

## 설계변수 표본에 근거한 다물체계 성능의 통계적 예측

최 찬 규\* · 유 흥 희†

(2009년 8월 3일 접수, 2009년 11월 9일 수정, 2009년 11월 10일 심사완료)

### Statistical Performance Estimation of a Multibody System Based on Design Variable Samples

Chan Kyu Choi and Hong Hee Yoo

**Key Words :** Variation Analysis(산포해석), Sensitivity(민감도), Statistical Parameter(모수), Sample(표본), Confidence Interval(신뢰구간)

#### Abstract

The performance variation of a multibody system is affected by a variation of various design variables of the system. And the effects of design variable variations on the performance variation must be considered in design of a multibody system. Accordingly, a variation analysis of a multibody system needs to be conducted in design of a multibody system. For a variation analysis of a performance, population mean and variance which are called statistical parameters of design variables are needed. However, an evaluation of statistical parameters of design variables is impossible in many practical cases. Therefore, an estimation of statistical parameters of the performance based on sample mean and variance which are called statistic of design variables is needed. In this paper, the variation analysis method for a multibody system based on design variable samples was proposed. And, using the proposed method, a variation analysis of the vehicle ride comfort based on sample statistic of design variables was conducted.

#### 1. 서 론

일반적으로 설계자는 기계 계(mechanical system) 설계 시 기계 계를 구성하는 요소들의 제조공차(manufacturing tolerance)에 의한 산포(variation)를 고려하지 않는다. 그러나 실제로 부품제조 시 제조산포는 반드시 존재하고, 이러한 제조산포는 기계 계의 성능에 직접적인 영향을 미치게 된다. 한 예로 설계자는 기계 계를 설계할 때 그 계가 최적의 성능을 발휘하도록 설계하지만, 구성요소의 제조산포에 의해 계 성능의 변동이 생기게 되어 목표한 계 성능에서 멀어지게 된다. 그렇기 때문에

계 성능의 변동을 산포해석(variation analysis)을 통하여 예측하고 설계에 반영해야 한다. 따라서 오늘날 산포해석은 기계 계 설계에 있어서 필수적인 해석이 되고 있으며 최근에는 신뢰성기반 최적화(reliability-based design optimization)를 통하여 성능 변동을 설계에 반영하고 있다. 여기서 산포해석이란 기계 계를 구성하는 요소들의 산포가 기계 계 성능의 산포에 미치는 영향을 해석하는 것이다.

산포해석에 관한 연구는 다양한 방법으로 발전되어왔다. Hartenberg와 Denavit은 최초로 설계변수의 공차에 의해 링크기구의 성능 오차가 야기된다고 언급하였고,<sup>(1)</sup> Garrett과 Hall은 링크기구 설계 시 설계변수의 공차(tolerance)에 의한 계 성능의 변동을 해석하는 통계적인 접근 방법을 제시하였다.<sup>(2)</sup> 그리고 Grossman은 몬테카를로 방법(Monte-Carlo Method; MCM)을 이용한 공차해석(tolerance analysis)을 수행하였고,<sup>(3)</sup> Lee와 Gilmore는

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부  
E-mail : hhyoo@hanyang.ac.kr  
TEL : (02)2220-0446 FAX : (02)2293-5070

\* 한양대학교 대학원 기계공학과

해석적인 방법을 이용하여 효율적인 공차해석을 수행하였다.<sup>(4)</sup> 더 나아가 Choi와 Yoo는 다물체 동역학 기법을 이용하여 다물체계에서의 통계적 공차해석 및 모드해석을 수행하였다.<sup>(5)</sup>

