

論文

부직포를 이용한 하이브리드 복합재료의 개발

이승환*, 정성균^{**+}, 노구찌히로시^{***}

On the Development of Hybrid Composites with Non-Woven Tissue

Seung-Hwan Lee*, Seong-Kyun Cheong^{**+}, Hiroshi Noguchi^{***}

ABSTRACT

The hybrid composite materials with non-woven tissue (NWT) was developed to improve the mechanical properties of conventional FRP composite materials. The hybrid prepreg with NWT consists of FRP prepreg and NWT prepreg. The NWT prepreg consists of NWT and polymer resin. The NWT has short fibers, discretely distributed with in-plane random orientation fibers.

The purposes of this study of hybrid prepreg with NWT are (i) to increase the interlaminar properties (the fracture toughness and strength), (ii) to improve the mechanical properties and reliability, while maintaining a low cost, (iii) to introduce a tough and strong interlayer at critical positions to be required of strength in the laminate. To accomplish the above purposes, a production technique to decrease voids in NWT layers was proposed in this paper. The interlaminar failure characteristics of laminated composite materials was tremendously improved by hybrid concept with NWT.

초 록

부직포를 이용한 하이브리드 복합재료는 일반적인 섬유강화 적층복합재료의 기계적 특성을 개선하기 위하여 개발되었다. 부직포 하이브리드 프리프레그는 전형적 FRP 프리프레그와 부직포 프리프레그로 이루어져 있다. 부직포 프리프레그는 부직포와 수지의 조합에 의해 만들어진다. 부직포는 단섬유가 평면상에 불규칙적으로 분산되어 배치된 형상이다.

부직포를 이용한 하이브리드 프리프레그의 개발목적은 (i) 적층간의 층간특성(층간파괴인성 및 층간강도)을 향상시키고, (ii) 저비용으로 재료의 기계적 강도에 대한 신뢰성을 개선하며, (iii) 복합적층판에서 강화가 요구되는 층에 인성과 강도를 부여함에 있다. 상기의 목적을 달성하기 위하여 부직포층의 기포를 감소시키기 위한 제조기술을 제안하였다. 그 결과, 부직포를 이용한 하이브리드 개념을 도입함으로써 복합적층판의 층간파괴특성이 크게 개선되었다.

Key Words : 섬유강화 적층복합재료(FRP laminated composites), 하이브리드 프리프레그(hybrid prepreg), 하이브리드 개념(hybrid concept), 제조기술(production technique)

1. 서 론

구조재로서 광범위하게 사용되고 있는 FRP 재료는 하이브리드화에 의해 고성능·다기능을 부가하는 것이 기대되고 있다

[1-8]. 이러한 관점에서 종래의 섬유강화 적층복합재료의 층간 손상(층간분리 및 모재균열 등)에 대한 저항특성을 개선하는 많은 연구가 수행되고 있다. 그 중에서 고인성의 수지 또는 고무입자가 첨가된 에폭시 수지를 모재로한 고인성화, 폴리머

* 특허청 일반기계심사팀 사무관

^{**+} 서울산업대학교 기계공학과 교수 교신저자(E-mail:skjung@snut.ac.kr)^{***} 일본큐슈대학대학원 공학연구원 교수

미드입자를 층간에 넣는 층간강화 등이 검토되었으며[4,5], 또한 고인성 수지필름을 층간에 삽입하는 방법[6,7]이나 휘스커(Whisker)를 층간에 수직으로 분포시켜 층간파괴인성을 증가시키는 연구도 있다[8]. 그러나 이러한 연구들은 성형조건에 대한 곤란성 및 제조비용이 증가한다는 문제점이 있다.

한편, FRP재료의 하이브리드화 중에는 삽입형하이브리드 재료로서, 주재료의 FRP층과 부재료의 FRP층을 결합시키는 방법이 있는데, 그 중에서 주재료층을 전형적인 일방향 FRP 프리프레그로 하고, 부재료층을 부직포 프리프레그(부직포[9]와 수지가 합쳐진 것)로 한 것(「부직포 하이브리드 프리프레그」라 칭함)의 특성에 대하여 저자들은 일련의 연구를 수행하였다[10-16]. 이 부직포 하이브리드 프리프레그의 개발목적은 적층복합재료의 (i) 층간특성(층간파괴인성 및 층간강도)을 향상시키고, (ii) 저비용으로 재료의 기계적 강도에 대한 신뢰성을 개선하며, (iii) 복합적층판에서 강화가 요구되는 층에 인성과 강도를 부여함에 있다.

부직포 하이브리드 프리프레그를 적층하여 제작한 부직포 하이브리드 복합재료의 여러 가지 기계적성질에 대한 연구성과[10-16]에 의하면, 부직포 하이브리드 복합재료는 종래의 복합재료의 응용분야에 적용할 가능성을 제시하였다.

그러나, 부직포 하이브리드 복합재료의 기계적특성은 그 제작방법에 따라 크게 의존하기 때문에 본 연구에서는 그 제작방법과 기계적성질의 관계에 대하여 검토한다.

