Technical Paper

Journal of Aerospace System Engineering
Vol.12, No.4, pp.106-111 (2018)

ISSN 1976-6300
EISSN 2508-7150
https://doi.org/10.20910/JASE.2018.12.4.106

항공기 구조생존성 평가를 위한 복합재의 변형률 속도 영향성 분석

서보휘[†]

국방과학연구소

Investigation of Tensile Strain Rate Effects on Composite Material for Aircraft Structural Survivability Assessment

Bo-hwi Seo[†]

Agency for Defense Development

Abstract

Hydrodynamic ram phenomenon could be generated by external threats such as impact and blast in the aircraft. High strain rate deformation caused by the hydrodynamic ram phenomenon is one of the main factors to influence structural survivability. Mechanical properties of composite structure change rapidly under conditions of high strain rate. Therefore, it is necessary to experimentally investigate the influence of strain rates for aircraft structural survivability. In this paper, tensile tests of composite material were conducted for low and high strain rates to investigate the influence of the various strain rates. Tensile modulus increases more compared to tensile strength at high strain rate under hydrodynamic ram condition. Regression analysis was conducted to predict tensile modulus at various strain rates because it is one of the main damaging factors for composite structures under high strain rate conditions. Also, the mechanical properties of composite materials were acquired and analyzed under high strain rate conditions. It is hypothesized that the results from this study would be used for designing aircraft composite structures and evaluation considering structural survivability.

초 록

항공기의 경우 충격 및 폭발과 같은 외부 피격에 의해 수압 램 현상이 발생할 수 있다. 고변형률 변형을 동반하는 수압 램 현상은 구조 생존성에 큰 영향을 미치는 요인 중 하나이다. 복합재 구조물의 기계적 물성은 이러한 고변형률 조건하에서 급격하게 변화하기 때문에 이러한 영향성을 실험적으로 분석하는 것은 항공기 생존성 평가를 위해 반드시 필요하다. 본 연구에서는 변형률 속도 변화의 영향성을 분석하기 위해 저속 및 고속 시험조건으로 인장시험을 수행하였다. 시험결과 수압 램 발생 환경과 유사한 수준으로 변형률 속도가 증가하면 인장계수가 인장강도보다 더 증가한다. 고변형률 조건에서 인장계수가 복합재 구조물 파손의 주요 요소이므로 회귀분석을 통해서 변형률 속도 변화에 따른 인장계수를 예측하였다. 항공기 피격시 발생할 수 있는 고변형률에 대한 복합재의 기계적 물성 자료를 획득하고 분석하였다. 획득된 자료는 향후 구조 생존성을 고려한 항공기 복합재 구조 설계 및 평가에 활용가능하다.

Key Words : High Strain Rate(고변형률 속도), Composite(복합재), Aircraft Structural Survivability(항공기 구조생존성), Hydrodynamic Ram(수압 램)

1. 서 론

복합재는 상대적으로 높은 비강도와 비강성을 가지고 있기 때문에 항공우주 및 자동차 산업에서 사용 빈도가 증가하고 있다[1]. 항공기의 경우에는 기체의 경량화가 매우 중요한 요소이기 때문에 복합재를 사용한 설계 최적화 등의 연구 등이 수행되고 있다[2,3]. 복합재 설계의 최적화는 항공기의 안전성과 직접적인 관련이 있기 때문에 신중하게 접근할 필요가 있다.

Received: Apr. 13, 2018 Revised: June. 09, 2018 Accepted: June. 27, 2018
† Corresponding Author
Tel: +82-42-821-0959, E-mail: sbh108@add.re.kr
Ⓒ The Society for Aerospace System Engineering

항공기는 전투 또는 임무 수행 중에 적의 위협에 의해 피격되어 손상이 발생하는 경우, 추락과 같은 치명적인 손상을 방지하여야 하며 최소한 후방기지로 귀환 비행을 가능하게 하는 구조생존성을 확보하는 것이 중요하다.

