

철도객차용 크로스 빔의 경량화 설계에 관한 연구

장득열*^{#,}, 전형용*

*강원대학교 기계공학과

A Study on the Lightweight Design of a Cross Beam for Railway Passenger Coach

Deuk-Yul Jang^{*,#}, Hyung-Yong Jeon^{*}

^{*}Department of Mechanical Engineering, Kangwon National University

(Received 23 July 2017; received in revised form 28 July 2017; accepted 9 August 2017)

ABSTRACT

This report investigates the stress distribution according to the location and shape change of the circular hole for the lightweight design of the cross beam of a railway passenger car and studies the lightweight design. To design a lightweight cross beam with a circular hole, we selected the non-circular crossbeam as a basic model, examined the stress distribution and displacement by position and determined the location, shape, size and quantity of the hole for light weight. We analyzed the effects of the position and shape of the hole on the maximum equivalent stress and displacement. The influencing factors were set as the design parameters, and the stress value was examined according to the variation of each variable. By considering the stress value according to the change of each variable and selecting the design parameter with the narrowest scattering value of the stress at each position of the hollow cross beam with various hole positions and shapes, we studied a cross beam with a circle hole under identical load condition to have an equal stress distribution to that of a non-circular cross beam.

Key Words : Cross Beam(크로스 빔), Non-Circular Cross Beam(무원공 크로스 빔), Location and Shape of Circular Hole(원공의 위치와 형상), Design Parameters(설계인자), Light Weight Design(경량화 설계), Change of Each Variable(변수의 변화)

1. 서 론

용접구조물에 대한 경량화 설계는 오래 전부터 산업전반에 널리 보급되어 구조물 설계에 필수적인 요소로 자리 잡고 있다. 철도차량은 사용 목적과 용도에 따라 균일한 강도와 강성이 분포되도록 경량화 설계를 추구한다. 이 구조물은 일반적으로 다

른 시스템^[1]과 공유되어 복잡한 종합 구조물을 형성하게 된다. 이 때 공기관, 전선관 등의 설치가 요구되어 부득이 하게 프레임을 관통하는 경우가 있고, 중량 감소를 위하여 프레임에 의도적으로 원공을 뚫는 경우가 발생한다. 이런 경우, 원공을 프레임의 어느 위치에 어떤 형상으로 내느냐에 따라 그 구조물의 경량화 설계에 큰 영향을 끼치므로 용접 구조물의 원공에 대한 연구가 필요하다.^[2-3]

본 연구는 철도객차의 under frame의 크로스 빔에 대하여 원공의 위치, 형상변화에 따른 응력분포를

Corresponding Author : jang@kangwon.ac.kr
Tel: +82-33-570-6320, Fax: +82-33-570-6333

연구한 것이다. 크로스 빔은 under frame의 중앙부에 위치하여 under frame의 절반정도를 차지하며 일반적으로 형강을 등 간격으로 배치하여 사이드 실에 용접되어 있고, 차체 중앙부의 승객하중과 제어기기 하중을 지탱하는 중요한 요소이다. under frame의 하부에는 차량을 제어하는 기기가 부착되는데 비교적 설치 공간이 많은 under frame의 중앙부에 배치하여 크로스 빔에 결합시킨다. 제어기기가 이곳에 설치되면 필연적으로 차량을 제어하는 다른 기기와 신호를 주고받기 위한 매체로서 공기관과 전선관이 요구되며 이는 설치할 수 있는 공간이 필요하다. 이를 크로스 빔 밖으로 설치하면, 차량 하부구조의 공간이 확대되어 주행저항을 받고, 난잡한 배관으로 예기치 않는 간섭으로 문제가 발생하므로 밀집된 하부 구조가 되도록 크로스 빔을 관통하여 이를 설치한다. 그리고 객차는 주어진 중량 범위^[4] 내에서 제작해야 되는데 최근에 차량 고급화로 인하여 고급화 기기^[5]들이 추가되어 중량은 증가하는 반면에 운용비를 절감하기 위하여 중량감소를 요구하는 상반된 하중조건으로 경량화 설계는 그만큼 중요하다. 따라서 중량감소의 대상을 중량이 많이 나가는 under frame에 집중되고 그 중에서 수량이 많고 원공이 요구되는 크로스 빔을 대상으로 중량을 감소시킨다. 크로스 빔은 이렇게 과부하를 받는 데도 불구하고 이런 이유로 원공을 내는 것은 면밀한 검토가 있어야 하며 원공의 위치나 형상의 결과에 따라 응력분포가 다르게 나타나며 최악의 경우 치명적인 손상을 입을 수 있다.

