한국소음진동공학회 2012년 춘계학술대회논문집, pp.361~366

# 위상최적설계를 이용한 차체 점용접 배치 최적화 연구

## A Study on Optimal Spot-weld Layout Design of the Car Body Structure Using Topology Optimization

김성래*·이채욱*· 김문영*· 김찬묵**·임홍재†
S. R. Kim, C. W. Lee, C. M. Kim, H. J. Yim

**Key Words** : Spot-weld(점용접), Topology Optimization(위상최적설계), Effect Analysis(효과분석)

**ABSTRACT**

In this paper, we propose the efficient technique that reduces the number of spot-welds and increases the structural rigidity by using the topology optimization technique. Eigen value analysis is used to evaluate the rigidity of the optimized model. As a first step, the topology optimization is performed to find optimal spot-weld distributions. In this study, the design objective is to maximize the weighted frequencies. The volume fractions of the weld components are used as design constraints, and also the densities of each element in the individual design space are used as design variables. And then, to consider the possibility of spot-weld failure, the contribution rate analysis was performed by using the orthogonal array method of DOE. The spot-welds in the rear panel part are reinforced according to estimation results of the contribution rate analysis. Finally, we obtained optimized spot-weld layout model which has the reduced number of spot-welds and the improved dynamic stiffness.

## 1. 서 론

점용접은 차제 조립에 일반적으로 사용되는 공정이며 박판 구조물을 효율적으로 연결시키는 일반적인 방법으로 차체의 조립 공정 속도 증가와 원가 절감에 밀접한 관련이 있다.

본 연구에서는 점용접의 배치 최적화를 통하여 차체의 동강성을 향상시키며 점용접의 개수를 줄여 공정 속도를 증가시키고, 원가를 절감할 수 있는 연구를 수행한다.

점용접 배치 최적화와 관련된 선행 연구는 10배 많은 점용접 모델을 생성하여 비틀림과 굽힘에 대한 정강성을 최대화하는 점용접 배치를 찾는 연구가 있었다[1]. 그러나 점용접의 유무와 패널의 두께를 설계변수로 설정하여 차체의 무게를 최소화하는 연구이기 때문에 점용접 최적화에 따른 효과가 상대적으로 적다는 단점이 있다. 또 점용접의 개수에 따른 강성의 변화를 분석한 연구로, 비틀림 모드와 굽힘 모드의 진동수 합을 최대화하는 점용접 치수최적화를 수행한 논문도 있었다[2]. 이 연구는 최적화된 배치를 찾기보다는 점용접의 감소에 따른 강성의 변화 정도를 보여준 연구로서, 이를 통해 확실한 최적모델을 제시하지는 못하였다. 치수최적화를 이용한 또 다른 점용접 최적설계 연구로는 점용접에 대해 민감도와 생존 횟수를 각각 평가한 연구가 있었다[3]. 그러나 점용접 개수가 수십 개인 부분 모델을 대상으로 수행되었고, 과정의 복잡성으로 인해 수천 개의 점용접을 갖는 전체 차체에 적용하기 힘들다.

따라서 본 연구에서는 차체의 동강성을 최대화하는 점용접의 배치를 찾기 위하여 차체를 차실바닥,

† 교신저자; 정회원, 국민대학교
E-mail : hjyim@kookmin.ac.kr
Tel : 02)914-8812, Fax : (02)910-5037
* 국민대 자동차공학 전문대학원
** 국민대 자동차공학 전문대학원

후방바닥, 후방, 좌측사이드, 우측사이드, 천정으로 여섯 부분으로 세분화하고 각 부분에 대한 점용접 배치 위상최적설계를 수행한다.

설계변수는 점용접의 강성밀도이며 제약조건은 기본 모델의 점용접 개수와 같은 점용접 수를 갖게 하는 체적분수의 값이다. 목적함수는 차체의 고유진동수를 최대화하는 것이다.

본 연구에서는 위와 같은 과정을 통해 기본모델 점용접 개수의 100% 모델과 90% 모델의 부분 최적화 모델을 선정하고 통합하여 전체 차체의 강성을 비교한다. 그 후 용접실패에 대한 영향을 고려하기 위해 효과 분석을 수행하고 분석은 직교배열표를 이용한 실험계획법을 통해 수행한다. 기여도가 크게 평가된 부분을 보강하여 최종적으로 더 높은 강성과 적은 수의 점용접을 갖는 차체 모델을 수립한다.

