

CFRP 시트로 부분 휨 보강된 철근콘크리트 보의 유한요소해석

김건수¹, 박기태², 김병철³, 김재환⁴, 정규산^{5*}

FEA for RC Beams Partially Flexural Reinforced with CFRP Sheets

Kun-Soo Kim¹, Ki-Tae Park², Byeong Cheol Kim³, Jaehwan Kim⁴, Kyu-San Jung^{5*}

Abstract : A CFRP sheet has been applied as a structural reinforcement in the field, and various studies are conducted to evaluate the effect of CFRP sheets on reinforced concrete. Although many experiments were performed from previous studies, there are still limitations to analyze structural behaviors with various parameters in experiments directly. This study shows the FEA on structural behaviors of RC beams reinforced with CFRP sheets using ABAQUS software. To simulate debonding failure of CFRP sheets which is a major failure mode of RC beam with CFRP sheets, a cohesive element was applied between the bottom surface of RC beam and CFRP sheets. Both quasi-static method and 2-D symmetric FE model technique were performed to solve nonlinear problems. Results obtained from the FE models show good agreements with experimental results. It was found that reinforcement level of CFRP sheets is closely related to structural behavior of reinforced concrete including maximum strength, initial stiffness and deflection at failure. Also, as over-reinforcement of CFRP sheets could give rise to the brittle failure of RC structure using CFRP sheets, an appropriate measure should be required when installing CFRP sheets in the structure.

Keywords: Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheet, Finite Element Analysis, Reinforced Concrete Beam, Structural Reinforcement

1. 서론

현재 국내의 대부분의 기반시설은 철근콘크리트구조물(RC)로 이루어져 있다. RC 구조물은 공용연수가 증가하면서 하중 및 환경적 요인에 의해 성능이 저하되므로, 구조물의 수명을 연장하기 위해서는 적절한 유지관리가 수행되어야 한다. 지금까지 RC 구조물의 보강을 위한 다양한 공법이 개발되고 적용되어 왔으며, 이 중 Carbon-Fiber-Reinforced-Polymer(CFRP) 시트를 위한 보강공법은 시공이 간편하고 보강효과가 우수하여 효율적인 보강공법으로 널리 적용되어 왔다.

CFRP 시트로 휨 보강된 RC 구조물은 보강 전에 비해 우수한 휨 강도를 확보할 수 있다. 하지만 CFRP 시트의 부착파괴로 인한 취성파괴가 발생할 우려가 있으며, 이에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다. Brena et al.(2003)에 의해 수행된 RC 보에 대한 실험에서는 이론적으로 추정된 휨 강도 이전에 실

험체의 파괴가 발생하였다. Park et al.(2005)이 수행한 실험에서도 CFRP 시트의 보강수준에 따라 파괴시점이 다르게 발생하였으며, 주요 파괴모드는 CFRP 시트의 부착파괴였다. 최근에 Hong et al.(2020)에 의해 수행된 연구에는 다양한 CFRP 시트의 부착조건을 갖는 RC 보에 대한 구조거동을 실험적으로 분석하였다. CFRP 시트 보강 RC 보는 공용연수가 증가함에 따라 다양한 환경적 요인에 의한 부착성능 저하가 발생한다. Park et al.(2006)은 CFRP 시트 보강 RC 보에서 부착조건에 따라 반복하중에 의한 성능저하 및 피로파괴가 발생할 수 있음을 확인하였다.

지금까지 CFRP 시트 보강 RC 보의 거동에 대한 연구는 주로 실험에 의존하여 파괴모드 및 성능 평가가 이루어졌다. 본 연구에서는 CFRP 시트 보강 RC 보의 거동에 대한 다양한 변수영향을 확인하기 위하여 ABAQUS를 활용한 유한요소해석을 수행하였다. 수치해석의 효율성을 높이기 위하여 2차원 모델을 사용하고 외연적 동해석(Dynamic Explicit)에 기반한 준정적해석(Quasi-Static Analysis)을 수행하였다. 주요 파괴모드인 부착강도 효과를 반영하기 위하여 콘크리트와 CFRP 시트 사이의 계면요소로 Cohesive 요소를 사용하였다.

¹정회원, 한국건설기술연구원 노후인프라센터 수석연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 노후인프라센터 선임연구위원

³정회원, 한국건설기술연구원 노후인프라센터 수석연구원

⁴정회원, 한국건설기술연구원 노후인프라센터 박사후연구원

⁵정회원, 한국건설기술연구원 노후인프라센터 수석연구원

*Corresponding author: jungkyusan@kict.re.kr

Korea Institute of Civil and Building Technology (KICT), Goyang, 10223, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2020년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2020년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 실험 및 결과

2.1 실험체 설계 및 변수

CFRP 시트의 부착조건은 RC 보의 중앙부 부착길이를 변수로 하였으며 Fig. 1 과 Table 1 에 나타내었다.

