

인공발(Prosthetic Foot) 스프링용 유리섬유강화 적층재의 적층배향에 따른 층간분리거동 해석

송삼홍[†] · 김철웅^{*}

(2002년 10월 10일 접수, 2003년 2월 28일 심사완료)

Analysis of Delamination Behavior on the Stacking Sequence of Prosthetic Foot Keel in Glass Fiber Reinforced Laminates

Sam-Hong Song and Cheol-Woong Kim

Key Words: Prosthetic Foot(인공발), Energy Storing Spring(에너지저장 스프링), Glass Fiber Reinforced Plastics(유리섬유강화 플라스틱, GFRP), Prosthetic Foot Fatigue Tester(인공발 피로시험기, PFFT), Stacking Sequence(적층배향), Delamination Growth Rate(층간분리성장률, dA_D/dN), Delamination Stress Intensity Factor Range(층간분리 응력확대계수범위, ΔK_{Del})

Abstract

It is considered that the application of advanced composite materials to the prostheses for the disables is important to improve their bio-mechanical performance. Particularly, energy storing foot prosthesis is mostly important to restore gait ability of the disables with low-extremity amputation since it could provide propulsion at terminal stance enhancing the disables ability to walk long distance even run and jump. Therefore, the energy storing spring of prosthetic foot keel under cyclic bending moment use mainly of high strength glass fiber reinforced plastic. The main objective of this study was to evaluate the stacking sequence effect using the delamination growth rate(dA_D/dN) of energy storing spring in glass fiber reinforced plastic under cyclic bending moment. The test results indicated that the shape of delamination zone depends on stacking sequence in GFRP laminates. Delamination area(A_D) turns out that variable types with the contour increased non-linearly toward the damage zones.

1. 서론

최근 생체공학 및 재활의료공학에 대한 연구는 복합재료의 발달과 더불어 급속한 발전을 거듭하고 있다. 현재 재활의료기구로 활용되는 대표적인 제품으로는 하퇴 및 대퇴의지, 상완의수, 인공발 그리고 보조기 등이 있다. 이러한 재활의료기

구 중 특히 인공발의 경우, 체중과 족부운동으로 인한 다양한 형태의 하중이 작용하고 이러한 하중의 지속적인 작용으로 인공발을 구성하는 재료는 피로파손이 발생할 수 있다. 따라서 인공발에 사용되는 복합재료의 피로거동 연구는 매우 중요하다. 하지만 국내에서 수행된 보행운동 및 인공발에 관련된 연구는 대부분 기구학 및 운동학적 관점이 연구의 주류를 이룬다. 그 예를 들면 다음과 같다. Lee 등⁽¹⁾은 유한요소해석과 다구찌 방법을 이용하여 에너지 저장형 의족의 형상을 설계하였다. 또한, 장애인의 보행특성을 고려하여 의족보행 시물레이션을 구현하고 에너지 저장형

[†] 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : shsong@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3353 FAX : (02)921-8532

^{*} 회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

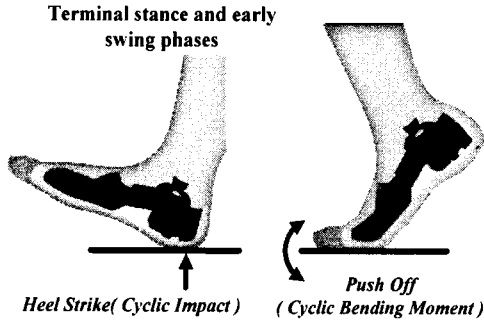


Fig. 1 Applied cyclic impact load and bending moment during the amputee's gait

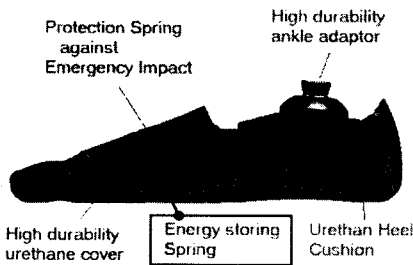


Fig. 2 Element of prosthetic foot in composite materials

의족의 성능 평가법을 제시하였다. Kim 등⁽²⁾은 인간의 보행운동을 모사한 이족 보행로봇의 제작 최적화에 관한 연구에서 시간분배의 최적화를 통해 다리 관절부 토크변화율을 최소화하는데 성공하였다. Youm⁽³⁾은 국내에서 진행되는 의용로봇 및 지능형 의수족에 관한 포괄적인 연구내용을 소개한 바 있다. 이처럼 국내에서 수행된 대부분의 의수족 및 인공발 관련 연구가 운동학적 관점에 중심을 두고 있다. 따라서 인공발에 적용되는 핵심 부품의 피로거동 연구는 매우 미흡한 실정이다.

