

두 섬유 의 Fragmentation Test에 관한 연구

문 창 권[†] · Walter G. McDonough^{*}

부산수산대학교 재료공학과, *미국표준연구소 복합재료연구실

(1995년 7월 14일 접수)

Two Fiber Technique for a Fragmentation Test

Chang Kwon Moon[†] and Walter G. McDonough^{*}

Department of Materials Science and Engineering, Pusan National Fisheries

University, Pusan 608-737, Korea

^{*}National Institute of Standards and Technology, Polymer Division, Polymer Composites

Group, Gaithersburg, MD 20877, U. S. A.

(Received July 14, 1995)

요 약 : 섬유와 수지와의 계면전단강도의 평가를 위해 fragmentation 시험에서 dogbone형의 한 시험편에 다섬유를 이용한 방법을 검토하였으며, 또 fragmentation 시험 과정에서 각 연신율에서 섬유 파괴수의 시간 의존성에 관하여 비교 검토하였다. 그 결과, 두섬유를 사용했을 때의 계면전단 강도는 단섬유를 사용했을 때와 거의 같은 결과를 얻었지만, 세섬유를 사용했을 경우에는 단섬유 또는 두섬유를 사용했을 때보다 매우 큰 값을 얻었다. 그것은 섬유의 간격이 너무 작을 때는 한가닥의 섬유파괴가 인접 섬유의 파괴를 유발시키기 때문이다. 그리고 시험 과정에서 각 연신율에서 섬유의 파괴수는 시간의 경과와 같이 증가한 후에 포화하였다.

Abstract : The single fiber fragmentation test has been modified by embedding multiple fibers into polyisocyanurate resin of dogbone shape. We were able to examine the interfacial shear strength between the fibers and the resin from the test. In addition, the time-dependent nature of the fragmentation test process was considered. We found that the failure profiles of the two fibers of more than $400\mu\text{m}$ apart were similar to the failure profiles from single fiber tests. When we examined three fibers, we found that measured interfacial shear strength values were much greater than the shear strength values obtained from either single or two fiber tests. Consequently, whenever the interfiber spacing was too small, breaks in one fiber have possibility to influence the breaks in the adjacent fibers. We also found that the number of fiber breaks at each strain increased with increasing time and then leveled off.

Keywords : fragmentation test, interfacial shear strength, fiber break number.

서 론

섬유강화 복합재료에서 강화섬유와 매트릭스 수지 간의 계면은 복합재료의 최종물성을 결정하는데 매우 중요한 역할을 하므로, 계면전단강도를 정확하게 평가하는 것은 더욱 중요하게 인식되어 왔다.

그래서 지금까지 계면전단강도를 평가하는 방법들이 많이 제안되어 왔으며, 그 방법들은 pull-out test,¹⁻⁴ microbond test,⁵⁻⁹ single fiber fragmentation test,¹⁰⁻¹⁵ debonding test¹⁶ 및 indentation test¹⁷ 등이 있다. 이 방법 중에서 가장 일반적으로 사용되는 방법 중의 하나가 single fiber fragmen-

tation test이다. 이 시험방법의 장점은 시편의 제작이 용이할 뿐만 아니라, 하나의 시편으로 부터 많은 데이터를 얻을 수 있는 것과, 환경에 대한 내구성 시험¹⁸⁻²⁰에도 다른 시험 방법에 비하여 쉽게 적용할 수 있다는 점이다. 하지만 시편의 매트릭스 수지가 투명해야 되는 것과 하나의 시편의 시험시간이 3~4시간 정도로 매우 많이 필요한 결점도 있다.

그리고 fragmentation 시험에서 계면전단강도(τ)를 구하기 위해서는 섬유인장강도(σ_f), 섬유직경(D_f) 및 임계 섬유장(L_c)을 알아야 하며, 다음 식²¹으로 구할 수가 있다.

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

(1)식에서 섬유의 인장강도와 섬유직경은 시험전에 측정하여 사용할 수가 있으며, 실제로 fragmentation 시험에서는 임계 섬유장을 먼저 평가한 후에 계면전단강도를 (1)식으로 계산한다.

이론상으로 fragmentation 시험에서의 최종섬유의 파단길이는 $L_c/2$ 에서 L_c 사이에 분포하므로, Osawa 등²²은 파단된 섬유의 평균길이를 단순평균으로 계산하여 $3L_c/4$ 로 생각하여 임계 섬유장을 섬유의 평균 파단길이의 4/3배로 취급하여 (1)식으로 계산하였다.

그리고 보통 계면전단강도를 구할 경우에는 (1)식에서 섬유의 인장강도는 단섬유의 인장시험에서 측정된 값을 사용할 수 있지만, 환경에 대한 내구성 시험 등은 섬유 자체의 인장강도도 열화되므로 단섬유의 인장시험에서 평가한 인장강도를 사용할 수 없으며, 또한 fragmentation 시편으로 부터 직접 섬유의 인장강도를 측정할 수는 없다.

그래서 Wagner²³⁻²⁵와 Shioya²⁶ 등은 단섬유 fragmentation 시험의 결과로 부터 섬유의 인장강도를 추정하는 새로운 방법을 제안했으며, 이 방법들은 fragmentation의 시험과정에서 얻을 수 있는 각 연신율과 섬유파괴수의 관계를 이용한 것이다.

그러나 그들은 각 연신율에서 섬유파괴수를 측정

할 때에 매트릭스 수지에서 섬유로 응력이 전달되는데 어느 정도 시간이 필요하다는 고분자 매트릭스의 점탄성 문제를 고려하지 않았다. 만약 이런 점탄성 문제까지 고려한다면 fragmentation 시험은 전술한 것보다 훨씬 더 많은 시간을 필요로 하게 된다.

