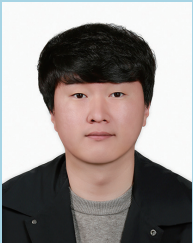




위성기반 가뭄지수 개발 및 센서기반 가뭄평가요소 관측망 설계



김진욱
건국대학교 박사수료
saertt@konkuk.ac.kr



이현석
(주)에이치큐테크
leehs@hqtech.kr



김성준
건국대학교 교수
kimsj@konkuk.ac.kr

01 서론

가뭄은 강수량 부족과 그에 따른 수문학적 불균형으로 인해 자연적으로 발생하는 현상이다. 이는 농작물을 시들게 하여 식량 안보와 경제적 안정성에 광범위하게 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 위성기반의 관측은 관측 센서와 알고리즘 적용 여부에 따라 지표면의 다양한 정보를 산출할 수 있으며, 시공간적 제약이 적은 넓은 지역에 일관된 시계열 데이터를 제공하여 지상기반 지점 관측을 통한 가뭄 분석을 보완해 예측되지 않는 유역의 가뭄을 판단하기 위해 사용되어 왔다(최가영 및 조영현, 2022).

위성영상 기반의 원격탐사는 가뭄 관련 변수를 모니터링하기 위해 다중 스펙트럼, 열적외선 및 마이크로파 데이터를 활용한다. 이를 통해 토양수분, 증발산량 등의 가뭄 관련 변수의 검색을 가능하게 하며, 식물의 광합성 능력을 평가함으로써 식물의 건강과 성장을 포함한 가뭄 생태계 영향을 평가한다(AghaKouchak et al, 2015). 최근 알고리즘의 개발, 클라우드 기반 컴퓨팅 및 저장용량의 증가로 가뭄 연구를 위한 원격감지의 적용 가능성이 크게 향상되었으며 다양한 발전과 함께 가뭄 분야에서의 위성영상 활용 모니터링 연구가 점점 증가하고 있다(Jiao et al., 2021).

국민 맞춤형 가뭄정보 생산기술을 위해 광범위한 가뭄 모니터링 및 공간정보 생산을 위한 위성영상 자료는 필수적이다. 실제 미국

국립가뭄경감센터(NDMC)에서는 지상기반 관측자료 기반의 SPI, PDSI와 함께 원격탐사 기반의 식생지수인 VegDRI(Vegetation Drought Response index) 등 위성영상을 포함한 가뭄 감시 도구를 제공하여 필요한 정보를 활용할 수 있도록 구성한 바 있다. 또한 유럽의 EDO(European Drought Observatory)에서는 위성영상 기반으로 측정된 FAPAR(Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) anomaly를 제공하며, 통합가뭄지수인 CDI(Combined Drought Indicator)의 일부로 위성기반으로 측정된 식생조건 등을 포함하고 있다.

한편, 국민 맞춤형 가뭄 예·경보를 위한 통합가뭄에 있어 많은 연구에서 현장 관측과 위성영상 데이터의 관측치를 결합하여 다변량 지수를 개발하기 위해 노력하고 있다. 위성영상이 결합된 통합가뭄지수를 생산하기 위해서는 준실시간(7일~16일)으로 영상 기록 길이가 상대적으로 짧은 시간해상도의 문제와 위성영상을 통합할 경우 서로 다른 센서에서 발생할 수 있는 변수 간 공간적, 시간적, 스펙트럼 해상도 등의 불일치를 해결해야 한다(Jiao et al, 2021). 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하면서도 위성영상의 장점인 미세측 영역까지 포괄하는 가뭄 모니터링의 중요한 자료원으로 활용하기 위한 가뭄 변수로 토양수분 및 증발산량을 산정하고 이를 기반으로 하는 농업, 수문학적 가뭄지수를 개발하고자 하였다.

02
기술개발 현황 및 동향

2.1 토양수분 개발 동향

토양수분은 토양 입자 사이 공극에 존재하는 물의 양을 말한다(Wanger et al., 1999). 위성기반 토양수분 관측에는 대표적으로 광학위성을 기반으로 작물의 물 스트레스 지수, 식생 캐노피, 지면온도 등의 지표면 매개변수와 토양수분간 경험적 관계를 기반으로 추정하는 간접추정 방법과 마이크로파 위성을 활용하여 밝기 온도(T_B) 혹은 후방산란계수를 활용하는 직접추정 방법이 있다.

