

〈논 문〉

평직복합재의 노치강도 및 피로특성에 미치는 보조원공의 영향

김정규* · 심동석** · 한민규***

(1997년 5월 23일 접수)

Effects of Defence Holes on Notched Strength and Fatigue Properties in Plain Woven Composite

Jung-Kyu KIM, Dong-Suk SHIM and Min-Gyu HAN

Key Words : Stress Concentration Factor(응력집중계수), Main Hole(주원공), Defence Hole(보조원공), Notched Strength(노치강도), Fatigue Life(피로수명)

Abstract

The relaxation of stress concentration in notched members can be very significant in the improvement of notched strength and fatigue life. This paper investigated the relationship of stress concentration factor, and notched strength and fatigue life. The stress concentration factors were analyzed by FEM. Uniaxial tensile and fatigue tests were carried on plain woven composite specimens which have a main hole and two defence holes. From experimental results, the notched strength and the fatigue limit increased up to about 50% and 30% respectively due to the reduction in stress concentration. The fatigue lives predicted by Juvinall's approach were underestimated than test results and this trends were remarkable as notched strength increased. This is because of the underestimation of a coefficient A in $S-N$ curve ($\sigma_{ar} = AN^B$). Therefore, considering notched strength the coefficient A was modified. The fatigue lives by this process were agreed well with the experimental results.

1. 서 론

볼트, 리벳, 핀 등에 의한 기계적 체결방법에서 나타나는 기하학적 불연속부는 응력집중을 유발하므로 설계응력을 저하시키는 문제점을 가지고 있다. 그러므로 기계부재의 응력집중 및 이의 완화에 대한 연구는 일찍부터 진행되어 왔다.

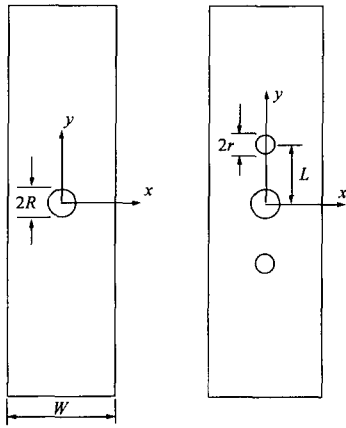
원공 등과 같은 기하학적 불연속부에서의 응력집중은 Savin⁽¹⁾ Peterson⁽²⁾에 의하여 연구되었으며 응력집중으로 인한 파손문제를 해결하기 위하여,

응력집중완화를 위한 여러 가지 방법들이 제시되고 있다. 먼저, 원공주위에 압축잔류응력이 생기도록 하여, 응력집중을 완화시키는 방법이 시도되고 있다. Lai 등⁽³⁾은 기계가공된 원공에 강구를 통과시킴으로써 주위에 압축잔류응력이 생기도록 하였으며, Poussard 등⁽⁴⁾은 냉간가공(cold worked)된 체결원공 주위의 잔류응력을 해석하였다. 또한 Giare 등⁽⁵⁾과 Lin^(6,7) 등은 원공주위를 보강하여 응력집중을 완화시켰다. Giare 등⁽⁵⁾은 탄소섬유를 이용하여 원공주위를 강화함으로써 원공주위의 응력집중을 감소 시켰으며, Lin^(6,7) 등은 복합재에서 기계 가공된 원공과 몰드(mould) 처리된 원공의 응력집중을 비교하여, 몰드처리된 원공이 응력집중완화로 인하여 더 좋은 피로특성을 나타냄을 밝혔다.

