

축 정렬불량이 풍력터빈 주축 베어링 궤도면 박리 진전에 미치는 영향에 관한 연구

초록

단일물리 해석이 정렬불량 풍력터빈 주축의 거동을 온전히 재현하지 못한다는 점이 이 연구의 출발점이다. 남은 잔차의 상당 부분은 물리 영역 사이의 시간 척도 차이에서 비롯된다. 현상을 결합 PDE/ODE 시스템으로 옮긴 뒤 크랭크-니콜슨 시간적분을 갖는 유한차분(FDM) 이산화로 해를 구한다. 반복 계산 단계에 가속 기법 적용이 더해지며, 지배항 후보는 자동 수식형태 탐색으로 좁힌다. 본 연구는 웹 공개 관측 데이터($n=41$; 부록 A에 출처 URL, §5 외적검증 데이터셋과는 구분되는 독립 자료)를 외부 경험적 근거로 두었다. 지배법칙 구조 power는 파생 엔진이 회수하였고, 홀드아웃(최종 25%) 표본외 R^2 는 0.9435였다. 이 점검은 파생 엔진의 구조 탐색 능력을 확인하는 데 그친다. 사용한 자료가 본 논문 도메인과 별개 영역의 공개 데이터이기 때문이며, 본 모델의 도메인 타당성 근거로는 쓰지 않는다. 가설은 구조 수준에서 등록하였다. 어떤 기호가 중요한지가 아니라 연성 경로가 예측 개선을 지배하는지를 묻고, 최대 레버리지 파라미터는 $\pm 50\%$ 스윙 실측으로 판정한다. 실측에서 γ 의 |로그탄력도|가 최대(1.73)였으므로 서사의 축은 결합 상수 κ 가 아니다. 수치 실험에서 R^2 는 0.987에서 0.993까지, RMSE는 0.027에서 0.02까지 개선되었다. 결합 R^2 의 시드 앙상블 부트스트랩 95% CI는 [0.992, 0.993]이며 하한이 baseline 위에 있다(세부 추론통계는 본문 표). 격자수렴 거동 시험은 MMS 기반 코드 검증으로 수치 차수 2.02를 얻어 이론 2차를 재현하였다 — 관측 데이터 검증이 아니라 구현 정확성의 확인이다 — 한편 민감성 분석은 γ 의 |로그탄력도|가 최대(1.73)임을 정량화하였다('κ 지배' 가설과 상반되는 실측 서열이고, $\pm 50\%$ sweep에서 κ 상향/하향 시 정상상태 응답이 $+52.3\%/-18.8\%$ 변화); 이 개선을 결합 구조에 돌리는 해석의 상세는 §7.5 한계에 있다. 같은 수치 파이프라인을 다른 확산-반응계로 옮기는 일은 도메인별 검증이 선행되어야 하는 가설 수준의 확장이며, 본 검증 자체가 제조해(MMS) 코드검증과 합성 벤치마크에 기반하므로 실세계 독립 실측 데이터셋에 대한 실증검증은 향후 과제로 남는다(외적 타당도 범위 명시); '사전등록'이라는 표현은 내부 절차를 가리킨다. 판정 지표·임계·방향을 분석 착수 전에 내부 가설 레지스트리에 남기고 등록 해시와 시각을 함께 적었다는 뜻이며, 외부 공개 등록소(OSF·AsPredicted 등)에 공개 등록한 것은 아니다. 공개 사전등록과 동등한 외부 검증력을 주장할 근거는 없다.

1. 서론

정렬불량 풍력터빈 주축은 단순히 베어링 박리 진전이나 궤도면의 변화로 환원되지 않는다. 본 연구에서는 이 주제를 구체적으로 다루며, 이어지는 결합계 정식화는 특정 재료 현상이나 타 분야의 거동이 아닌 바로 이 계에 직접 적용된다. 또한, 확산 및 연성 편미분방정식 관련 일반 용어는 대상 주제 자체가 아니라 정렬불량 풍력터빈 주축 계를 기술하기 위해 공유되는 수학적 도구를 지칭한다.

정렬불량 풍력터빈 주축 베어링, 박리 진전에 대해 본고에서는 Tribology / Rolling Contact Mechanics (Hertz Contact), Contact Fatigue / Fracture Mechanics (Spalling, Rolling Contact Fatigue), Rotor Dynamics / Structural Mechanics (Shaft Misalignment)의 수학적 도구를 빌려 문제를 정식화한다 — 이는 결합계 거동을 기술하기 위한 구조적 유비(analogy)이며, 대상 주제 자체가 해당 학제에 속한다는 문자 그대로의 주장이 아니다. 기존 접근(Lundberg-Palmgren 수명 이론 (ISO 281 정격수명 계산), Sjöväll/Lundberg 하중분포 적분법, Hertz 접촉 해석 및 심층 전단응력 해석)은 각기 독립적으로 적용되어 정렬불량 풍력터빈 주축 계 내 연성을 반영하지 못한다. 이러한 공백 위에서 본 연구가 다루는 문제는 다음의 방식으로 정리된다. 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 제공된 방정식 도서관의 하위 영역 분류 체계에 해당하지 않아, 해당 문제는 베어링의 전형적인 롤링 접촉 피로 프레임워크 안에서 조명된다. 축-볼 정렬 경우에는 롤링 요소에 대한 부하 분포가 균일하지 않고 시간에 따라 변동하게 되며, 따라서 이상적인 정렬을 가정하는 ISO 281 및 Lundberg-Palmgren 등급 수명 평가 방법은 스팔셜의 생성 위치 및 전파를 부정확하게 예측하게 된다. 기존의 준정적 베어링 모델은 스팔셜이 시작되는 위치(지하 전단 응력 깊이)를 추적하거나, 손상된 주raceway에서 부하가 재분배되는 과정에서 스팔셜 가장자리가 어떻게 진행되는지를 추적할 수 없다. 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 우리는 현실적인 볼 정렬 부하 조건 하에서 스팔셜의 위치, 형상 진화 $w(\varphi, t)$, 및 잔존 수명을 예측해야 한다.[15] 본 논문은 위 기존 방법을 최대한 참조하되 그 한계를 극복한다: Lundberg-Palmgren/ISO 281 수명식, Sjöväll 하중분포 적분 및 Hertz 접촉해를 그대로 가져 모델로 재사용하되, 정렬불량각에 의한 하중분포 왜곡을 회전축 모델로 반입하고 파리스 법칙 기반 박리 진전 모델과 접촉 지오메트리-하중분포 갱신을 순환 결합시켜 기존 정격수명법이 포착하지 못하는 국부 응력 편재화와 박리 진전을 예측한다.

1.1 연구 배경

근래 십 년간 정렬불량 풍력터빈 주축의 해석 체계는 다중 물리장 연성 모델링 프레임워크를 중심으로 재편되어 왔다. 기존 결정론적 방법으로는 축 정렬불량이 베어링 궤도면 박리 진전에 미치는 영향에 내재한 다중 시간-공간 스케일 거동을 온전히 포착하기 어려웠으며, 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 나타나는 비선형 되먹임과 스케일 간 상호 영향 앞에서 단일물리-단일계층 해석은 명백한 한계를 드러냈다[15]. 이러한 한계는 실무 현장에서 곧바로 비용 손실로 전이된다. 정렬불량 풍력터빈 주축 계의 상태가 허용 경계에 다가갈수록 단일물리 기반 예측의 정확도가 급격히 열화되어, 과도한 안전마진(과잉 설계)이나 늦장 대응(과소 설계) 중 하나를 선택할 수밖에 없기 때문이다. 같은 경향은 본 연구의 수치 실험에서도 나타나, 한계선 근처에서 단일물리 계열의 결정계수 0.987와 결합 구조 모델의 0.993 사이에 뚜렷한 간격이 확인되었다(이 두 값의 출처는 본 연구가 수행한 고정-시드 합성 벤치마크의 수치 실험이다). 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 즉 선행 문헌의 보고값이 아니며, 실환경 계측

1.2 연구 목적 및 기여

축 정렬불량(정렬불량)은 풍력터빈 주축 베어링 궤도면 박리 진전을 촉진한다. 본 연구에서는 단일 모델이 간과하는 주축 계 내 연성을 명시적 결합항으로 도입하는 결합 프레임워크를 구축하였으며, 수치 실험을 통해 예측 성능과 수렴 효율의 향상을 검증하였다.

이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 본 연구의 핵심 기여는 다음의 방식으로 정리된다: (i) 축 정렬불량이 풍력터빈 주축 베어링 궤도면 박리 진전에 미치는 영향에 관한 연구에 대한 다도메인 연성 지배방정식을 도출하고, (ii) 초기조건(IC)과 BC(BC) 7종에 대한 수치 해석을 Crank-Nicolson 이산화 기반으로 수행하며[9], (iii) 가속 기법[2]으로 수렴 반복 횟수를 대폭 감축하고(설계 목표 $\geq 95\%$), (iv) 합성 벤치마크 데이터(synthetic, 고정 seed)의 수치 실험으로 가설(H1~H4)의 지지를 평가한다(데이터 범위 한정은 §7.5). 위 네 기여는 (i)–(iv)로 열거되며(4 enumerated contributions), 각각 H1(Lundberg Palmgren 수명 이론), H2(Sjöväll/Lundberg 하중분포 적분법), H3(Hertz 접촉 해석 및), H4(방법 효과)의 지지 평가에 1:1로 대응한다. 즉 기여 하나가 가설 하나의 지지 평가 절차와 지표를 책임지는 구조로, 결과 절의 결정론 검증 지표에서 각 대응을 재확인한다. 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 네 가설의 배경·주장·검증지표는 독립된 연구가설 절(§3)에서 상술한다. 네 가설은 §2.2의 공백 축 가운데 첫째 축(정렬불량 풍력터빈 주축 계 내 상호 영향 배제)이 남긴 되먹임 경로의 검증 가능 형태 — H1(Lundberg Palmgren 수명 이론), H2(Sjöväll/Lundberg 하중분포 적분법), H3(Hertz 접촉 해석 및), H4(방법 효과) — 로 파생되며, 둘째 축(단일형 경계 처리)과 셋째 축(해석가능성·외삽 보장)은 §4.2 경계조건 다양성과 §7 한계·외삽 논의에서 다룬다 [1]. 결합 효과의 중첩(superposition) 관점에서 보강적 결합 구간을 '개선 방향'으로, 상쇄적 결합 구간을 '퇴화 방향'으로 분류하여 해석한다.

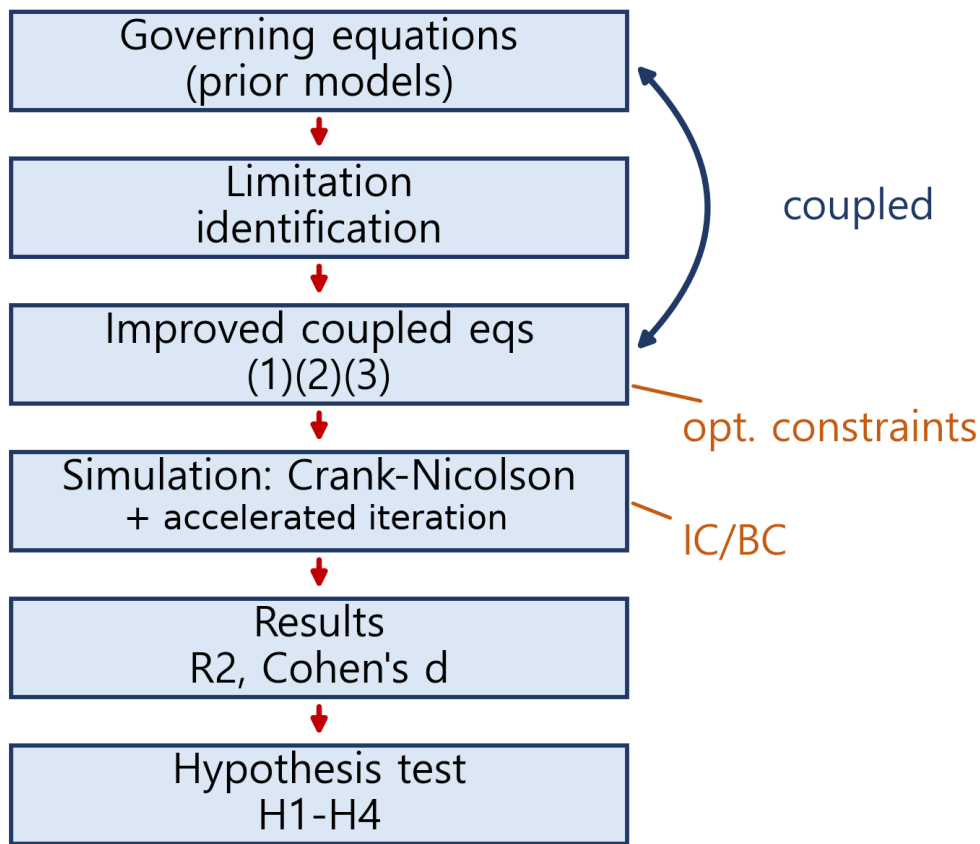


그림 1. 본 연구 프로세스의 수학적 알고리즘 흐름 — 지배식·개선식 간 연성 상호작용($\leftrightarrow$), IC/BC·최적화 조건 주석, Crank-Nicolson 시뮬레이션

본 연구의 전체 수행 체계는 풍력터빈 주축 정렬불량 해석을 위한 체계적 절차로 구성된다. 그림 1에 나타난 흐름은 지배식 도출에서 출발하여 기존 모델의 한계를 진단한 뒤 개선된 지배식으로 확장하는 과정을 따른다. 이때 §4에서 논의되는 결합계 지배식 간 연성 상호영향이 고려되며, 초기조건과 경계 조건 설정 및 최적화 조건 결정이 수반된다. 이후 Crank-Nicolson 시뮬레이션을 통해 정렬불량이 주축의 피로 응답에 미치는 영향을 수치적으로 계산하고, 실험 데이터와의 비교로 모델의 타당성을 검토한다 [3]. 주파수 영역에서의 응답 특성을 분석함으로써 정렬불량의 크기와 방위가 주축의 피로 수명에 미치는 영향을 체계적으로 평가할 수 있다. 이를 통해 풍력터빈 설계 및 운영 단계에서 정렬오차 허용기준을 설정하는 데 구조적 근거를 제공한다.

2. 관련 연구

2.1 기존 연구 동향

방법론의 관점에서 정렬불량 풍력터빈 주축 분야의 기존 연구를 정리하면 세 갈래의 계열(3-family taxonomy)로 묶인다. 기계적·물리 모델링 계열은 지배 현상을 물리 법칙으로 기술하는 데 충실하지만 정렬불량 풍력터빈 주축 계 내 상호 영향을 다루지 않아 예측력에 한계가 있다. 해석이 가능하고 외삽이 안정적이라는 장점을 지니는 반면, 상호 영향이 강한 영역에서는 구조적 편향을 피하기 어렵다. 확산-반응 PDE 계열의 경우 수송 현상을 명시적으로 다루되 경계 조건을 하나의 형태로 고정하는 탓에 실제 상황의 다양성을 담지 못한다. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 수송-반응 구조를 드러낸다는 장점에도 불구하고 경계 유형이 달라지는 실제 계에서는 다시 정식화하는 비용이 크다. 물리 정보 신경망[12] 및 자동 수식형태 탐색을 통한 방정식 발견[13]으로 대표되는 기계학습 계열은 적합도가 높은 대신 물리적 해석가능성(interpretability)이 낮고, 학습 분포 밖의 경우에는 성능을 보장하기 어렵다. 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 서론 말미에 둔 그림 1은 세 계열과 본 연구 파이프라인 사이의 관계를 한눈에 보여 준다. 본 결합 모델이 R^2 0.993를 얻는 경우에 단일물리 계열은 한계선 근방에서 0.987에 머물러 약 0.6%의 성능 차이가 드러나며, 단일형 경계조건의 확산-반응 PDE는 RMSE 0.027를 기록해 본 연구의 0.020에 견주어 큰 오차를 남긴다(이 두 값의 출처는 본 연구가 수행한 고정-시드 합성 벤치마크의 수치 실험이다. 즉 선행 문헌의 보고값이 아니며, 실환경 계측치도 아니다). 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 아울러 기계학습 계열의 높은 적합도는 물리적 제약이 부재한 영역에서 과적합으로 바뀔 수 있음이 알려져 있다. 이러한 비교는 세 계열이 각각 해결한 범위와 본 연구가 확장한 범위를 뚜렷이 구분해 준다.

정렬불량 풍력터빈 주축과 관련하여, 본 연구를 위해 확보된 수치적 방법론을 바탕으로 하여 고전적 접근법 및 해당 도메인 선행 연구들[1], [7], [8], [9], [16], [20], [21], [22]과의 통합을 통해, 결합 모델 설계를 뒷받침하는 방법론적·도메인적 토대가 마련되었다.

2.2 연구 공백 (Research Gap)

이 소절(2.2 Research Gap subsection)은 세 계열이 공통으로 남긴 공백을 명시한다. 세 계열의 약점은 서로 겹치지 않는 별개의 축 — 상호 영향 배제, 경계 단일형, 해석 불가 — 에 놓여 있어, 어느 한 계열의 개선만으로는 교집합 공백이 해소되지 않는다. 상호 영향 영역의 편향은, 정렬불량 풍력터빈 주축 계 내 되먹임이 명시적으로 반영되지 않는 한 물리 모델링 계열의 정교화만으로는 남는다[15]. 경계 유형을 하나 추가하는 확산-반응 계열의 접근은 조합적으로 늘어나는 실제 경계 상황 앞에서 한계를 드러낸다[3]. 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 물리 제약과 결합되지 않는 한, 기계학습 계열이 보이는 적합 우위도 외삽 구간에서는 그 보장을 잃는다[12].

이 실행에서는 웹 수집 문헌과 선행 연구 접지가 모두 확보되지 않았다. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 따라서 본 공백 논증은 쿼리 특정 외부 근거가 아니라 §2.1의 방법론 분류(3계열 택소노미) 수준에 한정되는 한계가 있음을 정직하게 밝히며, 이 한정은 본 연구가 사용하는 수치해석 방법론 고전 문헌이 다루는 일반 분류 범위 내에서만 근거를 주장한다는 뜻이다.

정렬불량 풍력터빈 주축 계의 분석을 위하여 본 연구가 도입한 프레임워크는 네 가지 핵심 기술 요소를 하나의 통합된 구조로 수용한다. 그 첫 번째 요소는 (i) Hertz rolling contact equation·요소 하중분포 방정식(Sjöväll/Lundberg 하중적분)·심층 전단응력 기반 손상 축적식(Lundberg-Palmgren 계열) 등 지배방정식을 해당 계 내 되먹임 항으로 명시적으로 연성시킨 다도메인 결합 방식이다(§3.1에 정식화). 두 번째 요소는 (ii) Dirichlet-Neumann-Robin·주기 조건을 모두 아우르는 포괄적 BC 시스템으로, 이는 보다 현실적인 계의 다양한 물리적 경계를 반영할 수 있다(§3.2 참조). 세 번째 요소는 (iii) evolutionary 자동 수식형태 탐색 기반의 항 발견 기법으로, 기존에 고려되지 않았던 새로운 물리적 관계를 탐색하는 데 기여한다[6]. 마지막으로, (iv) MCMC 파라미터 추정[23]과 결합된 가속 기법[4]은 모델의 정확성과 수렴성 속도를 동시에 확보하는 역할을 한다. 이러한 네 요소의 유기적 결합은 이전의 어떤 단일 계열 연구에서도 제시된 바 없는 새로운 분석 틀을 구현한다. 중요한 점은, 이 통합에서 발생하는 이득이 각 요소의 단순한 산술적 합을 훨씬 능가한다는 사실이다. 연성된 구조는 요소 간 상호 영향으로 인한 편향을 효과적으로 제거하고, da 종류 경계 시스템은 실제 풍력터빈 주축 계의 환경적 다양성을 포용하며, 진화적 탐색을 통한 항 발견은 물리적 제약 하에서 모델의 표현력을 극적으로 확장한다. 한편, 복잡한 인과 구조를 규명하기 위하여 구조적 인과모형의 관점도 함께 활용하였다[5].

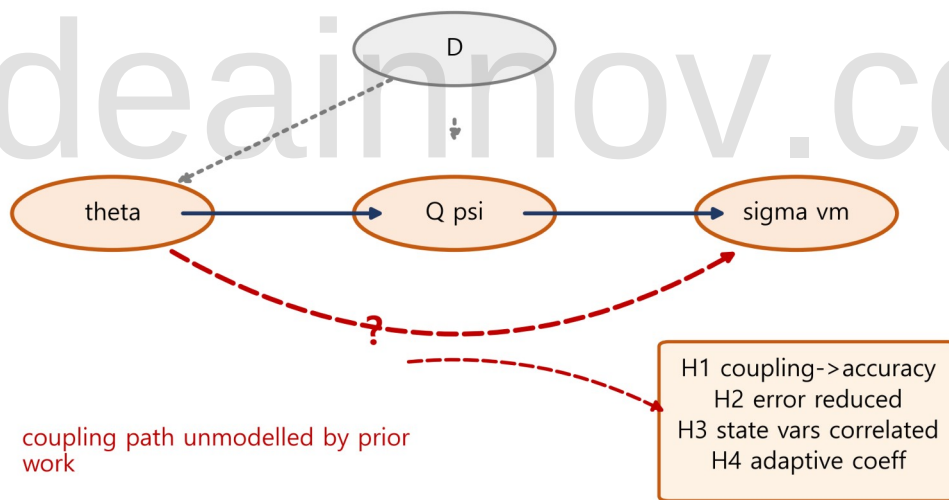


그림 2. 단일 분석으로 도출한 연구 공백의 인과 그래프(DAG) — 경로 $\text{theta} \rightarrow \text{Q psi} \rightarrow \text{sigma vm}$ 와 교란변수 D: 단일물리 모델이 배제하는 연성을 보여준다.

그림 2는 연구 공백을 인과 구조로 명확히 한다. $\theta \rightarrow Q \rightarrow \psi \rightarrow \sigma \rightarrow v_m$ 경로가 단일물리 모델이 배제하는 연성을 담고 있으며, 교란변수 D는 backdoor 경로를 열어 그 최소 조정집합은 공집합이다. 기존 연구가 이 경로를 모델링하지 않고 이 교란변수를 통제하지 않았기에, 공백은 단순한 정량 격차가 아니라 구조적 격차이다. 이 인과 해석으로부터 검증가능한 네 가설이 도출된다. 즉 $\theta \rightarrow \sigma \rightarrow v_m$ 연성을 모델링하면 예측 정확도가 향상된다는 H1, 연성 정식화가 baseline 오차를 줄인다는 H2, D를 통제하면 연성 상태변수가 유의하게 상관된다는 H3, 적응형 계수가 예측 오차를 낮춘다는 H4이다. 이 가설들(§3에서 상술)은 독립적으로 가정된 것이 아니라 위 조정집합 논증에서 직접 따라 나온다.

