

ACP와 AUTODYN을 이용한 방호·방폭 보강 복합패널 구조해석

Structural Analysis of Impact·Blast Resistant Composite Panel using ACP and AUTODYN

Woonhak Kim^{a,*}, Seokwon Kang^{b,1}

^a Department of Civil Safety and Environmental Engineering, University of Hankyong Nationnal, 167 Joongang-ro Anseong 17595, Republic of Korea

^b Department of Civil Safety and Environmental Engineering, University of Hankyong Nationnal, 167 Joongang-ro Anseong 17595, Republic of Korea

ABSTRACT

To make a model of a Impact/Blast resistant composite material and perform the analysis, material properties of the composite material are required. In order to obtain such a property value, it is necessary to input the result obtained by performing a lot of material tests by the calculation formula of the situation, and there is a lot of difficulty in the case of a special purpose material which is not a general material. In this study, modeling and structural analysis of composite fiber panels for protection and explosion - proofing were performed in ACP(ANSYS Composite PrePost) and AUTODYN by applying the application properties of composites provided in Ansys Workbench environment.

KEYWORDS

ACP
AUTODYN
Impact/Blast resistant
Modelling
Composite Panel

방호·방폭 보강용 복합재료의 특성상 모델을 구성하고 사용하기 위해서는 재료 각각의 물성치가 필요하며, 이러한 물성 데이터를 도출하기 위해서는 수많은 실험을 통해 도출된 결과를 여러 계산식을 통하여 도출된 값으로 입력해야 하며, 일반적인 재료가 아닌 특수 목적용 소재의 경우는 이를 수행하는데 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 Ansys Workbench 환경에서 제공하는 복합재 적용 물성을 적용하여 ACP와 AUTODYN에서 방호·방폭 보강용 복합섬유 패널의 모델링 및 구조 해석을 수행하였다.

ACP
AUTODYN
방호·방폭
모델링
복합패널

© 2016 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-10-5342-0738. Fax. 82-31-678-4674.
Email. whkim@hknu.ac.kr
1 Tel. 82-11-9720-0214. Email. hastally@naver.com

ARTICLE HISTORY

Received Dec. 12, 2016
Revised Dec. 16, 2016
Accepted Dec. 19, 2016

1. 서론

방호·방폭 보강용 복합패널은 두가지 이상의 재료가 서로 다른 상(phase)을 유지하면서 혼합된 복합체로서 구성물로는 섬유강화 복합재료(Fiber Reinforced Composite), 입자강화 복합재료(Particulate Composite)로 구성되어 있으며 구성물 재료의 방향성 등으로 인해 그 파손형태가 등방성 재료의 파손과 양상이 다르게 나타난다. 그러므로 일반적으로 적용되는 등방성 재료를 기준으로 하는 파손 이론들을 복합재료에 사용하여 평가하는 것은 적합하지 않다.(R.M. Jones, 1975). 본 연구에서 ANSYS Workbench 환경에서 복합섬유 재료의 구조해석을 수행하여 방호·방폭 보강용 복합패널의 대한 모델링 및 파손 평가를 수행하였다.

AUTODYN에서의 물성정의는 EOS(Equation OF STATE), Strength Model, Failure Model 형태의 알고리즘으로 정의되어 초기 조건과 경계조건으로 문제를 정의하며, EOS에 입력되는 Orthotropic은 Fig. 1과 같이 각 방향별 탄성계수, 전단계수, 포아송비가 입력되며, 이러한 값들은 재료의 각 방향별 인장시험과 전단시험 등을 통해 도출 할 수 있으며, 복합재의 기본 물성실험을 진행하여 결과가 유사한 KEVLAR-EPOXY의 값을 모델링에 적용하였으며, 아래 Table. 4.에 Laminate를 구성하는 Material 1, 2에 대한 물성 정보를 나타내었다.

