

한국의 기상기술력 평가: 미국, 일본, 영국과 비교분석[†]

Capability Assessment on Korean Meteorological Technology:
A Comparative Analysis of US, Japan, and UK

김혜민(Hye-min Kim)*, 박소연(So-yeon Park)**, 이경미(Kyoungmi Lee)***,
임병환(Byung-hwan Lim)****, 유승훈(Seung-hoon Yoo)*****

목 차

I. 서론	IV. 연구결과
II. 기존연구사례	V. 결론 및 정책적 시사점
III. 연구방법	

국문 요약

본 연구는 2015년을 기준으로 한국, 미국, 일본, 영국의 기상기술력을 평가하고, 선행연구와의 비교·분석을 통해 현재 수준을 파악하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 분석방법에 있어 선행연구와 동일한 평가방법을 사용하였다. 우선 객관적인 실적자료를 활용할 수 있는 지표평가는 Gordon의 점수제 모형을 적용하여 그 결과를 산출하고, 설문평가는 델파이 조사를 통해 200여명의 전문가들에게 설문을 요청하여 의견을 이끌어냈다. 평가대상 분야는 관측, 자료처리, 예보, 기후 분야로 나누어 평가하였다. 그 결과 지표평가에서는 영국의 기상기술력이 비교 대상국 중 가장 우위에 있는 것으로 평가되었고, 한국의 기상기술력은 영국의 88.5%, 일본의 89.9%, 미국의 90.6% 수준인 것으로 나타났다. 다음으로 기상 전문가들은 설문평가를 통해 가장 우위에 미국을 평가하고, 다음으로 영국, 일본, 한국 순으로 평가하였다. 설문평가에 의하면 한국의 기상기술력은 미국의 88.9%, 영국의 91.6%, 일본의 92.2% 수준으로 나타났다.

핵심어 : 기상기술력, Gordon 모형, 델파이 기법, 지표평가, 설문평가

※ 논문접수일: 2016.8.18, 1차수정일: 2016.12.23, 2차수정일: 2017.1.10, 게재확정일: 2017.2.6

* 국립기상과학원 연구원, hmkim84@korea.kr, 064-780-6541

** 국립서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과 박사과정, imsyeon@seoultech.ac.kr, 02-970-6960

*** 국립기상과학원 기상연구사, leekm80@korea.kr, 064-780-6542

**** 국립기상과학원 기상연구관, weatherman@korea.kr, 064-780-6503

***** 국립서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과 교수, shyoo@seoultech.ac.kr, 02-970-6802

† 본 연구는 국립기상과학원 주요사업 “기상업무지원기술개발연구(NIMS-2016-3100)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

ABSTRACT

The objective of this study is to assess the capability of meteorological technology in Korea, the United States, Japan, and the United Kingdom as of 2015 and compare them with the previous values for Korea, the United States, and Japan. For the comparison, the indicators and weights for the assessment similar to those used in previous studies are used and Gordon's rating model is applied here to evaluate the indicators and conduct a survey of weather experts. The survey was administered to 200 of experts in meteorology using the Delphi method. More specifically, we investigate four categories of observation, data processing, forecast, and climate. The overall results show that the United Kingdom has the highest capability of meteorological technology among the four countries. With the result of indicator evaluation on this study the United Kingdom has the highest capability of meteorological technologies compared with Korea, the United States, and Japan. The capability of meteorological technology in Korea is 88.5% of the United Kingdom, 89.9% of Japan, and 90.6% of the United States. The countries in order of score on survey evaluation are the United States, the United Kingdom, Japan, and Korea. Through the result of survey evaluation, the level of meteorological technology in Korea was 88.9% of the United States, 91.6% of the United Kingdom, and 92.2% of Japan.

Key Words : Capability of meteorological technology, Gordon model, Delphi method, Indicator evaluation, Survey evaluation

I. 서론

한 국가의 기상기술력은 국민 개인의 생활뿐만 아니라 국가 전체의 경제에도 직접적인 영향을 미친다. 고도의 기상기술력으로 생산된 정확한 기상정보는 개인의 웰-라이프에서부터 다양한 산업부문의 생산량과 매출액 등 경제적인 부분까지도 직접적인 영향을 미치기 때문이다. 게다가 최근에는 이상기후로 인한 기상재해가 늘어나고 이로 인한 피해액도 지속적으로 증가하는 추세에 있다. 2015년 통계청에 따르면 최근 10년간 기상재해로 인한 피해액은 약 6천억원에 이르는 것으로 나타났는데, 2014년의 1인당 국민총소득이 약 3천만원인 것을 감안할 때 2014년까지의 기상재해 피해액의 평균 규모가 작지 않음을 알 수 있다. 이처럼 국가의 기상기술력은 국민의 생명과 재산을 보호하는 데 있어 더욱 그 중요성이 증대되고 있다.

최근 기상과 관련된 기술과 서비스 등의 가치 및 편익추정에 관한 연구가 다수 진행되었다. 김세원 외(2011)는 국가기상기술력이 기상재해의 경감, 국민생활의 편익증진 및 사회·경제의 부가가치 증대에 크게 기여하기 때문에 국가경쟁력 향상에 필수적인 요소라고 언급하였다. 또한 이주석과 유승훈(2013)은 차세대 도시·농림 융합 스마트 기상서비스의 연간 총 편익을 약 500억원으로 추정하였으며, 유승훈 외(2011)는 기상서비스의 경제적 가치를 연간 3550억원으로 추정한다. 도시기상정보서비스의 경제적 편익은 조영상 외(2011)의 연구에 따르면 5년간 가구당 5,963원에 달하는 것으로 나타났다. 한창희 외(2009)는 기온예보의 정확도가 향상될 때 전력수요예측의 정확도 또한 향상되며, 이로 인해 비용절감이 일어날 수 있다고 분석한 바 있다. 이와 같이 질 높은 기상 정보와 서비스를 위한 기상기술력은 사회경제적으로 큰 영향을 미치고 국민의 삶의 질 향상과 국가경쟁력에 매우 중요한 요소이다. 따라서 지속적인 연구와 투자를 통해 정확한 기상기후의 예측정보를 생산하기 위해서는 현재 기상기술력 수준의 위치를 객관적이고 정확하게 파악하는 것이 반드시 꾸준히 선행되어야 한다.

미국, 일본, 유럽 등 선진국에서는 1~4년마다 과학기술분야 평가를 진행하고 있다. 특히 국제경영개발원(IMD, International Institute for Management Development)과 세계경제포럼(WEF, World Economic Forum)에서는 국가경쟁력을 구성하는 요소로 과학기술인프라를 평가하고 있으며, OECD의 과학기술혁신국(DSTI, Directorate for Science, Technology and Innovation)에서는 OECD 30여 개국을 대상으로 2년에 한 번씩 과학기술관련 통계조사 및 국가 간 비교를 진행하고 있으나 기상기술력과 관련된 부분을 세부적으로 나누어 구체적으로 평가하고 있지는 않다. 우리나라에서는 한국과학기술기획평가원(KISTEP, Korea Institute of Science Technology Evaluation and Planning)에서 과학기술 국가평가체계(NES, National Evaluation System)를 확립하였으며, 한국산업기술평가관리원(KEIT, Korea Evaluation Industrial

Technology)에서는 산업기술수준조사를 통해 28개 과학기술분야별로 2년에 한번 씩 기술수준을 평가하고 있다. 그러나 기상정보와 기상기술에 대한 중요성이 날로 증가하고 있음에도 불구하고 국내를 비롯하여 해외에서도 기상기술력 수준을 세부적·주기적으로 평가하고 있지 않으며, 기상선진국과의 비교분석 또한 국내의 서로 다른 기관에서 간헐적으로 이루어지고 있는 실정이다.

본 연구는 한국의 기상기술력 수준을 평가하고자 한다. 김세원 외(2011)는 국가기상기술력의 수준을 평가하기 위해서는 장비·프로그램의 수준을 비롯하여 인력과 정보·지식 등의 수준을 포함하여 분석해야하며, 기상기술력은 기상업무 수행 중 사용되는 모든 기술적 역량을 의미한다고 언급한 바 있다. 그런데 이 기준에 따른 평가를 위해서는 모든 민간분야(대학, 연구소, 사업체 등)를 포함해야 하는데 정량적이고 객관적인 평가를 위한 자료를 구하는 것이 현실적으로 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 한국의 기상청과 미국, 일본, 영국의 기상관련 공공기관(미국: NWS, National Weather Service, 일본: JMA, Japan Meteorological Agency, 영국: Met-Office)을 선정하여 국가별 기상기술력을 평가하고 그 결과를 비교하고자 한다. 또한, 과거 대비 현재의 기상기술력을 파악하기 위하여 국립기상연구소(2010)에서 수행한 선행연구의 결과와 비교·분석하였다. 이를 위해 선행연구와 동일한 평가방법론을 적용하였다. 한편 본 연구에서는 기존 연구와 달리 영국을 추가하여 비교·분석하였다. 영국은 국가 고유의 기상모델을 보유하고 있어 기상기술력 선진국으로서 그 위치를 차지하고 있다.

논문은 다음과 같이 구성된다. 제2절은 기상기술 관련 선행연구사례를 소개하고, 제3절은 기상기술력 평가에 사용된 연구방법론에 대해 설명한다. 제4절은 주요 분석결과를 제시하고, 마지막으로 제5절은 연구결과를 요약하고 시사점을 도출한다.

