

## 경량화에 대한 안전성을 고려한 로우컨트롤암의 다목적 최적설계

이 동 화<sup>1)</sup> · 박 영 철<sup>2)</sup> · 허 선 철<sup>3)</sup>

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

### Multi-objective Optimization of Lower Control Arm Considering the Stability for Weight Reduction

Dong Hwa Lee<sup>1)</sup> · Young Chul Park<sup>2)</sup> · Sun Chul Huh<sup>3)</sup>

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

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

<sup>3)</sup>School of Transports Vehicle Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 650-160, Korea

(Received 21 December 2002 / Accepted 11 June 2003)

**Abstract** : Recently, miniaturization and weight reduction is getting more attention due to various benefits in automotive components design. It is a trend that the design of experiment(DOE) and statical design method are frequently used for optimization. In this research, the safety of lower control arm is evaluated according to its material change from S45C to Al6061 for the reduction of arm's weight. 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 mass, stress and deflection.

**Key words** : Multi-objective optimization(다목적최적설계), Orthogonal array(직교배열표), Analysis of variance(분산분석), Multiple regression polynomial(중회귀다항식), Lower control arm(로우컨트롤암)

### 1. 서론

2000년대 들어 자동차는 고성능화, 고안전화 및 쾌적성을 추구하고 있으며 자동차의 각종 부품은 소형화 및 경량화 되는 추세이다. 자동차의 경량화 방법에는 재료적인 접근 방법과 구조 설계의 합리화에 의한 방법 등으로 분류된다.<sup>1)</sup> 국내에서는 자동차 부품 새시(chassis)계의 모듈화 및 경량화를 동시에 추진하면서, 구동부품과 차체부품을 알루미늄 주조 또는 단조재인 경량재료의 사용이 점차 증가하는 추세이다. 특히 현가장치(suspension)는 승차감

(ride comfort)과 조종 안전성(handling performances)에 대한 소비자들의 인식이 높아감에 따라, 고속주행시 차량의 주행성능을 확보하는 동시에 경량화를 통한 현가장치의 최적설계가 요구되고 있다. 현가장치의 성능은 장치가 차지하는 공간과 너클(knuckle) 및 로우 컨트롤 암(lower control arm)의 조향안전성 등에 의해 결정이 된다. 그 중에서 차축에서 프론트 액슬(front axle)과 크로스 멤버(cross member)를 연결하는 구조인 암은 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 경량화에 상반되는 강

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

도에 따른 안전성 여부의 검토 및 그에 만족되는 최적설계의 요구가 필수적이다. Stensson 등<sup>3)</sup>은 현가장치의 비선형 거동을 구조해석을 통해 수학적으로 모델링 한 바 있으며, Wehage 등<sup>4,5)</sup>은 현가장치의 설계에 설계자의 경험이나 기구의 운동방정식을 세워 민감도를 해석한 후, 이 식을 이용한 이론적인 최적설계를 수행하였다. 그러나 식의 전개가 어렵고, 또한 많은 시간과 전문적인 지식을 필요로 하는 단점이 있다.

이에 따라서 기존의 경험을 바탕으로 구조해석 및 설계보완기능, 구조물 내구성, 그리고 경량화 등의 최적설계를 수행할 수 있는 다목적 최적설계시스템이 필요하게 되었다.<sup>6)</sup> 최근에는 성능이 2개 이상으로 표시되는 목적함수를 최소화시키는 다목적 최적화 방법에는 가중치법(weighting method), 최소최대법(min-max method) 등이 많이 사용되고 있다. 또한 통계학적 방법을 이용한 실험계획법(design of experiments)과 연계하여 다목적 최적설계 방법의 적용이 시도되고 있다. 이는 시스템의 부정확성(inaccuracy)을 체계적으로 문제의 내부에 반영하여 모형에 포함시키고, 불확실성을 동시에 추론하는 방법으로 대두되고 있다. Chen 등<sup>7,8)</sup>은 반응표면법과 확장된 분산분석(analysis of variance)을 이용하여 구조해석과 실험계획법을 조합하는 다목적 문제에 적합한 설계지원시스템을 개발한 바 있고, 백석흠 등<sup>9)</sup>은 실험계획법과 수리적 방법을 이용하여, 목적함수에 대한 설계변수의 상관관계를 분산분석으로 파악한 뒤, 설계변수의 변화에 따른 평가특성치를 표현할 수 있는 추정식을 이용하여 다목적 최적설계를 수행하였다.