간접추정 방식에는 Landsat과 MODIS의 위성영상을 주로 활용한다. Landsat은 미국 NASA(National Aeronautics and Space Administration)에서 운용 중인 위성으로 1972년부터 관측을 시작하였으며 현재는 Landsat 7호의 ETM+(Enhanced Thematic Mapper) 및 OLI(Operational Land Imager)와 TIRS(Thermal Infrared Sensor)가 탑재된 Landsat 8호 및 9호가 운영되며 식생, 농작물, 토지피복에 대한 정보를 제공하고 있다. NASA에서 개발되어 1999년에 발사된 Terra 위성과 2002년에 발사된 Aqua 위성에 탑재된 MODIS(MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer)센서는 태양동주기궤도를 가져 하루 혹은 이틀에 한 번씩 지구 표면을 관측하고 있으며 공간해상도는 250 m~ 1 km의 범위를 가진다. 최근 MODIS 센서의 노후화로 성능을 보완하기 위해 SNPP(Suomi National Polar-orbiting

Partnership)를 제공하고 있으며, 차세대 극궤도 위성 시스템인 JPSS(Join Polar Satellite System)을 계획하고 VIIRS(Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)를 탑재해 MODIS의 시계열을 연장하고 해상도를 더 향상하였다(이용관 등, 2022). 간접추정에는 지면온도인 LST, 식생지수인 NDVI가 다수 활용되며 최근에는 SCS-CN 방법에서의 5일 선행토양함수 개념을 차용한 5일 선행강우, 무강우 누적일수 및 토양 속성정보를 입력변수로 활용하며 토양수분 추정 모형에는 다중선형회귀분석에서 머신러닝, 인공신경망, 딥러닝 등으로 예측 정확도를 향상시키고 있다.

한편, 직접추정 방식에 사용되는 마이크로파 센서는 0.3-300GHz 주파수를 가지며 적외선, 가시광선 복사에 비해 파장이 길어 대기 산란에 덜 민감하여 기상에 상관없이 관측이 가능하다는 장점이 있다. 마이크로파 신호는 토양 내 물과 토양입자간 유전상수값 차이를 통해 토양수분을 산정하게 되지만 수신 신호에 영향을 미치는 센서(파장, 편광, 입사각)의 수와 표면 특성으로 인해 제약을 받는다(최가영 및 조영현, 2022). 마이크로파 위성에는 태양에서 방출되어 관찰하고자 하는 대상에 반사된 전자기파를 측정하는 수동형 센서와 센서 자체에서 전자기 방사선을 방출에 반사되는 전자기파를 측정하는 능동형 센서로 구분되며, 현재 운용되는 수동형 센서는 AMSR2(Advanced Microwave Scanning Radiometer2)와 SMOS(Soil Moisture and Ocean Salinity Mission)이 있고 능동형 센서는 ASCAT(Advanced SCATterometer), SMAP(Soil Moisture Active and Passive), 및 SAR(Synthetic Aperture Radar) 등이 있다(이재현 등, 2016).

2.2 증발산량 개발 동향

증발산량은 토양, 식생에 저장된 물이 대기로 환원되는 증발과 식물의 기공을 통해 물이 증발하는 증산 과정을 포함하는 수문순환 인자의 구성요소이다(Verstraeten et al., 2008). 위성영상 증발산량 추정 연구는 대표적으로 온도 기반 모델과 전도도 기반 모델로 분류된다. 온도 기반 모델에서는 순복사에너지는 토양열 플럭스, 잠열 플럭스, 현열 플럭스의 합으로 계산되는 지표면 에너지 수지 방정식을 기반으로 증발산량을 추정한다.

복사표면온도를 계산하기 위해 토양 및 식생 구성요소의 구별 유무로 OSM(One Source Model)과 TSM(Two Source Model)로 나뉘며, 대표적인 OSM에는 SEBAL(Surface Energy Balance Algorithm for Land), METRIC(Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration), SEBS(Surface Energy Budget System)가 있고 TSM에는 ALEXI(Atmosphere Land Exchange Inverse)가 있다(Chen and Liu, 2020). 현열 플럭스를 추정하기 위해

경험적 관계 및 물리적 매개변수를 활용하며 가시광선, 근적외선, 열적외선복사, LST, NDVI, 알베도 등의 매개변수를 위성센서로부터 얻는다.

