

GENESIS 7.0을 이용한 전동차용 크로스 빔의 치수와 형상 최적화에 관한 연구

전형용*

A Study on the Size and the Shape Optimization of Cross Beam for Electric Vehicle using GENESIS 7.0

Hyung Yong Jeon*

ABSTRACT

Electric vehicle body has to be subjected to uniform load and demand auxiliary equipment such as air pipe, electric wire pipe and gas pipe. Especially, lightweight vehicle body is salutary to save operating costs and fuel consumption. Cross beam supports the weight of passenger and electrical equipments and account for the most of weight of vehicle body. Therefore this study performs the size and the shape optimization of crossbeam for electric vehicle using GENESIS 7.0 and presents the effect of mass reduction and the shape of hole in cross beam.

Key Words : Cross beam(크로스 빔), FEA(유한요소해석), Domain(영역), Design Variable(설계변수), Objective Function(목적함수) Size optimization(형상 최적화), Shape optimization(형상 최적화), Approximation Method(근사화 방법)

1. 서론

최근 들어 과학기술의 진보와 세계 경제의 활성화로 인하여 에너지의 소비가 증가하고 있어 지하 자원이 급속하게 고갈되고 있다. 특히, 자동차의 증가는 에너지 소비를 가속화시키고 있어 대기오염 및 지구환경을 황폐화시킬 뿐만 아니라 교통체증을 유발하는 큰 사회적 문제가 되고 있다. 따라서 대량수송과 고속성 및 안전성 측면에서 우수한 차량의 개발이 요구되고 있다. 그 중 전동차는 이와 같은 목적에 적합하지만 출퇴근 시 승차정원을 훨씬 초과하고 있고 운영비 절감문제를 수용하기 위하여

경량화 차체와 그 부속품의 개발에 최적화 개념의 도입이 절실하다.

전동차 차체는 하중을 균일하게 분포되도록 설계하는 것이 매우 중요하며 각종 부가적인 기능을 제공하는 별개의 시스템과 공유되어야 한다. 이러한 종합 시스템을 구성하기 위하여 공기관, 전선관 등은 필수적으로 설치되어야 하며, 차체중량을 감소시키고 밀폐된 부분의 유지보수작업을 가능하도록 차체에 의도적인 구멍을 내는 경우가 있다.

크로스 빔은 차체 중앙부의 승객과 전장품 하중을 지탱하는 중요한 부재로서 마루골조 중앙부의 1/2 정도를 차지하고 있다. 마루골조 하부에는 대차와 각종

* 2002년 6월 10일 접수

* 주) 로템 중앙연구소 기초연구팀

전장품이 취부되는데 차체 하중을 지탱하는 대차는 마루골조 양단에 취부되고, 차량을 제어하는 각종 전장품은 차체 중앙부에 배치되어 크로스 빔에 결합된다. 전장품을 이곳에 부착한다는 것은 필연적으로 차량을 제어하는 다른 전장품과 신호를 주고받기 매체로서 공기관, 전선관 등이 요구된다. 이는 부착할 수 있는 공간확보를 요구한다는 것을 의미하며, 이를 크로스 빔 밖으로 설치하면, 차량하부구조의 공간이 확대되어 주행 시 저항을 받고, 난잡한 배관으로 예기치 않은 간섭문제가 발생되므로 밀집된 하부구조가 되도록 크로스 빔을 관통하여 설치한다. 그리고 전동차는 주어진 중량 범위 내에서 제작해야 되는데 최근에 차량의 고급화로 인하여 차량에 추가되는 시스템이 늘어나 중량은 증가하는 반면에, 운영비를 절감하기 위하여 차량 경량화를 요구하는 상반된 하중조건으로 최적설계에 의한 중량 감소는 그만큼 중요하다고 할 수 있다. 따라서 그 대상은 비교적 중량이 많이 나가는 마루골조에 집중되고, 그 중에서도 수량이 많고 원공이 요구되는 크로스 빔에 원공을 내어 중량을 감소시키는 것이 가장 효율적이다.

