철도차량 차체용 탄소섬유/에폭시 복합재의 환경노화 특성 평가

Environmental aging characteristics of carbon/epoxy composite for train carbody

오진오* 윤성호** 김정석*** 한성호***

Oh, Jin-Oh Yoon, Sung-Ho Kim, Jung-Suk Han, Seong Ho

ABSTRACT

Mechanical and thermal analysis properties of carbon fiber/epoxy composite for train carbody were evaluated by varying with environmental factors such as ultraviolet, temperature, and moisture. Accelerated environmental aging tester was utilized for this study. Testing temperature was set to 80℃ and ultraviolet was obtained through xenon-arc lamp. To consider moisture, water sprayed on specimen for 18 minutes every 2 hour. All the specimens were made of CF1263/Epoxy composite. Mechanical properties such as tensile, bending, and shear properties were evaluated through a material testing system. Also, thermal analysis properties such as storage shear modulus, loss shear modulus, and tan δ were measured through dynamic mechanical analyzer. Finally surfaces of the composite exposed to environmental factors were examined using a scanning electron microscope. From experimental results, those properties of CF1263/Epoxy composite were shown to be slightly decreased due to environmental factors.

1. 서 론

본 연구에서는 한국형 틸팅열차 차체용 탄소섬유/에폭시 복합재를 대상으로 가속노화 시험을 수행하였다. 틸팅열차란 곡선 구간에서 차체가 안쪽으로 기울어져 고속으로 회전 시 발생하는 원심력을 극복할 수 있도록 제작되어진 철도차량이다. 틸팅차량의 장점은 직선 구간보다 곡선 구간이 많은 기존 철도 구간에서 곡선부 주행 시 최소한의 감속으로 운행 할 수 있어 추가적인 투자없이 운행시간을 획기적으로 단축할 수 있다. 하지만 틸팅차량이 곡선부 선로를 통과 시 액추에이터를 이용 차체 바깥쪽을 들어 올려야 함으로 인해 차체의 경량화가 필수적이다. 본 연구에서는 철도차량의 요구조건을 만족하면서 경량화를 이룰 수 있는 탄소섬유/에폭시 복합재를 대상으로 환경인자에 대한 내구성 시험을 수행하였다. 이때 복합재 시편은 철도차량에 적용가능한 CF1263/Epoxy 복합재를 이용하였으며 온도, 수분 및 자외선 등의 복합적인 환경인자가 복합재의 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 인장, 굽힘, 전단 시편을 제작하였다. 시편제작을 위해 반경화 상태의 프리프레그를 원하는 만큼 적층한 다음 규정된 온도와 압력으로 경화조건을 적용한 오토클레이브 공법을 적용하였다. 시편을 정해진 치수로 절단하고, Fill 방향보다 기계적 특성이 우수한 Warp 방향의 시편을 고려하여 제작하였다. 환경인자에 노출시간은 노출전, 1000시간, 2000시간, 3000시간을 적용하여 기계적 특성평가, 열분석 특성평가, 화학적 구조분석 특성평가, 노화표면 관찰을 수행하였다.

* 금오공과대학교, 기계공학부 대학원, 회원
E-mail : rio575@kumoh.ac.kr
TEL : (054)478-7313 FAX : (054)478-7319
** 금오공과대학교 기계공학부 교수, 정회원
*** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

2. 시험방법

2.1 가속노화시험

Fig. 1에는 온도, 수분, 자외선을 모사할 수 있는 가속노화시험장치가 나타나 있다. 여기에서 온도는 장착된 열선에 의해, 수분은 장착된 물 분사장치에 의해, 자외선은 2.5KW의 제논-아크 램프를 통해 조절된다. 본 연구에서 적용된 각 환경인자 조건은 ASTM G155-00a를 근거로 Fig. 2와 같이 제논-아크 램프가 켜진 상태에서 물을 2시간 마다 18분씩 분사하는 조건을 적용하고 설정온도는 60℃, 습도는 80%RH를 적용하였다. 또한 블랙판넬을 설치하여 시편의 실제적인 온도를 수집하였다. 환경인자의 노출시간은 0시간에서 최대 3000시간까지 1000시간을 주기로 고려하였다.

