

원전재료 경년열화 예측 및 관리를 위한 경험데이터 활용방안

오 영 진

한국전력기술(주) 스마트융합연구소

2022. 10. 19

**계산과학 및 AI활용 핵연료 및 원자력재료 연구 워크숍
한국원자력학회 핵연료 및 원자력재료 연구부회**

목 차

1. 데이터 기반 접근법 개요
2. 압력경계 피동기기 열화예측 연구방안
3. 기술개발 적용방안 예
4. 요약정리

1. 데이터 기반 접근법 개요

- 논리기반 모델 / 데이터기반 모델
- 데이터 기반 모델의 한계

■ 예) 스팸메일 필터링 시스템

• 논리 기반 모델 (기구학/물리모델)

➤ 알고리즘

- “이마트” 포함 → 스팸메일
- “광고” 포함 → 스팸메일
- “원자력” 포함 → 정상메일
- “광고” & “원자력” 포함 → 정상메일
-

➤ 다양한 유형의 스팸메일들을 직접 분석

➤ 메일 수신자별 특성을 모두 고려할 수 없음

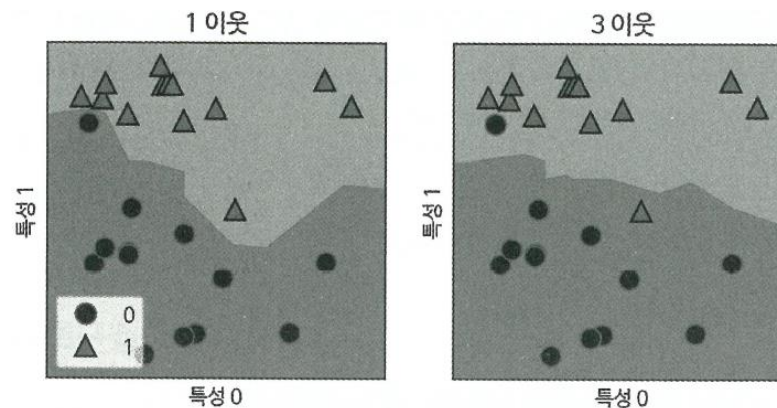
• 데이터 기반 모델 (머신러닝)

➤ 알고리즘

- 스팸메일과 정상메일의 빅 “데이터” 를 제공
- 학습에 의해 알고리즘 생성

➤ 메일수신자가 기 수행해 둔 스팸/정상 메일 분류결과에 따라 알고리즘 결정

➤ 데이터 축적량 증가에 따라 분류 알고리즘 성능도 향상



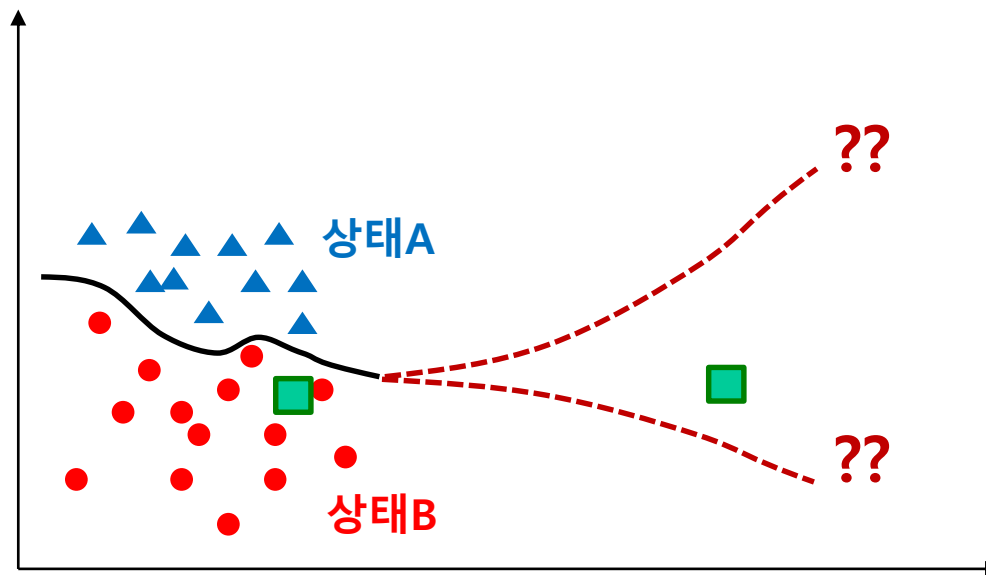
k-nearest neighbor
알고리즘 예

■ 순수 데이터 기반 모델

- 추세분석 / 패턴분석 (커브피팅)
- 머신러닝 예측모델의 비강건성

■ 예측 성능 확보를 위해서는,

- 데이터 개수 : 많아야 함
- 데이터 영역 : 넓어야 함



➡ 피동 압력경계 기기의 열화감시(예측진단)에 적용 가능?

