

FRP 복합체의 引張特性値 試驗方法에 관한 變數 研究

Parametric Study on Test Method of Tensile Characteristics of FRP Composite Material Used in Strengthening RC Members

○ 유영찬^{*} 최기선^{**} 강인석^{***} 김경환^{****}
You, Young-chan Choi, Ki-sun Kang, In-Seok Kim, Keung-hwan

Abstract

Experimental study has been performed in order to investigate the influence of specimen width and strain rate on the tensile characteristics of FRP used in strengthening RC structures. The strength reduction phenomena caused by the accumulation of CFRP sheet on job site are also examined. The FRP composite tested in this study are the unidirectional CFRP sheet, CFRP strip and bidirectional GFRP sheet. Test variables consist of various width ranging from 10mm to 25mm and the number of multi-layer CFRP sheets plied up to 5.

Test results indicated that unidirectional CFRP sheet and CFRP strip showed maximum tensile strength and minimum coefficient of variation value at 15mm width and 20mm width for bidirectional GFRP sheet. Also, the average tensile strengths of CFRP sheets are decreased as the number of layer of CFRP sheet are increased. The tensile strength of 5 plies CFRP sheet appeared to be decreased around 20% compared with that of 1 ply CFRP sheet.

키워드 : FRP 복합체, 인장특성치, 시험방법, 시험편 폭, 가력속도, 보강매수

Keywords : FRP composite, Tensile characteristics, Test method, Specimen width, Strain rate, multi-layer

1. 서론

첨단 항공우주산업, 선박/레저산업 및 군수산업 분야 등의 적용을 위해 특수한 목적으로 개발된 FRP는 소재 자체가 지니는 많은 장점으로 인하여 그 적용범위가 점차 확대되어 왔으며, 최근에는 건설분야에서 다양하게 활용되고 있다. 특히, 구조물 보강재로서 FRP의 활용은 전통적인 보강공법을 대체하며, 괄목할 만한 성장세를 보이고 있다. 그러나, 건설분야에서의 특수목적에 부합하기 위하여 다양한 형태의 FRP 보강재가 생산·시공됨에도 불구하고 FRP 복합체의 물성에 대한 성능규명은 일반화된 FRP 제품에 대한 시험법에 의해 실시되고 있으며, 제품의 치수/강도 등에 대한 표준규격이 미비된 실정이다. 또한, 표준화된 시험법의 부재로 인해 시험 의뢰자나 전문 시험기관에 따라 채택하고 있는 시험법이 서로 상이하기 때문에 품질관리의 일관성이 결여되고 있다.

따라서 본 연구에서는 FRP 복합체의 품질 시험항목 중에서 역학적 특성을 평가할 수 있는 인장시험 방법에 대하여 각국의 시험규격을 비교·분석하고, 시험방법의 차이가 재료성능에 미치는 영향에 대한 실험적 검증

통하여 표준화된 시험방법 및 평가기준을 도출하고자 하였다.

2. FRP 복합체 인장시험 개요

2.1 국내·외 FRP 복합체 인장시험 규격 비교

FRP 복합체의 인장시험에 관련된 국내·외의 규격 및 전문기관에서 제시하고 있는 시험방법을 검토한 결과 시험방법은 대체로 일치하지만 시험편의 치수 및 가력속도는 서로 상이한 것으로 조사되었다. 즉, 각국의 시험규격에서 규정하고 있는 시험편의 형상은 FRP 복합체의 길이방향으로 긴 직사각형 형태로 규정되어 거의 유사한 반면, 시험편의 폭 및 길이는 다소 다르게 규정되어 있다. 그 중에서 시험편의 폭에 대한 규정은 공학적인 근거보다는 각국의 단위법에 따라 제시되고 있으며, 2방향 연속섬유의 경우에는 공통적으로 25mm(1 inch)로 규정되어 있는 것으로 파악되고 있다. 또한 시험편의 두께에 대해서는 명확한 규정이 없으며, 통상적으로 1매의 FRP 복합체를 기준으로 시험한다.

이에 대하여, FRP의 재료강도는 시험편의 폭에 따라 영향을 받을 것으로 판단되며, 특히 구조용 FRP 복합체의 경우 공통된 시험편의 두께보다는 적층되는 보강재의 매수나 섬유함유량에 의해 인장강도가 영향을 받으므로 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다. FRP 복합체

* 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원, 공학박사

** 정회원, 한국건설기술연구원 연구원

*** 정회원, (주)토탈인포메이션서비스 한국지점 과장

**** 정회원, 한국건설기술연구원 연구위원, 공학박사

의 인장강도에 대한 각국의 시험규격에서 상이한 항목을 정리하여 나타내면 표 1과 같다.

