선을 아래 〈그림 3-3〉과 같이 도출키로 함

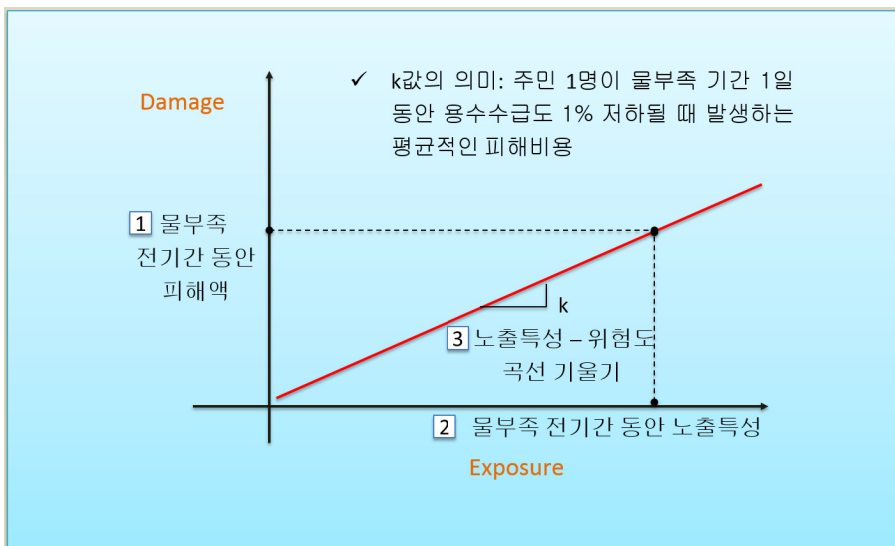
〈그림 3-3〉 노출특성-위험도 곡선의 기본개념



- 이를 위해, 과거 가뭄피해기록을 토대로 아래 <그림 3-4>에 제시된 곡선의 기울기를 조사키로 함
 - 먼저 과거 가뭄사태시 가로축과 세로축에 해당되는 물부족 전기간 동안 피해액과 물부족 전기간 동안 노출특성 (물부족 기간동안의 영향인구, 물부족일수, 물부족기간 용수수급도)을 개별적으로 조사
 - 가로축과 세로축의 값들을 얻은 뒤 곡선의 기울기 k , 즉, 주민 1명이 물부족 기간 1일 동안 용수수급도 1% 저하시 발생하는 평균 피해비용 (원/인/일/%저하)을 도출키로 함
 - 이 같은 결과를 토대로, i 번째 급수지역에서 j 번째 월동안 물부족 노출특성이 각각 E_{ij} (명), D_{ij} (일), R_{ij} (%)일 경우, 주민고충에 대한 피해환산액 C_{ij} (원)을 다음 식(3.4)와 같이 도출 (<그림 3-4>의 곡선식)

$$C_{ij} = k \times (100 - R_{ij}) \times E_{ij} \times D_{ij} \quad (3.4)$$

<그림 3-4> 본 연구의 노출특성 - 위험도 관계곡선 추정 방법



4. 위험도 산정단계

□ 극단적인 가뭄 조건에서 급수지역들의 월단위 주민고충 피해 산정

- 취약성 평가 단계에서 얻은 노출도-위험도 관계 곡선을 사용해, 특정 가뭄 조건에서 급수지역별로 분석된 노출특성을 주민고충 피해액으로 환산

□ 위험도 공간상세화 및 위험도 지도 구축

- 월단위로 급수지역별 위험도 산정결과를 이용해 공간해상도 높은 가뭄 위험도 지도를 만들고자 함
- 한 급수지역 전체의 피해액은 1km×1km 격자에서 발생하는 피해액들의 합이며, 각 격자의 피해액은 해당격자의 인구에 비례한다고 가정
 - 급수보급이 완전히 이루어지는 지역에서 생활용수의 수요는 인구에 비례하는 경향성이 높기 때문에, 위의 가정은 인구가 높은 지역에서 용수수요가 높고 계속해서 이 지역은 물부족시 더 큰 피해를 받게 된다는 의미를 갖게 됨
 - 게다가 지역개발특성에 따라 이미 급수지역을 구분하였기 때문에 인구자료를 이용해 한 급수지역의 피해액을 상세화한다면 업종특성에 따른 수요의 차이가 크게 문제시 되지 않는다고 판단됨
- 사용된 인구지도
 - 1km×1km 격자의 인구자료로는 미국 Oak Ridge National Laboratory에서 지자체 단위 센서스 자료와 야간영상자료 보간을 통해 구축한 고해상도 인구지도인 LandScan™ ver. L2009 (Budhendra 외, 2007)를 이용
- 가뭄 위험도 지도를 얻게 되면, 각 격자별 잠재적인 피해비용 값을 비교해 저감대책이 집중되어야 할 고위험구역을 선정하고 해당 구역의 재해특성, 노출 특성을 다시 확인해 위험도가 높은 기저원인에 대해 고찰함

제 4 장 사례연구 적용 결과

사례연구 적용 결과

1. 사례연구 대상지 기초조사

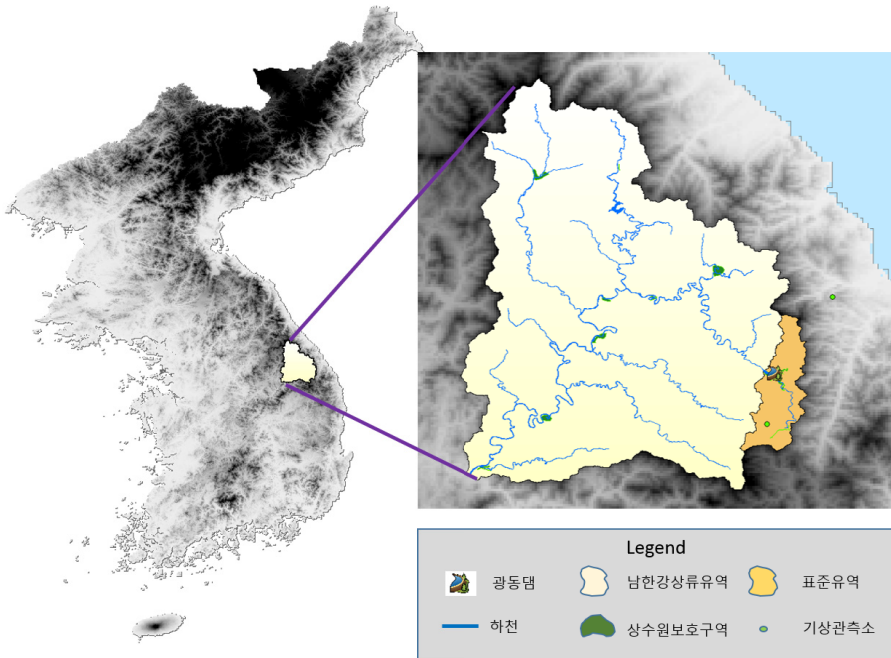
□ 사례연구 대상지 선정: 태백, 정선, 삼척 등 광동댐 급수지역

- 가뭄 위험도 평가 방법을 적용하기 위한 사례연구 대상지로, 실제 주민들이 제한급수로 인해 큰 피해를 입었던 광동댐의 수자원에 의존하는 지역들을 선정
 - 이 지역은 태백시, 정선군, 삼척시에 위치한 급수지역으로 구성됨
 - 도시 및 산간지역에 위치한 지자체들은 소규모 전용댐에 의존하는 경우가 많아 해당 사례연구 대상지는 이들에 대한 대표성을 지닐 것으로 판단됨
- 이 지역의 용수공급은 광동댐 저수지에 의존하고 있으므로, 광동댐 표준유역이 사례연구 대상지 수원이 위치한 유역 (이하 관심유역이라 명명함)이 됨
- 2008년 가을부터 2009년 초까지 계속된 가뭄으로 큰 피해가 발생하였으며, 광동댐 저수량이 고갈되어 국가비상사태까지 선포된 바 있음 (이상은 외, 2009)

□ 유역의 지형 및 기상 특성

- 관심유역의 지형적 특성
 - 강원도에 위치한 남한강상류유역 (유역번호: 1001)내에서, 광동댐은 최상류 표준유역에 위치 (유역번호: 100101)
 - <표 4-1>과 같이, 평균표고가 900 m를 넘고 유역면적이 120 km²에 불과한, 전형적인 높고 좁은 유역특성을 갖고 있음

〈그림 4-1〉 관심구역 위치



〈표 4-1〉 유역의 지형 특성

	유역면적 (km ²)	평균표고 (EL.m)	최고표고 (EL.m)	평균경사 (%)	형상계수	수계밀도
광동댐 표준유역	120.7	928.9	1,406.7	47.8	0.20	2.21
남한강 상류유역	2,448	748.3	1,565.0	51.1	1.30	1.80
한강권역	34,428	406.9	1,687.8	39.1	1.49	1.57

출처: 국가수자원관리종합정보시스템

- 관심유역의 기상학적 특성 (윤선권 외, 2014)
 - 해당 표준유역은 6-9월 동안의 홍수기에는 동아시아 몬순의 영향을 받아 전형적인 여름철 강수특성이 뚜렷해 세 달 동안 평균강수량이 863.8mm로 연평균강수량의 66%를 상회함
 - 10월에서 5월 동안의 갈수기에는, 평균강수량이 440.1mm로 8개월 동안 연평균강수량의 34%에 불과함
 - 기상학적으로 강수량의 계절적 특성이 비교적 뚜렷하다고 할 수 있음
 - 표준유역 인근에 기상자료는 두 지점, 즉, 동해 기상관측소 (106)와 태백 기상관측소 (216)에서 측정되고 있음

□ 용수공급시설 특성

- 한국수자원공사에서 관리중인 태백권광역상수도 (광동댐 저수지와 태백시, 삼척시, 정선군에 위치한 총 18개 급수구역에 대한 용수공급시설)를 근간으로 하며, 자체적인 지방상수도를 통해 추가 공급 받고 있음
- 한강 지류인 골지천에 위치한 광동댐 저수지는 <표 4-2>와 같은 제원을 갖추고 있으며, 홍수기 동안 충분히 채운 뒤 갈수기에 생활용수를 공급하는 전용댐임

<표 4-2> 광동댐 제원

유지관리기관	댐종류	총저수용량	저수면적
한국수자원공사	생공용수전용댐	13.1 MCM	1.0 km ²
정상표고	계획홍수위	상시만수위	저수위
678.5 EL.m	675.3 EL.m	672.0 EL.m	662.0 EL.m
상시만수위용량	유효저수용량	사수용량	용수공급능력
9.5 MCM	8.0 MCM	2.3 MCM	70 천 cmd
배분량_태백시	배분량_정선군	배분량_삼척시	배분량_영월군
36.5 천 cmd	20.5 천 cmd	10.0 천 cmd	3.0 천 cmd

출처: 수도관리연보 (한국수자원공사, 2014)

- <그림 4-2>와 같이, 광동댐에서 확보된 저수량은 황지정수장에서 처리된 뒤, 황지분기점에서 왼쪽의 상동계통과 오른쪽의 도계계통으로 나누어서 지역의 배수지로 송수됨
- 상동계통에는 정선군의 두문배수지를 중심으로 총 10개의 급수구역들이 위치하고 있고 영월군의 상동배수지 (운휴)까지 연결되어 있음
- 도계계통에는 태백시의 황지배수지와 통리배수지를 중심으로 8개의 급수구역들이 위치하고 있고 정선군의 고부배수지까지 연결되어 있음

<그림 4-2> 용수공급 시스템의 전체 구성



출처: 한국수자원공사 수도관리처 내부자료

<표 4-3> 황지정수장 제원

유지관리	처리방식	시설용량	이용률	가동률
한국수자원공사	일반 급속여과	70 천 cmd	68.4% (2013년)	88.0% (2013년)

출처: 수도관리연보 (한국수자원공사, 2014)

- 18개의 급수구역은 행정구역과 지리적 위치를 감안해서 <표 4-4>와 같이 4개의 급수지역으로 구분할 수 있음
 - 급수지역 I: 도계계통의 4개 급수구역으로 구성된 일반 주거 및 상업지역
 - 급수지역 II: 도계계통의 3개 급수구역으로 구성된 폐광 및 영세공장지역
 - 급수지역 III: 도계계통의 1개 급수구역과 상동계통의 5개 급수구역으로 구성된 일반 주거 및 상업지역
 - 급수지역 IV: 상동계통의 5개 급수구역으로 구성된 대규모 위락시설 주위의 관광업 및 영세공장지역
 - 각 급수지역의 개발특성이 달라 1인1일 물사용량에 있어서 큰 차이를 보일 뿐만 아니라, 무수율 (누수, 공공이용 등의 원인에 의해 총 공급량 중에서 요금수익을 받지 못하는 수량의 비율)이 38.9%에서 73.6%으로 이르는 등 급수효율성 면에서도 차이가 매우 큼

<표 4-4> 급수지역의 구분 (총 18개 급수구역내 59,000 여명 급수인구)

급수 지역	급수구역	위치	평균 공급량 (m3/일)	급수 인구 (명)	무수율 (%)	1인1일 사용량+ (m3/일/인)
I	[도계] 황지	태백 황지동, 상장동	22,570	23,300	73.6	0.3396
	[도계] 매립장	태백 통동	100	100		
	[도계] (직결)	태백 황지동	398	500		
	[도계] 통리	태백 철암동, 황연동	5,978	5,700		
II	[도계] (직결)	삼척 도계읍	35	100	38.9	0.8107
	[도계] (직결)	삼척 도계읍	2	-		
	[도계] 고구	삼척 도계읍	2,161	4,700		
III	[도계] 원동	태백 삼수동	1,442	1,600	73.6	0.3619
	[상동] 브라이튼	태백 화전동	198	200		
	[상동] (직결)	태백 화전동	2,268	2,400		
	[상동] 화전	태백 삼수동	665	1,000		
	[상동] 용소골	태백 화전동	525	600		
	[상동] 용연관광	태백 화전동	6	-		
IV	[상동] 두문	정선 고한읍, 사복읍, 남면	11,222	11,300	62.1	0.4089
	[상동] 터널관리	정선 고한읍	131	100		
	[상동] (직결)	정선 고한읍	2	-		
	[상동] (직결)	정선 고한읍	6	-		
	[상동] (직결)	정선 고한읍	172	200		

주: + 급수지역별 생활용수에 대한 1인 1일 사용량은 해당 지역의 모든 공급량으로부터 무수율을 감안해 실 사용량을 계산한 뒤, 급수인구를 감안해 환산한 값임

출처: 급수구역, 위치, 급수인구에 대해서는 한국수자원공사 수도관리처 내부자료 (2014년 8월)를 이용하였고, 연결된 지자체 정수장 정보와 용수공급 효과의 지표인 무수율 (Non-Revenue Water)에 대해서는 환경부의 2012년 상수도통계의 지자체별 측정치 참고

- 전체 급수구역들은 광동댐의 광역상수도가 아닌, 지방상수도를 통해서도 <표 4-5>와 같이 일평균 17,000 톤에 해당되는 수량을 추가적으로 받고 있음

〈표 4-5〉 급수지역의 지방상수도 공급 현황

급수 지역	연결된 지자체 정수장	지자체 정수장의 시설용량+ (m3/일)	지자체 정수장의 평균 공급량++ (m3/일)
I	당골2, 화전, 원동, 백산, 혈리	11,280	9,030
II	마교	7,000	4,171
III	화전, 원동	2,400	2,847
IV	도사곡	1,500	983

주: + 화전정수장과 원동정수장은 급수지역 I과 III의 구역에 공통으로 연결되어 있어 급수인구를 감안해 정수장 시설용량 분배
 ++ 당골2, 백산, 혈리정수장은 연구대상지 외의 지역에도 공급하고 있어 급수인구의 비율을 감안해 해당지역의 일평균 공급량을 추정하였으며, 화전정수장과 원동정수장은 급수지역 I과 III의 구역에 공통으로 연결되어 있어 급수인구를 감안해 각 구역의 공급량을 추정함

출처: 국가수자원관리종합정보시스템의 용수공급계통도와 환경부 (2013) 상수도통계를 토대로 작성

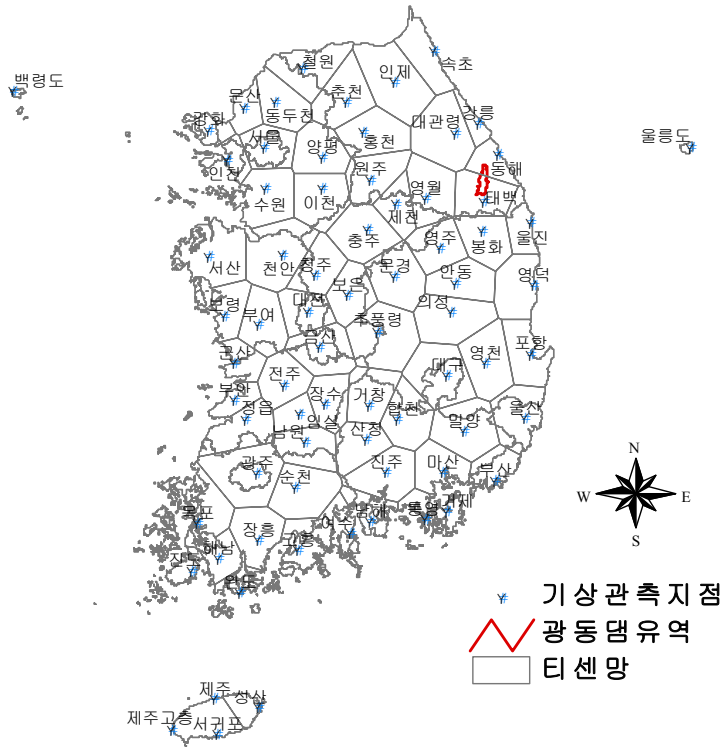
2. 재해특성 평가 결과

1) 특정 가뭄 조건에서 해당 유역의 갈수기 유출량 분석 결과

□ 관심유역의 월단위 면적평균강수량 시계열 자료 도출

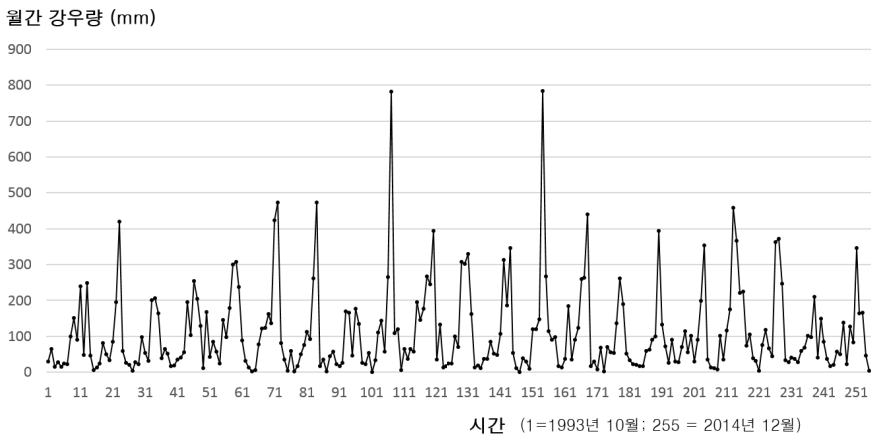
- 윤선권 외 (2014)는 기상청 기상관측지점에 대해 <그림 4-3>과 같이 티센망 자료를 구축한 바 있음
- 해당 연구에서 광동댐 표준유역 인근의 동해와 태백 관측소의 티센다각형의 지배면적을 각각 30.5 km²와 94.5 km²로 제시함에 따라, 본 연구에서 두 관측소 강수량의 티센가중인자를 각각 0.244와 0.756으로 적용
- 티센가중치를 식(3.1)에 적용하여, 동해와 태백 관측지점에서 1993년에서 2014년까지의 월간 강우량 자료를 관심유역의 면적평균 강우량으로 <그림 4-4>와 같이 변환