전¹⁾ 등은 경험적 설계 방법에 기초하여 크로스 빔에 널 구멍위치와 형상을 최적화하였다. 그러나 상술의 설계 방법에 의해 생성된 원공은 실제 각 원공에 미치는 응력을 고려하기 보다 크로스 빔의 전체적인 응력상태를 고려하여 설계되었으므로 원공의 크기가 전부 동일하여 크로스 빔의 전반적인 응력 분포의 특성을 반영하지 못하는 단점이 있다.

한편, 형상 최적 설계는 경험적 설계가 영역이 고정된 상태에서 형상을 나타내는 단면적이거나 두께를 설계변수로 정의하는 것과는 달리 구조물의 형상을 나타내는 함수가 고정된 영역에서 정의하며 이 영역을 기술하는 함수가 설계변수가 된다.²⁾

본 연구는 기존의 경험적 설계 방법으로 설계 및 제작되어 사용되고 있는 마루 골조의 크로스 빔을 치수 최적화와 원공의 형상 최적화를 각각 수행하여 두 가지 방법에 따른 중량감소를 비교하고 원공 형상 변화에 따른 응력분포를 연구하였다.

2. 유한요소해석

2.1 형상과 재료의 특성

본 연구에 적용된 크로스 빔은 전동차 마루골조를 구성하는 요소이다. 마루골조는 Fig. 1에서 나타

낸 바와 같이 전체 수직하중을 지탱하는 바디 볼스터(Body bolstr), 전후 충격력을 지탱하는 센타 실(Center sill), 승객하중과 각종 전장품 하중을 지탱하는 크로스 빔, 전체 크로스 빔의 하중을 받아 볼스터에 전달하는 사이드 실(Side sill), 그리고 엔드 빔(End beam)으로 구성되며 이들은 견고하게 용접되어 있다. 이들 대부분의 요소들은 10~12mm, 4.5mm 정도의 두꺼운 철판을 원공없이 인접된 요소와 용접되어져 있으므로 충분한 강도를 지니고 있으나, 크로스 빔은 공기관과 전선관을 취부하고, 중량을 감소시키기 위하여 이곳에 원공을 내며, 또한 중앙부의 승객하중과 전장품을 직접 지지하는 열악한 하중 조건을 받는 부재이다. 크로스 빔에 사용된 재료는 전동차에 널리 쓰이는 재료로써 내식성 내열성이 우수한 오스테나이트계의 스테인레스 재료인 STS 304가 사용되었고 사이드 실에는 STS 301L-H의 재료가 사용되었으며 그 재료의 특성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material properties of crossbeam

| Material | Density $\rho(\text{kg/mm}^3)$ | Yield Stress $\sigma_y(\text{kg/mm}^2)$ | Elastic modulus $E(\text{kg/mm}^2)$ | Elongation $\epsilon_f(\%)$ | Poisson's ratio ν |
|------------|-----------------------------------|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| STS 304 | 7.86×10^{-6} | 21 | 2.04×10^4 | 40 | 0.3 |
| STS 301L-H | 7.86×10^{-6} | 70 | 1.93×10^4 | 20 | 0.3 |

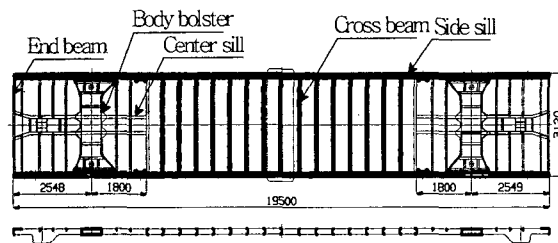


Fig. 1 Under frame of the electric car-body

2.2 유한요소모델

본 연구에서는 기존 전동차에서 사용되고 있는 크로스 빔을 기본으로 모델링하였다. 그 형상은

Fig. 2와 같고 그 두께는 크로스 빔에서 4mm, 사이드 실에서 4.5mm의 철판으로 제작되었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 크로스 빔과 사이드 실은 넓이에 비해 두께가 얇기 때문에 4절점 Shell Element (CQUAD4)를 사용하였고, 전체를 사각형요소로 분할하였다. 이렇게 하여 생성된 절점 수는 3461개이고, 요소 수는 3108개이다. 유한요소해석은 상용 유한요소 프로그램인 GENESIS 7.0으로 해석을 수행하였다.