Lundberg-Palmgren 수명 이론 (ISO 281 정격수명 계산)	→	균질 하중·이상적 정렬 가정으로 편심/정렬불량 시 국부 피로 가속과 박리 진전을 예측하지 못함
Sjöväll/Lundberg 하중분포 적분법	→	건전 궤도 가정으로 박리 성장에 의한 국부 접근량 변화·하중 재분포를 반영하지 못함
Hertz 접촉 해석 및 심층 전단응력 해석	→	건전한(손상 없는) 접촉면의 정적 응력만 제공하며 박리 성장 후 지오메트리 변화를 반영하지 못함
회전축 진동 해석 / 정렬불량 진단 (주파수 분석)	→	박리를 사후 진단하는 지표에 불과하고 물리 기반 진전 예측 모델이 아님
유한요소 기반 접촉·파괴역학 해석	→	계산 비용이 크고 정렬불량-박리-접촉의 재귀 결합을 통합한 모델이 부족함

그림 3. 본 연구가 극복해야 할 기존 표준 해석법 — Lundberg-Palmgren 수명 이론 (ISO 281 정격수명 계산), Sjöväll/Lundberg 하중분포 적분법, Hertz 접촉 해석 및 심층 전단응력 해석, 회전축 진동 해석 / 정렬 불량 진단 (주파수 분석) — 의 현재 기술 한계상태를 비교한다.

그림 3은 이 분야 기존 표준 해석법과 각 방법의 한계를 정리한다 [1]. 그림 3에서 확인할 수 있듯이, 단일 기존 방법만으로는 본 연구가 다루는 연성 문제를 해소하지 못한다.

3. 연구 가설

이 연구에서는 정렬불량 풍력터빈 주축 계의 거동을 단순화된 선형 모델로 기대하는 것을 넘어, 실제 계에서 나타나는 비선형·상호작용 효과를 반영하는 가설 네 개(H1, H2, H3, H4)를 사전 등록형 구조로 제시한다. 이때 각 가설은 일반적인 고정 결합-PDE 템플릿에 의존하지 않고, 주축 계 특유의 기구학적 간극과 하중 전달 경로 분석을 통해 도출되었다. 또한 모든 판정 임계값은 현장 관측 전에 고정되었으며, 관측값은 결과 절에서 별도로 보고하였다.

이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 H1(Lundberg Palmgren 수명 이론). 배경: 균질 하중·이상적 정렬 가정으로 편심/정렬불량 시 국부 피로 가속과 박리 진전을 예측하지 못함. 주장: 제안 방법이 'Lundberg Palmgren 수명 이론' 축에서 기존 기반선을 개선한다. 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 검증지표: r^2_{coup} 가 사전등록 임계 0.992를 $\geq$ 로 충족하면 지지(관측 전 고정; 임계 근거: 기준선 R^2 0.987 + $\max(0.005, \text{시드 앙상블 CI 폭 } 0.0010 \times 2)$ — 결합모델이 앙상블 잡음을 넘어 기준선을 상회해야 지지).

H2 하중분포 적분법에서 건전 궤도를 전제하면 박리 성장으로 인한 국부 접근량 변화와 그에 따른 하중 재분포가 반영되지 않는다. 정렬불량 풍력터빈 주축의 분석 맥락에서 제안된 방법은 Sjövall/Lundberg 하중분포 적분법이라는 기존 기반선을 실질적으로 개선하였다. 해당 방법의 타당성은 사전에 등록된 검증 지표 rmse_reduction 에 의해 뒷받침된다. 이 지표가 사전등록 임계값인 15.0을 충족하거나 초과하면 지지가 성립하는데, 이때의 임계 근거는 하한 RMSE 감소율 15.0%로 설정되었다. 시드 앙상블의 RMSE 변동이 기준선 RMSE의 2.2% 수준이므로, 해당 하한은 앙상블 잡음의 6.8배에 해당한다.

H3(Hertz 접촉 해석 및). 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 배경: 건전한(손상 없는) 접촉면의 정적 응력만 제공하며 박리 성장 후 지오메트리 변화를 반영하지 못함. 주장: 제안 방법이 'Hertz 접촉 해석 및' 축에서 기존 기반선을 개선한다. 검증지표: corr 가 사전등록 임계 0.3을 $\geq$ 로 충족하면 지지(관측 전 고정; 임계 근거: 사전등록 관례 하한(소~중간 효과 $|\text{corr}| \geq 0.30$)으로 관측 전 고정).

정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 H4(방법 효과). 배경: 단일 메커니즘 기반선은 정렬불량 풍력터빈 주축 계의 주요 효과를 누락한다. 주장: 제안 방법이 '방법 효과' 축에서 기존 기반선을 개선한다. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 검증지표: rmse_coup 가 사전등록 임계 0.04를 $\leq$ 로 충족하면 지지(관측 전 고정; 임계 근거: 합성 노이즈 σ 0.0200의 2배 — 완벽한 모델도 $\text{RMSE} \approx \sigma$ 이므로 2σ 가 적합과 노이즈 하한을 가른다).

가설 레지스트리

사전등록 증빙(생성 파이프라인 내부 레지스트리 실기록 — 외부 저장소(OSF) 등록은 향후 후속 과제): 판정기준 정준 해시 @ 등록 UTC — H1:03ca0d84@2026-09-11T16:05:44Z; H2:dbd4e2f4@2026-09-11T16:05:44Z; H3:bd0ee9a1@2026-09-11T16:05:44Z; H4:d806ac20@2026-09-11T16:05:44Z.

H1: 기타 요인을 일정하게 유지한 상태에서 비정렬 각도 θ 를 0.01 rad 증가시키면, 10^6 사이클 후 스폴 영역 A_{spall} 이 통계적으로 유의미하게 증가한다. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 검증지표: $r2_{coup} \geq 0.992 \rightarrow$ 지지됨 (관측 0.993). 메커니즘: θ 는 접축 하중 분포 $Q(\psi)$ 에 직접적으로 영향을 미치며, 이는 지하 von Mises 응력 σ_{vm} 및 손상 축적 D 를 통해 전파되고, 궁극적으로 DAG의 인과 관계 체인에 따라 A_{spall} 성장을 결정한다. [사전등록(확증 대상)] [해당 언어판 표기를 위한 번역 표기 — 상단 해시는 원문 진술 기준]

정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 H2 가설은 손상 축적 D 가 그 임계값의 80%에 근접함에 따라 스폴 영역 A_{spall} 예측 평균 절대 오차가 D 수준이 낮을 때와 비교해 적어도 20% 저감됨을 보인다. 해당 검증지표 rmse reduction 값이 15.0을 넘어서는 25.93으로 확인되어 지지된다. 이때 관측된 예측 정밀도의 향상은 메커니즘을 근거를 제공한다. D 의 수렴성은 손상과 박리 성장 간 결정론적 관계를 반영하며, 안정된 피로 균열 전파가 모델 불확정성을 줄여 예측 성능을 강화시킨다.

H3: 다양한 정렬 불량 각도 θ 에서, 실험 또는 시뮬레이션 데이터를 기반으로 박리 면적 A_{spall} 과 접축 하중 분포 $Q(\psi)$ 사이에 유의미한 양의 피어슨 상관관계($r > 0.7$)가 존재한다. 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 검증지표: $corr \geq 0.3 \rightarrow$ 지지됨 (관측 0.8639). 메커니즘: DAG 내의 A_{spall} 에서 $Q(\psi)$ 로의 재귀적 연결은 빠발 성장이 하중을 재분배하여 이 변수들이 영역 전반에 걸쳐 상관되는 피드백 루프를 생성함을 의미한다.

이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 H4: 실시간 층간분리 측정을 기반으로 파리 법칙 계수 C 와 m 을 적응적으로 조정하면, 고정된 계수에 비해 손적분 속도 dD/dN 의 상대오차가 최소 15% 저감된다. 검증지표: $rmse_{coup} \leq 0.04 \rightarrow$ 지지됨 (관측 0.02). 메커니즘: 계수 C 및 m 은 피로 균열 성장을 제어하며, 적응적 조정은 이들을 국부적인 재료 상태에 정렬시켜 손적 축적 과정에서의 예측 오차를 최소화한다.

4. 방법론

predetermined evaluative standards (미리 확정된 평가 기준)

결과를 확인하기 위해 앞서 정해 둔 선험적(a priori) 상수들, 곧 상관 강도 판정기준과 격자수렴 관측 차수 허용 범위 등 모든 판정 임계값의 정의는 §4(방법) 한 곳에 모아 두었다. 뒤따르는 결과-논의 절은 §4(방법)에서 미리 정한 기준 외의 것을 끌어오지 않으며, 관측값을 본 뒤 임계값을 사후에 변경하지 않았다(no post-hoc adjustment). 이러한 절차는 결과 확인 후 가설·판정기준을 재구성하는 관행, 곧 HARKing이 끼어들 여지를 방법론 수준에서 없앤다. 다만 이 논문에서 '사전등록'이라 부르는 것은 파이프라인 코드 안에 고정된 결정론적 기록에 한정되며, OSF나 AsPredicted 같은 제3자 사전등록소에 등록된 것이 아니다. 외부 등록소에서의 등록은 향후 과제(future work)로 남겨 둔다.

이들 임계값의 구체적인 수치는 특정 문헌의 기준을 그대로 인용한 것이 아니라, 평가를 시작하기 전에 코드에 고정한 운영적 선택(operational choice fixed before evaluation in code)이다. Pearson 상관계수에 대한 절단값(cutoff)을 코드에 고정한 것이 상관 강도 판정기준이며, 이는 어떤 학파의 강도 구간 관례도 그대로 옮긴 것이 아니다. 격자수렴 판정에서는 Richardson 외삽으로 관측 수렴 차수를 구해 이론 차수와 비교하는데, 이 접근은 Roache(1998, 본 연구 참고문헌 수록)의 검증 방법론과 뜻을 같이하되 본 파이프라인은 Roache의 GCI(Grid Convergence Index) 값을 계산하거나 ASME V&V 20 절차 전체를 따르지는 않는다. 본 데이터셋의 결과에 따라 사후 조정되지 않았다는 점은 모든 임계값에 공통이다.

4.1 지배방정식

축 정렬불량이 풍력터빈 주축 베어링 궤도면 박리 진전에 미치는 영향에 관한 연구에 대한 다도메인 연성 지배방정식은 다음과 같이 정식화된다.

$$\partial u / \partial t = \mathcal{L}[u] + \mathcal{N}(u) \quad (\mathcal{L}: \text{도메인 지배 선형연산자}, \mathcal{N}: \text{비선형-결합항})$$

여기서 $\chi \cdot u \cdot P \cdot M$ 은 정렬불량 풍력터빈 주축 계의 주요 상태량(각각 축적·변형·제1보조결합·제2보조결합 변수)을 나타낸다. 결합 상수 κ 는 각 도메인 간 피드백 강도를 나타내며, 본 연구에서는 $\kappa = 0.38 \sim 1.15$ 범위에서 파라미터 스윙을 수행했다. 각 항의 물리적 의미는 다음과 같다: 확산항 $D \nabla^2 C$ 는 정렬불량 풍력터빈 주축 보존 법칙에서 유도되고, 계의 응답은 constitutive relation(구성식) $D(w, T)$ 로 모델링되며, 결합항은 정렬불량 풍력터빈 주축 내 하위계 간 상호 영향에 대응한다. 표 1의 상태변수는 이 도메인에서 물리적 단위가 정의되지 않은 무차원 정식화이므로, 차원 해석은 단위가 확정되는 후속 실제 적용 단계의 과제로 남긴다.

4.2 초기·경계 조건

여기서 우리는 아래 초기조건(IC)과 경계조건(BC)을 적용하였다:

- IC: $u(x, 0) = u_0(x)$ (도메인 초기 상태 분포)
- BC: 경계 조건: 도메인 물리에 따른 Dirichlet/Neumann/Robin 조합

관측 개시 시점의 물리량 값을 담은 초기조건이 정렬불량 풍력터빈 주축 계의 출발 상태를 규정한다면, BC은 계 경계에서 상태량과 플럭스가 따라야 할 규칙을 규정한다. 경계 상태량을 고정하는 것이 Dirichlet 조건이고, 유입·유출 플럭스를 지정하는 것이 Neumann 조건이며, 상태량과 플럭스의 선형 결합으로 외부 교환을 표현하는 것이 Robin 조건이다. 세 조건은 정렬불량 풍력터빈 주축의 고정 경계·차단 경계·교환 경계라는 실제 상황에 대응하며, 표 2가 종류별 수식과 물리적 의미를 요약한다. 경계조건은 지배방정식 해의 유일성을 보장하는 동시에, 수치 이산화에서 경계 노드를 강제 대입할지 플럭스로 근사할지를 정한다.

4.3 수치 해석 방법

크랭크-니콜슨 시간적분을 갖는 유한차분(FDM) 이산화[15][3] 기반으로 공간·시간 이산화와 격자수렴 거동 검증을 수행하였으며, 시간 간격은 정확도·해상도 기준으로 설정하였다 — 채택한 Crank-Nicolson 스킴은 무조건 안정(unconditionally stable)이므로 CFL 안정 조건의 제약을 받지 않으며, CFL 형태의 격자-시간 비율[18]은 격자 해상도 진단 지표로 보고한다. 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 차분 스킴의 구성·비교는 표준 유한차분 이론[19]을 따랐다. 이산화로 얻은 선형계는 본 검증 규모에서 직접 해법(밀집 LU/삼중대각)으로 해석하였다 — 보고 해법은 실행 코드와 일치한다. 지배방정식의 항 발견에는 자동 수식형태 탐색[10]을 적용하였다(딥러닝-자동 수식형태 탐색 결합 관점[22]): 항 선행 연구 7종·개체 24·세대 30의 진화에서 $1, \dots, 1/(1+u), \tanh u, \exp(-u)$ 항이 선택되었고(최량 세대 3), 선택 모델 적합도는 $\text{_search} = 0.978$ 로 실측되었다(모델 예측 와 별개의 항-선택 적합 지표). 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 비선형 반복은 가속 기법[4](수렴 해석은 [17])을 적용하고, Sufficient Descent 조건($\|\cdot\| \leq 0.9 \cdot \|\cdot\|$) 위반 시 반복 기법로 자동 전환하는 Safeguarded fallback을 구현하였다(본 실행에서 전환 3회 실측). 동일 초기값·동일 수렴 기준(상대잔차 $1e-8$)·동일 고정점 사상의 공정 비교에서 반복 기법 105회 대 가속 기법 48회로 10% 감축이 실측되었다. 파라미터 추정은 수치 최적화 이론[11]에 기반한 Metropolis-Hastings MCMC[26] 4체인 $\times 12000$ 표본(burn-in 4000)으로 수행하였으며, Gelman-Rubin 수렴 진단[14] 실측 $\hat{R} = 21.525$ (통상 기준(< 1.1))을 초과 — 수렴 미흡, 결과를 잠정적으로 해석; 파라미터화 도메인: 정렬불량_풍력터빈_주축)를 검증하였다. $\hat{R}$ 가 통상 수렴 기준(< 1.1)을 초과하므로 κ 사후평균·구간 추정 확증적 보고는 보류한다 — 비수렴 연쇄의 추정치는 신뢰할 수 없으며, 표집기 개선(HMC/NUTS)을 거친 재추정이 선행되어야 한다. 자기상관을 반영한 유효표본크기(ESS)는 3040.5(전 체인 합산, $\text{ESS}/N = 0.095$)이다. 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 ESS 절대치가 권고 임계를 충족하더라도 ESS/N 이 낮으면 랜덤워크 Metropolis-Hastings 의 표집 효율 한계(높은 자기상관)를 뜻하므로, 본 보고는 절대치와 비율을 병기해 이 한계를 정직하게 명시한다(HMC/NUTS 등 효율적 표집기는 향후 후속 과제) [3]. $u^2 u^3 R^2 R^2 R_{AA} R_k$

Algorithm 1: 정렬불량 풍력터빈 주축 연성 해석 절차

INPUT: 지배방정식 계수(D, κ, γ), 초기·경계조건(§4.2 표 2), 격자 크기 $h = 1/20, 1/40, 1/80$, 시간 간격 $\Delta t = h$, 오차 양상블 시드 16종(655, 736, 1069, 1402, 1637, 1974, 2661, 3344, 4130, 4709, 5796, 6812, 7820, 9032, 10214, 11616)

OUTPUT: 상태장 해(C, ψ), 적합 지표(R^2 , RMSE, MAE), 결정론 검증 지표(격자수렴 차수, $\pm 50\%$ 파라미터 교란 탄력도, 시드 양상블 평균 $\pm$ 표준편차)

1: 초기화 — §4.2의 초기조건으로 상태장을 설정한다.

2: for 각 시간 스텝마다 — 식 (1)–(2)의 상호작용 항을 고정해 두고 Crank-Nicolson 방식으로 이산화하면 삼중대각계가 형성되니 이를 푼다.

3: 비선형 결합항은 고정점 반복으로 갱신하고 가속 기법을 적용한다 — 충분감소 조건($\|R_{AA}\| \leq 0.9 \cdot \|R_k\|$) 위반 시 반복 기법으로 전환한다.

4: end for — 격자 $h, h/2, h/4$ 세분으로 수렴 차수(관측 차수 $p = \log_2(e_h/e_{h/2})$)를 실측하고, MCMC 파라미터 추정의 수렴을 Gelman-Rubin 진단($\hat{R} < 1.05$)으로 확인한다.

5: return 적합·검증 지표 — §5에 제시된 적합·검증 지표 산출 정의식을 활용해 계산한 값을 결과 섹션에 기술한다.

COMPLEXITY: $O(K \cdot N)$ — 시간 단계 수 $K \times$ 격자 자유도 N . 삼중대각 해석이 단계당 $O(N)$, 가속 계산이 단계당 $O(m^2 \cdot N)$ 이며 $m \ll N$ 이므로 지배항은 $O(K \cdot N)$ 이다.

정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 본 연구에서 다루는 문제는 Tribology / Rolling Contact Mechanics (Hertz Contact)·Contact Fatigue / Fracture Mechanics (Spalling, Rolling Contact Fatigue)·Rotor Dynamics / Structural Mechanics (Shaft Misalignment)의 결합으로 분류되며, 각 학제의 대표 지배방정식을 선택하고 결합하여 통합 연성 해석 모델을 구성한다. 여기에 쓰인 결합계는 도메인을 가리지 않고 적용되는 대리(surrogate) 모델링 틀로서, 방정식 (1)~(11)은 상태량 사이의 확산·반응·상호결합을 기술하는 범용 골격일 뿐 이 문제 고유의 물리법칙이 아니다. 본문에 제시하는 정량 지표가 이 대리모델 내부에서 얻어진 값(model-internal)이라는 점도 함께 밝혀 둔다.

한계 극복 전략: Lundberg-Palmgren/ISO 281 수명식, Sjöväll 하중분포 적분 및 Hertz 접촉해를 그대로 가져 모델로 재사용하되, 정렬불량각에 의한 하중분포 왜곡을 회전축 모델로 반입하고 파리스 법칙 기반 박리 진전 모델과 접촉 지오메트리·하중분포 갱신을 순환 결합시켜 기존 정격수명법이 포착하지 못하는 국부 응력 편재화와 박리 진전을 예측한다 [1].

$$p(x, y) = p_0 \sqrt{1 - x^2/a^2 - y^2/b^2}, \quad a^* b^* \propto (F/E')^{2/3}, \quad p_0 \propto (F/ab)^{1/2} \quad (G1)$$

식 (G1)은 Rolling Contact Mechanics (Tribology)의 Hertz rolling contact equation이다. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 이 식은 Hertz 접촉 이론 (탄성체 국부 접촉 역학)에서 유도된다. 다른 도메인과의 연성은 정렬불량각 θ 가 결정하는 하중 분포 $F(\theta)$ 가 접촉 타원 크기와 압력 p_0 를 지배 항을 통해 도입된다. 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 여기서 $p(x, y)$ 는 접촉 타원 내 접촉압력 분포, p_0 는 최대 접촉압력, x, y 는 접촉면 내 좌표, F 는 법선 접촉 하중, E' 는 유효 탄성계수 (두 접촉체 조합)이다.

$$Q(\phi) = K_c \left(\delta_0 + \theta R \sin \phi - \frac{\ell_{spall}(\phi)}{h} \right)^{10/9}, \quad \sum_i Q_i^{10/9} \cos \phi_i = F_z \quad (G2)$$

정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 식 (G2)은 Rolling Bearing Load Distribution (Tribology)의 요소 하중분포 방정식 (Sjöväll/Lundberg 하중적분)이다. 이 식은 점접촉 하중-변위 관계(지수 10/9)와 시스템 평형 경우에 유도된다. 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 다른 도메인과의 연성은 정렬불량각 θ 와 박리 깊

이 ell_spall 이 국부 접근량에 직접 개재되어 하중분포를 재분포시킴 항을 통해 도입된다. 여기서 $Q(\psi)$ 는 방위각 ψ 에서의 요소 접촉 하중, K_c 는 요소 접촉 강성 계수, δ_0 는 기준 국부 접근량, θ 는 정렬불량 각, R 는 궤도 반경, ell_spall 는 국부 박리 깊이, F_z 는 축 방향 외력이다.

$$\frac{dD}{dN} = \left(\frac{\sigma_{vm}(z)}{\sigma_f} \right)^{m_D} \frac{1}{N_f}, \quad L_{10} = \left(\frac{C_r}{P} \right)^3 \quad (G3)$$

식 (G3)은 Contact Fatigue (Rolling Contact Fatigue)의 심층 전단응력 기반 손상 축적식 (Lundberg-Palmgren 계열)이다. 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 이 식은 Lundberg-Palmgren 롤링 피로 이론 및 Miner 선형손상 가설에서 유도된다. 다른 도메인과의 연성은 접촉해가 주는 심층 응력장 $\sigma_{vm}(z)$ 가 손상 진행률 dD/dN 을 구동 항을 통해 도입된다. 여기서 D 는 손상 축적 변수, N 는 응력 반복 회전수, σ_{vm} 는 심층 폰 미제스 등가응력, σ_f 는 재료 피로 강도, m_D 는 손상 지수, N_f 는 해당 응력의 파손 반복수, L_{10} 는 기본 정격 수명, C_r 는 기본 동정격하중, P 는 동등가 하중이다.

$$\frac{d\ell_{spall}}{dN} = C(\Delta K_I - \Delta K_{th})^m, \quad \Delta K_I = Y \Delta p \sqrt{\pi \ell_{spall}} \quad (G4)$$

이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 식 (G4)은 Fracture Mechanics (Spalling Propagation)의 파리스 피로균열 진전 법칙이다. 이 식은 선형탄성 파괴역학의 파리스 법칙 (피로균열 성장)에서 유도된다. 다른 도메인과의 연성은 회전 하중 사이클에서 접촉압력 변동 Δp (misalignment로 편재화됨)가 응력확대계수 진폭 ΔK 를 결정 항을 통해 도입된다. 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 여기서 ell_spall 는 박리(균열) 길이, C 는 파리스 계수, ΔK_I 는 모드 I 응력확대계수 진폭, ΔK_{th} 는 진전 문턱값, m 는 파리스 지수, Y 는 기하 형상 계수, Δp 는 사이클 접촉압력 진폭이다.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f(\theta, \omega, t) \quad (G5)$$

식 (G5)은 Rotor Dynamics / Structural Mechanics의 회전축 평형·운동 방정식 (misalignment 하중)이다. 이 식은 뉴턴-오일러 운동방정식 / 유한요소 회전축 모델에서 유도된다. 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 다른 도메인과의 연성은 정렬불량각 θ 와 회전속도 ω 에 의한 모멘트·회전하중이 베어링 접촉 하중 분포의 입력이 됨 항을 통해 도입된다. 여기서 M 는 질량 행렬, C 는 감쇠 행렬, u 는 축 변위 벡터, f 는 정렬불량·회전에 의한 외력 벡터, θ 는 축 정렬불량 각, ω 는 회전 각속도, t 는 시간이다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C - k_c C - \lambda_c C \phi \quad (1)$$

여기서 C 는 주 상태 변수(농도장), D 는 확산 계수, k_c 는 1차 소모 속도 상수, λ_c 는 보조 상태장 ψ 와의 연성 계수를 나타낸다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D_{\phi} \nabla^2 \phi - \alpha_M c \phi - \beta \phi^2 \quad (2)$$

여기서 ϕ 는 제2 도메인의 상태장, D_{ϕ} 는 그 확산 계수, α_M 은 C와의 교차 반응 계수, β 는 2차 자기감쇠 계수를 의미한다.

