

## 다구찌 최적화 방법을 이용한 단판형 로어암 개발

오승택<sup>1</sup>· 이두환<sup>1</sup>· 한도석<sup>1</sup>· 장용민<sup>2</sup>· 김대용<sup>#</sup>

### Development of One-Piece Lower Control Arm Based on Taguchi Optimization Method

Seung Taik Oh, Doo Hwan Lee, Do Suck Han, Yong Min Jang, Daeyong Kim

(Received October 13, 2008)

#### Abstract

As one way of cost innovation and weight saving of the automobile, the one-piece typed lower control arm was developed for the purpose of replacing the box typed lower control arm. In order to overcome less buckling strength of the one-piece typed lower control arm, the design parameters such as the high strength steel grade, the thickness and the shape of main panel were optimized based on Taguchi method.

**Key Words :** Lower Control Arm, Taguchi Method, High Strength Steel

#### 1. 서 론

자동차 업계는 갈수록 가혹해지는 환경법규에 대응하기 위해 자동차 부품의 경량화를 위한 노력을 지속하고 있으며, 그 일환으로 현가 부품에 540~590MPa 급 고강도 열연 강판의 사용을 점차 늘려가고 있는 추세이다. 현가 부품의 20%의 경량화는 차체 중량의 10% 경량화 효과를 얻을 수 있다고 알려져 있어[1] 현가 부품의 경량화는 그 중요성이 크다고 할 수 있다. 또한 각국의 자동차 업체들은 서로 간의 치열한 경쟁 속에서 생존하기 위하여 원가절감을 위한 혁신적인 아이디어 도출에 끊임없는 노력함으로써 수익성 향상을 꾀하고 있다.

전륜 로어 컨트롤 암(이하 로어암)은 엔진 서브 프레임과 너클을 불 조인트 및 부숴로 연결하여 현가장치의 구조를 결정하는 주요 부품으로, 타이어의 안쪽에 위치하여 노면으로부터 입력되는 하중을 차체에 전달하고 휠, 타이어, 제동장치 등을

차체에 연결하여 지지하는 역할을 담당한다.

현재 적용중인 로어암들은 제조공법에 따라 Table 1과 같이 분류할 수 있는데, 강판을 프레스 가공한 후 폐단면을 가지는 박스형태로 용접하여 제작한 로어암(closed section, two piece)이 가장 일반적으로 사용되고 있다. 이는 그 제작이 용이하고 폐단면 구조로 인한 강성과 강도가 우수한 장점을 갖기 때문이다. 그러나 용접 중 열변형에 의한 내구 특성 저하, 폐단면 형상에 의한 내부 도장 어려움 등의 단점을 수반한다.

최근 해외 중소형 차종을 중심으로 폐단면을 갖는 박스형 로어암을 개단면 형상을 갖는 단판형 로어암[2]으로 대체하여 적용하는 사례가 증가하고 있는 추세이다. 단판형 로어암은 박스형 로어암 대비 강성 및 강도에는 불리하나 용접 라인의 대폭 축소로 내구 품질이 향상되고 내부 도장 문제가 전혀 없을 뿐 아니라, 경량화 및 원가절감을 동시에 이를 수 있는 장점을 갖고 있다. 그러나 단판형 로

1. 현대자동차 금속재료연구팀

2. (주)화신 설계팀

# 교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소 소성용·용연구그룹,  
E-mail: daeyong@kims.re.kr

Table 1 Examples of lower control arms

Case	Material / Process	Type	Characteristics			
			Rigidity / Strength	Paintability	Weight	Cost
	Steel Sheet / Stamping	Close Section (Box Type) Two Piece	○	×	×	△
	Steel Sheet / Stamping	Open Section Two Piece	○	○	△	△
	Steel Sheet / Stamping	Open Section One Piece	×	○	○	○
	Iron / Forging	One Piece	○	○	×	△
	Aluminum / Cast or Forging	One Piece	△	○	○	×

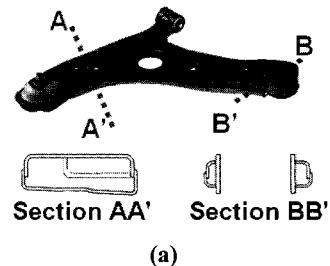
어암을 성공적으로 개발하기 위해서는 박스형 로어암 대비 불리한 강성과 강도에 대한 단점을 극복하기 위한 기술적인 대책이 필요한데, 본 연구에서는 고강도 열연 강판을 적용하고 다구찌 방법을 통하여 소재 등급 및 두께 그리고 주요 부위 형상 등의 설계 인자들을 최적화 함으로써 해결하였다.

