



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2021-0047158
(43) 공개일자 2021년04월29일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06F 30/00 (2020.01)

(52) CPC특허분류
G06F 30/23 (2020.01)
G01N 2203/0017 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2019-0130868
(22) 출원일자 2019년10월21일
심사청구일자 2019년10월21일

(71) 출원인
연세대학교 산학협력단

서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)

(72) 발명자
이중수

서울특별시 강남구 압구정로33길 70 현대아파트 53동 402호

유영민
서울특별시 도봉구 마들로 646 방학동삼성래미안 105동 102호
(뒷면에 계속)

(74) 대리인
특허법인 플러스

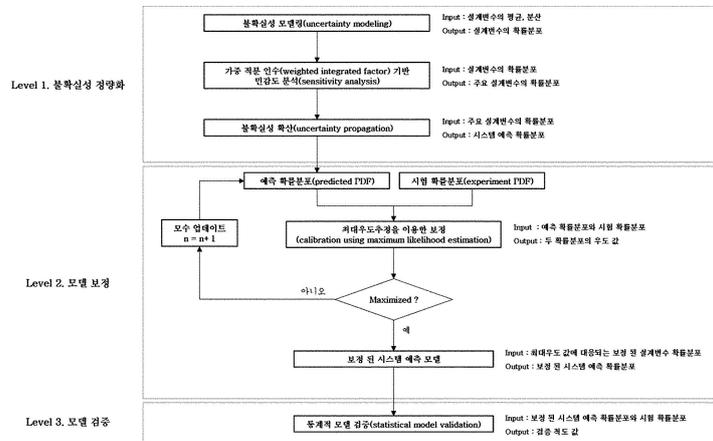
전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 통계학적 분석을 통한 유한요소모델의 신뢰성 보정 및 검증 방법

(57) 요약

본 발명은 통계학적 분석을 통한 유한요소모델의 신뢰성 보정 및 검증 방법에 관한 것이다. 본 발명의 목적은, 유한요소모델의 예측 능력에 대한 신뢰도를 보장하기 위해, 해석모델의 유효성을 통계적으로 검증하고 예측 결과를 향상시킬 수 있도록, 통계적 모델을 도입하여 검증 및 보정을 수행하는, 통계학적 분석을 통한 유한요소모델의 신뢰성 보정 및 검증 방법을 제공함에 있다.

대표도



(72) 발명자

이한빛

경기도 고양시 덕양구 능곡로 30-11, 104동 1404호

김윤지

서울특별시 서대문구 연희로10가길 26, 201호

명세서

청구범위

청구항 1

시편에 대한 기계적 물성 측정을 위한 시편시험결과 데이터를 기반으로 설계된 유한요소모델의 신뢰성을 보정 및 검증하는 방법으로서,

상기 시편의 복수 개의 설계변수 중 선택된 일부가 불확실성요인으로 설정되고, 불확실성요인으로 설정된 상기 설계변수가 상기 유한요소모델에 입력되어 산출된 모델해석결과로부터 불확실성이 전파된 예측확률분포가 획득되는 불확실성정량화단계;

상기 유한요소모델로부터 획득된 불확실성을 내포하는 상기 예측확률분포 및 상기 시편시험결과로부터 산출된 시험확률분포가 비교됨으로써 상기 설계변수가 보정되는 통계적모델보정단계;

보정된 상기 설계변수가 상기 유한요소모델에 재입력되어 보정된 상기 예측확률분포 및 상기 시험확률분포가 비교됨으로써 상기 유한요소모델이 검증되는 통계적모델검증단계;

를 포함하는 것을 특징으로 하는 통계학적 분석을 통한 유한요소모델의 신뢰성 보정 및 검증 방법.

청구항 2

제 1항에 있어서, 상기 불확실성정량화단계는,

상기 시편의 복수 개의 설계변수 중 모수인 평균 및 분산과 분포형태가 알려진 일부의 상기 설계변수를 인지 불확실성요인이라 할 때,

상기 시편의 복수 개의 설계변수 중 인지 불확실성요인에 해당하는 상기 설계변수가 확률분포 형태로 생성되는 불확실성모델링단계,

가중적분인수를 기반으로 하여 민감도가 분석됨으로써 복수 개의 상기 설계변수 중 일부가 주요설계변수로 선택되는 민감도분석단계,

상기 주요설계변수가 상기 유한요소모델에 입력되어 불확실성이 전파된 상기 예측확률분포가 획득되는 불확실성전파단계

를 포함하는 것을 특징으로 하는 통계학적 분석을 통한 유한요소모델의 신뢰성 보정 및 검증 방법.

청구항 3

제 2항에 있어서, 상기 민감도분석단계는,

하기의 식을 이용하여 상기 가중적분인수가 산출되는 것을 특징으로 하는 통계학적 분석을 통한 유한요소모델의 신뢰성 보정 및 검증 방법.

$$WIFac = 1 - \sqrt{\frac{\sum \max(f[n]^2, g[n]^2) \cdot \left(1 - \frac{\max(0, f[n] \cdot g[n])}{\max(f[n]^2, g[n]^2)}\right)}{\sum \max(f[n]^2, g[n]^2)}}$$

(WIFac : 가중적분인수, n : 데이터 샘플 수, f[n] : 시편시험결과, g[n] : 모델해석결과)

청구항 4

제 2항에 있어서, 상기 민감도분석단계는,

하기의 식에 의해 계산되는 스피어만 상관계수를 이용하여 상기 설계변수들 간의 상관성이 평가됨으로써 민감도가 분석되는 것을 특징으로 하는 통계학적 분석을 통한 유한요소모델의 신뢰성 보정 및 검증 방법.

$$\rho = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}}$$

(ρ : 상관계수, x : 설계변수, y : 모델해석결과)

청구항 5

제 1항에 있어서, 상기 통계적모델보정단계는,

상기 시편의 복수 개의 설계변수 중 모수인 평균 및 분산과 분포형태가 알려진 일부의 상기 설계변수를 인지 불확실성요인이라 하고, 모수인 평균 및 분산과 분포형태가 알려지지 않은 나머지 상기 설계변수를 불인지 불확실성요인이라 할 때,

상기 유한요소모델로부터 획득된 불확실성을 내포하는 상기 예측확률분포에 불인지 불확실성요인에 상응하는 표준화 바이어스를 도입하여 상기 시험확률분포에 근사화시킴으로써 불인지 불확실성요인에 해당하는 상기 설계변수의 모수가 추정되어 산출되는 바이어스계산단계,

상기 예측확률분포가 최대우도추정을 통해 상기 시험확률분포에 맞추어짐으로써 상기 유한요소모델의 인지 불확실성요인인 상기 설계변수 및 불인지 불확실성요인인 상기 바이어스가 보정되는 최대우도추정보정단계

를 포함하는 것을 특징으로 하는 통계학적 분석을 통한 유한요소모델의 신뢰성 보정 및 검증 방법.

청구항 6

제 5항에 있어서, 상기 바이어스계산단계는,

하기의 식을 이용하여 표준화 바이어스를 도입하는 것을 특징으로 하는 통계학적 분석을 통한 유한요소모델의 신뢰성 보정 및 검증 방법.

$$y^e(\mu_e, \sigma_e) = y^m(\Theta(\mu_{x_1}, \sigma_{x_1}, \dots, \mu_{x_n}, \sigma_{x_n})) + \delta(\mu_b, \sigma_b)$$

$$\delta(\%) = \frac{E(y^e) - y^m}{y^m} \times 100, \quad \delta \sim U(a_\delta, b_\delta)$$

(y^e : 시편시험결과, y^m : 모델해석결과, μ : 평균, σ : 표준편차, δ : 바이어스, a_δ/b_δ : 바이어스 상/하한 값)

청구항 7

제 5항에 있어서, 상기 최대우도추정보정단계는,

상기 예측확률분포 및 상기 시험확률분포 간의 우도 값이 산출되는 단계,

우도 값이 최대인지의 여부가 판단되는 단계,

우도 값이 최대가 아니면 상기 모수가 업데이트되어 상기 예측확률분포가 다시 산출되는 단계

를 포함하며,

우도 값이 최대가 될 때까지 상기 단계들이 반복 수행되는 것을 특징으로 하는 통계학적 분석을 통한 유한요소모델의 신뢰성 보정 및 검증 방법.

