

# Fragmentation Test법에 의한 단섬유 복합재료의 내구성에 관한 연구

문 창 권

부산수산대학교 재료공학과  
(1995년 8월 4일 접수)

## Study on the Durability of Single Fiber Composite by Fragmentation Test

Chang-Kwon Moon

Department of Materials Science and Engineering,  
Pusan National Fisheries University, Pusan 608-737, Korea  
(Received August 4, 1995)

**요약:** E-유리섬유/에폭시 수지 복합재료의 환경에 대한 내구성을 검토하기 위해 dogbone형의 단섬유(single fiber) fragmentation 시험방법을 채택하였고, 제조된 시편을 75°C의 증류수에 일정 기간 침적한 후에 섬유와 수지와의 계면전단강도를 측정함으로써 침적시간에 따른 영향을 비교 검토하였다. 그 결과, 증류수에 침적된 시편은 침적시간이 증가할수록 수분함유율은 계속적으로 증가를 보였으며, 수분흡수량의 증가에 따라 임계 aspect비도 증가하였다. 또한 침적시간이 증가할수록 계면전단강도는 감소하는 경향을 나타내었다.

**ABSTRACT:** The fragmentation test using dogbone shape of single fiber composite (E-glass fiber/epoxy system) was applied in order to investigate the durability against the environment. The effect of immersion time on the interfacial shear strength was studied by means of measuring the interfacial shear strength of the specimens which were immersed in distilled water at 75°C for a certain period of time. Water uptake increased continuously as the immersion time was increased and the critical fiber aspect ratio ( $L_c/D_f$ ) increased with increasing water uptake. It was also found that the interfacial shear strength was reduced significantly with increasing the immersion time.

**Keywords:** fragmentation test, interfacial shear strength, durability, aspect ratio.

### 서 론

섬유강화 복합재료에서 기계적 물성에 미치는 중요한 인자는 섬유의 종류, 섬유의 방향, 섬유의 길이, 섬유와 수지 간의 계면전단강도(interfacial shear strength) 및 매트릭스 수지의 종류 등이 있다. 특히 이 중에서 섬유와 수지간의 계면전단강도는 복합재료가 외력을 받았을 때, 그 응력이 매트릭스 수지로부터 강화섬유로 전달되는 과정에서 응력의 전달상태를 결정하는 중요한 인자이다. 섬유강화 복합재료에서 같은 종류의 섬유와 매트릭스 수지를 사용할 때, 강화섬유와 매트릭스 수지 간의 계면의 성질은 복합재

료의 최종물성을 결정하는데 매우 중요한 역할을 하므로, 계면전단강도를 정확하게 평가하는 것은 매우 중요하게 인식되어 왔다.

따라서 계면전단강도를 평가하는 방법들이 많이 제안되어 왔으며, 그 방법들로는 pull-out test,<sup>1-4</sup> microbond test,<sup>5-9</sup> single fiber fragmentation test,<sup>10-15</sup> debonding test<sup>16</sup> 및 indentation test<sup>17</sup> 등이 있다.

전술한 방법들 중에서 가장 일반적으로 사용되는 방법으로 단섬유(single fiber) fragmentation 시험법을 들 수 있다. 이 시험방법은 시험편 하나의 시험시간이 3~4시간 정도로 매우 많이 걸리는 결점도

있지만, 다른 방법 등과 비교하면 시험편 제작의 용이함과, 하나의 시험편으로부터 많은 데이터를 얻을 수 있는 점 및 환경에 대한 내구성 시험에도<sup>18-20</sup> 다른 시험방법에 비하여 쉽게 적용할 수 있다는 장점도 있다.

Fragmentation 시험에서 계면전단강도( $\tau$ )를 구하기 위해서는 섬유 $f$ 의 인장강도( $\sigma_f$ ), 섬유직경( $D_f$ ) 및 임계섬유장( $L_c$ )을 알아야 하며, 다음의 Kelly 와 Tyson의 식<sup>21</sup>으로부터 구할 수 있다.

$$\tau = \sigma_f D_f / 2 L_c \quad (1)$$

식(1)에서 섬유 $f$ 의 인장강도와 섬유직경은 시험전에 측정할 수 있으며, 실제로 fragmentation 시험에서는 임계섬유장을 시험 후에 섬유의 파단길이 분포로부터 먼저 평균한 후에 식(1)에 의해 계면전단강도를 계산한다.<sup>10</sup>

Kelly와 Tyson에<sup>21</sup> 의하면 이론상으로 fragmentation 시험에서의 최종섬유의 파단길이는  $L_c/2$ 에서  $L_c$  사이에 분포하므로, Osawa 등은<sup>22</sup> 파단된 섬유의 평균 길이를 단순 평균으로 계산하고  $3L_c/4$ 로 생각하여 임계섬유장을 섬유 $f$ 의 평균 파단길이의  $4/3$ 배로 취급한 다음 식(1)로 계산하였다. 그리고 Drzal<sup>10,11</sup>은 최종 섬유의 파단길이 $l$ 의 분포를 two parameter Weibull 분포함수에 적용시켜, 형상계수( $\alpha$ )와 척도계수( $\beta$ )를 구하여 임계섬유장을 평가하는 새로운 방법을 제안했으며, 그 제안된 방법은 많은 연구자들에 의하여 유효하다고 증명되었다.<sup>10-15</sup>