2. 압력경계 기기 열화예측 연구방안

- 압력경계 피동기기 경년열화 데이터 특성
- 압력경계 기기 열화감시 접근방안
- 기기 열화감시와 원전 디지털트윈

압력경계 피동기기 경년열화 데이터 특성

■ 능동기기(회전기기)

- 모터, 터빈, 펌프, 밸브 등
- 발전소 데이터
 - 실시간 데이터
 - 진동, 소음 등
- 데이터 특성
 - 데이터 개수 많음
 - 데이터 영역 (비교적) 넓음
 - 데이터 오차의 편향성 낮음
- 물리모델 (기구학모델)
 - 손상종류/위치 등을 조기에 확인할 수 있을 정도로 정밀하지는 않음

→ 데이터 개수/영역 충분하다면,
머신러닝 기반의 예측모델 적용

■ 피동기기

- 배관, 증기발생기, 열교환기, 탱크 등
- 발전소 데이터
 - 비파괴검사 데이터
 - 기타 실시간 감시데이터(?)
- 데이터 특성
 - 데이터 개수 적음
 - 데이터 영역 (비교적) 좁음
 - 검사자 특성에 따라 데이터 편향성 발생
- 물리모델 (기구학모델)
 - 균열생성/성장 등에 대한 재료과학적 물리모델 발달

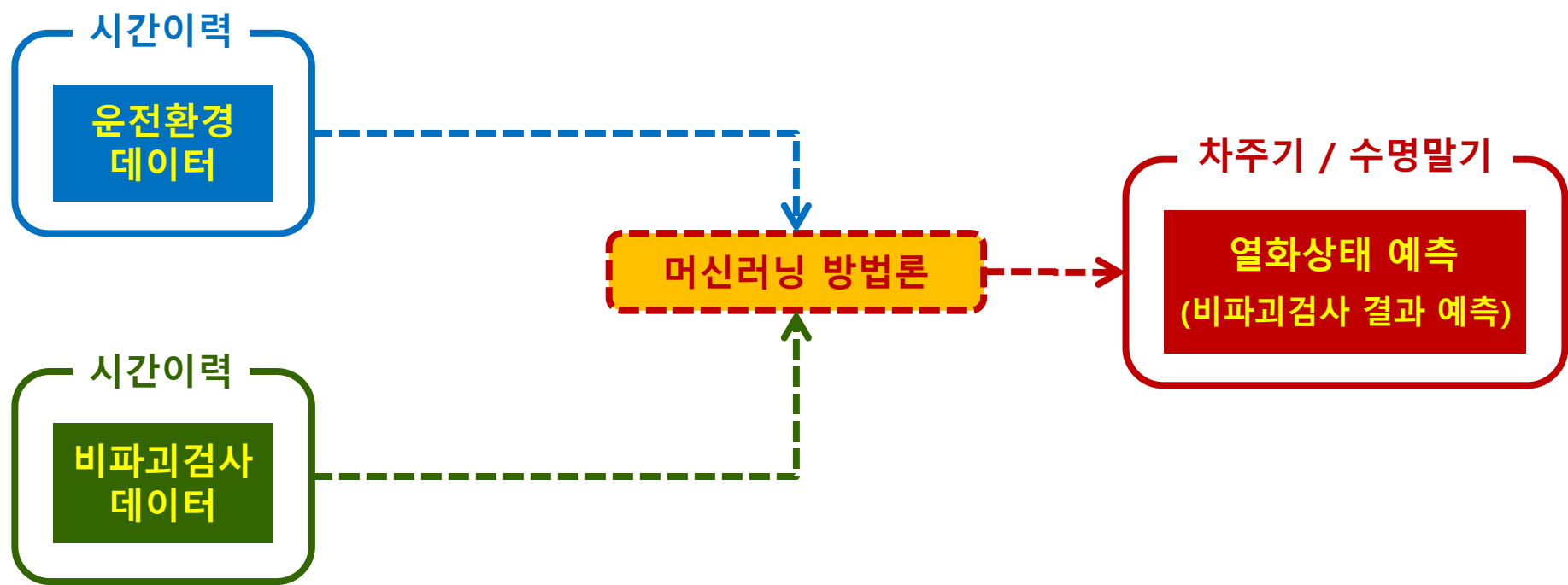
→ 데이터 개수/영역을 고려할 때,
물리모델+머신러닝 방법론 접근 필요

2. 압력경계 기기 열화예측 연구방안

압력경계 기기 열화감시 접근방안 (1)

■ 비파괴검사 기반 열화감시 접근방안

- 단순 머신러닝 적용 :

