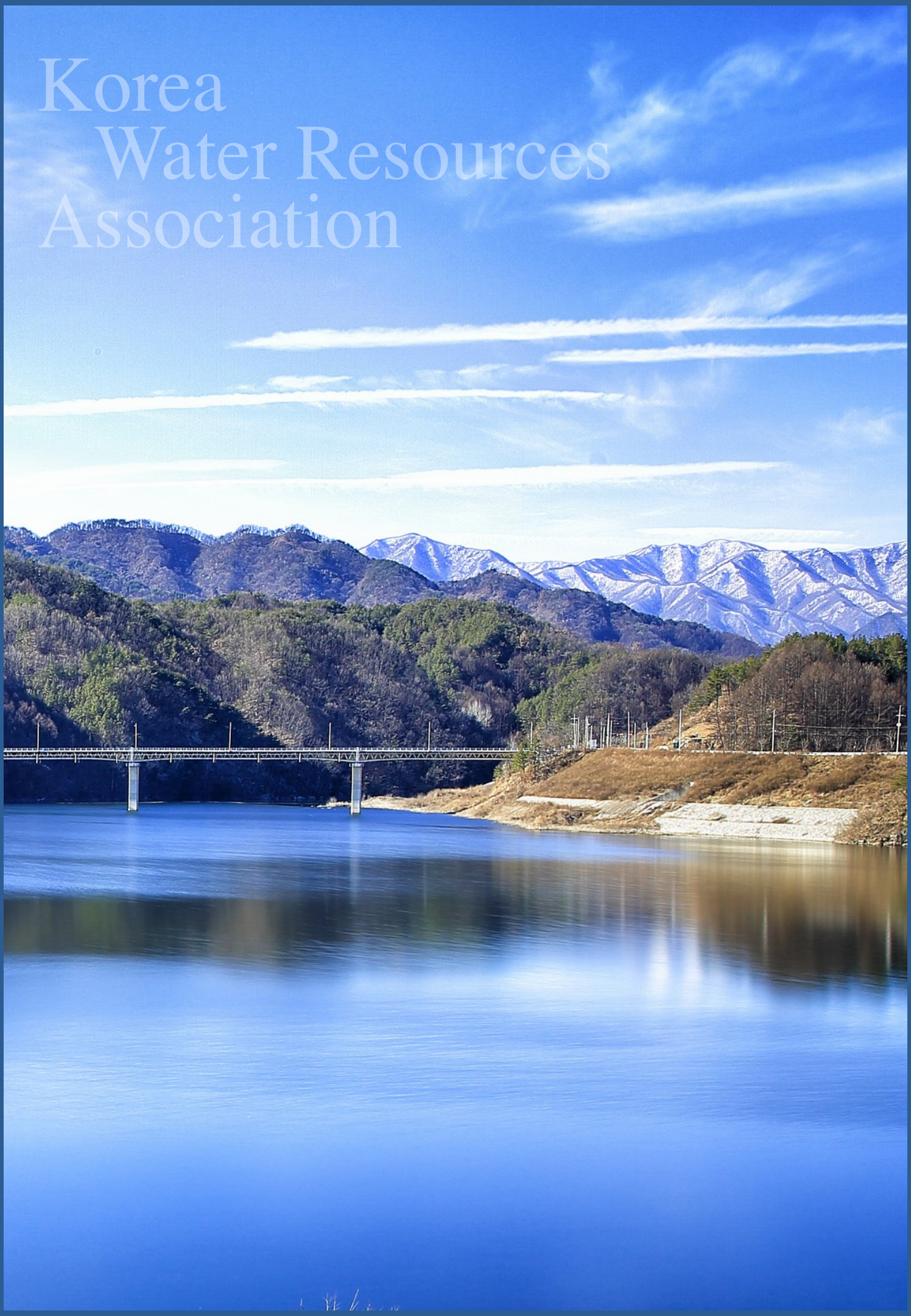
Korea Water Resources Association



학술/기술 기 사

68 우리나라 시설농업 단지에서 수막재배 시설을 난방시설로 대체할 경우의 에너지 및 탄소배출: 경제적 및 탄소중립 관점에서의 비교·분석
강동환·김용재·배인식

80 연안 수치모델링의 전 과정을 잇는 통합 플랫폼: Delft-to-Celeris Dashboard
황순철

90 인공신경망 모델에 의한 경사식 호안 배후 포장체 파력 추정
김태완·박성준·오상호

97 수치해석으로 보는 연안 식생의 감쇠 메커니즘
최성은

105 서핑 파랑과 이안류의 양면성: 연안 레저 안전을 위한 통합 검토 방향
이진욱·김민규·홍지훈·서지웅

112 물 부족시 비상대응을 위한 통합 의사결정지원 플랫폼 개발
김다래·강두선·김연주·김영오·박진혁·이경도

121 원격탐사 기반 하천 수중 지형 측량의 발전과 활용
권시윤

Water for future

Water for future
학술/기술 기사
01

우리나라 시설농업 단지에서 수막재배 시설을 난방시설로 대체할 경우의 에너지 및 탄소배출: 경제적 및 탄소중립 관점에서의 비교·분석

강동환
국립부경대학교
SEED연구소전임연구원(책임급)
dhkang@pknu.ac.kr

김용재
국립부경대학교 SEED연구소
전임연구원(책임급)
nhk2146@naver.com

배인식
(주)덕성해양개발 전무
pado196233@naver.com

초록

수막재배는 겨울철 시설하우스에서 지하수를 양수하여 하우스 외피 또는 보온커튼 위에 수막을 형성함으로써 내부 온도를 유지하는 대표적인 저비용 보온 방식이다. 우리나라 수막재배는 약 1만 ha 규모로 운영되고 있으며, 단위 면적당 지하수 사용량은 약 420 m^3/일/ha, 전국 규모 지하수 사용량은 연간 약 5.4억 m^3 수준으로 추정된다. 수막재배는 농가의 난방비 절감에 기여하지만, 겨울철 집중 양수로 인한 지하수위 저하, 수량 고갈, 염수화, 수질 변화, 하천 기저유출 감소 등의 수자원 관리 문제를 동반할 수 있다. 이에 따라 수막재배를 기존 화석연료 또는 전기 기반 난방시설로 대체할 경우의 에너지 비용과 탄소배출량을 정량적으로 비교할 필요가 있다.

본 기사에서는 수막재배 지하수의 유효 열 이용량을 온도차 5℃ 기준으로 산정하고, 이를 등유 난방, LNG/도시가스 난방, 전기저항식 난방, 전기 히트펌프 난방으로 대체하는 시나리오를 비교하였다. 분석 결과, 수막재배가 제공하는 열량은 약 1,055 GJ/ha·년, 전국 기준 약 11.3 PJ/년에 해당하였다. 이를 난방시설로 대체할 경우 전국 연간 에너지 비용은 히트펌프 약 720억 원, 전기저항식 난방 약 2,160억 원, LNG 난방 약 3,149억 원, 등유 난방 약 5,476억 원 수준으로 추정되었다. 탄소배출량은 히트펌프 약 43.8만 tCO_2eq/년, LNG 약

70.7만 tCO_2/년, 등유 약 95.9만 tCO_2/년, 전기저항식 난방 약 131.4만 tCO_2eq/년으로 산정되었다.

이 결과는 수막재배의 단순 폐지 또는 화석연료 난방 전환이 농가 비용과 탄소배출을 동시에 증가시킬 수 있음을 보여준다. 따라서 향후 정책 방향은 수막재배의 전면 대체가 아니라, 순환식 수막재배, 지하수 인공함양, 수위·수질 모니터링, 다겹보온커튼, 고효율 히트펌프, 재생에너지 연계형 난방을 결합한 통합 관리 방식으로 전환되어야 한다.

주요어: 수막재배, 시설농업, 지하수, 난방 에너지, 탄소배출, 히트펌프, 탄소중립, 지하수 관리

1. 들어가며: 수막재배는 에너지 절감 기술인가, 지하수 의존 기술인가?

우리나라 겨울철 시설농업은 기온 저하, 난방비 상승, 작물 생육 안정성 확보라는 세 가지 과제를 동시에 안고 있다. 특히 딸기, 토마토, 오이, 상추 등 겨울철 시설작물은 야간 최저기온이 생육 한계 이하로 떨어질 경우 생장 지연, 착과 불량, 품질 저하, 냉해 피해가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 줄이기 위해 농가에서는 등유 보일러, 온풍기, 전기히터, 온수 배관, 히트펌프 등 다양한 난방 방식을 활용해 왔다.

에너지 가격이 상승하고 난방비 부담이 커지면서, 지하수의 자연 열을 활용하는 수막재배가 널리 이용되어 왔다. 수막재배는 대체로 14~16℃ 내외의 지하수를 양수하여 비닐하우스 외피 또는 보온커튼 위로 흘려보내고, 이때 형성되는 얇은 물막이 외부 찬 공기와 내부 따뜻한 공기 사이의 열교환을 완화하는 방식이다. 즉, 수막재배는 지하수가 가진 열용량과 수막의 단열효과를 이용하는 농업용 보온 기술이다(그림 1).

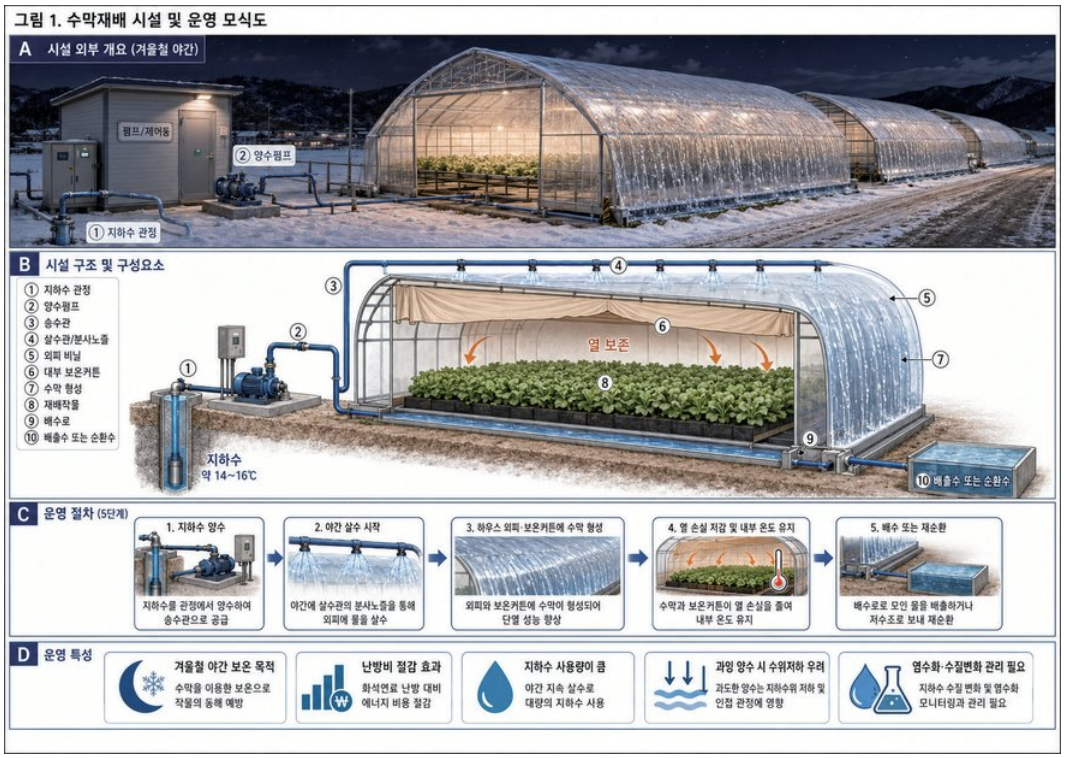


그림 1. 수막재배 시설 및 운영 모식도.

수막재배의 장점은 분명하다. 별도의 대규모 연료비 없이 지하수를 이용해 야간 보온을 유지할 수 있고, 농가 입장에서는 등유나 전기를 사용하는 난방시설보다 운영비가 낮다. 또한 수막재배는 시설 설치가 비교적 단순하고, 이미 많은 시설농업 단지에서 경험적으로 운영되어 왔기 때문에 농가 수용성도 높다.

수자원 관리 관점에서는 다른 해석이 가능하다. 수막재배는 겨울철 특정 기간에 대량의 지하수를 집중적으로 양수하므로, 지역에 따라 지하수위 저하, 주변 관정 간섭, 하천 기저유출 감소, 농업용수 부족, 염수화 또는 고염 지하수 상승, 수질 변화 등의 문제가 발생할 수 있다. 특히 해안 및 충적평야, 하천변 시설농업 단지, 지하수 함양량이 제한적인 지역에서는 수막재배가 지하수계에 가하는 부담이 상당할 수 있다.

수막재배를 단순히 “난방비를 절감하는 친환경 기술”로 볼 것인지, 아니면 “지하수자원에 비용을 전가하는 열 이용 기술”로 볼 것인지는 보다 정량적인 분석이 필요하다. 본 기사에서는 수막재배를 난방시설로 대체할 경우를 가정하여, 에너지 비용과 탄소배출량을 산정하고, 경제성 및 탄소중립 관점에서 수막재배의 의미를 재검토하고자 한다.

2. 우리나라 수막재배 시설 현황과 지하수 사용 특성

국내 수막재배는 1980년대 이후 시설농업 확대와 함께 보급되었으며, 1990년대 이후 겨울철 시설원예 지역을 중심으로 빠르게 확산되었다. 기존 연구에 따르면 우리나라 수막재배 면적은 약 1만 ha 수준으로 추정되며, 단위 면적당 지하수 사용량은 약 420 m^3/일/ha 수준으로 제시된 바 있다(표 1). 연간 수막재배 운영 일수를 120일로 가정하면, 전국 수막재배용 지하수 사용량은 식 (1)과 같이 산정된다.

$$420\,m^3/day/ha \times 10746\,ha \times 120\,day/year = 5.4억\,m^3/year \quad (1)$$

이는 농업용 지하수 사용량의 상당 부분을 차지하는 규모이다. 수막재배는 개별 농가 단위에서는 단순한 보온 방식처럼 보일 수 있으나, 전국 규모로 환산하면 연간 수억 m^3의 지하수를 겨울철에 집중적으로 양수하는 대규모 수자원 이용에 해당된다.

수막재배의 본질은 물을 “소비”하는 것이라기보다, 지하수가 가진 열에너지를 시설하우스 보온에 활용하는 것이다. 그러나 실제 현장에서는 양수된 지하수가 배수로를 통해 하천으로 유출되거나 농수로로 유출되는 경우가 많다. 순환식 시스

표 1. 수막재배 시설 및 지하수 사용량의 대표 기준값

구분	기준값	비고
전국 수막재배 면적	10,746 ha	기존 연구 기준
단위면적당 지하수 사용량	420 m^3/일/ha	현장 추정값
연간 운영일수	120일/년	겨울철 야간 운영 가정
전국 지하수 사용량	약 5.4억 m^3/년	420 × 10,746 × 120
지하수 온도	약 14~16°C	중부권 지하수 대표 범위
주요 운영 시간	겨울철 야간	보온 목적

표 2. 수막재배 열량 산정 기준 및 적용 값

항목	적용 값
지하수 사용량	420 m^3/일/ha
운영 일수	120일/년
지하수 유입 온도	15℃
유출수 온도	10℃
유효 온도차	5℃
물 비열	4.186 kJ/kg·℃
1 ha당 1일 열량	8.79 GJ/일/ha
1 ha당 연간 열량	1,055 GJ/ha·년
1 ha당 전력 열량 환산	293 MWh/ha·년
전국 시설농업 단지의 열량	약 11.3 PJ/년

템이 아닌 경우, 지하수는 재함양되기 전까지 대수층에서 배출되며, 이 과정에서 지하수위 저하가 발생할 수 있다.

시설농업 단지가 밀집한 지역에서는 다수의 농가가 같은 시간대에 동시에 양수하기 때문에 지하수위 저하가 누적될 수 있다. 또한 겨울철은 강수량과 자연 함양량이 상대적으로 적은 시기이므로, 양수량이 함양량을 초과할 가능성이 높다. 이 때문에 수막재배는 농업 에너지 문제와 수자원 관리 문제가 만나는 대표적 사례라고 할 수 있다.

3. 수막재배가 제공하는 열량의 산정

수막재배를 난방시설로 대체하려면, 우선 수막재배가 현재 제공하고 있는 열량을 산정해야 한다. 본 기사에서는 지하수 온도 15℃, 수막 후 유출수 온도 10℃를 가정하여 유효 온도차를 5℃로 설정하였다. 이는 보수적 산정이며, 현장 조건에 따라 실제 유효 온도차는 3~10℃ 범위에서 변동될 수 있다. 표 2는 전국 시설농업 단지에서 수막재배가 제공하는 보온 효과를 난방 에너지로 환산한 값이다. 만약 유효 온도차를 10℃로 보면 이 값은 약 2배가 된다. 반대로 유효 온도차를 3℃로 보면 약 60% 수준으로 감소한다. 따라서 본 산정은 수막재배의 열 이용량을 보수적으로 평가한 값으로 볼 수 있다.

4. 난방시설 대체 시나리오 설정

수막재배를 난방시설로 대체할 경우, 적용 가능한 기술은 다양하다. 본 기사에서는 현장에서 일반적으로 고려할 수 있는 네 가지 난방 방식을 비교하였다(표 3과 그림 2).

첫째, 등유 보일러 또는 등유 온풍기이다. 시설원예에서 오랫동안 활용되어 온 방식이며, 초기 설치와 운영 경험 측면에서 가장 익숙한 방식이다. 그러나 연료비 부담과 탄소배출량이 크다.

둘째, LNG 또는 도시가스 보일러이다. 도시가스 공급이 가능한 지역에서는 등유보다 상대적으로 탄소배출계수가 낮고 자동제어가 용이하다. 다만 농촌 시설농업 단지에서는 도시가스 배관망 접근성이 제한될 수 있다.

표 3. 난방 종류별 대체 시나리오

구분	대표 설비	적용 효율
시나리오 A	등유 보일러/온풍기	85%
시나리오 B	LNG/도시가스 보일러	90%
시나리오 C	전기저항식 난방	100%
시나리오 D	전기 히트펌프	COP 3.0

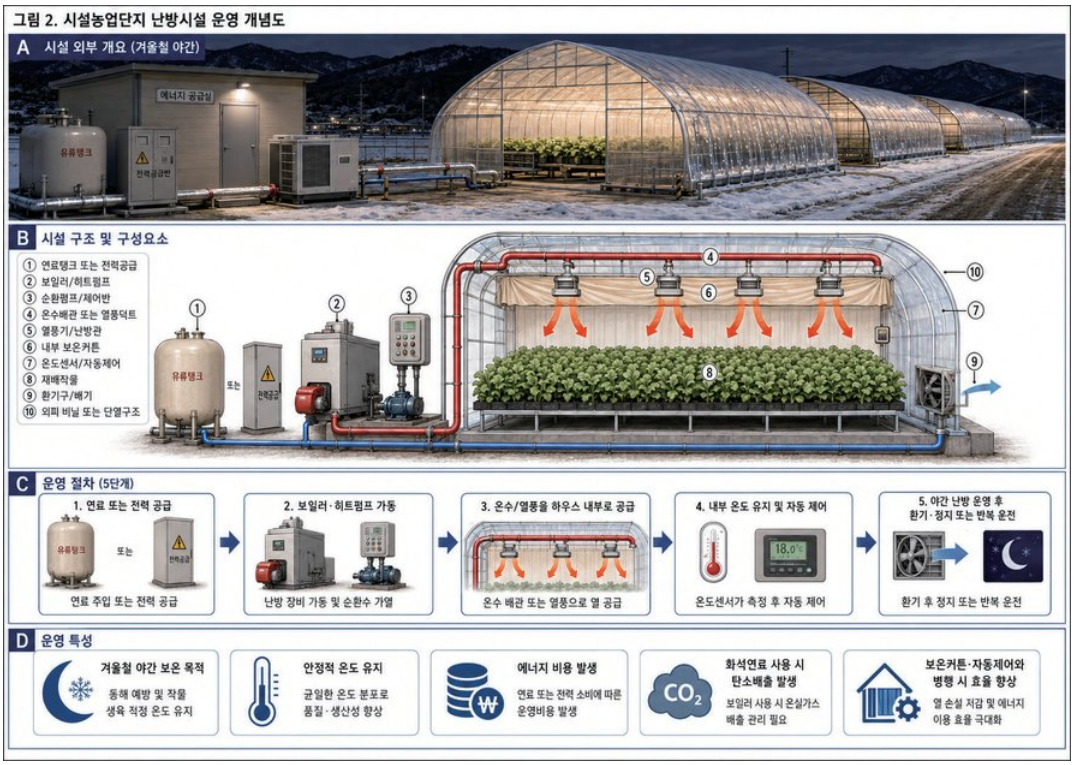


그림 2. 시설농업 단지의 난방시설 운영 개념도.

셋째, 전기저항식 난방이다. 전기를 열로 직접 전환하는 방식으로 시스템은 단순하지만, COP(Coefficient of Performance)가 1에 가깝기 때문에 에너지 효율 측면에서는 불리하다. 전력 단가가 낮을 경우 비용은 낮아 보일 수 있으나, 전력 배출계수를 고려하면 탄소배출량이 커질 수 있다.

넷째, 전기 히트펌프이다. 히트펌프는 외기, 지하수, 지중열, 폐열 등에서 열을 흡수해 실내로 공급하는 방식으로, COP 3.0 이상을 확보할 경우 에너지 비용과 탄소배출량을 크게 줄일 수 있다. 다만 초기 투자비, 저온 조건에서의 성능저하, 유지관리, 전력 피크 관리가 중요하다.

5. 난방시설 대체 시 에너지 비용 분석

산정한 수막재배 열량 1,055 GJ/ha·년을 각 난방 방식으로 공급한다고 가정하였다. 등유 난방은 연료 발열량 34.3 MJ/L, 보일러 효율 85%를 적

표 4. 1 ha당 연간 난방 대체 비용

난방 방식	필요 에너지	단가 가정	1 ha당 연간 비용
등유 난방	36,182 L/ha·년	1,408.53원/L	약 5,096만 원
LNG/도시가스 난방	1,172 GJ/ha·년	25원/MJ	약 2,930만 원
전기저항식 난방	293 MWh/ha·년	68.6원/kWh	약 2,010만 원
전기 히트펌프	97.7 MWh/ha·년	68.6원/kWh	약 670만 원

표 5. 전국 수막재배 면적 기준 연간 난방 대체 비용

난방 방식	전국 연간 에너지 비용
등유 난방	약 5,476억 원
LNG/도시가스 난방	약 3,149억 원
전기저항식 난방	약 2,160억 원
전기 히트펌프	약 720억 원

용하였다. LNG는 보일러 효율 90%, 연료 단가는 25원/MJ로 가정하였다. 전기저항식 난방은 293 MWh/ha·년을 그대로 사용하며, 히트펌프는 COP 3.0을 적용해 전력 소비량을 97.7 MWh/ha·년으로 산정하였다(표 4). 전국 수막재배 면적 10,746 ha에 적용하면, 난방 대체 비용은 표 5와 같이 추정된다.

수막재배를 단순히 등유 난방으로 대체할 경우 농가가 부담해야 할 추가 에너지 비용은 전국적으로 연간 5,000억 원 이상에 이를 수 있다. LNG 난방 역시 약 3,000억 원 이상의 비용이 발생한다. 전기저항식 난방은 단가 조건에 따라 비용이 상대적으로 낮게 나타나지만, 전력 피크와 탄소배출 측면에서 한계가 있다. 히트펌프는 에너지 비용이 가장 낮으나, 초기 투자비와 시스템 설계가 관건이다.

6. 난방시설 대체 시 탄소배출량 분석

탄소중립 관점에서는 단순한 난방비 비교만으로는 충분하지 않다. 난방 에너지원별 온실가스 배출량을 함께 산정해야 한다. 본 기사에서는 등유, LNG, 전기저항식 난방, 히트펌프의 탄소배출량을 비교하였다(표 6과 7). 등유는 연료 사용량에 배출계수를 적용하였고, LNG는 연료 투입량에 도시가스 배출계수를 적용하였다. 전력은 소비단 전력 배출계수 0.4173 tCO_2eq/MWh를 적용하였다.

전기저항식 난방이 비용 측면에서는 등유나 LNG보다 낮아 보일 수 있으나, 탄소배출량은 가장 높게 나타난다는 것이다. 이는 전기를 열로 직접 전환하는 방식이 에너지 효율 면에서 불리하기 때문이다. 반면 히트펌프는 전기를 사용하지만 COP 3.0을 적용하면 동일한 열량을 공급하는 데 필요한 전력량이 1/3 수준으로 줄어들기 때문에 탄소배출량도 가장 낮다. 즉, 탄소중립 관점에서 수막재배를 대체하려면 “전기화” 자체가 해답이 아니라, “고효율 전기화”가 필요하다. 단순 전기히터 전환은 전력수요와 탄소배출을 모두 증가시킬 수 있다.

표 6. 연간 탄소배출량(1 ha당)

난방 방식	탄소 배출량
등유 난방	약 89.2 tCO_2
LNG/도시가스 난방	약 65.8 tCO_2
전기저항식 난방	약 122.3 tCO_2eq
전기 히트펌프	약 40.8 tCO_2eq

표 7. 연간 탄소배출량(전국 수막재배 면적 기준)

난방 방식	탄소배출량
등유 난방	약 95.9만 tCO_2
LNG/도시가스 난방	약 70.7만 tCO_2
전기저항식 난방	약 131.4만 tCO_2eq
전기 히트펌프	약 43.8만 tCO_2eq

7. 난방시설 대체 시 경제성 비교

탄소배출은 향후 농업 부문에서도 비용을 지불해야 할 가능성이 있다. 현재 농업 부문이 직접적으로 배출권거래제의 주요 의무 부문은 아니더라도, 에너지 가격, 저탄소 농산물 인증, ESG 공급망, 탄소중립 정책, 농업시설 에너지 보조 사업 등과 연계될 수 있다. 따라서 탄소 비용을 가상의 사회적 비용 또는 정책 비용으로 환산해 보는 것은 의미가 있다.

본 기사에서는 배출권 가격을 19,600원/tCO_2로 가정하여 탄소 비용을 산정하였다(표 8). 이 결과는 수막재배를 단순히 화석연료 난방으로 대체하는 정책이 경제적으로도, 탄소중립 관점에서도 부

표 8. 우리나라 수막재배 지역의 연간 탄소배출량과 탄소 비용

난방 방식	전국 탄소배출량	탄소 비용
등유 난방	약 95.9만 tCO_2	약 188억 원
LNG/도시가스 난방	약 70.7만 tCO_2	약 138억 원
전기저항식 난방	약 131.4만 tCO_2eq	약 258억 원
전기 히트펌프	약 43.8만 tCO_2eq	약 86억 원

표 9. 우리나라 수막재배 지역의 연간 에너지 비용과 탄소 비용을 합산한 비용(단위: 억 원)

난방 방식	에너지 비용	탄소 비용	합계
등유 난방	약 5,476	약 188	약 5,664
LNG/도시가스 난방	약 3,149	약 138	약 3,287
전기저항식 난방	약 2,160	약 258	약 2,418
전기 히트펌프	약 720	약 86	약 806

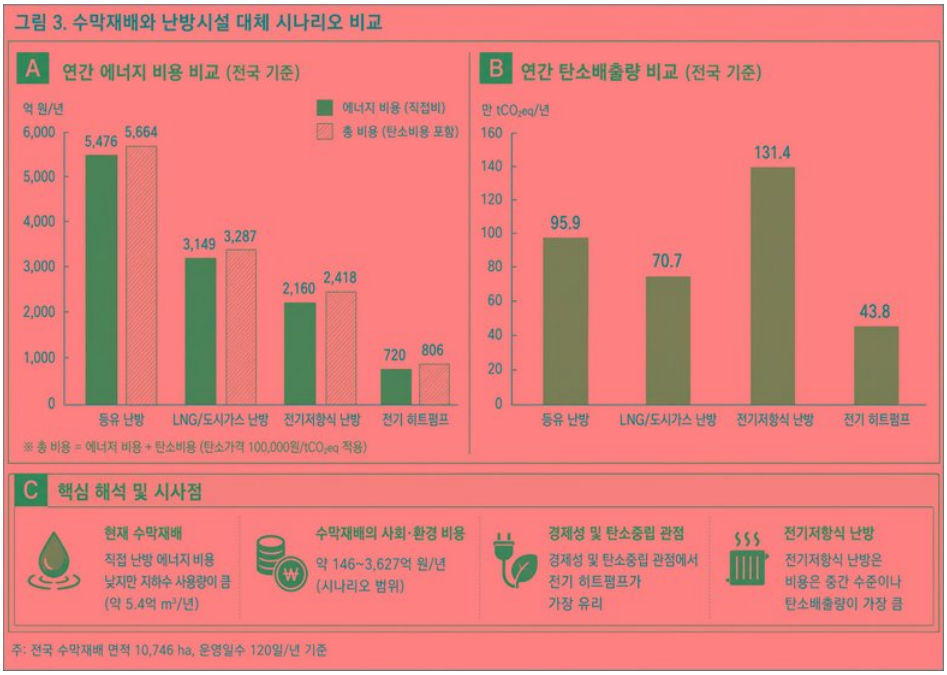


그림 3. 수막재배와 난방시설 대체 시나리오 비교.

