

# 철도차량용 유리섬유직물/페놀릭 복합재의 가속노화 특성

## Aging Characteristics of Glass Fabric/Phenolic Composites in Train Carbody

윤성호\*      남정표\*\*      황영은\*\*      신광복\*\*\*  
Yoon, Sung-Ho   Nam, Jung-Pyo   Hwang, Young-Eun   Shin, Kwang-Bok

---

### ABSTRACT

In this study, the effects of combined environmental factors on mechanical and thermal analysis properties of graphite/epoxy composites were evaluated through a 2.5KW accelerated environmental aging tester. Environmental factors such as temperature, moisture, and ultraviolet were considered. A xenon-arc lamp was utilized for ultraviolet light, and exposure times of up to 3000 hours were applied. Several types of specimens - tensile, bending, and shear specimens those are warp direction and fill direction - were used to investigate the effects of environmental factors on mechanical properties of the composites. The glass fabric #650/AP300 was used for the fabrication of specimens. Mechanical degradations for tensile, bending and shear properties were evaluated through a UTM. Also, storage shear modulus, loss shear modulus, and  $\tan \delta$  were measured as a function of exposure times through a dynamic mechanical analyzer. Finally exposed surfaces of the composites were examined using a scanning electron microscope.

---

### 1. 서 론

복합재는 비강성과 비강도가 높고 내부식성이 우수하여 우주항공, 항만시설, 철도차량에 널리 이용되고 있다. 특히 유리섬유직물/페놀릭 복합재는 직물의 형태와 페놀릭 수지가 갖는 특징으로 인해 곡면 형상과 내열성이 요구되는 구조재 제작에 유리하다. 그러나 자연환경에 장시간 노출시 온도, 수분, 자외선 등의 환경요인으로 인한 기계적 특성, 열적 특성, 물리적 특성이 변하게 되어 실제 복합재 구조물을 운용하는데 문제를 초래할 수 있다. 환경요인 중에서 온도는 수지의 열분해를 촉진시키거나 강화섬유와 수지의 열팽창 차이로 인한 잔류응력을 유발시키고, 수분은 강화섬유와 수지 사이의 계면 특성을 감소시키는 가소제 역할을 하고, 자외선은 광분해로 인한 수지의 사슬절단을 유발하여 분자량을 감소시키는 역할을 한다. 본 연구에서는 제논-아크 램프가 장착된 2.5KW 용량의 가속노화장치를 이용하여 실제 철도차량에 적용될 수 있는 유리섬유직물/페놀릭 복합재의 노화에 따른 내구성을 시험하였다. 가속노화에 적용된 시험편은 Warp 방향과 Fill 방향으로 구분한 유리섬유직물/페놀릭 복합재로서 UTM을 통한 기계적 특성 평가, DMA를 통한 열적 동특성 평가, SEM을 통한 노화상태의 가시화를 수행하였다.

---

\* 금오공과대학교 기계공학부 교수, 정회원

\*\* 금오공과대학교 기계공학부 대학원생

\*\*\*철도기술연구원 선임연구원, 정회원

## 2. 시편제작 및 실험방법

### 2.1 시편제작

본 실험에 사용된 유리섬유직물/페놀릭 복합재는 고온경화용 페놀수지(AP300)에 유리섬유직물(Glass fabric #650)을 함침시켜 놓은 프리프레그(Glass fabric #650/AP300, 한국화이버)를 이용하여 오토클레이브 공법을 통해 성형하였다. 인장시편(175mm×25mm×3mm)은 두께가 0.5mm인 유리섬유직물 프리프레그를 6층 적층한 다음 오토클레이브 공법을 적용하여 성형하고 다이아몬드 휠을 이용하여 Warp 방향과 Fill 방향으로 나누어 규정된 형상으로 가공하였고, 굽힘시편(125mm×25mm×3mm)과 전단시편(76mm×20mm×3mm)은 인장시편의 경우와 마찬가지로 유리섬유직물/페놀릭 프리프레그를 6층 적층한 다음 오토클레이브 공법을 적용하여 성형하고 다이아몬드 휠을 이용하여 Warp 방향과 Fill 방향으로 나누어 규정된 형상으로 가공하였다. 이때 각 시편들은 절단면으로의 수분침투를 막기 위해 실리콘을 이용하여 절단면을 코팅처리 하였다.

