

안정성을 고려한 ADI제질 컨트롤 암의 구조최적설계

Structural Optimization of ADI Material Control Arm Considering the Stability

*박한석¹, 송병철¹, 권영민², 이권희³, #박영철³

*H. S. Park¹, B. C. Song¹, Y. M. Kwon², K. H. Lee³, #Y. C. Park(parkyc67@dau.ac.kr)³

¹ 동아대학교 대학원 기계공학부, ² (주) 센트랄, ³ 동아대학교 기계공학부

Key words : Control Arm, Structural Optimization, ADI Material

1. 서론

2000년대 들어 산업기술의 비약적인 발전으로 자동차는 고기능화, 고안전화, 쾌적성을 추구하고 있으며 국내의 자동차 부품업체에서는 새시(chassis)계의 소형화, 경량화, 성능향상 및 안정성을 동시에 만족함을 목적으로 개발 되고 있다. 그중 특히 현가장치(suspension)는 차축과 차체를 연결하여, 주행할 때 차축이 노면에서 받는 진동이나 충격이 차체에 직접 전달되지 않도록 함으로써 차체나 화물의 손상을 방지하고 승차감을 좋게 하는 장치로서 승차감(ride comfort)과 조종 안정성(handling performances)에 대한 소비자들의 인식이 높아짐에 따라 고속 주행 시 차량의 주행성능을 확보하는 동시에 경량화를 통한 현가장치의 최적설계가 요구되고 있다.

컨트롤 암은 자동차 현가장치의 핵심 부품으로써 현재 국내에서는 스틸(S45C) 단조품 및 알루미늄(Al6061) 단조품을 사용하고 있다. 현재 컨트롤 암은 설계를 변경하여 중량감소를 하고 있다. 하지만 이보다 기계적 성질이 우수한 고강도 재료 개발을 통한 컨트롤 암의 중량감소가 요구되고 있다. 이와 같은 추세에 따라 본 연구에서는 현재 상용화되고 있는 S45C 보다 더 우수한 기계적 특성을 가지는 고강도 Steel 재료를 개발하였다. 개발된 고강도 Steel 재료를 자동차 현가장치의 핵심 부품인 컨트롤 암에 적용하였다.

최근의 최적설계는 통계학적 방법을 이용한 실험 계획법의 직교배열표와 CAE 시뮬레이션을 연계하여 설계공정을 단축시키고, 초기 설계의 정도를 높이기 위한 최적설계의 개념이 도입되고 있는 추세이다. 최적화 문제에서는 설계변수의 변화에 따른 목적함수와 제약조건의 변화정도를 표현하는 수학적 모델을 필요로 한다. 그러나 실제 시스템에 있어서 제약조건들과 목적함수를 정확히 수학적으로 기술하는 것이 매우 어려운 작업이다. 이로 인해 최근에는 시스템의 평가 특성치 함수를 수식적으로 구하기 어려운 경우에 통계적 방법을 이용한 실험계획법이 사용되고 있는 추세이다. 이렇게 통계적인 방법을 이용하여 근사적으로 얻어낸 모델을 메타모델(metamodel)이라한다. 대표적인 메타모델로 반응표면모델(Response surface model)과 크리깅모델(Kriging model)이 있다.

본 연구에서는 ANSYS WORKBENCH에 내장된 최적화 Tool인 DOE를 이용하여 컨트롤 암의 최적화를 수행하였다.

2. 재료검토

본 연구에서 컨트롤 암에 적용된 고강도 Steel 재료인 ADI는 Austempered Ductile Iron의 약자로서, 구상흑연주철(Ductile Cast Iron)을 열처리 함으로써 고강도, 고인성, 좋은 충격치의 성질을 가지고 있다. 열처리는 Austempering 열처리를 하며 이는 일정온도에서 항온 유지하여 Ausferrite 조직을 얻기 위한 열처리 방법이다. ADI는 인장강도를 증가시키기 위해 C 함량을 증가하였고 Si 함량을 증가하여 흑연 형성을 방지하고, 오스테나이트 기지에 탄소고용을 감소시켰으며, 공정온도를 증가시켰다. 그리고 경화능, 탄화물 형성, 오스테퍼링 반응비를 높이기 위해 Mn의 함량을 증가 시켰다. 또한 Cu, Ni 함량을 높여 경화기능을 증가시켰다. 위와 같은 방법으로 개선된 고강도 Steel 재료인 ADI의 기계적 성질을 S45C와 비교하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Comparison between S45C and ADI

	S45C	ADI
Yield Stress(Mpa)	490	550
Tensile Strength (MPa)	690	850

3. 유한요소모델

본 연구에서는 기계적 성질이 개선된 고강도 Steel 재료인 ADI를 적용하여 컨트롤 암의 구조 최적설계를 수행하였다. ADI의 항복강도(σ_y)는 550MPa이다. 국내 자동차 부품업체에서 컨트롤 암 개발 시 제품의 안전성을 평가하기 위해서 관성력 하중을 이용하여 구조해석을 수행하고 있다. 따라서 본 연구에서는 관성력 하중 중 가장 극악한 하중 조건인 3G_Bumping 만을 고려하여 최적설계를 수행하였다.

