

기후변화 적응을 위한 사용자 중심의 기후서비스체계 제안 및 사용자인터페이스 플랫폼 개발

조재필^{*†} · 정임국^{*} · 조원일^{*} · 이은정^{*} · 강대인^{**} · 이준혁^{***}

^{*}APEC 기후센터, 응용사업본부, ^{**}APEC 기후센터 대외협력실, ^{***}주식회사 노트스퀘어

Suggestion of User-Centered Climate Service Framework and Development of User Interface Platform for Climate Change Adaptation

Cho, Jaepil^{*†}, Jung, Imgook^{*}, Cho, Wonil^{*}, Lee, Eun-Jeong^{*},
Kang, Daein^{**} and Lee, Junhyuk^{***}

^{*}Dept. of Climate Application, APEC Climate Center, Busan, Korea

^{**}Dept. of External Affairs, APEC Climate Center, Busan, Korea

^{***}Dept. of Research and Development, NoteSquare Inc. Seoul, Korea

ABSTRACT

There is an emphasis on the importance of adaptation against to climate change and related natural disasters. As a result, various climate information with different time-scale can be used for science-based climate change adaptation policy. From the aspects of Global Framework for Climate Services (GFCS), various time-scaled climate information in Korea is mainly produced by Korea Meteorological Administration (KMA) However, application of weather and climate information in different application sectors has been done individually in the fields of agriculture and water resources mostly based-on weather information. Furthermore, utilization of climate information including seasonal forecast and climate change projections are insufficient. Therefore, establishment of the Cooperation Center for Application of Weather and Climate Information is necessary as an institutional platform for the UIP (User Interface Platform) focusing on multi-model ensemble (MME) based climate service, seamless climate service, and climate service based on multidisciplinary approach. In addition, APCC Integrated Modeling Solution (AIMS) was developed as a technical platform for UIP focusing on user-centered downscaling of various time-scaled climate information, application of downscaled data into impact assessment modeling in various sectors, and finally producing information can be used in decision making procedures. AIMS is expected to be helpful for the increase of adaptation capacity against climate change in developing countries and Korea through the voluntary participation of producer and user groups within in the institutional and technical platform suggested.

Key words: Climate Service, Climate Change, Downscaling, AIMS, GFCS

1. 서 론

기후서비스 (Climate Service)는 다양한 사용자의 의사결정 과정에 있어서 활용될 수 있는 사용자의 수요가 반영된 기후정보 제공을 의미한다. 기후정보는 기상변수에 대한 국가 또는 국제적인 데이터 제공의 협의적인 의미에 더하여 위험 또는 취약성 분석 등과 같은 추가적인 가공 정보

와 경우에 따라서는 사회경제적인 변수들과의 융합 또한 포함한다. 이에 WMO (World Meteorological Organization)는 2009년 이후 전지구기후서비스체계 (Global Framework for Climate Services; GFCS)를 통해 기후정보 및 서비스의 효율적인 제공을 위해 노력하고 있다. GFCS는 기후에 민감한 분야에서의 의사결정 지원을 위해 필요한 과학적 기반의 기후정보 및 서비스의 개발 및 적용을 이끌기 위해서

[†]Corresponding author: jpcho89@gmail.com

Received February 26, 2018 / Revised March 17, 2018 / Accepted March 23, 2018

2009년 제3차 세계기후회의에서 만장일치로 결정되어 UN 인도 하에 세계기상기구(WMO)를 중심으로 추진되고 있다. GFCS는 관측/모니터링(Observations and Monitoring), 연구/모형/예측(Research, Modeling and Prediction), 기후서비스정보시스템(Climate Services Information System), 및 사용자인터페이스 플랫폼(User Interface Platform)과 이들 4개 요소에 포괄적으로 적용될 수 있는 역량개발(Capacity Development)을 포함하여 5개 주요 요소로 구성되어 있다.

국내에서는 농업분야와 보건 분야에서의 기후서비스를 위해서 GFCS의 도입이 제안된바 있다(Lee et al., 2013; Gong, 2017). 국내 기후변화 적응의 경우 2009년에 개소한 국가기후변화적응센터를 통해 CCGIS(Climate Change Adaptation Toolkit based on GIS, NIER, 2008) 및 웹기반의 기후변화 취약성 평가 지원 도구 시스템(Vulnerability Assessment Tool to Build Climate Change Adaptation Plan; VESTAP, Oh et al., 2016) 등의 적응도구 개발을 통해 지자체 적응정책 수립을 지원하고 개별 항목에 대한 영향 및 취약성 평가를 수행하고 있다(Kim, 2010). 하지만 정책반영을 위해 필요한 과학적 기반의 기후정보 활용은 국가 차원의 통합된 기후서비스체계의 구축 없이 개별 분야별로 수행되고 있다. 따라서 모든 분야에 적용 가능한 기후서비스체계 구축을 목표로 GFCS의 주요 요소 별 국내 현황을 살펴보는 것이 필요하다. 주요 요소 중에서 관측/모니터링 분야의 경우에는 기상청의 지점별 관측 자료에 위성 및 레이더 등 격자기반의 관측자료 등이 수집되고 있다. 자동기상관측(Automatic weather station, AWS) 자료의 경우는 농촌진흥청 및 산림과학원에 의해 운영되는 자료들이 수집되고 있으며, 레이더의 경우에는 국토부에서 강우레이더를 별도로 운영하고 있어 기후정보의 생산자가 다각화되고 있는 상황이다. 모형/예측 자료는 기상청을 중심으로 기상법에서 정한 예보대상 기간에 따라 초단기예보(6시간 이내), 단기예보(3일 이내), 중기예보(10일 이내), 장기예보(11일 이상)의 다양한 시간 스케일의 예측정보가 생산되고 있다. 기후변화 시나리오 자료의 경우는 전 지구 영역에 대해서는 영국의 기후변화예측모델인 HadGEM2-AO를 도입하여 135 km의 공간해상도 자료를, 동아시아 지역에 대해서는 CORDEX 국제사업과 연계하여 50 km 해상도의 자료를, 한반도 영역에 대해서는 영국의 지역기후모델인 HadGEM3-RA를 이용하여 12.5 km 해상도의 자료를 생산하여 기후모델들의 계통오차를 제거하지 않고 제공하고 있다. 반면 12.5 km 한반도 시나리오 자료로부터 PRISM based Downscaling Estimation Model(PRIDE) 통계적 모델을 이용하여 모델의 계통오차를

제공한 후 남한 지역에 대해 1 km 공간해상도의 자료를 생산하여 제공하고 있다. 기후서비스정보시스템의 경우는 관측 및 단기예보와 같이 날씨 관련 정보는 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr/cmnm/main.do>)을 통해서, 장기예측 및 기후변화 시나리오 자료와 같이 기후 관련 정보는 기후정보포털(<http://www.climate.go.kr/home/>)을 통해 제공되고 있다. 앞서 언급된 농촌진흥청 및 산림과학원의 기상 관측 정보는 농업기상정보포털(<http://weather.rda.go.kr/index.jsp>) 및 산악기상관측시스템(<http://mw.nifos.go.kr/Main/>)을 통해 개별적으로 제공하고 있다. 기후모델에 의해 생산되는 기후정보들을 살펴보면, 기후변화 시나리오 자료의 경우에는 개별 모형에 의해 생산된 기후변화 정보의 불확실성을 고려하기 위해, 예측자료의 경우는 예측결과의 신뢰성 향상을 위해 다중모형앙상블(Multi-Model Ensemble, MME) 기반의 자료 생산이 바람직하지만 단일 모형의 결과들만이 제공되고 있다.

