

## 특성함수와 피로해석을 이용한 로워컨트롤암의 형상최적설계

박 영 철<sup>\*1)</sup> · 이 동 화<sup>2)</sup>

동아대학교 기계공학과<sup>1)</sup> · 동아대학교 기계공학과 대학원<sup>2)</sup>

### Shape Optimization of the Lower Control Arm using the Characteristic Function and the Fatigue Analysis

Youngchul Park<sup>\*1)</sup> · Donghwa Lee<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering Graduate School, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

(Received 7 April 2004 / Accepted 1 November 2004)

**Abstract** : The current automotive is seeking the improvement of performance, the prevention of environmental pollution and the saving of energy resources according to miniaturization and lightweight of the components. And the variance analysis on the basis of structure analysis and DOE is applied to the lower control arm. We have proposed a statistical design model to evaluate the effect of structural modification by performing the practical multi-objective optimization considering weight, stress and fatigue life. The lower control arm is performed the fatigue analysis using the load history of real road test. The design model is determined using the optimization of acquired load history with the fatigue characteristic. The characteristic function is made use of the optimization according to fatigue characteristics to consider constrained function in the optimization of DOE. The structure optimization of a lower control arm according to fatigue characteristics is performed. And the optimized design variable is D=47 mm, T=36mm, W=12 mm. In the real engineering problem of considering many objective functions, the multi-objective optimization process using the mathematical programming and the characteristic function is derived an useful design solution.

**Key words** : Characteristic function(특성함수), Orthogonal array(직교배열표), Analysis of variance(분산분석), Lower control arm(로워컨트롤암), Design of experiments(실험계획법)

### 1. 서론

기술발전으로 현대의 자동차는 고기능화, 고안전화, 및 쾌적성을 추구하고 있다. 또한 차량의 성능향상을 목적으로 각종 부품은 소형화 및 경량화로 되는 추세이다.<sup>1)</sup> 기존의 자동차 부품소재로 많이 사용되어온 철강재료는 강도가 높고 성형성이 양호하고 가격도 저렴하여 자동차용 재료로 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 자동차 재료의 사용추이를 보

면, 1, 2차 오일쇼크를 겪으면서 경량화의 필요성이 증대되었고, 철강재료는 부분적으로 알루미늄이나 플라스틱 재료로 대체되면서 점차적으로 사용량이 줄어들고 있는 추세이다.

국내에서는 자동차 부품 새시(chassis)계의 모놀화 및 경량화를 동시에 추진하면서, 구동부품과 차체부품을 알루미늄 주조 또는 단조재인 경량재료의 사용이 점차 증가하는 추세이다. 특히 승차감(ride comfort)과 조종 안전성(handling performances)에 대한 소비자들의 인식이 높아감에 따라, 고속주행시

\*To whom correspondence should be addressed.  
parkyc67@mail.donga.ac.kr

차량의 주행성능을 확보하는 동시에 경량화를 통한 현가장치의 최적설계가 요구되고 있다. 현가장치의 성능은 장치가 차지하는 공간과 너클(knuckle) 및 로워컨트롤암(lower control arm)의 조향 안전성 등에 의해 결정이 된다. 그 중에서 차축에서 프론트 액슬(front axle)과 크로스 멤버(cross member)를 연결하는 구조인 압은 현재의 생산방식과 알루미늄에 대한 재질변경에 따른 문제가 발생하여, 현장에서는 이를 해결하기 위한 연구가 진행되고 있다. 이와 같은 연구는 소재변경에 따른 생산방식의 개선<sup>2)</sup>과 구조적으로 다축하중을 받는 압을 각종 차량에 적용시에 경량화에 상반되는 강도에 따른 안전성 여부의 검토와 그에 만족되는 최적설계의 요구가 필수적이다. 또한 자동차의 주행 중 반복하중으로 인한 부품의 피로파손은 설계과정에서 고려되어야 할 중요한 사항이므로 이를 고려한 설계의 필요성이 증대되고 있다.

