

염수환경에 노출된 철도차량용 탄소섬유/에폭시 복합재의 내구성 평가 Durability of Carbon/Epoxy Composites for Train Carbody under Salt Water Environment

윤성호[†] · 황영은* · 김정석** · 윤혁진** · Michael R. Kessler***

Sung-Ho Yoon · Young-Eun Hwang · Jung-Seok Kim · Hyuk-Jin Yoon · Michael R. Kessler

Abstract This study investigates the durability of carbon/epoxy composites for use on train car bodies under a salt water spray environment. Salt water solution with 5% NaCl, similar to natural salt water, was used for the salt water environmental tests. The specimens were obtained from a composite panel consisting of an epoxy matrix reinforced with T700 carbon fabric. The specimens were exposed to the salt water environment for up to 12 months. Mechanical tests were performed to obtain tensile properties, flexural properties, and shear properties. Dynamic mechanical analysis was used to measure such thermal properties as storage modulus, loss modulus, and $\tan \delta$. Also FT/IR tests were conducted to investigate changes in chemical structure with exposure. The results revealed that fiber-dominated mechanical properties were not affected much by exposure time, but matrix-dominated mechanical properties decreased with increasing exposure time. Storage modulus was not very sensitive to exposure time, but glass transition temperature was affected, slightly decreasing with increasing exposure time. Although the peak intensity of FT/IR curves was affected slightly by exposure time, the peak shape and peak location of FT/IR curves were not noticeably changed. Carbon/epoxy composites used for this study were relatively stable to the salt water environment.

Keywords : Carbon/epoxy composites, Salt water spray environment, Mechanical properties, Thermal analysis properties

요 지 본 연구에서는 염수분무환경에 노출된 철도차량 차체용 탄소섬유/에폭시 복합재의 내구성을 조사하였다. 염수환경시험을 위해서는 해수와 가장 유사하도록 5% 염화나트륨 염수용액을 제조하여 사용하였다. 본 연구에 적용된 시편은 T700 탄소섬유직물을 에폭시 수지에 함침시킨 형태의 복합재 평판에서 채취하였다. 기계적 특성 시험을 통해 인장특성, 굽힘특성, 전단특성을 평가하였으며 동역학 측정장치를 통해 저장탄성계수, 손실탄성계수, 그리고 $\tan \delta$ 등의 열분석 특성을 평가하였다. 또한 적외선 분광분석을 통해 노출기간에 따른 화학구조 변화도 조사하였다. 연구결과에 따르면 강화섬유가 지배적인 역할을 하는 기계적 특성은 염수환경에 영향을 받지 않지만 수지가 지배적인 역할을 하는 기계적 특성은 노출기간이 길어짐에 따라 점차 감소하는 양상을 나타낸다. 저장탄성계수는 노출기간에 큰 영향을 받지 않지만 유리전이온도는 염수환경에 영향을 받으며 노출기간이 길어지면 감소하는 양상을 나타낸다. FT/IR 선도에서 관찰된 피크의 세기는 노출기간에 다소 영향을 받지만 피크의 형상과 위치는 노출기간에 따른 변화가 관찰되지 않는다. 이로 미루어 볼 때 본 연구에 적용된 탄소섬유/에폭시 복합재는 염수환경에 비교적 안정함을 알 수 있다.