표 1. FRP 복합체 인장시험방법에 대한 국내·외 규격

규격		KS	ISO	EN	JIS	ASTM	CSA
시험편폭 (mm)	일방향	10±0.5	15±0.5	10±0.5 15±0.5	12.5	15	12.7
	이방향	25	25±0.5	-	25	25	25.4
두께	(mm)	3h이하	-	-	-	1.5	-
가력속도	변위속도 (mm/분)	1±0.5	2	-	-	2	-
	변형률 (%/분)	0.5	-	-	1~2	1	0.1~0.2

2.2 보강재로 사용되는 FRP 복합체 특성

FRP 복합체의 물성은 기본적으로 섬유와 수지의 종류, 섬유의 방향, 섬유의 함유량에 의해 결정된다. FRP 보강재에는 탄소섬유, 유리섬유 또는 아라미드섬유가 사용되며, 수지는 주로 에폭시 수지가 사용된다. 섬유의 방향은 일방향(uni-directional)으로 배치하는 것이 일반적이거나 다방향(multi-directional)으로 배치하기도 하며, 이 경우 순수 섬유두께는 각 방향의 섬유만으로 한정한다. FRP 복합체의 제작형태는 sheet형의 습식현장가공(wet lay-up)형, FRP rod 및 strip형태의 사전양생(pre-cured)형으로 구분할 수 있다. 이때, 공법에 따라서 FRP의 공칭 두께는 명확히 정의되어야 한다. 즉, 일반적으로 현장가공형은 작업조건에 따라서 두께가 변하기 때문에 순수 섬유두께로 정의되며, 사전양생형은 일정한 두께를 유지하고 제작되었기 때문에 전체 단면적으로 정의되고 있다.

2.3 FRP 복합체 인장시험 일반사항

FRP 복합체의 인장시험을 위한 시험편의 형상 및 치수를 나타내면 그림 1과 같다. 본 연구에서는 시험편의 폭을 제외한 치수는 FRP 복합체의 인장성능에 영향이 없을 것으로 판단하고 ISO의 규격을 공통적으로 적용하였다. 가력을 위한 실험장치는 그림 2와 같이 5tonf 용량의 UTM을 사용하였으며, 그립부에서 시험편을 일정한 압력으로 고정하기 위하여 유압그립을 사용하였다.

실험에서의 측정항목은 로드셀에 의한 하중과 스트레인게이지를 이용한 FRP 복합체의 변형률을 측정하며, 측정된 하중을 FRP 복합체의 공칭단면적으로 나누어 인장강도를 산정하였다. FRP 복합체 인장시험편의 개수는 최소 20개 이상을 시험하며, 시험편의 정착부 파괴 및 슬립, 부분파단 등 비정상적인 파괴형태의 시험편은 평가에서 제외하였다. 이와 같은 시험을 통하여 얻어진 각 시험편의 값으로부터 평균인장강도 및 표준편차를 구하고, 식 (1)에 따라 인장강도의 신뢰하한치를 구하였다. 즉,