보행에 따른 인공발 각 부위에 걸리는 하중의 형태는 다양하지만 대표적인 하중형태를 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 족부운동시 인공발은 체중의 순간중심이동으로 인한 지속적이고 반복적인 부하가 작용한다. 특히, 인공발의 뒤꿈치에서는 반복적인 충격하중을 받게 되고 앞꿈치에서는 반복적인 굽힘 모멘트를 받게 된다. 따라서 반복되는 굽힘, 압축, 충격 등의 피로에 대한 저항력이 강한 재료의 선택이 무엇보다 필수적이므로 Fig. 2와 같이 인공발을 구성하는 각 부품들은 복합재

료를 사용하고 있다. 특히, 인공발에서 가장 핵심 부품인 에너지저장 스프링(energy storing spring)은 현재 탄소섬유나 유리섬유계통의 복합재료로 제작되고 있는 실정이다. 따라서 에너지저장 스프링이 주로 받는 하중 형태인 반복-굽힘 모멘트 하에서의 유리섬유강화 플라스틱(이하 GFRP)의 피로거동 연구가 수행되어야 한다. 또한, 강한 방향성을 나타내는 GFRP는 적층배향에 따라 피로거동 및 층간분리 특성이 크게 변화하므로 이에 따른 연구도 수반되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 인공발용 에너지 저장 스프링의 피로거동을 고찰하기 위해 본 연구그룹에서 직접 개발한 인공발용 피로 시험기(Prosthetic Foot Fatigue Tester, 이하 PFFT)를 이용하여 인공발 에너지저장 스프링의 운동형태를 모사하였다. GFRP 적층재의 피로거동은 균열이 존재하지 않고 층간분리만 나타나는 경우가 대부분이다. 또한, 층간분리의 형태는 적층배향에 의존적이다. 따라서 기존의 da/dN 과 ΔK 의 관계로 GFRP 적층재의 피로거동을 해석하는 것은 바람직하지 않다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 이상의 내용들을 다음과 같이 고찰하였다. 첫째, Paris 식⁽⁴⁾을 변형한 층간분리성장률(dA_D/dN)과 층간분리 응력확대계수범위(ΔK_{Del})의 제안. 둘째, 고전적층이론(CLT)에 의한 GFRP 적층재의 응력 및 변형을 평가. 셋째, 적층배향에 따른 층간분리 성장 거동. 넷째, 층간분리면적(A_D)과 피로수명의 관계. 다섯째, 층간분리성장률과 층간분리 응력확대계수범위의 관계 해석이다.

2. GFRP 적층재의 제작 및 실험방법

2.1 GFRP 적층재의 제작

GFRP 적층재는 단방향 GFRP 프리프레그(Prepreg, S-glass, Hankook Fiber Co.)를 이용하였다. GFRP 프리프레그는 유리섬유에 에폭시 수지계가 B-stage 상태로 함침되어 있는 재료를 말한다. 이러한 GFRP 프리프레그를 $[0]_4$, $[0/90]_s$, $[+45/-45]_s$, $[0/90/+45/-45]$ 의 4가지 형태로 적층하였다. 사용된 GFRP 프리프레그의 기계적 특성은 프리프레그 공급업체에서 제공한 값으로 Table 1과 같다. 4가지 형태로 적층된 GFRP 프리프레그는 핫-플레이트 프레스를 이용하여 경화하였다. 또한, 본 연구에서는 추가적으로 DSC(Differential

Table 1 Mechanical properties of S-glass fiber

Fiber type	Ultimate tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Tensile strain to failure (%)	Density (g/cm ³)
S-glass	4600	86	5.3	2.55

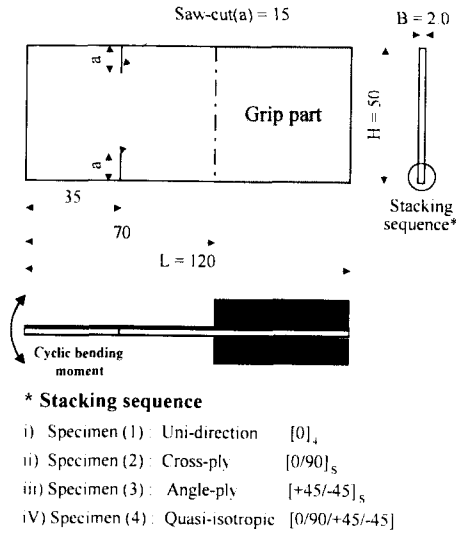


Fig. 3 Geometries of GFRP laminates (unit : mm)

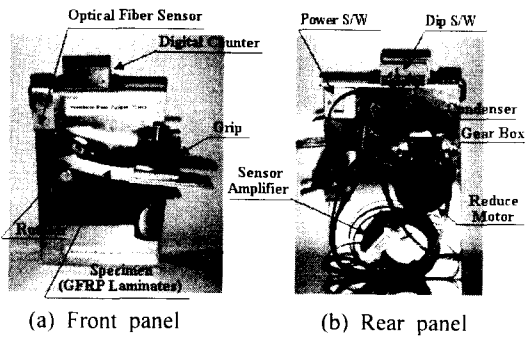


Fig. 4 Prosthetic foot fatigue tester (PFFT)

Scanning Calorimetry) 측정 결과를 반영하여 일반적인 경화사이클과 달리 후가열(post-heating)과정을 채택하였다. 따라서 화학적으로 더욱 안정된 시험편을 제작할 수 있었다.

2.2 시험편의 형상

Fig. 3은 인공발 에너지저장 스프링의 피로시험에 사용된 GFRP 적층재 시험편의 형상이다. 4가지 형태로 적층된 시험편은 휠거터를 이용하여

시험편의 양단에 예비균열(a=15mm)을 만들었다. 시험편의 물림부는 부하 시 슬립 및 이탈을 방지하고 안정된 피로거동을 유도하기 위해 시험편 전체 면적의 42%를 차지하게 설계하였다.

