

FRP-콘크리트 합성보의 휨거동에 관한 외연적 비선형 유한요소해석 연구

유승운* · 강가람**

Yoo, Seung Woon*, Kang, Ga Ram**

Explicit Nonlinear Finite Element Analysis for Flexure Behavior of FRP-Concrete Composite Beam

ABSTRACT

In order to study ultimate flexure behavior of FRP-concrete composite structures which can replace reinforced concrete structures, ABAQUS, a general purpose analysis program, was utilized for numerical nonlinear analysis of structural performance and behavior characteristics of FRP-concrete composite beams. Explicit nonlinear finite element analysis was conducted and the numerical results were compared with previous experiments. Concrete damaged plasticity model was adopted as material properties of concrete and Euro code was used as compressive stress state. Nonlinear analysis was performed for four different types of FRP-concrete composite beams, and ultimate load and cracking pattern was compared and analyzed. The model suggested in this research was able to simulate ultimate load and cracking pattern properly, it is expected to be utilized in study of precise structural and behavioral characteristics of various FRP-concrete composite structures.

Key words : GFRP plank, Composite beam, Cracking pattern, Explicit finite element method, Damaged plasticity model

초 록

본 연구는 철근콘크리트구조를 대신할 FRP-콘크리트 합성구조의 극한 휨 거동에 관한 것으로, FRP-콘크리트 합성보의 구조적 성능 및 거동 특성을 수치 해석적으로 규명하고자 범용 해석프로그램인 ABAQUS를 사용하여 외연적 비선형 유한요소해석을 실시하고 기 수행한 실험과 비교 분석하였다. 콘크리트의 재료모델은 콘크리트 손상 소성모델을 사용하였으며, 콘크리트 압축응력은 유로코드를 사용하였다. 4가지 종류의 FRP-콘크리트 합성보에 대해 비선형해석을 수행하고 극한하중 및 균열 형태를 비교 분석하였다. 본 모델의 경우 극한 하중 및 균열 형태를 잘 모사할 수 있었기 때문에 앞으로 다양한 FRP-콘크리트 합성구조의 정밀한 구조거동 해석 및 분석에 사용 가능할 것으로 판단된다.

검색어 : 유리섬유강화폴리머판, 합성보, 균열형태, 외연적 유한요소법, 손상소성모델

1. 서론

지금까지 철근콘크리트는 우수한 건설재료로써 건설구조물에 널리 이용되고 있으나, 철근의 부식, 중성화, 콘크리트 타설 및 양생에 의한 거푸집 및 동바리의 설치 및 제거 등의 많은 문제점을 가지고 있었다. 이러한 철근콘크리트의 문제점을 원천적으로 제거하고자 보강재료와 시스템적인 측면에서 많은 개선 노력이 경주 되고 있다. 보강재료적인 측면에서 내구성, 내식성 등 여러 면에서 우수한

* 중신회원·교신저자·가톨릭관동대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author·Catholic Kwandong University·swyoo@cku.ac.kr)

** 가톨릭관동대학교 토목공학과 대학원 (Catholic Kwandong University·y2t3@naver.com)

Received September 23, 2016/ revised January 10, 2017/ accepted January 17, 2017

재료특성을 갖는 섬유보강폴리머(fiber reinforced polymer: FRP)을 건설재료로 인식한 것은 비교적 최근 일이다(Bank, 2006). FRP는 항공우주산업, 자동차산업 등 첨단산업 분야에서 특수한 목적을 위해 개발되었으나, 최근 소재산업의 발달과 수요증가에 따른 대량 생산시스템 구축 등에 따른 가격하락 등에 따라 경제성을 확보하게 되었고 건설산업에도 적용되기 시작하였다(Cheng et al., 2007; Erki, 1999; Tang et al., 1999). 처음 보수보강재료로 활용이 많았지만 최근 주 구조부재료의 이용도 점차 증가하고 있는 추세이며, 콘크리트공사에서 필수적인 거푸집으로의 병행이용에도 최근 연구가 진행 중이다(Bank et al., 2007; Cho et al., 2007). FRP를 콘크리트 구조에 필수적인 거푸집으로의 병행 사용은 기존 콘크리트공사에서 필수적인 거푸집의 설치 및 탈형, 이를 임시 지지하기 위한 등바리 구조 설치 및 제거 등에 필요한 많은 인력과 시간 및 공사비를 획기적으로 줄일 수 있는 방안이다(Yoo, et al., 2007).

본 FRP-콘크리트 합성구조 개념은 콘크리트 타설 시 FRP를 거푸집으로 활용하고 콘크리트가 양생된 후에는 FRP를 인장보강재로 사용하여 콘크리트와 합성구조를 이루게 되는 구조형식이다. 기존건설재료인 콘크리트와 신소재 FRP를 합성구조화 함으로써 경제성, 시공성, 안전성 및 고내구성을 갖춘 새로운 합성구조를 실제적으로 실무에서 사용하기 위해서는 합성구조의 거동특성을 정확히 파악하는 것이 중요하며 지금까지 주로 실험적인 연구에 많이 의존하고 있다(Bank et al., 2010; Um and Yoo, 2015).

