

피로하중에 의한 홀 노치 탄소섬유강화 복합재의 잔류강도변화 평가[§]

김상영* · 강민성* · 구재민* · 석창성*†

*성균관대학교 기계공학부

Evaluation of Variation in Residual Strength of Carbon Fiber Reinforced Plastic Plate with a Hole Subjected to Fatigue Load

Sang Young Kim^{*}, Min Sung Kang^{*}, Jae Mean Koo^{*} and Chang Sung Seok^{*†}

^{*} Dept. of Mechanical Engineering, SungKyunKwan Univ.

(Received May 12, 2010 ; Revised August 12, 2010 ; Accepted August 12, 2010)

Key Words : CFRP(탄소섬유강화 복합재료), Fatigue(피로), Residual strength(잔류강도), Hole-notch(홀 노치)

초록: 탄소섬유강화 복합재료는 높은 비강도, 비강성, 설계유연성 및 우수한 화학적 특성 등으로 인하여 여러 분야에서 각광받고 있는 구조재료이다. 대부분의 CFRP 복합재료 제품들은 여러 부품들을 주로 볼트, 핀 등의 기계적인 방법으로 조립하여 제작된다. 볼트나 핀에 의해 발생하는 hole 은 구조물 내에서 노치로 작용하여 부품의 강도저하의 원인으로 작용한다. 본 논문에서는 피로하중에 의한 CFRP 복합재료 홀 노치재의 잔류강도를 실험적으로 평가하였다. 이를 위하여, 시편에 일정 반복 수만큼 피로하중을 부여하였으며, 이후 파괴시험을 통하여 홀 노치재의 잔류강도를 측정하였다. 그 결과, 피로하중으로 인해 하중방향의 균열이 발생하는 것을 확인하였으며 이 균열이 홀의 노치효과를 감소시켜 잔류강도를 증가시키는 것으로 생각되었다. 시편의 잔류강도는 일정 수준까지 증가하다가 감소하는 것으로 평가되었으며, 이를 Reifsnider 등의 평활재 잔류강도 저하모델과 Yip 등의 홀 노치재 응력재분포 함수를 이용하여, 피로하중 하의 홀 노치재 잔류강도 변화를 수식으로 나타내었다.

Abstract: CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) has received considerable attention in various fields as a structural material, because of its high specific strength, high specific stiffness, excellent design flexibility, favorable chemical properties, etc. Most products consisting of several parts are generally assembled by mechanical joining methods (using rivets, bolts, pins, etc.). Holes must be drilled in the parts to be joined, and the strength of the components subjected to static and fatigue loads caused by stress concentration must be decreased. In this study, we experimentally evaluated the variation in the residual strength of a hole-notched CFRP plate subjected to fatigue load. We repeatedly subjected the hole-notched specimen to fatigue load for a certain number of cycles, and then we investigated the residual strength of the hole-notched specimen by performing the fracture test. From the results of the test, we can observe the initiation of a directional crack caused by the applied fatigue load. Further, we observed that the residual strength increases with a decrease in the notch effect due to this crack. It was evaluated that the residual strength increases to a certain level and subsequently decreases. This variation in the residual strength was represented by a simple equation by using a model of the decrease in residual strength for plain plate, which was developed by Reifsnider and a stress redistribution model for hole-notched plate, which was developed by Yip.

1. 서 론

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 홀과 같은 불연속부를 부재에 형성하게 된다. 홀 등의 불연속부는 재료 내의 응력집중을 유발하여 정하중 및 피로하중 하에서 재료의 강도를 저하시키는 원인이 되므로 구조물의 안정성을 검토하는 데 있어서 불연속부로 인한 응력집중이 정적강도 및 피로 수명에 끼치는 영향은 반드시 고려하여야 한다. 일반적으로 금속재료의 경우, 단일균열의 생성과 진전에 의해 파괴가 발생되므로 집중

[§] 이 논문은 2010년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2010. 4. 22.-23., 라테나콘도) 발표논문임.

