

# 엔진마운트 진동성능 향상을 위한 신뢰성기반 최적설계

## Reliability Based Design Optimization

### for the Improvement of Engine Mount Vibration Performance

정재윤†

Jung, Jaeyun †

#### 1. 서론

기존의 최적설계는 제약조건을 만족시키면서 목적함수를 최소화하는 설계변수를 결정하는 방법을 사용하여 자동화 및 개발비용의 절감 등의 목적으로 수행 되어왔다. 최적설계법은 확률적 특성 관점에서 확정론적 접근방법(deterministic approach)과 통계학적 접근방법(stochastic approach)로 분류된다. 확정론적 접근방법은 최적화 과정에서 고려되는 변수들은 일정한 불변의 값을 갖는다고 가정하여 해석하며, 설계변수의 임의성(randomness), 제작오차, 재료 물성의 변동 등 설계과정의 불확실성(uncertainties)을 고려하기가 어렵기 때문에 최적값에 대한 신뢰성이 낮으며, 이것은 하나의 고정된 값만을 대표 값으로 사용하는 기존의 확정론적 접근법의 한계가 있음을 나타낸다.

설계변수의 임의성을 체계적이며 논리적인 확률 및 통계 이론을 적용하여 구조물의 안정성을 보다 정확하고 합리적으로 다루는 확률론적 접근방법이 최적화 기법에 도입되었으며, 이러한 확률론적 해석을 이용하여 설계의 신뢰성을 예측하는 것을 신뢰성 해석(reliability analysis)이라 한다. 구조물의 신뢰도를 제약조건으로 놓고 목적함수를 최소화하여 최적설계를 수행하는 것을 신뢰성 기반 최적설계(RBDO: Reliability Based Design Optimization)라 한다. 신뢰성기반 최적설계는 설계자가 만족하는 신뢰도를 제한조건으로 사용함으로써 제한조건을 강건화를 구현할 수 있다<sup>(1)</sup>.

본 논문에서는 신뢰성 기반 최적설계의 이론을 적용하여 엔진마운트의 진동성능 향상을 위한 최적설계를 수행하였다. 엔진마운트는 파워트레인계에서

발생되는 과도한 운동을 제어하고 주 시스템에 전달되는 진동과 소음을 절연하는 것을 목적으로 한다. 엔진마운트의 진동설계는 차량개발 단계에서 중요한 항목으로써 다양한 설계변수와 불확실성 등을 고려하여 최적화가 수행되어야 한다.

본 논문에서는 MSC.ADAMS 기반으로 개발된 엔진마운트 시스템 해석 프로그램인 EMTTOOLS 를 이용하여 엔진마운트 진동성능을 평가하였으며, 엔진마운트 진동성능에 대한 신뢰성 기반 최적설계는 범용 최적화 자동화 전용 프로그램인 iSIGHT-FD 를 사용하였다.

#### 2. 본론

##### 2.1 절 신뢰성기반 최적설계(RBDO: Reliability Based Design Optimization)

###### (1) 확률 설계변수(probabilistic design variable)

실제 구조물은 제조과정, 재료의 물성치, 온도, 습도 등 내 외부적의 영향으로 임의성과 불확실성을 가지고 있으며, 그에 따른 응답특성도 불확실성을 내포하고 있다.

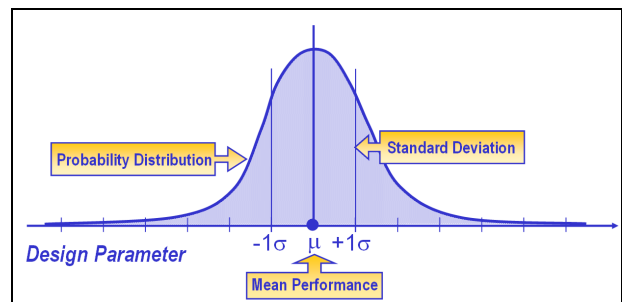


그림 1 확률 설계변수(probabilistic design variable)

† 정재윤 ; (주)아띠

E-mail : jyjung@ahtti.com

Tel : (031) 777-9131, Fax : (031) 777-9135

그림 1 은 설계변수가 임의의 특정값이 아닌 평균 값을 중심으로 분산특성에 따라 분포하는 확률변수 임을 보여준다. 따라서 구조물의 불확정성을 예측하는 해석을 위해서는 확률변수의 변동에 대한 응답특성의 변동을 함께 고려해야 한다.