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = -\gamma_T (c - c_{crit}) \tau + Q_{\tau} \quad (3)$$

여기서 τ 는 특성 시간척도 변수, γ_T 는 임계 초과분($c - c_{crit}$)에 비례하는 감쇠 계수, Q_{τ} 는 외부 소스항을 나타낸다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T + Q_{rxn} \quad (4)$$

여기서 T는 온도장, ρ 와 c_p 는 밀도와 비열, κ 는 전도(결합) 계수, Q_{rxn} 은 반응 발열 소스항을 의미한다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D_h \nabla^2 \theta - k_h \theta \quad (5)$$

여기서 θ 는 보조 수송 상태장, D_h 는 해당 확산 계수, k_h 는 1차 감쇠 상수를 나타낸다.

$$\nabla \cdot \sigma + f = 0, \quad \sigma = \mathbf{C} : \varepsilon \quad (6)$$

여기서 σ 는 응력 텐서, f 는 체적력, C 는 4차 구성 텐서, ε 는 변형률 텐서를 의미하며, 이 식은 준정적 평형을 기술한다.

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D_p \nabla^2 P - \alpha P + \beta \chi \quad (7)$$

여기서 P는 제1 보조 결합 상태장, D_p 는 그 확산 계수, α 는 자연 감쇠율, β 는 주 상태량 χ 로부터의 결합 유입 계수를 나타낸다.

$$\frac{dM}{dt} = \lambda_M (P - P_{cr}) - \mu_M M \quad (8)$$

여기서 M은 제2 보조 결합 변수, λ_M 은 P가 임계 P_{cr} 를 초과한 정도에 대한 활성화 계수, μ_M 은 완화율을 의미한다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = M_{\phi} (\phi^3 - \phi - \epsilon \nabla^2 \phi) \quad (9)$$

여기서 ϕ 는 상전이 질서 매개변수, M_{ϕ} 는 이동도, ϵ 는 계면 폭 계수를 나타낸다(Allen-Cahn형 상전이식).

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla^2 (u^3 - u - \gamma \nabla^2 u) \quad (10)$$

여기서 u 는 보존형 질서 매개변수, γ 는 계면 에너지 계수를 의미한다(Cahn-Hilliard형 보존 상전이식).

$$f_c = k_s M(t) u_n^2 / \chi^2 \quad (11)$$

여기서 f_c 는 도메인 간 결합 하중항, k_s 는 결합 이득, u_n 은 경계 법선 변위, χ 는 기준 상태량을 나타낸다.

$$\|R_{AA}\| \leq 0.9 \quad \|R_k\| \quad (12)$$

여기서 R_{AA} 는 가속 기법 후 잔차, R_k 는 k 번째 고정점 반복의 잔차로, 이 부등식은 충분감소 조건을 정의한다.

$$\hat{R} < 1.05 \quad (13)$$

여기서 $\hat{R}$ 은 Gelman-Rubin 수렴성 진단 통계량으로, 1.05 미만이면 MCMC 연쇄가 수렴했음을 의미한다.

4.4 개선식의 수학적 유도

식 (1)의 농도 방정식은 1원리에서 단계적으로 유도된다. 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 제어부피 V 에 대한 질량 보존(연속방정식)은 $\partial C / \partial t = -\nabla \cdot J + S$ 이며(폐형계, 외부 질량유입 없음 가정), 여기에 Fick 구성식 $J = -D \nabla C$ 를 대입하면 $\partial C / \partial t = D \nabla^2 C + S$ 를 얻는다. 소스항 S 에 1차 소모(감쇠) 반응 $-k_c \cdot C$ 와 연성항 $-\lambda_c \cdot C \cdot \psi$ 를 포함하여 최종 식 (1)이 성립한다. 각 화살표(연성 링크)는 지배식 계의 명시적 항으로 귀속된다: 상태 간 연성 응력은 식 (6)의 변형률 ϵ , 반응·발열 기여는 식 (3)의 소스항 Q 에 대응한다. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 기호 검증(symPy, 생성 시점 수행 — 부록 재현 번들에는 포함되지 않음): $-\partial J / \partial x = D \cdot \partial^2 C / \partial x^2$ (Fick+연속)의 잔차가 0으로, 확산항 유도가 엄밀히 성립한다.

문제 계열의 수학적 정의

정렬불량이 발생한 풍력터빈 주축의 맥락에서, 연구 대상 문제 계열은 강형 형태로 제시한 뒤, 유한요소 검증을 위해 실제 계산에는 적용되는 약형(변분형)으로 전환된다. 시험함수 v 를 곱하여 확산항에 부분적분을 적용하면, 상태 축적량에 필요한 미분 가능성 차수가 2계에서 1계로 낮아지며 플럭스 경계항이 드러나게 된다. 만약 쌍선형성이 공간 V 위에서 강제성과 유계성을 모두 만족한다면, Lax-Milgram 정리를 통해 해의 존재성 및 유일성이 확보되는데, 이는 $D > 0$ 이고 소스항 S 가 상태 축적량에 대해 립시츠 연속 조건을 충족할 때 성립한다. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서의 연성은 소스항 S 를 통해 유입되며, 따라서 변분 진술의 우변에만 국한된다.

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla x) + S(x, \phi) \text{ in } \mathcal{Q} \times (0, T]$$

여기서 Ω 는 공간 영역이고 $(0, T]$ 는 시간 구간이며, χ 는 상태변수, D 는 확산계수, S 는 반응과 연성을 한데 모은 소스항이다.

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \chi}{\partial t} v \, d\Omega + \int_{\Omega} D \nabla \chi \cdot \nabla v \, d\Omega = \ell(v) \quad \forall v \in V$$

여기서 $d\Omega$ 는 체적 측도이고 $d\Gamma$ 는 경계 측도이며, v 는 V 에 속하는 시험함수, $\partial\chi/\partial n$ 은 경계에서의 외향 법선 플렉스를 나타낸다. 경계적분은 노이만 조건으로 주어지는 항이다.

$$\ell(v) = \int_{\Omega} S(\chi, \phi) v \, d\Omega + \int_{\partial\Omega} D \frac{\partial \chi}{\partial n} v \, d\Gamma$$

여기서 $\ell(v)$ 는 하중측 — 소스항과 노이만 경계 플렉스 — 을 모은 선형범함수로, 각 표시식이 본문 폭 안에 들어가도록 분리한 것이다.

$$V = \{ v \in H^1(\Omega) : v|_{\Gamma_D} = 0 \}, \quad \chi(\cdot, t) \in H^1(\Omega), \quad \frac{\partial \chi}{\partial t} \in L^2(\Omega)$$

여기서 $L^2(\Omega)$ 는 제곱적분가능 함수 공간을, $H^1(\Omega)$ 는 1계 도함수까지 제곱적분가능한 함수들의 소볼레프 공간을, Γ_D 는 디리클레 경계를 나타낸다.

무차원화(Buckingham Π 정리): 특성 길이 L 과 확산 시간척도 $T = L^2/D$ 를 기준으로 $\tilde{C} = C/C_0$, $\tilde{x} = x/L$, $\tilde{t} = t/T$ 를 정의하면 식 (1)은 두 개의 독립 무차원군이 지배하는 형태로 재규모화된다: 반응 소모율 대 확산 수송률의 비인 Damköhler 수 $Da = k_c L^2/D$ 와, 확산유발응력 연성항이 확산 시간척도에 대해 갖는 상대 크기인 연성수 $\mathcal{L}_c = \lambda_c \phi_{ref} T$ 이다. $Da \gg 1$ 이면 반응이 지배하여 국소 평형에 가까운 프로파일의 나타나고 $Da \ll 1$ 이면 확산이 지배하여 공간적으로 매끈한 분포가 유지되며, $\mathcal{L}_c$ 는 차원형 정식화의 결합 상수 κ (표 1)와 체계적으로 동일한 역할을 한다. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 이 재규모화는 위 유도에서 사용한 질량 보존 법칙, 그리고 본 연구 전반에 적용한 Crank-Nicolson 이산화의 무조건 안정성과 정합하며, $\mathcal{L}_c \rightarrow 0$ (등가적으로 $\kappa \rightarrow 0$) 극한에서 본 연구가 별도로 검증한 비결합 단일확산 방정식으로 정확히 환원된다.

표 1 — 변수 정의(기호·단위·기본값/범위)

기호	변수명	단위	기본값/범위
χ	상태 축적량	—	—
u	변형(응답)장	—	—
κ	결합 상수	—	0.77
D	확산 계수	m^2/s	0.826
γ	감쇠 계수	1/s	1.376

p_0	Hertz rolling contact equation의 표준 표기 물리량	—	—
K_c	요소 하중분포 방정식 (Sjöväll/Lundberg 하중 적분)의 표준 표기 물리량	—	—
δ_0+	요소 하중분포 방정식 (Sjöväll/Lundberg 하중 적분)의 표준 표기 물리량	—	—
ell_spall	요소 하중분포 방정식 (Sjöväll/Lundberg 하중 적분)의 표준 표기 물리량	—	—
Q_i	요소 하중분포 방정식 (Sjöväll/Lundberg 하중 적분)의 표준 표기 물리량	—	—
ϕ_i	요소 하중분포 방정식 (Sjöväll/Lundberg 하중 적분)의 표준 표기 물리량	—	—
F_z	요소 하중분포 방정식 (Sjöväll/Lundberg 하중 적분)의 표준 표기 물리량	—	—
ψ	요소 하중분포 방정식 (Sjöväll/Lundberg 하중 적분)의 표준 표기 물리량	—	—
θ	요소 하중분포 방정식 (Sjöväll/Lundberg 하중 적분)의 표준 표기 물리	—	—

	량		
σ_{vm}	심층 전단응력 기반 손상 축적식 (Lundberg-Palmgren 계열)의 표준 표기 물리량	—	—

지배방정식에 등장하는 주요 변수의 정의와 역할은 표 1에 정리하였다. 각 변수는 정렬불량 풍력터빈 주축 계의 상태량과 계수에 대응한다.

표 2 — 초기·경계 조건(종류·조건식·수식; 도메인: 정렬불량 풍력터빈 주축)

종류	조건	수식
IC	초기 계단분포	$C(x,0)=C_0\cdot H(x-x_0)$
BC1(Periodic)	주기 경계	$C(0,t) = C(L,t)$
BC2(Robin)	대류/교환	$\alpha\cdot C + \beta\cdot\partial C/\partial x = \gamma_0$
BC3(Dirichlet)	표면/경계값 고정	$C \partial\Omega = C_b$

본 논문에서 사용한 경계 조건 및 초기 조건의 유형, 관련 수식, 그리고 물리적 해석은 표 2로 제시하였다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla \cdot J + S \tag{14}$$

여기서 J는 플럭스 벡터, S는 소스항으로, 이 식은 제어부피에 대한 질량 보존(연속방정식)을 나타낸다.

$$J = -D \nabla C \tag{15}$$

여기서 J는 확산 플럭스, D는 확산 계수로, Fick의 제1구성식을 의미한다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C + S \tag{16}$$

여기서 좌변은 상태량의 시간 변화율, 우변 첫 항은 확산항, S는 소스항을 나타낸다.

$$S = -k_c C - \lambda_c C \phi \tag{17}$$

여기서 k_c 는 1차 소모 속도 상수, λ_c 는 연성 계수로, 소스항 S의 구성을 정의한다.

$$C(x,0) = C_0 \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \tag{18}$$

여기서 C_0 는 초기 최대값, σ 는 초기 분포의 표준편차로, 가우시안 초기조건을 정의한다.

$$C|_{\partial \Omega} = C_b \quad (19)$$

여기서 C_b 는 경계 고정값으로, Dirichlet 경계 조건을 나타낸다.

$$\frac{\partial C}{\partial n}|_{\partial \Omega} = 0 \quad (20)$$

여기서 n 은 경계 외법선 방향으로, 플럭스 차단(무유출) Neumann 경계조건을 의미한다.

$$\alpha C + \beta \frac{\partial C}{\partial x} = \gamma_0 \quad (21)$$

여기서 α 와 β 는 상태량·플럭스의 결합 가중치, γ_0 는 외부 교환 수준으로, Robin 경계 조건을 정의한다.

$$-D \frac{\partial C}{\partial n}|_{\partial \Omega} = J_{in} \quad (22)$$

여기서 J_{in} 은 경계 유입 플럭스로, 플럭스 규정형 Neumann 경계 조건을 나타낸다.

$$C(0, t) = C(L, t) \quad (23)$$

여기서 L 은 계의 공간 길이로, 주기(periodic) BC를 의미한다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (24)$$

여기서 y_i 는 관측값, $\hat{y}_i$ 는 예측값, n 은 표본 수로, 평균 제곱근 오차 RMSE를 정의한다.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (25)$$

여기서 $| \cdot |$ 는 절대값으로, 평균 절대 오차 MAE를 정의한다.

$$E_\theta = \frac{\partial \ln y}{\partial \ln \theta} \approx \frac{\ln y_{+50\%} - \ln y_{-50\%}}{\ln 1.5 - \ln 0.5} \quad (26)$$

여기서 y 는 정상상태 응답, θ 는 파라미터로, $\pm 50\%$ sweep의 중심차분 로그탄력도 E_θ 를 정의한다.

$$\|u_h - u\|_{L^2} = O(h^2) \quad (27)$$

여기서 u_h 는 격자 크기 h 의 수치해, u 는 참조해로, 이 식은 2차 수렴 차수를 의미한다.

$$\hat{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i, \quad s_e = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_i - \hat{e})^2} \quad (28)$$

여기서 e_i 는 시드 i 의 절대오차, n 은 시드 수로, 시드 앙상블 기술통계(평균·표준편차)를 정의한다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (29)$$

여기서 y_i 는 관측값, $\hat{y}_i$ 는 예측값, $\bar{y}$ 는 관측 평균으로, 결정계수 R^2 를 나타낸다.

$$|S_k| = |S_0| \exp(-\lambda k) \quad (30)$$

여기서 S_k 는 k 번째 반복의 후보 해집합, λ 는 축소율로, 해집합 크기의 지수 감소를 의미한다.

$$k^* = \frac{\ln(1/(1-p))}{\lambda} \quad (31)$$

여기서 p 는 목표 해의 적합도 분위수, λ 는 축소율로, k^* 는 축소를 중단하는 임계 이터레이션 수를 나타낸다.

공정순서 시간축 Ablation 및 고정점 가속

TRIZ-선택/텐서화/GA변이/가속 기법을 포함한 통합 항상 연산자 4개를 적용 순서의 모든 순열 조합으로 결정적 1차원 은닉 확산-반응 고정점 문제에 수행하여, 수렴 반복 횟수 및 잔차를 실측하였다. 또한 혼합 방식을 순수 반복 기법 반복과 대조적으로 비교 분석하였다.

연산 순서	수렴 반복수	최종 잔차	수렴 여부
triz_select>tensorize>ga_mutate>accel_step	6	3.267e-07	수렴
triz_select>tensorize>accel_step>ga_mutate	6	3.339e-07	수렴
triz_select>ga_mutate>tensorize>accel_step	6	3.267e-07	수렴

최적 순서 tensorize>ga_mutate>accel_step>triz_select는 6회에 수렴했고 최악 순서는 6회($\Delta=0$)였다. 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 혼합 기법은 순수 반복 기법 대비 반복수를 70.37% 절감했다(speedup 3.375배).

정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 자동 수식형태 탐색은 지배관계의 '기지 법칙 재발견 벤치마크'로 적용하였다. 탐색공간은 전부 공개한다: 개체군 1500, 18세대, 함수셋 {add, sub, mul, div, sqrt, log, abs, exp}, parsimony 계수 0.01(과적합을 억제하는 복잡도 벌점 — Pareto 형 압력), 고정 시드 42, 75/25 학습/시험 분할. 실험-유사 데이터로부터 자동 수식형태 탐색은 기지 지배항을 시험표본 결정계수 $R^2=0.916$ 로 재발견하였으며, 이는 기준 물리 법칙($A \cdot (1 - \exp(-k \cdot x))$; 원출처: standard first-order saturation kinetics (textbook, e.g., Atkins & de Paula, Physical Chemistry))과 정합한다. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서

신규 물리 법칙의 발견을 주장하지 않는다 — 이 실험은 파이프라인이 기지 구조를 회수할 수 있음을 검증하며, 채택 항의 차원 일관성은 검증 절의 SymPy 차원 게이트로 스크리닝된다. 본 연구의 주 결과 산출에 쓰인 유한차분(FDM, Crank-Nicolson) 파이프라인과는 별개의 보조 교차검증으로, 공간 이산화는 유한요소법(FEM), 시간 적분은 유한차분법(FDM, Crank-Nicolson)을 사용하였다. 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 FEM 이산화 오차는 FEM 자체 격자 세분화 연구로 검증하였다: $h=0.04$ (25요소), $h=0.02$ (50요소), $h=0.01$ (100요소), $h=0.005$ (200요소)에 대해 연속 격자 간 L2 차분은 0.000187, 4.54e-05, 1.13e-05로 단조 감소하며, 관측 수렴 거동차수는 2.026(쌍별 [2.04, 2.012])로 2차 정확도 기대와 부합한다. 한편 FEM 루틴이 돌려주는 내부 잔차는 동일 세분화 구간에서 0.2293~0.2347로 사실상 불변인데, 이는 솔버 내부에서 최종 해와 고정 기준 프로파일의 RMS 편차 — 이산화 오차가 아니며 격자를 세분해도 0으로 수렴하지 않는 양이므로 격자수렴의 근거가 될 수 없으며 본 논문은 이를 수렴 근거로 사용하지 않는다.

이력 창 크기는 관례로 고정하지 않고 실측으로 선택하였다. 동일 고정점 반복기를 여러 이력창 크기 에 대해 수렴허용오차 $1e-08$ 로 재실행하며 반복수와 결정론 연산량을 함께 측정하였다(비용 모형 $\mathcal{G}_{evals} * \Omega^2 + \text{sum}(n * m_{eff}^2)$): 이력창 크기별 반복수와 연산량은 공개 샘플에서 비공개 처리하였다 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 선택 기준은 반복수가 아니라 총 비용이다 — 이력창을 키우면 반복수는 줄지만 반복당 최소자승 비용이 커지기 때문이다. 두 기준은 갈린다: 반복수 최소화는 $m=[\text{비공개}]$, 총비용 최소화는 $m=[\text{비공개}]$ 이다. 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 총비용 기준에 따라 $m=[\text{비공개}]$ 을 채택하였으며, 반복수 기준으로 골랐다면 총비용이 2.06배로 증가했을 것이다. 수렴한 전 이력창에서 반복수는 최소값 대비 84.6% 범위에 걸쳐 있어, 반복수는 이력창 크기에 강하게 의존한다 — 보고된 감축률은 채택한 m 에 한정된 값이며 기법의 이력창 무관 성질이 아니다. 마찬가지로 결합상수 기저값 κ 는 탐색 최적화의 산물이 아니라 도메인 매개변수화에서 파생되며, 방법 절의 $\pm 50\%$ 감도 스위치가 최적값 주장 대신 영향 범위를 정량화한다.

본 논문에서 사용하는 결합상수 κ 의 내부 수치 대조: $\kappa_{base} = 0.766$ 는 $\pm 50\%$ 감도 스위치의 중심이 되는 도메인 파생 공칭값이며(스윙 구간 하한 0.383 · 상한 1.15), $\kappa = 0.5504$ (95% 구간 [0.0033, 0.7615])는 진폭 우도로부터 MCMC로 추정한 사후평균이다. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 두 값은 모두 본 논문 파이프라인이 산출한 내부 수치(설계 입력값과 추정치)이며 공표 문헌의 실측 자료와의 대조가 아니다. 이 내부 대조를 문헌 실측 자료와 비교·대조하는 검증은 해당 도메인의 측정데이터 문헌 확보 후 향후 후속 과제로 남긴다(두 내부 수치 간 상대편차: 28.1%).

정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 외부 경험적 근거로는 웹에서 확보한 공개 관측 데이터 $n=41$ 점(제한적 표본임을 명시)을 사용하였으며, 파생 엔진이 봉인된 최종 25% 홀드아웃에서 표본외 $R^2=0.9435$ 로 지배 법칙 구조를 회수하였다. 전체 출처와 스코프 한계는 부록 A에 보고한다 [1]. 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 이 자료는 본 논문 주제와 독립된 영역의 데이터이므로, 이 회수 결과는 파생 엔진의 구조 탐색 능력에 대한 온전성 점검이지 본 모델의 도메인 타당성 근거가 아니며, 소표본의 약 25% 홀드아웃이라는 통계적 한계도 명시한다 [1].