주요어 : 탄소섬유/에폭시 복합재, 염수분무환경, 기계적 특성, 열분석 특성

[†] 책임저자 : 정회원, 금오공과대학교, 기계공학부, 교수
E-mail : shyoon@kumoh.ac.kr

TEL : (054)478-7299 FAX : (054)478-7319

* 정회원, 금오공과대학교, 기계공학부

** 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실

*** Iowa State University, Department of Materials Science & Engineering,
Assistant Professor

1. 서론

복합재는 기존의 금속재에 비해 비강성과 비강도가 높고 내열성과 내식성 등이 우수하여 항공우주, 선박, 교량 등 산업 전반에 널리 적용되고 있다. 최근에는 철도차량의 고속화 및 안정성을 위한 차체 소재로 적용하기 위해 많은 연구가 진행되었다. 복합재가 적용된 철도차량이 장기간 운행될 경우 자외선, 온도, 수분, 염수 등의 자연환경에 의해 복합재 차체에 노화가 발생되어 차량의 수명 및 성능이 저하될 우려가 있다. 특히 해양환경에서 고려되는 수분 및 염분 등의 환경인자는 복합재의 계면 특성을 감소시키는 가소제 역할을 하여 다른 환경인자보다 복합재의 내구성에 지배적인 영향을 미친다. 따라서 염수환경을 고려한 복합재의 내구성 평가는 많은 연구자에게 관심사로 되어 왔다. 미국의 Naval Facilities Engineering Service Center[1, 2]에서는 실제 해양기후에 해당하는 환경인자들을 인위적으로 조성하여 상업적으로 적용되는 섬유강화 복합재에 대해 다양한 해수환경인자를 고려한 가속환경시험을 수행하였다. 연구결과에 따르면 섬유강화 복합재가 35°C의 염수분무환경에서 12개월 노출되면 굽힘강도는 노출 전에 비해 27% 정도 감소하고, 35°C의 염수침수환경에서 12개월 노출되면 굽힘강도는 노출 전에 비해 34% 정도 감소한다고 하였다. 또한 이들은 염수분무환경 및 염수침수환경이 다른 환경인자에 비해 복합재의 특성 저하에 큰 영향을 미친다고 하였다. Yoon[3]은 유리섬유/에폭시 복합재에 대해 염수분무 시험장치를 통해 6개월 동안 염수분무시험과 염수침수시험을 수행하여 염수환경에 노출된 복합재의 내구성을 실험적으로 조사하였다. 연구결과에 따르면 강도의 경우 노출기간이 길어질수록 점차 감소하는 양상을 나타내지만 강성의 경우 노출 초기에는 감소하기 시작하다가 노출기간이 점차 길어지면 수지에 소성화 및 가교화가 유발되어 다소 증가하는 양상을 나타낸다고 하였다. 그러나 노출시간을 더욱 증가시키면 수지의 가소화가 지배적으로 발생하여 강성은 점차 감소된다고 하였다. Hammami[4] 등은 유리섬유/비닐에스터 복합재에 대해 해수, 2% 질산, 수분, 자외선 환경에 각각 노출시킨 후의 굽힘특성과 층간전단특성을 조사하였다. 연구결과에 따르면 적용된 환경인자에 최대 6개월 노출되더라도 복합재의 층간전단특성은 저하되지 않지만 굽힘특성은 노출기간에 따라 점차 감소하는 양상을 나타낸다고 하였다. 특히 복합재가 해수환경에 6개월 노출되면 3개월 노출에 비해 18.5% 정도의 굽힘강성이 감소한다고 하였다. 또한 복합재가 환경인자에 노출된 경우 전자현미경을 통해 섬유 표면 손상, 섬유와 수지 사이의 계면 손상, 층간분리 등의 현상을 가시화하였다. Zhang[5] 등은 유리섬유/비닐에

스터 복합재에 대해 염수용액에 노출된 경우, 옥외 자연에 노출된 경우, 가속 열환경에 노출된 경우를 고려하여 환경 인자에 장기간 노출된 복합재의 특성 저하를 조사하였다. 연구결과에 따르면 복합재가 염수용액에 최대 11개월 노출되면 인장강성과 인장강도는 노출 전에 비해 각각 25.5%와 14.9% 정도 감소한다고 하였다. 또한 11개월 노출 후 상온에서 건조시키면 복합재의 인장특성은 노출 3개월에 해당하는 인장특성과 유사한 결과를 나타냄을 보였다. Kootsookos[6] 등은 유리섬유와 탄소섬유가 각각 강화된 폴리에스터 복합재와 비닐에스터 복합재를 염수농도가 2.9%인 자연해수에 30°C의 온도 조건으로 2년간 침수시킨 후 굽힘시험 및 모우드 I 파괴시험을 수행하였다. 연구결과에 따르면 복합재가 자연해수에 노출되면 굽힘특성은 흡수된 수분이 증가할수록 감소하지만 모우드 I 파괴인성은 해수환경의 영향에 거의 영향을 받지 않음을 보였다.

본 연구에서는 염수환경에 노출된 철도차량용 탄소섬유/에폭시 복합재의 내구성을 조사하기 위한 염수환경 시험방법을 제시하고 염수환경시험을 통해 내구성 평가를 수행하였다. 이때 염수환경시험은 염수분무환경을 고려하였으며 최대 12개월까지의 노출기간에 따른 복합재의 기계적 특성, 열분석 특성, 화학구조 특성을 평가하였다.

2. 시편 제작 및 실험 방법

2.1 시편 제작

본 연구에서 적용된 복합재는 T700-12K의 탄소섬유 원사로 직조된 8매 주자직 직물로 되어 있다. 이때 경사와 위사의 밀도는 각각 4.5count/cm, 단위 중량은 790g/m², R/C(Resin content)는 40%, V/C(Volatile content)는 최대 2.5%이다. 복합재 시편을 제작하기 위해 철도차량 차체 제작용 프리프레그를 블리드 및 필 플라이와 함께 원하는 두께로 적층하고 실리콘 진공백으로 몰드 전체에 덮은 다음 오토클레이브를 통해 규정된 압력과 온도를 적용하여 성형하였다. 성형이 완료되면 다이아몬드 휠을 이용하여 복합재 적층판에서 인장시편, 굽힘시편, 전단시편을 채취하였다.