그리고 다섬유 복합재료에 관해서 몇몇 연구자들에 의해서 시험한 결과가 보고되었는데, 그 중에서 Phoenix²⁷ 등은 세가닥의 섬유와 수지의 복합재료의 모델 시편을 제작하여 한가닥의 섬유가 파괴될 때, 그것이 다른 섬유의 파괴위치에 영향을 미치는가를 검토한 결과, 섬유간격이 섬유직경의 2~3배일 때는 크게 영향을 미치지만 10배 이상에서는 거의 영향을 미치지 않는다고 보고했으며, Wagner²⁸ 등은 다섬유와 수지의 복합재료에서 파괴 후의 pull-out된 섬유의 길이를 측정하여 계면전단강도를 구하는 방법에 대해서 보고했다.

그러나 충분한 섬유간격을 고려한 dogbone형의 다섬유 fragmentation 시험에 관한 연구보고 및 fragmentation 시험에서 각 연신율에서 섬유파괴수를 측정할 때에 시간을 고려한 연구 보고는 거의 없다.

그래서 본 연구에서는 섬유로는 유리섬유와 탄소섬유를, 매트릭스로는 우레탄 수지를 사용하여 많은 시험시간을 절약할 수 있는 다섬유 fragmentation 시험의 유용성에 대해서 비교 검토하고, fragmentation 시험 과정에서 각 연신율에 대한 섬유파괴수의 시간 의존성에 관하여 고찰했다.

실 험

재 료. 본 연구에 사용된 섬유는 미처리 E-glass fiber(Owens-Corning)와 미처리 탄소섬유(Hecules AU-4)로, gage length가 20 mm의 단섬유 인장시험에서 30개 정도 측정된 섬유의 평균 인장강도는 각각 2.1 ± 0.22 GPa 과 2.71 ± 0.41 GPa이었다. 시험전 모든 시편의 섬유직경은 광학현미경을 이용하여 측정하였으며, 유리섬유와 탄소

섬유의 평균 섬유직경은 각각 $15.84 \pm 1.27 \mu\text{m}$ 와 $7 \mu\text{m}$ 이었다. 그리고 매트릭스 수지는 polyisocyanurate (Spectrim 364 Dow Chemical Co.)를 사용하였으며, 조성은 isocyanate (Spectrim MM 364-A from Dow Chemical)와 polyol (spectrim MM 364-B from Dow Chemical Co.)로 무게비로 2.4 : 1이었으며, 촉매 (Dabco 33-LV from Air Products and Chemicals, Inc.)는 polyol의 0.3%를 사용하였다.

시험편 성형. 단섬유와 다섬유로 된 fragmentation 시험편은 Drzal에 의해 제안된 방법¹⁰과 비슷하게 성형하였으며, 그 방법은 아래와 같다. 8개의 dogbone형으로 된 금형을 이용하여 실리콘 수지 (GE silicone RTV-664)의 몰드를 성형했다. 그 실리콘 몰드 (silicone mold)에 유리섬유 및 탄소섬유의 단섬유 및 다섬유를 실리콘 몰드의 양단에 $400 \mu\text{m}$ 폭의 sprue slot를 기준으로 걸치고 양면 테이프로 임시 고정시킨 후 양끝에 5분 경화용 에폭시 수지로 고정시켰다.

그리고 준비된 우레탄 수지를 실리콘 몰드에 주입시킨 후에 반응용기 (united McGLL)로 이동시켜 0.55 MPa 의 질소 가스 압력을 가하면서 93°C 에서 30분 동안을 가열 경화했다. 그리고 서서히 실내온도로 냉각시키면서 압력도 대기압으로 낮춘 후, 다시 오븐 (Blue M)에서 150°C 에서 1시간을 후경화 (post curing) 시켜, 두께가 2 mm, 전체길이가 60 mm, 평형부의 길이가 25 mm, 평형

부의 폭이 4 mm인 dogbone형 (Figs. 1, 2 참조)의 시험편을 각 종류별로 16개씩을 제작했다.

그리고 우레탄 수지는 먼저 일정한 양의 polyol에 촉매를 넣어 60초 동안 교반을 시킨 후, 그것과 isocyanate를 섞어서 다시 30초 동안 교반시키어 비이커 등에 적은 양으로 분리시키어 준비했다. 그것은 반응시에 발열 반응이므로 열의 발산의 차이 때문에 100 cc 정도의 많은 양이면 혼합 후에 6분 정도 지나면 경화가 시작되지만, 5cc정도 적은 양이면 30~40분간 지나야 경화가 시작되기 때문이다. 결국 비이커 등을 사용하여 적은 양으로 분리시키는 것은 발열 반응의 시작 시에 열의 발산을 쉽게하여 분위기 온도를 서서히 오르게 하여 경화 시간을 지연시켜 가사시간 (pot life)을 길게하기 위함이다. 마지막으로 실리콘 몰드로 부터 완성된 시험편을 분리시켜 섬유가 직선으로 유지되고 기포 (void)가 없는 유용한 시험편을 각 종류별로 10개씩 정도 선택하였다.

Fragmentation 시험. Fragmentation 시험은 Fig. 1과 같이 시험편에 외력을 가하여 섬유와 수지간의 기계적 성질의 차이로 계면에 전단응력을 발생시키고, 이 전단응력으로 섬유를 파괴시키어 섬유의 파괴수가 포화될 때까지 시험을 계속한 후, 포화상태의 많은 수의 파단된 섬유의 길이분포를 이용하여 섬유와 수지와의 계면전단강도를 구하는 방법이다. 본 연구에서의 fragmentation 시험은 Fig. 2에서와 같이 수동으로 작동되는 소형 인장시