## (2) 일계이차모멘트법(FORM : First Order Reliability Method)

결정론적인 최적설계 문제를 신뢰성을 고려한 최적설계 문제로 변환하기 위해서는 필요한 결정론적 제한조건들을 확률론적인 제한조건으로 변환해 주어야 한다. 신뢰성 최적설계를 위한 기법에는 신뢰도 지수를 이용하는 방법(RIA : Reliability Index Approach)과 역 신뢰성 해석을 이용하는 방법(PMA : Performance Measure Approach)이 있다.

본 논문에서는 신뢰도 지수를 이용하는 대표적인 신뢰성 최적설계 방법인 일계이차모멘트법을 사용하였다.

일계이차모멘트법은 실패확률의 산정을 위하여 확률변수(X)와 성능평가함수  $g(X)$ 를 서로 통계적으로 독립인 표준정규분포 확률변수 공간(U-space)에서 표현되도록 변환한 다음, 원점으로부터 가장 가까운 직선거리에 위치한 성능평가함수상의 점을 추적하고 그 직선거리를 신뢰도 지수(reliability index),  $\beta$ 로 정의하여 실패확률을 산정하는 것이다. 그림 2 는 일계이차모멘트법의 개념을 도식화 한 것이다.

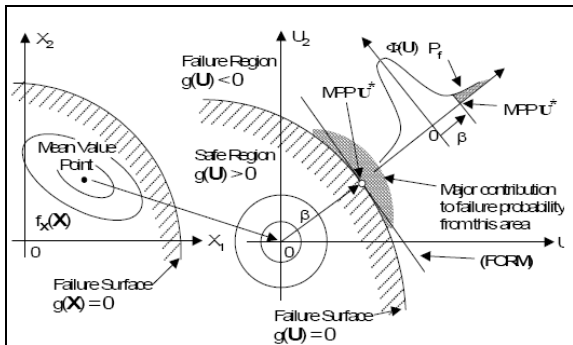


그림 2 일계이차모멘트법(FORM : First Order Reliability Method)

그림 2 에서 도식화한 일계이차모멘트법은 식(1)로 표현된다.

$$\beta = \min_U |U|$$

$$s.t. g(X) = g(T^{-1}(U)) = g(U) = 0 \quad (1)$$

여기서,  $g(U)$ 는 실패함수(failure function),  $U$ 는 표준 정규 공간(U-space)에서 선형화 된 표준정규

분포 확률변수(random variable)를 의미하며,  $U^*$ 는 수렴된 최대 위반 가능점(MPP : Most Probable Failure Point)을 나타내며, 이 거리가 신뢰성지수(reliability index),  $\beta$ 가 된다<sup>(2)(3)(4)</sup>.

## 2.2 절 엔진마운트 시스템 문제 정의

엔진마운트는 파워트레인계에서 발생하는 과도한 운동을 제어하고 주 시스템에 전달되는 진동과 소음을 절연하는 것을 목적으로 한다. 엔진마운트의 진동설계는 차량개발 단계에서 중요한 항목으로써 다양한 설계변수와 불확실성 등을 고려하여 최적화가 수행되어야 한다.

본 절에서는 엔진마운트 시스템의 진동성능 향상을 위한 신뢰성 기반 최적설계의 선행단계로서 엔진마운트 시스템 해석 프로그램 - EMTOOLS 을 이용하여 엔진마운트 시스템 초기모델을 정의하고, 초기모델의 엔진마운트 진동성능을 평가하였다.

