

탄소섬유메쉬와 콘크리트의 부착거동

윤현도^{1)*} · 성수용¹⁾ · 오재혁¹⁾ · 서수연²⁾ · 김태용³⁾

¹⁾ 충남대학교 건축공학과 ²⁾ 충주대학교 건축공학과 ³⁾ 광주대학교 건축공학과

(2002년 10월 15일 원고접수, 2003년 9월 15일 심사완료)

Bond Behavior between Parent Concrete and Carbon Fiber Mesh

Hyun-Do Yun^{1)*}, Soo-Yong Sung¹⁾, Jae-Hyuk Oh¹⁾, Soo-Yeon Seo²⁾, and Tae-Yong Kim³⁾

¹⁾ Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea

²⁾ Dept. of Architectural Engineering, Chungju National University, Chungju, 380-702, Korea

³⁾ Dept. of Architectural Engineering, Kwangju University, Kwangju, 503-703, Korea

(Received October 15, 2002, Accepted September 15, 2003)

ABSTRACT

The strengthening of concrete structures in situ with externally bonded carbon fiber is increasingly being used for repair and rehabilitation of existing structures. Because carbon fiber is attractive for this application due to its good tensile strength, resistances to corrosion, and low weight. Generally bond strength and behavior between concrete and carbon fiber mesh(CFM) is very important, because of enhancing bond of CFM. Therefore if bond strength is sufficient, it will be expect to enhance reinforcement effect. Unless sufficient, expect not to enhance reinforcement effect, because of occurring bond failure between concrete and CFM. In this study, the bond strength and load-displacement response of CFM to the concrete by the direct pull-out test(the tensile-shear test method) were investigated using the experiment and the finite element method analysis with ABAQUS. The key variables of the experiment are the location of clip, number of clips and thickness of cover mortar. The general results indicate that the clip anchorage technique for increasing bond strength with CFM appear to be effective to maintain the good post-failure behavior.

Keywords : carbon fiber mesh(CFM), bond strength, bond failure, FE models, ABAQUS

1. 서 론

탄소섬유메쉬(Carbon Fiber Mesh, 이하 CFM)는 탄소 섬유를 격자형태로 성형한 콘크리트 보강재로써 자중에 비해 높은 인장강도를 가지고 있으며, 가공 및 시공이 용이하고, 내구성 및 경제성 등이 우수한 장점을 가지고 있는 것으로 보고되고 있다¹⁻³⁾. 이러한 CFM 보강기법은 탄소섬유쉬트(carbon fiber sheet, CFS)나 탄소섬유적층판(carbon fiber reinforced plastics laminate, CFRP)과는 다르게 메쉬형태를 띠며 모르타르(mortar)를 이용해 부착시키기 때문에 보강재가 지나치게 얇아 유연성이 크거나 보강공사시 기존 구조체와 밀착되지 않아 보강효과가 저하되는 기존의 CFS 보강공법이 갖는 단점을 보완한 것이다. 또한 강판 에폭시 접착공법이 갖는 주요한 단점인 강판의 자중, 시공상 어려움, 콘크리트와의 낮은 합성작용, 내화

성의 미확보 문제, 강판의 박리에 의한 조기 파괴 등과 같은 문제점에 대한 대안이 될 수 있을 것으로 기대된다. CFM 보강기법의 일종인 직사각형 단면형태의 탄소섬유로드가 격자형태로 배치된 NEFMAC은 실질적으로 국외의 경우 이미 널리 사용 중에 있으며, 국내의 경우에도 도입하여 사용하기 위한 기초 연구가 진행되고 있는 실정이다⁴⁾. 최근 다양한 단면의 CFM이 기존 구조물의 보강재로 적용되기 시작하고 있어 CFM을 이용한 기존 철근콘크리트 구조물의 보강기법 및 보강된 부재의 구조성능 규명 및 사용성 향상에 대한 연구가 요구되고 있다. CFM 보강기법에 의해 보강된 기존 철근콘크리트 부재의 구조성능 평가에 대한 국내의 연구사례는 매우 부족하지만 CFS 및 강판보강과 같은 기존 보강기법을 CFM으로 대체되고 있는 현 시점에서 이에 대한 연구는 매우 중요하고 시급하다고 할 수 있다. 특히, CFM을 이용하여 보강된 철근콘크리트 부재의 구조거동 및 모재와 보강재 사이의 합성작용에 관한 기초연구 조차도 이루어지지 않은 현시점에서 본 연구는 CFM과 콘크리트의 부착특성 규명을 위한 일

* Corresponding author

Tel : 042-821-5622 Fax : 042-823-9467

E-mail : wiseroad@cnu.ac.kr

련의 연구로서 인장전단에 의한 콘크리트와 CFM 사이의 부착파괴 거동을 실험적으로 규명하고, 또한 이러한 실험 결과를 이용하여 범용 비선형 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS⁵⁻⁶⁾를 이용하여 CFM과 콘크리트의 부착특성을 묘사할 수 있는 해석기법을 제안하고자 한다.

2. 실험 연구

2.1 시험체

시험체의 특성 및 형상은 Table 1 및 Fig. 1에 나타난 바와 같고 각 시험체는 변수별로 3개씩 총 36개를 제작하였다. 시험체의 형상은 Fig. 1에 나타난 바와 같고 모재 콘크리트 블록은 20×20×40 cm의 크기로 설계기준강도 (f_{ck}) 23.54 MPa의 철근콘크리트로 제작되었다. CFM은 Fig. 2와 같이 고성능 연속섬유를 직경 3mm 원형단면의 로드형태로 제작하여 이를 가로·세로 동일간격으로 교차되도록 제작된 메쉬형태로써 전체길이 675mm, 부착길이 263mm, 부착 폭 150mm가 되도록 메쉬를 절단하여 모재 콘크리트에 부착하였다. CFM을 모재 콘크리트에 부착하기 위하여 사용된 정착철물(Clip set)은 Fig. 3과 같이 강재를 가공하여 제작하였으며 모재 콘크리트에 HILTI사의

DX450건 및 직경 1.5mm 핀을 이용하여 CFM을 고정하였다. 모재 콘크리트에 CFM을 고정한 후 실험조건에 따라 30, 50 및 60 mm 두께의 무수축 모르타르로 마감 처리하였다.