〈그림 4-3〉 사용된 티센망 지도



출처: 윤선권 외 (2014)

〈그림 4-4〉 표준유역의 월단위 강수량 시계열 대표값

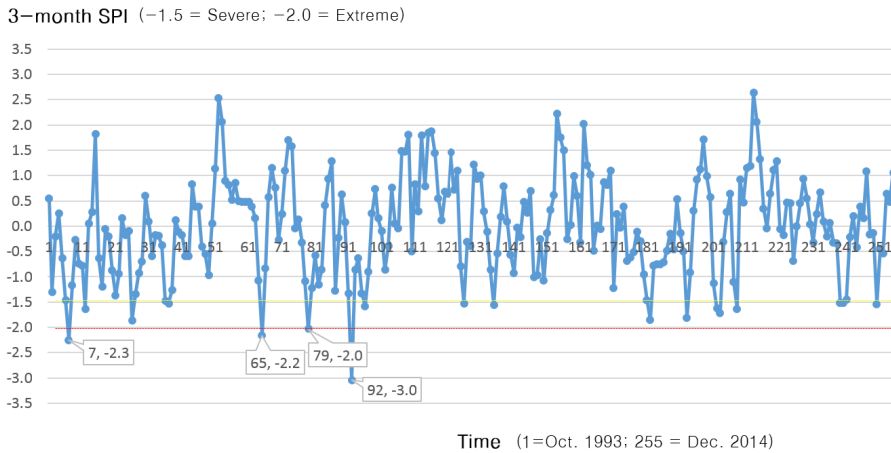


□ 광동댐 표준유역에 대한 3개월과 6개월 SPI 시계열 자료 분석 결과

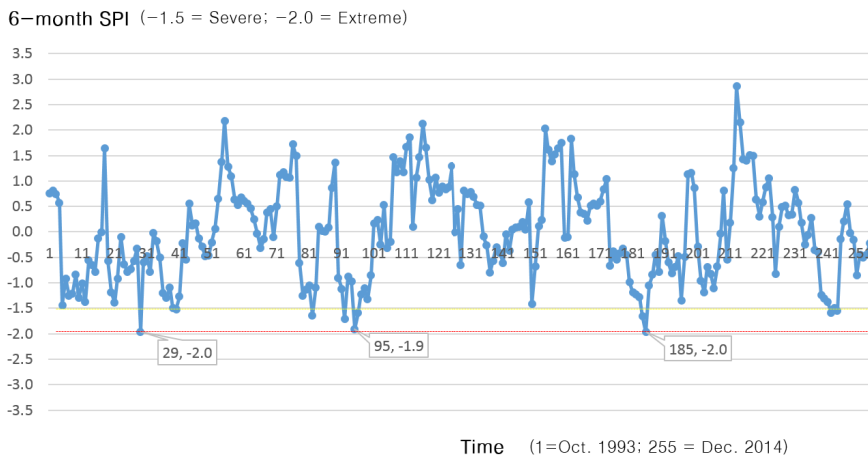
- 〈그림 4-5〉와 〈그림 4-6〉은 각각 지속기간에 대해 3개월과 6개월을 고려하여 식(3.2)를 통해 도출된 SPI 시계열 자료를 보여줌
- 사례연구 대상지의 사회경제적 가뭄 분석에 적합한 지속기간 선택을 위해서는 건설교통부 (2002), 한국수자원공사 (2005), 태백시 (2009), 국토해양부 (2011) 등의 가뭄피해기록과 비교키로 함
- 지속기간 3개월의 적정성 (〈그림 4-5〉)
 - 20여년 동안 SPI값이 -2.0 이하의 극단적 (extreme)인 가뭄이 1994년 4월 ($t=7$), 1999년 2월 ($t=65$), 2000년 4월 ($t=79$), 2001년 5월 ($t=92$)로 4차례 발생한 것으로 해석됨
 - $SPI = -2.0$ 의 세기가 극단적인 가뭄 조건이라는 점을 감안할 때 과도하게 자주 발생한 것으로 판단됨
 - 2001년 5월에는 $SPI = -3.0$ 으로 지나치게 낮은, 설명하기 힘든 가뭄이 발생
 - 무엇보다 2009년 봄에 저수지가 고갈되는 유례없는 현상에 대해서는 단순히 심각한 가뭄 정도로 설명됨
 - 결론적으로 해당 사례연구 대상지의 사회경제적 가뭄 분석에 지속기간 3개월 가정은 적절하지 않은 것으로 판단됨
- 지속기간 6개월의 적정성 (〈그림 4-6〉)
 - SPI 자료는 극단적인 가뭄 세기가 1996년 2월 ($t=29$)과 2009년 2월 ($t=185$)의 2차례 발생한 것으로 해석됨
 - 이 두 시점은 모두 해당 사례연구지에 극심한 피해가 발생한 시점과 잘 일치했으며, 2009년 2월에 해당유역의 저수지가 고갈된 점 또한 SPI 값을 토대로 잘 설명됨
 - 추가적으로 SPI값의 범위 또한 과도하게 떨어지지 않아 가뭄 세기를 덜 민감하게 판단할 수 있음을 알 수 있음

- 이 같은 점을 종합할 때, 광동댐 표준유역에서 가뭄판별에 적합한 지속기간은 6개월로 판단됨
- 이후 단계에서는 <그림 4-6>에 제시된 SPI 시계열 자료를 사용하기로 함

<그림 4-5> 3개월 지속기간 조건의 SPI 시계열 자료



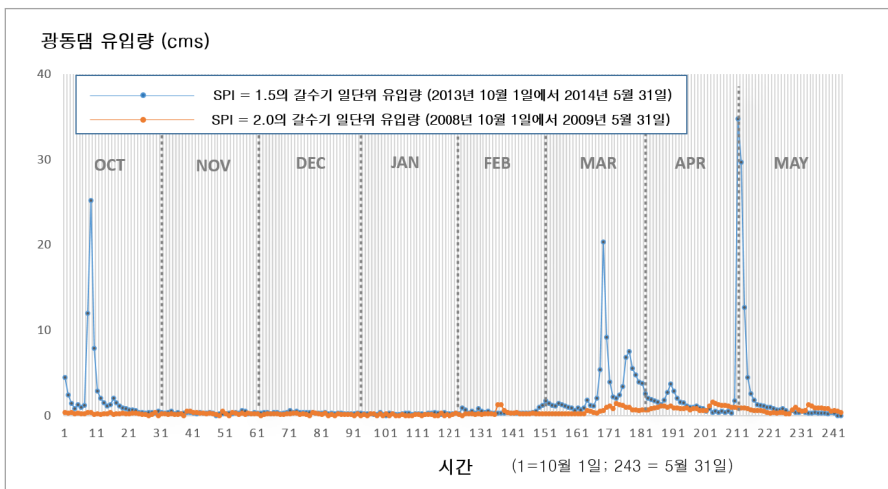
<그림 4-6> 6개월 지속기간 조건의 SPI 시계열 자료



□ 특정 SPI 값에 해당되는 갈수기 유출량 관측치 분석 결과

- 두 가지 가뭄 조건에 대해 가장 최근에 발생한 시점을 확인
 - $-1.5 \leq \text{SPI} < -2.0$ 의 심각한 가뭄: 2013~2014년 갈수기에 발생
 - $\text{SPI} \leq -2.0$ 의 극단적인 가뭄: 2008~2009년 갈수기에 발생
- 각 시점에 부합하는 관심유역의 일단위 유출량 시계열 자료를 국가수자원관리종합정보 시스템 (WAMIS)을 통해 확보한 뒤 <그림 4-7>과 같이 심각한 가뭄과 극단적인 가뭄 조건에서의 광동댐 표준유역의 유출량 대표값을 도출
- 두 가지 가뭄 조건들을 서로 비교해 보면, 10월과 3월 이후의 유출량에 큰 차이를 관찰할 수 있음
 - 심각한 조건에서는 10월과 3월 이후의 유출량은 적지 않지만, 극단적인 조건에서는 이 기간조차 유출량이 거의 발생되지 않음
 - 11월에서 2월까지의 4개월 동안은 두 가지 가뭄 세기 조건 모두 유출량이 매우 저조하고, 광동댐 저수량의 의미있는 증가 요인이 없음

<그림 4-7> 두 가지 가뭄 세기에 대한 갈수기 광동댐 유입량 대표값



2) 특정 가뭄 조건에서 급수지역 생활용수 이용가능량 분석 결과

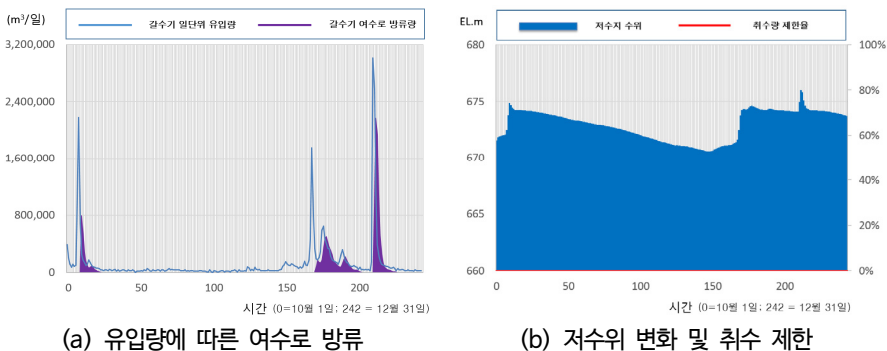
□ 댐 저수지 및 용수공급시설 운영관리 모형의 검토

- GRDM2는 Lee 외 (2012) 뿐만 아니라 앞서 언급한 여러 연구에서 사례연구 대상지인 광동댐 급수지역에 대해 검증되어 활용된 바 있으며, 본 연구에서 일부 수정/개선된 부분은 모형의 신뢰도에 영향을 미치지 않음
- 본 연구에서 동 모형에 대한 별도의 검토정을 실시하지 않음

□ 사례연구대상지의 생활용수 이용가능량 모의 결과

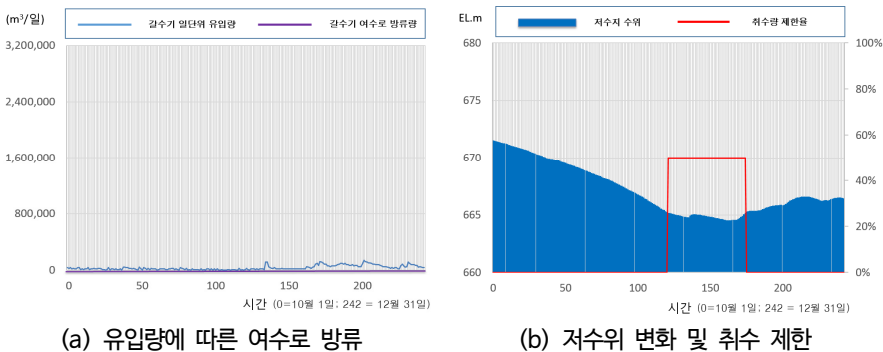
- 6개월 SPI가 -1.5에 해당되는 심각한 가뭄 조건의 유출량 대표값을 입력해 모의했을 때 저수지 물수지 해석 결과: 〈그림 4-8〉
 - 10월과 3월 이후에는 여수로 방류가 필요할 만큼 유입량이 컸음
 - 11월 이후 2월까지에 대해서는 유입량이 저조해 점진적으로 수위가 감소하지만 취수를 위협하는 수준은 아니었음 (즉, 취수량 제한은 발생하지 않음)
 - 결론적으로, 심각한 가뭄 조건은 해당 저수지와 이후의 용수공급계통에 영향을 주지 않는 것으로 분석되었으며, 이후의 위험도 평가가 불필요함

〈그림 4-8〉 심각한 가뭄 조건에서 저수지 물수지 해석 결과



- 6개월 SPI가 -2.0에 해당되는 극심한 가뭄 조건의 유출량 대표값을 입력해 모의했을 때 저수지 물수지 해석 결과: <그림 4-9>
 - 심각한 가뭄 조건에서의 모의 결과와 크게 다른 결과를 얻음
 - 갈수기 초인 10월부터 유출량이 거의 발생하지 않기 때문에 저수지 수위는 빠르게 감소하며 여수로 방류량은 전혀 발생하지 않음
 - 게다가 1월 말에 이르게 되면 수위가 사수위에 가까워지기 때문에, 수위가 다시 회복되는 3월 말까지 두 달 이상에 걸쳐 50%의 취수 제한이 필요한 응급 상황을 맞게 됨
 - 봄철 강수로 인한 유입량 또한 크지 않아, 4월 초까지 취수가 정상적으로 재개되지 못하는 것으로 분석됨

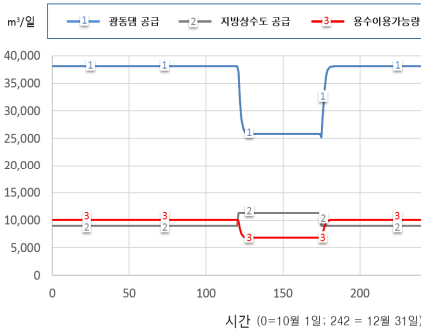
<그림 4-9> 극단적인 가뭄 조건에서 저수지 물수지 해석 결과



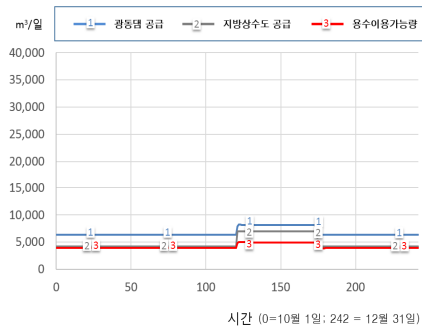
- 6개월 SPI가 -2.0에 해당되는 극심한 가뭄 조건의 유출량 대표값을 입력해 모의했을 때 급수지역별 생활용수 이용가능량 산정 결과: <그림 4-10>
 - 1월 말에서 3월 말까지 50%의 취수량을 제한함과 동시에 지방상수도로부터 공급량을 최대로 늘릴 때의 각 급수지역에 도달하는 생활용수 수량을 산정
 - 취수량 제한이 이루어졌을 때 급수지역 I과 급수지역 IV의 상황 (<그림 4-10(a)>와 <그림 4-10(d)>): 비교적 물수요가 클 뿐만 아니라 광동댐 용수에 대한 의존도가 높아 지방상수도 공급량을 극대화하더라도 실제 도달하는 총 이용가능량은 상당히 저하됨

- 취수량 제한이 이루어졌을 때 급수지역 II의 상황 (<그림 4-10(b)>): 광동댐 용수에 대한 의존도가 그리 높지 않고 지방상수도의 여유용량이 비교적 확보되어 있기 때문에 취수량이 제한되더라도 이용가능량의 저하는 발생하지 않음
- 취수량 제한이 이루어졌을 때 급수지역 III의 상황 (<그림 4-10(c)>): 이미 지방 상수도 공급이 설계용량을 초과하여 이용해 부족분 보충이 힘들기 때문에 광동댐 용수 의존도가 그리 높지 않고 물수요도 낮은 지역임에도 불구하고, 취수량 제한으로 인한 영향이 어느 정도 발생함
- 각 급수지역별 생활용수 이용가능량 상황은 2008-2009 광동댐 가뭄사태 당시에 지자체별 용수공급 여건 (이상은 외, 2009)의 차이를 잘 설명할 수 있음을 알 수 있음

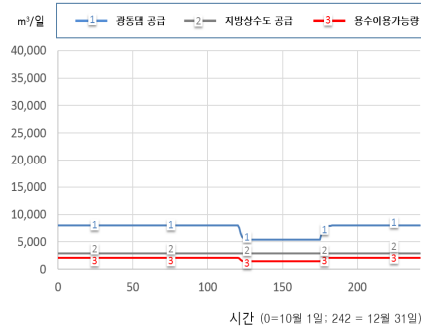
<그림 4-10> 극심한 가뭄 조건에서 갈수기 동안 급수지역들의 일단위 용수이용가능량



(a) 급수지역 I



(b) 급수지역 II



(c) 급수지역 III



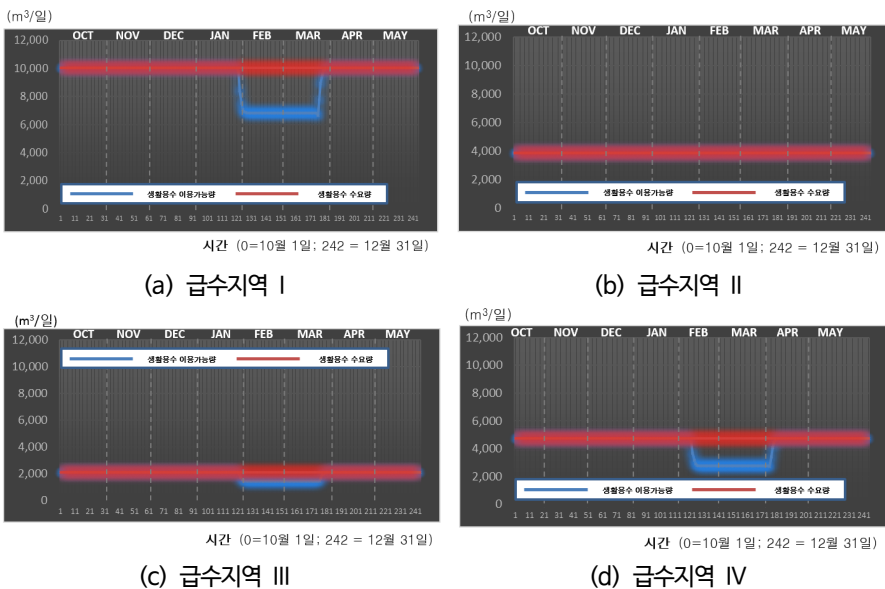
(d) 급수지역 IV

3. 노출특성 평가 결과

□ 급수지역별 용수 이용가능량과 수요의 비교

- <그림 4-11>과 같이 극단적인 가뭄 조건에서 급수지역 II를 제외하고는, 수급불균형이 1월 말에서 3월 말까지 발생
- 급수지역의 여러 여건에 따라 수급불균형 정도는 큰 차이를 보임

<그림 4-11> 극단적인 가뭄 조건에서 생활용수 용수수급 조사



□ 급수지역별 노출특성 평가 결과

- <그림 4-11>에 제시된 사례연구 대상지의 극단적인 가뭄조건에서 용수수급 상황을 <표 3-4> ~ <표 3-6>의 방법을 이용해 노출특성을 월단위로 계산했을 때 <표 4-6>과 같은 결과를 얻을 수 있었음
- 예로써, 급수지역 I의 1월 (즉, $i = 1, j = 4$)에 대한 물부족 영향인구, 물부족일수, 물부족기간 동안의 용수수급도는 아래 식(4.1)과 같이 산정됨

$$E_{14} = P_1 = 29,600 \text{ (명)}$$

$$D_{14} = \sum_{t=92}^{122} d_{14}[t] = 0 + \dots + 0 + d_{14}[121] + d_{14}[122] = 2 \text{ (일)}$$

$$\begin{aligned} R_{14} &= 100 \sum_{t=92}^{122} \{d_{14}[t] \times Q_1^a[t] / Q_1^d\} / \sum_{t=92}^{122} d_{14}[t] \\ &= \frac{100}{Q_1^d} \times \{0 + \dots + 0 + Q_1^a[121] + Q_1^a[122]\} \times \frac{1}{0 + \dots + 0 + d_{14}[121] + d_{14}[122]} \\ &= 100 \times \frac{\{Q_1^a[121] + Q_1^a[122]\}}{2Q_1^d} = 100 \times \frac{\{9,796.4 + 8,438.7\}}{2 \times 10,052.0} = 90.7 \text{ (%) } \quad (4.1) \end{aligned}$$

