

## 論文

가속노화시험을 이용한 복합재료의 환경영향에 대한  
장기간 성능 예측

홍성혁\* · 신광복\* · 정발† · 황태경† · 김종식†† · 김천곤\*\* · 홍창선\*\*

Prediction of Long-Term Performance of a Composite  
Material Using Accelerated Environmental TestS.H. Hong\*, K.B. Shin\*, B. Jung†, T.G. Hwang†, J.S. Kim††  
C.G. Kim\*\* and C.S. Hong\*\*

## ABSTRACT

Recently, graphite/epoxy composite materials are quite common in military aerospace structures. In service or stock, composite structures may be exposed to natural environments for long periods of time. Therefore, environmental aging factors such as temperature, moisture, and UV radiation can reduce mechanical and physical properties of the composite material.

In this study, accelerated aging test using Weather-Ometer was conducted to predict the long-term performance of a T300/AD6005 graphite/epoxy composite material system. To investigate the degradation of mechanical properties of the composite material and resin(AD6005 epoxy), tensile, compressive, shear, and flexural tests were performed at intervals of accelerated aging time of 500, 1000, 1500, and 2000 hours. It was found that the strength degradation of the composite and resin was much more severe than the stiffness degradation with the aging time. Matrix cracking and matrix loss were observed at the surface of aged specimens by using SEM. For correlation of accelerated aging to natural aging, acceleration factors were determined for several mechanical properties.

## 초 록

최근에 그래파이트/에폭시 복합재료는 군사용 항공우주 구조물에 많이 사용된다. 복합재료 구조물은 사용 중이거나 저장시 외부의 자연환경에 장시간동안 노출될 수 있다. 따라서 온도, 습기, 자외선 등의 환경노화 인자는 복합재료의 기계적, 물리적 성질들을 저하시킨다.

본 연구에서는 웨더-오미터를 사용한 가속노화시험을 수행하여 T300/AD6005 그래파이트/에폭시 복합재료의 장기간 성능을 예측하였다. 복합재료와 수지의 물성저하를 측정하기 위하여 가속노화 500시간, 1000시간, 1500시간, 2000시간의 등간격으로 인장, 압축, 전단, 굽힘 등의 11가지 기본 물성시험을 수행하

\* 한국과학기술원 항공우주공학과

\*\* 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

† 정회원, 국방과학연구소

†† 정회원, 한국화이바

였다. 그 결과 가속노화시간이 지남에 따라 복합재료와 수지 시편의 강도의 저하정도가 강성의 저하보다 더 큼을 알 수 있었다. 또한 주사전자현미경(SEM)으로 노화된 시편의 표면을 관찰한 결과 모재균열과 모재손실이 발생함을 알았다. 또한 가속노화와 자연노화의 상관관계를 결정하기 위하여 몇 가지 물성에 대해 가속화계수를 구하였다.

## 1. 서 론

섬유강화 복합재료(fiber reinforced composite material)는 기존의 금속재료나 알루미늄 합금에 비해 뛰어난 비강도와 비강성으로 인해 항공우주 구조물등 고급 구조물에 사용이 급속히 증대되고 있다. 따라서, 복합재료의 기계적 성질에 미치는 요인에 대한 연구가 필요하다. 특히 환경요인에 의한 복합재료의 내후성(weatherability)에 관한 문제는 국내에서 거의 연구된 결과가 없다. 예를 들어 탄소섬유 강화 복합재료로 만든 미사일 발사기나 항공기 등은 혹독한 외부환경속에서 몇 년을 쓸 수 있을까? 이런 의문들은 쉽게 대답할 수 없는 실정이다. 따라서, 복합재료 구조물의 외부 환경요인에 대한 연구는 구조물의 설계시 매우 중요한 과제가 되고 있다. 복합재료 구조물이 자연환경에 장시간 노출되면 강성(stiffness), 강도(strength), 유리전이온도(glass transition temperature)등의 기계적 성질(mechanical properties)과 구조물의 치수(dimension), 질량(mass)등의 물리적 성질(physical properties)이 변화한다. 이러한 복합재료 구조물의 환경요인에 대한 문제를 풀어갈 때는 물성변화를 장시간에 걸친 자연노화시험을 통하여 연구하는 것이 가장 정확한 데이터(data)를 얻는 최상의 방법이지만 이것은 오랜 시간을 필요로 하기 때문에 비효율적이다. 그에 비해 가속노화 시험방법은 비교적 단기간에 결과를 얻을 수 있고 실제 외부환경의 수많은 노화인자(aging parameter)를 임의로 조절 가능하므로 보다 더 다양한 환경조건에서 재현성 있는 데이터를 얻을 수 있다.

지금까지의 연구들을 살펴보면 Trabocco[1]등은 그라파이트/에폭시 패널(Graphite/Epoxy panel)을 워민스터(Warminster)와 파나마(Panama)에서 자연노화시킨 후 1, 3, 6, 12, 18, 24, 36 개월 간격으로 압축강도(compressive strength), 전단강도(shear strength), 인장강도(tensile strength)등의 물성을 측정하였다. 이 연구에서는 코팅(coating)한 패널의 물성변화도 측정하였는데 코팅의 사용이 물성저하 방지에 큰 효과가 있음을 밝혔다.

Cinquin[2]등은 3가지 종류의 모재(matrix) 즉, 에폭시(epoxy), 비스말레이마이드(bismaleimide), 싸이너네이트(cyanate)에 대해서 습기가 층간전단강도(interlaminar shear strength)와 유리전이온도에 미치는 영향을 가속노화 실험으로 연구했다. 각각의 시편을 고온다습한 오븐(hot wet oven)에서 온도 70℃, 상대습도(relative humidity) 85%로 3600시간동안 가속노화시킨 후 비틀림추(torsion pendulum)로 유리전이온도를 측정하고 3점굽힘시험(3-point bending test)으로 층간전단강도를 측정하였다. 에폭시에 비해 싸이너네이트와 비스말레이마이드의 유리전이온도가 상대적으로 많이 감소하며 층간전단강도는 3가지의 모재에서 감소하였다.

Blicblau[3]등은 카본/에폭시(Carbon/Epoxy) 복합재료를 인위적인 환경조건 즉, 종류수와 여러 가지 화학 용액에 28일 동안 담근 후 전단강도(shear strength)와 전단강성(shear stiffness)의 변화를 단보전단시험(short beam shear testing)방법으로 측정하였다. 그 결과 수분이 복합재료의 물성저하에 중요한 인자임을 밝혔다.

Tang[4]등은 Fiberite T300/976 Fabric 복합재료 시편을 환경챔버에서 70°F, 250°F, 350°F의 온도와 100% 상대습도의 조건에서 각각 가속노화시킨 후 다시 건조기로 건조시킨 후 압축강도와 압축강성 그리고 층간전단강도를 측정하였다. 압축강성은 습기와 온도에 거의 영향이 없었으며 압축강도는 온도와 습도가 증가할수록 점차로 감소하고 시편을 다시 건조 한 후에는 강도가 증가하는 가역성(reversibility)이 있음을 보였다. 층간전단강도도 온도가 증가할수록 감소하고 단 상온에서는 습도의 영향이 거의 없었으며 압축강도와 마찬가지로 건조 후에는 초기 물성으로 거의 회복되었다. 이 연구를 통하여 습기가 물성에 있어서 어느 정도 가역성이 있음을 밝혔다.