2.2 실험 계획

CFM과 모재 콘크리트의 부착거동을 규명하기 위하여 본 연구에서는 정착철물의 설치유무, 정착철물의 정착위치, 정착철물의 설치 열 수, 부착 모르타르의 유무, 부착 모르타르의 두께 등을 변수로 한 총 36개 시험체를 계획하여 인장전단 실험을 실시하였다.

먼저 CFM을 모재 콘크리트에 부착하는데 있어 정착철물의 합리적인 부착방법⁷⁾을 결정하기 위하여 Table 1에 나타난 Type I 과 같이 정착철물의 정착형태 및 위치를 변수로한 1차 부착실험을 계획하였다. Type I에 대한 부착실험 결과에 근거하여 정착철물의 합리적인 설치 방법을 결정하고 이러한 방식에 따라 설치된 정착철물의 설치 유무, 정착철물의 설치 열 수(Type II), 부착 모르타르의 유무, 부착 모르타르의 두께(Type III), 그리고 정착철물과 부착 모르타르의 합성작용 효과(Type IV)를 변수로 하여 2차 부착실험을 계획하였다.

Table 1 Summaries of specimens

Type	Specimen	Bond length (mm)	Number of clips	Thickness of mortar (mm)	Method to finish
I	BT1	263	1	-	Clip
	BT2	263	1	-	Clip
	BT3	263	1	-	Clip
II	B1	263	1	-	Clip
	B2	263	2	-	Clip
	B3	263	3	-	Clip
III	B4	263	-	30	Mortar
	B5	263	-	50	Mortar
	B6	263	-	60	Mortar
IV	B7	263	1	30	Clip+mortar
	B8	263	2	30	Clip+mortar
	B9	263	3	30	Clip+mortar

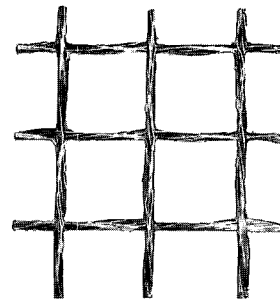


Fig. 2 CFM

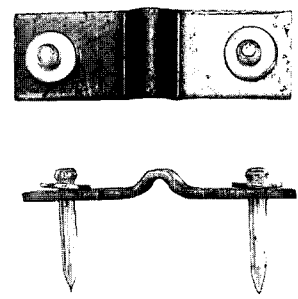


Fig. 3 Clip set

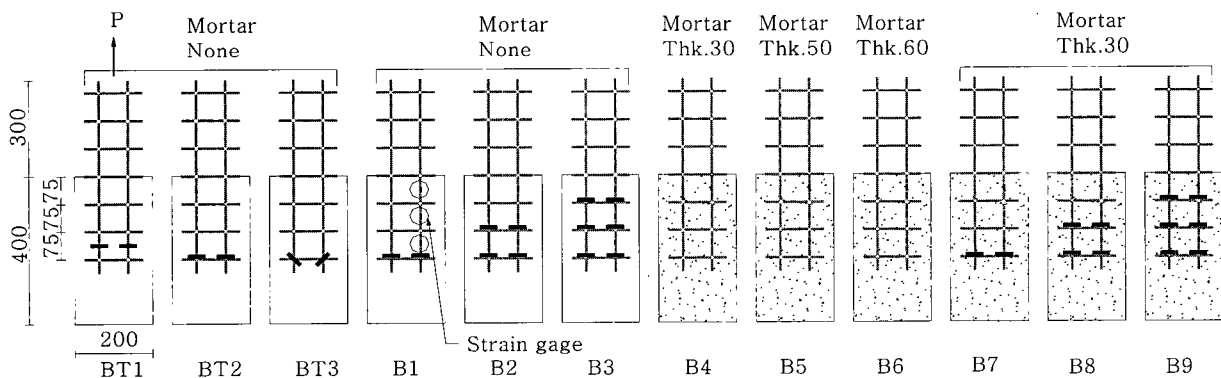


Fig. 1 Details of specimens (unit : mm)

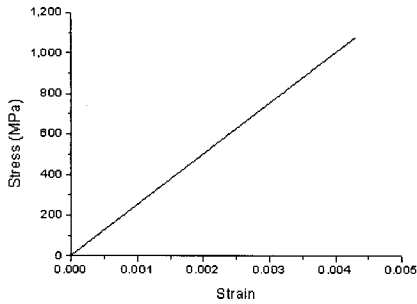


Fig. 4 Stress-strain curve for CFM

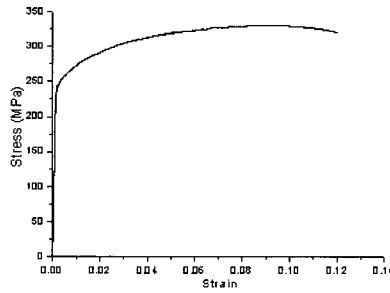


Fig. 5 Stress-strain curve for clip

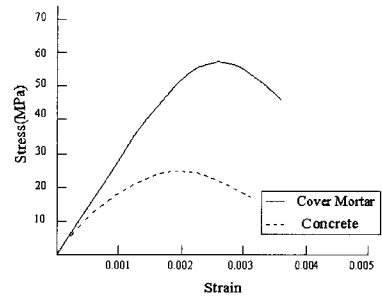


Fig. 6 Stress-strain curve for cover mortar and concrete

2.3 재료 실험

시험체에 사용된 CFM, 정착철물, 부착 모르타르 및 모재 콘크리트에 대한 재료시험은 각각 KS 규정에 준하여 실시하였으며 그 결과를 Fig. 4~6에 나타내었다. CFM의 인장강도와 탄성계수는 각각 1.08×10^3 MPa, 2.49×10^5 MPa로 선형적 특성을 보였다. 인장시험(Tensile-coupon test)을 통한 정착철물의 재료적 특성값인 항복강도, 인장강도 및 탄성계수는 각각 245.17 MPa, 333.42 MPa 및 1.96×10^5 MPa로 나타났다. 또한 부착 모르타르의 압축강도는 KS L 5105 실험방법에 의한 50×50×50 mm 입방형 공시체 6개를 제작하여 평가되었으며 실험결과 압축강도와 탄성계수는 각각 53.93~58.84 MPa, 2.65×10^4 MPa로 나타났다. 모재 콘크리트의 설계강도는 23.54 MPa로 기성 레미콘 제품을 사용하였으며 재령 28일 압축강도는 Fig. 6과 같이 24.03 MPa로 나타났다.