〈표 4-6〉 사례연구 대상지의 극단적인 가뭄 조건에서 월별 노출특성 분석 결과

급수 지역	노출특성	단위	월별							
			OCT j=1	NOV j=2	DEC j=3	JAN j=4	FEB j=5	MAR j=6	APR j=7	MAY j=8
I i=1	영향인구 E_{ij}	천명	0	0	0	29.6	29.6	29.6	0	0
	물부족일수 D_{ij}	일	0	0	0	2	28	31	0	0
	용수수급도 R_{ij}	%	100	100	100	90.7	68.2	72.6	100	100
II i=2	영향인구 E_{ij}	천명	0	0	0	0	0	0	0	0
	물부족일수 D_{ij}	일	0	0	0	0	0	0	0	0
	용수수급도 R_{ij}	%	100	100	100	100	100	100	100	100
III i=3	영향인구 E_{ij}	천명	0	0	0	5.8	5.8	5.8	5.8	0
	물부족일수 D_{ij}	일	0	0	0	2	28	31	0	0
	용수수급도 R_{ij}	%	100	100	100	88.6	68.3	72.9	100	100
IV i=4	영향인구 E_{ij}	천명	0	0	0	11.6	11.6	11.6	0	0
	물부족일수 D_{ij}	일	0	0	0	2	28	31	0	0
	용수수급도 R_{ij}	%	100	100	100	86.6	58.6	64.5	100	100

4. 취약성 평가 결과

□ 과거 가뭄시 주민고충과 관련된 피해항목의 선정 및 피해액 집계 결과

- 일반적인 피해조사 항목은 주민생활 외에도, 산업피해, 농업피해, 공공부문피해 등을 포괄하지만, 본 연구에서는 가뭄 위험도를 주민생활의 고충에 한정하였으므로, 주민들과 직접적으로 관련있는 항목에 대한 피해액을 집계
- 태백시 (2009)에서 실시한 2008-2009 가뭄사태의 피해조사 결과 활용
 - 해당 피해조사 보고서에 제시된 피해자료 가운데, 본 연구는 주민고충에 대한 피해라 할 수 있는, 일상생활 피해와 정신적·사회적 피해에 한정함
 - 일상생활 피해액: 302명의 주민에 대한 설문조사를 실시해 조사항목별로 가구평균 피해금액을 구한 다음 전체 가구수를 곱해 총 피해액 산정 (조사항목 중에서 ‘이웃의 가뭄극복을 위해 지원한 금액’과 ‘사랑의 생명수 지원금액’이 포함되어 있는데, 이 항목들은 주민생활 고충과 관련된다고 보기 힘들어 본 연구에서 배제함)
 - 정신적·사회적 피해액: 실제 피해가구를 대상으로 보상의 희망액수가 조사됨
 - 사례연구 대상지의 2008-2009년 가뭄에서 선택된 조사항목에 대한 주민고충 총 피해액은 총 398억 원에 달한 것으로 파악됨 (<표 4-7> 참고)

〈표 4-7〉 태백시 가뭄백서 (2009)로부터 재집계된 총 주민고충 피해액

구분	피해항목	피해금액 (원)
정신적·사회적 피해	정신적 보상	30,118,656,711
	세탁을 위한 택배비 또는 교통비	832,702,500
일상생활피해	부식구입비용	2,172,659,933
	일회용품구입비용	616,657,020
	난방시설수리 또는 교체비용	3,124,064,664
	추가 가스비용	196,934,468
	추가 전기비용	297,608,527
	병원진료비	91,393,072
	위생문제 해결비용	920,646,334
	용기구입비용	385,422,011
	피해 화초 가격	129,723,947
	월 통신요금 증가	167,174,007
	용수확보를 위한 차량유지비	470,083,093
	생활용품 구입비	270,704,725
총 주민고충 피해액		39,794,431,012

□ 물부족 노출특성과 피해액간의 관계 도출 결과

- 태백시 (2009) 가뭄백서를 토대로, 위의 398억원의 피해비용은 당시 급수인구 51,285명이 123일 동안 평균적으로 73.3%의 용수수급도를 갖는 상황에서 발생된 것임
- 398억원의 피해액은 주민 1인당 약 776,000원 (39,794,431,012원/51,285명)에 해당되며, 주민 1인당 일평균 피해액은 약 6,300원 (=775,947원/명/123일)이고, 이 주민은 매일 1% 만큼의 용수수급도 저하시 마다 172원의 고충을 평균적으로 (=6,309원/명/일/(100-73.3)%저하) 겪게 된다는 결론에 이름
- 이 같은 결과를 토대로, i번째 급수지역에서 j번째 월동안 물부족 노출특성이 각각 E_{ij} (명), D_{ij} (일), R_{ij} (%)일 경우, 주민고충에 대한 피해환산액 C_{ij} (원)는 다음 식(3.4)와 같이 완성함

$$C_{ij} = k \times (100 - R_{ij}) \times E_{ij} \times D_{ij} \quad (4.2)$$

- 여기서, k 는 172원을 적용키로 함

5. 위험도 산정 결과

□ 극단적인 가뭄 조건에서 급수지역들의 월단위 주민고충 피해 산정 결과

- 취약성 평가 단계에서 얻은 노출도-위험도 관계 곡선을 사용해, 극단적인 가뭄 조건에서 급수지역별로 분석된 노출특성을 주민고충 피해액으로 환산한 결과: <표 4-8>
- 심각한 가뭄 조건에서 사례대상지의 주민들은 전혀 위험도를 갖지 않음
- 극단적인 가뭄 조건에 대해서는 주민들은 전 갈수기 기간 동안 150억원에 해당되는 고충을 겪을 만큼 위험도가 높은 것으로 평가됨
- 시기적으로 2월과 3월에, 공간적으로는 물수요가 높고 광동댐 의존도가 높은 급수지역 I과 급수지역 II에 위험도가 집중되어 있음을 알 수 있음

〈표 4-8〉 극단적인 가뭄 조건에서 급수지역들의 월별 위험도 산정 결과

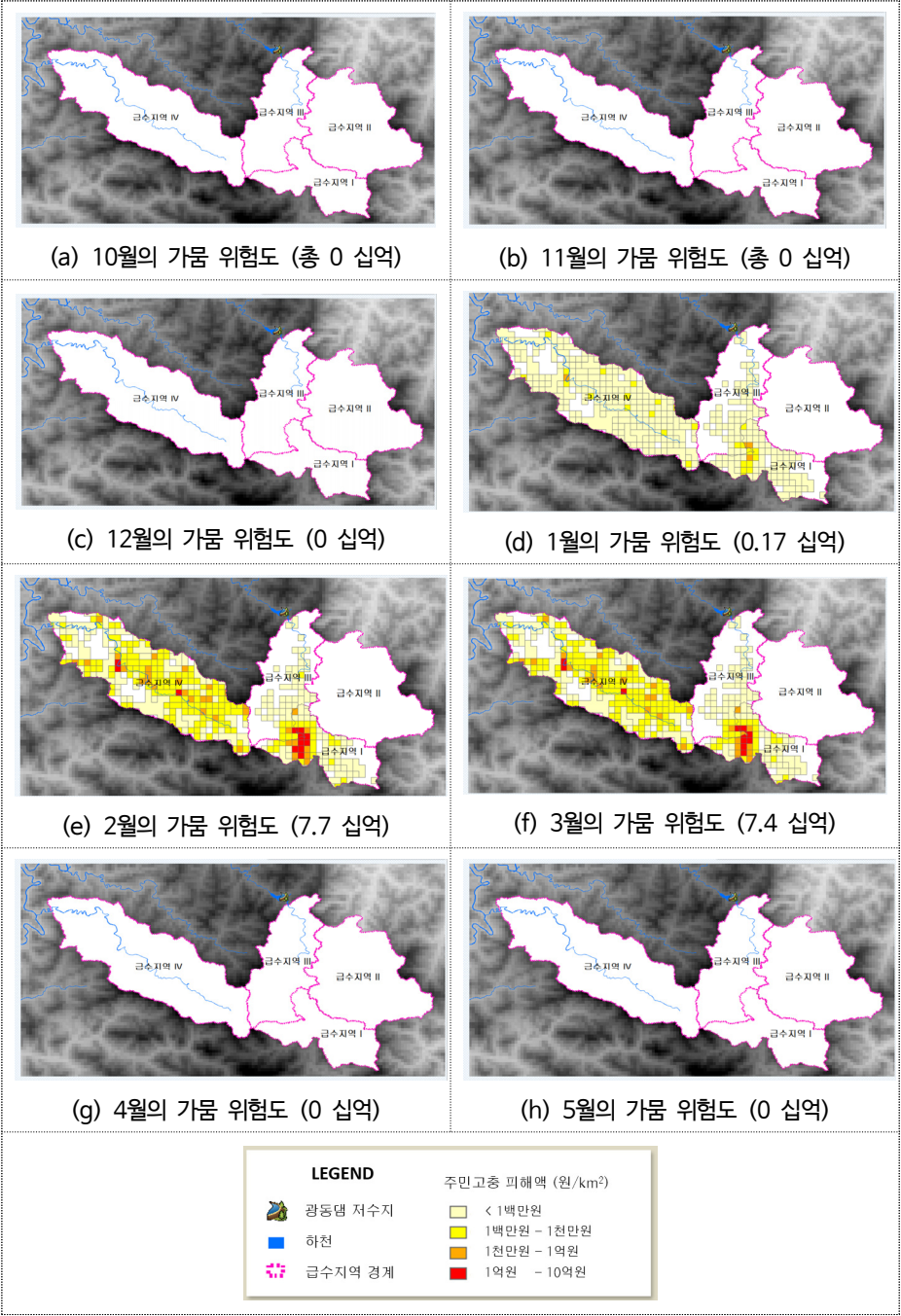
급수 지역	노출특성	단위	월별							
			OCT j=1	NOV j=2	DEC j=3	JAN j=4	FEB j=5	MAR j=6	APR j=7	MAY j=8
I i=1	영향인구 E_{ij}	천명	0	0	0	29.6	29.6	29.6	0	0
	물부족일수 D_{ij}	일	0	0	0	2	28	31	0	0
	용수수급도 R_{ij}	%	100	100	100	90.7	68.2	72.6	100	100
	위험도 C_{ij}	십억	0	0	0	0.09	4.5	4.3	0	0
II i=2	영향인구 E_{ij}	천명	0	0	0	0	0	0	0	0
	물부족일수 D_{ij}	일	0	0	0	0	0	0	0	0
	용수수급도 R_{ij}	%	100	100	100	100	100	100	100	100
	위험도 C_{ij}	백만원	0	0	0	0	0	0	0	0
III i=3	영향인구 E_{ij}	천명	0	0	0	5.8	5.8	5.8	5.8	0
	물부족일수 D_{ij}	일	0	0	0	2	28	31	0	0
	용수수급도 R_{ij}	%	100	100	100	88.6	68.3	72.9	100	100
	위험도 C_{ij}	백만원	0	0	0	0.02	0.9	0.8	0	0
IV i=4	영향인구 E_{ij}	천명	0	0	0	11.6	11.6	11.6	0	0
	물부족일수 D_{ij}	일	0	0	0	2	28	31	0	0
	용수수급도 R_{ij}	%	100	100	100	86.6	58.6	64.5	100	100
	위험도 C_{ij}	백만원	0	0	0	0.05	2.3	2.2	0	0
급수지역 전체 위험도			0	0	0	0.17	7.7	7.4	0	0

□ 위험도 공간상세화 및 위험도 지도 구축

○ LandScan™ ver. L2009 인구지도를 이용해 급수지역별 피해액을 상세화시킨 결과 〈그림 4-12〉와 같은 가뭄 위험도 지도를 얻을 수 있었음

- 극단적인 가뭄조건에서 2월에 가뭄 위험도가 가장 클 것으로 판단되며, 이 위험도는 급수지역 I의 한 곳 (태백시청 인근의 비교적 넓은 주거상업 지역)과 급수지역 IV의 두 곳 (정선군의 관광지역과 정선군의 영세 공장지역)에 과도하게 집중될 수 있음을 알 수 있었음
- 반대로 해석하면, 이곳을 중심으로 가뭄 저감사업을 하게 된다면 극단적인 가뭄 조건에서 주민피해를 효과적으로 감소시킬 수 있음을 의미함

〈그림 4-12〉 극단적인 가뭄 조건에서 사례연구 대상지의 가뭄 위험도 지도



6. 방법론상의 유용성 검토

- 본 연구는 가뭄분야 저감대책 과정에서 이해당사자들이 갖게 되는 세 가지 실무적인 질문들을 해소할 수 있는 가뭄 위험도 평가 기법을 제시코자 목표함
 - 이를 위해 앞에서 <표 4-9>과 같은 네 가지 개발 방향을 단기적으로 설정

<표 4-9> (앞서 설정한) 가뭄 위험도 평가 방법론 개발 방향

저감대책상 방법론의 필요성	방법론 개발 방향	비고
“정말 가뭄에 의해 재난이 발생할 수 있을 것인가”의 질문	가뭄으로 인한 피해규모를 판단에 도움 제공	단기
	검증 가능한 위험도 정보 제공	단기
	장래 피해규모에 대한 통찰력 제공	장기
“어느 지역에 가뭄 위험이 집중되어 있는가”의 질문	특정 가뭄 조건하에서 넓은 지역에 걸쳐 위험도가 집중된 지역을 명확히 설정	단기
“무슨 저감대책이 주민들을 효과적으로 보호할 수 있을 것인가”의 질문	고위험지역의 기저요인 (underlying risk factors)에 대한 이해를 제공해 지역에 맞는 저감대책 선별이 가능토록 함	단기
	저감대책의 효과 정량화	장기

- 사례연구 결과에 근거할 때, 구축된 가뭄 위험도 평가기법은 저감대책상의 질문들을 해소함에 있어서 다음과 같은 가능성을 확인할 수 있었음

□ 위험도 평가 방법은 가뭄의 피해규모를 판단하는 데에 도움을 제공할 수 있음

- 5~7년에 한 번 씩 발생할 수 있는 심각한 가뭄에 대해서는 사례대상지는 물부족 피해를 입지 않을 것으로 분석되었음
- 20~30여년에 한 번 씩 발생할 수 있는 극단적인 가뭄에 대해서는 급수지역 II를 제외한 전 지역 주민들은 큰 고충을 겪을 수 있을 것으로 판단되었음
- 게다가 극단적인 가뭄시 5만 여명의 주민들이 150억원 이상의 잠재적인 피해수준을 감내해야 한다는 결과는 저감대책의 필요성을 명확히 제시함

□ 위험도 평가방법은 검증 가능한 위험도 정보를 제공할 수 있음

- 본 연구에서 산정된 위험도는, 해당되는 가뭄 조건에서 실제 피해 발생을 잘 설명할 수 있음을 확인함
 - 심각한 가뭄 조건에 부합되는 2013-2014년 갈수기 동안 해당 사례지역에 가뭄 피해는 잘 알려지지 않았으며, 위험도 평가 결과에서도 광동댐 용수는 모든 급수지역에 정상공급 가능한 것으로 분석되었음
 - 극단적인 가뭄 조건에 부합되는 2008-2009년 갈수기 동안 해당 사례지역에는 1월말에서 3월말까지 국가재난이 선포될 정도로 가뭄 피해가 매우 컸으며 특히 태백시에 피해가 집중되었다는 점을 알 수 있었음
 - 산정된 위험도 또한 해당 갈수기내 주로 2월과 3월 동안 취수량 제한과 용수 수급불균형이 발생하며, 높은 물수요, 물이용의 비효율성, 광동댐 의존도 등 다양한 이유로 태백시에 피해가 집중됨을 잘 설명할 수 있었음

□ 위험도 평가방법은 특정 가뭄 조건하에서 넓은 지역에 걸쳐 위험도가 집중된 지역을 명확히 설정함

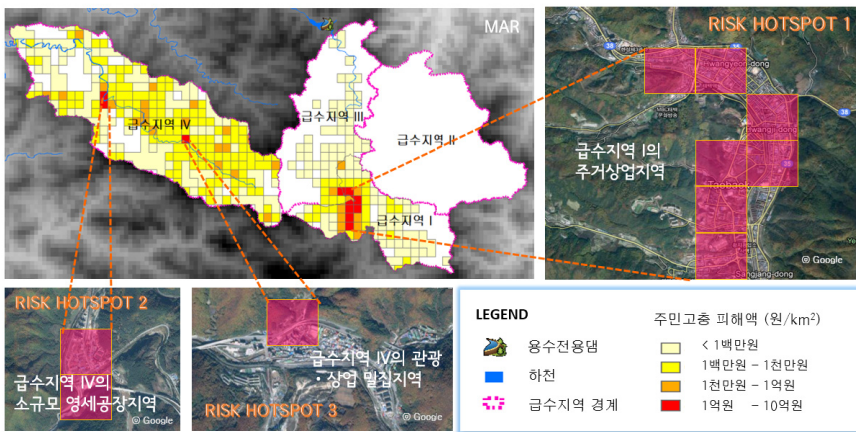
- 극단적인 가뭄이 발생시 2월과 3월 중 상당한 피해가 급수지역 I과 급수지역 IV의 일부 구역에 집중될 수 있음을 <그림 4-13>과 같이 정량적으로 제시함
- 계다가 저감대책이 필요한 공간범위를 1km×1km 단위로 명확히 설정

□ 위험도 평가방법은 고위험지역 기저요인의 이해를 토대로 적절한 저감방향 제시

- 선정된 고위험지역은 기상수문학적 위험 외에도 높은 물수요, 낮은 유수율, 광동댐에 대한 높은 의존도, 지방상수도 추가 공급능력 부족 등의 복합적인 문제들이 관여하고 있음을 알 수 있었음
 - <그림 4-14>와 같이 파악된 문제 각각에 대한 저감대책 발굴이 가능하고, 구축된 평가기법을 이용해 이 저감대책들의 효과를 정량적으로 분석하는데 큰 어려움이 발생하지 않을 것으로 판단됨

- 저감대책을 강구함에 있어서 가뭄피해가 극단적인 조건에서야 발생하며 <그림 4-13>처럼 이 위험도가 좁은 구역에 집중되어 있다는 점에 주목할 필요가 있음
 - 추가 수원을 개발하거나 장거리 도수를 통해 일괄적으로 해결하려는 대책은 건설비와 유지관리비에 비해 충분한 사업 효과를 얻지 못할 가능성이 높음
 - 대신, 선정된 고위험구역에 대한 한시적인 피해완화대책이 적절함
 - 예를 들어, 고위험구역을 중심으로 지하관정의 수질을 상시적으로 관리해 물부족시 즉시 용수공급을 보조하는 방안, 우수율 제고를 통한 물이용의 효율성을 제고하는 방안, 그리고 병원, 관공서, 복지시설 등에 대한 갈수기 비상용수 확보·운영 방안이 기회비용이 낮고 효과적이라 판단됨