### 2.2 가속노화시험

Fig. 1에 나타난 가속노화기는 내부에 열선, 물 분사장치, 2.5KW 제논-아크 램프가 장착되어 기온, 비와 눈, 일광에 의한 자외선 등의 조건을 복합재 시편에 가속화시킬 수 있다. 복합재 시편은 직경 508mm, 110rpm의 회전속도를 갖는 시편고정장치에 장착하여 가능한 균일한 환경조건이 가해지도록 하였다. 가속노화시험을 위해서는 ASTM G26과 ATLAS에서 제시하고 있는 시험조건을 고려하여 램프가 켜진 상태에서 2시간마다 18분씩 물을 분사하였으며 이때 온도는 60℃, 습도는 80%RH, 노출시간은 0시간, 250시간, 500시간, 750시간, 1000시간, 1500시간, 2000시간, 3000시간을 고려하였다.

Fig. 2에는 온도, 수분, 자외선 등이 설정조건에 부합되는지의 여부를 검증하기 위해 수집된 자료가 나타나 있다. 여기에서 보면 수분은 설정된 80%RH에 잘 일치하고 2시간마다 18분 주기로 물 분사가 이루어질 때 상대습도가 높아짐을 알 수 있으며 챔버의 내부온도도 설정된 60℃와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 시편고정장치에 장착된 시편에는 자외선과 복사열 때문으로 80℃임을 알 수 있으며 자외선은 노출시간에 따라 일정하지만 불 분사가 이루어지는 경우 분무 현상으로 인해 시편에 가해지는 자외선 강도는 주기적으로 감소하는 양상을 나타내고 있다.

### 2.3 기계적 특성평가

환경인자에 장시간 노출된 유리섬유직물/페놀릭 복합재의 인장특성, 굽힘특성, 전단특성 등의 기계적 특성을 평가하기 위해 하중시험기, 신호증폭기, A/D변환장치, 자료수집장치 등으로 구성된 실험장치를 사용하였다. 하중시험기는 Zwick/Z100이며 작용하중에 대한 변형률은 스트레인게이지와 같은 접착식 변형률 센서 또는 LVDT 및 extensometer 등의 비접착식 변형률 센서를 통해 측정하였다. 복합재의 기계적 특성은 ASTM에 규정된 절차에 따라 평가하였으며 인장특성은 ASTM D3039/D3039M [1], 굽힘특성은 ASTM D790[2], 전단특성은 ASTM D5379/5379M[3]에 근거하여 시험을 수행하였다. 시험결과의 분석을 위해서는 개인용 컴퓨터, Labview, A/D 변환기(PCI-MIO-16E, National Instruments)로 구성된 자료수집장치를 통해 초당 10개씩 하중, 변위, 변형률 등의 자료를 수집하였고 결과자료로부터 평균의 추정값을 편향시키고 정밀도 추정값 폭을 증가시키는 이상자료점을 제거하고 신뢰도 높은 결과값을 얻기 위하여 통계적 처리를 수행하였다. 이상자료점의 결정을 위해 Chauvenet 기준[4]을 적용하였으며 자료평균으로부터 각 편차를 포함하는 확률값이  $1/2n$ 보다 작은 경우 그 자료점은 제거하고 나머지 자료로부터 다시 통계값을 결정하는 방법을 채택하였다. 이때 n은 동일한 시험 조건에서 결과자료 개수를 의미한다.

### 2.4 열분석 특성 평가

복합재가 환경인자에 노출되면 유리전이온도, 상온에서의 강성, 유리전이온도 이상에서의 강성, 경화도, 가교밀도 등의 열분석 특성이 변하게 된다. 환경인자에 노출된 유리섬유직물/페놀릭 복합재의

Warp 방향과 Fill 방향에 대한 저장전단강성  $G'$ , 손실전단강성  $G''$ ,  $\tan\delta$  등의 열분석 특성을 조사하기 위해 동역학 측정장치 (DuPont DMA983)를 적용하였다. 이를 위해 질소가스로 충전되어 있는 챔버 내의 시편고정장치에 스펠이 32mm가 되도록 시편을 장착하고, 진폭 0.2mm, 주기 1Hz로 가진을 시켰다. 이때 온도는 30℃에서 2℃/min의 온도상승률로 300℃까지 상승시켰다.

