

강도를 고려한 컨트롤 암의 구조설계 Structural Design of a Control Arm Considering Strength

*김종규¹, #이권희², 손완영¹, 황석철¹, 박영철²

*J. K. Kim¹, #K. H. Lee(leekh@dau.ac.kr)², H. J. Son¹, S. C. Hwang¹, Y. C. Park²

¹ 동아대학교 일반대학원, ² 동아대학교 기계공학과

Key words : control arm, kriging, 1/4 car module, weak model

1. 서론

현재 많은 자동차 부품 업계에서는 자동차 부품의 모듈화 및 경량화를 통해 개발 비용의 절감과 에너지 효율성을 높이기 위해 노력하고 있다. 차량의 경량화 설계를 위하여 일부 부품들은 초기 설계 단계부터 그램(gram)단위까지 목표 중량을 설정하고 개발되고 있다¹.

컨트롤 암은 차체 프레임(frame)과 너클(knuckle)에 연결되어 피봇 역할을 한다. 컨트롤 암은 승차감(ride comfort)과 조종 안정성(handling performances)에 영향을 미치는 현가계(suspension system)의 핵심 부품이다. 본 연구에서 적용한 컨트롤 암은 K 업체에서 생산되는 제품이며, SUV 차량에 장착이 되는 후륜용 상부 컨트롤 암이다.

본 연구에서 적용한 최적화 기법은 크리깅¹⁻²을 이용한 메타모델 방법이다. 먼저 관성력 하중을 고려하여 최악하중을 선정하고 이를 기준으로 최적해를 산출하고 나머지 하중조건에 대해서도 검토를 한다. 유한요소해석 시 구속조건이 필요 없는 관성제거기법(inertia relief analysis)을 이용하였다.

그리고 컨트롤 암의 피로 강도에 평가를 위해 1/4 차 모듈을 구성하여 피로 해석 및 실험을 시행하였다.

2. 관성력을 고려한 컨트롤 암의 구조설계

컨트롤 암 제조업체나 완성차 업체에서는 관성력에 대한 하중조건과 그에 상응하는 기준을 가지고 있다. 본 연구에서는 K 업체에서 사용되고 있는 4 가지 하중을 고려하였고, 그 중 가장 엄격한 하중조건을 고려하여 최적화를 수행하였다.

컨트롤 암의 재질을 Table 1에 나타내었고, 초기 유한요소모델과 최악의 하중조건을 Fig. 1에 나타내었다. 컨트롤 암과 다른 요소와 연결되는 하드 포인트(hard point)를 Fig. 1에서 A, B, C로 표시하였다. 관성제거해석 시 이 점들에 Fig. 1에 표시한 하중크기가 입력이 된다. 초기 시작모델의 최악 하중 조건에 대한 강도해석 결과를 Fig. 2에 표시하였다. 초기모델에서의 검토되는 응력인 최대 폰미제스 응력은 275.43MPa를 나타내고 있으며 중량은 1946.85g이다.

이 하중조건에서 K사의 관성력 하중 평가기준은 재료의 항복응력으로 설정되어 있다. 따라서 초기 설계가 이를 만족하고 있음을 알 수 있다. 이 결과를 기준으로 컨트롤 암을 경량화 시킬 수 있는 여지가 있다고 판단하여 관성력을 고려한 구조최적화를 수행하였다.

형상설계변수는 CAD 모델에서 Fig. 3과 같이 정의하였다. 컨트롤 암은 좌, 우측의 두께가 서로 다르기 때문에 두 개의 스케치 면을 이용하여 두께를 생성하였다. 이 때 정의된 형상설계 변수는 $t_1 \sim t_6$ 으로 총 6개이다.

Table 1 : Material properties of Al6061M6

	Al6061M6
Yield Stress (MPa)	315
Tensile Strength (MPa)	340
Young's Modulus (MPa)	72,000
Density (kg/mm ³)	2.71×10 ⁻⁶