2.3 인공발 피로시험기(PFFT)의 설계 및 제작

기존의 피로실험장비로는 인공발을 장착한 장애자가 보행운동을 할 때 인공발 에너지저장 스프링에 가해지는 하중, 보행속도, 그에 따른 변형, 처짐(deflection) 등과 유사한 하중형태를 구현하기 어렵다. 또한, 국내에서 보유하고 있는 기존의 반복-굽힘 피로시험기(TB-10, Shimadzu Co.)는 금속재료의 반복-굽힘 피로시험에 적합하게 설계되어 있다. 따라서 본 연구그룹에서는 보행자의 족부운동에 의한 인공발 에너지저장 스프링의 부하형태, 보행속도, 처짐 등을 구현할 수 있는 시험기를 개발하였다. Fig. 4는 본 연구그룹에서 개발한 인공발 피로시험기(PFFT)의 프로토타입(prototype)이다. Fig. 2에 제시한 바와 같이 인공발 에너지저장 스프링과 앵클이 연결되는 부위를 Fig. 3의 물림부(grip part)에 해당되게 제작하고 Fig. 4 (a)의 그림에 고정하였다. 인공발이 실제 족부운동을 할 때 발생할 수 있는 변형, 처짐, 보행속도 등을 구현하기 위해 다음과 같이 설계하였다. 첫째, 에너지저장 스프링의 변형 및 처짐 설계를 Fig. 2에 제시된 바와 같이 에너지 저장 스프링(energy storing spring)과 위험충격방지 스프링(protection spring against emergency impact)이 접할 때를 임계값으로 고려하여 감속모터 축과 시험편 접촉면의 거리를 개선하였다(Fig. 4 (a)의 rotator). 둘째, 장애자의 보행속도를 구현하기 위한 설계는 인공발을 장착한 보행자가 2.8 km/h 정도의 속도로 족부운동을 수행한다고 가정하고 감속모터에 기어박스를 장착하여 적정속도를 부과하였다. 또한, 인공발이 지면에 닿는 순간의 충격값을 원주속도로 환산하여 설계에 적용하였다.

3. 변형된 Paris 식

3.1 층간분리성장률(dA_D/dN)의 평가

인공발용 에너지저장 스프링에 적용되는 GFRP 적층재는 이방성재료이므로 적층형태에 따라 피로거동이 현저한 차이를 보인다. 그 이유는 섬유의 방향성과 적층배향에 따라 변화하는 층간의

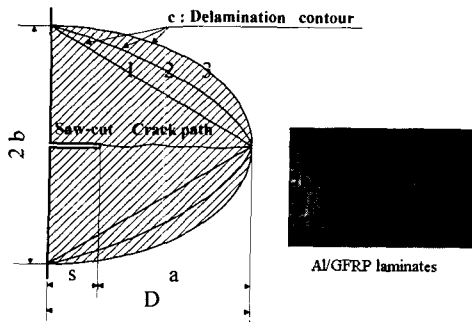


Fig. 5 Effect of delamination shape factor

응력 및 변형률 분포, 층간분리, 크레이지, 기지의 민감성, 섬유가교 등 다양한 인자들이 큰 영향을 미치기 때문이다.^(5,6) 파단형태도 크레이지, 기지의 파손, 층간분리, 섬유의 뜯김(pull-out) 등의 과정으로 진행되면서 손상부가 특정한 영역(면적)을 형성하며 진행되므로 균열과 같이 손상부를 길이로 취급하기에도 어려움이 따른다. 따라서 균열길이와 사이클의 관계(a-N) 및 균열성장률과 응력확대계수범위 등의 관계(da/dN-ΔK)로 GFRP 적층재의 피로해석을 수행할 경우 많은 오류를 범할 수 있다. 따라서, Song과 Kim⁽⁷⁾은 Al/GFRP 적층재의 층간분리연구에서 반복하중에 따라 증가하는 층간분리 성장거동을 제어할 수 있는 인자로 식 (1)과 같은 층간분리성장률(dA_D/da)을 제안하고 타당성을 검증하였다.

$$\frac{dA_D}{da} = f_s \frac{(A_D)_n - (A_D)_{n-1}}{a_n - a_{n-1}} \quad (1)$$

여기서, a는 균열길이, A_D는 층간분리영역의 면적, f_s는 층간분리 형상계수이다. 층간분리형상계수(f_s)는 Fig. 5 c의 층간분리경계에 의존적이며 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} c = 1, & f_s = b \left(1 - \frac{s}{D} \right) \\ c = 2, & f_s = b \sqrt{1 - \left(\frac{s}{D} \right)} \\ c = 3, & f_s = b \sqrt{1 - \left(\frac{s}{D} \right)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, b는 층간분리 폭의 절반, D는 층간분리 길이, s는 노치길이이다. GFRP 적층재는 Al/GFRP 적층재와 달리 균열이 생성되지 않으므로 층간분리가 균열에 의존적인 관계일 때 성립되는 식

(1), (2)에는 적용이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 사이클의 증가에 따라 GFRP 적층재의 노치 주위에 확장되는 손상영역을 각 사이클별 이미지 촬영을 하고, 이미지 분석 프로그램(SigmaScan pro)을 이용하여 손상영역의 면적을 계산하였다. 이러한 손상영역은 층간분리면적(A_D)으로 나타나므로 da/dN의 관계에서 균열길이(a) 대신 층간분리면적(A_D)를 대입하여 층간분리성장률(dA_D/dN)을 계산하였다.