따라서 본 연구는 원공 크로스 빔의 응력분포에 영향을 주는 설계파라미터에 대하여 응력을 고찰하고 최적의 원공위치와 형상을 연구하여 경량화 설계를 이루고자 무 원공 크로스 빔을 기본 모델로 하고, 원공의 위치와 형상, 크기를 예정하여 이들이 최대상당응력과 변위에 어떻게 영향을 끼치는 가를 분석하고, 영향을 끼치는 인자들을 설계파라미터로 설정하여 각 변수 변화에 따른 응력값을 고찰하고, 다양한 원공위치와 형상을 가진 원공 크로스 빔의 각 위치에서 응력 산포도 값이 가장 좁은 설계파라미터의 선정으로 동일한 하중조건에서 무 원공 크로스 빔과 대등한 응력 분포를 갖는 원공 크로스 빔의 경량화 설계에 대하여 연구 하였다.

2. 크로스 빔의 해석조건

2.1 개요

본 연구에 적용된 크로스 빔은 객차 under frame를 구성하는 요소이다. under frame은 Fig. 1에서 나타낸 바와 같고 전체 수직하중을 지탱하는 바디 볼스터, 전후 충격력을 지탱하는 센터 실, 승객하중과 각종 제어기기^[6]를 지탱하는 크로스 빔, 전체 크로스빔의 하중을 받아 볼스터에 전달하는 사이드 실, 그리고 엔드 빔으로 구성되며 이들은 서로 견고하게 용접되어 있다. 이들 요소들은 후판으로 (두께 10~12, 4~4.5mm)인접 요소와 용접되므로 충분한 강도와 강성을 가지나 크로스 빔은 중앙부의 승객하중과 제어기기 하중을 직접 지탱하고 공기관, 전선관을 설치하며 또한, 중량을 감소시키기 위하여 원공을 내야하는 악조건을 받고 있는 부재이다. 따라서 본 연구는 under frame의 반절을 차지하고 크로스 빔 중에서 중앙에 위치한 크로스 빔이 원공 위치와 형상 변화에 따라 최대상당응력이 큰 변화를 일으키고 이 같은 특성을 대표적으로 나타내고 있다고 판단되어 이를 연구 대상으로 삼았다. 그 형상과 구조는 Fig. 2에서 나타나 있고, 이들의 하중조건과 재질의 특성은 각각 Table 1과 Table 2와 같다.

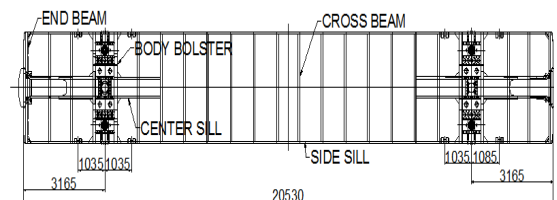


Fig. 1 Drawing of under frame

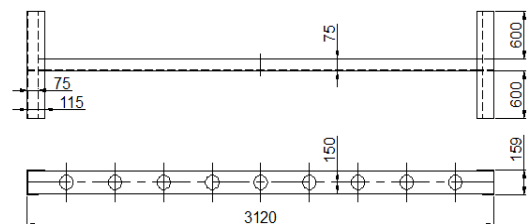


Fig. 2 Drawing of cross beam

Table 1 Load condition by JIS code

Load condition	Thickness of part
- Loaded weight : 1,042.2 kg	- Side sill : 4.5 mm
- Materials : SM 490A	- Cross beam : 4 mm

Table 2 Chemical composition and mechanical property of SM 490A steel substrate(wt%)

Mechanical property	Chemical composition
- Yield strength : 33 kg/mm ²	- C : 0.20 under
- Tensile strength : 50~62 kg/mm ²	- Si : 0.55 under
- Elastic modulus : 2.1×10 ⁴ kg/mm ²	- Mn : 1.50 under
- Elongation ratio : 17% over	- S : 0.040 under
- Poissons ratio : 0.3	- P : 0.040 under

2.2 해석모델

크로스 빔의 최적원공위치를 선정하기 위하여 무원공 크로스 빔을 기본 모델로 하고 원공 1개를 좌우 방향으로 일정한 간격으로 위치를 이동시킨 모델 5개, 원공 5개를 좌우로 일정구간에서 등 간격으로 배치시킨 모델 7개, 상하로 이동시킨 모델 5개, 원공 형상을 변화 시킨 모델 5개를 모델링하여 총 23경우에 대하여 모델링 하였다.