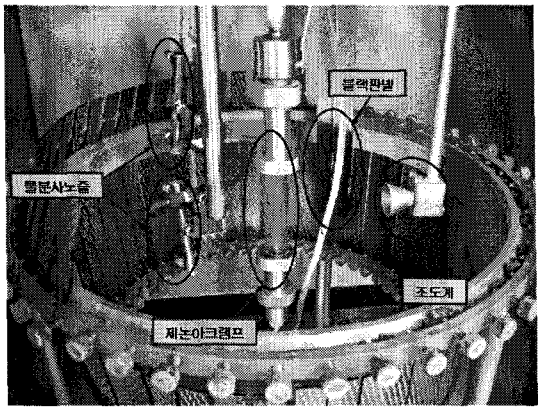


Fig.1 detailed view of internal chamber

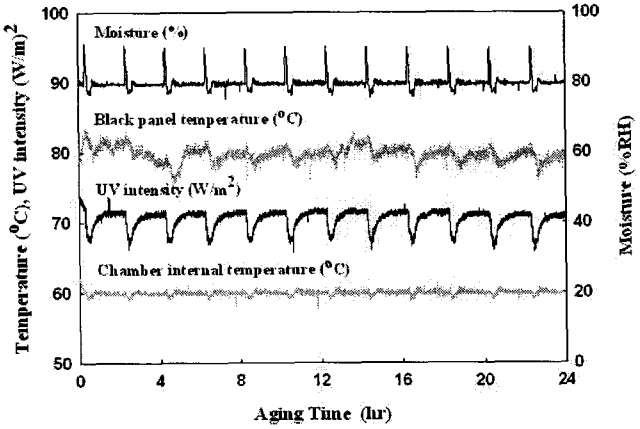


Fig. 2 Acquisition data for accelerated aging test

2.2 기계적 특성 시험

본 연구에서는 인장, 굽힘, 전단 시험을 통해 환경인자에 노출된 탄소섬유/에폭시 복합재의 기계적 특성을 평가하였다. 모든 기계적 특성 시험은 Fig. 3에 나타나 있는 만능 재료시험기(Zwick/Z100)를 이용하여 수행하였으며 인장시험은 비접착식 센서인 Extensometer를 이용하여 변형률을 측정하고 환경인자 노출시간에 따른 인장강성, 인장강도, 파단변형률을 평가하였다. 굽힘시험은 복합재 시편의 중앙 하단부에 비접착식 센서인 LVDT를 장착하여 굽힘강성과 굽힘강도를 평가하였다. 전단시험은 환경인자에 노출된 시편의 표면을 인위적으로 처리하는 경우 가속노화의 영향이 제거될 수 있기 때문에 면내전단강도만을 평가하였다. 각각의 기계적 특성 시험은 ASTM D3039, ASTM D790, ASTM D5379를 근거로 수행하였다.