Larsson[5]는 케블라/에폭시(Kevlar/Epoxy) 복합재료의 물성에 미치는 자외선(ultraviolet light)의 영향을 연구했는데 시편을 0.29~0.6μm의 스펙트럼 범위(spectral range)를 가지는 제논 버너(xenon burn-

er)에서 각각 500시간 1000시간을 가속노화 시켰다. 그 결과 자외선이 초기 인장탄성계수에는 거의 영향을 주지 않았고 인장강도가 1000시간 노화 후에는 초기 치의 약 40%로 감소했다. 이것은 플로리다(Florida)에서의 자연노화 3~4년에 해당한다. 또한 복합재 적층판의 두께가 증가할수록 자외선의 물성저하 효과가 감소한다는 사실을 밝혔다.

서울대학교 부속 농업 개발 연구소[6]에서는 카본/에폭시 복합재료를 웨더-오미터(weather-ometer)를 사용하여 가속노화 시킨 후 굽힘강도(flexural strength)와 층간전단강도의 변화를 측정하였다. 6500 와트(watt)의 제논 아크(xenon arc) 광원을 사용하였고 상대습도를 조절하기 위하여 분무장치로 매 2시간 마다 18분씩 물을 분사하였다. 그 결과 1000시간 가속노화 후 굽힘강도는 초기 치보다 7.3% 감소하였고 층간전단강도는 초기치보다 13% 감소하였다. 현재까지 복합재료의 환경영향에 대한 연구들의 대부분은 특별한 복합재료에 대한 시험결과를 가지고 데이터 베이스(data bases)를 구축하거나 고온 다습한 환경(hygrothermal environments)에서의 응력(stress)이나 변형률(strain)의 반응을 예측하기 위한 hygrothermal mechanics model의 개발로 크게 나눌 수 있다.

국내에서는 아직 복합재료의 환경영향에 대한 연구가 미흡하며 발표된 논문도 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 웨더-오미터를 사용한 가속노화시험을 통해 복합재료의 기계적, 물리적 성질의 변화특성을

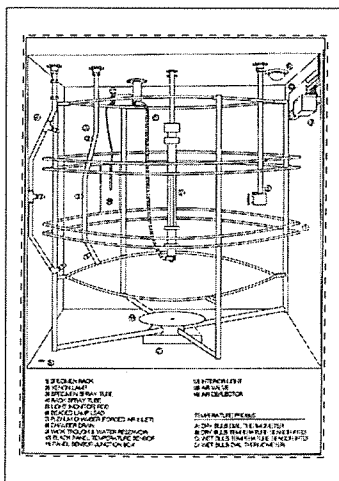
연구하여 실제 자연환경이 복합재료에 미치는 영향을 예측하는 실험적, 해석적 방법을 제시하고 실제 복합재료 구조물 설계시 참고할 수 있는 실험 데이터를 제공하고자 하였다. 물성치 측정은 ASTM에 제시된 기준 시험법[8~15]에 따라 11가지의 기본 물성을 측정하였다. 모재는 복합재료의 환경영향에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져왔다. 따라서, 본 연구에서는 환경영향에 대한 복합재료의 물성변화를 측정하기 위해 T300/AD6005 그라파이트/에폭시 복합재료와 모재인 에폭시(AD6005)로 시편을 제작하여 물성시험을 수행하였다. 또한 시편의 시각적 변화를 관찰하기 위해 주사 전자 현미경 SEM(scanning electron microscope)을 사용하였다. 이상의 가속노화시험으로 얻어진 데이터를 이용하여 각 물성에 대해서 가속노화시간에 대한 물성예측식을 지수식으로 세우고 또한 가속노화시험과 자연노화시험의 상호 관계식 결정을 위하여 가속화계수(acceleration factor)를 구하였다.

## 2. 가속노화 시험

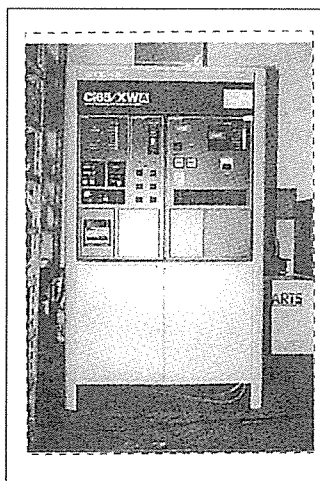
### 2.1 웨더-오미터(Weather-Ometer)

사용한 웨더-오미터는 미국의 Atlas Electric Device Company사의 모델명 Ci65/XWA로 사용한 광원은 6500와트의 제논 아크이다. 내부 구성도와 모습은 Fig. 1과 같다. 시편은 샘플 홀더(sample holder)에 장착되어 제논 램프(xenon lamp) 주위를 1분에 1회전 하게되며 시편이 받는 조사량을 일정하게 하기 위해서 Fig. 1(c)에서 보는바와 같이 홀더가 경사져있다.

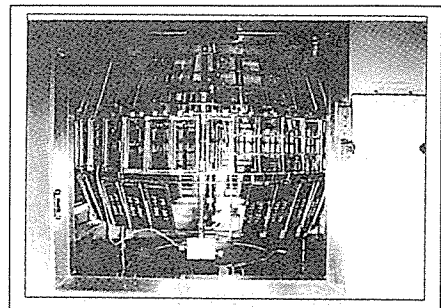
웨더-오미터의 주요 제어변수(control-



(a) Test Chamber and Components



(b) Front view



(c) Specimen rack and holder

Fig. 1. Weather-Ometer Ci65/XWA

ling parameter)를 기본적으로 제어함으로써 가속노화 사이클(cycle)을 구성하여 실제 기상조건을 모사(simulation) 하게된다.

## 2.2 가속노화 사이클 구성

본 연구의 목적은 복합재료가 실제 자연환경에서 장시간 노출시 기계적 성질과 물리적 성질이 어떻게 변화하는지를 고찰하는 것이다. 따라서 가속노화 사이클은 실제 기후조건(온도, 습도, 강수량, 일조량 등)을 기초하여 구성되어야 합리적이다.

본 연구에서는 웨더-오미터가 제공해주는 15가지 사이클 프로그램(cycle program)중에서 No.5를 선택했다. 선택배경은 다음과 같다.

첫째, 낮/밤을 라이트/다크(light/dark) 사이클을 통해 재현할 수 있다는 점이다. 라이트 사이클(2시간) 대 다크 사이클(1시간)의 시간의 비율은 2 : 1이다.

둘째, 실제 기상조건에서의 비의 효과를 스프레이(spray)로 물을 뿌려서 재현 할 수 있다.

실제로 대전지역의 월평균 최고기온은 8월에 30.1℃로 가장 높고 월 평균 최저기온은 1월에 -6.3℃로 가장 낮다. 또한 웨더-오미터가 제공해주는 허용온도 범위는 라이트 사이클시 60~120℃, 다크 사이클시 10~85℃이다. 따라서 이 온도 범위에서 실제 온도조건을 재현해야 하는데 최고기온은 라이트 사이클시 약 30℃가 더해진 60℃, 최저기온은 다크 사이클시 약 14℃가 높은 10℃로 설정했다.

