

04

호주 기상청의 수자원 예보 서비스에
대한 소개

신대혁
(Daehyok Shin)
Supervising Professional
Officer-Hydrology
Bureau of Meteorology
Head Office, Melbourne Australia
daehyok.shin@bom.gov.au

1. 들어가는 말

호주는 인간이 상주하는 대륙 중 가장 건조한 대륙이다. 이는 남회귀선이 대륙의 중앙을 관통하는 지정학적인 위치 때문인데 연안지역을 제외한 대부분의 지역이 고기압의 영향으로 매우 건조한 기후를 가지고 있다. 아울러 인도양, 태평양, 그리고 남극 연안에서 일어나는 다양한 대기-해양간의 상호작용이 호주의 기상에 영향을 미치고 있는데 이 중 특히 엘니뇨/라니냐로 잘 알려진 태평양 적도에서 일어나는 대기-해양간의 상호작용은 호주 남동부의 강우와 유량에 심각한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

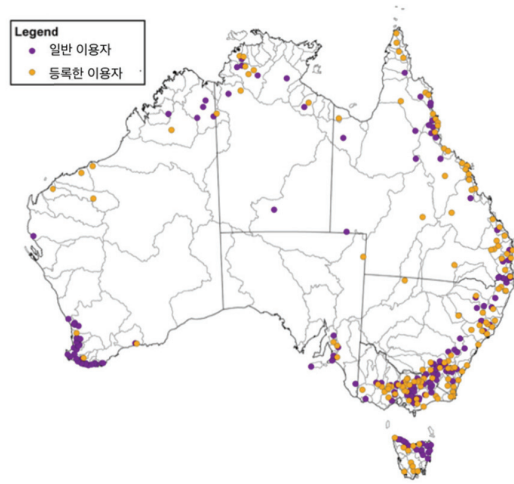
이 같은 기후의 특성으로 인해 호주는 늘 극심한 가뭄의 위험에 시달려 왔다. 예를 들어 1895년에서 1902년까지 Federation Drought라 불리는 대가뭄을 겪었으며, 1937년부터 1945년까지 WWII Drought라 불리는 대가뭄을 견뎌야 했다. 특히 2001년부터 2009년까지 발생한 Millennium Drought라는 대가뭄으로 인해 호주 동부의 관개농업 지역인 Murray Darling River 유역은 농업생산량에 심각한 타격을 입었고, Adelaide를 비롯한 주요 도시는 정상적인 도시 기능을 유지할 수 없는 지경에 이르렀다. 이로 인해 도시에서의 물 사용량은 극도로 제한되었고, 전기요금도 폭등하였으며, 많은 농민들이 생업을 포기해야만 했다. 또한, 대규모의 덩불 화재(bushfire)가 곳곳에서 발생하였다(van Dijk et al., 2013).

이 같은 위기를 극복하기 위해서 2007년 1월 26일 당시 호주 수상이었던 The Hon. John Howard는 National Plan for Water Security를 발표하고 이를 Water Act 2007로 입법화했다. 이 때 주요 계획 중 하나가 수자원 정보의 질적·양적 발전을 위한 연방정부 차원의 대규모 투자였다. 호주 기상청은 이 계획의 실행 책임을 맡게 되었는데, 이를 계기로 기상청의 수문 관련 프로그램이 크게 확충되었으며 기존의 홍수 예측 서비스를 넘어 수자원 자료의 수집과 분석 그리고 예보에 걸친 다양한 프로젝트와 서비스가 개발되었다(Vertessy, 2018). 현재 운용 중인 다양한 수자원 관련 서비스는 <http://www.bom.gov.au/water>에서 찾아볼 수 있다. 본 기사에서는 수자원 예측과 관련된 세 가지 주요 서비스에 대해 소개하고자 한다.

