

< 기술논문 >

제한된 이산정보를 이용한 로어컨트롤암의 신뢰성 기반 최적설계

장 준 용¹⁾ · 나 종 호²⁾ · 임 우 철¹⁾ · 박 상 현¹⁾ · 최 성 식¹⁾ · 김 정 호²⁾ · 김 용 석²⁾ · 이 태 희^{*1)}

한양대학교 자동차공학과¹⁾ · 한국GM Structure Integration팀²⁾

Reliability-based Design Optimization for Lower Control Arm using Limited Discrete Information

Junyong Jang¹⁾ · Jongho Na²⁾ · Woochul Lim¹⁾ · Sanghyun Park¹⁾ · Sungsik Choi¹⁾ ·
Junggho Kim²⁾ · Yongsuk Kim²⁾ · Tae Hee Lee^{*1)}

¹⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 135-791, Korea

²⁾GM Korea, 199-1 Cheongcheon 2-dong, Bupyeong-gu, Incheon 403-714, Korea

(Received 23 July 2013 / Revised 20 August 2013 / Accepted 22 August 2013)

Abstract : Lower control arm (LCA) is a part of chassis in automotive. Performances of LCA such as stiffness, durability and permanent displacement must be considered in design optimization. However it is hard to consider different performances at once in optimization because these are measured by different commercial tools like Radioss, Abaqus, etc. In this paper, firstly, we construct the integrated design automation system for LCA based on Matlab including Hypermesh, Radioss and Abaqus. Secondly, Akaike information criterion (AIC) is used for assessment of reliability of LCA. It can find the best estimated distribution of performance from limited and discrete stochastic information and then obtains the reliability from the distribution. Finally, we consider tolerances of design variables and variation of elastic modulus and achieve the target reliability by carrying out reliability-based design optimization (RBDO) with the integrated system.

Key words : Reliability analysis(신뢰성 해석), Reliability-based design optimization(신뢰성 기반 최적설계), Akaike information criterion(아카이케 정보 척도), Lower control arm(로어컨트롤암), Discrete information(이산정보), Surrogate model(근사 모델)

1. 서론

현대의 자동차는 고기능성 및 고안전화를 추구하고 있다. 또한 연비 및 여러 환경 규제에 의하여 자동차산업에서 차체 및 차체 부품의 고효율화와 경량화가 큰 화두이다. 차체 부품 중 하나인 로어컨트롤암(lower control arm, LCA)은 현가장치의 조향 안정성을 확보하는 부품으로써 형상에 의한 구조적 강성 확보, 제작 방법과 재질 변경에 의한 다양한 문제들이 발생한다. 현업에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 경량화와 구조적 안정성을 동시에 추구

하는 연구들을 진행하고 있다.¹⁾ 이는 제한조건을 만족하면서 목적함수를 최소화하는 설계변수의 값을 찾는 방법인 최적설계(design optimization) 기법과 부합하여 현업에 많이 도입되고 있다.^{2,3)}

이전 연구들은 차체 부품의 최적설계를 수행함에 있어 선형 강성해석을 통한 강성 확보 또는 내구 해석을 통한 요구 수명 확보에 집중하고 있다.^{2,3)} 하지만 차체 부품의 파손 또는 고장은 가해지는 악조건에서 발생하고 이로 인해 발생할 수 있는 영구변형은 부품의 고장 및 다른 부품의 오작동을 야기할 수 있다. 따라서 영구변형 또한 설계 단계에서 고려해야만 하며 강성, 수명, 영구변형을 모두 고려하기

*Corresponding author, E-mail: thlee@hanyang.ac.kr

위해 앞선 연구에 추가적으로 비선형 해석을 수행해야 한다. 그리고 최적설계를 수행하기 위해 차체 부품의 변수화 모델링(parametric modeling)과 서로 다른 해석 소프트웨어의 연동(batch process)이 필요하다.

