

유역유출예측을 위한 국내외 시스템 개발 및 적용 현황



정우창 >

한국수자원공사 수자원연구원 수자원환경연구소
선임연구원
jeongwc@kwater.or.kr



이상진 >

한국수자원공사 수자원연구원 수자원환경연구소
선임연구원
sjlee@kwater.or.kr



정구열 >

한국수자원공사 물관리센터 물관리계획팀 팀장
kychong@kwater.or.kr

수기에 대비한 단기 유량예측은 활발한 연구결과와 적용사례를 찾을 수 있으나, 이수기를 대비한 중장기 유량예측에 대한 연구는 상대적으로 미약한 실정이다. 현재 미국 등과 같은 선진국에서는 인공위성 등 첨단기술의 발달로 인해 중장기 기상예보의 정확성이 점진적으로 개선되고 있으며, 기상-수자원 연계기술을 이용한 수문분석 시스템을 개발하여 장래에 발생할 유출량 및 댐 유입량 예측을 단기, 중기, 장기의 다양한 기간에 걸쳐 수행하고 있다.

본고에서는 효율적인 수자원 관리를 위해 미국의 선진 물관련 기관에서 수행 중인 장단기 하천유량예측기술개발 동향을 알아보고, 국내에서의 기술개발 현황을 살펴보고자 한다. 또한 유역의 중·장기 용수 수요와 공급 예측을 위해 수자원연구원이 21세기 프론티어 연구개발 2단계 사업의 「유역 물 관리 운영기술 개발」과제 수행 중 검토했던 유역수문해석을 위한 기상정보 활용 및 연계기술의 적용 사례를 소개한다.

1. 서론

21세기에 예상되는 극심한 가뭄과 물 부족에 대비한 중요한 비구조적인 대책으로 유역 단위의 기존 댐 저수지 시스템의 운영 개선을 들 수 있다. 이러한 유역 수자원시스템의 운영 효과를 극대화하기 위해 가장 우선적으로 수행해야 할 사항은 수자원시스템 운영자의 의사결정에 결정적인 영향을 미치는 가장 중요한 요소 중의 하나인 유량예측이다. 유량예측은 크게 보면 홍수 사상에 대한 홍수량 예측과 같은 단기 유량예측이 있으며, 월 단위 혹은 계절단위 이상의 장기 유량예측으로 구분될 수 있다. 국내의 경우 홍

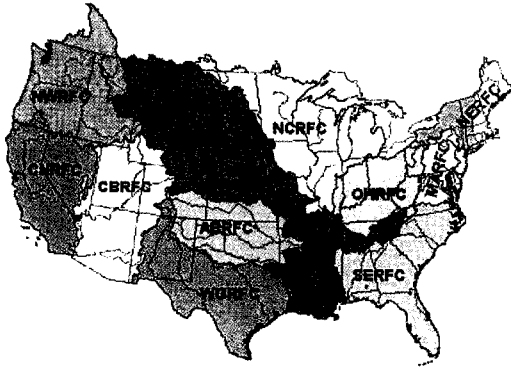
2. 국외 유출예측기술 동향

- 미국과 일본의 경우

2.1 미기상청 하천예보센터(River Forecast Center, RFC) 연계기술 현황

미기상청(National Weather Service, NWS)에서는 하천의 상태를 예보하여 홍수에 의한 인명과 재산피해를 줄이기 위한 노력의 일환으로 하천예보센터를 운영하고 있다. 하천예보센터는 미전역에 걸쳐 지역별 및 하천별로 운영되고 있으며, 그림 1은 지역별 하천예보센터 운영현황을 나타낸 것이다.

NWS River Forecast Centers
(areas of responsibility)



| Acronym | Locations |
|---------|--|
| ABRFC | Arkansas–Red River BasinsTulsa, OK |
| APRFC | Alaska–Pacific (not shown on map) Anchorage, AK |
| CBRFC | Colorado River BasinSalt Lake City, UT |
| CNRFC | California–Nevada Sacramento, CA |
| LMRFC | Lower Mississippi River BasinSlidell, LA |
| MARFC | Middle AtlanticState College, PA |
| MBRFC | Missouri River BasinPleasant Hill, MO |
| NCRFC | North–CentralChanhassen, MN |
| NERFC | NortheastTaunton, MA |
| NWRFC | NorthwestPortland, OR |
| OHRFC | Ohio River BasinWilmington, OH |
| SERFC | SoutheastPeachtree City, GA |
| WGRFC | West GulfFort Worth, TX |