담이 클 수 있음을 보여준다. 특히 등유 난방 대체는 전국적으로 연간 5,000억 원 이상의 에너지 비용과 약 100만 tCO_2 수준의 탄소배출을 유발할 수 있다(표 8과 9).

히트펌프는 비용과 탄소배출 모두에서 가장 우수한 대안으로 나타났지만, 현실적으로 모든 수막재배 농가가 단기간에 히트펌프를 도입하기는 어렵다. 초기 투자비, 전력 인입 용량, 한파 시 성능, 유지관리 역량, 시설하우스 단열 수준, 작물별 온도 요구 조건이 모두 검토되어야 한다(그림 3).

8. 수막재배의 숨은 비용: 지하수 자원의 환경비용

지금까지의 분석은 수막재배가 제공하는 열량을 난방시설로 대체했을 때의 에너지 비용과 탄소배출량을 산정한 것이다. 수막재배 자체에도 "보이지 않는 비용"이 존재한다. 바로 지하수 자원에 해당하는 환경비용이다.

수막재배는 농가 입장에서는 저렴한 난방 방식이지만, 지하수계 입장에서는 대량 양수 행위이다. 만약 양수량이 자연 함양량을 초과하면 지하수위가 하강하고, 주변 관정의 양수 가능량이 감소하며, 하천과 습지로 공급되는 기저유출이 줄어들 수 있다. 또한 해안 지역이나 하천 하류 충적층에서는 염수 또는 고염 지하수의 상승, 이른바 업코닝(upconing) 현상이 발생할 가능성도 있다.

수막재배가 지하수계에 미치는 영향은 개별 농가의 난방비 계산에는 반영되지 않는다. 다시 말해, 수막재배는 에너지 비용을 줄이는 대신, 일부 비용을 지하수계와 지역 수자원 관리 체계에 전가하는 구조를 가질 수 있다. 수막재배의 경제성을 평가할 때는 단순한 연료비 절감 효과뿐 아니라 다음과 같은 요소를 함께 고려해야 한다. 첫째, 지하수위 저하에 따른 추가 관정 개발 또는 펌프 교체 비용이다. 둘째, 지하수 수질 악화에 따른 수처

리 또는 대체 수원 확보 비용이다. 셋째, 주변 농가와의 물 이용 갈등 비용이다. 넷째, 하천 생태계와 기저유출 감소에 따른 환경비용이다. 다섯째, 장기적으로 지하수 자원 회복을 위한 인공함양 및 관리 시설 비용이다. 이러한 비용을 정량화하면 수막재배의 사회적 비용은 현재 농가가 부담하는 비용보다 훨씬 클 수 있다. 따라서 정책적으로는 수막재배를 금지할 것인지, 허용할 것인지의 이분법보다, 지하수 사용량을 줄이면서도 농가의 난방비 부담을 완화할 수 있는 전환 전략이 필요하다.

9. 대안: 수막재배의 전면 대체가 아니라 통합 전환이 필요하다

수막재배의 가장 큰 장점은 낮은 운영비이고, 가장 큰 문제는 지하수 과다 사용이다. 반대로 난방시설의 장점은 지하수 사용량을 줄일 수 있다는 점이고, 단점은 에너지 비용과 탄소배출량이 증가한다는 점이다. 따라서 현실적인 해법은 어느 한 쪽을 선택하는 것이 아니라, 두 시스템의 장점을 결합하고 단점을 줄이는 상호보완적인 전환 방식이다(그림 4).

9.1 순환식 수막재배

가장 우선적으로 고려할 수 있는 대안은 순환식 수막재배이다. 기존 개방형 수막재배는 양수한 지하수를 사용 후 배수로로 방류하는 경우가 많다. 반면 순환식 수막재배는 유출수를 회수하여 저류조에 저장하고, 열교환 또는 재가열 후 다시 사용하는 방식으로서 지하수 양수량을 줄일 수 있다.

순환식 시스템은 초기 설치비가 필요하지만, 지하수위 저하를 완화하고, 유출수 관리를 체계화할 수 있다는 장점이 있다. 특히 시설농업 단지가 밀집한 지역에서는 개별 농가 단위보다 단지 공동 순환시스템으로 구축하는 것이 효과적이다.

9.2 지하수 인공함양과 연계

수막재배로 양수한 지하수를 단순하게 유출시키지 않고, 사용 후 일정한 처리 과정을 거쳐 지하로 재함양하는 방안도 검토할 수 있다. 인공함양은 지하수위 회복, 수자원 순환, 하천 기저유출 보전 측면에서 유용하다. 다만 함양수의 수질, 온도, 미생물, 탁도, 철·망간, 영양염류 등의 관리가 필요하다.

수막재배 지역에서는 겨울철 양수량과 유출 수량을 관측하고, 이를 기반으로 인공함양 가능량을 산정해야 한다. 특히 지하수 관정, 함양정, 침투지, 저류조를 결합한 단지형 물순환 시스템을 도입하면 수막재배의 지하수 의존성을 줄일 수 있다.

9.3 다겹보온커튼과 고단열 하우스

수막재배 또는 난방시설 어느 쪽을 선택하더라도, 가장 중요한 것은 열 손실을 줄이는 것이다. 시설하우스의 외피 단열성능이 낮으면 수막재배 지하수 사용량도 증가하고, 난방시설의 연료 사용량도 증가한다. 따라서 다겹보온커튼, 이중피복, 측창 기밀성 개선, 방열 차단막, 보온덮개, 자동 개폐 제어 등이 병행되어야 한다. 이는 가장 기본적이면서도 비용 대비 효과가 큰 대처 방안이다. 수막재배를 줄이기 전에 먼저 하우스의 열 손실을 줄여야 한다.

9.4 히트펌프와 재생에너지 연계

본 기사에서는 히트펌프가 에너지 비용과 탄소배출 측면에서 가장 유리한 대안으로 나타났다. 특히 지하수열, 지중열, 공기열, 폐열을 활용한 히

트펌프는 수막재배의 열 이용 개념을 보다 효율적이고 통제 가능한 방식으로 전환할 수 있다. 예를 들어, 지하수를 직접 외피에 살수하는 대신 지하수열을 히트펌프 열원으로 사용하고, 사용 후 지하로 재주입하는 방식이 가능하다. 이 경우 지하수의 열은 이용하되, 물 자체의 손실은 최소화할 수 있다. 또한 태양광, ESS(Energy Storage System), 농업용 전력, 수요 반응 제도와 연계하면 탄소 중립형 시설농업 모델로 발전할 수 있다.

9.5 수위·수질 기반의 스마트 관리

수막재배 지역에서는 지하수 수위와 수질을 실시간 또는 주기적으로 관측해야 한다. 주요 관측 항목은 지하수 수위와 수온, 전기전도도, 염소이온, 질산성질소, 철, 망간, 탁도 등이다. 특히 염수화 가능성이 있는 지역에서는 전기전도도와 염소이온 농도의 장기 변화에 대한 관측이 필요하다.

향후에는 양수량, 지하수위, 외기온, 하우스 내부 온도, 에너지 사용량, 작물 생육 정보를 통합한 AI 기반 운영관리 시스템도 필요하다. 이를 통해 특정 시간대에 불필요한 양수를 줄이고, 보온커튼과 히트펌프를 자동 제어하며, 지하수위가 일정 기준 이하로 하강하면 양수량을 제한하는 방식의 지능형 운영체계를 구축할 수 있다.

10. 정책적 시사점

수막재배는 농업 에너지 복지, 농가 소득, 수자원 보전, 탄소중립이 충돌하는 지점에 놓여 있다. 농가 입장에서는 난방비를 줄이는 생존 전략이지만, 수자원 관리 관점에서는 겨울철 지하수 집중 이용에 의한 지하수자원 고갈이라는 부담이 있다. 또한 탄소중립 관점에서는 수막재배를 화석연료 난방으로 대체하는 것이 반드시 바람직하지는 않

그림 4. 수막재배 지역의 통합 물·에너지 관리 모델

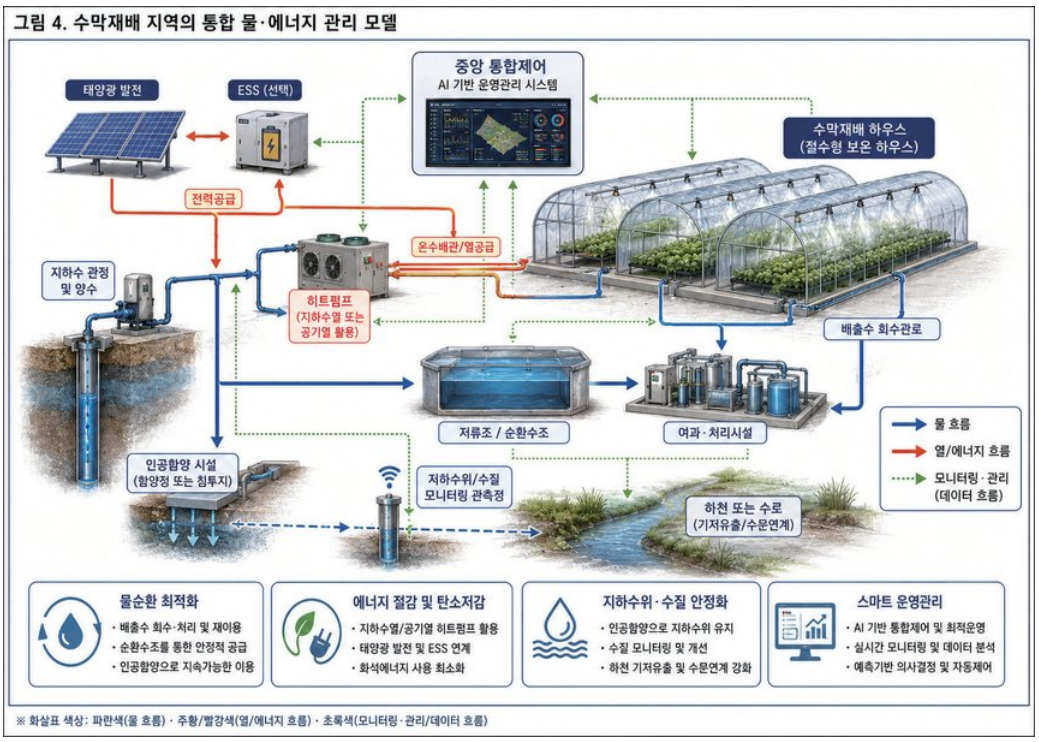


그림 4. 수막재배 지역의 통합 물 · 에너지 관리 모델.

다. 따라서 다음과 같은 정책 방향이 필요하다.

첫째, 수막재배 지역의 지하수 사용량 관측 의무화를 단계적으로 도입해야 한다. 현재 많은 지역에서 실제 양수량이 정확히 파악되지 않기 때문에, 지하수 관리 정책의 기초 자료가 부족하다.

둘째, 수막재배 밀집 지역을 대상으로 지하수 수위와 수질 관측망을 구축해야 한다. 단순한 허가 및 신고 관리가 아니라, 실제 지하수계 반응을 기반으로 한 관리가 필요하다.

셋째, 개방형 수막재배를 순환식 수막재배로 전환하는 시설 개선 지원사업이 필요하다. 특히 배수 회수, 저류조, 여과, 재순환 펌프, 자동제어 시스템을 묶은 표준 모델을 제시하고 적용할 필요가 있다.

넷째, 히트펌프와 고단열 시설 개선을 결합한 저탄소 시설농업 전환 사업이 필요하다. 히트펌프만 보급하고 단열을 개선하지 않으면 에너지 절감 효과가 제한적이기 때문이다.

다섯째, 수막재배 대체 정책은 지역별 지하수 취약성에 따라 차등 적용되어야 한다. 지하수 함양량이 풍부하고 수위 회복이 빠른 지역과, 해안 또는 충적층의 수위 저하에 의한 염수화에 취약한 지역을 차등화하여 관리해야 한다.

여섯째, 농가의 비용 부담을 고려한 단계적 전환이 필요하다. 수막재배를 갑자기 제한하면 난방비 증가로 농가 경영이 악화될 수 있다. 따라서 보조금, 저리융자, 에너지 절감 컨설팅, 공동 열 공급 시스템, 단지형 물순환 인프라가 함께 지원되어야 한다.

11. 결론

수막재배는 우리나라 겨울철 시설농업을 지탱해 온 중요한 보온 기술이다. 지하수의 안정적인 온도를 활용함으로써 농가의 난방비를 줄이고, 겨울철 작물 생산을 가능하게 해 왔다. 그러나 전국적으로 약 1만 ha 규모에서 연간 약 5.4억 m^3의 지하수가 사용된다는 점을 고려하면, 수막재배는 단순한 농업기술이 아니라 국가 수자원 관리의 중요한 대상이다.

본 기사에서 수막재배를 난방시설로 대체하는 시나리오를 분석한 결과, 수막재배가 제공하는 열량은 1 ha당 약 1,055 GJ/년, 전국 기준 약 11.3 PJ/년에 해당하였다. 이를 등유 난방으로 대체할 경우 전국적으로 연간 약 5,476억 원의 에너지 비용과 약 95.9만 tCO_2의 탄소배출이 발생할 수 있다. LNG 난방은 약 3,149억 원과 70.7만 tCO_2, 전기저항식 난방은 약 2,160억 원과 131.4만 tCO_2eq, 히트펌프는 약 720억 원과 43.8만 tCO_2eq 수준으로 추정되었다.

따라서 수막재배를 단순히 난방시설로 대체하는 것은 경제적·환경적 부담을 크게 증가시킬 수 있다. 특히 화석연료 기반 난방 대체는 탄소중립 방향과 상충될 수 있다. 가장 바람직한 방향은 수막재배의 장점인 저비용 보온 효과를 살리되, 지하수 과다 사용 문제를 줄이는 것이다.

이를 위해서는 순환식 수막재배, 지하수 인공함양, 다겹보온커튼, 고효율 히트펌프, 재생에너지 연계, 수위·수질 모니터링, AI 기반 자동제어를 결합한 통합형 시설농업 물·에너지 관리 체계가 필요하다. 수막재배의 미래는 “폐지”가 아니라 “전환”에 있다. 그리고 그 전환의 핵심은 지하수, 에너지, 탄소를 함께 관리하는 통합적인 관리시스템의 구축에 있다.

참고문헌

농촌진흥청 (2023). 시설원예 에너지 절감 기술로 고유가 시대 대비: 온실 보온력을 높이는 다겹보온커튼과 수막시스템. 농촌진흥청 보도자료(2023년 1월 5일).

문상호, 김용철, 김성윤, 기민규 (2016). 청주 상대리 수막재배지역 침투갤러리 설치와 효과 예비평가. 자원환경지질, 49(6), 445-458.

문상호, 김용철, 정윤영, 황정 (2016). 수막재배 활동에 의한 청주 상대리 지역 지하수-하천수 상호작용. 자원환경지질, 49(2), 105-120.

문상호, 하규철, 김용철, 윤필선 (2012). 청원-충주지역 수막재배용 지하수 사용량 및 배출량 분석. 지질공학, 22(4), 387-398.

이봉주, 김용철, 조병욱, 윤욱, 하규철, 이병대, 문상호, 윤필선, 김성윤 (2015). 수위-유량 관계곡선을 이용한 수막재배용 지하수 사용량 추정. 지질공학, 25(1), 35-43.

장선우, 정일문 (2014). 수막재배지역에서 일최저기온과 지하수 이용량의 상관관계를 이용한 지하수위 변화 분석. 지질공학, 24(2), 217-225.

정일문, 장선우 (2016). 수막재배지역의 수문성분 해석 및 평가. 한국수자원학회논문집, 49(9), 731-740.

조병욱, 윤욱, 이병대, 고경석 (2012). 논산시 왕전리 수막재배지역의 지하수위 변화. 지질공학, 22(2), 195-205.

한국가스공사 (2026). 도시가스용 천연가스 요금 및 요금체계 자료. 한국가스공사.

한국석유공사 (2026). 오피넷 면세유 평균판매가격 자료: 실내등유 및 농업용 면세유 가격 통계. 한국석유공사 유가정보서비스 오피넷.

한국수자원공사 (2026). 우리나라 지방상수도 요금 현황: 2024년 상수도 통계 기준. 한국수자원공사.

한국에너지공단 (2026). 에너지 발열량 및 온실가스 배출계수: 전력 및 연료별 온실가스 배출계수. 에너지온실가스종합정보 플랫폼(EG-TIPS).

환경부 (2023). 제4차 지하수관리기본계획(2022~2031). 환경부 토양지하수과.

환경부, 한국수자원공사 (2023). 지하수 조사연보 2023. 대전: 환경부·한국수자원공사.

환경부 (2025). 전력배출계수 갱신 주기 3년에서 1년으로 단축, 국제 기준 반영. 환경부 보도자료(2025년 12월 18일).

연안 수치모델링의 전 과정을 잇는 통합 플랫폼: Delft-to-Celeris Dashboard

Water for future
학술/기술 기사
02

황 순 철
한국해양과학기술원
해양공간개발·에너지연구부
선임연구원
shwang@kiost.ac.kr

1. 머리말

태풍과 폭풍해일, 고파랑에 의한 월파와 침수는 연안 지역에서 반복적으로 발생하는 주요 재해이다. 이러한 연안 재해를 평가하기 위해서는 먼바다에서 해안선에 이르기까지 서로 다른 공간 규모에서 나타나는 수리현상을 단계적으로 해석할 필요가 있다. 광역에서는 정수압 가정을 바탕으로 조석과 폭풍해일에 따른 수위변동과 해수유동을 해석할 수 있으며, 파랑의 생성과 전파는 스펙트럼 기반 위상평균모형을 이용하여 효율적으로 계산할 수 있다. 반면 해안 가까이에서는 파랑의 분산성과 비선형성이 커지고 개별 파의 위상 변화가 중요해지므로, 이를 직접 해석하기 위해서는 보다 높은 공간·시간 해상도를 사용하는 위상분해형 파랑모형이 필요할 수 있다.

이처럼 공간 규모에 따라 중요하게 고려해야 하는 물리현상과 이를 해석하는 수치적 접근방법, 그리고 요구되는 계산부하가 서로 다르기 때문에 하나의 수치모형으로 전 과정을 모두 해석하기는 비효율적인 경우가 많다. 실무와 연구에서는 각 공간 규모와 물리현상에 적합한 수치모형을 단계적으로 적용하거나 연계하여 사용하는 방식이 널리 활용된다. 예를 들어 광역 조석 및 해수유동에는 Delft3D FLOW(Deltares,

2024), 바람에 의한 파랑의 생성·발달·전파에는 제3세대 스펙트럼 파랑모형인 SWAN(Booij et al., 1999), 해안 가까이에서 개별 파의 상세한 변형을 해석하기 위해서는 Boussinesq형 모형인 Celeris Advent(Tavakkol and Lynett, 2017)를 적용할 수 있다. Delft3D FLOW와 SWAN은 비교적 넓은 영역을 효율적으로 계산하는 데 적합한 반면, Celeris Advent는 높은 공간·시간 해상도로 개별 파의 변형을 직접 해석한다. 이러한 위상분해형 계산은 본래 큰 계산부하를 요구하지만, Celeris Advent는 GPU 가속을 통해 이를 크게 줄여 실시간에 가까운 고속 계산이 가능하다.

그러나 여러 수치모형을 함께 활용하는 과정에서는 실제 계산 못지않게 입력자료를 준비하고 각 모형의 조건을 구성하는 데 상당한 시간과 노력이 필요하다. 모형마다 격자와 수심자료의 형식이 다르고, 개방경계의 조석 조화상수, 해상풍, 입사파, 관측점 등의 입력자료 역시 서로 다른 규칙에 따라 작성해야 한다. 이러한 전처리 과정은 대개 연구자가 개별적으로 작성한 스크립트와 수작업에 의존하며, 계산영역이나 기간, 해상도, 외력조건을 변경할 때마다 유사한 작업을 반복해야 한다. 그 결과 동일한 조건의 모델을 다시 구축하기 어렵고, 작업자에 따라 입력자료나 설정값이 달라질 가능성도 존재한다.

입력 구축 과정의 복잡성은 검토할 수 있는 조건의 수를 제한한다는 점에서도 문제가 된다. 연안재해 평가에서는 계산영역의 범위와 해상도, 수심자료의 종류, 외력조건 등에 따라 결과가 달라질 수 있으므로 여러 대안을 비교·검토하는 과정이 중요하다. 그러나 한 번의 모델 구축에 많은 시간이 소요되면 조건을 변경하여 반복적으로 계산하기 어렵고, 격자나 수심, 경계조건의 오류도 계산이 완료된 이후에야 발견되는 경우가 있다. 따라서 모델을 구축하는 각 단계에서 생성된 격자와 수심, 경계조건 등을 지도상에서 직접 확인할 수 있다면 입력 오류를 조기에 발견하고 반복적인 시행착오를 줄일 수 있다.

국내 해역을 대상으로 수치모델링을 수행할 경우에는 자료의 수집과 연계 문제도 추가된다. 전 지구 수심자료만으로는 연안의 복잡한 지형과 수심 변화를 충분히 표현하기 어려운 경우가 있어 국내에서 제공되는 수심자료를 함께 활용할 필요가 있다. 또한 계산결과를 검증하기 위해서는 조위와 파랑 등의 관측자료를 별도로 수집하고, 이를 모델 결과와 동일한 시간축으로 맞추어 비교해야 한다. 기존의 공개 전처리 도구인 Delft Dashboard(van Ormondt et al., 2020)는 전 지구 자료를 활용한 수치모형 구축에 강점이 있으나, 국내 연안의 복잡한 지형과 해양 특성을 보다 정확히 반영하기 위해서는 국내 수심·관측 DB를 연계하는 추가적인 작업이 필요하다.

이러한 한계를 개선하기 위해 본 연구에서는 지도 기반의 사용자 인터페이스에서 계산영역을 설정하고 단계별 조건을 적용하면 Delft3D FLOW, SWAN, Celeris Advent의 입력자료를 생성하고, 계산 실행과 결과 확인까지 하나의 환경에서 연속적으로 수행할 수 있는 Delft-to-Celeris Dashboard(이하 D2C Dashboard)를 개발하고 있다. D2C Dashboard는 서로 다른 수치모형의 전처리 과정을 가능한 한 동일한 작업 흐름으로 구성하고, 국내외 지형·수심 및 관측자료를 모델 구축과 결과 확인 과정에 연계하는 것을 목표로 한다. 또한 자연어 기반의 대화형 인터페이스를 통해 기존의 모델 구축 기능을 보다 직관적으로 사용할 수 있도록 구성하고 있다.

본 기사에서는 D2C Dashboard의 전체 구성과 모델링 흐름을 소개하고, Delft3D FLOW, SWAN, Celeris Advent의 모형별 구축 절차와 자연어 기반의 대화형 모델 구축 기능을 순차적으로 설명하고자 한다.

2. D2C Dashboard의 개요 및 특징

D2C Dashboard는 지도를 중심으로 구성된 데스크톱 기반 수치모델링 지원 도구이다(그림 1). 화면의 지도와 도구 모음에서 Delft3D FLOW, SWAN, Celeris Advent 가운데 대상 모형을 선택할 수 있으며, 각 탭에는 해당 모형의 구축 단계가 순서대로 구성되어 있다. 사용자가 각 단계에서 설정값을 입력하고 적용하면 해당 입력파일이 생성되고, 격자·수심·경계조건 등의 결과가 지도에 즉시 표시된다. 마지막 모델 구축 단계에서는 전체 입력을 완성한 후 계산을 실행할 수 있다. 선행 단계의 설정이 변경되면 이에 영향을 받는 후속 단계를 다시 적용하도록 표시함으로써 서로 다른 조건에서 생성된 입력파일이 혼재하는 것을 방지한다.

각 단계에서는 입력값을 적용하기 전에 설정 범위와 선행 단계의 적용 여부, 좌표의 계산영역 포함 여부 등을 검사한다. 입력값이 허용 범위를 벗어나거나 필수 조건이 충족되지 않은 경우에는 파일 생성을 중단하고 그 원인을 표시하며, 계산은 가능하지만 주의가 필요한 조건은 경고로 구분하여 제시한다. 생성된 입력파일은 사용자가 지정한 작업 폴더 아래 모델별로 저장되고, 적용된 설정과 원자료 정보는 프로젝트 파일에 함께 기록된다. 이에 따라 동일한 조건의 모델을 다시 생성할 수 있으며, D2C Dashboard에서 생성한 모델 폴더는 각 수치모형의 원본 실행파일을 이용하여 독립적으로 실행할 수 있도록 구성하였다.

D2C Dashboard에서 활용하는 자료는 크게 지

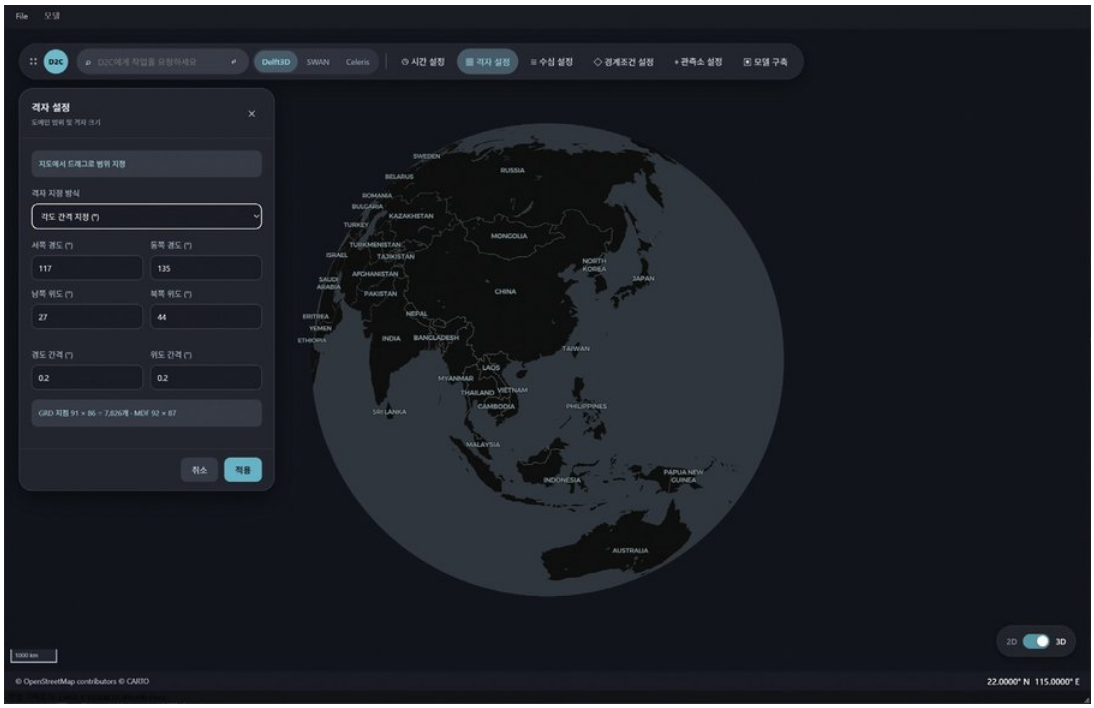


그림 1. D2C Dashboard의 사용자 인터페이스(지도, 모델 탭, 단계별 설정 창)

형·수심자료, 외력자료, 관측자료로 구분할 수 있다. 지형·수심자료로는 전 지구 수심자료인 GEBCO 2024(GEBCO Compilation Group, 2024)와 국립해양조사원이 제공하는 150 m 간격의 해양수치모델 전용 격자형 수심자료 BADA2024를 이용한다. 외력자료로는 TPXO 조석모형(Egbert and Erofeeva, 2002)의 조화상수, 일본 기상청 중규모 모형(MSM-GPV)의 해상풍, JONSWAP 스펙트럼으로 정의하는 입사파 등을 활용하며, 결과 확인을 위해 국립해양조사원(KHOA)의 조위관측자료와 해양수산부 전국파랑관측자료 제공시스템(WINK)의 파랑 관측자료를 연계한다.

세 모형 탭은 가능한 한 동일한 작업 흐름을 갖도록 구성하였다. 계산영역은 경위도 범위로 지정하고, 해상도를 입력하면 격자 수가 자동으로 계산된다. 격자 생성, 자료 보간, 입력파일 작성과 같은 수치 처리는 정해진 처리 모듈에서 수행하며, 계산은 수정하지 않은 각 수치모형의 원본 실행파일을 이용한다. D2C Dashboard에서 지원하는 주요 기능은 ① 광역 조석·해수유동을 위한 Delft3D FLOW, ② 파랑 해석을 위한 SWAN, ③ 연안의 상세한 파랑 변형을 위한 Celeris Advent, ④ 세 모형에 공통으로 적용되는 자연어 기반 대화형 모델 구축 기능으로 구성된다.

