

論文

케블라 복합재 평판의 고속충돌 특성 수치해석

안정희*, 권진회**, 최진호**

High Velocity Impact Analysis of Kevlar29/Phenolic Composite Plate

Jeoung-Hee Ahn*, Jin-Hwe Kweon**, Jin-Ho Choi**

ABSTRACT

Failure of Kevlar29/Phenolic composite plate under high velocity impact of FSP(Fragment Simulation Projectile) is investigated using a non-linear explicit finite element code, LS-DYNA. Composite laminate and impactor are idealized by solid element and interface between laminas are modeled by tied-break element in LS-DYNA. Interaction between impactor and laminate is simulated face-to-face eroding contact algorithm. When the stress level meets a failure criteria, the layer in the element is eroded. Numerical results are verified by existing test results.

초 록

비선형 동적해석 유한요소 프로그램인 LS-DYNA를 이용하여 고속 파편모의탄 충돌에 의한 Kevlar29/Phenolic 복합재 평판의 파손특성을 해석하였다. 적층판과 충격체는 고체요소를 사용하여 이상화하였고, 복합재 층과 층 사이 파손 해석을 위해서는 타이드 브레이크(tied-brake)요소를 사용하였다. 충격체와 복합재 적층판은 면-대-면 소멸 접촉 알고리즘을 사용하였다. 충격체에 의한 파손과 충격체의 관통을 모사하기 위해 응력이 일정한 파손기준식을 만족하면 해당되는 요소의 해당층은 제거된다. 해석 결과는 기존의 시험 결과와의 비교를 통해 검증한다.

Key Words : 복합재료(Composite), 고속충돌(High Velocity Impact), 케블라(Kevlar), 층간분리(Delamination)

1. 서 론

항공기 구조물에 복합재를 적용하는 비율이 증가함에 따라 전투기의 경우 설계 초기에 탄환내성을 가지는(ballistically tolerant) 설계개념을 도입하고 있다. 헬기에서도 주로터 블레이드(main rotor blade), 컨트롤과 허브(control and hub) 등에 대해서 피탄 후 생존성능을 요구하고 있다. HMMWV(high-mobility multi-purpose wheeled vehicle)나 헬멧, 차량 및 방호분야에서도 비강도, 비강성 특성이 우수한 복합재가 사용됨에 따라 구조물에 대한 내탄환 설계 요구가 증가되고 있는 실정이다. 그러나 충돌속도, 충격체의 형상, 강성과 질량, 경계조건 및 재료 특성치와 파손모드의 복잡성으로 인해 복합재에 대한 고속 충돌

문제는 주로 실험에 의해 연구되어 왔고[1-3], 수치해석기법을 이용한 충돌모사 연구는 최근 들어서야 수행되기 시작하였다.

충돌해석 수치모델은 미시적(microscopic) 모델과 거시적(macrosopic) 모델로 대별할 수 있다. 미시적 해석모델은 복합재료를 구성하는 섬유와 기지를 직접 다루며, 복합재료를 이들의 혼합체로 간주하는 방법이다. 해석모델을 섬유와 기지 등 복합재료를 구성하고 있는 성분수준까지 그대로 직접 모델링하여 해석하는 직접 수치모사(DNS; Direct Numerical Simulation) 방법[4], 또는 고속으로 충돌하는 복합재를 하나의 보강재와 기지재로 이루어진 단위 셀(unit cell)의 조합체로 표현하는 방법이 있다[5,6].

거시적인 모델은 보강섬유와 기지를 구분하지 않고 복합

* 경상대학교 항공기부품기술연구소 선임연구원

**+ 경상대학교 기계항공공학부 교수/항공기부품기술연구소, 교신저자(E-mail:jhkweon@gnu.ac.kr)

** 경상대학교 기계항공공학부 교수/항공기부품기술연구소

적층판을 균질한 하나의 이방성 재료로 가정하는 모델이다. 거시모델에서는 보강섬유와 기지재료를 구분하지 않기 때문에 모델링이 쉽고 구조물 전체에 대한 거동을 다룰 때 편리하다. 반면에 보강섬유와 기지의 상호작용에 의해 발생하는 복합재의 복잡한 파손거동을 모사하기 어려운 문제점이 있다[4].

