

## 論文

## 염수 환경에 노출된 고강성 탄소/에폭시 복합재의 물성치 변화 연구

문철진\*, 이청락\*\*, 권진화\*\*\*\*, 최진호\*\*\*, 조맹효\*\*\*, 김태경\*\*\*

## An Experimental Study on the Mechanical Properties of High Modulus Carbon-Epoxy Composite in Salt Water Environment

Chul-Jin Moon\*, Cheng-Lak Lee\*\*, Jin-Hwe Kweon\*\*\*\*, Jin-Ho Choi\*\*\*

## ABSTRACT

The main objective of this study is to investigate the effect of salt water on the mechanical properties of a high modulus carbon-epoxy composite. Specimens were made of a carbon-epoxy composite UPN139B of SK Chemical and tested under inplane tension and shear after 0, 1, 3, 6, 9, and 12 months immersion in 3.5% salt water. Acceleration technique such as temperature elevation was not used. The tensile strengths and moduli in fiber and matrix direction did not show any remarkable degradation until 12 months immersion. In contrast to the tensile properties, shear strength and modulus started to gradually decrease up to about 10% of values of dry specimens after 12 months immersion. It was confirmed through the test that the material UPN139B can be an effective material for the shell structures in salt water to resist against the external pressure buckling because of the high fiber directional modulus and corrosion resistance.

## 초 록

본 연구에서는 염수환경이 고강성 탄소-에폭시 복합재의 기계적 특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 시편은 UPN139B 탄소-에폭시 복합재로 제작하였고, 3.5% 염수에 0, 1, 3, 6, 9, 12 개월간의 침수 후 면내 인장시험과 전단시험을 수행하였다. 실험에서 온도 조절과 같이 흡수 시간을 절약하기 위한 특별한 가속방법은 사용하지 않았다. 섬유방향 및 기지방향 인장강도와 강성의 경우 12개월 동안의 침수에도 불구하고 특별한 변화를 발견할 수 없었다. 반면 12개월 침수 후 전단강도와 강성은 염수에 노출되지 않은 시편에 비해 약 10% 내외의 감소를 보였다. 본 연구를 통하여 UPN139B가 우수한 섬유방향 강성과 내부식성으로 인하여 염수환경에서 외부수압에 의한 좌굴을 지지해야 하는 구조물의 설계에 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

**Key Words** : 탄소-에폭시(Carbon-epoxy), 기계적 물성치(Mechanical properties), 염수침수시험(Salt water immersion test)

## 1. 서 론

복합재료의 높은 비강성(specific stiffness)은 무게 증가를 최소화하면서 구조물의 변형에 대한 저항능력을 향상시켜 기존 금속재료에 비해 복합재 구조의 좌굴에 대한 지지능력을 높일 수 있게 한다. 또한 복합재료는 고분자 수지와 탄소섬유

를 사용하기 때문에 수분 및 각종 화학물질에 대해 높은 내부식성을 가진다. 복합재료의 이러한 우수한 기계적 특성과 내식성은 복합재료를 조선해양 구조물에 적용할 수 있게 하는 근거가 되고 있다. 실제로 최근 들어 중량 및 부식의 문제가 모두 중요한 소형 수중운동체 등에 복합재료를 적용하기 위한 연구가 이루어지고 있다[1-3].

\* 경상대학교 대학원 항공공학과

\*\* 경상대학교 산업대학원 항공기계공학과, 현 한국항공우주산업(주)

\*\*\*\*+ 경상대학교 기계항공공학부 교수/항공기부품기술연구소. 교신저자(E-mail:jhkweon@gnu.ac.kr)

\*\*\* 경상대학교 항공기부품기술연구소

복합재료를 염수환경에 노출되는 수중운동체 등의 구조물에 사용하기 위해서는 수압에 대한 구조적 특성의 연구도 필요하지만, 일차적으로 구조 연구를 위한 재료특성이 정확히 밝혀져야 한다. 특히 장시간 염수환경에 노출되는 구조인 경우 염수환경이 복합재료의 기계적 특성에 어떤 영향을 미치는지에 대한 정확한 정보가 있어야 한다. 또한 이러한 특성은 복합재료를 구성하는 보강섬유나 기지의 종류, 염수의 농도와 온도 등에 따라서도 달라지므로 관련 데이터베이스를 구축하는 일은 매우 광범위한 작업이다.

국내에서는 수분흡수가 탄소 복합재의 열화 및 압축 특성에 미치는 영향에 대한 연구[4-6]와, 염수 혹은 증류수 환경에 노출된 유리섬유 복합재의 내구성에 대한 연구[7-10]가 일부 수행된 바 있다.

