

# 원공 위치와 형상 변화에 따른 전동차 크로스 빔의 강도해석

전형용\*, 성낙원\*\*, 한근조\*\*

The Stress Analysis of the Cross Beam of the Electric Car-body  
according to the Change of Location and Shape of Circular Hole

Hyung-Yong Jeon\*, Rak-Won Sung\*\*, and Geun-Jo Han\*\*

## ABSTRACT

This investigation is the result of the structural analysis by finite element method for optimal design of the cross beam with circular holes of the electric car-body. in order to install the air pipe and electric wire pipe that correspond signal between electric machines for the control system and to reduce the weight of the electric car-body, several circular areas from a cross beam should be taken off. What we want to perform is the optimal design of a cross beam with circular holes to posses equal stress in comparision with no hole cross beam. first, no hole cross beam as basic modal be chosen, executing the analysis, reviewing the distribution of stress and displacement at each location. several parameter should be adopted from the cross beam geometry like the location and shape of the hole to affect the maximum stress and displacement. So the analysis was executed by finite element analysis for finding optimal design parameter to the change of the location and shape of the circular hole. finally, the optimal design of the cross beam with circular holes was obtained and the maximum equivalent stress was compared with no hole cross beam at each location.

**Key Words** : Cross beam (크로스 빔), Circular hole (원공), Stress concentration (응력집중), optimal design parameter (최적설계변수)

## 1. 서 론

철골 용접 구조물에 대한 최적 설계는 오래 전 부터 산업 전반에 널리 보급되어 발전을 거듭해 오 면서 구조물 설계에 필수적인 요소로 자리잡고 있

으며, 그 적용 범위도 매우 다양하다. 철골 구조물 은 사용 목적이나 용도에 따라 정밀도 및 제작 방 법이 결정되며, 인공위성이나 항공기 같은 구조물 은 고가 정밀구조물로 제작되고, 조선, 철도차량 등의 구조물은 균일한 강도가 분포되도록 구조물의

\* 정희원, 한진중공업

\*\* 동아대학교 기계공학과

최적설계를 추구한다. 이러한 절골 구조물은 단순하게 1~2개의 목적만을 가지는 것은 거의 없으며, 일반적으로 구조물의 기본 골격을 이루면서 다른 시스템과 공유되어 복잡한 종합 구조물을 형성하게 된다. 이때 종합 시스템을 구성하기 위하여 공기관, 전선관, 가스관 등의 설치가 요구되어 부득이하게 절골을 관통하는 경우가 있으며, 경우에 따라서 구조물의 중량이 초과되어 중량을 감소시키기 위한 방법으로도 또한, 밀폐된 부분의 유지보수나 작업을 가능하게 하기 위한 방법으로 절골에 의도적으로 원공을 뚫는 경우가 종종 발생한다. 이런 경우, 원공을 절골의 어느 위치에 어느 형상으로 만드느냐에 따라 그 구조물의 최적 설계에 지대한 영향을 끼치므로 절골 구조물의 원공에 대한 연구는 절실히 요구된다.<sup>(1)~(2)</sup>

본 연구는 전동차 마루골조의 크로스 빔에 대하여 원공의 크기, 위치, 형상변화에 따른 응력분포를 연구한 것이다. 크로스 빔은 마루골조 중앙부에 위치하여 전체 마루골조의 절반 정도를 차지하며, 일반적으로 형상을 등간격으로 배치하여 사이드 실에 용접되어 있고, 차체 중앙부의 승객하중과 전장품 하중을 지탱하는 중요한 부재이다. 마루골조 하부에는 대차와 각종 전장품이 취부되는데 차체 하중을 지탱하는 대차는 마루골조 양단에 취부되고, 차량을 제어하는 각종 전장품은 취부 공간이 많은 차체 중앙부에 배치되어 크로스 빔에 결합된다. 전장품을 이곳에 취부한다는 것은 필연적으로 차량을 제어하는 다른 전장품과 신호를 주고받기 위한 매체로서 공기관, 전선관 등이 요구된다. 이는 공기관과 전선관을 취부할 수 있는 공간을 확보해야 된다는 것을 의미하며, 이를 크로스 빔 밖으로 설치하면, 차량 하부구조의 공간이 확대되어 주행 시 저항을 받고, 난잡한 배관으로 예기치 않는 간섭으로 문제가 발생되므로 밀집된(compact) 하부구조가 되도록 크로스 빔을 관통하여 공기관, 전선관을 설치한다. 그리고 전동차는 주어진 중량 범위 내에서 제작해야 되는데 최근에 차량 고급화로 인하여 차량에 추가되는 시스템이 늘어나 중량은 증가하는 반면에, 운용비를 절감하기 위하여 차량 경량화를 요구하는 상반된 하중조건으로 최적설계에 의한 중량 감소는 그만큼 중요하다고 할 수 있다. 따라서 중량 감소의 대상은 비교적 중량이 많이 나가는 마루골조에 집중되고, 그 중에서 수량이 많고 원공이 요구되는 크로스 빔에 원공을 내어 중량을 감소시

킨다. 크로스 빔은 중앙부 승객 하중과 전장품 하중을 받아 과부하를 받는데도 불구하고 이런 이유로 원공을 내는 것은 면밀한 검토가 있어야 되며, 원공 위치나 형상의 결과에 따라 응력분포가 다르게 나타나며, 최악의 경우 치명적인 손상을 입을 수 있다. 따라서 본 연구는 원공 크로스 빔의 응력 분포에 영향을 주는 설계 파라미터에 대하여 최대 상당응력을 유한요소법으로 고찰하고, 최적 원공 위치 및 형상을 연구하여 원공 크로스 빔의 최적 설계를 이루고자 하였다.