반면 전도도 기반 모형은 Penman-Monteith를 기반으로 구름의 영향을 최대한 줄이기 위해 식생 구조 정보를 활용하여 canopy의 전도도를 정량하는 방법으로 MODIS의 주요 product인 MOD16의 산정 방법이다. PM 방법의 광역적 적용을 위해 공기동역학적 인자를 계산하지 않고 습윤한 조건을 가지는 지역에서 증기압 차가 미치는 영향을 배제한다는 가정을 기반으로 상대적으로 적은 자료를 요구하는 PT(Priestley-Taylor) 방법이 개발되었다. PT 기반 모형은 PT-JPL(Priestley-Taylor Jet Propulsion Laboratory), MS-PT(Modified Satellite-based Priestley-Taylor ET algorithm), SWI-PT(Soil Water Index-based PT algorithm) 등이 있다(최가영 및 조영현, 2022).

03

위성기반
가뭄지수 산정
방안

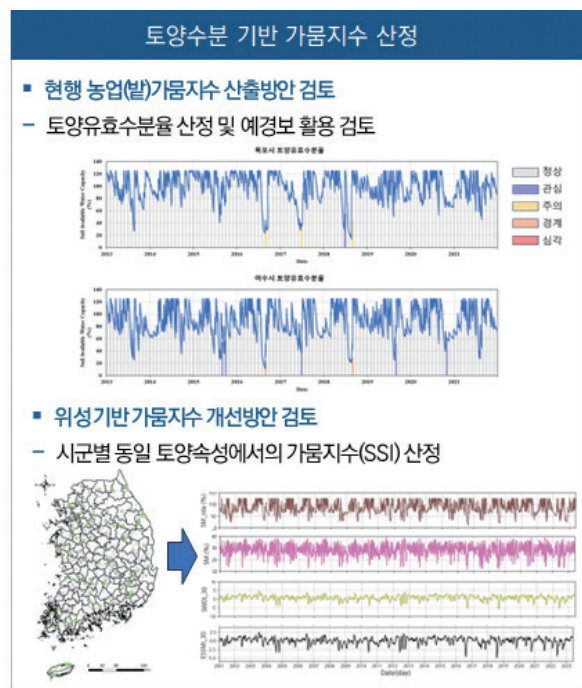
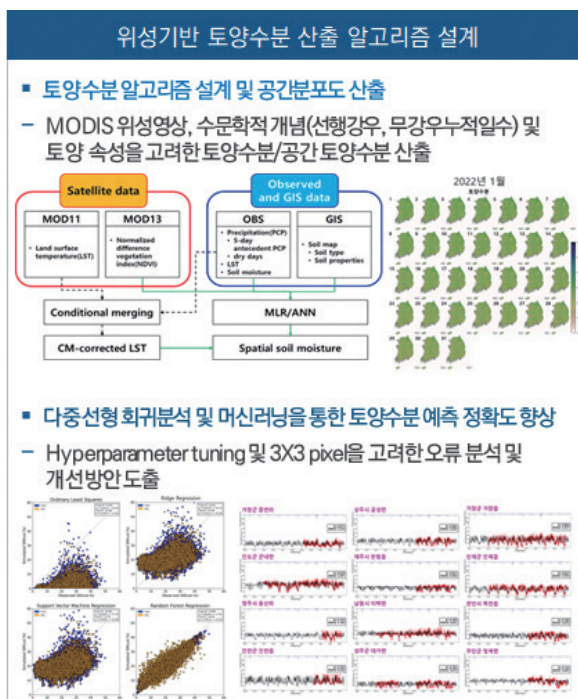
3.1 위성기반 가뭄지수 산정 방안 추진 전략

본 연구에서는 국민 맞춤형 실시간 시군별 예.경보를 위해 기상학적 가뭄지수, 농업(논), 농업(밭), 수문학적 가뭄지수의 통합가뭄지수 생산을 목표로 한다. 그 중 농업(밭) 가뭄지수의 경우 주로 토양수분을 활용하게 되는데 기상청 토양수분의 경우 2002년 이후로 생산되지만, 지점의 수가 총 11개로 적고, 농촌진흥청의 토양수분 자료는 2022년 기준 약 211개소로 전국에 가장 넓게 분포되어 있으나 2015년 이후 자료만 제공되며 재배작물 및 작물계수를 고려하지 않고 토양특성에 따른 포장용수량 및 영구위조점을 반영하지 못하여 위성기반 토양수분을 활용한 가뭄지수가 필요한 실정이다(전민기 등, 2021).