2. 부직포 하이브리드 복합재료의 개념

부직포는 일반적으로 항공산업, 자동차산업, 해상운송산업, 부식저항이 요구되는 압력용기, 화학설비, 전자회로기관 등의 표면보호 및 외장재에 사용되고 있다. 그 종류로는 폴리에스테르부직포, 유리부직포, 탄소부직포 및 아라미드부직포 등이 있다. 부직포는 단섬유가 평면상에 불규칙적으로 분산되어 배치된 형상이며, 단섬유의 길이는 3mm에서 25mm까지 다양하다. 또한, 단위면적당 무게(FAW: Fiber Aerial Weight)도 1g/m^2 에서 20g/m^2 까지 다양하다[9].

Fig. 1에 주사형전자현미경(Scanning Electron Microscope)으로 관찰한 유리부직포, 탄소부직포, 아라미드부직포를 나타낸다.

Fig. 2에 부직포와 수지를 조합시킨 부직포 프리프레그[11,12]를 나타낸다. 부직포 프리프레그에 사용되는 수지는 FRP 프리프레그에 사용된 수지와 같은 것이 주로 사용되며, 상황에 따라 다른 것을 사용할 수 있다.

Fig. 3에 부직포 프리프레그와 일방향 FRP 프리프레그를 결합한 부직포 하이브리드 프리프레그의 개념[10-12]을 나타낸다. 종래의 연구[4-7]에서는 일방향 FRP 프리프레그에 고인성의 수지층이나 입자층(강성이 낮음)을 층간에 배치하였으나, 본 연구에서는 강성이 높은 단섬유층(부직포 프리프레그)을 층간에 배치한 하이브리드 복합재료에 관한 연구로서 종래의 연구와 구별됨을 특징으로 한다.

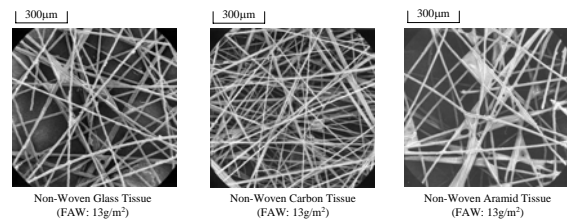


Fig. 1 View of non-woven tissues using a SEM.

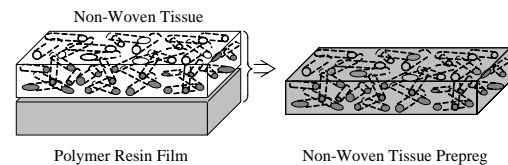


Fig. 2 Schematic of non-woven tissue prepreg.

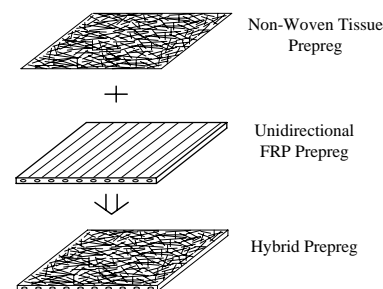


Fig. 3 Concept of hybrid prepreg with non-woven tissue.

3. 하이브리드화에 대한 분류

본 연구에서 저자들이 제안하고 있는 부직포 하이브리드 프리프레그의 범위를 정의하기 위해 Fig. 4에 기능상으로 본 FRP 복합재료의 하이브리드화에 대하여 분류하였다.

- (1) **혼합형(Mixed-type):** Fig. 4(a)에 나타난 것과 같이, 혼합형은 동일한 모재에 2종류 이상의 일방향 섬유(A 재료와 B 재료)를 배열한 것이다. 혼합형의 특징은 초기탄성률이 높아지고 최종 파단 변형률이 낮아지거나, 또는 초기탄성률이 낮아지고 최종 파단 변형률이 높아진다는 것이다[17].
- (2) **삽입형(Interlayer-type):** Fig. 4(b)에 나타난 것과 같이, 삽입형은 일방향 FRP 프리프레그(A 재료와 같은)의 층에 단섬유, 고무입자, 고인성필름 등 각종형태의 재료(B 재료와 같은)를 배치하는 것이다. 삽입형의 특징은 A 재료만으로 구성된 것과 비교해서 층간강도는 높아지고, 층내 또는 면의 강도는 낮아진다는 것이다[4-8].
- (3) **샌드위치형(Sandwich-type):** Fig. 4(c)에 나타난 것과 같이,

샌드위치형은 A 재료로서 등방성의 금속재료(예: 알루미늄합금)와 B 재료로서 일방향 FRP 프리프레그를 적층한 것이다. 샌드위치형의 특징은 A 재료의 특징에 비하여 피로균열전파에 대한 저항을 높일 수는 있으나, 층내강도는 낮아진다는 것이다[1-3].

본 연구의 부직포 하이브리드 복합재료는 외관상으로는 샌드위치형으로 보이지만, 하이브리드화라는 기능적 특성의 관점에서 볼 때, 삽입형으로 분류하는 것이 바람직하다.

