

복합재 패치로 보수된 노치형 알루미늄 합금 평판의 음향방출 특성

Acoustic Emission Characteristics of Notched Aluminum Plate Repaired with a Composite Patch

윤현성*, 최낙삼**†

Hyun-Sung Yoon* and Nak-Sam Choi**†

초 록 본 연구는 편측 노치가 삽입된 Al6061-T6 알루미늄 합금 평판 시편에 대해 유리섬유강화플라스틱 (GFRP) 복합재 패치의 적층수를 변수로 하여 보수하고, 인장 하중에 따른 시편의 손상 과정을 음향방출법 (acoustic emission, AE)으로 실시간 분석하였다. AE 에너지 발생률(AE energy rate), hit 발생률(hit rate), AE 진폭(AE amplitude) 거동과 파형 및 1차 중심주파수(1st peak frequency)의 대역을 조사하여, 시편 파괴시 알루미늄 크랙(Al cracking), 섬유 파단(fiber breakage), 수지 균열(resin cracking), 층간 분리(delamination)로 분류하였다. 시편의 변위를 음향방출 특성에 따라 구간(region) I, II, III으로 나눌 수 있었으며, 패치 자체가 실제 파괴되는 구간인 구간 II를 세부적으로 분석하여 패치의 적층수에 따른 AE 특성 차이를 구하였다.

주요용어: 복합재 패치, 음향방출, 적층수, 보수, Al6061-T6

Abstract Edge notched Al6061-T6 aluminum was repaired with a GFRP composite patch as a function of the number of stacking. Damage progress of specimen for tension load has been monitored by acoustic emission(AE). AE energy rate, hit rate, amplitude, waveform and 1st peak frequency distribution were analyzed. Fracture processes were classified into Al cracking, Fiber breakage, Resin cracking and Delamination. Displacement of a specimen can be divided into Region I, II and III according to acoustic emission characteristics. Region II where the patch itself was actually fractured was focused on to clarify the AE characteristics difference for the number of stacking.

Keywords: Composite Patch, Acoustic Emission(AE), Number of Stacking, Repair, Al6061-T6

1. 서론

항공기 동체의 손상을 복합재 패치로 접합하여 보수하는 연구는 국외에서 수십 년 전부터 활발히 진행하여 오고 있었다. 이와 관련된 피로거동의 경우 Ong 등[1]은 알루미늄 패널과 복합재 패치에 mindlin 평판 요소를 적용한 유한요소해석 결과를 실험결과와 비교분석 하였다. 또한

paris law으로 균열 선단의 피로균열성장 거동을 분석하여 수명을 예측하였으며, 패치의 박리 효과를 고려하여 효율적인 패치 조건을 연구하였다. Naboulsi와 Mall[2]은 복합재 패치 보수로 인해 최대 피로응력집중 부분이 알루미늄 균열 선단에서 옆으로 이동하여 피로응력 수준이 감소함을 보고하였다. Toudeshky 등[3]은 mode I, mixed mode에서 중간-면 파괴변수(mid-plane

fracture parameter)를 사용하여 균열성장수명을 예측하였으며, 복합재 패치의 두께가 증가할수록 J-적분값이 감소하고 균열성장률은 패치의 두께에 영향을 받으며, 패치 두께 방향의 각도는 45°일 때 가장 효율적인 것으로 발표하였다. Mathias 등[4]은 복합재 패치의 적층방향, 형상, 위치를 고려하여 ANSYS 해석 프로그램에서 유전자 알고리즘(genetic algorithms)을 적용하여 최적의 패치 조건을 연구하였다. Ouinas 등[5]은 복합재 패치의 두께에 따라 응력 수준이 변화하며, 알루미늄 패치로 보수한 것보다 30% 정도 피로강도가 증가하였다고 보고하였다.

한편, 정적 인장거동의 경우 Sun 등[6]은 ABAQUS 해석 프로그램으로 알루미늄, 복합재 패치에 각각 mindlin 평판 이론을, 접착필름은 스프링 연결 요소(spring connecting element)로 설정하고, 알루미늄-접착필름과 접착필름-복합재 패치의 경계면은 제약 방정식(constraint equation)으로 설정하였다. 그 후 계면의 변형 에너지 해방률을 실험 결과와 비교 분석함으로써 mindlin 평판 이론의 타당함을 제시하였다. Umamaheswar 등[7]은 복합재 패치의 재료, 치수와 접착필름의 두께 등을 고려하여 균열 성장률을 분석한 뒤 효율적인 패치의 조건을 제시하였다. Findik와 Unal[8]은 결합이 있는 Al2024-T3에 복합재 패치로 보수한 경우의 열잔류 변형률을 연구하였는데, 이것이 최소화될수록 구조물의 수명이 연장된다고 발표하였다. Colombi 등[9]은 알루미늄과 접착필름 계면 사이의 변형 에너지 해방률을 수정 균열 닫힘 방법(modified crack closure method)으로 해석하여, 접착필름의 두께와 응력 수준에 따른 층간분리 거동을 연구하였다. 실제 항공기에 복합재 패치 기술이 적용된 예로는 미공군 F-111의 Pivot 부위와 C-5A Galaxy 등이 대표적이다.

