

# 축소모형을 이용한 철도차량 충돌 해석 기법 연구

## Crash Analysis of Railway Vehicle Structure Using Scale Model

김범진\*  
Bum-Jin, Kim

허승진\*\*  
Seung-Jin, Heo

---

### ABSTRACT

In general, the aluminum extrusions are used to the light construction of the high speed rail vehicle structures. However, the research works on the crashworthy design of the high speed rail vehicle structures are not published sufficiently because the crash test of high speed rail vehicle structures costs high and is complicated. So, a method that can predict crash characteristics of a large size structure like a high speed rail vehicle should be suggested.

In this study, the scale model studies are performed to predict the impact energy absorption characteristics of full scale model. In the first place, we verified the theory of scale law using FE-simulation from the crashworthiness point of view. Secondly, we performed the crush test using scale model, made of aluminum sub structure. As a result, we could predict the crash characteristics using scale model by 10~20% error.

---

### 1. 서론

고속전철의 전체 충돌 성능을 예측하기 위하여 컴퓨터를 이용한 진산구조해석이 선호되고 있다. 물론 고속전철에 대한 충돌 시험 평가가 필수적이겠지만 고속전철의 충돌 시험이 실제적으로는 어려움이 많이 따르므로 축소모형 시험을 통한 실제 고속전철의 충돌 특성을 예측, 평가하는 부분이 제시되어야 할 것이다.

이를 위하여 본 연구에서는 전체 차량의 충돌 특성을 예측 할 수 있는 상사 이론을 적용한 축소 모델 정립 기법을 연구하고자 하며, 나아가서 알루미늄 압출재와 알루미늄 구조물의 압괴 해석 및 시험을 통하여 축소 모델 응용 개념의 타당성을 검증하고자 한다.

### 2. 상사 이론을 이용한 충돌에너지 흡수 부재의 축소 모델 정립 기법 연구

상사 이론을 이용한 충돌에너지 흡수 부재의 축소 모델을 통하여 실제 구조물의 충돌 성능을 예측 할 수 있다. 부피가 굉장히 크고 고가인 고속전철과 같은 차량에 대해서는 충돌 시험이 현실적으로 어려우므로 해석 외에 이러한 축소 모델을 이용한 충돌 시험 평가가 보조적으로 필요하다. 본 절에서는 축소모델을 적용한 사각 단면을 갖는 충돌에너지 흡수 부재로부터 상사법칙을 유도하였으며 이를 고속전철 동력객차의 충돌 해석 모델에 적용하여 상사 이론의 적용 가능성을 고찰해 보았다.

---

\* 국민대학교 자동차공학대학원, 회원

\*\* 국민대학교 기계자동차공학부, 회원

## 2.1 충돌에너지 흡수 부재의 상사법칙

축소 모델은 재료의 성질, 기하형상, 하중에 대한 상사비로부터 결정된다. 본 절에서 고려한 충돌 에너지 흡수 부재의 상사법칙은 이상화된 사각 단면 에너지 흡수 부재의 기하 형상으로부터 유도하였으며 축소 모델은 동일한 재질을 사용하고 기하학적으로 1:2의 상사비를 갖도록 설정하였다. 1/2 축소 모델(1/2 scale model)은 동일 재질이며 1:2의 상사비를 가지므로 길이는  $L = 2 \cdot L_m$ , 밀도는  $\rho = \rho_m$ , 탄성계수는  $E = E_m$ , 변형률은  $\varepsilon = \varepsilon_m$ 이다. 여기서 밑 첨자 'm'은 축소 모델을 의미한다. 상기의 결과로부터 하중,  $F$ , 에너지,  $W$ , 질량,  $m$ , 가속도,  $a$ , 속도,  $v$ , 그리고 시간,  $t$ 에 대한 상사비를 정리해보면 다음과 같다<sup>[1][2]</sup>.

