

기후변화를 고려한 수자원 분야의 취약성 분석

김 다 은* / 정 용** / 박 무 중*** / 윤 재 영**** / 김 상 단***** / 최 민 하*+

Vulnerability Analysis of Water Resources Considering Climate Change

Daeun Kim* / Yong Jung** / Moo Jong Park*** /

Jae Young Yoon**** / Sangdan Kim***** / Minha Choi*+

요약 : 인위적, 자연적, 지리적, 시간적 요소 등에 의하여 기후가 변동되는 현상을 ‘기후변화’라 하며, 이는 수십 년 또는 그 이상 지속되는 변동성이 평균적 상태에 대해 통계적으로 중요한 변화라고 정의된다. 이러한 기후변화가 최근 들어 급속하게 진행되어 자연재해가 발생함에 따라 세계는 이 변화의 추이를 예의 주시하고 있다. 특히 수자원 분야의 기후변화에 대한 취약성은 다른 분야에 비해 높을 것으로 평가되며, 이러한 기후변화로 인한 취약성을 예측하고 재해를 방지하는 것은 이 분야에서의 주요 사안이라고 할 수 있겠다. 국내의 수자원 분야 취약성 평가는 아직 미흡하므로, 본 연구에서는 수자원 분야의 전문가들을 대상으로 델파이 기법을 사용하여 우리나라 중소하천의 기후변화 취약성에 대하여 분석하였다. 조사는 총 3차에 걸쳐 실시하였으며 1차에서 총점분석을 이용하여 대리변수를 선정하였고, 1차에서 선택된 대리 변수들은 2·3차에서 항목 별 분석을 하였고, 이를 통하여 전문가 의견을 평가·정리하였다. 전반적으로 전문가 의견은 조사가 진행될수록 편차가 줄어들며 합의가 진전되었다. 추후연구로는 연구대상지역에 대한 직접적인 취약성 평가의 진행이 필요할 것으로 예상된다.

핵심용어 : 중소하천, 기후변화, 취약성, 델파이 기법

Abstract : Climate change is the variation of long term weather pattern based on statistical diversities in terms of natural and artificial factors. Recent numerous extreme weather phenomena have increasingly obtained people's awareness of climate change. Since water resources field especially has higher vulnerability caused by climate variation, the major part of future preparation should be focused on risk minimization of water resources. However, in reality validation of water resources vulnerability is not well built up. For this research, Delphi Method was applied to evaluate middle/small size rivers in Korea with respect to the degree of vulnerability due to the climate change. Delphi Survey is based on iterative, anonymous characteristics with experts' opinion sharing on the given issues. For this study, three iterative surveys were operated for the degree of vulnerability. First round was for selecting vulnerability indicators in terms of the magnitude of total score, and second and third rounds were for collecting experts' idea with opinion convergence. Per the variance of standard deviation of 2nd and 3rd surveys divergence, we clearly see the achievement of opinion agreement. For the future study, we may need to find an applicable field using delphi indicators with various circumstances.

Keywords : Mid/Small Size River, Climate Change, Vulnerability, Delphi Method

+ Corresponding author : mchoi@hanyang.ac.kr
* 학생회원 · 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 · E-mail : daeun@hanyang.ac.kr
** 정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 연구교수 · E-mail : gpic0126@gmail.com
*** 정회원 · 한서대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · E-mail : mjpark@hanseo.ac.kr
**** 정회원 · 고려대학교 환경시스템공학과 조교수 · 공학박사 · E-mail : jyoon@korea.ac.kr
***** 정회원 · 부경대학교 환경공학과 부교수 · 공학박사 · E-mail : skim@pknu.ac.kr
* 정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 조교수 · 공학박사 · E-mail : mchoi@hanyang.ac.kr

