

국내 수문학적 가뭄전망

Hydrologic Drought Outlooks in Korea

이재경* / 김영오

Lee, Jae-Kyoung / Kim, Young-Oh

요 지

최근 우리나라에서 발생한 가뭄의 특징은 발생주기는 짧고 그 피해는 오히려 심화되는 현상을 보이고 있다. 효율적인 가뭄재해 관리를 위해서는 현재 뿐만 아니라 미래에 대한 전망이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 국내에 적합한 월단위와 주단위의 가뭄전망기법을 제시하였다. 월단위 가뭄전망에서는 불확실성이 크기 때문에 양상별 기법을 이용한 확률론적 가뭄전망을 하였고 이에 반해 주단위 가뭄전망에서는 기상청에서 제공하는 GDAPS를 이용하여 확정론적 가뭄전망을 하였다. 월단위와 주단위 가뭄전망 모두 강수, 유량, 지하수 위를 인자로 하는 MSWSI(Modified Surface Water Supply Index)를 가뭄지수로 사용을 하였다.

월단위 가뭄전망에서는 과거 강수와 잠재증발산량 시나리오를 물수지모형인 *abcd*모형의 입력변수로 하여 최종적으로 유량과 지하수위 시나리오를 생산하였다. 확률론적 가뭄전망을 위해 MSWSI를 5개 구간으로 나누어 각 구간의 발생확률을 산정하고 실측자료로부터 산정한 MSWSI와 비교하였으며, AHS(Average Hit Score)를 이용하여 그 정확성을 평가하였다. 금강유역에 2001년과 2005년 7월부터 2006년 6월까지 적용한 결과, 월단위 가뭄전망의 AHS가 33.1로서 초보전망의 AHS인 20.0보다 높아 월단위 가뭄전망으로서 정확성이 있음을 확인하였다. 주단위 가뭄전망에서는 GDAPS를 *abcd*모형의 입력변수로 하여 확정론적 MSWSI를 산정하여 실측자료로부터 산정한 MSWSI와 비교하였으며, hit ratio를 이용하여 그 정확성을 평가하였다. 2001년 주단위 가뭄전망 결과, 주단위 가뭄전망의 hit ratio가 48.0으로서 초보전망보다 높아 주단위 가뭄전망 또한 효용성이 있음을 입증하였다. 계절별로 살펴보면, 갈수기의 가뭄전망이 홍수기보다 정확성이 높았다.

위 월단위와 주단위 가뭄전망은 적용기간이 짧아 가뭄전망의 정확성을 판단하기에는 아직 이르다고 판단되나 본 연구 결과를 토대로 장기적으로 가뭄전망을 수행하고 평가한다면, 가뭄전망에 대한 신뢰도가 더 높아질 것으로 사료된다.

핵심용어 : 가뭄전망, MSWSI, *abcd*모형, GDAPS

1. 서 론

가뭄의 피해규모는 전세계적으로 홍수보다 커지고 있다. 미국 FEMA(Federal Emergency Management Agency)에서는 1996년부터 2004년까지 평균적으로 가뭄으로 인하여 6억 ~ 8억 달러의 피해가 발생한 것으로 조사하였다(Whilhite, 2005). 우리나라에서도 발생주기는 짧아지고 그 피해는 오히려 심화되는 현상으로 보이고 있으며, 최근 가뭄의 경우 충청도 지방(1994년 ~ 1995년), 한강유역(2001년)을 중심으로 발생하였고 전국적 현상으로 확대되고 있다(건설교통부와 한국수자원공사, 2005).

가뭄은 그 특성상 진행속도가 느리기 때문에 현재 가뭄이 발생하였다고 하더라도 대처할 수 있는 시간적인 여유가 있으므로 대처시기만 잘 감지할 수 있다면 가뭄에 의한 피해를 줄일 수 있다(권형중 등, 2005). 따라서 효율적인 가뭄재해 관리를 위해서는 현재뿐만 아니라 미래에 대한

* 정회원·서울대학교 건설환경공학부 박사과정 E-mail: myroom1@snu.ac.kr
** 정회원·서울대학교 건설환경공학부 부교수 E-mail: yokim05@snu.ac.kr

전망이 선행되어야 한다(Whilhite, 2005).

