

VESTAP 기반 기후변화 취약성 평가 지침

박두선[†] · 박보영 · 정은화

한국환경정책·평가연구원 국가기후변화적응센터

Guidelines for the VESTAP-based Climate Change Vulnerability Assessment

Park, Doo-Sun R.[†], Park, Boyoung and Jung, Eunhwa

Korea Adaptation Center for Climate Change, Korea Environment Institute, Sejong, Republic of Korea

ABSTRACT

The Korea Adaptation Center for Climate Change (KACCC) located in Korea Environment Institute has serviced a climate change vulnerability assessment support tool (VESTAP) since 2014 in order to help local governments to establish their own adaptation plans. Owing to its easy usage, the VESTAP has been utilized by not only local governments but also academia for examination of climate change vulnerability in various fields. However, the KACCC has not suggested a standard usage how to compose indices for climate exposure, sensitivity, and adaptation capacity which are main components of vulnerability although the KACCC manages operation and application of the VESTAP. Many users had no choice but to compose indices based on their own interpretation on the components of vulnerability. This technical note suggests the standard usage of VESTAP by reevaluating some vulnerability assessments previously developed. This may help users to correctly compose indices for climate change vulnerability assessment, and may minimize possibility of inter-user inconsistency in definition of vulnerability assessments.

Key words: Climate Change, Vulnerability Assessment, Climate Adaptation

1. 서 론

국가기후변화적응센터는 지난 2014년 11월부터 광역 및 기초 지방자치단체의 기후변화 적응 세부시행계획 수립 지원을 위해 웹 기반 기후변화 취약성 평가 지원도구(Vulnerability assessment tool To build climate change Adaptation Plan; VESTAP) 서비스를 제공하고 있다. 기후변화 취약성이란 지구, 생물, 사회경제 등의 시스템이 기후변화에 의한 부정적 효과에 대해 얼마나 견딜 수 있을지의 정도를 나타내는 용어이며, 일반적으로 기후변화 영향과 그에 대한 적응능력으로 구성된다(UNDP, 2005; IPCC, 2007). 취약성 평가는 현재와 미래 취약성 평가결과에 기반하여 기후변화 적응 기술 및 정책 방향을 수립하는 형태로 활용될 수 있다. VESTAP은 국립환경과학원이 개발 및 배포한 Climate Change adaptation toolkit based on GIS(CCGIS) 및 Local Climate Change adaptation tool-

kit based on GIS(LCCGIS)에 기반하여 개발되었다(Kim *et al.*, 2012). 현재 VESTAP에서는 국립환경과학원에서 개발했던 총 7개 분야(건강, 재난/재해, 농업, 산림, 해양/수산, 물관리, 생태계) 32개 취약성 평가항목을 예시항목으로서 제시하고 있다(Kim *et al.*, 2012; Lee and Cha, 2015). VESTAP이 CCGIS 및 LCCGIS와 가장 주요하게 다른 점은 엑셀 기반이 아닌 웹 기반으로 서비스가 제공되어 사용자 접근성이 훨씬 용이하다는 점이다(Oh *et al.*, 2016; Oh *et al.*, 2017).

VESTAP은 제2차 광역지방자치단체 및 제1차 기초지방자치단체의 기후변화적응 세부시행계획 수립에 활용되었을 뿐만 아니라, 그 범용성 덕분에 연구기관에서도 활용되고 있다(Bae and Kim, 2015; Lim, 2016; Lim and Park, 2016). VESTAP 운영이 시작된 2014년부터 현재(2017년 10월)까지 정부기관 3건(국민안전처 외 1건), 공공기관 15건(인천환경공단 외 14건), 연구기관 6건(인천보건환경연구원 외 3건)에 대해

[†] Corresponding author: dspark@kei.re.kr

Received October 27, 2017 / Revised November 8, 2017 / Accepted November 22, 2017

계정이 발급되었으며, 그 수요는 지속적으로 증가하는 추세이다. 하지만 사용자가 증가하고 다변화됨에 따라 신규 취약성 평가항목 개발 시 취약성을 구성하는 각 요소에 대한 통일된 해석기준이 부재하다는 문제가 발생하고 있다. 이는 CCGIS 및 LCCGIS 운영 시에도 동일하게 제기되었던 문제이기도 하다(Kim and Lee, 2014). 국가기후변화적응센터는 VESTAP 사용자 안내서와 더불어 관련 연구논문을 국내외 학술지에 출판하였지만, 주로 VESTAP에서 취약성 평가의 기본원리 및 개념 등 기술적인 측면이 주된 내용을 이루었다(Oh *et al.*, 2016; Oh *et al.*, 2017). 이에 반해 신규 취약성 항목 개발 시 각 취약성 요소의 올바른 혹은 통일된 구성기준에 대한 연구는 상대적으로 미흡하였다. 본 연구에서는 기존의 몇 가지 취약성 평가 예시항목을 재평가하고, 이를 보완하는 과정에서 취약성 평가항목 개발 시 참고할 수 있는 통일된 기준을 제시하였다.

