

# 불인지 불확실성을 고려한 CAE 해석 모델의 예측 정확도 개선

윤병동<sup>†</sup> · 유민지<sup>\*</sup> · 이규석<sup>\*</sup> · 손혜정<sup>\*</sup> · 오현석<sup>\*</sup>

## Enhancement of Predictive Capability of CAE Model by Identifying Unrecognized Blind Uncertainty

Byeng D. Youn<sup>\*†</sup>, Minji Yoo<sup>\*</sup>, Guesuk Lee<sup>\*</sup>, Hyejeong Son<sup>\*</sup>, and Hyunseok Oh<sup>\*</sup>

**Key Words:** CAE model (해석모델), Unknown variables (미지 변수), Statistical model calibration (통계적 모델 보정), Statistical model validation (통계적 모델 검증), Area metric (면적척도)

### Abstract

In the design of passenger vehicles in the automotive industry, virtual testing is widely used. However, building a highly-predictive CAE model is still challenging. In this paper, to build a highly-predictive CAE model, several issues in statistical model validation approach are studied with an example of the steering column in cockpit modules: (1) selecting unknown input variables, (2) calibrating unknown parameters, and finally (3) checking the validity of CAE model using area metric based hypothesis testing. It is expected that the study helps to enhance the predictive capability of CAE models.

## 1. 서론

CAE 모델은 컴퓨터의 발달과 CAE 모델의 활용도 증가와 함께 다양한 산업에서 사용되고 있다. CAE 모델의 활용은 높은 신뢰도를 바탕으로 이루어질 수 있다. 따라서 CAE 모델의 신뢰도를 확인하고, 모델 성능을 개선하는 모델 검증 과정이 필요하다. CAE 모델과 실험 데이터를 비교하여 정확성을 평가하는 모델 검증 과정은 CAE 모델의 성능을 개선시키는데 사용된다. 더불어 모델 검증 과정 중 실험과 시뮬레이션의 불확실성을 고려한 통계적 모델 검증이 필요하다. 이 논문에서는 고 예지, CAE 모델을 만들기 위해 통계적인 모델 검증적인 접근에서 각핏 모듈 내 스티어링 컬럼을

대상으로 다음과 같이 몇 가지 이슈들이 연구되었다. (1) 미지 입력 변수 선택, (2) 미지 변수 계산, (3) 면적 척도 기반 CAE 모델의 가설 검증 확인. 이 연구는 CAE 모델의 예측 능력을 개선하는데 도움을 줄 것으로 기대된다.

## 2. 본론

### 1.1 각핏 모듈 내 스티어링 컬럼 형상

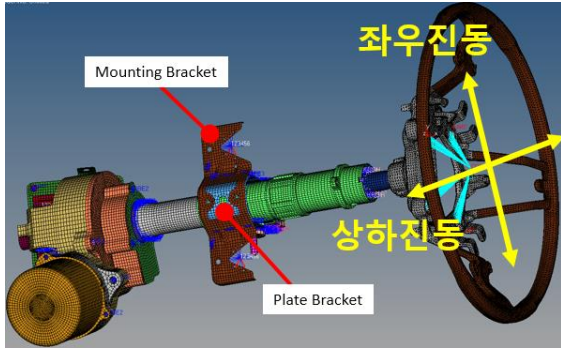
모델 검증의 대상이 되는 스티어링 컬럼은 스티어링 휠과 스티어링 기어를 연결하는 지지대로서, 운전자의 방향전환 의지를 조향 기어에 전달하는 역할을 담당한다 (Figure 1). 스티어링 컬럼은 다음과 같이 모델링 및 요소로 구분하여 나타내었으며 샤프트 하우징 내부의 조립 형상은 Figure 2와 같다.