국내외에서 가뭄에 대해 이루어진 최근 연구를 가뭄지수를 중심으로 살펴보면 다음과 같다. 기상학적 가뭄분석을 위해 강수에 바탕을 둔 SPI(Standardized Precipitation Index)와 토양수분에 바탕을 둔 PDSI(Palmer Drought Severity Index)를 이용한 연구(Lohani 등, 1997; Dai 등, 2004)가 있으며, 수문학적 가뭄분석을 위해 지표면 유출에 바탕을 둔 SWSI(Surface Water Supply Index)를 이용한 연구(Shafer 등, 1982; Garen 등, 1993)가 있으며 이중 가뭄전망에 대한 연구가 이미 시작되어 실용화되고 있다(Lemonte, 2006, 교신저자). 미국 등 선진국에서는 앞서 언급한 기준의 가뭄지수를 사용한 연구들 이외에 새로운 가뭄지수를 개발한 연구(Keyantash 등, 2004)도 활발히 진행되고 있다.

가뭄 평가지표 개발 등 가뭄분석에 대해서는 국내에서도 다수 연구(최영진 등, 1994; 윤용남 등, 1996; 이동률, 1999; 장인주 등, 2002)가 진행되었고, PDSI, SPI 등의 가뭄지수를 이용한 기상학적 가뭄분석에 수행된 사례(이동률, 1999; 권원태 등, 2001)를 찾아볼 수는 있으나 수문학적 가뭄전망을 체계적으로 수행한 연구는 거의 전무한 실정이다. 따라서 국내 실정에 맞는 가뭄전망 방안이 매우 시급한 과제라 할 수 있다.

기상학적 현상의 이해와 전지구모형(GCMs, Global Circulation Models) 등의 기후모형의 발전으로 기상예보의 정확성이 높아짐에 따라, 이를 치수목적인 홍수예측은 물론 이수 목적의 중장기 유량 또는 가뭄전망에 활용할 경우, 신뢰성 있는 전망을 기대할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기상예보를 활용한 가뭄전망 방안을 수립하고 검증하여 제시하고자 한다.

2. 기상예보

기상예보는 가뭄전망과 같은 수문학적 예보의 근간이 되므로 우선적으로 검토해야 할 정보이다. 한반도를 위해 생산되는 기상예보를 살펴보면, 현재 국내에는 단기예보(3일 ~ 4일)인 RDAPS(Regional Data Assimilation and Prediction), 중기예보(7일 이상)인 GDAPS(Global Data Assimilation and Prediction), 장기예보(한달 이상)인 월간산업기상정보 등이 있으며, 일부 민간 기상업체에서도 기상예보를 생산하고 있다. 국외에서는 미국 NWS(National Weather Services)의 NCEP(National Centers for Environmental Prediction), 일본의 JMA(Japan Meteorological Agency), 유럽의 ECMWF(European Centre Medium-Range Weather Forecasts) 등에서 기상예보자료를 생산하고 있다.

본 연구는 주단위와 월단위 가뭄전망에 초점을 맞추고 있으므로 GDAPS와 월간산업기상정보의 적용 가능성을 살펴보았다. 월간산업기상전망은 ‘평년보다 높음’, ‘평년과 비슷’ 등과 같이 평년과 비교하여 정성적으로 기상예보를 하고 있어 정량적 표현이 힘들고 정확성이 낮아 월단위 가뭄전망에는 확인하지 못했다. 한편 GDAPS는 최장 10일까지 생산되는 확정론적 기상예보로서 어느 정도 정확성이 검증되어 주단위 가뭄전망에 적용하였으며, 4.4절에서 상세 설명되고 있다.

3. 가뭄지수: Modified Surface Water Supply Index

SWSI는 Shafer and Dezman(1982)에 의해 개발된 지수로서, SWSI의 기본적인 개념은 각 수문 입력변수들의 비조과학률변수를 사용하여 다른 지역에서도 용수공급 능력의 비교가 가능하다. SWSI의 장점은 각 유역의 독특한 물공급 조건을 대표한다는 점이고 단점은 자료 수집 관측소 또는 물관리의 변화시 새로운 연산방식으로 계산되어져야만 하고 산정 과정에서 유역간 비교가 제한된다 는 점이다(건설교통부와 한국수자원공사, 2005).

