

論文

볼트로 겹침이음된 펄트루전 복합재 접합부의 구조적 거동

이영근*, 신광열*, 주형중*, 남정훈*, 윤순종***

Structural Behavior of Bolted Lap-Joint Connection in the Pultruded FRP Structural Members

Lee, Young-Geun*, Shin, Kwang-Yeoul*, Joo, Hyung-Joong*, Nam, Jeong-Hun* and Yoon, Soon-Jong***

ABSTRACT

In this paper, we present the result of an experimental investigation pertaining to the structural behavior of bolted lap-joint connection of pultruded fiber reinforced plastic structural shapes. In the experimental investigation, in order to find the mechanical property of the material, tension and shear tests on the pultruded structural composite specimen are conducted prior to the investigation on the structural behavior of bolted lap-joint connection of the member. Based on the result, number of bolts, type of placement, and location of bolt are determined to be a test variable. Three different types of experimental specimens are prepared. Tensile load is applied through the center of the specimen with lap-joint connection and the structural behavior and failure mode of the test specimens with respect to the tensile load increment are investigated. As a result, it is found that most of the failure mode at the lap-joint connection is shear failure mode. Consequently, it is also found that the data obtained through this experimental program could be used for the structure connection design as a basis.

초 록

이 연구에서는 볼트로 겹침이음된 펄트루전 복합재의 접합부에 대한 구조적 거동을 실험적 연구를 통해 조사하였다. 펄트루전 복합재 접합부의 구조적 거동 조사에 앞서 재료의 역학적 성질을 파악하기 위해 펄트루전 복합재의 인장 및 전단실험을 수행하였고, 이를 바탕으로 볼트의 수와 배열을 변수로 3종류의 겹침이음 시편을 제작하였다. 겹침이음 접합부 실험은 접합부를 중심으로 인장하중이 작용하도록 하중을 재하하였고, 하중증가에 따른 접합부의 구조적 거동 및 파괴모드를 조사하였다. 실험결과 접합부에 대한 파괴는 대부분 전단파괴로 나타났으며, 실험을 통해 얻어진 데이터를 분석하여 설계를 위한 기초자료로 활용될 수 있도록 하였다.

Key Words : 펄트루전 복합재(PFRP), 볼트겹침이음(Bolted lap-joint), 실험(Experiment), 구조적 거동(Structural Behavior)

1. 서 론

FRP 복합재는 콘크리트 및 강재와 같은 기존의 구조용

재료에 비해 단위중량당 강도 및 강성이 크고, 비자성, 비전도성이며, 특히 부식에 대한 저항성 및 내화학성이 매우 크다는 장점을 가지고 있다. FRP 복합재의 물리적, 화학적, 역

* 홍익대학교 대학원 토목공학과 구조공학전공

***홍익대학교 토목공학과 교수, 교신저자(E-mail:sjyoon@hongik.ac.kr)

학적 성질의 우수한 특성으로 인해 항공우주, 조선, 자동차 및 레저 산업 뿐만 아니라 토목, 건축 분야에서도 널리 사용되기 시작하고 있다. 그러나 FRP는 강재를 대체할만한 구조용 부재로서 인식되고 있음에도 불구하고 복합재의 종류와 연결방법 등에 따라 다양한 파괴모드가 존재하여 구조적 거동의 예측이 매우 어렵다. 또한, 건설 구조재로서 사용하기 적합한 펄트루전 FRP는 대부분의 보강섬유가 부재의 축방향으로 배치되어 있어 볼트 연결부의 강도가 현저히 저하되는 약점을 가지고 있다. 구조물의 유지관리 및 보수보강을 위해 대부분의 건설 구조재는 볼트접합방법을 채택하고 있으며, 펄트루전 복합재를 건설 구조재로 사용하기 위해서는 볼트접합부의 구조적 거동에 대한 기초적인 연구가 선행되어야 할 것이다. 펄트루전 FRP 복합재의 볼트연결에 대한 연구는 Abd-El-Naby[1]에 의해 하중방향의 섬유함유량(fiber volume ratio)에 따라 변화하는 FRP의 전단강도 및 구멍의 형상에 대한 영향이 조사된바 있으며, Prabhakaran[2]에 의해 볼트로 연결된 FRP 연결부에 대해 미국강구조학회의 하중저항계수 설계법(AISC-LRFD)의 설계식을 적용한 연구가 수행된 바 있다. 그러나 파괴모드가 순단면 인장파괴(net-tension failure)와 블록전단파괴(block shear failure)로만 국한되어 있어 복합재의 다양한 파괴모드에 대한 기초자료로 활용하기에는 한계가 있다. 또한, 최(2005[3])의 연구에서는 유한요소해석을 통해 원공주위의 응력분포, 부착면에서의 마찰계수와 토크 등의 영향을 다양하게 고려하였으나 결과의 타당성을 검증하기 위한 추가적인 실험적 연구가 수행되어야 할 것이다. 이(2009[4])의 연구에서는 펄트루전 구조용 복합재의 겹침이음 실험을 통해 볼트의 수와 배열에 따른 강도증가의 정도를 정량화하였다.