본 연구에서는 FRP를 인장보강재 및 거푸집으로 활용한 FRP-콘크리트 합성보의 휨 파괴거동을 해석적인 방법을 통해 그 거동 특성을 분석하고자 한다. 일반적으로 해석적인 접근방법으로 유한요소법을 주로 사용하며, 크게 내연적 유한요소법(implicit finite element method)과 외연적 유한요소법(explicit finite element method)으로 구분된다. 외연적 유한요소법은 각 단계에서 강성행렬을 구성할 필요가 없고 현재 단계의 해만 가지고 다음단계를 구하기 때문에 항상 수렴 문제없이 정량적인 해를 구할 수 있다(Kim et al., 2003).

본 연구는 철근콘크리트구조를 대신할 FRP-콘크리트 합성구조의 휨 거동에 관한 것으로, FRP-콘크리트 합성보의 구조적 성능 및 거동 특성을 해석적으로 규명하고자 범용 해석프로그램인 ABAQUS (Dassault Systems, 2014)를 사용하여 외연적 비선형 유한요소해석을 실시하고 기 수행한 실험과 비교분석하고자 한다.

2. 비교 실험 시편

2.1 실험시편 설계 및 제작

본 연구에서 비교한 실험체는 인장 보강재 및 영구거푸집으로 FRP 판을 사용하였고 그 외 추가적인 인장 및 전단 보강재는

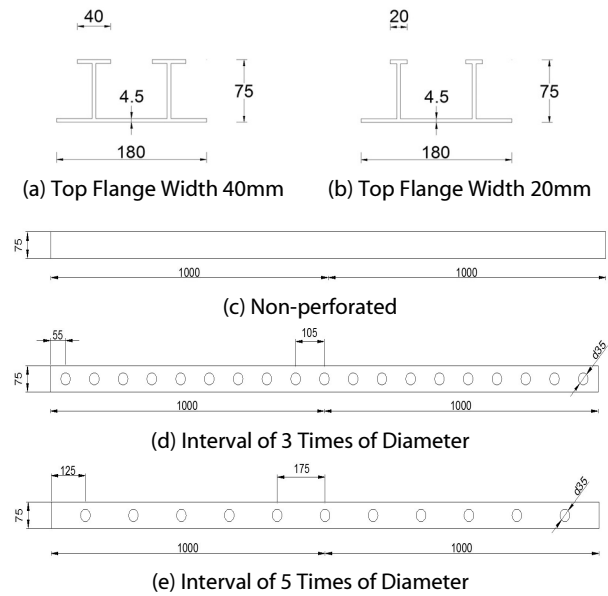


Fig. 1. Dimensions of FRP Plank (mm)

Table 1. List of Experiments

Name of experiment	No.	Tensile reinforcement	Perforation of the web	Top flange width (mm)	Perforated interval (times)
NOFC40N	2	Sand coated FRP	No perfbond	40	-
NOFC43N	2	Sand coated FRP	perfbond	40	3
NOFC45N	2	Sand coated FRP	perfbond	40	5
NOFC20N	2	Sand coated FRP	No perfbond	20	-

Table 2. Material Properties of FRP

Type	Production method	Thickness (mm)	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
Glass	Pultrusion process	4.5	386	328	25.3

사용하지 않았다. Fig. 1과 같이 리브(rib)가 2개가 포함되게 180 mm로 절단하여 합성보의 단위 폭으로 사용하였다. Table 1은 비교 실험체의 제원이다. 실험체 제작에 사용한 콘크리트의 압축강도 43 MPa이며, Table 2에 FRP 판의 물성을 나타내었다(Um and Yoo, 2015).

2.2 실험방법

실험은 단순지지 상태에서 순경간 1800 mm의 지간 중앙에

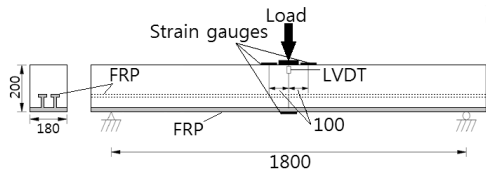


Fig. 2. Dimension and Typical Instrumentation of Specimens (mm)

유압식 압축장치를 사용하여 가력하였고, 로드셀(load cell)과 변위계를 사용하여 하중 및 처짐을 계측하였으며 자세한 형상은 Fig. 2와 같다.

3. 유한요소 모델링

3.1 재료모델

콘크리트의 재료모델은 ABAQUS에서 몇 가지 제공하고 있는데 그 중 Lublinear 등(1989)이 처음 제안하고 ABAQUS (Dassault Systems, 2014)에서 개선하여 도입한 콘크리트 손상 소성(concrete damaged plasticity) 모델을 사용한다(Genikomsou and Polak, 2015).