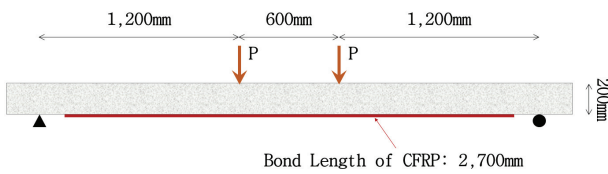
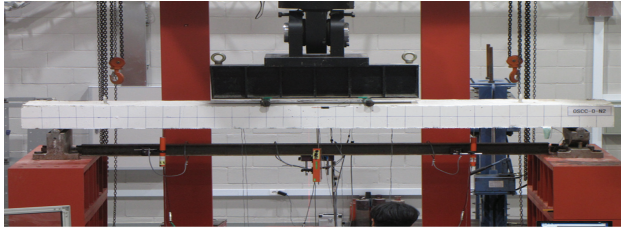


Fig. 1 Test Set-up Example : Specimen(L2-B100)

Table 1 Test Specimen Details

Specimen	No. of CFRP Sheet	Bonded Ratio(Length)	Bonded Location
L0-B0(1)-Exp.	0	N/A	N/A
L0-B0(2)-Exp.			
L2-B100(1)-Exp.	2	100 % (2,700 mm)	Mid-Span
L2-B100(2)-Exp.			

콘크리트의 압축강도는 27 MPa이며, 인장철근과 압축철근은 SD400-D16을 사용하였고, 스트립 철근은 SD400-D10을 사용하였다. 인장 철근은 5개, 압축 철근은 2개, 스트립 철근은 100 mm 간격으로 배근하였다. 실험체의 폭, 높이, 순경간은 각각 500 mm, 200 mm, 3,000 mm 이다. CFRP 시트는 실험체 중앙부 하면에 2 겹씩 부착되었으며, 완전부착 조건 실험체(L2-B100)의 부착 길이는 2,700 mm 이다. 실험방법은 4점 휨 시험으로 진행되었으며, 2,000 kN 용량의 유압가력기를 사용하였고, LVDT를 이용하여 중앙부 처짐을 계측하였다.

2.2 실험 결과

실험체별 하중-처짐 곡선을 Fig. 2 에 나타내었고, 실험결과로부터 얻은 실험체별 최대 강도, 초기 강성, 파괴시점을 Table 2 에 나타내었다. 실험 결과의 항목별 정의는 다음과 같다.

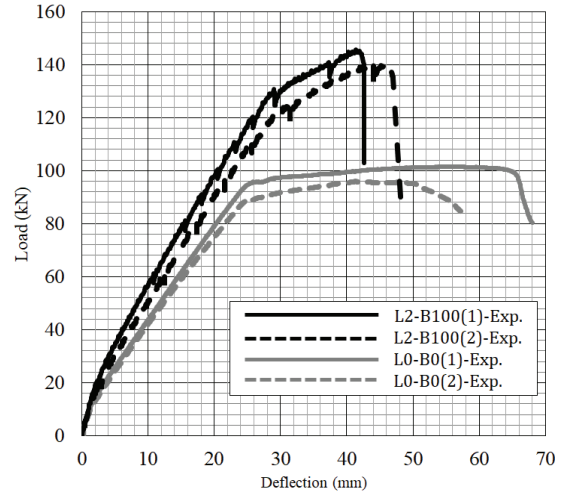


Fig. 2 Load-Deflection Curves : Test Results

Table 2 Test Results

Specimen	Maximum Strength	Initial Stiffness	Deflection at Failure
L0-B0(1)-Exp.	101.6 kN	3.96 kN/mm	66.4 mm
L0-B0(2)-Exp.	96.1 kN	3.75 kN/mm	56.4 mm
L0-B0-Exp. (Average)	98.9 kN	3.86 kN/mm	61.4 mm
L2-B100(1)-Exp.	145.7 kN	4.90 kN/mm	42.6 mm
L2-B100(2)-Exp.	140.6 kN	4.52 kN/mm	47.1 mm
L2-B100-Exp. (Average)	143.2 kN	4.71 kN/mm	44.9 mm

모든 실험체의 순경간이 동일하므로 휨 강도를 고려하지 않고 최대 강도를 고려하였고, 하중-처짐 곡선에서 얻은 최대 하중 값(kN)을 사용하였다. 초기 강성은 실험체가 항복하기 전 수준인 처짐 20 mm 에서 발생한 하중 값(kN)에 대한 처짐 값(mm)의 비율(kN/mm)로 정의하였다. 파괴시점은 파괴모드에 따라 다르게 고려하였다. 파괴모드가 접착면 파괴(L2-B100)인 경우는 취성파괴가 발생하는 점을 고려하여 최대 강도 발생 처짐을 파괴시점으로 정의하고, 파괴모드가 휨 파괴(L0-B0)인 경우는 최대 강도 발생 처짐 이후의 하중 값이 90% 이하가 되는 처짐(mm)으로 결정하였다. CFRP 시트 보강이 된 실험체(L2-B100)에서 무보강 실험체(L0-B0)에 비해 초기 강성과 최대 강도가 증가하는 경향을 보였다. 하지만 최대 강도 발생 이후 부착파괴로 인한 급격한 취성거동이 나타났다.

3. 유한요소모델 및 해석방법

3.1 해석조건 및 해석방법

유한요소해석에 사용된 모델의 기하형상 및 해석조건을 Fig. 3에 나타내었다. CFRP 시트 보강 RC 보의 유한요소모델은 해석의 효율성을 높이기 위하여 2차원 및 대칭조건을 사용하였으며, 모든 요소는 4절점 솔리드 요소로 구성되었다. 유한요소모델은 콘크리트 파트, 철근 파트, CFRP 시트 파트, 접착면 파트로 구성된다. 압축철근과 인장철근 및 전단철근으로 구성된 철근 파트는 2차원 모델의 적용을 위하여 환산단면적을 적용하였고, 접착면 파트는 Cohesive 요소로 모델링하였다. 철근 파트와 콘크리트 파트의 일체거동을 위하여 ABAQUS에서 제공하는 매입기능(Embedded Region)을 사용하였고, 콘크리트 파트의 하면과 접착면 파트의 상면 및 접착면 파트의 하면과 CFRP 시트 파트의 상면은 ABAQUS의 완전 부착기능(Tie)을 이용하여 접착면 Cohesive 요소의 파괴와 함께 CFRP 시트가 RC 보에서 분리되는 현상을 구현하였다.

