

컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 자동차용 Torque Strut의 경량 설계 §

김 기 주**

* 동명대학교 메카트로닉스공학과

Light-Weight Design of Automotive Torque Strut Based on Computer Aided Engineering

Kee Joo Kim**

* Dept. of Mechatronics Engineering, Tongmyung Univ.

(Received January 5, 2017 ; Revised July 19, 2017 ; Accepted July 25, 2017)

Key Words: Torque Strut(토크 스트럿), Stiffness(강성), Light-Weight(경량화), CAE(컴퓨터응용공학)

초록: 알루미늄 합금과 같은 경량소재의 적용을 통한 무게 감소는 연료절감과 대기 오염 감소에 기여할 수 있다. 알루미늄 합금 재료는 피로수명에 대한 강도 측면에서 철강(steel) 소재에 비하여 취약한 단점을 가지고 있다. 부품들의 안전성을 희생시키지 않고 자동차 부품 경량화를 이루기 위해 많은 연구자들이 보다 가볍고 강한 서스펜션 링크들에 관한 연구를 진행해 왔다. 본 연구에서는 기존 STKM11A 철강 소재로 설계된 토크 스트럿을 245 MPa의 인장강도 소재인 알루미늄 합금(A356) 소재로 대체하기 위한 경량화 설계 과정에 대하여 von-Mises 응력 변화를 분석하여 연구하였다. 최적화된 설계는 경량화 이전 강재로 설계된 링크보다 42% 이상 경량화 시킬 수 있었으며 이는 토크 스트럿 개발의 안전한 경량화 설계조건 및 경량화 설계에 대한 가이드에 참고가 될 수 있을 것이다.

Abstract: Savings in weight using lightweight materials such as aluminum alloy can lead to increase fuel economy. However, compared to steel, aluminum alloys have a lower strength for an equivalent life cycle. To reduce the weight of automobiles, research is being performed on the fabrication of lighter and stronger torque struts without having to sacrifice the safety of automotive components. In this study, a weight reduction design process for torque struts is proposed that is based on varying von-Mises stress contours using an aluminum alloy (A356) having a tensile strength of 245 MPa, instead of STKM11A steels. The optimized design can reduce the weight of the original steel torque strut by over 42% and it can contribute to the design of light-weight components and to the safe design of torque struts.

1. 서 론

자동차의 설계에 경량화와 고강성의 설계는 최대의 관심사이나 경량화와 고강성의 두 가지를 만족 시키는 것은 매우 어려운 문제이다.⁽¹⁾ 연비 향상 등의 이유 때문에 각 자동차 회사들이 노력을 기울이고 있는 분야는 첨단 엔진의 개발, 차량 경량화 등이다. 첨단 엔진의 개발은 엔진의

효율향상과 에너지 손실의 저감 및 차량 경량화의 기술적 과제 등이 있다.^(1,2)

그러나 엔진기술과 관련해서는 약 100년 동안 이미 많은 개량과 연구가 진행되어 동일성능을 유지하며 연비를 단기간에 획기적으로 증가시키는 것에는 한계가 있어 차량 경량화를 통한 연비 향상이 가장 효율적인 대안으로 떠오르고 있다.

자동차 경량화를 위한 방법은 철 구조물을 개선하여 필요 없는 부분을 제거하는 방법과 알루미늄 합금 등의 가벼운 비철금속을 사용하는 것이다. 첫 번째 방법은 고강도강을 사용하여 경량화시키는 것이고 두 번째 방법은 재료비가 높기

§ 이 논문은 대한기계학회 2016년도 학술대회(2016. 12.14.-16., 강원랜드 컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, kjkim@tu.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

때문에 고급이나 대형 승용차에 사용되고 있다. 알루미늄 합금 소재 자동차 부품에 대한 연구개발 노력은 자동차 선진국을 중심으로 전 세계적인 추세가 되고 있으며, 특히 국내 자동차 생산량의 절반 이상이 해외로 수출되는 점을 고려하면, 국내에서도 향후 지속적인 관심과 연구개발 및 투자를 통해 세계 자동차 시장에서 경쟁력을 높이는 기반을 마련해야 할 것이다. 따라서 이러한 알루미늄 부품 경량화 기술의 지속적인 연구개발은 최근 자동차 부품 제조 기술상이 최대 관심사가 되고 있는 경량화에 대한 가장 효과적이고 확실한 해결방안을 제시해 줄 수 있을 것이다.^(3,4)