해외에서는 1970년대부터 Judd[11]와 Loos 등[12]이 해수와 증류수가 탄소/에폭시 복합재의 내구성이 미치는 영향에 대한 연구를 시작하였고, 이후에도 염수환경에서의 피로 및 내구성에 관한 연구는 꾸준히 진행되고 있다[13-15].

그러나 여러 연구에도 불구하고, 지금까지는 1년 이상 장시간 염수환경에 노출시킨 복합재의 기계적 특성 변화에 관한 연구 사례는 많지 않다. 따라서 저자들은 선행연구[16]를 통해 SK 케미컬에서 생산하고 있는 탄소-에폭시 고강도 복합재 USN125B에 대하여, 실제 해수에 가까운 3.5% 염수가 복합재료의 기계적 특성에 미치는 영향을 살펴본 바 있다. 본 연구는 선행연구[16]의 후속연구로서, 고강성 복합재 UPN139B에 대한 염수환경 실험을 수행하였다. 구조물이 좌굴에 대한 높은 저항성을 갖기 위해서는 강도보다 강성이 커야 하는데 UPN139B는 USN125B에 비해 강성이 크게 개선된 재료이다. 침수기간은 0, 1, 3, 6, 9, 12 개월 이고, 면내 인장시험과 전단시험을 수행하였다.

## 2. 시험

### 2.1 시편 제작

#### 2.1.1 인장시험 시편

본 시험에 사용된 재료는 SK 케미컬사의 UPN139B 고강성 탄소-에폭시 프리프레그이다. 이번에 사용한 UPN139B와 선행연구[16]에서 사용한 USN125B 탄소섬유의 재료특성은 Table 1에 정리하였다. USN125B의 탄소섬유는 Mitsubishi Rayon사 TR50, UPN139B는 같은 회사의 HS40을 사용하고 있다. 수지는 두 재료 모두 같고 성형 후 밀도는  $1.2 \text{ g/cm}^3$ , 프리프레그 상태의 수지함유량은 33%, 두께는 0.122 mm(USN125B)와 0.132 mm(UPN139B) 이다.

ASTM D3039[17] 규격에 따른 섬유방향 및 지지방향 인장 시험 시편의 크기는 Fig. 1에 제시하였다. 섬유방향 인장시험은 일방향으로 8장, 지지방향 인장시험은 일방향으로 20장을 적층하였다. 성형 후 시편의 평균두께는 섬유방향 0.936 mm, 지지방향 2.34 mm이고, 한 층의 평균두께는 0.117 mm이다.

Table 1 Mechanical properties of carbon fibers

Properties	TR50(USN125B)	HS40(UPN139B)
Tensile Modulus (GPa)	240	451
Tensile Strength (MPa)	4800	4410
Elongation (%)	2.0	1.0
Density ( $\text{g/cm}^3$ )	1.82	1.85

실제 산업현장에서 복합재료의 가공면이 수분에 직접 노출되는 경우는 없으므로, 시편의 가공면에서 수분이 침투하는 것을 막기 위해 시편 가공면에는 방수 페인트를 칠하였다. 이렇게 함으로써 실제 제품에서의 시간에 따른 수분율(moisture content)의 변화에 보다 가까운 환경을 조성할 수 있을 것으로 판단하였다. 그러나 시험 결과 수분율이 포화상태에 도달하는 시간이 늘어나게 하는 효과가 발생하여 시험시간 절약의 측면에서는 효과적이지 못한 방법으로 판단된다.

시편은 침수기간별로 각각 5개씩 제작하였다. 침수 전 탭(tab) 속으로 수분이 침투하는 것을 방지하기 위하여 접착식 실링 테이프(sealing tape)를 사용하여 탭 부분을 밀봉하였다. 침수를 위해 사용한 수조는 Fig. 2에 보인 바와 같이 특별한 가속장치 없이 보통의 아크릴 재질로 제작하였고, 3.5%의 일정한 염도 유지를 위해 주 1회 주기적으로 물을 보충하였다. 시편은 실험 직전에 수조에서 꺼내고, 마른 수건으로 깨끗이 닦은 후 수분율을 측정하고, 섬유방향 및 지지방향으로 변형률 게이지를 부착하였다. 시험은 수조에서 시편을 꺼낸 뒤 100분 이내에 완료하였다.

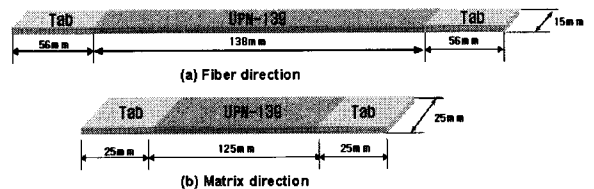


Fig. 1 Specimen dimensions for tensile test.