국내에서도 Kim[10]은 복합재 패치와 알루미늄 사이에 존재하는 열팽창의 불균형에 의한 열잔류 변형률이 최소화될수록 피로수명이 연장되며, 낮은 온도 성형 조건으로 경화해야 효과적인 보수 효과를 기대할 수 있다고 하였다. Chung 등[11]은 복합재 패치의 두께 방향의 각도에 따른 균열 성장률을 조사했는데, 경사지지 않은 평판이 최대이고, 30°와 45°에서 상대적으로 효과가 작았다고 보고하였다. Kim과 Rhee[12]는 DC plasma 식각 효과에 의한 알루미늄의 표면 처리는 복합

재 패치와의 접착력을 증가시켜 구조물의 수명을 연장시킴을 보고하였다.

한편, 음향방출법(acoustic emission, AE)은 재료나 부품이 외적 하중을 받아서 재료 내부에서 미세 손상과 균열, 소성변형이 발생할 때 방출되는 탄성파를 재료 표면에 부착한 압전센서로 검출하여 그 특성을 분석 평가하는 기법이며, 재료내부의 파손상황이나 변형상태를 연속적으로 온라인 모니터링하여 접근이 어려운 부분의 결합탐지와 위치표정이 가능하다.

이와 관련해서 Okafor 등[13]은 신경회로망(neural networks)를 사용하여 AE 신호를 분석하였고, 복합재 패치에서 발생하는 섬유파단, 수지균열, 알루미늄에서 발생하는 균열 진전의 AE events를 구별하여 탐지하고 이들 신호가 피로 균열 성장률과 서로 관련이 있음을 연구하였다. Kwon 등[14]은 알루미늄의 균열 진전에 의해 탐지된 AE 신호와 복합재 패치-알루미늄 사이의 계면 분리에 의한 AE 신호를 주성분 분석(principal components analysis)하여, 패치가 부착된 알루미늄 시편의 피로 균열 성장률을 예측하였다.

하지만 아직 국내에서 복합재 패치 내의 적층수를 변수로 하여 AE 신호를 미시 파괴 기구와 관련시켜 해명한 연구결과가 미흡한 실정이다. 복합재 패치 부착부의 피로 파괴거동이나 정적 파괴거동을 AE 해석으로 비파괴평가 및 감시하기 위해서는 하중 수준에 따른 AE 특성뿐만 아니라 그에 대응하는 파괴기구 및 패치적층 구조와 접착상태의 영향에 관한 AE 데이터가 정리될 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 이런 점을 고려하여 복합재 패치로 보수된 항공기 동체 Al 합금 구조물의 파괴과정에 대해 적층수를 변수로 하고 이에 따른 파괴기구 및 AE 특성의 차이점을 규명하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 시편은 Fig. 1과 같이 인산(H_3PO_4)으로 표면 처리한 Al6061-T6 알루미늄 합금 평판을 200×50×2 mm 크기로 절단 후 와이어 커팅기를 사용하여 12.5×0.4 mm 크기의 편축 노치를 가공하였다. 노치 선단은 실제 균열을 모사하기 위해 피로실험기 (Instron 8615)를 사용하여

최대 정하중의 50 %를 최대반복하중($P_{max}=50$ kN)으로 응력비 $R=0$ 에서 1 Hz의 조건으로 예비균열(pre-crack) 1 mm를 만들었다. GFRP 복합재 패치는 알루미늄 평판 시편에 접착필름(Bondex 206, 한국화이바)을 먼저 도포하고 두께가 0.125 mm인 일방향 유리섬유/에폭시 프리프레그(UGN 150, SK)를 60×25 mm 크기로 절단 후 인장실험 방향으로 1층(0.125 mm), 4층(0.5 mm), 8층(1.0 mm), 16층(2.0 mm)으로 hand lay-up하여 적층하였다. 이렇게 만든 시편을 제조사의 추천 경화 사이클에 따라 autoclave에서 경화 시켰다.

시편 제작 후 인장실험기(Zwick 250, germany)로 변위속도 1 mm/min의 조건으로 최대하중을 지나 최대하중의 50 %로 하중저하가 일어났을 때 자동으로 시험 종료되도록 설정하여 하중-변위 선도를 구하였으며, 시편의 종류당 5회씩 인장시험을 하였다.

AE 센서(Micro 30, PAC)의 주파수 검출 대역은 100~600 kHz이며, 공진주파수는 250 kHz이다. Fig. 2와 같이 시편의 중앙에서 센서(S_1 , S_2)를 각각 40 mm 떨어진 지점에 진공그리스를 바른 후 절연테이프로 압착하여 장착하였다. 인장하중 하에서 시험편의 하중-변위 곡선을 얻는 동시에 파괴과정에서 발생한 AE 신호를 센서에 의해 실시간 감지하였다. 발생한 AE 신호는 예비증폭기(40 dB)로 증폭된 후 DOS 6.1 이상에서 구동되는 2-channel(MISTRAS-2001, PAC)로 보내어 획득 저장된 후에 여러 음향방출 파라미터에 의해 분석된다. AE 신호의 샘플링 속도(sampling rate)는 4 MHz이며, 기계적 및 전기적 노이즈를 제거하기 위해 문턱전압값(threshold)은 40 dB로 설정하였다. 분석 정리되는 데이터는 AE 에너지, hit 수, AE 진폭, AE 주파수, AE 파형 등이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유리섬유/에폭시(GFRP) 복합재 패치로 보수된 알루미늄 시편의 기계적 물성 및 파괴거동