청구항 8

제 7항에 있어서, 상기 최대우도추정보정단계는,

하기의 식을 이용하여 우도 값이 산출되는 것을 특징으로 하는 통계학적 분석을 통한 유한요소모델의 신뢰성 보정 및 검증 방법.

$$\log(L) = \log\left(\prod_{i=1}^n (f_k(y_i^e | \theta))\right)$$

(L : 우도, y^e : 시편시험결과, f_k : 유한요소모델 함수, θ : 모수)

청구항 9

제 1항에 있어서, 상기 통계적모델검증단계는,

보정된 상기 설계변수가 상기 유한요소모델에 재입력되어 보정된 상기 예측확률분포 및 상기 시험확률분포 각각의 누적분포함수를 이용하여 시험횟수별 면적척도가 산출되며, 유-폴링 방법을 통해 복수 개의 시험횟수별 면적척도 값들로부터 최종적으로 면적척도가 추출되는 면적척도추출단계,

시험횟수별 면적척도 값들이 확률분포 형태로 생성되고, 상기 추출된 면적척도 값이 상기 시험횟수별 면적척도 확률분포 상에서 미리 결정된 유의수준과 비교되어, 상기 추출된 면적척도가 상기 유의수준보다 작으면 보정된 상기 유한요소모델이 유효하다고 판단되는 유효성판단단계

를 포함하는 것을 특징으로 하는 통계학적 분석을 통한 유한요소모델의 신뢰성 보정 및 검증 방법.

청구항 10

제 9항에 있어서, 상기 면적척도추출단계는,

하기의 식을 이용하여 면적척도가 산출되는 것을 특징으로 하는 통계학적 분석을 통한 유한요소모델의 신뢰성 보정 및 검증 방법.

$$d(F^e, F^m) = \int |F^e(x) - F^m(x)| dx$$

(d : 면적척도, F^e : 시편시험결과의 누적분포함수, F^m : 모델해석결과의 누적분포함수)

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 인장시편 등과 같은 실제 시편을 모사하여 설계된 유한요소모델의 기계적 물성의 신뢰성을 통계학적 모델의 검증 및 보정을 통하여 검증하는 방법에 관한 것으로서, 실제 시험 및 해석 간의 불확실성요인들을 고려하여 해석모델의 유효성을 검증함으로써 실제 시험 물성 예측 결과를 향상시키는 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 인장시험은 소재의 탄성 계수, 최대 전단 응력 등을 도출하기 위한 시험 방법으로서, ISO, ASTM, KS, JIS 등 다양한 표준 규격화된 방법들이 널리 사용되고 있다. 인장시험에는 도 1과 같이 생긴 도그 본(dog bone) 형태의 시편이 사용되며, 시험을 통해 다양한 하중에 대한 변위 값을 측정할 수 있다. 이렇게 측정된 하중-변위 값들을 이용하여 시편의 물성을 산출해 내게 된다. 도 2는 인장시험 및 (이후 설명될) 유한요소모델 하중-변위 선도로서, 도 2에서 선으로 표시된 부분이 바로 이러한 인장시험을 통해 얻어진 데이터를 기반으로 도시된 것이다.

[0003] 한편 유한요소모델(finite element model, FEM)에서 소재의 하중에 대한 변형, 응력 등을 해석하기 위해서는 탄

성(elastic) 물성과 소성(plastic) 물성을 부여해야 한다. 이러한 소재의 물성은 인장시험의 하중-변위 선도 데이터를 통해 얻어질 수 있다. 구체적인 예를 들자면, 탄성 물성을 정의하기 위해 필요한 탄성 계수는 인장시험의 하중-변위 선도 데이터를 시편의 단면적과 변위를 측정하는 표점 거리로 나누어 응력-변형률 선도 데이터로 변환한 후 초기 선형 구간의 기울기를 계산하여 얻어진다. 소성 물성을 정의하기 위해 필요한 항복 응력과 그때의 소성 변형률은 응력-변형률 데이터를 진응력-진변형률 데이터로 변환한 후 항복 지점의 소성 변형률을 0으로 오프셋(offset)하여 얻을 수 있다. 통상적으로 항복 지점은 0.2 % 변형률 지점에서 탄성 계수의 기울기에 따라 올라가는 직선이 응력-변형률 그래프와 만나는 지점을 항복 지점으로 정의한다.

[0004] 인장시험 결과 데이터를 기반으로 유한요소모델의 해석을 위한 물성을 부여해주고 나면 부여된 물성이 실제 물리 현상을 잘 반영하는지 확인하기 위해 물성 보정 과정을 거친다. 도 3은 실제 ISO 527 인장시편을 가지고 시험을 수행한 것을 보여주는 것으로, 좌측 사진은 시험 전의 인장시편을, 우측 사진은 시험 후의 인장시편을 각각 보여주고 있다. 도 4는 도 3에 보인 바와 같은 실제 인장시편을 기반으로 설계된 유한요소모델이다. 상술한 바와 같이 유한요소모델에 부여된 물성이 실제 물리 현상을 잘 반영하는지 확인할 수 있도록, 실제 시험 조건과 동일한 경계 조건을 부여하여 해석을 진행하게 된다.

[0005] 하기의 표 1은 실제 인장시험 시편(Exp.)으로 측정된 변위(δ) 및 하중(F) 데이터 및 유한요소모델(FEM)으로 산출된 변위(δ) 및 하중(F) 데이터를 비교한 것이며, 도 2는 표 1의 데이터를 사용하여 도시한 하중-변위 선도로서, 실제 인장시험 시편에서 측정된 값은 선으로 표시하고, 유한요소모델로 산출된 값은 점으로 표시하여, 서로를 비교할 수 있게 도시한 것이다. 이와 같이 이후 인장시험에서 얻은 하중-변위 선도 데이터와 유한요소모델을 통해 얻은 하중-변위 선도 데이터를 비교하여, 유한요소모델이 실제 인장시험 시편을 올바르게 모사하고 있는지의 여부, 즉 정합성을 판단한다. 시험과 해석 간의 정합성을 수치적으로 판단하기 위하여 시험 및 해석 데이터 간에 평균 제곱근 오차(root mean square error, RMSE)를 계산하여 확인할 수 있다.

표 1

[0006]

Exp. δ (mm)	Exp. F (kN)	FEM δ (mm)	FEM F (kN)
1.00E-03	1.77E-03	0	0
0.1535	0.2438	0.1937	0.2735
0.3625	0.5335	0.3878	0.5446
0.573	0.7739	0.5812	0.8121
0.947	1.0465	0.9273	1.0639
1.254	1.1667	1.213	1.1534
1.489	1.2333	1.4269	1.2093
1.7215	1.2848	1.643	1.2555
2.196	1.3571	2.1029	1.3119
2.436	1.3784	2.3332	1.3342
2.68	1.3919	2.5674	1.3521
3.086	1.4043	2.9586	1.3745
3.4285	1.3984	3.2874	1.3897
3.684	1.3926	3.5552	1.3938
3.9395	1.3873	3.8695	1.3945
4.197	1.3794	4.1826	1.3952
4.4555	1.3699	4.4942	1.3958
4.7125	1.3604	4.8057	1.3963
4.969	1.3488	5.1173	1.3968
5.3535	1.3338	5.5925	1.3974

[0007] 그런데 이러한 과정으로 이루어지는 기존의 정합성 판단 방법에서, 실제 소재에 존재하는 재료 물성(제작 공차), 경계 조건(시험 진행 시 시편의 고정점), 하중(동일 조건이라 주고 부여하는 반복 하중) 등에 내포된 불확실성으로 인하여 시험과 해석이 일치하지 않는 경향이 있다.

[0008] 모든 공학적 문제에서는 불확실성과 산포가 존재하며, 공학 시스템 성능 해석에 존재하는 불확실성 및 산포의 원인은 물리적 불확실성, 모델링 불확실성, 통계적 불확실성의 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 첫째, 물리적 불확실성이란, 시스템 설계 시 발생하는 제작 공차와 재료 물성치에 존재하는 산포의 영향으로 인한 것으로서, 실제 시스템 운영 시 이러한 물리적 불확실성요인이 상당히 크게 발생하게 된다. 둘째, 모델링 불확실성이란, 시

시스템의 수학적 모델링, 수치적 근사화 과정에서 수반되는 가정들, 근사화 오차 등의 영향으로 인한 것으로서, 시스템의 복잡도가 증가함에 따라 함께 증가하게 된다. 셋째, 통계적 불확실성이란, 적은 양의 데이터 또는 미지의 변수들에 따른 정보 부족에 기인하는 불확실성을 말하는 것으로서, 확률적 모델링에 충분한 수의 정보를 확보하기 위해서는 많은 시간과 비용이 요구된다.