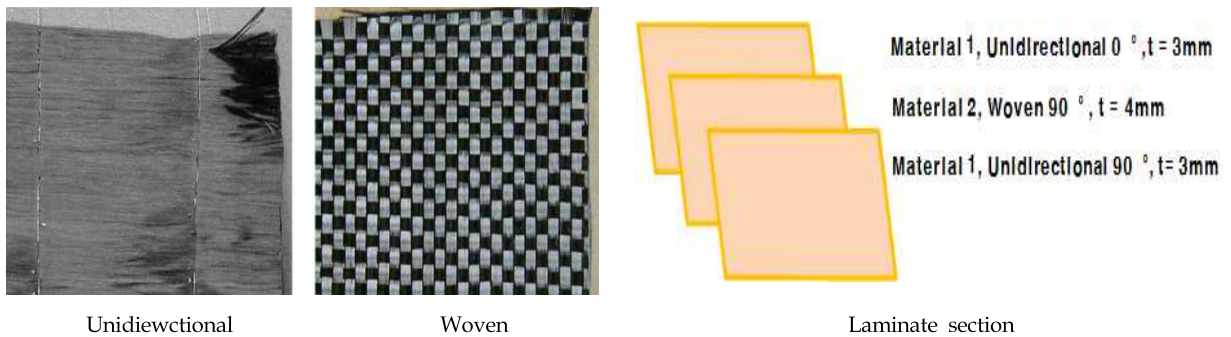


Fig. 1. Composite Panel

Table 1. Input value for each component

Property	Description
E11	Through thickness Young's Modulus
E22	In-plane Young's Modulus (Calculated from 0° tension tests)
E33	In-plane Young's Modulus (Calculated from 90° tension tests)
V23	In-plane Poisson's ratio (Calculated from 0° tension tests)
V31	Out-plan Poisson's ratio (Calculated from 90° tension tests)
V12	Out-plan Poisson's ratio
G23	In-plane shear modulus (45° tensile tests)
G12	Out-plane shear modulus (short beam shear tests)
G31	Out-plane shear modulus

Table 2. Composite physical properties

EOS	Strength Model	Fallure Model
Orthotropic	Orthotropic Yield	Orthotropic Softening
-	-	Material Stress/Strain
-	-	Tasi/Hoffman/Hill (Only 3D)

Table 3. Composite Panel Basic Properties Test

TEST Type	Test Methods	unit	Result	
Impact/blast resistant Panel	Tensile strength	ASTM D 3039	GPa	2.1
	Tensile modulus	ASTM D 7269	MPa	1063
Reinforcement panel A	Tensile strength	ASTM D 3039	GPa	1.1
	Tensile modulus	ASTM D 7269	MPa	863
Reinforcement panel B	Tensile strength	ASTM D 3039	GPa	0.98
	Tensile modulus	ASTM D 7269	MPa	843

2. 방호·방폭 복합패널 등방성 재료의 구조 해석

ACP (ANSYS Composite PrePost)를 사용하여 Shell 요소의 정적 구조해석을 수행하였다. 모델은 1,000×1,000×10mm 크기의 정사각형 패널로 이방성의 복합재료가 각기 다른 두께와 각도로 적층되어 있다. Table. 4에는 해석에 사용된 재료의 물성을 나타내었으며, 여기서 1, 2는 Fig.1의 material1, 2를 의미한다. Strength Model에 입력되는 Orthotropic Yield는 복합재의 경화효과(Hardening effect)를 고려할 때 사용되는 값으로 재료시험을 통해 얻은 항복강도를 계산식에 적용하여 얻을 수 있다

Table 4. Material Properties

Material Propety	1	2
Elastic Modulus in direction(E1)	130 GPa	200 GPa
Elastic Modulus in transverse direction(E2, E3)	10 GPa	10 GPa
Sheat modulus in 1-2 and 1-3 planes (G12, G23)	4.85 GPa	5.20 GPa
Sheat modulus in 2-3 planes(G23)	3.62 GPa	3.62 GPa
Poisson's ratios (V12, V13)	0.31	0.3
Poisson's ratios (V12, V23)	0.52	0.52

구조물의 안전성을 평가하기 위한 파괴 이론들은 다양하게 존재하며, 본 연구에서는 Tsai-Wu 파괴기준을 사용하여 구조 해석을 수행하였다. Tsai-Wu 파괴 기준은 인장 및 압축의 강도가 다른 이방성 복합 재료에 광범위하게 사용되는 현상학적 재료 결합 이론으로, 적층물의 파괴 지수가 1에 도달할 때의 파괴를 예측하며,(Tasi, et al. 1971) 입력된 값과 시뮬레이션을

