

기상예보를 고려한 ESP 유출 확률 산정

안정민* · 이상진*[†] · 김정곤* · 김주철* · 맹승진** · 우동현*

*한국수자원공사 K-water연구원

**충북대학교 지역건설공학과

Estimation of ESP Probability considering Weather Outlook

Jung Min Ahn* · Sang Jin Lee*[†] · Jeong Kon Kim* · Joo Cheol Kim* · Seung Jin Maeng** · Dong Hyeon Woo*

*Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

**Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungbuk National University

(Received 12 January 2011, Revised 14 April 2011, Accepted 14 April 2011)

Abstract

The objective of this study was to develop a model for predicting long-term runoff in a basin using the ensemble streamflow prediction (ESP) technique and review its reliability. To achieve the objective, this study improved not only the ESP technique based on the ensemble scenario analysis of historical rainfall data but also conventional ESP techniques used in conjunction with qualitative climate forecasting information, and analyzed and assessed their improvement effects. The model was applied to the Geum River basin. To undertake runoff forecasting, this study tried three cases (case 1: Climate Outlook + ESP, case 2: ESP probability through monthly measured discharge, case 3: Season ESP probability of case 2) according to techniques used to calculate ESP probabilities. As a result, the mean absolute error of runoff forecasts for case 1 proposed by this study was calculated as 295.8 MCM. This suggests that case 1 showed higher reliability in runoff forecasting than case 2 (324 MCM) and case 3 (473.1 MCM). In a discrepancy-ratio accuracy analysis, the Climate Outlook + ESP technique displayed 50.0%. This suggests that runoff forecasting using the Climate Outlook +ESP technique with the lowest absolute error was more reliable than other two cases.

keywords : Climate outlook, ESP, Runoff, Runoff forecast, SSARR

1. 서론

전 세계적으로 가뭄과 홍수, 태풍으로 인한 혹독한 피해와 손실은 날로 강도 높게 빈번해지고 있는 실정이며, 이로 인해 물 안보가 곧 국가 위기관리차원의 주요 이슈로 등장하게 되었다. 좁은 국토 내에서 많은 인구로 인한 적지 않은 물 수요로 압박 받고 있는 한국에서는 이미 새로운 수자원개발의 어려움과 공급의 증가, 수질관리에 소요되는 막대한 비용, 한정된 수량의 동일 수자원에 대한 지역 간 경쟁 및 물 부족과 수질오염을 둘러싼 이해당사자간의 갈등과 대립 등이 고조되고 있는 상황이다.

유역의 수자원을 지속적으로 확보하고 관리하기 위해서는 기본적으로 유역의 강우-유출 현상을 정확하게 분석하고 신뢰도 높은 유출예측 정보를 생산하는 모의기술이 필요하다. 일반적으로 유출예측량을 모의할 때 과거와 현재의 수문자료를 이용한다는 측면에서 미래 예측결과의 불확실성을 완전히 제거할 수는 없겠지만, 다양한 기법별 분석에 의하여 불확실성을 감소시킬 수 있다. 과학과 기술의 발전

으로 시·공간에 대한 측정자료의 정확성 향상과 수문현상의 분석을 위한 기초자료의 증가도 불확실성 감소에 기여하고 있다. 유출예측을 위한 기법 중 Ensemble Streamflow Prediction (ESP)는 1970년대 NWS California-Nevada River Forecast Center (RFC)에서 개발되어 California 주에서 처음으로 사용하였으며 유역 물공급전망의 확률예보 등을 목적으로 활발하게 사용되고 있는 기법이다.

김영오 등(2001)은 물공급전망의 개선을 위해 공주지점에 앙상블 유량예측기법을 적용하였다. 정대일과 김영오(2002)는 가상의 기후정보를 이용한 가중값을 충주댐 유입량 시나리오에 적용하여 앙상블 유출예측을 실시하였다. 안정민 등(2008a, 2008b, 2008c)은 금강유역에 ESP 기법을 적용하여 ESP확률을 개선하였고 기상전망 적중률 향상에 따른 유출예측의 개선효과를 가늠하였으며 정우창 등(2008)은 유역의 물공급 전망을 위한 월단위 유출예측기법에 대한 적용성 평가하였다. Georgakakos and Krzysztofowicz (2001)은 ESP를 통한 다양한 장·단기 연구사례를 편집하여 소개하였다.

이러한 기술적 필요성에 부합하기 위해 한국에서는 국가 정책과업중 하나인 21세기 프론티어 사업의 일환으로 실시간 통합 물 관리 시스템(Integrated Real-time Water Mana-

[†] To whom correspondence should be addressed.
sjlee@kwater.or.kr

gement System, IRWMS)은 2001년부터 수량과 수질을 동시에 고려하는 유역단위의 통합 물관리 운영 기술을 개발하고 있다. 본 연구에서는 이러한 시대적 요구에 발맞추어 ESP 기법을 중심으로 한 다양한 유출예측 기법을 적용 및 평가할 수 있는 유역유출 예측 모형을 개발하고 그 적정성을 검토하였다. 개발된 모형을 활용하여 과거 강우 시나리오 분석에 의한 장래 유출량 예측뿐만 아니라, 용도에 따라 기상예보와 결합하여 정량적 통계적 분석기법에 근거하여 유출량을 예측할 수 있다. 본 연구에서는 금강유역의 공주지점을 대상으로 ESP확률을 산정하는 후처리 기법에 따른 case별 유출예측의 개선효과를 평가하였다.