차체를 경량화 시키기 위해 최근 연구되고 있는 대표기술로는 초경량 철강차체와 알루미늄 합금 등의 비철금속 혹은 복합재료 같은 경량재료를 차체에 적용하는 기술을 들 수 있다.⁽⁴⁾ 특히 알루미늄 합금의 사용량이 크게 증가하여 주물부품을 중심으로 실린더블록, 실린더헤드, 피스톤, 링크, 휠, 라디에이터와 아울러 트렁크, 도어, 서브-프레임에 이르기까지 다양하게 적용되고 있다. 또한 차체 전체를 알루미늄 합금으로 적용한 차량(space frame) 등도 상용화 추세에 있으나 이들의 경량화 연구 방향은 정적해석과 아울러 동적해석 및 실험을 거치는 복잡한 검증과정을 거쳐야 한다.⁽⁵⁻⁸⁾

본 연구에서는 인장강도 245 MPa 급 알루미늄 합금 소재를 이용한 토크 스트럿의 경량화 설계 과정을 기존의 상용화로 검증된 철강 (STKM11A) 소재로 제작된 토크스트럿(torque strut)을 참고로 하여 실험계획법(DOE: Design of Experiment)을 이용해 요인인자를 분석 후 반응표면법(다중 반응 최적화 방법)을 통하여 최적 설계하는 기술을 확립하고자 한다.^(2,4) 특히, 서스펜션에 부여되는 각 하중조건의 변화에 따른 응력 및 강성의 변화를 비교하여 안전율을 고려한 토크스트럿을 편리하게 설계하는 방법을 제시하고자 한다.⁽³⁾

2. 해석방법

2.1 기존 모델 및 경량화 설계 모델

자동차 서스펜션 구성품인 토크스트럿은 승용차의 샤시 하단부에 위치하여 휠캐리어를(wheel carrier) 지지해 줄 뿐만 아니라 차체와 휠(wheel)에 전달되는 충격을 완화시켜 주는 역할을 한

다.^(1,2) 본 연구에서는 철강 (STKM11A) 소재로 개발된 토크스트럿의 구성파트를 알루미늄 합금으로 소재 변경하여 경량화 설계를 진행하였으며 Fig. 1에 모듈 형태로 제작된 리어 서스펜션의 차량 장착 위치를 나타내어 토크스트럿의 차량 구조물 상 역할을 구조적으로 나타내었다. 그림에는 캄버링크, 텐션링크, 트랙로드, 토크스트럿 등 총 4개의 각종 링크류를 나타내었는데 이 4개 부품 모두 휠캐리어와 연결되어 있으며 이들의 실제 부품 사진도 동시에 나타내었다. 이 4개의 링크류에 속 업소버(shock absorber) 등을 지지하는 스프링링크(spring link)를 추가하면 독립현가형 5-링크 타입의 서스펜션(five link type suspension)이라고 부르기도 하며 고급 승용차 뒷 차축(rear axle)에 적용하는 현가장치이다.

본 연구에서 경량화의 대상이 되는 부품은 독립현가형 5-링크의 한 부품인 토크스트럿으로 Fig. 1에서 확인할 수 있다. 토크스트럿의 양 끝단 결합부의 직선길이는 404 mm로 이는 리어 샤시 모듈의 전체 스펙에 의해 정해진 것이고 경량화 모델에도 적용되는 고정된 길이이다.

