

< 논문 >

# 필라멘트 와인딩 복합적층재의 환경가속 노화시험 평가

김덕재\* · 최낙삼† · 윤영주\*\*  
(2006년 5월 28일 접수, 2007년 1월 12심사완료)

## Degradation Characteristics of Filament-Winding-Laminated Composites Under Accelerated Environmental Test

Duck-Jae Kim, Nak-Sam Choi and Young-Ju Yun

**Key Words:** Laminated Composites(복합 적층재), Water Immersion(수침), Thermal Impact(열충격), Degradation(열화), Tensile Strength(인장 응력), Bending(굽힘).

### Abstract

Degradation behaviors of filament-winded composites have been evaluated under the accelerated environmental test of high temperature, water immersion and thermal impact conditions. Two kinds of laminated composites coated by an urethane resin have been used: carbon-fiber reinforced epoxy(T700/Epon-826, CFRP) and glass-fiber reinforced phenolic (E-glass/phenolic, GFRP). For tensile strength of 0° composites, CFRP showed little degradation while GFRP did high reduction by 25% under the influence of high temperature and water. However for water-immersed 90° composites tensile strength of both CFRP and GFRP showed high reduction. Bending strength and modulus of 90° composites were largely reduced in water-immersion as well as high temperature environment. Urethane coating on the composite surface improved the bending properties by 20%, however hardly showed such improvement for water-immersed 90° composites. In case of shear strength and modulus, both CFRP and GFRP showed high reduction by water-immersion test but did a slight increase by high temperature and thermal impact conditions.

### 1. 서 론

섬유강화수지 복합재료는 기존의 금속재료에 비하여 경량이면서 강도와 강성이 우수하기 때문에 현재는 항공기 및 경량 수송체 등의 구조재료로서 사용이 급속히 증대되고 있다. 이들 수송체는 운행중에 다양하고 가혹한 환경스트레스를 받게 되며 이에 따른 구조물성의 열화(혹은 노화)는 수송체의

수명을 단축시키고 안전성을 현저히 저하시키는 위험요인이 된다. 만일 다양한 환경조건이 몇 가지 주요모드로 분류되고 각 환경조건하에서 시간에 따른 복합재료의 물성변화와 수명을 예측할 수 있다면 사용중에 일어날 수 있는 급작스런 사고를 예방할 수 있을 것이다.<sup>(1-4)</sup>

본 연구에서는 우레탄으로 표면코팅 처리된 복합재 압력용기가 받는 다양한 환경 노화거동을 미국국방표준(MIL-STD-810F)<sup>(5)</sup>에 의거하여 파악하고자한다. 이를 위해 압력용기의 외관층을 구성하는 복합재(CFRP, GFRP)를 선정하여 고온, 수침, 열충격의 가속조건으로 노화시켰을 때 재료의 인장강도, 굽힘강도, 전단강도, 층간강도 및 각 하중 모드에서의 탄성계수 변화를 평가함으로써 복합재료의 노화특성을 구한다. 또한 노화되지

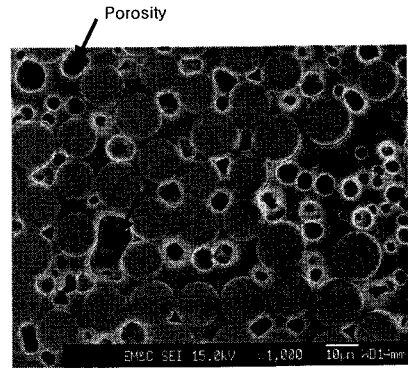
\* 한양대학교 대학원 기계공학과  
† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계정보경영공학부  
E-mail : nschoi@hanyang.ac.kr  
TEL : (031)400-5283 FAX : (031)406-7063  
\*\* 국방과학연구소

얇은 시편과의 비교를 통해 표면 코팅이 노화효과에 미치는 정도를 분석한다.