## 2.5 전자현미경 관찰

환경인자에 의한 복합재의 특성을 고찰하기 위해 사용한 전자현미경은 Hitachi/S-4300을 사용하였으며 최적화상을 얻기 위해 팔라듐(Pd)을 이용하여 200300Å의 두께로 금막처리를 하였다. 환경인자에 노출된 복합재 표면에는 노출시간이 비교적 짧은 경우에도 노화가 진행되어 수지층에 균열이 형성되기 시작하고 노출시간이 점차 길어지면 균열이 형성된 수지층에 박리가 발생하여 강화섬유가 노출되는 양상이 나타난다. 이와 같은 복합재의 표면에 발생한 수지층의 박리와 같은 노화는 강화섬유가 상대적으로 많은 Warp 방향의 특성에는 큰 영향을 주지 않지만 수지가 상대적으로 많은 Fill 방향의 특성에는 민감한 영향을 미치게 된다.

## 3. 환경노화 특성 평가 결과

### 3.1 노화시간에 따른 기계적 특성

Fig. 3에는 노출시간에 따른 인장 및 굽힘, 전단특성의 변화가 나타나 있다. 이들은 각각 6개씩의 시편에 대해 수행된 결과로서 Warp 방향이 시편 길이방향의 섬유밀도 때문으로 Fill 방향보다 강성과 강도가 높게 나타난다. 여기에서 보면 노출시간이 증가함에 따라 강성과 강도는 노출 전에 비해 조금씩 감소하는 양상이 나타난다. 특히 Warp 방향의 시편이 1000시간 노출되면 인장강성, 굽힘강성, 전단강성은 노출 전에 비해 각각 10.9%, 6.5%, 2.2% 정도 감소하고 인장강도, 굽힘강도, 전단강도는 각각 2.5%, 7.0%, 1.7% 정도 감소한다. 또한 3000시간 노출되면 인장강성, 굽힘강성, 전단강성은 노출 전에 비해 각각 14.8%, 6.0%, 3.8% 정도 감소하고 인장강도, 굽힘강도, 전단강도는 각각 22.5%, 12.8%, 0.8% 정도 감소한 것으로 나타난다. 여기에서 보면 3000시간 환경인자에 노출된 경우는 1000시간 노출된 경우보다 굽힘강성의 경우 0.5%, 전단강도의 경우 0.1% 정도 증가하는 것으로 나타나는 데, 이러한 현상의 원인으로서는 일차적으로 노출시간이 증가할 경우 환경인자에 노출된 복합재에 후경화에 따른 현상에서 기인할 수 있고, 이차적으로 각각의 시험편들이 대량으로 제작됨에 따라 시편마다 특성이 고르지 못한데서 기인한 것으로 사료된다. Fill 방향의 시편이 1000시간 환경인자에 노출되면 인장강성, 굽힘강성, 전단강성은 노출 전에 비해 각각 10.0%, 18.7%, 0.5% 정도 감소하고 인장강도, 굽힘강도, 전단강도는 각각 1.9%, 13.3%, 7.2% 정도 감소하며, 2000시간동안 노출시 강성은 노출 전에 비해 각각 7.6%, 15.9%, 7.3% 정도 감소하고 강도는 각각 12.4%, 3.2%, 5.4% 정도 감소하는 것으로 나타난다. 여기에서 보면 1000시간 환경인자에 노출된 경우는 Warp 방향에 비해 Fill 방향의 굽힘특성이 크게 저하되는데 이는 복합재의 표면에 발생한 수지층의 박리가 노화의 주 요인 중의 하나로서 수지가 상대적으로 많은 Fill 방향에서 특성 저하가 커지기 때문으로 판단된다.

### 3.2 노화시간에 따른 열분석 특성

Fig. 4에는 환경인자에 노출되기 전의 DMA시편에 대한 전형적인 저장전단강성  $G'$ , 손실전단강성  $G''$ ,  $\tan\delta$  선도가 나타나 있다. 여기에서 보면 상온에서 유리상태인 저장전단강성은 초기 평탄영역을 가지다가 온도가 증가하면서 서서히 감소하며 유리상태에서 고무상태로 변하는 유리전이온도 부근에서 급격히 감소한다. 유리전이온도 전후의 손실전단강성과  $\tan\delta$ 의 선도는 복합재 성형시 발생하는 수분이나 탄산가스과 같은 부가생성물에 의한 기포의 영향 및 페놀 수지의 넓은 분자량 분포로 인한 저분자량 페놀의 간섭 효과 때문으로 저장전단강성의 경우와는 달리 손실전단강성과  $\tan\delta$ 의 판독이 어렵다. 또한 노출시간에 따른 저장전단강성의 선도를 보면 노출시간이 길어질수록 상온에서의 저장전단강성과 유리전이온도가 낮아지는 것을 알 수 있으며 Warp 방향의 저장전단강성은 Fill 방향의 경