Fig. 2 Salt water bath.

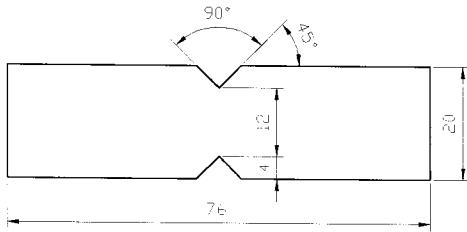


Fig. 3 Shear test specimen (unit: mm).

2.1.2 전단시험 시편

전단 물성치 측정을 위한 시편은 ASTM D5379[18] 규격에 따라 제작하였다. 총 40장의 프리프레그를 사용하여 성형하였고, 전체 두께는 4.68 mm이다. 제작된 모재를 76 mm×20 mm로 재단한 후 Fig. 3에 보인 바와 같이 규격에 따라 전용 가공장치를 이용하여 중앙 부분에 직각의 노치(notch)를 만들었다. 시편 제작 후 변형률 게이지를 ±45°로 부착하였다. 시편의 침수 방법은 인장시편의 경우와 동일하다.

2.2 수분율

시편의 평균 수분율(침수 후 시편 전체에 대한 수분 무게의 비)은 Table 2에 나타내었다. 수분율 측정에 사용된 저울은 A&D사의 GX-400으로서 1/1000 g까지 측정 가능하다. 시편의 무게는 수조에서 꺼낸 후 마른 수건으로 표면 수분을 제거한 후 변형률 게이지를 부착하기 전에 측정하였다. 1년 후 시편의 수분율은 평균 0.36%(전단)~1.65%(섬유인장)이다. 12개월 후 지지방향 시편의 수분율은 시험과정상의 실수로 측정하지 못하였다.

시편에 따라 수분율이 달라지는 이유는 시편의 두께와 염수에 노출되는 표면적과 관계가 있다. 수분이 포화되는데 필요한 시간은 두께가 두꺼울수록 길어지고, 수분에 노출되는 표면적이 넓어질수록 짧아질 것이다. 섬유방향 인장시편의 경우 상대적으로 두께(0.936 mm)가 얇고, 부피에 비해 염수에 노출되는 면적이 넓은 반면 전단시편은 두께(4.68 mm)가 두껍고 페인팅 처리가 된 가공면을 제외하면 수분에 노출되는 면적이 작다. 지지방향 인장시편(2.34 mm)의 경우 인장시편과 전단시편의 중간에 위치한다.

앞에서도 밝힌 바와 같이 가공면에 방수 페인트를 칠하지 않은 USN125B의 경우, 12개월 침수 후 수분율이 0.62%(전단)와 1.63%(섬유 및 지지 인장)였다. 이번에 실험을 수행한 UPN139B의 경우, 12개월 침수 후 섬유방향 시편의 수분율은 USN125B와 비슷하지만 지지방향 시편은 USN125B의 약 30%, 전단시편은 58%에 불과하다. 그 원인은 시편 가공면의 방수 페인트 때문인 것으로 판단된다. Fig. 4와 같이 전단시편과 지지방향 인장시편의 경우 가공면에서 보강섬유의 단면이 많이 드러나게 되고, 따라서 섬유와 기지의 계면이 수분에 많이

Table 2 Moisture content (% month)

Specimen	Time	1	3	6	9	12
Fiber Dir		1.17	1.21	1.21	1.53	1.65
Matrix Dir		0.16	0.49	0.52	0.55	-
Shear		0.13	0.16	0.30	0.32	0.36
Average		0.49	0.62	0.68	0.80	1.01

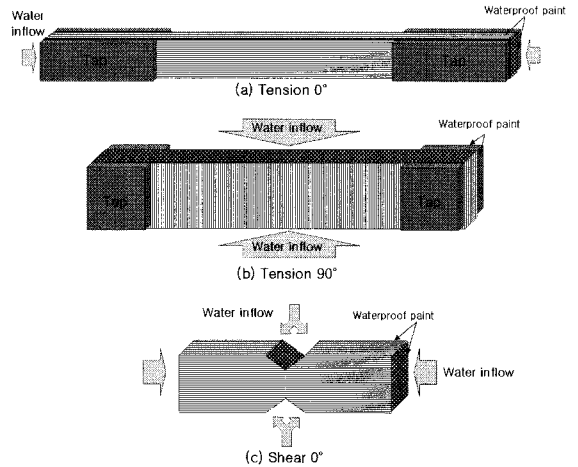


Fig. 4 Water absorbing mechanisms.

