

철도차량 충돌 해석을 위한 축소모델링 기법 연구

Scale Modeling Technique for the Crash Analysis of Railway Vehicle Structure

김범진¹, 허승진²

Bum-Jin Kim, Seung-Jin Heo

Keywords : Scale Model(축소 모델), Crush Test(압괴 시험), Fracture(파단), Mean Crash Load(평균 붕괴 하중), Sub-Structure(부분 구조물)

Abstract

Today, crash safety requirements of the railway vehicle structures become important design criterion according to the increased driving speed and the lightweight construction. Although the crash analysis using computer simulation can be effectively applied to predict the crash performance of the railway vehicles in the early design stage, the optimized design w.r.t the crash safety could be realized by the crash tests with actual prototype vehicles. However, it is very expensive and time-consuming task to perform the crash test of the railway vehicles. As a measure to cope with the problem, in this paper, the scale modeling technique is suggested and experimentally verified to predict the impact energy absorption characteristics of full scale model of aluminum extrusions sub-structures and the high-speed railway vehicle structure.

1. 서론

철도 차량과 같이 대형 구조물에 대한 충돌 시험의 수행은 대규모 시험 설비 구축 및 이에 따른 과도한 시험 비용이 요구됨으로써 실제적인 충돌 시험은 매우 제한적으로 이루어져왔다[1]. 오늘날 철도차량의 고속화 및 경량화에 따른 충돌안전도 성능 요구는 더욱 증대되고 있는 실정이다. 따라서, 철도차량의 초기 설계단계에서 충돌안전도 성능을 예측, 평가하기 위

해서 컴퓨터 시뮬레이션 기법이 활발히 응용되고 있다. 그러나, 알루미늄 압출재를 이용한 고속전철 차체의 충돌해석 결과는 충돌시 나타나는 재질적 및 기하학적 비선형성에 의하여 실제와 많은 차이를 보일 수 있으며, 결과적으로 경량화된 고속전철 차량의 충돌안전도 최적화를 위해서는 실제적인 충돌시험이 뒷받침 되어져야 된다[2, 3]. 이러한 문제를 해결할 수 있는 방안으로써 본 논문에서는 상사이론을 적용한 축소모델링 기법에 의하여 철도 전체 차량의 충돌 특성을 예측하고자 한다. 나아가서 알루미늄 압출재와 부분 구조물(sub-structure)의 압괴 해석 및 시험을 통하여 축소모델 응용 개념의 타당성을 검증하고자 한다.

¹ 정회원, 국민대학교 자동차공학대학원

² 정회원, 국민대학교 기계·자동차공학부

2. 상사이론 응용 철도차량 충돌 시뮬레이션

축소 모델은 재료의 성질 및 기하형상의 비율을 바탕으로 하여 다음과 같은 상사비가 결정될 수 있다[4~6].

$$(하중) F = F_m(L^2/L_m^2)(E/E_m)(\epsilon/\epsilon_m) \quad (1)$$

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

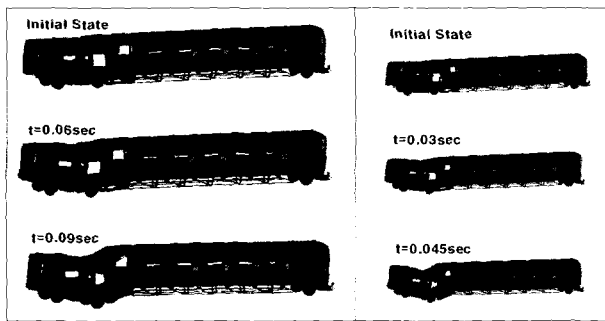
$$(질량) m = m_m(\rho/\rho_m)(L^3/L_m^3) \quad (3)$$

$$(가속도) a = a_m(F/F_m)(m_m/m) \quad (4)$$

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

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

여기에서 철차 m (하중), L , ρ , E , ϵ , s 는 각각 축소모델의 해석, 길이, 밀도, 탄성계수, 변형률, 압축 변형길이를 나타내고 있다. 식 (1)~(6)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 설정하였다. 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 있다.



