

복합판재의 파단 변형을 불확실성을 고려한 탄 관통 잔류속도에 대한 시험 및 수치해석

차 명 석* · 이 민 형**†

* 세종대학교 기계공학과, ** 세종대학교 기계항공우주공학부

Test and Numerical Analysis for Penetration Residual Velocity of Bullet Considering Failure Strain Uncertainty of Composite Plates

Myungseok Cha* and Minhyung Lee**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Sejong Univ.

** School of Mechanical and Aerospace Engineering, Sejong Univ.

(Received August 8, 2015 ; Revised January 11, 2016 ; Accepted January 14, 2016)

Key Words: Composite Material(복합재료), High Speed Impact(고속 충돌), Residual Velocity(잔류속도), Uncertainty(산포)

초록: 복합재는 재료 불균질성에 의해 고속 충돌 시 방호성능 자료가 산포한다. 본 연구에서는 다수의 충돌시험으로 복합판재 잔류속도 산포를 확보하고 수치해석으로 예측하는 방법을 정립하였다. 먼저 10개의 동일 시편으로 인장시험을 수행하여 파단변형을 산포를 얻었다. 같은 재료로 제작된 4ply([0/90]s)와 8ply([0/90/0/90]s) GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic) 복합판재에 FSP(Fragment Simulating Projectile) 고속 충돌시험을 동일 조건에서 다수 수행하여 잔류속도 산포를 얻었다. 인장시험에서 얻어진 파단 변형을 분포를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 충돌속도는 4ply와 8ply 각각 411.7m/s와 592.5m/s이다. 시험 결과와 비교하여 적절한 잔류속도의 산포를 예측할 수 있었다. 추가적으로 복합판재의 경우 Solid요소 대비 Layered Solid요소로 모델링하면 계산시간이 감소되었다.

Abstract: The ballistic performance data of composite materials is distributed due to material inhomogeneity. In this paper, the uncertainty in residual velocity is obtained experimentally, and a method of predicting it is established numerically for the high-speed impact of a bullet into laminated composites. First, the failure strain distribution was obtained by conducting a tensile test using 10 specimens. Next, a ballistic impact test was carried out for the impact of a fragment-simulating projectile (FSP) bullet with 4ply ([0/90]s) and 8ply ([0/90/0/90]s) glass fiber reinforced plastic (GFRP) plates. Eighteen shots were made at the same impact velocity and the residual velocities were obtained. Finally, simulations were conducted to predict the residual velocities by using the failure strain distributions that were obtained from the tensile test. For this simulation, two impact velocities were chosen at 411.7m/s (4ply) and 592.5m/s (8ply). The simulation results show that the predicted residual velocities are in close agreement with test results. Additionally, the modeling of a composite plate with layered solid elements requires less calculation time than modeling with solid elements.

- 기호설명 -

E_i : 탄성계수 (MPa)
 G_{ij} : 전단계수 (MPa)
 S_1 : 섬유 중 방향 인장강도 (MPa)

S_2 : 횡 방향 인장강도 (MPa)
 V_i : 충돌속도 (m/s)
 V_r : 잔류속도 (m/s)

그리스문자

α : 비선형 전단 응력 계수
 ϵ_f : 파단변형률

† Corresponding Author, mlee@sejong.ac.kr

ν_{ij} : 푸아송비
 ρ : 밀도
 $\bar{\tau}$: 전단비

하첨자

a, b, c : 섬유 종 방향, 횡 방향, 섬유 수직방향

1. 서론

복합재는 금속재에 비해 비강도(specific strength), 비강성(specific stiffness) 및 경량성이 좋고 재료의 부피분율을 조절하여 제작 시 원하는 강성과 강도를 조절 할 수 있다는 장점이 있어 다양한 분야에서 이용되고 있다. 그 중에서 복합판재의 고속 충돌 특성을 알아보기 위해 시험과 해석이 이루어지고 있다.^(1~5)

복합재는 섬유 파단(fiber fracture), 기지 균열(matrix crack), 층간 분리(delamination), 섬유 인발(fiber pull-out) 등 다양한 파괴 조건을 보이는 것으로 알려져 있다.^(1~3) 이와 더불어 복합재료 자체의 불균질성에 의해 동일 시편으로 인장시험을 반복 수행하면 파단이 일어나는 조건(failure strain)이 다르게 얻어진다. 이러한 특성 때문에 방탄성능 확인을 위한 고속 충돌 관통시험에서 실제 방탄한계속도(V_{50})는 산포한다. 하지만 현재까지는 하나의 결과 값만 얻었으며 그 값의 산포 정도(uncertainty)는 제공되지 않아 실제 설계 적용시에 불확실성 파악에 어려움이 있었다.