하지만 기존의 산포해석에 대한 연구는 설계변수의 모수(statistical parameter)를 필요로 하였다. 모수를 구하기 위해서는 설계변수의 전수조사(complete enumeration)가 필요하다. 그러나 실제 활용에 있어서 설계변수의 전수조사는 비용과 시간 측면에서 매우 비효율적이므로 사실상 불가능하다. 따라서 설계변수의 모집단(population)으로부터 표본추출(sampling)하고, 그것을 이용하여 성능지수(performance) 모집단을 예측하는 것이 필요하다. 하지만 아직 공학분야에서 설계변수 표본을 이용한 성능지수 모집단 예측에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 설계변수의 산포가 다물체계 성능의 산포에 미치는 영향을 설계변수 표본을 이용하여 분석하기 위한 해석적 방법을 제안하였다. 여기서 다물체계 성능이라 한 이유는 동역학적 해석을 위해서 다물체 모델링을 사용하였기 때문이다. 일반적으로 기계 계는 이음새(joint)요소, 강체(rigid body)요소, 힘(force)요소, 접촉(contact)요소로 구성된 다물체계(multibody system)로 모델링 될 수 있다. 그리고 이러한 다물체계를 구성하는 각 요소들은 제조산포를 가질 수 있기 때문에 산포해석 시 그 다물체계의 설계변수가 될 수 있다. 이러한 다물체계 성능지수로써 규칙노면을 일정속도로 주행하는 다물체 차량모델의 승차감지수(ride comfort measure)를 성능지수로 선정하여 제안된 방법을 적용하였다. 또한 제안된 방법의 신뢰성(reliability) 검증을 위하여 신뢰수준(confidence level)의 정의를 이용, 제안된 방법을 10000회 수행하고 결과들의 수렴도를 확인함으로써 제안된 방법의 신뢰성을 검증하였다.

## 2. 민감도 방정식 및 산포해석

### 2.1 민감도 방정식

일반적으로 절대좌표계에 대한 구속 다물체계의 운동방정식은 다음과 같은 확장 라그랑지 운동방정식으로 표현된다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \Phi_q^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q} \quad (1)$$

$$\Phi(\mathbf{q}) = 0 \quad (2)$$

위 식에서  $\mathbf{M}$  은 시스템의 관성행렬(system inertia matrix),  $\mathbf{q}$  는 일반좌표,  $\mathbf{Q}$  는 일반력(generalized force),

$\Phi$  는 절대좌표에 대한 구속방정식,  $\Phi_q$  는 절대좌표에 대한 구속방정식의 자코비안 행렬(Jacobian matrix), 그리고  $\boldsymbol{\lambda}$  는 라그랑지 승수(Lagrange multipliers)이다. 1차 테일러 급수 전개 방법(1<sup>st</sup> taylor series expansion method)을 이용한 산포해석을 하기 위해서는 민감도 정보가 필요하다. 민감도 정보를 얻기 위해서 식 (1)과 (2)를 설계변수에  $b$  에 대하여 직접 미분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}_b + \Phi_q^T \boldsymbol{\lambda}_b = & -\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{q}} - (\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}})_q \mathbf{q}_b \\ & - (\Phi_q^T \boldsymbol{\lambda})_b - (\Phi_q^T \boldsymbol{\lambda})_q \mathbf{q}_b \\ & + \mathbf{Q}_b + \mathbf{Q}_q \mathbf{q}_b + \mathbf{Q}_q \dot{\mathbf{q}}_b \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Phi_q \mathbf{q}_b = -\Phi_b \quad (4)$$

여기서 하첨자  $b$  와  $\mathbf{q}$  는 편미분 기호이다. 식(3)과 (4)로 표현되는 민감도 방정식은 미분 대수방정식의 형태가 아니므로 일반적인 해석 방법을 적용할 수 없다. 따라서 식(1)과 (2)를 함께 고려하는 방법이 연구되었으며<sup>(6)</sup>, 이때 얻어진 구속 다물체계의 민감도 방정식은 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{\Pi}_r^T \boldsymbol{\mu} = \hat{\mathbf{Q}} \quad (5)$$

$$\mathbf{\Pi} = 0 \quad (6)$$

여기서

$$\hat{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} (\mathbf{M}_b + \mathbf{P}) \mathbf{M} \\ \mathbf{M} & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{r} = \begin{Bmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{q}_b \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{\Pi}_r = \begin{bmatrix} \Phi_q & 0 \\ \{(\Phi_q \mathbf{q}_b)_q + (\Phi_b)_q\} & \Phi_q \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_b \\ \boldsymbol{\lambda} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_b + \mathbf{Q}_q \mathbf{q}_b + \mathbf{Q}_q \dot{\mathbf{q}}_b \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{\Pi} = \begin{Bmatrix} \Phi \\ \Phi_q \mathbf{q}_b + \Phi_b \end{Bmatrix} = 0 \quad (12)$$

또한, 행렬  $\mathbf{P}$  는 다음과 같은 관계식을 통해 얻어진다.

$$(\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}})_q \mathbf{q}_b = \mathbf{P}\ddot{\mathbf{q}} \quad (13)$$

