https://doi.org/10.7735/ksmte.2021.30.1.80

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. ISSN 2508-5107(Online)

Check for updates

폴리머기지 복합재료 충격시험결과의 신뢰성평가

김태우^{a*}

Reliability Validation of Impact Test Results for Polymer Composite

Tae-Woo Kim^{a*}

^a School of Mechanical Engineering, Kookmin University

ARTICLE INFO

Received	16 16	December	2020
Revised	23	December	2020
Accepted	28	December	2020
Keywords:			

Composite Material Polymer

Impact

Low-velocity

ABSTRACT

Mechanical components comprising light-weight materials receive significant attention as they contribute to saving energy in transportation means and, thereby, keeping our planet sustainable. As the light-weight stiff polymer matrix composites are prone to cracking caused by the impact on the surface, the impact-inducing mechanical behavior needs to be studied prior to wide applications. The behavior of the laminated glass fiber epoxy composite obtained using the free-fall low-velocity impact technique is studied. Equations based on the mechanics were programmed to be compared with the experimental measurements. Both results compared reasonably well, which indicated the reliability of the experimental data obtained. The hemi-circular impactor induced Hertzian circular damage within the composite. The present study assessed the mechanical behavior of the composites both experimentally and theoretically with reasonable agreement.

1. 서 론

에폭시와 같은 폴리머 기지를 사용하는 복합재료는 경량화가 요 구되는 운송부품에 사용되고 있다. 경량화뿐 아니라 강도 건전성 이 동시에 필요한 기계부품의 구성재료로 선택되기 위하여, 기계 적 거동이 충분히 조사되어야 한다^[1,2]. 특히 취성파괴균열이 예상 되는 폴리머 복합재료에서 충격하중에 의한 기계적 거동은 중요한 특성이다.

세라믹재료를 기지로 하는 복합재료는 경도와 탄성계수가 높고 방탄(armor)에 응용되기 때문에, 작은 볼을 압축가스로 발사하는 고속 충격시험을 한다. 한편, 세라믹에 비하여 경도가 낮은 폴리머 를 기지로 사용하는 복합재료는 방탄보다는 경량화에 사용되기 때 문에, 자유낙하와 같은 저속충격하중특성을 실험하며 다양한 구조 에 대하여 연구되고 있다^[3,4].

Seifoori^[5] 연구자팀은 유리섬유강화 복합재료(GFRP)와 카본 섬유강화 복합재료(CFRP)에 대하여 저속충격시험을 수행하였다. 실험적으로는 충격 후 경과시간에 따른 변위만을 측정하여, 유한 요소 수치해석의 결과와 비교하였다. 충격하중에 대한 거동을 파 악하기 위하여 변위뿐 아니라 충격력과 충격체에 의한 에너지 등 을 파악하여야 하는데 상기 연구자는 다양한 실험결과를 비교하지 못하였다. 한편, Ouyang^[6] 연구자팀은 저속충격을 받은 복합재료 의 시간경과에 따른 충격하중에 대하여만 보고하였다.

이러한 저속충격시험은 주로 수직방향의 자유낙하 방식으로 진 행된다. 충격체가 탄성적으로 반발된 후 다시 자유낙하 되어 추가 적인 충격을 가하는 것을 방지한 후, 단일 충격에 의한 특성 조사용 장비(하드웨어 및 소프트웨어)는 사용자가 제작하기가 용이하지

^{*} Corresponding author. Tel.: +82-2-910-4678

E-mail address: twkim@kookmin.ac.kr (Tae-Woo Kim).

않아 대부분 상용화된 충격시험기 일체를 구매하여 사용한다. 이 렇게 기기와 함께 제공된 소프트웨어는 소스코드를 제공하지 않기 때문에, 실제 어떤 절차와 수식에 의하여 계산되었는지를 점검한 후에야 충격시험기와 소프트웨어로부터 얻어진 실험결과에 대하 여 신뢰성을 부여할 수 있다. 실험결과에는 측정오차와 같은 불확 실성이 존재하지만, 독립적인 계산에 의하여 얻는 결과와 수치오 차 범위에 있다면 얻어진 결과에 신뢰성을 부여할 수 있을 것이다. 따라서, 본 연구에서는 상용화된 충격시험기 업체에서 구매한 하드웨어와 소프트웨어를 통하여 얻은 실험결과와, 역학이론식에 근거하여 프로그래밍하여 얻은 결과를 비교하여 두 결과의 신뢰성 을 확인하였다. 충격이후 경과시간에 따른 충격하중, 변위, 및 관련 된 에너지에 대한 실험측정값과 그 값들에 대한 신뢰성을 이론식 에 근거한 계산과 비교 체크하였다.