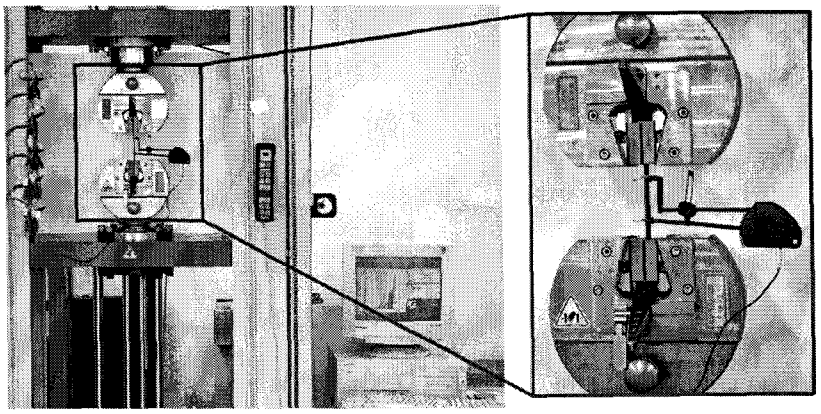


Fig. 3 Set-up for tensile test

2.3 열분석 특성 시험

복합재는 온도, 수분, 자외선과 같은 환경인자에 의해 열분석 특성이 변하게 되는데 본 연구에서는 동역학 측정장치를 적용하여 CF1263/Epoxy 복합재의 저장전단탄성계수, 손실전단탄성계수, tan δ 등의 열분석 특성을 평가하였다. 여기에서 저장전단탄성계수는 시편의 강성, 손실전단탄성계수는 시편에 변형이 발생하는 경우 내부마찰에 의한 방출에너지, tan δ는 시편의 감쇠성능을 판단하는 척도로 이용할 수 있다. 시험조건은 질소가스로 충전되어 있는 챔버 내의 시편고정장치에 스팬이 32mm이 되도록 하였으며 시편을 140 cm·N의 토크(Torque)로 고정하고 진폭 0.2mm, 주기 1.0Hz로 가진하였다. 이때 시편에 가해지는 온도는 25℃에서 250℃까지 상승시켰으며 2℃/min의 온도상승률을 적용하였다.

2.4 화학적 구조분석 시험

적외선 분광분석(FT-IR spectroscopy analysis)은 특정한 화합물이 나타내는 적외선 스펙트럼으로부터 피크를 관찰하여 화학 구조 및 확인이나 특성 기능기에 관한 정보를 얻을 수 있다. 이와 같은 이유로 환경인자에 노출된 시간을 달리한 CF1263/Epoxy 복합재의 화학구조 변화를 관찰하기 위하여 적외선 분광분석을 수행하였다. 이때 환경인자에 노출된 0시간, 1000시간, 2000시간, 3000시간을 고려하여 각각 펠렛 형태의 시료를 만들었으며 각각의 시료에 대하여 4000 ~ 700cm^{-1}의 영역에서 스펙트럼을 얻어 비교분석하였다.

2.5 노화표면 관찰

복합재가 온도, 수분, 자외선 등의 환경인자에 노출되는 경우 온도는 수지의 열분해 및 강화섬유와 수지 사이의 잔류응력을 유발하고, 수분의 강화섬유와 수지 사이의 계면 특성을 감소시키며, 자외선은 수지의 사슬절단을 유발시킨다. 환경인자에 노출된 복합재 표면에서는 노출시간이 비교적 짧은 경우에도 노화가 진행되어 수지층에 균열이 형성되기 시작하며, 노출시간이 점차 길어지면 균열이 형성된 수지층에 박리가 발생하여 강화섬유가 노출되는 양상이 나타난다. 이와 같이 환경인자에 노출된 복합재의 표면에 발생한 수지층의 박리와 같은 노화는 복합재의 특성저하를 일으키는 주요한 요인이다. 따라서 본 연구에서는 전자현미경을 이용하여 환경인자 노출 시간에 따른 복합재 표면의 변화를 관찰하였다.

3. 시험결과

3.1 기계적 특성 시험

Fig. 4에는 노출시간에 따른 인장특성의 변화가 나타나 있다. 여기에서 보면 비접착식 센서인 Extensometer를 통해 얻은 응력-변형률 선도의 초기 기울기에서 결정된 인장강성은 1000시간 노출시킨 경우 56.5GPa, 2000시간 노출시킨 경우 55.1GPa, 3000시간 노출시킨 경우 56.5GPa로 노출전의 인장강성 56.5GPa과 비교해 볼 때 노출시간에 따른 인장강성의 변화는 거의 나타나지 않았다. 그러나 인장강도의 경우 노출 전 인장강도가 724MPa 이며 노출시간에 따라 인장강도는 711MPa, 716MPa, 707MPa로 서서히 낮아짐을 알 수 있다. 따라서 복합적인 환경 하에 노출된 경우 인장강성은 환경인자에 대해 둔감하고 인장강도는 민감함을 알 수 있다.