$$F = F_m (L^2/L_m^2)(E/E_m)(\varepsilon/\varepsilon_m) = F_m(2^2)(1)(1) = 4F_m \quad (1)$$

$$W = W_m (F/F_m)(L/L_m) = W_m(4)(2) = 8W_m \quad (2)$$

$$m = m_m (\rho/\rho_m)(L^3/L_m^3) = m_m(1)(2^3) = 8m_m \quad (3)$$

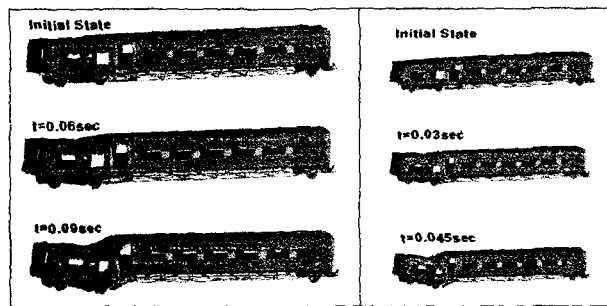
$$a = a_m (F/F_m)(m_m/m) = a_m(4)(1/8) = a_m/2 \quad (4)$$

$$v^2 = v_m^2 (F/F_m)(s/s_m)(m_m/m) = v_m^2(4)(2)(1/8) = v_m^2 \quad (5)$$

$$t = t_m (v/v_m)(a_m/a) = t_m(1)(2) = 2t_m \quad (6)$$

## 2.2 상사법칙을 이용한 고속전철 동력객차의 충돌해석

상기에서 유도한 1/2 축소 모델(1/2 scale model)의 상사비를 기초로 하여 해석용 고속전철 동력객차 모델과 동력객차 1/2 축소 모델을 완성한 후, 기준 모델인 동력객차 전체 모델(full scale model) 대비 충돌 특성 예측 정도를 살펴보았다. 충돌 조건은 50km/h의 속도로 동력객차가 고정벽에 충돌하도록 설정하였으며 Fig. 1에서는 동력객차 전체 모델과 동력객차 1/2 축소 모델의 충돌 붕괴 양상을 나타내고 있으며 두 모델이 동일한 상사 시간대에서 유사한 충돌 거동을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.



(a) Full scale model

(b) 1/2 Scale model

Fig. 1 Typical deformed shapes of full and 1/2 scale model

또한, Fig. 2의 힘-변위 선도에서 동력객차 축소 모델의 하중 곡선 및 변형량에 위에서 유도한 1/2 축소 모델에 대한 상사비 4, 2를 각각 곱하여 동력객차 전체 모델의 하중 곡선과 유사한 붕괴 곡선을 얻을 수 있었고 평균 붕괴 하중(mean crash load)의 오차는 약 11%임을 확인하였다. 따라서, 동력객차 축소 모델을 통하여 동력객차 전체 모델의 충돌 특성을 상당히 예측 가능함을 해석적으로 평가 할 수 있었다. 다음으로 상사비가 충돌안전도 측면에 미치는 영향을 분석하기 위하여

Fig. 3과 같이 동력력차 모델의 상사비에 따른 충돌해석 결과를 평균 붕괴 하중으로 나타내었으며 동력력차 전체 모델을 기준으로 평균 붕괴 하중 오차를 표시하였다. 상사비에 따른 충돌 해석 결과, 상사비가 증가할수록 오차가 증가하는 경향을 나타내었으며 상사비를 적용한 축소 모델이 기준 모델보다 다소 증가한 평균 붕괴 하중을 나타내고 있음을 확인하였다.

