

## 論文

### 복합재료의 기계적 거동에 염수환경이 미치는 영향에 관한 연구

문진범\*, 김수현\*\*, 김춘곤\*\*\*

### Effects of salt water environment on the mechanical behavior of composites

Jin-Bum Moon\*, Soo-Hyun Kim\*, Chun-Gon Kim\*\*\*

#### ABSTRACT

In this paper, two different experiments, namely, salt water spray and salt water immersion, were performed to reproduce the contact of composites with the seawater for three kinds of woven fabric composite material systems which would be used for the WIG(wing in ground effect)craft. After aging 140 days in the salt water environment, material properties of carbon/epoxy and glass/epoxy composite such as tensile, compressive and shear stiffness and strength, and inter-laminar shear strength (ILSS) were measured. By comparing baseline material properties with degraded ones, the effects of the salt water environment on the composite mechanical properties were evaluated. From the experiments, it was confirmed that the difference in aging conditions had very small influence on composite properties. And it was found that tensile strength of carbon/epoxy composites showed little degradation, but much more degradation was observed in glass/epoxy composites. And large degradations on matrix dominant properties were observed. The salt water could damage the fiber-matrix interface, matrix properties and the glass fiber.

#### 초 록

본 연구에서는 염수 침수 실험과 염수 분무 실험이라는 두 가지의 실험을 위그선의 구조재료로 사용될 3가지 다른 복합재료 시스템에 대해서 해수와의 접촉에 의한 물성저하를 재현하기 위해 수행하였다. 140일간 염수환경하에서 노화시킨 후 탄소섬유 복합재료와 유리섬유 복합재료의 인장, 압축, 전단 강성과 강도 및 층간 전단 강도를 측정하였다. 기본 물성과의 비교를 통해서 염수환경이 복합재료의 기계적 물성에 미치는 영향이 평가되었다. 실험을 통해 염수 분무환경과 침수 환경의 차이는 거의 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 탄소섬유 복합재료의 경우 인장 물성에 적은 손실이 발생한 반면 유리섬유 복합재료에서는 인장물성의 저하율이 탄소섬유 복합재료에 비해서 큼을 확인하였다. 그리고 모재 지배적 물성들의 큰 물성저하가 관찰되었다. 이를 통해, 염수는 복합재료의 섬유와 모재 사이의 계면을 퇴화시키고, 또한 모재 자체 물성과 유리섬유의 물성을 저하시킬 수 있음을 확인하였다.

**Key Words :** 위그선(WIG craft), 염수 분무(Salt water spray), 염수 침수(Salt water immersion), 복합재료(Composites)

#### 1. 서 론

최근에 들어 해상 여객과 물류의 원활한 운송을 위하여 가

장 효율적인 운송수단으로 위그선이 주목 받고 있다. Wing in ground effect를 이용해 양력을 극대화하여 수면 위에서 운행을 하는 비행체인 위그선은 선박과 항공기의 장점을 동시에 살린

\* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 대학원

\*\* 삼성중공업 풍력발전 사업부

\*\*\* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공, 교신저자(E-mail:cgkim@kaist.ac.kr)

운송수단이라 할 수 있다. 선박은 운송속도가 느리지만 대량의 화물을 운반할 수 있어 경제적인 반면, 비행기는 고속으로 운송이 가능하지만 비싸고 운송량이 제한되는 단점이 있다. 이러한 장단점을 모두 고려한 위그선은 수면 위를 나는 배의 개념으로 물에 의한 저항이 최소화되어 고속으로 운반이 가능하고 대량의 물류를 운송 가능하도록 설계되는 비행체이다. 이런 위그선의 특성을 극대화하기 위해 위그선체의 경량화가 무엇보다 우선으로 고려되어야 하므로, 선체의 무게를 획기적으로 감소시킬 수 있는 복합재료의 구조물로서의 적용이 요구된다. 또한 해수에 노출되는 운영환경 하에서의 선체 구조물로 부식에 취약한 금속재료보다는 내부식성이 강한 복합재료를 사용하는 것이 안정성을 증대시킬 수 있을 것이다. 하지만 복합재료를 위그선에 바로 적용하기 보다는 그 운용환경인 염수환경에 의한 복합재료의 물성 변화에 관한 연구가 우선적으로 필요하다.