따라서 본 연구에서는 복합재의 고속 충돌 관통 이후 측정되는 잔류속도 산포정도를 예측할 수 있는 방법론을 기술하였다.

먼저 복합재의 인장시험을 반복 수행하여 복합재 물성치와 파단이 발생하는 파단변형률(failure strain)의 범위를 측정하였다. 다음으로 동일한 재료로 만들어진 복합판재에 대한 고속 충돌 관통 시험을 수행하여 잔류속도 분포를 얻었다. 마지막으로 인장시험에서 얻어진 최대, 최소 파단조건에 따른 고속 충돌 시뮬레이션을 수행하여 잔류속도 산포를 시험 결과와 비교하였다.

추가적으로 수치계산의 효율성 관점에서 복합판재를 Solid와 Layered Solid요소로 모델링하여 시뮬레이션 결과와 계산시간을 비교하였다. 복합재는 직교 이방성의 재료이기 때문에 섬유 기준으로 여러 각도에 따라 판재를 적층하여 제작되어 진다. 따라서 복합재의 수치해석은 각각의 적

Table 1 Material property of laminated composite

E_a	47.90GPa	E_b	14.40GPa	E_c	14.40GPa
G_{ab}	2.29GPa	G_{bc}	3.97GPa	G_{ca}	3.97GPa
ν_{ab}	0.340	ν_{bc}	0.340	ν_{ca}	0.1025

Table 2 Failure strain and tensile strength

Longitudinal	ϵ_f	S_1
	2.26%	1002.6MPa
Transverse	ϵ_f	S_2
	0.38%	47MPa

층판을 모델링하여 수행된다. 하지만 각각의 적층판은 구조물에 비해 매우 얇기 때문에 기존 2차원 shell, 3차원 Solid요소로 모델링하고 계산하면 요소수 증가에 따른 계산 시간이 증대된다. 따라서 복합판재를 3차원 Layered Solid 요소를 이용하여 모델링하면 효율적인 복합판재 해석을 수행할 수 있다.⁽⁴⁾

2. 재료시험 및 파단 변형률 분포

본 연구에서는 E-glass/Epoxy 재료로 56.73%의 부피비로 조성된 단방향(unidirectional) 복합판을 사용하였다.

복합판을 ASTM D3039/3039M 규격에 맞춰 섬유의 종 방향, 횡 방향으로 각각 10개의 시편을 제작하였다. 제작된 인장시편으로 인장시험을 수행하여 재료 물성치, 파단이 얻어지는 최대, 최소 변형률 그리고 변형률에 따른 인장강도를 Table. 1, 2에 각각 나타내었다.

인장시험 결과 섬유 종 방향 시편의 경우 인장 파단 변형률이 최소 2.26%에서 최대 2.64%의 분포를 보였다. 변형률에 대응하는 인장강도는 최소 인장 강도 기준으로 약 18.23%의 차이를 보였다. 이러한 차이는 복합재료가 가지는 재료 불균질성에 기인한다. 횡 방향 시편의 경우 파단이 이루어지는 값이 산포하나 파단 값이 종 방향대비 미세하여 얻어진 결과의 평균값으로 나타내었다.

3. 고속 충돌시험

본 연구에서는 고속 충돌시험을 위해 앞서 언급한 재료를 가지고 4ply([0/90]s)와 8ply([0/90/0/90]s)

Table 3 Results of high velocity impact tests

ply	$V_{i_{ave}}$ [m/s]	V_r [m/s]
4	411.7(±3.84)	203.8~230.2
8	592.5(±3.13)	174.6~203.4

