

철도차량에 적용될 복합재료의 저속충격특성에 관한 연구

A Study on the Impact Characteristics of the Composite Materials for Low Velocity to Be Applied a Rail Vehicle

류충현*, 이영신*, 김재훈*, 나재연*, 조정미†, 박병준†

Chung-Hyun Ryu, Young-Shin Lee, Jae-Hoon Kim, Jae-Yeon Na, Jeong-Mi Cho, Byung-Jun Park

ABSTRACT

In this study, the property against low velocity of the composite material, which will be applied a rail vehicle, is shown using experiment and a finite element code. The property can be denoted the resistance of impact force, which is defined by maximum impact force over damage area. A damage propagation model is necessary to estimate accurately the impact property of a composite material through FEM code.

1. 서론

섬유강화 복합재료는 금속재료보다 비강도와 비강성이 크고 적층각 및 적층순서에 따라 재료의 강성설계를 할 수 있다는 장점이 있어서 매력을 얻는 재료이다. 그러나, 외부하중에 의한 파손 거동이 이미 알려져 있는 금속재료와 다르기 때문에 이에 대한 연구가 많이 시도되고 있다. 특히, 충격에 의한 재료의 거동은 매우 복잡하여 실험에 근거한 접근방법이 주된 시도이다.

복합재료의 충격거동을 살펴보면 충격체의 운동속도에 따라 고속충격의 경우와 저속충격의 경우로 구분할 수 있다. 고속충격에 대한 복합재료의 충격거동은 관통이 되는 경우로 대부분 육안으로 재료의 파손을 판단할 수 있으며 그에 따른 조치를 취할 수 있다. 그러나 저속충격의 경우는 재료의 손상여부를 육안으로 판단하기 어렵기 때문에 구조물의 지속적인 운전으로 갑작스런 파손을 일으켜 큰 인명피해를 유발할 수 있다. 따라서, 구조물의 유지 측면에서는 저속충격에 대한 손상 정도의 평가가 매우 중요한 인자로 작용한다.

Joshi[1]은 충격하중에 대한 복합재료 적층판의 손상예측을 2차원 평면변형률의 유한요소모델을 이용하여 해석하였다. Reis[2]는 복합재료의 저속충격에 대한 특성과 충격 후 잔류 압축강도를 실험에 의해 평가하였다. 그는 저속충격에 의해 발생된 층간분리 영역은 적층순서와 관계없으며 층간분리 영역과 충격 후 잔류 압축강도를 충격에너지의 함수로 나타내었다. Lou[3]는 cross-ply 복합재료 적층판에서의 충격 손상 진행과정의 평가에 대한 연구를 수행하였다. 복합재료 적층판의 충격손상 특성은 기지파손에 대한 개시강도와 진전강도에 의한 파손기준을 제안하였으며, 이에 예

* 충남대학교 기계설계공학과

† ㈜한국화이버

측되진 파손 모드를 실험과 ABAQUS를 이용한 유한요소해석으로 비교/검증하였다. 최근에는 재료의 특성을 예측하기 위해 미시적으로 접근하는 연구들도 많이 보고되고 있다.

철도차량의 경량화를 위해 복합재료의 적용은 필수적이고 또한 적용될 재료의 특성과파손은 매우 중요하다. 특히 손상평가는 구조물의 파손으로 인한 대형사고를 막을 수 있는 기술인 것이다. 이 연구는 육안으로 손상을 평가하기 어려운 저속충격에 대한 복합재료의 특성을 고찰한다. 사용된 복합재료는 철도차량에 적용될 Glass/phenolic 적층 복합재료이다. 수정된 Chang-Chang의 파손 기준식을 이용하여 유한요소해석을 수행하고 실험결과에 비교/고찰하였다.