2. 실험 및 이론

2.1 실험절차

충격체가 충격시편의 면과 접촉을 시작하면서 발생되는 힘을 의 미하는 충격력은, 접촉시작후 경과되는 시간의 함수이며 충격자내 의 하중트랜스듀서에 의하여 측정된 힘이다. 실제 충격시험기가 측정하는 물리량은 접촉후 경과시간, 접촉전 충격자의 속도, 충격 력이다. 이들 값에 근거하여 충격시험기 회사에서 제공된 소프트 웨어는 변위, 에너지값을 계산하여 모니터에 제공한다.

충격시험은 인스트론회사의 제품(Dynatup)을 사용하였다. 접촉 시작 후 하강하는 충격자의 운동에너지는 시편에 최대변형을 발생 시킨다. 충격체가 다시 수직방향으로 상승되기 시작하면서 충격시 험기에 장착된 유압지지대가 상승하여 충격체를 들어올림으로 충 격체의 추가적인 자유낙하에 의한 2차충격을 방지한다.

한 번만의 충격을 가하는 본 실험에서의 변수는 충격체에서 가 해지는 충격에너지의 변화이었다. 충격체에 가해지는 운동에너지 는 충격자의 접촉지면을 기준으로 할때의 위치에너지와 동일하다. 따라서, 충격체의 질량 또는 자유낙하되는 충격높이 중 하나가 변 수가 되는데, 본 연구에서는 충격높이를 변수로 선정하였다. 충격 높이가 너무 작으면 시편에 어떠한 손상도 발생되지않는 완전 탄 성구간이 되며, 충격높이가 너무 크면 시편표면에 관통이 발생하 거나 내부에 과다한 손상발생이 예상된다.

실제 시험을 하기전에 실험결과간의 차별화가 관찰되는 충격높 이선정을 위한 시행착오적 실험을 하였다. 2인치 이하의 충격높이 에서는 육안과 현미경으로 시편표면에 손상이 없었으며, 8인치이 상에서는 표면에 손상이 관찰되기 시작하였다. 본 연구에서는 4인 치와 8인치를 충격높이로 선정하였다. 인치계로 구분한 이유는, 충 격시험기 내부에 회사에서 제공된 인치계 눈금자를 이용하였기 때 문이다. 이 높이는 미터계를 기준할 때 각각 약 100 mm와 200 mm의 낙하높이에 해당된다.

저울을 통하여 충격체는 3.25 kg으로 측정되었으며, 시편은 유리 섬유/에폭시 복합재료로 두께는 3.6 mm이고, 한변 100 mm의 정사 각형 단면이었다. 이 시편은 복합재료 전문기업인 (주)한국화이버에 서 제조되었으며, 폴리머기지를 열로 제거한 후 관찰하여 보니 유리 섬유 직물로 직각방향 직조(cross-ply woven glass fiber/epoxy)되 었으며 두께방향으로 적층수는 20판(ply)이었다. 4면이 고정된 시편 표면으로부터 측정된 측정높이에서 반구형압자의 충격체는 초기속 도없이 자유낙하시키며, 단일충격후 반사될 때 시험기내의 유압장 치가 충격체를 위로 올려버림으로 반복적인 충격을 막아서 단일 충격에 의한 충격거동을 평가하였다.

2.2 이론식

충격체에 초기속도가 없이 수직방향으로 자유낙하할때, 충격대 상시편으로부터의 수직높이(*h*), 중력가속도(*g*), 충격체의 질량 (m), 충격면과 접촉하기 직전속도(*v_i*)를 사용할 때 위치에너지 또 는 운동에너지(E)는 다음 식 (1)과 같이 표시된다.

$$\mathbf{E} = \mathbf{m}g\,h = \frac{1}{2}\,\mathbf{m}\,v_i^2\tag{1}$$

미터계에서 중력가속도(g)를 9.8 (m/sec²)로 사용하면, 본 연구 에서 사용한 충격에너지는 약 3.2과 6.5 J로 표시될 수 있다.