위성기반 토양수분 산정 방법의 간접추정과 직접추정은 고유의 장점과 한계를 가지고 있으며(Han et al, 2023), 본 연구에서는 실시간 가뭄 예.경보를 위해 시간해상도 및 공간해상도가 높은 토양수분을 추출하고자 간접추정 방식을 활용하였다. 더 정확한 토양수분 예측을 위해 선행강우, 무강우 누적일수 및 토양수분의 거동범위를 파악하고자 토양의 Sand, Silt, Clay 비율을 입력변수로 고려하였으며 다중선형회귀분석과 Support Vector Machine, Random forest, Light GBM 등의 머신러닝과 DNN(Deep Neural Network) 등의 딥러닝을 활용하고자 하였다. 따라서 본 연구에서 정의한 위성기반 토양수분은 MODIS 위성영상의 LST 및 NDVI를 기반으로 토양 내 초기 함수율을 결정하는 5일 선행 강우량 및 무강우누적일수를 입력변수로 활용하여 토양종류별 물리적 특성 및 계절에 따른 거동을 분석한 공간토양수분지도로 공간해상도가 가장 큰 LST를 기준으로 1 km의 공간해상도와 일별 시간해상도를 가지는 자료이다.

위성기반 토양수분의 농업(밭) 가뭄지수 산정을 위해 MODIS의 가용자료를 2000년

2월 25일부터 최근까지 구축하였으며 통합가뭄지수의 산정을 위한 가뭄지수는 토양수분 값 기반의 SSMI(Standardized Soil Moisture Index)를 활용하였다. SSMI는 SPI와 같이 확률밀도함수를 기반으로 가우스, 베타 분포에 대한 로그우도함수를 최대화하여 매개변수를 추정하여 산정한다(Ryu and Famiglietti, 2005). 한편, 토양수분은 그 토양의 특성에 따라 수분 침투 속도 등의 거동이 달라지므로 시군별 동일한 토양특성 지점에서의 토양수분을 활용한 가뭄지수화가 필요하다. 따라서 우리나라 토양 중 가장 많은 비율(44.5%)을 차지하는 SandyLoam의 토양수분을 기준으로 SSMI를 산정하여 농업(밭) 가뭄지수를 산정하였다.