2.2 염수환경시험

복합재 구조물이 해수환경에 인접해 있는 경우를 고려하여 해수와 동일한 염수용액을 이용하였다. 염수분무시험기는 염수용액을 저장하는 저장소, 포화조 및 분무실의 내부 온도와 분무압력을 조절하기 위한 제어기, 분무실로 압축공기를 제공하는 압축기, 염수분무가 분무실 내부에 고르게 분사되는지를 확인하기 위한 분무량 측정계 등으로 구성되어 있다. Fig. 1에는 본 연구에 적용된 염수분무시험기와

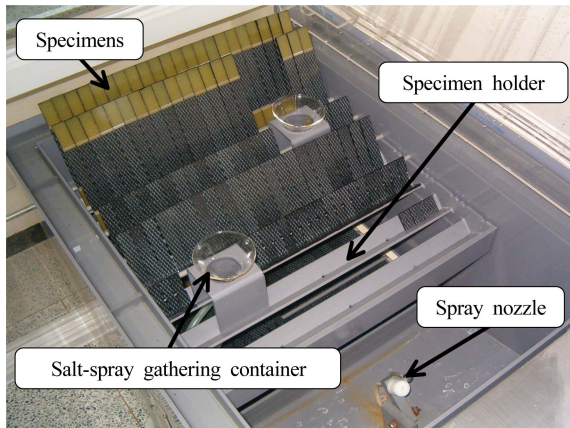


Fig. 1. Salt-spray testing in chamber

내부에 장착된 복합재 시편들이 나타나 있다. 이때 염수용액은 해수와 가장 유사한 5% 염화나트륨(순도 99.9%)과 증류수를 혼합하여 제조하였다. 염수환경시험은 ASTM B117[7]에서 제시한 조건에 따라 수행하였다. 염수탱크로부터 공급되어진 염수용액은 포화조에서 생성되어진 뜨거운 공기와 혼합되어 일정한 압력으로 분무실의 노즐을 통해 분사된다. 이때 노즐에서의 분무압력은 103.4KPa, 분무실 온도는 35°C가 유지되도록 설정하였으며 염수분무량은 시간당 1~2ml, 수소이온농도인 pH는 6.5~7.2가 되도록 조절하였다. 시편고정장치에 장착된 복합재 시편은 연직선에 대하여 25°로 놓이게 하여 분무된 염수가 시편의 표면이 균일하게 노출되도록 하였다. 염수분무시험이 진행되는 동안 분무실온도, 포화조온도, 분무압력, 염수분무량, 염수농도 등의 조건이 유지되도록 적용하였다. 염수분무기간은 최대 12개월이며 염수환경이 복합재의 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 1개월, 2개월, 4개월, 6개월, 12개월 등의 노출기간을 고려하였다.

2.3 기계적 특성 시험

Fig. 2에는 염수환경에 노출된 복합재 시편의 인장특성, 굽힘특성, 전단특성을 평가하기 위한 인장시편, 굽힘시편, 그리고 전단시편의 형상이 나타나 있다. 이들 시편의 형상은 미국표준시험규격에 근거하여 제작하였으며 시험절차는 인장시험의 경우 ASTM D3039[8], 굽힘시험의 경우 ASTM D790[9], 전단시험의 경우 ASTM D5379[10]에 근거하여 수행하였다. 시편은 시험종류 및 시험조건에 따라 각 8개씩을 적용하였다. 시험장치는 하중시험기(Zwick/Z100, Zwick), 신호증폭기(2300 Amplifier & Signal Conditioner, Measurements Group), A/D 변환장치(PCI-MIO-16E, National Instruments) 등으로 구성되어 있다. 시편에 형성된 변형률은 인장시험의 경우 Extensometer, 굽힘시험의 경우 LVDT