한편 보통 계면전단강도를 평가할 경우에 식(1)에서 섬유 $f$ 의 인장강도는 단섬유의 인장시험에서 측정값을 사용할 수 있지만, 어떤 환경에 대한 내구성 시험 등은 내구성 시험 동안에 섬유 자체의 인장강도도 열화되므로, 섬유와 매트릭스 수지 간의 계면전단강도를 정확하게 평가하기 위해서는 단섬유의 인장시험에서 측정된 인장강도는 사용할 수 없다. 그러나 내구성 시험중인 fragmentation 시험편으로부터 직접 섬유 $f$ 의 인장강도를 측정하는 것은 불가능한 것이다. 그래서 몇몇 연구자들에 의해 fragmentation 시험과정에서 얻을 수 있는 연신율과 섬유파괴수와의 관계에서 내구성 시험으로 열화된 섬유 인장강도의 추정 방법에 대한 여러가지 방법의 보고가<sup>23-26</sup> 있지만 아직까

지 확실한 방법은 제시하지 못하고 있다.

섬유강화 복합재료의 환경에 대한 내구성 시험에는 지금까지 해수 및 담수 등에 관한 연구 보고는<sup>18-20</sup> 많이 있지만, 그것보다 더 열악한 환경으로 해수나 담수 보다도 물분자들의 cluster가 작아서 침투력이 우수하여 보다 짧은 시간 내에 복합재료의 물성을 저하시킬 수 있는 증류수의 환경, 더우기 고온의 증류수 환경에서 연구한 결과의 보고는 거의 없다. 그래서 본 연구에서는 dogbone형의 단섬유 fragmentation 시험법으로 유리섬유/에폭시 수지의 단섬유 복합재료(single fiber composites)를 제작하여 75℃의 증류수에 침적시킨 후, 섬유와 수지의 계면전단강도에 침적시간이 미치는 영향을 비교 검토했다.

## 실 실험

**재 료.** 본 연구에 사용된 섬유는 sized (commercial sizing compatible with epoxy) E-유리섬유 (Owens-Corning)로, gage length가 10 mm의 단섬유를 이용한 인장시험의 결과 얻어진 인장강도는  $2.1 \pm 0.22$  GPa이었다. 시험편 모든 시험편의 섬유직경은 광학현미경을 이용하여 측정하였으며, 유리섬유의 평균섬유직경은  $15.68 \pm 1.12 \mu\text{m}$ 이었다. 매트릭스 수지로는 diglycidyl ether-Bisphenol-A (DGEBA) (Epon 828, Shell Co.)를 주재료 사용하였고, 14.5 phr의 meta-phenylene diamine (mPDA) (Fluka Chemical. Co.)를 경화제로 사용하여 경화하였으며, mPDA의 녹는점은 63~64℃였다.

**시험편 성형.** 단섬유의 fragmentation 시험편은 Drzal에 의해 제안된 방법과<sup>10</sup> 비슷하게 성형하였으며, 그 방법은 아래와 같다. 8개의 dogbone형으로된 금형을 이용하여 실리콘 수지(GE silicone RTV-664)의 몰드를 성형했다. 그 실리콘 몰드에 유리섬유의 섬유다발로부터 분리한 단섬유를 실리콘 몰드 양단의 sprue slot를 기준으로 걸치고 양면의 접착 테이프로 임시 고정시킨 후, 양단에 5분 경화용 에폭시로 고정시켰다. 그리고 에폭시 수지는 먼저 mPDA의 일정한 양을 오븐에서 70℃의 온도에서 녹이는 동안, Epon 828 역시 같은 온도에서 일정한 양을 가열하여 점도를 낮춘 후에, 두액을 잘 교반을 시켜 실리콘 몰드에 주입시킬 준비를 했다. 준비된

에폭시 수지를 실리콘 몰드에 주입시킨 후에 오븐에서 75°C에서 2시간을 가열 경화시킨 후, 다시 150°C에서 2시간 동안 후경화하여, 두께가 2 mm, 전체길이가 60 mm, 평형부의 길이가 25 mm, 평형부의 폭이 4 mm인 dogbone형(Fig. 1, 2 참조)의 시험편을 제작했다. 마지막으로 실리콘 몰드로부터 완성된 시험편을 분리시켜 섬유가 직선으로 유지되어 있고, 내부에 기공(void)이 전혀 없는 깨끗한 시험편만을 선택하여 시험하였다.

**Hydrothermal Exposure.** 시험편의 증류수에서의 침적은 1,000 cc 용량의 pyrex flask에 증류수를 800 cc 정도 채운 후에 제작된 dogbone형의 시험편을 넣고, 물의 누발을 막기 위하여 aluminium foil로 봉하여, 75°C로 유지되고 있는 오븐에 넣어 가열하였다. 그리고 일정한 시간(10, 25, 37, 60 days)이 지난 후에 7개씩의 시험편을 꺼내어 상온의 증류수에 보관을 한 후에 하나씩 다시 꺼내어 fragmentation 시험을 하였다. 수분 함유율은 유리섬유를 포함한 두개의 dogbone형의 시험편을 75°C의 증류수의 침적시간에 따라 무게의 변화를 정밀 balance를 이용 측정하므로써 얻어졌다.