II. 기존연구사례

기술 평가는 크게 기술의 경제적 가치를 측정하는 기술가치평가와 기술력 평가로 구분할 수 있다(김상운 외, 2006). 기술력이란 특정 목적을 달성하기 위해 필요한 기술적 역량의 크기를 나타내는 상대적 비교 개념으로 비교상대 또는 비교시점이 존재할 때 측정가능하다(한국과학기술기획평가원, 2006). 기술력을 평가하는 방법의 유형으로 지표구성간 연관성과 그 변화를 추적하는데 의미를 가지는 조직기술혁신체제, 기술력 제고 투자의 산업간 혹은 기업간 흐름 구조와 파급효과 등을 측정하는 기술의 효율성 분석, IMD(International Institute for Management Development) 방식을 통한 기술력 측정, 기능변수/기술변수 분석을 통한 기술

력 측정, 델파이 모형을 활용한 기술력 측정, WEF(World Economic Forum) 방식을 통한 기술력 측정 방법 등 다양한 방법이 존재한다. 그러나 국내에서 시행된 많은 선행연구들에서는 대개 델파이 모형을 활용한 기술력 측정 방법이 주를 이루고 있는 실정이며, 주기적으로 이루어지는 KISTEP의 「기술수준평가」와 KEIT의 「산업기술수준조사」 등이 대표적이다. 이는 기술력 또는 기술수준을 조사·분석·평가를 위한 대상의 범위가 방대하기 때문에 현실적으로 연구 진행에 어려움이 있기 때문인 것으로 생각해 볼 수 있다.

한편 오재호 외(1998)는 매년 북한에서 발행하고 있는 「기상과 수문」의 내용을 토대로 분야별 북한의 기상기술력을 평가한 바 있다. 그러나 학술지의 내용만으로 실제 북한에서 사용하고 있는 기상 장비의 수준이나 기상 예측 수준 등에 대한 정량적인 평가를 하기에는 무리가 있었기 때문에 정성적 평가 위주로 진행된 것으로 보인다. 또한 이우성과 류민우(2009)는 기상분야 현업과 학계의 전문가 설문평가를 통하여 북한의 기상기술력을 평가한 바 있다. 관측, 예보, 응용기상분야로 분류하여 세부분야별 기술수준에 대한 평가를 진행하였으며, 평가 이전에 전문가 설문을 통해 자연재해에 대응하기 위한 세부분야별 가중치를 설정하여 남한의 기술수준을 100으로 산정한 후 북한의 기술수준을 평가하였다. 이와 같이 기상기술력을 평가한 이전의 연구는 그 수가 적고, 국제적으로 통용되는 객관적인 평가의 틀이 정해진 바 없으며, 사용 장비 및 기상 예측 모델 등에 대한 정보가 공개되고 있지 않은 부분이 많아 기술력 평가를 위해 기존에 개발된 방법을 차용하거나 전문가 설문에 의지하는 것이 일반적인 평가방법이 되어왔다.

현재 국내에서 한국의 기상기술력과 관련하여 진행된 연구로는 장진규 외(2000)의 ‘기상기술력 종합평가기법 개발에 관한 연구’와 KISTEP(2006)의 ‘기상기술력 수준 종합평가’, 국립기상연구소(2010)의 ‘국가 기상기술력 평가를 위한 조사 분석 연구’가 전부이며, 그마저도 5년에 한번 정도 비정기적으로 평가되고 있다. 또한 평가를 실시한 기관이 달라, 동일한 평가기법으로 지속적으로 이루어져야 하는 기상기술력 평가에 어려움이 있다.

먼저, 장진규 외(2000)의 연구는 평가항목과 항목에 대한 가중치를 설정하고, 기상기술과 관련된 객관적인 실적자료를 이용하여 기상기술력을 평가하였다. 또한 한국, 미국, 일본을 평가대상국으로 선정하였다. 이 연구는 국내에서 처음으로 기상기술력을 평가하기 위하여 기상기술력을 정의하였고, 평가기법을 소개하는 데 큰 의의가 있다고 평가를 받았다(김세원 외, 2011). 이후 KISTEP(2006)은 주관적인 판단이 포함될 가능성이 있는 부분을 최대한 배제하여 기상기술력을 평가하였다. 그리고 장진규 외(2000)의 연구와 마찬가지로 한국, 미국, 일본의 기상기술력을 비교 및 분석하였다. 그러나 두 연구 모두 한정된 기술분야에 대해서만 연구가 이루어졌다는 평가를 받고 있다(김세원 외, 2011). 끝으로 가장 최근에 연구된 국립기상연구소(2010)의

국가기상기술력 평가는 객관적 실적자료를 이용한 지표평가와 전문가 설문평가를 동시에 진행하여 한국·미국·일본의 기상기술력 수준을 비교·평가하였다. 다른 선행연구들과 비교하여 세분화 된 기술에 대한 정량·정성 평가가 함께 진행된 연구로서 세부분야별 기술수준 파악이 가능하다. 정량적인 결과를 얻기 힘든 평가항목에 대해서는 전문가 설문만을 진행하였고, 한국과학기술기획평가원(2006) 연구의 평가항목과 가중치 중 2010년 현재 상황에 맞지 않는 평가항목과 가중치는 삭제 및 수정하여, 앞서 진행된 연구들 중 가장 잘 이루어진 평가라 할 수 있다.

III. 연구방법

1. 평가지표 및 가중치 설정

본 연구는 지표평가와 전문가 설문평가를 통해 한국의 기상기술력을 평가한다. 지표평가는 정량적이고 객관적인 실적자료를 활용하는 데 만약 정량적이고 객관적인 자료 확보가 어려운 평가항목은 전문가 설문평가를 통해 그 수준을 평가한다. 평가지표는 관측, 자료처리, 예보, 기후 등 4개의 복합평가지표로 분류를 하고 이를 9개 테마평가지표로 나누며, 테마평가지표는 다시 21개의 개별평가지표로 분류하여 각각의 가중치를 적용한다. 본 연구에서 적용한 분류방법 및 가중치는 국립기상연구소(2010)의 평가기준과 최대한 동일하게 하고자 하였으며, 이는 과거와 현재의 기술수준을 비교하기 위함이다. 본 평가에서 사용된 평가지표와 지표별 평가방법은 <표 1>과 같다.

<표 1>에 제시된 평가지표는 목적에 따른 기술분류 전개에 따른 것이며, 이는 선행연구(KISTEP, 2006)에서 제시된 분류 방법이다. 관측, 자료처리, 예보, 기후로 구분된 대분류는 대국민 기상서비스 질 향상을 위한 기상기술력 수준 평가라는 목적을 가지고 기상상황이 기상서비스로 완성되는 과정을 통해 구분한 것으로 볼 수 있다. 이후 국립기상연구소(2010)는 상황에 맞게 평가지표를 수정하여 기상기술력은 평가한 바 있다. 연구자의 주관에 따라 평가기준이 달리 적용될 가능성이 있고, 실적자료만으로 그 수준을 평가하는 데 무리가 있다고 판단되는 경우 지표평가에서 제외하여 연구를 진행하였다. 따라서 선행연구 결과와의 원활한 비교를 위해 동일한 방법으로 평가를 진행하되, 선행연구 이후 상당한 시간이 경과한 것을 감안하여 평가지표 및 세부 사항에 대해 각 분야 전문가의 의견을 충분히 반영하여 평가한다. 분야별 전문가의 의견에 따라 몇몇 세부분야 평가지표의 변화가 있었으며, 평가지표와 방법 개선여부는 이후의 절과 <표 2>에 기재하도록 한다.

〈표 1〉 분야별 평가지표 및 지표별 평가방법

복합 평가지표	테마 평가지표	개별 평가지표		평가 방법
관측	기본관측망	시·공간 분해능		지표 / 설문
	원격관측망	기상위성 운영·활용		지표 / 설문
		기상레이더 운영		지표 / 설문
	관측자료 품질	기본 관측자료		설문
고등 관측자료		지표 / 설문		
자료처리	자료동화	자료동화 수준		설문
	예측모델	수치모델 수준		지표 / 설문
	인프라	슈퍼컴 수준		지표 / 설문
예보	예보정확도	단기 (1일)	기온	지표 / 설문
			강수유무	설문
		중기 (+2~7일)	기온	지표 / 설문
			강수유무	설문
		태풍	진로(48시간)	지표 / 설문
			강수량	설문
풍속	설문			
기후	기후예측	기후자료품질 수준		설문
		기후예측모델 수준		설문
		기후예측 수준		설문
	기후변화	지구대기감시 수준		설문
		지구시스템모델개발 수준		설문
		국가표준시나리오 산출 수준		지표 / 설문

2. 평가지표의 평가기준

앞서 제시한 〈표 1〉을 통해 지표평가와 설문평가 대상이 되는 지표를 확인할 수 있다. 먼저 관측분야는 기본관측망의 시·공간 분해능, 원격관측망의 기상위성 운영·활용과 기상레이더 운영 그리고 관측자료 품질의 기본과 고등 관측자료를 평가한다. 여기서 기본관측자료 품질은 객관적 평가가 어려워 설문평가만 실시한다. 자료처리 분야는 자료동화의 자료동화 수준, 예측모델의 수치모델 수준, 인프라의 슈퍼컴 수준으로 분류하고, 자료동화 부문은 전문가 설문평가만 실시한다. 예보분야의 경우 예보정확도를 평가함에 있어, 단기예보와 중기예보로 분류하고 기온 및 강수유무에 대하여 평가한다. 다만 강수유무는 전문가 설문평가만 실시한다. 또한 여름과 가을철에 큰 영향을 미치는 태풍 예보정확도를 함께 평가하는데, 최근

5년간(2010~2014년) 태풍중심위치의 예보오차 평균을 확인하여 평가한다. 여기서 태풍과 함께 수반되는 강수량과 풍속에 대한 예보정확도는 전문가 설문평가만 실시한다. 끝으로 기후분야는 기후예측 부문의 기후예측모델 수준, 기후자료 품질 수준과 기후예측 수준을 평가하고, 기후변화 부문의 국가표준시나리오 산출 수준, 지구대기감시 수준과 지구시스템 모델 개발 수준에 대하여 평가한다. 국가표준시나리오 산출 수준의 경우 선행연구(국립기상연구소, 2010)에서는 ‘WCRP(World Climate Research Programme) CMIP(Coupled Models Intercomparison Project) multi-model dataset’의 유효도를 적용하였으나, IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 AR5(Assessment Report 5, 2014)에서는 모델의 유효성을 평가하는 기준이 달라짐에 따라 본 평가에서도 기준을 변경하여 평가를 진행한다. 개별평가지표의 평가기준과 2010년의 연구에서 사용된 평가지표와 본 연구에서 사용된 평가지표의 차이점은 아래의 <표 2>와 같다.