Fig 2에는 토크스트럿의 기존모델과 경량화 모델을 나타내었다. Fig. 2에서와 같이 경량화 모델은 기존 모델의 단면인 원형단면에서 I자형으로

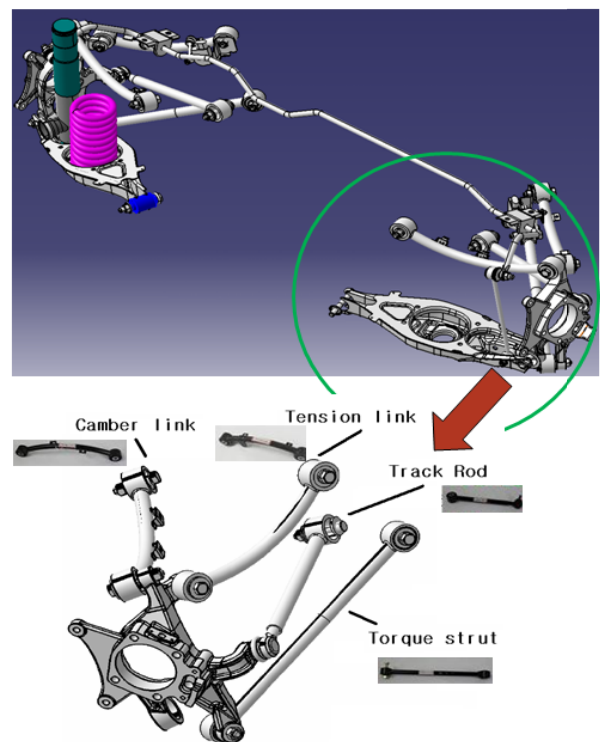


Fig. 1 Torque strut of the rear suspension module

Table 1 Mechanical properties⁽⁴⁾

	STKM11A	A356
Young's Modulus	200.0 GPa	71.0 GPa
Poisson's Ratio	0.30	0.33
Density	7.85 g/cm ³	2.77 g/cm ³
Yield Strength	305.0 MPa	160.0 MPa
Ultimate Strength	440.0 MPa	245.0 MPa

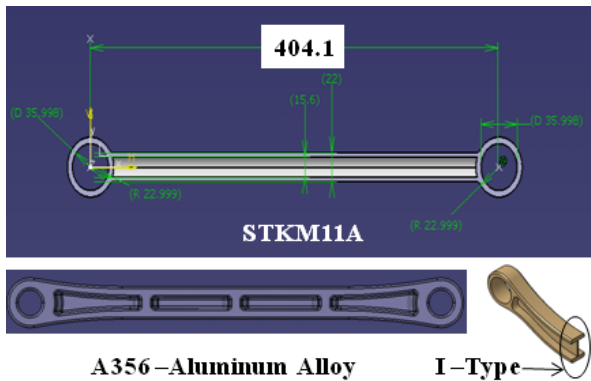


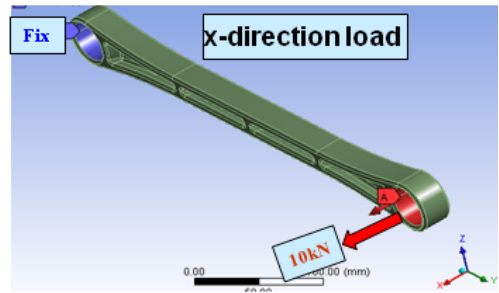
Fig. 2 Torque strut drawing made by STKM11A steel model (conventional model) and A356 Aluminum alloy model (reduction model)

바뀌었고 이 I자 형상은 옆면 보강에 의해 변화된 개선된 모델의 기준형상이다.

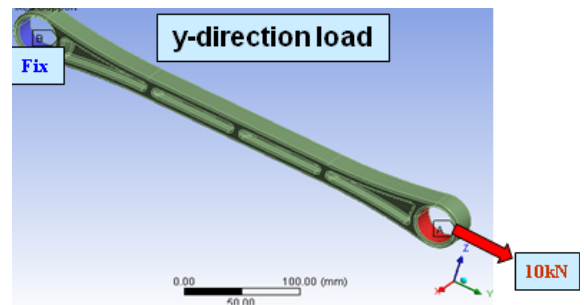
2.2 해석 조건(boundary conditions)

독립현가형 5-링크의 구성품인 토크스트럿의 CAE 해석은 상용프로그램으로 검증된 Ansys 프로그램을 이용하였으며 탄성해석을 수행하였다. Table 1은 해석 시 사용된 기존 철강(STKM11A) 소재 및 알루미늄 합금(A356)의 소재의 기계적 특성이다.⁽⁴⁾ 표에 나타냈듯이 각각의 물성에 대하여 해석에 사용된 물성은 탄성해석이므로 탄성계수(Young's Modulus)와 포와송비 및 밀도를 사용하였다. 또한 해석은 토크스트럿 단품/부품(Component)에 대하여 실시하였다.