1. 서 론

세계적으로 기후변화로 인한 자연재해들이 동시 다발적으로 발생하며, 이에 대한 관심 또한 증대되고 있다. 1992년 브라질에서 열린 유엔환경개발회의에서는 이산화탄소의 배출규제를 주요 논점으로 하는 기후 변화 협약이 정식 서명되었고, 정부 간 기후 변화 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change ; IPCC)에서는 기후변화에 대한 평가를 진행하고 있으며, 꾸준한 연구를 통해 기후변화에 대한 인식들을 전 세계적으로 심어주고 있다. 또한, 2009년 12월 덴마크 코펜하겐에서 개최된 제 15차 유엔기후변화협약 당사국 총회에서 언급된 세계 각 국가별 구체적인 온실가스 배출 감축에 대한 수많은 논쟁과 토론은 기후변화의 심각성 및 책임성을 이전보다 가일층 배가시키는 계기가 되었다. 이는 곧 기후변화가 비단 지구환경의 변화에 국한되지 않은, 향후 세계의 정치, 경제, 사회, 산업 등 전 분야에 걸쳐 구조적인 변혁을 실시해야 한다는 우려를 전 세계가 모두 공감하게 되었다는 데 의의가 있다 (이정호 등, 2009). 기후변화로 인한 여러 분야에서의 위험이 증가하며 기후변화에 대한 취약성 또한 함께 상승하고 있다고 할 수 있다. 취약성의 개념은 여러 분야에서 다양하게 사용되고 있으며, 여러 자료에서 취약성의 개념을 정의하고 있다. 본 연

구에서는 취약성을 한 시스템이 기후변화(기후의 변이, 극한사상 등을 포함)의 악영향에 쉽게 노출되는 정도, 또는 그에 대처하지 못하는 정도로 그 시스템의 여러 가지 변수(기후 변동 특성, 크기, 속도 등), 민감도와 적응능력의 함수 (IPCC 2007; Moss 등, 2001)라는 정의를 차용하였다. 아래의 표는 IPCC의 4차보고서 (IPCC 2007)에서 사용된 취약성 관련용어 정의이다.

즉, 기후변화에 대한 취약성은 기후변화의 악영향이 클수록, 적응능력이 적을수록 증가하게 된다. 취약성의 한 요소인 잠재영향력은 한 시스템의 기후변화에 민감도와 노출의 정도를 포함하고 있다.

기후변화의 취약성 부분에서도 특히 수자원분야는 변화에 많은 영향을 받고, 높은 취약성 또한 가지고 있는 것으로 평가된다. IPCC (2007)의 보고서에 의하면 미래의 기후변화에 가장 취약한 부문은 인간 환경의 영향중에서도 기후시스템 변화로 인한 강수패턴의 변화와 그에 따른 가용 수자원의 부족을 최우선으로 꼽고 있다. 선행 연구들도 기후변화는 물 순환과정에 큰 영향을 미칠 것으로 예측하고 있다 (서용원 등, 2000; Ludwig 등, 2004). 우리나라의 대표적인 연구 보고서로는 유가영과 김인에 (2008)에 의해 집필된 기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안을 들 수 있다. 그들은 전반적인 취약성에 대한 정의와 분석 그리고 다양한 접근 방법에 대해서 서술하였고

표 1. IPCC 취약성 관련 용어 정의

구분	정의
취약성 (Vulnerability)	취약성 = 잠재영향력(노출+ 민감도) - 적응능력
적응능력 (Adaptive capacity)	한 시스템이 기후변화에 맞게 스스로를 조절하거나, 잠재피해를 감소시키고, 기회를 이용하거나, 기후변화에 대처하기 위한 체계의 역량
민감도 (Sensitivity)	기후관련 자극에 의해 한 시스템이 해롭거나 이로운 영향을 직간접적으로 받는 정도

(참조 : 장남정, 기후변화 적응대책 수립을 위한 전라북도 기후변화 취약성 연구, 2009)