원공 구조물을 설계하는 과정에서 일반적으로 원공의 위치와 형상이 구조물의 응력 분포 변화에 끼치는 영향이나 응력집중과의 관계를 고려하지 않고, 시스템을 쉽게 연결할 수 있도록 그 위치와 형상을 임의로 선정하는 경우가 많다. 이런 원공 구조물은 최적설계 측면에서 치명적인 결함을 주어 원래 도재 강도보다 약 30~40% 정도 강도를 저하시키는 결과를 초래하여, 이를 보완하거나 다시 설계하는 문제가 야기된다. 원공 구조물의 응력분포에 지대하게 영향을 끼치는 원공 파라미터 변화에 대하여 최대 상당응력과 변위의 변화를 정량적으로 평가할 수 있다면, 설계단계에서 불필요한 손실을 방지하고 원공 구조물의 최적 설계를 달성할 수 있을 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 원공을 가진 크로스빔이 수직 하중을 받을 때, 원공의 위치와 최대 상당응력 변화에 어떻게 영향을 끼치는가를 유한 요소법으로 분석하고 원공 형상과 응력집중계수와의 관계를 고찰하여, 이와 유사한 원공 구조물 설계 시, 기초자료로 활용하고자 하였다.<sup>(3)~(4)</sup>

본 연구는 전동차 마루골조의 크로스 빔이 원공이 요구될 때, 원공 크로스 빔이 최적 설계를 이루고자 무원공 크로스 빔을 기본 모델로 선정하여 위치별로 응력분포와 변위를 살펴보고, 전장품 취부로 요구되는 공기관과 전선관의 수량 및 중량 감소의 목표치를 고려하여 원공의 크기와 수량을 결정하였다. 이를 기준으로 원공 크로스 빔의 최대 상당응력과 변위에 영향을 끼치는 요인들을 설계 파라미터로 설정하여, 각 변수 변화에 따른 응력값을 고찰하고, 다양한 원공 위치와 형상을 가진 원공 크로스 빔의 각 위치에서 응력 산포도 값이 가장 좋은 설계 파라미터 선정으로 동일 조건에서 원공 크로스 빔이 무원공 크로스 빔과 대등한 응력분포를 갖는 원공 크로스 빔의 최적 설계에 대하여 연구하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 해석대상 및 재질특성

본 연구에 적용된 크로스 빔은 전동차 마루골조를 구성하는 요소이다. 마루골조는 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 전체 수직하중을 지탱하는 바디 볼스터, 전후 충격력을 지탱하는 쉘타실, 승객하중과 각종 전장품 하중을 지탱하는 크로스 빔, 전체 크로스 빔의 하중을 받아 볼스터에 전달하는 사이드 실, 그리고 엔드 빔으로 구성되며 이들은 서로 견고하게 용접되어 있다. 이들 대부분의 요소들은 두꺼운 철판(두께 10~12mm, 4.5mm)을 사용하여 원공 없이 인접된 요소와 용접되므로 충분한 강도를 지니고 있으나, 크로스 빔은 공기관 및 전선관을 취부하고, 중량을 감소시키기 위하여 이곳에 원공을 내며, 또한 중앙부의 승객하중과 전장품 하중을 직접 지탱하는 악조건을 받고 있는 부재이다. 그래서 본 연구는 원공이 없는 대부분의 요소들은 충분한 강도를 갖는다고 간주하고, 여러 개의 형강으로 전체 마루골조 철판을 구성하는 크로스 빔에서 원공 위치나 형상의 변화에 따라 최대 상단응력이 큰 변화를 일으키고 있고, 그중 중앙에 위치한 크로스 빔이 이 같은 특성을 대표적으로 나타낸다고 판단되어 이를 해석대상으로 삼았다. 그 형상과 구조는 Fig. 2에 나타나 있고, 사이드 실은 SUS 301L-H를, 크로스 빔은 SUS 304 재질을 사용했으며, 이들 재료의 기계적 성질은 Table 1과 같다.

### 2.2 모델링

본 연구는 원공 크로스 빔의 원공 위치 및 형상 변화에 따른 원공 주위의 응력분포 상태를 살펴보고 원공의 최적 위치를 알아내는데 있으므로 부원공 빔을 기본 모델로 설정하고, 원공의 위치를 좌우로 이동시켜 7개를 모델링하고, 상하로 이동시켜 5개를 모델링하였다. 그리고 원공 형상을 변화시켜 5개를 모델링하여 총 18성우에 대하여 유한요소로 해석하였다. 해석 모델의 좌표계는 마루골조와 연루시켜 설정하였으며 Fig. 3에서 나낸 바와 같이 크로스 빔의 폭 방향을 X축으로, 길이 방향을 Y축으로, 높이 방향을 Z축으로 설정하여 모델링하였다. 그리고 크로스 빔과 사이드 실 모두가 각각 두께 4mm, 4.5mm 철판으로 제작되므로 사용된 요소는 모두가 쉘요소(shell element)로 모델