유한요소해석에서는 재료 비선형, 기하 비선형, 접촉조건 등 다양한 비선형 문제가 발생하게 되며, 이를 해결하기 위한 해석방법의 선택이 매우 중요하다. 본 연구에서는 CFRP 시트의 부착파괴에 의한 급격한 비선형 거동을 시뮬레이션하기 위하여 외연적 동적해석을 활용한 준정적해석을 적용하였다. 준정적해석은 짧은 시간에 발생하는 충격으로 인한 급격한 파괴 현상을 모델링하는데 주로 사용되는 방법이지만, 최근에는 강-콘크리트 합성구조물의 복잡한 비선형 해석에도 널리 사용되고 있다(Kim et al., 2019).

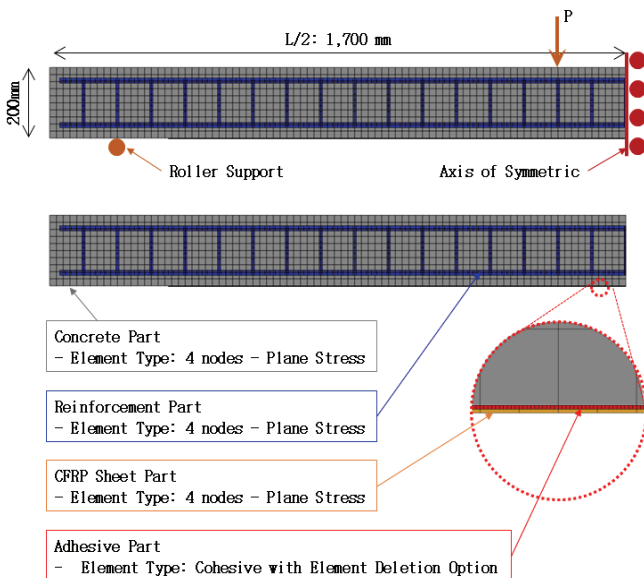


Fig. 3 Finite Element Model

3.2 재료 모델

콘크리트 파트의 비선형 모델은 콘크리트 손상(Concrete Damaged Plasticity, CDP) 모델을 사용하였다. CDP 모델은 축방향 압축 및 인장 거동을 다르게 표현할 수 있고, 소성 변형률의 크기에 따라 재료의 강성저하를 표현할 수 있는 특징이 있다. 본 연구에서는 압축과 인장거동을 개별적으로 모사하기 위한 목적으로 CDP 모델을 사용하였으며, 콘크리트의 균열 및 손상에 의한 영향은 본 유한요소해석의 범위가 아니므로 CDP 모델의 강성저하 기능은 사용하지 않았다. 콘크리트의 압축방향 응력-변형률 관계는 유로코드-2(BSI, 2004)와 Mander et al.(1988)의 혼합 모델을 적용하였다(Kim et al., 2019). 콘크리트 재료의 응력-변형률 관계는 Fig. 4와 같다. 압축거동에서 압축강도(σ_{c1}) 27 MPa의 40% 수준인 10.8 MPa까지는 탄성계수(E_c)에 따라 선형으로 증가하고, 이후로 식(1), (2), (3)에 따라 변화한다. 인장거동의 경우 인장강도(σ_{t1}) 2.7 MPa까지 탄성계수(E_c)에 따라 선형으로 증가하고, 이후로 식(4)에 따라 변화한다. 철근의 응력-변형률 관계는 이선형(Bi-Linear) 모델을 사용하였다. 철근의 항복응력 400MPa까지 탄성계수 190 GPa에 따라 선형으로 증가하고 이후로는 항복응력이 유지되도록 하였다. CFRP 시트 파트는 폭 500mm, 두께 1 mm에 탄성계수 50 GPa을 갖도록 하였으며, CFRP 시트의 파단은 무시하여 탄성재료로 모델링하였다.

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{c1} x r}{r - 1 + x^r} \quad (1)$$

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} (= 0.002) \quad (2)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - \sigma_{c1} / \epsilon_{c1}} \quad (3)$$

$$\sigma_t = \sigma_{t1} \left(\frac{\epsilon_{t1}}{\epsilon_t} \right)^{0.4} \quad (4)$$