<표 2> 개별평가지표의 평가기준 및 선행연구와의 차이점

분야	개별평가지표	평가기준	차이점	
관측	시·공간 분해능	공간/시간규모에 따른 기상현상 관측 능력	점수환산 방법 개선	
	기상위성	자체 기상위성 보유 여부, 활용 자료의 종류·수준, 활용 기상 위성 수	동일	
	기상 레이더	관측범위	국토면적 대비 관측 유효면적(%)	동일
		고성능 레이더 활용현황	도플러 레이더 운영율(%)	동일
		국산화율	레이더 국산화율(%)	동일
고등 관측자료	품질관리 과정에 제공하는 관측자료 수준(관측자료 종류의 수를 기준)에 대한 상대적 비교·분석	동일		
자료 처리	수치모델 수준	5일 후 500hPa 예측오차(RMSE) 분류표에 의한 평가	동일	
	슈퍼컴 수준	기상서비스 전용 슈퍼컴 성능(연산능력 기준)에 대한 상대적 비교·분석	동일	
예보	단기·중기 기온 (1일·2~7일)	최고기온 평균절대오차(MAE)와 최저기온 MAE의 기하평균 분류표에 의한 평가	동일	
	태풍 진로(48시간)	태풍중심 위치의 예보 오차 평균 상대적 비교·분석	동일	
기후	기후예측모델 수준	기후예측모델의 기온 및 강수량 Hit rate(%)분류표에 의한 평가	지표평가 삭제	
	국가표준시나리오 산출 수준	IPCC AR5에 참여한 기후예측모델 개발단계에 대한 상대적 비교·분석	평가기준 개선	

3. 평가모형

기술은 그 불확실성으로 인하여 평가하기가 쉽지 않으며, 그 때문에 이를 평가하기 위한 다양한 평가방법이 개발되어 왔다. 특히 최근에는 특허를 평가하거나 최고 기술수준과 비교하는 방법과 점수제 모형이 많이 활용되고 있다. 특허를 활용한 평가는 특허의 내용과 양 또는 관련 논문의 양을 기준으로 평가하는 연구가 진행된 바 있다(구영덕 외, 2012; 한국보건산업진흥원, 2011; 박현우·김기일, 2007). 국가과학기술심의회(2013)는 10대 기술분야 120개 국가전략기술의 주요 5개국 간 기술수준 및 격차 비교를 위해 논문·특허 점유율, 논문·특허 영향력 지수 등을 이용하였다. 그러나 기상기술력의 경우 특허와 관련 논문의 수가 예보정확도, 기후변화 부문등의 기상기술력 수준을 충분히 반영한다고 보기 힘들기 때문에 본 연구는 이를 적용하지 않는다. 또한 여러 국가들과의 기술수준을 비교할 때, 적용되는 '세계최고기술 수준대비(100기준) 한국의 수준'이라는 표현은 연도별로 최고기술 수준이 변화하기 때문에 평가 점수로 연도별 기술수준 변화 추이를 비교하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 최고기술수준(100점)과 그렇지 않은 수준의 차이가 어떠한 것을 의미하는지에 대한 논의가 필요하다는 점이 존재한다(박병무, 2007). 점수제 모형의 경우 여러 가지 대안을 평가하거나 우선순위를 매길 때 사용되고, 여러 기술모수의 조합에 따라 종합적인 성능 및 수준을 측정할 수 있다. 점수제 모형은 기술수준 평가를 위한 각각의 요인이 그 중요도에 따라 가중치를 가지고 하나의 수준이라도 0으로 계산된다면 전체기술수준이 0으로 계산되기도 하는 가장 고전적이고 일반적인 Martino 모형과 모든 기술은 장기적으로 이론적인 상한선을 가지고 있으며 성장곡선을 따라 발전한다는 가정을 기본으로 하는 Gordon 모형이 있다(KISTEP, 2008). Gordon 모형을 사용하기 위해서는 평가 대상 기술의 달성 목표와 측정방법이 명시되어야 하며, 기술수준 평가를 위해 아래의 식 (1)과 같은 계산식이 사용된다(KISTEP, 2010; Gordon and Munson, 1981).

$$\text{기술수준} = 100 \frac{C_i}{C^*} \left(\frac{X_{1i}}{X_{1i}^*} K_1 + \frac{X_{2i}}{X_{2i}^*} K_2 + \dots + \frac{X_{Ni}}{X_{Ni}^*} K_N \right) \quad (1)$$

- X_i : X의 i번째 요인
- X_i^* : X를 표준화하기 위한 기준값
- C : 0이 아닌 값을 가져야 하는 가장 중요한 요인
- K : 각 요인들에 대한 상대적 중요도를 반영한 가중치

선행연구(KISTEP, 2006; 국립기상연구소, 2010)에서는 기상기술력의 목표수준을 정하고 기술별 평가기준을 세부적으로 나누어 평가의 기준이 되는 점수표를 작성한 바 있다. 따라서 본 연구도 앞서 언급한 바와 같이 동일한 평가기준을 적용하고, 선행연구의 결과와 원활한 비교를 위해 선행연구와 같은 Gordon의 점수제 모형을 적용하여 평가한다. Gordon의 점수제 평가모형은 아래의 식 (2)와 같다.

$$M_i = \frac{28}{100} O_i + \frac{20}{100} P_i + \frac{34}{100} F_i + \frac{18}{100} C_i \quad (2)$$

- M_i : 평가대상국가의 종합평가점수
- O_i : 평가대상국가의 관측분야 평가점수
- P_i : 평가대상국가의 자료처리분야 평가점수
- F_i : 평가대상국가의 예보분야 평가점수
- C_i : 평가대상국가의 기후분야 평가점수

4. 전문가 설문평가

기상기술력 평가에 있어서 기술력의 발전에 관해 가장 잘 알고 있는 관련 전문가들의 의견을 조사하여 반영하는 것은 필수적이라 할 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 전문가의 의견을 조사하여 합의를 구하는 데 가장 많이 사용되는 델파이 기법을 적용하고, 관측/자료처리/예보/기후 등 4개 분야의 기상전문가(기상청, 연구분야, 학계 등)를 대상으로 설문조사를 실시한다.

델파이 기법은 1960년대 미국 Rand 연구소의 Helmer, Dalkey 등이 공동연구를 통해 개발한 방법론으로써 전문가의 직관적인 판단을 이용한 기법을 말한다. 이 기법의 핵심은 특정한 전문가그룹이 제시된 주제에 대한 합의를 체계적으로 도출하는 데 있다(Crisp et al., 1997). 일반적으로 미래에 대한 예측기법의 한 가지로 널리 알려져 있으나 실제로는 전문가그룹을 활용하여 합의를 도출해내는 경우에 어떤 목적으로도 이용될 수 있는 기법이다. 델파이 기법은 설문문에 참여하는 전문가의 개인정보를 제공하지 않으므로 익명성이 보장된다. 또한 두차례에 걸쳐 설문을 진행하는데, 1차 설문조사 후 도출된 결과를 2차 설문조사에서 제시받게 되므로 전문가는 1차 설문조사 시 제시한 자신의 의견을 수정할 수 있다. 그리고 의견을 수정하는 과정에서 서로의 견해를 교환할 수 있게 됨으로써 설문 참여자들이 ‘목적의 달성’ 또는 ‘합의를 위한 합의’가 아닌 설문 자체에 집중할 수 있다는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서도 두차례에 걸쳐 전문가 설문조사를 실시하며, 1차 조사에서 기상전문가

들이 판단하는 한국 기상기술력 수준과 상대적 위치를 분야별로 평가한다. 앞서 언급했듯이 2차 설문조사에서는 1차 조사의 결과를 제시하고 그 결과가 적절한지 여부를 평가하는데, 만약 평가결과가 적절하지 않다고 생각되면 그 의견을 수정하여 평가한다.