2.2 산포해석

설계변수 모집단이 정규분포(normal distribution)를 따르고 확률변수가 99.73%의 신뢰구간을 갖는 경우 테일러 급수 전개 방법을 이용하면 표준편차와 산포의 관계는 식 (14)와 같고<sup>(7)</sup>, 이 때의 성능지수 표준편차  $\sigma_p$  (standard deviation of the performance measure)<sup>(5)</sup>는 식 (15)과 같다.

$$T_b = 3\sigma_b \tag{14}$$

$$\sigma_p = \frac{1}{3} \frac{\partial P}{\partial b} T_b \tag{15}$$

여기서  $T_b$ 는 설계변수  $b$ 의 산포,  $\sigma_b$ 는 설계변수  $b$ 의 표준편차,  $P$ 는 성능지수,  $\partial P / \partial b$ 는 설계변수  $b$ 에 대한 성능지수의 민감도를 나타낸다.

3. 표본을 이용한 성능지수 모집단 추정

1차 테일러 급수 전개 방법은 설계변수에 대한 반응함수(response function)를 선형함수로 근사하기 때문에 그 반응함수의 평균과 표준편차 계산 시 가장 지배적인 영향을 미치는 설계변수 평균의  $\pm 3\sigma$  범위 내에서 선형일 때 사용 가능한 방법이다. 이 방법을 이용하여 설계변수 표본(sample) 으로부터 성능지수 모집단의 모수를 추정하였다.

3.1 점추정과 구간추정

표본을 이용하여 모수를 추정하는 방법은 점추정(point estimation)과 구간추정(interval estimation)이 있다. 점추정은 하나의 값을 사용하면서 알려져 있지 않은 모수를 추정함으로써 모집단에 대한 추론을 하는 것으로써, 표본의 평균 및 분산이 곧 모수의 점추정량(point estimator)이 된다. 점추정은 매우 간단하고 점추정량은 모수로부터 크게 벗어나지 않기 때문에 유용하지만, 점추정량이 모수와 일치할 것 이라고는 기대하기 힘들며 점추정량은 항상 오차를 가지고 있다. 반면에, 구간추정은 모수가 존재할 가능성이 있는 곳을 신뢰구간을 통해 모수를 추정하는 방법이다. 이 구간추정은 그 구간의 신뢰수준과 신뢰구간을 이용하기 때문에 모수를 추정할 때에는 점추정 보다 더 합리적이며, 따라서 본 논문에서는 구간추정을 이용하였다.

모집단에 대한  $(1-\alpha) \times 100\%$  신뢰구간<sup>(8)</sup>은 다음과 같다.

$$\bar{x} - t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{16}$$

$$\frac{(n-1)s^2}{\chi^2_{\alpha/2}} < \sigma^2 < \frac{(n-1)s^2}{\chi^2_{1-\alpha/2}} \tag{17}$$

여기서  $\bar{x}$ 는 표본평균,  $s$ 는 표본표준편차,  $\mu$ 는 모집단평균,  $\sigma$ 는 모집단표준편차,  $t$ 는  $t$ 통계량,  $\chi^2$ 는 카이제곱통계량 그리고  $n$ 은 표본의 크기이다. 식 (16), (17)은 모집단이 정규분포를 따르는 경우 사용 가능한데, 설계변수에 대한 성능지수의 반응함수가 평균을 기준으로  $\pm 3\sigma$  범위 내에서 선형을 띠다면 설계변수와 성능지수는 같은 분포를 띤다. 단지 확률변수(random variable)가 설계변수에서 성능지수로 바뀔 뿐이다. 일반적으로  $\pm 3\sigma$  범위는 아주 좁기 때문에 대부분의 공학적 문제에서 그 범위 내에서 반응함수는 선형에 가까우며 본 논문에서 사용된 승차감 평가지수 역시 반응함수가 선형임을 확인하였다. 따라서 식 (16), (17)은 설계변수가 정규분포를 따른다면, 대부분의 공학적 문제에서 적합하며 유용하다.