$$f_{fu}^* = f_{u,avg} - 3\sigma \quad (1)$$

여기서, $f_{u,avg}$: 평균 인장강도

σ : 인장강도 표준편차

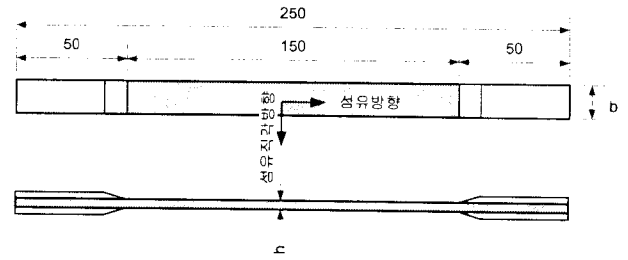


그림 1. FRP 복합체 인장시험편 형상 및 치수

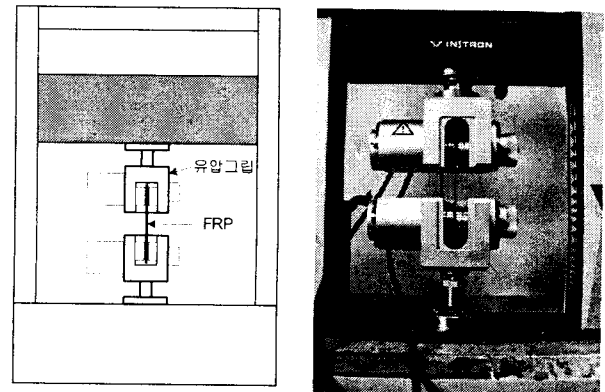


그림 2. FRP 복합체 인장시험 가력장치

3. FRP 복합체 인장시험

3.1 적정 시험편 폭 산출 시험

3.1.1 시험목적

FRP 복합체는 마이크로미터 단위의 섬유가 수지에 의해 결합된 형태로 구성되어 있기 때문에 시험편의 폭이 증가될수록 제작 및 가공오차로 인하여 훼손되는 섬유량의 비가 감소되므로 인장강도 측면에서 유리할 것으로 예상된다. 그러나, 폭의 증가에 따라 단면내의 응력 불균형이 증가되면 부분적인 파단이 발생되므로 인장강도 측면에서 불리하게 된다. 이에 따라 본 연구에서는 다양한 시험편 폭에 대한 검증시험을 통해 표준화된 시험편 폭을 도출하고자 하였다.

3.1.2 시험변수

본 연구에서는 시험편 폭의 변화에 따른 인장강도 특성을 평가하기 위하여 1방향 탄소섬유는 기존 규격에서 제시하고 있는 3가지 타입의 폭에 대하여 검토하였으며, 2방향 유리섬유는 직물형태로 제작되기 때문에 탄소섬유에 비하여 가공오차가 클 것으로 판단되므로 시험편 폭을 5가지 타입으로 세분화하여 실험을 실시하였다.

표 2. 시험편 폭 변수

종류	가력속도 (%/min)	길이 (mm)	두께 (mm)	폭 (mm)
CFRP sheet	1.0	250	0.111	10, 12.5, 15
CFRP strip	1.0	250	1.20	10, 12.5, 15
GFRP sheet	1.0	250	0.80	10, 12.5, 15, 20, 25

3.1.3 시험결과

1방향 FRP 복합체의 시험편 폭을 변수로 인장강도 시험을 수행한 결과, 그림 3에서 보는 바와 같이 시험편의 폭이 증가할수록 평균인장강도는 비례적으로 증가하는 경향을 보이고, 시험결과에 대한 변동계수는 작아지는 것으로 나타났다. 즉, 시험편의 폭이 15mm일 경우 평균 인장강도가 최대가 되며, 강도편차를 나타내는 변동계수도 최소값을 나타냈다. 따라서, 1방향 FRP 복합체는 시험편의 폭이 15mm 정도일 때 실험결과에 대한 신뢰도가 가장 높은 것으로 판단된다.

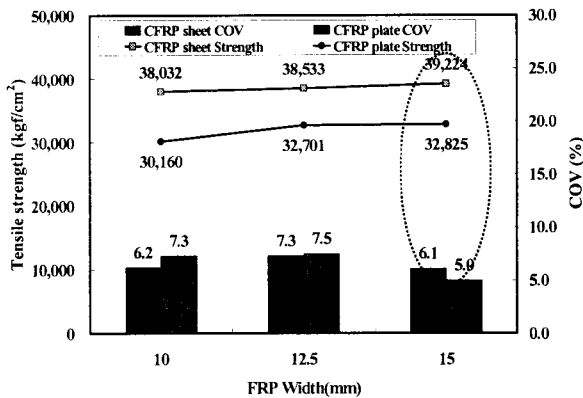


그림 3. 시험편 폭에 따른 1방향 FRP복합체의 인장강도

이에 대하여, 2방향 유리섬유쉬트의 인장시험편 폭은 각 규격에서 공통적으로 25mm를 제안하고 있는 반면, 본 연구에서 실시한 인장시험결과에 의하면 25mm 시험편 폭에서는 그림 5와 같이 폭 방향 섬유 불균등 파단에 의해서 인장강도가 저하되고, 변동계수가 10% 이상으로 증가되는 것으로 나타났다. 따라서, 2방향 유리섬유쉬트의 시험편 폭에 대한 재검토가 필요할 것으로 판단된다.

시험편 폭의 변화에 따른 인장강도를 비교해 보면, 그림 4에서 보는 바와 같이 20mm 이하의 시험편에서는 폭 방향 불균등 파단이 관측되지 않았으나, 시험편 폭이 감소할수록 평균인장강도는 감소하며 변동계수가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 2방향 FRP 복합체의 시험편 폭은 20mm가 적합할 것으로 판단된다.