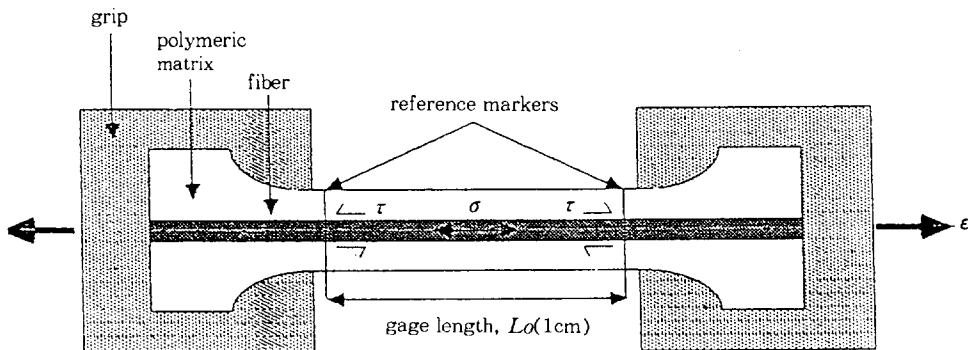


Fig. 1. Basic principles of single fiber fragmentation test.

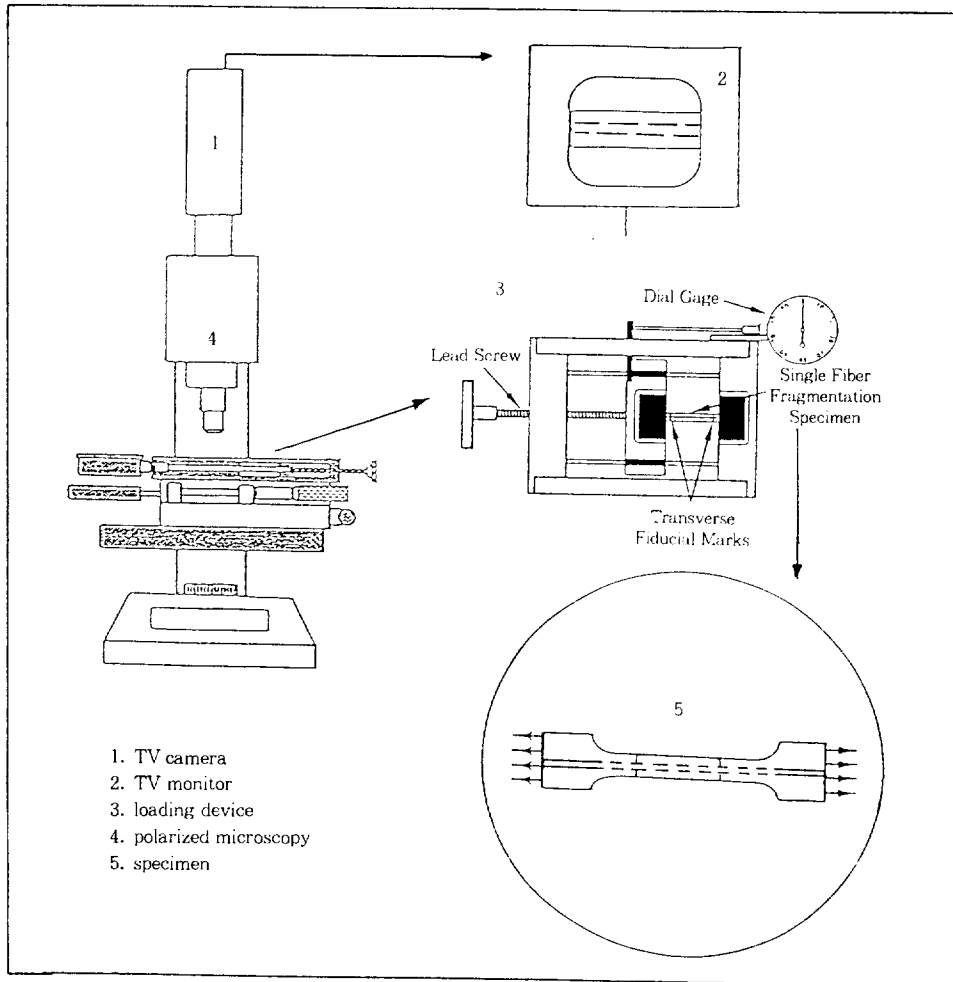


Fig. 2. Schematic of test set-up for the fiber fragmentation test.

험기를 편광현미경에 고정하고, 편광현미경에는 video camera를 부착시켜 모니터를 보면서 행하였으며, 모니터를 이용하여 섬유직경 및 섬유과괴수가 포화된 후의 섬유의 파단 길이 등을 측정했다. 그리고 시험전에 1500 매시의 sand paper를 사용하여 시험편의 평행부분과 chucking 부분 등의 모난 부분을 잘 연마한 후, 매직으로 시험편의 중간부분에 10 mm 정도의 연신율의 측정을 위해 Fig. 1과 같이 유성 매직으로 표점거리의 표시를 한다. 그리고 준비된 dogbone형의 시험편을 소형 인장시험기에 chucking을 하고 dial gage를 zero로 맞춘 후에 소

형 인장시험기를 현미경에 고정시킨다(Fig. 2 참조). 먼저 섬유직경과 표점거리를 정확하게 측정한 후에 dial gage를 참고로 하여 연신율을 증가시킨다. 시험전에 dial gage와 연신율의 실제의 관계를 검토하여 시험할 때에 참고로 했으며, 본 연구에 사용한 소형 인장시험기의 dial gage는 5 눈금이 약 0.3%의 연신율이었다.