*회원, 한양대학교 기계공학부

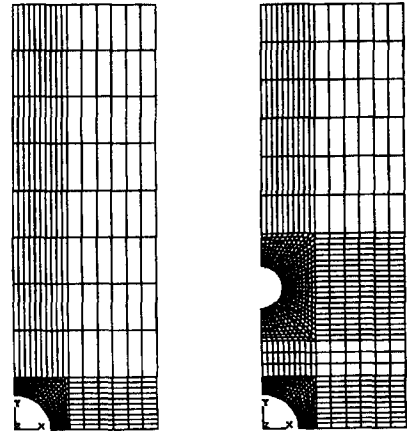
**회원, 한양대학교 대학원 기계설계학과

***회원, 만도기계(주) 평택사업본부·연구소



(a) Main hole sys (b) Defence hole sys

Fig. 1 Configuration of notched specimen



(a) Main hole sys (b) Defence hole sys

Fig. 2 FEM models

한편, 보조원공을 도입함으로써 주원공 주위의 응력흐름을 완만히 하여 응력집중을 감소시키고 피로수명을 증가시키려는 연구가 보고되고 있다. 고등⁽⁸⁾은 내압을 받는 이중 흡을 가진 압력용기의 피로수명평가에 있어서 단일흡의 경우에 비해 피로수명이 향상됨을 보고하였다. 또한 Erickson 등⁽⁹⁾은 주원공의 인장방향 양쪽에 보조원공을 도입하고 주원공과 보조원공의 크기 및 거리를 달리하여, 응력집중을 완화할 수 있는 최적의 조건을 찾았다. Jindal 등⁽¹⁰⁾은 주원공을 타원형으로 가공하여 응력집중을 더욱 완화시켰다. 그리고 Meguid^(11,12) 등은 단축인장하중을 받고 있는 판재의 원공선단에 생기는 응력집중을 줄이기 위해 체결원공(main hole) 사이에 보조원공(defence holes)을 도입하여 원공을 지나는 인장주응력선의 흐름을 완만하게 함으로써 응력집중을 완화시켰으며, 이를 통해 부재의 강도와 피로수명의 향상을 시사하였다. 이상의 연구 결과로부터 보조원공 또는 보조결합은 응력집중부의 응력을 감소시킬 수 있으나 부재의 강도 및 피로수명에 미치는 이의 영향에 대해서는 명확하지 않다.

본 논문은 주원공이 존재하는 평직(plain woven) glass/epoxy 복합재료에 보조원공을 도입하여 각 보조원공의 형상과 위치가 재료의 노치강도와 피로수명에 미치는 영향을 밝힌 것이다. 원공선단에서의 응력집중계수는 유한요소해석과 스트레인 게이지법을 이용하여 구하였으며, 노치강도와 피로수명은 단축인장시험과 일정진폭피로시험을 수행하여 검토하였다.

2. 응력해석

유한요소해석을 통해 응력집중계수를 구하기 위한 기하학적 형상은 Fig. 1과 같다. Fig. 1(a)는 주원공만이 있는 경우(이하 주원공 시스템)이며, Fig. 1(b)는 주원공의 하중방향 양쪽에 두개의 보조원공을 갖고 있는 경우(이하 보조원공 시스템)이다.

해석에 사용된 요소는 2차원 4절점 4변형요소이며, 직교이방성과 평면응력상태를 가정하여 해석하였다. 유한요소해석 모델은 작용응력과 재료물성, 시험편 형상의 대칭성으로 인해 전체 형상의 1/4을 취하였으며, 요소분할된 형상은 Fig. 2와 같다. 대칭축의 경계가 되는 x축과 y축의 절점은 각각 y방향과 x방향으로 구속하였으며, 응력이 작용하는 시험편의 선단에는 등분포응력이 작용하도록 하였다. 유한요소해석에 필요한 평직 glass/epoxy 복합재의 기계적 특성(E_x , E_y , G_{xy} , ν , σ_u)은 Table 1과 같다.

Fig. 3은 원공선단에서의 응력분포를 나타낸 해석결과로서, 주원공만 있는 경우에 비하여 보조원공을 도입함으로써 주원공선단에서 응력선의 흐름이 완만해지므로 응력집중이 완화됨을 알 수 있다.

3. 실험방법

본 실험에 사용된 재료는 평직 glass/epoxy 복합재료이며, 이의 기계적 성질은 Table 1과 같다.