앞서 제시된 기상·기후정보들의 경우 다양한 분야의 의사결정에 직접적으로 사용될 수도 있지만 많은 경우 기후모델의 낮은 시공간 해상도 문제로 인하여 사용자의 수요를 반영한 상세화(downscaling) 절차를 거치는 것이 필요하다(Hwang et al., 2013; Cho et al., 2015). 그러나 국내 현황을 살펴보면 GFCS의 사용자인터페이스 플랫폼(User Interface Platform) 관점에서의 사용자 맞춤형 서비스는 찾아보기 어렵다. 또한 역량개발 관점에서도 다양한 시간적 규모의 기상·기후정보를 의사결정에 활용하기 위해 필요한 교육 프로그램이 존재하지 않아 국내 기후서비스는 사용자의 수요를 고려하지 않는 공급자 중심의 서비스라 할 수 있다.

국외의 경우에는 ClimateWizard(<http://www.climatewizard.org>)와 같이 이미 가공되어진 다중모형 기반의 상세화 결과를 전 지구 규모로 제공하는 서비스가 존재한다. 또한 회귀적 방법에 기반을 둔 SDSM(Statistical DownScaling Model)(Wilby and Dawson, 2013)와 기상발생기 기반의 LARS-WG(Semenov et al., 2002)와 같이 사용자가 직접 자신의 관심 지역에 대한 관측자료를 이용하여 상세화를 수행할 수 있도록 개발된 프로그램들이 다양한 지역 및 분야의 기후변화 적응정책 수립의 기초자료 생산에 활용되어 왔다. 하지만 앞서 언급된 서비스들은 기후변화 시나리오 상세화 자료 제공에 국한되어 있어 계절예측을 포함한 다중 시간 규모의 기후정보를 통합적인 서비스로 제공하는 경우는 찾아보기 어렵다. 기후변화 시나리오의 경우에도 단일 기법에 의한 상세화만을 위한 서비스를 제공하고

있어 다양한 기법들 중에서 사용자의 목적에 적합한 기후자료 및 상세화 기법들을 평가하는 절차 등에 대한 서비스는 제공되고 있지 않는 상황이다.

따라서 본 연구에서는 국내의 기후변화 및 변동성을 고려한 기후변화 적응과 위험관리를 위해 필요한 사용자 중심의 기후서비스체계 구축을 위한 전략을 살펴보고, GFCS의 5개 주요 요소 중에서 국내 기반이 열악한 사용자 인터페이스 플랫폼 관점의 제도적 방안과 다양한 응용분야의 사용자 요구를 반영하여 시·공간적 상세화 자료를 생성할 수 있도록 개발된 AIMS (APCC Integrated Modeling Solution)라는 기술적 플랫폼의 현재 기능과 향후 발전 방향을 제시하고자 한다.

2. 사용자 중심의 국내 기후서비스 체계 구축 전략

2.1 다중 모형 앙상블 (MME) 기반 기후정보 활용

국내 기후변화 적응을 위한 기후변화 시나리오 자료는 앞서 살펴본 바와 같이 전 지구, 한반도, 남한 지역에 대해 역학적 모형인 HadGEM2-AO 및 HadGEM3-RA와 통계적 모형인 PRIDE을 이용하여 각각 135 km, 12.5 km, 1 km 해상도의 자료를 생산하여 다양한 분야의 기후변화 영향 및 취약성 평

가에 활용하여 왔다. 특히 기후모형의 계통오차가 보정된 미래 전망 자료가 필요한 응용분야에서는 통계적으로 보정된 1 km 남한 상세화 자료만이 사용 가능하다. 하지만 분야별 기후변화 영향 평가 또는 취약성 평가의 최종 결과에 영향을 미치는 불확실성은 온실가스 대표농도 시나리오의 선택 및 동일한 대표농도 시나리오 안에서는 선정된 전지구기후모형 (Global Climate Model, GCM)에 따라서 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이는 온실가스 농도의 증가에 따른 지구온난화 영향으로 기온의 경우 대부분의 GCM에서 일관되게 증가하는 경향을 전망하는 반면에 수자원 분야에서 중요한 강수량의 경우는 미래 전망 결과에 많은 불확실성을 내포하고 있어 선정된 GCM에 따라서 상반된 경향을 전망할 수 있는 가능성이 높다.

이에 기상청에서는 각각의 시나리오로부터 생산된 기후변화 정보가 가지는 불확실성을 낮추고 신뢰수준을 제시하기 위해 Fig.1과 같이 기상청 외부의 RegCM4, SNURCM, GRIMs, WRF 모형과 기상청의 HadGEM3-RA 지역기후모형을 이용한 다중모형앙상블 기반의 상세 시나리오를 생산하여 제공하고 있다. 기상청 이외의 기관에서 생산된 상세 시나리오 정보를 기후정책에 공식적으로 활용하기 위해서 기상청에서는 2013년도에 신설된 기상법 제21조2 (국가 기후변화 표준 시나리오의 인증)를 통해 시나리오 인증 제

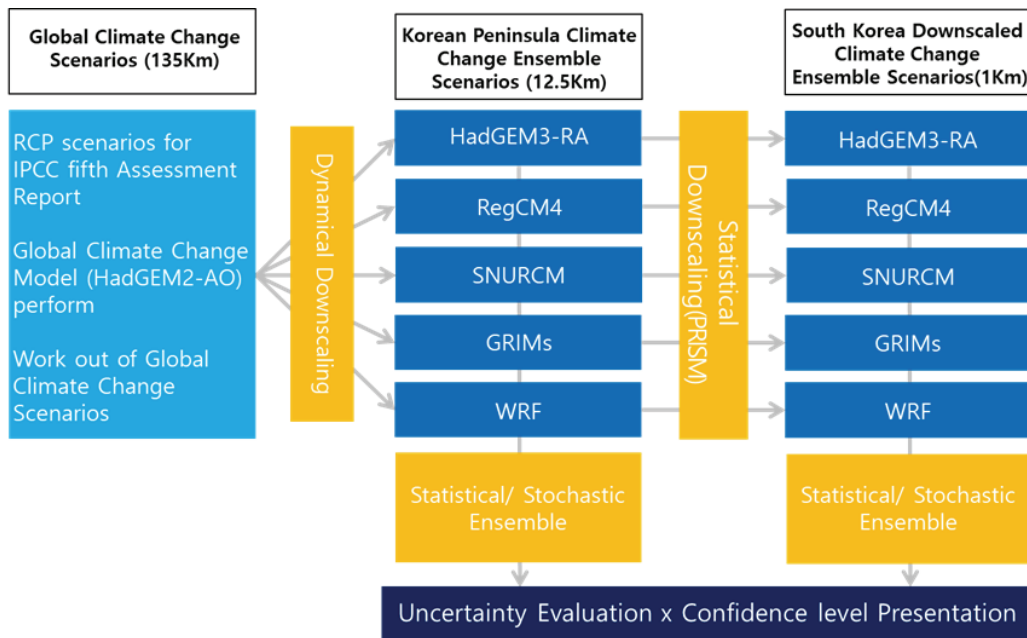


Fig. 1. Framework for creating downscaled climate change ensemble scenario data on Korea Peninsula (Source: <http://www.climate.go.kr/home/>).

도를 운영하고 있다. 하지만 인증의 기준이 역학적 상세화 모형의 결과만을 고려할 수 있도록 설정되어 있고 통계적 상세화 기법을 기반으로 생산되는 자료에 대한 평가에 적합하지 않아 향후 역학적 및 통계적 상세화 기법을 모두 고려할 수 있도록 제도적인 개선이 필요하다.