항공기 연료탱크는 외부 발사체의 충돌, 관통과 같은 전투손상을 받는 경우 매우 짧은 시간에 큰 변형과 응력, 손상이 발생하는 수압 램 현상에 의해서 고변형률(high strain rate) 변형이 일어난다. 복합재 항공기 날개의 경우에는 외부 피격에 의해 발생되는 변형률 속도 수준은 20/s 정도이다[4]. 하지만 항공기 연료탱크와 같은 구조물에 발사체 피격을 받을 경우 수압 램(hydrodynamic ram) 현상이 발생해서 수십 변형률 속도에 이르는 변형이 발생하게 된다[5]. 대부분의 복합재는 변형률 속도의 변화에 따라 기계적 물성이 변하는 특성을 가지고 있다. 이러한 이유 때문에 다양한 변형률 속도에서 복합재의 물성에 대한 수많은 연구가 이뤄지고 있다[6]. 하지만 복합재는 사용분야에 따라 요구되는 변형률 속도조건이 다르기 때문에 사용조건을 고려한 기계적 물성 획득이 매우 중요하다.

미국의 경우에는 실사격 시험(live fire test)의 요구도에 따라서 무기체계 개발 시 수압 램 손상 평가를 포함하는 다양한 전투위협을 고려하여 전투 취약성을 평가한다. 실사격 시험은 전기체 수준의 기체를 사용하기 때문에 일반적으로 개발 마지막 단계에서 수행되고 시험비용이 매우 비싸다. 또한 요구도 불만족 시 설계변경을 수행해야하므로 잠재적인 위험성이 크다. 그렇기 때문에 빌딩 블록 접근법(building block approach)을 통해 얻은 시편단위 시험결과를 해석에 적용하여 실사격 시험의 위험성을 줄이는 방법을 사용한다[7]. 그러므로 구조설계 초기단계에서 다양한 외부 위협에 대한 구조생존성을 고려한 시험 및 해석이 수행되어야 한다.

Hufner 등은 다양한 변형률 속도에서 우븐 복합재에 해수가 미치는 영향을 분석하였다[8]. Taniguchi 등은 홉킨슨바 장비를 사용하여 탄소 섬유 강화 플라스틱(carbon fiber reinforced plastics, CFRP)의 고속인장 시험을 수행하고 영향성을 분석하였다[9]. Shokrieh 등은 유리 섬유 강화 폴리머(glass fiber reinforced polymer, GFRP) 복합재의 인장거동에 변형률 속도 변화가 미치는 영향을 연구하였다[10]. 위와 같이 변형률 속도 변화를 고려하여 다양한 복합재료에 대한 연구를 수행하고 있지만 항공기의 구조 생존성 평가를 위한 연구는 아직 부족한 상황이다.

본 연구에서는 항공기 피격시 발생할 수 있는 수압 램 현상으로 인한 고변형률 변형이 복합재 물성에 미치는 영향을 확인하였다. 고속과 저속 조건에서의 시험결과를 비교 및 분석하였으며, 복합재는 변형률 속도 변화에 큰 영향을 받는 것을 확인하였다. 고변형률 조건에서 인장계수는 복합재 구조물 파손의 주요 요소이므로 회귀분석을 통해 분석하였다. 본 연구 자료는 향후 구조 생존성을 고려한 항공기 복합재 구조물 설계 및 평가에 활용될 것으로 기대된다.

2. 시험 방법

2.1 시험 장비

Figure 1은 고속 인장시험에 사용된 시험장비 형상이다. 시험 데이터는 MTS FlexTest 디지털 컨트롤러를 사용해서 획득하였으며 최대 1.25 MHz까지 측정이 가능하다. 시험장비 용량은 40 kN이며, 무부하 조건에서 18 m/s의 속도로 시험이 가능하다. 본 시험장비는 시편 그립 하단에 슬랙 어댑터(slack adaptor)를 체결해서 원하는 시험 속도에 도달할 때까지 시편을 무부하 상태로 유지시킬 수 있다. Figure 2는 슬랙 어댑터의 형상을 나타내고 있다. 슬랙 어댑터는 시편과 연결되는 로드(rod)와 액추에이터와 연결되는 하우징으로 구성되어 있다. 시험 시 액추에이터가 설정된 속도에 도달할 때까지 하우징 파트는 아래 방향으로 움직이고, 로드는 하우징과 접촉되기 전까지 시편을 무부하 상태로 유지하다가 목표속도에 도달하면 로드와 하우징이 접촉하면서 시편에 설정된 시험 속도로 하중을 부과할 수 있다.

정적시험은 만능 시험 장비를 사용하여 수행하였다. 스트레인 게이지(gage length 0.125“, 350Ω)를 시편의 중심부에 길이방향으로 부착하여 초당 200,000 sampling rate의 속도로 데이터를 획득하였다. Phantom V611 장비를 사용하여 초당 20,000 frame의 속도로 시험 진행 상황을 촬영하고 결과를 확인하였다.