그림 1. 미국의 하천예보센터의 지역별 분포 현황

하천예보센터는 대유역에 포함되어 있는 하천, 저수지 및 호수에 대한 수문모델링 운영을 관리하고 미 기상청의 수문 산출물을 위한 기초적인 예측정보를 생산하기 위해 그림 2와 같이 NCEP(National

Centers for Environmental Prediction)의 수문 기상예측센터(Hydrometeorological Prediction Center, HPC)와 기후 예측센터(Climate Prediction Center, CPC)의 강수진단기술

Operational HAS Function
Hydrometeorological Analysis and Support

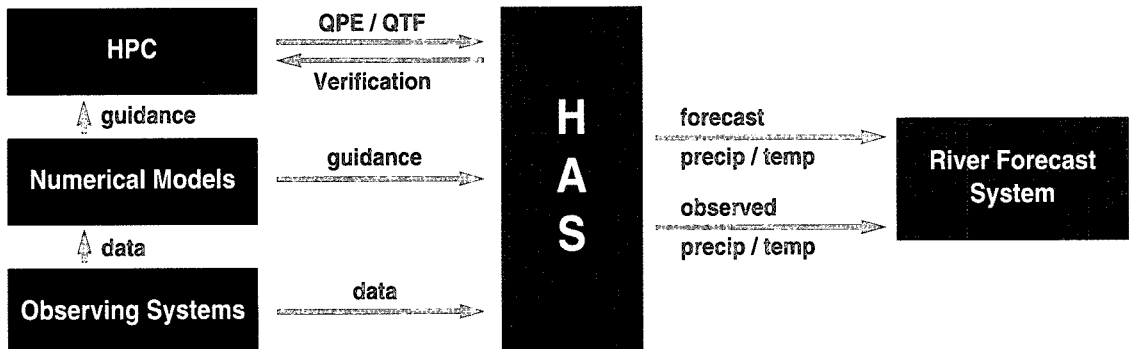


그림 2. 하천예보센터의 수문예보 과정도

(Quantitative Precipitation Forecast, QPF) 및 관측정보를 입력으로 단기, 중기, 장기 수문예보를 수행하고 있으며, 비홍수 기간에는 하루 두 번 그리고 중대한 홍수나 홍수발생 가능성이 높은 기간에는 24 시간 운영을 수행하고 있다.

하천예보센터에서는 NWSRFC(National Weather Service River Forecast System) 모형과 SSARR(Streamflow Simulation and Reservoir Regulation) 및 ESP(Ensemble Streamflow Prediction)을 이용하여 실시간 홍수예보 및 하천예보 그리고 장기(확률)예보를 수행하고 있다.

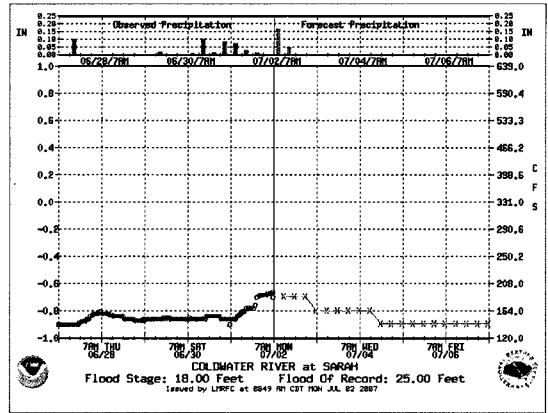


그림 3. 단기유량예측의 실례 (Coldwater river)

2.1.1 단기유출예측

하천예보센터의 주요 업무 중의 하나는 0~7일 간의 단기하천예보이며, 사용되는 예보 시스템은 그림 3과 같은 예보수문곡선과 이에 대한 정확도를 전달하는 확률정보를 생산한다. 또한 하천예보센터 예보자들은 수문기상학적 상황을 운영 중인 예보 시스템의 결과물과 함께 지속적으로 분석한다. 이들 분석을 근거로 하여 중대한 하천 홍수의 위험영역을 정의하는 그림 4와 같은 5일 예보 전망을 산출하며, 이를 경계비상 관리자와 홍수에 대한 다른 잠재적 사용자들에게 쓰여 진다.