2.1 Delft3D FLOW 탭

Delft3D FLOW 탭은 조석과 해수유동 모의에 필요한 입력자료를 구축하고 실행하기 위한 기능으로, 시간, 격자, 수심, 경계, 관측소, 모델 구축의 여섯 단계로 구성되며 현재는 수심평균 2차원 모형을 대상으로 한다. 시간 단계에서는 모의 기간과 계산 시간간격, 시간대를 지정하고, 격자 단계에서는 지도에서 직접 영역을 선택하거나 경위도 범위를 입력하여 구면좌표 직사각형 격자를 생성한다. 해상도는 각도 또는 미터 단위로 지정할 수 있으며, 계산되는 격자점 수를 사전에 확인할 수 있다.

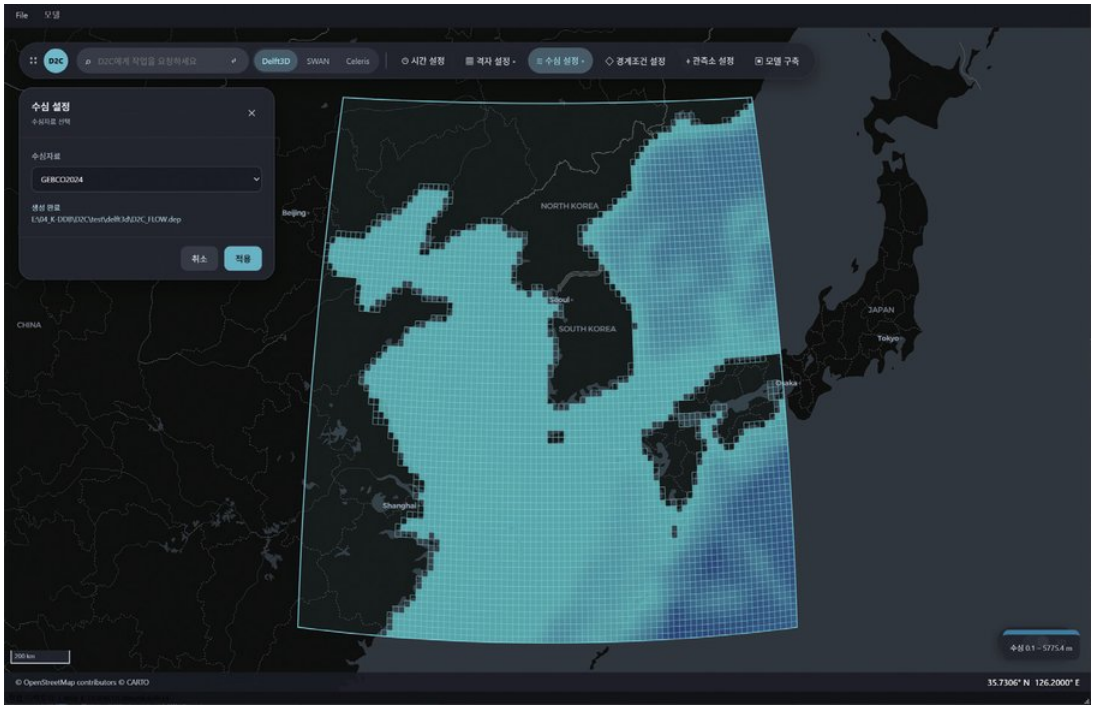


그림 2. Delft3D FLOW 탭에서 격자·수심·개방경계를 적용한 화면

그림 3. Delft3D FLOW 결과 창: 계산 및 관측 조위 시계열 비교

격자가 생성되면 수심자료의 표고를 이용하여 육지와 바다를 구분하고, 서로 연결된 해역을 대상으로 계산영역을 자동으로 구성한다. 수심 단계에서는 GEBCO 2024 또는 BADA2024를 선택하여 계산격자에 맞는 수심자료를 생성한다. GEBCO 2024는 격자 해상도에 맞추어 원자료를 처리한 후 보간하고, BADA2024는 인접한 자료를 이용하여 각 격자점의 수심을 결정한다. 생성된 수심은 지도에 색으로 표시되어 해안선과 주요 지형이 의도한 대로 반영되었는지 확인할 수 있다(그림 2).

경계 단계에서는 계산영역 외곽 가운데 일정 수심 이상의 구간을 찾아 개방경계를 구성하고, 각 경계에서 TPXO 조석모형의 분조별 진폭과 위상을 보간하여 조화상수 경계조건을 생성한다. 사용자는 전체 외곽 또는 동·서·남·북 가운데 원하는 방향에만 개방경계를 설정할 수 있으며, 생성된 경계는 지도에서 확인할 수 있다. 관측소 단계에서는 계산영역 내부의 KHOA 조위관측소를 자동으로 검색하고, 관측소가 육지 격자로 분류되는 경우 가장 가까운 해역 격자로 이동하여 출력지점으로 등록한다.

모델 구축 단계에서는 주 입력파일을 포함한 전체 모델 입력을 생성하고 계산을 실행한다. 계산이 시작되면 결과 창에서 시간에 따른 수위 분포와 관측지점 시계열을 확인할 수 있으며, KHOA 조위관측소가 등록된 경우 동일 기간의 관측자료를 함께 표시하고 평균을 제거한 수위 시계열의 평균제곱근오차와 상관계수를 제시한다(그림 3). 이를 통해 사용자는 대상 해역의 조석 모의를 동일한 절차로 반복 구축하고, 격자 해상도나 수심자료를 변경했을 때의 차이를 비교할 수 있다. 기존 모델의 주요 설정을 불러와 D2C Dashboard의 절차에 따라 입력파일을 다시 생성하는 기능도 포함하고 있다.

2.2 SWAN 탭

SWAN 탭은 제3세대 스펙트럼 파랑모형 SWAN의 입력자료를 구축하고 실행하기 위한 기능으로, 시간, 격자, 수심, 바람, 경계, 출력 지점, 모델 구축의 일곱 단계로 구성되며 비정상 상태 모의를

대상으로 한다. 시간 단계에서는 모의 기간과 계산 간격을 지정하고, 격자와 수심 단계에서는 계산영역과 해상도를 설정한 뒤 선택한 수심자료를 SWAN 계산격자에 보간하여 입력파일을 생성한다. 생성된 격자와 수심 분포는 지도에서 바로 확인할 수 있다.

바람 단계에서는 바람이 없는 조건, 일정 풍속·풍향 조건, 기존 바람파일 사용, MSM-GPV 해상풍 자동 수집의 네 가지 방식을 지원한다. MSM-GPV를 이용하는 경우 모의 기간에 필요한 자료를 수집하여 SWAN에서 사용할 수 있는 시간별 바람장으로 변환한다. 수집된 자료는 동일 기간의 모델을 다시 구축할 때 재사용할 수 있으며, 필요한 날짜의 자료가 없거나 입력값에 이상이 있는 경우에는 모델 생성을 중단하고 해당 원인을 사용자에게 제시한다.

경계 단계에서는 다중 격자 구성을 지원한다. 부모 도메인에서는 자식 도메인의 범위와 격자 수, 저장 간격을 지정하여 자식 영역 외곽의 파랑 스펙트럼을 저장하고, 자식 도메인에서는 부모 도메인이 생성한 스펙트럼을 경계조건으로 이용하도록 설정할 수 있다. 출력 지점은 지도에서 직접 선택하거나 좌표로 지정하며, 모델 구축 단계에서는 방향 및 주파수 분할 수와 같은 스펙트럼 해상도, 바닥 마찰 등의 주요 물리 옵션과 결과 저장 간격을 설정한다.

계산을 시작하면 결과 창에서 유의파고, 첨두주기, 파향, 풍속의 공간분포를 시간에 따라 확인할 수 있으며, 지정한 출력 지점의 시계열을 비교할 수 있다(그림 4). 출력 지점 인근에 WINK 파랑 관측소가 있는 경우에는 해당 기간의 관측자료를 계산결과와 같은 그래프에 표시한다. 또한 입력파일은 가능한 한 모델 폴더 내부의 상대경로를 이용하도록 구성하여 경로 길이와 관련된 오류 가능성을 줄이고, 바람자료와 경계자료의 시간축을 모의시간과 일관되게 관리하도록 하였다. 이를 통해

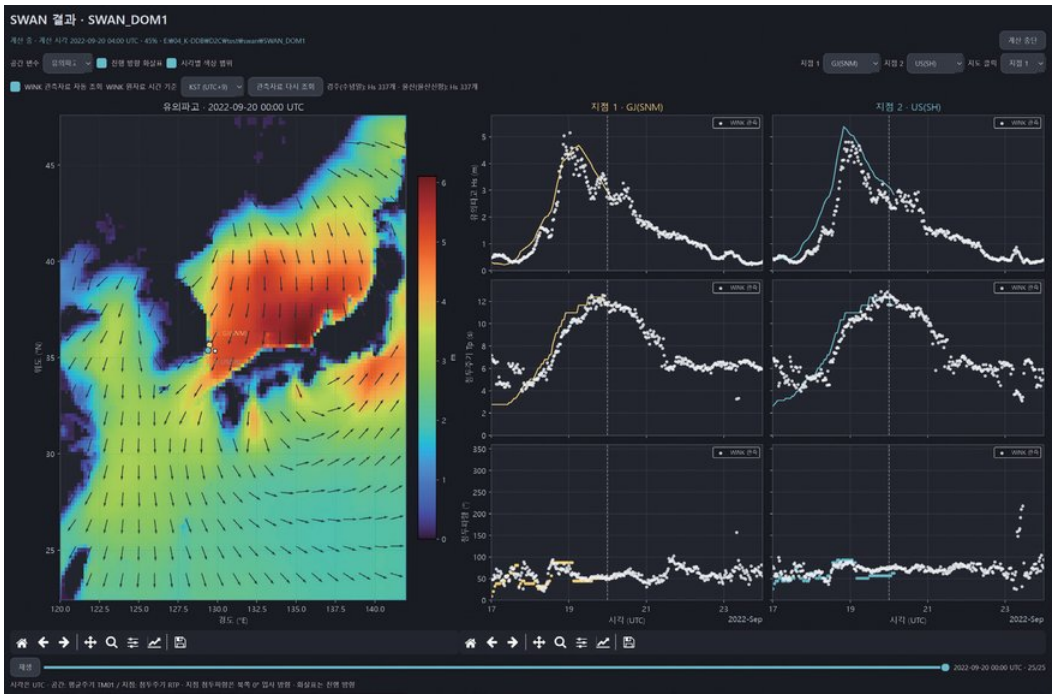


그림 4. SWAN 결과 창: 유의파고 분포와 계산 및 관측 유의파고, 첨두주기 및 파향 비교

광역에서 연안으로 이어지는 다중 격자 파랑 모의를 동일한 작업 흐름으로 구축할 수 있다.

2.3 Celeris 탭

Celeris 탭은 Celeris Advent의 입력자료를 구축하고 실행하기 위한 기능으로, 격자, 지형, 경계, 계측점, 모델 구축의 다섯 단계로 구성된다. Celeris Advent는 미터 단위의 직사각형 등간격 격자를 이용하므로, 격자 단계에서는 경위도로 지정한 계산영역을 남서쪽 모서리를 원점으로 하는 평면좌표계로 변환하고 사용자가 지정한 격자 크기에 따라 계산격자를 생성한다. 지형 단계에서는 BADA2024 수심자료를 계산격자에 보간하여 지형 파일을 작성하며, 주변에 수심자료가 없는 지점은 육지로 처리한다.

경계 단계에서는 네 경계 가운데 파가 유입되는 경계를 지정하고, 유의파고, 첨두주기, 파향, 첨두증폭계수와 방향분산으로 정의한 JONSWAP 스펙트럼을 주파수와 방향별 성분파로 분해하여 입사파 파일을 작성한다. 성분파의 진폭은 합성된 유의파고가 입력값과 일치하도록 정한다. 파향은 SWAN 및 관측자료와 동일한 기준으로 입력하고, 이를 Celeris에서 사용하는 방향 정의에 맞게 변환한다. 나머지 세 경계는 흡수층 또는 반사 경계조건으로 지정한다. 계측점 단계에서는 수면 변위를 기록할 지점을 지정하며, 적용한 지형과 입사 경계, 계측점은 지도에 함께 표시된다(그림 5).

모델 구축 단계에서는 계산 시간간격을 직접 지정하거나 자동으로 설정할 수 있다. 자동 설정 시에는 영역의 최대 수심과 격자 크기로부터 대표 파속을 산정하고, CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) 수를 기준으로 수치적으로 안정적인 범위에서 계산 시간간격을 결정한다. 또한 Boussinesq 형 모형은 격자 크기와 파장의 관계에 민감하므로, 입사 경계의 평균 수심과 가장 짧은 성분파의 파장을 이용하여 격자 해상도의 적절성을 확인하

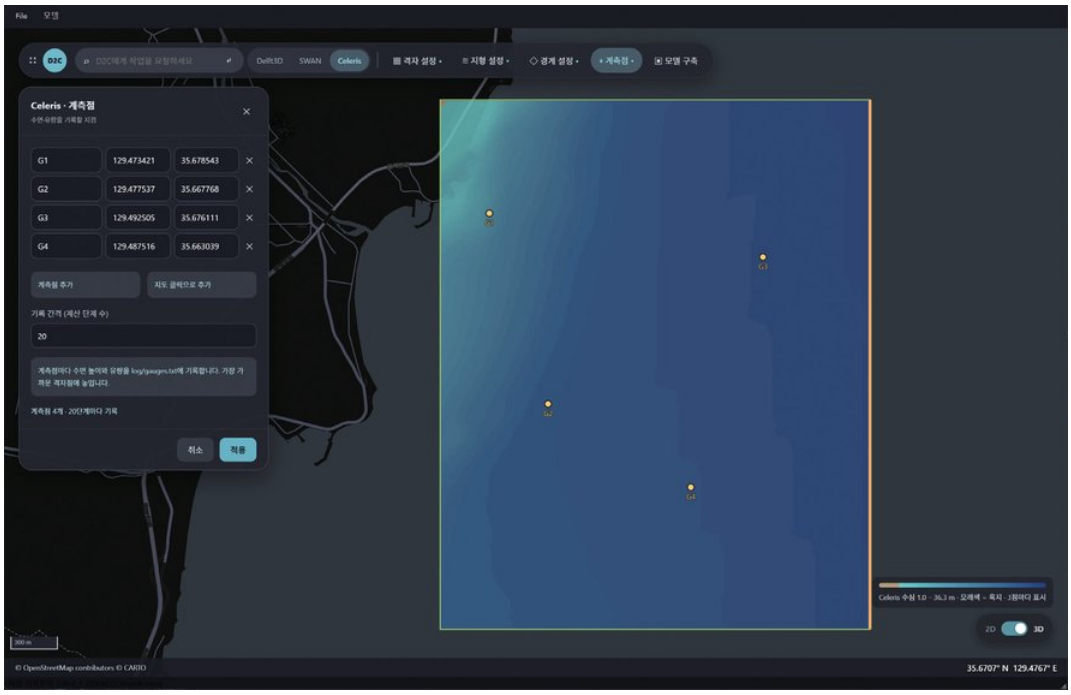


그림 5. Celeris 탭에서 지형·입사 경계·계측점을 적용한 화면

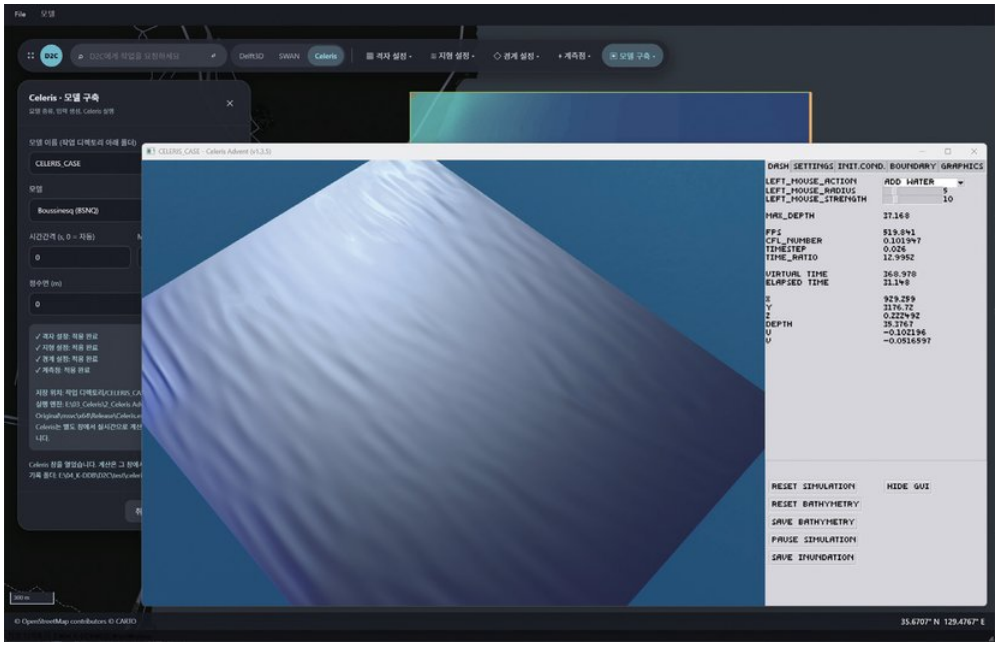


그림 6. Celeris 실행 화면

고, 한 파장에 포함되는 격자 수가 부족하거나 입사 경계의 수심이 해당 파랑조건에 비해 지나치게 깊은 경우에는 경고를 표시한다.

모델 구축이 완료되면 Celeris Advent를 실행하여 계산된 수면 변화를 실시간으로 확인할 수 있다(그림 6). 현재 본 기능은 관심 해안의 파랑 변형을 신속하게 검토하는 용도를 우선적으로 고려하고 있으며, 정밀한 연안 해석을 위해서는 향후 보다 상세한 지형자료와 구조물 정보를 추가로 반영할 필요가 있다.

2.4 대화형 모델 구축

D2C Dashboard는 단계별 설정 창을 직접 조작하는 방식과 함께, 대화창에 자연어로 요청을 입력하여 모델을 구축하는 기능을 제공한다(그림 7). 예를 들어 사용자가 선택한 모형 탭에서 “기본값으로 모델을 구축해 줘”, “격자 간격을 0.1도로 바꾸고 다시 구축해 줘”와 같이 요청하면 D2C Dashboard는 필요한 단계를 순서대로 적용하고, 각 단계의 결과를 지도와 대화창에 표시한다. 계산 실행도 같은 방식으로 요청할 수 있으며, 이 기능은 Delft3D FLOW, SWAN, Celeris Advent 세 모형 모두에서 사용할 수 있다.

D2C Dashboard의 대화형 인터페이스는 OpenAI API를 이용하여 사용자의 자연어 요청을 해석하고, 이를 단계별 모델 구축 기능에 필요한 명령과 설정값으로 변환한다. 실제 격자 생성, 자료 보간 및 입력파일 작성은 언어모델이 아닌 D2C Dashboard 내부의 처리 모듈에서 수행한다. 따라서 대화형 기능을 이용하여 구축한 모델과 사용자가 단계별 설정 창에서 직접 구축한 모델은 동일한 설정을 사용할 경우 동일한 입력파일을 생성한다. 적용된 설정도 프로젝트 파일에 그대로 저장되므로 이후에는 대화형 기능을 사용하지 않고도 같은 모델을 다시 구축할 수 있다.

또한 언어모델의 역할을 사용자의 요청을 해석하고 기존 D2C Dashboard 기능을 호출하는 데 한정하였다. 입력값이 허용 범위를 벗어나거나 선행 단계

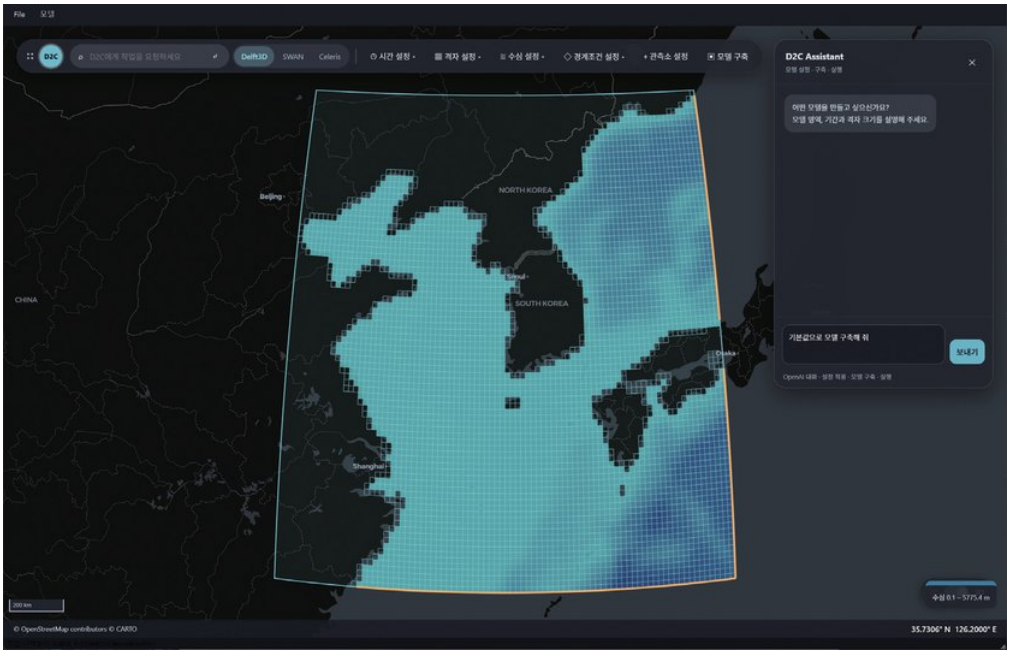


그림 7. 대화형 모델 구축 화면

가 적용되지 않은 경우에는 D2C Dashboard 내부 처리 모듈에서 발생한 오류가 그대로 대화창에 전달되며, 언어모델이 계산결과나 입력파일을 임의로 생성하지 않도록 구성하였다. 대화형 요청은 요청 시점에 선택되어 있는 모형 탭에만 적용되며, 실행파일이나 원자료의 경로처럼 사용환경에 직접 관련되는 항목은 대화로 변경할 수 없도록 제한하였다. 외부 언어모델 서비스를 사용할 수 없는 환경에서도 단계별 설정 창을 이용한 기존 모델 구축 기능은 동일하게 사용할 수 있다.

이와 같은 구조는 생성형 인공지능이 수치모형의 물리적 판단이나 실제 수치계산을 대신하도록 하기보다는, 사용자의 자연어 요청을 기존의 검증된 모델 구축 절차와 연결하는 인터페이스로 활용하는 데 목적이 있다.

3. 맺음말

D2C Dashboard는 광역 조석·해수유동, 파랑, 연안 파랑 변형을 다루는 Delft3D FLOW, SWAN, Celeris Advent의 입력 구축과 실행, 결과 확인을 하나의 지도 기반 환경에서 단계적으로 수행하기 위해 개발하고 있는 통합 수치모델링 도구이다. 각 모형에서 개별적으로 수행하던 전처리 과정을 유사한 구조의 단계로 구성하고, 격자와 수심, 경계조건 등의 결과를 지도에서 즉시 확인할 수 있도록 함으로써 계산영역 설정에서 모델 실행까지 일관된 작업 흐름을 제공하고자 하였다.

D2C Dashboard의 주요 특징은 국내 수심자료와 조위·파랑 관측자료를 모델 구축 및 결과 확인 과정에 직접 연계하고, 적용된 설정을 저장하여 동일한 입력을 다시 생성할 수 있도록 한 점이다. 계산에는 각 수치모형의 원본 실행파일을 그대로 사용하며, 계산이 진행되는 동안 결과를 확인하고 관측자료와 비교할 수 있다. 또한 OpenAI API를 활용한 자연어 기반의 대화형 인터페이스를 통해 동일한 모델 구축 절차를 수행할 수 있도록 하여, 사용자가 입력파일의 형식과 반복적인 자료변환에 소비하는 시간을

줄이고 계산영역과 외력조건의 설정 및 결과 해석에 보다 집중할 수 있도록 하였다.

현재 D2C Dashboard는 Delft3D FLOW, SWAN, Celeris Advent 각각에 대한 기본적인 입력 구축, 실행 및 결과 확인 기능의 검증을 완료하였으며, 다음 단계로 모형 간 입·출력자료를 직접 교환하는 결합 모델링 기능을 개발하고 있다. SWAN의 다중 격자 기능을 이용한 파랑모형 내부의 연계는 이미 구현되어 있으나, 서로 다른 수치모형 사이의 직접적인 자료 전달에는 추가적인 처리가 필요하다. 특히 Delft3D FLOW와 Celeris Advent를 연계할 경우에는 비분산형 장주기 유동을 해석하는 모형과 분산성을 고려하는 위상분해형 파랑모형 사이의 물리적 차이를 고려해야 하므로, Delft3D FLOW의 계산결과를 Celeris의 경계조건으로 단순히 전달하기보다는 두 모형의 물리체계에 적합한 별도의 경계조건 처리기법이 필요하다.

향후에는 이러한 모형 간 연계기능을 단계적으로 구현하여 Delft3D FLOW–SWAN–Celeris Advent를 이용한 다중 규모 연안 수치모델링 환경으로 확장하고자 한다. 또한 현재 활용하고 있는 GEBCO와 BADA2024뿐만 아니라 국내외에서 제공되는 다양한 고해상도 지형·수심자료를 추가로 지원하여 대상 해역과 해석 목적에 따라 적절한 자료를 선택할 수 있도록 기능을 확대할 계획이다. 나아가 보다 상세한 연안·육상 지형과 항만 및 연안 구조물 자료까지 연계할 수 있다면 Celeris Advent를 이용한 상세 파랑변형 및 연안 재해 해석의 적용범위도 더욱 넓어질 것으로 기대된다.

이와 같은 기능이 단계적으로 보완된다면 D2C Dashboard는 단순한 수치모형 전처리 도구를 넘어, 서로 다른 공간 규모와 물리과정을 다루는 수치모형을 하나의 일관된 작업 흐름으로 연결하는 통합 모델링 플랫폼으로 발전할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통해 반복적인 전처리 작업을 줄이고 연안 수치모델링의 접근성과 재현성을 높이는 동시에, 다양한 모형을 활용한 다중 규모 해석을 보다 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원의 적립금사업 “해양에너지 및 항만·해양구조물 고도화 기술 개발 (PKB0014)”의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

Deltares. (2024). Delft3D-FLOW user manual.

Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. Journal of Geophysical Research: Oceans, 104(C4), 7649-7666.

Tavakkol, S., & Lynett, P. (2017). Celeris: A GPU-accelerated open source software with a Boussinesq-type wave solver for real-time interactive simulation and visualization. Computer Physics Communications, 217, 117-127.

GEBCO Compilation Group. (2024). GEBCO 2024 Grid [Data set]. https://doi.org/10.5285/1c44ce99-0a0d-5f4f-e063-7086abc0ea0f

Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 19(2), 183-204.

인공신경망 모델에 의한 경사식 호안 배후 포장체 파력 추정

Water for future
학술/기술 기사
03

김 태 완
국립창원대학교
토목공학과 석사과정
kimktwkim@naver.com

박 성 준
국립창원대학교
토목공학과 석사과정
steve9087@naver.com

오 상 호
국립창원대학교 스마트그린공학부
건설시스템공학전공 교수
ohsangho@changwon.ac.kr

1. 서론

호안은 해안 침식과 배후 육지의 침수 피해를 방지하기 위한 구조물로, 해수면 상승과 태풍의 빈도·강도 증가로 연안 재해가 잦아지면서 그 중요성이 더욱 커지고 있다. 호안 설계 시 검토해야 하는 허용 월파량과 파랑 작용에 대한 구조적 안정성 산정식은 다수의 선행 연구를 통해 비교적 잘 정립되어 있다. 그러나 호안 배후면 포장체에 작용하는 파력에 대해서는 아직 연구가 불충분한 실정이다. 포장체는 상부구조물에 비해 파랑의 직접적인 영향을 적게 받지만 태풍 시 큰 규모의 월파가 발생하면 손상될 수 있으며, 도로 및 인도로 활용되어 사람들의 생활과 밀접한 공간이므로 안정성을 평가할 수 있는 산정식의 개발이 필요하다.

호안 배후면 포장체에 대한 연구로 Ko et al.(2022)은 경사식 호안 배후 포장체의 상·하부에 작용하는 파력을 수리모형실험으로 계측하여 경험식을 제안하였고, Lee et al.(2022)은 상부구조물 선단으로부터의 이격 거리에 따른 포장체 상부 파압 산정 경험식을 제안하였다. 그러나 이러한 경험식은 특정 조건의 실험 결과에 기반하므로 다양한 파랑 조건과 구조물 형상에 적용하기에는 한계가 있다. 실제 설계에서는 파고,

주기, 수심, 상대여유고 등 여러 인자가 복합적으로 작용하여 하중 특성이 비선형적으로 변화하며, 수치모델링은 이를 비교적 정밀하게 재현할 수 있으나 초기 조건과 격자 구성에 민감하고 계산에 많은 시간이 소요된다.