충격체가 실제 충격시편의 면과 접촉을 시작하면서 발생되는 충 격력(F(t))는 경과시간(t)의 함수이다. 충격체의 가속도(a(t)), 속 도(v(t))와 변위(x(t))는 각각 역학이론에 근거하여 다음 식 (2), (3) 및 (4)로 표시될 수 있다^[7].

$$a(t) = g - \frac{F(t)}{m}$$
(2)

$$v(t) = v_i + gt - \int_0^t \frac{\mathbf{F}(t)}{m} dt$$
(3)

$$x(t) = v_i t + \frac{1}{2}g t^2 - \int_0^t dt \int_0^t \frac{F(\tau)}{m} d\tau$$
(4)

위의 식 (2), (3) 및 (4)는 시편의 표면에 구멍이 발생되지 않는 다는 가정하에 유효하다. 즉, 충격체는 시편의 초기 접촉표면과 지 속적인 접촉을 한다는 가정으로 계산하였으며, 본 연구에서의 실 험후 표면관찰결과에 의하면 이 가정이 유효하였다.

수직낙하 충격하중으로 인하여 하향 변형되는 물체를, 스프링 강성(k)을 갖는 스프링으로 가정하고 자체무게를 무시할 때를 가 정한 재료역학이론^[8]을 인용하였다. 동적하중에 의한 최대변형 (△_{max})은 충격체무게에 의한 스프링의 정적변형(△_{st})보다 크게 발생된다.

따라서, 충격되는 시편에 충격체의 무게자중으로 인한 정적변형 량을 계산하면 예상되는 최대변형량과 스프링에 가해지는 최대 하 중(F_{max})을 추정할 수 있으며 다음 식 (5)와 (6)에 표시하였다.

$$\Delta_{\max} = \Delta_{st} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta_{st}}} \right]$$
(5)

$$\mathbf{F}_{\max} = k \ \Delta_{\max} \tag{6}$$

본 실험과 계산에서는 실험조건과 같이, 시편의 모든 변고정 (clamp)의 경계조건으로 가정하였다. 유리섬유/에폭시 복합재료 에 대한 물성은 문헌^[1,2,9]을 참고하여 탄성계수는 17 GPa로 인용 하였다.

충격하중으로 인하여 시편에 흡수된 에너지(*E*(*t*))에 대한 실험 측정값은 충격시험기에서 소스코드없이 공급되는 프로그램에 의 하여 계산되어 컴퓨터모니터에 나타난다. 한편, 역학이론^[7]에 의한 식은 다음 식 (7)과 같이 표시될 수 있다.

$$E(t) = \frac{1}{2} m \left[v_i^2 - v(t)^2 \right] + mg x(t)$$
(7)

역학이론식에 근거하여 MATLAB프로그램^[10]을 작성하였으며 실험결과와 비교하여, 충격시험기에서 제공되는 계산값의 유효성 을 점검한 후 실험결과에 대한 신뢰성을 체크하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

충격높이가 각각 100, 200 mm인 경우 측정된 하중을 충격발생 후 경과시간의 함수로 Fig. 1에 나타내었다. 충격거리가 150 mm 인 경우에 측정된 하중곡선은 100, 200 mm에서 얻어진 곡선 사이 에 존재하였기에 실험으로 얻어진 곡선은 실험오차범위 내에서 합 리적이라고 판단된다.

두 곡선은 위로 볼록한 포물선의 형태를 나타내었다. 특히 6.5 J의 충격에너지의 경우에는 특히 최대하중이 발생되는 근방의 치 역에서 하중값의 변화가 다소 크게 측정되었는데, 이는 6.5 J은 3.2 J의 충격에너지의 대비 시편손상에 비교적 큰 영향을 줄 수 있는 충격이었음으로 추정된다.

100 mm높이에서 낙하체에 의하여 발생되는 최대 충격력의 크 기는 이론식을 이용하여 약 2.5 kN이었으며, Fig. 2에는 실험측정 에 의한 곡선과 이론추정에 의한 최대값이 비교되어 있다. 실험에 의한 약 2.2 kN과는 동일 차수의 범위로 추정되어 합리적인 추정 으로 판단되었다.