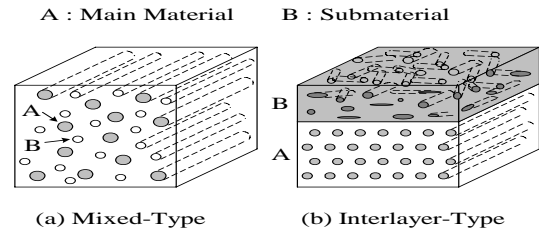


Fig. 4 Assortment of hybrid composite materials.

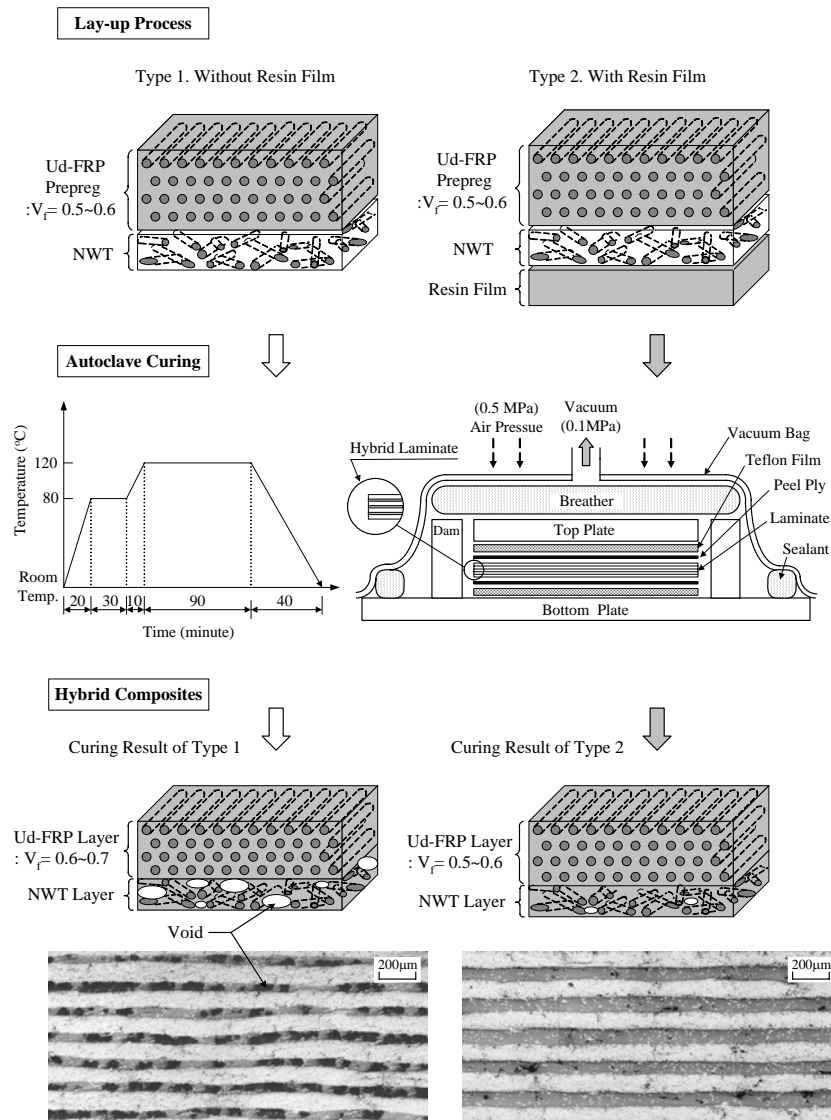


Fig. 5 Process for the fabrication of hybrid composites with NWT.

4. 부직포 하이브리드 복합재료의 제작조건

부직포 하이브리드 복합재료의 제작상의 특징으로는 다음의 2가지가 있다. (i) 부직포와 수지는 FRP 프리프레그에 비해 저가이다. (ii) 성형장치, 성형조건 및 제작과정은 종래의 FRP 복합재료와 같으므로 새로운 장비는 필요치 않다.

Fig. 5에 부직포 하이브리드 복합재료의 성형과정을 나타낸다. Fig. 5의 Type 1은 일방향 FRP 프리프레그와 부직포만을 사용하여 성형한 경우(부직포 하이브리드 복합재료의 개발 초기의 것[18]이 이것에 해당한다)이다. 여기서, 일방향 FRP 프리프레그는 고강도용 CFRP 프리프레그(USN125 series, SK-Chemicals)로서 섬유함유율(V_f)은 약 50~60%이다. 성형전의 부직포는 단섬유만으로 구성되어 있으며, 단섬유들 사이에는 공간이 존재하므로 오토클레이브(Autoclave)내의 고압, 고온에 의해 대부분의 일방향 FRP 프리프레그의 수지는 부직포층의 공간으로 이동하면서 성형된다. 이렇게 성형된 복합재료의 일방향 FRP층의 섬유함유율은 약 60~70%로 높아지며 [19], 부직포층은 수지가 흘러들어오는 것에 의해 일방향 FRP층과 접착된다. 이 때, 성형전의 부직포층내(단섬유들 사이의 공간)로 이동한 일방향 FRP 프리프레그의 수지의 양이 충분하지 못하여 Fig. 5의 Type 1의 성형결과와 같이 부직포층에 기포(Void)가 존재한다.