따라서 본 연구에서는 암의 소재변경에 따른 경량화 요구와 강도저하에 따른 안전성 문제에 만족하는 설계를 위해서 선행연구<sup>9,10)</sup>가 제안하는 방법을 기초로 실험계획법과 수리적 방법을 이용하였다. 그리고 다목적 최적설계를 위상최적화와 구조해석결과를 이용하여 최적설계를 위한 최종 암의 모델을 선정하였다. 또한 중량과 처짐 및 허용응력을 동시에 최소화시키는 다목적 최적설계를 수행하였다. 그리고 설계변수의 변화에 따른 구조변경의 효과를 정량적으로 평가하였다. 더불어 제안한 다

목적 최적설계방법의 유용성을 확인하고, 그 결과를 바탕으로 자동차 현가장치 부품의 통합적 최적설계의 모색방안을 검토하였다.

## 2. 통계적 방법을 이용한 다목적 최적설계

직교배열표는 각 반복단계에서 넓은 영역에서 진행되는 영역접근법이다. 따라서 계속되는 설계변경 중에 다른 인자의 변화 또는 관련 부분계의 변화에도 불구하고 설계인자의 추정효과는 계속 타당해야 한다.

다양한 공학문제에 대해 직교배열표를 사용한 결과에 의하면, 이 방법은 영역 접근적 특성으로 인해 최적화 초기단계의 경우, 초기 가정치가 최적치로부터 멀리 떨어져 있을 때 매우 효과가 좋은 것으로 알려져 있으나, 정밀한 최적해를 구하기에는 부적합하다. 따라서 최적화는 초기단계에서 직교배열표를 사용하고 나중 단계에서 수학적 프로그래밍(mathematical programming)방법을 수행함으로써 정도가 우수한 최적해를 구할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 1은 본 연구에서 제안하는 최적화의 진행과정을 나타낸 것으로 별표의 위상최적화를 이용하여

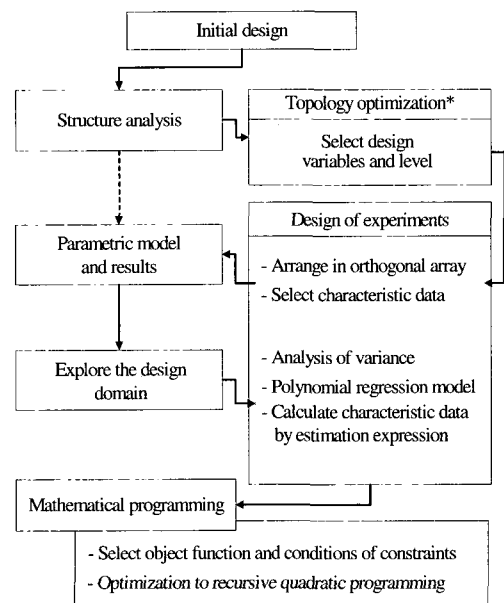


Fig. 1 Procedure of multi-objective optimization

해석모델의 구조적 위험영역의 설계변수 선정에 보다 정량적으로 탐색이 가능하였고,<sup>9)</sup> 목적함수(평가특성치)에 대한 설계변수의 영향을 구조해석과 실험계획법을 조합시켜 평가하였다. 그 결과를 분산분석에 기초를 두고 목적함수의 근사추정식을 작성하여 다양한 최적화 계산을 전개함으로써, 구조설계의 궁극적 목적인 구조물의 통계학적 설계 모델을 구축하였다.

### 2.1 직교배열표의 개요

최근에는 CAE분야에서도 실험계획법 중 직교배열표 및 Taguchi 방법이 자주 적용되고 있는데, 이는 해석의 경제성 및 이산설계변수의 효율적 처리, 그리고 잡음에 둔감한 설계를 구현할 수 있다는 장점 때문이다. 직교배열표는 Euler의 그레코 라틴 제곱(greco-latin squares)에서 연유하는 것으로, 모든 다른 인자들이 변할 때 주어진 제어인자의 평균효과를 찾아내고 설계상황의 분석방법을 정량적으로 측정할 수 있는 기준을 제공하기 위해서 실험계획법에 의한 설계에서 이용하게 된다.