Fig. 3은 편축 노치가 삽입된 Al6061-T6 알루미늄 시편에 GFRP 복합재 패치를 1층(0.125 mm), 4층(0.5 mm), 8층(1.0 mm), 16층(2.0 mm) 구조로 적층한 경우의 인장실험 결과이다. 노치가 없는 Al6061-T6 알루미늄 시편의 최대하중은 평균

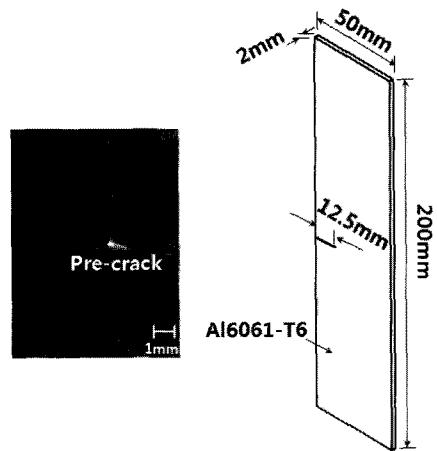


Fig. 1 Shape and dimension of the specimen and its pre-cracking

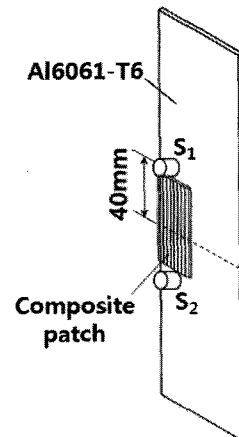


Fig. 2 AE measurement system

	■ Unnotched Al	○ Notched Al without patch	● GFRP 1 ply / Al
	△ GFRP 4 plies / Al	▲ GFRP 8 plies / Al	□ GFRP 16 plies / Al
Max. load(kN)	31.9±2.6	19.62±1.5	20.88±1.8
	27.32±2.4	28.14±1.3	28.71±1.9
Displacement at P_{max} (mm)	15.68±3.8	2.23±0.7	2.27±1.2
	2.84±1.0	2.94±0.9	3.07±1.8

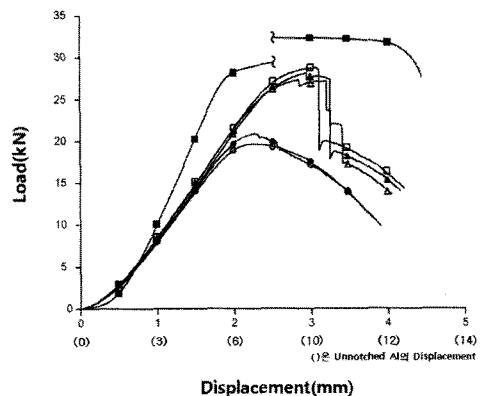


Fig. 3 Load-displacement curves of unpatched and patched Al specimens

31.9 kN이다. 하지만 알루미늄 시편에 12.5×0.4 mm의 노치를 가공하여 삽입하면 최대하중은 19.6 kN으로 37.6% 감소하였다. 여기에 1층 패치로 접착 보수하면 최대하중은 20.9 kN으로 편측 노치가 있는 알루미늄 시편보다 7% 증가하다. 4층 패치로 하면 24% 증가하였으며, 16층 패치로 하면 28.7 kN으로 46% 증가하였다. 따라서 패치 두께가 두꺼워질수록 편측 노치 알루미늄 시편보다 최대하중은 증가하고, 16층 패치 이후로는 노치가 없는 Al6061-T6 알루미늄 시편의 최대하중에 거의 근접하였다.

Fig. 4-6은 여러 두께를 가진 패치(1층, 4층, 8층, 16층)로 접착보수된 시편이 인장시험에 의해 최종적으로 파괴된 모습이다. 패치를 1층 구조로 적층한 경우는 섬유파단(fiber breakage, Fig. 4)이 대부분 발생하였다. 패치의 두께가 0.125 mm로 얇아서 균열진전과 함께 섬유파단이 쉽게 발생했기 때문이다.

Fig. 5는 패치를 4층, 8층 구조로 적층한 경우이며, 섬유 파단(fiber breakage)뿐만 아니라, 수지 균열(resin cracking), 층간 분리(delamination)가 함께 관찰되었다. Fig. 6은 패치를 16층 구조로 적층한 경우이며, 패치의 두께가 알루미늄 시편과 같은 2.0 mm로 두꺼워서 최종적으로 파괴된 모습은 패치 자체에서는 광학적(Fig. 6(a))으로 관찰되지 않고 대부분 패치와 Al 판 사이에서 층간분리로 관찰되었으며, 실제 층간분리 부분을 관찰하기 위해 초음파 C-스캔(ultrasonic C-scan) 이미지를 얻었다. Fig. 6(b)에서 어두운 부분은 패치가 알루미늄 시편과 접촉되어 있는 부분이며, 밝은 부분은 층간분리가 일어난 부분이다.