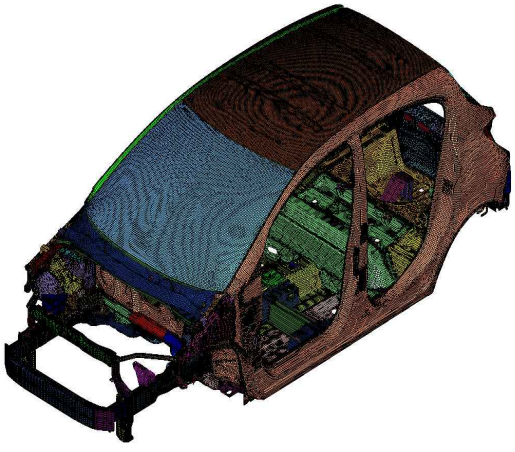
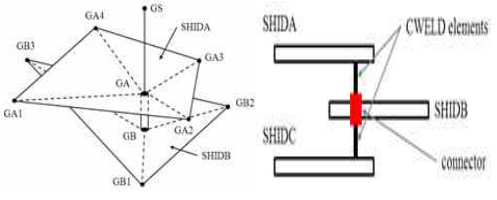


**Fig. 1** Finite elements model of body structure




(a) (b)

**Fig. 2** Illustrations of a CWELD element

**Table 1** Material properties of the spot weld element

| Properties | Values |
|---|---|
| Young's modulus | 210 GPa |
| Poisson ratio | 0.3 |
| Density | 350 Mg/m3 |

## 2. 해석모델 세분화 및 고유진동수 해석

본 연구를 위해 Fig. 1에 나타낸 차체 모델을 기본 모델로 선정하였다. 유한요소모델은 280여 개의 단품이 각각 점용접과 강체요소로 체결되어 있으며, 점용접은 CWELD 용접요소로 정의하였다. 이 용접요소는 Fig. 2와 같이 쉘 요소와 쉘 요소를 연결할 수 있는 모델링의 편의성과 해석 신뢰도가 높다는 장점이 있다[4][5]. 본 연구에서는 모든 용접요소를 CWELD요소로 모델링 하였다. 기본 모델은 4000여 개의 점용접과 5000여개의 용접요소를 가지고 있다. 점용접 너깃의 길이는 4.5mm로 정의하였고 물성치는 Table 1에 나타내었다.

작업의 편의성과 해석시간의 효율을 위하여 기본 모델을 차실바닥, 후방바닥, 후방, 좌측사이드, 우측사이드, 천정 여섯 가지로 세분화하였다. 전방은 충돌이나 좌굴 유도 등 다른 중요한 인자에 영향을 줄 수 있다고 판단되어 본 연구에서 제외시켰다. 우선적으로 목적함수인 동강성의 판단을 위하여 기본모델의 고유진동 모드해석을 수행한 결과 첫 번째 비틀림 모드의 고유진동수는 약 38Hz, 첫 번째 굽힘 모드의 고유진동수는 약 52Hz에서 나타났다.

본 연구에서는 첫 번째 비틀림 모드에 두 배의 가중치를 두고 첫 번째 굽힘 모드의 고유진동수와 첫 번째 비틀림 모드의 고유진동수를 최대화하는 연구를 수행한다.

## 3. 점용접 배치 최적설계

### 3.1 위상최적설계 이론

일반적으로 등방성의 재료특성을 가진 구조물에 대해 위상최적설계 하는 과정은 Fig. 3과 같다. 흔히

밀도법이라 불리는 이와 같은 최적설계방법은 재료의 밀도를 설계변수로 하여 위상최적설계가 진행된다. 일반적인 진행 과정은 간략하게 세단계의 과정으로 이루어져있다[6]. 과정 형상과 조건에 대한 전처리 과정에서 설계영역과 비설계영역을 지정하고 제약조건과 설계변수를 설정한다. 최적화 과정에서는 유한요소법에 의해 변위를 계산하고 반복적으로 형상의 강성을 계산하여 개선한계에서 반복을 종료한다. 또한 밀도 변수의 갱신 및 반복을 수행한다. 후처리 과정에서는 정의된 형상에 대한 재료의 최적분배를 CAD로 표현한다.

