

곡면 FRP 패널 부재 연속시공을 위한 연결부 화학적 접합 특성에 관한 연구

이규필¹, 신휴성^{2*}, 정우태³

A study on chemical bonding characteristics of the interface between curved FRP panels for consecutive structural assembly

Gyu-Phil Lee, Hyu-Soung Shin, Woo-Tai Jung

ABSTRACT A curved fiber reinforced polymer (FRP) panel is produced with a certain width depending on allowances of manufacturing processes and facilities. An targeted arch-shaped structure could be built by sequential connection of series of the FRP panels. The connection manner between the FRP panels could be given by chemical treatment, mechanical treatment and hybrid method. Among those, the connection between the panels by chemical treatment is commonly adopted. Therefore, For an optimized design of the connected part between FRP pannels, a number of direct shear tests have been undertaken in terms of a number of parameters: surface treatment conditions, bonding materials, etc.. As results, surface grinding condition by sand paper or surface treatment by sand blasting appear properly acceptable methods, and epoxy and acryl resins are shown to be effective bonding materials for the purpose in this study.

Keywords: Fiber reinforced polymer (FRP), chemical bond, surface treatment, adhesion test

요 약 곡면 FRP 패널 부재는 생산방식 및 생산설비 등의 제한으로 일정한 폭을 갖는 제품으로 생산되며, 이러한 곡면 FRP 부재를 이용하여 제작 공장 또는 현장에서 FRP 부재간 연결을 통한 연속 시공으로 목적대상 구조물을 시공할 수 있다. FRP 부재간 연결방법은 크게 화학적 연결, 기계적 연결, 그리고 복합적인 연결방법 등이 있으며, 이 가운데 접착용 수지를 이용한 화학적 연결이 가장 보편적으로 적용되고 있다. 따라서 FRP 부재의 연결부 최적화설계를 위하여 표면처리 조건 및 접착제 종류 등을 매개변수로 직접전단 시험을 수행하였다. 시험결과 sand paper를 이용한 연마 또는 sand blasting으로 FRP 부재 표면 처리 조건 및 에폭시 또는 아크릴계 접착제가 가장 효과적인 접합방식인 것으로 나타났다.

주요어: 섬유강화 복합재료, 화학적 연결, 표면처리, 접착시험

접수일(2012.1.5), 수정일(2012.1.15), 게재확정일(2012.1.20)

¹정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 수석연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 연구위원

³비회원, 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 수석연구원

*교신저자: 신휴성 (E-mail: hyushin@kict.re.kr)

1. 서 론

항공우주분야의 첨단소재로 개발된 섬유강화 복합재료(FRP, Fiber Reinforced Polymer)는 고분자 수지를 기지(matrix)로 사용하고, 이것에 유리섬유(glass fiber) 등을 섬유형태로 보강하여 제작된 복합재료로서, 부식에 대한 뛰어난 저항력과 자중 대비 높은 강도 등과 같은 장점으로 강재를 대체할 재료로 최근 각광받고 있다(Hollaway, 2010).

강재와 콘크리트는 구조물 시공에 가장 일반적이고 보편적으로 활용되고 있으나, 최근 구조물의 대형화, 장대화 추세와 함께 이들 전통적인 재료가 가지고 있는 부식 및 중량의 문제를 보완할 수 있는 대체 건설재료에 대한 요구가 증가하고 있다.

한국건설기술연구원에서는 터널구조물에 FRP 부재의 활용을 위한 아치형 터널 내공 단면형상에 따라 일정한 곡률반경을 갖는 곡면 FRP부재 생산을 위한 전용설비를 구축하고, 관련 시제품을 생산하였다. 관련 시제품에 대하여 수치해석기법 및 하중재하실험을 통한 곡면 FRP 부재의 역학적 성능 평가 및 적용성을 검토하였다(이규필과 신휴성, 2010; 이규필 등, 2011). 또한 FRP와 콘크리트 합성부재는 계면에서의 일체화를 위하여 일반적으로 규사코팅 방법이 활용되고 있으며, 효과적인 규사코팅 및 성능평가를 위한 관련 연구(이규필 등, 2011)를 통하여 곡면 FRP 부재의 활용성을 검토하였다.