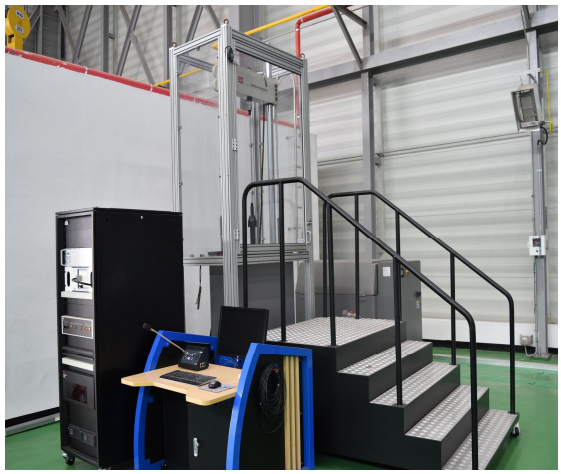

Fig. 1 High Strain Rate Test Machine

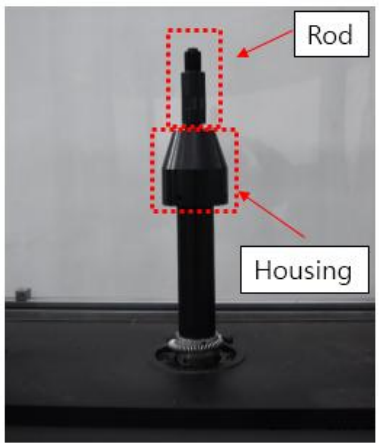

Fig. 2 Slack Adaptor

2.2 시험 시편

시편은 정적 인장시험과는 다르게 고속 인장시험의 경우에는 시험 규정이 명확하지 않기 때문에 ASTM D3039(American Society for Testing and Materials)[11] 규격을 기반으로 제작하였다. 시편의 형상 및 치수는 Fig. 3과 같다. 시편은 SK Chemical의 WSN 3K prepreg를 [0/90]s 패턴으로 적층하여 총 4층(ply)으로 제작되었다. 시험에는 총 10개의 시편이 사용되었다.

2.3 시험 조건

복합재 날개구조물 등이 피격을 받을 경우 실제로 발생할 수 있는 수준의 변형률 속도를 시험 속도로 선정하였다. 고속 인장시험은 5, 8, 9 m/s으로 수행되었으며 저속 인장시험은 0.0001, 0.00001 m/s으로 수행되었다.

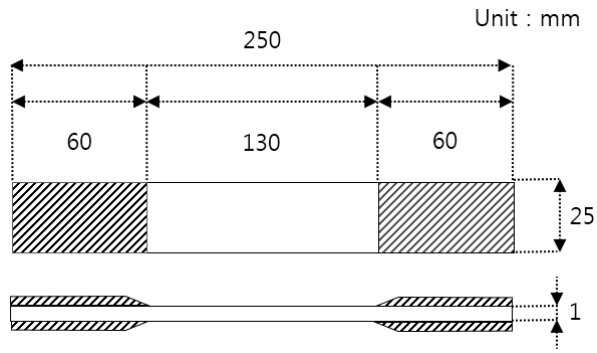

Fig. 3 Configuration of Specimen

3. 시험 결과 분석

3.1 시험 속도 검증

Figure 4는 시험 진행 동안 액추에이터의 이동거리를 나타낸 그래프이다. 이 그래프의 기울기를 계산하여 실제 시편에 시험목표 속도가 제대로 가해졌는지 확인할 수 있다. 시험목표 속도대비 실제 시험 속도는 다음 Table 1과 같다. 실제 시험 속도는 시험 하중이 가해지기 때문에 목표 속도보다 낮은 경향이 있으며 속도가 낮을 때 상대적으로 더 큰 오차가 발생하였다.