해석 모델의 좌표계는 크로스 빔의 길이 방향을 X축, 폭 방향을 Y축, 높이 방향을 Z축으로 설정하여 모델링하였고 그 형상은 Fig. 3과 같다. 사이드 실과 크로스 빔의 두께는 각각 4.5mm, 4mm 이므로 사용된 요소는 모두 쉘 요소(shell element)로 모델링 하였다. 이렇게 하여 발생한 절점 수는 8.037개, 요소 수는 7.576개로 모델링⁽⁸⁾ 하였다.

2.3 하중과 경계조건

under frame의 중앙부에 있는 여러 개의 크로스 빔 중에 한정된 수량의 크로스 빔만이 제어기기가 부착되어 있으므로 이들만 등분포와 집중하중을 동시에 받고 나머지는 승객하중만 등분포로 받는다. 따라서 하중조건은 under frame에 작용하는 하중이 등분포로 작용한다고 간주하고 이 등분포하중

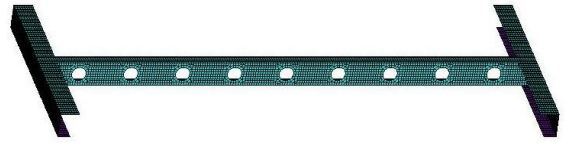


Fig. 3 Figure of Element of cross beam

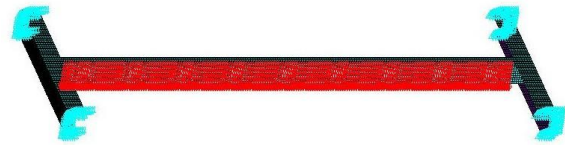


Fig. 4 Boundary condition of cross beam for finite element modal analysis

이 차량이 주행⁽⁷⁾하면서 발생하는 동하중(0.2g)을 반영하여 부과하였다. 이렇게 하여 크로스 빔 1개가 분담하는 하중은 1042.2kg이며, 이를 크로스 빔 상면에 부과하였다. 경계조건은 크로스 빔이 사이드 실에 용접되어 있으므로 완전 고정점 역할을 못하고 사이드 실과 상호작용을 하면서 결국, 전체 수직하중⁽⁸⁾을 지탱하는 바디 볼스타가 고정점 역할을 하게 된다. 이러한 특성을 반영하기 위하여 크로스 빔 양단을 고정하지 않고 크로스 빔이 연결된 사이드 실 전후 600mm 떨어진 위치에서 완전고정된 것으로 간주하여 이곳에 있는 모든 절점을 완전 구속 하였고 이를 Fig. 4와 같이 나타냈다.

3. 크로스 빔의 해석결과 및 토의

3.1 원공 1개를 가진 크로스 빔 좌우 강도 검토

원공의 좌우위치변화에 대한 응력변화와 원공이 응력에 미치는 영향을 고찰하여 원공의 최적 좌우 위치를 선정하기 위하여 기본 모델인 무원공 크로스 빔과 원공 1개를 일정한 간격으로 좌우 방향으로 이동시킨 모델 5개에 대하여 크로스 빔 중앙에서 끝단까지 원공을 낼 수 있는 범위인 0~1300mm에서 325mm 간격으로 원공 1개의 중심을 정하고, φ90mm의 원공을 대칭적으로 배치하여 총 6개의 모델에 대하여 크로스 빔 1개가 분담하는 하

중 1042.2kg를 동일하게 부과하여 해석을 하였다. Fig. 5는 상기의 6가지 모델에 대하여 최대상당응력과 응력분포를 나타낸 것이다. 무원공 모델인 CN의 응력은 중앙점의 수직하판에서 최고응력 10.72kg/mm²이 산출되고 2위에서 10.02 kg/mm², 3위에서 8.56 kg/mm², 4위에서 4.79 kg/mm², 5위에서 4.51 kg/mm², 고정점이라 할 수 있는 사이드 실과 크로스 빔이 연결된 부위 상면에서 8.56 kg/mm²이 산출되어 5위에서 최소응력이 산출되어 1300mm 위치에서 최소응력^[9]이 발생되고 이 점을 중심으로 좌우로 응력이 증가되는 현상이 나타나고 있다.

