

해수 열화 및 원공 손상 CF/Aramid 복합재의 패치 부착이 굽힘거동에 미치는 영향

권우덕¹ · 권오현^{2†} · 윤유성³

The Patch Attachment Effect for Bending Behavior on the CF/Aramid Composites with Seawater Aging and Hole Damage

Woo Deok Kwon¹ · Oh Heon Kwon^{2†} · Yu Seong Yun³

[†]Corresponding Author

Oh Heon Kwon
Tel : +82-51-629-6469
E-mail : kwon@pknu.ac.kr

Received : April 14, 2023
Revised : May 16, 2023
Accepted : June 10, 2023

Abstract : Fiber-reinforced composite materials with carbon, glass, and aramid fibers are widely applied to industrial field structures due to their excellent properties. However, carbon fibers are vulnerable to external impacts, whereas aramid fibers degrade when exposed to water. This study evaluated carbon/aramid fiber composites degraded and damaged by high-temperature saline environments using acoustic emission (AE). The test specimen was molded using an autoclave and immersed in seawater at 70 °C for 224 days. In order to imitate the damage, a 3-mm-diameter hole was drilled using a diamond drill. Additionally, the specimen with the perforation was repaired by patch attachment processing. Three-point bending was used to conduct the flexural experiment, and an AE sensor with a 150-kHz resonance frequency was attached to evaluate the damage and the effect of patch attachment. AE accumulative counts obtained at the maximum load were 69.2, 67.1, and 91.2 for a high-temperature seawater deteriorated condition, a hole specimen, and a repaired patch specimen, respectively. Furthermore, the maximum amplitude of AE was detected at low values of 28 dB, 31.3 dB, and 30.3 dB.

Copyright©2023 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Key Words : acoustic emission, CF/Aramid composite, flexural test, hole, repaired patch, seawater aging

1. 서론

섬유강화 복합재료는 우수한 기계적 성질을 가지고 있어 많은 산업 분야의 구조물 설계에 적용되고 있다. 섬유강화 복합재료에는 대표적으로 아라미드섬유, 탄소섬유, 유리섬유 등이 있으며 높은 비강도 및 비강성과 더불어 내마모성, 내식성, 내열성 등이 매우 우수하다. 이러한 장점으로 원자력, 자동차, 항공우주, 조선, 풍력발전 등에 적용되고 있다¹⁾. 탄소섬유를 적용한 구조물은 외부의 충격하중에서 손상이 발생하기 쉽다²⁾. 아라미드섬유는 높은 인장 강도 및 인장 탄성률이 우수하여 특히 소방, 방탄, 자동차, 통신분야 등 여러 산업

분야에 적용되고 있다^{3,4)}. 하지만 물과 500°C 이상의 고열에 노출된 아라미드섬유는 인장강도가 감소하는 성질을 갖는 것으로 보고되고 있다^{5,6)}. 따라서 탄소아라미드 직조 섬유강화 복합재로 제작하여 서로의 단점을 보완하고 있다⁷⁾. 하지만 아라미드 섬유강화 복합재료로 적용된 기계설비 및 구조물이 특히 해수 환경에 노출되면 균열 및 손상 등이 쉽게 발생할 가능성이 있다. 해수 열화 및 손상된 구조물의 강도를 복원하려면 구조물을 수리하거나 교체해야 한다. 손상된 부위가 크고 넓지 않은 한 교체를 하지 않고 손상된 부위에 섬유로 보강하면 성능을 복원하는 가장 경제적이고 효율적이다^{8,9)}. Hwang 등¹⁰⁾은 탄소섬유/에폭시 복합재에 대한 염수 환

¹부경대학교 안전공학과 박사과정 (Department of Safety Engineering, Pukyong National University)

²부경대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering, Pukyong National University)

³제이엠 에코(주) 연구소 연구소장 (JM Eco Co., Ltd, R&D, Director)

