



확률홍수예측의 필요성



강 태 호
한국건설기술연구원 연구원
kangth@kict.re.kr

1. 서론

예측이란 가까운 미래에 발생할 수 있는 현상을 사전에 예상하여 효과적으로 대처함으로써 피해를 줄이고 이득은 크게 하기 위한 방안이다. 앞으로 발생할 사건을 예상하기 위해 이미 발생한 사건들을 분석하거나, 수문 및 기상 분야와 같이 물리적 현상을 다루는 경우 예측에 영향을 미치는 요소들을 분석하여 모형을 구축하기도 한다. 물리적 기반의 수문모형은 유역의 유출특성을 반영할 수 있는 매개변수를 구성하고 예측시점의 기상자료를 입력자료로 사용하여 유량을 추정하도록 구성된다. 하지만 기상현상은 불확실성이 크기 때문에 신뢰도 높은 기상예측을 기대하기 어려우며, 기상자료가 정확하더라도 수문모형에서 고려되지 못한 유역 특성 및 매개변수의 추정 과정에 존재하는 오차 등으로 인하여 유량예측 결과에는 불확실성이 존재할 수 밖에 없다.

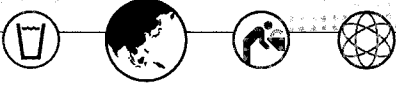
확률유량예측은 예측과정에 존재하는 불확실성을 고려하여 예측에 존재하는 오차의 범위에 대한 정보를 제공하는 방법이다. 국내에서도 확률예측에 대한 필요성이 인식되면서 그 동안 앙상블 유량예측(Ensemble

Streamflow Prediction, ESP) 기법을 활용한 중장기 확률유량예측 방안에 대한 연구가 수행되었다. 앙상블 유량예측은 예측기간과 동일한 시·공간적 특성 범위 속에서 발생한 모든 관측 기상자료를 수문모형의 입력자료로 사용하여 유량을 모의하는 방법으로, 기상현상에 존재하는 불확실성은 수문모형을 통해 예측 유출량에 전달되며, 다양한 입력자료에 대한 수문모형의 오차 또한 모의된 유량 앙상블에 반영되어 확률유량예측을 위한 분석에 사용된다.

중장기 확률유량예측의 연장선상에서 홍수예측을 위한 단기 확률유량예측에 대해서도 미국과 많은 유럽 국가에서는 지속적으로 점차 활발한 연구가 수행되고 있다. 하지만 국내의 경우 주요 연구기관들의 관심 밖에 있는 것이 현실이므로, 국제적으로 확률홍수예측을 주요하게 연구하는 이유와 현재 어느 정도의 연구가 수행되었으며 한계점 및 앞으로의 연구 방향에 관한 Cloke et al.(2009)의 Journal of Hydrology 논문 "Ensemble Flood Forecasting: A Review"을 요약 정리함으로써 국내 확률홍수예측에 대한 인식을 높이고 앞으로의 연구방향의 설정에 있어 도움이 되었으면 한다.

2. 홍수예측을 확률적으로 해야 하는가?

홍수예측에 대한 기술이 향상되면서 전 세계적으로 홍수방어에 대한 인식이 지난 수십 년 동안 점차 증가



하였다. 현업에서의 홍수예측시스템은 재난에 가까운 큰 홍수를 사전에 예측하여 기관 및 거주민에게 대처할 수 있는 시간을 줌으로써 그로인한 피해를 저감하기 위해서이다. 이러한 홍수예측시스템의 입력자료로 우량계 및 레이더로부터 관측된 강수량이 사용될 수 있으나, 2일 이상의 예측에서는 수치예보(Numerical Weather Prediction, NWP)모형을 통해 예측된 강수량이 요구되며, 특히 상류의 관측유출량 데이터가 가용하지 않거나 대부분의 극한 홍수 사상에서 그러한 것처럼 관측자료의 전송이 실패하는 경우 예측자료의 사용이 불가피하다.

기상현상은 비선형적이며 복잡한 시스템으로 정확히 예측하기란 불가능하다. 기상예측은 물리적 현상의 수치적인 반영에서 뿐만 아니라 모의 해상도 및 초기조건에 존재하는 한계에 의해 어려움이 존재한다. 지난 15년간 이러한 불확실성을 고려하기위한 앙상블 예측기술이 연구되어 왔으며, 동일 유역 및 기간에 대해 다수의 기상예측을 산출하게 되어 기상자료가 요구되는 홍수예측에서도 앙상블 예측이 매력적으로 다가오게 되었다.