이 연구에서는 볼트로 겹침이음된 펄트루전 복합재의 구조적 거동을 예측하기 위하여 펄트루전 공정을 통해 생산된 ㄱ형(Angle)과 ㄷ형(Channel) 구조용 부재에서 시편을 채취하여 인장 및 전단 시험을 수행하여 PFRP(pultruded fiber reinforced polymeric composite)에 대한 역학적 성질을 조사하였다. 이를 바탕으로 기존 연구에서 제안한 추천지표를 적용하여 파괴모드를 확인하고 실험에서 구한 파괴하중과 부재 시편의 인장강도 비교를 통해 얻어진 보정계수로부터 접합부에 대한 강도를 예측할수 있도록 하였다.

2. 볼트로 겹침이음된 복합재 연결부의 파괴모드

볼트로 겹침이음된 복합재 연결부의 파괴모드는 크게 지압파괴(bearing failure), 전단파괴(shear-out failure), 블록전단파괴(block-shear failure), 순단면 인장파괴(net-tension failure), 그리고 쪼개짐파괴(cleavage failure)로 구분되며, 각 파괴모드는 Fig. 1에 나타내었다(Bank, 2006[5]). Fig. 1에서 지압파괴

는 부재가 하중을 받으면 볼트의 목부분과 맞닿는 부재 볼트 구멍의 단면이 서서히 파쇄되면서 단면에 손실이 발생하는 파괴이고, 순단면 인장파괴는 볼트구멍에 의해 감소된 단면적으로 인해 하중에 의한 인장응력이 부재 재료의 인장강도를 초과하여 볼트가 배열된 선을 따라 단면이 끊어지듯 파괴되는 현상이다. 전단파괴는 볼트의 목 부분과 맞닿는 부재에 지압파괴가 더욱 진전되다가 전단저항에 취약해지면서 전단면을 따라 파괴되는 현상이며, 쪼개짐파괴는 볼트의 목 부분으로부터 하중을 전달받은 부재의 볼트구멍 단면이 하중에 저항하지 못하고 갈라지듯 파괴되는 현상을 말한다. 마지막으로 블록전단파괴는 전단파괴와 순단면 인장파괴가 동시에 발생하는 것으로 부재의 일부분이 뜯겨져 나가는 현상이다.

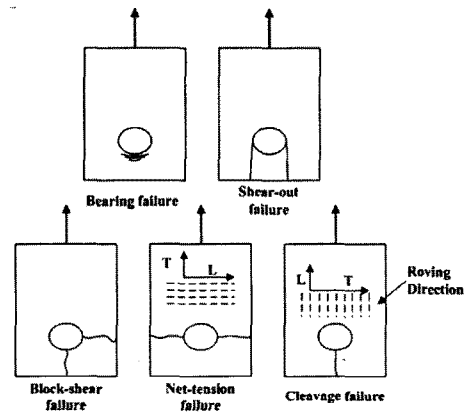


Fig. 1 Failure modes of single-bolt lap-joint in-plane connection.

