

# 가속노화시험을 이용한 틸팅차량 차체 복합재의 노화특성 Aging Characteristics of Composite Materials in Carbody of Tilting Train using Accelerated Aging Test

윤성호\*      김용구\*\*      남정표\*\*      신광복\*\*\*      구동회\*\*\*\*  
Yoon, Sung-Ho   Kim, Yong-Goo   Nam, Jung-Pyo   Shin, Kwang-Bok   Koo, Dong-Hoe

---

## ABSTRACT

Polymeric composite structures used in ground transportation applications such as the carbody of tilting train may be exposed to a ground environmental conditions during long-term missions. In this study, the degradation of mechanical and physical properties of graphite/epoxy composite and glass fabric/phenol composite under ground environmental conditions was investigated. Accelerated environmental conditions of ultraviolet radiation, temperature, and moisture were considered. Several types of specimens were used to investigate the effects of environmental conditions on mechanical properties of the composites. Also, storage shear modulus, loss shear modulus, and  $\tan \delta$  were measured as a function of exposure times through a dynamic mechanical analyzer. Finally, composite surfaces exposed to environmental conditions were examined using a scanning electron microscope.

---

## 1. 서론

복합재는 기존의 금속재와는 달리 자연환경에 장시간 노출되면 수지와 경화제, 경화시간, 경화온도 등의 제작상 요인, 하중조건과 환경인자 등의 운용상 요인에 의해 강성과 강도 등의 기계적 특성, 유리전이온도 등의 열분석 특성, 치수와 질량 등의 물리적 특성이 변하게 되어 복합재의 내구성 및 수명에 영향을 미치게 된다. 특히 온도, 수분, 자외선 등은 복합재의 내구성에 영향을 미치는 주요한 환경인자로서 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 유발시켜 분자량을 감소시키는 역할을 한다. 복합재의 내구성 평가 및 수명예측을 위해서는 자연환경의 영향이 고려된 복합재의 특성이 조사되어야 하지만 실시간 자연 환경에서의 시험을 수행할 경우 자료수집에 너무나 오랜 시간이 소요되고 환경인자 자체도 정량화하기도 어렵다는 단점이 있다. 본 연구에서는 틸팅차량의 복합재 전두부에 적용될 소재에 대한 환경인자의 영향을 평가하기 위한 가속노화 시험방법을 조사하고 복합재 전두부에 적용될 복합재 시편을 제작하여 온도, 수분, 자외선 등의 복합적인 환경인자에 노출된 경우의 기계적 특성을 평가하였다. 이때 복합재에 자외선을 주사시키기 위해 제논-아크 램프가 장착된 가속노화장치를 적용하였다. 또한 동역학 측정장치인 DMA를 이용하여 노출시간에 따른 복합재 시편의 열분석 특성을 평가하였으며 노출시간을 달리한 복합재 표면의 노화상태를 가시화하기 위해 전자현미경을 통해 관찰하였다.

---

\* 금오공과대학교 기계공학부 교수, 정회원  
\*\* 금오공과대학교 기계공학부 대학원생  
\*\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원  
\*\*\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

## 2. 시편제작 및 실험방법

환경인자가 탄소섬유/에폭시 복합재 및 유리섬유직물/페놀릭 복합재의 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 탄소섬유/에폭시 복합재인 경우 섬유의 횡방향 인장시편, 섬유방향과 섬유의 횡방향 굽힘시편, 1-2 평면과 2-1 평면의 전단시편을 제작하였으며, 유리섬유직물/페놀릭 복합재인 경우 warp 방향의 인장시편, 굽힘시편, 전단시편을 제작하였다. 특히 탄소섬유/에폭시 복합재인 경우 섬유의 횡방향 인장시편, 섬유의 횡방향 굽힘시편, 1-2 평면과 2-1 평면 전단시편들은 수지가 지배적인 역할을 하며 섬유방향의 굽힘시편은 강화섬유가 지배적인 역할을 한다. 이때 1은 섬유방향, 2는 섬유의 횡방향을 나타낸다.