곡면 FRP 부재는 생산방식 및 생산설비 등의 제한으로 일정한 폭을 갖는 제품으로 생산되며, 이러한 곡면 FRP 부재는 제작 공장 또는 현장에서 FRP 부재간 연결을 통한 연속 시공으로 목적대상 구조물을 시공할 수 있다. FRP 부재간 연결방법은 크게 화학적 연결, 기계적 연결, 그리고 복합적인 연결방법이 대표적으로 사용되며, 부재의 단면형상과 제작공법에 따라서 활용 가능한 연결방법에는 차이가 있다. 이 가운데 화학적 연결은 접착용 수지를 이용하여 FRP 부재를 연결하는 방식이 가장 보편적으로 적용되고 있으며, 기계적 연결은 FRP 패널 표면에 구멍을 만들어 볼트나 핀 등을 사용하여 체결하는 방법이다(한국건설기술연구원, 2006).

화학적 연결의 장점은 FRP 패널에 손상이 없고 두께 증가 없이 연결이 가능한 가장 일반적인 연결방법이라 할 수 있으나, 연결 후 분해가 어렵고 연결검사가 어려운 단점을 가지고 있다. FRP 패널을 화학적인 방법으로 연결하기 위해서는 FRP 부재 표면처리 및 접착제 종류별 연결특성 파악이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 FRP 부재의 연결부 최적화설계를 위하여 표면처리 조건 및 접착제 종류 등을 매개변수로 직접전단 시험을 수행하였다. 시험결과 sand paper를 이용한 연마 또는 sand blasting으로 FRP 부재 표면 처리 조건 및 에폭시 또는 아크릴계 접착제가 가장 효과적인 접합방식인 것으로 나타났으며, 관련 시험내용을 정리하면 다음과 같다.

2. 곡면 FRP 시제품 연결부 개요

곡면 FRP 패널 자동화 제작 장치의 성능파악 및 제품생산시의 문제점 도출 및 해결을 위하여 시제품을 생산하였다. 시제품은 그림 1에서 곡률반경 6,500 mm의 개구형과 곡률반경 3,800 mm의 중공형 2가지 형상이다.

FRP 부재의 연결방식은 가장 보편적으로 적용되고 있는 접착용 수지를 이용하여 FRP 패널을 연결하는 화학적 연결방식과 FRP 패널 표면에 구멍을 만들어 볼트나 핀 등을 사용하여 체결하는 기계적 연결방식으로 크게 구분할 수 있으며(그림 2 참조), 본 연구에서 제작한 곡면 FRP 시제품은 그림 3과 같이 화학적 연결을 통하여 연속시공이 되도록 고안되었다. 또한 곡면 FRP 현장시공은 그림 4에서 보이는 바와 같이 FRP 부재 현장 설치 후 콘크리트 현장타설을 통하여 대상 구조물 시공 및 프리캐스트 공장제품을 생산하여 현장에 시공하는 방안이 가능하다.