3. PFRP 재료의 역학적 성질

실험에 사용된 PFRP 구조용 부재는 일반적으로 주부재와 볼트로 연결되는 브레이싱 부재 등 부부재로 많이 사용되고 있는 ㄱ형, ㄷ형 2종류의 유리섬유복합재를 선택하였다. 실험적 연구에 사용된 PFRP 복합재는 (주)한국피엔피에서 펄트루전 공정으로 생산되었으며 수지는 폴리에스터(Polyester)를 사용하였고, 섬유는 동일산자(주)에서 생산된 유리섬유를 사용하였다. 펄트루전 부재의 생산과정 특성상 길이방향으로 로빙(Roving)이 배치되었으며 3~5cm 길이로 절단되어 임의 방향으로 분산 후 접착제로 사용하여 압착된 부직포 형태 스트랜드 매트(Chopped strand mat(CSM))와 $\pm 45^\circ$ 로 직조된 로빙 크로스 매트(Roving cross mat(DB mat))가 사용되었으며, 섬유함유율은 약 65%(중량비, (주)한국피엔피)이다. 각 PFRP 부재의 보강섬유 배치 및 시편절단면은 Fig. 2에 나타내었으며 스트랜드 매트와 로빙 크로스 매트는 Fig. 3에 나타내었다.

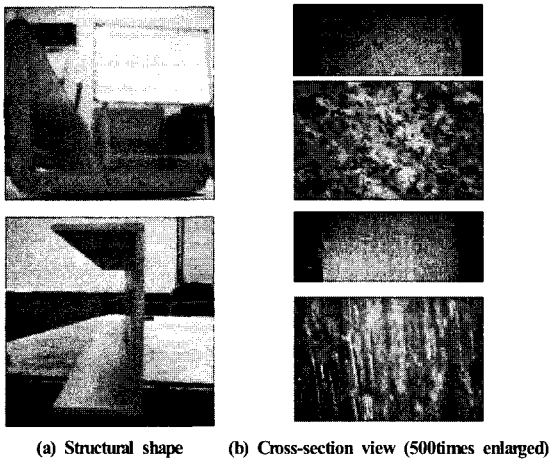
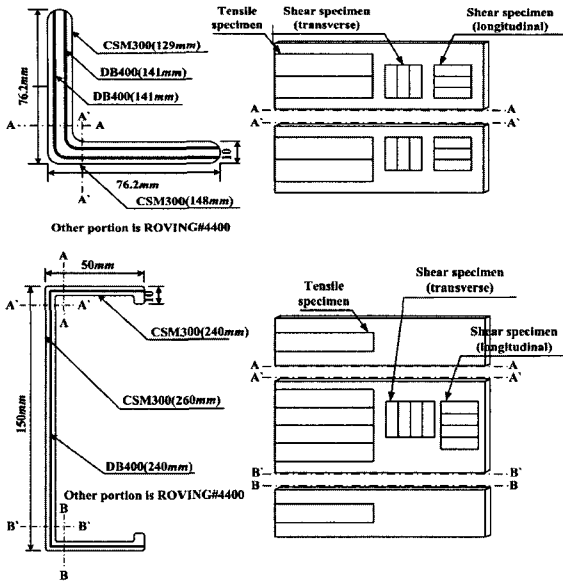


Fig. 2 Fiber architecture (Hankuk Plastic & Pultrusion. Co.).

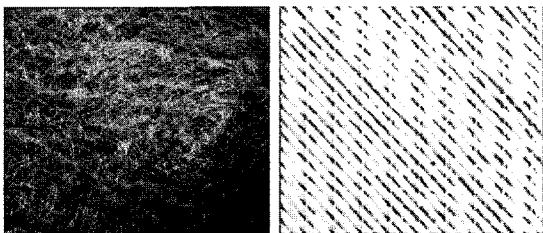


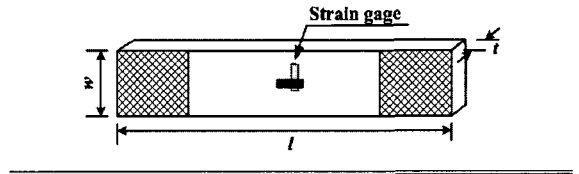
Fig. 3 CSM & DB mat (Dong-il Industrial Co.).