2.1.2 중장기유출예측

8~14일간의 중기수문예보와 그 이상의 장기수문예보 산출물 생산에 있어서 보다 정확한 정보를 가지기 위해서는 집중적인 계산 모델링을 통한 확률론적 시계열 연산이 필요하다. NWS의 AHPS(Advanced Hydrologic Prediction Service)에서는 이러한 확률론적 결과를 계산하기 위한 접근방법으로 그림 5와 같은 ESP(Ensemble Streamflow Prediction) 기법을 적용하고 있다. 이 기법은 기본적으로 하천유량이 현시점에서 장래에 어떻게 변화될 것인지를 모의하기 위해 수년에 걸친 과거수문자료(예, 강수, 온도)로부터 유도된 입력자료를 사용한다.

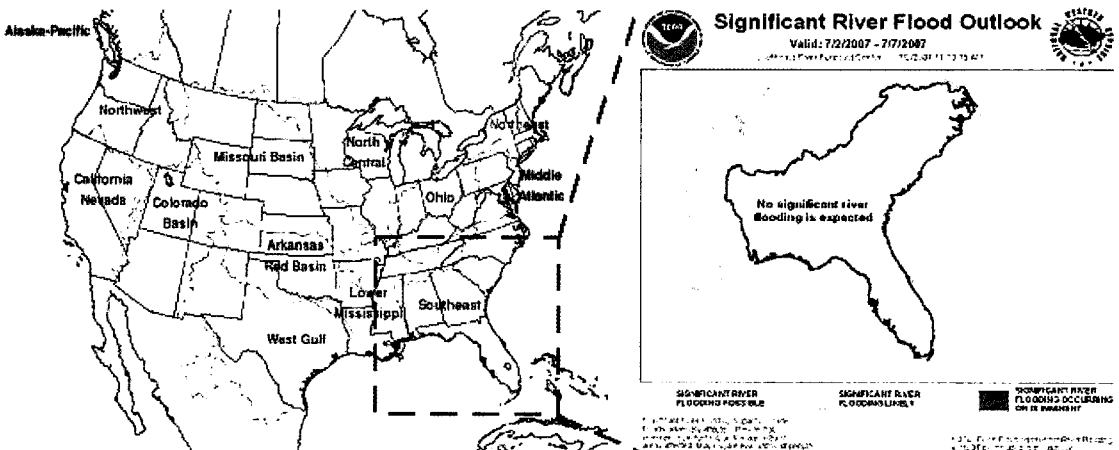


그림 4. 하천예보센터의 주요 하천 홍수 전망 (플로리다주의 경우)

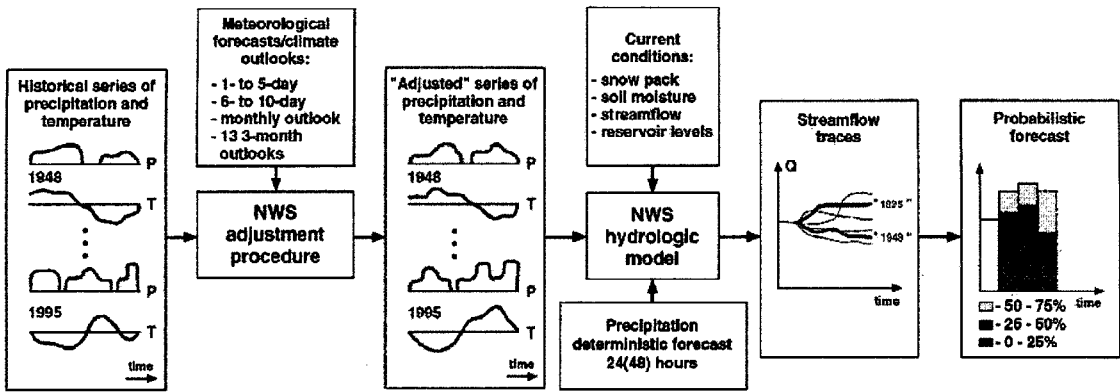


그림 5. ESP 예측기법의 계산 과정

하천예보센터에서는 ESP 기법을 활용하여 장기수문예보를 수행 중이며, 그림 6은 실례로서 NWSRFS를 이용한 Enid 댐의 장기 유입량 예측결과를 나타낸 것이다. 총예측기간은 2007년 7월 3일부터 9월 30일까지 90일이며, 일 평균 댐 유입량, 일 평균 댐 유입량의 누가곡선, 앙상블 멤버들의 수문학적 추적곡

선, ESP 통계특성치 등을 볼 수 있다.

