

고인성 열가소성 복합재료 AS4/PEEK의 피로강도에 관한 기초적 검토

- 시험편 형상 및 응력집중의 영향 -

강재윤* · 송지호**
(1999년 8월 5일 접수)

A Preliminary Study on Fatigue Strength of High Toughness Thermoplastic Composite Material AS4/PEEK - Effect of Specimen Shape and Stress Concentration -

Jae-Youn Kang and Ji-Ho Song

Key Words : Fatigue Strength (피로강도), Thermoplastic Composite (열가소성 복합재료), Fatigue Notch Factor (피로노치계수), Thermosetting Composite (열경화성 복합재료), Stiffness Degradation (강성저하), Stress Redistribution (응력재분포)

Abstract

First, various specimen geometries, namely, coupon type, waisted type and dog-bone type, were examined to determine appropriate fatigue specimen of thermoplastic composite material AS4/PEEK and then, fatigue strength of smooth and notched specimens of AS4/PEEK [-45/0/+45/90]_{2s} was investigated. Fatigue tests were performed under load controlled condition at a stress ratio of 0.1 at a frequency of 5Hz. Stiffness degradation of specimens with fatigue cycling was monitored using an automated unloading compliance technique. The waisted type specimen is found appropriate for smooth fatigue specimen geometry of AS4/PEEK. As for the effect of stress concentration, it is found that fatigue strength is higher for a 2mm-diameter hole notched specimen than a 5mm-diameter one. Fatigue notch factor decreases with the increase of fatigue life. These results are far different from the trend of fatigue strength of metallic materials. The stiffness variation of smooth specimen was only 4% at maximum until final fracture. On the other hand, the stiffness of hole notched specimen was reduced by 45% at maximum. Notched fatigue strength was compared between thermoplastic composite AS4/PEEK and thermosetting composite Graphite/Epoxy. In long-life fatigue (>10⁴), the AS4/PEEK composite shows superior fatigue strength, but in short-life fatigue, the fatigue strength of the Graphite/Epoxy composite is nearly equal or somewhat higher than that of the AS4/PEEK composite.

기호설명

K_f : 피로노치계수
 K_t : 응력집중계수
 $\sigma_{n,max}$: 공칭최대응력
 R : 응력비

E_1 : 초기의 탄성계수
 E_n : n사이클 후의 탄성계수

1. 서론

기계구조물의 경량화 및 효율성을 높이기 위해 많이 사용되는 섬유강화 복합재료는 Graphite/Epoxy와 같은 열경화성수지를 이용한 것이 매우 많으나, 근래에는 재료의 인성 및 정적강도가 우수한 열가소성 복합재료를 사용하려는 시도가 널리 이루어지고 있으며, 열가소성 복합재료의 피로

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : jykang@fatidesign.kaist.ac.kr
TEL : (02)958-3462 FAX: (02) 968-1638

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

특성에 관한 연구결과도 점차 증가하는 추세에 있다.⁽¹⁻¹⁵⁾ 그 중 주요(主要)한 것 몇 가지를 살펴보면, Nisitani-Noguchi-Kim⁽¹⁻⁷⁾은 짧은 탄소섬유보강 PEEK재료와 PEEK재료에 대해서 비교적 많은 연구를 하고 있다. 그들은 짧은 탄소섬유보강 PEEK재료와 PEEK재료에 대해서 회전굽힘시험으로 단면이 원형인, 평형시험편 및 노치시험편의 피로거동을 평가하여 짧은 탄소섬유보강 PEEK재료와 PEEK재료보다 노치 민감도가 작다고 보고하였다. 또한 이들은 짧은 탄소섬유보강 PEEK에 대하여 2단 하중 피로시험을 하여 Miner의 선형누적손상법을 적용할 수 있음을 밝혔으며, 짧은 탄소섬유보강 Polyamide 6.6재료에 대하여 회전굽힘 및 비틀림 피로시험을 하여 피로손상거동을 비교하였다. Tai-Ma-Wu⁽⁸⁾는 CF/PEEK [0/45/90/-45]_{2s} 복합재료에 대하여 직사각형 시험편을 사용하여 인장-인장 및 인장-압축 피로시험을 하여 S-N곡선을 Weibull확률분포에 의해서 표시하였으며, 반복하중에 의한 잔류강도감소 모델을 제안하였다. Im-Kim-Yang⁽⁹⁾은 CF/Epoxy[0₄/90₄]s와 CF/PEEK [0₄/90₄]s 재료에 대하여 직사각형 시험편으로 충격하중을 가한 후 3점 굽힘피로시험을 하여, 충격면이 압축인 경우 잔류 피로굽힘강도는 CF/PEEK가 CF/Epoxy보다 크고, 충격면이 인장인 경우 잔류 피로굽힘강도는 CF/PEEK가 CF/Epoxy보다 작다고 보고하였다. Song-Otani⁽¹⁰⁾는 직조된 탄소섬유 보강 Epoxy와 직조된 탄소섬유 보강 PEEK재료에 대하여 직사각형 시험편으로 인장-인장 피로시험을 하여 피로손상을 미시적으로 관찰하고, 재료성질로부터 피로강도를 예측하는 방법을 제안하였다.

이들의 연구결과에서는 시험방법 상 특별히 시험편 형상 문제를 지적하고 있지 않으나, 열가소성 복합재료의 피로특성은 경우에 따라 현재까지 많이 연구되어 온 열경화성 복합재료와는 크게 달라, 열경화성 복합재료에 관한 연구결과 혹은 연구방법을 그대로 이용하기에는 문제가 많다. 예컨대 복합재료의 피로특성을 검토하기 위하여 사용되는 피로시험편 형상은, 미국 시험재료학회 규격(ASTM D3479)에서는 복합재료의 정적강도 시험편 형상과 동일한 직사각형(parallel sided coupon)시험편(뒤의 Fig. 5 (a) 참조)을 권장하고 있으며, 열경화성 복합재료의 경우, 거의 문제가 없으나, Curtis 등⁽¹¹⁾은 인성이 큰 AS4/PEEK의 피로시험에 이러한 직사각형 시험편을 사용할 경우 탭 부근에서 파손이 일어날 확률이 높아 적절하지 못하다고 보고하고 있다. 따라서 그들은 AS4/PEEK 복합재료의 경우 평형부가 없는 곡률시험편, 이른바 허리모양(waisted)형 시험편(뒤의 Fig. 5 (b) 참조) 사용을 권

장하고 있다. 이들의 연구 결과에 의하면 직사각형 시험편과 허리모양형 시험편의 피로수명 차이는 나타나지 않고 있다. 피로시험편 형상으로는는 평형부가 있는 것이 바람직한 경우도 있으므로, 본 연구에서는 먼저 열가소성 복합재료 AS4/PEEK재료의 기본적인 피로강도평가에 적합한 피로시험편 형상에 관하여 검토하기로 하였다.

