

홀을 포함한 평직 CFRP 복합재료 'C'자 구조물의 파괴강도 평가

Evaluation of Fracture Strength for Weave CFRP Composite Structure of 'C'-Type with Hole

*김상영¹, 박홍선¹, 최경훈¹, 석창성², 구재민²

*S. Y. Kim¹, H. S. Park¹, J. H. Choi¹, #C. S. Seok(seok@skku.edu)², J. M. Koo²

¹성균관대학교 대학원 기계공학과, ²성균관대학교 기계공학부

Key words : Hole notch, CFRP, Structure, 'C'-Type, Fracture strength

1. 서론

일반적인 구조물의 경우, 체결부위가 없는 일체형으로 만드는 것이 가장 이상적이기는 하나, 부품의 크기, 제작의 어려움, 또는 검사의 편리성 등의 이유로 여러 개의 독립된 부재들을 조립하여 전체 구조물을 제작하게 된다. 이때 독립된 부재들을 볼트(bolt)나 핀(pin)과 같은 기계적 방법에 의해 체결하는 경우가 많은데, 이와 같은 체결법은 원공과 같은 불연속부를 부재에 형성하게 된다. 일반적으로 홀 노치 등의 불연속부를 가진 노치재의 강도평가는 응력집중계수를 사용하여 평가하고 있으나, 선형탄성파괴역학에 기반을 둔 Waddoups[1] 등의 결함모델이나 불연속부의 선단의 수직응력분포에 기반을 둔 Whitney[2,3] 등의 모델 등도 사용되고 있다. 특히 후자의 경우는 불연속부 선단으로부터의 거리, 즉 특성길이(characteristic length)에서의 응력이 평활재의 파괴응력과 같을 때 파손이 일어난다는 모델(point stress criterion)으로써, 파손조건을 결정짓는 특성길이(가 재료상수라는 가정하에서 강도평가를 하는 것이다. 그러나 CFRP 또는 GFRP 등의 적층판을 이용한 연구결과에 의하면 특성길이는 재료의 종류, 온도, 적층구조, 시험편의 형상 등에 의해 영향을 받고 있다고 보고되고 있다.[4-6] Kim[7]과 Kim[8] 등은 특성길이가 시편의 폭과 원공 크기의 함수임을 고려하여 Whitney[2,3]의 모델을 수정하였다. 본 연구에서는 평직 CFRP 복합재료 홀 노치 시험편의 파손기준식을 이용하여 'C'자형 홀 노치 구조물의 파손강도를 예측하고 이를 시험과 비교하여 시편과 구조물의 관계를 검토하였다.

2. 복합재료 적층판의 파괴해석 모델

Whitney와 Nuismer[2,3]는 불연속부 선단의 수직응력 σ_Y 의 분포에 기반을 둔 점응력조건(point stress criterion)의 파손모델을 제안하였다. 즉 불연속부 선단으로부터 일정한 거리(d_0)만큼 떨어진 곳에서의 수직응력이 평활재의 파괴강도 σ_u 와 같아질 때 파손이 일어난다고 가정하는 것이다. 이들은 특성길이를 불연속부의 크기에 무관하게 일정한 재료상수로 가정하여 원공이나 균열(slit)을 가진 glass/epoxy 및 graphite/epoxy 재료의 노치강도를 평가하였다.

그러나, Kim[7] 등은 시험편의 형상을 나타내는 2R 와 W의 함수로 특성길이 d_0 를 표현하여 Whitney와 Nuismer[2,3]의 파손조건식을 식 (1)과 같이 수정하였다.

$$\frac{\sigma_N^\infty}{\sigma_u} = \frac{2}{2 + \eta^2 + 3\eta^4 - (K_T^\infty - 3)(5\eta^6 - 7\eta^8)} \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{R}{R + d_0}, \quad d_0 = k^{-1}(2R/W)^m$$

여기에서 R은 원공의 반경, σ_u 는 인장강도, σ_N^∞ 는 무한 평판에서의 노치강도이며, K_T^∞ 는 이방성 재료 무한 판의 응력집중계수이다. 또한, k는 2R 및 W에 대한 노치의 감도계수 이고 m은 특성길이의 변화를 나타내는 계수이다.