또한 기존 최적설계 기법만으로는 제조 공정상 발생하는 많은 불확실성(uncertainty)을 직접 고려하는 것은 쉽지 않다. 기존의 확정론적 접근 방법(deterministic approach)의 최적설계에서는 설계변수가 평균과 같은 대표 값으로 최적설계를 수행하고, 변수와 시스템의 불확실성을 고려하기 위해 안전계수와 같은 경험적인 방법을 이용하여 신뢰성을 확보한다. 반면에 확률론적 접근 방법(stochastic approach)의 최적설계는 시스템의 신뢰성을 확보하기 위해 설계변수와 환경변수의 통계적 특성을 고려한다. 신뢰성 기반 최적설계(reliability-based design optimization)를 수행하기 위해서는 시스템의 신뢰도를 판단하는 신뢰성해석(reliability analysis)을 수행해야 한다. 실제 문제에서는 신뢰성해석에 사용되는 비용의 문제로 신뢰성 기반 최적설계를 적용하는데 어려움이 있으며 이를 해결하기 위해 많은 연구들이 수행되고 있다.⁴⁾ 특히 실제 문제에서 변수들의 분포는 알려져 있지 않거나 제한된 이산정보(limited discrete information)를 갖는 경우가 많기 때문에 변수의 분포를 특정 확률분포로 가정을 하지 않고 한정된 정보로부터 신뢰성해석을 수행할 수 있는 아카이케 정보척도(Akaike information criterion)를 이용한 신뢰성 해석 기법이 있다.⁵⁾

본 연구에서는 대상 부품의 변수화 모델링과 해석 절차를 통합하는 설계 자동화 시스템을 구축한다. 아카이케 정보척도 기반 신뢰성해석을 도입하여 제한된 이산정보를 이용한 차체 부품의 신뢰성 해석을 수행하고, 최종적으로 신뢰성 기반 최적설계를 수행한다. 차체 부품으로는 한국지엠에서 실제 양산되고 있는 로어컨트롤암이며 구축한 통합 설계자동화 시스템을 이용하여 신뢰성 기반 최적설계 안을 도출한다.

2. 로어컨트롤암의 설계 문제 정의

본 장에서는 로어컨트롤암의 변수를 정의하고,

요구 성능 측정 기준을 만족시키는 로어컨트롤암의 최적설계 문제를 정식화한다.⁹⁾

2.1 설계변수 정의

첫 번째 설계변수는 부품의 질량에 가장 큰 영향을 주는 압의 두께이다. 두 번째와 세 번째 설계변수는 형상 변수로써 Hypermesh의 절점 이동(node translation) 기능을 이용하여 형상을 변경시켰으며, Fig. 1과 같이 나타내었다. 두 번째 설계변수는 Ball joint(노드 1)와 Bushing-Rear(노드 2) 사이의 요소들이며, 세 번째 설계변수는 Fig. 1의 Ball joint(노드 1)와 Bushing-Front(노드 3)사이의 요소들이다. 편의상 설계변수는 바깥방향, 즉 압의 윗면이 넓어지는 방향을 양의 방향으로 정의하고, 반대 방향을 음의 방향으로 정의한다.

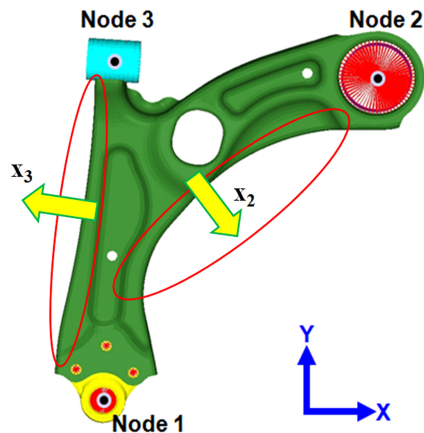


Fig. 1 Finite element model of lower control arm

2.2 최적설계 정식화

로어컨트롤암은 기본적으로 선형 강성 조건, 반복 하중에 의한 요구 수명 조건, 극한 하중에 의한 영구변형 조건을 만족하며 질량을 최소화하는 설계를 요구한다. 선형 강성 해석은 특정점에 X방향과 Y방향 하중을 주어 각각의 변위를 측정하여 선형 강성을 측정하는 방법이다. 내구 해석에 가해지는 하중들은 로어컨트롤암에 가해지는 동하중 해석 또는 실험 결과를 통하여 산출한 등가하중으로써 각 하드포인트에 적용하여 각 하중에 따른 요구 수명을 측정하는 방법이다. 극한 해석은 위와 같이 동하