하천예보센터에서 생산하는 단기, 중기, 장기수문예보의 확정론적 및 확률론적 결과는 관측수위와 관측유량 자료와 같은 자료원과 통합하거나 그래픽적 산출물에 기여하기 위해 규격화된 포맷으로 기록된다. 이러한 예보정보는 미개척국(USBR)과 같은 수자

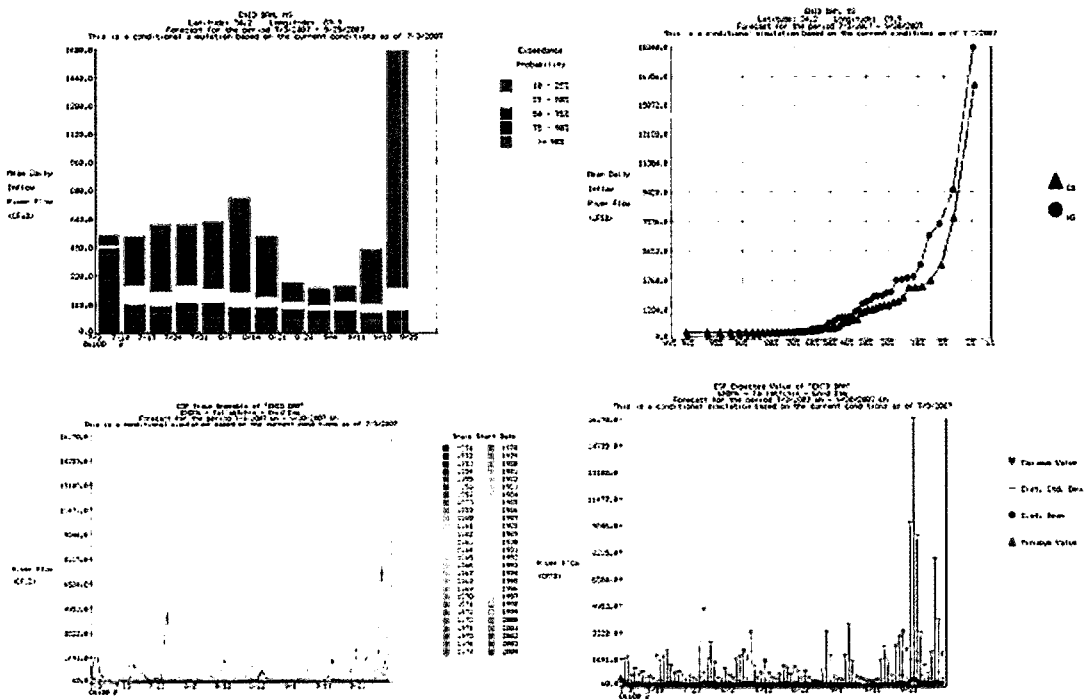


그림 6. ESP 예측기법을 이용한 장기 확률예보 적용예 (ENID 댐)

원 유관기관과 지속적으로 상호교환하며, 웹페이지를 통하여 하천예보센터 DB에 저장된 확정론적 및 확률론적 정보에 기초한 수문 산출물을 일반 사용자에게 제공한다.

2.2 미국TVA(Tennessee Valley Authority) 연계기술 현황

미국 TVA에서는 그림 7과 같이 60개의 다목적 댐을 통합 운영하고 있다. 이러한 통합 운영의 주요 목적은 주운(navigation), 홍수감시, 수력발전, 수위조절 등이며, 냉각수를 제공하여 화석 및 원자력 발전을 지원하는 것이다.

TVA의 저수지 조절은 60개 저수지에서의 일별 방류량을 계획하는 것으로 저수지의 수량, 각 저수지에 도달하는 시간, 기상 조건, 장기 이수 등을 고려한 복잡한 과정을 거쳐서 이루어진다. 고성능 컴퓨터와 수치모형, 대규모 자료 수집 시스템을 이용하여 각 댐

에서의 일 방류량을 결정하게 된다.

TVA의 자료수집 시스템은 74개 지점의 유량 관측값 및 50개 주요 댐의 댐 저수위와 방류량 그리고 292개 지점의 강수량 관측값으로 구성되어 있다. 그림 8은 TVA에 관리하는 댐 중 Apalachia 댐의 상하류 저수위와 방류량 현황 그리고 예측 저수위와 방류량을 나타낸 것이다.

