

장기 수질예측 자료의 갈수기 수질관리 의사결정 활용 방안

Use of long-term water quality forecast in decision-making for
dry-season water quality management

조재필

장기 수질예측 자료의 갈수기 수질관리 의사결정 활용 방안

Use of long-term water quality forecast in decision-making for
dry-season water quality management

조재필

발간사

최근 4대강 유역에서 조류의 대량 증식은 심각한 사회적인 문제가 되고 있으며 2015년 한해도 4대강 수계에 녹조류 발생이 반복 되었습니다. 일반적으로 조류 발생의 주요 원인으로 영양염류의 유입, 수온과 일사량, 체류시간 등이 알려져 있어 기후 요소가 조류의 발생에 직간접적으로 영향을 미치고 있습니다. 특히 우리나라는 강수량의 계절변동이 심해 수질 관리 측면에서도 어려움이 있습니다. 예를들어 강수량이 적은 봄철에는 하천수량이 감소하고 강우에 따른 오염물질의 유입과 상승하는 기온으로 인하여 조류 번식의 가능성이 높습니다. 환경부에서는 갈수기에 비점오염원의 집중관리와 같이 수질오염발생원에 대한 사전점검 등을 통해 수환경 변화를 고려한 수질오염사고를 사전에 예방하고자 노력하고 있지만 기후 요소의 변동 특성을 고려하여 대응하고 있지는 못한 실정입니다.

한편 최근 극한 기상 현상은 더욱더 심화되고 반복 횟수도 증가되고 있는 상황이며, 이에 수질관리는 발생한 문제를 수습하는 것이 아니라 발생 가능한 문제를 사전에 예측하여 예방하는 방향으로 전환되고 있습니다. 이와 같이 사전 예방을 위해서는 장기 기후예측 정보가 필요하지만 이를 실제 의사결정에 활용하는 경우는 국내외에서 아직 사례를 찾기 어려운 실정입니다. 이는 기후예측 정보를 수질관리를 위한 의사결정에 활용하기 위해서는 예측성을 포함하여 해결되어야 하는 많은 어려움이 있음을 의미합니다.

이에 본 연구는 2014년도에 생산된 APEC 기후센터의 기후예측 자료를 포함한 기후정보를 활용하여 통합 수문·수질 장기 예측을 위해 개발된 기반기술을 개선

하여 실시간 기후예측 시스템으로 발전시키고 영산강 유역의 조류 발생을 사전에 예방하기 위해 적용한 점에서 의미가 있다고 생각합니다. 특히 학제간 융합 연구가 중요한 시점에서 기후 및 수질 예측 분야의 융합을 위한 수평적인 연계에서 한 걸음 더 나아가 의사결정 과정에 필요한 수직적 연계를 위한 구체적인 활용 방안 제시는 본 연구의 중요 성과로서 향후 지속적으로 추진되어야 할 것입니다. 이를 통해서 장기기후예측을 기반으로 한 기후서비스는 본 연구에서 주어진 대규모 공공하수처리시설의 방류수 수질관리 뿐만 아니라 비점오염 부하량 사전 관리를 포함하여 수질관리 부문의 장기적인 사전예방 대책 마련에 활용될 수 있을 것입니다.

본 연구를 수행한 조재필 박사뿐만 아니라 연구 과정에서 귀중한 조언을 아끼지 않으신 부산대학교 신현석 교수와 세종대학교 배덕효 교수께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 본 연구가 장기 기후예측 정보를 활용한 사전 예방 차원의 수질관리와 이와 관련된 실질적인 정책 마련을 위한 시금석이 되기를 기대합니다.

2016년 1월
APEC 기후센터
소장 정진승

ABSTRACT

Demand from water resource managers is increasing for seasonal climate prediction information with a lead time of several months, as this information can provide key knowledge on issues like long-term dam inflow and water quality prediction information. Long-term water quality forecasts are particularly important in watershed management because they allow for these managers to implement proactive water quality control management techniques.

The objectives of this study are: (1) to develop a hybrid downscaling technique for predicting long-term precipitation and temperature on the Korean peninsula, by considering both the multi-model based prediction data provided by the APEC Climate Center (APCC) and the statistical prediction information based on teleconnection for water resources management; and (2) to evaluate the applicability of the seasonal forecast information in long-term future water quality predictions by using the predicted climate information as inputs to water quality modeling.

APCC produces climate prediction information utilizing a multi-climate model ensemble (MME) technique. In this study, four different downscaling methods, in accordance with the degree of seasonal climate prediction information utilization, were developed in order to improve predictability and to refine the spatial scale. These methods include: 1) the Simple Bias Correction (SBC) method, which directly uses APCC's dynamic prediction data with a 3 to 6 month lead time; 2) the Moving Window Regression (MWR) method, which indirectly utilizes dynamic prediction data; 3) the Climate Index Regression (CIR) method, which predominantly uses observation-based climate indices; and 4) the Integrated Time Regression (ITR)

method, which uses predictors selected from both CIR and MWR. Then, sampling-based temporal downscaling was conducted using the Mahalanobis distance method in order to create hourly weather inputs to the HSPF-EFDC modeling system in the National Institute of Environmental Research (NIER).

The SBC method shows the highest model selection for temperature forecast, while the MWR method shows the highest selection for precipitation prediction. For both precipitation and temperature prediction, there were difficulties when selecting models for the period of January to June. The greatest Temporal Correlation Coefficient (TCC) values occurred during the months of December and September for precipitation and temperature, respectively.

A framework for delivering water quality prediction information for decision-making was presented by considering four different levels of information including: 1) long-term water quality prediction information, 2) risk index information for each river segment, 3) best management practice information, and 4) economic analysis results. For the long-term water quality prediction information, the modeling-based predictability of water quality within the Yeongsan Basin was evaluated by using predicted data for January - June, 2014. The risk index, concerning the mass proliferation of blue-green algae in the mainstream, was considered by using the similar concept utilized for the vulnerability assessment of climate change. This consists of three components including exposure, sensitivity, and adaptive capacity. In terms of the best management practices, the scenario to control the total phosphorus concentration in the effluent of sewage treatment facilities, was selected. Then HSPF-EFDC was applied to assess the degree of water quality improvement through the management activities.

A comparison of observed Chlorophyll-a concentration (Observed-Chla), simulated Chlorophyll-a concentration using observed weather data (EFDC-Observed), and simulated Chlorophyll-a concentration using forecasted MME data (EFDC-Forecast),

shows that more uncertainty occurs in water quality modeling procedures than the seasonal forecasting procedure. Risk assessments showed that risk due to algae increased in the downstream section. Even though the downstream section has higher water storage in agricultural reservoirs and lower Chlorophyll-a concentrations, the risk index was highest there mainly due to sensitive index in consideration of water demands.

For a legal and institutional approach for long-term water quality prediction, it was suggested to make amendments to the provisions of water quality prediction and response measures regarding: the definition of water quality prediction, predicting water quality constituents, target area, announcement, and configuration of the water quality council. In addition, legal and institutional improvement in the higher level law was recommended in order to take advantage of the long-term prediction information for the preservation of ecology and water quality. It was also proposed that content on the application of various water quality management techniques, which utilize the long-term climate prediction information for prevention purposes, should be added to the water and environment management guidelines and plan. Regarding the construction of the long-term water quality prediction system, a GIS-based prediction system was suggested to improve the utilization of spatial information as proactive response and preventative measures, such as spatial distribution of pollutant sources and past water quality trends related to water quality management.

Keywords: *Seasonal Forecast, Long-term Prediction, Water Quality, Downscaling, Climate Index, Multi-Model Ensemble (MME), Teleconnection, Algae*

핵심용어: 계절예측, 장기예측, 수질, 상세화, 기후인자, 다중모형앙상블, 원격상관, 조류

목 차

1. 서론	1
2. 대상 유역 특성 분석	4
3. 연구 방법	12
3.1 기후예측 예측성 정보	13
3.1.1 실시간 계절예측 시스템	13
3.1.2 기후정보 (Climate Information)	18
3.1.3 예측성 평가	23
3.2 장기 수질예측 불확실성 정보	25
3.3 구간별 수질 위험도 정보	27
3.4 최적 관리방안 정보	30
4. 연구결과	32
4.1 기후예측 예측성 정보	32
4.2 장기 수질예측 정보	49

4.3 구간별 수질 위험도 정보-----	59
4.4 최적관리 방안 정보-----	66
5. 정책제언-----	72
6. 결론-----	80
7. 향후 연구 방향-----	85
Ⅱ 참고 문헌-----	89
Ⅲ 부록	
1. MWR 기반 예측을 위해 선정된 예측인자 리스트-----	90
2. 한반도 강수 및 기온 예측 결과(1983~2014)-----	103
3. 2015년 8-9월 조류 발생 예측 결과 보고-----	111

1. 서론

우리나라는 강수량의 계절변동이 심해 수자원 관리뿐만 아니라 수질 관리 측면에서도 어려움이 있다. 특히 강수량이 작은 갈수기에는 하천유지수량이 적어 소량의 오염물질 유입으로도 심각한 수질오염으로 확대될 우려가 있다. 하천수량이 감소하는 봄철에 초기 강우로 인한 오염물질의 유입 및 기온상승에 따른 조류 번식 등으로 인하여 수질이 악화 되어 물고기 폐사 등의 우려가 높다. 따라서 환경부에서는 갈수기에 비점오염원 집중관리와 같이 수질오염발생원에 대한 사전점검 등을 통해 수환경 변화를 고려한 수질오염사고를 사전에 예방하고자 노력하고 있다. 하지만 이와 같은 갈수기 수질관리를 위해서 평년을 기준으로 강수량이 적거나 많은 경우와 같이 연변동 특성은 고려되지 않고 있는 상황이다.

최근 4대강 유역에서 조류의 대량 증식으로 인하여 사회적인 문제가 되고 있다. 조류의 대량 증식은 스킴발생에 의한 심미적 영향, 남조류 독소에 의한 인간 및 동물의 건강에 미치는 영향, 심층산소 고갈에 따른 생태학적 영향, 생공용수 사용의 제한 등에 따른 경제적 영향 등 다양한 분야에 부정적인 영향을 미치고 있다(환경부, 2010). 국내 조류 발생은 수문학적으로 갈수기(겨울-봄) 및 풍수기(여름-가을)에 따라서 규조류-녹조류·남조류-규조류로 조류 군집이 달라지는 특성을 보이며, 이는 조류가 선호하는 계절적인 물환경 구조에 기인한다(심재기, 2012). 조류 발생의 주요 원인으로서는 질소와 인 등의 영양염류의 유입, 수온과 일사량, 체류시간과 관련된 수체의 안정성 등이 기존의 연구들을 통해 알려져 있다(환경부, 2015; 한혜진 등, 2014). 국내 영양염류 유입은 풍수기의 강우유출수에 의한 비점오염 유입과 갈수기 하수처리 시설 방류수 등과 같은 점원오염 유입으로 크게 구분되는 특성을 보인다. 또한 조류 발생의 규모에 영향을 미치는 일사량 및 수온 등 물리적 요인들도 계절 변동 특성이 고려되어야 한다. 따라서 조류의 대량 증식의 사전예방을 통해 다양한 분야에서의 부정적 영향을 최소화하기 위해서는 조류 발생의 주요 원인들의 계절적인 특성을 이해하고 조류 관리를 위해 적극적으로 활용하는 것이 중요하다. 또한 수체의 특성에 따라서도 조류 대발생 경향이 상이한데 체류시간이 짧은 하류의 소형 하천형 인공호와 대규모 강의 본류에서는 갈수기시 조류가 대발생하고 있다(환경부, 2010). 갈수기에는 대규모 하수처리시설의 방류수량이 전체 하천유량 중 차지하는 비중이 커지기 때

문에 전체 오염부하량 중 하수처리시설에 의한 비중 또한 증가 될 수 있다.

현재 국내에서는 4대강 사업 이후 2012년부터 4대강 16개 보 구간을 대상으로 예보 발표일 이후 7일간의 수온 및 클로로필-a의 변화를 주 2회 예보하고 있으며¹⁾, 물관리 관계기관을 대상으로 웹페이지²⁾를 통해 예측정보를 제공하고 있다. 수질예보제는 「수질예보 및 대응조치에 관한 규정(환경부훈령 제 1053호, 개정 2013.06.28.)」³⁾에 근거하여 친수활동 보호를 목적으로 국립환경과학원장이 발령하게 된다(한혜진 등, 2014). 하지만 단기 예측자료 기반의 7일 수질예보 자료는 선행예측기간의 한계로 인하여 조류 발생을 사전에 예방하는 목적으로 사용하는데 한계를 가지고 있다.

국립환경과학원에서는 「수질예보 및 대응조치에 관한 규정」을 근거로 3개월 선행 예측기간의 장기수질예보를 시행할 계획을 가지고 있으며, 2012년 하반기에는 기상청의 장기예측자료를 이용하여 시범예보를 수행한 바 있다 (국립환경과학원, 2013). 또한 국내에서 APCC에서 보유하고 있는 다중모형 기반의 전지구규모의 기후예측 정보의 수문·수질 분야에의 활용을 위한 기후, 수량, 수질의 장기 예측 가능성을 평가 위해서 다양한 계절예측 정보의 상세화 기법을 개발하고 적용한 바 있다 (조재필, 2014). 이와 같은 수문·수질 분야에서 계절예측 정보의 활용을 위한 연구자 레벨의 수평적 연계에 더하여 2012년도 APEC기후센터(APCC)에서 주최한 International Conference on Water, Climate and Policy 워크샵에서는 수자원 관리자 및 정책결정자들의 기후정보 활용을 위한 수직적 연계성이 강조된 바 있다⁴⁾.

따라서 본 연구에서는 1) 2014년도 연구를 통해 개발된 상세화 기법들을 실시간 예측에 활용할 수 있도록 개선하고, 2) 상세화된 계절예측 자료를 유역 규모의 갈수기 조류 문제에 적용함으로써 대규모 공공하수처리시설의 방류수 수질관리를 통한

1) <http://water.nier.go.kr/front/algaeInfo/algaeInfo04.jsp>

2014년부터는 상수원으로 이용되는 하천에 대한 조류경보제 적용 필요성에 따라 3개보 구간에 대해 '수질예보 및 대응조치에 관한 규정'에 의한 '수질관리단계' 발령을 배제함에 따라 13개 보 구간에 대한 단기수질예보 정보를 제공하고 있다.

2) <http://wqcast.nier.go.kr:8080/>

3) <http://law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2000000024386>

4) 2012년도 기후센터에서는 International Conference on Water, Climate and Policy (ICCWP) 2012라는 국제 워크샵을 개최하여 기후, 수자원, 정책결정자 등 다양한 분야의 전문가들을 대상으로 의견을 수렴하였다. 본 워크샵을 통해서 기후정보가 수자원분야의 의사결정에 활용되기 위해서는 기후정보를 수자원분야 전문가들이 쉽고 빠르게 활용될 수 있도록 연구자 레벨에서의 수평적인 연계의 중요성에 더하여 연구자들에 의해 생산되는 예측정보가 수자원/수질 관리자 및 이를 뒷받침해 줄 수 있는 정책결정자들에게 활용이 될수 있도록 수직적 연계성이 확보되어야 함이 강조되었다.

사전예방 차원의 관리방안들을 도출하여, 3) 계절예측 기반의 수질관리 의사결정 과정에서 예측정보의 최종 사용자들이 활용할 수 있는 정보전달 방법을 제시하고자 한다. 이를 통하여 계절예측 자료의 수질관리 분야 활용에 있어서 상세화기법 개발을 통한 수평적 연계를 기반으로 의사결정 과정의 수직적 연계를 위한 구체적인 활용 방안을 제시하고자 한다.

2. 대상 유역 특성 분석

본 연구의 대상유역으로 영산강 유역을 선정하였다. 영산강 유역은 4대강 중에서 유역의 규모가 작지만 광주광역시와 나주시로부터 유입되는 하수처리 방류수의 비중이 전체 유량에 미치는 영향이 크기 때문에 계절예측정보를 활용한 갈수기 조류 대발생 사전예방을 위한 대상유역으로 선정하였다. Figure 1에서와 같이 영산강 수계내에서 가장 규모가 큰 광주제1하수처리시설의 직하류에 위치한 마륙 유량관측소에서 관측 월평균유량(2012년~2014년)과 광주제1하수처리장의 시설용량을 비교할 때, 처리시설용량이 10월~6월 사이의 하천 평균유량의 50%에 근접하고 있음을 보여주고 있다.

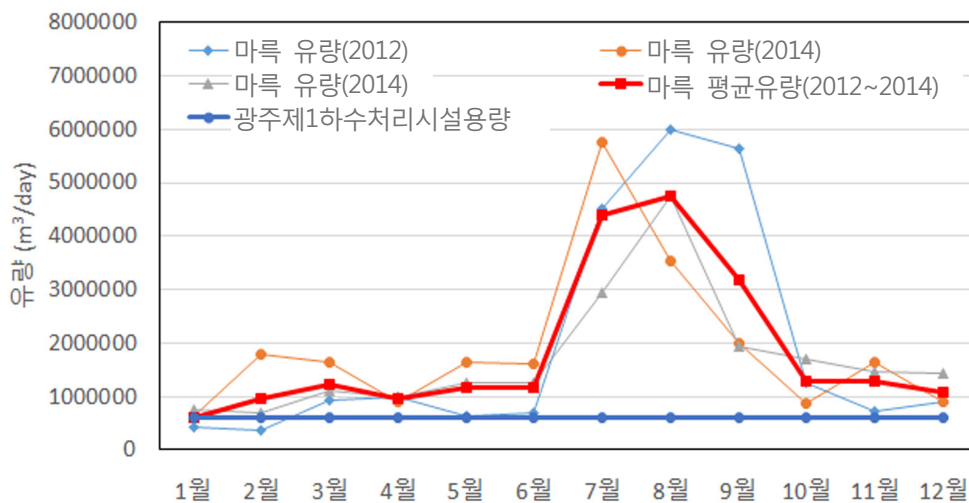


Figure 1 마륙지점 월평균 유량과 광주제1하수처리시설용량 비교

영산강 유역은 한반도 남서부 전라남북도에 위치(동경 126°26′12″~127°06′07″, 북위 34°40′16″~35°29′01″)하며 전라북도 정읍시, 광주광역시, 전라남도 나주시, 목포시, 담양군, 장성군, 영광군, 화순군, 함평군, 무안군, 영암군의 전체 또는 일부를 포함한다. 유역면적은 3,455km², 유로연장은 129.5km이며, 유역의 평균경사는 19.5%로 비교적 완만하다. 하천에 인접하여 농경지가 발달해 있으며 영산강의 중상류부에는 광주광역시와 나주시 등의 도심지 및 인구밀집지역이 위치하고 있다. 전체 유역면적

3,455km² 중 임야와 농경지가 각각 1,749km² (51%)와 1,161km² (34%)로 전체 유역면적의 85%를 점유하고 있으며, 도시지역이 242km² (7%)를 차지하고 있다. 유역내 연평균 강수량은 1,440.6mm 로 유역의 수자원총량은 4,977.3 백만m³ 이며 이 중 유출량은 2,936.6백만m³으로 전체 강수량의 59%를 차지하며 유출량 중 평상시 유출량은 792.9백만m³ (27%)이다(익산지방국토관리청, 2009). Figure 2은 영산강 유역의 DEM, 토지이용도, 토양도를 각각 보여주고 있다.

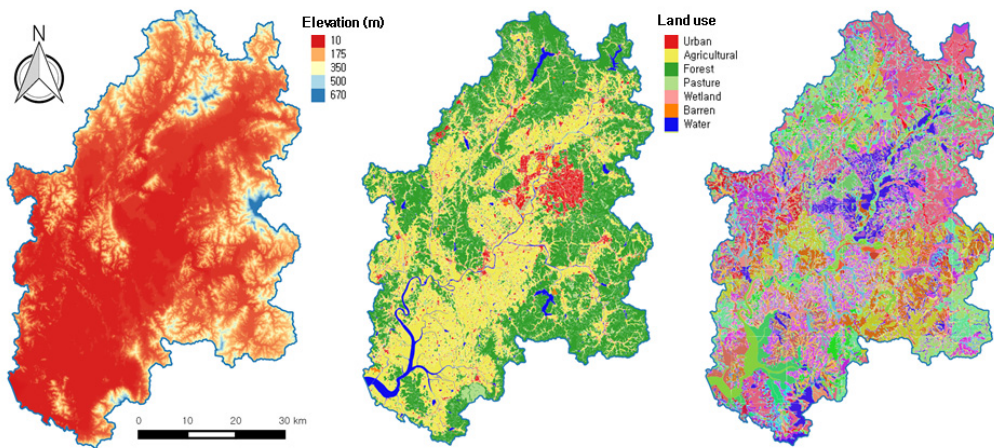


Figure 2 영산강유역의 지형, 토지이용, 토양 분포도

영산강 유역의 주요 기상관측소, 유량측정망, 수질측정망, 주요 공공하수처리시설의 위치는 Figure 3과 같다. 기상관측소의 경우 영산강 유역 주변에 정읍, 남원, 순천, 장흥, 해남, 목포, 영광, 고창 관측소가 위치하고 있으며, 광주 기상관측소의 경우 영산강 유역의 중앙에 위치하고 있다. 영산강 본류에 위치하고 있는 일반수질관측소의 경우 최상류 지역에 담양 관측소가 위치하고 있으며, 광주제1하수처리시설 하류에는 광주2 수질관측소가, 광주제2하수처리시설 하류 및 승촌보 상류에는 광산 수질관측소가, 나주하수처리시설 하류 및 죽산보 상류에는 영산포 수질관측소가 위치하고 있다.

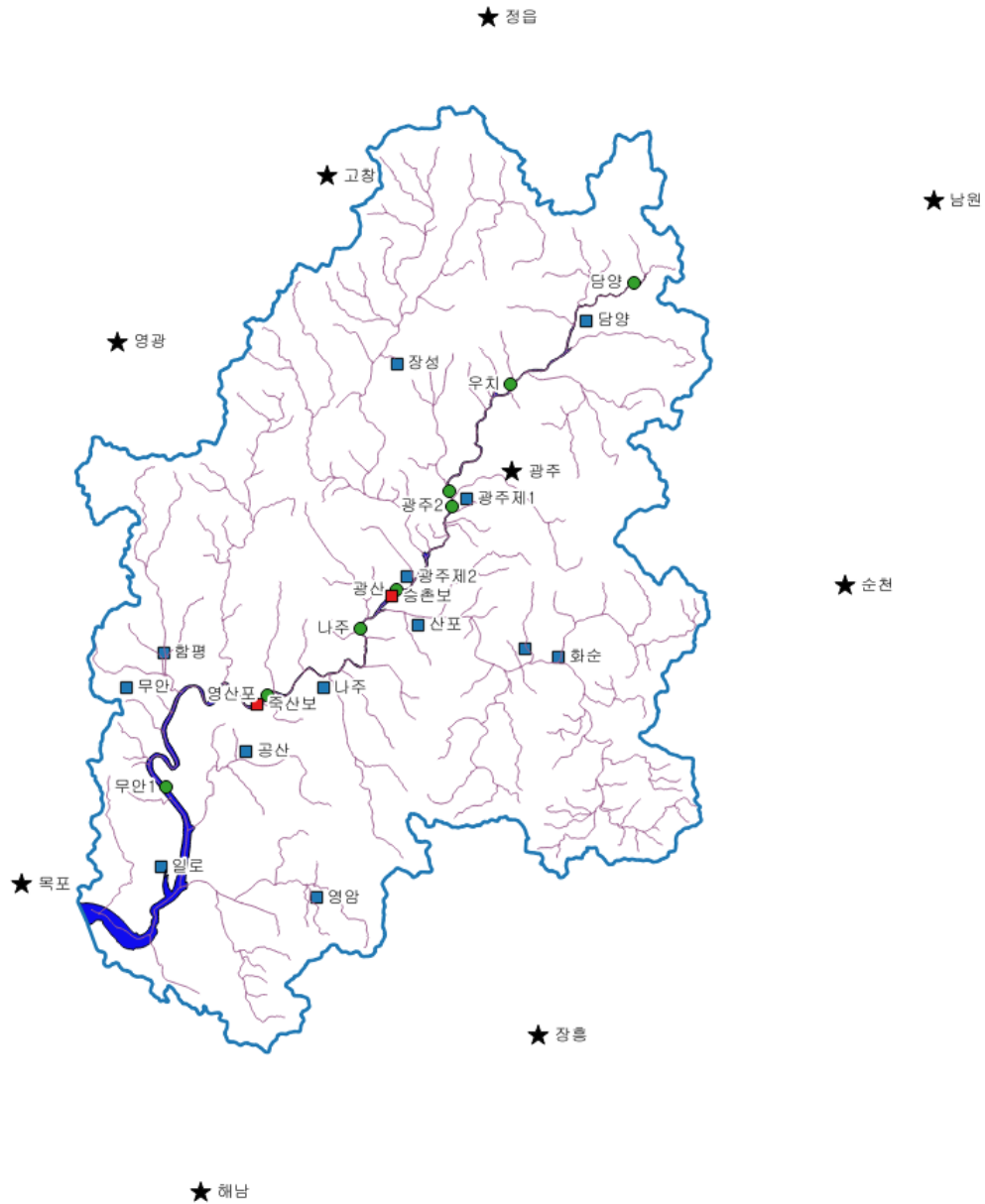


Figure 3 영산강유역 하천도 및 기상, 수질 관측소 및 주요 하수처리시설 위치도

영산강수계에는 Table 1과 같이 500톤 미만의 197개 하수처리장과 500톤 이상인 21개 하수처리장을 포함하여 총 844,551 m³/day의 처리시설 용량을 갖추고 있다. 이 중에서 광주광역시와 2개소의 처리시설을 보유하고 있는데 전체 시설용량의 85.2%

인 720,000m³/일을 차지하고 있다. 「하수도법 시행규칙」에는 시설용량이 500톤/일 이상인 공공하수처리시설의 경우 방류수 수질기준 적용을 위해 I 지역, II 지역, III 지역, IV 지역으로 구분하고 있다. 2015.1.1.에 시행된 방류수 수질기준 적용을 위한 지역구분 (환경부고시 제2014-219호, 2014.12.18., 일부개정)에 의한 영산강 유역의 대상 지역별 공공하수처리시설의 경우 II와 III 지역만이 존재한다. 광주제1, 광주제2 하수처리시설 모두 방류수수질적용 기준지역구분 중 II지역에 해당되며 기준 T-P 농도는 0.3mg/L로 적용되고 있다.

Table 1 영산강 유역내 공공하수처리시설 현황

시군	시설명	소재지	시설용량 (m ³ /일)	처리방식	지역 구분
광주광역시	광주제1(TMS)	서구 치평동 753-1	600000	NPR공법	II
광주광역시	광주제2(TMS)	광산구 본덕동 760	120000	표준활성슬러지법,MLE공법	II
나주시	나주(TMS)	나주시 운곡동 107(가야길 55)	22500	CNR 공법+여과설비	II
화순군	화순(TMS)	화순군 도곡면 죽청리 104	19000	SEIL-BiO공법+여과설비	III
광주광역시	효천(TMS)	남구 임암동 산50	16000	DMBR	III
장성군	장성(TMS)	장성군 황룡면 와룡리 399-2	11000	회전원판접촉법	III
함평군	함평(TMS)	함평군 엄다면 학야리 322-1	9000	산화구법	II
담양군	담양(TMS)	담양군 담양읍 강쟁리 1294	7000	산화구법+BSTSII	II
화순군	도곡온천(TMS)	화순군 도곡면 천암리 133	6000	표준활성슬러지법+접촉산화법	III
영암군	영암(TMS)	영암군 영암읍 망호리 173	5500	산화구법+여과시설	III
무안군	무안(TMS)	무안군 무안읍 성동리 1055-1	4500	symbio	II
나주시	산포(TMS)	나주시 산포면 내기리 915-1	3000	회전원판접촉법	III
무안군	일로(TMS)	무안군 일로읍 의산리 18-1	3000	symbio	II
장성군	삼계(TMS)	장성군 삼계면 사창리 370	2000	BSTS-2	III
화순군	화순온천(TMS)	화순군 북면 옥리 299-4	2000	표준활성슬러지법+접촉산화법	II
함평군	해보	함평군 해보면 용산리 1146-13	1300	PSBR	III
담양군	고서	담양군 고서면 주산리 39-1	1200	BSTS-2	II
영암군	신북	영암군 신북면 월평리 649	650	Y-PNR	II
나주시	공산	나주시 공산면 금곡리 19	500	표준활성슬러지법	II
담양군	대전	담양군 대전면 대치리 1135	500	DYBV+BSTS2	II
함평군	나산	함평군 나산면 월봉리 96-11	500	PSBR	III
		500톤이하 전체 시설용량	9401		

자료: 국립환경과학원 제공

관측 클로로필-a 자료는 물환경정보시스템에서 제공하는 하천수질관측소에서의 월평균 자료를 사용하였다. Figure 4은 클로로필-a 자료가 존재하는 2001년 1월 ~ 2014년 12월 기간 동안의 담양, 광산, 영산포 수질관측소에서의 월별 평균 수온, 총 질소(T-N) 농도, 총인(T-P) 농도, 클로로필-a 농도를 보여주고 있다. 수온의 경우 상류인 담양과 비교하여 하류에 위치한 광산, 영산포에서 수온이 증가하는 경향을 보였다. 수온은 1월부터 증가하다 4월에 대략 15 °C의 값을 지나 8월에 가장 높은 값을 기록한 후 이후 감소하는 경향을 보였다. T-N 및 T-P의 경우 모두 상류인 담양에서 가장 낮은 값을 보여준 반면 중간에 위치한 광산에서 가장 높은 값을 보여 주었다. 가장 하류에 위치한 영산포에서는 광산 관측소와 비교하여 T-N, T-P의 경우 모든 월에서 감소하는 경향을 보였다. 계절적으로는 유량이 적은 1~2월에 높은 농도를 보 이다가 홍수기인 7~8월에 가장 낮은 농도를 보인 후 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 클로로필-a 농도의 경우는 상류에 위치한 담양과 비교하여 하수처리장 하류에 위치한 광산 및 영산포에서 높은 경향을 보였다. 광산 및 영산포 수질관측소의 경우에는 4월에 증가하였다가 5월에 감소한 후 6월에 다시 증가한 후 서서히 감소하는 계절적인 경향을 보였다.

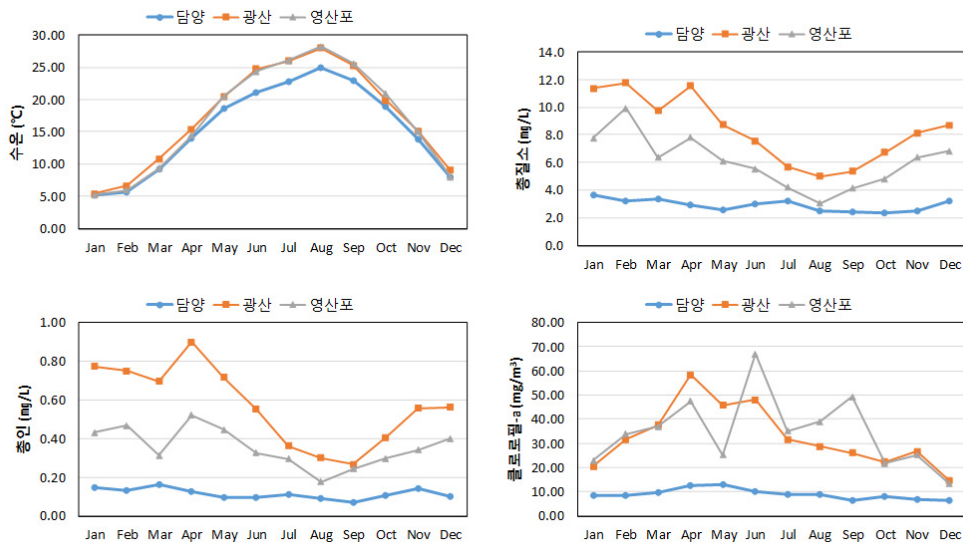


Figure 4 영산강 분류 주요 지점에서의 월별 평균 수질 비교

4대강 보의 영향을 살펴보기 위해서 승촌보 상류에 위치한 광산 관측소에서의 보 건설 전인 2001년~2009년 기간, 사업이 집중되었던 2010년~2011년 기간, 영산강 살리기사업 대부분의 공정이 마무리된 2012년 이후의 기간에 대하여 월별 수온, T-N, T-P, 클로로필-a 농도를 비교하였다. Figure 5에서와 같이 세 기간동안에 수온의 변화는 미미한 반면, T-N 및 T-P의 농도는 보 건설 이전에 모든 월에서 가장 높은 경향을 보였고 공사기간 및 보 건설 이후에 현저하게 감소하는 경향을 보였다. 이는 4대강 사업에 따른 환경기초시설 설치 지원 및 강화된 방류수 수질기준의 적용뿐만 아니라 보에 의해 증가된 유량 등에 의한 복합적인 결과라 판단된다. 반면 클로로필-a의 경우는 T-N 및 T-P의 농도가 감소하였음에도 불구하고 보 건설 이후에 수온이 증가하는 3월~5월사이에 크게 증가하는 경향을 보였다. 이는 보로 인한 체류시간의 증가에 기인하는 것으로 사료된다. 유항곡선에서 275일에 대응하는 저수량 기준 하천유량이 365일 동안 동일하게 흐른다는 가정하에 수행된 국립환경과학원의 모델링 결과에 의하면 광주2 수질관측점과 승촌보 사이의 12.4km 구간에서 체류시간이 0.44일에서 4.04일로 9.18배 길어지는 것으로 나타났다.

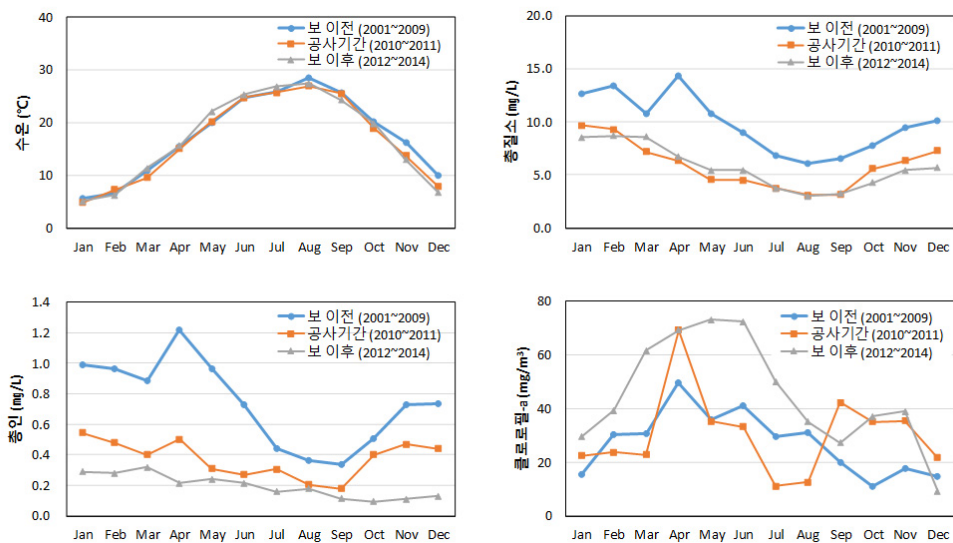


Figure 5 영산강 본류 월별 평균 수질의 4대강 보 건설 전후 비교

마지막으로 기후변수와 클로로필-a 농도와의 관계를 살펴보았다. 수온의 상승에 따라 조류 발생이 증가하기 시작하는 4월부터 강수로 인해 조류 농도가 감소하는 7월 이전에 해당되는 3개월(4월~6월)에 대해 분석을 수행하였다. 보에 의한 체류시간의 영향을 배제하기 위하여 2001년부터 2009년까지의 기간을 분석에 사용하였으며, 공공하수처리시설에 의한 영양염류의 영향을 비교하기 위해 상류에 위치한 담양 수질 관측소와 광주제1, 광주제2 하수처리시설 하류에 위치한 광산 수질관측소의 자료를 비교하였다⁵⁾. 기상자료는 유역내에 위치한 광주기상관측소의 일단위 자료로부터 월 단위 자료를 추출하여 사용하였다. 클로로필-a와 기상변수들 사이의 월단위 비교에서 일조시간이 Figure 6과 같이 두 수질 관측점에서 모두 가장 높은 상관성을 보였다. 3개월(4월~6월) 평균 클로로필-a와 기상변수들과의 비교에서는 Figure 7과 같이 일조시간과 평균기온이 높은 상관관계를 보였다.

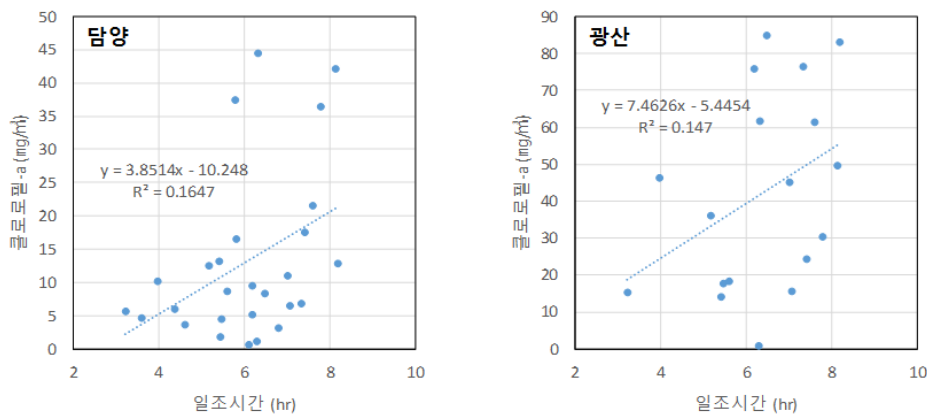


Figure 6 월평균 일조시간 및 본류 구간의 클로로필-a 농도와의 상관관계

5) 광산 관측소의 클로로필-a 자료는 자료의 결측으로 2004년 이후의 관측자료만을 사용하였다.

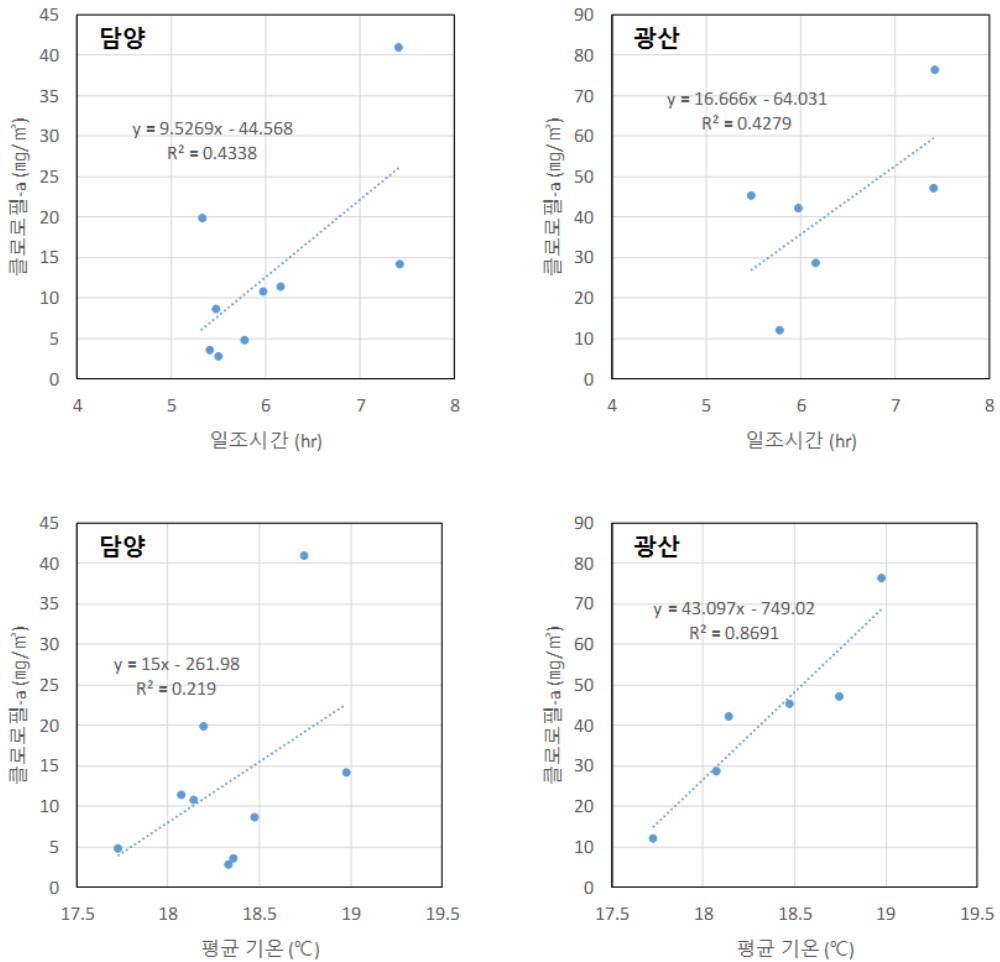


Figure 7 3개월(4월~6월) 평균 일조시간(생)과 기온(해) 및 본류 구간의 클로로필-a 농도와의 상관관계

앞서 살펴본 바와 같이 일사량(일조시간), 수온(기온), 질소·인과 같은 영양염류 및 체류시간 등의 환경조건이 영산강 본류의 조류의 성장과 사멸에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 일사량, 기온, 강수량 등의 기상변수는 개발된 계절예측 상세화 틀을 이용하여 예측하고, T-N 및 T-P 등 영양염류의 하천유입은 공공하수처리시설의 방류수 수질을 최적관리 방안으로서 고려하게된다. 이와 같이 기상 및 영양염류의 조건을 반영한 후 유역·수질 모델링을 통해 체류시간을 고려하여 조류를 예측하게 된다.

3. 연구 방법

본 연구는 의사결정을 위한 정보 전달과 관련하여 정보의 가공 수준에 따라서 Figure 8과 같이 1) 계절예측 및 장기 수질예측 모델링 정보, 2) 수질예측 기반 하천 구간별 수질 위험도 정보, 3) 위험 구간에 대해 수질 향상을 위해 필요한 최적관리방안 정보, 4) 장기에측정보 활용을 통해 발생하는 경제적 가치 정보 등의 4단계로 분류하였다. 경제적 가치정보는 전체적인 연구 프레임 차원에서 제시하였고 본 연구에서는 포함하지 않도록 한다.

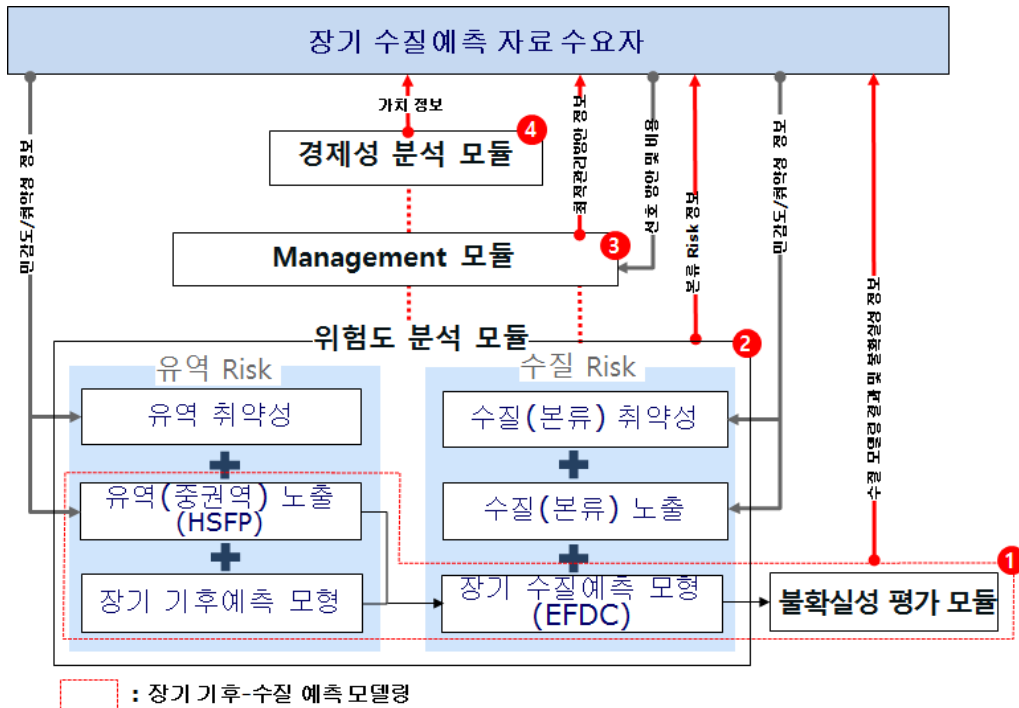


Figure 8 장기 수질예측정보의 의사결정 활용을 위한 가공수준별 정보전달 항목 및 상호 연계성

위험도, 최적관리방안, 경제적 가치 정보 생산을 위해 가장 기초가 되는 장기 기후 및 수질 예측정보 생산은 Figure 9와 같이 계절예측자료의 예측성 향상을 목적으로 하는 과정(① ~ ⑤)과 유역·수질 모델링 (⑥ ~ ⑨)의 두 부분으로 구성되어 있다.