[†] Corresponding Author, seok@skku.edu

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

된 응력의 최대값을 통하여 파괴를 예측할 수 있다. 따라서, 불연속부의 형상에 의해 결정되는 응력집중계수를 설계변수로 도입하여 노치 등으로 인한 응력집중이 재료의 강도에 미치는 영향을 고려할 수 있다. 이러한 금속재료와는 달리 복합재료는 재료내의 균열 외에도 층간분리, 모재와 섬유 분리의 분리, 섬유의 파괴 등 다양한 형태의 파괴기구를 가지는 것으로 알려져 있다. 복합재료의 이러한 파괴특성으로 인하여 응력집중계수만을 고려해서는 복합재료에서 나타나는 노치의 영향을 해석할 수 없다.

복합재료의 피로파괴에 대한 이론은 크게 잔류강도 저하모델과 잔류강성 저하모델의 두 가지로 구분할 수 있다. Broutman, Reifsnider 등은 피로손상이 재료의 강도를 저하시키며 재료의 잔류강도가 가한 응력과 같아질 때 피로파괴가 일어난다는 잔류강도 저하모델을 제시하였다.^(1,2) Hwang 등은 피로로 인한 재료의 손상을 강성저하의 측면으로 규정하고 변형률 파괴기준을 적용하여 잔류강성 저하모델을 제시한 바 있다.⁽⁶⁾ 응력집중을 가진 복합재료에 있어서 재료 내의 변형률은 균일하지 않으므로 거시적 의미의 강성을 정의하기 어렵다. 따라서, 잔류강성 저하모델 보다 잔류강도 저하모델이 노치를 가진 복합재료의 피로현상을 보다 효과적으로 설명할 수 있다.

응력집중이 없는 복합재료 평활재의 잔류강도 및 피로거동에 대한 연구결과^(1~5)에 비하여 홀과 같은 응력집중을 가진 복합재료의 피로수명과 같은 거시적 피로거동에 대한 정량적 연구결과는 미흡하며 노치 경계에서의 층간분리 및 균열 등과 같은 국소적인 손상, 응력해석^(7~9) 또는 피로수명과 잔류강도 등에 대한 실험적, 정성적 관찰^(10~12)이 주로 연구되어 왔다. 노치로 인한 응력집중을 가진 복합재료의 피로 하의 잔류강도에 대한 실험 결과의 보고에서 주목할 사항은 피로 후의 잔류강도가 정적인 노치강도보다 증가한다는 사실이다.^(11,12) 이는 지속적인 피로하중의 반복으로 인해 균열이 생성된 즉시 파괴가 일어나는 금속재료와는 달리 복합재료의 경우 단 일회 하중 반복으로도 균열이 형성될 수 있으며 균열의 형성이 즉시 피로파괴를 유발하지는 않으므로 피로가 반복됨에 따라 다수의 균열이 재료 내에 축적될 수 있고, 이로 인해 노치 주위의 응력이 재분포되어 그 집중 정도를 감소시키기 때문인 것으로 설명되고 있다. Yip 등은 홀 노치를 가진 무한평판에 대한 잔류강도 예측모델에서 피로손상이 축적됨에

따라 집중정도가 감소하는 응력분포를 제시하여 잔류강도의 증가를 설명하였다.⁽¹³⁾

본 연구에서는 홀 노치를 가진 CFRP 복합재료의 피로하중 하에서의 잔류강도를 실험적으로 평가하고, Yip 이 제안한 응력 재분포 함수⁽¹³⁾와 평활재의 잔류강도 저하모델을 이용하는 잔류강도 예측식을 제안하고자 하였다.

2. 피로하중에 의한 홀 노치재의 잔류강도 저하 모델

2.1 평활재의 잔류강도 저하 모델

Broutman 과 Sahu⁽¹⁾는 피로하중 하에서 평활재의 잔류강도가 선형적으로 감소된다고 가정한 식 (1)과 같은 선형감소 모델을 제안하였다.

$$\sigma_R = \sigma_u - (\sigma_u - \sigma_{app,max}) \left(\frac{n}{N_f} \right) \quad (1)$$

여기에서, σ_R 은 n cycle 후의 잔류강도, σ_u 는 인장강도, $\sigma_{app,max}$ 는 작용 최대 피로응력, N_f 는 작용 최대 응력이 $\sigma_{app,max}$ 일 때의 피로수명이다.