IV. 연구결과

1. 관측분야

1) 지표평가

관측분야는 기본관측망, 원격관측망, 관측자료 품질의 3개 부문으로 나누고 원격관측망을 또다시 기상위성(보유여부, 활용자료 종류·수준, 활용기상위성 수), 기상레이더(레이더관측범위, 고성능레이더 활용 현황, 국산화율)로 나누어 평가하였다. 기본관측망의 '시·공간 분해능'은 공간 및 시간규모에 따른 기상현상 관측능력을 평가한 것으로서 국가 기상관측망의 해상도로 평가하였다. 이는 선행연구(국립기상과학원, 2010)에서 사용한 평가기준과 동일하지만, 본 연구에서는 시간특성과 공간특성을 구분하여 둘 다 만족할 경우와 하나만 만족할 경우에 서로 다른 배점을 두고 평가하였다. 시·공간 분해능 평가를 위한 분류와 배점표는 <표 3>에 제시하였다.

<표 3> 시·공간 분해능 평가를 위한 분류 및 배점표

배점		분류 정의	특성	
특성 둘 다 만족	특성 하나만 만족		시간(a)	공간(b, km)
100	95	Micro γ, β, α	$a < 1$ 시간	$b \leq 2$
90	85	Meso γ	$a = 1$ 시간	$2 < b \leq 20$
80	75	Meso β	1 시간 $< a < 1$ 일	$20 < b \leq 200$
70	65	Meso α	1 일 $\leq a < 2$ 일	$200 < b \leq 2,000$
60	55	Macro β, α	$a \geq 2$ 일	$b > 2,000$

* 분류정의의 Micro, Meso, Macro는 기상관측망 해상도의 시·공간 규모임

원격관측망의 기상위성 운영·활용은 기상위성 보유여부와 활용자료의 종류 및 수준, 활용하고 있는 기상위성의 개수로 나누어 평가하였으며 평가기준의 분류 및 배점기준은 <표 4>와 같다.

〈표 4〉 기상위성 운영 및 활용수준 평가를 위한 분류 및 배점표

평가기준	배점기준	배점
기상위성 보유 여부 (50점)	미보유	0
	보유	50
활용자료의 종류·수준 (30점)	Visual(V.)	10
	V. + Infrared(I.)	20
	V. + I. + Microwave(M.)	30
활용기상위성의 수 (20점)	1기 ~ 2기	10
	3기 이상	20
총점		100

* Visual(V.): 가시광선, Infrared(I.): 적외선, Microwave(M.): 마이크로파(극초단파)

기상레이더 운영은 관측범위, 고성능레이더 활용 현황, 국산화율로 평가하고자 하였으며, 평가기준은 국토면적대비 관측 유효면적(%), 도플러레이더 운영율(%), 레이더 국산화율(%)로 각각 평가하였다. 또한 고등관측자료는 최고수준의 국가를 100점으로 두고, 나머지 국가의 수준을 상대적으로 평가하였다.

관측분야의 가중치는 아래 식 (3)과 같다. 국가별 관측분야 종합점수 및 부분별 점수는 〈표 5〉와 같다.

$$O_i = \frac{35}{100} O_{1i} + \frac{33}{100} \cdot \left(\frac{47}{100} O_{2i} + \frac{53}{100} O_{3i} \right) + \frac{32}{100} O_{4i} \quad (3)$$

- O_i : 평가대상국가의 관측분야 종합점수
- O_{1i} : 평가대상국가의 기본관측망의 시·공간 분해능 평가점수
- O_{2i} : 평가대상국가의 원격관측망의 기상위성 운영·활용 평가점수
- O_{3i} : 평가대상국가의 원격관측망의 기상레이더 운영 평가점수
- O_{4i} : 평가대상국가의 관측자료 품질의 고등관측자료 평가점수

기상레이더 운영은 미국을 제외한 한국과 일본의 점수가 상승한 것으로 나타났으나, 한국의 경우 미국, 일본, 영국의 절반에 가까운 점수를 획득한 것을 알 수 있다. 이는 한국의 기상레이더 국산화율 점수가 0으로 평가된 것이 그 원인인 것으로 나타났다.

고등관측자료 품질은 선행연구(국립기상연구소, 2010)에서 만점을 받은 미국은 과거에 비해 평가 점수가 하락하였다. 고등관측자료 품질 평가는 최고 기술을 가지고 있는 국가를 기준으로

〈표 5〉 관측분야 지표평가 종합결과

평가지표 (가중치)	평가 년도	한국	미국	일본	영국
시·공간 분해능 (0.350)	2015	33.3	33.3	33.3	33.3
	2010	31.5	31.5	31.5	-
	증감	△ 1.8	△1.8	△1.8	-
기상위성 운영·활용 (0.155)	2015	15.5	15.5	15.5	15.5
	2010	15.5	15.5	15.5	-
	증감	0.0	0.0	0.0	-
기상레이더 운영 (0.175)	2015	9.6	17.2	17.5	17.5
	2010	8.8	17.2	13.9	-
	증감	△0.8	0.0	△3.6	-
고등관측자료 품질 (0.320)	2015	24.2	30.0	29.1	32.0
	2010	10.3	32.0	20.7	-
	증감	△13.9	▽2.0	△8.4	-
합계 (1.000)	2015	82.6	96.0	95.4	98.3
	2010	66.1	96.2	81.6	-
	증감	△16.5	▽0.2	△13.8	-

* 2010년 평가점수는 선행연구(국립기상연구소, 2010) 결과이며, 2010년 평가결과와 비교하여 2015년 연구결과 점수의 변화는 '증감'에 표기

* △ 2010년 연구결과(국립기상연구소, 2010) 대비 점수 증가 정도

* ▽ 2010년 연구결과(국립기상연구소, 2010) 대비 점수 감소 정도

상대평가를 하도록 설계하였다. 따라서 이는 본 연구에서 평가대상국가로 기상선진국인 영국이 추가되고 영국이 최고기술을 가지고 있는 것으로 평가되면서 미국의 점수가 하락한 것으로 판단된다. 미국을 제외한 한국과 일본은 과거연구에 비해 평가 점수가 상승하였다. 단, 기상위성 운영·활용은 한국, 미국, 일본 모두 선행연구(국립기상연구소, 2010)에서 이미 목표기술수준에 도달한 것으로 나타났으므로 향후 연구에서는 새로운 지표 또는 목표기술수준을 설정하여 평가할 필요가 있다.

2) 설문평가

관측분야 설문평가는 '시·공간 분해능', '기상위성 운영 활용', '기상레이더 운영', '기본관측자료 품질', '고등관측자료 품질'로 나누어 진행하였다. 설문은 관측분야 전문가만 응답을 하도록 설계하였으며, 설문에 관한 충분한 이해를 돕기 위해 설문 전에 자세한 예시를 먼저 제시하여 이를 숙지한 후 설문을 진행할 수 있도록 하였다. 설문결과는 〈표 6〉과 같다.

〈표 6〉 관측분야 설문평가 종합결과

평가지표 (가중치)	평가 년도	한국	미국	일본	영국
시·공간 분해능 (0.350)	2015	35	34.2	34.7	33.7
	2010	34.4	33.8	35.0	-
	증감	△0.6	△0.4	▽0.3	-
기상위성 운영·활용 (0.155)	2015	12.9	15.5	14.1	14.7
	2010	13.3	15.5	14.8	-
	증감	▽0.4	0.0	▽0.7	-
기상레이더 운영 (0.175)	2015	14.7	17.5	16.4	16.5
	2010	15.3	17.5	17.5	-
	증감	▽0.6	0.0	▽1.1	-
기본관측자료 품질 (0.160)	2015	14.8	16.0	15.9	15.6
	2010	15.2	16.0	16.0	-
	증감	▽0.4	0.0	▽0.1	-
고등관측자료 품질 (0.160)	2015	14.1	16.0	15.1	15.2
	2010	14.3	16.0	15.6	-
	증감	▽0.2	0.0	▽0.5	-
합계 (1.000)	2015	91.5	99.2	96.2	95.7
	2010	92.5	98.8	98.9	-
	증감	▽1.0	△0.4	▽2.7	-

* 2010년 평가점수는 선행연구(국립기상연구소, 2010) 결과이며, 2010년 평가결과와 비교하여 2015년 연구결과 점수의 변화는 '증감'에 표기

* △ 2010년 연구결과(국립기상연구소, 2010) 대비 점수 증가 정도

* ▽ 2010년 연구결과(국립기상연구소, 2010) 대비 점수 감소 정도

대부분의 전문가들은 최고 관측기술 보유국으로 4개국 중 미국을 선택하였고, 다음으로 일본, 영국, 한국 순으로 평가하였다. 영국의 경우 지표평가에서는 미국보다 우위에 있는 것으로 평가되었으나, 전문가들은 미국보다 낮게 평가하다. 한편, 한국의 관측기술은 가장 우위에 있는 것으로 평가된 미국의 92.2%, 일본의 95.1%, 영국의 95.6% 수준인 것으로 평가되었다.

2. 자료처리분야

1) 지표평가

자료처리분야는 총 3가지 테마평가지표(자료동화, 예측모델, 인프라)를 기준으로 평가하였으며, 자료동화수준은 선행연구(국립기상연구소, 2010)와 동일하게 전문가 설문평가만을 실시하

었다. 예측모델은 수치모델의 수준으로 5일 후의 500hPa 고도의 예측오차(RMSE, Root Mean Square Error)의 분류표에 의한 평가를 하였고, 인프라 부분은 기상서비스 전용 슈퍼컴퓨터 성능(연산능력 기준)에 대한 분석을 실시하였다. 수치모델 수준의 평가기준 및 배점은 <표 7> 과 같으며 기상서비스전용 슈퍼컴퓨터 성능에 대한 배점표는 <표 8>과 같다.