2. VESTAP의 취약성 평가원리 및 구조

서론에서 언급한 바와 같이 기술적인 상세사항은 VESTAP과 CCGIS 및 LCCGIS 사이에 차이가 있지만 기본원리는 동일하다. 여기서는 상세한 사항에 대한 언급은 최소화하고, VESTAP, CCGIS, LCCGIS가 공유하는 취약성 평가의 기본원리에 대해서만 설명하고자 한다. 기후변화 취약성은 시스템이 노출되는 기후변화의 정도(기후노출도, *climate exposure*), 기후변화에 대해 시스템이 민감한 정도(민감도, *sensitivity*), 기후변화에 대해 시스템이 적응할 수 있는 정도(적응능력, *adaptive capacity*)의 세 가지 요소로 구성된 함수로서 계산할 수 있다.

$$\text{취약성} = (\alpha \times \text{기후노출도} + \beta \times \text{민감도}) - \gamma \times \text{적응능력} \quad (1)$$

기후노출도는 기온, 강수량, 상대습도와 같은 기후요소 혹은 기후요소에 기반한 지수로 구성된다. 민감도는 시스템이 해당 기후노출도에 얼마나 민감한 지를 나타내며, 보통 보고자 하는 취약대상의 수, 밀도 등으로 구성된다. 일반적으로 기후변화 영향은 기후노출도와 민감도를 합한 값으로 표현될 수 있다. 적응능력은 기후변화 영향을 저감할 수 있는 정책적, 기술적 정도를 나타내며, 지역 내 총생산, 소방서 인력, 하/폐수종말처리용량 등으로 구성될 수 있다. 마지막으로 α , β , γ 는 각 요소에 대한 가중치로서 총합은 1이 되어야 하며, 취약성 평가항목에 따라 비중이 달라질 수 있다. 가중치 산정방법에 대해서는 각 요소를 구성하는 지표에 대한 설명을 하면서 함

께 다루고자 한다.

기후노출도, 민감도, 적응능력의 세 요소는 각각을 대표하는 지표로 구성된다. 기존 폭염에 의한 건강 취약성 평가 예시항목을 예로 들어 설명하면 다음과 같다(Table 1). 기후노출도는 폭염을 나타내는 혹은 관련된 지표로 이루어져야 하므로 열파 지속지수, 일 최고기온의 연간 평균값, 일 최고기온이 섭씨 33도 이상인 날의 횟수 등으로 구성된다. 민감도는 폭염에 취약한 14세 이하 인구, 65세 이상 인구 등으로 구성되며, 적응능력은 정책 혹은 기술적 대비정도를 나타내는 인구당 보건소 인력, 재정자립도, 지역 내 총생산 등으로 구성된다. 각각의 지표는 취약성의 구성요소(기후노출도, 민감도, 적응능력)처럼 가중치를 가지며, 가중치의 합은 1이어야 한다. 모든 가중치는 전문가 대상의 Analytic Hierarchy Process(AHP)에 기반해 계산된다. AHP는 의사결정 과정에서 널리 쓰이는 기법으로 다양한 상황에 대해 단계별로 분석을 수행함으로써 종합적인 의사결정에 이르는 기법이다(Saaty, 1980).

3. 취약성 평가 항목 개발 시 지침 및 예시

본 연구에서는 기존 취약성 평가 예시항목인 폭염에 의한 건강 취약성을 예시로 삼아 기후노출도, 민감도, 적응능력의 지표 구성에 대해 재평가하고 개선방향을 제시하여, 궁극적으로 취약성 평가 항목 개발 시 지침을 제안하고자 한다. 또한, 제안된 지침을 기반으로 개발된 폭염-온열질환, 가뭄-우수, 가뭄-수질 취약성 평가 예시항목도 소개하고자 한다.

3.1 기존 예시항목의 재평가 및 개선방향

예시항목인 폭염에 의한 건강 취약성 평가항목의 기후노출도는 총 7개의 지표로 구성되어 있다(Table 1). 7개 지표 모두 폭염과 직간접적으로 연관성을 가지고 있다. 제시된 예시항목의 기후노출도 지표구성의 특성은 각각의 지표에 대한 가중치가 대략 0.1~0.2 내외로 대부분 분포하고 있다는 점이다. 이는 앞으로 살펴볼 민감도와 적응능력을 구성하는 지표의 가중치에서도 유사하게 나타나는 특성이다. 가중치가 비슷하다는 것은 다시 말해 기후노출도를 구성하는 지표 간의 우선순위가 거의 균등하다는 것을 의미한다. 하지만 지표 하나하나를 살펴보면 그렇지 않은 경우가 있다. 예를 들어 상대습도의 가중치가 이보다 더 직접적인 지표인 열파 지속지수 가중치와 비교하여 불과 0.05 밖에 작지 않다는 점은 이해하기 쉽지 않다. 이처럼 지표 간 가중치의 차이가 크게 나지 않는 가장 주요한 원인은 전문가 AHP 분석 시 전문가의 판단을 어렵