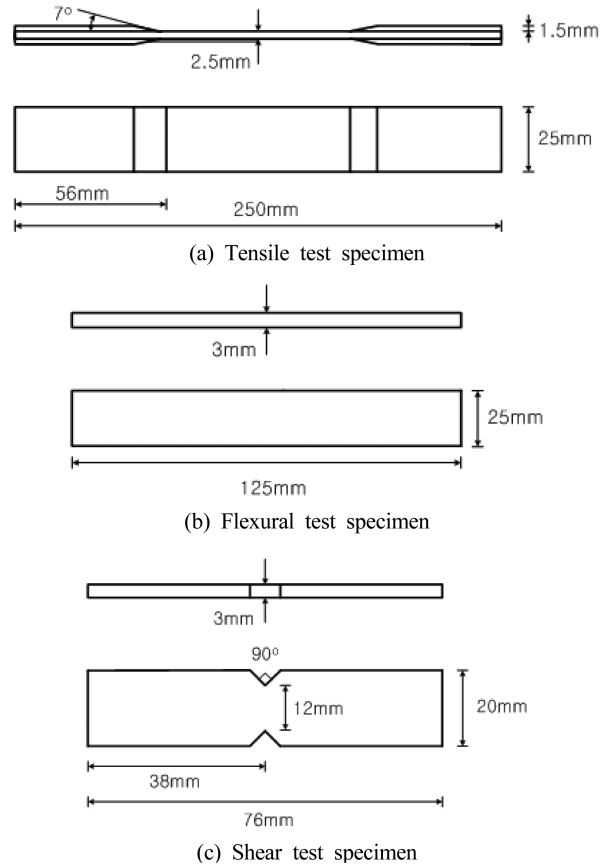


Fig. 2. Configuration of test specimens used for this study

를 적용하였다. 작용하중, 변위, 변형률 등의 자료는 A/D 변환장치가 장착된 개인용 컴퓨터를 통해 초당 10개씩 수집하였다.

2.4 열분석 특성 시험

염수환경에 노출된 복합재 시편의 열분석 특성을 평가하기 위해 Fig. 3에 나타난 동역학 측정장치(DMA 2980, TA Instrument)를 적용하였다.

점탄성 거동을 나타내는 시편에 식 (1)과 같은 복소수 주기함수 형태의 변형율을 작용시키면 식 (2)와 같은 복소수 주기함수 형태의 응력이 형성된다.

$$\epsilon^* = \epsilon^0 \sin(i\omega t) \quad (1)$$

$$\sigma^* = \sigma^0 \sin[i(\omega t + \delta)] \quad (2)$$

이때 ϵ^0 는 시편에 작용된 변형율의 진폭, ω 는 각속도(rad/sec), σ^0 는 시편에 형성된 응력의 진폭, δ 는 변형율과 응력 사이의 위상차이며 동적 변형율에 대한 재료의 점성 정도를 나타내는 척도이다.

복소수 형태의 탄성계수는 식 (1)과 식 (2)를 이용하면 식 (3)과 같이 나타난다[11].

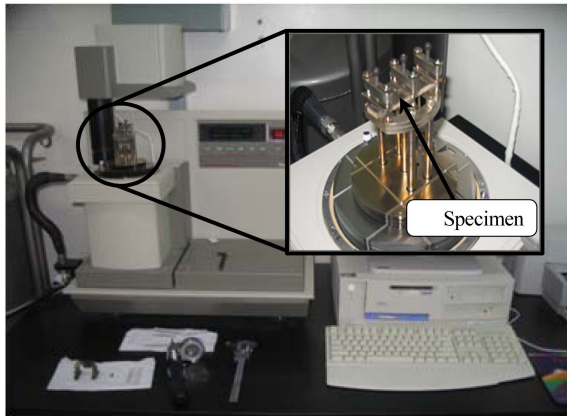


Fig. 3. Overview of dynamic mechanical analyzer

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\epsilon^*} = \left(\frac{\sigma'}{\epsilon'} \right) \exp(i\delta) \quad (3)$$

이때 복소수 형태의 탄성계수 E^* 는 식 (4)와 같이 저장탄성계수 E' 과 손실탄성계수 E'' 의 합으로 정의된다.

$$E^* = E' + E'' \quad (4)$$

저장탄성계수 E' 과 손실탄성계수 E'' 은 식 (5)와 식 (6)과 같이 나타나며 저장탄성계수와 손실탄성계수의 비로 정의되는 $\tan \delta$ 는 식 (7)과 같이 나타난다.

$$E' = \left(\frac{\sigma'}{\epsilon'} \right) \cos \delta \quad (5)$$

$$E'' = \left(\frac{\sigma'}{\epsilon'} \right) \sin \delta \quad (6)$$

$$\tan \delta = \frac{\sin \delta}{\cos \delta} = \frac{E''}{E'} \quad (7)$$

동역학 측정장치를 통해 시편에 가해진 동적신호에 대한 시편의 응답거동을 측정하면 저장탄성계수 E' , 시편이 변형될 때 내부마찰로 인한 방출에너지의 척도인 손실탄성계수 E'' , 시편의 감쇠성능 척도인 $\tan \delta$ 를 얻을 수 있다. 복합재의 열분해 특성을 평가하기 위해 길이가 60mm, 폭이 10mm, 두께가 2.5mm인 복합재 시편을 스캔이 35mm가 되도록 시편 양단을 고정시킨 다음 진폭 20 μ m, 주기 1.0Hz의 굽힘하중을 작용하였다. 이때 온도는 30°C에서 2°C/min의 온도상승률로 250°C까지 가하였다.