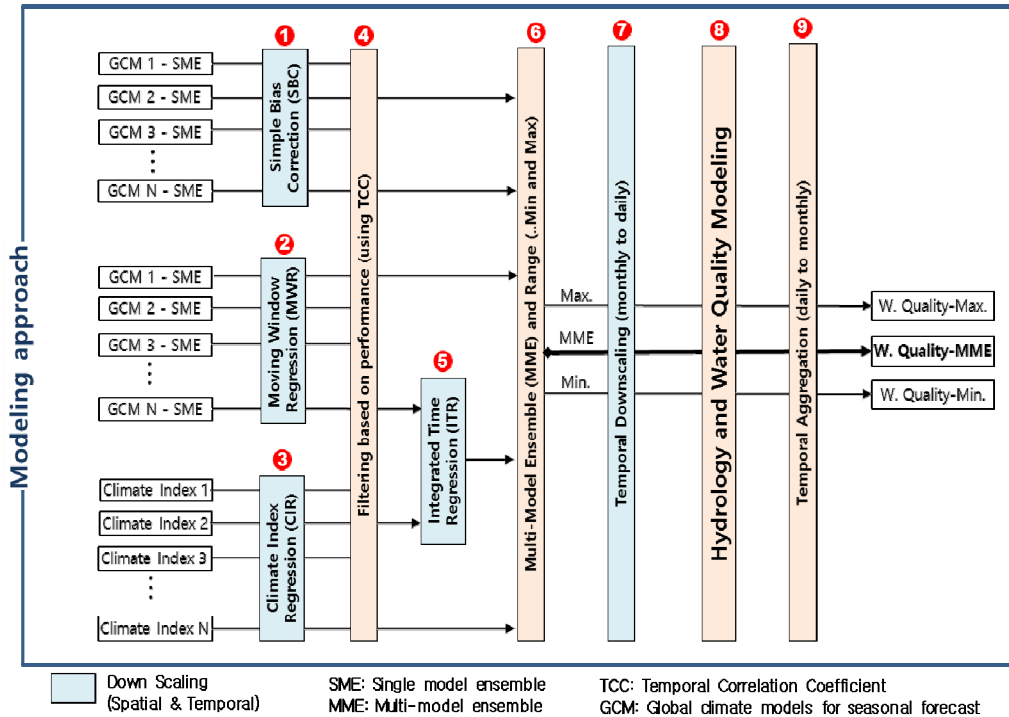


Figure 9 장기 기후예측자료 기반 수질예측을 위한 상세화 기법 및 자료처리 흐름도

3.1 기후예측 예측성 정보

3.1.1 실시간 계절예측 시스템

예측성 향성을 위해서는 Figure 9에서와 같이 예측 자료를 사용하는 정도에 따라서 예측 자료를 직접 사용하는 단순편이보정(Simple Bias Correction, SBC) 방법, 예측 자료를 간접적으로 사용하는 Moving Window Regression (MWR) 방법, 관측 자료 기반의 Climate Index Regression (CIR) 방법에 더하여, MWR 및 CIR에서 선정된 예측인자를 모두 사용하는 Integrated Time Regression (ITR) 방법 등 4개의 서로 다른 방법으로부터 예측된 자료를 병합하여 사용하였다. SBC 방법은 전 지구 기후모형(Global Climate Model, GCM)을 이용하여 생성된 특정 지역 및 기간의 예측 정보를 월평균 값의 보정만을 통하여 그대로 활용하는 예측 자료 기반의 직접적인 상세화 방법이다. 반면 MWR 방법은 GCM의 지역적인 강수 및 기온 예측 정보를 그대로 사용하는 대신에 GCM으로부터 예측된 광역규모의 기후예측 정보 중에서 지역

의 강수 및 기온에 영향을 미치는 대리변수를 찾아 지역의 장기 기후를 예측하는 예측 자료 기반의 간접적인 방법이다. CIR 방법은 광역규모의 해양 및 대기 순환과 지역 기후간의 상관성을 이용하여 지역 기후를 추정하는 통계적 상세화 방법으로 MWR 방법과 비슷하나 광역 규모의 기후 패턴과 대상 유역의 강수 또는 온도 사이에 있을 수 있는 지체시간(lag-time)을 고려하여 수개월 전의 기후인자(Climature Index)를 활용하는 관측 자료 기반의 간접적인 상세화 방법이다 (조재필, 2014). 본 연구에서는 2014년도에 개발된 상세화 툴의 원형(Prototype)을 기반으로 실시간 예측이 가능하도록 개발하였으며, 관측기반의 CIR 방법 및 예측기반의 MWR 방법에 의해 예측인자가 동시에 선정되는 경우 이를 모두 사용하는 ITR 방법을 추가로 고려하였고, MWR 및 CIR 방법과 같이 통계적 방법이 갖을 수 있는 과대적합(Overfitting)의 문제를 해결하기 위한 예측인자 선정 절차를 개선하였다. 각 방법에 대한 구체적인 예측자료 생산 절차를 살펴보면 다음과 같다.

Simple Bias Correction (SBC) 방법: SBC 방법은 GCM으로부터 예측된 한반도 상공의 강수량 및 기온 예측 자료를 관측자료의 월평균과 비교하여 매월 존재하는 편이를 보정하여 사용하는 방법이다. 온도의 경우 Equation 1 ~ Equation 2와 같이 기후예측모형의 Anomaly를 관측 자료의 평균에 더하여 보정하였으며, 강수의 경우는 비율을 이용하여 기후예측모형의 평균과 동일 기간 동안의 관측자료의 평균을 갖게 보정하였다.

$$T'_{y,m} = (T_{y,m} - T_{hist,m}) + T_{obs,m} \quad (1)$$

$$P'_{y,m} = \begin{cases} (P_{y,m} - P_{hist,m}) + P_{obs,m} & \text{for } P_{y,m} \geq P_{obs,m} \\ (P_{y,m} \div P_{hist,m}) \times P_{obs,m} & \text{for } P_{y,m} \leq P_{obs,m} \end{cases} \quad (2)$$

여기서, T는 온도, P는 강수, y는 연도, m은 월, hist는 예측 자료의 과거기간에 대한 평균, obs는 hist와 동일한 과거기간에 대한 관측 평균을 의미한다.

Moving Window Regression (MWR) 방법: MWR 방법은 Kang et al(2009)에 의해 사용된 방법과 비슷한 개념으로 역학적 기후모형으로부터 예측된 변수들 중에서 한반도의 강수 또는 기온 사이에 높은 상관관계가 존재하는경우에 이를 예측인자로 사용하는 예측 자료 기반의 통계적인 방법이다. 통계모형은 월별로 강수 및 기온에 대하여 개별적으로 구축하였다. 통계적 예측모형 구축 시 과대적합을 방지하기 위하

여 교차검정(Cross Validation) 및 분할검정(Split Validation) 방법을 적용하였다. 교차검정은 과거 관측기간(1983~2013)에 대하여 실제 예측과 동일한 조건을 재현하기 위해서 예측하고자 하는 년/월과 동일한 시점의 예측인자를 모두 제거한 후 통계모형을 구축하는 Leave-One-Out-Cross-Validation (LOOCV) 방법을 사용하였다. 즉 1983년 1월에 대한 회귀모형을 구성하는데 있어서 1983년 1월을 제외한 1984년~2005년 기간의 1월의 예측인자를 이용하여 회귀모형을 구성하여 1983년의 1월을 예측한다. 나머지 기간에 대하여도 동일한 방법으로 예측을 수행한다. 이 경우 실시간 예측에서 예측성이 확보되기 위해서는 매년 독립적으로 선정된 예측인자가 동일한 변수이어야하며 동일한 지역에 반복적으로 위치해야 한다. 만약 매년 선정된 예측인자가 변수의 종류가 바뀌거나 동일한 변수가 선정되더라도 위치가 바뀐다면 실시간 예측에 있어서는 예측성을 담보하기가 어렵다.

또한 실시간 예측에 있어서 예측성 있는 예측인자를 선정하기 위해서 매년 교차검정을 수행하는 과정에서 분할검정 방법을 적용하였다. 예를 들어 1983년 1월을 예측하는 경우 Figure 10과 같이 전체 관측기간(1984년~2013년) 기간을 훈련기간(1984년~2007년) 및 검정기간(2008년~2013년)으로 구분하였다⁶⁾. 첫 번째 절차로 훈련기간 동안에는 훈련기간의 2/3에 해당되는 샘플을 훈련기간의 자료 수(24번)만큼 무작위로 선정한다. 무작위로 선정된 각각의 샘플 기간에 대하여 독립변수(예측인자)와 종속변수와의 상관계수를 예측자료의 격자별로 구한다. 상관계수는 음의 상관관계를 갖는 지역과 양의 상관관계를 갖는 지역을 구분하여 두 가지의 경우를 고려하였다. 각각의 부호에 대하여 모든 샘플의 경우에서 상관계수의 하한 값보다 큰 값이 반복적으로 나타나는 지역을 우선 선정한다. 일반적으로 통계적으로 유의미한 상관관계를 갖는 지역은 여러 지역에 분산되어 위치할 수 있다. 이중 공간적으로 가장 넓게 분포하는 지역을 공간군집분석을 통해 추출하되 사용자에게 의해서 주어진 최대 임계값(80개 격자)을 넘지 않도록 선정하였다. 두 번째 과정으로는 훈련기간 동안에 선정된 잠재 예측인자들을 이용하여 나머지 검정기간에 대하여도 종속변수와의 상관계수를 구한다. 이 결과 훈련기간 및 검정기간의 상관계수들의 부호가 동일한 경우(양의 상관계수)로 예측인자의 범위를 좁힌다. 만약 여러 변수들이 선정된 경우에는 선정된 예측인자들 중에서 훈련기간 동안의 샘플들에 대한 상관계수의 평균값이 가장 높은

6) 훈련기간 및 검정기간의 설정은 개발된 R기반 상세화 툴에서 사용자가 정할 수 있다.

변수를 최종적인 예측인자로 선정하였다. 이와 같이 교차검정 및 분할검정 방법을 통해 가장 예측성이 높은 변수 및 지역을 선정하는 경우, 특정 연도에는 선정된 예측인자가 없을 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 연도별로 선정된 예측인자들이 전체 기간의 80% 이상 선정되고, 동일한 변수가 관측기간의 과반수 이상 동일한 지역에 반복되는 경우에 최종적으로 예측 모형으로 선정하였다. 예측인자 선정을 위한 예측기 후정보의 위도의 범위는 기후예측모형의 예측성이 높은 것으로 알려진 $-40^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 로 제한하였다.

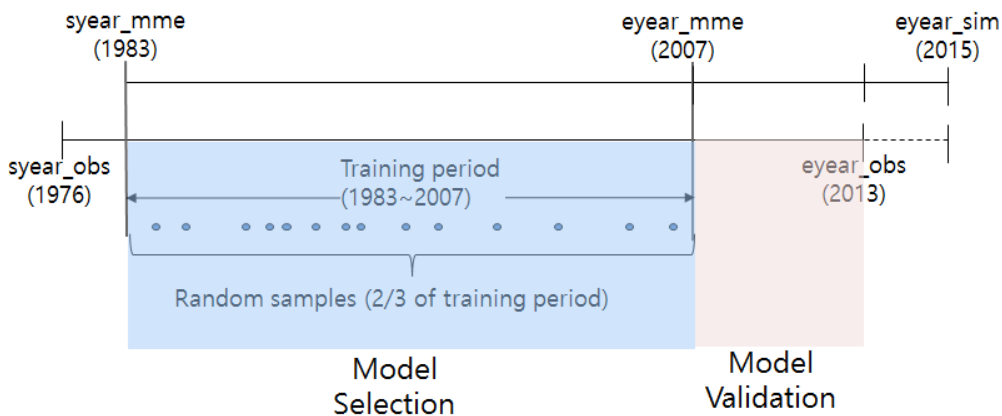


Figure 10 예측인자 선정을 위한 분할검정 모식도

Climate Index Regression (CIR) 방법: CIR 방법의 경우 관측 기반의 기후인자를 예측에 사용하기 위해서는 지체시간(lag time)이 선행예측기간(lead time) 보다 커야 한다. 최대 3개월 선행예측을 위한 지체시간의 범위는 2개월에서 최대 6개월을 사용한 반면 6개월 선행예측을 위한 지체시간의 범위는 2개월에서 최대 8개월을 사용하였다. MWR방법과 동일하게 교차검정과 분할검정을 사용하여 우연히 높은 상관관계를 갖는 예측인자의 선정을 배제함으로써 과대적합 가능성을 최소화하였다. 즉 특정 년/월을 예측하는데 있어서 해당 년/월의 예측인자를 제거하여 예측한 후 이를 모든 기간에 대해 반복하는 교차검정 방법을 사용하였으며, 해당 년/월을 예측하는데 있어서는 분할검정 방법을 사용하였다. 즉 훈련기간(1983~2007) 동안에 무작위로 선정한 샘플들에 대하여 계산된 모든 상관계수가 0.05 유의수준에서 유의미한 상관계수

이상이 되는 경우에만 잠재적인 예측인자로 선정하였다. 이후 선정된 예측인자 중에서 훈련기간에 및 검정기간(2008-2013)의 상관계수 부호가 동일한 경우로 잠재 예측인자의 범위를 제한하였다. 마지막으로 최종적인 예측인자의 선정은 훈련기간에서 다수의 무작위 샘플에 대하여 계산되었던 상관계수의 평균값이 가장 높은 순으로 선정하였다. 미래 기간에 대한 예측을 위해서는 개별 연도 별로 선정된 최종 기후인자 및 지체시간의 조합이 전체 기간의 과반수 이상에 대해 동일하게 반복되는 경우에 예측 모형으로 선정하였다.

Integrated Time Regression (ITR) 방법: ITR 방법은 특정 년/월에 대하여 MWR 및 CIR 방법에 의해 최종 선정된 예측인자가 동시에 존재하는 경우에 관측 및 예측기반 예측인자들을 함께 사용하는 방법이다. CIR에 의해 결정된 최적의 예측인자와 MWR 방법에 의해 결정된 1개의 최적 예측인자를 다중회귀 모형의 예측인자로 모두 사용한 후 Akaike Information Criterion (AIC) 분석을 통해 다중회귀식을 최종적으로 선정하였다.

Temporal Downscaling 방법: 4가지 방법에 의해 월별로 예측성이 인정된 예측모형만이 평균(MME), 최소(MIN) 및 최대(MAX)값의 범위를 정하는데 사용된다. 본 연구에서는 Figure 9와 같이 다양한 방법에 의해 예측된 결과를 평균한 MME와 월별로 개별 방법들에 의해 예측된 강수량 중에서 최대(MAX) 및 최소값(MIN)을 정한 후 온도의 경우에는 평균만을 이용하여 발생하는 3개 조합 (강수:MME-기온:MME, 강수:MIN-기온:MME, 강수:MAX-기온:MME)에 해당되는 년/월을 선정하였다. 이후에는 사용되는 수질모델링 시스템의 시간간격(time scale)에 맞게 시·공간적인 상세화 과정을 거치게 된다. 본 연구에서는 예측된 월 자료를 기반으로 과거 자료로부터 일 또는 시간단위 자료를 샘플링 하는 방법을 사용하였다 (조재필, 2014). 국립환경과학원의 모델링시스템에서 요구하는 시간단위 자료를 풍속, 대기압, 기온, 이슬점 온도, 상대습도, 강수량, 운량, 일사량 등 8개 기상변수에 대해 생성하였다. 즉 예측 자료의 한반도 평균과 과거 관측 자료의 한반도 평균사이에 2개 변수(강수와 기온)를 이용하여 Mahalanobis distance (Mahalanobis, 1936)를 계산한 후, 거리가 가장 작은 값을 가지는 연/월을 과거 관측 자료로부터 선정한 후 57개 관측소의 시간단위 자료로부터 선정된 연/월의 자료를 동시에 추출하였다.

3.1.2 기후정보 (Climate Information)

관측기반 CIR 방법은 NOAA 웹페이지에서 제공되는 40개 기후인자들 중에서 Table 2에서와 같이 매달 갱신되는 16개 인자에 매달 갱신되는 재분석자료 (NCEP Reanalysis 1)로부터 NCL을 이용하여 APCC에서 직접 계산한 9개 인자를 더하여 총 25개 기후인자를 실시간 예측을 위하여 사용하였다. Figure 11 ~ Figure 13은 실시간 예측에 사용된 기후인자들 계산을 위한 공간범위를 보여 주고 있다.

Table 2 실시간 예측을 위해 사용 가능한 기후인자 리스트

Climate index	Abb.	NOAA	APCC	Climate index	Abb.	NOAA	APCC
Pacific North American Index	PNA	S		Atlantic multidecadal Oscillation Long Version	AMO	S	
East Pacific/North Pacific Oscillation	EP	S		Quasi-Biennial Oscillation	QBO	S	
Western Pacific Index	WP	S		Equatorial Eastern Pacific SLP	ESL	S	
North Atlantic Oscillation	NAO	S		Oceanic Nino Index	ONI		S
Southern Oscillation Index	SOI	S		Northern Oscillation Index	NOI		S
Eastern Tropical Pacific SST	NINO3	S		Arctic Oscillation	AO		S
Tropical Northern Atlantic Index	TNA	S		Antarctic Oscillation	AAO		S
Tropical Southern Atlantic Index	TSA	S		Pacific Warmpool (1st EOF of SST (60e-170E, 15S-15N))	PACWARM		S
Western Hemisphere warm pool	WHWP	S		Tropical Pacific SST EOF	EOFPA		S
Multivariate ENSO Index	MEI	S		Atlantic Tripole SST EOF	ATLTRI		S
Extreme Eastern Tropical Pacific SST	NINO12	S		North Pacific pattern	NP		S
Central Tropical Pacific SST	NINO4	S		Trans-Niño Index	TNI		S
East Central Tropical Pacific SST	NINO34	S					

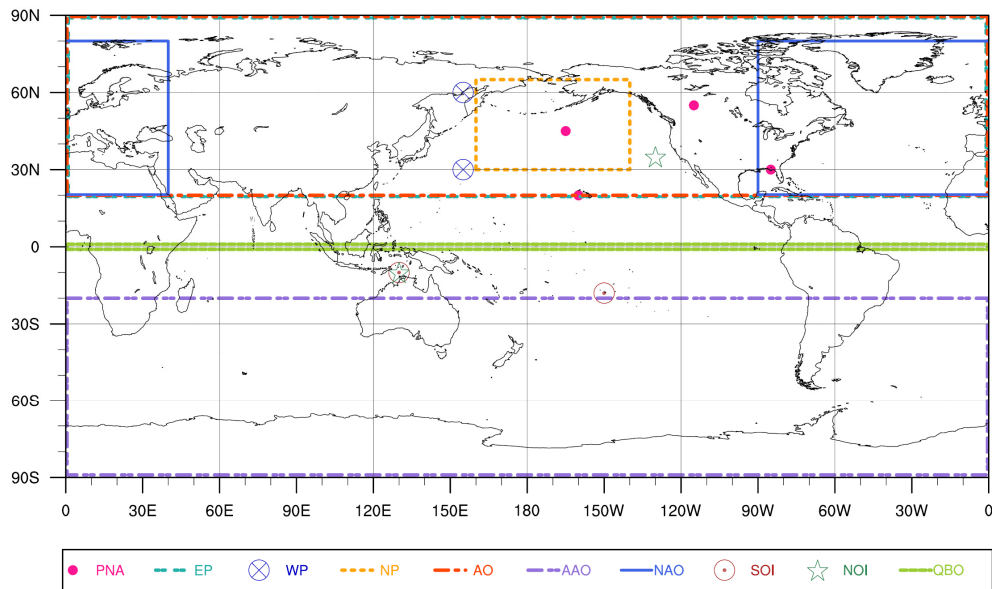


Figure 11 대기변수 중심의 기후인자(PNA, EP, WP, NP, AO, AAO, NAO, SOI, NOI, QBO) 계산에 사용되는 지점 또는 영역

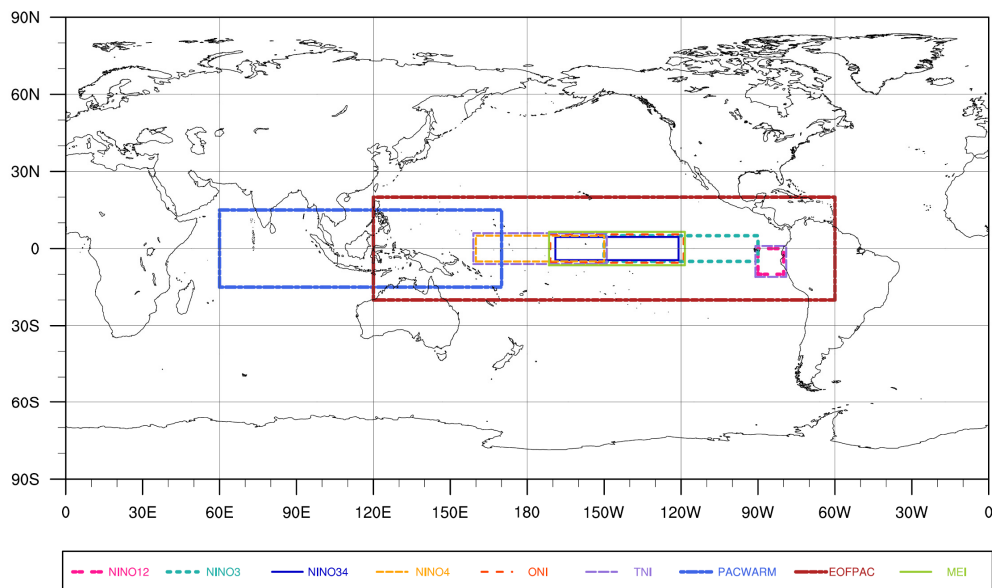


Figure 12 태평양 중심의 기후인자(NINO12, NINO3, NINO34, NINO4, ONI, TNI, PACWARM, EOF-PAC, MEI) 계산에 사용되는 영역

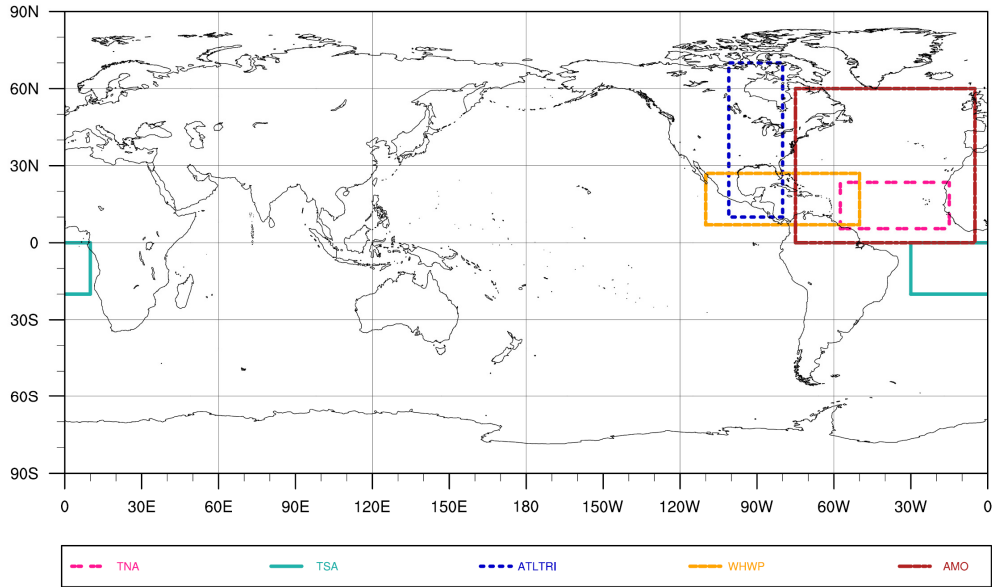


Figure 13 대서양 중심의 기후인자 (TNA, TSA, ATLTRI, WHWP, AMO) 계산에 사용되는 영역

SBC 및 MWR과 같이 예측기반 방법들의 경우에는 APCC에서 수집한 개별 기후 예측모형의 3개월 6개월 선행예측자료를 모두 사용하였다. 계절예측자료는 Figure 14과 같이 여러 기관으로부터 매달 예측에 사용된 월단위 예측자료를 제공받고 있다. 하지만 통계기반 상세화 기법의 예측성 평가를 위해서는 장기간의 과거예측자료(hindcast data)가 필요하며, 3개월 및 6개월 선행예측자료의 경우 Table 3과 같이 각각 10개 및 6개의 개별 모형이 1983년 이후 자료를 사용할 수 있다. 두 자료모두 APCC Multi-Model Ensemble (MME) 생성을 위해 원 자료의 격자로부터 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 격자 크기로 가공된 자료를 사용하였다. 모형별로 초기조건 변화에 따라서 서로 다른 개수의 개별모형앙상블 자료를 제공하고 있으나 본 연구에서는 개별모형의 앙상블 멤버들을 단순평균한 Single-Model Ensemble (SME)를 사용하였다. 제공되는 변수 들로는 예측하고자 하는 강수(PREC) 및 지상 2m 기온(T2M)에 더하여 Table 4와 같이 10개 변수가 월단위로 제공되고 있다.



Figure 14 APCC Multi-Model Ensemble(MME) 계절예측 참여 기관

Table 3 계절예측 상세화에 사용된 기후예측 모형 리스트

Model acronym	Institution(country)	Model resolution	Ensemble size
CWB	Central Weather Bureau (Taipei)	T42L18	10
GDAPS_F	Korea Meteorological Administration (Korea)	T106L21	20
HMC	Hydrometeorological Centre of Russia (Russia)	1.125°×1.40625°	20
JMA	Japan Meteorological Agency (Japan)	T95L40	31
CANCM3*	Meteorological Service of Canada (Canada)	1.41°×0.94°	10
CANCM4*	Meteorological Service of Canada (Canada)	1.41°×0.94°	10
NASA*	National Aeronautics and Space Administration (USA)	288×181	9
NCEP*	NCEP Climate Prediction Center (USA)	T62L64	15
PNU*	Pusan National University (Korea)	T42L18	5
POAMA*	Centre for Australian Weather and Climate Research /Bureau of Meteorology (Australia)	T47L17	10

* 6개월 선행예측 자료 제공 모형

월단위 강수 및 기온 예측을 위해서 한반도 전체를 대상지역으로 선정하였으며, 통계 모형 구축 및 예측성 평가를 위한 관측자료는 Figure 15과 같이 76년 이후 자료가 존재하는 기상청의 57개 종관기상관측시스템(Automatic Synoptic Observation System, ASOS)의 일단위 자료를 시·공간적으로 평균하여 사용하였다.

Table 4 APCC MME 참여 개별 모형의 제공 변수

Variable	Description
PREC	Precipitation
T2M	Temperature at 2m
T850	Temperature at 850 hPa
U200	Zonal wind at 200 hPa
V200	Meridional wind at 200 hPa
U850	Zonal wind at 850 hPa
V850	Meridional wind at 850 hPa
Z500	Geopotential height at 500 hPa
SLP	Sea level pressure
SST	Sea surface temperature

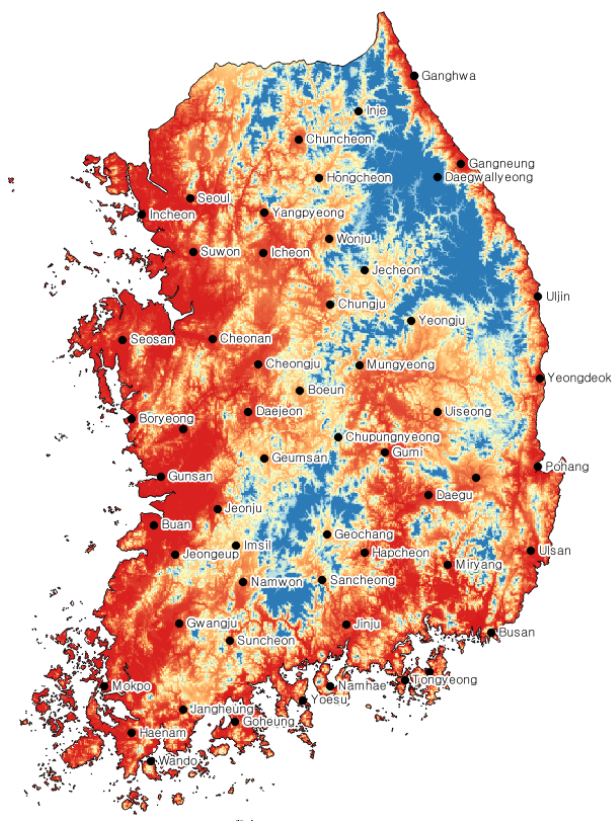


Figure 15 예측자료 상세화에 사용된 기상관측소 위치

3.1.3 예측성 평가

장기 기후 예측성은 강수량 및 기온에 대하여 월단위(monthly)로 평가하였다. 본 연구에서는 연속형 변수에 대한 정확성을 평가하기 위해서는 Equation 3과 같이 Root Mean Square Error (RMSE)를 관측값의 표준편차를 이용하여 표준화한 NRMSE를 사용하였으며, 예측값과 관측값의 선형 상관성을 평가하기 위해서 Equation 4와 같이 Pearson's correlation coefficient를 이용하여 Temporal Correlation Coefficient (TCC)를 계산하여 사용하였다. TCC는 강수 또는 온도 등과 같이 동일한 변량에 대하여 관측값과 예측값을 비교하는 경우 1에 가까울수록 높은 예측성을 나타낸다.

다중 범주형 (multi-category) 예측성 평가 지표에 대해서는 예측 검증 연구 (Forecast Verification Research)를 위해 WWRP (World Weather Research Programme) 및 WGNE (Working Group on Numerical Experimentation)에서 공동으로 제시한 방법들⁷⁾ 중에서 Table 5와 같은 예보분류표(Contingency table)에 대하여 Accuracy 및 Heidke Skill Score (HSS)를 사용하였다. 기상청에서는 강수 및 기온에 대하여 3개월 선행 예측 정보를 3개 범주 (평년보다 낮음, 평년과 비슷, 평년보다 높음)로 제공하고 있으며, 본 연구에서도 3개 범주를 기준으로 예측성을 평가하였다. 즉 과거 관측 자료를 이용하여 하위 33%를 평년보다 낮은 경우(Below normal), 중간의 33%를 평년과 비슷(Normal), 상위 33%를 평년보다 높은 경우(Above Normal)의 3개 구간으로 분류하였고 예측 결과가 각각의 범주에 해당되는 횟수를 분할표(Contingency Table)로 작성한 후 Equation 5 및 Equation 6을 이용하여 예측성을 평가하였다.

$$NRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (3)$$

$$TCC = \frac{\sum (F - \bar{F})(O - \bar{O})}{\sqrt{\sum (F - \bar{F})^2} \sqrt{\sum (O - \bar{O})^2}} \quad (4)$$

$$Accuracy = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k n(F_i, O_i) \quad (5)$$

7) <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/>

$$HSS = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^k n(F_i, O_i) - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^k N(F_i)N(O_i)}{1 - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^k N(F_i)N(O_i)} \quad (6)$$

Table 5 다중 범주형 예보 분류표

		예 측				
		F ₁	F ₂		F ₄	소 계
관 측	O ₁	n(F ₁ ,O ₁)	n(F ₂ ,O ₁)	...	n(F _k ,O ₁)	N(O ₁)
	O ₂	n(F ₁ ,O ₂)	n(F ₂ ,O ₂)	...	n(F _k ,O ₂)	N(O ₂)
		...	...	...	...	...
	O ₄	n(F ₁ ,O _k)	n(F ₂ ,O _k)	...	n(F _k ,O _k)	N(O _k)
	소 계	N(F ₁)	N(F ₂)	...	N(F ₄)	N

여기서, O= 관측값, F = 모의값, $\bar{O}$ = 관측값의 평균, $\bar{F}$ = 모의값의 평균, N = 총 모의 및 실측 횟수이다.

앞서 언급된 예측성 평가는 개별 예측모형들의 단순평균인 MME를 이용하여 계산하였다. 매월 예측을 수행하는 경우 MME 계산에 사용되는 예측자료의 개수는 Figure 16에서와 같이 현재 시점을 기준으로 선행예측기간에 따라서 달라진다. 그림에서 현재 시점(2015년 7월)을 기준으로 1개월 후인 8월의 경우에는 사용 가능한 예측정보가 5월에 예측된 결과(검정색), 6월에 예측된 결과(붉은색), 7월에 예측된 결과(파랑색)를 모두 사용할 수 있는 반면에, 3개월 후인 10월의 경우에는 7월에 예측된 결과만이 사용 가능하다.

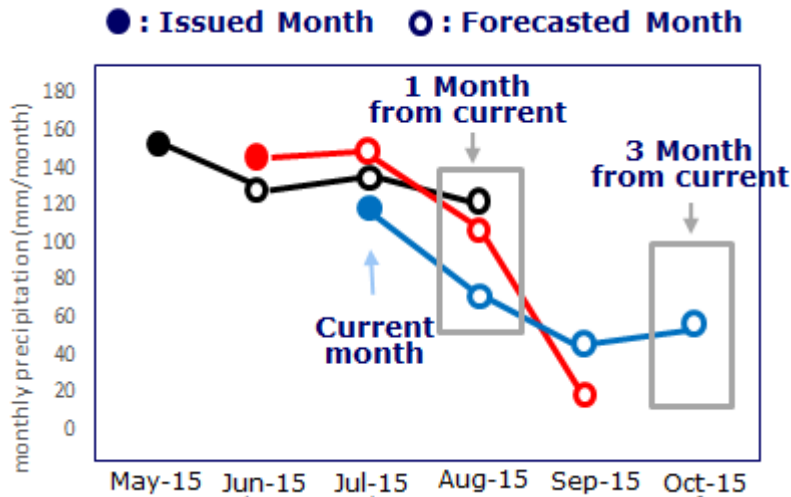


Figure 16 선형예측 기간에 따른 사용 가능 예측 정보 (3개월 선형예측)

마지막으로, 개발된 상세화 틀에 적용된 알고리즘이 실제보다 예측성을 높게 생성하는지 검증하기 위하여 무작위로 예측인자(random predictor)와 종속변수를 3000번 생성한 후 CIR, MWR, ITR 방법들을 이용하여 모의한 결과를 분석하였다. 예측성이 없는 무작위로 샘플링된 값을 예측인자로 사용하였기 때문에 Temporal Correlation Coefficient(TCC)의 값이 0에 수렴하는 것이 기대된다. 따라서 TCC값이 0보다 크게 나타나는 경우에는 상세화 틀의 알고리즘 자체가 과대적합을 유발하는 것으로 판단할 수 있다.

3.2 장기 수질예측 불확실성 정보

유역 및 수질 모델링은 국립환경과학원에서 단기 수질예보를 위해 사용하고 있는 HSPF-EFDC 모델링 시스템을 사용하였다. 수질예보를 위한 유역모델링은 HSPF (Hydrological System Program-Fortran) 모형이 시간별 모의를 통해 4대강 본류로 유입되는 유량과 수온, 그리고 수질을 계산한다. 하천수질모델링은 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code) 모형이 사용되며 앞에서 모의된 HSPF의 수량 및 수질 결과를 최상류와 지류의 경계조건으로 사용하며, 하천 본류로 방류되는 하수처리장과 같은 오염원자료 또한 수질 TMS로부터 제공 받아 수질경계조건을 구축한다. EFDC 모

형은 건천화가 심한 국내 하천에서도 수치적인 안정성을 보이며 4대강 보로 인한 불연속적인 흐름조건에 대해서도 모의가 가능하다(김경현, 2011; 이은정 등, 2012).

단기 또는 장기 수질예보의 경우 관측자료를 이용하여 모형에 의해 증가하는 편차를 예측시점에 보정해 주는 자료동화(Data Assimilation) 기법이 예측성 향상을 위해서 중요할 수 있다. Figure 17은 국립환경과학원의 수질예보 운영체계를 보여준다. 본 연구에서는 국립환경과학원의 자료동화가 고려된 시스템을 이용하여 3개월 계절예측 자료를 기상입력으로하여 3개월 장기 수질예보 결과를 모의하였다. 영산강의 경우 수질예보는 광주광역시 북구 우치동 용산교부터 영산강 하구언까지의 구간에 대해서 4대강 보 건설 이후 기간 중에서 2013~2014년 기간에 대해 예측된 유역모델링 및 수질모델링 결과를 사용하였다.

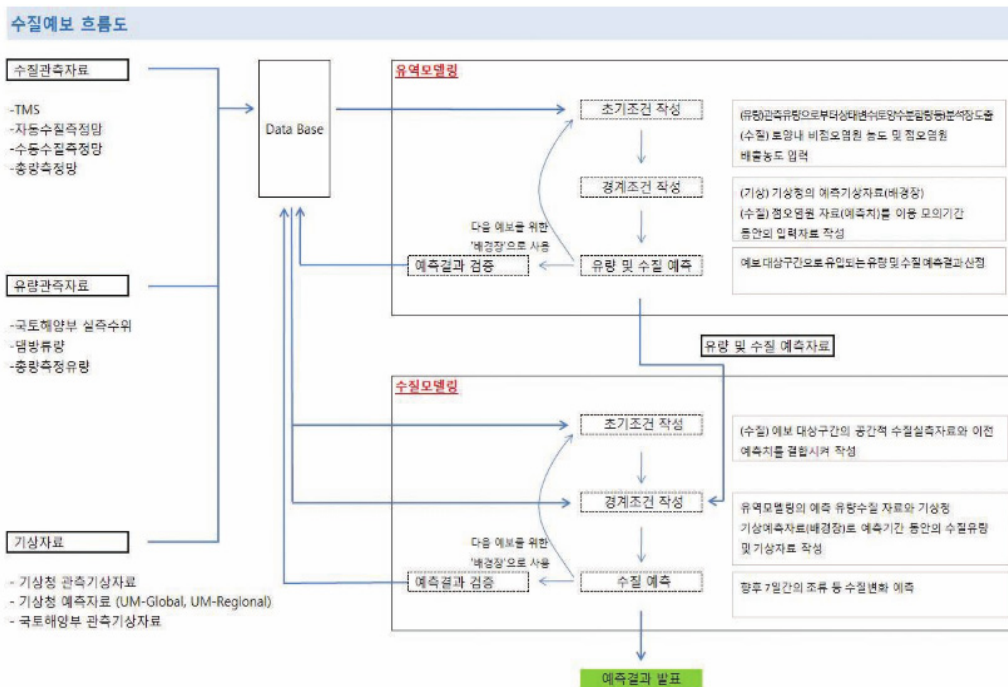


Figure 17 수질예보 흐름도(자료: 김경현, 2011)

실시간 장기 수질예측 정보의 전달방법은 2015년도 7월에 상세화된 자료를 이용하여 국립환경과학원에서 8월 9월에 대하여 HSPF-EFDC모델링 시스템을 이용하여조류 발생을 예측한 후 결과 보고에 사용된 내용들을 중심으로 살펴보았다.

3.3 구간별 수질 위험도 정보

제한된 예산과 인력을 이용하여 수질관리의 효율을 최대한 높이기 위해서는 최적 관리 방안의 적용에 있어서 우선순위의 설정이 중요하다. 따라서 의사결정을 위한 정보로서 위험도 관점의 정보전달이 중요할 수 있다. 본 연구에서는 기후변화 취약성 평가에 보편적으로 활용되는 개념을 Figure 18와 같이 계절예측의 시간 규모에서 위험도로 사용하였다.

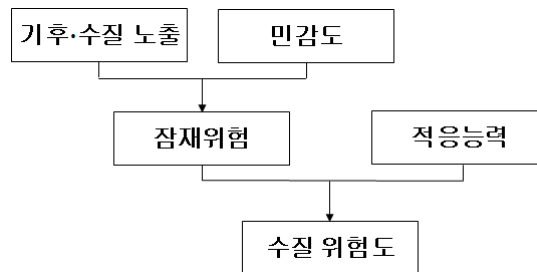


Figure 18 위험도 개념 틀

취약성 개념에서 재난위험관리 분야와 기후변화 분야 사이에는 Table 6과 같이 차이점이 존재한다. 기후변화 시간규모에서는 기후변화 스트레스가 인간에 의해 야기될 수 있고 또한 인간의 노력에 따라 감소 또는 증가할 수 있다고 보는 반면, 계절예측 시간규모에서는 시스템에 스트레스를 주는 위해 현상은 순전히 자연적이며 위해 현상 자체를 감소시키기 위해 할 수 있는 일은 없고 다만 인간은 사회시스템이나 기반시설의 변화를 통해 자연재해로 인한 취약성을 감소시킬 수 있다고 본다. 시스템에 대해서도 재난위험관리 분야의 경우 과거 위해에 효과적으로 대응하기 위해 진화해 온 현재 갖추어진 정적(static)인 상태로 보는 반면 기후변화의 경우 변화하는 기후에 사회시스템을 시공간적으로 적응시켜가는 동적(dynamic) 개념으로 본다 (유가영과 김인애, 2008)

Table 6 재난위험관리 및 기후변화 분야에서 보는 취약성 개념의 차이

	재난위험관리	기후변화
재해의 특성	자연적 변이	인간에의한 영향 + 자연적 변이
Risk 저감의 목표	내부의 취약성 감소	외부의 취약성(hazard potential) 및 내부의 취약성 감소
관심 시스템	사회시스템 사회간접자본	모든시스템(기후, 사회, 생물물리적 시스템 등)
기후자극		
- 시간적 특성	- 불연속적 재해	- 기후의 점진적 변화와 변이
- 공간적 범위	- 지역적	- 지역과 전지구
- 불확도	- 상대적으로 낮음	- 대체적으로 큼
재해의 익숙한 정도	알려진 재해	새로운 재해 및 알려진 재해
시스템 관점	정적(Static)	동적 그리고 적응적(dynamic and adaptive)
적응의 관점	응급모드	일상 및 응급모드

자료: 유가영과 김인에(2008) p. 9.

국내 국가 수자원 관리를 위한 지표 관련 연구들에서도 시스템에 부정적인 영향을 주는 압력(Pressure) 지표와 스트레스를 저감하고 조정하는 반응(Response) 지표로 구분하여 수질 및 수생태를 포함한 하천환경관리 측면의 다양한 지표를 사용하였다(강민구 및 박두호, 2010, 김연주 등, 2014).

하지만 시간규모에 따른 관점의 차이를 고려하기 위해서는 계절예측 규모에 맞는 노출(Exposure), 민감도(Sensitivity), 적응능력(Adaptive capacity) 항목에 대한 적절한 지표 선택이 중요하다. 예를 들어, 수질에 스트레스로 작용하는 노출 관련 지표들 중 많이 사용되고 있는 농경지 면적률, 불투수 면적률, 생활하수 처리량, 비료 소비량, 가축밀도, 수질오염 배출시설 현황 등의 경우 수개월 동안에는 변화가 없는 정적(static)인 관점에서 보는 것이 합리적이다. 본류 하천의 수질은 계절기후의 변화에 따른 유역 시스템 안에서 다양한 수문·수질 기작들의 비선형적인 반응의 결과이며 이는 앞에서 언급한 계절예측 정보를 입력으로한 유역·수질 모델링을 통해서 관련 정보를 취득하게 된다. 따라서 본 연구에서는 노출지수에 계절예측의 시간규모 안에서의 변동성을 반영하기 위해서 계절기후 변동에 따른 본류 수질의 변동만을 고려하였다.

동일한 기후·수질 위해(hazard)에 노출이 되더라도 지역 시스템의 민감도(Sensitivity)에 따라서 미치는 영향이 다랄질 수 있다. 예를들어 동일한 수질 문제가 발생하더라도 이를 생활용수로 사용하는 인구가 많은 경우에 사용인구가 적은 경우와 비교하여 위험도가 증가하게 된다. 하천수의 직접적인 사용과 관련해서는 상수도 이용 인구수,

농·공업용수 사용량 등이 중요할 수 있으며, 4대강 사업 이후 중요해진 하천의 친수성 관점에서는 하천 접근성과 관련하여 접근 가능 인구 및 레크리에이션 인구 등이 중요할 수 있고, 생태적인 관점에서는 수생태 보호지역의 유무 및 토착종의 다양성 등이 민감도 측면에서 중요할 수 있다. 본 연구에서는 계절예측 자료의 수질관리를 위한 활용성 및 수질관리 의사결정을 위한 정보전달 방법의 제시를 목적으로 하기 때문에, 갈수기의 조류 발생에 따른 생·농·공용수 활용 등 직접적인 민감도만을 고려하였다.