<표 7> 수치모델수준 평가기준: 수치모델 예측오차(RMSE) 평가기준에 따른 배점

예측오차	GPM ≤ 30	30 < GPM ≤ 50	50 < GPM ≤ 60	60 < GPM ≤ 70	GPM > 70
배점	100	90	80	70	60

* RMSE(Root Mean Square Error), 평균제곱근오차
 * GPM(Global Precipitation Measurement), 전지구 강수량측위성

<표 8> 기상서비스전용 슈퍼컴퓨터 성능 평가기준: 연산능력에 따른 배점

수행능력	P ≥ 1,000	1,000 > P ≥ 500	500 > P ≥ 100	100 > P ≥ 50	P < 500
배점	100	90	80	70	60

* P(Performance), RMax 기준 1,000 TFlops/s를 기술달성 목표로 설정
 * 출처: www.top500.com

자료처리분야의 세부분야별 가중치 또한 선행연구결과(국립기상연구소, 2010)와 원활한 비교분석을 위해 동일하게 부문별 가중치를 부여하여 종합점수를 산정하였다. 가중치 및 종합점수 산정식은 식 (4)와 같다.

$$P_i = \frac{75}{100}P_{1i} + \frac{25}{100}P_{2i} \tag{4}$$

- P_i : 평가대상국가의 자료처리분야 종합점수
- P_{1i} : 평가대상국가의 수치모델수준 평가점수
- P_{2i} : 평가대상국가의 슈퍼컴수준 평가점수

식 (4)에 제시한 각 부문별 가중치를 대입하여 계산한 국가별 자료처리분야의 종합점수 및 부문별 점수는 <표 9>와 같다.

자료처리분야에서 수치모델 수준은 한국이 선행연구(국립기상연구소, 2010)에서 52.5점으로 가장 낮았던 것에 반해 이번 평가에서는 미국과 일본의 수준을 따라잡은 것으로 나타났다. 기상 서비스 전용 슈퍼컴퓨터의 성능은 top500(15 November 2015)의 자료를 이용하여 평가하였으

〈표 9〉 자료처리분야 지표평가 종합결과

평가지표 (가중치)	평가 년도	한국	미국	일본	영국
수치모델수준 (0.750)	2015	67.5	67.5	67.5	67.5
	2010	52.5	67.5	67.5	-
	증감	△15.0	0.0	0.0	-
슈퍼컴수준 (0.250)	2015	25.0	22.5	22.5	22.5
	2010	25.0	2.8	2.7	-
	증감	0.0	△19.7	△19.8	-
합계 (1.000)	2015	92.5	90.0	90.0	90.0
	2010	77.5	70.3	70.2	-
	증감	△15.0	△19.7	△19.8	-

* 2010년 평가점수는 선행연구(국립기상연구소, 2010) 결과이며, 2010년 평가결과와 비교하여 2015년 연구결과 점수의 변화는 ‘증감’에 표기

* △ 2010년 연구결과(국립기상연구소, 2010) 대비 점수 증가 정도

* ▽ 2010년 연구결과(국립기상연구소, 2010) 대비 점수 감소 정도

며 슈퍼컴 3호기(해담)의 사용이 종료되면서 일시적으로 연산능력이 다소 저하되었으나 2015년 하반기에 슈퍼컴 4호기 “누리”와 “미리”가 도입되면서 평가대상국 중 가장 높은 연산능력을 가진 것으로 평가되었다. 한국, 미국, 일본 모두 선행연구(국립기상연구소, 2010)결과와 비교했을 때 자료처리분야의 종합점수는 상승한 것으로 나타났으며, 이번 연구에서 처음으로 평가한 영국은 슈퍼컴퓨터의 연산능력에서 한국보다 다소 낮은 점수를 받아 미국, 일본과 동일한 점수를 기록하였다.

2) 설문평가

자료처리분야의 설문평가는 ‘자료동화수준’, ‘수치모델수준’, ‘슈퍼컴수준’으로 구분하여 진행하였다. 설문은 관측분야와 마찬가지로 자료처리분야의 전문가만 응답을 하도록 설계하였으며, 설문응답의 예시를 먼저 제시해주고 이를 숙지한 뒤 평가를 실시할 수 있도록 하였다. 자료처리분야의 설문평가 결과는 〈표 10〉과 같다.

전문가들은 ‘자료동화수준’, ‘수치모델수준’, ‘슈퍼컴수준’ 모두 미국이 가장 높은 기술을 보유하고 있는 것으로 평가하였으며 그 다음으로 영국, 일본, 한국 순으로 평가하였다. 한국의 자료처리분야 기술수준은 지표평가보다 낮게 평가되었으며, 최고 기술보유국으로 평가한 미국의 82.3%, 영국의 87.1%, 일본의 90.2% 수준인 것으로 나타났다.

〈표 10〉 자료처리분야 설문평가 종합결과

평가지표 (가중치)	평가 년도	한국	미국	일본	영국
자료동화수준 (0.320)	2015	26.6	32.0	29.2	30.6
	2010	27.9	32.0	31.0	-
	증감	▽1.3	0.0	▽1.8	-
수치모델수준 (0.430)	2015	35.3	43.0	39.7	41.4
	2010	37.8	43.0	42.2	-
	증감	▽2.5	0.0	▽2.5	-
슈퍼컴수준 (0.250)	2015	20.5	25.0	22.3	22.5
	2010	23.4	25.0	24.3	-
	증감	▽2.9	0.0	▽2.0	-
합계 (1.000)	2015	82.3	100.0	91.2	94.5
	2010	89.1	100.0	97.5	-
	증감	▽6.8	0.0	▽6.3	-

* 2010년 평가점수는 선행연구(국립기상연구소, 2010) 결과이며, 2010년 평가결과와 비교하여 2015년 연구결과 점수의 변화는 '증감'에 표기

* △ 2010년 연구결과(국립기상연구소, 2010) 대비 점수 증가 정도

* ▽ 2010년 연구결과(국립기상연구소, 2010) 대비 점수 감소 정도

3. 예보분야

1) 지표평가

예보분야는 예보정확도를 3가지 개별평가지표(단기 기온, 중기 기온, 태풍)로 구분하여 평가하였다. 단기는 일일 예보를, 중기는 2~7일 예보를 그 기준으로 하였으며, 최고기온 평균절대 오차(MAE, Mean of Absolute Error)와 최저기온 MAE의 기하평균 분류표를 이용하여 평가하였다. 태풍은 태풍중심위치의 예보(48시간)오차의 평균에 대한 상대적 비교분석을 하였다. 단기 강수예보와 중기 강수예보, 태풍의 풍속·강수량예보는 선행연구(국립기상연구소, 2010)와 동일하게 전문가 설문평가만을 실시하였다. 예보분야의 평가모형은 식 (5)와 같다.

$$F_i = \frac{42}{100}F_{1i} + \frac{26}{100}F_{2i} + \frac{32}{100}F_{3i} \quad (5)$$

- F_i : 평가대상국가의 예보분야 종합점수
- F_{1i} : 평가대상국가의 단기 기온 예보정확도 평가점수
- F_{2i} : 평가대상국가의 중기 기온 예보정확도 평가점수
- F_{3i} : 평가대상국가의 태풍진로 예보정확도 평가점수

가중치를 대입하여 계산한 국가별 예보분야 종합점수 및 부분별 점수는 <표 11>과 같다.

<표 11> 예보분야 지표평가 종합결과

평가지표 (가중치)	평가 년도	한국	미국	일본	영국
단기 기온 예보정확도 (0.420)	2015	37.8	37.8	37.8	-
	2010	37.8	37.8	37.8	-
	증감	0.0	0.0	0.0	-
중기 기온 예보정확도 (0.260)	2015	23.4	23.4	23.4	-
	2010	23.4	20.8	23.4	-
	증감	0.0	△2.6	0.0	-
태풍진로 예보정확도 (0.320)	2015	29.2	32.0	27.8	-
	2010	31.1	30.9	32.0	-
	증감	▽1.9	△1.1	▽4.2	-
합계 (1.000)	2015	90.4	93.2	89.0	-
	2010	92.3	89.5	93.2	-
	증감	▽1.9	△3.7	▽4.2	-

* 2010년 평가점수는 선행연구(국립기상연구소, 2010) 결과이며, 2010년 평가결과와 비교하여 2015년 연구결과 점수의 변화는 '증감'에 표기

* △ 2010년 연구결과(국립기상연구소, 2010) 대비 점수 증가 정도

* ▽ 2010년 연구결과(국립기상연구소, 2010) 대비 점수 감소 정도

영국 기상청의 경우 한국, 미국, 일본과는 다른 기준의 예보정확도 관련 지표를 사용하고 있기 때문에 지표평가에서는 제외하고 설문평가만을 진행하였다. 한국과 미국, 일본은 기온 예보정확도 부분에서는 선행연구(국립기상연구소, 2010)와 동일한 점수를 보였다. 그러나 태풍진로 예보정확도 부분에서 한국과 일본은 점수가 하락한 반면 미국은 점수가 상승하여 미국이 예보정확도 부문에서 가장 높은 점수를 받았고, 그 뒤로 한국, 일본 순으로 평가되었다. 태풍진로 예보정확도의 경우 태풍중심위치의 예보오차 평균에 대해 국가별 상대평가를 하는 것으로 설계가 되어있기 때문에 한국과 일본의 점수가 하락한 것으로 나타났으나, 세 국가 모두 태풍진로 예보 오차평균이 대폭 개선(한국: 225km→177km, 미국: 228km→163km, 일본: 221km→184km)되어 기술수준이 하락한 것으로 보기 어렵다.