원공이 있는 경우에는 Fig. 5에서 나타내고 있는 바와 같이 원공의 위치에서 최고응력을 나타내고 있지만 원공이 4-5위에 있는 경우에는 중앙부의 응력보다 낮은 응력을 나타내고 있다. 원공이 있는 모델의 원공위치에서의 응력은 각각 C1-1 : 13.51kg/mm², C1-2 : 12.99kg/mm², C1-3 : 11.02 kg/mm², C1-4 : 9.09kg/mm², C1-5 : 9.79 kg/mm², 을 나타내고 있다.

여기서 나타난 바와 같이 C1-1 ~ C1-3모델은 무원공 모델의 최고응력 10.72kg/mm²보다 높게 나타나지만 C1-4 ~ C1-5모델은 원공이 있음에도 불구하고 오히려 낮은 응력을 나타내고 있고 이들의 응력의 산포도가 가장 안정적으로 분포되어 원공은 4-5위 위치에 배치하는 것이 가장 효과적이라고 생각된다.

Fig. 6은 이들 모델에 대한 변위를 나타낸 것이다. 각 모델에 대한 최고변위^[10]는 중앙점에서 각각 CN : 7.83mm, C1-1 : 7.88mm, C1-2 : 7.924mm, C1-3 : 7.89mm, C1-4 : 7.87mm, C1-5 : 7.876mm이 산출되어 모든 모델에서 거의 비슷한 변위량이 발생되어 무원공 크로스 빔보다 불과 0.094mm 더 많이 발생되고 있다. 이는 각 모델에 대한 변위량은 원공의 존재 여부에 관계없고 원공의 위치가 전체굽힘강성(EI)에 크게 영향을 끼치지 않는다는 것을 의미한다.

3.2 전 구간에서 원공 5개를 가진 크로스 빔 좌우 강도 검토

원공이 5개일 경우, 원공의 좌우위치변화에 대한 응력변화와 원공들이 응력에 미치는 영향을 고찰하여 원공의 최적좌우위치를 선정하기 위하여 기본 모델인 무원공 크로스 빔과 원공 5개를 일정한 간격으로 좌우 방향으로 이동시킨 모델 7개에 대하여 중앙점과 최소응력 발생위치 0~1300mm 사이를 일정한 비율로 원공 5개의 중심을 정하고, ϕ90mm의 원공을 대칭적으로 배치하여 동일 면적의 원공을 내었다. 총 8개의 모델에 대하여 크로스 빔 1개가 분담하는 하중인 1042.2kg를 동일하게 부과하여 해석을 하였다.

Fig. 7은 Table 3에서 나타낸 모델에 대하여 최대상당응력과 응력분포를 나타낸 것이다. 무원공 모델 CN은 앞 절에서 나타낸 바와 같이 중앙점에서 최고응력 10.72kg/mm²이 산출되고 2-5위로 갈수록

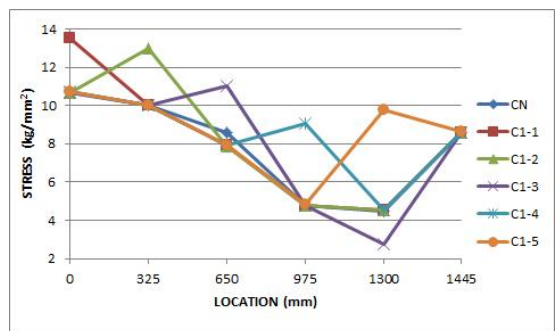


Fig. 5 Equivalent stress calculated in the model having 1 circular hole

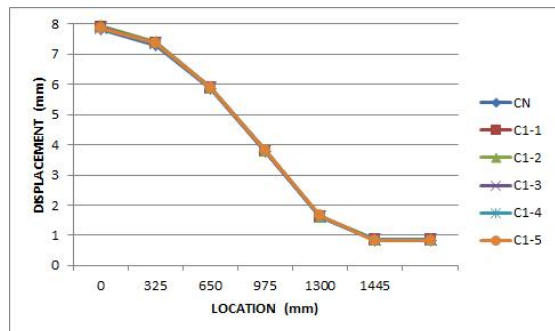


Fig. 6 Displacement calculated in the model having 1 circular hole

Table 3 Location of circular holes in each model (Unit : mm)

	1st	2nd	3rd	4th	5th	end	
CN	0	325	650	975	1300	1445	no hole
L1	0	195	390	585	780	1445	regular interval of center zone
L2	0	290	602	938	1300	1445	0.8 times interval
L3	0	308	627	958	1300	1445	0.9 times interval
L4	0	325	650	975	1300	1445	1.0 times interval
L5	0	341	671	990	1300	1445	1.1 times interval
L6	0	355	689	1004	1300	1445	1.2 times interval
L7	520	715	910	1105	1300	1445	regular interval of supporting zone