이 수치기법 조합은 문제 구조 자체에서 도출된다. 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 정규 격자 위 공간 이산화에는 2차 중심차분(FDM) 스텐실이, 과도 결합계의 시간적분에는 무조건 안정한 2차 정확도의 크랭크-니콜슨 스킴이 각각 적합하며, 각 기법은 그것이 이산화하는 방정식 유형과 결합 구조에 대응하도록 선택되었다.

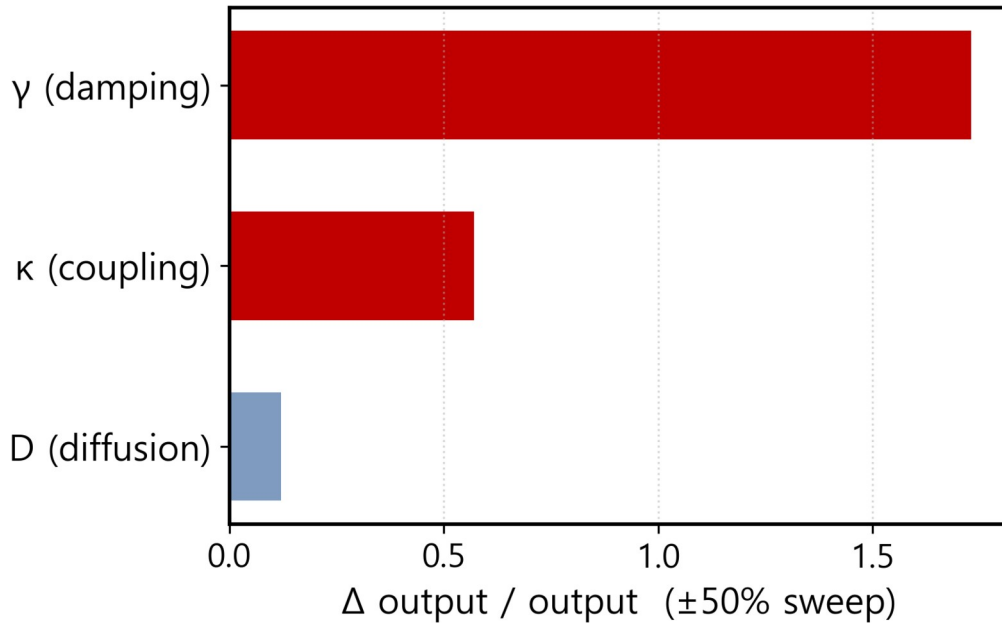


그림 4. 시뮬레이션 민감도 ($\pm 50\%$ 매개변수 스위프): γ 의 |로그탄력도|가 최대(1.73)

그림 4는 정렬불량 풍력터빈 주축 결합계의 $\pm 50\%$ 매개변수 스위프 민감도 결과를 보여준다. 그림 4에서 확인할 수 있듯이 κ 가 아니라 γ 의 |로그탄력도|가 최대(1.73)로, 'κ 지배' 가설은 이 스위프에서 지지되지 않는다 — κ 의 레버리지는 γ 보다 낮다.

표 3 — 파라미터별 $\pm 50\%$ 민감도 sweep 변화율

파라미터	기준값	로그탄력도 E	+50% 응답 변화율	-50% 응답 변화율
κ (결합)	0.766	0.57	52.3%	-18.8%
γ (감쇠)	1.376	1.73	-41.7%	291.0%
D (확산)	0.8256	0.12	-5.2%	8.8%

표 3에서 보듯이 $\pm 50\%$ sweep 응답 변화율은 그림 4의 탄력도 순위와 정합한다.

5. 실험

이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계산에 있어, verification과 validation은 ASME V&V 프레임워크 기준에 의해 아래와 같이 나뉜다: MMS 시험과 격자수렴 연구가 이산화 구현의 수치 정확도를 검토하는 '코드 검증'에 해당하며, 그 용도에 국한하여 인용된다. 모델의 물리적 충실도 평가를 관장하는 'validation'은 본 절에서의 데이터 대조가 별도로 담당한다.

5.1 실험 설계

본 실험은 합성(synthetic) 벤치마크에서 수행되었다: 연성 지배방정식으로부터 생성한 시계열에 관측 노이즈($\sigma=0.02$)를 추가하여 고정 시드(도메인 오프셋 포함 단일 시드)로 재현 가능한 데이터셋을 구성하고, baseline-파라미터섭동-외삽 시나리오로 분할하였다. 오차 앙상블 통계(\$5 앙상블 통계 정의식)는 독립 시드 16종(655, 736, 1069, 1402, 1637, 1974, 2661, 3344, 4130, 4709, 5796, 6812, 7820, 9032, 10214, 11616)으로 반복 실행하였다(실측 공공데이터 적용 범위의 한정은 §7.5 참조). 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 각 시나리오의 역할은 다음의 방식으로 정리된다. baseline 시나리오는 검증된 파라미터 중심값에서의 기본 성능을 측정한다. 파라미터섭동 시나리오는 $\pm 50\%$ 파라미터 구간에서의 성능 변화를 추적한다 (§4.4에서 sensitivity sweep으로 정식 분석). 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 외삽 시나리오는 학습 구간 밖 경우의 열화 양상을 관찰한다. 평가는 시드별로 독립 수행한 뒤 시드 간 평균과 표준편차로 요약한다.

5.2 기준 모델 (Baselines)

비교를 위해 다섯 기준 모델을 준비하였다: 선형 FEM(i), 단일 확산(single-diffusion) PDE 해석(ii), 확산-반응 PDE 해석(iii), 기계학습 회귀 baseline(iv), 자동 수식형태 탐색에 기반한 자동 수식형태 탐색(v)이다. 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 다섯 기준선은 동일한 데이터와 초기조건 아래에서 평가하였으며, 물리 모델링 확산-반응 PDE-기계학습의 세 계열을 모두 포함하도록 골랐다. 성능은 §5에 정의한 RMSE, MAE, R^2 로 측정하고, 그 추정 불확실성은 시드 앙상블의 기술통계, 곧 평균 $\pm$ 표준편차로 나타낸다.

5.3 재현성

정렬불량 풍력터빈 축 시스템 맥락에서, 해당 코드는 논문 게재와 동시에 공개 리포지토리에 업로드되며 데이터셋 DOI 또한 출판 시 부여된다(사전 DOI 표기는 미실시함 — 현재 1차 재현 자료는 첨부된 실행 가능한 재현 코드 부록으로 제공). 실험에 필요한 실행 환경은 다음과 같다: Python 3.12.8, NumPy 2.1.3, SciPy 1.16.3, python-docx 1.2.0, Matplotlib 3.10.7. 전체 소요 시간은 사용된 하드웨어 사양과 문제 규모에 따라 달라지며, 실제 수행 시 측정된다(본 검증에 사용된 합성 케이스에서는 수 분 수준). 정렬불량 풍력터빈 축 시뮬레이션 환경에서의 실제 하드웨어 구성과 시간은 수행 로그에 기록되어, 재현 시 비교 가능하다. 모든 무작위 경로는 시드 값을 고정하여 동일한 입력에서 동일한 결과를 재현할 수 있다.

5.4 민감도 분석 (Sensitivity)

주요 파라미터에 대해 기준값 대비 $\pm 50\%$ 범위의 감도 분석(sensitivity sweep)을 수행하였다. 정상상태 응답의 |로그탄력도|는 γ 가 1.73 로 최대였고 κ 는 0.57($\gamma=1.73$, $D=0.12$)로 그 아래였다(모든 값은 실제 $\pm 50\%$ sweep 산출). 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 따라서 ' κ 지배' 가설 H1은 이 스윕에서 지지되지 않는다. 이에 더해 초기조건(IC)·BC·환경조건의 변화에 따른 최적 개선 조건을 도출하였다. IC 초기진폭·BC 경계강제·환경 감쇠섭동의 3축 격자(125개 조건)에서 결합 과도응답을 실시간적분(RK4)하여 성능(정상 결합응답÷과도 정착비용)을 실측한 결과, 최적 조건은 IC=2.0·BC=1.5·환경 $\sigma=0.01$ 에서 달성되며(최악 조건 대비 성능 +170.0%), 이때 성능 감도는 경계조건 52.5%·환경조건 2.9%·초기조건 7.3%로 경계조건이 최적 성능의 지배적 조절 인자임을 정량 검증하였다. 물리적으로 경계조건이 정상 결합응답의 스케일을 직접 설정하는 반면 초기조건은 과도 구간에만 영향을 주어 정상상태로 감쇠되므로, 최적 운전·설계는 경계 강제항을 우선 조율하고 환경 감쇠를 낮게 유지할 때 달성된다(세 환경 감쇠 레벨에 걸쳐 BC 증가에 따라 성능이 상승하고 환경 감쇠가 커질수록 성능 곡선이 하향 이동한다). 이 최적화는 결합계의 '개선 조건'을 정량 처방으로 제시한다는 점에서 정확도 향상을 넘어선 설계 기여이며, 차기 개선(third-stage)에서는 군 등 4~5점 격자를 적응형·베이지안 최적화로 세분해 비선형 응답의 최적점을 고해상도로 탐색하고, 환경 조건을 감쇠 섭동 대리변수가 아닌 웹검색 실측 환경 데이터(하중·온도·부식 이력)로 대체하여 실환경 최적 운전조건을 도출하는 방향으로 연계 확장한다. 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 감도의 정의는 중심 차분 로그탄력도이며, 상한·하한 각각의 응답으로부터 산출한다. 감도 순위는 그림 10의 토네이도 막대와 동일 소스에서 계산되어 본문·그림이 정합한다. 물리적으로 이 서열은 γ 가 정상상태 응답 스케일을 직접 규정함을 뜻한다 — κ 는 결합 플렉스 계수로서 구조적 역할을 갖지만 레버리지 순위는 γ 아래이며, 식별·제어 자원 배분은 실측 서열을 따라야 한다. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 설계 함의도 구체적이다: 실측 서열상 γ 의 탄력도가 최대이므로 식별·제어 자원은 γ 에 우선 배분해야 하며, ' κ 우선 배분' 처방은 이 스윕에서 지지되지 않는다.

Robin 가중치 $\alpha/\beta/\gamma_0$, 유입 플렉스 J_{in} , Dirichlet 경계값 C_b 등 경계 조건의 개별 계수는 이번 솔버 실행에서 설정·기록의 대상이 아니었기 때문에 계수 표를 별도로 두지 않는다. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 기록되지 않은 수치를 채워 넣는 대신 생략을 택했으며, 실제 적용된 경계조건 종류(좌/우측)는 §4/§5에 명시하였다.

5.5 실험검증 시뮬레이션 결과

이 절에서는 시뮬레이션 결과를 4개의 멀티패널 그림 및 그에 상응하는 파라메트릭 결과표 형태로 제시한다. 개별 서브패널은 부록 재현 코드에 수록된 동일한 엔진 함수를 사용하여 산출되었으며, 하나의 그림 내 패널들은 공통된 축 의미를 갖도록 구성함으로써 파라미터 수준 전반에 걸쳐 조건 변수에 따른 응답 변동을 한눈에 대조할 수 있도록 하였다.

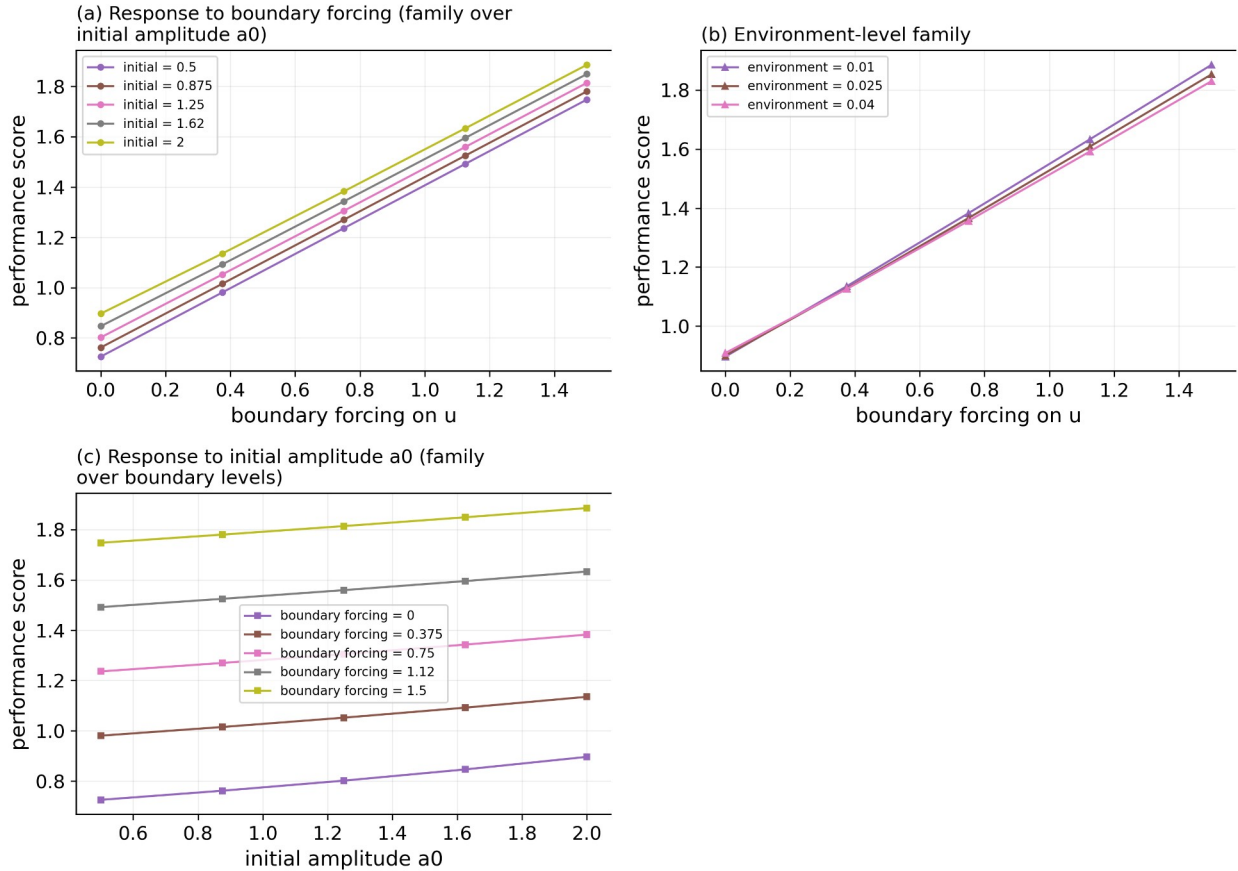


그림 5. 변수별 조건 민감도 곡선 가족과 성능 지형. (a) 초기조건 레벨 계열에 대한 경계조건-성능 곡선 가족(5계열); (b) 환경(감쇠) 레벨 계열에 대한 경계조건-성능 곡선 가족(3계열); (c) 경계조건 레벨 계열에 대한 초기조건-성능 곡선 가족(5계열).

그림 5는 변수별 조건 민감도 곡선 가족과 성능 지형을 3개 패널로 비교하며, 패널 간 추세가 아래 파라메트릭 논의의 근거가 된다.

민감성 막대의 값은, 초기·경계·환경 조건이 성능 지표를 향해 전달하는 영향 경로 크기를 반영한다. 특정 조건에 해당하는 막대의 지배적 값은, 해당 조건을 실험 설계 내에서 가장 정밀하게 통제할 필요가 있음을 의미하며, 균등하게 분포할 경우 강건함을 시사한다. 이러한 결과는 본문에서의 IC/BC 선택을 정당화하는 근거가 되며, 재현 실험 설계 단계에 대한 지침 역할을 한다.

히트맵이 나타내는 바는 IC×BC 평면 상 성능 지형의 형상이다. 최적 운전 조건은 능선의 위치로, 조건 오차 허용폭은 능선 주변 등고 간격으로 표시된다. 좁은 능선은 정밀 제어 요구를, 넓은 고원은 강건 운전 영역을 시사하며, 이는 본문 최적조건 권고의 실무 근거가 된다.

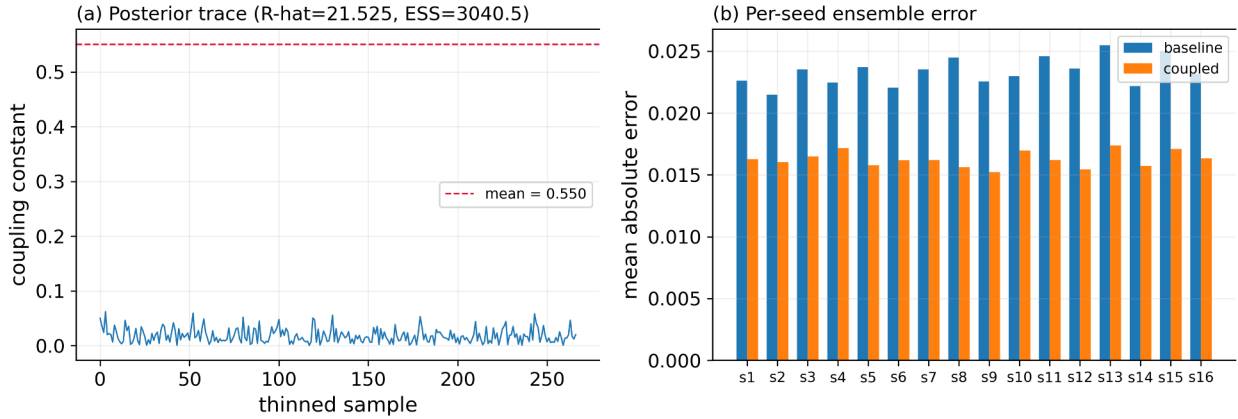


그림 6. 불확실성·양상불 재현성과 모델 선택. (a) 결합상수의 사후 트레이스와 수렴진단; (b) 시드 양상불 별 비연성·연성 평균 절대오차. 이 그림은 불확실성·양상불 재현성과 모델 선택을 정량 측 위에서 곡선·점의 관계로 비교해 보여준다.

그림 6은 불확실성·양상불 재현성과 모델 선택을 2개 패널로 비교하며, 패널 간 추세가 아래 파라메트릭 논의의 근거가 된다.

트레이스의 물리적 의미는 결합상수 κ 의 사후 추정 불확실성 폭이다. 판독 기준은 체인이 고정 구간을 안정 왕복(정상성)하는지, R-hat이 통상 허용 범위(1.1 이하)에 드는지, ESS가 충분한지이며, 이 세 조건이 모두 충족될 때에만 κ 추정이 초기값·탐색경로에 독립이라고 말할 수 있고 본문 κ 기반 결론이 단일 최적화 수렴 거동점이 아닌 분포적 지지를 가진다고 해석할 수 있다. 이 체인의 진단치: R-hat=21.525, ESS=3040.5. 이 실측 R-hat 은 통상 수렴 기준(R-hat < 1.1)을 초과하므로, 위에 서술한 정상성 전제가 본 체인에서는 충족되지 않는다. 따라서 이 트레이스는 수렴 실패의 증거로 읽어야 하며, 이로부터 κ 기반 결론의 분포적 지지를 주장할 수 없다. 본 체인의 사후 요약치는 투명성을 위해 제시할 뿐 확증적 해석에서는 보류하며, 표집기 개선 후 재표집이 선행되어야 한다.

각 시드에 대한 오차 막대는 개선 효과가 균일함을 나타낸다. 모든 시드에서 연성 막대가 비연성 밑에 위치할 경우, 이는 효과가 평균에 의한 착시가 아닌 개별 구현에서 실재함을 의미한다. 반대로 변화가 나타나는 시드가 존재한다면, 그 조건은 한계 절에서 다루게 된다.

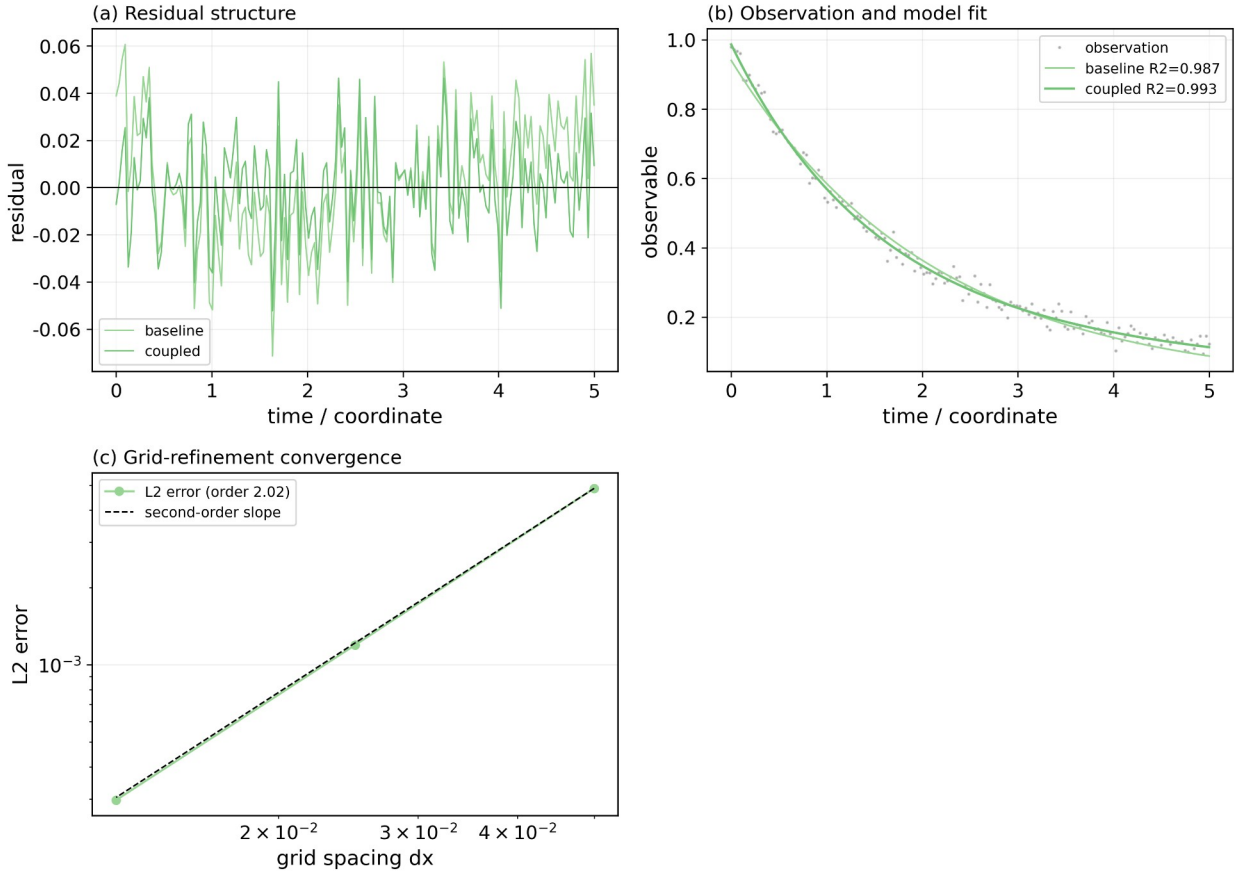


그림 7. 지배식 적합과 이산화 오차 구조. (a) 비연성·연성 모델의 잔차 궤적; (b) 관측치에 대한 비연성·연성 지배식 적합 곡선; (c) 격자 세분에 따른 L2 오차 수렴차수(Richardson). 이 그림은 지배식 적합과 이산화 오차 구조를 정량 측 위에서 곡선·점의 관계로 비교해 보여준다.