콘크리트의 압축 변형은 EC2 모델을 이용하여 콘크리트의 압축 응력-변형률 관계를 정의하였으며 관계식은 다음과 같다(Eurocode, 2004).

$$\sigma_c = f_{cm} \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \quad (1)$$

$$k = 1.05 E_{cm} \frac{\epsilon_{cl}}{f_{cm}}, \quad \eta = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cl}}$$

여기서 ϵ_c 는 압축변형률, ϵ_{cl} 은 최대압축응력시의 변형률 f_{cm} 은 압축강도, E_{cm} 은 접선탄성계수이다.

콘크리트 압축응력-변형률 곡선식은 Fig. 3과 같고, 압축강도 0.4 f_{cm} 까지 선형탄성으로 가정하였으며 탄성계수(E_{cm})는 $22(0.1f_{cm})^{0.3}$ 를 적용하였다. 콘크리트 인장탄성계수는 균열 전까지 압축탄성계수와 동일하게 선형 비례하여 증가하는 것으로 가정하였고, 균열

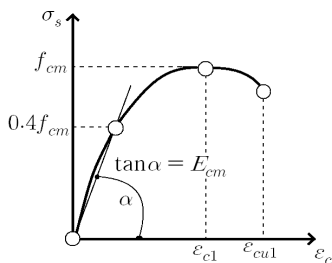


Fig. 3. Stress-strain Diagram for Uniaxial Compression

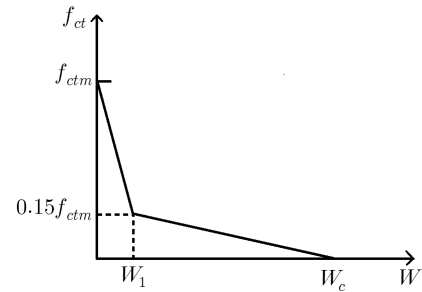


Fig. 4. Stress-crack Opening Diagram for Uniaxial Tension

후 인장강화효과를 고려하였다. CEB-FIP 모델을 이용하여, 파괴에너지를 근간으로 한 인장응력-변위 관계를 사용하여 요소크기에 대한 민감성을 제거하고자 하였다(CEB-FIP, 1993). 인장응력 및 변위 관계식은 Fig. 4와 같으며, 여기서 f_{ctm} 은 최대인장응력으로 $0.30f_{cm}^{2/3}$, w 는 균열폭이며, G_r 는 파괴에너지이다(Kmieciak and Kaminski, 2011).

FRP의 경우 항복점이 없기 때문에 파괴 시까지 탄성 거동을 보이고, 최대 강도 이후 취성적 파괴 양상을 보이나, 본 연구에서는 완전탄성체로써 거동하는 것으로 가정하고 모델링하였다.

3.2 해석모델 및 경계조건

외연적 유한요소법은 작은 시간 간격을 가지고 각 단계에서 강성행렬을 구성할 필요가 없고 현재 단계의 해만으로 다음 단계의 해를 구할 수 있으므로 3차원 고체 및 구조 문제에서 내연적 비선형해석법에 비해 기하학적 비선형성이 매우 큰 경우와 재료의 연화 현상이 심한 경우에 해를 안정적으로 구할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 비선형 유한요소해석은 외연적 해석코드인 ABAQUS/Explicit를 사용하였고, 3차원 구조해석 모델을 구성하여 비선형 해석을 수행하였다. 비선형 해석과 관련하여 변형에 따른 기하학적 비선형과 재료 비선형을 동시에 고려하였으며, 재료 물성은 재료실험을 통하여 얻어진 기본 물성을 바탕으로 해석에 반영하였다. FRP 판의 재료특성은 Table 2의 물성치를 적용하였다. FRP-콘크리트 시험체를 모사하기 위한 유한요소 모델은 콘크리트를 FRP판을 제외한 3차원 입체요소로 모델링하고, FRP 판을 연속체 쉘로 모델링한 후 타이구속(tie constraint) 경계조건을 사용하였다.

Fig. 5와 같이 해석모델링은 대칭성을 고려하여 1/4 대칭 모델로 구성하였다. 콘크리트 보는 감차적분(reduced integration)을 적용한 8절점 3차원 솔리드요소(8-node 3 dimensional solid, C3D8R)로 모델링하였고, FRP는 8절점 사변형 연속체 쉘요소(8-node quadri-lateral continuum shell, SC8R)를 사용하였다.