Fig. 5의 Type 2는 Type 1과 성형조건(Fig. 5 참조)이 같으며 일방향 FRP 프리프레그와 부직포 프리프레그를 사용하여 (Fig. 3의 부직포 하이브리드 프리프레그가 이것에 해당한다) 성형한 경우이다. 그 성형결과 부직포층의 기포는 현저히 감소하였다.

5. 부직포 하이브리드 복합재료의 인장특성

제4장에서 서술한 Type 1의 하이브리드 복합재료에 대해 기포의 영향은 어떠한 기계적 성질을 고려하느냐에 따라 달라진다. Type 2의 하이브리드 복합재료는 종래의 CFRP 복합재료에 비해, 층간파괴인성치(Mode II)는 균열의 위치에 따라 약 3배 증가하였으며[11,12], 정적인장 및 피로강도에 대한 분산의 정도는 안정적이었다[13,14]. 또한, 저에너지 충격에 따른 층간분리면적은 약 40~50% 감소하였으며[15], 저에너지 충격 손상 후의 잔류압축피로강도는 증가하였다[16]. 특히, 인장특성은 재료내부의 기포의 존재 유무에 따라 크게 변화할 것으로 예측된다.

그러므로 본 연구에서는 표준시험방법[20]에 따라 Type 1과 Type 2로 제작된 하이브리드 복합재료에 대하여 정적인장시험을 수행하였다. 또한, Type 1과 Type 2의 재료간 강도의 분산의 정도를 비교하기 위하여 2-parameter 웨이블 확률치를 사용하였다. Fig. 6에 인장시험편의 형상을 나타낸다. Fig. 7과 표 1에 탄소부직포 프리프레그(수지는 에폭시)를 20장 적층하여

Unit: mm

| Specimen | Width (W) | Length (L) | Specimen Thickness (T) | | |
|-------------------------|-----------|------------|------------------------|-------------------|--------|
| | | | CFRP | Hybrid Composites | |
| | | | | Type 1 | Type 2 |
| Non-woven carbon tissue | 25 | 230 | 1.10 | | |
| Longitudinal | 15 | 230 | 0.84 | 1.15 | 1.20 |
| Transverse | 25 | 200 | 1.30 | 1.15 | 1.90 |
| Angle-Ply | 25 | 230 | 1.30 | 1.80 | 1.85 |

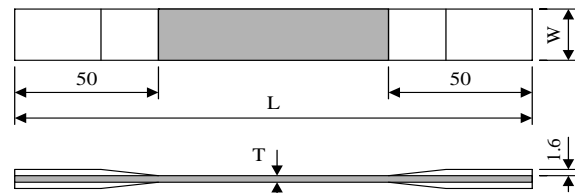


Fig. 6 Geometry of tensile test specimens.

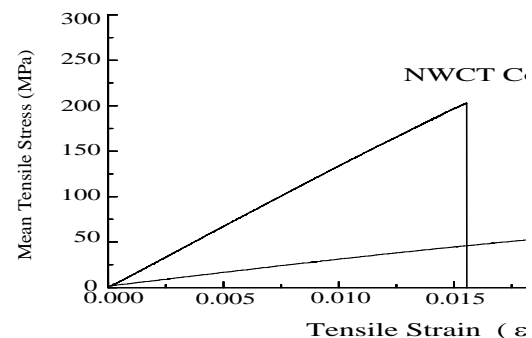


Fig. 7 Mean tensile stress-strain curves of NWCT composites and Epoxy resin.

제작한 탄소부직포 복합재료와 에폭시 수지의 기계적성질을 나타낸다. 인장시험에 의해 얻어진 인장강도의 분포($\sigma_{1,2,x}$: 여기서 1, 2, x는 각각 섬유방향, 섬유수직방향, $\pm 45^\circ$ 도앵글방향을 의미한다)는 식(1)에 의해 나타낸다.

$$F = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma_{1,2,x}}{\eta} \right)^m \right\} \quad (1)$$

여기서, m 은 형상계수(shape parameter), η 는 척도계수(scale parameter)이다. 원래 웨이블 분포[21]는 3개의 파라메타를 필요로 하지만, 본 연구에서는 Type 1과 Type 2의 재료간 강도의 분산의 정도를 비교하기 위하여 위치계수(position parameter)를 0으로 했다.

