

# [참고] K-CRP 시스템 운영 구조



### 데이터 수집 레이어

- 위성 데이터**
  - 천리안위성 (GK-2A/2B)
  - NOAA, Sentinel 등
  - 클로로필-SST 영상
- 해양 수치모델 (GPA ①)**
  - ROMS, HYCOM (전통 수치모델)
  - + Earth FM 파인튜닝
  - GraphCast + FourCastNet
  - 한국 연안 특화 예측
  - 수온-해양-DO-염분
- 현장 IoT 센서**
  - 수온-DO-염분-pH
  - 조위-유속 (양식장)
- 수과원 관측/예측**
  - 적조 발생 정보
  - 유해생물 관측 자료
  - 고수는 특보
- 기상 데이터**
  - 기온-강수-풍속-풍향
  - 기상예보 (단기/중기)

### 데이터 통합·처리 레이어

**사공간 정렬 및 격자화**  
500m~1km 격자 통합  
좌표계 표준화 (EPSG:4326)

**결측 보정 (GPA ②)**  
PINN 기반 물리 보간  
해양 방정식 내장 신경망으로  
관측 공백 격자 값 생성  
(열전달-연속방정식 제약)

**Physics-Informed NN**  
 $\partial T / \partial t + u \cdot \nabla T = \kappa \nabla^2 T$   
vs. 기존 통계 보간(IDW):  
물리적으로 유효한 값만 허용

**품질 관리 (QC)**  
이상값 필터링  
시계열 일관성 검증

**L1 상태변수 생성**  
표준화 (0~1 스케일)  
수온-DO-적조-클로로필  
변화율-유속 등 파생변수

**표준화 환경 상태 데이터**

### 전국 CRI 분석 엔진

**복합위험지수 (CRI) 산정**

$$CRI = \sum w_i F_i + \sum w_j |F_i| |F_j|$$

**6대 축:** 생물·물리·화학·해양환경·기상·운영  
 $w_i$  복합 상호작용 가중치 (XAI 학습)

**XAI/SHAP 원인 분해**  
요인별 기여도 산출  
"적조 55% + 고수는 28%"  
원인 설명 자동 생성

**공간 해상도**  
전국: 500m~1km 격자  
갱신: 3시간 단위  
출력: CRI Heatmap (0~100)

전국 해역 상시 모니터링

### 이벤트 트리거 + 정밀 분석

**트리거 조건**

- CRI > 임계치 (예: 60)
- 급격한 상승 감지
- 특정 패턴 탐지 (고수온+적조+저산소)

위험지역 자동 선정

**양식장 정밀 분석**  
센서 데이터 실시간 결합  
고해상도 보정 (양식장 단위)  
폐사 확률 예측 (24~72h)  
공간 해상도: 양식장 단위

**분석 결과 (Risk Package)**

CRI (복합위험도)	78 / 위험
폐사 확률	62%
주요 원인 기여도	적조 55%
위험 유형 분류	복합형
예측 신뢰도 (GPA)	93.2%

### 의사결정 AI 엔진

**시나리오 시뮬레이션**  
대용 시나리오 자동 생성  
결과 비교 (폐사·손실 감소)  
제약조건 (비용·시간·인력)

**72h 예측 엔진 (GPA ③)**  
Earth FM 기반 고정밀 예측  
GraphCast 파인튜닝 모델로  
72시간 수온·기상 예측  
→ CRI 예보 정확도 향상

전통 NWP 대비  
동등 정확도 · 100x 속도

**최적 행동 추천 (L3)**

- 사료 공급 즉시 중단
- 산소공급기 전체 가동
- 가두리 이동 검토
- 조기 출하 타이밍 제공

**출하 최적화**  
CRI 72h 예보 연동  
경제적 최적 출하 시점  
손실 최소화 전략

### 서비스 / 플랫폼 레이어

**대시보드 (웹)**  
지역 선정·양식장 선택  
해역 CRI 지도 시각화  
시계열·원인 분석

지재제 | 웨수부

**모바일 앱**  
양식장 위치 기반 CRI  
행동 지침 카드  
72h 예보 + 출하 타이밍  
위험 푸시 알림

어업인 | 양식업자

**API / 데이터 서비스**  
REST API 제공  
/risk-index /forecast  
외부 시스템 연계

연구기관 | 민간

**알림 채널**  
SMS · 카카오톡  
이메일 · 앱 푸시

# [참고] 데이터가 위험경보가 되기까지



L0 기초 데이터

## 원시 관측값

- 위성(GOCI-II, Sentinel)
- 현장 IoT · 수질측정망
- ROMS · HYCOM 수치모델
- 기상청 예보 · 수과원 예찰
- 양식장 운영 DB