지표수공급지수를 산정하기 위해서는 가뭄에 영향을 미치는 수문입력변수를 결정하고 결정된 각종 수문입력변수들을 통계학적으로 분석해야 하며, Shafer and Dezman(1982)은 각종 수문입력변수에 확률개념을 추가하여 수문입력변수들의 비교 및 조합이 가능하도록 개발하였다. SWSI식은 식 (1)과 같다.

$$SWSI = \frac{a \times PN_{sp} + b \times PN_{pcp} + c \times PN_{sf} + d \times PN_{rs} - 50}{12} \quad (1)$$

여기서, PN 은 비초과화률, a, b, c, d 는 각 입력변수들에 대한 가중치, 아래첨자 sp 는 적설입력변수(snowpack input variable), pcp 는 강수입력변수(precipitation input variable), sf 는 하천유출입력변수(streamflow input variable), rs 는 저류량입력변수(reservoir input variable)를 나타낸다.

본 연구에서는 ‘가뭄관리모니터링체계 수립 보고서(건설교통부와 한국수자원공사, 2005)’에서 새로 개발한 가뭄지수인 MSWSI(Modified Surface Water Supply Index)를 이용하였으며, 이는 식 (2)와 같다. MSWSI는 SWSI에서 적설입력변수 대신에 지하수입력변수를 추가한 지수이다. MSWSI에서 기존입력변수를 제하고 새로운 입력변수를 추가할 수 있는 이유는 각 수문입력변수가 유역의 용수공급능력에 미치는 영향이 계절에 따라 다르며, 유역의 특성에 따라 용수공급 수문입력변수가 달라질 수 있기 때문이다(건설교통부와 한국수자원공사, 2005).

$$MSWSI = \frac{a \times PN_{gw} + b \times PN_{pcp} + c \times PN_{sf} + d \times PN_{rs} - 50}{12} \quad (2)$$

여기서, 아래첨자 gw 는 지하수입력변수(groundwater input variable)이다.

4. 적용사례

4.1 적용지역

가뭄전망의 정확성 검증을 위해 금강유역을 적용지역으로 선정하였다. 금강유역은 유로연장 401 km이며, 유역면적은 9,810 km²이다. 금강유역은 총 21개의 중권역(수자원공사 기준)으로 나누어져 있다. 금강유역에는 용담댐과 대청댐이 위치하고 있으며, 용담댐은 전주원의 생공용수, 대청댐은 대전과 청주원의 용수를 담당하고 있다.

4.2 강우-유출모형

가뭄전망에 필요한 강우-유출모형으로서 물수지모형인 $abcd$ 모형을 선정하였다. $abcd$ 모형에 적용되는 매개변수를 산정을 위해 유역특성 인자를 이용한 회귀식을 사용하였다.

독립성 검증을 하여 각 특성인자간의 독립성이 유지될 수 있도록 하여 총 13개의 유역특성인자 중 유역 연평균강우, 연평균 잠재증발산량, 유역평균고도, 유역평균경사, 하천밀도, 평균온도, 월최대강우, 총하천길이 등 8개의 유역특성인자를 추출하였다. 선택한 매개변수와 유역특성인자를 이용하여 stepwise regression기법을 사용하여 매개변수별 회귀식을 작성하였다.

앞에서 구한 매개변수별 회귀식을 검증하기 위하여, 회귀식으로 구한 매개변수를 이용하여

*abcd*모형으로 2002년 1월부터 2004년 12월까지 용답댐의 유입량을 모의하였다. 검증결과 R^2 는 92.42, R-Bias는 -0.06, R-RMSE는 0.35로서 정확성이 매우 높게 나와, 적용 가능한 모형임을 확인하였다.

4.3 월단위 가뭄전망

월단위 가뭄지수를 전망하기 위하여 양상불 예측기법을 적용하였다. 가뭄지수를 전망하기 위해 사용된 강수와 온도 양상을 시나리오는 1986년 1월부터 1999년 12월까지 14개년도이며, 과거 실제 가뭄이 발생하였던 1999년 1월부터 2001년 12월까지를 검증기간으로 하였다.