Fig. 5에는 실험을 통해 평가된 노출 전과 1000시간, 2000시간, 3000시간 동안 노출된 CF1263/Epoxy 복합재에 대한 warp 방향의 굽힘특성이 나타나 있다. 여기에서 보면 1000시간의 경우 굽힘강도는 큰 폭으로 감소하나 시간에 지남에 따라 점차 증가하는 양상을 나타낸다. 이는 가속노화 환경에서 높은 온도와 수분에 의한 후경화로 인한 것으로 판단된다. 그러나 굽힘강성은 1000시간 노출시킨 경우 52.5GPa, 2000시간 노출시킨 경우 48.9GPa, 3000시간 노출시킨 경우 52.1GPa로 노출전의 굽힘강성 52.2GPa과 비교해 볼 때 노출시간에 따른 굽힘강성의 큰 변화는 없는 것으로 판단된다.

Fig. 6에는 실험을 통해 평가된 노출 전과 1000시간, 2000시간, 3000시간 동안 노출된 CF1263/Epoxy 복합재에 대한 warp 방향의 면내전단강도가 나타나 있다. 여기에서 보면 면내전단강도는 1000시간의 경우 노출 전에 비해 큰 폭으로 감소하다가 2000시간이 경과하면 감소폭이 작아지다가 3000시간에 다소 증가하는 양상을 나타낸다. 이는 노출초기에는 표면의 수지박리로 인한 물성 저하가 나타나지만 높은 온도에 장기간 노출되는 경우 후경화로 인해 면내전단강도가 다소 증가하는 것으로 판단된다.