3.1 인장시험

인장시험 시편은 ASTM D 3039/D 3039 M-08 [6]를 참고

Table 1 Result of tensile test for PFRP specimen

Specimen taken from	Dimension(mm)			Tensile strength (MPa)	Tensile elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio
	t	w	l			
Angle	9.53	25.03	250	323.60	27.71	0.29
Channel	5.14	25.21	250	480.36	33.28	0.30



(a) Angle



(b) Channel

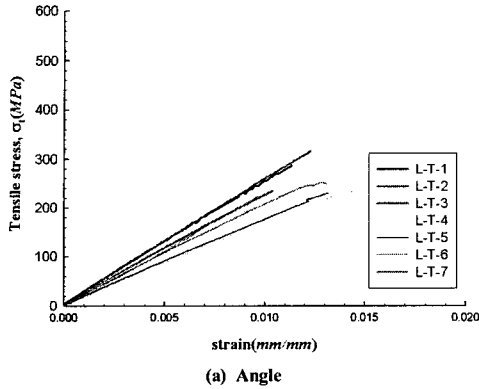
Fig. 4 Failed specimen.

하여 ㄱ형과 ㄷ형 단면 부재에서 각각 7개씩 총 14개의 시편을 폭과 길이가 일정하게 제작하였다. 인장시험은 1,000 kN 용량의 UTM에서 하중을 변위제어방식으로 3mm/min의 속도로 재하 하였으며, PFRP의 탄성계수는 ASTM D 3039/D 3039 M-08에서 제안하고 있는 방법에 따라 변형을 1,000 $\mu\epsilon$ ~ 3,000 $\mu\epsilon$ 구간의 기울기로부터 결정하였다.

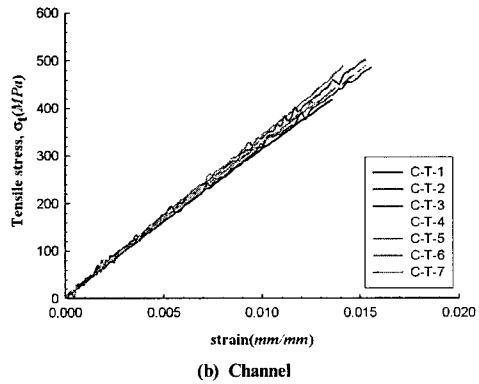
실험시편의 치수와 실험을 통해 얻은 인장강도와 탄성계수는 Table 1에 평균값으로 나타내었으며, 시편은 Fig. 4와 같은 형태로 파괴되었다. 계측기로 측정된 결과로부터 응력-변형률 관계 그래프를 Fig. 5에 나타내었다.

3.2 전단시험

PFRP 재료의 전단강도는 (주)한국화이바 기술연구소에서 Iosipescu 시험장치를 사용하여 시험하였다. 전단시험에 적용된 시험법은 ASTM D 5379 M-05[7]이며, 하중은 변위제어 방식으로 1.27mm/min의 속도로 재하하였다. 각각 재료의 부재축방향의 전단강도와 부재축에 직각방향의 전단강도를 측정하였으며, 그 결과를 Table 2에 정리하여 나타내었고, 시험장치 및 시험장면은 Fig. 6에 나타내었다.



(a) Angle



(b) Channel

Fig. 5 Test results of PFRP bar specimens.

