

양상불 예측을 통한 물공급전망 개선방안

○ 김영오¹⁾, 정대일²⁾, 김형섭³⁾ · 이길성⁴⁾

1. 서 론

효율적인 수자원 계획과 관리에 있어 핵심사항이 강우와 유량의 예측임은 더 이상 언급할 필요가 없다. 수문학적 예측은 단기와 중장기 예측으로 구분할 수 있으며, 일반적으로 단기 유출량 예측에는 확정론적 강우-유출모형을 이용하는 반면 중장기 유출량 예측에는 추계학적 모형을 이용하고 있다. 우리나라의 경우 치수 등을 위한 단기 실시간 유출량 예측은 그 긴박한 필요성으로 인하여 연구와 실무에서 관심의 대상이 되고 있으나, 한 달 이상의 중장기 유출량 예측에 대한 관심과 연구는 상대적으로 매우 미비한 실정이다.

미국 기상청인 National Weather Service(NWS)에서는 확률론적 유출량 예측기법의 하나인 Ensemble Streamflow Prediction(ESP)을 수문학적 예측시스템의 현대화 작업의 핵심사항으로 선정하여 그 연구에 박차를 가하고 있다(Fread, 1998). 본 연구에서는 ESP 기법을 건설교통부 하천 계획과와 한국건설기술연구원에서 매 월초 발간하고 있는 '물공급전망'의 개선을 위해 적용하여 중장기 유출량 예측의 방안을 제시하고자 한다.

2. ESP의 기본원리

ESP(Ensemble Streamflow Prediction) 기법은 1970년대 NWS California-Nevada River Forecast Center(RFC)에서 개발되어 California 주에서 처음으로 사용되었으며, 처음에는 Extended Streamflow Prediction의 약자로 사용되었다(Day, 1985). ESP는 강우-유출모형에 미래에 일어날 가능성이 있는 모든 강우 시나리오(즉, 강우 양상불)를 입력하여 그 결과물로 다수의 유출 시나리오(즉, 유출 양상불)를 얻는 기법이다. 예를 들어, 1951년부터 2000년까지 50년 동안의 10월 강우자료가 존재한다면 이를 강우-유출 모형에 입력하여 2001년 10월 유출량 예측으로 50개의 유출 시나리오를 생성해 내는 기법이다. 강우-유출 모형의 초기조건은 예측하는 시점(즉, 위의 예에서는 10월 초)에 따라 변하므로, 같은 강우 시나리오를 사용한다 하여도 초기조건에 따라 유출 시나리오가 다르게 생성된다. 이와 같은 이유로 ESP를 Conditional Monte Carlo Simulation이라 부르기도 한다.

ESP에서 가장 핵심이 되는 사항은 생성된 유출 시나리오의 가중값을 부과하는 과정인데, 가장 간단한 방법으로는 모든 시나리오의 중요도가 동일하다고 가정하는 방법, 즉 50개의 시나리오에 각각 1/50의 확률을 부과하는 방법이다. 좀 더 개선 방법으로는, 예를 들어 2001년의 수문학적 상

-
- 1) 서울대학교 지구환경시스템공학부 전임강사
 - 2) 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정
 - 3) 한국건설기술연구원 선임연구원
 - 4) 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

황이 1973년의 수문학적 상황과 유사하다면 1973년 강우 시나리오를 이용하여 생성한 유출 시나리오에는 상대적으로 높은 가중값을 부과하는 방법이다. 수문학적 상황을 판단하는 근거에는 강우의 예측정보, 엘리뇨/라니냐의 ENSO 정보 등이 있을 수 있다. 그림 1은 ESP 예측과정을 그림으로 나타낸 것이다.

