구조 CAE 표준 방법론

시험에 맞춘 재료 카드에서 조립체 예측모델까지

2026년 11월 12일 · 기술 조사 및 사내 구축 제안

연구 질문

모델을 표준화하면 해석자 간 편차가 줄고, 재료·연결부를 시험에 맞추면 기준 FE의 물리 오차가 줄어든다. 예측기는 그 FE의 설계 변경 응답을 재사용해 반복 평가 시간을 단축한다. 세 효과를 같은 조립체에서 따로 확인해야 투자 성과를 읽을 수 있다.

어디부터 볼 것인가

목적	먼저 볼 기관	얻을 수 있는 것
재료 정합	현대제철 · Fraunhofer EMI	속도별 시험, 파단 카드, 실제 하중 상태를 덮는 부재시험 선정 방법
충돌 조립체 예측	현대차그룹 · ENSAM/ESI	재질·두께 변경을 완성차 FE에서 대리모델까지 연결하는 방법
모달·진동	ETH Zürich · BYU	체결부의 비선형 응답을 시험으로 확인하는 방법과 별도의 공개 벤치마크
속도·정확도 평가	MIT/TRI · PNNL	기준 FE의 시험 편차와 예측 오차, 학습 이후의 시간 절감 측정

Jaylab 자료실과 최신 산출물

소재와 기준 FE

현대차그룹 · ENSAM/ESI

완성차 정면충돌과 재료모델

강판의 준정적·동적 시험에서 얻은 유동 곡선을 변형률속도와 연결했다. 전방 크래시박스와 사이드 멤버를 완성차 LS-DYNA 모델에 유지한 채 부품 두께와 재료 파라미터를 바꾸고, 고충실도 응답을 POD·PGD로 축소했다.

판두께 4개와 재료 파라미터 9개의 영향을 평가했다. 충돌 거동별로 모델을 나누자 가속도 곡선의 평균 상대 L2 오차가 단일 모델 15%에서 9%로 줄었다. 이 수치의 기준은 원 FE다. 독립 실차 충돌 대비 오차와 신규 차종 전이 성능은 별도다.

사내 적용 동일한 재질명 아래에서 카드 버전과 시험 속도가 바뀌면 결과가 어떻게 움직이는지 기록한다. 잔차가 큰 설계는 접힘 위치·하중 전달 경로가 바뀌었는지 먼저 확인한다.

공식 원문 ↗

현대제철

자동차 강판 파단과 부재 충격

고속 인장 DB와 GISSMO 기반 파단평가를 운영하고, 부재에는 낙하 시험을 적용한다. 범퍼와 사이드 멤버의 압괴, 필러의 굽힘처럼 설계 의사결정에 필요한 변형 모드를 시험과 연결한 산업 사례다.

기관 자료가 설명하는 범위는 재료 평가와 부품 검증 체계다. 학습용 원 시험곡선이나 배포용 솔버 카드, 대리모델의 추론 시간은 해당 페이지에서 제공하지 않는다.

사내 적용 한 강종·판두께의 시험 식별자, 변형률속도, 파단 모델, 부재 하중 조건과 검증 응답을 하나의 카드 이력으로 묶는다. 소재 담당자와 해석 담당자가 각각 승인할 항목을 구분한다.

공식 원문 ↗

시험 설계와 비선형 진동

Fraunhofer EMI

AIMM 재료모델 검증시험 설계

학습한 재료모델이 다양한 변형률 상태에서 응력을 예측하는지 확인하기 위해, 후보 부품시험을 먼저 해석한다. 각 시험의 변형률 상태가 차지하는 범위를 계산해 실제 수행할 시험을 선정한다.

크래시박스 예시의 78.9%는 연구에서 정의한 변형률 공간 피복률이다. 예측 정확도나 모든 실제 하중에 대한 시험 커버리지를 뜻하는 지표로 사용할 수 없다.

사내 적용 새 쿠폰을 추가할 때 실제 접힘부·접합 끝단 해석에서 나타난 하중 상태와 기존 시험의 상태를 겹쳐 본다. 빠진 상태를 재현하는 시험을 우선하면 정합성을 개선하는 데 들어가는 시험비를 설명할 수 있다.

공식 원문 ↗

ETH Zürich · Institute for Mechanical Systems

볼트 체결 조립체의 비선형 진동

접촉과 마찰을 포함한 조립체 FE의 자유감쇠 응답으로 축소모델을 학습했다. 가진을 가한 조립체의 실험 공진곡선과 비교하여 학습 시 가진 조건과 다른 응답을 평가했다.

187,920차원의 FE에서 4차원 축소모델을 얻었다. 차원 축소 배율은 계산 시간 배율과 다르다. 비교 시에는 같은 출력·시간구간·허용오차에서 전처리와 계산 시간을 측정해야 한다.

사내 적용 체결 예압, 접촉면, 마찰 조건, 가진 수준, 센서 위치를 데이터로 남긴다. 자유감쇠로 식별하고 가진시험으로 평가하면 보정과 검증을 분리할 수 있다.