웨더-오미터가 제공해주는 상대습도 허용범위는 10~95%이다. 실제 대전지역의 월 평균 상대습도는 74.3% 이고 최고치는 7월에 82.2%, 최저치는 4월에 65.1% 이다. 따라서 평균 상대습도보다 약 10% 높은 85%로 결정했다. 이 수치는 가속노화시험을 수행했던 다른 논문들에서 극심한 환경조건을 재현하위해 일반적으로 사용하는 값이다.

방사강도(irradiance level)는 0.37 watts/m<sup>2</sup>로 설정했다. 이 수치는 미국의 마이애미(Miami)지역의 태양광의 평균 방사(irradiance) 값이다.

## 3. 시편제작 및 시험장치

### 3.1 시편소재 및 시편제작방법

본 시험에 사용된 복합재료인 T300/AD6005 그라파이트/에폭시 시편은 한국 화이버에서 제작하였고 필

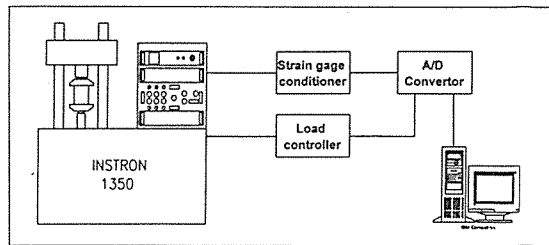


Fig. 2. Experimental setup

라멘트 와인딩(filament winding)공법을 사용하였다. 와인딩 완료 후 오븐(oven)내에서 멘드렐을 회전시키며 80℃ 2시간, 120℃ 2시간, 160℃ 8시간의 경화 사이클로 경화 시킨 다음 탈형을 하였다. 이때 시편의 가공중 손상을 방지하기 위하여 탈형 전에 선반에서 요구 폭만큼의 시편으로 가공하여 만든 뒤 탈형 시킨다. 탈형 후 ASTM 규격에 맞추어 시편을 제작하며 시편의 경계효과를 줄이기 위하여 탈형 후 시편 모서리를 사포로 가공하였다.

에폭시(AD6005) 수지물성시편은 금형 공구강인 SKD 61로 만든 금형을 사용하여 ASTM 규격에 맞추어 제작하였다.

### 3.2 시험장치 구성

복합재료와 에폭시의 물성치를 측정하기 위해 사용된 시험장치와 주변기기들은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 시험기, 기록기, 아날로그-디지털 변환기(A-D Converter), 변형도 증폭기, 개인용 컴퓨터(PC) 등이다.

물성을 측정하기 위한 시험기는 폐회로 써보(serv) 유압재료 시험기인 Instron(model 1350)을 사용하였고 변형도 증폭기는 스트레인 게이지 컨디션너 2100 시스템이다. 본 시험에서는 증폭기를 거친 데이터를 아날로그-디지털 변환기를 거쳐 개인용 컴퓨터에 저장하게 된다.

## 4. 물성치 시험

복합재료는 노화 후에 물성이 저하되는데 특히 강성과 강도의 저하가 심하다. 이러한 물성변화 데이터를 알면 물성을 시간의 함수로서 나타내어 임의의 시간에 따른 물성의 저하치를 예측할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 복합재료(T300/AD6005 graphite/epoxy)와 수지인 에폭시(AD6005)의 노화 후의 강성과 강도의

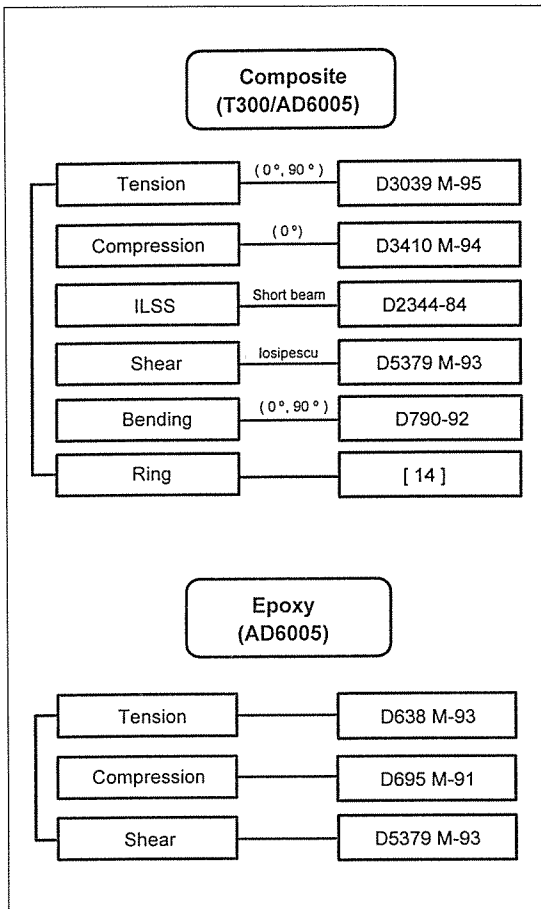


Fig. 3. Test methods of mechanical properties

변화를 측정하기 위하여 Fig. 3에서 보는바와 같이 ASTM 기준시험방법으로 11가지의 기본 물성시험을 수행하였다. 각 시편의 형상과 치수는 ASTM에 따라 제작하였다. 노화 이전의 각 시편의 물성을 알기 위하여 베이스라인 시험(baseline test)을 수행하였고 시편들을 웨더-오미터에서 각각 500, 1000, 1500, 2000시간의 주기로 가속노화 시킨 후 물성을 측정하였다. 각 시험당 1회에 시편 6개를 측정하여 그 값들의 평균값과 오차범위를 계산하였다. 시험 후 데이터 처리는 ASTM 기준에 따랐다.

## 5. 가속노화와 자연노화와의 관계

가속노화 시험을 이용하여 재료의 특성을 연구할 때

자연노화시험과 가속노화시험 결과들을 상호 연관시킬 수 있는 적절한 관계식의 결정이 중요하다. 본 연구에서는 가속화계수(acceleration factor)를 도입하였다. 가속화계수는 다음과 같이 정의된다.

$$a = \frac{\text{어떤재료의 감소폭을 초래하는데 필요한 자연환경속에서의 경과시간}}{\text{똑같은 감소폭을 초래하는데 필요한 가속환경에서의 경과시간}}$$

이 가속화계수는 시험장소와 환경, 웨더-오미터의 조건, 사용된 시편의 재료, 그리고 고려하는 물성의 종류에 따라서 달라진다. 일반적으로 비교적 짧은 노출시간에 대해서는(일반적으로 자연노화 8년 이하) 자연노화 시간과 가속노화시간 사이에 비교적 선형관계가 성립하여 그 기울기인 가속화계수로 대변할 수 있다[16]. 그러나 그이상의 노출시간에 대해서는 더 이상 선형관계가 아닌 비선형관계가 되어 가속화계수만이 아닌 어떤 함수식이 필요하게된다. Howard[16]는 폴리에틸렌(polyethylene) 패널을 22동안의 자연환경에서의 노출시험과 웨더-오미터를 사용한 가속노화시험을 수행하여 인장강도 등을 측정하였는데 다음과 같은 가속노화시간과 자연노화시간과의 관계식을 도출하였다.

$$t_a = C + t_n^k \dots \dots \dots (1)$$

여기서  $t_a$ 는 가속노화시간,  $t_n$ 은 자연노화시간이고  $C$ 와  $k$ 는 실험조건과 사용된 재료, 그리고 고려하는 물성에 따라 달라지는 상수이다.