본 연구의 fragmentation 시험에서의 시험방법은 먼저 섬유자체의 파단 연신율(탄소섬유는 1%, 유리 섬유는 2%)까지는 한꺼번에 연신을 시키고, 그 후에 3종류의 연신속도로 행하였다. 첫번째는 0.3%

씩의 연신율을 증가시키고, 각 연신율을 증가시킨 다음 10분 후에 섬유파괴수를 세는 방법으로 섬유파괴수가 포화될 때까지 계속하는 것이며, 본 연구에서는 별도의 설명이 없는 것은 모두 이 방법을 사용하였다. 두번째는 0.3% 씩의 연신율을 증가시키고 각 연신율에서 섬유파괴수가 포화될 때까지 기다린 후에 다음 연신을 가하는 방법으로 전체의 섬유파괴수가 포화될 때까지 계속 시험하는 방법으로 점탄성을 고려한 방법이다. 세번째로는 1.2% 씩의 연신율을 증가시키고 즉시 각 연신율에서의 섬유파괴수를 세는 방법으로 섬유파괴수가 포화될 때까지 가장 빨리 실험을 행하는 방법이다. 그리고 위의 방법 모두 각 연신상태에서 시편에 표시된 표점거리를 기준으로 연신율을 측정했으며, 표점거리 사이의 섬유파괴수만 고려하였다.

계면전단강도의 계산. Fragmentation 시험에서 연신율을 증가시킬수록 섬유의 파괴수는 증가하지만 섬유의 파단연신율의 3배 정도에서는 섬유의 파괴수는 포화상태에 도달하게 된다고 보고하였다.¹⁰ 이 때의 파단된 섬유의 길이를 측정하고, 이 파단된 섬유의 길이의 분포를 Fig. 3과 같이 two-parameter Weibull 분포 함수²⁹에 적용시켜서 shape parameter α 와 scale parameter β 를 구하여 다음 식¹⁰을 사용하여 계면전단강도를 구했다.

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

(2)식에서 Γ 는 Gamma함수이며, (2)식은 Drzal이 전술한 (1)식을 수정한 식이다.

Fig. 3은 유리섬유와 우레탄 수지의 fragmentation 시험의 결과를 two-parameter Weibull 분포 함수²⁸에 적용시켜 본 것으로, 실선은 이론곡선이며 ○표시는 실험치를 나타낸 것으로 두 값이 비교적 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 3에서 얻은 α 는 4.22, β 는 31.31이며, 이 두값으로 부터 계산한 계면전단강도는 40.52 MPa이었다.

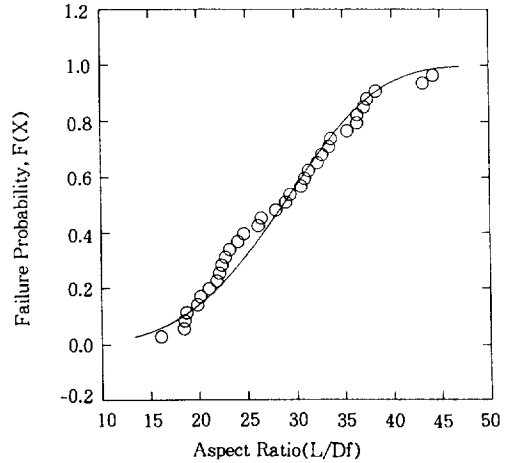


Fig. 3. Failure probability vs. aspect ratio of fragmented fiber at saturation.

그리고 (2)식에서 인장강도 σ_f 는 gage length가 임계 섬유장인 인장강도를 사용해야 되지만, 임계 섬유장의 인장강도는 직접적인 측정이 거의 불가능하므로 보통 외삽법³⁰에 의한 계산치를 사용하고 있다. 하지만 본 연구에서는 gage length 20 mm의 단섬유 인장시험으로 실제로 측정된 인장강도인 2.1 GPa을 사용했다. 그것은 본 연구의 목적 중에 하나가 다섬유 fragmentation 시험의 유용성을 검토하는 것이므로 결과에는 큰 영향이 없을 것으로 생각되기 때문이다.

결과 및 고찰

본 연구에 사용한 우레탄 수지(polyisocyanurate resin)는 대기압 하에서 성형할 때 시편의 바닥과 윗부분에 많은 기포가 발생하여 fragmentation 시험이 가능한 시편을 제작할 수 없었다. 그래서 성형 시에 압력을 가하여 기포를 깨어 제거할 목적으로, 반응용기에서 0.2 MPa의 압력을 가하면서 가열 경화시킨 결과, 시편의 윗부분에 아주 작은 몇개의 기포 외에 모든 기포가 제거된 깨끗한 시험편을 얻을 수 있었으므로, 성형압력을 더 높게 하여서 완전히 기포가 제거된 시편을 제작하려고 시도하였다.

Table 1은 E-glass 섬유와 우레탄 수지에 있어서

Table 1. The Effect of Molding Pressure on the Interfacial Shear Strength in Single E-Glass Fiber/Polyisocyanurate Resin Fragmentation Tests

Pressure(MPa)	0.20	0.55	0.69
τ (MPa)	40.06 ± 2.76	40.47 ± 1.84	41.08 ± 2.42

Table 2. The Effect of Fiber Number on the Interfacial Shear Strength in E-Glass Fiber/Polyisocyanurate Resin Fragmentation Tests

No. of Fibers	1	2	3
τ (MPa)	41.33 ± 3.84	40.50 ± 2.18	56.69 ± 7.21

성형압력이 계면전단강도에 미치는 영향을 보여 주고 있다. 성형압력이 높을수록 계면전단강도는 조금 증가하고 있지만, 이 압력의 범위에서는 성형압력이 계면전단강도에 거의 영향을 못 미치는 것을 알 수 있다. 그리고 성형압력이 0.55 MPa와 0.69 MPa의 것은 완전히 기포가 제거된 좋은 시험편이었다. 그래서 본 연구에서는 성형압력이 0.55 MPa를 모든 시험편의 제작 시에 표준조건으로 하였다.