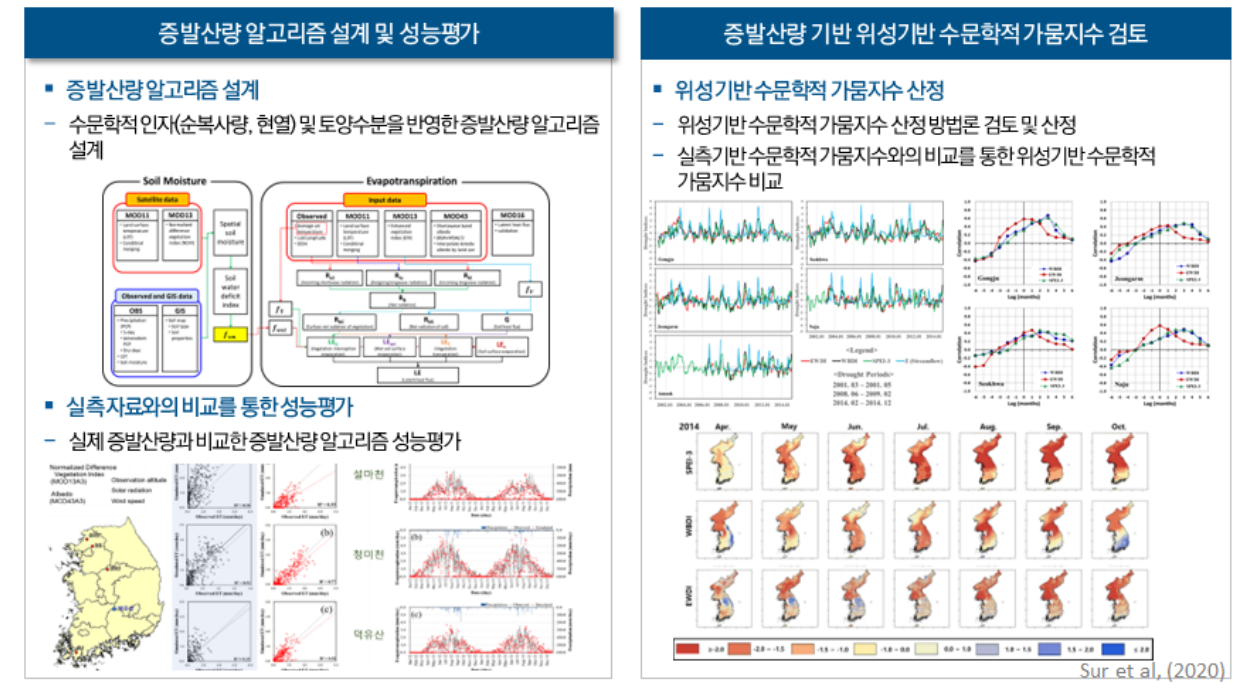


한편, 본 연구에서 정의한 위성기반 증발산량은 토양수분과 같은 시간해상도와 공간해상도를 갖는 MODIS 위성영상의 LST, NDVI 및 Albedo 기반 Priestley-Taylor (PT) 방법을 기반으로 생태생리학적 제약함수, 식생지수 및 토양수분 지수를 고려하여 산정된 실제증발산량 공간지도로 정의하였다.

수문학적 가뭄지수는 강수량과 증발산량의 차이를 물수지 방정식의 표면 유출 및 지하유출로 정의하는 가뭄지수인 WBDI(Water Budget Drought Index)를 활용하였다(Sur et al, 2020).

3.2 위성기반 가뭄지수 산정 방안 로드맵

본 과업의 1단계에서는 MODIS를 기반으로 위성기반 토양수분 및 증발산량을



산정하고 이를 기초자료로 하여 생산되는 시군별 농업(밭) 가뭄지수와 수문학적 가뭄지수를 산정한다. 추후 2단계에서는 MODIS 영상을 대체하는 VIIRS 영상을 통해 토양수분과 증발산량을 산정하며, 가뭄지수 분석 시 영상의 차이에서 발생할 수 있는 오차 등을 보완하여 검증할 예정이다.

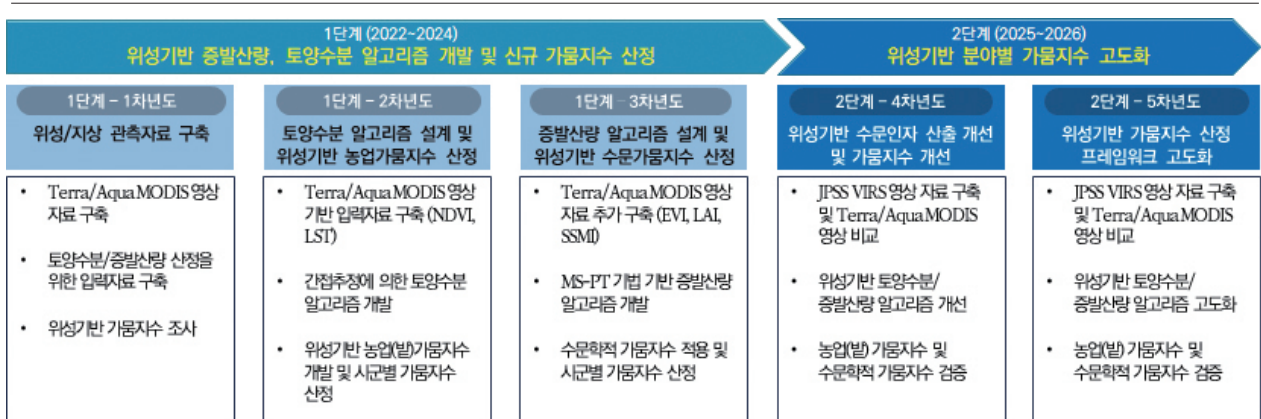


그림 5. 통합가뭄지수 단계별 개발 및 연계 활용방안

04
센서기반 가뭄평가
요소 관측망 설계

본 연구에서는 가뭄평가요소 중 토양수분에 대해 국가재난관리시스템(NDMS) 내 전국 밭가뭄 현황을 분석하기 위하여 토양수분 관측망을 설계하였다. 토양수분 센서는 기존의 FDR방식을 채택하였으며, 시스템의 안정화와 유지 보수의 용이함을 위해 가성비가 뛰어난 고효율 토양수분용 로거를 자체 개발한 후 탑재하였다.