2.5 화학 구조 분석

적외선 분광분석(FT/IR spectroscopy analysis)을 통해 특정한 화합물이 나타내는 적외선 스펙트럼으로부터 피크를 관찰하여 화학구조 및 기능기에 관한 정보를 얻을 수 있다 [12]. Fig. 4에는 염수환경에 노출된 복합재 시편의 화학구

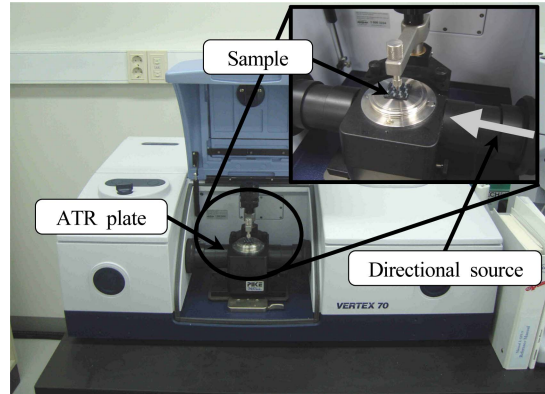


Fig. 4. Overview of FT/IR spectrometer

조 변화를 조사하기 위한 ATR(Attenuated total reflectance) 적외선 분광분석장치(VERTEX-70, Bruker Optics, Germany)가 나타나 있다. 시료는 염수분무환경에 최대 6개월까지 노출된 경우를 고려하였으며 4000~700 cm^{-1} 영역에서 32회 스캔하여 얻은 평균 스펙트럼을 수집하여 화학구조 변화를 분석하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 기계적 특성 결과

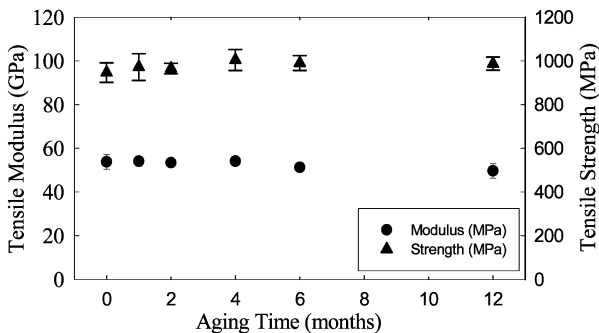
Fig. 5에는 염수분무환경에 노출된 기간에 따른 인장특성, 굽힘특성, 전단특성이 나타나 있다. 여기에서 보면 인장강성의 경우 노출 4개월까지는 노출 전에 비해 뚜렷한 증감이 나타나지 않지만 이후 노출기간이 증가하면 점차 감소하여 노출 12개월에는 노출 4개월에 비해 8.1% 감소한다. 인장강도는 염수분무환경에 노출된 초기에는 노출 전에 비해 다소 증가하지만 이후 노출기간이 증가하면 점차 감소하여 노출 12개월에는 노출 4개월에 비해 1.7% 감소한다. 이로 미루어 보면 강화섬유가 지배적인 영향을 미치는 인장강도는 염수분무환경에 큰 영향을 받지 않지만 응력-변형률 선도의 초기 기울기에서 결정되는 인장강성은 인장강도에 비해 염수분무환경에 다소 민감함을 알 수 있다. 굽힘강성은 1개월 노출되면 비교적 큰 폭으로 감소하여 노출 1개월에는 노출 전에 비해 3.4% 감소한다. 이후 노출기간이 증가함에 따라 점차 감소하여 노출 12개월에는 노출 전에 비해 5.6% 감소한다. 굽힘강도는 노출 2개월까지는 큰 폭으로 감소하며 이후 노출 6개월까지는 노출기간이 길어짐에 따라 다소 증가하는 양상이 나타나지만 노출기간이 더욱 길어지면 감소하는 양상이 나타난다. 특히 노출 6개월에는 노출 전에 비해 11.9%, 노출 12개월에는 노출 전에 비해 15.5% 감소한다. 굽힘강도가 노출 초기에 감소하는 원인은 흡수된 수분에 의해 수지에 가소화가 유발되었기 때