Table 1. Indices and weighting values of health vulnerability to heat extremes

Factor	Index	Weighting value
Climate exposure	· Heat wave duration index (HWDI)	0.15
	· Annual mean of daily maximum air temperature	0.11
	· Number of days in which daily maximum air temperature exceeds 33℃	0.26
	· Number of days in which daily minimum air temperature exceeds 25℃	0.10
	· Apparent temperature (AT)	0.13
	· Annual mean of daily relative humidity	0.10
	· Discomfort index	0.15
Sensitivity	· Population younger than 14 years old	0.10
	· Population older than 65 years old	0.20
	· Population rate of national basic livelihood guarantees recipients	0.10
	· Population rate of senior citizens (older than 65 years old) who lives alone	0.20
	· Number of deaths of cardiovascular disorders	0.16
	· Number of deaths of heatstroke/sunstroke	0.24
Adaptive capacity	· Ratio of medical hygienic and social welfare services to gross regional domestic product	0.16
	· Population rate having health insurance	0.10
	· Number of staffs in public health centers per population	0.16
	· Number of emergency medical treatment centers per population	0.16
	· Financial independence rate of local government	0.21
	· gross regional domestic product (GRDP)	0.21

게 만드는 유사지표가 많이 포함되어 있기 때문에 분석된다. 실제로 열파 지속지수와 불쾌지수 혹은 열파 지속지수와 일 최고기온이 섭씨 33도 이상인 날의 횟수 사이의 중요도 점수는 그 차이를 크게 주지 않는다. 한편, 대표성이 상대적으로 낮은 지표가 포함되어 절대적으로 지표의 수가 많아진 것도 가중치에 차별성이 낮아지게 된 원인 중 하나로 분석된다. 예를 들어 1일 상대습도, 일 최저기온이 섭씨 25도 이상인 날의 횟수 등은 다른 지표에 비해 폭염과 직접적 관련성이 낮은 편이다. 한편, 많은 지표를 기후노출도에 추가했을 때 발생할 수 있는 또 다른 문제점은 다음과 같다. 일반적으로 일 최고기온이 상승하면 불쾌지수도 상승하는 등 일부 변수는 서로 독립적이지 않은 경우가 있다. 이런 경우에 각각 가중치를 주게 되면 실질적으로 서로 중복되어 기여도가 과도하게 평가될 소지도 있다. 그러므로 위와 같은 문제를 최소화하기 위한 방안으로서 각 지표를 구성하는 기후요소가 서로 겹치지 않는 선에서 폭염이라는 현상을 대표할 수 있는 지표를 1~2

개만 선정할 것을 권장한다.

민감도는 총 6개의 지표로 구성되어 있다. 각각의 지표는 폭염에 취약한 대상 또는 계층을 비교적 잘 대표하고 있다. 하지만 폭염에 취약한 대상을 모두 한 번에 민감도의 구성지표로서 평가하면 취약성이 과소평가 혹은 왜곡될 가능성이 있다. 예를 들어 특정지역에서 영유아 비율과 노인 비율 사이에 서로 음의 상관성이 있는 경우, 영유아 비율은 매우 높지만 노인 비율은 매우 낮게 나타날 수 있다. 이 경우, 두 지표가 서로 상쇄되어 해당지역의 취약성 지수가 높지 않게 나타날 수 있다. 하지만 영유아 측면에서 보면 해당지역은 취약성이 매우 높은 지역임에 틀림이 없다. 실제로 대부분의 지역에서 영유아 비율과 노인 비율에서 시군구 간 통계적으로 유의한 음의 상관성이 있어 이러한 문제가 실제로 발생할 수 있음을 시사해준다(Fig. 1). 여기서 흥미로운 부분은 다른 지역과 달리 충청북도에서는 강한 양의 상관성이 있고, 경상남도 와 울산은 유의한 상관성이 없다는 점이다. 이에 대한 정확한 원

