



# 물 수급 네트워크 기반 수문학적 가뭄 모니터링 방법 연구



## 문장원

한국건설기술연구원  
연구전략기획본부  
수석연구원  
jwmoon@kict.re.kr

## 01 서론

가뭄에 효과적으로 대응하고 피해를 최소화하기 위해서는 지속적 가뭄 모니터링을 통해 현재 시·공간적인 상황을 정확하게 파악하는 것이 매우 중요하다. 가뭄의 시·공간적 크기를 정량화하고 표현하기 위한 도구로 여러 가지 가뭄지수가 개발되어 이용되고 있으며, 현재 이용 중인 대표적인 가뭄지수로 파머가뭄지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI)(Palmer, 1965), 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)(McKee et al., 1993), 지표수공급지수(Surface Water Supply Index, SWSI)(Shafer and Dezman, 1982) 등이 있다.

그러나 지금까지 개발된 가뭄지수는 대부분 강수량, 기온 등 기상요소만을 이용하여 정보를 생산하고 있으며, 이는 기상학적 측면의 가뭄을 표현하고 있다는 한계가 있다. 농업이나 수문학적 가뭄은 PDSI, SPI 등 기상학적 요소 기반 가뭄지수를 이용하여 모니터링 등에 활용하고 있는 상황으로, 농업 및 수문학적 가뭄이 갖는 특성을 정확하게 반영하기 어렵다. 특히 일반 국민들이 직접 체감하는 가뭄을 모니터링하기 위해서는 물 수요 공급을 담당하는 수원의 상황을 고려하고 지역의 물 수요-공급 네트워크를 고려한 정보 생산이 필요하다. 그러나 기존 가뭄지수 중 SWSI를 제외하면 물 공급원 및 물 수급 네트워크 기반 가뭄 평가 도구가 부족한 상황이다.

물 수요에 대한 공급은 댐, 저수지, 하천, 지하수 등 물 공급원과 취수시설 등 공급시설로 이루어진 네트워크를 통해 이루어진다. 물 공급을 위한 체계는 복잡한 네트워크로 구성되어 운영되고 있으며, 물 공급원의 부족으로 인해 초래되는 수문학적 가뭄의 모니터링을 위해서는 물 수급 네트워크 구성요소들에 대한 고려가 필수적이라 할 수 있다. 어떤 지역에 대한 수문학적 가뭄 평가를 위해서는 해당 지역의 물 공급 네트워크를 검토하고 이를 구성하는 물 공급원을 고려하여야 한다. Moon et al.(2011)은 이러한 점을 고려하여 가뭄을 정량화할 수 있는 방법으로 물가용지수(Available Water Index, AWI)를 제안하였다. 이에 본 고에서는 AWI의 방법론을 소개하고 기존 가뭄지수와 비교 검토를 수행하였으며, 그 결과에 대한 검토를 통해 수문학적 가뭄 모니터링 과정에서의 활용 방안을 제시하고자 하였다.

## 02 물가용지수 (Available Water Index, AWI)

AWI는 물 공급 체계를 기반으로 각각의 물 공급원에 대한 현재 공급능력을 평가한 후 그 결과를 바탕으로 가뭄 수준을 판단하는 방법이다. 지수 산정 과정에서 하천수, 댐 및 저수지, 지하수 등 다양한 물 공급원을 반영할 수 있다는 장점이 있으며, 구성요소별 중요도를 의미하는 가중치를 공급원별로 수요처에 공급하고 있는 양에 바탕을 두고 있다는 점이 특징이라 할 수 있다. 기존 가뭄지수 중 SWSI 또한 지역의 물 공급 체계를 검토한 후 해당 지역의 가뭄지수를 산정하기 위한 수식 구성 과정에서 물 공급 관련 요소를 반영토록 하고 있으나 SWSI에서는 통계적인 방법에 의해 가중치를 산정하고 있다는 점이 차별점이라 할 수 있다. 우리나라에서 가장 대표적인 물 공급원은 하천과 댐 및 저수지를 고려할 수 있으며, 각각에 대한 공급능력을 평가하는 방법을 별도로 설정하고 있다.

