

적층수에 따른 GFRP 피막 Al 평활재의 저주기 피로수명 평가

명노준* · 서지혜** · 이은균** · 최낙삼***†

Low Cycle Fatigue Life Behavior of GFRP Coated Aluminum Plates According to Layup Number

Nohjun Myung*, Jihye Seo**, Eunkyun Lee**, Nak-Sam Choi***†

ABSTRACT: Fiber metal hybrid laminate (FML) can be used as an economic material with superior mechanical properties and light weight than conventional metal by bonding of metal and FRP. However, there are disadvantages that it is difficult to predict fracture behavior because of the large difference in properties depending on the type of fiber and lamination conditions. In this paper, we study the failure behavior of hybrid materials with laminated glass fiber reinforced plastics (GFRP, GEP118, woven type) in Al6061-T6 alloy. The Al alloys were coated with GFRP 1, 3, and 5 layers, and fracture behavior was analyzed by using a static test and a low cycle fatigue test. In the low cycle fatigue test, strain - life analysis and the total strain energy density method were used to analyze and predict the fatigue life. The Al alloy did not have tensile properties strengthening effect due to the GFRP coating. The fatigue hysteresis geometry followed the behavior of the Al alloy, the base material, regardless of the GFRP coating and number of coatings. As a result of the low cycle fatigue test, the fatigue strength was increased by the coating of GFRP, but it did not increase proportionally with the number of GFRP layers.

초 록: 섬유 금속 적층판(Fiber metal hybrid laminate, FML)은 금속재료와 FRP의 접합으로 기존의 금속 소재가 가지지 못했던 뛰어난 물성과 가벼운 무게로 경제적인 구조용 재료로 사용된다. 그러나 섬유의 형태와 종류, 적층 조건에 따라 물성의 차이가 크며, 파괴거동을 예측하기 어렵다는 단점이 있다. 본 논문에서는 Al6061-T6 합금에 직조형태의 유리섬유 플라스틱(GFRP, GEP118)을 적층피막한 복합재의 파손거동에 대해 연구한다. Al합금에 GFRP 1, 3, 5 겹을 피막한 3가지 조건으로 성형하고, 피막의 적층수를 변수로 정적시험과 저주기 피로시험을 병행하여 파손거동을 분석하였다. 저주기 피로시험에서는 변형률-수명 해석, 전변형률 에너지밀도법을 사용하여 분석하고, 피로수명을 예측하여 하이브리드 재료에 대한 수명예측성을 분석하였다. 인장해석 결과, GFRP 피막으로 인한 강화효과는 없었고, 피로시험시 나타나는 히스테리시스 형상은 GFRP피막 유무와 피막 수에 상관없이 모재인 Al합금의 거동을 따랐다. 저주기 피로시험 결과 GFRP의 피막으로 피로강도가 증가하였지만, GFRP의 두께에 따라 비례하여 증가하지는 않았다.

Key Words: 저주기 피로시험(Low cycle fatigue), 복합재료(Composite materials), 유리섬유강화플라스틱(Glass fiber reinforced plastic), 전변형률 에너지 밀도법(Total strain energy density method)

Received 18 October 2018, received in revised form 15 November 2018, accepted 28 November 2018

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Hanyang Univ.

**Department of Mechanical Design Engineering, Graduate School, Hanyang Univ.

***†Department of Mechanical Engineering, Hanyang Univ., Corresponding author (E-mail: nschoi@hanyang.ac.kr)

1. 서론

섬유 금속 적층판(Fiber metal hybrid laminate, FML)은 금속재료와 FRP의 접합으로 기존의 금속 소재가 가지지 못했던 뛰어난 물성과 가벼운 무게로 경제적인 구조용 재료로 사용될 수 있다. 그러나 섬유의 형태와 종류, 적층조건에 따라 물성의 차이가 크며, 파괴거동을 예측하기 어렵다는 단점이 있다. 이러한 단점에도 불구하고 균열발생 방지 및 강도의 향상을 기대하여 FRP를 금속재료의 표면에 접합하여 사용해 오고 있다.

Lin 등[1]은 Al 2024 합금을 중심으로 유리섬유/에폭시 복합재와 탄소섬유/에폭시 복합재를 샌드위치 구조로 적층한 후 편측 노치(single edge notched specimen, SEN)를 가공하여 피로 전파 거동을 평가하였다. Yoon 등[2]은 알루미늄 합금에 아라미드/에폭시 섬유를 단면/양면 적층하여 노치가 없는 평활재 시험편에 대한 피로시험을 수행하여 피로한도의 증가가 적층 각도와 적층면에 따라 영향을 받았음을 확인하였다. Vo-gelesang 등[3]은 항공기 보수용 재료로서, GLARE(Glass fiber Reinforced metal laminates)와 AR-ALL(Aramid reinforced Al Laminates)을 리벳홀 패치 방식으로 기지에 부착하여 피로, 부식, 충격 거동에 대한 영향을 연구하였다. Cortes 등[4]은 마그네슘 합금에 평직 CFRP와 GFRP를 적층하였고, 시험편 중앙에 노치를 가공하여 복합재의 바리를 관찰하였다. Kawai[5]는 알루미늄 합금에 일방향 유리섬유 복합재(Unidirection GFRP)를 배향각도별로 적층하여 노치가 없는 평활재에 대해 응력비에 따른 S-N 선도를 비교 분석하였다. Monfared 등[6]은 판형 시험편의 양쪽에 노치를 가공한 후, 강재와 탄소섬유 복합재 사이의 접착력 향상을 위한 샌드 블라스트 처리의 유무, 섬유 적층면을 단면/양면으로 적층부를 변수로 피로거동을 평가하였다. Rhee와 Kim[7]은 케블라/에폭시 프리프레그를 사용하여, CCT(Center through cracked tension) 형의 노치를 도입한 금속결합판에서의 피로수명 및 피로균열 성장거동을 패치의 형상비에 따라 시험하였다. Khan 등[8]은 아라미드 섬유와 알루미늄 합금을 재료로 하여 복합재 경화 시 금속에 생기는 인장 잔류응력을 없애기 위한 Pre-stretch 조건을 도입하여 노치가 있는 시험편의 피로 수명거동을 연구하였다. Ergun 등[9]은 알루미늄에 UD 유리섬유/에폭시 복합재를 적층하여 여러 가지 온, 습도 조건에서의 피로거동을 연구하였다. Lee 등[10]은 Al 사각관보에 GFRP를 도포하여 Al-GFRP 혼성 사각관을 제작하여 굽힘성능 및 붕괴거동을 연구하였다. Yoon 등[11]은 Al2024 판재에 카본/에폭시 라미네이트를 섬유배열 방향에 따라 2 plies로 보강하여 피로균열 지연 거동을 연구하였다. Al합금에 비해 FML 시험편은 피로균열 전파속도가 현저하게 저하되었으며, 0/90도가 ±45도 보다 지연정도가 크다고 연구하였다.