Table 1 Mechanical properties of materials

| Material  | Tensile stress( $\sigma_b$ )<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | Yield stress( $\sigma_s$ )<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | Elastic modulus<br>(E)(kg/mm <sup>2</sup> ) | Elongation<br>(%) | Poisson's ratio( $\nu$ ) |
|-----------|---|---|---|-------------------|--------------------------|
| SUS304    | 531   | 211   | $2.04 \cdot 10^4$                           | 40                | 0.3                      |
| SUS301L H | 96  | 70  | $1.93 \cdot 10^4$                           | 20                | 0.3                      |



Fig. 1 Under frame of the electric car-body

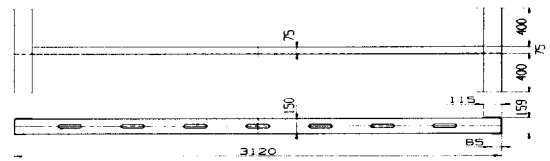


Fig. 2 Dimension and shape of the cross beam

링하였고, 이렇게 하여 발생된 절점 수는 6464개, 요소 수는 6190개이고, 그 형상은 Fig. 3에 나타내고 있다.

요소의 크기와 형상은 비교적 정확한 값을 구하고자 한번의 길이를 15mm 정도로 작게 메쉬(mesh)하고 가능한 사각형 요소가 되도록 하였으나 작은 수의 삼각형 요소도 사용되었다. 그리고 유한요소해석을 위하여 사용된 프로그램은 범용해석프로그램인 ANSYS 5.0을 사용하였다.<sup>(5)~(7)</sup>

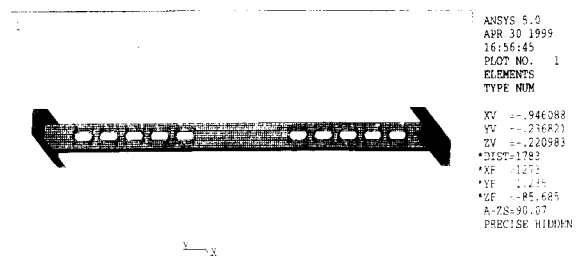


Fig. 3 Element of the cross beam

### 2.3 경계조건

마루골조 중앙부를 차지하는 여러 개의 크로스 빔은 이곳의 승객하중을 등분포로 균일하게 지탱

하고 전장품이 취부되는 한정된 수량의 크로스 빔만이 그 위치에서 집중하중을 받는다. 그러나 본 연구는 마루골조의 중앙부에 있는 원공 크로스 빔이 등분포 하중을 받을 때, 원공 위치나 형상 변화에 따라 최대 상당응력의 변화를 분석하고 최적 설계를 목적으로 하므로 마루골조에 작용하는 모든 하중이 등분포로 작용한다고 간주하고, 이 등분포 하중과 차량이 주행하면서 발생하는 동하중(0.2g)을 합하여 부과하였다. 이렇게 하여 크로스 빔 1개가 분담하는 하중은 1038kg이며, 개단면 크로스 빔이 하중작용에 의하여 발생하는 비틀림을 최소화하기 위하여 크로스 빔 리브(rib) 상면에 등분포로 부과하였다.

경계조건으로 크로스 빔은 사이드 실에 용접되어 지탱되므로 완전 고정점 역할을 하지 못하고, 인접되는 요소와 상호작용을 받으면서 결국, 전체 수직하중을 지탱하는 바디 볼스터가 고정점 역할을 하게 된다. 이러한 특성을 반영하기 위하여 크로스 빔 양단을 완전 구속하지 않고, 크로스 빔을 중심으로 사이드 실 양쪽으로 400mm 떨어진 위치에서 완전 고정된 것으로 간주하여 이곳에 위치한 모든 절점에 Fig. 4와 같이 X, Y, Z방향의 변위를 구속하였다.

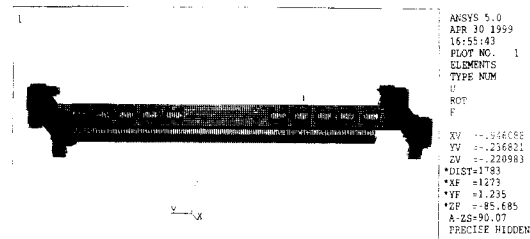


Fig. 4 Boundary condition of the cross beam

### 3. 해석결과 및 토의

연성재료에서 평면 응력상태와 가장 잘 일치하고 보편화되어있는 최대 변형에너지설을 이용하기 위하여 유한요소해석에서 상당응력분포를 구하고, 또한 사용된 재료가 갖고 있는 항복응력과 산출된 최대상당응력( $\sigma^c_{max}$ ) 값을 비교하여 원공의 좌우 위치, 상하위치, 형상 등의 변화에 대한 최적설계 파라미터 값을 선택하고자 한다.<sup>(8)</sup>

### 3.1 원공의 좌우위치 이동에 대한 응력과 변위 해석

원공의 좌우위치변화에 대한 응력 및 변위량의 변화를 고찰하여 원공의 최적좌우위치를 선정하기 위하여 Table 2와 같이 8가지 모델에 대하여 중앙점과 예상되는 최소응력 발생위치(1250mm) 사이를 일정한 비율로 원공의 중심위치를 정하고,  $\phi$  90mm의 9개 원공을 좌우 대칭적으로 배치하여 동일면적의 원공을 내었다. 다만, 중앙에 원공이 없는 모델 L<sub>2</sub>에서는 동일 원공면적을 갖도록 1위 원공을  $\phi$  63.64mm로 하여 무원공 하중조건과 동일하게 해석하였다.