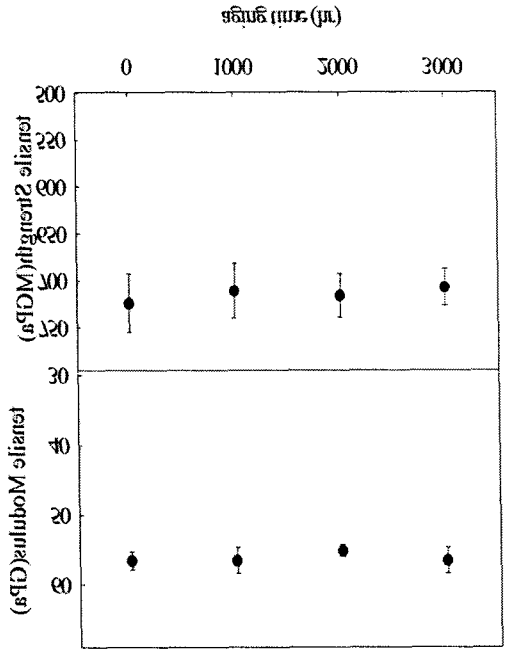


Fig. 4 Variations of tensile properties in accelerated aging test

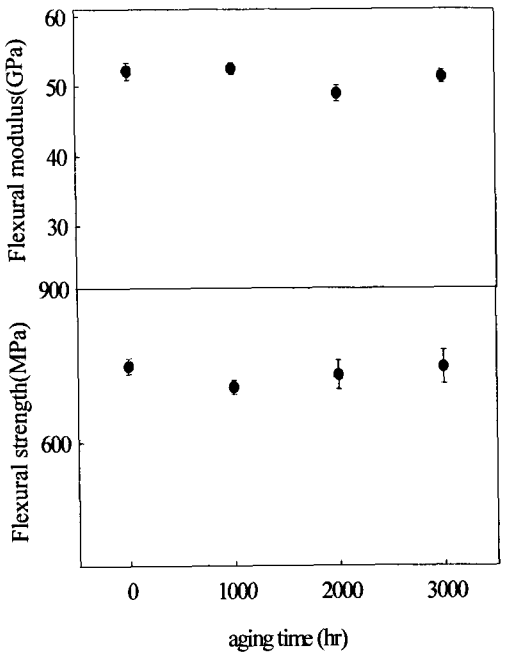


Fig. 5 Variations of flexural properties in accelerated aging test

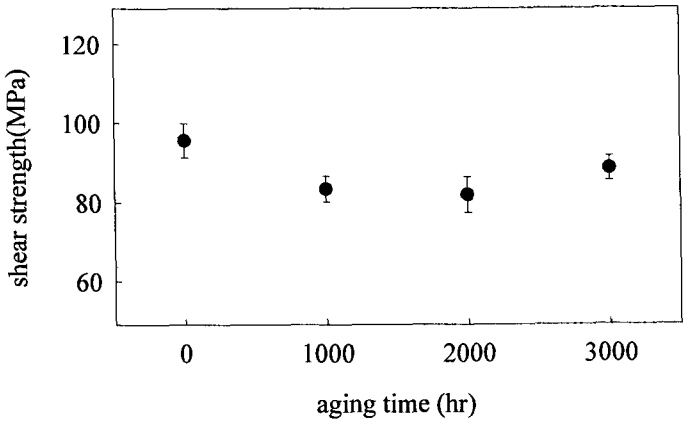
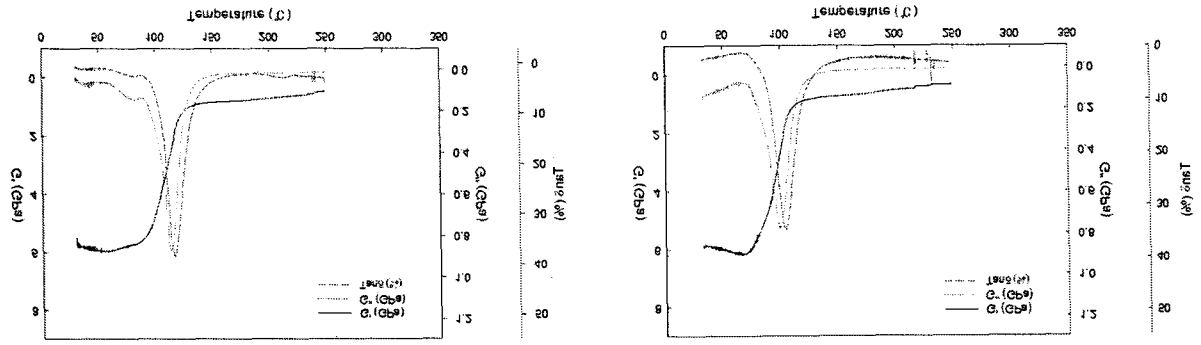


Fig. 6 Variations of shear property in accelerated aging test

3.3 열분석 특성 시험

Fig. 7에는 환경인자에 노출되기 전의 Base 시편과 1000시간 노출된 CF1263/Epoxy 복합재의 저장전단강성, 손실전단강성, tan δ 선도가 나타나 있다. 여기에서 보면 Base 와 1000시간 노출된 시편에서 저장전단강성의 변화는 유사한 양상을 나타낸다. 유리전이온도는 105℃ 부근에서 나타났으며 저장전단강성은 상온에서 초기에는 유리상태로서 비교적 평탄한 영역을 나타내지만 온도가 증가하게 되면 서서히 감소하다가 유리상태에서 고무상태로 변하는 유리전이온도 부근에서 급격히 감소하는 양상을 나타낸다. 환경인자에 노출되는 경우 유리전이온도 근처에서 복잡한 양상을 나타내지만 노출 시간이 증가함에 따라 유리전이온도가 점차 낮아질 것으로 판단된다.