이러한 관점에서 최근 해안공학 분야에서도 데이터 기반 예측 기법의 활용이 증가하고 있다. 인공신경망(ANN, Artificial Neural Network)은 충분한 자료가 확보되면 입·출력 변수 간의 비선형 관계를 스스로 학습하고, 학습 후에는 예측 결과를 즉각 산출할 수 있다. Mares-Nasarre et al.(2021)은 사석방파제의 월파층 두께와 월파 유속을 인공신경망으로 예측하여 기존 경험식보다 높은 정밀도를 얻었고, Oh and Oh(2022, 2024)는 조파기 입력파고 예측에 인공신경망과 가우시안 과정 회귀를 적용하여 높은 정확도를 확인하였다. 본 학술기사는 Ko et al.(2022)과 Lee et al.(2022)의 실험 자료를 이용하여 포장체 상부면 작용 파력(F_{vo})과 하부면 작용 파력(F_{vu})을 추정하는 인공신경망 모델을 구축하고, 그 성능을 기존 경험식과 비교한 최근 연구 결과 (Kim et al., 2026)내용을 요약하여 소개하였다.

2. 실험 자료 및 기존 경험식

2.1 실험 자료

Ko et al.(2022)의 실험은 길이 50 m, 너비 1.2 m, 높이 1.6 m의 2차원 조파수조에서 수행되었으며, 실험 단면과 매개변수의 정의는 그림 1과 같다. 사면부에 테트라포드(TTP)를 2열 및 4열로 피복한 조건에 대해 실험이 이루어졌고, 2열 조건에서는 높이 4 cm의 파라펫 유무에 따라 각각 실험이 수행되었다. 파라펫이 없으면 여유고(R_c)와 정수면에서 피복재 상단까지의 높이(A_c)가 같고, 파라펫이 설치되면 두 값이 달라진다. 파력은 그림 1에 붉은색 점으로 표시된 위치의 파압계 계측값으로부터 산정되었다.

Lee et al.(2022)의 실험은 길이 100 m, 너비 2

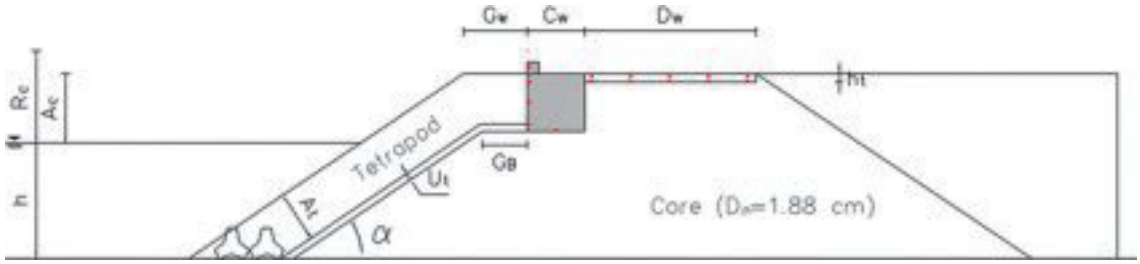


그림 1. Ko et al.(2022)의 실험 단면 및 매개변수 정의

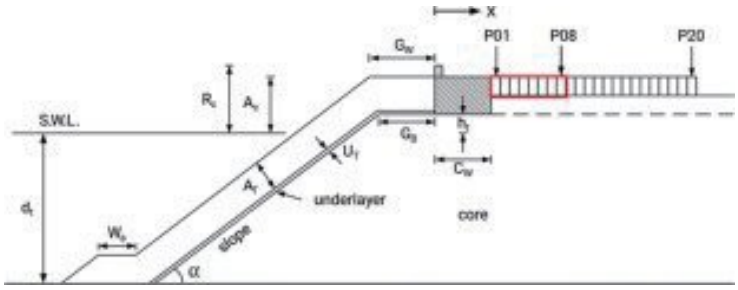


그림 2. Lee et al.(2022)의 실험 단면 및 매개변수 정의

표 1. 두 수리모형실험 데이터의 주요 조건

구분	Ko et al.(2022)	Lee et al.(2022)
수심	0.20, 0.25, 0.40, 0.45 m	0.8 m
유의파고 H_s	0.08~0.14 m	0.2~0.3 m
유의주기 T_s	1.4, 1.8, 2.2 s	2.0~3.2 s
여유고 R_c	0.07~0.19 m	0.30, 0.34, 0.38 m
파랑 스펙트럼	JONSWAP(γ = 3.3)	Bretschneider-Mitsuyasu

m, 높이 3 m의 2차원 조파수조에서 수행되었다(그림 2). 상부구조물 뒤쪽의 포장체는 20개의 패널로 구성되고, 각 패널에 하중계(load cell) 2대가 부착되어 파력이 계측되었다. 본 연구에서는 Ko et al.(2022)의 실험 범위($0.073 \le D_w/L_{m0} \le 0.199$)에 해당하는 P01~P08의 8개 패널 자료를 활용하였다. 여기서 D_w는 포장체의 폭, L_{m0}는 스펙트럼 평균주기로부터 구한 심해 파장이다. 두 실험의 주요 조건은 표 1과 같으며, R_c, A_c, 피복재 어깨폭(G_w), 주 피복층 두께(A_t), 포장체 두께(h_t), 수심(h), 유의파고(H_s), 유의파장(L_s) 등을 인공신경망 모델 구축에 활용하였다.

2.2 기존 경험식의 성능

Ko et al.(2022)은 포장체 상부면 작용 파력 F_{vo}와 하부면에 연직 방향으로 작용하는 파력 F_{vu}에 대해 각각 식 (1), (2)의 경험식을 제안하였다.

$$F_{vo} = \begin{cases} 0.5024\rho g R_c D_w W \cdot \exp\left\{-3.504\dfrac{R_c}{H_s}\right\}\dfrac{L_{m0}}{G_w}\dfrac{h}{H_s}, & \text{if } \dfrac{R_c}{A_c} > 1 \\ 0.0659\rho g R_c D_w W \cdot \exp\left\{-3.266\dfrac{R_c}{H_s}\right\}\dfrac{L_{m0}}{G_w}\dfrac{h}{H_s}, & \text{if } \dfrac{R_c}{A_c} = 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$F_{vu} = 1.297\rho g (A_c - h_t) D_w W \cdot \exp\left\{-10.33\frac{A_c - h_t}{H_s}\right\}\frac{L_{m0}}{G_w}\frac{h}{H_s} \quad (2)$$

여기서 W는 구조물의 폭이며, R_c/A_c 〉 1은 파라펫이 설치된 조건, R_c/A_c = 1은 설치되지 않은 조건이다. 한편 Lee et al.(2022)은 상부구조물 선단으로부터의 거리 x에 따른 무차원 최대 낙하파압을 $p^*_{max} = a(x/L_s)^b$의 형태로 제시하였으며, 계수 a, b와 최대 파압의 발생 위치는 R_c/A_c(1, 1.13, 1.27)에 따라 다르게 주어진다. 본 연구에서는 이 파압을 P01~P08 구간에 대해 적분하여 F_{vo}를 산정하였다.

경험식의 성능은 IOA(Index of Agreement; Willmott, 1981)와 NRMSE(Normalized Root Mean Square Error)로 평가하였다. IOA는 1에 가까울수록, NRMSE는 작을수록 예측 정확도가 높음을 의미한다. 두 실험의 시설과 조건이 달라 파력값의 범위가 크게 다르므로, 파력은 $\rho g H_s^2$으로 나누어 무차원화하여 비교하였다. 그 결과 식 (1)은 IOA 0.84, NRMSE 1.12로 실험값을 비교적 잘 재현하나 전반적으로 다소 크게 예측하였고, 식 (2)는 IOA 0.76, NRMSE 0.94로 전반적으로 과소평가하는 경향

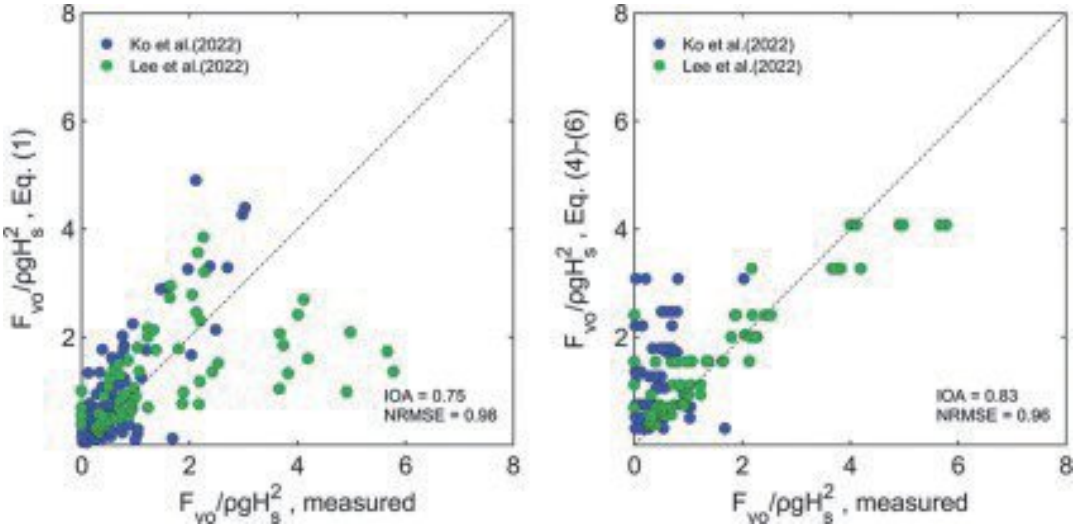


그림 3. 두 실험 자료에 대한 기존 경험식의 적용 결과(좌: Ko et al.(2022)의 식, 우: Lee et al.(2022)의 식)

을 보였다. Lee et al.(2022)의 경험식은 IOA 0.94, NRMSE 0.39로 자체 실험값을 잘 재현하였다.

그러나 그림 3과 같이 두 실험 자료를 각 경험식에 함께 적용하면 Ko et al.(2022)의 식은 IOA 0.75, NRMSE 0.98, Lee et al.(2022)의 식은 IOA 0.83, NRMSE 0.96으로 예측 정확도가 현저히 낮아졌다. 즉, 각 경험식은 도출에 사용된 실험 조건에는 적합하지만 구조 형상과 파랑 조건이 다른 자료에는 적용성이 떨어지며, 이러한 점을 고려하여 다양한 조건의 비선형 상관관계를 반영할 수 있는 데이터 기반 예측 방법이 요구된다.

3. 인공신경망 모델 구축

3.1 모델 구성

인공신경망은 입력층, 은닉층, 출력층으로 구성되며, 각 층의 노드가 계층적으로 자료를 전달하고 변환함으로써 복잡한 비선형 패턴을 학습한다. 본 연구에서는 표 2와 같이 F_{vo}에 대해 A1~A3, F_{vu}에 대해 B1~B3의 입·출력변수 조합을 적용하였다. A1, A2, B1, B2는 무차원 변수로, A3와 B3는 차원 변수로 구성된다. 은닉층은 1개로 하되 노드 수를 8~15개의 8가지로 변화시켰으며, 활성함수로는 시그모이드

표 2. 파력 예측을 위한 입·출력변수 조합

구분	입력변수	출력변수
A1	H_s/h, L_s/G_w, R_c/H_s, R_c/A_c	$F_{vo}/\rho gH_s^2$
A2	H_s/h, L_s/G_w, R_c/H_s, R_c/A_c, A_t/H_s	$F_{vo}/\rho gH_s^2$
A3	h, H_s, T_s, A_c, R_c, G_w, A_t	F_{vo}
B1	H_s/h, L_s/G_w, $(A_c - h_t)/H_s$	$F_{vu}/\rho gH_s^2$
B2	H_s/h, L_s/G_w, $(A_c - h_t)/H_s$, A_t/H_s	$F_{vu}/\rho gH_s^2$
B3	h, H_s, T_s, A_c, G_w, A_t	F_{vu}

(sigmoid) 함수를 사용하였다. 자료는 학습 70%, 검증 15%, 평가 15%로 분할하여 Ko et al.(2022)의 자료 107개는 75개, 16개, 16개로, Lee et al.(2022)의 자료 72개는 50개, 11개, 11개로 나누었다.

3.2 모델 선정 방법

인공신경망의 성능은 학습에 사용되는 자료의 구성에 따라 달라질 수 있으며(Bouthillier et al., 2021), 자료 수에 비해 모델 복잡도가 과도하면 평가 자료에 대한 일반화 성능이 저하될 수 있다(Alwosheel et al., 2018). 이에 제한된 수리모형실험 자료를 고려하여 단일 은닉층 구조를 적용하고 노드 수로 모델 복잡도를 조절하였으며, 자료를 무작위로 분할한 200개의 데이터 세트(시드)에 대해 성능을 평가하였다. 각 조합별로 노드 수에 따른 200개 시드의 IOA와 NRMSE 평균값을 비교하여 최적 노드 수를 결정하되, 표준편차를 함께 검토하여 시드에 따른 모델링 결과의 민감도를 확인하였다. 노드 수 8~15개 범위에서 성능 차이는 크지 않아 구축된 모델이 노드 수에 민감하지 않은 것으로 나타났다.

이러한 과정을 통해 F_{vo}에 대해서는 Ko et al.(2022)의 자료, Lee et al.(2022)의 자료, 두 자료를 통합한 자료 각각에 A1~A3를 적용한 9개 모델을, F_{vu}에 대해서는 계측이 이루어진 Ko et al.(2022)의 자료에 B1~B3를 적용한 3개 모델을 구축하였다.

4. 파력 예측 결과

4.1 포장체 상부면 작용 파력 F_{vo}

표 3은 9개 인공신경망 모델의 IOA와 NRMSE를 기존 경험식의 결과와 함께 나타낸 것이다. 인공신경망 모델의 값은 학습 및 검증에 사용되지 않은 평가 자료에 대한 것이다. Ko et al.(2022)의 자료로 구축한 모델에서는 A3의 예측 성능이 가장 우수하였으며(은닉층 노드 수 11개), 무차원 변수로 구성된 A1과 A2도 식 (1)보다 개선된 성능을 보였다. Lee et al.(2022)의 자료로 구축한 모델은 세 조합 모두 IOA가 1.00, NRMSE가 0.07~0.09로 매우 우수하였다. 이는 파압계로 계측한 파압을 적분하여 파력을 산정한 Ko et al.(2022)과 달리 하중계로 파력을 직접 계측하여 자료의 산포도가 훨씬 작았기 때문으로 분석된다.

두 실험 자료를 함께 학습한 통합 모델의 결과는 그림 4와 같다. 이 경우에도 A3(노드 수 15개)의 성능이 가장 우수하였다. 무차원 변수로 구성된 A1과 A2는 개별 자료로 구축한 경우보다 성능이 저하된 반면, 차원 변수로 구성된 A3는 여전히 우수한 예측 성능을 유지하였다. 통상적으로 무차원 변수를 사용하면 축척 효과를 제거하고 자료의 분포 범위를 줄일 수 있어 더 선호되지만, 자료 수가 어느 정도 확보된 경우에는 무차원화 과정에서

표 3. F_{vo}에 대한 기존 경험식과 인공신경망 모델의 예측 성능

구분	Ko et al.(2022)		Lee et al.(2022)		통합 자료	
	IOA	NRMSE	IOA	NRMSE	IOA	NRMSE
Ko 경험식	0.84	1.12	–	–	0.75	0.98
Lee 경험식	–	–	0.94	0.39	0.83	0.96
ANN A1	0.97	0.40	1.00	0.07	0.95	0.48
ANN A2	0.98	0.36	1.00	0.09	0.98	0.27
ANN A3	0.99	0.26	1.00	0.07	1.00	0.14

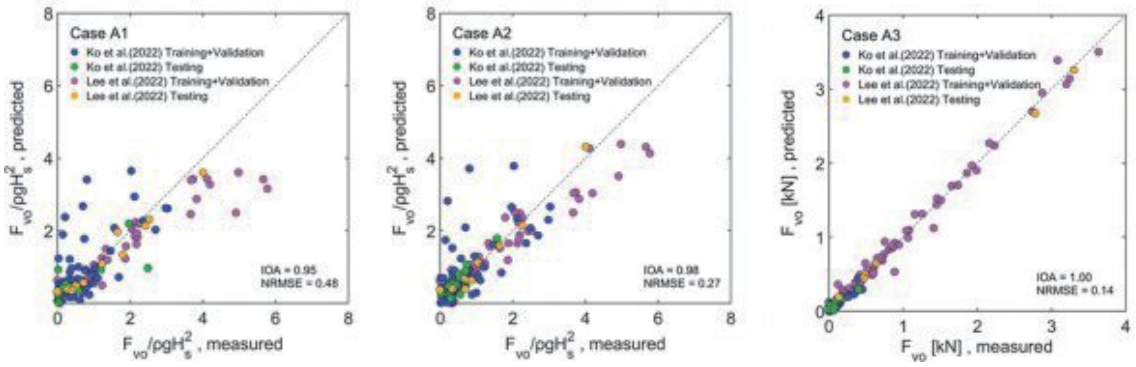


그림 4. 통합 자료로 구축한 인공신경망 모델(A1~A3)의 F_{vo} 계측값과 예측값 비교

오히려 정보 손실이 발생하여 예측 성능이 저하될 가능성도 있다. 다만 A1과 A2 모델도 그림 3에 보인 기존 경험식보다는 더 좋은 성능을 나타내었다. 기존 경험식은 개별 실험 조건에 특화되어 그 외의 자료에는 적용하기 어려운 반면, 인공신경망 모델은 특성이 서로 다른 실험 자료가 혼재된 경우에도 훨씬 나은 예측 적합도를 보였다.

4.2 포장체 하부면 작용 파력 F_{vu}

F_{vu}를 예측하는 B1~B3 모델의 결과는 그림 5와 같다. 세 모델의 IOA는 0.95~0.96, NRMSE는 0.43~0.46으로 입력변수 조합에 따른 차이가 크지 않았으며, 모두 식 (2)에 의한 결과(IOA 0.76, NRMSE 0.94)보다 우수하였다. 기존 경험식은 계측값이 큰 범위에서 연직 파력을 과소평가하였으나, 인공신경망 모델은 전체 자료 범위에서 계측값을 상당히 잘 예측하였다.

5. 맺음말

본 연구에서는 Ko et al.(2022)과 Lee et al.(2022)의 수리모형실험 자료를 활용하여 경사식 호안 배후 포장체의 상부면 작용 파력 F_{vo}와 하부면 작용 파력 F_{vu}를 추정하는 인공신경망 모델을 구축하였다. 차원 및 무차원 입력변수 조합과 은닉층의 노드 수를 변화시키고, 무작위로 분할한 200개의 데이터 세트를 이용하여 시드에 따른 민

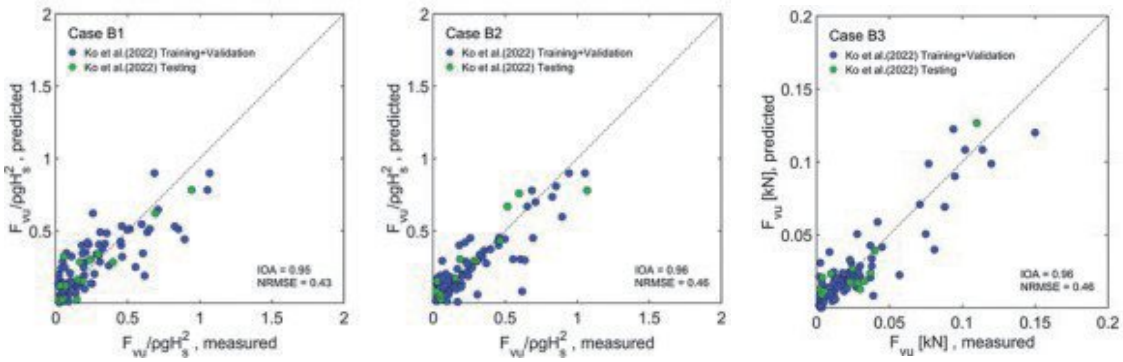


그림 5. Ko et al.(2022)의 자료로 구축한 인공신경망 모델(B1~B3)의 F_{vu} 계측값과 예측값 비교

감도를 검토함으로써 견고하게 작동하는 모델을 수립하였다.

기존 경험식은 도출에 사용된 실험 자료에 대해서는 일정 수준 이상의 예측 성능을 보였으나, 다른 실험 자료에 대해서는 예측 정확도가 확연히 저하되었다. 반면 F_{vo}를 예측하는 9개의 인공신경망 모델은 전반적으로 경험식보다 개선된 성능을 보였고, 두 실험 자료를 함께 학습한 통합 모델에서도 높은 정확도를 나타내어 서로 다른 실험 환경에서 취득된 자료의 통합 분석에 매우 효과적임을 확인하였다. F_{vu}를 예측하는 3개 모델도 경험식보다 향상된 결과를 나타내었다. 따라서 본 연구의 인공신경망 모델은 경사식 호안 배후 포장체에 작용하는 월파력 및 연직 파력의 예측에 활용 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

Alwosheel, A., Van Cranenburgh, S. and Chorus, C.G. (2018). Is your dataset big enough? Sample size requirements when using artificial neural networks for discrete choice analysis. Journal of Choice Modelling, 28, 167-182.

Bouthillier, X., Delaunay, P., Bronzi, M., et al. (2021). Accounting for variance in machine learning benchmarks. Proceedings of the 3rd MLSys Conference, Austin, TX, USA.

Ko, H.S., Lee, J.Y., Jang, S.-C. and Oh, S.-H. (2022). Experimental investigation of wave force on the pavement behind crown wall of rubble mound seawall. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 34(1), 19-25 (in Korean).

Kim, T.-W., Park, S.-J. and Oh, S.-H. (2026). Development and performance evaluation of an artificial neural network model for estimating wave forces on the pavement behind a sloping seawall. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 38(4), 172-183 (in Korean).

Lee, J.-I., Moon, G.I. and Kim, Y.I. (2022). Experimental study for downfall pressure on the floor behind rubble-mound structure by wave overtopping: Non-breaking condition. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 34(2), 27-36 (in Korean).

Mares-Nasarre, P., Molines, J., Gómez-Martín, M.E. and Medina, J.R. (2021). Explicit neural network-derived formula for overtopping flow on mound breakwaters in depth-limited breaking wave conditions. Coastal Engineering, 164, 103810.

Oh, J.-E. and Oh, S.-H. (2022). Estimation of the input wave height of the wave generator for regular waves by using artificial neural networks and Gaussian process regression. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 34(6), 315-324 (in Korean).

Oh, J.-E. and Oh, S.-H. (2024). Estimation of the input height of irregular waves generated at a wave maker by using Gaussian process regression and artificial neural networks. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 36(6), 225-232 (in Korean).

Willmott, C.J. (1981). On the validation of models. Physical Geography, 2(2), 184-194.

수치해석으로 보는 연안 식생의 감쇠 메커니즘

Water for future
학술/기술 기사
04

최성은
서울대학교 인프라스피어 교육연구단 연구조교수
sechoi94@snu.ac.kr

1. 서론

최근 기후변화에 따른 해수면 상승과 극한 파랑의 증가로 인해 연안 지역의 침식과 재해 위험이 증가하면서, 자연기반해법을 활용한 연안 보호에 대한 관심이 높아지고 있다(Temmerman et al., 2013; Morris et al., 2018). 특히 맹그로브, 염습지, 해초 등과 같은 연안 식생은 파랑의 진행을 방해하고 에너지를 소산시켜 파고를 감소시키는 역할을 하며, 기존의 방파제나 호안과 같은 경성 구조물을 보완할 수 있는 친환경적인 연안 보호 수단으로 주목받고 있다(Temmerman et al., 2013; Morris et al., 2018). 연안 식생에 의한 파랑 감쇠는 식생의 밀도, 직경, 배열 간격 및 수심과 같은 식생 및 수리학적 조건에 따라 크게 달라진다(Mendez and Losada, 2004; Hu et al., 2014; Maza et al., 2015). 파랑이 식생대를 통과하면 개별 식생 줄기 주변에서 유동 분리와 후류가 발생하고, 식생 사이의 좁은 공간에서는 유속이 증가하는 경향이 나타난다. 또한 이러한 유동은 주변의 와류 및 난류 구조와 상호작용하면서 파랑에너지와 운동량을 식생대 내부에서 재분배한다(Nepf, 1999; Chakrabarti et al., 2016). 기존 연구에서는 주로 식생에 의한 파고 감소, 투과율 또는 식생에 작용하는 항력 등에 초점을 두어 왔다. 그러나

파고가 감소한다고 해서 식생대 내부의 모든 위치에서 유속이나 바닥에 작용하는 힘이 균일하게 감소하는 것은 아니다. 식생 사이의 유동 가속과 후류에 의해 국부적으로 큰 유속과 난류가 발생할 수 있으며, 이에 따라 바닥전단응력 또한 위치에 따라 크게 달라질 수 있다(Yang et al., 2016; Tinoco and Coco, 2018). 이러한 근저 유동 특성은 퇴적물 이동이나 국부 세굴과 직접적으로 연관될 수 있기 때문에 연안 식생의 감쇠 효과를 이해할 때 함께 고려할 필요가 있다. 본 글에서는 연안 식생을 이상화한 원형 실린더 배열을 대상으로 수행한 3차원 수치해석 연구를 소개하고, 식생의 종방향 및 횡방향 배열이 파랑에 의해 형성되는 근저 유동, 난류 및 바닥전단응력에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보고자 한다.

2. 주요 연구내용

2.1 연안 식생의 수치적 모형화

2.1.1. 연구 배경 및 필요성

연안 식생은 복잡한 형태를 가지고 있지만, 식생과 유동 간의 기본적인 상호작용을 분석하기 위한 연구에서는 식생의 줄기를 원형 실린더로 단순화하여 모형화하는 방법이 널리 사용된다(Nepf, 1999; Chakrabarti et al., 2016; Tinoco and Coco, 2018). 이러한 원형 실린더 배열은 맹그로브나 염습지와 같은 강성 식생뿐만 아니라 말뚝식 방파제, 해상 구조물 기초 등 다양한 연안 구조물을 이상화하는 데에도 활용될 수 있다. 파랑이 실린더 배열에 입사하면 각 실린더 전면에서는 유동이 차단되고, 측면에서는 국부적인 유동 가속이 발생하며, 실린더 후면에는 후류와 와류가 형성된다. 여러 개의 실린더가 배열되어 있는 경우에는 이러한 후류가 하류의 실린더와 반복적으로 상호작용하기 때문에 단일 실린더 주변 유동과는 다른 복잡한 난류구조가 나타난다. 특히 실린더 사이의 간격은 유동 특성을 결정하는 중요한 요인이다. 종방향 간격이 좁으면 상류 실린더에서 발생한 후류가 충분히 회복되기 전에 다음 실린더와 만나면서 연속적인 후류 간섭이 발생한다(Nicolle and Eames, 2011; Chang and Constantinescu, 2015). 반대로 종방향 간격이 증가하면 유동이 일정 부분 회복된 이후 다음 실린더와 상호작용하게 된다. 또한 횡방향 간격이 좁을 경우에는 횡방향 흐름이 제한되고 실린더 사이에서 국부적인 유동 가속이 더욱 강하게 나타날 수 있다. 따라서 식생의 전체 밀도뿐만 아니라 식생이 실제로 어떠한 배열로 배치되어 있는지를 고려하는 것이 식생대 내부 유동과 바닥 안정성을 이해하는 데 중요하다.

2.1.2. 수치해석 방법 및 실린더 배열

본 연구에서는 규칙파 조건에서 원형 실린더 배열 주변의 유동을 분석하기 위하여 OpenFOAM 기반의 olaFlow를 이용한 3차원 대와류모사(Large Eddy Simulation, LES)을 수행하였다(Higuera et al., 2013). 자유수면은 체적분율법(Volume of Fluid, VOF) 기법을 이용하여 모사하였으며(Hirt and Nichols, 1981), 규칙파는 2차 Stokes 파 이론을 이용하여 생성하였다. LES에서는 비교적 큰 규모의 와류를 직접 계산할 수 있기 때문에 실린더 후류에서 발생하는 복잡한 비정상 난류구조를 분석하는 데 적합하다. 특히 본 연구에서는 근저 유동과 실린더 주변의 유동 분리를 정확하게 재현하기 위해 WALE 모델을 적용하였다(Nicoud and Ducros, 1999). 수치모형은 Yin et al. (2020)의 수리실험 자료를 이용하여 검증하였

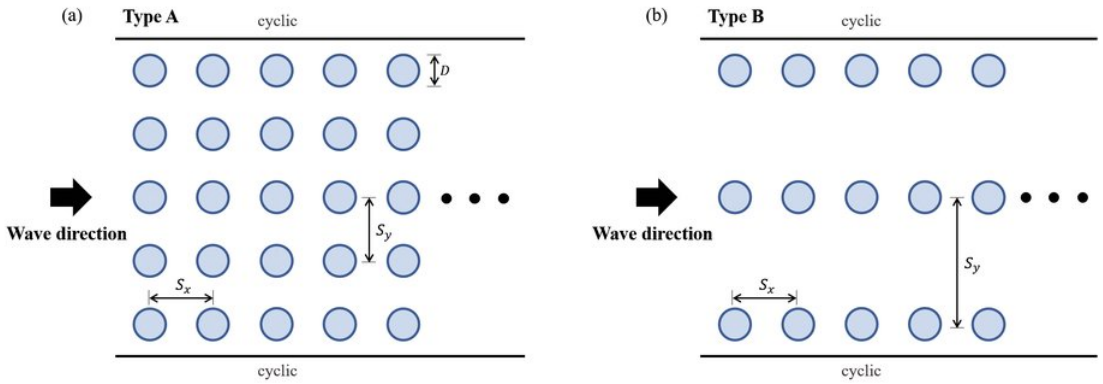


그림 2. 실린더 중심에서 1D 하류 지점에서의 배열 내부 최대 위상평균 흐름방향 유속 분포: (a) Type A와 (b) Type B; 원(○) A1/B1, 사각형(□) A2/B2, 삼각형(△) A3/B3, 마름모(◇) A4/B4.