중 또는 실험 결과 중 대상의 가장 악조건에서 재료 비선형과 기하비선형을 고려한 해석을 하여 영구변형량을 측정하는 해석이다. 이 요구 조건들은 각각의 목표(target) 성능으로 나타내도록 하며, 이를 통해 최적설계 문제를 정식화하면 다음 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find } \mathbf{x} \\
 & \text{Min Volume} \\
 & \text{S.T } \text{Stiffness} \geq \text{Stiffness}_{\text{target}} \\
 & \quad \text{Life} \geq \text{Life}_{\text{target}} \\
 & \quad \text{Perm.Displ.} \leq \text{Perm.Displ.}_{\text{target}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

3. 근사모델링 기법

신뢰성 기반 최적설계를 하기 위해서는 기존의 확정론적 최적설계보다 많은 해석이 필요하다. 하지만 로어컨트롤암의 해석은 선형 해석부터 비선형 해석까지 다양한 해석을 포함하고 있으며, 1회 총 해석 시간은 50여분이 소요된다. 따라서 많은 해석 횟수를 필요로 하는 신뢰성 기반 최적설계 특성상, 빠른 제품 개발 주기를 요구하는 현업에서는 사용이 불가능하다. 따라서 반복적인 해석 시간을 단축하기 위해 근사모델링 기법 도입한다. 본 장에서는 본 연구에서 사용한 실험계획법과 근사모델링 기법에 대해 설명한다.

3.1 혼합 순차적 실험계획법

본 연구는 같은 입력조건에 대해 같은 응답을 얻는 전산실험을 기반으로 하고 있으므로 이에 적절한 충전실험계획법(space filling design)을 적용한다. 충전실험계획법은 표본점의 개수만큼의 수준으로 설계 영역을 분할하여 모든 표본점의 정보가 중복이 발생하지 않는 최적라틴방격법과 각 표본점간의 최소거리를 최대화 최소거리최대화법 등이 있다. 본 연구에서는 각각의 장, 단점을 보완한 혼합 순차적 실험계획법을 사용한다.

최적라틴 방격법은 설계범위 내부에는 좋은 충전성을 나타내는 반면에 경계부에는 부족한 충전성을 보인다. 그 이유는 라틴방격법의 특성상 모든 수준에 대하여 1개의 표본점을 얻으므로, 경계에도 마찬가지로 1개의 표본점을 얻게 되기 때문이다. 따라서 라틴방격법은 각 설계 인자의 설계 범위에서 상한과 하한과 같은 경계부분의 충전성이 떨어지는 단

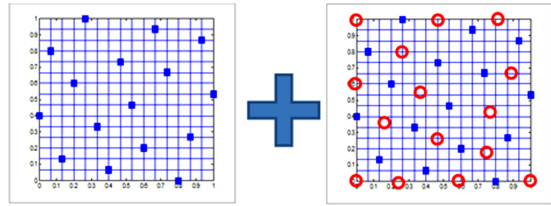


Fig. 2 Sequential design of experiment using optimal Latin hypercube design and maximin distance design

점이 있다. 이를 보완하기 위해 라틴방격법을 이용하여 초기 실험계획을 한 후에 최소거리최대화법을 이용하여 경계부 혹은 상대적으로 표본점 간격이 넓은 부분에 추가적인 표본점을 추출하는 방법을 적용한다. 이로써 설계변수의 전체 영역에 대한 충전성을 확보하게 되며, 이를 도식화하면 Fig. 2와 같다. 사각형의 점은 최적라틴 방격법을 이용하여 추출한 표본점이고, 원형 점은 추가적으로 최소거리최대화법을 이용하여 추출한 표본점이다.