2. 연구방법

2.1. 유역예측모형

본 연구에서 적용된 장기유출예측 모형은 유역의 저수지 운영효과를 고려할 수 있는 SSARR (Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation)모형을 기반으로 하고 있다. SSARR 모형은 미국 공병단에서 1956년 처음 개발된 이래, Windows기반의 GUI 프로그램으로 개선하여(SSARR-2000)은 수자원 실무에 활용되고 있다. 본 모형은 미국의 Columbia River (Rockwood, 1961)과 베트남의 Mekong River (Rockwood, 1968) 등과 같은 대하천에 성공적으로 적용된 바 있으며, 국내에서도 강주환(1986)이 한강유역에, 안상진과 이용수(1989)가 보청천유역에, 그리고 류경식 등(2007), 이상진 등(2009)이 금강유역에 각각 적용한 바 있다.

Fig. 1은 적용모형의 분석절차를 나타낸 것이다. 첫 번째 단계는 강우량, 온도, 각종 용수, 취수량 그리고 댐 방류량을 포함하는 다양한 수문학적 입력 자료의 구축이다. 이러한 입력 자료의 구축이 끝나고 나면 대상 유역의 강우-유출 관계를 특성 짓는 매개변수가 입력되며, 계산된 유출결과와 관측된 유출결과와의 비교를 통해 보정된다. 매개변수 보정 이후 다양한 수문학적 시나리오에 따라 장래 수자원

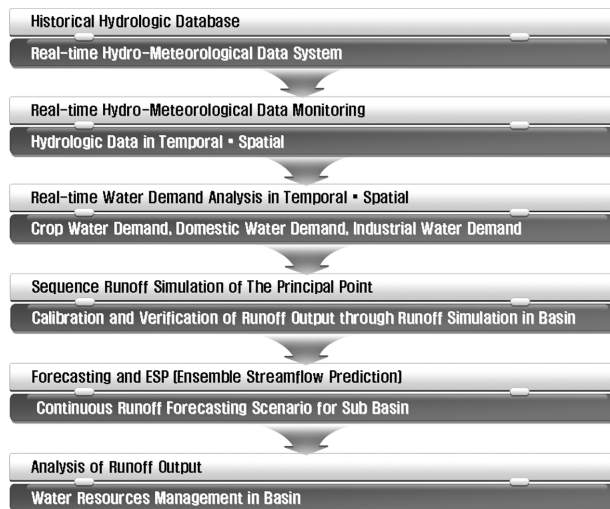


Fig. 1. Analysis procedure of simulation.

의 변화 양상을 조사하기 위해 유출모의와 예측이 수행되고 유역별 그리고 주요 지점별로 결과들이 정리된다.

2.2. 대상유역

본 연구의 대상유역은 신뢰성 높은 수문자료를 획득하기 위해 다년간 유역정밀조사와 현장조사를 실시한 바 있는 우리나라의 4대강유역 중 하나인 금강 수계 중·하류 유역을 대상으로 하였으며 주요지점은 공주지점으로 선정하였다. 유역내에는 다목적댐인 대청댐이 있고, 유출모의를 위해 총 7개의 소유역으로 구분하였으며, 소유역 분할도 및 유출모의 구성체계는 Fig. 2와 Fig. 3과 같다. 모형 적용을

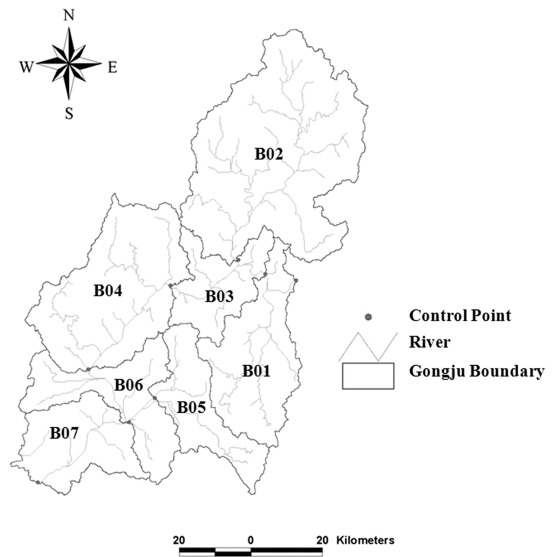


Fig. 2. Map of subbasin.

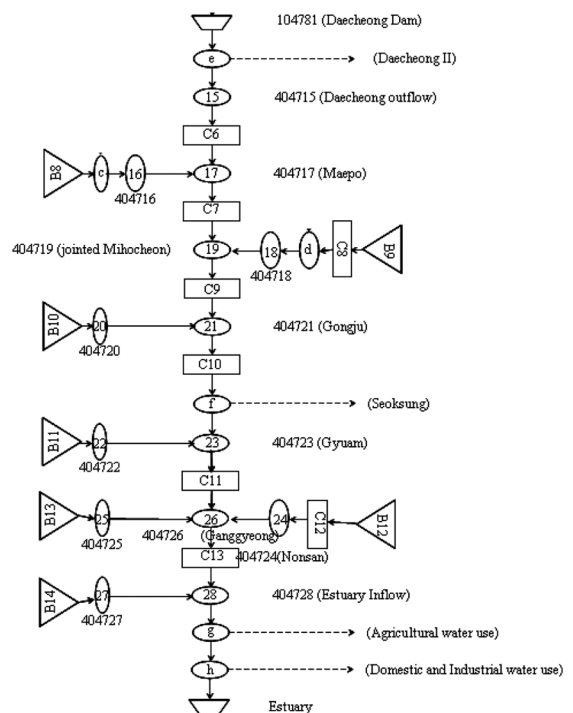


Fig. 3. Flowchart of rainfall-runoff model.