**Fragmentation 시험.** Fragmentation 시험은 Fig. 1과 같이 시험편에 외력을 가하여 섬유와 수지간의 기계적 성질의 차이에 계면에 전단응력을 발생시키고, 이 전단 응력으로 섬유를 파괴시켜서 섬유의 파괴수가 포화될 때까지 시험을 계속한 후, 포화상태의 많은 수의 파단된 섬유(fragment)의 길이분포를 이용하여 섬유와 수지와의 계면전단강도를 구하는 방

법이다. 본 연구에서의 fragmentation 시험은 Fig. 2에서와 같이 수동으로 작동할 수 있는 소형 인장시험기를 편광현미경에 고정시키고, 편광현미경에는 video camera를 부착시켜 TV 모니터로부터 섬유직경 및 섬유파괴수가 포화된 후의 섬유의 파단길이 등을 측정했다. 한편 시험전에 1,500 매시의 sand paper를 사용하여 시험편의 평형부분과 소형 인장시험기의 chucking 부분 등의 모난 부분을 잘 연마한 후, 연신율의 측정을 위해 Fig. 1과 같이 시험편의 중간 부분에 10 mm 정도의 표점거리를 표시했다. 다음 준비된 dogbone형의 시험편을 소형 인장시험기에 chucking을 하고 dial gage를 zero로 맞춘 후에 소형 인장시험기를 현미경에 고정시켰다(Fig. 2 참조). 먼저 섬유직경과 표점거리를 정확하게 측정한 후에 dial gage를 참고로 하여 연신율을 증가시켰으며, 본 연구에 사용한 소형 인장시험기의 dial gage와 연신율의 실제의 관계는 dial gage의 5개 눈금이 약 0.3%의 연신율이었다.

본 연구의 fragmentation 시험에서의 시험방법은 먼저 섬유자체의 파단 연신율의 부근(1.5%)까지는 한꺼번에 연신을 시키고, 그 후에 0.3%씩 연신율을 증가시킨 다음 10분 후에 섬유파괴수를 세는 방법으로, 연신율을 증가시켜도 섬유파괴수는 증가하지 않는 상태인 섬유파괴수가 포화될 때까지 계속하였다. 그리고 각 연신상태에서 시험편에 표시된 표점거리를 기준으로 연신율을 측정했으며, 표점거리 사이의 섬유파괴수만 고려하여 섬유파괴수의 포화상태를 판단하였다.

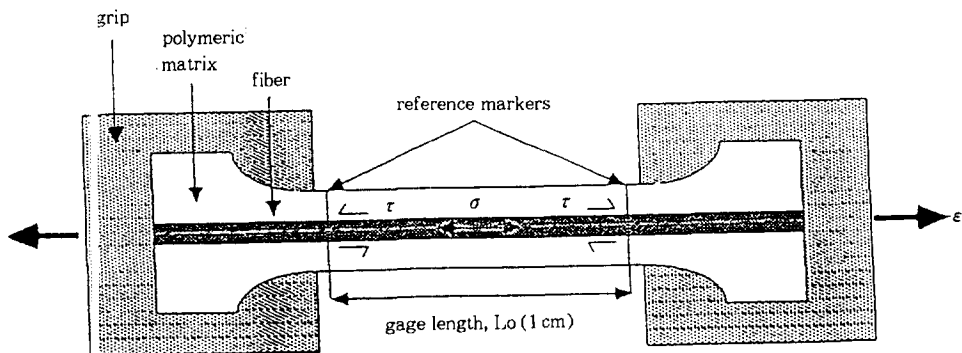


Fig. 1. Basic principle of fragmentation test.

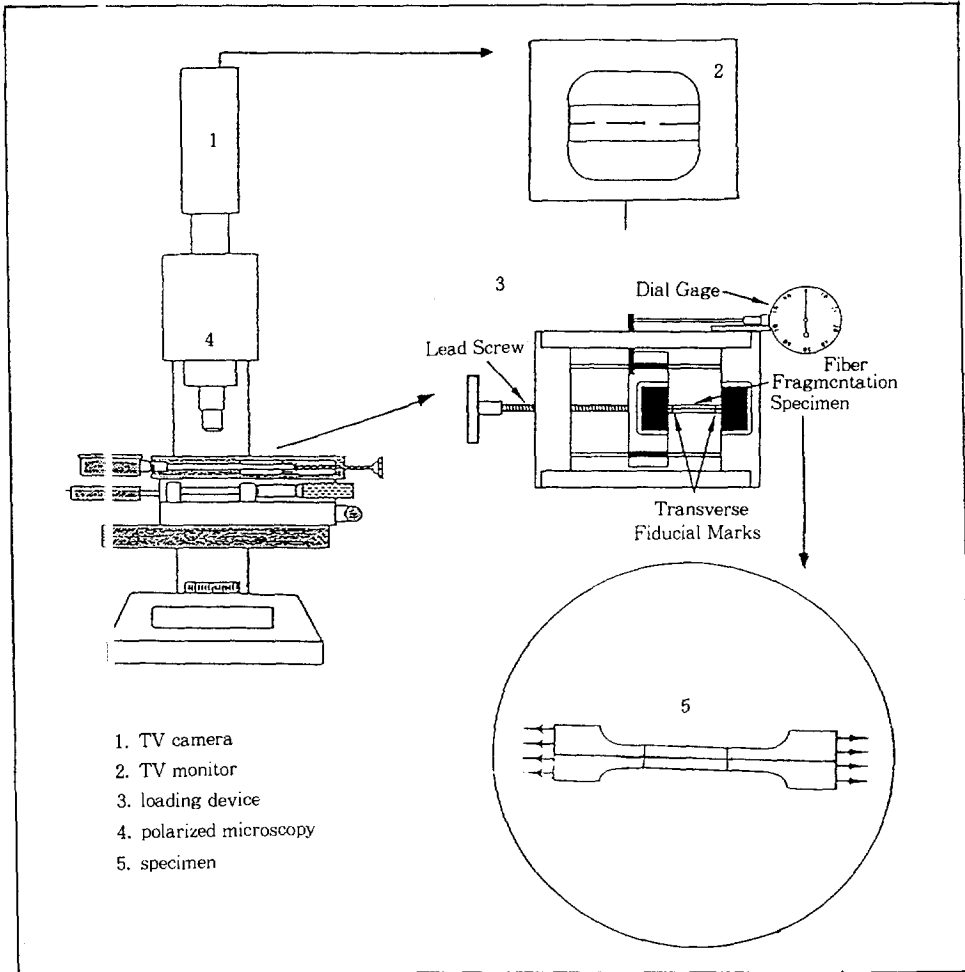


Fig. 2. Experiment 1 set-up for fragmentation test.