기존의 직교배열표를 이용한 최적설계는 제한조건을 고려하지 않고 목적함수만을 고려하는 설계상의 한계를 가지고 있었다. 따라서 이러한 설계과정 중에는 설계변수에 따른 목적함수의 변동량이 작으면서 초기에 설정된 제한조건을 항상 만족하는 최적해를 구하는 방법이 바람직하다.<sup>3,4)</sup> 이와 관련된 방법으로 목적계획법(goal programming), 벌칙항 방법(penalty term method)과 확률론적 방법(probabilistic method)이 있는데<sup>5-7)</sup> 본 논문에서는 실용적인 방법으로 제한조건의 위반량이 적을 수 있도록 상수를 조절해서 새로운 제한조건을 정의하고, 설계조합을 찾아 그 값이 제한조건에 만족하도록 하였다.

본 연구에서 연구대상으로 하고 있는 로워컨트롤 암은 바퀴의 너클과 차체에 연결되어 자동차 현가장치를 구성하고 있다. 로워컨트롤암에 작용하는 하중은 도로주행시 일정하지 않은 도로조건과 외적 요인으로 인한 랜덤하중과 구조적 요인인 다축하중이 발생한다. 이러한 하중조건 하에서 로워컨트롤 암의 재료가 철강재료에서 알루미늄 재료로 대체된 경우 경량화에 맞추어 중량의 만족도는 좋아지는 반면 강도저하에 따른 안정성 문제가 발생한다.

Fig. 1은 본 연구에서 제안하는 최적화 진행과정

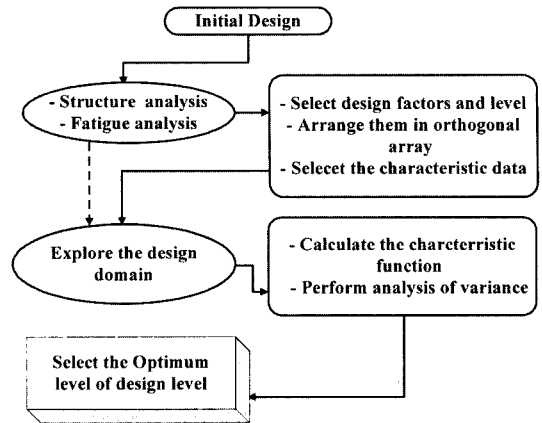


Fig. 1 Process of design optimization

을 나타낸 것으로서 먼저 로워컨트롤암에 대한 구조해석과 피로해석을 실시하였다. 특히 자동차에 발생하는 복합적인 하중을 고려하기 위해 실차 주행시험을 통해 획득된 하중이력 데이터를 이용하여 로워컨트롤암의 피로 수명 해석을 수행하였다. 그리고 실험계획법의 일종인 직교배열표를 이용하여 최적화를 실시하였다. 그런데 직교배열표는 최적설계에서 정의되는 제한조건함수를 고려할 수 없으므로 이를 해결하기 위하여 특성함수(characteristic function)<sup>8,9)</sup>를 사용하였고 다중목적함수를 단일 목적 함수 문제의 새로운 특성치로 정의하였으며 분산분석(analysis of variance)을 이용하여 정량적으로 평가하였다.<sup>10,11)</sup>

## 2. 로워컨트롤암의 구조해석과 피로해석

Fig. 2는 해석모델의 경계조건을 나타내고 있다. 로워 컨트롤 암에 대해서 하중 작용점인 볼다. 로워 컨트롤 암에 대해서 하중 작용점인 볼조인트 부분에 X,Y,Z 각 방향으로 단위하중을 적용하여 선형 정적해석을 실시하였다. 구속조건은 각 부시부(bush)에 Z방향의 회전자유도만을 제외하고는 모든 부분에서 구속을 하였다. 그리고 이때의 하중조건은 실차 데이터 측정에서 얻어진 하중이력 데이터를 이용하였다. 구조해석을 통해 구해진 각 절점에서의 응력이력과 Fig. 3과 같은 로워 컨트롤 암 재질의 응력수명선도(S-N curve)를 이용하여, 구조물 전체 절점에 대한 피로수명해석을 실시하였다.