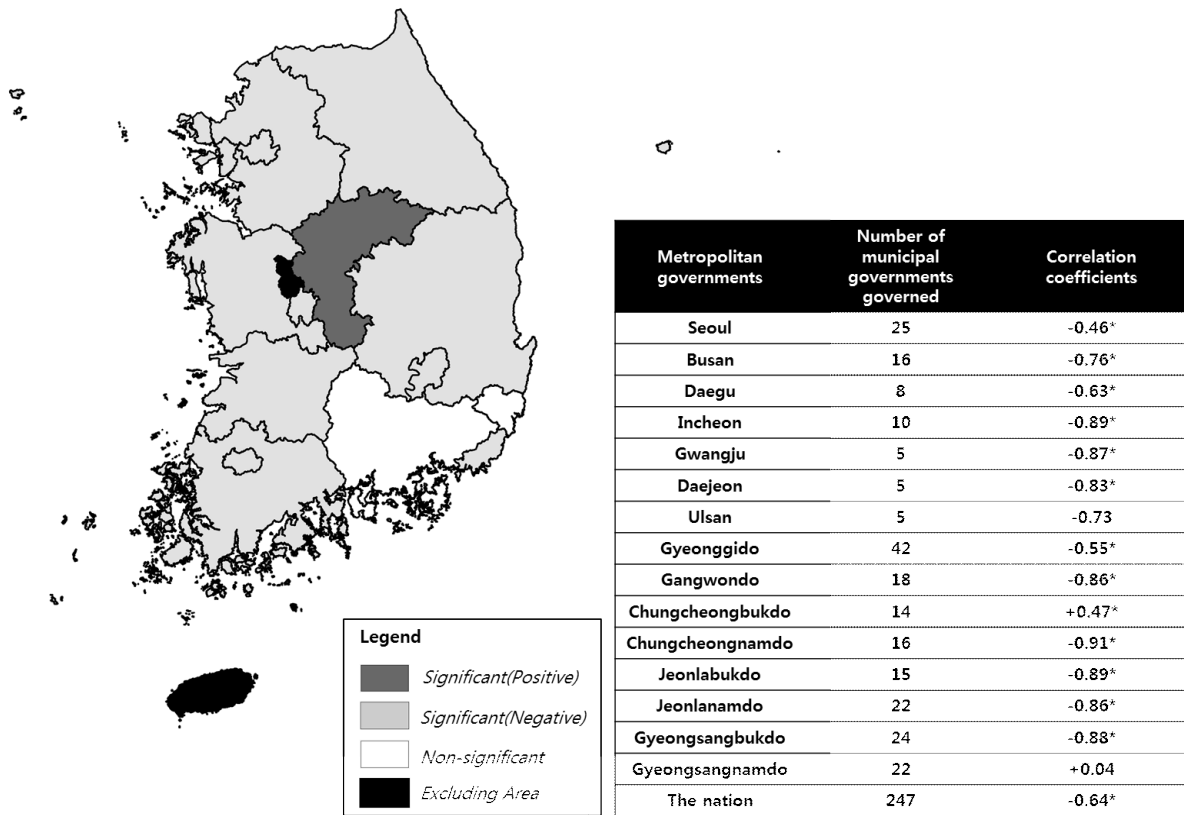


Fig. 1. Correlation coefficients between population rate of infants (younger than 5 years old) and senior citizens (older than or equal to 65 years old) in 2016. The asterisks indicate that the correlation coefficients are statistically significant at the 90% confidence levels. Dark and light gray shades on the map indicate that there are significant positive and negative correlations in the provinces, respectively. Black and white colors on the map represent no correlation values calculated and no significant correlations in the provinces, respectively. The population data is obtained from Statistics Korea.

인을 파악하기 위해서는 추가연구가 별도로 필요할 것으로 보인다. 한편, 현재의 민감도 구성지표로 취약대상은 포함되어 있지만, 그 외 일반국민은 포함되어 있지 않다. 그러므로 위와 같은 문제를 해소하기 위한 방안으로서 민감도 구성지표를 일반대상과 취약대상별로 나누어 각각 취약성을 평가하는 것을 권장한다.

적응능력은 6개의 지표로 구성되어 있으며, 각각은 직간접적으로 취약성을 저감하는 역할을 할 수 있다. 여기서는 지표 구성의 이해를 돕기 위해 크게 잠재적 및 실질적 적응능력의 두 가지 형태로 분류하고자 한다. 잠재적 적응능력은 지역 내 총생산, 재정자립도 등과 같이 폭염에 의한 건강 취약성을 직접적으로 저감할 수 있는 능력이라기보다는 해당 지방자치단체가 관련 정책 혹은 기술에 투자할 수 있는 잠재성을 평가하는 지표로 이해할 수 있다. 잠재적 적응능력 지표의 주된 특성은 모든 종류의 취약성 평가에서 적응능력 지표로서 포함

될 수 있다는 점이다. 실제로 가장 일반적이고 대표적인 적응능력 지표로서 위험도나 취약성 평가에서 널리 사용되고 있다(e.g., Neumayer and Barthel, 2011; Kousky, 2014; Park *et al.*, 2015). 하지만 잠재적 적응능력만으로는 정책적 구체성을 표현하기 어려운 측면이 있으므로, 잠재적 적응능력과 실질적 적응능력 지표를 함께 사용하는 것을 권장한다. 실질적 적응능력은 인구당 소방서 인력, 인구당 응급의료기관 수, 인구당 의료기관 수와 같이 폭염에 의한 건강 취약성 저감에 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 지표로서 적응능력의 투자방향을 제시해줄 수 있다는 장점이 있다. 하지만 단점은 잠재적 적응능력에 비해 너무 다양하고 많은 지표를 고려할 수 있다는 점이다. 즉, 위의 예시 외에도 무더위쉼터, 도시공원, 음수대 등 많은 다른 실질적 적응능력이 지표로서 고려될 수 있다. 그러므로 국가 차원 혹은 해당 지방자치단체의 대표적인 실질적 적응능력 지표를 선정하여 사용하는 것을 권장한다. 한편, 잠