복합재의 충돌손상에 관한 국내 연구는 주로 재료의 기계적 특성에서 변형률 속도(strain rate)의 영향을 무시할 수 있는 저속충돌에 국한되어 진행되어 왔다[7-9].

해외에서는 고속충돌에 대한 연구도 일부 이루어져 그 결과가 보고되고 있다. Tabiei 등[5,10]은 유연한 직물(fabric) 복합재에 대하여 미시역학적 접근과 균질화를 통한 단위 셀 재료모델을 구성하고 케블라(Kevlar)를 대상으로 시험을 수행하여 그 결과값을 비교하였다.

사용자 정의 재료모델(UMAT: User Defined Material)은 상용코드(code)에서 제공되는 재료모델과 달리 사용자가 직접 재료모델을 구성한 서브루틴(subroutine)을 상용코드와 함께 컴파일 하여 사용하는 재료모델로서, 참고문헌 [11,12]에서는 복LS-DYNA 사용자 정의 재료모델 구성을 통한 수치해석을 수행하였다. 그러나 전반적으로, 복합재의 고속충돌에 대한 관심에도 불구하고 국내에서는 수치적 방법을 사용한 고속충돌 해석 연구를 찾아보기 어렵고, 해외 연구에서도 충분한 데이터가 제공되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 복합재 고속충돌 수치해석을 위한 기초연구로, 파편모의탄(FSP: Fragment Simulation Projectile)에 의한 고속 충돌을 받는 단순지지된 직조 케블라/페놀(Kevlar29/Phenolic) 복합재 평판에 대한 수치해석을 수행하였다. 비선형 동적해석 코드인 LS-DYNA를 이용하여 적절한 요소분할을 포함한 접촉(contact), 소멸(eroding) 및 층간 인터페이스를 부가한 수치모델을 개발하였다. 시간이력에 따른 층간분리와 두께방향으로의 관통(perforating)을 모사하고 해석결과를 참고문헌[11]의 시험 결과와 비교하여 수치모델의 타당성을 보였다.

2. 수치해석

2.1 문제 설명

본 연구에서의 해석대상은 Fig. 1에 보인 바와 같이 길이×폭×두께가 152.4×101.6×9.5 mm³인 케블라/페놀 복합재 적층판에 강으로 된 충격체가 속도 483, 545, 586 m/s로 충돌하는 문제이다. 직조 복합재 평판의 적층순서는 [[(45)/(90)/(0)]₃/(0)]s 준등방성(quasi-isotropic)이다[13].

충격체는 MIL-P46953에 따른 직경 5.59 mm(0.22 in), 무게 1.1g의 파편모의탄이다. 충격체의 형상은 Fig. 2에 제시하였다. 본 연구에 사용된 복합재와 충격체에 대한 재료 물성치는 Table 1, 2에 나타내었다[11].

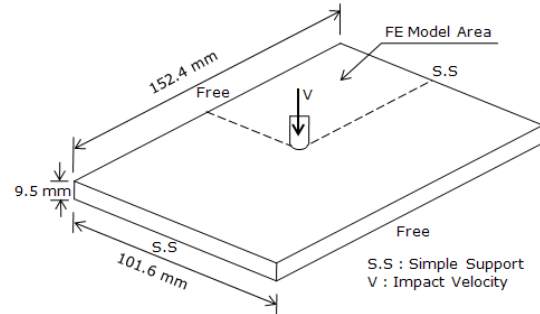


Fig. 1 Composite laminate under ballistic impact.

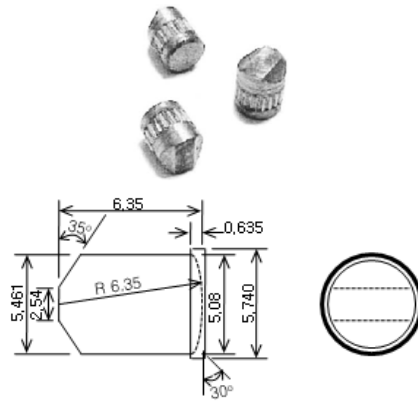


Fig. 2 Configuration of FSP(Fragment Simulation Projectile, mm).