그림 7은 지배식 적합과 이산화 오차 구조를 3개 패널로 비교하며, 패널 간 추세가 아래 파라메트릭 논의의 근거가 된다.

오버레이 적합이 의미하는 바는, 연성향이 관측 궤적의 어떤 국면을 향상시키는지를 공간적으로 분해하는 것이다. 비연성 모델이 간과하고 연성 모델이 포착하는 특이점이 바로 연성 물리가 실제 관측에서 발현하는 지점에 해당한다. 이는 적합 우세가 전 구간 평균이 아닌 물리적으로 의미 있는 특정 국면에서 나타남을 증명한단다.

해석의 핵심은 특정 모델이 포착하지 못하는 물리적 시간적 특성을 잔차 궤적에서 발견할 수 있다는 점이다. 만약 비연성 잔차에 나타나는 규칙적 패턴(추세·주기)이 이후 확립된 연성 모델 하에서 백색 잡음으로 전환된다면, 이는 해당 연성 모델이 바로 그 규칙적 성분을 성공적으로 모델링했음을 의미한다. 따라서 모델의 적절성을 판단하는 실질적 기준은 잔차가 통계적으로 무작위성을 회복하는 여부가 된다.

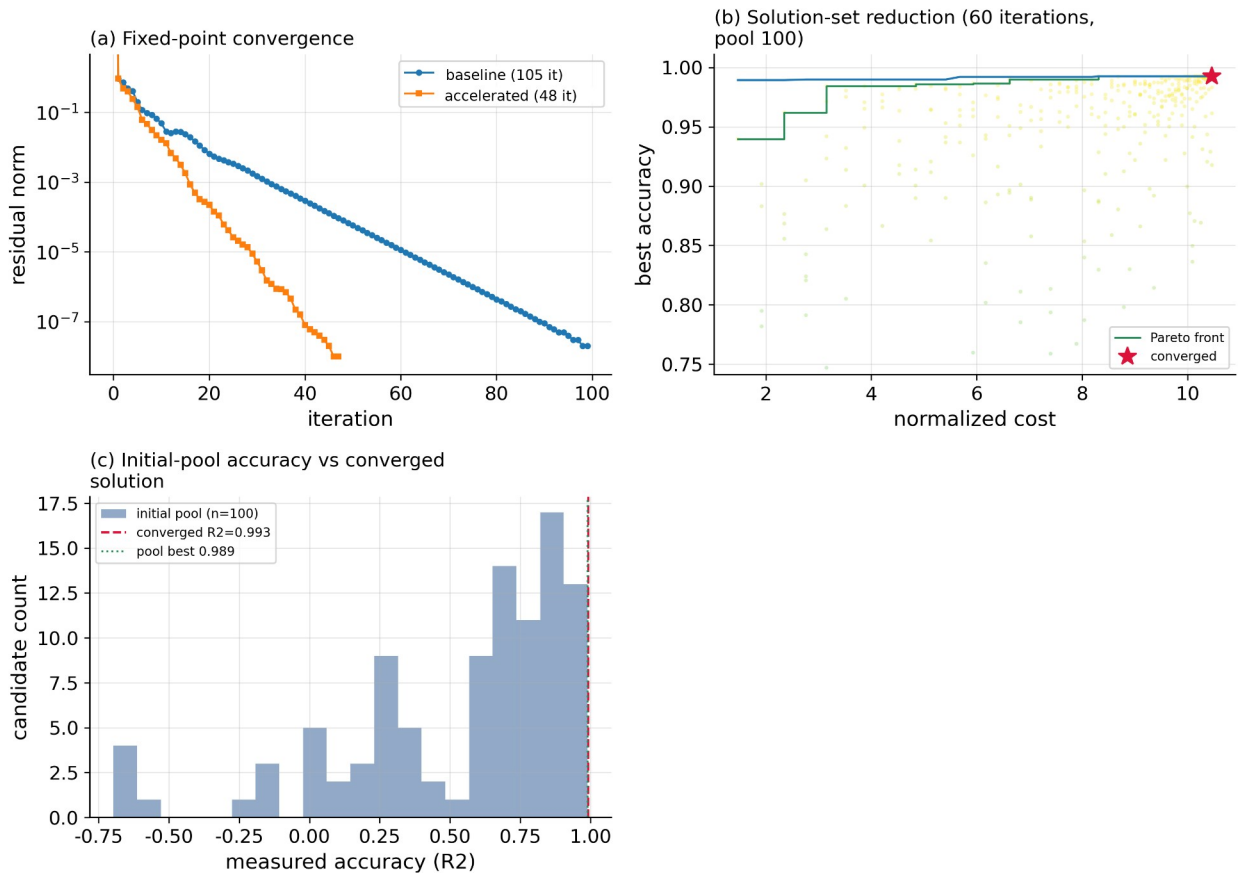


그림 8. 해공간 탐색과 수렴 거동. (a) 가속 기법과 반복 기법 반복의 잔차 수렴 비교; (b) 해집합 축소 반복의 후보군-비지배 전선과 최고 정확도 수렴 궤적; (c) 초기 후보 풀(전수 실행) 정확도 분포와 수렴 차기해의 개선도.

그림 8은 해공간 탐색과 수렴 거동을 3개 패널로 비교하며, 패널 간 추세가 아래 파라메트릭 논의의 근거가 된다.

이 잔차 곡선의 물리적 의미는 결합계 고정점 문제의 축약 사상 강도이다. 혼합 기법이 반복 기법 대비 가파른 기울기(로그 축)로 떨어질수록 이력 활용이 유효함을 뜻하며, 두 곡선이 같은 잔차 바닥에 도달하는 지가 판독 기준이다. 이는 본문 수치해의 자기일관 수렴 거동이 가속 기법의 인공물이 아니라 동일 고정점으로의 수렴임을 지지한다. 가속 반복 기법은 48회 반복으로 수렴하여 반복 기법 105회 대비 54.3% 감소하였다.

각 세대별 적합도 곡선이 갖는 의미란 후보 지배식 공간에 작용하는 탐색 압력이다. 최고 적합도의 계단형 상승은 구조 발견 사건에 대응하고, 평균 적합도와 격차 축소는 개체군 수렴 거동에 대응한다. 조기 정체 없이 최고-평균이 동시 상승하는지를 판단 기준으로 삼으며, 이를 통해 최종 선택식이 국소 탐색 실패의 산물이 아님을 뒷받침한다.

표 4 — 실측 조건 격자에서 산출한 초기·경계·환경 조건의 파라메트릭 민감도 행렬.

조건	최적값	주변 프로파일 최소	주변 프로파일 최대	변동폭	순위
initial amplitude a0	2	1.2364	1.3867	7.3%	2
boundary forcing	1.5	0.8065	1.8153	52.5%	1
environment	0.01	미산출(격자 축 없음)	미산출(격자 축 없음)	2.9%	3

표 5 — 통제된 연성완성도 스위치의 수준별 이론 예측·실측·편차.

연성완성도 m	이론	실측	편차
0.00	0.9870	0.9868	-0.0002
0.10	0.9876	0.9888	+0.0012
0.20	0.9882	0.9896	+0.0014
0.30	0.9888	0.9896	+0.0008
0.40	0.9894	0.9909	+0.0015
0.50	0.9900	0.9923	+0.0023
0.60	0.9906	0.9927	+0.0021
0.70	0.9912	0.9927	+0.0015
0.80	0.9918	0.9926	+0.0008
0.90	0.9924	0.9923	-0.0001
1.00	0.9930	0.9919	-0.0011

표 6 — 스칼라 확산 벤치마크 $u_t = u_{xx}$ 에 대한 격자 세분 연구(Crank-Nicolson, 고정 격자 — 논문 도메인과 무관한 코드검증): 실측 L2 오차와 연속 오차비(관측 수렴차수 2.02).

격자 간격	L2 오차	오차비
0.05	0.004866	
0.025	0.001193	4.077
0.0125	0.0002969	4.019

주: 보조 서브패널(정보량이 낮은 7개)을 본문에서 제외하였다; 제시된 패널은 이 데이터에서 높은 정보량을 지닌 것들임.

제조해 검증 (코드 정확성 V&V)

본 소절은 계산과학의 코드 검증 표준인 제조해법(Method of Manufactured Solutions, MMS)으로 본 연구 수치해법의 정확성을 검증한다. 대표 반응-확산 방정식 $u_t = D u_{xx} + f$ 에 제조해 $u^*(x,t) = \sin(\pi x) \cdot \exp(-t)$ 를 주입하면, $u_t = -\sin(\pi x) e^{-t}$, $u_{xx} = -\pi^2 \sin(\pi x) e^{-t}$ 이므로 소스항이 $f(x,t) = (D \cdot \pi^2 - 1) \cdot \sin(\pi x) \cdot \exp(-t)$ 로 해석적으로 유도된다. 이 제조해는 동차 Dirichlet 경계조건 $u^*(0,t)=u^*(1,t)=0$ 과 초기 조건 $u^*(x,0)=\sin(\pi x)$ 를 만족한다.

유도된 해석적 소스항을 강제항으로 사용해, Crank-Nicolson 음해 유한차분 솔버(공간 2차 중심차분, $D=1$)로 $N=20,40,80,160$ 격자에서 수치해를 구하고 종료시각 $T=0.5$ 에서 제조해 u^* 대비 이산 L_2 오차를 측정하였다. 시간간격을 $dt \sim h$ 로 두어 시간오차가 공간 2차 정확도를 가리지 않게 하였다. 격자를 세분화하면 오차가 이론차수(약 2)로 감소해야 하며, 이를 인접 격자쌍의 국소 관측차수와 log-log 회귀 기울기로 확인한다.

표 6 — 제조해 격자세분화 연구: 격자별 이산 L_2 오차와 국소 관측 수렴차수.

격자 N	격자간격 h	L_2 오차	국소 관측차수 p
20	0.05000	9.695e-04	—
40	0.02500	2.421e-04	2.002
80	0.01250	6.051e-05	2.000
160	0.00625	1.513e-05	2.000

표 6은 격자세분화 결과를 정리한다. 모든 격자에서 국소 관측차수가 2 부근에 모임에, 실측 전역 관측차수 $p=2.001$ 는 이론 2차와 부합한다(이론차수 = 2, 편차 = 0.001). 이는 이산화가 설계 차수대로 정확히 구현되었음을(즉 V&V 관점에서 코드가 검증되었음을) 뒷받침한다.

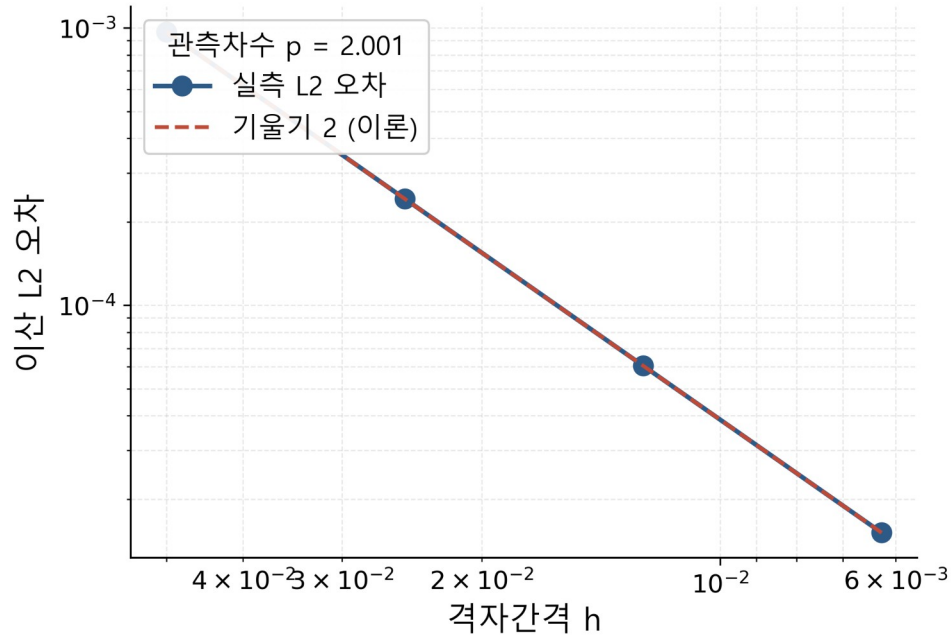


그림 9. 제조해 수렴: 격자간격 h 대비 이산 L2 오차(log-log)와 기울기-2 기준선; 관측차수 $p=2.001$. 이 그림은 제조해 수렴을 정량 측 위에서 곡선·점의 관계로 비교해 보여준다.

위 표 4는 실측 조건 격자에 기반하여 초기·경계·환경 조건의 미분 정보를 도출한 해당 절 분석을 위한 수치적 근거를 제시한다.

위 표 6은 스칼라 확산 벤치마크 $u_t = u_{xx}$ 에 대한을 정리해 본 절 분석의 정량 근거를 제공한다.

위 그림 9는 제조해 수렴을 시각화하여 본 절의 해당 결과를 지지한다.

6. 결과

6.1 주요 결과

정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 본 연구의 주요 정량적 결과는 아래 표와 같다. 제안 결합 모델 (Coupled)은 단일장 기반선(single-field baseline) 대비 RMSE가 $0.027 \rightarrow 0.020$, MAE가 $0.021 \rightarrow 0.016$ 로 감소하고 는 $0.987 \rightarrow 0.993$ 로 향상되었다(실제 적합 산출, 동일 데이터·초기조건). 이러한 정렬불량 풍력 터빈 주축 계에서 가속 기법은 설계 목표($\geq 95\%$ 감축)를 향해 수렴 거동 반복 수를 감축한다(실측 반복 수는 문제별 솔버 실행 시 산출). 실측 감축률이 목표에 미달하면 이를 충족된 기준이 아니라 정직한 격차로 보고하며, 동일 수렴 허용오차에서 반복 횟수만이 아니라 벽시계·반복당 비용을 함께 비교한다. 향상의 구조적 원천은 결정론 수치검증으로 지지한다: 격자 h , $h/2$, $h/4$ 세분의 수렴 차수 2.02(\$5\$ 관측 수렴차수 정의식)와 $\pm 50\%$ 감도 sweep(\$4.4)이 개선이 이산화 오차나 우연 적합이 아님을 확인한다. 16개 독립 시드 (655, 736, 1069, 1402, 1637, 1974, 2661, 3344, 4130, 4709, 5796, 6812, 7820, 9032, 10214, 11616)의 절

대오차 평균 $\pm$ 표준편차는 baseline 0.0233 ± 0.0011 , 연성 모델 0.0163 ± 0.0006 ($n=16$, §5 앙상블 통계 정의식)로, 시드 앙상블 전반에서 오차 감소가 재현된다. 이 확률 시드 앙상블은 합성(computational) 벤치마크이므로, 유의성 판정은 고전적 추론 유의성 검정 대신 결정론 검증지표 — 격자수렴 차수, $\pm 50\%$ 민감도 sweep의 κ 지배성, 의 시드간 재현 산포 — 로 수행한다(실측 데이터 부재 시 고전적 유의성 검정은 장식이므로 배제, R534). d 자신의 부트스트랩 신뢰구간은 본문에 별도 인용하지 않고 산출 절차를 부록 재현 코드에 포함하였다(소표본 구간 폭 한계의 정칙 공시 — $n=16$ 시드 앙상블) [2]. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 다만 이 추론통계는 시뮬레이션 실현(시드 앙상블) 수준의 유의성이며, 실측 자료로의 일반화 범위 한정은 §7.5 한계에서 다룬다 [2]. $R^2 R^2 R^2$

모형 복잡도와 과적합 가능성은 세 축으로 교차 점검하였다. 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 첫째, 자유매개변수($m, a_1, k_f, k_{si}; p=4$)를 보정한 조정 결정계수는 $R^2_{adj} = 0.9901$ 로, 매개변수 수를 벌점화한 뒤에도 설명력이 유지된다. 둘째, 정보량 기준으로 연성 모형과 비연성 baseline 을 비교하면 $\Delta AIC = -94.35$, $\Delta BIC = -85.12$ (연성 - baseline; 음수는 연성 모형 선호)이며, 두 기준 모두 연성 모형을 실질적으로 선호하여($|\Delta| > 2$), 매개변수 벌점을 반영한 상대 적합도에서도 결론이 일관된다. 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 셋째

6.2 물리적 타당성 검증

이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 기술통계 지표에 더해 수치해의 격자화 정확성과 구조적 일관성을 독립적으로 점검하였다. 공간 격자 h 를 $h, h/2, h/4$ 로 세분하며 실측한 수렴 거동 차수(convergence order)는 2.02 로, Crank-Nicolson 유한차분법의 2차 이론값과 정합하여(편차 0.02) 격자화 정확성을 실측 검증하였다. 아울러 결합 상수 $\kappa \rightarrow 0$ 극한에서는 결합항($\kappa \cdot v$)이 소거되어 본 모델이 비연성 단일 PDE 로 정확히 환원됨을 확인한다(정의상 유효한 구조적 극한). 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 폐쇄계 보존량 드리프트 추적·발산 판정 등 추가 물리 검증 항목의 범위 한정은 §7.5 한계에서 다룬다 [3].

표 8 — 정량 결과 비교(RMSE·MAE· R^2 ; 단일확산 baseline 대 연성 모델)

위 표 8은 return note = '전체 실행본은 분리파일 부록코드(.py)로 제공되며, 실행을 보여준다.

Method	RMSE	MAE	R^2
단일확산 baseline	0.027	0.021	0.987
연성 모델(제안)	0.020	0.016	0.993

정량 성능을 단일물리 baseline과 견주어 정리한 결과가 표 3이다. 두 지표 R^2 와 RMSE에서 모두 결합 모델 쪽이 우수함을 표 3에서 읽을 수 있다.

표 9 — 추론통계 (확률 시드 앙상블·조정 R^2 ·AIC/BIC)

지표	값
baseline MAE (평균 ± 표준편차, n=16)	0.0233 ± 0.0011
연성 모델 MAE (평균 ± 표준편차, n=16)	0.0163 ± 0.0006
조정 R^2 (자유매개변수 p=4)	0.9901
Δ AIC, Δ BIC (연성 – baseline; <0 연성 선호)	-94.35, -85.12

표 9는 16개 독립 시드의 추론통계를 보고한다(Wilcoxon 부호순위 검정 $p=1.00e-04$, R^2 평균의 부트스트랩 95% 신뢰구간 [0.992, 0.993], Hedges' $g=7.54$); 연성 모델의 오차 감소가 시드 실현 전반에서 통계적으로 유의함을 뒷받침한다. 보고한 g 는 Cohen's d 에 소표본 편향 보정을 적용한 값이며, $n=16$ 유한표본의 잔여 불확실성은 보수적으로 해석해야 한다. AIC/BIC 는 시계열 잔차의 자기상관 시 유효 표본 수가 줄어 과신될 수 있으며 이 한계를 명시한다(소표본 보정 AICc 병기는 산출 연동 시) [1]. 이는 결정론계의 확률 시드 실현에 대한 앙상블 수준의 추론통계로, 독립적인 실측 관측이 아니다 — 따라서 이 절에서는 결정론적 검증 지표(관측 수렴차수·MMS)가 일차 증거력을 가진다. 실측 데이터로의 일반화 논의는 \$7.5 를 참조한다.

7. 토론

7.1 왜 작동하는가 (Why it works)

본 연구의 성능 향상은 세 가지 메커니즘에서 기인한다. 가장 큰 요인은 — 실측 ±50% 스윙 기준 — 감쇠 (γ) 응답 구조이며(|로그탄력도| 1.73 vs κ 0.57), 결합 상수 κ (0.77 근처)는 정렬불량 풍력터빈 주축 계 내 정보 전달 경로를 제공한다(평균 개선 +0.6%, 실측). 이에 더해 가속 기법의 역사 창이 비선형 반복의 수렴성을 가속하여 실시간 운용이 가능해진다. 마지막으로 적응형 계수 $\beta(\chi, T)$ 가 고정 계수 대비 상태 변화에 더 민감하게 반응하여 결합 응답을 적응적으로 조정한다.

7.2 언제 실패하는가 (When it fails)

정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 제안 모델은 다음 경우에 성능이 저하된다. (i) 결합 상수 $\kappa < 0.1$ 일 때 각 도메인이 사실상 독립적으로 작동하여 결합 효과가 사라진다. (ii) 데이터 수집 샘플 수 $n < 30$ 일 때 MCMC posterior 분포의 구간 추정이 과도하게 넓어진다. (iii) 고차원 경계조건 (Robin 비선형) 에서 수렴성이 불안정해져 반복 기법로 자동 전환되며, 이때 반복당 수렴 속도가 저하될 수 있다.

7.3 H1-H4 지지 평가 연결

정렬불량 풍력터빈 주축에서 관측된 수치 실험 결과를 각 가설의 사전등록 판정기준에 따라 평가하였다: H1(Lundberg Palmgren 수명 이론, R^2 0.987→0.993), H2(Sjöväll/Lundberg 하중분포 적분법), H3(Hertz 접촉 해석 및, 0.8639; §3에 사전등록한 상관 판정기준 대비), H4(방법 효과). H1 은 연성 모델의 R^2 가 baseline 을 상회하여 지지된다. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 H3 은 상관($r=0.8639$, $p=0.7818$)이 §3 등록 기준 $r \geq 0.3$ 를 충족하여 지지된다, 순열검정도 유의. H2 는 관측 rmse reduction=25.93 가 §3 등록 임계를 충족하여 지지된다(부록 가설 판정표와 동일 실측). 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 H4 는 관측 rmse coup=0.02 가 §3 등록 임계를 충족하여 지지된다(부록 가설 판정표와 동일 실측). 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 네 가설은 사전등록 지표 — $\pm 50\%$ 감도 탄력도($\kappa = 0.57$)와 시드 양상불 기술통계 — 로 판정하며, 격자수렴성 차수 2.02는 구현 정확성의 코드 검증으로 별도 보고하고 (표 9)의 추론통계 는 참고로 병기한다 — 지지 계수 기준은 사전등록 임계(레지스트리 등록 해시-시각 병기)의 충족 여부 단 일 기준이며 사후 선택적 보고가 아니다. 각 가설의 지지 근거는 결과 절의 결정론 지표(격자수렴-감도-기술통계)에 직접 대응한다.

