

커플링 모델을 이용한 대차프레임 용접부 응력 해석

Stress Analysis on Weld Zone of Railway Bogie Frame Using Coupling Model

정순철*
Jung, Soon-Chul

전현규**
Jun, Hyun-Kyu

ABSTRACT

In this paper, stress analyses using shell and solid elements on weld zone of railway bogie frame were performed. To calculate stress distribution on weld zone, a coupling model using shell and solid elements was suggested. For this purpose, we performed specimen analyses on T-type solid and shell model of T-type panels which were modeled using shell elements, solid elements and coupled elements, respectively. The result showed that the stress concentration at weld zone was occurred in solid model, but it didn't occur in shell model. And the stress distribution of coupled model was similar to that of solid model. Also, we applied the coupled modeling method on the analysis on weld zone of bogie frame. The stress distribution of coupled model showed much higher compared to that of shell only model. Therefore, the coupled model method is highly recommended for the stress analysis in weld zone of bogie frame.

1. 서론

철도차량에서 대차는 차체 및 승객하중을 지지하며 열차가 주어진 궤도를 안정성 있게 주행할 수 있도록 하는 차량구성요소로서 열차운행 중 충분한 강도를 유지하는 것은 매우 중요하다. 도시철도용 대차프레임은 사이드프레임(side frame), 트랜섬(transom) 및 각종 구성품의 지지를 위한 브라켓(bracket)으로 구성되어 있으며 프레임 안쪽에 하중지지를 위한 보강재가 있어 복잡한 형상을 가지고 있다. 국내에서는 대차설계시 UIC⁽¹⁾ 규정에 따라 구조해석 및 하중시험을 수행함으로써 대차의 정적·동적강도 및 수명주기 중 피로하중에 의한 내구성이 유지되는지 검증하고 있다. 이와 같이 대차프레임 설계시 충분한 강도가 유지되도록 하고 있으나 노후된 대차프레임 용접부에서는 균열 등 손상이 발생되고 있다. 이러한 이유는 용접부에 설계시 고려하지 못한 과도한 하중이 작용되거나 용접시의 용입부족 등 용접불량을 의심해 볼 수 있으나 명확한 이유는 아직까지 밝혀지지 않고 있다.

국내 전동차의 용접대차프레임은 두께 8-10mm의 철판을 용접하여 만든 구조물로서 해석의 효율화를 위해 형상의 단순화과정을 거친 후 쉘 요소를 이용한 구조해석이 선호되고 있다. 즉 유한요소해석시 그림 1과 같이 요소망을 쉘 요소로 작성함으로써 형상을 모델링하는데 소요되는 노력, 해석시간 및 해석 데이터의 양을 줄이고 있다. 대차의 구조해석은 지금까지 여러 연구자에 의해 수행되어 왔다. 윤⁽²⁾ 등은 UIC 기준에 의거 대차프레임의 구조해석을 수행한 바 있으며 황⁽³⁾ 등도 도시철도용 표준화 대차프레임의 강도평가를 수행한 바 있다. 한편 국외에서는 Oyan⁽⁴⁾ 등이 대만 도시형 전동차 대차프레임의 구조해석을 수행한 바 있으며 국내의 경우와 마찬가지로 쉘 요소를 이용하고 있다.