일반적으로 복합재료가 여러 환경인자에 의해 노화가 되면 물성은 노출시간에 대해 지수적으로 감소된다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 지수식으로 각각의 물성에측식을 세웠다[6].

$$Y = Ae^{-Bt} \dots \dots \dots (2)$$

여기서  $Y$ 는 고려되어지는 물성이고  $t$ 는 노화시간,  $A$ 와  $B$ 는 노출인자(exposure parameter)라고 부르는 물성상수이다. 본 연구에서는 위에서 정의된 물성에측식과 가속화계수를 이용하여 다음과 같은 방법으로 가속노화시험과 자연노화시험을 관련시켰다. 8년이하의 자연노화 시편에서는 동일한 감소 폭의 물성저하를 초래하는데 필요한 가속노화시간과 자연노화시간과의 관

계가 선형이므로 두 노화시간에 대해서 다음의 선형식으로 표현된다.

$$t_n = at_a \dots\dots\dots(3)$$

또한 가속노화시험을 통하여 얻어진 물성들의 데이터를 가지고 각각의 물성예측식을 다음과 같이 가속노화시간에 대해서 세울 수 있다.

$$Y = Ae^{-Bt_a} \dots\dots\dots(4)$$

따라서 (3)식을 (4)식에 대입하면 다음과 같이 자연노화시간에 대한 물성식을 얻을 수 있다.

$$Y = Ae^{-B\frac{t_n}{a}} \dots\dots\dots(5)$$

본 연구에서는 직접 대전지역에서 5년동안 자연노화시킨 T300/AD6005 그래파이트/에폭시 시판(laminate)으로 굽힘 0°, 90°시편과 Iosipescu 전단시편을 제작하여 각각 물성시험을 수행하여 강성과 강도를 측정하였다. 자연노화와 가속노화의 관계식 결정의 예로써 0° 굽힘강도를 살펴보았다. 가속노화시험 결과들을 가지고 굽힘강도의 지수식을 다음과 같이 가속노화시간에 대해서 근사하여 얻었다. 단, Y의 단위는 MPa이고  $t_a$ 의 단위는 시간(hour)이다.

$$Y = 1140e^{-0.00002t_a} \dots\dots\dots(6)$$

자연노화시험결과 5년동안 자연노화시킨 0°굽힘시편의 강도는 1109.58MPa 이었다. 따라서 이 강도에 이

르는데 필요한 가속노화시간을 식(6)으로 구해보면

$$\begin{aligned} 1109.58 &= 1140e^{-0.00002t_a} \\ -0.00002t_a &= \ln \frac{1109.58}{1140} \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

$$t_a \cong 1352 \text{시간}$$

따라서 가속화계수  $a$ 는 다음과 같다.

$$a = \frac{t_n}{t_a} = \frac{43800 \text{시간}(5\text{년})}{1352 \text{시간}} \cong 32 \dots\dots\dots(8)$$

(7)과 (8)에서 얻은 결과를 가지고 식(5)와 같이 실제 자연노화시간에 대한 물성예측식을 구해보면 다음과 같다.

$$Y = 1140e^{-6.25 \times 10^{-7}t_n} \dots\dots\dots(9)$$

따라서 위에서 구한 식(9)로 실제 자연노화시간에 대한 굽힘강도의 변화를 예측할 수 있다. 다른 물성들에 대해서도 이와 같이 가속노화시험 결과를 이용하여 자연노화시 물성의 변화를 예측할 수 있다.

## 6. 시험결과 및 고찰

가속노화 환경시험결과 복합재료(T300/AD6005)와 수지인 에폭시(AD6005)는 가속노화 후에 전반적으로 물성(강성, 강도)이 저하됨을 알 수 있었다. 가속노화시간에 대한 각 물성의 변화는 Table 1과 Table 2에

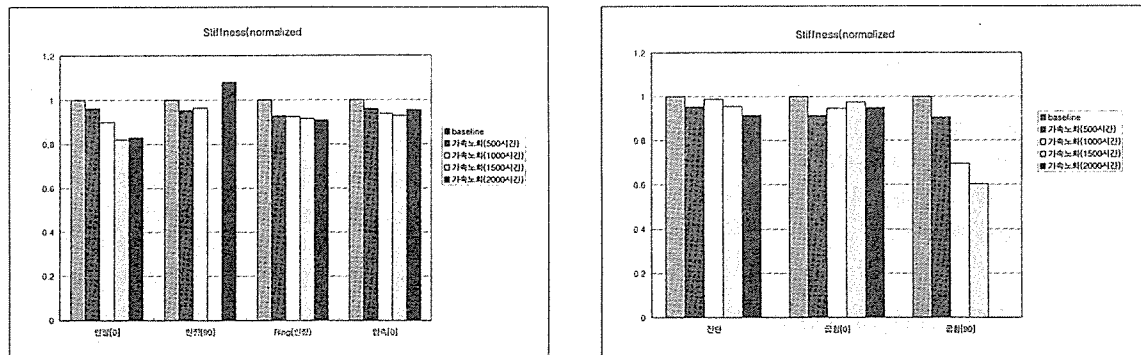


Fig. 4. Normalized stiffness of T300/AD6005 graphite/epoxy after accelerated aging

Table 1. Variations of stiffness for T300/AD6005 graphite/epoxy and epoxy(AD6005) with accelerated aging time

Unit : GPa		Baseline	S(%)	Aging time 500hr.	S(%)	Aging time 1000hr.	S(%)	Aging time 1500hr.	S(%)	Aging time 2000hr.	S(%)
T300/AD6005 graphite/epoxy	T[0°]	122.97	4.03	118.34	5.64	110.49	2.99	100.81	1.55	102.08	1.93
		1.000		0.962		0.899		0.820		0.830	
	T[90°]	8.32	1.32	7.93	3.46	8.01	0.12	—	8.99	2.31	
		1.000		0.953		0.963			1.080		
	C[0°]	109.78	2.43	105.05	1.44	103.27	6.49	102.22	4.36	105.07	4.86
		1.000		0.959		0.937		0.928		0.954	
	F[0°]	119.85	2.53	109.38	0.91	113.20	2.85	115.93	2.14	113.71	2.44
		1.000		0.913		0.945		0.974		0.949	
	F[90°]	8.13	6.89	7.36	5.57	5.64	7.62	4.90	7.96	—	
		1.000		0.905		0.694		0.603			
	TR	128.12	8.11	118.88	7.39	118.40	3.27	117.28	7.20	116.37	8.53
		1.000		0.928		0.924		0.915		0.908	
	S	5.23	6.69	4.98	3.28	5.16	4.23	4.99	4.86	4.78	6.82
		1.000		0.952		0.987		0.954		0.914	
Epoxy (AD6005)	T	3.48	4.66	3.15	1.27	3.15	0.63	3.22	4.08	3.20	3.80
		1.000		0.905		0.905		0.925		0.920	
	C	3.63	3.03	3.61	3.32	3.61	5.85	3.55	8.74	3.55	5.80
		1.000		0.994		0.994		0.978		0.978	
	S	1.42	0.70	1.38	6.52	1.35	1.48	1.42	6.12	1.34	5.76
		1.000		0.972		0.951		1.000		0.994	