자동차 업체의 연구 개발 부문, 특히 설계 분야에서 사용되는 DFSS(design for six sigma) 프로세스 내에서는 설계 최적화를 위하여 다구찌 방법이 주로 사용되고 있다. 다구찌 방법은 기존의 실험 계획법에 노이즈인자 개념을 추가 도입하여 제품의 성능에 변동을 일으키는 외부 환경 요인인 노이즈에 둔감하면서 요구되는 성능을 만족하는 최적 설계 사양을 찾는 강건 설계 방법이다.

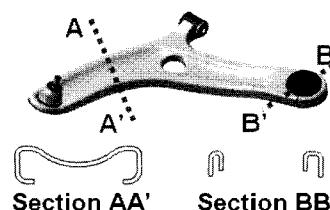
본 논문에서는 다구찌 방법을 통한 설계 인자들의 최적 선정 과정에 초점을 맞추어 고강도 열연 강판을 적용한 단판형 로어암의 개발 과정을 설명하였다.

## 2. 개념 개발

브레이크 스토퍼링, 경쟁사 벤치마킹 및 특히 분석 등의 개념 개발 과정을 거쳐 기존의 폐단면인 박



(a)



(b)

Fig. 1 Conceptual design (a) box type and (b) one piece type

스형 로어암과 레이아웃은 동일하게 유지하면서 개단면을 갖는 단판형 로어암으로 대체하기 위한 개념 설계 안을 도출하였다. Fig. 1은 기존의 박스형 로어암과 단판형 로어암을 보여준다. 주요 암

Table 2 Comparison of material properties

Materials	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	HER (%)
PH	477	571	27	83.5
FB	519	605	26	99.9
DP	417	643	28	57.8

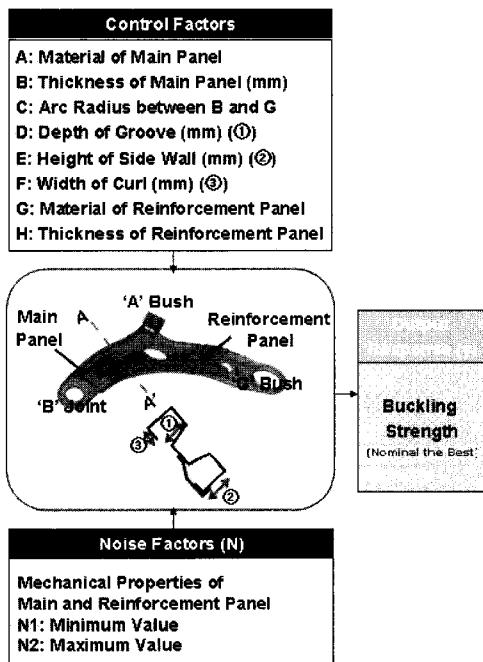
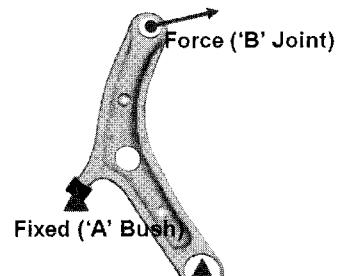


Fig. 2 Parametric diagram

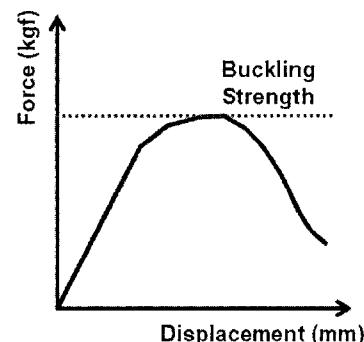
부위(AA'단면)는 기존 박스형 로어암이 세 개의 판(상, 하판과 보강판)으로 구성된 것을 하나의 판으로 변경하였으며, 부숴 부위(BB'단면)는 기존 박스형 로어암이 파이프 용접으로 설계된 것을 메인 판에 베링(burring) 공정을 추가하는 방식으로 변경하였다.

### 3. 소재 선정

개단면의 단판형 로어암은 폐단면의 박스형 로어암 보다 비틀림 강성 및 좌굴 강도가 취약하므로 이를 극복하기 위해서 기존의 박스형 로어암에서 사용되던 메인판의 370MPa급 열연 강판 소재를 540~590MPa급 소재로 대체하였다. 단판형 로어암에 540~590MPa급 소재를 적용하기 위해서는 특히 암 모서리부의 플랜징 공정과 부숴 장착



(a)



(b)

Fig. 3 (a) Boundary condition and (b) definition of buckling strength in analysis for output response

부의 베링 공정에서의 성형성을 확보가 필수적이이다. 이를 위해서는 소재의 구멍확장성이 우수한 소재가 우선적으로 고려되어야 하는데 일반적으로 구멍확장성은 소재의 HER (hole expansion ratio) 값으로 유추 가능하다[3]. Table 2에 정리된 대로 590MPa 급의 유사한 강도 가지는 강종들을 검토하여 그 중에서 HER (hole expansion ratio)이 우수한 FB 강종이 로어암 제작을 위하여 선정되었다.