Table 1 Material Properties for Kevlar29/Phenolic Panel

Young's modulus	$E_{11} = E_{22} = 18.5$ [GPa]
	$E_{33} = 6.0$ [GPa] : dynamic
Poisson's ratio	$\nu_{12} = 0.25$
	$\nu_{13} = \nu_{23} = 0.33$
Shear modulus	$G_{12} = 0.77$ [GPa]
	$G_{13} = G_{23} = 5.43$ [GPa]
Density	$\rho = 1.23$ [g/cm ³]
Strength	$X = Y = 1850$ [MPa]
	$Z = 1200$ [MPa]
	$S_{12} = 77$ [MPa]
	$S_{23} = S_{13} = 543$ [MPa]
Interlaminar normal	$S_n = 34.5$ [MPa]
Interlaminar shear	$S_s = 9.0$ [MPa]

Table 2 Material Properties for Impactor

Young's Modulus	$E = 207$ [GPa]
Poisson's ratio	$\nu = 0.30$
Yield Strength	$Y = 1034.2$ [MPa]
Hardening Modulus	$H = 685$ [MPa]

2.2 수치해석 모델링

상용 프로그램을 이용한 복합재 고속충돌 수치모델은 적합한 물성치와 함께 요소망의 조밀도, 접촉에 대한 규정, 복합재 특성에 따른 파손에 대한 정의 및 층간분리를 적절히 구현하고 있어야 한다. 또한 초기 모사된 해석 결과를 시험 결과와 비교하여 프로그램에서 요구하는 인자를 적절히 재 규정함으로써 최종적으로 시험 결과와의 연관관계를 잘 모사할 수 있도록 해야 한다. 이는 충돌발생시 충돌속도, 충격체의 형상, 강성과 질량, 경계조건 및 재료 특성치와 파손모드의 복잡성을 초기 수치모델 단계에서 정확히 고려하기 어렵기 때문이다.

Fig. 3에 복합재 평판과 충격체에 대한 유한요소모델을 나타내었다. 대칭경계조건을 이용하여 1/4만을 모델링하였다. 모두 8절점 고체요소를 사용하였고, 복합재 평판에 대한 요소망 조밀도는 참고문헌 [11,14]를 참조하였다. 접촉이 일어나는 가장 조밀한 영역의 요소는 각 두께 0.25 mm, 폭 0.83 mm이다. 각 층당 두께방향으로 2개의 요소를 가지도록 하였다.

재료의 파손 여부는 요소의 각 방향의 최대응력을 바탕으로 한 조합에 따라 결정되며 파손식은 다음과 같다[15].

$$f = \frac{4[\sigma_1 - \frac{X_t - X_c}{2}]^2}{(X_t + Y_c)^2} + \frac{4[\sigma_2 - \frac{X_t - X_c}{2}]^2}{(X_t + Y_c)^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{S_{12}^2} + \frac{\sigma_{13}^2}{S_{13}^2} + \frac{\sigma_{23}^2}{S_{23}^2} - 1 \quad (1)$$

여기서

X_t, X_c : 섬유방향 인장강도, 압축강도

Y_t, Y_c : 기지방향 인장강도, 압축강도

S : 면내전단강도

사용된 수치모델 요소가 파손 구현이 가능하고 파손식을 식 (1)과 같이 표현할 수 있지만 해석 수행시 과도한 변형으로 해를 구할 수 없는 현상이 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 변형률이 임계값에 도달하면 해당 요소의 해당 층이 제거(erosing)되는 변형을 파손 기준을 부가하였다. 접촉에 대한 규정은 재료가 파괴되어가는 현상을 시간에 따라 보일 수 있도록 점차 소멸되는 면-면(erosing- surface-to-surface) 접촉 알고리즘[11,14]을 사용하였다.