T:Tension, C:Compression, F:Flexural, TR:Tension of ring specimen, S:Shear, S(%):Scatter of data.((Standard deviation/Average value)×100)

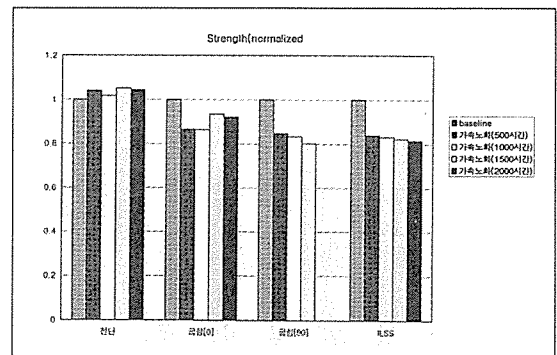
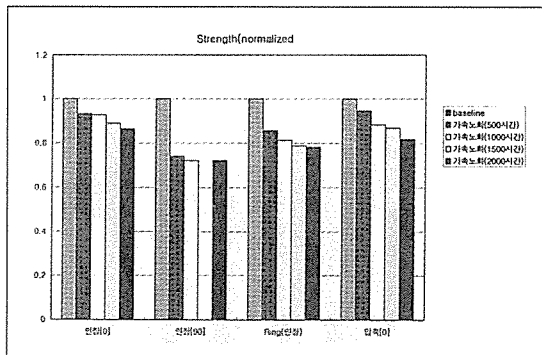


Fig. 5. Normalized strength of T300/AD6005 graphite/epoxy after accelerated aging

정리하였다. 또한 각 물성의 변화추이를 관찰하기 위하여 Fig. 4~Fig. 7에서 초기물성치(baseline)에 대한 가속노화 후의 물성의 비를 정규화(normalization)하여 막대그래프로 표현하였다. 그 결과 대부분의 강성과 강도가 초기치에 대해서 500시간 가속노화 후에 저하

폭이 비교적 컸고 500시간 이후에는 서서히 감소하는 경향을 보임을 알 수 있었다. 즉 가속노화 초기의 어느 정도까지는 물성의 저하가 급격히 이루어지다가 시간이 지날수록 그 감소 폭이 줄어들음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 물성변화의 추이를 가속노화

Table 2. Variations of strength for T300/AD6005 graphite/epoxy and epoxy(AD6005) with accelerated aging time

Unit : GPa		Baseline	S(%)	Aging time 500hr.	S(%)	Aging time 1000hr.	S(%)	Aging time 1500hr.	S(%)	Aging time 2000hr.	S(%)
T300/AD6005 graphite/epoxy	T[0°]	1752.70	5.31	1632.97	4.37	1625.07	1.64	1558.57	2.81	1514.20	5.83
		1.000		0.932		0.927		0.889		0.864	
	T[90°]	27.43	10.67	21.17	7.48	19.77	9.81	—	19.82	15.39	
		1.000		0.741		0.721			0.723		
	C[0°]	1150.12	4.51	1087.94	8.08	1015.48	6.96	997.80	12.12	940.91	7.00
		1.000		0.946		0.883		0.868		0.818	
	F[0°]	1222.95	2.50	1059.53	0.90	1056.07	3.55	1133.75	1.86	1126.09	3.34
		1.000		0.866		0.864		0.935		0.921	
	F[90°]	40.82	11.81	34.62	13.86	34.01	15.55	32.73	9.04	—	
		1.000		0.848		0.833		0.802			
	ILSS	56.01	6.32	47.04	2.95	46.58	5.17	46.12	3.82	45.65	8.57
		1.000		0.840		0.832		0.823		0.815	
	TR	1858.55	1.75	1591.12	10.30	1511.85	3.83	1466.84	11.45	1453.51	4.18
		1.000		0.856		0.813		0.789		0.782	
Epoxy (AD6005)	S	69.8	3.27	72.64	8.74	71.01	3.04	73.37	4.51	72.86	6.22
		1.000		1.041		1.017		1.051		1.044	
	T	43.89	3.48	30.09	8.91	38.96	5.24	37.36	5.83	34.85	11.88
		1.000		0.686		0.888		0.851		0.794	
	C	129.25	1.74	122.11	2.78	121.17	1.81	121.55	3.25	121.04	2.94
		1.000		0.945		0.937		0.940		0.936	
	S	33.33	10.26	30.65	15.95	29.09	8.15	28.97	13.52	28.33	8.22
		1.000		0.920		0.873		0.869		0.850	

T:Tension, C:Compression, F:Flexural, TR:Tension of ring specimen, S:Shear, S(%):Scatter of data.((Standard deviation/Average value)×100)

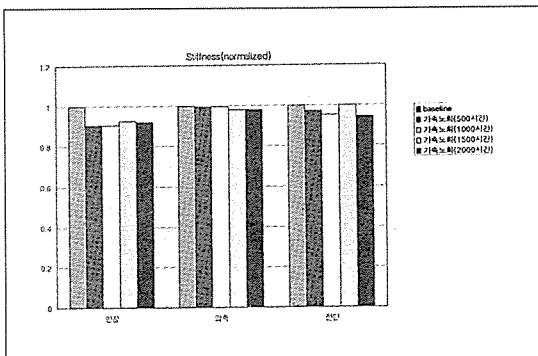


Fig. 6. Normalized stiffness of epoxy(AD6005) after accelerated aging

시간의 함수인 지수식으로 나타내 보았다. 물성예측식의 상수 A, B는 각 물성에 따라서 결정되는 물성상수다. 즉, A는 초기물성치이고 B는 물성의 감소경향을

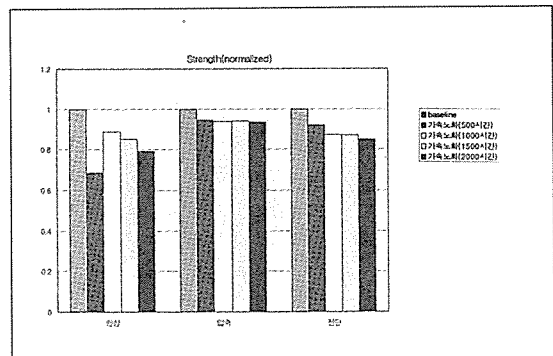


Fig. 7. Normalized strength of epoxy(AD6005) after accelerated aging

나타내주는 상수로써 그 값이 클수록 초기 물성저하속도가 빠르고 저하폭도 크다는 것을 의미한다. 가속노화시간이 지남에 따라 강성과 강도의 감소경향을 보이는



Table 3. Constants A and B of life-time equation for stiffness

		A(GPa)	B
T300/AD6005 graphite/epoxy	Tension[0°]	123.03	1E-4
	Tension[90°]	—	—
	Compression[0°]	107.49	2E-5
	Flexural[0°]	115.44	9E-6
	Flexural[90°]	8.34	4E-4
	Tension of ring	124.77	4E-5
	Shear	5.21	4E-5
Epoxy (AD6005)	Tension	3.33	3E-5
	Compression	3.63	1E-5
	Shear	1.41	2E-5

$$Y = Ae^{-Bt}$$

$Y$  : Stiffness(GPa)

$t$  : Accelerated aging time(hour)

경우들에 대해서 상수 A, B를 구하여 Table 3과 Table 4에 정리하였다.

