

국내 앙상블 유량예측 연구 5년

The 5-Year Ensemble Streamflow Prediction Studies in Korea

김영오*, 정대일**
Young-Oh Kim, Dae-Il Jeong

요 지

2000년도 국내에 소개된 앙상블 유량예측은 한반도 유출특성을 고려한 예측시스템 구축을 위해 꾸준한 수정과 보완을 반복하며 약 5년간의 연구가 진행되었다. 앙상블 유량예측의 연구방향은 크게 예측의 정확성을 향상시키기 위한 이론적 연구와 수자원 계획과 관리에 활용될 수 있도록 GUI를 포함한 유량예측시스템을 구축하는 등의 실무적 연구가 함께 진행되고 있다. 앙상블 유량예측의 정확성을 향상시키기 위해 갈수기에 강우-유출모형의 모의능력을 개선해야 하며, 홍수기에는 기상예보를 효율적으로 이용해야 한다는 기본 전략을 수립하였다. 최근 강우-유출모형의 모의능력을 개선하기 위해 신경망 강우-유출모형을 구축하고, 기존 강우-유출모형의 모의결과를 보정하거나, 두개 이상의 모형을 결합함으로써 유량모의능력을 개선하여 갈수기 앙상블 유량예측 정확성을 향상시킬 수 있음을 증명하는 성과를 거둔 바 있다. 향후 앙상블 유량예측의 연구방향은 기상예보자료의 적극적인 활용에 초점을 맞추고 있다. 최근 ENSO(El Nino Southern Oscillation), PDI(Pacific Decadal Index) 등 다양한 기후정보의 새로운 발견과 GCM 등 기후모형의 급속한 개선으로 기후예측의 정확도가 높아지고 있는 추세이므로, 이를 이용하여 홍수기 앙상블 유량예측의 정확도 개선을 목표로 연구가 진행될 전망이다.

핵심용어: 강우-유출모형, 결합기법, 기상정보, 앙상블 유량예측, 확률론적 예측

1. 서 론

미국 기상청인 National Weather Service을 비롯한 선진국의 기상 및 유량예측 기관에서는 앙상블 예측 기법에 기초한 확률론적 예측시스템을 핵심기법으로 선정하여 이용하고 있다. 2000년도 국내에 소개된 앙상블 유량예측(Ensemble Streamflow Prediction, ESP)은 현재까지 약 5년간의 연구를 통해, 공주지점을 비롯한 주요지점 및 다목적댐의 유량예측에 적용되어 적용가능성 및 효용성을 입증하였을 뿐만 아니라, 국내의 유출특성과 수자원관리를 고려한 개선작업이 꾸준히 진행되었다. 따라서 본 연구에서는 앙상블 유량예측기법의 도입에서부터 현재까지 수행된 연구결과를 정리하고 향후 연구방향을 제시하고자 한다.

2. 기본개념 및 연구동향

앙상블 유량예측은 그림 1과같이 예측시점의 유역의 적설량, 토양함수, 하천 수위, 습도 등 유역상태를 나타내는 초기조건과 미래에 재현 가능한 과거 기상자료를 결합함으로써 확률예보를 가능케하는 대표적인 방법이다. 즉 앙상블 유량예측은 확률론적 강우-유출모형에 미래에 일어날 가능성이 있는 모든 강우 시나리오(즉, 강우 앙상블)를 입력하여 그 결과물로 다수의 예측유량 시나리오(즉, 예측유량 앙상블)를 얻는 기법이다. 생성된 유량 앙상블은 유량을 몇 개의 구간으로 나눈 후 각 구간의 발생확률을 제시하는 구간확률예측

* 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수 · E-mail: yokim05@snu.ac.kr
** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 · E-mail: jung922@snu.ac.kr

(categorical probabilistic forecast) 또는, 사용자의 목적에 맞는 대표 통계값으로 표현될 수 있다.

Journal of Hydrology 에서는 “Special Issue: Probabilistic and Ensemble Forecasting”(Edited by Georgakakos and Krzysztofowicz, 2001)를 발간하여 앙상블 유량예측을 중심으로 한 단기와 중장기 확률예측의 최근 연구사례를 정리하였다. 기상분야에서도 앙상블 예측시스템(Ensemble Prediction System)은 현재 가장 활발히 연구되고 있는 분야중 하나이다. American Meteorological Society에서 발행하는 Monthly Weather Review, Journal of Climate, Journal of Hydrometeorology 등의 저널에서 기상분야의 앙상블 예측기법에 대한 연구흐름과 최신기법을 파악할 수 있다.