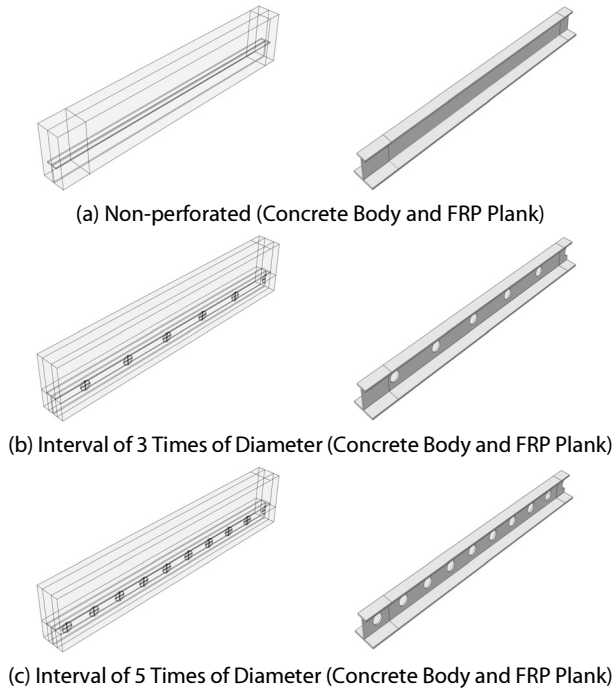


Fig. 5. Analysis Model of Specimen

4. 유한요소해석

4.1 재료변수 및 모델조정

FRP-콘크리트 합성보의 휨거동에 대한 콘크리트 손상 소성모델의 여러 변수의 영향에 대해 사전 연구를 수행하였다(Yoo and Kang, 2017). 요소의 크기, 팽창각(dilation angle), 파괴에너지, 변수 K_c , 손상계수 등을 변수로 사용하였고, 실험값과 비교 분석한 결과 요소크기는 20 mm, 팽창각은 30°, 변수 K_c 는 0.667, 파괴에너지는 100 Nm/m², 손상계수는 포함하는 것을 추천하였으므로 본 연구에서는 이 값들을 사용하였다.

4.2 비선형 합성보

기준 실험시편인 비선형 합성보 즉 NOFC40N의 하중-변위 곡선은 실험결과에 비해 다소 초기균열이 늦게 발생하고, 초기강성은 다소 크게 나타났으며 균열 후 강성은 유사한 경향을 보여주고 있다. 하중-변위 곡선 및 해석 결과는 Fig. 6과 Table 3과 같다. 실험시편의 경우 초기에 존재할 수 있는 미세균열의 영향 등으로 수치해석 값보다 다소 낮은 초기 균열하중 값을 보여 준다고 사료된다. 각각의 하중 단계에서 균열형태를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 Fig. 7(a)는 각각의 하중 단계에서의 수치해석 결과이며, Fig. 7(b)는 실험에서 관측한 결과이다. ABAQUS의 콘크리트 손상 소성모델에서는 균열을 직접적으로 표현하는 대신 소성변형률(plastic strain)로 균열을 묘사하고 있으며, 최대 주 소성변형률

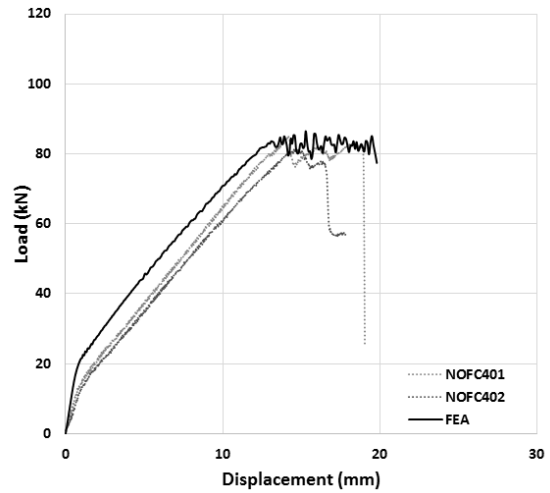


Fig. 6. Load-displacement Curve of NOFC40N

Table 3. Analysis Results of NOFC40N

	P1 (kN)		$\frac{P_N}{P_{EX}} \times 100$	D1 (mm)		$\frac{D_N}{D_{EX}} \times 100$
	NOFC401	NOFC402		NOFC401	NOFC402	
NOFC401	84.83	83.1	-	14.41	14.64	-
NOFC402	81.37			14.87		
FEA	86.50		104.1	15.27		105.8

(maximum principal plastic strain)이 양(+) 일 때 균열이 시작되며, 균열의 방향은 최대 주 소성변형률에 수직방향으로 가정하므로 이를 활용하여 Fig. 7(a)와 같이 시각화 할 수 있다.

실험결과와 유사하게 보의 중앙하단부에서 초기균열이 시작되어 점차 상부와 진행되며, 인근에서도 균열이 발생하는 과정을 보여주며, 최종적으로 극한하중에서 FRP판의 상부 플랜지와 콘크리트 사이에서 박리되는 현상을 묘사하고 있다. 실험결과와 해석결과를 비교하면, NOFC40N의 수치해석 값은 최대 극한하중 값과 변위 값은 86.50 kN, 15.27 mm 이다. 최대하중을 비교할 때 약 4.1%의 오차를 나타내고 있으며 전반적인 하중-변위 곡선은 실험결과와 일치함을 알 수 있었다.