염수환경이 복합재료에 미치는 영향에 대한 연구가 수행되었으며, 염수에 의해서 모재 지배적 물성이 감소하며, 염수에 노출 시간에 따라 기계적 물성의 변화를 관찰하는 연구들이 수행되었다[1]. 우선 금속 모재에 대한 염수환경 시험이 수행되었다. 실리콘 카바이드섬유와 알루미늄 모재를 사용한 금속 복합재에 대해서 염수환경 실험을 수행하여, 표면의 부식정도를 측정하는 시험을 수행한바 있다[2,8,11]. 또한 담수와 염수환경에 의한 복합재료의 물성저하를 비교하는 연구가 수행되었으며, 담수보다 염수환경에서 유리섬유 복합재료의 굽힘 물성과 인장 물성이 더 크게 저하되며, 염수의 농도는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 보고된 바 있다[3]. 대부분의 연구는 탄소섬유 복합재료나 유리 섬유 복합재료의 염수환경하에서의 물성 저하에 관한 연구가 많이 수행되었다. 그 결과 대부분의 모재 지배 물성이 염수환경에 의해서 손상을 받으며, 그 이유는 수분의 흡수 뿐 아니라 염분에 의한 화학적 반응에 의한 부식등이 큰 영향을 미침을 보고하였다[4-7,9-10,12-17]. 또한 이러한 이유로 인해서 복합재료의 기계적 물성들이 저하됨이 보고되었다.

이와 같이 염수환경에 의한 물성의 저하는 심각하지만 아직 많은 연구가 수행되지 않았으며, 최근에 들어서야 연구가 진행되고 있다. 때문에 염수환경에 노출되어 있는 WIG선을 설계를 함에 있어 우선적으로 염수환경에 의한 복합재료의 물성저하에 관한 연구가 반드시 필요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 WIG선의 구조재료로 사용될 3가지의 복합재료에 대해서 염수환경이 어떠한 영향을 미치는지 확인하였다. 그리고 염수 침수 환경과 염수 분무 환경에 의한 차이를 실험을 통해서 평가하였다.

## 2. 실험 과정

### 2.1 재료

본 연구에서는 3가지의 다른 평직(plain weave) 직조 복합

재료가 사용되었다. 탄소섬유 복합재료로서 CF6638/epoxy와 HPW193/epoxy가 사용되었으며, 유리섬유 복합재료로서 #7628/epoxy가 사용되었다. 각 복합재료에 대해서 기지재료로서 내충격성을 강화시킨 에폭시 재료인 RS1222가 동일하게 사용되었다. 실험에 사용된 복합재료는 한국화이버(주)에서 제조되었다.

### 2.2 시편

각 시편은 ASTM 기준에 의거하여 제작 되었으며, Table 1은 각 시험에 사용된 ASTM 리스트이다.

Table 1 List of ASTM standards used in this research

Tests	ASTM
Tensile	A370, B557
Compressive	D695
In-plane shear	D5379
Interlaminar shear	D2344

인장시편의 경우 탭이 있으면 탭을 붙이는 부분의 고분자 접착제가 염수환경에 의해 약화되어 슬립이 발생할 수 있기 때문에, 탭이 없는 독본 형태의 시편을 ASTM A370, B557을 사용하여 제작하였고, 압축시편의 경우도 마찬가지로 독본 형태의 시편을 사용하는 ASTM D695에 의거하여 시편을 제작하였다. 실제로 이러한 독본형태의 시편들이 섬유강화 복합재료의 환경 실험에서 위와 같은 문제로 인해 사용되고 있다[7-10]. 평면 전단 시험 시편과 층간 전단 시험 시편은 ASTM A5379와 D2344를 각각 사용하였으며, Fig. 1은 각 시험에 사용된 시편의 형상이다.