경에 대한 연구를 수행하였다. Derombise 등¹¹⁾은 해양 산업에 사용되는 아라미드 섬유로프에 대한 해수열화 현상을 연구하여 인장강도가 20%이상 감소함을 나타내었다. Oguz 등^{12,13)}은 하이브리드 아라미드/유리섬유 복합재료의 70°C 해수 침지 영향을 조사하였다. 그 결과 인장강도와 더불어 인장 탄성계수의 변화에 대하여 평가하였다. 그러나 탄소/아라미드 직조 섬유복합재에 대하여 해수 노출 및 손상의 평가해석은 미미한 실정이다. 따라서 본 연구는 능직 하이브리드 탄소/아라미드 섬유적층 복합재가 산업현장에서 실제 사용 중에 쉽게 노출될 수 있는 해수조건에서, 드릴 구멍 손상 및 손상된 부위에 동일한 탄소/아라미드 섬유 복합재의 프리프레그 패치로 보강하여 굽힘강도의 변화와 손상에서 발생하는 탄성파를 음향방출(Acoustic Emission ; 이하 'AE'라 한다)기법으로 평가하는 것을 목적으로 한다. AE평가법은 복합재의 결합 및 손상정도를 정량적으로 파악하는데 유용하게 적용되고 있다^{14,15)}. 실험은 AE측정을 수행하면서 3점 굽힘시험을 시행하였다. 시험편은 총 3가지 종류로, 고온해수열화시험편, 드릴구멍 손상해수열화 시험편, 패치 보수 시험편으로 구분하여 하였다. 본 연구의 결과는 해수 조건에서 사용되는 구조물의 손상부위 패치 수리의 안전성 평가에 유용하게 사용될 것으로 여겨진다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 실험재료 및 시험편

본 실험에서 사용하는 시험편은 3가지 종류로, 제작된 시험편의 명칭은 Table 1과 같이 명명하였다. SW, SWH 및 SWR 시험편은 일반시험편을 70°C의 고온 해수를 담은 항온수조에서 224일 동안 보관하였다. SW 시험편은 해수에 노출된 시험편이고, SWH 시험편은 해수에 노출 후 시험편에 직경 3 mm 구멍을 가공하였다. SWR 시험편은 SWH 시험편의 구멍부위에 동일한 섬유로 부착하여 수리한 시험편이다. 시험편의 재료는 하이브리드 능직 탄소/아라미드섬유 복합재료를 사용하였다. 하이브리드로 생산된 탄소/아라미드 원단(Fabric)은 탄소섬유(CF)와 파라아라미드섬유(p-AF)이며 2×2 능직 형태를 가진다. 각각 Toray 및 Kolon에서 생산된 원단은 p-AF는 위사방향(Weft), CF는 경사방향(Warp)이며 두께는 0.22±0.02 mm이다. 기지 재료로는 비닐에스테르 수지(Vinylester epoxy)를 이용하였다. Table 2는 각 섬유 재료의 특성을 나타낸다. CF/p-AF 섬유 원단은 아라미드 전용 절단 가위를 사용하여 원단을 160 mm × 250 mm 크기로 절단하였다. 3점 굽힘시험편을 제작하

기 위하여 절단된 원단은 성형판에 맞추어 섬유를 10 ply로 적층하였고 비닐에스테르 수지를 주입하였다. 성형은 오토클레이브(Autoclave)를 사용하였으며, 성형조건은 온도 79°C, 압력 588 kPa로 하였다. 성형된 탄소/아라미드 섬유 원판은 3점 굽힘 시험편 제작에 사용하기 위하여 ASTM D 7264/D 7264M-07¹⁶⁾에 따라 Fig. 1과 같이 폭 24 mm, 길이 120 mm로 기계 절단하였다. 시험편의 두께는 2.2 mm로 측정되었다. 손상을 모방하기 위하여 고온해수열화시험편의 중앙에서 10 mm 떨어진 위치에 다이아몬드 드릴로 Ø3 mm 크기의 구멍을 가공하였다. 패치 보수 시험편은 드릴 원공이 가공된 고온해수열화 시험편에 적용하였다. 시험편 가공에서 발생한 파편 및 오염 물질을 제거하기 위하여 아세톤으로 세척한 후 섬유 접착 강도를 높이도록 #1000 에머리 페이퍼를 사용하여 시험편 표면을 가공하였다. 전처리된 시험편 표면에 경화제가 혼합된 불포화 폴리에스테르

Table 1. Specifications of the test specimen

Name	Comments
SW	Hot seawater absorption (70°C, 33 weeks)
SWH	Seawater absorption after drill hole processing
SWR	Repaired-patch for hole area