유입량 계산 및 조정단계에서는 관측된 강수량 자료를 기반으로 경험적 수문모형을 사용하여 10~12 일 동안 각 저수지의 유입량과 도달시간을 계산하며, 예보된 유입량과 관측된 유입량이 일치하도록 수문곡선을 조정한다. 유입량은 관측된 강수량으로부터 계산되지만 만일 더 많은 강우가 예측되는 경우 강우증가량에 의한 영향도 계산되어진다. 유량이 많은 기간에는 활용 가능한 최근 관측 자료를 이용하여 매 6 시간마다 유입량을 계산한다.

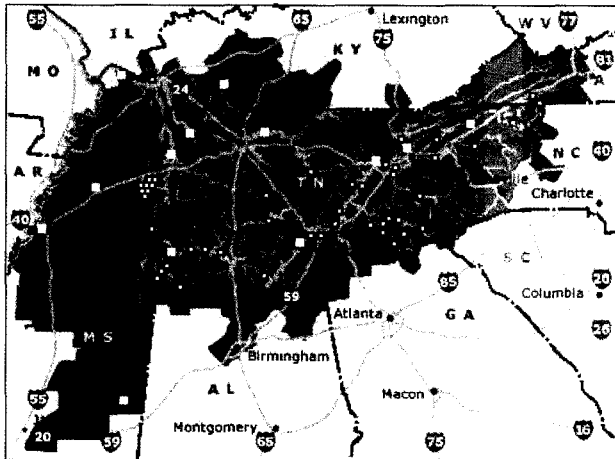
TVA Reservoirs and Power Plants

[Return to previous page](#)

Use this map to link to detailed information on all of TVA's facilities.
Point to a colored dot on the map to see the TVA site name. Click for more information.

or

Point to a name on the list to see the site location on the map. Click for more information.



- | | | |
|--------------------|------------------|--------------------|
| Reservoirs | Nickajack | Chickamauga |
| Apalachia | Nolichucky | Clear Creek |
| Bear Creek | Normandy | Dogwood |
| Beaver Creek | Norris* | Douglas |
| Beech | Nottely | Fontana* |
| <u>Blue Ridge</u> | Ocoee 1 | Fort Loudoun |
| Boone | Ocoee 2 | Fort Patrick Henry |
| Cedar | Ocoee 3 | Great Falls |
| Cedar Creek | Pickens | Guntersville |
| Chatuge | Pin Oak | Hiwassee |
| Cherokee | Pine | Kentucky* |
| Chickamauga | Raccoon Mtn.* | Little Bear Creek |
| Clear Creek | Redbud | Lost Creek |
| Dogwood | South Holston | Melton Hill |
| Douglas | Sycamore | |
| Fontana* | Tellico | |
| Fort Loudoun | Tims Ford | |
| Fort Patrick Henry | Upper Bear Creek | |
| Great Falls | Watauga | |
| Guntersville | Watts Bar | |
| Hiwassee | Wheeler | |
| Kentucky* | Wilbur | |
| Little Bear Creek | Wilson | |
| Lost Creek | | |
| Melton Hill | | |

Nuclear Plants

Browns Ferry
Sequoyah
Watts Bar

* Visitor Centers at these sites are open except during high security alerts.

그림 7. TVA 저수지 및 발전소 위치도

Releases

| Date | Time (Eastern) | Generators |
|----------|-----------------|------------|
| 7/3/2007 | 7pm - 11pm | 2 or more |
| | 11pm - midnight | 0 |
| 7/4/2007 | midnight - 2am | 0 |
| | 2am - 3am | 1 |
| | 3am - 6am | 0 |
| | 6am - 7am | 1 |
| | 7am - 10am | 0 |
| | 10am - 11am | 1 |
| 7/5/2007 | 11am - midnight | 2 or more |
| | midnight - 1am | 1 |

Observed

| Date/Time (Eastern) | Upstream Elevation (feet above mean sea level) | Downstream Elevation (feet above mean sea level) | Average Hourly*Discharge (cubic feet per second) |
|---------------------|--|--|--|
| 7/3/2007 | | | |
| noon | 1,275.86 | 840.39 | 2,762 |
| 1pm | 1,275.89 | 840.40 | 2,807 |
| 2pm | 1,275.92 | 840.40 | 2,810 |
| 3pm | 1,275.92 | 840.40 | 2,814 |
| 4pm | 1,276.19 | 840.39 | 2,806 |
| 5pm | 1,276.19 | 840.38 | 2,810 |
| 6pm | 1,276.19 | 840.40 | 2,808 |
| 7pm | 1,276.19 | 840.40 | 2,823 |