- [0009] 시스템 성능 해석에는 불확실성요인들이 많이 존재하므로 동일한 조건에서 반복 시험을 통한 결과는 불확실성을 갖는 반면, 유한요소모델은 성능을 결정론적으로 예측하게 된다. 이때, 시험 결과는 임의로 얻어지는 반면에 해석 결과는 항상 결정론적인 값으로 얻어진다. 이러한 해석 결과는 실제로 존재하는 여러 불확실성요인을 반영하지 못하며, 모델의 예측 정확도가 부정확해지는 결과를 초래할 수 있다.
- [0010] 인장시험에 사용되는 시편의 물성을 비교하는 기존의 결정론적 비교 방법은, 실제 시험 결과와 유한요소모델의 해석 결과를 RMSE 등을 통해 비교하여 해석모델의 예측 능력을 평가할 수 있는 가장 단순한 방법이다. 설계자가 정한 기준보다 두 결과의 차이가 작으면 유한요소모델이 적합하다고 판단을 하게 되고, 기준보다 결과의 차이가 크면 유한요소모델이 부적합하다고 판단하게 된다. 하지만 실제 시스템에 존재하는 재료 물성, 경계 조건, 하중 등에 내포된 불확실성과 산포 요인의 존재로 인해서 결정론적 모델 비교 방법은 유한요소모델의 예측 능력을 오히려 떨어뜨릴 수 있다.
- [0011] 실제 실험을 통해 얻어진 데이터의 신뢰성 향상을 위해 통계적 방법을 이용하는 기술의 한 예로서 한국특허등록 제1831561호("통계적 특성을 이용한 설계 장치 및 방법", 2018.02.14., 이하 '선행문헌 1')가 있다. 선행문헌 1에는, 입력된 데이터에 대한 신뢰성 여부를 판단한 후, 신뢰성이 있다고 판단된 경우 통계적 특성을 분석하여 저장함으로써 데이터베이스를 구축하고, 신뢰성이 없다고 판단된 경우 업데이트된 데이터에 대한 신뢰성을 재판단한 결과에 따라 통계적 특성을 분석할지의 여부를 결정하는 설계 방법이 개시된다. 그러나 선행문헌 1만으로는 이를 유한요소모델에 어떻게 적용할지를 유추하기 어려워, 실제 실험결과 및 유한요소모델의 정합성을 판단하는데 선행문헌 1을 적용하기에는 어려움이 있다.
- [0012] 한편 유한요소해석의 신뢰성을 향상하기 위한 기술의 한 예로서 한국특허공개 제2018-0063656호("금속재료 열처리를 통한 응력이완 예측을 위한 유한요소해석 신뢰성 향상방법", 2018.04.16., 이하 '선행문헌 2')가 있다. 선행문헌 2에는, 크립시험을 수행하여 얻어진 결과 데이터를 저장한 후, 이 중 저변형률 영역에 포함된 데이터를 이용하여 크립변형률속도 선형구성방정식을 결정하고, 이를 유한요소모델에 입력하여 해석을 수행하는 기술이 개시된다. 선행문헌 2는 말하자면 통계적인 데이터를 이용하여 유한요소모델을 보정하는 방법이라고 할 수 있다. 그러나 선행문헌 2는, 앞서 설명한 바와 같이 시험 수행으로 얻어지는 데이터에 이미 포함되어 있는 불확실성을 제거하지 못하는 바, 결국 결정론적 접근의 한계를 내포하고 있다.
- [0013] 즉 결정론적 접근의 한계를 극복하고 유한요소모델의 검증 및 보정을 성공적으로 수행하기 위해서는 통계학적 접근이 뒷받침 되어야 한다. 이를 위해서는 시스템에 존재하는 불확실성 및 산포 요인을 파악하고, 다양한 공학적, 통계적 기법을 적용하여 통계학적 모델을 정립하는 것이 필요하다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0014] (특허문헌 0001) 1. 한국특허등록 제1831561호("통계적 특성을 이용한 설계 장치 및 방법", 2018.02.14.)
- (특허문헌 0002) 2. 한국특허공개 제2018-0063656호("금속재료 열처리를 통한 응력이완 예측을 위한 유한요소해석 신뢰성 향상방법", 2018.04.16.)

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0015] 따라서, 본 발명은 상기한 바와 같은 종래 기술의 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로, 본 발명의 목적은, 유한요소모델의 예측 능력에 대한 신뢰도를 보장하기 위해, 해석모델의 유효성을 통계적으로 검증하고 예측 결과를 향상시킬 수 있도록, 통계적 모델을 도입하여 검증 및 보정을 수행하는, 통계학적 분석을 통한 유한요소모델의 신뢰성 보정 및 검증 방법을 제공함에 있다.

과제의 해결 수단

[0016] 상기한 바와 같은 목적을 달성하기 위한 본 발명의 통계학적 분석을 통한 유한요소모델의 신뢰성 보정 및 검증 방법은, 시편에 대한 기계적 물성 측정을 위한 시편시험결과 데이터를 기반으로 설계된 유한요소모델의 신뢰성을 보정 및 검증하는 방법으로서, 상기 시편의 복수 개의 설계변수 중 선택된 일부가 불확실성요인으로 설정되고, 불확실성요인으로 설정된 상기 설계변수가 상기 유한요소모델에 입력되어 산출된 모델해석결과로부터 불확실성이 전파된 예측확률분포가 획득되는 불확실성정량화단계; 상기 유한요소모델로부터 획득된 불확실성을 내포하는 상기 예측확률분포 및 상기 시편시험결과로부터 산출된 시험확률분포가 비교됨으로써 상기 설계변수가 보정되는 통계적모델보정단계; 보정된 상기 설계변수가 상기 유한요소모델에 재입력되어 보정된 상기 예측확률분포 및 상기 시험확률분포가 비교됨으로써 상기 유한요소모델이 검증되는 통계적모델검증단계; 를 포함할 수 있다.

[0017] 이 때 상기 불확실성정량화단계는, 상기 시편의 복수 개의 설계변수 중 모수인 평균 및 분산과 분포형태가 알려진 일부의 상기 설계변수를 인지 불확실성요인이라 할 때, 상기 시편의 복수 개의 설계변수 중 인지 불확실성요인에 해당하는 상기 설계변수가 확률분포 형태로 생성되는 불확실성모델링단계, 가중적분인수를 기반으로 하여 민감도가 분석됨으로써 복수 개의 상기 설계변수 중 일부가 주요설계변수로 선택되는 민감도분석단계, 상기 주요설계변수가 상기 유한요소모델에 입력되어 불확실성이 전파된 상기 예측확률분포가 획득되는 불확실성전파단계를 포함할 수 있다.

[0018] 또한 상기 민감도분석단계는, 하기의 식을 이용하여 상기 가중적분인수가 산출될 수 있다.

$$WIFac = 1 - \sqrt{\frac{\sum \max(f[n]^2, g[n]^2) \cdot \left(1 - \frac{\max(0, f[n] \cdot g[n])}{\max(f[n]^2, g[n]^2)}\right)}{\sum \max(f[n]^2, g[n]^2)}}$$

[0019]

(WIFac : 가중적분인수, n : 데이터 샘플 수, f[n] : 시편시험결과, g[n] : 모델해석결과)

[0020]

[0021] 또한 상기 민감도분석단계는, 하기의 식에 의해 계산되는 스피어만 상관계수를 이용하여 상기 설계변수들 간의 상관성이 평가됨으로써 민감도가 분석될 수 있다.

$$\rho = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}}$$

[0022]

(ρ : 상관계수, x : 설계변수, y : 모델해석결과)

[0023]

[0024] 또한 상기 통계적모델보정단계는, 상기 시편의 복수 개의 설계변수 중 모수인 평균 및 분산과 분포형태가 알려진 일부의 상기 설계변수를 인지 불확실성요인이라 하고, 모수인 평균 및 분산과 분포형태가 알려지지 않은 나머지 상기 설계변수를 불인지 불확실성요인이라 할 때, 상기 유한요소모델로부터 획득된 불확실성을 내포하는 상기 예측확률분포에 불인지 불확실성요인에 상응하는 표준화 바이어스를 도입하여 상기 시험확률분포에 근사화 시킴으로써 불인지 불확실성요인에 해당하는 상기 설계변수의 모수가 추정되어 산출되는 바이어스계산단계, 상기 예측확률분포가 최대우도추정을 통해 상기 시험확률분포에 맞추어짐으로써 상기 유한요소모델의 인지 불확실성요인인 상기 설계변수 및 불인지 불확실성요인인 상기 바이어스가 보정되는 최대우도추정보정단계를 포함할 수 있다.