전 세계적으로 홍수예보시스템 내에서 앙상블예측

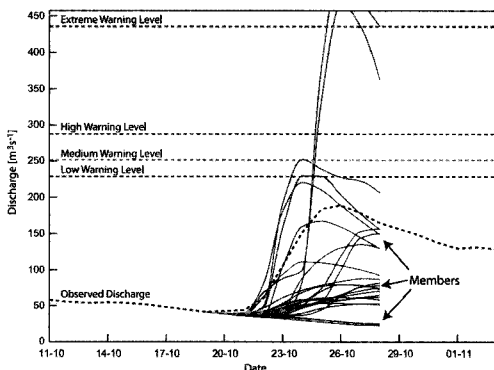


그림 1. An example of an ensemble 'spaghetti' hydrograph for a hindcasted flood event (Cloke et al., 2009)

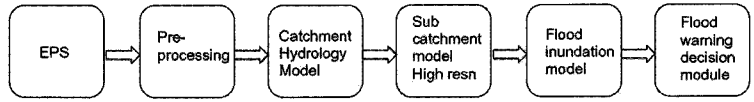


그림 2. A possible flood forecasting cascade, showing a cascade of components (Cloke et al., 2009)

시스템(Ensemble Prediction System, EPS)이라고 언급되는 NWP의 기상앙상블 예측자료를 점차 많은 연구 및 현업에서 사용하고 있다. NWP 기상앙상블을 수문모형의 입력자료로 사용하여 그림 1과 같이 유출량을 예측하며, 의사결정지원시스템 내에서 활용하게 된다(그림 2). 표 1은 현재 EPS를 운영체제에서 사용하는 수문 및 홍수예측 센터를 정리한 것이다. 앙상블 예측의 신뢰도 향상을 목적으로 전 세계적으로 수행되는 연구를 공유하기 위해 HEPEX(Hydrologic Ensemble Prediction EXperiment)라는 기관이 설립되어 운영되고 있으며, CHR(International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin)과 WMO(World Meteorological Organization)는 2006년 3월 '앙상블 예측과 홍수예측의 불확실성'이라는 주제로 전문가 회의를 시행하는 등 국제기구에서도 앙상블 예측에 높은 관심을 보이고 있다.

기존 단일 값만을 제공하는 확정적 예측과 비교하여 확률홍수예측의 가치는 가장 발생 가능한 예측의 범위뿐만 아니라 극한의 빈도가 낮은 사건에 대한 확률의 제공이 가능하다는데 있다. 확률홍수예측은 또한 특정 홍수량에 대한 확률을 제공할 수 있으므로 홍수 위험도를 추정하는데 유용하게 활용될 수 있다.

3. EPS를 사용한 확률홍수예측이란?

대부분의 EPS는 Monte Carlo 이론에 기초하여 중심 시나리오로부터 초기조건을 조정하여 다양한 시나리오를 생성하는 방법을 사용한다. 앙상블 시나리

오의 수는 10~50개까지 예보센터에 따라 다양하게 사용된다. 몇몇의 경우에는 초기조건에 대하여 매개 변수에 존재하는 불확실성을 고려하여 앙상블예측을 수행한다. EPS의 신뢰도를 높이기 위해서는 예보의 해상도를 높이고 충분한 영역의 물리적 특성 반영이 요구되지만 전산장비 및 자료의 한계로 인하여 빠른 변화가 어렵기 때문에 동일한 컴퓨터 속도 하에서 전체 앙상블을 시나리오 중 통계적으로 대표되는 시나리오를 줄여서 사용함으로써 해상도를 높이는 대안이 시도되고 있다.

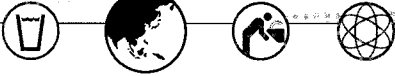
기상 앙상블은 또한 'poor men's ensemble'이라고 알려진 방안으로 다른 여러 예보센터의 예측을 모

아서 구성될 수 있다. Jasper et al.(2002)은 이탈리아 마조레 호수의 유입량을 예측하기 위해 5개의 예측모델 결과를 활용한 사례가 있다. 이러한 방법은 예측 모델과 수집된 기상자료에 존재하는 불확실성을 고려하는 것이나, 다른 모델의 예측은 다른 오차구조를 가지기 때문에 보다 정교한 활용을 위해서는 쉽게 결합될 수 없는 것이 사실이다.

EPS의 기상 앙상블에 반영된 NWP의 불확실성은 홍수예측시스템을 통해 모의되는 확률홍수예측에 전해진다. 예측된 기상 앙상블을 확률홍수예측에 사용하기 위해서는 수문모형의 입력자료로 구성되기 위한 사전처리 과정이 요구된다. 기후예보모델의 시·공간

표 1. Examples of operational and pre-operational flood forecasting systems routinely using ensemble weather predictions as inputs (Cloke et al., 2009)