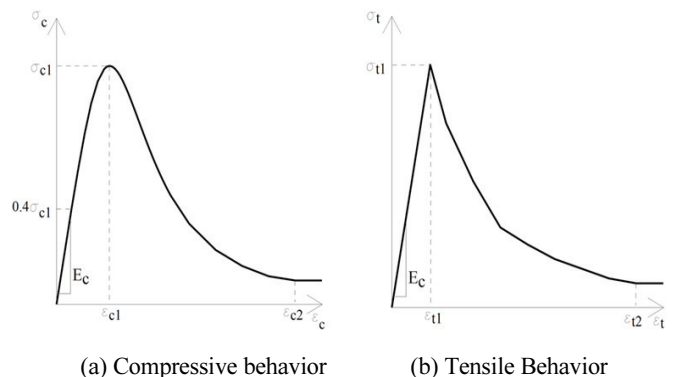


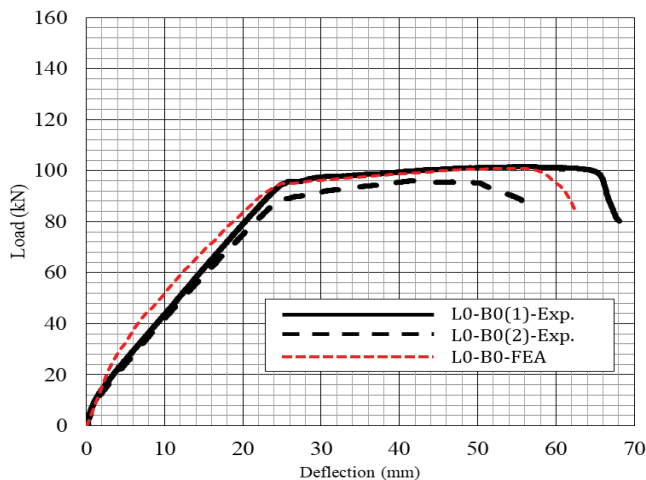
Fig. 4 Stress-Strain model of concrete(Kim et al., 2019)

CFRP 시트에 의해 휨 보강된 RC 보의 계면 부착파괴는 주로 접착부의 전단변형에 의해 발생한다(Park et al., 2018). 따라서 접착면 파트의 최대 전단응력을 초과하면 Cohesive 요소에 손상이 발생하고, 이후 급격하게 취성파괴 및 요소 삭제가 되도록 모델링하였다. 본 유한요소모델에 사용된 Cohesive 요소의 재료 물성치는 축방향 및 전단방향 두 가지로 구분된다. 그중, CFRP 시트가 적층되는 방향(RC 보의 높이방향) 거동을 나타내는 축방향 응력-변형률동은 구조거동에 큰 영향을 미치지 않으므로 강체에 가까운 선형 탄성관계로 모델링하였다. CFRP 시트 보강 RC 보의 거동에 큰 영향을 미치는 전단방향 거동은 완전부착 상태를 유지하다가 요소 간 상대변위가 일정 수준에 도달하면 파괴가 발생하도록 모델링하였다. 접착면 Cohesive 요소의 탄성계수는 CFRP 시트의 3배 수준인 120 GPa 로 모델링하고 최대 전단응력은 시험결과를 바탕으로 19.4 MPa 으로 하여 완전부착 조건을 갖되, 작은 전단변형에서도 요소의 손상이 발생하는 취성파괴 조건을 모델링하였다. 그리고 요소 삭제가 발생하는 상대변위는 0.05 mm 를 적용하였으며, 이는 CFRP 시트 부착특성에 대한 실험 및 유한요소해석을 수행한 기존 연구(Pham and Al-Mahaidi, 2007)를 참고하여 결정 되었다.

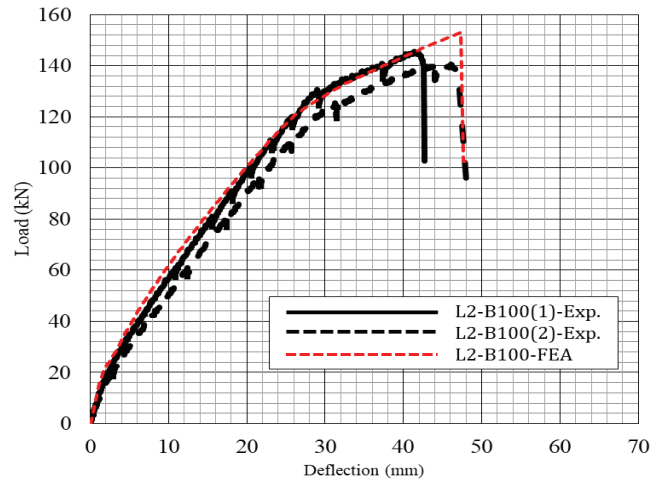
4. 유한요소해석 및 결과

4.1 실험 및 유한요소해석 결과 비교

유한요소해석을 수행하기 위해서는 기존 실험결과와의 비교를 통한 적정성 검토가 우선적으로 수행되어야 한다. 따라서 L0-B0, L2-B100 조건에 대한 실험 및 해석결과를 Fig. 5 및 Table 3에 나타내었다.



(a) L0-B0



(b) L2-B100

Fig. 5 Comparison of Load-Deflection curves

Table 3 Comparison of Results between Test and FEA

Specimen	Maximum Strength [kN]	Initial Stiffness [kN/mm]	Deflection at Failure [mm]
L0-B0	Exp.	98.9	61.4
	FEA	101.0	61.2
	Error	2.1 %	-0.3 %
L2-B100	Exp.	143.2	44.9
	FEA	153.0	47.4
	Error	6.8 %	5.6 %

하중-처짐 곡선의 경향을 보면 무보강 조건(L0-B0)과 전구간 보강 조건(L2-B100) 모두 하중-처짐 곡선 결과는 매우 유사하게 나타났다. Fig. 6 에 실험종료 후 촬영된 L2-B100 실험체와 유한요소 모델의 극한상태 모습을 함께 나타내었다. Fig. 6 에 보이는 바와 같이 휨 응력에 의한 RC 보의 파괴와 CFRP 시트의 탈락 현상이 잘 나타났음을 확인하였다.