데이터 로거는 GPS 정보 및 토양수분량 관측데이터를 전송하고 태양광 발전과 차량용 배터리를 전원시스템으로 하며, 절전을 위한 통신 간격 제어 기능을 추가하여 안정적으로 데이터를 저장하고 전송할 수 있도록 설계하였다. 고효율 토양수분 센서를 전국 100개소에 설치할 예정이며 기존 관측지점, 피해사례 분석, 토양통 구분, 현황조사를 통한 설치 가능지점을 고려하여 테스트베드를 선정하였다.

아래 그림은 충북 진천에서 밭 지역 중 토양통 조건에 따른 지점을 대상으로 고효율 토양수분계 10~50 cm 모니터링 현황 및 계측 결과를 나타낸 결과이다. 현재 20개 지점에 이와 같은 고효율 토양수분장치를 설치하였으며 지점자료를 확인하고 문제점을 개선하고 있다. 본 과업의 1단계에서는 40개 지점에 대해 고효율 토양수분계 시스템 및 로거를 설계하고 가뭄 평가에 적합한 맞춤형 고효율 토양수분 규격을 완성할 예정이다. 추후 2단계에서는 고정 정비, 예방 정비, 상태기상 정비, 예측 정비 등 단계별 유지보수계획을 수립하고 주기별, 단계별 정비 형태를 적용하여 고장 위험성을 저감하고 유지관리비용이 적게드는 체계를 구축할 예정이다. 또한 지속적으로 원격 펌웨어 기술, 케이블 거치대 구조 개선 및 경량화를 통해 시스템 관리 효율성 및 운영 안정성을 확보할 예정이다.

가뭄평가요소 관측망 설계 및 운영

- (관측망설계) 테스트베드 관측망설계**
 - 테스트베드(시·군·읍·면) 선정
 - 1. 전국 10개 시도 중 10개 시도 선정
 - 2. 10개 시도 중 10개 시·군·읍·면 선정
 - 3. 10개 시·군·읍·면 중 10개 지점 선정
 - 1차 관측망 구축
 - 1. 전국 10개 시도 중 10개 시도 선정
 - 2. 10개 시도 중 10개 시·군·읍·면 선정
 - 3. 10개 시·군·읍·면 중 10개 지점 선정
 - 2차 관측망 구축
 - 1. 전국 10개 시도 중 10개 시도 선정
 - 2. 10개 시도 중 10개 시·군·읍·면 선정
 - 3. 10개 시·군·읍·면 중 10개 지점 선정
- (관측망구축) 현장조사 및 설치계획**
 - 시·군·읍·면, 토양통, 밭가뭄 현황 분석 및 현장조사
- (토양수분센서) 적용성검토**
 - 맞춤형 토양수분센서 (저성능/개발)
 - 현장설치 및 운영계획 수립

고성능자료를 활용한 데이터 정확도 개선

- (테스트베드구축) 연차별 테스트베드구축**

구분	1차 관측망	2차 관측망	3차 관측망	4차 관측망	총계
1차 관측망 구축	10	0	0	0	10
2차 관측망 구축	0	10	0	0	10
3차 관측망 구축	0	0	10	0	10
4차 관측망 구축	0	0	0	10	10
총계	10	10	10	10	40
- (테스트베드모니터링) 관측망운영**
 - 전국 10개 시도 중 10개 시도 선정
 - 10개 시도 중 10개 시·군·읍·면 선정
 - 10개 시·군·읍·면 중 10개 지점 선정
- (정확도개선) 토양수분 관측데이터 정확도개선**
 - 테스트베드 가뭄평가요소 및 고장률 개선
 - 고장률 개선 방안 마련
 - 고장률 개선 방안 마련
 - 고장률 개선 방안 마련