Table 2는 하나의 시험편에 섬유수를 다르게 한 것의 fragmentation 시험의 결과로, 섬유의 수가 계면전단강도에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 실리콘 몰드의 양단에 섬유의 배열을 위한 sprue slot의 폭은 약 $400\mu\text{m}$ 이었으므로, 두가닥의 섬유만을 배열한 경우는 폭의 양쪽 끝을 기준으로 섬유의 간격을 일정하게 할 수 있었으며, 그 간격은 $400\mu\text{m}$ 였다. 그리고 하나의 시험편에 세가닥의 섬유를 배열한 경우는 두가닥의 섬유를 배열한 경우보다 섬유의 간격은 좁아지며, 그 간격을 조절하는 것은 특별한 장치가 없이는 매우 어려워, 본 연구에서 세가닥 섬유인 경우는 섬유간격을 일정하게 조절하지 못하였다. Table 2에서 섬유의 수가 다른 것은 결국 성형된 시험편에서 섬유사이의 간격이 다른 것이다. Table 2에서 계면전단강도의 크기는 섬유가 단섬유와 두섬유의 경우는 별 차이가 없는 데, 세섬유의 경우에는 단섬유와 두섬유의 경우보다 매우 큰 값이며 표준편차도 더 커짐을 알 수 있다.

Fig. 4는 fragmentation 시험에서 두가닥의 유리

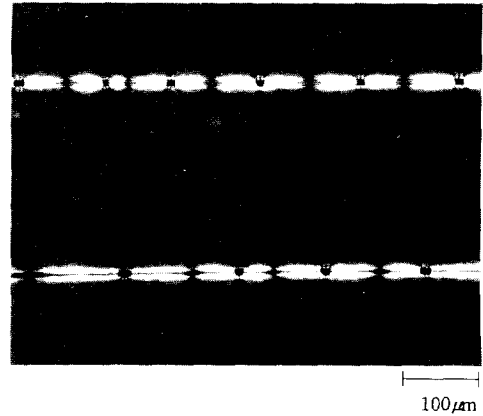


Fig. 4. Polarized transmitted light micrograph of saturated fragmentation test specimen with polyisocyanurate and two E-glass fibers.

섬유를 사용한 경우에 섬유의 파괴수가 포화되었을 때의 대표적인 편광현미경 사진이다. 두섬유의 간격은 $400\mu\text{m}$ 였으며, 섬유와 수지의 계면전단강도는 40.5 MPa이었다. 그리고 그림에서 두섬유의 파괴상에는 아무런 상호관계가 없음을 알 수가 있다.

Fig. 5는 Fig. 4와 마찬가지로 세가닥의 유리섬유를 사용한 경우의 대표적인 편광현미경 사진으로 섬유의 간격은 각각 약 $150\mu\text{m}$ 과 $250\mu\text{m}$ 였다. 작은 간격의 두섬유는 비록 이웃의 섬유와는 파괴위치는 같지 않지만, 간격이 큰 섬유보다도 섬유의 파괴수가 더 많았으며, 계면전단강도는 상부로 부터 각각 63 MPa과 67 MPa이었다. 간격이 큰 하부에 있는 섬유의 파단길이는 Fig. 4의 두 섬유 경우의 파단길이와 거의 같은 것을 알 수가 있으며, 계면전단강도도 그것과 거의 같은 값인 40.07 MPa이었다. 그러므로 세섬유를 가진 시험편의 평균 계면전단강도는 Table 2에서도 나타난 것처럼, 단섬유와 두섬유의 경우보다 크다. 결국 섬유들 사이의 간격이 작아지면 하나의 섬유의 파괴가 다른 섬유의 파괴에 영향을 미칠 수 있는 것을 나타내며, Fig. 5에서 섬유 간격이 $250\mu\text{m}$ 이 되면 각각의 섬유의 파괴위치 및 파괴수는 독립적인 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 4가닥의 유리섬유를 사용한 fragmentation 시험의 모델 시험으로 섬유의 파괴수가 포화되

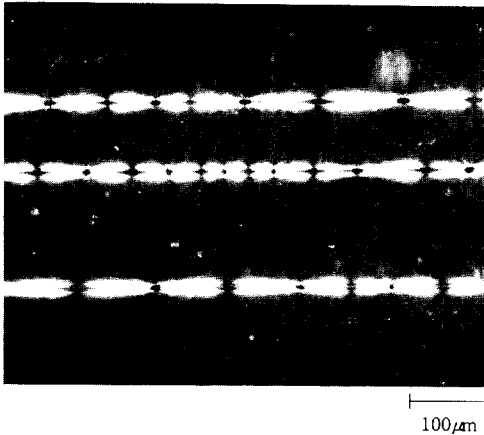


Fig. 5. Polarized transmitted light micrograph of saturated fragmentation test specimen with polyisocyanurate and three E-glass fibers.

있을 때의 편광현미경 사진이다. 사진에서 하부의 인접한 세섬유의 간격은 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 이며 상부의 한가닥의 섬유와는 $190 \mu\text{m}$ 정도로 떨어져 있다. 그리고 인접한 세섬유의 계면전단강도는 32.6 MPa 로 단섬유와 섬유간격이 $400 \mu\text{m}$ 인 두섬유의 경우보다 매우 적은 값이며, 상부의 한가닥 섬유의 계면전단강도는 44.5 MPa 로 전술한 단섬유나 두섬유의 값보다 큰 값을 나타내었다. 그것은 섬유사이의 간격이 $190 \mu\text{m}$ 에서도 한섬유의 파괴가 다른 섬유의 파괴에 영향을 미친다는 것을 의미한다. 이 사진으로 부터 섬유의 간격이 너무 가까우면 한섬유의 파괴가 다른 섬유에 큰 영향을 미치며, 결국 같은 위치의 다른 섬유의 파괴를 유발시키는 것을 알 수 있다. 그리고 사진에서 세가닥의 섬유의 파괴길이는 한가닥의 섬유의 그것보다 매우 크며, 세가닥의 섬유는 마치 한가닥의 큰 직경을 가진 섬유처럼 보인다. 그리고 섬유의 파단길이가 크게 되면 섬유와 수지와의 계면전단강도가 작게 되는 것을 의미하며, 저자의 이전의 연구⁸에서 섬유와 수지가 같은 종류인데도 섬유직경이 클수록 계면전단강도는 작아진 것과 비슷한 결과다. 결국 섬유함유율이 높은 실제의 복합재료에서 이와 유사한 거동을 보일 것이며, 실제 복합재료의 계면전단강도는 fragmentation 시험에서 얻는 계면전단강도보다 훨씬 작을 것으로 예상된다. Fig. 7은