재적 적응능력과 실질적 적응능력이 사실상 서로 양의 상관 이 높을 것임에도 불구하고, 두 지표를 구분하는 이유는 잠재 적 적응능력에 대한 해석상의 오류가 발생할 수 있기 때문이 다. 잠재적 적응능력은 실제 경제성장과 거의 일치하기 때문 에 자칫 경제성장만 하면 성공적인 기후변화 적응을 할 수 있 는 것으로 오해할 수 있다. 실제로는 경제성장만으로 기후변 화에 적응할 수 없으며, 실질적 적응능력에 대한 추가적인 투 자가 반드시 필요한 상황이다.

한편, 기후노출도와 달리 민감도와 적응능력 요소는 둘 모 두 사회경제 지표로 구성되기 때문에 때로는 특정 지표가 민 감도와 적응능력 요소 중 어디에 속하는 것이 더 적절한가에 대한 의문이 발생하는 경우가 많다. 본 연구에서는 이상적인 해결방안은 아니지만 가장 간단한 해결방안으로서 정성적으 로 보았을 때 값이 클수록 취약성을 높이는 방향으로 작용할 지표는 민감도로, 반대로 취약성을 낮추는 방향으로 작용할 지표는 적응능력으로 구성할 것을 권장한다.

3.2 새 지침에 기반한 예시항목

앞선 장에서의 분석결과로부터 취약성 평가 항목 개발 시 권장사항을 다음과 같이 3가지로 요약할 수 있다. 1) 구성 지 표의 대표성 강화 및 단순화, 2) 취약성 평가 항목을 일반 및 취약대상별로 세분화, 3) 잠재적 및 실질적 적응능력 구분이 그것이다. 본 장에서는 위 권장사항을 토대로 하여 개발된 폭 염-온열질환, 가뭄-용수, 가뭄-수질에 대한 취약성 평가 예 시항목을 소개하고자 한다. 본 기술노트에서 제시되는 예시항 목은 정답이 아니며, 하나의 견본으로서 받아들일 필요가 있 다. 예시항목과 동일한 주제의 취약성 평가에서도 실제 상세 지표의 구성은 각 지방자치단체의 특성이나 연구방향에 따라 서 충분히 달라질 수 있다.

우선 폭염-온열질환 취약성의 경우, 기후노출도는 열지수 (Heat Index)를 지표로 활용하였다(Table 2). 열지수는 지수의 범위에 따라 위험성이 분류되며, 일반적으로 열지수 값 32 이

상에서부터 열에 지속적으로 노출 시 열사병, 열경련 등 온열 질환의 가능성이 생기기 시작한다(Lee *et al.*, 2013). 그래서 구체적인 지표내용은 열지수가 32 이상인 날수로 정의하였 다. 기존에 존재하는 다른 기온 및 습도 관련 지표는 제거하 였는데, 그 이유는 열지수 자체가 이미 기온과 습도에 관한 정보를 복합적으로 분석하여 폭염의 강도를 표출하는 지수이 기 때문이다. 기온과 습도 정보를 독립적으로 추가할 경우 오 히려 유사 혹은 중복 정보가 될 수 있다. 민감도는 일반대상 과 취약대상별로 상세화하였는데, 일반대상을 나타내는 민감 도 지표는 인구수로 대표되며, 취약대상별 민감도 지표는 각 각 심혈관계질환 인구수, 65세 이상 인구수, 5세 미만 인구수, 야외노동자 인구수, 저소득층 인구수로 구성하였다. 적응능력 에서는 지역 내 총생산을 잠재적응능력 지표로 선정하였으며, 인구 당 의료기관 수, 인구 당 응급의료기관 수, 인구 당 소방 서 인력을 실질적응능력 지표로 선정하였다. 잠재적응능력 지 표로서 관련예산규모는 가장 직접적이고 이상적인 지표로서 사실상 지역 내 총생산보다 사용을 권장하지만, 일반적으로 해당 정보를 확보하기 어려운 경우가 많아, 본 연구에서는 지 방자치단체의 전체예산규모를 간접적으로 추정할 수 있는 지 역 내 총생산을 지표로 활용하였다.