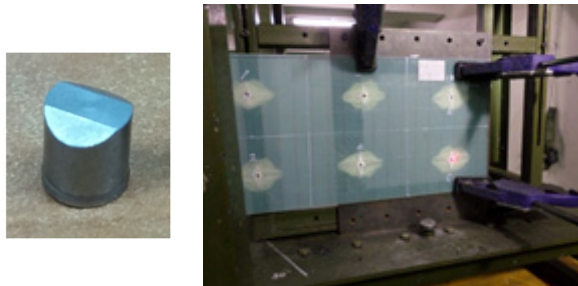


Fig. 1 Fragment simulating projectile and target

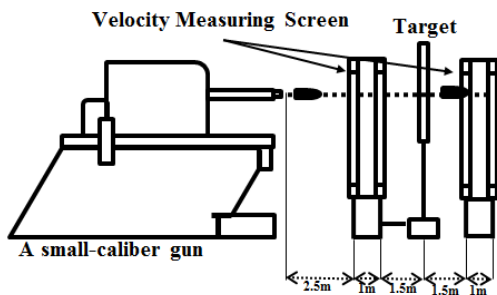
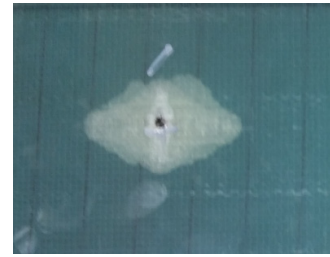


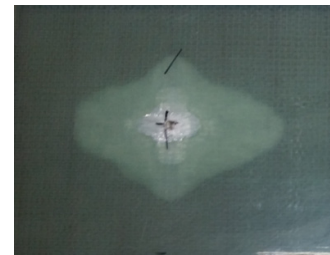
Fig. 2 Schematic diagram of impact test

로 적층된 복합판재를 제작하였다. 충돌체는 Fig. 1과 같이 직경 5.56mm, 무게 1.1g의 파편모의탄(FSP)을 사용하였다. 충돌시험은 MIL-STD-66 2F 규격을 갖춘 충돌 시험장에서 수행하였다.⁽⁶⁾ 충돌 시험에 사용된 장치로는 소구경 발사 장치와 충돌 속도 및 잔류속도를 측정하기 위한 2개의 속도 측정 스크린이 사용되었다.

제작된 시험평판을 Fig. 1과 같이 3개의 지그(jig)로 거치하여 총 18번의 시험을 수행하였고 최대한 동일한 충돌속도에서 관통되도록 하였다. 충돌속도와 잔류속도는 Fig. 2와 같이 평판 앞뒤로 배치된 속도 측정 스크린으로 측정하였다. Fig. 3을 통해 각 시험 결과가 변형에 의한 간섭이 이루어지지 않았기 때문에 적절한 시험을 수행했다고 판단하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 18번의 시험 결과 중 충돌속도가 적은 표준편차를 보이는 10개의 시험 결과를 샘플링하여 도시화한 그래프이다. 기준이 되는 표준편차의 값은 Table 3에 평균 충돌속도와 함께 나타내었다. 각각의 도시화한 그래프를 보면 충돌속도의 평균속도에서 잔류속도의



(a)4ply([0/90]s)



(b)8ply([0/90/0/90]s)

Fig. 3 Target plates after perforation

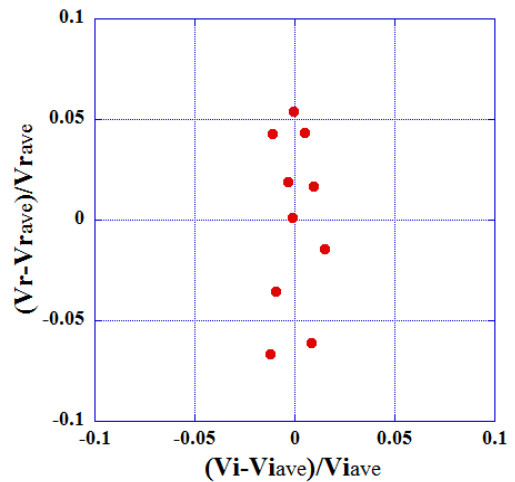


Fig. 4 Distribution of residual velocity(4ply)

분포가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

충돌시험 결과 Table 3에서와 같이 4ply에서는 평균 충돌속도 411.67m/s에서 203.8~230.2m/s의 잔류속도 분포를 보이며 8ply에서는 충돌속도 592.46m/s에서 174.6~230.4m/s의 분포가 나타난다. 평균 잔류속도 대비 백분율로 환산하면 4ply에서는 +5.4%~6.7%, 8ply에서는 +6.4%~9.0%의 산포를 보인다.