2) 설문평가

예보분야 설문평가는 '단기 기온 예보정확도', '단기 강수유무 예보정확도', '중기 기온 예보정확도', '중기 강수유무 예보정확도', '태풍풍속 예보정확도', '태풍강수량 예보정확도', '태풍진로 예보정확도'로 나누어 진행하였다. 설문은 예보분야 전문가만 응답을 하도록 설계하였으며,

설문이 이루어지기 전, 설문방법에 대한 예시를 제시하고 이를 숙지한 후 설문을 진행할 수 있도록 하였다. 설문결과는 <표 12>와 같다.

<표 12> 예보분야 설문평가 종합결과

평가지표 (가중치)		평가 년도	한국	미국	일본	영국
단기 예보정확도	기온 (0.180)	2015	17.6	17.5	17.9	18.0
		2010	17.9	18.0	17.9	-
		증감	▽0.3	▽0.5	0.0	-
	강수유무 (0.240)	2015	22.6	23.4	23.3	24.0
		2010	22.9	23.8	24.0	-
		증감	▽0.3	▽0.4	▽0.7	-
중기 예보정확도	기온 (0.130)	2015	12.9	12.9	13.0	12.9
		2010	12.1	12.9	13.0	-
		증감	△0.8	0.0	0.0	-
	강수유무 (0.130)	2015	12.2	12.6	13.0	12.6
		2010	11.7	12.9	13.0	-
		증감	△0.5	▽0.3	0.0	-
태풍 예보정확도	풍속 (0.106)	2015	9.9	10.2	10.6	10.2
		2010	9.7	10.6	10.6	-
		증감	△0.2	▽0.4	0.0	-
	강수량 (0.107)	2015	10.1	10.5	10.3	10.7
		2010	9.6	10.6	10.7	-
		증감	△0.5	▽0.1	▽0.4	-
	진로 (0.107)	2015	10.3	10.5	10.7	9.9
		2010	9.7	10.6	10.7	-
		증감	△0.6	▽0.1	0.0	-
합계 (1,000)		2015	95.6	97.6	98.8	98.3
		2010	93.6	99.4	99.9	-
		증감	△2.0	▽1.8	▽1.1	-

* 2010년 평가점수는 선행연구(국립기상연구소, 2010) 결과이며, 2010년 평가결과와 비교하여 2015년 연구결과 점수의 변화는 '증감'에 표기

* △ 2010년 연구결과(국립기상연구소, 2010) 대비 점수 증가 정도

* ▽ 2010년 연구결과(국립기상연구소, 2010) 대비 점수 감소 정도

전문가들은 예보분야의 설문에서 일본을 가장 우수한 기술력을 보유하고 있는 것으로 평가하였으며, 그 다음으로 영국, 미국, 한국 순으로 평가하였다. 한국은 '중기 기온 예보정확도', '중기 강수유무 예보정확도', '태풍풍속 예보정확도', '태풍강수량 예보정확도'에서 선행연구(국

립기상연구소, 2010)보다 다소 상승한 점수를 보였으며, 전문가들은 한국의 예보정확도 부문을 지표평가보다 낮게 평가하였다.

4. 기후분야

1) 지표평가

기후분야는 지표평가에서 국가표준시나리오 산출수준만을 평가하였다. 선행연구(국립기상연구소, 2010)에서는 기후예측모델수준도 지표평가에 포함하였으나, 기후예측모델수준의 평가기준인 “기후예측모델의 기온 및 강수량 Hit rate 분류표에 의한 평가” 중 ‘기온 및 강수량 Hit rate’는 비공개 정보이므로 이 부분은 설문평가만을 진행하였다. 국가표준시나리오 산출수준은 선행연구(국립기상연구소, 2010)에서는 IPCC의 AR4(IPCC, 2007)에 따라서 국가표준시나리오 종류, 해상도별 산출실적, 과거재현검증평가 결과 등을 기준으로 평가하였다. 그러나 가장 최근에 발간된 AR5(IPCC, 2014)에서 발표한 바에 따르면 기존의 선행연구(국립기상연구소, 2010)에서 사용한 지표와 다른 CMIP5에 제공하는 각국의 모델 지표 개수로 상대평가를 하였다. 각국의 기후변화예측모델의 개발단계는 <표 13>과 같다.

<표 13> 한국, 미국, 일본, 영국의 기후변화예측모델 개발 단계

지표 국가	Atomos	Land Surface	Ocean	Sea-Ice	Aerosol	Atomos Chem	Land Carbon	Ocean BGC
한국	○	○	○	○	○	×	×	×
미국	○	○	○	○	○	○	○	×
일본	○	○	○	○	○	○	○	○
영국	○	○	○	○	○	○	○	○

한국에서 개발한 기후변화예측모델은 총 8개 부문 중 5개 부문의 개발이 완료된 것으로 나타났다. 미국은 7개 부문이 완료된 것으로 나타났다. 일본과 영국은 8개 부문 모두 개발되었으며, 이에 일본과 영국을 100점으로 산정하고 상대평가를 진행하였다. 한국의 경우 선행연구(국립기상연구소, 2010)를 진행했을 당시 자체적인 기후변화예측모델을 구축하고 있지 않았으며 독일과 공동으로 모델을 구축하고 있었다. 그러나 이번 평가에서는 자체모델을 구축함으로써 국가표준시나리오 산출수준에서 많은 발전을 이루었다고 평가할 수 있다. 각국의 기후변화예측 모델 개발단계에 따른 기후분야 점수는 <표 14>와 같다.

〈표 14〉 기후분야 설문평가 종합결과

평가지표(가중치)	평가년도	한국	미국	일본	영국
국가표준시나리오 산출수준(1,000)	2015	62.5	87.5	100	100

* 선행연구(국립기상연구소, 2010)와 가중치 및 평가 기준이 다르므로 단순비교 불가능

기후분야는 선행연구(국립기상연구소, 2010)와 다른 평가기준을 선정하여 동등한 기준의 평가결과가 아니기 때문에 선행연구 결과는 제시하지 않았다.

2) 설문평가

기후분야 설문평가는 총 6개 지표로 나누어 실시하였다. 설문지는 기후분야 전문가만 응답을

〈표 15〉 기후분야 설문평가 종합결과

평가지표 (가중치)	평가 년도	한국	미국	일본	영국
기후자료품질 수준 (0,170)	2015	12.5	17.0	16.0	15.0
	2010	14.8	17.0	16.3	-
	증감	▽2.3	0.0	▽0.3	-
기후예측모델 수준 (0,180)	2015	13.7	18.0	16.5	17.5
	2010	15.3	18.0	17.2	-
	증감	▽1.6	0.0	▽0.7	-
기후예측 수준 (0,170)	2015	12.8	17.0	15.8	16.1
	2010	14.9	17.0	16.3	-
	증감	▽2.1	0.0	▽0.5	-
지구대기감시 수준 (0,160)	2015	12.0	16.0	15.2	14.4
	2010	13.9	16.0	15.3	-
	증감	▽1.9	0.0	▽0.1	-
지구시스템모델개발 수준 (0,160)	2015	10.7	16.0	14.2	15.3
	2010	13.0	16.0	15.2	-
	증감	▽2.3	0.0	▽1.0	-
국가표준시나리오산출 수준 (0,160)	2015	12.6	16.0	14.9	15.5
	2010	14.0	16.0	15.3	-
	증감	▽1.4	0.0	▽0.4	-
합계	2015	74.3	100.0	92.6	93.8
	2010	86.0	100.0	95.6	-
	증감	▽11.7	0.0	▽3.0	-

* 2010년 평가점수는 선행연구(국립기상연구소, 2010) 결과이며, 2010년 평가결과와 비교하여 2015년 연구결과 점수의 변화는 '증감'에 표기

* △ 2010년 연구결과(국립기상연구소, 2010) 대비 점수 증가 정도

* ▽ 2010년 연구결과(국립기상연구소, 2010) 대비 점수 감소 정도

하도록 설계하였으며, 주어진 설문응답 예시를 숙지한 뒤 평가를 진행하도록 하였다. 설문평가 결과는 <표 15>와 같다.

전문가들은 선행연구(국립기상연구소, 2010) 결과와 마찬가지로 미국을 최고 기술력 보유 국가로 평가하였으며, 미국은 모든 지표에서 만점으로 평가되었다. 한국과 일본은 이전의 연구에 비해 다소 점수가 하락한 것으로 나타났으며, 이는 기상선진국인 영국이 평가대상으로 새롭게 추가되면서 상대적으로 일본과 한국의 점수가 하락한 것으로 예상된다. 한국은 미국의 74.3%, 영국의 79.2%, 일본의 80.1% 수준에 달하는 것으로 평가되었다.

5. 종합

선행연구(국립기상연구소, 2010)와의 비교분석을 위해 가능한 동일한 지표를 이용하여 평가를 진행하였다. 지표평가가 불가능한 경우에는 설문평가만을 진행하였으며, 선행연구(국립기상연구소, 2010)에서 사용한 지표가 현재상황과 맞지 않을 경우에 한해 지표를 수정하여 평가를 진행하였다. 지표평가와 설문평가의 종합결과는 <표 16>과 같다.