통해 계산된 응력 값을 식(1)에 적용하여 평가 기준인 1 이상의 값이 나타나는지 AUTODYN에서 확인할 수 있다.

$$F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + 2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{12} + F_{66}\sigma_{12}^2 + F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{11} \geq 1 \tag{1}$$

3차원에서의 Tsai-Wu 파괴 기준은 식 (2)와 같다.

$$f = F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{33}\sigma_3^2 + F_{44}\tau_{23}^2 + F_{55}\tau_{12}^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2F_{23}\sigma_2\sigma_3 + 2F_{13}\sigma_1\sigma_3 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_3\sigma_3 \tag{2}$$

평면 응력 상태의 경우, 식 (2)의 기준 계수 F는 식(3)과 같으며, 식 (3)을 이용하면 식(4)와 같은 파괴기준을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{11} &= \frac{1}{X_t X_c} \\ F_{22} &= \frac{1}{Y_t Y_c} \\ F_{44} &= \frac{1}{Q^2} \\ F_{66} &= \frac{1}{S^2} \\ F_1 &= \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \\ F_2 &= \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \\ F_{55} &= \frac{1}{R^2} \end{aligned} \tag{3}$$

$$f = \frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{\tau_{23}^2}{Q^2} + \frac{\tau_{13}^2}{R^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} + \left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}\right)\sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}\right)\sigma_2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 \tag{4}$$

여기서 계수 F_{12} 는 일축 하중에 의한 파괴응력으로부터 직접 구할 수 없으며, 정확한 값을 얻기 위해서는 이축 하중 실험을 통해서만 얻을 수 있다. 이와 같은 어려움으로 인해 실제 F_{12} 는 다음과 같은 무차원의 상호 작용 계수의 형태로 주어진다.

$$F_{12}^* = \frac{F_{12}}{\sqrt{F_{12}F_{22}}} \tag{5}$$

여기서 계수 F_{12}^* 는 일반화된 Von Mises 기준에서는 $-\frac{1}{2}$ 에 해당되며, $2F_{12}^*$ 의 값은 -1 이 된다. 이와 같은 방법으로 $2F_{13}$, $2F_{23}$ 에 대해서도 동일하게 적용하면 3차원에서의 Tsai-Wu 파괴 기준은 식 (6)과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 f = & \frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{\sigma_3^2}{Z_t Z_c} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{xy}^2} + \frac{\tau_{13}^2}{S_{xz}^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{yz}^2} \\
 & - 1.0 \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sqrt{X_t X_c Y_t Y_c}} - 1.0 \frac{\sigma_2 \sigma_3}{\sqrt{X_t X_c Y_t Y_c}} - 1.0 \frac{\sigma_1 \sigma_3}{\sqrt{X_t X_c Z_t Z_c}} \\
 & + \sigma_1 \left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \right) + \sigma_2 \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \right) + \sigma_3 \left(\frac{1}{Z_t} - \frac{1}{Z_c} \right)
 \end{aligned} \tag{6}$$

해석이 완료되면 사용자가 보고자 하는 결과를 Solution 항목에 추가하여 확인할 수 있다. Fig. 2는 Total Deformation에 대한 결과를 나타내었으며, Fig. 3은 Normal Stress에 대한 결과를 나타낸 것으로 각각 시간에 따라 값이 변화하는 것을 확인할 수 있다.