가뭄-용수 취약성에서는 기후노출도로 표준강수지수(Stan dardized Precipitation Index; SPI)와 증발산수요기뭄지수(Eva porative Demand Drought Index; EDDI)를 활용하였다(Table 3). 가뭄의 발생을 정의하는 데에 있어 일반적으로 강수량과 증발산량의 두 기후요소가 주요하게 활용되고 있다(Guttman, 1999; Hobbins *et al.*, 2016; McEvoy *et al.*, 2016). 다양한 가 뭄지수가 존재하지만 그 중에서도 SPI와 EDDI를 선정한 이 유는 각각 강수량과 증발산량만으로 구성된 지수이기 때문이 다. 즉, SPI는 강수량 변동에 의한 가뭄, EDDI는 증발산량 변 동에 의한 가뭄을 정의하기 때문에 두 지수는 상호 직접적으 로 영향을 주지 않으며, 또한 두 지수 모두 기상학적 가뭄을 대표하는 지수로서 잘 알려져 있다. 두 지수도 열지수와 마찬가지로

Table 2. An example of thermal diseases vulnerability to heat extremes

Target	Climate exposure	Sensitivity	Adaptive capacity
General		<ul style="list-style-type: none"> Population 	<ul style="list-style-type: none"> GRDP
Vulnerable	Number of days in which heat index exceeds 32	<ul style="list-style-type: none"> Population rate of cardiovascular disorders Population rate of senior citizens (older than 65 years old) Population rate of infants and toddlers (younger than 5 years old) Population rate of outdoor workers Population rate of low income 	<ul style="list-style-type: none"> Number of medical institutions per population Number of emergency medical treatment centers per population Number of fire stations per population

Table 3. An example of water vulnerability to drought

Target	Climate exposure	Sensitivity	Adaptive capacity
General	<ul style="list-style-type: none"> Number of days in which 3-month SPI is less than -1 during April-to-May Number of days in which 3-month EDDI is less than -1 during April-to-May 	Total water consumption	- GRDP
	<ul style="list-style-type: none"> Number of days in which 6-month SPI is less than -1 during April-to-May Number of days in which 6-month EDDI is less than -1 during April-to-May 		
Vulnerable	<ul style="list-style-type: none"> Number of days in which 3-month SPI is less than -1 during April-to-May Number of days in which 3-month EDDI is less than -1 during April-to-May 	Agricultural water consumption	<ul style="list-style-type: none"> - GRDP - Maximum capacity of reservoir for water supply
	<ul style="list-style-type: none"> Number of days in which 6-month SPI is less than -1 during April-to-May Number of days in which 6-month EDDI is less than -1 during April-to-May 		<ul style="list-style-type: none"> - Irrigation rate for rice paddy - Irrigation rate for field
	<ul style="list-style-type: none"> Number of days in which 3-month SPI is less than -1 Number of days in which 3-month EDDI is less than -1 	Industrial water consumption	<ul style="list-style-type: none"> - GRDP - Maximum capacity of reservoir for water supply
	<ul style="list-style-type: none"> Number of days in which 6-month SPI is less than -1 Number of days in which 6-month EDDI is less than -1 		
	<ul style="list-style-type: none"> Number of days in which 3-month SPI is less than -1 Number of days in which 3-month EDDI is less than -1 	Residential water consumption	<ul style="list-style-type: none"> - GRDP - Maximum capacity of reservoir for water supply
	<ul style="list-style-type: none"> Number of days in which 6-month SPI is less than -1 Number of days in which 6-month EDDI is less than -1 		<ul style="list-style-type: none"> - Distribution rate of water supply facilities - Holding amount of water for emergency

가지로 범위에 따라 가뭄의 심각성이 분류되므로, 구체적인 지표는 각 지수가 -1 이하인 날수로 구성하였다. 또한, 가뭄의 경우, 단기 및 장기 가뭄의 특성이 서로 다르므로 지수의 계산에 있어 누적월을 각각 3개월, 6개월로 구분하여 단기가뭄-용수, 장기가뭄-용수 취약성으로 항목을 세분화하였다. 민감도는 일반대상은 총 용수사용량을 지표로 삼았으며, 취약대상별로는 농업용수 사용량, 공업용수 사용량, 생활용수 사용량의 용수유형별로 구분하여 지표를 구성하였다. 적응능력은 폭염-온열질환에서와 마찬가지로 지역 내 총생산을 일반대상 및 모든 취약대상별 잠재적응능력 지표로 활용하였다. 반면, 실질적응능력 지표는 취약대상별로 대표성을 지닐 수 있도록 각각 구성하였다. 농업용수의 경우, 용수공급용 저수지 최대용량, 수리답 비율, 관개전 비율로 구성하였으며, 공업용수의 경우에는 용수공급용 저수지 최대용량만을 실질적응능력 지

표로 구성하였다. 생활용수에서는 상수원 최대저수량, 상수도 보급률, 비상급수 보유량을 지표로 삼았다.