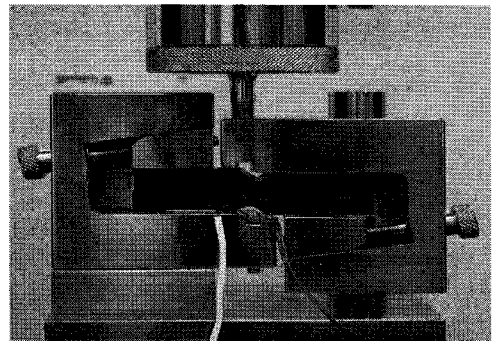


Fig. 5 Shear test set-up.

노출되게 된다. 이로 인해 수분의 유입경로가 형성되게 되는데 가공면에 페인트를 칠함에 따라 수분율이 크게 저하된 것으로 볼 수 있다.

2.3 인장 및 전단 시험

인장 및 전단시험에 사용한 재료시험기는 Instron 5582이고, 상온에서 분당 1 mm의 변위제어로 하중을 가하였다. Fig. 5에 V-노치 전단시험 치구 및 시편을 보였다.

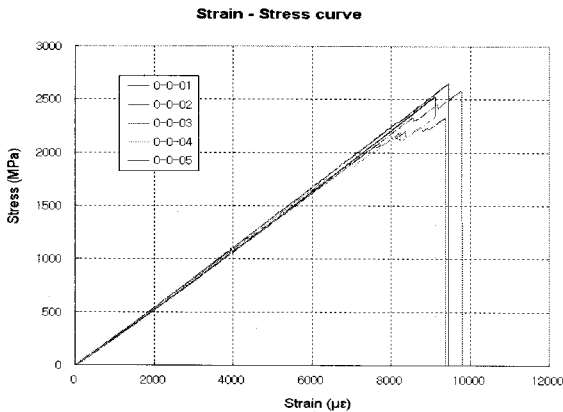
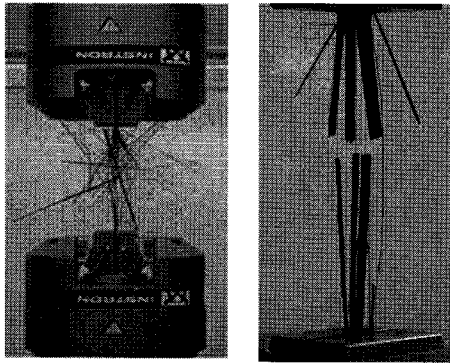


Fig. 6 Stress-strain curves of fiber direction tensile specimens in dry-room temperature environment.



(a) USN125B

(b) UPN139B

Fig. 7 A typical failure of fiber direction tensile test.

### 3. 결과 및 토론

#### 3.1 섬유방향 인장 특성

UPN139B의 전형적인 섬유방향 응력-변형률 곡선은 Fig. 6에 제시하였다. 거의 모든 섬유강화 복합재료에서 그렇듯이 파손 직전까지 응력-변형률 곡선은 선형적임을 알 수 있다. 강성과 Poisson 비는 규격에서 허용한 범위 내에서 선형성이 비교적 잘 유지되는 1000~3000 $\mu\text{e}$  부분에서 결정하였다.

파손은 Fig. 7에 보인 바와 같이 갑자기 섬유가 끊어지면서 발생한다. USN125B는 폭발적인 형태로 발생하면서 기지가 떨어져 나가고, 섬유가닥이 드러나지만, UPN139B에서는 섬유에 기지가 붙어있는 형태의 파손이 발생한다. 이러한 차이는 침수기간에 상관없이 공통적으로 나타났다.

Fig. 8에 UPN139B와 USN125B에 대한 섬유방향 인장강도를 제시하였다. UPN139B의 경우 1, 3, 6, 9, 12개월 침수 후의

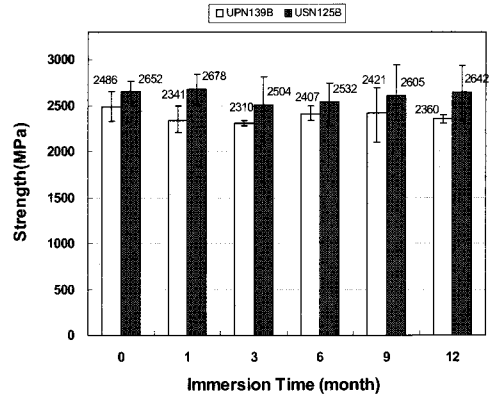


Fig. 8 Strengths in fiber direction for various immersion times.