Forecast centre	Ensemble NWP input	Further information
European Flood Alert System (EFAS) of the European Commission Joint Research Centre	European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) and Consortium for Small-Scale Modelling-Limited-area Ensemble Prediction System (COSMOLEPS)	Thielen et al. (2009)
Georgia-Tech/Bangladesh project	ECMWF	Hopson and Webster (2008, in press)
Finnish Hydrological Service	ECMWF	Vehvilainen and Huttunen (2002)
Swedish Hydro-Meteorological Service	ECMWF	Johnell et al. (2007), Olsson and Lindstrom (2008)
Advanced Hydrologic Prediction Services (AHPS) from NOAA	US National Weather Service (NOAA)	http://www.nws.noaa.gov/oh/ahps/ Mcenery et al. (2005)
MAP D-PHASE (Alpine region)/Switzerland	COSMO-LEPS	Rotach et al. (2008)
Vituki (Hungary)	ECMWF	Balint et al. (2006)
Rijkswaterstaat (The Netherlands)	ECMWF, COSMO-LEPS	Kwadijk (2007), Renner and Werner (2007), and Werner (2005)
Royal Meteorological Institute of Belgium	ECMWF	Roulin (2007) and Roulin and Vannitsem (2005)
Vlaamse Milieumaatschappij (Belgium)	ECMWF	http://www.overstromingsvoorspeller.be (and also Cauwenberghs, 2008)
Meteo France	ECMWF and Arpege EPS	Regimbeau et al. (2007) and Rousset-Regimbeau et al. (2008)
Land Oberoestereich, Nideroestereich, Salzburg, Tirol (Austria)	Integration of ECMWF into Aladin	Haiden et al. (2007), Komma et al. (2007) and Reszler et al. (2006)
Bavarian Flood Forecasting Centre	COSMO-LEPS	Hangen-Brodersen et al. (2008)



적 스케일은 유량예측에 사용되는 수문모형과 다를 수 있기 때문에 스케일 교정이 이루어져야 하며, 기상 앙상블에 존재하는 불확실성을 저감하기 위한 교정이 추가될 수 있다. Fortin et al.(2006)은 강수 및 온도 예측에 대한 사전처리를 수행함으로써 수문모형에 향상된 입력자료의 사용이 가능함을 보였다.

홍수예측에 EPS 기상 앙상블을 사용하는 경우 문제점은 극한 홍수사상의 낮은 빈도에 의해 수문예측을 위해 사용하는 기상예측과 홍수예측 자체의 신뢰도 높은 평가가 어렵다는 것이다. 인명 및 재산 피해를 야기할 수 있는 100년 빈도의 홍수는 100년 안에 최소한 3번 발생할 확률이 8 % 정도의 확률에 불과하다는 것이다. 따라서 주요 홍수에 대한 충분한 자료의 수집이 어려우며, 수집된 자료에 대해서도 공간적 상관관계가 주요한 문제점으로 남는다. 2007년 유럽에서 발생한 31번의 홍수에 대해 각각의 홍수는 동일한 기간 및 하천에서 발생하지만 다른 국가에서 발생하는 경우는 거의 없으며 결과적으로 다른 홍수 사상으로 기록된다. 이러한 홍수 기록을 독립된다고 가정하여 분석을 수행한다면 실제 존재하는 높은 상관관계에 의해 신뢰도 높은 결과를 얻기는 힘들다.

다른 지역의 홍수 사상에 대한 충분한 자료가 누적된다 하더라도 시공간적 정상성(stationarity)이 문제로 남게 된다. Beven(2000)은 유역 각각의 독특한 특성 때문에 공간적 정상성은 가정될 수 없다고 하였으며, 시간적 정상성 또한 Li et al.(2004)에 따르면 각각의 홍수사상의 영향으로 유역이 변하기 때문에 보장되기 어렵다고 하였다. 또한 식생의 변화, 인위적인 구조물, 기후변화 등으로 인하여 홍수의 크기 및 빈도는 지난 수십 년간 변화하여 왔다. 그러므로 홍수 분석을 수행하기 위한 수많은 홍수사상이 기록된다 하더라도 이러한 특성으로 인하여 기존과 다른 새로운 방법론이 검토되어야 하며, 이를 통한 EPS 예측의 불확실성 분석이 이루어져야 한다.

4. NWP와 확률홍수예측의 불확실성 요소

EPS는 현재의 기술수준 하에서는 기상현상을 모형화 하기위한 NWP의 모든 불확실성을 반영하지 못한다. 앞에서 언급된 것처럼 대부분의 EPS 기상 앙상블은 초기조건에 존재하는 불확실성을 고려하여 선정되며, 몇몇의 경우에 모형의 매개변수 또는 자료동화(data assimilation)에 존재하는 불확실성이 고려되었다. 그러나 모형과 관측자료에 존재하는 불확실성이 현재 무시되고 있으며, EPS의 전체 불확실성이 과소평가되는 결과를 가져오게 되었다.

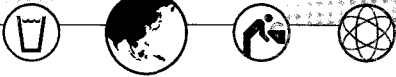
확률유량예측의 불확실성은 입력자료로 사용하는 EPS 기상 앙상블의 영향이 높으며, 그 외에도 사전처리 등의 보정, 입력자료의 시공간적 불확실성, 시스템에 포함된 홍수방어시설 등의 구조물, 하천 구조물의 실패 가능성, 시스템의 매개변수, 유역을 단순화한 모형에 의해 유량예측의 불확실성이 증가하게 된다. 확률홍수예측의 다양한 불확실성 요소의 상대적인 중요도와 전체 불확실성에 미치는 영향을 검토하기 위해서는 전체 요소에 대한 불확실성 분석이 이루어져야 한다. 이러한 불확실성 요소들의 상대적인 중요성은 예측기간, 홍수의 크기, 유역특성에 의해 영향을 받는 경향이 있으나, 전체 불확실성에 대한 검토는 기존의 연구사례에서 이뤄지지 못하였으며 현재 컴퓨터의 처리능력을 초과하는 관계로 분석에 어려움이 있는 것이 사실이다.