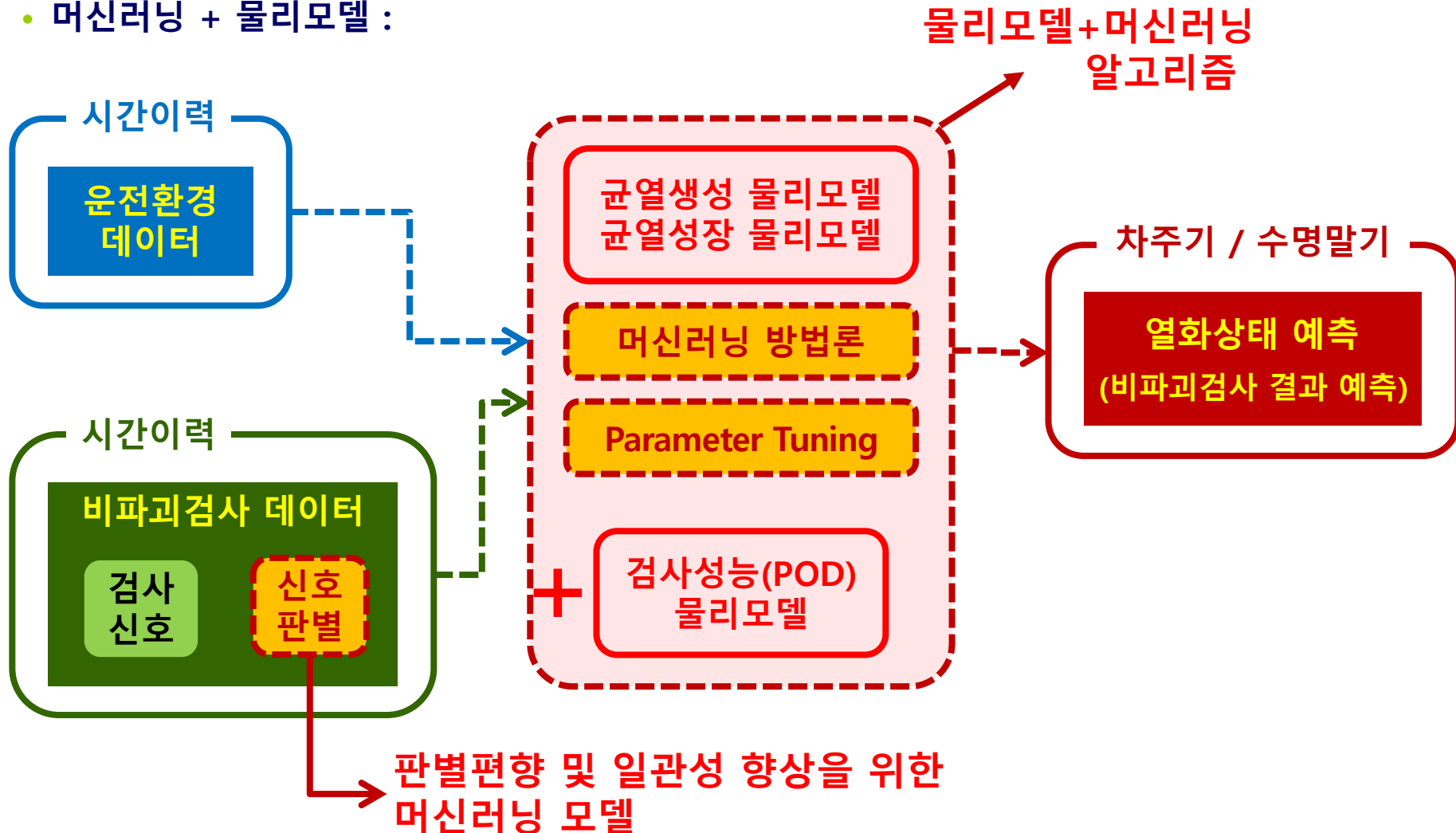


→ 비파괴검사 데이터의 개수/영역 및 열화 과정의 복잡성을 고려할 때, 열화상태 예측의 신뢰성을 기대하기 어려울 것으로 예상

압력경계 기기 열화감시 접근방안 (2)