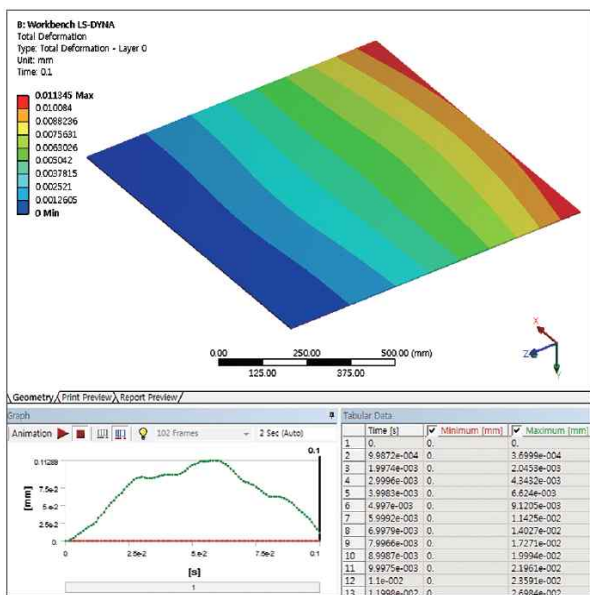


Fig. 2 Total Deformation result

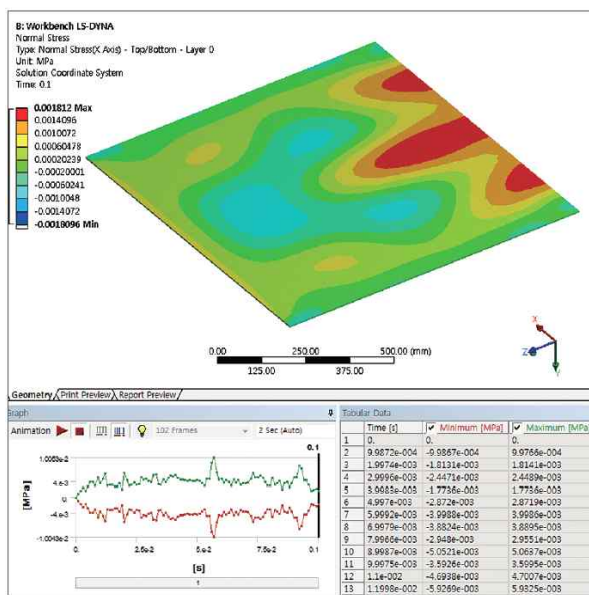


Fig. 3 Normal Stress result

3. AUTODYN의 복합재 모델링

AUTODYN에서의 복합재 모델링은 크게 2D와 3D 형태로 구분할 수 있으며, 구성 모델의 물성방향을 고려하여 모델링을 수행해야 한다. 첫 번째로 2D 모델링 방법은 Planar symmetry와 Axial symmetry로 구분되며, Planar symmetry 모델링 시 물성방향은 XY평면의 X축은 Young's Modulus 11방향, Y축은 Young's Modulus 22방향, XY평면에 수직인 방향은 Young's Modulus 33 물성이 적용된다(S. Hiermaier et al. 1999). 축대칭의 경우 Hoop 방향에 Young's Modulus 33이 적용된다. 재료의 적층각도를 변경하기 위해서는 Fig. 4에서 Rotation angle about 11에 각도 값을 입력하며, Fig. 4는 X축을 기준으로 1축 방향이 β만큼 각도가 변경됨을 나타낸다. 두 번째로 3D 모델링 방법은 XYZ공간에서 정의할 수 있으며, X축은 Young's Modulus 11방향, Y축은 Young's Modulus 22방향, Z축은 Young's Modulus 33 물성이 적용된다. 이때, 재료의 적층각도를 변경하는 방법은 2D와 마찬가지로 Rotation angle about 11에 각도 값을 입력하며, Fig. 5과 같이 Z축을 기준으로 α만큼의 각도가 변경됨을 나타낸다.

