다구찌 방법을 활용한 Rear Center-Hinge Bracket 강건 설계

정 세 빈^{*1)} · 김 민 호²⁾

한국GM Mini/Compact and Mid Seat Engineering Team¹⁾ · 한국GM Quality Tools Team²⁾

Robust Rear Center-Hinge Bracket Optimization Based on Taguchi Method

Sebin Jung^{*1)} · Minh Kim²⁾

¹⁾Interior Engineering Division, General Motors Korea, 233 Bupyeong-daero, Bupyeong-gu, Incheon 403-714, Korea

²⁾Validation & Engineering Quality Division, General Motors Korea, 233 Bupyeong-daero, Bupyeong-gu, Incheon 403-714, Korea

(Received 31 October 2013 / Revised 27 January 2014 / Accepted 21 February 2014)

Abstract : The rear center-hinge bracket is designed for supporting and folding the rear-seat backrest. This bracket needs to be strong enough to be able to rigidly hold the rear-seat backrest and to withstand luggage loads from the car trunk that are generated when a vehicle is driving on the roads. Particularly, current accident studies report that many serious occupant injuries occurred when the rear-seat back easily folded inward toward the car interior, driven by the luggage loads in the trunk. Given this fact, the robust design of the rear center-hinge bracket that mainly supports the rear backrest has become more important for providing customer safety and preventing high warranty and durability problems. However, none of the studies have emphasized its significant role and considered its robust optimization. Therefore, this paper presents how the hinge-bracket design is optimized based on an application of the finite-element method coupled with the parameter design using Taguchi's design experiment. Finally, Taguchi method's application optimizes a robust center-hinge bracket that shows more rigid performance although it has lighter weight and thinner thickness.

Key words : Center-hinge bracket(센터 힙지 브래킷), Robust optimization(강건 최적화), Taguchi's method(다구찌 방법론), Noise factor(노이즈 인자), Control factor(제어 인자), Design of experiments(실험계획법)

Nomenclature

σ : sigma - a measure of dispersion in a frequency distribution, equal to the square root of the mean of the squares of the deviations from the arithmetic mean of the distribution

Subscripts

FEM : finite element method

STB : small-the-better

DOE : design of experiments

TRL : transport research laboratory

1. 서론

후방 센터 힙지 브래킷(Rear center hinge bracket)은 차량 뒷좌석 등받이의 중심에 위치하여 양쪽에 나란히 위치해 있는 등받이를 지지해주는 역할을 하는 중요한 차량 뒷좌석 부품이다. 그 등받이를 지지해주는 후방 센터 힙지 브래킷(Rear center hinge bracket)이 차량 뒷좌석과 관련된 심각한 사고들이 이슈화 되면서 점점 중요하게 인식되고 있다. 현재

*A part of this paper was presented at the KSAE 2013 Annual Conference and Exhibition

*Corresponding author, E-mail: sebin.jung@gm.com

일어나는 사고들에 대한 연구결과에 의하면 강건하지 못한 뒷좌석 등받이가 차량 트렁크에 있는 수화물에 의해 쉽게 부서지고, 심지어 그 수화물들이 앞으로 튀어 나와 뒷좌석에 앉아있는 사람들은 물론, 앞좌석의 운전자에게도 심각한 상해를 입히고 있다는 것이다.¹⁾

또한, 영국의 교통 연구소는 “뒷좌석 등받이가 바로 뒤에 위치해 있는 차량 트렁크 안 수하물의 무게를 잘 버티지 못하고 앞으로 접힘으로써, 뒷좌석의 유아용 시트에 타고 있는 아이들이 심각한 부상을 입는 사고가 해마다 늘어나고 있다”고 덧붙였다.¹⁾ 이런 현상들은 차량 시트 시스템의 중요 기능인 안정성과 편안함에 위배되며, 빠른 속도에서의 충격에서도 강건하게 버틸 수 있는 차량 뒷좌석 시스템 개발의 필요하게 되었다.²⁾

따라서 본 논문에서는 비록 작지만 차량 뒷좌석 등받이를 가운데서 지지해주는 중요한 역할을 하는 후방 센터 힌지 브래킷(Rear center hinge bracket)을 다구찌(Taguchi) 박사의 강건 설계방법론을 적용하여 강건 최적화 하도록 하겠다. 또한, 이 브래킷이 강건 최적 설계 과정을 통해 어떻게 경량화와 비용 절감이 되면서 강건한 디자인이 되어 가는 지에 대한 자세한 과정을 가이드라인과 함께 제시하도록 하겠다.