* 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템안전연구본부

E-mail : scjung@krri.re.kr

Tel. : 031-460-5227

** 회원, 한국철도기술연구원

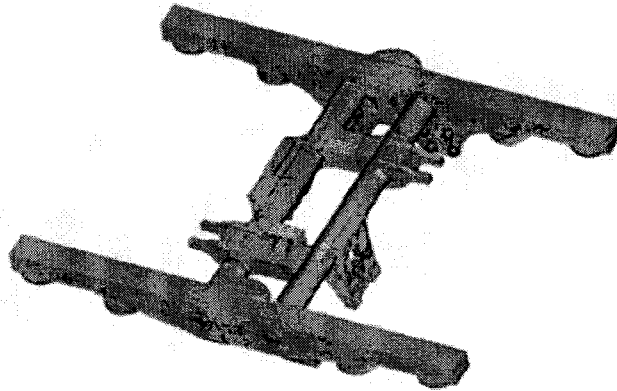


그림 1 대차프레임 유한요소해석 모델 예⁽²⁾

그러나 쉘 요소만을 이용한 유한요소해석법에서는 용접부와 같이 두께가 일정하지 않은 구조 취약부를 표현하기 어려우며 용접부에서 발생하는 국부응력을 정확히 평가할 수 없다. 따라서 용접부의 응력 해석을 수행하기 위해서는 쉘 요소만을 이용하여 요소망을 생성할 경우 한계가 있으므로 이를 해결하기 위한 연구가 수행될 필요가 있다. Pey⁽⁵⁾ 등은 사각관 조인트(tubular joint) 부위의 구조해석을 위해 쉘 요소와 솔리드 요소를 사용하여 용접부위에 대한 해석방법을 제시한 바 있다. 이 방법에서는 사각관 부위는 쉘 요소로 모델링하고 관과 관이 만나는 용접부위는 솔리드로 모델링함으로써 용접부위에 발생하는 국부응력을 평가하였다. 따라서 취약부위가 많은 대차의 용접부 구조해석의 경우에도 용접부의 정확한 응력해석을 수행하기 위해서는 이와 같이 쉘 요소와 솔리드 요소를 사용한 커플링 방법을 이용할 필요가 있다.

본 논문에서는 대차용접부에서 발생하는 국부응력을 평가하기 위한 연구의 일환으로 쉘과 솔리드의 커플링 모델을 이용한 대차구조해석 절차를 제시하였다. 이를 위하여 T형 시편의 응력해석을 수행하여 모델링 방법에 따른 응력을 평가하였으며 이를 대차프레임 구조해석에 적용하여 쉘 요소로 구조해석을 수행했을 경우와 커플링 요소로 구조해석을 수행했을 경우에 대해 응력을 평가함으로써 용접부의 응력을 더 정확히 평가할 수 있는 토대를 마련하였다.

2. 관련이론

2.1 쉘-솔리드 커플링 해석

대차프레임의 용접비드는 쉘 요소로 표현하기에 충분치 않기 때문에 용접비드는 솔리드로 모델링하고 대차프레임부위는 쉘로 모델링하는 커플링 방법을 이용할 필요가 있다. 쉘과 솔리드의 커플링을 위해서는 그림 2와 같이 쉘과 솔리드요소의 연결부위에서의 양립성(compatibility)이 유지되어야 한다. 즉, 솔리드와 쉘의 연결부위에서의 형태는 변형후에도 직선 및 수직의 형태를 유지해야 한다. 20 절점사각 요소(20 node brick element)와 8절점 쉘요소(8 node shell element)가 연결될 때에는 9번 절점위치에 솔리드 요소의 절점이 없기 때문에 9번 요소의 양립성 조건을 만족시키기 위하여 다음과 같은 조건이 만족되어야 한다.

$$\begin{aligned} (U_x)_9 &= \frac{1}{2}(U_x)_5 + \frac{1}{2}(U_x)_8 \\ (U_y)_9 &= \frac{1}{2}(U_y)_5 + \frac{1}{2}(U_y)_8 \end{aligned} \quad (1)$$

$$(U_z)_9 = \frac{1}{2}(U_z)_5 + \frac{1}{2}(U_z)_8$$

또한 회전자유도(rotational degree of freedom), Q도 A와 B점에서 다음과 같은 조건이 만족되어야 한다.

$$(Q)_A = \frac{\frac{1}{2}[(U_z)_3 - (U_z)_1]}{T} + \frac{\frac{1}{2}[(U_z)_7 - (U_z)_5]}{T} \quad (2)$$

$$(Q)_B = \frac{\frac{1}{2}[(U_z)_7 - (U_z)_5]}{T} + \frac{\frac{1}{2}[(U_z)_3 - (U_z)_2]}{T}$$

여기서, T는 셸요소의 두께이다.

