



## 유리와 탄소섬유로 제작된 하이브리드 FRP 로드 의 인장특성에 관한 실험연구

유영준<sup>1)\*</sup>·박지선<sup>2)</sup>·박영환<sup>1)</sup>·김궁환<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>한국건설기술연구원 구조연구부 <sup>2)</sup>한국건설기술연구원 건축연구부

(2005년 11월 7일 원고접수, 2006년 3월 30일 심사완료)

### Tensile Properties of Hybrid FRP Rods with Glass and Carbon Fibers

Young-Jun You<sup>1)\*</sup>, Ji-Sun Park<sup>2)</sup>, Young-Hwan Park<sup>1)</sup>, and Keung-Hwan Kim<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Structure Research Dept., Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

<sup>2)</sup>Building Research Dept., Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

(Received September 7, 2005, Accepted March 30, 2006)

#### ABSTRACT

Recently, Fiber Reinforced Polymers(FRP) has been emerged as an alternative material to solve the corrosion of steel reinforcement in reinforced concrete structures. FRP exhibits higher specific strength and lower weight compared to steel reinforcement. Moreover, good resistance to corrosion of the FRP may be useful in aggressive environments causing deterioration such as chloride environment. However, causes for higher initial cost of FRP than that of steel, little information on the long-term behavior of FRP, and brittle failure make the efforts to apply FRP in civil structures slow. Glass fiber among the fibers used to manufacture FRP can be seen as the most beneficial material with regard to initial costs. But its low elastic modulus, which attains barely a quarter of steel, may thus lead to excessive deflections when used as reinforcement for flexural members. This research was carried out on the tensile properties of hybrid rods made with glass and carbon fibers to improve those of FRP rod made with glass fiber. Parameters were resin type and the arrangement of glass and carbon fibers. The tensile properties of hybrid rods were compared with those of rods manufactured with only glass or carbon fibers. The results indicated that the tensile properties of hybrid rod were good when the carbon fiber was arranged in the core.

**Keywords** : hybrid, carbon fiber, glass fiber, FRP, tensile strength

### 1. 서 론

철근의 부식은 철근 콘크리트(이하 RC) 구조물의 수명을 단축시키는 원인 중 한 가지로서 공용기간 중에 많은 유지관리비용을 발생시키고 있다. 철근의 부식은 RC 구조물의 구조문제가 아닌 재료문제가기 때문에 사용재료가 바뀌지 않는 한 이 문제를 극복하기는 어렵다. 따라서 필요한 경우에 동일한 중량을 갖는 철근에 비하여 고강도이며 내부식성이 뛰어난 것으로 알려져 있는 섬유복합재료(Fiber Reinforced Polymers, 이하 FRP)가 철근의 효과적인 대체재로 제안되고 있다<sup>1,2)</sup>. 현재 해외에서 FRP를 보강근 또는 구조재료로 활용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 국내에서도 철근 대체재로서 콘크리트 구조물에 적용할 수 있는 FRP 보강근의 개발 연구가 진행 중에 있다<sup>3)</sup>.

FRP로 제작된 보강근은 동일 중량의 철근에 비해 높은 강도를 가지기 때문에 동일한 보강비를 적용할 경우 더 큰 휨

이나 인장 하중을 지지할 수 있는 단면을 설계할 수 있으며, 내부식성이 뛰어나 철근 부식을 발생시키는 염화물 등에 의해 구조물의 열화가 우려되는 환경에 유용하다.

이러한 장점에도 불구하고 FRP를 토목 구조물에 적용하려는 노력은 더디게 진행되고 있으며, 콘크리트 보강근의 경우에는 더욱 더 그러하다<sup>4)</sup>. 그 원인으로는 FRP가 강재에 비해 고가인 점과 항복거동을 보이는 강재와는 달리 취성파괴를 일으키는 재료특성 문제를 들 수 있다.

본 연구는 RC 구조물에 적용할 수 있는 FRP 보강근 개발 연구과제의 일환으로 유리나 탄소섬유로만 구성된 FRP 보강근의 단점을 상호 보완하기 위하여 두 종류 이상의 섬유로 FRP 로드(Rod)를 구성할 때 나타나는 하이브리드 효과를 관찰하고 섬유배치에 따른 인장성능의 개선 정도를 살펴보는데 그 목적이 있다.

FRP는 주로 섬유와 수지로 구성되며, 섬유는 일반적으로 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드섬유를 사용하고 있다. 이들 중 탄소섬유는 인장강도가 가장 크고 강재와 유사한 탄성계수를 가지고 있어서 구조적 관점에서 가장 유리한 재

\* Corresponding author

E-mail : yjyou@kict.re.kr

©2006 by Korea Concrete Institute

료이지만 파괴변형률이 상대적으로 작고, 가격이 유리섬유에 비해 최고 10배 정도로 고가인 단점이 있다. FRP 보강근을 철근 대체재로 사용하기 위한 필수조건 중 한 가지는 경제성이기 때문에 철근에 상응한 성능을 발휘할 수 있다면 초기비용 면에서는 유리섬유가 유리하다고 할 수 있다. 그러나 유리섬유는 탄성계수가 강재에 비해 1/4 정도 밖에 되지 않아 휨부재에 적용할 경우 과도한 처짐 문제가 발생할 수 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 경제성 및 우수한 인장특성을 가진 FRP 로드를 개발하고자 유리섬유로 제작된 FRP 로드와 탄소섬유를 혼합하여 인장특성을 개선하고자 하였다.