특히 정량적 기후변화 취약성 평가 방법을 자세히 소개해 주고 있다. 이렇듯 수자원 분야는 기후변화에 대해 중요한 화두가 되고 있으며, 우리나라에서도 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 정량화하기 위하여 꾸준한 관심과 신뢰성이 충분한 주요 기후 변수 변화 예측뿐만 아니라 피해에 대한 정확한 예측이 동시에 수반되어야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 우리나라의 중소하천에 대한 기후변화 취약성 평가를 분석하기 위해 델파이 기법을 적용하였다. 델파이 기법은 단기적으로 독특한 특성의 형태를 예측하는데 유리한 방법으로 전문가들의 의견 교환이 실시간으로 이루어지므로 전문가나 정책 결정자가 심각하게 고려하지 않은 부분들을 발견 가능하다. 그러므로 여러 전문가들의 다양한 의견을 수렴하기에 적합한 기법이라고 할 수 있다. 델파이 기법을 사용한 연구들로는 Talor 등(2003)의 델파이 기법을 사용한 복잡한 수자원 이용 문제에 관한 연구, Elmer 등(2010)의 델파이 기법을 사용한 홍수 피해 자료 수집을 위한 표준화 도출 등이 있다. 우리나라에서는 구자건 (2003)이 델파이기법을 통하여 댐 건설 사업의 사회영향평가 (Social Impact Assessment; SIA) 항목 결정을 위한 전문가 설문조사를 실시하였다. 이외에도 Okoli 등(2004)과 Hartman 등(1995)의 델파이 기법을 발전시키는 연구 등이 있다. 델파이 기법에 대한 자세한 설명은 연구 방법에서 언급하도록 하겠다. 이 논문에서는 델파이 기법을 사용하여 취약성 대리변수에 대한 의견을 평가·정리하였다.

2. 연구배경 및 방법

2.1 연구 지역

본 연구는 우리나라의 중소하천을 대상으로 진행되었다. 우리나라의 중소하천은 작은 유역면적과 짧은 유로연장, 그리고 하상경사가 급한 특성을 가지고 있다. 특히, 연도별, 계절별로 강우량의 차이가 많아 수해피해가 빈번하게 나타나기 때문

에 종합적인 관리와 하천정비가 필요하다.

현재 하천법 제25조 및 동법 시행령 제24조의 규정에 따라 하천의 효율적인 이용과 일관된 개수계획을 수립하기 위하여 10년 주기로 하천기본계획이 수행되고 있으며, 강우, 기상, 수질, 홍수 등 관련 사항의 분석을 통하여 하천의 보전, 이용, 정비 방향등을 제시한다. 그러나 기후변화로 인한 예측하기 어려운 기상이변으로 중소하천의 피해는 증가하고 있는 실정이므로 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

2.2 연구 방법

2.2.1 델파이 기법

델파이 기법은 고대 그리스의 델파이 (델포이 ; Delphoi)의 신전에서 미래 예측을 실시한 데에서 유래하였다. 이 기법은 Norman Dalk와 Olaf Helmer에 의하여 1953년에 처음 실시되었다 (Dalky 등, 1973). 이러한 델파이 기법은 분야 별 전문가들을 대상으로 익명성을 보장하여 실시하며, 의견의 반복적인 수집과 교환을 통하여 미래를 예측하는 방법이다.

델파이 기법의 가장 큰 특징으로 익명성을 들 수 있다. 설문에 참여하는 모든 전문가들의 익명성이 보장됨으로 직접 대면하는 토론의 방법에 비하여 개인의 독립성, 자율성이 확보된다. 따라서 직접 대면할 때 발생하는 공격성, 특정인의 영향력 등의 단점들이 차단되게 됨과 동시에 의견 작성성이 자유로워져 보다 적극적인 의견 교환이 가능하게 된다. 또한, 전문가들이 개인적으로 작성한 의견들을 다음 설문에 반영함으로써 의견 환류의 과정을 거치게 된다. 이를 통하여 견해의 교류가 이루어지며, 이를 기반으로 자신의 의견에 대한 수정, 보완을 거치는 피드백 과정이 반복되며 의견의 합의가 이루어지게 된다. 혹, 어떤 합의를 이루지 못하더라도 최소한 각기 다른 전문가들의 의견분산을 구체화하는 효과를 기대할 수 있다.

또한 대리변수 별로 작성된 문제에 대하여 점수를 부여하게 되면 부여된 점수에 의하여 대리변

▲ 다음 항목은 기후에 대한 노출 정도와 관련된 대리변수들입니다. 이 중에서 기후변화에 대한 노출이 가장 큰 항목은 어느 것이라고 생각하십니까?