마지막으로 적응능력(Adaptive capacity)과 관련해서는 조류 발생이 예상되는 경우 통합유역관리 관점에서 합의에 의해 적응 방안을 도출해 낼 수 있는 협의체(거버넌스) 구성 유무, 재원 마련 여부, 물리적으로 오염원 저감을 위한 하수처리시설들의 고도처리 여부, 국내에서 가장 현실적인 대안으로 인식되고 있는 댐·보·저수지 연계 운영을 통한 대응을 위해서는 플러싱(flushing)을 위한 여유 수량 확보 여부 등이 계절예측 시간 규모에서 중요할 수 있다. 노출 항목과 마찬가지로 계절예측 시간규모에서 고정된 변수들을 사용하기 보다는 계절예측 시간규모에서 변동성이 반영될 수 있는 변수를 사용하였다.

앞서 계산된 노출, 민감도, 적응방안 항목들에 대해서 선정된 변수들은 서로 단위가 다르기 때문에 변수들의 취합을 통한 수질위험도지수를 산출하기 위해서는 자료의 표준화(Normalisation)가 필요하다. 자료의 표준화 방법은 Z-스코어 계산법, 스케일 재조정(re-scaling) 방법, 기준선과의 차이(distance to a reference) 방법, 범주 스케일(categorical scale) 방법 등이 사용가능하다 (유가영과 김인애, 2009). 본 연구에서는 스케일 재조정 방법의 하나이며 UNDP(2006)에서 사용한 Dimension Index 방법을 Equation 7과 같이 사용하였다. 최종적으로 위험도 지수(RI)는 Dimension Index 방법으로 표준화된 노출 지수(EI), 민감도 지수(SI), 적응능력지수(AI)를 Equation 8을 이용하여 취합하여 계산하게 된다. 노출지수와 민감도지수는 증가함에 따라서 위험도가 커지는 쪽으로 기여하기 때문에 음(-)의 부호를, 적응능력지수는 증가함에 따라서 위험도가 감소하는 쪽으로 기여하기 때문에 양(+)부호를 부여하였다. 전체적으로 노출지수 및 민감도지수의 평균값과 적응능력지수에 의한 값을 비교함으로써 노출/민감도 항이 적응능력 항보다 큰 경우에 RI값이 양의 값을 갖게 되고 위험도가 증가하는 것을 의미한다. 또한 장기수질예측값을 기반으로하는 노

출지수의 경우 예측 신뢰성에 따른 기여도를 고려하기 위해서 예측신뢰도 가중치를 Equation 8에 고려하였고, 선정된 적응능력이 실제 시스템에 미치는 영향력을 고려하기 위해서 적응능력지수 가중치를 고려하였다.

$$DI = \frac{Actual\ Value - Minimum\ Value}{Maximum\ Value - Minimum\ Value} \quad (7)$$

$$RI = (1 - \beta) \times \frac{\alpha \times EI + (1 - \alpha) \times SI}{2} + \beta \times AI \quad (8)$$

여기서, DI = Dimension index, RI = 위험도 지수(Risk index), EI = 노출 지수(Exposure index), SI = 민감도 지수(Sensitivity index), AI = 적응능력 지수(Adaptation capacity index), α = 예측신뢰도 가중치, β = 적응능력 지수 가중치

3.4 최적 관리방안 정보

유해녹조 위험관리는 시간의 흐름에 따라서 조류 발생 이전 단계의 예방(prevention) 및 사전 준비(preparedness) 체계와 발생 이후 단계의 사후 대응(response) 및 복구·평가(recovery & evaluation) 체계로 구분할 수 있다 (한혜진 등, 2014). 단계별 주요 내용을 요약하면 Table 7과 같다. 계절예측의 시간규모는 유해녹조 발생 이전에 사전조치를 통해 조류 발생 가능성을 저감시키는 사전예방에 적합하다. 예방 단계에서 활용할 수 있는 대응방안들로는 영양염류의 유입제어, 물흐름 관리, 조류 휴면체 관리, 생화학적 방법 등이 사용될 수 있다. 영양염류의 유입제어 관점에서 볼 때, 실질적인 수질개선 효과를 기대하기 위해서는 유역관리 차원의 비점 오염 관리가 중요하나 관리방안 적용을 통한 수질개선에는 장기간의 시간이 소요될 수 있으며 자발적인 주민참여 등의 사회적 여건이 마련되어 있어야 한다. 본 연구에서는 계절예측 자료의 시간규모에 맞는 사전예방 차원의 최적관리 방안을 제공하는 것을 목적으로 하기 때문에, 점원오염 관리 중심의 영양염류 유입제어 방법을 최적관리 방안으로 선정하였다. 관리방안의 적용에 따른 수질에 미치는 영향은 유역의 특성을 반영한 시나리오를 도출한 후 HSPF-EFDC 모델링에 적용하여 수질 향상 정도를 평가하였다.

Table 7 유해녹조 발생 단계별 대응 내용

단계		세부 내용
예방	목표	유해녹조 발생 이전에 사전조치를 통해 중장기적으로 조류 발생 기회를 감소시키거나 원인 제거
	내용	- 영양염류 유입제어 (주요 방법으로 점·비점 오염관리 중심의 인 및 질소 제어) - 물 흐름 관리 - 조류 휴면체 관리 - 생화학적 대응
준비	목표	유해녹조 발생 시의 대응능력을 사전에 준비
	내용	- 위험경보체계 마련 - 각종 예방, 긴급대응, 평가, 소통 계획 수립 - 중요 자원들의 사전 확보 - 대응 기관들 사이의 사전동의 - 조정, 협조 요청, 담당자 훈련
대응	목표	유해녹조 발생시 기관별 단기적락을 바탕으로 준비 단계에서 작성한 경보체계에 맞게 녹조발생 위험단계별로 역할 및 기능을 수행하는 활동 과정
	내용	- 수면관리: 수체의 유해녹조 침전, 차단막 사용을 통한 취수지점 보호 - 정수장관리: 취수지점 변경, 대체수원 사용, 고도 정수처리 - 유량관리: 댐과 보의 운영기관과 협조 - 국민과 미디어와의 소통
복구 평가	목표	피해 발생지역이 원래 상태로 회복될 때까지 지속적인 지원 제공 및 위험관리 과정 전반에 대한 평가
	내용	- 계획수립의 평가 - 계획 이행결과의 평가

자료: 한혜진 등 (2014) p 118-127. 저자 요약

4. 연구결과

4.1 기후예측 예측성 정보

Table 8은 4가지 상세화 방법에 의한 선행예측기간에 따른 월별 강수량 예측을 위해 선정된 예측모형의 결과를 보여 준다. 예측자료를 직접 사용하는 SBC 방법의 경우는 1~6개월 선행의 경우 각각 6, 7, 8, 1, 0, 0 개 모형이 선정되어 전체적으로 21개 모형이 선정되었다. 1~3개월 선행예측기간에 대해서는 비슷한 개수의 모형이 선정된 반면에 선행예측기간이 4~6개월로 증가되면서 선택된 모형이 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 예측정보기반의 간접적인 방법인 MWR은 1~6개월 선행기간에 대해서 각각 7, 6, 9, 4, 4, 4 개 모형이 선정되어 총 34개 모형이 선정되었다. SBC방법과 비슷하게 1~3개월 선행예측기간의 경우가 4~6개월 선행예측기간보다 더 많은 예측모형이 선정되었다. 반면 관측자료 기반의 CIR 방법은 강수의 경우 7월에 대해서만 모형이 선정되었다. CIR 방법 및 MWR 방법이 동시에 결정된 경우에만 사용할 수 있는 ITR 방법은 7월의 3개월 및 6개월 선행예측기간에만 결정되었다. 전체적으로 MWR, SBC의 예측자료 기반의 방법이 통계적 방법인 CIR 방법보다 빈번하게 선정되었다. SBC 방법의 경우 10개 개별 예측 모형 중에서 강수의 경우에는 POAMA, PNU, JMA 모형이 각각 6, 6, 5 개씩 각각 선정되어 한반도에서 타 모형과 비교하여 높은 예측성 결과를 보였다. MWR 방법은 강수의 경우 PNU, CANCM4 모형이 각각 8, 6개로 타 모형들과 비교하여 가장 많이 선정되었다.

Table 9는 4가지 상세화 방법에 의한 선행예측기간에 따른 월별 기온 예측을 위해 선정된 모형의 결과를 보여 준다. 예측자료를 직접 사용하는 SBC 방법의 경우는 1~6개월 선행의 경우 각각 19, 10, 8, 1, 2, 2 개 모형이 선정되어 전체적으로 42개 모형이 선정되었다. 1개월 선행예측기간에 대해서 가장 많은 모형이 선정되었고, 2~3개월 선행예측기간에 대해서는 비슷한 개수의 모형이 선정된 반면에 선행예측기간이 4~6개월로 증가되면서 선택된 모형이 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 예측정보기반의 간접적인 방법인 MWR은 1~6개월 선행기간에 대해서 각각 5, 2, 4, 1, 2, 2 개 모형이 선정되어 총 16개 모형이 선정되었다. SBC방법과 비슷하게 1개월 선행예측기간의 경우가 5개 모형이 선정되어 가장 많았고 2~6개월 선행예측기간에는 서로 비슷한 개수의 모형들이 선정되었다. 반면 관측자료 기반의 CIR 방법은 6, 9, 10월에

대해서 각각 모형이 선정되었다. CIR 방법 및 MWR 방법이 동시에 결정된 경우에만 사용할 수 있는 ITR 방법은 9, 10월에 선정되었다. SBC 방법이 42개로 가장 많이 선정되었고, MWR 및 CIR 방법이 각각 16개 10개의 모형 선정결과를 보였다. 전체적으로 MWR, SBC의 예측자료 기반의 방법이 통계적 방법인 CIR 방법보다 빈번하게 선정되었다. SBC 방법의 경우 개별 예측 모형 중에서 PNU, JMA GDAPS_F, NASA 모형이 각각 10, 8, 8, 8 개씩 각각 선정되어 한반도에서 타 모형과 비교하여 높은 예측성 결과를 보였다. MWR 방법은 강수의 경우 PNU가 7번 선정되어 타 모형들과 비교하여 가장 많은 선정 결과를 보였다.

역학적 기후예측 모형의 결과를 편의보정을 거쳐 직접 사용하는 SBC 방법은 4개월 이상의 선행예측기간에 대해 강수 및 기온 모두 선정된 모형의 개수가 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이는 선행예측기간이 증가함에 따라서 예측성이 감소하는 예측모형의 특성을 반영한 결과라 판단된다. 또한 SBC 방법의 경우 기온 및 강수량에 대해 각각 총 42개 및 21개 모형이 선정되어, 역학적 모형의 경우 강수량보다는 기온의 경우에 높은 예측성 결과를 보였다. 반면 MWR 방법은 강수량 및 기온에 대해 각각 총 34, 16개의 모형이 선정되어 기온보다는 강수에 대해 높은 예측성을 보였다. 또한 강수 및 기온에 대해서 각각 12월 및 9월에 가장 많은 모형이 선정되었다.

Table 8 선행예측기간에 따른 월별 강수량 예측을 위한 모형 선정 결과

Month	1 month lead	2 month lead	3 month lead	4 month lead	5 month lead	6 month lead
JAN	Ⓢ JMA, Ⓢ POAMA					
FEB		Ⓜ CWB	Ⓜ GDAPS_F			
MAR	Ⓢ POAMA			Ⓜ CANCM4	Ⓜ CANCM4	
APR			Ⓢ HMC, Ⓢ NASA, Ⓜ NCEP, Ⓜ PNU			
MAY					Ⓜ PNU	
JUN	Ⓜ HMC	Ⓜ CANCM4				
JUL	ⓒ Lag	ⓒ Lag	Ⓛ PNU	ⓒ Lag	ⓒ Lag	Ⓛ NASA
AUG	Ⓢ JMA	Ⓢ GDAPS_F	Ⓜ POAMA	Ⓜ CANCM3		
SEP	Ⓜ NCEP, Ⓜ PNU, Ⓜ POAMA	Ⓢ PNU	Ⓢ GDAPS_F, Ⓢ PNU		Ⓜ CANCM4	
OCT			Ⓜ CANCM4			Ⓜ PNU
NOV	Ⓢ PNU	Ⓢ GDAPS_F, Ⓢ PNU, Ⓢ JMA	Ⓢ PNU, Ⓢ JMA, Ⓢ POAMA, Ⓜ CANCM3	Ⓢ PNU		Ⓜ PNU
DEC	Ⓢ POAMA, Ⓜ PNU, Ⓜ CANCM4, Ⓜ NASA	Ⓢ JMA, Ⓢ POAMA, Ⓜ CWB, Ⓜ HMC, Ⓜ POAMA, Ⓜ PNU	Ⓢ POAMA, Ⓜ GDAPS_F, Ⓜ POAMA, Ⓜ NASA	Ⓜ CANCM3, Ⓜ NASA	Ⓜ PNU	Ⓜ NASA, Ⓜ NCEP

Table 9 선행예측기간에 따른 월별 기온 예측을 위한 모형 선정 결과

Month	1 month lead	2 month lead	3 month lead	4 month lead	5 month lead	6 month lead
JAN	Ⓢ GDAPS_F, Ⓢ CANCM3, Ⓢ CANCM4, Ⓢ PNU, Ⓜ POAMA, Ⓜ PNU	Ⓢ POAMA	Ⓜ CWB		Ⓜ PNU	
FEB		Ⓢ JMA				
MAR	Ⓢ GDAPS_F, Ⓢ JMA					
APR	Ⓜ GDAPS_F	Ⓢ NASA				
MAY	Ⓜ CWB	Ⓜ PNU	Ⓜ CANCM3	Ⓜ NASA		
JUN				ⓒ Lag	ⓒ Lag, Ⓜ PNU	ⓒ Lag
JUL	Ⓢ JMA	Ⓜ GDAPS_F				Ⓜ PNU
AUG	Ⓢ PNU, Ⓢ HMC		Ⓜ CWB			
SEP	Ⓢ GDAPS_F, Ⓢ PNU, Ⓢ JMA, Ⓢ HMC, Ⓢ NASA, Ⓢ POAMA, Ⓜ NASA	Ⓢ NASA, Ⓢ GDAPS_F, Ⓢ PNU, Ⓜ CANCM4, Ⓜ NCEP	Ⓢ GDAPS_F, Ⓢ HMC, Ⓢ JMA, Ⓢ NASA, Ⓢ PNU, ⓒ Lag	Ⓢ PNU, ⓒ Lag	Ⓢ NASA, Ⓢ PNU, ⓒ Lag	Ⓢ NASA, ⓒ Lag, Ⓜ PNU
OCT	Ⓢ GDAPS_F, Ⓢ PNU, Ⓢ HMC, Ⓜ CANCM3	Ⓢ JMA, Ⓢ NASA, Ⓢ GDAPS_F, Ⓢ PNU, ⓒ Lag	Ⓢ GDAPS_F, ⓒ Lag	ⓒ Lag		Ⓢ PNU
NOV	Ⓢ POAMA		Ⓢ JMA, Ⓜ PNU			
DEC	Ⓜ POAMA		Ⓢ JMA			

CIR 방법의 경우 7월 강수에 대해서는 WP(Western Pacific Index)가 5개월 지체 시간을 갖고 선정되었고, 6월, 9월 및 10월 기온에 대해서는 각각 PACWARN(Pacific Warmpool 1st EOF of SST), ACWARN 및 ATLTRI(Atlantic Tripole SST EOF)가 7개월, 7개월 및 3개월 지체시간을 갖고 선정되었다. Figure 19은 강수(7월) 및 기온(6월, 9월, 10월)에 대해 선정된 예측인자의 공간적인 분포를 보여준다. WP는 서태평양의 한반도 근처에 위치하고 있으며, PACWARN은 태평양에, ATLTRI는 대서양의 해수면 온도와 관련된 기후인자이다. 일반적으로 ENSO와 관련된 NINO12, NINO34, NINO4 등과 같은 기후인자들이 많이 알려져 있지만 대신 PACWARN 인자가 선정되었다.

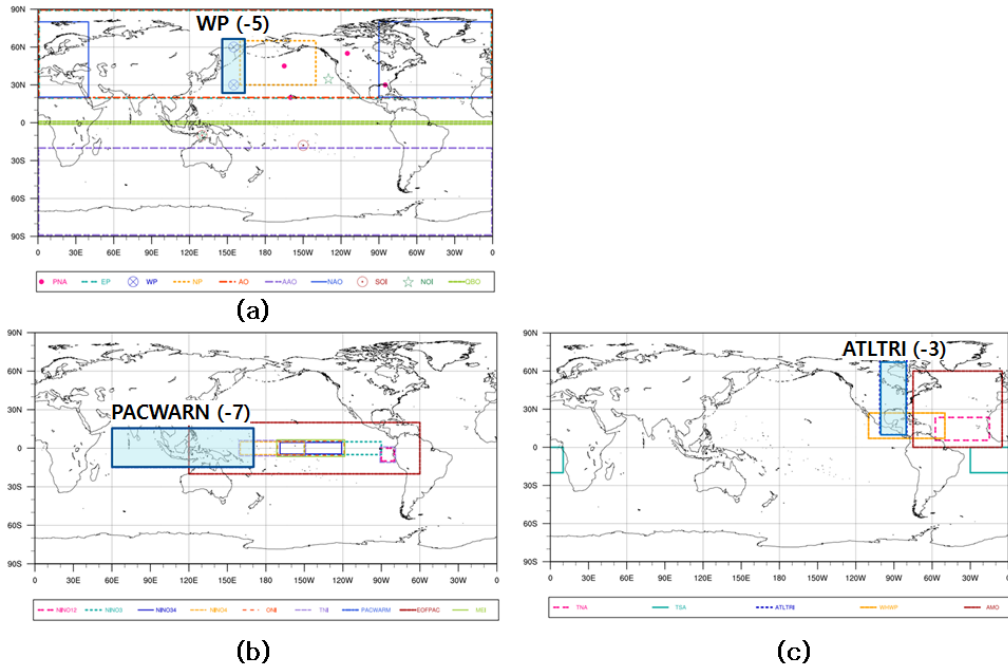


Figure 19 CIR 방법에 의한 선정 예측인자: (a) 7월 강수, (b) 9월 기온, (c) 10월 기온

MWR 방법의 경우 Figure 20은 9월 강수에 대해 1개월 선행 조건으로 예측하는 경우 선정된 예측인자들의 공간적인 분포를 보여주고 있다. 앞서서도 언급한 바와 같이 예측인자는 매 해 교차검정 수행 과정에서 동일한 지역에서 예측인자가 반복되는 경우에 선정되었다. 그림에서 노랑색은 선정된 횟수가 높은 경우를 의미한다. 예측모

형들에 의해 제공되는 변수들 중에서 NCEP 및 PNU 모형은 U200변수가 동일하게 선정되었지만 예측성이 높은 지역의 위치가 상이하였으며, POAMA 모형의 경우는 두 모형과 비교하여 상이한 변수(SST) 및 위치가 선정되었다. Figure 21은 5월 기온 예측을 위해서 1~4개월 선행기간에 대해 선정된 예측인자의 공간적인 분포를 보여주고 있다. CWB(1개월선행) 및 NASA(4개월선행)의 경우 교차검정 과정에서 선정된 예측인자가 30년에 대해 동일한 지역에 위치했던 반면 특정 1개년에는 전혀 다른 위치에서 나타나는 결과를 보였다. 반면 2개월 선행 조건에 대해 선정된 PNU 모형은 전체기간(33년)에 대해서 동일한 지역에 높은 상관관계를 보였다. 또한 3개월 선행 조건에 대하여 선정된 CANCM3모형의 경우는 29개년에 대해서는 동일한 지역에 예측인자가 선정된 반면 나머지 4개년에 대해서는 예측인자가 전혀 선정되지 않은 결과를 보였다. 이와 같이 MWR 방법은 동일한 월에 대해 동일한 변수를 예측하더라도, 선정되는 예측인자들이 상이하여 선정된 예측인자들과 예측 대상 지역의 기후 특성과의 연계성을 설명하기에는 한계가 많다.

따라서 바람직한 예측모형은 한반도 지역 기후에 영향을 미치는 지구 기후시스템의 주된 물리적 매커니즘을 이해하고 기후예측모형에 이를 반영하여 예측하는 것이다. 하지만 관측자료를 기반으로 주요 매커니즘을 이해하더라도, 기후예측 모형들이 물리적 현상을 공간적 위치를 포함하여 적절히 모의하는 것은 보장되지 않는다. 따라서 본 연구에서와 같이 예측모형 기반의 기후 패턴이 한반도 기후와 높은 상관관계를 보이는 경우에 대하여 물리적인 매커니즘을 설명하기 위해서는 향후 지구 시스템 및 개별 예측 모형에 대한 깊은 이해가 필요하며 기후분야와의 융합연구를 통한 지속적인 노력이 필요할 것으로 판단된다.

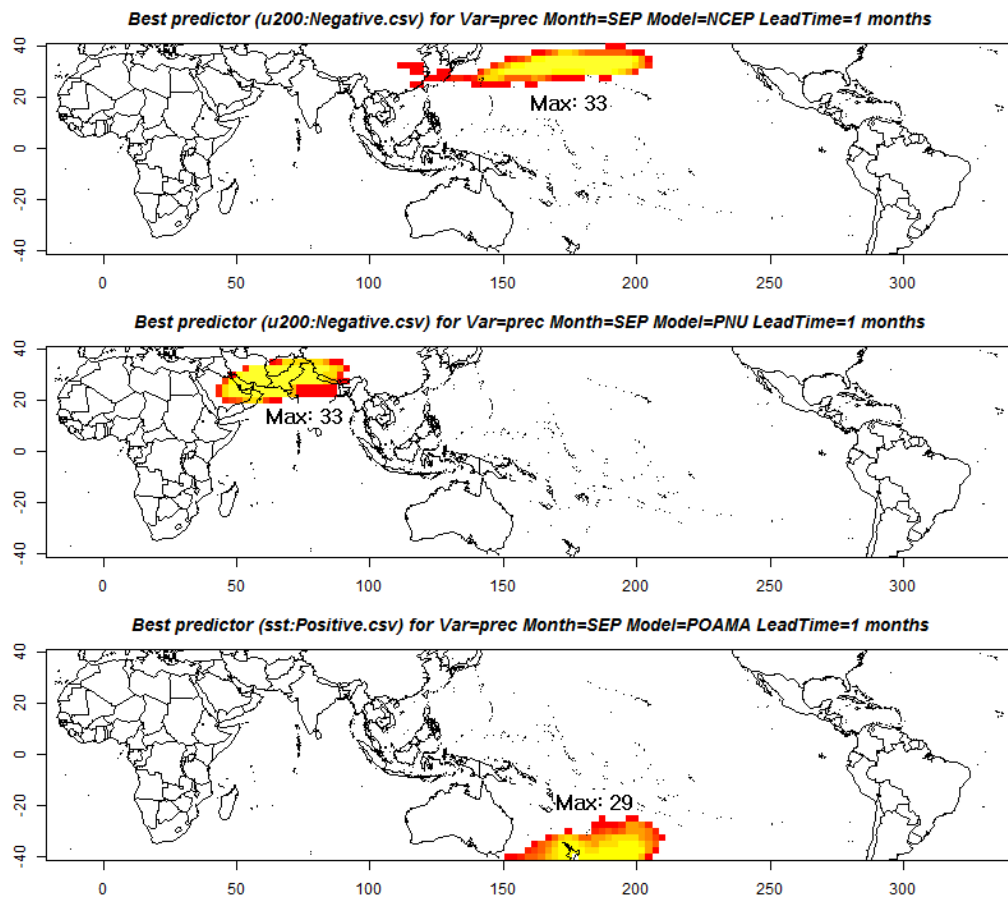


Figure 20 MWR 방법에 의한 선정 예측인자 (1개월 선행 9월 강수예측)

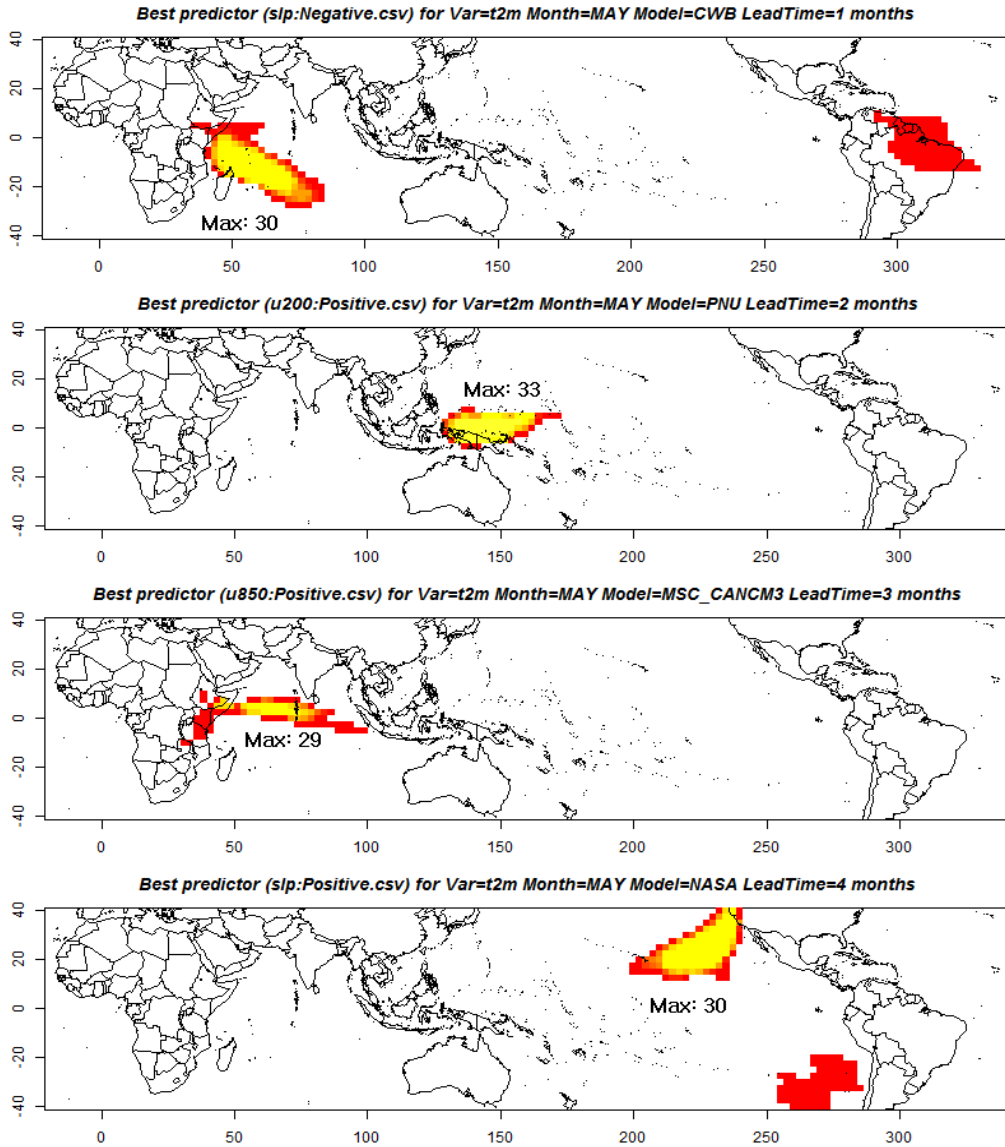


Figure 21 MWR 방법에 의한 선정 예측인자 (1~4개월 선행 5월 기온예측)

MWR 방법에 의해 월별 선행기간별 선정된 예측인자와 관련된 정보는 부록 1에 제시하였다. APCC에서는 APCC계절예측 정보를 기반으로 한 웹기반 상세화물인 CLIK⁸⁾ 서비스를 제공하고 있다. CLIK의 상세화 절차는 우선 지역의 관측기상 자료를 선정 한 후 Figure 22와 같이 예측 대상 기간(Prediction Season), 예측인자(Variable),

8) <http://clik.apcc21.org/>

예측모형(Models), 예측대상변수(Predictand), 훈련기간(Training Period), 통계방법(Method), 고급옵션(Advanced Option), 및 상세화지역(Downscaling Region) 정보를 입력한 후 우측하단의 Downscaling 버튼을 누르면 실행이 된다. 하지만 일반적으로 예측 대상지역에 대한 예측성이 높은 예측모형 및 예측인자의 지역정보를 모르는 경우 계산 결과 도출에 있어서 실패(fail) 결과를 얻는 경우가 대부분이다. 따라서 본 연구의 부록에 제시된 예측인자 정보는 향후 CLIK을 이용한 한반도 상세화에 활용될 수 있으리라 판단되며 한반도 이외의 지역에 대해서는 본연구를 통해 개발된 상세화 툴의 적용을 통하여 예측성이 높은 예측인자 및 지역 정보를 도출한 후 CLIK과 같은 웹기반 상세화 툴을 사용할 수 있을 것이다.

The screenshot displays the 'Set-up Downscaling' interface of the APCC CLIK system. The interface is organized into several sections for configuring the downscaling process:

- Prediction Season:** Year is set to 2015, and Season is set to OND.
- Variable:** A grid of radio buttons for selecting variables: PREC, T850, Z500, SLP, U850, V850, U200, V200, and SST. SLP is currently selected.
- Models:** A grid of checkboxes for selecting models: APCC, CMB, HMC, MGO, MSC_CANCM3, MSC_CANCM4, NASA, NCEP, POAMA, and PNU. PNU is currently selected.
- Predictand:** Radio buttons for selecting the predictand: Precipitation and Temperature. Temperature is currently selected.
- Training Period:** From year is 1980 and To year is 2006.
- Method:** A radio button for selecting the method: Linear Regression. Linear Regression is currently selected.
- Advanced Options:** Significance Level is set to 5% and Minimum Pattern Score is set to 0.3%.
- Downscaling Region:** A map of East Asia shows a selected region. The coordinates are Latitude: -8.059 to 48.225 and Longitude: 119.180 to 207.422. A text box displays the coordinates and area: Lat: -8.059230 to 48.224673, Lon: 119.179688 to 152.578125, Area: 26717589.14 sq.m.

At the bottom right, there are buttons for 'Previous' and 'Downscale'.

Figure 22 APCC CLIK의 사용자 입력정보를 위한 인터페이스

Figure 23 및 Table 10은 강수에 대하여 다른 선행예측 조건에 따라서 계산된 월별 Temporal Correlation Coefficient (TCC)값을 보여주고 있다. 제시된 결과는 매월 예측을 수행하는 경우에 대하여 개별 예측모형의 단순평균인 MME와 관측값을 비교하여 얻은 결과이다. 전체적으로 강수의 경우 1월~6월 기간 동안에 7월~12월 기간과 비교하여 한 개의 모형도 선정되지 않은 경우가 많았다. 4월 및 5월 강수의 경우에는 선행예측 기간에 따라서 TCC값이 변동이 없는데 이는 각각 3개월 및 5개월 선행예측기간에만 모형이 선정되었기 때문이다. 일반적으로 선행예측기간이 증가하면 예측성능이 감소하는 것으로 알려져 있으나 7월 강수의 1~3개월 선행예측 경우에는 반대의 경향을 보이고 있다. 이는 선행기간에 대한 예측성능의 반비례 관계가 역학적 기후예측 모형에 근거한 경우에 해당되는데, 7월 강수의 경우에는 관측자료 기반의 기후인자를 예측인자로 하는 통계적 방법이 선정되어 이와는 무관한 결과를 보인 것으로 사료된다. 역학적 기후예측 자료를 직접 이용하는 방법은 SBC 방법인데, SBC 방법이 주로 선택된 11월 강수 예측의 경우에는 선행예측기간의 증가에 따라 TCC값이 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 이와 같이 선행예측기간의 증가에 따라서 TCC값이 감소 경향은 MME에 사용된 개별 예측자료의 양에의해서도 영향을 받을 수 있다. 즉 선행예측기간이 짧은 경우 선행예측기간이 긴 경우와 비교하여 보다 많은 예측정보가 MME에 사용된다. 따라서 MME의 경우 자료의 양이 증가함에 따라서 예측성 향상이 기대된다. 강수량의 경우에는 개별 예측모형이 가장 많이 선정된 12월에 비교적 높은 예측성을 보였다.

기온에 대한 예측성 평가 결과는 Figure 24 및 Table 11에 제시되어 있다. 기온의 경우는 Table 9에서와 같이 9월에 가장 많은 예측모형이 선정되었고, 상세화 방법의 경우 SBC방법이 주로 선정되었다. 결과적으로 9월 기온 예측의 경우에 가장 예측성이 높은 결과를 보였고, 역학적 예측모형 결과를 기반으로하는 SBC 상세화 방법이 선정되어 선행시간의 증가에 따라서 TCC값이 감소하는 결과를 보였다. 다음으로는 10월과 1월(1개월 선행조건)에 다수의 SBC방법을 기반으로한 예측모형이 선정되었으며 1월의 경우에는 비교적 높은 예측성을 보이고 있다. 강수와 마찬가지로 2월~4월 기간에 예측이 가장 어려운 것으로 나타났다.

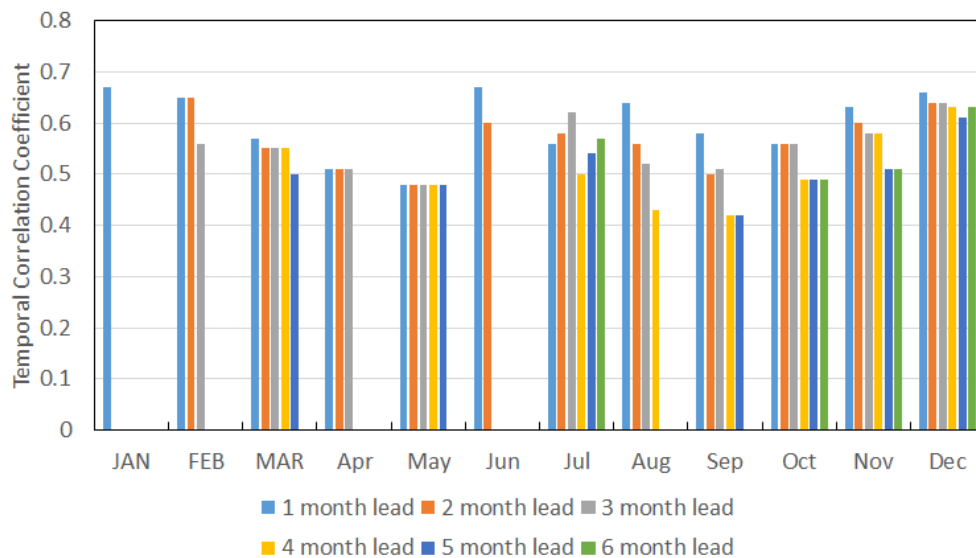


Figure 23 선행예측기간에 따른 월별 TCC (강수량, 매월 예측 수행 경우)

Table 10 선행예측기간에 따른 월별 TCC (강수량)

Month	1 month	2 month	3 month	4 month	5 month	6 month
JAN	0.67					
FEB	0.65	0.65	0.56			
MAR	0.57	0.55	0.55	0.55	0.5	
APR	0.51	0.51	0.51			
MAY	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	
JUN	0.67	0.6				
JUL	0.56	0.58	0.62	0.5	0.54	0.57
AUG	0.64	0.56	0.52	0.43		
SEP	0.58	0.5	0.51	0.42	0.42	
OCT	0.56	0.56	0.56	0.49	0.49	0.49
NOV	0.63	0.6	0.58	0.58	0.51	0.51
DEC	0.66	0.64	0.64	0.63	0.61	0.63

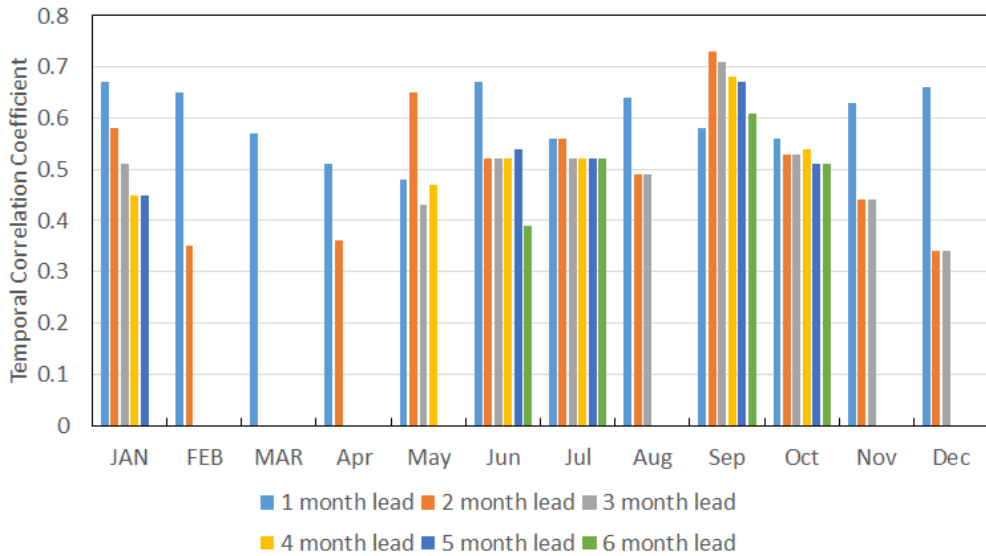


Figure 24 선행예측기간에 따른 월별 TCC (기온, 매월 예측 수행 경우)

Table 11 선행예측기간에 따른 월별 TCC (기온)

Month	1 month	2 month	3 month	4 month	5 month	6 month
JAN	0.67	0.58	0.51	0.45	0.45	
FEB	0.65	0.35				
MAR	0.57					
APR	0.51	0.36				
MAY	0.48	0.65	0.43	0.47		
JUN	0.67	0.52	0.52	0.52	0.54	0.39
JUL	0.56	0.56	0.52	0.52	0.52	0.52
AUG	0.64	0.49	0.49			
SEP	0.58	0.73	0.71	0.68	0.67	0.61
OCT	0.56	0.53	0.53	0.54	0.51	0.51
NOV	0.63	0.44	0.44			
DEC	0.66	0.34	0.34			

Figure 24는 예측에 있어서 많은 모형이 선정된 12월(강수) 및 9월(기온)에 대한 1개월 선행예측 자료의 시계열과 산포도를 보여 주고 있다. 시계열 자료를 살펴보면, 강수 및 기온의 경우, 개별 예측모형의 결과들은 관측의 연변동성 범위를 재현하고

있으나, 단순평균을 통한 예측 결과인 MME는 관측자료와 비교하여 연변동성의 범위가 축소되는 결과를 보여 주고 있다. 강수의 경우 1997년 2002년의 높은 값은 비슷하게 예측된 반면 1991년 및 2012년의 강수량에 대해서는 낮게 예측하는 결과를 보였다. 기온에 대해서도 비슷한 결과를 보였다. 산포도에서도 강수 및 기온의 기울기가 각각 0.58 및 0.34로 예측결과가 관측자료와 비교하여 낮은 값들에 대해서는 높게, 높은 값들에 대해서는 낮게 나타나는 경향을 보여 극한사상들을 재현하는데 어려움을 보였다. 월단위로 예측된 강수와 기온값이 시간상세화를 거쳐 수질모형의 입력으로 사용되는 점을 고려할 때, MME자료의 감소된 연변동성 결과는 비선형적으로 반응하는 강우-유출-수질의 복잡한 과정에서 많은 불확실성을 야기할 수 있다. 이와 관련해서는 계절예측 자료의 수질모델링을 위한 활용 측면에서 논의하고자 한다.

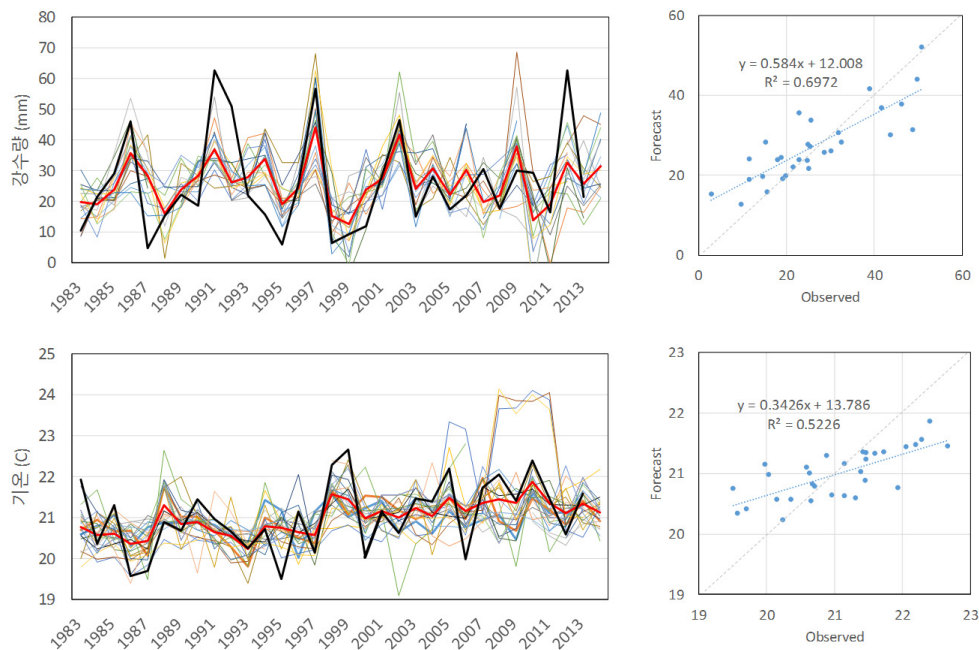


Figure 25 상세화 방법에 의한 12월 강수량(상) 및 9월 기온(하) 시계열(좌) 및 산포도(우) 비교 (얇은선: 개별예측모형, 굵은 검정색 선: 관측, 굵은 붉은색 선: 개별예측의 평균)

앞에서 제시된 내용들은 개발된 계절예측 상세화 시스템의 과거기간 (1983~2013)에 대한 월별 예측성 평가 결과이다. 즉 예측정보를 사용하는 목적에 따라 예측 대상 월, 매월 예측을 할 것인지 특정 월에만 예측을 할 것인지에 대한 예측빈도, 얼마나

미리 예측정보가 필요한지에 대한 선행예측기간 등 다양한 조건이 결정되는 경우 기대할 수 있는 예측성 정보를 제공하기 위함이다. 하지만 매월 실시간 예측을 수행하는 경우에 의사결정을 위해 제공되어야 하는 정보는 과거기간에 대한 예측성능 정보 뿐만아니라 미래 예측에 대한 정보도 직관적으로 파악할 수 있도록 제공되어야 한다. 본 연구에서는 Figure 26와 같이 기후예측정보 제공을 위한 템플릿을 구성하여 매달 실시간 예측시 R기반 상세화통에 의해 자동생성 될 수 있도록 하였다. ①은 예측시점 및 예측기간에 대한 정보 등 예측 조건에 대한 전반적인 정보를 제공한다. 제시된 예는 1994년 6월에 예측을 수행하여 향후 6개월인 1994년 7월부터 1994년 12월까지 강수량에 대한 예측을 수행한 결과이다. ②는 최근 과거기간에 대한 예측성과 미래 예측기간에 대한 예측결과를 직관적으로 제시하기 위한 그래프이다. 그래프에는 총 2년의 기간에 대한 정보를 제공한다. 그래프에서 파랑색 점선은 사용자에게 의해 정해진 관측기간 (본 경우는 1983년 ~2013년)에 대한 월 평균값 (Climatology)을 제공한다. Climatology값은 매달 실제 관측값과 예측값이 평년에 비해 낮은지 높은지를 비교할 수 있는 기준값 역할을 한다. 그래프에서 붉은 점선은 매달 실시간 관측자료가 수집된다는 가정하에서 현재까지 수집된 월평균 관측값 (Observed)을 보여주고 있다. 반면 검정색 실선은 매월 가용한 예측모델들에 의한 예측값을 단순 평균한 값 (Multi-Model Ensemble, MME)을 보여주며 boxplot은 개별 모형들에 의해 예측된 값들의 범위를 보여준다. ③은 미래 기간의 월별 예측 결과에 대한 신뢰여부를 결정하는데 도움을 주기 위한 목적으로 사용자에게 의해 주어진 장기 과거기간에 대한 월별 예측성 정보를 제공한다. 성능 평가를 위해서는 앞서 예측성 평가에 사용된 TCC, NRMSE, Accuracy, HSS 등의 값을 제공한다. ④는 예측기간에 대한 확률예보 정보를 제공한다. 확률정보의 생성은 우선 3개 구간(평년보다 높음: High, 평년과 비슷: Normal, 평년보다 낮음: Low)에 대해 과거관측자료를 이용하여 구간별 범위를 구한다. 본 연구에서는 관측값들을 전체 샘플의 33.3%씩 선정하여 3개 구간의 범위를 결정하였다. 이후 다중 상세화 모형에 의해 예측된 값들이 각각의 범위에 포함되는 빈도를 계산하여 확률을 결정하였다. 그림의 1994년과 같이 높을 확률이 100%로 제시되는 경우는 선택된 모형의 개수가 적은 경우 특정 범위에 예측된 모든 값들이 포함되는 경우를 의미한다. Figure 27은 1994년 6월에 향후 6개월에 대해 예측한 기온 결과의 예를 보여준다. 전체적인 구성은 강수의 경우와 동일하지만 그래프에서 Climatology로 실제 월별 기온 값을 사용하는 경우 온도의 계절변동과 비교하여 예

측된 값들의 범위가 작기 때문에 가독성이 떨어진다. 따라서 실제 기온값을 사용하는 대신에 실제값에서 평균값을 뺀 차이값(Anomaly)을 기준으로 사용하였다. 전체기간에 대한 강수와 온도에 대한 예측결과는 중복되는 부분을 최소화하여 그래프 부분만을 부록에 제시하였다 (2년 주기로 6월에 예측하는 경우 전체 2년에 대한 결과를 포함하게 된다).