동아시아 (East Asia)에 대해 다중모형앙상블 기반의 기후변화 시나리오 정보를 활용하기 위해서는 Fig. 1에 사용된 동일한 5개 지역기후모형을 이용하여 50 km 공간 해상도로 생산된 Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX) (<http://cordex-ea.climate.go.kr/>) 자료가 있다. 또한 국내의 기후전문기관인 APEC기후센터에서 CMIP5의 자료 중에서 29개 GCM을 수집하여 한반도 지역을 포함한 30개 국가 및 미국의 51개 주를 대상으로 추출하여 제공하고 있는 Clipped CMIP5자료 (<http://adss.apcc21.org/DataSet/CMIP5/cmip5.jsp>)를 활용할 수 있다. 하지만 CORDEX-EA 자료 및 Clipped CMIP5 자료는 계통오차의 보정이 되지 않은 자료로서 의사결정 목적에 맞는 상세화 방법을 이용한 계통오차 보정이 필요하다. 한반도 지역에 대해 제공되고 있는 Clipped CMIP5 자료를 이용하여 30년 이상 관측 자료가 존재하는 한반도 60개 종관관측소를 대상으로 Simple Quantile Mapping (SQM) 방법 (Cho et al., 2016; Cho et al., 2018) 및 Spatial Disaggregation and Quantile Delta Mapping (SDQDM) 방법 (Cannon et al., 2015; Eum and Cannon, 2016)을 이용하여 생산된 상세화 자료는 국내 교육에 활용되었고 다양한 분야에의 활용을 위해 공개되어 있다 (<https://doi.org/10.8888/EPOPS201711301YK>).

기후예측 자료의 경우에도 최근 극한 가뭄과 관련하여 감시로부터 선제적인 대응으로 방향이 전환되고 있는 시점에서 수개월의 강수량 정보를 제공해 줄 수 있는 장기예측 자료의 수요가 증가하고 있다. 기상청에서는 GloSea5 모형을 이용한 장기예측 자료를 생산하고 있으며, 기후변화 시나리오 자료와 비슷하게 단일 모형의 낮은 예측성을 극복한 사용자 중심의 예측정보 활용성 위해서는 다중모형앙상블 기반의 기후서비스가 필요하다.

기상청은 다양한 시간규모의 국가 기상·기후정보를 자체 생산하고 있으나 기후정보 생산에 많은 시간·인력·비용이 요구되므로 사용자들이 원하는 다중모형 기반의 모든 자료를 기상청 자체적으로 생산하는 것은 불가능하다. 따라서 기상청의 단일모형 기반의 기후정보에 사용자 측면의 기후정보의 불확실성 및 신뢰도를 고려하기 위해서는 해외 생산 자료를 추가적으로 활용할 수 있어야 하며, 국가 기후서비스체계 구축에 있어서 다중모형앙상블 기반의 기후정보를 제공할 수 있는 체계 구축이 필요하다.

2.2 이음새 없는 (Seamless) 기후정보 활용

최근 기후변화에 따른 기후변동성으로 인하여 가뭄 또는 홍수와 같은 대규모 자연재해의 발생 빈도와 강도가 전 세계적으로 증가하고 있다. 기후변화 적응 관점에서는 미래 기후변화 전망을 기반으로 다양한 분야의 인프라를 포함한 사회시스템을 장기적으로 변화시켜 가는 접근이 가능하다. 하지만 앞서 언급한 기후정보의 불확실성을 고려할 때 막대한 예산이 요구되는 정책결정에 반영되는 경우는 국내에서 찾아보기 어렵다. 따라서 최근에는 인프라 등의 구조적인 변경을 필요로 하는 기후변화 적응 방안들 대신에 비구조적인 변화를 통한 후회 없는 (No-regret) 기후변화 적응 방안이 미래 기후변화 전망의 불확실성을 고려하기 위한 대안으로 검토·제시되고 있다 (Hourcade and Chapuis, 1995; Hallegatte, 2009; Bhawe et al., 2016; Dittrich et al., 2016). 후회 없는 기후변화 적응 방안을 위해서는 다양한 분야에서 매년 반복되는 운영 및 관리 기법의 개선을 통해 시스템의 효율을 높임으로써 막대한 예산을 필요로 하는 기존 시스템의 구조적 변경 없이 기후변화에 탄력적인 사회로의 변화를 위한 노력이 필요하다.

시설물의 운영 및 관리를 위한 의사결정에 필요한 기후정보로서 AWS, 레이더 및 위성 자료와 같이 관측 기반의 기후정보가 최근까지 보편적으로 사용되고 있다. 하지만 근래에 심해지는 기후변동성의 증가로 인하여 new normal이라는 용어의 등장과 함께 과학적인 예측정보의 수요가 증가하고 있다. 운영의 효율성을 높이기 위한 예측정보로는 기후정보 사용자들에게 이미 익숙한 단기예측에 더하여 Fig. 2와 같이 현재 시점으로부터 향후 1주에서 1개월에 해당하는 기간을 예측하는 계절 내 예측 (Subseasonal to Seasonal, S2S forecast) 자료 및 1개월에서 1년 이내의 기간을 예측하는 계절예측 (Seasonal forecast) 자료가 국가별 기상청을 중심으로 생산되고 있다. 앙상블 기반의 접근이 기후변화 시나리오의 불확실성을 고려하기 위해 필요한 것과 마찬가지로 예측자료에 있어서도 예측의 신뢰성 향상을 위해서는 앙상블 기반의 접근이 필요하다. 계절예측과 관련해서는 APEC기후센터 (APCC)에서 2005년 설립 이후 17개의 국제적인 기후예측기관으로부터 생산되는 예측정보를 매월 수집하여 고품질의 MME 자료로 가공하여 서비스하고 있다.

국내 수자원 분야 전문가를 대상으로 실시된 설문조사에서 수일의 단기예측, 수개월의 장기예측, 수십 년의 기후변화 전망자료의 최대 활용 가능성과 비교하여 현재 업

무에 사용되고 있는 실제 활용성을 비교한 결과, 단기예측의 경우 활용 가능성과 실제 활용도가 비슷한 결과를 보인 반면, 장기예측 자료의 실제 활용도는 활용 가능성과 비교하여 낮게 나타났고 기후변화 전망 자료는 반대의 결과를 보였다 (Cho et al., 2015). 따라서 기후변화와 관련하여 심해지고 있는 자연 재난/재해에 대한 위험관리를 위해서는 다양한 분야에서 아직까지는 활용이 고려되지 않고 있는 S2S 자료에 더하여 활용에 대한 수요는 높지만 아직 실질적으로 충분하게 활용하지 못하고 있는 계절예측 자료를 포함한 예측자료의 활용성 증대를 목표로 국가 기후서비스체계가 구축되어야 한다. 이는 최근 국내 수량과 수질의 통합관리 관점에서 통합수자원관리 방안이 논의되고 있는 상황을 고려할 때, 기상·기후-수량-수질의 연계를 통한 수자원 관리의 효율성 향상을 위한 기후정보 활용 방안이 국가 기후서비스체계에 반영되어야 한다.