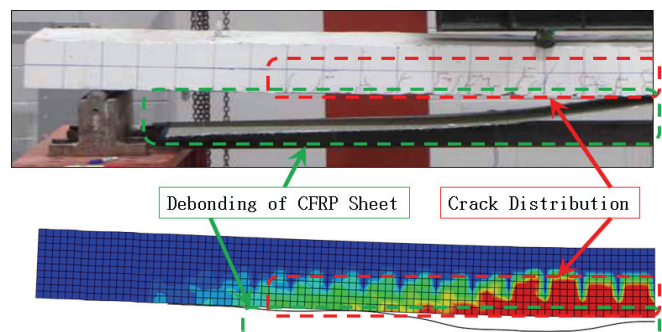


Fig. 6 Failure modes of Specimen(L2-B100)

4.2 변수영향 분석을 위한 유한요소해석

본 연구에서는 개발된 유한요소모델을 바탕으로 RC 보의 중앙부 보강수준 및 보강에 사용된 CFRP 시트의 수에 대한 영향을 세분화하여 해석적으로 분석하였다. 유한요소해석에 사용된 모델들에 대한 변수를 Table 4에 나타내었다. CFRP 시트의 강성이 구조거동에 미치는 영향을 확인하기 위하여 실험조건인 2 겹을 기준으로 하여 0.5 겹, 1 겹, 2 겹, 3 겹, 4 겹에 대한 유한요소해석을 수행하였고, 각 겹 수에 대한 중앙부 부착 수준을 10%(279 mm), 30%(810 mm), 50%(1,350 mm), 70%(1,890 mm), 90%(2,430 mm), 100%(2,700 mm)로 분류하여 총 31개의 유한요소해석을 수행하였다. 각 모델별 하중-처짐 곡선을 Fig. 7에 나타내었고, 최대 강도, 초기 강성, 파괴시점을 Table. 5에 나타내었다. Fig. 7과 Table. 5에서 보이는 바와 같이 CFRP 시트 보강 수준의 증가는 초기강성 및 최대 강도를 증가 시키는 것으로 나타났다. 하지만 중앙부 부착 길이에 따른 파괴시점은 CFRP 시트 겹 수가 적은 경우(L05, L1, L2)와 많은 경우(L3, L4)의 경향이 반대로 나타났으며, 다음 절에서 이에 대한 분석을 수행하였다.