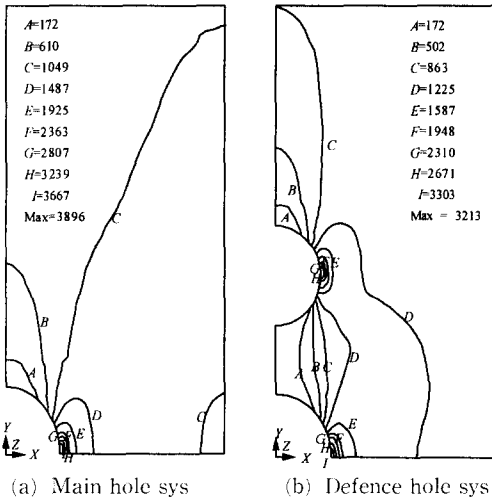


Fig. 3 Counter of y-directional normal stress

푸아송비(Poisson's ratio) ν_{xy} 는 $0^\circ/90^\circ$ 로 직교된 스트레인 게이지를 이용하여 구하였으며, G_{xy} 는 $\pm 45^\circ$ 스트레인 게이지법을 사용하여 식 (1)로부터 계산하였다.

$$G_{xy} = \frac{E_{45}}{2(1 + 2\nu_{45})} \quad (1)$$

여기서, E_{45} 와 ν_{45} 는 각각 하중방향에 대하여 섬유 배열방향이 $\pm 45^\circ$ 인 시험편의 종탄성계수와 푸아송비이다.

주원공 시스템의 형상은 응력해석에서 도입된 기하학적 형상에 따라 판폭 $W=40$ mm, 주원공 $2R=10$ mm의 시험편이며, 보조원공 시스템은 주원공의 중심과 보조원공 중심간의 거리 $L=12, 15, 30$ mm의 위치에 지름 $2r=2\sim 10$ mm의 보조원공이 있는 시험편으로 이들 원공은 기계가공에 의한 것이다.

유한요소해석에 의한 응력집중계수의 실험적 검증은 주원공과 보조원공의 선단에 스트레인 게이지 (gauge length=1 mm, gage resistance= $120.2 \pm 0.2\Omega$)를 부착하여 얻어진 최대응력과 작용응력과의 관계식 (2)으로부터 검토하였다.

$$k_t = \frac{(\sigma_{max})_{net}}{(\sigma_{applied})_{net}} \quad (2)$$

피로시험은 상온의 대기중에서 유압서어보식 피로시험기를 사용하였다. 실험에 사용된 파형은 최대응력이 노치강도를 기준으로 $0.45\sim 0.95$ 의 값을 갖는 응력비 $R=0.5$ Hz의 정현파를 사용하였다.

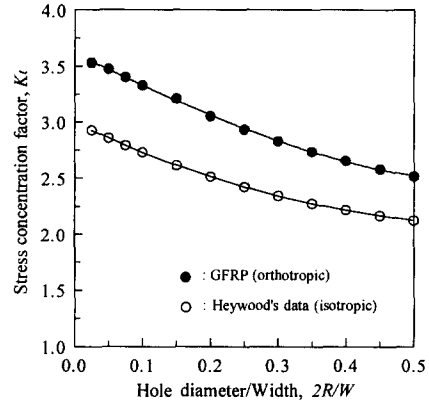


Fig. 4 Comparison of stress concentration factor in GFRP and Heywood's data

Table 1 Mechanical properties of plain woven glass/epoxy composites

E_{xx}	E_{yy}	G_{xy}	ν_{xy}	σ_u
23.4	23.4	4.3	0.16	246.1

E_{xx} : Longitudinal Young's modulus of x axis (GPa)

E_{yy} : Transverse Young's modulus of y axis (GPa)

G_{xy} : In-plane shear modulus of xy plane (GPa)

E_{45} : Longitudinal Young's modulus of $\pm 45^\circ$ from x axis

ν_{45} : Poisson's ratio of $\pm 45^\circ$ from xy plane

ν_{xy} : Poisson's ratio of xy plane

σ_u : Ultimate strength (MPa)

4. 실험결과 및 고찰

4.1 응력집중계수와 노치강도

Fig. 4는 주원공 시스템의 응력집중계수의 변화를 나타낸 것으로 판폭 $W=40$ mm로 일정하게 유지하고, 판폭에 대한 주원공의 지름 $2R/W$ 을 0.01에서 0.5까지 주원공의 지름 $2R$ 을 증가시키면서 해석한 결과이다. 이 그림에서 흰점은 유한 요소의 등방성재료에 대하여 해석한 결과이며, (2) 응력집중계수와 $2R/W$ 과의 관계는 식 (3)과 같다.