- ① 일강수량이 80mm 이상인 날의 최고값
- ② 일강수량이 80mm 이상인 날의 일수
- ③ 일강수량이 100mm 이상인 날수
- ④ 시간당 20mm 이상의 강우 발생 횟수
() 번

» 위에서 고른 항목과 기후변화에 대한 노출의 상관성 대해 어떻게 평가하십니까?

-2	-1	0	1	2

점수부여 () 점

< 기준 >

- 2 : 선택한 항목의 변화는 증소하천 자연재해에 대한 노출과 관련 없음
- 1 : 선택한 항목의 변화는 증소하천 자연재해에 대한 노출과 관련이 있으나, 영향은 미미
- 0 : 선택한 항목의 변화는 증소하천 자연재해에 대한 노출에 일정부분 영향을 미침
- +1 : 선택한 항목의 변화는 증소하천 자연재해에 대한 노출에 많은 영향을 미침
- +2 : 선택한 항목의 변화는 증소하천 자연재해에 대한 노출에 절대적인 영향을 미침

☞ 논리적 근거 :

그림 2. 문제선택식 질문 예시

으로 구성되어 있으며, 단순질문은 문제 당 하나의 대리변수에 대한 중요도 (-2 ~ 2)를, 문제선택식 질문은 문제에 관하여 중요하다고 생각되는 변수를 선택한 뒤 그 변수에 대한 중요도를 부여하는 형태로 작성되었다. 이 과정에서 문제선택식 질문은 관련된 대리변수를 하나의 질문으로 묶어 작성하였다. 또한, 중요도를 부여한 이유를 작성하는 논리적 근거 란을 제공하여 작성자들의 의견 교환을 위한 항목을 추가하였다. 1차 델파이 조사는 10일에 걸쳐 진행되었으며 이후의 취합/분석 과정을 거친 후 2차 델파이 설문지 작성을 시행하였다. 2차 델파이 질문은 모두 1차의 분석 결과를 토대로 단순 질문의 형태로 변형하였다. 이에 사용된 방법은 총점분석으로 문제선택식 질문 모두 시행하여 가장 기후변화에 영향력이 있다고 추정되는 대리변수 별로 설문지를 작성하였다. 총점

분석은 아래의 분석 방법에서 설명하도록 하겠다.

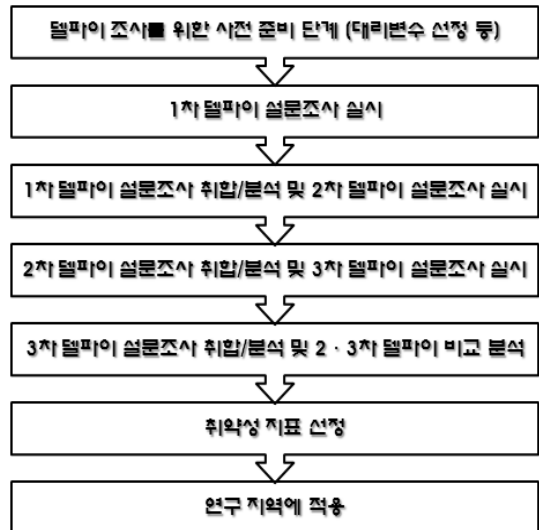


그림 3. 델파이 설문조사 절차

2.2.3 분석 방법

1차 델파이 설문조사를 분석하기 위하여 총점 분석을 사용하였다. 총점분석은 전문가들이 개별적으로 대리변수에 부여한 중요도 수치의 평균과 그 항목을 선택한 전문가들의 수를 인승하는 방법으로 단순히 다수가 선택한 항목에 의존하여 단순 수치가 높은 항목을 대리변수로 선정하는 것을 보완한다. 이를 통하여 중요도 수치를 보다 객관적으로 나타내어 문제 재조정시 항목 선택에 그 객관성을 반영할 수 있다.