2. Seasonal Streamflow Forecasting Service

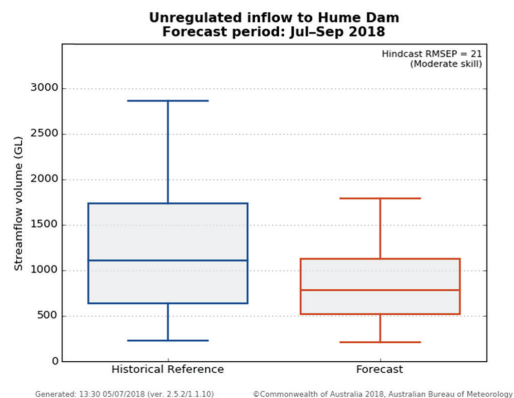
Seasonal Streamflow Forecasting(SSF) 서비스는 호주 기상청이 Water Act 2007에 따라 연방 정부의 지원을 받아 개발한 첫 수자원 계절예측정보 제공 서비스이다. 이 서비스의 주요 목적은 점차 증가될 것으로 예상되는 수자원 부족으로 인한 리스크에 대비하기 위한 것으로, 주요 수자원 공급을 담당하는 유역내 하천의 유량과 주요 댐의 총 유입량에 대한 예측정보를 제공하고 있다. 특히 이 서비스는 가뭄의 발생 시점과 회복 시점에서의 수자원 변화를 예보하는 것을 주목적으로 하고 있다.

2009년 호주 동남부의 14개 지점을 대상으로 시작된 서비스는 계속 대상 지역을 확장하여 현재 호주 전역에 걸쳐 150여 곳의 유역에 대한 예측정보를 제공하고 있다(지도 참조).



일반인들에게 제공되고 있는 예보는 <http://www.bom.gov.au/water/ssf> 사이트에서 확인할 수 있으며, 보다 전문적인 정보는 별도의 웹사이트를 통해 등록된 사용자에게 한해 제공되고 있다.

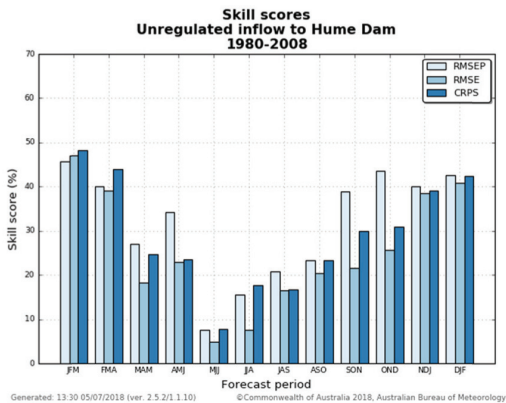
SSF 서비스는 매달 해당 서비스 유역에서 향후 3개월 동안 발생할 수 있는 유량의 통계적 분포와 과거 유량 분포를 비교한 결과를 여러 가지 그래프와 표로 제공한다. 그 중 가장 대표적인 그래프는 다음과 같다.



이 그래프는 2018년 7월부터 9월까지 호주 동남부의 주요 댐 중 하나인 Hume Dam의 총유입수량을 예측한 것이다. 붉은색의 boxplot은 예측 수

량을, 파란색의 boxplot은 과거 1980년에서 2008년 동안의 7월부터 9월까지 실제로 관측된 유입량의 분포를 보여 주고 있다. 두 boxplot의 비교에서 금년(2018)에는 예년에 비해서 상당히 적은 유입수량을 가질 확률이 높다는 것을 알 수 있다. 그림과 같이 유량에 대한 예보를 통계적 분포로 제시함으로써 예측정보의 불확실성에 대한 중요한 정량적 정보도 함께 사용자에게 제공하고 있다.

SSF 서비스는 유량 예측 결과뿐만 아니라 그 예보의 질적 수준을 가늠할 수 있는 검증 자료도 제공하고 있다. 검증 결과는 대상 지점의 과거 약 30년 동안의 관측 자료와 그 시기의 예보 자료를 비교해서 산출된다. 대표적인 검증 자료가 skill score plot이다.



Skill score는 예측정보의 정확도를 보여주는 척도로서, 쉽게 설명하면 skill score가 0.2라 함은 제공되는 예측정보가 과거 관측된 유량의 분포를 그냥 사용하는 것에 비해 20% 더 나은 정확성을 제공한다고 할 수 있다. 이 그래프에서 볼 수 있듯이 skill score는 해당 유역의 계절적 유량 패턴에 따라서 변하게 된다. 또한, skill score로 무엇을 쓰느냐에 따라 정확도를 계산하는 방법이 달라지

기 때문에 검증 결과에 차이가 있을 수도 있다. 이런 의미에서 각 skill score의 장점과 한계를 정확히 이해하고 검증 결과를 해석하는 것이 중요하다.