Fig. 6은 인장시험 결과 얻어진 섬유 종 방향 파단 변형률과 충돌시험에서 얻어진 잔류속도 결과를 각 평균값 대비 백분율로 계산하여 오름차순으로 나열한 것이다. 각 결과의 최대값과 최소

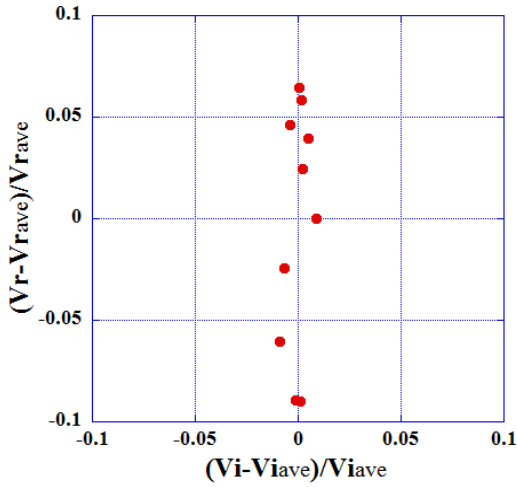


Fig. 5 Distribution of residual velocity (8ply)

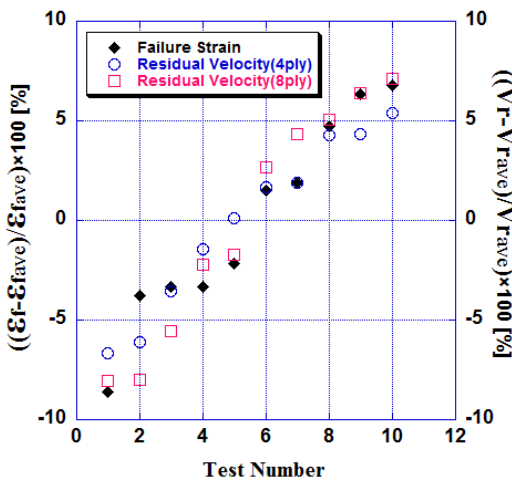


Fig. 6 Comparison distribution between tensile and impact test results

값의 차이가 산포의 크기를 나타낸다. Fig. 6의 결과를 통해 복합판재의 시험은 재료 불균질성에 의해 산포하고 각 시험 결과는 유사한 산포도를 보이는 것을 확인할 수 있다. 따라서 인장시험을 통해 파단변형률의 산포를 측정하고 그 결과를 활용하여 시뮬레이션을 수행하면 잔류속도의 산포도를 예측할 수 있을 것이다.

4. 수치해석

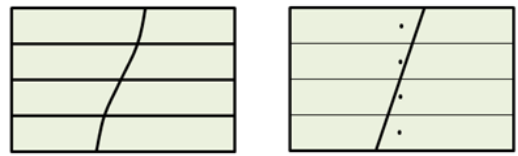
4.1 수치해석 방법론

4.1.1 Layered Solid Element

Fig. 7과 같이 4개의 적층 판으로 구성된 복합판재를 모델링 할 때 4개의 Solid요소로 모델링하

Table 4 Results of tensile test model

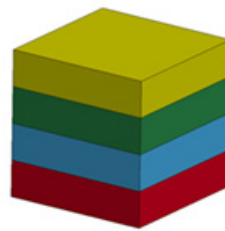
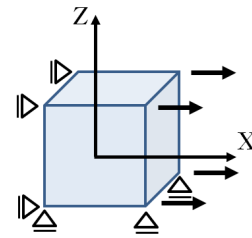
	0/0/0/0 [Error]	90/90/90/90 [Error]	45/45/45/45 [Error]
Analytical	958.0MPa	158.1MPa	288.0MPa
Solid Element	947.9MPa [1.13%]	156.5MPa [1.01%]	285.4MPa [0.90%]
Layered Solid Element	948.6MPa [1.05%]	154.9MPa [2.02%]	285.1MPa [1.01%]



4Solid element

1Layered solid element (4ply)

Fig. 7 Comparison between 4solid element and 1layered solid element of 4ply composite plate modeling



(a) Solid element



(b) Layered solid element

Fig. 8 Tensile test model

는 것보다는 하나의 Layered Solid요소에 각각의 적층 판에 대응되는 적분 점에 적용하여 해석하는 방법이 더욱 경제적이다.

먼저 4개의 적층 판으로 적층된 복합판재에 대한 두 가지 예제를 Layered Solid요소와 Solid요소로 모델링하여 두 결과를 비교하였다.⁽⁴⁾ 엄밀해(analytical results)는 참고문헌⁽⁴⁾을 활용하여 Table. 1의 재료로 재계산하였다.