이후, 많은 연구자들에 의해 피로에 의해 평활재의 잔류강도는 비선형적으로 감소한다는 것이 밝혀졌다.^(14~19) 이에 따라, Reifsnider 등은 Broutman 등의 식에 비선형성을 나타내는 변수 k 를 적용하여 식 (2)같은 비선형 감소모델을 제안하였다.⁽²⁾

$$\sigma_R = \sigma_u - (\sigma_u - \sigma_{app,max}) \left(\frac{n}{N_f} \right)^k \quad (2)$$

위 식에서 k 가 1 이면, 식 (1)과 같은 선형 감소 모델과 같게 되며, k 가 1 보다 작으면, 피로시험 초기에 급격한 감소가 발생하고 점차 감소량이 점차 작아지게 된다. 또한, k 가 1 보다 크면 잔류강도는 피로수명에 근접했을 때, 급격한 감소가 발생하게 되며, k 가 크면 클수록 감소의 정도는 증가하게 된다.

2.2 홀 노치재의 응력재분포 함수

노치를 가진 복합재료의 잔류강도에 대한 기존의 연구결과는 피로하중 하에서 잔류강도가 정적강도보다 증가하는 현상을 보고하고 있으며, 이는 모재의 균열 등 손상이 축적됨에 따라 노치주위의 응력이 재분포되어 응력의 집중이 감소하기 때문인 것으로 분석되고 있다.^(11,12) Yip 등은 원공노치를 가진 무한평판에 대한 잔류강도 예측모델에서 피로손상이 축적됨에 따라

집중정도가 감소하는 응력분포를 식 (3)과 같이 제시하여 잔류강도의 증가를 설명하였다.⁽¹³⁾

$$g(n) = 1 - \frac{n-1}{N_0} \times S^p \times \left(\frac{r}{a_0}\right)^q \quad (3)$$

식 (3)에서 N_0 는 cycle parameter, S는 하중비, r은 홀 노치의 반지름, p와 q는 재료 상수, a_0 는 Whitney와 Nuismer^(20,21)가 정의한 홀 노치재의 특성길이이다.

손상으로 인한 응력재분포 함수 g(n)는 하중 반복수 n이 0일 때, 1의 값을 가지게 되며, n이 증가할수록 감소하게 된다.

2.3 홀 노치재의 잔류강도 저하모델

노치재의 피로에서는 응력집중으로 인하여 불균일한 응력분포를 가지므로 평활재의 경우와 같이 전체 단면적으로 나눈 평균응력을 사용하는 것은 타당하지 않다. 노치재에 있어서 평균응력은 전체 단면에 대해 노치가 차지하는 면적의 비중을 고려하지 않은 것으로 가한 응력을 실제보다 과소평가하게 된다. 따라서 가한 하중을 노치를 제외한 실제 단면적으로 나눈 응력을 사용하는 것이 타당하다. 이에 따라, 본 연구에서는 노치재에 가한 응력으로 응력이 작용하는 실제 단면의 평균응력(net stress)을 사용하였다.

식 (3)에서 Yip 등은 노치재에 가한 응력으로 전체 단면적의 평균응력을 사용하였으며, 홀의 반지름과 특성길이를 이용하여 이를 보정하였다. 그러나 본 연구에서는 노치재의 작용응력으로 net stress를 사용하여 보정의 필요가 없고, 응력집중 효과의 감소는 응력의 크기와 cycle만의 함수로 나타내어 질 수 있을 것으로 판단되어, 홀의 반지름과 특성길이를 이용한 3 번째 항을 삭제하였다. 또한, 식 (3)에서 응력의 재분포 척도 g는 n에 대하여 선형적으로 감소하게 된다. 이는 응력집중 감소효과가 선형적으로 나타난다는 것을 의미한다. 그러나, 본 논문에서는 응력집중 감소가 비선형적으로 나타난다고 판단하고, 비선형 parameter인 q를 적용하였으며, 실험 결과로부터 결정되는 변수인 N_0 대신 평활재에 net stress와 동일한 크기의 평균응력이 작용할 때의 파단수명인 N_f 를 적용하여 변수를 줄이고 평활재의 피로실험 결과를 이용하여 홀 노치재의 응력재분포를 설명하고자 하였다. 식 (4)에 수정된 응력재분포 함수를 나타내었다.

$$g(n) = 1 - \left(\frac{n-1}{N_f}\right)^q \times \left(\frac{\sigma_{app,max}}{\sigma_u}\right)^p \quad (4)$$

본 논문에서는 홀 노치재의 노치강도 및 인장강도를 식 (2)의 평활재 잔류강도 저하모델에 적용하여 홀 노치재의 잔류강도 저하 모델을 제안하고자 하였다. 이를 위하여 식 (2)의 응력항들에서 홀 노치재에 적합하도록 인장강도 σ_u 를 홀 노치재의 강도 σ_N 으로 수정하였고, 양변을 인장강도 σ_u 로 나누어 일반화하였다. 이 때, N_f 는 평활재에 응력 $\sigma_{app,max}$ 이 작용할 때의 수명이다.