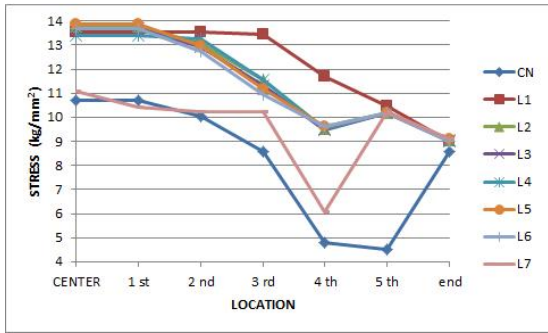


Fig. 7 Equivalent stress calculated in the model having 5 circular holes

응력이 감소하여 5위에서 4.51 kg/mm²로최소응력이 산출되며 지지부에서 8.56 kg/mm²이 산출되어 5위를 중심으로 응력이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 원공을 가진 모델 L1~L6이 공통적으로 나타나며 응력도 높게 나타나고 있다. 이 중에 모델 L6의 1위 원공 하부 정점에서 무원공 모델 CN에 비하여 29.6% 정도의 응력이 증가하고 있다. 또한, 수직평판 응력 중에서는 원공 정점에서 약 30° 각을 이루는 선과 수직평판 최하단선이 교차하는 지점에서 최고응력이 발생되고 있다. 이런 현상은 중앙점에 원공이 있는 모든 모델에서 같은 양상을 띄고, 각 모델의 응력값의 차이는 아주 근소하였다. 1위와 5위사이의 있는 원공에서 발생하는 응력은 원공이 중앙점에 가까울수록 응력값은 증가하고 그 응력구배는 Fig. 7에서 나타

낸 바와 같다. 이것은 중앙점과 각 위치에 원공이 있기 때문이며 모델 L1에서 L6로 갈수록 중앙점의 편중도가 떨어지지만 모델 L1을 제외하고는 그 응력값의 차이는 아주 미소하다. 모델 L1은 원공의 중앙점 편중도가 아주 심하여 모든 원공의 위치에서 두드러지게 높은 응력이 나타나지만 중앙점이 아닌 2~5위의 응력값은 중앙점의 응력값보다 낮게 나타난다. 그러나 원공이 지지점에 편중되어 있는 모델 L7에서는 중앙점에서 11.069kg/mm²의 응력이 산출되어 오히려 무원공 모델 CN보다 적은 응력값이 산출되었다. 이는 무원공 모델 CN과 비슷한 최고응력값이고 전체적으로 응력구배가 완만하게 형성되고 있다.

3.3 일정구간에서 원공 5개를 가진 크로스 빔 좌우 강도 검토

일정구간에서 원공이 5개일 경우, 원공의 좌우위 치변화에 대한 응력변화와 원공들이 응력에 미치는 영향을 고찰하여 원공의 최적좌우위치를 선정하기 위하여 기본 모델인 무원공 크로스 빔과 원공 5개를 최소응력이 산출되는 1300mm 지점을 기준으로 서로 다른 거리에 일정한 간격으로 원공을 좌우방향으로 배치시킨 모델 5개에 대하여 원공 5개의 중심을 정하고, ϕ90mm의 원공을 대칭적으로 배치하여 동일 면적의 원공을 내었다. 총 6개의 모델에 대하여 크로스 빔 1개가 분담하는 하중인 1042.2kg를 동일하게 부과하여 해석을 하였다.

Fig. 8은 Table 4에서 나타난 모델에 대하여 최대 상당응력과 응력분포를 나타낸 것이다. Fig. 8에서 나타난 바와 같이 무원공 모델 CN이 가장 낮은 응력을 나타내며 5위를 중심으로 응력이 증가하고 있고 중앙점에 원공이 있는 모델 LV00에서 최고 응력을 나타내고 전반적으로 높은 응력 발생하고 있다. 원공이 지지점으로 치우침에 따라 응력이 감소하며 지지점에 가장 편중된 모델 LV70에서 최소응력을 발생하고 있다. 중앙점의 응력은 원공이 있는 모델 LV00을 제외하고 모든 모델에서 무원공 모델과 비슷한 응력을 발생하며 1~3위 원공의 응력은 중앙점에서 떨어진 거리에 비례하여 응

Table 4 Location of circular holes in each model (Unit : mm)

	center	1st	2nd	3rd	4th	5th	end
CN	0	0	325	650	975	1300	1445
LV00	0	0	325	650	975	1300	1445
LV16	0	160	445	730	1015	1300	1445
LV34	0	340	580	820	1060	1300	1445
LV52	0	520	715	820	1105	1300	1445
LV70	0	700	850	1000	1150	1300	1445