이와 같이 금속과 복합재를 결합한 하이브리드 이중재

료에 대해서 이미 많은 피로수명 연구가 수행되었다. 그러나 복합재를 피막한 수준의 금속판에 대한 피로거동 정보가 제한적이며 특히 피로 파괴거동 연구는 미비하다.

즉, 금속재료의 피로수명 예측에 사용하는 방법이 FRP로 얇게 피막한 금속재료에도 동일하게 적용 가능한지 연구가 필요하다. 또한, 인장/피로시험에서 단일재료와 복합재 피막재료의 파괴거동을 분석하여 섬유 피막 금속판의 설계시 이 결과를 반영해야 한다.

본 논문에서는 Al6061-T6 합금에 직조형태의 유리섬유 플라스틱(GFRP, GEP118)을 적층피막한 하이브리드 재료의 복합재 피막 파손거동에 대해 연구한다. 피막의 적층수를 변수로 정적시험과 저주기 피로시험을 병행하여 두 가지 파손시험에 대한 차이를 관찰하고 분석한다. 저주기 피로시험에서는 변형률-수명 해석, 전변형률 에너지밀도법[12-14]을 사용하여 분석하고, 피로수명을 예측하여 하이브리드 복합재 피막재료에 대한 수명예측성을 분석한다.

2. 실험 방법

2.1 시험편

4 mm 두께의 Al6061-T6합금 평판에 직조 형태의 유리섬유 프리프레그(GEP-118, SK chemical)를 접합하여 제작하였다. 또한, Fig. 1과 같이 Al 합금과 GFRP 계면사이에 접착 필름(bondex 206, 두께 0.1 mm)을 삽입하여 접착력을 강화시켰다. 적층 접합된 GFRP 피막은 오토클레이브를 사용한 진공백 성형법으로 경화하였다. 피로 시험편은 Al 평판에서 압연의 수직방향에 길이가 되도록 가공한 후 절단표면의 표면거칠기가 최소화되도록 샌드페이퍼로 연마처리 하였다.

시험편의 형상은 KS-B-0801 (인장시험편), ASTM E606 (피로시험편)을 기준으로 제작하였다. Al합금에 GFRP 1, 3, 5 겹을 피막한 3가지 조건으로 성형하였다. GFRP 층수에 따른 복합재의 두께와 체적율을 Table 1에 나타낸다. 본 연

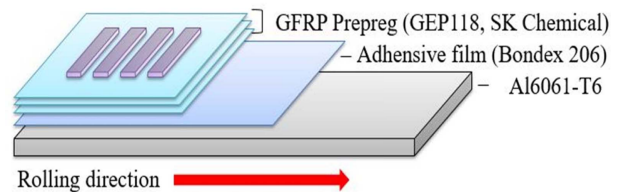


Fig. 1. Sketching order of GFRP and adhesive film

Table 1. Thickness of specimen and GFRP fraction

	Al	Al + 1 ply	Al + 3 plies	Al + 5 plies
Thickness (mm)	4	4.275 ± 0.026	4.556 ± 0.039	4.897 ± 0.106
GFRP volume fraction (%)	-	6.89	13.89	22.43

구에서 사용한 GFRP (GEP118)의 밀도는 약 1828 kg/m³으로 Al6061의 밀도인 2700 kg/m³의 약 67% 수준이다.

2.2 인장 및 피로시험

인장 및 피로시험은 상온에서 유압식 만능재료시험기 (INSTRON 8516)로 진행하였으며, 연신율계(INSTRON 3542-025M)를 시험편에 부착하여 변형률을 측정하였다.