* discharge reported at end of hour

Predicted

| Date | Daily Average Inflow (cubic feet per second) | Midnight Elevation (feet above mean sea level) | Daily Average Outflow (cubic feet per second) |
|----------|--|--|---|
| 7/3/2007 | 1,800 | 1,276.70 | 1,400 |
| 7/4/2007 | 2,000 | 1,277.00 | 1,800 |
| 7/5/2007 | 2,000 | 1,277.00 | 2,000 |

그림 8. Apalachia 댐의 관측 방류량(상), 상하류 저수위(중) 그리고 예측 저수위 및 방류량(하)

3. 국내 유출예측기술 동향

선진국에서는 기상-수자원 연계기술을 이용한 수문분석 시스템을 개발하여 장래에 발생할 유역 유출량 및 댐 유입량 예측을 단기, 중기, 장기의 다양한 기간에 걸쳐 수행하고 있지만, 국내의 경우 기상 및 수자원 전문가들이 독립적으로 실무 및 연구 분야에

종사하고 있는 실정이어서 이들 연계기술 개발이 아직 미흡한 실정이다.

가장 최근의 연구로는 21세기 프론티어 연구개발사업의 『유역 물 관리 운영기술 개발』과제에서 기상청에서 제공하는 2일 예보를 위한 RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System)와 10일 예보를 위한 GDAPS (Global