계면전단강도의 계산. Fragmentation 시험에서 연신율을 증가시킬수록 섬유의 파괴수는 증가하지만 증가시킨 연신율이 수유자체의 파단연신율의 3배 정도 되면 섬유의 파괴는 포화상태에 도달하게 된다.<sup>10</sup> 이 때의 파단된 섬유의 길이를 측정하고, 측정된 섬유 파단길이의 분포로써 다음 (2)식을 사용하여 실제의 파괴 확률값을 계산하였다.

$$F = \frac{L_i - 0.5}{N} \quad (2)$$

여기서  $N$ 은 표기거리 사이의 파괴된 섬유의 총수

이며,  $L_i$ 는 파괴된 섬유의 길이를 짧은 순서 부터 나열했을 때  $i$ 번째까지의 파괴된 섬유수의 총합이다.

그리고 식(2)에서 구한 파괴확률값과 섬유 파단길이의 관계를 (Figs. 5~9 참조) plot하여 2모수 Weibull 분포함수인 식(3)으로 fitting하여 형상계수  $\alpha$ 와 척도계수  $\beta$ 를 구하였다.

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (3)$$

여기서  $x$ 는 파단된 섬유의 길이를 섬유직경으로 나눈 aspect 비이며, 식(3)에서 구한  $\alpha$ ,  $\beta$ 의 값을

Drzal에<sup>15</sup> 의해 수정된 식(4)를 이용하여 계면전단 강도( $\tau$ )를 계산하였다.

$$\tau = \frac{\sigma_f}{2\beta} \cdot \Gamma \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \quad (4)$$

여기서  $\Gamma$ 는 Gamma 함수이며, 식(4)는 Drzal이 식(1)을 수정한 식이다. 그리고 식(4)에서 인장강도  $\sigma_f$ 는 증류수의 침적시간이 zero인 경우에 gage length가 섬유계장( $L_c$ )인 인장강도를 사용해야 되지만, 섬유계장의 인장강도는 섬유 길이가 너무 짧아 측정이 불가능하므로, 보통 외삽법에<sup>28</sup> 의해 얻어진 수치를 사용하고 있다. 그리고 전술한 바와 같이 증류수의 침적시간이 증가하면 섬유의 인장강도는 열화되지만 지금의 단계에서는 실제로 열화된 인장강도를 측정할 방법이 없다. 그래서 본 연구에서는 증류수의 침적 유무와 시간의 장단을 불문하고 모든 시험편에 대하여 gage length 10 mm의 단섬유 인장시험으로 실측한 인장강도를 사용했다. 그것은 본 연구의 목적이 75℃의 증류수에서 침적시간에 따른 계면전단강도의 변화를 검토하는 것이므로 결과의 경향에는 큰 영향이 없을 것으로 생각되기 때문이다.

### 결과 및 고찰

Fig. 3은 단섬유 fragmentation 시험에서 섬유의 파괴수가 포화되었을 때의 fragment의 파괴양상을 나타낸 것으로 편광을 이용한 것과 하지 않은 것의 사진이다. 그림에서 섬유의 파괴길이의 분포와 파괴된 섬유 근처의 응력분포 등을 잘 알 수 있다. Fig. 3에서 (a)는 탄소섬유의 경우에는 편광을 사용하지 않으면 섬유의 파단점이 잘 보이지 않지만 유리섬유의 경우는 편광을 사용하지 않아도 섬유의 파단점이 잘 보이는 것을 나타낸다. Fig. 3 (b)의 응력의 분포 사진으로부터 파괴된 섬유의 끝부분에 전단응력이 크게 작용하고 있는 것을 알 수 있으며, 계면에서 작용하는 전단응력은 결국 섬유에는 인장응력으로 작용하여 섬유를 파단시키는 것을 나타낸다.

Fig. 4는 유리 섬유를 포함한 dogbone형 시험편의 증류수의 침적시간에 따른 수분함유율을 나타낸 것이다. 그림에서 수분함유율은 처음 5일까지는 선형적

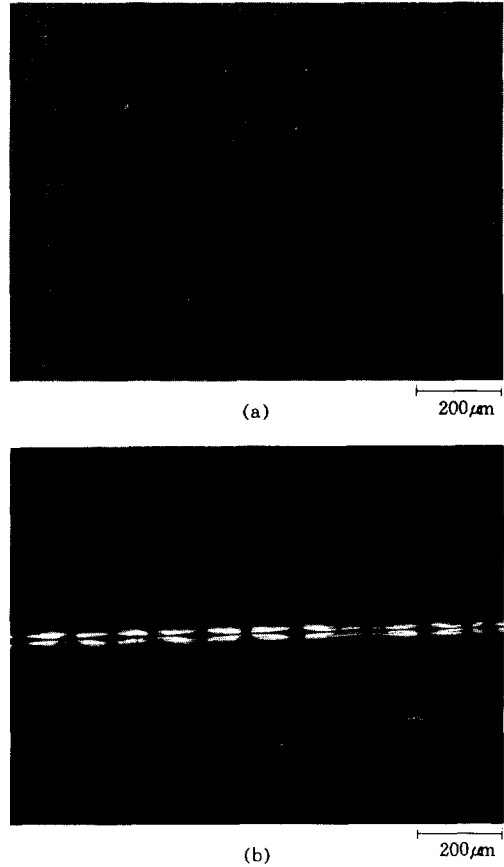


Fig. 3. Photographs of fragments, after samples had been saturated in the single fiber fragmentation test. (a) under unpolarized light and (b) under polarized light.

