

유역규모 비점오염 관리 의사결정 지원을 위한 APCC 계절예측 정보 활용 방안 연구

Study on Watershed-scale Non-point Source Pollution Management Decision
Support using APCC Seasonal Forecast

조재필

유역규모 비점오염 관리 의사결정 지원을 위한 APCC 계절예측 정보 활용 방안 연구

Study on Watershed-scale Non-point Source Pollution Management Decision
Support using APCC Seasonal Forecast

조재필

발간사

최근 우리 사회는 ‘수질오염총량제’의 도입으로 목표수질의 한도 내에서 지역의 오염물질 배출총량을 할당하고 수질보전과 지역개발을 함께 고려하여 지속가능성을 확보하고자 노력하고 있습니다. 하지만 선진적인 제도의 도입에도 불구하고 오염물질의 배출총량이 원단위 방법을 이용하여 계산되고 있어 과학적 근거가 부족한 상황입니다. 따라서 오염물질의 배출부하량을 지역의 공간적인 특성을 고려하여 과학적 근거를 바탕으로 정확히 산정하는 것은 수질오염총량제의 실행에 있어서 중요하다 할 것입니다.

특히 하수종말처리장 등의 환경기초시설을 통해 도시 및 마을 지역으로부터 배출되는 오염물질의 처리가 양적으로 증가해 왔습니다. 이로 인하여 강우 시 발생하는 비오염원이 전체 오염원 중에 차지하는 비중이 높아지고 있는 실정입니다. 비점오염은 강우 시 농경지, 임야, 도로 등의 넓은 면적으로부터 유출수와 함께 배출되는 오염물질로서 하수종말처리장을 통해 처리되는 점원오염과 비교하여 농도는 낮으나 양적으로 크고 일별 계절별 변동이 큰 특성을 갖고 있습니다. 이와 같은 이유로 점원오염과 같이 차집을 통한 처리가 어려워 유역관리 차원의 선제적인 접근이 필요합니다.

이와 같이 기후에 민감한 비점오염의 오염물질 배출량을 선제적 관리하기 위해서는 유역관리에 있어서 장기예측정보를 활용함으로써 유연한 의사결정체계를 구축하는 것이 필요합니다. 이러한 시점에서 지역의 공간적인 특성을 고려한 오염물질 배출량의 정량화 방법을 제시하고, APCC의 장기예측정보를

활용하여 기후에 민감한 비점오염물질의 배출량을 예측하고자 수행된 본 연구는 향후 국내 유역관리 측면에서 선제적으로 오염물질의 배출량을 저감하는데 도움이 되리라 기대됩니다.

연구결과가 나오기까지 본 연구를 맡아 수행한 조재필 박사의 노고에 감사드립니다. 아울러 연구수행에 필요한 자료를 제공해 준 하이드로코어 조홍래 박사에게 감사의 말씀을 전합니다. 또한, 연구결과의 개선을 위해 자문과 조언을 아끼지 않은 서울대학교 최지용 교수, 부산대학교 신현석 교수에게도 진심으로 감사를 표합니다.

2017년 1월
APEC 기후센터
원장 정 홍 상

ABSTRACT

The current watershed-scale quantification method for non-point source (NPS) pollution does not reflect the annual or seasonal variation of precipitation as well as spatial characteristics of soil, land use, and topography. It is necessary to develop a method for quantifying spatially and temporally changing NPS pollution loads in order to utilize the seasonal forecast data that predicts the change of precipitation up to 6 months in advance. In addition, it is possible to consider the application of nonstructural management measures within the time scale of several months as a part of proactive countermeasures against NPS pollution. Especially in agricultural lands including paddy fields, it is possible to apply various management methods such as adjustment of sowing and irrigation time and adjustment of fertilizer and irrigation amount as a part of best management practices (BMPs). Therefore, the objective of this study is to develop a method that quantifies and predicts the reduction of NPS loads at the watershed scale according to applied various farming methods by considering temporal variations based on seasonal prediction information as well as spatial variability of soil, land use, and topography.

The study consists of three detailed sub-items. First, the Observation-based Moving Window Regression (MWR-Obs) method using reanalysis data was added to the existing system. Second, the applicability of the APEX-Paddy model, which is known to be able to consider the characteristics of paddy fields in Korea, was evaluated. Finally, spatial and temporal variations of NPS pollutants was considered in a watershed with multiple land use characteristics.

Analyzing the monitoring data from the previous study on plot-scale paddy field

showed that precipitation amount during the growing season acted as an important factor for the non-point source (NPS) pollutant load. The APEX-Paddy model applied to quantify the NPS pollutant loading according to various farming practices in the plot-scale paddy field showed similar tendency of annual variations in total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) loads but quantitatively underestimated the loads. NPS load for TN and TP at the Jeonju-A TMDL (Total Maximum Daily Load) water quality station was evaluated for different land covers including paddy areas. TN and TP loads by overall NPS pollutants corresponded to 43.5% and 42.9% of total pollutant loads, respectively, showing slightly smaller loads than that of point source pollutants. In addition, the proportion occupied by NPS pollutants during wet years tended to be higher compared to dry or normal years. Considering different land covers, TN and TP loads contributed by paddy area alone corresponded to 6.9% and 8.8% of total pollutant loads, respectively. The forecasted TN and TP loads at the Jeonju-A TMDL station using 6-month (May to October) seasonal forecast information for 2011 and 2012 showed underestimations of 26.5% and 13.2%, respectively, compared to observed values. As a result, we presented the possibility of the utilization of seasonal forecast information in the decision making process for quantifying NPS pollutant loads and selecting appropriate farming practices as BMPs for reducing the NPS loads from agricultural areas.

Keywords: *Seasonal Forecast, Long-term Prediction, Water Quality, Downscaling, Climate Index, Multi-Model Ensemble (MME), Teleconnection, Non-point Source Pollution, Best Management Practices*

목 차

1. 서론	1
2. 연구 방법	8
2.1 대상 유역 및 모니터링 사이트	10
2.1.1 새만금 논 비점오염 모니터링 사이트	10
2.1.2 만경강 유역	14
2.2 기후예측 예측성 정보	19
2.2.1 실시간 계절예측 시스템	19
2.2.2 예측성 평가	28
2.3 농업비점오염 부하량 정량화 모델링	30
2.3.1 APEX-Paddy 모형	30
2.3.2 유역규모 비점오염 부하량 정량화	32
3. 연구결과	37
3.1 기후 변동에 따른 비점오염 부하량 변동 특성 분석	37
3.2 기후예측 예측성 평가	38
3.3 필지규모 농업비점오염 부하량 정량화	49
3.4 유역규모 비점오염 부하량 정량화	53
3.5 유역규모 비점오염 부하량 예측 및 최적관리방안 제시	64

4. 결론-----	67
------------	----

Ⅱ REFERENCE-----	69
------------------	----

Ⅱ 부록 1. 계절예측 상세화 프로그램 사용자 매뉴얼-----	71
------------------------------------	----

1. 서론

하수종말처리장 등의 환경기초시설을 통한 점원오염원의 처리가 양적으로 증가함에 따라서 강우 시 발생하는 비오염원이 전체 오염원 중에 차지하는 비중이 높아지고 있다. 비점오염은 강우 시 농경지, 임야, 도로 등의 넓은 면적으로부터 유출수와 함께 배출되는 오염물질로서 점원오염과 비교하여 농도는 낮으나 양적으로 크고 일별 계절별 변동이 크기 때문에 차집을 통한 처리가 어렵다. 또한 비점오염은 토지이용, 토양, 지형인자 등 공간적인 특성에 따라서 유출특성이 변하는 특성을 갖고 있다. 특히 농업비점오염은 동일한 공간적 조건에서도 경운 (tillage), 시비 (fertilization), 물관리 (water management) 등과 같이 농경지에 적용되는 영농방법의 시기 및 강도에 따라서 시간적으로 상이한 배출 특성을 보인다. 예를 들어 대규모 밭 중심의 영농 특성을 갖고 있는 미국의 경우 농업지역으로부터의 비점오염을 저감하기 위해 무경운(no till practice)을 포함한 다양한 경운 방법이 수질 관리를 위한 최적관리기법 (Best Management Practices, BMPs)로 활용되고 있다. 예를 들어 시·공간적으로 변화하는 비점오염 부하량 관점에서 경운과 관련되어 중요하게 고려되어야 할 인자는 강우 사상의 강도 및 시간적인 발생 시기에 따라서 역동적으로 변화하는 토양의 물리적 특성 (dynamic soil properties)이 있다 (Flanagan and Nearing, 1995; Cho and Mostaghimi, 2009). 일반적으로 경운 직후에 토양의 공극 및 수리학적 수리전도도는 급격하게 증가하였다가 시간이 지남에 따라서 강우에 의해 토양이 다져지면서 줄어드는 경향을 보이며, 이와 같은 토양의 특성은 농경지로부터 발생하는 유출량 및 이에 따른 토양 침식량에 영향을 미치게 된다.

이처럼 농업비점오염의 높은 시·공간적인 변동성을 이해하기 위해서 미국과 같은 농업중심의 선진국에서는 지역별 모니터링을 통해 오염물질의 배출 매커니즘을 이해하여 지역의 기후 및 영농 특성에 적합한 BMP를 개발하기 위해 노력해 왔다. 초기에는 토양, 지형, 기후 특성이 동질적인 필지 규모에서 다양한 영농방법의 적용에 따른 비점오염 부하량의 유출특성 및 저감 효율의 정량화를 목적으로 많은 모니터링 기반 연구가 수행되었다. 하지만 농업비점오염이 수질을 포함한 유역전체의 환경에 미치는 영향이 중요해짐에 따라서 오염원으로부터 하천까지의 유출 경로 상에서 발생하는 오염물질의 이동 및 변화와 관련된 매커니즘을 이해하기 위한 유역규모의 대규모

모니터링 프로젝트들이 수행되었다 (Osmond et al., 2012). 이와 같은 필지 및 유역 규모에서의 비점오염 관련 연구를 통해 비점오염 저감에 효과가 있다고 알려진 BMP를 중심으로 농민들이 영농에 자발적으로 적용할 수 있도록 인센티브를 지원해 왔다. 최근에는 오랜 기간 동안 막대한 예산 사용을 통해 적용되어진 최적관리기법들이 유역 전체의 수질을 포함한 환경에 미치는 영향을 정량화하기 위해서 Conservation Effects Assessment Project (CEAP)¹⁾가 수행되었다. 장기간 유역규모 모니터링 연구가 수행되어온 Figure 1의 대표 유역들을 중심으로 농업비점오염 최적관리기법들의 효과를 정량화하는 연구²⁾가 CEAP의 일부로서 수행되어 왔다 (Cho et al., 2010).

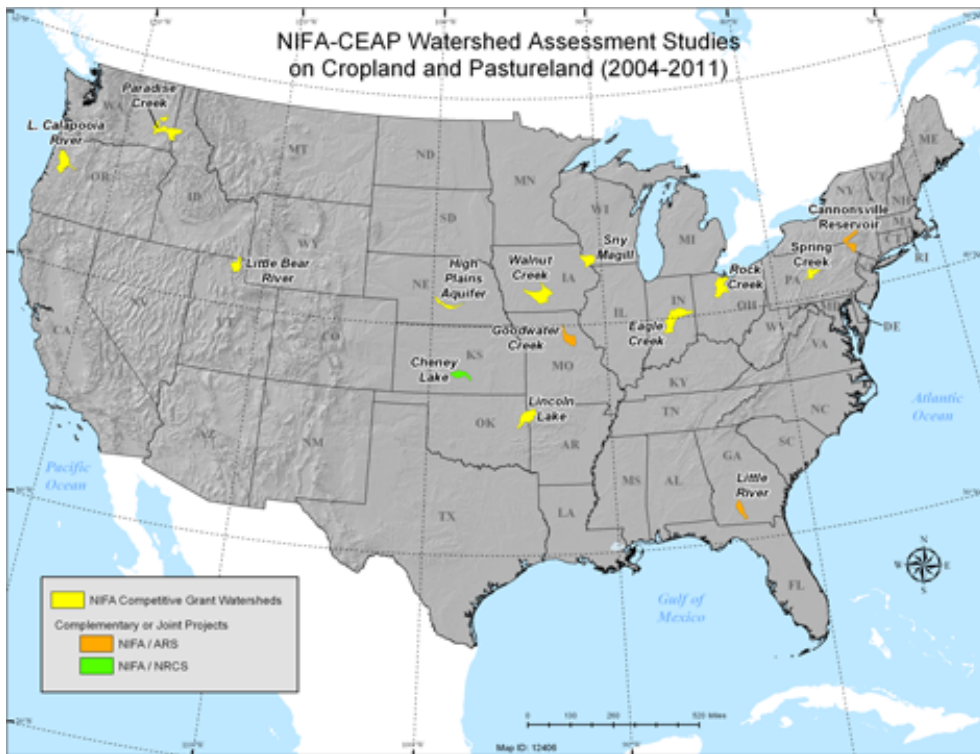


Figure 1 유역규모 정량화를 위한 CEAP의 대표 유역

1) https://www.nass.usda.gov/Surveys/Conservation_Effects_Assessment_Project/

2) <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/home/?cid=stelprdb1047821>

모니터링 방법은 많은 비용과 시간이 요구되며 비점오염의 높은 시·공간적인 변동 특성으로 인하여 모니터링 결과를 다른 지역으로 확장하여 적용하기에는 많은 제약이 따른다. 이와 같은 이유로 Environmental Policy Integrated Climate (EPIC) (Williams, et al. 1984), Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems (CREAMS) (Knisel, 1980), Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems (GLEAMS) (Leonard et al., 1987), Water Erosion Prediction Project (WEPP) (Flanagan and Nearing, 1995) 등과 같은 필지 규모 모형들 및 AGricultural Non-Point Source Pollution Model (AGNPS) (Young et al., 1987), Areal Non point Source Watershed Environment Response Simulation (ANSWERS) (Beasley et al., 1980), Hydrological Simulation Program—Fortran (HSPF) (Bicknell et al., 1993), Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold et al., 1998) 등과 같은 유역규모 모형들이 개발되어 사용되고 있다. 필지 규모의 모형들은 상세한 영농방법들을 고려할 수 있는 장점이 있는 반면에 유역규모의 전체적인 영향을 평가하기에는 필지간의 연계성을 고려할 수 없는 한계를 갖고 있다. 반대로 유역 모형들은 필지규모의 모형들과 비교하여 다양한 영농방법들을 고려하는데 있어서 많은 한계를 갖고 있다. 오염원으로부터 수체에 유입되는 오염부하량을 모의하기 위한 유역모형들은 여러 관점에서 분류가 가능하다. 시간적 관점에서는 강우사상모형(event model) 및 장기유출모형(continuous model)으로, 공간적 관점에서는 분포형모형(distributed model) 및 총괄형모형(lumped model)으로, 오염원의 이동, 소멸, 변환 등을 고려하는 매커니즘을 재현하는 관점에서는 과정기반 모형(process-based model)과 경험식 기반의 모형(empirical model)으로 구분될 수 있다. 비점오염의 특성을 고려할 때 비점오염 정량화를 위하여 가장 이상적인 유역모형으로는 공간적으로 분포형 모형이면서 오염원의 이동 및 소멸 매커니즘을 과정기반으로 고려하되 시간적으로는 장기유출을 고려할 수 있는 모형이다 (Cho and Mostaghimi, 2009). 분포형 모형은 AGNPS 및 ANSWERS 모형과 같이 분포형 모형으로 개발되었다가 각각 AnnAGNPS (Bingner and Theurer, 2001) 및 ANSWERS-2000 (Bouraoui et al., 2002) 과 같이 장기 유출모형으로 개선되었다. 하지만 두 모형 모두 다양한 영농기법 및 그에 따른 물리적 토양 특성의 역학적 변화를 고려하지 못하는 단점을 갖고 있다. 이에 다양한 영농기법에 따른 역학적 토양 특성의 변화 및 지표와 지하수의 연계를 고려할 수 있는 Dynamic agricultural non-point source assessment tool (DANSAT) (Cho and

Mostaghimi, 2009)과 같은 비점오염 정량화 모형이 개발되었다. 하지만 미국의 농무성에서 개발한 SWAT과 환경청에서 개발한 HSPF모형 등과 같은 준분포형 모형이 국내외의 다양한 환경에서의 적용사례를 기반으로 많은 프로젝트에 활용되고 있는 실정이다.

비점오염 정량화 관련 국내의 상황은 미국의 경우와 비교하여 여러 고려되어야 할 문제를 내포하고 있다. 우선 모델링 접근 방법의 기반이 되는 모니터링의 경우 관측 기간이 짧고 필지 규모에서의 모니터링 중심의 연구로서 「새만금유역 농업비점오염 저감 기법 개발 연구」(농어촌공사, 2015)와 같은 대규모 프로젝트가 수행되었지만 유역규모 정량화에 필요한 정보를 제공하기에는 한계를 내포하고 있다. 유역규모에서 비점오염 부하량을 정량화하기 위한 방법으로는 토지이용별 발생부하원단위를 이용하는 간단한 방법으로부터 앞서 언급한 유역모델링을 이용하는 상세한 방법까지 다양한 방법이 사용될 수 있다. 하지만 국내에서는 현재 토지계 지목별 단위시간 및 단위 면적에 대해 정해 놓은 발생부하원단위를 적용하는 원단위법을 사용하고 있는 실정이다. 원단위법은 유역현황 자료만을 이용하여 배출부하량을 쉽게 계산할 수 있다는 장점을 가지고 있지만 시·공간적으로 큰 변동성을 보이는 비점오염의 특성을 반영하기 어렵다. 즉 동일한 토지이용 특성을 갖고 있더라도 상이한 토양, 경사, 하천까지의 거리 등 공간적 특성을 고려하여 부하량 산정이 불가능하다. 또한 시간적으로는 강수량의 많고 적음에 상관없이 배출부하량이 동일하게 결정되어 부하량의 시간적 변동성 또한 고려할 수 없다. 반면 유역모델링을 이용하는 방법은 유역 내에서 강우에 의한 유출시 지표유출, 중간유출, 기저유출 등 다양한 유출경로에 따른 오염 부하량의 상세한 모의가 가능하여 유역 내에서 발생하는 점원 및 비점오염을 모두 포함하여 유역 출구점에서 관측된 오염부하량을 이용하여 모형을 검보정 함으로써 유역 내에서 발생한 다양한 오염원들의 유역 출구까지의 이동을 동시에 고려할 수 있는 장점이 있다. 하지만 국내의 모델링 기반 접근방법의 경우 토지이용 특성이 외국의 상황과는 다르지만 모형의 개발 및 유지·보수를 위해서는 많은 시간과 비용이 필요한 점을 고려할 때 SWAT 및 HSPF와 같이 미국에서 개발된 모형을 한국 상황에 적용하고 있는 실정이다. 국내 상황은 미국의 대규모 발 중심의 영농방법과는 다르게 소규모의 논 중심의 영농방법이 고려되어야 한다. 이에 SWAT-K (한국건설기술연구원, 2007) 및 HSPF-Paddy (Jeon et al., 2007)와 같이 논 중심의 국내 실정에 맞게 모형들이 수정되어 적용된 사례가 있으나 다양한 영농방법들을 고려하기에는 한계를 갖고 있다.

또한 유역모델링을 통한 방법은 전국의 모든 수질오염총량 단위유역에 대해 비점오염 부하량을 정량화하는 경우 많은 시간과 인력이 요구되어 국가단위의 정책결정을 위해 사용하기에는 한계를 내포하고 있다.

국내 비점오염원 중에서 농업지역의 경우는 물관리, 시비관리, 지표면관리 등과 같은 영농방법의 변경을 통한 비구조적인 방법들이 농업지역으로부터 발생하는 오염원을 저감하기 위한 최적관리기법으로 제시되고 있다. 따라서 국내의 상황은 유역규모의 농업비점오염 정량화에 앞서 그간 수행되어 온 필지규모에서의 축적된 모니터링 자료를 기반으로 필지규모 모델링을 통한 농업비점오염 정량화 연구가 진행되고 있다. 필지 규모의 모형에서도 유역규모의 경우와 마찬가지로 해외 선진국에서 밭에 적합하게 개발된 모형들을 국내의 논 특성에게 맞게 CREAMS 및 GLEAMS 모형들을 개선하여 적용하고 있는 실정이다 (진영민 등, 2002, Kim et al., 2007). 필지규모 모형들의 필지들 사이의 공간적인 연계성을 고려 못하는 단점을 개선하기 위해서 소규모 유역규모에서 적용 가능도록 Agricultural Policy/Environmental eXtender (APEX) (Williams et al., 2000) 모형이 개발되었다. APEX 모형 또한 국내 논 상황에 적용하기 위한 시도가 있었으나 모형의 구조적인 한계를 인식하여 농촌진흥청은 미국 텍사스 A&M 농업연구소와 함께 국내 논 수문·수질 기작을 모의할 수 있는 모듈을 추가하여 APEX-Paddy³⁾ 모형을 개발하여 공개하였다.

하천의 수질에 영향을 미치는 점오염과 비점오염 중 비점오염은 기후 특성의 변화 특히 강수 특성과 밀접한 관계를 가지고 있다 (Lee et al., 2011). 기후특성의 변화로 인하여 유사를 포함한 비점오염 부하량의 변화는 이로 인한 수질오염의 심화 및 수온 증가에 따른 수질 및 생물군집의 변화까지 하천을 포함한 유역관리 측면에서 범부처 차원에서 중요하게 다뤄져야 한다 (Kim et al, 2006; Choi, 2008; 환경부, 2011). 하지만 국내외 모두 영농기간의 강수의 시·공간적인 변동성이 유역 내 농업비점오염의 배출부하량의 시·공간적인 변동에 영향을 미친다는 모니터링 기반의 연구 결과에도 불구하고 수질문제의 해결을 위한 최적관리기법의 선정 및 적용에 있어서는 기후 정보가 고려되지 못하고 있는 실정이다. 즉 토사 및 영양염류의 하천으로의 유입 등 농업비점오염원을 줄이기 위해서는 강우 특성을 반영하여 강우유출수의 양을 줄일 수 있는

3)

http://www.naas.go.kr/02_research/Research_Read.do?menu_code=2&mcode=35&tg=9&ntceSnn=102
49

영농방법의 개선을 통한 최적관리기법의 개발 및 실제 농경지에서의 적용이 필요하다. APEC 기후센터 (APEC Climate Center, APCC)에서는 2005년 이후 APCC에서 개발한 다중모형앙상블 기법을 통해 생산된 전지구규모의 3개월 선행기간에 대한 강수 및 기온 예측정보를 제공하고 있으며 최근에는 선행예측기간을 3개월에서 6개월로 확장하여 제공하고 있다. 또한 기후예측정보의 수질을 포함한 수자원분야 활용을 위해서 예측성을 높이면서 250 km 공간해상도를 갖는 월단위 예측정보를 유역 규모의 일단위 모델링을 통한 예측에 활용 가능하도록 시·공간 상세화 기법을 개발하여 예측성 기반의 적용성을 평가하고 있다 (조재필, 2014; 조재필, 2015). 「계절예측 정보를 활용한 통합 수문·수질 장기 예측 기술 개발」(조재필, 2014) 연구에서는 다양한 예측정보 생산을 위한 상세화 기반 기술의 개발 및 제안된 방법별 장기 기후, 수량, 수질의 예측 가능성을 수평적 연계 관점에서 평가하였다. 하천의 수질 개선을 위해서는 점원오염과 비점오염의 종합적인 관리가 필요한데 「장기 수질예측 자료의 갈수기 수질관리 의사결정 활용 방안」 (조재필, 2015) 연구에서는 APCC 계절예측 자료를 이용하여 갈수기 공공하수처리장 방류수 수질기준의 차등 적용을 통한 점원오염 관리 방안을 제안 하였다.

APCC의 6개월 선행예측 정보는 강수량에 대한 월 또는 계절 변동성 관련 정보를 제공함으로써 강우 유출수를 통하여 오염원이 하천에 들어오기 이전에 비점오염 저감을 위한 관리방안의 선정 등에 유용하게 사용될 수 있다. 따라서 유역의 점원 및 비점오염을 포함한 수질 장기예측에 따른 종합적인 수질관리를 위해서는 계절변동성으로 인한 상류유역으로부터의 유출, 유사, 및 영양물질을 포함한 비점오염 부하량의 변화에 대한 예측이 수행되어야 한다.

따라서 2014년 이후 연구의 최종적인 목적은 장기수질예측 자료를 의사결정에 활용하기 위한 플랫폼 개발을 통하여 현재 예측자료의 정확성 및 불확실성이 고려된 수질관리 방안 및 의사결정을 위해 필요한 사용자 중심의 정보를 제공하는데 있다. 이와 관련하여 2016년도 연구는 비점오염 부하량 정량화를 위하여 기후예측정보의 활용과 관련된 기후-비점오염 사이의 수평적 연계 방법론이 제시되어 있지 않은 실정에서, 토양, 경사, 위치 등 특성 변화를 고려한 비점오염 부하량의 공간적 변동성뿐만 아니라 계절예측 정보를 기반으로 한 시간적 변동성을 고려하여 다양한 영농방법에 의한 유역 규모에서 비점오염 부하량 점감 효과를 정량화하고 예측할 수 있는 기

법의 개발을 목적으로 한다. 세부 항목으로는 1) 2014년도 이후 선행연구를 통해 실시간 예측에 활용할 수 있도록 개발된 예측시스템에 예측성 향상을 위한 모듈을 추가하고 다양한 분야의 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 사용자 편의성을 개선하며, 2) 필지 규모의 논에서 비점오염부하량 저감을 위해 선정된 영농방법을 국내 논 특성 반영하여 고려할 수 있는 것으로 알려진 APEX-Paddy 모형의 적용성을 평가하고, 3) 논을 포함한 다양한 토지피복이 공존하는 유역규모에서 공간적 변동성 및 시간적 변동성을 고려한 비점오염부하량의 정량화 기법을 제시하고, 4) 2번과 3번의 연계를 통해 계절예측 기반의 유역 내 비점오염관리 의사결정 과정에서 예측정보의 최종 사용자들이 활용할 수 있는 정보전달 방법을 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

연구 프레임은 전체적으로 Figure 2와 같이 4개의 세부연구로 구성되어 있다: ① 우선 농업비점오염과 관련하여 BMP로서 제시될 수 있는 다양한 영농방법들의 필지 규모에서의 오염 부하량 저감 효과를 정량화 한다. ② 필지규모의 효과를 유역규모로 확장하여 유역별 오염부하량 리스크 정보를 제공한다. ③ 유역별 리스크 정보를 기반으로 우선순위 및 유역특성을 고려한 최적관리방안을 제안한다. ④ 최종적으로 유역 규모에서의 수질개선 효과 및 관리방안 적용에 따른 비용을 비교하여 경제적 가치 정보를 제공한다. 본 연구에서는 ①과 ② 항목에 대해서 수행하도록 하며 ③ 및 ④는 향후 후속 연구를 통해 수행하도록 한다.

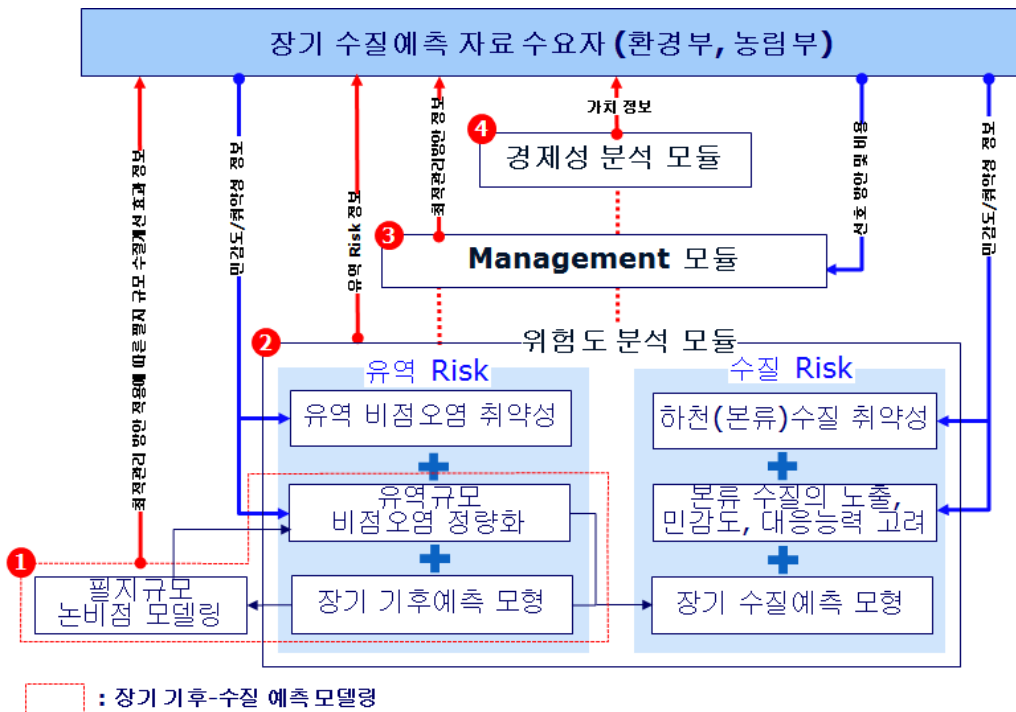


Figure 2 세부 연구 연계도 (전체)

① 및 ② 항목에 대한 연구 흐름도는 Figure 3에서와 같이 1) 규모에 따라서 대상 필지 모니터링 및 유역에 대한 자료 수집 및 분석, 2) 대상 유역에 대한 계절예측 상세화 자료 생산 및 구축, 3) 논에서의 비점오염 정량화 목적의 영농관리 방법을 고려

한 APEX-Paddy 모델링, 4) 유역규모에서 점원오염 유입량 및 주거지, 밭, 산림 등 기타 토지피복에 의한 비점오염 부하량의 공간적 변동성을 고려한 정량화 기법 개발 등이 포함되어 있다. 즉, 본 연구에서는 논에서의 영농방법에 따른 필지 규모에서의 비점오염 부하량을 정량화 할 수 있는 APEX-Paddy 모델링 방법과 토양, 경사, 위치 등 공간적 특성 및 계절예측에 따른 시간적 강우 특성에 따른 비점오염 부하량의 시·공간적인 변동성을 고려할 수 있는 유역규모 정량화 방법과의 연계성을 반영하고자 하였다. 최종적으로 논에서의 영농기법의 변경에 따른 농경지로부터의 부하량을 유역 규모에서의 전체 비점오염 부하량 산정에 반영하고자 하였다.