2. 충격 해석 모델

2.1 수정된 Chang-Chang 파손기준

Hou[4]은 Chang-Chang의 파손기준식이 평면 응력만을 고려했다는 점과 인장 응력에 대한 지지파손 기준식에 전단파손에 대한 재배적인 응력인 전단응력 σ_{23} 의 영향을 포함시켜 3차원 영역에 대한 파손기준식을 제시하였다.

$$\text{섬유파손 : } e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_T} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_f^2} \right) \geq 1 \quad (1)$$

$$\text{인장에 의한 지지파손 } (\sigma_{22} \geq 0) : e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}} \right)^2 \geq 1 \quad (2)$$

$$\text{압축에 의한 지지파손 } (\sigma_{22} < 0) : e_m^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{-\sigma_{22}}{S_{12}} \right)^2 + \frac{\sigma_{22} Y_c}{4 S_{12}^2} - \frac{\sigma_{22}}{Y_c} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right)^2 \geq 1 \quad (3)$$

$$\text{두께방향 압축에 의한 층간분리 } (\sigma_{33} \geq 0) : e_l^2 = \left(\frac{\sigma_{33}}{Z_T} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}} \right)^2 \geq 1 \quad (4)$$

$$\text{굽힘에 의한 지지파손이 발생한 경우의 층간분리 } (\sigma_{33} \geq 0, e_m \geq 1) : e_l \geq 1 \quad (5)$$

여기서, σ_{ij} 은 각 방향의 응력성분, X_T, Y_c 는 섬유방향의 인장강도와 압축강도, Y_T, Y_c 는 횡방향 인장강도와 압축강도, S_{ij} 은 각 방향의 전단강도, S_f 는 섬유의 전단강도를 나타낸다.

2.2 유한요소모델

평직 복합재료를 고려하였으므로 평면에서 x방향과 y방향의 재료 특성은 동일하고 균질이라고 가정하였다. 두께방향인 z방향으로는 여러 층들이 적층되므로 다른 방향의 특성과 다른 값을 갖으나 이 값들은 시험에서도 측정이 어렵다. 따라서 참고문헌의 값을 이용하여 z방향에 대한 재료의 물성을 다음과 같이 예측하였다.

$$\begin{aligned} E_x &= E_y = 2.5E_z \\ \nu_{xy} &= 0.58\nu_{yz} = 0.58\nu_{xz} \\ G_{xy} &= 0.95G_{yz} = 0.95G_{xz} \end{aligned} \quad (6)$$

시험에서 획득한 재료특성과 식(6)을 이용하여 얻은 값을 통하여 정리된 재료의 특성은 Table 1에

나타내었다.

복합재료 적층판의 손상해석은 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였다. 사용된 요소는 복합재료 모델에 사용된 C3D8R와 충격자 모델에 사용된 R3D4이다. 대칭성을 고려하여 1/4모델을 생성하였으며 충격자와 복합재료 판이 접촉하는 부위는 조밀한 메쉬를 하였다. Fig. 1은 유한요소해석에 사용된 해석모델을 보인다.

3. 충격 거동

3.1 충격에너지에 따른 영향

충격에너지의 크기에 따른 복합재료의 거동을 알아보기 위해 #650/phenolic에 대하여 실험과 해석을 수행하였다. 실험에서는 질량 6.45kg의 충격자의 높이를 조절하여 충격에너지를 변화시켰으며 유한요소해석에서는 그에 해당하는 초기속도를 충격자에 적용함으로써 이를 모사하였다. 실험과 해석을 통한 충격하중 이력선도를 Fig. 2에 나타내었다. 충격에너지는 예비실험으로 규명된 손상발생 충격에너지인 6.69J에서 31.70J까지 고려되었으며 충격에너지가 클수록 최대충격하중이 큰 것을 알 수 있다. 해석이나 실험에서 모두 충격하중이 선형적으로 증가하지 않고 기복을 보이며 증가하는 것은 복합재료 시편의 고유진동수와 연관된 사항으로 기복의 주기를 살펴보면 충격에너지에 관계하지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 또한 다소 차이는 있으나 해석결과와 실험결과의 주기가 일치하는 것을 보면 유한요소모델이 잘 되었다는 것을 알 수 있다. 실험에서 획득한 충격하중은 고려된 모든 경우에서 약 3kN까지는 거의 일정한 기울기를 유지하며 증가하나 그 이후에 충격하중의 기울기가 변화되는 것을 확인할 수 있다. 이 결과로부터 충격하중 3kN에서 복합재료 시편에 손상이 발생된다는 것을 유추할 수 있으며 이 값은 충격에너지에 따른 영향이 작다는 것을 알 수 있다. 이에 반해 해석결과는 모든 경우에서 일정하게 증가한다. 이것은 유한요소 해석 모델에서 손상이 발생됨에 따라 구조강성이 감소하는 거동을 고려하지 않았기 때문으로 고려된다. 그러므로 복합재료의 손상거동을 정확히 모사하기 위해서는 손상이 진전되는 모델을 생성하는 것이 중요하다.