저주기 피로시험은 변형률비($R = \epsilon_{min}/\epsilon_{max}$) 0, 반복주파수 1 Hz의 일정한 속도로 sin 파형 반복변형으로 진행했다. 전 변형률($\Delta\epsilon$) 조건은 $\Delta\epsilon/2 = 0.15, 0.20, 0.30, 0.50\%$ 으로 좌굴이 발생하지 않는 범위로 설정하였다. 시험편의 파단수명은 최대 응력진폭의 75%가 되는 시점으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Al합금과 GFRP 피막재의 인장 변형거동

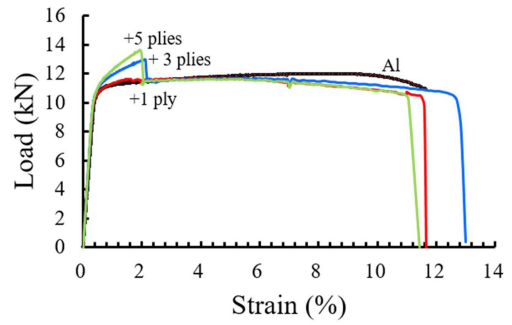
Al합금 평판은 압연방향에 따라 물성의 차이가 있다. 시험편의 기계적 물성을 조사하기 위해 압연의 수직과 평행 방향의 시험편을 제작하여 인장시험을 수행하였다. 각 방향에 따라 9개의 시험편을 시험한 후 평균값과 표준편차를 Table 2에 나타내었다. 압연의 수직방향이 약간 더 취성적인 경향을 보여 복합재 피막의 강화효과를 분석하기 위한 피로시험 방향으로 선택하였다.

Al합금과 GFRP 복합재 피막 후의 인장시험 결과를 Fig. 2에 나타낸다. Fig. 2(a)은 하중기준의 인장시험 결과로 + 1 ply는 강화효과가 거의 없었으며 + 5 plies는 한층 높은 하중까지 상승하였다가 약 2% 변형률에서 피막 층이 파손되면서 Al합금의 인장하중 곡선에 귀착되었다. 복합피막층이 먼저 파손되고 Al합금만 남게되면서, 피막층에서 먼저 파손이 발생하고 있다고 추정하였다.

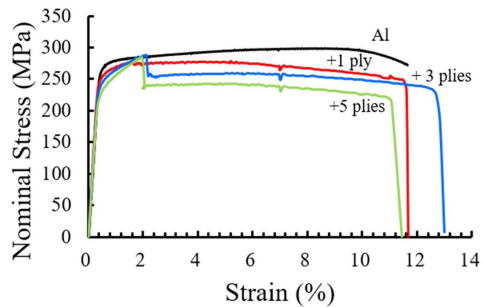
Fig. 2(b)은 복합재 두께를 고려한 응력값 기준의 인장시험 결과이다. 초기 인장시에는 Al합금의 탄성계수 기울기를 따라갔지만, 변형률 0.5% 이후부터 그래프의 기울기가 오히려 급격히 감소하였다. 이는 GFRP 두께가 두꺼울수록 확연히 나타났는데, GFRP의 탄성계수가 Al 합금보다도 낮기 때문이다. 따라서, GFRP 피막으로 인한 Al합금의 인장강도 강화효과는 없고 오히려 사용된 Al합금보다 낮은 인장특성이 나타났다. GFRP 피막을 통해 Al합금보다 가볍지만 탄성영역내에서는 비슷한 인장특성의 재료를 만들 수 있는 장점이 있다.

Table 2. Tensile test results of rolling direction of Al6061-T6 plate

Length direction	Ultimate stress (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation (%)
Transverse	299.66 ± 0.70	68.3 ± 1.6	11.4 ± 0.3
Rolling	295.13 ± 1.45	67.2 ± 1.2	12.4 ± 0.4



(a) Load – strain curve



(b) Nominal stress – strain curve

Fig. 2. Tensile test curves of aluminum alloy and Al/GFRP laminates

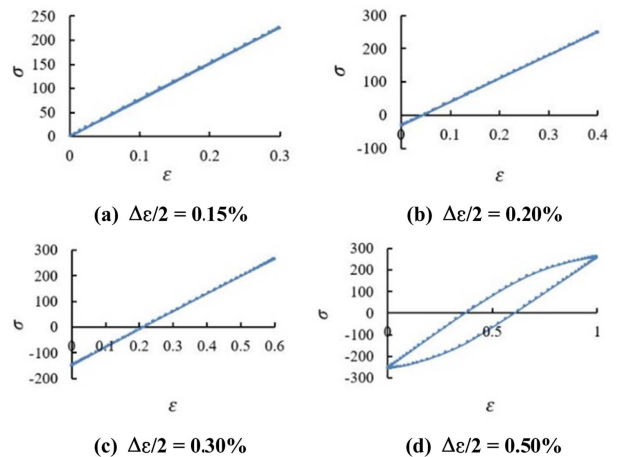


Fig. 3. Nominal stress-strain curves of aluminum alloy at the cycle of half lives

3.2 전 변형률 크기에 따른 응력-변형률 이력곡선 변화

Fig. 3은 전변형률 조건별로 측정한 피막없는 Al합금의 반수명에서의 응력-변형률 이력곡선(hysteresis loop)이다. $\Delta\epsilon/2 = 0.15, 0.2, 0.3\%$ 진폭에서는 거의 선형으로 나타나고 있는데 이는 해당 변형률의 피로시험에서 소성변형이 발생하고 있지 않는다는 것이다. 하지만 변형비 조건이 $R = 0$ 임에도 불구하고, $\epsilon = 0$ 인 지점에서 응력이 음수인 압축응력이 발생했다는 것은 반복변형 부하에 의해 소성변형이 이미 발생했음을 알 수 있다. $\Delta\epsilon/2 = 0.15\%$ 조건에서만 피