### 2.2 다목적 최적화

일반적으로 공학설계 문제는 몇 개의 상충되는 목적함수가 존재하여 각 목적함수간에 트레이드오프 함수(trade-off function)를 가지게 된다. 따라서 다목적 문제는 설계자가 가치판단의 정보를 어떻게 취급하는 것에 따라 몇 가지의 파레토(pareto)해에 접근하는 방법이 있다. 그 중 복수의 설계목표간에 우선순위가 존재하는 본 연구에서는 다목적 최적화 알고리즘으로 각 목적함수의 만족수준을 설정하여 우선순위가 높은 것에서부터 순차적으로 단일 목적의 최적화를 반복적으로 실행하는 SQP(sequential quadratic programming)법을 사용하였다. 즉,  $r$  개의 목적함수가 어떠한 희생을 지불하더라도 만족해야만 하는 요구목표  $l$  개와 변경될 가능성이 있는 희망목표  $m$  개로 나누어진다. 또한 각각의 목적함수의 우선 순위가 분명하므로 각각의 목적함수에 대하여 최저 한도로 달성하여야 하는 수준도 설정하여야 한다.

요구수준  $F^\epsilon = (F_1^\epsilon, F_2^\epsilon, \dots, F_l^\epsilon)$

희망수준  $f^\epsilon = (f_1^\epsilon, f_2^\epsilon, \dots, f_m^\epsilon)$

우선, 가장 순위가 높은 요구목표  $F_1(x)$ 에 대하여 아래에 표시한 것과 같은 단일 목적 최적화 문제를 설정하여 최적치  $F_1^*$ 를 얻는다.

1) Objective function :  $F_1(x) \rightarrow \text{minimum}$

$$\begin{aligned} \text{Constraints : } F_i(x) &\leq F_i^\epsilon \\ &(i=2, 3, \dots, l) \\ f_i(x) &\leq f_i^\epsilon \\ &(i=1, 2, \dots, m) \end{aligned}$$

$F_1^* > F_1^\epsilon$  일 때 희망수준  $f^\epsilon$ 의 설정을 완화하고 허용한도로서 편차  $\Delta_1 (0 \leq \Delta_1 \leq F_1^\epsilon - F_1^*)$ 를 설정하며 다음으로 순위가 높은 요구목표에 대한 목적함수  $F_2(x)$ 에 대하여 최소치  $F_2^*$ 를 얻는다.

2) Objective function :  $F_2(x) \rightarrow \text{minimum}$

$$\begin{aligned} \text{Constraints : } F_i(x) &\leq F_i^* + \Delta_1 \\ &(0 \leq \Delta_1 \leq F_1^\epsilon - F_1^*) \\ F_i(x) &\leq F_i^\epsilon \\ &(i=3, 4, \dots, l) \\ f_i(x) &\leq f_i^\epsilon \\ &(i=1, 2, \dots, m) \end{aligned}$$

$F_2^* > F_2^\epsilon$  일 때 역시 희망수준  $f^\epsilon$ 의 설정을 완화하여 재실행한다. 동일하게  $3 \leq p \leq l$ 에 대하여 순차적으로 최소치를 얻는다.

3) Objective function :  $F_p(x) \rightarrow \text{minimum}$

$$\begin{aligned} \text{Constraints : } F_k(x) &\leq F_k^* + \Delta_k \\ &(0 \leq \Delta_k \leq F_k^\epsilon - F_k^*) \\ &(k=1, 2, \dots, p-1) \\ F_i(x) &\leq F_i^\epsilon \\ &(i=p+1, p+2, \dots, l) \\ f_i(x) &\leq f_i^\epsilon \\ &(i=1, 2, \dots, m) \end{aligned}$$

$F_p^* > F_p^\epsilon$  일 때 희망수준  $f^\epsilon$ 의 설정을 완화하여 재실행하며, 요구목표에 대하여도 동일하게 반복한다. 따라서 추정식에 대한 최적계산을 반복적으로 수행하는 다단계 최적구조설계 방법에 있어서도 위와 같은 수리계획법을 이용하여 용이하게 해석을 수행할 수 있다.<sup>11)</sup>

### 3. 로우컨트롤암의 유한 요소 해석

#### 3.1 선행연구의 검토

로우 컨트롤 암의 제작과정은 제작방식에 따라 I 형과 단면 형상을 변화시킨 H 형으로 나눌 수 있다. 구조해석을 수행한 결과 I 형 단면보다 H 형 단면을 가진 암의 강도가 더 우수함이 보고된 바 있다.<sup>12)</sup> 그러나 H 형 단면에서 암의 중량이 증가함에 따라 제작상 원가 상승의 요인이 되었다. 따라서 이와 같은 중량증가의 불필요한 요소를 제거하더라도 강도 및 안전성에 영향을 미치지 않는 새로운 형태의 암의 설계가 필요하게 되었다.