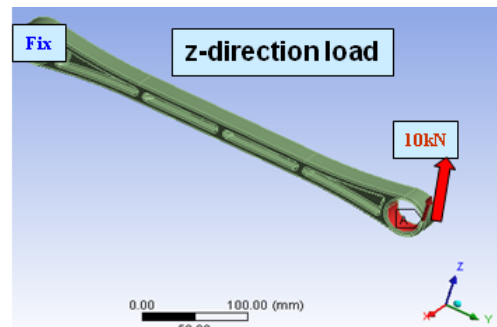
Fig. 3은 개선된 토크스트럿의 응력 및 강성 계산을 위한 해석에 사용된 하중과 경계조건이다. 토크스트럿의 한쪽 결합부의 내면을 변위 구속된 중앙 한 점에 구속하였고 하중은 그림과 같이 3가지 성분을 고려하여 반대쪽 결합부의 내면을 구속한 중앙점에 가하였다. Fig. 3(a)의 x-방향 하중의 경우 토크스트럿의 한쪽은 고정(Fix)하고 반대쪽의 길이방향에 수직방향(x-방향)으로 10kN의 하중을 부여하였을 때 강성변화를 계산



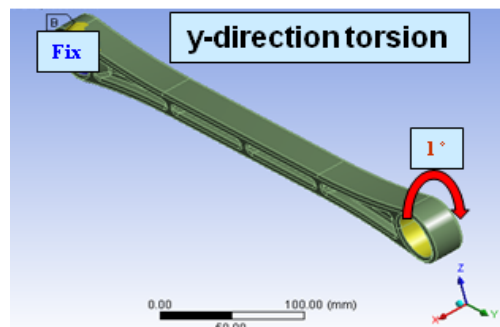
(a) x-direction load (unit force : 10kN)



(b) y-direction load (unit force : 10kN)



(c) z-direction load (unit force : 10kN)



(d) y-direction torsion (1°)

Fig. 3 Boundary conditions of torque strut

한 경우이며 (b), (c)의 경우도 역시 한쪽은 고정 후 반대쪽에 y-방향 및 x-방향의 하중을 가한 경우이다. 또한 토션의 경우 Fig. 3(d)에 나타낸 것처럼 한 쪽 끝을 고정시키고 반대쪽에 1도의 단위 비틀림을 부여하여 비틀림 강성을 분석하였

다. 각 하중조건에서 하중의 크기 10 kN은 Steel 소재(이미 상용화되어 안전성에 문제없는 것으로 검증된 소재 혹은 그 부품)로 제작한 텐션링크를 알루미늄 합금 링크로 경량화 설계한 모델의 값들과 상대적으로 얼마나 차이가 나는 지를 비교하는 방법을 사용하기 때문에 크기의 고저는 의미가 없다. 인장강성과 굽힘강성은 각각의 하중 부여방향(서로 수직임)으로 10 kN을 가했을 때 나타나는 강성(Stiffness) 값을 각각 인장강성과 굽힘강성 결과값으로 사용하였다. 또한 비틀림 강성의 경우 1도 회전시킴으로써 구속조건을 부여하였으며 역시 상용화되어 안전성에 문제없는 소재와 단순비교를 위해 단위값인 1도를 부여하였다.