(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 윗 식으로부터 유도한

1/2 축소 모델에 대한 상사비를 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 모델의 해석을 통하여 동력객차 전체 모델의 충돌 특성을 잘 예측할 수 있었다. 다음으로 상사비가 충돌안전도 측면에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Fig. 3과 같이 동력객차 모델의 상사비에 따른 충돌해석 결과를 평균 붕괴 하중으로 나타내었으며 동력객차 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. 그러나, 이러한 해석 결과는 본 연구에서 선정된 동력객차 모델에 대한 연구 결과이므로 이러한 경향이 일반적으로 적용되는 것인지에 대한 판단을 위하여 구조가 다른 차량 모델 등에 대한 추가적인 축소모델 연구가 필요하다.

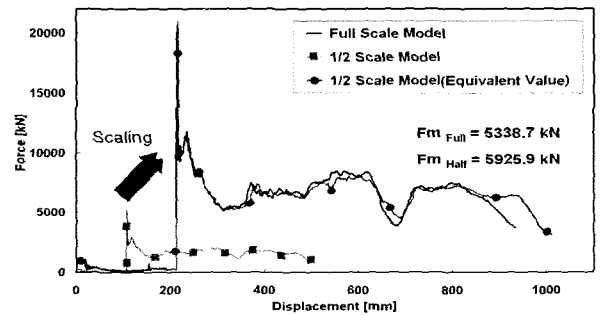


Fig. 2 Force-displacement diagram of full and 1/2 scale model

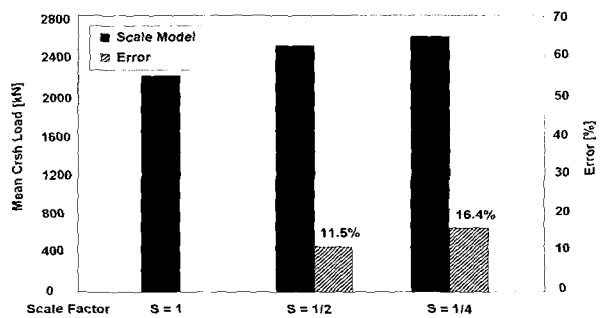


Fig. 3 Crash analysis results according to the scale factor

3. 압괴 시험을 통한 축소 모델 응용 개념의 타당성 분석

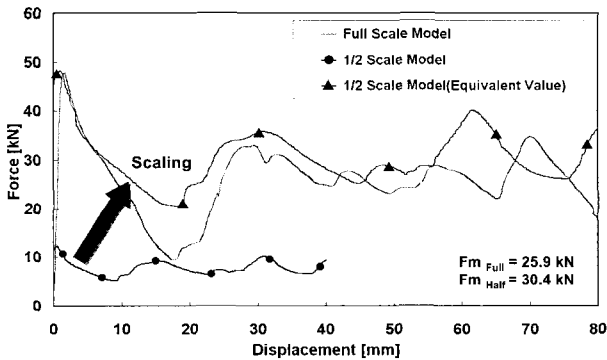
3.1 알루미늄 압출재의 압괴 시험

충돌안전도 측면에서 축소 모델 응용 개념의 타당성을 검증하기 위하여 우선적으로 사각 및 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 각각 Fig. 4와 Fig. 5에 최종 변형양상 및 힘-변위 선도로 나타내었다.

Fig. 4(a)와 Fig. 5(a)에서의 최종 변형 형태를 비교하여 볼 때, 사각 및 원형 단면 부재에 대한 축소 모델은 전체 모델과 유사한 압괴모우드를 나타내고 있음을 알 수 있다.