3.2 층간분리 응력확대계수범위(ΔK_{Del})의 제안

층간분리를 동반하는 GFRP 적층재의 응력확대계수범위(ΔK) 거동을 더욱 명확히 해석하기 위하여 층간분리 응력확대계수범위(ΔK_{Del})를 제안하였다. 층간분리 응력확대계수범위는 응력확대계수범위의 형상계수 f(a/W)에서 균열길이(a) 대신 층간분리면적(A_D)을 대입하고 시험편의 폭(W) 대신 시험편의 관찰부 전체면적(A_{all})을 대입한 인자이다. 응력확대계수범위를 변형한 층간분리 응력확대계수범위(ΔK_{Del})는 식 (3)과 같다.

$$\Delta K_{Del} = f \left(\frac{A_D}{A_{all}} \right) \Delta \sigma \sqrt{\pi A_D} \quad (3)$$

여기서, A_D는 층간분리면적(mm²)이다. 형상계수 f(A_D/A_{all})는 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} f(A_D/A_{all}) = & \frac{\sqrt{\frac{\pi A_D}{2 A_{all}}}}{\sqrt{1 - \frac{A_D}{A_{all}}}} \left[1.122 - 0.561 \left(\frac{A_D}{A_{all}} \right) \right. \\ & \left. - 0.205 \left(\frac{A_D}{A_{all}} \right)^2 + 0.471 \left(\frac{A_D}{A_{all}} \right)^3 + 0.190 \left(\frac{A_D}{A_{all}} \right)^4 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

이상의 식을 이용하여 GFRP의 층간분리성장률(dA_D/dN)과 층간분리 응력확대계수범위(ΔK_{Del})의 관계를 고찰해 보았다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 고전적층이론에 의한 GFRP 적층재의 응력 및 변형률 평가

Fig. 3에 제시한 GFRP 적층재의 적층형태([0]₄, [0/90]_s, [+45/-45]_s, [0/90/+45/-45])에 따른 응력 및 변형률 분포 평가는 고전적층이론(CLT)을 바탕으로 수행되었고, 이의 검증을 위해 복합재료 해석

Table 2 Mechanical properties of GFRP laminates under 4 types stacking sequence

Stacking sequence	$[0]_4$	$[0/90]_s$	$[+45/-45]_s$	$[0/90/+45/-45]$
E_L (GPa)	49.33	32.27	19.94	26.89
E_T (GPa)	14.71	32.27	19.94	26.89
ν_{12}	0.30	0.14	0.47	0.28
ν_{21}	0.09	0.14	0.47	0.28
G_{12} (GPa)	6.80	6.80	14.2	10.5
k_x (1/m)	1520	1660	3964	2591
k_y (1/m)	-450.1	-379.6	-1551	-962.5
k_{xy} (1/m)	0	0	-1132	555.1
R_x (mm)	0.66	0.60	0.25	0.39
R_y (mm)	-2.22	-2.63	-0.64	-1.04
R_{xy} (mm)	∞	∞	-0.88	1.8
ϵ_x ($\times 10e-6$ S)	10	15	25	-521.502
ϵ_y ($\times 10e-6$ S)	-3	-2	-12	277.079
γ_{xy} ($\times 10e-6$ S)	0	0	0	-74.477

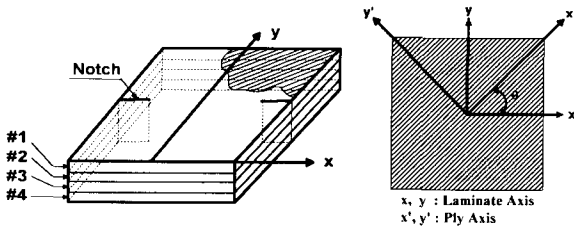


Fig. 6 Schematic of laminate axis and ply axis

프로그램(LACOM)을 이용하였다. GFRP 적층재는 섬유와 기지사이의 열팽창계수 값의 차가 크기 때문에 경화시 열응력이 발생된다. 따라서 경화 온도 292°F, 실험온도 103°F 조건에서 흡습열(hygro-thermal)을 고려하였다. 또한, 하중조건 $N_1=1,000$ [N/m], $M_1=50,000$ [Nm/m]를 적용하여 적층배향에 따른 GFRP 적층재의 물성치를 Table 2와 같이 구하였다. Table 2에서 $[0]_4$ 인 경우를 제외한 적층형태는 $E_L=E_T$, $\nu_{12}=\nu_{21}$ 를 보였다. 그러나 전단탄성계수(G_{12}), 곡률(k_{ij}), 곡률반경(R_{ij})과 변형률(ϵ_{ij})은 적층형태에 따라 다른 값을 보였다. 곡률은 $[+45/-45]_s$, $[0/90/+45/-45]$ 일 때, 변형률은 $[0/90/+45/-45]$ 일 때 각각 큰 값을 나타냈다. 이러한 결과를 인장강성(extensional stiffness, A_{ij}), 커플링강성(coupling stiffness, B_{ij}), 굽힘강성(bending