위한 수문자료로 금강 유역내 7개 소유역에 대한 일 강우량, 관측유량, 생·공·농업용수 계획 이용량, 취수량, 댐 유입량, 댐 방류량 및 온도 등을 수집하였다(건설교통부 등, 1998, 2001) 수집된 관측자료 중 강우량, 관측유량 및 용수 이용량 자료에 대해서는 결측 및 이상치에 대한 검증 및 보정을 실시하였다. 본 연구에서 적용한 유출모의 검증기간은 1983~2006년으로 총 24년 일단위 수문자료이다.

2.3. 검증

보정기간은 다양한 유출특성이 반영될 수 있도록 장기간에 해당하는 18년간(1983~2000년)의 자료를 이용하였으며 최종적인 매개변수는 년 단위로 보정을 실시한 후, 이를 종합하여 결정하였다. 매개변수의 보정은 본 연구에 앞서 수행된 공주시점 유출특성분석의 민감도 분석결과(이상진 등, 2006)를 토대로 고수시와 저수시를 분리하여 실시하였다.

토양습윤상태별 유출율은 침투유량과 총유출량을 조정하는 데에는 한계가 있으나 중요한 매개변수 중에 하나이며, 침투량별 지하수 유입률은 총유출량 중 지하수로 유입되는 비율을 설정하는 매개변수이다. 유역추적과 관련된 SMI (soil moisture index) 및 BII (baseflow infiltration index)는 고수 및 저수기 모두 민감하였고 지표수와 복류수의 저류시간을 유량의 함수로 할 경우 상수로 고정시킨 경우와 비교해 볼 때 저수시 뿐만 아니라 고수시에도 민감한 결과를

보인다. SMI는 토양의 습윤상태에 관한 지표로서 이를 통해 유출량이 결정되는데 이는 강우 또는 강설과 같이 토양에 제공되는 수분에 의해 증가하고 증발산에 의해 감소된다. 토양수분지수(SMI(*in*); Soil Moisture Index)에 따른 유출 계산은 식 (1)~(3)과 같으며 증발산을 통하여 제거될 수 있는 토양층 내에 저류된 물의 가중 평균치이며 연속적인 증발산 손실을 모의한다(USACE, 1991).

$$SMI_2 = SMI_1 + (MI - RGP) - PH \frac{ETI}{24} \tag{1}$$

$$ROP = f(SMI, I) \text{ or } f(SMI) \tag{2}$$

$$RGP = ROP \cdot MI \tag{3}$$

여기서 *MI*는 차단 및 손실량을 제외한 계산시간간격의 수분입력량(*in*)을 나타내며, *RGP*는 증발산 손실량을 제외한 시간간격의 유출수분량(*in*), 그리고 *ETI*는 증발산량(*mm/day*)을 나타낸다. 계산시간간격(*hr*)은 *PH*이며, *ROP*, *SMI₁*, *SMI₂*는 각각 유출 백분율, 초기 설정된 SMI, MI, *RGP*, *PH*, *ETI* 등에 의해 영향을 받은 후의 SMI를 나타낸다.

이 두 매개변수 조정을 통해 침투유량과 총유출량을 조절하여 유출결과의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된

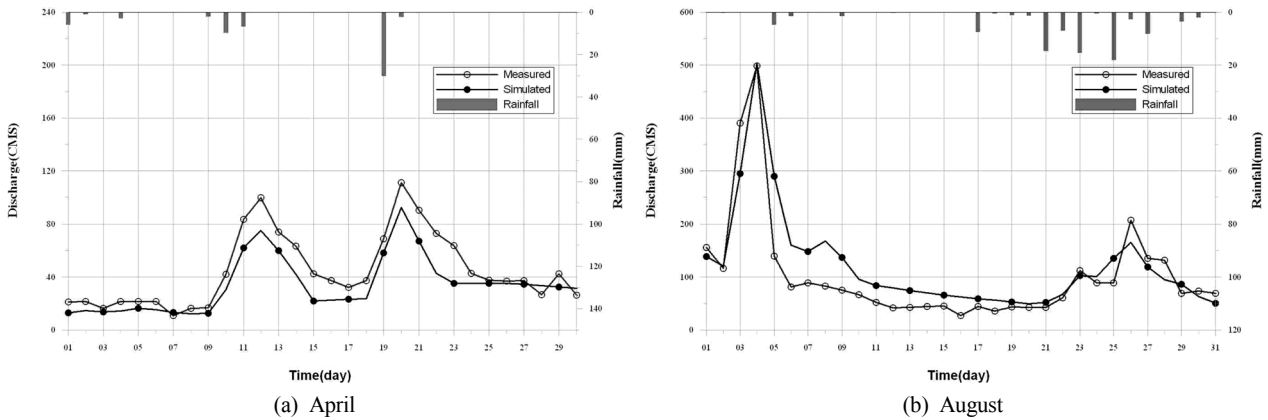


Fig. 4. Simulation of parameter in Gongju point.