그 결과를 바탕으로 본 시험재료의 기본적인 피로특성을 얻고, 나아가서 응력집중이 존재하는 경우에 대해서도 검토하며, 취성이 강한 열경화성 재료 Graphite/Epoxy의 피로특성과 비교하기로 한다. 본 연구에서는 특히 되풀이 수에 따르는 피로손상정도를 검출하기 위하여, 자동화된 제하탄성 컴플라이언스 방법을 이용하여 탄성계수의 변화를 측정하였다.

2. 시험재료 및 시험방법

2.1 시험재료

먼저 AS4/PEEK재료의 피로시험에 적합한 시험편 형상결정을 위한 연구에서는, ICI/FIBERITE사에서 제작한 AS4/PEEK 프리프레그(preprag)를 실험실에서 [-45/0/+45/90]_s로 적층한 후, 고온 압착기(hot press)를 이용하여 성형하여 사용하였다. 성형 온도 및 압력과 냉각속도는 ICI/FIBERITE사의 권장방법에 따라 Fig. 1과 같이 하였다.

AS4/PEEK재료의 기본적인 피로거동 평가에는, 가능한 한 시험편 재료의 균일성 등을 확보하기 위하여, 특별히 ICI/FIBERITE사에서 성형제작 판매하는 [-45/0/+45/90]_{2s} 적층판(16"x16", 두께 2mm)을 구입하여 사용하였다. ICI/FIBERITE사에서는 오토클레이브(autoclave)를 사용하여 성형하고 있으며, 성형조건은 Fig. 2와 같다.

열경화성재료인 Graphite/Epoxy재료는 (주)한국파이버에서 제작한 프리프레그를 [-45/0/+45/90]_s로 적층한 후 오토클레이브에서 Fig. 3과 같은 압력과 온도를 가하여 성형하였다.

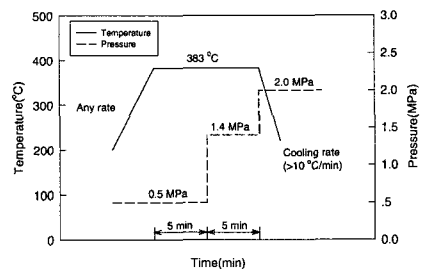


Fig. 1 Curing cycle for AS4/PEEK [-45/0/+45/90]_s.

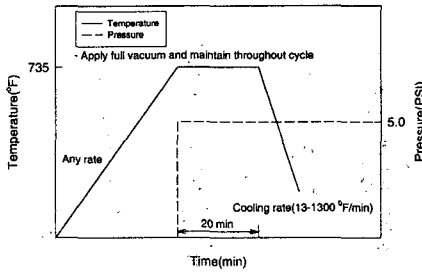


Fig. 2 Curing cycle for AS4/PEEK [-45/0/+45/90]_{2s}

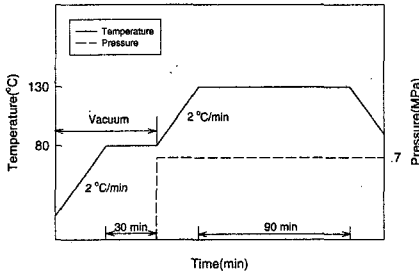


Fig. 3 Curing cycle for Graphite/Epoxy [-45/0/+45/90]_s

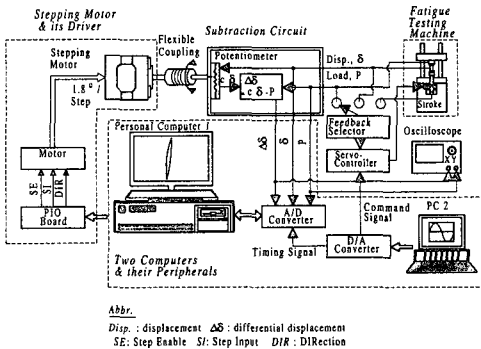


Fig. 4 Schematic diagram of automated measurement system

2.2 피로시험장치 및 방법

시험기는 MTS사 50톤 용량 유압피로시험기를 사용하였으며, 시험편의 강성변화를 자동으로 측정하기 위하여 Fig. 4와 같은 자동측정 시스템을 사용하였다.⁽¹⁶⁾ 특히 본 연구에서는 시험편의 강성변화를 감도 높게 검출하기 위하여, 아래에서 설명하는 바와 같이 감산변위 신호를 이용한, 이른바 0점 보상법(zero compensation method)을 사용하고 있다. 실험중, 로드셀에서 출력되는 하중신호와 변위계 출력인 변위신호, 그리고 이 두 신호가 감산회로를 거쳐 얻어지는 감산변위신호는 모두 A/D 변환기를 거쳐 컴퓨터에 입력된다. 특히 입력된 하중과 감산변위를 사용하여, 하중-감산변위 관계곡선의 직선부분 기울기가 일정량(제어프로그

램에서 초기 입력한 기울기) 이상이 되면 PIO (parallel input/output) 보드에 신호를 보내고, 이 신호가 모터 구동기를 거쳐서 스텝모터를 구동시킨다. 또한 스텝모터는 감산회로에 있는 10회전 가변저항(그림중의 potentiometer)을 돌려주어 재료의 강성변화에 의해서 증가한 감산변위의 양을 0으로 한다.

감산변위에 있는 10회전 가변저항의 눈금(H)의 변화 $\frac{H_n}{H_1}$ 와 재료의 강성변화의 관계를 예비실험에 의해 구한 결과, 다음과 같은 선형식이 얻어졌다. 이 식을 이용하여 되풀이 수에 따르는 강성변화를 측정하였다.

$$\frac{E_n}{E_1} = \frac{P/\delta_n}{P/\delta_1} = \frac{H_n}{H_1} \quad (1)$$

여기서 P는 작용하중 이고, $E_1, E_n, \delta_1, \delta_n, H_1, H_n$ 는 각각 초기 및 n 사이클 후에서의 재료의 탄성계수, 재료의 변위 그리고 10회전 가변저항의 눈금이다.

피로시험은 하중제어로 하였으며, 되풀이속도는 5Hz, 응력비 $R(=\sigma_{min}/\sigma_{max})$ 는 0.1로 하였다.

3. 피로시험편 형상결정

3.1 AS4/PEEK재료의 피로시험편 형상결정을 위한 시험편 종류

Fig. 5에 제시한 3종류의 시험편 형상에 대하여 검토하였다.

Fig. 5 (a)는 직사각형 시험편으로서, 길이 160 mm, 폭 20mm이며 탭 부분의 길이는 40mm이다. 탭 재료는 cross-ply Glass/Epoxy로 두께는 2mm이며 테이퍼 각도는 10°로 하였다. 탭은 (130°C에서 1시간 유지하여 사용하는) 고온 경화성 FM77접착제를 사용하여 시험편에 부착하였다.