Kim[8] 등은 파손강도를 d_0/R 의 함수로 보고 식(1)의 파손조건식을 식 (2)와 같이 수정하였다.

$$\frac{\sigma_N^\infty}{\sigma_u} = \frac{d_0}{0.2R + d_0} \quad (2)$$

3. 시험 시험 결과

Kim[7]과 Kim[8] 등이 수행한 시험 결과를 이용하여 Kim[8] 등

은 특성길이 계산식의 계수 m이 0.35로 동일한 것으로 보았으며, k는 시편의 형상에 따라 변화하는 것으로 판단하였다. Kim[7]과 Kim[8] 등의 시험결과로부터 시편 형상에 따른 k 값을 Fig. 1에 나타내었다. 이를 선형 적합한 결과, 시편의 재질이 다른 경우에도 시편의 폭 W에 대하여 k값은 동일한 기울기를 가지며 변화하는 것으로 생각된다. 또한, d_0 의 차원을 고려할 때, k는 $[L^{-1}]$ 의 차원을 가지는 것으로 판단된다. 이러한 점들을 고려하여 k의 계산식을 구성하였으며, 이를 식 (3)에 나타내었다.

$$k = \frac{14}{W} + \left(\frac{E \times v}{G}\right)^3 \left(\frac{1}{3t}\right) \quad (3)$$

4. 구조물 파괴시험

본 연구에서는 (주) SK chemical에서 시판되는 직물구조 탄소 섬유 프리프레그인 WSN3K(1ply 두께 0.27mm)를 하중방향에 대해 0°/90°로 16 ply 적층하여 최종두께가 3.52mm가 되도록 제작하였다. 시편은 Autoclave에서 140°C, 60kg/cm²의 온도와 압력에서 60분간 성형, 제작되었다. 'C'자 형태로 제작된 구조물을 NC 머신으로 절단/가공하여 'C'자 형태의 구조물 시편으로 제작하였으며, 시편 중앙의 홀 가공은 적층분리와 같은 손상을 최소화하기 위하여 원통형 조경합금 드릴을 사용하여 $\phi 4, 6.4, 10, 20$ mm로 가공하였다. 제작된 시편의 기계적인 특성은 Table 1과 같다. Fig.2는 본 연구에 사용된 평직 적층판의 구조이며, Fig.3는 홀 노치 시험편의 형상이다.

시편의 길이방향으로 인장하중을 부여하기 위한 지그를 제작하여 시험을 수행하였다. 인스트론(Instron)사의 25ton용량의 전기유압식 시험기(model 8802)를 사용하여 시험을 수행하였으며, 속도는 3mm/min으로 상온에서 수행하였다. Fig. 4는 시험을 위해 시편 및 지그를 시험기에 장착한 모습이다.