으로, 10일까지는 급격한 증가를 보였으며, 10일부터 60일까지는 점차적으로 증가를 계속하지만, 60일이 경과될 때까지도 평형상태에는 도달하지 않은 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 증류수에 침적하지 않았던 시험편의 단섬유 fragmentation 시험의 결과로 최종의 섬유 fragment의 길이 분포에 대한 파괴확률과 섬유 fragment의 aspect(섬유길이/섬유직경)비의 관계를 나타낸 것이다. ○표시는 식(2)로 계산한 측정치이며, 실선은 식(3)으로 fitting한 이론치이다. 그림에서 시험결과의 섬유 fragment의 aspect 비를 파괴확률로 나타낸 실측치와 2모수 Weibull 함수로 나타낸 이론치가 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있으며, 이것은

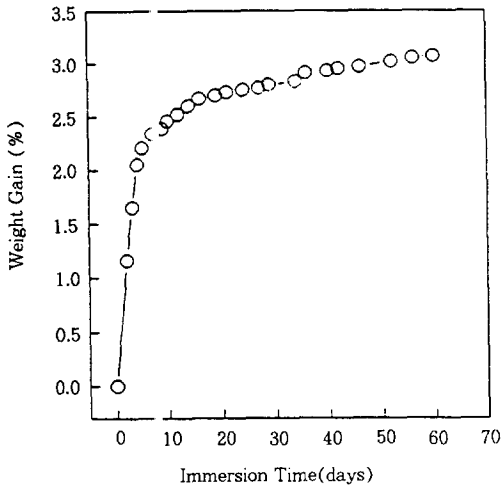


Fig. 4. Weight gain of a specimen as a function of immersion time in distilled water at 75°C.

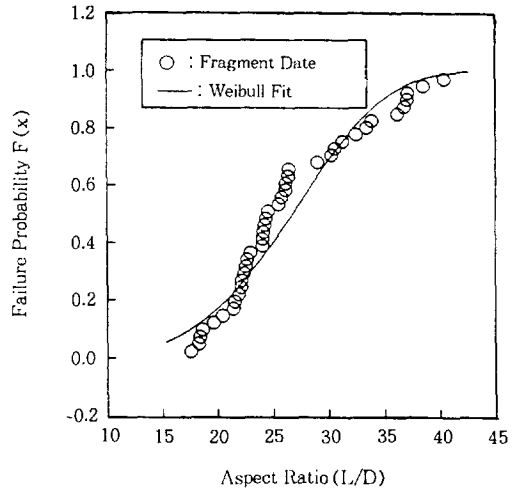


Fig. 6. Plot of a failure probability as a function of aspect ratio for a wet specimen that had been immersed in distilled water at 75°C for 10 days.

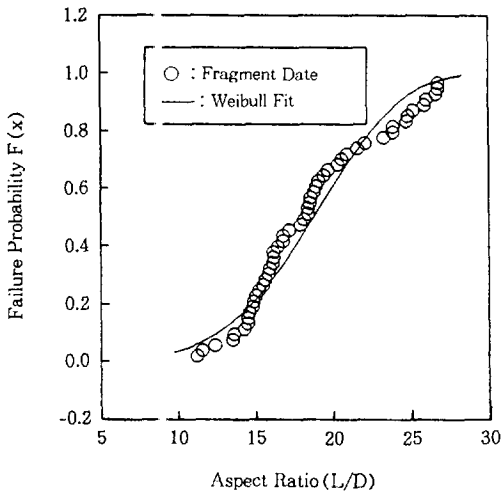


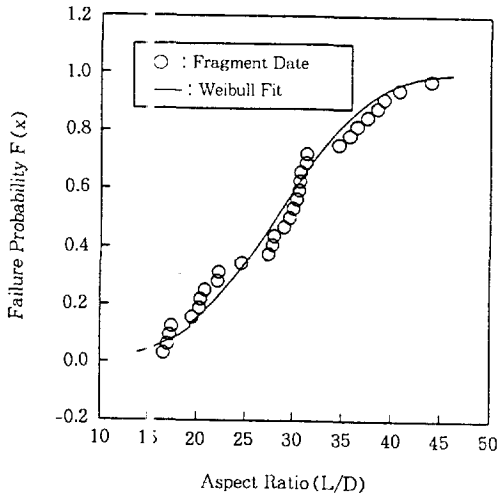
Fig. 5. Plot of a failure probability as a function of aspect ratio for a dry specimen.

fragmentation 시험의 결과인 섬유 fragment의 길이 분포가 2모수 Weibull 함수에 잘 일치되며 Weibull 확률해석으로 섬유임계장의 평가가 가능하다는 것을 나타낸다. 그리고 그림에서 섬유 fragment 길이의 aspect 비는 11~26으로 분산되어 있는 것을 알 수 있다.