<sup>†</sup> 종신회원, 서울대학교 기계항공공학부

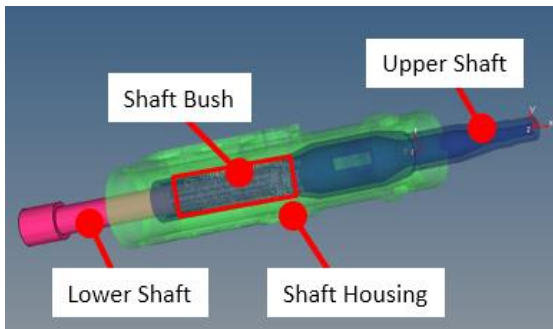
E-mail: bdyoun@snu.ac.kr

TEL: (02)880-1919

<sup>\*</sup> 서울대학교 기계항공공학부



**Figure 1** External geometry of CAE model of steering column



**Figure 2** Internal geometry of CAE model of steering column

### 1.2 스티어링 컬럼 모델 입출력 변수

본 논문에서는 스티어링 컬럼의 모델 출력 변수인 상하 고유진동수를 이용하여 모델을 보정하고 좌우 고유진동수를 이용하여 모델을 검증한다. Table 1은 스티어링 컬럼의 모델 검증을 위한 미지변수 후보이다.

Table 1에서 표시된 바와 같이 각종 Thickness, Steel, Weld의 변화량을  $\pm 10\%$ 로 추정하였으며 Bush의 경우 변화량을  $\pm 40\%$ 로 높히 추정하고 민감도를 분석하였다. 이때 Bush의 강성의 변화량은 K1, K2, K3 각 방향 별로 동일하게 변하는 것으로 가정하였다.

### 1.3 모델 입력 변수 민감도 분석 결과

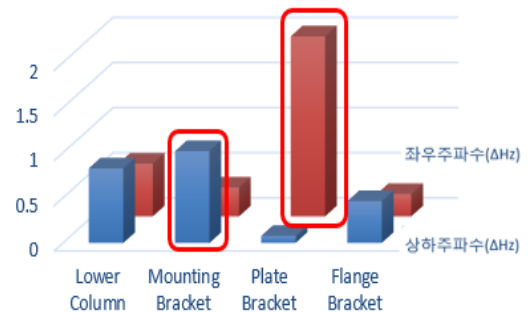
민감도 분석 결과 Figure 3에 보이는 바와 같이 각종 Thickness의 좌우주파수는 Plate Bracket에서 가장 민감한 것으로 나타났으며, 상하주파수는 Mounting Bracket에 가장 민감한 것으로 나타났다. 이처럼 Thickness는 변화량이 적지만 관심주파수의 영향을 무시할 수 없기 때문에 상하, 좌우 진동에 민감한 두 가지 Bracket을 기지변수로 활용하였다. 또한 Figure 4에서는 상하, 좌우 주파수 모두 Bush의 경우 강성이 그

변화량과 모델에서의 영향력이 크기 때문에 Tube Bush와 Shaft Bush 두 가지를 미지변수로 고려하였다. 마지막으로 Steel의 Young's modulus가 변화량이 적지만 영향력을 무시할 수 없음을 확인하였기 때문에 기지변수로 활용하였다. 그러나 Weld Young's modulus의 경우 Mounting Bracket 주위에 분포하기 때문에 진동에 민감할 것으로 예상되었으나 실제로는 변수의 변화에 둔감하여 변수에서 제외하였다.

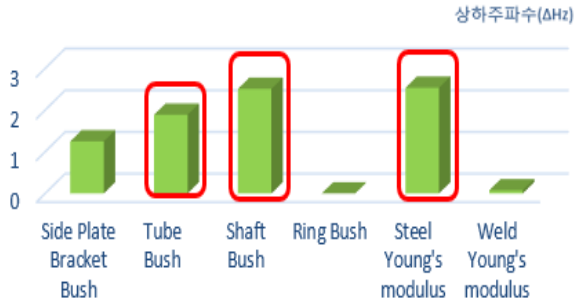
**Table 1** Candidates of unknown variables