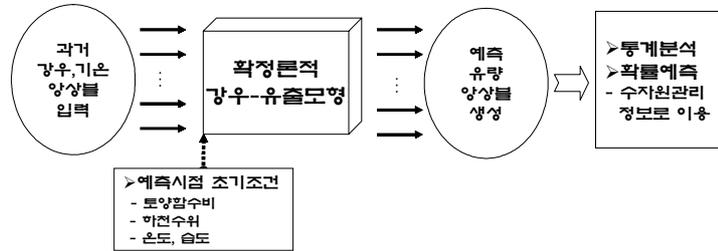


그림 1 앙상블 유량예측 과정

3. 본 론

3.1 국내 소개

건설교통부와 한국건설기술연구원에서는 매달 ‘물공급전망’을 발간하고 있으며, 가장 핵심이 되는 부분은 5대강 유역에 매 월초 실시하는 해당 월의 유량예측이다. 물공급전망에 사용되는 강우 시나리오는 해당 월의 예년 평균과 더불어, 평균을 20 % 증가시키고 감소시킨 3가지이며, 한국건설기술연구원에서 개발한 다중감수 수문모형을 이용하여 예상 유출량을 각각 대, 중, 소로 매월 발표하고 있다. Kim et al.(2001)은 세 가지 강우 시나리오 대신 과거 강우 시나리오를 모두 사용한다면 기존의 방법보다 좋은 예측결과를 가져올 수 있다고 지적하고 앙상블 유량예측기법을 이용할 것을 제안하였다.

이 연구에서는 구체적 확률예측과 평가방법을 제시하였는데, 확률예측 방법으로서 ‘구간확률예측’, 예측정확성 평가방법으로 ‘예측점수’가 제안되었다. 구간확률예측을 위해 예측지점에 대한 과거유량의 적합분포를 선정하고 누가확률 33.3%와 66.7%에 해당하는 유량을 기준으로 저수(low flow), 평수(normal flow), 풍수(high flow)로 나누었다. 만일 별다른 예측기법이 존재하지 않는다면 미래유량은 이러한 과거자료에 의존하여 각 구간에 대하여 동일하게 33.3%의 확률로 예보되어야 할 것이며, 이를 “초보예측(naive forecasts)”이라 정의하였다. 생성된 예측유량 앙상블의 통계분석을 실시하여 각 유량구간의 발생확률을 제시함으로써 예측이 이루어진다. 예측의 정확성평가를 위해 각 예측에서 실측유량이 발생한 구간의 발생확률을 ‘예측점수’라고 하였으며, 전체 예측월의 예측점수를 평균한 값을 평균예측점수(average hit score)라고 하였다. 만약 평균예측점수가 33.3 %보다 크다면 전체적인 앙상블 예측은 초보예측보다 정확하여 예측기법으로 유효하다고 할 수 있다.

금강유역의 공주지점을 대상지점으로 선정하여 1919년~1994년까지의 강우 시나리오를 한국건설기술연구원에서 개발한 다중감수 수문모형에 입력하여 매년 7월부터 12월까지 6개월간을 1995년부터 1999년까지 30개월 동안 예측하고 평가하였으며, 평가결과 평균예측점수가 38.3 %로서 초보예측보다 높아 앙상블 유량예측의 효용성을 입증할 수 있었다.

3.2 기상정보를 이용한 가중값

정대일과 김영오(2002)는 앙상블 유량예측기법을 이용하여 충주댐 월 유입량의 확률론적 예측을 실시하고 그 효용성을 재확인 하였다. 또한 기상 입력변수의 불확실성으로 인해 야기되는 예측오차를 기상 확률예보자료를 이용하여 극복할 수 있는 방법으로 Croley방법과 PDF-Ratio방법을 소개하고 적용성을 검토하였다.

TANK모형에 1966년부터 1995년까지의 30개의 강우자료를 입력하여 1996~1999년까지 4년간의 예측유량

양상블을 생성하였다. 생성된 예측유량 시나리오에 균일한 가중값을 부여하는 방법과 기상 확률예보를 이용하는 방법으로 Croley방법(Croley, 2000)과 Steginger and Kim (2002)이 제시한 PDF-Ratio방법을 적용하고 결과를 비교하였다(표 1). 국내에는 기상확률예보가 아직 존재하지 않으므로, 실측 강우자료를 이용하여 예보자료를 인위적으로

표 1. 가중값 부여방법별 평균 예측점수(%)

	균일 가중값	Croley	PDF-Ratio
평균 예측점수	38.5	46.6	45.9

생성하였으며 구체적인 내용은 정대일과 김영오(2002)의 논문을 참조하기 바란다.