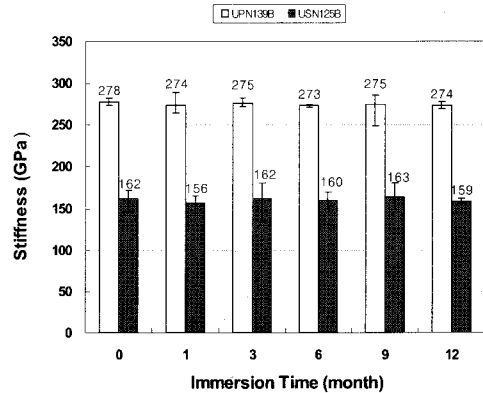


Fig. 9 Stiffnesses in fiber direction for various immersion times.

강도는 각각 2341, 2310, 2407, 2421, 2360 MPa이다. 침수 전 상온에서의 강도 2486 MPa과 비교할 때 각각 5.8, 7.1, 3.1, 2.6, 5.1%가 저하된 값이다. 침수 1개월 후부터 강도의 저하가 발생하고, 12개월 후 약 5.1%가 강도저하가 나타나지만 뚜렷한 경향을 발견하기는 어렵다. USN125B와 비교할 때 섬유방향 강도는 침수 전 약 94%, 12개월 침수 후 약 89% 정도로 약간 낮다.

섬유방향 인장 강성은 Fig. 9에 제시하였다. UPN139B를 기준으로 침수 1, 3, 6, 9, 12개월 후의 강성은 각각 274, 275, 273, 275, 274 GPa이다. 침수 전 상온에서의 강성 278 GPa과 비교할 때 최대 1.8%가 저하된 값이지만 데이터의 분산을 고려할 때 의미가 없는 수준이다. 이러한 경향은 USN125B에서도 동일하다. UPN139B와 USN125B를 비교하면, UPN139B가 침수 전 278 GPa, 12개월 침수 후 274 GPa인 반면 USN125B는 각각 162, 159 GPa로서 UPN139B가 약 72% 가량 높게 나타난다. 이는 좌굴이 설계의 중요한 기준이 되는 수중운동체 등의 구조물 설계에서 매우 중요한 의미를 갖는

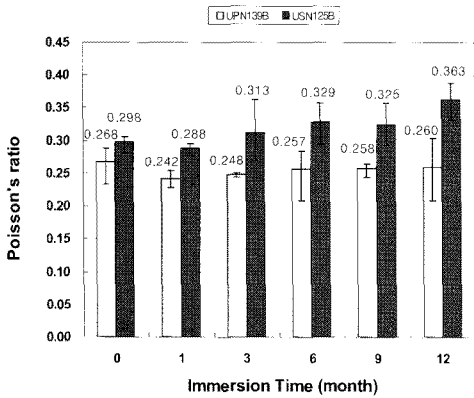


Fig. 10 Poisson's ratios for various immersion times.

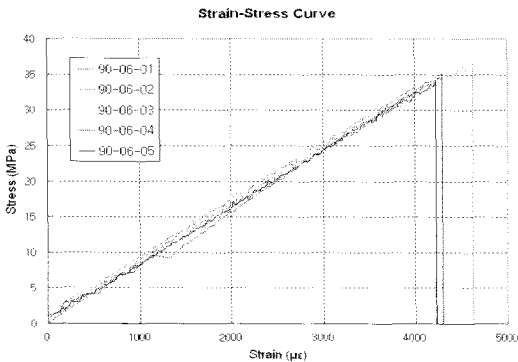


Fig. 11 Stress-strain curves of matrix direction tensile test in dry-room temperature.

결과이다. 외부압력을 받는 압력용기 형태의 구조물의 좌굴하중은 재료의 강도가 아닌 강성에 의해 결정되기 때문이다.

Fig. 10에 보인 UPN139B의 Poisson 비는 침수 전과 비교하여 침수기간에 따라 9.7, 7.5, 4.2, 4.3, 3%의 저하를 보이지만 데이터의 분산을 고려할 때 특별한 경향성이 없는 것으로 보인다. 하지만 USN125B의 경우 3개월 침수 후 4.8% 증가 후 12개월 침수 후에는 18.1%까지 증가한다.

### 3.2 지지방향 인장 특성

지지방향 인장 시편은 형상과 적층순서를 제외하고는 섬유방향 인장시험과 동일하다. Fig. 11에 보인 바와 같이 응력-변형률 곡선의 형태도 데이터의 분산이 더 심하다는 점을 제외하면 섬유방향에서와 유사하다. 전형적인 파손의 형태는 Fig. 12에 보였다. 시편의 강성은 규격에 따라 1500~3000μE 부분을 이용하여 결정하였다.