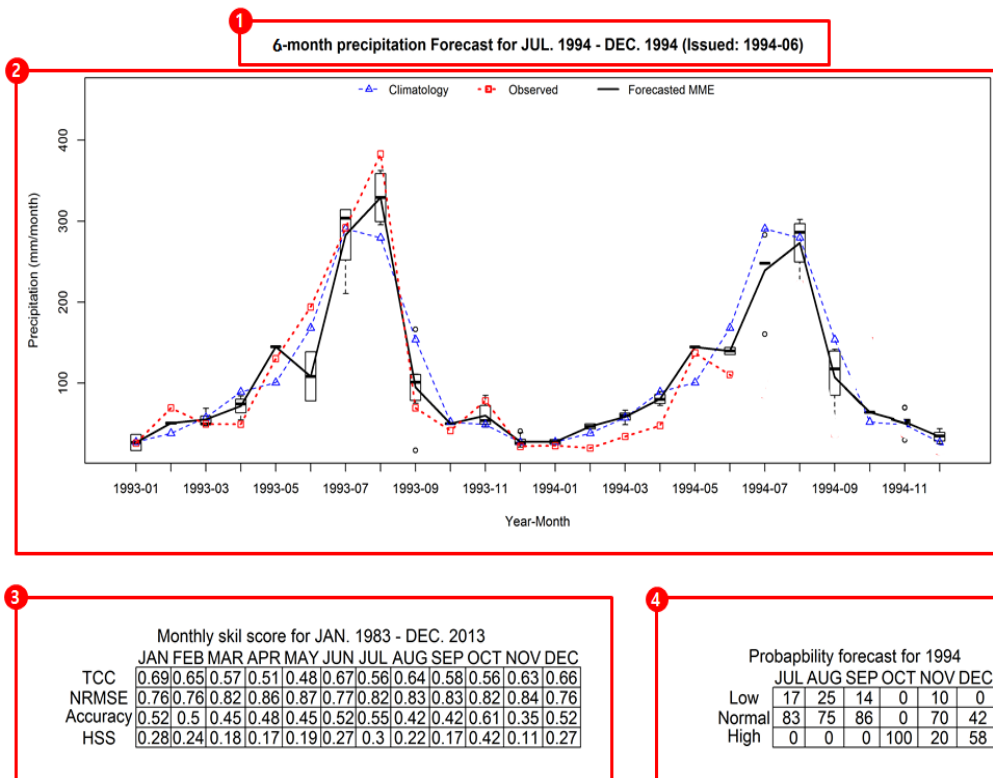
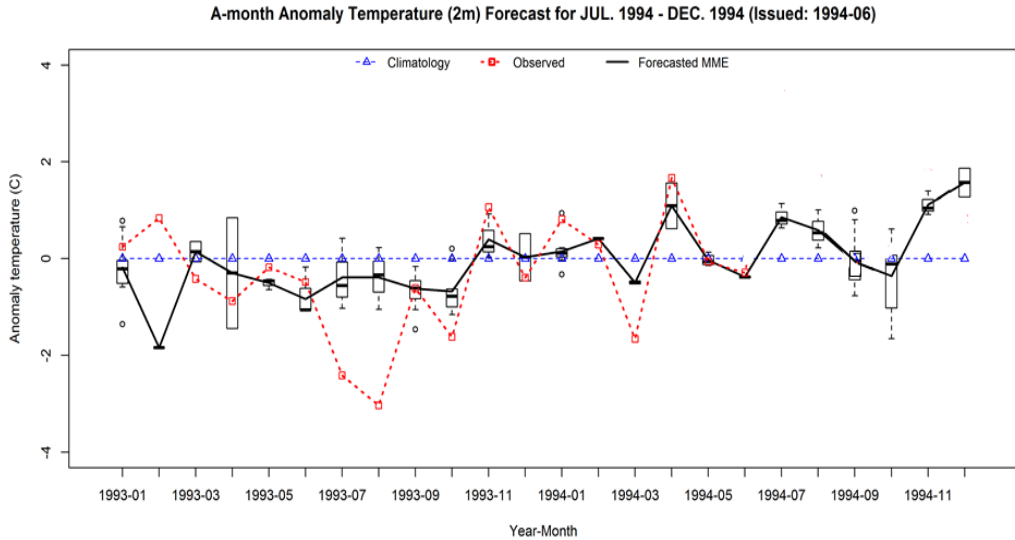


Figure 26 실시간 강우 예측정보 전달을 위한 템플릿 구성



Monthly skill score for JAN. 1983 - DEC. 2013

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
TCC	0.77	0.22	0.7	0.45	0.66	0.52	0.68	0.64	0.72	0.55	0.47	0.42
NRMSE	0.78	0.99	0.73	0.97	0.75	0.84	0.78	0.82	0.72	0.84	0.88	0.89
Accuracy	0.61	0.34	0.58	0.48	0.55	0.42	0.42	0.45	0.58	0.45	0.39	0.48
HSS	0.41	-0.032	0.38	0.24	0.31	0.17	0.11	0.17	0.35	0.16	0.059	0.22

Probapbility forecast for 1994

	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Low	0	0	23	31	0	0
Normal	33	33	65	62	0	0
High	67	67	12	8	100	100

Figure 27 실시간 기온 예측정보 전달을 위한 템플릿 구성

상세화 시스템은 오픈소스 통계분석 소프트웨어인 R을 이용하여 개발되었다. 개발된 상세화 툴은 관측자료가 있는 경우에 범용적으로 사용할 수 있도록 개발되었으며 Figure 28과 같이 기후정보를 처리하여 통계 모형을 구축하는데 필요한 함수들 모음과 이를 바탕으로 특정 지역에 상세화 방법들을 구동하는데 필요한 코드로 구성되어 있다.

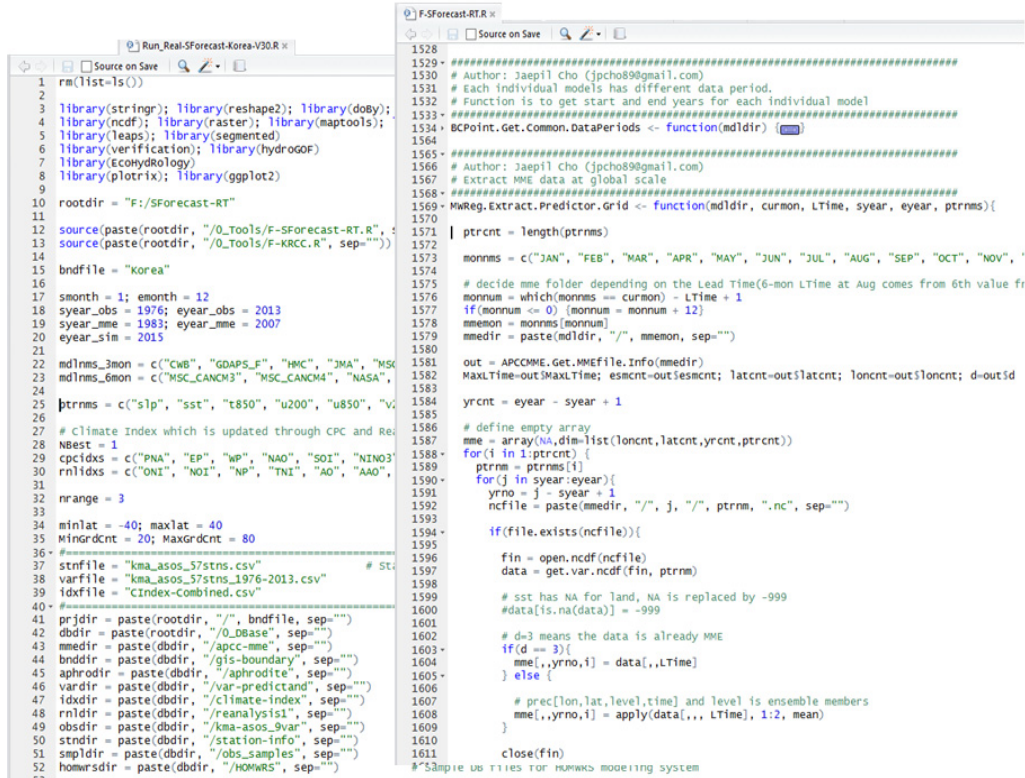


Figure 28 계절예측 상세화를 위한 R 기반 톨(상세화 구동 코드,좌, 기후정보 처리를 위한 함수 모듈, 우)

마지막으로, 개발된 상세화 톨에 적용된 알고리즘이 예측성을 실제보다 높게 생성해 내는지 검증하기 위해 수행된 무작위 예측인자(random predictor) 테스트 결과는 Figure 29에 제시되어 있다. 즉 코딩된 Cross Validation 알고리즘 자체에서 과대적합이 발생하는 지를 확인하기 위하여 통계적 방법인 CIR, MWR, ITR 방법들에 대해 3000번 무작위로 생성된 예측인자와 종속변수들을 이용하여 계산된 Temporal Correlation Coefficient 값들의 분포를 보여준다. CIR 방법의 경우 Predictor가 1개로 고정되는 관계로 1000회 모의를 통해 얻은 3000개 개별 결과(1000회 $\times$ 3개 Lead Time)를 이용한 결과이고, MWR 및 ITR 방법은 100회 모의를 통해 얻은 3000개 개별 결과(100회 $\times$ 10개 개별모형의 Predictor $\times$ 3개 Lead Time)로부터 얻은 결과이다. 모든 방법에서 TCC가 0값을 중심으로 정규분포하는 결과를 보여 Cross Validation 알고리즘에서 과대적합이 발생하지 않는 것으로 판단하였다.

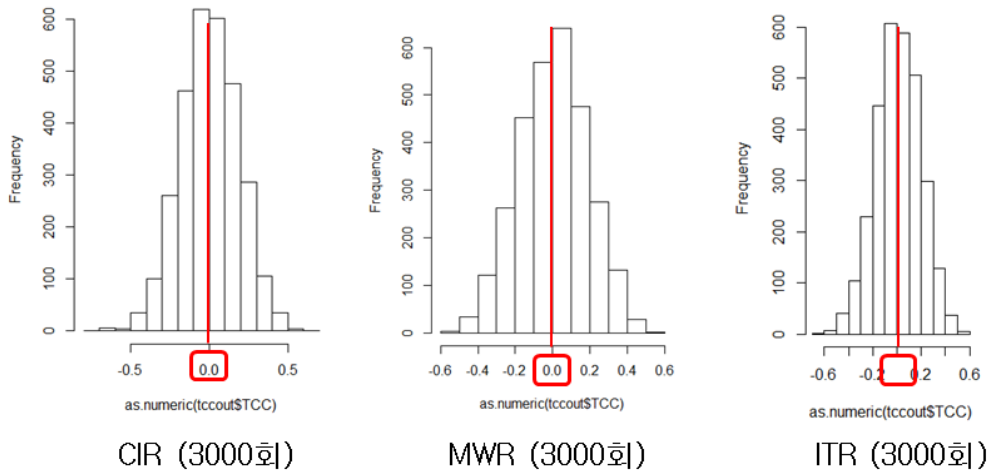


Figure 29 통계적 상세화 방법별 Random 예측인자를 이용한 TCC 비교

4.2 장기 수질예측 정보

본 연구에서는 2013년 1월에서 2014년 6월까지 총 18개월에 대하여 3개월 선행기간의⁹⁾ 계절예측 자료를 HSPF-EFDC 모델링 입력으로 사용하여 예측된 수온, 클로로필-a, TN, TP를 영산강 유역의 수질관측값과 비교하여 장기 수질 예측성을 평가하였다. 예측기간이 짧기 때문에 전체 모의기간에 대한 TCC와 NRMSE를 이용하여 예측성을 평가하였다. 장기에보의 대상지점인 영산강 본류에서의 수질을 정확히 예측하기 위해서는 가정 먼저 장기기후예측이 정확해야하며, 이를 이용하여 HSPF 모델링을 통해 계산되는 유역으로부터 본류로 유입되는 오염원의 부하량 예측이 정확해야하고, 끝으로 본류 구간에서의 EFDC 모델링이 실제 본류의 상황을 잘 재현해야만 한다.

한반도 전체 평균 강수량 및 기온에 대한 계절예측 자료의 예측성은 앞에서 살펴 보았으므로 본 절에서는 영산강 유역의 대표 관측소인 광주관측소(ID156)에 대하여 일단위로 상세화된 자료를 이용하여 강수량, 최고기온, 최저기온, 일사량에 대한 예측성을 평가하였다. Figure 30은 선행예측기간에 따른 월별 TCC를 보여주고 있다. 한반도 평균에 대한 월별 강수 예측의 경우에는 TCC값이 0.4에서 0.7 사이에서 분포

9) 6개월 선행기간의 예측자료를 사용하여 모의된 장기수질예측 자료를 사용하기로 계획되어 있었으나 3개월 선행기간의 예측자료를 사용한 장기수질예측 결과를 국립환경과학원으로부터 제공 받아 사용하였다.

하는 경향을 보였으나, 관측소별 일단위로 샘플링을 통한 시·공간적 상세화를 거친 후 광주 관측소에서의 강수량에 대한 월단위 예측성은 전체적으로 0.2와 0.6사이에서 분포하여 한반도 전체에 대한 예측성과 비교하여 낮아지는 경향을 보였다. 또한 경우에 따라서는 음의 값을 보이는 경우도 발생하였다. 이는 한반도 강수량의 평균이 비슷한 년/월을 과거 관측기간으로부터 선택하더라도 강수의 공간적 분포는 샘플별로 상이한 분포를 보일 수 있기 때문이다. 최고 및 최저 기온에 대한 예측성은 강수와 마찬가지로 한반도 평균에 대하여 TCC값이 0.3에서 0.7 사이에서 주로 분포하는 결과를 보인 반면에 최고 기온은 0.2에서 0.5, 최저 기온은 0.2와 0.6 사이에 주로 분포하여 한반도 평균기온에 대한 예측성의 경우와 비교하여 낮아지는 경향을 보였다. 또한 최저기온의 경우에는 한반도 평균기온에 대한 예측성이 높게 나타난 9월 및 10월에 대하여 동일하게 높은 TCC값을 보여주었다. 또한 일사량의 경우에는 강수 및 기온 변수들과 비교하여 낮은 예측성 결과를 보였다.

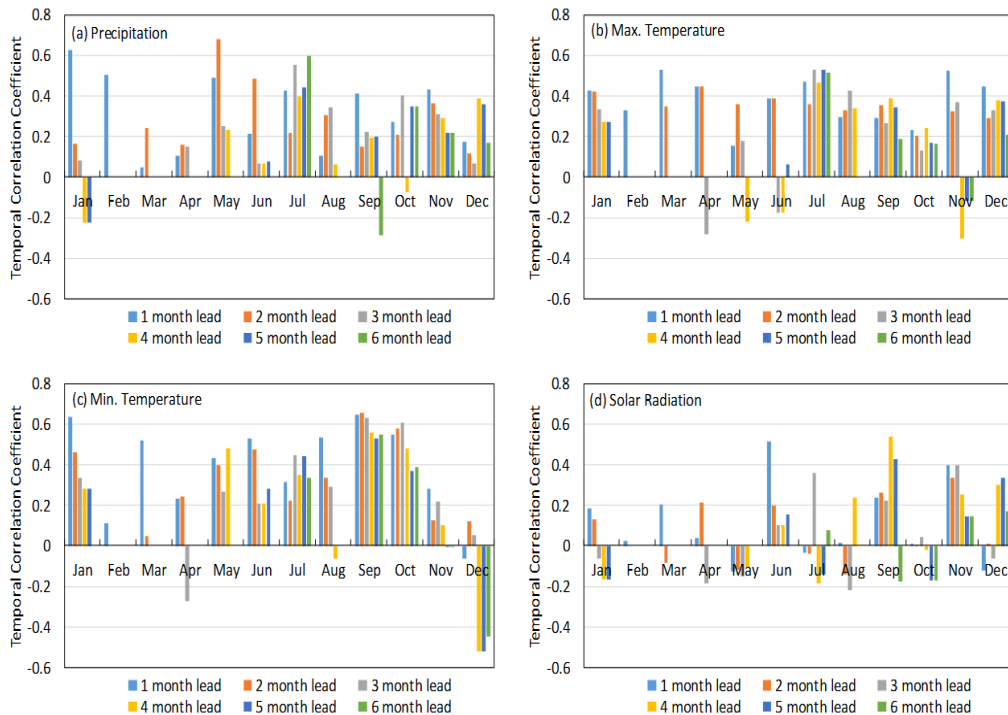


Figure 30 선행예측기간에 따른 광주 관측소에서의 (a) 강수량, (b) 최고 기온, (c) 최저 기온, (d) 일사량에 대한 TCC

이후 관측소별 계절예측 자료를 HSPF 및 EFDC 모델링의 입력으로 사용하여 모의된 수질 결과를 관측 수질과 비교하였다. Figure 31은 영산강 본류로 합류하는 중권역의 말단에서 HSPF모델링을 통해 예측된 수질과 월평균 관측 수질과의 비교를 통해 계산된 TCC와 NRMSE의 결과를 보여준다. 제시된 결과는 실제 예측을 가정하여 매월 실측자료를 통한 초기화를 고려하여 익월부터 3개월 기간을 예측한 결과 중에서 1개월 선행시간의 결과만을 이용하여 관측수질과 비교한 결과이다. 수온의 경우 수온의 계절성으로 인하여 TCC가 모든 지점에서 0.96 이상의 값을 보이고 있다. 반면에 클로로필-a의 경우에는 광주천-2에서 가장 낮은 결과를 보인 반면에 문평천에서 0.36으로 가장 높은 값을 보였다. TN 및 TP의 경우에는 함평천3 및 지석천4에서 각각 가장 낮은 값을 보였고, 우치 및 영암천에서 0.81 및 0.33으로 가장 높은 예측성을 보였다.

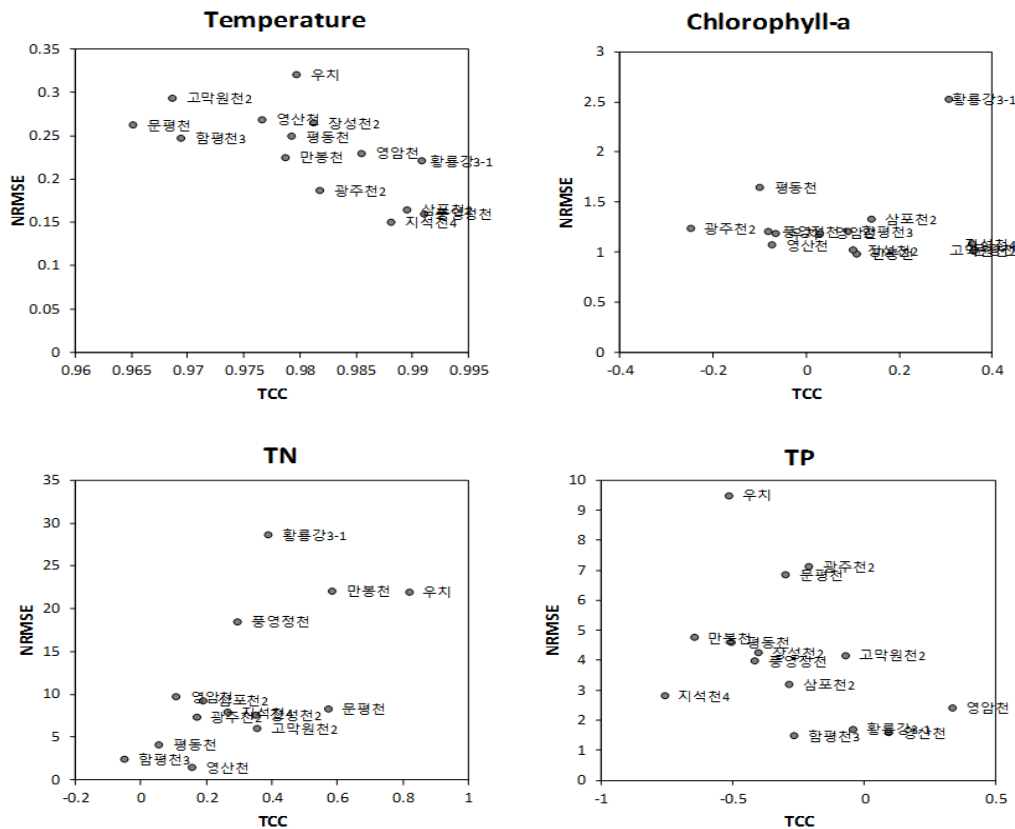


Figure 31 영산강 본류 합류 지점에서의 HSPF 수질 예측성 평가 결과 (2013년 1월 - 2014년 6월, 1개월 선행예측 결과)

수온, 클로로필-a, TN, TP 항목에 대해서 가장 예측성이 높게 나타난 풍영정천, 문평천, 문평천¹⁰⁾, 영암천에서의 월평균 예측 및 관측 수질의 비교는 Figure 32에 제시되어 있다. 문평천에서의 클로로필-a 예측 결과는 2013년 10월 및 2014년 3월에 발생한 높은 농도의 절대값을 모의하지 못하고 있음을 보여준다. TN 및 TP의 경우는 2014년 이전에는 예측과 관측사이에 많은 차이를 보이고 있지만 2014년 2월부터는 예측 농도가 급격하게 감소함에 따라서 관측값과 비슷한 범위에서 예측되는 결과를 보였다. 결과적으로 수온을 제외한 클로로필-a, TN, TP 항목에서 예측치가 모두 실제 관측값의 범위를 잘 재현하지 못하는 결과를 보였다.

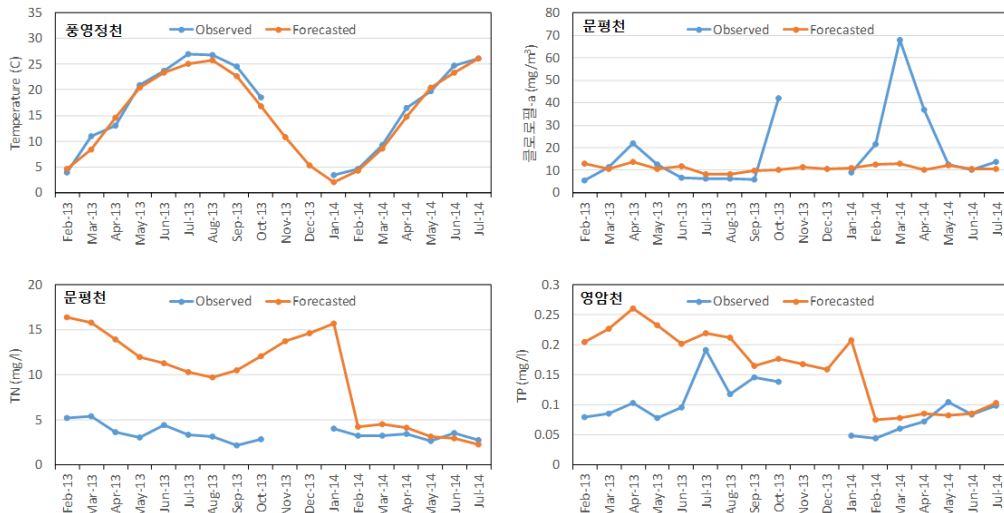


Figure 32 예측성이 가장 높게 나타난 지천에서의 HSPF 예측 및 관측 수질 시계열 비교

앞에서 살펴본 바와 같이 HSPF 모델링 결과가 본류로 유입되는 오염원을 정확히 예측하지 못하는 점을 고려할 때, EFDC 모델링에 의한 수질 예측의 정확성을 기대하기 어렵다. Figure 33는 영산강 본류 수질관측지점에서의 월평균 수온, 클로로필-a, TN, TP에 대한 예측과 관측의 비교 결과를 보여주고 있다. 본류 합류점에서의 HSPF 예측결과와 마찬가지로 수온을 제외한 모든 항목에서 만족스럽지 못한 예측 결과를 보이고 있다. Figure 34은 수온, 클로로필-a, TN, TP 항목별 가장 높은 TCC값을 보인 나주, 죽산, 광주1, 광주2¹¹⁾에서의 시계열 비교 결과를 보여준다. 죽산 지점의 클

10) 가장 높은 TCC값은 우치에서 나타났지만, 결측된 관측자료가 많아 문평천을 비교하였음.

로로필-a의 경우는 지천에서의 결과와는 다르게 경향 뿐만아니라 농도 또한 비슷한 범위에서 분포하는 경향을 보였다. TN 및 TP는 지천에서의 결과와 비슷하게 2014년도 2월 이후에 예측값의 급격한 감소로 인하여 관측값과 비슷한 범위에서 예측 결과를 보였다.

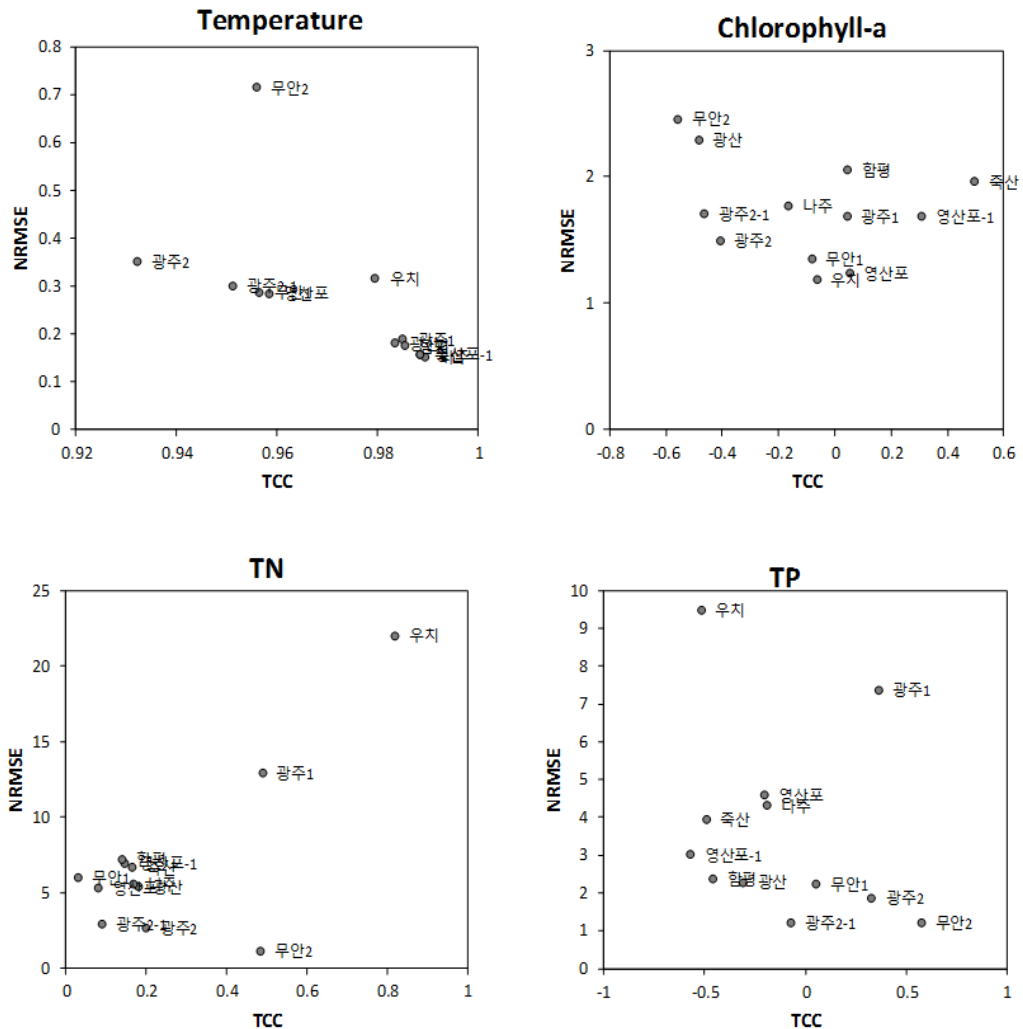


Figure 33 영산강 본류 지점에서의 EFDC 수질 예측성 평가 결과 (2013년 1월 - 2014년 6월, 1개월 선행 예측 결과)

11) 우치, 무안2에서의 의 경우 2013년 12월 이후 결측으로 TN은 광주1 관측지점에서 TP는 광주2 관측지점에서의 시계열을 비교하였음.

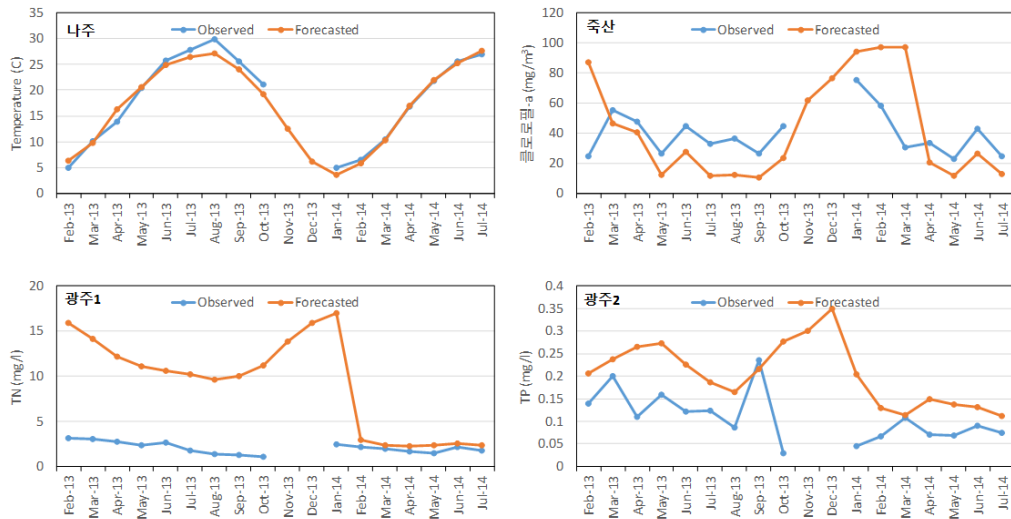


Figure 34 예측성이 가장 높게 나타난 영산강 본류 관측지점에서의 EFDC 예측 및 관측 수질 시계열 비교

앞에서 살펴본 바와 같이 지천에서의 HSPF 및 본류 구간에서의 EFDC 모델링 결과 모두 관측 클로로필-a, TN, TP 농도를 예측하는데 어려움을 보이고 있다. 장기수질예측의 불확실성은 기후예측의 불확실성 및 모델링 자체의 불확실성의 복합적인 영향에 기인한다. 이를 판단하기 위해서는 향후 동일 기간에 대해 관측기상자료를 이용한 수질 모의 값을 함께 비교하는 것이 필요하리라 판단된다. 즉, 관측기상 자료를 이용하여 모의한 결과가 관측 수질의 경향을 잘 반영하는 경우에는 대부분의 불확실성이 기후예측으로부터 기인한다고 판단할 수 있으나, 반대의 경우에는 대부분의 불확실성이 모델링 과정에서 기인한다고 판단할 수 있다.

Figure 35는 앞의 결과 도출에 동일하게 사용된 HSPF-EFDC모델링 시스템에 의해 발생하는 불확실성을 제거하고 장기 기후 예측에 의한 영향만을 비교하기 위한 낙동강 유역에서의 모의결과를 보여 준다 (국립환경과학원, 2014). 즉 상세화 방법에 의해 생성된 예측 기후자료를 입력으로 사용하여 모의된 수질(HSPF/EFCD-Forecasted)을 실제 수질 관측 자료(Observed) 뿐만 아니라 동일 기간 동안에 관측 기상 자료를 입력으로 사용하여 모의된 수온 및 클로로필-a 결과(HSPF/EFDC-Observed)와의 비교 결과를 보여 준다. 유의수준 0.05에서 유의미한 TCC 값의 하한치는 0.33(그림의 세로 점선)으로서 chlorophyll-a의 경우 예측 기후자료를 입력으로 사용하여 모의된 값을 실제 관측 수질과 비교한 경우(그림의 왼쪽 칼럼) 5개 관측지점(달성, 대암-1,

안동2, 창녕, 합천)에서 0.33보다 낮은 TCC 값을 보인 반면, 실제 관측 기후자료를 입력으로 하여 모의된 값과 비교한 경우(그림의 오른쪽)에는 모든 관측지점에서 0.33 이상의 TCC 값을 보여 주었다. 이는 HSPF-EFDC 모델링 과정에서 발생하는 불확실성이 적지 않음을 시사하며 모델링 시스템의 예측성 향상을 통해서 예측정보를 활용한 전체적인 장기 수질의 예측성을 향상 시킬 수 있으리라 판단된다.

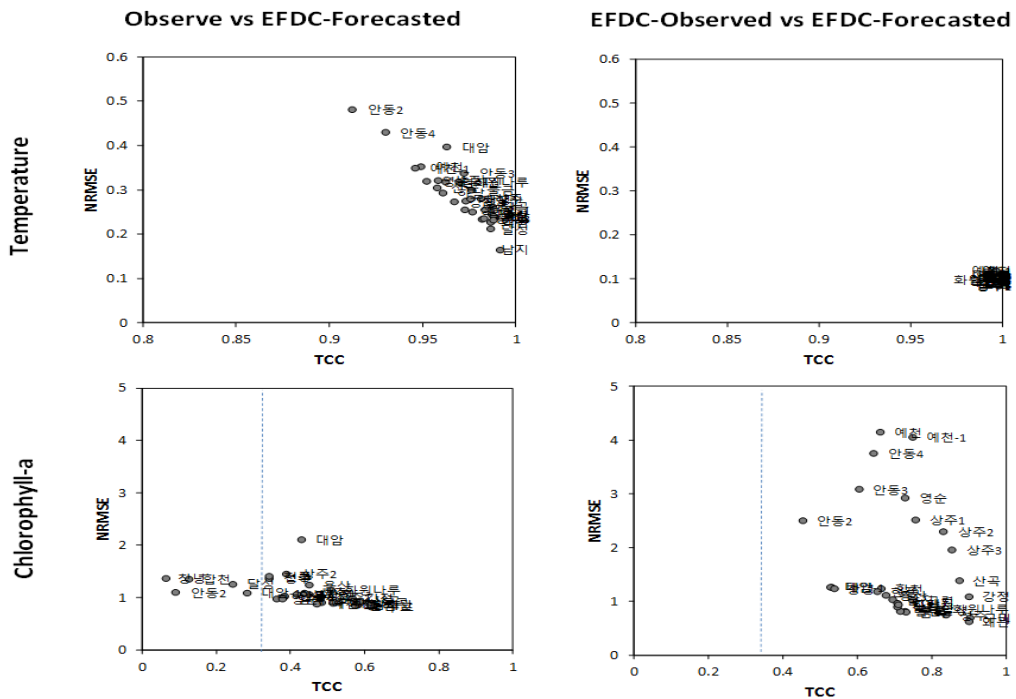


Figure 35 낙동강 유역 30개 관측지점에 대한 EFDC 장기 수질 예측성 평가 결과 (2009-2011)

장기 수질예측 결과의 예측성 평가를 위해서는 계절예측에서와 같이 장기간의 관측 및 모의결과가 필요하다. 하지만 조류 관측자료의 경우 1991년 이후에 자료가 존재하여 기후자료와 비교할 때 관측기간도 짧고, 앞서 영산강 유역에 대해 살펴 본 바와 같이 4대강 사업을 통한 보 건설 이후 수환경의 급격한 변화가 있었으며, 모델링 관점에서도 보 운영을 포함한 과거 유역환경을 재현하기 어려우며, 7일예보에 사용되는 HSPF-EFDC 모델링 시스템이 많은 구동시간을 필요로하는 점을 고려하여 장기간 예측성 평가 대신에 특정 사례 중심의 예측성 평가를 수행하였다. 환경부에서는 「2014년 조류(녹조)발생과 대응 연차보고서」를 통해서 영산강 유역에서의 2014년도

녹조 발생 및 원인을 분석하였다. 따라서 장기 수질 예측성 평가를 위해서 2014년도 갈수기인 1월~6월에 대해 예측한 결과와 연차보고서의 분석 결과를 비교하였다. Figure 36는 2013년 12월, 2014년 4월, 2014년 6월에 예측한 기후(기온 및 강수) 및 승촌보 직상류에 위치한 광산 수질측점에서의 클로로필-a 농도의 예측 결과를 보여 준다.

연차보고서에서 1월~2월의 경우 “영산강의 조류는 2014년 1~2월 경 지난 2012~2013년도와 달리 평년 대비 높은 기온과 가뭄의 영향 등으로 죽산보에서 겨울철에 주로 나타나는 저수온성 규조류(Stephanodiscus)의 이상증식으로 클로로필-a 농도가 최대 152.8mg/m³까지 치솟아 수질관리 “관심단계”가 2회(13일) 동안 발령되기도 하였다.”와 같이 1월 및 2월의 평년대비 높은 기온을 규조류 이상 증식의 주요원인으로 언급하고 있으나 동일 기간에 대한 기온 예측은 평년과 비슷한 결과를 보여주어 기온 상승을 예측하지 못하였으나, 클로로필-a 농도는 1월~3월 기간동안에 관측 평균농도보다 높게 예측하였다.

5월에 대해서는 보고서에서 “봄철 갈수기에 접어들면서 승촌보 상류의 클로로필-a 농도가 높은 수준을 유지하다 이상고온 현상과 농번기에 다량의 영양염류가 하천으로 유입되어 5월 30일 오후 극락교 부터 승촌보까지 상류 전구간에 걸쳐 녹조류(Eudorina)에 의한 수화현상이 일시적으로 나타났으나 익일 소멸되었으며, 수질관리 “관심단계”가 1회(6일, 5.27~6.1) 발령되었다. 5월 광주지역의 평균기온은 평년 대비 0.9℃ 상승하였으나, 5월 21일부터 31일까지는 무려 2.5℃(19.8→22.3℃)가 상승하였고, 강우가 거의 없어 맑은 날이 지속되었으며, 1962년(5.31일 33.7℃) 이후 5월 중 가장 높은 기온을 기록(5.30~31, 33.5℃)하는 등 많은 일사량과 일조시간, 그리고 퇴비 등 다량의 영양염류 유입 등이 주요 원인으로 추정된다. 이후 승촌보 구간은 장마시작(7.2~9, 광주 53.7 mm)과 더불어 클로로필-a 농도가 감소하기 시작했으며, 7월 중순 집중강우(7.17~19, 광주 127.5 mm)로 7.4mg/m³까지 급감하였다.”라고 언급하고 있다. 예측의 경우에는 기온의 경우 5월에 평년보다 0.5℃높게 예측하였으며, 클로로필-a 농도의 경우에는 예측의 경우 전체적으로 관측 농도보다 전체적으로 낮게 예측하였고, 시간적 경향성도 관측의 경우 5월이후 감소하는 경향을 보였으나 예측의 경우는 6월에 가장 높은 값을 보인후 7월에 감소하는 경향을 보였다.

7월 이후 기간에 대해서는 보고서에서 “장마가 소강상태를 보이고, 7월 24일 최고 기온이 33.5℃을 기록하는 등 폭염이 지속되면서 클로로필-a 농도는 재차 99.5 mg/m³(7.28 채수)까지 상승하는 등 급격한 변화를 보였다. 하지만 태풍 나크리 등의 영향으로 8월중 많은 강우(8.1~5 광주 46.1 mm, 8.13~21 광주 227.6 mm)가 내려 클로로필-a 농도는 급격하게 감소하였고, 9월 이후 20 mg/m³ 안팎의 농도를 유지하였다.”라고 언급하고 있다. 예측 결과를 살펴보면 8월에 평년 강수량과 비교하여 66 mm가량 높게 강수를 예측하였고 클로로필-a 농도의 감소 경향을 반영하고 있으나 7월의 높은 농도는 재현하지 못하는 결과를 보였다.

영양염류와 관련하여서는 보고서에서 “영양염류인 총질소 농도는 과거 2년 대비 큰 차이가 없었으나 총인은 약 40%감소했다. 비교적 유량이 적은 1~6월까지의 큰폭으로 감소하여 광주하수처리장의 총인 처리 시설의 고도화와 관련이 있는 것으로 판단되며, 강우가 증가하는 7월, 8월이후의 증가는 강우에 의한 비점오염원의 유입 때문인 것으로 사료된다.”라고 언급하고 있다. 앞에서 살펴본 바에 의하면 본류 및 지천의 TN 및 TP의 예측 농도가 2014년을 중심으로 급격하게 감소하는 경향을 보였는데 유역내 공공하수처리시설의 강화된 방류수수질 기준의 적용에 따른 오염부하량의 저감효과가 모형에 반영된 결과라 판단된다.



Figure 36 2014년 기후예측 및 광산 지점에서의 클로로필-a 예측값의 비교: 2013년 12월 예측(왼쪽), 2014년 4월 예측(가운데), 2014년 6월 예측(오른쪽)

실시간 장기 수질예측을 수행하는 경우 의사결정에 필요한 정보의 전달과 관련하여서는 2015년도 7월에 향후 3개월(8월~10월)에 대해 예측한 상세화 자료를 국립환경과학원의 HSPF-EFDC모델링 시스템의 입력으로 이용하여 모의된 조류 발생 예측 결과 보고에 사용된 내용들을 중심으로 살펴 보았다. 전체적인 보고서 구성 내용은 영산강 수계와 관련된 내용만을 발췌하여 부록에 제시하였다. 보고는 크게 예측기간, 기상, 댐·보 운영, 오염원에 대한 예측조건, 예측 방법, 결과 제시 방법에 대한 정보를 포함하는 「예측 개요 및 모델링 조건」 부분, 구체적인 수질 예측결과를 4대강 전체에 대해 제시하는 월별 종합분석, 수계별 분석, 16개 보 구간에 대한 조류 농도 변화 예측 테이블 등의 정보를 포함하는 「예측 결과」 부분, 예측 강우량 및 보구간의 예측 결과를 그래프로 보여주는 「참고」 부분으로 구성되어 있다.

우선 「예측 결과」 및 「참고」 부분을 살펴보면, 예측결과의 비교를 위해 Figure 37와 같이 예측 결과를 전년도 동일 기간에 대한 모의결과와 일단위로 비교하였다. 또한 함께 제시된 표에서도 최대 증가율 및 최대 증가 시기 항목의 경우 일단위 비교를 통해서 일별 최대 증가율과 발생 시점을 제시하였다. 이는 현재 단기 수질예보의 경우 일단위의 조류농도를 기준으로 예보를 발령해야하는 점을 고려할 때 일단위 비교가 의미가 있을 수 있다. 하지만 계절예측 자료의 특성을 고려할 때 모의된 일단위 결과를 이용하여 수질예측 결과를 비교 분석하는 것은 적절하지 못하리라고 판단된다.

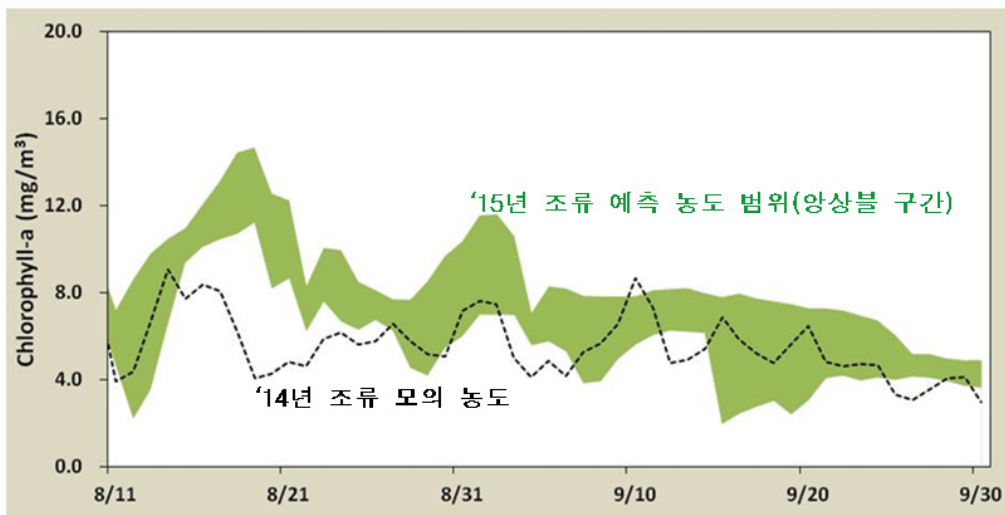


Figure 37 조류발생 예측 결과 그래프

「예측 개요 및 모델링 조건」 부분의 내용을 살펴보면, 실시간 예측을 위해서 7개의 개별 예측모형에 의한 상세화 자료가 제공되었으나¹²⁾ 예측 강우량의 변동 폭을 기준으로 최다 강우, 최소 강우, 평균 강우에 해당되는 3개 모형의 결과만을 사용하였다. 따라서 계절예측 정보를 수질예측 모델링의 입력으로 사용하는 경우, 앞서 살펴본 계절예측 자료의 MME결과가 갖는 문제점과 연관지어 향후 연구 방향에서 살펴보았다.