(a) Base (b) 1000hr

Fig. 7 DMA result of CF1263/Epoxy composite

3.4 화학적 구조분석 시험

가속노화시험에서 노출 시간을 달리한 CF1263/Epoxy 복합재의 화학구조 변화를 관찰하기 위하여 적외선 분광분석을 수행하였다. Fig. 8에는 염수 분무 및 침수환경에 각각 노출 전의 Base와 1000시간, 2000시간, 3000시간 노출된 복합재의 FT-IR 결과 선도가 나타나 있다. 여기에서 주요 피크를 하나씩 살펴보면 3500cm^{-1} 근처의 피크는 O-H기를 나타내며 3000cm^{-1} 근처의 피크는 방향족 내의 sp^2 C-H, 2900cm^{-1} 근처의 피크는 sp^3 C-H, 그리고 1600cm^{-1} 근처의 피크와 1450cm^{-1}는 방향족 내의 C=C 이중결합을 나타내고 있다. 가속노화시험에서 노출되기 전의 경우에 나타나는 피크의 생김새(shape) 및 위치는 노출 시간이 증가되어도 변화되지 않는 것을 알 수 있다.

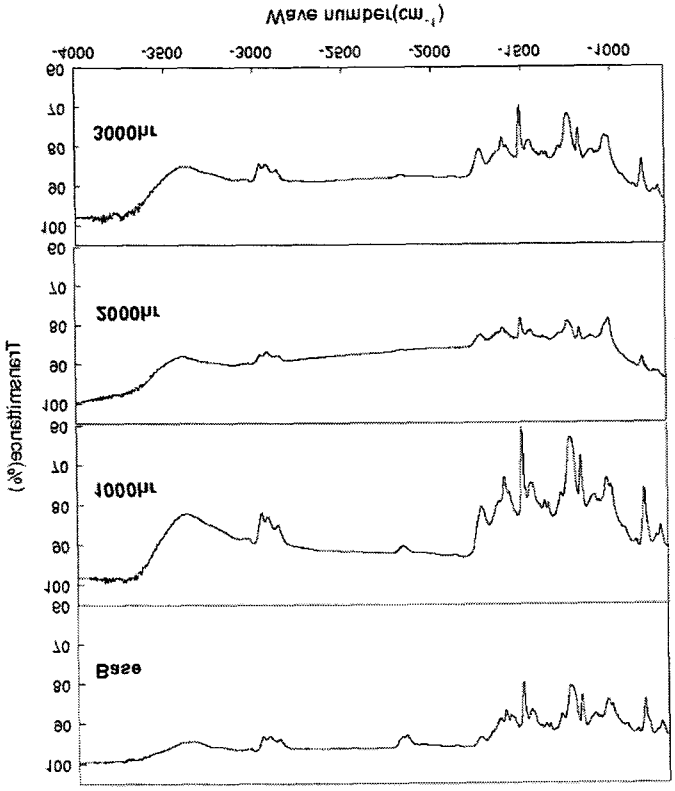


Fig 8. IR results in accelerated aging test

3.5 노화표면 관찰

복합적인 환경 하에 노출되는 경우 노출시간에 경과함에 따라 기계적 특성이 감소하게 되는데 이러한 현상의 원인으로는 수지의 열분해 및 강화섬유와 수지 사이의 잔류응력의 형성, 강화섬유와 수지 사이의 계면 특성 감소 등이 발생됨으로 인해 노출시간에 따라 노화 정도가 달라짐을 알 수 있다. 특히, 노출시간이 짧은 경우 환경인자에 노출된 복합재 표면에는 노화가 진행되어 수지층의 균열이 형성되기 시작하고, 노출시간이 점차 길어지면 균열이 형성된 수지층에는 박리가 발생하여 강화섬유가 노출되는 양상이 나타난다. Fig. 9 ~ Fig. 10에는 CF1263/Epoxy 복합재의 노출시간에 대한 표면을 전자현미경을 통해 관찰한 사진이 나타나 있다. 이때 Fig. 9는 수지와 강화섬유를 100배의 배율로 관찰한 사진이고, Fig. 10은 강화섬유 부분의 표면을 1000배의 배율로 관찰한 사진이다. Fig. 9에서 보면 수지로 덮혀 있던 섬유다발 부분이 노출시간에 따라 점차 수지층의 박리가 발생하여 강화섬유가 노출되는 양상이 나타나며, 3000시간 노출된 경우 강화섬유의 손상이 나타나기도 한다.