Fig. 4 및 Table 2에 최적의 설계안을 만들기 위해 실험계획법에 의해 결정된 설계변수를 나타내었다. 그림 및 표에 나타나듯이 총 9개의 설계인자를 선정하였으며 각 인자에 2 수준의 실험설

Table 2 Selected values of design parameters

No	Design parameters	Levels (unit : mm)	
		+	-
1	No. of rectangular holes	#6	#4
2	Height of rectangular	10	6
3	Thickness of rectangular	12	10
4	Thickness of upper rib	10	8
5	Thickness of lower rib	10	8
6	Angle 1	-5°	-25°
7	Angle 2	37°	35°
8	Width	30	26
9	Thickness of Wall	10	8

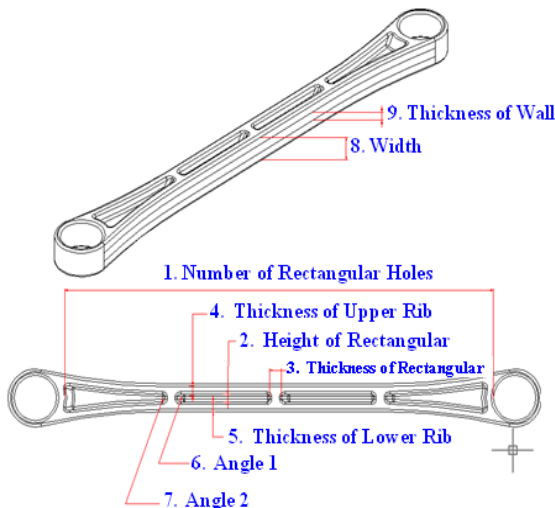


Fig. 4 Explanation and selection of design variables

계에 관하여 총 512(=29)개의 해석을 수행하였다.

3. 해석결과 및 고찰

STKM11A 철강소재 및 알루미늄 합금(A356)으로 제작된 토크스트럿에 각각 x-방향 하중, y-방향 하중, x-방향 하중 및 y-방향 토션을 가했을 때 응력해석을 수행하였는데 설계인자를 고려하여 512회의 실험계획법을 응용한 DOE(design of experiment) 해석을 수행하였다.

Table 3에 512회의 DOE 해석 후 각 방향의 하중이 가해질 때 최대응력이 가장 낮은 값을 나타내는 경우를 각 해석값과 함께 철강소재 대비 %로도 정리하여 나타내었으며 Table 4에 강성이 최대값을 나타내는 경우를 정리하여 나타내었다. 이상의 DOE를 이용한 CAE 해석을 통하여 최적의 설계안을 도출하였으며 이를 Table 6에 나타내었다. 해석결과에서 알 수 있듯이 최대응력 값은 낮을수록 강성은 높을수록 강건한 설계이지만 무게는 가벼울수록 경량화 효과가 높다.

실험계획법에 의해 요인배치법을 사용하여 계산된 9인자 2수준(총 512개)의 해석 결과를 다음과 같이 추가 분석하여 각 하중별 가장 큰 영향을 미치는 인자를 선택하였다. x-방향, y-방향, z-방

Table 3 DOE Analysis results showing minimum stress values

		case93	case77	case5	case503
x-direction	Stiffness	0.13 (118%)	0.14 (127%)	0.14 (127%)	0.08 (73%)
	Max. Stress	1,908 (45%)	1,972 (46%)	2,019 (47%)	3,201 (75%)
y-direction	Stiffness	40.7 (44%)	121.2 (132%)	121.5 (132%)	86.2 (94%)
	Max. Stress	29 (13%)	25 (11%)	26 (12%)	35 (16%)
z-direction	Stiffness	0.19 (173%)	0.23 (209%)	0.23 (209%)	0.10 (91%)
	Max. Stress	968 (25%)	766 (20%)	766 (20%)	1,502 (39%)
y-direction torsion	Stiffness	20.9 (100%)	21.5 (103%)	21.5 (103%)	22.3 (107%)
	Max. Stress	88 (73%)	102 (84%)	94 (78%)	53 (44%)
Weight	g (gram)	916 (67%)	967 (70%)	971 (71%)	709 (51%)

- case93 : + + - + - - - + +
- case77 : + + - + + - - + +
- case 5 : + + + + + - - + +
- case 503 : - - - - - + - - +