Fig. 5 (b)는 허리모양형 시험편으로서, 길이 160 mm, 곡률반경 42.5mm 이며, 최소 폭은 10mm이다. 이러한 형상의 시험편은 곡률부위에서의 응력분포가 균일하지 않다는 단점이 있으나 파손부위가 최소 폭 부위에서 크게 벗어나지 않는 장점이 있다.⁽¹¹⁾ 이 형상에 대한 응력집중계수 K_t 는 약 1.07이다.⁽¹⁷⁾

시험편은 다이아몬드 회전톱을 사용하여 적층판으로부터 직사각형 모양의 재료를 절취한 후, 다이아몬드가 코팅 된 줄로 곡률부위를 가공하였다. 탭을 붙이는 과정은 직사각형 시험편과 동일하다.

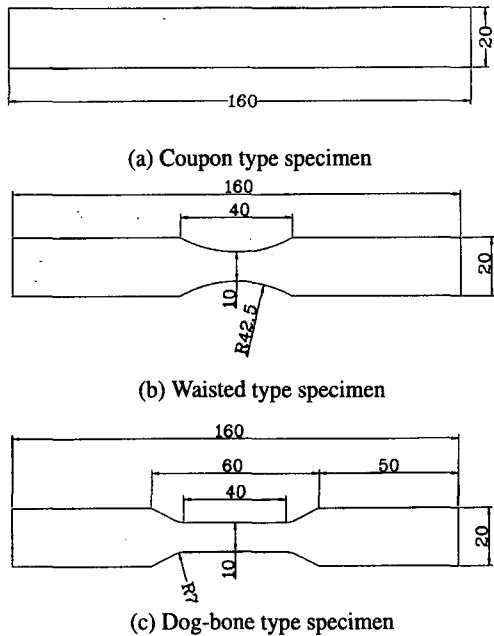


Fig. 5 Specimen geometries tested for determining appropriate fatigue specimen type (AS4/PEEK [-45/0/+45/90].)

Fig. 5 (c)은 단볼이 평행부(dog-bone)형 시험편으로서, 길이 160mm, 측정부위 폭 10mm이며, 단볼이 부분(fillet)의 곡률반경은 7mm이다. 탭 재료로는 #220사포를 사용하였으며, 에폭시 접착제를 사용하여 시험편에 부착하였다.

3.2 시험결과

Fig. 6은 각 시험편 형상에 대한 최종 파단상태를 나타낸 것이다. 시험하중조건은 최대응력 σ_{max} 이 250 ~ 600 MPa의 범위이며, 피로수명은 $10^4 \sim 10^6$ 의 범위이다.

Fig. 6 (a)는 직사각형 시험편의 경우로, 탭이 떨어지거나 탭 부근에서 파손이 되고 있다. 특히 이 시험편의 경우에는 하중을 부하 한 순간에 탭이 빠지고, 파손하는 하는 경우가 많다. 이러한 현상은 Curtis 등⁽¹¹⁾ 과 Henaff-Gardin과 Lafie-Frento⁽¹²⁾의 연구결과에서도 보고되고 있다.

Fig. 6 (b)는 허리모양형 시험편에 관한 결과로 시험편 중앙부에서 대부분 파손하고 있다.

Fig. 6 (c)는 단볼이 평행부(dog-bone)형 시험편 결과로서 본 연구의 범위에서는 거의 단볼이 부위에서 파손하고 있다.

이상 결과로부터 열가소성 복합재료인 AS4/PEEK의 경우는 응력집중에 매우 민감하다는 것을

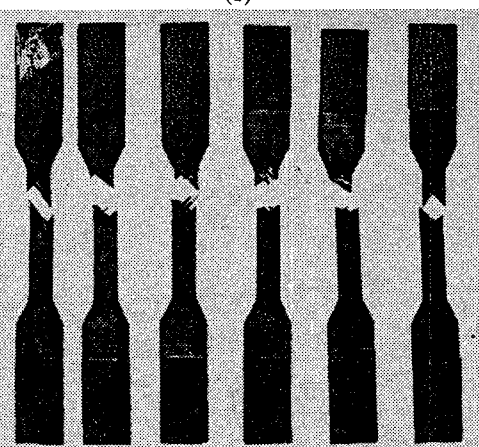
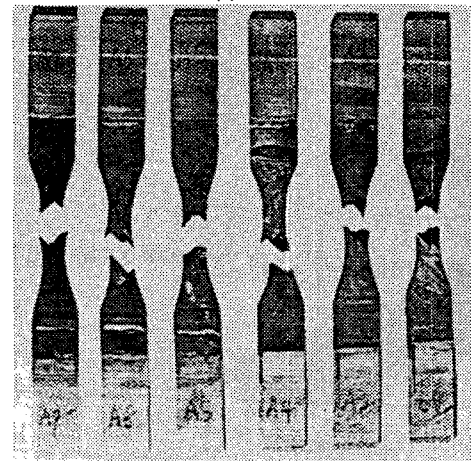
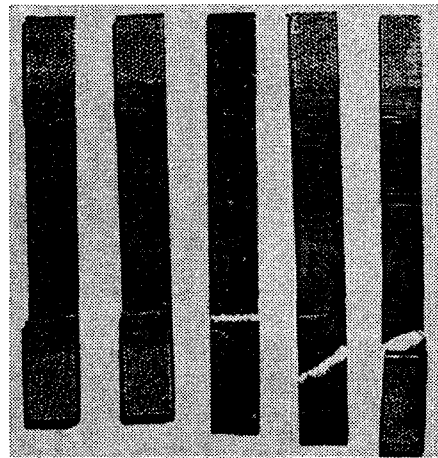


Fig. 6 Examples of fractured sepcimens, (a) coupon type, (b) waisted type, and (c) dog-bone type (AS4/PEEK[-45/0/+45/90].)

알 수 있으며, 대체로 하중을 부하하면 탭이 떨어지거나 탭 부분에서 파손되는 직사각형 시험편은 피로시험편으로 부적당하다. 한편 단봉이 평행부 시험편의 경우에도 응력집중 부위인 단봉이 부위에서 파손하여, 피로시험편으로는 반드시 바람직하지 않으나, 단봉이 부분의 곡률반경을 충분히 크게 한 경우에는, 파단이 대체로 평행부에서 일어난다는 Henaff-Gardin과 Lafie-Frento의 연구결과⁽¹²⁾가 있다. 그러나 단봉이 부분의 곡률반경이 커지면 시험편의 길이가 너무 길어지는 등 문제점도 없지않다.

따라서 파손이 예상되는 최소단면부위 부근에서의 응력변화를 되도록 적게, 곡률반경을 가능한 한 크게 한 허리모양형 시험편을 AS4/PEEK의 피로시험편으로 사용하는 것이 바람직하다고 말할 수 있다.