Table 1. Calibration of parameters such as SMI and BII at Gongju Point (unit: m³/sec)

Group	High flow (SMI)		Low flow (SMI)		High flow (BII)		Low flow (BII)	
	RMSE	AE	RMSE	AE	RMSE	AE	RMSE	AE
A	188.42	41.73	7818.83	6344.43	195.67	43.10	8008.29	6384.89
B	186.65	41.32	7787.11	6261.80	201.26	44.06	8210.14	6389.41
C	185.09	40.88	7772.61	6190.53	205.27	44.52	8342.39	6384.89
D	183.48	40.48	7747.58	6130.05	207.98	44.79	8443.80	6377.41
E	182.50	40.20	7724.88	6076.98	211.02	45.14	8554.29	6382.84
F	194.25	41.54	7974.40	6092.98	194.25	41.54	7974.40	6092.98
G	193.55	43.46	7886.29	6528.03	186.52	41.94	7740.33	6543.65
H	197.99	44.83	7968.68	6610.46	182.66	41.69	7663.60	6739.98
I	204.83	46.45	8143.14	6674.88	179.87	41.72	7635.65	6991.89
J	215.26	48.65	8502.21	6813.15	177.89	42.03	7658.83	7338.93
K	230.71	51.10	9121.65	7034.01	176.51	42.45	7708.71	7675.81

Table 2. Parameter verification of Gongju point using RMSE result (unit: m³/s)

Month	Total discharge (Day Sum)		RMSE (Day)
	Measure	Simulation	
January	1549.8	1697.6	12.3
February	1467.3	1597.6	6.3
March	1346.9	1519.1	5.9
April	1897	1360.1	27.1
May	2656.4	1999.3	31.7
June	3516.3	3236.1	30.3
July	26766.4	23126.5	541.5
August	5781	6780	46
September	2443	2289.1	7.9
October	1398.8	1580.7	7.6
November	1312.8	1438.9	7
December	1274	1320.9	3.2
Mean			60.6

다. 모형의 검증방법으로는 절대오차(Absolute Error: AE)와 평균제곱근오차(Root Meal Square Error: RMSE)을 이용하였다. 각 경우의 매개변수는 “A”를 기준으로 먼저 SMI를 5%씩 증가하였고 가장 오차가 작게 나타나는 SMI를 선정 후 BII를 증가시키면서 매개변수를 보정하였다. Table 1은 2006년 공주지점 고수유출과 저수유출에 대해 모형의 매개변수 조정에 대한 절대오차와 제곱평균제곱근오차를 분석한 결과이며 공주지점에 대한 “E”의 모의결과는 Fig. 4와 Table 2와 같다. 본 연구에서는 가장 오차가 적게 나타난 “E”의 SMI매개변수와 “J”의 BII 매개변수를 채택하여 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기상예보와 ESP의 결합

3.1.1. 월별 관측유량 ESP확률

본 연구에서는 유출예측결과의 신뢰도 개선을 위해 미국 기상청에서 개발하여 사용하고 있는 ESP 기법을 공주지점

에 적용하였다. 과거 발생한 강우유출 사상이 미래에도 재현될 것이라는 가정하에 생성된 유출예측 양상표를 이용하여 중간 값인 50%의 확률 값을 적용하여 본 결과, 우리나라의 실정에 맞지 않고 신뢰성 있는 수자원 관리 정보로서 활용하기 힘들다. 따라서 통계적인 분석을 통하여 정확도가 개선된 발생확률을 제시하기 위하여 연구를 수행하였다.

모형을 통해 1년간의 보정 기간을 거쳐, 모의하기 위한 유역의 초기 매개변수를 산정한 후 예측하고자 하는 전(前)년도 동(同)월의 유역 조건을 적용하여 유출시나리오를 생성하였다. Table 3은 공주 지점에서 2006년 6월 모의된 유출 시나리오 결과의 일(一)으로서 다음과 같이 생성된 24개의 유출시나리오를 바탕으로 각 예측유량에 ESP확률을 부여하고 실측유량과 예측유량을 비교하였다. 확률론적 통계분석은 수문사상의 발생순서에 관계하지 않고 초과(혹은 비초과)확률만 고려한 것으로 빈도해석 중 경험적인 빈도해석을 통해 생성된 전체 자료를 사용하여 빈도해석을 수행할 수 있다. ESP 기법을 통해 생성된 각 년별 결과자료에 대해 자료를 군집화하지 않고 전체 자료를 도시공식을 사용하여 빈도해석을 실시하기 위해 확률도시법에 의한 점 빈도해석에서 사용되는 도시위치 공식인 Weibull (1939)공식을 사용하였다. 또한, 이를 이용한 확률론적 해석에서 확률분포를 선형화하는 확률지상에서의 자료점의 도시로부터 회귀식을 얻기 위한 방법으로 선형회귀분석을 사용하였다.

Weibull (1939)공식을 이용하여 공주지점의 2006년 6월 ESP확률을 산정한 기법은 Table 3과 같이 각 년도 별로 과거 관측된 강우량을 순차적으로 모형에 적용하여 산정된 유출량을 최소값부터 최대값 순으로 나열한다. 여기서 Non-exceedance Probability의 최대값은 1이 된다. 나열된 유출예측시나리오와 관측유출량을 비교했을 때 오차가 가장 작은 가중치 구간에서 선형회귀보간하여 각 월별 유출시나리오에 누가확률을 부여하였으며 Fig. 5에 자세히 도시된 바와 같이 계산된 ESP확률은 0.425이다. 다음과 같은 ESP확률 산정기법을 이용하여 1983년부터 2006년까지 각 월별 관측유량 ESP 확률을 산정하였다(Table 4).