■ 비파괴검사 기반 열화감시 접근방안

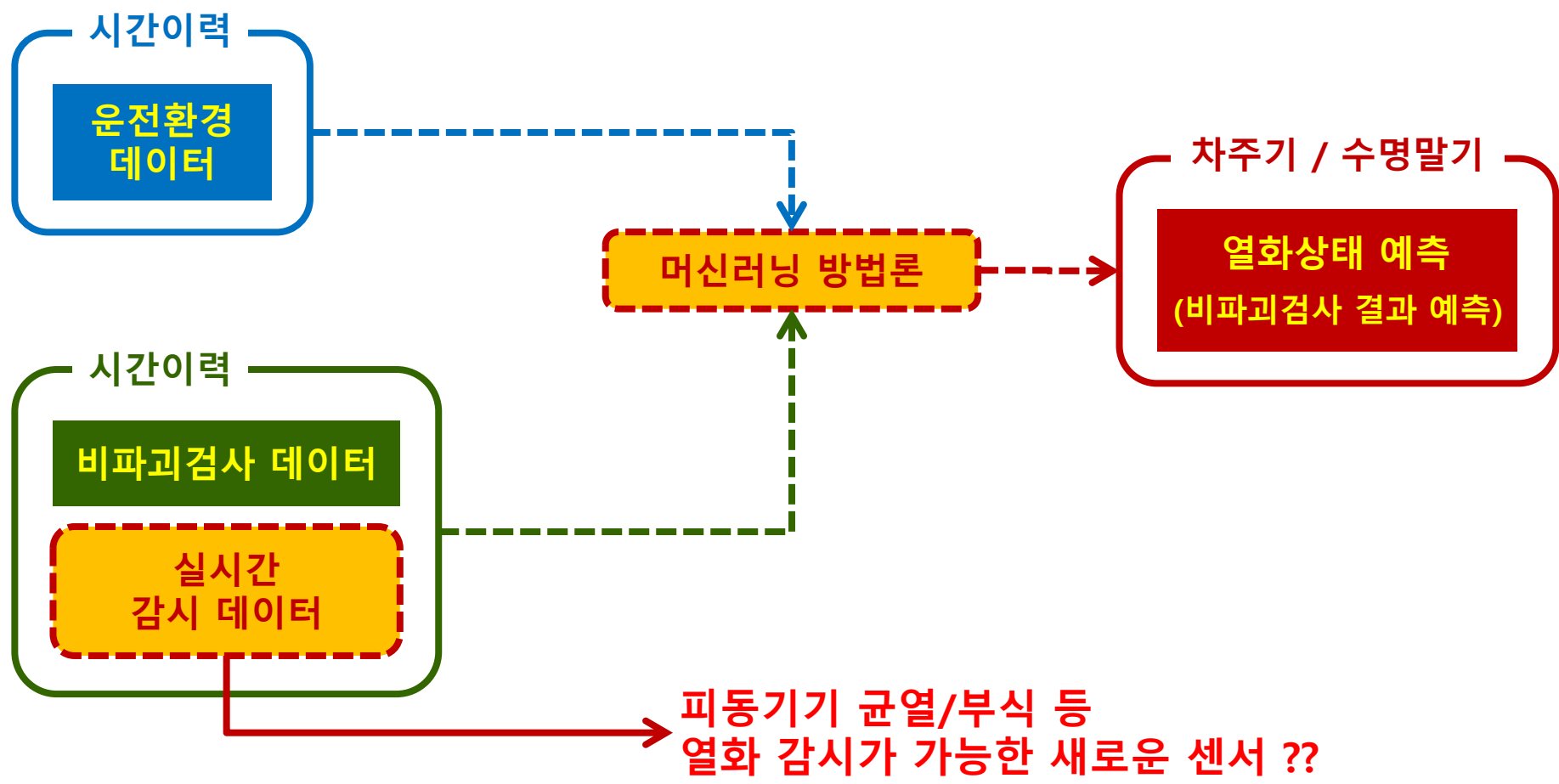
- 머신러닝 + 물리모델 :



2. 압력경계 기기 열화예측 연구방안

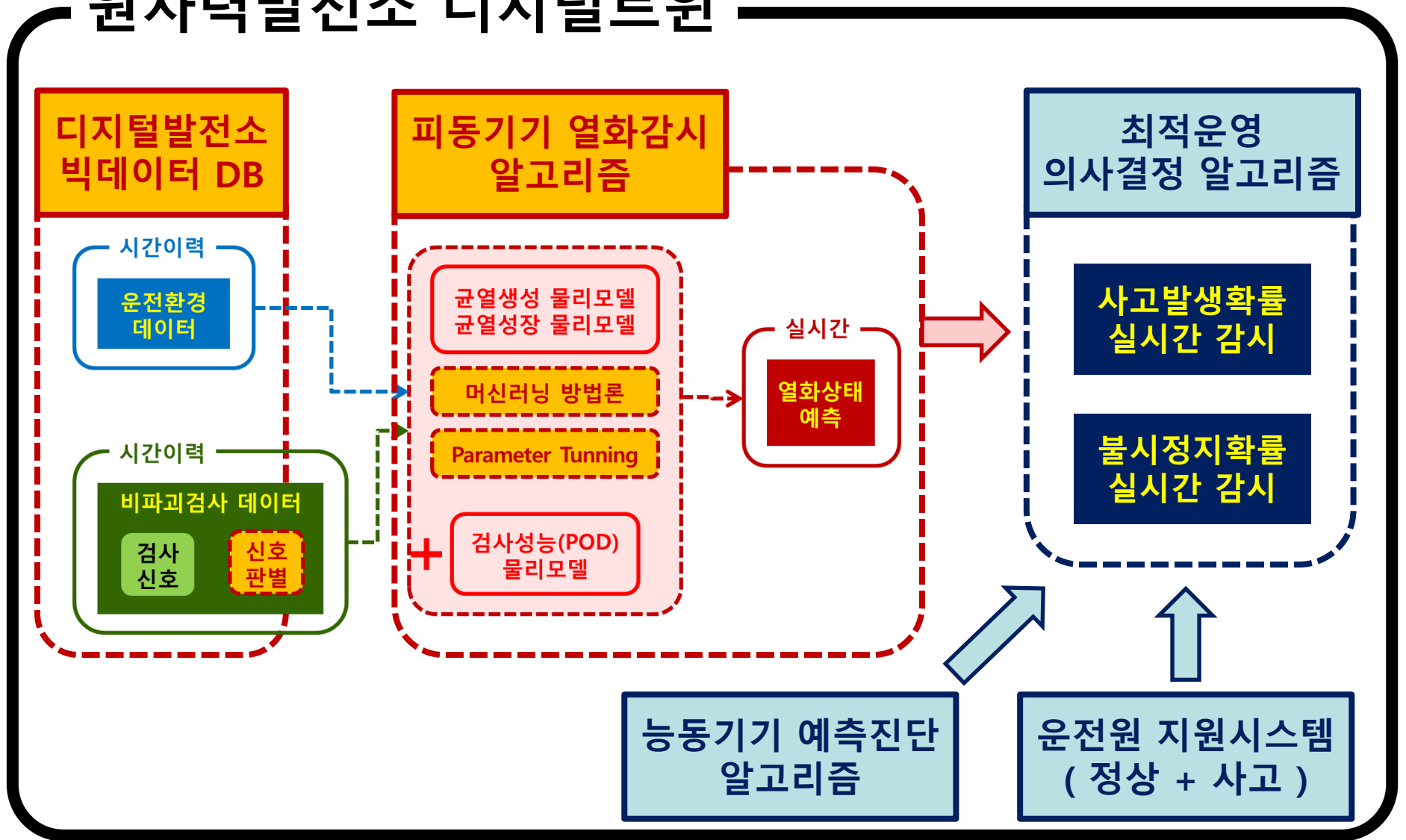
압력경계 기기 열화감시 접근방안 (3)