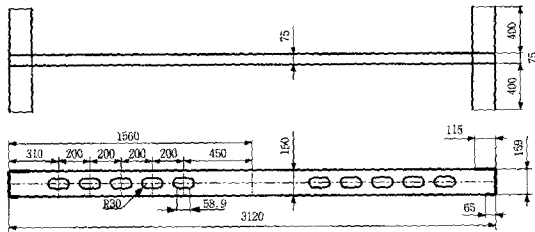


Fig. 2 Dimension and shape of the crossbeam



Fig. 3 Finite element model of crossbeam

2.3 경계조건과 하중조건

Fig. 4는 크로스 빔의 경계조건과 하중조건을 나타낸 것이다. 크로스 빔은 사이드 실에 용접되어 지지되므로 완전 구속되지 못하고, 인접되는 요소와 상호 작용을 받으면서 결국, 전체 수직하중을 지지하는 바디 볼스터가 고정점 역할을 하게 된다. 이러한 조건을 반영하기 위하여 크로스 빔 양단을 완전 구속하지 않고, 크로스 빔 양단을 중심으로 사이드 실 양쪽으로 400mm 떨어진 위치에서 완전 고정된 것으로 간주하여 이곳에 위치한 모든 절점을 구속하였다. 크로스 빔은 마루골조의 중앙부를 차지하며 전장품이 취부되어 집중하중을 받는 한정 수량의 크로스 빔을 제외하고는 승객하중을 등분포로 균일하게 지지한다. 따라서 마루골조 중앙부의 크로스 빔은 승객에 의한 등분포 하중을 받을 때,

크로스 빔의 두께와 원공의 형상을 최적화하는 것을 목적으로 하므로, 모든 크로스 빔에 작용하는 하중이 등분포로 작용한다고 가정하고, 여기에 주행 중 발생하는 동하중(0.2g)을 합하여 적용하였다. 이러한 경우 1개의 크로스 빔이 분담하는 하중은 약 1034kg 정도이며, 개단면 크로스 빔이 하중작용에 의하여 발생하는 비틀림을 최소화하기 위해 크로스 빔 리브 상면에 등분포로 적용하였다. Fig. 4는 상술의 경계조건과 하중조건을 각각 나타낸 것이다.

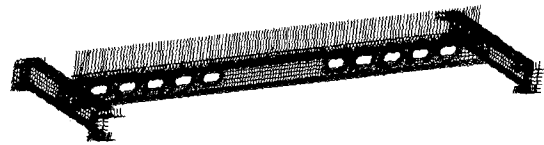


Fig. 4 Boundary condition of crossbeam

2.4 해석결과고찰

Fig. 5에서는 크로스 빔의 응력분포를 나타내고 있다. 응력은 무원공 지점인 크로스 빔의 가운데 부분을 기점으로 좌우 대칭으로 분포하고 있으며, 최대응력은 크로스 빔이 연결된 사이드 실 하단에서 8.5403kg/mm²만큼 발생하고 있다. 현재 모델에서는 크로스 빔이 등분포하중을 받으면서 사이드 실에 지지되어 있으므로 크로스 빔에 작용된 모든 부하가 사이드 실에 전달되면서 사이드 실에 비틀림 모멘트를 작용하게 되고 또한, 크로스 빔의 고정단 역할을 하기 때문에 크로스 빔에서 고응력이 발생되지 않고, 사이드 실 하단에서 고응력이 발생됨을 알 수 있다.