$$K_t = 2 + (1 - 2R/W)^3 \quad (3)$$

이 그림에서 보는 바와 같이 $2R/W$ 에 대한 평직 glass/epoxy 복합재의 응력집중계수는 등방성재료에 대한 결과에 비해 14% 정도 높은 값을 가지며,

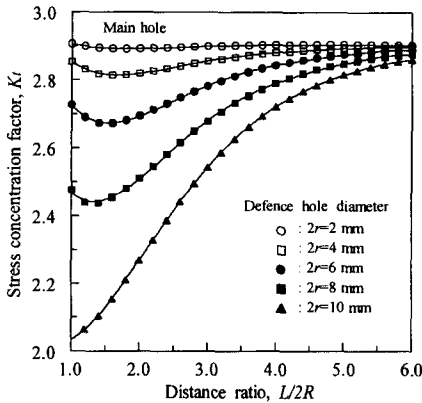


Fig. 5 SCFs of main hole

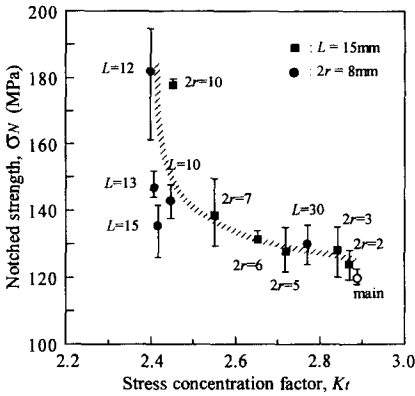


Fig. 6 Relationship between SCF and notched strength

등방성재료와 같이 판복에 대한 주원공의 크기가 클수록 감소하는 경향을 알 수 있다.

Fig. 5는 판복 $W=40$ mm, 주원공의 지름 $2R=10$ mm로 일정하게 유지하면서 보조원공의 지름 $2r$ 에 대한 주원공중심에서 보조원공중심까지의 거리 L 의 변화에 대한 주원공의 응력집중계수를 나타낸 것이다. $L/2R$ 에 대한 주원공의 응력집중계수는 보조원공의 지름이 커짐에 따라 급격히 저하하며, $L/2R$ 이 1.0~2.0 사이에서 주원공의 응력집중계수는 최소가 됨을 알 수 있다.

이러한 원인은 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 보조원공 시스템에서의 주원공의 응력집중계수는 응력상호간섭효과에 의한 응력완화로 인하여 저하하게 되는 것이다.

Fig. 6은 보조원공의 위치 및 크기의 변화에 따른 응력집중계수를 노치강도의 실험결과에 대하여 함께 나타낸 것이다. 보조원공 시스템은 주원공 주

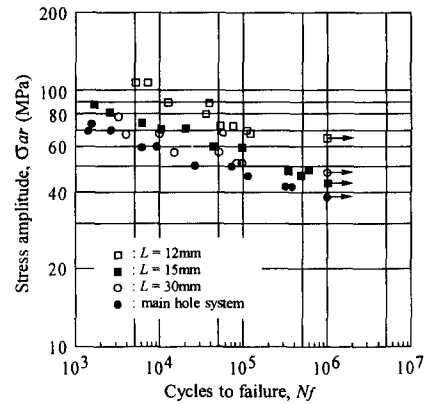


Fig. 7 S-N curve ($2r=8$ mm)

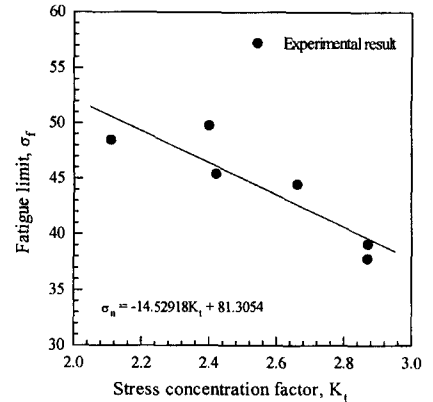


Fig. 8 Stress concentration factor vs. fatigue limit

위의 인장 주응력선의 흐름을 완만하게 함으로써 응력집중을 완화하며, 또한 노치강도를 주원공시스템의 것($\sigma_n \approx 120$ MPa)에 비하여 최대 50%정도 증가시킬 수 있다. 이로부터 보조원공의 도입은 이의 형상 및 위치에 따라 기계·구조물의 설계강도를 높일 수 있음을 시사한다.