1986년부터 1999년까지의 14개 강수와 기온양상을 각각 *abcd*모형에 입력하여 2001년 1월 14개의 유입량과 지하수위 양상을 생성하였다. 다음으로 월별로 14개의 과거 강수 양상을, 유입량 양상을, 지하수위 양상을 각각 수문관측소에서 취득한 자료를 이용하여 비초과학률을 작성하였다. MSWSI를 산정하기 위해서는 유역의 가뭄에 영향을 미치는 수문입력변수들을 통계학적으로 분석해야 하므로 수문입력변수의 시계열을 분석하여 월별 확률밀도함수를 산정하였으며, 최종적으로 누가학률분포함수를 산정하여 비초과학률을 구하였다. 다음으로 각 수문입력변수가 유역에 미치는 가중치는 McKee 등(1993)이 제시한 방법을 적용하여 산정하였다. 마지막으로 각 입력변수의 월별 비초과학률 양상을 MSWSI 공식에 대입한 다음 MSWSI 양상을 산정하였다.

본 연구에서는 가뭄전망 구간들을 ‘심한습윤’, ‘보통습윤’, ‘정상상태’, ‘보통가뭄’, ‘심한가뭄’의 5 단계로 전망하였다. 우선 가뭄전망의 검증을 위하여 과거 수문관측자료를 이용하여 가뭄지수를 산정하였으며, 이렇게 산정된 가뭄지수를 ‘실제가뭄(real-drought)’으로 표현하였다. 다음으로 월단위 가뭄전망의 정확성 평가하기 위한 지표로 평균예측점수(average hit score)를 사용하였다. 가뭄전망의 평균예측점수가 20.0보다 크면 전체적인 가뭄전망은 초보전망(naive forecast)보다 정확하여 가뭄전망으로서 유효하다고 할 수 있다. 본 연구의 경우, 모든 월에서의 평균예측점수가 최저 23.0에서 최고 46.0이며, 전체 평균예측점수도 33.1로서 모두 초보전망보다 정확성이 높음을 확인하였다. 따라서 양상을 기법을 가뭄전망에 적용한 기법이 어느 정도 효용성이 있음을 확인하였다.

4.4 주단위 가뭄전망

본 연구에서는 주단위 가뭄전망의 검증기간은 2001년 1월 ~ 12월(1년 52주)이며, 중기 기상예보인 GDAPS를 이용하였다. 본 연구에서 사용한 GDAPS는 한반도를 덮는 12개의 격자점으로 구성된 확정론적 예보로서 강수와 기온예보가 양상불이 아닌 단일 시나리오로 구성되어 있다. 이 단일 강수와 기온예보 시나리오를 직접 *abcd*모형의 입력변수로 입력하면 단일한 유량 및 지하수위 예측시나리오를 생성할 수 있다. 우선 각 격자점의 GDAPS를 *abcd*모형에 적용하기 위하여 각 격자점과 충주댐 유역의 각 소유역 중심과의 거리에 따라 격자점에 가중치를 주었으며, 가중치 산정을 위해 식 (3)과 같은 역거리가중법(inverse distance weighting method)을 사용하였다.

$$w_i = \frac{\frac{1}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} \quad (3)$$

여기서, d_i 는 격자점과 유역중심간의 거리(m)를 나타낸다. 다음으로 각 격자점의 강수 및 기온예

보에 가중치를 적용하여 단일한 강수 및 기온 입력자료를 생성하였으며, 이를 *abcd*모형의 입력변수로 하여 최종적으로 주단위 가뭄전망을 수행하였다.

주단위 가뭄전망의 정확성 평가를 위하여 과거 수문관측자료를 이용하여 ‘실제가뭄’을 산정하였다. 다음으로 월단위 가뭄전망의 정확성 평가하기 위한 지표로 적중횟수(hit number)와 적중률(hit ratio)을 사용하였다. 주단위 가뭄전망의 적중횟수를 보면, 52주 중에서 25주가 일치하여 25회의 적중횟수를 보였다. 따라서 적중률도 48.0으로 매우 높은 전망 정확성을 보여 GDAPS를 이용한 주단위 가뭄전망이 매우 유용함을 확인하였다.

5. 결론 및 향후연구

본 연구는 우리나라 가뭄전망을 수행하기 위해 사용가능한 기상예보를 조사하였으며, 장기기상 예보로서 월간산업기상정보를, 중기기상예보로서 GDAPS를 적용 가능한 기상예보로 선정하였다. 각 기상예보의 정확성 평가를 실시하였으며, GDAPS의 정확성은 어느 정도 유효하여 적용이 가능하나 월간산업기상정보의 정확성은 낮아 적용이 가능하지 않은 것으로 판단하였다.