### 2.3 염수환경 모사실험

ASTM B117에 의거하여 염수 분무 실험을 수행하였다. 염수를 모사하기 위해 5%의 소금물을 사용하였으며, 분무 시 온도환경은 35℃를 유지하였다. 이상과 같은 환경에서 시편을 140일 동안 노화시키는 실험을 수행하였다. 140일은 기존의 논문에서 염수에 의해서 시편 내부에 수분 흡수율이 포화가 일어나는 시간 보다 충분히 긴 시간이며[7,11-15], 포화 이후 충분한 노화가 진행되었을 것으로 사료되는 시간이다. 따라서 충분한 염수환경에의 노화 후 복합재료의 물성 저하를 평가 하기 위해서 140일간의 실험을 수행하였다. 실험은 염수 분무 시험기 내에서 수행되었으며 Fig. 2는 염수 분무 시험기를 보여주고 있다.

염수 침수와 염수 분무의 효과의 차이를 알아보기 위해 염수 침수 실험을 동시에 수행하였다. 두실험은 모두 동일한 온도조건과 염수를 사용하였으며, 유일한 차이점은 침수와 분무의 차이만을 두었다. 이런 실험 조건을 모사하기 위해

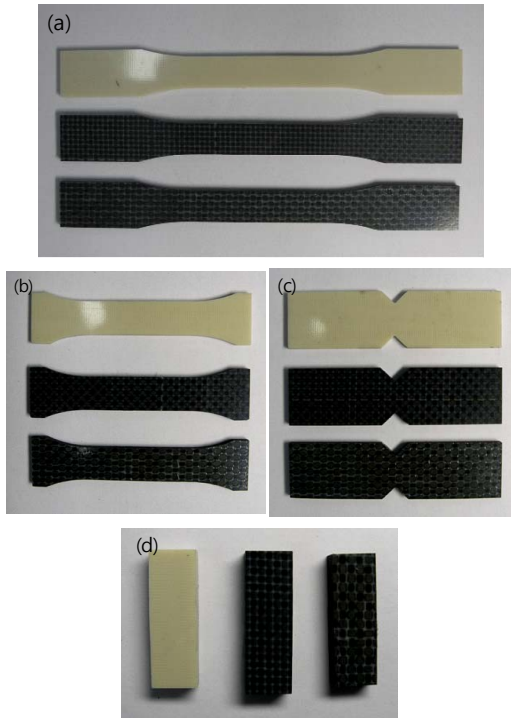


Fig. 1 Specimens((a) tensile test, (b) compressive test, (c) in-plane shear test, (d) inter-laminar shear test).



Fig. 2 Experiment of immersion test.

염수 분무 장비 챔버 내의 바닥부분에 분무된 염수를 모으는 장비를 설치하고, 분무되어 떨어지는 염수를 모아 침수실험을 수행함으로써 같은 염수를 사용하였으며, 같은 챔버 내에서 실험을 수행하여 같은 온도조건을 유지하였다. Fig. 3은 실험 장치의 개념도이며, Fig. 4와 Fig. 5는 각각 실제 염수 침수 실험과 염수 분무 실험을 수행하게 될 시편의 장착 모습을 보여주고 있다.

## 2.4 시험

각 재료에 대해서 기본 물성 시험을 수행하였고, 140일간의

염수분무 시험과 염수 침수 시험을 마친 시편에 대해서도 각각 물성 시험을 수행하였다. 각 시험은 앞서 언급한 각 ASTM에 따라 수행하였으며, 각 시험마다 7개의 시편을 사용하였으며, 그 중에서 5개를 선택하여 데이터 처리를 하여 재료의 물성을 획득하였다.