Table 2. The properties of fiber materials

Material (Product)	Thread (count/mm)	Weight	Tensile strength	Woven type
p-Aramid (K300-1420)	Weft 55	200 (g/m ²)	3.6 (GPa)	2×2 Twill
Carbon fiber (T300B-3K)	Warp 55		3.53 (GPa)	
Vinyl-ester Epovia [®] RF-1001	N/A	1.04 (g/cm ³)	0.031 (GPa)	N/A

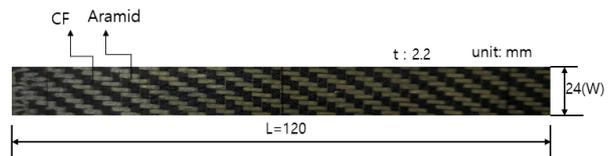


Fig. 1. Geometry of flexural specimen(seawater ageing).

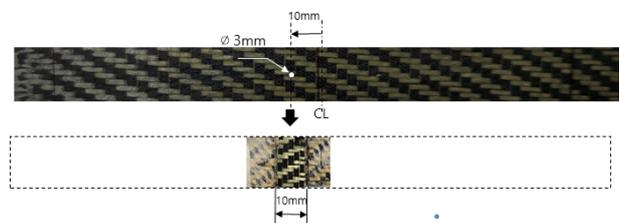


Fig. 2. Photo of drill hole and repaired patch specimen.

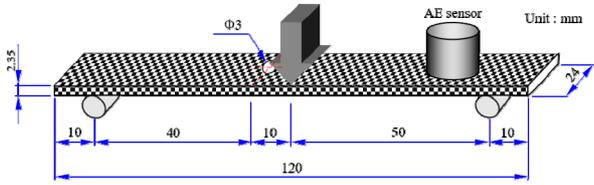


Fig. 3. A geometry of SWH specimen with AE sensor under the flexural test.

수지를 도포하면서 드릴 원공에도 수지를 완충하였다. 이후 시험편과 동일한 섬유 원단으로 부착하였으며 섬유 원단 패치 크기는 가로 24 mm, 세로 10 mm 이며, 시험편의 섬유 배열과 동일한 배열로 부착하였다. 원공이 패치된 시험편에 다시 불포화 폴리에스테르 수지를 도포하였다. 패치 부착 시험편은 상온에서 핫 프레스크기로 24시간 동안 압축(계기압력 0 MPa) 경화하였다. Fig. 2에는 드릴 원공이 가공된 시험편과 원공에 패치보수된 시험편 사진을 나타낸다. 또한 3점 굽힘시험 동안 균열 관측을 위해 사포로 시험편 측면 부위를 정밀 연마하였다.

Fig. 3은 3가지 시험편 중 SWH 시험편의 개략도를 나타낸다.

해수 흡수율 확인을 위해 시험편 무게를 76시간 간격으로 측정하였다. 1×10^4 (g)까지 측정되는 전자저울을 사용하여 시험편 무게를 측정하였고 해수 흡수율(%)은 아래의 (1)식으로 구하였다¹⁷⁾.

$$W(\%) = \frac{W_i - W_0}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

여기서, W는 해수 흡수율, W_i 는 해수 흡수 후 시험편의 무게, W_0 는 해수 흡수 이전의 시험편의 무게를 나타낸다.

2.2 음향 방출(AE)

AE 신호해석에는 AE 전용 AEDSP-32/16보드(PAC Co.)가 장착된 PC 시스템을 사용하였다. AE법은 재료 내부에서 국부적으로 변화할 때 발생하는 탄성파를 획득하는 검사방법이기 때문에 동적인 현상을 실시간으로 관찰하여 결함 유무를 관측하는 것이 가능하다. AE 센서는 공진주파수가 150 kHz의 R15 센서를 사용하였다. 굽힘시험 중 발생하는 음향과 기계 및 전기적 소리의 잡음과 분리하기 위하여 Hsu-Nielsen source법¹⁸⁾을 이용하여 문턱값(threshold)을 26 dB로 고정한 후 샤프 심 파손으로 확인하였다. 시험편 파괴에서 발생하는 음파가 AE 센서에 도달까지의 손실을 줄이기 위하여

음향 임피던스 값이 높은 글리세린 접착 매질(couplant)로 접착하였다. 굽힘시험 중 상부 지그와 접촉하지 않도록 시험편 중심에서 40 mm 떨어진 곳에 한 개의 AE 센서를 부착하였으며 굽힘시험 중 움직이지 않도록 청테이프로 고정하였다. 획득된 AE신호는 전용 해석프로그램인 MISTRAS 2001에 의해 분석된다.