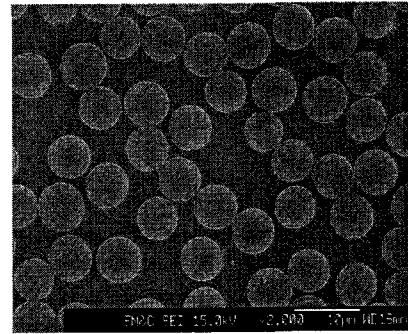
## 2. 실험방법

### 2.1 재료 및 시험편

본 시험에 사용된 복합재료인 T700/Epon-826 탄소섬유/에폭시 시편(CFRP)과 E-glass/Phenolic 시편(GFRP)은 필라멘트 와인딩(filament winding)공법을 사용하여 한국화이버에서 제작하였다. 필라멘트 와인딩 공법은 섬유 스트랜드(fiber strands) 혹은 필라멘트(filaments)를 일정 형상의 회전 맨드렐(mandrel)상에 감은 후 경화시켜 복합재료 구조물을 제작하는 방법이다.<sup>(6)</sup> 필라멘트 와인딩으로 원통형 셀구조물을 만든 다음 이를 종단면으로 잘라서 평평한 테이블 위에서 잘 편 다음 오토클레이브 안에서 진공 감압과 함께 가압하면서 경화시켰다. CFRP 복합재료의 경화조건은 85°C에서 6시간 1차 경화 후에 150°C에서 6시간 2차 경화를 실시하였고 승온시의 속도는 1°C/min으로 하였다. GFRP 복합재료의 경화조건은 30°C에서 8시간 1차 경화 후에 60°C에서 16시간 2차 경화를 실시하였고 승온시의 속도는 CFRP의 경우와 같았다. 이렇게 만든 평판형 복합재를 인장시편(15×250×0.8mm/0° 방향, 25×175×2.0mm/90° 방향), 굽힘시편(25×127×3.2 mm/0°방향, 25×76×3.2mm/90° 방향), iosipescu 전단시편(20×76×2.5mm), 층간전단시편(6.4×38.4×6.4mm)으로 절단하여 ASTM규격<sup>(7-10)</sup>에 따라 각 종류의 시편형상을 갖추도록 제작하였다. Fig. 1(a)와 (b)는 각각 본 연구에서 사용한 CFRP와 GFRP시편의 내부구조를 주사형 전자현미경(SEM)으로 찍은 사진이다. CFRP의 섬유부피분율은 약 58%이었으며 탄소섬유와 에폭시 수지 사이의 계면접합상태가 매우 양호하고 수지중에 기공 등의 결함이 거의 없었다. 하지만, GFRP는 섬유부피분율이 약 52%이었으며 유리섬유와 페놀수지 사이의 접합상태도 비교적 나쁜 편이었고 수지내부에 다량의 기공(porosity)이 16% 정도 함유되어 있는 다공질 구조임을 알 수 있었다. 이들 기공들은 고온경화중에 페놀수지의 열분해로 인해 자발적으로 발생한 것이며, 전체 단면에 걸쳐 균등하게 분포하고 있다.



(a) CFRP



(b) GFRP

Fig. 1 Microstructures of CFRP and GFRP composite laminate specimens used in this study

### 2.2 가속노화시험

#### (1) 고온노화시험

필라멘트 와인딩 공법으로 제작한 복합재료에 대해 고온 내구성을 평가하고자 고온노화시험을 실시하였다. 각 종류의 시편을 MIL-STD-810F노화시험규격<sup>(9)</sup>에 따라 100°C 열풍오븐에 넣고 3주간 방치하였다. 열풍오븐내벽의 직접적인 시편 접촉은 접촉부의 물성 변화에 영향을 줄 수 있으므로 접촉되지 않도록 하였다.

#### (2) 수침노화시험

필라멘트 와인딩 공법으로 제작한 복합재료가 장시간 침수되거나 강우 환경에서 사용될 때 야기될 수 있는 노화에 대한 내구성을 평가하기 위하여 수침노화시험을 실시하였다. MIL-HDBK-17B노화시험규격에 따라 각 시편을 70±1°C의 항온수조에 넣고 2주간 방치함으로써 수침노화 시편을 만들었다.

(3) 열충격노화시험

필라멘트 와인딩 공법으로 제작한 복합재료가 고온과 저온이 반복되는 환경 하의 재료 내구성을 평가하기 위하여 열충격 노화시험을 실시하였다. 각 시편을 MIL-STD-810F 노화시험규격에 따라 -40°C의 일정온도에서 24시간 처리 후 다시 80°C의 일정온도에서 24시간 처리하는 과정을 4회 반복함으로써 저온(-40°C)과 고온(80°C)의 반복적인 열충격에 의해 노화된 시편을 만들었다.