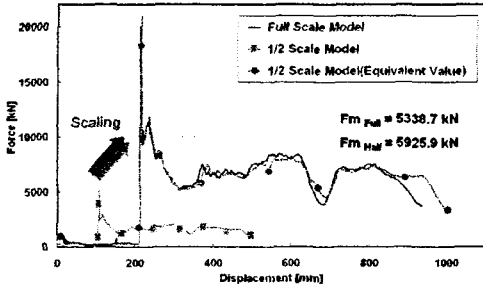


Fig. 2 Force-displacement diagram of full and 1/2 scale model

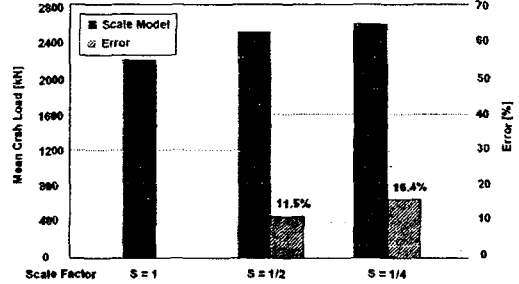


Fig. 3 Crash analysis results according to the scale factor

### 3. 압괴 시험을 통한 축소 모델 응용 개념의 타당성 분석

#### 3.1 알루미늄 압출재의 준정적 압괴 시험

충돌안전도 측면에서 축소 모델 응용 개념의 타당성을 검증하기 위하여 우선적으로 사각, 원형 단면을 갖는 압괴 시험용 알루미늄 압출재 단품에 대하여 기준 모델인 전체 모델과 1/2 축소 모델을 각각 준비하였다. 준정적 압괴 시험(quasi-static crush test)은 30ton U.T.M을 사용하였으며 축소 모델을 적용한 사각 단면 부재 및 원형 단면 부재에 대한 준정적 압괴 시험 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 최종 변형양상 및 힘-변위 선도로 나타내었다<sup>[2]</sup>.

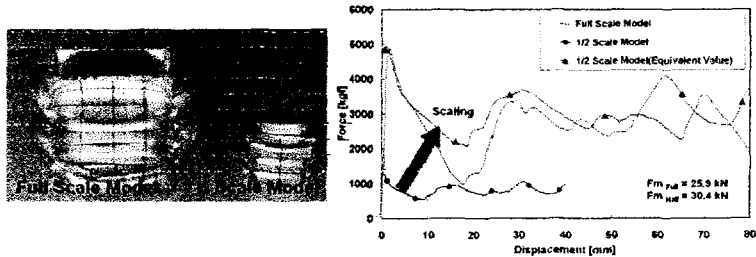


Fig. 4 Typical deformed shapes and force-displacement diagram of square box beams

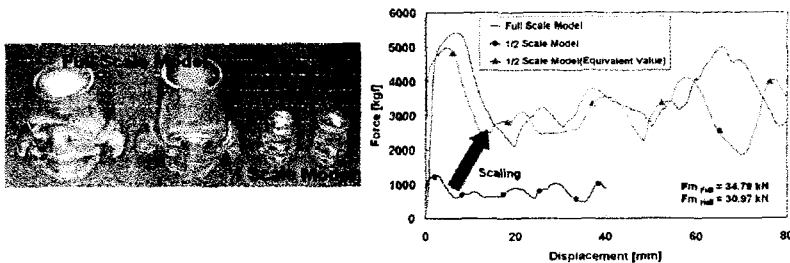


Fig. 5 Typical deformed shapes and force-displacement diagram of cylindrical shape beams

Fig. 4와 Fig. 5에서 사각 단면 및 원형 단면 부재에 대하여 축소 모델 및 전체 모델의 최종변형 양상을 비교해보면 유사한 압괴모우드를 나타내고 있음을 알 수 있으며, 축소 모델의 하중 곡선 및 변형량에 앞 절에서 유도한 1/2 축소 모델에 대한 상사비 4, 2를 각각 곱하여 기준 모델과 유사한 하중 곡선을 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한, 평균 붕괴 하중값은 10%~15%의 오차를 나타내었으며, 기준 모델의 경우, 모서리 부위에서 파단(fracture)<sup>[3][4]</sup>이 발생하는 것을 확인하였지만 1/2 축소 모델에서는 파단이 발생하지 않음을 확인하였다. 따라서, 알루미늄 부재의 압괴 시, 파단 특성은 상사비와는 무관하게 발생하며 알루미늄 재질 두께에 민감하게 영향 받음을 알 수 있었다.