먼저 하천수에 대한 공급능력은 가뭄을 판단하고자 하는 지역의 3개월 누가강수량을 고려하는 방법을 이용하고 있다. 3개월 지속기간 누가강수량을 이용하여 시계열을 구성하고 비초과확률을 산정하여 하천수 공급능력을 평가하는 방법을 채택하였다. 비초과확률을 이용하는 방법은 현재의 상황이 과거 대비 어느 정도의 수준인가를 통계학적으로 판단하는 방법이라 할 수 있으며, SWSI 방법론에서도 고려하고 있다. 두 번째로 댐 또는 저수지에 대한 공급능력 평가는 Lee et al.(2006)에 의해 제시된 바 있는 물공급능력지수(Water Supply Capacity Index, WSCI)를 이용하고 있다. WSCI는 댐이나 저수지에 대해 설정되어 있는 월별 공급 계획량과 해당 시설의 현재 저수량과 비교하여 산정되는 지수로 향후 댐이나 저수지로의 유입량이 없는 최악의 상황에서의 공급능력을 나타낸다.

이처럼 가뭄 상황을 판단하고자 하는 지역에 대한 물 공급 체계를 파악한 후 해당 네트워크를 구성하는 공급원을 고려하여 다음 식과 같이 지수 산정 식을 나타낼 수 있다.

$$AWI = \frac{a_1 PN_{S_1} + a_2 PN_{S_2} + \dots + a_n PN_{S_n} - 50}{12} \quad (1)$$

여기서,  $PN$ 은 물 공급 네트워크를 구성하는 공급원별로 산정된 비초과확률을 의미하며,  $a$ 는 공급원별 기여도를 나타내는 가중치로 모든 가중치의 합은 '1.0'이 되어야 한다. 가중치와 비초과확률을 곱한 후 합산한 결과에서 50을 감한 후 12로 나누어 준 것은 산정된 지수의 범위를 PDSI와 유사한 범위를 갖도록 제한하기 위한 것으로 SWSI 산정 공식과 그 형태가 같다. 식 (1)을 이용하여 AWI를 산정하고자 할 경우 물 공급원별 가중치를 결정하여야 하며, 공급원별로 배분되어 있는 공급계획량을 이용하여 가중치를 산정하고 있다. 즉, 수요처의 전체 수요량 대비 물 공급원별 공급량의 비율을 산정하고 그 결과를 가중치로 이용하는 것이다. 지역별로 물 공급 네트워크가 다르므로 지역별 지수 산정 식은 다르게 구성되며, 공급원별 가중치 또한 다른 값을 갖는다. 따라서 AWI를 산정하기 위해서는 먼저 가뭄 상황을 판단하고자 하는 지역의 물 공급 체계를 조사하고 어떤 물 공급원을 고려하게 되는지 판단하여야 한다. 이를 통해 지수 산정 식과 공급원별 가중치를 결정하고 최종적으로 지수를 산정함으로써 해당 지역의 물 공급 네트워크 기반 수문학적 가뭄 상황 파악이 가능하다.

### 03 적용 및 결과 검토

AWI 적용성 검토를 위해 서울 등 23개 지역을 선정하고 해당 지역에 대한 물 공급 체계를 조사하였다. 23개 지역에 대해 물 공급원별 공급량을 조사한 후 가중치를 산정하였으며, 그 결과는 표 1과 같다. 표 1의 결과를 이용하여 서울 지역의 AWI 산정 식을 나타내면 다음 식 (2)와 같다.

$$AWI_{서울} = \frac{0.30 PN_{prep_{서울}} + 0.12 PN_{WSCI_{소양강댐}} + 0.58 PN_{WSCI_{충주댐}} - 50}{12} \quad (2)$$

23개 지역에 대해 식 (2)의 형태로 지역별 지수 산정 식을 구성한 후 AWI를 산정하였으며, 적용성의 판단을 위한 검토를 수행하였다. 결과 검토 방법은 먼저 광동댐 고갈 등으로 심각한 가뭄 피해가 발생했던 태백 지역에 대해 2008년과 2009년의 가뭄 상황을 AWI와 기존 가뭄지수를 이용하여 검토를 수행하였으며, 두 번째로 23개 지역에 대해 산정된 AWI와 PDSI, 5가지 지속기간을 갖는 SPI(1, 3, 6, 9, 12개월)와 상관 분석을 수행하였다.