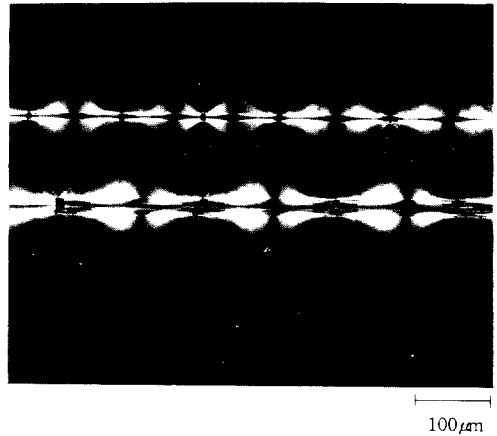


Fig. 6. Polarized transmitted light micrograph of the four E-glass fibers/polyisocyanurate fragmentation test at saturation.

Fig. 6과 같은 시험편의 현미경사진으로 편광을 사용하지 않았다. 사진에서 전술한 섬유간격 차이의 효과를 확실히 알 수가 있을 것이다.

이상을 종합하여 보면, 본 연구에서 사용한 유리섬유와 우레탄 수지와의 fragmentation 시험에서 비록 하나의 시험편에 여러 가닥의 섬유를 사용할지라도 섬유의 간격이 $250 \mu\text{m}$ 이상이 되면, 단섬유를 사용한 것과 같은 결과를 얻을 수 있는 것을 알 수가 있다. 하지만 전술한 바와 같이 세가닥의 섬유의 경우에는 두가닥의 섬유에 비하여 섬유간격 조절의 어려움 등의 시험편의 제작상의 문제와, 비록 섬유간격의 조절이 가능해도 본 연구에 사용된 실리콘 몰드로는 섬유의 간격을 $250 \mu\text{m}$ 으로 할 수가 없으므로, 본 연구에서는 두섬유에 대해서만 중점적으로 고찰하기로 한다.

Table 3은 탄소섬유와 우레탄 수지의 fragmentation 시험에서 단섬유와 두섬유인 경우의 계면전단강도를 비교한 것으로, 그 결과는 매우 비슷한 것임을 알 수가 있다.

Fig. 8은 탄소섬유 및 유리섬유와 우레탄 수지의 fragmentation 시험 후의 편광현미경사진으로, 위의 것은 유리섬유이고 아래의 것은 탄소섬유이며 두 섬유의 간격은 $400 \mu\text{m}$ 이었다. 사진에서 두종류 섬유의 파괴위치는 서로 관계가 없는 것을 알 수 있

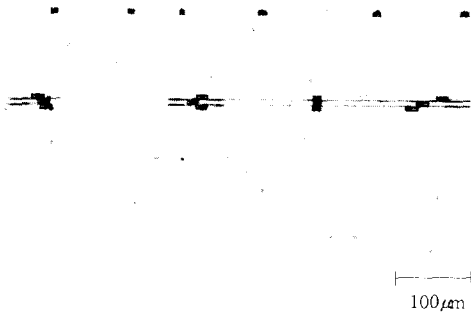


Fig. 7. Micrograph of the four E-glass fibers/polyisocyanurate fragmentation test at saturation.

Table 3. The Comparison of Interfacial Shear Strength in One and Two Carbon Fibers/Polyisocyanurate Resin Fragmentation Tests

No. of Fibers	1	2
τ (MPa)	29.90 ± 3.42	30.81 ± 3.38

며, 또한 두섬유의 fragmentation 시험으로 같은 매트릭스 수지에 서로 다른 섬유의 계면전단강도의 평가를 할 수 있는 것을 나타낸다.

Table 4는 탄소섬유 및 유리섬유와 우레탄 수지와 fragmentation 시험의 결과를 나타낸 것으로, 유리섬유의 계면전단강도가 탄소섬유의 그것보다 큰 것을 알 수 있다. 그리고 각각의 결과는 각각의 단섬유와 두섬유를 사용했을 때의 결과와 거의 같은 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 유리섬유와 우레탄 수지의 fragmentation 시험의 결과로 단섬유와 두섬유인 경우의 연신율에 대한 표준화된 섬유파괴수의 관계를 나타낸 것으로, 단섬유와 두섬유인 경우에 거의 같은 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 탄소섬유와 우레탄 수지와 fragmentation 시험의 결과로 단섬유와 두섬유인 경우의 연신율에 대한 표준화된 섬유파괴수의 관계를 나타낸 것으로, Fig. 9와 마찬가지로 섬유수에 상관없이 거의 같은 경향을 보이고 있다.

Table 4. The Comparison of Interfacial Shear Strength in Carbon and E-Glass Fibers/Polyisocyanurate Resin Fragmentation Tests

Fiber	Carbon	E-glass
τ (MPa)	30.75 ± 1.74	40.97 ± 3.26

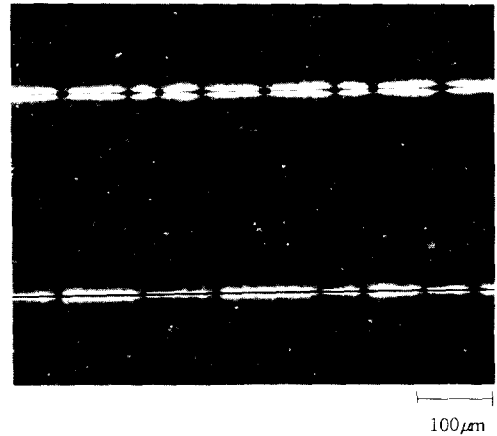


Fig. 8. Polarized transmitted light micrograph of the E-glass and carbon fibers/polyisocyanurate fragmentation test at saturation. Upper ; E-glass fiber, down ; carbon fiber.