### 3.2 알루미늄 구조물의 준정적 압괴 시험

충돌안전도 측면에서 축소 모델 응용 개념의 타당성을 검증하기 위하여 앞 절의 알루미늄 단품 부재에 대한 압괴 시험과 더불어 알루미늄 단품 부재들로 구성된 알루미늄 구조물의 압괴 시험을 수행하였다. 축소모델을 적용한 알루미늄 압괴 시험용 구조물 제작 시, U.T.M의 용량과 구입 가능한 알루미늄 압출재의 사이즈를 고려하여 Fig. 6의 도면과 같은 형상 및 제원의 구조물을 설계 하였으며 Fig. 7의 압괴 해석을 통하여 압괴 시, 접합에 의한 간섭 및 최대하중을 검토하였다. 최종적으로 완성된 알루미늄 구조물은 Fig. 8에 제시하였으며 Fig. 6과 Fig. 7에서 제시한 도면 및 압괴 해석 결과에 근거하여 제작된 것이다.

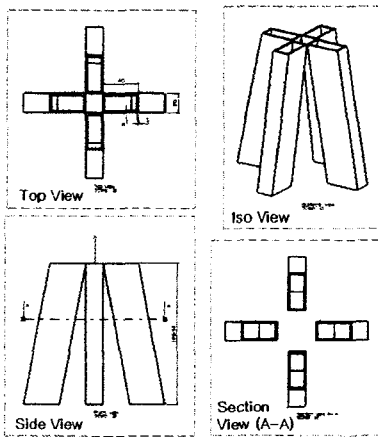


Fig. 6 Drawing of aluminum structure for quasi-static crush test

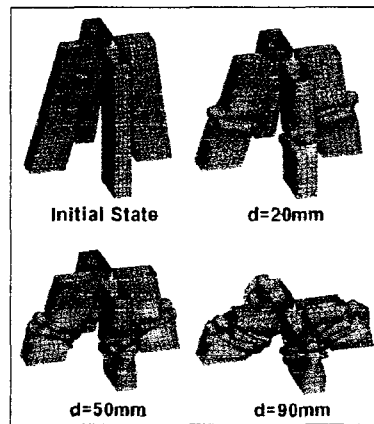


Fig. 7 Crush analysis result of aluminum structure



Fig. 8 Scale model of aluminum structure for quasi-static crush test

Fig. 8에서 제시한 압괴 시험용 알루미늄 구조물을 가지고 30ton U.T.M을 이용하여 압괴 시험을 수행하였다. 압괴 시험 결과 Fig. 9와 같은 변형 양상으로 전체 모델 및 축소 모델 알루미늄 구조물이 붕괴되었으며 동일한 상사 변위에서 접힘이 발생하는 위치가 각각 다르음을 확인할 수 있었다. 한편, Fig. 10에서 제시한 힘-변위 선도 결과를 살펴보면 상사비를 적용한 축소 모델의 하중 곡선과 전체 모델의 하중 곡선이 초기 최대 하중까지는 유사한 경향을 나타내지만 그 이후로 유사하게 상사되지 않는 것을 볼 수 있는데 평균 붕괴 하중의 오차를 살펴보면 약 19%임을 확인하였다. 이는 알루미늄 구조물을 제작 시, 기하학적인 상사비는 만족시켰으나 전체 모델 및 축소 모델의 상하 플레이트의 아랫쪽 용접부에서 상사가 잘 이루어지지 않아 발생된 모형 제작 오차로 판단되며 이러한 제작 오차는 압괴 경계 조건에 영향을 주어 궁극적으로 압괴 시험 결과에 영향을 미친 것으로 사료된다.