염수환경에 노출된 UPN139B 복합재의 지지 방향에 대한 물성치 변화는 섬유방향의 물성치 변화에 비해 분산이 큰 특징이 있다. 이는 섬유의 기계적 특성에 의해 주로 결정되는 섬유

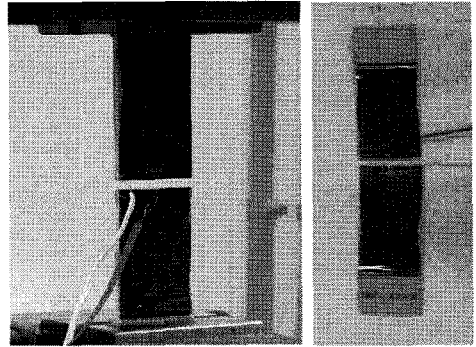


Fig. 12 A typical failure of matrix direction tensile test.

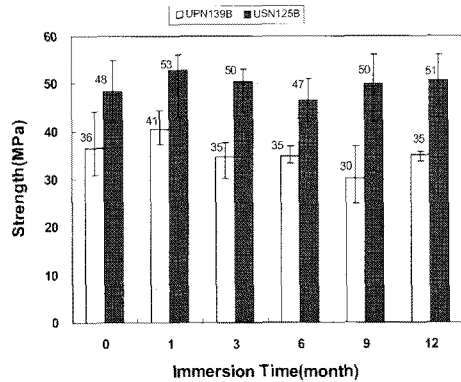


Fig. 13 Strengths in matrix direction for various immersion times.

방향 특성과 달리, 지지방향의 특성은 여러 가지 재료적 결합의 가능성이 높은 지지와 섬유의 계면에 의해 결정되기 때문에 판단된다.

Fig. 13에 UPN139B와 USN125B에 대한 침수 후의 강도를 제시하였다. UPN139B의 1, 3, 6, 9, 12개월 침수 후의 지지방향 강도는 각각 41, 35, 35, 30, 35 MPa이다. 침수 전 상온에서의 강도 36 MPa와 비교할 때 1개월 후(13.9% 증가)와 9개월 후(16.7% 감소)를 제외하면, 3, 6, 12개월 침수 후의 값의 변화는 무시할 만하다. 전체적으로 12개월 동안 염수환경에 의한 의미 있는 강도 변화는 없는 것으로 판단된다. USN125B에서도 침수 전 강도가 48 MPa이고, 12개월 침수 후 강도가 51 MPa로서 미세하게 증가하였다. UPN139B의 지지방향 강도를 USN125B와 비교하면 침수 전 75%, 12개월 침수 후 69% 정도로 나타난다.

지지방향 강성은 Fig. 14에 제시하였다. UPN139B의 경우 12개월 침수 후 3% 가량 미세하게 증가한 값이 관찰되고, USN125B에서는 2% 가량 감소하지만, 데이터의 분산을 고려할 때 두 경우 모두 12개월 동안 침수의 영향은 거의 받지 않는 것으로 보인다. UPN139B의 지지방향 강성은 USN125B에 비해 침수 전 82%, 12개월 침수 후 86% 정도로, USN125B가 높다.

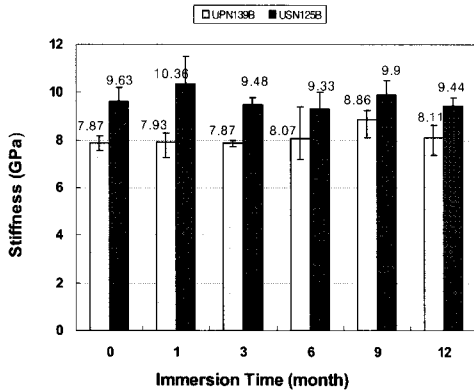


Fig. 14 Stiffnesses in matrix direction for various immersion times.

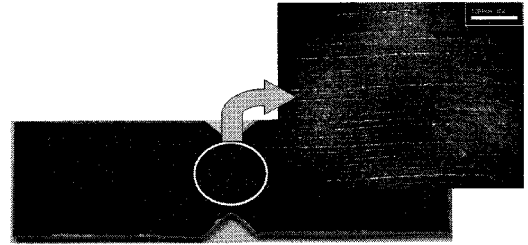


Fig. 16 A typical failure of V-notch shear test specimen.

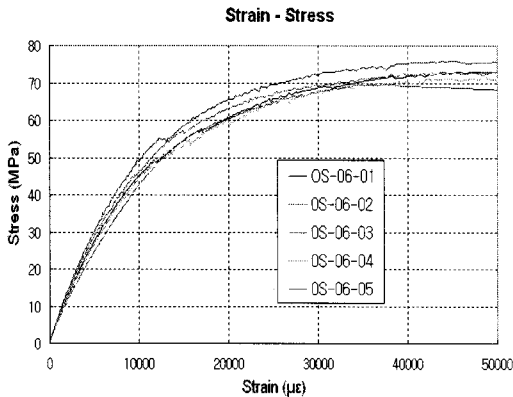


Fig. 15 Stress-strain curves of V-notch shear test in dry-room temperature.