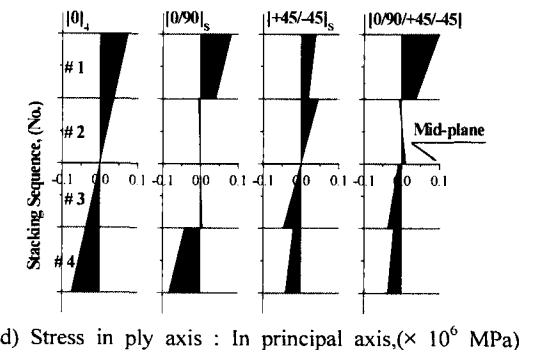
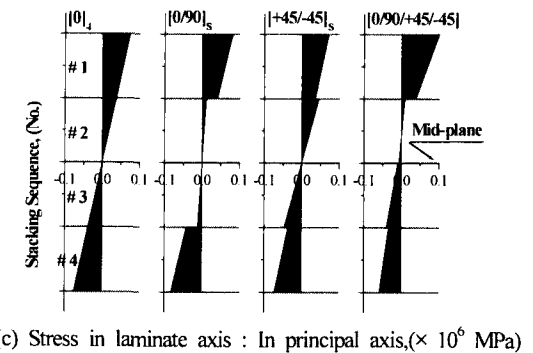
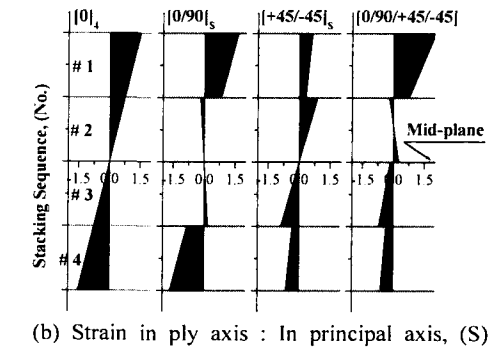
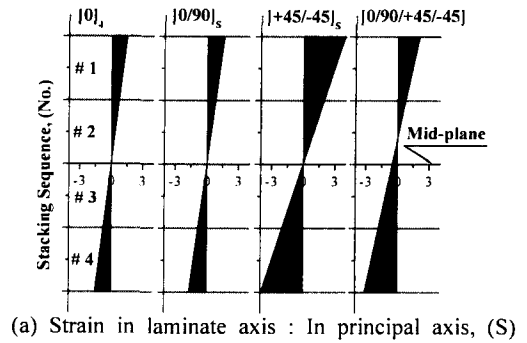


Fig. 7 Stresses and strain on the variable stacking sequence in GFRP laminates

Table 3 Number of cycles on the stacking sequence

No.	Number of cycles (No.)			
	(a)	(b)	(c)	(d)
	Uni-direction [0] _n	Cross-ply [0/90] _s	Angle-ply [+45/-45] _s	Quasi-isotropic [0/90/+45/-45]
1	100	1,000	200	200
2	500	15,000	1,000	500
3	1,000	40,000	2,000	1,000
4	2,000	60,000	3,000	2,000
5	3,000	100,000	5,000	3,000
6	4,000	140,000	15,000	4,000
7	5,000	220,000	25,000	5,000
8	6,000	260,000	30,000	7,000
9	7,000	500,000	35,000	10,000
10	8,000	-	-	-
11	9,000	-	-	-
12	10,000	-	-	-

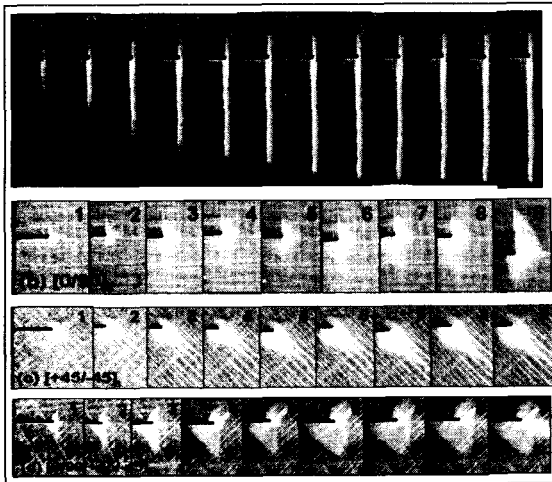
외하고 층간에서 급격한 불연속 구간을 형성했음을 관찰할 수 있는데, 특히 인접한 플라이 사이에 적층배향각 차가 클수록 플라이층에서의 변형률 구배가 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, Fig. 7(a)에서 [0/90/+45/-45]의 경우만 중간층을 기준으로 변형률이 비대칭구조를 이루고 있음을 관찰할 수 있다. 각층의 응력분포(Fig. 7 (c),(d))를 살펴보면, [0]_n의 경우를 제외하고 각각 층간에 응력구배의 차이가 심하게 나타남을 볼 수 있다. 특히 [0/90/+45/-45]는 변형률뿐만 아니라 응력분포 또한 중간층을 기준으로 비대칭구조를 나타낸다. 그 이유는 [0]_n, [0/90]_s, [+45/-45]_s의 경우, 적층형태가 대칭구조이므로 커플링강성이 $B_{ij} = 0$ 을 나타내지만 [0/90/+45/-45]인 경우, 커플링강성은 다음과 같은 값을 나타냈기 때문이다.

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} 8144 & -3701 & 2222 \\ -3701 & -742 & 2222 \\ 2222 & 2222 & -3701 \end{bmatrix} (N)$$

이러한 커플링강성 값이 [0/90/+45/-45]에 작용하여 응력분포에 지대한 영향을 미쳤으며, 그 때문에 비대칭구조는 부하가 진행될수록 불안정구조를 심화시켰다. 결과적으로, 비대칭구조는 커플링강성이 존재하기 때문에 반복-굽힘 모멘트 하에서의 GFRP 적층재의 층간분리형상과 응력확대계수범위에 지대한 영향을 미칠 것이고 적층배향에 따라 큰 영향을 받을 것으로 판단된다.