4. 피로특성검토

4.1 시험편 형상

AS4/PEEK재료의 기본적인 피로특성평가를 위한 평활(노치가 없는) 시험편 형상으로서, 앞 3장의 결과를 이용하여 Fig. 7 (a)와 같은 길이 180mm, 곡률반경 71mm, 최소 폭 15mm인 허리모양형으로 하였다. 특히 이 시험편 형상과 치수는 Curtis⁽¹¹⁾의 연구에서 사용된 시험편과 동일하다. 이 형상에 대한 응력집중계수는 약 K_t 는 1.06이다.⁽¹⁷⁾ 곡률부위는 반경이 71mm인 다이아몬드가 코팅 된 연삭휠을 사용하여 가공, 연마하였다. 탭 재료로는 간편하게 #220사포를 사용하였으며, 에폭시 접착제를 사용하여 시험편에 부착하였다.

AS4/PEEK재료의 피로수명에 미치는 응력집중의 영향을 검토하기 위한 시험편으로는, Fig. 7 (b)와 같은 중앙원형노치 시험편(길이 180mm, 폭 25mm)을 사용하였다. 원형노치의 크기로는 지름이 2mm인 것과 5mm인 것 두 가지를 대상으로 하였다. 응력집중계수 K_t 는 Tan⁽¹⁸⁾의 제안 식을 이용하면, 지름 2mm인 경우 2.78이고 지름 5mm인 경우 2.51이다. 원형노치는 다이아몬드 드릴을 사용하여 가공하였다. 탭 재료로는 #220사포를 사용하였으며, 에폭시 접착제를 사용하여 이것을 시험편에 부착하였다.

AS4/PEEK와 비교용으로, 열경화성재료인 Graphite/Epoxy재료에 대해서도 Fig. 7 (c)와 같은 길이 140mm, 폭 22mm, 지름 5mm인 원형노치 시험편을 제작하여 피로시험을 수행하였다. Tan⁽¹⁸⁾의 제안 식을 이용하면, 응력집중계수 K_t 는 2.46으로서, 위

의 열가소성재료의 응력집중계수와 거의 동일하다. 가공방법은 Fig. 7 (b)의 경우와 거의 동일하다.

4.2 열가소성 AS4/PEEK 재료의 평활시험편과 노치시험편의 피로강도

Fig. 8에 평활시험편과 노치시험편의 S-N곡선을 나타내었다. 세로축은 공칭최대응력 $\sigma_{n,max}$ 으로, 하중을 최소 단면적으로 나눈 값이고 N은 되풀이 수이다. 그림중의 화살표는 하중 되풀이 수 2×10^6 이내에서는 파단되지 않은 결과를 나타낸다.

각 시험편에 대한, log-log 선도상의 S-N곡선의 회귀직선 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

평활시험편의 경우

$$\sigma_{n,max} = 789N^{-0.034} \quad (2)$$

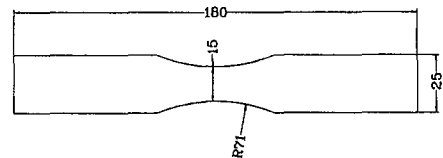
$\phi 2\text{mm}$ 원형노치 시험편인 경우

$$\sigma_{n,max} = 501N^{-0.007} \quad (3)$$

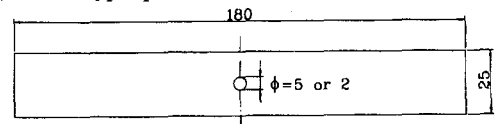
$\phi 5\text{mm}$ 원형노치 시험편인 경우

$$\sigma_{n,max} = 445N^{-0.013} \quad (4)$$

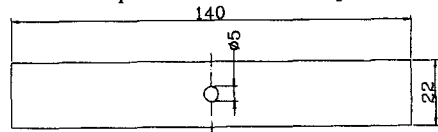
Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이, 응력집중이 있는 경우 피로강도는 평활시험편에 비해 저하하나, 본 재료의 경우 응력집중계수가 큰, 지름 2mm 원형노치재의 피로강도가 응력집중계수가 낮은, 지름 5mm 원형노치재의 피로강도보다 높은 결과가 되고있다. 특히 5mm 원형노치재의 경우



(a) Waisted type specimen of AS4/PEEK[-45/0/+45/90]_{2s}



(b) Hole notched specimen of AS4/PEEK[-45/0/+45/90]_{2s}



(c) 5mm diameter hole notched specimen of Graphite/Epoxy[-45/0/+45/90]

Fig. 7 Fatigue test specimens

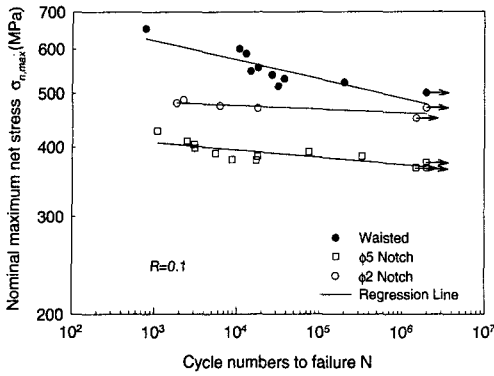


Fig. 8 Stress-life curve for AS4/PEEK[-45/0/+45/90]_{2s}

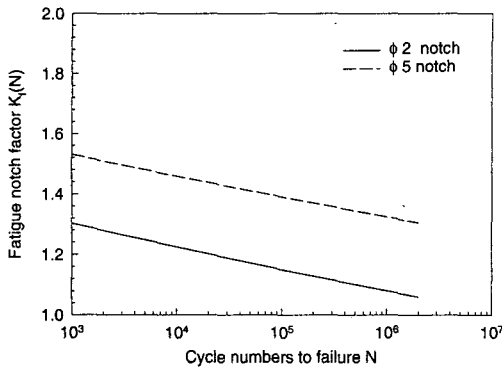


Fig. 9 Fatigue notch factor for AS4/PEEK [-45/0/+45/90]_{2s}

피로강도는 전 수명영역에서 저하되고 있으나, 2mm 원형노치재의 경우에는 짧은 수명영역에서는 재료강도가 현저하게 저하하나, 수명이 길어지면 평활재의 강도와 비슷한 양상이 되고있다.

Fig. 9는, 동일한 피로수명에 대해 평활시험편과 노치시험편의 피로강도비, 즉 피로노치계수(fatigue notch factor, 엄밀하게는 피로강도 감소계수)를 피로수명에 대해 나타낸 것이며, 그림중의 실선 및 점선은 식 (2)~(4)로부터 다음과 같이 얻어진 것이다.