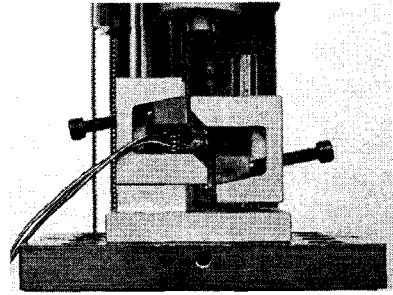


Fig. 2 Rig for iosipescu shear test

2.3. 물성측정 시험

복합재료는 고온, 수분흡수 및 열충격 가속노화 후에 탄성계수와 강도의 물성변화 데이터를 측정함으로써, 실제 환경에서 임의의 시간에 따른 물성의 저하치를 예측할 수 있을 뿐만 아니라 재료를 장시간 사용할 때 시간에 따른 노화정도를 예측할 수 있는 기초 데이터로 활용할 수 있다. 본 연구에서 수행한 인장시험, 굽힘시험, 전단시험은 Zwick 250 만능시험기를 사용하여 실시하였다. Fig. 1의 각 종류의 시편에 대해서 최대강도와 탄성계수를 구하기 위해 시편 8개의 측정 데이터값들중에서 최대값과 최소값을 뺀 나머지에 대하여 평균을 구하고 오차범위를 계산하였다. 시험 후 데이터처리는 MIL STD 시험규격에서 추천하는 바와 같이 ASTM 기준<sup>(8-11)</sup>에 따랐다.

전단시험<sup>(10)</sup>은 Fig. 2와 같이 수행하였으며, 전단탄성계수를 측정하기 위해서 CAS사의 2축 스트레인게이지(AE-11-TS30N-120-EL)와 NI사의 Strain gage conditioner(SCC-SG01)를 사용하였다. 또한 Labview 프로그램을 이용하여 데이터를 저장하고 후처리하였다. 전단탄성계수G는 섬유가 시편길이 방향으로 배향된 iosipescu시편을 이용한 전단시험을 통해서 서로 직각인 2축의 응력-변형률선도에서 선형성을 나타내는 1000~6000 με (0.1~0.6%)의 변형률범위를 설정하여 다음 식 (1)로 구했다.

$$G = \frac{\Delta P}{A_g (|\Delta \epsilon_{+45}| + |\Delta \epsilon_{-45}|)} \quad (1)$$

여기서 A<sub>g</sub>는 시편의 리가멘트부 단면적, ε<sub>+45</sub>와 ε<sub>-45</sub>는 +45도 스트레인게이지와 -45도 스트레인

게이지의 측정변형률, P는 하중을 의미한다. iosipescu 전단강도는 본 시험에서 구한 최대하중을 A<sub>g</sub>로 나눈 것이다.

층간전단시험<sup>(7)</sup>은 두께에 비해 짧은 보 타입의 시편을 이용하며, 섬유가 시편길이 방향으로 배향되어 있는 상태에서 3점 굽힘하중을 주면 중립면에서 최대전단응력이 작용함으로써 층간전단파괴가 발생한다. 층간전단강도 S는 다음 식 (2)로 구한다.

$$S = 0.75 \times \frac{P_{max}}{bh} \quad (2)$$

여기서 P<sub>max</sub>는 최대하중, b는 시편의 폭, h는 시편의 두께이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 인장특성에 미치는 열화거동

Fig. 3은 우레탄 코팅된 0° CFRP시편과 0° GFRP시편의 노화거동을 나타내는데, 0° CFRP시편의 경우 고온, 수침 및 열충격 노화에 의하여 전반적으로 강도가 저하 하였으나 이는 노화시키지 않은 시편을 기준으로 7% 미만정도였다. 반면에 0° GFRP시편의 경우 고온 및 수침 노화에 의하여 각각 25%, 32%의 현격한 강도저하를 보였다. 0° 복합적층판의 강도는 섬유 강도에 의해서 주로 지배되며, 섬유강도는 와이블 분포를 나타내므로 약한 섬유부터 순차적으로 섬유파단이 발생하여 전체파괴가 진행하므로 국부적으로는 섬유와 수시간의 계면강도의 영향도 약간 받게 된다.<sup>(11-13)</sup> 따라서 0° 복합적층판의 강도열화는 복합재 내부에 있는 섬유의 열화정도에 주로 의존한다고 전제할 수 있으며, 탄소원자간의 공

유결합형 탄소섬유는 열화정도가 미미하지만, 이온결합형 유리섬유는  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ 망목수식체가 고온과 수침에 의해서 유리 밖으로 녹아 나와 유리 구조에 공식(pits) 등의 미세결함을 형성시켜 열화 속도가 상당히 컸던 것이다.<sup>(13)</sup>