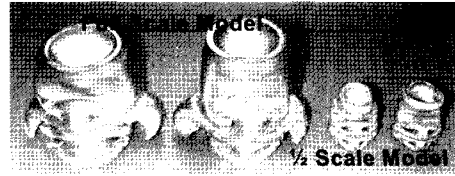


(a) Deformed shapes

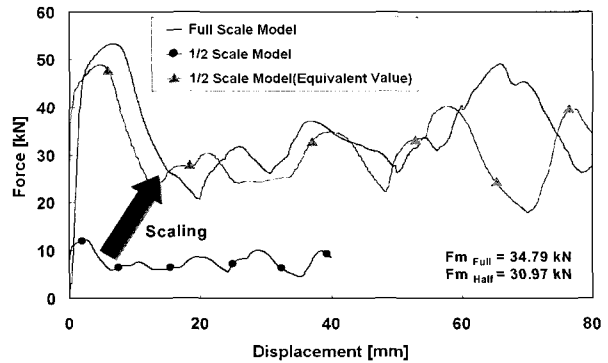


(b) Force-displacement diagram

Fig. 4 Typical deformed shapes and force-displacement diagram(rectangular box aluminum extrusions; full scale: 40×20×2, half scale: 20×10×1)



(a) Deformed shapes



(b) Force-displacement diagram

Fig. 5 Typical deformed shapes and force-displacement diagram(cylindrical aluminum extrusions; full scale: $\phi=32$, $t=2$, half scale: $\phi=16$, $t=1$)

그러나, 기준 모델의 경우, 모서리 부위에서 파단(fracture)[7~10]이 발생하는 것을 확인하였지만 1/2 축소 모델에서는 파단이 발생하지 않았다. 따라서, 알루미늄 부재의 압괴 시, 파단 특성은 상사비와는 무관하게 발생하며 알루미늄 재질 두께에 민감하게 영향 받음을 알 수 있었다. Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)에서는 앞 절에서 유도한 1/2 축소 모델에 대한 상사비를 각각 곱하여 기준 모델과 유사한 하중 곡선을 얻을 수 있었으며, 평균 붕괴 하중값은 10%~15%의 오차를 나타내었다.

특히, 알루미늄 압출재의 두께 차이에 의한 파단 발생 여부가 시험 결과의 오차에 큰 기여를 한 것으로 예측되며 축소 모델에 대한 파단 효과 요소의 고려가 아울러 요구됨을 알 수 있다.

3.2 알루미늄 압출재 부분 구조물의 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 부분 구조물(sub-structure)의 압괴 시험을 수행하였다. 축소모델을 적용한 알루미늄 부분 구조물의 압괴 시험을 위해서 Fig. 6의 도면과 같은 형상 및 제원의 구조물을 설계하였으며, Fig. 7에서는 최종적으로 제작된 알루미늄 부분 구조물의 전체 모델 및 1/2 축소 모델을 비교하여 보여주고 있다.

Fig. 7에서 제시한 압괴 시험용 알루미늄 구조물에 대하여 30ton U.T.M을 이용한 압괴 시험을 수행하였다. 압괴 시험 결과 Fig. 8과 같은 변형 양상으로 전체 모델 및 축소 모델 알루미늄 구조물이 붕괴되었다. 전체적으로 두 모델간의 압괴 모우드는 유사하게 나타나고 있으나, 국부적인 좌굴(local buckling)에 해당되는 접힘(folding) 발생 위치는 각각 상이함을 확인 할 수 있었다. 이는 알루미늄 구조물을 제작 시, 기하학적인 상사비는 만족시켰으나 전체 모델 및 축소 모델의 상하 플레이트의 아르곤 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.