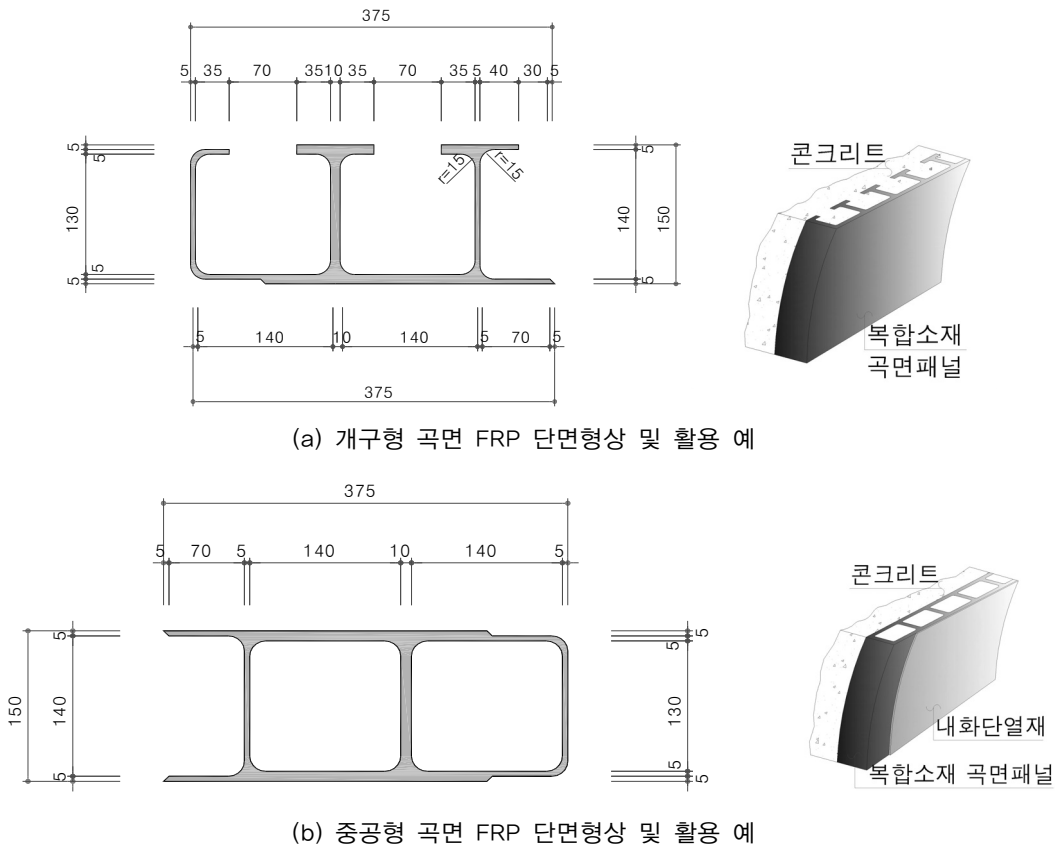
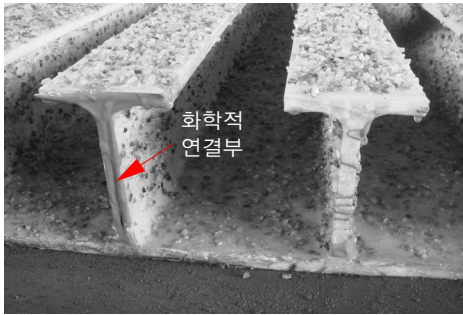


그림 1. 곡면 FRP 시제품 단면형상 (단위 : mm)



(a) 화학적 연결



(b) 기계적 연결

그림 2. FRP 부재 연결방식

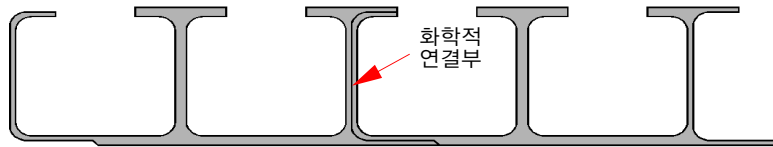


그림 3. 화학적 연결을 통한 곡면 FRP 연결 개요도



(a) 현장타설을 위한 FRP 부재 설치



(b) 프리캐스트 제품 생산

그림 4. 곡면 FRP 부재 시공 개요

3. FRP 부재 화학적 연결부 성능 평가

3.1 연결부 성능평가를 위한 시험 개요

본 연구에서는 FRP 부재의 연결부 최적화설계를 위하여 연결부의 길이, 표면처리 조건 및 접착제 종류 등을 매개변수로 직접전단 시험을 수행하였다.

직접전단 시험용 시편제작을 위하여 그림 5에서 보이는 바와 같이 FRP 직선부재를 별도로 제작 및 가공하여 KS M 3734(접착제의 인장 전단 접착 강도 시험 방법)에 따라 그림 6에서 보이는 바와 같은 제원으로 제작하였다.



그림 5. 직접전단 시험을 위한 FRP 직선부재

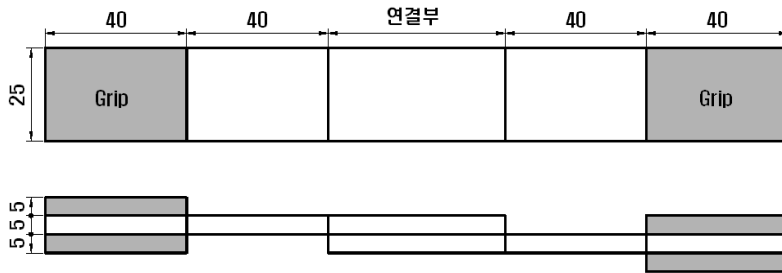


그림 6. 직접전단 시험 시편 제원(단위: mm)

3.2 직접전단 시험 매개변수

FRP 부재 연결부 성능평가를 위한 직접전단 시험과 관련된 매개변수는 연결부 길이, 표면처리방법 및 접착제 등 3가지를 선정하였다.