90° 복합재의 경우(Fig. 4), 0° 복합재와는 달리 수지영역의 강도와 함께 섬유/수지간 접합강도나 내재하는 결함이 90° 복합재의 인장강도에 큰 영향을 미치는데,<sup>(12,13)</sup> 수침노화에서 CFRP와 GFRP의 인장강도가 각각 50%, 28% 만큼 크게 저하하였다. 이는 우레탄 표면코팅에도 불구하고 90° 복합재는 수분흡수에 의해서 섬유/수지간 계면강도와 수지자체의 강도가 크게 저하하였음을 나타내며, 에폭시 수지를 함유하는 CFRP의 경우가 페놀수지를 함유하는 GFRP보다 더 열화된 것이다. 한편 고온노화의 경우, 약 11%의 인장강도 증가를 보이는 90° CFRP와는 대조적으로 90° GFRP는 고온노화에 의해서 인장강도가 26%만큼 저하했다. 즉, 탄소섬유/에폭시 시편의 경우 고온처리중에 수지부의 후경화가 진행하여 인장강도의 증가를 촉진하지만 유리섬유/페놀수지 시편의 경우 페놀수지의 후경화효과가 오히려 수지의 인장강도를 열화시켜 90° GFRP복합재의 인장강도가 크게 저하된 것으로 생각된다. 이들 열화현상은 각 수지의 후경화 비율과 열특성에 의존할 것이다.<sup>(4,14)</sup> 한편 열충격에 의해서는 90° CFRP와 GFRP가 모두 강도의 저하를 별로 나타내지 않았으며 이는 섬유와 수지간의 계면부 열화가 반복열충격에 의해서 별로 진행되지 않았음을 가리킨다.

우레탄 코팅된 0° 복합재의 인장탄성계수는 각 종류의 노화에 대해 비교적 미미하였으나(Fig. 5), 수침노화 시편의 탄성계수 저하가 상대적으로 컸다. 또한 수침노화로 인해서 90° CFRP의 경우(Fig. 6)는 탄성계수가 3%정도로 미미한 저하를 보였으나 Fig. 4와 같이 인장강도가 50%나 감소한 것은 수지부 및 탄소섬유/에폭시수지 계면부에서 인장응력 집중에 의한 초기균열발생과 파단 거동이 수분흡수로 급격히 민감해졌음을 알 수 있다.

90° GFRP는 수침노화로 탄성계수가 32% 만큼의 현격히 큰 저하를 보였고 강도도 28%만큼 저하하여 페놀수지부 및 유리섬유/페놀수지 계면부가 수분에 의해 전반적으로 약해진 거동을 보였던 것이다. 고온가속 노화에서 90° CFRP와

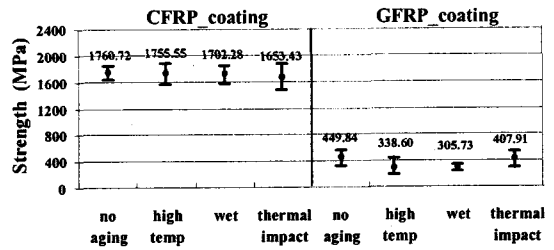


Fig. 3 Tensile strength of 0° longitudinal and coated specimens under various aging conditions

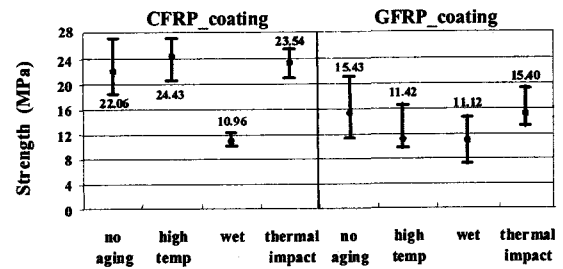


Fig. 4 Tensile strength of 90° transverse and coated specimens under various aging conditions

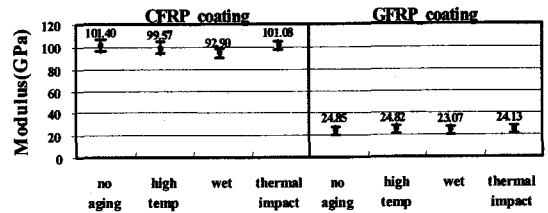


Fig. 5 Tensile modulus of 0° longitudinal and coated specimens under various aging conditions

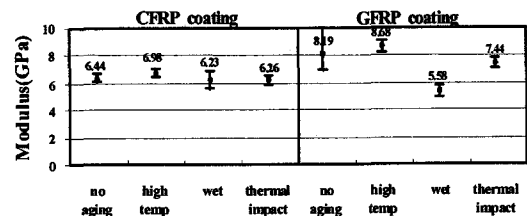


Fig. 6 Tensile modulus of 90° transverse and coated specimens under various aging conditions

GFRP는 수지부 후경화로 인해 각각 8%와 5%의 탄성계수증가를 보였다.

열충격노화에서 90° GFRP복합재는 별다른 강도저하를 보이지 않았으나(Fig. 4) 탄성계수는 10%만큼의 큰 저하를 보여(Fig. 6) GFRP복합재의 탄성특성은 강도변화와 다른 거동을 보였다. 또한 이는 GFRP의 인장강도가 고온처리로 26%만큼 저하한 것과 대조적이며 페놀수지는 후경화로 인장강도가 저하했지만 탄성계수는 오히려 증가했던 것을 가리킨다.