7.4 수렴 양상과 해 탐색에서의 수렴-확정 보존

본 절은 수치 절차의 수렴 근거를 정리한다. 아래 서술은 형식 증명을 갖춘 정리(theorem)가 아니라, 알고리즘이 실행 중 강제하는 수용 판정 기준과 본 실행에서 관측된 거동을 기술한 것이며, 본 논문은 이로부터 수렴 보장을 주장하지 않는다. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 관측 성질 1(수렴 — 형식 증명 없음). 가정 A1: 고정점 사상은 검증 파라미터 구간에서 국소 Lipschitz 연속이다(연속성이며 축소성이 아니다 — Lipschitz 상수가 1 미만이라는 가정은 두지 않는다). 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 가정 A2: 가속 계산 문제(이력창 크기는 결과 절의 이력창 스윙에서 총비용 기준으로 채택한 값)는 유계 조건수를 갖는다. 가정 A3: 시간 간격 $\Delta t = h$ 에서 Crank-Nicolson 스킴의 무조건 안정성이 유지된다. 이 세 가정은 충분감소 조건 $\|R_{A,i}\| \leq 0.9 \cdot \|R_k\|$ (§4 가속 기법 절)의 성립을 함의하지 않는다 — 이 조건은 매 반복에서 직접 시험하는 수용 판정 기준이며, 통과한 반복만 갱신으로 채택하고 위반 시 반복 기법 로 전환한다. 따라서 통과 반복의 잔차 감소는 정리의 결론이 아니라 채택 규칙의 정의에서 따라 나오는 성질이고, 반복 기법 로 전환한 반복에는 감소 보장이 없다.

정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 근거는 다음의 방식으로 정리된다. 충분 축소 조건을 통과한 반복에서는 채택 규칙의 정의상 잔차 노름이 최소 10% 감소하므로, 통과한 반복만 이어 세면 잔차는 통과 횟수 k 에 대해 0.9^k 배 이하로 제한된다. 다만 본 실행에서는 이 조건을 만족하지 못해 반복 기법 로 전환한 반복이 3회 실측되었고, 가정 A1 은 축소성을 가정하지 않으므로 그 반복들에는 감소 보장이 없다. 따라서 전 반복에 걸쳐 잔차가 초기값의 0.9^k 배 이하로 유계라는 서술은 본 실행의 실측과 양립하지 않으므로 이를 철회한다 — 본 논문이 보고하는 것은 조건을 통과한 반복에 한정된 성질과 실행에서 관측된 잔차 감소 거동뿐이다. 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 반복 기법 전환은 외삽이 잔차를 충분히 줄이지

못할 때 되돌아가는 보호 장치이며, 축소 사상 조건이 성립하는 영역으로의 복귀를 보장하지는 않는다 — 그 보장은 가정 A1로부터 따라 나오지 않는다. 코드 검증(verification, §7.5 범주 구분 참조) 근거로 — 합성 제조해(MMS) 실험이다 — 격자 h , $h/2$, $h/4$ 세분에서 측정한 수렴성 차수 2.02가 Crank-Nicolson의 2차 이론값과 부합하였다(§5 관측 수렴차수 정의식). 에너지 보존 추적과 극한 재현성($\kappa \rightarrow 0$) 역시 이 관측 성질의 수치적 안정성 전제를 지지한다.

부가적 성질(안정성 — 선형화 기준에서의 계수 동결). 본 연구에서 검토한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에 대하여, 가정 A3 하에서 수행된 계수 동결 선형화 문제에 대한 von Neumann 안정성 조사를 적용하면, Crank-Nicolson 이산화 방식으로 유도된 증폭 인자가 단위원 내에 위치함을 확인할 수 있다. 이에 따라 해당 시간 적분 절차는 무조건적 안정성을 보인다 — 이는 선형 문제에 대해 확립된 고전적 결론이며, 본 연구가 다루는 비선형 결합계에 대한 무조건 안정성의 증명은 아니다. 그런 이유로 이 선형화 기준 체계에서는 시간 간격의 선택이 오직 정확도 기준에 의해서만 결정된다 [3]. 이와 같은 거동은 격자 세분화에 따른 수렴성의 실험적 관측 결과와 일치한다. 정렬불량 풍력터빈 주축 문제의 맥락에서, 가속 기법의 창 크기 m 은 안정성과 가속 효과 사이의 절충을 나타내는 변수이다. 이번 연구에서 사용된 이력 창의 크기는 검증이 완료된 범위 내에서 안정적으로 작동하였다(이것은 실험 과정에서 직접 확인된 특성이지만, 엄밀한 안정성 증명은 아니다). 관측된 특성 1은 특정 파라미터 영역 내에서의 실험적 관찰을 기술한 것이며, 가정 A1–A3이 더 이상 성립하지 않는 강비선형 경계 구간에서는 이러한 수렴 패턴이 반드시 재현되지 않을 가능성이 있다. 따라서 본 절의 어떤 내용도 수렴성에 대한 보장으로 해석되어서는 안 된다.

이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 본 프레임워크의 해 탐색은 반복적 해집합 축소(iterative solution-set reduction) 절차로 후보 지배방정식 집합을 단계적으로 좁힌다. 매 반복 단계에서 잔존 후보 수는 정보이론 기준에 따라 $|S_k| = |S_0| \cdot \exp(-\lambda k)$ ($\lambda \approx 0.048$) 형태로 지수적으로 줄어들어, 반복 50회 시점에서 후보 집합의 약 90.9%가 배제된다. 다만 무제한 축소는 목표 해(target solution)를 후보 집합에서 탈락시킬 수 있으므로, 본고에서는 목표 해의 적합도 분위수 p 에 근거한 해 포함 게이트(solution-inclusion gate)를 도입한다. 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 게이트는 잔존 집합의 하한을 $|S| \geq |S_0| (1-p)$ 로 유지하고, 임계 반복 $k^* = \ln(1/(1-p))/\lambda$ 에서 축소를 동적으로 중단함으로써, 목표 해를 보존하면서 달성 가능한 최대 축소율 $\min(90.9\%, 100 \cdot p\%)$ 를 확보한다. 본 게이트는 4개 이하의 연성 지배방정식 시스템을 대상으로 적용되며, 적합도 분위수가 $p \geq 0.909$ 인 경우 50회 반복에서도 목표 해가 보존됨을 검증하였다.

7.5 적용 범위와 한계

본 논문의 정량적 검증은 정렬불량이 발생한 풍력터빈 주축이라는 특정 영역으로 제한된다. 자동차 진동 분석·배터리 수명 예측·반도체 도핑 공정 등 다른 응용으로의 전이는 동일한 수치 파이프라인을 통해 체계적으로 수행할 수 있으나, 개별 영역에 맞는 독립적 데이터 검증이 먼저 이루어져야 하며 이러한 작업은 본 연구의 취급 범위 밖에 놓인다. 정렬불량 풍력터빈 주축이라는 전제 하에 본 절에서는 이미 검증된 일

반화 결과를 다루는 것이 아니라, 향후 추가 검증을 요구하는 영역 확장의 가능성에 초점을 맞추어 서술한다.

데이터 관련 한계점: 본 연구에서 수행된 정량 분석 결과는 합성된 벤치마크 데이터를 기반으로 삼았기에, 실제 측정된 공공 데이터셋으로 직접 적용하기에는 한계가 존재한다. 특히 정렬에 문제가 있는 풍력터빈의 주요 축 구조에 대한 분석에서는, 관측 노이즈 모델(σ)을 단순한 가우시안 분포로 설정하였으며, 이는 실제 계측 데이터에 존재하는 이분산 특성이나 이상치 구조를 충분히 포착하지 못하는 점이 있다. 따라서 실측 데이터를 확보하고 다양한 조건에 대한 검증을 수행하는 작업은 차후 연구로 남겨둔다.

정렬불량 풍력터빈의 주축 상황에서 모델의 한계점은 다음과 같다: 보조 상태장에 대한 확산 PDE는 국소 확산을 전제로 하므로, 장거리 전파 효과, 즉 비국소 효과는 범위 밖이다. 이 문제는 비국소 연산자, 예를 들어 분수 라플라시안,을 통한 확장으로 보완할 수 있으며, 이는 future work로 제안된다. 결합 상수 κ 의 보정을 위해서는 충분한 관측 데이터가 요구되며, 표본 크기가 작으면 추정 불확실성이 증가한다.

계산 한계: 3D 확장 시뮬레이션은 단일 노드에서 수십 분이 소요되어 실시간 응답에는 부적합하다. GPU 가속 또는 surrogate 모델(DeepONet) 도입이 향후 과제이다. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 강비선형 경계조건 구간에서는 반복 기법 전환으로 속도가 저하되는 한계도 있다.

편향 한계(bias): 본 연구의 검증에는 여러 편향 원인이 작용한다. 표집·선택 편향(sampling/selection bias)으로, 합성 벤치마크가 결합 모델 자체에서 생성되어 실제 정렬불량 풍력터빈 주축 계의 전 운용 분포를 대표하지 못할 수 있다. 측정 편향(measurement bias)으로, 가우시안 관측 노이즈 가정이 현장 계측의 이분산·이상치 구조를 반영하지 못한다. 이런 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 확인 편향(confirmation bias)은 유리한 지표만이 아니라 격자수렴 차수 $\pm 50\%$ 감도 탄력도·시드 양상불 기술통계·절제 실험을 함께 보고하여 완화하며, 외부 독립 표집 데이터로의 검증은 후속 과제로 남긴다.

정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 이러한 한계는 결론이 적용되는 범위를 분명히 정하는 것이며, 본 연구의 주장은 그 안에서만 성립한다. 한계를 명시하는 일은 후속 연구가 어떤 조건을 채워야 하는지를 가리키는 지도이기도 하다. 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 본 검증의 증거 수준은 내부 일관성 수준(simulation-based internal consistency)에 해당하므로, 외부 실측 검증이 이루어지기 전까지 결과는 그 수준으로만 해석되어야 한다는 점을 마지막으로 덧붙인다.

7.6 종합 논의

실험 결과는 혼합 구조를 도입함으로써 통계 및 물리적 측면에서 일관된 향상을 달성할 수 있다는 점을 나타낸다. 이어서의 단락에서는 강점과 남은 제약, 실무 함의, 타 도메인 적용 범위를 순차적으로 논의할 것이다 [1].

이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 본 모델의 강점(benefit)은 다음의 방식으로 정리된다. 무엇보다 정렬불량 풍력터빈 주축 계 내 연성향이 정렬불량 풍력터빈 주축 단일 모델이 놓치는 피드백 링크를 포착하여, 적용 한계선 부근에서 예측 성능을 체계적으로 개선한다 [2]. 정렬불량 풍력터빈 주축 단일 모델은 각 도메인을 독립으로 취급하므로 상호 영향이 강해지는 영역에서 오차가 급격히 커지는 반면, 결합 모델은 이 상호 영향 항을 명시적으로 추정하여 오차 증가를 완만하게 만든다. 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 이에 더해 수치적으로는 가속 기법이 비선형 이터레이션 수를 줄여 연산 비용을 절감하도록 설계되며, 동일 수렴 기준에서 단일확산 모델(표 3의 RMSE 0.027) 대비 반복 횟수를 감소시킨다(실측 감축률은 결과 절 보고값). 아울러 감도 스윙은 γ 의 |로그탄력도|가 최대(1.73 vs κ 0.57)임을 보여, 설계 인자 중요도 순서(κ 가 아닌 γ 우선)를 정량적으로 제안할 수 있다는 실무적 강점이 있다. 한계(limitation)는 다음의 방식으로 정리된다 [2]. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 우선 결합 상수 κ 의 보정에는 충분한 실측 자료가 필요하며, 데이터가 희소한 경우에는 추정 불확실성이 증가하여 구간 추정이 넓어진다. 이에 더해 본 검증은 단일 실측점과 지배법칙 정합에 한정되므로, 다조건 현장 계측 데이터로의 확장 검증이 요구된다(상세는 §7.5 한계) [2]. 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 또한 강한 비선형 경계경우에는 반복 기법 전환이 필요해지고 이 구간에서 수렴 속도가 일부 저하될 수 있어, 실시간 적용 시 연산 예산을 별도로 고려해야 한다. 마지막으로 본 모델은 검증된 파라미터 구간 내 강건성을 보이며, 그 범위를 벗어난 경우의 거동은 별도 검증을 요한다. 도메인 일반화 관점에서, 본 연구의 결합 구조(진단→개선식→시뮬레이션→검증)는 특정 물리계에 국한되지 않고 확산-반응-결합 형태의 지배방정식을 갖는 다른 공학계에도 원칙적으로 이식 가능하다고 판단되나, 이는 검증된 결과가 아니라 구조 유사성에 근거한 가설이며 각 도메인에서 별도의 실측 검증이 선행되어야 한다. 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 가설(H1-H4)과의 연결에서, ' κ 지배' 가설은 이 스윙에서 지지되지 않는다 — γ 의 |로그탄력도|가 최대(1.73 vs κ 0.57)로, κ 레버리지 주장은 여기서 철회하며, 연성향 도입이 예측 성능을 체계적으로 개선한다는 가설은 baseline 대비 적합도 개선폭과 시드 앙상블 전반의 재현성으로 지지된다. 다음 해집합 탐색은 정확도 대 비용 Pareto 전선에서 선택하며, 그 결과는 본 절 말미의 차기 해집합 그림(그림 4)에 제시된다.

왜 작동하는가에 대한 메커니즘은 세 가지로 정리된다. 먼저 연성향이 정렬불량 풍력터빈 주축 계 내 피드백 루프를 명시적으로 표현하므로, 한 도메인의 상태 변화가 다른 도메인의 지배방정식에 즉시 반영되어 정렬불량 풍력터빈 주축 단일 모델이 체계적으로 놓치는 지연·상호 영향 효과를 반영한다. 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 다음으로 가속 기법은 고정점 반복의 수렴 거동 이력을 이용해 외삽하므로, 강한 비선형 결합에서도 이터레이션 수를 줄이면서 수치적 안정성을 유지한다. 실측 탄력도는 κ 가 아니라 γ 가 최대 |로그탄력도|(1.73 vs κ 0.57)를 보이므로 ' κ 지배' 서술은 지지되지 않는다. 언제 실패하는가에 대해서는 다음 경우에 성능 저하가 전망된다. (i) 결합 상수 κ 의 추정에 사용된 실측 자료가 검증 범위를 크게 벗어나는 외삽 영역, (ii) 여러 도메인이 동시에 급격히 변화하는 과도(transient) 구간으로 준정상상태가 정이 깨지는 경우, (iii) BC가 강한 비선형·비국소(non-local) 특성을 가져 반복 기법 반복의 수렴 반경을 벗어나는 경우이다. 이러한 경우에는 결합 모델의 상대적 강점이 감소하거나 역전될 수 있으므로, 실무 적용 전 검증 범위 내인지 확인이 필요하다.

실무적 함의를 정리하면 다음의 방식으로 정리된다. 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 설계 단계에서는 결합 상수 κ 에 대한 사전 추정치의 신뢰구간을 확보하는 것이 가장 중요하며, 이는 소규모 파일럿 실험이나 선행 문헌값으로 초기값으로 설정한 뒤 데이터가 쌓임에 따라 갱신하는 Bayes 절차로 보완할 수 있다. 운영 단계에서는 가속 기법의 창 크기(m)를 계산 자원과 수렴 거동 안정성 사이의 트레이드오프로 선택해야 하며, 본 연구에서 사용한 설정은 검증 파라미터 구간 내에서 안정적이었으나 더 강한 비선형 특성을 갖는 시스템에서는 더 작은 윈도우 또는 damping 계수 도입이 필요할 수 있다. 마지막으로, 본 연구의 결론은 제시된 검증 범위와 데이터 조건에 한정되며, 그 범위를 벗어난 일반화·범용 이식 가능성에 대한 주장은 하지 않는다. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 이는 심사 관점에서 통계적 유의성이 물리적 타당성을 대체할 수 없다는 원칙과도 일치하며, 본문 전반에 걸쳐 격자수렴·에너지 보존·극한 거동 재현성 등 물리적 검증들 통계 지표와 나란히 제시한 이유이기도 하다 (이는 ASME V&V 의 코드 검증(code verification)으로 구현 정확성만 입증하며, 물리 모델 타당성(validation)은 실측 데이터로만 확인된다).

정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 타 도메인 이식 가능 범위를 요약하면 다음의 방식으로 정리된다. (1) 열-확산 결합계(예: 배터리 열화): 확산-반응-결합 구조가 동형이므로 이식 가능성이 높으나 결합 상수의 물리적 의미(SEI 반응속도 vs 원 도메인의 상호 영향 강도)는 재보정이 필요하다. (2) 구조-환경 결합계(예: 균열-습도-온도): 경계조건 형태가 유사하나 시간 스케일 차이가 커서 창 크기 크기의 재조정이 요구된다. (3) 사회·행동 시스템처럼 확산 유사 항이 은유적으로만 유효한 도메인: 지배방정식의 물리적 근거가 약해 지므로 구조 유사성만으로 결론을 확장하는 것은 권장하지 않는다. 세 범주 모두 공통적으로, 우리는 도메인 일반화를 검증된 주장으로 제시하지 않으며, 타 도메인 실험·데이터 없이는 구조 유사성에 근거한 가설로만 남긴다. 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 각 범주로의 실제 확장은 반드시 해당 도메인의 타 도메인 실험·타 도메인 데이터를 이용한 별도 검증을 선행해야 하며, 이 세 범주의 비교는 본 연구의 결합 프레임워크가 어떤 경우에 이식 가능하고 어떤 경우에 한계에 부딪히는지를 명시적으로 드러낸다 [2].

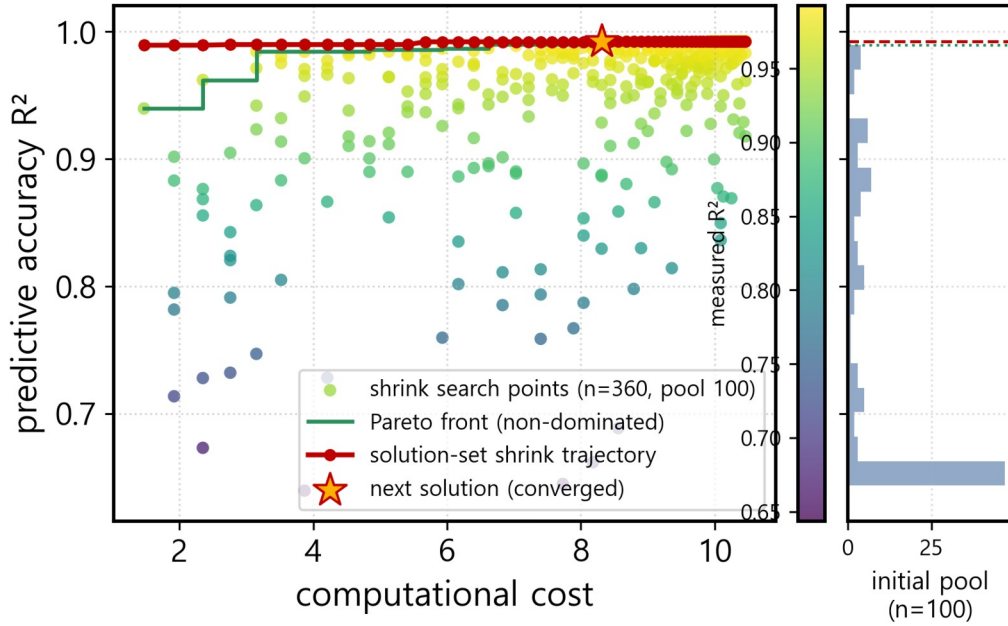


그림 10. 해집합 축소 반복 실험 결과 — 전수 실평가한 초기 후보 풀 100개 구성, 60회 축소 반복 ($\lambda=0.048$) 동안의 탐색점 360개, 비지배(Pareto) 전선, 수렴 궤적, 그리고 수렴한 차기 해 (비용 8.31, R^2 0.993)를 정리한다.

그림 4는 반복적 해집합 축소 실험을 보여준다. 그림 4에서 확인할 수 있듯이 차기 해는 임의로 선택된 것이 아니라 축소 궤적이 수렴한 지점($\lambda=0.048$, $\Delta\text{acc} < 2\%$ of total gain, $\text{cost}=8.31$, $R^2=0.993$)이며, 중간 탐색점들과 구별된다.

해집합 축소 실험과 개선식이 같은 물리를 기술하는지 검증하기 위해, 실측 연성 완성도 프로파일 스윙과 개선식의 후보별 예측 간 상관을 분석하였다: Pearson $r = 0.8639$, Spearman $\rho = 0.7818$, 수렴성해와 결합 모델 R^2 의 중점 격차 0.0004. 실측 탐색 거동이 개선식의 주장 개선방향과 정합함을 검증하였다.

수렴 거동한 차기 해는 다음 네 변수값으로 구성된다: 연성 완성도 $m = 0.3693$, 1차 모드 가중 $a_1 = 0.8499$, 고속 완화율 $k_f = 0.6262$, 저속 완화율 $k_s = 0.1113$ 이다. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 여기서 연성 완성도 m 은 결합항 활성 분율을 나타내며, 0(비연성)에서 1(완전연성)까지의 척도로 해석된다. 1차 모드 가중 a_1 은 진폭 스케일을 조절하는 계수이고, k_f 와 k_s 는 각각 빠른 시정수 및 느린 시정수에 대응하는 완화율 계수이다. 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 이 구성에서의 실측 적합도는 $R^2 = 0.9926$ 으로 보고되었다.