표 1. 분석 대상 지역에 대한 물 공급원별 가중치의 결정

광역시도	지역명	지역별 물 공급원 및 가중치
서울 경기	서울	소양강댐(0.120), 충주댐(0.580), 하천수(0.300)
	수원	소양강댐(0.313), 충주댐(0.545), 하천수(0.142)
	이천	충주댐(0.740), 하천수(0.260)
	양평	소양강댐(0.140), 하천수(0.860)
강원	춘천	소양강댐(0.740), 하천수(0.260)
	원주	황성댐(0.420), 하천수(0.580)
	태백	광동댐(0.730), 하천수(0.270)
대전 충남	대전	대청댐(0.830), 하천수(0.170)
	천안	대청댐(0.870), 하천수(0.130)
	보령	보령댐(0.820), 하천수(0.180)
충북	청주	대청댐(0.910), 하천수(0.090)
	충주	충주댐(0.590), 하천수(0.410)
	제천	충주댐(0.020), 하천수(0.980)
전북	전주	용담댐(0.770), 하천수(0.230)
전남	순천	주암조절지댐(0.410), 하천수(0.590)
대구 경북	대구	안동댐(0.726), 운문댐(0.188), 하천수(0.086)
	포항	임하댐(0.210), 영천댐(0.350), 하천수(0.440)
	구미	임하댐(0.730), 하천수(0.270)
울산 경남	울산	합천댐(0.690), 사연댐(0.130), 대암댐(0.030), 하천수(0.150)
	진주	남강댐(1.000)
	통영	남강댐(0.970), 하천수(0.030)
	밀양	밀양댐(0.730), 하천수(0.270)
	거제	남강댐(0.580), 구천댐(0.210), 연초댐(0.170), 하천수(0.040)

강원도 태백 지역은 광동댐과 하천수를 통해 물을 공급받고 있는 지역으로 두 가지 물 공급원을 고려할 수 있다. 태백 지역은 2008~2009년까지 우리나라에서 발생했던 가뭄의 피해가 가장 심각했던 것으로 알려져 있으며, 예년에 비해 매우 적은 양이 발생했던 가을철 강수량이 가뭄의 근본적인 원인이었다. 태백 지역은 광동댐을 통해 물 수요의 70% 이상을 공급받고 있어 광동댐의 저수 상황이 가뭄 대비에 있어 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 태백 지역의 AWI를 산정하기 위해 강수량과 광동댐 자료를 수집하여 분석하였으며, 그림 1은 2008~2009년의 3개월 지속기간 누가강수량과 광동댐 WSCI에 대한 비초과확률 시계열을 나타내고 있다. 그림 2는 이를 이용하여 산정된 태백 지역 AWI를 도시하여 나타낸 것이다.

결과를 통해 2008~2009년 태백 지역 가뭄은 2008년 이후 지속된 강수량 부족이 누적되어 발생한 것으로 판단되며, 여름철에도 충분한 비가 내리지 않아 광동댐의 저수량이 회복되지 못한 점이 복합적으로 영향을 미쳐 발생한 것으로 판단된다. 가뭄의 징후는 2008년 7월부터 나타나고 있었던 것으로 판단할 수 있으나 장마철 홍수

대비 등 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하여 효과적인 가뭄 대처가 이루어지지 못한 것으로 판단된다. 산정된 AWI에 의하면 태백 지역 가뭄은 2008년 11월에 가장 심각했던 것으로 나타났으며, 이후 점차 호전되어 2009년 6월 이후로는 가뭄이 해결된 것으로 보인다. 그러나 광동댐에 대한 제한급수는 2009년 1월에 시작되어 이후 총 4개월 동안 시행되는 등 효과적인 가뭄 대처가 미흡했던 것으로 판단된다. 만약 2008년 7월부터 가뭄 발생 상황을 파악하고 사전에 대책을 마련하여 시행하였을 경우 가뭄으로 인한 피해를 최소화할 수 있었을 것으로 보인다.