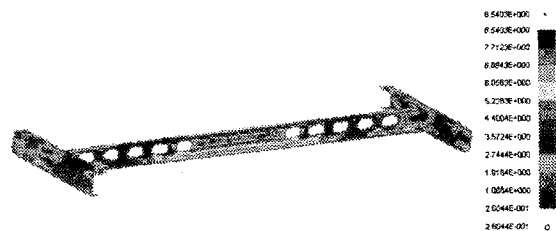


Fig. 5 Stress distribution of the crossbeam

3. 최적설계

3.1 알고리즘

본 연구에서 사용된 최적화 알고리즘은 Schmit 와 Vanderplaat에 의해 개발된 근사법(Approximation Method)이다.⁽⁴⁾ 이 방법은 원래의 목적 및 구속조건의 함수를 근사함수로 변환하여 풀고 이 결과값이 다음 단계의 최적화 과정의 설계변수값이 되어, 이 값으로 다시 근사화된 새로운 함수를 구성하고 다음 단계의 설계 변수값을 찾아낸다. 근사법은 이런 과정을 반복적으로 수행하여 최적치를 구한다. 이때, 최적화 과정 중 수렴을 위한 판단 기준이 필요하게 되는데 그 기준으로는 먼저 최대 제약조건의 위반량이 정해진 값보다 적으면서 목적함수의 변화량이 정해진 값 이하인 경우(Hard convergence) 또는, 최대제약조건의 위반량이 정해진 값보다 적으면서 설계변수의 변화량이 정해진 값보다 작은 경우(Soft convergence)에 수렴한 것으로 간주한다.⁽⁵⁾ 본 연구에서는 최대제약조건 위반량이 5×10^{-3} 이하이면서 목적함수 또는 설계변수의 변화량이 1×10^{-3} 보다 작을 경우 수렴한 것을 기준으로 한다. Fig. 6은 이러한 최적설계의 흐름도를 도식적으로 나타낸 것이다.

근사법은 정확한 최적값을 구할 수 없다는 단점이 있으나 많은 함수값의 계산이 필요한 큰 구조물의 설계에서 설계시간을 단축 할 수 있다는 이점이 있다. 따라서 근사법은 수학적으로 정확한 해를 요구하지 않는 실제설계에서 매우 유용하다.⁽⁴⁾

3.2 최적설계의 정식화

크로스 빔의 최적설계 문제는 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

$$\text{Minimize } M = \rho \cdot V \quad (1)$$

$$\text{Subject to } \frac{|\sigma_{\max}|}{\sigma_a} - 1 \leq 0 \quad (2)$$

식 (1)의 M 은 크로스 빔의 질량으로 선정하였으며 밀도와 체적의 곱으로 나타낼 수 있다. 또한 식 (2)는 제한조건을 표현한 것으로 σ_{\max} 는 최적화된

크로스 빔의 최대응력을, σ_a 는 설계허용응력을 각각 나타낸다.

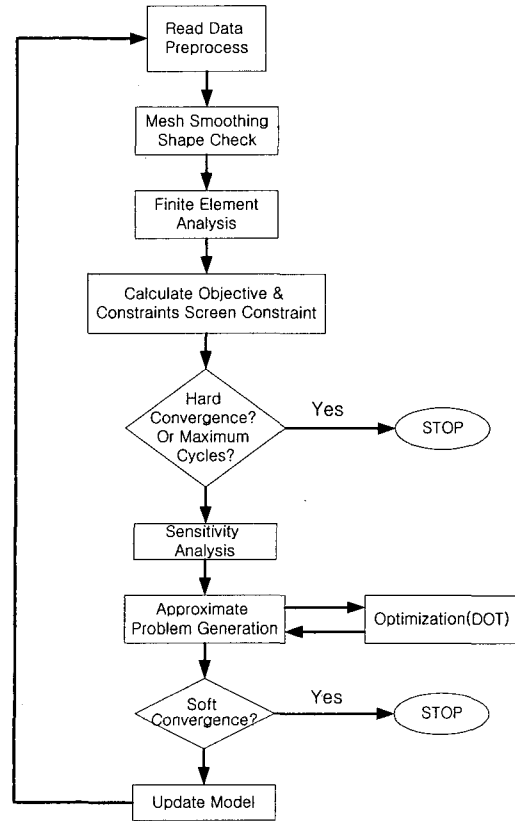


Fig. 6 Flowchart for optimization⁽⁶⁾

3.3 목적함수와 설계구속조건

본 연구는 경량화와 경제성의 측면에서 차체의 전체질량을 목적함수로 설정하여 이를 최소화하는 문제이다. 크로스 빔의 허용응력은 일반적으로 항복강도에 대하여 안전율 1.5를 고려하므로 구속조건은 허용응력 14.67 kgf/mm^2 을 벗어나지 않는 범위로 설정하였다.