Table 2 Location of circular holes in each model (unit : mm)

| Position Condition   | 1 st | 2 nd  | 3 rd  | 4 th   | 5 th | Remarks                            |
|----------------------|------|-------|-------|--------|------|------------------------------------|
| Model L <sub>1</sub> |      |       |       |        |      | no hole                            |
| Model L <sub>2</sub> | 450  | 650   | 850   | 1050   | 1250 | regular interval of supported zone |
| Model L <sub>3</sub> | 0    | 402.4 | 737.7 | 1017.1 | 1250 | 0.8 times interval                 |
| Model L <sub>4</sub> | 0    | 358.5 | 684.4 | 980.7  | 1250 | 0.9 times interval                 |
| Model L <sub>5</sub> | 0    | 312.5 | 625   | 937.5  | 1250 | regular interval                   |
| Model L <sub>6</sub> | 0    | 269.3 | 565.6 | 891.5  | 1250 | 1.1 times interval                 |
| Model L <sub>7</sub> | 0    | 232.9 | 512.3 | 847.6  | 1250 | 1.2 times interval                 |
| Model L <sub>8</sub> | 0    | 200   | 400   | 600    | 800  | regular interval of center zone    |

Fig. 5는 Table 2에서 나타낸 각각의 모델에 대하여 최대상당응력과 응력분포를 비교하여 나타낸 것이다. 무원공인 모델 L<sub>1</sub>의 크로스 빔 단면전체의 응력은 중앙점의 수직평판 하부에서 9.859kg/mm<sup>2</sup>로 최고 응력을 나타내고, 중앙점에서 1050mm 떨어진 곳에서 4.597kg/mm<sup>2</sup>로 최소응력이 산출되며, 지지점이라고 할 수 있는 사이드 실과 크로스 빔이 연결되는 상부에서 8.466kg/mm<sup>2</sup> 산출되어 1050mm 기준으로 양쪽으로 증가하는 응력구배를 가지고 있다. 그리고 크로스 빔의 수직평판에서는 1255mm위치에서 최소 응력값이 발생되고 이 점을 중심으로 좌우로 응력이 증가하고 있다.

중앙에 원공이 있는 경우, 모델 L<sub>5</sub>의 1위 원공 하부 정점에서 13.455kg/mm<sup>2</sup>로 최고 응력이 발생되어 무원공 크로스빔에 비하여 36.5% 정도의 응력이 증가하고 있다. 또한, 수직평판의 응력중에서

1위 원공 정점에서 약 30° 각을 이루는 선과 수직 평판 최하단선이 교차되는 지점에서 최고 응력이 발생되고 있다. 이런 현상은 크로스 빔 중앙에 원공이 있는 모든 모델에서 같은 양상을 띠고, 각 모델의 응력값 차이는 아주 근소한 차이가 있었다. 1위와 5위 사이에 있는 원공에서 발생하는 응력은 원공이 중앙점에 가까워질수록 응력값은 증가되고, 그 응력구배는 Fig. 5에서 나타낸 바와 같다. 그러나 원공이 지지점 근처에 편중되어 있는 모델 L<sub>2</sub>에서는 중앙점에서 9.486kg/mm<sup>2</sup>의 응력이 산출되어 오히려 무원공 크로스 빔보다 적은 응력값이 산출되었으며, 지지점으로 갈수록 응력값이 감소하여 1위 원공이 위치하는 곳에서는 다른 원공보다 직경이 적으므로 급격한 단면 감소로 인한 응력 집중을 완화시키고 있어 인접한 2위 원공 정점에서 10.089kg/mm<sup>2</sup>로 최고응력이 산출되고 있다. 이는 무원공 크로스 빔과 비슷한 최고 응력값이고 전체적으로 응력구배가 완만하게 형성되고 있다.

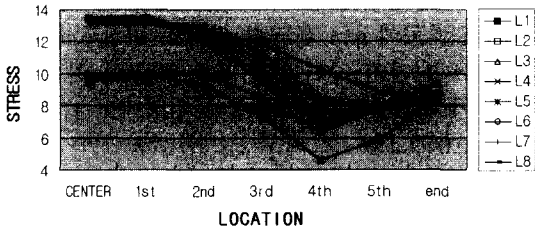


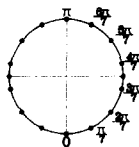
Fig. 5 Stress for the change of hole's center position to horizontal direction

Table 3은 크로스 빔의 중앙에 위치한 1위 원공 하위정점에서 상위정점까지 원주 주변의 응력분포를 나타낸 것으로 원공의 최하위 정점에서 최고 응력이 산출되고 있으며 중앙 수직선을 중심으로 좌우 대칭적인 응력 분포를 가지고 있다. 이는 본 모델이 채널 형강이라고 할지라도 유한 평판 중앙에 원공이 있고, 원공 좌우에 동일 모멘트를 받는 경우와 마찬가지로 모멘트와 응력집중계수 영향을 받기 때문이라고 생각된다.<sup>(9)</sup>

또한 원공이 지지점으로 갈수록 원공 하부 꼭지점에서 발생하는 응력과 인접 절점에서 발생하는 응력차는 점점 줄어들면서 원호가 반시계 방향으로

회전하는 것 같아 좌우 최고 응력 발생위치가 변화되고 있다. 이는 평판 좌우에 작용하는 모멘트 차로 인하여 원호의 저항력 위치가 달라지기 때문이라고 생각된다.