<그림 4-13> 사례연구 대상지의 가뭄 고위험지역 선정



<그림 4-14> 사례연구 대상지의 위험도 기저원인 해석 결과

급수지역 I	물수요 ↑	광동댐 의존도 ↑	지방상수도 여유량 ↓	물이용 효율성 ↓	잠재적인 주민고충 매우 높음
급수지역 II	물수요 ↓	광동댐 의존도 ↓	지방상수도 여유량 ↑	물이용 효율성 ↑	잠재적인 주민고충 거의 없음
급수지역 III	물수요 ↓	광동댐 의존도 ↓	지방상수도 여유량 ↓	물이용 효율성 ↓	잠재적인 주민고충 중간수준
급수지역 IV	물수요 ↓	광동댐 의존도 ↑	지방상수도 여유량 ↓	물이용 효율성 ↓	잠재적인 주민고충 높음

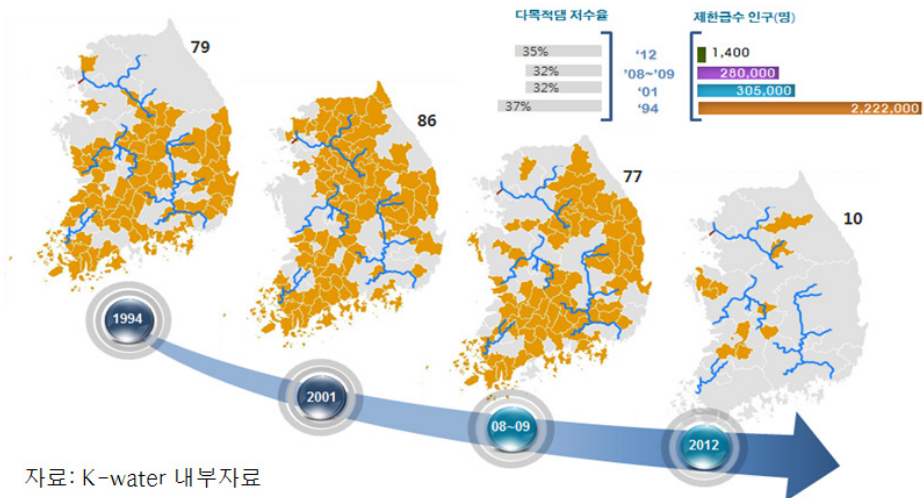
제 5 장 결론

1. 정책적 시사점

□ 극단적인 가뭄 발생에 대한 국가전략수립 요구

- 20세기 후반부터 정부의 노력으로 가뭄에 대한 사회 안전도는 상당히 확보되었음
 - 수자원이 상대적으로 덜 개발되었다고 알려진 사례연구 대상지조차 심각한 수준의 가뭄에도 주민생활에 별 영향이 없을 것으로 분석됨
 - 실제로 최근 가뭄 발생 추이를 보면 <그림 5-1>과 같이 전국적으로 영향지역 면적이 서서히 줄어드는 추세였음

〈그림 5-1〉 전국적인 가뭄영향 추이

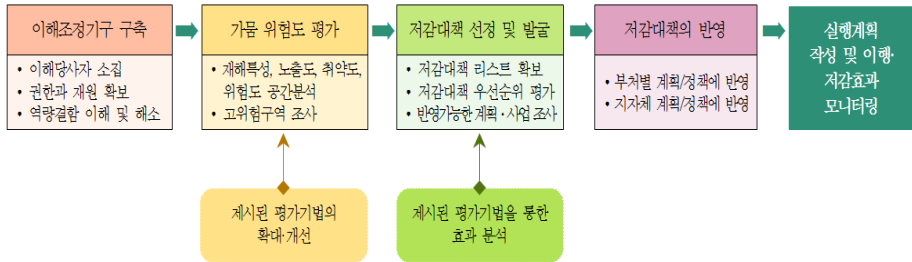


- 극단적인 가뭄 사상에 맞춰 수자원관리의 초점을 구체화시킬 필요가 있음
 - 첫째, 기후변화로 강수량의 계절적 특성이 더욱 뚜렷해져 극단적 수문사상이 보다 일상화 (normal extremes)되고 있기 때문임 (중양하천관리위원회, 2010; 국립환경과학원, 2011)
 - 과거대비 갈수기 강수량의 극치값은 더욱 낮아지는 것으로 전망됨
 - 이를 해석하면 동일한 재현기간에서 가뭄은 더 심각해진다는 점과 과거에 문제시 되었던 가뭄은 더 자주 발생하게 됨을 의미
 - 둘째, 많은 지역에서 극단적인 가뭄발생에 대한 대응능력이 현저히 부족
 - 본 사례연구 대상지처럼, 용수전용댐 또는 간이상수도시설을 이용하는 도시들은 극단적인 가뭄발생에 크게 노출되어 있음
 - 이 도시들의 수자원시설은 (i) 가뭄빈도 10년 이내의 조건에서도 저수량이 쉽게 고갈되는 시설에 의존할 뿐만 아니라, (ii) 1차 산업 또는 관광산업의 우세로 물수요가 높으며, (iii) 관로정비 부족으로 급수 효율성이 비교적 낮으며, (iv) 수원 개발이 미미해 비상시 대체용수 확보도 쉽지 않고, (v) 개인과 지자체의 경제적 기반 (fragility)도 상대적으로 낮아 피해민감도 높은 등 다양한 불리함을 갖는 경향이 있음 (이상은과 박희경, 2011)
 - 셋째, 가뭄으로 인해 용수 이용가능성이 동일한 수준으로 저하되더라도 사회에 야기되는 갈등은 과거보다 훨씬 더 심각할 수 있음
 - 과거 물재해가 발생할 때 주민들은 피할 수 없는 자연의 섭리로 받아들이는 경향이 있었고, 국가의 역할은 이들에 대한 위로, 구호, 보상에 국한되었음
 - 재해관리에 대한 국가의 역할과 시민들의 의식수준이 증가되면서, 물재해가 피해로 연결될 때 중앙정부, 지방자치단체, 수자원관리기관간의 책임여부를 놓고 깊은 갈등이 초래되며, 주민들의 반응 또한 피해보상소송, 단체행동 등 과거보다 더욱 적극적으로 변화되고 있음

□ 과학기술역량에 근거한 건전한 저감대책 논의 가능성 확인

- 가뭄과 관련된 많은 국가들이 선제적인 대책의 필요성을 인식하고 있지만 정책결정자에게 신뢰와 체감을 제공할 수 있는 위험도 정보가 크게 부족(WMO와 UNCCD, 2012)
 - 정부 정책과 예산을 유동시키기 위해 극단적인 재해발생시 해당지역이 갖는 잠재적인 피해규모, 피해가 집중될 수 있는 구역, 효과적인 저감대책 등에 대한 확신이 선행되어야 함
 - 정부 담당자들의 정보에 대한 실무적인 수요와 전문가들의 학술적인 정보 공급에 간격이 커 저감대책 의사결정에 충분히 지원받지 못한 상황이었음
- 아직 방법론 개선의 여지가 많이 남아 있지만, 최근 발전된 과학기술역량을 이용해 가뭄 위험도 평가 방법을 시범적으로 구축해 사례연구를 수행한 결과 저감대책 의사결정에 많은 지원을 할 수 있는 가능성을 확인함
 - 저감대책 의사결정단계에서 이해당사자들의 실무적인 질문들을 상당히 해소시킬 수 있는 정보를 객관적으로 제공할 수 있음을 확인
 - 저감대책을 발굴한 뒤 효과 및 우선순위 평가시에도 신뢰할 수 있는 정보를 제공할 수 있음
- 본 연구를 확대해, 전국적인 차원 또는 유역관리차원으로 확대해 동일한 확률 조건하에서 또한 동일한 공간크기 단위로, 잠재적인 피해비용을 평가해 <그림 5-2>와 같이 정책지원 가능성을 높일 필요가 있음
 - 위험이 과도하게 집중된 구역을 조사하고 고위험구역간의 저감대책 필요에 대한 우선순위를 따져보고 각 구역별로 위험 기저요인을 해소할 수 있는 대책을 발굴하며, 이에 대한 효과와 지역의 수용가능성을 평가하며, 최종적으로 국가 중장기 계획을 마련

〈그림 5-2〉 저감대책 수립을 위한 가뭄 위험도 평가 방법론의 활용



□ 저감대책 투자의 기본원칙 정립 필요성

- 국가적으로 가뭄의 저감대책 논의가 본격적으로 진행되기 전에, 국가예산 부담을 줄일 수 있도록 명확한 투자원칙을 설정하는 것이 강조되어야 함
- 작은 수준의 영향을 주지만 자주 발생하는 가뭄과 큰 영향을 주지만 간헐적으로 발생하는 가뭄을 동일한 방식으로 대응할 수 없음
- 재난관리분야의 선도국가들은 재해특성이 고확률 저영향 인지 저확률 고영향 인지에 따라 투자 전략을 명확히 구분 (Hiroki, 2012)
- 고확률 저영향 가뭄에 대해서는 앞으로 더 이상 문제가 되지 않도록 “해결”하는 전략이 효과적
 - 기존의 물안전도 전략은 목표가뭄 (다목적댐 20~30년 가뭄, 전용댐 10년 가뭄, 간이 취수원 10년 이하)에서 용수수요를 충족시킬 수 있도록 저수시설 용량을 확보해 일괄적으로 해결해 옴
 - 이러한 가뭄은 5~7년에 한차례씩 발생하고 있지만 충분한 시설용량의 확보로 최근에는 사회적으로 이슈가 되지 않고 있음
- 저확률 고영향 가뭄에 대해서는 과거의 안전도 전략에 의존할 수 없고 관리능력을 높일 수 있는 투자 전략이 필요

- 과학기술의 발전에도 불구하고, 저확률 고영향 가뭄에 대한 영향크기와 발생주기를 예측하는 데에는 기술적으로 극복할 수 없는 불확실성 (irreducible uncertainty)에 직면하게 됨
- Lee와 Park (2010), 이상은과 박희경 (2011)에서 논의한 것처럼, 사회경제적 요소들과 기상수문 요소들의 불확실성을 함께 보면 시설용량의 설계 담당자는 단순히 확률의 문제가 아닌 “모호함 (ambiguity)”의 문제에 당면함
- 이에 목표가뭄을 상향 조정해 일괄적으로 대규모 시설용량을 확보하게 된다면 시설물관리의 비효율성을 피하기 힘들 (Gleick, 2003; Lee 외, 2012)
- 저확률 고영향 가뭄에 대한 전략은 높은 불확실성에 강건 (robustness)한 대책이 되도록 관리능력을 활성화시킬 수 있는 soft한 보완대책이 필요
- 즉, 고위험구역에 피해가 과도하게 집중되지 않도록 한시적인 보완대책을 미리 확보한다든지, 위험요인 중 사회경제적 취약성을 감소시켜 지역의 개발 또는 복지계획 과 조화를 이룰 수 있게 한다던 지, 지역경제나 환경질 개선에 도움이 되는 대안들을 발굴해야 함
- 이러한 차원에서, 사례연구에서는 고위험구역을 중심으로 비상시 지하수 공급이 용의하도록 평상시 수질 관리를 수행하거나, 물공급 효율성 개선 사업, 의료복지시설, 공공서비스시설 등에 대한 갈수기 비상용수 확보가 저확률고영향 가뭄의 저감대책에 중요함을 강조
- 가뭄의 특성에 따라 차별화된 투자전략에 대해 저자의 견해는 <표 5-1>와 같이 요약될 수 있음
- 추후 국가차원에서 투자전략을 정립하고 공감대가 확보된다면 본 연구에서 구축된 가뭄 위험도 평가기법은 저감대책의 투자 의사결정을 지원하는 데 상당한 도움을 제공할 수 있을 것임

〈표 5-1〉 고확률 저영향 가뭄과 저확률 고영향 가뭄에 대한 투자전략 구분의 예

	물안전도 전략	위험도관리 전략
가 뭄 조 건	심각한 가뭄조건 (고확률 저영향)	극단적인 가뭄 조건 (저확률 고영향)
목 표	물수급 불균형 최소화	주민과 경제활동의 잠재적 피해 최소화
대 상	취수원별 물수급도	고위험구역내 주민생산활동의 위험 요소
주 요 대 안	[정상시] - 갈수기 추가 저수량 확보를 위한 시설용량 설치 또는 증설 [가뭄 피해시] - 위기관리차원의 주민 및 산업체 지원	[장기적 저감대책] - 위험도 및 취약도 분석 결과의 국가 및 지자체 계획에 반영 - 비상 대체수원 유지관리 - 특정 수원 의존도 해소 - 응급시 피해완화 물량배분 제도 운영 - 중장기 수요관리대책 목표 설정 - 비상용수, 보험 등 취약그룹 보호대책 [단기적 대비책] - 조기경보 및 모니터링 운영 - 국가, 지자체, 분야별 가뭄대비계획 수립 - 가뭄대비 위한 교육, 훈련, 역량강화사업 - 물수요 억제 프로그램 운영 등

2. 추후 연구

- 다른 자연재해와는 달리, 가뭄의 위험도를 평가해 정책결정자들과 의사소통 하려는 연구는 여전히 미개척된 주제라 할 수 있음
- 본 연구에서도 여전히 가능성 보다는 추후 연구의 필요성을 더 많이 발견할 수 있었음
- 이에, 자문회의, 실무자와의 협의, 관련 전문가와의 학술 토론, 학술논문 검토 등 다각적으로 추후 연구 항목을 도출하고자 시도하였음

- 국가 차원의 가뭄 위험도 저감대책을 지원하기 위해 최종적으로 다음과 같은 연구주제들이 필요한 것으로 선정되었음
- 추후 연구의 “중요성”은 정책지원의 수준을, “시급성”은 방법론 발전을 위한 우선순위를 각각 의미 (중요성 또는 시급성이 낮은 연구주제는 배제)

□ 전국토 또는 대유역 영역에서 위험도 평가 연구 (중요성: 높음; 시급성: 중간)

- 저감대책을 국가예산상 반영하기 위해 국가나 대유역과 같은 보다 넓은 공간 영역에서 우선순위 높은 고위험지역 조사
- 소규모 용수전용댐 뿐만 아니라 대규모 다목적댐 용수공급지역을 포함
- 특히, 지자체 물안보를 확보하는 차원에서 대규모 다목적 댐에 대한 지자체의 적정 의존도 검토

□ 전국토 또는 대유역 영역에서 사회경제적 가뭄 판별을 위한 지속기간 연구 (중요성: 중간; 시급성: 높음)

- SPI 시계열 자료 분석방법은 특정 시점에서 가뭄의 세기를 특성화 (예 심각한 가뭄, 극단적인 가뭄)해 가뭄 위험도 평가의 기준을 제공함
- 본 연구에서는 SPI 시계열 자료 분석시 광동댐 유역에 대해서는 지속기간으로 6개월이 적절하다고 판단되었음
- 6개월 지속기간에 대한 가정은 다른 유역에 대해 일반화할 수 없음
- 즉, “강수량이 얼마나 오랫동안 저하될 때 사회경제적 가뭄이 발생하게 되는 가?”는 해당 유역의 지형·수문특성과 수자원개발특성에 따라 다름
- 따라서 제시된 방법론을 전국토 또는 대유역으로 확대하기 위해서는 각 유역별로 다양한 지속기간에 대한 SPI 시계열 분석 결과와 가뭄피해기록을 비교하며 해당 유역에 적합한 지속기간을 각각 조사해야 함

□ 기후변화 및 도시성장 시나리오별 가뭄 위험도 전망 (중요성: 높음; 시급성: 중간)

- 위험도는 본래 장래의 관점이므로, 기상수문과 도시특성에 대한 과거 자료보다 장래 예측 자료가 활용되는 것이 바람직함
 - 특히, 기후변화로 인해 갈수기 용수 이용가능량에 큰 변화가 예상되고, 도시의 성장과 쇠퇴에 대한 동적특성은 용수수요상 큰 변화를 발생시키고 있음
- 불확실한 외부조건에서 현명하게 저감대책을 검토하기 위해, 이 외부조건에 대한 다양한 시나리오를 종합해 가뭄 위험도를 전망하는 것이 필수적임

□ 지역의 개발특성에 따른 저감대책 효과 차이 실증 (중요성: 높음, 시급성: 높음)

- 저감대책을 수립하는 가운데 저감대책의 발굴 및 계획 작성 단계에서 제시된 방법론의 유용성을 검토하기 위한 파일럿 규모의 연구 수행
- 각 급수지역의 위험도 기저요인과 현장조건에 맞는 저감대책을 할당하고, 위험도 평가 방법을 통해 효과를 실증하며, 대상지의 이해관계자들과 함께 각 저감대책별로 수용가능성을 조사하는 등의 시범사업 수행 후 공유

□ 취약성 요인들을 구체화하고 각각의 피해민감도 실증 (중요성: 중간, 시급성: 높음)

- 설문조사를 체계적으로 설계해 실제 가뭄 피해발생 지역에 거주하는 주민들의 지리적·사회적·경제적 요인과 피해규모간의 관계에 대한 통계분석
- 피해 민감도 발생에 유의한 취약성 요인을 정의하고, 취약성 저감을 위해 효과적인 저감대책 검토

□ 공업용수와 관개용수에 대한 연구 확대 (중요성: 중간, 시급성: 중간)

- 저감대책상의 시너지를 도모하기 위해 모든 종류의 용수를 통합할 수 있도록 가뭄 위험도 방법론의 확대

참고문헌

- 건설교통부. 2002. 가뭄기록조사 보고서.
- 국가수자원관리종합정보시스템 (WAMIS). <http://www.wamis.go.kr/>
- 국립환경과학원. 2010. GIS기반 기후변화 적응도구 사용자 매뉴얼, 환경부.
- 국립환경과학원. 2011. 한국 기후변화 평가 보고서.
- 국토연구원. 2012. 기후변화 적응도시 조성방안 연구. 국토해양부.
- 국토해양부. 2011. 수자원장기종합계획.
- 심우배, 김결, 한우석, 구형수. 2011. 기후변화 대응 물관리 정책방안 연구. 국토연구원.
- 윤선권, 조재필, 문영일. 2014. RCPs 시나리오 자료를 이용한 비매개변수적 갈수빈도 해석: 광동댐 유역을 중심으로. 대한토목학회지 34(4): 1125-1138.
- 이상은, 박희경. 2011. 수자원 시설 물공급 리스크의 적응형 관리를 위한 물수요 및 기후변화 영향의 불확실성 검토. 상하수도학회지 25(3): 293-305.
- 이상은, 최동진, 박희경. 2009. 기후 변화 대응을 위한 상수도 시설 적응형 관리의 필요성: 2008-2009 광동댐 취수 제한 사례 연구. 상하수도학회지 23(5): 583-598.
- 이현경. 2014. 불확실성 대응을 위한 RCD 곡선 (Risk-Cost-Decentralization Curve) 기반의 물공급 시스템 분산율 최적화 방법론 개발. 석사학위논문. KAIST.
- 중앙하천관리위원회. 2010. 기후변화 대응 미래 수자원 전략. 국토해양부.
- 차동훈. 2012. KAIST 기후변화 적응 계획법을 이용한 갈수기 물공급 취약성 평가. 박사학위 논문. KAIST.
- 태백시. 2009. 가뭄백서.
- 한국수자원공사. 2005. 가뭄 관리 모니터링 체계 수립 보고서.
- 한국수자원공사. 2014. 수도관리연보
- 환경부. 2013. 2012 상수도통계.