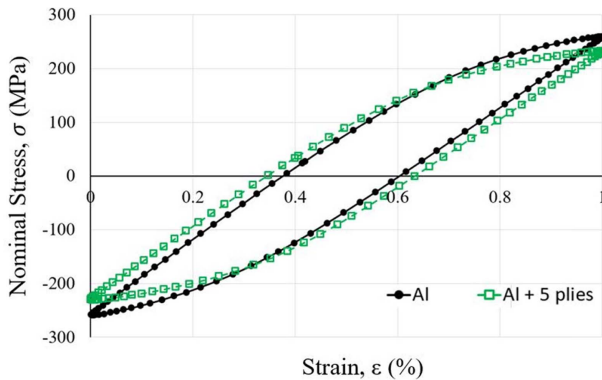


Fig. 4. Nominal stress-strain curves of aluminum alloy and Al/GFRP laminates at the cycle of half lives

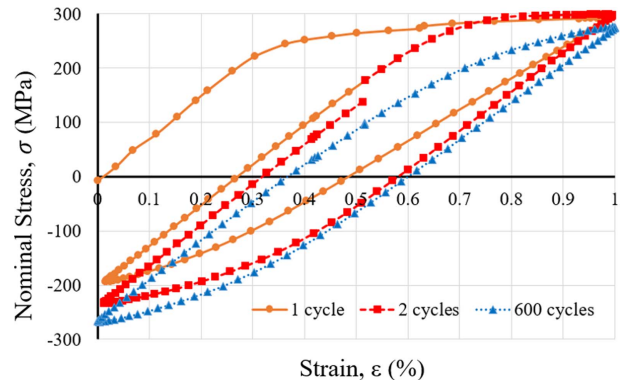


Fig. 5. Nominal stress-strain curves of Al + 3 plies at 1, 2 and 600 cycles

Table 3. Average of the internal area of the hysteresis loop at half life

	Al	+ 1 ply	+ 3 plies	+ 5 plies
Hysteresis area	110.724	109.371	101.469	122.633

로시험 전체에 걸쳐 소성변형이 전혀 발생하지 않았고, 히스테리시스 루프가 직선으로 유지됐던 $\Delta\epsilon/2 = 0.2, 0.3\%$ 의 경우도 피로시험중에 소성변형이 발생하여 재료거동의 압축응력 이동(shift)이 일어났던 것이다. 특히 $\Delta\epsilon/2 = 0.5\%$ 조건에서는 소성역이 시험중에도 성장하여 큰 소성변형의 형성으로 인해 응력비가 거의 $R = -1$ 에 가까운 인장-압축 거동으로 변화되었던 것이다.

Fig. 4는 변형률 진폭 조건 $\Delta\epsilon/2 = 0.50\%$ 에서 Al합금과 Al + 5 plies의 반수명시 측정한 응력-변형률 이력곡선이다. Al 합금과 비교해서 + 5 plies의 경우 최대 응력값 수준이 낮아졌다. GFRP피막의 비율이 커지면서 나타나는 결과이다. 이는 Fig. 2(b)에서 변형률 1%까지의 인장시험 결과와 유사하다. 피막의 접합에 따른 히스테리시스 루프는 약간의 응력 이완 형태로 나타났다.

Table 3은 반수명에서의 히스테리시스 루프의 내부면적인 소성역의 크기를 계산한 것이다. + 1 ply의 경우는 Al합금과 비슷하였고 + 3 plies은 내부 면적이 작아졌다. 반수명에서 소성에너지의 크기가 작아졌다는 것으로 3겹의 GFRP의 피막이 피로거동에 좋은 영향을 미치고 있음을 나타낸다. 하지만 + 5 plies의 경우 소성역의 크기가 Al합금보다 커졌다. 기계적 탄성이 낮은 GFRP피막층의 비율이 너무 높아지면 오히려 피로거동에 나쁜 영향을 주고 있는 것이다.

3.3 사이클 수 증가에 따른 응력 이완 특성

Fig. 5는 Al + 3 plies를 대상으로 전변형률($\Delta\epsilon$) 1.0%의 조건에서 저주기 피로시험시 첫번째, 두번째 사이클에서의 히스테리시스 루프와 안정화된 반수명에서의 히스테리시스 루프를 나타낸 것이다.

첫 번째 사이클에서 많은 소성변형이 발생하였으며 두 번째 사이클부터 상당한 히스테리시스 루프의 면적 거동을 나타내었다. 두번째 주기의 최대, 최소 응력은 첫 주기보다 더 저하하였다. 이는 응력의 이완이 계속 진행한 것이며 초기 큰 소성변형으로 인해 재료의 성질에 변화가 나타난 것이다. 안정화된 반수명에서의 히스테리시스 곡선과 초기거동을 비교하면 피로시험이 진행함에 따라 평균응력이 감소하면서 내부 면적이 작아졌다. 이는 반복변형으로 인해 재료의 반복연화가 발생한 것이다. 초기 몇 주기에서 대부분의 소성이 발생하며, 그 이후 점차 안정화된 것이다. 이러한 응력이완 거동은 히스테리시스 루프에서 내부면적이 거의 없는 $\Delta\epsilon/2 = 0.20\%$ 에서도 나타났다. 히스테리시스 루프에서 소성역은 나타나지 않았음에도 점차적으로 평균 응력이 저하하며 반복연화가 발생한다. 이러한 결과는 히스테리시스 루프 면적만으로는 분석 될 수 없는 소성거동이 피로시험 사이클에서 발생했음을 보여준다.