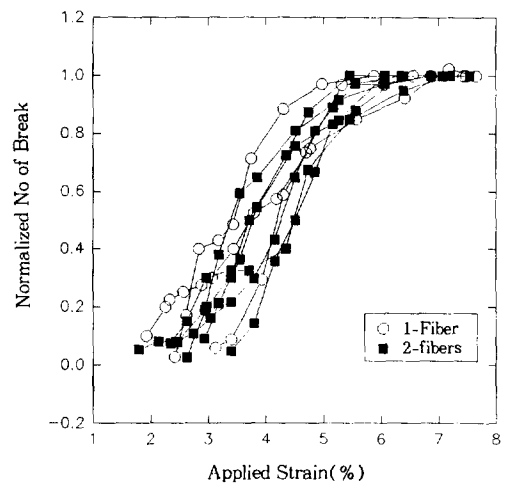


Fig. 9. Plot of the normalized number of fragments as a function of applied strain in one and two E-glass fibers/polyisocyanurate fragmentation test.

Fig. 11은 Table 4와 같이 탄소섬유 및 유리섬유와 우레탄 수지와 fragmentation 시험의 결과로

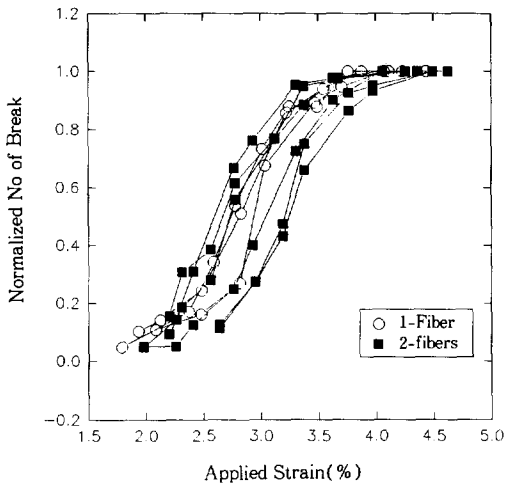


Fig. 10. Plot of the normalized number of fragments as a function of applied strain in one and two carbon fibers/polyisocyanurate fragmentation test.

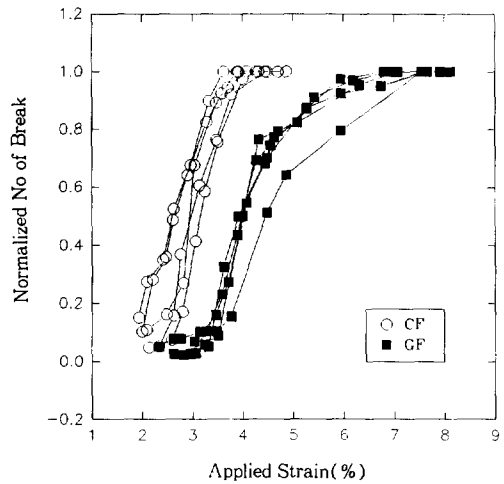


Fig. 11. Plot of the normalized number of fragments as a function of applied strain in carbon and E-glass fibers/polyisocyanurate fragmentation test.

연신율에 대한 표준화된 섬유파괴수를 나타낸 것이다. 유리섬유의 경우는 섬유의 파괴시작의 연신율은 2.2~3.0%이며, 섬유의 파괴수가 포화되었을 때의 연신율은 6.8~0%였다. 그리고 탄소섬유의 경우는 섬유의 파괴시작의 연신율은 1.8~2.1%이고 섬유의 파괴수가 포화되었을 때의 연신율은 4.0~4.5%였다. 탄소섬유는 유리섬유보다 낮은 연신율에서 섬유 파괴수가 포화가 되는 것을 알 수 있다. Fragmentation 시험에서 섬유파괴수가 포화되는 연신율은 매트릭스가 에폭시 수지일 경우는 섬유의 파괴연신율의 3배 정도로 보고되고 있지만, 본 연구의 우레탄 수지일 경우는 4배 정도인 것을 알 수가 있다. 그리고 그림에서 탄소섬유의 경우는 유리섬유와 비교해서 섬유자체의 파괴연신율(탄소섬유는 1%, 유리섬유는 2%)에 비해 섬유의 파괴시작의 연신율이 큰 것은, Table 4에서도 알 수 있듯이 탄소섬유는 유리섬유보다 계면전단강도가 작아 매트릭스 수지로부터 섬유로 응력전달이 유리섬유에 비해서 좋지 않기 때문이라고 사료된다.

Fig. 12는 유리섬유와 우레탄 수지의 fragmentation 시험에서 단섬유와 두섬유의 경우에 각 특정한 연신율에 대한 시간과 섬유파괴수의 관계를 나타낸

것으로, 시간이 증가할수록 섬유의 파괴수가 증가하며 어느정도 시간이 지나면 섬유파괴수는 포화되는 것을 알 수 있으며, 시편의 섬유수(단섬유, 두섬유)에는 관계없이 같은 결과를 보이고 있다. 그리고 비슷한 연신율에서 시작과 포화될 때의 섬유파괴수가 다른 것은 특정한 연신율에 있어서 섬유파괴수는 사용된 시편의 섬유의 인장강도, 탄성율, 계면전단강도, 수지의 점탄성 정도, 연신속도 및 전체의 연신율 크기 등에 영향을 받는다고 생각되기 때문이다. 그림에서 특히 각 연신율에서의 정확한 섬유파괴수를 구하기 위해서는 섬유파괴수의 시간 의존성을 고려해야 됨을 알 수가 있다. 그래서 저자들은 fragmentation 시험으로 내구성 시험을 할 때, 연신율과 섬유파괴수의 관계로 부터 열화된 섬유의 인장강도를 추정하는 것과 같이 각 연신율에서 정확한 섬유파괴수가 요구되는 경우에는, 각 연신율에서 충분한 시간이 지나서 섬유파괴수가 포화되고 난 후에 그 다음단계의 연신율을 증가시키는 시험방법을 제안한다. 이렇게 한다면 fragmentation 시험에서 각 연신율에 대한 정확한 섬유의 파괴수를 구할 수 있을 것이다.