문이고 특정 노출기간 동안 굽힘강도가 다소 증가하는 원인은 흡수된 수분과 온도의 영향으로 수지에 후경화가 다소 진행되었기 때문으로 판단된다. 이후 노출기간이 더욱 길어지면 굽힘강도가 다시 감소하는데 이는 흡수된 수분에 의해 수지의 물리적 팽창 및 염수와의 화학반응으로 인한 수지의 가소화가 더욱 진행되었기 때문이다[13, 14]. 전단강도는 노출기간이 길어지면 인장특성과 굽힘특성에 비해 다소 큰 폭으로 감소한다. 특히 노출 1개월에서 노출 전에 비해 16.4%, 노출 12개월에는 노출 전에 비해 25.4% 감소한다. 이로 미루어 보면 강화섬유가 하중지지에 지배적인 역할을 하는 인장강도는 염수분무환경에 장기간 노출되어도 저하 정도는 크지 않지만 강화섬유 뿐 아니라 수지도 하중지지에 역할을 하는 인장강성, 굽힘강성, 굽힘강

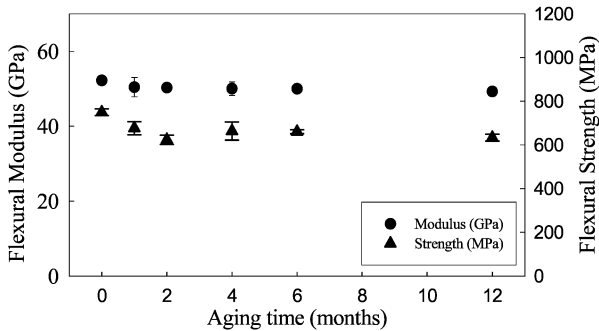
도는 염수분무환경에 장기간 노출되면 저하 정도는 다소 커진다. 그러나 수지가 지배적인 역할을 하는 전단강도는 염수분무환경에 장기간 노출되면 저하 정도는 매우 심하게 나타난다.

3.2 열분석 특성 결과

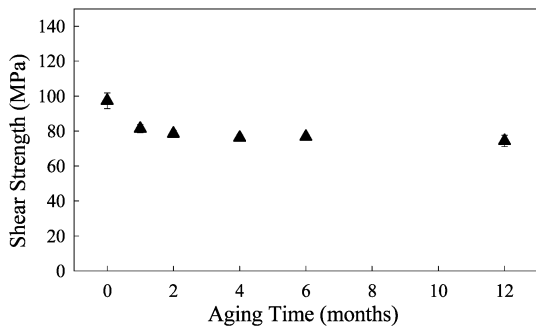
Fig. 6에는 염수분무환경에 노출된 복합재의 노출기간에 따른 저장탄성계수 E' , 손실탄성계수 E'' , $\tan \delta$ 선도가 나타나 있다. 여기에서 보면 상온에서 유리상태인 에폭시 수지는 분위기 온도가 높아지면 저장탄성계수가 서서히 감소하고 일정 온도에 도달하면 급격히 감소하여 고무 상태로 변한다. 저장탄성계수는 노출 전의 경우 28.1GPa, 1개월의 경우 29.2GPa, 2개월의 경우 28.1GPa, 4개월의 경우 28.8GPa, 6개월의 경우 29.1GPa로 나타난다. 반면에 $\tan \delta$ 선도의 피크에 의해 정의되는 유리전이온도는 노출 전의 경우 105.3°C, 1개월의 경우 95.0°C, 2개월의 경우 90.9°C, 4개월의 경우 83.4°C, 6개월의 경우 82.5°C로 나타난다. 이와 같이 복합재가 염수환경에 노출되면 저장탄성계수는 노출 전의 경우에 비해 크게 변하지 않지만 유리전이온도는



(a) Results of tensile properties.



(b) Results of flexural properties.



(c) Results of shear property.

Fig. 5. Results of mechanical properties in the salt-spray conditions with exposed time