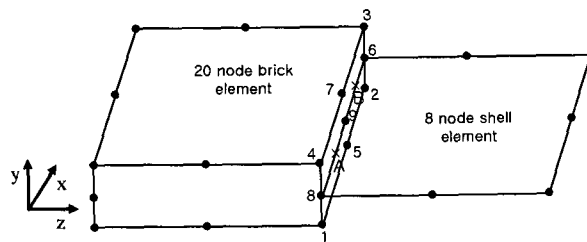


그림 2 셸과 솔리드 요소의 커플링 모델

2.2 셸, 솔리드 및 커플링 방법 비교

기존의 대차프레임 유한요소모델작성 방법과 커플링 모델방법을 분석하기 위하여 그림 3과 같이 대차 프레임의 판넬이 용접으로 이루어진 것을 고려하여 T형 용접판넬을 모델링하고 여기에 굽힘하중을 작용한 후 응력해석을 수행하였다. 해석의 단순화를 위해 두께 10mm의 판넬이 연결되는 부위에 길이 8mm의 용접비드를 가정하였으며, 연결부위에 굽힘모멘트를 생성하기 위해 150mm 판넬끝단에 250N의 수직하중을 작용하였다. 수직판넬의 양끝단은 구속하였으며, 수직판넬이 충분한 강성을 가지고 있다는 가정 하에 x방향의 변위를 구속하였다.

$$\sigma_b = \frac{Mc}{I} = \frac{M \times h/2}{1/12 \times bh^3} \quad (3)$$

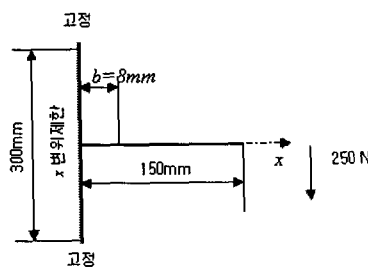


그림 3 T형 용접판넬 모델

그림 4는 셸과 솔리드요소의 모델링 방법을 비교하기 위하여 구성된 5가지의 T형 용접판넬의 모델링 방법, (a) 용접비드를 고려하지 않은 솔리드 모델, (b) 용접비드를 고려한 솔리드 모델, (c) 용접비드를 고려하지 않은 셸모델, (d) 용접비드를 고려한 셸모델, (e) 용접비드를 고려한 셸-솔리드 커플링 모

델과 유한요소모델이다. 유한요소해석은 ABAQUS Ver. 6.7을 이용하였다.