### (1) 엔진마운트 시스템 초기모델 정의

엔진마운트 시스템의 진동성능을 평가하기 위해서는 엔진마운트 주요 특성정보를 해석모델에 입력해야 한다. 주요 특성정보는 다음과 같다.

- 1) 엔진 중량 정의
- 2) 엔진 장착 방향(수평, 수직)
- 3) 엔진 MOI(mass moment of inertia) 정의
- 4) 엔진 TRA(torque roll axis) 정의
- 5) 엔진 COG(center of gravity) 정의
- 6) 엔진 마운트 위치(hard point) 정의
- 7) 엔진 마운트 부시강성(bush stiffness) 정의
- 8) 엔진 마운트 자세(Orientation) 정의

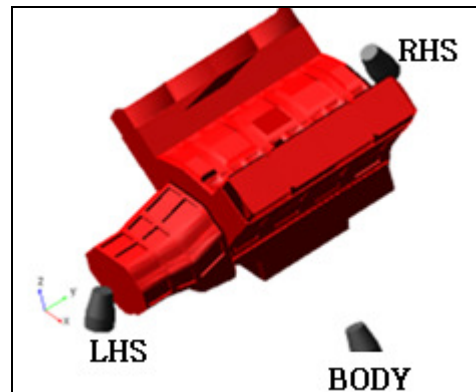


그림 3 엔진 장착 방향 및 마운트 위치

그림 3 은 엔진 장착 방향 및 마운트 위치를 보여준다. 엔진 장착 방향은 차량좌표계를 기준으로 되어있으며, 본 논문에서는 횡방향(Y-dir)으로 장착되

었다. 엔진 장착 방향이 횡방향(Y-dir)으로 되어 있을 경우, 엔진의 주요 진동성능 관심 항목은 롤모드(Roll mode)이다. 마운트 위치는 LHS, RHS, BODY이며, 3 점 지지 엔진 마운팅 형식(3-point engine mounting type)으로 구성되었다.

표 1 ~ 4 는 엔진마운트 진동성능 평가를 위해 입력해야 할 엔진마운트 주요 특성정보를 보여준다.

표 1 Engine-PT Property

Weight [kg]	262.7		
MOI [kg.mm**2]	1.61E+07	-	-
	-6.49E+05	8.69E+06	-
	-8.75E+05	1.88E+06	1.45E+07
TRA(torque roll axis)	1.00	29.89	-3.82

표 2 Engine CG & Mounting Position

	X	Y	Z
COG	-205.25	30.48	193.79
RHS Mounting	-247.00	473.00	346.00
LHS Mounting	-161.00	-455.70	303.20
Reaction rod PT	55.07	-42.30	-94.42
Reaction rod Body	205.07	-42.30	-84.42

표 3 Engine Mount Bush Stiffness

Bush Stiffness (N/mm)	Kx	Ky	Kz
LHS	182	172	133
RHS	225	215	124
Reaction PT	1500	1500	1500
Reaction BD	200	80	350

표 4 Engine Orientation

Orientation (deg)	Alpha	Beta	Gamma
LHS	90	0	0
RHS	90	0	0
Reaction PT	90	0	0
Reaction BD	0	0	0

(2) 엔진마운트 시스템 초기모델 해석 결과

엔진마운트 시스템 초기모델의 해석 결과는 그림 4 와 같다. 그림 4 에서 보는 바와 같이 디커플수준(% decouple the kinetic energy)을 평가할 때, No. 5 Purity(Roll mode)의 디커플수준이 약 77%로

나타났으며, No. 6 Purity(Yaw mode)의 디커플수준이 약 81%로써, No. 1~4 Purity 의 모드 디커플수준보다 다소 낮게(90% 이하) 나타났다.