4.1.2 단축 인장 모델

단축인장 모델은 Fig. 8과 같이 가로, 세로, 높

Table 5 Deflection results of cantilever beam

	0/0/0/0 [Error]	0/90/90/0 [Error]
Analytical	6.52mm	7.59mm
Solid element	6.58mm [0.92%]	6.98mm [8.04%]
Layered solid Element	6.32mm [3.07%]	7.51mm [0.92%]

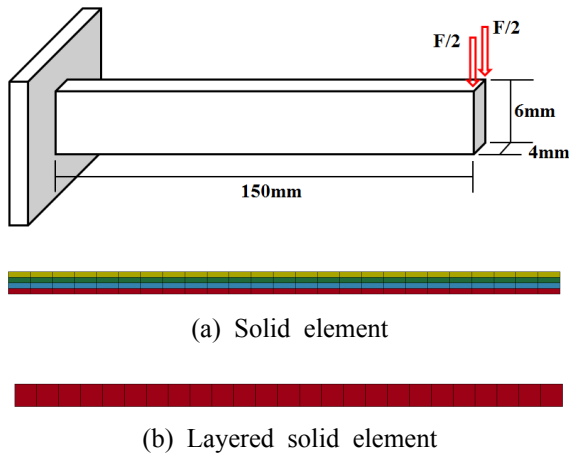


Fig. 9 Cantilever beam model

이 각각 1mm의 단축인장 모델을 모델링하여 2% 변형률에서의 응력을 비교하였다. 적층판재는 섬유 적층 각에 따른 계산이 중요하므로 세 가지의 적층 배열에 따른 응력 값을 계산하여 Table 4에 나타내었다. 계산 결과 얻어진 각각의 응력은 엄밀해⁽⁴⁾와 비교해서 적은 오차를 가지는 것을 확인할 수 있다.

4.1.3 Cantilever beam Model

Cantilever beam을 Fig. 9와 같이 모델링하여 20N의 힘을 가해졌을 때 처짐 값을 비교하였다. [0/0/0/0]와 [0/90/90/0]로 적층된 두 가지 모델을 비교하였다. 계산하여 얻어진 결과는 Table 5와 같다. [0/0/0/0] 적층 복합재 계산 결과는 각 모델링 방법이 엄밀해⁽⁴⁾와 유사한 결과가 얻어졌다. [0/90/90/0]의 경우 Solid요소로 모델링한 경우 약 8%의 오차가 발생하였으나 Layered Solid요소 모델링의 경우 엄밀해와 유사한 계산 결과가 얻어졌다.

4.2 파괴모델

본 연구에서 사용된 파괴모델은 Chang-Chang

Table 6 Comparison tensile strength between test and simulation at average failure strain

	Longitudinal [0/0/0/0]		Transverse [90/90/90/90]	
	$\epsilon_{f_{ave}}$ [%]	S_1 [MPa]	$\epsilon_{f_{ave}}$ [%]	S_2 [MPa]
Tensile test	2.45	1094.0	0.38	47.000
Solid element	2.45	1159.8	0.38	54.621
Layered solid element	2.45	1159.4	0.38	54.623

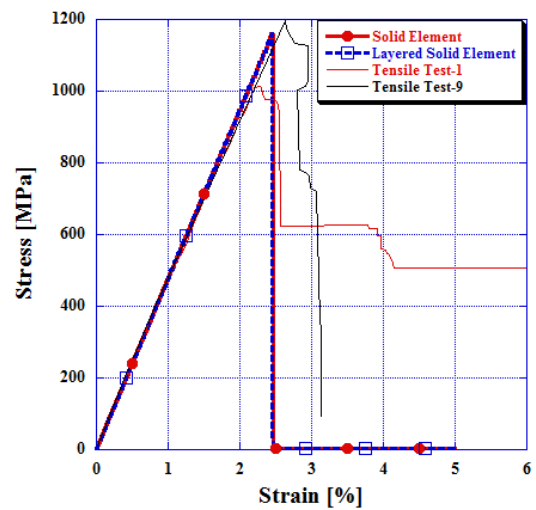


Fig. 10 Stress-strain curve of longitudinal direction

Composite Failure Model이다. 파괴모델의 수식은 다음과 같다.^(7,8)

$$\bar{\tau} = \frac{\frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha\tau_{12}^4}{\frac{S_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha S_{12}^4} \quad (1)$$

$$F_{matrix} : \left(\frac{\sigma_2}{S_2}\right)^2 + \bar{\tau} > 1 \quad (2)$$

$$F_{fiber} : \left(\frac{\sigma_1}{S_1}\right)^2 + \bar{\tau} > 1 \quad (3)$$

섬유의 횡, 종 방향 인장 강도는 인장시험 결과 얻어진 값을 사용하였다. 본 연구에서는 인장 강도를 메인 파라미터로 고려하였기 때문에 S_1 , S_2 값만 사용하여 파괴모델을 계산하였다.