가뭄평가요소 관측망 최적 운영관리 기술

- (모니터링 및 유지보수) 단계별 계획수립**
 - 1차 관측망 운영
 - 고장률 개선
 - 고장률 개선
 - 고장률 개선
 - 2차 관측망 운영
 - 고장률 개선
 - 고장률 개선
 - 고장률 개선
 - 3차 관측망 운영
 - 고장률 개선
 - 고장률 개선
 - 고장률 개선
 - 4차 관측망 운영
 - 고장률 개선
 - 고장률 개선
 - 고장률 개선
- (기술안정화) 운영관리 기술**
 - 가뭄평가요소 운영관리 기술
 - 가뭄평가요소 운영관리 기술
 - 가뭄평가요소 운영관리 기술
 - 가뭄평가요소 운영관리 기술
 - 가뭄평가요소 운영관리 기술
 - 가뭄평가요소 운영관리 기술
 - 가뭄평가요소 운영관리 기술
 - 가뭄평가요소 운영관리 기술

05 맺음말

본 연구의 결과는 우리나라 실정에 맞는 국민 맞춤형 실시간 가뭄 예·경보를 위해 위성기반의 각 분야별(농업(밭), 수문학적) 가뭄지수를 추정하고, 통합가뭄지수를 개발할 수 있다. 이는 가뭄 예·경보의 기준이 되는 지상기반 관측자료와 크게 다르지 않아 가뭄 대비·대응을 하기 위한 법률적 근거를 마련할 수 있는 기준자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 한편, 토양수분 관측망 자료는 위성 원격탐사

기반의 발가뭄을 예측하는데 있어 검증 및 교정을 위한 자료가 될 수 있으며 품질 및 유지관리 보수를 통해 국가재난관리시스템에서 신뢰성있는 발가뭄 정보를 생산하는데 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 원고는 행정안전부 재난안전 공동연구 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구(2022-MOIS63-001(RS-2022-ND641011))의 내용을 기반으로 작성되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- AghaKouchak, A., Farahmand, A., Melton, F.S., Teixeira, J., Anderson, M.C., Wardlow, B.D., and Hain, C.R. (2015) Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities, *Reviews of Geophysics*. 53(2). 452-480.
- Chen, J.M., and Liu, J. (2020). Evolution of evapotranspiration models using thermal and shortwave remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*. 237. 111594.
- Han, Q., Zeng, Y., 코뮹, L., Wang, C., Prikaziuk, E., Niu, Z., and Su, B. (2023). Global long term daily 1 km surface soil moisture dataset with physics informed machine learning. *Scientific data*. 10. 101.
- Jiao, W., Wang, L., McCabe, M.F. (2021). Multi-sensor remote sensing for drought characterization: current status, opportunities and a roadmap for the future. *Remote Sensing of Environment*. 256. 112313.
- Ryu, D., and Famiglietti, J.S. (2005). Characterization of footprint-scale surface soil moisture variability using Gaussian and beta distribution functions during the Southern Great Plains 1997 (SGP97) hydrology experiment. *Water Resources Research*. 41(12).
- Sur, C., Park, S.Y., Kim, J.S., Lee, J.H. (2020). Prognostic and diagnostic assessment of hydrological drought using water and energy budget-based indices. *Journal of Hydrology*. 591. 125549.
- Verstraeten, W.W., F. Veroustraete, and J. Feyen, (2008). Assessment of evapotranspiration and soil moisture content across different scales of observation, *Sensors*. 8(1). 70-117.
- Wagner, W., Lemoine, G., and Rott, H. (1999), A method for estimating soil Moisture from ers scatterometer and soil data. *Remote Sensing of Environment*. 70(2). 191-207.
- 이용관, 정지훈, 장원진, 김진욱, 및 김성준. (2022). VIIRS와 MODIS 자료를 활용한 중분류 토지이용별 알베도 분석. *대한원격탐사학회지*. 38(6-1). 1385-1394.
- 이재현, 최민하, 김동균 (2016). 조건부 합성방법을 이용한 위성관측 토양수분과 지상관측 토양수분의 합성. *한국수자원학회논문집*. 49(3). 263-273.
- 전민기, 남원호, 이희진, 홍은미, 황선아, 및 허승오. (2021). 위성영상기반 증발산량 및 토양유효수분을 활용한 발가뭄 평가. *한국방재학회논문집*. 21(1). 25-33.
- 최가영, 조영현. (2022). 위성기반 증발산량 및 토양수분량 산정 국내 연구동향. *대한원격탐사학회지*. 38(6-1), 1141-1180.