3.2 굽힘 특성에 미치는 열화거동

굽힘거동은 인장변형과 압축변형이 동시에 작용하는 거동이므로 시편의 굽힘특성은 3.1절의 인장특성에 추가하여 압축특성이 조합된 상태로 나타날 것이다.

Fig. 7을 보면 수침 노화에 의하여 0° CFRP 시편의 굽힘강도는 14%의 저하를, 0° GFRP의 경우에는 47%의 큰 저하를 보였으며 인장강도에서 나타난 바와 같이 0° GFRP의 굽힘강도가 수침노화에 민감함을 보였다. 고온노화에 의해서 0° CFRP는 미미한 감소를 보였지만 0° GFRP는 굽힘강도의 편차가 고온 노화 전후에 유사한 수준이었지만 그 평균은 오히려 약간 증가거동을 보였다. 또한, 열충격 가속노화를 받은 0° GFRP시편의 굽힘 강도는 노화하지 않은 시편보다 오히려 14% 정도 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 3에서 0° GFRP의 인장강도가 감소한 것과는 반대현상이 나타난 것이며, 압축변형과 인장변형거동이 함께 발생하며 압축부에서는 압쇄형(crushing mode) 파괴, 인장부에서는 섬유파단이 지그재그형으로 진행되는 굽힘파괴거동의 과정에서 굽힘강도가 더 크게 나타난 것으로 생각된다.

90° 복합재의 굽힘강도에서는 Fig. 8과 같이 CFRP와 GFRP 각각 수침노화에서 52%, 48%만큼의 큰 저하를 보였으며 고온 및 열충격노화에서는 9% 내의 열화거동을 나타냈다. 이는 90° 복합재의 굽힘강도가 역시 인장강도의 열화특성에 흡사하게 노화에 매우 민감함을 나타냈다.

0° CFRP와 0° GFRP의 굽힘탄성계수는 각각 노화하지 않은 시편에 비해 6% 이내로 미미하게 저하하여 강도의 저하만큼 크지는 않았다.

반면에 90° 복합재의 굽힘탄성계수는 Fig. 9에서처럼 수침노화에서 취약하여 23%만큼의 저하를 볼 수 있다. 또한 90° 복합재의 경우, 인장특성과 달리 굽힘특성은 고온노화에서도 취약하였는

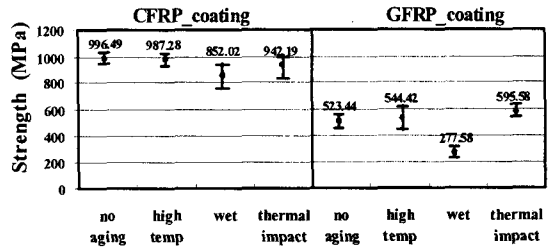


Fig. 7 Flexural strength of 0° longitudinal specimens under various aging conditions

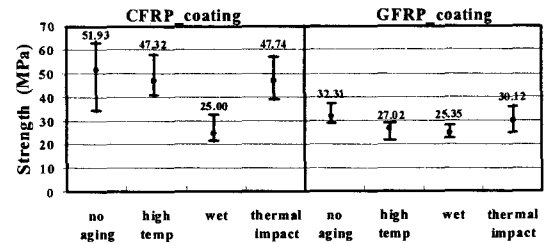


Fig. 8 Flexural strength of 90° transverse specimens under various aging conditions

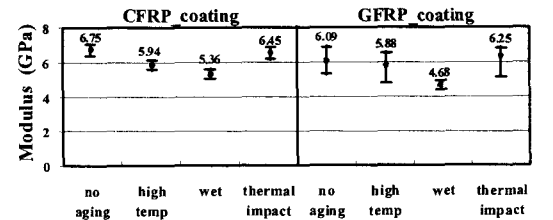


Fig. 9 Flexural modulus of 90° transverse specimens under various aging conditions

데 이는 굽힘시험시의 압축부가 취약한 거동을 보였기 때문으로 해석된다.