FRP 로드 제작에 사용된 수지는 비닐에스터와 불포화 폴리에스터 수지이며, 섬유배치는 탄소섬유를 ① 중앙에 집중 ② 외피에 위치 ③ 단면 내 산포 등 3가지 방법이 적용되었다. 실험결과와 비교를 위해 유리 혹은 탄소섬유로만 구성된 FRP 로드도 제작하였다. 각 변수에 대해 4개씩 총 40개의 시편을 제작하여 인장특성을 비교하였다. 섬유의 혼합 방법에는 여러 가지가 있었으나 본 연구에서는 일차적으로 섬유의 배합비율은 고정시키고 로드의 단면 내에 유리섬유와 탄소섬유를 배치시키는 방법에 초점을 맞추어 실험을 실시하였다.

## 2. 연구동향

일반적으로 '하이브리드'는 서로 다른 두 가지 이상의 재료를 혼합하여 하나의 재료로 만드는 것을 뜻하며, 두 가지 이상의 섬유를 포함하고 있는 복합체를 보통 '하이브리드 복합체(hybrid composites)'라고 한다. 이렇듯 하이브리드화시키는 목적은 각 구성물의 장점만을 취하는 새로운 재료를 만들기 위해서이다.

'하이브리드 효과(hybrid effect)'는 식 (1)과 같은 '복합법칙(rule of mixture)'으로 부터 얻는 어떤 성질의 긍정적인 효과를 의미하며, 일방향으로 섬유가 강화된 섬유 복합체에 있어서는 하중이 섬유 배열방향과 평행하게 작용할 경우 하이브리드로 제작된 섬유 복합체의 파괴변형률이 구성재료 중 연신율이 작은 재료의 극한변형률보다 커지는 것을 의미한다<sup>3)</sup>.

섬유가 일방향으로 강화된 하이브리드 복합체의 탄성계수  $E_H$ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$E_H = \sum_{i=1}^n E_i V_i \quad (1)$$

여기서,  $E_i$ 와  $V_i$ 는 복합체를 구성하는  $i$ 번째 구성재료의 탄성계수와 체적률(volume fraction)이고,  $V_i$ 의 전체 합은 1이다.

일방향 복합체를 구성하고 있는 다수의 구성체들에 균등

한 변형률이 발생된다면 축방향 인장강도는 연신율이 가장 작은 구성체의 극한변형률로 계산할 수 있다. 연신율이 가장 작은 섬유가 파괴될 때 하이브리드 복합체에 작용하는 응력  $\sigma_H^{ult}$ 은 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\sigma_H^{ult} = \epsilon_f^{ult} E_H \quad (2)$$

여기서,  $\epsilon_f^{ult}$ 는 연신율이 가장 작은 섬유의 극한변형률로 보통 수지가 함침된 단섬유에 대한 인장실험으로부터 얻을 수 있다.

Kretsis<sup>5)</sup>는 연신율이 작은 섬유의 비율이 작고 집중이 덜 될수록 하이브리드 효과가 잘 나타난다고 하였고, 1994년에 Jones와 DiBenedetto<sup>6)</sup>는 탄소/탄소, 유리/유리, 아라미드/탄소, 유리/탄소로 제작된 하이브리드 복합체에 대한 실험을 실시하여 연신율이 작은 섬유가 적은 양으로 잘 산포되어야 의사연성(pseudo-ductility) 거동을 보인다고 하였다.

특별한 경우에 연신율이 작은 섬유가 파괴된 후에 남아 있는 섬유사들이 재분배된 하중을 지지할 수 있어서 이 섬유사들의 즉각적인 파괴로 이어지지 않는다면 응력-변형률 관계는 의사연성 거동을 보이게 되고 추가적으로 작용하는 하중을 지지할 수 있다고 알려져 있다<sup>7)</sup>. Bakis<sup>8)</sup>는 섬유의 체적률과 배치 방법을 다르게 하여 인발성형된 하이브리드 로드의 실험결과로부터 탄소섬유를 산포시킬 경우에 가장 좋은 의사연성 효과가 있다고 발표하였다.

최근에 Yujin 등<sup>9)</sup>은 탄소와 유리섬유로 제작한 로드의 인장실험으로부터 탄소섬유를 산포시킨 로드는 최대 응력 발현 후 응력의 증감이 반복하여 나타나는 의사연성 거동을 보이고, 탄소섬유를 중앙에 집중시킬 경우에는 1차 최대 응력에서 파괴가 발생한 후, 이 응력보다 큰 값에서 2차 파괴가 발생한다고 하였다.

