통합실시간 물관리 운영시스템을 위한 장기유량예측

Long-term Streamflow Prediction for Integrated Real-time Water Management System

강부식*, 유승엽, 고익환*****

Boosik Kang, Seung Yup Rieu, Ick-Hwan Ko

요 지

수자원관리에 있어서 미래시구간에 대한 유량예측은 수자원시스템운영자에게 있어서 의사결정에 결정적인 영향을 미치는 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 효율적 물배분이나 발전 등의 이수활동을 위해서 최소 월단위 이상의 장기유량예측이 필요하며, 이를 위해서는 강우예측이 선행되어야 하는데, 본 연구에서는 통합실시간 물관리 운영시스템을 위한 중장기 유량예측을 목표로 방법론을 제시하고자 한다.

중장기 유량예측을 수행하는 대표적인 방법 중의 하나는 앙상블 유량예측(ESP; Ensemble Streamflow Prediction) 기법이다. ESP란 현재의 유역상태를 초기조건으로 사용하고 과거의 온도나 강수 등의 시계열앙상블을 모형입력으로 이용해서 강우-유출모형을 통하여 유출량을 예측하는 기법이다. ESP는 결국 현재의 유역상태와 유역에서의 과거강우관측기록, 미래강우예측에 대한 정보를 조합하여 그에 따른 유출앙상블을 생산해 내게 된다. 유출앙상블은 각 앙상블 트레이스가 갖게 되는 가중치에 따라 확률분포를 달리 갖게 되고 경우에 따라서는 유량으로부터 2차적으로 유도되는 변수들의 확률분포로 전이되기도 한다.

기존의 ESP 이론은 미국 NWS의 범주형 확률예보를 근간으로 하고 있어, 이를 국내 환경에 그대로 적용시키기에 어려움이 있어 왔다. 따라서 본 연구에서는 국내 기상청의 월간 강수전망을 이용하고, 이러한 정보의 특성에 맞는 ESP기법을 제시하였다. 더 나아가 중장기 수자원운영을 위한 일단위 월강수시나리오 구성을 위해서 수치예보와 월강수전망을 조합하여 ESP를 사용하는 기법을 제시하였다.

핵심용어 : ESP, 실시간 물관리, 강수확률분포, 앙상블 가중치 설정, 월강수전망

1. 서 론

수자원관리에 있어서 미래시구간에 대한 유량예측은 수자원시스템운영자에게 있어서 의사결정에 결정적인 영향을 미치는 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 효율적 물배분이나 발전 등의 이수활동을 위해서 최소 월단위 이상의 장기유량예측이 필요하며, 이를 위해서는 강우예측이 선행되어야 하는데, 본 연구에서는 통합실시간 물관리 운영시스템을 위한 중장기 유량예측을 목표로 방법론을 제시하고자 한다.

실시간 통합물관리시스템의 기본구조는 통합물관리 D/B를 중심으로 수문모형인 RRFS(Rainfall-Runoff Forecasting System), 저수지군 월운영 최적화모형인 SSDP(Sampling Stochastic Dynamic Program), 저수지군 일운영 최적화모형인 CoMOM(Coordinated Multi-reservoir Operation Model), 저수지군 모의모형인 KORSIM, 정상상태 수질모의모형인 QUAL2E, 그리고 비정상상태 수질모의모형인 KORIV1 등의 모형이 물

* 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원·공학박사·042-860-0431(E-mail:bskang@kowaco.or.kr)
** 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 연구원·공학석사·042-860-0348(E-mail:rieusy@kowaco.or.kr)
*** 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 수자원시스템연구소장·공학박사·042-860-0340(E-mail:ihko@kowaco.or.kr)

정보 D/B를 통해 서로 자료를 교환하면서 실시간으로 각자의 역할을 수행하도록 구성되어 있다. 모형에 따라서는 정상상태 수질예측모형과 같이 특별히 유량예측값을 필요로 하지 않는 모형도 있지만 대부분의 모형은 유량예측값을 필요로 하고 있다. 이들은 중장기의 수자원운영을 위한 의사결정을 지원하는 역할을 하기 때문에 기본적으로 일단위의 월유량예측을 입력조건으로 하고 있다.