[0025] 또한 상기 바이어스계산단계는, 하기의 식을 이용하여 표준화 바이어스를 도입할 수 있다.

$$y^e(\mu_e, \sigma_e) = y^m(\Theta(\mu_{x_1}, \sigma_{x_1}, \dots, \mu_{x_n}, \sigma_{x_n})) + \delta(\mu_b, \sigma_b)$$

[0026]

$$\delta(\%) = \frac{E(y^e) - y^m}{y^m} \times 100, \quad \delta \sim U(a_\delta, b_\delta)$$

[0027]

[0028] (y^e : 시편시험결과, y^m : 모델해석결과, μ : 평균, σ : 표준편차, δ : 바이어스, a_δ/b_δ : 바이어스 상/하한값)

[0029] 또한 상기 최대우도추정보정단계는, 상기 예측확률분포 및 상기 시험확률분포 간의 우도 값이 산출되는 단계,

우도 값이 최대인지의 여부가 판단되는 단계, 우도 값이 최대가 아니면 상기 모수가 업데이트되어 상기 예측확률분포가 다시 산출되는 단계를 포함하며, 우도 값이 최대가 될 때까지 상기 단계들이 반복 수행될 수 있다.

[0030] 또한 상기 최대우도추정보정단계는, 하기의 식을 이용하여 우도 값이 산출될 수 있다.

[0031]
$$\log(L) = \log\left(\prod_{i=1}^n (f_k(y_i^e | \theta))\right)$$

[0032] (L : 우도, y^e : 시편시험결과, f_k : 유한요소모델 함수, θ : 모수)

[0033] 또한 상기 통계적모델검증단계는, 보정된 상기 설계변수가 상기 유한요소모델에 재입력되어 보정된 상기 예측확률분포 및 상기 시험확률분포 각각의 누적분포함수를 이용하여 시험횟수별 면적척도가 산출되며, 유-폴링 방법을 통해 복수 개의 시험횟수별 면적척도 값들로부터 최종적으로 면적척도가 추출되는 면적척도추출단계, 시험횟수별 면적척도 값들이 확률분포 형태로 생성되고, 상기 추출된 면적척도 값이 상기 시험횟수별 면적척도 확률분포 상에서 미리 결정된 유의수준과 비교되어, 상기 추출된 면적척도가 상기 유의수준보다 작으면 보정된 상기 유한요소모델이 유효하다고 판단되는 유효성판단단계를 포함할 수 있다.

[0034] 또한 상기 면적척도추출단계는, 하기의 식을 이용하여 면적척도가 산출될 수 있다.

[0035]
$$d(F^e, F^m) = \int |F^e(x) - F^m(x)| dx$$

[0036] (d : 면적척도, F^e : 시편시험결과의 누적분포함수, F^m : 모델해석결과의 누적분포함수)

발명의 효과

[0037] 먼저 기술적 측면에서 볼 때 본 발명에 의하면, 기존의 결정론적 설계 방법에서 내포하고 있던 불확실성 등의 문제점을 통계학적 분석을 통하여 효과적으로 보완할 수 있다는 큰 효과가 있다. 구체적으로 설명하자면, 기존에는 불확실성을 내포하는 실험 데이터를 기반으로 유한요소모델에 물성을 부여하였기 때문에, 이러한 유한요소모델로 시뮬레이션한 결과가 실제 시편의 실험 결과에 부합하지 않는 경우가 종종 발생하였다. 그러나 본 발명에 의하면, 불확실성 자체를 정량화하고 이를 이용하여 모델을 보정 및 검증함으로써, 실제 시편 및 유한요소모델의 정합성을 극대화시킬 수 있게 된다. 즉 본 발명에서 제안하는 방법으로 통계적 모델의 유효성이 검증이 되면 인장시편에서의 보정된 설계변수는 유효성이 있다고 판단할 수 있으며, 인장시험 결과 대비 유한요소모델의 예측 결과를 정확하게 맞추는 것이 가능한 것이다. 이에 따라 본 발명에 의하면, 소재의 신뢰성 있는 기계적 물성 확보가 가능하게 하는 효과를 얻을 수 있다. 더불어 본 발명은, 어느 단일 제품에만 적용 가능한 것이 아니라, 불확실성요인이 존재하는 다양한 제품 설계 산업에서도 널리 적용할 수 있다는 큰 효과가 있다.

[0038] 또한 산업적 측면에서 볼 때 본 발명에 의하면, 소재에 대한 정확한 물성 파악이 가능하게 되므로, 시스템 단위에서의 부품 파손 및 경제적 손실을 매우 효과적으로 방지할 수 있다. 더불어 본 발명에 의하면, 제품의 강건성 확보를 위해 불필요한 과도설계를 방지할 수 있으며, 또한 설계 비용 역시 절감할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0039] 도 1은 ISO 527 인장시편 예시(두께: 4mm).
- 도 2는 인장시험 및 유한요소모델 하중-변위 선도.
- 도 3은 ISO 527 인장시편(좌: 시험 전, 우: 시험 후).
- 도 4는 인장시편 유한요소모델.
- 도 5는 본 발명의 보정 및 검증 방법의 흐름도.
- 도 6은 불확실성 확산 해석 단계의 실시예.
- 도 7은 통계적 모델 보정 단계의 실시예.
- 도 8은 면적척도 결과 예시(좌: u_i 값 추출, 우: 면적척도 값 U 추출).
- 도 9는 통계적 모델 검증 결과 예시(추출된 U 값 개수는 10개).