2. 다구찌 강건최적화

겐이치 다구찌 박사의 강건 최적화는 엔지니어링 생산성을 크게 향상시킬 수 있는 효과적인 방법론이다.³⁾ 특히, 강건 최적화는 제품 또는 공정의 기본적인 주요 기능을 개선하는 데 초점을 맞추고 있기 때문에 엔지니어링을 하는 동시에 자유도가 높은 설계를 가능하게 한다.³⁾ 또한, 제품의 가격을 저감할 수 있는 가장 강력한 방법론이며, 품질을 향상시키는 동시에 개발 기간을 단축시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.⁴⁾

따라서, 이번 장에서는 다구찌 강건 최적화 방법론의 단계인 범위 정의, 이상기능 선정, 신호 및 노이즈인자 선정, 제어인자 선정, 실험계획 설정, 데이터 분석 그리고 검증 단계를 후방 센터 힌지 브래킷(Rear center hinge bracket) 강건 설계를 위해 적용해 보도록 하겠다.

2.1 범위 정의

후방 센터 힌지브래킷(Rear center hinge bracket)의 설계목적은 뒷좌석의 등받이를 문제없이 강건하게 지지해 주는데 있다. 따라서 강건성에 영향을 주는 주요 범위를 선정하여 체계적인 설계를 계획하는 것이 중요하다. 첸 왕(Chen Wang)과 팡 라우(Fang Liao)의 말에 따르면, “브래킷(Bracket)의 두께 증가 없이 브래킷(Bracket)은 비드(Bead)의 배치만으로 강화시킬 수 있기에 원가 절감이 가능하며, 설치 공간 때문에 대부분의 브래킷(Bracket)의 형상은 복잡하기에, 각 브래킷(Bracket) 비드(Bead)의 배치 방법은 균일하지 않다.”⁵⁾라고 한다. 이에 비드(Bead)의 설계를 다르게 함으로써, 브래킷(Bracket) 성능의 강건성을 향상시킬 수 있다 라고 보고, 비드(Bead)를 주요 범위로 선정하였다(Fig. 1).

브래킷(Bracket)의 비드(Bead) 형상을 개발하기 위해, 엔지니어링(Engineering)에서 자주 사용되고 있는 정량적 선정 기법인 푸 개념 선정(Pugh Concept Selection) 과정이 사용되었다. 이 개념 선정 과정에는 현재 비드 디자인 콘셉트 외에 다섯 가지의 다른 비드 디자인 콘셉트들이 제시되었고(Table 1), 최종적으로 땅콩형상, 사각형상, 그리고 다이아몬드 형상의 비드(Bead)가 최적 비드 디자인으로 선정되었다(Table 2).

Fig. 1 Current rear center hinge bracket design

2.2 이상 기능

브래킷 강성을 위한 범위와 디자인이 결정된 뒤에는, 새로이 디자인된 브래킷이 처음에 예측했던 데로 얼마나 강건하게 되었는지 측정하기 위한 이상 기능 설정 단계를 거치게 된다. 이 센터 힌지브래킷(Center Hinge-Bracket)에서는 강성 및 강도에 높

Table 1 Pugh matrix

Criteria \ Concept	0	1	2	3	4	5
Minimize modification	D A T U M	-	-	-	S	S
Productivity		-	-	-	S	+
Low Mass		-	-	-	+	+
Low Piece Cost		-	-	-	+	+
Functional Performance		+	-	-	+	+
$\Sigma+$		1	0	0	3	4
$\Sigma-$		4	5	5	0	0
ΣS		1	1	1	3	2