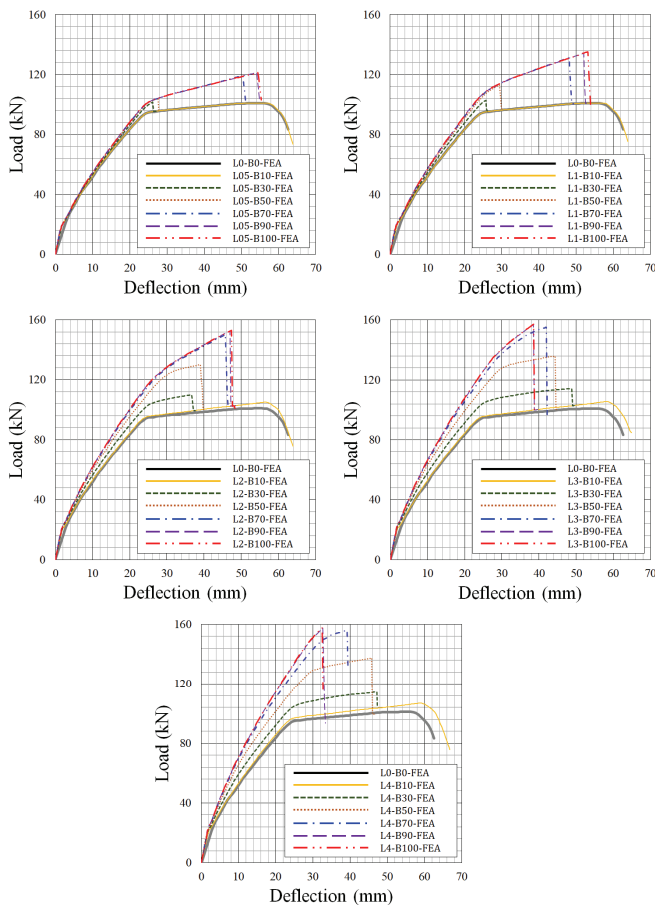


Fig. 7 Load-Deflection Curves : FEA Results

Table 4 Finite Element Model for Parametric Study

FE Model	No. of CFRP Sheet	Bonded Ratio (Length)	Bonded Location
L0-B0	0	N/A	N/A
L05-B10	0.5	10% (279 mm)	Mid-Span
L05-B30	0.5	30 % (810 mm)	Mid-Span
L05-B50	0.5	50 % (1,350 mm)	Mid-Span
L05-B70	0.5	70% (1,890 mm)	Mid-Span
L05-B90	0.5	90% (2,430 mm)	Mid-Span
L05-B100	0.5	100% (2,700mm)	Mid-Span
L1-B10	1	10% (279 mm)	Mid-Span
L1-B30	1	30 % (810 mm)	Mid-Span
L1-B50	1	50 % (1,350 mm)	Mid-Span
L1-B70	1	70% (1,890 mm)	Mid-Span
L1-B90	1	90% (2,430 mm)	Mid-Span
L1-B100	1	100% (2,700mm)	Mid-Span
L2-B10	2	10% (279 mm)	Mid-Span
L2-B30	2	30 % (810 mm)	Mid-Span
L2-B50	2	50 % (1,350 mm)	Mid-Span
L2-B70	2	70% (1,890 mm)	Mid-Span
L2-B90	2	90% (2,430 mm)	Mid-Span
L2-B100	2	100% (2,700mm)	Mid-Span
L3-B10	3	10% (279 mm)	Mid-Span
L3-B30	3	30 % (810 mm)	Mid-Span
L3-B50	3	50 % (1,350 mm)	Mid-Span
L3-B70	3	70% (1,890 mm)	Mid-Span
L3-B90	3	90% (2,430 mm)	Mid-Span
L3-B100	3	100% (2,700mm)	Mid-Span
L4-B10	4	10% (279 mm)	Mid-Span
L4-B30	4	30 % (810 mm)	Mid-Span
L4-B50	4	50 % (1,350 mm)	Mid-Span
L4-B70	4	70% (1,890 mm)	Mid-Span
L4-B90	4	90% (2,430 mm)	Mid-Span
L4-B100	4	100% (2,700mm)	Mid-Span

Table 5 FEA Results

FE Model	Maximum Strength [kN]	Initial Stiffness [kN/mm]	Deflection at Failure [mm]	Failure Mode
L0-B0	101.0	4.19	61.2	Bending
L05-B10	101.0	4.19	61.3	Debonding
L05-B30	101.4	4.32	26.1	Debonding
L05-B50	104.4	4.39	27.5	Debonding
L05-B70	119.2	4.41	50.1	Debonding
L05-B90	121.1	4.42	54.1	Debonding
L05-B100	121.4	4.42	54.4	Debonding
L1-B10	101.0	4.19	61.8	Bending
L1-B30	102.9	4.40	25.7	Debonding
L1-B50	113.1	4.55	29.4	Debonding
L1-B70	131.2	4.62	48.1	Debonding
L1-B90	134.3	4.64	52.0	Debonding
L1-B100	135.2	4.64	53.2	Debonding
L2-B10	105.1	4.24	61.2	Bending
L2-B30	110.0	4.50	36.6	Debonding
L2-B50	130.1	4.78	39.0	Debonding
L2-B70	150.3	4.98	45.7	Debonding
L2-B90	152.6	5.03	46.9	Debonding
L2-B100	153.0	5.04	47.4	Debonding
L3-B10	105.6	4.24	62.8	Bending
L3-B30	114.2	4.58	48.8	Debonding
L3-B50	135.9	4.98	44.3	Debonding
L3-B70	155.2	5.29	42.0	Debonding
L3-B90	156.9	5.39	38.5	Debonding
L3-B100	157.0	5.40	38.5	Debonding
L4-B10	106.8	4.29	63.7	Bending
L4-B30	116.0	4.62	47.1	Debonding
L4-B50	137.4	5.09	45.7	Debonding
L4-B70	156.1	5.55	39.2	Debonding
L4-B90	157.5	5.73	32.7	Debonding
L4-B100	157.7	5.75	32.4	Debonding

4.3 유한요소해석 결과

CFRP 시트 중앙부 부착 수준 및 보강 겹 수가 증가함에 따라 최대 강도는 증가하는 현상을 확인하였으나, 중앙부 부착 수준이 낮은 모델(B10, B30)의 일부에서는 증가효과가 없었다(Fig. 8(a)). 이는 해석조건이 4점 휨 시험을 모사함에 따라 보강 구간 대부분이 중앙부와 가력부 사이에 위치하여 CFRP 시트 부착에 영향을 주는 전단력 발생 구간이 작기 때문이다. B10 조건의 모델에서 파괴모드가 휨 파괴로 나타나는 것도 같은 맥락으로 판단된다. CFRP 시트 보강 수준(중앙부 부착 및 겹 수)과 최대 강도의 관계는 보강 수준에 따라 최대강도가 급격히 증가하다가 일정 수준에서 급격히 감소하는 sin 함수의 형태를 갖는데, 이러한 현상은 CFRP 시트의 부착강도와 부착 길이의 관계를 2 차 함수가 아닌 sin 함수로 나타낸 Chen and Teng(2001)의 연구결과 유사하다. 초기 강성의 경우, 최대 강도에 비해 선형거동을 갖는 구간의 하중-처짐 값을 활용하였기 때문에 최대 강도에 비해 보강수준에 따른 편차는 크게 나타나지 않았다(Fig. 8(b)).