Table 3. Example of runoff scenario simulated in 2006 June

Order	1 Month		Tot.runoff (MCM)	Order	1 Month		Tot.runoff (MCM)
	Scenario	Non-exceedance probability			Scenario	Non-exceedance probability	
1	1992	0.024	50.293	13	1983	0.54	119.31
2	2003	0.063	52.773	14	2005	0.579	120.796
3	1995	0.103	53.447	15	1989	0.619	134.585
4	2002	0.143	56.082	16	1986	0.659	139.069
5	1985	0.183	59.573	17	1987	0.698	142.845
6	1988	0.222	59.832	18	2001	0.738	144.435
7	1994	0.262	61.888	19	2000	0.778	186.771
8	2006	0.341	66.502	20	1997	0.817	194.875
9	1984	0.381	94.833	21	1998	0.857	199.869
10	1991	0.421	96.552	22	1996	0.897	331.266
11	1993	0.46	103.758	23	1990	0.937	355.83
12	1999	0.5	106.963	24	2004	0.976	615.747

Table 4. ESP Non-exceedance probability analysis of monthly measured discharge

Year	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
1984	0.024	0.938	0.976	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
1985	0.024	0.024	0.024	0.024	0.54	0.024	0.439	0.925	0.976	0.976	0.965	0.906
1986	0.336	0.024	0.959	0.024	0.801	0.507	0.867	0.781	0.759	0.864	0.024	0.024
1987	0.714	0.024	0.024	0.807	0.957	0.88	0.976	0.964	0.537	0.024	0.024	0.024
1988	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.883	0.083	0.383	0.024	0.024	0.024
1989	0.582	0.237	0.744	0.024	0.024	0.488	0.869	0.105	0.907	0.881	0.438	0.024
1990	0.024	0.894	0.024	0.454	0.637	0.951	0.904	0.383	0.932	0.024	0.024	0.024
1991	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.665	0.024	0.671	0.024	0.024	0.024
1992	0.024	0.024	0.748	0.976	0.976	0.747	0.421	0.787	0.62	0.024	0.024	0.024
1993	0.966	0.975	0.779	0.97	0.976	0.763	0.648	0.852	0.629	0.849	0.89	0.599
1994	0.024	0.024	0.522	0.024	0.915	0.271	0.181	0.663	0.331	0.895	0.559	0.024
1995	0.986	0.879	0.941	0.914	0.964	0.945	0.476	0.97	0.024	0.138	0.024	0.024
1996	0.976	0.927	0.976	0.754	0.943	0.024	0.024	0.024	0.024	0.867	0.865	0.024
1997	0.024	0.024	0.066	0.024	0.976	0.957	0.115	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
1998	0.976	0.976	0.976	0.834	0.759	0.859	0.238	0.926	0.396	0.024	0.024	0.024
1999	0.794	0.89	0.976	0.969	0.976	0.872	0.062	0.526	0.839	0.93	0.746	0.787
2000	0.968	0.138	0.563	0.745	0.857	0.857	0.404	0.785	0.638	0.858	0.866	0.024
2001	0.976	0.976	0.896	0.948	0.976	0.893	0.136	0.382	0.024	0.863	0.024	0.024
2002	0.937	0.492	0.666	0.976	0.976	0.263	0.239	0.805	0.024	0.877	0.894	0.976
2003	0.024	0.832	0.741	0.916	0.998	0.369	0.949	0.504	0.612	0.799	0.024	0.586
2004	0.875	0.943	0.976	0.875	0.976	0.976	0.762	0.431	0.379	0.735	0.976	0.976
2005	0.706	0.851	0.782	0.928	0.955	0.86	0.706	0.603	0.914	0.872	0.024	0.024
2006	0.024	0.183	0.024	0.927	0.964	0.425	0.976	0.024	0.355	0.024	0.318	0.087

3.1.2. 기상예보를 고려한 ESP확률분석

기상청에서는 과거부터 현재까지 관측 자료를 이용하여 기온, 기압, 강우 등에 대한 대한민국 기후에 대해 평년 자료를 구축하여 제공하고 있다. 기상청에서는 이 자료를 바탕으로 각 월별로 평년을 기준으로 많음, 적음, 같음과 같이 3가지로 분류하여 단기 및 장기예보를 제공하고 있다.

본 연구에서는 기상청의 분류기준을 이용해서 A(Above), N(Normal), B(Below)로 구분하여 1983년부터 2006년까지의 강우사상을 분류하였으며 Above는 평년보다 강우사상이 많이 예상될 경우, Normal은 평년과 같은 강우사상인 경우, Below는 평년보다 적은 강우가 예상될 경우이다(이하 A, N, B). Table 5는 앞서 제시한 기준을 바탕으로 1983년부터 2006년 실측된 공주지점의 강우를 분류한 것이다. 1983년부터 관측된 공주지점의 경우 A 사상이 많이 나타나지 않는 것은 큰 홍수사상이 없었거나 기상청에서 제시한 평년 강우의 기준이 큰 강우사상까지 포함하는 것으로 판단된다.

기상전망과 ESP의 결합은 Table 4와 Table 5의 매칭을 통해 이루어진다. 한 예로 Table 4의 1984년 1월의 확률은 0.024이며 Table 5를 통해 B의 강우사상인 것을 알 수 있다. 즉, 공주지점 1월의 경우, 기상청의 예보가 B인 경우는 1984년, 1988년, 1991년, 1992년, 1993년, 1999년, 2003년, 2004년, 2005년이며 이것의 확률은 0.024, 0.024, 0.024, 0.024, 0.966, 0.794, 0.024, 0.875, 0.706이다. 이 값을 평균하게 되면 Table 6에 제시된 강우사상이 평년보다 작게 예상되는 1월의 ESP 확률(0.349)이 된다.