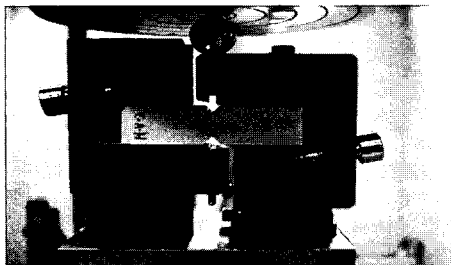
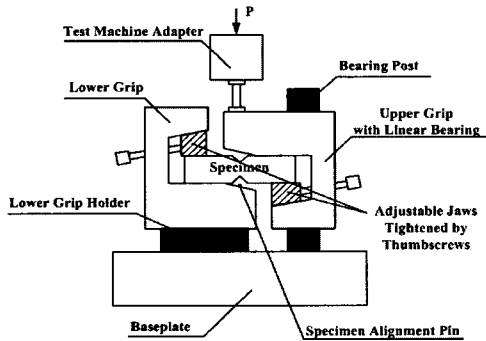
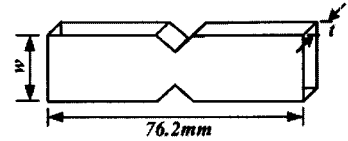


Fig. 6 Shear test using Iosipescu test apparatus (ASTM D 5379 M-05[6]).

Table 2 Result of shear test for PFRP

Specimen taken from		Dimension(mm)		Displacement (mm)	Shear strength (MPa)
		w	t		
Angle	Longitudinal	12.13	9.46	2.00	77.42
	Transverse	12.05	9.22	1.19	40.68
Channel	Longitudinal	12.20	4.92	1.43	80.28
	Transverse	12.11	4.94	1.10	56.56



4. PFRP 부재 볼트연결부의 거동특성

4.1 ㄱ형 PFRP 부재 겹침이음 시편 제작

PFRP 복합재 볼트연결부에 대한 기존의 연구 등을 참고하여 시편을 제작하였고, 겹침이음방식을 사용하였다 (Prabhakaran et al., 1995[2]). Table 4와 같이 부재 연단까지의 거리 비(e/d_b)의 영향을 조사하기 위해 e/d_b 가 2~7인 시편을 각각 5개씩 ㄱ형 부재에서 채취하여 제작하였다.

실험에 사용한 구조용 볼트의 규격은 F10T, M10이며, 볼트의 직경(d_b)은 10mm이다. 또한, w 는 Table 3에 제시된 기존 연구자료(Bank, 2006[5])와 PFRP 구조물 시공 및 생산업체들이 제시한 가이드라인을 참고하여 추천되는 규정치수 중 최소값을 만족하도록 하였다[4].

PFRP 부재 겹침이음 실험시편의 볼트구멍의 직경(d_h)은 홀쏘(hole saw)의 크기를 고려하여 볼트직경보다 약 2mm 더 큰 12.0mm로 하였다.

Table 3 Recommended geometric parameter for lap-joint connection

	Researcher		Manufacturer	
	Recommended	Minimum	Recommended	Minimum
e/d_b	≥ 3	2	≥ 3	2
w/d_b	≥ 5	3	≥ 4	3
s/d_b	≥ 2	1.5	≥ 2	1.5
p/d_b	≥ 4	3	≥ 5	4
g/d_b	≥ 4	3	≥ 5	4
d_b/t_{PL}	≥ 1	0.5	2	1
d_w/d_b	≥ 2	2	N/R	N/R
$d_h - d_b$	tight fit ($0.05d_b$)	1.58mm	1.58mm	N/A

N/A: Not applicable

N/R: No recommended

Table 4 Specimen dimension (taken from PFRP angle member)

Bolt	e/d_b	Dimension (mm)			
		e	w	l	t_{pl}
1	2	20	50	400	9.53
	3	30			
	4	40			
	5	50			
	6	40			
	7	50			

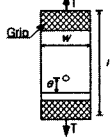


Table 5 Failure load of single-bolt connected specimen taken from PFRP angle member

Specimen	e/d_b	Failure load P_f (kN)	Ultimate tensile load P_u (kN)	P_f/P_u
L-20	2	7.84	75.66	0.10
L-30	3	14.36		0.19
L-40	4	22.59		0.30
L-50	5	27.27		0.37
L-60	6	29.60		0.39
L-70	7	32.37		0.43

4.2 ㄱ형 PFRP 부재 겹침이음 실험결과

실험결과 Fig. 7에 나타낸바와 같이 최대하중시의 실험시편의 파괴는 대부분 전단파괴가 발생하거나 조개짐파괴가 나타난 후에 블록전단파괴로 진행되는 모습을 보였으며, e/d_b 값의 증가에 따라 파괴모드가 지압파괴와 조개짐파괴가 발생한 후 전단파괴 혹은 블록전단파괴로 이어지는 경향을 관찰할 수 있었다.