φ2mm 노치시험편의 피로노치계수

$$K_{f2}(N) = 1.57N^{-0.027} \quad (5)$$

φ5mm 노치시험편의 피로노치계수

$$K_{f5}(N) = 1.77N^{-0.021} \quad (6)$$

피로노치계수는 피로수명이 짧은 경우에 높고, 피로수명의 증가에 따라 감소하는 형태가 되고 있으며, 지름 5mm 원형노치재 경우의 피로노치계수가 지름 2mm 원형노치재의 경우보다 약 0.2 정도

높다. 이러한 AS4/PEEK재료의 피로노치계수 결과는 금속재료의 경우와 매우 대조적이다.

일반적으로 금속재료의 경우 응력진폭이 큰, 피로수명이 짧은 영역에서는, 소성변형에 의해서 응력집중현상이 완화되기 때문에 피로노치계수는 작아지고, 응력진폭이 작아 수명이 길어지면 응력집중효과가 커져, 피로노치계수가 커지는 것이 보통이며, 또한 일반적으로 응력집중계수가 큰 경우 피로노치계수도 크다.⁽¹⁹⁾

복합재료에서의 Fig. 9와 같은 피로노치계수의 거동은, 일찌기 김정규-김도식⁽²⁰⁾이 Glass/Epoxy 에 대한 연구에서 보고하고 있어, 복합재료 특유의 일반적인 특성으로 추측된다.

원형노치 크기의 영향에 관해서는 이미 언급한 바와 같이, 원형노치의 지름이 클수록 피로강도는 저하한다. 한편, 정적강도에 관해서는 원형노치의 지름이 클수록 강도가 저하하며, 그 이유로서는 응력집중영향역이 커지기 때문이라는 결과가 Tan,⁽²¹⁾ 김정규-김도식,⁽²²⁾ 김형근 등⁽²³⁾의 열경화성 복합재료의 연구에서 얻어지고 있다.

AS4/PEEK 열가소성 복합재료의 정적파괴강도에 대한 원형노치 크기의 영향에 관해서는 본 연구에서는 수행하지 않았으며, 또한 참고할 다른 연구결과도 당장은 없으나, 이상 연구결과들을 종합해 보면, 섬유강화 복합재료의 경우에는 열경화성, 열가소성에 관계없이 정적 및 피로강도에 미치는 노치의 영향에 있어서는 응력집중계수의 크기와 함께 응력집중 영향역의 크기 또는 응력구배도 금속재료에 비하여 훨씬 중요한 인자라는 것을 어느정도 알 수가 있다.

AS4/PEEK 열가소성재료에서의 노치의 피로강도에 미치는 영향에 관해서는 피로파손기구와 관련하여 상세히 검토할 필요가 있을 것이다. 피로파손 기구에 관해서 본 연구에서는 미시적 관찰을 포함한 체계적인 검토를 수행하지 않아 명확한 설명은 어려우나, Simonds-Bakis-Stinchomb,⁽¹³⁻¹⁵⁾ Kellas 등⁽²⁴⁾에 의하면, Fig. 9의 결과와 같이, 피로수명이 짧은 경우 피로노치계수 값이 크고, 수명이 길어지면 피로노치계수가 감소하는 것은, 본 재료와 같은 고인성 복합재료의 경우에는 반복하중의 크기에 따라서 손상영역의 진전모양에 크게 차이가 나기 때문이라는 설명이다. 즉 재료가 고 인성재료인 경우에는, 하중진폭이 커지면 응력집중으로 인해 응력이 매우 높아져, 탄소섬유가 파단하면서 손상영역이 하중방향에 수직으로 진전하게 되고, 계속 Mode I 형식의 균열이 진전하는 형태가 되어, 응력집중의 영향이 비교적 오래 계속된다. 반면, 하중진폭이 작은 경우(수명이 긴 경우)에는 응력집중이 있더라도 국부응력이 비교적 낮으므로, 탄소섬유의 파단 보다는 되풀이 하중에 의한 모재에서의 균열발생, 모재와 섬유의 분리, 층간분리 등

이 일어나, 노치에 의한 응력집중이 비교적 빨리 완화되어, 응력집중의 영향이 그다지 크게 나타나지 않게 되며, 손상영역은 하중방향으로 진전한다.

4.3 강성변화와 피로수명의 관계

복합재료에서의 피로손상의 정도는 시편의 강성과 밀접한 관계가 있는 탄성계수, 또는 피로하중 부하 후의 정적강도, 즉 잔류강도의 변화를 측정하여 평가하는 방법이 있으며, 이외에 피로시험 시작시를 기준으로, 어떤 시점까지의 일방향 피로 변형을 포함한 전체 변형에 대한 시컨트(secant)계수를 평가하는 피로계수법⁽²⁵⁾ 등이 있다. 본 연구에서는 측정이 가장 간편한 탄성계수의 변화를 측정하기로 하였다.

변위는 변위계를 사용하여 측정하였으며, 표점거리는 80mm와 5.7mm 두 가지를 사용하였다.

Fig. 10은 허리모양형 평활시험편의 하중되풀이수에 따르는 강성변화를 나타낸 것으로, Fig. 10 (a)는 표점거리가 80mm인 경우, Fig. 10 (b)는 표점거리가 5.7mm인 경우이며, Fig. 10 (c)는 가로축을 수명비 n/N_f 로 하여 표시한 것이다.

파단까지의 강성변화는 표점거리가 80mm인 경우, 수명에 관계없이 최대 2%, 표점거리가 5.7mm인 경우에는 4% 정도로, 매우 작은 것을 알 수가 있다. 전체적인 강성변화가 작아 명확하지는 않으나, 피로에 의한 강성저하는 결보기상 수명비에 대해 대체로 선형적이다.

Henaff-Gardin과 Lafie-Frento⁽¹²⁾가 단불이 평활(dog-bone)시험편을 사용하여 AS4/PEEK 재료의 피로손상을 X선 촬영법(X-ray radiography)으로 관찰한 결과에 의하면 최종파손 직전까지 피로손상이 측정되지 않고있다.

이상의 결과로부터, 평활재의 경우 피로손상은 매우 국부적으로 발생하며, 거시적인 강성변화로서 파악하기는 어렵다는 것을 알 수가 있다.

Fig. 11은 지름이 5mm인 원형노치재에 대한 결과로서, Fig. 11 (a)는 표점거리가 80mm인 경우, Fig. 11 (b)는 표점거리가 5.7mm인 경우이며, Fig. 11 (c)는 가로축을 수명비 n/N_f 로 하여 표시한 것이다. 파단까지의 강성변화는, 표점거리가 80mm인 경우 10% 정도, 표점거리가 5.7mm인 경우는 수명이 짧은 경우 45% 정도, 수명이 긴 경우에는 20% 정도로 비교적 크다.