본 연구에서는 복합재료의 인장, 굽힘시험의 경우에 시편을 섬유방향 0°와 90° 두 가지에 대해서 수행하여 그 물성변화를 비교하였다. Table 1 과 Table 2에서 보듯이 90°시편이 0°시편에 비해서 초기 강도의 저하가 현저히 나타났다. 예를 들면 인장강도의 경우, 500시간 가속노화 후에 90°시편은 초기치(baseline)의 22.93%가 감소한 반면 0°시편은 초기치의 6.83%만이 감소했다. 굽힘강도의 경우에도 90°시편은 500시간 가속노화 후에 초기치의 15.2%가 감소한 후 가속노화시간이 지날수록 계속 감소하여 2000시간 후에는 초기치의 19.8%가 감소하였다. 그러나 0°시편의 굽힘강도는 500시간 가속노화 후에 초기치의 13.4%가 감소하고 그 이후에는 거의 변화가 없었다. 이러한 경향은 Table 3와 Table 4의 결과에서도 알 수 있다. 대체적으로 90°시편의 강도의 경우에 물성예측식의 상수 B가 0°시편에 비해서 차수가 하나 높거나 같은 차수라도 그 값이 컸다. 이와 같은 결과는 90°시편이 모재지배성질(matrix dominated property)이기 때문에 환경인자의 영향을 많이 받기 때문이라고 사료된다. Table 2을 보면 모재지배성질인 층간전단강도(ILSS)의 저하도 다른 물성에 비해 비교적 큼을 알 수 있다.

그러나 복합재료의 전단강도의 경우는 가속노화 후에 오히려 증가함을 보이는데 Table 2에서 볼 수 있듯이 그 증가정도가 데이터의 표준편차 안에 있으므로 가속노화시간에 대해서 전단강도의 변화는 거의 없다

Table 4. Constants A and B of life-time equation for strength

		A(MPa)	B
T300/AD6005 graphite/epoxy	Tension[0°]	1728.00	7E-5
	Tension[90°]	24.72	1E-4
	Compression[0°]	1142.10	1E-4
	Flexural[0°]	1140.00	2E-5
	Flexural[90°]	39.22	1E-4
	ILSS	52.44	9E-5
	Tension of ring	1760.40	1E-4
Epoxy (AD6005)	Shear	—	—
	Tension	38.59	5E-5
	Compression	126.37	3E-5
	Shear	32.40	8E-5

$$Y = Ae^{-Bt}$$

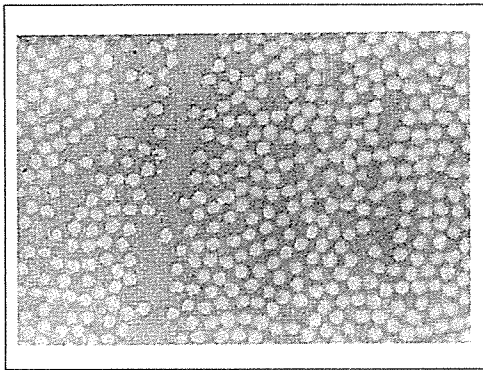
$Y$  : Strength(MPa)

$t$  : Accelerated aging time(hour)

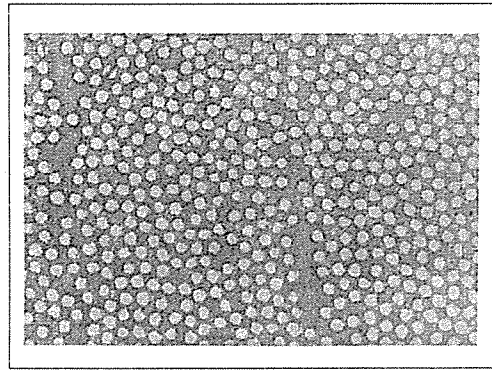
고 사료된다. 전단강성의 경우도 그 감소 폭은 비교적 작음을 알 수 있었다.

수지(epoxy)의 경우는 인장강도와 전단강도의 저하 폭이 컸으며 압축강도의 저하는 비교적 작음을 알 수 있었다. 강성은 인장강성의 저하가 가장 큰데 500시간 가속노화 후 초기강성의 9.48%가 감소하고 이후에는 거의 일정하게 유지되었다. 수지 압축강성의 경우는 가속노화시간이 지남에 따라 감소함을 보였지만 Fig. 6에서 보는바와 같이 그 감소폭이 매우 작았다.

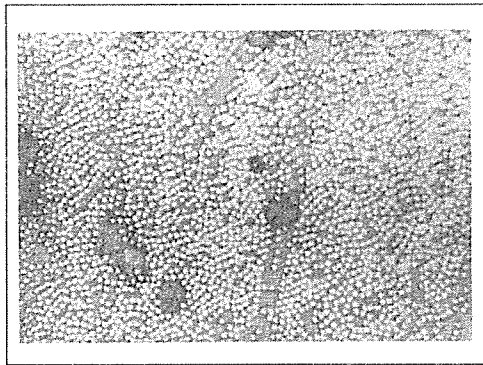
가속노화시험 결과를 정리하는 과정에서 복합재료의 90°인장과 90°굽힘의 경우, 더 오랜시간동안 가속노화됐음에도 예상과는 달리 오히려 강성과 강도가 급격히 증가함을 발견하였다. 90°인장의 경우 1500시간 가속노화 후에 강성은 8.84GPa, 강도는 25.81MPa로 이전의 500, 1000시간 가속노화의 경우보다 급격히 증가하였다. 90°굽힘의 경우도 2000시간 가속노화 후에 강성은 7.37GPa, 강도는 38.63MPa로 앞의 90°인장의 경우에서와 같은 경향을 보였다. 따라서 본 연구에서는 이러한 결과가 발생하게된 원인을 규명하기 위하여 시편들의 섬유체적비(fiber volume fraction)를 관찰하였다. Fig. 8(a)는 500시간동안 가속노화된 90°인장시편의 섬유방향 단면사진이고 Fig. 8(b)는 1500시간 가속노화된 90°인장시편의 섬유방향 단면사진이다. 배율은 ×500으로 광학현미경으로 촬영하였다. (a)와 (b)를 비교해보면 (b)의 경우에 (a)에 비해 수지과다영역이 적고 섬유가 많이 분포되어있는 것을 발견할 수 있다. Fig. 9(a)은 1500시간 가속노화된 90°굽힘시



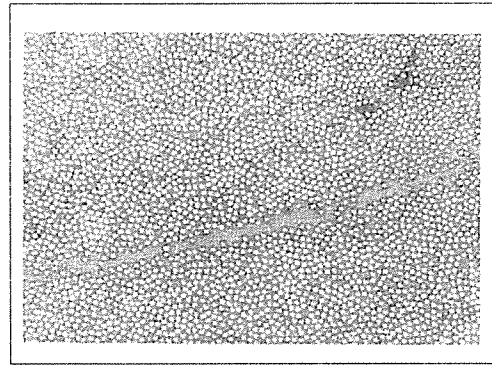
(a)