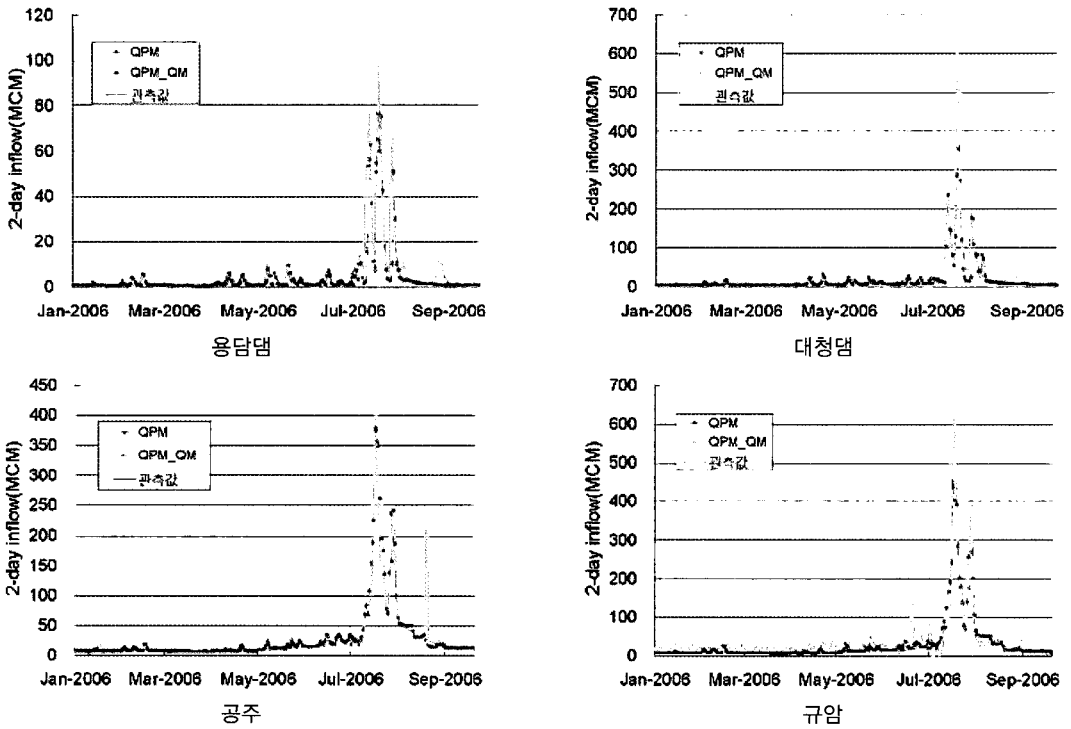


그림 9. 금강유역 주요 지점별 단기(2-day) 유량예측 결과

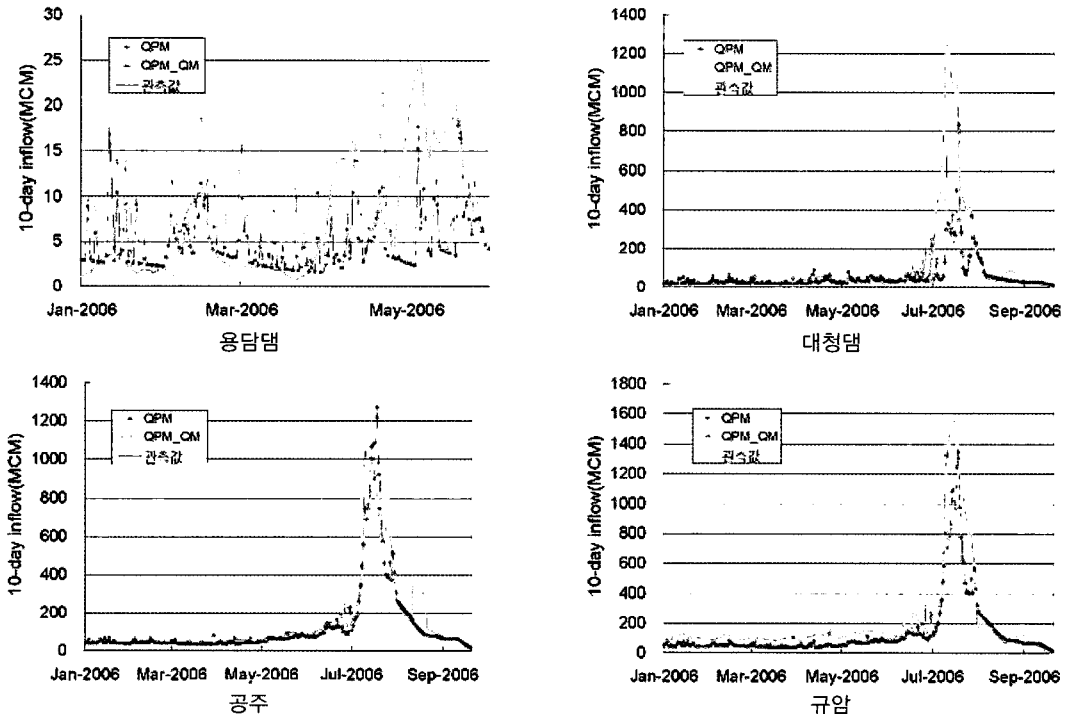


그림 10. 금강유역 주요 지점별 중기(10-day) 유량예측 결과

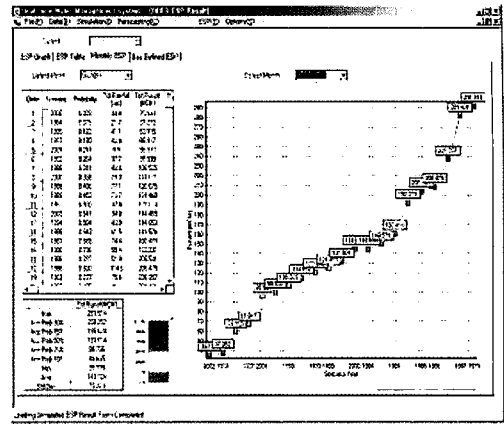
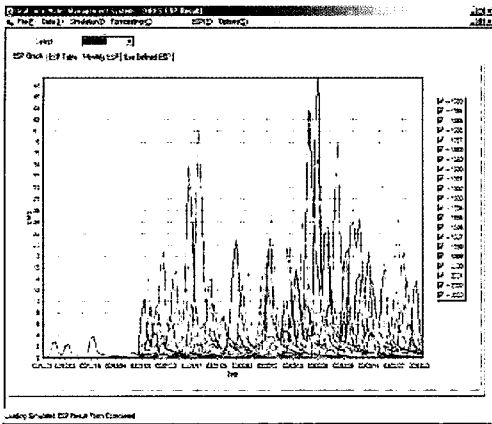