Table 4 DOE Analysis results showing maximum stiffness values

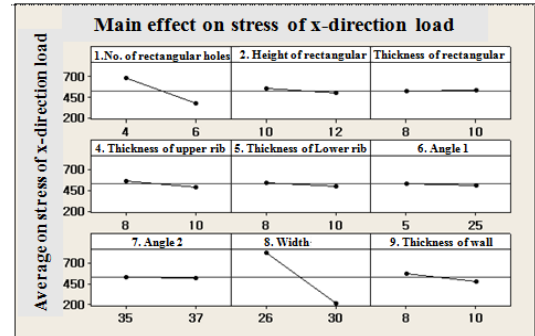
		case 1	case77	case65	case107
x-direction	Stiffness	0.14 (127%)	0.14 (127%)	0.14 (127%)	0.08 (73%)
	Max. Stress	1,935 (45%)	1,972 (46%)	1,914 (45%)	2,656 (62%)
y-direction	Stiffness	122.0 (133%)	121.2 (132%)	121.6 (132%)	93.4 (102%)
	Max. Stress	26 (12%)	25 (12%)	25 (12%)	32 (15%)
z-direction	Stiffness	0.23 (209%)	0.23 (209%)	0.23 (209%)	0.14 (127%)
	Max. Stress	768 (20%)	766 (20%)	768 (20%)	1,159 (30%)
y-direction torsion	Stiffness	21.5 (103%)	21.5 (103%)	21.5 (103%)	22.4 (107%)
	Max. Stress	94 (78%)	102 (84%)	92 (76%)	65 (54%)
Weight	g (gram)	976 (71%)	967 (70%)	978 (71%)	760 (55%)

- case 1 : + + + + + + + + +
- case77 : + + - + + - - + +
- case65 : + + - + + + + + +
- case107 : + + - - + - + - +

향 및 y-방향 비틀림의 하중 조건에 대하여 분산 분석을 수행하였으며 분석결과를 Fig. 6에 나타내었다. 분산분석 수치의 크기를 통해 설계인자가 반응인자에 영향을 주는 정도를 분석할 수 있다. 분산분석은 통계학에서 두 개 이상 다수의 집단을 비교하고자 할 때 집단 내의 분산, 총 평균과 각 집단이 평균 차이에 의해 생긴 집단 간 분산의 비교를 통해 만들어진 F분포를 이용하여 가설 검정을 하는 방법이다. Fig. 6에서 분산분석을 통하여 각 하중별 가장 큰 영향을 미치는 인자를 3개 선택하였으며 이는 사각구멍개수, 사각높이 및 폭이었다.

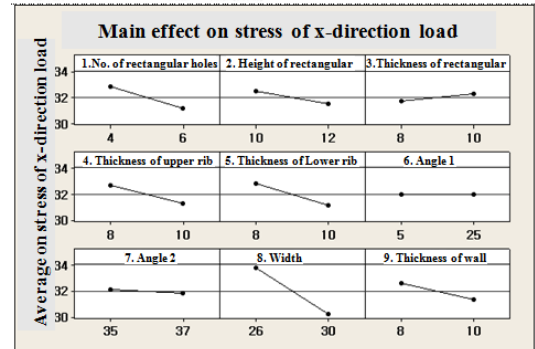
3인자수준별 3수준의 설정값은 다음과 같다. 사각구멍 개수는 2개, 4개, 6개의 수준으로, 사각 높이는 4mm, 5mm, 6mm로, 벽두께는 8mm, 9mm, 10mm의 수준으로 총 3³인 27개의 해석하여 최적 인자를 찾도록 설정하였으며 상기 반응표면법을 통해 해석 후 최대응력이 가장 낮은 값을 나타내며 강성이 최대값을 나타내며 무게는 가장 가벼운 경우는 case 254였고 이 경우의 수준은 + - - - - - + -이었다. 이것을 값으로 표시하면 사각구멍 개수 : 6개(+), 사각높이 : 5mm, 기둥두께 : 10mm, 위쪽 Rib 두께 : 8mm, 아래쪽 Rib 두께 :