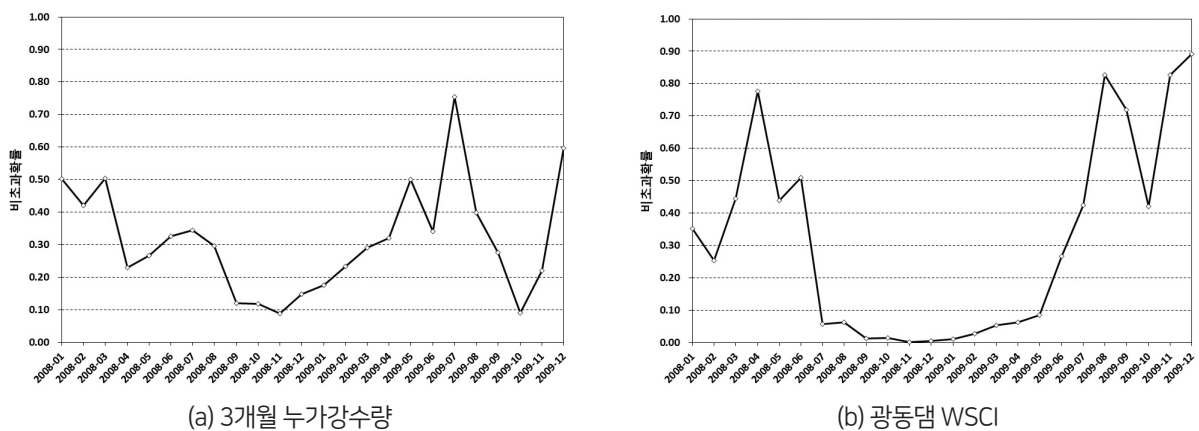


그림 1. 태백 지역 AWI 산정을 위한 구성요소별 비조과확률(2008~2009년)

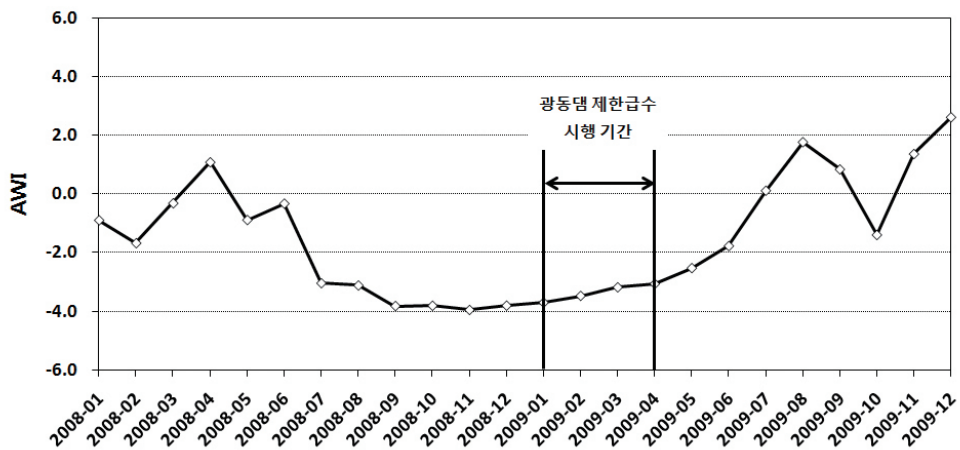


그림 2. 태백 지역 AWI 산정 결과(2008~2009년)

이번에는 AWI와 PDSI 등 기존 가뭄지수와 상관분석을 수행하였다. 이때 고려한 기존 가뭄지수는 PDSI와 5가지 지속기간 SPI(1, 3, 6, 9, 12개월)이며, 서울 등 23개 지역의 결과를 비교하였다. 표 2는 상관분석 결과를 지역별로 정리하여 나타낸 것이다.

표 2. AWI와 기존 가뭄지수 간 상관분석 결과

지점명	상관계수					
	PDSI	1개월 SPI	3개월 SPI	6개월 SPI	9개월 SPI	12개월 SPI
서울	0.582	0.291	0.665	0.560	0.452	0.397
수원	0.680	0.189	0.542	0.567	0.523	0.445
이천	0.662	0.287	0.652	0.619	0.556	0.502
양평	0.509	0.495	0.957	0.664	0.490	0.417
춘천	0.501	0.213	0.600	0.557	0.489	0.391
원주	0.454	0.409	0.870	0.691	0.584	0.512
태백	0.396	0.262	0.583	0.480	0.382	0.260
대전	0.661	0.275	0.580	0.669	0.659	0.572
천안	0.512	0.223	0.506	0.549	0.497	0.418
보령	0.606	0.140	0.383	0.544	0.600	0.584
청주	0.583	0.200	0.498	0.593	0.581	0.498
충주	0.677	0.384	0.789	0.687	0.598	0.510
제천	0.485	0.476	0.975	0.578	0.404	0.310
전주	0.714	0.277	0.628	0.565	0.609	0.511
순천	0.465	0.439	0.854	0.627	0.558	0.471
대구	0.685	0.188	0.491	0.647	0.761	0.723
포항	0.635	0.467	0.863	0.748	0.674	0.596
구미	0.657	0.352	0.681	0.630	0.596	0.521
울산	0.609	0.301	0.595	0.659	0.689	0.588
진주	0.483	0.327	0.537	0.453	0.336	0.252
통영	0.039	0.242	0.473	0.324	0.154	-0.038
밀양	0.504	0.267	0.656	0.507	0.533	0.443
거제	0.448	0.344	0.703	0.647	0.549	0.391
평균	0.545	0.306	0.656	0.590	0.534	0.447