실제로 예측정보 검증 과정은 장기간에 걸친 반복적인 모형 재보정과 예보를 반복해야 하는 복잡한 과정으로 상당한 시간과 노력이 필요하다. 이를 보다 효과적으로 지원하기 위해 SSF 팀은 대규모의 클러스터(cluster) 시스템을 이용한 병렬 처리를 이용하고 있다. 예보 검증의 전자동화와 효율 향상은 사실 새로운 모델링이 가져올 서비스의 질적 향상을 빠르고 객관적으로 평가하는데 중요한 역할을 담당하고 있다. 따라서 이에 대한 투자는 서비스의 지속적인 발전을 위해 필수적이라 할 수 있다.

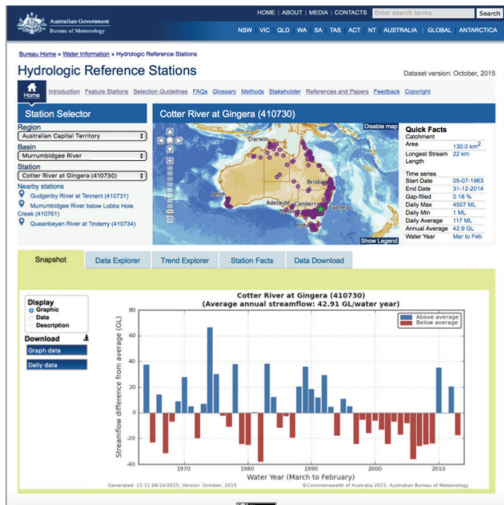
현재 SSF 서비스는 유량 예측을 위해서 호주 의 한국과학기술원(KIST)에 해당하는 CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation)에서 개발한 BJP (Bayesian Joint Probability) 모델링 방법을 사용하고 있다(Wang et al, 2009). 이 방법을 간단히 설명하면 관측 유량과 주요 기후지수와의 유의미한 통계적인 관계를 Bayesian 모형을 통해 알아내고, 이를 미래 유량 예측에 사용하는 방법이라 할 수 있다. 이 방법은 대기-해양간의 상호작용과 강우량이 밀접한 관계를 갖고 있는 호주(특히 동남부지역)에서 강우와 유량의 변화를 모형화할 수 있는 장점을 가지고 있다.

호주 기상청이 SSF 서비스를 운영한지 십 년이 되어가고 있는 지금, 이 서비스에서 매달 제공되는 유량 예측정보는 다양한 분야에서 활용성이 증대되고 있다. 특히 기상청은 하천 유량이나 댐 저수량의 운영과 관리를 담당하는 기관들과 지속적으로

협력을 강화하고 있는데, 이에 대한 자세한 내용은 해당 웹 사이트(http://www.bom.gov.au/water/ssf/case_studies.shtml)를 참조하기 바란다.

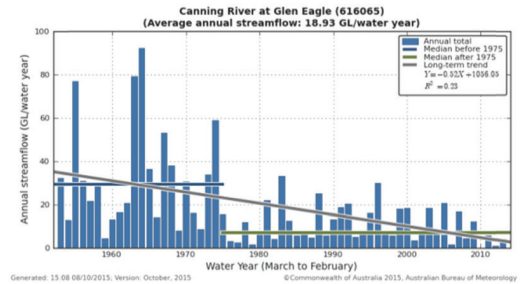
3. Hydrologic Reference Stations Service

Hydrologic Reference Stations(HRS) 서비스는 기후 변화로 인한 장기적인 수자원 변화에 대한 정보를 제공하기 위해 개발된 서비스이다. 이 서비스는 측정된 유량 자료의 추이 분석을 통해 산출되는 경험적 자료를 장기적인 수자원 변화의 기본 자료로서 제공하고 있다(<http://www.bom.gov.au/water/hrs/>).