그림 11. RRFs에 탑재된 장기간 유출예측을 위한 ESP 모듈

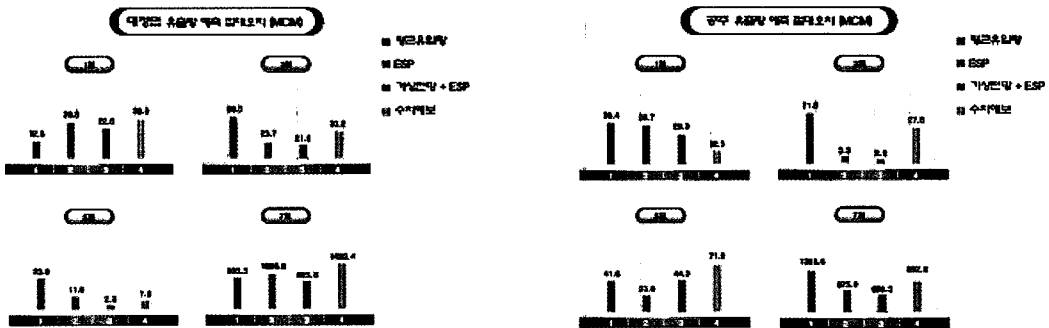


그림 12. 기법별 예측된 월유출량 비교결과

Data Assimilation and Prediction System)와 같은 수치예보자료 그리고 이러한 자료를 특정 유역에 강우상세정보를 생산할 수 있는 강수진단모형(Quantitative Precipitation Model, QPM)으로부터의 결과를 이용하여 금강유역의 주요 지점별 단기(2-day) 및 중기(10-day) 유출예측을 수행하였다. 그림 9와 10은 각각 2006년 1월에서부터 9월까지 단기 및 중기 주요 지점별 유출예측 결과를 나타낸 것이다.

한달이상의 장기간 유출예측은 동일 과제에서 개발된 유역유출예측시스템인 RRFs(Rainfall-Runoff Forecasting System)을 이용하여 수행되며, RRFs에 구현되어 있는 유출예측기법으로는 통상적 기법에 해당하는 지점별 과거 실측 유출 평균량, 기존의 ESP 기법, 기존의 ESP 기법을 보완하기

위해 기상청에서 제공하는 월기상 전망을 고려한 ESP 기법 그리고 강수진단모형으로부터 예측된 수치자료를 이용한 유출예측기법이 있다. 그림 11은 한 예로 RRFs에 구축되어 있는 ESP 유출예측 모듈을 나타낸 것이다

그림 12는 2006년 1월부터 8월까지 금강유역 주요 지점(대청댐과 공주)에 대해 예측된 기법별 월유출량을 관측 월유출량과 비교한 결과를 나타낸 것이다.

5. 결론

유역 내의 이·치수에 대한 효율적인 관리 및 장래의 물 수요에 따른 공급을 성공적으로 수행하기 위해서는 우선적으로 신뢰성 있는 유량예측결과가 필수적

있다. 본고에서는 미기상청 하천예보센터와 TVA(Tennessee Valley Authority)와 같은 외국기관에서의 선진화된 유량예측기술 개발 현황과 유량예측시스템의 실무적 활용에 대해 살펴보았다.

우리나라의 경우 유량예측에 관한 연구는 아직 초기단계이며, 이에 대한 연구가 더욱 요구되는 실정이다. 보다 신뢰성 있는 유량예측결과를 산출하기 위한 노력의 일환으로 현재 과기부에서 주관하고 있는 프런티어 연구개발사업의 『유역 물 관리 운영기술 개발』과제 2단계에서 이수기 중·장기 유량예측을 위한 유역유출예측시스템(Rainfall Runoff Forecasting System, RRFS)을 개발하였다. 개발된 본 시스템으로 예측된 지점별 유량은 한국수자원공사 물관리센터에서 수행하고 월단위의 『물 공급 전망』을 위한 기초자료로서 활용될 것이다. 앞으로 추진될 3단계에서는 2단계에서 개발된 유량예측시스템을 보완하여 보다 신뢰성 있는 유량예측결과를 산출할 수 있도록 할 것이며, 이를 통해 보다 선진화된 유출예측기술의 확보와 더불어 보다 효율적인 유역 수자원 관리 및 안정적인 물 공급 계획을 수립하는데 큰 기여를 할 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술 개발 사업단의 과제인 “유역 물 관리 운영 기술 개발(과제번호:1-6-2)” 연구에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 고익환, 정세용 (2002). 통합 수자원 관리 기반 기술 구축 방안 (I): 선진국의 하천 유역 통합 물관리 기술 개발 동향, 한국수자원학회 학회지, 제35권 제6호, pp. 61-70.
- 고익환 (2004). 유역 통합 수자원 관리 기술 개발, 한국수자원 학회지, 제37권 제3호, pp. 10-15.
- 김진훈과 배덕효 (2006). “한강유역 한강유출량 산정.” 한국수자원학회 논문집, 제39권 제2호, pp. 151-160.
- 배덕효 (2005). “국내 홍수예보 현황 및 개선방향”, 2005년 홍수대비 정기교육, 한강홍수통제소, pp. 1-160.
- 한국수자원공사 (2007). “유역 물 관리 운영 기술 개발.” 2단계 연구개발 보고서, pp. 1-1080. 