2차와 3차의 델파이 조사를 비교하는 과정에서는 설문조사 자료를 토대로 조사 대상자들의 점수 관계를 표준편차의 그래프로 나타내었다. 사용된 표준편차 (σ)는 식(1)과 같으며, x_i 는 변수들의

중요도 수치, m 은 중요도 수치의 평균값, n 은 변수들의 개수를 정의한다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n}} \quad (1)$$

3. 결 과

1차 설문조사는 총 35명, 2차는 29, 3차는 22명이 응답해주었다. 문제 1번부터 6번까지는 노출 분야, 7번부터 21번까지는 민감도, 그리고 22번부터 26번까지는 적응능력에 속해 있다. 2차와 3차 설문에서 사용된 대리변수는 다음 표와 같다.

표 2. 2차와 3차 델파이에서 사용된 대리변수 목록

분류	대리변수
노출	<ol style="list-style-type: none"> 1. 일강수량이 80mm 이상인 날의 일수 2. 현재와 미래의 동일 빈도 강우량의 강우량 변동폭((미래강우량-현재강우량)/현재강우량) 3. 100년 빈도, 지속시간 24시간 확률강우량 4. 하천 주변(하천 2~3km 이내) 거주인구 5. 65세 이상 고령화 인구수(재해 취약자수) 6. 유역별 단위면적당 자산밀도(원/m²)
민감도	<ol style="list-style-type: none"> 1. 하천 길이(km, 면적대비) 2. 산림변화율(연간 %) 3. 연평균 최대일유출량(m³/sec) 4. 전체 상위 10%의 유출량을 초과하는 일유량 값의 평균 5. 불투수지역이 차지하는 면적비율(%) 6. 설계홍수량 초과 강우량에 의한 월류 홍수범람지역 면적 7. 천의 홍수위를 기준으로 계획홍수위 이하인 지역 면적비율(%) 8. 3월~10월 저수율 평균(단위 %) 9. 국가하천 길이 * 평균 개수율 + 지방하천 길이 * 평균 개수율/총 하천 길이(제방정비율) 10. 하천개수율(%) 11. 내수배제시설(유역 내 내수배제시설의 총양수량(ton/min)) 12. 빗물펌프장 처리 능력 13. 홍수조절용댐의 홍수조절능력(10⁶m³) 14. 도로밀도 15. 홍수피해액(재산피해액)
적응 능력	<ol style="list-style-type: none"> 1. 하수도 보급률(%) 2. (1+2차 산업)/(1+2+3차 산업)*100 (%) (기후에 의존도가 높은 산업의 비중 정도) 3. 지자체의 현재까지의 방재·유지보수 성과 4. 재정자립도(%) 5. 연구개발 인력(연구수행능력 및 이해능력(인구 백명 당 연구개발 인력))