2.3 다학제 융합기반 기후정보 및 서비스 제공

다양한 분야에서 기후변화 및 변동성을 과학적으로 고려하여 사용자 중심의 의사결정을 지원하기 위하여 기후서

비스는 Fig. 3에서와 같이 다학제간 융합을 기반으로 하여야 한다. 기후변화 적응 관련 융합은 2가지 단계로 고려될 수 있다. 우선 다양한 분야에서의 과학적이고 사용자 중심의 의사결정을 지원하기 위해서는 과학자 또는 연구자 레벨에서의 융합이 필요하다. 국내에서는 기후정보의 생산자인 기상청과 기후변화 관점에서 중요한 농업 및 수자원 분야 사이의 연계성을 고려한 기후정보 활용을 위해 농림기상센터 (<http://www.ncam.kr/>)와 수문기상협력센터 (<http://www.hcc.re.kr/html/location.php?depth=index/index>)가 설립되어 운영되고 있지만 기상자료를 중심으로 연계가 고려되고 있는 상황이며, 수요가 증가하고 있는 기후예측 및 기후변화 시나리오 등을 포함하는 기후자료 중심의 연계는 미흡한 실정이다. 또한 기상청 단일모형의 예측결과를 중심으로 국제적인 협력 관계를 통한 다중모형앙상블 (MME) 기반의 기후서비스는 불확실성 관점에서의 중요성에도 불구하고 고려되지 않고 있다. 따라서 앞서 언급된 MME 및 Seamless를 기반으로 하는 사용자 중심의 기후서비스 활성화를 위해서 기후서비스체계 구축을 위한 국가 차원의 제도적인 노력이 필요하다. 또한 생산자 그룹을 통해 제공되는 다양한 시간규모의 기후정보를 다양한 분야의 기후

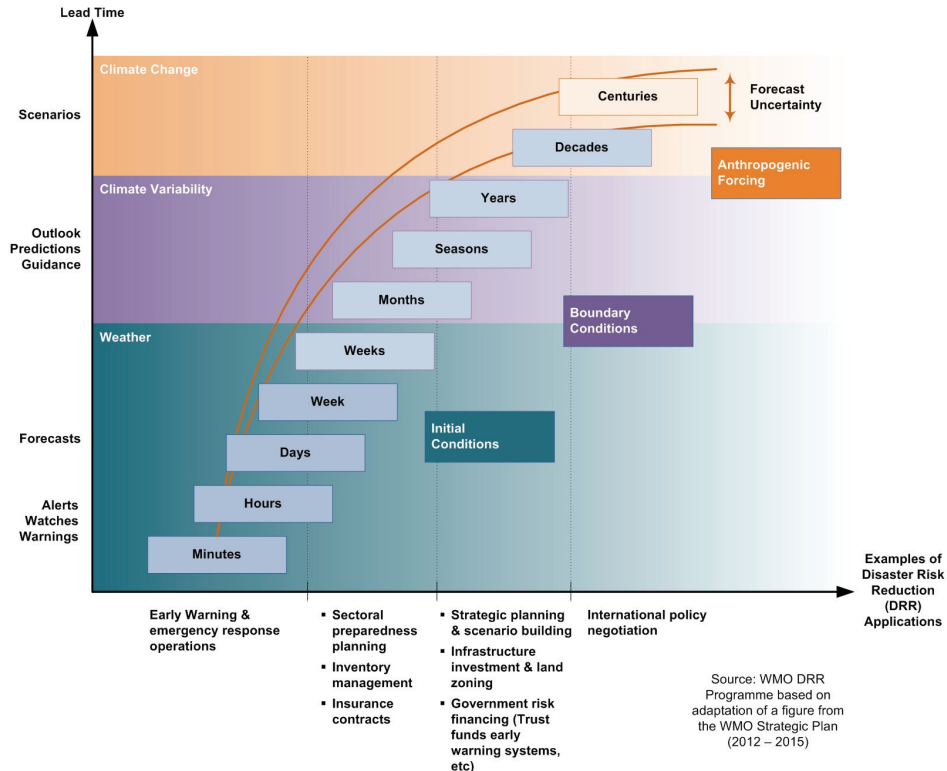


Fig. 2. Seamless Climate Services.

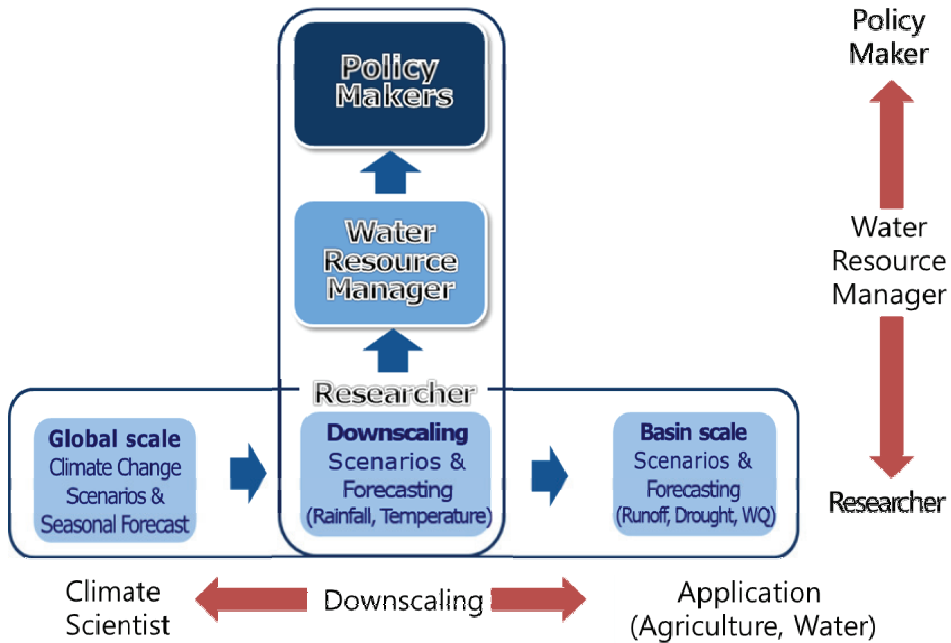


Fig. 3. Schematic diagram of integration of different stakeholders for implementing climate change adaptation plans (example of water sector).

변화 적응 관련 의사결정에 활용하기 위해서는 기후정보의 특성에 대한 충분한 이해와 적용 분야 및 지역에 대한 특성을 반영함과 동시에 사용자의 수요를 고려한 계통오차 보정 (Bias Correction) 및 시·공간적인 상세화 (Downscaling) 등의 융합을 위한 기술적인 기반이 마련되어야 한다.

하지만 앞서 언급된 연구자 레벨에서의 융합이 전제되더라도 이를 통해 도출된 과학적인 정보가 실제 다양한 분야의 운영 및 관리자 레벨에서의 의사결정에 활용되기 위해서는 이를 극대화하기 위한 제도적 개선이 필요하다. 정책결정자 레벨에서의 기후정보 활용을 위해서는 정보의 수요자의 레벨에 맞는 교육과 정책결정 지원을 위한 프레임워크가 필요하다. 현재 국가기후변화적응센터가 과학과 정책 간의 연계를 위한 역할을 국내에서 수행하고 있다. 하지만 연구자 레벨에서의 융합을 위한 전문기관과의 긴밀한 협력관계를 통해 과학적으로 활용성이 높은 기후정보가 정책에 반영될 수 있도록 지속적인 노력이 필요하다. 또한 기후변화 시나리오 중심의 적응 정책 지원에 더하여 앞서 언급된 후회 없는 적응 관점의 다양한 예측 정보 기반의 정책 지원으로의 역할을 확대해야 한다. 적응 정책의 지원 대상과 관련해서는 현재 지자체 중심의 적응 정책 지원으로부터 다양한 분야의 공공기관의 적응정책 수립을 위한 지원을 활성화하여야 한다.

이와 같이 연구자 레벨에서의 수평적인 연계와 연구자, 관

리자, 정책결정자 사이의 수직적인 연계가 원활히 이뤄질 때 실제 의미 있는 기후변화 적응 대책들이 실생활에 적용이 될 수 있다.