CFRP 보강 수준에 따른 파괴시점은 시트 겹 수에 따라 서로 다른 경향을 보이는 것을 알 수 있다(Fig. 8(c)). Fig. 8(c)에서 파괴모드가 휨 파괴로 나타난 중앙부 보강 수준 10%(B10) 모델의 결과를 제외하면, 시트 보강 겹 수가 적은 모델(L05, L1, L2)에서는 중앙부 부착구간이 증가함에 따라 파괴시점도 함께 증가하는데 비해 시트 보강 겹 수가 상대적으로 많은 모델(L3, L4)에서는 중앙부 부착구간이 증가하면 파괴시점이 감소하는 경향을 보인다. 이러한 현상은 최대 강도 및 초기 강성과 관계가 있다. CFRP 시트 보강 RC 보의 접착면 부착파괴는 RC 보 하면과 CFRP 시트 사이에 발생하는 전단력에 의해 결정되는데, 이때 발생하는 전단력은 하중 크기에 직접적인 영향을 받게 된다. 그리고 초기 강성이 높은 모델은 상대적으로 작은 처짐에서 최대 강도에 도달하여 부착파괴가 발생하게 된다. 즉, L3, L4 모델은 L05, L1, L2 모델에 비해 부착 구간 증가에 따른 초기 강성의 증가량이 높기 때문에, 부착 구간이 증가할수록 최대 강도에 도달하는 처짐량이 줄어든다. 이를 CFRP 보강 겹 수의 기준으로 보면, 보강되는 RC 보의 구조 성능에 비해 보강 겹 수가 지나치게 많으면 급격한 취성파괴를 발생시켜 구조물의 안전성을 저하시키는 효과를 낼 수도 있다. 이러한 경향은 기존 연구결과에서도 찾을 수 있다. Park et al.(2005)의 연구에서는 CFRP 보강 겹 수가 증가할수록 파괴시점이 증가하는 경향을 보이는 반면, Kim(2012)와 Yi and Lim(2005)의 연구에서는 CFRP 시트 보강 겹 수가 증가하면 파괴시점이 감소하는 경향을 보였다. 따라서 CFRP 시트로 보강된 RC 보의 연성거동을 확보하기 위해서는 보강되는 RC 보의 구조성능을 기반으로 최적의 보강수준을 갖도록 CFRP 시트 보강 설계를 해야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 CFRP 시트로 보강된 RC 보의 구조거동을 중앙부 부착 길이 및 CFRP 시트 겹 수를 변수로 하여 그 영향을 해석적으로 분석하였다. 해석적 연구를 통해 분석된 구조거동은 최대강도, 초기 강성, 파괴시점이며 얻어진 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) CFRP 시트 보강 RC 보의 주요 파괴모드인 시트의 탈락을 해석적으로 표현하기 위하여, RC 보와 CFRP 시트 사이에 Cohesive 요소를 적용한 유한요소모델을 개발하였다. 유한요소모델은 기존 실험결과와 유사한 하중-처짐 곡선을 갖는 것을 확인하였으며, 특히 CFRP 시트 탈락에 의한 취성파괴 현상을 잘 반영하는 것을 확인하였다.
- 2) CFRP 시트 보강 수준 증가에 따른 유한요소 모델의 최대 강도의 증가는 sin 함수의 형태를 갖는 비선형 특성을 갖는 것을 확인하였으며, CFRP 시트 보강 수준이 낮은 RC 보의 거동예측에서는 이를 고려해야 할 것으로 판단된다.
- 3) CFRP 시트 보강 수준에 따라 초기 강성도 최대 강도와 마찬가지로 sin 함수의 증가 경향을 갖는 것을 확인하였으며, 초기 강성의 평가가 비교적 선형탄성구간에서 수행되는 만큼 최대 강도에 비해 비선형성이 크지 않은 것을 확인하였다.
- 4) 파괴시점은 부착파괴를 발생시키는 최대 하중과 초기 강성에 영향을 받는 것으로 나타났다. 보강되는 RC 구조물의 구조성능에 비해 CFRP 보강 수준이 지나치게 높으면 오히려 파괴시점이 감소하는 현상이 나타나 구조물의 취성파괴를 유도할 우려가 있어, 이를 고려한 적절한 보강 설계가 이루어야 할 것으로 판단된다.
- 5) CFRP 시트 보강 RC 보의 구조거동을 정확하게 모사하기 위해서는 전단파괴 뿐만 아니라 콘크리트 휨 균열로 인한 접착면 파괴를 동시에 모사할 수 있는 유한요소모델 개발이 요구되며, 이를 검증하기 위한 실험적 연구가 향후 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설기술연구개발사업의 연구비지원(20CTAP-C152254-02)에 의해 수행되었습니다.

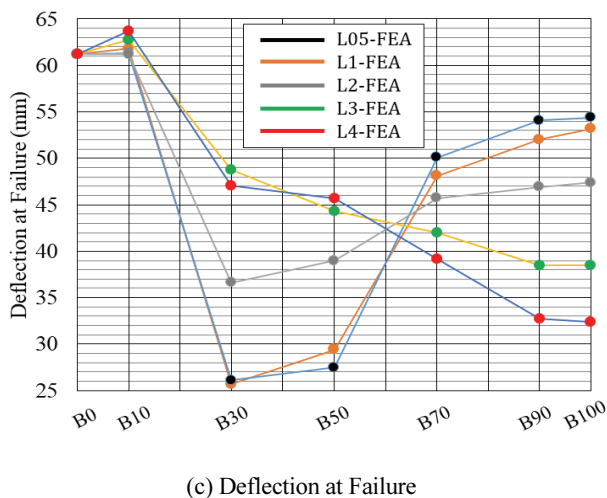
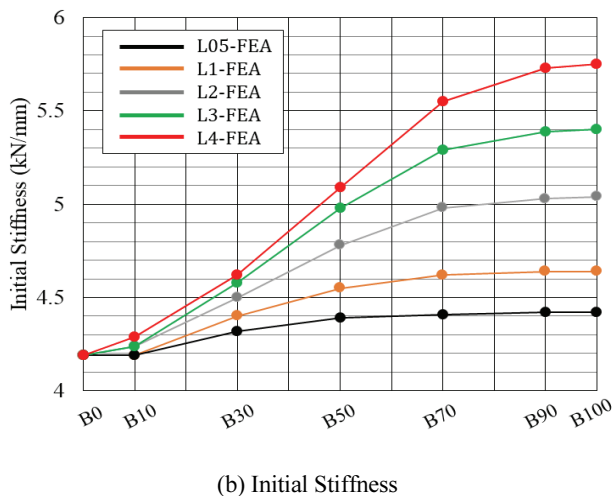
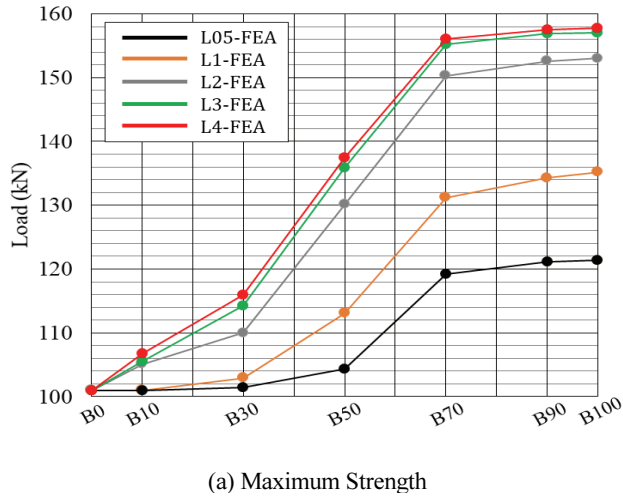