후보	물리량	변화량
Lower Column Thickness	2.0mm	$\pm 10\%$
Mounting Bracket Thickness	3.2mm	$\pm 10\%$
Plate Bracket Thickness	4.0mm	$\pm 10\%$
Flange Bracket Thickness	4.0mm	$\pm 10\%$

후보	물리량			변화량
	K1	K2	K3	
Side Plate Bracket Bush	370	12850	370	$\pm 40\%$
Tube Bush	350	350	350	$\pm 40\%$
Shaft Bush	35	35	35	$\pm 40\%$
Ring Bush	1600	1600	1600	$\pm 40\%$
Steel Young's modulus	205GPa			$\pm 10\%$
Weld Young's modulus	205GPa			$\pm 10\%$



**Figure 3** Sensitivity analysis of thickness of each frequencies

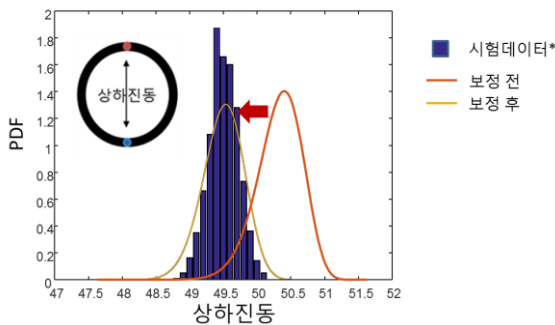


**Figure 4** Result of sensitivity analysis of Bush, Young's modulus (Frequency trend is similar between up/down & left/right side)

#### 1.4 미지 입력변수 통계적 보정

모델 입력 변수의 민감도 분석을 통하여, 기지 변수로 Mounting Bracket 의 두께와 Plate Bracket 의 두께, 미지 변수로 Shaft Bush 의 Stiffness 가 시스템 성능의 산포에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 통계적 해석을 위하여 위 선정된 변수들의 확률분포를 해석 모델의 입력 값으로 사용할 수 있다. 기지 변수인 Mounting Bracket 의 두께와 Plate Bracket 의 두께에 대하여 기존에 알려진 통계적 정보를 이용하여 정상분포를 따르는 것을 확인하였다. 미지 변수 Shaft Bush 의 Stiffness 에 대하여 정상 분포를 따른다고 가정하였으며, 통계적 보정 과정을 통해 확률분포 변수를 보정하였다. 보정을 위하여 스티어링 컬럼 상하진동 성능 값의 분포를 이용하였다.

Figure 5 와 같이 해석으로부터 얻은 상하진동 성능 값 분포는 시험데이터 분포와 차이를 최소화하는 방향으로 최적화되었다. 최적화에는 우도 척도가 목적함수로 사용되었다 [1]. 그 결과 Table 2 와 같이 미지 변수 Shaft Bush 의 Stiffness 의 확률 분포 파라미터가 보정되었다.



**Figure 5** Result of statistical model calibration

**Table 2** Comparison between initial and calibrated value of statistical parameter of shaft bush stiffness

	$\mu$ Shaft	$\sigma$ Shaft	Likelihood
Initial Value	35	3.50	1167.81
Calibrated Value	27.01	2.76	5.18

#### 1.5 면적 척도 기반 유효성 검증 절차

모델 유효성 검증을 위해서는 불확실성 정량화를 통해 통계적으로 모델링 된 해석결과와 통계적 시험결과를 비교하고, 그 유사 정도를 수치적으로 나타내는 과정이 필요하다 [2]. 이를 위한 척도를 검증 척도 (Validation Metric) 라고 한다. 현재까지 개발된 검증척도는 베이즈 인수(Bayes Factor), 프리퀀티스트 척도(Frequentist Metric) 등이 있다 [3]. 본 논문에서는 Ferson 등이 개발한 면적 척도(Area Metric)를 사용 하였다 [4].

면적 척도는 해석 결과의 분포와 실험 결과의 분포 사이의 면적을 계산함으로써, 해석과 실험 결과의 정량적인 오차 계산이 가능하다. 계산을 위한 수식은 다음과 같다.