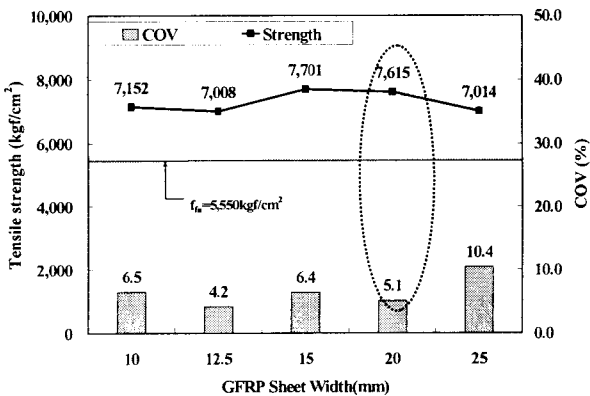


그림 4. 시험편 폭에 따른 2방향 FRP복합체의 인장강도

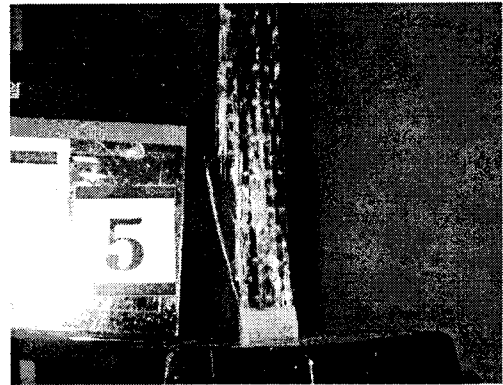


그림 5. 2방향 FRP복합체의 불균등 파단(b=25mm)

3.2 적정 가력속도 도출 시험

3.2.1 시험목적

각국의 시험규격에서 규정하고 있는 시험속도는 크로스헤드의 이동속도를 기준으로 하여 설정되어 있으며, 그 절대값은 다소 다르게 규정되어 있다. 일반적으로 시험편의 인장강도는 시험속도에 비례하여 부분적으로 증가되는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 현행 각국의 인장시험규격에서 제시하고 있는 가력속도를 실험적으로 비교·검토하였다. 실험결과를 바탕으로 가력속도의 변화에 따른 인장강도 특성치의 평균, 표준편차 및 변동계수를 분석하여 합리적인 가력속도를 선정하고자 하였다.

3.2.2 시험변수

FRP 복합체의 인장시험에서 가력속도에 의한 영향을 파악하기 위하여 각국의 시험규격에서 제시하고 있는 가력속도를 참고하여 표 3과 같이 5단계의 가력속도에 대하여 검토하였다. 시험편은 국내에서 생산된 탄소섬유판으로 제작하였다.

표 3. 가력속도 변수

종류	길이 (mm)	두께 (mm)	폭 (mm)	가력속도 (%/min)
CFRP strip	250	1.3	10	0.5, 1, 2, 3, 6

3.2.3 시험 결과

탄소섬유판을 대상으로 가력속도를 변수로 실험한 결과 현행 각 규격에서 제시하고 있는 가력속도의 범위 내에서는 탄소섬유판의 인장강도에 미치는 영향이 매우 적은 것으로 나타났다. 따라서 가장 많은 규격에서 일반적으로 제시하고 있는 변형률 속도 1%/min을 가력속도로 제시해도 무관할 것으로 판단된다.