Table 1 Mechanical properties of epoxy resin and non-woven carbon tissue(FAW: 12g/m²) composites

| Tensile Property | Epoxy Resin | NWCT Composites |
|--------------------------------------|-------------|-----------------|
| Mean Young's Modulus E (GPa) | 3.2 | 14.0 |
| Mean Tensile Strength σ (MPa) | 80 | 215 |
| Poisson's Ratio ν_{12} | 0.43 | 0.41 |
| Fiber Volume Fraction V_f (%) | - | 11 |

5.1 섬유방향

Fig. 8과 표 2에 CFRP 복합재료($V_f \approx 65\%$)와 Type 1 및 Type 2 하이브리드 복합재료의 섬유방향에 대한 평균적인 응력-변형률곡선과 인장시험결과를 나타낸다. 하이브리드 복합재료의 탄성계수와 강도는 CFRP 복합재료보다 감소하였다. 그것은 표 1에 나타난 것과 같이 하이브리드 복합재료의 부직포층 탄성계수($E=14\text{GPa}$)와 강도($\sigma=215\text{MPa}$)가 CFRP 복합재료의($E_1=146\text{GPa}$, $\sigma_1=2615\text{MPa}$)보다 낮기 때문이다. 그리고, Type 1과 Type 2 하이브리드 복합재료를 비교하면, Type 1의 탄성계수는 Type 2의 탄성계수보다 높다. 그 이유는 Type 1에 대해서는 CFRP 프리프레그의 수지 일부가 부직포층내의 공간으로 이동하는 것에 의해 CFRP층의 섬유함유율[19]이 높아지기 때문이다($V_f \approx 70\%$).

한편, Type 1의 인장강도는 Type 2보다 낮다. 그 이유는 Fig. 5의 Type 1의 성형결과와 같이 부직포층에 존재하는 기포에 의해 응력집중이 발생하고 그것으로부터 부직포층에 모재균열이 발생하고 전파되어 국부적으로 CFRP층내 섬유다발의 조기파단을 유발시키는 것으로 보인다. 더욱이 부직포층에 존재하는 기포에 의해 CFRP층과 부직포층의 층간 접착력이 저하되는 것도 하나의 원인으로 보인다.

Fig. 9는 웨이블 확률지에 섬유방향의 인장강도를 나타낸 것이다. 여기서, 하이브리드 복합재료의 강도에 대한 분산의 정도는 하이브리드 효과[13]에 의해 CFRP 복합재료보다 안정적이었으며, Type 1과 Type 2는 비슷하였다.

5.2 섬유수직방향

Fig. 10과 표 3에 섬유수직방향의 CFRP 복합재료와 Type 1 및 Type 2 하이브리드 복합재료에 대한 평균적인 응력-변형률곡선과 인장시험결과를 나타낸다. 여기서, Type 1의 탄성계수와 인장강도는 모두 Type 2보다 낮다.

그것은 Type 1의 CFRP 프리프레그 수지가 부직포층으로 이동하는 것에 의해 CFRP층의 섬유함유율이 높아지지만, 부직포층의 탄성계수는 부직포층에 존재하는 기포에 의해 낮아지기 때문이다. 더욱이 부직포층의 기포에 의해 응력집중이

Table 2 Results of longitudinal tensile tests.

| Property | CFRP | Hybrid Composites | |
|--|------|-------------------|--------|
| | | Type 1 | Type 2 |
| Mean Young's Modulus E_1 (GPa) | 146 | 116 | 107 |
| Mean Tensile Strength σ_1 (MPa) | 2615 | 1625 | 1790 |

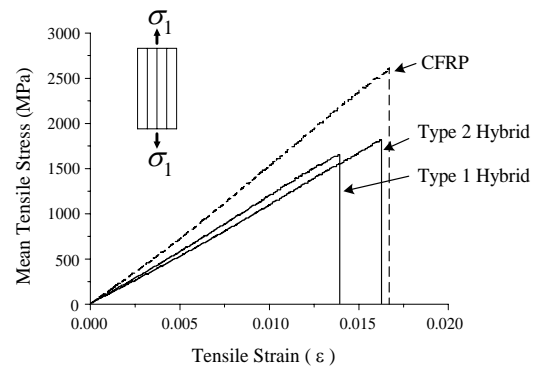


Fig. 8 Mean longitudinal tensile stress-strain curves.

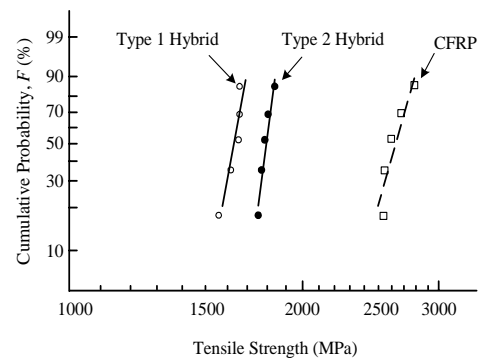


Fig. 9 Longitudinal tensile strengths on Weibull-probability paper.