피로 cycle인 n이 증가할수록 피로하중으로 인한 홀 노치재의 응력재분포는 노치효과 감소를 유발하게 되고, 이로 인해 잔류강도는 증가하게 된다. 또한, 응력재분포 함수인 g(n)은 n=1일 때, 1이며, n이 증가할수록 감소하게 된다. 이로부터, 홀 노치재의 잔류강도는 응력재분포 함수와 반비례관계를 가지고 있다고 할 수 있다. 이에 따라, 본 논문에서는 수정된 평활재의 잔류강도 저하모델을 응력재분포 함수 g(n)으로 나누어 줌으로써 홀 노치재의 잔류강도 저하모델을 식 (5)과 같이 구성하였다. 식 (5)에서 홀 노치재의 잔류강도 σ_{HR} 은 피로 cycle이 증가함에 따라 응력재분포의 영향으로 점차 증가하게 될 것이며, 일정 수준까지의 증가 이후 피로 cycle이 N_f 에 가까워 질수록 급격한 평활재의 잔류강도 저하모델의 영향으로 감소하게 될 것이다.

$$\frac{\sigma_{HR}}{\sigma_u} = \frac{\frac{\sigma_N}{\sigma_u} - \left(\frac{\sigma_N}{\sigma_u} - \frac{\sigma_{app,max}}{\sigma_u}\right) \left(\frac{n}{N_f}\right)^k}{1 - \left(\frac{n-1}{N_f}\right)^q \times \left(\frac{\sigma_{app,max}}{\sigma_u}\right)^p} \quad (5)$$

3. 실험

3.1 재료 및 시편

본 연구에 사용한 재료는 (주) SK chemical에서 시판되는 직물구조 탄소섬유 프리프레그인 WSN3K(1ply 두께 0.27 mm, 1cell 크기, 2mm×2mm)이며, 이를 이용하여 최종두께가 3.52 mm가 되도록 적층판을 제작하였다. 적층판은 16 ply로 Autoclave에서 140 °C, 60 kg/cm²의 온도와 압력에서 60 분간 성형, 제작되었다. 제작된 시편의 각 성분의 함량은 Table 1과 같으며, 기계적인 특성은 Table 2와 같다. ASTM D-3039-07⁽²²⁾를 참조하여 NC 머신으로 절단/가공하여 폭이 25 mm이고, 섬유배열 방향이 0°/90°인

Table 1 Physical properties of WSN3K

Wet Resin Content	32 ± 2 (Wt. %)
Resin Areal Weight	148 ± 5 g/m ²
Fiber Areal Weight	197 ± 8 g/m ²
Total Areal Weight	353 ± 10 g/m ²

Table 2 Mechanical properties of WSN3K

E _{xx} (GPa)	E _{yy} (GPa)	ν _{xy}	G _{xy} (GPa)
55	55	0.13	4.75

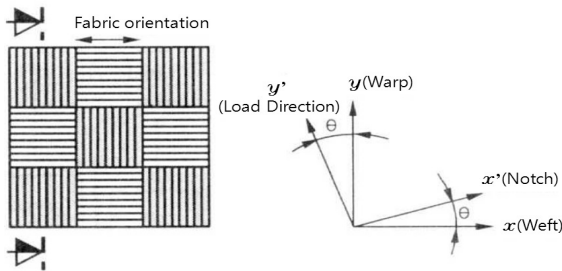


Fig. 1 Texture and load orientation of plain woven CFRP laminate composite

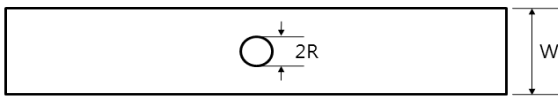


Fig. 2 Configuration of test specimens

시편을 제작하였다. 홀 노치 시편 중앙에는 적층분리와 같은 손상을 최소화하기 위하여 원통형 초경합금 드릴을 사용하여 직경 1 mm 인 홀을 가공하였다. 1 ply 의 프리프레그는 warp 방향 섬유와 weft 방향의 섬유가 교차하면서 이루어진 2 층 구조로써 홀이 cell 의 어느 위치에 있건 상관없이 손실된 섬유의 양(warp 및 weft)은 항상 동일하며, 강도 또한 항상 동일하게 나타나게 된다. Fig. 1 은 본 연구에 사용된 평직 적층판의 구조이며, Fig. 2 는 홀 노치 시편의 형상이다.