우에 비해 높게 나타남을 알 수 있다. Warp 방향의 저장전단강성은 2000시간 노출시킨 경우 노출 전의 경우에 비해 10.6% 정도 감소하고 Fill 방향의 저장전단강성도 노출시간이 길어짐에 따라 서서히 감소하기 시작하며 2000시간 노출시킨 경우에는 노출 전의 경우에 비해 18.9% 정도 감소하는 것으로 나타난다.

### 3.3 노화시간에 따른 노화표면 관찰

Fig. 5과 Fig. 6에는 환경인자에 노출된 유리섬유직물/페놀릭 복합재의 표면을 전자현미경을 통해 관찰한 사진이 나타나 있다. 여기에서 보면 노출시간이 길어짐에 따라 환경인자에 노출된 복합재 표면에는 노화가 진행되어 수지층의 균열과 유리섬유와 수지사이 계면에서의 벌어짐이 형성되기 시작하고, 노출시간이 더욱 길어지면 균열이 형성된 수지층에는 박리가 발생하여 강화섬유가 수지로부터 떨어져 나가는 양상이 관찰된다. 이와 같이 환경인자에 노출된 복합재는 온도에 의한 수지의 열분해 및 강화섬유와 수지 사이의 잔류응력 형성, 수분에 의한 강화섬유와 수지 사이의 계면 특성 감소, 자외선에 의한 수지의 사슬절단 유발 등이 유발됨으로 인해 노출시간에 따라 노화 정도가 달라짐을 알 수 있다.

## 4. 결 론

틸팅차량의 복합재 전두부에 적용될 수 있는 소재에 대해 가속노화장치를 이용하여 환경인자의 영향을 평가하기 위한 연구를 통해서 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 환경인자에 노출된 유리섬유직물/페놀릭 복합재의 Warp 방향과 Fill 방향을 따른 강성은 환경인자에 비교적 둔감하지만 강도는 강성에 비해 민감함을 알 수 있으며 노출시간이 증가함에 따라 이들 특성은 감소하는 경향을 나타낸다.
- (2) 저장전단강성과 유리전이온도는 노출시간이 증가함에 따라 Warp 방향과 Fill 방향 모두 감소하는 양상을 보였다. 유리전이온도는 복합재의 후경화 때문으로 초기 노출단계에서 다소 증가하였지만 노출시간이 더욱 길어지면 복합재의 사슬절단이 지배적으로 발생하여 점차 감소한다.
- (3) 환경인자에 노출된 복합재는 Warp 방향과 Fill 방향 모두 초기 단계에는 수지층에 많은 미세균열을 형성하고 노출시간이 길어질수록 수지층의 박리현상으로 인하여 강화섬유가 노출된다. 이와 같은 환경인자에 노출된 복합재의 표면에 발생한 수지층의 박리는 Warp 방향과 Fill 방향으로의 특성을 저하시키는 주 요인 중의 하나이다.
- (4) 복합재 차체의 적용을 위해서는 확장된 노출시간에 대한 복합재 특성의 정량적인 평가가 필요하며 아울러 실시간 노출시험의 수행도 병행되어야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. ASTM D3039/D3039M-00, 2001, Annual Book of ASTM Standards, 15.03, American Society for Testing and Materials.
2. ASTM D790-00, 2001, Annual Book of ASTM Standards, 08.01, American Society for Testing and Materials.
3. ASTM D5379/D5379M-98, 2001, Annual Book of ASTM Standards, 15.03, American Society for Testing and Materials.
4. J. P. Holman, "Experimental Methods for Engineers", McGraw-Hill, 2001.

## 후 기

본 연구는 철도청의 철도기술개발사업에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다.