마지막으로 가뭄-수질 취약성은 기후노출도로 가뭄-용수 취약성과 동일하게 단기 및 장기 가뭄으로 구분하여 구성하였다(Table 4). 민감도는 앞선 두 개의 취약성 항목과는 달리 취약대상별 구분을 하지 않고, 일반대상만을 고려하여 점 및 비점 오염부하량을 지표로 적용하였다. 실제로는 취약대상별로 저수지, 호수, 대하천, 소하천 등으로 나누어 평가하는 부분이 추가될 수 있지만, 본 연구에서는 이들 취약대상 사이에 평가지표의 차이가 크지 않다고 판단하였다. 하지만 사용자의 판단에 따라 필요하다면 취약대상별로 구분하여 평가지표를 구성하는 것을 권장한다. 적응능력은 잠재적응능력 지표로 지역 내 총생산이 선정되었으며, 실질적응능력 지표로는 비점오염저감시설 처리용량, 하수종말처리시설 처리용량, 폐수종말

Table 4. An example of water quality vulnerability to drought

Target	Climate exposure	Sensitivity	Adaptive capacity
General	· Number of days in which 3-month SPI is less than -1	Water pollution load (point + nonpoint)	- GRDP
	· Number of days in which 3-month EDDI is less than -1		- Treatment capacity of nonpoint water pollution abatement facility - Treatment capacity of sewage treatment plant - Treatment capacity of wastewater treatment plant - Flow rate - Flow speed

처리시설 처리용량과 같이 점 및 비점 오염을 저감할 수 있는 정보를 사용하였다. 이에 더해 유량과 유속도 실질적응능력 지표로 포함하였다. 사실 유량과 유속은 민감도의 구성지표로 활용하더라도 해석상의 문제가 발생하지 않는다. 여기서는 유량과 유속은 높을수록 취약성을 낮추는 역할을 하며, 현재 기술로 유량과 유속을 조절하는 것이 불가능하지는 않으므로 앞선 장에서의 권장방향을 따라서 적응능력 지표로 포함시켰다.

한편, 본 장의 첫 단락에서 언급한 지표구성의 유연성에 대하여 첨언을 하면, 예를 들어 폭염-온열질환 취약성의 기후노출도에서 만약 시간분해능이 더 좋은 기후자료가 있다면 열지수가 32 이상인 날수 대신 열지수가 32 이상인 시간 형태로도 지표를 정의할 수 있다. 또한, 열지수보다 특정 지방자치단체의 상황에 더 적합한 지수가 있다면 해당지수로 지표를 변경하거나 추가하는 것도 가능하다. 단, 유의해야 할 사항은 지표의 수정이 발생할 시 반드시 가중치 산정도 그에 맞게 다시 수행해야 한다는 점이다.

4. 결론 및 제언

본 기술노트에서는 기존 취약성 평가 예시항목을 재평가하여 VESTAP 기반의 취약성 평가 항목 개발 시의 권장지침에 대해서 소개하였다. 큰 틀에서 요약하면 취약성 평가 항목의 개발 시 1) 구성지표는 대표성을 극대화하는 대신 최소화할 것, 2) 취약성 평가 항목을 일반대상 및 취약대상별로 세분화할 것, 3) 적응능력은 잠재적 및 실질적 지표로 분류할 것을 제안하였다. 또한, 실제 위 지침을 적용하여 개발된 폭염-온열질환, 가뭄-용수, 가뭄-수질 취약성 평가 예시항목을 소개하였다. 하지만 여기서 제시한 예시항목은 전국단위 평가에 적절하도록 제작된 것으로 절대 정답은 아니며, 실제 동일항목에 대해 취약성 평가를 수행할 때에는 해당 지방자치단체의 상황에 맞게 지표구성을 수정 및 보완하여 사용하는 것을 적극 권장한다. VESTAP의 영문이름에서도 알 수 있듯이 도구

로서의 기능이 주된 기능이며, 기본적으로 배포되는 취약성 평가 항목은 각 지방자치단체의 자체 취약성 평가 항목 개발을 돕기 위한 하나의 예시라고 이해하는 것이 적절하다. 그 이유는 지방자치단체별로 상황이 다르고 또한 보고자 하는 취약대상의 특성에 따라 지표구성은 달라져야만 하기 때문이다. 그러므로 사용자가 직접 지표를 구성할 때 본 기술노트를 참고삼아 활용할 것을 적극 권장하며, 이를 통해 지표구성의 어려움이 다소간 해소될 것으로 기대한다.