Variables	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
1.No. of rectangular holes	1	12384020	12384020	12384020	1130.47	0.000
2.Height of rectangular	1	414847	414847	414847	37.87	0.000
3.Thickness of rectangular	1	15466	15466	15466	1.41	0.236
4.Thickness of upper rib	1	682842	682842	682842	62.33	0.000
5.Thickness of Lower rib	1	254006	254006	254006	23.19	0.000
6.Angle 1	1	88884	88884	88884	8.11	0.005
7.Angle 2	1	11438	11438	11438	1.04	0.307
8.Width	1	47544657	47544657	47544657	4340.10	0.000
9.Thickness of wall	1	1104841	1104841	1104841	100.86	0.000
Error	502	5493273	5493273	10955		
Total	511	68000275				



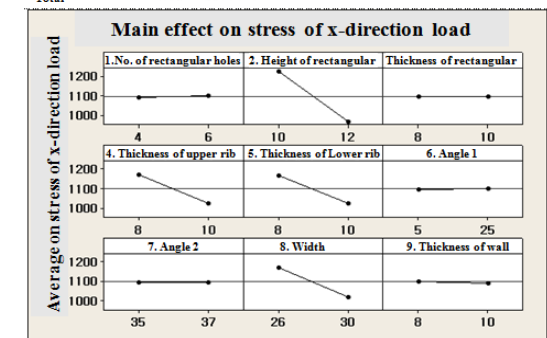
(a) Analysis at x-direction load

Variables	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
1.No. of rectangular holes	1	362.81	362.81	362.81	204.10	0.000
2.Height of rectangular	1	119.16	119.16	119.16	67.03	0.000
3.Thickness of rectangular	1	42.21	42.21	42.21	23.74	0.000
4.Thickness of upper rib	1	265.94	265.94	265.94	149.60	0.000
5.Thickness of Lower rib	1	372.99	372.99	372.99	209.82	0.000
6.Angle 1	1	0.02	0.02	0.02	0.01	0.921
7.Angle 2	1	7.75	7.75	7.75	4.36	0.037
8.Width	1	1628.06	1628.06	1628.06	915.86	0.000
9.Thickness of wall	1	201.25	201.25	201.25	113.21	0.000
Error	502	892.37	892.37	1.78		
Total	511	3892.56				



(b) Analysis at y-direction load

Variables	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
1.No. of rectangular holes	1	16676	16676	16676	13.15	0.000
2.Height of rectangular	1	8472796	8472796	8472796	6681.39	0.000
3.Thickness of rectangular	1	30	30	30	0.02	0.878
4.Thickness of upper rib	1	285154	285154	285154	2251.49	0.000
5.Thickness of Lower rib	1	2682507	2682507	2682507	2115.35	0.000
6.Angle 1	1	3032	3032	3032	2.39	0.123
7.Angle 2	1	83	83	83	0.07	0.798
8.Width	1	2906461	2906461	2906461	2291.95	0.000
9.Thickness of wall	1	9282	9282	9282	7.32	0.007
Error	502	636595	636595	1268		
Total	511	17982605				



(c) Analysis at y-direction load

Fig. 6 Result of the response surface analysis for various direction by using MiniTab S/W

Table 5 DOE Analysis results of optimized case254

		Steel (STKM11A)		Aluminum alloy (A356)	
x-direction	Stiffness	0.11	100%	0.12	109%
	Max. Stress	4,263	100%	2,186	51%
y-direction	Stiffness	92.0	100%	97.0	105%
	Max. Stress	218.0	100%	31.0	14%
z-direction	Stiffness	0.11	100%	0.11	100%
	Max. Stress	3,825	100%	1,310	34%
y-direction torsion	Stiffness	20.8	100%	21.5	103%
	Max. Stress	121.0	100%	87.0	72%
Weight	g (gram)	1,377	100%	804	58%

Stiffness unit : kN/mm, stress unit : MPa

**Fig. 7** Road simulator test view of the test vehicle including weight reduction model of torque strut

8mm, 각도 1 : -25° , 각도 2 : 35° , 폭 : 30mm, 벽 두께 : 8mm이었다. Table 5에 최적화된 해석결과를 기존 steel 소재 모델과 비교하였으며 각 방향에 대하여 강성은 100% 이상, 최대응력은 낮은 값을 나타내어 steel 제품의 성능을 만족하면서 무게는 약 42% 경량화하였다.