### 3.3 전단 특성

Fig. 15에 보인 바와 같이 전단시험에서는 변형률이 5%를 넘어설 때까지 파손이 일어나지 않았기 때문에 ASTM D5379의 규격에 따라 변형률이 5%인 곳에서 강도를 결정하였다. 전단강성은 변형률 2000~6000 $\mu\epsilon$ 에서 결정하였다. 시편의 파손 모드는 Fig. 16에서와 같이 면내전단파손(fiber splitting) 형태로 발생하였다.

염수 환경에 노출된 UPN139B 복합재의 섬유방향 전단시험에 대한 강도의 변화는 Fig. 17에 나타내었다. 침수 3개월까지는 거의 변화가 발생하지 않았으나, 침수 6개월 후부터 서서히 감소하여 침수 12개월에는 67 MPa로 침수 전 74 MPa과 비교하여 9.5%의 강도 감소가 나타났다. USN125B의 경우에는 그 경향이 더 뚜렷하다. 그러나 여기서 주의해야 할 것은 UPN139B는 가공면에서의 방수 페인팅으로 인하여 12개월 후의 수분율이 USN125B의 58%에 불과하다는 사실이다. 따라서 UPN139B와 USN125B의 전단강도 감소율을 직접 비교하는 것은 곤란하다.

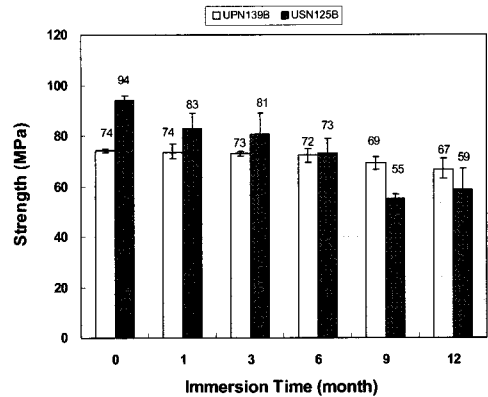


Fig. 17 Shear strengths for various immersion times.

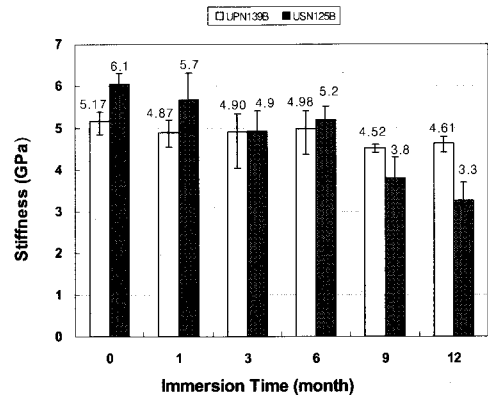


Fig. 18 Shear stiffnesses for various immersion times.

UPN139B의 전단강성의 변화는 Fig. 18에 제시하였다. 침수 전 5.17 GPa에서 침수 1개월부터 감소하여, 9개월 후에는 12.6%, 12개월 후에는 10.8%의 감소를 보인다. USN125B의 경우 12개월 침수 후 46%가 넘는 전단강성 감소를 보이지만 앞에서 언급한 바와 같이 수분율이 다르기 때문에 침수기간만으로 상대적인 비교를 하는 것은 어렵다. USN125B는 6개월 침수 후에 이미 UPN139B의 12개월 후 수분율과 비슷한 0.37%의 수분