2.3 굽힘 시험법

3점 굽힘시험에서 사용한 시험편은 SW, SWH 및 SWR 3가지 종류이며, 패치가 부착된 SWR 시험편은 패치가 압축하중을 받는 방향으로 굽힘하중을 인가하였다. 3점 굽힘시험편의 하부 지지 경간은 ASTM D 7264/D 7264M-07¹⁶⁾에 따라 100 mm이다. 3점 굽힘시험은 만능인장기(Tinus Olsen, H50KS)를 사용하였다. 3점 굽힘시험은 0.5 mm/min 변위제어로 수행하였다. 균열 성장에 따른 손상부위는 실체 현미경(Kyowa, $\times 20$)과 이동식 테이블(Japan, N.O.W사)을 조립하여 관찰하였다. Fig. 4에 3점 굽힘시험장치를 나타내었다.

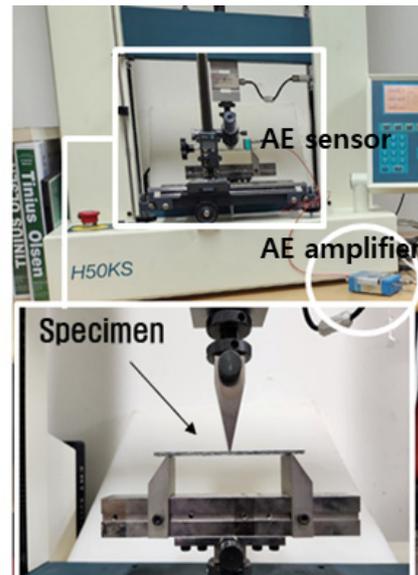


Fig. 4. A photo of an experimental apparatus.

3. 결과 및 고찰

3.1 해수흡수율의 영향

하이브리드 능직 탄소/아라미드 섬유 복합재료 시험편의 시간에 따른 수분흡수율을 Fig. 5와 같이 나타내었다. SW1, SW2, SW3 시험편 3개를 70°C에서 33주(5,376시간) 동안 침지시켰다. 침지 후 시험편 해수흡수량을 약 72시간까지는 3%에서 최대 4%까지 증가하였지만 200시간 이후부터 2% 감소한 후 측정 완료

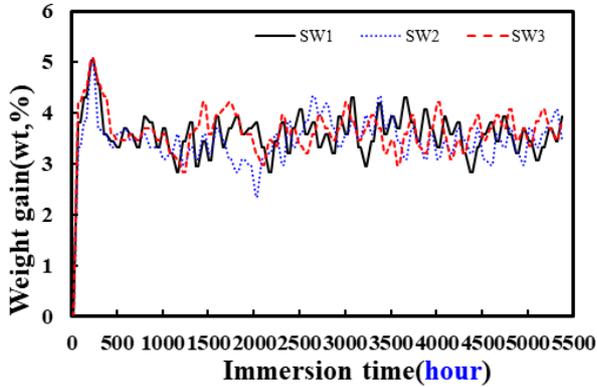


Fig. 5. Seawater absorption gains as a function of immersion time in the seawater environment at 70°C.

까지 큰 변화 없는 상태로 침지 기간까지 유지되어 이러한 결과는 탄소/아라미드 섬유 복합재 구조물의 최대해수 흡수율이 무게 대비 최대 약 3% 내외임을 알 수 있다.

3.2 3점 굽힘시험

Fig. 6은 3점 굽힘시험에서 SW, SWH, SWR 시험편 종류별 하중-하중선 변위 선도를 나타내었다. SWH 시험편의 손상 구멍을 패치로 보수한 SWR 시험편의 경우 가로, 세로 각각 24×10 mm의 패치를 한쪽 면만 부착하였기에 패치가 부착된 면이 압축하중을 받는 방향으로 굽힘시험을 수행하였다. SW 시험편의 최대하중 값은 변위 8.64 mm에서 114.66 N으로 가장 높았다. SWH 시험편은 $\varnothing 3$ mm 구멍으로 인해 SW 시험편의 최대하중 값보다 약 10% 감소한 102.9 N(변위 6.77 mm)으로 나타났다. SWH 시험편은 직경 $\varnothing 3$ mm의 드릴 원공부위에서의 단면감소로 인한 최대하중의 감소 현상이 발생하였으나 패치 보수에 의하여 최대하중은 다시 증가하였다.