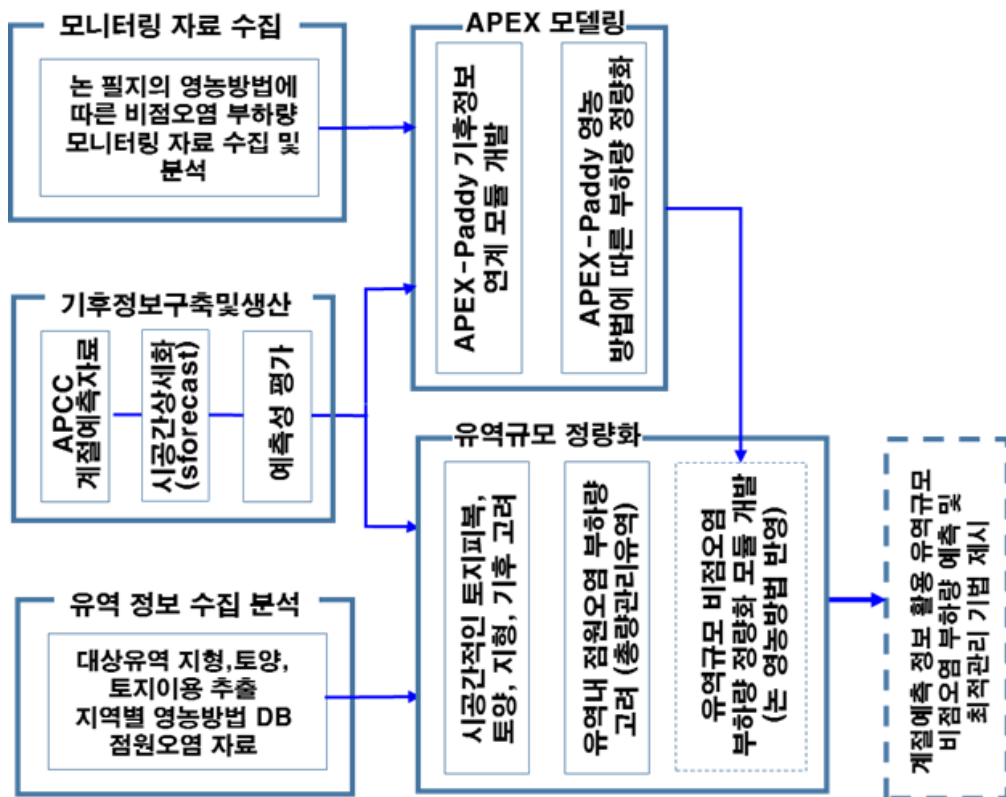


Figure 3 연구 세부 항목 (2016년)

2.1 대상 유역 및 모니터링 사이트

2.1.1 새만금 논 비점오염 모니터링 사이트

필지구도 비점오염 모델링 검보정을 위해서는 모니터링 자료가 중요한데 본 연구에서는 농업비점오염 모니터링 자료가 비교적 많이 수집되었고 기존에 관련 연구가 수행되어 온 새만금 유역을 선정하였다. 농어촌연구원에서는 논에서의 오염부하 배출기작을 규명하고 비점오염 배출 부하를 저감할 수 있는 물관리 및 시비관리 등과 같은 영농기법의 개선을 통한 최적관리기법을 개발하고 매뉴얼을 작성하여, 향후 관리정책 및 제도개선을 위한 기초자료로 활용하고자 2010년부터 2016년까지「새만금 유역 농업비점오염 저감기법 개발」연구를 수행중이다⁴⁾. 본 연구에서는 새만금 유역 내 필지 논을 대상으로 수행 된 비점오염 모니터링 결과를 사용하였다.

시험 포장은 전북 익산시 춘포면 용연리 일대에 위치한 8개 필지 중에서 서울대학교로부터 모니터링 자료를 제공 받은 SPD#1 ~ SPD#6의 6개 필지의 모니터링 결과를 사용하였다 (Figure 4). 각각의 필지는 가로 33 m에 세로 110 m 규모로서 관개용수로에서 논 필지로 유입되는 곳에는 유량계가 설치되었고 배수구에는 웨어에 초음파 및 부자식 수위계가 설치되어 10분 단위로 관개량 및 배수량이 측정되었다. SPD#3 및 #4에는 그림과 같이 침투량계가 각각 설치되어 있다. SPD#1 및 SPD#5는 대조구이며, SPD#2 및 SPD#6은 물관리 적용 필지이고, SPD#3 및 SPD#4는 시비관리 적용 필지로서 Table 1에서와 같이 필지별 물관리 및 시비관리 관련 영농기법이 적용되었다.

4) <http://www.agbmp.kr/>

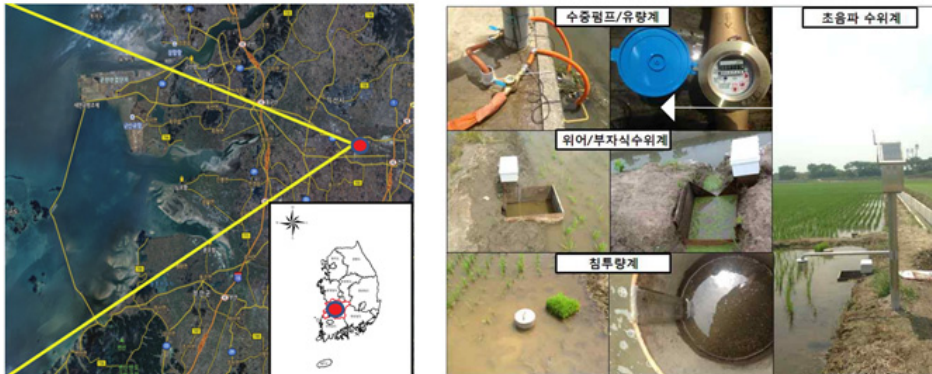
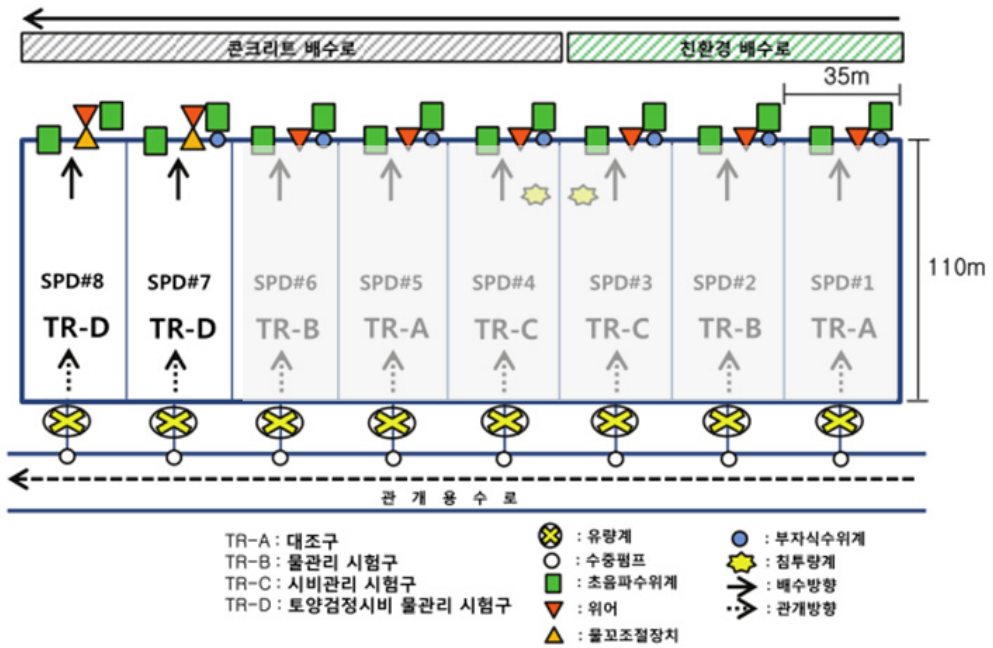


Figure 4 새만금 논 비점오염 모니터링 계측기 위치 및 모식도 (출처: 한국농어촌공사, 2013 & 2015, 저자 편집)

Table 1 논 비점 모니터링 필지별 적용 영농관리 및 조사항목

구분	영농관리	조사항목
관행포 (대조구)	· 물꼬 : 7cm (새만금 관행) · 비료 : 맞춤형 비료 · 포장 : SPD#1, #5	· 유량측정 : 수위측정기 (10분 간격) · 정기조사 : 영농기 연 10회 · 정밀조사 : 이앙 및 강우 시 연 5회 · 토양조사 : 연 2회 이상 (입도 및 토양 화학특성 조사) · 작물생육조사 : 작물 생체량 및 생산성 모니터링 · 수질분석항목 : SS, TN, NO₃-N, TP, TOC, DO, pH, EC, 수온 · 처리구별 및 물 및 물질수지 분석
물관리 시험포	· 물꼬 : 12cm · 비료 : 맞춤형 비료 · 포장 : SPD#2, #6	
시비관리 시험포	· 물꼬 : 7cm (새만금 관행) · 비료 : 완효성 비료 (오래가, 18-8-8+4+0.2) · 포장 : SPD#3, #4	

Table 2는 APEX-Paddy 모델링 입력에 필요한 2013 ~ 2015년의 필지별 영농방법을 보여 준다.

Table 2 포장별 영농일지 (2013 ~ 2015)

영농방법		대조구 (관행구)		물관리구		시비구	
		SPD#1	SPD#5	SPD#2	SPD#6	SPD#3	SPD#4
2013년	관개시작	06.08.	05.20.	06.03.	05.31.	05.20	05.20
	씨레질	06.12.	05.21.	06.08.	06.01.	05.24.	05.24.
	시비 (기비)	06.11. *맞춤 16호 (질소: 11.6, 인산: 3.1kg/10a)	05.20. 맞춤 16호 (질소: 12.6, 인산: 5.7kg/10a)	06.05. 맞춤 16호 (질소: 11.4, 인산: 5.2kg/10a)	05.28. 맞춤 16호 (질소: 10.3, 인산: 4.7kg/10a)	05.20. 완효성 (질소:9.4, 인산: 4.2 kg/10a)	05.20. 완효성 (질소:9.4, 인산: 4.2 kg/10a)
	모내기	06.13. (신동진벼)	05.24. (새누리벼)	06.11. (새누리벼)	06.03. (새누리벼)	05.27. (새누리벼)	05.27. (새누리벼)
	관개 (본답기)	06.14. ~	05.24. ~	06.11. ~	06.03. ~	05.27. ~	05.27. ~
	중간낙수	07.14 ~ 21	07.07. ~ 16	07.10. ~ 22	07.09. ~ 20	07.09. ~ 22.	07.09. ~ 22.
	추수	10.21.	10.18.	10.21.	10.21.	10.21.	10.21.
2014년	관개시작	05.20.	05.20.	06.05.	06.02.	06.10.	06.10.
	씨레질	05.25.	05.21.	06.07.	06.05.	06.13.	06.13.
	시비 (기비)	05.25. 맞춤 16호 (질소: 12.6, 인산: 5.7kg/10a)	05.21. 맞춤 16호 (질소: 12.6, 인산: 5.7kg/10a)	06.09. 맞춤 16호 (질소: 12.6, 인산: 5.7kg/10a)	05.31. 맞춤 16호 (질소: 12.6, 인산: 5.7 kg/10a)	06.15. 완효성 (질소:9.4, 인산: 4.2 kg/10a)	06.15. 완효성 (질소:9.4, 인산: 4.2 kg/10a)
	모내기	05.29.	05.21.	06.09.	06.07.	06.15.	06.15.
	관개 (본답기)	05.30. ~	05.24. ~	06.10. ~	06.09. ~	06.16. ~	06.16. ~
	중간낙수	07.11. ~ 07.19.	07.05. ~ 07.24.	07.06. ~ 07.21.	07.05. ~ 07.21.	07.07. ~ 29.	07.07. ~ 29.
	추수	10.15.	10.05.	10.25.	10.18.	10.25.	10.25.
2015년	관개시작	05.17.	05.24.	06.11.	05.26.	06.11.	06.09.
	씨레질	05.20.	05.26.	06.14.	05.28.	06.14.	06.11.
	시비(기비)	05.20. 맞춤 16호 (질소: 12.6, 인산: 5.7kg/10a)	05.26. 맞춤 16호 (질소: 12.6, 인산: 5.7kg/10a)	06.14. 맞춤 16호 (질소: 12.6, 인산: 5.7kg/10a)	05.28. 맞춤 16호 (질소: 12.6, 인산: 5.7kg/10a)	06.14. 오래가 (질소: 9.4, 인산: 4.2kg/10a)	06.11. 오래가 (질소: 9.4, 인산: 4.2kg/10a)
	모내기	05.28.	05.29.	06.15.	05.31.	06.15.	06.13.
	관개(본답기)	05.30. ~	05.29. ~	06.15. ~	05.31. ~	06.15. ~	06.13. ~
	중간낙수	06.26. ~ 07.30.	07.02. ~ 07.31.	07.17. ~ 08.04.	07.02. ~ 07.31.	07.17. ~ 07.28.	07.17. ~ 08.05.
	추수	10.15.	10.19.	10.21.	10.14.	10.21.	10.21.

2.1.2 만경강 유역

새만금 유역은 국내 유역 중에서 농경지 비중이 높고 새만금 방조제 건설로 인하여 상류의 만경강 및 동진강으로부터 유입되는 오염원이 새만금호에 정체됨으로써 강우유출에 의해 발생한 비점오염원이 바다로 흘러가는 일반적인 유역과는 상이한 특성을 갖고 있다. 이와 같은 이유로 점오염원 처리뿐만 아니라 비점오염관리 등 체계적인 오염저감 기술의 개발과 보급이 적용되고 있는 지역이다. 만경강 및 동진강 유역 중에서 앞서 제시한 필지규모 비점오염 모니터링 사이트가 위치하고 있는 만경강 유역을 대상유역으로 선정하였다. 만경강 유역은 Figure 5에서와 같이 만경A, 만경B, 만경C, 전주A, 탑천A를 포함하여 5개의 수질오염총량관리 (Total Maximum Daily Loads, TMDL) 단위유역을 포함하고 있다. 유역규모 비점오염 정량화는 TMDL 단위유역 규모에 대해 수행하였다. 5개 단위유역 중에서 만경A 유역은 산림 지역의 비중이 높고 상류유역이지만 용당댐으로부터 어우보 상류지점으로 연평균 300 만톤 이상의 유량이 유입되고 있는 특성을 갖고 있으며, 만경B 유역은 만경강 중간에 위치하여 비점오염 부하량 산정에 있어서 만경A 및 전주A 상류유역으로부터 유입되는 유량과 오염원이 고려되어야 하며 WAMIS 유량관측지점 (목천, 3301685)에서의 일단위 유량값이 모든 기간동안에 0의 값을 보였고, 탑천A는 상류유역이면서 토지이용 특성상 농업지역이 주를 이루고 있어 농업비점오염 부하량의 정량화에 적합하나 WAMIS 유량관측지점 (원두, 3301688)에서의 일단위 유량값이 모든 기간 동안에 0의 값을 보였고, 만경C 유역은 새만금호 주변의 지역을 포함하며 분석에 활용할 수 있는 수질 및 유량 관측자료가 존재하지 않으며, 전주A 지역은 전주시를 포함하고 있어 도시지역의 비중이 높아 하수처리장으로부터의 유량 및 점원오염 부하량의 유입이 많은 특성을 갖고 있다. 본 연구에서는 상류 유역이면서 사용 가능한 유량 및 수질 관측자료가 존재하는 전주A 단위유역을 선정하였다.

기상관측소의 경우 만경강 유역 주변에 군산, 전주, 부안, 임실, 군산 5개 관측소가 위치하고 있으며, 전주 기상관측소가 전주A 단위유역의 주요 관측소이다. 수질오염총량관리 단위유역 규모에서 비점오염 부하량을 정량적으로 평가하기 위해서는 유역출구점에서의 총오염부하량 중에서 점원오염에 의한 부하량을 제거한 후 남는 비점오염부하량을 유달율을 고려하여 토지이용별로 시·공간적인 특성을 반영하여 분배

하는 과정이 필요하다. 전주A 단위유역의 총오염부하량 산정을 위해서는 전주A 쓰이 관측소와 WAMIS 전주 (3301665) 유량관측소 자료를 활용하였다.

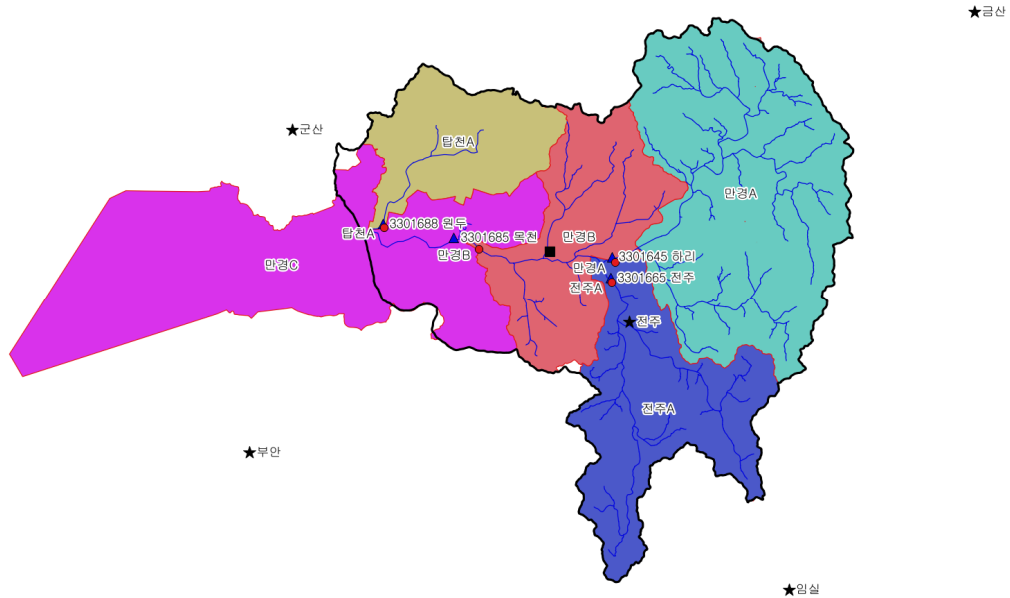


Figure 5 만경강유역의 수질오염총량관리 단위유역 및 기상, 수질, 유량 관측소 위치

점원오염에 의한 부하량은 만경강 유역에 위치한 10개 공공하수처리시설 중에서 전주A 단위유역에는 전주하수종말처리장 및 구이공공하수처리시설이 위치하고 있다. 또한 전주A에는 황소지구, 원석구지구, 전주추동마을, 난산마을하수처리시설 및 구암, 용신, 묘원 하수처리시설 등 7개가 위치해 있다. Figure 6 및 Table 3은 전주A 단위유역 내의 환경기초시설들의 공간적 위치와 제원을 보여 주고 있다. 이중 처리시설 용량 기준으로 전주1 및 전주2 하수종말처리장의 방류량이 전체 방류량의 99.7%를 차지하고 있다.

Table 3 전주A 단위유역내 환경기초시설 제원

시설명	용량m ³ _일	가동개시일	운영기관
전주 (전주1, 전주2)	403000	1990.04.01	전주개발(주)
구이	700	2008.06.25	(주)전북엔비텍
원석구지구 마을하수처리장	60	2006.04.10	전주시 하수과
황소지구 마을하수처리장	40	2006.09.05	전주시 하수과
전주추동마을하수처리시설	60	2008.06.19	전주시 하수과
용신오수처리시설	40	2002.01.11	환경시설관리공사
구암 간이오수처리시설	50	1998.12.23	환경시설관리공사
난산마을하수도시설	45	-	-
묘원공공하수처리시설	48	-	-



Figure 6 전주A 단위유역의 환경기초시설 위치

전주A 쓰이 단위구역에서의 비점오염 부하량 산정은 국내 농경지의 소규모 특성을 고려하기 위하여 30미터 격자 규모에서 수행하였다. 시·공간적으로 변동성이 큰 비점오염의 특성을 고려하여 경사도, 기상 관측소, 토지이용, 토양 등의 공간적 분포를 Figure 7에서와 같이 총 315,971개의 격자를 이용하여 고려하였다. 수문학적토양군 (Hydrologic Soil Group)의 경우 배수가 가장 양호한 A군 토양은 전체 구역의 45%를, 가장 불량한 D군 토양은 7%를 차지하고 있으며, B군 및 C군 토양은 각각 26% 및 21%의 비율을 보였다. 토지이용의 경우 시가화 건조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역의 토지이용별 전체 구역에 대한 비율이 각각 13.3%, 20.2%, 59.7%, 1.8%, 1.0%, 2.1%, 2.0%로서 산림지역이 가장 높은 비율을 보였다. 이 중 논이 전체 구역에 대하여 차지하고 있는 비율은 13.5%로 나타났다.

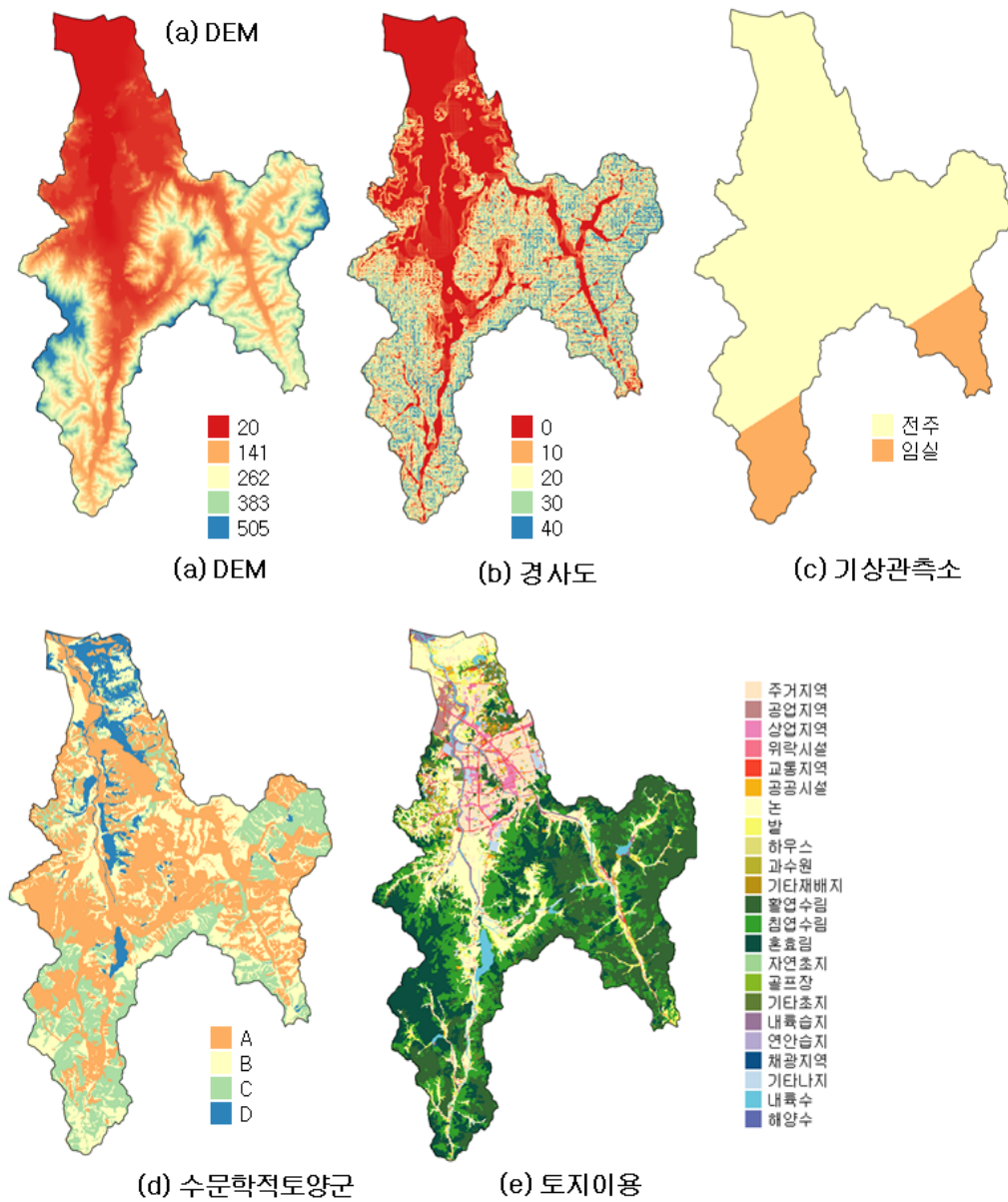


Figure 7. 전주A 쓰이 단위유역의 (a) 고도, (b) 경사도, (c) 기상관측소, (d) 수문학적 토양군, (e) 토지이용의 공간적 분포 (30 m 공간 해상도)

2.2 기후예측 예측성 정보

2.2.1 실시간 계절예측 시스템

본 연구에 사용된 실시간 계절예측 시스템은 선행 연구인 「장기 수질예측 자료의 갈수기 수질관리 의사결정 활용 방안」(조재필, 2015)에 사용된 시스템과 비교하여 Table 4와 같은 사항들이 반영되었다.

Table 4 계절예측 상세화 시스템의 선행연구와의 비교

구분	선행 연구 (조재필, 2015)	본 연구
계절예측 모듈	• SBC, MWR, CIR, ITR	• SBC, MWR, CIR, MWR-Obs
계절예측자료	• 3개월 예측모형 (4개): CWB, GDAPS_F, HMC, JMA • 6개월 예측모형 (6개): CANCM3, CANCM4, NASA, NCEP, PNU, POAMA	• 3개월 예측모형 (4개): BCC, CWB, MC, IRI_CA • 6개월 예측모형 (7개): APCC, CMCC, MSC, NASA, NCEP, PNU, POAMA
상세화 자료의 후처리 (Post process)	• 변동선 보정하지 않음	• 변동성 보정
상세화 자료의 양상별 멤버	• 강수량 기준 전체 예측기간에 대한 최소값(MIN), 최대값(MAX), 평균값(MME) 제공	• 강수량 기준 월단위 최소값(MIN), 최대값(MAX), 평균값(MME)에 의한 모든 조합 제공
과거기간 예측성 평가 결과	• 1개월 선행예측 자료의 예측성 평가 결과	• 1~6개월 선행예측 자료의 예측성 평가 결과 제공
사용자 편의성	• 패키지 및 매뉴얼 미제공	• 패키지 및 매뉴얼 제공

첫째, 우선 계절예측 모듈의 경우, 예측을 위해 사용되는 자료에 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) 방법, MWR 및 CIR에서 선정된 예측인자를 모두 사용하는 Integrated Time Regression (ITR) 방법 중에서 ITR 방법을 상세화 시스템에서 제거하는 대신에 관측자료 기반의 Observation-based Moving Window Regression (MWR-Obs) 방법을 추가하였다. 역학적 전 지구 기후모형(Global Climate Model, GCM)에 의해 예측된 결과를 직접적으로 사용하는 SBC 방법에 추가

하여 CIR, MWR, MWR-Obs와 같은 통계적 예측모형을 사용하는 이유는 한반도와 같이 중위도 지역에서 GCM 자체의 예측성이 낮기 때문이다. Figure 8은 본 연구에서 사용된 실시간 계절예측 시스템의 모식도를 보여 준다. 각 계절예측 모듈의 특성을 비교하면 Table 5와 같다.