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0040] 이하, 상기한 바와 같은 구성을 가지는 본 발명에 의한 통계학적 분석을 통한 유한요소모델의 신뢰성 보정 및 검증 방법을 첨부된 도면을 참고하여 상세하게 설명한다.
- [0041] 본 발명은 기본적으로 통계적 모델 검증 및 보정 기술로서, 간략히 설명하자면 시편을 가지고 실제로 시험을 수행하여 얻은 시편시험결과와 유한요소모델로부터 산출하여 얻은 모델해석결과를 통계적으로 비교함으로써 유한요소모델의 유효성을 보정 및 검증하는 기술이다. 앞서 인장시험 시편을 가지고 인장시험을 하는 예시를 들었지만, 이로써 본 발명이 한정되는 것은 아니며, 다양한 형태의 시편 및 시험에 얼마든지 확대 적용이 가능하다.
- [0042] 본 발명은 보다 구체적으로 설명하자면, 본 발명은 시편에 대한 기계적 물성 측정을 위한 시편시험결과 데이터를 기반으로 설계된 유한요소모델의 신뢰성을 보정 및 검증하는 방법으로서, 불확실성정량화(uncertainty quantification)단계, 통계적모델보정(statistical model calibration)단계, 통계적모델검증(statistical model validation)단계를 포함한다. 도 5는 본 발명의 보정 및 검증 방법의 흐름도를 도시하고 있다.
- [0043] **[1] 불확실성정량화단계**
- [0044] 상기 불확실성정량화단계를 요약하자면, 상기 시편의 복수 개의 설계변수 중 선택된 일부가 불확실성요인으로 설정되고, 불확실성요인으로 설정된 상기 설계변수가 상기 유한요소모델에 입력되어 산출된 모델해석결과로부터 불확실성이 전파된 예측확률분포가 획득되는 단계이다. 보다 구체적으로는, 상기 불확실성정량화단계는 불확실성모델링(uncertainty modeling)단계, 민감도분석(sensitivity analysis)단계, 불확실성전파(uncertainty propagation)단계를 포함할 수 있다.
- [0045] 상기 불확실성모델링단계는, 상기 시편의 복수 개의 설계변수 중 모수인 평균 및 분산과 분포형태가 알려진 일부의 상기 설계변수를 인지 불확실성요인이라 할 때, 상기 시편의 복수 개의 설계변수 중 인지 불확실성요인에 해당하는 상기 설계변수가 확률분포 형태로 생성되는 단계이다. 보다 상세히 설명하자면 다음과 같다.
- [0046] 상기 불확실성모델링단계는 상기 불확실성정량화단계의 첫 번째 단계로서, 유한요소모델에 대한 각 설계변수들의 평균, 분산 등의 모멘트 정보를 정의한 후 설계변수들을 결정론적인 값이 아닌 확률분포 형태로써 통계적인 값으로 나타내는 과정이다. 설계변수들을 결정론적 값으로 구하는 대표적인 방법으로는 실험계획법(design of experiment, DoE)이 있으며, 이는 설계변수의 수준을 고려하여 실험점을 생성하고 나서 분석을 진행한다. 그러나 앞서 기술한 바와 같이 실제 공학적 문제에서는 각 설계변수들이 불확실성을 내재하고 있으며, 통계학적 분석을 위해서는 설계변수들을 확률분포로 생성하여 분석을 진행하여야 한다. 불확실성은 설계자의 파악 여부에 따라 인지 불확실성(recognized uncertainty)과 불인지 불확실성(unrecognized uncertainty)으로 나눌 수 있다. 인지 불확실성은 불확실성요인을 가지고 있으면서 설계변수 분포의 모수인 평균과 분산을 알고 있는 상태를 가리킨다. 불인지 불확실성은 불확실성 모델링 단계에서 파악하지 못한 불확실성으로 설계변수가 가지고 있는 분포의 형태 및 모수를 모르는 상태이며, 이는 후에 보정 단계에서 고려하여 통계적 모델 분석을 진행하게 된다.
- [0047] 결정론적 설계 관점에서는 소재의 설계변수를 단일 값으로 선정한 후 유한요소해석을 수행하여 단일한 결과를 도출하게 되지만, 확률론적 설계 관점에서는 설계변수들을 통계적 분포로 선정하고 이에 대한 결과를 분포 형태로 도출하게 된다. 앞서의 인장시험용 시편의 예시를 들자면, 인장시편의 설계변수로서 두께, 너비, 표점 거리, 탄성 계수의 4가지를 선정할 수 있다. 두께와 너비는 제작 공차에 해당되며, 표점 거리는 관측 오차에 해당되며, 탄성 계수는 모델링 오차에 해당된다. 이와 같이 선정해 준 4가지 설계변수는 정규분포를 따른다고 가정한다. 설계변수에 대한 데이터 추출 기법에는 랜덤 샘플링(random sampling)을 통해 이루어진다.
- [0048] 상기 민감도분석단계는, 가중적분인수를 기반으로 하여 민감도가 분석됨으로써 복수 개의 상기 설계변수 중 일부가 주요설계변수로 선택되는 단계이다. 보다 상세히 설명하자면 다음과 같다.
- [0049] 상기 민감도분석단계는 상기 불확실성정량화단계의 두 번째 단계로서, 많은 설계변수들 중에서 시험 및 해석 결과에 영향을 크게 미치는 인자를 구분하는 기술이다. 따라서 민감도 분석을 통해 선정된 주요 설계변수들만을 고려하면 효율적인 통계적 해석이 가능하다. 민감도 분석 진행을 위해서는 각 설계변수들의 값과 그에 대응하는 시스템 결과 값이 필요하다. 각 설계변수들의 값은 불확실성 모델링에서 도출한 설계변수의 확률분포 값을 적용하며, 시스템 결과 값은 실제 시험 및 유한요소모델의 결과를 비교하여 식 (1)과 같이 계산할 수 있는 가중적분인수(weighted integrated factor, WIFac)로 변환한다. 이러한 변환 이유는 시스템 값을 특정 값(e.g. 최대 값, 평균 값)으로 정하여 보는 것이 아니라 시험 선도의 전체적인 결과 값을 모두 고려하여 시스템 값을 정할

수 있기 때문이다.

$$WIFac = 1 - \sqrt{\frac{\sum \max(f[n]^2, g[n]^2) \cdot \left(1 - \frac{\max(0, f[n] \cdot g[n])}{\max(f[n]^2, g[n]^2)}\right)}{\sum \max(f[n]^2, g[n]^2)}} \quad (1)$$

(WIFac : 가중적분인수, n : 데이터 샘플 수, f[n] : 시편시험결과, g[n] : 모델해석결과)

가중 적분 인수는 상관성 지수의 종류 중 하나로 시편시험결과 값 f[n]과 모델해석결과 값 g[n]을 비교한다. 여기서 n은 시험 선도의 x축에 해당하는 데이터 샘플 수이다. 일반적인 상관계수 기반 비교 방법은 각 비교 모델의 경향이 비슷하면 높은 상관성 값을 도출하는 반면에, 가중 적분 인수는 경향뿐만 아니라 시험과 해석 결과의 크기 차이도 고려하기 때문에 하중-변위 선도에서의 시험과 해석간의 선도들을 1:1로 비교함으로써, 선도 전체의 개형 비교가 정확하게 가능하다. 이러한 특성을 이용하여, WIFac의 구체적 효과로는 동일한 조건에서의 반복적인 시험의 결과(시편시험결과) 값과 유한요소모델의 해석 결과(모델해석결과) 값을 정확하게 비교가 가능하다는 점이 있다. 이와 같이 불확실성 모델링을 통해 설계변수들의 값을 통계적으로 정의해주고, WIFac을 통해 시스템 결과 값을 정의해주고 나면 설계변수들과 시스템 결과 간의 민감도를 분석하고 주요 설계변수를 도출할 수 있다.

민감도 분석에는 상관성 분석 중 하나인 스피어만 상관계수(Spearman correlation coefficient)를 적용하고, 여러 설계변수(앞서의 예시에서는, 두께, 너비, 표점 거리, 탄성 계수의 4가지 설계변수)와 유한요소모델의 선도 데이터 사이의 관계성이 높은 순으로 순위를 매겨 식 (2)와 같이 상관계수 ρ를 도출하고 평가한다.

$$\rho = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

(ρ : 상관계수, x : 설계변수, y : 모델해석결과)

x_i는 설계변수 x에서 i번째의 데이터 순위, y_i는 시스템 결과 값 y에서 i번째의 데이터 순위, 문자 위의 바(bar)는 평균을 의미한다. 이 기법은 변수 간의 상관 관계가 있는지 없는지를 밝혀주며, 상관계수는 -1과 1 사이의 값으로 변환된다. 변수간의 상관성이 높을수록 계수의 값은 1 또는 -1에 가까우며, 상관성이 없으면 0에 가까워진다.

상기 불확실성전과단계는, 상기 주요설계변수가 상기 유한요소모델에 입력되어 불확실성이 전과된 상기 예측확률분포가 획득되는 단계이다. 보다 상세히 설명하자면 다음과 같다.

상기 불확실성전과단계는 상기 불확실성정량화단계의 세 번째 단계로서, 민감도 분석을 통해 선정된 주요 설계변수들을 유한요소모델을 통해 시스템 결과 값을 통계적인 분포로 도출하는 방법이다. 실제로 존재하는 여러 가지 불확실성이 유한요소모델을 통해서 어떻게 확산되어 응답이 어떤 확률 분포로 형성되는지 확인하는 방법으로, 이를 통해 성능 값을 통계적으로 정량화하는 것이 가능하게 된다. 도 6은 불확실성 확산 해석 단계의 실시예로서, 이와 같이 통계 기반 불확실성 확산 해석을 수행할 수 있으며, 반응표면모델(response surface model)을 활용하여 시스템 결과 값을 근사화한 후에 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 이용해서 더 많은 가상의 시뮬레이션 케이스를 생성하여 불확실성 확산 해석이 가능하다.

불확실성 확산 해석으로부터 유한요소모델의 시스템 결과 값을 확률밀도함수(probability density function, PDF)로 표현할 수 있으며, 이는 시스템의 초기 예측 확률분포가 된다. 따라서 초기 예측 확률분포를 가지고 보정 단계에서 실제 시험 확률분포와의 보정을 통해 시험 및 해석 간의 시스템 결과 값을 맞추는 것이 가능하다.