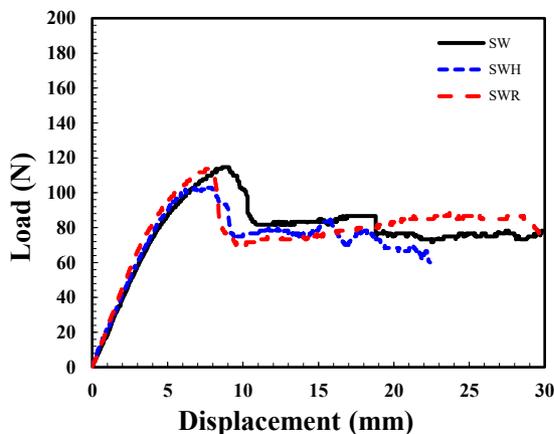


Fig. 6. The load–displacement curves under flexural test.

SWR 시험편은 수지 함침과 섬유 적층으로 인해 SW 시험편의 최대하중보다 1% 감소한 113.68 N과 변위 7.5 mm으로 나타났다. SW, SWH 시험편의 하중 초기 기울기는 거의 유사하게 나타났으며 SWR의 경우, 원공에 수지가 주입되면서 구멍 가공 중 발생한 미소 균열에 수지 함침과 섬유 적층으로 인하여 SW 시험편의 최대하중의 99%까지 최대하중이 복원되었고 변위는 86.8%까지 근접하였다. 시험편에 적층한 섬유의 특성 즉 탄소섬유의 강도와 아라미드 섬유의 강성과 연성으로 압축 하중을 견디는 것을 의미한다.

Fig. 7에는 SW, SWR 시험편의 굽힘시험 후의 시험편 좌굴 파손 현상을 나타내었다.

SW, SWR 시험편의 경우, 하중이 변위 약 3 mm까지 선형적으로 증가하면서 3 mm 이후부터는 하중이 감소를 하지 않은 상태에서 최대하중까지 도달하였다. 이때 시험편 파손 현상에서 탄소섬유에서 미소균열이 발생하면서 일부가 파단 되었고 또한, 균열이 진전되고 일부 적층분리 현상도 발생하였다. 아라미드 섬유는 굽힘하중에 의해 신장과 비틀림이 발생하였다. 상부 지그에 가까운 곳에서 국부좌굴이 생기면서 균열이 발생하고, 최대하중 이후 하중이 급감소한 후 하중이 증가 및 감소를 반복하면서 탄소섬유의 연속 파단과 아라미드 섬유의 신장과 접합이 반복적으로 나타났다.

Fig. 8은 SWH 시험편의 굽힘거동을 나타내고 있다. 하중이 변위 약 3 mm까지 선형적으로 증가하면서 3 mm 이후부터는 하중이 감소 없이 증가하였다. 시험편 파괴 현상에서 탄소섬유는 균열진전, 파단이 발생하였고, 아라미드는 박리가 발생하였다. SW, SWR 시험편과 다르게 상부지그에서 약 10 mm 떨어진 부위에서

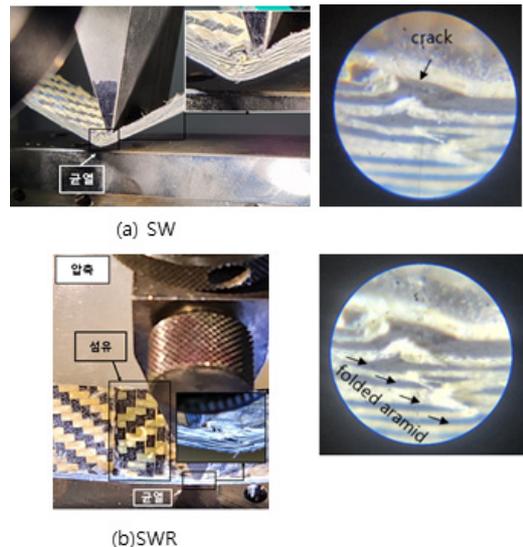


Fig. 7. The flexural behavior of SW and SWR specimen.