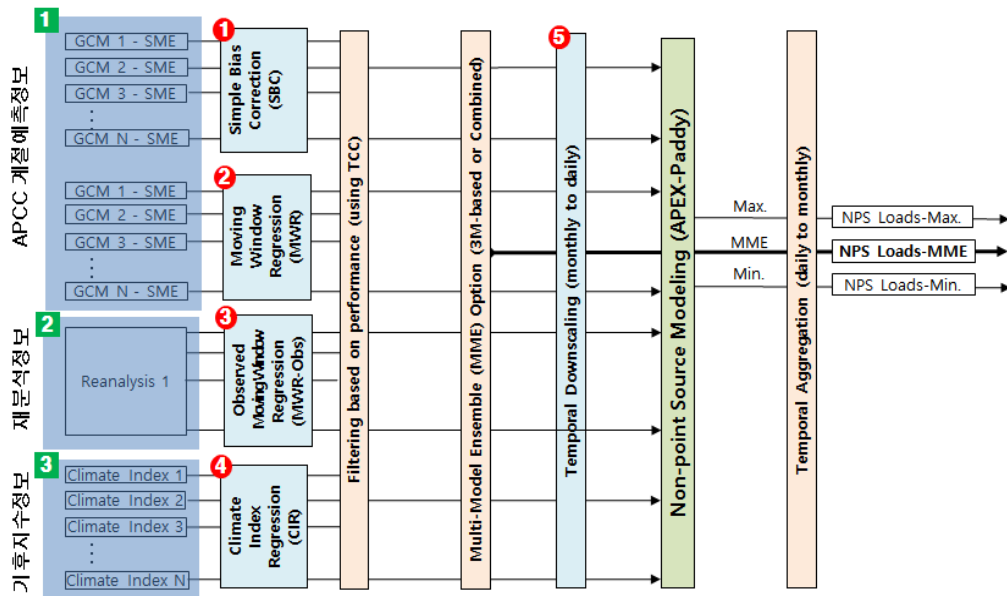


Figure 8. 실시간 계절예측 시스템 모식도

Table 5 월단위 계절예측 모듈의 특성 비교

구분	SBC	MWR	CIR	MWR-Obs
사용 기후 정보	APCC 계절예측자료	APCC 계절예측자료	NOAA/APCC 기후지수	재분석자료(Reanal- ysis 1)
예측 대상 변수와 예측인자와의 관계	동일	다름	다름	다름
예측인자와 대상지역의 공간적 관계	동일	다름	다름	다름
예측인자와 예측대상 변수의 시간적 관계	동일	동일	다름 (자연시간)	다름 (자연시간)

우선 SBC 방법은 APCC에서 매달 9개국 17개 기관으로부터 수집하는 개별 기후예측모형(GCM)에 의해 생성된 대상 지역 및 기간의 예측 정보를 월별 기후 특성(평균)

만을 보정하여 활용하는 예측 자료 기반의 직접적인 상세화 방법이다. 즉 예측하려는 대상지역이 한반도이면서⁵⁾ 예측하려는 기후변수가 강수량인 경우에, 한반도 상공에 해당되는 GCM 격자의 강수량 값을 관측자료의 동일한 과거기간에 대한 월평균 값과 비교하여 매월 존재하는 GCM의 계통오차(Bias)를 보정하여 사용하는 방법이다. 예측 인자와 예측대상 변수의 시간적 관계는 현재로부터 3개월 후를 예측하는 경우 GCM의 3개월 선행예측자료를 사용하기 때문에 동일한 시점의 자료를 사용한다.

반면 MWR 방법은 SBC 방법과 같이 APCC에서 매월 수집하는 개별 GCM의 예측 자료를 사용하는 것은 같으나, 한반도 상공의 강수 예측 정보를 그대로 사용하는 대신에 GCM으로부터 예측된 광역규모의 기후예측 정보 중에서 한반도 강수량과 높은 상관관계를 보이는 해수면온도 또는 해수면기압 등과 같은 대리변수를 이용하여 통계(회귀)모형을 구축하여 예측하는 예측자료 기반의 간접적인 통계적 예측방법이다.

GCM에 의해 생산되는 예측자료의 경우에는 기후예측모형의 특성에 따라서 모형 별로 서로 상이한 계통오차를 보일 수 있으며 예측결과도 많은 불확실성을 포함할 수밖에 없다. 반면에 관측기반의 자료의 경우에는 예측자료와 비교하여 불확실성이 현저히 적다는 장점이 있다. CIR 방법은 광역규모의 해양 및 대기 순환과 대상지역(한반도)의 강수량과의 상관관계를 이용하여 대상지역의 기후를 예측하는 통계적 방법이라는 점에서 MWR 방법과 비슷하다. 하지만 CIR 방법은 예측자료를 사용하는 대신에 관측자료를 이용하여 매월 업데이트되는 기후인자(Climatic Index)를 예측인자(predictor)로 사용한다. 과거자료를 예측에 사용하기 위해서는 사용하려는 관측자료 기반의 기후인자와 한반도 강수 사이에 지연시간(lag time)이 존재해야 하며 이는 예측하고자 하는 선행예측기간(lead time) 보다 커야 한다.

본 연구에서 추가된 Observation-based Moving Window Regression (MWR-Obs) 방법은 전지구규모의 격자형 기후자료로부터 상관성이 높은 변수와 지역을 예측인자로 찾아내는 방법에 있어서 MWR방법과 동일하지만, 관측자료 기반의 장점을 최대화하기 위해서 예측인자로 개별 GCM의 예측자료를 사용하지 않고 관측자료인 NCEP/NCAR 재분석자료(Reanalysis 1)를 사용한다. CIR 방법과 비슷하게 관측기반 자료를 예측에

5) 월단위 강수 및 기온 예측을 위해서는 2015년도 연구와 동일하게 한반도 전체를 대상지역으로 선정하였으며, 76년 이후 자료가 존재하는 기상청의 57개 종관기상관측시스템(Automatic Synoptic Observation System, ASOS)의 일단위 자료를 시·공간적으로 평균하여 한반도 월평균 관측값으로 사용하였다.

사용하기 위해서는 예측대상 변수와 예측인자 사이에 지연시간(lag time)이 존재해야 한다. 본 연구에서는 지연시간을 최대 8개월까지 고려하였다. MWR-Obs 방법 또한 MWR 방법과 동일하게 통계적 예측모형의 과대적합을 방지하기 위해 동일한 예측인자 선정 절차⁶⁾를 고려하였다.

앞서 설명한 예측성 향상을 위한 상세화 방법들에 더하여 장기 기후예측 자료를 비점오염 모형의 입력 자료로 활용하기 위해서는 월단위 자료를 일단위 자료로 변환하는 시간적 상세화 과정이 필요하다. 시간적 상세화 방법은 예측된 월 자료를 기반으로 과거 자료로부터 일 자료를 샘플링 하는 기존 연구와 동일한 방법을 사용하였다. 즉 대상지역에 대하여 예측된 월별 강수량 및 평균기온을 동일한 지역을 대상으로 과거 관측 자료로부터 계산된 공간평균 강수량 및 평균기온과 비교하여 가장 비슷한 특성을 가지는 연/월을 선정한 후 선정된 과거자료의 연/월로부터 대상 지역에 포함되어 있는 모든 관측점의 자료를 동시에 추출하여 일 자료를 생성한다 (조재필, 2014). 비슷한 기후 특성을 갖는 연/월의 선정은 2개 변수 (강수 및 평균온도)를 이용하여 Mahalanobis distance (Mahalanobis, 1936)를 계산한 후, 거리가 가장 작은

6) 통계적 예측모형 구축 시 과대적합을 방지하기 위하여 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 전체 관측기간(1984년~2013년) 기간을 훈련기간(1984년~2007년) 및 검정기간(2008년~2013년)으로 구분하였다. 첫번째 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 상관 관계를 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 사용자에 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 경우로 예측인자의 범위를 좁힌다. 만약 여러 변수들이 선정된 경우에는 선정된 예측인자들 중에서 훈련기간 동안의 샘플들에 대한 상관계수의 평균값이 가장 높은 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 예측기후정보의 위도의 범위는 기후예측모형의 예측성이 높은 것으로 알려진 $-40^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 로 제한하였다.

값을 가지는 연/월을 과거 관측 자료로부터 선정하였다. 이 경우 대상지역 내에 존재하는 모든 관측소에 대하여 동일한 기간의 일 자료를 가져오기 때문에 수문 모델링에 필요한 관측지점간의 공간상관성이 확보된다는 장점이 있다.

둘째, 선행 연구와의 또 다른 차이점은 실시간 계절예측을 위해 필요한 기후정보 중에서 기후지수 정보는 기존 연구와 동일하게 NOAA 및 APCC에서 제공하는 실시간 자료⁷⁾를 사용한 반면 새로 고려된 MWR-Obs 방법에 필요한 재분석자료를 추가하여 사용하였고, MWR 및 CIR 방법에 필요한 개별 계절예측모형은 선행 연구(조재필, 2015)와 비교하여 Table 6과 같이 변경된 자료를 사용하였다⁸⁾. APCC에서 매월 9개국 17개 기관으로부터 수집하는 개별 기후예측모형을 MWR 방법과 같은 통계적 방법 기반의 실시간 계절예측에 사용하기 위해서는 과거예측 자료(hindcast data) 또한 제공하여야 한다. 예를 들어 예측 정보를 제공하는 기관 (Model providers)에서 예측모형을 개선하는 경우, 개선 시점 이후의 실시간 예측정보를 제공하는 것에 더하여 과거기간에 대하여도 실제 예측 상황을 재현하여 생성한 자료인 과거예측 자료를 제공하여야 한다. 갱신된 예측모형에 의해 실시간 예측과 일관성을 갖는 과거기간에 대한 hindcast data는 새로 갱신된 예측모형의 예측성 평가를 위해서도 꼭 필요한 자료이다. 2016년 6월에 APCC에서 수집하는 예측모형에 변동이 있었고 본 연구에서 사용하고 있는 상세화 시스템이 실시간 자료 수집을 위해 연동하여 사용하고 있는 APEC Climate Center Data Service System (ADSS)⁹⁾의 제공자료 리스트에 변동이 있었다. 예를 들어, 기상청에서 제공하던 GDAPS-F 모형은 새로운 장기예측모형

7) 관측기반 CIR 방법은 NOAA 웹페이지 (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>)에서 제공되는 40개 기후인자들 중에서 매달 갱신되는 16개 인자에 매달 갱신되는 재분석자료 (NCEP Reanalysis 1)로부터 NCL을 이용하여 APCC에서 매달 생산하는 9개 인자(<http://www.apcc21.org/ser/indic.do?lang=en>)를 더하여 총 25개 기후인자를 실시간 예측을 위하여 사용하였다.

8) 개별 기관에서 생산되는 원시 예측자료는 사용되는 모형에 따라서 상이한 공간해상도를 사용하고 있으나, 본 연구에서는 APCC Multi-Model Ensemble (MME) 생성을 위해 2.5°×2.5° 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 분석에 사용하였다. 이는 SBC 방법과 같이 모형의 통계적 계통오차를 보정하기 위해서는 매달 생산되는 동일한 번호의 앙상블멤버들이 시스템적인 일관성을 갖고 있어야 하지만 실제 생산되는 자료는 초기조건에 따라 발생되기 때문에 계통오차를 보정하는 것이 의미가 없을 수 있기 때문이다. 제공되는 변수로는 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) 등 10개 변수가 있으나, 강수량 및 기온 예측을 위해서는 동일한 변수를 제외한 8개 변수를 예측인자(predictor)로 사용하였다.

9) <http://www.apcc21.org/ser/adss.do?lang=en>

(GloSea5)이 도입됨에 따라서 모형 리스트에서 제외되었다. 따라서 본 연구에서는 3개월 및 6개월 선행예측자료의 경우 Table 6과 같이 갱신된 예측모형들 중에서 1983년 이후 기간에 대하여 갱신된 hindcast 자료를 제공하는 모형이 각각 4개 및 7개 선정되어 총 11개 개별모형이 사용되었다. 즉 개발된 계절예측 상세화 시스템은 살아있는 유기적인 생명체와 같이 예측정보 제공 기관의 모형개선 여부에 따라서 통계적 예측모형의 선정이 변경되어야 하고 이에 따른 예측성 또한 평가되어야 한다.

Table 6 계절예측 상세화에 사용된 기후예측 모형 리스트

Model acronym	Institution(country)	Lead time(month)	Ensemble size
BCC	Beijing Climate Center (China)	3	8
CWB	Central Weather Bureau (Taipei)	3	10
HMC	Hydrometeorological Centre of Russia(Russia)	3	20
IRI_CA	International Research Institute for Climate and Society (USA)	3	24
APCC	APEC Climate Center (Korea)	6	10
CMCC	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (Italy)	6	9
MSC	Meteorological Service of Canada (Canada)	6	20
NASA	National Aeronautics and Space Administration (USA)	6	9
NCEP	NCEP Climate Prediction Center (USA)	6	15
PNU	Pusan National University (Korea)	6	5
POAMA	Centre for Australian Weather and Climate Research /Bureau of Meteorology (Australia)	6	10

MWR-Obs 방법에 사용된 재분석자료는 실시간 예측을 위해서 매달 업데이트 되어야 한다. 기후분야에서 사용되는 재분석 자료로는 NCEP에서 제공하는 Climate Forecast System Reanalysis (CSFR) 및 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)에서 제공하는 ECMWF re-analysis (ERA) 등 다양한 자료가 있으나¹⁰⁾ 본 연구에서는 매달 갱신이 되는 NCEP/NCAR Reanalysis 1 자료¹¹⁾를 사용하였다. 예측인자로는 Table 7과 같이 총 9개의 변수를 사용하였다.

10) <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/atmospheric-reanalysis-overview-comparison-tables>

11) <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

Table 7 예측인자로 선정된 Reanalysis1 재분석 자료의 변수 리스트

Predictor	Description
slp	Sea level pressure
t850	Air temperature at 850mb pressure level
z500	Geopotential height at 500mb pressure level
shum	Specific humidity
u200	Monthly mean zonal wind at 200mb pressure level
v200	Monthly mean meridional wind at 200mb pressure level
u850	Monthly mean zonal wind at 850mb pressure level
v850	Monthly mean meridional wind at 850mb pressure level
o500	Monthly mean omega (vertical velocity) 500mb pressure level

셋째, 특정 월 및 선행예측 기간에 대해서 다중 예측모형이 존재하는 경우, 다중모형 앙상블 (Multi-Model Ensemble, MME) 자료의 연변동성이 관측 자료와 비교하여 감소하는 결과를 보일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 상세화된 예측자료가 관측자료가 갖는 변동성과 동일하게 될 수 있도록 Equation 1과 같이 보정상수를 이용하여 보정하였다. 즉, 보정 전·후의 Temporal Correlation Coefficient (TCC) 값은 동일하게 유지되면서 관측자료와 보정후의 예측자료의 Coefficient of Variation (CV) 값이 동일하게 후처리 (Post process)를 수행하였다.

$$F_{adj} = \alpha F \quad (1)$$

여기서, F_{adj} = 보정된 예측 시계열 자료, F = 보정 전의 예측 시계열 자료, α = 보정상수

넷째, APEX-Paddy 모형의 입력으로 사용되는 예측자료의 앙상블멤버 생산 방법을 Figure 9에서와 같이 선택할 수 있도록 옵션 (옵션2)을 추가하였다. 그림에서 현재시점에서 향후 6개월을 예측하는 경우 다중의 예측모형이 존재하는 1, 3, 6개월 선행예측의 경우에 다중예측모형의 최소 (MIN), 최대 (MAX), 평균 (MME) 값이 존재할 수 있으나, 단일 예측모형만이 존재하는 4개월 선행예측과 예측모형이 없어서 과거기간의 평균값 (Climatology)을 사용하는 경우에는 최대, 최소, 평균값이 동일하게 된다. 기존에는 6개월 전체 기간에 대한 최소, 최대, 평균의 3개 앙상블멤버만을 모형의 입력으로 활용한 반면에, 본 연구에서는 월별 최대, 최소, 평균을 구하여 발생

하는 모든 조합의 경우를 앙상블멤버로 활용할 수 있도록 옵션을 추가하였다.

일반적으로 강수에 따른 유출량만을 예측하는 경우 전체기간의 강수량의 최소/최대값이 유량의 최소/최대값과 동일하게 나타날 가능성이 높지만, 수질과 같이 강수량과 수질이 비선형적으로 반응하는 경우에는 발생할 수 있는 모든 조합을 수질모델의 입력으로 고려한 후 예측된 수질 중에서 최소/최대/평균값을 구하는 방법이 합리적일 수 있기 때문이다. 월단위 예측후 시·공간적인 상세화를 위해서는 기존 연구와 동일하게 과거 DB로부터의 샘플링하는 방법¹²⁾을 사용하였다. 강수량 및 기온의 2개 변수를 이용하여 Mahalanobis distance를 계산할 때, 강수의 경우에는 Figure 9에서와 같이 다중 상세화 예측 모델들의 결과를 평균한 MME와 최대값 (MAX) 및 최소값 (MIN)을 사용하였으나 온도의 경우에는 평균값 (MME)만을 이용하여 발생하는 3개 조합 (강수:MME-기온:MME, 강수:MIN-기온:MME, 강수:MAX-기온:MME)을 사용하였다.

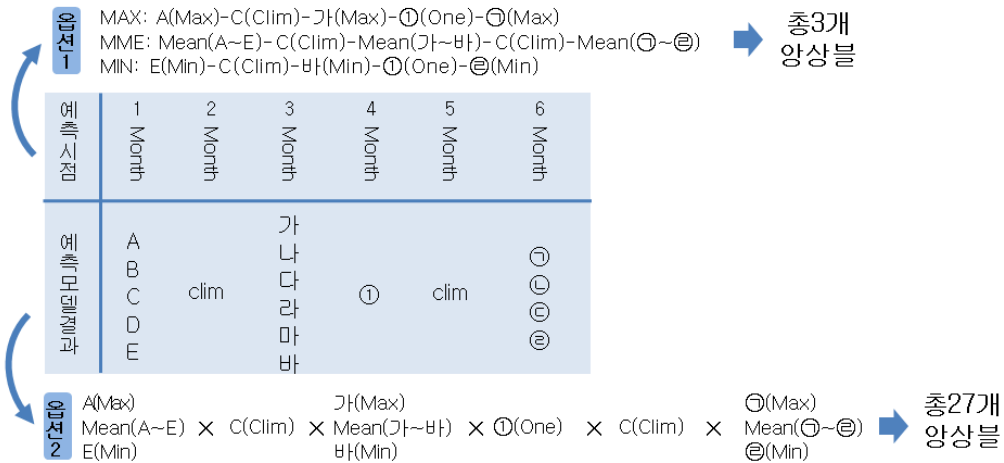


Figure 9. 계절예측 상세화 앙상블멤버 생산 옵션

12) 본 연구에서는 예측된 월 자료를 기반으로 과거자료 DB로부터 일단위 자료를 샘플링 하는 방법을 사용하였다 (조재필, 2014). APEX-Paddy 모델링시스템에서 요구하는 일단위 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.

다섯째, 실시간 기후의 예측 시 생산되는 Figure 10의 템플릿의 좌측하단에 위치한 과거기간에 대한 예측성 결과 제시부분에 기존의 1개월 선행예측에 대한 결과만을 제시하던 것을 보완하여 1개월에서 6개월 선행예측에 대해 예측성 결과를 제시하도록 템플릿을 개선하였다.

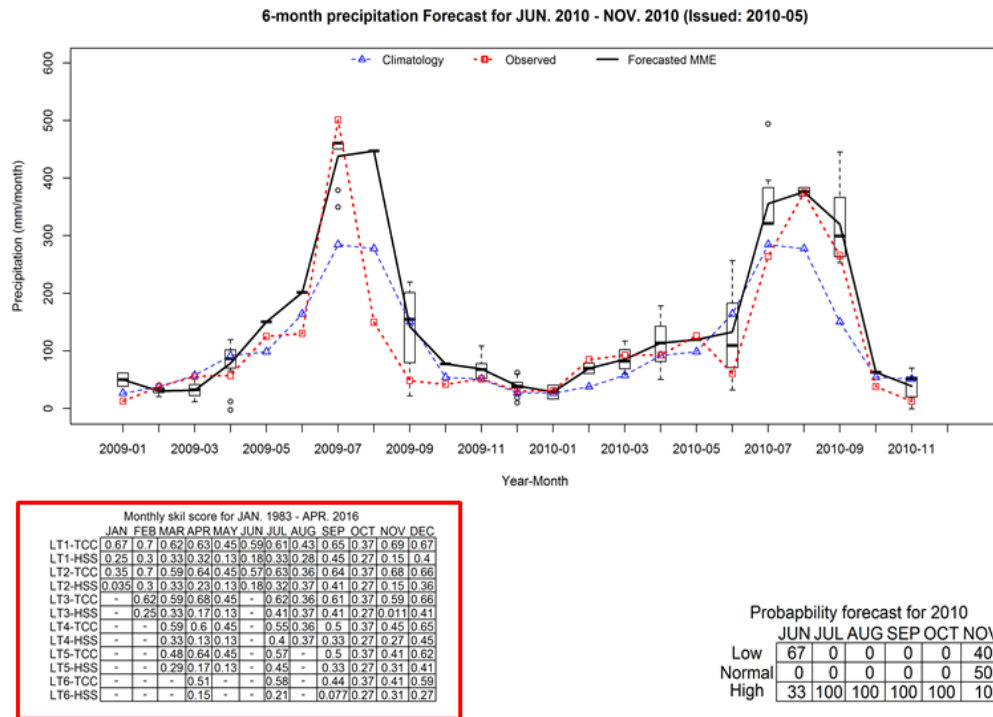


Figure 10 계절예측 결과 제공 템플릿 (좌측하단 붉은색 box: 과거기간에 대한 예측성 평가 제시를 위한 테이블)

여섯째, 본 연구를 위해서 사용된 계절예측 상세화 틀을 오픈소스 통계 언어인 R의 패키지(sforecast)로 개발하여 향후 동일한 방법을 다른 지역에 적용하는 경우 사용자가 쉽게 적용할 수 있도록 하였으며, 패키지 사용 방법에 대하여서는 사용자 매뉴얼을 부록에 제시하였다.

2.2.2 예측성 평가

계절예측에서 예측성 향상을 위해 SBC 방법에 추가하여 고려된 MWR, MWR-Obs, CIR 방법을 모두 이용하여 예측된 한반도 평균 월단위 강수량 및 기온에 대한 예측성 평가가 수행되었다. 연속형 변수에 대한 정확성을 평가하기 위해서는 Equation 2와 같이 Root Mean Square Error (RMSE)를 관측값의 표준편차를 이용하여 표준화한 NRMSE를 사용하였으며, 예측값과 관측값의 선형 상관성을 평가하기 위해서 Equation 3과 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 방법들¹³⁾ 중에서 Table 8과 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 4 및 Equation 5를 이용하여 예측성을 평가하였다.

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

$$TCC = \frac{\sum (F - \bar{F})(O - \bar{O})}{\sqrt{\sum (F - \bar{F})^2} \sqrt{\sum (O - \bar{O})^2}} \quad (3)$$

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

$$\text{Accuracy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k n(F_i, O_i) \quad (4)$$

$$\text{HSS} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^k n(F_i, O_i) - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^k N(F_i)N(O_i)}{1 - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^k N(F_i)N(O_i)} \quad (5)$$

Table 8. 다중 범주형 예보 분류표

		예 측				
		F1	F2		F4	소계
관 측	O1	$n(F_1, O_1)$	$n(F_2, O_1)$	...	$n(F_k, O_1)$	$N(O_1)$
	O2	$n(F_1, O_2)$	$n(F_2, O_2)$	...	$n(F_k, O_2)$	$N(O_2)$
		...	...	...	...	...
	O4	$n(F_1, O_k)$	$n(F_2, O_k)$	...	$n(F_k, O_k)$	$N(O_k)$
	소계	$N(F_1)$	$N(F_2)$	...	$N(F_k)$	N

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

예측성 평가는 매월 예측을 수행하는 상황을 기준으로 개별 예측모형들의 평균인 MME를 대상으로 수행하였다. 즉 MME 계산에 사용되는 예측자료의 개수는 예측을 수행하는 시점으로부터 선행예측 기간이 늘어날수록 줄어든다. 예를 들면 2016년 7월에 6개월을 예측을 수행하는 경우, 1개월 후인 8월의 경우에는 2016년 2월에 예측한 6개월 선행예측 결과로부터 7월에 예측한 1개월 선행예측 결과까지 사용 가능한 반면에 2017년 1월의 경우에는 7월에 예측된 6개월 선행예측 결과만이 MME 계산에 사용 가능하다.

2.3 농업비점오염 부하량 정량화 모델링

2.3.1 APEX-Paddy 모형

최적관리방안에 따른 저감되는 비점오염 부하량 저감 효과를 이해하기 위해서는 모니터링 방법을 사용할 수 있으나 모니터링 방법은 많은 시간과 비용이 요구되며 연구 결과의 시·공간적인 확장이 어렵고 상이한 관리방법에 따른 저감 효과를 정량화하기에 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 필지 규모에서의 다양한 관리방안 적용에 따른 오염부하량 저감 효과를 정량화하기 위해서 모델링 방법을 사용하였다.

영농방식을 고려할 수 있는 대표적인 유역모델로는 Soil and Water Assessment Tool (SWAT)이 있다. 그러나 농경지에서의 비점오염 배출부하량을 줄이기 위해 사용될 수 있는 다양한 영농방법들에 따른 필지규모에서의 작물 생육 및 토양의 물리적 특성 변화를 모의하는 데 한계가 있다. 예를 들어, 경운 (Tillage)의 경우 다양한 방법들이 적용 가능한데 선택된 방법에 따라서 토양 공극 및 밀도 등과 같은 토양의 물리적 특성이 다르게 변하게 되며, 강우 사상 및 시간이 흐름에 따라서 토양의 물리적 특성이 변하게 된다. 이와 같은 토양 특성의 변화는 필지의 유출 및 양분 유출 특성의 변화로 이어지게 된다.

여러 포장규모의 모형 중 대표적인 모형으로 EPIC (Environmental Policy Integrated Climate) 모형 (Williams 등, 1984)이 있다. EPIC 모형은 1980년대 초에 기상, 토양 및 영농방식이 동일한 포장규모에서 발생하는 침식이 생산성에 미치는 영향을 파악하기 위해서 개발되었다. EPIC 모형은 CREAMS(Knise, 1980) 및 SWRRB(Williams 등, 1985)의 다양한 요소들 및 GLEAMS(Leonard 등, 1987) 모델의 농약 관련 기능 등이 추가되면서 수문, 침식-퇴적, 양분 순환, 농약의 분해과정, 작물 생장, 토양 온도, 경작, 경제성 및 작물 환경 제어 등을 모의할 수 있도록 발전하였다. 고려 가능한 영농관리 요소로는 윤작, 경운, 관개, 배수, 제방 작업, 토양 개량, 방목, 가지치기, 솎음 및 수확, 비료 및 농약 사용량 및 사용 시기 조절 등이 있다. APEX (Agricultural Policy/Environmental eXtender) 모형¹⁴⁾은 EPIC모형의 기능을 농장 전체 또는 소규모 유역으로 확장하기 위해 개발되었으며, 다양한 지역에서 여러 영농방식이 유출,

14) <http://epicapex.tamu.edu/apex/>

토양 침식, 및 양분유출 등에 미치는 영향을 분석하기 위해 사용되어 왔다. 하지만 APEX 모형은 개발된 미국의 대규모 밭 중심의 농업환경에 적합하도록 개발되었기 때문에 국내 농경지의 60%이상을 차지하는 논·밭의 담수조건 및 쪼레질, 이앙, 관개 및 배수 등과 같이 논과 관련된 영농방식을 고려하기에 한계가 있다. 이에 농촌진흥청에서는 미국 텍사스 A&M 농업연구소와 함께 국내 논·밭의 수문·수질 기작을 모의할 수 있도록 APEX-Paddy 모형을 최근에 개발하여 공개하였다.

APEX-Paddy 모형은 강우사상 및 관개에 따른 담수 논에서의 토양 유실과 질소·인의 유출을 일단위로 모의할 수 있으며, 양분 유출을 최소화할 수 있는 BMP의 선정에 사용될 수 있는 한국 실정에 적합한 모형으로 알려져 있다. APEX-Paddy 모형은 논에서의 BMP 적용에 있어서 쪼레질 및 이후 토양입자의 침전에 따른 토양 밀도 및 공극의 역동적인 변화, 시비에 따른 장기적인 토양의 산성화, 탄소의 순환 및 탈질화 등을 모의할 수 있다. 논에서의 수문학적 과정으로는 담수 관개 및 배수가 고려되어야 하며, 작물생육과 관련해서는 이앙재배 (transplanting)에 따른 작물생육 등이 고려되어야 하고, 영농방식과 관련해서는 이앙을 위한 쪼레질 등이 밭에서의 특성과 비교하여 고려되어야 한다.