가중값을 부여하지 않아도(균일 가중값) 평균예측점수가 38.5%로서 초보예측 보다는 우수하여 그 효용성을 충주댐 적용사례에서도 다시 한번 입증하였다. 강우 확률예보를 이용하여 예측유입량 시나리오에 가중값을 부여할 경우, 평균 예측점수는 Croley방법에서 8.1%, PDF-Ratio방법에서 7.4%의 개선효과를 보여 기상확률예보를 이용할 경우 양상블 유량예측의 정확성을 향상시킬 수 있음을 증명하였다.

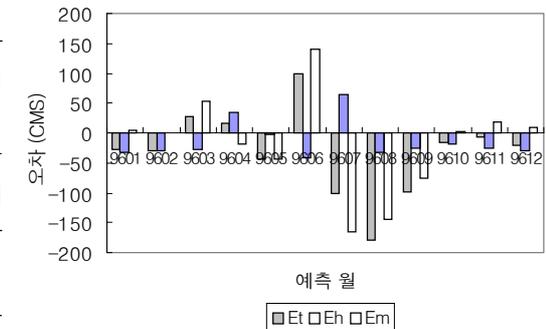


그림 2. 오차분석 결과(1996년)

예측분포의 중앙값, TANK모형의 모의유입량, 그리고 실측유입량을 이용하여 총 예측오차(Et)를 수문모형인 TANK모형에서 기인한 수문학적 오차(Eh)와 과거강우 양상블을 입력변수로 사용하여 비롯된 기상학적 오차(Em)로 분류하였다(그림 2). 강우가 적은 갈수기의 경우 TANK모형의 불확실성에서 발생하는 오차가 큰 반면(그림 2의 1월 2월, 4월, 10월, 11월, 12월), 강우가 많은 홍수기의 경우(그림 2의 6월, 7월, 8월, 9월)에는 TANK모형에 의한 오차보다는 입력변수의 불확실성에서 발생하는 오차가 크게 나타났다. 따라서 갈수기의 예측오차를 감소시키기 위해서는 강우-유출모형의 개선이 필요하며, 홍수기의 경우는 정확한 기상 확률예보를 이용하여 강우 입력변수의 불확실성을 감소시켜야 한다는 결론에 이르렀다.

분류하였다(그림 2). 강우가 적은 갈수기의 경우 TANK모형의 불확실성에서 발생하는 오차가 큰 반면(그림 2의 1월 2월, 4월, 10월, 11월, 12월), 강우가 많은 홍수기의 경우(그림 2의 6월, 7월, 8월, 9월)에는 TANK모형에 의한 오차보다는 입력변수의 불확실성에서 발생하는 오차가 크게 나타났다. 따라서 갈수기의 예측오차를 감소시키기 위해서는 강우-유출모형의 개선이 필요하며, 홍수기의 경우는 정확한 기상 확률예보를 이용하여 강우 입력변수의 불확실성을 감소시켜야 한다는 결론에 이르렀다.

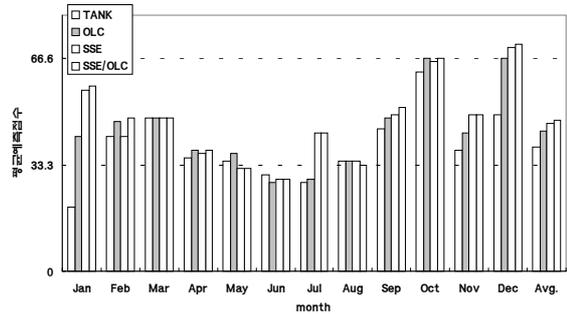
3.3 강우-유출모형의 개선

정대일과 김영오(2002)의 오차분석 결과는 양상블 유량예측의 정확성 개선을 위한 연구를 크게 갈수기와 홍수기로 나누어 추진하는 계기가 되었다. Jeong and Kim(2004)은 대형댐 유입량에 대한 갈수기 양상블 유량예측의 정확성 향상을 위해 기존의 TANK모형을 대신할 수 있는 강우-유출모형을 신경망을 이용하여 구축하였다. 다층신경망모형과도 같은 의미인 단일신경망모형과 복수의 멤버 네트워크들의 결과를 조합함으로써 단일신경망에 비해 더 좋은 일반화 성능을 보인다고 알려져 있는 양상블 신경망(Ensemble Neural Network, ENN)모형을 이용하였다. 구축된 신경망 강우-유출모형은 기존의 대형댐 유량모의를 위한 개념모형인 TANK모형과의 비교를 통해 보다 정확한 모의를 할 수 있음을 확인하였다.