다. 식생 배열을 통과하는 정규화 파고를 실험값과 비교한 결과, 정규화 평균제곱근오차는 3.32%로 나타났다. 또한 Hu et al. (2014)의 유속 자료와 비교한 결과, 시간에 따른 유속의 위상과 크기도 잘 재현하였다. 실린더 배열은 크게 Type A와 Type B로 구분하였다. Type A는 횡방향으로 5개의 실린더가 배치된 상대적으로 조밀한 배열이며(그림 1(a)), Type B는 횡방향으로 3개의 실린더가 배치된 상대적으로 성긴 배열이다(그림 1(b)). 각 배열에서는 종방향 실린더 간격을 2.5D, 5D, 7.5D, 10D로 변화시켜 총 8개의 조건을 구성하였다. 배열 전체 길이는 동일하게 유지하였기 때문에 종방향 간격이 증가할수록 실린더 열의 수와 정면면적 밀도는 감소하였다.

2.2. 배열에 따른 근저 유동 및 난류 특성

2.2.1. 실린더 간격에 따른 유동 회복

수치해석 결과, 식생의 종방향 간격은 배열 내부에서 발생하는 유동 회복에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 횡방향 밀도가 높은 Type A 배열에서는 종방향 간격이 가장 작은 조건에서 첫 번째 실린더 열 이후 근저 유속이 크게 감소하였으며, 이러한 낮은 유속이 배열의 상당 부분에서 유지되었다(그림 2(a)). 이는 상류 실린더에서 발생한 후류가 충분히 회복되기 전에 다음 실린더에 도달하면서 지속적인 후류 간섭이 형성되기 때문이다. 반면 종방향 간격이 증가하면 실린더 열 사이에서 유동이 부분적으로 회복할 수 있는 거리가 확보되면서 하류로 갈수록 근저 유속이 다시 증가하는 경향이 나타났다. 즉, 식생 사이의 거리가 단순히 통수면적만을 변화시키는 것이 아니라 후류가 다시 발달할 수 있는 공간을 결정한다는 것을 보여준다. Type B에서도 가장 좁은 종방향 간격에서는 유동 회복이 억제되었으나, 횡방향 밀도가 낮아지면서 Type A에 비해 종방향 간격에 따른 차이가 상대적으로 감소하였다(그림 2(b)). 이는 종방향 간격의 영향이 독립적으로 나타나는 것이 아니라 횡방향 식생 밀도와 함께 결정된다는 것을 의미한다.

2.2.2. 난류의 생성과 회복

유속뿐만 아니라 난류의 생성과 소산 역시 배열 형태에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. 횡방향 밀도가 높은 Type A에서는 종방향 간격이 가장 작

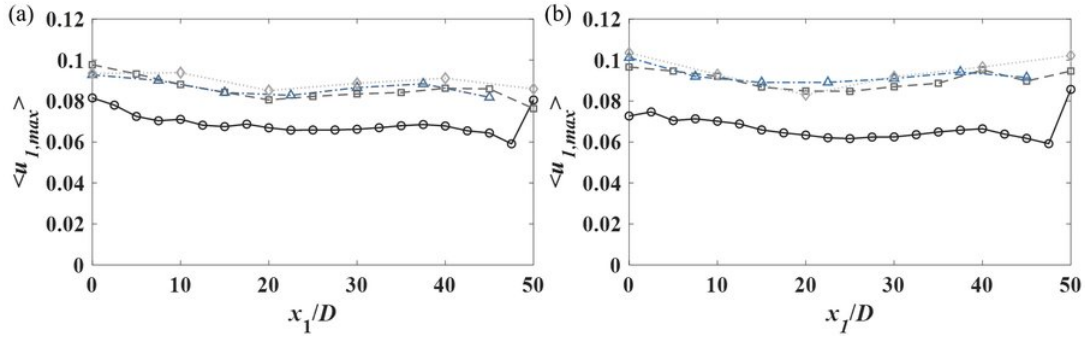


그림 2. 실린더 중심에서 1D 하류 지점에서의 배열 내부 최대 위상평균 흐름방향 유속 분포: (a) Type A와 (b) Type B; 원(○) A1/B1, 사각형(□) A2/B2, 삼각형(△) A3/B3, 마름모(◇) A4/B4.

은 조건에서 지속적인 후류 간섭으로 인해 하류로 갈수록 유동 회복이 억제되었으며, 이에 따라 하류부의 난류 생성과 소산도 상대적으로 제한되었다. 반면 종방향 간격이 증가하면 실린더 사이에서 유동이 부분적으로 회복되고, 회복된 유동이 다음 실린더와 다시 상호작용하면서 하류부에서 난류 생성과 소산이 다시 증가하는 경향을 보였다(그림 3(a), (b)). 횡방향 밀도가 낮은 Type B에서는 Type A와 다소 다른 양상이 나타났다. 가장 좁은 종방향 간격인 B1에서도 하류부까지 비교적 큰 난류 생성과 소산이 유지되었으며, B2–B4 사이에서는 종방향 간격 증가에 따른 변화가 Type A만큼 일관되게 나타나지 않았다(그림 3(c), (d)). 이는 횡방향 밀도가 낮아지면서 유동에 대한 구속이 약해지고, 좁은 종방향 간격에서도 유동과 후류의 상호작용이 하류까지 지속될 수 있기 때문으로 해석된다. 이러한 결과는 종방향 간격이 난류 특성에 미치는 영향이 횡방향 밀도와 독립적으로 결정되는 것이 아니라, 두 배열 조건의 복합적인 영향을 받는다는 것을 보여준다.

2.3. 식생 배열과 바닥전단응력

식생에 의한 파랑 감쇠는 연안 보호에 긍정적인 역할을 하지만, 파고의 감소가 반드시 바닥에 작용하는 힘의 감소를 의미하는 것은 아니다. 식생 주변에서는 유동의 차단과 가속, 후류 및 난류구조가 복합적으로 작용하기 때문에 바닥전단응력이 위치에 따라 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 파랑 주기에 따라 변화하는 바닥전단응력을 위상평균한 후 각 위치에서의 최대값을 이용하여 배열 내부의 근저 하중을 평가하였다. 모든 배열 조건에서 비교적 큰 바닥전단응력이 배열 전면부에서 나타났다. 이는 입사파에 의해 형성된 유동이 첫 번째 실린더 열과 직접적으로 상호작용하면서 발생하는 유동 차단과 근저 유동 가속 때문으로 해석된다. 그러나 배열 후반부에서는 실린더 배열에 따라 서로 다른 특징이 나타났다. 횡방향 밀도가 높은 Type A에서는 종방향 간격이 증가할수록 배열 후반부의 바닥전단응력이 증가하였다(그림 4(a)). 실린더 사이의 거리가 넓어지면서 유동이 부분적으로 회복되고, 이후 하류 실린더와 다시 상호작용하면서 강한 속도구배와 난류가 재형성되었기 때문이다. 반면 횡방향 밀도가 낮은 Type B에서는 종방향 간격에 따른 하류 바닥전단응력 증가가 상대적으로 약하게 나타났다(그림 4(b)). 즉, 식생의 종방향 간격이 바닥전단응력에 미치는

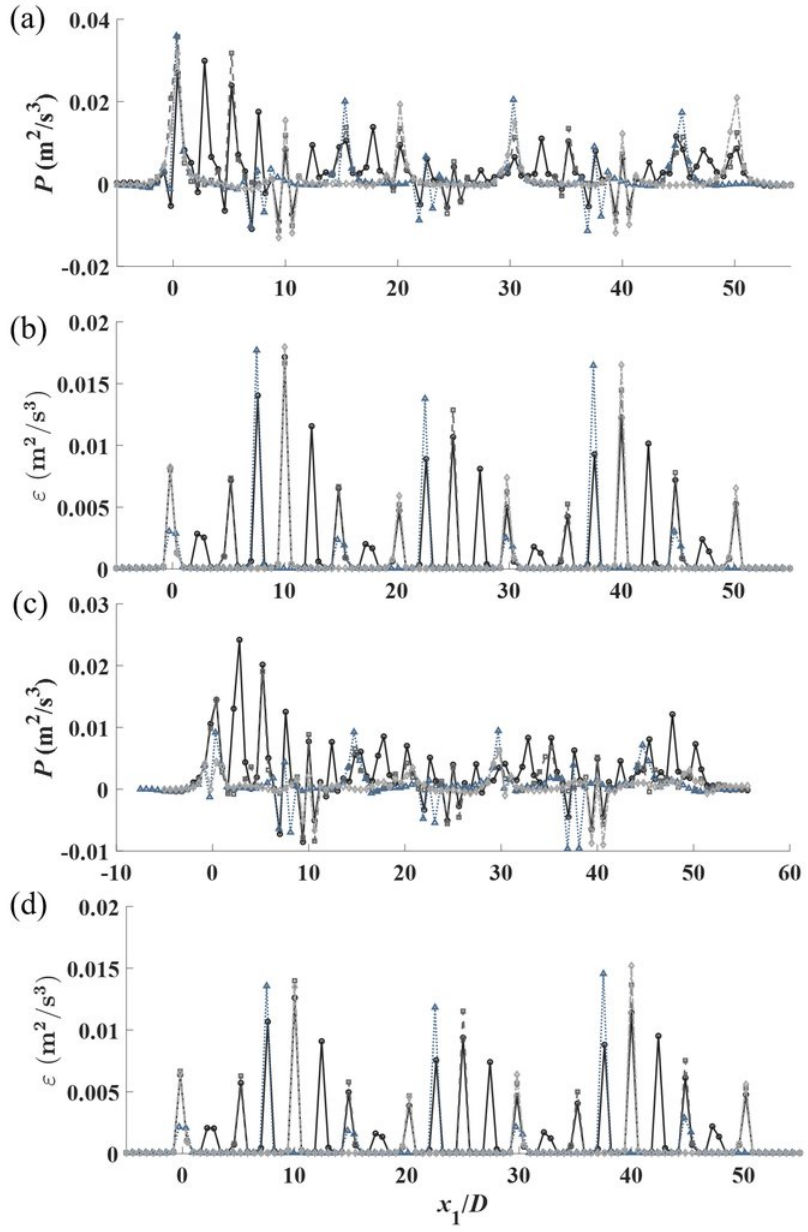


그림 3. 실린더 배열에 따른 난류 특성의 흐름방향 분포: (a) Type A의 난류 생성률, (b) Type A의 난류 소산률, (c) Type B의 난류 생성률, (d) Type B의 난류 소산률; 원(○) A1/B1, 사각형(□) A2/B2, 삼각형(△) A3/B3, 마름모(◇) A4/B4.

영향은 횡방향 밀도에 따라 달라졌다.

특히 중요한 결과는 단순한 식생 밀도만으로 배열 내부의 바닥전단응력을 설명하기 어렵다는 점이다. 일반적으로 식생의 저항 특성을 표현하기 위해 정면면적밀도와 같은 지표가 활용된다. 그러나 본 연구에서는 유사한 정면면적밀도를 갖는 두 배열을 비교하더라도 횡방향 배열이 다른 경우 바닥전단응력이 서로 다르게 나타났다. 유사한 정면면적밀도를 갖는 A3와 B2를 비교한 결과, Type A의 바닥전단응력이 Type B보다 약 21.24% 크게 나타났다. 또한 Type A에서는 종방향 간격이 2.5D에서 10D로 증가함에 따라 하류부 평균 바닥전단

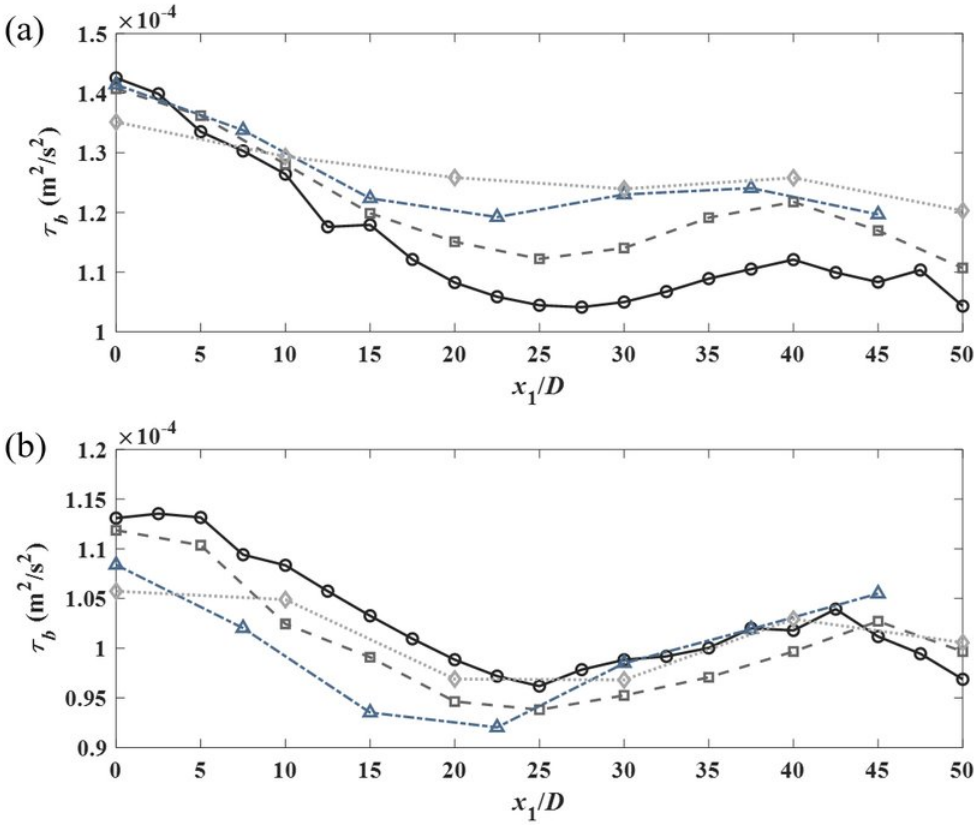


그림 4. 실린더 배열 내부 최대 위상평균 바닥전단응력의 흐름방향 분포: (a) Type A와 (b) Type B; 원(○) A1/B1, 사각형(□) A2/B2, 삼각형(△) A3/B3, 마름모(◇) A4/B4.

응력이 약 14.2% 증가한 반면, Type B에서는 변화폭이 약 3.58%에 불과하였다. 이는 횡방향 밀도가 전체적인 바닥 하중 수준에 영향을 미치고, 종방향 간격은 그 하중이 식생대 내부에서 재분배되는 양상에 영향을 미치는 것으로 나타났다

3. 결론

본 글에서는 연안 식생을 이상화한 원형 실린더 배열을 대상으로 수행한 3차원 수치해석 결과를 바탕으로, 식생 배열이 파랑에 의한 근저 유동과 난류, 바닥전단응력에 미치는 영향을 살펴보았다. 수치해석 결과, 종방향 간격이 좁은 배열에서는 상류 실린더에서 발생한 후류가 충분히 회복되지 못한 상태에서 다음 실린더와 상호작용하면서 지속적인 후류 간섭이 발생하였다. 이로 인해 배열 내부의 근저 유동 회복이 억제되었으며, 난류 역시 배열 후반부에서 상대적으로 낮은 수준을 유지하였다. 반면 종방향 간격이 증가하면 실린더 사이에서 유동이 부분적으로 회복되고, 회복된 유동이 하류 실린더와 다시 상호작용하면서 난류가 재발달하였다. 이러한 유동 및 난류 특성은 바닥전단응력의 공간적 분포에도 영향을 미쳤다. 모든 배열에서 식생대 전면부에 상대적으로 큰 바닥전단응력이 나타났으며, 횡방향 밀도가 높은 배열에서는 종방향 간격 증가에 따라 배열 후반부의 바닥전단응력도 증가하였다. 반면 횡방향 밀도가 낮은 배열에서는 종방향 간격 변화에 따른 바닥전단응력의 차

이가 상대적으로 작게 나타났다. 특히 유사한 정면 면적밀도를 갖는 배열에서도 바닥전단응력이 서로 다르게 나타나, 배열 내부의 근저 하중을 단순한 식생 밀도만으로 설명하기 어렵다는 점을 확인하였다. 횡방향 밀도는 전체적인 바닥 하중 수준에 영향을 주는 반면, 종방향 간격은 유동 회복과 후류 재발달을 통해 해당 하중이 식생대 내부에서 어떻게 재분배되는지를 결정하는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 연안 식생을 활용한 자연기반 연안 보호에서 파랑 감쇠 성능뿐만 아니라 식생대 내부의 근저 유동과 바닥 안정성을 함께 평가해야 함을 보여준다. 향후에는 실제 식생의 유연성, 불규칙한 배열 및 파랑 조건, 다양한 KC 수와 레이놀즈수 조건을 고려하고, 이동상과 세굴을 직접 모사하는 연구로 확장할 필요가 있다.

참고문헌

Chakrabarti, A., Chen, Q., Smith, H. D., & Liu, D. (2016). Large eddy simulation of unidirectional and wave flows through vegetation. Journal of Engineering Mechanics, 142(8), 04016048.

Chang, K., & Constantinescu, G. (2015). Numerical investigation of flow and turbulence structure through and around a circular array of rigid cylinders. Journal of Fluid Mechanics, 776, 161-199.

Higuera, P., Lara, J. L., & Losada, I. J. (2013). Realistic wave generation and active wave absorption for Navier–Stokes models: Application to OpenFOAM®. Coastal Engineering, 71, 102-118.

Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. Journal of Computational Physics, 39(1), 201-225.

Hu, Z., Suzuki, T., Zitman, T., Uittewaal, W., & Stive, M. (2014). Laboratory study on wave dissipation by vegetation in combined current–wave flow. Coastal Engineering, 88, 131-142.

Maza, M., Lara, J. L., & Losada, I. J. (2015). Tsunami wave interaction with mangrove forests: A 3-D numerical approach. Coastal Engineering, 98, 33-54.

Mendez, F. J., & Losada, I. J. (2004). An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields. Coastal Engineering, 51(2), 103-118.

Morris, R. L., Konlechner, T. M., Ghisalberti, M., & Swearer, S. E. (2018). From grey to green: Efficacy of eco-engineering solutions for nature-based coastal defence. Global Change Biology, 24(5), 1827-1842.

Nepf, H. M. (1999). Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation. Water Resources Research, 35(2), 479-489.

Nicolle, A., & Eames, I. (2011). Numerical study of flow through and around a circular array of cylinders. Journal of Fluid Mechanics, 679, 1-31.

Nicoud, F., & Ducros, F. (1999). Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor. Flow, Turbulence and Combustion, 62(3), 183-

200.
Temmerman, S., Meire, P., Bouma, T. J., Herman, P. M., Ysebaert, T., & De Vriend, H. J. (2013). Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. Nature, 504(7478), 79-83.
Tinoco, R. O., & Coco, G. (2018). Turbulence as the main driver of resuspension in oscillatory flow through vegetation. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 123(5), 891-904.
Yang, J. Q., Chung, H., & Nepf, H. M. (2016). The onset of sediment transport in vegetated channels predicted by turbulent kinetic energy. Geophysical Research Letters, 43(21), 11,261-11,268.
Yin, Z., Wang, Y., Liu, Y., & Zou, W. (2020). Wave attenuation by rigid emergent vegetation under combined wave and current flows. Ocean Engineering, 213, 107632.

서핑 파랑과 이안류의 양면성: 연안 레저 안전을 위한 통합 검토 방향

Water for future
학술/기술 기사
05

이진욱
부경대학교 지속가능공학부
토목공학전공 박사과정
nestia@pukyong.ac.kr

김민규
부경대학교 지속가능공학부
토목공학전공 석사과정
rhaqkdlzj@naver.com

홍지훈
부경대학교 지속가능공학부
토목공학전공 석사과정
wlgns8071@naver.com

서지웅
부경대학교 지속가능공학부
토목공학전공 학사과정
sjw469@naver.com

전 세계 서핑 인구는 3,500만 명 이상으로 추정되며(ISA, 2019), 서핑이 올림픽 정식 종목으로 채택된 이후 해양 레저는 소수의 동호인 문화를 넘어 대중적인 스포츠로 자리 잡고 있다. 국내 서핑 인구 역시 2014년 약 4만 명에서 2024년 120만 명 이상으로 급증하였으며(Korea Surfing Association, 2024), 부산 송정, 강원 양양, 제주 중문 등은 계절에 관계없이 서퍼가 찾는 대표적인 서핑 해수욕장으로 자리 잡았다. 그러나 국내 연안은 계절풍과 태풍의 영향이 없는 시기에는 서핑에 적합한 파랑이 충분히 형성되지 않는다. 자연 조건이 서핑에 불리한 해역에서 쇄파 위치와 형태를 인위적으로 제어하는 방안으로, 국외에서는 잠제 형태의 다기능 인공 구조물(multi-purpose structure)이 설계·시공되어 왔으며, 호주 골드코스트의 Narrowneck Reef가 대표적인 사례이다(Jackson et al., 2007, Shore & Beach).

한편, 서퍼가 활동하는 쇄파대(surf zone)는 매년 반복되는 대표적인 연안 안전 위험 요소인 이안류(rip current)가 발생하는 공간이기도 하다. 이안류는 해안에서 외해 방향으로 좁고 강하게 흐르는 해류로, 해수욕장에서 발생하는 인명 구조 사례의 주요 원인으로 지목되고 있다(MacMahan et al., 2006, Marine Geology). 국내에서는 부산 해운대 해수욕장이 대표적인 이안류 다발 해역으로 보고되어 있으며(Choi et al., 2011, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers), 국립해양조사원은 주요 해수욕장을 대상으로 이안류 감시 및 예측 정보를 제공하고 있다. 흥미로운 점은 일반 해수욕객에게 위험 요소인 이안류가 서퍼에게는 쇄파대를 빠르게 통과하여 외해로 나가는 이동 경로로 활용되는 것으로 알려져 있다는 점이다. 즉, 서핑 파랑과 이안류는 동일한 파랑-지형 상호작용의 결과물이면서도, 이용자에 따라 정반대의 가치를 지니는 양면적인 현상이라 할 수 있다.

본 기사에서는 서핑 파랑의 품질을 결정하는 공학적 지표와 이안류의 발생 기구를 정리하고, 서핑 조건 개선을 목적으로 하는 인공 구조물이 배후 순환류 및 이안류에 미칠 수 있는 영향을 검토한 뒤, 이러한 관점이 연안 관리에 갖는 함의를 논한다.

서핑 파랑의 공학적 지표

서핑에 적합한 파랑의 품질은 파고뿐 아니라 쇄파의 형태와 쇄파선의 진행 특성에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다(Scarfe et al., 2009, Journal of Coastal Research). 하와이 연안의 자연 암초 지형이 서핑에 적합한 파랑을 형성하는 원인을 분석한 초기 연구에서는 파랑의 굴절(refraction)과 집중(focusing)에 의해 쇄파선이 해안선에 대해 일정한 각도를 유지하며 진행하는 것이 핵심 요인임을 제시하였다(Walker et al., 1972, Coastal Engineering Proceedings). 이후 연구를 통해 서핑 파랑의 품질은 쇄파 각(peel angle), 쇄파 강도(breaking intensity), 파고, 그리고 라이딩 구간 길이(section length)로 정량화되어 왔으며, 이하에서는 이들을 서핑 지표라 한다. 쇄파 각은 이미 쇄파된 백파(whitewater)의 경계선과 아직 쇄파되지 않은 파봉선이 이루는 각도로 정의되며, 각도가 작을수록 쇄파가 파봉을 따라 빠르게 진행하여 서퍼에게 높은 이동 속도를 요구하므로 상급자에게 적합한 파랑이 된다(Hutt et al., 2001, Journal of Coastal Research). 쇄파 형태는 해저 경사를 파형 경사(wave steepness)의 제곱근으로 나눈 Iribarren 수($\xi = \tan\beta/\sqrt{(H/L_0)}$)에 따라 붕괴파(spilling), 권파(plunging), 쇄기파(surging)로 구분되며(Battjes, 1974, Coastal Engineering Proceedings), 쇄파 강도는 권파에 가까울수록 커져 해저 경사가 급한 지형에서 높게 나타난다(Mead and Black, 2001, Journal of Coastal Research). 서핑에서 가장 선호되는 형태는 권파이며, 인공 구조물 설계에서는 마루 수심과 구조물 전면의 경사를 조절하여 권파를 유도하는 것이 핵심 설계 변수가 된다. Figure 1은 이 중 쇄파 각과 라이딩 구간 길이의 기하학적 정의를 나타낸다.

이안류의 발생 기구와 분류

이안류는 쇄파대 내에서 파랑 에너지의 소산에 의해 형성된 해수면 상승(wave setup)이 해안선

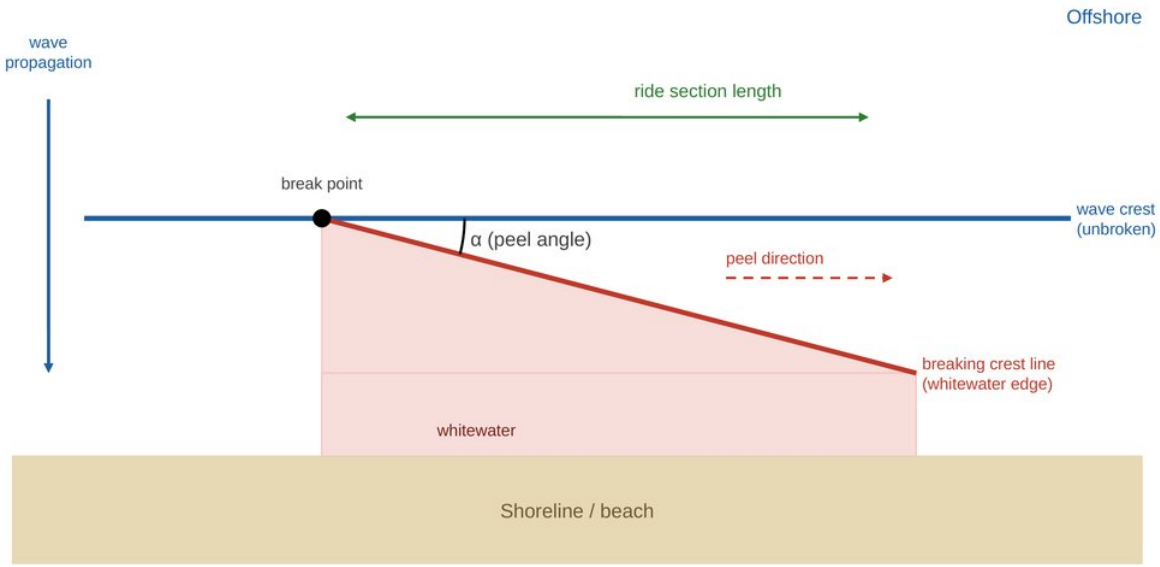


Figure 1. Geometric definition of surfing wave parameters. The peel angle α is defined between the unbroken wave crest and the breaking crest line (whitewater edge), and the ride section length is determined by the along-crest breaking speed.

을 따라(alongshore) 불균일하게 분포할 때, 상대적으로 수위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 해수가 수렴하여 외해로 배출되는 흐름이다(Shepard et al., 1941, Journal of Geology; MacMahan et al., 2006, Marine Geology). 연안 사주(sandbar) 사이에 채널이 형성된 해빈에서는 사주 위에서 쇄파가 활발히 발생하여 수위가 상승하고, 채널 구간에서는 쇄파가 약하여 수위가 낮게 유지되므로, 해수가 채널을 통해 집중적으로 외해로 빠져나가게 된다(Haas et al., 2003, Journal of Geophysical Research). 이안류의 유속은 일반적으로 0.5~1 m/s 수준이나(MacMahan et al., 2006, Marine Geology), 파랑 조건에 따라 2 m/s를 초과하는 사례도 보고되어 있으며(Brander and Short, 2000, Marine Geology), 이는 일반인이 해안 방향으로 역행하여 헤엄쳐 벗어나기 어려운 수준으로 평가된다(Dalrymple et al., 2011, Annual Review of Fluid Mechanics).