동일한 재료로 파괴모델이 적용된 단축인장 모델을 계산하여 인장시험 결과와 비교하였다. 인장 시험 결과의 경우 평균값을 나타내었으며 계산을

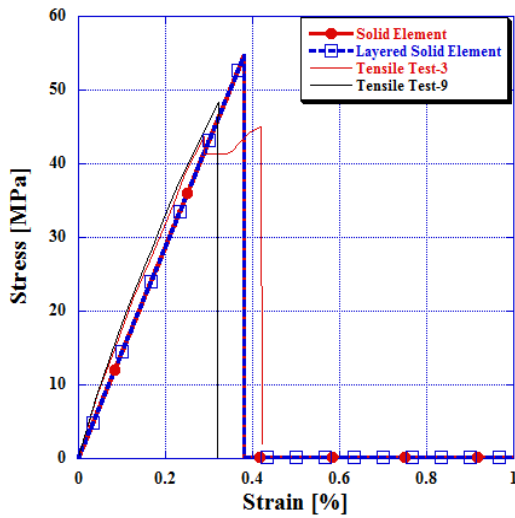


Fig. 11 Stress-strain curve of transverse direction

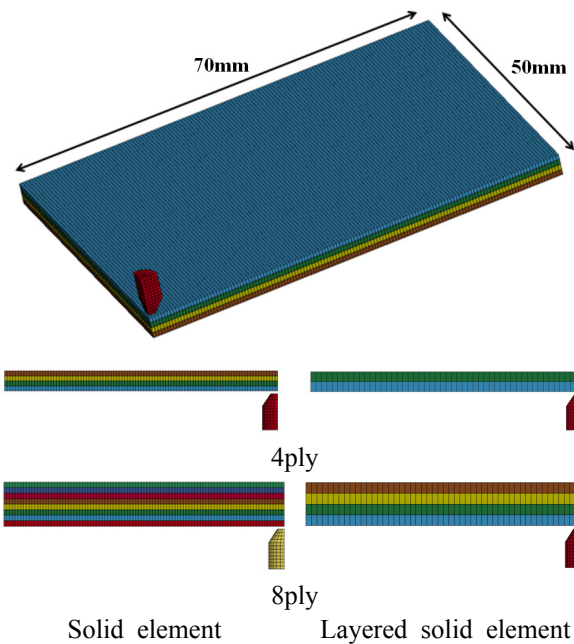


Fig. 12 Finite element model of impact simulation

통해 인장시험에서의 평균 파단 변형률이 얻어지는 인장 강도를 Table 6에 나타내었다. Table 6과 Fig. 10, 11을 통해 Solid요소와 Layered Solid요소의 2개의 수치기법은 유사한 결과가 얻어졌으나 시험 결과에 비해 인장강도의 값이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이 차이는 인장시험에서 시그와 시편의 슬립(slip) 발생과 그에 따른 인장력 측정의 오차에 의해 발생한다.

4.3 고속 충돌 시뮬레이션

복합재의 수치 모델은 미시적 모델과 거시적

Table 7 Material property of FSP

ρ	7,850kg/m ³
--------	------------------------

Table 8 Results of test and simulation

4ply (Vi=411.67m/s)	V_{r_min} [m/s] ($\epsilon_f=2.64\%$)	V_{r_max} [m/s] ($\epsilon_f=2.26\%$)
Impact Test Results	203.8	230.2
Simulation Results (Solid Element)	205.7	227.0
Simulation Results (Layered Solid Element)	210.5	227.2
8ply (Vi=592.46m/s)	V_{r_min} [m/s] ($\epsilon_f=2.64\%$)	V_{r_max} [m/s] ($\epsilon_f=2.26\%$)
Impact Test Results	174.6	203.4
Simulation Results (Solid Element)	179.5	204.2
Simulation Results (Layered Solid Element)	177.1	204.6

모델이 있다. 미시적 모델은 섬유와 기지를 직접 모델링 하는 방법이며 거시적 모델은 재료를 직교 이방성 균질 재료로 가정하는 방법이다.^(2,6,7) 본 연구에서는 재료의 인장시험을 통해 얻어진 Table 1과 Table 2의 균질화 된 직교 이방성 재료 물성과 파단조건을 이용하여 거시적 모델로 모델링하였다. 재료의 구성방정식 및 파괴 모델로는 위에서 언급한 Chang-Chang에 의해 제안된 모델을 사용하였다.^(7,8)