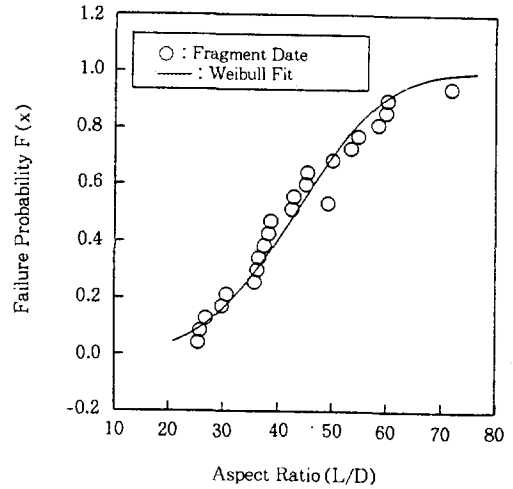
Fig. 6은 10일 동안 증류수에 침적시킨 시험편의

단섬유 fragment 시험의 결과로 섬유 fragment의 길이 분포에 대한 파괴확률과 fragment의 aspect 비를 나타낸 것으로, aspect 비는 17~40으로 분산되어 있다. 이것은 Fig. 5의 증류수에 침적시키지 않았던 것에 비하면 섬유 fragment 길이의 aspect 비의 분산범위가 넓어진 것과 전체적으로 aspect 비가 커진 것을 알 수 있다. 여기서 aspect 비가 크게 된다는 것은 식(1)에서 알 수 있듯이 계면전단강도가 작아진다는 것을 의미한다.

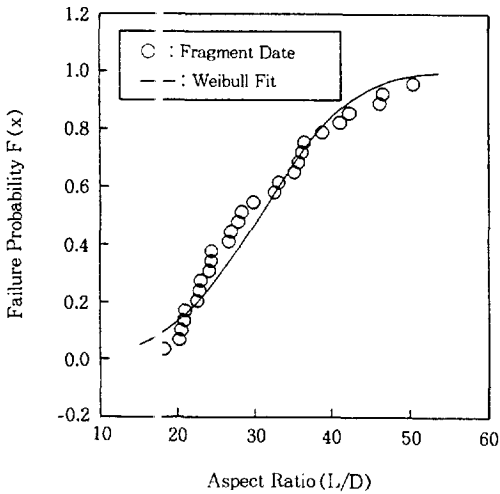
Figs. 7~9 역시 Fig. 6과 같은 단섬유 fragmentation 시험의 결과로 증류수의 침적시간을 Fig. 6에 비하여 증가시킨 것이다. 즉 Fig. 7은 25일간, Fig. 8은 37일간, Fig. 9는 60일간을 75°C 증류수에 침적시킨 것으로 섬유 fragment의 길이의 aspect 비의 분산이 각각 17~44, 19~50, 25~60이다. Figs. 6~9의 단섬유 fragmentation 시험의 결과에서 75°C 증류수에 침적한 시간이 증가할수록 섬유 fragment 길이의 aspect 비의 분산범위는 넓어지고, 대체로 분산된 aspect 비가 증가된 것을 알 수 있다. 증류수에 침적시간이 증가할수록 섬유파괴수의 포화시 섬유의 fragment의 길이가 크게 되는 것을 나타내며, 이것은 결국 전술한 바와 같이 섬유와 매트릭스 수지간의 계면전단강도가 수분의 영향을 받아서 열화되어 감소한다는 것을 나타낸다.



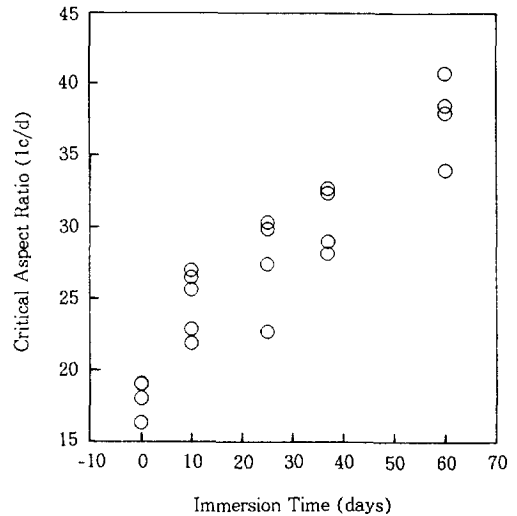
**Fig. 7.** Plot of a failure probability as a function of aspect ratio for a wet specimen that had been immersed in distilled water at 75°C for 25 days.



**Fig. 9.** Plot of a failure probability as a function of aspect ratio for a wet specimen that had been immersed in distilled water at 75°C for 60 days.



**Fig. 8.** Plot of a failure probability as a function of aspect ratio for a wet specimen that had been immersed in distilled water at 75°C for 37 days.



**Fig. 10.** Critical aspect ratio vs. immersion time in distilled water at 75°C.

Fig. 10은 단섬유 fragmentation 시험의 결과로 임계 aspect 비와 75°C의 증류수에 침적한 시간과의 관계를 나타낸 것으로, 각각의 데이터는 증류수에 침적시간마다 4~5개의 시험편의 결과를 나타낸 것으로, 임계 aspect 비는 침적시간의 증가에 따라 증가하고 있는 것을 보여준다. 이와같이 침적시간의 증가

에 따라 60일까지 임계 aspect 비( $L_c/D_f$ )가 증가한다는 것은, 식(1)의 변형식인  $L_c/D_f = \sigma_f/2r$ 에서 알 수 있듯이 섬유의 인장강도( $\sigma_f$ )가 열화되어 저하되는 것보다 계면전단강도( $\tau$ )의 열화가 더 크게 나타나는 것을 의미한다.