### 4. 형상 최적화

#### 4.1 최적화 방법

개념 설계된 단판형 로어암의 상세 최적화 설계를 위해서 다구찌 방법이 사용되었다. Fig. 2는 다구찌 방법에서 최적화 전략인 p-다이어그램을 보여준다.

상세 설계를 위한 출력인자(y)로는 기존 박스형 로어암 대비 취약한 단판형 로어암의 강도를 최

적화하기 위한 목적으로 로어암의 좌굴강도(Fig. 3(b))가 선정되었다. 로어암의 좌굴강도는 Fig. 3(a)와 같은 경계조건에서 좌굴 해석 수행을 통하여 얻어졌는데, 해석을 위해서는 범용 프로그램인 ABAQUS[4]가 사용되었다. 최적화 특성은 좌굴 강도 4G(G: 차량 및 승객 중량을 고려하여 로어 암에 가해지는 단위 하중)에 안전율 10%를 고려하여 2084kgf을 목표값으로 삼는 망목 특성으로 하였다. 다구찌 방법의 망목 특성에서 사용된 S/N 비(signal to noise ratio)는 다음과 같이 정의 된다. 노이즈 인자  $n$ 개에 대한 출력인자  $y_i$  ( $i=1 \sim n$ )에 대해서,

$$S/N (\text{dB}) = 10 \log_{10} \frac{\bar{y}^2}{\sigma^2} \quad (1)$$

$$\text{여기서, } \bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} \text{이고 } \sigma^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \text{이다.}$$

설계 인자(또는 제어 인자, control factor)로는 소재 등급 및 두께 그리고 주요 부위 형상 등을 선정하였다. 원칙적으로 단판형 로어암은 하나의 메인판으로 구성되는 것이 바람직하나, 향후 설계 변경에 따른 대응을 신속하기 위하여 설계인자로 보강판의 소재 등급과 두께도 포함시켰다. 이때 보강판의 적용 여부는 최적화 결과로서 판정될 수 있도록 하였다. 각 제어 인자의 수준(level)은 기존의 박스형 로어암을 참조로 하여 Table 3과 같이 설정하였다. A와 C인자는 2수준, B인자와 D~H인자는 3수준으로 선정하여, 최적화 실험을 위하여  $L_{18}(2^13^7)$  직교표를 사용하되 C인자는 의인자로 처리하였다.

노이즈 인자는 메인판과 보강판 소재의 제조산포로 산정하였다. 납품되는 소재에 대한 1년 간의

Table 3 Levels of control factors (unit: mm)

Control Factor	Level 1	Level 2	Level 3
A	FB540	FB590	-
B	2.9	3.2	3.6
C	205	230	-
D	12	17	23
E	20	25	30
F	0	15	30
G	SAPH440	FB540	FB590
H	0.0	1.3	2.6

Table 4 Noise factors (unit: MPa)

Material	N1 (YS, TS)	N2 (YS, TS)
SAPH440	290, 450	351, 512
FB540	414, 547	453, 613
FB590	460, 598	489, 655

물성 산포 정보로부터 노이즈 수준을 선정하였다. 실제 출력반응을 얻기 위한 해석에서는 노이즈 수준에 대한 전(全) 영역의 유동곡선이 사용되었으나 Table 4에 항복응력과 인장강도만을 대표적으로 나타내었다.

#### 4.2 최적화 결과

$L_{18}(2^13^7)$  직교표에 근거하여 각 설계안에 대하여 수행한 노이즈 별 해석 결과가 Table 5에 정리되었다. 그리고 직교표 결과를 바탕으로 계산된 각 제어인자에 대한 S/N 비와 평균값의 반응 그래프를 Fig. 4에 나타내었다. 일반적으로 다구찌 방법에서 망목 특성의 경우 (1) S/N을 최적화 (2) 평균값을 목표값으로 조정 (3) 경량화 및 제조 원가 등의 효과를 고려하여 최적 수준을 타협 선택(trade off)하는 순서로 최적 설계인자를 선정하게 되는데, 본 연구에서도 같은 방식으로 최적사양을 선정하였으며 최종적으로 얻은 최적사양을 Fig. 4에 도시하고 Table 6에 정리하였다. 단판형 로어암 개발 취지에 맞게 최적 설계사양은 보강판이 없