Fig. 1 Internal chamber

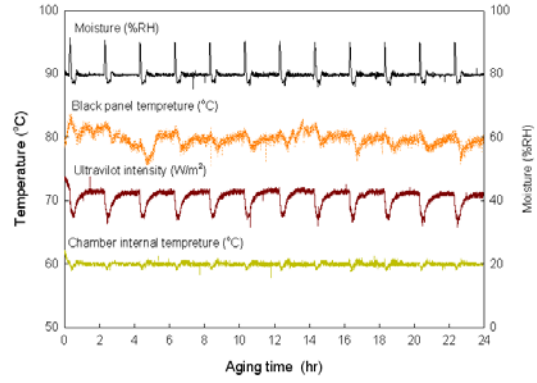
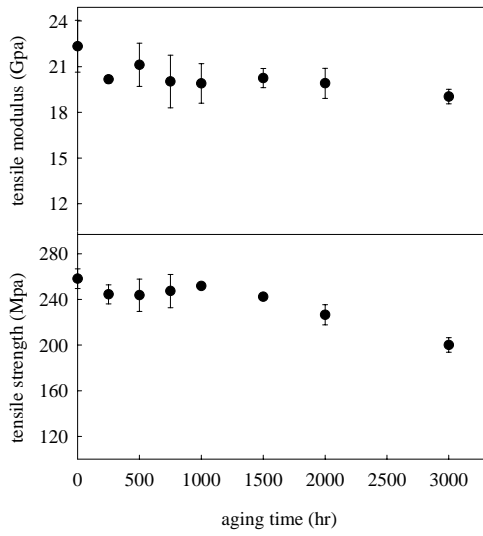
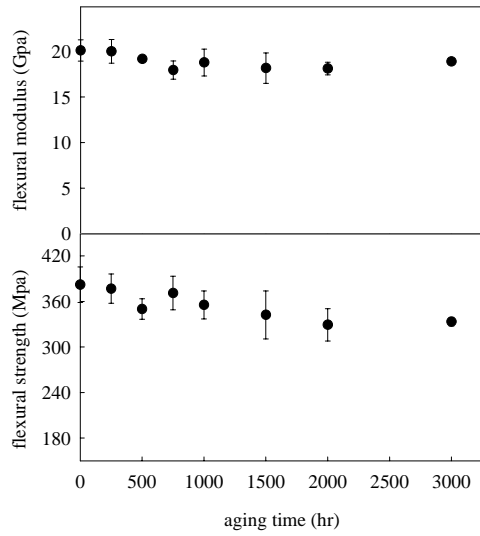


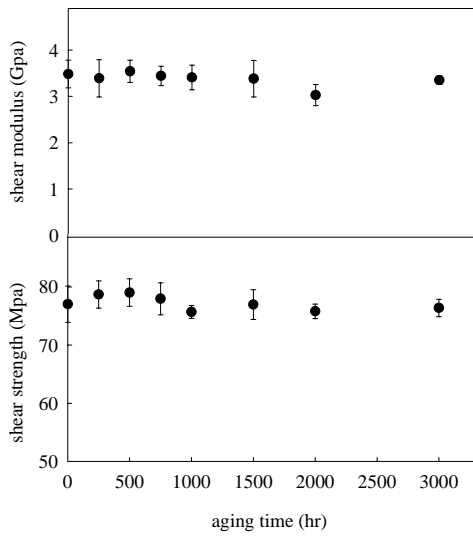
Fig. 2 Acquisition data of control parameters