3.2. 유리섬유/에폭시(GFRP) 복합재 패치의 적층수가 음향방출 특성에 미치는 효과

GFRP 복합재 패치로 보수된 편측 노치 알루미늄 시편의 AE 특성을 분석하기 위해, 우선 패치 부착이 없는 편측 노치 알루미늄 시편만의 음향방출 특성을 분석하였다. Fig. 7은 편측 노치 알루미늄 시편의 하중-변위 선도에 대한 음향방출 특성이다. 하중-변위 곡선에서 변위(δ)=1.6 mm(시험 시작 110sec 경과) 이전은 선형 탄성영역(elastic region)이며, AE 신호는 거의 발생하지 않았다. 이후 비선형구간인 소성영역(plastic region)

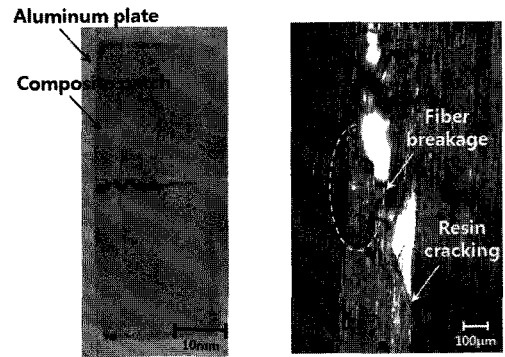


Fig. 4 Fracture image of notched aluminum specimen repaired with a 1ply GFRP composite patch and fiber breakage

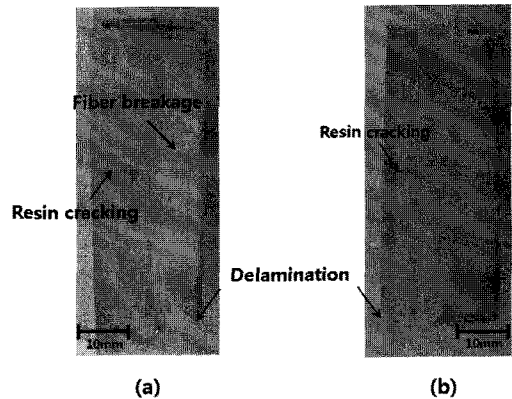


Fig. 5 Fracture images of notched aluminum specimens repaired with composite patch : (a) with GFRP 4plies patch, (b) with GFRP 8plies patch

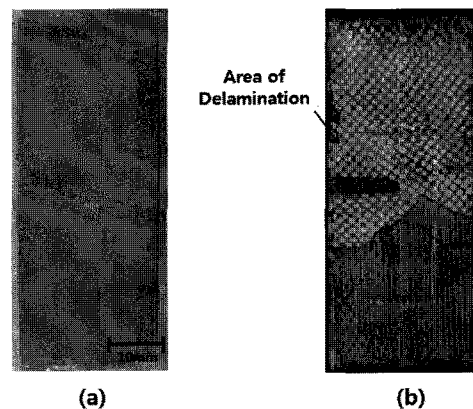


Fig. 6 Fracture images of notched aluminum specimen repaired with a 16plies GFRP composite patch: (a) optical photo, (b) ultrasonic C-scan image

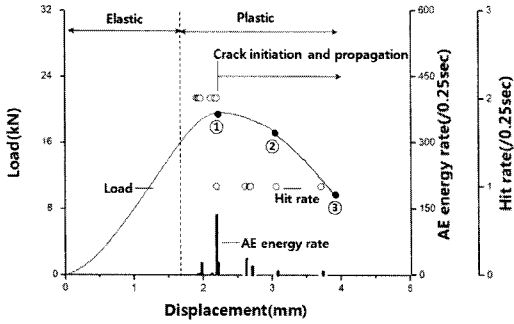
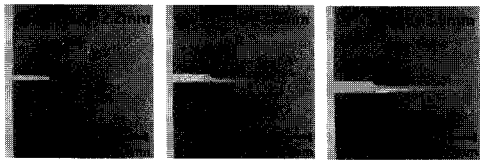


Fig. 7 Load and AE characteristic versus displacement of notched aluminum specimen

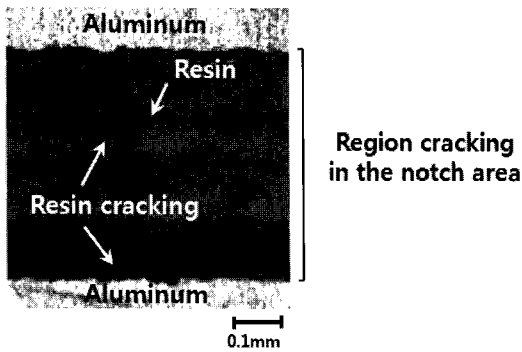


Fig. 8 Resin cracking in the notch area (Region I)

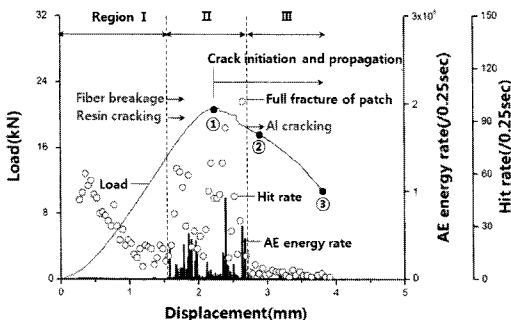
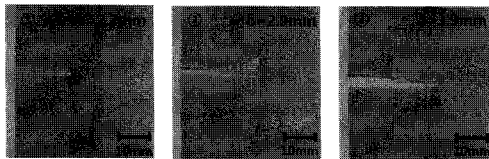