3.2 성능지수 모집단 추정

본 논문에서는 성능지수 모집단을 추정하기 위한 두 가지 방법을 제안하였다(Fig. 1). 첫 번째 방법은 설계변수 모수를 먼저 추정한 뒤 그 설계변수 모수를 이용하여 산포해석을 하는 것이고, 두 번째 방법은 설계변수 표본의 통계량을 이용, 산포해석을 한 뒤 그 성능지수 표본의 통계량을 이용하여 성능지수 모수를 추정하는 방법이다. 직관적으로 첫 번째 방법이 타당하다고 여겨지지만 설계변수 모수를 먼저 구간추정 하게 되면 설계변수 모수는 단일 값이 아닌 구간을 가지게 되고 이 구간을 산포해석에 이용할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 두 번째 방법을 사용하였다.

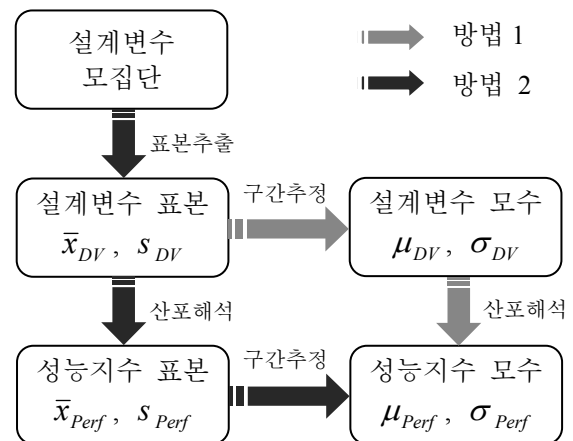


Fig. 1 Two methods of variation analysis based on design variable samples

### 4. 수치예제

수치예제로써 다물체 차량 모델과 규칙 노면을 이용한 차량승차감(ride comfort) 평가 지수를 성능 지수로 하여 제안된 방법을 적용하였다.

#### 4.1 차량승차감 평가지수

차체 진동에 의한 승차감을 평가하기 위한 지수로서 가속도의 피크치나 유효치(RMS value)가 많이 사용되고 있다. 하지만 인체는 가진 주파수나 가진 방향의 변화에 따라 서로 다른 반응을 보이므로 일반 도로와 같이 불규칙적인 가진을 받는 경우 넓은 영역의 주파수 대역에 대한 승차감을 평가하는 방법으로는 한계가 있다. 이러한 점을 보완하기 위하여 주파수에 따른 인체의 반응 비중을 다르게 하는 방법이 사용되고 있으며, 대표적으로 가중함수(weighting function)를 이용한 방법이 사용되고 있다. 본 논문에서는 노면 가진 함수가 일정한 진폭과 주기로 되어있기 때문에 사실상 가중함수는 의미가 없다. 하지만 가중함수를 이용하면 보다 복잡한 노면일 경우도 해석이 가능하다.

ISO<sup>(9)</sup>기준에 따르면 수직방향 가속도에 대한 인체의 반응을 고려한 안락감의 척도인 반응함수는 주파수 영역에서 주어지고, 가중함수는 반응함수의 제곱에 대한 역을 반응함수의 면적으로 나누어 얻을 수 있다. 측정된 PSD결과를 보정함으로써 주파수에 따라 인체의 반응을 다르게 나타내는 주파수 영역에서의 PSD 진폭을 보상하는 효과를 주게 된다.

운전석의 수직방향 가속도에 대한 PSD(power spectral density)를  $P(f)$  라 하면 PSD의 WRMS (weighted RMS)는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$WRMS = \left[ \int_a^b W^2(f) P^2(f) df \right]^{1/2} \quad (18)$$

여기서 a와 b는 관심 주파수 영역의 상한·하한치이며  $W(f)$ 는 가중함수로 다음과 같이 정의 하였다.

$$W(f) = \begin{cases} 1/0.255 & 0 \leq f \leq 1\text{Hz} \\ f/0.255 & 1 \leq f \leq 4\text{Hz} \\ 1/0.0636 & 4 \leq f \leq 8\text{Hz} \\ 1/(0.000994 f^2) & 8 \leq f \text{ Hz} \end{cases} \quad (19)$$

본 논문에서는 운전석의 수직방향 가속도 PSD의 WRMS 값을 차량 승차감 평가 지수로 사용하였다.