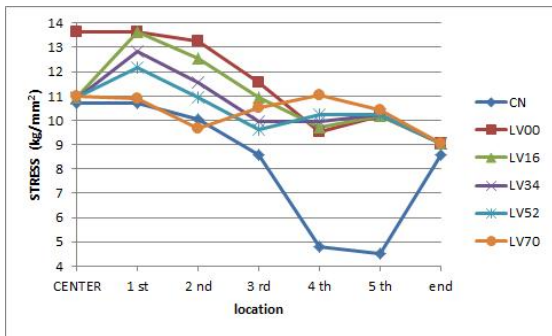


Fig. 8 Equivalent stress calculated in the model having 5 circular holes of regular section

력이 감소한다. 그러나 4-5위 원공의 응력은 원공이 있는 모든 모델에서 서로 비슷한 응력을 나타내나 모델 LV52~LV70에서는 응력이 높으며 또한, 반전되어 다른 모델보다 높게 나타난다.

3.4 원공의 상하위치 이동에 대한 크로스빔 강도 검토

원공의 상하위치 이동에 대한 응력분포를 고찰하기 위하여 Fig. 9와 같이 원공의 중심 위치를 결정하였다. 좌우 위치는 앞 절의 연구 결과를 토대한 모델 LV52을 대상으로 520~1300mm 범위에서 195mm 등 간격으로 배치하고 직경은 $\phi 90\text{mm}$ 로 내었으며 상하 위치는 크로스빔의 중립선을 중심으로 상하로 10mm 간격으로 이동시켜 총 5개의 모델에 대하여 동일조건으로 해석하였다.

Fig. 10은 Fig. 9에서 나타난 모델에 대하여 각 원공위치의 최대응력을 나타낸 것이다. 모든 모델

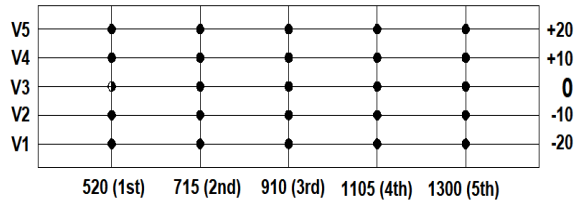


Fig. 9 Location of circular holes in each model

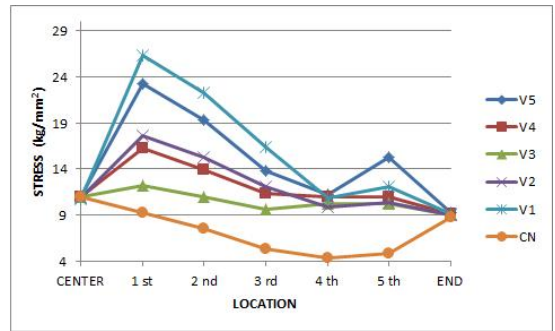


Fig. 10 Equivalent stress calculated in rib & lower plate before & after reinforcement of lower plate

에서 원공이 없는 중앙부의 응력 값은 대등한 응력값이 산출되나 1위 원공에서는 원공이 상하로 편심 됨에 따라 응력값이 현저하게 증가하고 있다. 원공이 최하위에 있는 모델 V1은 원공의 하부 정점에서 26.38kg/mm^2 로 최고응력이 산출되고, 원공이 최상위에 있는 모델 V5는 원공의 상부 정점에서 23.22kg/mm^2 , 모델 V2는 17.65kg/mm^2 , 모델 V4는 16.23kg/mm^2 를 나타내며 원공이 중립선에 있는 모델 V3에서는 1위 원공에서 12.16kg/mm^2 , 중앙에서 10.94kg/mm^2 로 산출되어 가장 낮고 안정적인 응력을 나타내고 있다. 이는 모델 V1보다 117% 정도 낮게 발생되고 무원공 모델 CN보다 10.6% 정도 더 높게 발생되고 있다. 원공이 1위에서 3위로 이동됨으로서 최고응력의 폭은 감소하나 응력값의 크기는 같은 경향을 나타내고 있다. 그러나 4위와 5위의 원공에서 나타나는 응력값은 모델 5만 제외하고 비슷한 응력값을 가진다. 1위 원공의 응력분포 특성은 Fig. 11에서 나타난 바와 같이 e의 값이 감소하여 원공 중심이 상부에 있을 때는 원공 상부정점에서 최고응력이