## 3. 실험

### 3.1 실험변수

본 연구에서는 종류가 다른 섬유의 혼합에 따른 하이브리드 효과와 인장특성의 개선 정도를 파악하기 위하여 유리섬유와 탄소섬유를 고려하였으며, FRP 로드는 Table 1에 나타난 바와 같이 총 5가지 종류의 형태로 제작하였다.

수지는 비닐에스터(Vinylester, 시편명: VE)와 불포화 폴리에스터(Unsaturated Polyester, 시편명: PE) 수지를 사용하였으며 각각에 대해 4개씩 총 40개의 시편을 제작하여 실험하였다. 시편 설계시 A, B Type 로드의 인장강도를 900 MPa 이상으로 설정하였으며 하이브리드 로드(C, D, E Type)의 인장강도도 이와 근사한 값을 갖도록 유리 및 탄소섬유의 섬유 비율을 결정하였다.

하이브리드 FRP 로드의 인장특성은 여러 가지 매개변수

**Table 1** Type of FRP rods

Type	A	B	C	D	E
Fiber Volume fraction(%)	G 49	C 39	G 37 C 23	G 37 C 23	G 37 C 23
Carbon fiber placement	None	Full	In core	On surface	Dispersed
Cross-sectiona		●	●	○	●●●●

a: Gray (G, glass fiber), Black (C, carbon fiber)

**Table 2** Material properties of fibers and resins

Material	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Elongation (%)
Carbon fiber	4,900	230.0	2.10
Glass fiber	2,410	79.0	3.04
Vinylester resin	79	3.7	7.00
Unsaturated polyester resin	62	3.1	5.00

에 따라 변할 것이나 본 연구에서는 일차적으로 섬유 배합률을 고정시키고 탄소섬유의 배치방법과 수치 종류에 따른 변화를 살펴보고자 하였다.

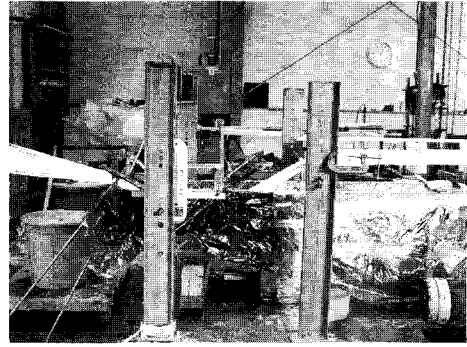
### 3.2 FRP 로드 제작

본 연구에서는 FRP 로드와 콘크리트 사이의 부착 특성은 고려하지 않기 때문에 로드는 매끄러운 표면을 가진 직경 12.7mm의 원형 단면으로 제작하였다. 유리섬유는 E-glass 계열인 한국 Owens Corning사의 RS-4400-366을 사용하였고, 탄소섬유는 일본 Toray사의 T-700 12K를 사용하였다. 인발성형(Pultrusion)으로 FRP 로드를 제작하기 위해 비닐에스터와 불포화 폴리에스터 수지를 사용하였다. 비닐에스터와 불포화 폴리에스터 수지는 경제적이고, 점성이 낮으며, 경화가 빠르기 때문에 인발성형 방법에 가장 이상적인 것으로 알려져 있다. 수치에는 약간의 충전제, 촉진제, 이형제를 첨가하였으며 각각의 재료물성은 Table 2에 나타내었다.

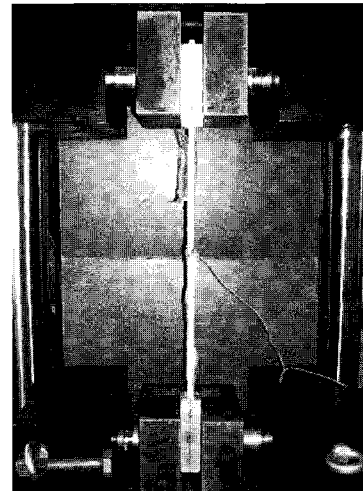
### 3.3 인장 실험

FRP 로드 제작에 대한 인장특성 실험방법은 CSA 표준<sup>10)</sup>에 근거하여 실시하였다. 시편의 길이는 850mm이며 1,000kN 용량의 UTM를 이용하여 실험하였다.

변형률은 시편 중앙부에 변형률 게이지를 부착하여 측정하였으며, 로드의 상하 단부를 ASTM D 3916<sup>11)</sup>의 알루미늄 그립 어댑터를 이용하여 거치하였다.



**Fig. 1** Pultrusion processing



**Fig. 2** Test set-up

## 4. 실험 결과

각 시편의 인장강도는 실험으로부터 측정된 최대하중을 로드의 단면적  $A_{rod}$ 로 나누어 계산하였으며, 탄성계수  $E_{rod}$ 는 CSA 규준에 따라 다음과 같이 산출하였다.