내충격성은 개념적으로는 충격에 견디는 성질, 즉 손상이 개시되는 하중이 클수록 내충격성이 큰 재료이다. 그러나, 현실적으로 손상이 개시되는 하중을 정확히 얻기가 매우 힘들다. 이 논문에서는 저속충격의 결과인 최대충격하중을 손상영역으로 나눈 새로운 내충격인자를 제시한다. 따라서 R_{impact} 으로 나타낸 내충격인자의 단위는 N/mm^2 로 단위 손상영역을 발생시키는데 필요한 충격하중이다. 즉, R_{impact} 이 크다는 것은 복합재료에 손상에 대한 저항성을 의미하게 된다. 이를 이용한다면 재료의 내충격성을 정량적으로 비교할 수 있는 장점이 있다.

Table 2는 고려된 충격에너지에 따른 최대 충격하중과 손상영역을 정리한 것이다. 내충격인자인 R_{impact} 는 충격에너지가 증가함에 따라 감소하는 것을 실험결과에서 볼 수 있다. 그러므로 복합재료의 내충격성은 충격자의 속도가 증가할수록 또는 충격자의 질량이 증가할수록 감소된다. 유한요소해석결과도 유사한 경향을 보이지만 차이를 보이는 것은 해석의 오류로 유추된다.

3.2 재료에 따른 영향

고려된 재료는 기존의 철도차량에 이용되던 재료인 MAT/U.P.와 Glass/phenolic재료인 #580/phenolic, #650/phenolic, #823/phenolic 그리고 #650/epoxy이다. 각 재료를 나타내는 수치는 섬유 면밀도를 나타내며 모든 시편의 두께는 5mm로 동일하다. 그러나, 면밀도에 따라 한 층의 두께가 다르므로 적층수는 #580은 8층, #650은 10층, #823은 20층이다. 적용된 충격에너지는 6.69J이다. 실험결과와 해석결과는 Table 3에 정리하였다. 내충격인자에 의해 각 재료를 평가하여 보면 재료의 내충격성은 다음과 같은 순서로 정리할 수 있다. #650/epoxy, #650/phenolic, #823/phenolic, MAT/U.P., #580/phenolic은 실험에 의한 결과이고, #650/epoxy, #823/phenolic, #650/phenolic, MAT/U.P., #580/phenolic은 해석에 의한 결과이다.

3.3 두께에 따른 영향

6.69J의 충격에너지에 대하여 #650/phenolic의 두께에 따른 충격특성을 평가하기 위해 3mm, 5mm, 7mm 그리고 9mm가 고려되었다. 일반적으로 두께가 증가함에 따라 굽힘강성이 증가하여 내충격성이 좋아질 것으로 예상된다. 이에 대한 결과는 유한요소해석결과만이 있으며 결과는 Table 4에 정리되었다. 실험에서는 필요한 데이터를 얻지 못했으며 해석 결과만을 살펴보면 예측된 것과 동일한 경향으로 나왔다.