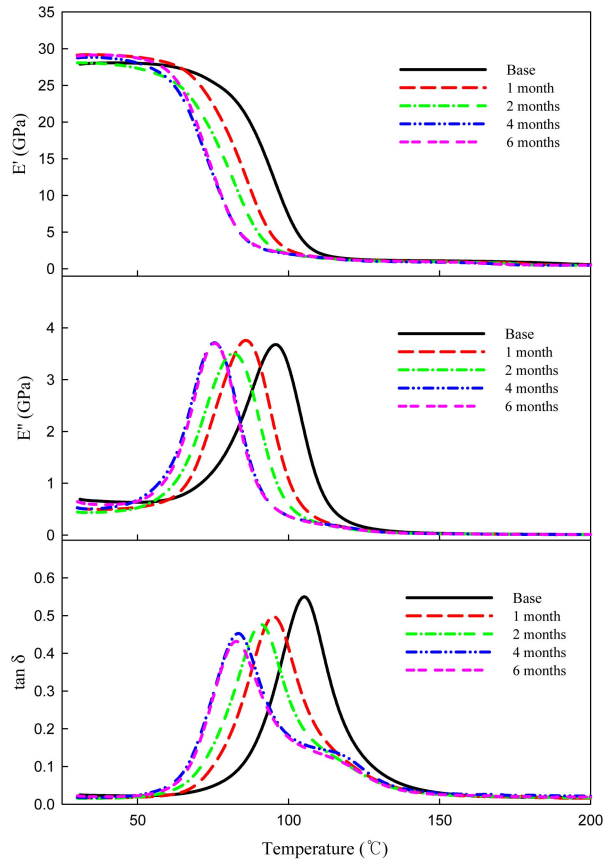


Fig. 6. Results of dynamic mechanical analysis in the salt-spray conditions with exposed time

노출기간이 길어짐에 따라 점차 감소한다. 이는 복합재 내에 침투된 염분 및 수분이 고분자 사슬 간의 반데르발스 (Van Der Waals) 결합을 방해하기 때문이다[15].

3.3 화학적 구조분석 결과

Fig. 7에는 적외선 분광분석기로 측정한 염수분무환경에 노출된 복합재의 FT/IR 선도가 나타나 있다. 여기에서 보면 3400cm⁻¹ 영역의 피크는 물 분위기의 영향에 의해 나타나는 O-H 결합으로 염수 분위기에 노출되면 노출기간에 무관하게 관찰된다. 그러나 노출 2개월에서는 다른 노출기간의 경우와는 달리 O-H 결합의 피크가 관찰되지 않는다. 이는 시편 자체의 화학적 구조 변화의 영향이라기보다는 시료준비 처리과정에서 수분 효과가 제거되었기 때문으로 판단된다. 2900cm⁻¹ 영역에서는 3개의 작은 피크가 합쳐 하나의 큰 C-H 결합 피크를 형성하고 있다. 피크의 형상과 위치는 노출기간에 큰 영향을 받지 않고 거의 유사하게 나타나지만 피크의 세기는 노출 1개월의 경우가 다른 노출기간의 경우에 비해 상대적으로 크게 나타난다. 2200cm⁻¹ 영역에서는 에폭시 수지에 있는 C-O 결합에 의한 피크가