4.2 적층배향에 따른 층간분리 성장 거동

GFRP는 이방성 재료이므로 각 플라이의 적층각이 변하지 않아도 적층순서가 변하면 적층재의 강도가 변한다. 왜냐하면, 인장강성(A_{ij})은 변하지 않지만 층간수직응력(σ_z) 값이 적층재 가장자리에서 변하기 때문이다.⁽⁸⁾ Fig. 8은 [0]_n, [0/90]_s, [+45/-45]_s, [0/90/+45/-45]가 사이클 증가에 따라 변화하는 층간분리거동을 단계별로 나타낸 이미지이다. Table 3은 Fig. 8에 제시된 이미지의 해당 사이클을 나타낸 표이다. 피로수명을 살펴보면, [0]_n, [0/90/+45/-45]의 경우 1×10^4 cycles 정도의 낮은 피로수명을 보인 반면, [0/90]_s의 경우 Fig. 8의 Final Phase (b)에 제시한 바와 같이 5×10^5 cycles 이상에서도 완전파단이 일어나지 않을 만큼 긴 피로수명을 보였다. 이러한 현상을 4.1절에 언급한 적층이론 해석결과와 결부해보면, [0/90]_s



Final Phase

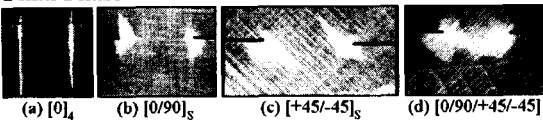


Fig. 8 Variable delamination extension near a notch in GFRP laminates during the cyclic large deformation

stiffness, D_{ij})의 결과와 조합하여 각층에 걸리는 응력 및 변형률을 구해보았다. Fig. 7은 Fig. 6에 제시한 두 가지 좌표축을 기준으로 적층형태에 따라 각층에 걸리는 응력과 변형률의 분포를 계산한 결과이다. 적층판 축 변형률(Fig. 7(a))은 적층배향과 관계없이 층간에서 연속임을 알 수 있다. 그러나 플라이층 변형률(Fig. 7(b))은 [0]_n를 제

의 경우 Fig. 7에서 시험편 중심부에 해당되는 #2, #3 플라이에 작은 값의 응력과 변형률이 존재하기 때문이라고 판단된다. 그러나 Fig. 7의 [0/90/+45/-45]의 경우 #2, #3 플라이에서 두 번째로 작은 값을 보임에도 불구하고 피로수명이 짧은 이유는 비대칭구조로 인한 커플링강성(B_{yy})의 작용으로 피로수명이 급격히 저하되었기 때문이라고 생각된다.

4.3 층간분리면적(A_D)과 피로수명의 관계

본 절에서는 Fig. 8에 제시된 바와 같이 GFRP 적층재에 균열대신 층간분리형태의 손상영역확장이 관찰되기 때문에 층간분리면적(A_D)을 인자로 적용하여 사이클과의 관계를 검토해 보았다. 그 결과는 Fig. 9와 같다. 피로수명(N)은 적층배향에 따라 많은 차이를 보였지만, 층간분리면적 증가 양상은 크게 두 가지 형태로 구분할 수 있었다. [0]_s, [0/90]_s(Fig. 9(a),(b))는 사이클이 증가할수록 층간분리면적 확장속도가 서서히 감소하는 경향을 보인다. 반면, [+45/-45]_s, [0/90/+45/-45](Fig. 9(c),(d))은 사이클이 증가할수록 층간분리면적 확장속도가 꾸준히 증가하였다. 적층배향에 따른 이러한 특이현상은 Fig. 8의 Final Phase의 결과와 연계해보면 규명할 수 있다. 즉, Fig. 8의 Final Phase (a),(b)는 층간분리의 증가방향이 주로 노치 방향에 수직인 방향으로 성장하므로 사이클이 증가하여도 시험편의 리가먼트 감소를 초래하지 않았다. 따라서 층간분리면적 확장속도가 서서히 감소하는 Fig. 9(a),(b)의 결과를 나타냈고, Fig. 8 Final Phase의 (c),(d)는 사이클이 증가할수록 층간분리가 양쪽노치방향과 평행하게 증가하므로 결국 시험편의 리가먼트를 급격히 감소시켰고, 그 결과 층간분리면적 확장속도가 꾸준히 증가하는 Fig. 9(c),(d)의 결과를 나타냈다. 층간분리면적의 확장속도는 적층배향에 크게 영향을 받는데, 층간분리 확장방향이 양쪽노치방향과 평행하게 진행되면 리가먼트가 감소되어 층간분리면적 확장속도는 꾸준히 증가하는 경향을 보이고, 층간분리 확장방향이 양쪽노치 방향과 수직하게 진행되면 층간분리면적 확장속도는 서서히 감소된다.