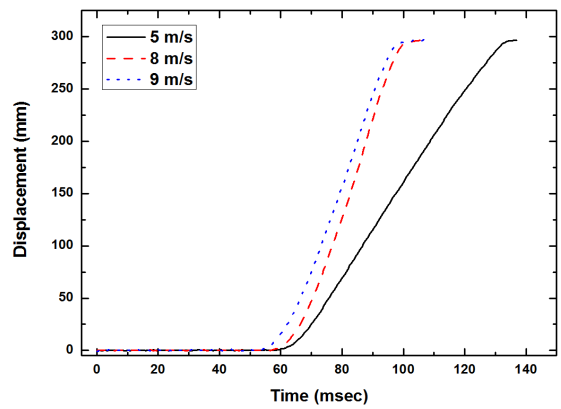

Fig. 4 Time-Displacement Curves at Various Test Rates

Table 1 Comparison of Target and Actual Test Rates

	Crosshead Rate (m/s)		
Target Rates	5.00	8.00	9.00
Actual Rates	4.65	7.84	8.86

3.2 변형률 속도

Figure 5는 시험 진행 동안 시편에 발생한 변형률을 나타낸 그래프이다. 각 시험조건마다 하중부과 시점이 다르기 때문에 변형률의 변화가 생기는 시점을 기준으로 영점 조절하였다. 시간-변형률 선도의 기울기를 통해 변형률 속도를 계산하였고, 실제 시험 속도를 시편의 유효 길이로 나눈 계산된 변형률 속도[10]를 Table 2에 나타내었다. 변형률 속도는 측정위치에 따라 약간씩 차이가 발생하기 때문에 평균값을 사용했다.

3.3 변형률 속도의 영향성

복합재가 인장하중을 받을 때 변형률 속도 변화의 영향성을 확인하기 위해 저속 및 고속 인장 시험을 수행하였다. 인장시험은 0.00001, 0.0001, 5, 8, 9 m/sec의 속도로 수행하였다. Figure 6은 각각의 시험 속도별 응력-변형률(stress-strain) 선도를 나타낸 그래프이다.

복합재의 응력-변형률은 대체로 선형성을 보이고 있다. Figure 6을 통해 얻어진 물성값은 Table 3에 정리되어 있다. Figure 7은 변형률 속도 변화에 따른 인장강도를 나타낸 그래프이다.

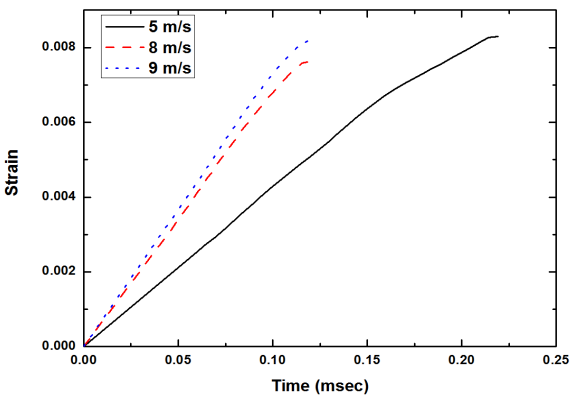

Fig. 5 Time-strain Curves at Various Test Rates

Table 2 Comparison of Test and Calculated Strain Rates

Test Rate (m/s)	Actual Strain Rate(/s)	Calculated Strain Rate(/s)
4.65	36.14	35.77
7.84	61.43	60.31
8.86	65.46	68.15

인장계수(tensile modulus)와 인장강도(tensile strength)는 변형률 속도가 증가함에 따라 같이 증가하는 경향을 보인다. 저속 변형률 속도(6.9×10^{-5} s^{-1})와 고속 변형률 속도(65.46 s^{-1})의 인장계수를 비교해 보면 급격하게 증가하여 2.10배가 되었으며, 인장강도는 점진적으로 증가해서 1.22배가 되었다. 복합재는 재료 및 적층 패턴에 따라 차이가 발생하지만 인장계수와 강도가 증가하는 경향은 유사하게 나타났다[12].