3.2 크리깅 근사모델

크리깅 근사모델은 실제 함수를 평균에 해당하는 전역모델과 편차에 해당하는 국부모델의 합으로 가정하는 보간 모델(interpolation model)로써 외부적인 오차가 발생하지 않는 전산 실험에서 우수한 성능을 나타낸다.

크리깅모델의 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Y}(\mathbf{x}) &= \mathbf{f}(\mathbf{x})^T \hat{\boldsymbol{\beta}} + \mathbf{r}(\mathbf{x}) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Y} - \mathbf{F} \hat{\boldsymbol{\beta}} \\
 \hat{\boldsymbol{\beta}} &= \mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F}^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Y}
 \end{aligned} \tag{2}$$

\mathbf{R} 은 상관행렬로 데이터들의 공간적인 상관관계(spatial correlation)를 나타낸다. 본 연구에서는 상관함수를 식(3)과 같은 가우스(Gauss) 상관함수로 가정한다.

$$\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta}; \mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j) = \exp \left[- \sum_{k=1}^{n_d} \theta_k (\mathbf{x}^i - \mathbf{x}^j)^2 \right] \tag{3}$$

여기서 $\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x} \in \mathbb{R}^{n_d}$ 이다. 식 (3)의 미지수인 $\boldsymbol{\theta}$ 는 최우량추정법(maximum likelihood estimation: MLE)에 의해 추정된다.

4. 로어컨트롤암의 설계자동화 시스템 구축

로어컨트롤암의 해석은 선형 해석과 비선형 해석

을 모두 포함한다. 선형 해석은 Radioss를 이용하며 비선형해석은 Abaqus를 이용한다. 또한 기본적으로 설계변수의 변화에 따른 유한요소모델의 생성은 Hypermesh를 사용하기 때문에 여러 상용소프트웨어를 통합하는 과정이 필수적이다. 또한 많은 표본점에 따라 해석모델을 구성하고 해석하기 위해서 통합 시스템의 자동화 절차가 절실하다. 본 연구에서는 로어컨트롤암 뿐만 아니라 이러한 해석을 요구하는 차체 부품의 설계자동화 시스템을 구축한다.

언급한 세 상용소프트웨어를 유기적으로 연결하기 위하여 Matlab을 사용하였으며, 이를 Fig. 3에 순서도로 나타내었다. 첫 번째 과정(Step. 1)은 모델 수정과정이다. Hypermesh는 기본적으로 그래픽 사용자 인터페이스(graphical user interface, GUI)를 통한 요소 생성 및 하중 입력이 가능하고, Tcl 언어 또는 Hypermesh 자체의 입력 상자를 이용한 명령어(command)를 이용하여 GUI와 마찬가지로 요소 생성 및 하중 입력이 가능하다. 모델 수정을 하기 위해 Matlab은 기본 모델을 호출(import)하고 변수화된 모델에 표본점의 값을 입력함으로써 변경된 모델을 생성 및 출력(export)되도록 명령 파일을 생성한다. 생성된 명령 파일을 Hypermesh와 연동하여 수정된 모델을 얻는다. Radioss로 수행하는 강성해석과 내구해석은 FEM 확장자의 파일로 출력되며, Abaqus로 수행하는 극한해석은 inp 확장자의 파일로 출력된다. 두 번째 과정(Step. 2)은 모델 해석 과정이다.

해석은 Radioss와 Abaqus를 이용한다. 마지막(Step. 3)으로 강성 값, 수명 그리고 영구변형등의 결과를 Matlab을 이용하여 결과 파일에서 추출한다. 위의

일련의 과정을 반복하여 모든 표본점에 대하여 결과를 추출한다.