현재 약 70 여 개 수자원 관계기관과 협력해 엄격한 기준으로 선정된 200여 곳의 장기간 유량 관측 자료와 추이 분석 결과를 제공하고 있다. 유역 선정의 기준에는 1) 적어도 30년 이상의 신뢰성 높은 유량 자료를 보유하여야 하며, 2) 댐이나 관개와 같은 인간 활동에 의한 영향을 받지 않아야 하며, 3) 다양한 기후대에 걸쳐 고르게 분포되어야 한다는 조건이 포함된다.

호주기상청은 유량의 장기간 추이를 자동으로 통계 분석하고, 각종 그래프, 표 등을 생성, 출판할 수 있는 HRS Toolkit을 개발하여 운영하고 있다. 추이 분석을 위해서는 Mann-Kendall Test, Median Crossing, Rank Difference 등의 통계 방법이 적용되고 있다.

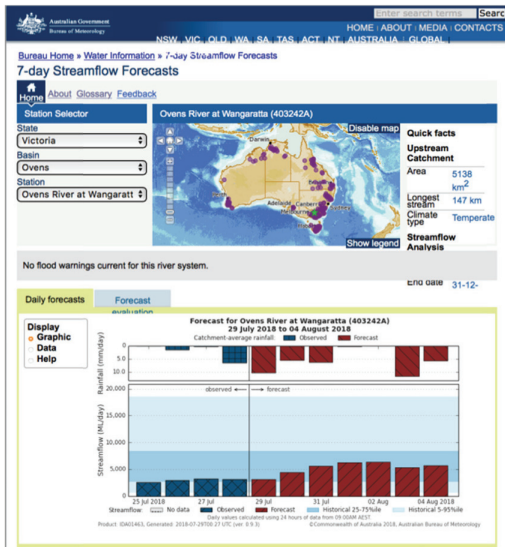


서호주의 수도 Perth 근처에 위치한 Canning River의 유량을 분석한 자료는 다음 그림과 같다. 추이 분석 결과에서 볼 수 있듯이 해당 유역은 1975년을 분기점으로 급격한 유량 감소를 겪고 있다. 사실 지난 수 십 년간 서호주의 대부분 지역들이 심각한 수자원 부족에서 벗어나지 못하고 있어, 이 지역 수자원 공급의 대부분을 지하수와 담수화 공장에 의존하고 있는 실정이다.

HRS에서 서비스되는 자료는 다양한 분야에서 활용되고 있는데, 장기적인 기후 변화가 수자원에 미치는 영향에 대한 연구, 새로운 수자원 공급지 선정, 유역간의 수자원 공유, 수자원 모델링을 위한 기초 자료 등으로 사용되고 있다. 이 서비스의 자료는 2년에 한번씩 갱신될 예정이며, 이와 더불어 서비스 유역의 추가, 자료의 신뢰도 향상, 그리고 보다 나은 추이 분석을 위한 투자가 꾸준히 이루어질 예정이다.

4. 7-Day Streamflow Forecasting Service

호주기상청의 수자원 예보와 관련된 또 하나의 대표적인 서비스는 7-Day Streamflow Forecasting (SDF) 서비스이다(<http://www.bom.gov.au/water/7daystreamflow/>; Hapuarachchi et al., 2016).

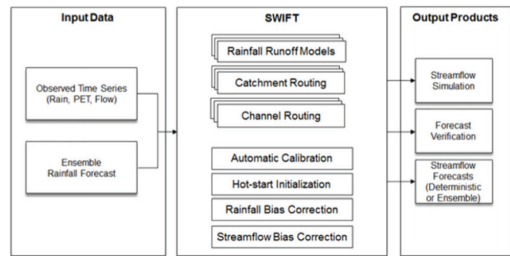


이는 최근에 변화된 기상 패턴의 직접적 영향을 받는 유량의 단기적 변화를 예보하기 위해 개발된 서비스이다.

이 서비스는 현재 호주 전역에 걸쳐 150여 개 유역에 대해서 매일 앞으로 7일동안(7일 선행)의 유량 변화를 예측한다. 또한 예측 자료에 대한 검증 자료도 함께 제공하고 있다.