Fig. 9 Load and AE characteristic versus displacement of notched aluminum specimen with GFRP 1ply patch

에서는 AE 에너지 발생률(AE energy rate, AE 시험 0.25 sec 중에 발생된 AE 에너지의 합)이 최대 20이 넘게 발생하였으며, $\delta=2.3$ mm에서 노치 선단으로부터 균열이 진전되면서 AE 에너지 발생률은 145이면서, hit 발생률(hit rate, AE 시험 0.25sec 중에 발생된 hit 수)이 높게 발생하였다. 위에 첨부된 광학 관찰 사진은 최대하중 이후 편측 노치 알루미늄 시편의 균열 진전 상황을 나타내며, 소성영역의 성장과 함께 노치 선단으로부터 균열이 진전되었다.

패치가 부착된 Al 시편의 음향방출 특성을 AE 에너지 발생률과 hit 발생률에 따라서 3가지 구간(region) I, II, III으로 구분할 수 있었다. 구간 I은 10 이하의 미약한 AE 에너지 발생률이 발생하는 구간으로, 패치의 수지와 접착필름이 녹아 흘러나온 수지가 노치부에 채워져 경화된 부분의 레진균열(resin cracking, Fig. 8)이 집중적으로 발생한 구간이다. 구간 II는 패치의 손상 즉, 섬유파단, 수지균열, 층간분리가 발생한 구간이다. 마지막으로 구간 III는 이전의 구간 II에서 패치가 파괴되었기 때문에 AE 에너지 발생률이 급감한 구간이며, 대부분 알루미늄 자체의 균열 진전에 따른 AE 신호가 발생했다.

예를 들어, Fig. 9는 패치를 1층 구조로 적층한 경우의 하중-변위 선도에 대한 음향방출 특성이 다. 알루미늄 시편만의 음향방출 특성과는 달리 많은 음향방출 신호가 발생하였다. 초기부터 $\delta=1.6$ mm(시험 시작 95sec 경과)까지는 AE 에너지 발생률은 10 이하의 낮은 수준이었지만, hit 발생률은 높은 수준으로 발생하였다. 이 구간 I에서 발생한 음향방출 신호는 알루미늄 시편 노치부의 레진균열에서 발생된 미약한 신호들로 판단된다. 구간 II가 시작하는 $\delta=1.6$ mm 이후에는 하중-변위 선도의 비선형구간으로 높은 수준의 음향 방출 신호들이 발생하였다. AE 에너지 발생률은 최대 95,000정도 발생하였으며, $\delta=2.3$ mm부터 알루미늄 균열이 진전되면서 10,000이상의 AE 에너지 발생률 및 70 이상의 hit 발생률이 발생하였다. 구간 II에서는 섬유파단에 대한 신호들이 대부분 발생하였다. 위에 첨부된 사진은 최대하중($\delta=2.3$ mm) 이후의 파괴과정을 보여주며, 패치의 두께가 얇아서 알루미늄의 균열 진전과 함께 패치가 거의 일직선으로 파괴되었다.

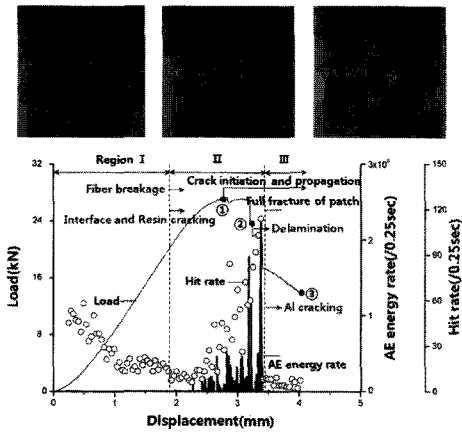


Fig. 10 Load and AE characteristic versus displacement of notched aluminum specimen with GFRP 4plies patch

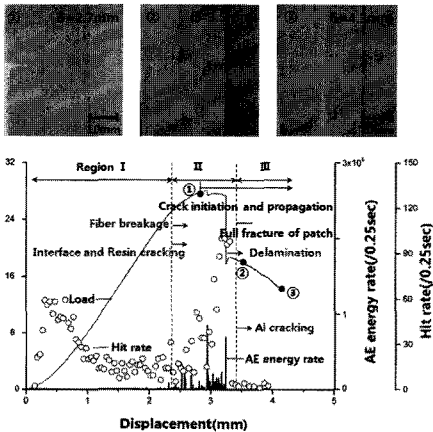


Fig. 11 Load and AE characteristic versus displacement of notched aluminum specimen with GFRP 8plies patch

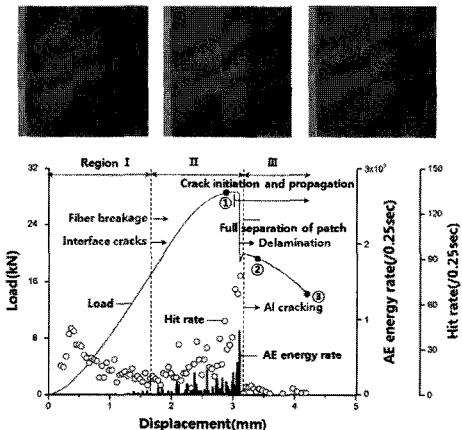


Fig. 12 Load and AE characteristic versus displacement of notched aluminum specimen with GFRP 16plies patch