2.4 실험 방법

Fig. 7은 본 연구에서 CFM과 콘크리트의 부착거동을 규명하기 위하여 실시된 인장전단 실험의 설치상황을 나타낸 것이다. 시험체는 콘크리트와 CFM의 계면에서 순수 인장전단이 발생하도록 3,000 MPa 용량의 오일잭(oil jack)과 모재 콘크리트를 동일 면상에 위치하도록 Fig. 7과 같이 강성골조(strong frame)에 수직으로 설치하였다. 오일잭에 의한 하중 재하속도는 1 mm/min의 속도로 섬유가 파단 되거나 모재와 부착 모르타르의 계면에서 부착파괴가 발생될 때까지 점진적으로 가력하였으며 부착면에 도입된 하중 측정은 500 MPa 용량의 로드셀(load cell)을 이용하여 측정하였다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 CFM의 각 그리드(grid) 중 양부에 변형률 게이지(wire strain gauge)를 1개씩 부착하여 재하단계별로 CFM의 변형률을 측정하였으며, Fig. 7과 같이 변위계(linear variable displacement transducer)를 각각 4곳에 설치하여 CFM의 변형량과 미끄러짐 변형량을 측정하였다. 또한 각 단계별 하중 및 변위량은 정적변형측정기(TDS-601)를 이용하여 획득하였다.

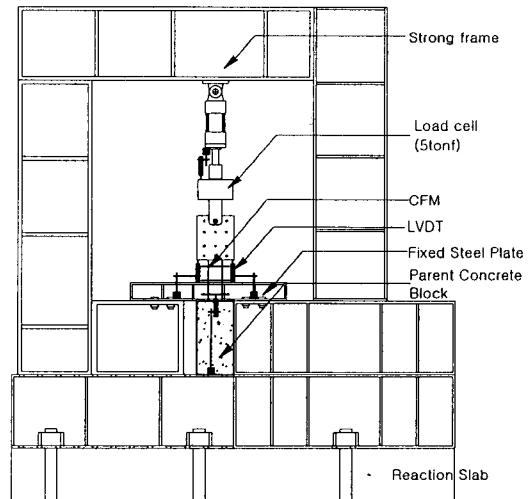
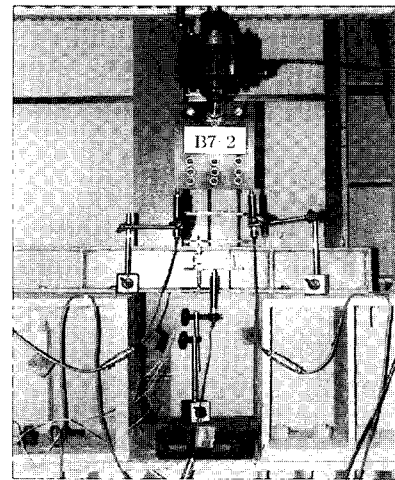


Fig. 7 Test setup

3. 실험결과 및 분석

실험종료 후 초기강성, 항복 및 최대강도, 파괴유형을 Table 2에 정리하여 나타냈으며 여기서 항복강도는 각 시험체의 하중-변위(미끄러짐) 곡선상에서 강성이 급격하게 저하되는 시점의 하중으로 정의된다. 시험체 종류에 따른 전형적인 최종파괴형상은 Fig. 9에 나타난 바와 같다.

Table 2 Test results⁸⁾

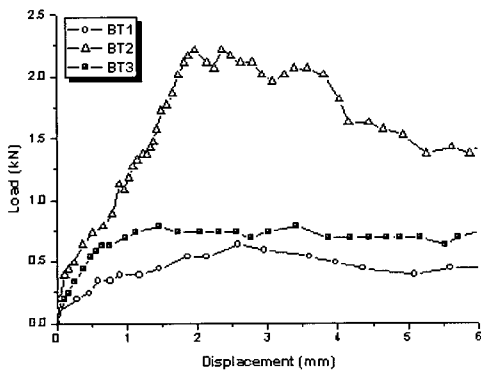
Type	Specimen	Yield strength (kN)	P_y/P_{ICFM}	Displacement at yield strength (mm)	Peak strength (kN)	Displacement at peak strength (mm)	Initial stiffness (MPa)	Failure modes
I	BT1	3.92	0.03	1.25	0.59	20.12	4.05	Sliding of CFM
	BT2	1.27	0.08	0.52	2.15	6.29	3.82	Sliding of CFM
	BT3	1.47	0.10	0.35	1.77	12.12	1.42	Sliding of CFM
II	B1	1.37	0.09	0.35	2.55	2.24	3.37	Sliding of CFM
	B2	3.43	0.23	0.75	4.90	2.81	5.14	Sliding of CFM
	B3	5.10	0.33	1.24	6.77	6.06	5.40	Sliding of CFM
III	B4	16.48	1.08	2.65	16.67	2.81	8.66	Rip-off failure
	B5	10.20	0.67	1.16	15.59	3.44	11.28	Rip-off failure
	B6	4.22	0.28	0.65	7.94	1.07	6.90	Rip-off failure
IV	B7	12.94	0.85	1.78	13.53	4.12	11.96	Crack on cover mortar
	B8	17.85	1.17	3.13	18.34	4.92	8.73	Crack on cover mortar
	B9	20.10	1.32	4.13	24.91	4.34	9.44	Tensile failure of CFM

※ P_y : yield strength, P_{ICFM} : tensile strength of CFM (7.55 kN/EA)

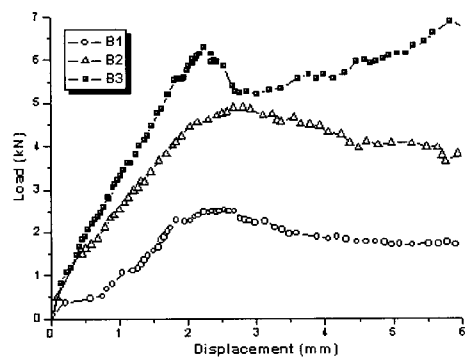
3.1 정착철물의 부착위치에 따른 효과

정착철물의 부착위치에 따른 거동을 비교하기 위하여 계획된 Type I의 하중-변위 관계곡선은 Fig. 8(a)과 같다. 그림에 나타난 바와 같이 모든 시험체는 초기 재하 단계에서부터 정착철물과 CFM 사이에 미끄러짐 변형이 발생하였으며 이러한 미끄러짐 변형 성분에 의해 전체 변형이 지배받는 것으로 나타났다. 또한 최대강도는 CFM의 미끄