- Asian Development Bank (ADB) and Asia-Pacific Water Forum (APWF). 2013. *Asian Water Development Outlook 2013: Measuring Water Security in Asian and the Pacific*. Metro Manila: Asian Development Bank.
- Budhendra B., Bright E., Coleman P., Urban M. 2007. LandScan USA: a high-resolution geospatial and temporal modeling approach for population distribution and dynamics. *GeoJournal* 69: 103–117.
- Bureau for Crisis Prevention and Recovery (BCPR). 2004. *Reducing Disaster Risk: a Challenger for Development, UNDP Global Report*. NY: United Nations Development Programme.
- Cha D., Lee S., Park H. 2012. Investigating the vulnerability of dry-season water supplies to climate change: using the Gwangdong Reservoir Drought Management Model. *Water Resources Management* 26(14): 4183–4201.
- Dilley M., Chen R.S., Deichmann U., Lerner-Lam A.L., Arnold M., Agwe J., Buys P., Kjekstad O., Lyon B., Yetman G. 2005. *Natural Disaster Hotspots: a Global Risk Analysis*. Washington DC: The World Bank.
- Engle N.L. 2011. Adaptive capacity and its assessment. *Global Environmental Change* 21: 647–656.
- Gleick P.H. 2003. Global freshwater resources: soft-path solutions for the 21st century. *Science* 302: 1524–1528.
- Gibbs W.J., Maher J.V. 1967. *Rainfall Deciles as Drought Indicators*. Bureau of Meteorology Bulletin 48. Melbourne: Commonwealth
- Hamdy A., Trisorio-Liuzzi G. 2008. Drought planning and drought mitigation measures in the Mediterranean region. In: López-Francos A. (ed.), *Drought Management: Scientific and Technological Innovations*. Zaragoza : CIHEAM (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 80).
- Hinkel J. 2011. Indicators of vulnerability and adaptive capacity: towards a clarification of the science policy interface. *Global Environmental Change* 21: 198–208.

- Hiroki K. 2012. *Strategies for Managing Low-probability, High-impact Events*. Washington DC: The World Bank.
- International Centre for Hazard Assessment and Risk Management (ICHARM). 2013. *Technical Assistance for Supporting Investments in Water-related Disaster Management, Main Volume*. Metro Manila: Asian Development Bank.
- International Hydrological Programme (IHP). 2012. *Water Security: Responses to Local, Regional and Global Challenges: Strategic Plan IHP-VIII (2014-2021)*. Geneva: UNESCO.
- Knutson C.L., Hayes M.J., Phillips T. 1998. *How to Reduce Drought Risk, Preparedness and Mitigation*. Lincoln, Neb.: Western Drought Coordination Council.
- Kogan F.N. 1995. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Adv. Space Res.* 15: 91–100.
- Lee S., Okazumi T., Kwak Y. 2015a. Possibilities and challenges in the development of the global flood risk indicator at the post-2015 processes perspective: a preliminary study. *Water Policy* 17(2): 208–227.
- Lee S., Okazumi T., Kwak Y., Takeuchi K. 2015b. Vulnerability proxy selection and risk calculation formula for global flood risk assessment: a preliminary study. *Water Policy* 17(1): 8–25.
- Lee S., Park H. 2010. Transition of water demand and treatment plant overcapacity: a case study of the Seoul Metropolitan City, Korea. *Water Science & Technology* 61(12): 3129–3140.
- Lee S., Suhaimi A.-T., Park H. 2012. Lessons from water scarcity of the 2008–2009 Gwangdong reservoir: needs to address drought management with the adaptiveness concept. *Aquatic Sciences* 74: 213–227.
- Lee S., Vink K. 2015. Assessing the vulnerability of different age groups regarding flood fatalities: case study in the Philippines. *Water Policy* [in print].
- McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *The 8th Conf. Appl. Clim.* 17–22 Jan. Anaheim, CA.

- O'Keefe P., Westgate K., Wisner B. 1976. Taking the naturalness out of natural disasters. *Nature* 260: 566–567.
- Okazumi T., Lee S., Kwak Y., Gusyev M., Kuribayashi, N. Yasuda, Sawano H. 2014. Global water-related disaster risk indicators assessing real phenomena of flood disasters: think locally, act globally. In: The Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (ed.) *Understanding Risk in an Evolving World – Emerging Best Practices in Natural Disaster Risk Assessment*. The World Bank, Washington DC, USA. pp. 107–111.
- Pahl–Wostl C. 2007. Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change. *Water Resources Management* 21:49–62.
- Palmer W.C. 1965. *Meteorological Drought*. Technical Paper 45: 1–58. US Dep. Commer./Weather Bur.
- Peduzzi P., Dao H., Herold C., Mouton F. 2009. Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: the disaster risk index. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9: 1149–1159.
- Pulwarty R.S., Sivakumar M.V.K. 2014. Information systems in a changing climate: Early warnings and drought risk management. *Weather and Climate Extremes* 3: 14–21.
- Rossi G., Castiglione L. 2011. Towards guidelines for drought preparedness and mitigation planning within EU water policy. *European Water* 36: 37–51.
- Sawano H., Lee S. 2014. Report of Side Event 3. Water-Related Disaster Risk Information for Risk Reduction. Submitted to the *6th Asian Ministerial Conference on Disaster Risk Reduction*, UNISDR and Government of Thailand, 22–26 June, Bangkok.
- Scientific and Technical Advisory Group. 2013. *Using Science for Disaster Risk Reduction*. Geneva: UNISDR.
- Shahid S., Behrawan H. 2008. Drought risk assessment in the western part of Bangladesh. *Natural Hazards* 46:391–413.

- Shiau J.T., Hsiao Y.Y. 2012. Water-deficit-based drought risk assessments in Taiwan. *Natural Hazards* 64:237–257.
- Sullivan C., Vorosmarty C.J., Craswell E., Bunn S., Cline S., Heidecke C., Storeygard A., Proussevitch A., Douglas E., Bossio D., Gunther D., Giacomello A., O'Regan D., Meigh J. 2006. *Mapping the Links between Water, Poverty and Food Security*. Report on the Water Indicators Workshop. GWSP Issues in GWS Research No. 1. Global Water System Project.
- UNDP. 2011. *Mainstreaming Drought Risk Management*. NY: UNDP.
- UNDRO. 1979. *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*. Report of Expert Group Meeting, 9–12 July. Geneva: United Nations.
- UNEP. PREVIEW Global Risk Data Platform. <http://preview.grid.unep.ch/>
- UNISDR. Preventionweb <http://www.preventionweb.net/>
- UNISDR. 2007. *Hyogo Framework for Action 2005–2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters*. Geneva: United Nations.
- UNISDR. 2009a. *2009 Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction: Risk and Poverty in a Changing Climate*. Geneva: United Nations.
- UNISDR. 2009b. *UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*. United Nations.
- UNISDR. 2011a. *Disaster through a Different Lens: behind Every Effect, There Is a Cause*. Geneva: United Nations.
- UNISDR. 2011b. *2011 Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction: Revealing Risk, Redefining Development*. Geneva: United Nations.
- UN-Water. 2012. *Managing Water under Uncertainty and Risk. UN World Water Development Report IV, Volume 1*. Geneva: UNESCO, World Water Development Programme, UN-Water.
- Wilhite D.A. 1996. A methodology for drought preparedness. *Natural Hazard* 13: 229–252.
- Wilhite D.A., Pulwarty R. 2005. *Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues*. CRC Press.

- World Meteorological Organization (WMO). 2012. *Standardized Precipitation Index: User Guide*. WMO-No. 1090. Geneva.
- World Meteorological Organization (WMO), United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). 2012. *High Level Meeting on National Drought Policy*. Policy Document: National Drought Management Policy. Geneva
- Yevjevich V.M. 1967. *An Objective Approach to Definitions and Investigations of Continental Hydrologic Droughts*. Hydrological Paper 23. Colorado State Univ.
- Zhang Q., Sun P., Li J., Xiao M., Singh V.P. 2015. Assessment of drought vulnerability of the Tarim River basin, Xinjiang, China. *Theoretical Applied Climatology* [in print].

S U M M A R Y

SUMMARY

Keywords: Drought Risk Assessment, Socioeconomic Drought, Mitigation, Disaster Risk Management, Water Scarcity

This study is carried out in order to propose a drought risk assessment methodology with a focus on the socioeconomic aspect of drought. This methodology is required to deal with practical questions that a variety of stakeholder often raise in the course of discussions on mitigation measures: for instant, (i) whether disastrous situations would occur in some areas of interest; (ii) which districts should have the highest priority on investment in mitigation measures; (iii) which measures would be effective to protect residents from disastrous droughts.

From the above backgrounds, this study first tries to operationally define basic concepts on drought risk management and mitigation, and then list political requirements that drought risk assessment will have to satisfy. Building upon the concepts and political requirements, a methodological framework is suggested in order to assess hazard, exposure, vulnerability and risk in a theoretically and practically acceptable manner.

A case study is conducted to understand usefulness of the drought risk assessment methodology in (i) particularly assessing residents' suffering from droughts in a certain area with high dependency on a small-scale dam reservoir.

The case shows a large possibility of the methodology in representing residents' sufferings very plausibly in terms of the monetary value, i.e., damage costs, in (ii) clearly identifying the boundary of districts where risk is excessively concentrated, i.e., drought risk hotspots at the viewpoint of residents' hardship. Moreover, the methodology is also deemed to be useful to help understanding the underlying risk factors of those districts, which would result in suggesting effective mitigation measures tailored to local development situations and various socioeconomic conditions as well as the capacity of existing water supply systems.

Based all those findings, it is concluded that the proposed methodology is able to provide policy-makers in charge of drought mitigation with improved risk information. Besides, the author designs a variety of further studies in order to overcome current methodological limitations and make use of the methodological possibility at the country level and at the future perspective.

부록

[부록 1] 가뭄발생 진단에 활용가능한 지표

- 기상기관이나 수자원 관리기관은 강수량, 유출량, 토양수분의 변동 등을 지수화 하여 ‘자연현상으로서의 가뭄’에 대한 발생 가능성을 모니터링해 옴
- 이 지표들은 수자원 및 급수시설의 물리적 성능, 특정지역의 수원 연계 방식, 도시의 생활 및 경제활동, 도시내 물소비 방식 등 수자원 관리와 도시 개발을 반영하지 않기 때문에 가뭄의 위험도에 대해 직접적인 시사점은 제공하는 것은 아님
- 대신 위험도 평가 단계에서 가뭄의 조건을 설정하는 데에는 중요한 기준을 제공할 수 있음

□ 무강우일수

- 특정기간동안 연속무강우일수가 임계치 이상일 경우를 가뭄으로 간주
- 주로 20세기 중반까지 기상기관들이 기상학적 가뭄의 모니터링 용도로 관습적으로 활용해옴

□ 평균강우비

- 특정기간동안 다년평균 강우량에 대한 실제 강우량의 비율이 임계치 미만일 경우를 가뭄으로 간주
- 주로 수자원관리 기관들이 갈수기간 저수지 운영 계획시 기상학적 가뭄의 모니터링 용도로 관습적으로 활용해 옴

□ 10분위 강우량 (Gibbs and Maher, 1967)

- 특정기간 동안 강우량을 10분위로 구분한 뒤, 관측된 강우량이 3-4 분위 미만일 경우를 가뭄으로 간주
- 일부 국가 수자원관리 기관들이 저수지 운영시 기상학적 가뭄의 모니터링을 위해 활용되고 있음

□ PDSI 또는 파머지수 (Palmer, 1965)

- 가뭄의 심도를 토양층에서 수분부족량과 수분부족기간의 함수로 정의하고, 수분이 -2나 -3에 해당되는 편차를 보일 경우를 가뭄으로 간주
- 대거나 기상기관의 광범위한 공간영역에서 장기간 지속되는 기상 또는 농업측면의 가뭄에 대한 모니터링 용도로 활용되며 매우 긴 기간동안 강우 부족으로 인한 농업 영향을 간접적으로 예상케 함

□ SPI 또는 표준강우지수 (McKee 외, 1993)

- 일정기간의 강우량 자료를 과거 관측치를 토대로 정규화한 뒤 -1이나 -1.5 미만에 해당될 경우를 가뭄으로 간주
- WMO에서 기상학적 가뭄의 모니터링에 국제 표준으로 지정한 강우량 지수임
- 강우량 발생기간을 조절해가면서 다양한 가뭄에 적용을 하려고 시도하지만, 수문환경 요소를 고려하지는 않음

□ VCI 또는 식생생태지수 (Kogan, 1995)

- 위성관측된 근적외 영역과 가시 영역의 반사로 산출되는 식생활성화값 (NDVI) 이 임계수준 이하일 경우를 가뭄으로 간주 (농업측면의 가뭄)
- 아직 실무적으로 잘 보급되어 있지는 않지만, 농업측면의 가뭄 모니터링을 위한 대리변수의 가능성이 높아지고 있음
- 지수값의 물리적 의미가 직접적이지 않고 장기적인 자료이용의 한계가 있음

□ 물부족분 (Yevjevich, 1967)

- 일정기간 유량의 평년대비 과부족 합이 임계수준 이상일 때 가뭄으로 간주
- 하천 유량 관측이나 모의결과를 토대로 수문 가뭄의 모니터링에 활용
- 매우 장기적인 자료가 필요하고, 하천 지점별로 지표값이 다른 단점이 있음

[부록 2] 가뭄 위험도 산정 관련 선행연구

- 최근 몇 년 동안 자연재해 분야의 UN 전략 논의에서 저감대책을 위해 위험도 정보의 중요성이 계속해서 강조되어옴
 - 특히 UNISDR STAG (Scientific and Technical Advisory Group), UNESCO IHP (International Hydrological Programme), ICSU (International Council for Science)의 IRDR (Integrated Research on Disaster Risk) 등은 자연재해에 대처하기 위한 지구촌 노력의 일환으로, 전문가들이 위험도 평가 방법론을 시급하게 개발토록 요구하고 있음
 - 동시에, UNDP, 세계은행, 정부간 개발은행 등의 기관은 개발도상국가에 대한 해외원조기금을 물재난의 저감사업에 투자하기 위해 위험도 지표를 구축하려는 시범사업들을 발주해옴
- 여러 선도연구기관들이 참여해 위험도 지표에 필요한 개념적·방법론적 체계를 검토하였으며, 특히 홍수분야에 대해서는 최근 발전된 수문기술들을 접목해 인적손실이나 경제적 피해의 잠재적인 수준을 잘 평가하고 있는 것으로 알려져 있음 (Okazumi 외, 2014)
 - 하지만 가뭄의 위험도에 대한 방법론은 대부분의 시범사업들이 아직 만족스러운 결과를 얻지 못했으며, 특히, 저감대책이라는 실무에 활용되기에는 여전히 지표값의 설득력이 불충분한 것으로 논의 되고 있음 (UN-Water, 2012)
- 해당되는 연구사업과 함께 이후 학계에서 발표된 대표적인 연구 결과는 다음과 같이 요약됨.

□ Disaster Risk Index (BCPR, 2004; Peduzzi 외, 2009)

- UNDP는 방대한 전문가 그룹을 조직해 다양한 자연재해에 대해 일관되고 이론적으로 수용가능한 위험도 평가 기법을 구축을 시도함
- 해당 연구사업에서, 가뭄분야에 대해서 전 지구 영역에서 각 grid별로 가뭄재해특성과 노출도를 산정하였고, 각 국가별로 취약도와 위험도 지표를 산정

- <표 A-1>은 해당 연구에서 적용된 위험도 평가를 요약
 - 가뭄의 위험도는 사망자 수로 간주
 - 다중선형회귀식을 개발해 위험도는 노출도와 취약도의 통계적 함수로 표현
 - 여기서, 노출도는 물부족 지역에 거주하는 영향인구로, 취약도는 여러 사회경제적 지수들로 측정
- UNDP의 연구진들이 언급한 것과 같이, 사용된 방법론은 다른 자연재해와는 달리 가뭄 위험도에 대해서는 결과가 좋지 않았음
 - 가뭄분야는 인간활동과 밀접한 관련이 있어 더욱 복잡한 해석이 필요하고 더욱 많은 인적 요소들을 고려해야 한다는 점을 결론으로 제시함
 - 특히, 기상학적 가뭄을 재해특성으로 간주하였는데, 기상학적 가뭄 그 자체는 사회에 직접적인 위협이 되지 않기 때문에 개발도상국조차 과거 가뭄발생 시점을 설명하는 데에 어려움이 있었음
 - 게다가 다양한 자연재해에 대한 개념상의 일관성을 유지하기 위해 위험도를 잠재적인 사망자로 간주한 점 또한 문제시 되었음
 - 가뭄으로 인한 사망자는 주로 정치적으로 심각한 갈등을 내포한 아프리카 지역에만 발생하기 때문에, 사망자는 가뭄 위험도의 범용적인 지표로 활용하기 힘들다는 점이 재확인됨

〈표 A-1〉 Disaster Risk Index 연구에서 가뭄 위험도 평가 요약

가뭄재해특성	· IRI의 월별 grid 강우량 자료를 이용해 기상학적 가뭄의 빈도를 각 grid별로 측정 · 3개월 누적 강우량이 50% 이하일 때 가뭄이 발생한다고 간주 · 1980-2000 사이 기간 동안 월별로 분석해 연평균 가뭄 발생빈도 산정
노출도	· 매년 가뭄에 영향을 받는 기대인구수로 측정하였는데, 각 기대인구수는 인구수 (GPW ver.2의 전자 인구지도 이용)와 기상학적 가뭄의 빈도의 곱으로 각 grid별로 산정하였음
취약도	· 가뭄 사망자 기록과 사회경제 대리변수값 (proxy)의 회귀분석을 통해 국가단위에서 분석해 노출도-위험도 간의 관계를 설명할 변수와 계수값 조사 · 1인당 GDP, 가난지수, GDP의 농업의존도, 농업부문 인력비율, 토양열화지수, 상수도 보급률 등의 대리변수의 통계량을 국가단위에서 분석한 결과, 상수도 보급률만이 통계적 유의성을 갖는 것으로 확인
위험도 지표	· 취약도 분석 결과 얻은 매개변수 관계식 (nonlinear parametric formula)을 이용해 위험도 지표를 국가 단위로 산정

□ 세계은행의 Natural Disaster Hotspots (Dilley 외, 2005)

- 세계은행은 미국 콜롬비아 대학에 재해및위험도연구센터 (Center for Hazards and Risk Research)를 설립하고 ProVention Consortium 이라는 전문연구기관 네트워크를 운영해 Global Natural Disaster Risk Hotspots 사업을 수행
- 동 사업은 지구영역에서 다양한 자연재해에 대한 위험도를 분석한 뒤 재해별로 위험도 지도를 개발하고 고위험지역을 조사하기 위함이었으며, 그 결과를 활용 해 경제적 피해를 저감하기 위한 대책을 국제기관과 함께 검토하고자 추진
- 가뭄에 대해서는, grid 크기 약 2.5 x 2.5 km²단위로 전 세계 거주지역에 대한 위험도를 분석
 - UNDP의 위험도 개념을 확장해, 재해에 대한 위험도를 인적손실과 관련된 물리적 영향과 생산력 저하와 관련된 경제적 영향으로 간주
 - 이 위험도는 노출도와 취약도의 함수로 간주
 - 여기서 노출도는 물리적 영향의 경우 물부족 지역의 연평균 영향인구로, 경제적 영향의 경우 물부족 지역의 연평균 GDP로 간주
 - 또한 취약성의 경우 대륙별, 그리고 국가별로 부여된 부의 지수 (Index of Wealth)로 측정
- UNDP의 연구와 마찬가지로 가뭄의 물리적 영향에 대한 결과는 실제적 의미가 분명치 않다고 지적됨
 - UNDP 연구에 비해 재난위험도 지표의 공간 해상도를 증가시킨 반면, 세계은행의 위험도 지표는 통계적 의미가 약해 실제 피해기록으로 검증하지 못함