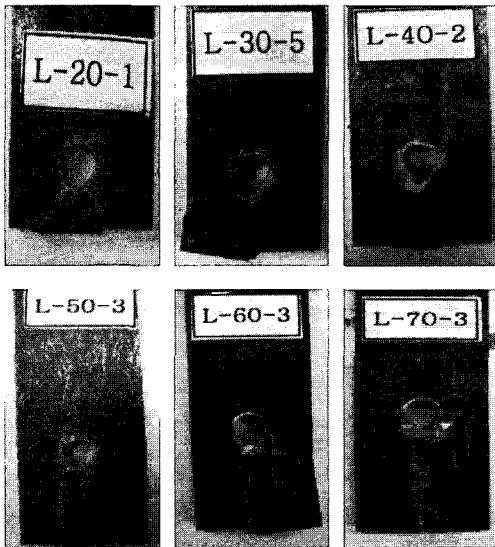


Fig. 7 Failure mode of single-bolt connected specimen taken from PFRP angle member.

실험으로부터 얻은 파괴하중은 Table 5에 정리하여 나타내었으며, e/d_b 에 따른 강도변화를 조사하기 위해 실험결과를 정리하여 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8은 실험시편의 파괴하중을 재료의 인장시편이 파괴될 때의 최대하중으로 나누어 무차원화 한 값으로 비교하여 그래프로 나타낸 것으로, Rosner(1995[8])의 연구결과와 유사하게 볼트 1개로 연결한 경우 e/d_b 값이 증가함에 따라 파괴하중이 증가하다가 e/d_b 값이 5 이상이 되면 증가폭이 줄어드는 현상을 나타내었다.

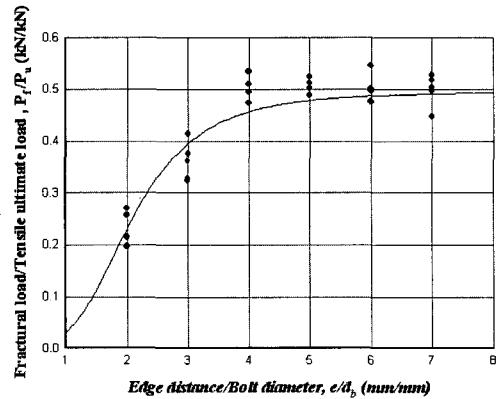


Fig. 8 Relationship between P_f/P_u and e/d_b .

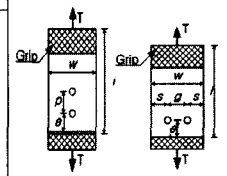
4.3 ㄴ형 PFRP 부재 겹침이음 시편 제작

ㄴ형 PFRP부재의 볼트접합 시편은 Table 6에 나타낸 바와 같이 볼트의 숫자를 2개로 하여 가로연결과 세로연결로 체결 방법을 달리하였으며, 부재 연단까지의 거리 비(e/d_b)는 앞의 실험결과를 참조하여 3~5로 하고, 각각 5개의 시편을 제작하여 인장실험을 수행하였다.

볼트의 직경은 ㄱ형 부재에서 채취하여 실험한 겹침이음 시편의 것과 동일하며, Table 3에서 제시한 가이드라인을 참고하여 추천되는 규정치수 중 최소값을 만족하도록 하였다.

Table 6 Specimen dimension (taken from PFRP channel member)

Bolt	e/d_b	Dimension (mm)						
		e	w	g	s	p	l	t_{pl}
2 (horizontal)	3	30	80	40	20	-	400	5
	4	40						
	5	50						
2 (vertical)	3	30	50	-	-	40	400	5
	4	40						
	5	50						



4.4 ㄷ형 PFRP 부재 겹침이음 실험결과

실험은 ㄱ형 부재에서 채취하여 제작한 시편의 경우와 같은 조건으로 수행하였으며, 실험시편의 파괴형태는 Fig. 9에 나타내었다.