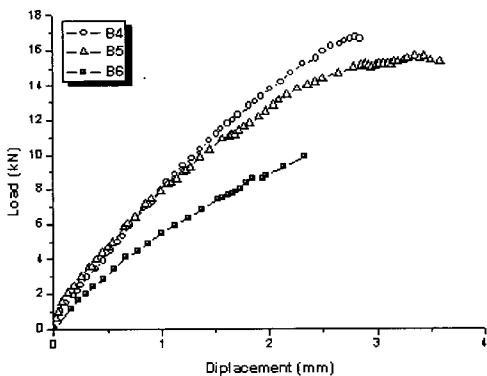
러짐 변형 성분을 구속하는 정착철물의 위치에 따라 다르게 나타났으며 Table 2 및 Fig. 8(a)에 나타난 바와 같이 BT2 시험체와 같은 정착철물의 부착형태가 최대강도와 강성면에서 타 시험체에 비해 현저하게 우수한 것으로 나타났다. 이상의 Type I 실험으로부터 도출된 결과를 근거로 Type II와 Type IV 실험에서는 BT2 시험체와 같은 방법에 따른 정착철물의 설치 열 수와 부착 모르타르의 유무에 따른 CFM의 부착특성을 평가하고자 하였다.



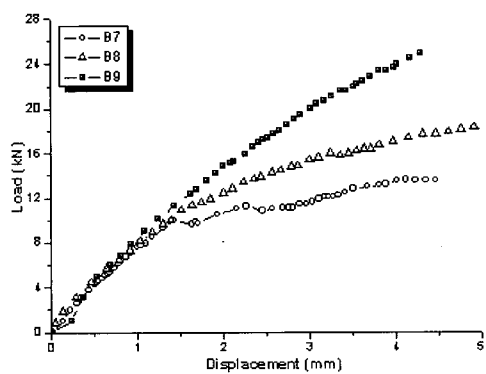
(a) Type I



(b) Type II



(c) Type III



(d) Type IV

Fig. 8 Load-displacement curve for each type

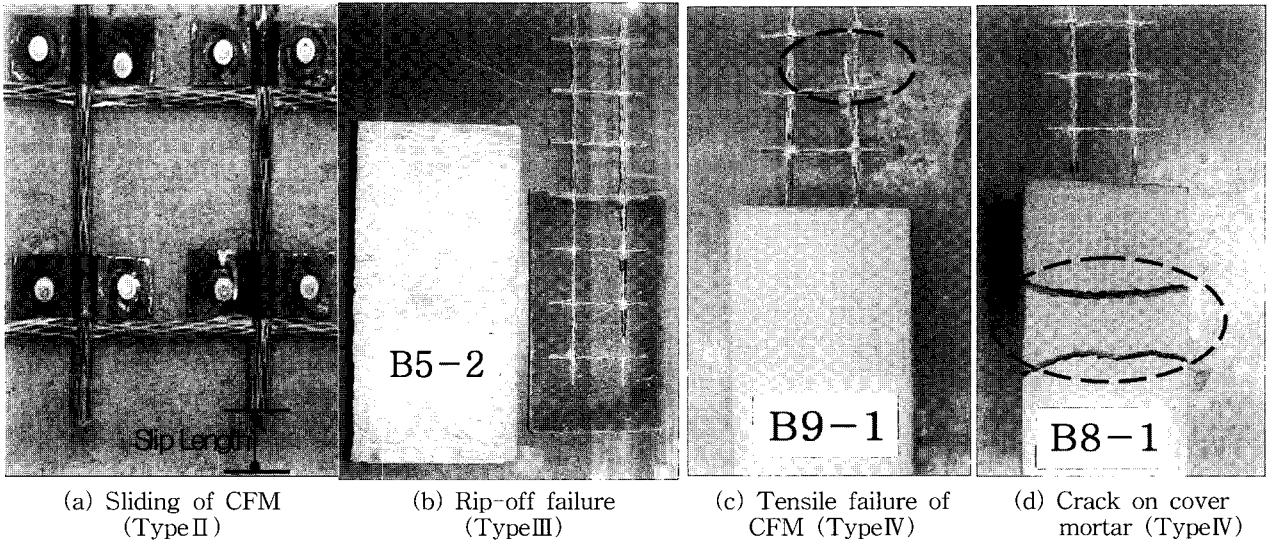


Fig. 9 Typical failure mode

3.2 정착철물의 설치 열 수에 따른 효과

정착철물의 설치 열 수에 따른 효과를 평가하기 위하여 계획된 Type II 시험체의 하중-변위 관계를 Fig. 8(b)에 비교하여 나타내었다. 변수에 따른 각 시험체의 최대 강도는 Table 2에 나타난 바와 같이 정착철물의 설치 열 수가 1열, 2열, 3열로 증가됨에 따라 1열로 정착철물이 설치된 시험체 B1의 강도에 대한 상대적인 비는 각각 1.92(50.99/26.51 N), 2.65(70.36/26.51 N)배 증가되는 경향을 보이고 있으나 정착철물 설치 열 수가 증가됨에 따라 부착강도가 선형적으로 증가되지는 않았다. Fig. 10은 정착철물 설치열수에 따른 각 시험체의 총 변형(δ_{TOTAL})이 4 mm에 이를 때까지 미끄러짐 변형성분(δ_1)과 CFM 인장 변형 성분(δ_2)을 각각 분리하여 비교한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 B1 시험체의 경우 초기 재하 단계부터 미끄러짐 변형성분이 전체 변형성분에서 큰 비율을 점유하고 있으나 정착철물의 열 수가 2열 및 3열로 증가된 B2 및 B3 시험체에서는 재하 초기 미끄러짐 성분이 B1 시험체 비하여 현저히 감소되는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 9(a)에 나타난 바와 같이 각 시험체의 최종파괴는 Type I 과 마찬가지로 CFM을 구성하는 가로 및 세로방향 섬유로드의 교차부 미끄러짐에 의해 기인한 것으로 나타났다.

3.3 부착 모르타르의 두께에 따른 효과

부착 모르타르의 두께는 시공현장에서 일반적으로 적용되는 30 mm와 이러한 부착 모르타르 두께를 1.5~2배 증가시킨 시험체를 제작하여 부착 모르타르의 두께가 CFM의 부착강도에 미치는 영향을 규명하고자 하였으며 이를 변수로한 시험체의 하중-변위 관계곡선은 Fig. 8(c)와 같다.