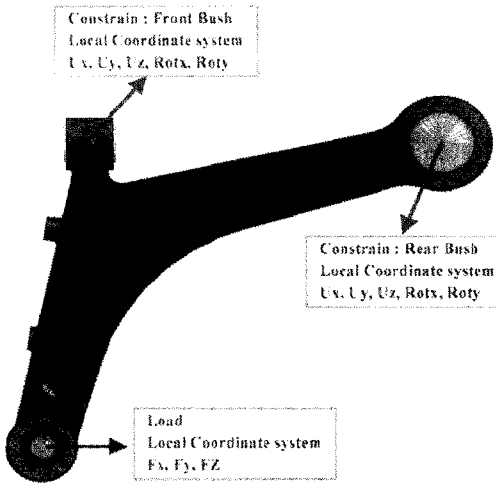


Fig. 2 Finite element model and boundary condition of the lower control arm

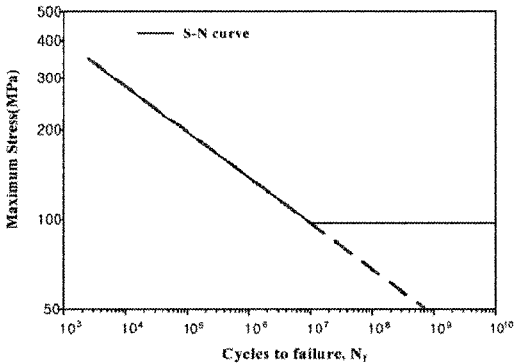


Fig. 3 Stress strain curve of Al6061

해석 결과에서 피로수명에 영향을 미치는 인자를 선택하고, 실험 계획법을 이용하여, 피로 수명에 대한 최적의 로워컨트롤암의 설계 인자를 결정하였다. 사용되어진 재료는 알루미늄합금 소재인 Al6061로서 탄성계수는 70 GPa, 프와송비는 0.33, 밀도는  $2.66 \times 10^{-6} \text{ Kg/m}^3$ 을 적용하였다. 하중이력 데이터는 벨지안로, 표준약로, 슬라럼, 8주주행등의 시험에서 실차 주행시험을 통하여 획득된 하중이력을 10회 반복하게 되면 내구하중인 16만 킬로미터 주행하중을 만족하므로 이를 적용하였다.

### 1. 특성함수를 이용한 제한조건의 문제

#### 1.1 특성함수

영함수는 직교배열표의 각 실험에서 제한조건

의 가용성(feasibility)이 포함될 수 있도록 하였다 따라서 식 (1)과 같이 제한조건함수의 가용성을 리할 수 있는 벌칙함수  $P(x)$ 를 정의한다. 벌칙함수는 직교배열표의 실험결과에 의한 특성치와 제한조건의 위배량에 따라 계산하였다.

$$P(x) = k \cdot \sum_{j=1}^N \text{Max}[0, g_j] \quad (1)$$

여기서  $g_j$ 는 제한조건함수를 나타내고, k는 벌칙계수를, N은 부등식조건의 개수를 나타낸다. 벌칙계수 k는 목적함수 및 벌칙함수의 기여도를 조절하는 역할을 한다. 식 (1)에서 모두 제한조건을 만족시킬 경우 벌칙함수는 0의 값을 갖게되고 제한조건을 위배할 경우 위배량인  $k \times \sum_{j=1}^N g_j$ 만큼의 값을 갖게 된다.