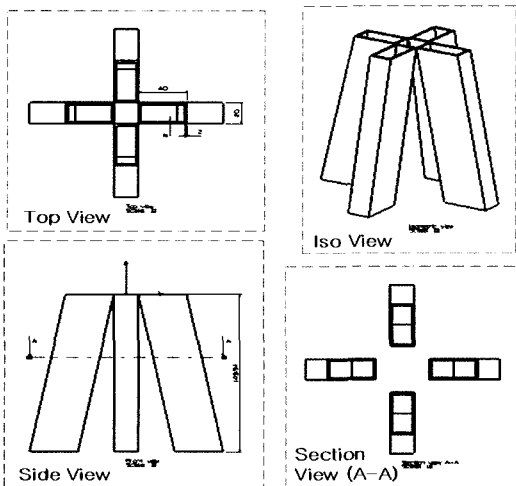


Fig. 6 Drawing of aluminum sub-structure for crush test

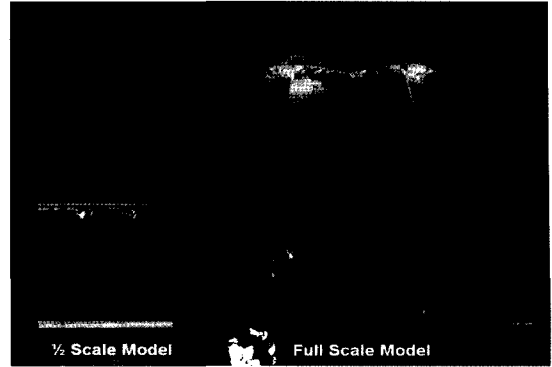
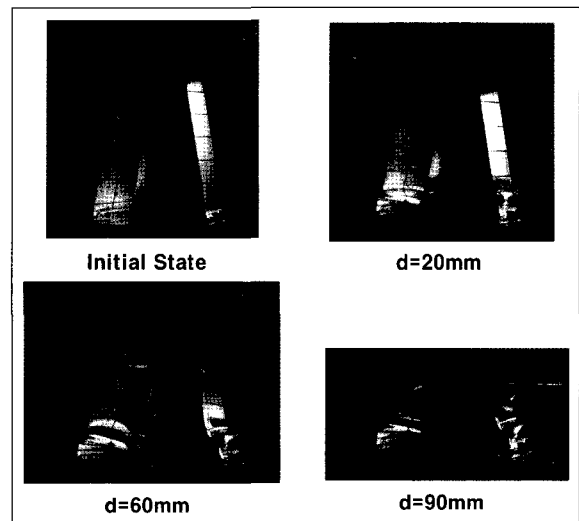
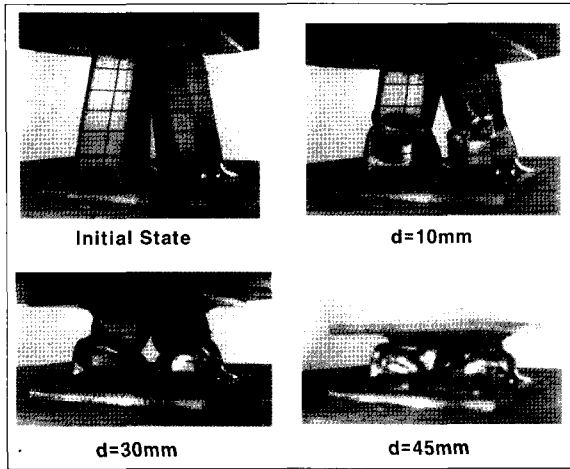


Fig. 7 Full and half scale model of aluminum sub-structure for crush test

이에 따라서 Fig. 9에서 제시한 힘-변위 선도 결과를 살펴보면 상사비를 적용한 축소 모델의 하중 곡선과 전체 모델의 하중 곡선이 초기 최대 하중까지는 유사한 경향을 나타내지만 후좌굴(post buckling) 과정에서는 Fig. 8에서와 같은 국부 좌굴 발생의 차이로 인하여 좌굴 하중 특성의 상사가 비교적 잘 이루어지지 못함을 알 수 있다. 평균 붕괴 하중의 계산 결과는 약 19%의 오차를 나타내고 있으나, 앞서 설명한 제작상의 오차를 보완할 때, 축소 모델의 부분 구조물을 이용한 압괴 시험은 충분한 타당성을 갖을 것으로 예측된다.