Fig. 10은 패치를 4층 구조로 적층한 경우의 하중-변위 선도에 대한 음향방출 거동이다. 구간 II가 시작하는 $\delta=1.8$ mm에서 AE 에너지 발생률은 약 50,000으로 hit 발생률이 급격히 높은 수준으로 발생하면서 알루미늄 균열이 진전되기 시작하였다. $\delta=3.4$ mm에서 패치와 알루미늄 시편간의 층간분리에 대한 AE 신호로 최대 200,000 이상의 AE 에너지 발생률이 발생하였으며, hit 발생률은 다른 패치 적층수(1층, 8층, 16층)의 구간 II와 비교하였을 때 가장 높은 수준이었다. 이 시점 이후로 패치가 알루미늄 시편에서 층간분리되어 급격히 하중이 저하되었다. 위에 첨부된 사진은 최대하중($\delta=2.6$ mm) 이후의 파괴과정이다. 하중이 증가할수록 패치의 파괴는 섬유파단, 수지균열, 층간분리 등으로 발생하였으며, $\delta=3.4$ mm 이후에는 패치가 알루미늄 표면에서 대부분 분리되어 알루미늄의 균열 진전만 일어났다.

Fig. 11은 패치를 8층 구조로 적층한 경우의 하중-변위 선도에 대한 음향방출 특성이다. 구간 II에서 $\delta=2.6$ mm 지점에서 20,000 이상의 AE 에너지 발생률이 발생하면서, 알루미늄 크랙이 진전되기 시작하였다. $\delta=2.9$ mm에는 패치와 알루미늄 시편 사이의 층간분리가 발생하면서 AE 에너지 발생률은 80,000 이상이며, hit 수는 높은 수준으로 발생하였다. 이후 $\delta=3.2$ mm에는 다시 이전의 층간분리보다 약한 AE 신호가 발생하면서, 패치와 알루미늄 시편이 층간분리되어 하중의 급격한 저하가 일어났다. 구간 III의 초기인 $\delta=3.4$ mm는 AE 에너지 발생률이 50 이하로 떨어졌으며, 이는 알루미늄 균열 진전의 신호로 판단된다.

위에 첨부된 사진은 최대하중($\delta=2.7$ mm) 이후의 파괴과정을 보여주며, 패치를 4층 구조로 적층한 경우와 비슷한 거동을 보였다.

Fig. 12는 패치를 16층 구조로 적층한 경우의 음향방출 특성이다. 초기부터 $\delta=1.7$ mm까지는 구간 I에 해당한다. 구간 II의 $\delta=1.7$ mm부터 AE 에너지 발생률이 100 이상으로 발생하면서, $\delta=3.0$ mm에는 알루미늄 균열 AE 신호로 판단되는 AE 에너지 발생률이 발생하였다. 이후 $\delta=3.2$ mm에서 패치와 알루미늄 시편 사이의 층간분리에 해당하는 90,000 이상의 AE 에너지 발생률과 함께 높은 hit 발생률이 발생하였다. 구간 III는 패치의 손상이 끝난 뒤 AE 에너지 발생률

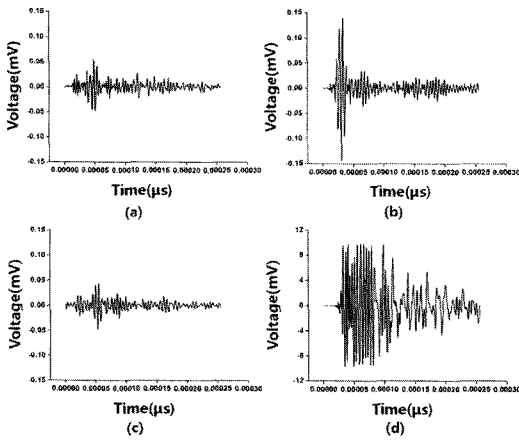


Fig. 13 AE signal waveforms corresponding to : (a) Al cracking, (b) fiber breakage, (c) resin cracking, (d) delamination

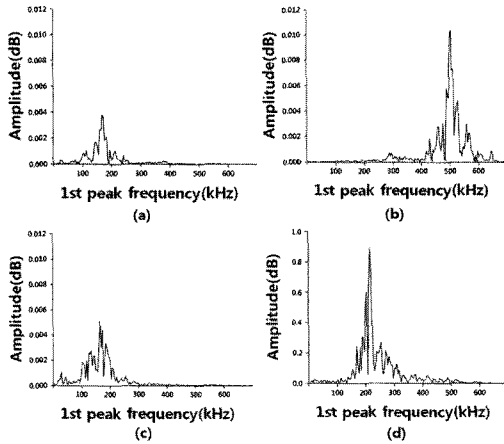


Fig. 14 FFT results to the signals in Fig. 13 : (a) Al cracking, (b) fiber breakage, (c) resin cracking, (d) delamination

이 50 이상인 알루미늄 균열 진전을 보였다. 위에 첨부된 사진은 최대하중 이후 패치의 파괴과정을 촬영한 사진이다. 최대하중 부근에서 노치 주위로부터 시작하여 패치와 알루미늄 표면이 분리되었다. 이후 패치의 한 쪽 면이 알루미늄의 표면에서 완전히 분리되면서(Fig. 6(b)) 알루미늄 균열 진전만 발생하였으며, 최대하중은 급격히 저하되었다.