3.4 치수최적설계(size optimization)

치수 최적설계는 구조물의 형상 변화 없이 판의 두께나 보의 단면적과 관성모멘트 및 비틀림 강성

과 같은 파라미터를 설계 변수로 하여 최적 설계를 수행하는 것을 의미한다.⁽³⁾ 셸(Shell) 형상의 구조물 경량화를 수행할 때 가장 먼저 생각해 볼 수 있는 설계변수가 두께이다. 따라서 본 연구에서도 구멍의 형상을 고정하고 크로스 빔의 두께를 설계변수로 설정하였다. Fig. 7과 8은 치수 최적화에 따른 설계변수와 목적함수의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 세 번의 최적화에 의해 설계변수인 크로스 빔의 단면 두께 변화는 초기 4mm에서 최적치인 1.92mm로 감소하였다. 이에 따른 목적함수인 질량의 변화는 Fig. 8에 나타내었으며 초기 47.87kg에서 34.03kg로 약 28.9%의 질량 감소율을 보였다.

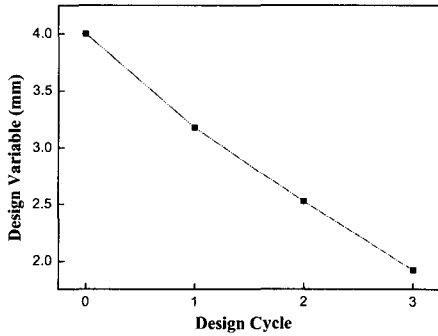


Fig. 7 Design variable history of in process of size optimizing of cross-beam

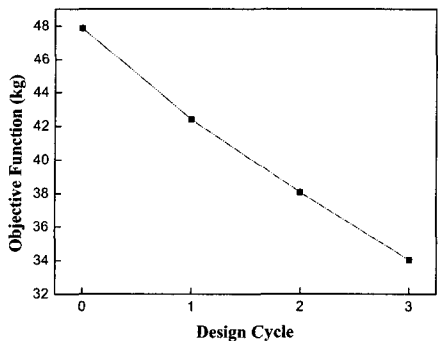


Fig. 8 Mass reduction of objective function in process of size optimization

Fig. 9는 치수 최적화 수행 후 크로스 빔의 응력분포를 나타낸 것이다. 응력분포는 최적화 전과 비슷하나 두께의 감소에 의해 최대응력이 크로스 빔의 중앙부분으로 이동되었으며 그 값은 14.07kg/mm²이다.

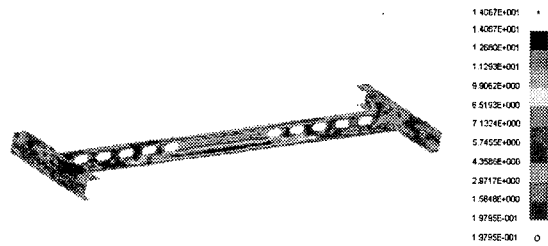


Fig. 9 Stress distribution of crossbeam after size optimization

3.5 형상최적설계(shape optimization)

