

민감도 해석을 이용한 로우어 컨트롤 암의 구조 최적설계

송병철*, 조영직*, 김주형**, 이권희***, 박영철#

Structure Optimization for a Lower Control Arm Using Sensitivity Analysis

Byoung-Cheol Song*, Young-Jik Jo*, Ju-Hyoung Kim**, Kwon-Hee Lee***, Young-Chul Park#

ABSTRACT

Recently developed automotive components are of lightweight nature, providing automobiles with a high fuel efficiency and performance. In response to those trends of car developments, this study proposes a structural optimization method for the lower control arm. Lightweight design of lower control arm can be achieved through two approaches: design and material technology. In this research, the former includes optimization technology, and the latter the technologies for selecting aluminum as a steel-substitute material. In this research, the design of experiments(DOE) built in ANSYS WORKBENCH are utilized to determine the optimum shape of a Lower Control Arm. And optimum design is compared first model and reduced design variable model that considered sensitivity using orthogonal array.

Key Words : Lower Control Arm(로우어 컨트롤 암), ANSYS WORKBENCH(앤시스 워크벤치), DOE(실험계획법), SN ratio(신호대 잡음비)

1. 서 론

국내에서는 자동차 부품 새시(chassis)계의 모듈화 및 경량화를 동시에 추구하면서, 구동부품과 차체부품을 알루미늄 주조 또는 단조재인 경량재료의 사용이 점차 증가하는 추세이다. 특히 현가장치(suspension)는 승차감(ride comfort)과 조종 안정성(handling performances)에 대한 소비자들의 인식이 높

아감에 따라, 고속 주행 시 차량의 주행성능을 확보하는 동시에 경량화를 통한 현가장치의 최적설계가 요구되고 있다⁽¹⁾. 최근의 최적설계는 통계학적 방법을 이용한 실험 계획법의 직교배열표와 CAE 시뮬레이션을 연계하여 설계공정을 단축시키고, 설계의 고도화를 도입하기 위한 최적설계의 개념이 도입되고 있는 추세이다. 최적화 문제에서는 설계변수의 변화에 따른 목적함수와 제약조건의 변화정도를 표현하는 수학적 모델을 필요로 한다. 그러나 실제 시스템에 있어서 제한 조건들과 목적함수를 정확히 수학적으로 기술하는 것이 매우 어려운 작업이며 표현방식이 가지고 있는 한계성으로 인해 부정확성의 문제가 발생한다. 이로 인해 최근에는 시스템의 평가 특성치

* 동아대학교 대학원 기계공학부

교신저자 : 동아대학교 기계공학부

E-mail : parkyc67@dau.ac.kr

** (주)센트랄

*** 동아대학교 기계공학부

함수를 수식적으로 구하기 어려운 경우에 통계적 방법을 이용한 실험계획법이 사용되고 있는 추세이다(2).

본 연구에서는 ANSYS WORKBENCH에 내장된 최적화 TOOL인 Design Xplorer 중 DOE를 이용하여 최적화를 수행하였다. 그리고 그 결과와 직교배열표를 사용하여 각각의 설계변수가 최대 응력 및 중량에 미치는 민감도를 산출하고 그에 따라 설계변수를 감소시킨 경우의 최적화 결과를 비교 검토해 보았다.

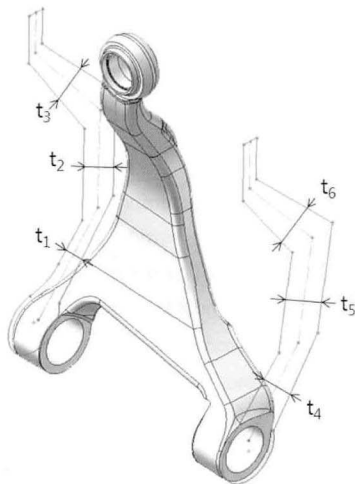


Fig. 1 Design variables of a Lower control arm

2. Lower Control Arm의 구조 최적설계

2.1 하중조건 및 설계변수 정의

최적 설계 대상인 Lower Control Arm은 현 차종에 사용 중으로 재질은 AL6061이며 항복강도(σ_y)는 270MPa 이다. 본 연구에서는 재질을 AL6061M6이고 항복강도(σ_y)는 315MPa이다. 다음 재질을 적용한 모델의 최적설계를 수행하였다.