율을 가진다. 이 때 강도와 강성의 감소율은 각각 22.3%와 7.4%이다. UPN139B의 12개월 후 전단강도와 강성의 감소율이 각각 9.5%와 10.8%인 점을 고려하면 수분율에 따른 강도저하는 USN125B에서 현저하고, 강성저하는 UPN139B에서 약간 더 큰 것을 알 수 있다. 전단강성의 절대값을 비교하면 UPN139B의 전단강성이 침수 전 5.17 GPa, 12개월 침수 후 4.61 GPa이고, USN125B는 침수 전 6.05 GPa, 12개월 침수 후 3.26 GPa이다. 침수기간으로만 비교하면 침수 전에는 USN125B의 전단강성이 높지만 12개월 침수 후에는 UPN139B의 전단강성이 더 높게 나타난다. 그러나 동일한 수분율에서 두 재료의 전단강성을 고려하면 미세하지만 USN125B가 0.62 MPa 가량 더 높다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고강성 탄소섬유 복합재료 UPN139B가 염수환경에 노출될 때 노출시간에 따라 면내 인장 및 전단 물성치가 어떻게 달라지는지를 연구하였다. 시험 결과 섬유방향은 물론 기지방향의 경우에도 12개월까지 인장 강도 및 강성의 뚜렷한 변화는 발견되지 않았다. 그러나 12개월간 염수환경에 노출된 시편의 전단 강도와 강성의 경우 염수환경에 노출되지 않은 시편 대비 각각 약 10% 정도 저하되었다. 구조물의 내좌굴 설계에 가장 큰 영향을 미치는 섬유방향 인장강성은 UPN139B의 경우 12개월 침수 후에도 95% 이상 유지되었다. 그러나 아직 모든 시편에서 수분율이 증가하고 있는 과정에 있으므로 현재 수조에 보관된 시편에 대한 추가적인 시험이 필요한 상황이다.

#### 후 기

본 연구는 국방과학연구소 지정 수중운동체 특화연구센터와 한국학술진흥재단(중점연구소지원사업(KRF-2005-005-J09902))의 지원에 의해 수행되었음.

#### 참고문헌

- 1) Kimpara I., "Use of advanced composite materials in marine vehicles," *Marine structures*, Vol. 4, No. 2, 1991, pp. 117-127.
- 2) Summerscales J., "Design of marine structures in composite materials," *Composite science and technology*, Vol. 41, No. 1, 1991, pp. 99-100.
- 3) Ross, C. T. F., "A conceptual design of an underwater vehicle," *Ocean Engineering* Vol. 33, No. 16, 2006, pp. 2087-2104.

- 4) 서상하, 이덕보, 문창권, "탄소섬유 강화 복합재료의 수분에 의한 열화 및 회복에 관한연구," 한국복합재료학회지, 제17권, 제3호, 2004, pp. 8-14.
- 5) 김원근, 문창권, "적층형 탄소섬유 복합재료의 기계적 성질에 미치는 수분환경의 영향," 한국해양공학회지, 제 13 권, 제4호, 1999, pp. 1225-0767.
- 6) 이지훈, 이정엽, 김현주, "해수가 흡수된 Carbon-Epoxy 적층복합재의 압축특성에 대한 연구-정수압력 영향," 한국해양공학회지, 제16권, 제4호, 2004, pp. 191-195.
- 7) 윤성호, "염수환경에 노출된 유리섬유 직물/페놀 복합재의 내구성 평가," 한국복합재료학회지 제18권, 제4호, 2005, pp. 27-34.
- 8) 문창권, 구자삼, "흡수에 의한 FRP의 내구성에 관한 연구," 한국해양공학회지, 제11 권, 제2호, 1997, pp. 48-56.
- 9) 최영호, 강태진, 이경우, "수분과 열피로에 의한 복합재료의 물성변화에 대한 연구," 한국섬유공학회지 제37권, 제 5호, 2000, pp. 273-279.
- 10) 김재현, 문창권, "장시간의 수분흡수가 유리섬유/에폭시 수지 복합재료의 계면특성에 미치는 영향," 한국고분자학회지, 제22권, 제3호, 1998, pp. 468-477.
- 11) Judd, N. C. W., "Absorption of water into carbon fibre composite," *Society of Chemical Industry*, Vol 9, No. 1, 1977, pp. 36-40.
- 12) Loos, A. C. and Springer, G. S., "Moisture absorption of graphite-epoxy composites immersed in liquids and in humid air," *Journal of composite materials*, Vol. 13, No. 2, 1979, pp. 131-147
- 13) Joshi, O. K., "The effect of moisture on the shear properties of carbon fiber composites," *Composites*, Vol 14, No. 3, 1983, pp. 196-200.
- 14) Chiou, P. and Bradley, W. L., "Effects of seawater absorption on fatigue crack development in carbon/epoxy EDT specimens," *Composites*, Vol. 26, No. 12, 1995, pp. 869-876.
- 15) Miller, P. H., "Effects of moisture absorption and test method on the properties of E-glass/Polyester hull laminates," *Journal of composite materials*, Vol. 36, No. 9, 2002, pp. 1065-1078.
- 16) 허성화, 김정희, 김홍석, 권진희, 최진호, 조종래, 조윤식, "염수 환경에 의한 탄소/에폭시 복합재의 물성치 변화 연구," 한국복합재료학회지, 제21권, 제3호, 2008, pp. 1-8.
- 17) ASTM D3039, "Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials"
- 18) ASTM D5379, "Standard test method for shear properties of composite materials by the V-Notched beam method"