복합재의 층간분리 모사를 위해서는 타이드브레이크(tied-break)를 적용하였다[4,11,14]. 적용된 타이드 브레이크 인터페이스는 적층 사이에 Fig. 4와 같이 접촉요소로 삽입되어 모델링될 수 있는데 초기 접촉강성을 가지고 접촉면을 유지하다가 면내 수직방향 또는 면내 전단방향의 응력이 허용 접촉응력에 도달하면 분리되는 특성을 가지는 접촉요소이다. 타이드 브레이크의 개념은 층간분리 해석에 Fig. 5과 같은 파손모드 개념을 도입하는 것으로 모드 I을 나타내는 두께방향

성분과 모드 II와 III을 합친 면내 전단의 층간 파손모드 성분의 합으로 모사하고 있다. 타이드 브레이크 파손은 다음 식으로 나타낼 수 있다[14].

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{S_n}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{S_s}\right)^2 \geq 1 \quad (2)$$

여기서

S_n : 층간인장강도

S_s : 층간전단강도

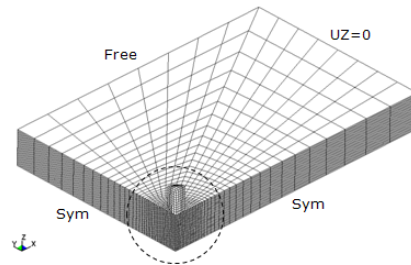


Fig. 3 Finite element model for composite plate and impactor.

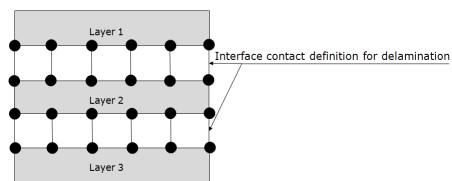


Fig. 4 Tied-break contact elements.

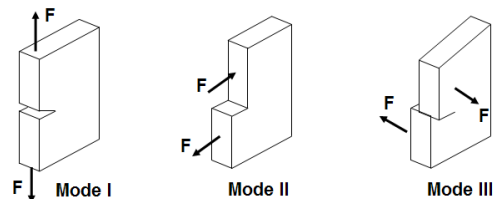


Fig. 5 Interlaminar fracture modes.

충격체의 수치해석 모델에 사용된 고체요소에서 von Mises 항복조건은 식 (3)과 같이 주어진다[16].

$$\phi = J_2 - \frac{\sigma_y^2}{3} \quad (3)$$

여기서 이차 응력 불변량 J_2 는 편차응력성분의 항을 사용하여 다음과 같이 정의된다.

$$J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} \quad (4)$$

여기서

s_{ij} : 편차응력(deviatoric stress)

항복응력 σ_y 는 유효 소성변형률 ϵ_{eff}^p 과 소성 경화강성 E_p 의 함수이며, 다음과 같다.

$$\sigma_y = \sigma_0 + E_p \epsilon_{eff}^p \quad (5)$$

여기서

σ_0 : 한계응력(specified threshold stress)

강체가 아닌 탄성체인 강으로 제작된 충격체에 대한 실질적인 모델링과 충돌 후의 복합재 평판과의 상호 거동을 관찰하기 위해 3차원 등방성 탄성-소성 고체요소를 사용하였다.

2.3 요소망 민감도

고속 충돌 수치해석에서는 일반적인 정적해석과 달리 요소망의 밀도에 따라 결과의 차이가 많이 발생한다. 또한 최소 요소크기는 재료 매질에 따른 음파속도(material sound wave speed)와 함께 초기 시간간격을 정의하는 요인으로 사용된다. 따라서 적절한 요소의 분할과 검토는 본격적인 수치해석 전에 수행되어야 할 과정이다. 그러나 요소망에 대한 인자연구는 여전히 많은 비용을 필요로 한다. 본 연구에서는 프로그램의 사용자 매뉴얼에서 제시하고 있는 기준과 해석시간, 재료매질, 충격체와 복합평판의 폭 및 두께를 고려하여 요소분할을 하였으며, 접촉면은 가능한 한 기하학적으로 동일한 크기의 요소가 될 수 있도록 하였다.