발생하여 Type 1의 강도는 Type 2보다 낮아졌다고 사려된다. 또한, Type 2의 탄성계수와 강도는 CFRP보다 높다. 그 이유는 부직포의 탄성계수와 인장강도가 섬유수직방향의 CFRP 복합재료보다 높은 것과 복합법칙에서 고려되지 않은 파괴프로세스에 대한 복잡한 현상(부직포층에 의해 CFRP층의 모재균열이 억제되고 부직포층내의 단섬유에 의해 가교효과 등이 발생: 부록참조)이 발생하여 CFRP층을 보강함으로써 파괴변형률이 커지고, 파괴강도의 분산정도가 작아 안정적이며 아울러 파단 직전까지 강성이 유지된다[13].

Fig. 11은 웨이블 확률지에 섬유수직방향의 인장강도를 나타낸 것이다. 여기서, CFRP 복합재료, Type 1 및 Type 2 하이브리드 복합재료의 강도에 대한 분산정도는 모두 비슷하였다.

Table 3 Results of transverse tensile tests

| Property | CFRP | Hybrid Composites | |
|--|------|-------------------|--------|
| | | Type 1 | Type 2 |
| Mean Young's Modulus E_2 (GPa) | 9.4 | 9.5 | 11.2 |
| Mean Tensile Strength σ_2 (MPa) | 71 | 66 | 96 |

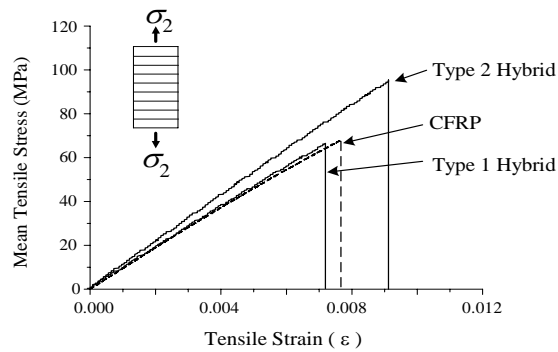


Fig. 10 Mean transverse tensile stress-strain curves.

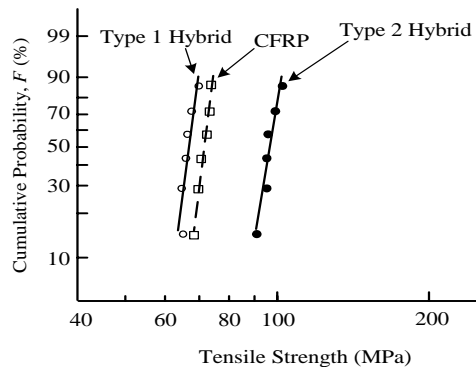


Fig. 11 Transverse tensile strengths on Weibull-probability paper.

5.3 ±45도 앵글방향

Fig. 12과 표 4에 ±45도 앵글방향의 CFRP 복합재료와 Type 1 및 Type 2 하이브리드 복합재료에 대한 평균적인 응력-변형률곡선과 인장시험결과를 나타낸다. 여기서, CFRP, Type 1 및 Type 2의 탄성계수는 거의 비슷하였으며, Type 1 및 Type 2의 인장강도는 CFRP보다 낮았다. 그러나, 하이브리드 복합재료는 인장변형률(ϵ)이 약 1.6%까지는 부직포에 의해 CFRP보다 탄성계수와 인장강도가 증가하였으며, 인장변형률(ϵ)이 약 1.6% 이후에는 부직포가 국부적으로 파괴되면서(Fig. 7 참조) 인장강도는 저하하였다. 특히, Type 1 하이브리드 복합재료의 인장강도는 부직포층에 존재하는 기포에 의해(모재균열의 발생과 전파 등) Type 2 하이브리드 복합재료보다 낮았다.

Table 4 Results of ±45-degree angle-ply tensile tests

| Property | CFRP | Hybrid Composites | |
|--|------|-------------------|--------|
| | | Type 1 | Type 2 |
| Mean Young's Modulus E_x (GPa) | 17.5 | 16.5 | 17.0 |
| Mean Tensile Strength σ_x (MPa) | 231 | 158 | 184 |

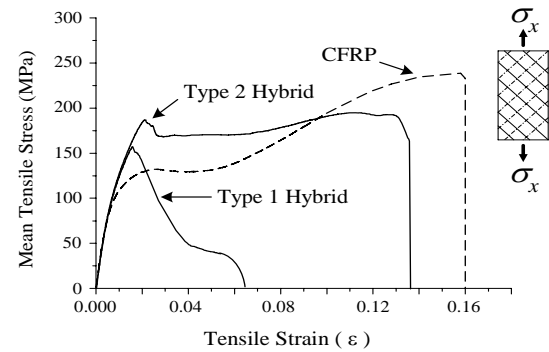


Fig. 12 Mean ±45-degree angle-ply tensile stress-strain curves.