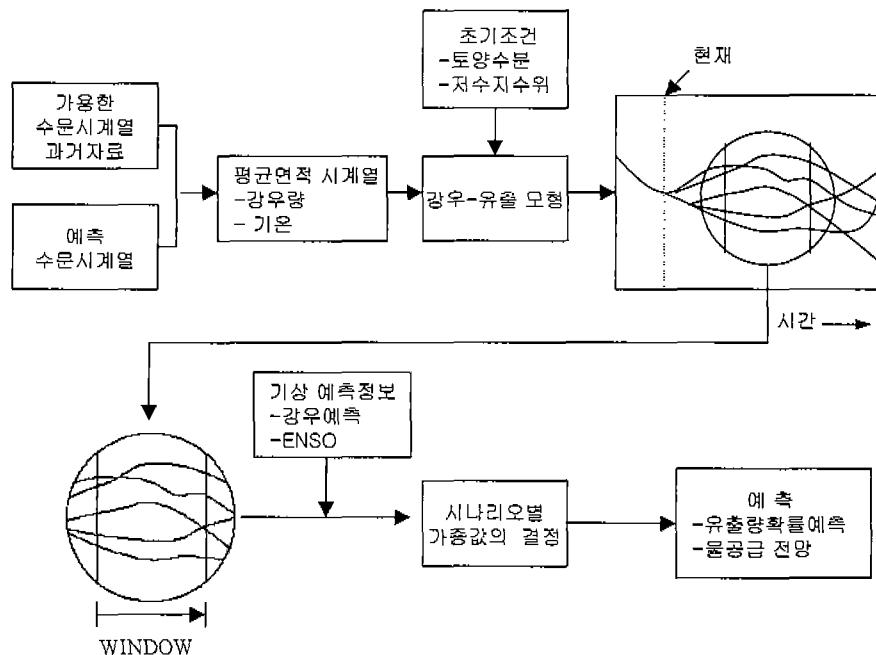


그림 1. ESP Procedure

ESP는 현재 조건에 대한 정보와 이용 가능한 기상 예측정보를 예측과정에 포함시킴으로서 과거 수문사상의 단순한 재현이 아닌 실질적 예측을 가능하게 하는 방법이다. 또한 확률론적 유량 예측이 가능하므로 수자원 시스템의 관리에 있어 위험도를 고려한 운영을 실시할 수 있다. 특히, 우리나라와 같이 강우자료에 비해 유량자료가 빈약한 경우 ESP는 강우-유출모형을 통해 유량 시계열을 재생할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다.

3. ESP 기법의 적용

물공급전망 중 가장 핵심이 되는 부분은 5대강 유역에 대하여 매 월초 실시하는 해당 월의 유출량 예측이다. 현재 물공급전망에서는 1월부터 6월까지는 강우-유출모형을 사용하지 않고 면적비를 이용하여 유출량을 예측하고 있으며, 7월부터 12월까지 6개월 동안만 각 달의 유출량 예측을 위해 강우-유출 모형을 이용하고 있으므로, ESP 기법을 7월부터 12월까지 6개월만 적용하여 비교하였다.

물공급전망에서 사용되고 있는 강우 시나리오는 해당 월의 예년 평균강수량, 예년 평균보다 20% 증가와 감소한 경우의 강수량 등 3가지이며, 이에 따라 예상 유출량을 각각 차례대로 중, 대, 소로 발표하고 있다. 본 연구에서는 금강유역의 1995년 7월부터 1999년 12월까지 30개월 동안의

월 유출량 예측을 ESP 기법으로 실시하여 예측하였다.

ESP 기법에 사용된 강우-유출 모형으로는 한국건설기술연구원에서 개발하여 물공급전망에서 현재 사용 중인 다중감수 수문모형을 그대로 적용한다. 다중감수 수문모형은 최소의 입력자료(강수량, 증발량)와 매개변수로 일 자연유량을 모의할 수 있는 집중형 확정론적 모형이다. 이 다중감수 수문모형의 기본개념은 유출량과 증발산량의 합이 강수량과 같고, 유출곡선을 나타내는 감수곡선의 경사는 저류량의 함수로써 나타낼 수 있다는데 근거하고 있다(건설부, 1994).