5. 확률홍수예측에 대한 연구사례

홍수예보를 위해 앙상블 예측을 사용한 여러 연구 사례들은 앙상블 입력자료에 기초한 홍수예측시스템의 잠재성 및 가능성을 검토하였으며, 단일 값만을 제공하는 확정적 예측에 비해 앙상블 예측 시스템에

표 2. Key case studies evaluating ensemble flood forecasting (Cloke et al., 2009)

Case study reference	Catchment/study area	Event/period	Hydrological model	Meteorological input
Balint et al. (2006) and Csik et al. (2007)	Main Danube in Hungary	July/August 2002	NHFS modelling system	EPS ECMWF (with 6 day lead time)
Bartholmes et al. (2007) and Bartholmes et al. (2009)	European Flood events	January 2005 until February 2007	Lisflood-FF (as input to the EFAS)	ECMWF (EPS and deterministic), DWD (global and local)
Bartholmes and Todini (2005)	Po river	October/November 1994	TOPKAPI	ECMWF EPS, HIRLAM EPS
Bogner and Kalas (2008)	Danube	July 2007	Lisflood (FF)	ECMWF (EPS and deterministic up to monthly), DWD (global and local), COSMO-LEPS
Bonta (2006)	Upper Tisza and central Hungary	March 2001 and August 2005	NHFS modelling system	ECMWF EPS
Cluckie et al. (2006)	Brue (in Southwest England)	October 1999, December 1999, April 2000	Simplified grid-based distributed rainfall-runoff model (GBDM)	ECMWF EPS and PSU/NCAR mesoscale model (MM5)
De Roo et al., 2006	Alpine region	August 2005	Lisflood (FF)	ECMWF (EPS and deterministic up to monthly), DWD (global and local)
Davolio et al. (2008)	Reno (in north Italy)	7-9th November 2003, 10-12th April, 2005, 2nd-3rd December 2005	TOPKAPI	Six different forcings (BOLAM, MOLOCH, LM7, LM2.8, WRF7.5, WRF2.5)
Dietrich et al. (2008)	Mulde	August 2002	ArcEGMO (note there is also a shortrange forecast presented using a large range of different models)	COSMO-LEPS and COMSO-DE
Gabellani et al. (2005)	Reno (in north Italy)	8-10th November 2003	DriFit	COSMO-LEPS
Gouweleeuw et al. (2005)	Meuse, Odra	January 1995 and July 1997	Lisflood-FF (as input to the EFAS)	ECMWF (EPS and deterministic), DWD (global and local)
He et al. (2009)	Upper Severn (UK)	January 2008	Lisflood-FF (here called Lisflood-RR)	TIGGE
Hlavcova et al. (2006)	Upper Hron (tributary to Danube)	August 1997 July 2002	Conceptual semi-distributed rainfall runoff model	ECMWF (EPS and deterministic), HIRLAM, DWD (global and local) and ALADIN
Hopson and Webster (in press)	Ganges and Brahmaputra	Summer 2003, 2004 and 2006	Catchment lumped model (CLM) and Semi distributed model (SDM)	ECMWF EPS
Jasper et al. (2002)	Ticino-Verzasca-Magiia (including smaller subcatchments smallest 186 km ²)	September 1993 October 1993 October 1994 June 1997 September 1999 October 2000	WaSIM-ETH	Poor man ensemble consisting of Swiss Model, MESO-NH, BOLAM3, MC2, ALADIN