Kim et al.(2003)은 강우-유출모형의 보정 및 결합기법을 이용하여 모의능력을 향상시키는 방법에 대해 검토하였다. 결합기법의 경우는 선진국에서도 그 적용사례가 찾아보기 힘들며, 수문모형의 다양화로 같은 유역을 대상으로도 새로운 강우-유출모형이 계속 개발되는 추세로 볼 때 향후 그 활용성이 매우 클 것으로 기대된다. 이 연구에서는 많은 보정 및 결합기법이 소개되고 비교되었으며, 특히 단순 선형회귀식을 이용하여 TANK모형의 모의값을 보정하는 최적선형보정(Optimal Linear Correction, OLC)기법과 선행연구를 통해 구성된 양상블 신경망 강우-유출모형(ENN모형)을 TANK모형과 결합하는 결합기법 중 가장 우수한 성능을 보인 SSE(Sum of Squared Error)기법, 그리고 편의가 있는 TANK 모형을 먼저 OLC로 보정한 후 ENN모형과 SSE로 결합한 SSE/OLC기법을 이용하여 대형댐 월 유입량 예측을 1966년부터 2001년까지 실시하였으며 예측결과는 그림 3과 같다.

연 평균예측점수(X축의 Avg.)를 보면, TANK, OLC, SSE, SSE/OLC 순으로 양상블 유량예측의 정확성이 증가하고 있음을 확인할 수 있는데 이는 유출모의 능력과도 같은 순서이다. 월별 평균예측점수에서, 갈수기인 1월 2월 4월, 10월 11월, 12월의 예측정확성이 TANK 모형보다 보정 및 결합기법을 적용한 OLC, SSE,

SSE/OLC기법이 우수함을 확인할 수 있다. 특히 가장 간단하며 외부의 정보 없이 TANK모형의 모의결과를 보정하는 기법인 OLC를 적용하여도 갈수기의 예측정확성이 크게 향상됨을 확인할 수 있었다. 위 결과를 종합해 볼때, 앙상블 유량예측의 정확성은 강우-유출모형의 모의능력에 따라 좌우되며, 특히 갈수기 유량예측의 정확성 향상을 위해서는 정확한 강우-유출모형의 사용이 필수적임을 확인하였다.



3.4 예측시스템 구축 및 실용화

그림 3. TANK모형과 보정 및 결합기법의 앙상블 유량예측 정확성 비교

‘21세기 프론티어연구개발사업’인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 ‘실시간 물관리 운영시스템 구축 기술개발’에서는 유역추적, 하도추적, 저수지조작 기능이 가능한 SSARR모형을 기반으로 금강유역에 앙상블 유량예측 시스템을 구축하였다. 특히 방대한 입력력 자료를 다루어야 하는 앙상블 유량예측의 단점을 보완할 수 있는 사용자 Interface를 구축하여 실무에서의 활용성을 극대화 하였으며(그림 4), 이론적 연구를 가속화 할 수 있는 기틀을 마련하였다. 예측시스템은 예측 기간과, 강우 앙상블 기간을 자유로이 선택하여 앙상블 유량예측을 실행할 수 있는 초기화면과 생성된 예측 유량 앙상블을 표와 그래프로 나타내어주는 ‘예측유량 시나리오’, 그리고 통계적 분석을 거쳐 예측결과를 설명하는 ‘결과분석’으로 구성되어있다.