상부플랜지 폭인 20 mm 인 NOFC20N의 수치해석결과로는 극한하중값 90.55 kN, 변위값 18.11 mm 이다. 기준 실험시편 NOFC40N과 유사하게 초기강성이 실험치보다 크게 나타났으며 균열 후의 강성은 유사하게 나타났다. FRP의 상부플랜지 폭이 40 mm인 기준 실험시편에 비해 최종적인 균열형태는 상부플랜지와 콘크리트의 박리파괴가 아닌 일반적인 휨파괴 형태이었다. 이와 같은 연유로 플랜지 폭이 좁은 경우가 극한하중 값에서 실험과 유사하게 수치해석에서도 크게 나타났다. 하중-변위 곡선과 극한하중 값은 Fig. 8과 Table 4에 나타내었으며, 각각의 하중단계에서 균열 형태는 Fig. 9와 같다.

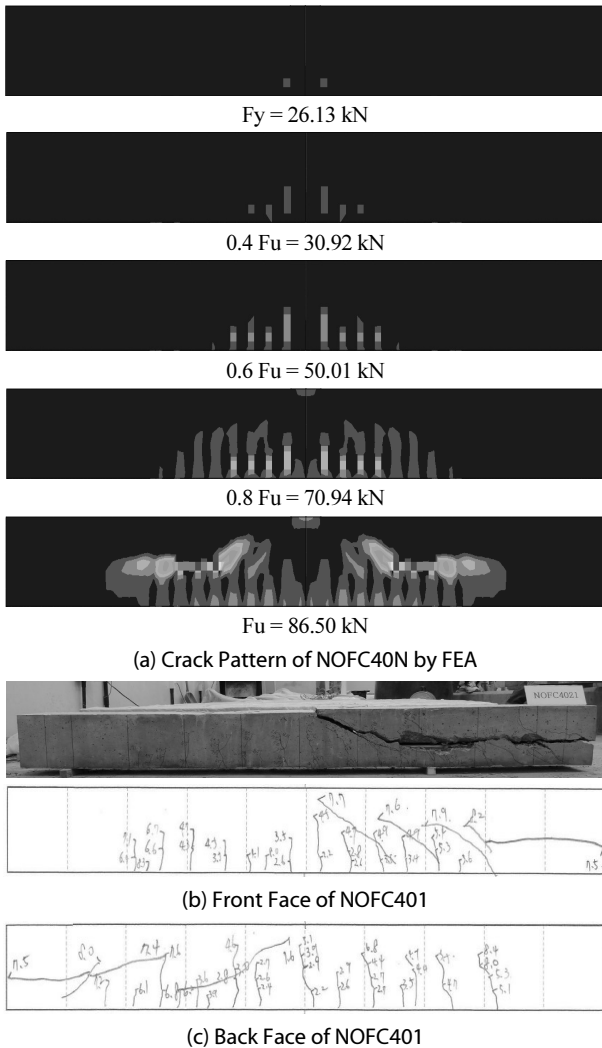


Fig. 7. Crack Pattern and Failure Mode of NOFC40N

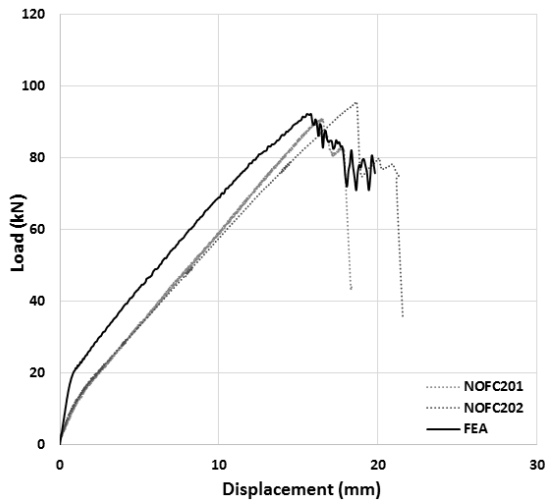


Fig. 8. Load-displacement Curve of NOFC20N

Table 4. Analysis Results of NOFC20N

	P1 (kN)	$\frac{P_N}{P_{EX}} \times 100$	D1 (mm)	$\frac{D_N}{D_{EX}} \times 100$
NOFC201	91.15	93.28	16.75	-
NOFC202	95.41		18.73	
FEA	92.15	98.7	15.79	89.0

