

틸팅차량 전두부 충돌 특성 해석

Finite element analysis of front head of tilting train express

양승용[†] · 권태수^{*}

Seung-Yong Yang and Taesoo Kwon

ABSTRACT

Finite element analysis was conducted for the front head structure of Korean tilting train express (TTX). Crush force vs. crush length diagrams and crushed shapes due to a collision were obtained. Numerical results were investigated with respect to shear failure conditions and material rate dependencies. It was examined how results depend on the material models assumed for the simulation. It is shown that the rate dependency is related to the initial barrier of the crush force and the failure condition affects the average height of the crush force.

1. 서론

국내 기존선의 운행성능향상을 위해 개발 중인 틸팅열차(Tilting Train Express, TTX)는 이전 열차에 적용하지 못했던 첨단 충돌안전설계를 수행하고 있다. 다단계 충돌에너지 흡수구조 및 각종 충돌안전장치 등을 장착하여 최근 강화된 철도안전기준에 부응하는 충돌안전성을 갖추도록 하고 있다. 충돌사고 발생 시 충돌에너지는 차량의 변형을 통해 흡수되는데, 차량의 압괴강도를 증가시키면 동일한 에너지를 흡수하는데 필요한 압괴량이 작아지게 되므로 탑승자의 생존공간을 좀 더 확보할 수 있다. 반면, 압괴강도가 커져서 동일한 에너지를 흡수하는데 필요한 압괴량이 작아지면 승객이 받는 가속도가 증가되어 탑승자의 부상 가능성이 높아지게 된다. 따라서 사고발생 시 생존공간이 확보되고 과도한 가속도를 받지 않으면서 전체 충돌에너지를 흡수할 수 있도록 충돌에너지 흡수영역을 설정하고 영역별로 적절한 압괴강도를 확보하여야 한다. 본 논문에서는 TTX 차량 전두부의 충돌특성을 해석하였다. 기존의 연구는 재료의 변형속도에 관계없이 재료의 항복특성을 일정하게 가정하였으나 본 연구에서는 항복응력이 변형률속도에 의존하도록 하여 변형률 속도의 영향을 조사하였다. 또한 소성변형이 과도하여 재료가 파단(failure)될 경우와 그렇지 않을 경우에 대하여 계산결과의 차이를 조사하였다.

2. 틸팅차량 전두부 충돌 특성 해석

2.1 차체 모델링

권태수 등은 Fig. 1에 나타낸 TTX Mcp-car 에 대하여 충돌사고 시 운전자의 생존공간을 확보하는 문제와 관련하여 전두부 구성 부재의 두께 등을 변화시켜 가며 충돌해석을 수행하였다. 정지해 있는 15ton 의 건널목 선로장애물과 75 km/h로 충돌하는 시나리오에 대해 3가지의 전두부 설계안을 평가하였다. 각 설계안에 대한 부재의 치수는 참고문헌 [1]에 기술되어있다. 충돌 후 전두부 형상의 변형 및 장애물의 가속도 변화를 조사하였으며 설계변경안 1과 2는 건널목사고시나리오에 대해 운전자의 생존공간

[†] 한국기술교육대학교 기계정보공학부

^{*} 한국철도기술연구원

확보요건을 만족함을 확인하였다.

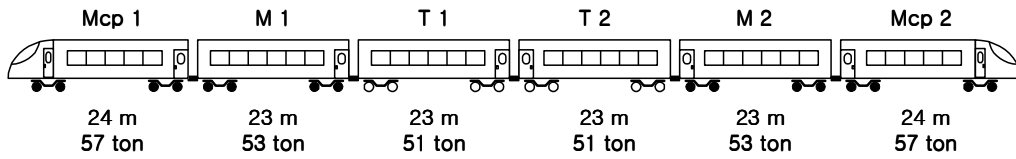


Fig. 1 TTX 차량의 기본편성

본 논문에서는 참고문헌 [1]에 나와있는 두번째 전두부 설계변경안의 유한요소모델에 대하여 차체 부재의 재질 특성을 변화시켜가며 충돌 시 차체의 변형특성이 어떻게 변화하는지 조사하였다. 즉 재료의 항복응력이 변형률 속도에 따라 변하도록 할 경우와 재료의 파단(failure)을 허용할 경우에 대하여 차체의 변형 및 장애물의 가속도 변화를 조사하였다. 15ton의 건널목 장애물은 집중질량을 가진 4각형 평판으로 모델링 하였으며 충돌방향으로의 병진운동만 가능하도록 하였다.(Fig. 2 참조) 열차전체의 질량인 320ton 은 전두부 모델 후미에 부가 하였다. 전두부 앞쪽에 부착된 honeycomb 부재는 차체의 충돌특성에 큰 영향을 미치지 않는다고 가정하여 유한요소모델에서 제외하였다.