4.3 구간별 수질 위험도 정보

수질 위험도 분석을 위한 구간설정은 영산강 본류의 하천수질측정망 중에서 Figure 38에서와 같이 우치, 광주2, 광산, 나주, 영산포, 무안1, 무안2 등 7개 수질관측소를 기준으로 설정하였다. 즉 각각의 관측소에서의 조류 농도를 노출 인자 선정을 위해 사용하였다. 갈수기 기간 중에서 조류 농도가 높게 나타나는 4월~6월의 3개월 조류농도 평균값을 노출인자로 사용하였다. 우선 예측자료를 사용하여 위험도 분석을 수행하기 전에, 2012년~2014년의 관측 조류농도를 이용하여 위험도 분석을 수행하였다. Figure 39는 위험도 분석 구간별 3개월(4월~6월) 평균 조류농도를 보여 주고 있다.

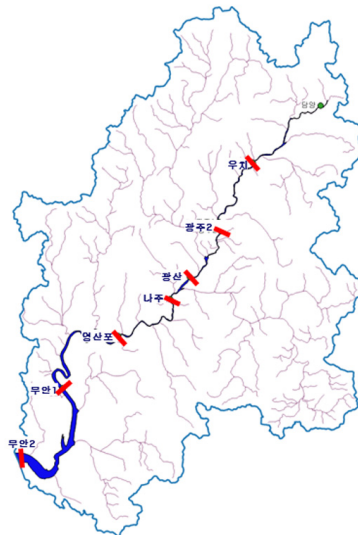


Figure 38 조류 위험도 분석 구간

12) 본 수질예측에 사용된 상세화 자료는 실시간 예측 시 과대적합(Overfitting)을 피하기 위해 고려된 예측인자 선정관련 절차가 반영되지 않은 Integrated Time Regression (ITR) 방법만을 이용하여 생성된 자료로서 Figure 9와는 다른 절차로 구축된 자료이다.

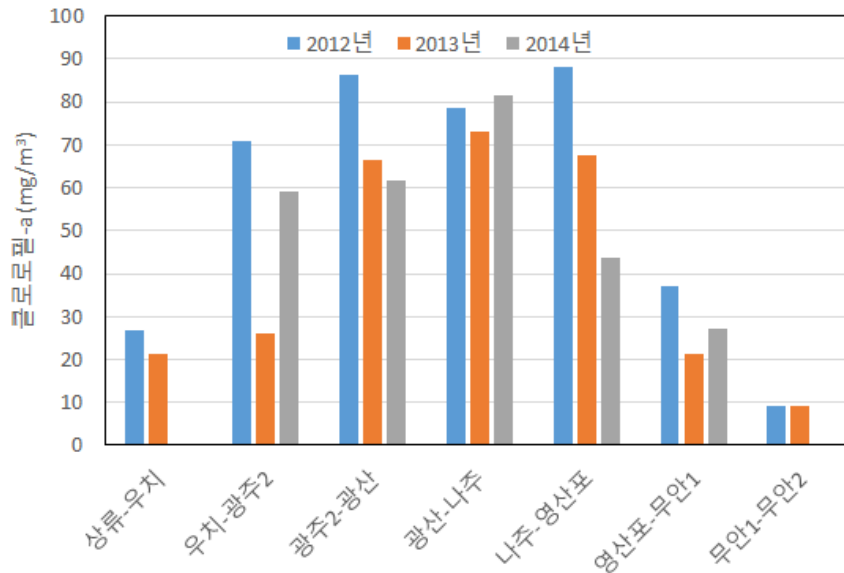


Figure 39 위험도 구간별 3개월(4월~6월) 평균 관측 조류 농도

조류 대량 증식과 관련된 민감도 지표를 결정하기 위해서 조류 대발생에 의한 피해를 살펴보면 Table 12와 같이 시각적 영향, 생태학적 영향, 생물생존 위협 등 간접적인 피해와 상수원 위협 및 농공용수 사용과 관련된 경제적 손실 등이 있다. 본 연구에서는 용수사용과 관련된 직접적인 피해와 관련하여 민감도 지수를 결정하였다. 영산강 유역의 경우 본류구간에서 생활용수 취수는 몽탄 취수장 폐쇄 이후 없기 때문에 본류 구간에서 사용되는 양은 농업용수 일부에 대부분 양수장과 보를 통해 농업용수로 사용되고 있다.

Table 12 담수 남조류 대발생에 의한 피해

항목	생태적 영향 및 피해	원인생물, 특징
시각적 영향	착색 또는 녹조현상(Scum) 형성	Microcystis, Anabaena
	죽은 물고기 등으로 인한 시각적인 불쾌감 유발	악취
생태학적인 영향	생태계 파괴로 인한 토종 동물의 사멸, 서식처 이동, 개체군 변화, 먹이 손실	악취
경제적 손실	레크리에이션 활동 및 여행의 저해	Scum, 악취
	농업 용수·산업 용수 부적합	Microcystin

항목	생태적 영향 및 피해	원인생물, 특징
생물 생존위협	남조류 독소에 의한 가축이나 야생 동물의 폐사	Microcystin, Saxitoxin
	수중 용존 산소의 부족으로 인한 물고기 및 수 중 생물의 폐사	세균 분해 작용
상수원 위협	남조류 독소 발생, 이취미 생성,	Microcystis
	상수처리과정 중 여과지 폐쇄, 불충분한 정수처리시의 응집침전 저해	Microcystis

자료: 국내 담수 조류저감 마스터플랜 마련 연구(환경부, 2010)

따라서 지천이 아닌 본류 구간에서 사용되는 용수량을 고려하기 위해서 홍수통제소 또는 지자체 허가에 의한 수리권 자료를 국가수자원관리종합정보서비스(WAMIS)로부터 내려 받았으며, 본류 주변에 위치한 표준유역에 할당되어 있는 허가량(m^3/d)을 구간별로 계산하였다. 하천구간이 표준유역의 중간에 위치하는 경우 유역내 하천거리의 비를 이용하여 허가량을 할당하였다. Figure 40는 본류 주변에 위치한 표준유역의 공간적 분포를 보여주며, Figure 41은 구간별 취합된 허가수리권의 허가량을 보여 준다. 대부분이 농업용수이기 때문에 광주시와 나주시가 위치한 우치-광주2 및 광산-나주 구간은 낮은 값을 보여 주고 있으며 하류로 갈수록 용수사용량이 증가하는 경향을 보였다. 즉 동일한 조류 농도가 발생하더라도 하류 구간에서 조류에 의한 영향이 클 수 있다.

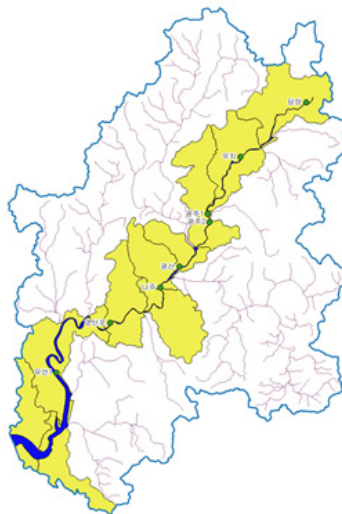


Figure 40 영산강 주변에 위치한 표준유역의 공간적 분포

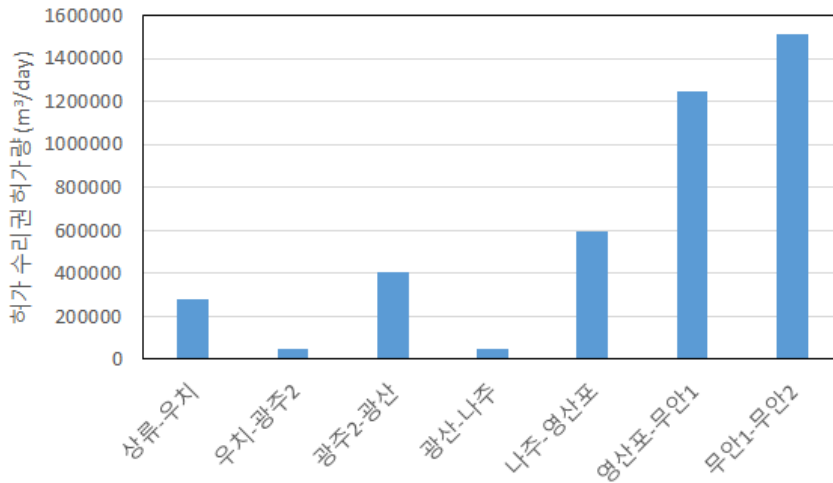


Figure 41 위험도 구간별 허가수리권 허가량

마지막으로 적응능력으로는 하천수 이외의 여유수량 확보 정도를 고려하였다. 즉 조류 대발생으로 하천수를 이용한 용수공급에 어려움이 있는 경우 농업용 저수지에 의한 농업용수 공급 및 녹조 방지를 위한 여유수량 방류 등은 적응능력 차원에서 중요할 수 있다. Figure 42는 영산강 본류 주변 표준유역내에 위치한 농어촌공사 관리 저수지의 위치를 보여준다. 동일 표준 유역에 위치한 농어촌공사 관리 농업용저수지의 유효저수량과 지자체 관리 저수지를 포함한 전체 저수지의 유효저수량과의 비교는 Figure 43에 제시되어 있다. 농어촌공사에서 관리하는 저수지는 전체 저수지에의 한 총 유효저수량의 85% 정도를 차지하는 것으로 나타났으며, 나주-영산포 구간 및 무안1-무안2 구간에 총 유효저수량이 높게 나타났다. 또한 계절예측의 수개월 시간 규모에서의 적응능력을 고려하기 위해서는 저수지의 유효저수량에 예측시점의 저수율이 고려되는 것이 필요하다. 이는 관개 시작 이전의 초기 저수율 확보 여부가 향후 수개월 동안의 용수공급에 큰 영향을 미치기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 농어촌 공사의 저수율 관측 자료를 이용하여 예측시점의 구간별 평균 저수율에 유효저수량을 곱하여 적응능력 지표로 사용하였다. Figure 44은 예측시점인 전년도 12월의 저수율을 이용하여 구간별로 예측대상 기간에 대한 총 저수량을 산정한 결과이다. 상류에서 나주 수질관측소 까지의 구간은 연도별로 초기저수량에 있어서 변동이 거의 없는 것으로 나타났으나, 농업용수 수요량이 많은 나주~무안2 구간은 연도별로 초기 저수량의 변동폭이 큰 것으로 나타났다. 이는 전년도 농업용수 공급에 따른 영향이 누적되

어 나타나는 것으로 판단된다. 즉 동일한 노출 및 민감도 지수가 주어지더라도 동일한 저수지들의 초기 저수율이 달라지면 전체적으로 위험도 지수가 변하게 된다.

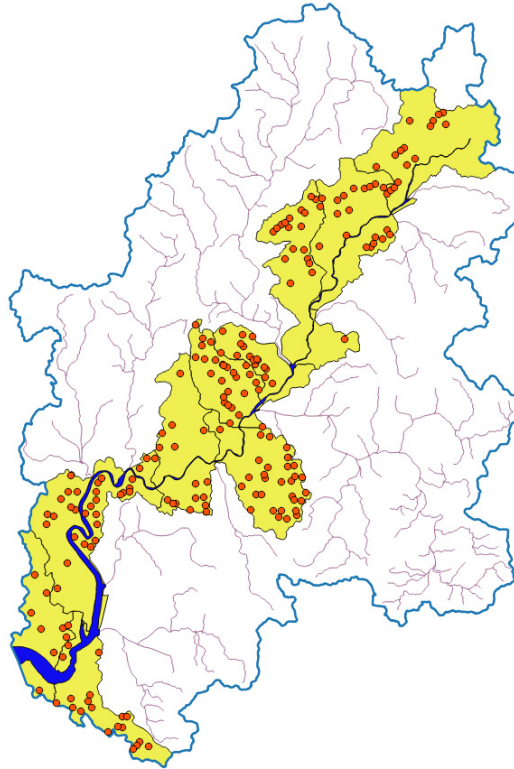


Figure 42 영산강 주변 표준유역 내에 위치한 농어촌공사 관리 대상 저수지의 공간적 분포

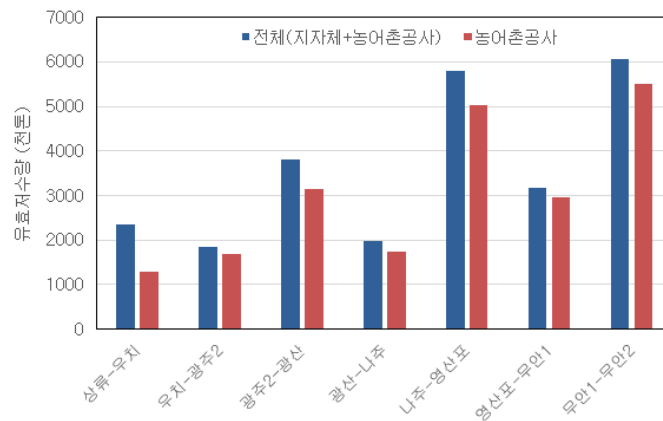


Figure 43 위험도 구간별 표준유역 내에 위치한 농업용 저수지의 유효저수량 비교

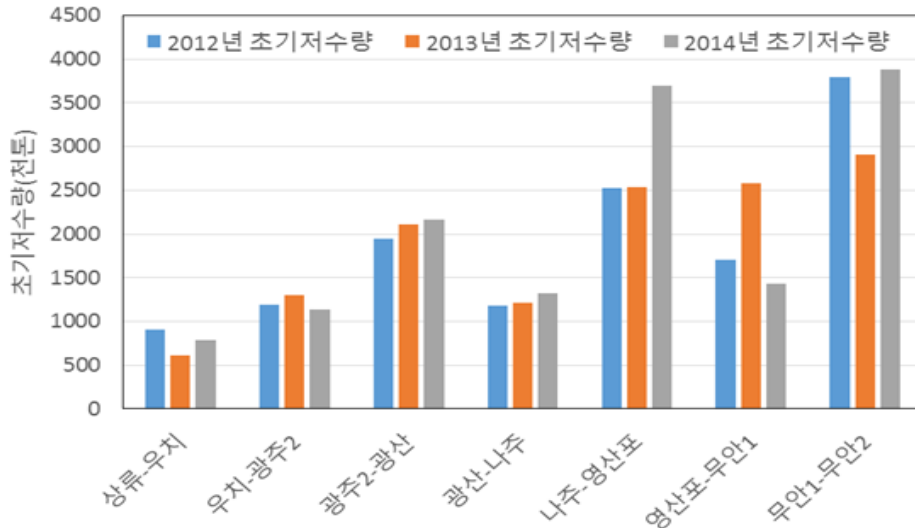


Figure 44 위험도 구간별 초기저수량을 고려한 농업용저수지의 저수량 비교

앞서 언급된 관측자료 기반의 조류 노출지수, 민감도 지수, 적응능력 지수를 이용하여 표준화한 후 최종적으로 도출된 위험도 지수의 결과는 Figure 45에 제시되어 있다. 예측신뢰도 가중치(α)와 적응능력 지수 가중치(β) 값의 변화에 따른 위험도 지수의 민감도를 살펴 보았으나, 모든 경우에 영산포-무안1 및 무안1-무안2 구간에서 양의 값을 보였으며 나머지 구간에서는 음의 위험도 지수값을 보여 하류 구간에서 조류발생에 따른 위험도가 높은 것으로 나타났다. 이는 영산강 하류지역이 중류지역과 비교하여 조류농도는 낮고 농업용저수지의 저수량은 높은 반면에, 허가수리권과 관련된 용수수요량이 가장 높았기 때문인 것으로 판단된다. 2012년~2014년 결과를 비교해 보면, 영산포-무안1 구간에서 위험도는 2014년도에 가장 높은 것으로 조사되었으며, 이후에 2013년, 2012년 순으로 나타났다. 상류-우치 구간과 중류(우치~영산포) 구간에서의 조류 위험도를 비교하면 상류 지역이 중류와 비교하여 위험도가 높은 것으로 나타났다.

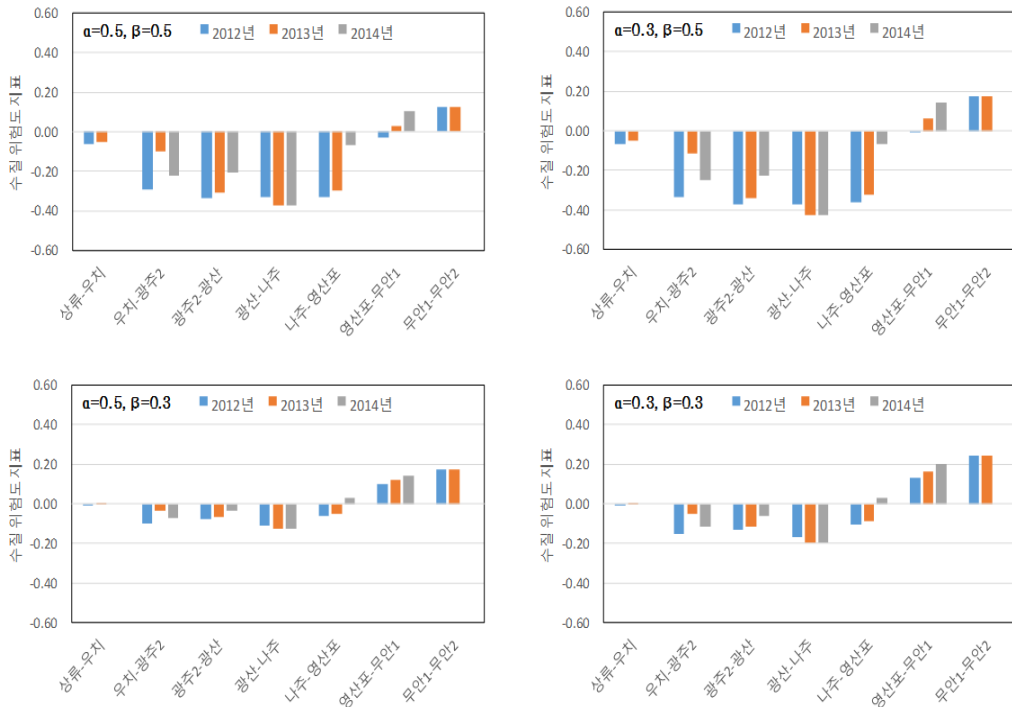


Figure 45 신뢰도 및 적응능력 지수 가중치 변화에 따른 관측수질 기반의 구간별 위험도 지수

위험도 분석에서 민감도 지수 및 적응능력 지수는 변경하지 않고, 관측 조류농도 대신에 2014년 장기 수질예측 자료를 노출 지수로 사용하여 계산된 구간별 위험도 지수를 계산하였다. Figure 46는 예측된 조류 농도와 이를 활용한 조류 위험도 지수를 보여준다. 구간별 예측된 조류의 농도는 관측 조류 농도와 비교하여 낮게 모의되었으며 중류 구간에서 높게 나타난 공간적인 경향을 반영하지 못하는 것으로 나타났다. 하지만 위험도 지수의 경우는 관측자료를 사용한 경우와 마찬가지로 하류 구간에서 위험도 지수가 양의 값을 보여 조류 대량 증식에 취약한 것으로 나타났다. 이는 하류 구간의 높은 용수사용량에 기인하는 것으로 판단된다. 구간별 수질 위험도 정보의 전달은 각각의 구간에 대한 위험도 항목별로 기여도를 쉽게 파악할 수 있도록 Figure 46와 같이 제시될 수 있다.

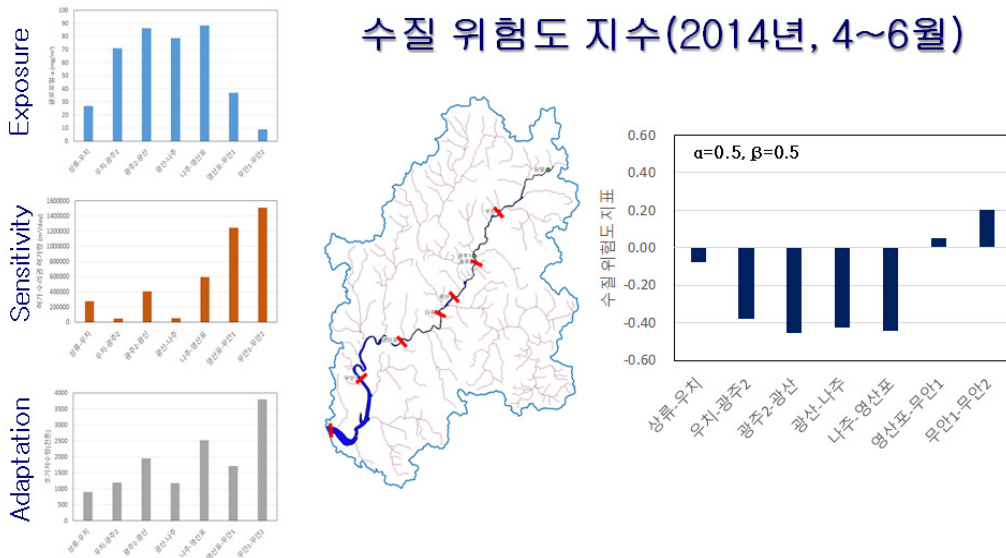


Figure 46 구간별 위험도 정보 전달 방안

4.4 최적관리 방안 정보

영산강 본류에서의 조류 중심의 수질관리 입장에서 볼 때, 조류의 성장과 사멸에 영향을 미치는 일사량, 수온, 질소·인과 같은 영양염류 및 체류시간 등 환경조건을 고려한 최적관리 방안을 제시하는 것이 필요하다.

계절예측의 직접적인 변수인 강수와 기온 및 간접적인 변수인 일사량은 하천의 수생태 환경에 큰 영향을 미친다. 갈수기 강수량은 하천 유량과 연결되어 있으며 평년보다 적은 강수량은 하천유량의 감소로 이어지고 체류시간의 증가로 이어진다. 국립환경과학원에서 국회에 제출한 자료에 의하면 영산강의 경우 유량이 지속적으로 적게 흐르는 조건으로 모의한 결과는 담양~광주2 (승춘보 상류 12.4km 지점, 31.5km) 및 죽산보~하구언 (48.6km) 구간에서는 4대강 사업에 따른 보 설치 후의 체류시간이 큰 변화가 없으나 광주2~승춘보 (12.4km) 구간에서는 체류시간이 0.44일에서 4.04일로 9.18배 길어지고, 승춘보~죽산보 (19.1 km) 구간은 0.74일에서 6.40일로 8.65배 길어지는 것으로 나타났다¹³⁾. 광주2~승춘보 구간은 시설용량이 각각 600,000m³/일,

13) 제시된 체류시간은 유랑곡선에서 275일에 대응하는 저수량 기준 하천유량이 365일 동안 동일하게 흐른다고 가정한 모델링 결과로부터 산출된 모의자료로서 실제 강수량, 상류댐방류량, 보 운영조건 등에 따라 매일 매일 실제 유량의 변동을 고려한 체류시간과는 차이가 있음.

120,000m³/일인 광주제1, 광주제2 하수처리시설이 위치하고 있으며, 승촌보~죽산보 구간의 경우에도 영산강 유역에서 3번째 규모 (시설용량 22,500m³/일)의 나주하수처리시설이 위치하고 있어 갈수기 체류시간의 증가에 더하여 방류수의 수질에 따라 크게 영향을 받을 수 있다. 하지만 강수량, 기온, 일사량 등의 변수는 얼마나 정확하게 최대한 긴 선행예측시간을 갖고 예측할 수 있는지의 문제이지 인위적인 관리의 대상이 아니다.

인위적인 관리 대상이 될 수 있는 질소인과 같은 영양염류의 경우, 갈수기에는 대규모 하수처리시설의 방류수량이 전체 하천유량 중 차지하는 비중이 커지기 때문에 전체 오염부하량 중 하수처리시설에 의한 비중 또한 증가 될 수 있다. 실제 겨울철 방류수수질기준이 강화되기 전인 2005년 연구에 의하면 영산강 본류로 유입되는 광주천과 광주하수처리장 방류수의 오염기여도를 산정하한 결과 풍수기 7월 8월을 제외한 대부분의 기간에서 하수종말처리장의 방류수 오염기여도가 광주천의 오염기여도 보다 큰 것으로 나타났다(영산강섬진강수계관리위원회, 2005).

공공하수처리시설의 방류수수질기준은 1995년까지는 BOD, COD, SS의 세 항목만을 고려하였으나, 1996년 이후 호소 및 하천의 부영화를 고려하기 위해서 총질소(T-N) 및 총인(T-P) 항목이 추가되었다. 2003년 이후에는 대장균수를 포함하여 총 6개 항목의 방류수수질기준이 적용되고 있다. 2000년 이후 2007년까지는 특정지역과 기타지역으로 구분하여 방류수 수질을 관리했으며, 2008년 이후에는 기타지역도 특정지역과 같은 기준을 적용받도록 하여 방류수수질기준이 강화되었다. 2008년 11월에 50m³/일을 기준으로 50m³/일 미만의 하수처리시설에 대해서는 T-N과 T-P 항목의 방류수수질기준을 Table 13와 같이 하향조정되었다(환경부, 2010). 2012년 이후에는 1일 하수처리용량 500m³/일을 기준으로 강화된 기준을 적용하되 겨울철(12월 1일~3월 31일까지)의 총 질소와 총 인의 방류수 수질 기준은 60mg/L 이하와 8mg/L 이하로 이전과 동일하게 적용하여 왔다. 하지만 Table 14에서와 같이 2014년 이후부터는 겨울철 구분 없이 모든 기간에 대해 동일한 T-N 및 T-P 방류수수질기준을 적용하고 있다. 따라서 현행 500m³/일 이상의 하수처리용량인 시설의 경우, T-P의 허용 농도는 I, II, III, IV 지역에 대하여 각각 0.2mg/L, 0.3mg/L, 0.5mg/L, 2mg/L 이하로 계절구분 없이 적용되고 있으며, T-N의 허용 농도는 지역구분 없이 50m³/일을 기준으로 이상과 미만인 처리시설에 대하여 20 mg/L와 40mg/L로 각각 적용되고 있다.

Table 13 공공하수처리시설의 방류수수질기준 (2011.12.31. 까지 적용)

구분	생물화학적 산소요구량 (BOD) (mg/L)	화학적 산소요구량 (COD) (mg/L)	부유물질 (SS) (mg/L)	총질소 (T-N) (mg/L)	총인 (T-P) (mg/L)	총대장균군 수 (개/mL)	생태 독성 (TU)
1일 하수처리용량 50m³ 이상	10 이하	40 이하	10 이하	20 이하	2 이하	3,000 이하	1
1일 하수처리용량 50m³ 미만	10 이하	40 이하	10 이하	40 이하	4 이하		

비고: 겨울철(12월 1일~3월31일까지)의 총 질소와 총인의 방류수 수질 기준은 60mg/L 이하와 8mg/L 이하를 각각 적용한다.

Table 14 공공하수처리시설의 방류수수질기준 (2014.7.17. 개정)

구분		생물화학적 산소요구량 (BOD) (mg/L)	화학적 산소요구량 (COD) (mg/L)	부유물질 (SS) (mg/L)	총질소 (T-N) (mg/L)	총인 (T-P) (mg/L)	총대장균군 수 (개/mL)	생태 독성 (TU)
1일 하수처리용량 500m³ 이상	I 지역	5 이하	20 이하	10 이하	20 이하	0.2 이하	1,000 이하	1 이하
	II 지역	5 이하	20 이하	10 이하	20 이하	0.3 이하	3,000 이하	
	III 지역	10 이하	40 이하	10 이하	20 이하	0.5 이하		
	IV 지역	10 이하	40 이하	10 이하	20 이하	2 이하		
1일 하수처리용량 500m³ 미만 50m³ 이상		10 이하	40 이하	10 이하	20 이하	2 이하		
1일 하수처리용량 50m³ 미만		10 이하	40 이하	10 이하	40 이하	4 이하		

영산강 유역내 대규모 하수처리시설 운영자를 대상으로 계절예측정보를 활용하여 강화된 방류수수질 기준의 적용 가능성에 대해 조사하였다. 화학적 처리가 가능한 T-P의 경우는 방류수수질기준이 II지역인 경우 0.3 mg/L로 적용되고 있으며, TMS를 통한 모니터링을 통하여 기준 수질 초과시 현재 하수도법에 의하여 과태료를 부과하고 있다. 하지만 수질오염총량제 도입에 따른 부하량 개념의 규제에 의하여 실제 방류되는 T-P 농도는 0.3 mg/L 보다 낮은 수준으로 운영되고 있는 것으로 나타났다. 환경부 하수도종합정보관리시스템¹⁴⁾에서 제공하는 500톤 이상 공공하수도시설

에 대한 2013년도 운영결과 조사표에 의하면 Figure 47과 같이 인처리를 하지 않는 도곡온천 및 장성을 제외한 모든 시설에서 0.2 mg/L 보다 낮은 농도로 운영하고 있음을 보여 주고 있다. 따라서, 계절예측에 의해 갈수기 동안에 평년보다 낮은 강수량이 예측되더라도 방류수 수질 농도를 낮추기 위해서는 운영을 위한 현실적인 상황이 고려되어야 한다. Figure 48은 2013년도 운영결과 조사표에서 제시하고 있는 인처리 시설의 약품설계주입농도(mg/L)와 실제 약품운영농도 (mg/L)를 보여 주고 있다. 공산, 담양, 화순온천, 신북, 영암 공공하수처리시설의 경우 설계주입농도를 초과하여 운영되고 있는 반면에, 방류수량이 가장 많은 광주제1, 광주제2 하수처리시설의 경우에는 설계주입농도에 대한 운영주입농도의 비가 각각 61% 및 56%로서 추가 약품사용을 통한 T-P 농도의 저감 및 본류에 미치는 오염부하량 측면에서 기대효과가 가장 높을 것으로 판단된다.

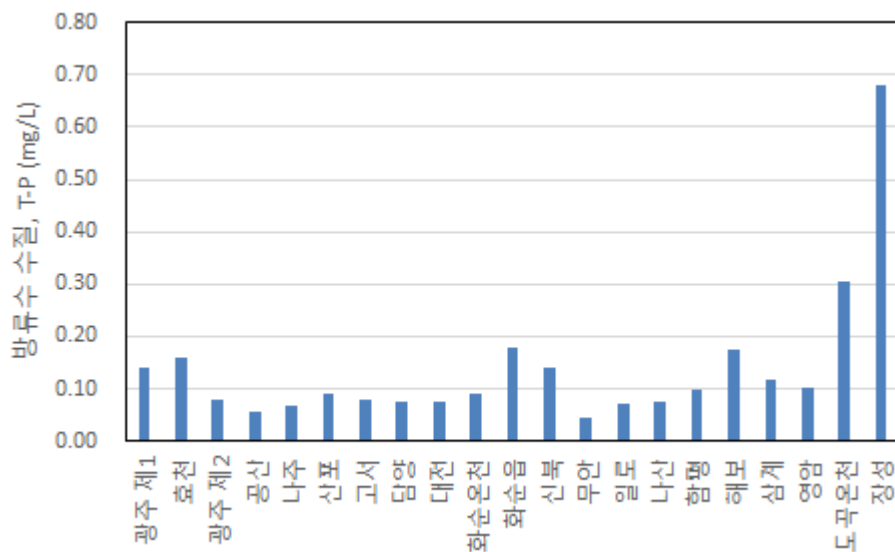


Figure 47 영산강 유역 주요 공공하수처리시설 방류수 TP 농도 (2013년)

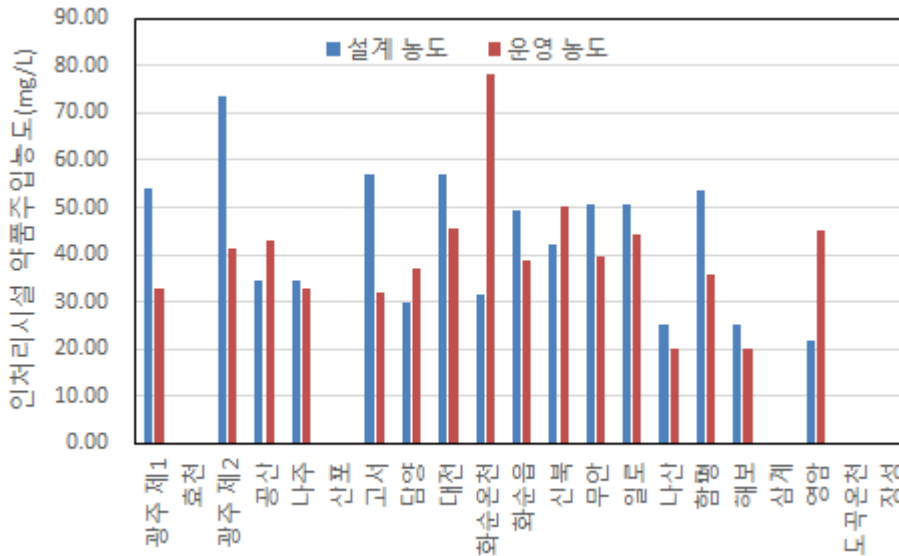


Figure 48 영산강 유역 주요 공공하수처리시설 인처리시설의약품설계주입농도(mg/L)와 실제 약품운영 농도 (mg/L) (2013년)

반면 생물학적 처리에 의존하는 T-N의 경우는 처리효율이 수온에 민감하기 때문에 수온이 낮아지는 동절기에는 하절기와 비교하여 처리효율이 낮아지는 특성이 있다. 500톤 이상 시설물의 경우 T-N의 방류수 수질은 T-P와 마찬가지로 지역구분 없이 20mg/L로 적용되고 있으나 2013년도 운영결과 조사표에 의하면 Figure 49와 같이 산포 공공하수처리시설을 제외한 모든 시설들에서 10mg/L 안팎의 방류수질 농도값을 보였다. Figure 50은 2012년 기준 전국오염원 조사자료 중 영산강 유역내 환경기초시설들의 가동율을 보여 준다. 적정 가동율이 80%정도임을 고려할 때 가장 규모가 큰 광주제1 및 제2 하수처리시설의 경우 이미 80%이상의 가동율을 보이고 있으며, 4월~6월 사이에 조류 발생을 억제하기 위해서는 1월~3월 사이에 부하량을 감소시켜야 하지만, 낮은 기온으로 인하여 생물학적 방법에 의존하는 질소의 경우는 화학적 방법에 의존하는 인과는 달리 처리율을 높이는데 한계가 있을 것으로 판단된다.

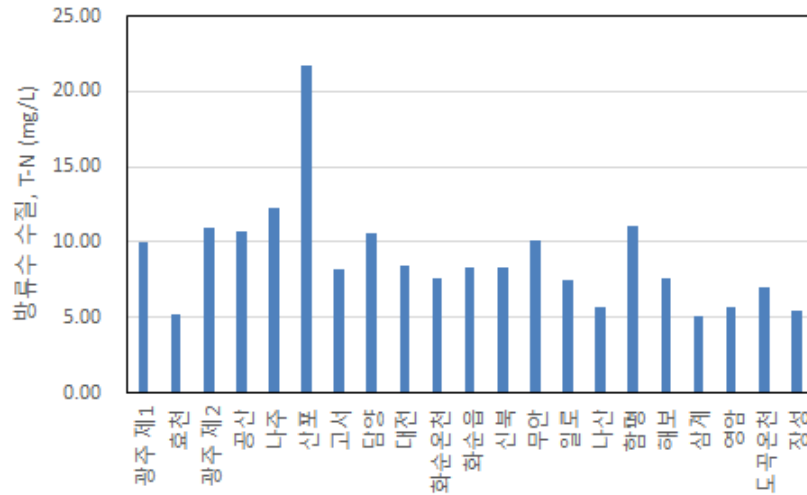


Figure 49 영산강 유역 주요 공공하수처리시설 방류수 T-N 농도 (2013년)

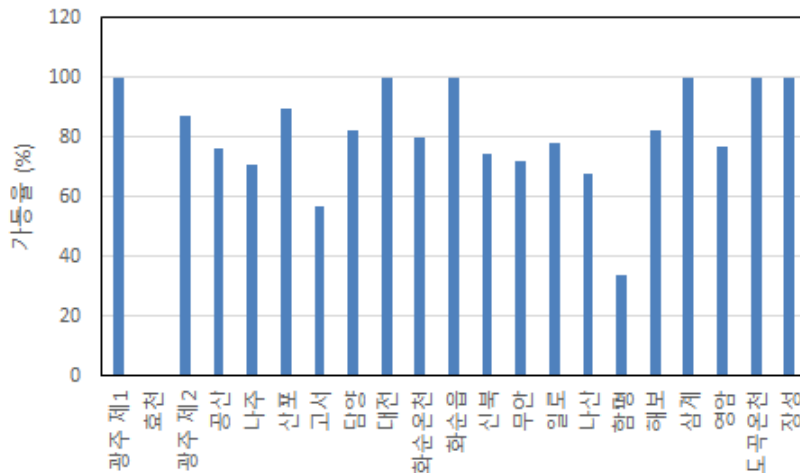


Figure 50 영산강 유역 주요 공공하수처리시설 가동률 (2013년)

따라서, 최적관리방안 시나리오로 가장 규모가 큰 광주제1 및 제2 하수처리시설의 방류수 T-P 농도를 1급수 수질기준에 해당하는 0.02mg/L 수준으로 낮추는 방안을 고려하였다. 갈수기 방류수의 T-P 농도 저감에 따른 조류 억제 효과는 HSPF-EFDC 모델링 결과를 이용하여 시나리오 전·후의 조류 농도를 구간별로 비교하여 제시할 수 있다.

5. 정책제언

계절예측 정보를 활용한 조류 중심의 수질관리를 위해서는 수체의 규모, 형태 뿐만 아니라 수리학적 특성을 고려하여 각각의 특성에 따른 맞춤형 수질 관리가 필요하다. Table 15은 담수의 특성에 따라서 호소형 인공호와 하천형 인공호 및 대규모 강의 하류로 크게 두 부류로 나누고 있으며, 영양물질의 체류정도에 따라서 조류 대발생 시기 및 종류가 달라짐을 보여주고 있다. 즉 영양염류의 체류정도가 큰 상류의 대형 인공호는 여름철 집중 호우 직후 비점오염에 의한 영양염류의 유입으로 인하여 조류발생 경향이 높은 반면에 체류시간이 짧은 하류의 하천형 인공호와 대규모 강의 본류에서는 갈수기에 장기화되는 체류시간으로 인하여 점오염원으로 인한 조류 발생 경향이 증가하게된다. 따라서 담수의 수리학적, 계절적 특성을 고려하여 조류 대발생을 억제하기 위해서는 계절별 장기 기후예측정보를 활용하여 조류 저감 효율을 극대화하는 것이 필요하다.

Table 15 국내 담수의 조류발생 경향

구 분	호소형인공호	하천형인공호 및 대규모 강의 하류
환경용량	큼	적음
영양물질의 체류정도	큼	적음
집우호우 이후 영양염류	조류증식에 이용됨	Wash out됨
조류 대발생 시기 및 종류	하절기 집중호우 이후 남조류	- 봄가을 갈수기시규조류 - 평년대비 강우가 적은 하절기에 남조류
가을~봄의 갈수기시 조류발생 경향	낮음 (적은 영양염류 유입, 성층파괴로 수직순환 희석)	큼 (상대적으로 장기화되는 체류시간)
여름철 집중호우시 조류발생 경향	큼(특히 남조류) (성층형성, 높은 영양염류 유입)	낮음 (탁도로빛투과 감소, 체류시간이 짧아져 조류축적도 낮음)

자료: 국내 담수 조류저감 마스터플랜 마련 연구 용역(2010)

본 연구에서와 같이 계절예측 정보를 활용하여 갈수기 점오염원(공공하수처리시설 방류수)의 하천 유입 억제를 통해 조류 대량 증식을 사전에 예방하는 경우에도 유역

별 특성을 고려하여 적용 우선순위가 결정되는 것이 바람직하다. 예를 들어, 조류의 대량 증식이 사회적 관심 대상인 이유는 유해조류의 냄새물질 및 독성이 식수원에 미치는 영향인 점을 고려할 때, 4대강 유역 중에서 점오염원 중심의 갈수기 조류관리 대상의 우선순위는 하천수를 식수원으로 사용하는 유역 별 조류 대량 증식에 대한 민감도를 고려하여 선정하는 것이 마땅하다. Figure 46은 유역별 하천수(자연유하 및 표류수 포함) 취수시설의 용량을 보여준다. 한강의 경우 전체 취수량의 8%만이 하천수를 사용하고 있는 반면에 낙동강 유역의 경우 70% 정도를 하천수로부터 취수하여 사용하고 있다. 따라서 점원오염 중심의 갈수기 오염원 관리는 낙동강 유역에서 우선순위가 높게 책정되어야 할 것이다.

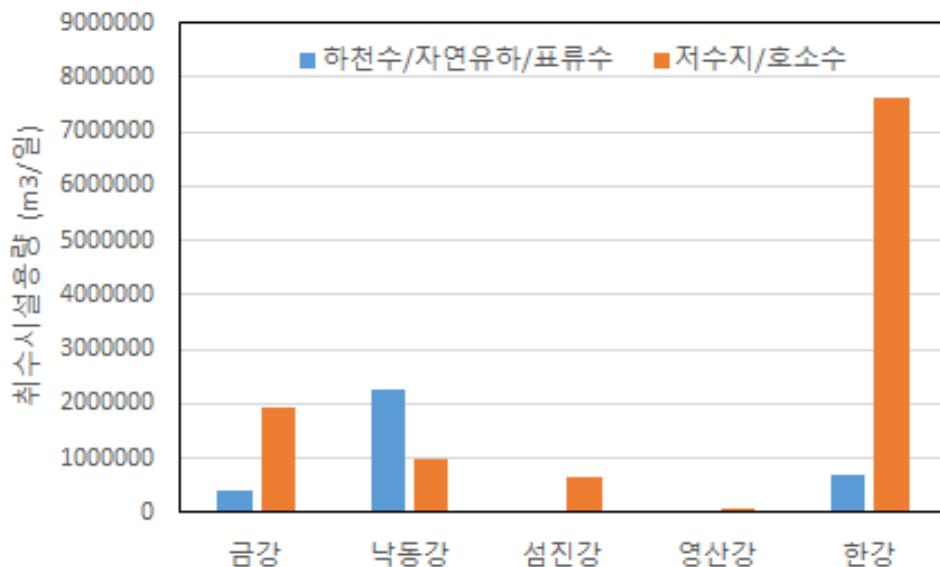


Figure 51 유역별 취수시설용량 비교(자료: WAMIS)

더 나아가 계절예측정보를 활용하여 지역특성 및 계절특성을 고려한 점오염 또는 비점오염 중심의 수질관리를 위해서는 통합유역관리 관점의 접근이 필요하다. 이를 위해서는 4대강 중심의 대권역 규모보다 작은 규모에서 기후노출에 대한 유역별 민감도를 반영하여 우선순위에 따라 유역단위의 수질관리가 가능하도록 제도 개선이 필요하다.

우선 계절예측정보를 유역관리에 활용할 수 있도록 제도개선이 필요하다. 장기수질예보와 관련해서는 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」¹⁵⁾ (이하 “수생태법”이라 한다)중에서 사전예방에 관한 제3조와 수질오염 경보제에 관한 제21조를 바탕으로 하여 공공수역의 수질예보와 사전 예방적 수질관리를 위해 필요한 수질예보규정의 근거를 제공하고 있다. 하지만 계절예측정보를 활용하여 기후노출에 취약한 유역중심의 관리를 위해서는 기후변화취약성과 관련된 수생태법 19조의 “기후변화”의 범위를 확대적용할 수 있도록 Table 16과 같이 변경이 필요하리라 판단된다.