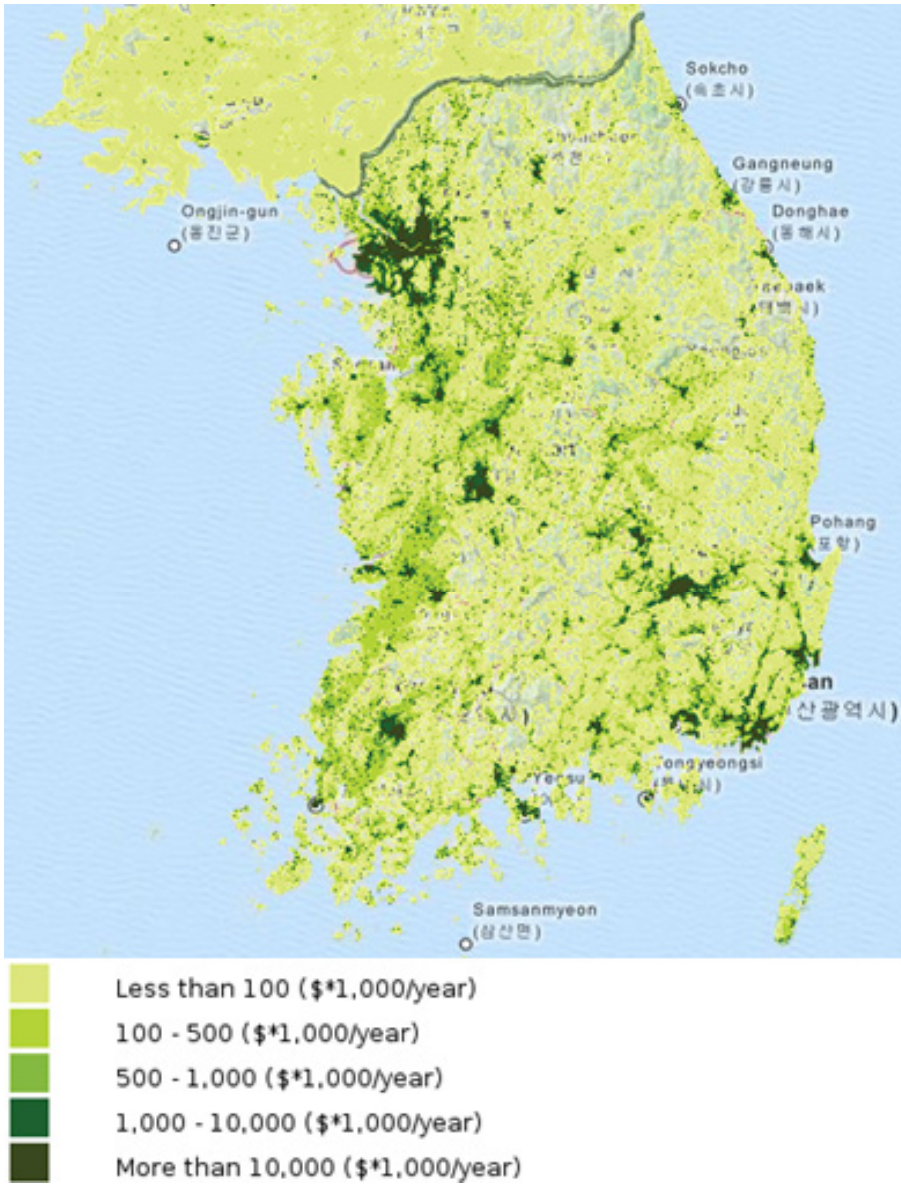
〈표 A-2〉 National Disaster Hotspots 연구에서 가뭄 위험도 평가 요약

가뭄재해특성	· grid 별로 기상학적 가뭄의 연평균 발생빈도를 산정 · IRI의 월별 grid 강우량 자료를 이용해 3개월 누적 강우량이 50% 이하인 경우 가뭄이 발생한다고 간주
노출도	· 위험도가 물리적 영향으로 측정될 경우에는 기대 영향인구수로, 각 grid별 발생빈도와 인구수(GPW ver. 3 이용)를 곱해 산정 · 재난위험도가 경제적 영향으로 측정될 경우에는 기대 영향GDP 규모로, 각 grid별 발생빈도와 GDP 를 곱해 산정
취약도	· 대륙별-국가별 wealth 지수를 취약성의 크기로 간주
위험도 지표	· 노출도와 취약도 지수의 곱으로 각 grid별로 산정함

□ UNEP의 PREVIEW Global Risk Data Platform

- 전 세계 전문가들과 함께 지구촌 자연재해로 인한 위험도를 시각화하기 위한 플랫폼 구축사업
- UNEP/GRID 연구진들이 자연재해 위험도에 대한 지리공간정보를 개발하기 위한 1999년에 사업을 착수한 이후 UNISDR의 2009년, 2011년, 2013년 Global Assessment Report 일정에 따라 지속적으로 개선해 오고 있음
- 재해특성분석은 WMO와 UNESCO에서 지정한 24개의 연구그룹이 담당
- 가뭄을 포함한 모든 종류의 위험도를 사망자수와 경제적피해로 간주
 - 위험도는 노출도와 취약도의 함수로 간주
- 자료의 신뢰도 문제로 인해, 다른 자연재해와는 달리 가뭄의 경우 2015년 4월 현재 경제적 노출도만 <그림 A-1>과 같이 공개
 - 경제적 노출도는 재해특성 평가와 노출도 평가의 두 단계에 의해 산정
 - 여기서, 재해특성은 매년 기상학적 가뭄의 발생빈도로 정의되며, University of East Anglia)의 전 세계 영역의 월별 grid 강우량 자료를 SPI 기법에 적용해 각 grid별로 측정한 결과임
 - 경제적 노출도는 각 grid 별로 산정한 가뭄의 발생빈도와 세계은행의 2010년 GDP 전자지도의 GDP 자료를 곱하여 최종적으로 연평균 가뭄에 영향을 받는 GDP의 규모 (US \$, year 2000 equivalent)로 측정
 - UNDP나 세계은행 연구에 비해 재난위험도 지표의 공간 해상도는 크게 증가되었지만, 방법론의 개선이나 실제 가뭄기록과의 검증 등에 있어서는 큰 차이를 보기 힘들
- 다른 자연재해와는 달리, 가뭄에 대한 위험도 정보는 계속해서 전문가들에 의해 신뢰성 문제가 제기되어 옴
 - 실제로 Global Assessment Report 2011 (UNISDR, 2011b) 에서도 기상학적 가뭄에 대한 모델링 결과를 이용해 사회경제적 차원의 위험도 지표를 제시한 과정 속에서 이론적으로 해결해야 할 많은 연구들이 있으며, 현재로서는 실제 피해를 설명하는 데에 어려움이 있음에 대해 언급됨

〈그림 A-1〉 PREVIEW 플랫폼에서의 한국 가뭄 노출도 현황

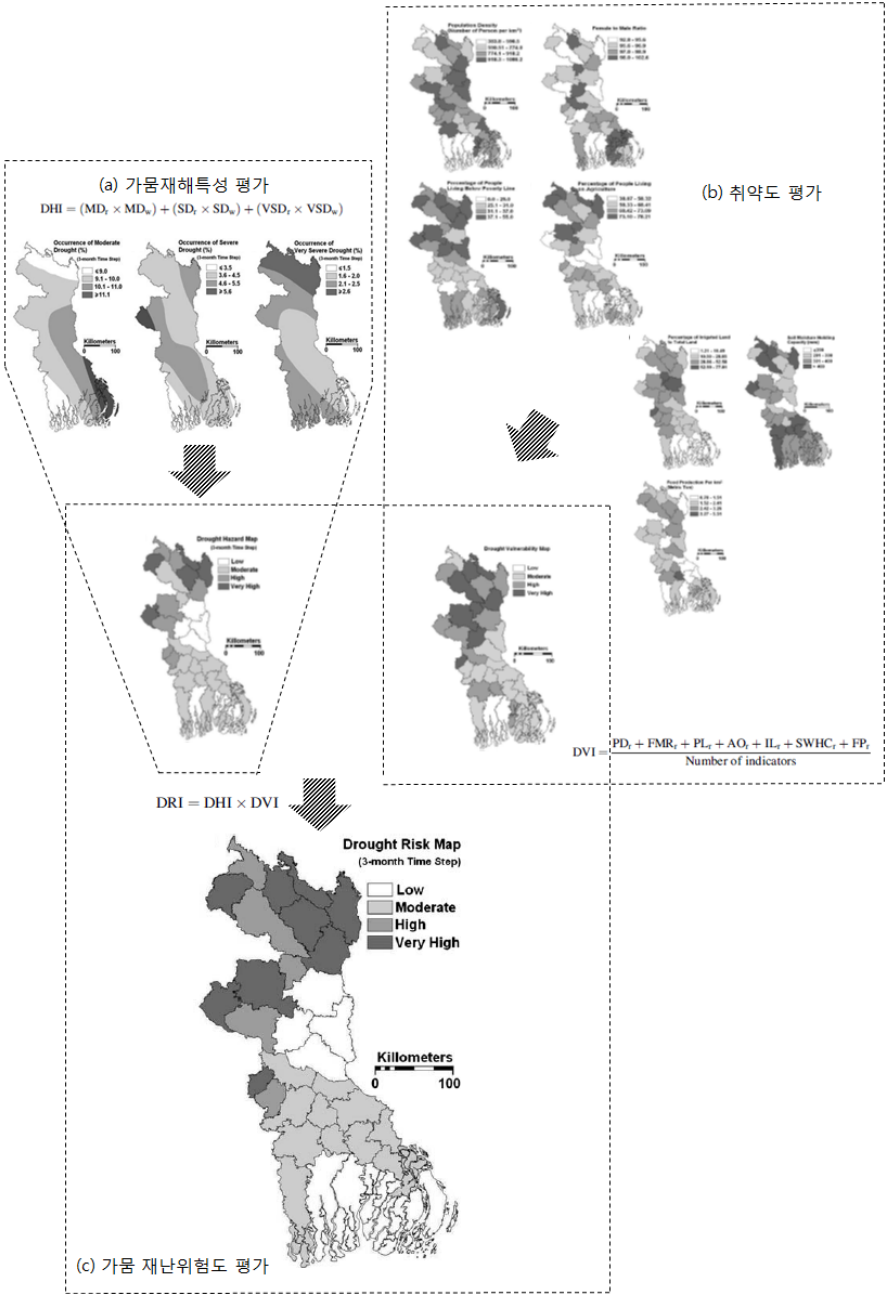


출처: <http://preview.grid.unep.ch/>

□ Shahid and Behrawan (2008)

- 가뭄 발생이 증가하는 방글라데시 서부지역을 대상으로 가뭄 위험도의 공간적 분포를 조사하기 위한 학술연구
- 기존의 SPI 방식에 근거한 기상학적 가뭄 진단과 사회경제통계를 결합해 지자체 단위에서 위험도 지도를 작성하기 위해 수행
- 해당 연구를 통해 방글라데시 북부와 북서부의 지자체들이 위험도가 높음을 발견하였고, 저감차원에서 이 지역에 물과 농작지 관리의 개선, 물공급시설 확대, 교육강화, 유역계획 개선, 물절약 등의 노력이 필요함이 결론으로 제시
- 이 연구에서 가뭄 위험도는 가뭄재해특성 (물리적 영역)과 취약도 (사회경제적 영역)의 함수로 간주
 - 〈그림 A-2〉와 같이 가뭄재해특성과 취약도를 각각 지수화한 뒤 위험도는 두 지수의 곱으로 산정
 - 가뭄재해특성은 SPI 기법을 이용해 각 grid별로 기상학적 가뭄의 세기 등급에 따라 발생빈도를 계산한 뒤 세기의 범위에 따라 가중치 (weight)를 빈도의 범위에 대한 평점 (rating)을 임의로 부여해 각 공간을 지수화
 - 취약도는 재해로 인한 피해영향요인으로서, 인구밀도, 여성인구비율, 빈곤층 비율, 농업인구의존비율, 관개지역비율, 토양수분함량능력, 단위면적당 식량 생산 등 7가지 지표를 표준화하여 지자체 단위에서 종합지수 (composite index)를 계산
 - 최종적으로, 각 지자체별로 가뭄재해지수와 취약도 종합지수를 곱하여 “위험도 지수”를 산정
- 비록 공간정보 개발에 위험도의 개념이 사용되었지만, 각 지자체별 위험도 지수가 의미하는 바가 분명치는 않음
 - 즉, 높은 위험도가 어떤 종류의, 그리고 어느 규모의 피해잠재력을 갖는지 명확히 제시하지 않음
 - 또한 가뭄재해특성 평가에서 가뭄세기와 발생횟수를 가중치와 평점으로 각 공간을 재해지수로 특성화하였는데, 재해특성은 해당 공간의 물리적인 위험수준임에도 불구하고 지수화로 인해 의미 파악이 힘들

〈그림 A-2〉 Shahid와 Behrawan가 제시한 가뭄 위험도 평가 방법 및 결과

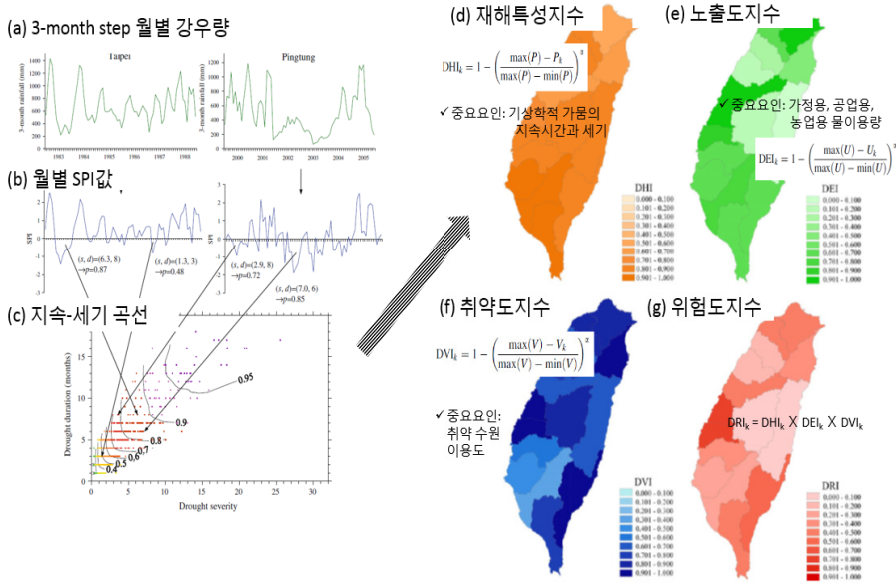


출처: Shahid와 Behrawan (2008)을 재구성함

□ Shiau and Hsiao (2012)

- 대만의 15개 지자체에 대해 가뭄 발생으로 유발되는 물부족 상황 (water-deficit situation)의 위험도 평가
- 해당 연구에서 위험도는 물부족 상황의 발생가능성으로 간주되었고, 가뭄재해특성, 노출도, 취약도 각각의 지수들을 〈그림 A-3〉과 같이 산정됨
- 가뭄재해특성에 대한 지수를 산정하는 데에는, SPI 기법을 이용해 각 지자체별로 월단위 강우량 자료를 3개월 지속기간의 SPI 시계열로 변환한 뒤, 가뭄 발생시 (SPI <0) 누적된 SPI 값을 가뭄 세기로 정의
- 이후 가뭄 발생기간과 세기에 대한 이변량 확률밀도함수를 도출한 뒤 특정지역의 가뭄 발생 확률을 특성화함
- 노출도는 가뭄의 위협에 대한 자산, 자원, 인구의 노출 정도로 정의하였으며, 해당 지역의 물이용 (생활용, 공업용, 농업용 물이용의 합) 수준으로 측정
- 취약도는 각 지역 수원지의 가뭄에 대한 민감도에 초점을 맞춤
 - 하천으로부터 직접 취수하는 경우와 지하관정으로부터 허용취수율을 넘어서서 취수하는 경우에는 다른 수원을 활용하는 경우 보다 가뭄 발생시 큰 피해가 발생한다는 점을 착안해 취약한 수원지의 물공급 비율을 지수화함
- 최종적으로 지자체 단위로 각 지수들을 곱하여 물부족 상황의 발생을 특성화
- 지표 산정을 위해 위험도에 대한 용어를 차용하였지, 실제 위험도에 대한 이론적 분석을 통해 가뭄의 사회경제적 영향을 평가한 것은 아님
- 게다가 농업용, 생활용, 공업용 물공급 시스템은 저마다 가뭄의 위험도 요소가 상이하나, 모두 종합된 지수가 제시됨으로 인해 위험도 정보의 실무적 유용성에 한계가 예상되었음

〈그림 A-3〉 Shiao와 Hsiao가 제시한 가뭄 위험도 평가 방법 및 결과



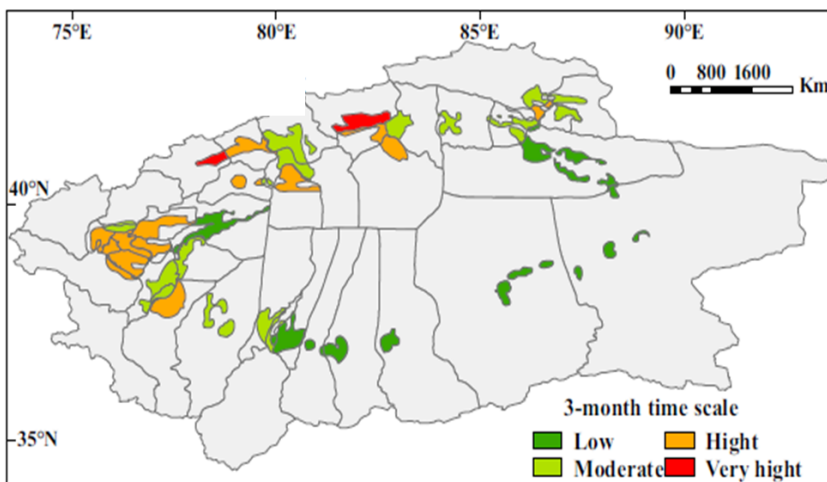
출처: Shiao와 Hsiao (2012)를 재구성함

□ Zhang 외 (2015)

- 이 연구는 Shahid와 Behrawan (2008)의 방법을 개선해 중국의 타림유역 도시들의 가뭄 위험도를 평가함
- 가뭄 위험도를 가뭄재해특성 (물리적 영역)과 취약성 (사회경제적 영역)의 함수로 간주하였고, 가뭄재해특성과 취약성을 각각 지수화한 뒤 두 지수를 곱해 위험도 지수 산정
- 가뭄재해특성에 대한 지수 산정하는 데에는 Shahid와 Behrawan (2008)와 동일한 방법 사용
 - 즉, 21개 관측지점 강우량 자료를 SPI 기법에 적용해 각 지점별로 가뭄 세기 등급에 따른 발생빈도를 계산하였으며, 세기와 빈도의 범위에 대한 임의의 rating 값을 부여