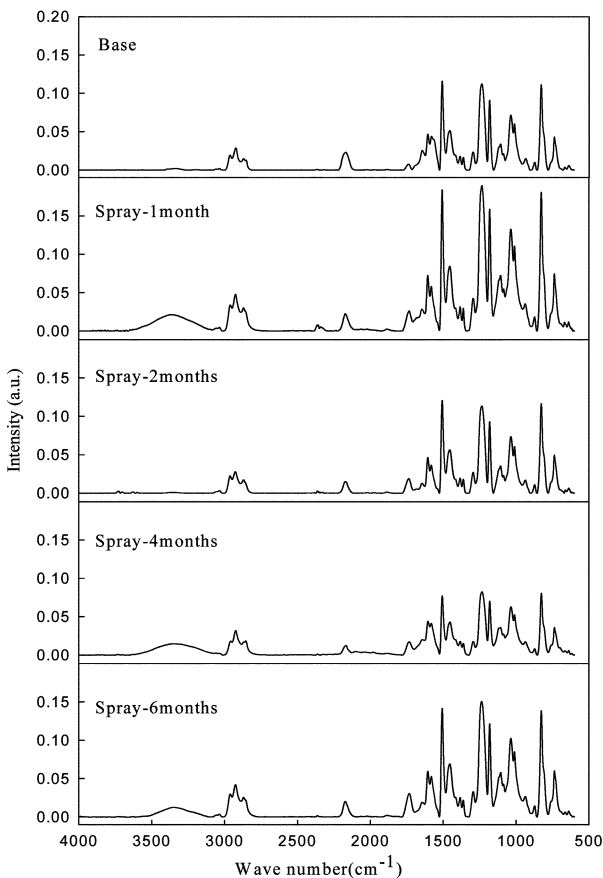


Fig. 7. FT/IR spectra in the salt-spray conditions with exposed time

관찰된다. 피크의 형상과 위치는 노출기간에 무관하게 나타나지만 피크의 세기는 노출기간에 따라 약간의 차이를 나타낸다. 1600cm⁻¹과 1450cm⁻¹ 영역의 피크는 주로 탄소원자와 관련된 C=C 결합, 1200cm⁻¹ 영역의 피크는 C-O 결합에 해당한다. 이 경우도 C-O 결합과 마찬가지로 피크의 형상과 위치는 노출기간에 무관하게 일정하게 나타나지만 피크의 세기는 노출기간에 따라 다소 달라지는 양상을 나타낸다. 따라서 본 연구에 적용된 탄소섬유/에폭시 복합재는 염수환경에 노출되더라도 피크의 형상과 위치가 노출기간에 무관함으로 미루어 화학구조가 염수환경에 매우 안정적임을 알 수 있다. 그러나 피크의 세기는 노출기간에 영향을 다소 받음을 알 수 있으며 이는 노출기간에 따른 기계적 특성 변화와 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

염수분무환경에 노출된 탄소섬유/에폭시 복합재의 내구성 평가를 통해 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 강화섬유가 하중지지에 지배적인 역할을 하는 인장강도는 염수분무환경에 장기간 노출되어도 저하 정도는 크지 않지만 강화섬유와 수지가 하중지지에 역할을 하는 인장강성, 굽힘강성, 굽힘강도는 장기간 노출되면 저하 정도는 다소 커진다. 그러나 수지의 역할이 지배적인 전단강도는 장기간 노출되면 저하 정도는 심하게 나타난다.

(2) 저장탄성계수는 노출기간에 따라 큰 변화는 나타나지 않지만 유리전이온도는 노출기간이 길어지면 점차 감소하는 양상을 나타낸다.

(3) 복합재가 염수분무환경에 장기간 노출되면 FT/IR 선도에서 피크의 세기는 노출기간에 다소 영향을 받지만 피크의 형상과 위치는 노출기간에 무관하게 나타난다. 따라서 본 연구에 적용된 탄소섬유/에폭시 복합재는 염수환경에 노출되더라도 화학구조의 변화가 없으며 염수환경에 매우 안정적임을 알 수 있다.

참고 문헌

1. Jamond, R. M., Caceres, A., Hoffard, T. A. and Malvar, L. J. (2000), "Accelerated Testing of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites - Test Plan," NFESC Special Publication SP-2091-SHR.
2. Jamond, R. M., Hoffard, T. A., Novinson, T. and Malvar, L. J. (2000), "Composites in Simulated Marine Environments," NFESC Special Publication SP-2083-SHR.
3. Yoon, S. H. (2005), "Evaluation of Durability for Glass Fabric/

- Phenolic Composites under Salt Water Environment,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 18, No. 4, August, pp. 27-33.
4. Hammami, A. and Al-Ghuilani, N. (2004), “Durability and Environmental Degradation of Glass-Vinylester Composites,” *Polymer composites*, Vol. 25, No. 6, December, pp. 609-616.
 5. Zhang, S., Karbhari, V. M., Mai, L. Y. and Mai, Y. W. (2000), “Evaluation of Property Retention in E-Glass/Vinylester Composites after Exposure to Salt Solution and Natural Weathering,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 19, No. 9, pp. 704-731.
 6. Kootsookos, A. and Mouritz, A. P. (2004), “Seawater Durability of Glass- and Carbon-Polymer Composites,” *Composites Science and Technology*, 64, pp.1503-1511.
 7. ASTM B117-97 (1997), *Annual Book of ASTM Standards*, 03.02, American Society for Testing and Materials.
 8. ASTM D3039/D3039M-00 (2001), *Annual Book of ASTM Standards*, 15.03, American Society for Testing and Materials
 9. ASTM D790-00 (2001), *Annual Book of ASTM Standards*, 08.01, American Society for Testing and Materials.
 10. ASTM D5379/D5379M-98 (2001), *Annual Book of ASTM Standards*, 15.03, American Society for Testing and Materials.
 11. Fried, J. R. (2003), *Polymer Science and Technology*, Prentice-Hall of India.
 12. Donald, L. P., Gary, M. L. and George, S. K. (1998), *Introduction to Spectroscopy*, Saunders College Publishing.
 13. Catherine, A. W. and Walter, L. B. (1997), “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* 57, pp.1033-1043.
 14. Caceres, A., Jamond, R. M., Hoffard, T. A. and Malvar, L. J. (2002), “Salt-Fog Accelerated Testing of Glass Fiber Reinforced Polymer Composites,” *NFESC Technical Report TR-2215-SHR*.
 15. Wolff, E. G. (1993), “Moisture Effects on Polymer Matrix Composites,” *SAMPE Journal*, Vol. 29, No. 3, pp.11-19.
- 접수일(2008년 1월 11일), 수정일(2008년 7월 22일), 게재확정일(2008년 7월 31일)