Concept	0	1	2	3	4	5
Concept Feature						
Concept Description	Current bead design shape	Center & bridge bead design changes 1	Center & bridge bead design changes 2	Center & bridge bead design changes 3	Bending bead design change 1: Rectangle bead shape	Bending bead design change 2: Diamond bead shape

Table 2 Selected bead concepts from Pugh matrix

Best Cases	Major Strengths	Major Weaknesses	Design
Concept 5 (Diamond Bead)	1) Low mass and cost 2) Functional performance 3) Productivity	None	
Concept 4 (Rectangle Bead)	1) Low mass and cost 2) Functional performance	None	
Concept 0 (Current Bead)	1) Functional performance	1) Functional Performance	

은 수준의 요구조건을 만족해야 하기 때문에, 처짐이나 응력과 같은 반응 값들은 작을수록 좋으며, 특정 신호 값이 대상에 적용되었을 때 이상적인 출력 값은 “0”에 가까울수록 좋다는 망소특성(STB: Smaller-The-Better)이 사용되었다.³⁾ 또한, 특정한 힘 (Force)이 브래킷(Bracket)에 전달되면, 그 힘을 가능

Fig. 2 Ideal function for the bracket optimization

한 견뎌낼 수 있어야 하는 이상기능을 위해서 처짐 및 응력값을 정확하게 예측할 수 있는 유한요소해석(FEA)을 사용하였다. Fig. 2에서는 특정한 힘 (Force)과 응력(Stress)의 관계를 보여주고 있다.

2.3 노이즈 인자 선정

강건 최적화의 목적은, 제품 사용 중 환경의 변화와 제조 산포 및 구성품의 노화 등의 노이즈 인자들로부터 제품의 성능이 민감하지 않도록 만드는 것이며, 이러한 노이즈 인자들은 예상하지 못한 결과 혹은 예측 값과 잘못된 출력 값을 나타나게 만든다.⁶⁾ 이 후방 센터 힌지 브래킷에서는 비드(Bead) 깊이의 허용공차가 노이즈 인자로 선정되었다(Fig. 3). 이는 비드(Bead)의 깊이는 제조 산포로 인하여 일정하지 않은 값을 갖게 되는 경향이 있으며, 일정하지 않은 비드(Bead)의 깊이는 브래킷(Bracket) 성능에 영향을 미치는 주요인이 되기 때문이다. 일반적으로 노이즈 인자는 아래의 Fig. 4와 같이 두 개의 수준

Fig. 3 Noise factor: Bead depth

Fig. 4 Noise factor strategy

으로 선정이 되는데, 하나는 낮은 출력 값을 나타내며 (N1), 다른 하나는 높은 출력 값을 나타낸다(N2).⁷⁾ 비드의 깊이는 깊을수록 높은 출력 값을 나타내는 경향이 있기 때문에, 노이즈 1(악조건)으로 공차 -0.2mm, 그리고 노이즈 2(호조건)으로 공차 0mm가 적용되었다.

2.4 제어 인자 선정

제어인자는 엔지니어가 제품의 성능을 향상시키기 위해 변경할 수 있는 변수들이다.⁴⁾ 또한 강건 최적화를 위한 제어인자들은 신호와 응답 사이의 관계에 영향을 미칠 것으로 예상되는 설계 변수들이다.⁷⁾

이번 브래킷(Bracket) 최적화에서는 두께(Thickness), 재료(Material), 비드(Bead)면적, 그리고 비드(Bead)깊이 등 4개의 제어인자가 선정되었으며, 각각의 제어인자는 아래의 Table 3과 같이 3수준으로 설정되었다.