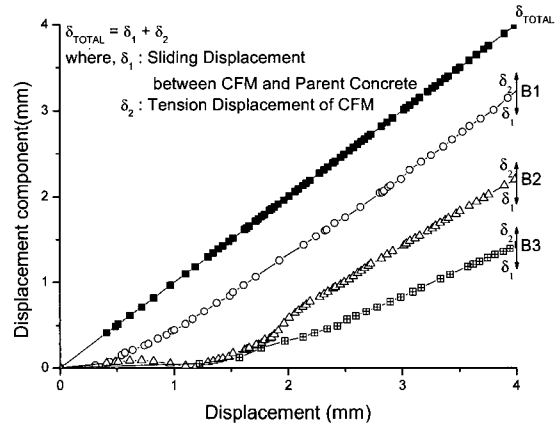


Fig. 10 Comparison for parameter (effect of clip layer)

실험결과 모든 시험체는 Fig. 9(b)에 나타난 바와 같이 모재 콘크리트와 부착 모르타르의 급작스런 박리(Rip-off)에 의해 최종파괴 되었다. Fig. 8(c)의 하중-변위 관계곡선으로부터 CFM을 정착철물만으로 모재 콘크리트에 부착한 경우에 비하여 부착 모르타르로 마감한 경우에는 Type II와 같이 재하 초기 CFM의 미끄러짐에 의한 강성 저하가 현저히 발생되었으나 최대강도 이후 부착 모르타르의 박리에 의해 파괴되는 취성적인 특성을 보였다. 모르타르의 두께에 따른 부착파괴 특성을 평가하기 위하여 부착 모르타르 두께를 변수로 한 각시험체의 최대 부착강도 변화를 비교하여 나타내면 Fig. 11과 같다. 그림에 나타난 바와 같이 모르타르 두께에 따른 부착강도 변화는 다소 분산된 결과를 보이고 있으나 모르타르 두께별 부착강도에 대한 평균값의 변화로 판단할 때 모르타르 두께가 증가됨에 따라 부착강도는 다소 증가되는 경향을 보이거나 모르타르 50 mm를 분기점으로 감소되는 경향을 보이고

있다. 이는 부착 모르타르 두께가 증가될수록 부착 모르타르의 외기에 노출된 바깥쪽 면과 모재에 부착되는 면 사이에서 건조 수축량 차이가 증가되면서 모재 콘크리트와 부착 모르타르 계면에서의 부착강도를 감소시켰기 때문인 것으로 판단된다.

3.4 정착철물과 부착 모르타르의 효과

정착철물로 CFM을 고정시킨 후 부착 모르타르로 마감한 TypeIV 시험체의 파괴양상은 부착 모르타르의 두께만을 변수로 한 TypeIII 시험체에 나타났던 급격한 부착 모르타르의 박리에 의한 파괴와는 다르게 Fig. 9(c)와 같이 CFM이 파단되거나 Fig. 9(d)와 같이 부착 모르타르에 인장균열이 발생하는 파괴형태를 보였다. 이상과 같은 결과를 근거로 CFM을 모재 콘크리트에 부착하기 위하여 사용된 정착철물은 CFM의 부착거동을 개선하는데 크게 기여하고 있는 것으로 판단된다. TypeIV 시험체의 하중-변위 관계곡선은 Fig. 8(d)에 나타난 바와 같고 부착강도는 정착철물의 설치 열수가 증가할수록 정착철물이 1열 설치된 B7에 비하여 각각 1.36 (18.34/13.53 kN), 1.84 (24.91/13.53 kN)배 증가되었다. 또한 재하 초기의 미끄러짐 변형특성을 보이지 않은 전체 변위 약 1~1.5mm에서의 부착강도는 B7시험체에 비하여 각각 1.1 (10/9.02 kN), 1.25 (11.28/9.02 kN)배 증가되는 경향을 보였다. 이상과 같은 결과로부터 정착철물이 부착 모르타르와 CFM 및 모재 콘크리트의 미끄러짐을 구속함으로써 부착강도 증진에 크게 기여하고 있는 것으로 판단되었다.

4. 비선형 유한요소 해석

4.1 재료의 구성모델

CFM을 콘크리트에 부착하기 위하여 사용한 정착철물 및 부착 모르타르와 모재 콘크리트 사이의 계면 부착력에

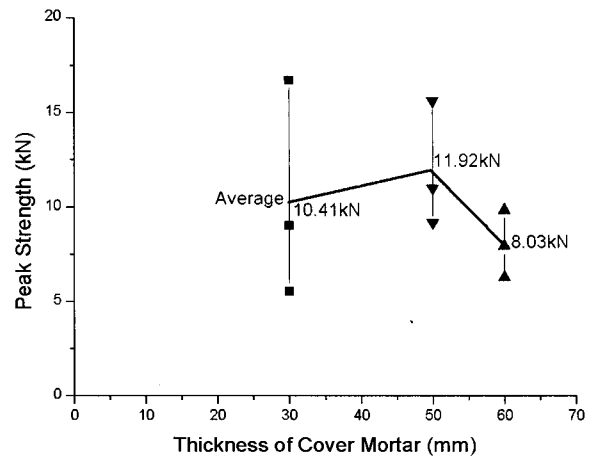


Fig. 11 Comparison for parameter (effect of cover mortar thickness)

대한 모델링은 ABAQUS에서 지원하고 있는 부착탄성 (connector elasticity)요소를 사용하였으며 요소의 부착응력-미끄러짐 변위 관계는 Fig. 12와 같다. 여기서 τ_f 는 최대 부착응력, δ_1 은 최대 부착응력시의 변위, δ_f 는 부착응력이 소멸되는 시점에서의 최대변위를 나타낸다. CFM과 모재 콘크리트의 부착거동을 묘사하기 위한 해석연구에서는 Fig. 15에 나타난 바와 같이 정착철물을 connector A, 모재 콘크리트와 부착 모르타르 사이의 부착응력을 connector B로 이상화 하였으며 이러한 connector A 및 B 요소의 특성값은 현재까지 CFM의 부착실험에 대한 연구결과가 전무하므로 반복적인 유한요소해석결과와 본 실험연구결과를 비교하여 합리적인 특성값을 4.3절에서와 같이 결정하였다. 부착 모르타르에 대한 구성방정식은 모르타르의 재료실험 결과를 근거로 하여 ABAQUS에서의 콘크리트 모델을 응용하였다. 압축강도에 비해 상대적으로 낮은 인장강도의 특성을 가지고 있는 모르타르의 인장축에 발생하는 인장균열은 모르타르의 비선형 거동에 중요한 영향을 미치는 요인이며 모르타르내에 인장응력이 발생할 경우 재료는 취성재료의 특성을 보인다.