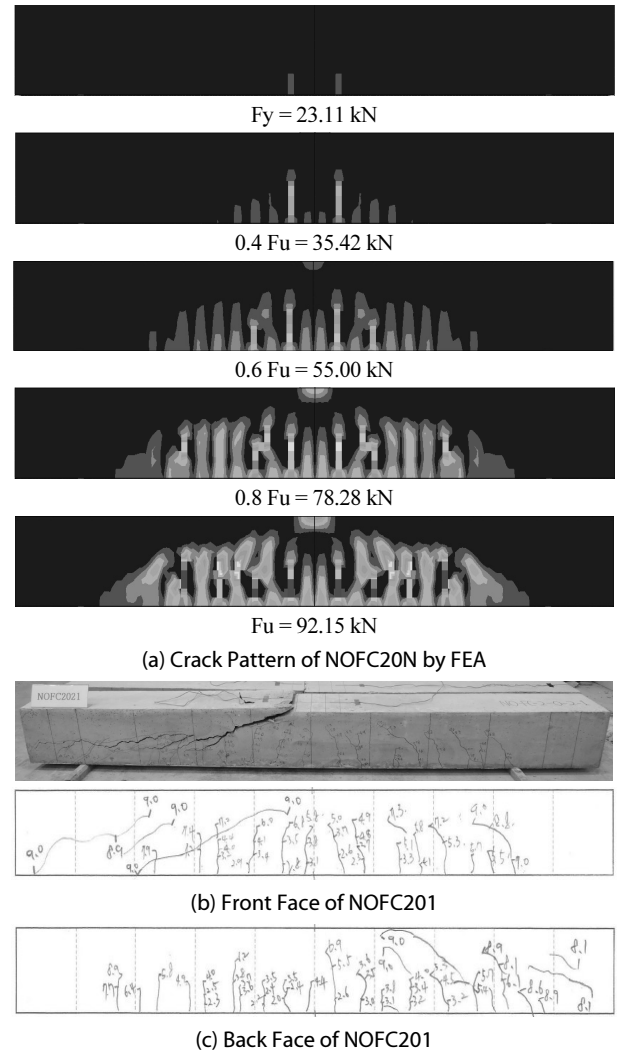


Fig. 9. Crack Pattern and Failure Mode of NOFC20N

4.3 천공 합성보

5배 간격 천공 합성보인 NOFC45N의 하중-변위 곡선 및 해석 결과는 Fig. 10과 Table 5와 같다. 수차해석의 최대하중은 80.77 kN으로 실험 평균 값 92.25 kN보다 약 12.5% 작게 계산되었다. 초기 강성의 경우 비천공 합성보와 유사하게 실험 결과보다 다소 크게 발생되었으나 초기균열 이후 강성은 초기에는 실험결과와 유사하나 후반부에서 강성이 저하되어 다소 빨리 파괴되는 양상을

보여주고 있다. 최대 변위치의 경우 약 15% 정도의 차이가 있다. 균열 형태는 Fig. 11에 나타내었으며, 실험 결과와 유사한 형태를

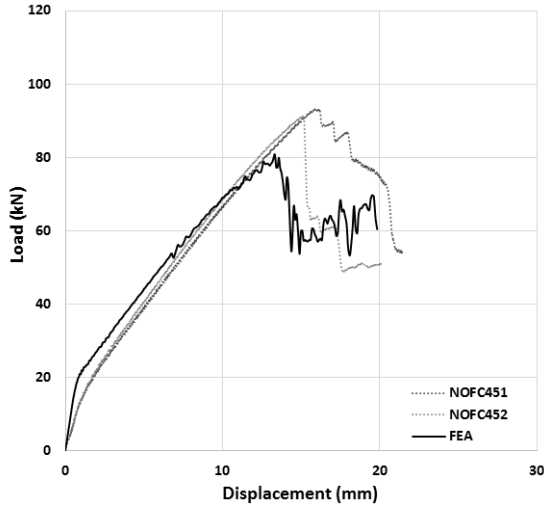
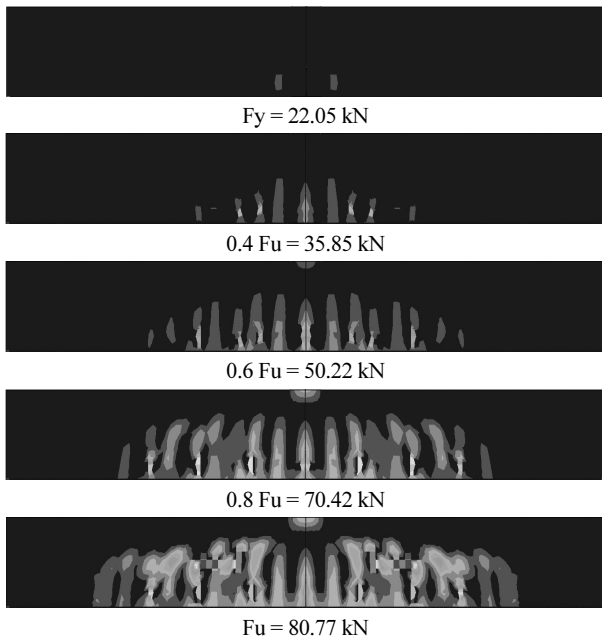