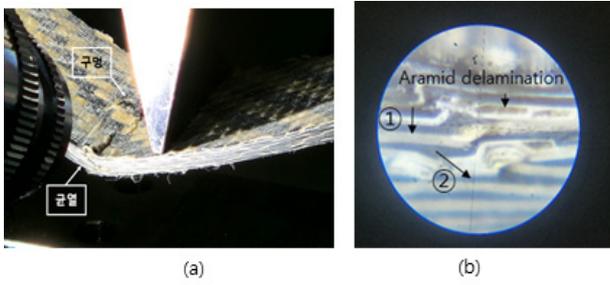


Fig. 8. The flexural behavior of SWH specimen.

파단 형태가 나타났다. SW, SWR 시험편은 상부지그 접촉 부위에 국부좌굴 및 균열이 발생하였으나 SWH 시험편은 원공 부위에 응력이 집중되면서 구멍 부위 국부좌굴과 상부지그에서 약 10 mm 떨어진 부위에서 국부좌굴이 발생하였다. 원공 부위에서의 응력 집중현상으로 인해 SW, SWR 시험편과 비교하여 낮은 하중에서 재료의 파손이 발생하였고, Fig. 8(b)의 ① 방향에서 ② 방향으로 균열이 진전되면서 탄소섬유의 파단이 지속적으로 나타났으며 시험편 적층분리와 아라미드 섬유의 접합과 끊어짐이 발생하였다.

3.3 하중선 변위와 누적 AE count

Fig. 9는 굽힘시험에서 얻어진 하중선 변위와 누적 AE count와의 관계를 나타낸다. AE법의 분석방법은 대표적으로 주파수 분석, 패턴 분석, 위치표정을 들 수 있다. 본 연구에서는 패턴분석에 의해 AE법을 적용하였다. AE count는 AE event 내 문턱값을 넘는 파고의 수로 정의되며, 해당 재료의 손상의 빈도를 나타내는 척도로 이용될 수 있다.

SW 시험편의 경우 하중선 변위가 약 0.3 mm에서 2의 초기누적 AE count가 얻어졌다. 이후 굽힘시험이 종료될 때까지 최대 누적 AE count는 479가 얻어졌다. SWH 시험편의 경우 하중선 변위가 약 0.6 mm에서 초기 5의 누적 AE count가 얻어졌으며, 최대 누적 AE count는 558로 얻어져 Fig. 8에 나타내는 것처럼 손상된 원공의 주위에서 발생된 균열의 영향을 받았다. 또한 SWR 시험편의 경우 하중선 변위가 약 0.3 mm에서 3의 초기누적 AE count가 발생되었으나 굽힘시험이 종료될 때에는 최대 누적 AE count는 1,000이 얻어졌다. 이것은 최대하중에 도달한 이후부터는 굽힘거동에 의하여 패치부의 섬유가 접합현상이 심화되어 발생되었다. 전체적으로 굽힘시험 시작과 동시에는 AE count가 발생되지 않아 잡음은 제거되었다. 최대하중 변위에서는 누적 count가 SW, SWH, SWR 시험편에서 69, 91 및 67로 각각 나타났다. SWH 시험편의 경우, 원공 부위에서

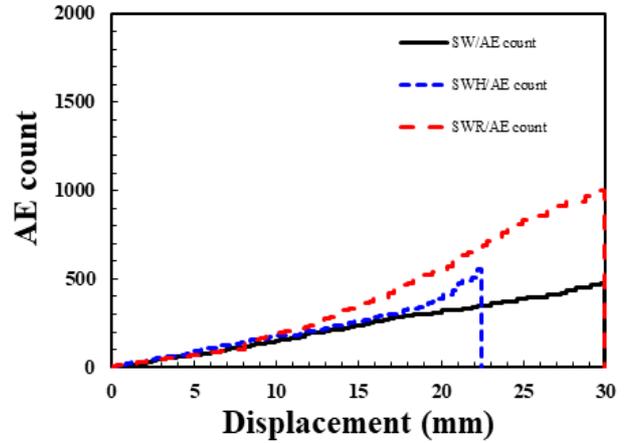


Fig. 9. The relationship between AE count and for load and displacement.

