학위논문요약서		
성명	**학과**	**해당 학위**
박강재	**기계공학과**	**박사**
학위개요	○ 논문제목 • 국문제목: 고정밀도 디지털 트윈 구현을 위한 센서 배치 및 자유도 확장 기법 • 영문제목: Sensor Placement and DOF Expansion Methods for the Realization of a High-Precision Digital Twin • 논문심사합격일: 2025.06.12 • 지도교수: 박용화 교수	

주요 내용 요약

Ⅰ. 연구목적

디지털 트윈(Digital Twin)은 물리적 구조물과 매우 유사한 고충실도 해석 모델을 기반으로, 실제 구조물의 상태를 실시간으로 진단하고, 원인 분석 및 수명 예측 등을 가능하게 하는 기술입니다. 해석 기반 모델에 실측 데이터를 연계함으로써, 구조물의 복잡한 동적 거동을 보다 정밀하게 이해하고 예측할 수 있으며, 다양한 운용 조건 및 이상 상황에 대한 대응 능력을 향상시킬 수 있습니다. 디지털 트윈은 일반적으로 네 가지 단계로 구성됩니다: (1) 모델 구성, (2) 센서 설치, (3) 상태 재구성, (4) 모델 갱신 단계입니다. 모델 구성 단계에서는 대상 구조물의 기하학적 및 물리적 특성을 반영한 수치 해석 기반 모델을 수립하며, 이는 디지털 트윈 구현의 핵심 기반이 됩니다. 센서 설치 단계에서는 수립된 해석 모델을 기반으로 최적의 센서 위치를 선정하고, 실제 구조물에 센서를 부착하여 데이터를 수집합니다. 상태 재구성 단계에서는 측정된 데이터를 이용하여 전체 구조물의 응답을 추정하거나 보간함으로써, 비계측 지점의 동적 거동까지 재현할 수 있습니다. 마지막으로, 모델 갱신 단계에서는 실측 데이터를 바탕으로 해석 모델의 파라미터를 지속적으로 보정하여, 실구조와의 일치도를 향상시키고 구조적 이상을 효과적으로 감지할 수 있도록 합니다. 본 연구에서는 디지털 트윈의 초기 단계인 고정밀 해석 모델 구성 및 효율적인 센서 배치 전략 수립에 중점을 두었습니다.