Fig. 10. Load-displacement Curve of NOFC45N

Table 5. Analysis Results of NOFC45N

	P1 (kN)	$\frac{P_N}{P_{EX}} \times 100$	D1 (mm)	$\frac{D_N}{D_{EX}} \times 100$
NOFC451	93.07	92.25	16.06	-
NOFC452	91.43		15.35	
FEA	80.77	87.5	13.33	84.8



(a) Crack Pattern of NOFC45N by FEA

Fig. 11. Crack Pattern and Failure Mode of NOFC45N

보여주고 있다. 합성보 하단의 휨 균열과 FRP 플랜지 상부에서 콘크리트와의 국부적인 분리 현상을 잘 모사할 수 있는 것을 알 수 있다.

3배 간격 천공 합성보인 NOFC43N의 하중-변위 곡선 및 해석 결과는 Fig. 12와 Table 6과 같다. 비천공 합성보의 경우와 유사하게 초기 강성의 경우 실험 결과보다 강하게 발생되며 초기균열 후 강성은 실험치와 유사하게 모사됨을 알 수 있다. 최대하중의 경우 약 95%, 최대변위 경우 약 89%로 수치해석 결과와 실험 결과가 차이를 보이고 있다. 균열의 형태는 Fig. 13과 같고, 최대

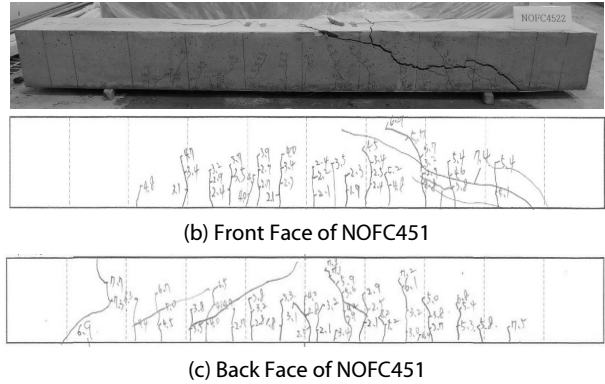


Fig. 11. Crack Pattern and Failure Mode of NOFC45N (Continue)

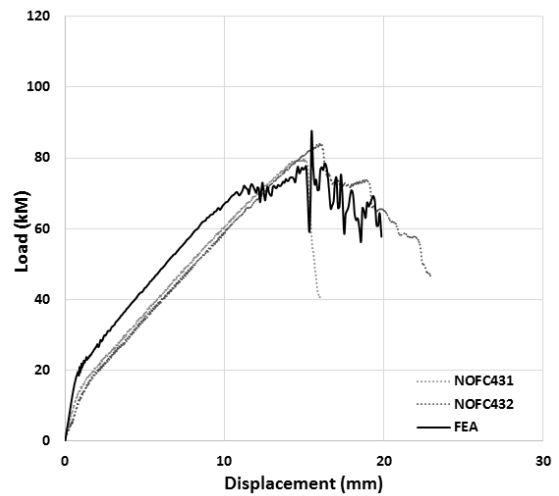


Fig. 12. Load-displacement Curve of NOFC43N

Table 6. Analysis Results of NOFC43N

	P1 (kN)	$\frac{P_N}{P_{EX}} \times 100$	D1 (mm)	$\frac{D_N}{D_{EX}} \times 100$
NOFC431	79.68	81.90	15.11	-
NOFC432	84.13		16.25	
FEA	77.67	94.8	15.12	88.9