공식 원문 ↗

공개 시험과 차량 데이터

BYU Structural Dynamics Research Group

S4 Beam 시험·해석 벤치마크

2017년 시험체의 선형·비선형 시험, 유한요소 모델과 2020년 시험체 자료를 공식 압축파일로 배포한다. 서로 다른 시험체와 실험 조건을 식별하는 데 쓸 시험 로그가 포함된다.

S4 Beam은 위 ETH 연구와 별개 시험체다. 원 데이터를 얻은 뒤 첫 확인 항목은 응답 단위, 입력 수준, 센서 방향, 시험 로그와 파일명의 대응이다. 이번 작업은 자료 확보와 압축 무결성 확인까지다.

사내 적용 비교 가능한 측정점과 모드를 먼저 고른 후 공진 주파수, 모드형상, 가진에 따른 응답 변화를 비교한다. 공개 벤치마크 재현 결과와 사내 모듈·팩의 시험 상관은 별도 기록한다.

공식 원문 ↗

MIT · Toyota Research Institute / GMU CCSA

차량 충돌 데이터셋과 기준 FE 검증

CarCrashNet은 범퍼 14,742건과 차량 3종의 전차량 충돌 825건을 보고했다. 저자들은 기준 Yaris 응답을 실차와 솔버 간에 비교했다. GMU CCSA가 배포하는 상세·간략 Yaris 모델과 검증 보고서는 별도로 확보할 수 있다.

Yaris의 기준 FE가 실차 대비 벽 반력 피크를 약 14.6% 과대, 지속시간을 약 19.6% 과소 예측했다. 이는 기준 FE의 편차다. 조사 당시 저자 저장소는 심사 후 데이터 다운로드 링크와 로더를 추가한다고 명시했다. 확보한 GMU 덱은 CarCrashNet 전체 학습 데이터와 구분한다.

사내 적용 기준 모델이 시험에서 얼마나 벗어나는지 KPI별로 기록한다. 같은 차종의 시간 프레임을 서로 다른 독립 설계로 세지 않고, 변형 모드·차종·메시 버전으로 분할 범위를 명시한다.

공식 원문 ↗

설계 반복의 속도와 비용

PNNL · UNC Charlotte

복합재 배터리 인클로저의 열성형·충돌

소재·공정 조건을 바꾸며 열성형과 충돌 해석을 연계하고, 그 결과에서 가우시안 프로세스 회귀 모델을 구축했다. 새 설계의 성능과 예측 불확실성을 함께 평가한다.

연구 환경에서 연계 FE 1건은 약 8시간, 학습 후 추론은 수 ms였다. 신규 FE에 대한 출력별 평균절대백분율오차는 8.08% 이내이며 일부 개별 오차는 14.64%였다. 실측 대비 오차와 학습 비용은 이 수치에 포함되지 않는다.

사내 적용 프로젝트에는 학습 데이터 생성비, 예측 요청부터 응답까지의 시간, 확인 FE 호출률을 함께 기록한다. 평균 오차와 최악 설계의 오차를 분리해야 판단 여유가 작은 설계에서의 손실을 볼 수 있다.

공식 원문 ↗

속도 측정 예산

기존 설계 1건은 전처리, 대기, 솔버, 후처리, 설계자의 판독까지 같은 시작·종료 조건으로 측정한다. AI 경로에는 입력 변환, 추론, 결과 검토와 적용 범위 밖의 확인 FE를 포함한다. 동일 하드웨어나 실제 운영 자원 및 큐 조건도 기록한다.

한 번의 학습 비용을 C_0, 설계당 기존 비용을 C_FE, 예측 경로의 평균 비용을 C_AI라 두면, 비용 절감이 시작되는 반복 횟수는 $C_0 \div (C_FE - C_AI)$로 추정한다. 분모가 양수이고 동일한 비용 단위를 사용한 경우에 적용한다. 소수 설계만 평가하는 과제는 초기 데이터 생산비가 더 클 수 있다.

실시험 대비 오차가 크지만 예측기와 FE가 가깝다면 입력 물성·접촉·지그를 먼저 검토한다. FE와 시험은 맞는데 예측기만 벗어나면 설계변수 범위와 학습 데이터를 점검한다.

5개 해석의 검증 설계

공통으로 관리할 항목은 단위, 좌표계, 질량, 재료 버전과 모델 계보다. 하중에 따라 샘플링 방법과 합격 판단 지표를 정한다. 아래는 사내 설계안이다.