이 서비스에서 사용하는 모의 시스템은 Delft의 FEWS(Flood Early Warning System; <http://oss.deltares.nl/web/delft-fews/>)를 기반으로 한 HyFS(Hydrological Forecasting System)

를 사용해서 개발했다. 이 시스템은 각종 입력 자료와 수치 기상 예측 자료의 수집, 다양한 모의 작업 관리, 모형의 내부 상태 관리 그리고 모의 결과의 시각화 등을 위한 기능을 제공하고 있다. 현재 수문기상자료는 호주기상청에서 운영 중인 ACCESS-G(Australian Community Climate and Earth-System Simulator-Global)에서 실시간으로 제공받고 있다.



이 시스템의 핵심 수문 모의는 SWIFT(Short-term Water Information Forecasting Tools)에서 담당하는데, 이는 복잡한 하천 유역에서 다양한 수문 모형의 보정, 모의 그리고 검증을 지원한다. 서비스 운용의 전 과정은 자동화 되어 있으며 매일 현지 시간 오전 9시에서 10시 사이에 갱신된 유량 예측 정보를 제공하고 있다.

이 서비스는 수자원의 실제적 운용에 다양하게 이용되고 있다. 관개 시스템의 물 사용량을 줄이고 강과 습지 생태계가 필요한 수량을 공급하며 하천 시스템과 댐의 실시간 운용에도 사용되고 있다. 또한, 낚시, 캠핑과 같은 각종 레저 활동의 참조 자료로도 활용되고 있다.

5. 맺음말

전세계적으로 지금까지 많은 수자원 예측 서비스가 홍수와 같은 단기간의 재난 예보를 목적으로 개발, 운용되어 온 것이 현실이다. 하지만 장기간에 걸쳐 서서히 그러나 그 정도가 지속적으로 심화되고 있는 기후 변화가 수자원에 미치는 영향을 제대로 예보하기 위해서는 중장기의 수자원 예측에 대한 대규모 투자가 필요하다. 특히 호주는 지정학적인 특성으로 인해 상시적인 물 부족 문제를 경험하고 있으며, 이를 극복하기 위해 중장기 수자원 예측 기술과 서비스 개발에 다양한 노력과 투자를 지속하고 있다. 그 중에서 본 저자는 현재 호주기상청에서 제공하고 있는 세 가지 수자원 관련 서비스에 대해서 간단히 소개했다. 이 서비스들의 실제 운용을 통해 취득한 풍부한 경험과 장단기 강우량 예측, 유량 모의, 강우량 및 유량 모의 후처리 등의 기술 분야에서 유용한 교류가 가능할 것으로 생각한다. 그런 관점에서 이 글이 수자원 예측 분야에 있어서 한국과 호주의 보다 활발한 교류를 여는 단초가 되었으면 하는 바램을 가져본다.

6. 감사의 글

호주에서 개발, 운용되고 있는 수자원 관련 서비스에 대한 각별한 관심을 가지고 이 글을 투고할 수 있도록 도와주신 조재필 박사께 감사합니다. 아울러 영문과 한글이 뒤섞인 부족한 초고를 깔끔하게 다듬어 주신 정일원 박사에게도 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Hapuarachchi, P., A. Kabir, S. Zhang, N. Tuteja, D. Enever, D. Kent, M. Bari, and D. Shin. Development of an operational 7-day streamflow forecast service for Australia. In OzWater, 2016.
2. van Dijk, A. I. J. M., H. E. Beck, R. S. Crosbie, R. A. M. de Jeu, Y. Y. Liu, G. M. Podger, B. Timbal, and N. R. Viney. The Millennium Drought in southeast Australia (2001–2009): Natural and human causes and implications for water resources, ecosystems, economy, and society. *Water Resources Research*, 49:1040–1057, 2013.
3. Vertessy, R. Water information services for Australians. *Australian Journal of Water Resources*, 16:91, 2013.
4. Wang, Q. J., D. E. Robertson, and F. H. S. Chiew. A Bayesian joint probability modeling approach for seasonal forecasting of streamflows at multiple sites. *Water Resources Research*, 45:W05407.