#### 4.2 차량 모델

Fig. 2는 승차감 평가를 위해 사용되는 차량 모델을 다물체 진동계 시스템으로 나타낸 것이다. 다물체 해석을 위해 회전 조인트(revolute joint)와 병진 조인트(translational joint)로 연결된 5 자유도 다물체 차량 모델을 구성하였다. 차량 모델은 1 개의 sprung mass 와 2 개의 unsprung mass 로 이루어져 있다. 5 자유도 운동은 sprung mass 의 수직운동과 피칭(pitching)운동의 2 자유도, unsprung mass 의 수직운동 2 자유도 그리고 운전석 질량의 수직운동 1 자유도로 구성된다. 운전석의 수직방향 가속도를 측정하기 위하여 일반 차량 모델에 시트 모델을 추가하였다. 또한, 차체와 현가장치의 강성-감쇠 시스템은 무질량 강체(massless rigid body)를 매개로 병진 조인트와 회전 조인트로 연결되었다. 도로 가진에 의한 영향은 지면과 병진 조인트로 연결된 무질량 강체를 사용하여 고려되었다. 해석에 사용된 인자 제원들의 평균 값은 Table 1 과 같다.

Table 1 Population means of properties of multi-body vehicle model

	M (kg, kg·m <sup>2</sup> )	C (Ns/m)	K (N/m)	L (m)
1	51 (kg)	500	8300	0.259
2	1250 (kg)	2500	75800	1.316
3	1634.8 (kg·m <sup>2</sup> )	2500	45000	1.732
4	67.25 (kg)	-	219400	-
5	67.23 (kg)	-	219900	-

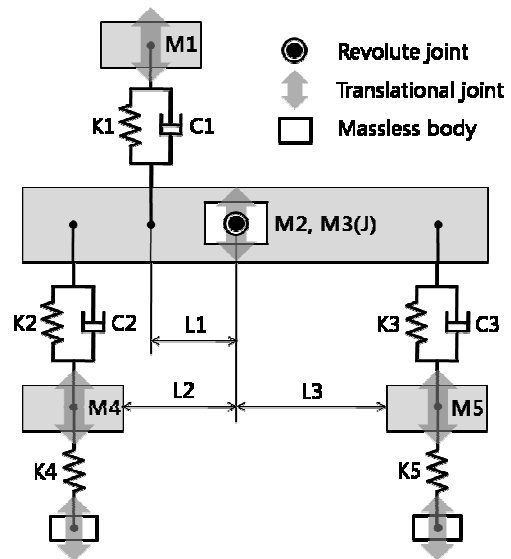


Fig. 2 Multibody vehicle model

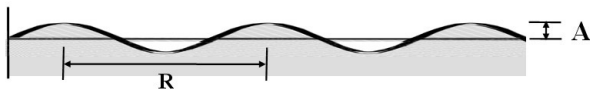


Fig. 3 A road profile

4.3 노면 가진 함수

본 논문에서는 승차감 평가를 위하여 사용한 규칙 노면을 Fig. 3과 같은 형상으로 정의하여 사용하였다. 여기서 A는 도로의 진폭, R은 도로의 공간주기이다. 타이어는 항상 지면과 점 접촉하는 것으로 가정하였으며, 노면의 기복에 따른 수직변위가 전·후륜에 각각  $f_1(t)$  와  $f_2(t)$  로 작용한다고 정의하였다. 이상의 도로상태와 차량속도에 의해 공간주파수로 주어지는 도로 가진력을 시간주파수로 변환시키면 전륜에 작용하는 가진력은 다음과 같이 정의된다.

$$f_1(t) = A \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2\pi V}{R} t\right) \right\}, \quad 0 \leq t \quad (20)$$

여기서 V는 차량의 속도이며, 후륜에 작용하는 가진력은 차량의 축간 거리(wheel base)로 인한 시간 지연에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$f_2(t) = \begin{cases} A \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2\pi V}{R} (t - t_s)\right) \right\}, & t_s \leq t \\ 0 & t \leq t_s \end{cases} \quad (21)$$

여기서  $t_s$ 는 축간 거리에 의한 시간 지연이다. 본 논문에서 사용된 도로의 진폭과 공간주기는 각각 0.03m, 10.08m이다.

4.4 산포해석 결과

해석에는 위에서 제시한 노면 가진 함수를 사용하였고 이 노면을 60km/h의 일정한 속력으로 1분 동안 주행하여 승차감 평가 지수를 계산 하였다. 설계변수는 K1, K2, K3, C1, C2, C3로 선정하였고, 설계변수를 하나만 사용하여 각 설계 변수당 산포해석을 하였다. 실제로는 알 수 없는 값이지만, 난수 생성, 그리고 결과 확인을 위해 각 설계변수의 산포  $T_b$ 는 그 설계변수 평균의 3%라고 가정 하여 각 설계변수의 모집단을 100000개씩 생성하였다. 표본크기(sample size)는 각 설계변수당 50을 사용하였고, 승차감 평가 지수 모집단 추정에는 95%신뢰수준(confidence level)을 사용하였다.