3.4 피로수명 평가: 전변형률-수명 곡선

변형률 제어 저주기 시험에서 전변형률-수명($\Delta\epsilon - 2N_f$)

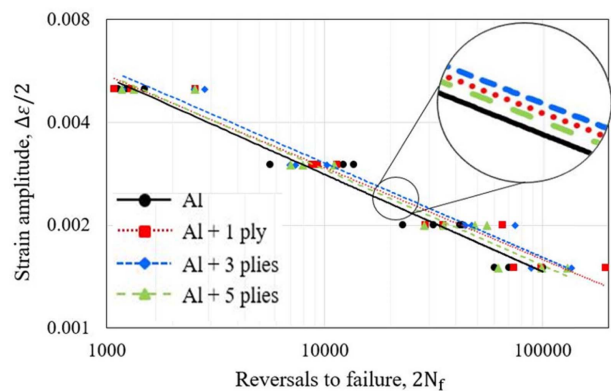


Fig. 6. Fatigue test results of aluminum alloy and Al/GFRP laminates

Table 4. Experimental constants in total strain energy density method

	C	m	R2 (=SSR/SST)
Al	0.0387	-0.2845	0.9653
Al + 1 ply	0.0352	-0.2691	0.9771
Al + 3 plies	0.0386	-0.2760	0.9687
Al + 5 plies	0.0384	-0.2802	0.9701

모델은 식 (1)의 Basquin 식[15]을 이용하여 다음과 같은 멱급수로 나타낸다.

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = C(2N_f)^m \quad (1)$$

본 연구의 피막층 조건과 변형률 조건에서의 피로시험 결과 데이터를 Fig. 6에 보였으며, 이를 바탕으로 선형회귀 분석법을 이용하여 계산된 C, m 값을 Table 4에 나타내었다.

피로시험결과 모든 피막 시험편은 피막없는 Al합금보다 수명이 향상되었다. 그 중에도 3 plies 적층한 시험편의 피로수명이 가장 우수하게 나타났으며 + 5 plies 시험편의 수명이 가장 열악한 수명을 보였다. 이러한 경향은 Table 3에서 볼 수 있듯이 피막시험편의 히스테리시스 면적이 작을수록 우수한 순서로 앞선 Fig. 6의 결과와 일치하고 있다. 또한, Table 4에서 피막 적층수에 따라 실험상수인 C, m 값이 각자의 특징을 보이는데 피막없는 Al과 + 5 plies는 C절편이 크지만 기울기 m의 크기가 커서 저주기 영역에서는 피로강도가 크나 3,000 cycles 이상의 중주기에서는 오히려 낮아진다. 반면에 + 1 ply에서는 c 절편과 기울기 m이 함께 작으므로 중주기이상에서 피로강도가 회복된다. R² (= SSR/SST, Regression sum of squares divided by total sum of squares)은 선형회기분석의 결정계수로서, 계산된 예측수명 곡선과 시험데이터에 대한 근사성을 나타내는 값이다. 변형률-수명 조건에서는 R²의 값이 1에 가까울수록 근사성이 높은 것이다. Fig. 6의 예측피로수명식의 R² 값이 최소 0.95 이상으로 해당 예측선은 상당히 적합하다.

이들 피로해석결과를 평가하면, + 3 plies 적층이 피로수명 증가에 가장 효과적이다. Fig. 2(b)의 인장응력 결과를 볼 때 피막층의 두께가 증가한다고 정적인 기계적 물성이 좋아지지는 않았지만, GFRP피막을 + 3 plies 적층한 경우가 재료 전체의 밀도는 감소하므로 경량화와 함께 우수한 피로강도를 보였다.

3.5 피로수명 평가: 전변형률 에너지밀도법

수명 사이클이 진행하면서 누적된 전체 변형률에너지가 재료의 흡수가능 한계점에 도달할 때 피로파손이 발생한다[12,13]. 소성변형률에너지가 작은 중고주기피로까지의 피로수명 평가를 위해 Ellyin과 Kujawski[14]는 탄성변형률 에너지와 소성변형률에너지를 함께 고려하는 전변형률 에

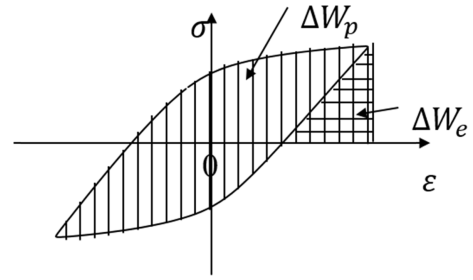


Fig. 7. Description of the plastic and elastic strain energy densities

Table 5. Experimental constants in total strain energy density method

	χ	α	R ² (=SSR/SST)
Al	21.8182	-0.4056	0.9419
Al + 1 ply	14.4262	-0.3629	0.8947
Al + 3 plies	20.0547	-0.4006	0.8774
Al + 5 plies	30.0931	-0.4604	0.9014

너지밀도법을 제안하였다. 전변형률 에너지밀도(ΔW_{total})를 파라미터로 한 저주기 피로수명 예측은 다음 식 (2)로 표현되며 Fig. 7로 설명한다.

$$\Delta W_{total} = \Delta W_{plastic} + \Delta W_{elastic} = \chi(N_f)^\alpha \quad (2)$$

히스테리시스 루프의 면적부분 ΔW_{plastic}는 히스테리시스 곡선의 내부면적으로 소성역의 크기이고, ΔW_{elastic}는 탄성 구간에서의 내부면적으로 계산된다. 이 때 χ와 α는 선형회귀분석으로부터 얻어지는 실험상수가 된다. 실험을 통해 안정화된 히스테리시스 거동과 실험상수를 얻을 수 있다면 피로수명(N_f)을 계산하여 예측 가능하다.