- 취약도의 경우 인구밀도, 여성인구비율, 문맹률, 연령의존도, 농업인구의존비율, 농업부문 GDP 기여도, 관개지역비율, 단위면적당 식량생산, 가뭄피해면적 비율 등 9가지 지표를 표준화하여 도시별로 4단계로 등급화
- 최종적으로 도시별로 가뭄재해지수와 취약도 지수를 곱해 위험도 지수 제시
- 해당 연구는 재해특성 분석시 SPI 기법에 여러 가지 지속시간을 적용했다는 점과 취약도 분석시 사회경제 지표들이 몇 가지 더 추가되었다는 점 외에 Shahid와 Behrawan (2008)와 큰 차이를 보이지 않음

〈그림 A-4〉 위험도 지수 산정 결과



출처: Zhang 외 (2014)

[부록 3] 가뭄 위험도 저감의 국제 동향 및 절차

1) 위험도 관리

□ 전통적인 자연재해 접근법: 사후적 위기관리

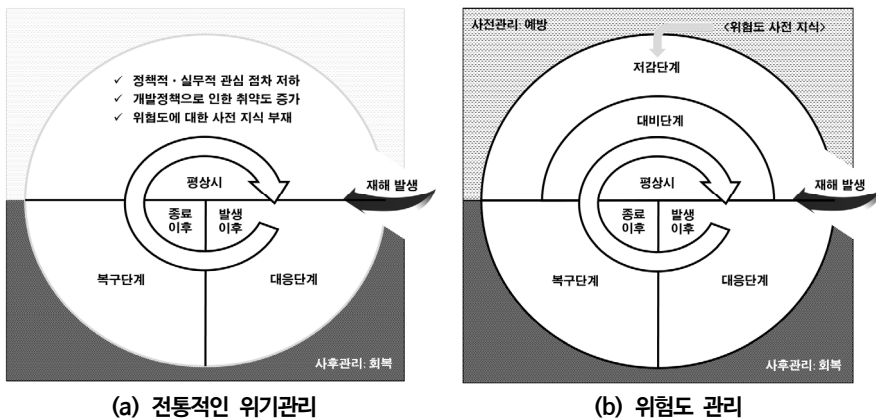
- 전통적으로 재해 발생과 관련해 주민들의 생명과 재산을 보호하는 일은 국가의 최상위 역할
 - 대한민국헌법 제34조에도 국가는 재해로부터 국민을 보호하기 위하여 노력해야 한다고 규정
 - 이에 자연재해가 발생하였을 때 정부는 대규모 재난이 되지 않도록 대책본부를 구성해 상황을 파악해 긴급하게 구호하는 대응의 역할을 수행
 - 응급예산을 편성해 주민들의 피해에 대해 위로하고 국가의 기능을 재건하는 복구의 역할 또한 중시됨
- 재해는 정해진 일정대로 발생하는 것이 아니므로 자연재해에 대처함에 있어서 <그림 A-5(a)>의 사후적 위기관리 접근법은 많은 한계를 드러냄
 - 중앙정부는 개발 압력과 예산의 한계속에서 장기적인 대책을 위한 투자와 정책에 우선순위를 두기 힘들
 - 지자체들이나 주민들은 중앙정부에 대한 의존도가 커져 지역, 커뮤니티, 개인의 자발적인 노력이 경시됨
 - 홍수범람지역에 빈곤층의 비정형 주거지가 밀집된다든지, 충분한 용수확보가 용의하지 않은 산간지역에 관광업이 성행하는 것처럼, 사회는 종종 취약도가 증가하는 방식으로 발전

□ UNISDR을 중심으로 한 위험도 관리를 위한 행동강령 구축

- 90년대의 UN 국제 자연재난감소의 세기 (International Decade for Natural Disaster Reduction)를 통해 각국 정부의 자발적인 책임과 국제 협력에 대한 의식이 공고해졌으며, 2000년에는 위험도에 대한 각 국의 이해를 높이고 협력을 조정할 수 있도록 UNISDR (UN 국제 재난감소 전략)의 기구가 발족됨

- UNISDR의 조정하에 UN 회원국들은 2005년 일본 고베에서 개최된 ‘제2차 재난위험도감소를 위한 세계회담 (2nd World Conference on Disaster Risk Reduction)’을 통해 획기적인 전략 변화를 시도
 - 각국 정부, UN 시스템, 국제기관, 학술연구기관, 시민단체 등은 <그림 A-5(b)>와 같은 위험도관리 채택

〈그림 A-5〉 위험도 관리 접근법의 변화



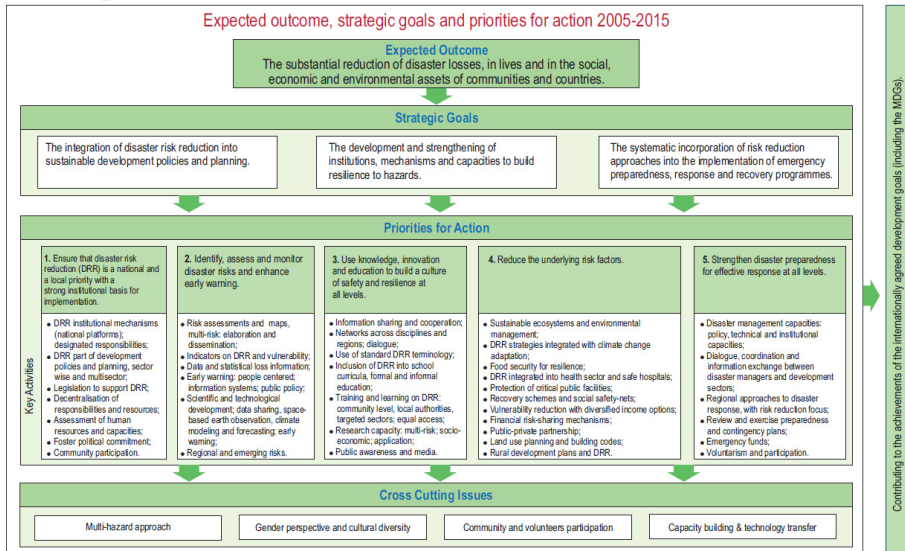
- 2005-2015의 기간 동안 168개 회원국들은 5개 중점분야 (Priority Area)를 명시한 효고행동강령 (Hyogo Framework for Actions) 수립해 <그림 A-6>과 같이 사전적 위험도 관리에 필요한 내용들을 방대하게 규정
 - 중점분야 1 (거버넌스 및 법제도): 재난위험도관리가 국가와 지역의 우선순위를 갖도록 제도적 기반 조성
 - 중점분야 2 (정보): 재난위험도를 확인·평가·모니터링하고 조기경보 개선
 - 중점분야 3 (문화): 안전과 복원탄력성에 대한 문화를 조성하기 위해 지식, 혁신, 교육을 활용
 - 중점분야 4 (위험도 감소): 내재된 위험요인을 감소하기 위한 실질적 노력
 - 중점분야 5 (대비와 대응): 효과적으로 대응할 수 있도록 대비책을 강화

〈그림 A-6〉 · 효고행동강령의 중점분야



United Nations
International Strategy for Disaster Reduction

SUMMARY of the Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters



출처: UNISDR (2007)

□ 현행 위험도 관리의 특성

- 현행 위험도관리는 재해발생 전 과정, 특히, 사전단계에서의 대책들을 강조
- 이를 위해 모든 이해당사자들이 자연재해로 인한 해당지역이 입을 수 있는 피해의 잠재적 수준, 즉, 위험도를 이해하는 것이 관건
- 재해발생 이후에도, 정해진 프로토콜에 따라 체계적이고 유연하게 대응할 수 있도록 하고, 체득한 교훈을 서로 공유하고 이를 관리업무에 반영하며, 다음 재해 발생시 피해를 줄일 수 있도록 복구하려는 등의 여러 가지 원칙들을 포함
- 위험도관리라고 함은 특정 재해가 대상지역에 제공할 수 있는 잠재적인 피해규모가 용인할 수 있는 수준을 넘지 않도록 저감, 대비, 대응, 복구의 네 단계의 활동을 체계화하는 것으로 통용

(i) 저감단계

- 평상시에 위험도 정보에 기초해 고위험구역 (Risk Hotspot)에 피해가 과도하게 집중되지 않게 하는 대책들을 장기적인 관점에서 추진하는 것을 의미
 - 여기서 대책들은 관련 투자, 정책, 프로그램을 종합해, (i) 방재시설물 설치와 같은 구조적 대책 뿐만 아니라, (ii) 위험도 정보 개발, (iii) 이주, 규제, 토지용도 변경 등 도시계획, (iv) 지역의 주거, 환경, 의료, 복지, 교육 프로그램과의 연계 등의 비구조적 대책을 포괄

(ii) 대비단계

- 재해가 발생하였을 때 영향을 받을 수 있거나 관리에 책임이 부여된 모든 이해당사자 (주민, 커뮤니티, 산업체, 지자체, 중앙정부, 관련 기관 등)이 재해 발생에 앞서 미리 준비하는 것을 의미
 - 이 단계는 당장에 위험도를 낮추는 것은 아니지만, 응급상황이 발생하였을 때에 적시에 그리고 체계적으로 대응하려는 것이 목적
 - 일반적으로 (i) 재해 모니터링 및 조기경보 운영, (ii) 대피 또는 동원 계획과 훈련, (iii) 재난상황망 운영계획, (iv) 응급예산확보, (iv) 비상 생필품 관리 등의 노력들을 포괄

(iii) 대응단계

- 재해가 발생해 영향이 지속되는 동안 주민, 자산, 경제활동 등에 대규모 피해가 발생하는 것을 막기 위해 추진되는, 현장의 긴급한 대책들을 의미
 - 여기에는 (i) 전담반 가동, (ii) 구조 및 대피소 운영, (iii) 피해 집계, (iv) 구호 및 동원 필요 평가, (v) 식량, 식수, 약품 등의 구호품 동원이 포함
- 급박한 상황에서 효과적으로 대응하기 위해 대비단계에서 수립된 프로토콜에 따라 진행되어야 할 뿐만 아니라, 실제 재해가 예상과는 다른 확산 추이를 갖을 경우 프로토콜을 유연하게 조정할 수 있도록 강구함

(iv) 복구단계

- 일반적으로는 재해로 인한 영향이 사라지는 시점에서 주민생활과 경제활동이 빠르게 재개될 수 있도록 임시적인 대책들을 투입하는 것을 의미
 - 경우에 따라 재해가 완전히 종료되고 난 뒤 주거지, 기간시설물 등의 재건(reconstruction)도 포함
 - 해당 사태에 대해 재해 특성, 피해, 대책 효과 등의 상세한 기록을 수집분석한 뒤 교훈을 공유하고 위험도관리 실무를 개선하는 노력을 반드시 포함
 - 추가적으로 복구단계에서 피해 기록 분석에 근거해 주민에 대한 세금 감면, 보조금 지급 등의 지원도 이루어짐

2) 가뭄분야 위험도 저감

□ 가뭄 위험도 저감의 개념

- 모든 자연재해는 통제할 수 없는 자연현상에 의해 발생되므로, 발생 그 자체를 충분히 억제하는 데에는 큰 한계가 있어 현 위험도 관리에서는 저감단계를 가장 강조
 - 잠재적으로 피해가 집중될 수 있는 지역을 찾아서 해당공간에 부속된 취약성을 장기적으로 그리고 상시적으로 낮추는 것이 최선이라는 의미
- 같은 맥락에서 가뭄분야의 저감은 “가뭄과 관련된 위험도 정보를 토대로 고위험구역을 파악하고, 물부족 상황이 발생했을 때 주민과 경제활동이 피해를 덜 받을 수 있도록 이 공간이 가진 사회적, 경제적, 환경적, 기술적 불리함을 평상시에 해소시키는 것”으로 정의할 수 있음
- 저감단계의 활동은 크게 세 가지, 즉, 위험도 평가, 저감대책의 선정 및 발굴, 부처 및 지자체의 각종 계획에 대한 반영으로 구분할 수 있음
 - 추가적으로 UNDP (2011)는 세 가지 활동 전에, 저감단계의 실행력을 담보하기 위해 이해당사자 조정기구의 구축이 선행되어야 함을 강조

□ 가뭄 위험도 평가

- 위험도 평가는 가뭄의 위험도와 관련된 객관적이고 신뢰할 수 있는 정보를 제공하기 위해 수행
- 특히, 가뭄 위험도를 평가하여 어느 지역이 저감대책의 시급성이 높은 지를 파악해 전문가뿐만 아니라 다양한 이해당자자들을 이해시키는 것이 중요함
- 이를 위해, 다음과 같은 공간분석이 요구됨 (ICHARM, 2013)
 - 재해특성 평가 (hazard assessment): 높은 공간해상도에서 가뭄과 관련된 기상, 수문 특성을 분석한 뒤, 동일한 가뭄 조건에서 각 지역의 위험을 물리적인 특성치로 제시
 - 노출특성 평가 (exposure assessment): 인구토지이용생산액 등의 GIS 자료 위에 재해특성 평가 결과를 놓고 가뭄재해발생 공간내 물부족으로 영향을 받는 객체의 수 산정
 - 취약성 평가 (vulnerability assessment): 과거 가뭄피해기록과 사회경제 요인 간의 통계적 관련성을 토대로, 노출특성과 피해간의 관계를 도출하고, 해당공간의 사회·경제·기술·환경적 불리함에 대한 실증 분석 수행
 - 위험도 산정 (risk calculation): 노출도와 취약성 평가 결과를 토대로 개별 공간을 위험도로 특성화시키고 위험도 지도 개발
- 가뭄에 대한 위험도를 공간분석한 뒤에는 정책적 활용을 위해 다음과 같은 사항에 대한 검토가 필요 (UNDP, 2011)

(i) 위험도 크기에 대한 해석과 판단

- 해당지역의 위험도가 주민들이 감내해도 되는 수준인 지, 별도의 투자없이 지자체, 커뮤니티, 주민들이 스스로 경각심을 가지고 대비해서 극복할 수 있는 수준인 지, 또는 주민과 경제활동에 발생할 수 있는 피해가 허용가능한 수준을 넘어서는 지 등을 판단

(ii) 저감대책이 필요한 고위험구역의 결정

- 먼저 현장조사, 실무자·지역전문가 면담, 과거 피해기록과의 비교 등을 통해 위험도 평가 결과의 신뢰도 확인
- 신뢰도가 확인된다면, 위험도 지도상에서 지표값이 과도하게 집중된 곳을 구분해 저감대책의 대상지 결정

(iii) 저감대책 방향 검토

- 선정된 구역에 위험도 지표값이 높은 기저원인 (underlying risk factor)을 분석하고 다른 지역과 비교할 수 있도록 결과 시각화

□ 저감대책의 선정 및 발굴

- <표 A-3>은 가뭄으로 인한 위험지역을 저감하기 위해 적용가능한 대책의 예를 보여주고 있음
 - 다양한 대책들 가운데에서 해당 지역 위험도의 기저원인을 해소하는 데에 장점이 있을 뿐만 아니라 추진 절차상 다양한 제약조건들을 극복할 수 있는 것을 선정하는 것이 중요

<표 A-3> 가뭄분야 저감대책의 예

수요 감소 대책	• 요금조절 등 물절약 인센티브 제고 • 물소비 감소를 위한 농경기술 개선 • 누수탐사, 관로개량 등 효율 개선	• 농사 일정 조절 • 토양침식 감소와 함수능력 제고를 위한 토양관리 신기술 도입
공급 보완 대책	• 다중수원 연계 용수공급 체계 구축 • 유역간 물이동을 위한 시설 및 제도 • 폐수 재활용 및 재이용 확대	• 빗물이용시설 확대 • 담수화 시설 건설 • 침투 및 증발손실 제어
피해 최소화	• 비상용 수원지 및 관정 유지관리 • 유역내 물분배를 위한 시설 및 제도 • 작물 보험 프로그램 지원	• 가뭄에 저항력 높은 재배품종 선택

출처: Knutson 외 (1998); Rossi와 Castiglione (2011)

- 사실 이 같은 저감대책들은 연구자들과 수자원 관리 담당자들 모두에게 이미 잘 알려져 있지만, 행정상의 부담과 갈등 요인이 있어 실무적으로 크게 관심을 갖지 못하고 있음
- 이에 저감대책 선정시 위험도 저감 효과 외에도 실무적 차원에서의 제약조건에는 시간, 비용, 기술, 인적자원의 이용가능성, 공평성, 효과성, 환경성, 법제도적 수용성, 사회문화적 적합성 등이 수많은 항목들을 고려할 필요가 있음
 - 예를 들어, 주민을 이주시키거나 산업활동을 중단시킨다면 가뭄시 물부족의 노출을 당장에 줄일 수 있어 이론상으로는 탁월한 저감대책이라 할 수 있음
 - 하지만 이러한 극단적인 대책을 추진할 경우 이주토지와 보상비용의 부족, 주민들의 문화적 거부감, 사업자와의 법적 갈등 등에 제약이 발생하게 되므로 가뭄분야에서 이주대책은 저감대책으로 고려되지 않음
- Knutson 외 (1998)는 가뭄분야 저감대책에 대한 타당성을 검토할 때 다음과 같은 질문항목을 가지고 선별할 것을 제안함
 - (경제성) 해당대책의 BC 비율은 어느 수준인가?
 - (수용성) 해당대책에 대해 정부와 일반대중들이 선호할 것인가?
 - (관리용의성) 해당대책이 지역의 환경조건에 잘 부합하는 가?
 - (취약도 감소) 해당대책이 사회경제적 취약도 감소에 도움이 되는가?
 - (확실성) 해당대책이 다른 국가나 다른 지역에서 성공을 보인 적이 있는가?
 - (공평성) 해당대책이 가뭄에 특히 취약한 그룹의 필요를 잘 반영하는가?