요소망 조밀도의 영향을 알아보기 위해 초기 두께방향으로 층당 하나의 고체요소로 모델링 하였다. Fig. 6에 보는 바와 같이 복합재 평판은 전체 해석시간 $t=200\mu s$ 중 $50\mu s$ 에서 관통되었다. 그러나 Fig. 7에서와 같이 층당 2개의 요소로 모델링할 경우 동일 시간조건에서 관통 현상이 발생되지 않고, $t=200\mu s$ 에서는 시험결과와 유사한 최종 배면변위를 나타내고 있다. 이 결과를 바탕으로 본 연구에서는 층당 2개의 요소를 사용하였다.

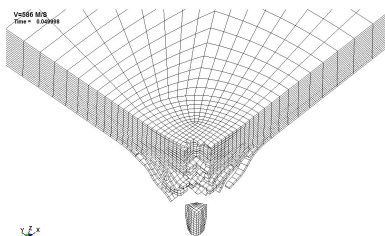


Fig. 6 Perforating behavior using single solid element per ply ($t=50 \mu s$).

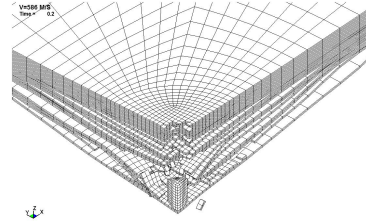


Fig. 7 Perforating behavior using double solid elements per ply ($t=200 \mu s$).

3. 결과 및 토론

방호 헬멧이나 방호 의류에 사용되는 복합재에 대한 탄환 충돌 해석에서는 시간이력에 따른 충격체의 속도변화 및 관통 여부와 함께 배면변위가 중요한 인자로 인식되고 있다. Fig. 8에는 시간에 대한 충격체 속도의 이력을 제시하였다. 시험 결과와 잘 일치하고 있다.

각 속도별 배면변위를 참고문헌[11]에서 사용된 UMAT 방법의 결과 값과 비교하여 Fig. 9~11에 나타내었다. 시험 계측장비의 제약으로 충돌순간($t=0\mu s$) 충격체의 위치결정이 어려워 해석결과와 시험결과와의 변위시간 차이가 발생되었다.

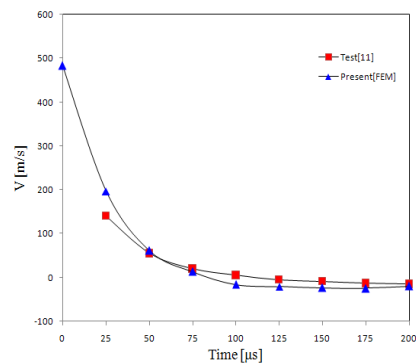


Fig. 8 FSP velocity-time history($V=483 \text{ m/s}$).

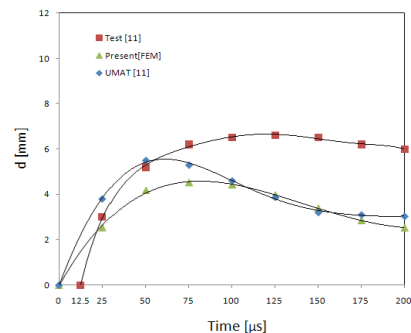


Fig. 9 Backplane deflection vs. time history($V=483 \text{ m/s}$).

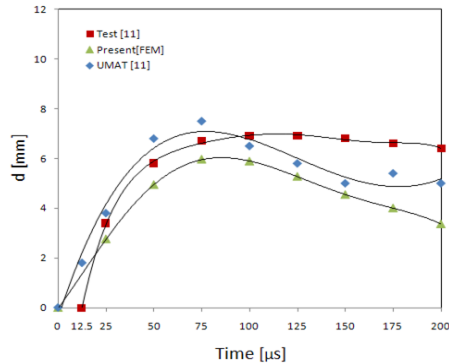


Fig. 10 Backplane deflection vs. time history(V=545 m/s).

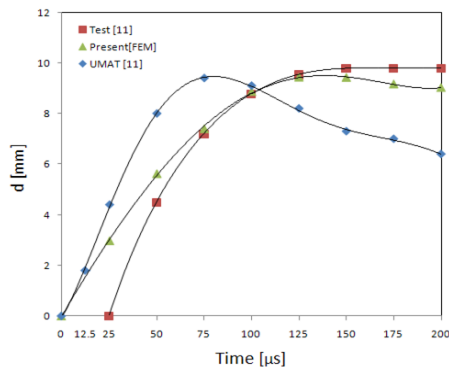


Fig. 11 Backplane deflection vs. time history(V=586 m/s).