Table 4를 보면 전체적으로 A 강우 사상이 나타난 경우

관측유량 ESP 확률이 ESP시나리오에서 가장 높은 확률을 가지는 0.976의 확률을 보이는 것을 알 수 있으며 N의 경우와 B의 경우는 초기 유역 조건에서의 차이를 고려하여 1984년부터 2006년까지 각 사상별로 절삭 평균하여 산정하였다(Table 6). 농번기인 4-6월의 경우 다른 월보다 ESP 확률이 다소 높게 나왔으며 이것은 이 기간 동안 농업용수 이용이 크므로 많은 유량을 필요하게 되며 실제로 농업저수지나 기타 수리시설물에 의해 농업용수로 공급된 용수가 실제하천에 회귀되어 유출량이 늘어나게 된다. 이것은 실제 강우에 의해 발생하는 유출량보다 관측 유출량이 많아지게 되기 때문에 ESP 확률이 높아진 것으로 판단된다. Table 4에 제시한 월별로 분석된 ESP 확률에 기상전망(Table 5)을 결합하여 분석된 Table 6을 이용하여 장래의 유출예측을 수행시 기상청에서 전망한 기상상황에 맞는 ESP 확률을 적용할 수 있어 신뢰성이 향상된 유출예측을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2. ESP 확률 산정 기법별 비교

ESP 확률을 산정하기 위해 기존에 연구된 후처리 기법과 본 연구에서 수행한 정성적 기상전망과 결합한 ESP 확률을 비교·검토하기 위해 Table 7과 같이 case별로 구분하였다. 각각의 ESP 확률 값은 Table 8과 같으며 각 case별로 산정된 ESP확률을 적용하여 유출예측을 수행하여 절대오차를 산정하였다. 분석 결과 장기유출적인 관점에서 기존에 사용해 오던 월평균관측유량을 이용한 유입량 예측기법보다 ESP 기법을 이용한 유출예측이 관측유량과 비교해 보

Table 5. Classification of yearly rainfall in Gongju point

(A: Above, N: Normal, B: Below)

Year	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
1984	B	B	B	N	B	N	N	N	N	B	N	N
1985	N	N	N	B	N	B	N	N	A	A	N	N
1986	N	B	N	B	N	N	N	N	N	N	B	N
1987	N	N	N	B	N	N	A	A	B	N	N	B
1988	B	B	N	B	B	B	A	B	B	B	B	N
1989	N	N	N	B	B	N	N	B	A	B	N	B
1990	N	A	N	N	N	N	N	N	A	B	N	B
1991	B	N	N	N	N	B	A	B	A	B	B	N
1992	B	B	B	N	N	B	N	N	N	B	N	N
1993	B	N	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N
1994	N	B	N	B	N	N	B	N	B	A	B	N
1995	N	B	N	B	B	B	N	A	B	B	B	B
1996	N	B	N	B	B	A	N	B	B	N	N	N
1997	N	N	B	B	N	N	N	N	B	B	A	N
1998	N	N	N	N	N	A	N	A	A	N	N	B
1999	B	B	N	N	N	N	B	N	A	A	B	B
2000	N	B	N	B	B	N	N	A	A	B	N	N
2001	N	N	B	B	B	N	N	B	B	N	B	N
2002	N	B	B	N	N	B	N	A	B	N	B	N
2003	B	N	N	N	N	B	A	N	N	B	N	B
2004	B	N	N	N	N	A	N	N	N	B	B	N
2005	B	N	B	B	B	N	A	N	A	N	B	B
2006	N	N	B	B	N	B	A	B	B	B	N	B

Table 6. Analysis table of ESP probability (Case 1) combining Climate Outlook

Point	Climate Outlook	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Gongju	A	0.876											
	N	0.541	0.506	0.566	0.672	0.83	0.694	0.438	0.542	0.504	0.655	0.374	0.264
	B	0.385	0.436	0.566	0.51	0.596	0.353	0.122	0.107	0.192	0.298	0.332	0.178

Table 7. Case for application of ESP technique

Case 1	Weather outlook + ESP of Case 2
Case 2	ESP probability considering monthly measured streamflow
Case 3	ESP probability divided by season

았을 때 오차가 작았으며 또한 ESP 확률 산정에 따라 더 신뢰성 높은 유출예측이 수행되었다. 또한 Table 9에 도시한 것과 같이 기상전망과 결합된 ESP 확률 기법을 이용한 유출예측이 다른 case보다 확실히 신뢰성 높은 유출예측을 하는 것을 알 수 있다.

기상전망과 ESP를 결합한 유출예측 기법에 의해 산정된 연간 절대오차 평균(case 1)은 이수기 295.75 MCM, 홍수기

273.8 MCM으로 case 2 (324.4 MCM, 463.1 MCM)과 case 3 (360.1 MCM, 473.1 MCM)보다 절대오차의 비(ratio)가 작은 것으로 나타났다.

3.3. 불일치율 산정

본 연구에서 산정한 Climate Outlook+ESP 기법과 기존에 후처리 기법으로 연구된 ESP확률 산정 기법들의 양상불 유출예측의 결과를 평가하고 향후 개선해야 할 사항을 알아보기 위해 확률예측의 정확도를 평가할 수 있는 Discrepancy Ratio를 검토하였다.

Discrepancy ratio는 Cheong and Seo (2003)에 의해서 식 (4)와 같이 정의되었으며 여기서, Q_p 는 예측유량, Q_m 은 관

Table 8. ESP probability for three cases (Gongju point)

	Group	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Case1	A	0.876											
	N	0.541	0.506	0.566	0.672	0.83	0.694	0.438	0.542	0.504	0.655	0.374	0.264
	B	0.385	0.436	0.566	0.51	0.596	0.353	0.122	0.107	0.192	0.298	0.332	0.178
Case2		0.48	0.492	0.584	0.573	0.749	0.565	0.52	0.504	0.479	0.505	0.34	0.23
Case3	Low flow	0.502											
	High flow	0.501											

Table 9. Comparison of absolute error for three cases

(unit: MCM)