이안류는 발생 원인에 따라 지형 제어형(bathymetrically controlled), 수리동역학 제어형(hydrodynamically controlled), 경계 제어형(boundary controlled)으로 분류된다(Castelle et al., 2016, Earth-Science Reviews). 지형 제어형은 위에서 설명한 사주–채널 지형에 의해 고정된 위치에서 반복적으로 발생하는 형태로, 사주가 발달한 저경사 사질 해빈에서 흔히 관측된다. 수리동역학 제어형은 파군(wave group)이나 연안류의 불안정성에 의해 지형과 무관하게 순간적으로 발생하는 이른바 플래시 이안류(flash rip)이며, 해운대 이안류의 경우 파향이 다른 파랑의 중첩으로 형성되는 벌집 구조 파랑(honeycomb pattern)이 주요 발생 기작으로 제안된 바 있다(Choi et al., 2012, Journal of the Korean Society of Civil Engineers). 경계 제어형은 돌제, 방파제, 잠제, 암초와 같은 구조물 측면에서 발생하는 이안류로, 구조물이 연안류를 차단하거나 쇄파 위치를 변

화시킴으로써 유발된다(Dalrymple et al., 2011, Annual Review of Fluid Mechanics). Figure 2는 사주-채널 지형과 구조물 인접부에서 발생하는 이안류의 순환 형태를 개념적으로 보여준다.

서핑 파랑 개선과 이안류의 관계

여기서 주목해야 할 점은 서핑 조건을 개선하기 위한 인공 구조물이 경계 제어형 이안류의 발생 조건을 동시에 만들어 낼 수 있다는 것이다. 잠제 형태의 인공 구조물은 마루 위에서 강제 쇄파를 유발하여 쇄파 위치를 외해 측으로 이동시켜 라이딩 구간을 확장한다(Black and Mead, 2001, Journal of Coastal Research). 그러나 마루 위에서의 집중적인 파랑 에너지 소산은 구조물 배후에 국지적인 수위 상승을 초래하고, 이 해수는 구조물 양측 또는 개구부를 통해 외해로 되돌아가야 하며, 이러한 순환류가 배후 해빈의 침식을 유발한 사례가 잠제 관련 연구에서 다수 보고되어 있다(Ranasinghe and Turner, 2006, Coastal Engineering). 호주 골드코스트 Narrowneck Reef의 7년 모니터링에서는 구조물 배후에 퇴적 지형이 형성되어 연안 보호 기능이 확인되었으나(Jackson et al., 2007, Shore & Beach), 이는 동시에 구조물 주변의 순환 패턴이 설치 전과 달라졌음을 시사한다. 실험실 규모의 연구에서도 인공 구조물 주변에서 순환류가 형성됨이 계측되었다(Cáceres et al., 2010, Journal of Hydraulic Engineering).

따라서 서핑 파랑 개선을 목적으로 하는 구조물 설계는 쇄파 각과 라이딩 구간 길이 등 서핑 지표의 최적화만으로는 완결될 수 없으며, 구조물이 유도하는 순환류의 유속과 위치가 일반 해수욕객의 안전 범위 내에 있는지를 함께 평가할 필요가 있다. 나아가 서퍼가 이안류를 외해 진출 경로로 활용하는 특성을 고려하면, 구조물이 만드는 순환류를 억제해야 할 대상으로만 볼 것이 아니라 그 위치를 서핑 라인업(line-up) 구역 쪽으로 유도하

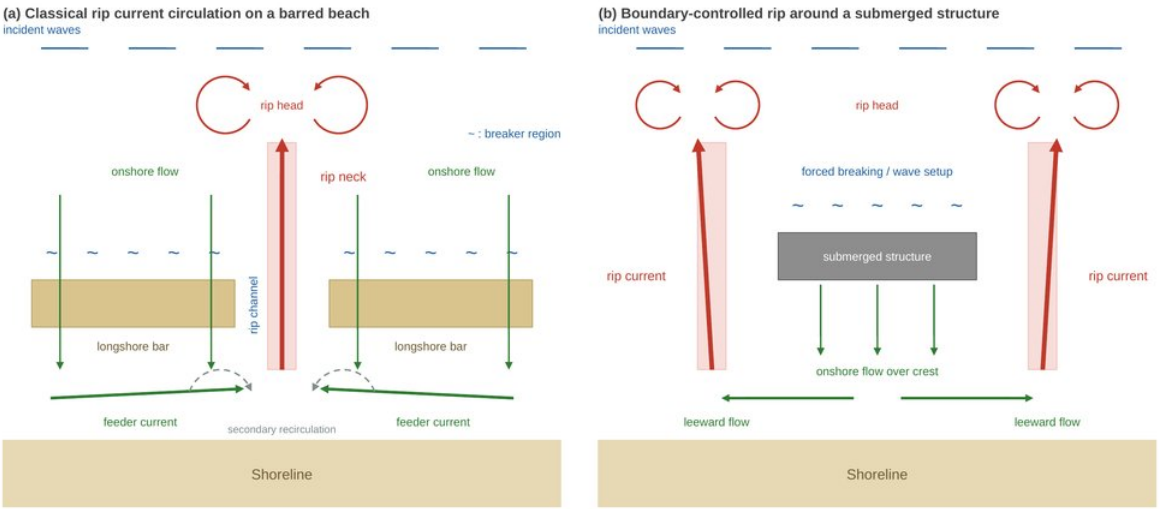


Figure 2. Schematic of rip current circulation: (a) classical bar-channel rip system with feeder currents, rip neck and rip head, including the secondary recirculation cells near the shoreline; (b) boundary-controlled rip currents around a submerged structure driven by wave setup over the crest.

는 설계도 가능하다. 이를 위해서는 파랑 변형, 순환류, 지형 변화가 함께 작용하는 3차원 연안 역학을 하나의 틀에서 해석해야 한다.

맺음말

서핑 파랑과 이안류는 파랑이 지형 및 구조물과 상호작용하며 에너지를 소산하는 하나의 물리 과정에서 갈라져 나온 두 얼굴이다. 같은 쇄파대가 서퍼에게는 자원이고 해수욕객에게는 위험이며, 서핑 조건을 개선하려는 구조물은 그 자체로 새로운 순환류를 만든다. 서핑 인구가 120만 명에 이른 지금, 해수욕장은 여름 한 철의 물놀이 공간이 아니라 서퍼, 일반 해수욕객, 어업인, 지역 주민이 연중 함께 쓰는 연안 공간이 되었다. 그러나 국내 해수욕장 관리는 여전히 하절기 개장 기간의 익수사고 예방에 초점이 놓여 있어, 연중 이루어지는 해양 레저 활동과 그에 따른 안전 문제를 포괄하지 못하고 있다.

앞으로의 연안 관리는 세 방향에서 보완될 필요가 있다. 첫째, 서핑 구역과 일반 해수욕 구역을 파랑과 순환류 특성에 근거하여 구분하고, 이안류 발생 위치와 시간대 정보를 이용자에게 실시간으로 제공하는 체계가 필요하다. 국립해양조사원의 이안류 감시 서비스와 기상청의 파랑 예보를 서핑 적합도 정보와 결합하면, 같은 자료가 해수욕객에게는 경보로, 서퍼에게는 활동 정보로 기능할 수 있다. 둘째, 서핑 조건 개선을 위한 인공 구조물 도입은 서핑 산업의 경제적 효과만이 아니라 배후 해빈의 침식, 순환류 변화에 따른 안전 위험, 해양생태계와 경관에 미치는 영향을 함께 검토하는 절차 위에서 이루어져야 하며, 이를 위한 설계·평가 기준이 제도적으로 마련되어야 한다. 셋째, 해수욕장을 관리하는 지방자치단체, 안전을 담당하는 해양경찰, 관측 정보를 생산하는 국립해양조사원과 기상청, 그리고 서핑 단체와 지역 주민이 참여하는 협의 구조가 필요하다. 연안 공간의 이용 갈등은 공학적 해석만으로 해소되지 않으며, 과학적 근거를 공유하는 의사결정 과정이 뒷받침되어야 한다.

이안류로부터 안전한 해수욕장과 서핑에 적합한 해수욕장은 서로 다른 목표가 아니다. 파랑과 흐름을 정확히 이해하고 그 정보를 이용자와 공유하는 것이 두 목표에 동시에 다가가는 길이며, 이는 해안공학이 사회에 기여할 수 있는 가장 직접적인 방식 중 하나이다.

Acknowledgement

본 기사는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 “연안지역 서핑존 활성화를 위한 친환경 다기능 인공 구조물의 실해역 적용 설계기술 개발(RS-2026-25479872)” 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

Battjes, J. A. (1974). Surf similarity. Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, 466–480.

Black, K. P., and Mead, S. T. (2001). Design of the Gold Coast Reef for surfing, in Australia. Journal of Coastal Research, SI 29, 115–130.

Brander, R. W., and Short, A. D. (2000). Morphodynamics of a large-scale rip current system at Muriwai Beach, New Zealand. Marine Geology, 165(1–4), 27–39.

Cáceres, I., Trung, L. H., van Ettinger, H. D., Reniers, A., and Uijttewaal, W. (2010). Wave and flow response to an artificial surf reef: Laboratory measurements. Journal of Hydraulic Engineering, 136(5), 299–310.

Castelle, B., Scott, T., Brander, R. W., and McCarroll, R. J. (2016). Rip current types, circulation and hazard. Earth-Science Reviews, 163, 1–21.

Choi, J., Park, W. K., and Yoon, S. B. (2011). Boussinesq modeling of a rip current at Haeundae Beach. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 23(4), 276–284 (in Korean).

Choi, J., Park, W. K., Bae, J. S., and Yoon, S. B. (2012). Numerical study on a dominant mechanism of rip current at Haeundae Beach: Honeycomb pattern of waves. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 32(5B) (in Korean). https://doi.org/10.12652/Ksce.2012.32.5B.321

Dalrymple, R. A., MacMahan, J. H., Reniers, A. J. H. M., and Nelko, V. (2011). Rip currents. Annual Review of Fluid Mechanics, 43, 551–581.

Haas, K. A., Svendsen, I. A., Haller, M. C., and Zhao, Q. (2003). Quasi-three-dimensional modeling of rip current systems. Journal of Geophysical Research: Oceans, 108(C7), 3217.

Higuera, P., Lara, J. L., and Losada, I. J. (2014). Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM. Part I: Formulation and validation. Coastal Engineering, 83, 243–258.

Hutt, J. A., Black, K. P., and Mead, S. T. (2001). Classification of surf breaks in relation to surfing skill. Journal of Coastal Research, SI 29, 66–81.

International Surfing Association (ISA) (2019). Bring surfing's Olympic, youthful and environmental values to your city [Presentation slides].

Jackson, L. A., Corbett, B. B., Tomlinson, R., McGrath, J., and Stuart, G. (2007). Narrowneck Reef: Review of seven years of monitoring. Shore & Beach, 75(4), 67–79.

Korea Surfing Association (2024). Domestic surfing population statistics (in Korean).

MacMahan, J. H., Thornton, E. B., and Reniers, A. J. H. M. (2006). Rip current review. Marine Geology, 230(1–2), 1–21.

Mead, S. T., and Black, K. P. (2001). Predicting the breaking intensity of surfing waves. Journal of Coastal Research, SI 29, 51–65.

Ranasinghe, R., and Turner, I. L. (2006). Shoreline response to submerged

structures: A review. Coastal Engineering, 53(1), 65–79.
Scarfe, B. E., Healy, T. R., and Rennie, H. G. (2009). Research-based surfing literature for coastal management and the science of surfing—A review. Journal of Coastal Research, 25(3), 539–557.
Shepard, F. P., Emery, K. O., and La Fond, E. C. (1941). Rip currents: A process of geological importance. Journal of Geology, 49(4), 337–369.
Walker, J. R., Palmer, R. Q., and Kukea, J. K. (1972). Recreational surfing on Hawaiian reefs. Proceedings of the 13th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, 2609–2628.

Water for future
학술/기술 기사
06

물 부족시 비상대응을 위한 통합 의사결정지원 플랫폼 개발 (Development of an Integrated Decision-Support Platform for Emergency Response to Water Shortages)

김 다 래
주식회사 헥코리아
수자원환경사업부 과장
kimdr0910@hecorea.co.kr

강 두 선
경희대학교
사회기반시스템공학과 교수
doosunkang@khu.ac.kr

김 연 주
연세대학교
건설환경공학과 교수
yeonjoo.kim@yonsei.ac.kr

김 영 오
서울대학교
건설환경공학부 교수
yokim05@snu.ac.kr

박 진 혁
한국수자원공사
K-water 연구원 수석연구원
park5103@kwater.or.kr

이 경 도
주식회사 헥코리아
대표이사
kdlee@hecorea.co.kr

1. 머리말

최근 기후변화로 인해 강수의 강수의 시·공간적 변동성이 확대되고 가뭄의 장기화와 지역별 물 공급 불균형이 반복되면서, 단순한 가뭄 모니터링을 넘어 향후 물 부족 규모를 전망하고 대응대안의 효과를 사전에 검토할 수 있는 의사결정지원 체계의 필요성이 커지고 있다. 특히 2022~2023년 영산강·섬진강 유역에서 장기간 가뭄이 지속되면서 댐 저수량 감소와 생활·공업용수 공급 위험이 동시에 부각되었으며, 한정된 수자원의 효율적 활용을 위한 수자원시설 간 연계운영과 관계기관 간 협의의 중요성이 더욱 강조되었다.

현재 국내에는 가뭄지수, 댐 저수율, 기상·수문정보 등 가뭄 대응에 필요한 다양한 정보를 제공하는 시스템이 운영되고 있다. 그러나 실제 비상대응 과정에서는 현재 상황의 파악뿐만 아니라 향후 물 수요와 유입량 변화를 고려한 물 부족 가능성 전망, 시설별 공급조건 조정, 지역 간 물 배분, 수원 연계 및 이해관계자 간 대응대안 협의가 함께 이루어져야 한다. 기존 정보제공 중심의 시스템만으로는 이러한 일련의 의사결정 과정을 하나의 체계에서 연계하여 지원하는 데 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 가뭄 및 물 공급 정보를 통합하고, 미래의 물 수요·유입량 조건을 시나리오로 구성하여 물 부족 상황을 분석할 수 있는 물 부족 비상대응 의사결정지원 플랫폼(Emergency Response Decision-making Supporting Platform, ER-DSP)을 개발하였다. ER-DSP는 물수요·유입량 시나리오와 물 배분 모형(Water Allocation Model, WAM), 비전 공유 모형(Shared Vision Model, SVM)을 연계하여 지역 및 시설별 물 부족 규모와 용수공급 조정에 따른 영향을 분석하고, 다양한 대응대안을 비교·검토할 수 있도록 구성하였다.

또한 ER-DSP는 현재의 가뭄 상황과 물 공급 여건을 제공하는 정보조회 기능에 그치지 않고, 현황을 진단하여 미래의 위험을 전망하고 이에 따라 대응대안을 분석하고 의사결정을 지원하는 통합적인 업무 흐름을 구현하는 것을 목표로 한다. 사용자는 물수요와 유입량 조건을 변경하면서 미래 물 부족 가능성을 검토하고, WAM과 SVM을 통해 공급조

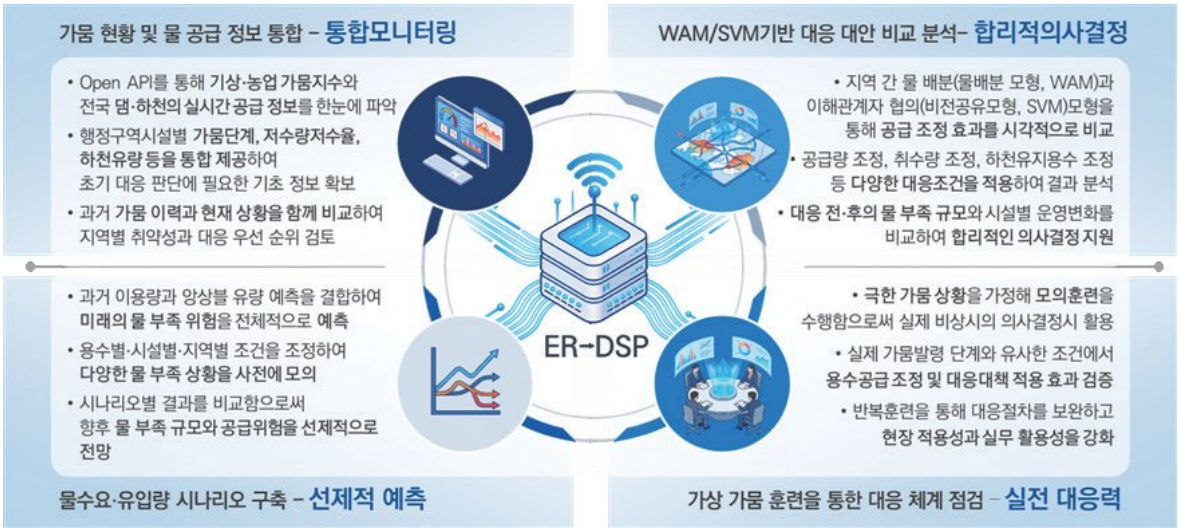


그림 1. ER-DSP의 개념 및 의사결정 지원 흐름

정 및 수자원시설 연계운영 대안의 효과를 비교할 수 있다. 또한 가상가뭄훈련을 통해 실제 비상상황이 발생하기 전에 가뭄단계별 대응절차와 용수공급 조정방안을 반복적으로 검토함으로써 선제적인 가뭄 대응을 지원할 수 있도록 하였다.

2. ER-DSP 구축을 위한 기초 수문 및 데이터 연계

ER-DSP의 의사결정 기능을 구현하기 위해서는 가뭄 및 수문 현황, 수자원시설 운영정보, 행정구역별 물 이용 정보, 모형 입력·출력자료 등 서로 다른 형식의 자료를 하나의 플랫폼에서 일관되게 활용할 수 있어야 한다. 이를 위해 영산강·섬진강 유역을 대상으로 기초자료와 자료의 갱신주기에 따라 실시간·정기 갱신자료와 기초자료로 구분하여 수집하고, 플랫폼 통합 DB와 분석 모듈 간 연계 구조를 구성하였다.

ER-DSP에서 활용되는 자료는 크게 ①실시간 또는 정기적으로 갱신되는 외부 연계자료, ②과거 가뭄 및 물 이용 실적과 같은 기초 DB, ③물 수요·유입량 시나리오 자료, ④WAM 및 SVM의 모형 입력·출력자료로 구분하였다. 외부자료는 가능한 범위에서 Open API 기반으로 자동 수집하고, 자동연계가 어려운 자료는 사전 구축된 DB와 연계하도록 구성하였다. 또한 서로 다른 기관에서 제공되는 자료의 시간단위와 공간단위가 상이하므로, 플랫폼에서는 행정구역·시설·중권역 및 표준유역 단위로 자료를 정리하여 모형 입력과 화면 표출에 공동으로 활용할 수 있도록 하였다.

2.1 가뭄 및 물 공급 정보의 통합

가뭄 현황은 생활·공업용수의 가뭄 예·경보 발령현황과 기상·농업가뭄 지표를 중심으로 구성하

표 1. ER-DSP 가뭄 및 물 공급 정보 메뉴의 주요 데이터 구성 및 연계 방식

메뉴명	주요 정보	수집·연계 방식
가뭄 예·경보 발령 현황	생활·공업용수 분야의 가뭄 단계, 예·경보 발령 현황 및 향후 전망 정보	[자동] 한국수자원공사 Open API 연계
가뭄 지표	기상자료를 활용한 SPI6 기반 기상가뭄 현황	[자동] 한국수자원공사 Open API 연계
	저수율, 토양수분 등을 활용한 농업가뭄 현황 및 과거 이력 자료	[수동] ADMS 농업가뭄관리시스템 자료 연계
시설물별 공급 현황	댐 위치 및 제원, 저수량·저수율·유입량·방류량 등 운영 현황	[자동] 국가수자원관리종합정보시스템 Open API [수동] 국가수자원관리종합정보시스템
	하천유지유량 고시지점 및 갈수 관리지점 등 하천 수문정보	[자동] 국가수자원관리종합정보시스템 Open API
시·군별 물 공급 현황	시·군별 생활·공업·농업용수 이용 현황, 취수장·정수장·공급계통 등 지역 단위 물 공급 정보	[수동] 국가수자원관리종합정보시스템, 가뭄 기초조사 보고서 등 활용
과거 가뭄	시·군별 과거 가뭄 발생 이력, 피해 및 대응 현황 등 가뭄 이력 정보	[수동] 국가가뭄정보포털 자료 연계

<가뭄 예·경보 발령현황>

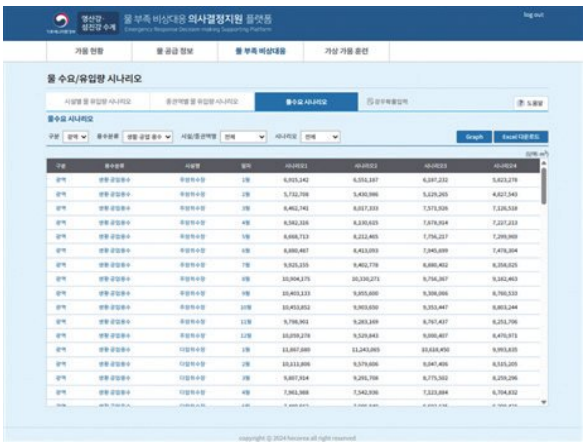
<시설물별 공급 현황 – 시설물 유량 현황>

그림 2. ER-DSP 가뭄 및 물 공급 정보 화면

였다. 가뭄 예·경보는 현재와 1~3개월 전망정보를 함께 제공하고, 기상가뭄은 SPI6, 농업가뭄은 저수율 및 밭 토양수분 정보 등을 활용하도록 구성하였다. 물 공급 정보에서는 유역 내 주요 시설물과 용수공급체계, 댐 저수량·저수율, 하천유지유량 고시지점 및 갈수관리지점의 유량, 시군별 물 이용·공급 현황 및 과거 가뭄정보를 연계하였다.

자료는 Open API를 통해 자동 연계 가능한 정보와 별도 DB구축이 필요한 자료로 구분하였다. 이를 통해 사용자가 여러 기관의 시스템을 개별적으로 확인하지 않고도 현재 가뭄 상황과 시설별 공급여건을 한 화면에서 파악할 수 있도록 하였다.

가뭄 및 물 공급정보는 단순한 정보조회 기능에 그치지 않고 이후 물 부족 분석을 위한 기초조건으로 활용된다. 예를 들어 가뭄 예·경보 단계와 댐 저수량, 하천유량, 시설별 공급현황을 함께 확인함으로써 현재의 공급여건을 진단하고, 향후 물 수요·유입량 시나리오를 설정할 대상지역과 시설을 선정할 수 있다. 이를 통해 정보제공 화면과 분석 모형 간의 연계성을 강화하고, 사용자가 현재 상황에 따라 필요한 분석 대상과 조건을 자연스럽게 설정할 수 있도록 하였다.



<물 수요 시나리오 조회 화면>

<물 유입량 시나리오 조회 화면>

그림 3. 물 수요·유입량 시나리오 조회 및 비교 화면

2.2 물 수요·유입량 시나리오 구축

물 부족 분석에서 미래의 공급위험을 평가하기 위해서는 유입량과 수요량을 동시에 고려할 필요가 있다. ER-DSP에서는 기상정보와 앙상블 기반 유량 예측 결과를 활용한 유입량 시나리오와 과거 물 이용자료에 기반한 물 수요 시나리오를 구성하였다.

물 수요 시나리오는 용수분류와 시설·중권역별 조건을 선택하여 월별 수요량을 비교할 수 있도록 구성하고, 여러 시나리오의 값을 표와 그래프로 제공함으로써 수요변화의 크기와 시기를 직관적으로 확인할 수 있도록 하였다. 유입량 시나리오는 과거 관측유량과 앙상블 유량전망 결과를 연계하여 시설 및 중권역별 미래 유입량을 시나리오 형태로 구성하고, 앙살블 예측결과의 범위와 평균·최소·최대 유입량을 비교함으로써 향후 유입량의 변동성과 물 공급여건을 사전에 파악할 수 있도록 하였다.

2.3 물 배분 모형(WAM) 기반 지역 간 물 배분 평가

물 배분 모형(WAM)은 WRF-Hydro와 MODSIM을 연계하여 행정구역 및 표준유역 단위의 물 수급 조건을 분석하고, 설정된 물 수요·유입량 시나리오에 따라 지역 및 시설별 용수공급 가능량과 부족량을 산정하는 분석도구이다. 또한 비상대응 프로토콜에 따른 중·단기 물배분 계획을 모의하여 대응대책 적용 전후의 물 부족 규모와 배분효과를 비교하고, 수원 연계방안 및 최적 물배분 대안을 검토함으로써 가뭄 상황에서의 의사결정을 지원하도록 구성하였다.

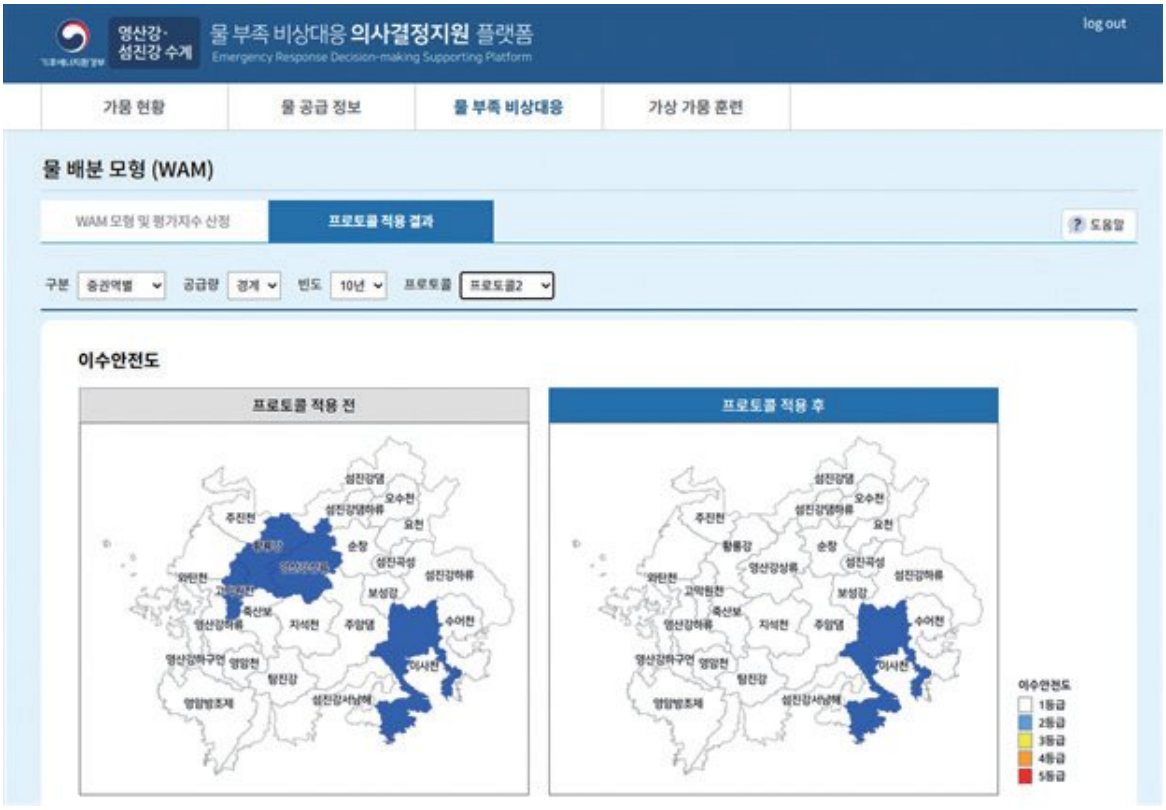


그림 4. WAM을 이용한 대응 전·후 물 부족 규모 비교

WAM에서는 WRF-Hydro를 통해 유역의 수문조건과 유입량 정보를 구성하고, MODSIM을 통해 수원-수요처 간 네트워크와 공급조건을 고려한 물배분을 모의한다. 이를 통해 동일한 수문조건에서도 물수요 및 유입량 조건, 공급체계, 비상대응 프로토콜의 적용 여부에 따라 지역별 물 부족 규모와 공급가능량이 어떻게 변화하는지를 정량적으로 비교할 수 있다.

플랫폼에서는 사용자가 유입량 조건과 대응 프로토콜을 선택한 후 물 부족 규모의 변화를 지도 기반으로 확인할 수 있도록 하였으며, 동일한 조건에서 대응대책의 효과를 비교할 수 있도록 결과를 시각화하였다. 주요 분석결과는 지역 및 시설별 공급량, 부족량, 부족률과 이수안전도 지표를 중심으로 구성하고, 이를 공간정보와 함께 표출하여 물 부족이 집중되는 지역과 공급조정에 따른 개선효과를 직관적으로 확인할 수 있도록 하였다. 또한 수원 연계, 용수공급 조정 및 비상대응 프로토콜 적용에 따른 결과를 비교함으로써 중·단기 물배분 대안별 효과를 검토할 수 있도록 구성하였다.