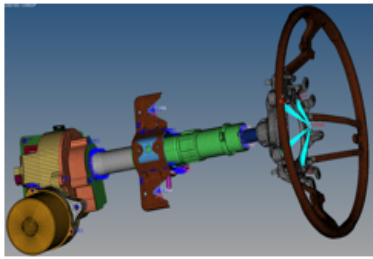
$$d(F, S_n) = \int_{-\infty}^{+\infty} |F(x) - S_n(x)| dx$$

식에서  $F, S_n$  는 각각 실험결과와 해석결과의 누적 확률 분포 함수 이다. 오차에 해당하는 부분을 적분한 것이 면적 척도의 값이 된다.

2.2 에서 언급한 대로, 좌우 고유진동수 이용 모델검증을 위해서는 다음과 같은 과정이 필요하다: 1) 보정된 모델 입력변수를 이용한 상하 고유진동수의 통계적 예측결과 도출; 2) 좌우 진동수 데이터 통계적 모델링; 3) 면적척도를 이용한 유효성 검증; 4) 유효성 검증을 위한 가설검정.

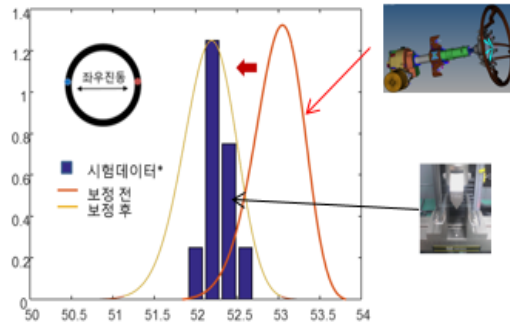
가설검정은 제한된 표본으로 유효성을 검증할 수 있는 방법이다. 고유진동수 실험은 높은 비용문제로 여러 번 수행하기 어렵기 때문에 데이터 수 확보에 한계가 있다. 한편, 면적 척도는 데이터 수에 관계없이 어떤 케이스에도 적용 가능 하지만, 데이터의 수가 부족할 경우 해석결과의 실질적인 유효 정도와는 관계없이 그 값이 크게 계산될 수 있다. 이는 해석모델의 정량화된 유효성에 대한 정확도를 감소시키는 요인이 된다. 즉, 검증에 사용될 데이터의 부족으로 인해 검증 척도의 정확도가 감소하는 현상을 바로잡고,

### 1. 보정된 시뮬레이션 모델

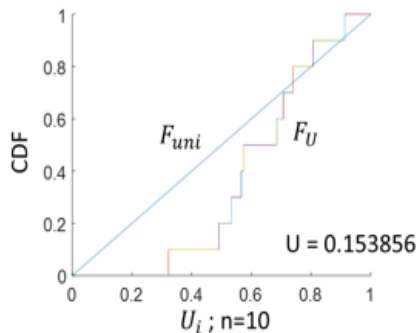


$$f(X_1, X_2, X_3) \rightarrow f(X'_1, X'_2, X'_3)$$

### 2. 예측 값과 시험 값



### 3. 유효성 검증을 위한 면적 척도



### 4. 유효성 검증을 위한 가설 검정

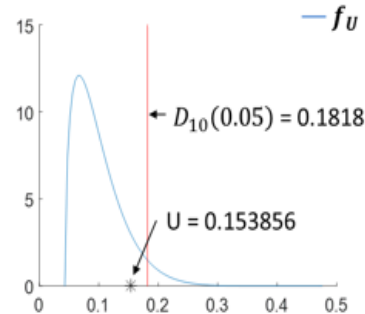


Figure 6 Process of model validation based on area metric with hypothesis testing

해석과 실험데이터의 유효성을 보다 정확하게 정량화 하기 위한 방법으로 가설검정이 사용된다. 가설검정은 일반적으로 귀무가설(Null Hypothesis)을 세우고 유의수준(Significance Level)를 선정하여 귀무 가설의 기각 여부를 판단하는 것으로 이루어진다.