Case study reference	Catchment/study area	Event/period	Hydrological model	Meteorological input
Jaun et al. (2008), Jaun and Ahrens (2009)	Rhine (Swiss part)	August 2005, 2005–2006	Precipitation Runoff Evapotranspiration Hydrotope (PREVAH)	COSMO–LEPS
Johnell et al. (2007), Olsson and Lindstrom (2008)	51 Catchments in Sweden	January 2006– August 2007	HBV	ECMWF EPS
Kalas et al. (2008)	Morava	March–April 2006	Lisflood–FF (as input to the EFAS)	ECMWF (EPS and deterministic), DWD (global and local)
Komma et al. (2007)	Kamp, North Austria	August, 2002 (2 events) July, 2005 ALADIN August, 2005 (two events)	Model of Reszler et al. (2006)	Combination of ECMWF and ALADIN
Pappenberger et al. (2005)	Meuse (upstream Masseik), Belgium	January 1995	Lisflood–FF, Lisflood–FP	ECMWF EPS
Pappenberger et al. (2008)	Danube, Romania	October 2007	Lisflood (FF)	TIGGE (grand–ensemble)
Regimbeau et al. (2007)	Seine, Herault	March 2001, September 2006	ISBA and MODCOU	ECMWF EPS
Roulin (2007), Roulin and Vannitsem (2005)	Ourthe (Meuse) and Scheldt, Belgium	All events 1997– 2006	IRMB (adapled) water balance model	ECMWF EPS
Rousset–Regimbeau et al. (2008), Thirel et al. (2008)	France (on 881 gauges)	March 2005– September 2006	MODCOU	Prevision d’Ensemble ARPege and ECMWF EPS
Siccardi et al. (2005)	NW Italy, Liguria	November 1994	DrIFit	LEPS (five clusters)
Thielen et al. (2009b)	Danube, Romania	October 2007	Lisflood (FF)	ECMWF (EPS and deterministic up to monthly), DWD (global and local), COSMO–LEPS
Verbunt et al. (2007)	Upper Rhine (up to Rhinefelsen)	May 1999 November 2002	PREVAH	ECMWF EPS, COSMO–LEPS
Webster et al. (submitted for publication)	Ganges and Brahamaputra	Summer 2007	Catchment lumped model (CLM) and Semi distributed model (SDM)	ECMWF EPS
Younis et al. (2008)	Elbe	March–pril 2006	Lisflood–FF (as input to the EFAS)	ECMWF (EPS and deterministic), DWD (global and local)
Zappa et al. (2008)	Linth, Oglio (both in the Alps)	August and November 2007	DIMOSOP	COSMO–LEPS

기초한 홍수예보 시스템이 높은 가치를 가지는 것으로 결론짓고 있다. Balint et al. (2006)은 ECMWF 앙상블 예측을 1~6일 전의 홍수예측에 사용한 결과 "수문학적 예측을 수행하기 위한 기상 앙상블의 사용으로 홍수경보의 능력이 향상되었다"고 하였으며, Roulin(2007)은 벨기에의 두 유역에 ECMWF 앙상

블 예측을 입력자료로 하여 수문학적 앙상블 예측 시스템을 분석한 결과 "수문학적 앙상블 예측이 확정적 예측에 비해 높은 능력이 있음"을 보였다.

표 2에 정리된 다른 연구사례의 결론에서도 비슷한 언급을 찾을 수 있다. Roulin과 Vannitsem(2005)은 "앙상블 예측이 홍수의 발생 가능성에 대한 명확한 정

보의 제공이 가능함"을, Gouweleeuw et al.(2005)는 "전반적인 저조한 수행능력에도 불구하고 앙상블 유량예측은 확정적 예측에 비해 추가적인 정보의 제공이 가능함"을 나타내었다.

그러나 많은 사례에서 불확실성 및 앙상블 정보의 이해와 관련하여 주의가 필요함을 지적하였다. Hlavcova et al.(2006)은 "앙상블 예측과 확정적 예측 모두 4일 까지의 예측에서는 명확한 홍수에 대한 신호를 제공할 수 있었으나, 예측에 상당히 큰 분산이 포함되었다. 앙상블의 불확실성과 유용성을 적절히 설명하기 위해서는 보다 긴 기간에 대한 분석이 요구되며, 앙상블의 의미 있는 해석과 사용자와의 정보공유방안이 수립되지 못하였음"을 지적하였다.

여러 연구사례들은 또한 기상예측의 높은 불확실성이 평가결과에 지배적으로 영향을 미치고 있음을 언급하였다. Pappenberger et al.(2005)은 "저조한 강수예측의 수행능력으로 인하여 예측의 가치가 낮아졌음"을, Jasper et al.(2002)는 "성공적인 홍수예측을 위해서는 정확한 강수예측이 전제가 되며, 강수예측은 시간, 강도, 양 및 공간적 분포에서 정확하게 예측되어야 함"을 언급하였다. Xuan et al.(2005)은 "NWP에 기초한 QPF(Quantitative Precipitation Forecast)는 일반적으로 강수의 패턴은 나타낼 수 있었으나, 강수예측의 불확실성이 상당히 높음"을 보였다.

6. 기존 연구사례의 문제점

Cloke et al.(2009)은 홍수예측을 위한 앙상블예측의 활용과 관련한 기존 연구사례에 존재하는 문제점을 다음과 같이 지적하였다.

(i) 분석이 하나의 연구사례에 기초하는 경우 허위경보(false alarm)에 대해 언급하는 연구는 드물었

다. 예외적인 사례는 Bartholmes와 Todini(2005)의 연구로 "앙상블예측시스템의 추가적인 가치는 없으며 저조한 수행능력을 보였음"을 언급하였다. Olsson과 Webster(2008)은 허위경보의 분석을 숨김없이 나타내었으며, Roulin(2007)은 허위경보 비용을 포함한 비용·손실을 계산하였다.

(ii) 많은 연구사례에서 NWP EPS의 긍정적인 영향만을 단순히 질적인 설명을 통해 나타내었다.