(a) Tensile properties



(b) Flexural properties



(c) Shear properties

Fig. 3 Variations of mechanical properties w.r.t. aging time of warp direction

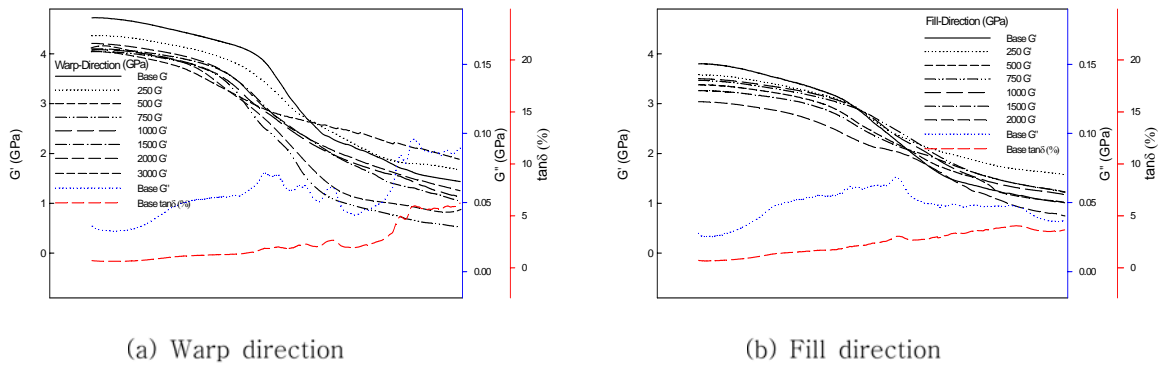


Fig. 4 DMA results of glass fabric/phenolic composite

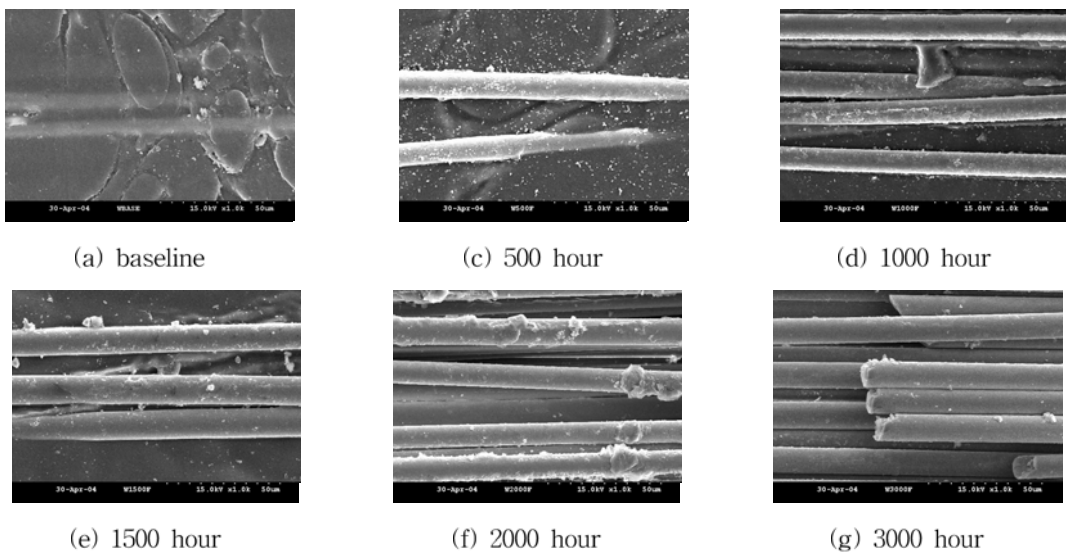


Fig. 5 SEM photographs of exposed surfaces for glass fabric/phenolic composite along the warp direction

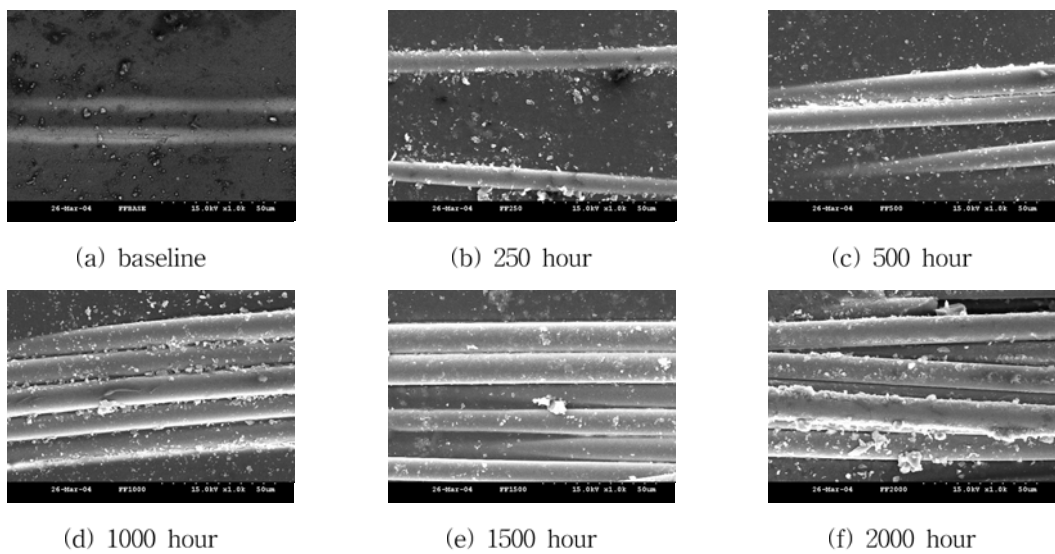


Fig. 6 SEM photographs of exposed surfaces for glass fabric/phenolic composite along the fill direction