유한요소 모델은 Fig. 12와 같이 복합판재와 충격체인 파편모의탄을 대칭 경계조건을 이용하여 1/4만을 모델링 하였다. 충격체인 파편 모의탄은 충돌시험에서 관통 후 변형이 많이 이루어지지 않아 강체(Rigid)로 가정하였고 밀도는 Table 7과 같다. 복합판재의 경우 Solid요소와 Layered Solid요소 두 가지 방법을 활용하였다. Layered Solid요소를 이용한 방법은 하나의 Part가 두 개의 적층 판재를 대표한다. 충돌 모델의 관통 모사는 접촉 알고리즘과 Erosion을 사용하였다.⁽³⁾

충돌속도는 4ply([0/90]s)와 8ply([0/90/0/90]s)에서의 충돌시험 결과를 정리하여 얻어진 411.67m/s과 592.46m/s를 활용하였고 이를 이용하여 인장강도에 따른 고속 충돌 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 9 Comparison of computational CPU time

	4ply	8ply
Solid element	952seconds	953seconds
Layered solid element	45seconds	45seconds

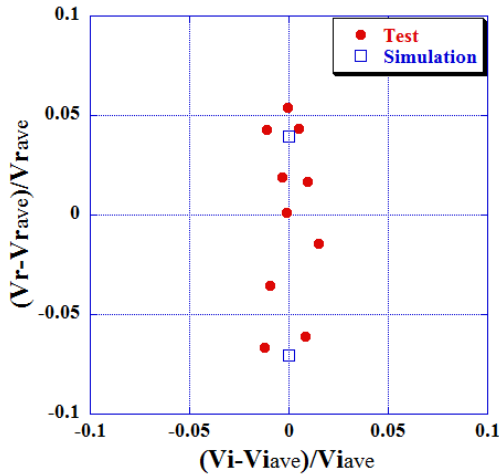


Fig. 13 Comparison of residual velocity(4ply, solid element)

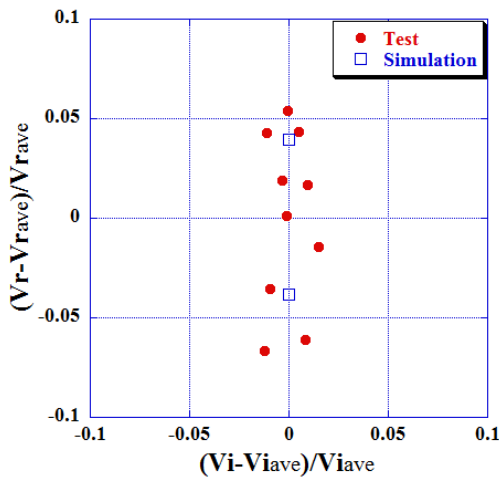


Fig. 14 Comparison of residual velocity(4ply, layered solid element)

고속 충돌 시뮬레이션을 수행하여 2.26%과 2.64%의 인장 변형률에서 각각 Table 8과 같은 잔류속도가 얻어졌다. Fig. 13~16은 충돌시험과 충돌 시뮬레이션에 의한 잔류속도의 산포도를 비교한 것이다. 충돌 시뮬레이션을 통해 4ply에서는 Solid 요소는 +3.9%~7.0%, Layered Solid 요소는 +3.9%~ - 3.8%의 결과가 얻어졌다. 8ply에서는 각각 +6.7%~ - 6.3%, +7.2%~ - 7.5%의 결과가 얻어졌다.

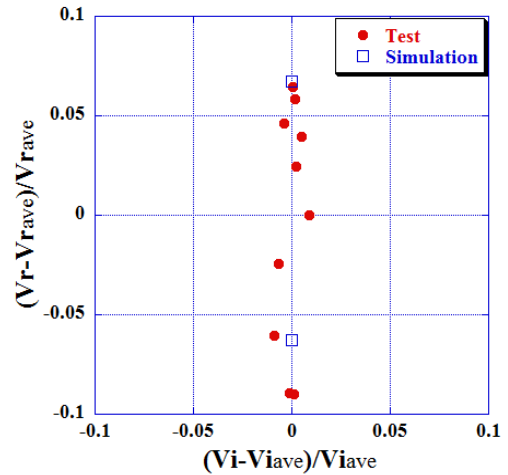


Fig. 15 Comparison of residual velocity(8ply, solid element)