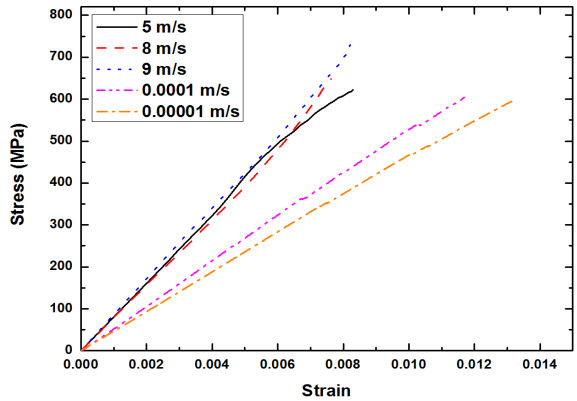

Fig. 6 Stress-strain Curves at Various Strain Rates

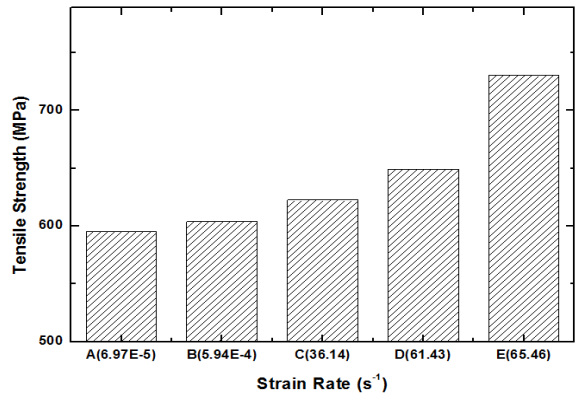

Fig. 7 Tensile Strength at Various Strain Rates

Table 3 Tensile Properties at Various Strain Rates

Crosshead Rate (m/s)	Strain Rate (/s)	Tensile Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)
0.00001	6.9×10^{-5}	45.30	595.46
0.0001	5.9×10^{-4}	51.80	603.88
4.65	36.14	72.06	622.47
7.84	61.43	89.93	649.09
8.86	65.46	95.50	730.19

변형률 속도변화는 인장강도에도 영향을 미치지만 인장계수에 더 지배적인 영향이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 영향성을 분석하기 위해 지수회귀분석(exponential regression analysis)을 수행하였다. 다음 Eq. 1은 변형률 속도변화에 따른 인장계수를 예측하기 위한 방정식이다.

$$E = \alpha + \beta \times \exp^{(x/\gamma)} \qquad (1)$$

여기서 E는 인장계수, α, β, γ는 회귀상수, x는 변형률 속도이다. 위 상수들은 Table 4와 같으며 상관계수(R^2)값이 0.988로 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. Figure 8은 인장계수와 변형률 속도의 상관관계를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 인장계수는 저속 변형률 속도에서보다 고속 변형률 속도 변화에 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.

Table 4 Regression Constants and Correlation Coefficient

	α	β	γ	R^2
Tensile Modulus	-48.78	97.37	-169.36	0.988

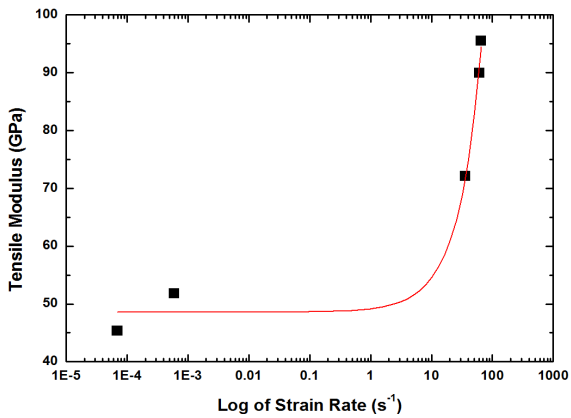

Fig. 8 Modulus-Strain Rate Regression Curve

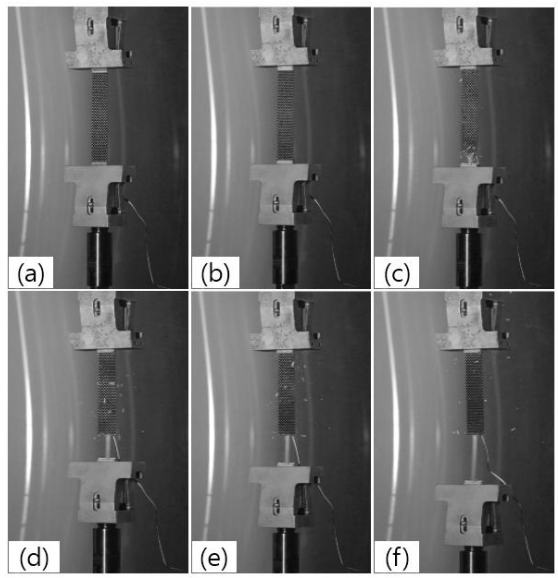

Fig. 9 High Speed Camera Images

3.3 고속카메라 촬영 이미지

복합재 시편이 고변형률 인장하중을 받을 때 파단경향을 확인하기 위해 시험을 수행하는 동안 고속카메라 영상을 촬영하였다. 고속카메라는 Phantom V611 모델을 사용하였다. Figure 9는 시험속도 8 m/s의 시험결과를 나타내었다. 영상을 통해 시편 하부 그립 부근에서 파손이 발생한 것을 확인할 수 있다. 복합재의 파단 위치는 랜덤하게 발생하기 때문에 향후 시편의 파손모드 및 초기 파손위치 등을 확인하는데 활용할 수 있다.