3.4 RC에 따른 영향

일반적으로 복합재료는 레진의 함유량에 따라서도 재료의 특성들이 달라진다. 이 연구에서 고려한 레진의 함유량은 #650/phenolic에 대하여 35%, 40% 그리고 45%가 고려되었으며 결과들은 Table 5에 정리하였다. 실험결과와 해석결과는 다소 차이를 보였으며 실험결과에 따르면 레진함유량은 45%, 35% 그리고 40% 순으로 내충격특성을 갖는다.

4. 결론

철도차량에 적용될 복합재료의 저속충격에 대한 특성을 실험결과와 유한요소해석을 통해 평가하였다. 유한요소해석결과는 실험결과와 차이를 보였으며 이는 파손이 진전되는 거동을 모사하지 못하였기 때문으로 유추된다. 따라서 유한요소해석을 이용하여 복합재료의 충격거동을 연구하기 위해서는 파손기준식도 중요하지만 파손진전모델링이 매우 중요하다.

후기

이 연구결과는 산업자원부와 ㈜한국화이바의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. S.P. Joshi and C.T. Sun(1987), "Impact-Induced Fracture Initiation and Detailed Dynamic Stress Field in the Vicinity of the Impact," Proc. Of the America Society for Composite, pp. 177-185.

2. L. Reis and M. de Freitas(1997), "Damage Growth Analysis of Low Velocity Impacted Composite Panels," Composite Structures, Vol. 38, pp. 509-515.
3. R.K. Luo, E.R. Green and C.J. Morrison(2001), "An Approach to Evaluate the Impact Damage Initiation and Propagation in Composite Plates," Journal of Composite Materials, Vol. 32, pp. 513-520.
4. J.P. Hou, N. Petrinic, C. Ruiz and S.R. Hallett(2000), "Prediction of Impact Damage in Composite Plates," Journal of Composite Materials, Vol. 21, pp. 834-855.

Table 1 Material properties for the considered composites

		MAT/U.P.	Glass/phenolic			#650/epoxy
			#580	#650	#823	
Young's Modulus (GPa)	E_1	8.13	15.92	19.74	19.06	19.84
	E_2	8.13	15.92	19.74	19.06	19.84
	E_3	8.13	6.23	7.77	7.46	7.76
Poisson's Ratio	ν_{12}	0.298	0.097	0.138	0.139	0.158
	ν_{23}	0.298	0.016	0.228	0.230	0.259
	ν_{13}	0.298	0.016	0.228	0.230	0.259
Shear Modulus (GPa)	G_{12}	3.26	2.88	3.69	4.44	4.04
	G_{23}	3.26	2.18	2.80	3.37	3.22
	G_{13}	3.26	2.18	2.80	3.37	3.22

Table 2 Results of the #650/phenolic composite with 5 mm thickness under various impact energy

	Impact Energy	Maximum Impact Force (N)	Damage Area (mm ²)	(N/mm ²)
Experiment	6.69	3505	254.1	13.79
	13.03	3922	524.4	7.48
	25.77	5389	858.0	6.28
	31.70	5910	1033.4	5.72
FEM	6.69	4084	98.4	41.50
	13.03	6168	480.0	12.85
	25.77	8548	623.0	13.72
	31.70	9900	888.0	11.15

Table 3 Results of the considered materials with 5 mm thickness under 6.69J impact energy

	Material	Maximum Impact Force (N)	Damage Area (mm ²)	(N/mm ²)
Experiment	MAT/U.P.	2196.0	282.4	7.77
	#580/phenolic	2586.0	354.6	7.29
	#650/phenolic	3505.2	254.1	13.79
	#823/phenolic	4084.4	461.1	8.86
	#650/epoxy	3535.8	19.9	177.76
FEM	MAT/U.P.	2743.7	250.4	10.95
	#580/phenolic	3218.4	430.2	7.48
	#650/phenolic	4084.8	98.4	41.51
	#823/phenolic	4444.0	84.0	52.90
	#650/epoxy	4244.0	64.4	65.85

Table 4 Results of the #650/phenolic composite with various thickness under 6.69J impact energy