<표 16> 국가별 지표평가 및 설문평가 종합결과

복합평가지표 (가중치)	평가 년도	지표평가				설문평가			
		한국	미국	일본	영국	한국	미국	일본	영국
관측 (0.28)	2015	23.1	26.9	26.7	27.5	25.6	27.8	26.9	26.8
	2010	18.5	26.9	22.8	-	25.9	27.7	27.7	-
	증감	△4.6	0.0	△3.9		▽0.3	△0.1	▽0.8	-
자료처리 (0.20)	2015	18.5	18.0	18.0	18.0	16.5	20.0	18.2	18.9
	2010	15.5	14.1	14.0	-	17.8	20.0	19.5	-
	증감	△3.0	△3.9	△4.0	-	▽1.3	0.0	▽1.3	-
예보 (0.34)	2015	30.7	31.7	30.3	30.9	32.5	33.2	33.6	33.4
	2010	31.5	30.4	31.7	-	31.8	33.8	34.0	-
	증감	▽0.8	△1.3	▽1.4	-	△0.7	▽0.6	▽0.4	-
기후 (0.18)	2015	11.3	15.8	18.0	18.0	15.5	18.0	16.7	16.9
	2010	10.1	11.6	12.2	-	13.4	18.0	17.2	-
	증감	△1.2	△4.2	△5.8	-	△2.1	0.0	▽0.5	-
합계 (1.00)	2015	83.6	92.4	93.0	94.4	90.1	99.0	95.4	96.0
	2010	75.6	83.0	80.7	-	88.9	99.5	98.4	-
	증감	△8.0	△9.4	△12.3	-	△1.2	▽0.5	▽3.0	-

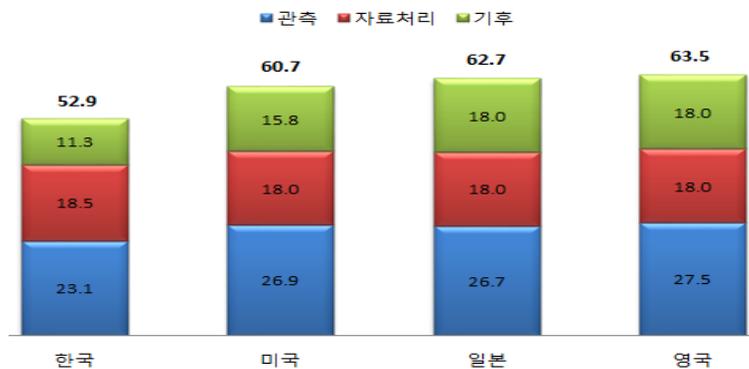
* 2010년 평가점수는 선행연구(국립기상연구소, 2010) 결과이며, 2010년 평가결과와 비교하여 2015년 연구결과 점수의 변화는 '증감'에 표기

* △ 2010년 연구결과(국립기상연구소, 2010) 대비 점수 증가 정도

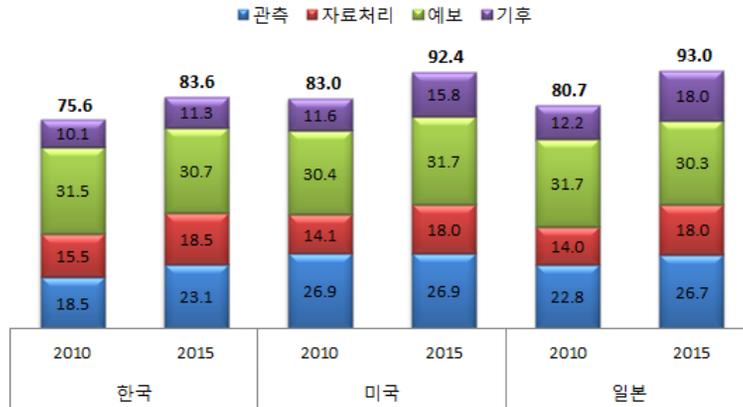
* ▽ 2010년 연구결과(국립기상연구소, 2010) 대비 점수 감소 정도

전문가 설문평가는 1차와 2차로 나누어 실시하였다. 1차 설문조사에 참여한 전문가는 총 219명 관측 25명, 자료처리 19명, 예보 15명, 기후 18명으로 총 77명이었으며, 2차 설문조사에는 1차 설문에 참여한 77명을 비롯하여 무응답자 모두에게 다시 한 번 설문을 요청하였다. 그 결과 관측 16명, 자료처리 14명, 예보 12명, 기후 14명으로 1차 설문에 응답한 인원보다 적은 총 56명의 응답을 얻을 수 있었다. Gordon(1991)과 Rowe and Wright(2001)의 연구에 따르면 델파이 기법을 이용한 설문을 진행할 때 설문 참여자의 수가 많은 필요는 없는 것으로 나타났으며, 이는 델파이 기법 자체가 통계적 절차나 모형을 기초로 한 연구를 시도할 때 사용하는 방법이 아니기 때문인 것으로 생각할 수 있다. 또한 델파이 기법을 수행할 때 설문 참여자의 수 보다 중요시 되어야 하는 것은 설문 참여자의 전문성을 확보할 수 있도록 하는 선택이며, 본 연구에서는 학계, 연구계, 산업계, 기상청 등 각 분야의 기상 전문가를 대상으로 하고, 설문에 들어가기 앞서 설문 참여자 본인의 전문 분야가 아닐 경우 그 분야에 해당되는 설문에는 응답하지 않도록 설문지를 구성함으로써 설문에 대한 신뢰성을 확보할 수 있도록 하였다.

지표평가 결과에 의하면 한국, 미국, 일본, 영국 중 예보분야를 제외한 기상기술력이 가장 높은 나라는 영국인 것으로 나타났고, 설문평가 결과에 의하면 각 기상분야의 전문가들은 미국의 기상기술력을 가장 높은 것으로 평가하였다. 특히 한국은 자료처리분야가 강점으로, 관측분야가 약점인 것으로 평가 되었다. 동일한 지표를 이용하지 않은 부분이 다소 있어 단순 비교하는 것은 무리가 있을 수 있으나, 선행연구(국립기상연구소, 2010) 결과와 비교해보면 지표평가의 결과는 국가별로 모두 상승하였으나, 설문평가에서는 다소 하락한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 설문평가의 마지막 문항으로 설문에 응답한 전문가들이 생각하는 한국, 미국, 일본, 영국, 중국, 캐나다, 프랑스, 독일, 러시아, 호주의 국가별 기상기술력 상대적 수준에 대한 질문을 한 바 있다. 그 결과 전문가들은 영국의 기상기술력을 가장 높게 평가하였으며, 실제 지표평가

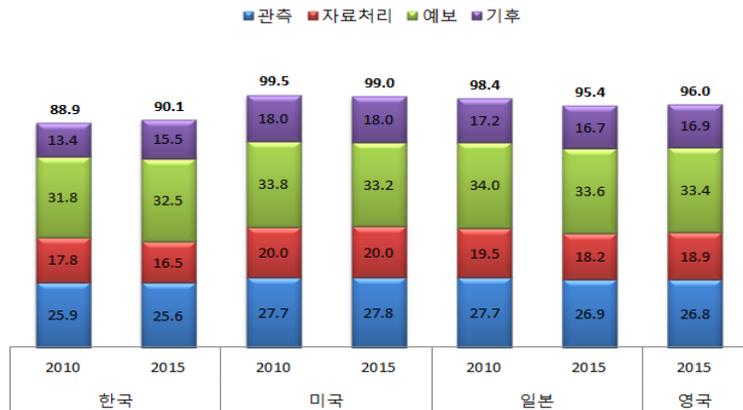


(그림 1) 예보분야를 제외한 국가별 지표평가 결과



* 2010년 평가점수는 선행연구(국립기상연구소, 2010)의 결과임.

(그림 2) 영국을 제외한 국가별 지표평가 결과



* 2010년 평가점수는 선행연구의 (국립기상연구소, 2010)의 결과임.

(그림 3) 국가별 설문평가 결과

에서도 예보분야를 제외했을 때 가장 높은 수준을 보인 영국의 기상기술력을 감안하였을 때 전문가 설문평가에서 2010년 결과 대비 미국과 일본의 점수가 다소 하락한 것은 평가대상의 추가로 인한 것으로 생각해 볼 수 있다. <표 16>을 토대로 작성한 예보분야를 제외한 국가별 지표평가 결과는 (그림 1), 영국을 제외한 국가별 지표평가 결과는 (그림 2), 설문평가 결과는 (그림 3)과 같다.

V. 결론 및 정책적 시사점

본 연구의 지표평가는 선행연구(국립기상연구소, 2010)와 최대한 같은 평가기준과 가중치를 사용하였기 때문에 점수변화를 파악하는 것이 의미가 있다고 할 수 있으나 전문가 설문평가의 경우 선행연구에서는 평가되지 않았던 영국을 추가하였고, 상대평가로 진행하였기 때문에 점수의 변화에 대한 구체적인 의미를 부여하기에는 무리가 있다. 점수의 변화 보다는 각국의 순위 변화와 평가대상 국가의 점수 차이에 집중하는 것이 적절하다고 할 수 있다. 한국은 선행연구(국립기상연구소, 2010)와 같이 평가대상국 중 가장 낮은 점수를 보였으나, 미국, 일본과의 점수차이가 선행연구(국립기상연구소, 2010)보다 적어진 것을 알 수 있다. 이는 두 나라와의 기상기술력 차이가 2010년 보다 다소 줄어든 것이라고 생각해 볼 수 있다.