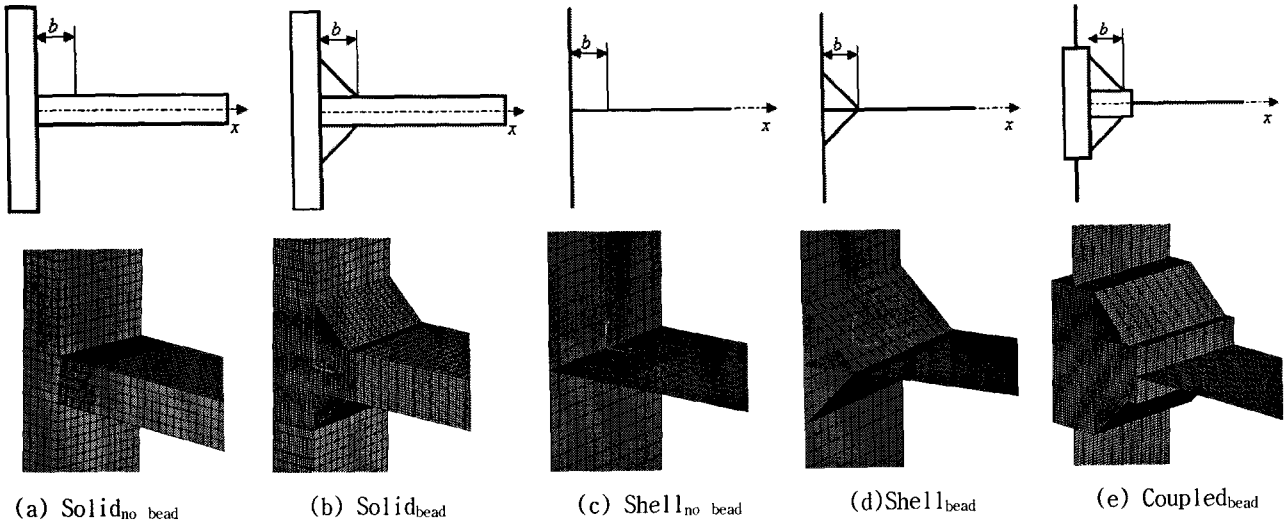
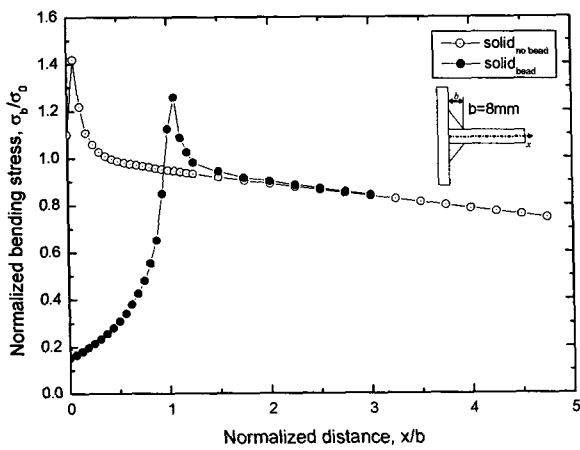
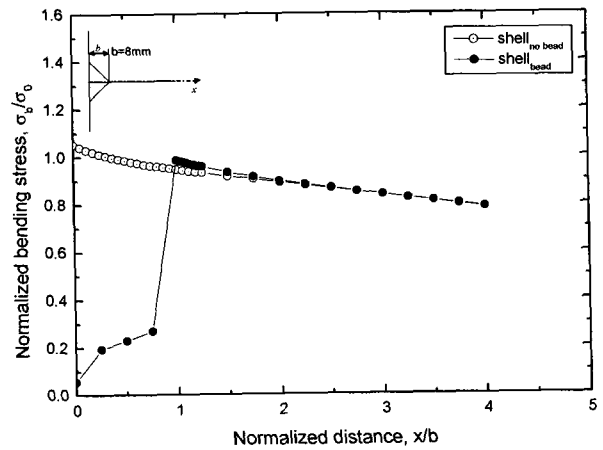


그림 4 T형 용접판넬 해석을 위한 유한요소모델

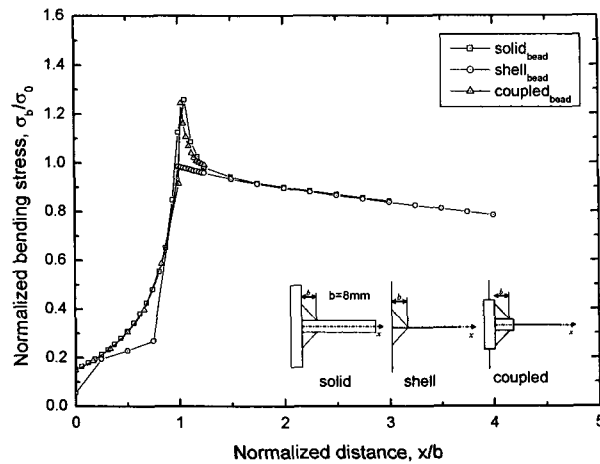
그림 5는 해석결과로서 솔리드로 모델링한 경우(a)에는 용접비드가 없는 경우 약 43%, 용접비드가 있는 경우 약 33%의 응력이 발생되어 응력집중현상이 뚜렷이 나타났지만 셸로 모델링한 경우(b)에는 응력 집중현상이 나타나지 않았다. 따라서 셸요소로만 모델링한 경우에는 용접부에서의 응력집중현상을 제대로 평가하지 못하는 오류를 범할 수 있음을 알 수 있다. 셸과 솔리드 요소를 결합한 커플링 모델의 경우(c)에는 솔리드 모델의 해석결과와 비슷한 응력분포를 보여주고 있으며 셸과 솔리드 요소를 결합한 커플링 모델이 용접부의 응력해석을 위해 더 타당함을 알 수 있다. 따라서 대차프레임 해석의 경우 용접부에 나타나는 응력을 더 정확히 평가하기 위해서는 기존의 셸 요소만을 이용하여 응력을 수행한 모델보다 셸과 솔리드를 결합한 커플링 모델을 이용할 필요가 있음을 알 수 있다.