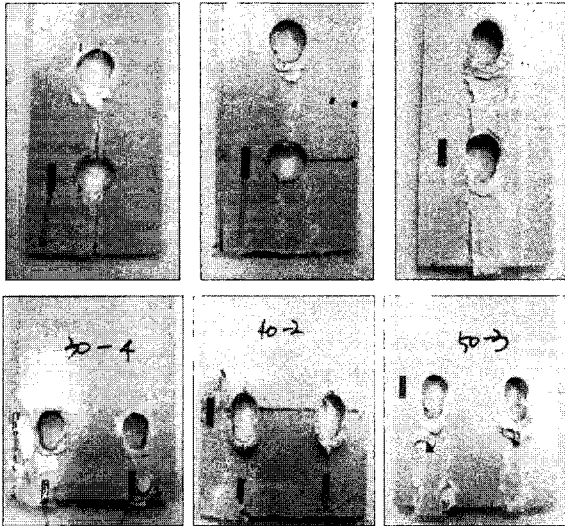
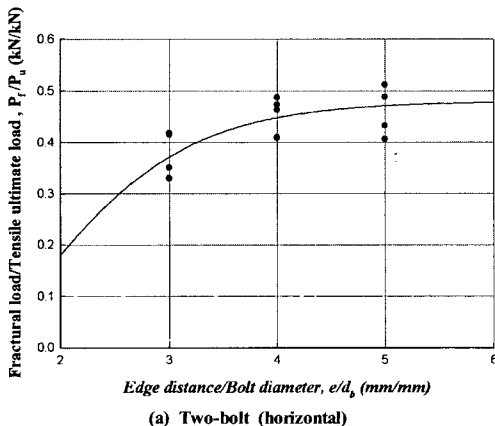
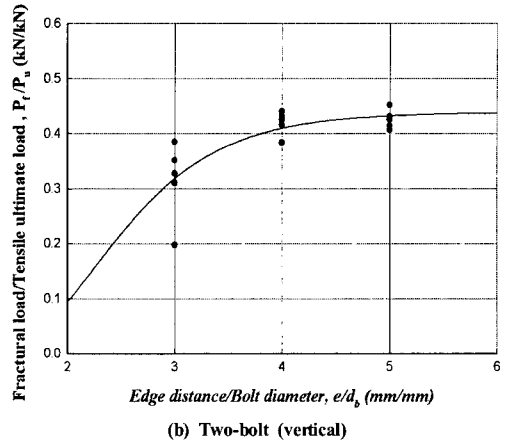


Fig. 9 Failure mode of two-bolt connected specimen taken from PFRP channel member.

Fig. 9에서 가로연결과 세로연결 시편 대부분이 전단파괴로 나타났고, 볼트를 세로로 연결한 경우 연단거리가 짧은 일부 시편에서 쪼개짐파괴가 관측되었다. ㄱ형 실험결과와 유사하게 e/d_b 값의 증가에 따라 지압파괴에 이은 전단파괴가 발생하였고, 가로연결과 세로연결 시편에서 e/d_b 의 영향은 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 대체로 파괴하중이 증가하지만 상승폭이 작고 e/d_b 가 4 이상의 값에서는 거의 상승하지 않았다. 각 시편에 대한 파괴하중은 Table 7에서 정리하여 나타내었다.



(a) Two-bolt (horizontal)



(b) Two-bolt (vertical)

Fig. 10 Relationship between P_f/P_u and e/d_b .