Fig. 11은 단섬유 fragmentation 시험의 결과로 계면인장강도와 75°C의 증류수에 침적시간과의 관계

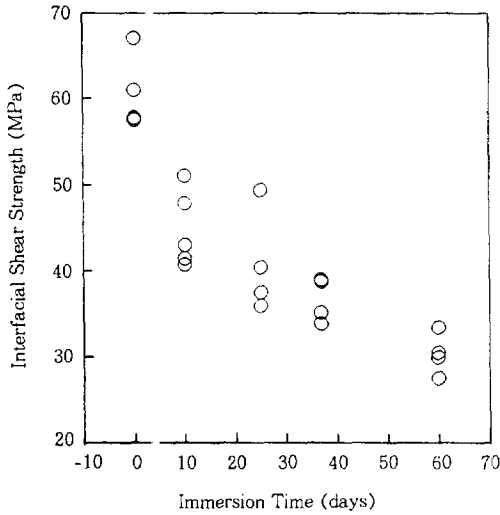


Fig. 11. Plot of interfacial shear strength as a function of immersion time in distilled water at 75°C.

를 나타낸 것으로, 계면전단강도는 식(4)에 의해서 계산된 것이다. 증류수의 침적시간에 따른 계면전단강도의 변화는 10일까지는 급격히 감소하고 그 후는 완만하게 60일까지 감소하고 있는 것으로, 10일 후에는 처음의 계면전단강도의 25% 감소하고, 60일 후에는 처음의 계면전단강도 보다 50% 정도 감소한 것을 알 수 있다. 하지만 전술한 바와 같이 75°C의 증류수에서 침적시간이 길어지면 섬유 인장강도 역시 저하되는 것을 고려한다면 실제 증류수에 침적시킨 시험편의 정확한 계면전단강도(식(4) 참조)는 Fig. 11에 표시한 데이터 보다도 더욱 작아질 것이다. 그리고 계면전단강도가 증류수의 침적시간에 따라 감소하는 경향은, 결국 수분흡수율이 증가하면 계면전단강도는 감소한다는 것을 나타낸다.

본 연구에서 사용한 시험방법은 단섬유 fragmentation test법으로 일종의 모델 시험이지만, Fig. 11과 같이 E-glass/epoxy의 계면전단강도가 60일간의 75°C 증류수의 침적시간에 처음의 계면전단강도 보다 50% 정도로 감소한 것은, 비록 본 연구에서 사용된 증류수의 환경이 물분자들의 cluster가 해수나 담수보다 작아 침투력이 우수하여, 해수나 담수보다 더욱 열악한 조건이지만 매우 심각한 결과이며, 이로부터 실제의 복합재료에서도 본 연구와 비슷한 환경조건에서는 시간의 경과에 따라 계면전단강도의 열화에

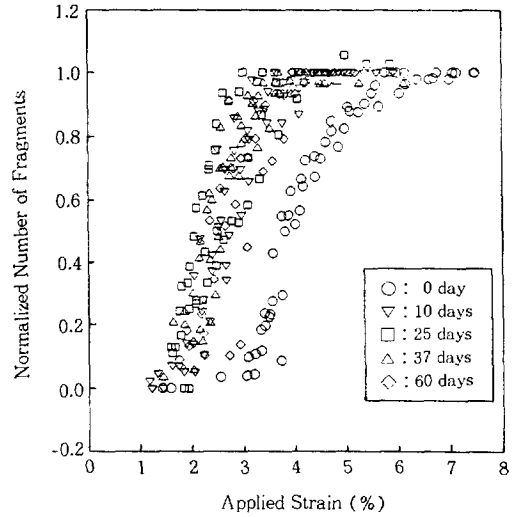


Fig. 12. Plot of the fragmentation profile, normalized number of fragments as a function of applied strain.

의한 복합재료의 기계적 성질의 저하를 충분히 예측 가능한 것이다. 그러므로 섬유강화 복합재료의 환경에 대한 내구성(durability)의 연구는 매우 중요하기 때문에 적절한 시험방법에 따라 많은 연구가 이루어져 기초적인 데이터가 충분히 축적해야 된다고 사료된다.

Fig. 12는 단섬유 fragmentation 시험의 결과로 75°C 증류수에서의 침적시간에 따른 표준화된 섬유 파괴수와 연신율과의 관계를 나타낸 것이다. 섬유 파괴수의 표준화는 시험편의 각 연신율에서의 섬유파괴수를 섬유파괴수가 포화되었을 때의 섬유파괴수로 나누어서 계산을 했으며, 각 연신율에서 일어난 섬유 파괴수 분율을 나타내는 것이다. 증류수에 침적시키지 않았던 시험편의 경우는 첫 섬유의 파괴시의 연신율이 3% 전후인데 반하여, 10일 이상 증류수에 침적시킨 시험편은 1.5% 전후인 것을 알 수 있다. 그리고 섬유파괴수가 포화되었을 때의 연신율도 증류수에 침적시키지 않았던 시험편의 경우는 7% 전후인데 비하여, 증류수에 침적시킨 시험편은 5.5% 전후인 것을 알았다. 결국 증류수에 침적시키지 않는 시험편은 연신율이 3~7% 범위에서 섬유가 파괴되지만 증류수에 침적시킨 시험편은 연신율이 1.5~5.5% 범위에서 섬유가 파괴되었다. 이는 섬유자체의 기계적 성질의 열화와 수분 흡수에 의한 매트릭스 수지의 체



적의 팽창으로 섬유에 인장응력이 발생되고, 그 응력이 잔류한 결과라고 보여진다.