수명비에 따르는 강성변화는 표점거리가 80mm인 경우, 선형적으로 나타나고 있으나, 표점거리가 5.7mm인 경우는 응력레벨에 따라 변화양상이 다르다. 수명이 짧은 경우, 강성변화가 현저히 나타나는 수명비 영역은 응력이 높을수록 작아 최대응력이 410MPa일 때는 $n/N_f=15\sim30\%$ 정도이며 최

대응력이 380MPa일 때는 $n/N_f=40\sim60\%$ 정도이다.

한편 응력이 낮아 수명이 긴 경우에는 수명비가 매우 작은 시점($n/N_f < 2\sim3\%$)에서 강성변화가 나타나기 시작하여, 급격히 저하한 후, 그 이후는 강성이 거의 변하지 않는 양상이 된다. 노치가 있는 경우에는 특히 손상이 노치부근에 집중하게 되므로, 강성검출을 위해서는 표점거리가 충분히 작은 것이, 감도가 높아 하중되풀이에 따르는 변화도 비교적 잘 검출할 수가 있어, 바람직하다.

Fig. 12는 지름이 2mm인 원형노치에 대한 결과로서, 표점거리가 5.7mm인 경우이다. 이 경우에도

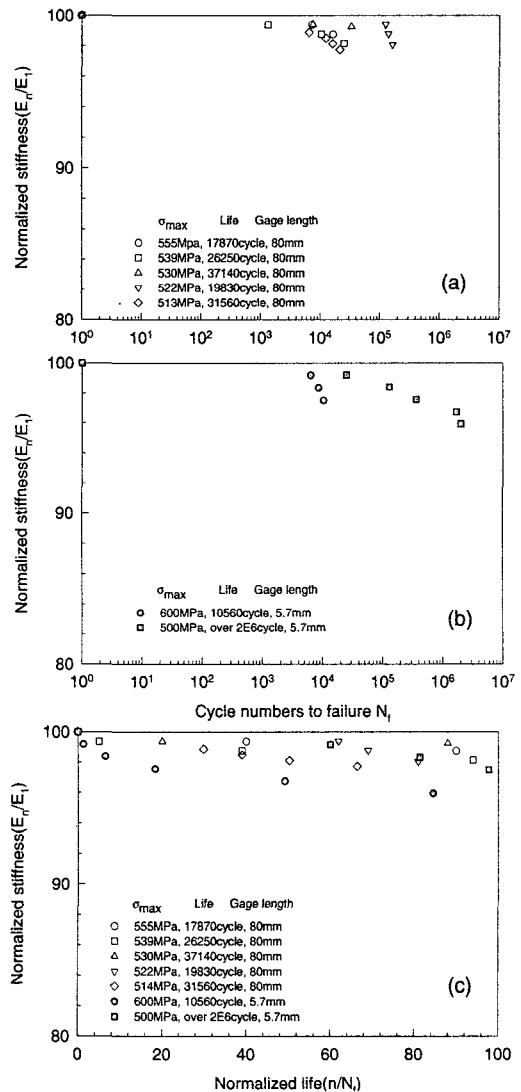


Fig. 10 Stiffness degradation of waisted specimens (AS4/PEEK[-45/0/+45/90]_{2s})

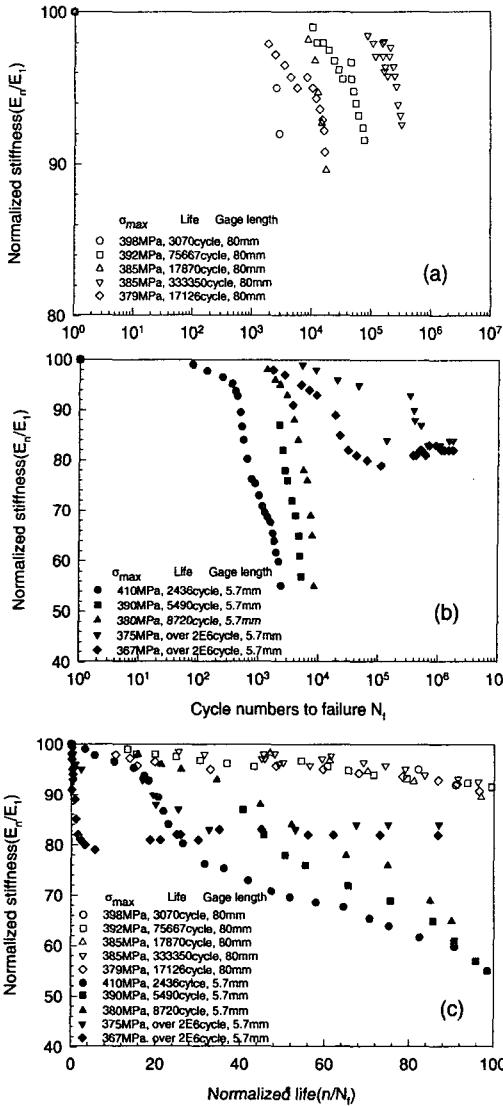


Fig. 11 Stiffness degradation of 5mm diameter hole notched specimens (AS4/PEEK[-45/0/+45/90]_{2s}).

Fig. 11 (b)의 경우와 거의 마찬가지로 파단까지의 강성변화는 최대 45% 정도가 되고 있다. 지름 5mm 원형노치의 경우와 다른점은 강성변화가 매우 빠른 시기, 거의 피로수명의 초기단계에서, 나타나기 시작하고 있다는 점으로, 그 이후의 강성변화 양상은, 지름 5mm 원형노치의 경우와 거의 비슷하다.

Fig. 11 (b), Fig. 12로부터 알 수 있는 바와 같이, 강성변화가 비교적 크게 검출되는 경우에도, 수명에 따르는 강성변화는 응력크기에 의존하고 있어, 강성변화를 사용하여 피로손상을 일의적(一意的)으로 평가하기에는 어려운 문제가 있다.

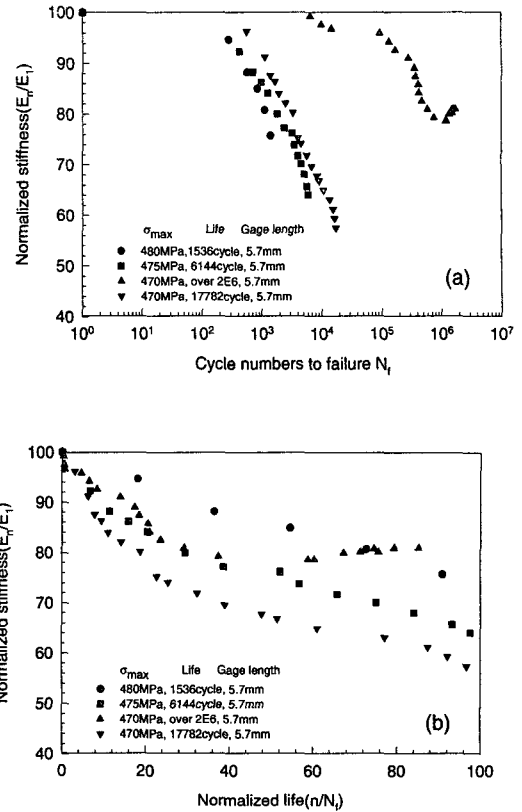


Fig. 12 Stiffness degradation of 2mm diameter hole notched specimens (AS4/PEEK[-45/0/+45/90]_{2s}).