4.2 응력집중계수의 감소와 피로한도의 변화

기계·구조물의 설계에 있어서 피로한도는 설계응력의 기준이 된다. 따라서 응력집중계수의 감소로 인한 노치강도의 증가에 따른 피로한도의 변화를 주원공 시스템과 보조원공 시스템($2r=2, 8, 10$ mm)에 대하여 검토하였다. Fig. 7은 주원공 시스템과 보조원공의 지름 $2r=8$ mm로 일정하고 중심간의 거리 $L=12, 15, 30$ mm의 세 가지 보조원공 시스템에 대한 S-N 선도이다. 그림에서와 같이 보조원공 시스템의 실험결과는 주원공 시스템의 것에

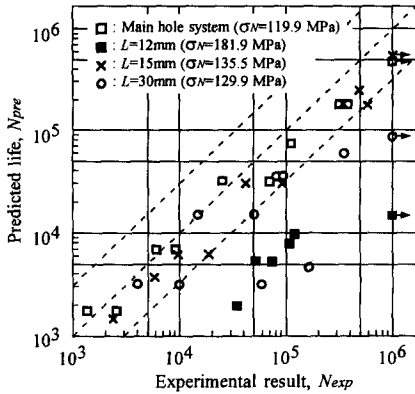


Fig. 9 Comparison between exp. results and predicted life by Juvinall's approach

비해 우상방향에 존재하므로 보조원공의 도입은 부재의 피로수명 및 피로한도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

응력집중계수의 감소와 피로한도 ($N_f=10^6$ cycle)의 관계를 알기 위하여, Fig. 8에 응력집중계수에 대한 피로한도의 변화를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 피로한도는 응력집중계수가 감소함에 따라 선형적인 증가를 보이며, 최고 30% 정도까지 향상되고 있다. 이는 구조물의 경량화와 설계응력의 증가에 도움이 될 것으로 생각된다.

4.3 노치강도의 증가에 따른 피로수명의 예측

입의의 피로강도에 따른 피로수명의 예측은 기계·구조물의 안전성과 경제성 측면에서 요구되는 사항이다. 응력집중의 감소로 인한 노치강도의 증가는 피로강도에 영향을 미치고 있으므로, 응력집중계수와 노치강도를 고려하여 다음과 같이 S-N선도의 기본식에 근거하여 피로수명을 예측하였다.

부하응력진폭 σ_{ar} 과 파단수명 N_f 와의 관계를 양대수 그래프상에 나타내면, 이의 관계식은 식 (4)와 같다.

$$\sigma_{ar} = AN_f^B \tag{4}$$

여기서, 노치재의 경우 A 및 B를 Juvinall⁽¹³⁾은 각각 다음과 같이 나타낸다.

$$A = \frac{(f')^2 \sigma_u}{f \cdot k_f}, \quad B = -\frac{1}{3} \log \frac{f'}{f} \tag{5}$$

이들 식에서 f와 f'는 각각 10^6 과 10^3 사이클에서의 피로강도 저하계수로서 다음과 같다.

$$f = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4, \quad f' = 0.75 \tag{6}$$

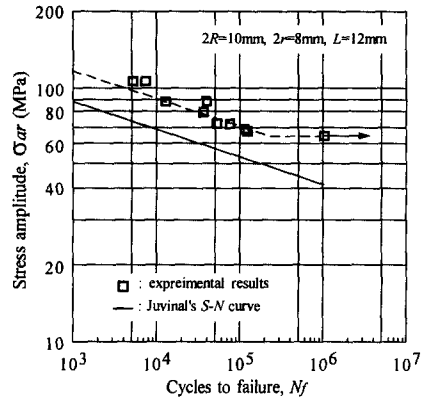


Fig. 10 Comparison between exp. results and Juvinall's S-N curve

f_1 는 인장강도에 대한 계수로서 $R=0$ 에서는 0.32이다.⁽¹⁴⁾ f_2 는 하중모드계수, f_3 는 크기계수, f_4 는 표면다듬질계수이며, 이들 값은 시험편의 크기 및 표면상태로부터 모두 1.0을 택하였다. 또한 k_f 는 피로노치계수로서 Neuber가 제안한 식 (7)을 사용하였다.

$$k_f = 1 + \frac{k_t - 1}{1 + \sqrt{\frac{B}{\rho}}} \tag{7}$$

여기서 ρ 는 곡률반경이고, β 는 재료가 갖는 고유상수이다.