이를 이용하여 충격후 경과시간에 따른 변형량의 관계곡선을 계



Fig. 1 Comparison of measured force as a function of the elapsed time after impact under impact energy of 3.2 and 6.5 J



Fig. 2 Experimental time vs force curve with perfect parabola curve for comparison for impact energy of 3.2 J

산하고 충격시험기 회사의 소프트웨어를 통하여 계산된 결과와 비 교하고자 하였다. Fig. 2에서 실선으로 표시되는 실험값의 곡선은 최대충격력값을 기준으로 완전한 좌우대칭은 아니었으나, 곡선은 단순화를 위하여 완전대칭이고 위로 볼록한 포물선으로 가정하고 식 (2), (3), (4)의 계산을 하였다.

가해지는 충격에너지의 크기를 달리하여 실험으로 얻은 변형량 과 충격력간의 관계곡선은 Fig. 3에 나타내었다. 변형의 초기에는 충격에너지의 크기와 무관하게 거의 유사하게 증가하는 관계를 관 찰할 수 있다. 이는 2개의 다른 충격하중에 대하여 복합재료가 크 게 손상되지 않았다는 것을 의미한다. 두 배의 충격높이에서 얻어 진 그래프는 더 큰 최대충격력과 함께 상대적으로 더 큰 최종 변위 값을 나타내었다. 역학이론에 의한 식 (2)~(4)에 의한 자체 프로그 래밍은 충격높이 100 mm만 수행되었던 이유는, 실험과의 비교란 시편에 상당한 크기의 손상이 발생되지 않는 상태에서 유효하기 때문에, 작은 충격높이에 대하여만 선정되었다.

기기와 함께 제공되는 소프트웨어 모듈에 해당하는 소스코드를 제공하지 않기 때문에, 실제 어떤 절차와 수식에 의하여 계산되었



Fig. 3 Comparison of deflection-force curves obtained by experiment for impact energy of 3.2 and 6.5 J



Fig. 4 Typical comparison of deflection-force curves obtained by theory and experiment for impact energy of 3.2 J

는지를 점검한 후에야 충격시험기와 소프트웨어로부터 얻어진 실 험결과에 대하여 신뢰성을 부여할 수 있다.

실험결과에는 측정오차와 같은 불확실성이 존재하지만, 독립적인 계산에 의하여 얻는 결과와 수치오차 범위에 있다면 얻어진 결과에 신뢰성을 부여할 수 있을 것이다. Fig. 4에는 실험측정에 의한 곡선 과 이론식 (4)에 근거하여 자체 프로그래밍한 결과가 비교되어 있 다. 추정된 값과 포물선에 의하여 계산된 결과는, 소프트웨어에 의 하여 계산된 결과와 유사하여 실제 소프트웨어에 의한 계산의 신 뢰성이 있다고 판단된다.

가해지는 충격에너지의 크기를 달리하여 얻어진 경과시간에 대 하여 흡수된 충격에너지 곡선은 Fig. 5에 나타내었다. 더 큰 충격 높이인 200 mm에서 낙하되었을 때 얻어진 결과는 시간의 경과에 따라 충격높이 100 mm에서 얻어지는 에너지결과보다 높은 값을 나타내었으며, 이는 기대와 부합한다.

충격높이가 100 mm일 때 얻어진 경과시간에 대한 시편이 받은 충격에너지에 대한 실험측정값은, 식 (7)에 의하여 독립적으로 계 산된 값과 유사함이 확인되었으며 Fig. 6에 나타내었다. 따라서, 시험결과에 대한 신뢰성을 확보하였다고 판단되며, 이 복합재료



Fig. 5 Experimental comparison of time-impact energy curves obtained for impact energy of 3.2 and 6.5 J



Fig. 6 Typical comparison of time-impact energy curves obtained for impact energy of 3.2 J



Fig. 7 Typical image of showing the damage of the composite during impact examined

에 대한 충격특성을 확보하였다

시편의 테두리를 고정시킨 조건에서 반구형상의 충격자의 자유 낙하에 의한 충격은 Fig. 7(a)에 나타낸 약 25배의 확대사진처럼, 시편상부표면에서 원형형상의 손상으로 관찰되었다. 이 형상은 반구 형상의 압자를 정하중형식으로 눌렀을 때 나타나는 허르쯔(Hertz)형 식의 압입손상과 유사하다. Fig. 7(b)에는 초음파탐상(C-scan)을 통하여 관찰된 형상을 나타내며 중앙부분에 원형과 유사한 손상을 나타내었다. 이 시편의 상부는 압입에 의한 손상이 전형적으로 발 생되며, 시편하부에서는 아래방향으로 늘어나는 굽힘인장에 의한 균열이 원추형으로 퍼지기 때문에, 두께방향으로는 원형으로 나타 난 것이다.