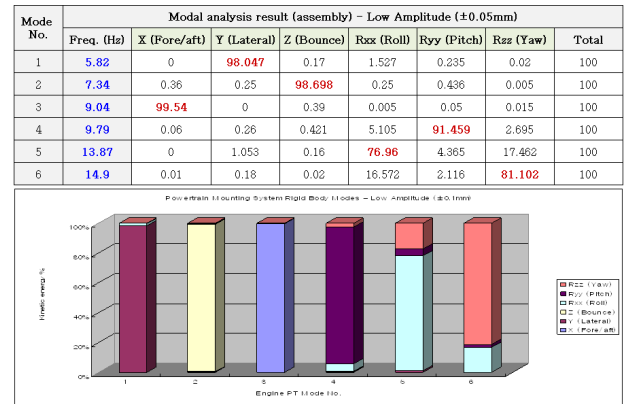


그림 4 엔진마운트 시스템 초기모델의 진동해석 결과

2.3 절 신뢰성 기반 최적설계(RBDO : Reliability Based Design Optimization)

(1) 엔진마운트 시스템의 RBDO 문제의 정의

엔진마운트 시스템의 품질변동(random variable)에 대한 신뢰성을 고려한 최적설계를 결정하고 최적해의 강건성(robustness)과 신뢰성(reliability)을 동시에 고려한 설계를 위해 RBDO 해석을 수행하였다. RBDO 해석은 원하는 신뢰성에 대해서 확률변수(random variable) 조절이 가능하며, 신뢰성 제한 조건에 대한 반응치 설계 용이하며, 변동요인을 제거하여 목적하는 평균값으로 변경이 가능하여 강건성을 만족시키는 설계를 할 수 있다. 또한, 확률변수의 변동을 조절하여 허용오차와 비용의 타협(trade-off)이 가능하다.

다음은, 엔진마운트 시스템의 RBDO 문제를 정의한 것이다.

- 1) 확률변수(random variable)의 정의 : 부시강성(bush stiffness)의 품질오차(±10%)를 표준정규분포 함수로 정의
- 2) 신뢰성 제한조건(reliability constraints)의 정의 : 강건성 및 신뢰성 평가의 기준 설정 (Sigma level 설정)
- 3) 설계변수(design variable)설정 : 엔진마운트 위치, LHS, RHS x-dir. 좌표
- 4) 목적함수(objective function) 설정 : No.1 Modal frequency(4.7~7.5Hz)

확률변수는 엔진마운트 각 장착 위치의 부시강성(bush stiffness)의 품질오차 (±10%)를 표준정규분

포 함수로 정의하였으며, 장착위치는 그림 3 과 같으며, LHS\_K(x,y,z), RHS\_K(x,y,z), BODY\_K(x,y,z), 3 개의 장착점에서 모두 9 개의 부시강성을 선정하였다. 표 5 ~ 7 에서는 9 개의 확률변수를 각 마운팅 위치별로 상세히 정리하였다.

표 5 확률변수(random variable), LHS

Mounting Position	LHS		
	Kx	Ky	Kz
Stiffness (N/mm)			
Mean	170.0	102.0	330.0
Standard Devi.	17.0	10.2	33.0
Random variable			
Probability Density Function	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$		

표 6 확률변수(random variable), RHS

Mounting Position	RHS		
	Kx	Ky	Kz
Stiffness (N/mm)			
Mean	220.0	132.0	220.0
Standard Devi.	22.0	13.2	22.0
Random variable			
Probability Density Function	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$		

표 7 확률변수(random variable), BODY

Mounting Position	BODY		
	Kx	Ky	Kz
Stiffness (N/mm)			
Mean	190.0	190.0	95.0
Standard Devi.	19.0	19.0	9.5
Random variable			
Probability Density Function	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$		

설계변수(deign variable)는 표 8 에 정리하였으며, 12 개의 마운트 위치 중 엔진의 진동성능에 영향도가 높은 LHS\_hp\_X 와 RHS\_hp\_X, 2 개의 설계변수만을 선택하여 적용하였다.

설계 목적함수(objective function)는 No.1 Modal frequency 로 설정하였고, 신뢰성 제한조건(reliability constraints)은 표 9 와 같이 5 개의 인자(parameter)를 선정하여 적용하였다.