3.2 시험방법

시험은 인스트론(Instron)사의 25 ton 용량의 전기유압식 재료시험기(model 8802)를 이용하여 수행하였으며, 인스트론(Instron)사의 유압식 그립(grip)을 이용하여 양 끝단을 고정하였다. 피로하중의 주기는 5~8 Hz 로 하였으며, 하중제어 방식으로 응력비 R=0.1 인 일정진폭하중을 적용하였다. 평활재를 이용한 피로시험의 경우, 인장강도의 70~80 %범위 내에서 시험을 수행하여, 10⁴~10⁶cycle 범위 내에서 응력(Stress)-수명(Number of cycle)



Fig. 3 Pictures of (a) specimen and (b) equipment

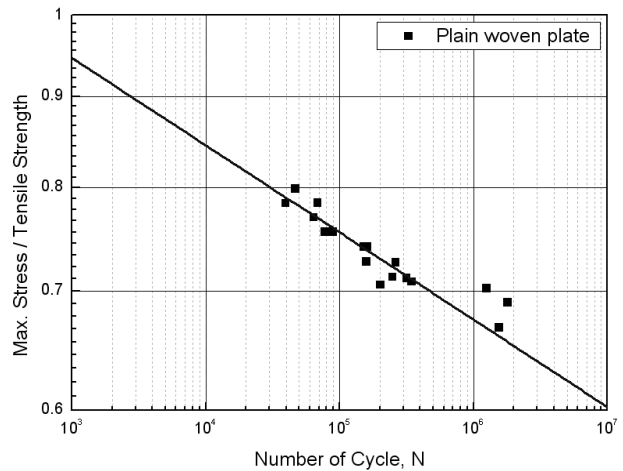


Fig. 4 S-N curve and data for plain specimen

데이터를 획득하고자 하였다. 홀 노치재의 경우 피로하중을 인장강도 대비 작용 net stress ($\sigma_{net,app,max} / \sigma_u$)로서 70~75% 수준으로 부여한 피로시험을 수행하였으며, 70% 의 피로하중으로 각각 1 만, 10 만, 20 만, 30 만, 50 만 cycle 동안 피로시험을 수행한 후, 3 mm/min 의 속도로 파괴시험을 수행하여 홀 노치재의 잔류강도를 측정하였다. 홀 노치재의 잔류강도는 파괴시험으로부터 획득한 파괴하중을 시험편의 net section 의 단면적으로 나누어 획득하였다. Fig. 3 에는 제작된 시편의 모습과 시편을 그림에 장착한 모습을 나타내었다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 평활재 피로시험

평활재의 피로시험에서 획득한 S-N 데이터를 외삽하여 S-N 선도를 획득하였다. 획득한 데이터와 선도 식을 Fig. 4 와 식 (6)에 나타내었다.

$$\log\left(\frac{\sigma_{app}}{\sigma_u}\right) = 0.123 - 0.049 \times \log(N) \quad (6)$$