[2] 통계적모델보정단계

상기 통계적모델보정단계를 요약하자면, 상기 유한요소모델로부터 획득된 불확실성을 내포하는 상기 예측확률분포 및 상기 시편시험결과로부터 산출된 시험확률분포가 비교됨으로써 상기 설계변수가 보정되는 단계이다. 보다 구체적으로는, 상기 통계적모델보정단계는 바이어스계산단계, 최대우도추정(maximum likelihood estimation, MLE)보정단계를 포함할 수 있다.

상기 바이어스계산단계는, 상기 시편의 복수 개의 설계변수 중 모수인 평균 및 분산과 분포형태가 알려진 일부의 상기 설계변수를 인지 불확실성요인이라 하고, 모수인 평균 및 분산과 분포형태가 알려지지 않은 나머지 상

기 설계변수를 불인지 불확실성요인이라 할 때, 상기 유한요소모델로부터 획득된 불확실성을 내포하는 상기 예측확률분포에 불인지 불확실성요인에 상응하는 표준화 바이어스를 도입하여 상기 시험확률분포에 근사화시킴으로써 불인지 불확실성요인에 해당하는 상기 설계변수의 모수가 추정되어 산출되는 단계이다. 보다 상세히 설명하자면 다음과 같다.

[0063] 상기 바이어스계산단계는 상기 통계적모델보정단계의 첫 번째 단계로서, 앞서 고려하지 못했던 불인지 불확실성요인을 고려한다. 이는 앞서 상기 불확실성모델링단계에서 인지 불확실성을 고려하여 설계변수의 확률분포 모델링만 진행하였으므로, 실질적으로 불인지 불확실성요인을 고려하지 못하였기 때문이다. 만약 불인지 불확실성의 한 요소가 모델의 관심 성능에 큰 영향을 미치고 있다면, 인지 불확실성만을 가지고 고려하는 것은 유한요소모델의 예측 정확도를 일정 수준 이상 향상시키기에 부족하게 된다. 유한요소모델의 예측 값은 주로 실제 값으로 가정할 수 있는 시험 데이터와 비교하게 되는데, 두 값에 대한 관계는 식 (3)과 같다.

[0064]
$$y^e(\mu_e, \sigma_e) = y^m(\Theta(\mu_{x_1}, \sigma_{x_1}, \dots, \mu_{x_n}, \sigma_{x_n})) + \delta(\mu_b, \sigma_b) \quad (3)$$

[0065]
$$\delta(\%) = \frac{E(y^e) - y^m}{y^m} \times 100, \quad \delta \sim U(a_\delta, b_\delta) \quad (4)$$

[0066] (y^e : 시편시험결과, y^m : 모델해석결과, μ : 평균, σ : 표준편차, δ : 바이어스, a_δ/b_δ : 바이어스 상/하한 값)

[0067] y^e 는 실험 값, y^m 은 예측 값, μ 와 σ 는 각각 평균과 표준편차이며, δ 는 불인지 불확실성 요인을 나타내는 바이어스(bias)를 의미한다. 불확실성에 대해 식 (4)와 같이 상/하한 a_δ 에서 b_δ 범위를 갖는 표준화 바이어스를 도입하여 예측 값을 시험 값에 근사시키고, 불확실성 정도를 표현하는 확률분포의 모수인 평균과 표준편차를 추정하게 된다. 표준화 바이어스인 불인지 불확실성을 고려하지 않고 통계적 모델 보정은 가능하다. 그러나 표준화 바이어스를 도입하므로써, 도입하지 않을 때보다 예측 확률분포를 시험 확률분포에 더 정확하게 보정을 시킬 수 있다. 도 7은 통계적 모델 보정 단계의 실시예로서, 도 7 중 초기 값에서 이동된 값으로 넘어가는 과정이 표준화 바이어스를 도입하여 예측 확률분포를 시험 확률분포에 근사하게 옮기는 과정이다. 바이어스는 통계적 변수로서, 인지 불확실성의 모수들과 함께 보정된다.

[0068] 상기 최대우도추정보정단계는, 상기 예측확률분포가 최대우도추정을 통해 상기 시편확률분포에 맞추어짐으로써 상기 유한요소모델의 인지 불확실성요인인 상기 설계변수 및 불인지 불확실성요인인 상기 바이어스가 보정되는 단계이다. 보다 상세히 설명하자면 다음과 같다.

[0069] 상기 최대우도추정보정단계는 상기 통계적모델보정단계의 두 번째 단계로서, 최대우도추정(maximum likelihood estimation, MLE)을 이용하여 여러 설계변수와 바이어스 변수를 보정한다. 앞서의 인장시험 시편의 예시라면, 앞서 설명한 4가지 설계변수의 평균, 표준편차와 1가지 바이어스 변수를 보정할 수 있을 것이다. 이 방법은 n개의 인장시험의 성능 결과 y^e 분포와 유한요소모델의 성능 결과 분포를 맞춰주되, 우도 L을 가장 크게 해주는 설계변수 및 바이어스 변수의 모수 θ 를 찾는 방법이다. 상세히 설명하자면, 이 단계는 상기 예측확률분포 및 상기 시편확률분포 간의 우도 값이 산출되는 단계, 우도 값이 최대인지의 여부가 판단되는 단계, 우도 값이 최대가 아니면 상기 모수가 업데이트되어 상기 예측확률분포가 다시 산출되는 단계를 포함하며, 우도 값이 최대가 될 때까지 상기 단계들이 반복 수행되어 이루어진다. 도 7 중 이동된 값에서 보정+이동된 값으로 넘어가는 과정이 최대우도추정을 통해 예측 값을 보정하는 과정을 나타내고 있으며, 식 (5)는 최대우도추정에 대한 계산 과정을 나타낸다.

[0070]
$$\log(L) = \log\left(\prod_{i=1}^n (f_k(y_i^e | \theta))\right) \quad (5)$$

[0071] (L : 우도, y^e : 시편시험결과, f_k : 유한요소모델 함수, θ : 모수)

[0072] **[3] 통계적모델검증단계**

[0073] 상기 통계적모델검증단계를 요약하자면, 보정된 상기 설계변수가 상기 유한요소모델에 재입력되어 보정된 상기 예측확률분포 및 상기 시험확률분포가 비교됨으로써 상기 유한요소모델이 검증되는 단계이다. 이 단계에서는 유효성 검증을 수행하기 위해서 앞서 진행하였던 불확실성 정량화 및 보정을 통해서 통계적으로 모델링 된 해석

결과와 시험 결과를 통계적인 관점에서 비교한다. 보다 구체적으로는, 상기 통계적모델검증단계는 면적척도추출 단계, 유효성판단단계를 포함할 수 있다.

[0074] 상기 면적척도추출단계는, 보정된 상기 설계변수가 상기 유한요소모델에 재입력되어 보정된 상기 예측확률분포 및 상기 시험확률분포 각각의 누적분포함수를 이용하여 시험횟수별 면적척도가 산출되며, 유-풀링 방법을 통해 복수 개의 시험횟수별 면적척도 값들로부터 최종적으로 면적척도가 추출되는 단계이다. 보다 상세히 설명하자면 다음과 같다.

[0075] 상기 면적척도추출단계는 상기 통계적모델검증단계의 첫 번째 단계로서, 검증을 위한 척도를 통해 시험 성능 결과와 보정된 해석 성능 결과의 분포 차이를 정량화시키는데, 이 때 면적척도(area metric)와 유-풀링 방법(U-pooling method)을 이용한다.

[0076] 면적척도는 보정된 유한요소모델 성능 결과의 분포와 인장시험 결과의 분포 사이의 면적을 계산함으로써, 해석과 시험 결과의 정량적인 오차 계산이 가능하다. 식 (6)은 이러한 수식을 나타낸다. 식에서 F^e 와 F^m 은 각각 시험 결과와 해석 결과의 누적분포함수(cumulative distribution function)를 나타낸다. 오차에 해당하는 부분을 적분한 것이 면적척도의 값이 된다.

$$d(F^e, F^m) = \int |F^e(x) - F^m(x)| dx \quad (6)$$

[0078] (d : 면적척도, F^e : 시험시험결과의 누적분포함수, F^m : 모델해석결과의 누적분포함수)

[0079] 시험 결과에 대한 해석 결과의 누적분포함수를 이용하는 면적척도를 사용할 때, 반복적인 조건에서 수행한 시험 결과들을 유효성 검증에 동시에 사용하기 위해서 유-풀링 방법을 이용한다. 실제 시험 값과 해석 값의 누적분포함수를 대응시켜 시험 횟수에 따른 u_i 값을 계산한다. 계산된 u_i 값을 기준으로 하여, 검증을 위해 균등누적분포 F_{uni} 와 u_i 값을 기반으로 한 누적분포 F_u 를 대응시켜 면적 차이를 계산할 수 있다. 유-풀링 방법으로부터 최종적으로 면적척도 값인 U를 추출할 수 있으며, 도 8은 이에 대한 면적척도 결과 예시(좌: u_i 값 추출, 우: 면적척도 값 U 추출)를 나타낸다.