접착제의 종류는 본 시험에 활용한 FRP 부재 생산시 활용한 재료가 불포화폴리에스터임을 고려하여 불포화폴리에스터에 대해 접착력이 우수한 것으로 알려진, 우레탄계 접착제(S사, 1액형), 에폭시계 접착제(N사, 주제 : 경화제 = 100 : 45), 불포화 폴리에스테르 접착제(E사, 주제 : 경화제 : 경화촉진제 = 100 : 1 : 0.3) 및 아크릴계 접착제(H사)를 선정하였다.

연결부길이 변화조건은 50 mm, 75 mm, 100 mm, 125 mm, 150 mm 5가지로 변화시켰다. FRP 부재는 인발성형을 통한 제품 생산시 효율성을 높이기 위해 표면에 코팅제가 도포되며, 이러한 코팅제는 FRP 부재간 접합 및 FRP와 콘크리트의 접합에 큰 영향을 미치므로, FRP 부재 표면처리는 시공시 매우 중요한 검토사항이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 표면처리방법에 의한 영향분석을 위하여 무 처리, sand paper를 이용한 연마 및 sand blasting 3가지 변화조건에 대하여 직접전단시험을 수행하였다.

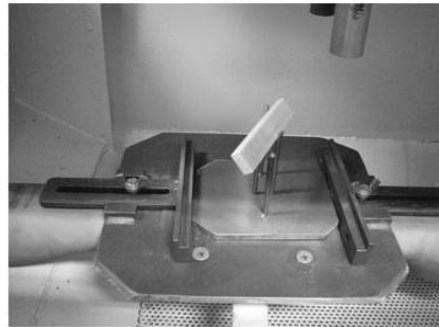
sand blasting 이란 연마재를 고압으로 분사하여 소재 표면을 다듬거나 절삭하는 가공방법으로 과거에는 모래를 연마재로 분사했기 때문에 sand blasting이라 명명되었으나, 최근에는 알루미늄(산화 알루미늄) 또는 탄화규소 등 세라믹 분말, 글래스 비드, 플라스틱 파우더 등을 연마재로 사용하고 있다.

본 연구에서는 그림 7에서 보이는 바와 같이 #100 sand paper 및 알루미늄을 이용한 sand blasting (작업 시간 500초/1개)을 이용하여 FRP 부재의 표면처리를 수행하였으며, 표면처리 후 FRP 부재의 표면상태는 그림 8과 같다.

표면처리방법에 의한 영향분석을 위하여 연결부 길이 150 mm 고정조건에 대하여 상기 3가지 표면처리방법에 대하여 4가지 접착제 변화조건에 대하여 시험을 수행하였으며, 접착제종류 및 연결부 길이변화에 의한 영향분석을 위하여 sand paper를 이용한 연마 표면처리방법을 고정조건으로 하고, 연결부 길이 및 접착제종류 변화조건에 대하여 시험을 수행하였다. 상기와 같이 직접전단 시험은 총 28개 조건에 대하여 각각 3회씩 시험을 수행하였다(표 1 참조).