2.4 비전공유모형(SVM)을 활용한 대응대안 비교

비전공유모형(SVM)은 다양한 이해관계자의 참여를 통해 물 부족 상황에 대한 대응조건을 공유하고, 시설운영 및 용수공급 조정에 따른 영향을 비교하기 위한 협의형 모형이다. ER-DSP에서는 SVM의 분석결과를 플랫폼에 탑재하여 댐 저수량과 공급조건의 변화를 확인하고, 시나리오별 결과를 동일한 화면에서 비교할 수 있도록 구성하였다.

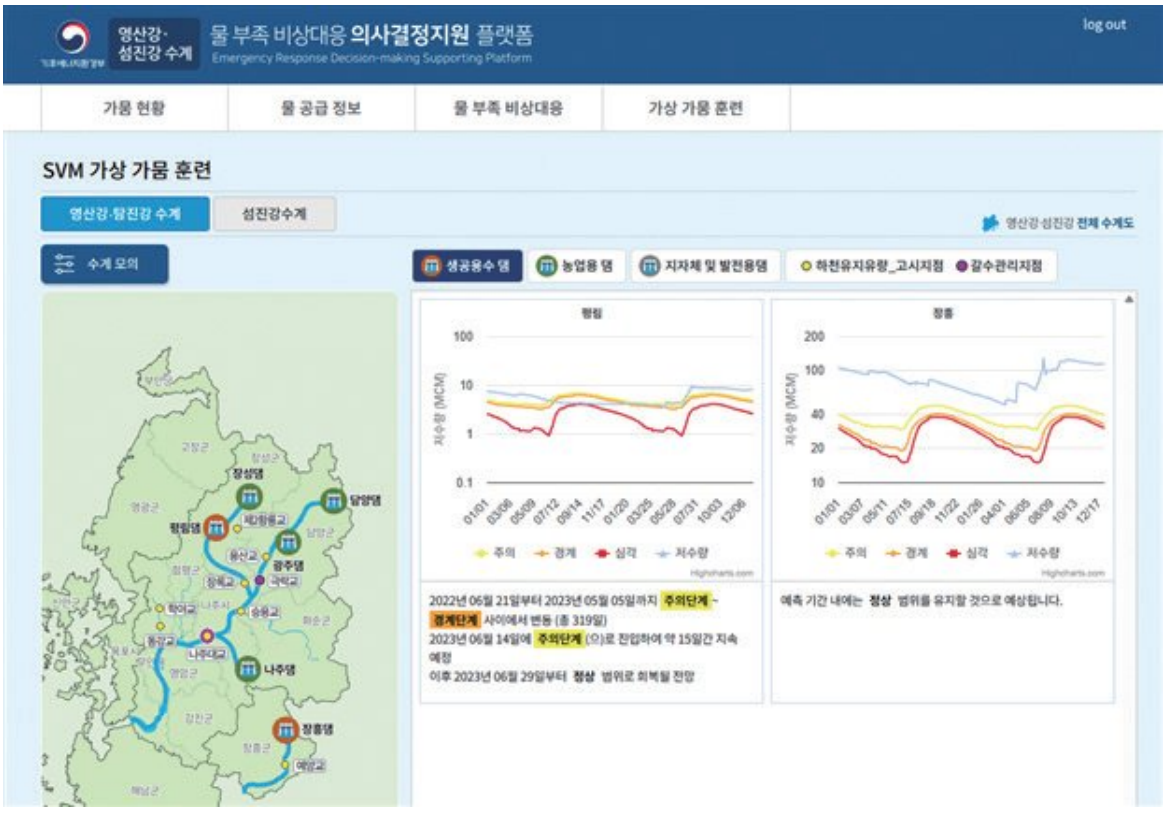
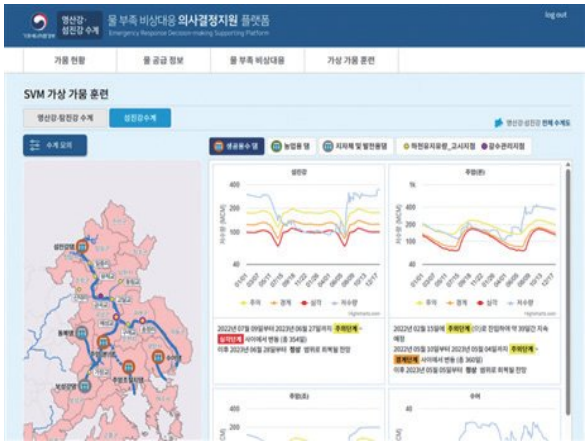
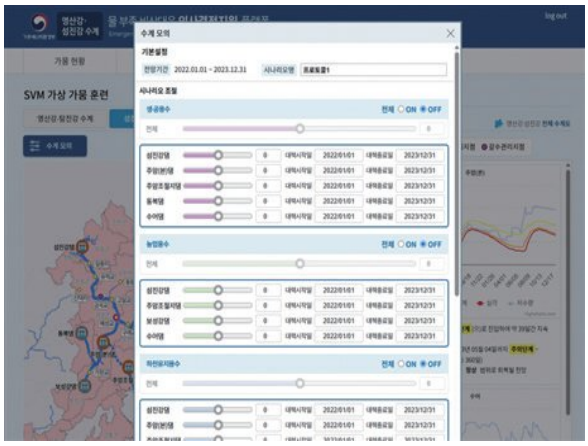


그림 5. 비전공유모형(SVM) 화면



<SVM 가상 가뭄 훈련 메인 화면>

<수계 모의 - 프로토콜 설정 화면>



<수계 모의 - 용수별 공급량 설정 화면>

<수계 모의 결과 비교 화면>

그림 6. ER-DSP 가상가뭄훈련 운영 화면

SVM의 핵심은 특정 대응대안을 자동으로 선택하는 것이 아니라, 동일한 가뭄조건과 공급제약하에서 여러 대응조건을 설정하고 그에 따른 결과를 비교·공유할 수 있도록 하는 데 있다. 따라서 플랫폼에서는 댐 방류량, 취수량, 생활·공업·농업용수 및 하천유지용수 공급량 등 주요 운영조건을 사용자가 직접 조정할 수 있도록 하였으며, 각 조건에 따른 시설별 저수량과 공급결과의 변화를 비교할 수 있도록 구성하였다.

SVM은 단일한 최적해를 제시하는 기능보다는 여러 대응대안을 비교하고, 이해당사자 간 협의과정에서 결과를 공유하는 데 의의가 있다. 따라서 플랫폼은 시나리오 선택, 공급량 조정, 분석결과 확인의 절차를 단순화하고, 향후 실제 협의체 운영과 연계할 수 있도록 구성하는 방향으로 개발하였다. 이러한 구조를 통해 수원관리기관, 지자체, 용수이용기관 등 다양한 이해관계자가 동일한 분석결과를 바탕으로 대응 조건과 조정수준을 비교·검토할 수 있도록 하였다.

2.5 가상가뭄훈련을 통한 사전 대응능력 점검

가상가뭄훈련은 과거 실제 가뭄 상황을 기반으로 특정 시점의 가뭄단계를 재현하고, 가뭄 심화에 따른 용수 공급 조정방안을 사전에 검토하기

위한 기능이다. 훈련에서는 기준시점의 댐 저수상황과 가뭄단계를 확인한 후, 생활·공업·농업용수 및 하천유지용수 등 용도별 공급조건과 취수량을 조정하여 다양한 대응 시나리오를 설정할 수 있도록 구성하였다.

훈련에서는 과거 실제 가뭄사례 또는 사용자가 설정한 기준시점을 출발조건으로 활용하고, 대상 댐과 취수시설의 초기 저수량 및 공급상태를 설정한다. 이후 가뭄 단계 변화에 따라 공급량 조정, 취수량 조정, 하천유지용수 조정 등 단계별 대응대책을 적용하고, 각 대책에 따른 저수량 변화와 용수공급 안정성 등을 비교할 수 있도록 하였다.

설정된 대응조건은 SVM에 적용하여 시설별 저수량과 공급량의 변화를 모의하고, 조정 전·후 결과를 비교함으로써 각 대응대책의 효과를 확인한다. 특히 가뭄단계가 심화되기 이전에 공급량 감축, 취수량 조정 등 선제적 대응방안을 적용하고, 그에 따른 저수량 유지효과와 용수공급 안정성을 분석할 수 있도록 하였다.

가상가뭄훈련의 기본 절차로는 먼저 훈련 시점 및 가뭄상황을 설정하고 대상시설을 선정한 다음 용도별·시설별 공급조건을 조정한다. 설정이 완료되면 SVM을 모의 수행하고 시설별 저수량 및 공급결과를 비교한 후 대응방안을 검토하는 순서로 구성된다. 이를 통해 실제 가뭄 발생 이전에 다양한 대응조건을 반복적으로 검토하고, 물관리기관이 가뭄단계별 대응수준과 용수공급 조정방안을 사전에 점검할 수 있도록 지원한다.

훈련 결과는 단순한 모의결과 확인에 그치지 않고, 동일한 가뭄상황에서 대응 시점과 조정 수준을 달리 적용했을 때의 결과를 비교하는 데 활용된다. 이를 통해 선제적 대응과 지연된 대응에 따른 차이를 확인하고 실제 비상상황에서 적용 가능한 대응 수준과 조치시점을 사전에 검토할 수 있다.

2.6 ER-DSP 플랫폼 구성 및 활용방향

ER-DSP는 가뭄현황, 물 공급 정보, 물 부족 비상대응, 가상가뭄훈련의 주요 메뉴를 중심으로 구성하였다. 정보 제공 기능과 모형 분석 기능을 분리하지 않고 하나의 업무 흐름으로 연계함으로써, 사용자가 현재 상황을 확인한 뒤 미래 조건을 설정하고 대응대책을 검토하는 일련의 과정을 플랫폼 내에서 수행할 수 있도록 하였다.

ER-DSP의 활용체계는 평상시 모니터링, 가뭄 위험 증가에 따른 미래전망, 대응대안 분석, 가상가뭄훈련의 단계로 구성하였다. 평상시에는 가뭄현황과 수자원시설 운영 및 물 공급정보를 지속적으로 확인하고, 가뭄 위험이 증가할 경우 시나리오를 이용하여 향후 공급여건과 물 부족 가능성을 전망한다. 이후 WAM을 통해 지역 간 물배분과 수원 연계대안을 검토하고, SVM을 활용하여 시설 운영 및 용수공급 조정조건에 따른 영향을 비교한다. 가뭄 심화 또는 비상상황에 대비해서는 가상가뭄훈련을 수행하여 대응절차와 조정수준을 사전에 점검하도록 구성하였다.

이러한 구성은 가뭄정보 조회, 시나리오 설정, 모형분석, 대응대안 검토 및 가상훈련을 각각 독립된 기능으로 제공하는 것이 아니라 하나의 연속된 의사결정 과정으로 연결한다는 데 특징이 있다. 사용자는 동일한 데이터와 시나리오를 기반으로 현재 상황을 진단하고 미래 위험을 전망한 뒤, 대응대안의 효과를 비교하고 가상훈련을 통해 실제 적용 가능성을 검토할 수 있다. 이를 통해 평상시 모니터링에서 비상 상황 대응까지 단계별 의사결정을 지원하는 통합 활용체계를 구축하고자 하였다.

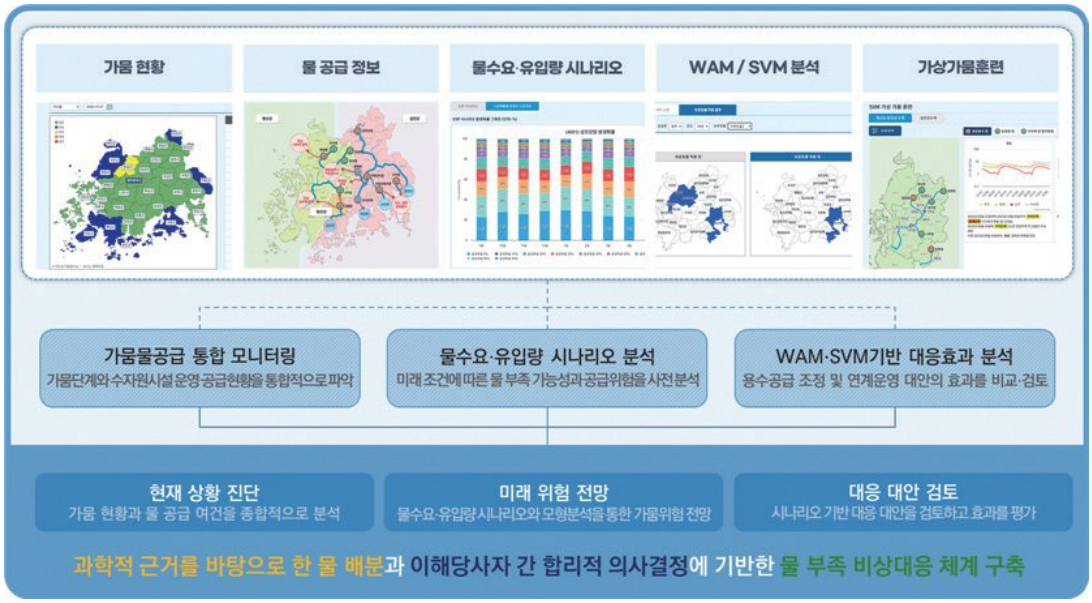


그림 7. ER-DSP의 주요 화면 및 활용체계

4. 맺음말

본 연구에서는 기후변화와 반복되는 가뭄으로 인해 증가하는 물 부족 위험에 대응하기 위해, 가뭄 및 물 공급정보와 물 수요·유입량시나리오, WAM, SVM을 통합한 물 부족 비상대응 의사결정지원 플랫폼(ER-DSP)을 개발하였다. 플랫폼은 단순한 현황정보 제공을 넘어 미래 공급여건을 시나리오로 설정하고, 대응 전·후의 물 부족 규모 및 시설운영 변화를 비교할 수 있도록 구성하였다.

특히 WAM을 이용한 지역 간 물배분 평가와 SVM을 이용한 협의형 대응대안 비교, 그리고 가상가뭄훈련 기능을 하나의 플랫폼에 연계함으로써 실제 가뭄 대응업무에 필요한 분석과 협의 과정을 지원할 수 있는 기반을 마련하였다.

본 플랫폼의 주요 성과는 서로 다른 기관에서 제공되는 가뭄·수문·물 공급 정보를 통합하고, 이를 미래 시나리오 및 분석모형과 직접 연계하여 정보조회에서 대응대안 검토까지 하나의 업무 흐름으로 구현하였다는 점이다. 또한 WAM과 SVM의 분석결과를 동일한 플랫폼 환경에서 비교하고, 이를 가상가뭄훈련까지 연계함으로써 실제 물 부족 대응 업무에 활용 가능한 통합 분석환경을 구축하였다.

향후에는 테스트베드 적용과 성능평가를 통해 분석결과의 신뢰성과 사용자 편의성을 검증하고, 다양한 유역과 수자원시설 운영조건을 반영할 수 있도록 기능을 지속적으로 확장할 필요가 있다. 이를 통해 ER-DSP가 물 부족 위험을 단순히 감시하는 시스템을 넘어, 가뭄 발생 이전부터 대응대안을 검토하고 관계기관 간 정보공유와 협의를 지원하는 실무형 의사결정지원 플랫폼으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 기후변화 적응 수재해 관리 기술개발사업(R&D)의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2023-00231944).

원격탐사 기반 하천 수중 지형 측량의 발전과 활용

Water for future
학술/기술 기사
07

권 시 윤
경상국립대학교
건설시스템공학과 조교수
siyoon@gnu.ac.kr

1. 머리말

하천 지형은 홍수 시 통수능과 수위, 하상의 침식·퇴적 및 수생태 서식처를 결정하는 중요한 요소이다. 같은 유량이 흐르더라도 단면 형상과 수심 분포에 따라 유속과 흐름 저항이 달라지므로 정확한 지형 정보는 유사의 이동과 퇴적을 해석하는 데에도 기초가 된다. 특히 하상 변화는 교량 주변 세굴, 취수시설 운영 및 준설 계획과 직접 연결되기에 하천 관리 과정에서 지속적으로 파악해야 할 대상이다. 그러나 제한된 측선의 현장 조사만으로 넓은 구간을 반복 측량하기에는 많은 시간과 인력이 소요되며 측선 간 보간으로는 깊은 소나 사주 주변의 급격한 수심 변화를 충분히 반영하기 어렵다. 이러한 한계를 보완하기 위해서는 현장 측량과 함께 공간적으로 연속된 지형 정보를 확보하고 갱신하는 관측 체계가 필요하다.

최근 항공기와 드론, 위성을 활용한 원격탐사는 수자원 분야의 관측 범위를 넓히는 데 활발히 적용되고 있다. 대표적으로 NASA의 Surface Water and Ocean Topography (SWOT) 위성은 광폭 간섭계 레이더를 통해 하천과 호수의 수면고 및 수면 분포를 관측하며, 이를 이용해 전 세계 126,674개 하천 구간의 수위에 따른 하도 형상과 저류량 변화를

분석한 사례가 보고된 바 있다(Cerbelaud et al., 2026). 다만 이러한 수면 관측을 홍수와 흐름 해석에 활용하려면 수면 아래의 하상 정보가 함께 확보되어야 한다. 즉, 수면의 높이와 폭이 유사하더라도 수중 단면에 따라 통수능과 저류량이 달라지므로, 수면 관측과 수중 지형 측량을 연계하는 것이 중요하다.

따라서 본 기사에서는 수심 LiDAR와 분광 영상의 관측 특성을 살펴보고, ICESat-2와 AVIRIS-NG를 중심으로 수중 지형 측량의 최근 성과를 소개하고자 한다. 특히 고성능 초분광 센서로 관측한 탁수의 미세한 분광 차이를 수심 추정에 활용할 수 있음을 설명하고, 국내외 하천 및 저수지 사례를 통해 적용 가능한 수심과 수체 조건을 비교하고자 한다. 아울러 국내 하천 조사에서 원격탐사와 현장 측량을 연계하기 위한 고려사항을 살펴보고, 센서 성능과 분석 기법의 발전에 따른 활용 방향을 논의하고자 한다.

2. 수심 LiDAR와 분광 영상의 관측 특성

수심 LiDAR는 물을 투과하는 녹색 레이저를 송신한 뒤 수면과 하상에서 되돌아오는 신호의 도달 시간 차이를 이용하여 수심을 산정하는 기술이다. 이때 물속에서의 빛의 전파속도와 수면 굴절을 보정하고 하상 반사 신호를 구분하는 과정이 필요하다. 육상과 수중을 함께 측정하는 topo-bathymetric LiDAR는 제방·범람원·하상을 연결한 상세 지형을 구축할 수 있으며, 자체 광원을 사용하므로 태양광 없이도 관측이 가능하다는 장점이 있다. 다만 부유사에 의한 산란과 감쇠가 커지면 하상 신호의 검출이 어려워지기에 수체의 투명도가 적용 범위를 좌우한다. 오스트리아 하천과 연못에서 드론 수심 LiDAR를 적용한 사례에서는 약 두 배의 Secchi 수심까지 투과하는 성능이 확인되었다(Mandlburger et al., 2020).

아울러 탁수가 존재하는 하천에서도 LiDAR의 적용 사례가 지속적으로 보고되고 있다. 미국 Colorado강의 모래 하상 구간에서는 ASTRALiTe EDGE 편광 LiDAR로 탁도 12 NTU 조건에서 약 1 m까지 하상 신호를 탐지하였으나, 더 깊은 구간에서는 수층 산란의 증가와 하상 신호의 감소로 적용에 한계가 나타났다(Kinzel et al., 2021). 한편 독일 Elbe강에서는 인접 관측의 약한 반사 신호를 결합하는 전파형 누적 처리를 통해 분석 가능 수심을 약 1.65 m에서 2.20 m로 확대하였다(Mader et al., 2023). 이는 수체 조건에 적합한 장비의 선정과 파형 처리의 개선을 병행할 경우, 탁수에서도 LiDAR의 활용 범위를 넓힐 수 있음을 보여준다.

더욱이 ICESat-2의 등장은 수십 m 깊이의 수중 지형을 위성에서 관측할 수 있다는 점에서 수심 LiDAR의 광역 활용 가능성을 크게 높였다. 2018년 발사된 NASA의 ICESat-2는 본래 빙상과 해빙의 높이 변화를 정밀하게 관측하기 위해 개발되었으며, 탑재된 ATLAS 센서는 532 nm 녹색 레이저와 개별 광자의 도달 시간을 기록하는 광자 계수 방식을 사용한다. 발사 후에는 물을 투과한 레이저가 수중 바닥에서 반사되는 신호도 포착할 수 있음이 확인되었고, 이를 계기로 수심 측량이 주요 응용 분야로 확대되었다(Parrish et al., 2019, 2025).

그림 1과 같이 LiDAR는 수면과 수중 바닥의 광자 분포를 구분하면 두 신호의 높이 차이로부터 수심을 산정할 수 있다. 네 연안 지역의 관측 자료를 분석한 결과, 투명도가 높은 조건에서 최대 약 38 m까지 해저 신호가 탐지되었으며, 배경 잡음

과 수층 산란을 제거하고 수면 굴절을 보정한 뒤 St. Thomas 연안의 항공 LiDAR와 비교한 1 m 격자의 RMSE는 0.43~0.60 m로 나타났다(Parrish et al., 2019). 즉, 수십 m 깊이의 수중 지형을 위성에서 관측하면서 현장 및 항공 측량과 비교 가능한 수심 자료를 확보할 수 있다는 점에서 기술적 의의가 크다.

최근에는 관측 자료의 처리와 공개가 확대되면서 ICESat-2를 실무에 활용하기 위한 여건도 개선되고 있다. 2025년 4월 공개된 ATL24는 수면·해저 신호의 자동 분류와 굴절 보정을 거친 전 지구 연안 수심 자료로 8개 지역의 수심 0.05~24.43 m에서 검증한 지역별 RMSE의 평균은 전체 자료에서 0.61 m, 고신뢰도 자료에서 0.42 m였다(Parrish et al., 2025). 이와 같이 처리된 자료를 활용하면 원시 광자 자료를 직접 분석하는 부담을 줄일 수 있으므로, 현장 접근이 어려운 수역의 수심 정보 확보에도 기여할 것으로 기대된다(NASA, 2025).

이러한 수심 탐지 성과와 공개 자료의 축적은 ICESat-2가 광역 수중 지형 조사의 강력한 관측 수단으로 활용될 수 있음을 보여준다. 별도의 항공 측량 없이 자료를 확보할 수 있고, 반복 관측 중 투명도가 양호한 시기를 선택할 수 있다는 점에서도 실무적 이점이 있다(Parrish et al., 2025). 다만 관측은 위성 궤도를 따른 측선에 한정되며 탐지 가능한 수심은 탁도와 수면 상태에 민감하다. 또한, 앞서 제시한 고수심 측정 성과는 연안에서 얻은 결과이므로 국내 하천에 적용할 때에는 수체 조건과 하상 신호의 검출 여부를 별도로 확인하는 것이 바람직하다.

한편 초분광과 다분광 영상은 수체와 하상에서 반사되어 센서에 도달한 태양광을 이용하며 파장별 반사도와 수심의 관계를 통해 수심을 산정한다. 즉, LiDAR가 신호의 도달 시간으로 거리를 구하는 방식이라면 분광 수심법은 빛이 수체를 통과하면서 변화하는 분광 특성을 활용하는 방식이다. 이때 반사도에는 부유사, 조류, 유색용존유기물(CDOM) 및 하상재료의 영향도 포함되므로 동일

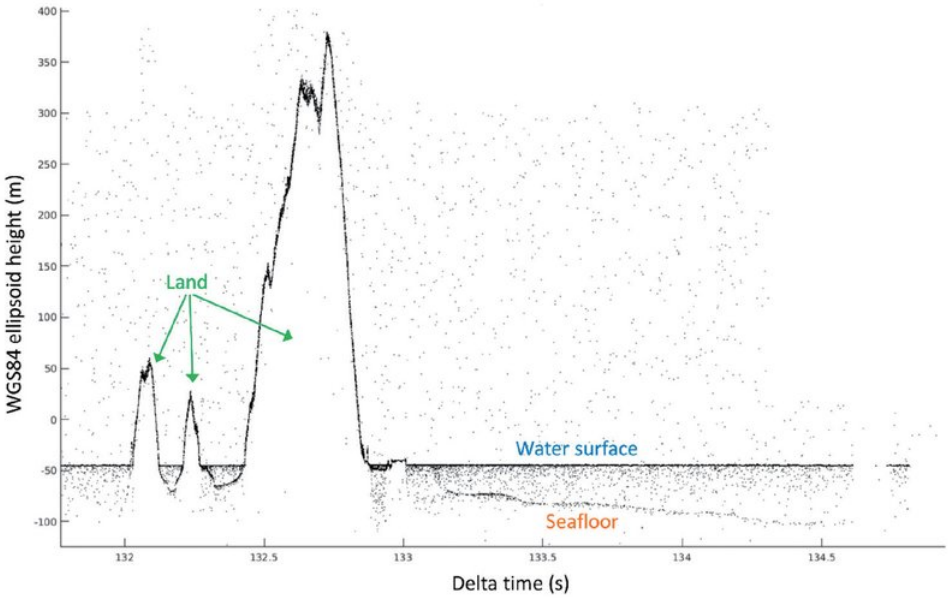


그림 1. ICESat-2의 궤도상 광자 분포와 육상·수면·해저 신호의 구분. 세로축은 WGS84 타원체고 (Parrish et al., 2019).

한 수심에서도 수질과 하상 조건에 따라 서로 다른 스펙트럼(분광 다양성)이 나타날 수 있다. 초분광 영상은 연속된 다수의 좁은 파장 대역을 관측하기에 이러한 광학적 차이와 수심에 따른 미세한 반사도 변화를 함께 분석하는 데 유리하다(Kwon et al., 2023).

이러한 미세한 차이를 수심 정보로 활용하려면 분광센서의 관측 성능이 중요하다. 파장을 얼마나 세밀하게 구분하는지를 나타내는 분광 해상도뿐 아니라, 빛의 세기 차이를 구분하는 복사 해상도와 신호대잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)가 확보되어야 하기 때문이다. 최대 측정 가능 수심은 수체의 광학적 특성과 센서의 복사 해상도에 함께 영향을 받으며, 깊고 탁한 물에서 나타나는 작은 반사도 차이를 활용할수록 이러한 성능의 중요성이 커진다(Legleiter and Harrison, 2019; Kwon et al., 2024).

분광 영상은 수심을 연속적인 면 자료로 제공하면서 동일 영상에서 수질과 하상 특성까지 분석할 수 있다는 점에서 활용성이 크다. 특히 LiDAR는 탁수에서 하상 반사 신호가 약해지면 수심 산정이 어려워지는 반면, 초분광 영상은 다수 파장에 포함된 수층 신호의 미세한 차이까지 활용할 여지가 있다(Kwon et al., 2024). 다만 초분광 영상 역시 탁도의 영향을 받으므로 이러한 가능성이 모든 탁수 조건에서 적용되는 것은 아니다. 따라서 조도·대기·수면 반사의 보정과 현장 수심 자료를 바탕으로 수심·수질·하상이 함께 변하는 영향을 검토하고, 대상 수역에서의 적용 범위를 확인하는 과정이 전제되어야 한다(Kwon et al., 2023).

3. 초분광 기반 수심 측량의 확장

3.1 AVIRIS-NG로 확인한 탁수의 수심 정보

하천의 분광 수심 측량에 널리 활용되어 온 최적밴드비분석법(Optimal Band Ratio Analysis, OBRA)은 두 파장의 반사도 비를 로그 변환한 값과 현장 수심을 선형회귀하여 적합한 파장 조합을 찾는 방법이다(Legleiter et al., 2009). 적은 수의 변수로 수심을 산정할 수 있어 적용과 해석이 용이하지만, 수심에 따라 수질과 하상의 영향이 달라지는 수역에서는 하나의 밴드비와 선형 관계만으로 전체 변화를 표현하기 어렵다. 이러한 제약을 보완하기 위해 다수 파장의 비선형 관계를 학습하는 기계학습 기법이 활용되고 있다.

국내 실규모 수로와 청미천 연구에서는 드론 탑재형 microHSI 410 SHARK 센서를 활용하여 부유사와 하상 조건에 따른 분광 수심법의 적용성을 검토하였다. 모래와 황토를 주입하여 부유사 조건을 변화시킨 실험에서는 수심 1 m 미만의 범위에서 6~12개 파장을 선택한 기계학습 모형으로 R^2 0.95 이상의 성능을 확인하였다(Gwon et al., 2023). 또한 분광 군집분석으로 하상 유형을 구분한 뒤 OBRA를 적용한 결과, 수심 추정 오차가 약 0.05~0.07 m 감소하였다(Kwon et al., 2023). 이때 하상 분류는 별도의 현장 표본 없이 수행되었으나, 수심 회귀식의 보정에는 현장 수심이 사용되었다. 즉, 부유사의 조성과 하상재료에 따른 광학적 차이를 모형에 반영하는 것이 수심 추정의 정확도를 높이는 데 유효함을 알 수 있다.