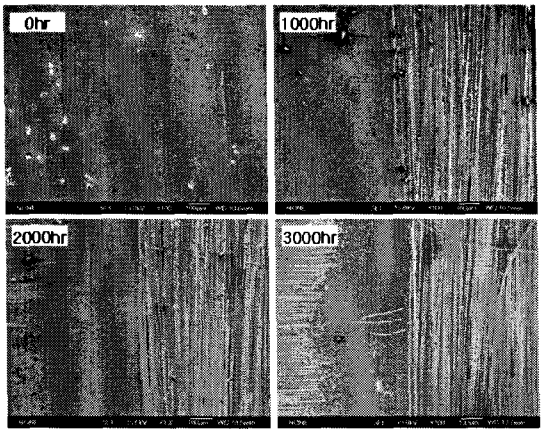


Fig. 9 Photographs of surface according to exposed time (x100)

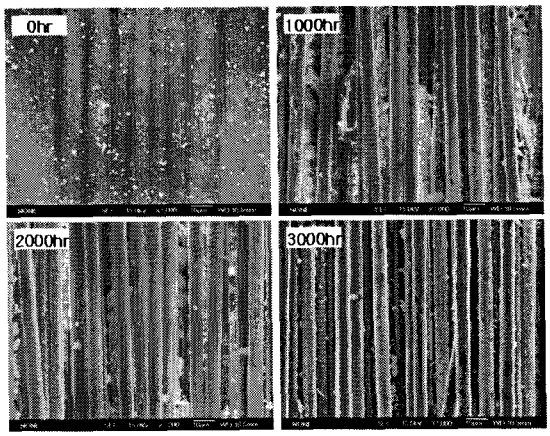


Fig. 10 Photographs of surface according to exposed time (x1000)

4. 결론

본 연구를 통해서 환경인자에 노출된 복합재의 강성은 환경인자에 비교적 둔감하지만 강도는 강성에 비해 환경인자에 민감하고 노출시간이 증가하면 점차 감소하는 양상을 나타내었으며 환경인자에 노출된 복합재는 노출시간에 따라 수지층의 박리현상이 발생하고 강화섬유가 노출됨을 알 수 있었다.
본 연구에 적용된 CF1263/Epoxy 복합재는 8매 주자직의 직물형태로서 곡면 형상에 요구되는 구조재 제작에 유리하지만 틸팅차량 제작에 적용되기 위해서는 우선적으로 틸팅차량의 설계요구조건의 고려가 필수적이며 장시간 환경인자에 노출된 복합재의 성능을 정량화하기 위해서는 기존의 시험에 적용된 노출시간이 확장되어야 하며 필요에 따라서는 실시간 노출시험의 병행을 통한 복합재 내구성 평가 및 수명예측이 행해져야 한다.

참고문헌

1. Caceres. A., Jamond R. M., Hoffard T. A., Malvar l. J.(2002), "Salt-Fog Accelerated Testing of Glass Fiber Reinforced Polymer Composite," NFESC Technical Report TR-2215-SHR
2. Yoon. S. H., Lee. S. J., Lee. J. K.(2002), "Effects of Combined Environmental Factors on Mechanical and Thermal Analysis Properties of Gfaphite/Epoxy Composites," Journal of the Korean Mechanical Engineers, Vol.26, No.7, pp1416~1425
3. ASTM G155-00a(2001), "American Society for Testing and Materials," Annual Book of ASTM Standards,14.04.