Figs. 13, 14는 Figs. 7~12의 AE 신호 중에서 알루미늄 균열 진전(Fig. 13(a), Fig. 14(a)), 섬유파단(Fig. 13(b), Fig. 14(b)), 수지균열(Fig. 13(c), Fig. 14(c)), 층간분리(Fig. 13(d), Fig. 14(d))에 해당하는 대표적인 신호의 파형 및 FFT 분석결과이다.

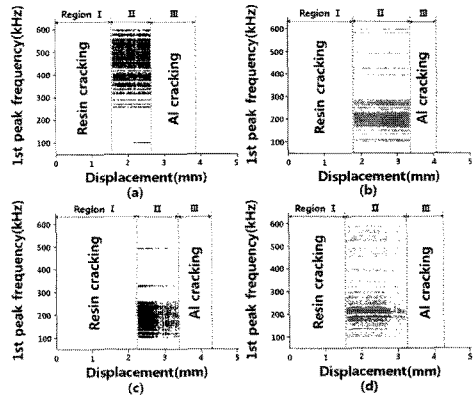


Fig. 15 1st peak frequency distribution versus displacement of notched aluminum specimen with GFRP composite patch (Region II) : (a) with GFRP 1ply patch, (b) with GFRP 4plies patch, (c) with GFRP 8plies patch, (d) with GFRP 16plies patch

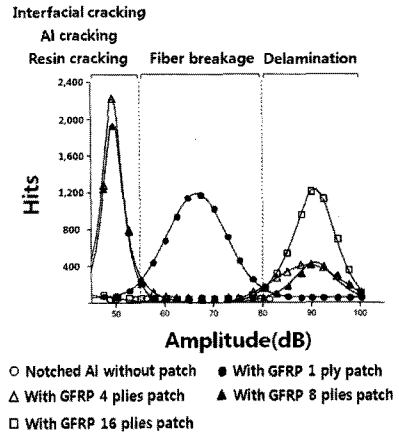


Fig. 16 AE hits distribution versus amplitude for all kinds of specimens (Region II)

섬유파단의 파형은 상승시간이 매우 짧으며, 에너지는 높은 수준이었다. 1차 중심주파수는 250~600 kHz 대역에 분포하였다. 알루미늄 균열과 수지균열은 섬유파단에 비해 상승시간이 길며, 100~250 kHz 대역에 분포하였다. 층간분리는 다른 파형에 비해 진폭이 6~7배 높은 수준이며, 1차 중심주파수는 100~250 kHz 대역에 분포하여 주로 알루미늄과 패치 사이의 계면부 수지파괴임을 보였다.

Fig. 15는 구간 II에서 패치의 적층수에 따른 1차 중심주파수의 분포를 나타낸다. 패치를 1층 구조로 적층한 경우는 250~600 kHz 대역에 분포하여 섬유파단이 많았음을 보였으며, 100 kHz에

분포하는 신호는 약간의 수지균열 및 알루미늄 균열 신호들로 판단된다. 패치를 4층, 8층, 16층 구조로 적층한 경우는 1층 구조와는 다른 100~250 kHz 대역에 많이 분포하였으며, 섬유파단은 상대적으로 적게 발생하고 수지균열, 알루미늄 시편과의 층간분리 등의 파괴거동이 함께 발생하였지만, 이를 주파수 분석 결과로 서로 구분하기 어려움이 따랐다.

Fig. 16은 편측 노치 알루미늄 시편과 패치 적층수에 따른 AE 진폭 분포를 비교한 그림이다. 패치 1층 구조로 적층한 경우 55~80 dB에 집중적으로 분포하였으며, 이는 섬유파단 영역이다. 패치 4층, 8층 구조는 수지균열과 층간분리 영역인 45~55 dB과 80~100 dB에 많이 분포하였으며, 이에 비해 섬유파단 영역인 55~80 dB은 적게 발생하였다. 16층 패치 구조는 층간분리 영역인 80~100 dB에 집중적으로 분포하였으며, 패치가 두꺼워질수록 80~100 dB의 hit 발생률이 증가하였다.

4. 결론

GFRP 복합재 패치로 보수된 Al6061-T6 편측 노치 알루미늄 합금 시편에 대해서 인장실험을 하여 음향방출(acoustic emission, AE) 신호의 특성을 분석하였다. 음향방출법을 통하여 알루미늄 균열 진전(Al cracking)과 복합재 패치의 섬유파단(fiber breakage), 수지균열(resin cracking), 층간분리(delamination) 등의 신호들을 다음과 같이 분류 가능하였다.