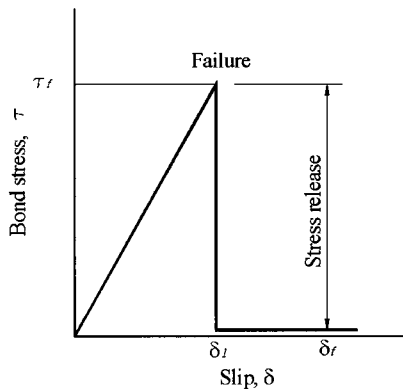


Fig. 12 Bond stress-slip relationship

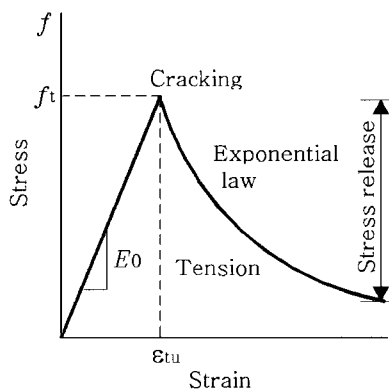


Fig. 13 Tension stiffening model of mortar

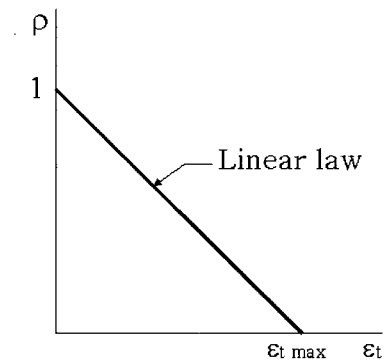


Fig. 14 Shear stiffening model of mortar

따라서 인장응력이 증가하여 모르타르 내에 균열이 발생하게 되면 모르타르의 인장강도는 급격하게 저하된다. 그러나 CFM과 모르타르의 부착응력으로 인하여 모르타르에 균열 발생 이후에도 어느 정도의 인장응력을 부담할 수 있게 된다. 본 해석에서는 이러한 인장강성 효과를 고려하기 위한 방법으로 Okamura⁴⁾(1985) 등이 실험을 통해 제안한 인장강성 모델을 적용하였으며 이는 Fig. 13과 같다. 그림으로부터 인장응력하에서 모르타르의 거동은 평균 변형률이 균열 변형률에 도달하면 응력이 지수함수로서 감소된다고 가정된 것으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_t = f_t \left(\frac{\epsilon_{tu}}{\epsilon_t} \right)^c \quad (1)$$

여기서 σ_t 는 균열에 직각방향의 모르타르 평균 인장응력, f_t 는 모르타르의 인장강도, ϵ_t 는 균열에 수직인 모르타르의 평균 인장 변형률, ϵ_{tu} 는 모르타르의 인장한계 변형률을 나타낸다. c 는 인장강성 계수를 나타내는 것으로서 CFM과 부착된 경우에 대하여 0.4 값을 적용하였다. 균열 발생 이후 모르타르의 전단강성은 균열 폭의 증가에 따라 감소된다. 따라서 균열 발생 이후 전단탄성계수(Shear modulus)는 ρG 로 정의되며, 여기서 G 는 균열 발생 이전의 모르타르 전단탄성계수이고 ρ 는 계수이다. 본 해석연구의 전단보유 모델은 Fig. 14와 같이 균열 발생시 전단강성이 균열 폭의 증가에 따라 전단탄성계수 ρG 가 영에 이르기까지 선형적으로 감소되는 것으로 가정하였다.

$$\begin{aligned} \epsilon_t < \epsilon_{t \max} &, \quad \rho = (1 - \epsilon_t / \epsilon_{t \max}) \\ \epsilon_t \geq \epsilon_{t \max} &, \quad \rho = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 ϵ_t 는 균열에 직각 방향의 인장 변형률, $\epsilon_{t \max}$ 는 ρ 가 영이 되는 최대 변형률을 나타내며, 본 모델은 균열 발생 후 모르타르 인장거동을 표현하는 인장강성 모델에 따라 적용하였다.

4.2 선정 시험체 및 이상화

CFM의 부착특성을 규명할 수 있는 유한요소해석모델을 구축하기 위하여 본 연구대상 일부 시험체를 Fig. 15와 같이 이상화하였다. 본 해석연구에서 사용된 비선형유한요소해석 프로그램은 ABAQUS/Standard⁹⁾ 6.2-1이며, 이상화된 각 부착 시험체를 구성하는 이상화된 요소로서 부착 모르타르와 모재 콘크리트는 8절점의 3차원 솔리드 요소(C3D8R), CFM은 3차원 2절점의 트러스 요소(T3D2), 정착철물 및 부착 모르타르와 모재 콘크리트 사이의 계면 부착상태는 Fig. 15(e)에 나타난 바와 같이 3차원 2절점 부착(Connector)요소(CONN3D2)를 각각 적용하였다.