□ 부처 및 지자체의 각종 계획에 대한 반영

- 위험도 평가 및 저감대책 발굴 결과를 각종 개발 계획에 반영하는 것은 메인스트리밍 (mainstreaming)이라고 불리우며, 여기에는 진입지점의 선정, 저감대책의 반영, 실행계획 로드맵 작성 등 세 가지 활동이 요구됨 (UNDP, 2011)

(i) 진입지점의 선정

- 진입지점 (entry point)을 선정한다는 것은 도출된 저감대책 각각에 대해 가장 효과적으로 추진할 수 있는 정책, 전략, 계획을 조사하는 것을 의미
- 중장기적으로 사회경제적인 취약도를 제거하려는 장기 대책들은 국가개발계획이나 부처별 정책에 반영하는 것이 적절하며, 비교적 단기와 중기 대책들은 종래의 지자체의 계획과 사업에 포함시킬 것이 일반적으로 권장됨

(ii) 저감대책의 반영

- 저감대책들을 내부화시키는 과정은 진입지점별로 다르므로, 각 저감대책은 반영하려는 계획의 일정에 따라 다른 방식의 협의와 추진을 필요로 함
- UNDP (2011)는 국가개발계획, 부처별 중장기 계획, 지자체 계획 각각에 저감대책을 반영하는 시 다음과 같은 사항들을 권장하고 있음
- 국가개발계획에 대한 저감대책 반영
 - 가뭄분야의 저감대책은 수자원, 상하수도, 환경관리, 재난관리 분야의 계획과 높은 관계가 있지만, 이 외에도 농업, 축산업, 관광업, 에너지 등의 방대한 분야와 연계되어 있음
 - 가뭄 저감대책이 본격적으로 추진되도록 상위의 국가개발계획상 기본원칙을 명시하여, 가뭄 위험도가 국가개발에 중요한 제약조건이 된다는 점과 부처별 (또는 분야별) 정책과 전략에 저감대책이 반영되어야 한다는 점을 공표
 - 위험도 관리 원칙들을 상위 제도에 언급함으로써 저감대책의 실행에 필요한 자금 유동에 근거를 제공
- 부처별 중장기 계획에 대한 저감대책 반영
 - 모든 저감대책을 한꺼번에 추진하기 보다는, 위험도 감소 효과가 큰 저감대책을 관련부처의 영향력있는 중장기 계획에 반영해 노력을 집중
 - 계획의 비전과 목표에 가뭄 위험도관리와 저감대책이 기여할 수 있는 지 확인하고 조정
 - 저감대책에 대한 사업과 프로그램을 포함시킴

○ 지자체의 계획에 대한 저감대책 반영

- 지자체 계획에 저감대책을 반영하는 것은 위험도관리의 역할과 책임을 분산화하기 위해 필수적이지만, 이를 위해서는 국가개발계획과 예산계획에 가뭄 위험도관리의 반영 여부가 선행되어야 함
- 그렇지 않을 경우 지자체에 필요한 예산이 도달하지 않을 뿐만 아니라 정부기관을 통해 전문성을 지원받기에도 한계가 발생
- 지자체의 계획에 저감대책을 반영하는 것은, 지자체의 노력에 더해, 지자체를 총괄하는 중앙부처나 광역단체에서 주도적인 역할을 수행해야 함
- 한국의 예로써, 해당되는 지자체의 계획은 (i) 용수공급 관련 계획 (수도정비기본계획, 물수요관리 시행계획, 절수기기설치 계획, 누수복구사업, 지하수관리사업 등), (ii) 지역 환경 계획 (하수도정비기본계획, 환경보전종합계획, 도시환경정비사업, 물환경관리계획 등), (iii) 지역 농축산 및 경제 계획 (농업재해예방 사업, 중소기업 및 소상공인 지원 사업 등) 등이 대표적임

(iii) 실행계획 로드맵 작성

- 일반적으로 중앙부처나 지자체의 정책문건, 전략계획, 사업계획 등에 저감대책이 반영된 횟수를 저감단계의 유형적인 결과로 간주
- 하지만 이것만으로는 저감대책의 성공을 보장하기에는 한계가 있음
 - 저감대책이 발주단계에서 누락되지 않아야 하며, 이 대책의 시행이 실제로 가뭄취약지역의 위험도를 감소하는 효과로 이어졌는지 확인되어야 함
 - 따라서 저감단계의 마지막 절차로, 저감대책별로 계획반영, 사업이행, 효과를 모니터링하기 위해 로드맵이 개발될 필요가 있음
- 로드맵 개발시 저감대책의 이행과 관련해 이해당사자들의 역할과 책임을 명확히 하고 점검할 수 있는 수단이 강구되어야 함
 - 로드맵에 포함된 세부 실행계획들은 이해당사자들과 충분한 협의를 통해 일정, 담당기관, 소요 예산, 인력, 필요한 컨설팅 서비스, 정보 등을 구체화
 - 일정의 결정은 예산편성, 사업의 협의 및 승인 등과 같이 해당되는 계획의 일정을 감안해 작성

[부록 4] 사례연구 대상지 현장조사 사진자료

□ 현장 조사 개요

- 일시: 2015. 5. 3 ~ 5. 4 (1박2일)
- 목적: 사례연구 대상지의 방문을 통한 용수공급계통 이해 제고, 태백권 용수공급 담당자 의견 청취, 가뭄 고위험구역 현장 확인 등
- 방문 장소
 - 태백시, 정선군, 삼척시의 주요 수자원 및 용수공급 시설
 - 용수공급시설 관리기관: 한국수자원공사 태백권관리단
 - 고위험구역: 태백시 황지동 일대, 정선군 남면 일대, 정선군 사북읍 일대

□ 현장 사진

〈그림 A-7〉 광동댐 저수지 (위치: 삼척시 하장면 골지천)



〈그림 A-8〉 광동댐 취수장 (위치: 삼척시 하장면 골지천)



〈그림 A-9〉 사미취수가압장 (위치: 태백시 상사미동)



〈그림 A-10〉 한국수자원공사 태백권관리단 황지정수장 (위치: 태백시 황지동)



〈그림 A-11〉 화전정수장 (위치: 태백시 화전동)



〈그림 A-12〉 분석된 고위험구역: 태백시 황지동 일대



〈그림 A-13〉 분석된 고위험구역: 정선군 사북읍 일대



〈그림 A-14〉 분석된 고위험구역: 정선군 남면 일대



[부록 5] 저수지 및 용수공급시설 관리 모의를 위한 시스템 모형

□ 저수지 물수지

$Water_in_Reservoir(t) = Water_in_Reservoir(t - dt) + (inflow_into_storage - evaporation - Intake - Spillway_discharge) * dt$

INIT Water_in_Reservoir = |갈수기 초 저수량 값|

INFLOWS:

$inflow_into_storage = Inflow_at_severe_drought_condition$

OUTFLOWS:

$evaporation = coefficient_for_estimation_of_evaporation * (Water_level)^2$

$Intake = Total_contract_amount_for_all_regions * (1 - Restriction_of_Withdrawal)$

$Spillway_discharge = \text{if } Difference_of_critical_and_actual_water_storages > 0 \text{ then } 0 \text{ else}$

$Water_in_Reservoir - Upper_limit_for_water_storage$

$coefficient_for_estimation_of_evaporation = 0.02$

$coefficient_for_relationship_between_water_level_and_dam_storage[1] = \text{|해당 저수지의 수위 - 저수량 곡선 계수|}$

$coefficient_for_relationship_between_water_level_and_dam_storage[2] = \text{|해당 저수지의 수위 - 저수량 곡선 계수|}$

$coefficient_for_relationship_between_water_level_and_dam_storage[3] = \text{|해당 저수지의 수위 - 저수량 곡선 계수|}$

$Total_contract_amount_for_all_regions = \text{|급수지역들과의 계약량 총 합|}$

$Water_level =$

$(-coefficient_for_relationship_between_water_level_and_dam_storage[2] + \sqrt{4 * coefficient_for_relationship_between_water_level_and_dam_storage[3] * (Water_in_Reservoir / 1000) + coefficient_for_relationship_between_water_level_and_dam_storage[2]^2 - 4 * coefficient_for_relationship_between_water_level_and_dam_storage[1] * coefficient_for_relationship_between_water_level_and_dam_storage[3]}) / (2 * coefficient_for_relationship_between_water_level_and_dam_storage[3])$

$Inflow_at_severe_drought_condition = GRAPH(time) \text{ |특정 가뭄조건의 관심유역 유출량 대표값|}$

Decision on spillway discharge

$Difference_of_critical_and_actual_water_storages = Upper_limit_for_water_storage - Water_in_Reservoir$

Upper_limit_for_water_storage = |저수지의 유효저수용량|

Decision on withdrawal restriction

critical_water_level = |저수지의 임계 저수위|

Restriction_of_Withdrawal = if Water_level <= critical_water_level then |취수 제한율| else 0

□ 정수, 송수, 급수의 물량 배분 및 이동

Total_Production_in_WTP(t) = Total_Production_in_WTP(t - dt) + (Intake - Delivery_into_Area1 - Delivery_into_Area2 - Delivery_into_Area3 - Delivery_into_Area4) * dt

INIT Total_Production_in_WTP = |정수시설용량 이내의 임의의 값|

INFLOWS:

Intake = Total_contract_amount_for_all_regions*(1-Restriction_of_Withdrawal)

OUTFLOWS:

Delivery_into_Area1 = Total_Production_in_WTP*Area1_share

Delivery_into_Area2 = Total_Production_in_WTP*Area2_share

Delivery_into_Area3 = Total_Production_in_WTP*Area3_share

Delivery_into_Area4 = Total_Production_in_WTP*Area4_share

Area1_share = |계약량 비율|

Area2_share = |계약량 비율|

Area3_share = |계약량 비율|

Area4_share = |계약량 비율|

Arrival_at_Tank_in_Area1(t) = Arrival_at_Tank_in_Area1(t - dt) + (Delivery_into_Area1 + Delivery_from_Local_Sources_to_Area1 - Water_supply_in_Area1) * dt

INIT Arrival_at_Tank_in_Area1 = |배수지 용량 이내의 임의의 값|

INFLOWS:

Delivery_into_Area1 = Total_Production_in_WTP*Area1_share

Delivery_from_Local_Sources_to_Area1 = if Restriction_of_Withdrawal = 0 then |평시 타수원 공급량| else |타수원 최대 공급가능량|

OUTFLOWS:

Water_supply_in_Area1 = Arrival_at_Tank_in_Area1

Arrival_at_Tank_in_Area2(t) = Arrival_at_Tank_in_Area2(t - dt) + (Delivery_into_Area2 + Delivery_from_Local_Sources_to_Area2 - Water_supply_in_Area2) * dt

INIT Arrival_at_Tank_in_Area2 = |배수지 용량 이내의 임의의 값|

INFLOWS:

Delivery_into_Area2 = Total_Production_in_WTP*Area2_share

Delivery_from_Local_Sources_to_Area2 = if Restriction_of_Withdrawal = 0 then |평시 타수원
공급량| else |타수원 최대 공급가능량|

OUTFLOWS:

Water_supply_in_Area2 = Arrival_at_Tank_in_Area2

Arrival_at_Tank_in_Area3(t) = Arrival_at_Tank_in_Area3(t - dt) + (Delivery_into_Area3 +
Delivery_from_Local_Sources_to_Area3 - Water_supply_in_Area3) * dt

INIT Arrival_at_Tank_in_Area3 = |배수지 용량 이내의 임의의 값|

INFLOWS:

Delivery_into_Area3 = Total_Production_in_WTP*Area3_share

Delivery_from_Local_Sources_to_Area3 = if Restriction_of_Withdrawal = 0 then |평시 타수원
공급량| else |타수원 최대 공급가능량|

OUTFLOWS:

Water_supply_in_Area3 = Arrival_at_Tank_in_Area3

Arrival_at_Tank_in_Area4(t) = Arrival_at_Tank_in_Area4(t - dt) + (Delivery_into_Area4 +
Delivery_from_Local_Sources_to_Area4 - Water_supply_in_Area4) * dt

INIT Arrival_at_Tank_in_Area4 = |배수지 용량 이내의 임의의 값|

INFLOWS:

Delivery_into_Area4 = Total_Production_in_WTP*Area4_share

Delivery_from_Local_Sources_to_Area4 = if Restriction_of_Withdrawal = 0 then |평시 타수원
공급량| else |타수원 최대 공급가능량|

OUTFLOWS:

Water_supply_in_Area4 = Arrival_at_Tank_in_Area4

Water_Availability_in_Area1 = Water_supply_in_Area1*(1-NRW_in_Area1)

Water_Availability_in_Area2 = Water_supply_in_Area2*(1-NRW_in_Area2)

Water_Availability_in_Area3 = Water_supply_in_Area3*(1-NRW_in_Area3)

Water_Availability_in_Area4 = Water_supply_in_Area4*(1-NRW_in_Area4)

NRW_in_Area1 = |무수율|

NRW_in_Area2 = |무수율|

NRW_in_Area3 = |무수율|

NRW_in_Area4 = |무수율|

[부록 6] 가뭄빈도분석 결과

□ 방법론 소개

- 가뭄은 광범위한 지역에 장기간에 걸쳐 연속해서 일어나며, 인간이 극복하기 힘든 자연재해 중 하나로 발생 시 사회·경제적으로 큰 영향을 미침. 따라서 가뭄발생의 규모와 위험도를 사전에 예측하여 대비하는 일은 매우 중요함
- 광동댐 표준유역의 가뭄 발생을 정량적으로 평가하기 위한 지표로 WMO (World Meteorological Organization)에 의해 권고된 표준가뭄지수(Standard Precipitation Index, SPI) 가뭄지수를 적용하였으며, 산정된 가뭄지수의 연최소치 시계열자료를 구축하여 경계핵밀도함수(Boundary Kernel)를 이용한 비초과 확률을 구하는 방법으로 지속기간별 재현기간별 가뭄빈도 해석을 수행하였음

□ 절차

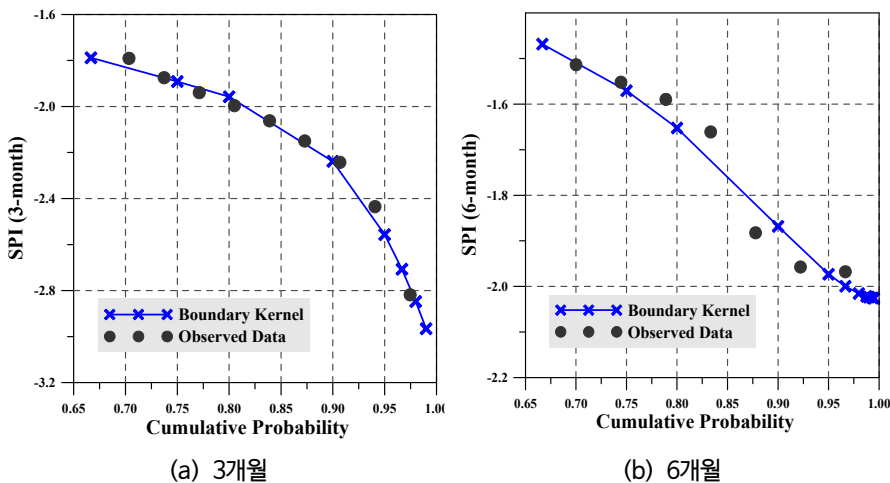
- 강수량 자료 처리: 광동댐 유역 인근 기상청 ASOS(Automated Synoptic Observing System) 관측지점 동해(ID: 106, 1993~2014년), 태백(ID: 216, 1986~2014년) 관측소의 일단위 강수량 자료 수집한 후 티센가중치 적용 광동댐 유역 면적평균 강수량 산정
- SPI 산정: 강수량 감소에 따른 광동댐 유역의 정량적 가뭄발생평가를 위하여 면적평균 강수량을 월단위 누가강수량으로 합산 후, 최우도법(Maximum Likelihood Method, ML)에 의한 매개변수 최적해 추정 및 감마(Gamma)확률 분포를 적용하여 SPI 근사식에 의한 가뭄지수 산정
- 실제 가뭄사례 검증: 기존의 가뭄기록 보고서와 태백시 가뭄백서를 통한 과거 가뭄 피해지역 현황과 SPI 가뭄지수 산정 결과의 일치 여부 판단 및 실제 가뭄사례 검증

- 가뭄빈도해석: SPI 연최소치 시계열 작성 후, 경계핵 밀도함수 적용을 통한 하위 비초과확률 산정으로 재현기간별 지속기간별 SPI 가뭄지수 값 산정. SPI 3개월과 SPI 6개월에 대한 심각한 가뭄(SPI -1.5 이하)과 극심한 가뭄(SPI -2.0이하)의 재현기간과 지속기간별 가뭄빈도해석
- SDF 곡선 작성: 가뭄빈도해석 결과를 바탕으로 가뭄심도-지속기간-생기빈도 (Severity-Duration-Frequency, SDF) 곡선을 작성하여, 가뭄의 지속기간과 재현기간별 가뭄심도(Severity)와 가뭄규모(Magnitude) 판단

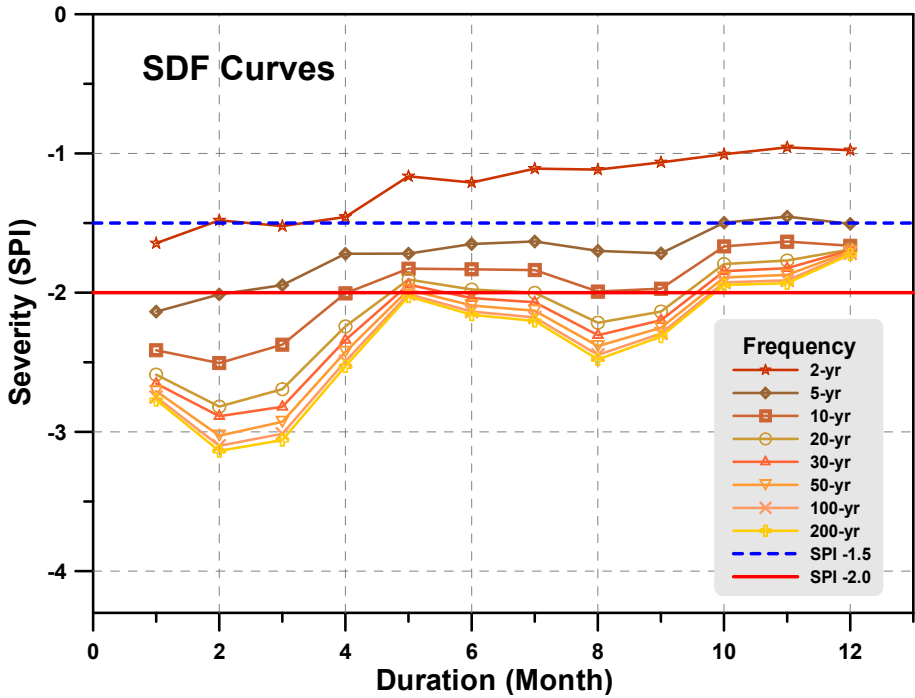
□ 사례연구 대상지 적용 결과

- 광동댐 유역의 가뭄빈도해석 수행결과 SPI 3개월에 대한 재현기간(2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200년)별 가뭄심도는 각각 -1.50, -1.92, -2.28, -2.72, -2.94, -3.14, -3.31, -3.41로 분석되었으며, SPI 6개월에 대한 재현기간(2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200년)별 가뭄심도는 각각 -1.22, -1.65, -1.87, -1.97, -1.99, -2.02, -2.02, -2.03으로 분석됨

〈그림 A-15〉 경계핵밀도함수를 이용한 가뭄빈도해석 결과



〈그림 A-16〉 사례연구 대상지 SDF 곡선 작성 결과



수시 15-04

가뭄 위험도 평가기법 구축 및 정책적 활용에 관한 연구

지 은 이 이상은

발 행 인 김동주

발 행 처 국토연구원

출판등록 제25100-1994-2

인 쇄 2015년 6월 29일

발 행 2015년 6월 29일

주 소 경기도 안양시 동안구 시민대로 254

전 화 031-380-0114

팩 스 031-380-0470

가 격 7,000원

ISBN 979-11-85948-77-5

한국학술진흥재단 연구분야 분류코드 B170300

홈페이지 <http://www.krihs.re.kr>

© 2015, 국토연구원

이 연구보고서의 내용은 국토연구원의 자체 연구물로서
정부의 정책이나 견해와는 상관없습니다.

이 연구보고서는 네이버에서 제공한 나눔글꼴이 적용되어 있습니다.

가뭄 위험도 평가기법 구축 및 정책적 활용에 관한 연구

제1장 연구의 개요 및 목적

제2장 가뭄 위험도에 대한 개념 및 방법론체계 구축

제3장 가뭄 위험도 평가 기법

제4장 사례연구 적용 결과

제5장 결론



국토연구원
KRIHS

431-712 경기도 안양시 동안구 시민대로 254
전화. 031.380.0114 팩스. 031.380.0470