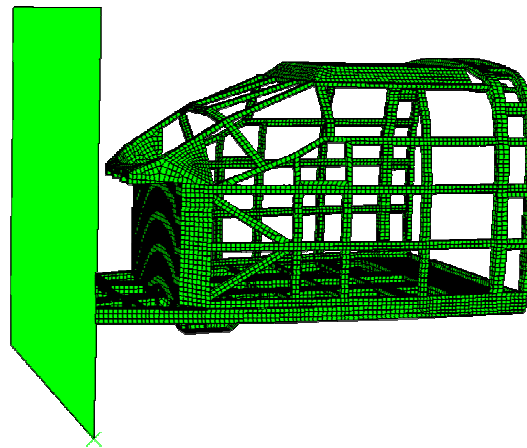


Fig. 2 TTX 차량 전두부 및 장애물 모델

2.2 재료 특성

금속 재료의 항복응력은 충돌 등의 고속 변형하에서 준정적인 경우보다 증가하는 경향을 보인다. 또한 변형이 커지면 금속 내부 기공의 확장이나 균열 성장에 의해 재료가 파단(failure)되게 된다. 이러한 재료의 구성방정식 특성을 변화 시켜가며 차체의 충돌 거동을 조사하는 것이 본 논문의 주요 내용이다.

본 연구에서는 항복응력의 속도의존성을 고려하기 위하여 Johnson-Cook 경화 법칙(hardening rule)을 이용하였다. Johnson-Cook 소성모델은 상관소성흐름법칙(associated flow rule)을 가정하며 소성변형률의 누적에 따른 항복응력을 다음과 같이 가정하고 있다.

$$\sigma^0 = \left[A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n \right] \left(1 - \hat{\theta}^m \right)$$

$\bar{\epsilon}^{pl}$ 는 등가소성변형률이고 $\hat{\theta}$ 은 무차원 온도이다. 재료의 온도변화를 고려하지 않을 경우 마지막 항은 사라지고,

$$\sigma^0 = A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n$$

을 얻을 수 있다. Johnson-Cook 모델에서 변형률속도 의존성(strain rate dependence)은 다음 식과 같이 고려

된다.

$$\bar{\sigma} = \sigma^0 (\bar{\epsilon}^{pl})^n R(\dot{\epsilon}^{pl})$$

R은 $\bar{\sigma}$ 와 σ^0 의 비이고 등가변형률속도와 다음의 관계가 있다.

$$\dot{\epsilon}^{pl} = \dot{\epsilon}_0 e^{(R-1)/C}$$

위의 식을 정리하면 다음과 같은 항복응력에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$\bar{\sigma} = \left[A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right]$$

본 논문에서는 소성변형률속도가 커지면 항복응력도 커진다고 가정하였으며, Fig. 3에 네가지 변형률속도 $\dot{\epsilon}^{pl}$ 값에 대한 항복응력 $\bar{\sigma}$ 를 도시하였다.

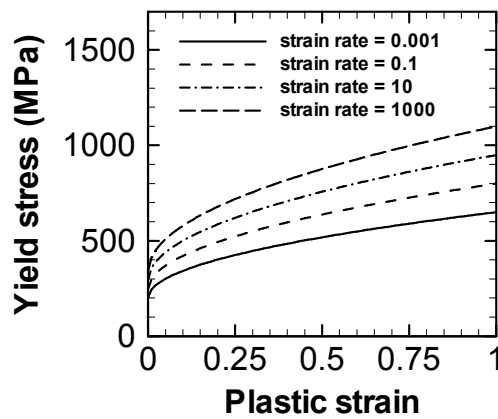


Fig. 3 변형률속도 변화에 따른 항복응력의 변화

한편 재료의 파단을 고려하기 위하여 다음과 같은 소성변형률의 누적을 고려한 손상계수(damage parameter)

$$\omega = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_f^{pl}}$$

를 고려하고, 손상계수가 1에 도달하면 해당 유한요소가 삭제되도록 하였다. 계산에 사용된 재료상수들의 값을 Table 1에 정리하였다. 부재의 밀도는 STS304 재질만 7800 kg/m^3 이고 나머지 재질은 7900 kg/m^3 을 사용하였다.

2.3 해석 결과

Fig. 4 (a)는 재료의 파단을 허용하지 않고 항복응력의 변형률속도의존성도 무시할 경우의 건널목사고시나리오에 대한 충돌하중곡선을 보여주고 있으며, (b)는 충돌 후 0.2초에서의 전두부 변형형상을 나타내고 있다. 충돌하중곡선은 충돌과정 동안에 15ton 강체에 가해지는 힘을 나타낸 것이다. 일정 변형 후 압괴 하중은 0을 떨어지고 운전자의 생존공간은 확보됨을 알 수 있으며, 압괴하중은 대략 2000 kN 정도로 계산되었다.