Thickness (mm)	Maximum Impact Force (N)	Damage Area (mm ²)	(N/mm ²)
3	3010	333.4	9.03
5	3505	254.1	13.79
7	7036	39.7	176.96
9	9500	6.4	1483.38

Table 5 Results of the #650/phenolic composite with 5 mm thickness for 35%, 40%, 45% resin content

	Resin Content (%)	Maximum Impact Force (N)	Damage Area (mm ²)	(N/mm ²)
Experiment	35	2599	242.9	10.70
	40	2909	297.0	9.79
	45	3080	252.8	12.18
FEM	35	4312	32.4	133.08
	40	3866	98.0	39.44
	45	4092	98.0	41.75

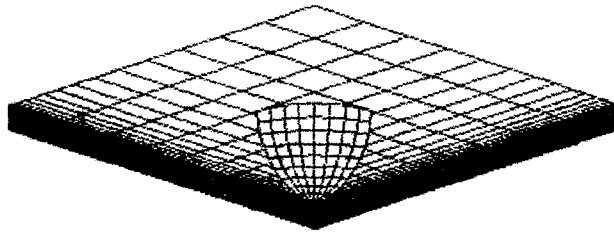


Fig. 1 Finite element model for low velocity impact of composites

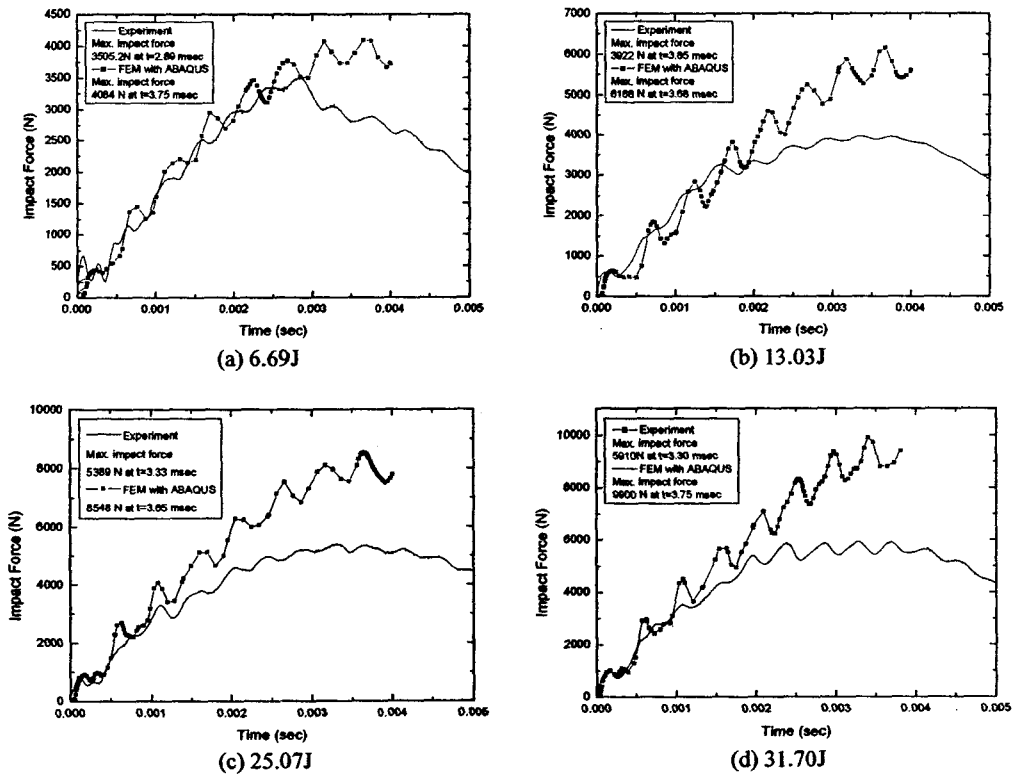


Fig. 2 Impact force history of the #650/phenolic composite with 5 mm thickness under various impact energy