Fig. 1에는 유한요소 모델과 하중조건을 표시하였다. 유한요소 모델은 3자유도를 가지는 사면체 요소를 선택하였으며 크기는 수렴해석을 통하여 5mm로 설정하였다. 다른 파트와 조립하는 기준점이 되는 Hard point A, B, C 점에 하중을 가하고 강제운동을 하고 있는 구조를 해석할 때 쓰이는 방법인 Inertia Relief 해석을 수행하였다. Inertia Relief 해석을 수행하면 구조물의 탄성변형에 영향을 미치는 응력만을 산출할 수 있다. Fig. 2는 초기 모델의 해석결과를 나타내었다. 최대 응력은 485.8MPa 이고 중량은 3449.9g이다. 최대응력은 재료의 항복강도인 550MPa을 충분히 만족하고 있다. 따라서 본 연구에서는 과잉 설계된 ADI제질 Control Arm의 구조최적화를 수행하였다.

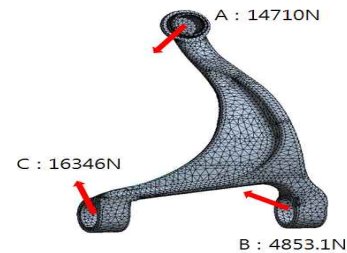


Fig. 1 FE model and Load Condition

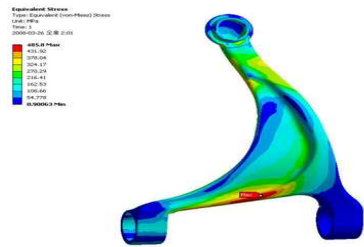


Fig. 2 Stress contour at the initial design

4. 구조최적설계

효과적으로 설계변수를 설정하기위해 ANSYS WORKBENCH에서 제공하는 topology optimization을 수행하였다.

Find	<i>Mass Distribution</i>	(1)
Maximize	<i>Stiffness</i>	(2)
Subject to	$W \leq W_{original} \times \alpha\%$	(3)
	$\alpha_i (i = 10, 20, \dots, 60)$	(4)

초기형상에 하중조건을 부여하고 목적함수를 Control arm의 강성(Stiffness)으로 설정 후 제한조건으로 초기 중량의 몇 %를 감량할 것인가를 설정하면 각각의 weight reduction 양에 따라 제거 가능한 부분을 contour를 보여준다. 하중조건을 부여하는 Hard point 부분은 변경되지 않아야 할 부분이므로 제외하였고 안쪽 두께부분만을 고려하여 weight reduction을 10%~60%를 10% 간격으로 ANSYS WORKBENCH의 topology Optimization을 수행하였다. 그 결과를 Fig. 3에 표시하였다. 결과를 고찰해보면 Fig.3의 A와 B 부분을 설계변수로 설정하는 것이 최적화에 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 4에는 본 연구에서 고려한 설계변수를 표시 하였다. 컨트롤 암의 좌측면 두께와 우측면의 두께가 다르다. 그러므로 Fig.4에 표시한 것 과 같이 두개의 스케치 면을 이용하여 두께를 생성 하였다. $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ 은 컨트롤 암의 두께를 구성하는 치수 이다. 이때 두께를 하나의 설계변수로 설정할 경우 과잉설계의 우려가 있으므로 두께를 결정하는 부분을 6부분으로 나누어 설계변수로 설정하였다.