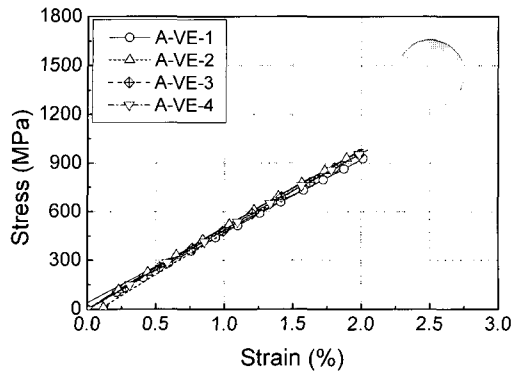
$$E_{rod} = \frac{(P_1 - P_2)}{(\epsilon_1 - \epsilon_2)A_{rod}} \quad (3)$$

여기서,  $P_1$ 과  $P_2$ 는 극한 하중의 50%와 25%에 해당되는 하중이고,  $\epsilon_1$ 과  $\epsilon_2$ 는 해당 하중에 대한 변형률이다.

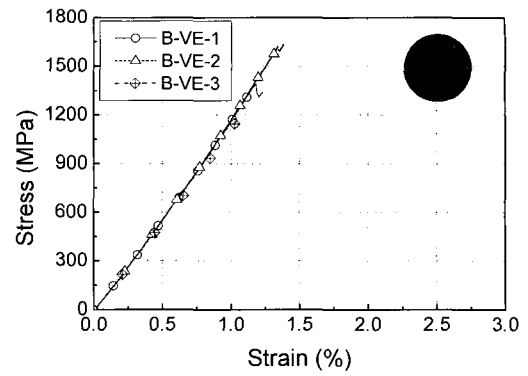
### 4.1 유리/탄소섬유 로드의 인장특성

유리 또는 탄소섬유와 수치만으로 구성된 시편(A, B type)에 대해 인장실험 결과를 Fig. 3과 Table 3에 나타내었다.

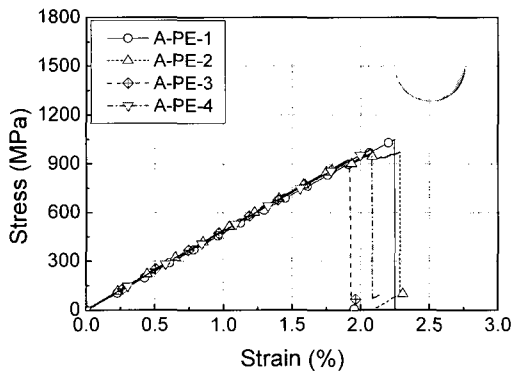
시편의 응력-변형률 곡선은 FRP의 전형적인 재료특성인 선형 증가 후 취성 파괴 거동을 나타내었다. 대부분의 시편은 중앙에서 파단 되었으나 몇몇 시편은 그립 어댑터 부분



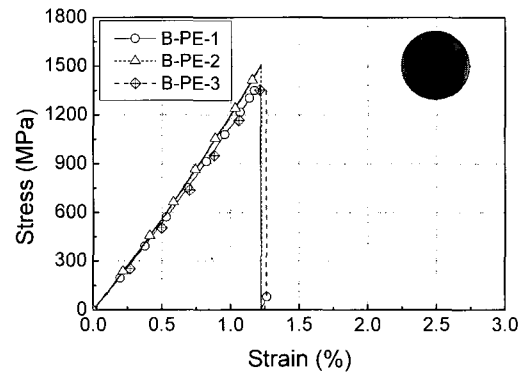
(a) A-VE



(b) B-VE



(c) A-PE



(d) B-PE

Fig. 3 Stress versus strain curves for non-hybrid rods

에서 파괴되었다.

실험으로부터 구한 탄성계수는 Table 3에서 보듯이 예측 값에 비해 21% 크게 나타났고, 인장강도는 24% 낮게 나타났다.

시편의 크기, 그립 방법(Grip method), 제작시 섬유 손상 이나 배열의 잘못됨 등에 따라 인장실험에는 다양한 강도 감소효과가 나타나기 때문에 탄소섬유 복합체의 경우 극한

변형률은 일반적으로 함침되지 않은 스트랜드에 비해 쿠폰 실험값이 15~20% 작게 발견되는 것으로 알려져 있다<sup>8)</sup>. 또한 Malvar<sup>12)</sup>는 ASTM D 3916 형식과 Clamp 형식 등의 그립 어댑터에 대한 실험에서 ASTM D 3916 그립 어댑터에 의한 FRP 로드의 인장강도가 가장 작게 나오는 것

Table 3 Results of tensile tests for non-hybrid rods

Type	Experiment			Prediction <sup>a</sup>		
	Tensile strength (MPa)	Elastic moduls (GPa)	Ultimate strain <sup>b</sup> (%)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Ultimate strain (%)
A-VE	972 (2.3%)	47.8 (3.7%)	2.03	1,248	41.1	3.04
B-VE	1,454 (10.6%)	114.8 (4.3%)	1.27	1,935	92.1	2.10
A-PE	983 (5.4%)	48.3 (0.8%)	2.03	1,240	40.8	3.04
B-PE	1,431 (4.0%)	114.6 (3.2%)	1.25	1,928	91.8	2.10

a : calculated value using Eqs.(1) and (2)