Table 3 Stress around the circular hole at center point (unit : mm)



| Model          | 0      | 1π/7   | 2π/7   | 3π/7   | 4π/7   | 5π/7   | 6π/7   | π      |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| L <sub>2</sub> | 7.7692 | 4.7164 | 1.9439 | 1.7638 | 0.5722 | 1.3494 | 2.0783 | 4.3182 |
| L <sub>3</sub> | 13.527 | 8.0733 | 2.4886 | 3.2023 | 1.9175 | 1.7825 | 5.2031 | 8.8783 |
| L <sub>4</sub> | 13.413 | 8.0424 | 2.4696 | 3.1637 | 1.9061 | 1.7716 | 5.1659 | 8.8156 |
| L <sub>5</sub> | 13.455 | 8.0666 | 2.4722 | 3.1636 | 1.9166 | 1.7764 | 5.1863 | 8.499  |
| L <sub>6</sub> | 13.416 | 8.0406 | 2.4502 | 3.1172 | 1.9251 | 1.7755 | 5.1822 | 8.8394 |
| L <sub>7</sub> | 13.285 | 7.9551 | 2.3888 | 2.9984 | 1.9251 | 1.7571 | 5.1556 | 8.7867 |
| L <sub>8</sub> | 13.131 | 7.8487 | 2.2664 | 2.7812 | 1.8777 | 1.6885 | 5.1096 | 8.7027 |

Fig. 6은 8가지 모델에 대하여 변위량을 나타낸 것으로 변위량은 L<sub>6</sub>의 중앙점에서 -5.4393mm로 최대 변위가 발생되며, 모든 모델에서 거의 비슷한 변위량이 발생되어 무원공 크로스 빔보다 불과 0.2676mm 더 많이 발생되고 있다. 이는 원공위치가 전체 굽힘 강성(EI)에 크게 영향을 끼치지 않는다는 것을 의미한다.

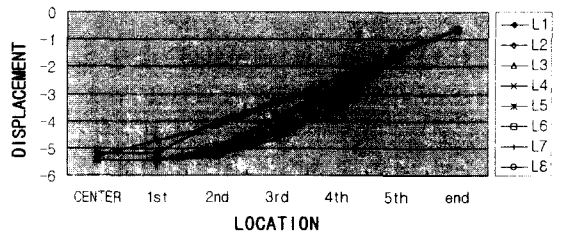


Fig. 6 Displacement for the change of hole's center position to horizontal direction

Fig. 7은 모델 L<sub>2</sub>의 크로스빔과 사이드실이 결합

되는 부분의 응력분포를 나타낸 것이다. 응력분포에서와 같이 크로스 빔이 연결된 사이드 실 하단에서 최고 응력 12.534kg/mm<sup>2</sup> 발생되고 있다. 본 모델에서는 등분포 하중을 받는 크로스 빔이 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 발생된다고 판단된다.

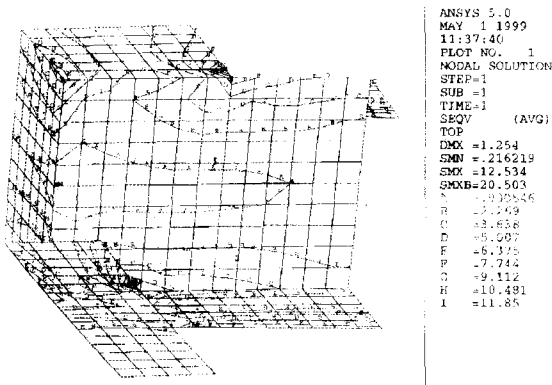


Fig. 7 Stress distribution of the cross beam edge zone

이상의 결과에서 본 모델의 원공의 좌우위치이동에 대한 응력 분포는 중앙부에서는 원공의 위치에 따라 변화하는 모멘트 크기와 원공 크기에 따른 응력 집중계수의 영향을 지대하게 받고, 지지부에서는 모멘트의 영향이 사이드 실에 전달되어 완전 고정단도 또한, 단순 지지도 아닌 특성을 띄며 Fig. 7과 같이 제한된 상하단에서만 고응력이 발생되므로 최소 모멘트와 최소 응력이 산출되는 점을 기점으로 등간격으로 배치하면, 중량 감소 효과를 내면서 비교적 균일한 응력값을 얻을 수 있다고 판단된다. 따라서 원공의 최적좌우위치 선정은 지지부의 최소 모멘트와 최소 응력이 산출되는 점을 기점으로 좌우로 분포시켜야 한다고 판단된다.

### 3.2 원공의 상하위치 이동에 대한 응력해석

원공의 상하 위치 이동에 대한 응력 분포를 고찰하기 위하여 Fig. 8과 같이 원공의 중심 위치를

결정하였다. 좌우 위치는 지지부의 응력분포와 앞 절의 연구 결과를 토대로 사이드 실 내부 끝단의 150mm 안쪽에서 5위 원공의 가장자리가 일치하도록 선정하고 이 점에서 중앙부 쪽으로 200mm 등간격으로 배치하여 고정시켰으며 직경은 모두  $\phi 90$  mm로 전공하였다. 상하위치는 크로스 빔의 중립선을 기점으로 상하로 10mm 간격으로 이동시켜 총 5가지 경우에 대하여 동일 조건으로 해석하였다.