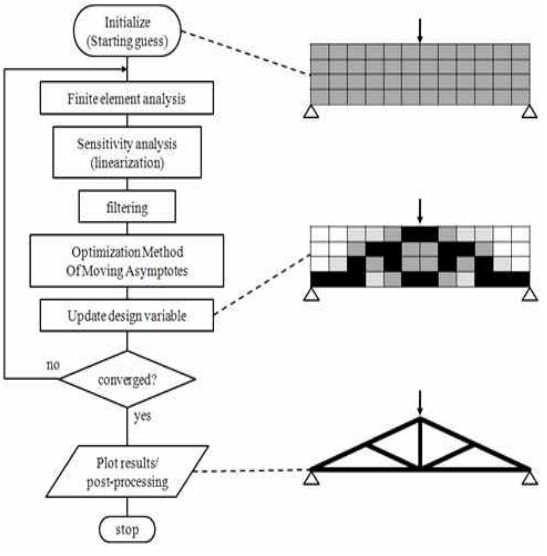



**Fig. 3** The flow of computations for topology design and the method of moving asymptotes(MMA)

**Table 2** Comparison of original and new layouts for optimization

| | | Original layout | New layout | Volume fraction Original / New |
|---|---|---|---|---|
| Center floor | Connector | 733 | 2733 | - |
| | CWELD | 889 | 3174 | 0.280 |
| Rear floor | Connector | 545 | 1348 | - |
| | CWELD | 711 | 1739 | 0.409 |
| Rear panel | Connector | 569 | 1674 | - |
| | CWELD | 696 | 1946 | 0.358 |
| Left side | Connector | 589 | 1935 | - |
| | CWELD | 834 | 2918 | 0.286 |
| Right side | Connector | 601 | 1976 | - |
| | CWELD | 844 | 3002 | 0.281 |
| Roof panel | Connector | 137 | 611 | - |
| | CWELD | 201 | 934 | 0.215 |

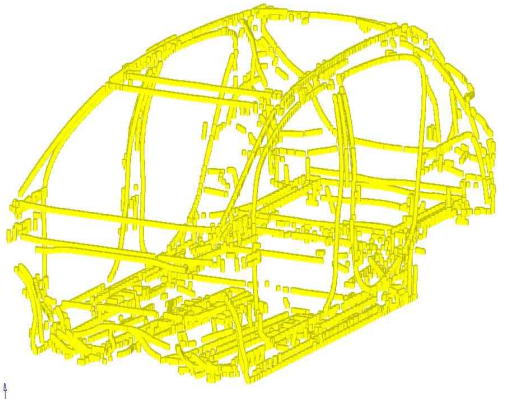


**Fig. 4** Spot-weld layout for optimization

### 3.2 설계모델 정의 및 최적설계 정식화

설계모델을 정의하기 위해서 차실바닥, 후방바닥, 후방, 좌측사이드, 우측사이드, 천정 여섯 부분으로 세분화된 모델에 대해 기본 모델의 점용접 배치를 따라 10mm 간격으로 새로운 점용접을 배치하였으며 이를 Fig. 4에 나타내었다. 새로운 점용접이 배치된 모델과 기본 배치 모델과의 점용접 수 비교를 Table 2에 나타내었다.

고유진동문제에 대한 위상최적설계를 수행하기 위해 최적설계 정식화가 필요하다. 본 연구에서는 최적설계 정식화를 바탕으로 Table 3과 같이 정식화하였다. 목적함수는 첫 번째 비틀림 모드의 고유진동수와 첫 번째 굽힘 모드의 고유진동수의 최대화이며 첫 번째 비틀림 고유진동수에 두 배의 가중치를 두도록 설정하였다. 제약조건은 체적분수의 최대값이 기본 모델의 체적분수 값 이하가 되도록 하는 것이고 설계변수는 점용접 요소의 밀도이며 이것은 하나의 용접요소가 갖는 강성에 대해 대표하는 값이라 말할 수 있기 때문에 강성밀도라 표현하였다.

연속적인 설계영역에 적용되는 최적화기법인 위상최적설계를 불연속적인 설계영역을 갖는 점용접에 적용시키기 위해서 다음과 같은 선정기준을 정립하였다. 우선 두 부재가 하나의 점용접으로 이어졌을 경우 이를 먼저 선정하고 최소 간격은 20mm이며, 최대 간격은 100mm가 되게 한다. 이 중에서 높은 강성밀도를 갖는 점용접을 먼저 선정한다.