벌칙계수에 따라 설정된 제한조건을 모두 만족할 경우도 있지만 이러한 결과는 특성함수에서 목적함수의 영향을 무시하는 결과를 얻을 수 있기 때문에 원래 목적함수에 비해 벌칙항이 한차원 높은 값을 부여하였다. 따라서 로워컨트롤암의 특성함수 ( $\Psi_{new}$ )는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\Psi_{new} = \frac{W}{W_0} + \alpha \cdot \sum_{j=1}^M \text{Max}\left[0, \frac{\sigma_j}{\sigma_y} - \epsilon\right] + \beta \cdot \sum_{j=1}^M \left| \text{Min}\left[0, \frac{\text{fatigue life}_j}{\text{fatigue life}_{req}} - \epsilon\right] \right| \quad (2)$$

여기서  $W_0$ 는 초기중량을 나타내고,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 목적함수 및 벌칙함수의 기여도를 조절하는 벌칙계수를 나타내고,  $\epsilon$ 은 각 벌칙항을 한차원 낮은 값을 만들기 위한 각각의 상수를 나타낸다.

### 3.2 평균분석

다양한 설계변수와 복잡한 과정을 통한 실험으로 자료를 수집한 경우 어떠한 방법으로 데이터를 분석할 것인가를 결정해야 하므로 본 연구에서는 특성치에 대한 결과를 쉽고 간단히 구할 수 있는 평균분석을 이용하였다. 평균분석은 전체평균으로부터 설계변수 수준에 의한 결과의 편차로 정의되는 설계변수 수준의 효과를 추정할 수 있으며, 설계변수의 최적수준의 결정에 사용할 수 있다. 따라서 직교배열표에 의한 다중목적함수에 대한 특성치를 계산

하며, 이 특성치를 이용하여 각 설계변수의 수준의 효과를 평균분석을 통하여 설계변수의 주효과를 구할 수 있다.

#### 4. 로워컨트롤암의 형상 최적 설계

##### 4.1 설계 변수의 설정

피로수명을 고려한 설계를 위해서 실험계획법을 이용한 최적설계기법을 적용하였다. Fig. 4와 같이 설계변수는 외각두께(D), 내부두께(T), 내부너비(W)를 선정하였다.

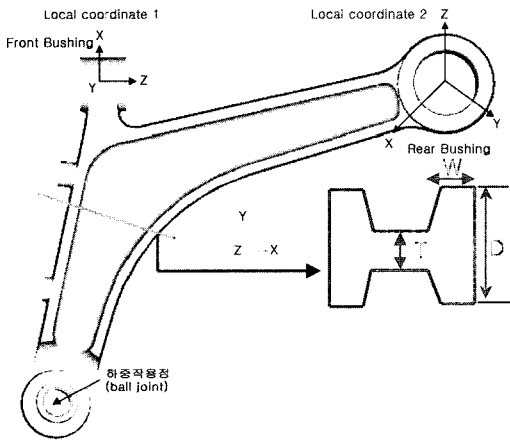


Fig. 4 Model of lower control arm

설계 변수와 수준수를 Table 1에 나타내었고, 혼합 직교배열표인 L18(2<sup>1</sup>×3<sup>7</sup>)에 분배하여 해석을 수행하였다.<sup>12)</sup> 특성치는 응력, 중량, 피로수명을 선정하였으며, 여기서 응력은 하중-이력 데이터 중에서 각 방향으로 가장 큰 하중을 조합하여 적용하였을 경우 발생되어지는 최대응력을 구하였다.