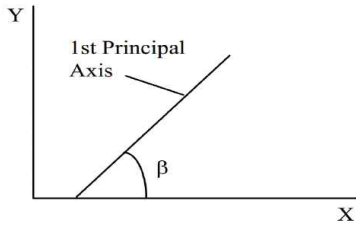


Fig. 4 Set Material Orientation for 2D Modeling

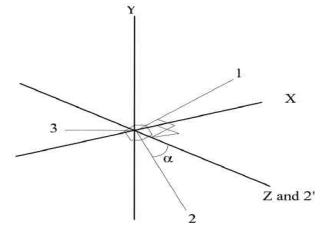


Fig. 5 Set Material Orientation for 3D Modeling

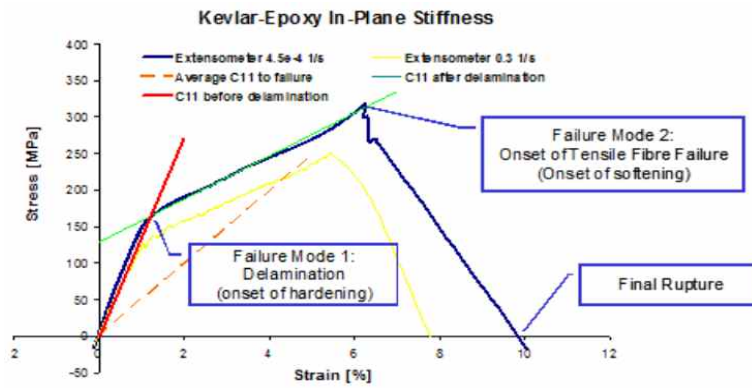


Fig. 6 Typical In-Plane Stress-Strain Behavior of Kevlar-Epoxy

일반적으로 합성 라미네이트의 거동은 일련의 탄성 모델로 설명이 되며, Kevlar-epoxy 와 같은 일부 복합 재료는 비선형 응력 - 변형률 관계를 나타내며, Fig. 6에 거동 특성을 나타내었다.

4. 복합패널의 총알 관통해석

앞에서 서술한 내용을 바탕으로 AUTODYN에서 보유하고 있는 물성인 Kevlar-Epoxy의 총알 관통해석을 수행하였다. 이 때, 해석의 효율성 향상을 위해 2D Axial symmetry 조건으로 해석을 수행하였다. 총알의 물성은 STEEL 1006을 적용하였으며, Fig. 7과 같이 초기속도 900m/s로 충돌할 수 있도록 하였다.

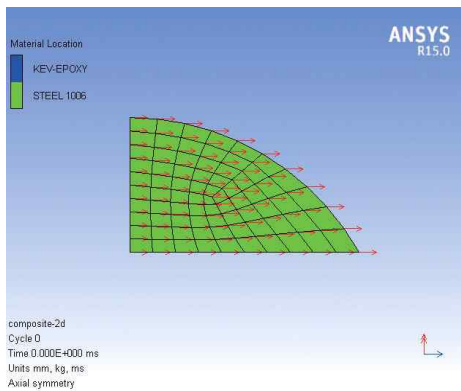


Fig. 7 2D Modeling of Bullets and Initial Velocity

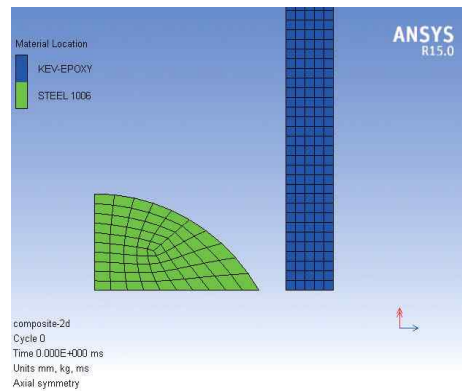


Fig. 8 Conditions Bullet penetration analysis modeling

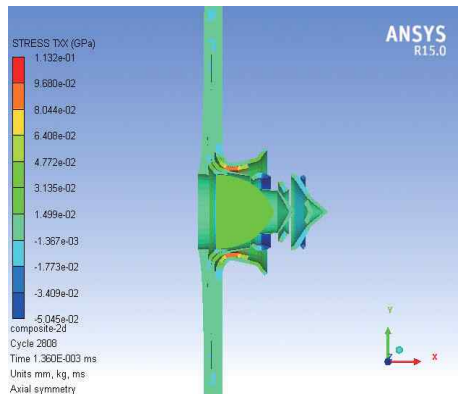


Fig. 9 Bullet penetration analysis result

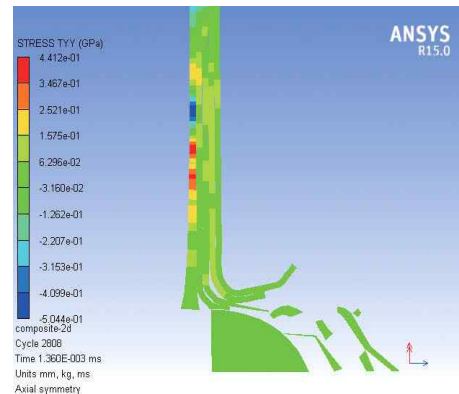


Fig. 10 One-way stress results of Kevlar composite

Fig. 8은 Kevlar-Epoxy를 두께방향으로 5층 적층하여 모델링 하였으며, 상단 부분을 완전구속 하였다. Fig. 9은 해석수행 후 발생한 응력결과에 대해 나타내었다. 이때, 총알이 복합재 플레이트에 대해 관통하는 모습을 나타내기 위해 절점탈락기능 (Erosion)을 사용하였다.