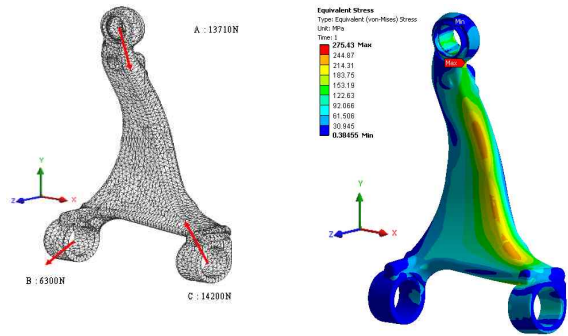


Fig. 1 FE model and loading

Fig. 2 Stress contour at the

condition

initial design

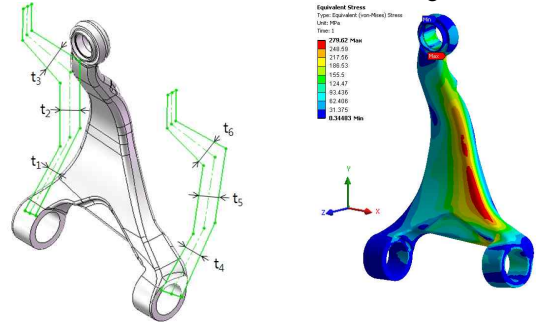


Fig. 3 Definition of design variables.

Fig. 4 Initial stress contour for structural optimization

위상최적화와 형상설계변수를 고려하여 새롭게 작성된 초기모델에 대한 관성력 하중의 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 최대응력은 279.62MPa 이고, 중량은 1802.8g을 나타내고 있다.

컨트롤 암의 형상최적설계를 위한 정식화는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} && W(t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6) \\ & \text{Subject to} && \sigma_i \leq \sigma_a \quad (i=1, \dots, n_e) \\ & && t_{iL} \leq t_i \leq t_{iU} \quad i=1, \dots, 6 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 W 는 무게, σ_i 는 각각의 요소의 응력, n_e 는 요소의 개수이고, σ_a 는 허용응력으로 재료의 항복강도로 설정하였다. 그리고 $t_{iL}=[7.60 \ 12.68 \ 15.02 \ 14.54 \ 11.44 \ 16.64]$ mm 이고 $t_{iU}=[9.50 \ 15.85 \ 18.87 \ 18.17 \ 14.30 \ 20.80]$ mm이다.

식 (1)에서 요소 수만큼 메타모델을 생성하는 것은 불가능하므로 이를 목적함수와 응력에 관한 제한조건함수를 식 (2)와 같이 수정하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} && \hat{w}(t) \\ & \text{Subject to} && \hat{\sigma}_{\max} \geq \sigma_a \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\hat{\cdot}$ 은 추정치를 나타내는 기호이다. 본 연구에서는 중량과 응력에 대한 반응치에 대한 크리깅 메타 모델을 구성하여 최적해를 산출하였다. 메타 모델을 구성하기 위한 표본점 구성은 최대 엔트로피법을 적용하였다. 각 표본점

에 대한 유한요소해석을 수행한 후, 중량과 최대응력에 대한 크리깅 메타모델을 구성하고 최적화 알고리즘을 사용하여 문제를 풀었다.

다음은 크리깅 이론에 대한 간단한 소개이다¹⁻². $\hat{y}(\mathbf{t})$ 를 근사모델이라고 하면 $y(\mathbf{t})$ 와 $\hat{y}(\mathbf{t})$ 의 평균제곱오차가 최소가 되도록 하면 $y(\mathbf{t})$ 는 다음과 같이 예측된다.

$$\hat{f}(\mathbf{t}) = \hat{\beta} + \mathbf{r}^T(\mathbf{t})\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \hat{\beta}\mathbf{q}) \quad (3)$$

\mathbf{R}^{-1} 은 상관행렬 \mathbf{R} 의 역행렬 \mathbf{r} 은 상관벡터, \mathbf{y} 는 n_s 개의 표본데이터 벡터이고, \mathbf{q} 는 단위벡터이다.

최대엔트로피방법을 이용한 각 실험점에 대한 해석 결과를 Table 2에 나타내었다. 표본점 수는 50으로 선택하여 중량과 최대응력을 반응치로 두고 메타모델을 생성하였다. Table 3에 메타모델을 이용한 최적화 결과를 나타내었다. 그리고 최적화 모델을 해석한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 최대 응력은 315.06MPa로 항복응력에 만족하는 것으로 나타났다. 그리고 나머지 조건에서도 모두 만족하였다.