■ 새로운 감시센서 도입을 통한 열화감시 접근방안



기기 열화감시와 원전 디지털트윈

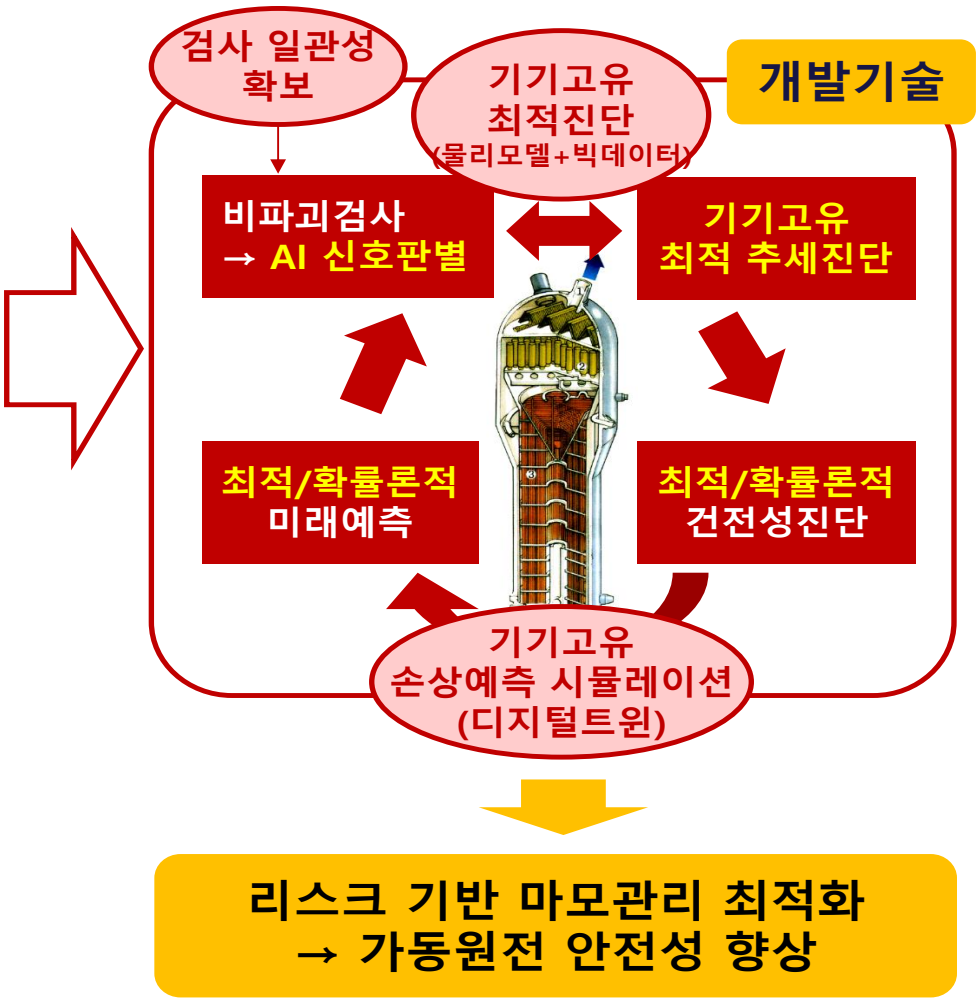
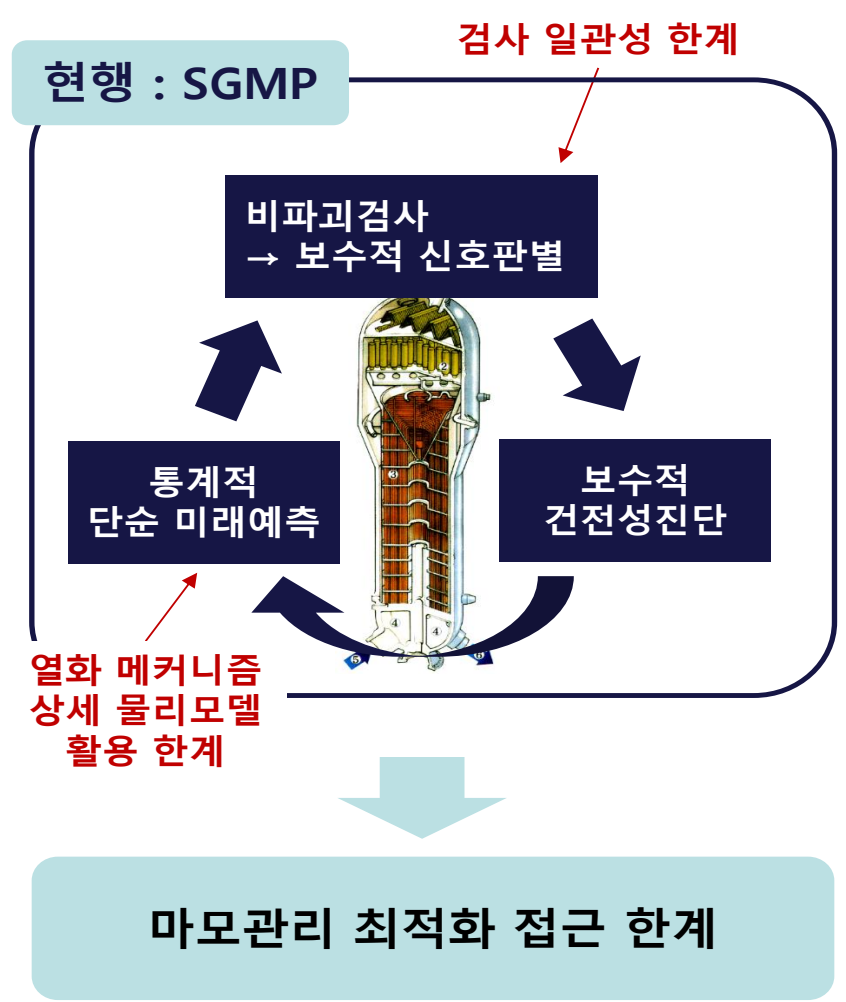
원자력발전소 디지털트윈