또한 Fig. 11 (b)와 Fig. 12로부터, 피로수명이 거의 같은 경우, 피로손상은, 응력집중계수가 큰 지름 2mm 원형노치인 경우가 일찍 발생하고 있어, 노치의 영향은 피로손상 발생과 진전 기간에 따라 달라, 노치가 큰 경우 피로손상진전이 더욱 빠르다는 것을 알 수가 있다. 따라서 복합재료에서의 응력집중의 영향을 검토할 때에는 피로손상 발생과 진전 기간을 나누어서 생각하는 것이 합리적일 것이다.

4.4 AS4/PEEK 열가소성 복합재료와 Graphite/Epoxy 열경화성 복합재료의 피로강도 비교

Fig. 7 (c)에 제시한 지름 5mm 원형노치가 있는 Graphite/Epoxy[-45/0/+45/90]_s의 시험편에 대한 피로 시험결과를 AS4/PEEK[-45/0/+45/90]_{2s}의 결과와 함께 Fig. 13에 나타내었다.

수명이 긴 영역에서의 피로강도는 AS4/PEEK의 경우가 Graphite/Epoxy보다 높아, $N=2 \times 10^6$ 수명에 대한 피로강도는 약 20% 높다. 그러나 수명이 10^4 이하가 되는 영역에서는 Graphite/Epoxy가 AS4/PEEK와 피로강도가 거의 같거나 약간 높아지는

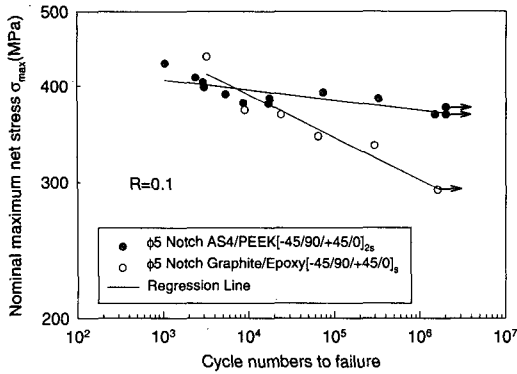


Fig. 13 Stress-life curve for 5mm diameter hole notched specimens AS4/PEEK[-45/0/+45/90]_{2s} and 5mm diameter hole notched specimens Graphite/Epoxy[-45/0/+45/90]_s.

경향이 있다.

이상과 같은 강도의 차이는 각 재료에서의 피로파손기구와 관련하여 어느 정도 설명이 가능할 것이다. 이미 언급한 바와 같이 AS4/PEEK인 경우, 응력이 낮은 경우에는 모재의 균열발생, 모재와 섬유 사이의 분리, 층간분리에 의해 파손되며, 응력이 높아지면 강화섬유가 파단되어 손상영역이 하중방향에 수직으로 진전하여 파손된다. 한편 Graphite/Epoxy의 경우는 모재가 일반적으로 취성이 강하므로, 전 수명영역에 걸쳐 모재의 균열 및 층간분리에 의해서 파손이 일어난다고 알려져 있다.^(13,26)

이상에서 알 수 있는 바와 같이, 응력이 낮은 경우에는, 어느 재료나 모재의 강도에 의해 전체의 피로강도가 지배되므로, 이 경우에는 모재의 강도가 높은 AS4/PEEK^(27,28)가 Graphite/Epoxy보다 피로강도가 높게 된다. 한편 응력이 높아지면 AS4/PEEK의 경우에는 이미 설명한 바와 같이 강화섬유가 파단 되어 손상영역이 하중방향에 수직으로 진전하여, 응력집중의 영향이 비교적 오래 계속되는데 비해, Graphite/Epoxy의 경우에는 응력이 높은 경우에도 모재의 균열 및 층간 분리가 주로 일어나, 응력집중을 완화시켜, 응력집중효과를 감소시키므로, 경우에 따라 AS4/PEEK에 비해 피로강도가 높아진다고 생각할 수가 있다. 더욱 상세한 이유에 대해서는 체계적인 연구가 필요할 것이나, 복합재료의 선택에 있어서는, 대상이 되는 응력레벨, 피로수명영역등에 관해서 충분히 고려할 필요가 있다.

5. 결론

고인성 재료인 PEEK를 모재로 한 AS4/PEEK 복합재료에 대해 피로시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 응력집중에 비교적 민감한 AS4/PEEK 재료의 평활 시험편 형상으로는 탭부분과 단봉이부분에서 응력집중이 크게 발생하는 직사각형과 단봉이 평행부형은 적합하지 않으며, 최소단면부위 부근에서의 응력변화를 되도록 적게, 곡률반경은 가능한 크게 한 허리모양형이 적합하다.

(2) 원형노치가 있는 경우, 응력집중계수가 큰, 지름 2mm 원형노치재의 피로강도가 응력집중계수가 낮은, 지름 5mm 원형노치재의 피로강도보다 높다. 또한 피로노치계수는 피로수명이 짧은 경우에 높고 피로수명의 증가에 따라 감소하였다. 이러한 결과는 금속재료의 경우와 매우 대조적이다.

(3) 표점거리를 짧게(5.7mm)하여 강성변화를 측정하였을 때, 평활시험편의 경우 파손될 때까지의 변화는 최대 4%였으며, 원형노치 시험편의 경우에는 파손될 때까지의 변화는 최대 45%가 되었다. 한편, 수명에 따르는 강성변화는 응력크기에 의존하고 있어 강성변화를 사용하여 피로손상을 일의적(一意的)으로 평가하기에는 어려운 문제가 있다.

(4) 원형노치가 있는 AS4/PEEK[-45/0/+45/90]_{2s} 열가소성 복합재료와 Graphite/Epoxy[-45/0/+45/90]_s 열경화성 복합재료의 피로강도를 비교한 결과, 수명이 긴 영역에서의 피로강도는 AS4/PEEK의 경우가 Graphite/Epoxy보다 높으며, $N=2 \times 10^6$ 수명에 대한 피로강도는 약 20% 높다. 그러나 수명이 10^4 이하가 되는 영역에서는 Graphite/Epoxy가 AS4/PEEK보다 피로강도가 거의 같거나 약간 높아지는 경향이 있다.