(a)

Fig. 8. Typical microscopic photographs of aged 90° tension specimens( $\times 500$ )

(a)



(a)

Fig. 9. Typical microscopic photographs of aged 90° bending specimens( $\times 200$ )

편의 섬유방향 단면사진이고 Fig. 9(b)은 2000시간 가속노화된 90°굽힘시편의 섬유방향 단면사진으로 배율은  $\times 200$ 이다. (a)와 (b)를 비교해보면 기공(void)이 존재하지 않는 지역에서의 섬유체적비는 거의 큰 차이가 관찰되지 않지만 (a)의 경우에 (b)에 비해 기공이 많이 존재함을 알 수 있다. 이와 같은 사실들로 복합재료 시편들을 필라멘트 와인딩으로 성형시 섬유체적비와 기공함유율이 균일하지 않아서 시편들간의 강성과 강도에 차이를 가져왔다고 사료된다. 따라서 보다 정확한 가속노화시험 결과를 얻기 위해서는 시편들의 성형시 시편들간의 성형상태가 되도록 동일하도록 유의가 요구된다. 이러한 데이터들은 가속노화시험 결과에서 제외하였다.

가속노화후의 시편의 시각적 변화를 관찰하기 위해 복합재료 시편과 수지시편의 표면을 SEM 촬영하였는

데 배율은  $\times 1250$ 으로 했다. Fig. 10에서 보여주듯이 복합재료 시편의 경우 노화가 될수록 시편표면에서 모재균열(matrix cracking)이 일어나 모재가 시편에서 떨어져나가는 모재손실(matrix loss)현상이 일어난다. 이러한 현상은 노화가 계속될수록 시편 안쪽으로 진전된다. 수지시편의 경우도 Fig. 11에서 볼 수 있듯이 같은 현상을 관찰할 수 있는데 가속노화 시간이 증가할수록 수지표면의 결정이 변화하여 1500시간 가속노화된 수지시편의 표면에서는 균열(crack)이 생성되어 진전하다가 2000시간 가속노화 후에는 균열이 전 표면에 완전히 분포하여 수지가 표면에서 떨어져나가는 것을 볼 수 있다. 이상의 사실로 노화시 복합재료의 물성저하는 모재배성질의 경우에서 현저하며 이는 모재손실이 큰 이유임을 알 수 있었다.

앞의 5장에서 설명한 방법으로 5년동안 옥외에서 자

연노화시킨 T300/AD6005 그래파이트/에폭시 시편의 물성시험을 수행하여 0°굽힘강도와 강성, 90°굽힘강도와 강성 그리고 전단강성의 가속화계수를 각각 구하였다. 그 결과는 Table 5에 정리하였는데 0°굽힘강도의 가속화계수는 32이고 0°굽힘강성의 가속화계수는 2였다. 90°굽힘강도 경우는 가속화계수가 28이었고 90°굽힘강성의 가속화계수는 32였다. 또한 5년동안 자연노화된 Iosipescu 전단강도는 71.71MPa로 노화이전의 강도와 거의 변화가 없었는데 이러한 사실은 가속노화

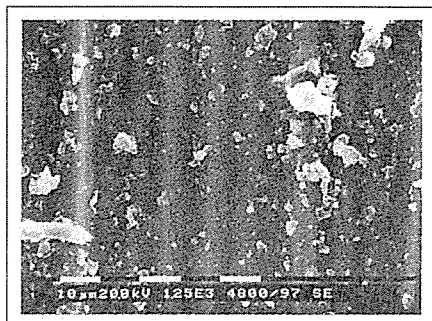
후 강도의 저하가 거의 없다는 가속노화시험 결과와 일치하였다. 따라서 노화시간에 대해 감소경향이 있는 전단강성에 대해서만 가속화계수를 구하여보았다. 그 결과 전단강성의 가속화계수는 대략 7이었다.

## 7. 결 론

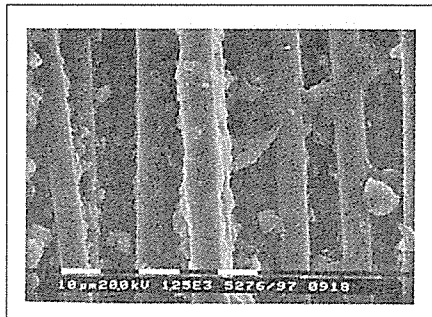
본 연구에서는 장시간동안 외부환경에 노출된 복합재료가 받는 환경영향에 대해정량적, 정성적 고찰을 위

Table 5. Correlation of Weather—Ometer hours to actual exposure hours

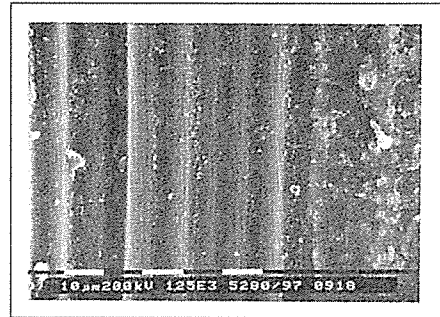
	Baseline	Natural aging (5 years)	Acceleration factor
Flexural strength(0°)	1222.95(MPa)	1109.58(MPa)	32
Flexural stiffness(0°)	119.85(GPa)	92.18(GPa)	2
Flexural strength(90°)	40.82(MPa)	33.59(MPa)	28
Flexural stiffness(90°)	8.13(GPa)	4.84(GPa)	32
Shear stiffness	5.23(GPa)	4.04(GPa)	7



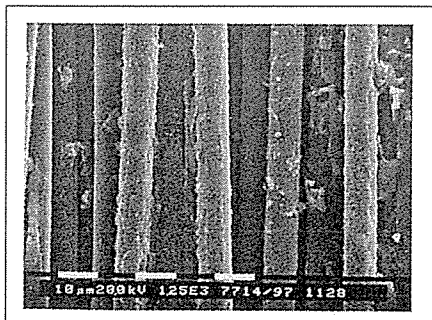
(a) Baseline



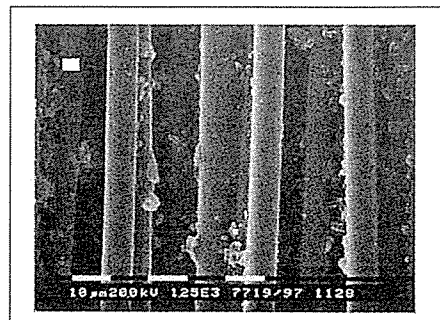
(b) Accelerated aging for 500hr



(c) Accelerated aging for 1000hr



(d) Accelerated aging for 1500hr



(e) Accelerated aging for 2000hr

Fig. 10. Surface morphology of aged T300/AD6005 graphite/epoxy specimen using SEM