3. 기술개발 적용방안 예 - 증기발생기

- 증기발생기 전열관 마모 연구 예시
- 마모 예측 선형적 접근 예
- 마모 관련 상세 물리모델 연구사례
- 마모계수 측정 연구사례
- 전열관 마모 물리모델과 현장데이터의 융합

증기발생기 전열관 마모 연구 예시



➡ 기기고유 최적진단 = 물리모델 + 실험데이터 + 현장데이터

$$V_w = K_w \times FN \times L_S \quad \leftarrow$$

접촉 하중

$$K_w = 40 \times 10^{-15}$$

$$FN_d = \frac{1}{2} \times (\overline{K}^i \times y_0)$$

$$FN_D = \frac{1}{2} \times C_D \times \left(\rho_i \times \frac{V^2(x)}{2g_c} \right) \times D \times L$$

$$y_x = \sum_i \left\{ \sqrt{(y_n)_x^2 + (y_n)_y^2} \right\}$$

$$l_S = \sum_i 4 \times (f_i \times y_x)$$

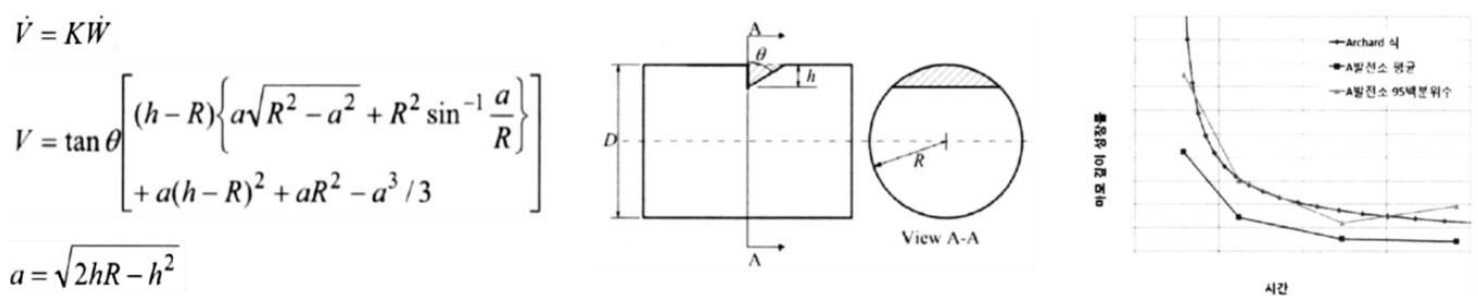
$$L_S = l_S \times time$$