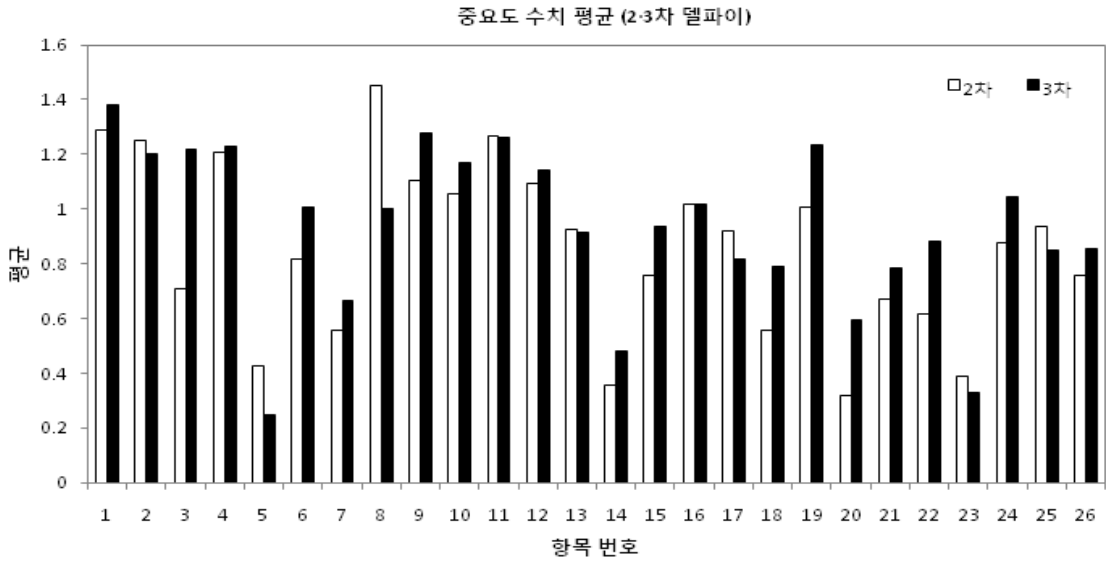


그림 4. 2차와 3차 설문조사에서 나타난 항목 별 중요도 수치의 평균

2차와 3차에서 보여진 중요도 수치는 그래프 (Fig. 4)와 같다. -2점에서 2점 사이의 점수를 부여할 수 있었다는 점을 고려하면, 모두 양의 수치가 나온 것으로 미루어 보아 모든 변수들이 기후 변화에 영향이 있다는 것을 알 수 있다. 이를 토대로 선정된 임시 대리변수를 검토하여 대리변수를 최종 선정하였다. 중요도 수치를 가중치로 부

여하고 대리변수 별로 자료의 유무와 자료의 사용 가능 여부를 변수 선정의 판단 요소로 사용하였다. 이 과정을 통하여 변수의 최종 선택 유무를 결정하고, 적용성이 미흡한 변수는 서로 통합하는 과정을 거치거나, 최종 변수에서 제외, 혹은 변수를 대체 가능한 다른 변수로 교체함으로써 사용 여부를 판단하여 최종 변수를 선정하였다.