3. 사용자 인터페이스 플랫폼

3.1 제도적 플랫폼으로서의 기상·기후-응용 융합센터의 필요성

GFCS의 5개 주요 요소 중에서 사용자 인터페이스 플랫폼 (UIP)은 Fig. 4와 같이 기후정보의 생산자인 기상청과 다양한 응용분야의 사용자들 사이에 존재하는 기상·기후-응용 융합센터의 설립을 통해 진행될 필요가 있다. 우선 융합센터는 협의체 구성 및 운영을 통해 기후정보의 공급자와 사용자간의 원활한 커뮤니케이션이 가능하도록 역할을 수행해야 한다. 현재 기상청은 기후변화 시나리오 및 계절예측 자료와 같이 제공하는 기후정보에 따라 담당부서별로 사용자의 수요를 반영하기 위한 협의체를 개별적으로 운영하고 있다. 따라서 효율적인 기후서비스를 위해서 기상정보뿐만 아니라 기후정보를 포괄적으로 다룰 수 있는 기상·기후-응용 융합센터를 통한 협의체의 단일화가 필요하다. 이를 통해 기존에 농업 및 수자원 분야에서 기상정보 중심의 연계를 각각 고려하기 위한 농림기상

센터 및 수문기상협력센터의 역할을 통합적으로 수행하는 역할에 더하여 기후정보 중심의 연계를 추가적으로 고려할 필요가 있다.

이를 통해 다양한 분야와의 융합에 있어서 공통적으로 활용 가능한 기후정보 및 핵심기술에 대한 수요를 도출하여 다양한 분야에 일관되게 제공함으로써 중복성을 피하고 기후서비스의 효율성을 증대시킬 수 있다. 사용자 중심의 기후정보 관점에서는 기상청에서 생산하는 단일 모형 결과를 중심으로 해외의 다양한 기상·기후 정보의 생산자들로부터 수집한 다중모형 결과를 추가적으로 제공함으로써 제공 정보의 확실성을 줄이고 의사결정에 필요한 정보를 제공하는 역할을 수행해야 한다. 수집된 다중모형이상상 기상·기후 자료는 모든 분야에 공통적으로 활용 가능하기 때문에 융합센터를 통한 일원화된 접근이 필요하다. 또한 기상·기후 정보의 응용분야의 활용을 위해서는 계통오차의 보정 및 상세화 절차가 필요하다. 상세화 기법의 개발과 같이 기후분야와 응용분야 사이의 융합을 위해서 다양한 분야에 공통적으로 적용 가능한 핵심 기술 또한 융합센터를 통해 개발이 수행되어야 한다. 이는 농업 및 수자원 등 개별 분야를 중심으로 비슷한 기후정보 및 핵심기술을 중복적으로 개발하는 대신에 기상청 중심의 융합센터를 통해 기후전문가와 다양한 응용분야의 전문가들이 참여한 연

구개발, 검증된 연구개발 결과의 서비스화, 개발된 서비스를 이용한 사용자 교육 등의 일원화된 선순환적인 기후서비스 제공을 의미한다. 즉, 융합센터는 기후정보 기반의 국내 응용분야 활용을 위한 연구, 서비스 개발, 교육 등의 역할을 수행할 수 있도록 조직체계가 마련되어야 한다. 이를 통해 기상·기후 데이터 제공에 더하여 기상·기후 자료 분석을 위한 툴 및 기후정보 활용을 위한 가이드라인 제공 등을 포함한 복합적인 사용자 맞춤형 기후서비스를 제공할 필요가 있다.

3.2 기술적 플랫폼으로서의 APCC Integrated Modeling Solution (AIMS) 개발

3.2.1 AIMS 개념

상세화 (downscaling)는 연구자 레벨에서 언급된 기후-응용분야 융합 관점에서 중요하다. 즉, 저해상도의 기후변화 시나리오 또는 계절예측 자료를 응용분야에 올바르게 사용하기 위해서는 시·공간적인 상세화 기법 개발과 같은 융합연구가 필요하다. APEC기후센터에서는 기후자료의 응용분야 활용을 극대화하고 사용자 중심의 기후서비스를 제공하기 위한 플랫폼으로서 APCC Integrated Modeling Solution (AIMS)를 개발하여 제공하고 있다

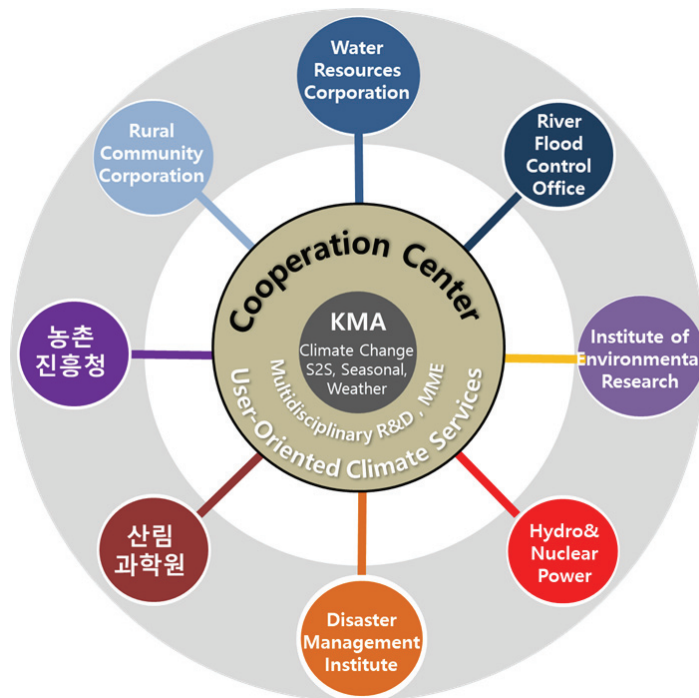


Fig. 4. Conceptual diagram of cooperation center for application of weather and climate information.

(<http://aims.apcc21.org>).

AIMS는 Fig. 5에서와 같이 기후변화 시나리오 및 계절 예측 자료의 상세화 (좌측), 상세화 된 기후자료만을 이용하는 증발산량 산정, 기상학적 가뭄 예측, 기후지수 (Climate Indices)를 이용한 기후특성 분석 (중앙 하단), 상세화 기후정보의 응용분야 대표 모델에의 적용을 통한 영향 분석 (우측)을 사용자의 컴퓨터에 설치하여 수행할 수 있는 상세화 및 분야별 모델링 플랫폼이다. 즉, 기후정보를 상세화하는 목적이 분야별 추가 분석을 지원함으로써 최종적으로 의사결정에 활용할 수 있는 정보를 생산하는 것임을 고려할 때, AIMS는 상세화에 더하여 분야별 대표적인 모델링과의 연계성을 고려하기 위한 플랫폼이다.

AIMS는 ADSS (APCC Data Service System)를 통해 서비스하고 있는 국가별 Clipped CMIP5 자료와 매월 제공 받는 개별 모형의 계절예측 자료와 자동으로 연동되어 상세화를 수행한다. 국가별 Clipped CMIP5 기후변화 시나리오 자료의 경우 개도국을 중심으로 30개국에 대한 국가별 자료를 제공하고 있으며, 계절예측 자료의 경우에는 APCC에서 매월 17개 기관으로부터 수집하고 있는 개별 모형의 계절예측 자료를 제공하고 있다. 계절예측의 경우 실시간 예측이 목적이며 이는 매월 예측자료의 업데이트가 필요하다. 기후변화 시나리오의 경우에도 전지구모형의 개선 및 새로운 모형의 적용에 따라 향상된 기후변화 전망 자료가 주기적으로 제공되고 있으며 향후 AR6 기후변화 시나리오

자료가 공개될 예정이다. 이와 같이 기후모형의 결과가 변경되는 경우 기존에 사용하던 상세화 모델링 환경을 사용자 스스로 수정해야 하지만 전문가가 아닌 일반 사용자서는 사실상 불가능하다. 따라서 AIMS는 이러한 기후모형 자료가 개선되고 갱신될 때 이를 반영할 수 있는 지속 가능한 통계적 상세화 플랫폼으로서 개발되었다.