b : calculated value using test data

( ) : coefficient of variation

Table 4 Results of tensile tests for hybrid rods

Type	Tensile strength <sup>a</sup> (MPa)	Elastic Modulus <sup>b</sup> (GPa)	Ultimate strain <sup>c</sup> (%)	Hybrid effect <sup>d</sup> (%)
C-VE	1,281 (5.4%)	80.4 (3.1%)	1.59	25
D-VE	1,083 (3.2%)	78.9 (0.5%)	1.37	8
E-VE	1,045 (2.6%)	62.4 (0.4%)	1.68	32
C-PE	1,331 (3.2%)	83.1 (4.2%)	1.60	28
D-PE	1,128 (2.7%)	79.5 (0.4%)	1.42	14
E-PE	1,213 (4.9%)	84.0 (2.3%)	1.44	15

c : =a/b

d : =c/ε<sub>f</sub><sup>ult</sup> of non-hybrid carbon rod

( ) : coefficient of variation

을 관찰하였다. Kretsis<sup>5)</sup>는 식 (1)은 수지가 섬유와 섬유 사이에서 힘을 효과적으로 전달한다는 가정에 근거한 선형 방정식이기 때문에 예측값은 큰 편차를 나타낸다고 하였다.

상기 영향에 의해 실험값과 예측값 사이에는 어느 정도 차이가 존재하지만 Table 3에서 보듯이 변동계수가 크지 않기 때문에 실험값에는 일관성이 있다고 볼 수 있고, 본 연구의 목적은 로드 단면 내에 탄소섬유를 배치하는 방법에 따른 상대적인 거동 변화를 살펴보기 위한 것이므로 본 논문에서는 식 (1)에 의한 예측값과 실험값의 차이에 대해서는 논하지 않기로 한다.

한편, 불포화 폴리에스터 수지를 사용한 경우에 대한 실험결과는 비닐에스터 수지를 사용한 경우에 비해 인장강도와 탄성계수 모두 1.6% 이내의 차이를 보이고 있어 수지 종류에 따른 인장강도와 탄성계수의 변화는 거의 없는 것으로 관찰되었다.

#### 4.2 하이브리드 효과

Table 4에 하이브리드 로드의 실험결과를 나타내었다. 하이브리드 효과는 탄소섬유와 수지만으로 제작된 FRP 로드(B type)의 인장실험에서 얻은 극한변형률을 기준으로 나타내었다.

유리섬유 37%, 탄소섬유 23%를 혼합하여 하이브리드 로드를 제작할 경우 모든 시편에 있어서 극한변형률이 B type의 극한변형률에 비해 증가하는 하이브리드 효과가 나타났다. 비닐에스터 수지를 사용한 경우에 탄소섬유를 로드 단면 내에 분포시킨 시편(E-VE)에서 하이브리드 효과가 가장 크게 발생하였고, 탄소섬유를 로드의 바깥쪽에 배치한 시편(D-VE)에서 가장 작게 나타났다. 불포화 폴리에스터 수지를 사용한 경우에는 이 효과가 상대적으로 작게 나타났는데 이는 탄소섬유의 배치상태와 관련이 있을 것으로 추측되며 이에 대해서는 다음 절에서 설명하기로 한다.

하이브리드 로드의 극한변형률은 B type에 비해 8~32% 증가하였으나 탄소섬유의 배치방법에 따라 인장강도와 탄성계수는 하이브리드 효과와 비례하여 증가하지 않는 것을 Table 4에서 볼 수 있다. 비닐에스터 수지를 사용한 경우 하이브리드 효과는 E-VE 시편에서 가장 크게 발생하였으나 인장강도와 탄성계수는 C-VE 시편에서 가장 크게 증가하였다. 따라서 하이브리드 로드를 구조물에 적용할 경우에는 설계 목적에 적합한 인장특성이 발현되도록 설계해야 할 것으로 판단된다.

#### 4.3 섬유 배치방법에 따른 효과

각각의 섬유 가닥은 많은 섬유사가 뭉쳐있는 Roving 형태이기 때문에 제작과정에서 원하는 배치상태를 정확하게 유지하기가 쉽지 않으며, 인발 과정에 있어서도 섬유 가닥

의 직진성이 유지되지 않을 경우 섬유배치가 균질하게 되지 않을 수 있다.

Fig. 4은 시편의 단면을 찍은 사진으로서 시편길이 850 mm 내에서도 섬유가 계획대로 정밀하게 배치되지 않고 있음을 볼 수 있다.

Table 4에서 수지 종류에 관계없이 탄소섬유가 로드의 중심에 위치하는 시편(C-VE, C-PE)이 바깥쪽에 위치하는 시편(D-VE, D-PE)에 비해 인장강도와 극한변형률이 평균적으로 각각 18%, 14% 정도 증가하였으므로 탄소섬유를 단면의 중심에 위치시키는 것이 하이브리드 로드의 인장특성 면에서 유리한 것으로 사료되며, 이는 로드에서 인장력이 가해질 때 그림으로 인해 단면 내 응력이 균등하게 발생하지 않고 외측에 최대응력, 중심에 최소응력이 발생하는 현상과 연신율이 작은 섬유가 내부에 존재할 경우 외측의 연신율이 큰 섬유에 의한 구속효과에 의해 내부 섬유의 파괴 시점이나 파괴로 인한 충격파의 전달이 다소 지연되기 때문으로 판단된다.