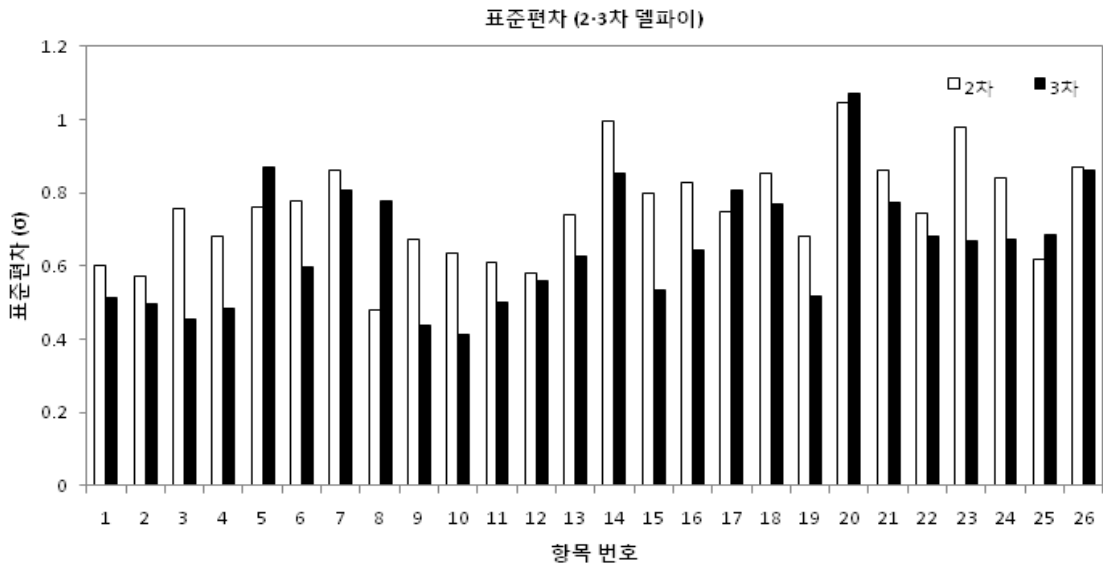


그림 5. 2차와 3차 설문조사의 중요도에 대한 표준편차

보편적으로 델파이 설문 조사 횟수가 늘어날수록 의견 수렴이 일어남으로 표준 편차의 크기 감소를 기대한다. 이번 델파이 조사도 3회를 실시하며 점점 의견 수렴의 양상이 나타났다. 예외적으로 5번 (노출)이나 8번 (민감도)과 같이 표준편차가 늘어나는 경우도 있었지만, 모든 전문가들의 의견이 교환되어 현재 진행되어지고 있는 사업의 방향성을 공감하고, 그 중에 중요한자 (대리변수) 들을 추출할 수 있어서 큰 의미가 있다고 할 수 있겠다. 전체적으로 편차가 줄어들었으므로 전문가들의 의견 합의는 상당부분 진행되었다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 델파이 기법을 사용하여 우리나라 중소하천에 대한 기후변화 취약성 분석을 실시하였다. 이를 통하여 총26개의 대리변수를 선정하였고, 전체적인 의견합의를 도출하였다. 일부 항목에서는 약간 편차가 늘어나는 경우도 존재하였지만, 사업의 방향성에 대한 공감을 이끌어내었으므로 의미가 있다고 할 수 있겠다. 특히, 수자원 분야의 취약성은 민감도의 분야에서의 다양한 변수들의 영향을 받고 있는 것으로 나타났으며, 이는 추후 수자원 분야의 취약성 평가 진행에 참고하여야 할 것이다. 앞으로는 연구 대상지역에 대하여 진행된 과거의 변수들과 관련된 자료를 참조하여 취약성 평가를 진행할 것이다. 자료를 이용, 과거 일정 기간 동안의 경년분석을 실시하고, 이를 바탕으로 자료가 존재하는 미래(선택한 기간을 기준으로 한 그 이후의 기간)의 경향을 예측한 후, 이 자료와 미리 측정된 기간의 자료의 경향을 비교·분석하고 이를 통하여 변수에 대한 미래 경향성 예측 분석을 실시 (Cross-Validation)하는 방향으로 나아갈 것이다. 또한 지표의 중요도를 평가하고 시스템 분석 결과에 대한 표출 형태를 결정하고, 지표가 선정된 이후 그 지표를 뒷받침해 줄 자료들에 대한 획득 여부에 대한 정확한 판별이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업 [과제번호 (NEMA-자연-2010-35)] 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

구자건, 국책사업의 사회영향평가(SIA) 방법 연구 (I) -댐 건설 계획 및 사업을 중심으로-, 한국환경사회학회지, 제5호, pp. 407-444, 2003.

서용원, 이승현, 김영오, 이동률, 대청댐 운영에 대한 기후변화 영향 평가, 대한토목학회학술발표논문집, 제3호, pp. 427-430, 2000.

송성진, 윤도근, 델파이 기법을 적용한 노인 요양 시설의 수급전망에 관한 연구, 대학건축학회는 문집, 제8권, 제7호, pp 85-94, 1992.

유가영, 김인에, 기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안, KEI, RE-05, 2008.

이성웅, 델파이 기술예측방법의 유용성에 관한 연구, 전북대학교 대학원, 1987.

이정호, 전성우, 이명진, 홍현정, 기후변화 연동 4 대강 유역 지하수 함양 및 이용가능량 산정 기법 개발, 한국환경정책·평가연구원, 14호, 2009.

Dalky, N., Rourke, D. L., Lewis, R., and Snyder, D, Studies in the Quality of Life : Delphi and Decision Making, Lewington :D. C. Helath & Co., 1973.

Dajani, J. S., Sincoff, M. Z., and Talley W. K., Stability and Agreement Criteria for the Termination of Delphi Studies, Technological Forecasting and Social Change 13 : pp 83-90, 1979.

Elmer, Seifert F. I., Kreibich H., and Thieken A. H., A Delphi Method Expert Survey to Derive Standards for Flood Damage Data Collection. Risk Analysis, Volume 30, No. 1:107-124, 2010.

IPCC, Climate Change 2007: The Physical

Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, P.Forster et al., Cambridge, UK, 2007.

Taylor, J.G., and Ryder S. D., Use of The Delphi Method in Resolving Complex Water Resources Issues. Journal of the American Water Resources Association,

No. 01240:183-189, February, 2003.

Moss, R.H., Brenkert A.L., and Malone E.L., Vulnerability to Climate Change: A Quantitative Approach. PNNL-SA-33642, 2001.

○논문접수일 : 11년 01월 17일

○심사의뢰일 : 11년 01월 24일

○심사완료일 : 11년 03월 25일