AIMS를 통해 상세화 된 기후자료는 추가적인 모델링 또는 정보 없이 증발산량의 산정, 강우 기반의 기상학적 가뭄의 예측 또는 전망, 극한기후지수 (Climate Extreme Indices) 등의 계산과 같이 다양한 분석에 활용될 수 있다. 기후변화 시나리오 상세 자료로부터 계산되는 극한기후지수는 기후변화 취약성 평가의 기후노출인자로 사용되어 민감도 및 대응역량 인자와 결합을 통해 취약지역의 우선순위 선정에 활용될 수 있다. 또한 계절예측 상세화 자료의 경우도 기후변화에 따른 취약성 평가 방법과 비슷한 방법을 적용함으로써 먼 미래에 대한 취약성 평가가 아닌 향후 수개월 이후의 취약성 지표 산정에 있어서 기후노출인자 산출을 위한 기초자료로 사용될 수 있다. 마지막으로 농업 및 수자원 분야에서의 다양한 시간 규모의 기후정보를 활용한 영향평가를 위해서 분야별 주요 모델과의 연계를 고려하였다.

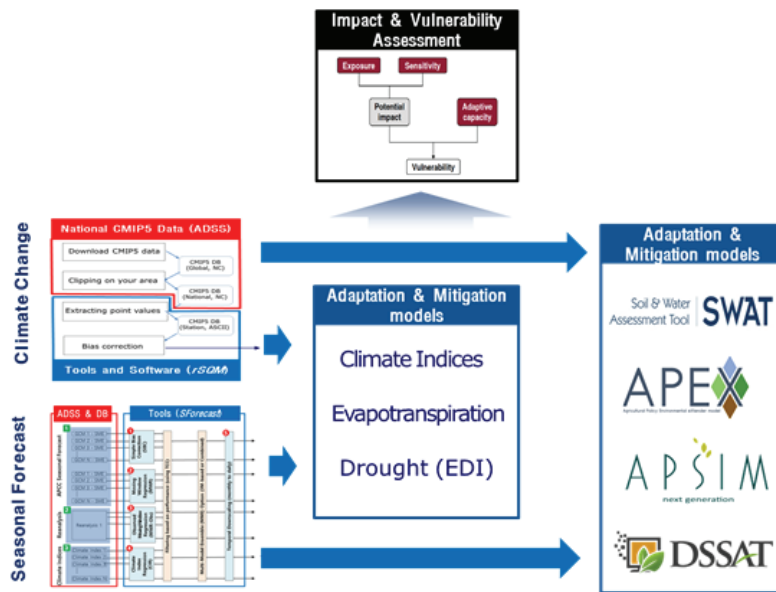


Fig. 5. Schematic procedure for downscaling and impact analysis using the climate information (climate change scenario and seasonal forecast).

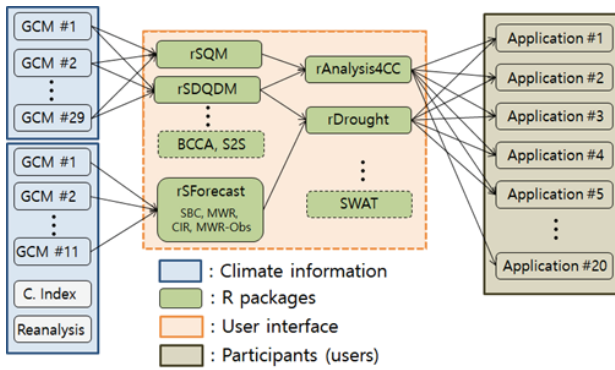


Fig. 6. Conceptual diagram of AIMS for considering independency of individual packages and extensibility of AIMS by integrating packages.

3.2.2 AIMS 구성 모듈

AIMS는 설계부터 개별 모듈들의 독립성과 확장성을 고려하여 개발하였다. Fig 6은 AIMS의 모듈 구성을 보여준다. 우선 좌측은 앞서 설명한 바와 같이 다양한 생산자에 의해 제공되는 다중 GCM 기반의 기후자료를 의미한다. 현재 포함되어 있는 자료는 APCC의 ADSS를 통해 제공하고 있는 국가별

CMIP5 기후변화 시나리오 자료 및 APCC 계절예측 다중 모형앙상블 (MME)에 사용된 개별 예측모형 자료 외에도 외부 기관의 공개된 기후자료를 포함한다. 우측은 다양한 분야 및 지역의 사용자들을 의미한다. AIMS 모듈의 독립성 및 확장성은 중앙의 부분에서 고려되었다. rSQM, rSDQDM은 기후변화 시나리오 자료를 기반으로 하는 통계적 상세화 모듈이며, rForecast는 계절예측 기반 상세화 모듈이다. rAnalysis4CC는 상세화 된 기후변화 시나리오 자료를 사용자가 최종 사용하기 전에 사용자 중심의 결정을 위해 필요한 기초적인 분석 수행을 목적으로 하는 모듈이다. rDrought는 상세화 된 기후자료를 이용하여 EDI (Effective Drought Index)를 이용한 가뭄 모델링을 위한 모듈로서 기후변화 및 계절예측에 모두 사용 가능하다.

앞서 언급된 모듈들은 다양한 개발자들의 자발적인 참여를 통한 독립성 및 확장성을 고려하기 위해서 통계언어인 R 기반 패키지로 개발되었다. 즉 AIMS라는 플랫폼 없이도 R이라는 범용적인 플랫폼을 통해서도 동일한 작업이 독립적으로 수행이 가능하다. 예를들어 rSQM 모듈은 R 사용자들의 공식 패키지 저장소인 CRAN (Comprehensive R Archive Network)에 등록되었으며 (<https://cran.r-project.org/web/packages/rSQM/>), 사용

Table 1. R-based packages for considering independency of individual packages and extensibility of AIMS

Packages	Descriptions
RSQM	<ul style="list-style-type: none"> Simple Quantile Mappin: Statistical downscaling package can be applied at a station level using daily CMIP5 climate change scenario data and empirical quantile mapping technique R-CRAN: https://cran.r-project.org/web/packages/rSQM/ GitHub: https://github.com/APCC21/rSQM
RSDQDM	<ul style="list-style-type: none"> Spatial Disaggregation Quantile Delta Mapping: Statistical downscaling package which conducts spatial disaggregation (SD)using the inverse distance weight and bias-correction based on Quantile Delta Mapping (QDM) method for maintaining signals of original GCMs in all ranges of quantile GitHub: https://github.com/APCC21/rSDQDM
RSForecast	<ul style="list-style-type: none"> Statistical downscaling package for seasonal forecast information which uses Simple Bias Correction (SBC), Moving Window Regression (MWR), Climate Index Regression (CIR), Observation-based Moving Window Regression (MWR-Obs) approaches for forecasting monthly precipitation and temperature over the target area and conducting spatial downscaling based on the Mahalanobis Distance (MD) sampling approach for generating daily weather data at a station level GitHub: https://github.com/APCC21/rSForecast
RAnalysis4CC	<ul style="list-style-type: none"> Package for user-centered climate change scenario downscaling which conducts raw GCM analysis, reproducibility analysis using climate extreme indices for the past, analysis of signal changes for the future, reproducibility analysis considering spatial correlation among weather stations, estimation of weight factor for each GCM and uncertainty ranges GitHub: https://github.com/APCC21/rAnalysis4CC
RDrought	<ul style="list-style-type: none"> Effective Drought Index (EDI) based R packages for drought monitoring, drought forecasting, and climate change impact assessment on drought characteristics such as duration, intensity, and frequency GitHub: https://github.com/APCC21/rDrought

자는 AIM 없이도 rSQM 패키지를 이용하여 독립적으로 상세화를 수행할 수 있다. 이는 기존에 사용자 커뮤니티 층이 가장 두터운 R 개발자들을 AIMS 플랫폼으로 초대하여 개별 개발자들의 크레딧을 존중해 줌과 동시에 자발적인 참여를 통한 플랫폼의 확장성을 유도하고, 최종적으로는 사용자들에게 다양한 선택의 폭을 넓혀 줌으로서 기후서비스의 질을 높이고자 함이다. 또한 CRAN에 등록되지 않은 모듈들은 GitHub를 통해서 코드를 공개하여 개발자들의 자발적인 참여를 유도하였다. 개발되고 있는 모듈 별 설명 및 소스코드 링크는 Table 1에 제시되어 있다.