3.3 굽힘열화특성에 미치는 우레탄 코팅의 효과

우레탄으로 표면코팅 처리된 복합재료 시편의 실제 코팅효과를 알아보기 위해서 표면코팅 처리하지 않은 90° CFRP복합재 시편을 동일한 노화 조건에서 노화시키고 굽힘시험 후 물성을 비교해 보았다. 표면 우레탄코팅층의 두께가 약 130μm이며 이 표피층의 탄성계수와 강도는 각각 90°

CFRP복합재의 20%, 50% 정도로 작으므로, 코팅된 90° CFRP복합재료 시편의 탄성계수와 강도를 구할 때 코팅층의 두께를 제외한 원래의 시편 두께를 이용하여 계산했다. Fig. 10과 Fig. 11을 보면 표면코팅 하지 않은 시편의 굽힘탄성계수 및 굽힘강도보다 표면코팅처리한 시편이 노화의 조건에 따라 다소 차이가 있었지만 최대 20% 정도 큰 값으로 나왔음을 알 수 있다. 이는 시편의 표면처리가 복합재 굽힘물성의 노화방지에 긍정적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있으며, 특히 열충격노화의 경우 가장 큰 효과를 보고 있음을 확인하였다.

하지만, 수침노화를 받은 90° CFRP복합재시편의 굽힘강도는 우레탄코팅에 의해서 오히려 평균 21%의 저하를 초래하였는 바 이는 굽힘파괴시에 90° CFRP의 표면코팅부가 수분흡수로 인해서 취성적인 미세 표면균열을 먼저 일으키고 이 미세 표면균열이 90° CFRP의 수지부나 섬유/수지간 계면부에 응력집중을 일으켜 오히려 코팅효과가 부정적으로 나타난 것일 수 있어 향후 근본적인 원인분석을 할 필요가 있다. 즉, 본 시편의 코팅재료인 우레탄 수지가 수침노화에 취약하였음을 보여준다.

3.4 전단특성에 미치는 노화효과

iosipescu전단시편은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 파괴를 유도하기 위한 노치부를 가지고 있으며 전단하중이 섬유에 수직방향으로 가해지므로 인장시험이나 굽힘시험으로 파악하기 힘든 수지부, 계면부의 전단거동특성을 나타낼 수 있다. iosipescu전단강도의 경우 Fig. 12와 같이 CFRP와 GFRP 시편 모두 고온 및 열충격 노화에서 오히려 증가하였다. 이는 고온노화 중에 수지가 후경화되고 이것이 전단강도를 높여 파괴를 지연시킨 것으로 생각된다. 수침노화에서는 Fig. 12과 Fig. 13에서 보는 바와 같이 전단강도와 전단탄성계수도 저하하여 GFRP시편의 경우에는 각각 12%, 17%만큼 열화했다.

Fig. 14는 0° CFRP 와 0° GFRP시편의 층간전단강도가 각종 노화시험에 따라 변동한 결과를 나타낸다. 전체적으로 볼 때 iosipescu전단강도에 비해 층간전단강도의 값이 15~20MPa 정도 낮게 나왔으며 이는 실험방법에 따른 차이라고 간주할 수 있다. 노화에 따른 GFRP의 층간전단강도의

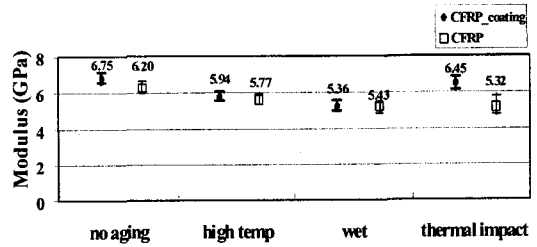


Fig. 10 Surface coating effect on flexural modulus of 90° transverse specimens under various aging

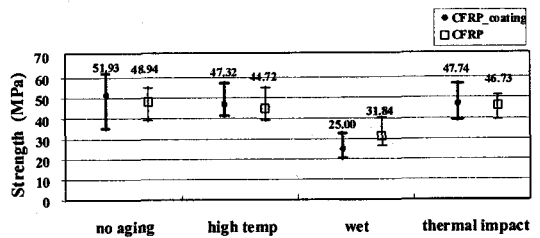


Fig. 11 Surface coating effect on flexural strength of 90° transverse specimens under various aging