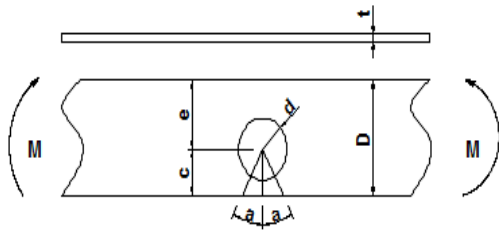


Fig. 11 Shape of eccentric circular hole in a finite plane in relation to stress concentration

발생된다. 이렇게 발생된 응력성분을 분석해 보면 상부에서는 반시계 방향, 하부에서는 시계방향으로 응력값의 크기가 치우쳐 있다.

원공이 5위 축으로 갈수록 최고응력 발생점은 이런 경향이 커지며 지지점에 인접한 5위 원공에서는 이런 응력분포 방향이 약 30° 반대방향으로 이동하나 사이드 실과 인접한 상하부는 약 15°~20° 정도 반대방향으로 이동된다. 이는 원공좌우에 작용하는 모멘트가 다르기 때문이며, 5위 원공에서 반대현상이 나타나는 것은 지지점 근처에서 모멘트 크기 차가 반전되고 크로스 빔의 상하평판이 대부분의 모멘트를 사이드 실의 상하평판에 전달하기 때문이라고 생각한다. 그리고 Fig. 11과 같은 유한 폭 D, 직경 d를 가진 평판에서 원공 중심이 편심되고 양단에서 동일 굽힘 모멘트를 받을 경우 응력집중계수 K가 (c/e)와 (d/c)의 영향을 받아 원공 중심이 상하로 편심됨에 따라 응력분포특성이 다르게 나타난다고 판단된다.

3.5 원공의 형상변화에 대한 크로스 빔 강도 검토

원공 형상에 대한 응력분포를 고찰하기 위하여 원공 좌우, 상하위치에서 응력분포가 가장 안정적으로 산출된 모델 V3을 선정하여 직경 90mm 원공 넓이와 같도록 Table 5와 같이 직사각형 양쪽에 반원을 결합한 장방형 형태로 직경 d와 직사각형 가로 L을 조합하여 L의 중간점을 V3 모델의 중심점과 일치시켜 직경 50mm에서 90mm까지 10mm씩 증가시켜 천공한 5개의 모델을 해석대상으로 동일조건에서 해석하였다. Fig. 12는 모델 CN과 S1 ~ S5에 대한 응력 분포를 나타낸 것이다.

Table 5 Diameter of hole and horizontal length of rectangular (Unit : mm)

Item	model	S1	S2	S3	S4	S5
Center Point		520	715	910	1105	1300
Diameter (d)		50	60	70	80	90
Length (L)		87.96	58.9	35.9	16.65	0

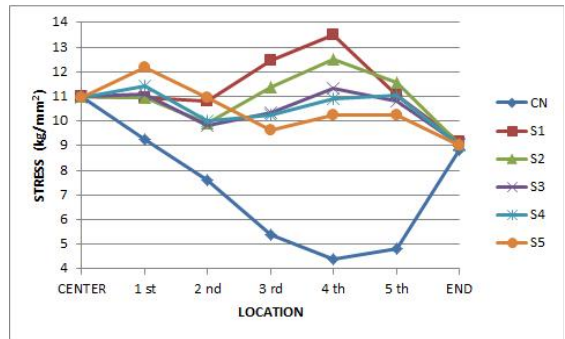


Fig. 12 Equivalent stress calculated in rib & lower plate before & after reinforcement of lower plate

원공이 없는 중앙점의 응력은 전 모델에서 비슷한 응력값은 산출되었으며 1위 원공에서는 직경 90mm의 모델 S5에서 12.16 kg/mm²로 최대응력이 발생하고 직경60mm의 모델 S2에서 10.94 kg/mm²로 최소응력이 발생하여 이를 중심으로 원공형상이 변할수록 약간씩 증가하고 있다.

2위 원공에서는 직경이 작은 모델일수록 응력이 적고 각 모델에 대한 산포도가 적다. 그러나 3~4위로 갈수록 직경이 큰 모델일수록 적은 응력을 발생하며 산포도가 커지는 양상이다. 5위 원공에서는 모델 S2에서 11.57kg/mm²로 최대응력이 발생하고 모델 S5에서 10.25kg/mm²로 최소응력이 발생하여 원공형상의 변화에 관계없이 비슷한 응력을 발생한다.