Fig. 8 Parametric Effects of FE Models

References

1. Brena, S. F., Bramblett, R. M., Wood, S. L., & Kreger, M. E. (2003), Increasing flexural capacity of reinforced concrete beams using carbon fiber-reinforced polymer composites, *Structural Journal*, 100(1), 36-46.
2. British Standards Institution (BSI) (2004), Eurocode 2: Design of Concrete Structures: Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings; British Standards Institution.
3. Chen, J. F., & Teng, J. G. (2001), Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete, *Journal of Structural Engineering*, 127(7), 784-791.
4. Hong, K. N., Shim, W. B., Yeon, Y. M., & Jung, K. S. (2020), Effect of Partial Delamination of CFRP Sheet on the Load Capacity of RC Beam, *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, 11(2), 15-23.
5. Kim, H. S. (2012), Experimental Studies of Effect of Beam Sizes and CFRP Layers on Structural Behaviors of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRPs (Carbon Fiber Reinforced Polymers), *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 28(11), 99-106.
6. Kim, K. S., Han, O., Gombosuren, M., & Kim, S. H. (2019), Numerical simulation of Y-type perfobond rib shear connectors using finite element analysis, *Steel and Composite Structures*, 31(1), 53-67.
7. Mander, J.B., Priestley, M.J. & Park, R. (1988), Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804-1826.
8. Park, J. S., Jung, W. T., You, Y. J., & Park, Y. H. (2005), An Estimate of Flexural Strength for Reinforce Concrete Beams Strengthened with CFRP Sheets, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 17(2), 213-220.
9. Park, J. S., Kim, B. C., Park, K. T., & Jung, K. S. (2018), Analytical Study on the Bond Performance of Fiber Optic Sensor Embedded Carbon Fiber Sheets for Strengthening Concrete Structures, *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, 9(2), 31-36.
10. Park, J. Y., Kim, S. D., Cho, B. S., Kim, I. T., & Cheung, J. H. (2006), Improvement in Fatigue Durability of RC Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheets, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 10(6), 205-212.
11. Pham, H. B., & Al-Mahaidi, R. (2007), Modelling of CFRP-concrete shear-lap tests, *Construction and Building Materials*, 21(4), 727-735.
12. Yi, W. H., & Lim, J. H. (2005), Experimental Study on Flexural Capacity Evaluation of Reinforced Concrete Beam strengthened with Carbon Fiber Sheet, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 21(6), 3-11.

Received : 07/03/2020

Revised : 09/25/2020

Accepted : 09/25/2020

요 지 : CFRP 시트를 이용한 RC 구조물의 보강은 다양한 방법으로 적용되어 왔으며, 관련 연구도 오랜 기간 수행되어 왔다. 하지만 CFRP 보강에 대한 연구는 대부분 실험적으로 수행되어, 다양한 변수 효과를 효율적으로 분석하기에는 한계가 있었다. 본 연구에서는 CFRP 시트로 보강된 RC 보의 구조거동을 ABAQUS 프로그램을 이용하여 수치해석적으로 분석하였다. RC 보 하면과 시트 사이에 Cohesive 요소를 적용하여 CFRP 보강 RC 보의 주요 파괴모드인 CFRP 시트 탈락을 모사하였다. CFRP 시트 탈락에 의한 급격한 비선형 문제 및 효율적인 유한요소해석을 위하여 준정적 해석 기법과 2 차원 대칭 모델을 사용하였다. 본 연구에서 수행한 유한요소해석 결과는 기존 실험결과를 잘 반영하는 것을 확인하였으며, CFRP 보강 수준과 최대 강도, 초기 강성, 파괴 시점의 관계를 분석하였다. 총 31개 모델에 대한 유한요소해석을 수행한 결과 보강 수준의 증가에 따라 최대 강도 및 초기 강성이 sin 함수 형태로 증가하는 것을 확인하였다. 또한 과도한 CFRP 시트 보강은 파괴시점을 앞당겨 보강 구조물의 취성 파괴를 야기할 수 있음을 확인하였으며, 이를 방지하기 위한 적절한 수준의 CFRP 시트 보강 설계가 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 탄소섬유 시트, 유한요소해석, 콘크리트 보, 구조물 보강