Table 5은 두가닥의 유리섬유와 우레탄 수지의

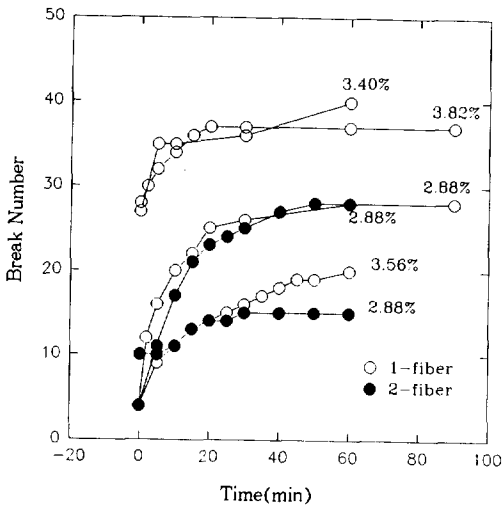


Fig. 12. Plot of the fiber breaks number as a function of time at each strain in one and two E-glass fibers/polyisocyanurate fragmentation test.

Table 5. The Effect of Strain Rate on the Interfacial Shear Strength in Two E-Glass Fibers/Polyisocyanurate Resin Fragmentation Tests

Strain rate	Slow	Fast
τ (MPa)	39.03 ± 2.99	39.97 ± 2.11

fragmentation 시험에서 연신속도가 계면전단강도에 미치는 영향에 대해 나타낸 것이다. Table 5에서 연신속도가 slow는 연신율을 0.3%씩 증가시키고 각 연신율에서 섬유파괴수가 포화된 후에 다음 연신을 증가시키는 방법으로 전술한 두번째의 시험방법이고, fast는 연신율을 1.2%씩 증가시키고 즉시 각 연신율에서의 섬유파괴수를 측정하는 방법으로 전술한 세번째의 시험방법이다. 그 결과, fragmentation 시험에서의 연신속도는 Fig. 12와 같이 각 연신율에서 시간에 의존하는 섬유파괴수에는 지대한 영향을 미치지 않지만, Table 5의 결과로부터 시험시의 연신속도는 계면전단강도의 크기에는 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

결 론

섬유와 수지와와의 계면전단강도의 평가를 위해

fragmentation 시험에서 dogbone형의 한 시편에 다섬유를 이용한 방법의 유용성과, fragmentation의 시험과정에서 각 연신율에서의 섬유파괴수의 시간에 대한 의존성에 대해서 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Fragmentation 시험에서 다섬유를 사용할 때, 섬유의 간격이 너무 가까우면 한섬유의 파괴가 같은 위치의 다른 섬유의 파괴를 유발시키므로, 적어도 섬유의 간격이 $250 \mu\text{m}$ 이상이 필요하다는 결론을 얻었다.

2. 섬유간격이 $400 \mu\text{m}$ 인 두섬유를 사용했을 때의 계면전단강도는 단섬유를 사용했을 때와 거의 같은 결과를 얻었지만, 섬유간격이 $250 \mu\text{m}$ 이하인 세섬유를 사용했을 경우에는 단섬유 또는 두섬유를 사용했을 때보다 매우 큰 값을 얻었다.

3. Fragmentation 시험에서 하나의 시편에 다섬유를 사용하여 여러 가지의 측면에서 검토한 결과, 섬유의 간격이 $400 \mu\text{m}$ 이었던 두섬유 사용의 fragmentation 시험은 유용하다는 결론을 얻었다.

4. 두섬유의 fragmentation 시험은 단섬유에 비하여 많은 시간의 절약, 하나의 수지에 다른 두종류의 섬유의 계면전단강도의 평가 및 섬유의 표면처리 등의 효과를 동시에 평가할 수 있는 장점이 있다.

5. 고분자 수지를 이용한 fragmentation 시험에서 각 연신율에 대한 정확한 섬유파괴수를 구하기 위해서는 섬유파괴수의 시간의존성을 고려해야 된다.

6. Fragmentation 시험에서 본 연구에서 사용한 연신속도는 계면전단강도의 크기에는 거의 영향을 미치지 않았다.

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, *ibid.*, **34**, 35 (1989).
7. C. K. Moon, H. H. Cho, and J. O. Lee, *J. Appl. Polym. Sci.*, **44**, 561 (1992).
8. C. K. Moon, J. O. Lee, and H. H. Cho, *ibid.*, **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, D. Jeulin, and D. Valentin, *Comp. Sci., Tech.*, **48**, 47 (1993).
16. J. O. Outwater and M. C. Murphy, *Modern Plastics*, **47**, 16 (1970).
17. J. F. Mandell, J. H. Chen, and F. J. McGarry, *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).
26. M. Shioya, W. G. McDonough, and D. L. Hunston, in *Proceeding of The Adhesion Society*, 248 (1994).
27. R. Gulino and S. L. Phoenix, *J. Mater. Sci.*, **26**, 3107 (1991).
28. H. D. Wagner and L. W. Steenbakkens, *ibid.*, **24**, 3956 (1989).
29. W. Weibull, *J. Appl. Mech.*, **18**, 293 (1951).
30. E. M. Asloun, M. Nardin, and J. Shultzl, *J. Mater. Sci.*, **24**, 3504 (1989).