4.2 홀 노치재의 피로시험 및 잔류강도 측정 시험

홀 노치재의 경우, 많은 논문에서 피로하중으로 인하여 잔류강도가 점차 상승하는 현상이 보고되고 있다^(11,12). 이러한 현상은 Fig. 5^(9,23)에 나타낸 것과 같은 홀 노치 선단에서 발생하는 하중방향 균열에 의한 것으로 생각되며, 이전의 연구자들은 응력 집중과 손상 진전 등의 관점으로 이러한 현상을 이해하고자 하였다. 그러나, 응력집중에 의해 발생한 균열은 하중방향에 수직하다는 사실로 인해 명확한 설명이 어려웠다. 그러나, 본 연구에서 하중방향 균열의 거동을 유심히 관찰한 결과, 하중방향 균열은 피로하중에 의한 시편 내부의 전단응력에 의한 것으로 판단되었다. 다시 말하면, Fig. 6(a)에 나타낸 것과 같이 재료의 유실로 인하여 홀 노치의 윗 부분과 아랫 부분은 하중을 전달받지 못하여 변형률이 0에 가깝게 된다. 그러나 재료의 유실이 없는 좌우측 부분은 하중을 전달함으로써 큰 변형률이 발생하게 되고, 두 변형률의 차는 내부에서 전단응력을 발생시켜, 홀 노치의 좌. 우측 끝부분인 Fig. 6(a)의 점선부분에서 세로방향의 균열이 발생하는 것으로 생각된다. 이러한 세로균열은 Fig. 6(b)에 나타낸 것과 같이 피로하중을 반복할수록 점점 길어지게 되고 결국 홀 노치로 인한 응력집중효과는 사라지게 될 것이다. 이러한 응력집중효과 감소에 따른 잔류강도 상승현상은 'wear-in'현상이라고 불리고 있다^(3,11). 그러나 이 wear-in 현상으로 인한 파괴강도의 상승은 일정레벨까지만 지속되며 정점에 이른 후에는 다시 낮아지는 것으로 알려져 있다. Fig. 7에는 본 연구의 시편에서 발생한 하중 방향의 균열을 나타내었다.

직경 1 mm의 홀을 가지는 노치재를 사용하여 일정 cycle 동안 피로시험을 수행하고, 파괴시험을 통해 잔류강도를 측정된 결과 Fig. 8과 같이 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 실험 결과를 적합하여 홀 노치재의 잔류강도 저하모델 식(5)의 변수들을 결정(k=7, p=4.8, q=0.6)하였고, 이를 Fig. 8과 식 (7)에 나타내었다. 잔류강도는 서서히 상승하다가 40~50만 cycle 부근에서 최대 잔류강도를 나타내고, 피로수명인 약 50만 cycle 부근에서 급격하게 하강하는 것으로 판단된다. 이는 세로 방향 균열이 점점 증가함에 따라 발생하는 응력집중 감소효과로 인해 잔류강도가 점점 상승하다가, 50만 cycle 부근에서는 시편에

누적된 피로 damage로 인해 급격한 하강곡선을 나타내는 것으로 생각된다.

또한, 홀이 차지하는 면적을 고려한 net stress를 기준으로 할 때, 홀 노치재의 수명은 평활재의 수명과 비슷하게 평가되었다.

$$\frac{\sigma_{HR}}{\sigma_u} = \frac{\frac{\sigma_N}{\sigma_u} - \left(\frac{\sigma_N}{\sigma_u} - \frac{\sigma_{app,max}}{\sigma_u}\right) \left(\frac{n}{N_f}\right)^7}{1 - \left(\frac{n-1}{N_f}\right)^{0.6} \times \left(\frac{\sigma_{app,max}}{\sigma_u}\right)^{4.8}} \quad (7)$$

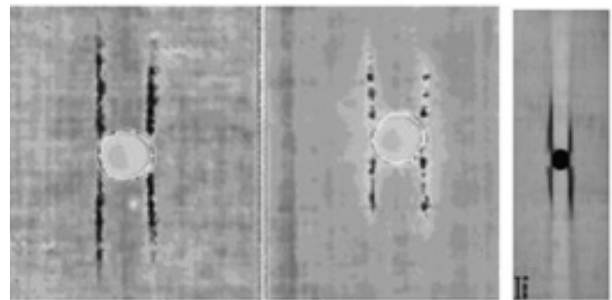


Fig. 5 Shape of specimen after fatigue test^(9,23)