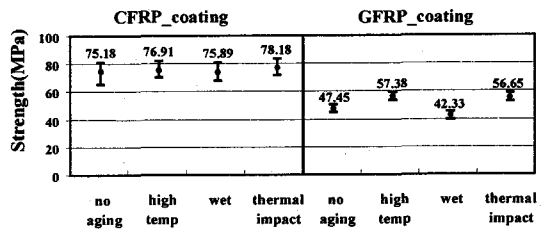


Fig. 12 Iosipescu shear strength of composites under various aging conditions

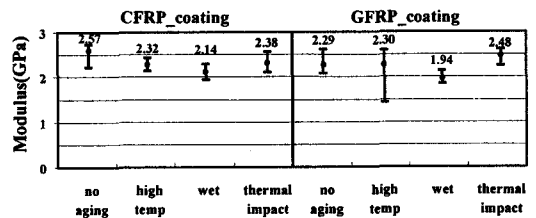


Fig. 13 Iosipescu shear modulus of composites under various aging conditions

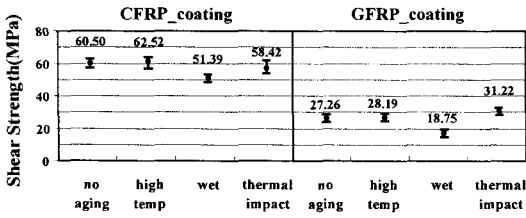


Fig. 14 Interlaminar shear strength of composites under various aging conditions

변동거동은 iosipescu전단강도의 변동거동과 유사하였지만, CFRP와 GFRP의 층간전단강도는 수침노화시에 각각 15%, 31%만큼의 현저한 저하를 보였다.

위에서 언급한 바와 같이 CFRP와 GFRP는 수침노화에 의해서 기계적성질이 가장 크게 저하되었으므로 시험방법과 시험편 방향(섬유방향)에 따른 수침노화거동을 별도로 정리하여 비교분석할 필요가 있다. 복합재의 강도 열화의 경우(Fig. 15), 0° CFRP와 0° GFRP가 함께 굽힘강도가 인장강도보다 더 많이 저하되고 0° GFRP의 열화가 두드러지게 많았다. 하지만 90° GFRP는 90° CFRP에 비해 열화 정도는 훨씬 적었다. 이는 페놀수지가 에폭시보다 수침노화에 강했음을 의미한다. 또한, CFRP는 섬유방향(0°)으로 수침노화에 강했지만 섬유수직방향(90°)으로는 오히려 GFRP보다도 훨씬 약했음을 알 수 있다. 한편 층간전단강도(ILSS)는 iosipescu전단강도에 비해 열화 정도가 크게 나타났으며 이는 ILSS가 수지 자체와 섬유/수지간 계면부의 열화상태를 잘 나타내 주는 방법이라고 해석된다.

수침노화에 의한 탄성계수 저하의 경우(Fig. 16), 0° FRP는 수% 정도로 작았으나 90° FRP는 비교적 큰 저하를 보였다. 또한 iosipescu전단시험에 의해서도 탄성계수의 저하거동이 확실히 많았는데 이는 역시 수지와 섬유/수지간 계면부의 탄성저하가 크게 나타난 것이다. 한편 CFRP의 탄성계수는 강도의 경우와는 달리 섬유수직방향(90°)에서 GFRP보다 열화 정도가 적었음에 주지해야 한다.

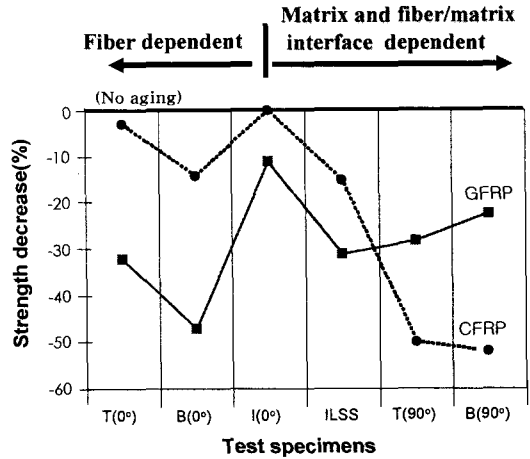


Fig. 15 Strength degradation characteristics of water-immersed (wet) composites as a function of test method and fiber orientation. T(0°): tensile test using unidirectional composites, B(0°): bending test using unidirectional composites, I(0°): iosipescu shear test using unidirectional composites, ILSS: interlaminar shear test using unidirectional composites, T(90°): tensile test using transverse composites, B(90°): bending test using transverse composites

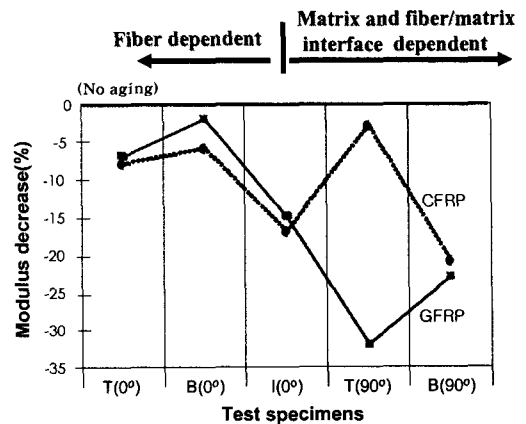


Fig. 16 Modulus degradation characteristics of water-immersed (wet) composites as a function of test method and fiber orientation

## 4. 결 론

본 연구에서는 압력용기가 받는 환경노화를 고려하여 우레탄으로 표면코팅 처리된 용기의 외관층인 복합재(CFRP, GFRP)를 고온, 수침 및 열충격의 가속조건으로 노화시켰을 때 재료의 물성변화를 평가하였다.