담수 재배와 관련하여 Figure 11에서와 같이 SCS-CN 방법에 기반한 APEX의 유출 기작과는 다르게 물수지 방정식을 이용한 유출과, 쪼레질에 의한 토양유실, 담수에서의 양분의 변화 및 소멸, 이에 따른 작물생육 알고리즘이 추가되었다. 논에서의 낮은 침투는 2번째 토양의 수리전도도 (Hydraulic Conductivity)를 낮춰 고려하였으며 쪼레질 영농방식이 APEX의 OPS DB에 추가되었다. 쪼레질 적용 시에 관개를 통해 담수된 물과 쪼레질 과정에서 경운에 따른 토양층과의 반응에 따라서 질소, 인, 탄소, 작물의 잔여물 등의 혼합이 고려되며 결과적으로 유사농도의 급작스런 증가와 침식이 모의된다. 관개의 경우, APEX 모형의 자동관개는 토양수분의 부족 시 적용되는 반면에 APEX-Paddy 모형의 자동관개는 OPS 파일에 규정된 담수심 이하로 수위가 내려갈 때 적용된다. 작물생육의 경우 논에서의 이앙을 고려하기 위해서 이앙 시점의 초기 LAI (Leaf Area Index) 값을 0.1로 사용하고 성숙에 필요한 Heat Units을 2,200 degrees에서 1,500 degrees로 변경하였으며 단위면적(m^2)당 벼의 개체수는 124로 사용하였다. 또한 생육속도를 규정하는 DLAP1 및 DLAP2 매개변수를 조정하여 초기에 빠르게 성장하는 생체량 (Biomass)을 고려하였고 이앙 시 초기 바이오매스

를 100kg/ha 로 조절하였다. 밭 조건과 비교하여 담수조건에 따른 뿌리 성장의 억제를 고려하여 전체 바이오매스에 대한 뿌리의 비율이 보다 빠르게 감소하도록 모형에서 고려되었다.

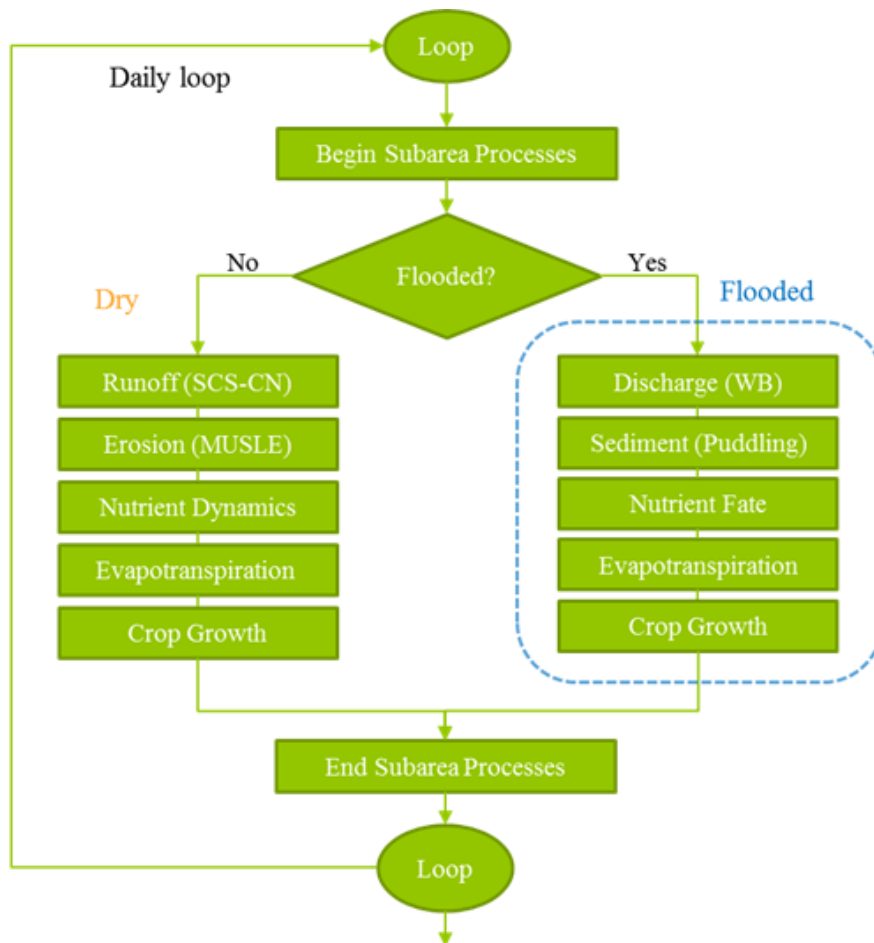


Figure 11 논에서의 담수조건 고려를 위한 APEX-Paddy 모형의 알고리즘 모식도

2.3.2 유역규모 비점오염 부하량 정량화

본 연구에서는 향후 논영농방법을 고려한 필지규모 APEX-Paddy 모델링과 연계가 가능하고 강수량의 시간적 변화 및 공간적인 토양 및 지형 특성의 차이를 반영하여 TMDL 단위유역 규모에서의 비점오염 부하량을 정량화 할 수 있는 기법을 제안하고자 한다. 전체적인 정량화 절차는 다음과 같다.

- 1) **총량 측정에서의 일단위 관측 유량 및 유달부하량 산정:** 유역 출구점에서의 유달부하량은 유량과 농도의 곱으로 산정하는데 이와 같은 이유로 강우사상에 따른 유출량 증가 시 배출부하량 및 유달부하량이 증가한다. 따라서 관측 지점에서 정확한 유달부하량 산정을 위해서는 일단위 연속유량과 수질 관측자료가 동시에 필요하다. 하지만 쓰이 단위유역의 말단에서 관측되고 있는 수질은 현재 8일 간격으로 동일 시점의 유량값과 함께 측정되고 있다. 환경부의 TMDL 측정과 국토부 WAMIS 유량 측정의 위치가 다른 경우, 환경부 TMDL 측정의 8일단위 관측유량과 국토부 WAMIS 유량 측정의 일단위 유량 사이의 상관관계를 이용하여 TMDL 측정에서의 일단위 유량을 산정하고 8일 간격의 수질 농도를 곱하여 유역으로부터 배출되는 총 관측 유달부하량을 산정한다.
- 2) **강우에 의한 직접유출비 산정:** 유역 내 개별 격자로부터 발생하는 총 배출부하량을 계산하기 위해서는 직접유출에 의해 발생하는 비점오염 발생부하량에 더하여 기저유출에 의한 비점오염 발생부하량이 함께 고려되어야 한다. 이를 위해서는 실제 유량 중에서 기저유출이 차지하는 비중을 알아야 하는데 유역말단에서 계측된 총 유량에는 점원오염인 하수처리시설로부터 방류된 방류량도 포함되어 있다. 본 연구의 전주A 대상유역과 같이 유역 말단의 총 유량 중에서 하수종말처리장의 방류수 등과 같이 점원오염원이 차지하는 비중이 큰 경우에는 총 유량에서 점원오염에 의한 기여분을 제거한 후 강수에 의한 직접유출량과 기저유출량을 분리할 필요가 있다. 일반적으로 강수의 영향이 작은 갈수기에 유역내에 위치한 점원오염의 방류량이 유역 출구점에서의 전체 유량보다 큰 경우가 발행하는데 이는 상류에서 발생된 모든 유량이 유역출구까지 도달하지 못하고 중간에 소멸하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 일차적으로 하수처리장의 방류수와 같은 점원오염의 기여분을 제거한 후 남은 유량을 이용하여 기저유출을 분리한 후 계산된 직접유출비 (직접유출/총유출)를 기저유출에 의한 오염부하량 산정에 활용하였다 (부하량 산정시 직접유출량 및 기저유출량에 동일한 농도 가정).
- 3) **점원오염 및 비점오염 배출부하량 산정:** 배출부하량과 관련해서는 점원오염의 경우 하수처리시설에서 방류하는 일단위 방류량에 관측된 수질의 농도를 곱하여 계산하였다. 반면 토지이용별 강우 시 직접유출에 의해 발생하는 비점오염

발생부하량은 Long-Term Hydrological Impact Analysis (L-THIA)¹⁵⁾ 및 Regional Diffuse POLLution Loads Estimation (REDPOLE)¹⁶⁾ 모형과 같이 Table 9에서와 같이 중분류 토지피복별 Curve Number (CN) 값을 이용하여 Equation 6 ~ 9에 의해 격자별로 산정된 직접유출량에 토지이용별 유량가중 평균농도 (Event Median Concentration: EMC)를 곱하여 산정하였다. 다만 국내의 경우 산림지역의 경사가 급한 지형특성을 고려하여 Equation 8과 같이 지형의 경사를 고려하여 CN값을 보정한 후 사용하였다. 또한 5일 선행강우량에 따라 유출곡선계수를 결정하였으며 CN_1 과 CN_2 , CN_2 와 CN_3 의 구분은 각각 35.56 mm, 53.34 mm를 기준으로 결정하였다. 전체 유출량에 의한 비점오염 배출부하량을 산정하기 위해서는 앞서 계산된 직접유출비를 이용하여 총 유출량에 의한 비점오염 배출부하량을 환산하였다.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (6)$$

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad (7)$$

$$CN_{2s} = \frac{100}{(1 + (\frac{100}{CN_2} - 1) \cdot (1.1 - \frac{Slp}{Slp + \exp(3.7 + 0.02117 \cdot Slp)}))} \quad (8)$$

$$CN_1 = \frac{CN_2}{2.281 - 0.0128 \cdot CN_2} \quad CN_3 = \frac{CN_2}{0.427 + 0.0057 \cdot CN_2} \quad (9)$$

여기서, P : 호우별 총우량 (mm), I_a : 초기손실량 (mm) ($I_a = 0.05S$ 사용), S : 최대잠재보유수량(potential maximum retention) (mm), Q : 직접유출에 해당하는 유효우량 (mm), $CN_{1,2,3}$: 선행강우조건에 따른 유출곡선계수, CN_{2s} : 경사를 고려하여 보정된 유출곡선계수

15) <https://engineering.purdue.edu/~lthia/>

16) 비점오염관리지역 및 총량관리지역 비점오염 정량화체계 적용방안 연구 (환경부, 2016)

Table 9 토지피복 별 CN 및 EMC

환경부 토지피복 (중분류)	토지피복 코드	SCS Curve Number (CN)				EMC (mg/l)		
		수문학적 토양군 A	수문학적 토양군 B	수문학적 토양군 C	수문학적 토양군 D	BOD	TN	TP
주거지역	110	58	73	82	86	5.82	5.04	0.31
공업지역	120	81	88	91	93	19.91	3.63	0.38
상업지역	130	95	96	97	97	34.24	6.95	0.66
위락시설지역	140	58	73	82	86	13.03	4.68	0.53
교통지역	150	87	91	93	94	8.6	3.8	0.24
공공시설지역	160	58	73	82	86	6.71	5.33	0.34
논	210	78	78	78	78	4.1	2.95	0.41
밭	220	64	75	82	86	10.75	8.39	2.49
하우스재배지	230	98	98	98	98	0	0	0
과수원	240	44	66	77	83	3.28	5.69	0.77
기타재배지	250	59	74	82	86	5.05	7.95	2.66
활엽수림	310	47	67	78	85	1.48	3.02	0.09
침엽수림	320	46	68	79	86	1.17	2.25	0.03
혼효림	330	47	68	79	86	1.29	1.62	0.04
자연초지	410	30	58	71	78	5.04	1.55	0.93
골프장	420	52	70	80	85	4.91	8.2	0.86
기타초지	430	52	70	80	85	4.01	3.02	0.31
내륙습지	510	98	98	98	98	0	0	0
연안습지	520	98	98	98	98	0	0	0
채광지역	610	77	86	91	94	3	0.84	0.06
기타나지	620	77	86	91	94	8.78	3.85	0.39
내륙수	710	100	100	100	100	0	0	0
해양수	720	100	100	100	100	0	0	0

출처: CN: 배덕효와 이병두, 2003, EMC: 비점오염관리지역 및 총량관리지역 비점오염 정량화체계 적용방안 연구(환경부, 2016)

4) 유역에 대한 EMC 보정계수 및 수질 항목별 소멸계수 결정: 유역 말단에서 관측된 유달부하량과 모의된 유달부하량을 비슷하게 맞추기 위해서 EMC 보정계수를 이용하였다. 즉 비점오염 배출부하량 계산에 사용한 토지이용별 유량가중

농도인 EMC는 전국의 동일한 토지이용에서 관측된 자료를 이용하여 만들어진 전국평균 개념의 값이기 때문에 유역별로 EMC 값에 보정계수를 곱하여 모의된 전체 유달부하량 값을 조정하였다. 또한 점원오염 및 비점오염의 형태로 유역 내 다양한 위치에서 발생된 부하량이 모두 유역 말단까지 도달하는 것은 아니기 때문에 유역말단으로부터 오염원발생 지점까지의 거리를 고려한 오염원별 유달율을 고려함으로써 유역 출구점에서의 유달부하량을 계산하였다. 즉, 최종적으로 관측된 유달부하량과 모의된 유달부하량이 상이한 경우 EMC 보정계수 및 유달율을 고려하여 관측 및 모의된 유달부하량의 합이 동일하게 보정하였다. 지점별 유달율은 Equation 10과 같이 계산되었는데 본 연구에서는 EMC 보정계수를 결정하기 위하여 TN의 유달율의 최솟값을 0.2로 가정한 후 가장 먼 위치의 격자점에서의 유달율이 0.2가 되도록 소멸계수 결정하였다. 이후 앞서 계산된 유역 내 격자별 총 배출부하량 (격자별 비점오염 배출부하량과 점원오염 배출부하량의 합)에 유역 말단까지의 거리 및 앞서 선정된 소멸계수를 기반으로 산정된 유달율을 고려하여 계산된 유달부하량과 동일 출구점에서의 관측 유달부하량이 같도록 대상 유역에 대한 EMC 보정계수를 결정하였다. 기준으로 사용한 TN을 제외한 수질항목에 대해서는 결정된 EMC 보정계수를 이용하여 유역 출구점에서의 모의 유달부하량을 계산하고, 관측 유달부하량과의 비교를 통해 동일한 값을 갖을 수 있도록 수질항목별로 소멸계수를 결정하였다.

$$DR_{i,j} = e^{-K_i \cdot L_j} \quad (10)$$

여기서, $DR_{i,j}$: 수질항목 i에 대한 j 격자의 유달율, K_i : 수질항목 i에 대한 소멸 계수 (m^{-1}), L_j : j 격자에서 유역 출구점까지의 유하 거리 (m)

- 5) **논 및 전체 비점오염에 의한 기여율 산정:** 앞서 결정된 유역의 EMC 보정계수, 수질 항목별 소멸계수, 직접유출비 등을 이용하여 총 유달부하량에서 비점오염 및 점원오염이 차지하는 비중을 산정하였다.

3. 연구결과

3.1 기후 변동에 따른 비점오염 부하량 변동 특성 분석

모니터링 사이트로부터 가장 가까운 기상 관측소인 전주관측소의 영농기간 (5월 ~ 9월)동안 최근 30년 평균 강수량은 997mm 이었던 반면에 2013년에는 721mm, 2014년에는 587mm, 2015년에는 373mm로 적게 나타났다. Table 10 및 Figure 12 는 월별 연도별 서로 다른 영농관리 기법의 적용에 따른 유출량, TN, TP 부하량의 변화를 보여 준다. 전체적으로 2013년 강수량 기준으로 49%가 줄어든 2015년이 경우에는 TN-시비관리 경우를 제외하고는 모든 경우에 있어서 유출량 및 비점오염 부하량이 줄어드는 결과를 보였다. 반면 19%가 줄어든 2014년의 경우에는 유출량(대조구 및 시비관리) 및 TN(시비관리), TP(대조구 및 시비관리)의 경우에 증가하는 경향을 보였다. 유출량의 경우에는 강우 총량만을 고려하는 것에 더하여 강우강도가 큰 강우 사상의여부와 선행강우 사상이 얼마나 있었는지 등 강우의 시간적 패턴 또한 중요한 요소로서 고려되어야 하며, TN 및 TP의 경우에는 강우의 시간적 패턴에 더하여 시비한 시점 이후의 강수량이 전체 배출부하량 결정에 있어서 중요한 요소임을 시사한다.

Table 10 영농방법별 유출량 및 부하량 변화

연도	강수량 (mm)		유출량 (mm)			TN 부하량 (kg/ha)			TP 부하량 (kg/ha)		
	30년 평균	관측	대조구	물관리	시비 관리	대조구	물관리	시비 관리	대조구	물관리	시비 관리
2013	997	721	401	340	384	15.6	11.9	8.6	1.4	1.01	0.7
2014	997	587	532	326	401	15.2	9.3	10.1	1.72	0.82	1.41
2015	997	373	252	229	255	7.2	6.5	8.1	0.66	0.49	0.66

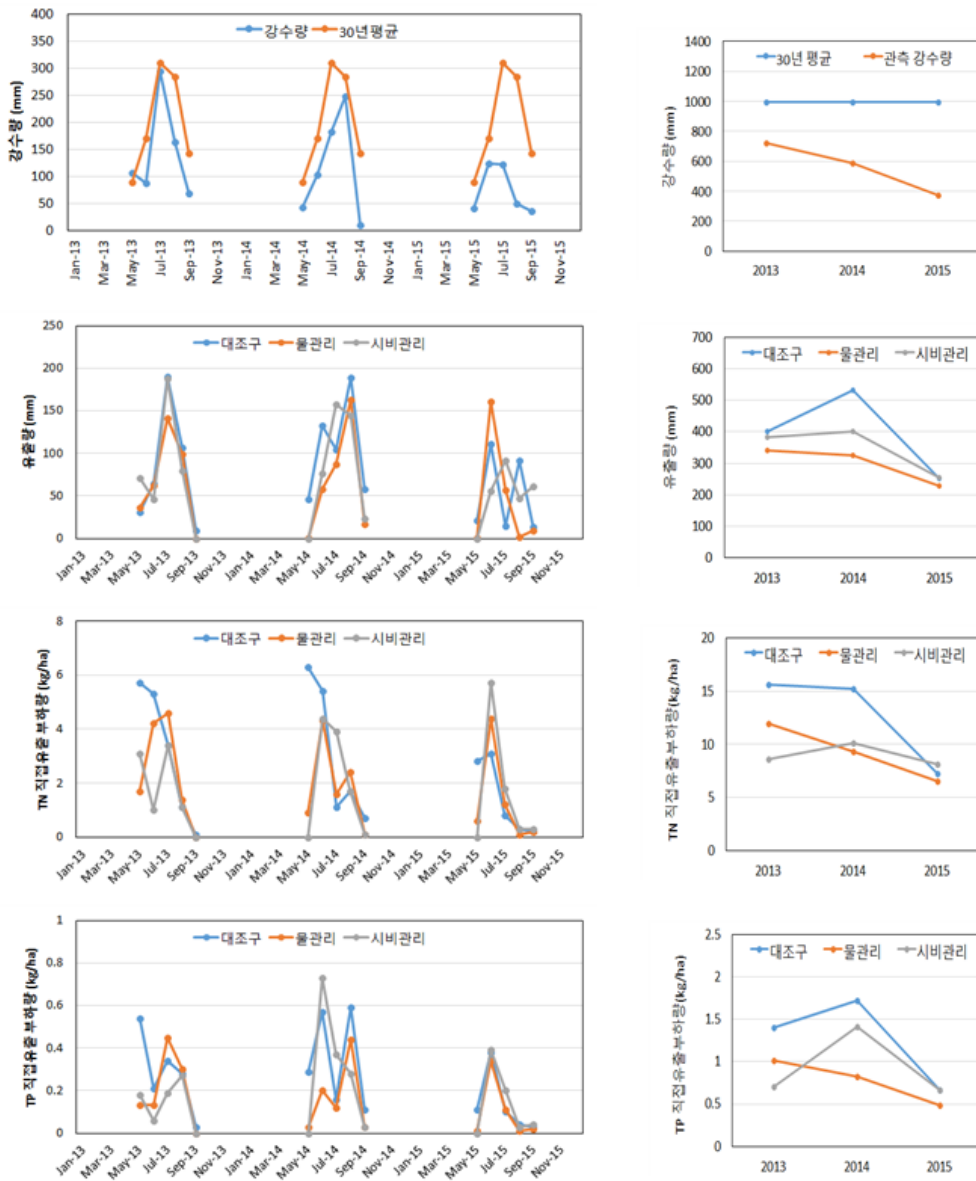


Figure 12. 영농방법별 유출량 및 부하량의 변화

3.2 기후예측 예측성 평가

Table 11은 4가지 상세화 방법에 의한 월별, 선행예측기간별 강수량 예측을 위해 선정된 예측모형들을 보여준다. 1월 및 10월에는 한 개의 예측모형도 선정되지 않았

다. 예측모형이 개별 GCM의 예측자료를 직접 사용하는 SBC 방법의 경우, 1~6개월 선행예측기간에 따라서 각각 4, 9, 10, 5, 6, 5 개 모형이 선정되어 전체적으로 38개 모형이 선정되었다. 2~3개월 선행예측기간에 대해서는 비슷한 개수의 모형이 선정된 반면에 선행예측기간이 4~6개월로 증가되면서 선택된 모형이 감소하는 경향을 보였다. 예측자료 기반의 간접적인 방법인 MWR은 1~6개월 선행예측기간에 대해서 각각 2, 1, 1, 3, 1, 1 개 모형이 선정되어 총 9개 모형이 선정되어 선행예측기간에 상관없이 3개 미만의 예측모형이 선정되었다. 반면 관측자료 기반의 CIR 방법은 강수의 경우 7월에 대해서만 모형이 선정되었다. MWR-Obs 방법의 경우도 강수량의 경우 9월에 2개월 선행예측의 경우에만 예측모형이 선정되었다. 전체적으로 SBC 및 MWR의 예측자료 기반의 방법들에서 관측자료 기반의 CIR 및 MWR-Obs 방법들과 비교하여 예측모형이 보다 빈번하게 선정되었다. SBC 방법의 경우 11개 개별 예측 모형 중에서 강수의 경우에는 NCEP 및 POAMA 모형이 각각 12, 10 개씩 각각 선정되어 한반도에서 타 모형과 비교하여 높은 예측성 결과를 보였다. MWR 방법은 강수의 경우 NASA 모형이 3개로 타 모형들과 비교하여 가장 많이 선정되었다.

Table 12는 4가지 상세화 방법에 의한 월별 선행예측기간별 기온 예측을 위해 선정된 모형의 결과를 보여 준다. 예측자료를 직접 사용하는 SBC 방법의 경우는 1~6개월 선행예측기간에 따라서 28, 11, 12, 11, 11, 11 개 모형이 각각 선정되어 전체적으로 84개 모형이 선정되었다. 1개월 선행예측기간에 대해서 가장 많은 모형이 선정되었고, 2~6개월 선행예측기간에 대해서는 비슷한 개수의 모형이 선정되었다. 예측정보기반의 간접적인 방법인 MWR은 1~6개월 선행기간에 대해서 각각 5, 3, 1, 0, 3, 0 개 모형이 선정되어 총 12개 모형이 선정되었다. SBC방법과 비슷하게 1개월 선행예측기간의 경우가 5개 모형이 선정되어 가장 많았고 2~6개월 선행예측기간에는 3개 미만의 모형들이 선정되었다. 반면 관측자료 기반의 CIR 방법은 6월 및 9월에 대해서 각각 모형이 선정되었다. MWR-Obs 방법은 9, 10월에 각각 1개씩 선정되었다. SBC 방법이 84개로 가장 많이 선정되었고, MWR 및 CIR 방법이 각각 12개 12개의 모형 선정결과를 보였다. 전체적으로 MWR, SBC의 예측자료 기반의 방법이 관측자료 기반의 방법인 CIR 및 MWR-Obs 방법보다 빈번한 예측모형 선정 결과를 보였다. SBC 방법의 경우 개별 예측 모형 중에서 NASA, POAMA, PNU, NCEP 모형이 각각 23, 19, 11, 11 개씩 각각 선정되어 한반도에서 타 모형과 비교하여 높은 예측성 결과를

보였다. MWR 방법은 강수의 경우 POAMA가 4번 선정되어 타 모형들과 비교하여 가장 많은 선정 결과를 보였다.

역학적 기후예측 모형 (GCM)의 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 84개 및 38개 모형이 선정되어, 역학적 모형의 경우 강수량보다는 기온의 경우에 높은 예측성 결과를 보였다. MWR 방법 또한 강수량 및 기온에 대해 각각 총 9, 12개의 모형이 선정되어 강수량보다는 기온에 대해 높은 예측성을 보였다. 또한 강수 및 기온에 대해서 각각 12월 및 9월에 가장 많은 예측모형이 선정되었다.

Table 11 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						
FEB			B_NCEP03			
MAR		B_HMC02				
APR	B_NCEP01	B_CWB02 B_MSC02	M_PNU03		B_NCEP05	
MAY			B_APCC03			
JUN						B_NCEP06
JUL	C_Lag01	C_Lag02	C_Lag03	C_Lag04	B_APCC05 C_Lag05	C_Lag06
AUG		B_BCC02	B_MSC03		B_MSC05	
SEP	B_POAMA01 M_APCC01	B_NCEP02 B_PNU02 O_LTime02	B_NCEP03 B_PNU03	M_APCC04 M_MSC04	B_POAMA05	
OCT						
NOV	B_NCEP01 B_PNU01	B_POAMA02	B_NCEP03 B_POAMA03	B_NCEP04 B_POAMA04	B_NCEP05	B_NASA06
DEC	M_CWB01	B_POAMA02 B_NASA02 M_CWB02	B_CWB03 B_APCC03 B_POAMA03	B_NCEP04 B_POAMA04 B_NASA04 M_NASA04	B_POAMA05 M_NASA05	B_NCEP06 B_APCC06 B_POAMA06 M_NASA06

Table 12. 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	B_HMC01 B_NASA01 B_PNU01 B_POAMA01			B_NASA04 B_POAMA04		B_NASA06
FEB	B_POAMA01 B_NCEP01	B_NASA02		B_POAMA04	B_POAMA05	
MAR	B_NASA01 B_POAMA01 B_MSC01 M_BCC01 M_POAMA01	B_NASA02	B_NASA03 B_POAMA03		B_POAMA05	B_POAMA06
APR	B_BCC01 B_NASA01 B_PNU01 B_POAMA01 B_NCEP01	B_NASA02				
MAY	M_CWB01		B_NASA03		B_NASA05	B_NASA06 B_POAMA06
JUN	C_Lag01 M_APCC01	C_Lag02	C_Lag03	C_Lag04	B_NCEP05 C_Lag05 M_PNU05	C_Lag06
JUL	B_BCC01	B_HMC02				
AUG	B_POAMA01		M_CWB03			
SEP	B_NASA01 B_PNU01 B_NCEP01 B_APCC01 C_Lag01 M_APCC01 M_NASA01 O_LTime01	B_NASA02 B_APCC02 B_NCEP02 B_PNU02 B_POAMA02 C_Lag02 M_NCEP02	B_NASA03 B_POAMA03 B_MSC03 B_NCEP03 B_PNU03 C_Lag03	B_NASA04 B_MSC04 B_PNU04 C_Lag04	B_NASA05 B_NCEP05 B_APCC05 B_MSC05 B_PNU05 C_Lag05 M_PNU05	B_NASA06 B_POAMA06 B_MSC06 C_Lag06
OCT	B_HMC01 B_CWB01 B_NASA01 B_PNU01 B_POAMA01	B_CWB02 B_PNU02 M_POAMA02	B_HMC03 B_NASA03	B_APCC04	B_NASA05 B_MSC05 M_POAMA05 O_LTime05	B_MSC06 B_PNU06
NOV	B_POAMA01		B_NCEP03	B_NASA04 B_POAMA04		B_NCEP06
DEC	B_HMC01 B_PNU01	M_POAMA02	B_NCEP03	B_NASA04 B_POAMA04		B_NCEP06

CIR 방법의 경우 7월 강수에 대해서는 WP (Western Pacific Index)가 5개월 지연시간을 갖고 선정되었고, 6월 및 9월 기온에 대해서는 모두 PACWARN (Pacific Warmpool 1st EOF of SST)가 7개월의 지연시간을 갖고 선정되었다. WP는 서태평양의 한반도 근처에 위치하고 있으며, PACWARN은 태평양의 해수면 온도와 관련된 기후인자이다. 일반적으로 ENSO와 관련된 NINO12, NINO34, NINO4 등과 같은 기후인자들이 많이 알려져 있지만 대신 PACWARN 인자가 선정되었다.

MWR 방법의 경우 Figure 13은 5월~9월 강수에 대해 선정된 예측인자들의 공간적인 분포를 보여주고 있다. 예측인자는 매 해 교차검정 수행 과정에서 동일한 지역에서 예측인자가 반복되는 경우에 선정되었다. 그림에서 노랑색은 선정된 횟수가 높은 경우를 의미한다. 바람직한 예측모형은 한반도 지역 기후에 영향을 미치는 지구 기후시스템의 주된 물리적 매커니즘을 이해하고 기후예측모형에 이를 반영하여 활용하는 것이다. 하지만 기후예측 모형들이 공간적 위치를 포함하여 물리적 현상을 적절히 모의하는 것을 보장할 수 없기 때문에 예측자료를 기반으로 하여 메커니즘을 분석하기란 어려운 상황이다 (조재필, 2015). 따라서 MWR-Obs와 같이 관측자료 기반의 지연시간을 고려한 높은 상관관계를 보이는 예측인자를 도출한 경우에 예측자료 기반의 선정된 예측인자와 비교하여 물리적인 매커니즘을 설명하기에 용이하며 이를 통한 기후분야와의 융합연구가 가능할 것으로 판단된다. Figure 14는 MWR-Obs 방법에 의해 생육기인 5월~9월의 강수 예측 중에서 9월에 유일하게 선정된 예측인자의 공간적 위치를 보여준다. 결정된 예측인자 (z_{500} , 2개월 지연시간)에 대한 물리적 의미에 대한 설명은 추가적으로 필요할 것이라 판단된다.