Table 3 Four control factors for the center-hinge bracket

Thickness	Material		Bead Shape		Bead Depth	
1	3T	1	CR 300LA STANDARD	1	A (Peanut: Baseline)	1
2	2.6T	2	CR 270LA STANDARD	2	B (Rectangle)	2
3	2T	3	CR 340LA STANDARD	3	C (Diamond)	3

2.5 실험계획법

실험계획법(Design of experiments)이란, 다양한 인자(변수)들과 그 인자들의 출력 값들 사이에서의 관계를 찾는 것을 의미한다. 그리고 그것들의 관계들을 정확하고 효율적인 공식으로써 나타낸다.⁸⁾ 이 효율적인 공식으로 이용하여 각 제어인자들의 효과를 분리하여 나타낼 수 있으며, 적은 조합을 선택하여 테스트를 진행하는 실험계획법 중의 하나가 바로 직교표이다.⁷⁾

이 센터 힌지 브래킷을 위해서는 실험계획법의 L9 직교표(Table 4)를 사용하였고, 출력 값을 평가하기 위해 유한요소해석(FEA)을 진행하였다.

유한요소해석 시, 각기 다른 성질의 조합으로 이루어진 각각의 Run에 모두 동일한 힘을 가하였고, 힘이 가해지는 위치는 후방 센터 힌지 브래킷(Rear

Table 4 Orthogonal Array L9 (3⁴)

Run	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Fig. 5 FEA for three bead concepts

center hinge bracket)이 뒤의 수하물로부터 충격을 받았을 때, 실제로 힘이 가해지는 부분으로 설정하였다(Fig. 5). 유한요소해석(FEA) 후 비드의 강건함을 분석하기 위해 비드 부분을 아홉 개의 구역으로 나누어, 해석 값을 얻음으로써 데이터의 정확도를 기하였다(Fig. 6). 이렇게 아홉 개의 구역으로 나누어진 해석 값들을 모아, 식 (1)을 사용하여 Graph 1과 같이 S/N비의 값과 평균값(Mean)을 추정하였다. 식 (1)을 보면 “y” 출력 값과 “σ” (시그마) 분산 값이 작

Fig. 6 FEA data for three bead concepts

$$S/N = \eta = 10 \log \left[\frac{1}{(\bar{y}^2 + \sigma_{n-1}^2)} \right]$$

식 (1) STB(Smaller The Better) S/N Ratio

Graph 1. Graph for S/N and mean values

Table 5 Best combination

	Thickness	Material	Bead Shape	Bead Depth	Run
Base	1	1	1	1	1
Optimized No.2	2	1	3	3	New

을수록 S/N비는 큰 값을 얻게 된다. 즉, 적은 산포와 작은 출력 값으로부터 높은 S/N비의 값을 얻게 되며, 이로부터 강건성을 고려할 수 있게 된다. S/N비는 높은 값과 평균값은 낮은 값에 초점을 두어, 최종적으로 선택한 최적 조합은, Table 5와 같이 다이아몬드 비드(Bead) 형상에, 두께 2.6mm를 선정하였다. Graph 1에서 제어인자 A(두께)의 1수준(3mm)이 2수준(2.6mm) 보다 좋은 출력 값을 나타내고 있지만, 2수준을 선택해도 성능을 만족하기 때문에 중량 저감의 효과를 얻기 위하여 두께가 얇은 2수준을 선정하였다.

3. 실험 및 결과

실험 계획법을 통해 최적화 된 조합들로 이루어진 후방 센터 힌지 브래킷(Rear center-hinge bracket)이 이슈화 되었던 수화물의 무게를 얼마나 강건하게 버틸 수 있는지 유한요소해석(FEA) 방법을 이용하여 확인 실험을 해보았다. 이 실험에 도입된 테스트는 수화물 침입 테스트(Luggage retention test)로 뒷좌석에 일정 길이 간격을 두고 각각 18kg 물체를 놓고 힘을 주었을 때, 얼마나 뒷좌석 등받이가 외부의 힘에 부서지지 않고 잘 버티는지, 또한 그 등받이를 지지하고 있는 후방 센터 힌지 브래킷이 강건하게 부서지지 않고, 차체와 뒷좌석 사이에서 잘 지탱하고 있는지를 이 테스트를 통해 확인할 수 있다 (Fig. 7). 또한, 전 단계의 다구찌 최적 설계 방법을 통해서 최적화된 디자인 이외에도 현재 사용하고 있는 브래킷 콘셉트가 현재 보다 얼마나 강건성 향