각 단위모형 중에서도 SSDP와 같이 추계학적으로 구성된 모형은 확률론적 앙상블 유량예측정보를 제공해야 한다. 그러나, CoMOM, KORSIM, KORIV1등의 결정론적 모형은 단일시계열 형태의 유량예측정보를 요구한다. 또한 SSDP와 같은 월모형은 한달내의 특정한 날짜에서 잘 맞는 예측보다는 한달 동안의 유출총량에 대한 정확한 예측이 중요하다. 그러나, CoMOM과 같은 일모형에서는 시스템 구성상 한달 예측을 요구하기는 하지만 현시점에서 약 2~3일 이내의 정확한 예측을 더욱 중시하게 된다.

중장기 유량예측을 수행하는 대표적인 방법 중의 하나는 앙상블 유량예측(ESP; Ensemble Streamflow Prediction) 기법이다. ESP란 현재의 유역상태를 초기조건으로 사용하고 과거의 온도나 강수 등의 시계열앙상블을 모형입력으로 이용해서 강우-유출모형을 통하여 유출량을 예측하는 기법이다. ESP는 결국 현재의 유역상태와 유역에서의 과거강우관측기록, 미래강우예측에 대한 정보를 조합하여 그에 따른 유출앙상블을 생산해 내게 된다. 유출앙상블은 각 앙상블 트레이스가 갖게 되는 가중치에 따라 확률분포를 달리 갖게 되고 경우에 따라서는 유량으로부터 2차적으로 유도되는 변수들의 확률분포로 전이되기도 한다.

기존의 ESP 이론은 미국 NWS의 범주형 확률예보를 근간으로 하고 있어, 이를 국내 환경에 그대로 적용시키기에 어려움이 있어 왔다. 따라서 본 연구에서는 국내 기상청의 월간 강수전망을 이용하고, 이러한 정보의 특성에 맞는 ESP기법을 제시하였다. 더 나아가 중장기 수자원운영을 위한 일단위 월강수시나리오 구성을 위해서 수치예보와 월강수전망을 조합하여 ESP를 사용하는 기법을 제시하였다.

2. 시공간 동질성을 고려한 중장기 강수확률분포 추정

그림 1에서 평년강수량 상한과 하한값은 전국예보의 형태인 기상청의 월기상전망에서 1971년에서 2000년까지의 30년 강수량 자료의 평년값 기준에 해당한다. 그림에서 보는 바와 같이 금강유역의 소유역면적평균강수량들의 순별 평균값들은 대체로 예보의 평년값에서 벗어나고 있지 않으며, 순별 변동의 추세도 대체로 평년값의 변화추세와 비슷한 경향을 보인다. 연평균강수량의 경우도 다른 권역과 비교하였을 경우 그림 2와 같이 금강유역의 경우 전국평균강수량과 가장 비슷한 특성을 보이고 있으며, 한반도 우기의 강수 특성과 지역 구분에 관한 한국기상학회지의 논문(고정웅 외, 2005)에서도 서산과 대전 등이 포함된 중남부 지역을 전국 평균 강수량을 유지하는 지역으로 구분한 바 있다. 따라서 금강 유역은 다른 권역에 비해 전국평균강수량에 가장 가깝다고 결론지을 수 있으며, 전국단위의 범주형 예보를 적용함에 있어서도 값을 조정할 필요없이 적용해도 무리가 없을 것으로 판단되었다.