먼저 설계변수 표본을 이용한 승차감 평가 지수 모수의 95%신뢰구간을 Table 2와 Table 3에 정리하였다. 그리고 Fig. 4는 Table 2와 Table 3을 각각 도

Table 2 95% Confidence intervals of ride comfort measure mean

Design variable	95% Confidence interval
K1	$1.740030 < \mu_{WRMS} < 1.740830$
K2	$1.739681 < \mu_{WRMS} < 1.741233$
K3	$1.739945 < \mu_{WRMS} < 1.746852$
C1	$1.739830 < \mu_{WRMS} < 1.743572$
C2	$1.737065 < \mu_{WRMS} < 1.740901$
C3	$1.738513 < \mu_{WRMS} < 1.746754$

Table 3 95% Confidence intervals of ride comfort measure standard deviation

Design Variable	95% Confidence interval
K1	$0.001175 < \sigma_{WRMS} < 0.001752$
K2	$0.002281 < \sigma_{WRMS} < 0.003403$
K3	$0.010151 < \sigma_{WRMS} < 0.015143$
C1	$0.005499 < \sigma_{WRMS} < 0.008203$
C2	$0.005637 < \sigma_{WRMS} < 0.008410$
C3	$0.012112 < \sigma_{WRMS} < 0.018068$

식화 한 것이다. 검은색 막대는 설계변수 모수를 이용한 결과로서 실제 예측하고자 하는 성능 지수 모수이다. 이 결과는 실제로는 알 수 없지만 제안된 방법이 옳은지를 확인하기 위하여 앞서 생성한 모집단 100000개를 이용하여 계산하였다. 파란색과 붉은색 막대는 설계변수 표본을 이용한 성능 지수 모수 예측 결과이다. Fig. 4는 그 결과가 승차감 평가 지수 모수를 잘 예측하고 있음을 보여준다. 여기서 설계변수 K3, C3에 의한 승차감 지수 표준편차가 큰데, 승차감 평가 지수 표준편차가 크다는 것은 승차감 평가 지수가 그 설계변수의 변동에 대해 민감하여 변동이 크다는 것을 의미하며 또한, 승차감 평가 지수 모집단 예측 시 신뢰구간이 넓어 모집단을 정확히 예측 할 수 없음을 뜻한다. 정확한 예측을 위해 신뢰구간을 좁히려면 더 큰 표본크기(sample size)가 요구된다.

제안된 방법의 신뢰성을 검증하기 위해서 제안된 방법을 각각의 설계변수에 대하여 10000 회 시행하여 10000 개의 신뢰구간 중 성능지수 모수를 포함하는 것의 비율을 도출해 보았다. Fig. 5는 시행 횟수대한 각각의 신뢰구간 중 성능지수 모수를 포함하는 것의 비율이 95%에 수렴함을 보여준다.

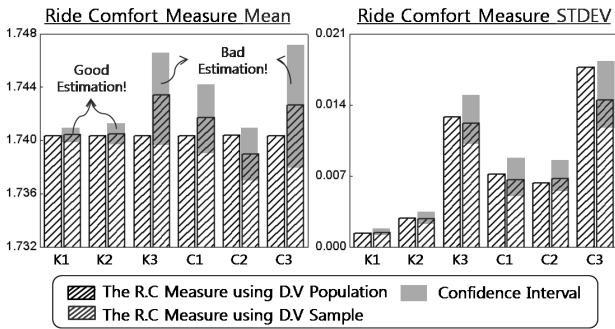


Fig. 4 95% Confidence intervals of ride comfort measure mean and standard deviation