3.5.1 Domain의 설정

본 연구에서는 Domain 방법에 의해 형상최적설계를 수행하였다. 이 방법에서는 설계자가 설정한 Domain에 설계변수를 부여하여 형상을 변화시킨다. Domain은 유한 요소와 비슷한 형태를 가지나 일반적으로 유한 요소보다는 더 크고 내부에 많은 절점을 포함하고 있어 설계자가 설계변수로써 Domain의 모서리나 가운데 변의 절점의 이동경로를 설정하면 보간형상함수를 이용하여 내부 절점들의 이동에 관한 함수가 정의된다.^{(7),(8)} 이때, 최초에 이동한 벡터가 다음 단계 이동의 기준벡터(Basis Vector)가 되고 이를 반복적으로 수행하여 최종 설계점을 찾는다. Domain 방법은 사용상의 편리함과 사용자가 내부 절점의 이동위치를 완벽하게 제어할 수 있다는 점 그리고, 절점간의 함수를 정의해 주지 않아도 된다는 장점으로 인해 최적화 수행 시 많은 시간적 이득을 얻을 수 있다. Fig. 10은 사각형 Domain에 설계변수를 부여하여 절점들이 이동하는 예를 나타낸 것이다.^{(4),(7)} 일반적으로 진원인 경우 9개의 Domain을 사용하나 본 연구에서는 최적화 하고자 하는 구멍의 형상이 장방형이기 때문에 구멍의 확대와 축소에 의한 mesh의 비틀어짐(skew) 현상을 최소화 시키기 위해 Fig. 11과 같이 각 구멍 당 5개의 Domain을 설정하였다.

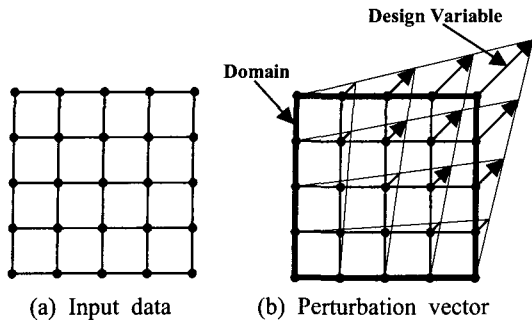


Fig. 10 Perturbation automatically generated with QUAD4 domain

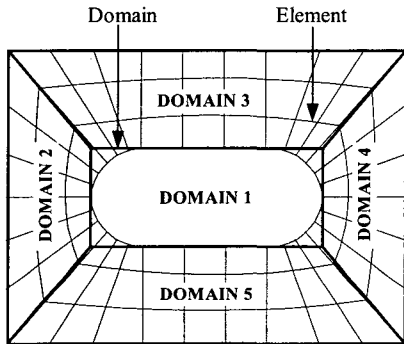


Fig. 11 Domain for finite element model

3.5.2 설계변수의 설정

형상 최적 설계는 구조물의 형상을 설계변수로 하여 최적 설계를 수행하는 것을 의미한다. Fig. 12는 현재 철도 차량에 사용중인 크로스 빔의 구멍의

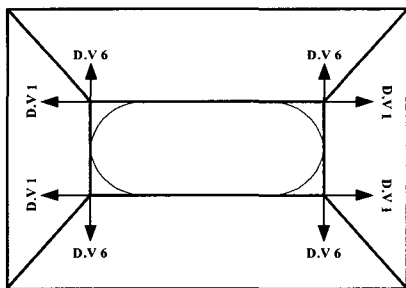


Fig. 12 Design variable for domain

형상에서 각 구멍의 장축과 단축을 설계변수로 설정한 것을 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 설계변수(Design Variable) 1~5는 각 구멍을 감싸는 Domain의 장축방향을 설계변수 6~10은 단축방향을 설계변수로 설정하였다. 나머지 대칭면의 설계변수도 동일하게 설계변수 11~15는 각 구멍의 장축을 설계변수 16~20은 구멍의 단축을 설계변수로 설정하였다.