4. 결 론

항공기 피격 시 발생할 수 있는 수압 램 현상에 의한 고변형률 변형이 복합재의 기계적 물성에 끼치는 영향을 분석하기 위해 저속 및 고속 인장시험을 수행하였다. 인장시험은 0.00001, 0.0001, 5, 8, 9 m/sec의 속도로 수행하였다. 고속 인장시험의 경우 설정 속도와 실제 속도 비교결과 유사한 속도가 나오는 것을 검증하였다. 변형률 속도는 계산된 변형률 속도와 실제 변형률 데이터를 통해 계산한 변형률 속도 비교를 통해 유사한 수준임을 확인하였다. 수압 램 현상에 의한 고변형률 변형 수준에서 인장계수와 인장강도는 변형률 속도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다.

복합재 파손에 주요 요인 중 하나인 인장계수는 고속 인장하중 조건에서 변형률 속도 변화에 큰 영향을 받는기 때문에 인장계수의 회귀분석을 통해 예측식을 만들었으며 상관계수 0.988로 잘 맞는 것을 알 수 있었다. 고속카메라 영상을 통해 복합재 시편의 파단모드 및 1차 파손위치 등을 식별할 수 있다.

본 결과를 통해 항공기 피격시 발생할 수 있는 수압램 변형률 속도 수준의 복합재 기계적 물성을 획득할 수 있었다. 획득한 데이터는 향후 항공기 구조생존성을 고려한 항공기 복합재 구조물 설계 및 평가에 활용될 것으로 기대된다.

References

[1] J. S. Kim, J. H. Roh and S. Y. Lee, “A study on bending behaviors of laminated composites using 2D strain-based failure theory,“ *Journal of Aerospace System Engineering, v*ol. 11, no. 5, pp. 13-19, 2017

[2] S. J. Kim, S. W. Park and T. U. Kim, “Study for determining design allowable values of light weight composite unmanned aircraft structures,“ *Journal of The Society for Aerospace System Engineering, v*ol. 11, no. 4, pp. 1-7, 2017

[3] Y. M. Yang, M. J. Kim, J. S. Kim and S. Y. Lee, “Optimal manufacturing of composite wing ribs in solar-powered UAVs: a study,“ *Journal of The Society for Aerospace System Engineering, v*ol. 10, no. 4, pp. 50-58, 2016

[4] S. P. Renze, S. W. Carnegie and F. Sandow, “Experimental evaluation of srvivable composite structural concepts,“ *AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and materials Conference and Exhibit,* pp. 39-46, 1996.

[5] G. J. Czarnecki and R. Hinrichsen, “Assessment of dynamic skin-spar joint failure properties,” *AIAA 2007-1672, U.S. Air Force T&E Days*, February 2007.

[6] S. Gurusideswar, N. Srinivasan, R. Velmurugan and N. K. Gupta, “Tensile response of epoxy and glass/epoxy composites at low and medium strain rate regimes,” *Procedia Engineering*, vol. 173, pp. 686-693, 2017.

[7] A. Selvarathinam, M. Stewart, S. Engelstad and B. Eby, “Application of progressive damage failure analysis to large aircraft composite structures,” 2018 *AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and materials Conference*, Kissimmee, Florida, January 2018.

[8] D. R. Hufner and S. I. Hill, “High strain rate testing and modeling of a woven E-glass-vinylester composite in dry and saturated conditions,” *Journal of Composite Materials,* vol. 51, no. 21, pp. 3017-3039, 2017.

[9] N. Taniguchi, T. Nishiwaki and H. Kawada, “Tensile strength of unidirectional CFRP laminate under high strain rate,” *Advanced Composite Material,* vol. 16, no. 2, pp. 167-180, 2007.

[10] M. M. Shokrieh, M. J. Omidi, “Tension behavior of unidirectional glass/epoxy composites under different strain rates,” *Composite Structures,* vol. 88, pp. 595-601, 2009.

[11] ASTM D3039, “Standard Test method for tensile properties of polymer matrix composite materials,” *American Society for Testing and Materials International.*

[12] A. A. Mosawe, R. A. Mahaidi and X. L. Zhao, “Engineering properties of CFRP laminate under high strain rates,” *Composite Structures,* vol. 180, pp. 9-15, 2017.