각 원공들의 최고응력 발생위치는 모두가 원공의 가장자리에서 발생하지 않고, 중앙점에 가까운 수직평판하부의 원공이 시작되는 점에서 나타난다. 그리고 원공 주변의 응력은 직경이 커질수록 증가하여 진원인 모델 S5의 원공하부정점에서 발생된다. 이런 현상은 1~3위 원공까지 나타나고 4위 원

공부터는 지지점에 가까운 원공 가장자리로 변화되어 고응력이 발생된다. 이는 4위 원공에서 굽힘 모멘트가 변화되는 변곡점이라는 것을 의미하고 이를 중심으로 응력이 증가되어 지지점에서 최고 응력이 발생되어야 하나 앞절의 특성으로 인하여 크로스 빔을 지탱하는 사이드 실에서 최고응력이 발생되고 크로스 빔에서는 사이드 실과 결합되는 부분의 상하부에서만 고응력이 발생되고 수직평판 중앙부에서는 저응력이 발생된다.

원공형상에 대한 응력분포는 단면의 수직 길이 1/2범위의 원공형상인 $\phi 70$ 의 모델 S3 가 전 구간에서 산포도가 적고 안정적이어서 경제적인 설계가 이루어진다고 판단된다.

5. 결 론

1. 최고응력은 원공이 중앙점에 있을 때 원공의 상하 정점에서 발생되며 중앙점에서 약 1200mm 떨어진 부분에서 최소응력이 발생된다.
2. 최대 굽힘 모멘트를 받는 지지부는 사이드 실에 비틀림 모멘트로 변환하여 작용되므로 직교하는 사이드 실과 연결된 상하부에서 고응력이 발생되고 수직평판 중앙부에서는 저응력이 산출된다.
3. 원공의 좌우 위치선정은 굽힘 모멘트의 변곡점 중앙점에서 약 1200mm 지점에서 좌우로 배치하고 이곳에 직경을 크게 하고 중앙점으로 갈수록 직경을 감소시키면 균일한 응력분포를 얻을 수 있으며 무 원공 크로스 빔과 같은 효과를 내는 설계를 할 수 있다.
4. 형강의 경우에도 수직평판에 있는 원공이 편심되면 편심량, 직경, 단면계수의 영향을 받아 원공 주변에 응력이 집중되므로 원공의 상하 위치선정은 원공의 중심이 단면의 중립선에서 약간 위에 두면 안정된 응력분포를 얻을 수 있다고 판단된다.
5. 원공 형태는 단면의 수직 길이 1/2 범위의 장방형 원공이 진원보다 안정적이고 저 응력분포를 나타낸다. 따라서 원공은 단면의 수직 길이 1/2 범위에서 장방형 원공으로 천공하는 것이 바람직하다고 판단된다.

후 기

“이 논문은 2016년도 강원대학교 대학회계 학술연구 조성비로 연구하였음(관리번호-620160006).”

REFERENCES

1. Son, Y. J., Introduction to Rolling Stock System Technology, GOOMIBOOK Inc, pp. 251-268, 2013.
2. Professional Engineer Railroad Rolling Stock Association, Technology Engineering of Railroad Vehicle (I), GOOMIBOOK Inc, pp. 101-113, 2016.
3. Seo, S. B., Railway Engineering, Book Gallery, pp. 580-582, 2011.
4. Seong, D. R., Park, S. H., Railway Engineering & Regulation, YEAMOONSA Inc, pp. 55-60, 2015.
5. Lee, J. D., Introduction of Railway Engineering, NOHAE Inc, pp. 584-563, 2017.
6. Baek, N. W., Lee, B. S., Lee, D. H., Kang, B. B., Railway Vehicle System Engineering, Golden Bell Inc, pp. 494 -511, 2017.
7. Japanese Standards Association, Test Methods of Static Load of Body Structures of Railway Rolling Stock, pp. JIS E 7105, 1989.
8. Go, J. H., Kang, D. M., "CAE Analysis on Strength and Fatigue of Rear Door of Passenger Car," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 3, pp. 63-69, 2014.
9. Cho, S. J., Han, J. W., Park, Y. J., Lee, G. H., "Structural Analysis of a Planetary Gear Carrier in the Slewing Reducer for Tower Crane," JJournal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 5, pp. 1-7, 2014.
10. Kim, S. K., Lee, J. W., "Analytical Study on the Structural Strength of an Air Compressor for Main Engine Starting of 22000TEU Class Container Ships," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers., Vol. 14, No. 5, pp. 60-67, 2015.