Fig. 8은 전변형률 에너지밀도법으로 구한 전변형률 에너지밀도 - 피로수명의 계산 결과값이며, Table 5는 이로부터 근사곡선을 계산하여 구한 실험상수값(χ, α)이다. 전변

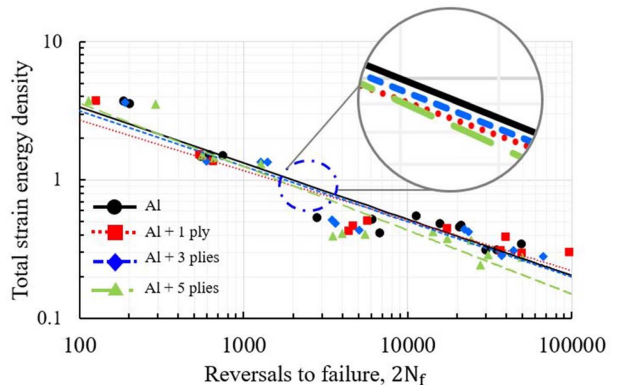


Fig. 8. Total energy density method results of aluminum alloy and Al/GFRP laminates

형률 에너지밀도법으로 계산된 수명곡선(Fig. 8)을 보면 GFRP 피막 후 Al합금보다 낮은 에너지밀도가 구해졌는데 이는 피막으로 인해 전변형률 에너지(ΔW_{total})가 Al합금에 비해 감소함을 보였다. 반수명에서의 히스테리시스 곡선(Fig. 3)을 보면 변형률 조건 $\Delta\epsilon/2 = 0.30\%$ 이상부터 소성 변형에너지가 확연하게 나타났다. 즉, 에너지밀도가 1이 되는 약 2,000 cycles를 기준으로 $N_f < 2,000$ cycles의 영역은 소성변형에너지가 지배적이었고, $N_f > 2000$ cycles의 영역은 탄성변형에너지의 영향이 지배적이었던 구간으로 구분하였다.

GFRP피막 후 에너지 밀도의 감소량은 + 3 plies가 가장 적었으며, + 5 plies가 가장 크게 나타났다. + 5 plies의 경우 소성변형이 지배적인 구간에서는 $\Delta W_{plastic}$ 의 양이 커져 전변형률 에너지밀도가 높아졌지만(Table 3), 탄성변형이 지배적인 $N_f > 2000$ cycles에서는 $\Delta W_{elastic}$ 의 값이 낮아져 급격한 수명저하가 계산되었다. 이는 인장강도특성이 낮은 GFRP의 피막으로 인한 결과(Fig. 2b)이다. α 는 전변형률 에너지-수명의 기울기 값으로 수명변화에 따른 에너지감소량을 나타낸다. 다른 적층 수 조건에 비해 + 5 plies에서 에너지감소량이 많았으며, + 1 ply는 피막없는 알루미늄보다도 낮게, + 3 plies는 알루미늄과 유사한 수준으로 나타났다. 즉, 변형률에너지밀도로 계산한 피로수명 예측곡선(Fig. 8)에서도 + 5 plies의 적층이 가장 낮은 에너지 밀도를 보였다. 에너지감소가 α 의 기준으로는 + 1 ply가 가장 좋았지만 전체

에너지량의 크기와 관련있는 χ 값이 낮아, 저주기부터 고주기까지의 피막 효과는 + 3 plies의 조건이 가장 우수하다.

전변형률 에너지 밀도법의 R^2 값은 최소 0.87 이상으로 3.4 절의 전변형률-수명식의 최소값 0.95에 비해서는 약 0.08 낮지만 예측식에 적합한 근사성을 보였다. 이는 각각의 반수명에서 히스테리시스곡선을 추출하여 탄/소성구간에너지를 구분하여 계산하고 에너지 밀도로 변환할 때 발생하는 오차로서 더 합리적인 해석 방법으로 저주기 피로의 에너지 변화의 정확한 분석이 가능하다.

Fig. 9는 전변형률 에너지로 예측된 피로수명값과 실제 실험데이터의 근사성을 나타낸다. 중앙 실선은 예측과 실제 수명이 같음을 나타내는 선도이다.

Al 합금과 Al + 3 plies의 두 경우 모두 전변형률 에너지 밀도로 계산된 수명값이 실제 실험값과 유사한 결과를 나타냈다. GFRP를 피막한 복합재료에서도 전변형률 에너지법을 사용하여 수명예측이 가능하다.

중앙 실선보다 왼쪽에 위치한 점들은 예측수명보다 먼저 파손된 것들로 대부분 변형률조건 $\Delta\epsilon/2 = 0.20\%$ 에서의 결과이다. 이 조건에서는 히스테리시스 루프(Fig. 3b)가 직선으로 나타나 소성변형에너지인 내부 면적을 '0'으로 수명예측 한 것이다. 하지만 앞서 3.2절에 설명한 바와 같이 소성변형으로 인한 압축응력 이동(shift)의 경우 실제로는 피로시험중 소성변형이 발생하고 있지만 이를 무시했다. 즉, 실제로 존재하는 소성변형에너지($\Delta W_{plastic}$)를 '0'으로 입력하여 발생한 오차다. 이렇게 소성변형에너지가 매우 작아 계산되지 않는 영역을 제외하고는 예측수명에 비해서 실제 실험수명 값은 더 길게 나타났다.