- 1) 음향방출법을 이용하여 시편의 파괴 과정을 구간 I, II, III으로 구분 가능하였다. 구간 I은 AE 에너지 발생률이 10 이하이며, hit 발생률이 낮은 레진 미소균열에 의한 AE 신호가 발생하였으며, 실제 복합재 패치의 손상이 시작하는 구간 II에서 섬유파단, 수지균열, 층간분리가 발생하였다. 250~600 kHz 주파수 대역은 섬유파단이었으나, 100~250 kHz에서는 알루미늄 균열, 수지균열, 층간분리에 해당하는 주파수 대역으로, 서로 구분하기 어려웠다. 이후 패치의 손상이 끝난 구간 III에서는 알루미늄 균열 진전의 AE 신호들이 발생하였다.
- 2) GFRP 복합재 패치를 1층 구조로 적층한 경우의 음향방출 특성은 구간 II에서 AE 에너지

발생률은 최대 80,000 이상의 AE 신호가 발생하였으며, 알루미늄 크랙 진전($\delta=2.3$ mm) 이후 높은 수준의 AE 에너지 발생률이 발생하였다. 또한 1차 중심주파수는 250~600 kHz 대역에 분포를 하였으며, 파형은 상승 시간이 짧고, 에너지 수준이 높은 섬유파단이 대부분 발생하였다.

- 3) GFRP 복합재 패치를 4층 구조로 적층한 경우는 구간 II에서 섬유파단뿐만 아니라 수지균열, 층간분리가 함께 발생하였다. AE 에너지 발생률과 hit 발생률은 다른 복합재 적층수(1층, 8층, 16층)에 비해 가장 높게 발생하였으며, 특히 $\delta=3.3$ mm에서 패치와 알루미늄 시편과의 층간분리로 가장 높은 AE 신호가 발생하였다. 이에 관련된 파형을 1차 중심주파수를 조사한 결과 100~250 kHz에 대부분 분포하였다. 패치를 8층 구조로 적층한 경우는 4층 구조와 비슷한 거동을 나타냈지만, AE 에너지 발생률과 hit 발생률은 다소 감소하였다.
- 4) GFRP 복합재 패치 16층 구조로 적층한 경우는 구간 II에서 대부분 층간분리가 발생하였으며, hit 발생률은 다른 GFRP 복합재 패치 시편에 비해 30% 정도 낮은 수준이었다. 이와 관련된 개별 신호의 파형은 높은 진폭을 가졌으며, 1차 중심주파수는 100~250 kHz 대역에 분포하였다.

후 기

본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0016942)

참고문헌

- [1] C. L. Ong, R. C. Chu, T. C. Ko and S. B. Shen, "Composite patch reinforcement of cracked aircraft upper longeron : analysis and specimen simulation," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 14, No. 1, pp. 13-26 (1990)
- [2] S. Naboulsi and S. Mall, "Characterization of fatigue crack growth in aluminum panels with a bonded composite patch," *Composite*

- Structure*, Vol. 37, No. 3-4, pp. 321-334 (1997)
- [3] Hossein Hosseini Toudeshky, Bijan Mohammadi and Hamid Reza Daghyani, "Mixed-mode fracture analysis of aluminum repaired panels using composite patches," *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 2, pp. 188-198 (2006)
- [4] Jean Denis Mathias, Xavier Balandraud and Michel Grediac, "Applying a genetic algorithm to the optimization of composite patches," *Computers and Structures*, Vol. 84, No. 12, pp. 823-834 (2006)
- [5] D. Quinas, B. Bachir Bouiadjar, B. Achour and N. Benderdouche, "Modelling of a cracked aluminum plate repaired with composite octagonal patch in mode I and mixed mode," *Material and Design*, Vol. 30, No. 3, pp. 590-595 (2009)
- [6] C. T. Sun, J. Klug and C. Arendt, "Analysis of cracked aluminum plates repaired with bonded composite patch," *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 2, pp. 369-375 (1996)
- [7] Turaga V. R. S. Umamaheswar and Ripudaman Singh, "Modelling of a patch repair to a thin cracked sheet," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 62, No. 203, pp. 267-289 (1999)
- [8] F. Findik and H. Unal, "Development of thermal residual strain in a single sided composite patch," *Composite Part B: Engineering*, Vol. 32, No. 4, pp. 379-383 (2001)
- [9] P. Colimbi, A. Bassetti and A. Nussbauber, "Delamination effects on cracked steel members reinforced by prestressed composite patch," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 39, No. 1, pp. 61-71 (2003)
- [10] 김위대, "복합재 패치를 이용한 노후 항공기의 중앙균열 보수에 관한 연구", *한국항공우주학회지*, Vol. 27, No. 8, pp. 71-78 (1999)
- [11] 정기현, 양원호, 김철, "경사균열을 갖는 복합재료 보강판의 피로균열 성장에 관한 연구", *대한기계학회지 A권*, Vol. 25, No.12, pp. 2091-2099 (2001)
- [12] 김만태, 이경엽, "탄소섬유/에폭시 복합재료 보수된 알루미늄의 피로특성에 대한 연구: 알루미늄 표면처리 효과", *한국정밀공학학회지*, Vol. 21, No. 11, pp. 149-154 (2004)
- [13] A. Chukwujekwu Okafor, Navdeep Singh and Navrag Sinph, "Acoustic emission detection and prediction of fatigue crack propagation in composite patch repairs using neural networks", *American Institute of Physics*, pp. 1532-1539 (2007)
- [14] 권오양, 김성진, 장용준, "복합재 패치로 보수된 알루미늄 패널의 피로균열 성장거동과 AE신호의 유형인식", *비파괴검사학회지*, Vol. 27, No. 1, pp. 48-57 (2007)