Fig. 9는 피로수명의 실험결과와 위의 식들에 평균응력을 고려하여 구한 예측결과의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 주원공 시스템의 피로수명의 예측결과는 실험결과와 잘 일치하고 있지만 보조원공 시스템의 경우 피로수명의 예측결과는 실험결과에 대해 과소평가되고 있으며, 노치강도가 클수록 이의 정도는 현저함을 알 수 있다. 예측수명의 이러한 과소평가는 안전설계에 있어서 바람직하지만 비경제적인 설계의 요인이 된다. 따라서 과소평가의 원인을 밝히기 위하여 주원공과 보조원공 시스템의 S-N 곡선에 대하여 검토하였다. Fig. 10은 보조원공 시스템의 S-N곡선으로 앞에서 설명한 요인은 응력진폭의 절편인 A값의 과소평가라고 생각된다. 따라서 보조원공 시스템에서 노치강도에 대한 A값의 변화를 검토하였다. Fig. 11은 이의 결과를 나타낸 것으로 이들 관계는 식 (8)과 같다.

$$A_{exp}/A = 0.005\sigma_N + 0.407 \tag{8}$$

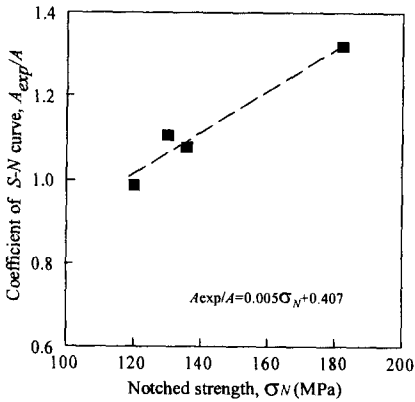


Fig. 11 Relationship between coefficients A of S-N prediction equation

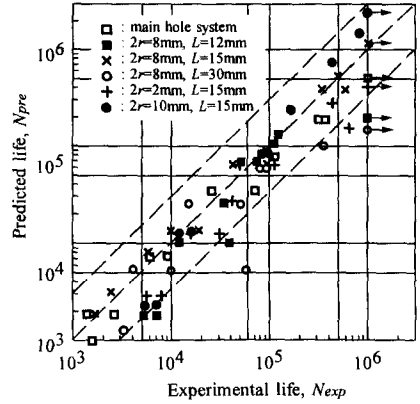


Fig. 13 Comparison of exp. results and predicted life by modified equation

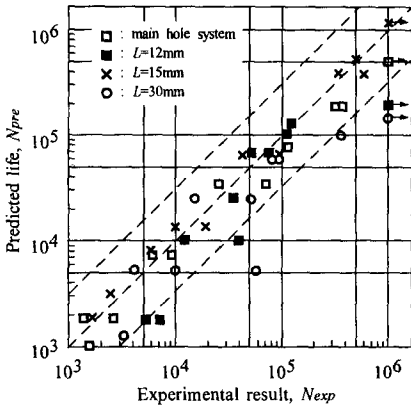


Fig. 12 Comparison of exp. results and predicted life by modified equation

따라서 식 (5)의 A값은 식 (9)와 같이 보정하여 피로수명을 예측하고 이를 실험결과와 함께 나타낸 것이 Fig. 12이다. 이 그림으로부터 피로수명의 예측값은 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

$$A_{exp} = (0.005\sigma_N + 0.407) \frac{(f')^2 \sigma_u}{f \cdot k_f} \quad (9)$$

한편 보조원공의 크기가 다른 보조원공 시스템에 대해서도 수정식 (9)의 타당성을 알아보기 위해 L=15 mm로 일정하게 하고, 보조원공의 지름 2r=2, 8, 10 mm일 경우에 대해 피로실험을 수행하였다. Fig. 13은 Fig. 12의 결과와 함께 나타낸 것으로 피로수명의 예측결과는 실험결과에 대해 2-밴드 영역내에 대부분 존재하게 되며, 이로부터 제안된 수정식은 피로수명예측에 있어서 유효함을 알 수 있다.