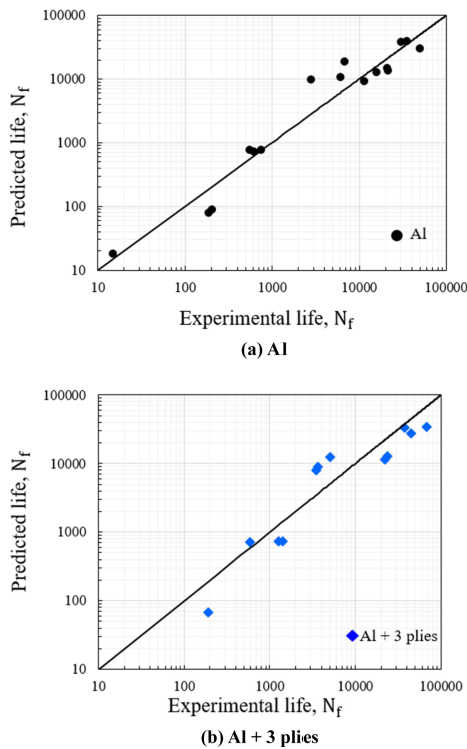


Fig. 9. Comparison at each specimen type between experimental life and predicted life by total strain energy density method

3.6 인장시험과 저주기 피로시험에서의 파괴거동 비교

Fig. 10은 GFRP피막 Al시험편의 인장시험시 완전한 파단이 일어나기 직전의 GFRP피막부 표면 사진이다. 모든 피막시험편은 GFRP가 먼저 파손되며 바리가 발생한 후 Al합금이 파손되었다. 이 거동은 앞서 인장 응력곡선의 변화거동과 일치하여 나타났다. Fig. 10(a)의 경우는 한 겹의 GFRP

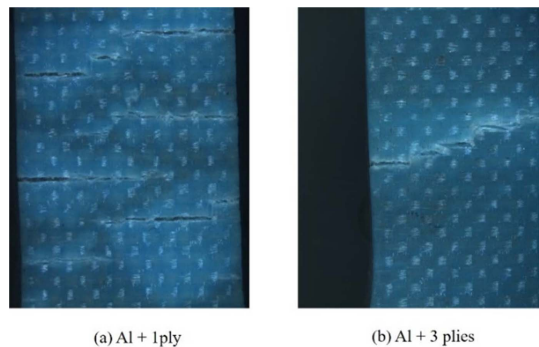


Fig. 10. Fractography of GFRP-coated Al specimens at the tensile test

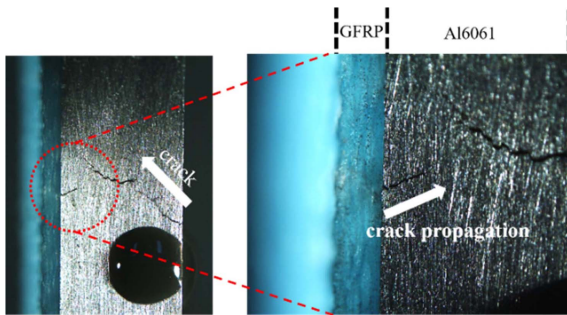


Fig. 11. Fractography of GFRP-coated Al specimen at the fatigue test

표피부가 Al합금의 부분적인 인장변형을 이기지 못하고 균열이 동시다발적으로 성장한 것이다. 한 겹의 GFRP 피막으로는 금속과 GFRP가 결합된 이종재료로서의 강화효과를 기대할 수 없음을 나타낸다. Fig. 10(b)는 + 3 plies으로 다수의 미세균열이 큰 하나의 균열로 성장하여 결국 이 부분에서 GFRP가 끊어지고 이후 Al합금의 파괴가 발생하였음을 보여준다. 이러한 파괴거동은 + 5 plies에서도 유사하게 나타났다. 또한 GFRP의 균열발생 부위와 Al합금의 파손부위가 달라, 이종재료의 접합이었지만 각 소재부 파괴에 서로 영향을 주지 않고 있음을 알 수 있다. 따라서, 인장 파괴 결과를 비교해보면 Al + 1 ply는 피막없는 Al합금과 동일한 파괴경향이 나타났고 + 3 plies 이상부터 섬유부에서 한 개의 거시적 균열거동을 보이며 FRP부와 금속간에 박리(delamination)가 일어났다.

Fig. 11은 + 3 plies 시험편의 피로시험편에서 발생된 균열의 모습이다. 피로시험시 변형률 조건이 가장 큰 $\Delta\epsilon/2 = 0.5\%$ 에서도 GFRP에서의 균열은 발견되지 않았다. 이는 인장시험시의 파괴거동과는 반대로 모재인 Al합금에서 먼저 균열이 발생하고 성장하여 피로파손이 발생한 것이다. 피로강도는 GFRP가 Al합금보다 높기 때문인 것으로 생각한다. + 1 ply 시험편의 피로 파괴거동은 피막없는 Al합금의 파괴거동과 유사하였고, + 5 plies 시험편의 피로파손 거동은 + 3 plies와 서로 유사하였다. + 3 plies 시험편은 정적시험과 피로시험에서 파괴모드의 전환을 일으킨 적층수 조건으로 판단되었다.

4. 결 론

경량화 구조물로 널리 쓰이는 Al합금에 GFRP 복합피막을 적착하여 인장강도와 저주기 피로수명의 개선효과를 연구하였다.

Al 시험편과 여기에 + 1 ply, + 3 plies, + 5 plies 피막을 접착한 시험편의 인장시험결과, 초기에는 Al합금의 탄성계수를 따라갔지만, 변형률 0.5% 이후부터 그래프의 기울기가 오히려 급격히 감소하였다. 이러한 경향은 GFRP 피막층 개

수가 증가할수록 확연하게 나타났다. GFRP 피막으로 인한 Al합금의 인장강도 강화효과는 없었다.