강우 입력자료와 다중감수 수문모형을 이용하여 1919년~1994년까지의 강우량을 입력자료로 유출량을 모의한 결과 76년간의 예측 유출량 시나리오를 얻을 수 있었다. 생성된 예측 유출량 시나리오에 대하여 기본 통계분석을 실시하였으며, 그 결과를 토대로 각 예측월의 유출량에 대한 적합분포 검정을 실시하였다. 검정은 Chi-Square Test와 Kolmogorov-Smirnov Test를 이용하였으며 유의수준 5% 이상에서 가설검정을 실시하여 적합분포를 채택하였다.

30개의 예측월 중에서 23개의 예측월은 Gamma 분포로 적합검정 되었으며, 1995년 8월과 1998년 7월은 Lognormal 분포로, 1998년 9월은 Weibull 분포로, 1999년 11월은 Normal 분포로, 그리고 1995년 7월, 1997년 7월, 1999년 7월은 3 Parameter Lognormal 분포로 적합검정 되었다. 거의 대부분의 예측월 유출량 자료가 Gamma 분포로 적합검정 되었으나, 7월의 경우에는 3 Parameter Lognormal, Gamma, Lognormal 분포 등 다양하게 채택되었다.

4. ESP에 의한 유출량 확률예보 방안

미래 유출량을 확률로 예보하기 위해서는 전체 유출량 범위를 몇 가지 구간으로 나눈 후, 각 구간에 대한 확률을 설정하여야 한다.

(1) 유출량 구간의 설정

본 연구에서는 유출량을 대, 중, 소 세 구간으로 분할하고, 이를 위해 과거 유출자료를 분석하였다. 즉 과거자료를 빈도분석한 후 누가확률이 33%와 66%인 유출량을 각각 $Q_{33.33}$ 와 $Q_{66.67}$ 로 정하여, $Q_{33.33}$ 까지를 저수(Low Flow)구간, $Q_{33.33}$ 에서 $Q_{66.67}$ 까지를 평수(Median Flow)구간, 그리고 $Q_{66.67}$ 이상을 풍수(High Flow)구간으로 설정하였다. 만일 별다른 예측기법이 존재하지 않는다면 미래 유출량은 이러한 과거자료에 의존하여 각 구간에 대하여 동일하게 33.33%로 예측할 수 밖에 없을 것이며, 본 연구에서는 이를 '초보예측(Naive Forecast)'이라 칭하였다. 표 1은 각 달에 가장 적합한 분포를 통계검정을 통해 가정한 후 그 분포로부터 구한 $Q_{33.33}$ 에서 $Q_{66.67}$ 을 보여주고 있는데, 적합 분포는 8월만 Lognormal 분포를 채택하였고 그 외의 달은 Gamma 분포를 채택하였다.

표 1. 검정된 분포의 누가 확률에 따른 유출량 (단위 mm)

유출량	7월	8월	9월	10월	11월	12월
$Q_{33.33}$	85.27	71.26	49.10	19.32	11.83	10.35
$Q_{66.67}$	165.40	128.88	107.69	35.25	22.03	19.46

(2) ESP를 이용한 구간별 확률 설정

다음으로 ESP 기법에 의한 유출량 예측이 존재하는 경우, 앞서 설정한 유출량 구간에 확률을 부여하는 방안을 살펴보았다. 이는 표 1에서 나타난 $Q_{33.33}$ 와 $Q_{66.67}$ 가 3월 마지막 과정에서 구한 예측 확률분포에서는 어떤 누가확률값에 해당하는지를 구하는 과정이다. 예를 들어 그림 2에서 1995

년 10월의 예측 확률분포로 채택된 Gamma 분포를 이용하면 $Q_{33.33}$ 와 $Q_{66.67}$ 의 누가확률은 각각 0.402와 0.648이다. 즉, ESP 기법에 의하면 95년 10월의 저수확률은 40.2%, 평수확률은 24.6%, 풍수확률은 35.2%로 '초보예측' 33.33%에 비하여 저수확률은 증가, 평수확률은 감소, 풍수확률은 비슷하게 확률예보를 한 경우가 된다. 또 다른 예로, 1997년 12월은 저수확률이 1.5%, 평수확률이 13.4%, 그리고 풍수확률이 85.1%로 예보될 수 있으며, 만일 실제로 $Q_{66.67} = 19.46 \text{ mm}$ 보다 큰 풍수의 유출이 발생했다면 ESP 확률예보는 '초보예측' 보다 합리적인 예측기법이라 할 수 있을 것이다. 그러나, 1995년 이후의 실측 유출량과의 비교에 의한 예측기법의 평가는 수위-유량곡선(Rating Curve)의 문제로 인하여 비교가 어려운 실정이며, 이는 향후 연구로 남긴다.