그리고 각 실험마다 최대하중을 적용하여 해석을 수행하고, 다시 X, Y, Z 각 방향으로 단위하중을 적용하여, FE-SAFE에서 피로수명해석을 각각 수행하였다. Table 2는 혼합직교배열표를 이용한 구조해석

Table 1 Design variable and level

D.V.	D	T	W
Level 1	47	36	12
2	50	40	15
3	53	44	18

Table 2 Analysis result according to orthogonal array L18(21×37)

	Column number								Stress (MPa)	Weight (kgf)	Fatigue life (log10)
	1	D	T	W	5	6	7	8			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	189	4.41299	1.287
2	1	1	2	2	2	2	2	2	183	4.69992	1.255
3	1	1	3	3	3	3	3	3	201	4.92281	1.874
4	1	2	1	1	2	2	3	3	167	4.48625	0.994
5	1	2	2	2	3	3	1	1	177	4.79517	1.076
6	1	2	3	3	1	1	2	2	177	5.04057	1.239
7	1	3	1	2	1	3	2	3	141	4.68642	1.192
8	1	3	2	3	2	1	3	1	146	4.98652	1.709
9	1	3	3	1	3	2	1	2	144	5.02537	1.488
10	2	1	1	3	3	2	2	1	175	4.58100	1.175
11	2	1	2	1	1	3	3	2	177	4.64874	0.469
12	2	1	3	2	2	1	1	3	180	4.90218	1.755
13	2	2	1	2	3	1	3	2	174	4.59385	0.682
14	2	2	2	3	1	2	1	3	164	4.87202	1.551
15	2	2	3	1	2	3	2	1	163	4.95317	1.881
16	2	3	1	3	2	3	1	2	151	4.81587	1.074
17	2	3	2	1	3	1	2	3	159	4.79462	1.435
18	2	3	3	2	1	2	3	1	145	5.09250	1.614

과 피로해석 결과를 나타낸 것으로 설계변수의 각 수준수의 배치에 따른 특성치인 응력, 중량 및 피로수명을 나타내고 있다.

##### 4.2 분산 분석에 의한 설계변수의 기여도 평가

직교배열표를 이용하여 응력, 중량, 피로수명에 대하여 각각의 변동계산표, 분산분석표를 작성하였다. 각 과정에 따른 피로수명에 대한 결과를 Table 3과 Table 4에 각각 나타내었다. 피로수명에 영향을 미치는 설계변수 및 수준을 분석하였다. 변동계산표는 각 요인과 수준수를 피로수명에 대하여 배치시켜놓은 것이고 아래 식 (3)의 CT 및 식 (4)의 S는 각각 수정항과 변동을 의미한다.

$$CT = S^2/k \tag{3}$$

k:인자의실험횟수

$$S=(\text{수준수}/\text{실험횟수})[(1\text{열에서}0\text{수준데이터합})^2 + (1\text{열에서}1\text{수준 데이터 합})^2 + \dots] - CT \tag{4}$$

$$V = S/\phi \tag{5}$$

Table 3 Variation calculated table (fatigue life)

No.	2			3			4		
D.V	D			T			W		
Level	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	1.287	0.994	1.192	1.287	1.255	1.874	1.287	1.255	1.874
	1.255	1.076	1.709	0.994	1.076	1.239	0.994	1.076	1.239
	1.874	1.239	1.488	1.192	1.709	1.488	1.488	1.192	1.709
	1.175	0.682	1.074	1.175	0.469	1.755	0.469	1.755	1.175
	0.469	1.551	1.435	0.682	1.551	1.881	1.881	0.682	1.551
	1.755	1.881	1.614	1.074	1.435	1.614	1.435	1.614	1.074
Total	7.815	7.423	8.512	6.404	7.495	9.851	7.554	7.574	8.622
CT	31.3			31.3			31.3		

Table 4 Analysis of variance table (fatigue life)

Design variable	S	DOF	V	F	P
D	0.0405	1	0.0405	0.40	0.538
T	0.9902	1	0.9902	9.73	0.008
W	0.0951	1	0.0951	0.93	0.350
E	1.4246	14	0.1018	-	-
Total	2.5503	17	-	-	-

식 (5)에서 V는 분산을 나타내며,  $\sigma$ 는 변동과 관련된 자유도이다. Table 4의 분산분석표에서 V(분산)를 살펴보면 설계변수 T가 가장 높으며, 다음으로 설계변수 W와 D순서이다. 즉 T의 설계변수는 피로수명에 대하여 가장 민감도가 높다는 것을 나타내고 있다.