Table 16 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 19조 변경안

변경 전	제19조의4(배출시설 등에 대한 기후변화 취약성 조사 및 권고) ① 환경부장관은 폐수배출시설, 비점오염 저감시설, 폐수종말처리시설을 대상으로 기후변화에 대한 시설의 취약성 등을 조사하고, 조사결과 기후변화에 취약한 시설에 대해서는 시설 개선 등을 권고할 수 있다. ② 제1항에 따른 조사에 필요한 구체적인 조사 항목·방법 및 절차 등은 환경부령으로 정한다.
변경 후	제19조의4(배출시설 등에 대한 기후변화 취약성 조사 및 권고) ① 환경부장관은 폐수배출시설, 비점오염 저감시설, 폐수종말처리시설을 대상으로 기후변화에 대한 시설의 취약성 등을 조사하고, 조사결과 기후변화에 취약한 시설에 대해서는 시설 개선 등을 권고할 수 있다. ② 기후변화는 먼 미래 기후특성의 변화뿐만 아니라 수개월 내에 발생할 수 있는 기후변동을 포함하는 모든 시간규모에서의 기후특성 변화를 의미한다. ③ 제1항에 따른 조사에 필요한 구체적인 조사 항목·방법 및 절차 등은 환경부령으로 정한다.

수생태법 개정을 통하여 다양한 시간규모의 기후정보 활용에 대한 근거가 마련되면 대권역보다 작은 유역단위에서 수질관리 방안을 적용하는데 필요한 세부 시행과 관련된 계획 또한 개선되는 것이 필요하다. 이와 관련하여서는 수생태법 24조, 25조, 26조에 유역규모에 따라 각각 “대권역계획”, “중권역계획”, “소권역계획”의 수립에 대해 규정하고 있다¹⁶⁾. 환경부장관은 대권역계획을 10년마다 수립하여야 하며, 유역환

15) 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」

제3조(책무) ① 국가와 지방자치단체는 수질 및 수생태계의 오염이나 훼손을 사전에 억제하고 오염되거나 훼손된 수질 및 수생태계를 적정하게 보전할 수 있는 시책을 마련하여 하천·호소 등 공공수역의 수질 및 수생태계를 적정하게 관리·보전함으로써 모든 국민이 건강하고 쾌적한 환경에서 생활할 수 있도록 하여야 한다.

제21조(수질오염 경보제) ① 환경부장관 또는 시·도지사는 수질오염으로 하천·호소의 물의 이용에 중대한 피해를 가져올 우려가 있거나 주민의 건강·재산이나 동식물의 생육에 중대한 위해를 가져올 우려가 있다고 인정될 때에는 해당 하천·호소에 대하여 수질오염 경보를 발령할 수 있다. ⑤ 수질오염 경보의 종류와 경보종류별 발령대상, 발령주체, 대상 수질오염물질, 발령기준, 경보단계, 경보단계별 조치사항 및 해제기준 등에 관하여 필요한 사항은 대통령령으로 정한다.

16) 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」

경청장 또는 지방환경청장은 대권역계획에 따라 중권역계획을 수립하고, 특별자치시장·특별자치도지사·시장·군수·구청장은 대권역계획 및 중권역계획에 따라 소권역계획을 수립하여 승인을 받은 후 시행하게 되어 있다. 현재 물환경 관리 및 수생태계 보전을 위한 정부 최상위 계획으로서 유역별, 지자체별로 수립하는 중소권역 수질보전계획의 지침이 되는 물환경관리기본계획(2006-2015) 있으며, 2016년부터 향후 10년간은 개정된 물환경관리기본계획이 적용될 것이다. 따라서 향후 10년간의 기본계획을 수립하는데 있어서 기후변화의 큰 틀에서 다양한 시간규모의 기후정보 활용을 극대화 할 수 있도록 반영하는 것이 필요할 것이다. 이를 위해서는 물환경관리기본계

제24조(대권역 수질 및 수생태계 보전계획의 수립)

- ① 환경부장관은 대권역별로 수질 및 수생태계 보전을 위한 기본계획(이하 “대권역계획”이라 한다)을 10년마다 수립하여야 한다.
- ② 대권역계획에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다.
 1. 수질 및 수생태계 변화 추이 및 목표기준
 2. 상수원 및 물 이용현황
 3. 점오염원, 비점오염원 및 기타수질오염원의 분포현황
 4. 점오염원, 비점오염원 및 기타수질오염원에서 배출되는 수질오염물질의 양
 5. 수질오염 예방 및 저감 대책
 6. 수질 및 수생태계 보전조치의 추진방향
 7. 「저탄소 녹색성장 기본법」 제2조제12호에 따른 기후변화에 대한 적응대책
 8. 그 밖에 환경부령으로 정하는 사항
- ③ 환경부장관은 대권역계획을 수립할 때에는 관계 중앙행정기관의 장 및 「한강수계 상수원수질개선 및 주민지원 등에 관한 법률」과 그 밖의 법률에 따른 관계 수계관리위원회와 협의하여야 한다. 대권역계획을 변경할 때에도 또한 같다.
- ④ 환경부장관은 대권역계획을 수립하였을 때에는 관계 중앙행정기관의 장 및 관계 지방자치단체의 장에게 통보하여야 한다.
- ⑤ 환경부장관은 대권역계획이 수립된 날부터 5년이 지나거나 대권역계획의 변경이 필요하다고 인정할 때에는 그 타당성을 검토하여 변경할 수 있다.

제25조(중권역 수질 및 수생태계 보전계획의 수립)

- ① 유역환경청장 또는 지방환경청장은 대권역계획에 따라 중권역의 수질 및 수생태계 보전을 위한 계획(이하 “중권역계획”이라 한다)을 수립하여야 한다.
- ② 유역환경청장 또는 지방환경청장은 중권역계획을 수립하려는 경우에는 관계 시·도지사와 협의하여야 한다. 중권역계획을 변경하려는 경우에도 또한 같다.
- ③ 유역환경청장 또는 지방환경청장은 중권역계획을 수립하였을 때에는 관계 시·도지사에게 통보하여야 한다.

제26조(소권역 수질 및 수생태계 보전계획의 수립)

- ① 특별자치시장·특별자치도지사·시장·군수·구청장은 대권역계획 및 중권역계획에 따라 소권역의 수질 및 수생태계 보전을 위한 계획(이하 “소권역계획”이라 한다)을 수립하여 시·도지사(특별자치시장·특별자치도지사가 소권역계획을 수립하는 경우는 제외)한도의 승인을 받은 후 시행하여야 한다.
- ② 제1항에도 불구하고 소권역계획 수립 대상 지역이 둘 이상의 시·도에 걸쳐있는 경우에는 해당 시·도지사는 협의하여 공동으로 소권역계획을 수립하여야 하고, 소권역계획 수립 대상 지역이 같은 시·도의 관할 구역 내 둘 이상의 시·군·구(자치구를 말한다)에 걸쳐있는 경우에는 관할 시·도지사가 관계 시장·군수·구청장의 의견을 들어 소권역계획을 수립하여야 한다.
- ③ 시·도지사는 제1항에 따라 소권역계획을 승인하거나 제2항에 따라 소권역계획을 수립하려는 경우에는 미리 환경부장관과 협의하여야 한다.

획에 중권역계획 또는 소권역계획을 수립하는데 있어서 권역별 사·공간적으로 상이한 특성을 고려하여 계획을 수립할 수 있도록 관련 내용이 추가되어야 할 것이다. 즉 유역의 사·공간적 특성을 반영하여 기후에 민감한 유역을 선정하고, 해당 권역들에 대해서는 적합한 기후정보의 시간적 스케일(단기, 장기, 기후변화 시나리오 등) 안에서 활용 가능한 사전예방 차원의 관리방안들의 적용을 통해서 수질 및 수생태계 보전 및 관리의 효과를 최대화 할 수 있도록 하여야 한다 (조재필, 2014).

앞에서는 수생태법 및 물환경관리기본계획 등에 먼 미래만 대상으로 하는 좁은 의미기후변화가 아닌 계절규모를 포함하여 다양한 시간규모를 반영할 수 있는 넓은 의미의 기후변화 개념에서의 제도 개선을 살펴보았다. 따라서 현재 존재하고 있는 수질관련 예·경보 제도와 본 연구에서 다루고 있는 장기수질예측정보 활용과 관련하여 연계성을 살펴보는 것이 중요할 것이다. 국내에서는 현재 「조류경보제」와 「수질예보제」를 실행하고 있다. 「조류경보제」는 국내 주요 상수원수로 사용하고 있는 호소에서 조류발생 빈도가 증가함에 따라 유해녹조로부터 식수의 안정성을 확보하기 위해서 1998년부터 적용되어 왔다. 반면에 「수질예보제」는 4대강 사업 이후 16개 보구간을 대상으로 친수활동 및 수생태계보호를 위해 2012년부터 실시되어 왔다. 최근에는 낙동강 수계의 하천수를 직접 취수하는 3개 보 구간(칠곡보, 강정고령보, 창녕함안보)을 대상으로 조류경보제를 시범운영하고 있다. 기존 관련 연구들은 조류경보제와 수질예보제에 혼재 되어 있는 유해녹조에 대한 상수원 보호 및 친수활동 보호기능을 조류경보제로 통합하여 관리하는 방안 (한혜진 외, 2014) 및 Table 17과 같이 단기예보로의 통합(국립환경과학원, 2013)을 제안하고 있다. 현재 조류경보제는 클로로필-a 농도 및 유해 남조류 세포수의 실측을 기준으로, (단기)수질예보제는 클로로필-a 농도를 예측하여 수질관리 단계를 발령한 후 유해 남조류 세포수를 실측하여 단계를 상향 조정하여 운영된다. 따라서 표에서와 같이 예측중심의 장기수질예보는 실측을 기반으로하는 조류경보제 및 단기수질예보제와는 별개로 분리하여 사전예방을 위한 유역관리 차원에서 실행하는 것이 필요하다.

Table 17 조류경보제 및 수질예보제 개선 방안

기존	개선 방안						
	명칭		목적	기간	항목	방안	대상
조류 경보	단기 예보	경보	상수	실시간	남조류세포수, 독소	실측중심 예측보조	수도사업자, 중앙 및 지자체
단기 수질 예보		예보	친수	7일이전	Chl-a, 수온	예측중심 실측보조	국민
장기 수질 예보	장기예보		유역 수질	3개월 이상	TOC, TP	예측중심	국민, 수도사업자, 중앙 및 지자체

자료: 수질예보 2단계 운영방안 수립연구(국립환경과학원, 2013), 저자수정

APCC의 기존 연구¹⁷⁾에서는 계절예측을 이용한 장기수질예보의 경우 1) 제2차 비점오염원관리 종합대책[‘12~’20]과 관련된 비점오염부하량 사전 관리, 2) 수환경 관리시설 의사결정, 3) 2014년에 발표된 “수질·녹조 대비 댐-보-저수지 운영기준(안)”과 관련하여 수량-수질 통합관리 등 수질관리 목적의 사전예방대책 마련을 위한 활용가능성을 제시하였다. 또한 현재 단기 및 장기 수질예보를 모두 포함하고 있는 「수질예보 및 대응조치에 관한 규정」의 제2조(수질예보의 정의), 제5조(수질예보 항목), 제7조(수질예보구간), 제8조(수질예보 발표)와 관련하여 Table 18와 같이 수정을 제안하였다.

Table 18 장기수질예보 관련 규정 개선 안

항목	내용
수질예보의 정의	물리적 법칙에 기초를 두고 있는 “수치모델링” 방법의 예측성 한계를 고려하여 통계적 기법을 활용한 수질예보 가능성 포함
수질예보 구간	사전예방 관점에서 4대강 분류로 유입되는 중권역의 대표 수질 관측점 추가
수질예보 항목	물 관리기관이 사전에 조치를 취하는데 필요한 사항을 장기 수질예보의 대상 항목으로 포함(SS, T-P 등)
협의회 구성	수질예보의 예측기간(단기 또는 장기)별 기상예측 전문기관을 포함하여 수질관리협의회 위원 구성

17) 「계절예측 정보를 활용한 통합 수문·수질 장기 예측 기술 개발」 [조재필, 2014]

장기수질예보는 관련기관에 장기적인 측면에서 수질관리를 위한 중요 요인을 제시하여 사전에 대응토록 함에 목적이 있다. 따라서 기존 연구에서는 장기수질예보의 단계 판단 기준 및 단계 및 관련기관별 대응조치와 관련하여 Table 19와 같이 제시된 바 있다. 그러나 수질예보 단계 판단 기준으로 수질 항목별 수질기준을 초과하는 횟수를 사용하고 있는데 이는 현재 계절예측 자료가 월 또는 계절 단위 평균값이 평년과 비교하여 어떻게 변할지에 대한 정보를 제공하는 수준에서 의미를 갖고 있는 점을 고려할 때, 계절예측 정보의 특성을 반영한 단계 판단 기준 설정이 우선되어야 할 것이다.

의사결정을 위한 수직적 정보전달 방법과 관련해서는 본 연구에서 제시한 계절예측 정보, 장기수질예측 정보, 위험도 정보, 최적관리방안 정보, 경제적 가치 정보 등 정보 가공 수준에 따른 다양한 정보를 장기수질예보의 정보전달 체계에 반영하여 사전예방 측면의 유역관리를 위해서 제공해야 할 것이다. 이 경우 정보수준에 따라서 공간규모와 가공을 위한 필요 정보가 다를 수 있는데, 기후예측 정보의 경우에는 글로벌 규모의 기후예측정보와 지역 규모의 기후 관측자료가 필요하며, 장기수질예측 정보를 위해서는 수질에 영향을 미치는 점오염원 및 비점오염원 관련 정보가 유역내 공간적 위치정보를 포함하여 제공되어야 한다. 위험도 정보를 위해서는 수질예측정보 생산을 위해 필요한 정보에 더하여 대상 지역의 인문사회 정보 등이 민감도 측면에서 추가적으로 필요하며, 최적관리방안 정보를 제공하기 위해서는 위험도 정보 생산을 위해 필요한 정보에 추가하여 최적관리 대상인 다양한 수리시설물, 환경기초시설물 등에 대한 정보가 유역내 위치정보를 기반으로 제공되어야 한다. 이와 같이 장기수질예보는 사전 예방적인 대응이 목적이므로 수질관리와 관련된 오염원의 공간적 분포 및 과거 수질의 동향 등과 같은 시·공간적인 데이터를 바탕으로 사전예방대책 수립을 위한 활용도를 높일 수 있도록 예보 시스템이 구축되어야 한다. 따라서 장기수질예보 시스템은 이러한 GIS 플랫폼을 기반으로 오염원 공간자료와 기상 및 기후 자료가 연계될 때 사전예방 대책을 위한 장기에보시스템으로 활용될 수 있을 것이다 (조재필, 2014).

본 연구에서는 도출된 최적관리방안의 현실적인 적용을 고려하여 계절예측정보를 활용한 갈수기의 공공하수처리시설 방류수에 초점을 맞추어 연구를 수행하였다. 하지만, 국내에서 비점오염에 의한 오염부하량의 비중이 전체 부하량의 50%를넘어 가고 있는 상황에서 효율적인 비점오염 관리 없이는 향후 수질의 개선을 기대하기 어려

을 것으로 판단된다. 비점오염은 공간적으로 분산되어 있는 토지계에서의 최적관리방안의 적용이 전제되어야 실질적인 수질개선 효과를 기대할 수 있기 때문에 자발적이고 적극적인 주민참여가 필수적이다. 하지만 국내 현실은 자발적인 주민참여를 유도할 수 있는 제도적 뒷받침이 마련되어 있지 않은 상황이다. 따라서 계절예측정보의 활용을 위한 제도 개선을 통해 최적관리방안의 효율성을 극대화 할 수 있는 가능성을 제공하는 것에 더하여 유역내 구성원들의 자발적인 참여를 유도할 수 있는 제도 개선 또한 시급하다고 판단된다.

Table 19 장기수질예보 발령 단계별 관계기관 및 대응조치 방안

구분 (판단기준)	관심단계 (TOC, T-N, T-P 중 1개 항목 수질기준 초과 예상)	주의단계 (TOC, T-N, T-P 중 2개 항목 수질기준 초과 예상)	경계/심각단계 (TOC, T-N, T-P 중 1개 항목 수질기준 초과 예상)/ (TOC, T-N, T-P 중 2개 항목 이상 수질기준 2배 초과 예상)
국립환경과학원장	- 장기적 차원에서 수질관리 강화 통보 및 수질관리 강화 조치의 해제 - 유역내 수질관리 강화기준 초과 원인 및 실태조사	- 수질 악화 원인 파악 및 확인 - 조치사항 통보를 위한 기초자료 수집	- 장기적 대책에 시행 및 수질 개선효과 분석 - 과학적인 자료 분석을 통한 장기 대응방안 등 제언
유역·지방환경청장	- 주요 오염원에 대한 장기 거동 조사 - 수질관리 단계별 대응조치 총괄 및 관계기관 대응조치사항 점검 - 주요 오염원 수질관리강화 협조 요청	- 관계기관 대응조치사항 파악 및 점검 - 주요 오염원 점검 강화 - 오염원에 대한 지자체 등과 관계기관 합동점검 실시 및 지원	- 장기 대응방안 수행 및 추진 독려 - 오염저감 대책의 추진상황 점검과 개발허가 연- 관계기관에 필요 대책 요청 및 협의
지방자치단체	- 주요오염원 변화 점검강화 - 신규 오염원 입지지역 오염발생 저감 추진 - TOC, TN, TP 다량배출 사업자 점검	- 수질악화 원인 확인 및 조치 - 수질악화방지를 위한 조치사항에 우선순위 선정 및 집행 - 원인파악, 조치 등을 위한 관계기관 합동점검 지원	- 오염원 관리 및 저감을 위한 조치사항 이행 - 물관리 시스템 위기상황 대응 준비
관계기관	- 주요 오염원 증감에 대한 정보 교류 - 오염저감을 위한 상호 협조체계 구축 - 오염원 증감에 대한 감시 및 관리강화	- 자체적인 위기평가 및 예방조치 시행 - 관계기관 합동점검 지원	- 자체적인 저감방안 실시 - 위기 평가에 따른 조치 시행 및 평가 - 위기 해소를 위한 사항 제언

자료: 수질예보 2단계 운영방안 수립연구(국립환경과학원, 2013), 저자 수정

6. 결론

본 연구에서는 계절예측 자료의 수질관리 분야 활용에 있어서 상세화기법 개발을 통한 수평적 연계를 기반으로 수질관리 의사결정 과정의 수직적 연계를 위한 구체적인 활용 방안을 제시하고자 하였다. 계절예측 자료를 활용하여 영산강 유역의 갈수기 조류 문제에 대하여 대규모 공공하수처리시설의 방류수 수질관리를 통한 사전예방 차원의 관리방안을 제시하였다. 계절예측자료 기반의 갈수기 수질관리 적용을 통하여 상세화된 계절예측 정보의 수질모델링에의 활용 과정에서 발생할 수 있는 문제점을 제시하고 수질관리 의사결정 과정에 활용할 수 있는 정보전달 방법을 제시하였다.

수평적 연계: 실시간 계절예측 상세화 툴 개발 및 예측성 평가

- 예측 자료를 사용하는 정도에 따라서 예측 자료를 직접 사용하는 단순편이보정(Simple Bias Correction, SBC) 방법, 예측 자료를 간접적으로 사용하는 Moving Window Regression (MWR) 방법, 관측 자료 기반의 Climate Index Regression (CIR) 방법에 더하여, MWR 및 CIR에서 선정된 예측인자를 모두 사용하는 Integrated Time Regression (ITR) 방법 등 4개의 다른 방법을 통합하여 월단 위 강수와 기온을 예측하는 실시간 예측시스템을 개발하였다.
- 관측기반 CIR 방법의 경우 NOAA의 웹페이지를 통해 매달 갱신되는 16개인자와 재분석자료(NCEP Reanalysis 1)로부터 NCL을 이용하여 APCC에서 직접 계산한 9개 인자를 더하여 25개 기후인자를 실시간 예측을 위하여 사용하였다.
- 실시간 예측시 통계적 방법에서 발생할 수 있는 과대적합(Overfitting) 문제를 해결하기 위해서 예측인자 선정 절차를 개선하였고, 개발된 시스템의 교차검정(Cross Validation) 알고리즘의 과대적합 여부를 검증하기 위하여 무작위로 예측인자(random predictor)와 종속변수를 3000번 생성하여 Temporal Correlation Coefficient(TCC)의 수렴여부를 분석하였다.
- 한반도 월별 강수 예측을 위한 모형선정 결과 MWR 방법이 가장 많이 선정된 반면에 기온 예측을 위한 모형선정 결과는 SBC 방법이 가장 많이 선정되어, 역학적 기후예측 모형 기반 예측자료의 경우 강수보다는 기온의 예측에 있어서 높은 예측성을 보였다.

- 역학적 기후예측모형의 결과를 직접적으로 사용하는 SBC 방법의 경우, 강수 및 기온 예측에 있어서 짧은(1~3개월) 선행예측기간과 비교하여 선행예측기간이 4~6개월로 증가됨에 따라서 선택된 모형이 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 이는 선행예측기간이 증가함에 따라서 예측성이 감소하는 예측모형의 특성을 보여주었다.
- 4가지 방법을 모두 사용하는 경우, 7월~12월 기간이 1월~6월 기간과 비교하여 강수 및 기온 예측모형 선정에 있어서 높은 선정 결과를 보였다. 전체적으로 강수 및 기온에 대해서 각각 12월 및 9월에 가장 많은 모형이 선정되었다.
- 선행예측기간이 짧은 경우 선행예측기간이 긴 경우와 비교하여 보다 많은 예측 정보가 MME에 사용되어 TCC 값이 높게 나타난 반면, 단순평균을 통한 개별 예측결과와 MME는 관측자료와 비교하여 연변동성의 범위가 축소되는 결과를 보여 주었다.
- 실시간 예측시 기후예측정보 제공을 위하여 R기반 템플릿을 구성하였다. 템플릿은 예측에 대한 전반적인 정보, 과거 및 미래 기간에 대한 모의결과를 직관적으로 보여주는 그래프, 장기 과거기간에 대한 월별 예측성 정보, 예측기간에 대한 확률예보 정보를 제공한다.
- 코딩된 Cross Validation 알고리즘 자체의 과대적합 여부 분석 결과, CIR, MWR, ITR 등 모든 방법에서 TCC가 0값을 중심으로 정규분포하는 결과를 보여 Cross Validation 알고리즘에서 과대적합이 발생하지 않는 것으로 판단하였다.
- 상세화 시스템은 오픈소스 통계분석 소프트웨어인 R을 이용하여 관측자료가 존재하는 경우에 범용적으로 사용할 수 있도록 개발되었다.

수직적 연계: 갈수기 수질관리 의사결정 활용을 위한 정보전달

- 수질예보를 위해 사용된 국립환경과학원의 모델링 시스템은 4대강 본류로 유입되는 유량과 수온, 그리고 수질을 모의하기 위해 HSPF(Hydrological System Program-Fortran) 모델이 사용되며, 본류 구간의 하천수질을 모의하기 위해 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code) 모델이 사용된다. HSPF-EFDC

모델링 시스템은 관측자료를 이용하여 모형에 의해 증가하는 편차를 예측시점에 보정해 주는 자료동화(Data Assimilation) 기법이 반영되어 있는 장점을 가지고 있다.

- 계절예측 자료의 특성을 고려할 때 모의된 일단위 수질 결과를 이용하여 비교 분석하는 것은 적절하지 못하며, 향후 관측기간이 짧은 경우 예측성 평가를 포함한 정보전달 방법의 제시가 필요하다.
- 계절예측자료 단계에서 평균(MME)한 후 수질모델링에 사용하는 경우 구동시간을 줄여 줄수 있는 장점이 있다. 하지만 개별 예측자료들을 단순 평균한 MME값은 관측자료와 비교할 때 변동성(variation)을 감소시키며, 수질예측결과와 시·공간적인 분포에서 발생하는 불확실성을 가중시킬 수 있는 단점을 갖고 있다.
- 2014년도 갈수기에 대해 예측한 결과를 「2014년 조류(녹조)발생과 대응 연차보고서」의 녹조 발생 및 원인 분석결과와 비교하였다.
- 본류 구간에서의 조류 대량 증식에 의한 위험도 지수는 기후변화 취약성 평가에 보편적으로 활용되는 노출(Exposure), 민감도(Sensitivity), 적응능력(Adaptive capacity) 개념을 취합하여 산정하였다.
- 조류 대량 증식에 대하여 예방 단계에서 활용할 수 있는 대응방안들로는 영양염류의 유입제어, 물흐름 관리, 조류 휴면체 관리, 생화학적 방법 등이 사용될 수 있으며, 점원오염 관리 중심의 영양염류 유입제어 방법을 최적관리 방안으로 선정하여 시나리오를 도출하였다.
- 수질 위험도 분석은 영산강 본류 7개 수질관측소를 기준으로 설정하였으며, 4월~6월의 3개월 조류 예측 농도의 평균값을 노출 인자로, 본류 구간에서의 허가수리권 허가량(m^3/d)을 민감도 인자로, 초기 저수율을 반영한 구간별 농업용 저수지 저수량을 적응능력 인자로 사용하였다.
- 하류 구간에서 조류발생에 따른 위험도가 높은 것으로 나타났으며, 이는 영산강 하류지역이 중류지역과 비교하여 조류농도는 낮고 농업용저수지의 저수량은 높은 반면에, 허가수리권과 관련된 용수수요량이 가장 높았기 때문인 것으로 판단된다.

- 방류수량이 가장 많은 광주제1, 광주제2 하수처리시설의 경우에는 설계주입농도에 대한 운영주입농도의 비가 각각 61% 및 56%로서 추가 약품사용을 통한 T-P 농도의 저감 및 본류에 미치는 오염부하량 측면에서 기대효과가 가장 높을 것으로 판단되어 광주제1 및 제2 하수처리시설의 방류수 T-P 농도를 1급수 수질기준에 해당하는 0.02mg/L 수준으로 낮추는 방안을 시나리오로 고려하였다.

정책 제언

- 계절예측 정보를 활용한 조류 중심의 수질관리를 위해서는 수체의 규모, 형태 뿐만아니라 수리학적 특성을 고려하여 각각의 특성에 따른 맞춤형 수질 관리가 필요하다. 체류시간이 짧은 하류의 하천형 인공호와 대규모 강의 본류에서는 갈수기에 장기화되는 체류시간으로 인하여 갈수기 점오염원으로 인한 조류 발생 경향이 증가하게된다.
- 낙동강 유역의 경우 70% 정도를 하천수로부터 취수하여 사용하고 있는 점을 고려할 때, 점원오염 중심의 갈수기 오염원 관리는 다른 유역과 비교하여 낙동강 유역에서 우선순위가 높게 책정되어야 한다.
- 계절예측정보를 활용하여 지역 및 계절 특성을 고려한 점오염 또는 비점오염 중심의 수질관리를 위해서는 기후노출에 대한 유역별 민감도를 반영하여 우선순위에 따라 통합유역관리 관점의 접근이 필요하다. 이를 위해 수생태법 19조 “기후변화”의 범위를 확대적용할 수 있도록 변경안을 제안하였다.
- 향후 10년 동안에 적용될 물환경관리기본계획기본계획의 수립에 있어서 중권역 계획 또는 소권역계획 수립 과정에서 다양한 시간규모의 기후정보 활용을 극대화 할 수 있도록 관련 내용의 추가를 제안하였다.
- 예측중심의 장기수질예보는 실측을 기반으로하는 조류정보제 및 단기수질예보제와는 별개로 분리하여 사전예방을 위한 유역관리 차원에서 실행할 것을 제안하였다.
- 장기수질예보 정보는 수질관리와 관련된 오염원의 공간적 분포 및 과거 수질의 동향 등과 같은 시·공간적인 데이터와의 연계를 통해 사전예방대책 수립에 있어서

활용도를 높일 수 있도록 GIS 플랫폼을 기반으로 제공되어야 함을 제시하였다.

- 국내에서 비점오염에 의한 오염부하량의 비중이 전체 부하량의 50%를 넘어서고 있는 상황에서 효율적인 비점오염 관리 없이는 향후 수질의 개선을 기대하기 어렵기 때문에 유역내 구성원들의 자발적인 참여를 유도할 수 있는 제도 개선이 시급하다.

7. 향후 연구 방향

계절예측 자료의 활용은 Figure 52과 같이 다중모형앙상블(MME) 절차를 언제 수행하느냐에 따라서 크게 2가지로 구분할 수 있다.

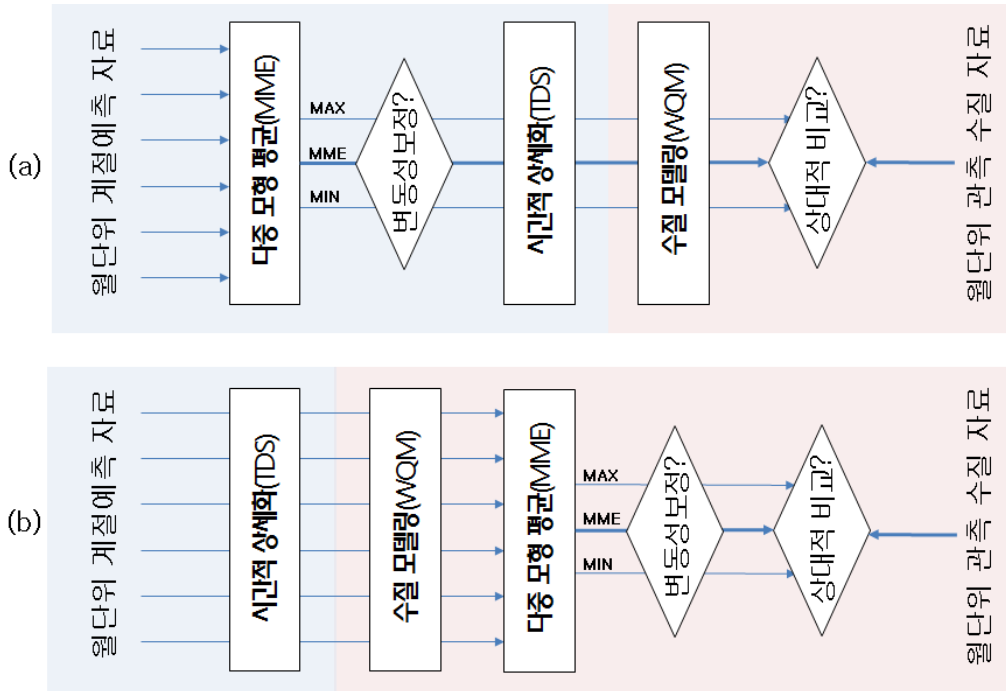


Figure 52 다중모형앙상블 위치에 따른 계절예측정보 활용 방안

우선 본 연구에서 사용하고 있는 바와 같이 개별 기후예측 자료를 평균한 단일값과 최고, 최대 기후입력만을 모델링의 입력으로 사용하여 계산된 수질 결과를 사용하는 방법이 있다 (Figure 52-a). 계절예측자료를 평균하는 경우는 시간적상세화(TDS) 및 수질모델링(WQM)의 과정을 단순화할 수 있는 장점이 있다. 실시간 예측에서 수개월을 모의하는 데는 모형 구동에 소요되는 시간이 큰 문제가 되지 않을 수 있다. 하지만, 기후예측 모형과 비슷하게¹⁸⁾ 현재 시스템의 상황을 반영한 예측성 정보를 제공하기 위해서는 30년 이상의 과거기간(Hindcast)에 대해서 실제 예측을 재현하여 모

18) APCC의 기후예측정보 제공자의 경우 모델링 기법에 있어서 개선이 있는 경우 과거기간에 대한 예측을 통해 업데이트된 Hindcast 자료를 제공하고 있다.

의한 장기 자료를 사용하여 예측성을 분석하는 것이 필수적이다. 즉 이는 현 모델링 시스템에서 주요 컴포넌트가 업그레이드된 경우에 새로운 시스템의 예측성을 평가하기 위해서 과거 전체 기간에 대한 모델링이 반복 수행되어야하는 것을 의미한다. 본 연구에서와 같이 새로 개발되고 있는 상세화 기법의 월별 예측성을 평가하기 위해서는 기후예측정보와 동일한 기간에 대한 수질모델링이 바람직하다. 이와 같은 경우 계절예측자료 단계에서 평균(MME)하는 방법은 HSPF-EFDC 모델링 시스템과 같이 구동시간이 오래 걸리는 경우에 활용할 수 있는 장점이 있다.

하지만, 개별 기후예측 자료를 평균하는 경우 도출된 MME 평균값은 앞에서 살펴본 바와 같이 개별 예측자료들이 갖는 변동성(variation)이 상쇄되어 관측자료의 변동성과 비교할 때 작게 나타나는 경향이 있다. 이 경우 그림에서와 같이 변동성 보정을 수행할 수도 있다. Figure 53는 앞서 제시된 Figure 25를 표준편차의 비율을 이용하여 보정한 결과를 보여 주고 있다. 보정 후 산포도의 결정계수는 변함이 없고 기울기의 경우 강수 및 기온 모두 증가한 결과를 보여주고 있다. 하지만, 강수의 시계열 자료에서 보는 바와 같이 1986, 1991, 1997년 등의 경우에는 예측성을 향상 시키는 방향으로 보정되었지만 한편으로는 관측값과의 차이를 더욱 크게하는 방향으로 보정된 경우도 발생하기 때문에 변동성보정(Inflation) 절차가 예측성의 향상을 의미하는 것은 아니다. 또한 이 경우에 사용된 계절예측의 최대 및 최소값 또한 비선형적이고 복잡한 유역시스템 안에서 최대 및 최소의 수질 예측값을 의미하지 않는다. 마지막으로 계절예측자료를 우선적으로 평균하는 방법은 수질예측결과와 공간적인 분포에서 발생하는 불확실성을 가중시킬 수 있는 단점을 갖고 있다. 본 연구에서 사용된 상세화 절차를 살펴보면 한반도 전체에 대한 월단위 강수 및 기온을 예측한 후 관측지점별 시간단위 예측자료는 과거관측 자료로부터 비슷한 년/월을 선정하여 샘플링하는 방법을 사용하고 있다. 이 경우 동일한 예측기간을 고려하더라도 개별 예측모형의 강수 및 기온 예측값에 따라서 선택되는 년/월이 달라질 수 있다. 즉, 선택된 개별 예측모형에 따라서 한반도 내에서의 강수 및 온도의 공간적 패턴이 달라질 수 있고 동일한 관측지점에 대해서도 일단위/시간단위 규모에서의 시계열 특성이 달라질 수 있다.

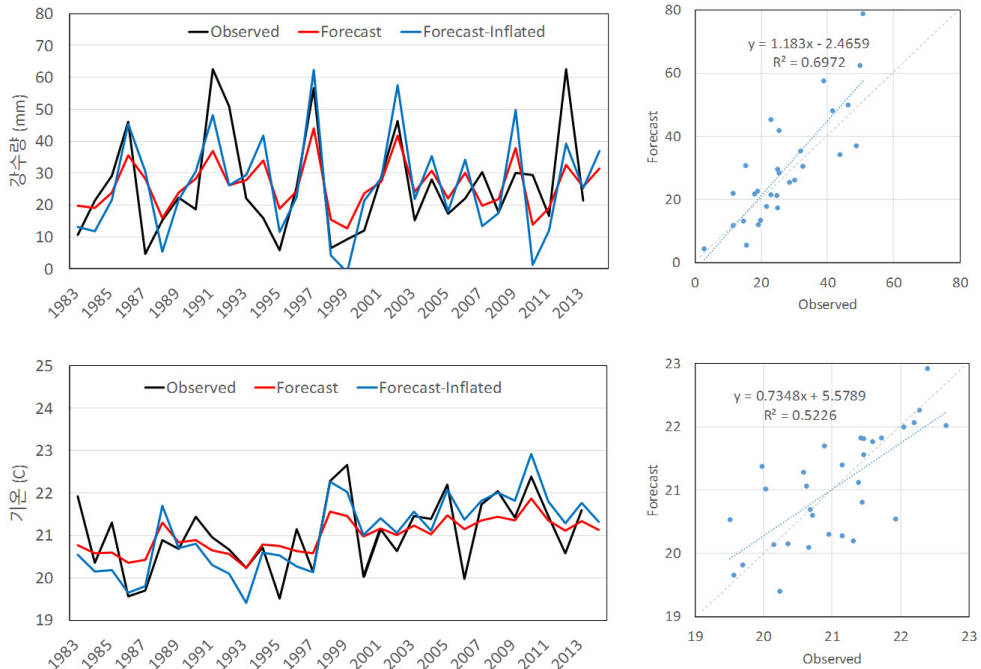


Figure 53 계절예측 다중모형앙상블(MME)결과의 연변동성 보정 전후 비교 결과: 12월 강수량(상) 및 9월 기온(하) 시계열(좌) 및 산포도(우)

두 번째로 고려될 수 있는 방법은 모든 개별 기후예측 자료를 시간적 상세화 과정을 거쳐 수질모델링의 입력으로 사용한 후 도출된 수질 결과를 평균하거나 최대 최소 값을 구하는 방법이다(Figure 52-b). 이와 같은 방법은 상당한 계산 자원과 시간을 소요하게 되는 단점이 있는 반면, 실제 상황을 반영한 평균 및 최대/최소 수질 예측 값의 범위를 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한 특정 개별 모형만을 사용하는 경우와 비교하여 샘플링 과정에서 발생할 수 있는 공간적 시간적 불확실성을 줄일 수 있는 장점이 있다. 따라서 MME를 수행하는 위치에 따른 장기수질의 예측성 평가가 향후 연구에 반영되어야 할 것이다.

또한 예측된 강수량 및 기온을 이용하여 과거관측 자료로부터 가장 비슷한 년/월을 결정한 후 일 또는 시간자료를 샘플링 하는 시간적 상세화 절차를 고려할 때, 선정된 월의 일단위 시간패턴이 달라짐에 따른 월평균 수질 예측에 미치는 영향을 파악하기 위해서 (즉, 동일한 월 강수량이 주어지더라도 월의 초기에 강수가 많이 오는 경우와 말기에 많이 오는 경우에 따라서 수질이 다르게 영향을 받는 경우) 샘플링 개수의

증가에 따른 장기수질 예측성 변화에 대한 평가가 필요하다.

마지막으로 장기 수질예측의 전체 불확실성 중에서 계절예측 및 수질 모델링 각 단계별 기여 정도를 분석하는 것이 향후 필요할 것이다. 즉HSPF-EFDC모델링에 의해 발생하는 불확실성을 제거하고 장기 기후 예측에 의한 영향만을 비교하기 위해 상세화 방법에 의해 생성된 예측 기후자료를 입력으로 사용하여 모의된 수질(EFCD-Forecasted)을 실제 수질 관측 자료(Observed) 뿐만 아니라 동일 기간 동안에 관측 기상 자료를 입력으로 사용하여 모의된 수질 결과(EFDC-Observed)를 비교함으로써 각 단계별 불확실성의 기여도를 평가하는 것이 필요할 것이다.

참고 문헌

- 강민구, 박두호. 2010. 통합지표를 이용한 국가 수자원 평가 기법 제안. 대한토목학회지 58(9): 110-118.
- 국립환경과학원. 2013. 수질예보 2단계('14~'18) 운영방안 수립연구.
- 김경현. 2011. 수질예보와 하천 수질관리. 물과 미래, 44:8-10.
- 김연주, 김익재, 안종호, 한 대호, 공인혜. 2014. 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구(I), 한국환경정책·평가연구원.
- 신재기. 2012. '12년도 녹조 발생원인 및 향후대책, 2012 Water & Tech (6), 28-35.
- 유가영, 김인에. 2008. 기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안, 한국환경정책·평가연구원.
- 이은정, 나은혜, 김경현. 2012. 선제적 수질관리를 위한 수질예보시스템 구축. 전원과 자원, 54(1): 50-55.
- 익산지방구토관리청. 2009. 영산강 하천기본계획[변경] 보고서.
- 조재필. 2014. 계절예측 정보를 활용한 통합 수문·수질 장기 예측 기술 개발, APEC기후센터
- 환경부. 2010. 국내 담수 조류저감 마스터플랜 마련 연구 용역 보고서
- 환경부. 2015. 2014년 조류(녹조)발생과 대응 연차보고서.
- 한혜진, 김호정, 이병현. 2014. 물환경 및 기후변화를 고려한 유해녹조 대응체계 및 정책 개선 방안 연구, 한국환경정책·평가연구원.
- Kang, H., C.-K. Park, S. N. Hameed, and K. Ashok, 2009: Statistical downscaling of precipitation in Korea using multimodel output variables as predictors. Monthly weather review, 137, 1928-1938.
- Mahalanobis, P. C., 1936: On the generalised distance in statistics. Proceedings of the National Institute of Sciences of India 2 (1): 49-55
- UNDP. 2005. Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures. Citeseer.