탄소섬유를 산포시킨 시편(E type)의 인장강도는 중앙에 위치시킨 시편(C type)에 비해 비닐에스터와 불포화 폴리에스터 수지별로 각각 18%, 9% 감소하였고, 극한변형률은 6% 증가, 10% 감소하였다. 수지 별로 증감상태가 다른 것은 서술한 바와 같이 수지의 영향은 거의 없으므로 산포되어 있는 정도 차이에 기인한 것으로 판단된다. 이것은 Fig. 5에서 보듯이 E-PE 시편의 탄소섬유는 E-VE 시편에 비해 상대적으로 탄소섬유가 중앙에 집중되어 있는 형태를 보이고 있으므로 탄소섬유의 배치상태가 C-PE 시편과 동일하지만 탄소섬유 양이 이보다 다소 적은 상태의 거동을 보인 것으로 판단된다.

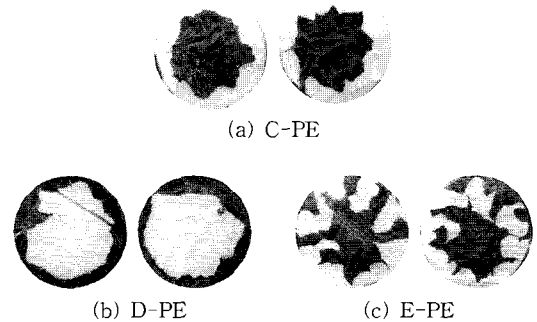


Fig. 4 Cross-sections of rods at different location



Fig. 5 Cross-sections of E type rods

#### 4.4 하이브리드 로드 의 인장특성

비닐에스터 수지를 사용한 하이브리드 로드에서는 응력-변형을 곡선이 최대응력까지 선형으로 거동한 후 단계적으로 파괴되는 거동을 나타내었다(Fig. 6 (a), (b), (c)). 불포화 폴리에스터 수지를 사용한 시편에서는 이러한 거동이 잘 관찰되지 않았는데 이것은 섬유와 섬유 사이에서 하중을 재분배 해주는 수지의 성능과 특성 차이 때문인 것으로 추측된다(Fig. 6 (d), (e), (f)).

Bakis<sup>8)</sup>는 탄소섬유가 산포된 시편의 경우 의사연성 효과가 다른 경우에 비해 확연히 나타난다고 하였으나, 본 연구에서는 Yujin 등<sup>9)</sup>의 실험에서와 마찬가지로 짧은 변형률 범위에서 응력 최고점이 증가를 반복하는 거동을 나타내었다(Fig. 6 (c), (f)). 또한 Yujin 등은 탄소섬유를 외피에 위치시킨 경우에 1차 파괴 후 더 높은 응력에서 2차 파괴가 발생한다고 하였으나, 본 연구의 시편에서는 이러한 거동이 나타나지 않았다. 이러한 차이는 각 연구별로 탄소섬유와 유리섬유의 체적을 비가 다르기 때문으로 판단된다. Jones와 DiBenedetto<sup>6)</sup>