#### 3.2 해석대상 및 재질특성

Fig. 2는 현재 실차에 장착되어 사용되고 있는 위시본형(wishbone type) 독립 현가장치인 프론트 로우 컨트롤 암을 나타내고 있다. 경량화를 목적으로 기존의 S45C 구조용 압연강판소재의 암을 알루미늄으로 재질 변경하여 구조해석을 실시하였다. Table 1은 하중의 종류와 볼 조인트(ball joint)부에 작용하는 하중의 크기를 나타내었다. 차량 주행 시 휠(wheel)측에 발생하는 4 방향의 하중들은 비독립적이며 복합적으로 작용함으로써, 도로노면의 기복

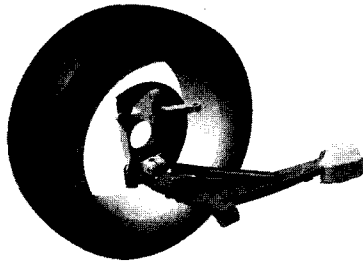


Fig. 2 Wishbone type independent front suspension

Table 1 Load condition of lower control arm

| Direction          | Fx (N)  | Fy (N)  | Fz (N)  |
|--------------------|---------|---------|---------|
| C.W.               | -313.6  | 1607.2  | -98.0   |
| 6G Bumping         | -2753.8 | 10633.0 | 3038.0  |
| 1G Braking         | 10358.6 | 2930.2  | -68.6   |
| 1G Cornering (OTR) | -1107.4 | -8212.4 | -1617.0 |
| 1G Cornering (INR) | -156.8  | 3488.8  | -1450.4 |

에 의하여 발생하는 상하 진동, 운전자의 가속도에 의한 관성하중, 운전자의 제동에 의한 제동하중 및 선회시 타이어의 측면이 벽면 접촉 또는 자갈길 등을 주행시에 발생하는 횡력 등으로 분류가 된다. 본 해석에 사용한 하중 조건은 이런 하중들을 각 주행시 조건별로 세분화시킨 것이다.

Fig. 3은 해석대상인 암의 유한요소모델과 경계 조건 및 직교배열표에 사용할 인자들을 나타내고 있다. 구속 조건은 Fig. 3과 같이 암의 부시(bush)부 안쪽 면을 각 부시의 축 방향 회전에는 자유도를 풀어주고 각 축 방향 변위만 구속하였다. 특성치의 선정은 Fig. 4의 구조해석 결과를 바탕으로 하였다. 오른쪽 부시부의 최대응력이 발생하는 부분에서 발생하는 응력과 아래쪽 볼조인트부의 최대치점이 발생하는 부분에서의 치점을 각각 특성치로 하였다. 암의 단면형상을 H 형 단면으로 선정한 것

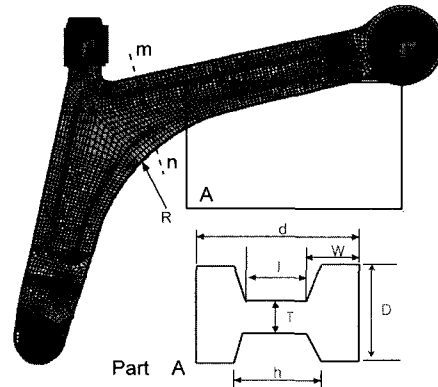


Fig. 3 FE-model, boundary condition and design variable (R,D,W,T) of lower control arm

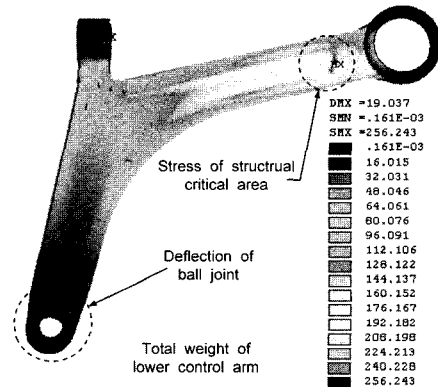


Fig. 4 Stress distribution of the initial model

은 위상해석인 선행연구<sup>10)</sup>를 참조하여 결정하였다. 선정된 인자는 외곽두께(D), 내부너비(W), 내부 두께(T)와 외곽 반경(R)이다. 각각의 인자 및 수준을 Table 2에 나타내었다.