균열, 섬유파단, 박리가 발생한 상태에서 시험편의 손상이 발생하였다는 것을 나타낸다. SWR 시험편의 누적 AE count가 SW 시험편보다 낮게 발생한 것은 수지 함침과 섬유 적층의 영향을 받은 것으로 판단된다. SW, SWH 시험편의 경우 시험편 전체가 해수를 흡수한 상태로 인해 시험편이 열화된 상태로 되어 있어 SWR 시험편보다 약 50% 낮은 최대누적 AE count를 획득하였다. 즉 시험편에 흡수된 해수로 인해 누적 AE count 획득이 낮아짐을 알 수 있다. SWR 시험편은 원공 손상 부위에 수지 함침과 패치섬유 적층으로 시험편의 물리적 성질은 개선되었으나, 최대하중점 이후에는 내부 손상의 발생정도는 오히려 증가되었을 가능성을 보여준다. 이것은 향후 패치보수를 시행할 때 적절한 패치의 크기와 적층수 등의 결정에 고려되어야 할 사항이며 차기 연구과제에서 검토 예정이다.

3.4 AE amplitude

Fig. 10은 굽힘시험에서 얻어진 AE 진폭을 나타낸다. AE count가 손상의 빈도라 할 경우, AE 진폭은 하나의 AE Hit 내의 최대 진폭을 나타내며, 발생원의 크기와 종류에 따라 달라지는 변수이다. SW, SWH, SWR의 누적 AE count는 시험편의 특성에 따라 다르게 나타났고 시간이 경과함에 따라 증가하였지만 AE 진폭은 모든 시험편에 큰 차이가 없이 낮은 저진폭이 나타났다. 초기 AE 진폭은 SW 시험편의 경우 180 sec.에서 27 dB, SWH 시험편은 36 sec.에서 27.3 dB 마지막 SWR 시험편의 경우 36 sec.에서 27 dB이 발생하였다. AE count처럼 굽힘시험이 시작되고 적어도 36 sec. 뒤에 AE 진폭이 발생됨으로 전기적 및 기계적 잡음은 제거되었다. 최대 AE 진폭은 SW 시험편이 28 dB, SWH

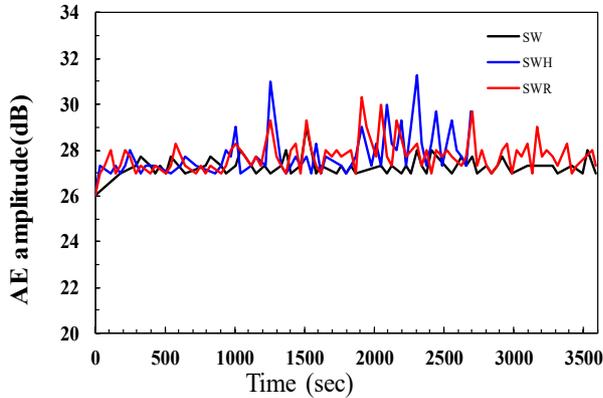


Fig. 10. AE amplitude during flexural test.

시험편 31.3 dB, SWR 시험편이 30.3 dB를 획득되었다. AE 진폭이 낮게 나오는 것은 시험편에 가해지는 하중에 의해 시험편 내부에서 발생하는 탄성파가 시험편이 흡수하고 있는 해수에 간섭을 받고 있다는 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 하이브리드 능직 탄소-아라미드 섬유 복합재로 SW, SWH, SWR 3가지 종류로 제작하여 3점 굽힘 실험을 고온의 해수흡수상태 조건에서 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 하이브리드 능직 탄소-아라미드 섬유 복합재의 수분흡수율이 최대 3% 내외로 얻어졌다.

(2) SWH 시험편의 원공 손상부위에 수지 함침과 패치 섬유 적층한 SWR 시험편의 최대하중은 113.68 N으로 나타났으며 SW 시험편 최대하중의 99%까지 복원되었고 변위는 86.8%까지 근접하였다.

(3) 최대하중이 모든 시험편 중 가장 높게 나타났는 고온의 해수를 흡수한 시험편에 직경 $\varnothing 3$ mm 원형 구멍 가공한 시험편의 최대하중은 10% 감소하였다.