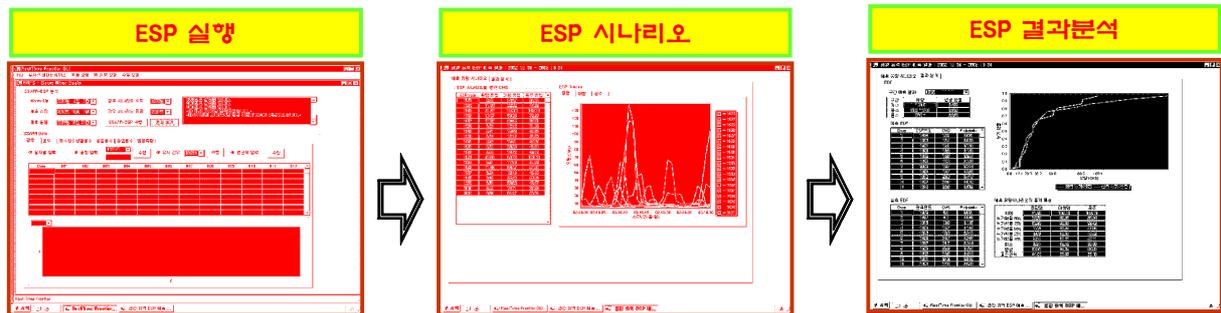


그림 4 앙상블 유량예측 시스템의 GUI

3.5 수자원관리와의 접목

중장기 저수지 최적화 모형은 미래 유입량의 불확실성을 고려하기 위해 확률론에 입각한 추계학적 최적화 기법이 필수적이다. 따라서 앙상블 유량예측의 확률론적 예측결과와 저수지 최적화 모형의 접목에 대한 연구가 시도되고 있다. ‘낙동강수계 댐군 최적연계운영시스템 개선 연구 보고서’(2002)와 2001년에서 2004년에 걸쳐 진행된 ‘21세기 프론티어연구개발사업’인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 ‘실시간 물관리 운영시스템 구축 기술개발’에서는 앙상블 유량예측과 표본 추계학적 동적계획법(Sampling Stochastic Dynamic Programming, SSDP)을 접목하여 추계학적 특성을 고려하여 매일 운영 계획을 실시할 수 있는 SSDP/ESP 모형을 구축하여 실용화를 진행 중이다.

4. 향후연구

향후 앙상블 유량예측의 연구방향은 기상예보자료의 적극적인 활용에 초점을 맞추고 있다. 최근에는 ENSO(El Nino Southern Occillation), PDI(Pacific Decadal Index) 등 다양한 기후정보가 새로이 발견되고

GCM 등 기후모형이 급속히 개선됨에 따라 기후예측의 정확도가 높아지고 있는 추세이다. 따라서 이를 이용한 앙상블 유량예측의 정확도 개선에 관한 연구, 특히 홍수기의 유량예측 정확성 개선에 관한 연구가 필요하다. 본 논문의 3.2절에 설명한 기상예보를 이용한 가중값 부여방안은 국내에 이용 가능한 기상예보가 없어 현재까지는 불가능하나, 기상청에서도 조만간 강우 확률예보를 실시한다면 어려움 없이 실용화 되리라 사료된다. 과거 강우 시나리오 대신 GCM 등을 이용하여 생성된 예측강우 앙상블을 수문모형에 직접 입력하는 앙상블 예측방법 역시 단기예측을 중심으로 연구되어야 한다. 또한 예측시점의 유역 초기조건이 유량예측에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고, 예측 시나리오 개수가 많을 경우 예측 정확도가 증가하는지, 예측 시나리오의 퍼진 정도(분산)와 예측 정확성과 어떤 관계가 있는지 등 관련된 연구를 추후로 진행하여 규명함으로써 앙상블 유량예측에서 유효한 예측기간, 강우시나리오 개수와 범위에 대한 가이드라인을 설정하고 제시하여야 할 것이다.

5. 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-6-1), 두뇌한국21사업, 그리고 서울대학교 공학연구소에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

6. 참고 문헌

1. 건설교통부, 한국수자원공사(2002). **낙동강수계 댐군 최적연계운영시스템 개선 연구 보고서**.
2. 정대일, 김영오(2002). 앙상블 예측을 이용한 충주댐 월 유입량 예측, **대한토목학회논문집**, 제 22권, 제 3-B호, pp. 321-331.
3. Croley II, T. E.(2000). *Using Meteorology Probability Forecasts in Operational Hydrology*, ASCE Press.
4. Georgakakos, K. P. and Krzysztofowicz, R., Ed.(2001) Special Issue: Probabilistic and Ensemble Forecasting, *Journal of Hydrology*, Vol. 249, No. 1-4.
5. Jeong, D. I., Kim, Y.-O.(2004). Rainfall-runoff models using artificial neural networks for ensemble streamflow prediction. *Hydrological Processes* (submitted).
6. Kim, Y.-O., Jeong, D. I., and Kim, H. S.(2001). Improving Water Supply Outlooks in Korea with ensemble streamflow prediction, *Water International*, 26(4), pp. 563.-568.
7. Kim, Y.-O., Jeong, D. I., Ko, I. H.(2003). Combining rainfall-runoff models for improving ensemble streamflow prediction. *Journal of Hydrology* (submitted).
8. Stedinger, J. R. and Kim, Y.-O.(2002). Updating ensemble probabilities based on climate forecasts. *Conference on Water Resources Planning and Management and Symposium on Managing the Extremes Floods and Droughts*, EWRI, ASCE, Roanoke, VA. CD.