따라서 이러한 내용들을 종합해보면, 반복적인 큰변형이 동반되는 인공발 에너지 저장스프링의 최적 적층배향은 부하가 증가될수록 층간분리면적 증가가 저하되고 가장 우수한 피로특성을 보

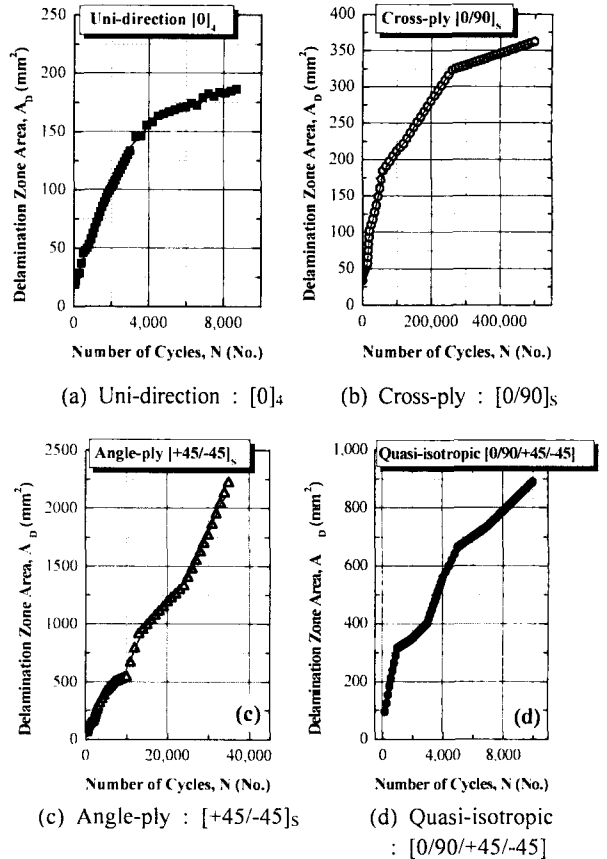


Fig. 9 Relationship between delamination zone area(A_D) and cycles(N)

유한 [0/90]_s의 경우가 최적의 적층형태라고 할 수 있다.

4.4 층간분리성장률(dA_D/dN)과 층간분리 응력확대계수범위(ΔK_{Del})의 관계

GFRP 적층재에서 층간분리의 발생은 적층재의 급격한 파손을 야기한다. 왜냐하면, 층간분리가 존재하면 적층재의 전체적인 강성이 저하하게 되고 대칭 적층판도 층간분리 이후 국부적인 비대칭을 이루므로 커플링강성(B_{yy})이 생성되기 때문이다. 이로 인해 설계하중 이하에서 전체적인 파손이 야기된다.⁽⁹⁾ 따라서 대칭구조인 [0]_s, [0/90]_s, [+45/-45]_s의 경우도 층간분리가 발생하는 순간부터는 비대칭구조를 이루며 급격한 파괴가 나타나게 된다. 또한, Fig. 8에 제시된 바와 같이 적층형태에 따라 층간분리의 형상이 달라진다. 따라서

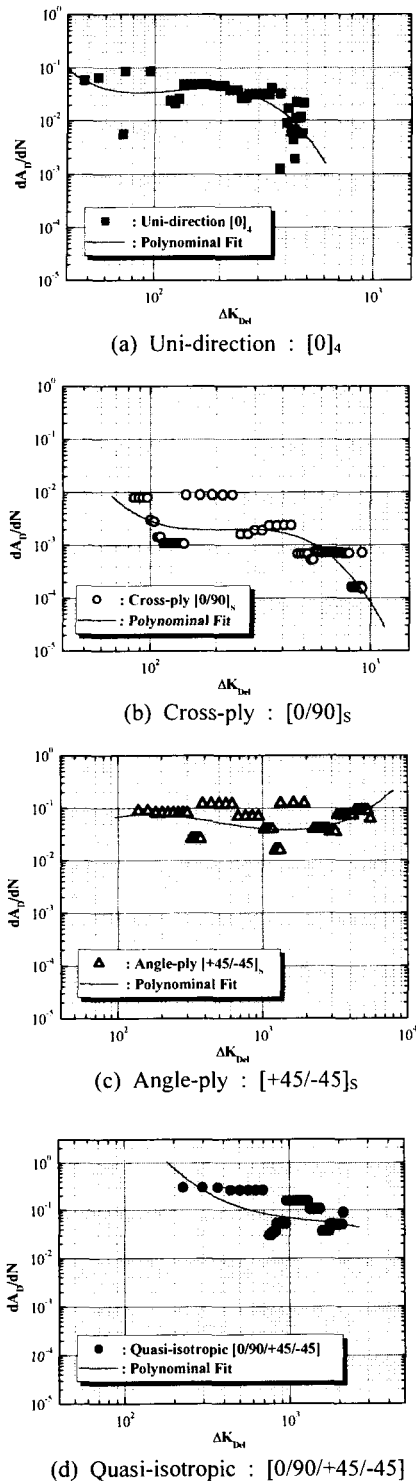


Fig. 10 Relationship between delamination growth rate (A_D/dN) and delamination stress intensity factor range (ΔK_{DeI})

본 절에서는 층간분리성장률(dA_D/dN)과 층간분리 응력확대계수범위(ΔK_{DeI})를 도입하여 적층배향에 따른 GFRP 적층재의 층간분리거동을 평가해 보았다.