(a) 솔리드 모델



(b) 셸 모델



(c) 커플링 모델

그림 5 용접부 응력해석 결과

3. 대차프레임 해석

3.1 셸 모델

대차프레임의 셸 모델과 커플링 모델의 해석 결과를 비교하기 위하여 그림 6과 같이 셸 요소를 이용한 대차프레임의 유한요소모델을 생성하였다. 사용된 요소의 종류는 8절점 셸요소(S8R)이며 총 요소수는 약 10만개이다. 경계조건으로는 1차 스프링시트 위치에 수직방향 강성 2.024 MN/m, 수평방향 강성 7.75 MN/m의 스프링을 8개 모델링하여 지지하였으며, 하중조건으로는 차체 및 승객하중을 고려하여 30톤의 하중을 분포하중으로 적용하였다. 대차프레임 응력해석을 수행한 결과, 용접부 위치에서의 응력은 약 112 MPa로 나타났으며, 최대 국부응력은 131.2 MPa로 나타났다.

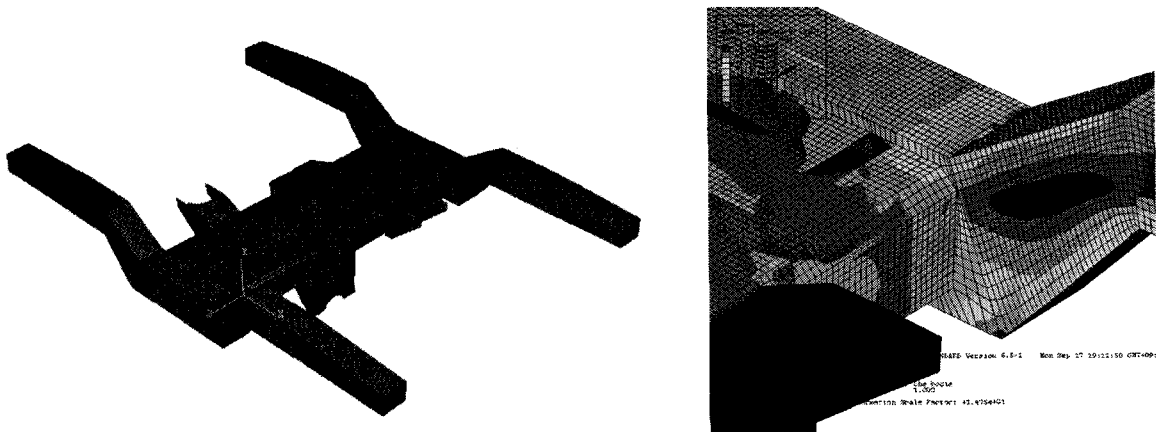


그림 6 셸요소로 생성한 대차프레임 유한요소모델 및 응력해석결과

3.2 커플링 모델

커플링모델에서는 그림 7과 같이 사이드프레임과 트랜섬이 연결되는 구조취약부에 솔리드밴드를 모델링하고 셸-솔리드 연결을 위한 구속조건(shell to solid constraint)을 부여한 후 용접부의 응력해석을 수행하였다. 해석조건은 앞서의 셸모델 해석조건과 동일하다. 응력해석을 수행한 결과, 용접부 위치에서의 응력분포는 166MPa로 나타났으며, 최대 국부응력은 190.6 MPa로 나타났다.