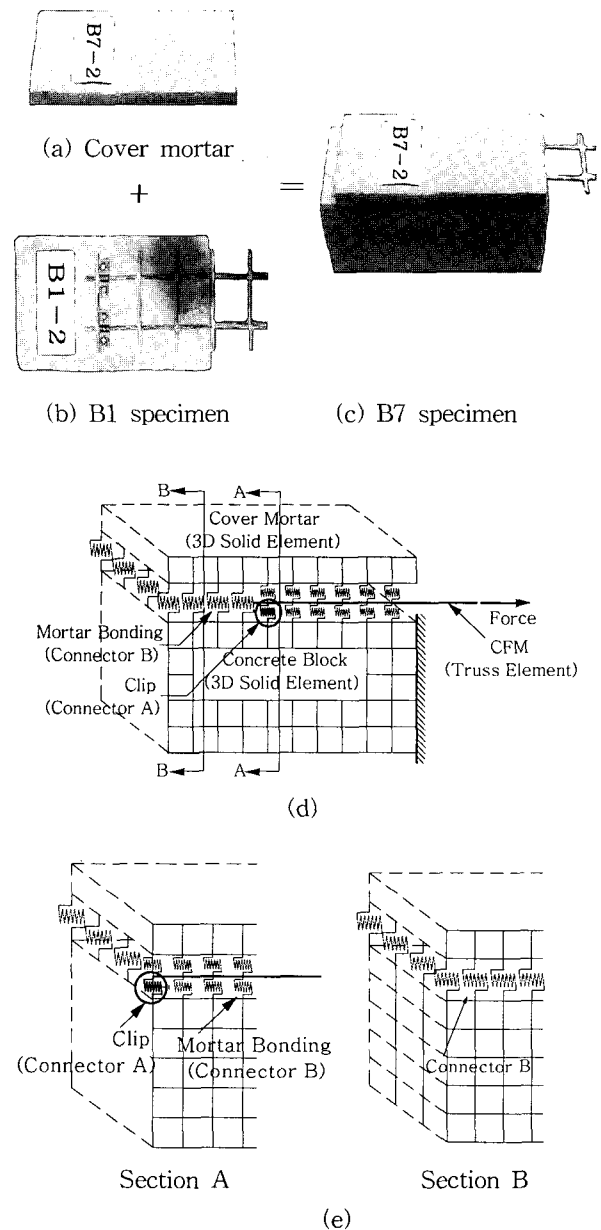


Fig. 15 Specimen and idealization for B7

4.3 부착요소의 특성값

모재 콘크리트에 CFM의 정착을 위하여 사용된 정착철물 및 부착 모르타르를 이상화한 부착요소(Connector 요소)의 특성값을 추정하기 위하여 Type II 및 Type III 시험체에 대한 실험결과와 각 시험체의 반복적인 해석결과를 근거로 부착요소의 특성값을 결정하였다. 이러한 과정을 거쳐 정착철물의 모델링 요소로 사용한 Connector A 요소의 특성값은 τ_t 는 250, δ_1 은 0.11, δ_2 는 0.4로 제안되었고 또한 부착 모르타르 모델링 요소로 사용한 Connector B 요소의 특성값은 τ_t 는 250, δ_1 은 0.02, δ_2 는 0.4로 제안되었다.

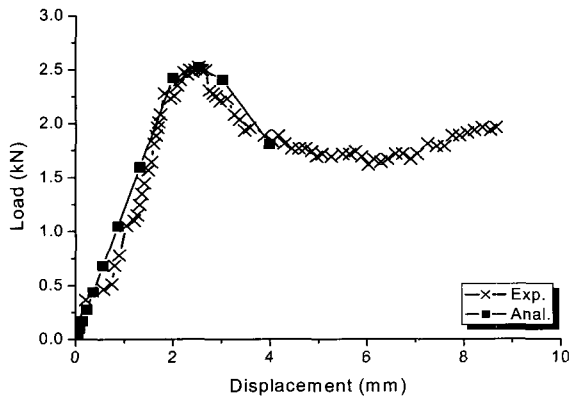


Fig. 16 Comparison of analysis and test result for B1

5. 해석결과와 실험결과의 비교 · 분석

5.1 정착철물로 부착된 CFM의 부착거동

본 실험에서 CFM을 모재 콘크리트에 부착하기 위하여 사용한 정착철물의 제안된 모델링 기법을 검증하기 위하여 선정된 B1 시험체에 대한 해석결과 및 실험결과의 하중-변위 곡선을 비교하여 나타내면 Fig. 16과 같다. Fig. 16으로부터 본 연구에서 제한된 CFM의 부착해석기법은 초기강성, 최대부착강도 및 전체적인 거동을 효과적으로 묘사하고 있는 것으로 판단된다. 해석모델에 의해 하중 0.05tonf에서 실험값의 변위가 증가한 것은 실험과정에서 인장력 도입을 위해 설치된 플레이트와 CFM 사이에 발생한 미끄러짐에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 그 이후의 최대하중에 도달하기까지의 해석 및 실험결과의 거동은 유사한 특성을 보임으로써 본 해석적 연구에서 제안된 정착철물의 해석기법은 적절하게 구축된 것으로 평가된다. 그러나 정착철물에 대한 범용적 해석모델이 제안되기 위하여 보다 다양한 조건을 갖는 실험결과에 대한 축적 및 분석이 요구된다.

5.2 정착철물과 모르타르로 부착된 CFM의 부착거동

정착철물로 CFM을 부착시킨후 부착 모르타르로 마감한 시험체에 대해 부착 모르타르의 해석모델 및 해석기법을 제안하기 위하여 선정된 B7 시험체의 하중-변위 곡선에 대한 해석결과 및 실험결과를 비교하여 나타내면 Fig. 17과 같다. 본 해석에서는 B1 시험체의 해석결과에서 얻은 정착철물의 모델링 요소인 Connector A의 재료 특성을 적용함과 동시에 여기에 모재 콘크리트와 부착 모르타르의 부착을 위한 모델링 기법으로 Fig. 15에서 나타난 바와 같이 계면 부착력을 Connector B요소로 이상화하였다. Fig. 17에 나타난 바와 같이 초기 하중재하 후 실험값