[0080] 상기 유효성판단단계는, 시험횟수별 면적척도 값들이 확률분포 형태로 생성되고, 상기 추출된 면적척도 값이 상기 시험횟수별 면적척도 확률분포 상에서 미리 결정된 유의수준과 비교되어, 상기 추출된 면적척도가 상기 유의수준보다 작으면 보정된 상기 유한요소모델이 유효하다고 판단되는 단계이다. 보다 상세히 설명하자면 다음과 같다.

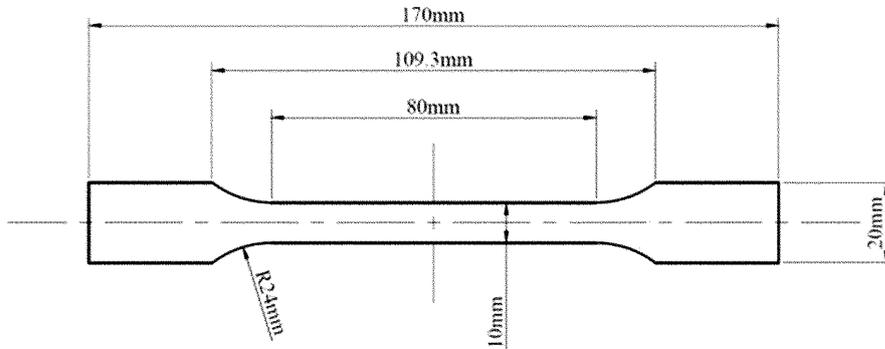
[0081] 상기 유효성판단단계는 상기 통계적모델검증단계의 두 번째 단계로서, 추출된 면적 척도가 유효한 값인지 판단하기 위해 가설 검정을 이용한다. 귀무가설은 해석모델이 유효하다고 가정하며, 일레로 유의수준을 0.05로 두고 검증을 수행한다. 도 9는 통계적 모델 검증 결과 예시(추출된 U 값 개수는 10개)로서, 도 9의 예시와 같이 반복적인 시험 횟수에 따른 면적 척도의 값들을 확률분포로 나타내었을 때, 95% 유의수준에 만족하는 값은 0.241로 계산할 수 있다. 즉, 반복적인 시험 결과를 기반으로 계산한 면적척도 값 0.181은 선정한 유의수준보다 작은 수치로써 도출이 되면 해석모델은 유효하다는 귀무가설은 기각될 수 없고 보정된 모델은 도 9의 예시와 같이 유효하다고 판단할 수 있다. 만약 보정된 모델의 검증척도가 유의수준에 미치지 못해 유효성이 떨어진다는 판단이 되면, 통계적 모델에 대한 재 보정 과정을 거치거나 모델 개선을 통한 모델 수정이 필요하다.

[0082] 이와 같은 방법으로 통계적 모델의 유효성이 검증이 되면 시험에서의 보정된 설계변수는 유효성이 있다고 판단할 수 있으며, 실제 시험 결과 대비 유한요소모델의 예측 결과를 정확하게 맞추는 것이 가능하다. 기존의 정합성 판단 방법과 비교하여 볼 때, 본 발명에 의하면 불확실성 요인을 고려한 통계학적 접근을 통해 정합성을 판단함으로써, 구체적인 예를 들면 인장시험을 기반으로 소재의 탄성 물성과 소성 물성에 대한 신뢰성도 확보할 수 있다.

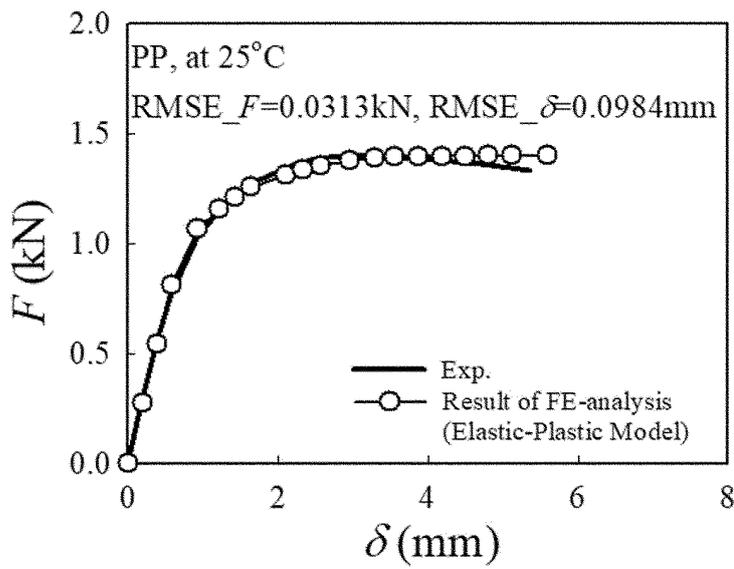
[0083] 본 발명은 상기한 실시예에 한정되지 아니하며, 적용범위가 다양함은 물론이고, 청구범위에서 청구하는 본 발명의 요지를 벗어남이 없이 당해 본 발명이 속하는 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 누구든지 다양한 변형 실시가 가능한 것은 물론이다.