3.5.3 형상 최적설계결과

Fig. 13은 8회의 최적화 과정에서 한쪽 5개의 구멍에 대한 각 설계변수의 변화를 나타낸 것이고 Fig. 14는 설계변수에 따른 목적함수인 중량의 변화를 나타낸 것이다. 또한, Table 2.에서는 최적화에 따른 설계변수의 변화를 나타내었다. 본 연구에서는 크로스 빔의 형상, 하중조건, 구속조건 및 c 이에 따른 응력 분포가 좌우 대칭이므로 반대편의 설계변수 변화 및 값은 중복표시 하지 않았다. 따라서 8회의 최적화 과정을 거쳐 중량은 최초 47.9 kg에서 46.1kg로 중량이 감소되었다. 설계변수의 변화의 최대값은 5번의 설계변수 에서 34.7mm를 나타내었고 최소값은 6번의 설계변수에서 21.69mm 이고 목적함수인 중량은 초기 47.9kg에서 46.1kg 으로 3.6%의 중량감소율을 보이고 있다. Fig. 15에서는 각 반복설계 단계에서 최대 제한조건 위반율을 나타낸 것이다. 최적화의 최종 단계에서 위반율인 0%이므로 제한조건 내에서 수렴되어져 최적설계가 이루어 졌음을 알 수 있다.

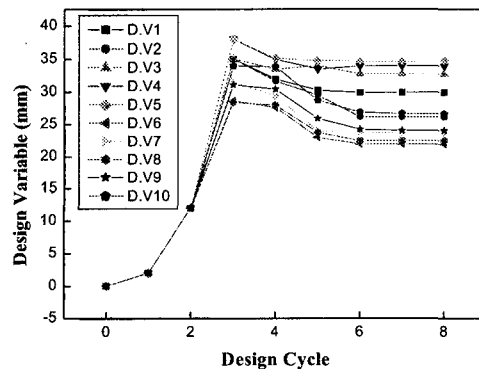


Fig. 13 Design variable history in process of shape optimizing process of crossbeam

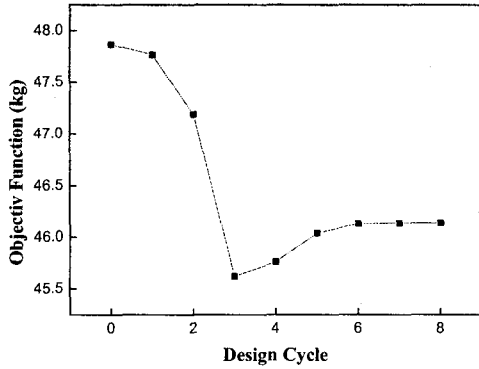


Fig. 14 Mass reduction of objective function on shape optimization

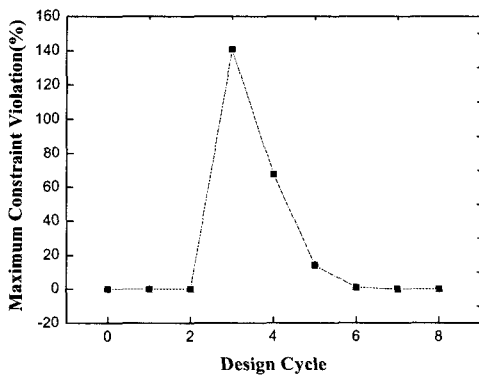
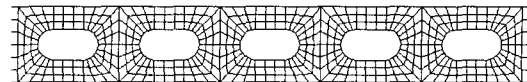


Fig. 15 Maximum constraint violation rate for objective function

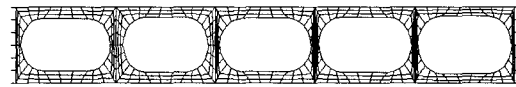
Table 2 Variation of design variables

| Design Variable | Initial Value(mm) | Optimal Value(mm) |
|-----------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 0 | 29.885 |
| 2 | 0 | 26.100 |
| 3 | 0 | 32.695 |
| 4 | 0 | 33.907 |
| 5 | 0 | 34.700 |
| 6 | 0 | 21.865 |
| 7 | 0 | 23.608 |
| 8 | 0 | 22.434 |
| 9 | 0 | 24.015 |
| 10 | 0 | 26.630 |

Fig. 16은 이상의 최적화 과정을 통해 크로스 빔의 응력분포가 고려된 각 구멍의 최적화된 형상을 나타낸 것이다. 구멍의 형상변화에 따른 크로스빔의 최대응력은 14.6kg/mm²이고 그 분포를 Fig. 17에 나타내었다.