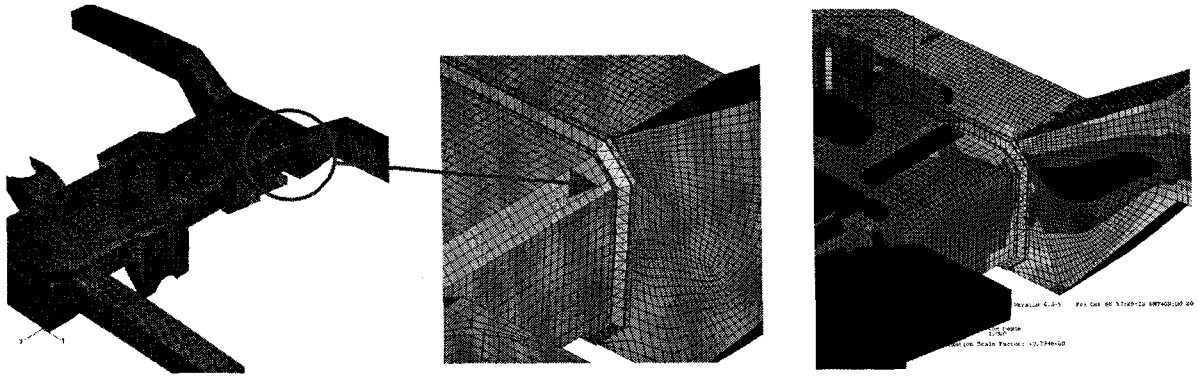


그림 7 용접부의 솔리드-셸 커플링 모델 및 응력해석결과

셸모델과 커플링 모델의 해석결과를 비교해보면 앞서 시편에서의 경우와 같이 응력집중의 영향으로 용접부에서의 응력이 약 45%정도 증가함을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 대차프레임 용접부에서의 응력평가를 위하여 셸과 솔리드 요소를 결합한 커플링 방법을 이용한 응력해석법을 제시하였다. 이를 위하여 T형 시편의 응력해석을 통하여 제시한 방법의 타당성을 검증하였으며, 대차프레임 응력해석을 통해 용접부에서의 응력이 약 45% 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 용접부와 같이 응력집중이 예상되고 구조가 불규칙한 경우 셸요소만을 이용한 응력해석보다 커플링 방법을 이용한 응력해석이 구조취약부에서의 응력을 더 정확히 평가할 수 있다고 판단된다.

참고문헌

1. UIC Code 615-4(2003), "Motive power units-Bogies and running gear-Bogie frame structure strength tests", International Union of Railway.
2. 윤성철, 김원경(2005), "대차들의 구조해석 및 하중시험에 관한 연구", 한국철도학회논문집, 제8권 제 6호, pp.101-107.
3. 황동황, 최중호, 송시엽(2005), "도시철도용 표준화 대차프레임의 강도평가", Proceedings of World Congress Railroad Research, pp.661-666.
4. C. Oyan(1998), "Structural strength analysis of the bogie frame in Taipei rapid transit systems", Proc Instn Mech Engrs Part F, Vol. 212, pp.253-262.
5. L.P. Pey, A.K. Soh and C.K. Soh(1995), "Partial implementation of compatibility conditions in modeling tubular joints using brick and shell elements", Finite elements in analysis and design, Vol.20, pp.127-138.
6. S.T. Lie, C.K. Lee, S.P. Chiew and Z.M. Yang(2006), "A consistent crack modelling and analysis of rectangular hollow section joints", Finite elements in analysis and design, Vol.42, pp.639-649.