**3.3 실험계획법을 이용한 근사 추정식 작성**

Table 3은  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 의 혼합 직교배열표에 설계 변수를 할당하여 해석결과를 표시한 것이다. 이 결과를 기초로 평가특성치에 대한 설계변수의 민감도를 분산분석을 이용해 회귀분석(regression analysis)을 수행하였다. 회귀분석은 설계변수들의 관련성을 규명하기 위해 수학적 모형을 데이터로부터 추정하는 것이다. 일반적으로 추정된 모형을 이용하여 필요한 예측을 하거나 관심있는 통계적 추론을 하게 된다.

Table 2 levels of factors for  $L_{18}$

| Factor  | R (mm) | D (mm) | W (mm) | T (mm) |
|---------|--------|--------|--------|--------|
| Level 1 | 150    | 33     | 10     | 6      |
| Level 2 | 200    | 35     | 14     | 8      |
| Level 3 |        | 37     | 18     | 10     |

Table 3 Result of structure analysis for  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$

| Analysis number | Stress (MPa) | Deflection (mm) | Weight (kgf) |
|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| 1               | 462          | 30.52           | 2.2192       |
| 2               | 261          | 18.32           | 2.5488       |
| 3               | 212          | 13.63           | 2.7731       |
| 4               | 308          | 21.08           | 2.4907       |
| 5               | 208          | 13.90           | 2.785        |
| 6               | 287          | 16.79           | 2.6239       |
| 7               | 208          | 14.94           | 2.7636       |
| 8               | 324          | 18.46           | 2.5900       |
| 9               | 217          | 12.73           | 2.8875       |
| 10              | 308          | 21.96           | 2.4588       |
| 11              | 200          | 17.98           | 2.7283       |
| 12              | 315          | 18.15           | 2.5220       |
| 13              | 427          | 27.11           | 2.3327       |
| 14              | 263          | 16.99           | 2.6575       |
| 15              | 201          | 11.92           | 2.9406       |
| 16              | 208          | 14.57           | 2.8113       |
| 17              | 268          | 15.57           | 2.7573       |
| 18              | 217          | 12.51           | 2.9224       |

본 연구에서는 유의한 설계변수의 정도(precision)를 중회귀 다항식(multiple regression polynomial)을 이용해서 평가특성치를 표현하였다. 즉 평가특성치인 평균응력, 처짐, 중량 등의 직교배열표의 실험에 따른 변화를 설명하기 위해, 각 설계변수의 수준영역에서 평가특성치와의 관계가 선형

Table 4 Variance analysis of multiple regression polynomial for stress

| Factor     | Unstandardized |           | Std.coeff.  | T-ratio | Sig.  |
|------------|----------------|-----------|-------------|---------|-------|
|            | B              | Std.Error | Beta        |         |       |
| Const.     | 557.560        | 39.426    |             | 14.142  | 0     |
| R          | -8.889         | 14.902    | -0.060      | -0.597  | 0.561 |
| D          | -26.333        | 9.125     | -0.289      | -2.886  | 0.013 |
| W          | -39.333        | 9.125     | -0.431      | -4.310  | 0.001 |
| T          | -70.500        | 9.125     | -0.773      | -7.726  | 0     |
| Model      | Sum of squares | DOF       | Mean square | F-ratio | Sig.  |
| Regression | 86885.222      | 4         | 21721.31    | 21.737  | 0.01  |
| Residual   | 12990.556      | 13        | 999.274     |         |       |
| Total      | 99875.778      | 17        |             |         |       |