Fig. 5는 참고문헌 [1]의 계산 방식과 동일하게 재료의 파단은 허용하고 속도의존성을 무시할 경우의 계산 결과이다. 이 경우 재료의 손상을 고려하고 변형속도 증가에 따른 응력 증가도 없기 때문에 Fig. 4의 결과에 비하여 압괴하중이 낮게 계산됨을 확인할 수 있다. 이 경우도 0.2초 동안의 변형에 대해서는 운전자의 생존공간이 확보됨을 볼 수 있다.

Table 1. 계산에 사용된 물성치

C	0.05		
$\dot{\epsilon}_0$	0.001		
SS400		STS304	
A	200 MPa	A	180 MPa
B	450 MPa	B	600 MPa
n	0.5	n	0.6
$\bar{\epsilon}_f^{pl}$	0.21	$\bar{\epsilon}_f^{pl}$	0.4
SM490A		SMA490B	
A	250 MPa	A	300 MPa
B	370 MPa	B	400 MPa
n	0.25	n	0.35
$\bar{\epsilon}_f^{pl}$	0.2	$\bar{\epsilon}_f^{pl}$	0.2
STS301LT		STS301HT	
A	210 MPa	A	650 MPa
B	550 MPa	B	470 MPa
n	0.6	n	0.6
$\bar{\epsilon}_f^{pl}$	0.45	$\bar{\epsilon}_f^{pl}$	0.45

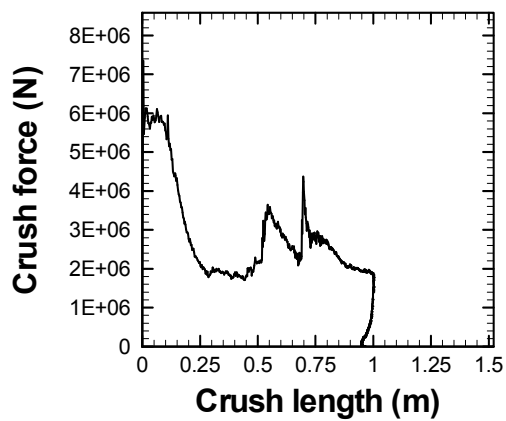


Fig. 4(a) 압괴하중 특성 곡선. 재료의 파단을 허용하지 않고 변형률속도 의존성을 무시할 경우

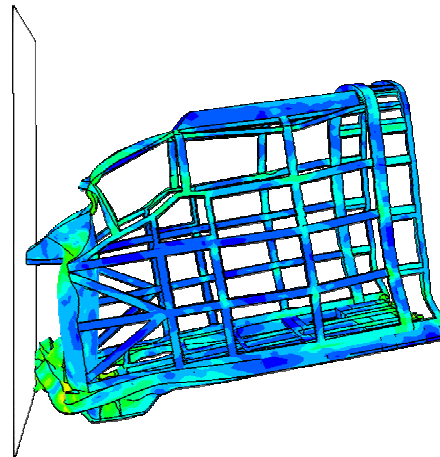


Fig. 4 (b) 충돌 후 0.2초 에서의 전두부 변형 형상. 재료의 파단을 허용하지 않고 변형률속도 의존성을 무시할 경우

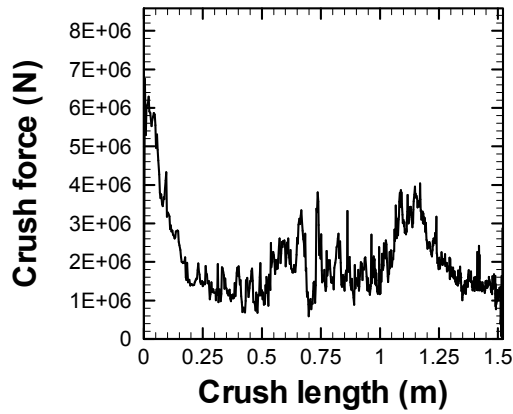


Fig. 5 (a) 압괴하중 특성 곡선. 재료의 파단을 허용하고 변형률속도 의존성을 무시할 경우

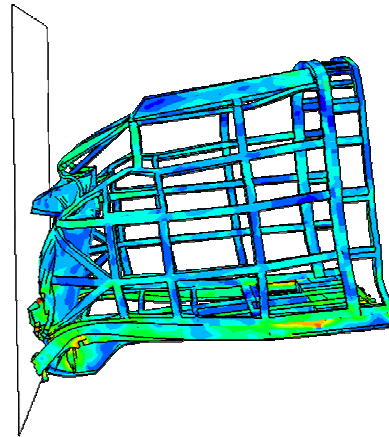


Fig. 5 (b) 충돌 후 0.2초 에서의 전두부 변형 형상. 재료의 파단을 허용하고 변형률속도 의존성을 무시할 경우

Fig. 6는 재료의 파단은 허용하지 않고 속도의존성을 고려할 경우의 계산 결과이다. 이 경우 압괴하중이 본 논문에서 고려한 4가지 경우 중 가장 크게 나옴을 확인할 수 있다.