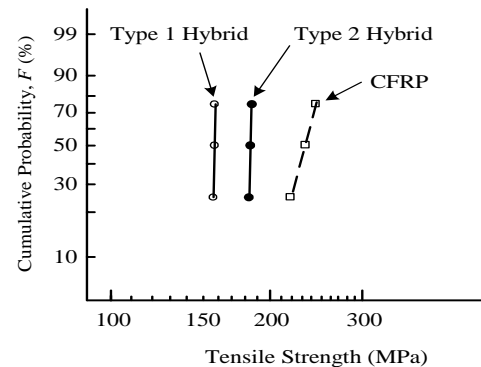


Fig. 13 ±45-degree angle-ply tensile strengths on Weibull-probability paper.

Fig. 13은 웨이블 확률지에 ±45도 앵글방향의 인장강도를 나타낸 것이다. 여기서, Type 1 및 Type 2 하이브리드 복합재료의 강도에 대한 분산의 정도는 CFRP 복합재료보다 안정적이다. 그 이유는 Type 1 및 Type 2 하이브리드 복합재료의 최대인장강도에서 일어나는 파괴현상에 연관된다. 즉, 하이브리드 복합재료의 최대인장강도는 부직포층의 파괴변형률에 의존하기 때문이다. 그리고 Type 2 하이브리드 복합재료는 인장변형률이 약 1.6%에서 부직포층에 국부적인 파괴가 일어나지만 중간강도는 계속 유지되다가 어느 시점(Fig. 12에서 $\epsilon_{(Type 1)} =$ 약 1.7%, $\epsilon_{(Type 2)} =$ 약 2.1%)에서 중간강도의 저하로 인장강도가 저하된다. 이와 같은 파괴 프로세스에 의해 하이브리드 복합재료의 인장강도에 대한 분산의 정도가 작아진다고 사려된다.

6. 결 론

종래의 섬유강화 복합재료의 기계적 특성을 개선하기 위하여 부직포를 이용한 하이브리드 복합재료가 개발되었다. 부직포 하이브리드 복합재료의 기계적 성질 중에서도 제조결합이 현저한 영향을 미치는 정적인장강도특성에 대하여 실험적·통계적 방법으로 검토하였으며 그 결과를 정리하면,

- (1) 섬유방향에 대하여, 하이브리드 복합재료의 탄성계수와 인장강도는 CFRP 복합재료보다 낮았다. Type 1 하이브리드 복합재료(수지가 없는 것)의 탄성계수는 Type 2 하이브리드 복합재료(수지가 있는 것)보다 높았지만, 부직포층에 존재하는 기포에 의해 인장강도는 낮았다.
- (2) 섬유수직방향에 대하여, Type 2 하이브리드 복합재료의 탄성계수와 인장강도는 CFRP 복합재료보다 높았다. Type 1 하이브리드 복합재료의 탄성계수는 CFRP 복합재료와 비슷하였으며, 인장강도는 부직포층의 기포에 의해 낮았다.
- (3) $\pm 45^\circ$ 도 앵글방향에 대하여, Type 1과 Type 2 하이브리드 복합재료의 탄성계수는 CFRP 복합재료와 비슷하였으며, 인장강도는 낮았다. 그러나, 인장강도에 대한 분산의 정도가 작아 안정적이었다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 제안된 부직포 프리프레그와 하이브리드 프리프레그를 이용한 하이브리드 복합재료의 제조기술에 대하여 그 유효성을 검토하였으며, 종래의 복합재료의 응용분야에 기여할 수 있는 가능성을 제시한다.