Lower Control Arm의 설계 시 고려해야 할 하중은 내구 하중, 충격 하중, 정강도 하중이 있다. 정강도 하중의 종류로는 1GVW, 1G_Braking, 1G_Cornering, 3G_Bumping이 있다. 본 연구에서는 정강도 하중 중 가장 큰 하중 조건인 3G_Bumping 만을 고려하였다.

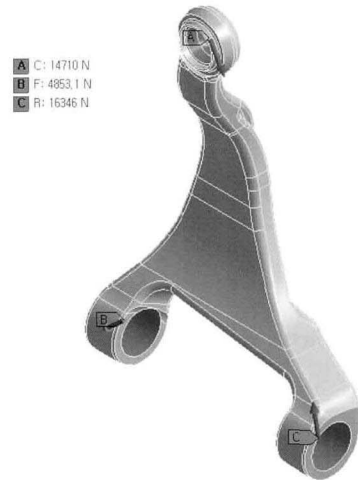


Fig. 2 Boundary condition of a Lower control arm

Fig. 1에는 본 연구에서 고려한 설계변수를 표시 하였다. Lower Control Arm은 좌측편 두께와 우측편의 두께가 다르므로 두 개의 스케치 면으로 Loft하여 두께를 생성하였다. $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ 은 Lower Control Arm의 두께를 구성하는 부분이다. 두께를 하나의 설계변수로 설정할 경우 과잉 설계의 우려가 있으므로 두께를 결정하는 부분을 6부분으로 나누어 하나씩 설계변수로 설정하였다. Fig. 2에는 경계조건을 표시하였다. A, B, C는 Lower Control Arm의 Hard point이다. 이것은 다른 파트와 조립하는 기준점으로 그 포인트에 하중 조건을 가하고 Inertia Relief 조건으로 해석 하였다. Inertia Relief 해석은 강제 운동을 하고 있는 구조를 해석할 때 쓰이는 방법으로 대표적인 예는 도로를 주행하는 자동차, 공중에 떠 있는 비행기를 들 수 있다. 이들은 모두 외력이 결정되어 있으나 강제운동을 구속할 변위 경계조건이 주어지지 않은 경우이다. 고정된 구조물에 힘을 가하는 경우 모든 힘이 탄성 변형에 기여한다. 하지만 구조물이 이동하는 경우 힘은 탄성 변형뿐만 아니라 강제운동에도 영향을 미치게 되므로 움직이는 구조물에 대해 탄성 변형만을 고려하려면 강제운동에 의한 영향을 제거 해주어야한다. Inertia Relief 해석을 수행하면 구조물의 탄성변형에 영향을 미치는 응력만을 산출할 수 있다(3).

2.2 초기 해석 결과 및 최적설계 정식화

Fig. 3은 초기 모델의 해석결과를 나타내었다. 최대 응력은 269.9MPa 이고 중량은 1890.6g이다. 최대 응력은 재료의 항복강도인 315MPa을 충분히 만족하고 있다. 따라서 본 연구에서는 과잉 설계된 Lower Control Arm의 구조최적화를 수행 하였다.

본 연구에서는 Lower Control Arm의 최적설계를 위해 다음과 같은 정식화를 제안한다.

$$\text{Minimize } W(t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6) \quad (1)$$

$$\text{Subject to } \sigma_{\max} \leq \sigma_a \quad (2)$$

$$t_L \leq t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6 \leq t_U \quad (3)$$

여기서 σ_{\max} 는 발생하는 최대 응력(von-mises stress), W 는 무게, $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ 는 설계변수를 표시한 것이다. 본 연구에서는 ANSYS WORKBENCH의 DOE를 이용하여 최적화 문제를 해결하였다^(4,5).