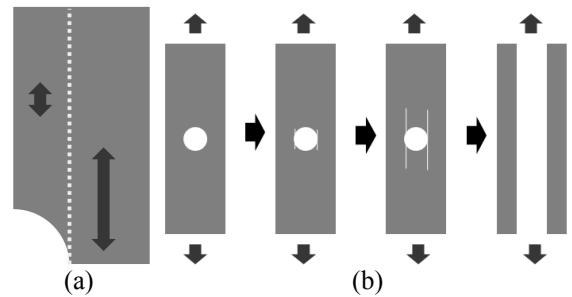


Fig. 6 Schematic of fatigue behavior for hole-notched specimen

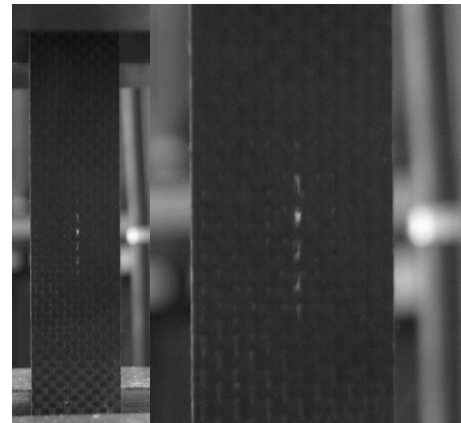


Fig. 7 Picture of vertical crack on hole notched specimen

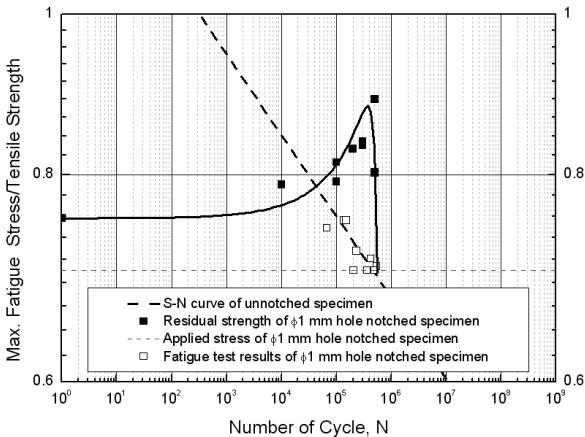


Fig. 8 Test results and degradation curve of residual strength for hole notched specimen

5. 결론

본 논문에서는 평직 CFRP 복합재료를 이용하여 피로 하중에 의한 홀 노치재의 잔류강도를 측정하였고, Reifsnider 등⁽²⁾에 의한 평활재의 잔류강도 저하 모델과 Yip 등⁽¹³⁾에 의한 응력재분포 함수를 이용하여 홀 노치재의 잔류강도 저하모델을 제안하였다. 본 연구로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 홀 노치재의 경우 평활재의 경우와 달리 피로시험에서 잔류강도가 점점 상승하는 것을 확인할 수 있었으며, 잔류강도는 일정수준까지 상승하다가 이후 급격한 하강곡선을 나타내었다.

(2) 피로시험 시에 시편에는 홀 노치로 인한 변형률의 차이가 발생하게 되고, 이 변형률의 차이는 전단응력을 야기하게 된다. 전단응력은 홀 노치의 선단에 하중방향 균열을 발생시키고, 하중방향 균열은 노치효과를 감소시키고 응력을 재분포시켜 잔류강도가 상승하는 효과(wear-in 현상)를 나타내는 것으로 판단된다.

(3) Reifsnider 등⁽²⁾에 의한 평활재의 잔류강도 저하 모델과 Yip 등⁽¹⁷⁾에 의한 응력재분포 함수를 이용하여 새로운 홀 노치재의 잔류강도 저하모델을 구성하였고, 실험결과를 통해 변수들을 결정하였다. 그 결과, 제안된 노치재의 잔류강도 저하모델은 홀 노치재의 잔류강도 변화를 잘 나타내는 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2 단계 두뇌한국 21 (BK21) 사업, 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국

연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2007-0055842).