도면

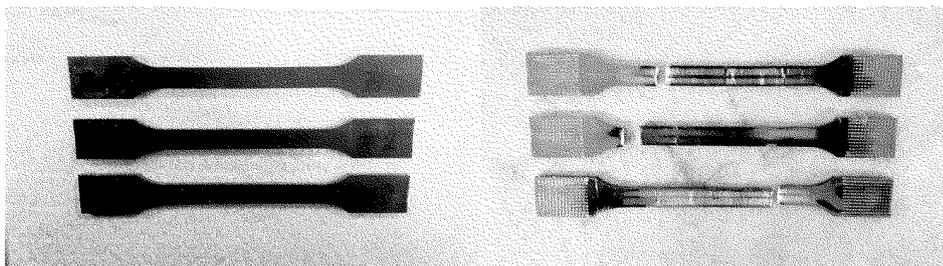
도면1



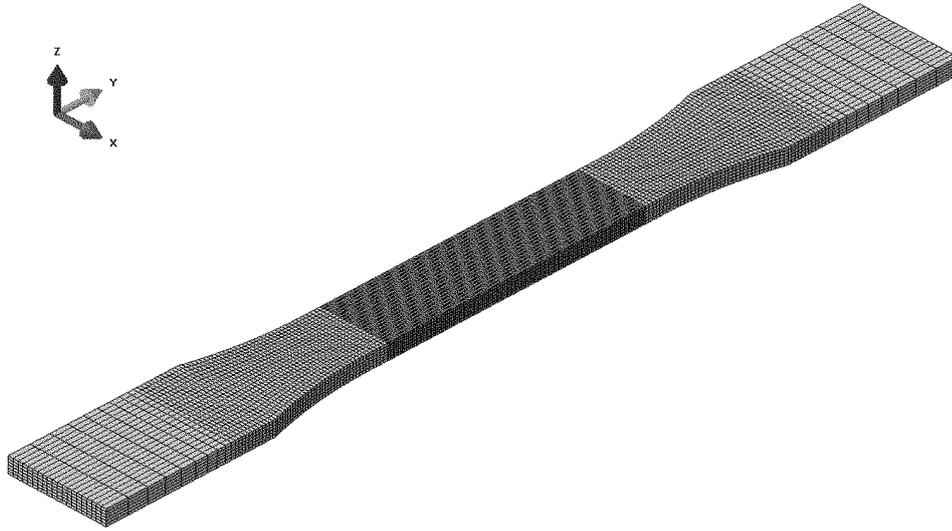
도면2



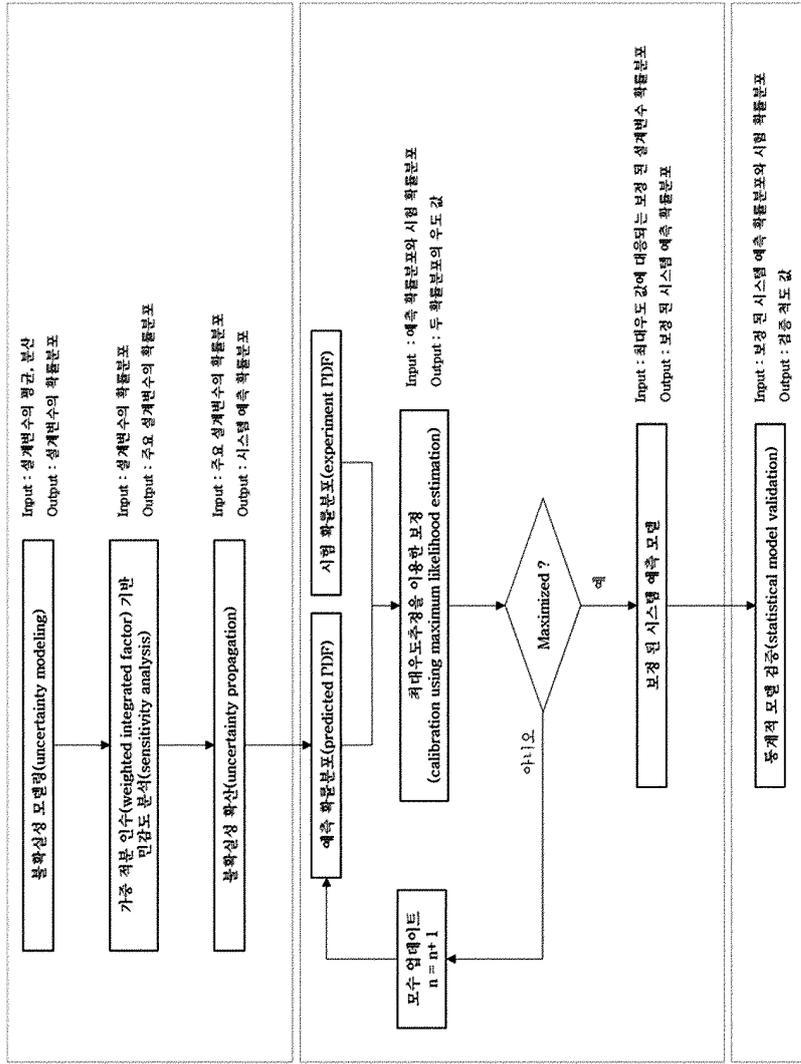
도면3



도면4



도면5

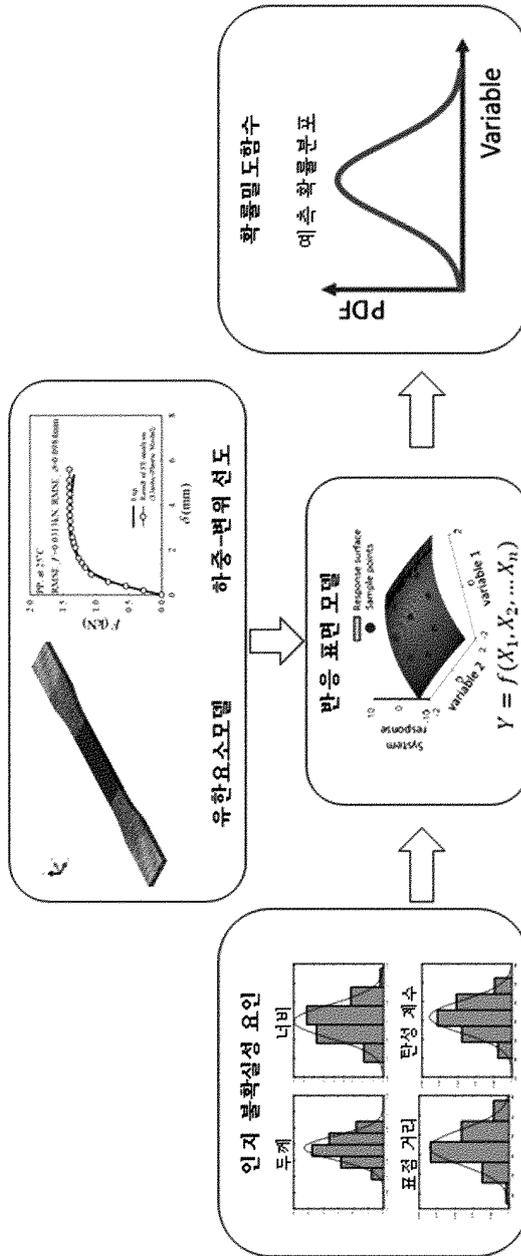


Level 1. 불확실성 정량화

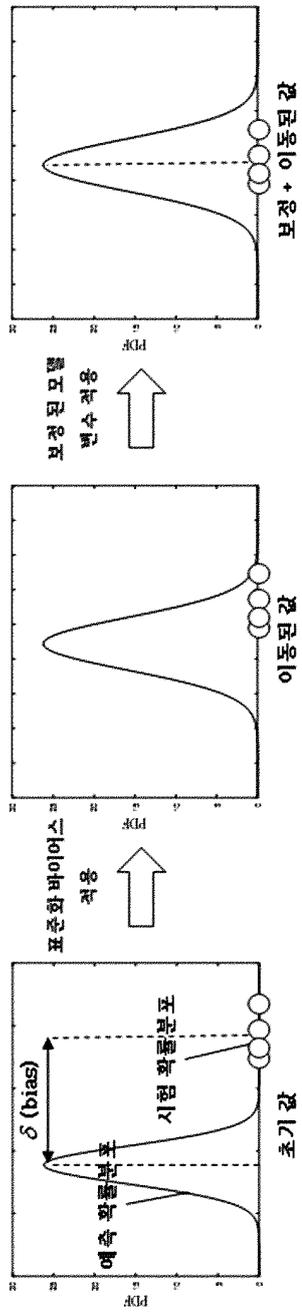
Level 2. 모델 보정

Level 3. 모델 검증

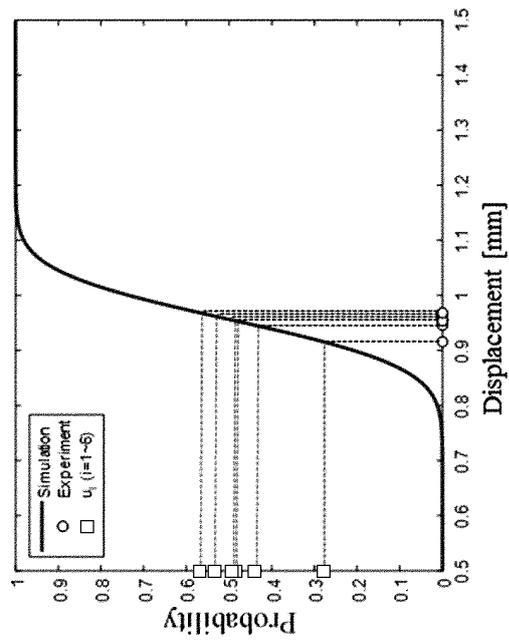
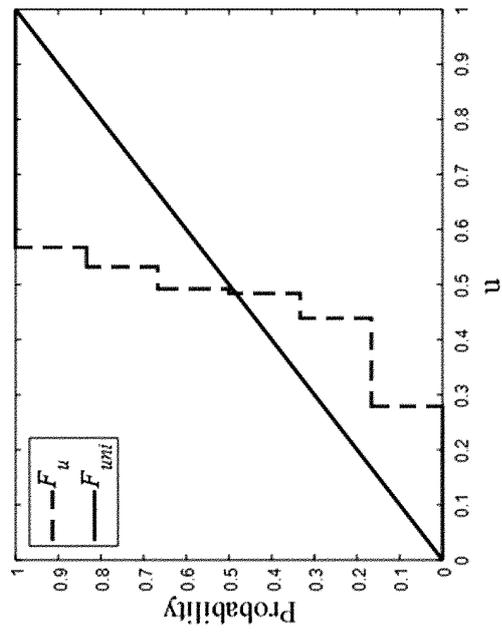
도면6



도면7



도면8



도면9