Year	Group	Case1	Case2	Case3
2002	Low flow	289.7	326.6	378.0
	High flow	310.7	575.3	625.9
	Sum	647.3	1125.6	1141.3
2003	Low flow	167.2	171.4	233.7
	High flow	225.3	158.4	167.3
	Sum	673.2	756.1	904.3
2004	Low flow	651.0	792.1	801.5
	High flow	155.2	163.7	247.1
	Sum	994.2	992.1	1172.8
2005	Low flow	265.9	247.9	289.7
	High flow	134.0	421.9	338.8
	Sum	490.2	635.9	675.7
2006	Low flow	156.9	184.5	220.4
	High flow	134.4	499.4	573.1
	Sum	837.8	1357.4	1554.5
2007	Low flow	243.8	223.6	237.2
	High flow	683.0	959.7	886.6
	Sum	887.9	1326.6	1173.5
Average	Low flow	295.8	324.4	360.1
	High flow	273.8	463.1	473.1

측유량이다. Discrepancy ratio가 0이면 예측결과는 관측유량과 거의 근사한 값으로 볼 수 있으며 discrepancy ratio가 0보다 크면 유출예측을 과대산정한 것이며 0보다 작으면 과소산정한 것이다.

$$R_D = \log(Q_p / Q_m) \tag{4}$$

유출신뢰도는 discrepancy ratio에서 proportion의 개수로 정의할 수 있으며 전체 자료에서 -0.2에서 0.2의 범위에 드는 것을 기준으로 큰 값이 신뢰도가 높은 것으로 판단하였다. Climate Outlook+ESP를 case 2와 case 3을 비교했을 때 -0.2부터 0.2의 범위에서 discrepancy ratio가, Climate Outlook+ESP에서 50%, case 2에서 34.7%, case 3은 33.3%로 계산되었으며 Fig. 6에 결과를 도시하였다. Climate Outlook+ESP을 통하여 유역의 월간 유출을 전망하는 것은

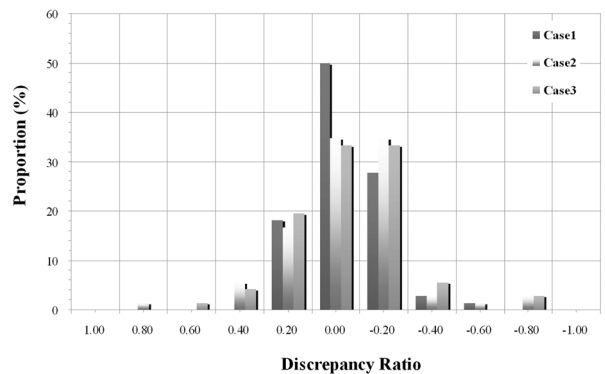


Fig. 6. Analysis of discrepancy for ESP Case (Proportion, %)

적정하다고 판단되며, 향후 유역의 확장 및 추가적인 수문 분석에 의하여 ESP 기법의 적용성을 확인하는 연구가 지속되어야 할 것으로 사료된다. 현재 전 세계적으로 다양한

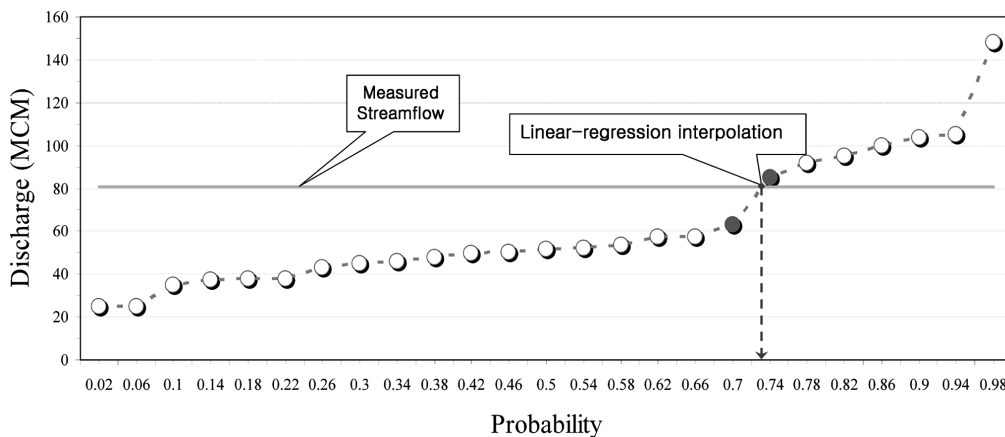


Fig. 5. Calculation procedure for ESP Probability.

수치예보 모형이 개발되고 있으며, 결과적으로 향상된 기후 예보결과를 사전처리를 통해 앙상블 유량예측 결과에 반영하는 것이 가능하므로, 이러한 결과는 앞으로 보다 진보될 것으로 예상된다. 기상청의 순강수전망 또한 점차 많은 자료가 누적되고 있어 향후 앙상블 유량예측에 있어 보다 높은 적용 가능성을 보일 것이다.

4. 결론

미국 기상청(NWS)은 수문학적 예측 분야에서 확률론적 분석방법인 ESP 기법을 활용하고 있으며 전 세계적으로 강·단기 유출예측에 대해 많은 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 장기유출예측의 불확실성을 감소시키고 예측의 신뢰성을 향상시키기 위해 금강유역의 공주지점 유역에 대해 시·공간적으로 상세분석을 실시하고 이를 토대로 유출예측을 수행하여 ESP 유출예측 시나리오를 산정하였다. 본 연구에서 산정한 기상전망과 결합한 ESP 확률을 통해서 장기유출예측의 신뢰도를 향상시키고자 하였고 이에 대한 결과는 다음과 같다.