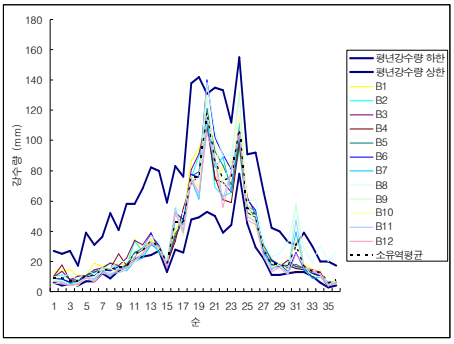


그림 1. 평년강수량과 금강 소유역 평균강수량

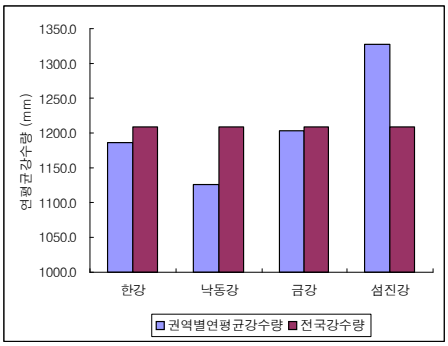


그림 2. 권역별 평균강수량 비교

이러한 균질성 가정을 바탕으로 금강유역 강수량과 기상청 범주형 강우예보간의 적중률을 평가하기 위해

2000년에서 2003년까지의 자료를 사용하여 평균적중률(average hit score)을 기준으로 이용가능성을 평가하였다. 평가결과 총 48개월 동안의 월예보에서 평균적중률은 0.42, 총 144순 동안의 순예보에서의 평균적중률은 그보다 조금 낮은 0.38의 값을 보였다. 범주별 또는 계절별 적중률을 고려하지 않고 모든 시간단위에서의 예보를 검토한 결과에서의 적중률은 전체적으로 그다지 높지 않았다. 그러나 범주가 평년(normal), 평년보다 높음(above normal), 평년보다 낮음(below normal)의 3개이므로 이 값들은 기후학적(climatological) 평균인 0.33보다는 조금 더 높은 수준이며, 금강 유역 적용시 향후 강우수치예보를 도입하기 전 단계에서는 범주형 예보의 범주구분을 확장함에 의해 ESP 예측 자체의 신뢰성을 높이는 데 기여하리라 판단된다.

2.1 계절적 동질성을 고려한 강수확률분포

수자원예측에 있어서 중장기강수에 대한 범주형 확률예측정보를 활용하는 경우 동일기간에 대한 확률분포함수를 추정해야 한다. 일반적으로 강수의 발생확률 및 강우심도의 확률분포는 강우를 다루는 시간적 스케일에 따라서 지역적, 계절적 영향을 달리 받는다. 본 연구에서는 군집분석을 통하여 순, 월, 연단위 강수량의 지역적·계절적 동질성에 따라 자료를 군집화하고, 동일한 자료군내에서의 무차원화된 강수의 확률분포를 추정하였다.

본 연구에서는 예보와 실적강우간에 유의성 있는 상관성을 찾기에 과거 예보자료축적이 다소 짧다는 점과 유역상태변수와 기상변수간의 조건부 확률을 추정하기 어렵다는 현실을 감안하고, 현재 기상청에서 제공하는 월강수전망이 범주형 예보(Categorical forecast)의 형태를 취하고 있으나 완전한 확률예보는 아니라는 특성이 주어진 상황에서 주어진 정보로부터 합리적인 결과를 도출하기 위하여 계절별·범주별 확률분포를 유도하고 이에 근거로 가중치를 찾아가는 방법을 취하였다.

본 연구에서는 순자료에 대해 순강수량 변수들간의 유클리드 거리(Euclidean distance)에 대한 평균연결법(average linkage)과 Ward 기법을 사용한 순별 군집분석 결과(그림10)에서 6월 하순에서 8월 중순까지의 홍수기는 하나의 클러스터로 하고 나머지 갈수기에 해당하는 순들은 하나의 클러스터로 하여 분포형을 적합시키기 위한 자료수의 확충을 기하였다. 변량들간의 평균거리 개념에서 6월 하순에서 8월 중순까지의 총 7개 순들은 기존의 홍수기 개념과 유사하게 구분되었으며, 모든 자료들은 식 (1)과 같은 무차원 강수량의 개념을 도입하여 사용하였다.

$$DP_{i,j} = R_{i,j} / \overline{R_{i,j}} \qquad (1)$$

여기서, DP : 무차원 강수량 (Dimensionless Precipitation), R: 소유역 면적평균강수량,
i : 소유역 번호, j : j번째 순.

즉, 이 통계량은 어느 소유역에서 순별 소유역 면적평균 강수량을 무차원량으로 만들고, 동질계절로 판명된 계절에 대해서는 가용자료수 확충을 위해 무차원량들을 모두 함께 사용하여 해당 계절의 분포형을 보다 신뢰성 있게 찾기 위한 것이다. 이 통계량의 기본적인 가정은 어떤 동질계절 k가 있을 때 여기서의 소유역별 관측 강수량의 모분포 $F(R_{i,k})$에서 순별강수량인 $R_{i,j}$가 발생한다는 것이라고 할 수 있다.

기간이 10일인 순자료의 분포 특성상 갈수기에 해당하는 순에는 값이 0인 자료가 존재하기 때문에 0 자료의 경우는 다음과 같이 식 (2)를 이용한 혼합분포모형을 적용하였다.