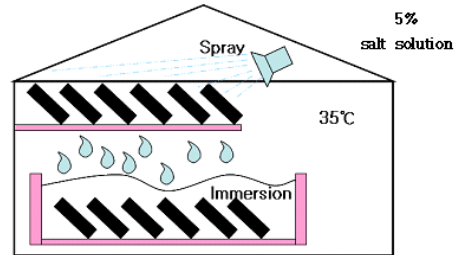


Fig. 3 Schematics of salt water immersion and salt water spray experiments.



Fig. 4 Salt water immersion specimens.



Fig. 5 Salt water spray specimens.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 수분 흡수율

노화된 시편의 시험을 수행하기에 앞서 물성저하에 미치는

**Table 2** The weight gain of each composite material

(a) CF 6638/RS1222				
	Tensile	Compressive	In-plane shear	ILSS
Spray	0.92%	0.94%	0.59%	0.56%
Immersion	0.94%	1.00%	0.73%	0.50%

(b) HPW 193/RS1222				
	Tensile	Compressive	In-plane shear	ILSS
Spray	0.57%	0.75%	0.69%	0.48%
Immersion	0.71%	0.82%	0.62%	0.39%

(c) #7628/RS1222				
	Tensile	Compressive	In-plane shear	ILSS
Spray	0.88%	0.77%	0.64%	0.41%
Immersion	0.78%	0.78%	0.60%	0.40%

큰 인자 중 하나인 수분 흡수율을 각 시편에 대해서 측정하였으며, 수분율 측정에는 1/10000g까지 측정이 가능한 AND사의 HM-200 고정밀 저울을 사용하였다. Table 2는 수분흡수율측정 결과이며, 염수 분무와 염수 침수 환경의 차이에 의한 수분 흡수율의 차이는 거의 없음을 알 수 있다.

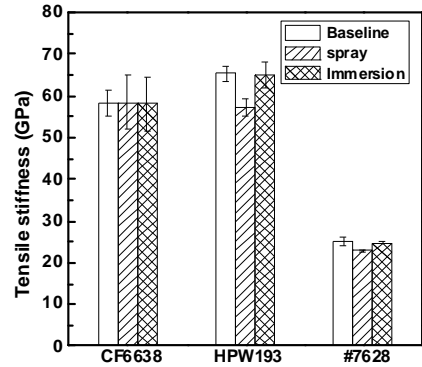
### 3.2 강성

Fig. 6은 각 재료에 대해서 강성을 비교한 그래프이다. 인장 강성의 경우 3가지 재료에 대해서 물성의 저하가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 인장 강성의 경우 섬유 지배적 물성이며, 염수에 의한 물성저하는 모재에서 주로 일어남을 감안할 때 예상할 수 있는 결과이다. 다만, HPW193/RS1222의 경우 염수 분무 환경에서 저하 폭이 12.3% 정도로 크게 나타났으나, 이는 실험상의 오차가 크게 작용한 것으로 보이며, 큰 의미를 찾기는 힘든 것으로 보인다. 압축 강성의 경우도 마찬가지로 모든 재료에 대해 5% 이내의 작은 물성 저하율을 보였다. 압축 강성 또한 섬유 지배적 물성으로서 염수환경에 의해 섬유는 거의 영향을 받지 않기 때문인 것으로 보인다.

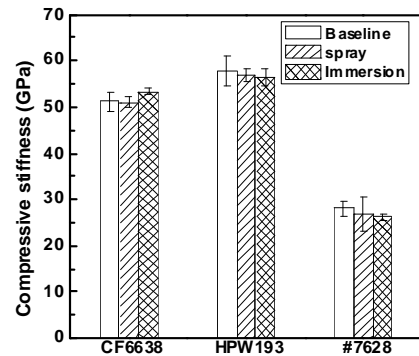
반면 평면 전단 강성은 각각 12%, 9%, 18% 정도로 큰 폭으로 저하했음을 알 수 있다. 이는 평면 전단 강성은 모재 지배적 물성임을 감안할 때, 모재가 염수환경에 의해서 물성의 저하가 초래되었음을 알 수 있다.