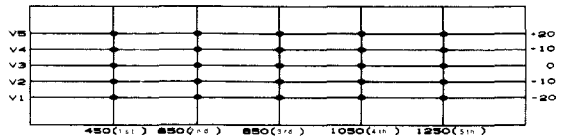


Fig. 8 Location of the center of circular holes

Fig. 9는 모델 L<sub>1</sub>과 모델 V<sub>1</sub>~V<sub>5</sub>에 대한 각 원공 위치의 최대응력 산출결과를 나타낸 것이다. 모든 모델에서 원공이 없는 중앙부의 응력값은 원공이 하부로 치우칠수록 약간씩 감소하나, 첫 번째 원공이 있는 곳에서는 원공이 상하로 편심됨에 따라 응력값은 현저히 증가하고 있다. 원공이 최상위와 최하위에 있을 때, 원공의 상하 정점에서 17.006kg/mm<sup>2</sup>, 20.044kg/mm<sup>2</sup>로 최고응력이 산출되어 최하부에 있을 때가 더 큰 응력이 발생되고 있다.

모델 V<sub>3</sub>과 같이 원공이 단면의 중립선에 있을 때, 응력 구배가 가장 안정되어 무원공 모델 L<sub>1</sub>과 비슷하나, 1위 원공의 하부정점에서 최고 응력 11.441kg/mm<sup>2</sup>를 나타내어 모델 V<sub>1</sub>보다 42.9%정도 적게 발생되고, 모델 L<sub>1</sub>보다는 16% 더 많이 발생되고 있다.

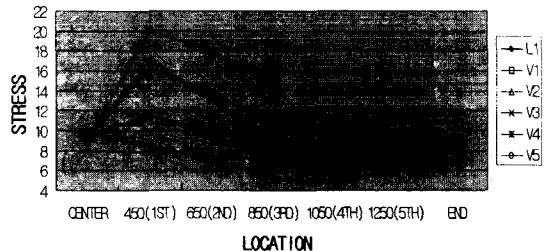


Fig. 9 Stress for the change of hole's center position to vertical direction

1위 원공의 응력 분포 특성? Fig. 10에서 나타낸 바와 같이  $c$ 의 값이 감소하여 원공 중심이 상부에 있을 때는 원공 상부 정점에서 최고 응력이 산출되고, 하부로 갈수록 이동하여 하부 정점에서 최고 응력이 발생된다. 이렇게 발생한 응력 성분을 분석해 보면, 상부에서는 반시계 방향, 하부에서는 시계방향으로 응력분포가 치우쳐 있다.

원공이 5위 축으로 갈수록 최고 응력 발생점은 이런 이동 성향이 커지며, 지지점에 인접한 5위 원공에서는 이런 응력분포 방향이 약  $30^\circ$  반대방향으로 이동하나 사이드과 인접된 상하부만은 약  $15^\circ \sim 20^\circ$  정도 반대방향으로 이동된다. 이는 원공좌우에 작용하는 모멘트가 다르기 때문이며, 5위 원공에서 반대 현상이 나타나는 것은 지지점 근처에서 모멘트 크기 차가 반전되고, 크로스 빔의 상하평판이 대부분의 모멘트를 사이드 실의 상하평판에 전달하기 때문이라고 생각된다.<sup>(10)</sup>

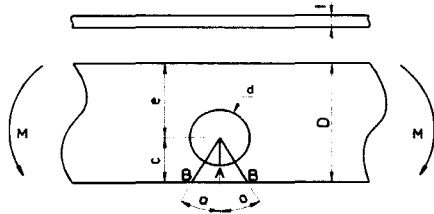


Fig. 10 Shape of eccentric circular hole in a finite plane width in relation to stress concentration

그리고 Fig. 10과 같이 유한 폭  $D$ , 직경  $d$ 를 가진 평판에서 원공중심이 편심되고 양단에서 동일 굽힘 모멘트  $M$ 을 받는 경우의 Table4와 같이 응력 집중계수  $K$ 가  $(c/e)$ 와  $(d/c)$ 의 영향을 받아 원공 중심이 상하로 편심됨에 따라 응력분포 특성이 다르게 나타난다고 판단된다.

Fig. 11은 동일 조건에서 각각의 모델에 대한 변위량을 나타낸 것으로 원공이 최하위에 있는 모델  $V_1$ 의 중앙점에서  $-5.5059\text{mm}$  변위가 발생하고, 모델  $V_4$ 에서  $-5.3331\text{mm}$ 가 발생되어 전체 모델에서 각각 최대, 최소 변위를 나타내고 있다. 그 차이는 적은 량이지만 원공이 중앙에서 약간 상부에 위치할 때 최소 변위량을 발생되고 있다.