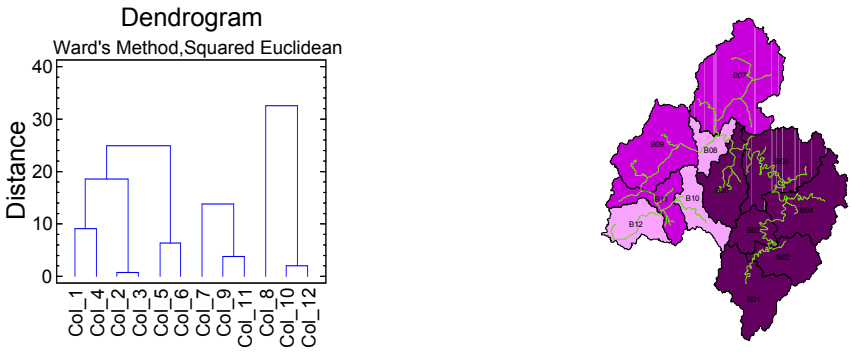
$$F(x) = \begin{cases} 0, & x<0, \\ p+(1-p)G(x), & x \geq 0. \end{cases} \qquad (2)$$

여기서 $F(.)$는 강수량의 누적확률분포함수(CDF)이며, p는 강수량이 0일 확률, $G(.)$는 0이 아닌 강수량의 누적확률밀도함수이다. p는 자료에서 어느 지역 또는 계절에서의 0의 비율이 되며, $G(x)$는 0이 아닌 자

료값들에서 동질계절의 무차원 강수량 전체에 대해 L-moment 추정법에 의해 추정하였다.

2.2 지역적 동질성을 고려한 강수확률분포

지역적 동질성을 고려한 강수확률분포의 유도는 계절적 동질성을 고려한 방법과는 다르게 기본적으로 Hosking(1997)의 지역빈도분석 방법론을 따라 수행하였다. 지역적 동질성의 검토 또한 군집분석을 연, 월, 순의 각 시간단위에 대해 수행하고, 이를 불일치 척도(discordancy measure)와 이질성 척도(heterogeneity measure)에 의해 다시 한번 확인하는 절차를 거쳤다. 지역적 동질성의 경우는 연자료를 대상으로 한 그림 3(a)의 덴드로그램과 3(b)의 IRWMS 상의 금강유역 12개 소유역의 지역적 구분도와 같이 대부분의 계절 구분에 대해 1번에서 6번까지의 소유역을 첫 번째 그룹, 7, 9, 11번 소유역을 두 번째, 8번, 10번, 12번 소유역을 세 번째 그룹으로 구분할 수 있었다.



(a) 12개 소유역에 대한 덴드로그램 (b) 소유역의 지역적 구분

그림 3. 지역적 동질성 구분

3. 월강수예측시나리오 구성을 위한 강우수치예보 및 월강수전망의 조합체계

실시간 물관리 시스템에서는 단위모형들의 입력요구사양을 최대한 만족시키기 위하여 월총량에 주목하는 경우에는 월강수예측 시나리오 구성시 GDAPS와 월강수전망을 조합하고, 향후 2~3일의 단기예측에 주목하는 경우에는 RDAPS+GDAPS+월강수전망의 조합으로 월강수 예측시나리오를 구성할 계획에 있다(그림 4).

RDAPS나 GDAPS와 같은 수치예보자료는 모의예측자료가 결정론적 단일시계열 형태로 주어지며, 특정시간 특정지점에 대해 예측값을 주지만 실제 관측값에 대한 상대적 편이(bias)는 피할 수 없다. 그러나 결정론적 모의에서는 이러한 불확실성에 대한 범위(range)는 함께 제공하지 않는다. 물론 경우에 따라 모형자체에 내재된 불확실성을 정량화하기 위하여 같은 조건에서 서로 다른 모형간에 모의된 자료를 이용하여 모델앙상블형태로 불확실성을 평가하기도 하지만 이는 주로 연구차원에서 이루어지고 있으며, 실제 현업에서 제공하는 자료는 RDAPS, GDAPS의 단일모형에서 모의되는 단일시계열의 예측모의만이 제공되고 있다.