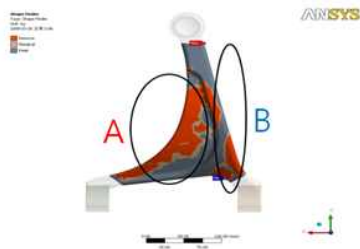


Fig. 3 Result of Topology Optimization

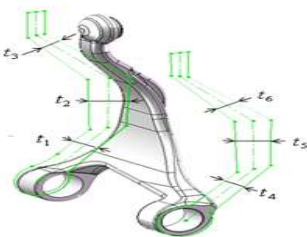


Fig. 4 Design Variable

본 연구에서는 컨트롤 암의 최적설계를 위해 다음과 같은 정식화를 제안한다.

$$\text{Minimize } W(t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6) \quad (5)$$

$$\text{Subject to } \sigma_{max} \leq \sigma_a \quad (6)$$

$$t_L \leq t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6 \leq t_U \quad (7)$$

여기서 W 는 무게, σ_{max} 는 발생하는 최대응력(von-mises stress), $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ 는 설계변수를 표시한 것이다. 설계변수의 상한값과 하한값의 설정 시 고려해야 할 사항은 Suspension module 구성시 다른 부품과 간섭 문제 때문에 상한값이 초기 모델의 치수를 넘어서는 안 된다. 경계조건에 만족하도록 초기값을 상한값으로 설정하고 20% 범위에 하한값으로 설정하였다. 그리고 제한조건인 최대응력이 ADI의 항복응력인 550MPa를 넘지 않아야 한다. 이를 만족하면서 중량이 최소가 되는 최적점을 찾도록 설정하였다.

ANSYS WORKBENCH에 내장된 최적화 Tool인 Design Xplorer 중 DOE를 이용하여 최적화를 수행하였다. DOE를 이용하여 최적화를 수행하기 전 메타모델의 종류를 선택할 수 있다. DOE에서

제공하는 메타모델에는 반응표면법과 크리깅법이 있으며 이 두 가지 메타모델을 이용하여 컨트롤 암의 최적화를 수행하였다. Space Filling Design의 Maximum entropy 법을 이용하여 실험점을 50개 생성하였다.

Table 2에는 ANSYS WORKBENCH에서 제공하는 두 가지 메타모델을 이용해 구한 최적 설계값과 응력, 무게를 비교하였다. 반응표면법 결과 보다 크리깅법을 이용한 결과가 더 낮은 값을 도출할 수 있었다. 앞에서 언급했듯이 최적화에 사용된 하중조건은 3G bumping 이다. 하지만 정강도 해석에서 1GVW, 1G cornering, 1G braking, 3G bumping 모두를 고려해야 한다. 최종적으로 도출된 최적점을 이용해 하중조건별로 유한요소해석을 수행하였다. 1GVW는 168.73(MPa), 1G Braking은 72.528 (MPa), 1G Cornering은 343.44(MPa)이다. 결과로 보아 모든 하중조건에서 항복강도를 만족한다.

Table 2 Comparison of optimum

Design variable	Initial	Kriging	RSM
t_1 (mm)	13.79	12.81	12.69
t_2 (mm)	20.97	19.75	20.62
t_3 (mm)	15.41	14.99	14.01
t_4 (mm)	11	10.97	10.85
t_5 (mm)	18.031	15.43	17.58
t_6 (mm)	13.134	11.62	12.13
W (g)	3449.9	3269.6	3307.6
σ_{max} (MPa)	485.8	529.64	529.3

5. 결론

본 연구에서는 경량화를 위해 기계적 성질이 개선된 고강도, 고인성, 좋은 충격치를 가지는 ADI를 컨트롤 암에 적용하였다. ADI가 S45C에 비해 약 12%의 항복강도, 23%의 인장강도 향상을 보였다.

ANSYS WORKBENCH를 이용하여 최적화를 수행한 결과 크리깅 메타모델을 이용한 DOE는 무게가 초기 값보다 5.226% 감소한 값을 얻을 수 있었고, 반응표면 메타모델을 이용한 DOE는 무게가 초기값의 4.125%가 감소한 것을 얻을 수 있었다.

후기

본 연구는 교육과학기술부와 한국 산업 기술재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 결과임.

참고문헌

1. 구영덕, 이창환, 유재영, "현가장치," 정보통신연구진흥원, 정보통신연구진흥원 학술기사.
2. 박영철, 이동화, "특성함수와 피로해석을 이용한 로우컨트롤 암의 형상최적설계," 한국자동차공학회, 한국자동차공학회 논문집, 13, 1, 119-125, 2005.
3. 방일권, 강동현, 한동섭, 한근조, 이권희, "실험계획법을 이용한 조(Jaw)의 형상최적설계," 한국해양항만학회지, 30, 8, 685-690, 2006.
4. 이동화, 박영철, 허선철, "경량화에 대한 안전성을 고려한 로우컨트롤암의 다목적 최적설계," 한국정밀공학회, 한국정밀공학회지, 24, 4, 102-108, 2007.
5. "ANSYS WORKBENCH USER MANUAL," ANSYS Inc., 2007.
6. "공간정보 모델링," 구미서관, 2004.