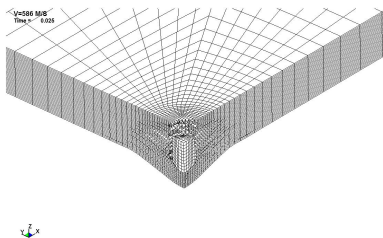


Fig. 12 Failure of composite plate (t=25 ms).

본 연구에서 사용된 수치해석 모델은 UMAT과 비교적 같은 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 최고속도(V=586 m/s)에서는 시험치에 더 근접한 결과를 보이고 있다. 관통이 저지되는 모델에서는 최대 변형 이후 처짐이 회복되는 탄성복원(elastic spring back) 현상을 묘사하고 있으나 시험에서는 잘 나타나지 않고 있다. 탄성복원은 실제 시험에서 관찰되는 현상이지만 고속충돌에 의한 최대 배면변위에 주안점을 두고 있는 시험결과 치에서는 최대변위 이후 탄성복원거동 측정이 잘 이루어지지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 12~15에서는 V=586 m/s에서의 두께방향으로의 파손

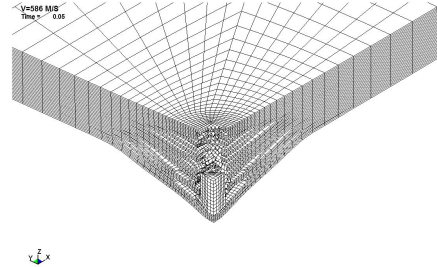


Fig. 13 Failure of composite plate (t=50 ms).

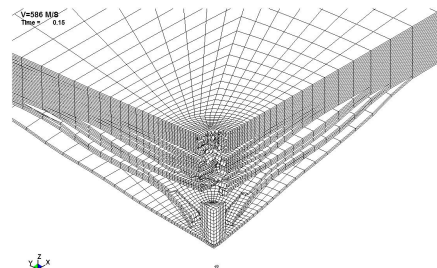


Fig. 14 Failure of composite plate (t=150 ms).

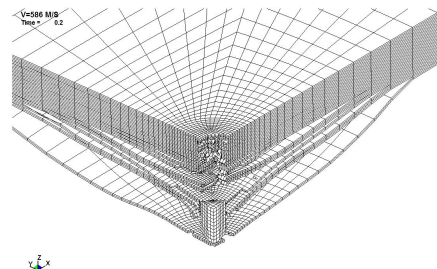


Fig. 15 Failure of composite plate (t=200 ms).

과정을 시간이력에 따라 나타내었다. Fig. 12에 보인 바와 같이 t=25 μ s에서 초기 상당량의 인입(dent)이 진행되었으며, 복합 적층판의 파손은 대부분 충격면에 집중해서 발생하고 있음을 볼 수 있다. 층간분리와 충격체의 파손은 발생하지 않았으나 접촉면이 확장되었다.