표 8 설계변수(random variable)

Input Parameters	Lower Bound		Current Value		Upper Bound
LHS_hp_X	-181.00	≤	-161.00	≤	-141.00
LHS_hp_Y			-455.70		
LHS_hp_Z			303.20		
RHS_hp_X	-277.00	≤	-247.00	≤	-237.00
RHS_hp_Y			473.00		
RHS_hp_Z			346.00		
ENG_hp_X			55.07		
ENG_hp_Y			-42.30		
ENG_hp_Z			-94.42		
BODY_hp_X			205.07		
BODY_hp_Y			-42.30		
BODY_hp_Z			-84.42		

표 9 신뢰성 제한조건 & 목적함수(reliability constraints & objective function)

Output Parameters	Lower Bound		Current Value		Upper Bound	Reliability constraints or Objective Function	Sigma Level
Frequency_1st			0.0			Objective Function	-
Purity_1st Lateral	60.0	≤	0.0			Reliability constraints	3.0
Frequency_2nd	6.7	≤	0.0	≤	9.2	Reliability constraints	3.0
Purity_2nd Bounce			0.0			-	-
Frequency_3rd			0.0			-	-
Purity_3rd Foreafter			0.0			-	-
Frequency_4th	8.0	≤	0.0	≤	11.0	Reliability constraints	3.0
Purity_4th Pitch			0.0			-	-
Frequency_5th			0.0			-	-
Purity_5th Yaw	60.0	≤	0.0			Reliability constraints	3.0
Frequency_6th			0.0			-	-
Purity_6th Roll	80.0	≤	0.0			Reliability constraints	3.0

## (2) 엔진마운트 시스템 RBDO 해석 결과

엔진마운트 진동성능에 대한 신뢰성 기반 최적설계는 범용 최적화 및 자동화 프로그램인 iSIGHT-FD 를 사용하였으며, 해석 결과는 다음과 같다.

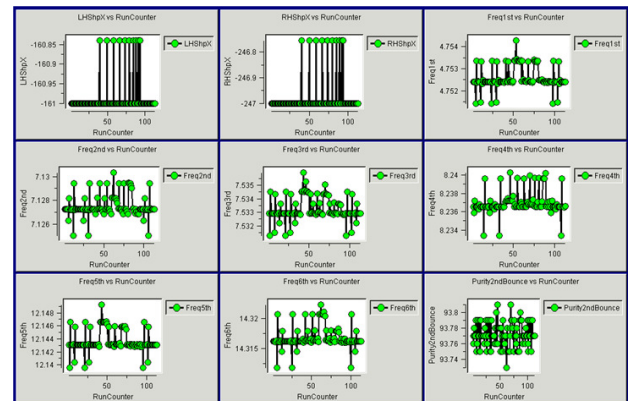


그림 5 RBDO Iteration Results

그림 5 는 설계변수 와 제한조건에 대한 RBDO 해석진행 과정의 결과를 나타낸다.

표 10 에서는 RBDO 해석시 설계변수로 설정한 LHS\_hp\_X 와 RHS\_hp\_X, 2 개의 설계변수의 변동량을 표시하였다.

표 10 Engine CG & Mounting Position (RBDO Results)

	X	Y	Z
COG	-205.25	30.48	193.79
RHS Mounting	-247.92	473.00	346.00
LHS Mounting	-157.99	-455.70	303.20
Reaction rod PT	55.07	-42.30	-94.42
Reaction rod Body	205.07	-42.30	-84.42

표 11 에서는 LHS\_K(x,y,z), RHS\_ K(x,y,z), BODY\_ K(x,y,z), 3 개의 장착점에서 모두 9 개의 부시강성에 대한 RBDO 결과를 정리하였다.

표 11 Engine Mount Bush Stiffness (RBDO Results)

Bush Stiffness (N/mm)	Kx	Ky	Kz
LHS	173.68	98.18	330.48
RHS	216.18	130.97	227.21
Reaction PT	1500	1500	1500
Reaction BD	189.74	190.00	93.88

부시강성의 경우, 10% 품질 변동 오차에 대한 관리 기준점을 설정하였으며, LHS 및 RHS 마운트 위치에 대한 강건 설계점(robust design point)을 제시하였다.