후 기

본 연구에 많은 조언과 협조를 아끼지 않으신 (주)SK-Chemical의 임승규 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) R. Marissen, "Flight Simulation Behaviour of Aramid Reinforced Aluminum Laminates (ARALL)", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, 1984, pp. 261-277.
- 2) R. O. Ritchie, W. Yu and R. J. Bucci, "Fatigue Crack Propagation in ARALL Laminates: Measurement of the Effect of Crack-Tip Shielding from Crack Bridging," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 32, 1989, pp. 361-377.
- 3) M. M. Stevanovic and T. B. Stecenko, "Mechanical Behaviour of Carbon and Glass Hybrid Fiber Reinforced Polyester Composites," *Journal of Material Science*, Vol. 27, 1992, pp. 941-946.
- 4) J. K. Kim, C. Baillie, J. Poh and Y. W. Mai, "Fracture Toughness of CFRP with Modified Epoxy Resin Materials," *Composites Science Technology*, Vol. 43, 1992, pp. 283-297.
- 5) N. Odagiri, H. Kishi and M. Yamashita, "Development of Torayca Prepreg P2302 Carbon Fiber Reinforced Plastic for Aircraft Primary Structural Materials," *Advanced Composite Materials (in Japan)*, Vol. 5, 1996, pp. 249-252.
- 6) F. Ozdil and L. A. Carlsson, "Mode I Interlaminar Fracture of Interleaved Graphite/Epoxy," *Journal of Material Science*, Vol. 26, 1992, pp. 432-459.
- 7) O. Ishai, H. Rosenthal, N. Sela and E. Drukker, "Effect of Selective Adhesive Interleaving on Interlaminar Fracture Toughness of Graphite/Epoxy Composite Laminates," *Composites (A)*, Vol. 19, 1988, pp. 49-54.
- 8) S. Yamashita, H. Hatta, T. Takei and T. Sugano, "Interlaminar Reinforcement of Laminated Composites by Addition of Orientated Whiskers in the Matrix," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, 1992, pp. 1254-1268.
- 9) SK-Chemicals Co. Ltd. in Korea, "Document of Non-Woven Tissue," 1996.
- 10) S. H. Lee and H. Noguchi, "Shear Characteristics of Hybrid Composites with Non-Woven Carbon Tissue," *JSME International Journal (A)*, Vol. 44, 2001, pp. 535-541.
- 11) S. H. Lee, H. Noguchi, Y. B. Kim and S. K. Cheong, "Effect of Interleaved Non-Woven Carbon Tissue on Interlaminar Fracture Toughness of Laminated Composites: Part I-Mode II," *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, 2002, pp. 2153-2168.
- 12) S. H. Lee, H. Noguchi, Y. B. Kim and S. K. Cheong, "Effect of Interleaved Non-Woven Carbon Tissue on Interlaminar Fracture Toughness of Laminated Composites: Part II-Mode I," *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, 2002, pp. 2169-2181.
- 13) S. H. Lee, H. Noguchi and S. K. Cheong, "Static Behavior Characteristics of Hybrid Composites with Non-Woven Carbon Tissue," *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, 2003, pp. 233-252.
- 14) S. H. Lee, H. Noguchi and S. K. Cheong, "Fatigue Behavior Characteristics of Hybrid Composites with Non-Woven Carbon Tissue," *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, 2003, pp. 253-268.
- 15) S. H. Lee, Y. Aono, H. Noguchi and S. K. Cheong, "Damage Mechanism of Hybrid Composites with Non-Woven Carbon Tissue Subjected to Quasi-Static

- Indentation Loads,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, 2003, pp. 333-349.
- 16) S. H. Lee, Y. Aono, H. Noguchi and S. K. Cheong, “Residual Compressive Failure Characteristics of Hybrid Composites with Non-Woven Carbon Tissue after Indentation Damage,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 38, 2004, pp. 1461-1477.
- 17) P. W. Manders and M. G. Bader, “The Strength of Hybrid Glass/Carbon Fiber Composites: Part 1 Failure Strain Enhancement and Failure Mode,” *Journal of Material Science*, Vol. 16, 1981, pp. 2233-2245.
- 18) S. K. Cheong, S. H. Lee and S. G. Lim, “A Study on the Material Properties of Carbon Fiber Reinforced Composite Laminates with Non-Woven Carbon Mat,” The First Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-1), Japan, 1998, pp. 420.1-420.4.
- 19) P. Compston and P. Y. B. Jar, “Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Glass-Fibre/Vinyl Ester: Effect of Global Fibre Volume Fraction,” The First Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-1), Japan, 1998, pp. 710.1-710.4.
- 20) ASTM D3039-95, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, 1995.
- 21) W. A. Weibull, “Statistical Distribution Function of Wide Applicability,” *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 18, 1958, pp. 293-310.

부 록

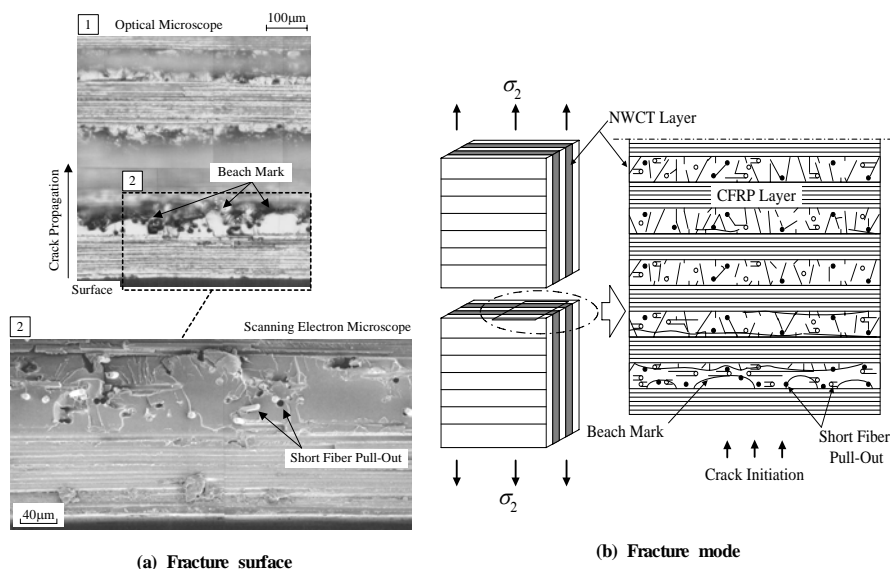


Fig. A Fracture process of the transverse Type 2 hybrid specimen under tensile test.