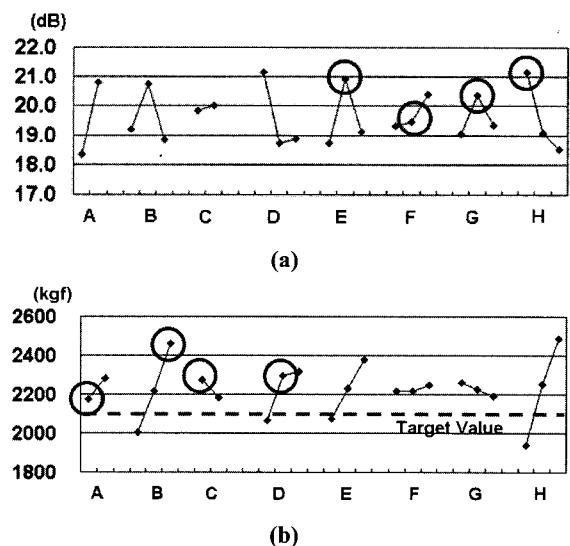


Fig. 4 Selection of the optimum parameter based on  
(a) S/N ratio (b) mean value in response graph

Table 5 Result of L18 orthogonal matrix

Run NO.	A	B	C	D	E	F	G	H	N1	N2	S/N	MEAN
L1	1	1	1	1	1	1	1	1	1395	1626	9.3	1510
L2	1	1	2	2	2	2	2	2	1821	2159	18.4	1990
L3	1	1	1'	3	3	3	3	3	2275	2697	18.4	2486
L4	1	2	1	1	2	2	3	3	2137	2514	18.8	2325
L5	1	2	2	2	3	3	1	1	1900	2244	18.6	2072
L6	1	2	1'	3	1	1	2	2	1950	2310	18.5	2130
L7	1	3	1	2	1	3	2	3	2325	2938	15.7	2631
L8	1	3	2	3	2	1	3	1	1855	2181	18.8	2018
L9	1	3	1'	1	3	2	1	2	2190	2585	18.6	2387
L10	2	1	1	3	3	2	2	1	1896	2206	19.4	2051
L11	2	1	2	1	1	3	3	2	1509	1741	9.9	1625
L12	2	1	1'	2	2	1	1	3	2192	2542	19.6	2367
L13	2	2	1	2	3	1	3	2	2360	2736	19.6	2548
L14	2	2	2	3	1	2	1	3	2189	2586	18.6	2387
L15	2	2	1'	1	2	3	2	1	1791	1870	30.3	1830
L16	2	3	1	3	2	3	1	2	2631	3058	19.5	2844
L17	2	3	2	1	3	1	2	3	2530	2917	19.9	2723
L18	2	3	1'	2	1	2	3	1	2007	2298	20.4	2152
T (average)									-	-	19.6	2227

어도 되는 것으로 판정되었다.

반응 그래프로부터 얻은 최적사양에 대하여 요구되는 수준의 값을 갖는지 S/N비와 평균값에 대한 추정값( $\eta$ )을 계산하고, 실제 최적 설계에 대해 좌굴 해석을 수행하여 그 값을 확인, 검증하였다. 아울러 다구찌 방법에 의한 최적사양 선정 방법의 효과를 산출하기 위해서 기존의 박스형 로어암의 설계 인자를 근거로 전문가가 최적이라고 판단하여 선정한 초기사양과 비교하였다. 초기사양과 최적사양에 대한 추정값은 직교표의 데이터를 바탕으로 다음과 같은 선형식을 이용하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} \eta_{initial} (\text{S/N or Mean}) &= A1 + B3 + C1 + D2 \\ &+ E1 + F3 + G2 + H2 - 7T(\text{S/N or MEAN}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \eta_{optimum} (\text{S/N or Mean}) &= A1 + B3 + C1 + D2 \\ &+ E2 + F2 + G2 + H1 - 7T(\text{S/N or MEAN}) \end{aligned} \quad (3)$$

초기사양과 최적사양에 대한 추정값과 확인값은 Table 7에서 비교되었다. 추정값과 확인값이 비

교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있는데, 이는 다구찌 방법에 의해 설정된 최적 설계사양이 신뢰할 수 있다는 것을 보여주는 것이다. 또한 초기사양과 비교하였을 때 최적사양의 S/N 비가 우세하고 평균값도 목표값에 더 근접한 결과를 얻어 원하는 대로 최적화가 이루어 졌음을 확인할 수 있었다. 이는 초기사양과 최적사양의 좌굴해석 결과를 도시한 Fig. 5을 통해서도 확인할 수 있다.