(a) Original hole shape before shape optimization



(b) Optimal hole shape after shape optimization

Fig. 16 Variation for shape of holes of crossbeam

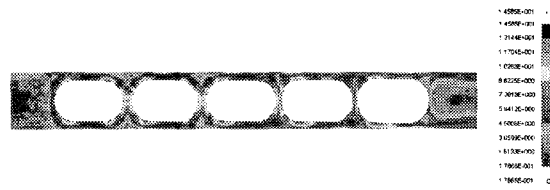


Fig. 17 Stress distribution of crossbeam after shape optimization

3.6 고찰

세 가지 경우의 최적화 결과로 치수 최적화에 의해 크로스 빔의 두께는 최초 4mm에서 1.92mm로 변하여 최초 중량 47.87kg에서 34.03kg로 약 28.9%의 중량 감소율을 구할 수 있었고, 형상 최적화에 의해 각 구멍의 형상변화로써 중량은 46.1kg로 약 3.6%의 중량 감소율을 나타내었다.

치수 최적화는 크로스 빔 전체의 치수를 대상으로 하기 때문에 한정된 영역에서의 구멍의 형상 변화에 의한 최적화를 수행한 형상 최적화 보다 훨씬 질량감소가 많음을 알 수 있었다. 그러나 치수 최적화와는 달리 형상 최적화는 모델전체를 대상으로 최적화를 수행하는 것이 아니라 최적화 영역이 관심 부분에 국한되어져 수행하므로 본 연구의 결과로써 치수 최적화가 형상 최적화보다 질량감소에

우수하다고는 말할 수 없다. 형상 최적화를 수행해 본 결과 크로스 빔의 응력 분포를 좀더 충분히 반영하고 또 무원공인 부분에서의 질량감소 요인을 찾기 위한 위상 최적화가 필요함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 전동차의 마루골조를 이루는 크로스 빔의 중량감소를 위한 치수 및 형상 그리고 치수와 형상의 동시 최적화를 통한 경량화에 대해 연구하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 현재 사용중인 크로스 빔은 실제 허용응력에 비해 과도한 설계로 인해 전동차의 경량화를 저해하는 큰 원인으로 작용하고 있다.
2. 치수 최적화와 형상 최적화를 통하여 현저한 중량 감소가 일어나 경량화에 큰 도움이 되었다.
3. 치수 최적화는 크로스 빔 전체의 치수를 대상으로 하기 때문에 한정된 영역에서의 구멍의 형상 변화에 의한 최적화를 수행한 형상 최적화 보다 훨씬 중량 감소에 유효하였다.

참고문헌

1. 전형용, 성낙원, 한근조, “원공의 위치와 형상변화에 따른 전동차 크로스 빔의 강도해석,” 한국정밀공학회지, 제16권, 제9호, pp. 9-17, 1999.
2. 이희각, “형상 최적설계의 기초,” 전산구조공학회지, Vol. 7, No. 3, pp. 16-23, 1994.
3. 왕세명, “최적설계의 개념 및 응용,” 전산구조공학회, 제13권, 제3호, pp. 18-24, 2000.
4. 박영선, 이상현, 박경진, “구조최적설계시 직접법 및 근사법 알고리즘의 성능비교에 관한 연구,” 대한기계학회논문집, 제18권, 제2호, pp. 313-322, 1994
5. “GENESIS 6.0 USER MANUAL,” VMA Engineering, 2001.
6. “FEMB/GENESIS TRAINING MANUAL,” 한국시물레이션기술(주), 2001.
7. Juan P. L., Brian C. W., “Shape Optimization in the

GENESIS Program,” VMA Engineering.

8. Levita, J.P., Watson, B.B., “Automatic Generation of Basis Vector for Shape Optimization in the Genesis Program,” 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multi disciplinary Analysis and Optimization, St. Louis, Missouri, pp. 1115-1122, Sep 2-4, 1998.