Fig. 10은 층간분리성장률(dA_D/dN)과 층간분리 응력확대계수범위(ΔK_{DeI})의 관계를 나타내는 그래프이다. 전체적으로 보면, 층간분리성장률은 부하가 진행되고 층간분리 응력확대계수범위가 증가할수록 서서히 감소하는 경향을 보인다. 그러나 Fig. 10(c)는 감소하다가 다시 증가하는 특이 현상을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 $[+45/-45]$ 의 경우, 하중방향과 평행한 플라이가 존재하지 않아서 리가먼트가 작아지는 부하후반에 하중을 크게 지탱하지 못해서 층간분리성장률이 급격히 증가했기 때문이라고 생각된다. 한편, 층간분리성장률의 분포를 살펴보면, Fig. 10(a),(b)에 비해 Fig. 10(c),(d)가 약간 높게 나타났다. 즉, $[+45/-45]_s$, $[0/90/+45/-45]$ 의 경우가 $[0]_4$, $[0/90]_s$ 보다 층간분리성장 속도가 빠르다. 그 이유는 $[+45/-45]_s$, $[0/90/+45/-45]$ 의 적층형태에서는 층간분리 진행방향이 양쪽노치방향과 평행하여 리가먼트 감소를 촉진시켰고, 그 결과 층간분리 확장이 빠르게 진행되었기 때문이다. 층간분리 응력확대계수범위(ΔK_{DeI})는 $[0]_4$ 일 때 가장 작은 범위값을 나타냈고, $[+45/-45]_s$ 일 때 가장 큰 범위값을 나타냈다. 대체적으로 $10^2 \sim 10^3 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ 정도의 값을 보였다. $[+45/-45]_s$, $[0/90/+45/-45]$ 경우 층간분리 응력확대계수 값이 더 증가한 이유는 이 경우 부하후반 층간분리면적이 급속히 증가하는 경향이 나타나고, 비대칭구조가 빠르게 형성되기 때문이라고 판단된다. 이상의 내용을 정리해 보면, 인공발 에너지 저장 스프링용 GFRP 적층재의 최적 적층배향은 가장 우수한 층간분리성장률(dA_D/dN)을 나타낸 $[0/90]_s$ 임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 인공발 스프링용 유리섬유강화 적층재의 적층배향에 따른 층간분리거동을 해석하기 위해 층간분리면적(A_D), 층간분리성장률(dA_D/dN), 층간분리 응력확대계수범위(ΔK_{DeI}) 등의 인자를 제안하였다. 그리고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 적층배향이 비대칭구조일 때 커플링강성

(B_{ij}) 값이 존재하게 되고, 이로 인해 피로수명은 급격히 감소하게 된다. 따라서 [0/90/+45/-45]와 같이 비대칭구조인 경우에 피로수명은 짧게 나타났다.

(2) 층간분리 확장은 적층배향에 크게 영향을 받는다. 층간분리 확장이 양쪽 노치 방향과 평행하게 진전되는 [+45/-45]_s, [0/90/+45/-45]의 경우, 층간분리면적(A_D) 확장속도는 부하후반에도 꾸준히 증가하였고, 층간분리확장이 양쪽 노치방향과 수직하게 진전되는 [0]₄, [0/90]_s의 경우, 층간분리면적(A_D) 확장속도는 부하후반에 서서히 감소되었다.

(3) 하중방향과 평행한 플라이가 존재하지 않는 [+45/-45]_s의 경우, 부하후반 층간분리성장률(dA_D/dN)이 서서히 증가한다.

(4) [+45/-45]_s, [0/90/+45/-45]일 때 층간분리성장률(dA_D/dN)과 층간분리응력확대계수범위(ΔK_{Del})는 높게 나타난다. 왜냐하면 이 형태는 반복하중에 의해 리가먼트가 쉽게 취약해지기 때문이다.

(5) 인공발 에너지 저장 스프링용 GFRP 적층재의 최적 적층배향은 가장 우수한 피로수명(N) 및 층간분리성장률(dA_D/dN)을 나타낸 [0/90]_s임을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : R01-2001-000-00395-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Lee D. H., Jang T. S., Lee J. J. and Yoon Y. S., 2000, "A Study on the Design of the Keel in the Energy Storing Prosthetic Foot Using the Finite Element Analysis and the Taguchi Method,"

Transactions of the KSME, A, Vol. 24, No. 3, pp. 613~624.

(2) Kim Chang-Boo and Cho Hyeon-Seok, 1998, "A Study on the Trajectory Optimization Planning of Biped Walking Machine," *Journal of the KSPE*, Vol. 15, No. 3, pp. 157~167.

(3) Youm Young-Il, 2000, "Bio-Robots and Intelligent Prosthetics," *Journal the of KSPE*, Vol. 17, No. 11, pp. 36~42.

(4) Richard W. Hertzberg, 1996, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, John Wiley & Sons Inc., Philadelphia, pp. 591~606.

(5) Choi N. S. and Kinloch A. J., 1998, "Delamination Behavior of Multidirectional Laminates under the Mode I Loading," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 22, No. 3, pp. 611~623.

(6) Kim C., Kang T. J., Yook J. I. and Park J. K., 1995, "Effect of the Intra-ply Hybridization on the Mechanical Properties of Kevlar/Spectra Woven Laminated Composite," *Journal of the KSCM*, Vol. 8, No. 3, pp. 25~35.

(7) Song Sam-Hong and Kim Cheol-Woong, 2003, "The Analysis of Fatigue Behavior Using the Delamination Growth Rate(dA_D/da) and Fiber Bridging Effect Factor(F_{BE}) in Al/GFRP Laminates," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 27, No. 2, pp. 317~326.

(8) Ronald F. Gibson, 1994, *Principles of Composite Materials*, McGraw-Hill Inc., New York, pp. 34~269.

(9) Kim H. J. and Hong C. S., 1995, "Influence of Couplings on the Buckling Behavior of Composite Laminates with a Delamination," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 19, No. 2, pp. 354~362.