해석	보존할 모델 조건	대응 시험·출력	판정 방법
모달	밀도·질량분포, 탄성계수, 체결 예압/강성과 경계조건	모달 시험의 질량·구속 상태, 고유진동수, 모드형상과 센서 좌표	유사·교차 모드는 MAC로 짝지은 뒤 주파수 오차를 평가한다.
진동	감쇠, 체결면 마찰·접촉, 입력 방향과 가진 수준	측정점별 FRF·공진 피크·대역 RMS, 가진 수준별 반복시험	진폭이 커졌을 때 공진 이동과 감쇠 변화를 재현하는지 본다.
충격	충격 펄스·지그, 체결과 접촉, 속도 의존 물성	입력·응답 가속도 이력, 펄스 폭과 충격응답스펙트럼	파형과 피크의 시간 정렬을 확인하고 지그 입력과 조립체 응답을 분리한다.
스웰링	팽창 변형률 또는 하중, 패드 이력, 초기 간극·예압·구속	동일 온도·상태에서의 반력-변위와 센서 면적에 대응하는 압력 분포	예압 기준점을 고정하고 센서 공간 평균과 FE 면적 평균을 같은 위치에서 비교한다.
충돌	속도 의존 소성·손상, 요소 길이, 접합 파손과 접촉	관심점 침입량, 반력·가속도 이력, 흡수에너지, 파손 모드	에너지·반력 이력과 변형 모드를 같이 보고 모드 전환 설계는 따로 집계한다.

합격 기준을 정하는 순서

설계 의사결정에 쓰는 KPI와 관심 위치를 정하고, 반복시험 산포·측정 분해능·설계 여유를 함께 검토한다. 수치 허용오차와 적용 제외 조건은 유보 시험을 보기 전에 고정한다. 중요 부위에서의 최대 편차와 설계 합격·불합격 역전을 별도로 기록한다.

기존 모델에서 신규 조립체로

단계	실행	남길 산출물
기존 모델 점검	동일 설계의 덱·시험·개정 이력을 모으고 원본을 보존한다. 질량, 메시, 카드, 연결, 하중 조건이 다른 위치를 찾는다.	재실행이 가능하고 시험 대응점이 있는 대표 조립체와 편차 목록.
재료·접합 정합	시험곡선의 단위·측정 구간·시편·속도·온도를 기록한다. 카드 보정에 쓸 시편과 유보할 시편을 먼저 나눈다. 접합은 별도 형상의 부재시험으로 확인한다.	피팅 조건, 미사용 시험 결과, 요소 유형·길이 등 유효 범위가 붙은 카드.
기준 조립체 확정	실제 시험 지그, 볼트 예압과 하중 경로를 반영한다. 메시·재료·접촉을 한 항목씩 바꿔 어떤 차이가 응답을 지배하는지 확인한다.	시험 산포와 설계 여유로 정한 지표별 허용오차, 재현 덱, 독립 시험과의 비교 곡선.
설계 변경 데이터 생성	기준 덱에서 재료·판두께·체결력 등 설계변수를 계획적으로 변경한다. 실패한 해석과 변형 모드 전환도 남긴다.	설계 ID, 실행 ID, 프레임, 솔버 버전, 결과장, 단위·좌표계와 분할표.
예측기 검증·운영	처음에는 단순 응답표면·축소모델을 기준선으로 둔다. 학습에 없는 설계 전체에서 평균·최악 오차와 판정 역전을 측정하고 적용 범위 밖에서는 확인 해석으로 보낸다.	FE↔시험, 예측↔FE, 예측↔시험 3종 오차와 요청부터 설계 판단까지의 시간.
후속 조립체 전이	신규 조립체를 통째로 유보한다. 같은 신규 FE 예산으로 기존 가중치 적응과 처음부터 학습한 경우를 비교한다.	목표 정확도에 도달하는 추가 FE 건수, 최악 하중과 재사용한 카드·조인트 모델의 목록.

첫 대표 조립체

기존 모델과 물리시험이 함께 남아 있고, 판·보와 체결부를 포함하며 반복 설계가 많은 조립체를 우선한다. 메시, 물성, 접촉을 한꺼번에 바꾸기 전에 기준 덱을 재계산해 차이의 원인을 추적한다.

재사용할 데이터와 자료 접근

데이터 한 건의 정의

제품·조립체·설계 개정·기준 FE 버전·재료 카드 ID·하중 조건·솔버 버전·실행 ID·시험 ID를 연결한다. 설계 수, 솔버 실행 수, 시간 프레임 수를 분리한다. 동일 설계의 시계열은 같은 학습 분할에 유지하고 시험 반복 시편도 보정과 검증에서 중복되지 않게 한다.

접합부의 첫 적용

Liu 등의 접착 자료는 시험 그림에서 전사한 개별 하중-변위 곡선을 원 시편과 연결하는 사례다. 전사 좌표의 정합도, 재료 파라미터의 식별성, 새 접합 형상에서의 예측력을 각각 판단한다. 곡선을 피팅할 때 지그·시편 변위에 들어 있는 기여를 점검하고 별도로 측정하지 않은 국부 분리량을 확정값으로 취급하지 않는다.

Liu 등 · Materials 2021 원문

자료 접근과 인계

자료실에는 배포기관 직접 다운로드, 공개 논문, 프로젝트 공식 페이지를 구별해 연결했다. CarCrashNet의 서술상 데이터 규모와 현시점에 직접 받을 수 있는 파일 범위는 별도다. 원본 파일의 해시와 아카이브 검사는 수집 무결성을 확인한다. 논문 수치의 독립 재현과 사내 설계 승인에는 별도의 비교가 필요하다.

최신 원자료 목록 및 프로젝트 산출물