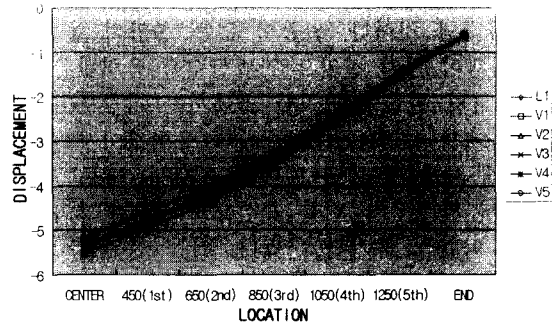


Fig. 11 Displacement for the change of hole's center position to vertical direction

따라서 본 연구대상과 같이 평판이 아닌 단순한 형상인 경우에도 원공주변의 응력집중과 변위량은 원공의 편심량, 직경, 단면계수의 영향을 받고 있으며 원공 중심이 단면의 중립선의 약간 위에 있을 때, 최소 응력과 변위량이 발생된다. 따라서 원공의 상하위치선정은 각 단면의 중립선에서 하중작용방향으로 단면수직길이의 약 13.34%범위 이내에 선정해야 된다고 판단되며, 복잡한 단면형상을 가진 경우에도 응용할 수 있다고 판단된다.

### 3.3 원공 형상변화에 대한 응력과 변위 해석

원공 형상에 대한 응력 분포를 고찰하기 위하여 원공 상하, 좌우위치에서 응력 분포가 가장 안정적으로 산출된 모델  $V_3$ 을 선정하여 직경 90mm 원공 넓이와 동일하게 되도록 직사각형 양쪽에 반원을 결합한 장방형 형태로 Table 4와 같이 직경  $d$ 와 직사각형 가로  $L$ 을 조합하여 천공하고,  $d$ 와  $L$ 의 교차점  $c$ 를  $V_3$ 모델의 중심위치와 일치시켰으며, 직경 50mm에서 90mm까지 10mm씩 증가시켜 5단계 모델을 해석대상으로 동일조건에서 해석하였다.

Table 4 Diameter of hole and horizontal length of rectangular (Unit : mm)

| Model<br>Item | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | $S_4$ | $S_5$ |  |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| Center Point  | 450   | 650   | 850   | 1050  | 1250  |  |
| Diameter (d)  | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    |  |
| Length (L)    | 87.96 | 58.9  | 35.9  | 16.65 | 0     |  |

Fig. 12는 모델 L<sub>1</sub>과 모델 S<sub>1</sub>~S<sub>5</sub>에 대한 응력분포를 나타낸 것이다. 원공이 없는 중앙의 응력은 원공 직경이 커져 진원으로 변할수록 응력값은 감소하나, 1위 원공이 위치한 곳에서는 직경 90mm의 모델 S<sub>5</sub>에서 11.441kg/mm<sup>2</sup>로 최대 응력값이 발생하고, 직경 60mm의 모델 S<sub>2</sub>에서 9.748kg/mm<sup>2</sup>로 최소 응력값이 발생되어, 이를 중심으로 원공형상이 변할수록 약간씩 증가하고 있다. 이는 진원인 모델 S<sub>5</sub>보다 약 14.8% 적은 양이고, 무원공 모델 L<sub>1</sub>의 최고응력 9.859kg/mm<sup>2</sup> 보다 오히려 약 1.1% 정도 적게 발생되고 있다.

이들 최고응력 발생위치는 장방향 원공인 경우, 모두가 원공의 가장자리에서 발생하지 않고, 중앙점에 가까운 수직 평판 하부의 단면감소 개시점에서 나타난다. 그리고 원공 주변의 응력은 직경이 커질수록 증가하여 결국 진원인 모델 S<sub>5</sub>의 원공 하부 정점에서 발생된다. 이런 현상은 1위~3의 원공까지 나타나고, 4위 원공에서는 지지점에 가까운 원공 가장자리로 변화되어 고응력이 발생된다. 이는 4위 원공의 위치에서 굽힘 모멘트가 변화되는 변곡점 위치라는 것을 의미하고, 이를 중심으로 응력이 증가하여 지지점에서 최고 응력이 발생되어야 하나, 앞질의 특성으로 인하여 크로스빔을 지탱하는 사이드실에서 최고 응력이 발생되고, 크로스빔에는 사이드 실과 결합되는 부분의 상하부 일부에서만 고응력이 발생되고 수직 평판 중앙부에서는 저응력이 발생된다.

원공형상에 대한 응력분포는 Fig. 12에서 나타낸 바와 같이 φ80 ~ φ90의 모델 S<sub>4</sub>와 S<sub>5</sub>을 제외하고 단면수직길이 1/2이내의 원공형상에서는 응력분포가 서로 비슷하게 나타난다.

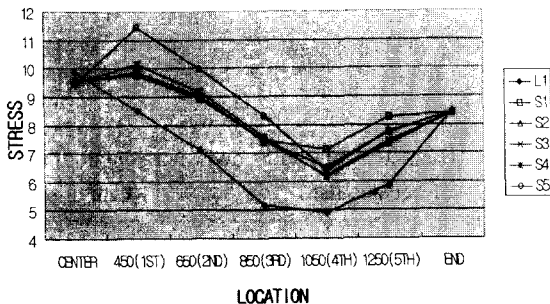


Fig. 12 Stress for the change of hole's shape

Fig.13은 모델 L<sub>1</sub>과 S<sub>1</sub>~S<sub>5</sub>에 대한 최대 변위량을 나타낸 것으로 모델 S<sub>3</sub> 중앙에서 -5.3101mm가 나타나고, 이를 중심으로 조금씩 증가하여 모델 S<sub>5</sub>에서 -5.335mm로 최대 변위를 발생하고 있어 이도 마찬가지로 원공 형상이 변위량 변화에 큰 영향을 끼치지 않고 서로 비슷한 변위량을 나타내고 있다.