**Table 3** The problem formulation for topology optimization

| Objective: | Constraints: | Design variables: |
|---|---|---|
| Maximize weighted frequencies (first torsion mode : 2, first bending mode : 1) | Volume fraction < G G is the rates of the number of elements in the design space, new over original layout model | The density for each element in the design space (design space is the spot weld component) |

### 3.3 최적화 결과

위와 같은 기준으로 기본 모델 점용접 개수의 90%, 100%인 모델을 생성하였고, 부분별 최적화 모델의 고유진동 모드해석을 수행하였다. 부분별 최적화 결과 후방부분과 좌측사이드, 우측사이드 부분이 전체 차체의 동강성에 미치는 영향이 상대적으로 크다는 것을 확인하였다. 또한 후방 부분은 비틀림 모드에, 좌측사이드와 우측사이드 부분은 굽힘 모드에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 부분별 최적화 모델을 기반으로 점용접의 개수가 기본 모델에 대해 100%인 모델과 90%인 모델의 전체 차체모델을 수립하고 고유모드해석을 수행한 결과 점용접의 개수가 기본모델과 동일하고 배치는 다른 모델의 첫 번째 비틀림 모드는 약 39Hz이며 첫 번째 굽힘 모드는 약 53Hz이다. 이를 통해 기본모델과 점용접의 개수가 동일하고 배치는 다른 모델은 비틀림 모드와 굽힘 모드에서 각각 약 1.5%의 강성이 증가함을 알 수 있다. 또한 90% 모델의 첫 번째 비틀림 모드는 약 38Hz, 첫 번째 굽힘 모드는 약 52Hz이다. 이 모델은 설계영역에 포함되지 않은 전방 부분이 포함된 전체 차체를 대상으로 고유모드해석을 수행하였기 때문에 실제적인 점용접 개수의 감소량은 약 8% 이다. 이를 통해 기본모델 대비 점용접의 개수가 약 8% 감소하고 비틀림 모드와 굽힘 모드의 강성이 다소 증가한 모델을 수립하였다.

## 4. 효과분석을 통한 기여도 평가

### 4.1 효과분석

일반적으로 자동화되어 있는 점용접 공정에서 전체 용접점의 1% 정도가 용접에 실패한다. 이것은 중요한 용접점에서 용접실패가 일어날 경우 최적화 모델을 선정한 후에도 차체의 강성에 영향을 줄 수 있음을 의미한다. 따라서 이러한 영향이 큰 부분을 확인하고 보강하여 용접실패 발생시에도 전체 차체의 강성을 확보할 수 있도록 해야 한다.

효과분석은 네 단계로 진행된다. 첫 번째 단계에서는 기본 모델에서 변화가 가능한 모든 설계변수를 선택하고 두 번째 단계에서는 실험계획법을 사용하여 실험점을 선택한다. 세 번째 단계에서는 생성된 실험점에 대한 해석을 수행하고 마지막 단계에서 해석조건에 영향을 주는 인자를 선별한다.

본 연구에서는 최적화된 점용접의 배치 모델의 변화가 전체 차체의 강성에 미치는 영향을 판단하기 위해 각 인자에 대한 효과 분석을 실시하였고 실험계획법을 통한 8번의 실험으로 점용접의 배치 변화가 차제 동강성에 미치는 영향을 확인하였다[7]. 실험계획을 위한 직교배열은 Taguchi법에 사용되는 $L_8(25)$ 직교배열을 사용하였다. 설계변수는 천정부분을 제외한 다섯 부분을 선정하였다. 천정부분의 경우 점용접의 개수가 적기 때문에 용접 실패가 없을 것으로 판단하여 변수에서 제외시켰다. 설계변수는 좌측부터 차실바닥, 후방바닥, 후방, 좌측, 우측 최적화모델이고 수준은 기본 모델 대비 점용접의 개수가 90%와 100%인 부분 최적화 모델을 선정하였다. Table. 4와 같이 점용접 개수가 90%인 모델을 −, 100%인 모델을 +로 표현하였다. 8개 실험에 대한 고유진동모드 해석 결과로 각 설계변수의 점용접 개수가 90%로 이루어진 실험 1의 결과값이 가장 작았고, 차실 바닥부분만 점용접의 개수가 90%인 모델로 해석을 수행한 실험 3의 첫 번째 비틀림 모드 값이 가장 높았다. 해석결과를 토대로 shainin 다변수차트[8]를 도입하여 각 설계변수의 효과를 분석한 결과 후방 부분의 점용접 배치가 차체 전체의 동강성에 미치는 영향이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 후방 부분의 용접 실패 시에 전체 차체의 동강성 확보가 힘들다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 후방 부분의 점용접 배치 보강을 통하여 용접 실패 시에도 차체 전체의 동강성을 확보할 수 있도록 최적화를 수행 한다.