### 3.2 강도

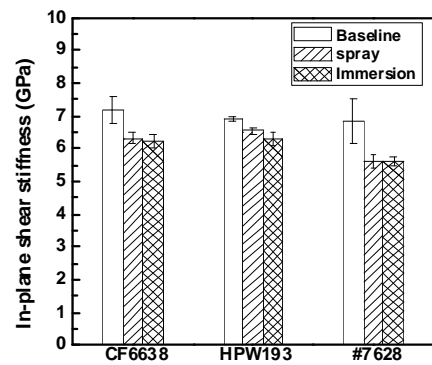
각 재료의 강도시험 결과를 Fig. 7에서 보이고 있다. 우선 인장 강도의 경우 탄소 섬유를 사용한 CF6638/RS1222와 HPW193/RS1222는 강도 저하가 거의 나타나지 않음을 확인하였다. 이는 강성의 경우와 마찬가지로 섬유 지배적 물성이며,



(a) Tensile stiffness



(b) Compressive stiffness



(c) In-plane shear stiffness

**Fig. 6** Stiffness of the each material.

탄소섬유가 염수환경에 의해서 영향을 받지 않았음을 보여준다. 반면에 유리 섬유를 사용한 #7628/RS1222의 경우 강성의 경우와는 달리 분무환경에서 15.3%, 침수 환경에서 17.8%의 큰 물성 저하를 보였다. 이를 통해 유리 섬유는 염수환경에

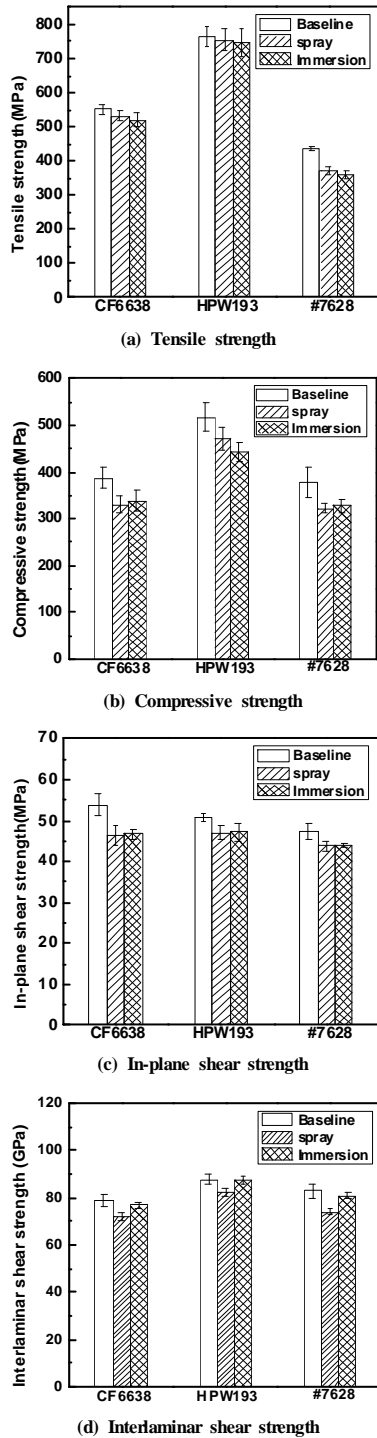
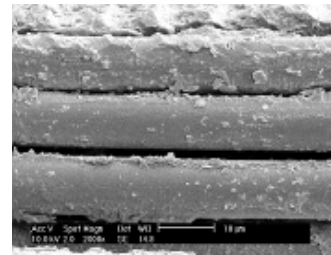


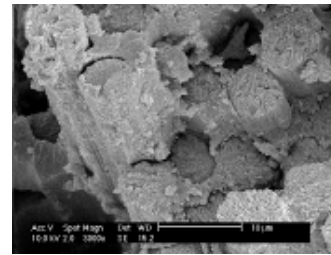
Fig. 7 Strengths of the each material.