탄소섬유/에폭시 복합재인 경우 섬유의 횡방향 인장시편은 일방향 프리프레그 (HFG 125NS, 한국화이바)를 16층 적층한 다음 오토클레이브 공법을 통해 성형된 적층판에서 다이아몬드 휠을 이용하여 규정된 형상으로 가공하여 얻었다. 섬유방향의 굽힘시편, 섬유의 횡방향 굽힘시편, 1-2 평면과 2-1 평면의 전단시편도 섬유의 횡방향 인장시편과 유사하게 일방향 프리프레그를 24층 적층한 다음 오토클레이브 공법을 통해 성형된 적층판에서 다이아몬드 휠을 적용하여 규정된 형상으로 가공하여 얻었다. 유리섬유직물/페놀릭 복합재는 고온 경화용 페놀 수지 (AP300)에 유리섬유직물 (Glass fabric #650)을 함침시켜 놓은 형태로서 복합재 시편은 반경화 상태의 프리프레그를 원하는 두께만큼 적층한 다음 탄소섬유/에폭시 복합재의 경우와 마찬가지로 오토클레이브 공법을 통해 성형하였다. Warp 방향의 인장시편은 두께가 0.5mm인 유리섬유직물 프리프레그 (Glass fabric #650/AP300, 한국화이바)를 6층 적층하고 오토클레이브 공법을 적용하여 성형한 다음 다이아몬드 휠을 적용하여 warp 방향을 따라 규정된 형상으로 가공하여 얻으며, 굽힘시편과 전단시편도 인장시편의 경우와 마찬가지로 유리섬유직물 프리프레그를 6층 적층하고 오토클레이브 공법을 적용하여 성형한 다음 다이아몬드 휠을 이용하여 규정된 형상으로 가공하여 얻었다.

그림 1에는 환경인자에 장시간 노출된 탄소섬유/에폭시 복합재 및 유리섬유직물/페놀릭 복합재의 인장특성, 굽힘특성, 전단특성 등의 기계적 특성을 평가하기 위한 실험장치의 구성도가 나타나 있다. 실험장치는 하중시험기, 변형률 증폭기, A/D 변환장치, 자료수집장치 등으로 구성되어 있으며 하중시험기는 Zwick/Z100을 사용하였다. 작용하중에 대한 시편에서의 변형률은 스트레인게이지와 같은 접착식 변형률 센서 또는 LVDT 및 extensometer 등의 비접착식 변형률 센서를 통해 측정하였다. 복합재의 기계적 특성은 미국 표준화 시험규정인 ASTM에 규정된 절차에 따라 평가하였으며 인장특성은 ASTM D3039/D3039M, 굽힘특성은 ASTM D790/790M, 전단특성은 ASTM D5379/5379M에 근거하여 시험을 수행하였다. 시험결과와 분석을 위해서는 개인용 컴퓨터, Labview, A/D 변환기 (PCI-MIO-16E, National Instruments)로 구성된 자료수집장치를 통해 초당 10개씩 하중, 변위, 변형률 등의 자료를 수집하였다.

복합재가 환경인자에 노출되면 유리전이온도, 상온에서의 강성, 유리전이온도 이상에서의 강성, 경화도, 가교밀도 등의 열분석 특성이 변하게 된다. 환경인자에 노출된 탄소섬유/에폭시 복합재 및 유리섬유직물/페놀릭 복합재에 대한 저장탄성계수, 손실탄성계수,  $\tan \delta$  등의 열분석 특성은 그림 2에 나타난 동역학 측정장치 (DuPont DMA983)를 적용하였다. 실험시에는 질소가스로 충전되어 있는 챔버 내의 시편고정장치에 시편을 장착하고 진폭 0.2mm, 주기 1Hz로 가진시켰다. 이때 온도는  $-100^{\circ}\text{C}$ 에서  $300^{\circ}\text{C}$ 까지 상승시켰으며  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 온도상승률을 적용하였다.

환경인자에 노출된 복합재 표면에는 노출시간이 비교적 짧은 경우에도 노화가 진행되어 수지층에 균열이 형성되기 시작하며, 노출시간이 점차 길어지면 균열이 형성된 수지층에 박리가 발생하여 강화섬유가 노출되는 양상이 나타난다. 이와 같이 복합재의 표면에 발생한 수지층의 박리와 같은 노화는 강화섬유에 의해 지배되는 섬유방향의 특성에는 큰 영향을 주지는 않지만 수지가 지배적인 역할을 하는 섬유의 횡방향 특성에는 민감한 영향을 미치게 된다. 환경인자에 의한 복합재의 특성을 고찰하기 위해 전자현미경을 적용하여 시편의 노화표면을 관찰하였으며 최적화상을 얻기 위해 시편의 표면은 팔라듐(Pd)을 이용하여 200~300Å의 두께로 금막처리를 하였다.