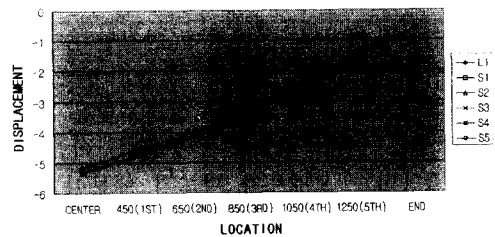


Fig. 13 Displacement for the change of hole's shape

이상과 같이 원공 형상에 대한 응력 분포는 직경이 60mm인 S<sub>2</sub>모델에서 무원공 크로스빔과 가장 유사한 응력분포를 나타내고 있으나, 직경이 수직 평판길이 1/2이내의 장방향 원공에서는 서로 비슷한 응력분포와 변위량을 나타내므로 원공의 형상 선정은 비교적 안정적인 응력분포를 나타내는 수직평판길이 1/2이내의 장방향 원공을 선택하여 공기관 및 전선관을 관통시켜 배치하는 것이 바람직하다고 판단된다.

#### 4. 결론

전동차 원공 크로스빔의 설계를 위하여 원공의 좌우, 상하위치 및 형상변화를 설계파라미터로 정하고, 각각의 파라미터 변화에 대하여 유한요소법으로 구조해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 최대상당응력은 원공이 지지점에 있을 때보다는 중앙부에 있을 때, 원공의 상하정점에서 발생되며, 무원공 크로스빔보다 36.5% 응력이 증가하였으며 이를 중심으로 가장자리로 갈수록 응력은 감소한다.



- 2) 최대 굽힘모멘트를 받고 있는 직각부는 사이드 실에 비틀림 모멘트로 변환하여 작용하므로 직교하는 사이드 실과 연결된 상하부 일부에서만 고응력이 산출되고 수직평판 중앙부는 저응력이 산출된다.
  - 3) 원공의 좌우위치선정은 사이드 실과 크로스 빔이 연결된 위치의 약 190mm 안쪽을 기점으로 좌우로 배치하고, 크로스 빔 중앙으로 갈수록 원공의 직경을 감소시키면 균일한 응력분포를 얻을 수 있으며 무원공 크로스 빔보다 낮은 응력으로 설계할 수 있다.
  - 4) 형강의 경우에도 수직평판에 있는 원공이 편심되면, 편심량, 직경, 단면계수의 영향을 받아 원공주변에 응력이 집중되므로 원공의 상하위치선정은 원공이 단면의 중립선에서 하중작용방향으로 약 13.34% 범위 이내에 두면, 가장 안전된 응력분포를 얻을 수 있다고 판단되며, 복잡한 단면형상에서도 응용할 수 있다고 판단된다.
  - 5) 원공의 형태는 장방형 원공이 진원공보다 적은 응력이 발생되고, 장방형 원공 직경이 전체 단면 수직길이 1/2범위 이내의 모델에서는 서로 비슷한 응력분포와 변위량을 나타냈으며, 이들의 응력차는 거의 없고 저응력이 발생된다. 따라서 원공형상선정은 공기관, 전선관 취부 및 중량감소의 목적으로 원공을 낼 경우, 단면수직길이 1/2 범위 이내의 장방형 원공으로 천공하는 것이 바람직하다고 판단된다.
  - 6) 동일조건에서 원공위치와 형상에 대한 변위량은 원공이 중앙에 위치하고, 하부에 위치할수록 증가하나, 모든 모델에서 가장 큰 변위량을 발생시킨 모델 V<sub>1</sub>이 무원공 모델 L<sub>1</sub>보다 약 6.5% 더 많이 발생되어 응력변화에 비하면 큰 차이는 없었다.
- is.” McGraw-Hill, Inc. pp.102 ~ 105, 1981.
  4. Stephen P. Timoshenko, J. N. Goodier, “Theory of Elasticity 3rd Edition,” MCGraw-Hill International Edition, pp.235 ~ 242, 1970.
  5. Robert D.Cook, “Finite Element Medeling for Stress Analysis,” JOHN Wiley & Sons, Inc., pp63~67, 1995.
  6. “ANSYS User's Manual for Revision 5.0 Vol III,” Swanson Analysis System, Inc., pp. 4.339~4.344, 1993.
  7. “ANSYS User's Manual for Revision 5.0 Vol IV,” Swanson Analysis System, Inc., pp.14.251~14.256, 1993.
  8. 오세욱, “재료역학 9판,” 동명사, pp.437~438, 1990.
  9. Walter D. Pilkey, “Formulas for Stress, Strain and Structural Matrices,” John Wiley & Sons, Inc., pp.272~274, 1994.
  10. Stephen P. Timoshenko, D. H. Young, “Theory of Structures 2nd Edition,” McGraw-Hill International Edition, pp.408 ~ 412, pp.421~431, 1965.

## 참고문헌

1. 丸山弘志, 景山允男 編著, “鐵道工學,” 1st Edition, 丸善株式會社, pp. 58~65, 1981.
2. 沖島善入, “鐵道車輛特論,” 2nd Edition, 交友社, 日本東京, pp.196~203, 1981.
3. Ugural, A. C., “Stress in Plates and Shal-