GPA ① PINN — 관측 공백 보간



L1 단일 이벤트 진단

## 변수별 이상 탐지

- 축별 임계값 초과 여부 판단
- 이상 탐지 알고리즘 적용
- 수과원 예경보 출력 연계
- 공간 지도화 (격자 단위)

GPA ② Earth FM 파인튜닝 — 예측 정확도 향상



L2 복합위험도(CRI) ★ 핵심

## 6개 축 통합 평가

- 5개 Risk Module 가중 합산
- XAI/SHAP 원인 기여도 분해
- 공간 위험지도 생성
- 동시발현 확률 산출
- 4단계 경보 등급 결정

XAI / SHAP — 위험 원인 기여도 분해·설명



L3 의사결정 지원

## 역할별 행동 지침

- 지자체: 경보 발령 기준 제공
- 어업인: 조기출하·산소공급 시점
- 현장: 우선 대응 해역 지정
- 민간: API 기반 서비스 연계



핵심: 단순 데이터 수집이 아닌 "물리기작 기반 통합 판단" — GPA가 데이터 공백을 메우고, XAI가 판단 근거를 설명한다

# [참고] CRI는 어떻게 계산되는가

	<p><b>R_heat_hypoxia</b>  <b>고수온·빈산소 ★가중치 최대</b>  <i>f(수온, DO, 수온×DO)</i></p>	<p><b>왜 위험한가</b>          수온 상승 + 성층 강화 → 저층 DO 감소          → 양식생물 폐사의 가장 직접적 원인</p>	<p><b>현장 대응</b>  <b>산소공급 장비 사전 배치 · 조          기출하</b></p>
	<p><b>R_redtide</b>  <b>적조 발생·확산</b>  <i>f(적조 밀도, Chl-a, 해류)</i></p>	<p><b>왜 위험한가</b>          수과원 예찰 출력값을 입력으로 연계          → K-CRP는 공간화·복합위험 연계 담당</p>	<p><b>현장 대응</b>  <b>양식장 이동 · 출하 최적화</b></p>
	<p><b>R_turbidity</b>  <b>부유사·탁도 확산</b>  <i>f(탁도, 파랑, 퇴적물)</i></p>	<p><b>왜 위험한가</b>          준설·매립·해상공사로 인한 확산          → 저서생태 영향 + 민원·이해충돌</p>	<p><b>현장 대응</b>  <b>공사시간 조정 · 오탁방지막          운영</b></p>
	<p><b>R_stratification</b>  <b>냉수대·성층 변화</b>  <i>f(수직 온도 기울기, 혼합 지수)</i></p>	<p><b>왜 위험한가</b>          냉수 용승·수괴 분리로 단기 환경 급변          → 동해권 시범 적용의 핵심 모듈</p>	<p><b>현장 대응</b>  <b>냉수 출현 전 사전 점검 통보</b></p>
	<p><b>R_salinity</b>  <b>염분 변화·저염수 유입</b>  <i>f(염분, 염분 변화율, 강우량)</i></p>	<p><b>왜 위험한가</b>          강우·하천 유입·담수 방류 → 급격한 염          분 저하 → 양식생물 삼투압 스트레스</p>	<p><b>현장 대응</b>  <b>취약 해역 사전 모니터링 강화</b></p>



**CRI**  
 복합위험지수

---

$w_1 \cdot R_{heat}$   
 $+ w_2 \cdot R_{red}$   
 $+ w_3 \cdot R_{turb}$   
 $+ w_4 \cdot R_{strat}$   
 $+ w_5 \cdot R_{salt}$