5. 로어컨트롤암의 신뢰성 기반 최적설계

5.1 설계변수 및 환경인자의 확률 정보

신뢰성 해석을 하기 위해서는 설계변수의 확률분포나 설계에 영향을 주는 환경인자의 확률분포를 파악하는 것이 우선되어야 한다. 로어컨트롤암에서 셸 요소로 구성된 암 부위는 일정 두께의 박판을 이용하여 성형된다. 이 박판의 제작 시 두께에 관한 제조 공차가 발생하는데 이는 KS 규격에서도 관리하도록 권장하고 있으며, 실제 제조사에서는 이보다 더 엄격한 기준을 제시하며 제품을 생산하고 있다. 본 연구에서는 P社의 제조 공차 (± 0.09 [mm])를 이용하여 두께 공차의 이산정보를 가정한다.⁶⁾

이 외에도 설계변수로 설정된 x_2 과 x_3 의 경우는 프레스 성형 시 강판의 복원 또는 성형으로 발생할 수 있는 공차로써 임의로 ± 0.03 [mm]를 갖도록 가정한다. 또한, 설계변수 외에 제품의 신뢰성에 영향을 줄 수 있는 인자로 재료의 탄성계수의 변동을 고려한다. 이는 일반적으로 대푯값, 즉 평균값을 사용하는데, 일반적인 철의 경우 210 [GPa]로 알려져 있다. 하지만 재료의 제작 시 온도 및 후처리 과정에 따라 탄성계수의 변동이 발생하게 되는데 본 과제에서는 문헌에 제시 되어 있는 약 8%의 분산 계수를 이용하여 탄성계수 분포를 가정한다.⁷⁾

제한된 이산정보는 정의된 변동 폭 안에 존재하게 하기 위하여 Table 1과 같이 표준편차를 적절히 정하여 정규분포에서 각 100개를 추출하였으며, 이를 히스토그램으로 나타내면 Fig. 4와 같다.

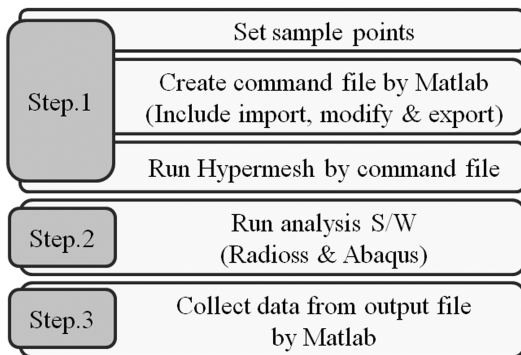


Fig. 3 Process of integrated system for design automation

Table 1 Get limited discrete data from normal dist'n

	Meaning	Tolerance range	Data from normal dist'n
x_1	Thickness of arm [mm]	± 0.09	$\sim N(x_1, 0.02^2)$
x_2	Variation [mm]	± 0.03	$\sim N(x_2, 0.01^2)$
x_3	Variation [mm]	± 0.03	$\sim N(x^3, 0.01^2)$
x_4	Elastic modulus [GPa]	$\pm 8\%$	$\sim N(x^4, 8^2)$