Normalized Displacement (y_n) at Diagonal Strip

Normalized Displacement (y_n) at Vertical St

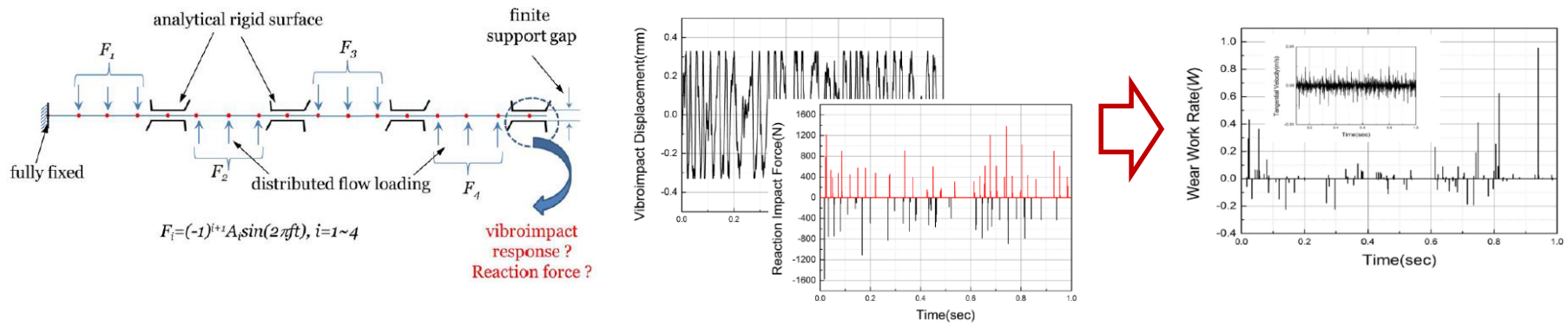
Mid-Span
Normalized
Displacement (y_o)
at Tube Vertical
Section

■ 접촉 단면적 및 두께감소 속도 [이국희, 다양한 형상의 마모 깊이와 부피 상관관계, KSME 춘계학술대회, 2015]



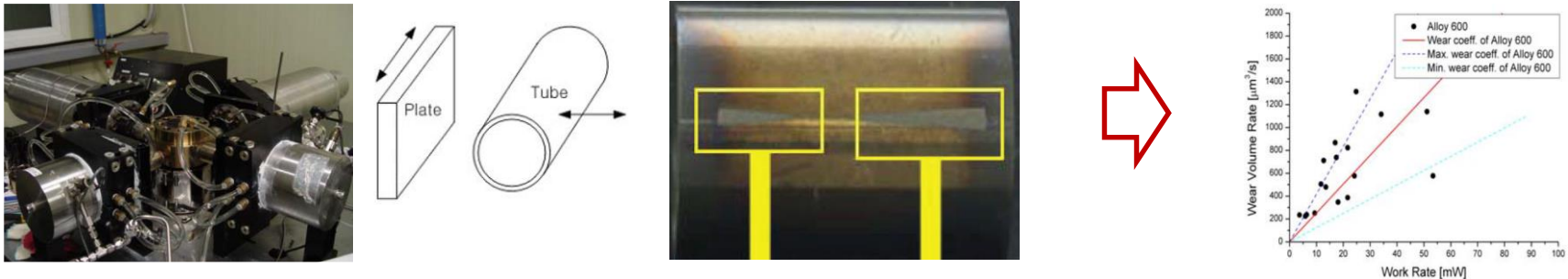
→ 마모진행의 비선형성

■ 비선형 진동해석 [이강희, 지지점 간극을 갖는 다점지지 유연관의 유동하중에 의한 시간응답이력해석과 상용유한요소 해석코드의 적용, KPVP논문집, 2015]

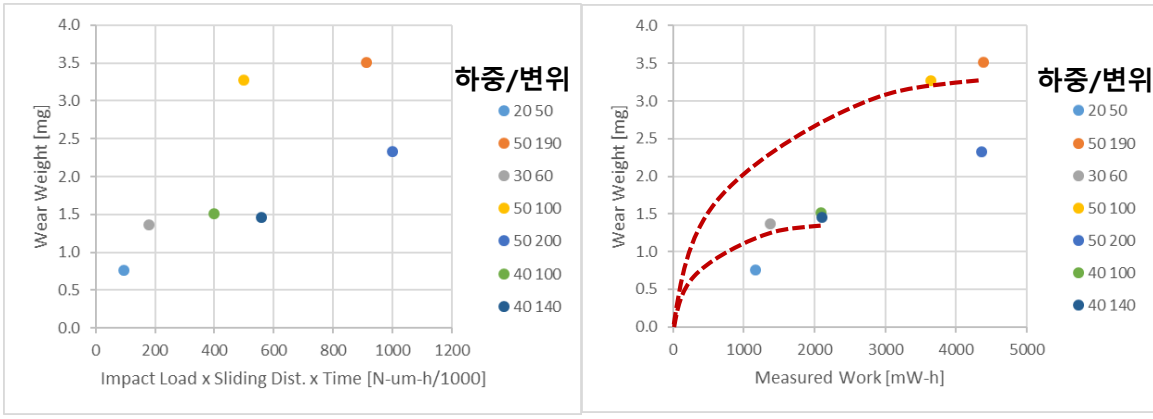


→ 접촉하중과 접촉변위 관계의 비선형성

■ 전열관 충격마모 모사시험 [박치용, EPRI 1016563, SGMP: PWR Steam Generator Tube Wear, 2008]



■ 시험 데이터 검토



하중x변위(amp.) 선형곱 ???
시간이력 기반 비선형 고려 ??