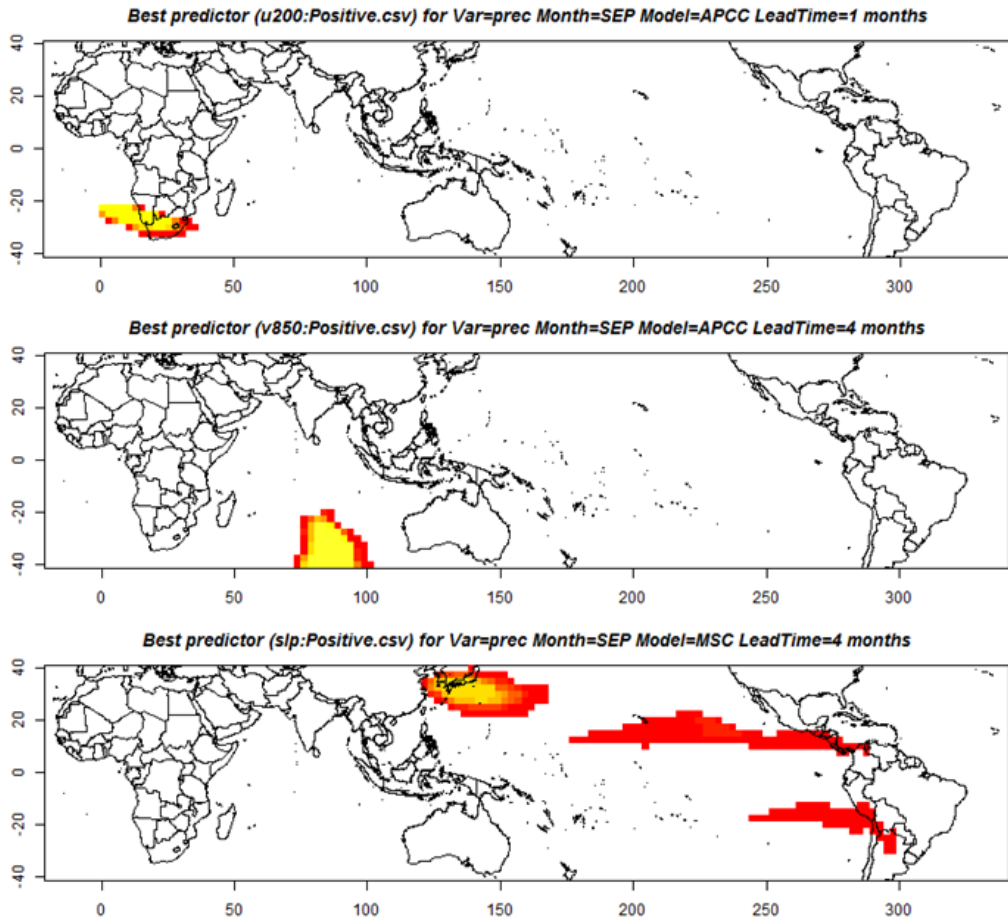


Figure 13 5월~9월 강수량에 대해 MWR 방법에 의해 선정된 예측인자

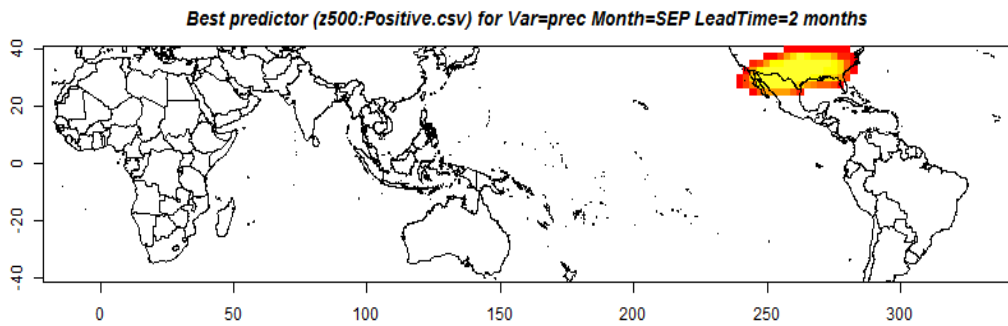


Figure 14 5월~9월 강수량에 대해 MWR-Obs 방법에 의해 선정된 예측인자

Figure 15 및 Table 13은 강수에 대하여 월별, 선행예측기간별 계산된 Temporal Correlation Coefficient (TCC)값을 보여주고 있다. 제시된 결과는 매월 예측을 수행하는 경우에 대하여 개별 예측모형의 단순평균인 MME와 관측값을 비교하여 얻은 결과이다. 3월 및 6월 강수의 경우에는 선행예측 기간에 따라서 TCC값이 변동이 없는데 이는 각각 3개월 및 6개월 선행예측기간에만 모형이 선정되었기 때문이다. 일반적으로 선행예측기간이 증가하면 예측성능이 감소하는 것으로 알려져 있으나 7월 강수의 1~3개월 선행예측 경우에는 반대의 경향을 보이고 있다. 이는 선행예측기간에 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 8월 강수 예측의 경우에는 선행예측기간의 증가에 따라 TCC값이 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 이와 같이 선행예측기간의 증가에 따라서 TCC값이 감소 경향은 MME에 사용된 개별 예측자료의 양에 의해서도 영향을 받을 수 있다. 즉 선행예측기간이 짧은 경우 선행예측기간이 긴 경우와 비교하여 보다 많은 예측모형 결과가 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 16 및 Table 14에 제시되어 있다. 기온의 경우는 Table 12에서와 같이 9월에 가장 많은 예측모형이 선정되었고, 상세화 방법의 경우 SBC방법이 주로 선정되었다. 결과적으로 9월 기온 예측의 경우에 모든 선행기간에 대하여 예측성이 전체적으로 높은 결과를 보였고, 역학적 예측모형 결과를 기반으로 하는 SBC 상세화 방법이 선정되어 선행예측기간의 증가에 따라서 TCC값이 감소하는 결과를 보였다. 다음으로는 10월에 다수의 SBC방법을 기반으로 한 예측모형이 선정되었으며 10월의 경우에도 비교적 높은 예측성을 보이고 있다. 기온의 경우 4월, 7월, 8월에 3개월보다 긴 선행예측기간에 대해서 예측이 어려운 것으로 나타났다.

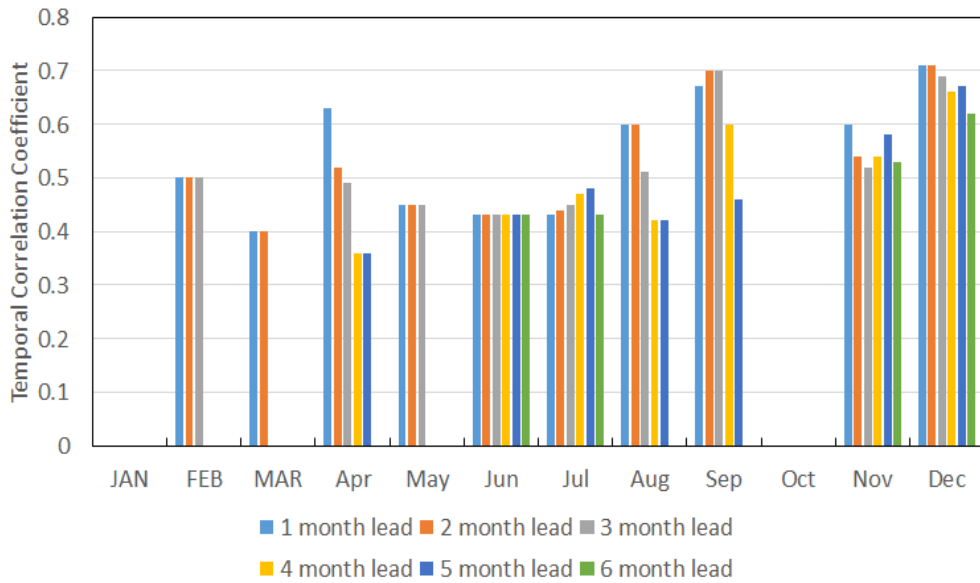


Figure 15 선행예측기간에 따른 월별 TCC (강수량, 매월 예측 수행 경우)

Table 13 선행예측기간에 따른 월별 TCC (강수량)

Month	1 month	2 month	3 month	4 month	5 month	6 month
JAN	.	.	.	.	.	.
FEB	0.5	0.5	0.5	.	.	.
MAR	0.4	0.4	.	.	.	.
APR	0.63	0.52	0.49	0.36	0.36	.
MAY	0.45	0.45	0.45	.	.	.
JUN	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43
JUL	0.43	0.44	0.45	0.47	0.48	0.43
AUG	0.6	0.6	0.51	0.42	0.42	.
SEP	0.67	0.7	0.7	0.6	0.46	.
OCT	.	.	.	.	.	.
NOV	0.6	0.54	0.52	0.54	0.58	0.53
DEC	0.71	0.71	0.69	0.66	0.67	0.62

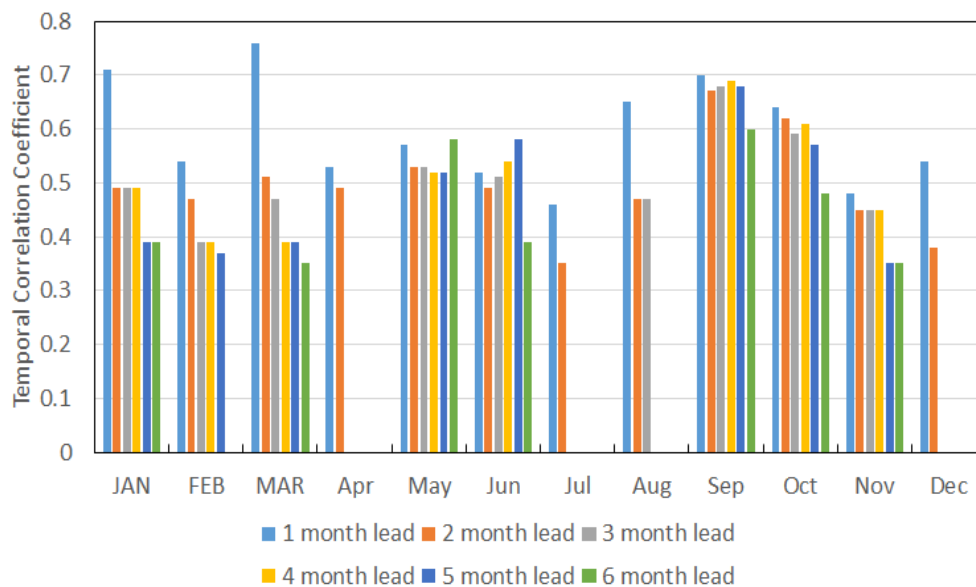


Figure 16 선행예측기간에 따른 월별 TCC (기온, 매월 예측 수행 경우)

Table 14 선행예측기간에 따른 월별 TCC (기온)

Month	1 month	2 month	3 month	4 month	5 month	6 month
JAN	0.71	0.49	0.49	0.49	0.39	0.39
FEB	0.54	0.47	0.39	0.39	0.37	.
MAR	0.76	0.51	0.47	0.39	0.39	0.35
APR	0.53	0.49	.	.	.	.
MAY	0.57	0.53	0.53	0.52	0.52	0.58
JUN	0.52	0.49	0.51	0.54	0.58	0.39
JUL	0.46	0.35	.	.	.	.
AUG	0.65	0.47	0.47	.	.	.
SEP	0.7	0.67	0.68	0.69	0.68	0.6
OCT	0.64	0.62	0.59	0.61	0.57	0.48
NOV	0.48	0.45	0.45	0.45	0.35	0.35
DEC	0.54	0.38	.	.	.	.

Figure 17은 농업비점오염 부하량에 중요할 것으로 판단되는 5월~9월의 강수량 예측 자료의 시계열과 산포도를 보여 주고 있다. 예측 조건은 매월 예측하는 대신에 4월달에 5월~10월까지 5개월에 대해 예측하는 것을 가정으로 하였다. 시계열 자료를 살펴보면, 예측자료의 후처리를 통하여 예측자료의 연변동성을 관측의 연변동성과 같게 보정하였기 때문에 관측값의 범위를 잘 재현하고 있는 것을 볼 수 있다. 실시간 예측을 위한 예측모형의 구성은 1983~2013년의 과거기간을 사용하였기 때문에 2014년 및 2015년의 경우는 통계적 방법에 의해 발생할 수 있는 과대적합 (Overfitting) 문제로부터 자유롭다고 판단할 때, 예측된 강수량이 관측 강수량을 잘 재현하는 결과를 보였다.

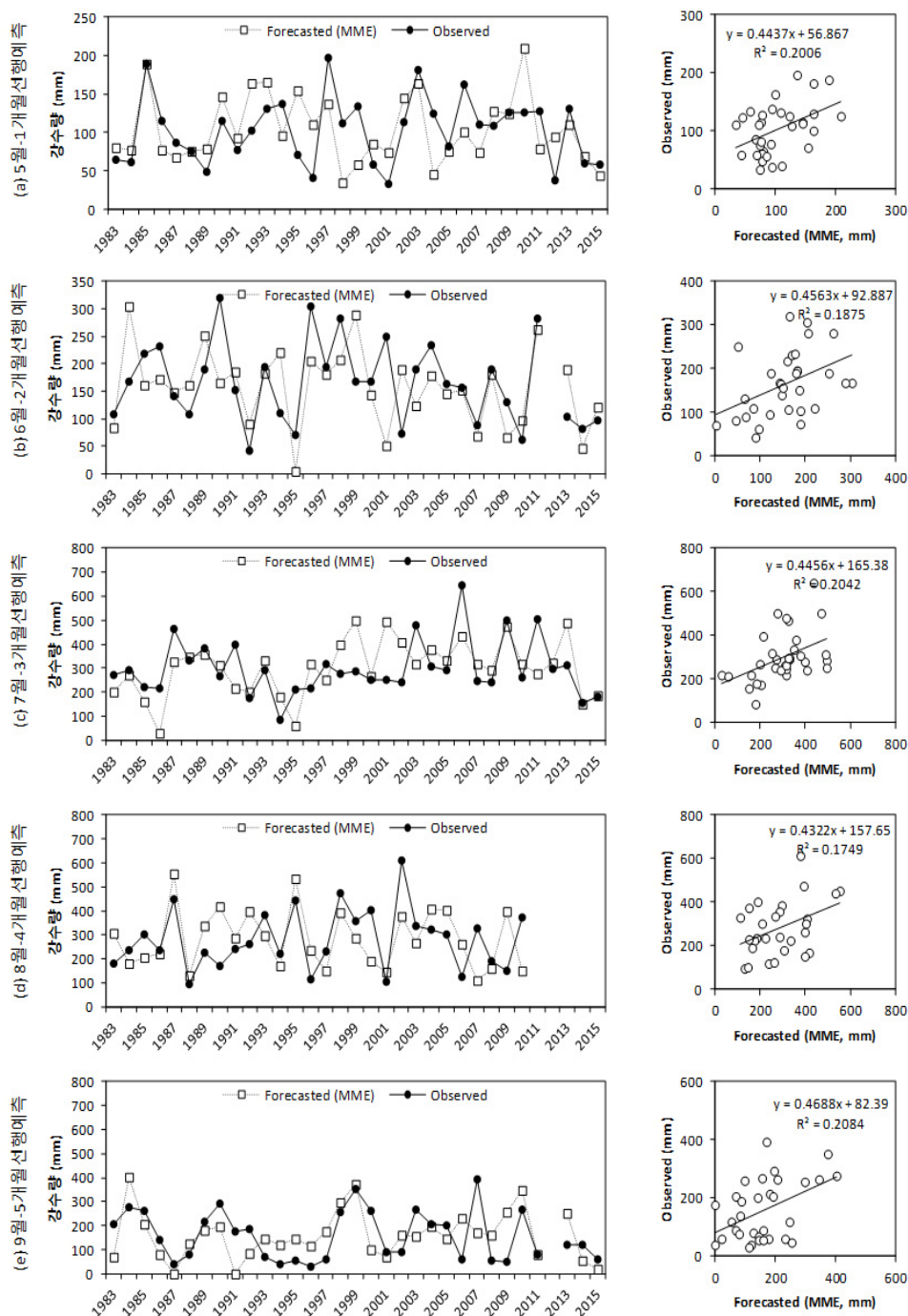


Figure 17 5월~9월 강수 예측 시계열 및 산포도 (4월예측)

3.3 필지규모 농업비점오염 부하량 정량화

물관리 또는 시비관리 등과 같은 영농방법의 변경을 통한 농업비점오염 부하량 변화를 정량화하기 위해서는 사용하는 모형이 영농방법을 고려할 수 있어야 하며 관측에서 보여 지는 경향성을 잘 모의할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 대조구, 물관리, 시비관리에 대한 각각 2개 필지에 대해서 개별적으로 모형의 보정을 수행하지 않고 물관리 및 시비관리에 대한 영농방법만을 필지별로 고려하였고 나머지 매개변수는 전체 6개 필지에 동일한 값을 사용하였다. 이는 모든 조건이 동일한 상황에서 모형이 영농방법의 변경에 따른 영향만을 얼마나 잘 반영하는지 평가하기 위함이다.

Figure 18은 유출량에 대한 모의 결과를 보여준다. 대조구에 대해서는 모든 기간에 대해서 실제 관측 유출량과 비교하여 과대 모의한 반면 물관리 포장의 경우에는 과소 모의한 결과를 보였다. 두 경우 모두 연간 강우변동에 따른 유출량의 연변동 경향을 동일하게 모의하였다. 반면 시비관리 포장의 경우에는 양적으로는 비슷한 결과를 보였으나 2014년의 유출량을 과소 모의하는 결과를 보였다. 관측과 모의 결과 모두 물관리 포장에서 2015년의 유출량이 가장 작게 나타났는데 이는 2015년 기간 동안 관개기 강우량이 과거 평균 강우량에 비해 작았고 물꼬 높이의 증가로 인한 물관리 포장에서 유효 강우의 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

대조구와 비교하여 3년 평균 유출량의 경우 관행(대조구) 대비 물관리 포장의 지표배수량은 관측의 경우 평균 24% (관행: 395mm, 물관리: 298mm) 감소되는 것으로 나타난 반면에 APEX-Paddy 모의 결과는 64% (관행: 485mm, 물관리: 177mm)로 물꼬 높이를 70mm에서 120mm로 변경함에 따라서 저류로 인한 배출량의 저감 효과를 과대하게 모의했다. 반면 시비관리 포장에서의 3년 평균 유출량은 관행 대비 관측의 경우 평균 12% (관행: 395mm, 시비관리: 347mm) 감소되는 것으로 나타난 반면에 APEX-Paddy 모의 결과는 34% (관행: 485mm, 시비관리: 321mm)의 저감 효과를 보였다. 시비관리에 의한 이와 같은 효과는 모든 조건이 동일하다면 유출량의 변화가 없어야 하지만 이와 같은 차이는 관행구의 관개량이 상대적으로 컸던 점을 고려할 때 포장별로 관개되는 유량이 다르기 때문에 발생하는 결과로써 불확실성 관점에서 고려되어야 할 요소라 판단된다.

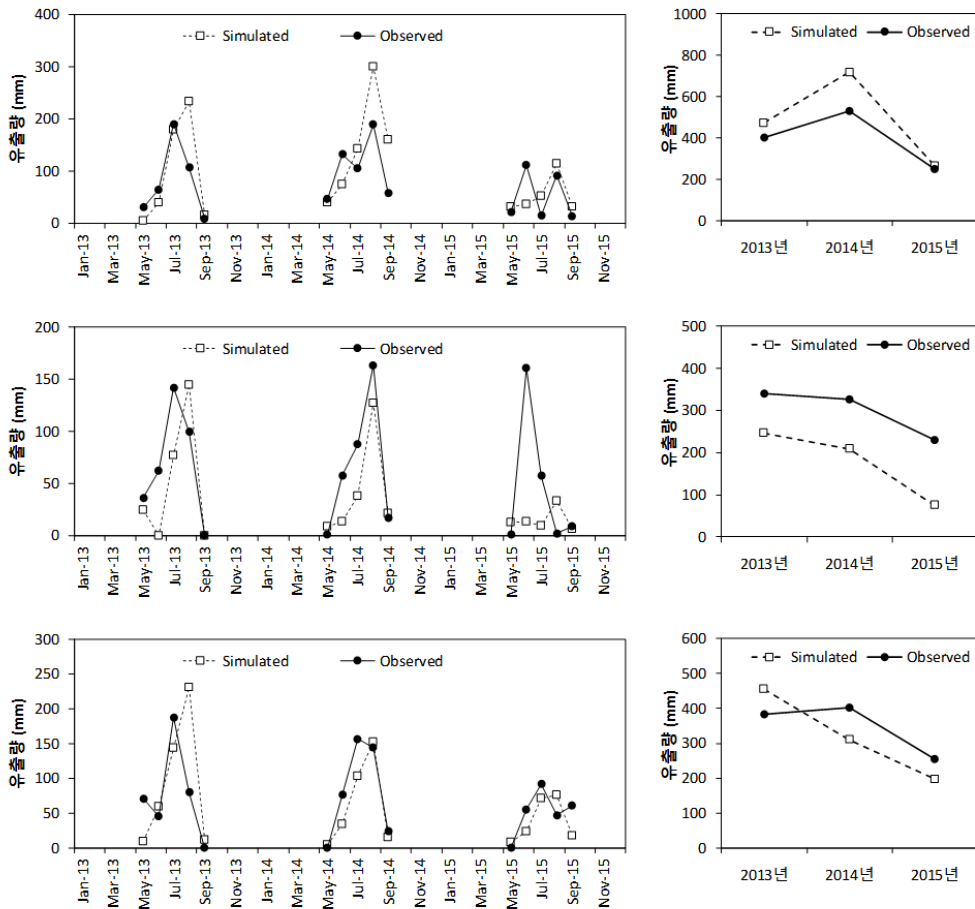


Figure 18. 영농관리 방법에 따른 유출량 모의 결과 (상: 대조구, 중: 물관리, 하: 시비관리)

Figure 19는 영농관리 방법에 따른 TN 배출부하량의 비교를 보여 준다. 관행구, 물관리구, 시비관리구의 모든 경우에 대한 모의 결과는 실제 관측 부하량과 비교하여 현저하게 작게 모의하는 경향을 보였다. 부하량의 양은 과소 모의하였으나 연도별 부하량의 변동 경향은 물관리구를 제외하고 관측과 비슷한 모의 결과를 보였다.

대조구와 비교하여 3년 평균 TN 배출부하량의 경우 관행(대조구) 대비 물관리 포장의 지표배수량은 관측의 경우 평균 27% (관행: 12.7kg/ha, 물관리: 9.2kg/ha) 감소되는 것으로 나타난 반면에 APEX-Paddy 모의 결과는 0% (관행: 1.5kg/ha, 물관리: 1.5kg/ha)로 관측에서는 물꼬 높이를 변경함에 따라서 배출부하량 감소하는 경

향을 보였으나 모의 결과는 이를 반영하지 못하였다. 시비관리 포장에서도 3년 평균 TN 배출부하량은 관행 대비 관측의 경우 평균 29% (관행: 12.7kg/ha, 시비관리: 8.9kg/ha) 감소되는 것으로 나타난 반면에 APEX-Paddy 모의 결과는 8% (관행: 1.5kg/ha, 시비관리: 1.4kg/ha)의 저감 효과를 보여 물관리 포장이 경우와 비슷한 결과를 보였다.

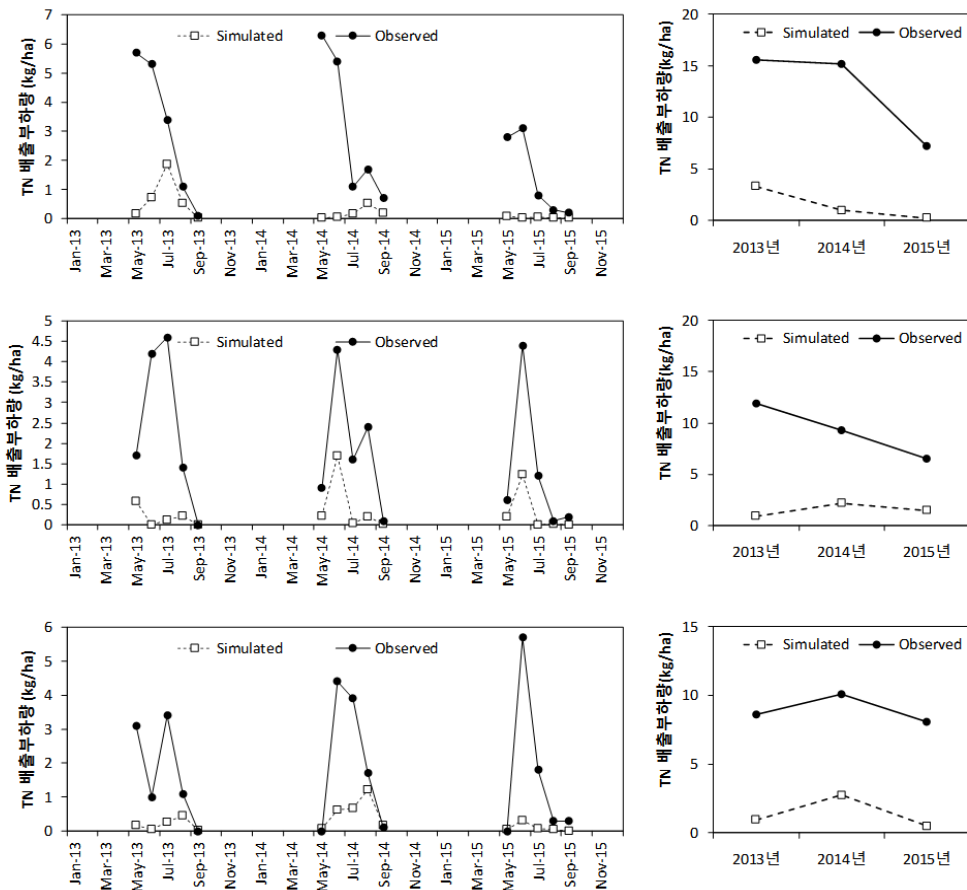


Figure 19 영농관리 방법에 따른 TN 배출부하량 모의 결과 (상: 대조구, 중: 물관리, 하: 시비관리)

Figure 20은 영농관리 방법에 따른 TP 배출부하량의 비교를 보여 준다. 관행구의 2013년도 결과를 제외하고는 TN 부하량 결과에서와 같이 모든 경우에 대한 모의 결과는 실제 관측 부하량과 비교하여 작게 모의하는 경향을 보였다. 연도별 부하량의 변동 경향은 시비관리 포장에서만 관측과 비슷한 모의 결과를 보였다.

대조구와 비교하여 3년 평균 TP 배출부하량의 경우 관행(대조구) 대비 물관리 포장의 배출부하량은 관측의 경우 평균 39% (관행: 1.3kg/ha, 물관리: 0.8kg/ha) 감소되는 것으로 나타난 반면에 APEX-Paddy 모의 결과는 79% (관행: 0.9kg/ha, 물관리: 0.2kg/ha)로 물꼬 높이 변경에 따른 배출부하량의 감소 경향을 보였다. 시비관리 포장에서도 3년 평균 TP 배출부하량은 관행 대비 관측의 경우 평균 27% (관행: 1.3kg/ha, 시비관리: 0.9kg/ha) 감소되는 것으로 나타난 반면에 APEX-Paddy 모의 결과는 68% (관행: 0.9kg/ha, 시비관리: 0.3kg/ha)의 저감 효과를 보여 물관리 포장의 경우와 비슷한 결과를 보였으나 모의 결과는 이를 잘 반영하지 못하였다. 따라서 전체적으로 관측의 경우 강우량이 적은 해에는 강우량이 많은 해에 비해 배출부하량은 상대적으로 적게 배출되는 경향을 보였다.