그림 3에는 온도, 수분, 자외선 등의 환경인자를 조절할 수 있는 가속노화장치가 나타나 있다. 여

기에서 보면 가속노화장치는 제논-아크 램프를 점화시키는 고전압 부하용 점화기, 시편고정장치를 회전시키는 모터, 물 분사장치 등으로 구성되어 있다. 특히 기온을 모사하는 온도는 장착된 열선에 의해, 비와 눈을 모사하는 수분은 장착된 물 분사장치에 의해, 일광을 모사하는 자외선은 2.5KW의 제논-아크 램프를 통해 조절된다. 준비된 복합재 시료들은 직경 508mm, 1~10rpm의 회전속도를 갖는 시편고정장치에 장착되며 가능한 균일한 환경조건이 가해지도록 하였다. 가속노화시험을 위해서는 비교적 단시간에 장시간의 노출효과를 얻을 수 있는 ASTM G26의 연속적인 빛 노출과 간헐적인 물 분사 조건 및 가속노화시험기의 제작사 중의 하나인 ATLAS의 램프가 켜진 상태에서 물을 2시간마다 18분씩 분사하는 조건을 적용하였다.

그림 4에는 설정된 온도, 수분, 자외선 등의 노화조건에 따라 노화시험장치에서 얻어지는 수분, 블랙판넬온도, 자외선 강도, 챔버 내부온도 등의 수집자료가 나타나 있다. 여기에서 보면 수분은 설정된 80%RH에 잘 일치하고 있으며 2시간마다 18분 주기로 물 분사가 이루어질 때 상대습도가 높아지며 챔버의 내부온도도 설정된 60°C와 잘 일치하고 있다. 또한 시편고정장치에 장착된 시편에는 블랙판넬 온도인 80°C가 가해지고 있음을 알 수 있다. 또한 자외선 세기도 노출시간에 따라 일정하지만 물 분사가 이루어지는 경우 분무 현상으로 인해 시편에 가해지는 자외선 강도는 주기적으로 감소하는 양상을 나타낸다.