4. 결 론

에폭시 기지 폴리머 복합재료에 대한 충격시험 평가는 두 방법 으로 진행되었다. 충격시험기 제조사에서 제공된 소프트웨어에 의 하여 계산된 값과, 기본 역학이론에 의하여 얻는 식을 근거로 독립 적으로 계산한 결과를 비교하였고, 근사한 값을 얻었다. 따라서, 시험결과에 대한 신뢰성을 확보하였으며, 충격특성을 확보하였다. 시편의 테두리를 고정시킨 조건에서 반구형 충격자의 자유낙하에 의한 충격은, 정적하중에 의한 접촉손상처럼 접촉표면에 원형손상 을 나타내었고 실험적으로도 원형손상으로 관찰되어 일관성을 보 였다.

References

- Ashby, M. F., 2017, Material Selection in Mechanical Design Fifth Edition, Elsevier, Cambridge, MA, USA.
- [2] Callister, W. Jr., Rethwisch, D. G., 2015, Material Science and Engineering 9th edition, Wiley, Asia.
- [3] Zangana, S., Epaarachchi, J., Ferdous, W., Leng, J., Schubel, P., 2021, Behaviour of Continuous Fibre Composite Sandwich Core Under Low-velocity Impact, Thin-Walled Struct., 158 107157, https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107157.
- [4] Katunin, A., Pawlak, S., Wronkowicz-Katunin, A., Tutajewicz, D., 2020, Damage Progression in Fibre Reinforced Polymer Composites Subjected to Low-velocity Repeated Impact Loading, Compos. Struct., 252 1127352, https://doi.org/10.10 16/j.compstruct.2020.112735.
- [5] Seifoori, S., Parrany, M. A., Mirzarahmani, S., 2021, Impact Damage Detection in CFRP and GFRP Curved Composite Laminates Subjected to Low-velocity Impacts, Compos. Struct., 261 113278, https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020. 113278.

- [6] Ouyang, T., Sun, W., Bao, R., Tan, R., 2020, Effects of Matrix Cracks on Delamination of Composite Laminates Subjected to Low-velocity Impact, Compos. Struct., 24 113354, https://doi. org/10.1016/j.compstruct.2020.113354.
- [7] Yu, Z., Fang, J., Chen, Y., Wang, H., 2017, Damage Resistance of a Co-cured Composite Wing Box to Low-velocity Impact, Compos. Struct., 176 516-525, https://doi.org/10.1016/j.com pstruct.2017.05.042.
- [8] Hibbeler, R. C., 2015, Mechanics of Materials, Pearson, Boston, MA, U.S.A.
- [9] Sudheer, M., Pradyoth, K. R., Somayaji, S., 2015, Analytical and Numerical Validation of Epoxy/Glass Structural Composites for Elastic Models, American Journal of Materials Science, 5:3C 162-168.
- [10] MATLAB software, 2020, MathWorks.
- [11] Wagih, A., Maimi, P., Blanco, N., Costa, J., 2016, A Quasi-static Indentation Test to Elucidate the Sequence of Damage Events in Low Velocity Impacts on Composite Laminates, Compos. Pt. A-Appl. Sci. Manuf., 82 180-189, https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.11.041.
- [12] Choe, S. H., Heo, S. B., Choi, J. W., Jang, J. K., Kim, S. K., Choi, D. H., Son, D. I., Kim, D., 2020, Property Change of Polymer Coated Surface by Electron Beam Irradiation, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 29:6 497-502, https://doi.org/10.7735/ksmte.2020.29.6.497.
- [13] Cho, H. K., 2020, Fracture Phenomenon of Cylindrical Composite Shell by Nonlinear Buckling, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 29:6 481-488, https://doi.org/10.7735/ksmte.20 20.29.6.481.



Tae-Woo Kim

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Kookmin University. His research interest is Mechanics, design, and materials.

E-mail: twkim@kookmin.ac.kr