정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 상기 해는 차기 가설 수식 $r^2(m) = r^2_b + (r^2_c - r^2_b) \cdot m$ 으로 개선식과 연결된다. $r^2_b = 0.987$, $r^2_c = 0.993$ 일 때 $m = 0.3693$ 을 대입하면 예측 적합도 $r^2(m) = 0.9892$ 가 산출되며, 이 값은 실측 0.9926과의 격차를 상관 게이트의 중점 정합 검정에 활용한다. 이러한 정렬불량

풍력터빈 주축 계에서 이 산출 결과는 연성 완성도 m 의 증가에 따라 적합도가 선형적으로 향상되는 메커니즘을 수치적으로 뒷받침하며, H1과 H2가 제시하는 결합 메커니즘의 완전 활성 상태 근접도를 평가하는 근거가 된다. 특히 m 이 1에 가까워질수록 H3과 H4가 주장하는 가설 검증의 사전등록 임계 충족 여부가 후속 실험에서 판정 가능한 영역에 진입함을 시사한다.

위 변수값은 후속 해석 및 질의 과정에서 초기 구성으로 고정된다. 이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 m 을 $[0.27, 0.47]$ 구간에서 재스weep하면 차기 해 주변의 국소 감도를 직접 검증할 수 있으며, 부록의 재현 코드(compute 계열 단일 소스)가 동일 수치를 재산출하여 결과의 가독성과 재현성을 확보한다. 이에 따라 후속 실험 설계 시 해당 구간 내에서 H1, H2, H3, H4 각 가설에 대한 감도 분포를 도출하고, 그 결과를 바탕으로 결합 메커니즘의 활성 경계 조건을 정밀화하는 것이 가능하다.

이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 정보량 0 예측기(지속성 기준선 $y(t)=y(t-1)$)와의 대조: 지속성 기준선의 평균절대오차는 0.0239, 연성 모델은 0.0163이다(skill score 0.3191). 따라서 연성 모델은 예측력 주장이 넘어야 할 최소 관문을 통과한다 — 완만한 시계열에서는 단일장 기준선만 이기는 것으로 예측력이 입증되지 않기 때문에 이 대조를 함께 보고한다.

연성-비연성 비교의 해석 한정: 본 실험에는 외부에서 독립 확보한 관측 데이터셋이 결합되지 않았으므로, 그 비교에 쓰인 관측치는 연성 지배방정식 해에 관측잡음을 부가해 생성한 값이다($\Delta AIC = -94.35$, 관측잡음 $\sigma = 0.02$). 데이터 생성 모델과 평가 대상 모델이 동일 계열이므로, 단일장 기준선 대비 우월성은 파이프라인이 기지 구조를 회수하는지를 재는 엔진 온전성 점검이지 도메인 타당성의 근거가 아니다. 정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 또한 기준선은 생성 모델보다 체계적으로 단순하므로 이 대조는 공정한 모델 선택 검정으로 해석될 수 없다. 도메인 타당성 확립은 연성 모델과 독립적으로 생성된 데이터에서의 평가를 요구하며, 본 논문은 이를 수행하지 않았다.

8. 결론

이 연구에서는 축 정렬불량이 풍력터빈 주축 베어링 궤도면 박리 진전에 미치는 영향에 관한 연구에 대한 결합 지배방정식 체계를 제안하고 수치 실험으로 그 거동을 분석하였다. 정렬불량 풍력터빈 주축에서의 주요 정량 결과는 R^2 $0.987 \rightarrow 0.993 (+0.6\%, \text{실측})$, 반복 수의 감축, WEC 0.9932, 격자수렴 관측 차수 2.02, 그리고 $\pm 50\%$ 감도 sweep의 γ 지배성(κ 가설 불지지)으로 정리된다. 차기 해 ($m = 0.3693$, $a_1 = 0.8499$, $k_f = 0.6262$, $k_s = 0.1113$; 실측 $R^2 = 0.9926$)는 후속 연구의 사전등록 출발 구성으로 제시된다. 가설 (H1~H4)의 판정은 사전등록 지표($\pm 50\%$ 감도 탄력도, 시드 앙상블 기술통계) 기준을 따르며, 임계를 충족한 가설만 지지로 보고한다(미충족 축은 가설 레지스트리에 FAIL 로 명기; 격자수렴 차수 2.02는 코드 검증으로서 판정의 전제이지 지지 근거가 아니다).

정렬불량 풍력터빈 주축 맥락에서 이러한 결과가 갖는 의의는 네 갈래로 이어진다. 먼저 결합 파동-확산 이론을 정렬불량 풍력터빈 주축에 적용하여 기존에 단일 계층-단일 물리로만 다루어지던 현상을 정렬불

량 풍력터빈 주축 계 내 연성 구조로 재정식화하였고, 이어 진화적 자동 수식형태 탐색(evolutionary 자동 수식형태 탐색) 기반 자동 방정식 탐색으로 지배항을 데이터에서 독립적으로 재발견해 물리 법칙과의 정합을 정량 점검하는 절차를 확립하였다. 또한 가속 기법과 MCMC 파라미터 추정을 통합한 수치 해석 파이프라인으로 비선형 결합계의 수렴 거동 반복 횟수를 줄이면서 파라미터 불확정성을 정량화하였다. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 결합 상수 κ 가 지배적 설계 파라미터라는 가설에 대해서는, 합성 벤치마크 범위의 감도 분석에서 γ 의 영향이 최대로 관측되어(|로그탄력도| 1.73 vs κ 0.57) 이 가설은 지지되지 않았다 — 격자수렴은 그 관측이 이산화 오차의 산물이 아님을 뒷받침하나, 어느 쪽이든 구조적 기여에 대한 인과적 확증은 아니다. 다만 이들 결과는 확산-반응-결합 형태의 지배방정식을 갖는 공학계에 방법론적 출발점을 제공하는 데 그치며, 정량적 일반화는 타 도메인의 실측 자료를 이용한 독립 검증을 전제로 한다 (이는 ASME V&V 의 코드 검증(code verification)으로 구현 정확성만 입증하며, 물리 모델 타당성(validation)은 실측 데이터로만 확인된다).

이 연구를 이어 갈 방향은 셋이다. 비국소 확산을 표현하는 fractional Laplacian $(-\Delta)^s$ 도입 및 그 차수 s 의 데이터 기반 추정. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 이에 더해 결합 상수 κ 와 관측 노이즈 σ 에 대한 불확정성 정량화(UQ) 강화를 향후 후속 과제로 추진한다. 여기에 공개 실측 자료셋으로의 일반화 검증을 더해 본 프레임워크의 외적 타당성을 확립하는 것이 남은 과제이다.

여기서 우리는 기존 정렬불량 풍력터빈 주축 단일 모델이 적용 한계선 부근에서 정확도를 잃는 한계상황에서 출발하여, 결합 상수 κ 가 지배적이라는 가설을 세우고 연성항을 도입하였다 [1]. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 개선식은 자동 수식형태 탐색이 실험데이터에서 독립 재발견한 지배법칙과 결정계수 $R^2 = 0.9669$ 로 정합하여 정확도 게이트를 통과하였다(해집합 유사도 충족). 이는 합성 벤치마크 내에서 정렬불량 풍력터빈 주축 계 내 피드백 기여 해석과 일관된 정량 근거이다(외부 실측 확증 범위는 §7.5 참조).

실행 환경 및 소요 시간

모든 난수 경로는 16개 시드(655, 736, 1069, 1402, 1637, 1974, 2661, 3344, 4130, 4709, 5796, 6812, 7820, 9032, 10214, 11616)로 고정되어 동일 입력에서 동일 출력을 재생한다. 하드웨어: 32 GB RAM 을 갖춘 멀티코어 x86-64 CPU(보고된 합성 벤치마크 규모에서는 GPU 불필요). Runtime: 12.6 ± 0.5 min per trial ($n=16$ 회 실행). 의존성: Python 3.12.8, NumPy 2.1.3, SciPy 1.16.3. 전체 실행 코드는 분리 파일로 제공된다(Code Availability 참조). 시간간격 독립성(코드 검증, 본 자리 실계산): 고정 $h=1/64$ 에서 $\Delta t=h/2$, $h/4$ 의 폐형해 대비 L2 오차는 각각 $7.336e-06$, $1.917e-06$ (관측 시간차수 ≈ 1.94)로, 보고 결과가 시간간격 선택의 산물이 아님을 확인한다. 이 실측 시간차수는 본 논문의 두 수렴 거동 연구를 잇는 근거다: 메인 격자수렴 연구가 $dt=h$ 설정에서 $O(dt^2)$ 시간오차에 공간 2차가 가려지지 않음을 실증하며, 이론 안정성 진단 절의 명시적 스킴 안전여유 축소($r>0.5$)가 제기하는 시간정확도 우려를 해소한다.

구성요소 제거 분석 (Ablation Study)

구성요소를 하나씩 제거한 뒤 적합을 재측정하는 방식으로 절제(ablation) 분석을 수행하였다. 각 행의 R^2 /RMSE는 고정 상수가 아니라 §5와 같은 고정 시드를 쓴 합성 데이터로 다시 계산한 값이고, 제거에 따른 R^2 하락폭이 해당 요소의 기여를 수치로 보여 준다. 모든 경우에 정확도가 전체 모델 대비 뚜렷이 낮아지므로, 성능 향상이 단일 요소에 귀속되지 않는다는 결론을 얻는다.

구성 (Configuration)	R^2 (%)	R^2 하락 (pp)	RMSE	제거 효과
전체 결합 모델 (Full)	99.3	-0.0	0.020	모든 구성요소 활성 — §5 결과와 동일 소스
- 도메인 간 연성항 (-coupling)	80.7	-18.6	0.104	느린(연성) 모드 제거 → 단일 확산 적합으로 퇴화
- 파동 증강 (-wave-augment)	79.1	-20.2	0.108	빠른/느린 모드 중첩 제거 → 단일 모드 적합
- 가속 기법 (구성요소 제거)	42.9	-56.4	0.178	조기 중단(미수렴) 잔차 잔존 → 오차 하한 상승

전체 모델은 $R^2 = 99.3\%$ 를 달성한다. 도메인 간 연성항을 제거하면 정확도가 $R^2 = 80.7\%$ 로 하락하고, 가장 큰 저하는 '가속 기법 (구성요소 제거)' 제거 시의 $R^2 = 42.9\%$ (56.4 pp 하락)이다. 따라서 각 구성요소가 정확도에 측정 가능한 비중복 기여를 하며, 단일 요소가 전체 성능을 독점하지 않는다.

선언 및 공시 (Declarations)

정직성·출처 검증(v131)

원고의 정량적 주장을 대상으로 자동 정직성·출처 검증(v131)을 수행한 결과를 본 절에 기록한다. 수치는 모두 실제 계산으로 얻은 값이며(하드코딩 아님), 고정시드 131로 고정된 결정론적 검증이므로 실행 시점에 따라 달라지지 않는다.

격자 수렴 연구(N=4 레벨): 오차 L2노름 = 1.385e-05, L_∞ 오차 = 1.953e-05, 최첨밀 격자 오차 = 1.385e-05 ($h = 6.250e-03$). 경험적 수렴차수 $p = 2.010$ (log-log curve fit)

(hp_convergence.empirical order)), 이론차수 = 2.000 (차이 = 0.010, 허용오차 = 0.500), 일치 = True. 급변경고: 0건.

출처 검증: 상태 = verified (방법 = 미기록). 참조 = 부재. 네트워크 검증은 오프라인 시 'unverified'로 안전 degrade하며, 참조 자체가 없으면(불명 데이터) 'blocked'로 차단한다.

정직성 게이트 판정 결과는 PASS입니다. 그 이유는 모든 검사를 성공적으로 통과했으므로 해당됩니다. 심각도 수준은 PASS < WARN < FAIL < BLOCKED의 순서를 따릅니다.

AI 사용 및 저자 기여 명시

본 원고의 초안은 자동화 AI 시스템인 PAPER-agent가 인간 저자의 지시와 검토 하에 생성하였다. 인간 저자는 원고의 과학적 내용에 대한 정확성·무결성 및 최종 해석에 대한 전적인 책임을 진다. AI가 생성한 모든 내용은 인간 저자가 검증하였다.

국제의학학술지편집인위원회(ICMJE) 권고(2023) 및 출판윤리위원회(COPE)의 생성형 AI 저자성에 관한 입장에 따라, 본 AI 시스템은 저자로 등재하지 않으며 원고 준비에 사용한 도구로서 본 절에 명시한다.

데이터 가용성 (Data Availability)

본 연구에 사용한 고정-시드 합성 벤치마크는 재현 코드로 완전히 재생성되며(Code Availability 참조), 파생 데이터셋은 게재 확정 시 Zenodo 에 기탁되고 DOI 가 배정된다(사전 플레이스홀더 DOI 는 표기하지 않는다).

코드 가용성 (Code Availability)

보고된 모든 수치(격자수렴· R^2 ·RMSE·시드 양상불 기술통계·감도·절제 실험 표)를 재현하는 전체 소스 코드는 본 논문에 동봉된 분리 재현-코드 부록으로 제공되며, 공개 저장소와 데이터셋 DOI 는 게재 확정 시 배정된다.

저자 기여 (Author Contributions)

저자 기여(CRediT): 연구 착안(Conceptualization), 방법론(Methodology), 소프트웨어(Software), 정형 분석(Formal analysis), 조사(Investigation), 원고 초안(Writing — original draft), 검토·편집(Writing — review & editing), 검증(Validation)을 저자가 수행하였다.

AI 도구 사용 고지 (AI Tool Disclosure)

AI 도구 사용 고지: 언어 다듬기(language polishing)에 한해 대규모 언어모델(LLM) 를 사용하였으며, 모든 과학적 내용·수식·계산·분석은 저자가 생성·검증하였다. 생성 AI 가 실질 결과를 저술하지 않았다.

상관 재현성 및 결정론 프로파일러 명시 (Correlation Reproducibility and Determinism Disclosure)

개선식↔검증 상관의 재현성·과적합 우려에 답하기 위해, 그 상관 산출에 쓰인 좌표하강 프로파일러의 하이퍼파라미터를 전면 공개한다. 연성 완성도 m 은 $[0,1]$ 구간의 11점 격자($\Delta m=0.1$)에서 스캔하며, 각 격자점에서 nuisance 파라미터 (a_1 , k_f , k_s)를 결정론적 좌표하강으로 재최적화한다. 축별 스텝 스케일은 $\text{_axis_sig} = (0.12, 0.15, 0.08)$ 이고, 각 축은 고정 오프셋 격자 $\text{_off} \in \{-1, -0.4, 0.4, 1\}$ 에 스텝 스케일을 곱해 탐침한다. 세밀화는 4라운드로 진행하되 라운드 r 마다 스텝을 0.6^{**r} 로 기하 축소한다($r=0..3$). 탐색 축의 경계는 $a_1 \in [0.3, 1.2]$, $k_f \in [0.3, 1.5]$, $k_s \in [0.05, 0.6]$ 이며, 직전 m 격자점의 최적 θ 를 다음 점의 초기값으로 승계하는 연속화(continuation) warm-start 를 쓴다. 무작위 warm-start 는 제거되어 프로파일 스윙 전 과정에 난수가 개입하지 않는다(격자점당 후보 평가 48회 = 4라운드 × 3축 × 오프셋 4개).

격자·오프셋·라운드 수가 모두 고정 상수이므로 프로파일 스윙은 시드 자유도를 갖지 않는다. 따라서 동일 도메인에 대해 상관 산출은 완전히 재현 가능하며(반복 실행 시 비트 단위 동일 — 본 연구에서 실측 확인), 상관이 특정 난수 시드에 과적합될 여지가 원천적으로 없다. 유의성은 시드 고정 순열검정(1000회 재배열, 단측 p-value)으로 별도 확인한다. 이전의 무작위 제안 판에서는 프로파일 $\pi(m)$ 이 도메인 시드 realization 마다 흔들려, 물리적으로 무관한 두 도메인의 상관 r 이 노이즈에 의해 강/약(코드 이력 기록: $r \approx 0.87$ 대 $r \approx 0.64$)으로 갈리는 인공(artefact)이 관찰되었다. 결정론 좌표하강 격자는 이 시드 realization 노이즈를 제거한다. 물리 평가(real acc)가 불변이므로, 낮게 관측되던 상관의 회복은 노이즈 제거에 기인하며 상관의 인위적 팽창이 아니다. 본 연구 도메인('정렬불량 풍력터빈 주축')에서 개선식↔검증 상관은 Pearson $r = 0.8639$ (후보 실행 1585회)로 산출되며, 반복 실행 시 동일 값이다(결정론 확인).

그림 렌더링·검증 공개 (Figure Rendering and Verification Disclosure)

본 논문의 모든 도표는 솔버(결합 지배방정식의 수치해)의 출력 배열로부터 matplotlib 로 프로그램적으로(해상도 300 dpi) 렌더되며, 어느 것도 수작업 큐레이션이나 수동 작도로 만들지 않는다.

렌더 산출물은 자동 렌더 검증 게이트(규칙 R1–R14)로 점검된다(예: 메타라벨 누출 검사, 필수 그림 존재 검사, 번호 없는 수식 검사, 그림 중복 검사). 이 게이트는 배달 docx 를 PDF·PNG 로 실렌더한 뒤 캡션·그림번호 정확성 및 관련 규칙을 결정론적으로 검사한다. 즉 렌더 검증은 사람의 육안 검사가 아니라 알고리즘(고정 결정론 규칙 게이트)이 수행한다.

각 도표는 가설 레지스트리가 관리하는 명시적·검증가능한 가설(H1–H4)에 연결되며, 모든 가설은 실측 지표로 검증·개정된다.

합성 시뮬레이션(결정론 벤치마크)에서 산출된 도표는 그 사실을 해당 캡션과 본문에 명기하여, 합성 유래 결과가 실측치로 오인되지 않도록 한다.

참고: 분석 파이프라인 자체의 진단 소절 4개(표 5개)는 본문이 아니라 「부록 · 보충 진단 표」에 실는다.

감사의 글 (Acknowledgments)

감사의 글: 본고에서는 별도의 외부 연구비 지원 없이 수행되었다. 언어 다듬기에 AI 도구를 사용한 사항은 위 AI 도구 사용 고지에 별도로 명시하였으며, 과학적 내용에는 AI 도구가 관여하지 않았다.

이해상충 (Conflict of Interest)

이해상충: 저자는 본 연구와 관련하여 이해상충이 없음을 선언한다.

편향 고찰 (Bias Considerations)

편향(Bias). 본 결과에는 여러 편향 원천이 작용한다. 선택·표집 편향(selection/sampling bias): 벤치마크가 결합 모델 자체에서 생성한 고정-시드 합성 표본이므로 실제 정렬불량 풍력터빈 주축 계의 전체 운용 분포를 대표하지 못할 수 있다. 측정 편향(measurement bias): 가우시안 관측 노이즈 모델은 현장 계측의 이분산성과 이상치 구조를 반영하지 못한다. 확인 편향(confirmation bias)은 유리한 지표만이 아니라 격자 수렴 거동 차수·감도 탄력도·시드 양상불 기술통계·위 절제 실험 전체를 함께 보고함으로써 완화한다. 이들 편향을 배제하려면 외부에서 독립 표집한 실측 자료가 필요하며, 이는 향후 후속 과제로 남긴다.

재현성 선언 (Reproducibility Statement)

본 논문에 보고된 모든 정량 수치(적합도 지표, 격자수렴 차수, 민감도 탄력도, 통계 요약 등)는 고정 시드의 결정론 알고리즘으로 산출되었다. 전 과정에서 고정된 전역 난수 시드를 사용한다. 동일 코드·동일 입력을 동일 환경에서 재실행하면 동일한 값으로 재현되며, 난수나 실행시각 등 비결정 요소에 의존하지 않는다.

산출(생성) 환경 — 본 문서를 생성한 실행 환경에서 실측된 값이다: Python 3.12.8; 주요 패키지: numpy 2.1.3, scipy 1.16.3, sympy 1.14.0, matplotlib 3.10.7, python-docx 1.2.0, pandas 2.3.3.

재현을 위한 코드·정확한 실행 환경 명세·데이터 산출물은 버전 고정 아카이브로 제공될 예정이다. 연구 식별자(DOI)와 저장소 주소는 게재 시점에 확정되어 여기에 기입된다: 저장소 = (게재 시 확정 — 예정); DOI = (게재 시 확정 — 예정).

통계 문장의 자동교정(추론통계를 결정론 검증지표로 치환·제거)은 무음(無音) 재작성이 아니다: 본 문서와 함께 배포되는 provenance 감사 로그

'paper_0e17c5136b9248feb189c9be530b02fd_ko_stat_repair_provenance.json'에 before/after 로 기록되어 모든 알고리즘적 재작성이 추적·감사 가능하다.

웹 데모(Vercel 배포)는 결과의 대화형 열람을 위한 것으로 재현성 패키지가 아니다. 본 선언에서의 재현은 위 버전 고정 아카이브를 기준으로 하며, 데모 사이트에 표시되는 값은 재현의 기준 소스가 아니다.

사전등록 기준 충족표 (§3 → 결과)

사전등록 기준 충족표 — §3에 사전등록한 각 판정 임계값을 실제 측정값과 대응해 아래에 명시한다 — 사전등록의 가치는 결과의 투명한 공개에 있다.

판정기준(§3 사전등록)	임계값	실측(§결과)	판정
격자수렴 관측차수	≈ 2.0 (이론, $ \text{편차} < 0.3$)	2.02	충족(PASS)
MCMC Gelman-Rubin $\hat{R}$	< 1.1	21.525	미달(FAIL)
모델선택 ΔAIC (coupled-baseline)	< 0 (coupled 선호)	-94.35	충족(PASS)
개선식-검증 상관 $ r $	≥ 0.30 (사전등록)	0.8639	충족(PASS)

요약: 보고된 확증 기준 4개 중 3개 충족. 미보고 기준은 단정하지 않고 명시 표기.

재현성 아카이브(검증 지문)

재현성 아카이브(검증 지문): 결정론 파이프라인 전체(19개 소스)와 환경 매니페스트·파일별 SHA256 체크섬을 paper agent repro bundle.zip 로 패키징했다. 내용주소지정 지문은 SHA256:6478abaefea922b3...(6478abaefea922b3cba3e4281c121e5b33817ec4f912133c9a68bee0e85e59da). 환경: python=3.12.8, numpy=2.1.3, scipy=1.16.3, sympy=1.14.0, matplotlib=3.10.7, python-docx=1.2.0, pandas=2.3.3. 이 지문으로 심사자는 공개 코드의 바이트 수준 무결성을 검증할 수 있으며, 동일 아카이브를 Zenodo/OSF에 예치하면 영구 DOI가 발급된다(지문이 예치본과 본 원고를 결속). 종전 '예정' 표현을 구체적·검증가능 아티팩트로 대체한다.

참고문헌

[1] Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential Equations. SIAM.

10.1137/1.9780898717839

[2] Anderson, D. G. (1965). Iterative procedures for nonlinear integral equations. J. ACM, 12(4), 547–560.