본 연구에서는 세부분야별 평가를 통해 미국, 일본, 영국과 비교하여 기술력이 특별히 낮은 분야 또는 동등한 수준의 기술력을 가지고 있는 분야 등에 대한 파악을 할 수 있었다. 한국은 기상레이더 국산화, 기후변화예측모델 개발이 특히 미국, 일본, 영국에 비교하여 부족한 것을 알 수 있었으며, 특히 기상레이더 부분은 미국, 일본, 영국이 만점에 가까운 점수를 기록했을 때, 한국은 그 절반수준에 머물고 있는 것으로 나타났다. 기상레이더 운영에서 한국이 관측범위와 고성능레이더 활용현황에서 높은 점수를 받은 것을 감안했을 때, 기상레이더 기술 국산화율이 극히 낮은 것을 알 수 있다. 지표평가를 종합해 보면 한국은 대부분의 세부분야에서 점수가 상승하였고, 이는 기상기술력 수준 향상과 함께 기상선진국과의 격차가 줄어들고 있음을 의미한다고 생각해 볼 수 있지만 이와 동시에 평가지표 개선이 필요함을 시사한다. 관측분야의 기상위성 운영·활용, 자료처리 분야의 슈퍼컴퓨터 수준, 예보분야의 태풍진로 예보정확도, 기후분야의 국가표준시나리오 산출 수준에서 만점을 기록한 나라들이 존재하고, 특히 기상위성 운영·활용과 슈퍼컴퓨터 수준은 대부분의 평가대상국에서 평가기준을 충분히 만족한 것으로 나타났다. 지속적이고 주기적인 평가를 위해서는 충분한 전문가 합의를 통해 새로운 평가지표가 개발되어야 할 것이다. 기후변화예측모델은 선행연구(국립기상연구소, 2010)와 비교했을 때, 자체모델 구축에 대해서는 기술력이 향상된 것으로 볼 수 있겠으나, 미국, 일본, 영국 모두 자체 모델을 구축하고 있고, 특히 영국과 일본은 AR5에서 요구하는 개발단계를 모두 마무리한 것으로 나타났다. 한국의 기후변화예측모델 개발 단계는 영국과 일본의 절반 수준에 달한다고 할 수 있다. 따라서 레이더 국산화율 향상과 기후변화예측모델 개발을 위한 우선적인 인력양성 및 정부지원이 필요할 것으로 생각된다.

기상현상은 인간의 실생활을 포함하여 사회·경제적으로 직·간접적인 영향을 끼치기 때문에 기상관측·예보·자료처리를 비롯하여 기후변화예측 등에 대한 정확도와 신뢰도 향상은 우리 사회에서 아주 중요한 부분 중 하나이다. 현재 우리의 기상기술수준에 대해 알고 다른 기상선

진국들과의 비교는 반드시 필요한 작업임에도 불구하고, 현재까지는 정기적인 평가가 지속적으로 이루어지지 않고 있어, 현실에 맞는 평가지표 개발 또한 늦어지고 있는 상황이다. 본 연구에서는 과거 결과와의 비교를 위해 선행연구(국립기상연구소, 2010)에서 사용된 평가지표와 가중치를 그대로 사용하였으나, 기술이 발전함에 따른 평가지표 개선 등이 반드시 필요하다. 단발성이 아닌 지속적인 평가 및 결과 비교 등을 위해서는 기상 전문가들의 합의를 통해 평가지표 및 기준의 개선을 위한 연구가 진행되어야 할 것이다. 평가지표 개선을 위한 후속연구가 이루어짐과 동시에 본 연구에서 밝히지 못한 세부 분야별 평가 결과에 대한 구체적인 원인과 본 연구결과와 같은 현상이 나타나게 된 것에 대한 분석을 위한 연구 또한 진행되어야 할 것으로 판단된다.

평가지표 개선을 통한 지속적이고 정기적인 기상기술력 평가는 한국의 기상기술력 발전을 위한 정책개발과 재정의 우선 투자를 위한 기술분야 선정 등 국가 기상기술력 발전 전략 수립 관련 정책결정자들에게 유용한 핵심 정보로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- 과학기술심의회 (2013), 「2012년도 기술수준평가 결과」, 경기: 과학기술심의회.
- 구영덕·권영일·정대현 (2012), “LED 지식 맵 구성을 위한 지식재산권 기반 기술 경쟁력 분석”, 「한국전자통신학회」, 7(5): 955-960.
- 국립기상연구소 (2010), 「국가 기상기술력 평가를 위한 조사 분석 연구」, 서울: 국립기상연구소.
- 김상윤·유은정·임춘성 (2005), “기술집약형 중소 벤처기업의 기술력평가 체계에 관한 연구”, 기술경영경제학회 2005년 하계학술대회 발표논문집, 24-43.
- 김세원·박길운·조창범·이영근·임덕빈 (2011), “국가 기상기술력 수준 평가 - 한국, 미국, 일본을 대상으로 한 비교 연구”, 「大氣」, 21(3): 319-336.
- 박병무 (2007), “동태적 기술수준 측정 방법에 대한 이론적 접근 : 차세대성장동력 기술의 사례 분석”, 「기술혁신학회지」, 10(4): 654-686.
- 박현우·김기일 (2007), “특허정보를 통한 PMP연구동향과 기술경쟁력 분석”, 「한국콘텐츠학회」, 7(9): 117-126.
- 유승훈·박선영·김세원 (2011), “기상서비스의 경제적 가치”, 한국기상학회 2011년 추계학술대회 발표논문집, 112-113.
- 오재호·최영진·정성래·류상범·유홍주·김맹기·이부용·류찬수·배덕효·이홍제·이정은·김준형

- (1998), “북한 학술지를 통한 북한의 기상 인력 및 기술력 평가”, 한국기상학회 1998년 추계 학술대회 논문집, 296-297.
- 이우성·류민우 (2009), “북한 기상기술력 평가와 남북한 기상협력의 효과에 관한 연구”, 「현대 북한연구」, 12(3): 151-188.
- 이주석·유승훈 (2013), “차세대 도시·농림 융합 스마트 기상서비스기술 개발 사업의 이용자 측면 편익 추정”, 「기술혁신학회지」, 16(3): 630-649
- 장진규·윤문섭·정성철 (2000), 「기상기술력 종합평가기법 개발에 관한 연구」, 서울 : 과학기술 정책연구원.
- 조영상·구원모·이종수·이중우 (2011), “조건부가치측정법을 이용한 도시기상정보서비스의 경제적 편익 분석”, 「자원·환경경제연구」, 20(4): 643-662.
- 한국과학기술기획평가원 (2006), 「기상기술력수준 종합평가」, 서울: 과학기술부.
- 한국과학기술기획평가원 (2008), 「기술성장모형을 활용한 동태적 기술수준평가 방법」, 서울: 한국과학기술기획평가원.
- 한국과학기술기획평가원 (2010), 「기술성장모형에 기반한 기술수준평가방법론 연구」, 서울: 한국과학기술기획평가원.
- 한창희·이중우·이기광 (2009), “전력 수요 예측 관련 의사결정에 있어서 기온예보의 정보 가치 분석”, 「경영과학」, 26(1): 77-90.
- Crisp, J., Pelletier, D., Duffield, C., Adams, A. and Nagy, S. (1997), “The Delphi Method?”, *Nursing Research*, 46(2): 116-118.
- Gorden, T. J. and Munson, T. (1981), “A Proposed Convention for Measuring the State of the Art of Products of Process”, *Technological Forecasting and Social Change*, 20: 1-26.
- Gordon, T. J. (1994), “The Delphi Method”, *Futures Research Methodology V.3.0*, The Millenium Project.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Chnage, Switzerland) (2007), *AR4 (Assessment Report 4)*, Geneva: WMO.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Chnage, Switzerland) (2014), *AR5 (Assessment Report 5)*, Geneva: WMO.
- Rowe G. and Wright G. (2001), “Expert Opinion in Forecasting: The Role of the Delphi Technique”, *Prinsples of Forecasting*, 30(4): 125-144.
- <http://www.top500.org> (15 November 2015).

김혜민

서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과에서 경제학 석사학위를 취득하였으며, 현재 국립기상과학원 연구기획운영과에서 연구원으로 근무 중이다. 관심분야는 환경경제, 기상경제 등이다.

박소연

서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과에서 박사과정에 재학중이며, 관심분야는 공공재 및 비시장재 평가와 환경·자원·기상경제학 등이다.

이경미

건국대학교 지리학과에서 대기환경 박사학위를 취득하고 현재 국립기상과학원 연구기획운영과에서 기상연구사로 재직 중이다. 주요 연구분야는 기후변화, 응용기후, 도시기후 등이다.

임병환

부경대학교에서 박사학위를 취득하고, 현재 국립기상과학원 연구기획운영과에서 기상연구관으로 재직 중이다. 주요 연구분야는 종관기상, 3차원 가시화, 해양기상 등이다.

유승훈

서울대학교에서 기술경영경제정책과정에서 자원/환경경제학으로 경제학박사학위를 취득하고, 현재 서울과학기술대학교 에너지환경대학원의 원장 및 에너지정책학과의 교수로 재직 중이다. 관심분야는 자원/환경경제학, 산업경제학 등이다.