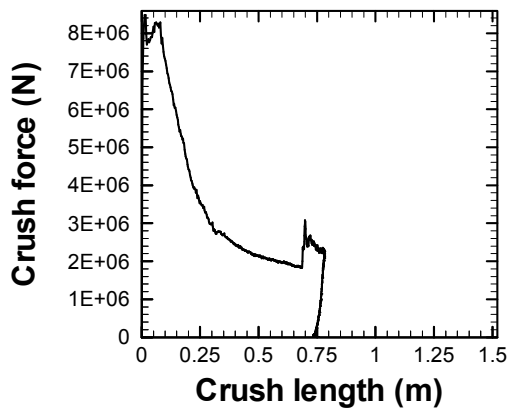


Fig. 6 (a) 압괴하중 특성 곡선. 재료의 파단을 허용하지 않고 변형률속도 의존성을 고려할 경우

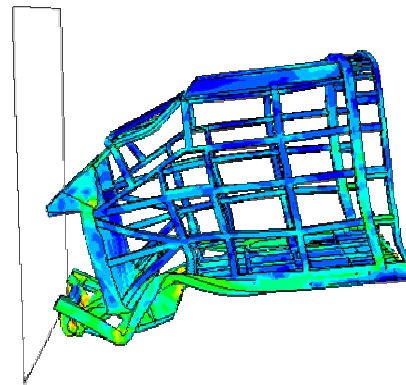


Fig. 6 (b) 충돌 후 0.2초 에서의 전두부 변형 형상. 재료의 파단을 허용하지 않고 변형률속도 의존성 고려할 경우

Fig. 7는 재료의 파단 및 속도의존성을 모두 고려할 경우이다. 전두부가 1.25 미터 정도 압괴된 후 더 이상 압괴하중이 걸리지 않음을 볼 수 있다.

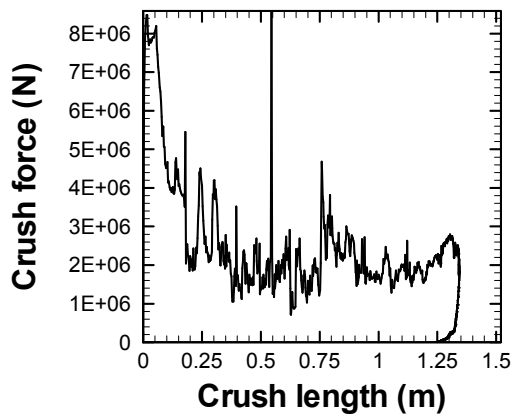


Fig. 7 (a) 압괴하중 특성 곡선. 재료의 파단을 허용하고 변형률속도 의존성을 고려할 경우

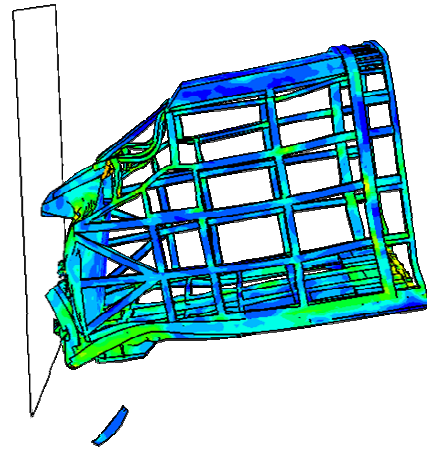


Fig. 7 (b) 충돌 후 0.2초 에서의 변형 형상. 재료의 파단을 허용하고 변형률속도 의존성을 고려할 경우

3. 결론

본 논문에서는 재료의 파단 및 변형률 속도 의존성이 틸팅차량의 전두부 충돌 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 압괴량-압괴력 곡선으로부터 변형률속도 의존성은 충돌 직후의 압괴력 높이에 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 즉 변형률속도 의존성이 크다고 가정하면 충돌 직후의 압괴력의 높이가 높게 계산되었다. 한편 재료의 파단은 압괴가 진행되는 과정 중의 압괴력 높이와 관련이 있다는 것을 확인할 수 있었다. 즉 재료가 대변형 후 파단된다고 가정할 경우 압괴력의 평균적인 높이가 낮아지는 결과를 관찰할 수 있었다. 이상의 결과로부터 차량의 정확한 충돌 특성을 예측하기 위해서는 차량 재료의 정확한 모델링이 필요하다는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) 기존선 속도향상을 위한 틸팅차량의 충돌안전도 해석 및 설계지원, 2005, 권태수 등, 한국철도기술연구원.