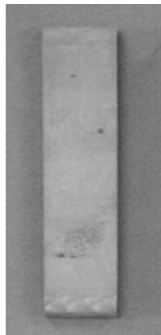


(a) sand paper 연마

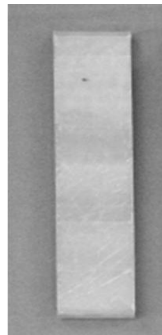


(b) sand blasting 챔버 내부

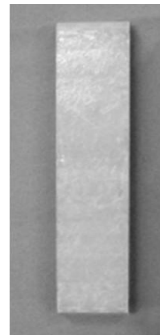
그림 7. FRP 부재 표면처리 전경



(a) sand blasting



(b) sand paper 연마



(c) 무 처리

그림 8. FRP 부재 표면처리 후 전경

표 1. 직접전단 시험변수 및 조건

변수	표면처리	접착제 종류	연결부 길이
표면처리방법 및 접착제 종류	무 처리	불포화폴리에스터	150 mm
		우레탄	150 mm
		에폭시	150 mm
		아크릴	150 mm
	sand paper 연마	불포화폴리에스터	150 mm
		우레탄	150 mm
		에폭시	150 mm
		아크릴	150 mm
	sand blasting	불포화폴리에스터	150 mm
		우레탄	150 mm
		에폭시	150 mm
		아크릴	150 mm
접착제종류 및 연결부 길이	sand paper 연마	불포화폴리에스터	50 mm
			75 mm
			100 mm
			125 mm
			150 mm
		우레탄	50 mm
			75 mm
			100 mm
			125 mm
			150 mm
		에폭시	50 mm
			75 mm
			100 mm
			125 mm
			150 mm
		아크릴	50 mm
			75 mm
			100 mm
			125 mm
			150 mm

각 접착제를 이용한 시편제작시 KS M 3718에 따라 온도 23±2°C, 상대습도 50±10%의 항온항습 조건에서 제작하였으며, 접착제의 완전경화시간을 고려하여 3일간 경화하였다.



그림 9. 직접전단 시험체 제작 전경

3.3 실험결과 분석

3.3.1 표면처리 방법 변화에 따른 결과 분석

FRP 부재 연결부 성능평가를 위한 직접전단 시험결과 FRP 부재 표면 무 처리 시험편은 대부분 (아크릴 접착제 조건 제외) 파괴면이 매끈한 반면에 sand paper 및 sand blasting 처리 시험편은 FRP 부재의 층간 박리 또는 연결부 접착면 부근에서 파괴가 발생한 것으로 나타났다. 이는 FRP 부재 표면 코팅제 영향으로 FRP 부재표면과 접착제가 박리되는 응집파괴가 발생하였기 때문이며, 이로 인하여 FRP 부재간 접착강도가 크게 저하된 것으로 나타났다(그림 10~11 참조).

그림 10에서 보이는 바와 같이 동일한 표면처리 조건이라 하더라도 우레탄 또는 불포화폴리에스터 접착제 보다 에폭시 또는 아크릴 접착제가 높은 접착력을 발현하는 것으로 나타났다.

그림 11에서 보이는 바와 같이 FRP 부재 표면 무 처리 및 우레탄 접착제 조건이 가장 접착강도가 낮은 것으로 나타났으며, sand blasting 처리 시험편을 에폭시 접착제로 접착한 경우 최대 접착강도를 나타내었으며, 최저 접착력 발생조건보다 약 7.5배 높다.

또한 표 2에서 보이는 바와 같이 에폭시 접착제의 경우 표면처리 방법 변화에 따른 평균 전단력은 19.4 kN, 표준편차는 4.7인 것으로 나타났다. 따라서 에폭시 접착제가 FRP 부재의 표면처리에 가장 큰 영향 받는 것으로 나타났으며, 아크릴 접착제의 경우 표면처리 방법 변화에 따른 평균 전단력은 21.5 kN, 표준편차 1.1로 표면처리 조건에 큰 영향을 받지 않으며, 가장 접착효과가 우수한 것으로 판단된다.