상관분석 결과, AWI와 PDSI 및 5가지 SPI 간 상관계수는 평균 0.30~0.66 정도의 범위로 나타나고 있으며, 3개월 SPI가 가장 높은 상관관계를 나타내고 있다. 수문학적 가뭄을 모니터링하기 위해 많이 이용되고 있는 PDSI나 9개월 및 12개월 지속기간 SPI와 상관관계가 상대적으로 낮게 나타나고 있다. 이는 기존 가뭄지수들이 강수량 등 기상학적 요소 위주로 가뭄을 평가하고 있어 물 공급원의 상황을 고려하여 산정되는 AWI와의 상관관계가 비교적 낮게 나타나고 있는 것으로 판단된다. 물 공급 부족에 따라 나타나는 수문학적 가뭄은 비가 충분히 내리더라도 이용 가능한 물이 부족한 상황이 발생하면 가뭄으로 판단하게 되며, 반대로 비가 정상상태 대비 부족한 상황이라도 댐 등에 충분한 수자원이 확보되어 있을 경우 가뭄이 아닌 것으로 판단할 수 있다. 이러한 점을 고려할 때 AWI와 기존 가뭄지수들 간 차이가 발생하는 것은 수문학적 가뭄 모니터링에 있어 AWI의 활용성을 나타내주는 결과라 할 수 있다.

## 04

## 결론 및 제언

지금까지 본 고에서는 수문학적 가뭄을 보다 효과적으로 모니터링하기 위한 방안으로 지역의 물 수급 체계를 반영하는 방법을 검토하여 제시하였다. 이를 위해 가뭄 모니터링을 위한 정보 생산 과정에서 물 수급 체계 반영이 가능한 가뭄지수로 제안된 바 있는 AWI를 이용하는 방안을 검토하였다. AWI는 기존 가뭄지수와 상관계수를 수행한 결과, 0.30~0.60의 범위로 상관계수가 산정되었으며, 3개월 지속기간 SPI, 6개월 지속기간 SPI, PDSI의 순으로 상관관계가 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 기존 가뭄지수와 AWI의 관계에 있어 차이가 나타나는 원인으로는 지수 산정 과정에서 고려하는 특성의 차이에 따른 결과로 판단된다. AWI는 지수 산정 과정에서 지역의 물 수급 체계를 바탕으로 물 공급원의 공급 능력을 고려하고 있어 기상상황과 함께 댐 및 저수지에 확보된 수자원의 양적 변동도 반영된다는 특징이 있다. 따라서 강수의 부족으로 인해 SPI나 PDSI에서 가뭄 상황이 발생한 것으로 판단되는 경우에도 댐이나 저수지에 이용 가능한 수자원이 충분히 확보되어 있을 경우 AWI는 정상 상태로 판단하게 될 가능성이 있다. 이는 기존 가뭄지수를 이용하여 파악하기 어려운 수문학적 가뭄을 확인하는 과정에서 AWI가 유용하게 활용될 수 있음을 의미하는 결과라 할 수 있다. 이처럼 기존 가뭄지수를 통해 기상학적 상황에 대한 정보를 생산하여 제공하고 AWI와 같이 물 수급 체계에 대한 고려가 가능한 지수를 활용함으로써 보다 효과적인 수문학적 가뭄 모니터링이 가능할 것으로 판단된다. 또한 AWI는 수문학적 가뭄에 대한 대응 방안의 적절성을 평가하는 과정에서도 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 지속적인 연구를 통해 보다 효율적인 체감형 가뭄 상황 판단지표를 개발하기 위한 노력이 이루어질 필요가 있다.

## 참고문헌

McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kieist, J.(1993), The Relationship of Drought Frequency and Duration of Time Scales, Eighth Conf. on Applied Climatology, Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc., pp. 179~184.

Moon, J.W., Lee, D.R., Kim, T.W., and Kim, J.H. (2011), Development of New Drought Index to Monitor Droughts, Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference, KWRA, Daegu, p. 418.

Palmer, W.C.(1965), Meteorological Drought, U.S. Dept. of Commerce Weather Bureau, Research Report No. 45.

Shafer, B.A., Dezman, L.E.(1982), Development of Surface Water Supply Index to Assess the Severity of Drought Conditions in Snowpack Runoff Areas, Proceedings of the Western Snow Conference, pp. 164~175.