Fig. 7에 본 연구에서 해석한 결과를 토대로 알루미늄 합금으로 경량화 설계 후 제작된 토크 스트럿을 차량에 장착 후 Road data를 입력한 대상 내구 시험 중인 사진을 나타내었으며 내구시험결과 10만 km 이상의 주행 중 서스펜션 링크류의 문제가 발생하지 않음을 알 수 있었다(시험장비: MTS Road simulator). 로드시뮬레이터의 하중인가 조건은 일반내구시험 모드로 차량시험 시 차량에

수집되는 각종 길(Road)에 대한 변위 값(차량 휠 센터에서 수신되는 변위값)들을 기 수집한 데이터를 토대로 실험실 내에서 차량 4바퀴에 실제의 일반내구 주행과정과 동일한 형태로 인가하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 차량 경량화를 위하여 토크스트럿의 A356 소재 적용 경량화 모델의 최대응력 및 강성을 계산하고 실험계획법(DOE)을 이용한 최적화 모델의 기준 형상을 제안하고자 하였다.

(1) 최대응력은 모든 방향에서 A356으로 제작된 모델이 STKM11A 철강소재 모델보다 낮은 값을 나타내었다. 이는 환봉 모양의 기존 철강소재 모델을 경량화 모델에서는 설계변경을 통해 보강하여 재설계하여 강건하게 만든 것 때문이다.

(2) 경량화 모델의 강성값이 낮았기 때문에 이를 보강하기 위하여 설계인자를 고려하여 $512(2^9)$ 회의 실험계획법을 응용한 DOE 해석을 수행하였다. 최적화 해석 결과 강성이 최대값을 나타내며 무게는 가장 가벼운 경우를 찾을 수 있었다.

(3) A356 소재를 적용해 최적화된 모델은 하중을 부여하는 각 방향에 대하여 강성은 100% 이상, 최대응력은 최소값을 나타내어 철강소재 제품의 성능을 만족하면서 무게는 약 42% 경량화하였다.

후 기

이 논문은 2017학년도 동명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음(과제번호 2017 F017).

참고문헌 (References)

- (1) Park, J.-H. and Kim, K. J., 2013, "Optimal Design of Camber Link Component for Light Weight Automobile Using CAE (Computer Aided Engineering)," *International J. of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 14, No. 8, pp. 1433~1437.
- (2) Park, J. H., Kim, K. J., Lee, J. W. and Yoon, J. K., 2015, "Light-Weight Design of Automotive Suspension Link Based on Design of Experiment," *International J. of Automotive Technology*, Vol. 16, No. 1, pp. 67~71.

- (3) Park, J.-H., Kim, K. J. and Yoon, J.-G., 2013, "Light-weight Design of Automotive Spring Link Based on Computer Aided Engineering," *Transaction of KSAE*, Vol. 21, No. 5, pp. 157~161.
- (4) Park, J.-H. and Kim, K. J., 2017, "Light- Weight Design of Automotive Tension Link Based on Computer Aided Engineering," *Transaction of Korean Soc. Mech. A*, to be published.
- (5) Wu, S., Tang, Z. and Guo, Z., 2017, "Lightweight Mixture Faults Detection Method for Gasoline Engine Using on-Line Trend Analysis," *Int. J. of Auto. Tech.*, Vol. 18, No. 3, pp. 365~375.
- (6) Kwan, T., 2016, "Aluminum Alloy and Heat-Treated for Optimizing the Development of Lightweight Automobile Steering Components," *KSAE 2016 Annual Conference*, pp. 579~581.
- (7) Kim, C.-J., Kang, Y. J., Lee, B.-H. and Ahn, H.-J., 2012, "Sensitivity Analysis for Reducing Critical Responses at the Axle Shaft of a Lightweight Vehicle," *Int. J. of Auto. Tech.*, Vol. 13, No. 3, pp. 451~458.
- (8) Kim, W., Kim, I., Jeong, J. and Heo, S.-J., 2009, "Lightweight Design of Convertible Vehicle Trunk," *KSAE 2009 Annual Conference*, pp. 1154~1158.