Table 6 Control factors for initial and optimum design

Control Factor	Initial		Optimum	
	Level	Value	Level	Value
A	1	FB540	1	FB540
B	3	3.6	3	3.6
C	1	205	1	205
D	2	17	2	17
E	1	20	2	25
F	3	30	2	15
G	2	FB540	2	FB540
H	2	1.3	1	0.0

**Table 7 Confirmation analysis**

	Estimation		Confirmation	
	S/N (dB)	Mean	S/N (dB)	Mean
Initial	16.1	2458	15.8	2468
Optimum	20.6	2221	19.5	2072
Gain	4.5	-	3.7	-

## 5. 부품 제작 및 평가

다구찌 방법을 통한 최적화를 수행하여 얻은 최적 설계 사양에 대하여 성형해석을 통하여 제품 성형 가능성을 확인한 후 제품을 제작하였다 (Fig. 6). 최종 제작된 제품을 좌굴 시험한 결과 좌굴 강도를 2011kgf 얻어 요구되는 성능을 만족하였고, 기타 내구 시험 및 도장성 등의 성능 시험 조건을 만족하였다.

일련의 개발 과정을 통하여 단판형 로어암 개발함으로써 기존 박스형 로어암 대비 경량화 7% 및 원가 절감 10%의 효과를 얻을 수 있었다.

## 6. 결 론

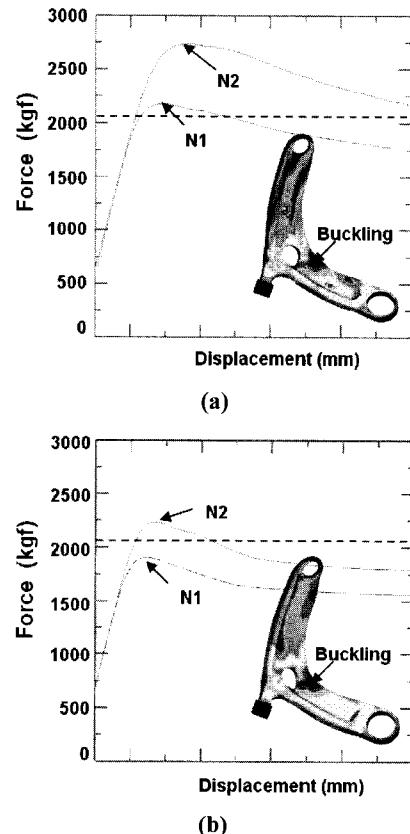
자동차의 경량화 및 원가절감 목적으로 로어암을 박스형에서 단판형으로 대체 개발하였다. 단판형으로 변경되면서 취약해진 좌굴 강도에 대한 요구 조건을 만족시키기 위한 노력으로, 설계 인자 선정에 다구찌 최적화 방법을 이용하였다. 좌굴 강도를 망목 특성으로 하는 출력반응에 대하여 소재의 강도 등급 및 두께, 로어암 주요 부위에 대한 형상 치수 등의 설계 인자를 최적화하여 로어암을 개발한 결과는 다음과 같다.

(1) 요구 좌굴 강도를 만족하면서도 과도 설계를 회피하여, 경량화 7% 및 원가 절감 10%의 효과를 얻었다.

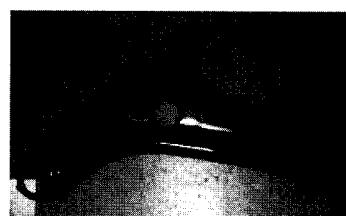
(2) S/N비 3.7dB 이득만큼 소재 산포에 강건한 설계가 이루어 졌다.

## 참 고 문 헌

- [1] Y. N. Kwon, Y. S. Lee, J. H. Lee, 2006, Processing comparison for fabrication of Al control arm, Transactions of Materials Processing, Vol. 15, pp. 490~495.



**Fig. 5 Force vs. displacement profile in buckling analysis for (a) initial (b) optimum design**



**Fig. 6 Final shape of one piece lower control arm**

- [2] Y. Kato, K. Imaizumi, 1999, Suspension arm, US Patent No. 5992867.  
[3] X. M. Chen, P. M. McKune, D. G. Prince, 2003, Automotive applications of stretch flange high strength steel, SAE Technical Report 2003-01-0690.  
[4] ABAQUS, 2005. User's manual for version 6.5, HSK Inc.