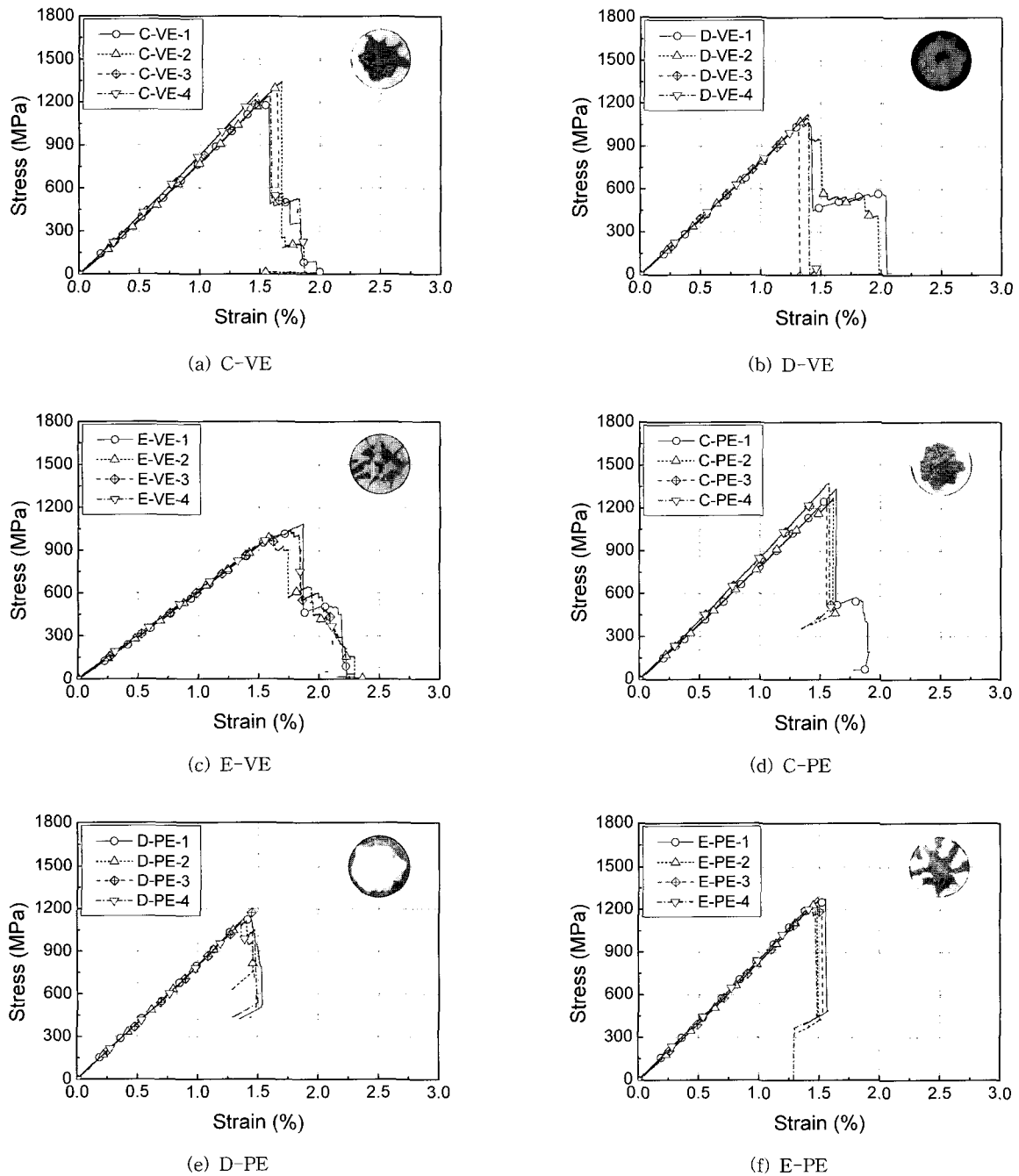


Fig. 6 Stress versus strain curves for hybrid rods

는 연신율이 작은 섬유가 적은 양으로 잘 산포되어야 의사연성 거동을 보인다고 하였다. 유리섬유에 대한 탄소섬유의 체적률 비는 Yujin 등의 연구에서는 27%, Bakis의 연구에서는 37%였으며, 본 연구에서는 61%로서 다른 연구자들에 비해 탄소섬유가 상대적으로 많이 함유되어 있다.

## 5. 결 론

본 연구는 수지의 종류와 탄소섬유 배치방법에 따른 FRP 로드의 하이브리드 효과를 관찰하고자 수행된 것으로 인장실험 결과를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

- 1) 유리섬유 37%, 탄소섬유 23%를 혼합하여 제작한 하이브리드 로드의 극한변형률은 탄소섬유와 수지만으로 제작된 FRP 로드의 극한변형률에 비해 탄소섬유 배치방법에 따라 8~32% 증가하여 섬유 혼합에 의한 하이브리드 효과가 발생하였다.
- 2) 탄소섬유를 로드의 단면에 산포시킨 시편(E-VE)의 극한변형률이 탄소섬유와 수지만으로 구성된 시편(B-VE)의 극한변형률에 비해 32% 증가되었지만 제작의 연속성 및 정밀성이 보장되지 않는다면 탄소섬유의 산포 정도가 달라질 수 있기 때문에 E-PE 시편의 결과와 같이 극한변형률의 증가정도는 달라질 수 있다.
- 3) 사용된 수지의 종류에 관계없이 탄소섬유가 중심에 위치하는 시편(C type)이 외피에 위치하는 시편(D type)에 비해 인장강도와 탄성계수, 극한변형률이 모두 증가하였다. 탄소섬유를 단면 내 산포시키는 시편(E-VE)에는 중앙에 집중시킨 시편(C-VE)에 비해 인장강도는 감소하였지만 극한변형률은 증가하였다.
- 4) 탄소섬유를 단면 내에 산포시킬 경우에 하이브리드 효과가 가장 크게 나타났고, 중앙에 집중시킬 경우에는 인장강도의 증가가 가장 크게 나타났다. 하이브리드 효과와 인장강도, 탄성계수의 증가 정도가 탄소섬유의 배치방법에 따라 다르게 나타나므로 구조물에 적용할 경우에는 설계 목적에 적합한 인장특성이 나타나도록 설계해야 할 것으로 사료된다. 제작의 난해함과 극한변형률, 탄성계수, 인장강도의 증가를 전반적으로 고려할 경우 탄소섬유가 중앙에 집중되어 위치하는 경우가 가장 유리할 것으로 판단된다.

본 실험에서는 하이브리드 로드의 확연한 의사연성 거동은 나타나지 않았으며, 이는 유리섬유에 비해 탄소섬유가 상대적으로 많이 함유되어 있기 때문으로 판단된다. 의사연성 거동은 탄소섬유의 양 뿐만 아니라 탄소섬유의 산포에 따른 응력 재분배 메커니즘의 영향을 받기 때문에 이에 대해서는 좀 더 많은 논의가 필요하다.