3.2.3 AIMS 다운로드 및 인터페이스

현재 공개된 AIMS버전은 1.1.2로서 AIMS 홈페이지 (<http://aims.apcc21.org>)를 통해서 다운로드 받을 수 있으며 AIMS 관련 논의는 Google Groups에서 회원 가입을 통해서 가능하다 (https://groups.google.com/forum/#!forum/apcc_aims).

3.2.4 AIMS 발전 방향 및 기대효과

AIMS는 처음부터 Fig. 7과 같이 개인용 컴퓨터에 설치하여 사용하는 AIMS 클라이언트 프로그램 (AIMS Client Application)과 이와 연동되는 AIMS서버 (AIMS Server)로 구성되어 있으며 플랫폼 관점에서 고려되었다.

우선 개발자 관점에서 살펴보면, AIMS개발자에 의해 업데이트된 최신 버전의 클라이언트 프로그램은 AIMS 서버를 통해 사용자가 설치하게 된다. 또한 외부의 모듈 개발자들도 개발된 R 패키지를 CRAN에 업데이트함으로써 AIMS 클라이언트 사용자들이 최신의 기능을 활용할 수 있다. 사용자 관점에서 살펴보면, AIMS 클라이언트를 직접 사용하는 상세화 사용자의 경우 통계적 상세화를 위해서는 대상지역의 관측 기상자료를 AIMS 클라이언트 프로그램을 통해 업로드 하는 것이 필요하며, 업로드 된 관측 자료는 AIMS 서버에 저장된다. AIMS 서버에 수집된 다양한 지역 (국가)의 관측 자료는 웹기반 사용자들에게 공유되어 관심 지역 및 적용 분야에서의 선행 연구 및 상세화 자료의 공유 등 여러 목적으로 사용될 수 있다.

기후서비스 관점의 플랫폼은 다양한 기후정보의 공급자와 사용자가 쌍방향으로 정보를 공유할 수 있는 장을 의미한다. 대부분 생산되는 기후정보는 전지구기후모형 (Global Climate Model, GCM) 또는 지역기후모형 (Regional Climate Model, RCM)에 의해 생산되기 때문에 응용분야 사용자들이 관심을 갖게 되는 공간규모 (국가 규모, 국가 내 유역규모, 또는 필지구모)와 많은 차이를 보인다. 또한 기후자료는 최첨단 모델링 기술을 요구하기 때문에 선진국 중심의 소수 생산자에 의해 생산되고 있는 반면에 기후정보의 수요자들은 기후변화에 취약한 다수의 개발도

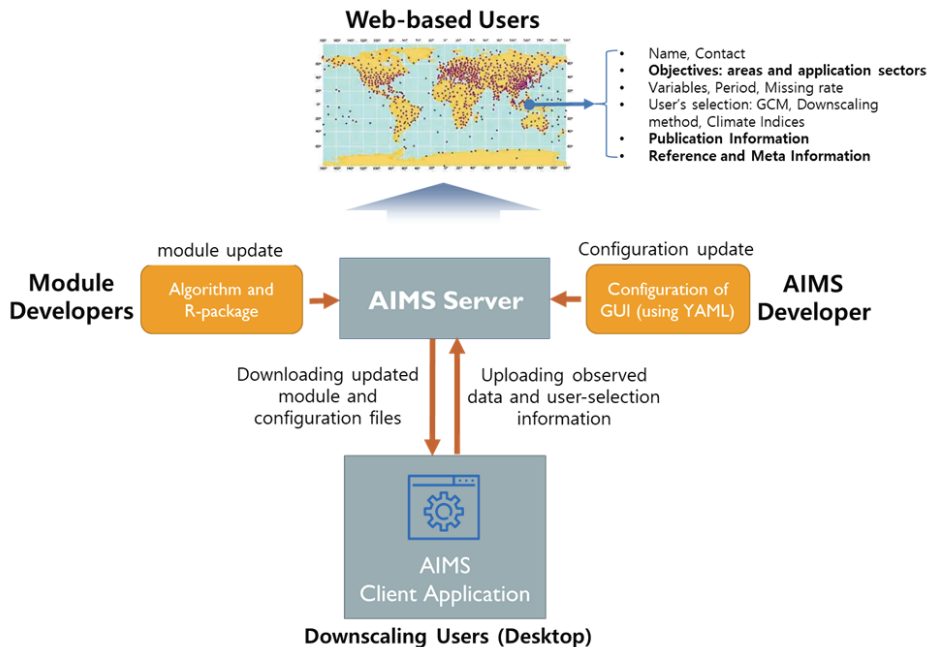


Fig. 7. Linkage between AIMS client application and web-based AIMS server.

상국들이다. 사용자 관점에서 살펴보면 농업 및 수자원을 포함한 다양한 적용 분야가 있고, 수자원 분야와 같은 동일한 적용 분야 내에서도 가뭄 및 홍수와 같은 세부 분야로 나뉘질 수 있으며, 적용 대상지역의 다양한 위치와 공간적 규모를 고려하면 무수히 많은 사용자들이 존재함을 의미한다. 따라서 플랫폼 개념의 서비스는 글로벌 스케일의 기후정보 생산자들과 무수히 많은 응용분야 사용자들의 자발적인 참여를 전제로 하여 새로운 가치의 기후서비스를 만들어 가는 것을 목적으로 한다. 따라서 AIMS의 플랫폼 관점의 접근은 APCC 내부에서 생산되는 자료, 개발된 툴, 가이드라인만을 담은 것이 아니라 전 세계에 존재하는 기후정보 생산자들, 상세화 기법 및 분야별 모델 개발자들에 의해 만들어 지는 결과를 플랫폼을 통해 공유함으로써 Fig. 3에서 제시된 수평적 연계를 구축하는 것을 목적으로 한다.

하지만 기후변화 취약성 평가 등을 통해 적응 정책을 수립하는 사용자들에게는 상세화 자료를 생산하기 위해 개발된 AIMS클라이언트의 직접적인 활용성은 제한적일 수밖에 없다. 따라서 웹기반의 AIMS서버는 AIMS클라이언트에서 생산된 상세화 자료를 기후노출 인자로 사용하여 기후변화 영향 또는 취약성 평가를 수행할 수 있는 서비스로 연계 또는 발전해갈 필요가 있다. 예를 들어 세계은행(World Bank)에서는 기후정보를 기반으로 하여 개발 및 정책결정을 위한 Climate Change Knowledge Portal (<http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/>)을 구축하여 활용하고 있으며 아시아개발은행에서도 이와 비슷한 기후변화를 고려한 위험관리 서비스를 개발하고 있다. 이와 같이 현재 보편적으로 활용되고 있는 서비스들은 먼 미래에 대한 기후변화 관점의 취약성 평가를 목적으로 하고 있으나, AIMS서버는 계절예측 자료를 기반으로 하는 수개월 이후의 취약성 평가로의 확장을 포함하여 갈수기의 녹조 및 저수지 관리 등과 같이 다양한 분야의 실제 의사결정에 활용될 수 있도록 개발되어야 한다. 또한 현재 AIMS는 관측 지점을 기반으로 상세화 서비스를 제공하고 있으나 적응 정책 수립을 위해 고해상도 상세화 자료에 대한 수요가 증가하고 있는 상황에서 외부기관의 고성능 컴퓨터와의 연동을 고려할 수 있는 서비스 개발 또한 고려되어야 한다.