AUTODYN에서 복합재 파손평가를 위한 방법은 다양하게 있으며, 본 해석에서는 Maximum Stress를 통해 확인하였다. Kevlar의 인장강도는 449MPa이며, Fig. 10은 1방향의 응력결과를 나타낸 것으로 최대 441MPa이 발생하여 인장강도 이내의 값이 나타났다. 이때, 이미 파손이 발생한 부분은 인장강도를 초과하여 절점탈락이 발생하였다.

5. 결론

방호·방폭 보강용 복합 패널의 성능 검증을 위하여 ACP(Pre)와 AUTODYN에서 복합섬유 패널의 모델링 및 관통해석 해석을 수행하였으며, ACP(Pre)와 AUTODYN을 이용하여 복합재료의 물리적인 실험을 수행하지 않고도 손쉽게 복합재 모델링을 수행할 수 있어 빠른 설계 검증을 수행할 수 있었으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 적층된 복합섬유판의 Total Deformation 및 Normal Stress의 변화량을 시간에 따라 변화하는 것을 확인하여 설계에 반영할 수 있었다.
- (2) Kevlar-Epoxy(아라미드+에폭시)의 인장강도는 449MPa이며, 1방향의 응력결과는 441MPa이 발생하여 인장강도 이내의 값이 나타났다.
- (3) 총알이 관통한 부분은 인장강도를 초과하여 절점탈락이 발생하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업(방호·방폭용 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료 및 성능평가 기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다

References

- Tsai, S. W. and Wu, E. M. A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of Composite Materials*. vol. 5, pp. 58 - 80, 1971
- S. Hiermaier, W. Riedel, C.J. Hayhurst, R.A. Clegg, C.M. Wentzel, *Advanced Material Models for Hypervelocity Impact Simulations*, EMI-Report No. E43/99, ESA CR(P) 4305, 1999.
- W. Riedel, W. Harwick, D.M. White, R.A. Clegg, *Advanced Material Damage Models for Numerical Simulation Codes*, EMI-Report No. I 75/03, ESA CR(P) 4397, October 2003.
- J.K. Chen, F.A.Allahdadi, C.T.Sun, "A Quadratic Yield Function for Fiber-Reinforced Composites", *Journal of Composite Materials*, vol. 31, No. 8, 1997.
- C.T. Sun and S. Li, "Three-Dimensional Effective Elastic Constants for Thick Laminates", *Journal of Composite Materials*, vol. 22, 1988.
- C.E. Anderson, P.A. Cox, et. al. "A Constitutive Formulation for Anisotropic Materials Suitable for Wave Propagation Computer programme-II", *Comp. Mech.*, vol. 15, p201-223, 1994.
- R.M. Jones, "Mechanics of Composite Materials", McGraw-Hill, 1975.
- M.A. Meyers, "Dynamic Behavior of Materials", John Wiley & Sons, 1994 - ISBN 0-471-58262-X.
- W.C. Kim, C.K.H. Dharan, Analysis of five-point bending for determination of the interlaminar shear strength of unidirectional composite materials, *Composite Structures*, Vol. 30, 1995, 241-251.
- ASTM standard D3846-79 (1985), *ASTM Standards and Literature References for Composite Materials*, 2nd Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1990.
- R.A. Clegg, C.J. Hayhurst, J.G. Leahy, M. Deutekom,. "Application of a Coupled Anisotropic Material Model to High Velocity Impact of Composite Textile Armour", presented at the 18th Int. Symposium on Ballistics, San Antonio, USA, 1999
- D.M. White, E.A. Taylor, R.A. Clegg, "Numerical Simulation and Experimental Characterisation of Direct Hypervelocity Impact on a Spacecraft Hybrid Carbon Fiber/Kevlar Composite Structure", *Int. J. Impact Eng.*, vol. 29, 2003, pp779-790.
- Autodyn Composite modeling. Ansys, Inc