- 1) 모형의 매개변수 보정은 case별로 구분하여 유출량을 산정한 후 첨두유량과 총유출량을 조절하였다. 보정방법으로는 절대오차(Absolute Error: AE)와 제곱평균제곱근오차(Root Mean Square Error)를 이용하였으며 절대오차는 년단위 모의결과에 대한 보정을 목적으로 실시하였고 제곱평균제곱근오차는 일단위 모의결과에 대한 보정을 목적으로 실시하였다. 보정결과, Group “E”의 경우 가장 양호한 유출결과를 나타내어 이를 채택하였다.
- 2) 과거 관측된 강우자료 수와 동일하게 유량자료를 생성할 수 있는 ESP 기법을 이용하여 1984년부터 2006년까지 ESP 분석을 실시하여 관측유량 ESP 확률을 산정하였다. 또한 기상청에서 전망하는 기상예보와 ESP 기법을 결합하기 위해 A, N, B에 따른 ESP 확률로 분리하여 각 기상상황에 따른 ESP 확률을 재산정하였다.
- 3) case에 따른 ESP 확률을 2002~2007년 공주지점에 적용하여 관측유량과의 유출절대오차를 비교·분석하였으며 유출예측의 개선효과를 확인해본 결과, 기상예보와 ESP 기법이 결합된 case 1의 경우 이수기 295.8 MCM, 홍수기 273.8 MCM의 유출절대오차가 발생하였으며 상대적으로 유출예측의 절대오차가 작은 것으로 나타났기 때문에 유출예측신뢰도가 높다고 판단된다.
- 4) Climate Outlook+ESP(case1)를 case 2 또는 case 3와 비교했을 때 -0.2 부터 0.2의 범위에서 discrepancy ratio가, Climate Outlook+ESP에서 50%, case 2에서 34.7%, case 3은 33.3%로 계산되었기 때문에 Climate Outlook+ESP를 통하여 유역의 월간 유출을 전망하는 것은 적절하다고 판단된다.
- 5) 본 연구에서는 Climate outlook+ESP를 산정하기 위해 과거 관측된 강수량 자료를 사용하여 임의로 완벽한 기상전망을 생성하였기 때문에 실제 기상전망이 포함하는 많은 불확실성이 배제되었으므로 추후 기상청에서 제공

하는 기상전망의 불확실성에 대해 지속적인 추가 연구가 필요하다. 또한 유출예측에 있어 가장 민감도가 큰 강우사상에 대한 통계분석을 실시하여 상황별로 강우사상을 적용할 수 있는 시스템을 구축하고 기상청의 기상예보에 대한 적중률이 향상된다면 유출예측의 불확실성을 크게 감소할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원(1-6-3)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

강주환(1986). 강우-유출모형에 의한 가지야마 공식의 한계성 검토. 석사학위논문, 서울대학교.

건설교통부(1998). 기존댐 용수공급 능력조사(금강수계-부록).

건설교통부(2001). 수자원 장기종합계획 - Water Vision 2020.

김영오, 정대일, 김형섭, 이길성(2001). 앙상블 예측을 통한 물공급전망 개선방안. 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 304-308.

류경식, 황만하, 맹승진, 이상진(2007). 유역관리모형을 이용한 금강 유역 유출특성 해석. 수질보전 한국물환경학회지, 23(4), pp. 527-534.

안상진, 이용수(1989). SSARR모형에 의한 유역유출 해석. 한국수문학회지, 22(1), pp. 109-116.

안정민, 정우창, 황만하(2008a). 유출예측을 위한 금강유역의 ESP확률 개선. 학술발표대회 논문집, 한국수자원학회, pp. 704-708.

안정민, 정우창, 이상진, 신용노(2008b). 정성적 기상예보와 ESP 기법의 결합을 통한 유출예측 적용. 학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 2724-2727.

안정민, 황만하, 이상진, 정구열(2008c). 정성적 기상예보와 ESP 기법의 결합을 통한 유출예측 방안. 학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 2720-2723.

이상진, 노준우, 안정민, 김주철(2009). 유출관리모형을 활용한 수문학적 공간정보 분석. 한국공간정보시스템학회 논문집, 11(3), pp. 97-104.

이상진, 이배성, 류경식, 황만하(2006). 유출모의를 위한 주요제어지점 유량특성 분석. 한국수자원학회논문집, 39(11), pp. 905-914.

정대일, 김영오(2002). Forecasting monthly inflow to Chungju dam using ensemble streamflow prediction. Korean Society of Civil Engineers, 22(3-B), pp. 321-331.

정우창, 황만하, 정구열(2008). 유역의 물공급 전망을 위한 월단위 유출예측기법에 대한 적용성 평가. 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 1160-1164.

Cheong, T. S. and Seo, I. W. (2003). Parameter estimation of the transient storage model by routing method for river mixing processes. Water Resources Research, 39, pp. HWC 1-11.

Georgakakos, K. P. and Krzysztofowicz, R. (2001). Probabilistic and ensemble forecasting. Journal of Hydrology, 249(Issues 1-4), pp. 198.

- Rockwood, D. M. (1961). Columbia basin streamflow routing by computer. Transactions, *American Society of Civil Engineers*, pp. 3119.
- Rockwood, D. M. (1968). Application of stream-flow synthesis and reservoir regulation "SSARR" Program to the lower Mekong river. The Use of Analog and Digital Computer in Hydrology Symposium, *International Association of Scientific Hydrology*, UNESCO, pp. 329-344.
- USACE (1991). The Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation (SSARR) Model. U.S. Army Corps of Engineers North Pacific Division.
- Weibull, W. (1939). A statistical theory of the strength of materials. *Ingeniors Vetenskaps Akademien, Handlingar*, **151-3**, pp. 45-55.