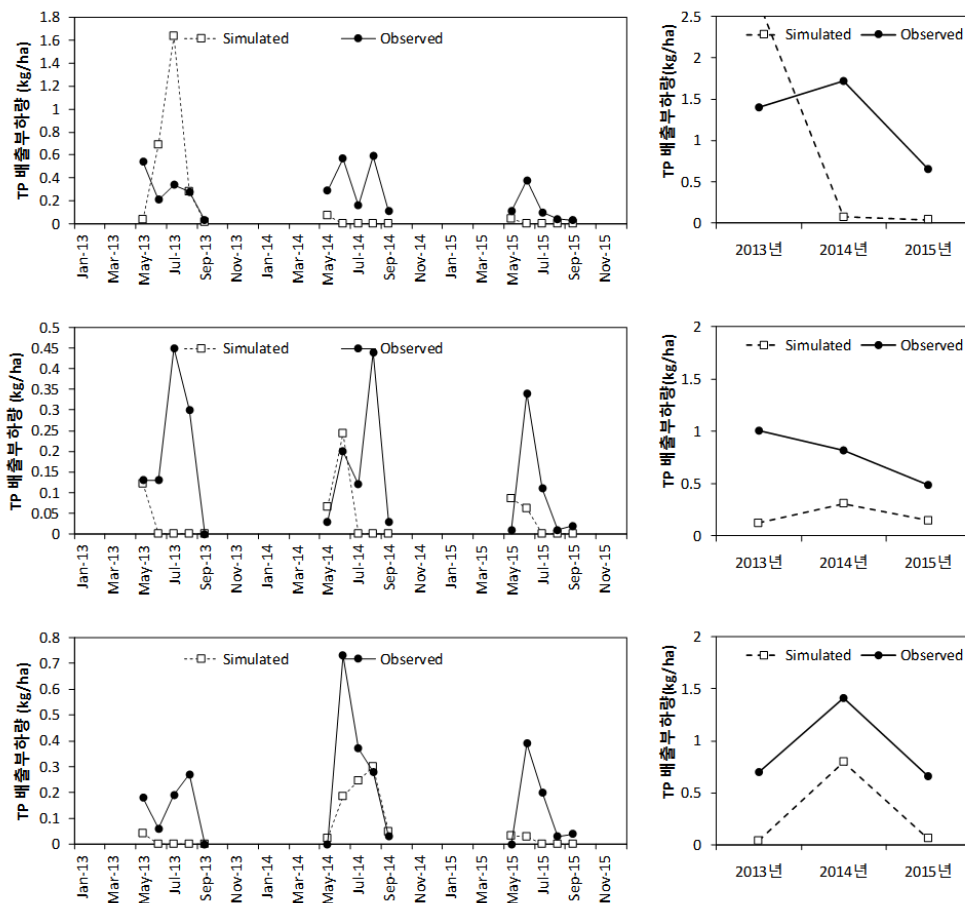


Figure 20 영농관리 방법에 따른 TP 배출부하량 모의 결과 (상: 대조구, 중: 물관리, 하: 시비관리)

3.4 유역규모 비점오염 부하량 정량화

전주A TMDL 단위유역에서의 직접유출에 의한 비점오염 부하량을 정량화하기 위해서는 직접유출과 기저유출의 분리가 중요하다. 기저유출을 분리하기 위해서는 일단위 유량값이 필요한데 TMDL 관측지점에서는 8일단위 유량 및 수질 관측 값만이 존재한다. 일유량 자료가 있는 WAMIS 전주 지점의 유량 중에서 TMDL 전주A 관측 지점의 유량값이 존재하는 동일 날짜의 유량만을 비교하면 Figure 21-a에서와 같이 추세선의 기울기가 2.0907로서 1보다 큰 값을 보이는데 이는 인접한 두 관측 지점 사이에 유량의 유입이 없다면 비슷한 값을 보여야 하지만 TMDL 관측지점에서의 유량값이 WAMIS 관측유량과 비교하여 2009년 7월 1일 (TMDL: 900.3cms vs WAMIS: 370.6cms)와 같이 큰 값을 보이기 때문이다. 유량값이 큰 차이를 보이는 3개 시점의 자료를 제거하면 Figure 21-b에서와 같이 추세선의 기울기가 0.987의 값을 보였다. 따라서 본 연구에서는 일단위 유량은 WAMIS 전주 관측소의 값을 수질은 TMDL 전주A 지점의 자료를 사용하였다.

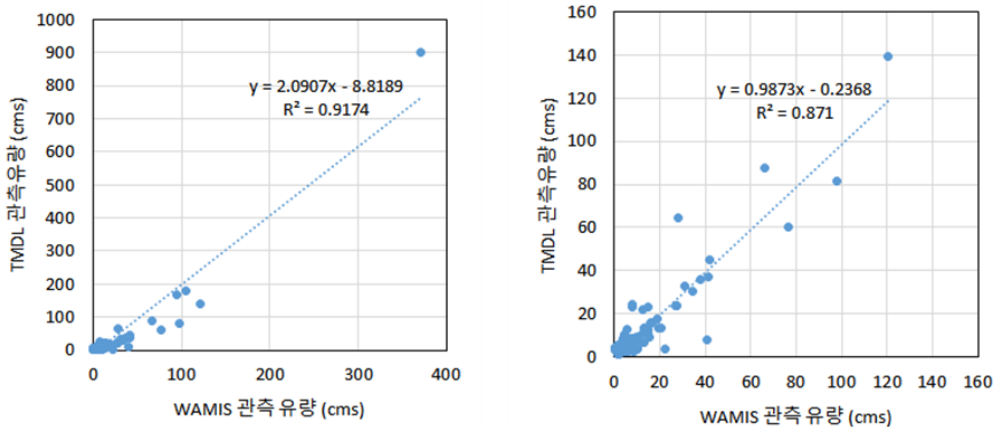


Figure 21 WAMIS 유량(전주)과 TMDL 유량(전주A) 비교

WAMIS 전주 지점의 일유량은 전주 하수종말처리장을 포함한 환경기초시설로부터 방류된 유량을 포함하고 있다. 따라서 강우 시 발행하는 직접유출에 의한 비점오염 부하량을 정량화하기 위해서는 제일 우선적으로 점원오염으로부터 방류되는 유량을 전체 유량으로부터 제거한 후 남은 유량 중에서 기저유출과 직접유출을 분리하는 것

이 필요하다. WAMIS 일유량 자료로부터 하수종말처리장의 일방류량 자료를 빼는 경우 유량값이 음의 값을 보이게 되는데 이는 실제 방류된 모든 유량이 유역의 말단 까지 도달하는 것이 아니기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 전주지점의 월유량에서 환경기초시설에 의한 월단위 방류량에 손실율을 곱하여 유량값이 0보다 크게 되는 시점을 환경기초시설 방류량의 손실율로 결정하였다. 본 연구에서는 Figure 22에서와 같이 30%의 손실율을 고려하였다. 우기인 여름철에는 강수량에 의한 유량으로 인하여 음의 값을 보이는 경우가 없으나 건기인 겨울철에는 유역으로부터의 기저유출만이 전체 총유량에 기여하기 때문에 음의 값이 발생하는 경우가 많다. 따라서 실질적인 손실율을 고려하기 위해서는 유역으로부터의 직접유출의 기여가 없는 갈수년의 겨울철 유량을 기준으로 손실율을 산정하는 것이 바람직할 것이다.

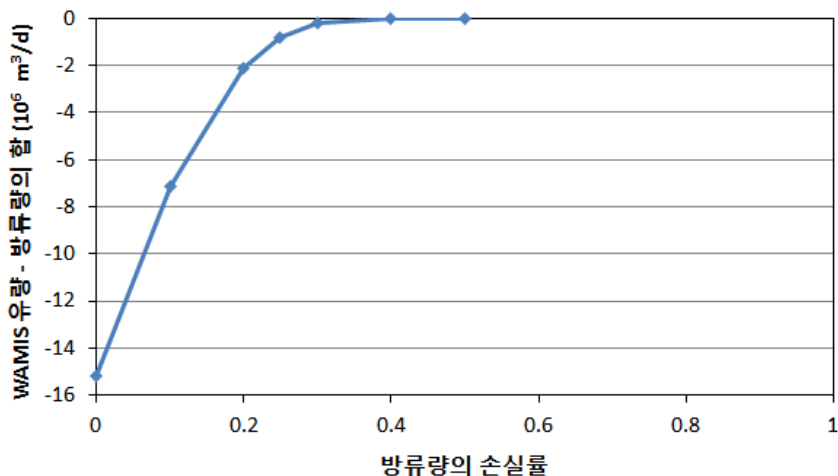


Figure 22. 손실율에 따른 유량차(WAMIS 유량 - 방류량)의 합

WAMIS 유량 관측소의 총유량에서 상류의 환경기초시설에 의한 방류량을 30%의 손실율을 고려한 후 제외하고 남은 일단위 유량을 Nathan and McMahon (1990)의 방법을 이용하여 기저유출을 분리하였다. Figure 23은 강우에 의해 발생한 유량 중에서 기저유출 및 직접유출의 월유량의 변화를 보여 주며 기저유출은 2011~2012년 기간동안에 총유량의 17.3%를 보였다. 총유량에 대한 기저유출량의 비율은 향후 직접유출에 의해 발생하는 부하량으로부터 총유출에 의해 발생하는 부하량을 산정하는데 사용하였다.

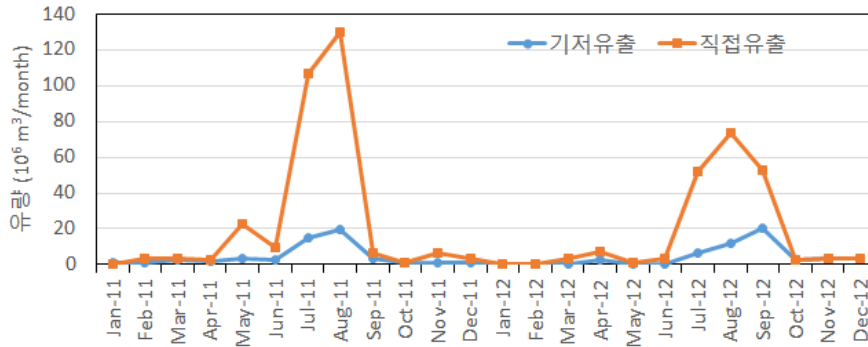


Figure 23 기저유출 분리에 따른 기저유출 및 직접유출의 월단위 변동

토지이용별 직접유출량 및 직접유출에 따른 BOD, TN, TP의 배출부하량은 지형의 경사를 고려하여 SCS CN 방법으로 유역 내 격자별로 직접유출량을 계산한 뒤 Table 9와 같이 유량가중농도 (Event Mean Concentration, EMC)에 보정계수를 곱하여 계산하였다. EMC는 전국의 토지피복 별 적계는 기타 나지와 같이 3개로부터 많게는 주거지역의 201개의 상이한 모니터링 자료로부터 계산된 평균적인 의미의 값이다. 따라서 모든 유역에 동일한 EMC를 적용하는 경우에는 유역의 특성에 따라서 유역 내에서 점 및 비점오염원에 의해 발생하는 전체 발생부하량에 유달율을 곱하여 산정된 유역 말단에서의 유달부하량과 유역 출구점에서 관측 수질 및 유량에 의해 계산된 관측 유달부하량의 합이 다를 수 있다. 따라서 본 연구에서는 모의된 유달부하량과 관측된 유달부하량이 같아지도록 EMC 산정에 있어서 모든 수질항목에 동일한 보정계수를 고려하였다. Figure 24 ~ Figure 26은 보정계수를 고려하지 않고 전주A 단위유역에서의 2011년 및 2012년에 발생된 직접유출량, TN, TP의 배출부하량의 공간적 분포를 보여 준다.

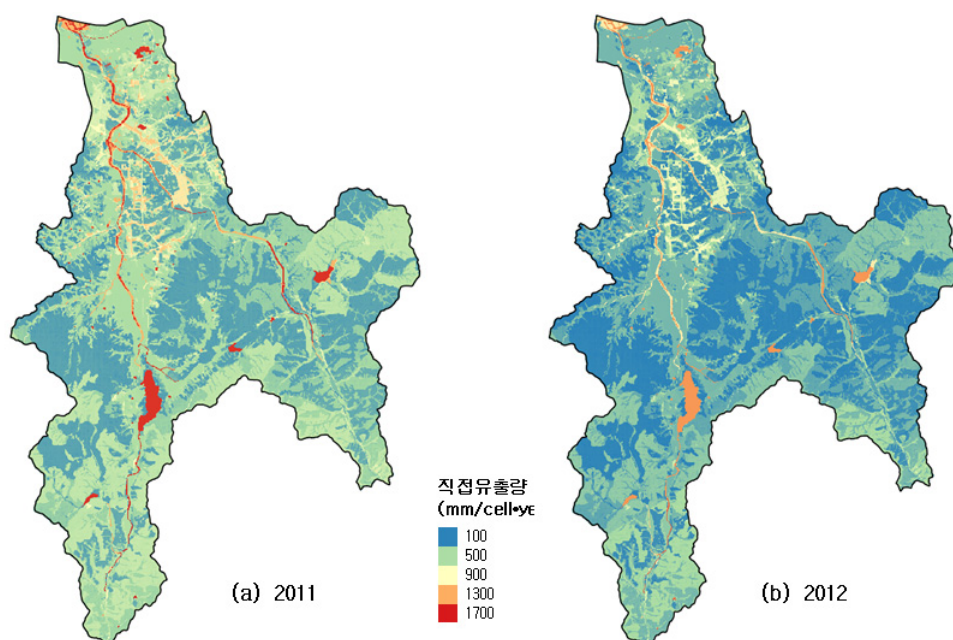


Figure 24. 전주A 단위유역의 직접유출량 (좌측: 2011년, 우측: 2012년)

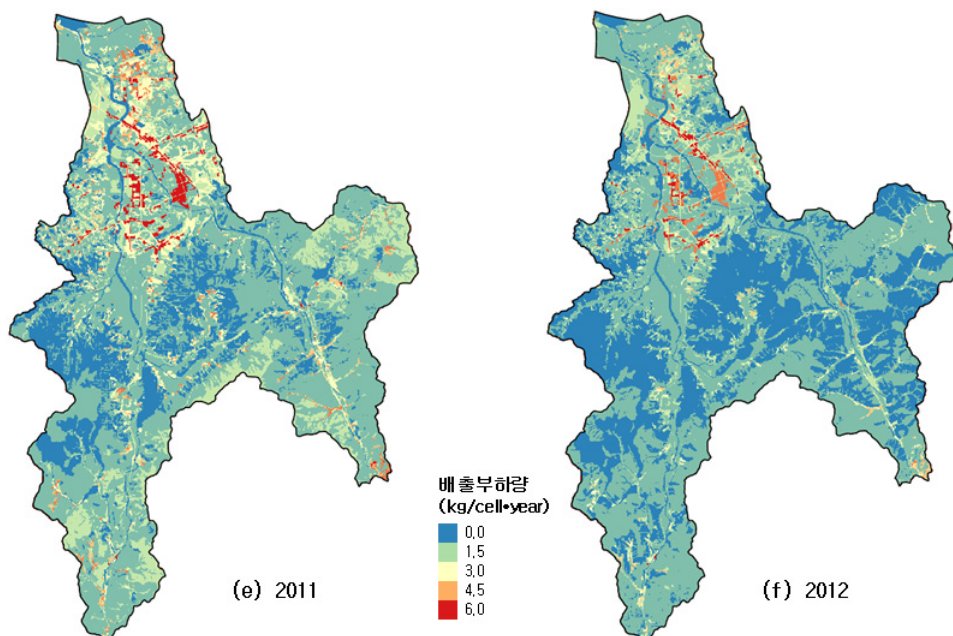


Figure 25. 전주A 단위유역의 TN 배출부하량 (좌측: 2011년, 우측: 2012년)

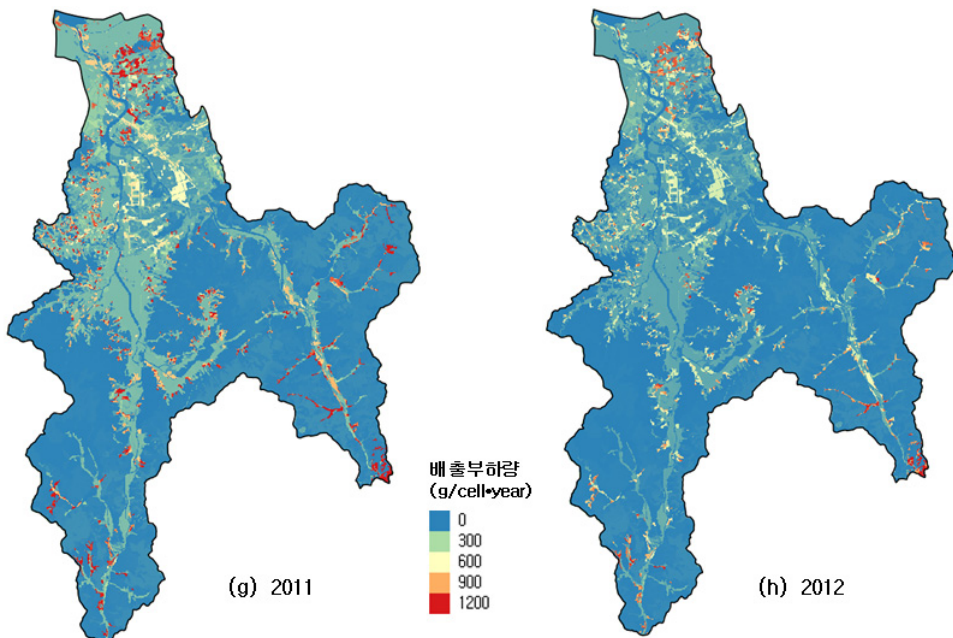


Figure 26 전주A 단위유역의 TP의 배출부하량 (좌측: 2011년, 우측: 2012년)

기저유출에 포함된 비점오염의 배출부하량은 앞에서 기저유출 분리를 통해 계산된 월별 직접유출의 비를 이용하여 계산한 후 직접유출에 의한 배출부하량에 더하여 비점오염에 의한 전체 배출부하량을 산정하였다. 반면에 점원오염에 의한 배출부하량은 일 단위 방류량에 방류수의 수질 농도를 곱하여 계산하였으며 Figure 27은 전주 하수종말처리장의 월단위 배출부하량의 변화를 보여 준다.

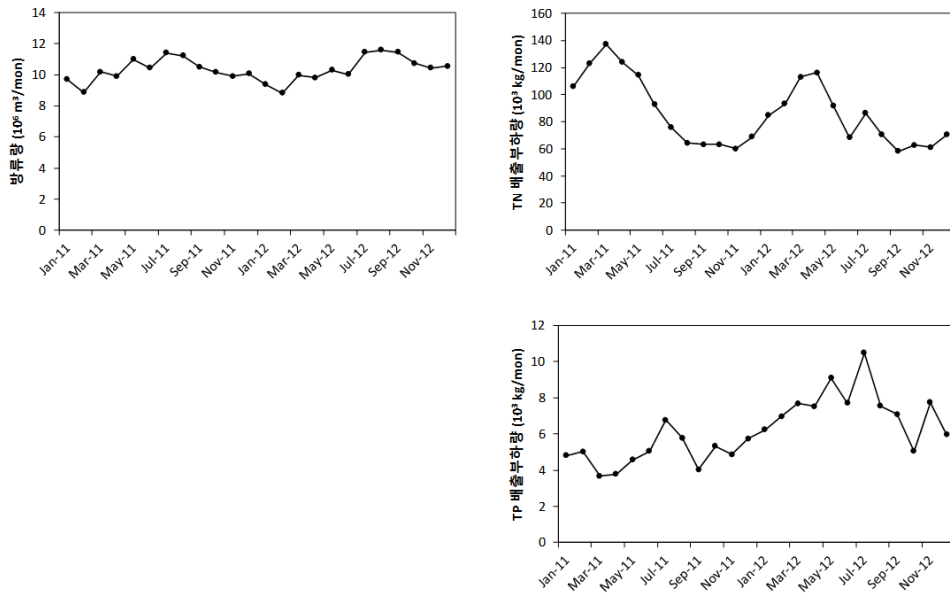


Figure 27 전주 하수종말처리장에서의 월별 방류량 및 배출부하량 변화

마지막 단계로 유역말단으로부터의 각각의 오염원까지의 거리를 고려한 유달율을 Equation 10과 같이 고려하였다. 유달율은 하천 및 지표면의 구분 없이 유역출구점까지의 유하거리만을 고려하여 가장 먼 지점에서의 유달율의 최소값이 TN의 경우 0.2 값이 되도록 결정하였다. 즉 점원 및 비점오염 모두 동일 지점에 위치한 경우에 동일한 유달율을 사용한다. Figure 28는 전주A 단위유역의 각 격자점으로부터 유역말단까지의 거리 및 유달율의 공간적 분포를 보여준다.

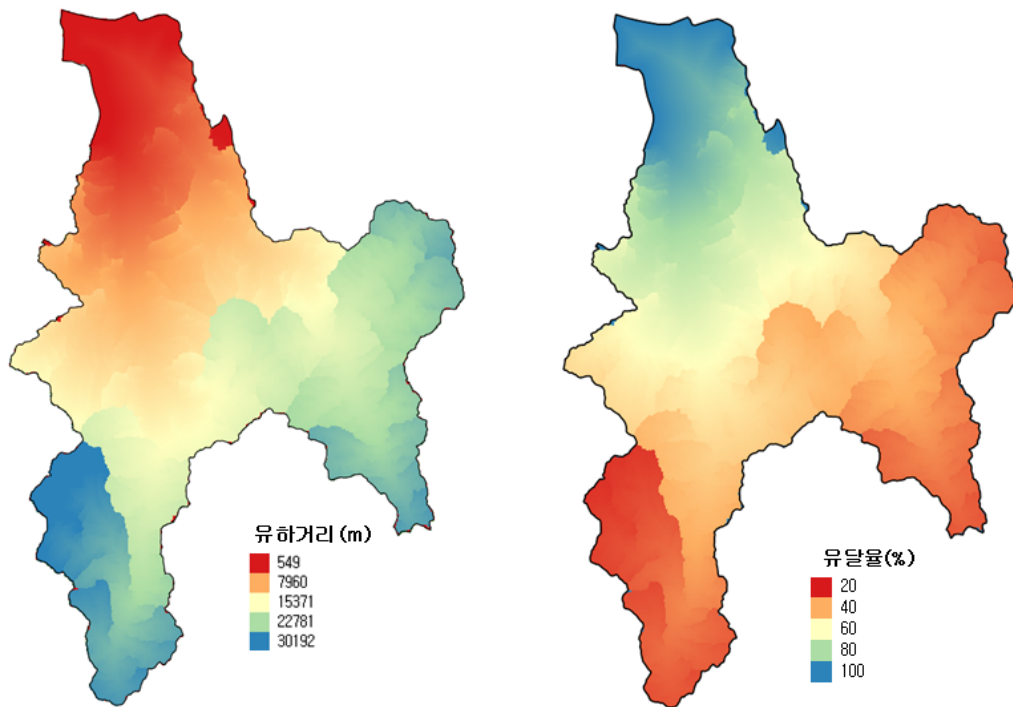


Figure 28 유역말단까지의 유하 거리 (전주A 단위유역)

최종적으로 유역 출구점에서 계측된 월평균 유달부하량과 앞에서 산정된 점원 및 비점오염 유달부하량의 합을 비교하면서 앞에서 언급한 EMC의 보정계수를 결정하였다. Figure 29은 EMC 보정계수를 3.0으로 하였을 때의 부하량의 변화를 보여준다. 보정계수 결정에 있어서 10월에서 다음 해 6월의 기간을 중심으로 보정하였다. 그래프에서 7월~9월 사이에 유역 내에서 산정된 유달부하량이 말단에서 계측된 유달부하량과 비교하여 작은 값을 보이는데 이는 유역내 부하량 산정에 사용된 점원오염 부하량의 경우 강우시 합류식 하수도 월류수 (CSO)등에 의한 유입량이 고려되지 않아 발생하는 것으로 판단된다.

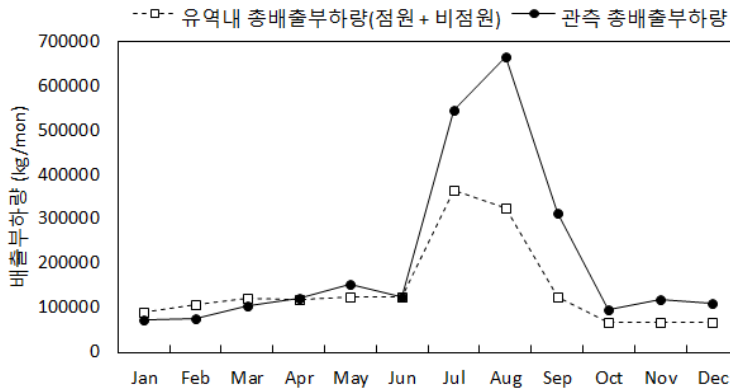


Figure 29 월평균 유역내 총 TN 배출부하량과 관측 배출부하량의 비교 (2011~2012, 전주A 단위유역)

TN의 경우 앞의 과정에서 결정된 EMC 보정계수 및 소멸계수를 이용하여 산정된 유역 말단에서의 항목별 유달부하량의 2011 ~ 2012년 평균 월별 변화량은 Figure 30 과 같으며 계산된 기여율은 Table 15과 같다. 전주A 유역의 경우 갈수기인 10월부터 다음해 4월까지의 전체 유달부하량 중에서 점원오염이 차지하는 비중이 높으며 5월 ~ 6월부터는 비점오염이 차지하는 비중이 점차 증가하다가 우기인 7월 및 8월에 비점 오염의 기여율이 높게 나타나다 다시 9월 ~ 10월에 감소하는 경향을 보였다. 1월부터 12월의 전체 기간에 대한 연평균 유달부하량 중에서 논으로부터 발생되어 기여하는 양은 전체의 6.9%, 비점오염 전체가 기여하는 양은 43.5%, 점원오염이 기여하는 양은 56.5%로 점원오염의 비중이 다소 높은 것으로 나타났다.

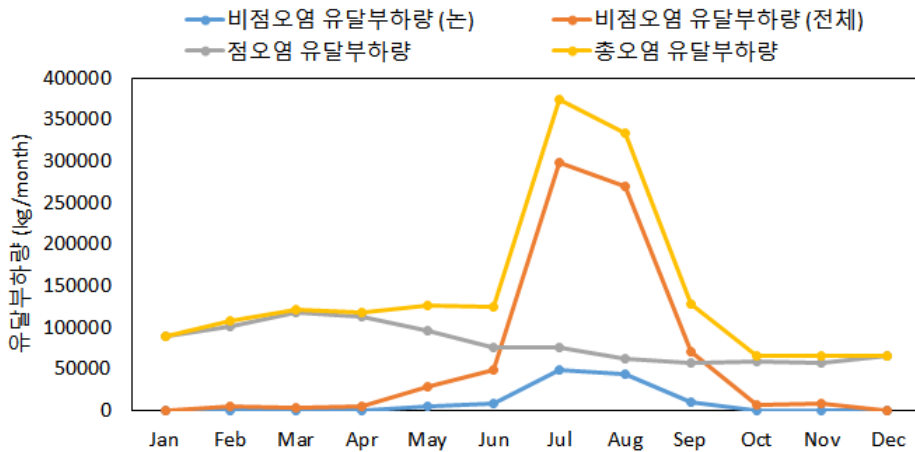


Figure 30 TN 유달부하량의 월별 평균 변화량 (2011 ~ 2012년 평균)

Table 15 비점오염 및 점오염의 TP 총유달부하량에 대한 기여율 (2011년~2012년 평균, 전주A TMDL 단위유역)

기여율(%)	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	전체
비점오염(논)	0.0	0.8	0.2	0.4	3.7	6.4	13.0	13.0	8.5	1.5	1.7	0.0	6.9
비점오염(전체)	0.1	5.7	2.8	4.5	23.4	39.3	79.6	81.0	55.3	11.3	14.1	1.5	43.5
점오염	99.9	94.3	97.2	95.5	76.6	60.7	20.4	19.0	44.7	88.7	85.9	98.5	56.5

강수량의 경년 변화에 따른 유달부하량의 변동성을 살펴보면 Figure 31과 같다. 전주 기상관측소에서의 2011년 및 2012년의 5월에서 10월 사이의 강수량은 각각 1325mm와 1083mm의 값을 보였으며 이에 따라서 같은 시기의 비점오염에 의한 유달부하량 및 기여율 모두 2011년의 경우에 2012년과 비교하여 높은 경향을 보였다.

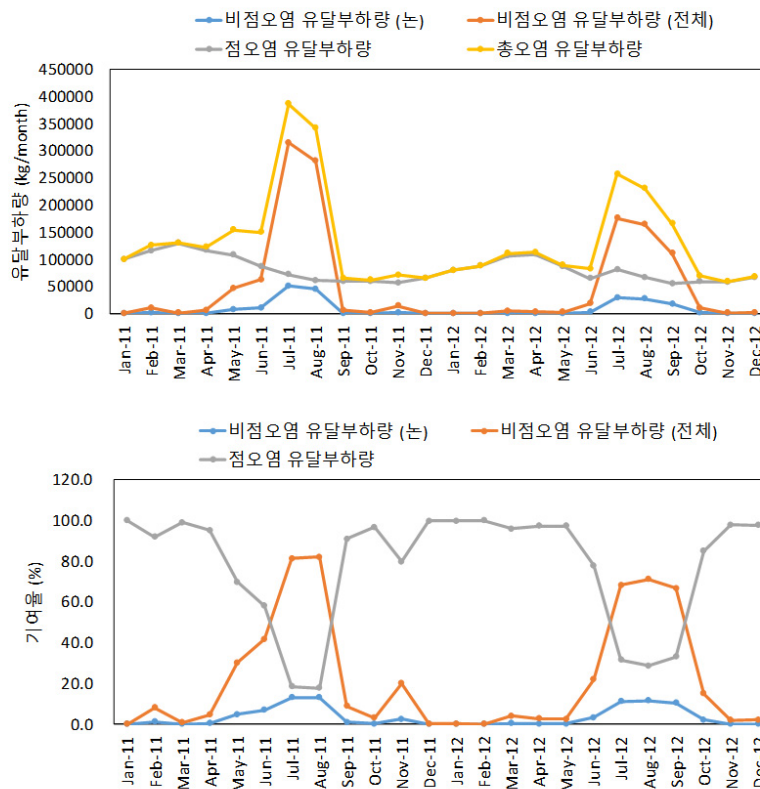


Figure 31 월별 TN 유달부하량 (상) 및 항목별 기여율 (하) (전주A 단위유역)

TP의 경우에는 앞서 유역에 대해 선정된 EMC 보정계수를 고정하여 놓고 관측 및 모의 유달부하량의 비교를 통해 소멸계수를 결정하였다. TP의 경우 소멸계수는 0.00013으로 TN의 0.000045와 비교하여 높은 값을 보였는데, 이는 유달울에 있어서는 유사에 흡착되어 이동되는 인의 특성상 유역 출구점으로부터 멀어질수록 TN보다 낮은 유달 특성을 보이는 것으로 판단된다. Figure 32는 보정된 소멸계수 및 유하 거리에 따른 유달울의 변화를 보여 준다.