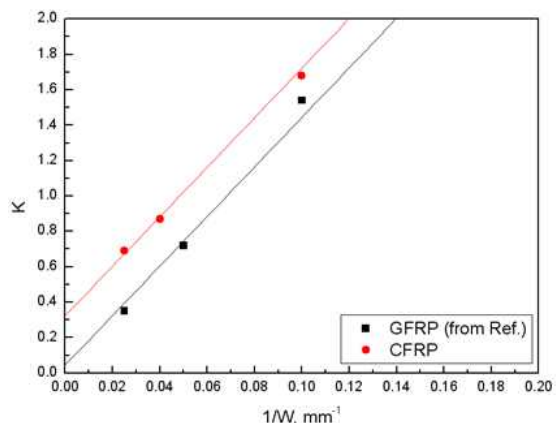


Fig. 1 Variation of k value for characteristic length

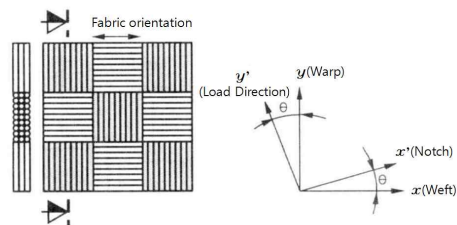


Fig. 2 Texture and load orientation of plain woven CFRP laminate composite

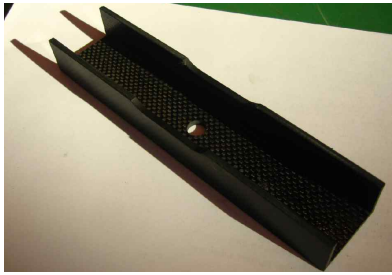


Fig. 3 Configuration of test specimens



Fig. 4 Pictures of installed jig and specimen for test

Table 1 Mechanical properties of WSN3K

E_{xx} (GPa)	E_{yy} (GPa)	ν_{xy}	G_{xy} (GPa)
55	55	0.13	4.75

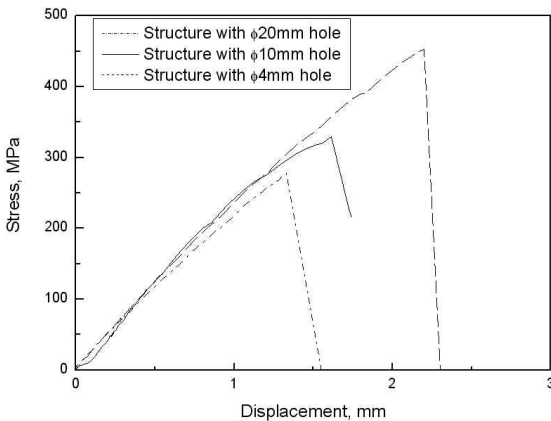


Fig. 5 Test results of fracture test for 'C'-type structure

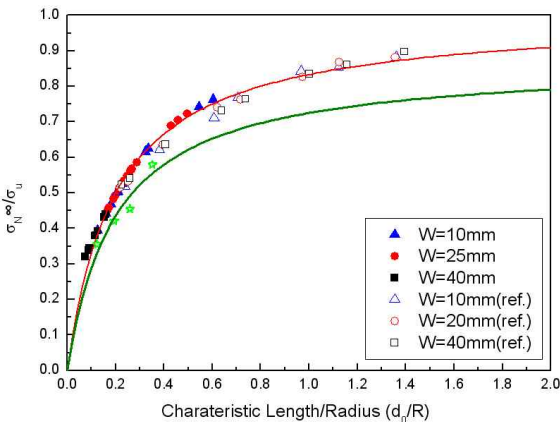


Fig. 6 Prediction Results of fracture strength for 'C'-type structure

5. 결과 및 고찰

식(1)의 특성길이 관계식과 식(2), (3)을 이용하여 홀노치 구조물의 파괴강도를 예측하기 위해서는 구조물의 W에 대한 재정의

가 필요하다. 본 연구에서는 구조물의 W를 홀이 가공된 중앙부재의 폭과 양쪽 부재의 폭을 모두 더한 값으로 정의하여 구조물의 파괴강도를 예측하였다. 그 결과, Fig. 6에 나타난 바와 같이 시편의 파괴강도 대비 약 87%의 파괴강도를 나타내었으며, 홀의 선단에서 파괴가 발생하였다. 실험결과에서 나타난 파괴강도의 차이는 'C'자 형상의 격인 부분 등의 구조물 형상으로 인하여 발생하는 평활재 응력분포와 구조물 응력분포의 차이로 인한 것으로 생각된다.

6. 결론

본 논문에서는 평직 CFRP 복합재료를 이용한 'C'자형 홀노치 구조물의 파손강도를 예측하고 이를 시험과 비교하여 시편과 구조물의 관계를 검토하고자 하였다. 본 연구로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 시편시험 결과로부터 특성길이 계산식의 변수 k에 대한 관계식을 유도하였으며, 이를 이용하여 실험을 하지 않고도 임의의 폭을 가진 시편의 파괴강도를 예측할 수 있을 것이라 기대된다.
- (2) 식(1)의 특성길이 관계식과 식 (2), (3)을 이용하여 구조물의 파괴강도를 예측하고, 시험을 수행하여 예측결과를 검토하였다. 그 결과, 시편시험 결과보다 구조물 시험결과가 약 87%수준으로 낮게 평가되었다. 이는 시편과 구조물의 형상차이로 인하여 발생하는 응력분포의 차이로부터 발생하는 것으로 판단된다.

후기

이 논문은 2단계 두뇌한국 21 (BK21) 사업, 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2007-0055842).

참고문헌

1. Waddoups, M.E., Eisenmann, J.R. and Kaminski, B.E., 1971, "Macroscopic Fracture Mechanics of Advanced Composite Materials," Journal of Composite Materials, Vol.5, pp. 446~455.
2. Whitney, J.M. and Nuismer, R.J., 1974, "Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations," Journal of Composite Materials, Vol. 8, pp. 253~265.
3. Nuismer, R.J. and Whitney, J.M., 1975, "Uniaxial Failure of Composite Laminates Containing Stress Concentrations," ASTM STP 593, pp. 117~142.
4. Agrawal, D.C., Agarwal, B.D. and Banerji, K., 1985, "Fracture Behavior of Glass-Cloth-Reinforced Composites," Polymer Composites, Vol.6, No.1, pp. 29~33.
5. Lagace, P.A., 1986, "Notch Sensitivity of Graphite/Epoxy Fabric Laminates," Composites Science and Technology, Vol.26, pp. 95~117.
6. Ghasemi Nejjhad, M.N. and Chou, T.W., 1990, "A Model for the Prediction of Compressive Strength Reduction of Composite Laminates With Molded-in Holes," Journal of Composite Materials, Vol.24, pp. 236~255.
7. Jung-Kyu Kim and Do-Sig Kim, 1992, "Notched Strength and Fracture Criterion of Glass/Epoxy Plain Woven Composites Containing Circular Holes," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.16, No.7, pp. 1285~1293.
8. 김상영·금진화·구재민·석창성, "홀 노치를 포함한 평직 CFRP 복합재료의 파괴기준 연구", 대한기계학회논문집A권 제34권 제4호, pp. 481~486