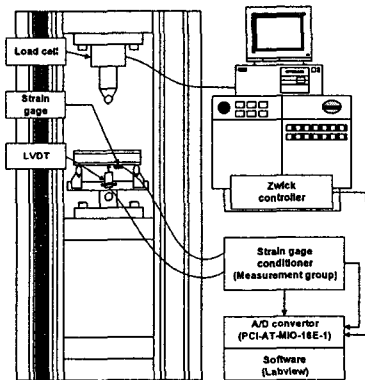


Fig. 1 Overview of mechanical tester

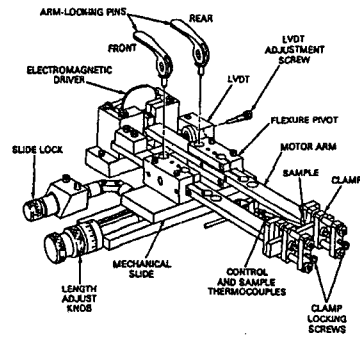


Fig. 2 Overview of DMA equipment

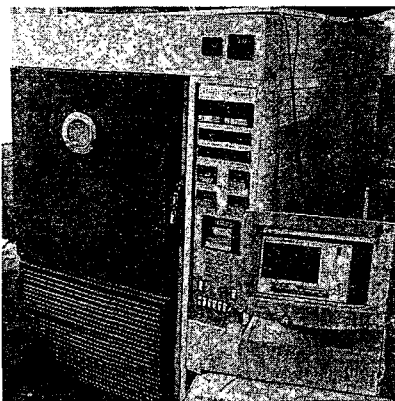


Fig. 3 Accelerated aging test equipment

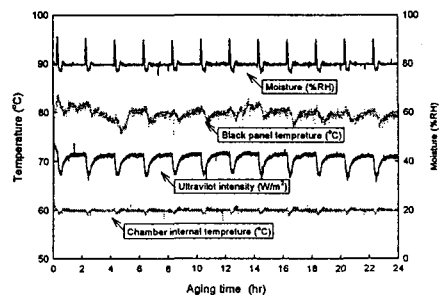


Fig. 4 Acquisition data of control parameters

그림 5에는 접착식 센서인 스트레인게이지를 통해 수집된 변형률에서 결정된 노출시간에 따른 탄소섬유/에폭시 복합재의 섬유 횡방향 인장특성 변화가 나타나 있다. 이들은 각각 6개씩의 시편에 대해 수행된 결과로서 스트레인게이지를 부착시킨 상태에서 측정된 인장강성은 1000시간까지 노출시키더라도 큰 변화는 없지만 스트레인게이지를 부착하지 않은 상태에서 측정된 인장강도는 노출시간이 증가되면 점차 감소하고 특히 1000시간 노출시킨 경우의 인장강도는 노출 전의 경우에 비해 10.0% 감소함을 알 수 있다.

그림 6에는 유리섬유직물/페놀릭 복합재에 대한 노출시간에 따른 인장특성의 변화가 나타나 있다. 여기에서 보면 extensometer를 통해 측정된 인장강성은 500시간 노출시키는 경우 노출 전에 비해 3.6% 정도 감소하고 인장강도는 노출시간에 따라 서서히 감소하기 시작하며 500시간 노출시킨 경우 노출 전에 비해 5.0% 정도 감소한다. 1500시간 노출시키는 경우 인장강성은 노출 전에 비해 4.7% 정도 감소되고 인장강도는 노출 전에 비해 6.3% 정도 감소한다.

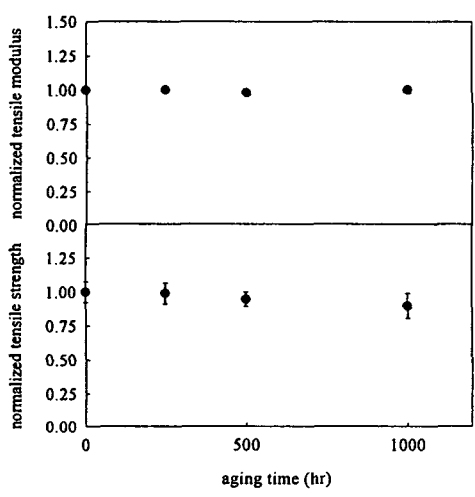


그림 5. Variations of normalized tensile properties in graphite/epoxy composite

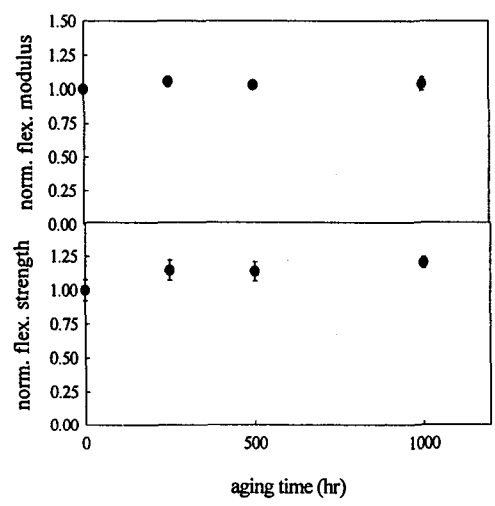


그림 6. Variations of normalized tensile properties in glass fabric/phenol composite

그림 7에는 동역학 측정장치를 이용하여 측정한 환경인자에서의 노출시간에 따른 저장전단강성, 손실전단강성,  $\tan \delta$  선도의 변화가 나타나 있다. 여기에서 보면 상온에서는 유리상태인 저장전단강성은 온도가 증가함에 따라 서서히 감소하다가 유리상태에서 고무상태로 변하는 유리전이온도 부근에서 급격히 감소한다. 또한 유리전이온도 이상의 온도에서는 고무상태로 되어 저장전단강성은 매우 낮게 나타나며 유리상태에서와 마찬가지로 온도가 증가하면 서서히 감소한다. 손실전단강성  $G''$  또는  $\tan \delta$  선도의 최대값으로 정의되는 유리전이온도는 500시간까지 노출된 경우에는 노출 전에 비해 다소 증가하지만 노출시간이 더욱 길어지면 약간 감소하는 양상을 나타낸다. 그리고  $\tan \delta$ 의 크기도 노출시간이 증가하면 점차 감소하는데 이는 노출시간이 길어지면 복합재의 감쇠능이 점점 약화됨을 의미한다.