본 연구에서 사용한 DOE방법은 설계변수의 설계 범위를 설정해야 한다. Lower Control Arm의 경계조건에 만족하도록 초기값을 상한값으로 설정하고 20% 범위에 하한값으로 설정하였다. 다른 부품과 간섭 문제로 설계변수의 상한값은 초기 모델의 치수를 넘어서는 안 된다. 제한조건인 최대 등가응력이 315MPa을 넘지 않으면서 중량이 최소가 되는 최적점을 찾도록 설정하였다.



Fig. 3 Stress contour at the initial design

3. ANSYS WORKBENCH 를 이용한 최적화

DOE는 최적해를 구하기 위하여 중심합성법(central composit approach)을 이용하여 실험 횟수를 정하게 된다. 그 식을 식(4)에 표시하였다.

$$n = 2^k + 2k + n_0 \quad (4)$$

따라서 n 개의 실험 결과 값을 이용하여 반응표면(response surface)을 만들게 되고 이 반응 표면으로부터 최적해를 선정한다. 본 연구에서는 반응치는 중량 및 최대응력이다. 즉 식 (1) 과 (2)에서 W 는 반응표면모델 \hat{W} , σ_{\max} 는 $\hat{\sigma}_{\max}$ 로 대치된다. 초기에 6개로 설정한 설계변수를 이용하여 ANSYS WORKBENCH의 DOE를 수행하였다. 식 (4)를 고찰해보면 설계변수의 갯수에 따른 실험횟수의 변경 폭이 크다. 따라서 설계변수를 줄일 수 있다면 실험횟수가 크게 줄어 해석시간을 줄일 수 있다.

3.1 초기 설계변수를 이용한 최적화 결과

DOE방법을 이용하면 3개의 후보 최적점을 제공한다. 산출된 후보 최적점과 실제 해석값을 Table 1,2에 표시하였다. 그리고 Table 3에는 모델의 초기 설계변수와 최적화된 설계변수의 결과를 비교해 보았다. Table 4에는 초기 응력, 무게와 최적화된 모델의 응력, 무게를 비교하였다. 그리고 민감도해석을 각각의 설계변수가 반응치인 중량 및 최대응력에 미치는 민감도를 산출하기 위하여 다구찌 기법을 활용하여 SN비를 구해 보았고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다⁽⁶⁾. Fig. 4의 결과를 고찰하여 보면 설계변수 t_2 가 반응치에 가장 민감하지 않은 것으로 나타났고 t_5 가 그 다음이다. 다음의 두 개의 설계변수가 다른 설계변수들에 비해 그 민감도가 덜 한 것을 알 수 있다. 그에 따라 민감도가 덜한 설계변수 t_2 와 t_5 를 제외한 4개의 설계변수를 새로운 설계변수를 설정하여 DOE를 수행하였다.

Table 1 Optimum values using 1st DOE

		DP ₁	DP ₂	DP ₃
t ₁ (mm)		8.000	8.000	8.000
t ₂ (mm)		15.675	13.613	15.314
t ₃ (mm)		15.622	16.889	16.654
t ₄ (mm)		15.057	15.543	14.918
t ₅ (mm)		17.945	18.327	18.431
t ₆ (mm)		17.480	18.240	17.054
σ _{max} (MPa)	predict	305.57	303.26	308.2
	true	317.24	319.43	308.09
W (g)	predict	1689.7	1688.8	1696.4
	true	1689.7	1688.8	1696.4

Table 3 Optimum values using DOE

Design variable	t ₁ (mm)	t ₂ (mm)	t ₃ (mm)	t ₄ (mm)	t ₅ (mm)	t ₆ (mm)
Initial	10	16.5	19	17	21	19
First	8	15.3	16.7	14.9	18.4	17.1
Second	9.6	-	15.7	-	17.7	19.9

Table 4 Comparison of optimum

	Initial	1 st DOE		2 nd DOE	
		predict	true	predict	true
σ _{max} (MPa)	269.1	308.2	308.1	309.3	302.98
W (g)	1890.6	1696.4	1696.4	1699.6	1699.6