Fig. 13의 t=50 μ s에서는 인입이 더욱 진행되고 층간분리가 확장되는 것을 볼 수 있으며, 층 사이의 일부 요소들이 소멸되는 것을 볼 수 있다. t=150 μ s (Fig. 14)에서는 최고의 인입깊이로 최대의 배면 변위를 보이고 있으며, 층간분리가 광범위하게 확산되고 있다. 층간 내 파손은 배면에 가까울수록 더욱 많이 진행되는 양상을 보이고 있다. Fig. 15의 t=200 μ s에서는 t=150 μ s 이후 탄성복원의 영향으로 최하층의 층간분리가 좀 더 넓게 진행되고 충격면 주위의 층들이 일부 소멸되고 있음을 보이고 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 비선형 동적 해석 프로그램인 LS-DYNA를 사용하여 1.1g 고속 모의 충격체로 충돌되는 Kevlar29/Phenolic 평판 복합재 적층판에 대한 수치해석 모델을 개발하였다. 수치 모델의 타당성을 검증하기 위해 각 속도별 해석결과를 참고문헌[11]에서 개발된 사용자정의 재료모델(UMAT) 및 시험치와 비교 검토한 결과 충격체 속도이력, 배면변위, 층간분리 모사들이 잘 일치하고 있다. 특히 본 수치모델에 사용된 충격이후 요소의 급속한 파손모사를 위한 소멸접촉알고리즘과 층간분리를 위한 면내 수직인장과 전단을 가지는 타이드 브레이크 모사는 고속충돌을 받는 복합평판에 적합한 모델로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단(중점연구지원사업(KRF-2008-005-J01001))과 경상대학교 지식경제부 항공우주부품기술개발사업의 지원으로 수행된 것이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 정우균, 안성훈, 이우일, 김희재, 권정원, “세라믹/유리섬유강화 복합재 적층판의 고속충돌에 의한 파괴거동,” 한국정밀공학회지, 제23권 제5호, 2006, pp. 170-176.
- 2) D. Liu, “Charaterization of Impact Properties and Damage Process of Glass/Epoxy Composite Laminates,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 38 No. 16, 2004, pp. 1425-1442.
- 3) B. L. Lee, T. F. Walsh, S. T. Won, H. M. Patts, J. W. Song, and A. H. Mayer, “Penetration Failure mechanisms of Armor-Grade Fiber Composites under Impact,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 35 No. 18, 2001, pp. 1605-1633.
- 4) 지국현, 김승조, “저속충격을 받는 적층 복합재료 평판의 직접수치모사,” 한국복합재료학회지, 제19권 제2호, 2006, pp. 1-8.
- 5) A. Tabiei and I. Ivanov, “Computational Micro-Mechanical Model of Flexible Woven Fabric for Finite Element Impact Simulation,” Proc. of the 7th International LS-DYNA Users Conference, 2002, pp. 8-15.
- 6) M. Onosson and E. Buzard, “Scalar and Vectorized User Defined Material Routine in LS-DYNA,” FOA Defence Research Establish ment, Methodology Report, 2000.
- 7) 공창덕, 김영광, 이승현, “탄소/에폭시 복합재 적층판과 강판의 저속충격 거동에 관한 비교연구,” 한국복합재료학회지, 제20권 제5호, 2007, pp. 1-6.
- 8) 이복원, 이성현, 김천근, 윤병일, 백종규, “전단농화유체를 함침한 케블라 직물의 저속충격거동 및 마찰특성연구,” 한국복합재료학회지, 제21권 제2호, 2008, pp. 15-24.
- 9) 박재범, 김동륜, 김형근, 황태경, “저속 충격하중을 받는 탄소섬유강화 복합재 압력용기의 잔류강도 저하평가,” 한국복합재료학회지, 제21권 제3호, pp. 9-17.
- 10) A. Tabiei and Q. Chen, “Micromechanics Based Composite Material Model for Crash worthiness Explicit Finite Element Simulation,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 14 No. 4, 2001, pp. 264-289.
- 11) J. V. Hoof, “Modeling of Impact Induced Delamination in Composite Materials,” Ph.D. Thesis, Dep. Mechanical and Aerospace Engineering, Carleton University, Ontario, 1999.
- 12) C. F. Yen, “Ballistic Impact Modeling of Composite Materials,” Material Sciences Corporation & 7th Int. LS-DYNA User Conference, 2002, pp. 6-23.
- 13) G. Zhu, W. Goldsmith, and C.K.H Dharan, “Penetration of Laminated Kevlar by Projectiles-I. Experimental Investigation,” *Int. J. Solids Structures*, Vol. 29, No. 4, 1992, pp. 399-420.
- 14) LSTC, “LS-DYNA Keyword User Manual,” Livermore Software Technology Corporation, 2007, Version 971.
- 15) K. Schweizerhof, K. Weimar, T. Munz, and T. Rottner, “Crashworthiness Analysis with Enhanced Composite Material in LS-DYNA- Material and Limits,” Proc. of the LS-DYNA World Conference, 1998, pp. 14-15.
- 16) LSTC, “LS-DYNA Theory Manual,” Livermore Software Technology Corporation, 2006.