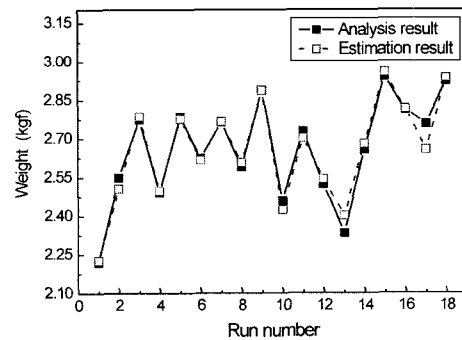


Fig. 5 Relation between weight and run number in DOE

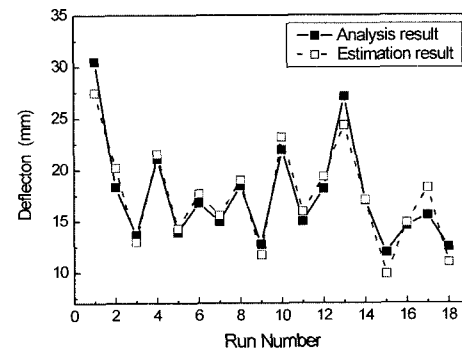


Fig. 6 Relation between deflection and run number in DOE

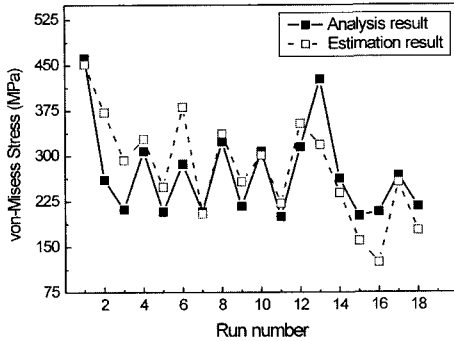


Fig. 7 Relation between von-Mises stress and run number in DOE

으로 가정되는 회귀모형을 나타낸 것이다. Table 4는 그 결과의 일례인 평균응력에 대한 결과로서 회귀식 계수에 대한 t-검정이다. 여기서 t 값이 높은 변수일수록 평가 특성치인 평균응력에 대한 민감도가 크다는 것을 의미한다. 그리고 다항식의 성분을 분산분석의 결과에 기초를 두고 있어 고차항의 계수를 모르거나 계수차이가 크게 되더라도 기저(base)를 정규화(normalize) 할 수 있어 효율적으로 탐색이 가능하다.<sup>10)</sup> 따라서 식 (1), (2), (3)의 추정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{stress} = 557.556 - 8.889 X_1 - 26.333 X_2 - 39.333 X_3 - 70.5 X_4 \quad (1)$$

$$Y_{deflection} = 37.868 - 0.734 X_1 - 2.398 X_2 - 3.704 X_3 - 3.555 X_4 \quad (2)$$

$$Y_{weight} = 1.776 + 0.0499 X_1 + 0.123 X_2 + 0.133 X_3 + 0.146 X_4 \quad (3)$$

이들은 평가 특성치에 대한 중회귀다항식으로 나타낸 것이다. 이는 직교배열표상의 불연속 변수점에 의한 결과를 이산 연속함수식인 중회귀다항식으로 나타낸 결과가 된다. 따라서 최적해의 수렴성 및 정도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단되며 통계프로그램으로 SPSS base 7.5를 사용하였다.<sup>13)</sup>

이상에서 얻어진 목적함수의 근사 추정식과 해석값을 비교한 그래프를 Fig. 5, 6, 7에 표시하였다. 따라서 이러한 추정식을 기초로 로우 컨트롤 암의 다목적 최적화를 수행한다.

#### 4. 수리계획법을 이용한 다목적 최적화

##### 4.1 요구목표 설정

다목적 최적화 문제를 수학적으로 표현하면 다음과 같이 설정할 수 있다.

Objective function :

$$\text{minimize } \{ Y_{stress}, Y_{deflection}, Y_{weight} \}$$

Constraints :  $1 \leq x_1 \leq 2$

$$1 \leq x_i \leq 3 \quad (i=2, 3, 4)$$

목적함수는 각각 응력, 처짐, 중량이 된다. 그리고 구속조건인 설계변수의 상하한은  $x_1$ 에 대해서는 1과 2수준이고,  $x_2$ 에서  $x_4$ 까지는 각각 1에서 3수준 사이로 정의가 된다. 일반적으로 다목적 최적화 문제에서는 단일목적함수의 문제와는 달리 해가 유일하지 않다는 특징이 있으며, 일련의 다른 해를 제공한다.

##### 4.2 최적화 계산

소재변경에 따른 로우 컨트롤 암에 대한 목적함수에 우선순위를 두기 위해 중량을 1 순위, 처짐을 2 순위, 평균응력을 3 순위로 하였다. 그리고 각 목적함수는 변경 가능한 회구목표를 중량은 3 kgf, 처짐은 15 mm, 평균응력은 항복강도 225 MPa을 기준으로 설정하였다. 각 목적함수의 회구수준을 각각

$Y_{weight}^e, Y_{deflection}^e, Y_{stress}^e$ 로 하고, 우선 순위가 높은 순서부터 최적화 계산을 실행했으며, 최적화 계산으로는 SQP를 사용하였다.