반면에 월강수전망은 “예보”라는 용어 대신에 “전망”이라는 용어를 사용할 정도로 수치예보에 비하여 훨씬 개략적인 예측정보를 제공한다. 또한 전국예보의 형태로 주어지며, 유역에 대한 상세정보를 포함하지 않고 있다. 이는 예보시간이 길어질수록 전국적인 기상현상과 지역적인 기상현상을 구분해내기가 용이하지 않다는 현실적인 이유 때문으로 판단된다. 아뭏튼 월강수전망은 전망자체가 대략적인 경향성만을 제시하고 있기 때문에 이를 정량적으로 활용하기는 용이하지 않으나, 미국 NWS의 ESP의 경우에도 범주형의 확률예보(Categorical Probabilistic Forecast)를 활용하고 있기 때문에 기법에 대한 이론적 구성에는 문제가 없으나, ESP결과로 제시되는 각 앙상블 트레이스(Ensemble Trace)에 얼마의 가중치를 부여할 것인가가 관건이라 할 수 있다(정대일과 김영오, 2002).

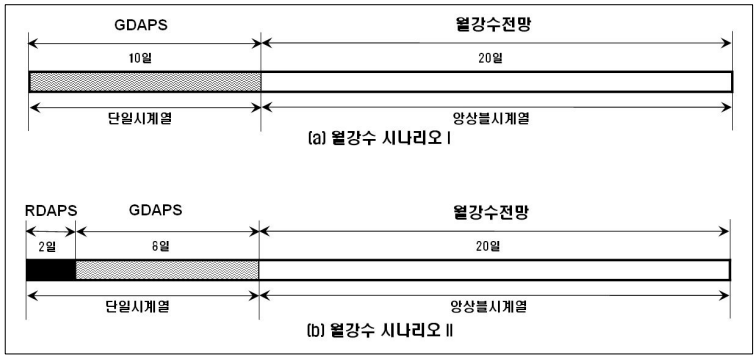


그림 4. 월강수 시나리오 구성

5. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 국내 월강수전망의 단점을 보완하고 정확도를 제고하기 위한 강우수치모의와의 조합을 통한 월강수예측 시나리오를 구성하고 앙상블 트레이스 가중치 설정을 위하여 순강수 자료분석을 통하여 계절을 구분하고 계절별·지역별 순강수 확률분포를 유도하여 실제 전망이 들어오면 확률분포에서 가중치를 찾아가는 기법을 제시하였다. 또한 상대적으로 불확실성이 큰 월강수전망의 특성상 신뢰도를 확보하기 위하여 월강수전망의 갱신주기에 맞추어 매10일마다 월강수예측 시나리오가 갱신되도록 시스템을 구성하였다.

여기서 제시하는 표본가중치 설정 절차는 다음으로 요약될 수 있다.

1) 과거 N개년의 일단위 순강수앙상블 구성
2) 범주(Above Normal, Normal, Below Normal)별 일단위 순강수 앙상블 재구성
3) 통계적 동질성을 갖는 계절 및 지역 구성
4) 계절·지역 및 범주별 순강수 확률분포 유도
5) 강수전망에 따라 순강수 trace별 강수총량에 해당하는 marginal probability에 의한 표본가중치 산정

각 단위모형 중에서도 SSDP 저수지 월운영 최적화 모형과 같이 추계학적으로 구성된 모형은 확률론적 앙상블 유량예측정보를 제공하여야 하며, CoMOM과 같은 저수지 일운영 최적화 모형은 향후 2~3일간의 정확한 예측이 필요하다. 본 과제에서 개발된 보다 정확한 예측정보는 IRWMS 시스템의 유출 모형의 유량예측 정확도를 제고하고, 저수지 운영 및 수질 모형들의 의사결정 지원능력을 향상시키는데 활용될 예정이다.

감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-6-2)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 고정웅, 백희정, 권원태(2005). 한반도 우기의 강수 특성과 지역 구분, 한국기상학회지, 제44권 제1호, pp. 101-114.
2. 과학기술부, 한국수자원공사 (2004), 실시간 물관리 운영시스템 개발, 21세기 프론티어 「수자원의 지속적 확보기술개발 사업」
3. 정대일, 김영오(2002), 앙상블 예측을 이용한 충주댐의 월 유입량 예측, 대한토목학회 논문집, 제22권 제3-B호, pp. 321-331.
4. Hosking, J. R. M. and J. R. Wallis(1997), Regional Frequency Analysis, Cambridge University Press.