깊고 탁한 수체에서는 하상에서 반사된 빛이 약해지므로, 수심 정보를 얻기 위해서는 수층 자체에서 발생하는 신호의 역할을 함께 살펴볼 필요가 있다. Kwon et al. (2024)은 AVIRIS-NG 초분

광 영상을 활용한 연구에서 이러한 수층 신호에도 수심 관련 정보가 포함될 수 있다는 가설을 제시하였다. 이를 물리적으로 설명하기 위해 수면 직하의 반사도를 수층과 하상의 기여로 구분하면 다음의 단순 복사전달식으로 나타낼 수 있다(Kwon 등, 2024, 식 1).

$$R(0^-)(\lambda) = R_\infty(\lambda)[1 - e^{-K(\lambda)H}] + \frac{\rho_b}{\pi} e^{-K(\lambda)H} \quad (1)$$

여기서 λ는 파장, H는 수심(m), $K(\lambda)$는 흡수·산란의 영향을 반영하는 유효감쇠계수(m^{-1})이다. $R_\infty(\lambda)$는 광학적으로 충분히 깊은 수체의 반사도, ρ_b는 하상 알베도이다. 우변의 첫째 항은 수층의 기여, 둘째 항은 하상 반사의 기여를 나타낸다. 수심과 감쇠계수의 곱 $K(\lambda)H$가 커지면 하상 신호는 지수적으로 감소하고 수층 신호의 비중이 커진다.

식 (1)에서 수심이 증가하면 하상 반사 항은 감소하고 수층 항은 광학적으로 깊은 수체의 반사도에 접근하므로 전체 반사도의 변화는 하상과 수층의 상대적인 밝기 및 파장별 감쇠 특성에 의해 결정된다. 특히 탁수에서는 부유사 산란의 영향이 커지기에 수심이 깊어질수록 반사도가 감소하는 관계를 일률적으로 적용하기 어렵다. 즉, 하상 반사와 함께 수층 신호의 파장별 변화를 고려해야 하며 여러 파장의 비선형 관계를 학습하는 방법은 이러한 정보를 수심 추정에 활용하기 위한 접근으로 볼 수 있다.

다만 수질과 하상 조건이 일정할 때 $K(\lambda)H$가 충분히 커지면 반사도가 포화되어 수심 변화에 대한 민감도가 낮아진다. 따라서 감쇠가 큰 파장이 수심 추정에 기여한다는 결과는 이러한 제약 아래에서 미세한 분광 차이를 경험적으로 활용한 것으로 해석할 필요가 있다. 이때 수심 자체에 따른 변화와 수심에 수반되는 수질·하상 조건의 영향을 구분하는 것이 중요하며, 이를 위해서는 추가적인 광학 관측과 검증이 요구된다.

이러한 관점에서 AVIRIS-NG는 미세한 분광 신호를 관측하는 데 특히 유리한 고성능 항공 초분광 센서이다. 380~2,510 nm를 약 5 nm 간격의 425개 밴드로 관측하고 복사량을 14비트로 기록하며, 높은 신호대잡음비를 갖도록 설계되었다(Kwon et al., 2024). 동일한 복사량에서 신호대잡음비가 높을수록 센서가 구분할 수 있는 최소 복사량 변화가 작아지므로, 탁수에서 감쇠와 관련된 미세한 분광 차이를 포착하는 데 유리하다. 즉, 세밀한 파장 구분과 작은 빛의 세기 변화에 대한 감도가 함께 확보되었다는 점이 AVIRIS-NG의 강점이며, 이는 기계학습에 제공할 수심 관련 신호의 품질을 높이는 기반이 된다.

Kwon et al. (2024)은 이러한 AVIRIS-NG의 관측 성능을 활용하여 미국 Wax Lake Delta에서 취득한 446~897 nm 파장대의 반사도와 현장 ADCP 수심을 결합하였다. 수심 추정에는 Random Forest (RF)와 기여도가 낮은 파장을 단계적으로 제거하는 재귀적 변수 제거(RFE)를 결합한 RF-RFE 모형을 적용하였으며, 봄·가을 통합 자료의 교차검증에서 R^2 0.94±0.005의 성능을 확인하였다. 이를 통해 두 시기에 깊은 본류에서 얕은 삼각주로 이어지는 수심 분포를 추정할 수 있었다(그림 2). 또한 추정한 횡단면 수심은 ADCP 관측값과 전반적으로 잘 일치하였고, 3×3 화소의 공간 평균을 적용할 경우 불규칙한 변동이 감소하면서 탁수가 존재하는 봄철 깊은 단면에서도 약 30 m의 수심까지 재현되었다(그림 3).

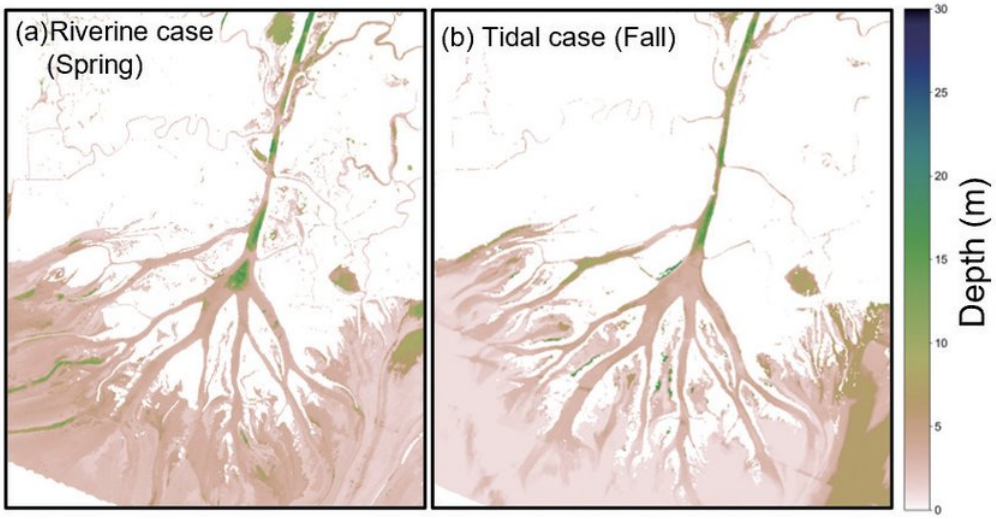


그림 2. AVIRIS-NG로 추정한 Wax Lake Delta의 수심 분포: (a) 2021년 봄, (b) 2021년 가을(Kwon et al., 2024, 2025).

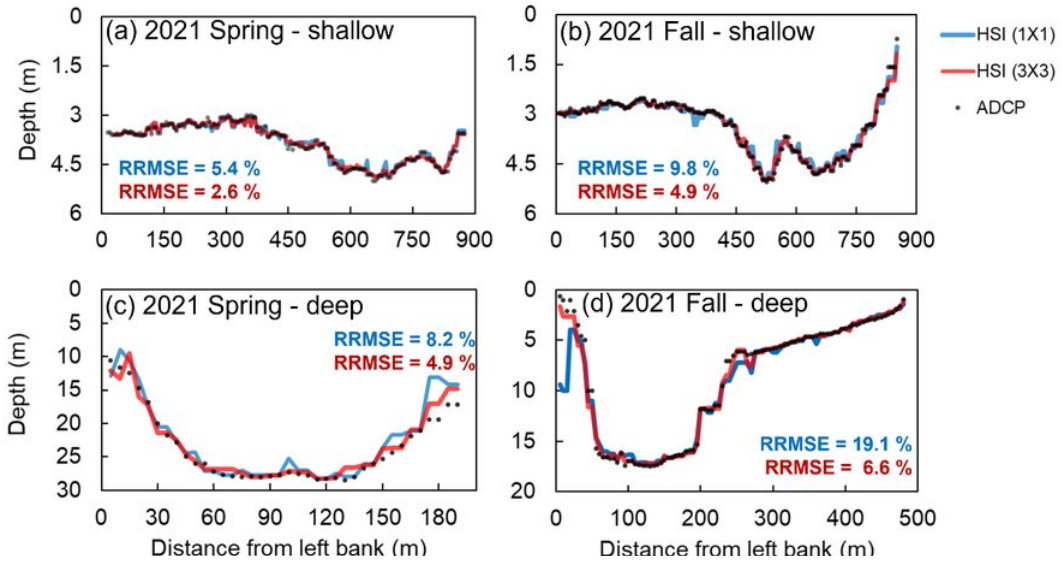


그림 3. Wax Lake Delta의 AVIRIS-NG 추정 수심과 ADCP 관측 수심 비교: (a, b) 봄·가을의 얕은 단면, (c, d) 봄·가을의 깊은 단면. 파란색은 원영상(1×1 화소), 빨간색은 3×3 화소 공간 평균을 적용한 결과이며 검은 점은 ADCP 관측값(Kwon et al., 2024).

이 연구의 핵심은 하상 반사에 주로 의존하는 일반적인 수심 추정과 달리, 탁수에서는 수층의 감쇠 특성과 관련된 미세한 분광 변화도 수심 정보로 활용할 수 있다는 점이다. 특히 청색 446 nm와 근적외선 897 nm의 높은 기여도는 식 (1)의 파장별 흡수·산란에 따른 감쇠 영향을 고려하는 것이 중요함을 시사한다. 탁도 수치를 비교하면 Wax Lake Delta의 봄철 평균 46.2 NTU는 앞서 소개한 Colorado강 LiDAR 사례의 12 NTU보다 약 3.9배 높으며, 가을철 평균 13.59 NTU는 비슷한 수준이다. 이는 상대적으로 높은 탁도와 깊은 수심이 함께 나타나는 조건에서도 초분광 영상의 활용 가능성을 보여준다. 다만 서로 다른 수역·센서·학습자료에서 얻은 성과이므로, LiDAR의 하상 직접 탐

지와 분광 모형의 경험적 추정이라는 차이를 고려하여 비교하는 것이 적절하다(Kinzel et al., 2021; Kwon et al., 2024).

여기서 약 30 m는 해당 센서와 수역의 자료에서 확인된 경험적 추정 범위로 이해할 필요가 있다. 일부 깊은 본류에서는 수심의 과소 추정과 수심도의 불연속성이 나타났으며 이는 20 m 이상의 현장 표본 부족과 미세한 반사도 차이에 대한 민감성 등을 함께 검토해야 함을 의미한다. 따라서, 실제 적용 시에는 깊은 구간의 현장 표본을 확보하고 수심별 오차와 지형의 연속성을 함께 평가하는 과정이 중요하다(Kwon et al., 2024).

Kwon et al. (2024)이 제시한 방법은 다양한 하천 환경에서 추가로 검토되고 있다. 미국 지질조사국(USGS) 연구진은 해당 연구를 인용하여 Deschutes, Kootenai, Niobrara, Sacramento 및 Snake 등 5개 하천의 초분광 영상과 현장 수심에 유사한 모델을 적용하였다(Legleiter 등, 2025). 그 결과 모든 대상지에서 OBRA보다 관측·예측 수심 간 회귀의 결정계수가 높았으며, 각 하천의 수심 범위 전반에서 추정 성능이 개선되었다. 이는 두 파장의 비에 한정되었던 수심 정보를 다수 파장의 관계로 확장할 경우, 서로 다른 지형과 광학적 특성을 지닌 하천에서도 수심 추정의 정확도를 높일 수 있음을 보여준다.

USGS 연구진이 개발한 무료 소프트웨어 HIRBERT(Hyperspectral Imaging of River Bathymetry using an Ensemble of Regression Trees)는 이러한 분석 절차를 구현한 도구로 파장 선택부터 수심도 작성과 예측에 기여한 파장의 해석까지 연계할 수 있다(Legleiter et al., 2025). 다만 위 5개 하천의 결과는 각 하천의 영상과 현장 자료를 이용하여 모형을 구축하고 검증한 것이므로 다른 수역이나 시기로 적용 범위를 넓히려면 현장 보정과 독립 검증이 필요하다. 즉, 고성능 분광센서로 확보한 정밀한 신호를 기계학습에 활용하되, 대상 수역을 대표하는 현장 수심 자료를 함께 충분히 확보하는 것이 분광기반 수심 측량의 가장 중요한 과정이다(Kwon et al., 2024; Legleiter et al., 2025).

3.2 국내외 하천과 저수지 적용 사례

국내 낙동강 본류에서는 탁도 10.9 NTU 조건에서 분광 군집별 기계학습 모형인 CMR-OV를 적용한 결과, OBRA의 약 2.5 m보다 깊은 약 4 m까지 양호한 추정 성능이 확인되었으며 검증 단면의

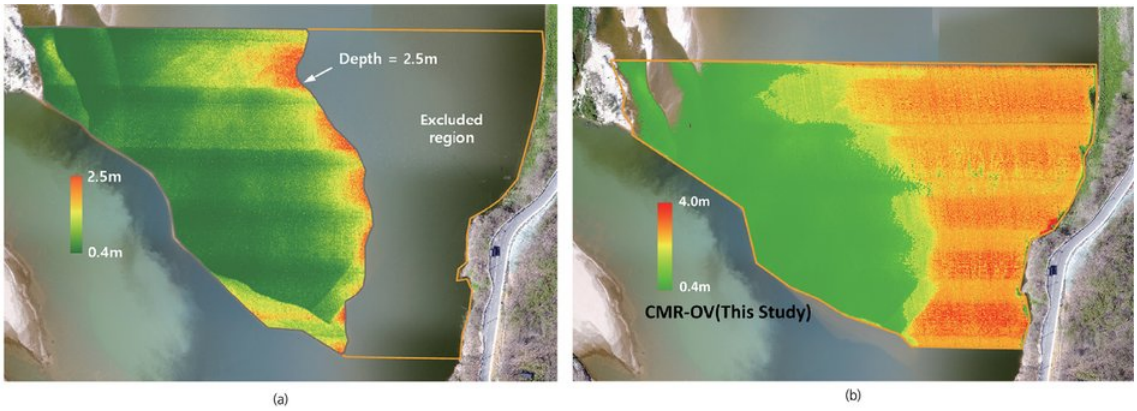


그림 4. 낙동강 본류의 초분광 수심도 비교: (a) OBRA, (b) CMR-OV(김도현 등, 2026).

RMSE는 0.21~0.65 m로 나타났다(그림 4; 김도현 등, 2026). 본 사례는 합류부와 같이 수질과 하상 조건이 공간적으로 달라지는 구간에서 분광 특성에 따라 수역을 구분하여 학습하는 방법이 유효할 수 있음을 보여준다. 다만 깊은 수심의 관측점이 적었고 탁도 176.4 NTU인 황강 구역은 분석에서 제외되었으므로, 검증된 수심과 탁도 범위를 벗어나는 조건에 대해서는 추가 평가가 필요하다.

의암호에서는 Sentinel-2 영상과 약 16 m까지의 기준 수심 자료를 이용하여 수심 구간별 기계학습의 효과를 검토하였다(Kim et al., 2026). 얕은 수역의 하상 반사와 깊은 수역의 수층 감쇠 특성을

표 1. 수심 원격탐사의 국내외 사례와 적용 조건

연구·대상지(수체)	센서 종류 & 알고리즘	최대 수심·산정 범위	부유물질·탁도·투명도
Gwon et al. (2023) 한국건설기술연구원 안동하천실험센터 실규모 수로	microHSI 410 SHARK 머신러닝	1 m 미만(실험 범위)	SSC 10.59~317.63 ppm (모래·실트 추적자 실험 결과)
Kwon et al. (2023) 청미천	microHSI 410 SHARK OBRA(선형회귀)	조사 최대: 수로 0.88 m, 청미천 0.63 m	-
Kwon 등(2024) Wax Lake Delta	AVIRIS-NG 머신러닝	약 30 m(경험적 추정)	봄: SSC 80.86±40.4 mg/L, 탁도 46.2±15.8 NTU 가을: SSC 23.2±8.14 mg/L, 탁도 13.59±4.67 NTU
김도현 등(2026) 낙동강 본류 (대하천 합류부)	microHSI 400 SHARK 머신러닝/OBRA	약 4 m(양호한 적용 범위) OBRA: 약 2.5 m	탁도 10.9 NTU Secchi 약 1.5 m 황강 176.4 NTU 구역 제외
Kim et al. (2026) 의암호(저수지)	Sentinel-2 MSI 머신러닝	약 16 m(기준 수심 상한)	탁도 8.0 / 4.4 NTU (7월/9월 영상 시기)
Mandlburger et al. (2020) 오스트리아 연못	RIEGL VQ-840-G LiDAR 거리측정	약 3.07 m(하상 탐지) 수신 시야각 18 mrad	Secchi 수심 1.4 m SSC·NTU 수치 미제시
Kinzel et al. (2021) Colorado강 Kremmling 구간	ASTRALiTe EDGE 편광 LiDAR 거리측정	약 1 m(하상 탐지)	탁도 12 NTU 부유사농도 16.16 g/m^3 (LISST 관측)
Mader et al. (2023) 독일 Elbe강	RIEGL VQ-880-G LiDAR 거리측정 (전파형 누적 처리)	약 1.65 → 2.20 m (처리 개선에 따른 분석 가능 수심 확대)	탁수 조건 SSC·NTU 수치 미제시
Parrish et al. (2019) 4개 연안 수역	ICESat-2 ATLAS LiDAR 거리측정	최대 약 38 m(하상 탐지)	Kd (490): 0.05~0.12 m^{-1}
Parrish et al. (2025) 8개 연안 수역	ICESat-2 ATLAS 거리측정/ATL24	0.05~24.43 m(검증 범위)	다양한 투명도 조건

고려하여 전체 수심을 하나로 학습하는 모형과 얕은 구간·깊은 구간을 나누는 모형을 비교한 결과, 두 관측일 모두 6 m를 경계로 분리할 때 성능이 가장 개선되었다. 이때 6 m는 해당 저수지 자료에서 선택된 경계이므로 다른 수체에서도 동일한 값을 적용하기보다는 대상 수역의 광학적 특성과 수심 분포에 따라 평가하는 것이 바람직하다.

또한 해당 연구에서는 현장 측선 간격이 넓어져 학습자료가 줄어드는 경우에도 수심 구간별 모형이 상대적으로 안정적인 성능을 유지하였다. 인접 관측점이 학습과 평가 자료에 섞이는 영향을 줄이기 위해 80 m×80 m 공간 블록으로 자료를 분리하고 독립 시험 자료를 두었으며 이를 통해 관측점의 수뿐 아니라 얕은 연안부와 깊은 주수로를 대표하는 자료 확보의 중요성을 살펴볼 수 있다. 다만 측선 간격 실험은 조밀한 기준 자료에서 일부 측선을 추출한 결과이기에 실제 조사에서 발생하는 위치 오차와 관측 시차를 함께 고려한 검토가 필요하다.

앞서 소개한 국내외 사례의 센서, 모형, 수심 범위 및 수체 조건은 표 1과 같다. 이때 최대 수심은 LiDAR의 하상 신호 탐지 깊이, 경험적 모형의 평가 범위 및 현장 기준 자료의 최대 깊이로 구분되므로 각 수치가 의미하는 범위를 확인하는 것이 중요하다. 또한 SSC와 TSS는 질량 농도, 탁도는 광학적 산란 특성, Secchi 수심은 투명도를 나타내기에 입자 조성과 크기 등의 정보 없이 직접 환산하기 어렵다. 따라서 조사 농도 범위가 최대 수심 지점의 조건과 일치하는지 확인해야 하며 NTU가 제시되지 않은 LiDAR 사례와 AVIRIS-NG 연구의 탁도를 직접 비교하는 데에는 제약이 있다.

4. 국내 하천 조사 활용과 발전 방향

국내 하천 조사에 원격탐사를 활용하기 위해서는 관리 목적과 수체 조건에 따라 현장 측량과의 조합을 설정하는 것이 가장 중요하다. 얕고 비교적 맑은 중소하천에서는 드론 수심 LiDAR와 분광영상을 통해 여울·소·사주의 지형을 연속적으로 구축할 수 있으며 제방부터 하상까지의 지형 연결에는 topo-bathymetric LiDAR가 유리하다. 반면 수심과 함께 수질·하상재료를 파악하는 경우에는 초분광 영상의 활용성이 크다. 대하천과 합류부에서는 수질의 공간적 차이를 반영한 구역별 보정이 필요하고, 깊거나 광학 신호가 부족한 구간은 ADCP 및 음향측심으로 보완하면 보다 정확한 지형 자료를 얻을 수 있다.

실무적으로는 영상 취득 시기에 맞추어 수심·탁도·부유사농도·수질을 관측하고, 얕은 사주와 깊은 주수로가 함께 포함되도록 측선을 배치할 필요가 있다. 횡단 관측에 최심선을 따르는 종단 관측을 병행하면 깊은 수심의 표본 부족을 줄일 수 있으며 모형 보정에 사용하지 않은 단면이나 구역에서 정확도를 검증함으로써 수심과 수체 조건에 따른 적용 범위를 확인할 수 있다. 이러한 기준 자료는 다른 시기의 영상에 모형을 적용할 때에도 활용되므로, 반복 조사의 신뢰도를 확보하는 데 중요한 역할을 한다.

하상변동 조사에서는 갈수기의 기준 지형과 홍수 이후의 지형을 비교하여 침식 및 퇴적 양상을 파악할 수 있다. 이때 수심은 수위 변화에도 영향을 받으므로 각 시기의 수면고에서 수심을 차감한 뒤 동일한 높이 기준면으로 변환한 하상고를 비교해야 한다. 관측 오차를 함께 고려하면 사주의 침식·퇴적, 최심선 이동 및 구조물 주변 퇴적을 구분

하고, 정밀 조사가 필요한 구간을 우선적으로 선정하는 데 도움이 된다. 아울러 Sentinel-2의 수역 영상, 이용 가능한 ICESat-2 수심 자료 및 SWOT의 수면고 정보를 항공·드론 관측과 연계하면 조사 범위를 넓힐 수 있으나, 자료 간 관측 시기와 위치, 높이 기준면을 일치시키는 과정이 선행되어야 한다.

향후 국내 하천 조사에서도 분광센서의 성능을 장비 선정의 주요 기준으로 고려할 필요가 있다. 특히 깊고 탁한 구간을 조사할 때에는 공간 해상도와 함께 청색부터 근적외선까지의 파장 구성, 분광 해상도, 신호대잡음비 및 복사 해상도를 검토해야 한다(Legleiter and Harrison, 2019; Kwon et al., 2024). AVIRIS-NG와 같이 미세한 복사량 변화를 구분할 수 있는 관측 성능이 드론 탑재형 센서로 확대된다면 국내 하천에서도 분광 수심법의 활용 범위를 넓히는 데 기여할 것으로 기대된다. 아울러 복사 보정과 수면 반사 제거를 개선하고 파장별 흡수·산란 및 감쇠 특성을 기계학습에 반영하는 과정이 함께 요구된다. 이러한 센서와 분석 기법의 발전을 실제 조사로 연결하기 위해서는 국내 하천의 다양한 수심·탁도·하상 조건을 포함한 자료를 축적하고, 학습에 포함하지 않은 하천과 시기에서 검증할 필요가 있다(Kwon et al., 2024; Legleiter et al., 2025).

5. 맺음말

본 기사에서는 수심 LiDAR와 분광 영상의 관측 특성 및 국내외 수심 추정 사례를 살펴보았다. ICESat-2는 투명도가 높은 수역에서 수십 m 깊이의 하상 신호를 위성으로 탐지할 수 있음을 보여주었다. 또한 AVIRIS-NG 연구에서는 탁수의 감쇠 특성과 관련된 미세한 분광 차이를 기계학습에 활용하여 약 30 m까지 수심을 경험적으로 추정하였다. 이러한 결과는 수중 지형 관측의 범위가 확대되고 있음을 보여주며, 특히 분광 수심법에서는 세밀한 파장 구분과 높은 신호대잡음비를 확보하는 것이 중요함을 시사한다.

국내 하천에서는 관리 목적과 수체 조건에 맞는 센서를 선정하고, 현장 수심 자료와 독립 검증을 통해 적용 범위를 확인하는 것이 우선되어야 한다. 원격탐사로 얻은 연속적인 지형 정보에 ADCP 및 음향측심 자료를 보완하고 반복 관측을 연계하면 하상변동을 파악하고 정밀 조사가 필요한 구간을 선정하는 데 도움이 될 수 있다. 나아가 센서 성능의 개선과 광학적 특성을 반영한 분석 기법의 발전을 국내 하천의 검증 자료 축적과 병행함으로써 원격탐사를 보다 신뢰도 높은 하천 관리 자료의 확보 수단으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

김도현, 김동수, 유호준, 이서경, 권시윤 (2026). CMR-OV 초분광 수심 기법의 최대측정 가능수심 확장을 통한 국내 대하천 정밀하상측정 가능성 평가. 한국수자원학회논문집, 59(8), 907-920. https://doi.org/10.3741/JKWRA.2026.59.8.907

Cerbelaud, A., Wade, J., David, C. H., Durand, M., Frasson, R. P. M., Pavelsky, T., and Oubanas, H. (2026). Wide-swath altimetry maps bank shapes and storage changes in global rivers. Nature, 651, 666-671. https://doi.org/10.1038/s41586-026-10218-y

Gwon, Y., Kwon, S., Kim, D., Seo, I. W., and You, H. (2023). Estimation of shallow stream bathymetry under varying suspended sediment concentrations and compositions using hyperspectral imagery. Geomorphology, 433, 108722. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108722

Kim, J. S., Baek, K. O., and Kwon, S. (2026). A depth-dependent machine learning framework for satellite-derived bathymetry of morphologically complex reservoirs. Geocarto International, 41(1), 2694889. https://doi.org/10.1080/10106049.2026.2694889

Kinzel, P. J., Legleiter, C. J., and Grams, P. E. (2021). Field evaluation of a compact, polarizing topo-bathymetric lidar across a range of river conditions. River Research and Applications, 37(4), 531-543. https://doi.org/10.1002/rra.3771

Kwon, S., Gwon, Y., Kim, D., Seo, I. W., and You, H. (2023). Unsupervised classification of riverbed types for bathymetry mapping in shallow rivers using UAV-based hyperspectral imagery. Remote Sensing, 15, 2803. https://doi.org/10.3390/rs15112803

Kwon, S., Passalacqua, P., Nghiem, J. A., and Lamb, M. P. (2025). Mixing patterns of river deltas obtained from remotely sensed Rouse number. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 130, e2024JF008077. https://doi.org/10.1029/2024JF008077

Kwon, S., Passalacqua, P., Soloy, A., Jensen, D., and Simard, M. (2024). Depth mapping in turbid and deep waters using AVIRIS-NG imagery: A study in Wax Lake Delta, Louisiana, USA. Water Resources Research, 60, e2023WR036875. https://doi.org/10.1029/2023WR036875

Legleiter, C. J., Roberts, D. A., and Lawrence, R. L. (2009). Spectrally based remote sensing of river bathymetry. Earth Surface Processes and Landforms, 34, 1039-1059. https://doi.org/10.1002/esp.1787

Legleiter, C. J., and Harrison, L. R. (2019). Remote sensing of river bathymetry: Evaluating a range of sensors, platforms, and algorithms on the upper Sacramento River, California, USA. Water Resources Research, 55(3), 2142-2169. https://doi.org/10.1029/2018WR023586

Legleiter, C. J., Kinzel, P. J., Overstreet, B. T., and Harrison, L. R. (2025). Hyperspectral imaging of river bathymetry using an ensemble of regression trees. Earth Surface Processes and Landforms, 50(12), e70155. https://doi.

org/10.1002/esp.70155

Legleiter, C. J., Leonard, C. M., Burger, P. A., Pletcher, A. G., and Kinzel, P. J. (2026). Toward an efficient framework for remote sensing of river bathymetry: Comparing sensors and algorithms on an inaccessible proglacial river in Alaska. Geomorphology, 495, 110140. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.110140

Mader, D., Richter, K., Westfeld, P., and Maas, H.-G. (2023). Volumetric nonlinear ortho full-waveform stacking in airborne LiDAR bathymetry for reliable water bottom point detection in shallow waters. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 204, 145–162. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.08.014

Mandlburger, G., Pfennigbauer, M., Schwarz, R., Flöry, S., and Nussbaumer, L. (2020). Concept and performance evaluation of a novel UAV-borne topo-bathymetric LiDAR sensor. Remote Sensing, 12, 986. https://doi.org/10.3390/rs12060986

NASA (2025). Data from NASA's ICESat-2 goes beyond the surface. NASA Science, June 25. https://science.nasa.gov/blogs/science-news/2025/06/25/data-from-nasas-icesat-2-goes-beyond-the-surface/

Parrish, C. E., Magruder, L. A., Neuenschwander, A. L., Forfinski-Sarkozi, N., Alonzo, M., and Jasinski, M. (2019). Validation of ICESat-2 ATLAS bathymetry and analysis of ATLAS's bathymetric mapping performance. Remote Sensing, 11, 1634. https://doi.org/10.3390/rs11141634

Parrish, C. E., Magruder, L. A., Perry, J., Holwill, M., Swinski, J. P., and Kief, K. (2025). Analysis and accuracy assessment of a new global nearshore ICESat-2 bathymetric data product. Earth and Space Science, 12, e2025EA004391. https://doi.org/10.1029/2025EA004391