기상예보를 이용한 가뭄전망 방안을 수립하고 금강유역에 적용하였다. 월단위 가뭄전망에서는 월간산업기상정보의 정확성이 낮아 과거 기상관측자료를 이용하는 양상을 기법을 적용하였다. 모든 월과 전체 평균예측점수가 초보전망보다 높게 나타나 가뭄전망으로서 유효함을 증명하였다. 주단위 가뭄전망에서는 GDAPS를 이용하였으며, 주단위 가뭄전망의 적중률이 초보전망보다 매우 높은 정확성을 보여, GDAPS를 이용한 주단위 가뭄전망이 뛰어남을 확인하였다.

본 연구에서 기상예보를 이용한 가뭄전망이 가능함을 확인하였으며, 보다 정확한 기상예보가 확보되면 가뭄전망의 정확성 또한 높아질 것으로 기대된다. 따라서 기상예보 정확성의 향상이 매우 중요할 전망이다. 최근 대두되고 있는 기상예보간의 결합(Rajagopalan et al., 2002; Kim et al., 2004)이나 확률예보 혹은 확정예보 등 기상예보의 다양성 등이 확보된다면 가뭄전망의 정확성 향상에 매우 기여할 것으로 사료된다. 또한 기상예보를 사용한 가뭄전망이 전국에 걸쳐 체계적으로 확대 적용되는 연구도 앞으로 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부, 한국수자원공사와 서울대학교 공학연구소의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 장인주, 윤용남 (2002). “가뭄관리를 위한 수문학적 의사결정에 관한 연구: 1-마코프 연쇄를 이용한 PSDI의 추계학적 거동분석.” *수자원학회 논문집*, 제35권 5호, pp. 583-595.
2. 건설교통부, 한국수자원공사 (2005). *가뭄관리모니터링체계 수립*.
3. 권원태, 오재호 (2001). “가뭄에 대한 기상학적 고찰.” *한국수자원학회지*, 제 34권 4호, pp. 81-86.
4. 권형중, 신차철, 김성준 (2005). “RS, GIS를 이용한 기상, 수문, 농업 가뭄의 평가.”, *한국수자원학회 학술발표회 논문집 CD*.
5. 윤용남, 안재현, 이동률 (1996). “Palmer의 방법을 이용한 가뭄의 분석.” *한국수자원학회 학술발표회 논문집*, pp. 259-267
6. 이동률 (1999). “엘니뇨/남방진공과 한국의 가뭄과 관계.” *한국수자원학회 논문집*, 제 32권 2호, pp. 111-120.

7. 정대일, 김영오 (2002). "양상불 예측을 이용한 충주댐 월 유입량 예측." *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제22권, 제3-B호, pp. 321-331.
8. Dai, A., Trenberth, E. K., and Qian, T. (2004). "A global data set of Palmer drought severity index 1870 ~ 2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming." *Journal of Hydrometeorology*, vol. 5, pp. 1117-1130.
- 9.. Garen, D. C. (1993). "Revised surface-water supply index for western United States." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 119, No. 4, pp. 437-454.
10. Keyantash, J. A. and Dracup, J. A. (2004). "An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage." *Water Resources Research*, vol. 40, W09304.
11. Kim, M.K., Kang, I.S., Park, C.K., and Kim, K.M. (2004). "Superensemble prediction of resional precipitation over Korea." *International Journal of Climatology*, Vol. 24, pp. 777-790.
12. Lohani, V. K. and Loganathan, G. V. (1997). "An early warning system for drought management using the Palmer drought index." *Journal of American Water Resources Association*, vol. 33(6), pp. 1375-1385.
13. McKee, T. B., Doesken, N. J., and Kleist, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration of time series", *8th Conference on Applied Climatology*, Jan., Aneheim. CA, pp. 179-184.
14. Rajagopalan, R., Lall, U., and Zebiak, S.E. (2002). "Categorical climate forecasts through regularization and optiamal combination of multiple GCM ensembles." *Monthly Weather Review*, Vol. 130, pp. 1792-1811.
15. Shafer, B. A. and Dezman, L. E. (1982). "Development of surface water supply index - A drought severity indicator for Colorado." *Proc. Western Snow Conference*, pp. 164-175.
16. Whilhite, D. A. and Buchanam-Smith, M. (2005). "Chapter 1 Drought as hazard: Understanding the natural and social context." *Drought and Water Crises*. edited by Whilhite, D. A., CRC Press