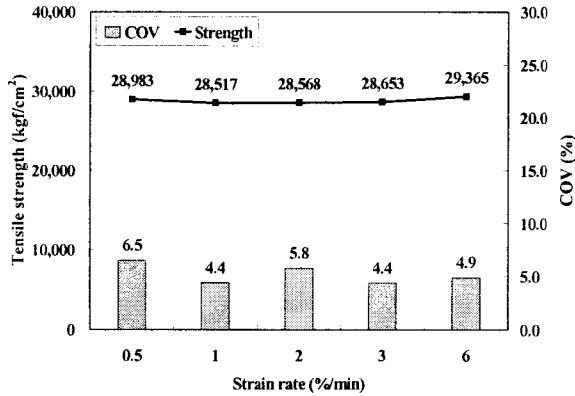


그림 6. 가력속도에 따른 탄소섬유판의 인장강도

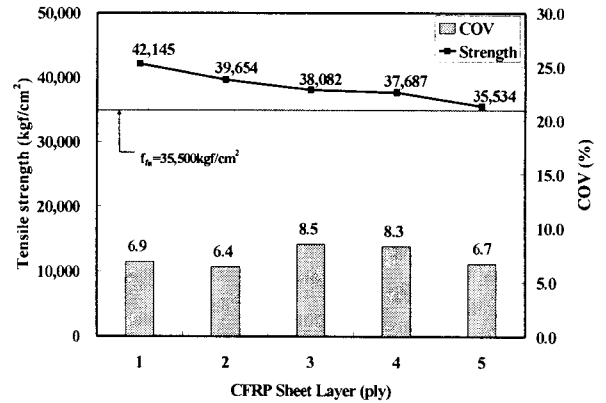


그림 7. 보강매수에 따른 탄소섬유쉬트의 인장강도

3.3 보강매수에 따른 인장강도

3.3.1 시험목적

적층보강되는 쉬트형 FRP 복합체의 경우 시공성 저하로 인해 강화섬유 사이에 함침수지가 균일하게 분포되지 못하므로 인장강도는 감소하게 되며, 이러한 경향은 적층매수에 비례하여 증가하는 것으로 보고되고 있다. 따라서 본 절에서는 FRP 복합체의 보강매수에 따른 인장강도 특성치를 파악하기 위한 시험을 실시하고, 인장강도 저하현상을 설계에 반영할 수 있는 절차를 구축하고자 한다.

3.3.2 시험변수

FRP 복합체의 보강매수 증가에 따른 인장특성치의 변화를 평가하기 위한 실험으로 적층형으로 시공되는 탄소섬유쉬트를 대상으로 실험을 수행하였다. 통상적으로 탄소섬유쉬트에 의한 보강에서는 보강매수가 5매를 초과하지 않는다. 따라서, 본 연구에서는 탄소섬유쉬트를 1매에서 5매까지 제작하여 인장특성치를 파악하였다.

표 4. 보강매수 변수

종류	길이 (mm)	두께 (mm)	폭 (mm)	보강매수 (ply)
CFRP sheet	250	0.111	15	1~5

3.3.3 시험결과

탄소섬유쉬트의 인장강도는 보강매수가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 적층과정에서 발생하는 탄소섬유쉬트와 수지의 불균등한 함침과 적층판 사이의 섬유배열이 일정하게 유지되기 어렵기 때문이며, 이외에 에폭시 함침수지에서 발생하는 기포 등에 의한 결함요인이 증가하기 때문으로 판단된다. 따라서 여러 겹으로 적층된 탄소섬유쉬트 복합체는 전단면이 균등한 응력분포를 받지 못하기 때문에 인장강도가 저하된다.

따라서 적층형 FRP 복합체의 인장시험에서는 보강매수의 증가에 따른 인장강도의 저하현상을 평가할 수 있도록 재료적인 측면에서 시험항목 및 평가기준의 설정이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 FRP 복합체의 인장시험에 대한 표준화된 시험방법 및 평가방법을 도출하기 위하여 국내·외의 다양한 시험규격을 비교·검토하고 실험적 검증을 수행하였다. 실험결과로부터 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 시험편 폭을 변수로 한 시험에서 평균인장강도와 변동계수를 고려하였을 때 1방향 FRP 복합체는 15mm, 2방향 FRP 복합체는 20mm 폭이 적절할 것으로 판단된다.
- ② 시험범위로 설정된 가력속도 범위 내에서 인장강도의 변화는 크지 않을 것으로 나타났다. 따라서, 적정 가력속도는 변형률 속도를 기준으로 하여 약 1%/분 (1.5mm/분) 정도가 합리적일 것으로 판단된다.
- ③ 적층형으로 시공되는 FRP 보강시스템의 경우에는 보강매수에 따른 인장강도의 저하현상을 적절히 고려할 수 있는 평가기준의 설정이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. KS M 3381 “유리섬유강화플라스틱의 인장강도 시험방법”
2. ISO 527-5:1997 “Plastics—Determination of tensile properties—Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites”
3. EN 2561 “Aerospace series—Carbon fiber reinforced plastics—Unidirectional laminates—Tensile test parallel to the fiber direction”
4. JIS K 7073 炭素纖維強化プラスチックの引張試験方法
5. ASTM D 3039 “Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials”
6. CSA 806-02 Annex G “Test method for tension test of flat specimens”