피로시험시 나타나는 변형률 조건에 따른 히스테리시스 형상은 GFRP피막 유무와 피막 수에 상관없이 모재인 Al합금의 거동을 따랐다. 하지만, 히스테리시스의 면적은 + 5 plies에서 가장 넓게 측정되었으며, + 3 plies에서 가장 작게 측정되었다.

저주기 피로시험 결과 GFRP의 피막으로 피로강도가 증가하였지만, GFRP의 두께에 따라 비례하여 증가하지는 않았다. 변형률 - 수명평가 결과 + 3 plies에서 피로강도 향상 효과가 가장 크게 나타났으며, + 5 plies의 경우 낮게 분석되었다. 이러한 저주기 피로시험 결과는 전변형률 에너지 밀도법으로 계산된 예측결과와 상응하였다. 인장/피로시험, 전변형률에너지 피로수명예측법과 파손메커니즘 분석을 통해 Al평활제에 피막하는 GFRP의 최적 조건은 + 3 plies으로 모재 두께의 약 14%에 해당하였다. 또한, 금속재료에 GFRP가 피막된 복합재료에서 전변형률 에너지밀도법으로 적절한 피로수명 예측이 가능함을 확인하였다.

인장 및 피로시험편의 파손거동을 관찰한 결과 변형률을 매우 높게 설정한 인장시험에서는 GFRP 피막에서 먼저 균열이 발생하여 파손하였지만, 변형률이 상대적으로 낮게 설정된 피로시험에서는 그 반대로 Al 모재에서 파괴가 선행되는 결과가 나타났다. 낮은 변형률에서는 GFRP피막의 피로강도가 Al합금보다 더 좋다. 따라서 인장강도가 높은 Al합금과 가볍고 피로강도가 좋은 GFRP의 적절한 접합으로 기존 Al합금보다 가볍고 피로강도가 높은 하이브리드 구조재료를 설계 가능함을 확인하였다.

후 기

이 연구는 한국연구재단 과제번호(NRF-2015 R1A2A2A 01002413)와 (NRF-2018R1D1A1B07041353)에 의해 연구되었습니다.

REFERENCES

- (International Journal) Lin, C.T., Kao, P.W., and Yang, F.S., "Fatigue Behaviour of Carbon Fibre-reinforced Aluminium Laminates," *Composites*, Vol. 22, Issue 2, 1991, pp. 135-141.
- (Proceeding) Yoon, H.K., Lee, K.B., Park, W.J., and Hue, C.W., "A Study on Characteristics of Tensile Strength and Fatigue Life with Hybrid Composite Materials for Aircraft," *Proceedings of the KSME 1995 Conference*, 1995, pp. 213-217.
- (International Journal) Vogelesang, L.B., and Vlot, A., "Development of Fibre Metal Laminates for Advanced Aerospace Structures," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 103, Issue 1, 2000, pp. 1-5.
- (International Journal) Cortes, P.W., and Cantwell, J., "The Fracture Properties of a Fibre-metal Laminate Based on Mag-

- nesium Alloy," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 37, Issue 2-3, 2005, pp. 163-170.
5. (International Journal) Kawai, M., and Kato, K., "Effects of R-ratio on the Off-axis Fatigue Behavior of Unidirectional Hybrid GFRP/Al Laminates at Room Temperature," *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, Issue 10, 2006, pp. 1226-1238.
 6. (Proceeding) Monfared, A., Soudki, K., and Walbridge, S., "CFRP Reinforcing to Extend the Fatigue Lives of Steel Structures," *Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering(CICE2008)*, 2008, pp. 1-6.
 7. (International Journal) Rhee, H.W., and Kim, S.H., "Fatigue Crack Growth Behavior of the Thin-to-thick Type Stiffened Panels with Bonded Patch," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 22, No. 3, 2008, pp. 89-95.
 8. (International Journal) Khan, S.U., Alderliesten, R.C., and Benedictus, R., "Post-stretching Induced Stress Redistribution in Fibre Metal Laminates for Increased Fatigue Crack Growth Resistance," *Composites Science and Technology*, Vol. 69, Issue 3-4, 2009, pp. 396-405.
 9. (International Journal) Ergun, E., Tasgetiren, S., and Topcu, M., "Fatigue and Fracture Analysis of Aluminum Plate with Composite Patches under the Hygrothermal Effect," *Composite Structures*, Vol. 92, Issue 11, 2010, pp. 2622-2631.
 10. (Korean Journal) Lee, S.H., Kim, H.J., Chang, Y.W., and Choi, N.S., "Bending Performances and Collapse Mechanisms of Light-weight Aluminum-GFRP Hybrid Square Tube Beams," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 20, No. 3, 2007, pp. 8-16.
 11. (Korean Journal) Yoon, H.K., Park, W.J., and Hur, C.W., "A study on Fatigue Crack Retardation Using NDT Test in a Hybrid Composite Material Reinforced with a CFRP," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 12, No. 3, 1999, pp. 1-7.
 12. (International Journal) Coffin, L.F., "A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stress on a Ductile Metal," *Trans. ASME*, Vol. 76, 1954, pp. 931-950.
 13. (International Journal) Halford, G.R., "The Energy Required for Fatigue," *Journal of Materials*, Vol. 1, No. 1, 1966, pp. 3-18.
 14. (International Journal) Ellyin, F., and Kujawski, D., "An Energy-based Fatigue Failure Criterion," *Microstructure and Mechanical Behavior of Materials*, Vol. 2, 1985, pp. 541-600.
 15. (International Journal) Basquin, O.H., "The Experimental Law of Endurance Tests," *American Society for Testing and Materials Proceedings*, Vol. 10, 1910, pp. 625-630.