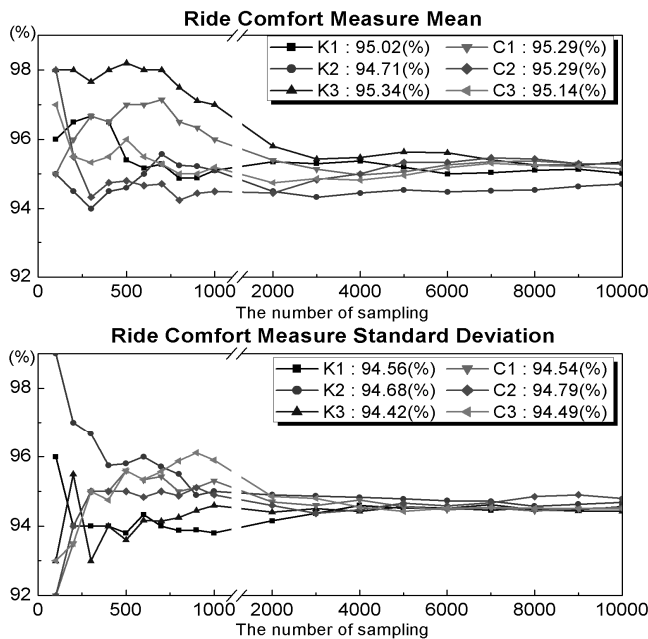


Fig. 5 The rate of confidence intervals which are including the parameter

5. 결론

본 논문에서는 설계변수가 산포를 가질 때 설계변수 표본의 통계량을 이용한 성능지수 모집단 모수의 통계적 예측 방법을 제안하였다. 본 논문에서 사용된 테일러 급수 전개 방법을 이용한 산포 해석은 설계변수에 대한 성능지수의 민감도가 필요하며 민감도는 다물체 민감도 방정식을 이용하여 구하였다. 또한 이 민감도와 설계변수 표본의 통계량을 이용하여 성능지수 표본의 통계량을 구하였고, 이 성능지수 표본의 통계량을 이용하여 성능지수 모집단의 모수를 예측 하였다. 제안된 방법을 차량 승차감 평가 지수의 산포해석 예제에 적용하였고, 제안된 방법의 신뢰성을 검증하기 위하여 신뢰수준의 정의를 이용, 제안된 방법을 10000회 시행하여 시행횟수에 대한 각각의 신뢰구간(confidence interval) 중 모집단을 포

함하는 것의 비율을 구하였다. 그 결과 신뢰구간이 모집단을 포함하는 것의 비율이 신뢰구간의 신뢰수준에 수렴하는 것을 확인하였고, 제안된 방법의 신뢰성을 검증하였다. 하지만 제안된 방법은 기본적으로 설계변수에 대한 성능지수의 반응함수가 평균을 기준으로  $\pm 3\sigma$  범위 내에서 선형함수이고, 또한 설계변수가 정규분포를 따를 때 사용할 수 있다는 한계를 가진다. 하지만  $\pm 3\sigma$  범위는 매우 좁은 범위이기 때문에 많은 공학적 문제에서 반응함수는 범위 내에서 선형을 띄고 설계변수 또한 많은 경우 정규분포를 따르기 때문에 본 방법은 유용하다.

후기

이 논문은 2009년도 2단계 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Hartenberg, R. S. and Denavit, J., 1964, *Kinematic Synthesis of Linkages*, McGraw-Hill, New York.
- (2) Garrett, R. E. and Hall, A. S., 1969, "Effect of Tolerance and Clearance in Linkage Design," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 91, pp. 198~202.
- (3) David D. Grossman, 1976, "Monte Carlo Simulation of Tolerancing in Discrete Parts Manufacturing and Assembly," Tech. Rep. STAN0CS-76-555, Stanford AI laboratory.
- (4) Lee, S. J. and Gilmore, B. J., 1991, "The Determination of the Probabilistic Properties of Velocities and Accelerations in Kinematic Chains with Uncertainty," *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 113, pp. 84~90.
- (5) Choi, D. H., 2005, "Statistical Tolerance Analysis and Modal Analysis of Multibody Systems," Hanyang University, Ph. D. Thesis.
- (6) Serban, R. and Freeman, J. S., 1996, "Direct Differentiation Methods for the Design Sensitivity of Multibody Dynamic Systems," *The 1996 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference*, DETC/DAC-1087.
- (7) Hyungho Chun, Sang Jik Kwon and Taeh Tak, 2008, "Multibody Approach for Tolerance Analysis and Optimization of Mechanical Systems," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.22, pp.276~286.
- (8) Ronald E. Walpole, Raymond H. Myers, Sharon L Myers, Keying Ye, 2002, *Probability & Statistics for Engineers & Scientists*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, pp. 230~265.
- (9) International Organization for Standardization, ISO 2631-1, 1997, *Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration-part 1: General Requirements*.