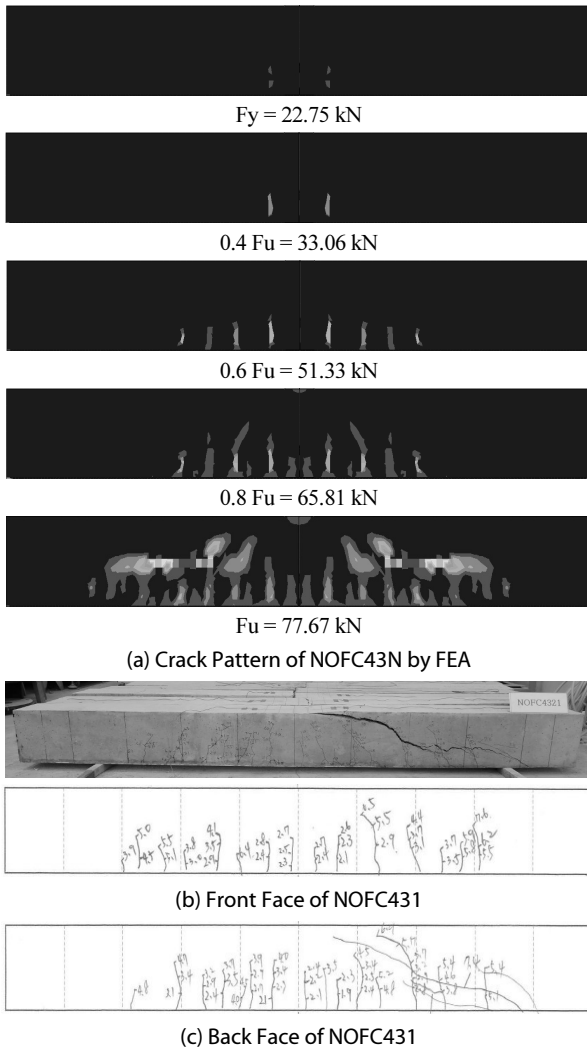


Fig. 13. Crack Pattern and Failure Mode of NOFC43N

하중 단계에서 균열 형태는 비천공 합성보와 유사한 경향을 보여주고 있다.

5. 결론

본 연구는 철근콘크리트구조를 대신할 FRP-콘크리트 합성구조의 휨 거동에 관한 것으로, FRP-콘크리트 합성보의 구조적 성능 및 거동 특성을 수치 해석적으로 규명하고자 범용 해석프로그램인 ABAQUS를 사용하여 외연적 비선형 유한요소해석을 실시하고 기 수행한 실험과 비교분석하였다. 4가지 종류의 FRP-콘크리트 합성보에 대해 비선형해석을 수행하고 극한하중 및 균열 형태를 비교 분석하였다. 본 모델의 경우 극한 하중 및 균열 형태를 잘 묘사할 수 있었기 때문에 앞으로 다양한 FRP-콘크리트 합성구조의 정밀한 구조거동 해석 및 분석에 사용 가능할 것으로 판단된다.

또한 앞으로 파괴 메커니즘이 다른 다양한 형태의 FRP-콘크리트 합성구조에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 가톨릭관동대학교 학술연구비에 의해 지원되었습니다.

References

Bank, L. C. (2006). *Composites for construction: Structural design with FRP materials*, John Wiley & Sons, NJ, USA.

Bank, L. C., Oliva, M. G., Bae, H. U., Barker, J. W. and Yoo, S. W. (2007). "Pultruded FRP plank as formwork and reinforcement for concrete members." *Advances in Structural Engineering*, Vol. 10, No. 5, pp. 525-536.

Bank, L. C., Oliva, M. G., Bae, H. U. and Bindrich, B. V. (2010). "Hybrid concrete and pultruded-plank slabs for highway and pedestrian bridges." *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 552-558.

CEB-FIP model code (1993). Thomas Telford.

Cheng, L., Zhao, L. M., Karbhari, V., Hegemier, G.-a. and Seible, F. (2005). "Assessment of a steel-free fiber reinforced polymer-composite modular bridge system." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No. 3, pp. 498-506.

Cho, K. H., Park, S. Y., Cho, J. R. and Kim, B. S. (2007). "Structural systems and behavioral characteristics of an innovative FRP-concrete composite deck." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 27, No. 3, pp. 347-357 (in Korean).

Dassault Systems (2014). *Abaqus Analysis User's Manual Version 6.14*, Dassault Systems.

Erki, M. (1999). "Fiber-reinforced polymers for structural engineering in Canada." *Structural Eng. International*, Vol. 9, No. 4, pp. 278-280.

Eurocode 2 (2004). *Design of Concrete Structure*, Belgium.

Genikomsou, A. S. and Polak, M. A. (2015). "Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in Abaqus." *Engineering Structures*, Vol. 98, pp. 38-48.

Kim, K. W., Jeong, H. S. and Beom, H. G. (2003). "Transient dynamic analysis of a patterned tire rolling over a cleat with and explicit finite element program." *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 11, No. 6, pp. 164-170 (in Korean).

Kmiecik, P. and Kaminski, M. (2011). "Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration." *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 623-636.

Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. and Onate, E. (1989). "A plastic-damage model for concrete." *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 25, No. 3, pp. 299-326.

Tang, B., Podolny, W. and Hooks, J. (1999). "A good start for fiber-reinforced polymer composite material bridges." *American Society of Civil Engineers, Materials Engineering Congress*, pp.324-331.

- Um, C. H. and Yoo, S. W. (2015). "An experimental study for flexural failure behavior of composite beam with cast-in-place high strength concrete and GFRP plank using as a permanent formwork and tensile reinforcement." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 35, No. 5, pp. 1015-1025 (in Korean).
- Yoo, S. W., Bae, H. U., Oliva, M. and Bank, L. (2007). "Experimental study of concrete beam with FRP plank as formwork and reinforcement." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 1, pp. 67-74 (in Korean).
- Yoo, S. W. and Kang, G. R. (2017). "Influence of various parameter for nonlinear finite element analysis of FRP-concrete composite beam using concrete damaged plasticity model." *Journal of The Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 18, No. 2, pp. 697-703 (in Korean).