표 12 에서는 RBDO 결과로서 신뢰수준(quality level) 과 성공확률(probability of success)을 정리하였다.

표 12 Quality level & Probability of success (RBDO Results)

Parameters Name	Sigma Level (Target : $\beta=3$ )	Probability of Success
Purity_1st_Lateral	2.56	98.94%
Frequency_2nd	1.1	72.86%
Frequency_4th	1.57	88.46%
Purity_5th_Yaw	2.11	96.47%
Purity_6th_Roll	8	100.00%

RBDO 결과로부터 신뢰성 제한조건 중 No.6

Purity(Roll mode)에서 설계 강건성과 신뢰성이 매우 높게 평가 되었다.

표 13 에서는 목적함수(Objective function)와 신뢰성 제한조건(reliability constraint) 결과에 대해 엔진마운트 시스템 초기모델의 해석 결과 및 확정론적 최적설계 결과, 그리고 RBDO 결과를 정리하였다. RBDO 결과의 No.5 Purity(Roll mode) 과 No.6 Purity(Yaw mode)의 디커플수준(% decouple the kinetic energy)은 초기모델의 해석 결과 대비 No.5 Purity(Yaw mode)에서 25% 향상되었으며, No.6 Purity(Roll mode)의 14% 향상을 보였다. 확정론적 최적화 결과와 상대 비교 해 볼 때, No.5 Purity(Yaw mode)에서 약 5% 감소를 보였으며, No.6 Purity(Roll mode)의 1% 감소를 보였다. 전반적으로 변동량은 미소하였으나, 이러한 감소 이유는, RBDO 해석시 확률변수의 변동에 대한 응답특성의 변동을 함께 고려하여 불확정성을 예측을 하는 데에서 발생하는 상대적인 오차로 보인다.

표 13 Objective function & reliability constraint (Initial Design & RBDO Results)

Parameter Name	Initial Design Results	Deterministic Optimization Results	RBDO Optimization Results
Frequency_1st	5.82Hz	4.75Hz	4.71Hz
Purity_1st_Lateral	98.05%	98.86%	98.83%
Frequency_2nd	7.34 Hz	7.13 Hz	7.20 Hz
Frequency_4th	9.79 Hz	8.24 Hz	8.24 Hz
Purity_5th_Roll	76.96%	97.89%(Yaw)	96.11%(Yaw)
Purity_6th_Yaw	81.10%	93.62%(Roll)	92.77%(Roll)

### 3. 결론

본 논문에서는 신뢰성 기반 최적설계의 이론을 적용하여 다양한 설계변수와 불확실성 등을 고려하여 엔진마운트의 진동성능 향상을 위한 최적화 설계를 수행하였다.

부시강성의 경우, 10% 품질 변동 오차에 대한 관리 기준점을 설정하였으며, LHS 및 RHS 마운트 위치에 대한 강건 설계점(robust design point)을 제시하였다. 또한, No.6 Purity(Roll mode)에서 설계 강건성과 신뢰성이 매우 높게 평가 되었다.

### 4. 참고 문헌

1. T.H.LEE, “신뢰성기반 최적설계”, *기계저널 제 45 권 제 2 호*, pp. 86~89, 2005
2. S.B.LEE, “OPTIMAL RELIABILITY DESIGN FOR THIN-WALLED BEAM OF VEHICLE STRUCTURE CONSIDERING

- VIBRATION”, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 4 No. 3, pp. 135~140, 2003
3. Sang-Joon Yoon, “Reliability-Based Design Optimization of Slider Air Bearings”, *KSME International Journal*, Vol. 18 No. 10, pp. 1722~1729, 2004
  4. Chul-HO Bae, “Reliability Based Design Optimization of the Softwater pressure Tank Considering Temperature Effect”, *대한기계학회 논문집 A 권*, 제 28 권 제 10 호, pp. 1458~1466, 2004
  5. EMTOLS Manual
  6. iSIGHT-FD Component Guide Manual