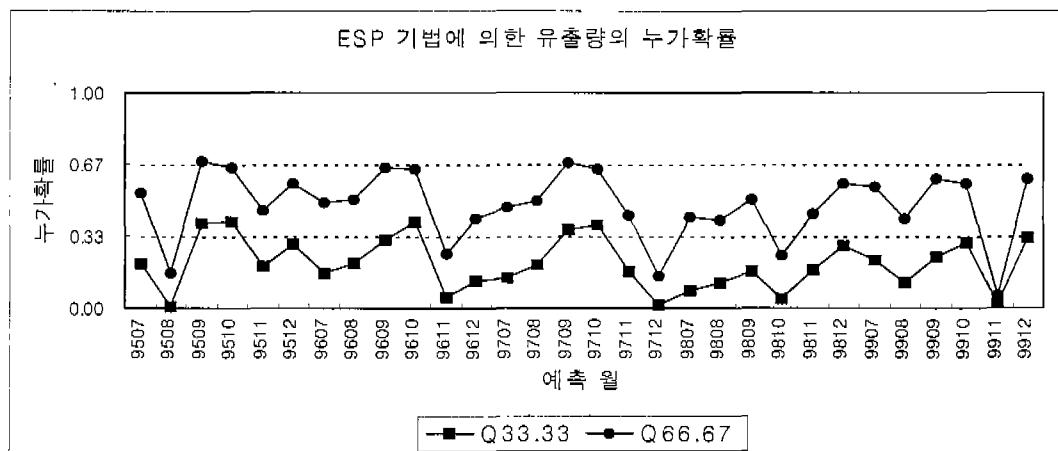


그림 2. ESP 기법에 의한 유출량의 누가확률

5. 기존 물공급전망 예측과의 비교

마지막으로 '물공급전망'에서의 유출량 예측과 ESP 기법에 의한 유출량 예측을 비교해 보았다. 이를 위해 각 달의 예측 확률분포로부터 누가확률이 33%와 66%에 해당하는 예측 유출량인 $F_{33.33}$ 와 $F_{66.67}$ 를 구하였다. 그리고 물공급전망의 평균예측(즉, 평균강우량을 입력으로 사용한 경우)이 세 구간 중 어디에 위치하는지를 살펴보았다. 그림 3에서 보는 바와 같이, 30개월의 예측기간 동안 물공급전망의 평균예측은 $F_{33.33}$ 보다 작은 경우가 4번, $F_{33.33}$ 와 $F_{66.67}$ 사이에 위치한 경우가 8번, 그리고 $F_{66.67}$ 보다 큰 경우가 18번인 것으로 나타났다. 그러므로, 물공급전망의 평균예측은 ESP 확률예보 중 상위 33%에 편향되어 있음을 알 수 있으며, 이러한 편향된 결과에 대한 검증이 앞으로 필요할 것이다.

6. 요약 및 향후 연구

본 연구에서는 미국 NWS에서 실시하고 있는 ESP 기법을 우리나라 금강유역에 적용하여 유출량의 확률예보 방안을 제시하였다. 우리나라와 같이 실측 강우자료가 유량자료에 비해 상대적으로 풍부한 경우 ESP를 이용하면 실측 유량자료의 한계를 극복하고 유량 시계열을 생성하여 이용할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서 제시한 ESP 기법의 예측결과는 그 유용성을 확인하기 위하여 실측 유출량과 비교되어야 하나 수위-유량곡선의 문제로 인하여 유출량 자료의 신뢰도가 불확

실한 설정이다. 그러므로, 앞으로 이러한 문제점을 해결하여 ESP 기법의 유용성을 검증하는 방안의 연구가 시도되어야 한다. 이는 현재 진행 중인 물공급전망의 예측결과를 검증하기 위해서도 필요한 작업이다.