#### 1.6 모델 유효성 검증 결과

2.4에서 보정한 파라미터 들의 유효성 검증을 위해, 10개의 좌우 고유진동수 실험 데이터를 가지고 유효성 검증을 시도하였다. Figure 6 의 우측 상단 그림을 보면, 보정한 변수들의 파라미터로 그려낸 해석 결과(보정 후) 가 기존 해석 결과(보정 전) 보다 실험 데이터와 유사한 것을 시각적으로 확인할 수 있다. 정량적인 유효성 검증을 위해 면적 척도를 계산한 결과, Figure 6의 좌측 하단 그래프와 같이 면적 척도는 0.1539으로 계산되었다.

다음으로, 면적 척도가 유효한 값인지 판단하기 위해 가설검정을 수행하였다. 우선, 귀무 가설은 해석 모델이 유효하다고

가정하였다. 유의수준은 시스템의 위험한 정도를 판단하여 그 수준을 결정할 수 있는데, 위험도가 큰 제품에는 엄격한 기준을, 위험도가 작은 제품은 유연한 기준을 둔다. 본 논문에서는 유의수준을 0.05 로 두고 검증을 시도하였다.

계산결과, 유의수준 0.05에 해당하는 면적척도는 0.1818로 해석모델의 면적척도인 0.1539보다 큰 수치이다. 따라서, 해석모델은 유효하다는 귀무 가설은 기각될 수 없고 보정된 모델은 유효하다고 판단할 수 있다.

만약 보정된 모델의 검증척도가 유의수준에 미치지 못해 유효성이 떨어진다는 판단이 되면, 재보정 과정을 거치거나 모델 개선(Model Refinement)을 통한 모델 수정이 필요하다.

### 3. 결론

본 연구는 스티어링 컬럼 CAE 해석 모델의 예측 정확도 향상을 위해, 개선된 방식의 입력변수 민감도 분석, 통계적 모델보정 및

검증 과정을 도입하여 CAE 모델의 예지 능력을 개선하고자 하였다. 그 결과, 물리적 시스템에 기반한 민감도 분석을 통해 불인지 불확실성 요소였던 연결부 Shaft Bush 강성의 불확실성이 주요함을 확인할 수 있었다. 또한, 민감도 분석을 통해 선정된 주요 변수들 중 미지의 변수 Shaft Bush Stiffness에 대하여, 시험 결과와 비교하여 통계적 파라미터를 보정하였다. 마지막으로, 기존의 면적 척도에 기반한 유효성 검증방법의 정확도를 개선하기 위해 가설검정을 도입하였고 보정된 해석 CAE 모델이 유효함을 입증하였다 스티어링 컬럼 해석 CAE 모델의 예측 정확도를 개선하였다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부 기술혁신사업 (과제번호: 10048305, 모듈형 시스템 설계를 위한 플러그인 디지털 해석 프레임 워크 개발)의 지원을 받아 수행하였음을 밝힙니다.

## 참고문헌

- (1) Youn B. D., Jung B. C., Xi Z., Kim S. B., and Lee W., 2011, "A hierarchical framework for statistical model calibration in engineering product development," *Comput. Method Appl. M.*, Vol. 200, pp. 1421-1431
- (2) Jung B. C., Park J., Oh H., Kim J., and Youn B. D., 2015, "A framework of model validation and virtual product qualification with limited experimental data based on statistical inference," *Struct. Multidiscip. O.*, Vol. 51, No. 3, pp. 573-583
- (3) Chen W., Arendt P., and Huang H-Z., 2011, "Toward a better understanding of model validation metrics," *J. Mech. Design*, Vol. 133, 071005
- (4) Ferson S., Oberkampf W. L., and Ginzburg L., 2008, "Model validation and predictive capability for the thermal challenge problem," *Comput. Method Appl. M.*, Vol. 197, No. 29-32, pp. 2408-2430