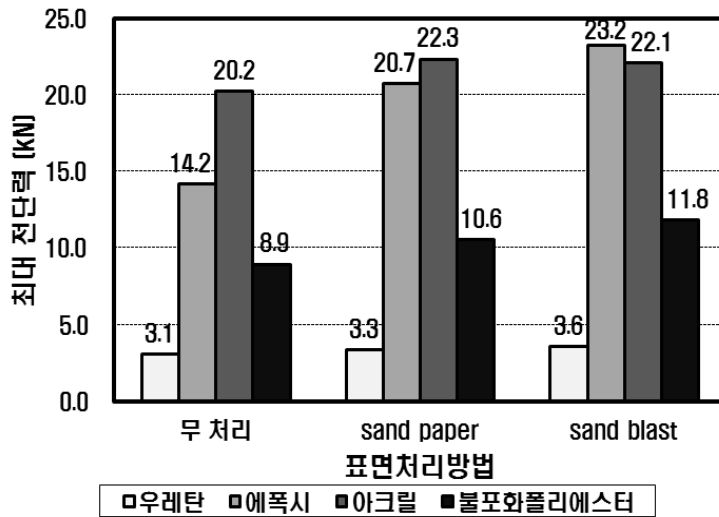


그림 10. 동일 표면처리 조건별 접착제 변화에 따른 전단력 변화

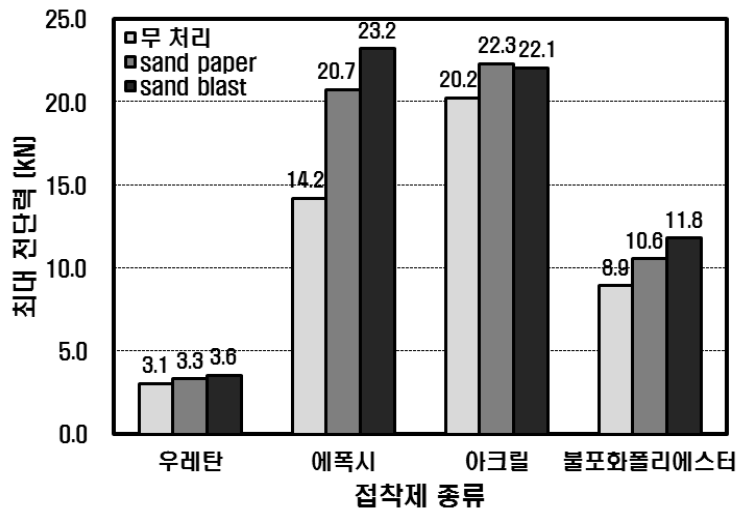


그림 11. 각 접착제별 표면처리 변화에 따른 전단력 변화

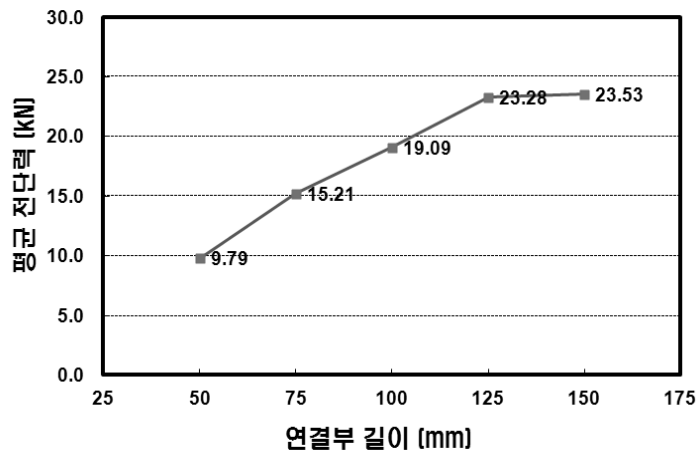
표 2. 표면처리 및 접착제 종류 변화에 따른 직접전단시험 평균값 및 표준편차

표면처리	우레탄	에폭시	아크릴	불포화폴리에스터
무 처리	3.0 kN	14.2 kN	20.2 kN	8.9 kN
sand paper 연마	3.3 kN	20.7 kN	22.3 kN	10.6 kN
sand blasting	3.6 kN	23.2 kN	22.1 kN	11.8 kN
평균	3.3 kN	19.4 kN	21.5kN	10.4 kN
표준편차	0.3	4.7	1.1	1.4