Table 5 Optimal solution

| Objective Step | Weight (kgf) | Deflection (mm) | Stress (MPa) |
|----------------|--------------|-----------------|--------------|
| Initial        | 2.6054       | 21.05           | 355          |
| First step     | 2.7576       | 14.47           | 216          |
| Second step    | 2.8631       | 11.46           | 176          |
| Third step     | 2.8617       | 11.54           | 177          |

Table 6 Optimal design parameter

| DV                | X <sub>1</sub> (R) | X <sub>2</sub> (D) | X <sub>3</sub> (W) | X <sub>4</sub> (T) |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Result            |                    |                    |                    |                    |
| Optimum level     | 1.0569             | 1.7805             | 2.3012             | 2.7658             |
| Optimum size (mm) | 153.0              | 34.6               | 15.2               | 9.5                |

1) First step

Objective function :  $Y_{weight}^{\epsilon} \rightarrow \text{minimum}$

Constrains :  $Y_{deflection}^{\epsilon} \leq 15, Y_{stress}^{\epsilon} \leq 225$

$$1 \leq x_1 \leq 2,$$

$$1 \leq x_i \leq 3 \quad (i=2,3,4)$$

첫 번째 단계에서 얻어진 최적해  $Y^*$ 를 Table 5에 나타내었으며 다음으로 얻어진 최적해에 편차  $\Delta$  ( $\Delta = |Y^* - Y^{\epsilon}|/2$ )을 더해 최적 계산을 실행하였다.

2) Second step

Objective function :  $Y_{deflection}^{\epsilon} \rightarrow \text{minimum}$

Constrains :  $Y_{stress}^{\epsilon} \leq 225$

$$Y_{weight}^{\epsilon} \leq 2.7576 + 0.1212$$

$$1 \leq x_1 \leq 2,$$

$$1 \leq x_i \leq 3 \quad (i=2,3,4)$$

3) Third step

Objective function :  $Y_{stress}^{\epsilon} \rightarrow \text{minimum}$

Constrains :  $Y_{deflection}^{\epsilon} \leq 11.46 + 1.77$

$$Y_{weight}^{\epsilon} \leq 2.7576 + 0.1212$$

$$1 \leq x_1 \leq 2,$$

$$1 \leq x_i \leq 3 \quad (i=2,3,4)$$

위의 세 단계의 과정 중에서 얻어진 해가 바로 다목적 최적해가 되며, 그 값을 Table 5와 Table 6에 나타내었다. Fig 8은 각 단계에 의하여 최적화가 진행되는 상태를 나타내었는데, 여기서 종축은 요구수준으로 나눈 것으로 정규화하였다. 종축에 표시한 정규화되어진 목적함수가 1을 넘어서면 목적함수가 요구수준을 만족하고 있다는 것을 의미한다.<sup>9,11)</sup> 따라서 최적화가 진행됨에 따라 중량을 일정수준을 만족하면서 처짐과 응력집중의 분포를 개선하였는데 1단계에서 모든 목적함수가 요구수준을 만족하고 있지는 않지만 각각 적절하게 만족된 설계가 가능하였다.

Table 7은 얻어진 최적해에 대하여 재해석을 수행하여 나타낸 것이다. 최적해와 재해석을 비교해 보면 오차가 평균응력은 1.4%, 처짐은 0.2%, 중량은 0.3%의 오차가 발생되었다. 이는 추정식에 의한 오차와 구조해석에 의한 분산 등은 최적화 진행과정

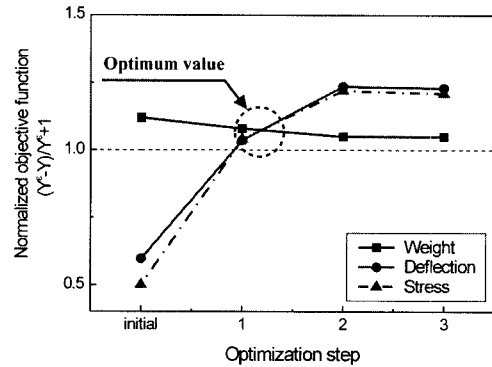


Fig. 8 Multi-objective optimization process using SQP

Table 7 Reanalysis solution

| Objective        | Weight (kgf) | Deflection (mm) | Stress (MPa) |
|------------------|--------------|-----------------|--------------|
| Kind             |              |                 |              |
| Optimized result | 2.7576       | 14.47           | 216          |
| Reanalysis       | 2.7480       | 14.49           | 213          |

에 매우 큰 영향을 미치므로 이러한 변동의 강건성 (robustness)<sup>14)</sup>의 정량적인 평가가 요구된다. 따라서 이러한 변동의 오차요인을 고려한다면 다소 편차가 있다고 하더라도 성능이 변동하기 어렵고 안전성이 높은 제품을 개발할 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 자동차 현가장치인 로우 컨트롤 암에 대하여 재질변경을 통한 경량화를 목적으로 실험계획법과 수리적 방법을 이용하여 다목적 최적 설계를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 실험계획법을 이용하여 평가특성치와 설계변수의 상관관계를 분산분석을 이용하여 근사 추정식인 다항식으로 나타냄으로써 이 식을 중심으로 실용성이 있는 다목적 최적설계의 전개와 수행이 가능하였다.