(iii) 예측의 양적인 평가가 이뤄진 몇몇의 연구에서 평가에 관측된 유출량이 아닌 관측된 기상자료로부터 모의된 유출량이 사용되었다. 관측자료의 신뢰도가 낮거나 사용이 어려운 경우 이러한 방법을 통해 분석이 가능하게 되는 장점이 있으나, 다른 연구사례와의 비교 분석이 어렵게 되며, 오차를 포함한 수문모형이 현실적인 완전한 수문모형으로 가정되는 것은 이해되기 어렵다.

(iv) 기존의 연구사례들은 서로 직접적으로 비교되기 어려웠다. 연구사례들은 다른 수문 및 기상학적 계획에 의해 수행되며, 예측 시스템은 시간에 따라 계속하여 수정되기 때문에 연구사례 결과의 분석은 변할 수 있게 된다.

(v) 대부분의 경우 시스템의 모든 여러 요소가 예측 불확실성에 미치는 영향이 양적으로 심지어 질적으로도 평가되지 못하였다.

(vi) 의사결정지원 또는 최종 사용자와의 예보 공유와 관련하여 충분한 검토가 이뤄지지 못하였다.

7. EPS를 활용한 확률홍수예측의 주요 과제

앙상블 홍수예측은 점차 전 세계적인 연구가 되고 있으며, 그 동안의 연구사례는 앙상블 예측방안이 홍수예측에 활용가치가 있으며 특히 홍수경보에서 효과적임을 나타내었다. 그러나 이를 뒷받침 하기위한 연



구사례는 아직까지 부족한 현실이며, Cloke et al.(2009)은 조기 홍수경보를 위한 EPS의 활용과 관련하여 다음과 같은 사항을 제안하였다.

(i) NWP의 향상

EPS의 기상양상불은 NWP의 낮은 정확성으로 인하여 양상불 홍수예측의 입력자료로 사용되기에는 아직까지 충분하지 못하며, 따라서 높은 해상도, 충분한 수의 양상불 멤버, 계통적오차 및 불확실성의 저평가에 대한 해결이 요구된다.

(ii) 시스템의 전체 불확실성에 대한 이해

아직까지 예측시스템의 불확실성에 대한 전체 범위 및 상호작용에 대해 검토되지 못하였다. 전체 불확실성에 대한 분석은 컴퓨터의 수행능력을 초과하는 관계로 어려움이 있으며, 기존의 EPS에 기초한 예측 또한 기상현상의 실제 불확실성을 반영하지 못하고 있다.

(iii) 자료동화

양상불 홍수예측시스템의 자료동화기술은 현재 토양습윤, 적설량 또는 유출량을 포함하고 있으나, 예측기간에 대해 수문학적 유역초기조건의 영향이 높다는 것을 감안하면 수문학적 자료동화에 보다 큰 관심이 요구된다.

(iv) 충분한 연구사례

확률예측의 평가는 쉽지 않은 작업으로 드문 홍수 사상에 대한 연구사례에 의존해야 한다. 하지만 EPS를 활용한 홍수예측의 가치를 통계적으로 분석하기 위한 충분한 연구사례가 없는 것이 현실이며, 신뢰도 높은 분석을 위해서는 앞으로 보다 많은 사례에 대한 연구가 진행되어야 한다.

(v) EPS를 사용한 확률홍수예보의 활용방안

수문분야와 관련된 많은 기관에서 최근에 들어서야 양상불에 기초한 예측방안을 받아들였으며, 확률예측에 관한 접근방법은 아직까지는 비현실적인 면이 있다. 양상불예측에 관한 노후우가 쌓이고 홍수예보방안의 장점을 모두 활용하기 위해서는 앞으로 수년의 노력이 필요할 것이다. 최적화된 의사결정지원 방안은 홍수예보서비스의 주요한 부분이며, 신뢰도 높은 예측의 수행을 위해서는 기상자료를 전처리하는 등 추가적인 처리과정이 요구되나 현재까지의 관련연구는 초보적인 단계에 있다. 또한 예측의 불확실성을 나타내는 확률홍수예측이 최종 사용자의 활용방향에 따라 어떻게 이해되고 활용될 수 있는지에 대한 연구가 미비한 현실이다. ☞

● 참고문헌

1. Balint, G., Csik, A., Bartha, P., Gauzer, B., Bonta, I., 2006. Application of meteorological ensembles for Danube flood forecasting and warning. In: Marsalet, J., Stancalie, G., Balint, G. (Eds.), *Transboundary Floods: Reducing Risks through Flood Management*. Springer, NATO Science Series, Dordrecht, The Netherlands, pp. 57-68.
2. Bartholmes, J., Thielen, J., Gentilini, S., 2007. Assessing operational forecasting skill of EFAS. In: Thielen, J., Bartholmes, J., Schaake, J., (Eds.), *Abstracts of the 3rd HEPEx Workshop*, Stresa, Italy, 27-29th June 2007, European Commission, Institute for Environment and Sustainability, EUR22861 EN.
3. Bartholmes, J., Thielen, J., Ramos, M., Gentilini, S., 2009. The European flood alert system EFAS-Part 2: statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational

- forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences* 13 (2) 141-153.
4. Bartholmes, J., Todini, E., 2005. Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences* 9, 333-346.
 5. Beven, K.J., 2000. Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences* 4, 203-213.
 6. Bogner, K., Kalas, M., 2008. Error correction methods and evaluation of an ensemble based hydrological forecasting system for the Upper Danube catchment. *Atmospheric Science Letters* 9 (2), 95-102.
 7. Bonta, I., 2006. Using ensemble precipitation forecasts for hydrological purposes. *Geophysical Research Abstracts* 8, 06027.
 8. Cauwenberghs, K., 2008. Personal conversation.
 9. Cloke, H.L., Pappenberger, F. 2009. Ensemble flood forecasting: A review. *Journal of Hydrology* 375, 613-626
 10. Cluckie, I.D., Xuan, Y., Wang, Y., 2006. Uncertainty analysis of hydrological ensemble forecasts in a distributed model utilising short-range rainfall prediction. *Hydrology and Earth System Sciences-Discussion* 3, 3211-3237.
 11. Csik, A., Balint, G., Bartha, P., Gauzer, B., 2007. Application of meteorological ensembles for Danube flood forecasting and warning. In: Thielen, J., Bartholmes, J., Schaake, J., (Eds.), *Abstracts of the 3rd HEPEX Workshop, Stresa, Italy, 27-29th June 2007*. European Commission, Institute for Environment and Sustainability, EUR22861 EN.
 12. Davolio, S. et al., 2008. A meteo-hydrological prediction system based on a multimodel approach for precipitation forecasting. *Natural Hazards Earth System Sciences* 8, 143-159.
 13. De Roo, A., et al., 2006. The Alpine floods of August 2005. What did EFAS forecast, what was observed, which feedback was received from end-users? EFAS 25, Post-event summary report, European Commission, EUR 22154 EN, p. 94.
 14. Dietrich, J. et al., 2008. Combination of different types of ensembles for the adaptive simulation of probabilistic flood forecasts: hindcasts for the Mulde 2002 extreme event. *Nonlinear Processes in Geophysics* 15, 275-286.
 15. Fortin, V., Favre, A.C., Said, M., 2006. Probabilistic forecasting from ensemble prediction systems: improving upon the best-member method by using a different weight and dressing kernel for each member. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 132 (617), 1349-1369.
 16. Gabellani, S. et al., 2005. Applicability of a forecasting chain in a different morphological environment in Italy. *Advances in Geosciences* 2, 131-134.
 17. Gouweleeuw, B., Thielen, J., Franchello, G., de Roo, A., Buizza, R., 2005. Flood forecasting using medium-range probabilistic weather prediction. *Hydrology and Earth System Sciences* 9 (4), 365-380.
 18. Haiden, T., Kann, A., Stadlbacher, K., Steinheimer, M., Wittmann, C., 2007. Integrated nowcasting through comprehensive analysis (INCA)-system overview, ZAMG report. p. 49. http://www.zamg.ac.at/fix/INCA_system.doc.
 19. Hangen-Brodersen, C., Vogelbacher, A., Holle, K.-K., 2008. Operational flood forecast in



- Bavaria, dealing with uncertainty of hydrological forecasts in the Bavarian Danube catchment. In: Proceedings of the 24th Conference of the Danubian Countries, 2-4 June 2008, Bled, Slovenia, <http://ksh.fgg.uni-lj.si/bled2008/cd_2008/>.
20. He, Y., Wetterhall, F., Cloke, H.L., Pappenberger, F., Wilson, M., Freer, J., McGregor, G., 2009. Tracking the uncertainty in flood alert driven by grand ensemble weather predictions. *Meteorological Applications* 16 (1) 91-101.
 21. Hlavcova, K., Szolgay, J., Kubes, R., Kohnova, S., Zvolensky, M., 2006. Routing of numerical weather predictions through a rainfall-runoff model. In: Marsalek, J., Stancalie, G., Balint, G. (Eds.), *Transboundary Floods: Reducing Risks through Flood Management*. Springer, NATO Science Series, Dordrecht, The Netherlands, pp. 57-68.
 22. Hopson, T., Webster, P., 2008. Three-Tier flood and precipitation forecasting scheme for south-east asia. <<http://cfab2.eas.gatech.edu/>> (accessed 08.05.08).
 23. Jasper, K., Gurtz, J., Lang, H., 2002. Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology* 267 (1-2), 40-52.
 24. Jaun, S., Ahrens, B., 2009. Evaluation of a probabilistic hydrometeorological forecast system. *Hydrology and Earth System Sciences* 13, 1031-1043.
 25. Jaun, S., Ahrens, B., Walser, A., Ewen, T., Schar, C., 2008. A probabilistic view on the August 2005 floods in the upper Rhine catchment. *Natural Hazards Earth System Sciences* 8, 281-291.
 26. Johnell, A., Lindstrom, G., Olsson, J., 2007. Deterministic evaluation of ensemble streamflow predictions in Sweden. *Nordic Hydrology* 38 (4), 441-450.
 27. Kalas, M., Ramos, M.H., Thielen, J., Babiakova, G., 2008. Evaluation of the mediumrange European flood forecasts for the March-April 2006 flood in the Morava river. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 56 (2), 116-132.
 28. Komma, J., Reszler, C., Bloschl, G., Haiden, T., 2007. Ensemble prediction of floods-catchment non-linearity and forecast probabilities. *Natural Hazards Earth System Sciences* 7, 431-444.
 29. Kwadijk, J.C.J., 2007. Assessing the value of ensemble prediction in flood forecasting- Report Q4136.40, Delft Hydraulics, Delft.
 30. Li, L.Q., Lu, X.X., Chen, Z.Y., 2004. River channel change during the last 50 years in the middle Yangtze River, the Jianli reach. *Progress in Physical Geography* 28(3), 405-450.
 31. Olsson, J., Lindstrom, G., 2008. Evaluation and calibration of operational hydrological ensemble forecasts in Sweden. *Journal of Hydrology* 350 (1-2), 14-24.
 32. Pappenberger, F. et al., 2005. Cascading model uncertainty from medium range weather forecasts (10 days) through a rainfall-runoff model to flood inundation predictions within the European Flood Forecasting System (EFFS). *Hydrology and Earth System Sciences* 9 (4), 381-393.
 33. Regimbeau, F.R., Habets, F., Martin, E., Noilhan, J., 2007. Ensemble streamflow forecasts over France. *ECMWF Newsletter* 111, 21-27.
 34. Renner, M., Werner, M., 2007. Verification of ensemble forecasting in the Rhine basin-