그림 8에는 환경인자에서의 노출시간에 따른 유리전이온도의 변화가 나타나 있다. 여기에서 보면 유리전이온도는 노출 전의 경우 117°C, 250시간 노출된 경우 122°C, 500시간의 경우 126°C, 750시간의 경우 122°C, 1000시간의 경우 120°C로서 노출의 초기단계에서는 노출시간에 따라 다소 증가하지만 노출시간이 더욱 길어지면 점차 감소한다. 이때 유리전이온도가 증가한다는 것은 환경인자에 노출된 복합재에 후경화가 진행되었음을 나타내며 유리전이온도가 감소한다는 것은 자외선 방사와 수분 흡수 등으로 인해 복합재에 사슬절단이 지배적으로 발생하였음을 나타낸다.

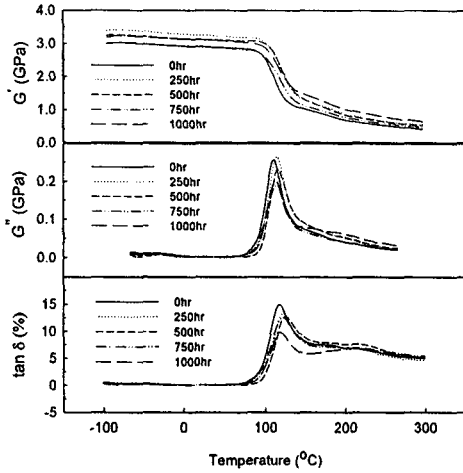


그림 7. DMA results as a function of aging times

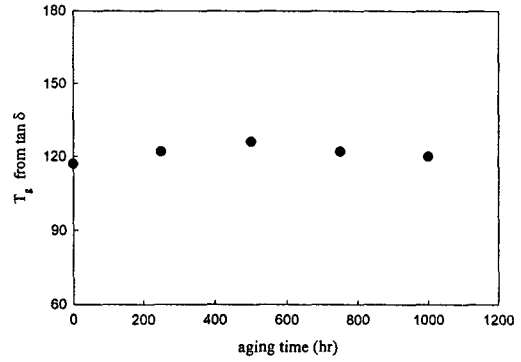


그림 8. Variations of glass transition temperature

그림 9에는 전자현미경을 통해 환경인자에 노출된 탄소섬유/에폭시 복합재의 표면을 관찰한 사진이 나타나 있다. 여기에서 보면 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 등으로 비교적 노출시간이 짧은 경우에도 환경인자에 노출된 복합재 표면에는 노화가 진행되어 수지층의 균열이 형성되기 시작하고, 노출시간이 점차 길어지면 균열이 형성된 수지층에는 박리가 발생하여 강화섬유가 노출되는 양상이 나타난다. 이와 같이 환경인자에 노출된 복합재의 표면에 발생한 수지층의 박리와 같은 노화는 강화섬유에 의해 지배되는 섬유방향의 특성에는 큰 영향을 주지는 않지만 수지가 지배적인 역할을 하는 섬유의 횡방향 특성에는 민감한 영향을 미치게 된다.

그림 10에는 환경인자에 노출된 유리섬유직물/페놀릭 복합재의 표면을 전자현미경을 통해 관찰한 사진이 나타나 있다. 여기에서 보면 탄소섬유/에폭시 복합재와 마찬가지로 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. 특히 노출시간이 짧은 경우 복합재 표면에는 노화가 진행되어 수지층의 균열이 형성되기 시작하고, 노출시간이 점차 길어지면 수지층에 박리가 발생하여 강화섬유가 노출되는 양상이 나타난다.