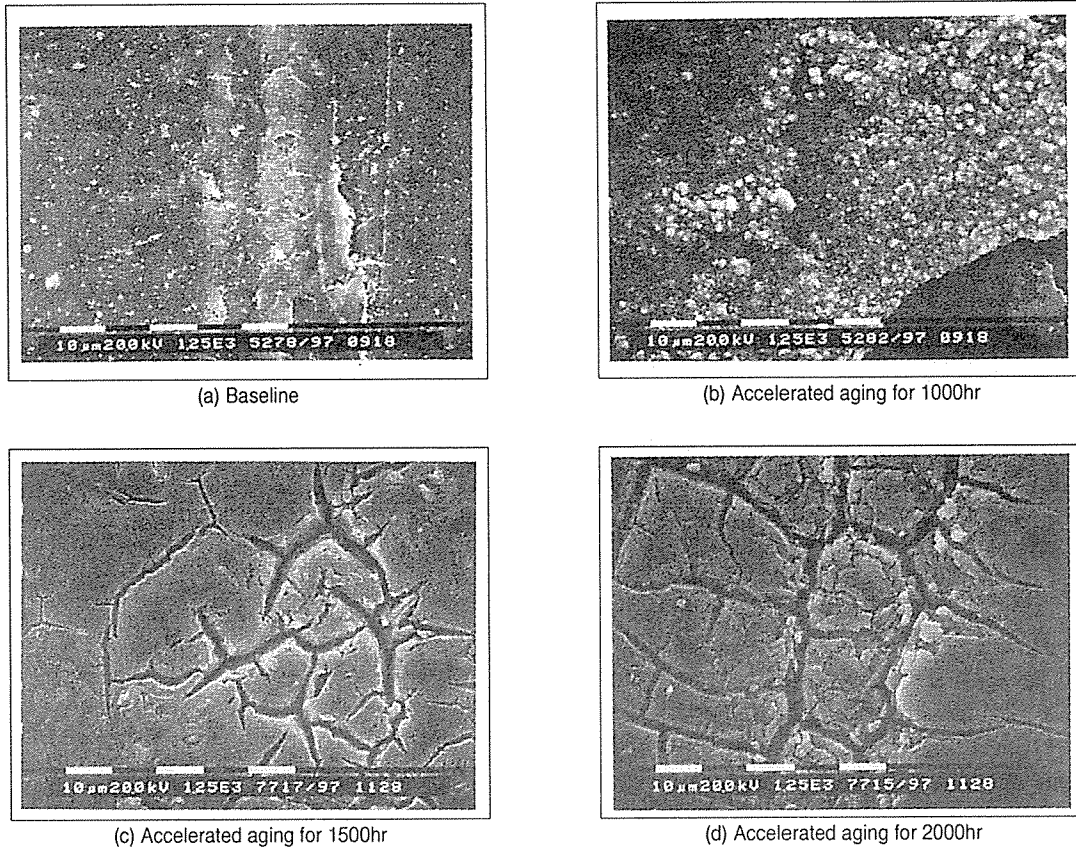


Fig. 11. Surface morphology of aged epoxy(AD6005) specimen using SEM

한 실험적, 해석적 방법을 제시하였다. 가속노화 사이클을 결정하여 가속노화 시험을 수행하였고 노화된 시편의 물성시험으로 환경영향에대한 복합재료의 물성변화 특성을 알아보았다. 또한 가속노화시험 결과를 이용하여 복합재료가 실제 자연환경에서 노화시 물성변화를 예측할 수 있는 방법을 제시하였다.

이상의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 온도, 습기, 자외선을 주요 환경인자로하는 가속노화시험을 웨더-오미터를 사용하여 수행하였다. 그 결과 T300/AD6005 그라파이트/에폭시 복합재료와 AD6005 에폭시 시편의 강성과 강도는 가속노화시간에 대해 지속적으로 감소하는 경향을 보임을 알았다. 따라서 외부환경에 장시간 노출되는 복합재료 구조물의 설계시 이러한 환경인자들에 의한 성능저하를 고려

해야하고 그 영향을 줄일 수 있는 방법의 개발이 요구되어진다.

2. 가속노화 후 모재지배성질인 90°시편의 강도가 0°시편에 비해 그 저하 정도가 심했다. 또한 같은 모재지배성질인 층간전단강도도 감소폭이 큼을 알았다.

3. SEM촬영으로 노화된 시편의 시각적 변화를 관찰한 결과 노화가 진행될 수록 시편표면에서 모재균열이 발생하고 결국엔 모재가 시편에서 떨어져나가는 모재손실 현상이 일어남을 알았다. 이와 같은 사실로 노화시 복합재료의 물성저하는 모재손실이 큰 원인임을 알았다.

4. 노화초기에 물성저하가 심하게 일어나고 노화시

간이 지남에 따라 그 저하정도가 완만하다는 사실로 각 물성예측식을 지수식으로 근사하였다. 또한 가속화계수를 구하여 가속노화시험을 통한 실제 자연노화시 물성의 변화 예측방법을 제시하였다.

## 8. 참고문헌

1. Trabocco, R. E. and Stander, M., "Effect of Natural Weathering on the Mechanical Properties of Graphite/Epoxy Composite Materials," Environmental Effects on Advanced Composite Materials, ASTM STP 602, American Society for Testing and Materials, 1976, pp. 67~84.
2. Cinquin, J. and Abjean, P., "Correlation between Wet Aging, Humidity Absorption and Properties on Composite Materials based on Different Resins Family," 38th International SAMPE Symposium, May 10~13, 1993, pp. 1539~1551.
3. Blicblau, A. S., Tran, L. and Warden, P., "Environmental Effects on Carbon Fibre/Epoxy Shear Strength," ICCN-9th, pp. 660~664.
4. Tang, J. M. and Springer, G. S., "Effects of Moisture and Temperature on the Compressive and Short Beam Shear Properties of Fiberite T300/976 Fabric," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 7-March, 1988, pp. 120~134.
5. Larsson, F., "The Effect of Ultraviolet Light on Mechanical Properties of Kevlar 49 Composites," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 5-January, 1986, pp. 19~22.
6. 서울대학교 부속 농업개발연구소, "Environmental Effects on Carbon Fiber / Epoxy Composite," 용역 보고서, 1992, pp. 13~20.
7. Springer, G. S. Ed. 1981, 1984, 1988. Environmental Effects on Composite Materials - Vol. 1, Vol. 2, Vol. 3, Lancaster, PA : Technomic Publishing Co, Inc.
8. "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Material," ASTM Standards, Standard D3039/D3039M-95.
9. "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (Metric)," ASTM Standards, Standard D638M-93.
10. "Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading," ASTM Standards, Standard D3410/D3410M-94.
11. "Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics (Metric)," ASTM Standards, Standard D695M-91.
12. "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials," ASTM Standards, Standard D790-92.
13. "Standard Test Methods for Apparent Interlaminar Shear Strength of Parallel Fiber Composites by Short-Beam Method," ASTM Standards, Standard D2344-84.
14. 윤성호, 김천곤, 조원만, "필라멘트 와인딩된 링 시편을 이용한 인장특성 평가," 대한기계학회 논문집, 제19권, 제6호, 1995, pp. 1479~1489.
15. "Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method," ASTM Standards, Standard D5379/D5379M-93.
16. Howard, J. B. and Gilroy, H. M., "Natural and Artificial Weathering of Polyethylene Plastics," Polymer Engineering and Science, Vol. 9-July, 1969, pp. 286~294.