---

출력 예시

**CRI : 82**

위험 구조:  
 복합 스트레스형



**Meta Risk**  
 복합 생태계  
 교란 위험

*조건: 3개수  
 동시 발현*

---

고수온·빈산소  
 → 산소공급·이동

---

적조  
 → 출하 최적화

---

탁도  
 → 사료 조절

---

성층  
 → 혼합 유도

---

염분  
 → 이동 방류

**XAI / SHAP**      모듈별 기여도를 정량 분해 → "CRI 82점 중 고수온이 45%, 빈산소가 28%, 성층이 20% 기여" 형태로 설명 → 행정 보고·감사 근거 자동 생성

**핵심: 5개 모듈이 각각 위험을 점수화 → 가중 합산하여 CRI 산출 → XAI가 "왜 위험한가"를 설명 → 역할별 행동지침으로 연결**

# [참고] Geo-Physical AI(GPA)란 무엇인가

## ① 개념 정의

### Geo-Physical AI (GPA)

위성·현장관측·수치모델 등 지구물리 기반 해양환경 데이터와 해양환경의 물리기작(物理機作)을 함께 AI 모델 구조 안에 명시적으로 반영하여 복합 연안환경위험을 진단·단기예측하는 인공지능 접근 방식

## ② 기존 패턴 학습 AI vs Geo-Physical AI — 핵심 차이

### 기존 패턴 학습 AI

- ⚠ 학습 방식 관측 데이터 패턴만 학습
- ⚠ 물리 타당성 보장 안 됨 — 데이터에 의존
- ⚠ 극단 이벤트 학습 데이터 부족 시 불안정



### Geo-Physical AI (GPA)

- ✓ 학습 방식 패턴 + 물리기작 동시 반영
- ✓ 물리 타당성 물리 법칙이 예측 범위를 제약
- ✓ 극단 이벤트 물리 제약이 하한선 역할 → 안정

## ③ GPA + XAI — 직렬 2단 구조 (병렬 X, 선후 관계 O)

### 1단계 Geo-Physical AI (GPA)

위성·관측·모델 + 물리기작 → 복합위험도(CRI) 산출  
비유: 의사의 진단 도구



결과 전달

### 2단계 설명가능 AI (XAI)

SHAP 등으로 "왜 위험한가" 원인·기여도 설명  
비유: 의사의 소견서 작성

# [참고] GPA 단계별 고도화 전략 및 예상 질의응답

## ④ GPA 구현 단계별 고도화 — A안 → B안 → C안(최종)

### 1~2년차 | A안 하이브리드

#### 수치모델 + 위성 + 관측 → AI 통합

ROMS/HYCOM 수치모델 출력을 AI 입력으로 활용  
물리기작은 수치모델 내부에 존재 (AI 외부)

- 데이터 파이프라인  
복합위험도 프로토타입 v1.0

### 3년차 | B안 PINN 도입

#### 물리 방정식을 AI 학습에 직접 제약

손실함수에 물리 패널티 추가 → 물리 법칙 위반 시 감점  
열확산, 밀도성층, DO 산소소모 관계 등 반영

- GPA 고도화 알고리즘  
XAI 리포트 자동화

### 4~5년차 | C안 A+B 결합 (완성)

#### 수치모델 + 물리 제약 AI 완전 통합

하이브리드(A) + PINN(B) 동시 적용  
극단 이벤트에서도 물리적 타당성 보장 + 예측 정확도 극대화

- 플랫폼 v2.0  
운영 프로토콜 확정

## ⑤ 예상 심사 질문 및 대응 논리

Q GPA와 XAI는 어떻게 다른가요?

A GPA는 복합위험을 진단·예측하는 엔진, XAI는 그 결과를 정책 담당자가 이해할 수 있도록 원인과 기여도를 설명하는 해석 레이어입니다. 병렬이 아닌 직렬(선후) 구조입니다.

Q ROMS/HYCOM은 기존에도 썼는데 뭐가 달라요?

A 기존은 수치모델과 관측을 개별 활용하여 단일 지표 경보를 발령했습니다. K-CRP는 AI가 이를 통합 판단하여 복합위험도를 산출하는 체계로 재구성한다는 점이 차별성입니다.

Q PINN을 처음부터 왜 안 하나요?

A PINN은 반영할 물리 방정식 선정과 연안 특성 검증이 선행되어야 합니다. 1~2년차 데이터 파이프라인과 시범지역 실증을 통해 물리 제약 범위를 확정한 후 3년차부터 단계적으로 도입합니다.