#### 4. 결론

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

- (1) 환경인자에 노출된 복합재의 강성은 환경인자에 비교적 둔감하지만 강도는 강성에 비해 환경인자에 민감하고 노출시간이 증가하면 점차 감소하는 양상을 나타낸다.
- (2) 저장전단강성은 노출시간이 증가함에 따라 점차 감소하는 양상을 나타내며 노출시간이 증가하면 복합재의 감쇠능 약화로 인해  $\tan \delta$ 의 크기가 감소한다. 완전경화가 되지 않은 복합재가 환경인자에 노출되면 유리전이온도는 노출의 초기단계에서는 노출시간에 따라 복합재의 후경화로 인해 다소 증가하지만 노출시간이 더욱 길어지면 복합재의 사슬절단이 지배적으로 발생하여 점차 감소한다.
- (3) 환경인자에 노출된 복합재는 초기 단계에는 수지층에 많은 미세균열을 형성하지만 노출시간이 점차 길어지는 경우 수지층에 박리현상이 발생하고 강화섬유가 노출된다. 탄소섬유/에폭시 복합재의 경

우 수지층의 손상은 섬유방향의 특성에는 큰 영향을 주지는 않지만 섬유의 횡방향 특성에는 민감한 영향을 미친다. 그러나 환경인자에 노출된 유리섬유직물/페놀릭 복합재의 표면에 발생한 수지층의 박리 등과 같은 노화는 탄소섬유/에폭시 복합재와는 달리 섬유방향의 특성에 다소 영향을 미침을 알 수 있다.

(4) 탄소섬유/에폭시 복합재와 유리섬유직물/페놀릭 복합재는 모두 틸팅차량 전두부의 제작에 적용이 가능한 우수한 복합재이지만 내구성을 평가하기 위해서는 장시간 환경인자에 노출된 영향이 정량적으로 평가되어야 하며 필요에 따라서는 실시간 노출시험의 수행도 병행되어야 한다.

### 후 기

본 연구는 철도청 철도기술연구개발사업으로 지원된 “틸팅차량 전두부 복합재 선정을 위한 가속노화시험”과제의 연구결과의 일부입니다.

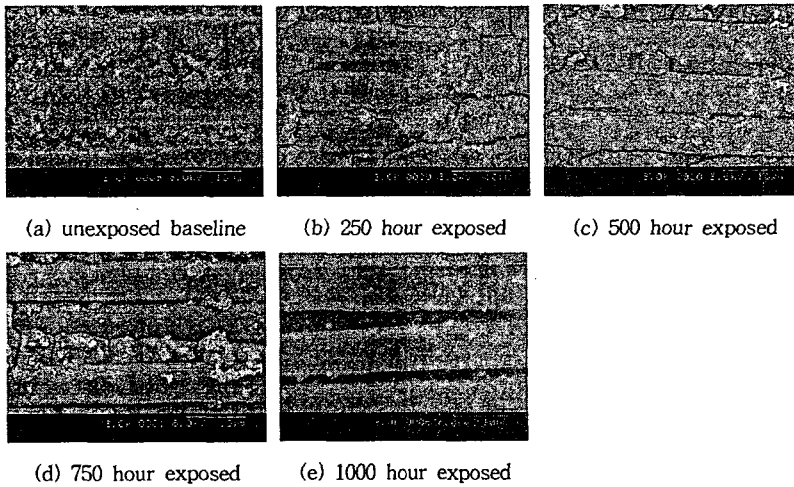


그림 9. SEM photographs of graphite/epoxy composite subjected to various aging times

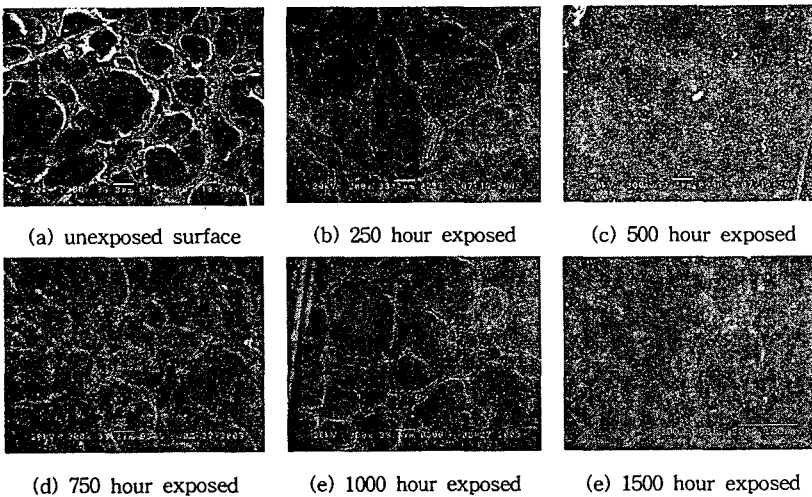


그림 10. SEM photographs of graphite/epoxy composite subjected to various aging times