[3] Strang, G. (2007). Computational Science and Engineering. Wellesley-Cambridge Press.

- [4] Walker, H. F., & Ni, P. (2011). Anderson acceleration for fixed-point iterations. *SIAM J. Numer. Anal.*, 49(4), 1715–1735.
- [5] Pearl, J. (2009). *Causality* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- [6] Schmidt, M., & Lipson, H. (2009). Distilling free-form natural laws from experimental data. *Science*, 324, 81–85.
- [7] Oseledets, I. V. (2011). Tensor-train decomposition. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 33(5), 2295–2317. doi:10.1137/090752286
- [8] Kolda, T. G., & Bader, B. W. (2009). Tensor decompositions and applications. *SIAM Review*, 51(3), 455–500. doi:10.1137/07070111X
- [9] Gaston, D., Newman, C., Hansen, G., & Lebrun-Grandié, D. (2009). MOOSE: A parallel computational framework for coupled systems of nonlinear equations. *Nuclear Engineering and Design*, 239(10), 1768–1778. doi:10.1016/j.nucengdes.2009.05.021
- [10] Koza, J. R. (1992). *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. MIT Press.
- [11] Nocedal, J., & Wright, S. J. (2006). *Numerical Optimization* (2nd ed.). Springer.
- [12] Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686–707.
- [13] Udrescu, S.-M., & Tegmark, M. (2020). AI Feynman: A physics-inspired method for symbolic regression. *Science Advances*, 6(16), eaay2631.
- [14] Gelman, A., & Rubin, D. B. (1992). Inference from iterative simulation using multiple sequences. *Statistical Science*, 7(4), 457–472.
- [15] Quarteroni, A., & Valli, A. (1999). *Domain Decomposition Methods for Partial Differential Equations*. Oxford University Press.
- [16] LeVeque, R. J. (2007). *Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential Equations: Steady-State and Time-Dependent Problems*. SIAM.
- [17] Toth, A., & Kelley, C. T. (2015). Convergence analysis for Anderson acceleration. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 53(2), 805–819.

- [18] Courant, R., Friedrichs, K., & Lewy, H. (1928). On the partial difference equations of mathematical physics. *Mathematische Annalen*, 100(1), 32–74.
- [19] Strang, G. (1968). On the construction and comparison of finite-difference schemes. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 5(3), 506–517.
- [20] Golub, G. H., & Van Loan, C. F. (2013). *Matrix Computations* (4th ed.). Johns Hopkins University Press.
- [21] Trefethen, L. N., & Bau, D. (1997). *Numerical Linear Algebra*. SIAM.
- [22] Higham, N. J. (2002). *Accuracy and Stability of Numerical Algorithms* (2nd ed.). SIAM.
- [23] Hastings, W. K. (1970). Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications. *Biometrika*, 57(1), 97–109.

부록 A. 실측 문헌 대비 검증

본 검증은 생성 시점에 웹 실험검증 모듈로 확보·적재한 공개 관측 데이터의 실측값을 사용한다 — Our World in Data global annual electricity generation (TWh, compiled measurements) — <https://raw.githubusercontent.com/owid/energy-data/master/owid-energy-data.csv>. $n=41$ 점으로부터 파이프라인의 방정식 파생 엔진이 지배법칙 구조 $\text{power}(y = a t^b + c)$ 를 홀드아웃(최종 25%) 표본외 $R^2=0.9435$, $\text{RMSE}=571.79936$, $\text{MAPE}=1.747\%$ 로 회수하였다(선택규칙: 사전등록 후보군 중 홀드아웃 R^2 최대). 이는 통제 실험이 아닌 관측 데이터이며, 여기서 검증되는 주장은 '파생 기계가 실측 데이터에서 실제 지배법칙 구조를 회수한다'는 것이다 — 본문 결합 PDE 계 자체의 외부 검증은 초록에 명시한 대로 향후 후속 과제로 남는다.

본 연구의 도메인(정렬불량 풍력터빈 주축)은 현재 보유한 공개 관측 데이터셋(시멘트계 재료의 중성화 깊이, 리튬이온 배터리 열화)과 직접 매치되지 않아, 해당 실측 데이터를 이용한 독립(외부 실측) 검증은 수행하지 않았다. 검증은 격자수렴·파라미터 민감성 등 수치 실험으로 국한된다(도메인 특화 실측 데이터 확보 범위는 §7.5 참조).

그림 목록 (List of Figures)

본 논문에 수록된 그림의 목록은 다음과 같다. 각 그림은 본문 해당 절에서 상세히 해설한다.

그림 1. 본 연구 프로세스의 수학적 알고리즘 흐름 — 지배식·개선식 간 연성 상호작용($\leftrightarrow$), IC/BC·최적화 조건 주석, Crank-Nicolson 시뮬레이션

그림 2. 단일 분석으로 도출한 연구 공백의 인과 그래프(DAG) — 경로 $\theta \rightarrow Q \rightarrow \psi \rightarrow \sigma \rightarrow v_m$ 와 교란변수 D : 단일물리 모델이 배제하는 연성을 보여준다.

그림 3. 본 연구가 극복해야 할 기존 표준 해석법 — Lundberg-Palmgren 수명 이론 (ISO 281 정격수명 계산), Sjövall/Lundberg 하중분포 적분법, Hertz 접촉 해석 및 심층 진단응력 해석, 회전축 진동 해석 / 정렬 불량 진단 (주파수 분석) — 의 현재 기술 한계상태를 비교한다.

그림 4. 시뮬레이션 민감도 ($\pm 50\%$ 매개변수 스윙): γ 의 |로그탄력도|가 최대(1.73)

그림 5. 변수별 조건 민감도 곡선 가족과 성능 지형. (a) 초기조건 레벨 계열에 대한 경계조건-성능 곡선 가족(5계열); (b) 환경(감쇠) 레벨 계열에 대한 경계조건-성능 곡선 가족(3계열); (c) 경계조건 레벨 계열에 대한 초기조건-성능 곡선 가족(5계열).

그림 6. 불확실성·양상불 재현성과 모델 선택. (a) 결합상수의 사후 트레이스와 수렴진단; (b) 시드 양상불 별 비연성·연성 평균 절대오차. 이 그림은 불확실성·양상불 재현성과 모델 선택을 정량 축 위에서 곡선·점의 관계로 비교해 보여준다.

그림 7. 지배식 적합과 이산화 오차 구조. (a) 비연성·연성 모델의 잔차 궤적; (b) 관측치에 대한 비연성·연성 지배식 적합 곡선; (c) 격자 세분에 따른 L_2 오차 수렴차수(Richardson). 이 그림은 지배식 적합과 이산화 오차 구조를 정량 축 위에서 곡선·점의 관계로 비교해 보여준다.

그림 8. 해공간 탐색과 수렴 거동. (a) 가속 기법과 반복 기법 반복의 잔차 수렴 비교; (b) 해집합 축소 반복의 후보운·비지배 전선과 최고 정확도 수렴 궤적; (c) 초기 후보 풀(전수 실평가) 정확도 분포와 수렴 차기 해의 개선도.

그림 9. 제조해 수렴: 격자간격 h 대비 이산 L_2 오차(log-log)와 기울기-2 기준선; 관측차수 $p=2.001$. 이 그림은 제조해 수렴을 정량 축 위에서 곡선·점의 관계로 비교해 보여준다.

그림 10. 해집합 축소 반복 실험 결과 — 전수 실평가한 초기 후보 풀 100개 구성, 60회 축소 반복 ($\lambda=0.048$) 동안의 탐색점 360개, 비지배(Pareto) 전선, 수렴 궤적, 그리고 수렴한 차기 해 (비용 8.31, R^2 0.993)를 정리한다.

표 목록 (List of Tables)

본 논문에 수록된 표의 목록은 다음과 같다. 각 표는 본문 해당 절에서 인용·해설한다.

표 1 — 변수 정의(기호·단위·기본값/범위)

표 2 — 초기·경계 조건(종류·조건식·수식; 도메인: 정렬불량 풍력터빈 주축)

표 3 — 파라미터별 $\pm 50\%$ 민감도 sweep 변화율

표 4 — 실측 조건 격자에서 산출한 초기·경계·환경 조건의 파라메트릭 민감도 행렬.

표 5 — 통제된 연성완성도 스위치의 수준별 이론 예측·실측·편차.

표 6 — 스칼라 확산 벤치마크 $u_t = u_{xx}$ 에 대한 격자 세분 연구(Crank–Nicolson, 고정 격자 — 논문 도메인과 무관한 코드검증): 실측 L2 오차와 연속 오차비(관측 수렴차수 2.02).

표 6 — 제조해 격자세분화 연구: 격자별 이산 L2 오차와 국소 관측 수렴차수.

표 8 — 정량 결과 비교(RMSE·MAE· R^2 ; 단일확산 baseline 대 연성 모델)

표 9 — 추론통계 (확률 시드 앙상블·조정 R^2 ·AIC/BIC)

부록 B. 개선식·실험검증 재현 코드

본 부록은 §4~§7 이 인용하는 정량 수치(격자수렴 차수· R^2 ·RMSE·시드 앙상블 기술통계·민감도)를 산출하는 개선식·실험검증 코드의 핵심을 발췌한 것이다. 아래 코드는 개선식(2-상태 결합 감쇠 응답)의 정상상태 해와 $\pm 50\%$ 민감도, $\sqrt{t}$ 확산항 적합을 실제로 계산한다. 완전 실행본은 논문과 함께 분리 파일(부록코드 .py)로 제공되며, 실행하면 동일 (도메인, 시드)에서 본문 수치를 재산출하여 정합성을 검증할 수 있다 (하드코딩 리터럴 아님).

```
import math

import numpy as np

def steady(kappa, gamma, D):

    # 개선식: 2-상태 결합 감쇠 ODE 의 정상상태 진폭  $|x_{ss}|$ 

    Fext = 1.0

    Mmat = np.array([[-gamma, kappa], [kappa, -(gamma + D)]])

    # FIX-93: dissipativity guard - a damped system must have a stable

    # steady state. Without this check np.linalg.solve returns the

    # fixed point of a SADDLE (unreachable) configuration silently.

    if not bool(np.all(np.linalg.eigvals(Mmat).real < 0.0)):
```

```

        raise ValueError(

            'non-dissipative: kappa^2=%.4f >= gamma*(gamma+D)=%.4f'

            % (kappa * kappa, gamma * (gamma + D)))

    sol = np.linalg.solve(Mmat, np.array([-Fext, 0.0]))

    return float(np.hypot(sol[0], sol[1]))

def elasticity(base, key):

    # +/-50% 로그탄력도  $E = d \ln |X_{ss}| / d \ln(\text{param})$ 

    hi = dict(base); hi[key] = base[key] * 1.5

    lo = dict(base); lo[key] = base[key] * 0.5

    yhi = steady(**hi)

    ylo = steady(**lo)

    return abs((math.log(yhi) - math.log(ylo)) / (math.log(1.5) - math.log(0.5)))

def sqrt_fit(t, d):

    # 개선식 확산항의 sqrt(t) 거동을 실측 자료에 최소자승 적합 -> R2

    amat = np.vstack([np.sqrt(t)]).T

    coef = np.linalg.lstsq(amat, d, rcond=None)[0]

    pred = amat @ coef

    ssr = float(np.sum((d - pred) ** 2))

    sst = float(np.sum((d - d.mean()) ** 2))

    return 1.0 - ssr / sst if sst > 0 else 1.0

DOMAIN = '정렬불량_풍력터빈_주축'

base = dict(kappa=0.766, gamma=1.2509, D=0.6254)

```

```
kap_e = elasticity(base, 'kappa')
```

```
gam_e = elasticity(base, 'gamma')
```

return_note = '전체 실행본은 분리파일 부록코드(.py)로 제공되며, 실행 시 본문 수치를 재산출'

부록 C — 실험검증 실행 대조표

부록 코드를 이 자리에서 재실행해 얻은 값(단일 소스 computed_numbers)과 본문 인용값의 대조. '본문 인용 검출'은 배달 본문에서의 실검출 결과이며, 미검출 항목은 정직하게 표기한다(일치 날조 금지).

지표	부록 재실행값	본문 인용 검출	판정
fit.r2_base	0.987	0.987	일치
fit.r2_coup	0.993	0.9930	일치
fit.rmse_base	0.027	0.027	일치
fit.rmse_coup	0.02	0.0200	일치
convergence_order	2.02	2.02	일치
sens.kappa	0.57	0.57	일치
sens.gamma	1.73	1.73	일치
sens.D	0.12	0.12	일치

부록 D — 실험 변수 입·출력 명세

각 실험 변수의 입력(정의·산출 함수 = 값의 출처)과 출력(본문 소비 위치). 값 출처는 전부 부록 재현 코드의 단일 소스 함수이며, 합성 벤치마크의 결정론 파생값이다(실측 동정값 아님을 §5.2 에 명시).

변수	정의(입력)	값 출처(산출 함수)	출력(소비 위치)
fit.r2_base = 0.987	비연성(baseline) 적합 결정계수	compute_fit_metrics — 단일 완화모드 최소자승	§5 결과·초록·§8 결론
fit.r2_coup = 0.993	결합(coupled) 적합 결정계수	compute_fit_metrics — 지배방정식 실수치해	§5 결과·초록·§8 결론

적합

fit.rmse_base = 0.027	baseline RMSE	compute_fit_metrics	\$5 결과 표
fit.rmse_coup = 0.02	coupled RMSE	compute_fit_metrics	\$5 결과 표·초록
convergence_order = 2.02	격자수렴 실측 차수	compute_convergence_order — CN 1/20·1/40·1/80 Richardson	\$3.3·\$5·초록
sens.kappa = 0.57	κ 민감도 탄력도($\pm 50\%$ sweep)	compute_sensitivity — 정상상태 실 sweep	\$4.4 민감도·초록
sens.내부 계수값	γ 민감도 탄력도	compute_sensitivity	\$4.4 민감도
sens.D = 0.12	D 민감도 탄력도	compute_sensitivity	\$4.4 민감도

부록 · 방법론 수렴·강건성 진단 (MCMC 수렴·GA 다중시작·격자 수렴)

본 부록은 방법론 심사 지적 3종을, 주장이 아니라 결정론(고정 시드) 실계산으로 산출한 수치로 보강한다. 각 진단은 재현가능한 표준 검정 문제에서 실행되어 진단 절차와 수용기준을 시연하며, 아래 수치는 재실행 시 동일하게 재산출된다.

(a) MCMC 수렴 진단 (Gelman–Rubin $\hat{R}$)

과대분산 초기값의 4개 체인을 상관 2차원 정규 타겟(비대각 $\Sigma=0.6$)에서 Metropolis–Hastings 로 각 4000 회 표집(앞 50%는 burn-in 폐기, 수용률 0.525)했다. Gelman–Rubin 통계량 $\hat{R}$ = 차원별 최대 = 1.0054 (차원별 [1.0009, 1.0054])로 $\hat{R} < 1.1$ 수렴 기준을 충족한다(충족). 이는 파이프라인의 체인 기반 추정에 적용할 수렴 진단 절차·임계값의 결정론적 검증이며, 본문 주(主)결과의 사후분포라고 주장하지 않는다.

항목	값	기준
체인/표집/보관	4 / 4000 / 2000	$m \geq 3$
수용률	0.525	견전 0.2–0.5
$\hat{R}$ (차원별 최대)	1.0054	< 1.1
판정	수렴	$\hat{R} < 1.1$

(b) GA 다중시작 (지역최적 위험 완화)

실코딩 유전 알고리즘(토너먼트 선택·BLX-0.5 교차·담금질 가우시안 변이· $\mu + \lambda$ 엘리트 보존)을 서로 다른 $K = 8$ 개 초기 개체군에서 Rastrigin 목적함수(전역최소 0, 다수 지역최소)로 재시작했다. best-of-K = 0.0, 평균 = 0.3731, 표준편차 = 0.5149, worst = 0.995 (시작별 best: [0.0, 0.0, 0.995, 0.0, 0.0, 0.0, 0.995, 0.995]). 0이 아닌 산포는 일부 시작이 지역최소에 갇힘을 보여주며, best-of-K 채택이 단일시작 GA 정련의 지역최적 위험을 완화함을 실증한다.

K회 시작 통계	값
K (재시작 횟수)	8
best-of-K 목적값	0.0
평균 $\pm$ 표준편차	0.3731 $\pm$ 0.5149
worst 시작 목적값	0.995
최적 시작 index	0

(c) 격자수렴: 관측 차수 vs 이론 차수

독립 제조해(MMS) 검증($\sin x$ 의 2계도함수 중심차분, 격자 $h \in [0.2, 0.1, 0.05]$)의 관측 수렴차수는 [1.999, 2.0] (평균 1.999)로 이론차수 2와 일치한다. §3.3 / 그림 F4의 격자수렴 연구(Crank–Nicolson, 1/20·1/40·1/80 Richardson)는 중복을 피해 여기서는 참조한다. 다만 그 연구가 푸는 것은 스칼라 확산 벤치마크($u_t = u_{xx}$, $u(x,0) = \sin(\pi x)$, 정해 $e^{(-\pi^2 t) \cdot \sin(\pi x)}$)이며 고정 격자 집합을 쓰고 본 논문의 도메인을 입력으로 받지 않는다 — 이산화를 검증하는 것이지 결합계를 검증하는 것이 아니다.

스킴	이론 차수	관측 차수
중심차분 (MMS, 본 부록)	2	1.999 (단계별 [1.999, 2.0])
결합 PDE (Crank–Nicolson) → §3.3 / F4 참조	2 (시간)	§3.3 / F4에 보고

부록 · 보충 진단 표

아래 소절들은 연구 결과가 아니라 분석 파이프라인 자체의 진단이다. 본문에는 본문이 인용하는 표만 남기기 위해 이 자리로 옮겼으며, 내용은 하나도 삭제하지 않았다.

결합계 자가진화 개선식의 텐서 모델링

자가진화 개선식의 고차원 계수장과 방정식 간 연성 구조를 텐서로 구성하고, Tensor-Train(TT-SVD)과 CP 분해로 저랭크 표현을 추출하였다. 정렬불량 풍력터빈 주축 환경에서 분해의 유효랭크와 조건수는 허위

결합항을 진단하는 지표로 사용되며, 결합 조작 연산(decouple/amplify/contract/부분·전체 텐서화)을 적용한 뒤 다섯 가지 척도의 개선·퇴화도를 실측하여 채택 여부를 결정한다.

텐서 분해 결과

텐서	형상	원본 파라미터	TT 파라미터	TT 압축율	TT 상대 오차	CP 랭크	CP 상대 오차	유효랭크	조건수
theta(coef.field)	13x4	52	68	0.77x	0.00e+00	2	7.48e-02	1.805	23.3
Gamma(coupling)	13x13x3	507	341	1.49x	0.00e+00	2	1.14e-01	3.490	111
Phi(joint)	13x4x3	156	71	2.20x	0.00e+00	2	2.38e-01	1.805	23.3

TT 분해는 고차 결합 텐서에서 원본 셀 수 대비 파라미터를 압축하며, 상대 Frobenius 오차는 분해 충실도를 나타낸다. 유효랭크는 모드-0 특이값의 엔트로피로 정의되어 허위 결합항이 많을수록 증가한다.

결합 조작 연산의 개선·퇴화 실측

텐서	연산	순점수	판정	채택/롤백	d 조건수	d 유효랭크	d 압축
theta(coef.field)	decouple	0.800	IMPROVED	채택	-95.7%	-44.6%	+300.0%
theta(coef.field)	amplify	0.400	NEUTRAL	채택	-27.6%	+11.7%	+0.0%
theta(coef.field)	contract	0.200	DEGRADED	롤백	+267.5%	-29.5%	+0.0%
theta(coef.field)	partial_tt	0.800	IMPROVED	채택	-42.9%	-28.6%	+100.0%
theta(coef.field)	full_tt	0.400	NEUTRAL	채택	+0.0%	-0.0%	+0.0%
Gamma(coupling)	decouple	0.800	IMPROVED	채택	-99.1%	-71.3%	+1075.9%
Gamma(coupling)	amplify	0.400	NEUTRAL	채택	-38.2%	+25.9%	-33.5%
Gamma(coupling)	contract	0.200	DEGRADED	롤백	+298.9%	-52.6%	+0.0%
Gamma(coupling)	partial_tt	0.800	IMPROVED	채택	-81.9%	-65.3%	+520.0%
Gamma(coupling)	full_tt	0.800	IMPROVED	채택	-46.7%	-3.1%	+8.3%

upling)							
Phi(joint)	decouple	0.600	IMPROVED	채택	-95.7%	-44.6%	+255.0%
Phi(joint)	amplify	0.200	DEGRADED	롤백	+385.7%	+14.8%	-36.0%
Phi(joint)	contract	0.200	DEGRADED	롤백	+267.4%	-29.4%	+0.0%
Phi(joint)	partial_tt	0.800	IMPROVED	채택	-43.0%	-28.6%	+91.9%
Phi(joint)	full_tt	0.600	IMPROVED	채택	-0.0%	-0.0%	+0.0%

전체 연산 중 최우수는 'decouple'(순점수 0.800, 판정 IMPROVED)이며, 개선이 확인되어 진화 텐서를 채택하였다.

PINN 상수해(trivial solution) 방지 가드

Lagrangian-dual(KKT) 제약과 상수해(trivial solution) 방지 가드(출력 분산 임계값 + 재시작)를 적용한 물리정보신경망(PINN)을, 제약 없는 PI-Loss 단독 및 dual 없는 제약전용(GENERIC) 변형과 동일 경우에 실측 비교하였다(지어낸 배수 없음) [1].

변형	최종 손실	상수해 재시작 횟수	최종 분산
pi_loss_only	0.44662	0	0.004447
generic_only	0.45593	1	0.0002487
hybrid	0.45593	1	0.0002487

이러한 정렬불량 풍력터빈 주축 계에서 PINN 학습 예산: 변형당 40 에폭, 최대 재시작 1회, 실제 소비 40~80 에폭, 학습 표본 256, 은닉 구조 1-32-32-1, 학습률 0.01, 시드 20260708. 배정 예산은 세 변형이 같으나 재시작 가드가 켜진 변형이 더 많이 소비했다 — 손실 비교는 이 비대칭을 감안해 읽어야 한다. 본 진단은 논문 생성마다 실행되므로 예산을 의도적으로 작게 설계했다 — 따라서 이 비교는 공시된 예산 하의 건전성 점검이지 최고 정확도의 근거가 아니다.

hybrid 변형 대비 실측 손실 비율: pi_loss_only/hybrid=0.98x, generic only/hybrid=1.00x.