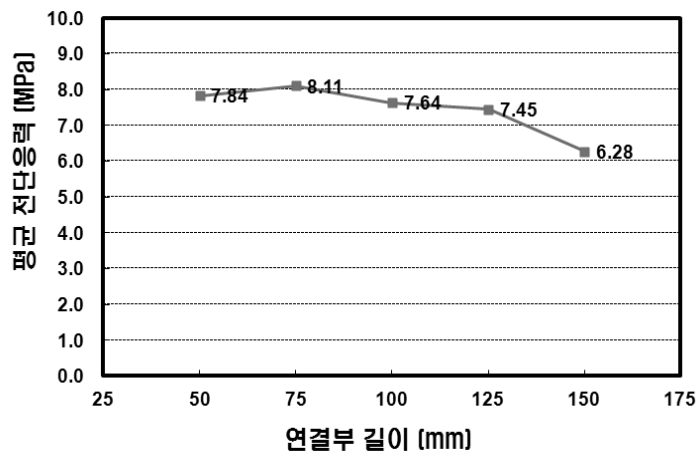
3.3.2 연결부 길이 변화에 따른 결과 분석

곡면 FRP 연속시공시 연결부의 길이는 구조물의 역학적 안정성 확보는 물론 FRP 부재 제작시 소요되는 수지와 섬유량 등에 큰 영향을 미치므로, 이에 대한 적절한 설계가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 sand paper로 FRP 부재표면 처리 후 접착제 종류 변화 및 연결부 길이변화를 매개변수로 하는 실험적 연구를 수행하였다.

연결부 길이 증가시 일반적으로 전단력 증가와 동시에 접합부 면적도 증가하게 됨으로 효율적인 연결부 길이 분석을 위하여 본 연구에서는 전단응력을 토대로 실험결과를 분석하였다.



(a) 연결부 길이에 따른 평균 전단력 변화



(b) 연결부 길이에 따른 평균 전단응력

그림 12. 기존 직접전단시험결과(한국건설기술연구원, 2010)

에폭시 접착제로 수행한 기존 직접전단시험 결과에 따르면, 연결부 길이가 증가함에 따라 일정 부착 길이 이상이 되면 전단력이 거의 증가하지 않으며 평균 전단응력의 경우 일정길이 이후로 감소하는 경향을 나타냈다(그림 12 참조).

우레탄 접착제의 경우 전단응력은 약 0.5~1.1 MPa로 연결부 길이 증가에 따른 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 본 실험에 사용한 우레탄 접착제가 FRP 부재에 대한 침투성이 낮고 신축성 및 내충격성이 높아 우레탄 접착제 자체의 물리적 특성만이 접착효과로 발현된 것으로 판단된다.

불포화폴리에스터 연결부 길이가 75 mm에서 100 mm로 증가시 전단력은 5.6 kN에서 8.9 kN으로 증가하나, 전체적인 연결부 길이증가에 따른 전단응력의 변화양상은 그림 13에서 보이는 바와 같이 50 mm에서 150 mm로 증가하는 경우 전단응력은 4.2 MPa에서 2.8 Mpa로 감소하는 것으로 나타났다. 일반적으로 접착강도는 접착제와 부착면의 젖음성과 관계가 있으며, 젖음성이 클수록 접착강도가 증가하는 것으로 알려져 있으나(주효숙 등, 2005), 불포화 폴리에스터계는 경화촉진제의 사용으로 양생시간이 단축되어 부착면이 접착제에 충분히 젖지 않은 상태에서 경화 되어 낮은 접착강도를 발현한 것으로 판단된다.

연결부 길이 증가에 따른 직접전단 실험결과, 기존 연구와 유사하게 연결부 길이 증가에 따라 전단력이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 에폭시와 아크릴 접착제의 경우, 100 mm, 125 mm에서 실험오차로 인하여 전단력이 낮게 측정되어 기존 결과와 차이가 발생하였다. 불포화폴리에스터 및 우레탄 접착제의 경우, 100 mm 이후로 기존 연구와 유사하게 전단력이 증가하지 않는 경향을 보이며, 평균 전단응력의 경우 125 mm 이후로 수렴하는 것으로 나타났다.

따라서 본 시험조건인 sand paper 표면처리 및 에폭시 또는 아크릴 접착제 사용조건에서는 연결부 길이는 125 mm가 가장 효과적인 것으로 판단된다.

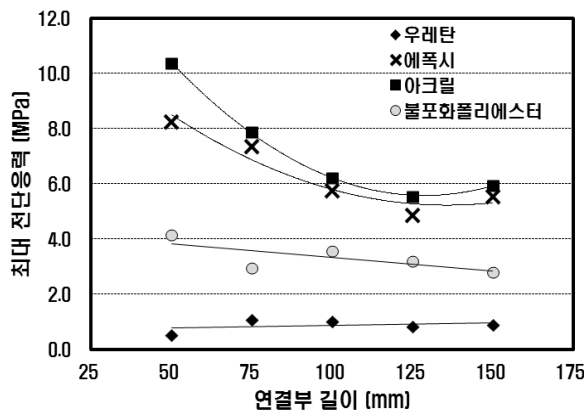


그림 13. 각 접착제별 연결부 길이변화에 따른 전단응력 변화

4. 결 론

곡면 FRP 연속시공시 연결부의 길이는 구조물의 역학적 안정성 확보는 물론 FRP 부재 제작시 소요되는 수지와 섬유량 등에 큰 영향을 미치므로, 이에 대한 적절한 설계가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 FRP 부재의 연결부 최적화설계를 위하여 표면처리 조건 및 접착제 종류 등을 매개변수로 직접전단 시험을 수행하였으며, 상기 내용을 정리하면 다음과 같다.