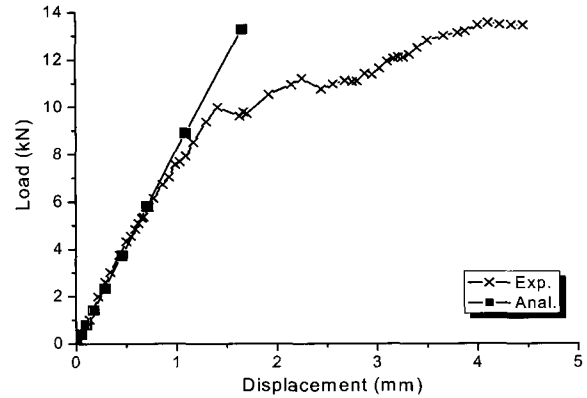


Fig. 17 Comparison of analysis and test result for B7

과 해석값의 초기강성은 동일한 거동을 보이나 변위 1 mm 이후에 실험값의 변위가 동일 하중하에서 해석값보다 증가하는 경향을 보였다. 이는 해석 모델에서 표현되지 않는 정착철물, CFM 및 부착 모르타르 사이의 미끄러짐 변형에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 초기강성 및 모재 콘크리트와 CFM의 초기 미끄러짐이 발생되기 이전인 변위 1 mm까지 해석결과는 실험결과와 좋은 대응을 보이고 있다. 본 연구에서 제안한 CFM에 의한 철근콘크리트 부재의 보강방법에서는 CFM을 모재 콘크리트에 정착철물 및 부착 모르타르를 이용하여 부착함으로써 기존 CFS의 부착방법에 비하여 부착기구가 다소 복잡함으로 부착모델을 구축하기 위하여 보다 폭 넓고 다양한 실험결과를 근거로 검증할 필요가 있는 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 기존 철근콘크리트 구조물의 보강재료인 CFM을 부착함에 있어서 적절한 부착방법을 제시하고 CFM과 모재 콘크리트의 부착거동을 규명하기 위하여 수행된 실험 및 유한요소 해석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 정착철물의 정착위치는 하중 가력시 정착철물과 CFM 사이의 미끄러짐을 효과적으로 제어할 수 있는 BT2 (가로 및 세로 로드의 접점에서 가로 로드와 나란하게 정착철물 설치)의 형태가 강도 및 미끄러짐 억제측면에서 가장 우수한 것으로 평가되었다.
- 2) Type II 및 Type IV를 근거로 CFM의 인장강도 이상의 부착 항복강도를 확보하기 위해서는 각 CFM 단부에 2열의 정착철물과 30 mm 두께의 부착 모르타르가 요구되는 것으로 판단된다.
- 3) 부착 모르타르의 두께의 증가에 따른 CFM의 부착강도 변화는 일정한 경향을 보이지 않았다.
- 4) 부착 모르타르와 정착철물로 CFM이 모재 콘크리트에

부착된 시험체에서는 정착철물로 CFM을 부착한 시험체에 비하여 약 4배, 부착 모르타르만으로 부착한 시험체(Type III)에 비하여 약 1.2배의 강도증진 효과를 보였다. Type III의 경우와 비교하여 강도증진 효과는 적게 나타나지만 파괴모드에 있어서 Type III 시험체의 경우 부착 모르타르의 박리에 의한 급격한 파괴가 발생된 반면, Type IV 시험체에 있어서는 CFM의 인장파단과 부착 모르타르의 균열에 의한 파괴의 양상을 보였다.

5) CFM으로 보강된 철근콘크리트 부재의 거동을 예측할 수 있는 해석모델을 구축하기 위하여 정착철물 및 계면 부착력의 해석모델 요소를 제안하였으며 이를 근거로 하여 정착철물 및 부착 모르타르로 모재 콘크리트에 부착된 CFM의 부착거동을 예측할 수 있는 해석기법을 제안하였다. 해석 모델에 의한 CFM의 부착거동을 예측한 해석결과와 실험결과와의 비교에서는 미끄러짐 변형이 발생되기 이전까지의 해석결과와 실험결과와는 좋은 일치를 보이고 있으나 정착철물과 부착 모르타르로 CFM을 부착한 경우에 있어서는 계면에서의 현저한 미끄러짐이 발생한 후의 해석결과와 실험결과는 다소 오차를 보이고 있는 것으로 나타나 이러한 거동을 묘사할 수 있도록 해석모델에 대한 지속적인 보완 개발이 요구된다.

감사의 글

이 연구는 건용(주)의 연구비지원에 의해 수행한 과제의 일환으로 진행되었음을 밝히며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. "NEFMAC을 이용한 내력시험보고서", 엠·에스·아시아 주식회사, 1994.
2. "NEFMAC as Reinforcement for Concrete Bridge Decks and Barrier Walls," Autocon Composite Inc., 1995.
3. "탄소섬유그리드를 이용한 콘크리트 구조물의 보수·보강공법 연구", 홍익대학교 과학기술연구소, 1999.
4. 조병완, 태기호, 권오혁, "격자형 탄소섬유로 보강한 R/C보의 보강효과", 콘크리트학회 논문집 15권 3호, 2003, pp. 377~385.
5. Hibbit. Karlsson & Somsen Inc., "ABAQUS, Theory Manual," Version 6.2.
6. Okamura. H, Maekawa. K, and Sivasubramaniyam.S. "Verification of modeling for reinforced finite element, Finite Element of Reinforced Concrete Structures," ASCE, 1985, pp.528~543.
7. 조영홍, 이우철, 김성도, 김동환, 정진환 "탄소섬유 보강 부재의 단부탈락 방지 방안에 관한 실험", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 12권, 2호, 2000, pp. 1013~1018.
8. 오재혁, 성수용, 한병찬, 윤현도, 서수연, 김태용, "콘크리트와 탄소섬유메쉬의 부착파괴 거동에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 14권, 1호, 2002, pp.965~970.

요 약

최근 철근콘크리트(RC) 구조물의 보강기법으로 큰 인장강도와 탄성계수를 갖는 탄소섬유계열 보강재를 사용한 보강공법 개발과 이와 관련된 많은 실험 및 이론적 연구가 진행되고 있다. CFS 및 강판 보강재에 의한 보강시 야기되는 문제점을 해결하기 위하여 대체 재료로 국내에 도입된 탄소섬유메쉬(CFM)를 실 구조물의 보강공사에 적용하기 위하여 우선적으로 CFM을 이용한 보강기법 및 보강된 부재의 구조성능 규명에 대한 연구가 요구되고 있다. 본 연구에서는 탄소섬유메쉬와 콘크리트의 부착특성 규명을 위한 실험적 연구를 수행하였다. 일반적으로 탄소섬유 부착 보강공법은 보강재와 기존 부재와의 부착성능에 의해 보강효과가 지배받게 된다. 즉 부착강도가 충분한 보강효과를 기대할 수 없을 경우의 부착 파괴의 가장 큰 원인으로서는 계면에서의 전단강도에 기인한다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 CFM을 콘크리트에 부착하는데 있어서 정착철물(Clip)의 설치 유무, 정착철물의 정착위치, 정착철물의 설치 열 수, 부착 모르타르의 바름 유무, 부착 모르타르의 바름 두께 등의 실험 변수를 설정하고 인장전단 실험을 수행하였다. 실험결과 적절한 정착철물의 부착 위치 및 정착철물 및 부착 모르타르의 부착특성을 규명할 수 있었다. 또한 본 연구에서는 범용 비선형 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 CFM의 부착특성을 규명하기 위한 유한요소 모델 및 해석기법을 개발하였고 이를 실험결과와 비교하여 이에 대한 검증을 하였다.

핵심용어 : 탄소섬유메쉬(CFM), 부착강도, 정착철물(Clip), 유한요소모델, ABAQUS