결론적으로 피로수명만 보았을 때 각 설계변수의 수준수와의 관계에서 D는 2수준과, T는 1수준과, W는 1수준일 때 가장 좋은 조합이라는 것을 알 수 있다. 실험계획법에 의한 분산분석표의 결과를 정리하면 Table 5와 같다. 여러 개의 제한조건이 있는 요구조건의 문제인 경우 각 목적함수에 따라 설계변수의 기여도를 분석하여 어느 조건에 가중치를 더 부여해야 하는지를 결정할 필요가 있다. 직교배열표에서 피로수명이 1보다 크면서 중량이 적게 나오는 것은 1, 2, 7, 10번째의 해석이다. 이때에 각각의 응력 및 중량은 망소특성에 대하여 분석하고 피로수명은 망대특성에 대하여 분석한 결과 이때의 설계변수의 최적수준과 그 관계를 Table 5와 같이 나타내었다. 피로수명은 설계변수 T에 가장 민감하다는 것을 알 수 있고 이러한 피로특성의 가용성이 포함될 수 있도록 특성함수를 작성하였다.

Table 5 Optimal level and correlation table

D.V. Item	D	T	W	Interaction influence
Stress	3	1	2	D > W > T
Weight	1	1	1	T > D > W
Fatigue life	2	1	1	T > W > D

### 4.3 특성함수를 이용한 최적설계

특성함수를 이용하여 최적설계에 적용할 경우 해석결과와 요구조건을 기초로 직교배열표를 선택하여 설계변수와 각 설계변수의 수준수가 결정되어지면 중량과 응력 및 피로수명을 특성치로 하는 직교배열표에 의한 행렬실험을 실시한다. 한편 특성함수는 이러한 중량을 포함한 응력과 피로수명의 요구조건에 대하여 하나의 함수로 나타내고 강건설계 개념의 일종인 실험계획법의 SN비 분석을 이용하여 최적설계를 수행한다.

Table 6은 직교배열표에 의한 행렬실험을 통해 얻은 응력과 중량, 피로수명에 대한 실험결과를 바탕으로 설계변수에 대한 수준을 대응시켜 제한조건의 문제를 고려하기 위한 특성함수로써 나타낸 것이다. 각 실험에서 구해진 응력과 중량, 피로수명에 대하여 특성함수를 식 (2)에 적용하였다. 일반적으로

Table 6 Characteristic function

Exp.	Characteristic function
1	1.07834
2	1.15028
3	1.21753
4	1.52992
5	1.48420
6	1.19920
7	0.99903
8	0.86150
9	0.85466
10	1.23708
11	2.67373
12	1.07408
13	2.21856
14	0.96237
15	0.96926
16	1.31832
17	0.91611
18	0.87255

벌칙계수는 보통 경험상 1-1.5의 값을 가지는데, 여기서 사용된 벌칙계수는  $\alpha=0.76$ ,  $\beta=2.32$ ,  $\epsilon=1$ 을 적용하였다.

일반적인 형태의 정적문제와 그에 대한 특성함수를 이용하여 로워컨트롤암의 목표로 하고 있는 제한조건이 있는 최적설계를 수행하였다.

본 연구에서 사용되어진 실험계획법에서 SN 비는 이차식으로 주어지는 품질손실함수(quality loss function)으로부터 유도된 값으로서 성능의 평균과 산포를 동시에 고려하는 척도라고 할 수 있다. 가장 많이 사용되는 세가지의 SN비 중 본 연구는 망소특성 분석에 준하여 실행하였다.

$$SN = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n y_i^2 \right) \quad (6)$$

식 (6)에서  $n$ 은 측정값의 수,  $y_i$ 는 측정된 특성값, 기대값은  $E(y^2)$ 가 된다.