참고문헌

- (1) Broutman, L. J. and Sahu, S., 1972, "A New Theory to Predict Cumulative Fatigue Damage in Fiberglass Reinforce Plastics," *Composite Materials: Testing and Design (Second Conference)*, ASTM STP 497, pp. 170~188.
- (2) Reifsnider, K. L. and Stinchcomb, W. W., 1986, "A Critical-Element Model of the Residual Strength and Life of Fatigue-Loaded Composite Coupons," *Composite Materials: Fatigue and Fracture*, ASTM STP 907, Hahn, H. T., Ed., pp. 298~313.
- (3) Huh, J. S., Hwang, W., Park, H. C. and Han, K. S., 1996, "Fatigue Life Prediction of Circular Notched CFRP Laminates," *Transactions of the KSME (A)*, Vol. 20, No. 3, pp. 832~842.
- (4) Philippidis, T. P. and Passipoularidis, V. A., 2007, "Residual Strength After Fatigue in Composites: Theory vs. Experiment," *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, pp. 2104~2116.
- (5) Tserpes, K. I., Papanikos, P., Labeas, G. and Pantelakis, Sp., 2004, "Fatigue Damage Accumulation and Residual Strength Assessment of CFRP Laminates," *Composite Structures*, Vol. 63, pp. 219~230.
- (6) Hwang, W. and Han, K. S., 1989, "Fatigue of Composite Materials-Damage Model and Life Prediction," *Composite Materials: Fatigue and Fracture, Second Volume*, ASTM STP 1012, Paul A. Lagace, Ed., pp. 88~102.
- (7) Benchekchou, B. and White, R. G., 1995, "Stress Around Fasteners in Composite Structures in Flexure and Effects on Fatigue Damage Initiation Part 1: Cheese-Head Bolts," *Composite Structure*, Vol. 33, pp. 95~108.
- (8) Nishikawa, Y., Okubo, K., Fujii, T. and Kawabe, K., 2006, "Fatigue Crack Constraint in Plain-Woven CFRP Using Newly-Developed Spread Tows," *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, pp.1248~1253.
- (9) Akbar, A.-K., Lin, Y., Mai, Y.-W., 2001, "An Experimental Study of the Influence of Fibre-Matrix Interface on Fatigue Tensile Strength of Notched Composite Laminate," *Composites: Part B*, Vol. 32, pp. 371~377.
- (10) Razvan, A., Bakis, C. E. and Reifsnider, K. L., 1990, "Influence of Load Levels on Damage Growth Mechanisms of Notched Composite Materials," *Composite Materials: Testing and Design (Ninth Volume)*, ASTM STP 1059, Garbo, S. P. Ed., pp.

- 371~389.
- (11) Bakis, C. E., Siminds, R. A., Vick, L. W. and Stinchcomb, W. W., 1990, "Matrix Toughness, Long-Term Behavior, and Damage Tolerance of Notched Graphite Fiber-Reinforced Composite Materials," *Composite Materials: Testing and Design* (Ninth Volume), ASTM STP 1059, Garbo, S. P., Ed., pp. 349~370.
- (12) Hosoi, A., Kawada, H. and Yoshino, H., 2006, "Fatigue Characteristics of Quasi-Isotropic CFRP Laminates Subjected to Variable Amplitude Cyclic Two-Stage Loading," *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, pp. 1284~1289.
- (13) Yip, M.-C. and Perng, T.-B., 1993, "The Influence of Hole Size in Static Strength and Fatigue for CFRP Composite Materials," *Proceedings of the International Conference on Advanced Composite Materials*, Chandra, T. and Dhingra, A. K., Eds., pp. 651~657.
- (14) Hahn, H. T. and Kim, R. Y., 1975, "Proof Testing of Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 9, pp. 297~311.
- (15) Yang, J. N. and Liu, M. D., 1977, "Residual Strength Degradation Model and Theory of Periodic Proof Tests for Graphite/Epoxy Laminates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 11, pp. 176~203.
- (16) Yang, J. N. and Cole, R. T., 1982, "Fatigue of Composite Bolted Joints Under Dual Stress Levels," *Progress in Science and Engineering of Composites, ICCM-IV*, Vol. 1, pp. 333~340.
- (17) Yang, J. N. and Du, S., 1983, "An Exploratory Study into the Fatigue of Composites Under Spectrum Loading," *Journal of Composite Materials*, Vol. 17, pp. 511~526.
- (18) Sendeckyj, G. P., 1991, "Life Prediction for Resin-Matrix Composite Materials," *Composite material series*, 4. Elsevier, pp.431~483.
- (19) Adam, T., Dickson, R. F., Jones, C. J., Reiter, H. and Harris, B., 1986, "A power Law Fatigue Damage Model for Fiber-Reinforced Plastic Laminates," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 200, No. C3, pp.155~166.
- (20) 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.
- (21) Nuismer, R. J. and Whitney, J. M., 1975, "Uniaxial Failure of Composite Laminates Containing Stress Concentrations," ASTM STP 593, pp. 117~142.
- (22) ASTM D3039-07, 2007, "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials," Annual Book of ASTM Standard.
- (23) Rakesh, P. K., Singh, I. and Kumar, D., 2010, "Failure Prediction in Glass Fiber Reinforced Plastics Laminates with Drilled Hole Under Uni-Axial Loading," *Materials and Design*, Vol. 31, 3002~3007.