2) 로우 컨트롤 암의 목적함수에 대한 근사 추정식에서 중량과 처짐은 수리적 모형식과 해석값이 거의 동일한 결과를 나타내었고, 응력의 경우는 중량과 처짐에 비해 비교적 많은 오차가 발생하였으며, 이것은 인자 수준의 범위가 적절하지 못했기 때문인 것으로 판단된다.

3) 로우 컨트롤 암의 재질이 S45C에서 알루미늄으로 변경되었을 경우 초기 모델보다 중량이 30%의 경량화가 되고도, 허용응력과 처짐을 만족하는 암의 건전성이 확보된 모델을 얻을 수 있었다.

4) 다목적 최적설계를 수행함에 있어서 실험계획법에 의한 설계변수의 각 수준의 조합 이외의 최적해도 SQP를 사용하여 구할 수 있다.

5) 효율적인 다목적 최적설계를 수행하기 위해서 통계적 방법, 수리적 방법, 구조해석을 하나의 설계과정으로 모듈화 한다면, 자동화 설계가 가능 할 것으로 보인다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행하고 경상남도에서 추진하는 중기거점 지역특화사업(과제명: 자동차 조향·현가 Module의 고강도 경량화 제조기술 개발)에 의하여 연구가 수행되었습니다. 연구에 많은 도움을 주신 (주)센트랄 및 관계자 분들께 감사드립니다.

## References

- 1) S. I. Song, K. J. Bae, K. H. Lee, 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. C. Park, D. P. Yun, G. J. Han, M. H. Bae, D. B. Jin, B. J. Lee, "Stress Analysis of Lower Arm for Change of Section Shape(I)," Transactions of KSAE, Vol.6, No.1, pp.99-107, 1998.
- 3) A. Stensson, C. Asplund, L. Karlsson, "The Nonlinear Behavior of a Macpherson Strut Wheel Suspension," Vehicle System Dynamics, Vol.23, pp.85-106, 1994.
- 4) R. A. Wehage, N. C. Barman, E. J. Haug, "Design Sensitivity Analysis of Planer Mechanism and Machine Dynamic," Trans. ASME, Vol. 103, pp.560-570, 1981.
- 5) R. A. Wehage, E. J. Haug, N. K. Mani, "Design Sensitivity Analysis of Large-Scale Constrained Dynamic Mechanical Systems," ASME J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol.106, pp.156-162, 1984.
- 6) J. B. Lee, B. C. Lee, "Multi-objective Optimization of Fuzzy System using Membership Function Defined by Normed Method," Transaction of the KSME, Vol.17, No.8, pp.1898-1909, 1993.
- 7) W. Chen, J. K. Allen, K. N. Mavris, F. Mistree, "A Concept Exploration Method for Determining Robust Top-Level Specifications," Engineering Optimization, Vol.26, pp.137-158, 1996.
- 8) W. Chen, J. K. Allen, K. L. Tsui, 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.
- 9) S. H. Baek, D. W. Lee, K. Y. Lee, S. S. Cho, W. S. Joo, "Application of Sequential Quadratic Programming on Multi-objective Optimization using the Stochastic Method," Proceedings of the KSME 2002 Spring Annual Meeting, pp.954-961, 2002.
- 10) Y. C. Park, N. S. Park, D. H. Lee, 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.
- 11) YU Qiang, Y. Hideoki, Y. Takeshi, S. Masaki, M. Keiichi, "Multi Objective Optimization of Reinforced Members for Crash Safety Design of Automobiles," JSME(A), Vol.66, No.641, pp.1-6, 2000.
- 12) Y. C. Park, D. P. Yun, S. C. Hue, D. B. Jin, B. J. Lee, "The Study of Safety Evaluation of Improvement on Lower Arm (II)," Transactions of KSAE, Vol.6, No.3, pp.18-25, 1998.
- 13) SPSS Base 7.5 for Windows User's Guide, SPSS Inc, Chicago IL., 1997.
- 14) J. M. Lim, G. J. Park, "Design Recommendations of the Occupant Protection Systems Using Orthogonal Arrays," Transactions of KSAE, Vol.7, No.8, pp.208-215, 1999.