후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구사업(KOSEF 89-04-05-02)에 의해서 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한 복합재료 적층판 제작을 도와준 한국과학기술원 항공우주공학과 홍창선 교수님 연구실에 심재열 박사님에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Nisitani, H., Noguchi, H., Yamaguchi, T. and Kim, Y.H., 1991, "Fatigue Strength of Plain and Notched Specimens of Thermoplastics (In the Case of Polyethe

- retherketone)," *Trans. Jpn. Soc. Mech. Engrs A*, Vol. 57, No. 540, pp.1659~1699.
- (2) Nisitani, H., Noguchi, H. and Kim, Y.H., 1992, "Evaluation of Fatigue Strength of Plain and Notched Specimens of Short Carbon-Fiber Reinforced Polyetheretherketone in Comparison with Polyether etherketone," *Engng Fract. Mech.*, Vol. 43, No. 5, pp. 685~705.
- (3) Nisitani, H., Noguchi, H. Kim, Y.H. and Yamaguchi, T., 1992, "Fatigue Strength of Plain and Notched Specimens of Short Carbon- Carbon Fiber Reinforced Poly-Ether-Ether-Ketone (In Comparison with Poly-Ether-Ether-Ketone)," *J. Soc. Mat., Japan*, Vol. 41, No. 464, pp. 740~745.
- (4) Noguchi, H., Nisitani, H., Kim, Y.H. and Yamaguchi, T., 1992, "Torsional Fatigue Process in Short Carbon-Fiber Reinforced Polyamid 6.6 (Comparison with Fatigue of Rotating Bending)," *Trans. Jpn. Soc. Mech. Engrs A*, Vol. 58, No. 553, pp. 1555~1560.
- (5) Nisitani, H., Noguchi, H. and Kim, Y.H., 1993, "Fatigue process in Short Carbon-Fiber Reinforced Polyamide 6.6 under Rotating-Bending and Torsional Fatigue," *Engng Frac. Mech.*, Vol. 45, No. 4, pp. 497~512.
- (6) Noguchi, H. Nishizawa, A., Nisitani, H. and Kim, Y.H., 1994, "Miner's Rule for Fatigue Life of Short Carbon Fiber Reinforced Poly-Ether-Ether-Ketone," *J. Soc. Mat., Japan*, Vol. 43, No. 489, pp. 672~678.
- (7) Noguchi, H., Kim, Y.H. and Nisitani, H., 1995, "On the Cumulative Fatigue Damage in Short Carbon Fiber Reinforced Poly-Ether-Ether-Ketone," *Engng Frac. Mech.*, Vol. 51, No. 3, pp. 457~468.
- (8) Tai, N.H., Ma, C.C.M. and Wu, S.H., 1995, "Fatigue Behavior of Carbon Fiber/PEEK Laminate Composites," *Composites*, Vol. 26, No. 8, pp. 551~559.
- (9) Im, K.H., Kim, J.H. and Yang, I.Y., 1998, "A Study on Residual fatigue Bending Strength and Damage Behavior of CFRP Composites Subjected to Impact Loadings," *KSME Int. J.*, Vol. 12, No. 1, pp. 50~57.
- (10) Song, D.Y. and Otani N., 1998, "Approximate Estimation of Fatigue Strength of Polymer matrix Composites by Material Properties," *Material Science and Engineering A*, Vol. 254, pp.200~206.
- (11) Curtise, D.C., Moor, D.R. and Zahlan, N., 1988, "Fatigue Testing of Multi-Angle Laminates of CF/PEEK," *Composites*, Vol. 5, No. 6, pp. 446~452.
- (12) Henaff-Gardin, C and Lafie-Frento, M.C., 1992, "Fatigue Behavior of Thermoset and Thermoplastic Cross-Ply Laminates," *Composites*, Vol. 23, No. 2, pp. 109~116.
- (13) Simonds, R.A. and Bakis, C.E. and Stinchomb, W.W., 1989, "Effects of Matrix Toughness on Fatigue Response of Graphite Fiber Composite Laminates," *ASTM STP 1012*, pp. 5~8.
- (14) Bakis, C.E., Simonds, L.W. and Stinchomb, W.W., 1990, "Matrix Toughness, Long-Term Behavior and Damage Tolerance of Notched Graphite Fiber-Reinforced Composite Materials," *ASTM STP 1059*, pp. 349~370.
- (15) Simonds, R.A. and Stinchomb, W.W., 1989, "Response of Notched AS4/PEEK Laminates to Tension/Compression Loading," *ASTM STP 1044*, pp. 133~145.
- (16) Oh, C.H., Earmme, Y.Y. and Song, J.H., 1997, "Automated Real-Time Measurements of Fatigue Crack Length and Crack Opening Load Using Unloading Elastic Compliance Method," *Int. J. of Fatigue*, Vol. 19, No. 2, pp. 169~176.
- (17) Peterson R.E., 1974, *Stress Concentration Factors*, John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 37.
- (18) Tan, S.C., 1988, "Finite-Width Correction Factors for Anisotropic Plate Containing a Central Opening," *J. of Composite Materials*, Vol. 22, pp. 1080~1097.
- (19) Dowling, N.E., 1993, *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 408~411.
- (20) 김정규, 김도식, 1993, "Glass/Epoxy 복합재료의 피로강도평가 및 피로수명예측," 대한기계학회 논문집, 제7권, 제10호, pp. 2475~2482.
- (21) Tan, S.C., 1989, "Mixed-Mode Fracture of Notched Unidirectional and Off-Axis Laminates under Tensile Loading," *J. of Composite Materials*, Vol. 23, pp. 1083~1105.
- (22) 김정규, 김도식, 1992, "원공을 가진 Glass/Epoxy 복합재료의 노치강도 및 파손조건," 대한기계학회 논문집, 제16권, 제7호, pp. 1285~1293.
- (23) 김형근, 황운봉, 한경섭, 1991, "적층판 복합재료의 원형노치에 의한 노치강도," 한국항공우주학회지, 제19권, 제3호, pp. 41~51.
- (24) Kellas, S., Morton, J. and Curtis, P.T., 1991, "A Characteristic Fatigue Parameter for Notched Composites," *Int. J. of Fatigue*, Vol. 13, No. 1, pp. 35~43.
- (25) Hwang, W. and Han. K.S., 1986, "Fatigue of Composites-Fatigue Modulus Concept and Life Prediction," *J. of Composite Materials*, Vol. 20, pp. 154~165.
- (26) Daken, H.H. and Mar, J.W., 1985, "Splitting Initiation and Propagation in Notched Unidirectional Graphite/Epoxy Composites Under Tension-Tension Cyclic Loading," *Composite Structures*, Vol.4, pp. 111~133.
- (27) 日本複合材料學會, 1989, 複合材料ハソトブック, 日刊工業新聞社, 東京, pp. 243.
- (28) 成澤郁夫, 1986, プラスチックの強度設計と選び方, 工業調査會, 東京, pp. 15.