**Table 4** $L_8$(25)type orthogonal array DOE table

| | DV1 | DV2 | DV3 | DV4 | DV5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | | | | |
| 1 | – | – | – | – | – |
| 2 | – | – | – | + | + |
| 3 | – | + | + | + | + |
| 4 | – | + | + | – | – |
| 5 | + | – | + | – | + |
| 6 | + | – | + | + | – |
| 7 | + | + | – | + | – |
| 8 | + | + | – | – | + |

(a) Original spot-weld

(b) Optimized spot-weld

**Fig. 4** Spot-weld layout of the B.I.W model

### 4.2 최적화 모델 선정 및 평가

앞 절에서 후방부분의 점용접 배치가 차체 전체의 동강성에 가장 많은 영향을 준다는 것을 확인하였다. 따라서 후방부분은 기본모델과 동일한 개수의 접용접을 갖고 후방부분을 제외한 나머지 부분은 기본모델의 90%의 점용접 개수를 갖는 모델을 부분 최적화 모델을 선정하였다. 최종적인 점용접 배치와 기본모델과의 비교를 Fig. 4에 나타내었으며 기본모델과 비교하여 비틀림모드와 굽힘 모드가 다소 증가하였으며 점용접의 개수는 약 7% 감소하는 효과가 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 위상최적설계를 이용한 차체의 점용접 배치 최적화를 통해 차체 전체의 동강성을 향상시키는 연구를 실시하였다. 차체를 차실바닥, 후방바닥, 후방, 좌측사이드, 우측사이드, 천정 여섯 부분으로 나누어 각 부분별로 점용접의 배치를 최적화하였고 효과분석을 통하여 용접실패를 고려한 보강방법을 적용시켰다.

차체의 점용접 배치 최적화를 위한 설계변수는 점용접의 강성밀도이고 제약조건은 기본모델과 같은 점용접 개수를 같게 하도록 하는 체적분수의 값이며 목적함수는 가중치를 적용한 복합고유진동수의 최대화이다. 위상최적설계 결과, 기본모델보다 점용접의 개수가 약 8% 감소하였고 첫 번째 비틀림모드의 고유진동수와 첫 번째 굽힘모드의 고유진동수가 다소 증가하였다.

위상최적설계를 통한 점용접 배치 최적화가 이루어진 모델을 기반으로 점용접 용접실패를 고려한 차체 강성에 대한 보강을 위해 효과분석을 실시하였다. 효과분석은 직교배열표를 이용한 Taguchi 실험계획법을 통해 실시하였으며 분석 결과 후방 부분의 점용접을 보강해야 한다는 것을 확인하였다. 이를 통해 후방 부분의 점용접을 보강하였고, 최종적으로 효과 분석을 통한 점용접 보강까지 이루어진 최적화 모델의 첫 번째 비틀림모드의 고유진동수와 첫 번째 굽힘모드의 고유진동수가 다소 증가하였으며 점용접의 개수가 기본모델에 비해 약 7% 감소하였다.

## 참 고 문 헌

(1) A. Yamaguchi, G. Wakana, K. Obayashi, T. Okabe and M. Muller-Bechtel, “Spot-weld Layout Optimization for Body Stiffness by Topology Optimization”, SAE Paper No.2008-01-0878.

(2) J.P. Leiva, L. Wang, S. Recek and B.C. Watson, “Automobile Design Using the GENESIS Structural Optimization Program”, Nafems Seminar: Advances in Optimization Technologies for Product Design, Chicago, 2001.

(3) J.S. Eom, B.H. Joo and B.C. Lee, “Optimization on the Spot Welded Configuration of Vehicle components Considering the Structural Performances”, KSME 2005 fall conference, pp. 1638~1641, 2005.

(4) B.H. Joo, H.B. Byun and B.C. Lee, “Performances Evaluation for the Methods of Spot Weld Modeling Considering Durability”, Trans. of the KSME(A), Vol.29, No.8, pp. 1153~1160, 2005.

(5) MSC.Nastran 2007 Quick Reference Manual, MSC.Software.

(6) M.P.Bendsoe and O.Sigmund, “Topology Optimization; Theory, Methods and Applications”, Springer, 2004.

(7) M.S. Kim, “Design of Experiments”, Lecture book, Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin Univ., 2008.

(8) J. Krottmaier, “Optimizing Engineering Design”, McGraw-Hill, 1994.