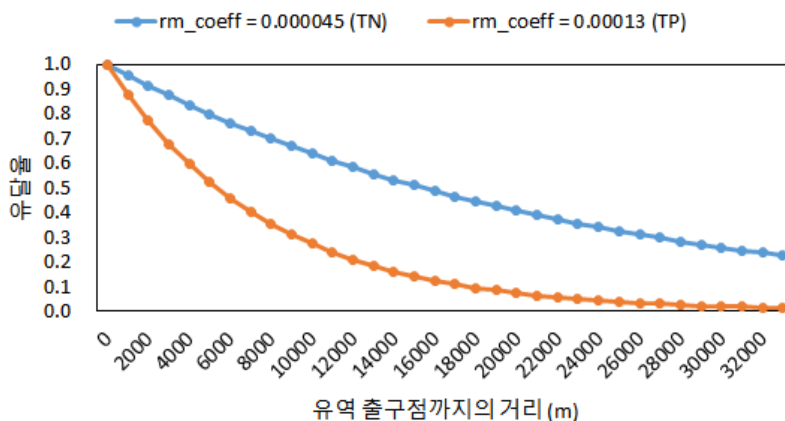


Figure 32 보정된 소멸계수 및 유하 거리에 따른 유달울 변화

유역에 대해 결정된 EMC 보정계수와 TP에 대해 결정된 소멸계수를 이용하여 모의된 2011년부터 2012년 기간의 유역 출구점에서의 월별 유달부하량과 관측 유달부하량의 비교 결과는 Figure 33과 같다. 2년 기간의 총유달부하량은 모의값과 관측값이 각각 189454 kg 및 217468 kg으로서 모의값이 관측값과 비교하여 12.8% 작게 모의하는 결과를 보였으나 시계열의 경향성은 R^2 값이 0.83으로 높은 값을 보였다.

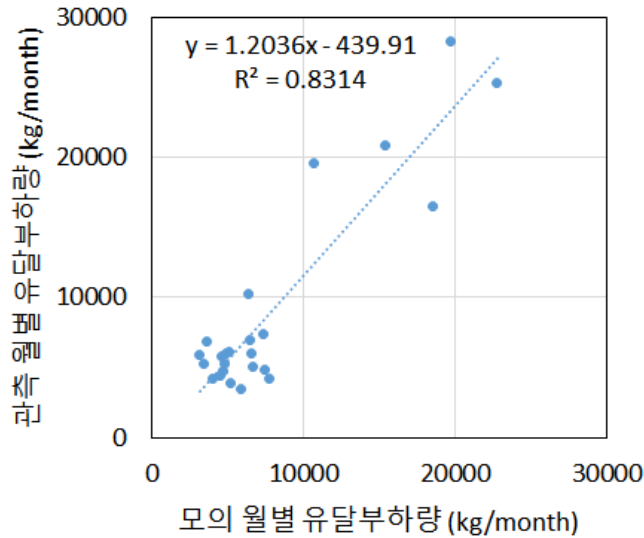


Figure 33 전주A 유역 출구점에서의 월별 모의 및 관측 TP 유달부하량의 비교 (2011년 ~ 2012년)

Table 16은 2011년부터 2012년까지의 월평균 유달부하량에 대한 오염원 항목별 기여율의 보여주고 있다. TN과 마찬가지로 비점오염의 기여율은 7월 및 8월에 높은 값을 보였고 갈수기에는 전주A 유역의 특성 상 10% 미만의 작은 값을 보였다. 전체 기간에 대한 기여율을 살펴보면 점원오염 및 비점오염이 각각 57.1% 및 42.9%의 기여율을 보여 점원오염이 높게 나타났다. 강우의 경년 변화에 따른 부하량 항목별 변동성은 Figure 34에 제시되어 있다. TN과 마찬가지로 TP 또한 비점오염 부하량 및 기여율 모두 2011년의 높은 강수량으로 인하여 2012년과 비교하여 높은 경향을 보였다.

Table 16 비점오염 및 점오염의 TP 총유달부하량에 대한 기여율 (2011년~2012년 평균, 전주A TMDL 단위 유역)

기여율(%)	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	전체
비점오염(논)	0.0	1.3	0.4	0.6	5.0	7.6	15.2	15.6	9.7	1.7	1.5	0.0	8.8
비점오염(전체)	0.1	7.5	4.4	6.0	24.6	37.5	71.9	75.0	47.6	10.3	10.2	1.3	42.9
점오염	99.9	92.5	95.6	94.0	75.4	62.5	28.1	25.0	52.4	89.7	89.8	98.7	57.1

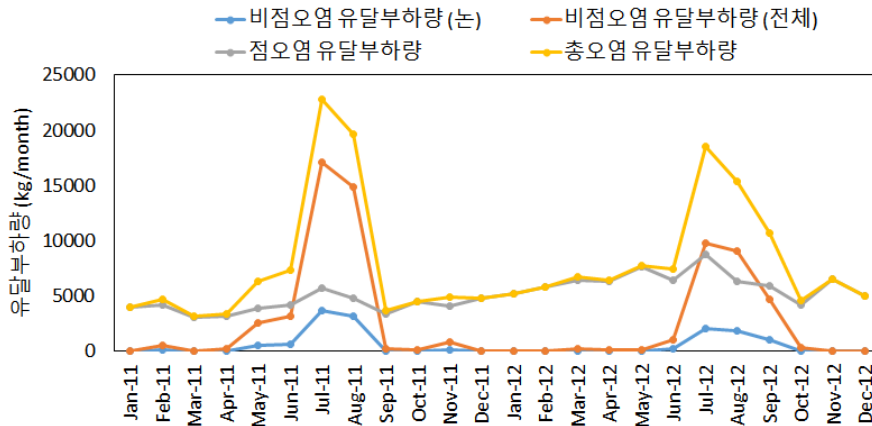


Figure 34 월별 TP 유달부하량 (상) 및 항목별 기여율 (하) (전주A 단위유역)

3.5 유역규모 비점오염 부하량 예측 및 최적관리방안 제시

Figure 35는 4월에 예측한 5월부터 10월까지의 6개월에 대한 전주 기상 관측소에
서의 강수량 및 전주A 단위유역 말단에서의 TN 및 TP에 대한 비점오염 유달부하량
의 예측 결과를 보여 주고 있다. 강수량의 경우 2년 (5월 ~ 10월) 동안의 강수량은 관
측 및 예측이 각각 2408 mm와 2312 mm로 관측과 비교하여 4% 작게 예측하였다.
TN 비점오염 유달부하량의 경우는 관측 및 예측이 각각 1193394kg 및 876656kg으
로 26.5% 작게 예측한 반면, TP 비점오염 유달부하량의 경우는 관측 및 예측이 각각
63022kg 및 54706kg으로 13.2% 작게 예측하였다. 전체적으로 강수량, TN, TP 모
두 관측과 비교하여 작게 예측되었으며 TN이 TP와 비교하여 강수량의 예측에 민감하
게 반응하는 결과를 보였다. 연도별 변화를 살펴보면, 2012년도에 2011년과 비교하
여 많은 강수량으로 인하여 TN 및 TP의 관측 유달부하량 또한 2012년도에 2011년
도와 비교하여 낮은 결과를 보였는데, 예측에 있어서도 강수량, TN 및 TP 유달부하
량 모두 2012년도에 2011년도와 비교하여 낮은 값을 보였다. 다만 월별 예측 결과는
강수량의 경우 7월 ~ 8월의 높은 강수량을 6월~7월 기간에 모의하였고 결과적으로
TN 및 TP의 유달부하량 또한 강수량과 비슷한 경향으로 모의된 결과를 보였다. 이에
따른 R^2 값은 강수량, TN, TP에 대하여 각각 0.39, 0.35, 0.38의 결과를 보였다.

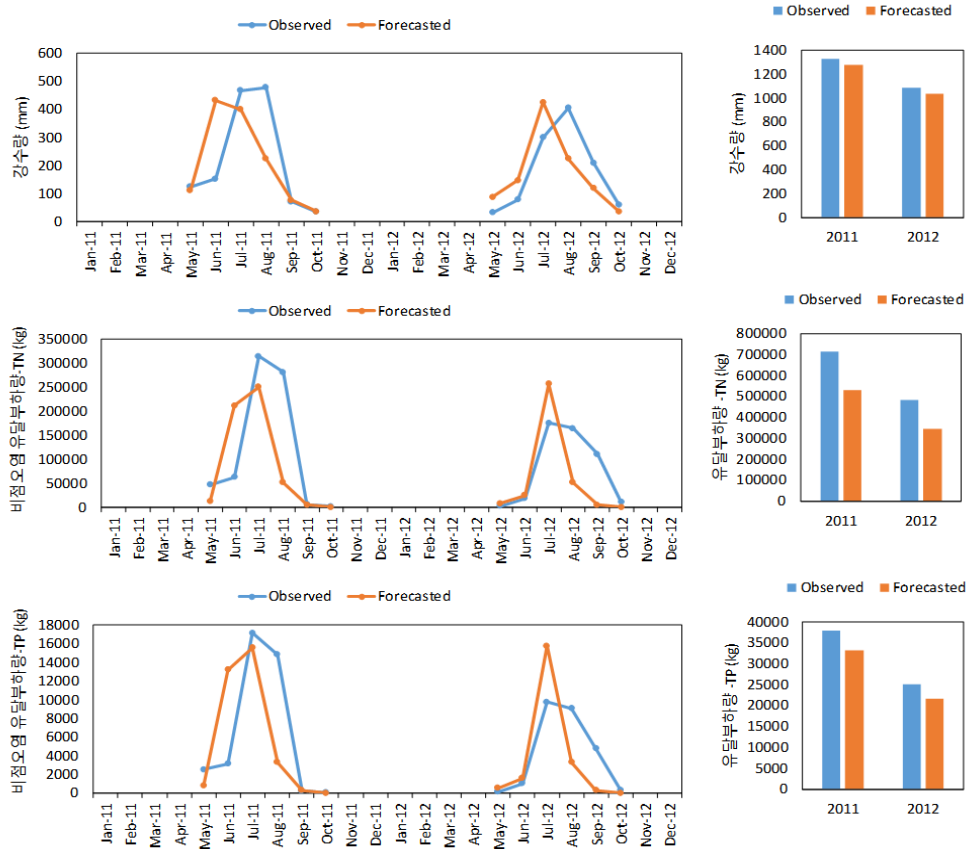


Figure 35 강수량 (전주:상), TN 비점오염 유달부하량 (전주A: 중), TP 비점오염 유달부하량 (전주A: 하) 4월 예측결과

계절예측 정보를 활용한 유역규모 비점오염 부하량 저감을 위한 최적관리방안 제시를 위해서는 계절예측 정보 생산, 영농방법 변경에 따른 농업비점오염 부하량의 정량화, 유역규모에서의 비점오염 부하량 정량화 등 세부 항목으로부터의 결과가 제공되어야 한다. Figure 35에서와 같이 유역규모에서 유달부하량이 결정되면 본류하천에 대한 수질예측을 통해 하천 구간별 수질을 예측할 수 있고 Figure 36에 제시된 개념을 기반으로 위험도를 평가 관리할 수 있다. 다만 계절예측 시간규모에서는 시스템에 스트레스를 주는 자연적인 위해 현상 자체를 감소시킬 수 있는 방법은 없고 사회시스템 및 기반시설의 변화 또는 관리를 통해서 자연재해로 인한 내부 취약성을 감소시킬 수 있다고 본다. 따라서 계절예측 규모에 맞는 노출(Exposure), 민감도(Sensitivity), 적응능력(Adaptive capacity) 등 3개 항목에 대한 적합한 지표 선정을 통해 위험도가 고려되어야 한다.

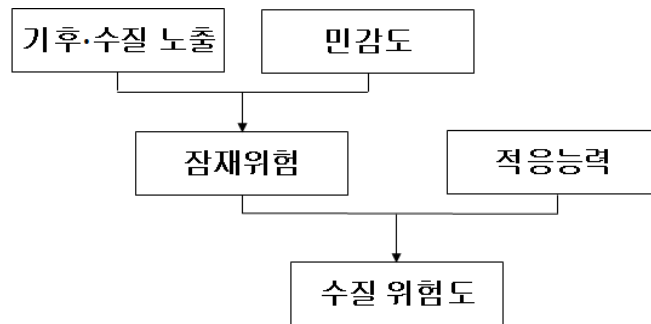


Figure 36 위험도 개념 틀

기후 및 수질 관련 노출 지표들로는 계절예측 정보의 선행예측 기간을 고려할 때 수개월 동안에 변화가 없는 정적(static)인 항목들은 사용할 수 없으며, 계절예측 정보를 입력으로 하여 유역·수질 모델링을 통해서 예측되는 본류 하천의 수질 정보를 노출 관련 지표로 사용할 수 있을 것이다. 최종적인 위험도는 지역의 시스템이 동일한 기후·수질 위해(hazard)에 노출이 되더라도 대상 시스템의 수질에 대한 민감도(Sensitivity)에 따라서 달라질 수 있다. 민감도 지표는 상수도 이용 인구수, 농·공업 용수 사용량 등과 같은 하천수의 직접적인 사용에 더하여 하천의 친수환경 및 생태적인 관점에서 관련 지표들이 고려될 수 있을 것이다. 유역 내의 수개월 시간 규모에서 고려 가능한 적응능력(Adaptive capacity)과 관련해서는 하천으로 유입되는 부하량을 줄이기 위한 최적관리방안 합의 및 적용을 위한 협의체(거버넌스) 구성 유무, 재원 마련 여부, 하수종말처리장의 방류수 고도처리를 통한 점오염원 저감 여부, 댐·보·저수지 연계 운영을 통한 여유 수량 확보 여부 등이 중요할 수 있다. 본 연구의 대상인 비점오염원 관점에서 볼 때, 다양한 토지피복에 따른 배출부하량 중에서 관리방안의 적용을 통해 저감 가능성이 가장 높은 분야는 영농 관련 인위적인 행위가 가장 빈번하게 발생하는 농업지역일 것이다. 따라서 국내의 상황이 농민의 자발적인 참여를 통한 최적관리기법의 실제 농경지에의 적용과는 멀더라도, 본 연구를 통해 제시되는 영농관리기법의 개선을 통한 유역규모 비점오염 정량화는 적응능력의 관점에서 중요하다 볼 수 있다. 본 연구에서는 전주 하수종말처리장이 위치해 있는 전주A 단위유역을 대상으로 살펴보았으며 비점오염에 의한 기여율이 점오염과 비교하여 낮게 나타나는 결과를 보였다. 하지만 향후 전체 단위유역에 대한 분석을 통해 비점오염 특히 농경지의 기여율이 높은 유역들을 선정하여 제시된 비점오염 저감 기법의 적용을 고려하는 것이 필요하리라 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 계절예측 자료의 수질관리 분야 활용에 있어서 상세화 기법 개발을 통한 수평적 연계를 기반으로 농업비점오염 관리를 위한 의사결정 과정의 수직적 연계를 위한 구체적인 활용 방안을 제시하고자 하였다. 계절예측 자료를 활용하여 전주 A TMDL 단위유역에서의 비점오염 및 점오염에 의한 유달부하량의 정량화를 방법을 제시하였다. 기존 연구의 필지 규모에서의 논으로부터의 모니터링 결과를 살펴볼 때 영농기 강수량이 비점오염 배출부하량에 중요한 요소로 작용하는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 상세화된 계절예측 정보의 비점오염 부하량 정량화 및 대응방안의 수립을 위한 의사결정 과정에 활용할 수 있는 가능성을 제시하였다.

- 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, 관측자료 기반의 다른 방법인 Observation-based Moving Window Regression (MWR-Obs) 방법을 추가하여 월단위 강수와 기온을 예측하는 실시간 예측시스템을 개발하였다.
- 계절예측 상세화 시스템은 일반 사용자가 실시간 계절예측을 위해 쉽게 사용할 수 있도록 사용자 매뉴얼과 함께 오픈소스인 R 기반 패키지로 개발되었다.
- 갱신된 개별 예측모형들을 이용하여 한반도 강수 및 기온 예측을 위한 예측모형이 재구축 되었고 예측성을 평가하였다.
- APEX-Paddy 모형은 관행구와 비교하여 물관리구 및 시비관리구에서 모두 배출량의 저감 효과를 과대하게 모의했다.
- APEX-Paddy 모형은 논에서의 TN 및 TP의 배출부하량의 연변동성 경향은 비슷하게 모의하였지만 정량적으로 과소 모의하는 경향을 보였다.
- 전주A 단위유역 내 점원오염 배출부하량, 기저유출에 의한 비점오염 배출부하량을 고려한 후 유역 말단의 관측 유달부하량과의 비교를 통하여 토지이용별 비점오염 유달부하량 및 점오염원 유달부하량 등 각각의 오염원별 유달부하량을 정량

화 할 수 있는 기법을 제시하였다.

- TN 및 TP의 경우 비점오염은 전주A 단위유역 말단에서의 전체 유달부하량 중에서 각각 43.5% 및 42.9%로 점원오염과 비교하여 다소 낮은 결과를 보였다.
- 2011년 ~ 2012년 동안의 6개월 (5월 ~ 10월) 선행기간에 대한 강수량, TN 및 TP 유달부하량 예측 결과는 관측값과 비교하여 각각 4%, 26.5%, 13.2% 작게 모의되었다.
- 연도별 TN 및 TP 유달부하량 모두 2012년의 경우 2011년과 비교하여 낮게 예측되어 관측과 비슷한 경향을 보여 주었으나, 월별 예측 결과는 관측에서 나타난 2011년도 7월 ~ 8월의 높은 유달부하량을 예측하는데 어려움을 보였다.

REFERENCE

- 국립농업과학원 (2015). APEX 모델 사용 매뉴얼 <0806 ver>
- 국립환경과학원 (2011). 농촌지역 비점오염원 식감효과 정량화 연구(2)
- 김민경, 노기안, 서명철, 방혜선, 나영은, 한민수, 김명현, 이정택 (2006). 논에서 발생하는 비점원 오염 저감을 위한 최적관리방안, 농업과학기술원
- 이혜원, 최남희, 이용석, 최정현 (2011). 강우강도와 토지이용을 고려한 비점오염물질 부하량 산정에 관한 연구, 대한환경공학회지 33:572-577.
- 조재필 (2014). 계절예측 정보를 활용한 통합 수문수질 장기 예측 기술 개발, APEC기후센터
- 조재필 (2015). 장기 수질예측 자료의 갈수기 수질관리 의사결정 활용 방안, APEC기후센터
- 진영민, 박승우, 김상민, 강문성, 강민국 (2002). CREAMS-PADDY 모형을 이용한 논에서의 영양물질 부하 추정, 농촌계획 8(1):60-68.
- 최지용 (2008). 강우강도와 토지이용을 고려한 비점오염물질 부하량 산정에 관한 연구, 한국환경정책평가 연구원 정책보고서
- 한국건설기술연구원 (2007). 지표수 수문성분 해석 시스템 개발 단계 연구보고서
- 한국농어촌공사 (2015). 새만금유역 농업비점오염 저감기법 개발 연구
- 환경부 (2011). 4대강수계 비점오염저감시설 모니터링 및 유지관리
- Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams (1998). Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. Journal of American Water Resources Association. 34(1): 73-89.
- Beasley, D. B., L. F. Huggins, and E. J. Monke (1980). ANSWERS: A model for watershed planning. Transactions of the ASAE. 23(4): 938-944.
- Bicknell, B. R., J. C. Imhoff, J. L. Kittle, Jr., A. S. Donigan, Jr., and R. C. Johanson (1993). Hydrologic Simulation Program-FORTRAN (HSPF): User's Manual for Release 10. Report No. EPA/600/R-93/174, Athens, GA: U.S. EPA Environmental Research Lab.
- Cho, J. and S. Mostaghimi (2009). Dynamic Agricultural Non-point Source Assessment Tool (DANSAT): Model Development, Biosystems Engineering, 102(4):486-499.
- _____, G. Vellidis, D. Bosch, R. Lowrance, and T. Strickland (2010). Water quality effects of simulated conservation practice scenarios in the Little River Experimental Watershed, Journal of Soil and Water Conservation, 65(6):463-472.
- Flanagan, D. C., and M. A. Nearing (1995). WEPP Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10. W. Lafayette, IN: National Soil Erosion Research Laboratory.

- Jeon J. H., C. G. Yoon , K. W. Jung , and J. H. Jang (2007). HSPF-Paddy simulation of water flow and quality for the Saemangeum watershed in Korea. *Water Sci Technol*, 56(1):123-30.
- Kim S. M., S. W. Park, J. J. Lee, B. L. Benham, H. K. Kim (2007). Modeling and assessing the impact of reclaimed wastewater irrigation on the nutrient loads from an agricultural watershed containing rice paddy field. *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng*, 42(3):305-15.
- Knisel, W. G. (1980). CREAMS: A field-scale model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems. Conservation Research Report No. 26, U.S.DepartmentofAgriculture,ScienceandEducationAdministration.
- Mahalanobis, P. C. (1936). On the generalised distance in statistics. *Proceedings of the National Institute of Sciences of India* 2 (1): 49-55
- Leonard, R. A., W. G. Knisel, and D. A. Still (1987). GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. *Transactions of the ASAE*.30(5): 1403-1418.
- Nathan, R. J. and T. A. McMahon (1990). "Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis." *Water Resources Research* 26(7): 1465-1473.
- Osmond, D., D. Meals, D. Hoag, and M. Arabi, (Eds.) *How to Build Better Agricultural Conservation Programs to Protect Water Quality: The NIFA-CEAP Experience*. Ankeny, IA: Soil and Water Conservation Society
- Williams J. R., Jones C. A., and P. T. Dyke (1984) A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* 27:129-144.
- _____, J. G. Arnold, and R. Srinivasan (2000). *The APEX Model*. Texas A&M Blackland Research Center Temple, BRC Report No. 00-06.

부록 1. 계절예측 상세화 프로그램 사용자 매뉴얼

Hindcast기간에 대한 모형 구축

응용분야(수자원 및 농업 분야) 활용을 위한 계절예측 상세화 자료 활용은 크게 두 단계를 거친다. 우선 첫단계에서는 대상지역(한반도)에서의 월단위 강수량과 기온에 대한 예측성을 높이는 것을 목적으로 하고 두번째 단계에서는 응용분야 영향평가를 위해 사용되는 다양한 모형에 적합하게 시·공간적으로 규모축소된 자료를 생산하는 것을 목적으로 한다. 본 매뉴얼은 첫번째 과정에서 다양한 기후정보를 활용하여 과거 기간에 대해 실제 예측상황을 재현하여 구축된 예측모형의 예측성을 평가하는 절차를 포함한다.

1. 필요한 소프트웨어 설치

R 설치: R 프로그램은 Linux, Mac OS, Windows 환경을 지원하고, OS에 맞는 설치 방법 및 파일들은 공식사이트인 CRAN, Comprehensive R Archive Network)에 있다. Window 환경에서의 설치 “Download R for Windows” -> “install R for the first time” 에서 아래 그림과 같이 지원되는 최신 버전을 설치하면 된다. 일반적인 윈도우 프로그램을 설치하듯이 Next (다음) 버튼을 계속 클릭하면 된다. R의 장점 중 하나는 커뮤니티가 잘 발달되어 있고 문제 발생 시 웹검색을 통해서 웬만한 문제에 대한 답을 얻을 수 있다. 이 경우 설치 과정에서 언어 선택을 English를 선택하면 더 많은 정보를 얻을 수 있다.

Rstudio 설치: 앞으로 설명될 내용들은 R을 설치하면 기본적으로 제공되는 R 콘솔 환경에서도 사용이 가능하지만, 보다 쾌적한 통합 환경에서 사용하기 위해서는 RStudio를 사용하기를 권한다. RStudio는 공식사이트에서 RStudio Desktop의 Open Source Edition 버전을 설치하면 무료로 사용할 수 있다.

SForecast 패키지 설치: SForecast package 최신 파일을 요청하여 제공받는다. RStudio의 좌측하단의 Packages 탭의 Install 버튼을 클릭한 후 Figure A-1에서와

같이 팝업 된 윈도우에서 Install from에 Package Archive Files(.zip;.tar.gz)을 선택한 후, 제공 받은 파일을 Browse 버튼으로 지정한 후 Install 버튼을 클릭하면 설치가 진행 된다.