Fig. 7 Luggage retention test FEA

Fig. 8 FEA result: current design

Fig. 9 FEA result: optimized design

상이 진행되었는지 비교하기 위해서 이 확인 실험에 적용되었다.⁹⁾

이 확인 실험의 결과, 새롭게 최적화된 브래킷이 좋은 성과를 내었고, 브래킷의 자세한 해석 결과를 분석하였을 때에도 Fig. 8과 9에서 보이는 바와 같이 힘을 받는 곳의 응력 값도 현재 브래킷보다 적은 수치를 나타내었다. 특히, 최적화된 브래킷 콘셉트는 두께가 얇음에도 불구하고 현재 브래킷보다 더 강건한 데이터 수치를 나타내었다.

4. 결 론

이번 후방 센터 힌지 브래킷의 최적화된 강건 설계의 목적은 엔지니어링 품질 향상에 최적의 접근 방법으로 인식되고 있는 다구찌의 최적화 설계 방법론을 통하여 강건한 후방 센터 힌지 브래킷을 찾는 것이었다. 그 다구찌의 방법론을 통해 본래의 브래킷 보다 가격, 두께, 그리고 중량면에서 절감 효과를 가지면서 강건한 브래킷 디자인을 찾아내었다 (Table 6).

마지막으로, 이번 후방 센터 힌지 브래킷의 강건 최적화 설계를 통해 얻어진 결과를 바탕으로 몇 가지 가이드라인을 제시하겠다.

Table 6 Final result: current and new design

Content	Thickness	Cost	Mass
Current Bracket	3 T	445 (KRW)	297.9 (g)
New Optimized Bracket	2.6 T	405 (KRW)	259.8 (g)
Comparison	-0.4 T	-40 (KRW)	-38.1 (g)

- 1) 다이아몬드 비드(Diamond bead)는 브래킷 강건성에 도움을 준다.
- 2) 비드 면적(Bead area)의 변형 중 비드(Bead)의 깊이가 깊을수록 브래킷 강건성에 도움을 줄 수 있다.
- 3) 두께가 두꺼운 브래킷이 항상 브래킷 강건성을 보장해 주지 않으며, 오히려 비드(Bead)의 깊이와 디자인 형상들이 강건성에 더 큰 영향을 미치며, 두께가 얇은 브래킷일 지라도 비드 형상(Bead shape)과 깊이(Depth)에 따라 더 좋은 강건성을 보일 수 있다.

References

- 1) R. Vroman, P. Gloyns and J. Roberts, Testing of Rear Seat Strength in Cars, ANEC, 2012.
- 2) D. W. Shin, N. H. Kim and S. S. Lee, "Development of Seating System with GMT for ECE 17.07 Regulation," SAE International, Vol.1, No.1041, pp.1-9, 2002.
- 3) W. Wu, Taguchi Methods for Robust Design, pp.12, ASME Press, New York, 2000.
- 4) G. Taguchi, S. Chowdhury and S. Taguchi, Robust Engineering, 1st Edn., McGraw-Hill, New Jersey, 2000.
- 5) C. Wang and F. Liao, "Topography Optimization and Parametric Analysis of Bead Layout for Sheet Metal Bracket," SAE International, Vol.1, No.266, pp.1-8, 2010.
- 6) B. Assadsangabi, F. Daneshmand, N. Vahdati, M. Eghtesad and Y. Bazargan-Lari, "Optimization and Design of Disk-type MR Brakes," Int. J. Automotive Technology, Vol.12, No.6, pp.921-932, 2011.
- 7) General Motors DFSS Team, Design for Six Sigma Training Ver.13.0, General Motors Publishing, 2013.
- 8) G. Taguchi, S. Chowdhury and Y. Wu, TAGUCHI'S Quality Engineering Handbook, 1st Edn., John Wiley & Sons, New York, 2005.
- 9) Y. S. Yu, K. Z. Cho and I. B. Chyun, "Vehicle Dynamic Simulation Using a Nonlinear Finite Element Analysis Code," Int. J. Automotive Technology, Vol.6, No.1, pp.29-35, 2005.