Table 2 Design of experiments using maximum entropy method

No	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	σ_{max}	$W(g)$
1	8.23	13.47	18.22	14.57	12.61	19.51	338.07	1579.6
2	8.11	14.93	16.91	15.23	11.47	19.09	349.58	1574.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
49	7.73	15.12	18.60	15.88	12.67	19.34	339.82	1614.1
50	7.77	14.04	17.60	18.06	12.56	18.01	350.71	1586.5

Table 3 Summary of optimum result

Design variable	Initial design	Optimum design
t_1 (mm)	9.50	9.14
t_2 (mm)	15.85	13.47
t_3 (mm)	18.78	15.07
t_4 (mm)	18.17	18.17
t_5 (mm)	14.30	12.38
t_6 (mm)	20.8	20.80
$W(g)$	1946.85	1598.8
σ_{max} (MPa)	275.43	315.06

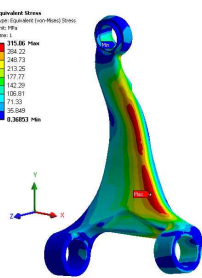


Fig. 5 Stress contour at the optimum design

3. 1/4 차 모듈을 적용한 컨트롤 암의 피로강도 평가

컨트롤 암의 피로 강도를 평가하기 위해 1/4 차 모듈을 구성하였다. 구성 부품으로는 컨트롤 암을 포함해서 로워 컨트롤 암, 어시스트 암 등, 총 6 개로 이루어졌다. 기존의 컨트롤 암과 관성력을 고려한 최적화 모델은 피로해석 시에 무한 수명에 가까운 값을 가지고 있어, 시험을 하기에는 적합한 모델이 아니다. 그렇기 때문에 이를 해결하기 위해 위크 모델(weak model)을 제작하여 피로 해석 및 시험을 수행하였다. 위크 모델은 보다 짧은 시간에 시험을 완료하기 위해 컨트롤 암에 기계적인 가공을 하여 낮은 수명을 갖도록 하는 모델을 말한다.

Fig. 6은 1/4 차 시험을 위한 장비를 나타내고 있다. 이와 동일하게 FE model을 구성하여 해석을 실시한 후에 그 결과를 기초로 시험을 실시하여 해석과 시험의 상관성을

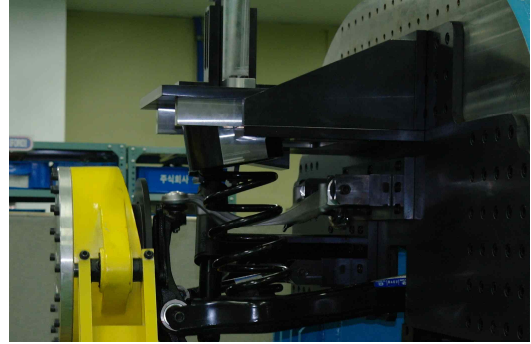


Fig. 6 Equipment for experiment of control arm

알아보고자 한다.

Table 4에 해석과 시험 결과의 피로 수명을 나타내었다. 피로해석을 수행하기 위해서 MSC.Fatigue⁴ 프로그램을 사용하였다. 내구 수명 해석 방법은 준정적 내구 해석으로 정적 해석 결과에 시그널을 입력하여 피로 수명을 산출하는 방법이다. 위크 모델 샘플은 총 2 개를 사용하여 시험을 실시하였다. 해석의 결과와 시험의 결과가 비교적 일치하는 것으로 나타났다.

Table 4 Comparison of 1/4 car simulation and experiment

Model	Fatigue life
1/4 car simulation	4.34×10^4
1/4 car experiment (sample A)	4.68×10^4
1/4 car experiment (sample B)	4.89×10^4

4. 결론

- 1) 본 연구에서 단조품의 컨트롤 암 구조최적설계를 위한 일련의 절차를 제시하였고, 컨트롤 암의 경량화를 위해 메타모델 방법을 적용하여 관성력을 고려한 최적화 모델을 제시하였고 초기모델 대비 약 18%의 중량 감소를 이룰 수 있었다.
- 2) 컨트롤 암의 피로 강도 평가를 위해 1/4 차 모듈에 대한 해석과 시험을 시행하였고, 비슷한 결과 값을 얻을 수 있었다.
- 3) 향후 과제보다 많은 샘플을 사용하여 시험을 시행하여 시험과 해석의 상관성을 보다 정확히 분석해야 할 것으로 생각된다.

후기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03)지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. K. H. Lee, and D. H. Kang, "Structural Optimization of an Automotive Door Using the Kriging Interpolation Method," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: **221**, 12, 1524-1534, 2007.
2. J. Sacks, W. J. Welch, T. J. Mitchell and H. P. Wynn, "Design and Analysis of Computer Experiments," Statistical Science, **4**, 4, 409-435, 1989.
3. Bessert N. and Frederich O., "Nonlinear Airship Aeroelasticity," Journal of Fluids and Structures, **21**, 8, 731-742, 2005.
4. MSC Software Corporation, MSC.NASTRAN 2004 Design Sensitivity and Optimization User's Guide, Santa Ana, California, 2004.