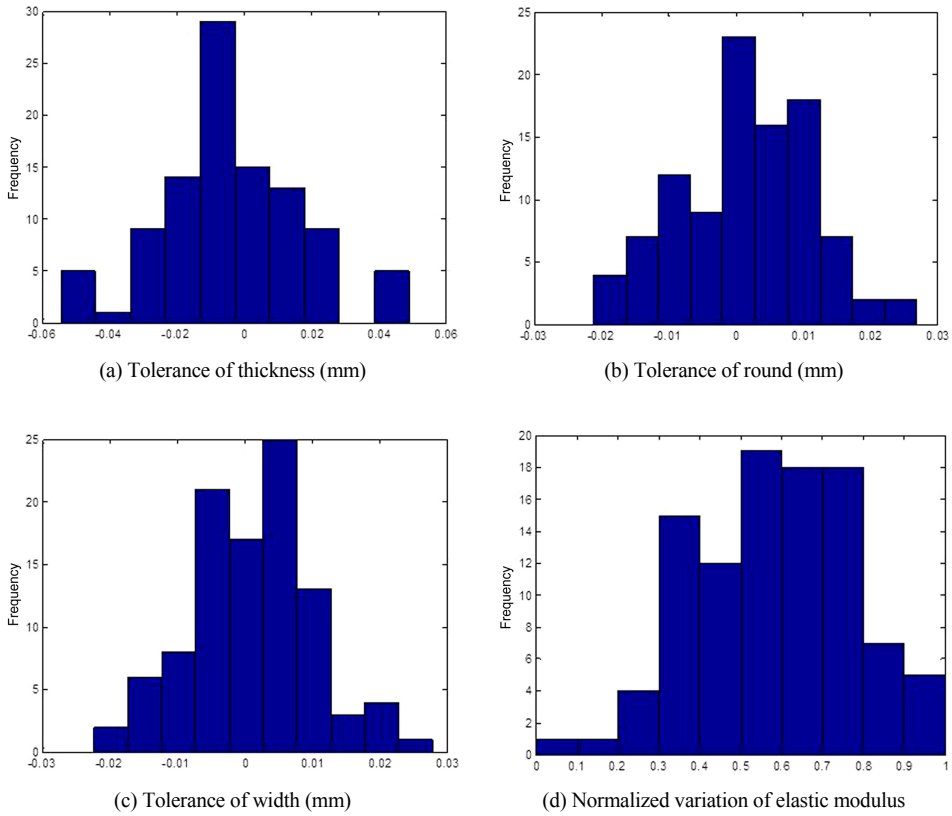


Fig. 4 Limited discrete information of LCA

5.2 아카이케 정보척도를 이용한 신뢰성 해석

실제 문제에서 설계자가 설계에 고려하는 정보가 불연속적이며 연속함수로 정의되는 특정 확률 분포로 가정할 수 없을 때 기존의 설계변수의 분포를 정규분포로 가정하는 급속확률적분법, 연속확률분포로 가정하는 모멘트법 또는 분포의 가정 없이 모든 표본점에 대해 응답을 추출하는 추출법은 신뢰성 해석을 하는데 한계가 있거나 비용의 관점에서 비효율적이다.

제한된 이산정보를 이용한 신뢰성 해석 및 신뢰성 기반 최적설계 위해 아카이케 정보척도를 이용한 신뢰성 해석 및 신뢰성 기반 최적설계 기법이 제안되었다.⁵⁾ 아카이케 정보척도 기반 신뢰성 해석기법은 한정된 이산정보로부터 얻어진 시스템의 통계적 특성을 가장 잘 나타내는 분포를 추정하고 추정된 분포를 이용하여 신뢰성 해석을 수행하는 방법이다.

아카이케 정보척도는 설계자가 정한 후보확률분

포들의 최대우량함수(maximum log likelihood function, f_{ml})와 모수의 개수 (n_{free})를 이용하여 식 (4)과 같이 정의된다.⁸⁾

$$\varphi = -2(f_{ml} - n_{free}) \quad (4)$$

제한된 이산정보에 대해 φ 가 가장 작은 후보 연속확률분포가 시스템의 통계적 특성을 가장 잘 표현하는 분포이며, 이를 이용하여 시스템의 신뢰도를 구한다.

5.3 신뢰성 기반 최적설계의 정식화 및 과정

신뢰성 기반 최적설계는 목적함수를 최소화하면서 제한조건 $G(X)$ 를 만족할 확률인 신뢰도 R^{target} 을 만족하는 설계변수 x 를 찾는 설계기법이며 로어컨트롤람의 신뢰성 기반 최적설계의 설계 정식화는 식 (1)의 확정론적 최적설계에 기반하여 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

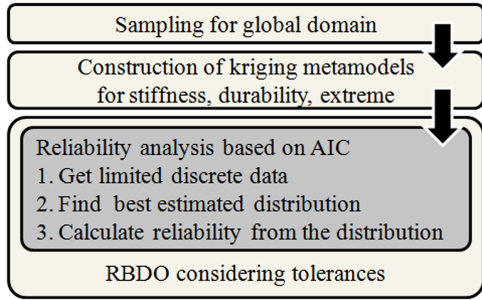


Fig. 5 Process of RBDO based on AIC

Find \mathbf{x}
 Min Volume
 S.T $\Pr(G_j(\mathbf{X}) \leq 0) \geq R^{target}$
 $j = 1, 2, 3, R^{target} = 0.95$ (5)
 $G_1(\mathbf{X})$: Stiffness_{target} - Stiffness
 $G_2(\mathbf{X})$: Life_{target} - Life
 $G_3(\mathbf{X})$: Perm. Displ. - Perm. Displ._{target}

본 연구에서 목적하는 신뢰도는 95%로 설정한다. 이는 100개의 제품 중 5개의 불량률을 갖도록 설정한 것이며 이는 설계자의 의도에 따라 변경 가능하다. 최종적으로 AIC를 이용한 신뢰성기반 최적설계의 절차는 Fig. 5와 같이 정리할 수 있다.