(4) SWH의 경우, 원공 부위에서 손상이 발생하였으며, SWR 시험편은 패치 적층으로 물리적 성질은 개선되었으나, 최대 하중점 이후 내부 손상의 발생 증가 가능성이 나타났다.

References

- 1) Y. R. Ryu, Y. S. Yun and O. H. Kwon, "AE Application for Fracture Behavior of SiC Reinforced CFRP Composites", J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 3, pp. 16-21, 2016.
- 2) H. Rahmani, S. H. M. Najafi and A. Ashori, "Mechanical

- Performance of Epoxy/Carbon Fiber Laminated Composites", Journal of Reinforced Plastic Composites, Vol. 33, No. 8, pp. 733-740, 2014.
- 3) J. W. S. Hearle, "High-Performance Fibers", Woodhead Pub. Ltd. New York, pp. 23-58, 2001.
- 4) L. Nicolais, M. Meo and E. Milella, "Composite Materials, A Vision for the Future", Springer, London, 2011.
- 5) K. Komai, K. Minoshima, K. Tanaka and T. Tokura, "Effects of Stress Waveform and Water Absorption on the Fatigue Strength of Angle-ply Aramid Fiber/Epoxy Composites", International Journal of Fatigue, Vol. 24, No. 2, pp. 339-348, 2002.
- 6) C. Y. Yue, G. X. Sui and H. C. Looi, "Effects of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Kevlar-29 Fiber", Composites Science and Technology, Vol. 60, No. 3, pp. 421-427, 2000.
- 7) A. K. Bandaru, L. Vetiyatil and S. Ahmad, "The Effect of Hybridization on the Ballistic Impact Behavior of Hybrid Composite Armors", Composites Part B, Vol. 76, pp. 300-319, 2015.
- 8) K.B. Katnam, L. F. M. D. Silva and T. M. Young, "Bonded Repair of Composite Aircraft Structures : A Review of Scientific Challenges and Opportunities", Progress in Aerospace Sciences, Vol. 61, pp. 26.42, 2013.
- 9) W. Zhou, X. I. Ji, S. Yang, J. Liu and L. H. Ma, "Review on the Performance Improvements and Non-destructive Testing of Patches Repaired Ccomposites", Composite Structures, Vol. 263, 113659, 2021.
- 10) Y. E. Hwang and S. H. Yoon, "Effect of Patch Hybridization on the Compression Behavior of Patch Repaired Glass/Epoxy Composite Laminates using Acoustic Emission Monitoring", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 36, No. 10, pp. 1261-1266, 2012.
- 11) G. Derombise, E. Chailleux, B. Forest, N. Lacotte, L. V. V. Schoors and P. Davies, "Long-term Mechanical Behavior of Aramid Fibers in Seawater", Polymer Engineering & Science, Vol. 51, pp. 1366-1375, 2011.
- 12) Z. A. Oğuz and A. Erklığ, "Hydrothermal Aging Effect on the Tensile Properties of Hybrid Aramid/Glass/Epoxy Composites", Journal of Composite materials, Vol. 56, Issue 24, pp. 3695-3714, 2022.
- 13) Z. A. Oguz, A. Erklığ and O. Y. Bozkurt, "Degradation of Hybrid Aramid/Glass/Epoxy Composites Hydrothermally Aged in Distilled Water", Journal of Composites Materilas,

- Vol. 55, Issue 15, pp. 2043-2060, 2021.
- 14) M. Amini, R. A. Gazik, F. Honarvar and A. Montazeri, "Analysis of Failure Mechanisms of Degraded Hybrid Glass-Carbon Composites in Acidic Medium: Insights from Acoustic Emission Analysis", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 134, 106082, 2022.
 - 15) X. Wang, H. Xie, Y. Tong, B. Wang and H. Hu, "Three-point Bending Properties of 3D_C/C_TiC_Cu Composites", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 184, 109693, 2023.
 - 16) ASTM D 7264/D 7264M, 7 Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
 - 17) W. D. Kwon, O. H. Kwon and W. R. Park, "The Effects of Temperature and Water Absorption on Failure Behaviors of Carbon / Aramid Fiber Composites", *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 37, No. 4, pp. 11-19, 2022.
 - 18) T. L. Anderson, *Fracture Mechanics : Fundamentals and Applications*, CRC Press, Florida, 1994.