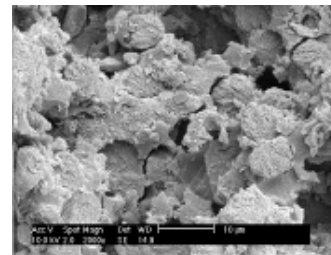
(a) Baseline tensile specimen(#7628/epoxy)



(b) Aged tensile specimen(#7628/epoxy)



(c) Aged tensile specimen(CF6638/epoxy)



(d) Aged tensile specimen(HPW193/epoxy)

Fig. 8 Fracture surfaces of specimens.

의해서 영향을 받아 표면부분에 부식이 생겨 국부적 취약부위가 발생하여, 크랙이 늘어나고 응력집중부가 발생해 강도가 저하되었음을 알 수 있다. 반면, 인장강성의 경우 재료의 전체적인 국부적 손상에는 무관한 재료의 물성이므로 큰 저하는 생기지 않은 것으로 사료된다. 다음으로 압축 강도의 경우에는 3가지 재료에 대해서 공통적으로 강도가 큰 폭으로 저하됨을 볼 수 있다. 염수환경에 의해서 복합재의 물성이 저하가 일어나는 원인으로 모재 물성의 저하를 들 수 있지만, 한

편으로는 섬유와 모재의 계면 강도의 저하도 중요한 원인 중 하나이다. 압축 강도의 공통적인 물성저하는 계면강도의 저하로 설명될 수 있다. 염수 환경에 의해 계면강도가 저하되어 섬유와 모재의 디본딩 현상이 전체적으로 발생하여 하중이 잘 전파되지 못하고, 섬유를 잡아주지 못해 전체적인 압축강도의 저하가 초래되었다. 인장의 경우 계면에서 디본딩 현상이 발생하더라도 섬유 자체만으로도 인장 하중을 견딜 수 있어 물성저하가 크지 않은 반면, 섬유자체만으로 압축하중을 견딜 수 없기 때문에 똑같은 계면강도의 저하로 인한 디본딩이 생기더라도 압축강도의 경우 그 효과가 크게 나타난 것이다. 평면 전단 강도는 3가지 재료에 대해서 모두 큰 저하폭을 보였으며, 특히 CF6638/RS1222의 경우가 13%정도로 다른 재료에 비해 큰 폭 저하됨을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 염수환경이 WIG선의 구조재료로서 선정된 3가지 복합재료에 미치는 영향을 알아 보기 위해 140일 동안 염수환경에 노화시키는 실험을 수행하였다. 또한 염수 분무 환경과 염수 침수 환경의 차이를 보기 위해 동일한 소금물과 동일한 온도 조건하에서 같은 시간 동안 노화를 진행하여 실험을 통해 결과를 얻었다.

- 1) 실험결과 염수 침수와 염수 분무 실험 후 수분 흡수율이 두 가지 경우에 대해서 거의 차이가 거의 없음을 확인하였고, 물성 시험결과로도 분무 환경과 침수 환경의 차이가 미미함을 확인하였다.
- 2) 모재 지배적 물성인 평면 전단 강성과 강도의 경우 물성이 크게 저하됨을 확인하였다.
- 3) 강성에 있어서 섬유지배적 물성인 인장강성과 압축강성은 염수환경에 의해서 거의 영향을 받지 않음을 확인하였다. 반면 강도 부분에서는 인장강도의 경우 탄소섬유를 사용한 두 재료에서는 인장강도의 저하가 거의 나타나지 않은 반면 유리섬유를 사용한 경우 염수환경에 의해 강도가 큰 폭 저하됨을 확인하였다. 이는 탄소 섬유와는 다르게 유리 섬유가 염수에 영향을 받아 섬유물성이 저하되었기 때문이다.
- 4) 압축강도의 경우 3가지 재료에 대해서 공통적으로 큰 폭으로 저하되었으며, 이는 섬유와 모재 사이의 계면 강도가 염수환경에 의해 저하되었기 때문이다.