부록 1. MWR 기반 예측을 위해 선정된 예측인자 리스트

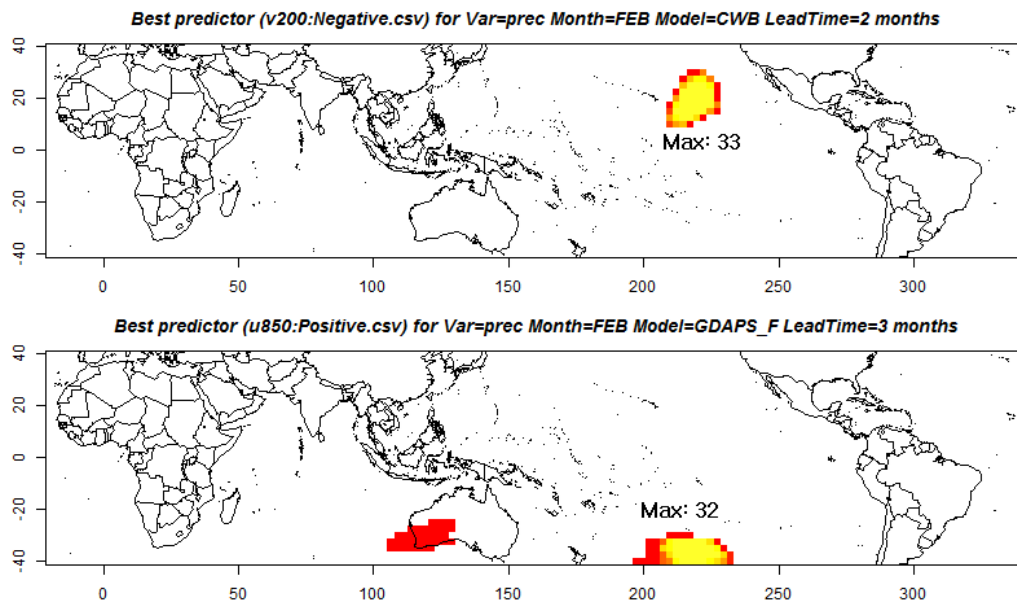


Figure A-1 한반도 2월 강수 예측을 위한 예측인자 및 공간분포

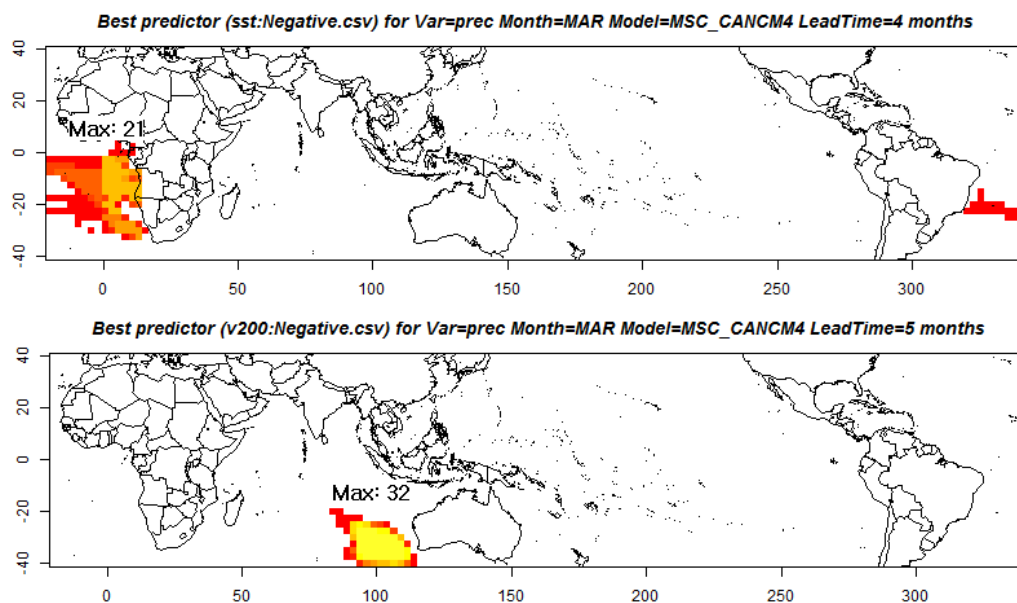


Figure A-2 한반도 3월 강수 예측을 위한 예측인자 및 공간분포

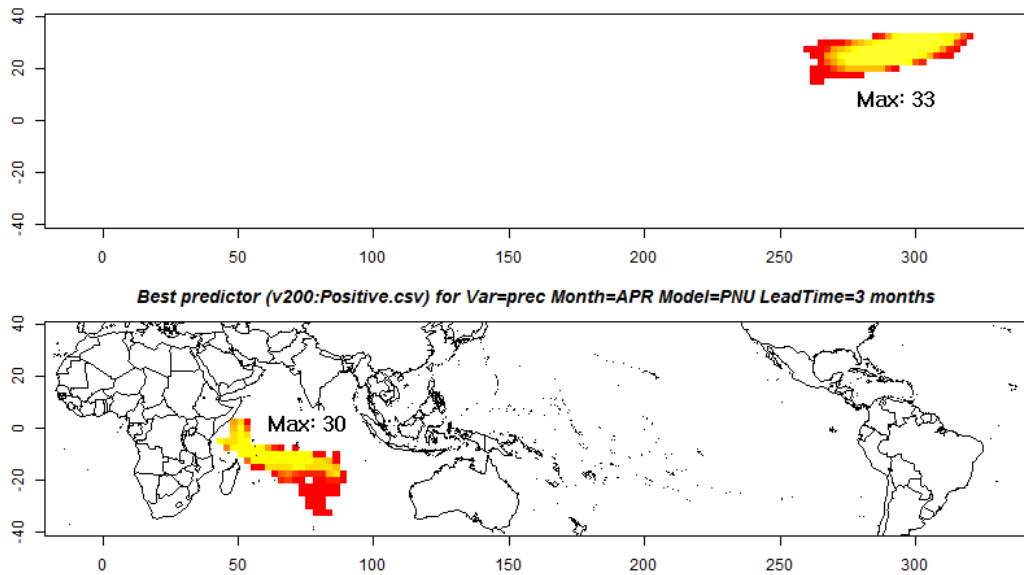


Figure A-3 한반도 4월 강수 예측을 위한 예측인자 및 공간분포

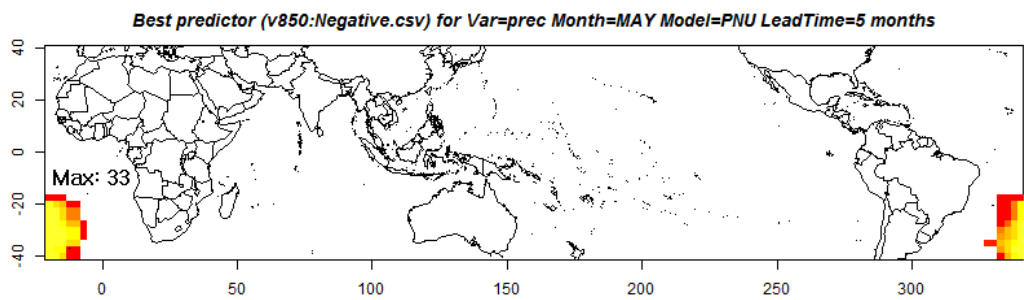


Figure A-4 한반도 5월 강수 예측을 위한 예측인자 및 공간분포

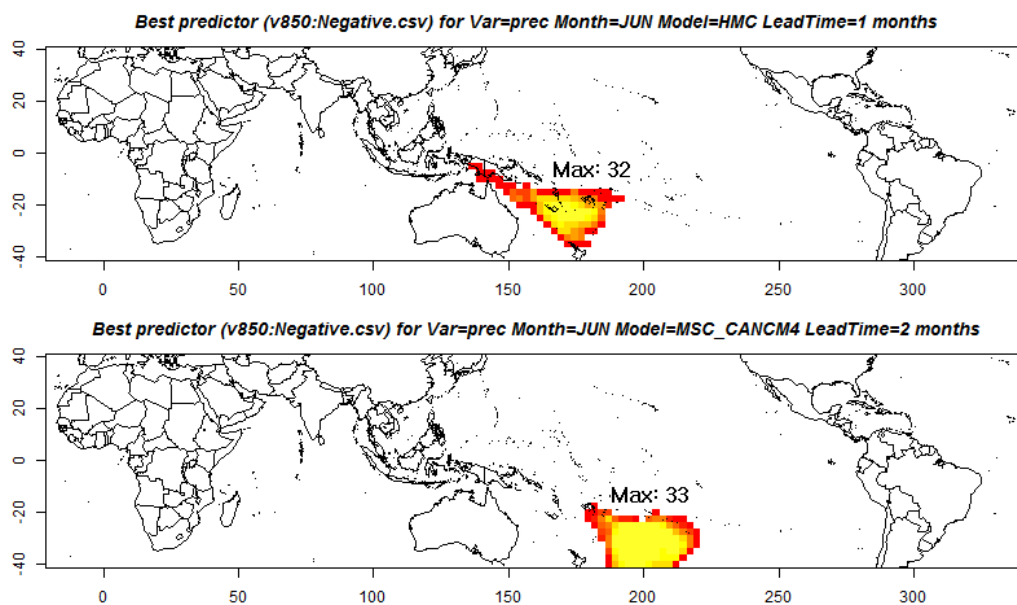


Figure A-5 한반도 6월 강수 예측을 위한 예측인자 및 공간분포

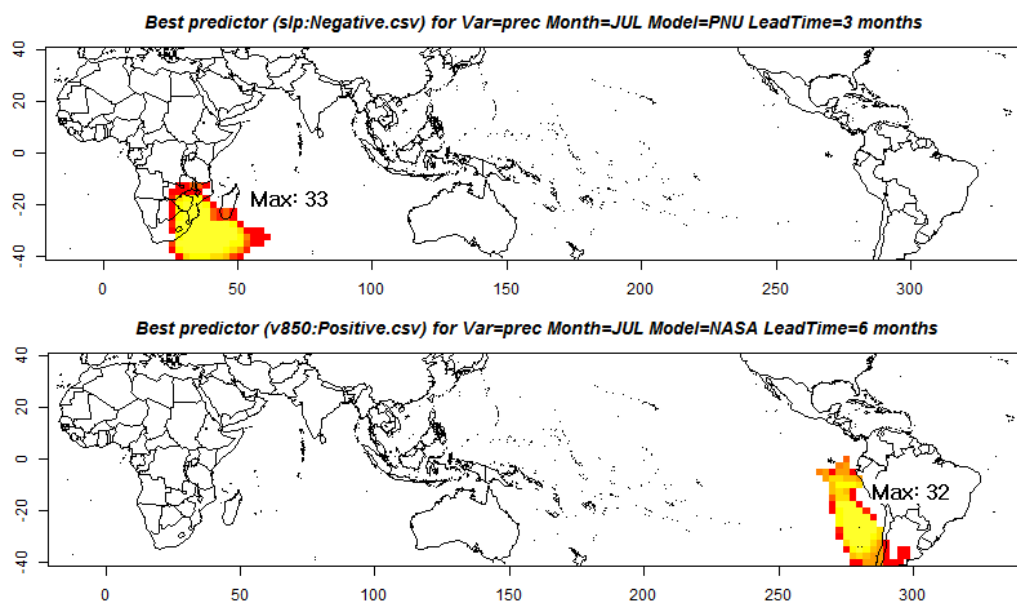


Figure A-6 한반도 7월 강수 예측을 위한 예측인자 및 공간분포

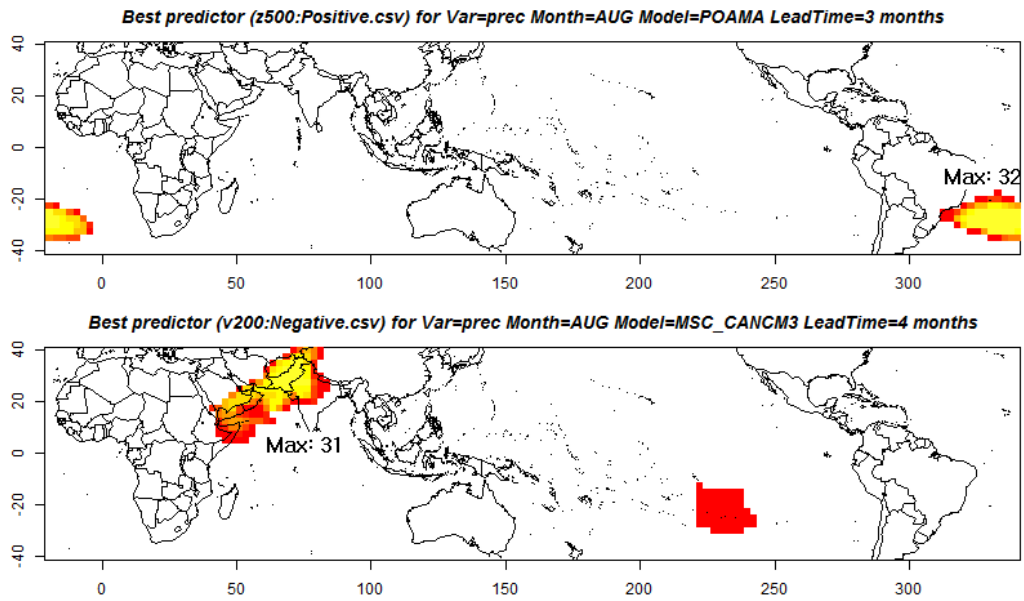


Figure A-7 한반도 8월 강수 예측을 위한 예측인자 및 공간분포

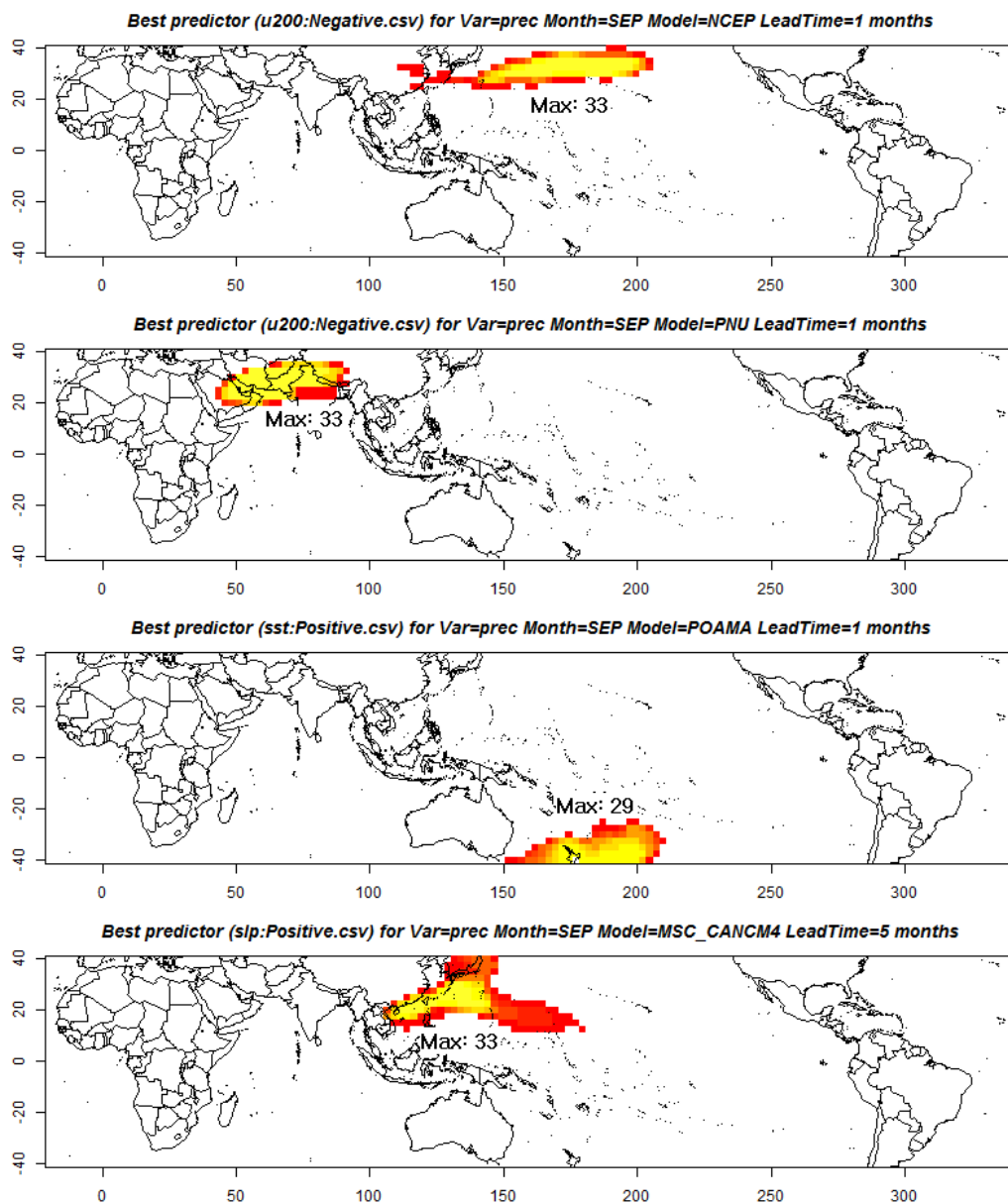


Figure A-8 한반도 9월 강수 예측을 위한 예측인자 및 공간분포

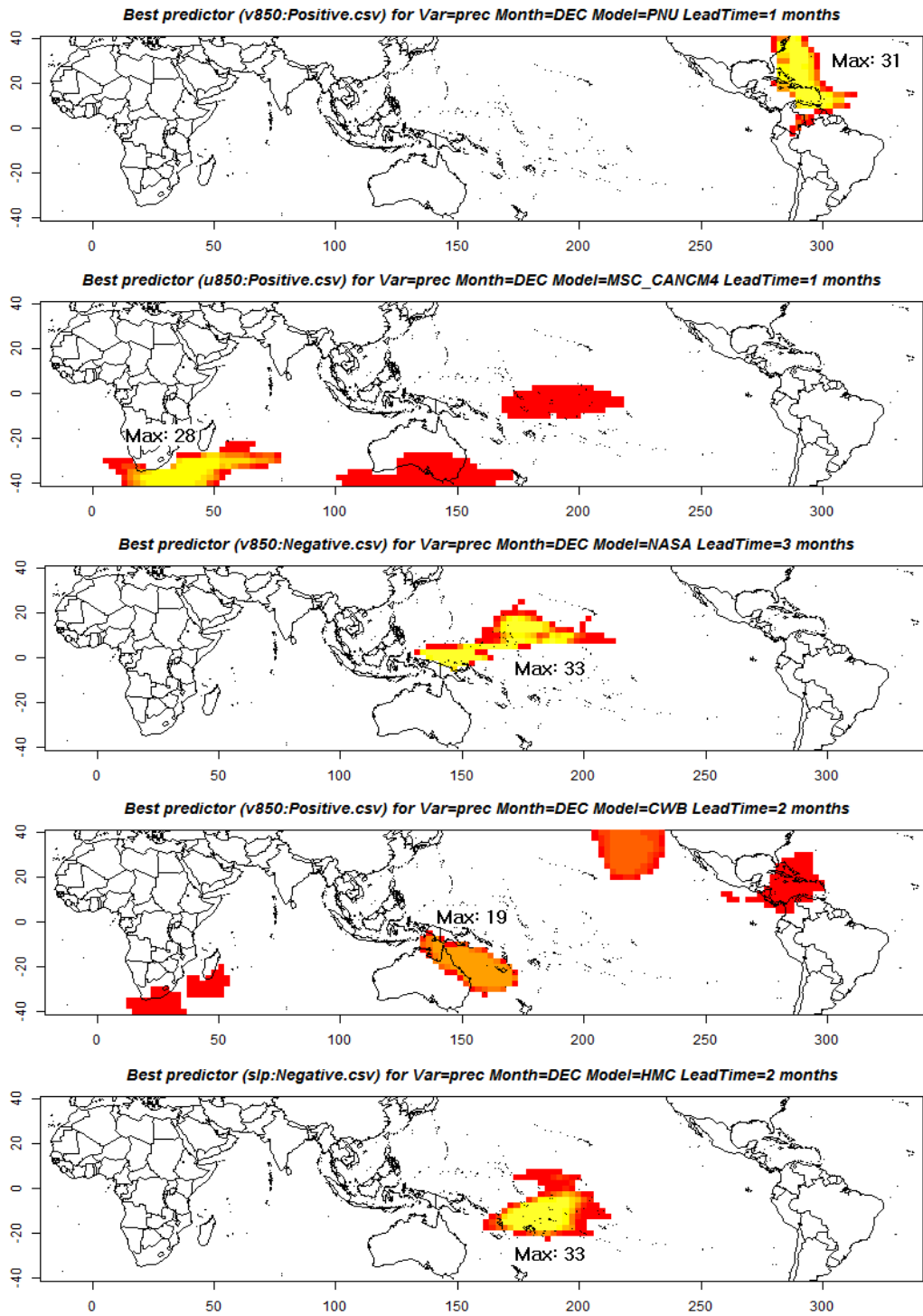


Figure A-9 한반도 12월 강수 예측을 위한 예측인자 및 공간분포

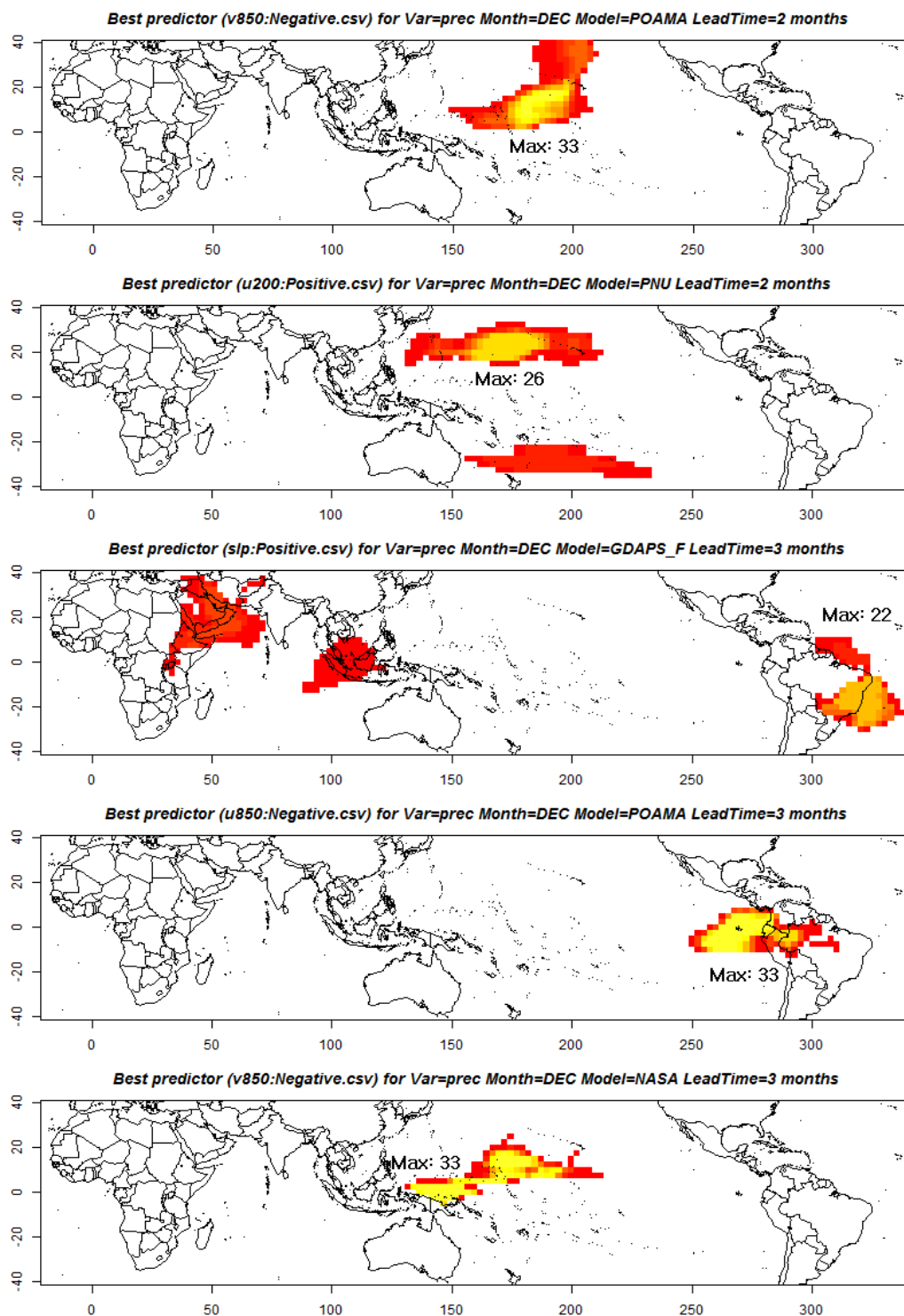


Figure A-9 한반도 12월 강수 예측을 위한 예측인자 및 공간분포(계속)

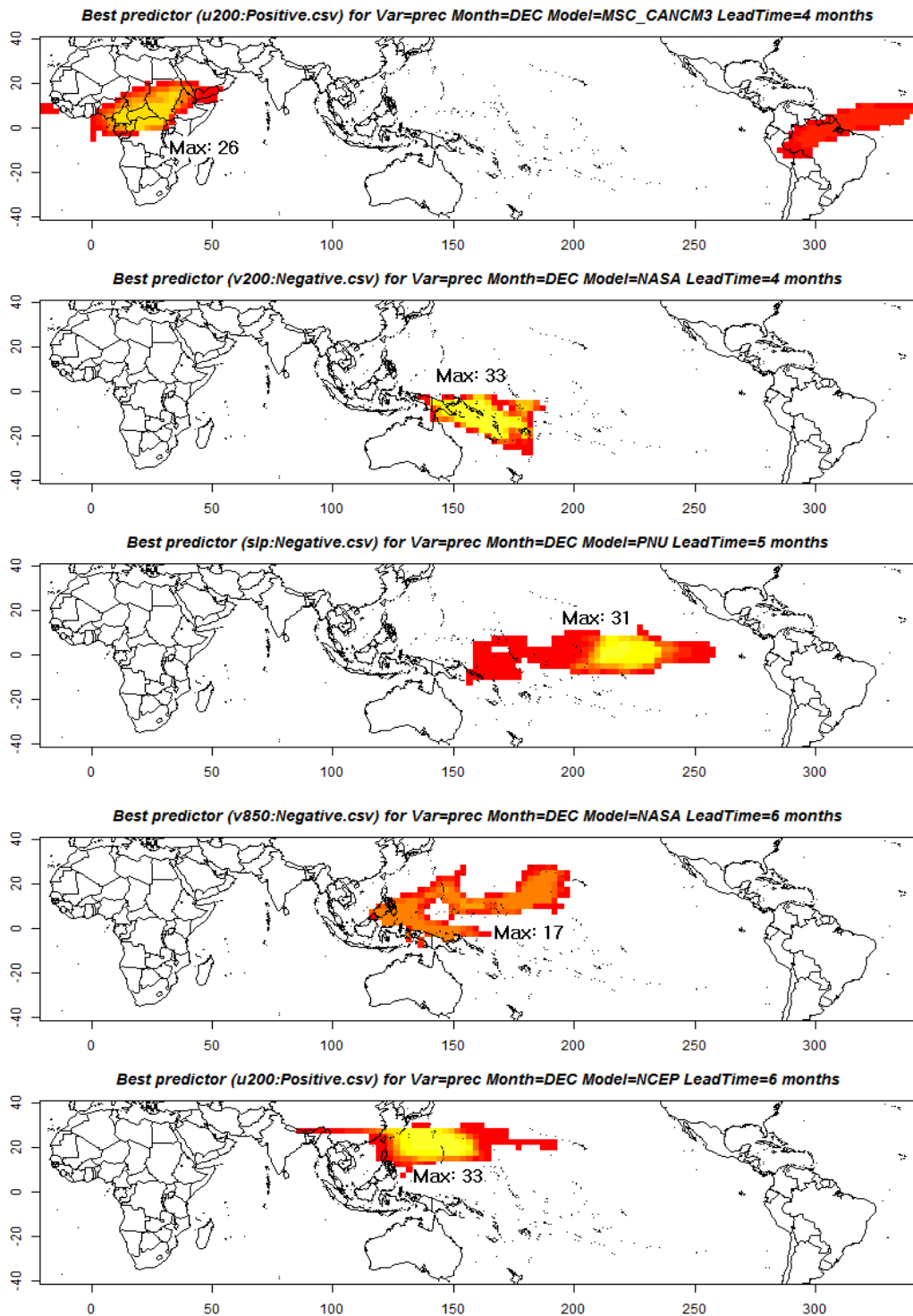


Figure A-9 한반도 12월 강수 예측을 위한 예측인자 및 공간분포(계속)

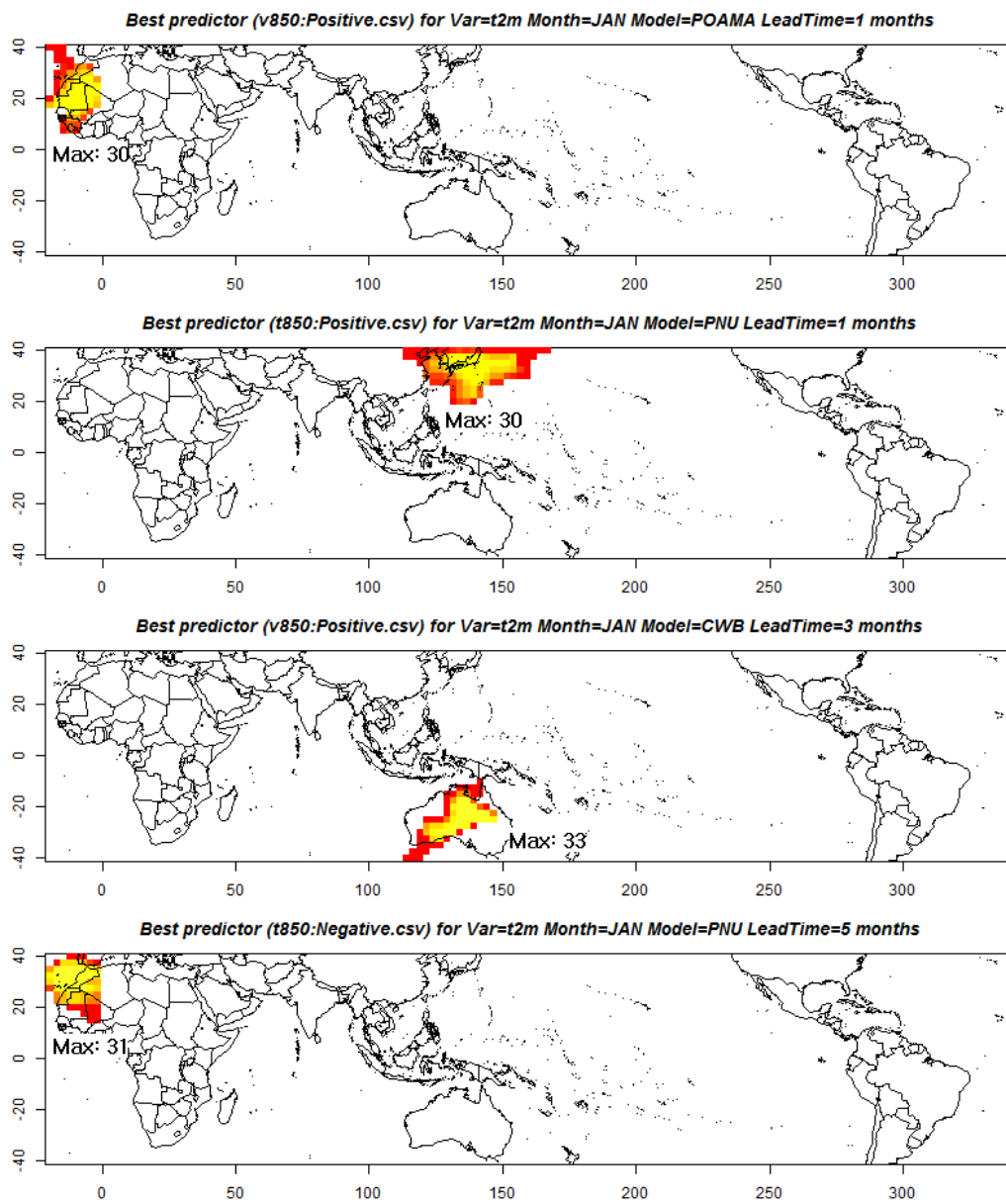


Figure A-10 한반도 1월 기온 예측을 위한 예측인자 및 공간분포

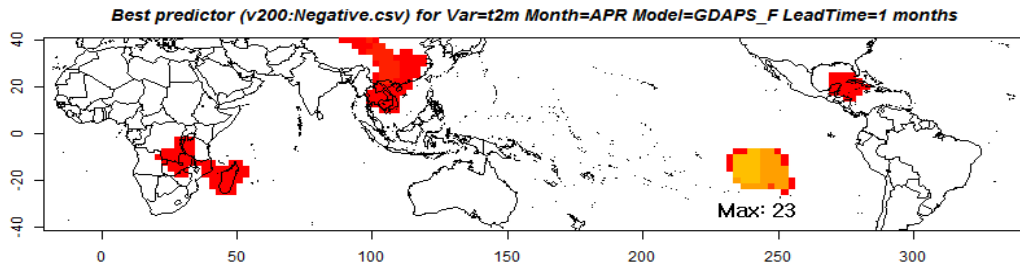


Figure A-11 한반도 4월 기온 예측을 위한 예측인자 및 공간분포

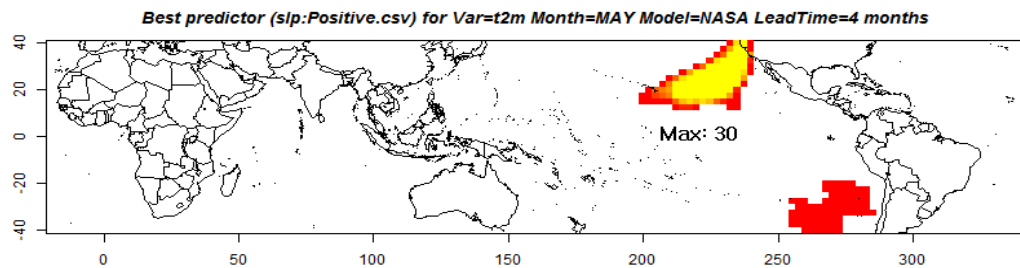
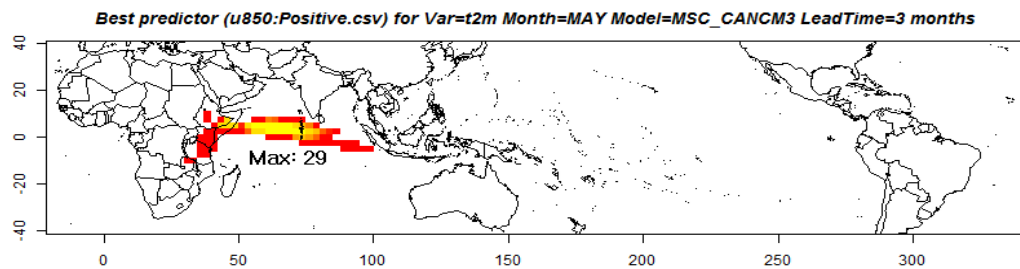
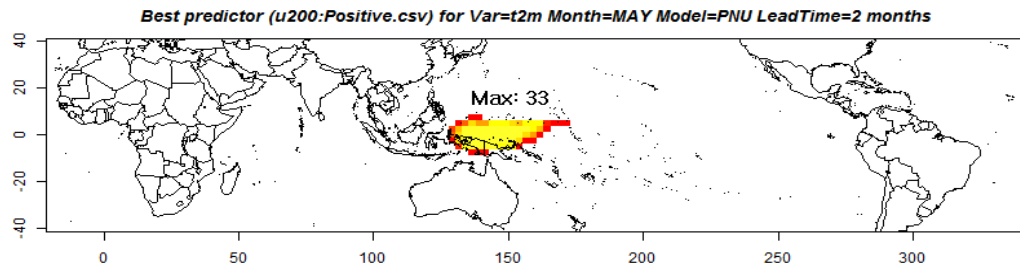
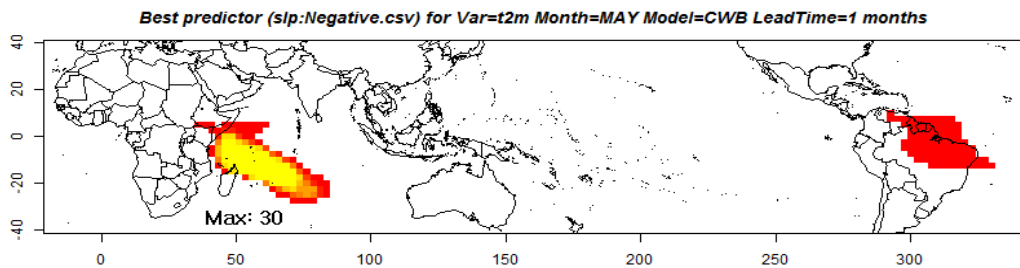


Figure A-12 한반도 5월 기온 예측을 위한 예측인자 및 공간분포

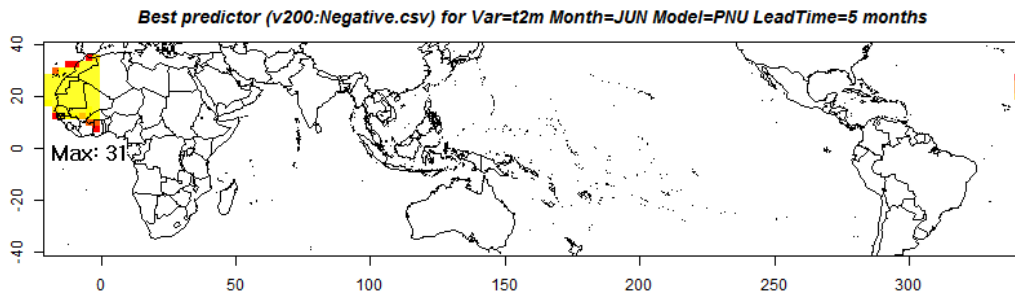


Figure A-13 한반도 6월 기온 예측을 위한 예측인자 및 공간분포

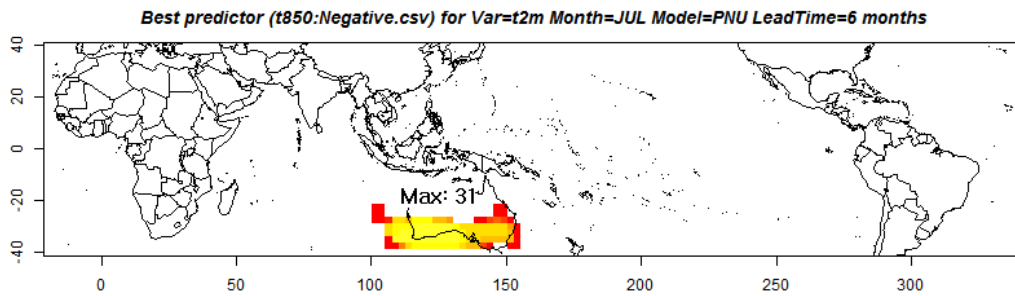
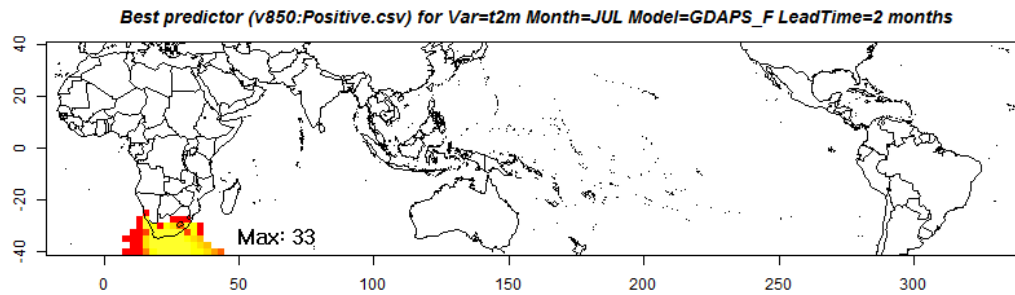


Figure A-14 한반도 7월 기온 예측을 위한 예측인자 및 공간분포

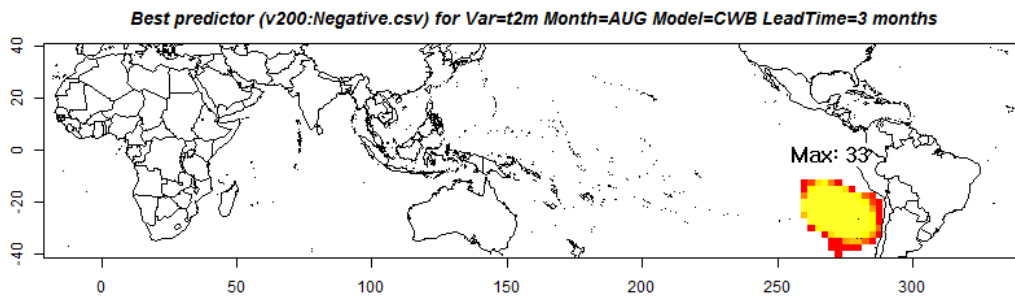


Figure A-15 한반도 8월 기온 예측을 위한 예측인자 및 공간분포

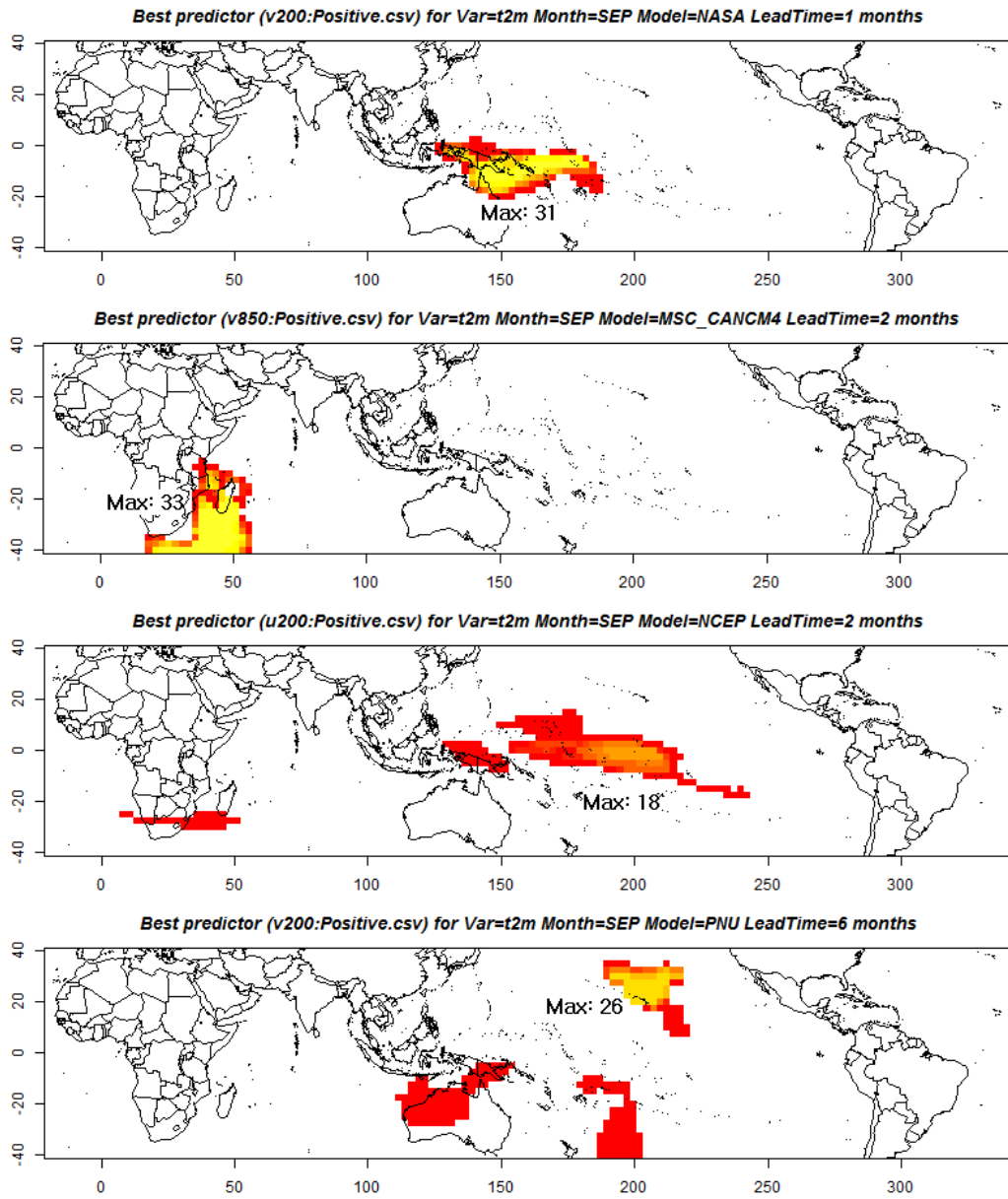


Figure A-16 한반도 9월 기온 예측을 위한 예측인자 및 공간분포

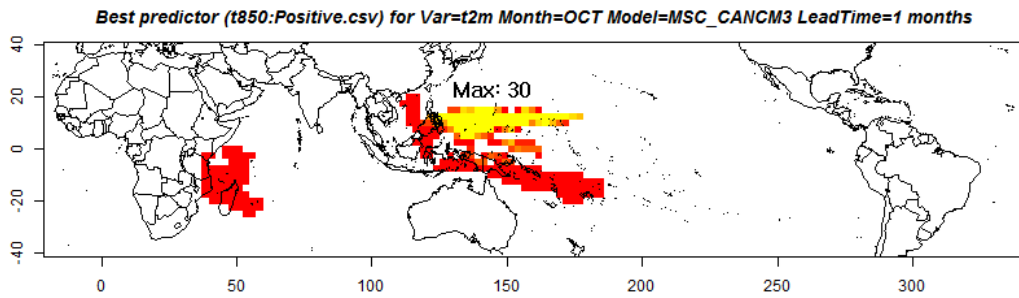


Figure A-17 한반도 10월 기온 예측을 위한 예측인자 및 공간분포

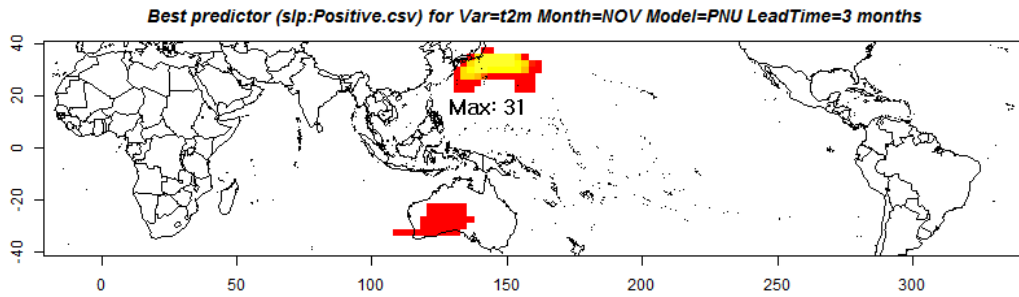


Figure A-18 한반도 11월 기온 예측을 위한 예측인자 및 공간분포

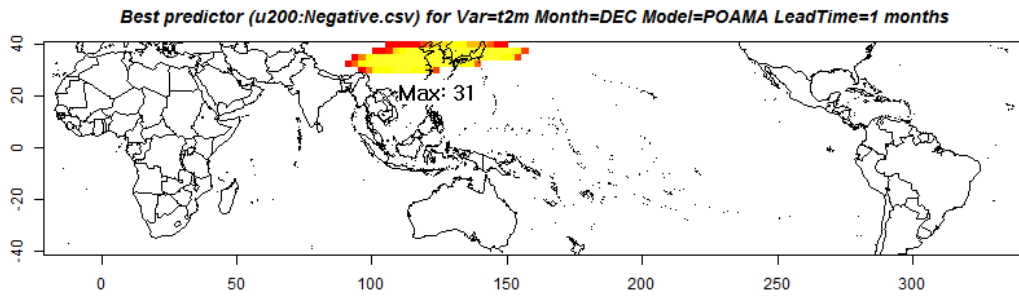


Figure A-19 한반도 12월 기온 예측을 위한 예측인자 및 공간분포

부록 2. 한반도 강수 및 기온 예측 결과(1983~2014)