5.4 신뢰성 기반 최적설계 결과

식 (5)를 이용하여 정식화 된 신뢰성 기반 최적설계의 최적점에서 설계 인자의 불확실성에 의한 성능의 분포는 Fig. 5의 히스토그램으로 나타내었으며, 그에 따른 결과 데이터들은 Table 2와 Table 3에 정리하였다. 아카이케 정보척도를 이용한 방법의 정확성을 검증하기 위하여 최적점에 대해서 몬테카를로 추출법을 이용하여 100,000개의 신뢰성 데이터로 신뢰도를 검증하였다.

Fig. 6의 히스토그램에서 점선은 추정된 분포를 나타내며, 빨간색 실선은 요구 성능치를 표기한 것

Table 2 Optimum of RBDO

	Meaning	Initial design	Design range	Optimum design
x_1	Thickness of arm [mm]	3.5	[3.2 3.8]	3.3891
x_2	Variation [mm]	0	[-1.5 3.0]	3.0000
x_3	Variation [mm]	0	[-1.5 3.0]	1.1594

Table 3 Reliability at optimum and validation by MCS

	Meaning	Initial design	Optimum design	Validation at optimum (MCS)
G_1	Reliability of Stiffness [%]	93.9	96.7	97.0
G_2	Reliability of Life [%]	31.8	95	94.4
G_3	Reliability of Perm. Displ. [%]	100	98.4	93.9
Obj.	Volume [mm ³]	306,663	304,218 (0.80% ↓)	-

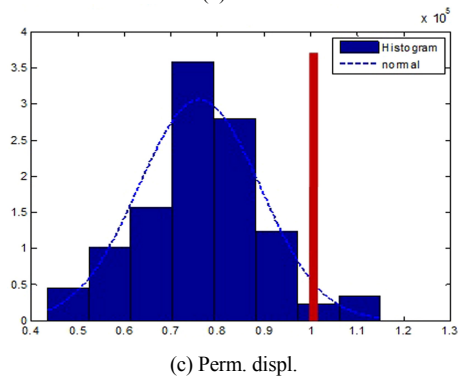
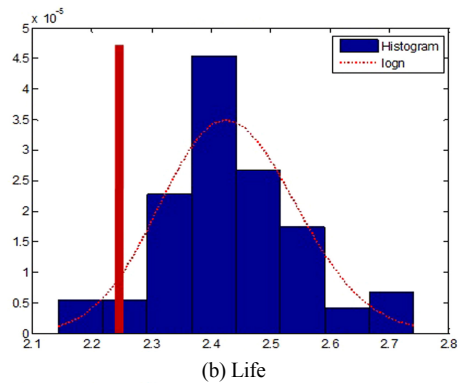
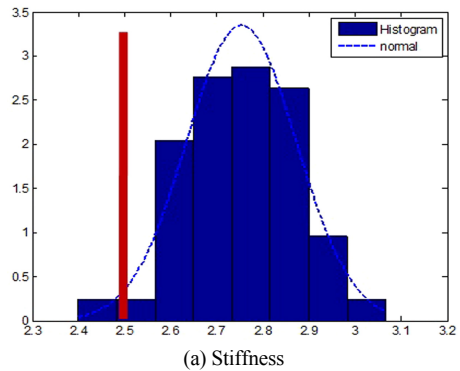