본 연구에서 적용된 ESP 기법 자체를 개선하기 위해서는 첫째로, 유출량 구간을 보다 세밀하게 분할하여 확률예보를 실시하는 방안의 연구가 필요하다. 유출량을 5가지로 나눌 경우 갈수(Drought Flow), 저수, 평수, 풍수, 홍수(Flood Flow) 등으로 분할할 수 있다(Lee, 2000). 둘째로, 장우 확률예보와 ENSO 등의 기상정보를 이용하여 유출량 예측 시나리오별 가중값을 부여하는 연구도 필요하다(Croley II, 2000). 이는 기상청과의 긴밀한 협조 아래 추진되어야 할 것이다. 마지막으로 ESP 기법으로 생성한 유출량 시나리오나 이에 따른 확률분포를 수자원 관리에 접목시키는 연구가 향후에 진행되어야 실제로 ESP의 가치를 평가할 수 있다. 이러한 사례는 선진국에서도 초동단계에 머물고 있는데, Faber and Stedinger(2000)은 ESP에서 생성된 시나리오를 Sampling SDP(Stochastic Dynamic Programming)에 접목하여 저수지운영의 최적화 문제에 적용한 바 있다.

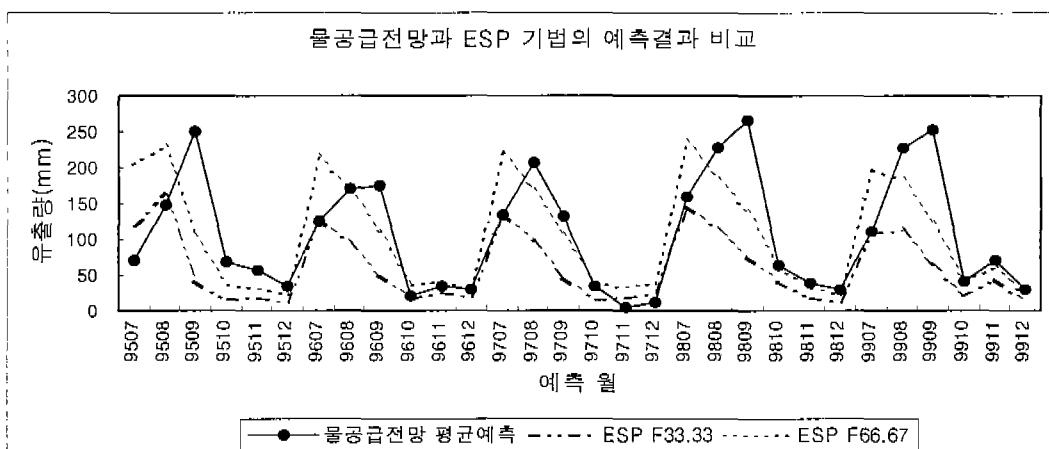


그림 3. 물공급전망과 ESP 기법의 예측결과 비교

7. 참고문헌

- 건설부 (1994). 수자원관리기법개발연구조사 보고서.
- Croley II, T. E. (2000). *Using Meteorology Probability Forecasts In Operational Hydrology*, ASCE Press.
- Day, G. N. (1985). "Extended Streamflow Forecasting Using NWSRFS", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 111(WR2), pp. 147-170.
- Fread, D. L. (1998). "A Perspective on Hydrologic Prediction Trends", *Special Symposium on Hydrology, American Meteorological Society*, Phoenix, Arizona, pp. J1 - J6.
- Faber, B. A., and Stedinger, J. R. (2000). "Reservoir Optimization Using SSDP with Extended Streamflow Prediction (ESP) Forecasts", *Journal of Hydrology*, in process.
- Lee, K. S. (2000). *Fundamentals of Water Resource Systems*, SaeRon Publishing Co., pp. 57.