Table 7 Failure load of two-bolt connected specimen taken from PFRP channel member

Type	Specimen designation	e/d_b	Failure load P_f (kN)	Ultimate tensile load P_u (kN)	P_f/P_u
two-bolt (horizontal)	C-A30	3	22.73	61.55	0.38
	C-A40	4	27.59		0.46
	C-A50	5	28.93		0.46
two-bolt (vertical)	C-B30	3	19.36		0.34
	C-B40	4	25.81		0.42
	C-B50	5	26.20		0.43

5. 결론

이 연구에서는 강재에 비해 가벼우면서도 단위중량당의 강도와 강성이 크고, 부식저항성이 뛰어난 PFRP를 토목공학분야의 구조용 부재로 활용하기 위해서 재료에 대한 역학적 성질, 볼트연결부에 대한 인장실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 볼트연결된 PFRP 겹침이음 시편에 대한 인장실험 결과 시편의 파괴모드는 e/d_b 값의 증가에 따라 대부분 전단 파괴로 나타났으나 경우에 따라 쪼개짐파괴와 지압파괴가 발생하였다.
- (2) 볼트 1개를 사용한 겹침이음부는 e/d_b 값이 5 이상이 되도록 하여 사용하는 것이 바람직하다.
- (3) 볼트 2개를 사용한 겹침이음부는 e/d_b 값이 4 이상이 되도록 하여 사용하는 것이 바람직하다.
- (4) 기존 연구자들이 제안한 기하학적 추천지표에서 시편 폭의 최소값(즉, 시편 폭/볼트직경=5 이상)을 사용할 경우 순단면 인장파괴를 방지할 수 있음을 알 수 있었다.

따라서 복합재의 연결방법 중 기계식 체결방식인 볼트 연결에 대한 기존 연구자들의 기하학적 지표의 일부에 대한 타당성을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

- (5) 이 연구에서는 겹침이음 연결부에 대한 것을 실험적으로 검토한 것이며 실제 현장에서 부재를 연결할 경우와 최대한 유사하게 시편이 거동하도록 실험시편을 제작했기 때문에 이 결과는 설계에 사용할 경우 안전측 설계가 될 수 있다.

이 연구에서는 부재 축방향 하중에 대해서만 연구를 수행하였고, 다른 형태의 하중이나 조합하중을 받는 볼트연결부에 대한 연구가 추후 계속적으로 진행되어야 할 것으로 생각되며, 재료적인 측면에서 겹침이음부의 강도를 향상시킬 수 있도록 보강섬유의 양과 배치방법 등에 대해서도 연구가 수행되어야 한다. 또한, 다양한 설계변수 및 더 많은 시편에 대한 실험을 하여 연구결과의 신뢰도를 높이는 것이 필요하다.

후 기

이 연구는 한국해양수산기술진흥원의 연구과제(F20833209H14000110) 지원비의 일부와 홍익대학교 2007년도 학술연구진흥비의 지원에 의해 수행된 것으로, 이 연구비 지원에 대해 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Abd-El-Naby, S. F. M. and Hollaway, L., "The Experimental Behaviour of Bolted Joints in Pultruded Glass/Polyester Material. Part 2: Two-Bolt Joints," *Composites*, Vol. 24, No. 7, 1993b, pp. 539-546.
- 2) Prabhakaran, R., Razzaq, Z., and Devara, S., "Load and Resistance Factor Design (LRFD) Approach for Bolted Joints in Pultruded Composites," *Composites: Part B*, Vol. 27B, No. 3, 1996, pp. 351-360.
- 3) 최재민, 전홍재, 변준형, "기계적으로 체결된 복합재료 평판에서 다양한 인자의 영향에 따른 원공 주위의 응력 분포," 한국복합재료학회지, 제18권 제6호, 2005, pp. 9-18.
- 4) 이영근, "PFRP 볼트연결부의 구조적 거동특성," 홍익대학교 석사학위논문, 2009.
- 5) Bank, L. C., *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2006.
- 6) ASTM D3039/D3039M-08., Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, *American*

Society for Testing and Materials, 2008.

- 7) ASTM D5379/D5379M-05., Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-notched Beam Method, *American Society for Testing and Materials*, 2005.
- 8) Rosner, C. N. and Rizkalla, S. H., "Bolted Connections for Fiber-Reinforced Composite Structural Members: Experimental Program," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 7, No. 4, 1995, pp. 223-231.