보다 명확한 VESTAP 기능 활용을 위해 현행 VESTAP이 가지는 명확한 한계에 따른 사용시 주의사항을 세 가지 서술하면 다음과 같다. 첫째, 미래 기후변화는 그 불확실성이 매우 크기 때문에 이 문제를 최소화하기 위해서는 반드시 하나 이상의 기후모형 예측정보를 활용해야 하며, 기후모형 간 평균값뿐만 아니라 기후모형 간 분산에 따른 확률정보 측면에서 결과를 이해해야만 한다. 둘째, VESTAP은 매우 단순한 취약성 평가도구로서 복잡한 인과관계에 따른 취약성 평가를 수행하기에는 적절치 않다. 예를 들어 가뭄에 따라서 수량이 감소하고, 감소된 수량에 따라서 수질이 악화되며, 결과적으로 생태계가 파괴되는 형태의 복잡다단한 과정을 평가하기에는 부적절하다. 이런 한계를 극복할 수 있는 대안으로서 현재 부문별 기후변화 영향 및 취약성 통합평가 모형개발이 2020년 완료로 목표로 진행되고 있다. 셋째, 현행 VESTAP에서는 민감도와 적응능력 지표 자료에 대한 미래 전망이 없는 상태이다. 그러므로 결과를 해석할 때에 반드시 ‘현재 수준의 민감도와 적응능력이 유지될 경우에’라는 단서조항을 붙여야만 한다. 향후 가능한 민감도 및 적응능력 자료부터 미래전망을 추가할 계획을 가지고 있다. 위와 같은 뚜렷한 한계에도 불구하고 VESTAP이 가지는 장점은 오랜 기간의 누적된 통계자료 없이 기본적인 통계자료를 기반으로 취약성 평가를 수행할 수 있다는 점이다. 즉, 긴급한 현안에 대해 비교적 쉽게 취약성 평가를 우선적으로 수행할 수 있다. 본격적인 기후변화 적응정책에 따른 기후변화 실태조사 및 자료수집이 얼마 안

된 현 시점에서 최적의 평가도구로 볼 수 있다.

사 사

본 연구는 환경부 역무대행 사업 「2017년도 기후변화 적응」의 세부과제인 ‘취약성 평가 고도화 시범사업’의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Bae MK, Kim BE. 2015. Improvement directions on climate change adaptation planning based on analysis of vulnerability. Characteristic in Chungbuk Province. *Chungbuk Development Review* 26(2):103-124.
- McEvoy DJ, Huntington JL, Hobbins MT, Wood A, Morton C, Anderson M, Hain C. 2016. The evaporative demand drought index: Part II-CONUS-wide assessment against common drought indicators. *Journal of Hydrometeorology* 17(6):1763-1779.
- Guttman NB. 1999. Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm. *Journal of American Water Resources Association* 35(2):311-322.
- Hobbins M, Wood A, McEvoy D, Huntington J, Morton C, Anderson M, Hain C. 2016. The evaporative demand drought index: Part I-Linking drought evolution to variations in evaporative demand. *Journal of Hydrometeorology* 17(6):1745-1761.
- IPCC 2007. *Climate change 2007: Impacts, adaptation, and vulnerability. Fourth Assessment Report.* Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kim CH, Song CK, Hong YD, Yu JA, Ryu SH, Yim GY. 2012. Development and application of CCGIS for the estimation of vulnerability index over Korea. *Climate Change Research* 3(1):13-24.
- Kim YS, Lee SH. 2014. Improvement of vulnerability assessment to climate change using LCCGIS. *Journal of Climate Change* 5(2):165-178.
- Kousky C. 2014. *Informing climate adaptation: A review of the economic costs of natural disasters.* *Energy Economics* 46:576-592.
- Lee G, Cha J. 2015. Assessing climate change vulnerability for tuning the local government's countermeasure. *Journal of Climate Research* 10(1):13-24.
- Lee S, Kwon BY, Jung D, Jo K, Kim M, Ha S, Kim H, Kim BN, Masud MA, Lee E, Kim Y. 2013. Future prediction of heat and discomfort indices based on two RCP scenarios. *Atmosphere* 23(2):221-229.
- Lim CH. 2016. The vulnerability assessment forest fire in Jeju to climate change using the VESTAP. *Fire Science and Engineering* 30(1):57-62.
- Lim CH, Park YY. 2016. Study of a flood vulnerability assessment for climate change and utilizing the vulnerability-based disaster response in Jeju-do. *Fire Science and Engineering* 30(6):64-70.
- Neumayer E, Barthel F. 2011. Normalizing economic loss from natural disasters: A global analysis. *Global Environmental Change* 21:13-24.
- Oh KY, Lee MJ, Han DE. 2016. Development of web-based supporting tool (VESTAP) for climate change vulnerability assessment in lower and municipal-level local governments. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 19(1):1-11.
- Oh KY, Lee MJ, Jeon SW. 2017. Development of the Korean climate change vulnerability assessment tool(VESTAP)-centered on health vulnerability to heat waves. *Sustainability* 9(7):1103.
- Park DSR, Ho CH, Nam CC, Kim HS. 2015. Evidence of reduced vulnerability to tropical cyclones in the Republic of Korea. *Environmental Research Letters* 10(5):054003.
- Saaty TL. 1980. *The analytic hierarchy process. Planning, priority setting, resource allocation,* McGraw-Hill, New York, USA.
- UNDP 2005. *Adaptation policy frameworks for climate change: Developing strategies, policies, and measures.* Cambridge University Press, USA.