5. 결 론

평직 glass/epoxy 복합재료에 보조원공을 도입하여 응력집중의 완화가 부재의 노치강도와 피로수명에 미치는 영향을 검토하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 주원공에 보조원공을 도입함으로써 보조원공의 크기 및 위치에 따라 주원공에 작용하는 응력집중은 최고 27.0% 정도까지 완화되었고, 이에 따라 노치강도는 최고 50% 그리고 피로한도는 최고 30% 정도까지 증가하였다.

(2) 노치효과를 고려한 Juvinall 식에 의한 피로수명의 예측결과는 실험결과에 비하여 과소평가 되었으며, 이의 정도는 노치강도가 클수록 현저하였다.

(3) $\sigma_{ar} = AN^b$ 의 관계식에서 A에 노치강도를 고려하여 보정함으로써 피로수명의 예측결과는 실험결과와 잘 일치하였다.

$$A = (0.005\sigma_N + 0.407) \frac{(f')^2 \sigma_u}{f \cdot k_f}$$

참고문헌

- (1) Savin, G. N., 1961, *Stress Concentration around Holes*, Pergamon Press.
- (2) Peterson, R. E., 1974, *Stress Concentration Factors*, John Wiley & Press, New York.
- (3) Lai, M. O., Oh, J. T. and Nee, A. Y. C., 1993,

- "Fatigue Properties of Holes with Residual Stresses," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 45, No. 5, pp. 551~557.
- (4) Poussard, C., Pavier, M. J. and Smith, D. J., 1995, "Analytical and Finite Element Predictions of Residual Stresses in Cold Worked Fastener Holes," *Journal of Strain Analysis*, Vol. 30, No. 4, pp. 291~304.
- (5) Giare, G. S. and Shabahang, R., 1989, "The Reduction of Stress Concentration around the Hole in an Isotropic Plate Using Composite Materials," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 32, No. 5, pp. 757~766.
- (6) Lin, H. J. and Yang, S. H., 1993, "Modeling and Analysis of Composite Laminates with Continuous Fiber around a Circular Hole," *Journal of Composite Materials*, Vol. 27, No. 5, pp. 513~525.
- (7) Lin, H. J. and Tang, C. S., 1994, "Fatigue Strength of Woven Fabric Composites with Drilled and Moulded-in Holes," *Composites Science and Technology*, Vol. 52, pp. 571~576.
- (8) 고승기, 이송인, 정세희, 이경엽, 1996, "CAE 기법을 이용한 자간가공된 두꺼운 압력용기의 피로설계," 대한기계학회 추계학술대회논문집(A), pp. 226~232.
- (9) Erickson, P. E. and Riley, W. F., 1978, "Minimizing Stress Concentrations around Circular Holes in Uniaxially Loaded Plates," *Experimental Mechanics*, Vol. 18, pp. 97~100.
- (10) Jindal, U. C., 1983, "Reduction of Stress Concentration around a Hole in a Uniaxially Loaded Plate," *Journal of Strain Analysis*, Vol. 18, No. 2, pp. 135~141.
- (11) Meguid, S. A., 1986, "Finite Element Analysis of Defence Hole System for the Reduction of Stress Concentration in a Uniaxially-Loaded Plate with Two Coaxial Holes," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 25, No. 4, pp. 403~413.
- (12) Meguid, S. A. and Gong, S. X., 1993, "Stress Concentration around Interacting Circular Holes : A Comparison between Theory and Experiments," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 44, No. 2, pp. 247~256.
- (13) Dowling, N. E., 1993, *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice-Hall International Editions, pp. 422~426.
- (14) 김정규, 김도식, 1993, "Glass/Epoxy 복합재료의 피로강도평가 및 피로수명예측," 대한기계학회논문집, 제17권, 제10호, pp. 2475~2482.