본 연구에서도 기존 연구자들이 발표한 바와 같이 탄소섬유가 단면 내에 분포되어 있을 경우에 극한변형률 탄소

섬유의 극한변형률보다 증가하는 하이브리드 효과가 관찰되었으나 제작단계에서 탄소섬유를 설계대로 산포시키지 못하고 직진성을 유지하기 힘든 문제점이 발견되어 균일한 하이브리드 효과를 얻을 수 없었다. 제작방법의 개선을 통하여 이러한 문제점을 해결하는 것에는 한계가 있을 것이기 때문에 섬유 원사 생산과정에서 유리섬유와 탄소섬유를 미리 혼합하여 하이브리드 Roving 형태로 제작한다면 각각의 Roving을 혼합하는 것보다 훨씬 균질한 산포정도를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 공공기술연구회 정책연구사업인 “FRP 복합재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발” 연구비 지원에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Mufti, A., Erki, M. A., and Jaeger, L., eds., *Advanced composites materials with application to bridges*, Canadian Society of Civil Engineers, Montreal, Canada, 1991.
2. Nanni, A. E., and Dolan, C. W., eds., “Fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures”, *Proc. Int. Symp.*, American Concrete Institute, Detroit, Mich., 1993.
3. 한국건설기술연구원, FRP 복합재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발, 1차년도 최종보고서, 2004.
4. Harris, H. G., Somboonsong, W., and Ko, F. K., “New Ductile Hybrid FRP Reinforcing Bar for Concrete Structures”, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol.2, No.1, 1998, pp.28~37.
5. Kretsis, G., “A review of the tensile, compressive, flexural and shear properties of hybrid fibre-reinforced plastics”, *Composites*, Vol.18, No.1, 1987, pp.13~23.
6. Jones, K. D. and DiBenedetto, A. T., “Fiber fracture in hybrid composite systems”, *Composites Science and Technology*, Vol.51, No.1, 1994, pp.53~62.
7. Phillips, L.N., “The hybrid effect - does it really exist”, *Composites*, Vol.7, No.1, 1976, pp.7~8.
8. Bakis, C. E., Nanni, A., Terosky, J. A., and Koehler, S. W., “Self-monitoring, pseudo-ductile, hybrid FRP reinforcement rods for concrete application.”, *Composite Science and Technology*, Vol.61, No.6, 2001.
9. Yujin Liang, Changsen Sun, and Farhad Ansari, “Acoustic Emission Characterization of Damage in Hybrid Fiber-Reinforced Polymer Rods”. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol.8, No.1, 2004, pp.70~78.

10. CSA S806-02, *Test Method for Tensile Properties of FRP Reinforcement*, Canadian Standard Association, Annex C, 2002.
11. ASTM D 3916, *Standard Test Method for Tensile Properties of Pultruded Glass-Fiber-Reinforced Plastic Rods*, American Society of Testing and Material, ASCE, 2002.
12. Malvar, L. J. and Bish, J., "Grip effects in tensile testing of FRP bars", *Proc. 2nd Int. RILEM Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, L. Taerwe, ed., Univ. of Ghent, Belgium, 1995. pp.108~115.

## 요 약

최근 철근 콘크리트 구조물에서 철근의 부식문제를 근본적으로 해결하기 위한 대안으로 섬유강화폴리머(Fiber Reinforced Polymers, FRP)가 주목받고 있다. FRP는 철근에 비해 높은 비강도를 가지며, 무게가 가볍다. 특히 내부식성이 뛰어나 염해와 같은 열악한 환경에 특히 유용하다. 그러나 재료단가가 철근에 비해 높고, 장기거동에 대해 구축되어 있는 정보가 적으며 항복 거동을 보이는 철근과는 달리 취성파괴를 일으키기 때문에 FRP를 토목재료로 사용하려는 노력은 더디게 진행되고 있다. FRP 제작에 사용되는 섬유 중 유리섬유가 가장 경제적이지만 강성이 철근에 비해 대략 1/4 정도 밖에 되지 않아 휨부재에 사용될 경우 과도한 처짐 문제가 발생한다. 이에 본 연구에서는 유리섬유로 제작된 FRP(Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP) 로드(Rod)의 인장특성을 개선하고자 탄소와 유리섬유로 제작된 하이브리드 로드의 인장특성에 관한 연구를 수행하였다. 로드 제작에 사용되는 수지 종류와 배치 방법에 대해 변수를 설정하여 총 40개의 시편을 제작하여 인장실험을 실시하였다. 하이브리드 로드의 인장특성은 섬유가 혼합되지 않은 순수한 유리섬유와 탄소섬유로만 제작된 로드의 인장특성과 비교하였다. 실험 결과에 따르면 로드의 핵은 탄소섬유로, 외피는 유리섬유로 제작된 하이브리드 로드의 인장특성이 가장 우수하였다.

**핵심용어** : 하이브리드, 탄소섬유, 유리섬유, 섬유 복합체, 인장강도