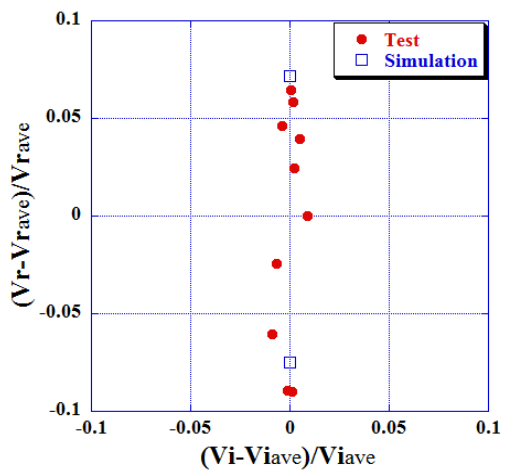


Fig. 16 Comparison of residual velocity(8ply, layered solid element)

4개의 시뮬레이션 결과는 시험 결과에 비해 작은 산포를 보였다. 또한 시험 결과 얻어진 잔류속도의 평균 속도 대비 대칭성 있는 산포를 보였다.

따라서 인장시험 결과 얻어진 섬유 과단 인장 변형률의 분포 측정을 통해 고속 충돌에 의한 잔류속도 산포를 예측할 수 있음을 확인하였다.

Table 9는 각각의 시뮬레이션 결과가 얻어지는 계산시간을 나타내었으며 Layered Solid 요소의 계산 결과가 약 21배의 빠른 시간에서 얻어졌다.

5. 결론

본 연구에서는 복합재의 재료 불균질성이 고속 충돌 시 충돌체의 잔류속도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 인장시험, 고속 충돌시험 그리고 고

속 충돌 시뮬레이션을 수행하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 동일한 시편으로 여러 번 인장시험을 수행하면 재료 불균질성에 의해 복합재의 파단변형률은 다양하게 얻어진다.

(2) 동일한 충돌속도에서 고속 충돌시험을 수행하면 잔류속도가 산포한다.

(3) 인장시험 결과 얻어진 재료 물성치와 최대, 최소 파단변형률의 정보를 가지고 충돌 시뮬레이션을 수행하면 잔류속도의 산포를 예측할 수 있다.

(4) 고속 충돌 시뮬레이션에서 Layered Solid요소를 이용하여 복합재를 모델링하면 빠른 계산시간에서 Solid요소 모델과 유사한 잔류속도 산포도를 얻을 수 있다.

후 기

이 연구는 국방과학연구소의 기초연구분야 연구비(UD120053GD, UD140011GD) 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌 (References)

- (1) Yen, C. F., 2002, "Ballistic Impact of Composite Materials," *7th International LS_DYNA Conference* Vol. 20, No. 5, pp. 449~464.
- (2) Silva, M.A.G., Cismasiu, C. and Chiorean, C. G., 2005, "Numerical Simulation of Ballistic Impact on Composite Laminates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 31, pp. 289~306.
- (3) Ahn, J. H., Kweon J. H. and Choi, H. H., 2009, "High Velocity Impact Analysis of Kevlar29/Phenolic Composite Plate," *Composite Research*, Vol. 22, pp. 18~23.
- (4) Madhukar C., Thomas G. and Anton M., 2009, "An Assessment of the New LS-DYNA Layered Solid Element: Basic, Patch Simulation and Its Potential for Thick Composite Structure Analysis," *7th European LS-DYNA Conference*.
- (5) Jo, J. H., Lee, Y. S. and Jin, H. L., 2012, "Numerical Simulation of Steel/Kevlar Hybrid Composite Helmet Ubjected to Ballistic Impact," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 12, pp. 1569- 1575.
- (6) "MIL-STD-662F: Department of Defense Test Method Standard V50 Ballistic Test for Amor," 1997, United States of America Department of Defense.
- (7) LSTC, "LS-DYMA Keyword User's Manual," 2013, Livermore Software Technology Corporation, Version R7.
- (8) LSTC, "LS-DYMNA Theory Manual," 2006, Livermore Software Technology Corporation.

- (1) Yen, C. F., 2002, "Ballistic Impact of Composite Materials," *7th International LS_DYNA Conference* Vol. 20, No. 5, pp. 449~464.
- (2) Silva, M.A.G., Cismasiu, C. and Chiorean, C. G.,