본 연구에서 제시한 AIMS플랫폼은 다양한 지역 및 분야에서 사용자 요구가 반영된 시·공간적 상세화 자료를 보다 간편하게 생성할 수 있으며 이를 통해 APCC에서 제공하는 기후자료의 활용성을 극대화할 것으로 기대된다. 개발도상국은 기후정보 및 사회적 인프라 부족으로 인해 기후변화에 매우 취약하여 이에 대한 기후변화 및 변동성에

대한 적응능력의 증대가 요구된다. 따라서 향후 개발된 AIMS플랫폼을 통해 다양한 분야의 국제적 선도그룹과 협력관계를 구축하여 공식적인 기후정보서비스가 가능토록 하는 것이 필요하며, 다양한 분야의 Global 전문기관과 협력을 통해 개발도상국 사용자를 대상으로 하는 역량강화 교육의 확대를 통해 기후변화에 취약한 개발도상국의 적응역량을 증대하는데 도움이 될 것으로 기대된다. 또한 국내 사용자뿐만 아니라 해외 사용자들에 대한 지원을 통해 국내 기업들의 기후변화 관련 해외사업에의 진출에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

국내 기후변화 적응을 위한 사용자 중심의 기후서비스체계 구축을 위해서 국제기상기구의 GFCS의 5개 요소에 해당되는 국내의 상황을 살펴보았다. 국내의 기후정보는 기상청을 중심으로 관측자료, 초단기예측, 단기예측, 중기예측, 장기예측 및 기후변화 시나리오 정보 등 다양한 시간규모의 기상·기후 정보가 생산되고 제공되고 있다. 최근에는 AWS 및 레이더의 관측 자료를 중심으로 농업, 산림 및 수자원 분야를 중심으로 자체적인 관측 및 자료제공 시스템이 운영되고 있으나 사용자 입장의 통합된 서비스는 제공되지 않고 있는 실정이다.

기상·기후 정보의 응용분야 활용의 경우는 농업 및 수자원 분야를 중심으로 농림기상센터 및 수문기상협력센터를 통해 고려되고 있으나 기상정보 활용을 중심으로 추진되고 있어 중기(계절 내 예측) 및 장기(계절예측) 예측정보 및 기후변화 관련 기후정보의 활용 측면에서는 미흡한 실정이다.

따라서 국내의 기상·기후 정보의 생산자인 기상청을 중심으로 국외의 다양한 기상·기후 정보 생산자들이 제공하는 다중모형 기반 정보를 국내의 다양한 사용자가 활용할 수 있도록 수집하고, 기후-응용분야의 융합연구를 통한 핵심기술을 개발하며, 이를 기반으로 기후정보의 서비스까지 담당할 수 있는 기상·기후-응용 융합센터의 설립을 제안하였다. 융합센터는 다중모형앙상블 기반의 기후정보 서비스, 이음새 없는 기후정보 서비스, 다학제 융합 기반 기후정보 서비스를 중심으로 기후서비스체계의 사용자 인터페이스 플랫폼(UIP)의 제도적 플랫폼으로서의 역할을 수행해 가는 것이 필요하다.

사용자 인터페이스 플랫폼의 기술적 플랫폼으로서 개발된 AIMS는 다양한 기후정보를 기반으로 하여 사용자 관점에서 상세화를 수행할 수 있고, 상세화 된 자료를 다양한 분야의

모델링에 쉽게 적용함으로써 최종적인 의사결정에 활용될 수 있는 정보 생산을 목적으로 개발되었다.

AIMS는 플랫폼 관점에서 개발자와 사용자들의 자발적인 참여를 유도하고 다양한 분야의 국제적 선도그룹과 협력관계를 구축하여 역량강화를 포함한 공식적인 기후정보서비스를 확대시켜 기후변화에 취약한 개발도상국의 적응역량을 증대하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

REFERENCES

- Bhave AG, Mittal N, Mishra A, Raghuwanshi NS. 2016. Integrated Assessment of no-Regret Climate Change Adaptation Options for Reservoir Catchment and Command Areas. *Water Resour Management* 30(3): 1001-1018.
- Cannon AJ, Sobie SR, Murdock TQ. 2015. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate* 28(17): 6938-6959.
- Cho J, Hwang S, Go G, Kim K-Y, Kim J. 2015. Assessing the Climate Change Impacts on Agricultural Reservoirs using the SWAT model and CMIP5 GCMs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(5): 1-12. (in Korean with English abstract)
- Cho J, Ko G, Kim K, Oh C. 2016. Climate Change Impacts on Agricultural Drought with Consideration of Uncertainty in CMIP5 Scenarios. *Irrigation and Drainage* 65(S2): 7-15.
- Cho J, Cho W, Jung I. 2018. rSQM: Statistical Downscaling Toolkit for Climate Change Scenario using Non Parametric Quantile Mapping [Internet]. [place unknown]; [cited 2018 Feb 24]. Available from: <https://cran.r-project.org/web/packages/rSQM/index.html>
- Dittrich R, Wreford A, Moran D. 2016. A survey of decision-making approaches for climate change adaptation: Are robust methods the way forward? *Ecological Economics* 122(C): 79-89.
- Eum HI, and Cannon AJ. 2016. Intercomparison of projected changes in climate extremes for south Korea: Application of trend preserving statistical downscaling methods to the CMIP5 ensemble. *International Journal of Climatology* 37(8): 3381-3397.
- Gong YJ. 2017. A study on introduction and development of global framework for climate service in health for adaptation to climate change. MS Thesis, Korea University.
- Hallegatte S. 2009. Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global Environmental Change* 19(2): 240-247.
- Hourcade JC, Chapis T. 1995. No-Regret Potentials and Technical Innovation: A Viability Approach to Integrated Assessment of Climate Policies. *Energy Policy* 23(4/5): 433-445.
- Hwang S, Her YG, Chang S. 2013. Uncertainty in Regional Climate Change Impact Assessment using Bias-Correction Technique for Future Climate Scenarios. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(4): 95-106. (in Korean with English abstract)
- Kim KJ. 2010. "National Adaptation Center for Climate Change" leading climate adaptation in Korea Peninsula-Korea Adaptation Center for Climate Change-. *Water Future*. 43(1): 35-39.
- Lee BL, Federica R, Raymond M, Robert S. 2013. Conference Report : Implementation Strategy of Global Framework for Climate Service through Global Initiatives in AgroMeteorology for Agriculture and Food Security Sector. *Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology* 15(2): 109-117. (in Korean with English abstract)
- NIER, 2008. User's manual for Climate Change Adaptation Toolkit based on GIS. CCGIS ver 2.2. National Institute of Environmental Research.
- Oh KY, Lee MJ, Han DE. 2016. Development of Web-Based Supporting Tool(VESTAP) for Climate Change Vulnerability Assesment in Lower and Municipal-Level Local Governments. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 19(1): 1-11. (in Korean with English abstract)
- Semenov MA, Barrow EM, Lars-Wg A. 2002. A stochastic weather generator for use in climate impact studies. User Man Herts UK.
- Wilby RL, Dawson CW. 2013. The Statistical DownScaling Model: insights from one decade of application. *Int J Climatol*. 33:1707-1719.
- WMO, 2014. Implementation Plan of the Global Framework for Climate Services (GFCS)