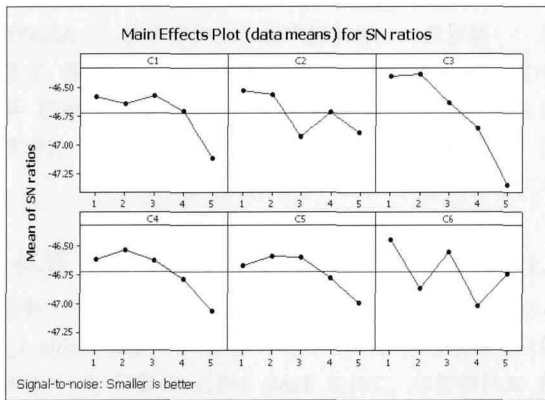


Fig. 4 Effect of Design variables on von-mises stress by SN ratio

Table 2 Optimum values using 2nd DOE

		DP ₁	DP ₂	DP ₃
t ₁ (mm)		9.555	9.504	9.054
t ₃ (mm)		15.651	17.022	17.972
t ₅ (mm)		17.701	19.827	18.987
t ₆ (mm)		19.938	15.89	18.001
σ _{max} (MPa)	predict	309.3	298.82	293.55
	true	302.98	305.43	295.4
W (g)	predict	1699.6	1718.8	1741.0
	true	1699.6	1718.7	1741.1

4. 결 론

1. WORKBENCH에서 DOE방법은 중심합성으로 직교배열표나 라틴하이퍼큐브 방법보다 정확한 근사합수를 얻지 못했기 때문에 만족한 결과를 얻지 못했다.

2. 1st DOE 방법으로는 무게가 초기 값보다 10.27% 감소한 값을 얻을 수 있었고, 2nd DOE방법으로는 무게가 초기값의 10.1%가 감소한 값을 얻을 수 있었다. 결과로 고찰해보면 첫 번째와 두 번째 방법과 무게 감소율은 거의 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 이후 다른 방법으로 값을 찾아 최적설계를 수행할 예정이다.

3. DOE방법은 설계변수의 개수가 증가함에 따라 실험수가 많아진다. 이는 최적해를 찾기 위한 근사합수를 만드는 시간이 증가하기 때문에 적은 수의 설계변수를 가질 때 사용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서와 같이 민감도해석을 하여 그 결과를 이용하여 민감도가 덜한 설계변수를 제외 한다면 최적설계를 효율적으로 할 수 있을 것이다.

4. 실제 주행상황을 고려한다면 3G Bumping 뿐만 아니라 1GVW, 1G_Braking, 1G_Cornering 해석 조건을 모두 고려해야 할 것이며 내구 해석과 충돌해석도 병행하여 수행해야 한다. 이후 다른 조건으로도 해석을 수행을 하여 최적설계를 할 예정이다. 그리고 현재 설정한 설계변수 외에 다른 설계변수를 검토 할 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역 혁신인력양성사업으로 수행된 연구 결과 임.

참고문헌

1. 박영철, 이동화, “유한 요소법을 이용한 로우컨트롤암의 피로수명 평가,” 한국자동차공학회지, 추계 학술대회, pp. 1441-1446, 2003.
2. 강창경, 박영철, 이동화, “특성함수를 이용한 로우컨트롤암의 형상 최적 설계,” 한국자동차공학회지, 추계 학술대회, pp. 1447-1452, 2003.
3. 주병현, 남기원, 이병채, “CAE 해석 기반 내구도 평가 방법에 대한 연구,” 한국정밀공학회 추계 학술대회 논문집, pp. 60-64, 2004.
4. 방일권, 강동현, 한동섭, 한근조, 이권희, “실험계획법을 이용한 조(Jaw)의 형상최적설계,” 한국항해항만학회지, 제30권, 8호, pp. 685-690, 2006.
5. “ANSYS USER'S MANUAL,” ANSYS Inc., 1992.
6. “Minitab을 이용한 다구찌 기법 활용,” 이레테크, 2006