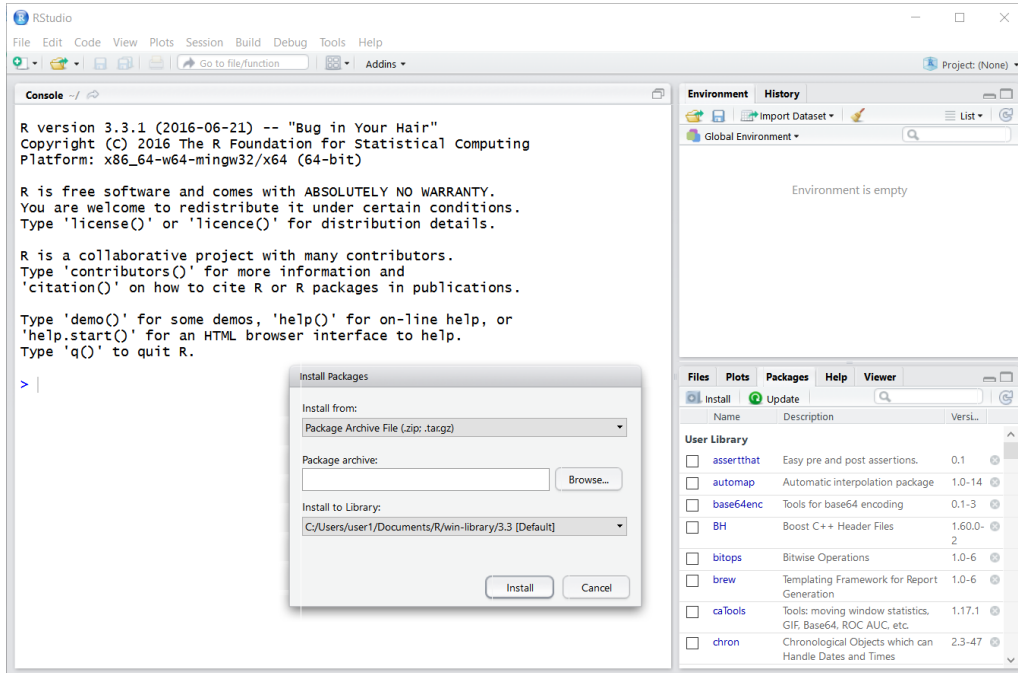


Figure A-1 RStudio에서의 R 패키지 설치

RStudio를 이용한 패키지 설치: 비슷하게 SForecast 패키지에 필요한 아래에 제공된 패키지를 Install from: Repository(CRAN, CRANextra) 옵션을 이용하여 설치한다.

```
install.packages("reshape2")
install.packages("doBy")
install.packages("RODBC")
install.packages("sfsmisc")
install.packages("plyr")
install.packages("raster")
install.packages("maptools")
install.packages("rgdal")
```

```
install.packages("maps")
install.packages("spdep")
install.packages("leaps")
install.packages("segmented")
install.packages("verification")
install.packages("hydroGOF")
install.packages("EcoHydRology")
install.packages("plotrix")
install.packages("ggplot2")
install.packages("XML")
install.packages("chron")
```

2. 프로젝트 환경 설정 및 전역변수 지정

계절예측을 위한 폴더 이름 및 구조는 사용자 편의성을 위해 고정되어 있다. 계절예측을 위해서는 계절예측 상세화에 필요한 자료 및 결과가 저장될 최상위 폴더인 basedir, 프로젝트 이름인 prjname 이름을 지정해 주어야 한다. , 프로젝트에 대한 계절예측 상세화에 필요한 모든 입력 변수를 갖고 있는 envfile의 (prjname과 envfile의 이름이 같도록 설정한다). 사용자는 basedir, prjname을 지정한 후 아래의 예와 같이 함수를 실행시키면 사용자가 지정한 basedir 아래에 필요한 폴더들을 자동으로 생성하고 envfile 파일을 받아 prjname을 파일 이름으로하고 txt를 확장자로 하여 basedir 폴더에 저장한다. 이 과정은 향후 실시간예측에서도 동일하게 수행된다.

```
EnvList = Set.Working.Environment (basedir="F:/SForecast-ADSS", prjname =
"Korea_57Stns")
```

함수를 실행시키면 envfile에 지정된 변수들을 읽은 후 EnvList에 리스트 형식으로 저장하게된다. envfile에는 Figure A-2에서와 같이 39개 변수들이 지정되어 있다. 입력변수들에 대한 설명은 Table A-1에 제시되어 있다.

```

1 mdlrms_3mon="CWB","GDAPS_F","HMC","JMA"
2 mdlrms_6mon="MSC_CANCM3","MSC_CANCM4","NASA","NCEP","PNU","POAMA"
3 adssid="jpc96"
4 adsspw="APCC210RG"
5 ptrrms="slp","sst","t850","u200","u850","v200","v850","z500"
6 NBest=1
7 cpcidxs="PNA","EP","WP","NAO","SOI","NINO3","TNA","TSA","WHWP","MEI","NINO12","NINO4","NINO34","AMO","QBO","ESL"
8 apccidxs="AAO","AO","ATLTRI","EOFPAC","NOI","NP","ONI","PACWARM","TNI"
9 nrange=3
10 minlat=-40
11 maxlat=40
12 MinGrdCnt=20
13 MaxGrdCnt=80
14 smonth=1
15 emonth=12
16 nrange=3
17 syear_obs=1976
18 eyear_obs=2013
19 syear_mme=1983
20 eyear_mme=2007
21 eyear_sim=2016
22 stnfile="kma_asos_57stns.csv"
23 varfile="kma_asos_57stns.csv"
24 idxfile="Cindex-Combined.csv"
25 ptrfile="ptrlist.csv"
26 bndfile="Korea.shp"
27 nrstfile="kma_asos_57stns_nearest_10stns.csv"
28 BCPointOpt="On"
29 BCAreaOpt="Off"
30 CIREgOpt="On"
31 MWRRegOpt="On"
32 MWRObsOpt="On"
33 tscale="hourly"
34 fcstmode="Cont"
35 combnmode=F
36 fiyearmode=F
37 AcuMonths=1
38 precopt=F
39 CRAAdj=1.0

```

Figure A-2 envfile 예시

Table A-1 envfile에 포함된 입력변수 리스트

입력변수명	설명
mdlrms_3mon	3개월 선행예측 모형 리스트
mdlrms_6mon	6개월 선행예측 모형 리스트
adssid	ADSS를 통해 예측자료를 다운로드 받기 위해 필요한 ID
adsspw	ADSS를 통해 예측자료를 다운로드 받기 위해 필요한 Password
ptrrms	개별 예측모형의 MWR 방법에 사용하고자 하는 변수 리스트
NBest	CIR 방법에서 사용하고자 원하는 최대 예측인자(predictor) 갯수 (1로 고정하여 사용할 것)
cpcidxs	NOAA CPC에서 제공하는 기후지수 중에서 예측에 사용하고자 하는 기후지수 리스트
apccidxs	APCC에서 제공하는 기후지수 중에서 예측에 사용하고자 하는 기후지수 리스트
nrange	강수 및 기온의 확률예보를 위해 필요한 범위의 갯수
minlat	MWR 및 MWR-Obs 적용시 예측인자 검색을 위한 위도의 최소값
maxlat	MWR 및 MWR-Obs 적용시 예측인자 검색을 위한 위도의 최대값
MinGrdCnt	MWR 방법에서 예측인자 선정시 요구되는 최소 갯수(1개 격자는 250km 해상도를 갖고 있음)
MaxGrdCnt	MWR 방법에서 예측인자 선정시 요구되는 최대 갯수(1개 격자는 250km 해상도를 갖고 있음)
smonth	계절예측 시작 월

입력변수명	설명
emonth	계절예측 마지막 월
syear_obs	대상 관측소별 공통 관측 시작년도
eyear_obs	대상 관측소별 공통 관측 마지막 년도
syear_mme	Hindcast에 사용될 시작년도
eyear_mme	Hindcast에 사용될 마지막 년도
eyear_sim	예측을 수행할 마지막 년도
stnfile	대상지역의 평균 강수량 및 기온을 계산하기 위해 필요한 관측소 리스트 및 정보를 포함한 파일 이름
varfile	대상지역의 평균 강수량 및 기온에 대한 시계열 자료 파일
idxfile	CIR 방법에 사용되는 기후지수 입력파일 (CIndex-Combined.csv 로 고정)
ptrfile	MWR-Obs 방법에 사용될 예측인자 리스트 및 정보를 포함한 파일 이름
bndfile	관측자료가 격자형일 경우 사용자가 제공한 경계에 대한 평균 강수량 및 기온을 산정하기 위해 필요한 GIS 파일 이름
nrstfile	관측소 자료에 결측이 있는 경우 가장 가까운 관측소 값을 사용하여 보정함 (관측소별 가까운 관측소 리스트를 포함하고 있는 파일 이름)
BCPointOpt	관측소 기반 CBS 방법을 사용하기 위한 Flag (On 또는 Off 중 선택)
BCAreaOpt	격자자료 기반 CBS 방법을 사용하기 위한 Flag (On 또는 Off 중 선택)
CIRRegOpt	CIR 방법을 사용하기 위한 Flag (On 또는 Off 중 선택)
MWRegOpt	MWR 방법을 사용하기 위한 Flag (On 또는 Off 중 선택)
MWRObsOpt	MWR-Obs 방법을 사용하기 위한 Flag (On 또는 Off 중 선택)
tscale	시간적 상세화에 필요한 기상자료의 시간적 규모 (daily 또는 hourly 중에서 선택)
fcstmode	매달 계절예측을 수행하는 경우 Cont 선택, 특정 월에만 계절예측을 수행하는 경우 Once 선택 (Cont 조건으로 고정)
combnmode	앙상블 자료 생성을 위한 옵션 (On인 경우 각월의조 강수 예측 중 Min, Max, Avg의 모든 조합을 고려, Off인 경우 매월의 Min, Max, Avg의 3개 자료세트 생성)
fiyearmode	예측을 수행하는 달의 자료를 최종 결과파일에 포함할지 여부 결정을 위한 flag (On인경우 관측자료 또는 climatology 자료를 사용, off인 경우 예측대상에 대한 자료만을 생산함)
AcuMonths	계절별 결과 분석을 위한 옵션 (3인경우 3개월의 통합된 결과 제공, 월별 결과 생산을 위한 1로 고정할 것)
precopt	예측대상 변수가 강수인 경우 결과의 단위를 mm/day 에서 mm/month로 변경하기 위한 옵션(On인 경우 단위 환산함)
CRAAdj	예측인자 선정시 통계적으로 유의한 TCC값을 조절하기 위한 옵션 (1로 고정하여 사용할 것)

3. 데이터 다운로드

3.1. 예측을 위한 기후정보

계절예측 상세화를 위해서 필요한 모든 자료를 모형을 구동하고자 하는 로컬 컴퓨터로 다운로드 받는다. 계절예측 상세화 흐름도에서 Simple Bias Correction (SBC) 및 Moving Window Regression (MWR) 방법은 APCC에서 매달 16개 기관으로부터 제공받는 개별모형의 예측 결과를 필요로 하며, Climate Index Regression (CIR) 방법은 매달 재관측자료를 기반으로 생산되는 NOAA제공 Monthly Atmospheric and Ocean Time Series 및 APEC Climate Center 제공 기후지수 자료를 필요로 하고, Observation based Moving Window Regression (MWR-Obs) 방법은 매일 실시간으로 업데이트되는 월단위 NCEP/NCAR Reanalysis1 자료를 필요로 한다.

아래 함수를 실행시키는 경우 APCC의 개별 모형에 의한 예측 자료는 basedir/Database/apcc_mme 폴더에, 기후지수 자료는 basedir/Database/ climate-index 폴더에, 재분석 자료는 basedir/Database/reanalysis1 폴더에 저장된다. APCC 개별 모형 자료를 처음 다운로드하는 경우에 updatemode = F로 하고, 실시간 예측을 위해서 최근 자료만을 업데이트하는 경우 updatemode = T 로 설정한다.

Update.Climate.Information (EnvList, updatemode = F)

3.2. 관측자료

기상청(KMA) 일단위/시간단위 관측자료 : 기상청 종관기상관측장비(ASOS)의 일단위 관측자료는 기상자료개방포털의 종관기상관측웹페이지를 통해 다운로드 받는다. 자료를 다운로드 받기 위해서는 회원가입이 필요하다. 발급된 계정으로 로그인한 후 아래 그림과 같이 자료조회 페이지에서 “자료형태”는 일자료, “기간”은 당해 년도 1월 1일부터 현재까지를, “지점” 및 “요소”는 Figure A-3에서와 같이 전체를 선택해서 “basedir/Database/observed/asos_daily_download” 폴더에 기존 파일이름을 참조하여 저장한다. 매달 갱신된 일자료를 다운받는 경우에는 동일한 파일에 계속하여 덮어쓰면 된다. 아래 함수를 실행하기 전에 우선 EnvList 파일의 tscale 변수가

daily로 설정되어 있는지 확인한다.

KMA.ASOS.Observation.Update (EnvList, fillingmode = T)

합수를 실행하는 경우 일단위 자료를 sforecast 패키지에서 필요한 형식으로 포맷을 변경하여 basedir/Database/observed에 저장한다. 또한 basedir/Database/station-info 폴더에 있는 EnvList의 stnfile 변수에 지정되어 있는 관측소들에 대한 지역 평균 강수량과 기온을 계산하여 basedir/Database/var-predictand 폴더에 EnvList 파일의 varfile 변수로 지정된 파일 이름으로 저장한다. varfile은 계절예측 통계 모형 구축시 종속변수(predictand)로 사용된다. Fillingmode = T로 선정하는 경우 관측자료에 결측이 있는 경우 EnvList의 nrstfile 변수에 지정된 파일의 자료(대상 관측소로부터 가까운 거리에 있는 주변 관측소 리스트)를 이용하여 가장 가까운 관측소의 관측 자료를 이용하여 결측 자료를 대체한다. 이과정은 시·공간적으로 상세화 된 자료가 분석모형의 입력으로 사용되는 경우 결측이 존재하는 경우 모델링 과정에서 에러가 발생하는 경우 유용하게 사용될 수 있다.

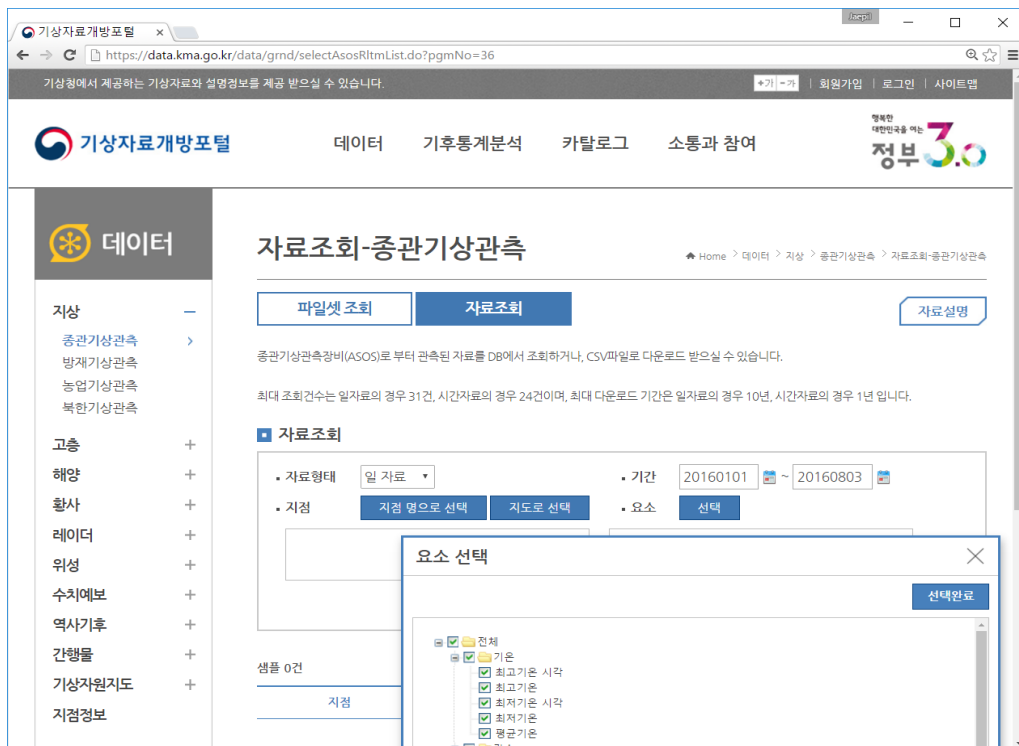


Figure A-3 기상청 일단위 관측 자료 다운로드 예시

KMA 시간단위 종관기상 관측소 자료 다운로드 : EnvList 파일의 tscale 변수에 hourly로 설정되어 있는 경우에는 Figure A-3에서 자료형태를 시간자료로 선택한 후 지점 및 요소 선택을 전체로 한 후 1년 단위로 추출된 결과를 basedir/Database/observed/asos_hourly_download 폴더에 저장한다. fillingmode = T로 선정되는 경우에는 daily와 비슷하게 해당 관측소에 결측 기간이 하루 보다 짧은 기간에는 선형보간법을 이용하여 채우고, 결측 기간이 장기간인 경우에는 daily 에서와 같이 nrstfile 파일의 가장 가까운 관측소로부터 순차적으로 검색하여 결측 된 값을 채운다.

GHCN 일단위 관측자료 : 지역별 관측자료가 없는 경우에는 미국 National Climatic Data Center (NCDC)에서 제공하는 Global Historical Climatology Network-Daily (GHCN-Daily)자료를 다운로드 받아 사용할 수 있다. 아래 함수를 실행하기 위해서는 국가별 두자리의 영문 코드가 필요하다. 다운로드된 원본 자료는 basedir/Database/observed/ghcn-daily_download 폴더에 저장되고 sforecast 패키지에서 필요한 포맷으로 변환된 csv 포맷 자료는 basedir/Database/observed 폴더에 저장된다. 또한 EnvList의 stnfile 변수에 해당되는 관측소에 대한 자료는 basedir/Database/observed/station-info 폴더에 저장된다¹⁷⁾.

```
ghcn.daily.update (EnvList, cntry = "KS")
```

17) 주의: 저장된 일단위 자료는 많은 결측 자료를 포함하고 있을 수 있다. 따라서 사용하기 전에 사용하는 목적에 자료가 적합한지 관측소별로 확인한 후 사용여부를 결정하도록 한다.

4. Hindcast 기간에 대한 예측모형 선정

과거기간에 대한 모형 선정은 아래 함수를 실행함으로써 수행된다. 상세화 모듈별 사용 여부는 EnvList 파일의 BCPointOpt (또는 BCAreaOpt), CIREgOpt, MWRegOpt, MWRObsOpt을 On, Off로 설정하여 컨트롤할 수 있다.

Hindcast.Forecast.Model.Construction (EnvList)

4.1. SBC (BCPoint) 방법 실행

관측소 자료를 편이보정에 이용하는 SBC 방법 (BCPointOpt)이 선정된 상태에서 함수를 구동하는 경우 basedir/prjname/BCPoint 폴더에 선행기간에 따라서 3MON 및 6MON 폴더가 생성되고 편이보정 없이 추출된 값들은 01_extracted 폴더에 관측소별로 Station ID-Target variable-Model nmae-Lead time(ex. ID090-prec-CWB-01.csv) 포맷으로 저장된다. 파일의 내용 중에서 v00 칼럼들은 앙상블 멤버들을 의미하며 MME 칼럼은 앙상블 멤버들의 단순 평균 값을 의미한다. 또한 편이보정된 자료는 02_BiasCorrected 폴더에 저장된다.

마지막으로 편이보정이 완료된 결과로부터 TCC를 기준으로 통계적으로 유의미한 경우만을 선정하여 실시간 예측에 사용할 예측모형을 정리하게 된다. 요약 결과는 basedir/prjname/0_Analysis/BCPoint 폴더에 선행기간에 따라서 3MON 및 6MON 폴더에 저장된다. 해당 폴더에 예측대상 변수에 대해서 2개의 파일이 생성된다. 즉 강수(prec)의 경우에는 BCPoint-prec-AM01-TCC.csv 와 BCPoint-prec-AM01-Summary.csv 파일이 생성된다. 여기서 BCPoint 항목은 상세화 방법을, prec 항목은 예측대상 변수를, AM01 항목은 누적기간을 (즉 01은 누적없이 월단위 결과임을 의미함), TCC 항목은 계산된 TCC 값을 포함하고 있음을 의미한다. Summary 항목은 선택된 예측모형을 통해 예측된 전체 기간에 대한 시계열 자료를 보여 준다. 또한 Monthly-TSeries 폴더에는 월별 시계열 자료를 생성한다.

4.2. MWR 방법 실행

MWR 방법이 선정된 상태에서 함수를 구동하는 경우 basedir/prjname/ MWReg 폴더에 사용된 모형의 선행시간에 따라서 3MON 및 6MON 폴더가 생성된다. 역학적 모형의 결과를 바로 사용하는 SBC 방법을 제외한 나머지 통계적 방법들은 과대적합 문제를 해결하기 위해 과거기간에 대해 연도별로 예측 상황을 재현하는 교차검정 (Cross Validation) 방법을 사용한다. 따라서 3MON 및 6MON 폴더에 연도별 폴더가 생성되고 각각의 연도에 대하여 아래 Table A-2에서와 같이 3개의 폴더가 생성되며 분석 결과 파일이 폴더별로 저장된다.

Table A-2 MWR 방법을 통해 생성되는 폴더 및 출력 파일

폴더명	파일명(설명)
01_Regression-all	• MWReg-prec-M01-CWB-LT01-slp-Negative.csv : 선택된 예측인자의 위치를 보여주며, MWReg 항목은 상세화모듈을, prec 항목은 예측대상 변수를, M01 항목은 월을, CWB항목은 사용된 예측모형을, LT01항목은 선행시간을, slp 항목은 선택된 예측인자의 변수명을, Negative 항목은 예측대상 변수와 선택된 예측인자가 음 또는 양의 상관관계를 갖고 있는지를 의미함. • WReg-prec-M01-CWB-LT01-slp-Negative-TSeries.csv : 앞서 언급된 조건(MWReg-prec-M01-CWB-LT01-slp-Negative 선택변수 및 위치)으로부터 추출된 예측인자의 시계열 자료를 의미함. • MWReg-prec-M01-CWB-LT01.csv : 예측인자로 사용가능한 전체 목록 리스트
02_BPredictor_TSeries	• MWReg-prec-M01-CWB-LT01-v200-Positive.png : 앞서 선정된 예측인자들 중에서 선정 조건을 만족시키는 예측인자만을 지도 위에 가시적으로 표시함. • MWReg-prec-M01-CWB-LT01-v200-Positive-TSeries.csv : 최종적으로 선정된 예측인자의 공간적 위치로부터 추출된 예측인자의 시계열자료.
03_Run_Regression	• MWReg-prec-M01-CWB-LT01.csv : 선택된 예측인자를 통해 계산된 예측 변수에 대한 예측값 시계열자료 파일.

연도별 모델링이 모두 끝나면 연도별 결과를 기반으로 최종적인 예측모형을 선정한다. 선정된 예측인자 결과는 basedir/prjname/0_Analysis/MWReg 폴더에 선행시간에 따라서 3MON 및 6MON 폴더가 생성되고, 각 폴더별로 Composite-Grid 폴더에 저장된다. 즉 동일한 예측인자가 동일한 지역에서 매년 반복되는 경우에 최종적인 예측인자로 선정한다. 폴더에는 최종적인 예측인자의 위치를 보여 주는 csv 및 png 포맷의 결과가 저장되는데 cvs의 숫자는 선정된 예측인자가 동일한 위치에서 매년

반복된 횟수를 의미한다. 최종적으로 선정된 예측인자를 바탕으로 TCC를 기준으로 실시간 예측에 사용할 예측모형들은 basedir/prjname/0_Analysis/MWReg 폴더에 저장된다. 해당 폴더에 예측대상 변수에 대해서 2개의 파일이 생성된다. 즉 강수(prec)의 경우에는 MWReg-prec-AM01-TCC.csv 와 MWReg-prec-AM01-Summary.csv 파일이 생성된다. 여기서 MWReg 항목은 상세화 방법을, prec 항목은 예측대상 변수를, AM01 항목은 누적기간을 (즉 01은 누적없이 월단위 결과임)을 의미한다. TCC 항목은 월별 선정된 예측인자를 이용하여 계산된 TCC 값 테이블을 보여준다. 반면 Summary 파일은 선택된 예측인자를 통해 예측된 전체 기간에 대한 시계열 자료를 보여 준다. 또한 Monthly-TSeries 폴더에는 월별 시계열 자료를 별도로 생성한다.

4.3. MWR-Obs 방법 실행

MWR-Obs 방법이 선정된 상태에서 함수를 구동하는 경우 basedir/prjname/MWRObs 폴더에 과대적합 문제를 해결하기 위해 과거기간에 대해 연도별로 예측 상황을 재현하는 교차검정(Cross Validation) 방법에 의한 연도별 폴더가 생성되고 각각의 연도에 대하여 아래 Table A-3에서와 같이 3개의 폴더가 생성되며 분석 결과 파일이 폴더별로 저장된다

Table A-3. MWR-Obs 방법을 통해 생성되는 폴더 및 출력 파일

폴더명	파일명(설명)
01_Regression-all	- MWRObs-prec-M01-LT03-slp-Negative.csv : 선택된 예측인자의 위치를 보여주며, MWRObs 항목은 상세화모듈을, prec 항목은 예측대상 변수를, M01 항목은 월을, LT03항목은 선행시간을, slp 항목은 선택된 예측인자의 변수명을, Negative 항목은 예측대상 변수와 선택된 예측인자가 음 또는 양의 상관관계를 갖고 있는지를 의미함. - MWRObs-prec-M01-LT03-slp-Negative-TSeries.csv : 앞서 언급된 조건 (MWRObs-prec-M01-LT03-slp-Negative의 선택변수 및 위치)으로부터 추출된 예측인자의 시계열 자료를 의미함. - MWRObs-prec-M01-LT03.csv : 예측인자로 사용가능한 전체 목록 리스트
02_BPredictor_TSeries	- MWRObs-prec-M04-LT01-shum-Positive.png : 앞서 선정된 예측인자들 중에서 선정 조건을 만족시키는 예측인자만을 지도 위에 가시적으로 표시함. - MWRObs-prec-M04-LT01-shum-Positive-TSeries.csv : 최종적으로 선정

폴더명	파일명(설명)
	된 예측인자의 공간적 위치로부터 추출된 예측인자의 시계열자료.
03_Run_Regression	• MWRObs-prec-M01-LT03.csv : 선택된 예측인자를 통해 계산된 예측변수에 대한 예측값 시계열자료 파일.

연도별 모델링이 모두 끝나면 연도별 결과를 기반으로 최종적인 예측모형을 선정한다. 선정된 예측인자 결과는 basedir/prjname/0_Analysis/MWRObs 폴더에 Composite-Grid 폴더에 저장된다. 즉 동일한 예측인자가 동일한 지역에서 매년 반복되는 경우에 최종적인 예측인자로 선정한다. 폴더에는 최종적인 예측인자의 위치를 보여 주는 csv 및 png 포맷의 결과가 저장되는데 csv의 숫자는 선정된 예측인자가 동일한 위치에서 매년 반복된 횟수를 의미한다. 최종적으로 선정된 예측인자를 바탕으로 TCC를 기준으로 실시간 예측에 사용할 예측모형들은 basedir/prjname/0_Analysis/MWRObs 폴더에 저장된다. 해당 폴더에 예측대상 변수에 대해서 2개의 파일이 생성된다. 즉 강수(prec)의 경우에는 MWRObs-prec-AM01-TCC.csv와 MWRObs-prec-AM01-Summary.csv 파일이 생성된다. 여기서 MWRObs 항목은 상세화 방법을, prec 항목은 예측대상 변수를, AM01 항목은 누적기간을 (즉 01은 누적없이 월단위 결과임)을 의미한다. TCC 항목은 월별 선정된 예측인자를 이용하여 계산된 TCC 값 테이블을 보여준다. 반면 Summary 파일은 선택된 예측인자를 통해 예측된 전체 기간에 대한 시계열 자료를 보여 준다. 또한 Monthly-TSeries 폴더에는 월별 시계열 자료를 별도로 생성한다.

4.4. CIR 방법 실행

CIR 방법이 선정된 상태에서 함수를 구동하는 경우 basedir/prjname/CIReg 폴더에 과대적합 문제를 해결하기 위해 과거기간에 대해 연도별로 예측 상황을 재현하는 교차검정(Cross Validation) 방법에 의한 연도별 폴더가 생성되고 각각의 연도에 대하여 아래 Table A-4에서와 같이 2개의 폴더가 생성되며 분석 결과 파일이 폴더별로 저장된다.

Table A-4 CIR 방법을 통해 생성되는 폴더 및 출력 파일

폴더명	파일명(설명)
01_Regression-all	- Reg_prec_01-SplitTest.csv : 월별 예측성이 높은 기후지수를 보여 준다. Reg 항목은 Regression 방법에 의한 방법임을, prec 항목은 예측대상 변수를, 01 항목은 월을, SplitTest 항목은 split 테스트를 거쳐 선정된 결과임을 의미한다. - prec-MinLag01-Observed.csv : 앞서 계산된 월별 결과로부터 선행예측 시간의 관점에서 취합한 결과이다. prec 항목은 예측대상 변수를, Observed 항목은 관측기반의 방법임을, MinLag01 항목은 선행예측시간을 의미하며 즉 01은 1개월 이전에 예측을 할 때 사용가능한 기후지수의 정보를 보여 준다.
02_Best_multi-model	prec-MinLag01-Observed.csv : MinLag01 항목은 선행예측시간을 의미하며 최종적으로 선정된 기후지수를 이용하여 계산된 예측변수 prec에 대한 예측값 시계열 자료 파일.

연도별 모델링이 모두 끝나면 연도별 결과를 기반으로 실시간 예측에 사용될 최종적인 예측모형을 선정한다. 즉 연도별 결과로부터 동일한 기후지수가 동일한 지연시간을 가지고 반복되는 경우만을 선정한다. 최종적으로 선정된 예측인자를 바탕으로 TCC를 기준으로 들은 basedir/prjname/0_Analysis/ CIReg 폴더에 에 저장된다. 해당 폴더에 예측대상 변수에 대해서 2개의 파일이 생성된다. 즉 강수(prec)의 경우에는 CIReg-prec-AM01-TCC.csv 와 CIReg-prec-AM01-Summary.csv 파일이 생성된다. 여기서 CIReg 항목은 상세화 방법을, prec 항목은 예측대상 변수를, AM01 항목은 누적기간을 (즉 01은 누적없이 월단위 결과임)을 의미한다. TCC 항목은 월별 선정된 예측인자를 이용하여 계산된 TCC 값 테이블을 보여준다. 반면 Summary 파일은 선택된 예측인자를 통해 예측된 전체 기간에 대한 시계열 자료를 보여 준다. 또한 Monthly-TSeries 폴더에는 월별 시계열 자료를 별도로 생성한다.

5. Hindcast 기간에 대한 예측모형 선정

앞서 개별적인 상세화 방법들에 대한 예측성 평가를 통한 예측모형 선정이후 실시간 예측을 위해서는 사용 가능한 모든 예측모형들을 하나의 결과로 취합하게 된다. 이를 위해서는 아래 함수를 실행하도록 하며 정리된 월별 선행시간별 사용가능한 모듈들에 대한 Temporal Correlation Coefficient (TCC) 결과는 basedir/prjname/0_RTForecast 폴더에 예 RTFcst-Table-prec-AM01.csv 및 RTFcst-Table-t2m-AM01.csv 파일에 저장된다. Figure A-4는 저장된 결과의 예를 보여 준다.

Integrate.Individual.Forecast.Model (EnvList)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	month	B_JMA01	B_CWB02	B_JMA02	B_HMC03	B_GDAPS_F03	B_JMA03	B_CWB03	B_MSC_CANCM401	B_POAMA01	B_NCEP01	B_MSC_CANCM301	B_PNU01	B_MSC_CANCM402
2	M01		0.71	NA	NA	NA	NA	NA		0.36	NA	NA	NA	0.35
3	M02	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
4	M03	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA		0.36	NA	NA	NA
5	M04		0.35	0.34	NA		0.42	NA	NA	NA	NA		0.54	NA
6	M05	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
7	M06		0.39	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
8	M07	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
9	M08		0.37	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
10	M09	NA	NA	NA	NA		0.41	NA	NA	NA		0.51	NA	NA
11	M10	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
12	M11	NA	NA		0.46	NA	NA		0.38	NA	NA		0.53	0.5
13	M12	NA	NA		0.46	NA	NA		0.35	0.46	NA		0.59	NA

Figure A-4 선택된 상세화 모듈에 따른 월별 예측모형 선정 결과 파일

또한 basedir/prjname/0_RTForecast 폴더에 Monthly-TSeries 폴더가 생성되며 예측결과와 TCC값은 동일하게 유지하면서 관측의 표준편차와 동일하게 보정한 월별 시계열 자료를 저장한다.

연구보고서 2016-21

유역규모 비점오염 관리 의사결정 지원을 위한 APCC
계절예측 정보 활용 방안 연구

Study on Watershed-scale Non-point Source Pollution Management
Decision Support using APCC Seasonal Forecast

조재필



APEC 기후센터

48058 부산광역시 해운대구 센텀7로12

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

www.apcc21.org



9 791156 981725

ISBN 979-11-5698-172-5