### 결 론

Dogbone형의 단섬유 fragmentation 시험법으로 유리섬유와 에폭시 수지와와의 단섬유 복합재료를 제작하여 75°C의 증류수에 침적시킨 후, 섬유와 수지의 계면전단강도에 침적시간이 미치는 영향을 비교 검토한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 증류수에 침적된 시험편은 침적시간의 증가에 따라 수분함유율은 60일까지 계속적으로 증가함을 보이며, 특히 5일 후 전후하여 급속한 증가를 보였다.
2. 수분흡수량의 증가에 따라 단섬유 복합재료에서 임계 aspect 비( $L/D_f$ )는 증가하였다.
3. 계면전단강도는 증류수에서의 침적시간의 증가에 따라 급격히 감소했으며, 침적시간이 10일 후에는 25%, 60일 후에는 50%가 감소하였다. 그리고 증류수에 침적시킨 시험편의 침적시간이 증가할수록 섬유의 인장강도 역시 저하되는 것을 고려한다면, 식 (1)에 의하면 실제의 계면전단강도의 저하는 본 연구에서의 결과 보다 더욱 심각할 것이다.
4. 환경에 대한 내구성 시험에서 fragmentation 시험법을 이용한 섬유와 수지간의 정확한 계면전단강도를 평가하기 위해서는 환경에 의해 열화되는 섬유의 인장강도를 우선적으로 고려해야 한다.
5. 증류수에 침적시키지 않은 시험편은 연신율이 3~7%인 범위에서 섬유가 파괴되지만, 증류수에 침적시킨 시험편의 연신율은 1.5~5.5% 범위에서 섬유가 파괴되었는데, 이는 수분흡수에 의한 시험편의 체적팽창으로 섬유에 인장응력이 발생된 결과라고 생각된다.
6. 실제의 복합재료에서도 본 연구의 시험 환경과 비슷한 조건이든, 아니든 간에 시간의 경과에 따라 계면전단강도의 열화에 의한 기계적 성질의 저하를 초래할 것이므로, 복합재료에서 환경에 대한 내구성 시험은 매우 중요하다는 것을 인식해야 한다.

### 참 고 문 헌

1. A. Takaku and RGG Arridge, *J. Phys. D, Appl.*

*Phys.*, **6**, 2038 (1973).  
 2. J. Bowling and G. W. Groves, *J. Mater. Sci.*, **14**, 431 (1979).  
 3. J. Favre and M. C. Merienne, *Int. J. Adhesion and Adhesives*, **1**, 311 (1981).  
 4. L. S. Penn and S. M. Lee, *Fiber Science and Technology*, **17**, 91 (1982).  
 5. B. Miller, P. Muri, and Rebenfeld, *Comp. Sci. Tech.*, **28**, 17 (1987).  
 6. U. Gaur and B. Miller, *Comp. Sci. Tech.*, **34**, 35 (1989).  
 7. C. K. Moon et al., *J. Appl. Polym. Sci.*, **44**, 561 (1992).  
 8. C. K. Moon et al., *J. Appl. Polym. Sci.*, **45**, 443 (1992).  
 9. C. K. Moon, *J. Appl. Polym. Sci.*, **54**, 73 (1994).  
 10. L. T. Drzal and M. J. Rich, *J. Adhesion*, **16**, 1 (1982).  
 11. L. T. Drzal, *SAMPE Journal*, Sept./Oct., 7 (1983).  
 12. W. D. Bascom and R. M. Jensen, *J. Adhesion*, **19**, 219 (1986).  
 13. W. A. Curtin, *J. Mater. Sci.*, **26**, 5239 (1991).  
 14. M. C. Waterbury and L. T. Drzal, *J. Comp. Tech., Res.*, **13**, 22 (1991).  
 15. C. Baxevanakis et al., *Comp. Sci. Tech.*, **48**, 47 (1993).  
 16. J. O. Outwater and M. C. Murphy, *Modern Plastics*, **47**, 16 (1970).  
 17. J. F. Mandell et al., *Int. J. Adhesion and Adhesives*, **5**, 40 (1980).  
 18. X. S. Bian and L. Ambrosio, *Polymer Composites*, **12**, 333 (1991).  
 19. G. B. Lowe and T. C. P. Lee, *Int. J. Adhesion and Adhesives*, **14**, 85 (1994).  
 20. H. D. Wagner and A. Lustiger, *Composites*, **25**, 613 (1994).  
 21. A. Kelly and W. R. Tyson, *J. Mech. Phys. Solids*, **13**, 329 (1965).  
 22. M. Miwa and T. Osawa, *J. Appl. Polym. Sci.*, **25**, 795 (1980).  
 23. H. D. Wagner and A. Eitan, *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 1965 (1990).  
 24. B. Yavin and H. D. Wagner, *Polymer Composites*, **12**, 436 (1991).  
 25. H. D. Wagner and J. R. Wood, *Advanced Composites Lett.*, **2**, 173 (1993).

Fragmentation Test법에 의한 단섬유 복합재료의 내구성에 관한 연구

26. M. Shioya et al., in Proceeding of The Adhesion Society, 248 (1974).

27. W. Weibull, *J. Appl. Mech.*, **18**, 293 (1951).

28. E. M. Asloun et al., *J. Mater. Sci.*, **24**, 3504 (1989).