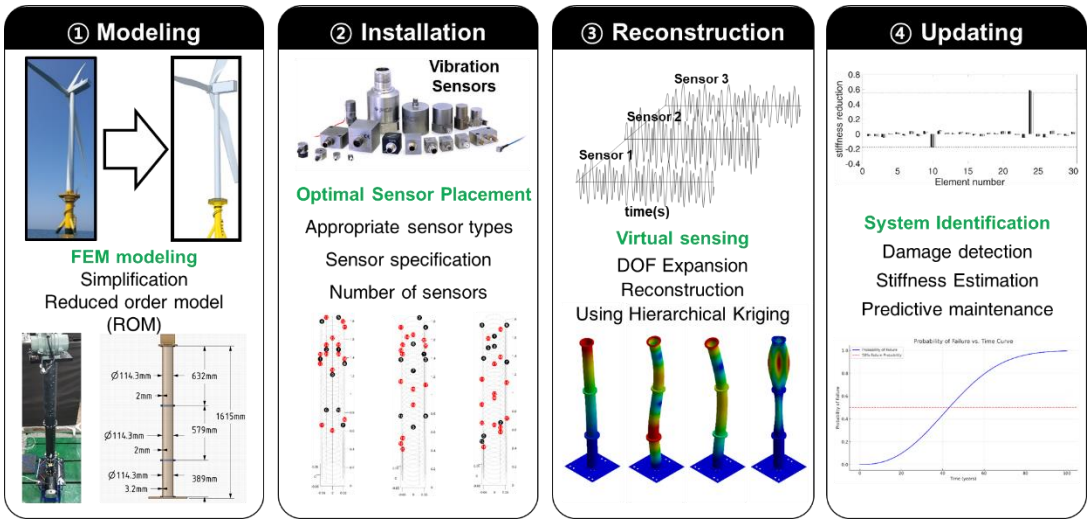

Figure 1. 디지털 트윈의 4가지 단계

Ⅱ. 연구내용

1. 새로운 센서 배치 기법 제안

기존 센서 배치 기법은 센서의 수가 증가함에 따라 모드 형상 간 측정 중복도가 증가하고, 그 결과 모드 간 독립성이 저하되는 문제가 있습니다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, Information Theory에 기반한 피셔 정보 행렬 (FIM)과 AutoMAC 행렬의 비대각 성분을 정량화한 목적함수를 구성하였습니다. 해당 목적함수는 (1) 모드 형상 추정의 불확실성을 최소화하고, (2) 모드 간 독립성을 극대화하도록 설계되었습니다. 제안한 기법은 기존의 대표적인 센서 배치 기법들과 비교 분석을 통해 우수성을 검증하였습니다.

2. Hierarchical Kriging을 적용한 자유도 확장 기법 제안

기존 자유도 확장 기법은 구조물의 기하학적 특성을 고려하지 않고, 해석 모델 기반의 응답만을 활용하여 비계측 지점의 응답을 추정하였습니다. 이에 본 연구에서는 구조물의 공간적 상관관계를 반영할 수 있는 계층적 크리깅 (Hierarchical Kriging) 기법을 도입하였습니다. 이를 통해 확장된 자유도에서의 예측 오차를 효과적으로 감소시킬 수 있었으며, 기존 방법 (SEREP)과 비교하여 향상된 재구성 성능을 확인하였습니다.

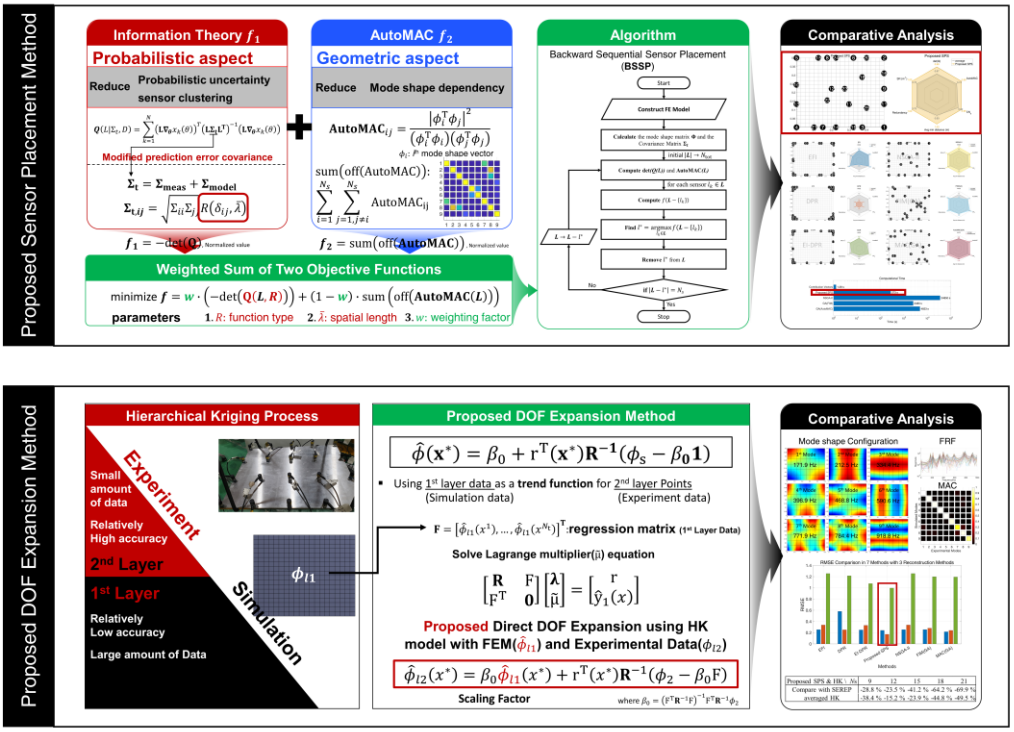

Figure 2. 연구 요약