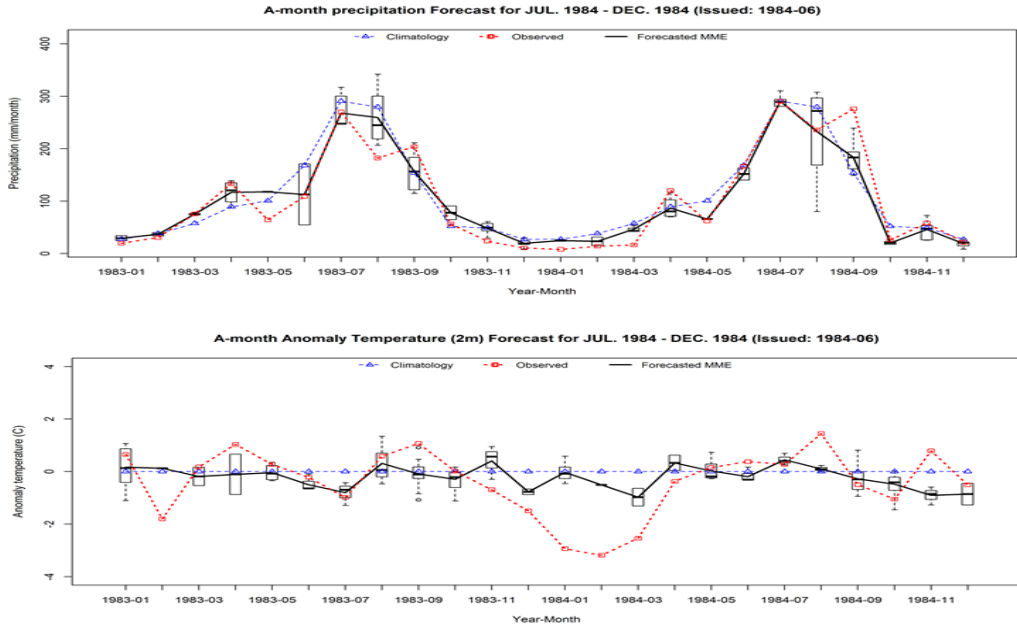


Figure A-20 한반도 계절예측 결과(1983~1984)

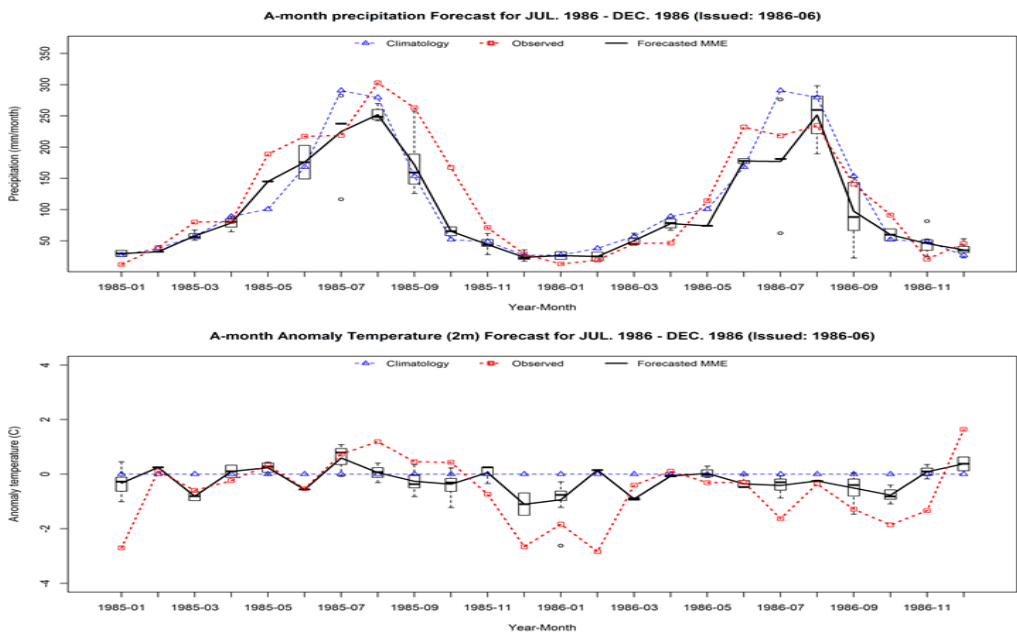


Figure A-21 한반도 계절예측 결과(1985~1986)

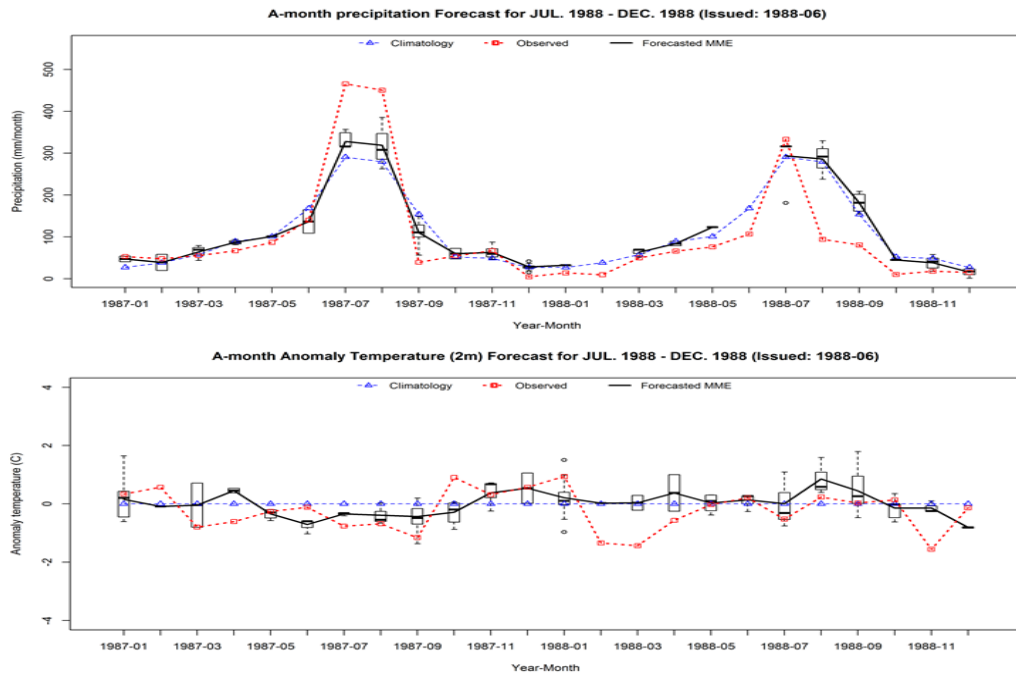


Figure A-22 한반도 계절예측 결과(1987~1988)

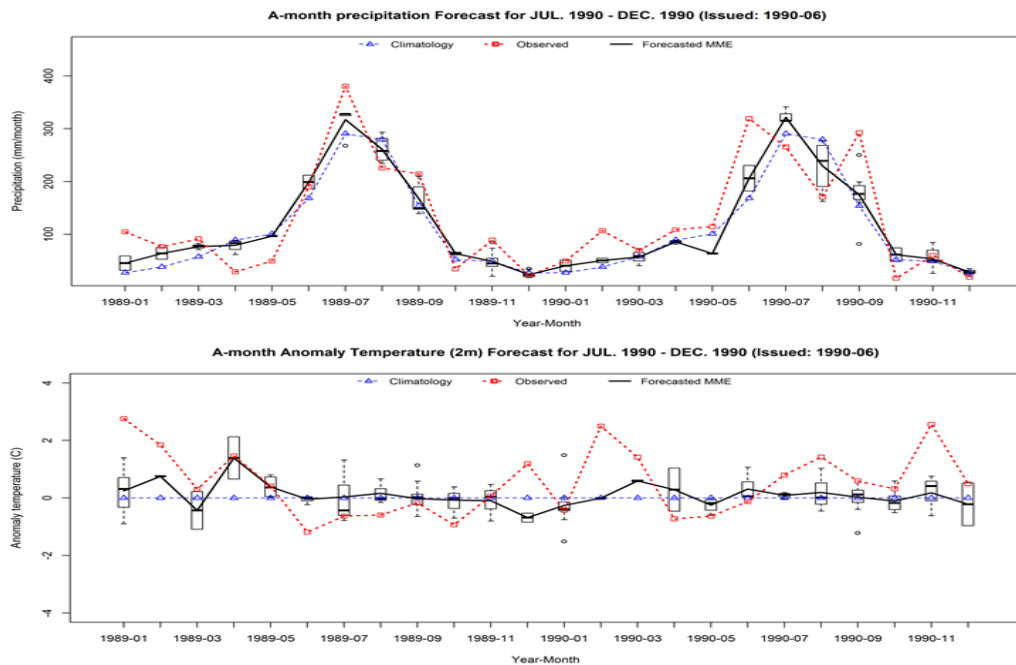


Figure A-23 한반도 계절예측 결과(1989~1990)

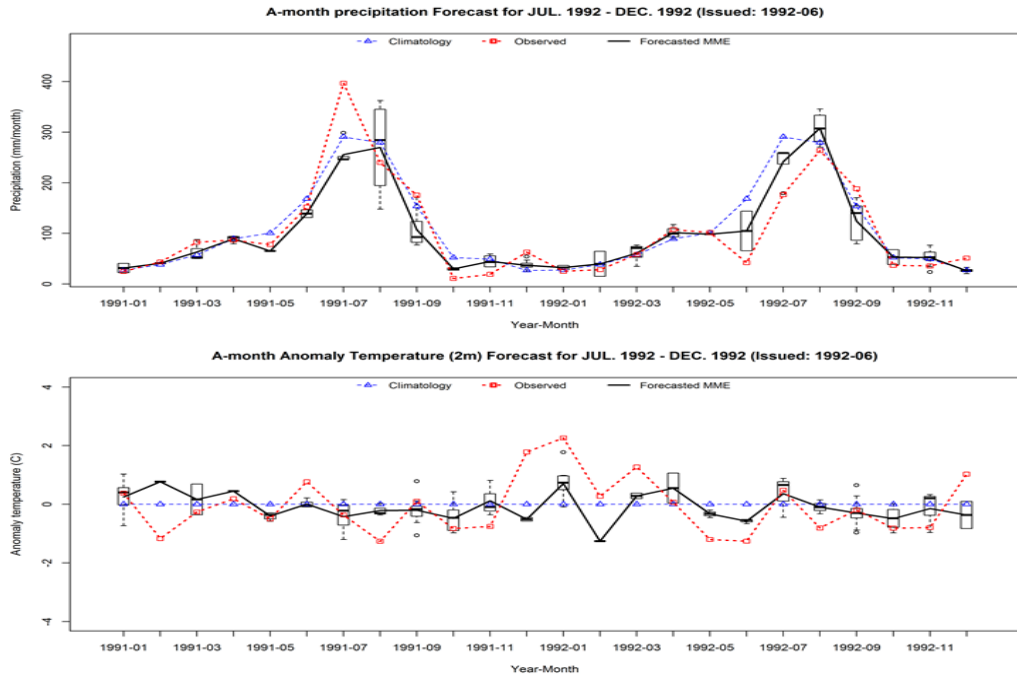


Figure A-24 한반도 계절예측 결과(1991~1992)

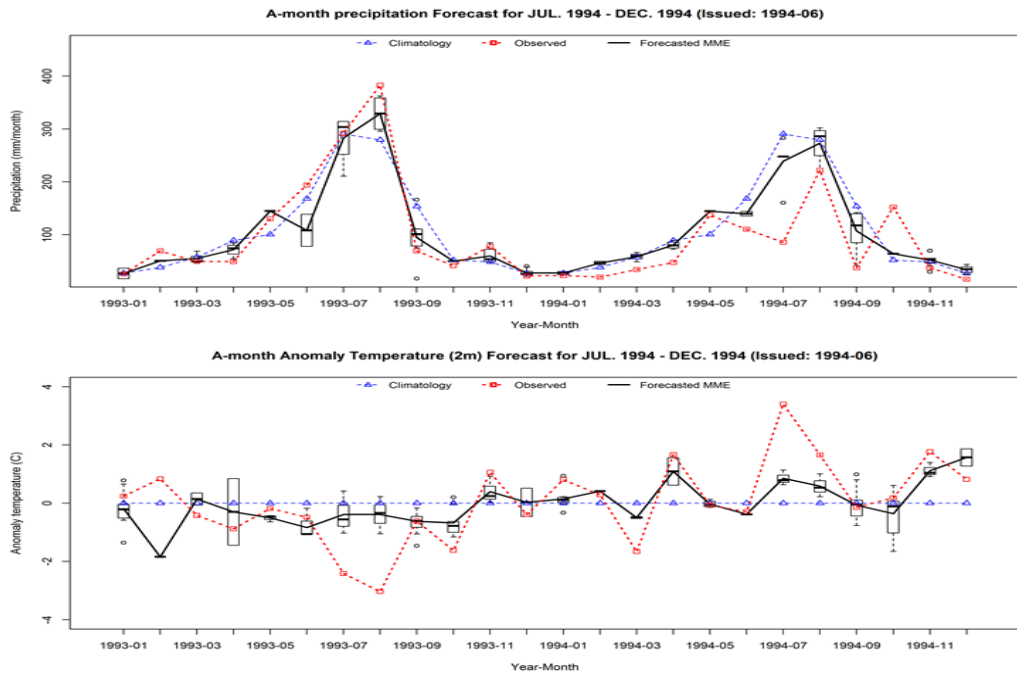


Figure A-25 한반도 계절예측 결과(1993~1994)

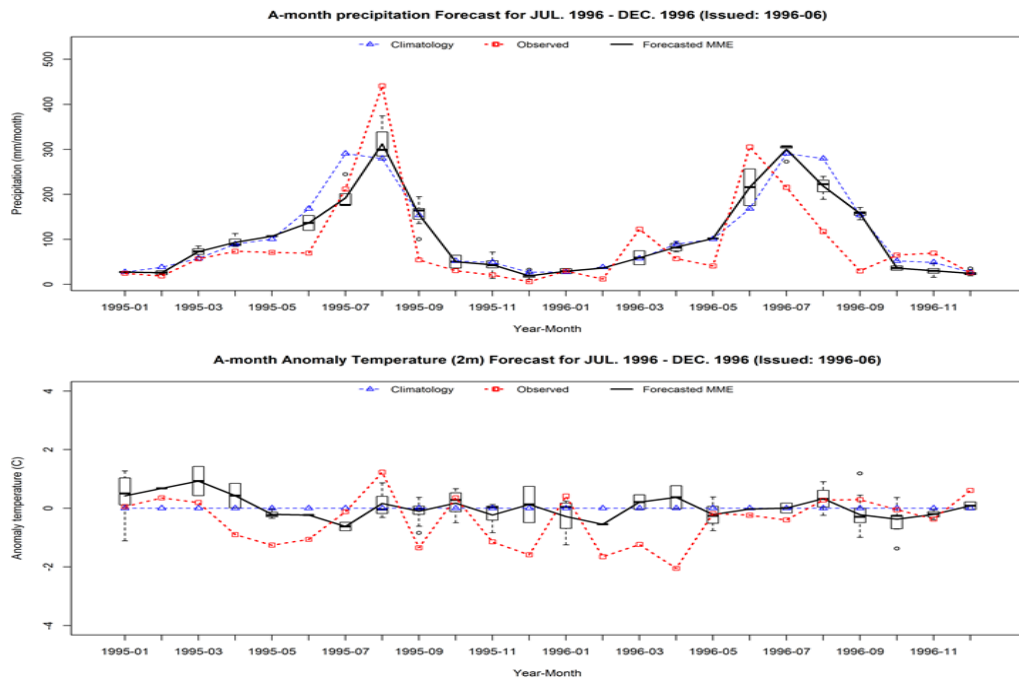


Figure A-26 한반도 계절예측 결과(1995~1996)

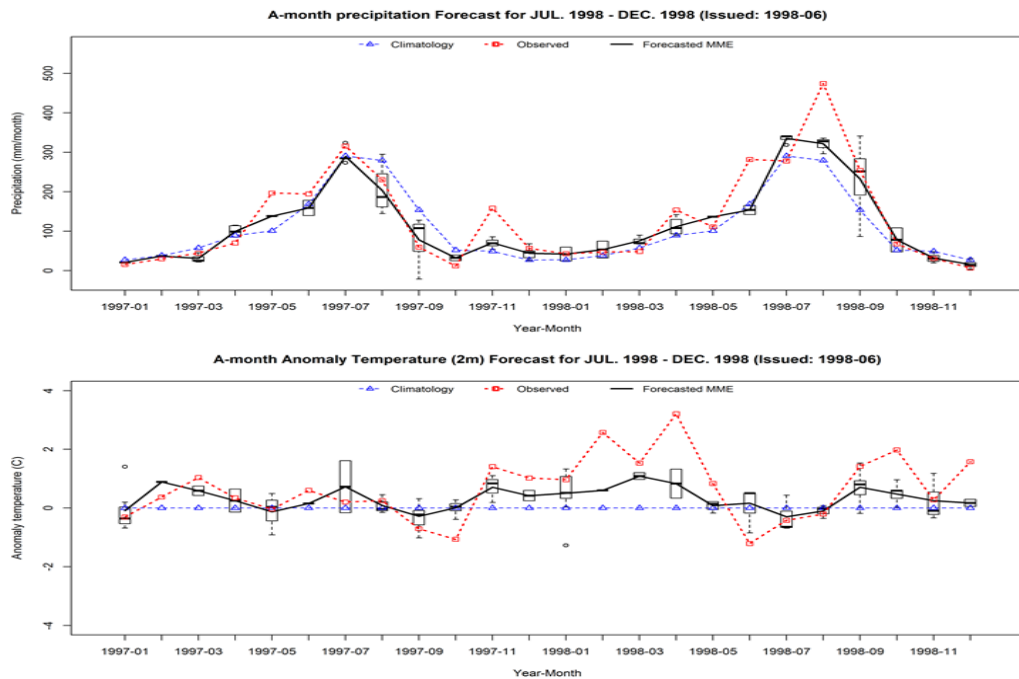


Figure A-27 한반도 계절예측 결과(1997~1998)

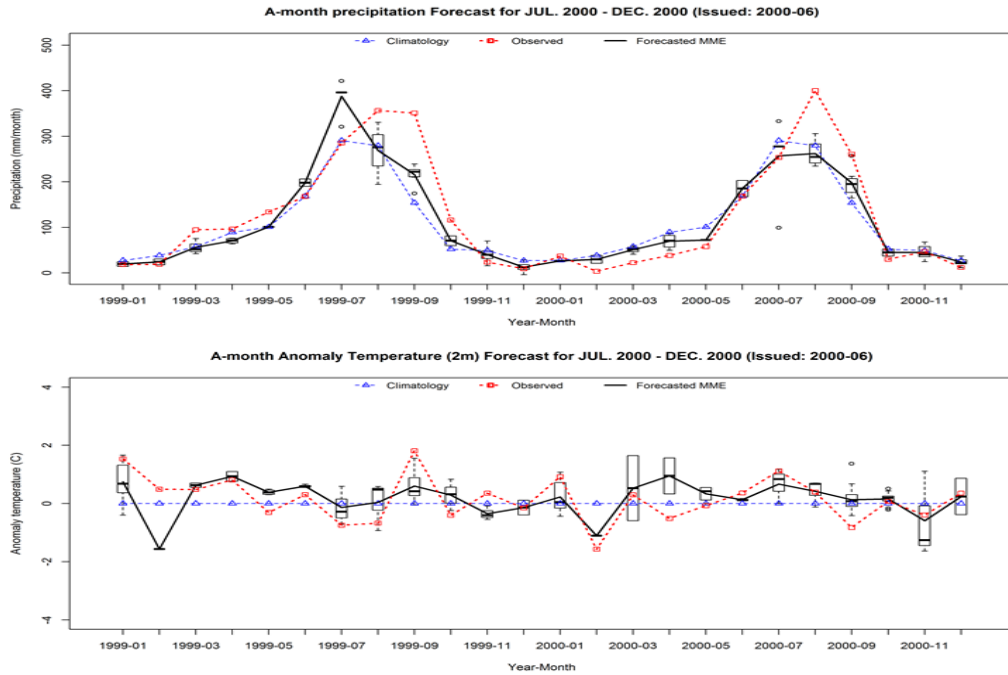


Figure A-28 한반도 계절예측 결과(1999~2000)

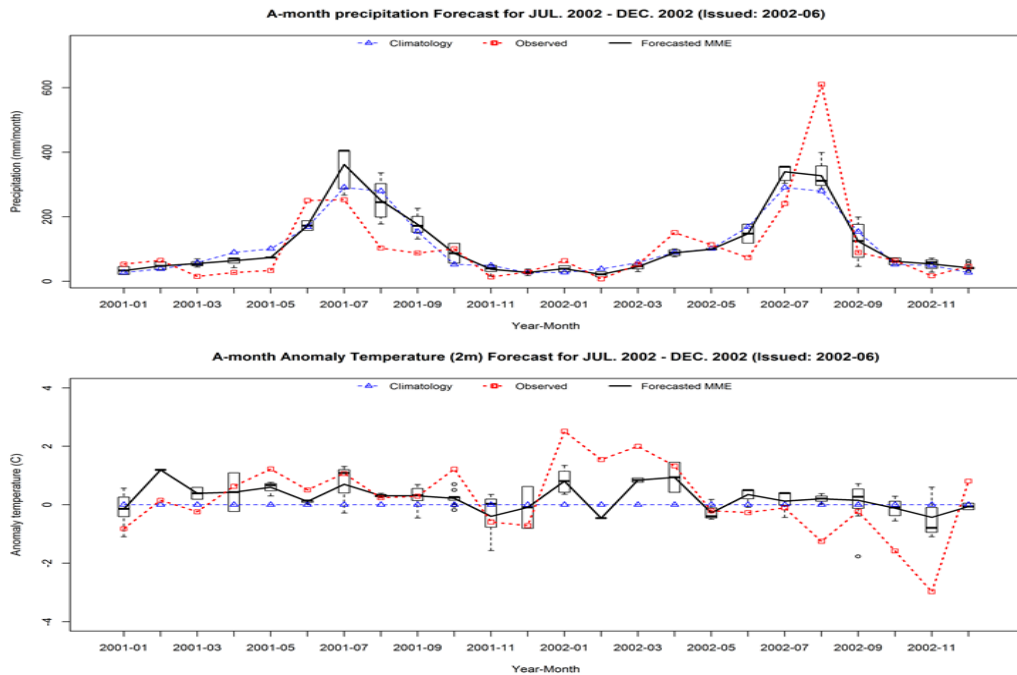


Figure A-29 한반도 계절예측 결과(2001~2002)

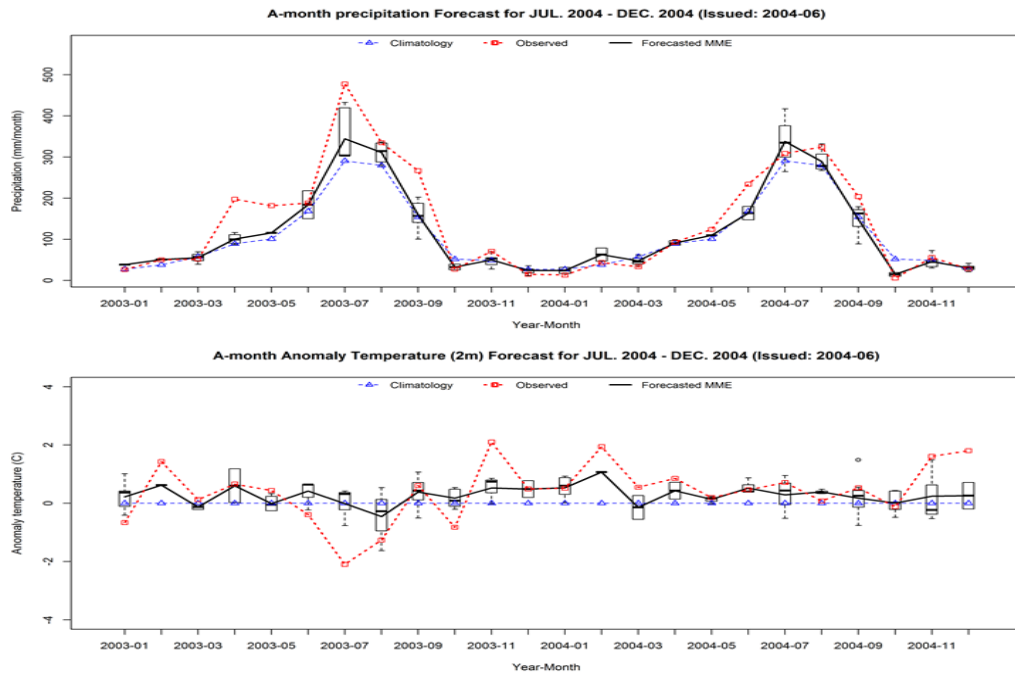


Figure A-30 한반도 계절예측 결과(2003~2004)

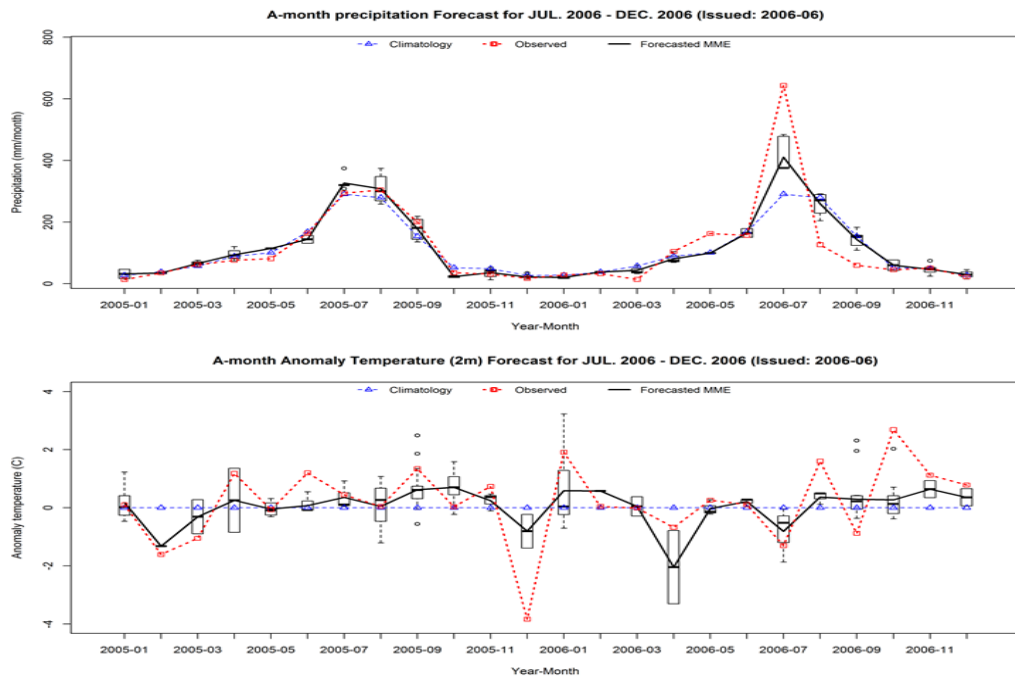


Figure A-31 한반도 계절예측 결과(2005~2006)

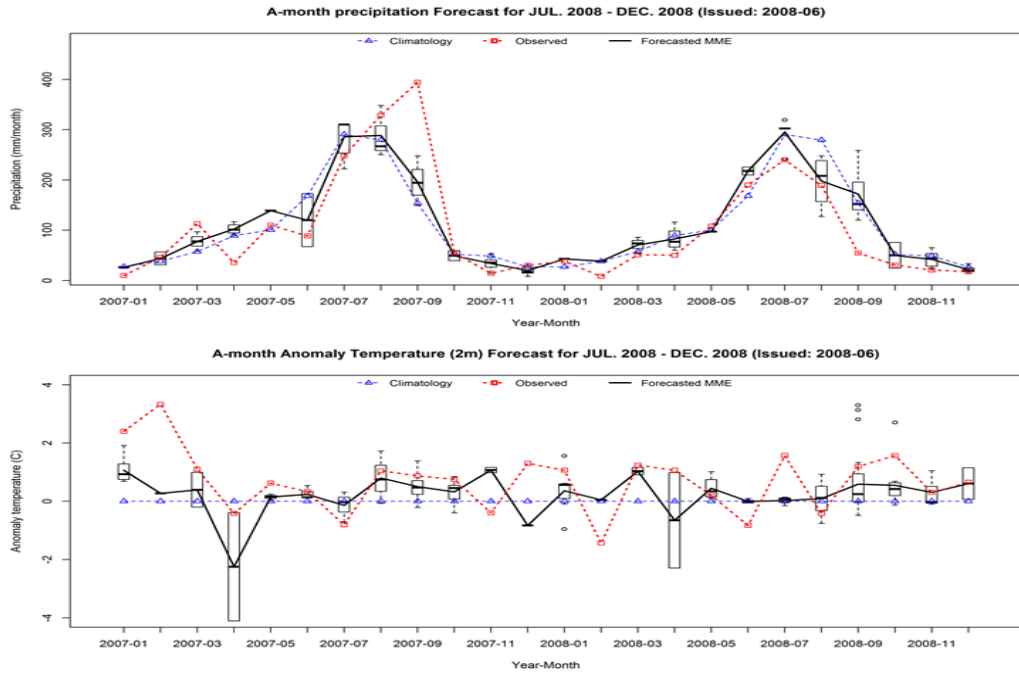


Figure A-32 한반도 계절예측 결과(2007~2008)

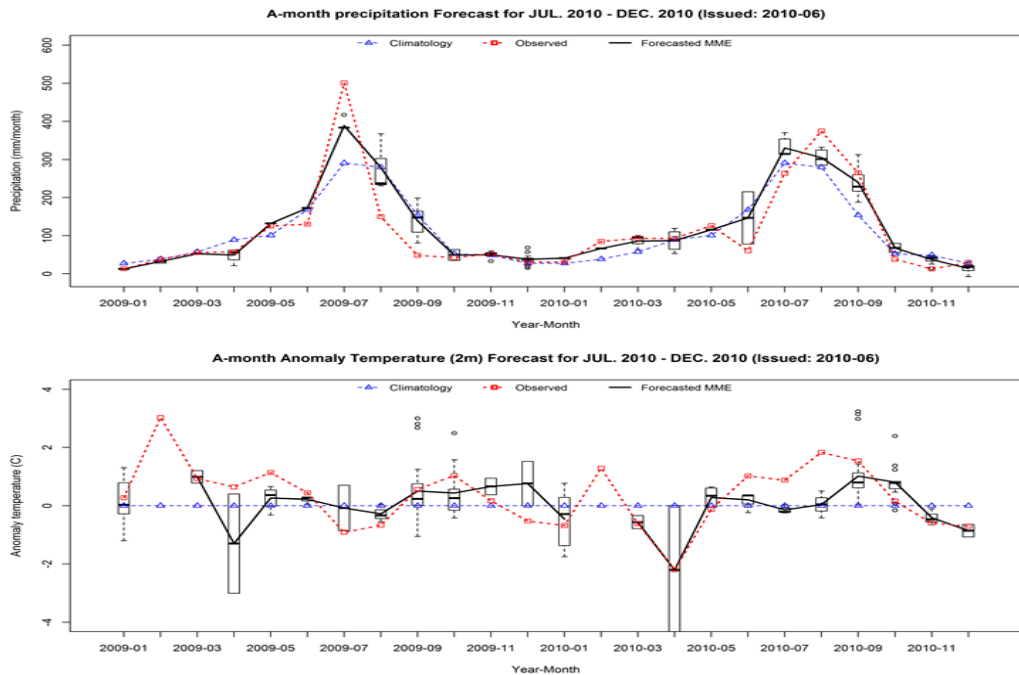


Figure A-33 한반도 계절예측 결과(2009~2010)

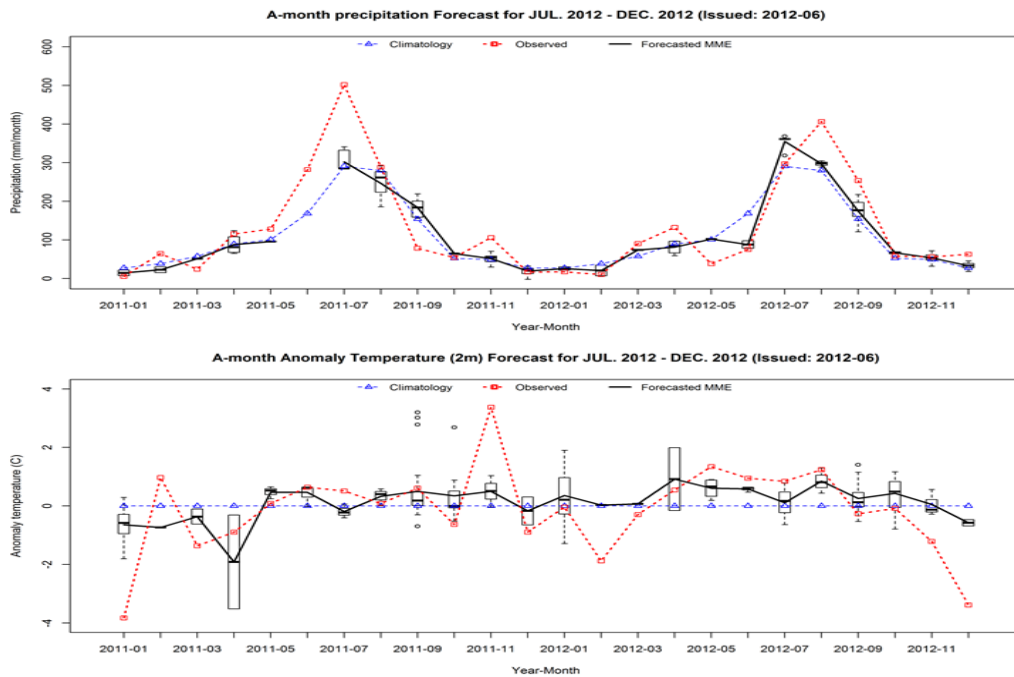


Figure A-34 한반도 계절예측 결과(2011~2012)

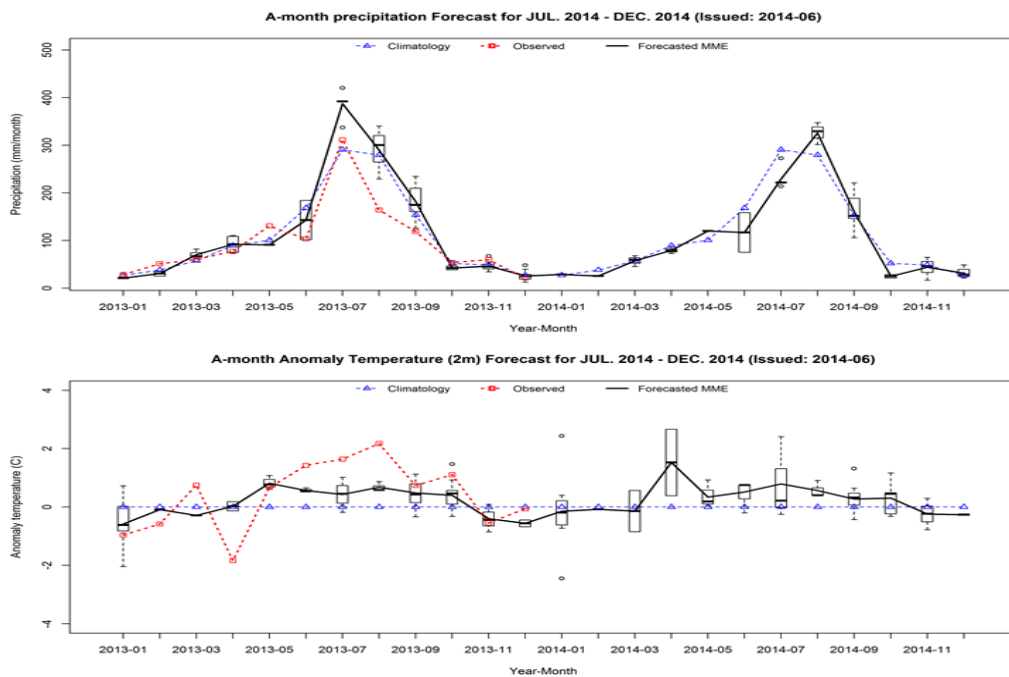


Figure A-35 한반도 계절예측 결과(2013~2014)

부록 3. 2015년 8-9월 조류 발생 예측 결과 보고

[영산강수계]

○ (8월) 전년 대비 적은 강수량의 영향으로 중순까지 다소 증가(예상

범위 : 14~35 mg/m³), 하순에는 전년과 유사할 것으로 전망

○ (9월) 대체로 전년과 유사

<참고4> '15.8~9월 영산강수계 강우량(광주 지점) 및 조류 예측 모의 결과

<표 1> 4대강 16개 모 구간 '15.8~9월' 조류 농도 변화 예측

클로로필- <i>a</i> 농도 (mg/m ³)	'14년도 관측값 범위	'14년도 모의값 범위	'15년도 예측			
			예측값 범위	평균 강간(배) ³⁾	최대 강간(배) ³⁾	최대 강간 시점 ⁴⁾
강원도	8월 10~44 9월 08~30	39~91 30~87	22~146 19~116	1.4 1.2	3.6 2.1	중/하
충청도	8월 13~27 9월 04~17	46~79 36~89	24~158 21~121	1.4 1.2	3.4 2.2	중/하
이포도	8월 11~25 9월 14~51	51~100 22~168	22~168 27~125	1.1 1.2	3.2 1.9	중/하
상무도	8월 36~125 9월 56~261	14~117 10~144	11~209 01~184	1.1 1.0	6.7 15.8	중/하
낙산도	8월 43~117 9월 59~233	12~128 13~133	13~133 03~175	1.0 0.9	7.5 15.0	중/하
구미도	8월 45~71 9월 52~170	12~86 13~145	16~118 05~160	1.5 0.9	9.3 9.1	중/하
칠곡도	8월 39~76 9월 34~107	15~90 41~163	31~105 03~182	1.4 0.8	6.6 2.2	중/하
강릉고령도	8월 44~73 9월 49~125	19~92 38~171	17~111 04~199	1.3 0.9	4.6 3.2	중/하
달성도	8월 52~123 9월 42~145	30~94 46~148	27~145 14~149	1.3 0.9	3.3 2.4	중/하
합천함안도	8월 49~161 9월 59~186	30~101 52~155	36~121 14~140	1.3 0.8	3.5 2.3	중/하
창녕함안도	8월 56~163 9월 140~499	7.7~22.2 24.5~57.3	26~238 8.7~60.0	1.6 0.7	5.3 1.4	중/하
세종도	8월 7.6~27.3 9월 7.9~47.2	8.0~46.8 43.8~107.7	7.0~85.5 7.0~85.5	1.4 0.5	3.1 1.4	중/하
공주도	8월 12.2~106.6 9월 19.8~96.3	11.2~75.5 38.2~79.0	10.2~75.7 7.7~70.3	1.2 0.5	3.3 1.3	중/하
백제도	8월 19.0~52.5 9월 30.5~70.5	120~56.8 0.8~19.1	12.6~56.8 0.9~26.5	1.1 2.5	2.5 32.5	중/하
승은도	8월 1.8~41.4 9월 12.0~44.3	4.2~27.2 0.6~34.5	0.6~34.5 1.3~19.2	1.2 3.3	7.1 20.7	중/하
죽산도	8월 1.2~5.5 9월 5.9~17.1	0.9~12.6 5.7~17.9	1.0~25.5 1.0~25.5	1.8 1.8	3.3 3.3	중/하

¹⁾예측 기간 : '15.8.11~9.30

²⁾'14년 모의값 대비 장기기후예측자료 기반 '15년 예측간의 평균 강간률

³⁾'14년 모의값 대비 장기기후예측자료 기반 '15년 예측간의 밀별 최대강간률

⁴⁾밀별 최대강간률이 발생한 시점(초 : 초순, 중 : 중순, 하 : 하순)

‘15년 8-9월 조류 발생 예측 결과 보고

- 양상별 기상예측 자료 기반 4대강 보 구간 조류 발생 전망 -

(2015. 8. 11. 국립환경과학원 물환경평가연구과)

1. 예측 개요 및 모델링 조건

○ (예측 기간) '15.8.11.~ 9.30

○ (예측 조건)

- (기상) APCC 기후센터에서 제공하는 장기 기후예측 앙상블 자료 중, 예측 강우량의 변동 폭을 기준으로 최종 3개 앙상블 선택, 각각 기상 입력 자료로 활용<참고5>

※ 최대 강우 : HMC, 최소 강우 : POAMA, 평균 강우 : MSC

- (샘-보 운영) 각 수계별 3분기 샘-보 연계운영계획 반영<참고6>

※ 모는 관리 수위 유지 가정

- (오염원) 주요 오염원의 방류량과 수질은 전년 동일 가정

○ (예측 방법) 과학원 수질예보시스템(HSPF-EFDC 연계모델링 시스템) 활용

○ (결과 제시) 대상 기간('15.8~9월)동안 세 종류의 기후예측 앙상블 자료를 이용하여 예측된 조류 농도의 변화폭을 '14년 동일 모의값'과 비교

* <참고1~4> 조류 예측 모의 결과 그래프의 연두색 구간 : 최소~최대값

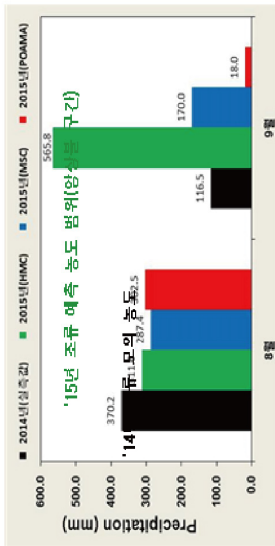
** <참고1~4> 조류 예측 모의 결과 그래프의 점선

2. 예측 결과

- (8월) 한강, 낙동강, 영산강수계는 중·하순에 구간별 조류가 전년보다 높을 것으로 예측되나, 금강수계는 다소 감소할 것으로 전망됨
- ※ 한강(북한강 포함), 낙동강 중·하류, 영산강수계 일부는 클로로필-*a* 농도 증가와 함께 남조류 개체수의 증가가 예상된다
- (9월) 대체로 전년과 유사한 수준, 앙상블 기상예측자료 간 강우량의 차이가 커서 조류 농도의 변동 폭이 크겠음

참고 4 '15.8~9월 영산강수계 강우량 및 조류 예측 모의 결과

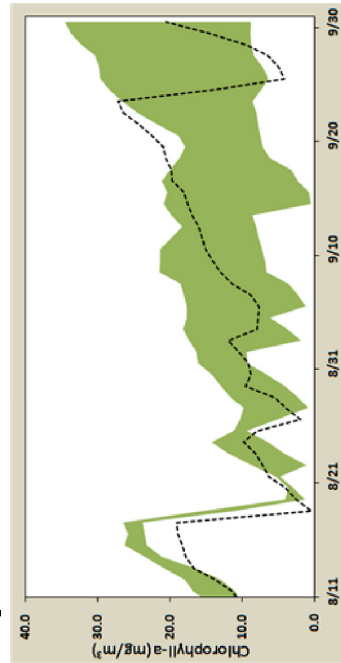
○ 예측 강우량(관주 기준)



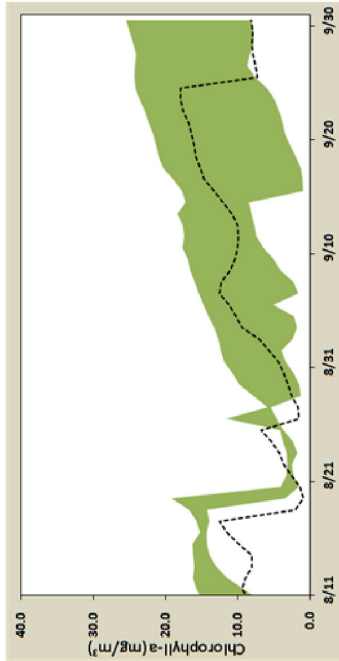
관주	2014년 관측	2015년 예측	
		HMC	POAMA
8월	370.2	311.6(84.2%)	302.5(81.7%)
9월	116.5	565.8(483.7%)	180.0(15.5%)
합계	486.7	877.4(180.3%)	320.5(65.9%)

() : '14년 동 기간 대비 강우량 비율

○ 승촌보



○ 죽산보



참고 6 '15년도 3분기 수계별 주요 담방류량의 설정

□ 담방류 조건의 설정

○ 각 수계별 담·보 연계운영계획 및 과거 담방류 특성을 분석하여 방류 조건 설정

- (한강) '15년도 3분기 한강수계 주요 담 월별 계획방류량* 적용

	'15.8-9월	'14.8월
총주담	24~48 m³/s	70.4 m³/s
청평담	24~28 m³/s	157.6 m³/s
		89.6 m³/s

* '15년 3분기 한강수계 담·보 등의 연계운영계획의 실시 결과('15.7.7, 한강홍수통제소)

연구보고서 2015-20

장기 수질예측 자료의 갈수기 수질관리 의사결정 활용 방안

Use of long-term water quality forecast in decision-making for
dry-season water quality management

조재필



APEC 기후센터

48058 부산광역시 해운대구 센텀7로12

Tel: 051-745-3900 Fax: 051-745-3949

www.apcc21.org



ISBN 979-11-5698-117-6