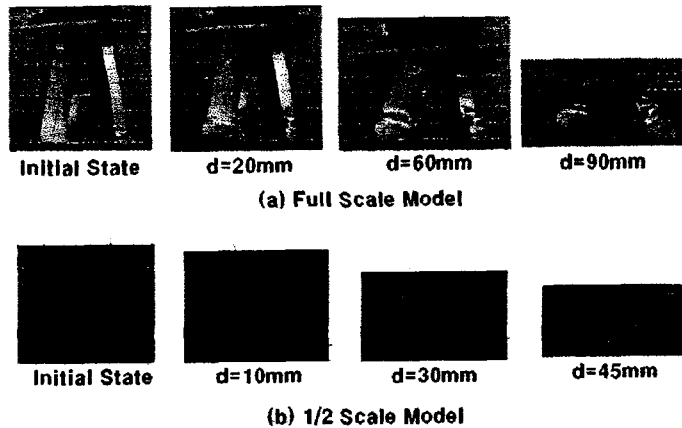


Fig. 9 Typical deformed shapes of full and 1/2 scale model

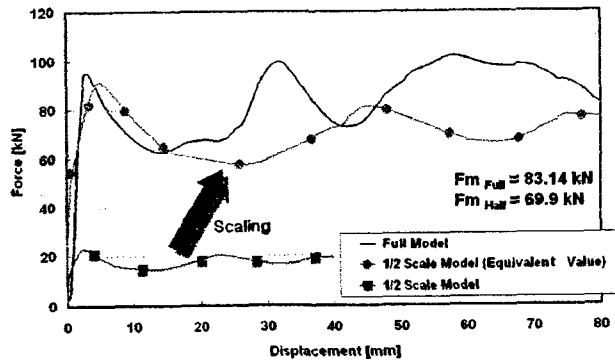


Fig. 10 Force-displacement diagram of full and 1/2 scale model

#### 4. 결론

본 연구에서는 전체 차량의 충돌 특성을 예측 할 수 있는 상사 이론을 적용한 축소 모델 응용 개념을 정립하고자 충돌에너지 흡수 부재로부터 유도한 상사법칙을 고속전철 동력궤차에 적용하여 충돌해석을 수행하였다. 또한, 실제 알루미늄 축소 모델 구조물을 제작하여 압괴 시험을 통한

축소 모형 응용 개념의 타당성을 검증하고자 하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- 축소 모형의 압괴 시험 및 해석을 통하여 실제 모형의 충격에너지 흡수 성능을 약 80%~90%의 정확도로 예측 가능하였다.
- 알루미늄을 이용한 축소 모형의 압괴 시험 결과, 알루미늄의 파단 특성은 상사비와는 무관하며 재질 두께에 민감하게 영향 받음을 확인하였다. 즉, 축소 모형의 재질 특성은 축소 모형 제작 시, 고려해야 할 중요한 요소임을 알 수 있었다.
- 용접, 절단 등의 알루미늄 축소 모형 제작 기술은 충돌 부재의 압괴모우드 및 하중 곡선에 민감한 영향을 미치며 충돌 특성을 예측, 평가함에 있어서 많은 오차를 내포하고 있음을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. B. Samuel Holmes and George Sliter (1974), "Scale Modeling of Vehicle Crashes - Techniques, Applicability, and Accuracy; Cost Effectiveness" SAE 740586
2. 김범진, 허승진, 구정서, 송달호 (2001), "알루미늄 압출재의 붕괴 특성 및 축소모형을 이용한 충격해석 기법 연구" 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 232-233.
3. Maurice L. Sharp (1992), "Behavior and Design of Aluminum Structure", McGraw-HILL Inc.
4. 김범진, 백인봉, 이상기, 허승진, (2001), "알루미늄 압출재의 붕괴 특성 및 해석 기법 연구" 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, pp. 1081-1086.