특성함수를 이용하여 각 실험에 대한 특성치의 결과를 각 설계변수의 수준수 중에서 가장 적합한 최적해를 결정하기 위해 각 설계변수의 기여도 및 평균분석으로써 설계변수에 대한 수준수의 최적해를 평가하였다.

Table 7은 특성함수에 따른 각 설계변수 및 수준 효과를 나타내었다.

수준차(diviation)는 설계변수의 수준별 효과의 최대값과 최소값의 차이를 뜻하며 기여율(percentage contribution)은 전 수준차의 합에 대한 백분율로 나타낸다.

결과를 평가하면 기여율이 가장 높은 것은 설계변수 D임을 알 수 있다. 따라서 각 설계변수에 따른 수준의 효과를 비교하여 최적의 설계변수 수준을 찾으면 D1, T1, W1일 때 잡음에 강건하고 원하는 제한조건에 만족하는 모델을 얻을 수가 있다. Fig. 5는 기존수준에 대하여 SN비에 의한 특성함수의 최적

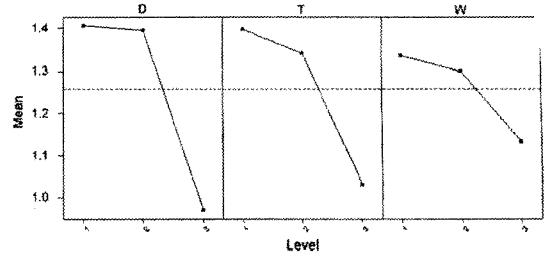
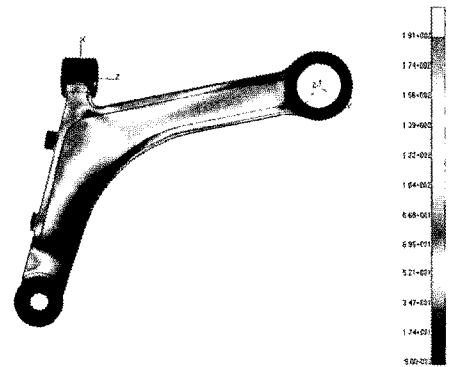


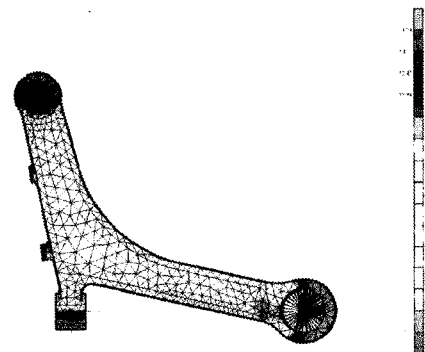
Fig. 5 Optimal solution the characteristic function

Table 8 Optimal solution and level of lower control arm

Factor	D	T	W	Results		
				Stress (MPa)	Weight (Kg)	Fatigue life ( $\times 10^4$ Km)
Opt. level	1	1	1	191	4.41334	18.576
Value	47	36	12			



(a) Maximum von-Mises stress



(b) Fatigue life

Fig. 6 Maximum stress and fatigue life optimal model

Table 7 Factors affecting the characteristic function

Factor	Effect			Deviation	PC* (%)
	1	2	3		
D	1.40517	1.39392	0.97036	0.43481	43.3
T	1.39688	1.34137	1.03121	0.36567	36.4
W	1.33700	1.29978	1.13267	0.20433	20.3
total	-	-	-	1.00481	100

수준을 나타낸 것이고, 그 결과는 Table 8에 나타내었다. 설계변수의 최적수준은 D(1수준), T(1수준), 그리고 W(1수준)일 때 로워 컨트롤 암의 최적 모델

의 형상을 도출할 수 있었다.