결과적으로 염수환경에 의해서 복합재료의 모재 물성이 크게 저하됨을 확인하였고, 또한 탄소섬유와는 달리 유리섬유의 경우 염수환경에 의해 강도가 저하될 수 있음을 확인하였다. 또한 염수환경에 의해 섬유와 모재 사이의 계면 강도가 크게 저하됨을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 한국 과학재단의 중견연구자 지원 사업의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- 1) 윤성호, "염수환경에 노출된 유리섬유복합/페놀 복합재의 내구성 평가," *한국복합재료학회지*, 제18권, 제4호, 2005, pp. 27-34.
- 2) Zaki Ahmad, and B. J. Abdul Aleem, "Corrosion Behavior of a Discontinuously Reinforced Composite in Salt Water Environment," *Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 25, 2006, pp. 1507-1517.
- 3) K. Liao, C.R. Schultheisz, and D.L. Hunston, "Effects of Environmental Aging on the Properties of Pultruded GFRP," *Composites*, Vol. 30, 1999, pp. 485-493.
- 4) Houssam A. Toutanji, "Durability Characteristics of Concrete Columns Confined with Advanced Composite Materials," *Composite Structures*, Vol. 44, 1999, pp. 155-161.
- 5) Manuel A.G. Silva, "Aging of GFRP laminates and confinement of concrete columns," *Composite Structures*, Vol. 79, 2007, pp. 97-106.
- 6) C. Wang, Y. D. Huang, H. Y. Xv, W. B. Liu, "The durability of adhesive/carbon-carbon composites joints in salt water," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 24, 2004, pp. 471-477.
- 7) S. K. Rege, S. C. Lakkad, "Effect of Salt Water on Mechanical Properties of Fibre Reinforced Plastics," *Fibre Science and Technology*, Vol. 19, 1983, pp. 317-324.
- 8) K. Komai, K. Minoshima, "Tensile and fatigue fracture behavior and water-environment effects in a SiC-whisker/7075-aluminum composite," *Composites Science and Technology*, Vol. 46, 1993, pp. 59-66.
- 9) Catherine A. Wood, Walter L. Bradley, "Determination of the effect of seawater on the interfacial strength of an interlayer E-Glass/Graphite/Epoxy composite by in situ observation of transverse cracking in an environmental SEM," *Composites Science and Technology*, Vol. 57, 1997, pp. 1033-1043.
- 10) Huang Gu, "Behaviours of glass fibre/unsaturated polyester composites under seawater environment," *Materials and Design*, Vol. 30, 2009, pp. 1337-1340.
- 11) Zaki Ahmad, B. J. Abdul Aleem, "Degradation of aluminum metal matrix composites in salt water and its

- control,” *Materials and Design*, Vol. 23, 2002, pp. 173-180.
- 12) A.M. Visco, L. Calabrese, P. Cianciafara, “Modification of polyester resin based composites induced by seawater absorption,” *Composites: Part A*, Vol. 39, 2008, pp. 805-814.
- 13) Huang Gu, “Dynamic mechanical analysis of the seawater treated glass/polyester composites,” *Materials and Design*, Vol. 30, 2009, pp. 2774-2777.
- 14) Huang Gu, “Behaviours of glass fibre/unsaturated polyester composites under seawater environment,” *Materials and Design*, Vol. 30, 2009, pp. 1337-1340.
- 15) K.V. Arun, S. Basavarajappa, B.S. Sherigara, “Damage characterisation of glass/textile fabric polymer hybrid composites in sea water environment,” *Materials and Design*, Vol. 31, 2010, pp. 930-939.
- 16) 허성화, 김정희, 김홍석, 권진희, 최진호, 조종래, 조윤식, “염수환경에 의한 탄소/에폭시 복합재의 물성치 변화 연구,” 한국복합재료학회지, 제21권, 제3호, 2008, pp. 1-8.
- 17) 문철진, 이청락, 권진희, 최진호, 조맹효, 김태경, “염수 환경에 노출된 고강성 탄소/에폭시 복합재의 물성치 변화 연구,” 한국복합재료학회지, 제21권, 제6호, 2008, pp. 1-7.