(a) Full scale model



(b) 1/2 scale model

Fig. 8 Typical deformed shapes of full and 1/2 scale model of aluminum sub-structure

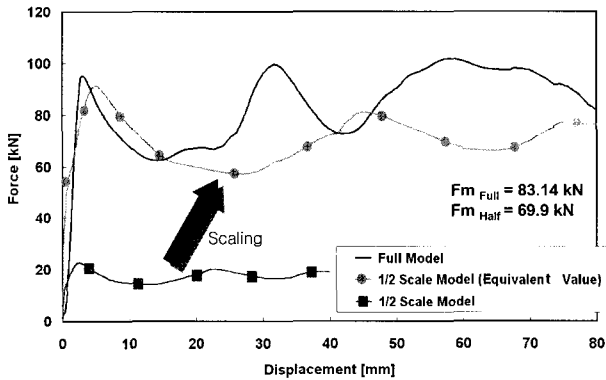


Fig. 9 Force-displacement diagram of full and 1/2 scale model of aluminum sub-structure

4. 결론

본 연구에서는 전체 차량의 충돌 특성을 예측 할 수 있는 상사 이론을 적용한 축소 모델 응용 개념을 정립하고자 충돌에너지 흡수 부재로부터 유도한 상사 법칙을 고속전철 동력객차에 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 모델의 압괴 시험 및 해석을 통하여 실제 모델의 충격에너지 흡수 성능이 약 80%~90%의 정확도로 예측 가능하였다.

- 알루미늄을 이용한 축소 모델의 압괴 시험 결과, 알루미늄의 파단(fracture) 특성은 상사비와는 무관하며 재질 두께에 민감하게 영향 받음을 확인하였다. 따라서, 파단 발생 등과 같은 재질의 비선형 특성은 축소 모델 제작 시, 추가적으로 고려해야 할 중요한 요소를 알 수 있었다.

- 용접, 절단 등의 알루미늄 축소 모형 제작 기술은 충돌 부재의 압괴모우드 및 하중-변위 특성에 민감한 영향을 미치며 충돌 특성을 예측, 평가함에 있어서 많은 오차를 내포하고 있음을 확인하였다. 따라서, 축소 모형의 각종 제작 오차가 충돌특성에 미치는 영향 분석에 대한 체계적인 연구 수행이 추가적으로 이루어져야 할 것이다.

- 본 논문에서 제시한 상사법 응용의 충돌 해석 기술은 향후, 실제 철도 차량에 대한 축소 모형 제작을 통한 충돌 시험 및 해석의 기반을 구축하기 위한 연구 결과로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. Lewis, J. H., "Development of Crashworthy Vehicle Structures for Railway", British Rail Research Structures Group, 1994.
2. Shunta Ushioda, et al., "Application of Aluminum Extrusion to Automotive Parts", IBEC Vol.15, Oct. 1995.
3. V. Lakshminarayan, H. Wang, W. J. Williams, Y. Harajli, "Application of CAE Nonlinear Crash Analysis to Aluminum Automotive Crashworthiness Design", SAE 951080, 1995.
4. B. Samuel Holmes and George Sliter, "Scale Modeling of Vehicle Crashes-Techniques, Applicability, and Accuracy; Cost Effectiveness", SAE 740586, July, 1974.
5. Michael J. Pavlick, "Development of Energy Absorbing Automotive Structures Using Scale Model Test Techniques", SAE 740570, July, 1974.

6. 김범진, 허승진, 구정서, 송달호, “알루미늄 압출재의 붕괴 특성 및 축소모형을 이용한 충격해석 기법 연구” 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 232-233, 2001.
7. Maurice L. Sharp, “Behavior and Design of Aluminum Structure”, McGraw-HILL Inc. 1992.
8. 김범진, 백인봉, 이상기, 허승진, “알루미늄 압출재의 붕괴 특성 및 해석 기법 연구” 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, pp. 1081-1086. 2001.
9. Gitter, R., “Designing with extruded aluminum sections (in German)”, Tagungsband DVM-Tag 1990.
10. Kenji Tanabe, Kousaku Hashimoto, Masatoshi Tanaka, “Development of the All-Aluminum Light Body Structure for the Hybrid Electric Vehicle”, FISITA World Automotive Congress, F2000G371, 2000.