(1) 0° 복합재의 경우, CFRP는 전반적으로 노화에 의한 인장강도 저하가 미미하였으나, GFRP의 경우 우레탄 코팅에도 불구하고 고온 및 수분 접촉에 의해 인장강도가 25%정도의 큰 저하를 보였다.

(2) 90° 복합재의 경우, 수분 접촉 노화에 의해 CFRP와 GFRP 모두 인장강도가 28% 이상으로 크게 저하되었다. CFRP의 굽힘강도는 노화에 의해 전반적으로 감소하였지만, GFRP는 노화 후에 수지의 후경화의 영향으로 고온 및 열충격 노화에서 굽힘강도가 오히려 증가되는 것을 확인하였다. 하지만 수침노화에서 CFRP와 GFRP는 각각 52%, 48%만큼의 큰 저하를 보였으며, 고온 및 열충격노화에서는 9% 내의 열화거동을 나타냈다. 굽힘탄성계수는 수침노화에서 역시 취약하여 23%정도의 저하를 보였다.

(3) 노화거동을 개선하기 위한 우레탄 표면코팅 효과를 굽힘특성으로 검토한 결과, 전체 노화시험에 걸쳐 개선적 효과를 보이고 있으며 열충격 노화에서 약 20%정도로 큰 개선효과를 보였다. 단, 수침노화를 받은 90° 복합재의 굽힘강도는 코팅에 의해서 오히려 21%만큼의 저하를 보여 향후 좀더 근본적인 분석이 필요하였다.

(4) iosipescu전단강도와 전단탄성계수의 경우, CFRP와 GFRP가 모두 수침노화에서 상대적으로 큰 저하를 보였고, GFRP시편의 경우에는 각각 12%, 17% 만큼 저하했다. 전단강도는 고온 및 열충격노화에서 오히려 증가하였다. 층간전단강도는 각종 노화에 따른 iosipescu전단강도의 변동거동에 유사하였으며 GFRP의 경우 수침노화시에 31%만큼 크게 저하했다.

## 후 기

본 연구는 한국화이버 시험용역사업 및 한국과학재단 특정기초연구(R01-2005-000-10566-0)사업의 지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

- (1) Hwang, T.G., Jung, H.J., Jung, S.G., Jung, B., Kang, B.Y. and Kim, J.S., 1995, "Standardization of Process/Test and Evaluation of Composite Pressure Vessels," *Proc. of the 4th Korean Society for Propulsion Engineering*, pp. 11~19.
- (2) Choi, Y.G., Jung, K.D. and Kim, J.K., 1995, "Structural Stability of Propulsion Body as Application of Fire Spreading Composite Shell," *Proc. of the 4th Korean Society for Propulsion Engineering*, pp. 3~8.
- (3) Park, M.G., Ryu, B.N. and Choi, Y.B., 1997, "Humidity Permeability of T800/AD6005 Composite Materials," *Proc. of the 9th Korean Society for Propulsion Engineering*, pp. 35~36.
- (4) Springer, G. S. (Ed), 1988 "Environmental Effects on Composite Materials Vol. 3," *Technomic Publishing Co. Ltd, Lancaster*.
- (5) MIL-STD-810F, 2000, Department of Defense Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests.
- (6) Yoon, Y.B., Cho, S.W. and Ha, S.G., 2002, "Optimal Design of CNG Filament Winding Composite Pressure Vessels," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 26, No. 1, pp. 23~30.
- (7) Tang, J.M. and Springer, G.S., 1988, "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, pp. 120~134.
- (8) "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Material," *ASTM Standards*, Standard D3039/D3039M-95.
- (9) "Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials," *ASTM Standards*, Standard D790-92.
- (10) "Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method," *ASTM Standards*, Standard D5379/D5379-93.
- (11) Curtin, W.A., 2000, "Tensile Strength of Fiber Reinforced Composites," *Journal of Composite*



- Materials*, Vol. 34, No. 15, pp.1301~1332.
- (12) Curtin, W.A., 2000, "Stochastic Damage Evolution and Failure in Fiber-Reinforced Composites," *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 36, pp. 163~253
- (13) Hull, D., 1981, "An Introduction to Composite Materials," *Cambridge University Press, Cambridge*, pp. 125~154.
- (14) Geier, M.H., 1994, "Quality Handbook for Composite Materials," *Chapman & Hall*, pp. 131~167.