Fig. 6은 Table 8의 일레인 재해석을 통한 최종 형상의 최대응력 및 피로수명결과를 나타내고 있다. 최대응력은 191 MPa이며, 최소피로수명은 내구한도인  $16 \times 10^4$  km를 만족하는  $18.576 \times 10^4$  km이다. 그런데 로워컨트롤암의 리어부싱(Rear Bushing)부의 국부적인 피로수명의 저하가 나타남을 알 수 있다, 따라서 차후 이 부분을 고려한 피로특성 평가가 필요할 것으로 판단된다.

### 5. 결론

자동차 현가장치 부품인 로워컨트롤암의 개발 단계에서 중량, 응력 및 내구수명을 예측하고 평가하기 위하여 본 연구의 최적화 과정을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실차 하중이력 데이터를 이용하여 피로수명 해석을 실시하여 유용한 결과를 도출할 수 있었다.
- 2) 직교배열표와 변칙계수를 각각  $\alpha=0.76$ ,  $\beta=2.32$ ,  $\epsilon=1$ 을 적용한 특성함수를 이용하여 로워컨트롤암의 형상 최적화를 실시한 결과 설계변수의 최적 수준은 각각 D(1수준), T(1수준), 그리고 W(1수준)이다.
- 3) 로워컨트롤암의 리어부싱(Rear Bushing)부의 국부적인 피로수명의 저하가 나타남으로 차후 이 부분을 고려한 피로특성 평가가 필요할 것으로 보인다.

### References

- 1) S. I. Song, K. J. Bae, K. H. Lee and G. G. Park, "Lightweight Design for Automotive Door Using Optimizations and Design of Experiments," Transactions of KSAE, Vol.10, No.1, pp.125-132, 2002.
- 2) Y. H. Chung, "Aluminum Alloy Products for Automobile Use," Journal of KSAE, Vol.18, No.5, pp.38-52, 1996.
- 3) K. H. Lee and G. J. Park, "Robust Structural Optimization Considering the Tolerances of Design Variables," Transaction of the KSME, A, Vol.2, No.1, pp.112-123, 1997.
- 4) D. H. Jung and B. C. Lee, "Development of an Optimization Technique for Robust Design of Mechanical Structures," Transaction of the KSME, A, Vol.24, No.1, pp.215-224, 2000.
- 5) A. Parkinson, C. Sorensen and N. Pourhassan, "A General Approach for Robust Optimal Design," Journal of Mechanical Design, Vol. 115, pp.74-80, 1993.
- 6) J. P. Dauer and R. J. Krueger, "An Iterative Approach to Goal Programming," Operational Research Quarterly, 28, pp.671-681, 1997.
- 7) L. P. Chao, "Multiobjective Optimization Design Methodology for Incorporating Manufacturing Uncertainties in Advanced Composite Structures," Engineering Optimization, Vol.25, pp.309-323, 1996.
- 8) K. H. Lee and G. J. Park, "Robust Optimization in Discrete Design Space for Constrained Problems," Transaction of the KSME, A, Vol.22, No.5, pp.728-737, 1998.
- 9) J. W. Yi, J. S. Park, K. J. Park and K. H. Lee, "Development of an Optimization Algorithm Using Orthogonal Arrays in Discrete Design Space," Transaction of the KSME, A, Vol.25, No.10, pp.1621-1626, 2001.
- 10) W. Chen, J. K. Allen, K. N. Mavris and F. Mistree, "A Concept Exploration Method for Determining Robust Top-Level Specifications," Engineering Optimization, Vol.26, pp.137-158, 1996.
- 11) W. Chen, J. K. Allen, K. L. Tsui and F. Mistree, "A Procedure for Robust Design Minimizing Variations Caused by Noise Factors and Control Factors," Journal of Mechanical Design, Vol.118, pp.478-485, 1996.
- 12) Y. C. Park, N. S. Park, D. H. Lee and D. S. Park, "A Study on Robust Design Application of the Lower Control Arm of the Vehicle Suspension," 11th Korea ANSYS User's Conference 2001.