1. FRP 부재 연결부 성능평가를 위한 직접전단 시험결과 sand paper 및 sand blasting 처리 시험편은 FRP 부재의 층간 박리 또는 연결부 접착면 부근에서 파괴가 발생하였으나, 무 처리 시험편은 대부분 FRP 부재 표면 코팅제 영향으로 FRP 부재표면과 접착제가 박리되는 응집파괴가 발생하며, 표면처리 방법에 따라 FRP 부재 접합면의 파괴 매커니즘이 상이한 것으로 나타났다. 따라서 FRP 부재 연속시공시에는 부재형상 및 시공성 등을 고려한 효과적인 표면처리 방법이 선행되어야 할 것으로 판단된다.
2. 총 4가지 접착제 종류에 대한 직접전단 시험결과 에폭시 및 아크릴 접착제가 우수한 접착 효과를 발현하는 것으로 나타났으나, 에폭시 접착제는 아크릴 접착제 보다 FRP 부재의 표면처리에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 본 시험결과 범위 내에서는 아크릴 접착제가 표면처리의 영향을 비교적 적게 받으며 높은 접착효과를 발현 할 수 있을 것으로 판단된다.
3. 곡면 FRP 연속시공시 연결부의 길이는 구조물의 역학적 안정성 확보는 물론 FRP 부재 제작시 연결부가 길어지는 경우 소요되는 수지와 섬유의 사용량 등에 큰 영향을 미치므로, 이에 대한 적절한 설계가 요구되며, 본 연구에서 수행한 시험결과를 토대로 분석하면 아크릴 접착제 사용 및 곡면 FRP 화학적 연결부 중 본 실험과 동일하게 전단을 받는 부분의 길이가 125mm인 경우 가장 효과적인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2009년도 건설기술 혁신사업(과제번호09기술혁신C01, 과제명 : 프리캐스트 복합소재 곡면패널 개발 및 수로터널 활용 기술 개발)에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

참 고 문 헌

1. 이규필, 신휴성, 김승한 (2011), “새로운 FRP-콘크리트 전단부착성능 평가법을 활용한 최적 FRP 규사코팅 조건에 관한 연구”, 한국터널지하공간학회논문집, Vol. 13, No. 3, pp. 227-289.
2. 이규필, 신휴성, 김승한 (2011), “터널 라이닝 구조체로서 활용을 위한 곡면 FRP-콘크리트 복합부재의 역학적 거동특성 분석 연구”, 한국터널지하공간학회논문집, Vol. 13, No. 2, pp. 149-158.
3. 이규필, 신휴성 (2010), “터널 라이닝 구조체로서 곡면 섬유강화 복합재료의 적용성 검토를 위한 수치해석적 연구”, 한국터널공학학회논문집, Vol. 12, No. 6, pp. 451-461.
4. 주효숙, 임동혁, 박영준, 김현중 (2005), “점착물성과 접촉각의 관계”, 한국접착 및 계면학회 논문집, Vol. 6, No. 1, pp. 19-26.
5. 한국건설기술연구원 (2006), “장수명 합리화 바닥판 개발-무강재 바닥판”, 건기연 2006-067 한국건설기술연구원 기본사업 최종보고서.
6. 한국건설기술연구원 (2010), “프리캐스트 복합소재 곡면패널 개발 및 수로터널 활용기술 개발”, 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업 1차년도 연차보고서.
7. 한국건설기술연구원 (2011), “프리캐스트 복합소재 곡면패널 개발 및 수로터널 활용기술 개발”, 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업 2차년도 연차보고서.
8. Holloway, L.C. (2010), “A review of the present and future utilization of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties”, Construction and Building Materials, Vol. 24, pp. 2419-2445.