- Report Q4378, Delft Hydraulics, Delft.
35. Reszler, C., Komma, J., Blöschl, G., Gutknecht, D., 2006. Ein Ansatz zur Identifikation flächendetaillierter Abflussmodelle für die Hochwasservorhersage (An approach to identifying spatially distributed runoff models for flood forecasting). *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 50 (5), 220-232.
 36. Rotach, M.W. et al., 2008. MAP D-PHASE: real-time demonstration of weather forecast quality in the alpine region. *Atmospheric Science Letters* 2, 80-87.
 37. Roulin, E., 2007. Skill and relative economic value of medium-range hydrological ensemble predictions. *Hydrology and Earth System Sciences* 11 (2), 725-737.
 38. Roulin, E., Vannitsem, S., 2005. Skill of medium-range hydrological ensemble predictions. *Journal of Hydrometeorology* 6 (5), 729-744.
 39. Rousset-Regimbeau, F., Noilhan, J., Thirel, G., Martin, E., Habets, F., 2008. Mediumrange ensemble streamflow forecast over France. *Geophysical Research Abstracts*, 11. EGU2008-A-03111.
 40. Thielen, J., Bartholmes, J., Ramos, M.-H., de Roo, A., 2009a. The European flood alert system-Part 1: concept and development. *Hydrology and Earth System Science* 13 (2), 125-140.
 41. Thielen, J., Bogner, K., Pappenberger, F., Kalas, M., del Medico, M., de Roo, A., 2009b. Monthly-, medium-, and short-range flood warning: testing the limits of predictability. *Meteorological Applications* 16 (1), 77-90.
 42. Thirel, G., Rousset-Regimbeau, F., Martin, E., Habets, F., 2008. On the impacts of short-range meteorological forecasts for ensemble stream flow predictions. *Journal of Hydrometeorology* 9(6), 1301-1317.
 43. Vehviläinen, B., Huttunen, M., 2002. Hydrological forecasting and real time monitoring in Finland: The watershed simulation and forecasting system (WSFS). (<http://www.environment.fi/waterforecast>).
 44. Verbunt, M., Walser, A., Gurtz, J., Montani, A., Schar, C., 2007. Probabilistic flood forecasting with a limited-area ensemble prediction system: selected case studies. *Journal of Hydrometeorology* 8 (4), 897-909.
 45. Webster, P., Hopson, T., Hoyos, C., Jian, J., Chang, H.-R., submitted for publication. *Extended range probabilistic forecasting of the 2007, Bangladesh floods*.
 46. Werner, M., 2005. FEWS NL Version 1.0-Report Q3933, Delft Hydraulics, Delft.
 47. Xuan, Y., Cluckie, I.D., Han, D., 2005. Uncertainties in application of NWP-based QPF in real-time flood forecasting, Innovation, advances and implementation of flood forecasting technology, Tromsø, Norway, pp. 1-9.
 48. Younis, J., Ramos, M., Thielen, J., 2008. EFAS forecasts for the March-April 2006 flood in the Czech part of the Elbe River Basin-a case study. *Atmospheric Science Letters* 9 (2), 88-94.
 49. Zappa, M. et al., 2008. MAP D-PHASE: real-time demonstration of hydrological ensemble prediction systems. *Atmospheric Science Letters* 2, 80-87.