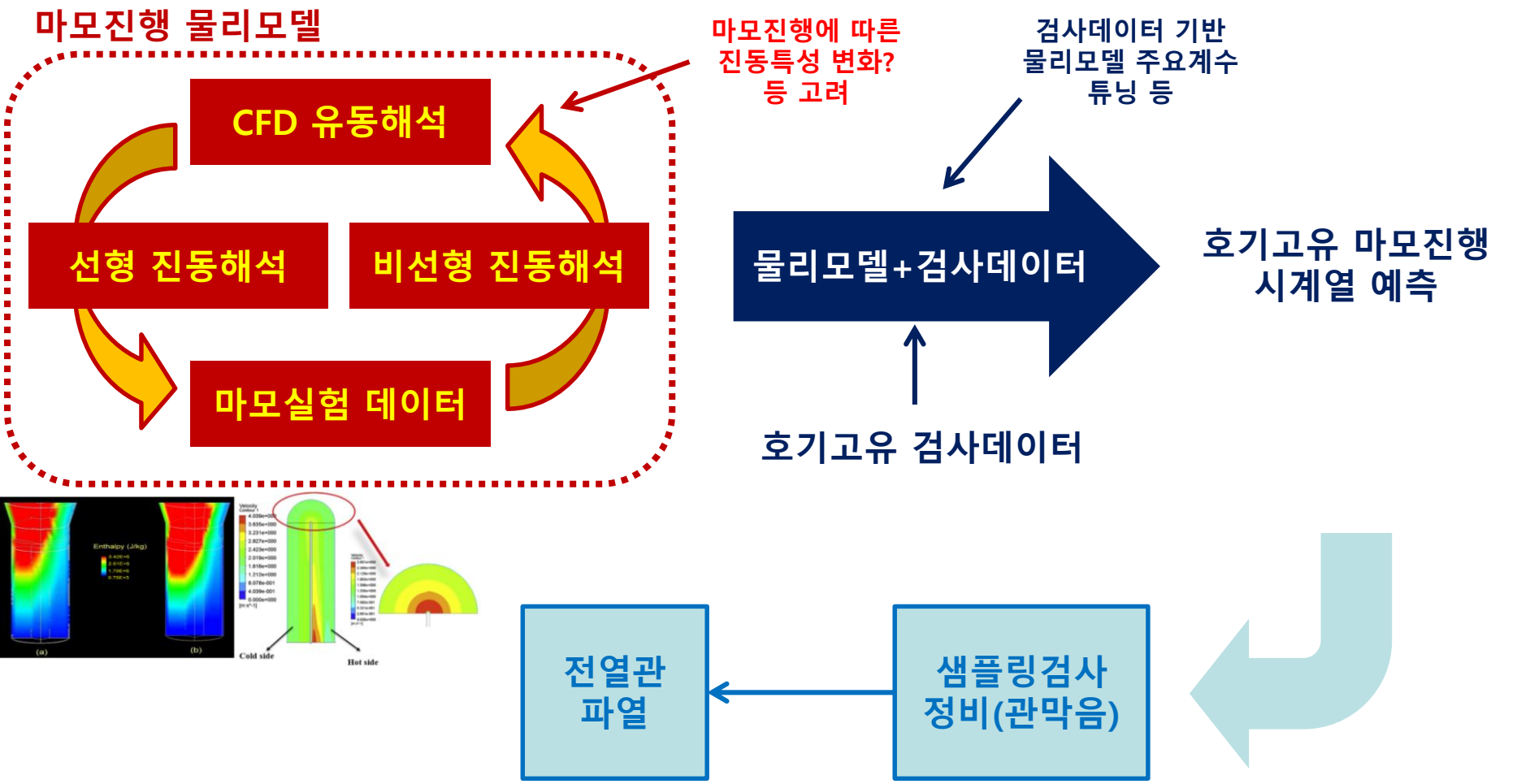
접촉 단면적 고려
데이터 재해석 필요 ???

하중/변위(amp.) 인가값 기준

하중/변위 시간적분 기준

3. 기술개발 적용방안 예

전열관 마모 물리모델과 현장데이터의 융합



4. 요약 정리

4. 요약 정리

- 피동 압력경계 기기의 경년열화 예측/관리 측면에서, 데이터 기반 접근법의 적용성 한계
- 물리모델과 경험데이터의 결합을 통한 데이터 기반 접근법 활용 가능성 제안
- 증기발생기 전열관 마모 예측/관리 측면에서, 실험데이터의 효과적 활용 및 상세 물리모델의 활용 방안 예시 소개



재료 경년열화 특성 연구와 기기 경년열화 모델링 연구의 결합을 통한 물리모델/경험데이터 통합 연구 필요

감사합니다.