Fig. 6 Histograms of performances at optimum point

이다. 부피에 큰 영향을 주는 압의 두께(x_1)가 초기 모델보다 감소하면서 부피가 감소하였으며, 구속 조건을 만족시키기 위해 x_2 와 x_3 가 증가하여 초기형상 대비 최종형상은 넓고 얇은 압의 결과가 도출되었다. 아카이케 정보척도를 이용한 신뢰도는 최적점에서 목표 신뢰도였던 95%를 달성하였다. 최적점에서 100,000개의 데이터로 몬테카를로 추출법을 이용한 검증 결과와 약간의 오차가 발생하는 것을 알 수 있으나, 제한된 100개의 정보를 이용한 것에 대비하면 매우 근사한 결과라 할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 차체 부품의 선형 강성 해석, 내구 해석과 비선형 해석을 동반하는 설계 자동화 시스템을 구축하고 이를 통해 로어컨트롤암의 경량화와 요구되는 성능의 목표 신뢰도를 만족시키는 신뢰성 기반 최적설계를 수행하고 결과를 도출하였다.

- 1) 설계 범위 내에서 설계 인자의 변동에 따른 유한 요소 모델의 형상 변화를 Matlab을 통해 조작하고, 상용 해석 소프트웨어를 구동한 후 설계자가 원하는 응답을 추출하는 통합 설계 자동화 시스템을 구축하였다.
- 2) 연속확률분포가 아닌 제한적 이산정보를 기반으로 하여 아카이케 정보척도 기반 신뢰성 해석 기법을 수행하였다. 제한된 이산정보량은 100개이며, 통용되는 몬테카를로 추출법의 100,000개보다 훨씬 적은 횟수로 근사한 신뢰도를 구할 수 있는 장점을 활용하였다.
- 3) 아카이케 정보척도를 이용한 신뢰성 기반 최적 설계를 수행하였다. 설계 범위 내에서 각 인자의 불확실성에도 불구하고 각 성능의 신뢰도를 목적 신뢰도 수준으로 끌어 올리며 경량화도 이루는 최적설계안을 도출하였다. 최적점에 대해서 몬테카를로 추출법을 이용하여 신뢰도를 검증하였을 때 약간의 오차가 발생하나 매우 근사한 결과인 것을 확인할 수 있다.

후 기

본 연구는 (주)한국지엠과 한양대학교의 산학협력과제로 수행된 “차량구조의 위상최적화”의 결과 중 일부를 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- 1) J. Cho and M. Han, “Durability and Stress Analysis on Automotive Lower Arm,” Journal of the Korean Soc. of Machine Tool. Eng., Vol.19, No.3, pp.376-380, 2010.
- 2) J. Kim, B. Jang, Y. Park and K. Lee, “Durability Evaluation of Automobile Control Arm,” Journal of Korean Soc. Manufacturing Process. Eng., Vol.11, No.4, pp.168-172, 2012.
- 3) B. Song, H. Park, Y. Kwon, S. Kim, Y. Park and K. Lee, “Structural Design of an Upper Control Arm considering Static Strength,” Transactions of KSAE, Vol.17, No.1, pp.190-196, 2009.
- 4) Z. Xi, C. Hu and B. D. Youn, “A Comparative Study of Probability Estimation Methods for Reliability Analysis,” Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol.45, Issue 1, pp.33-52, 2012.
- 5) W. Lim and T. H. Lee, “Reliability-based Design Optimization Using Akaike Information Criterion for Discrete Information,” Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol.36, No.6, pp.921-927, 2012.
- 6) Posco, Cold Rolled Steel, <http://www.posco.co.kr>, Catalog, p.22, 2012.
- 7) B. Dupen, “Measuring Young’s Modulus with Metal Flatstock,” The Technology Interface, Vol.8, Issue 1, pp.1-8, 2007.
- 8) Y. Sakamoto, M. Ishiguro and G. Kitagawa, Akaike Information Criterion Statistics, KTK Scientific Publishers, New York, 1986.
- 9) J. Jang, J. Na, W. Lim, S. Park, S. Choi, J. Kim, Y. Kim and T. H. Lee, “Reliability-based Design Optimization for Lower Control Arm using Limited Information,” KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1306-1311, 2013.