

## 콘크리트 손상 소성모델을 이용한 FRP-콘크리트 합성보의 비선형 유한요소해석에서 여러 변수들의 영향

유승운\*, 강가람  
가톨릭관동대학교 토목공학과

### Influence of Various Parameter for Nonlinear Finite Element Analysis of FRP-Concrete Composite Beam Using Concrete Damaged Plasticity Model

Seung-Woon Yoo\*, Ga-Ram Kang

Department of Civil Engineering, Catholic Kwandong University

**요약** 본 연구는 기존의 철근 콘크리트 구조형식을 대신할 FRP-콘크리트 합성구조의 휨거동에 관한 것이다. 구조적 성능 및 거동 특성을 수치 해석적으로 규명하고자 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 비선형 유한요소해석을 실시하였으며, 이때 사용하게 되는 여러 변수들의 영향을 실험 결과와 비교, 분석하여 본 합성구조에 최적화된 변수 값을 제시하고자 하였다. 합성구조의 구조재료모델은 콘크리트 손상소성모델(concrete damage plasticity model)을 사용하였고 콘크리트 압축응력관계식은 유로규준(Euro code)를 이용하였다. 내연적 유한요소해석의 경우 기하학적, 재료적 비선형성이 큰 경우 수렴에 많은 문제가 있으므로 본 연구의 경우 외연적 유한요소해석법이 적절한 것으로 판단된다. 콘크리트 손상 소성 모델의 여러 변수들에 대해 실험값과 비교한 결과 본 연구의 경우, 요소 크기는 20mm, 팽창각은 30°, 파괴에너지 값은 100Nm/m<sup>2</sup>, 변수 Kc는 0.667, 손상계수는 고려하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 제시된 수치모델의 경우 신소재 합성보의 극한하중 및 균열패턴을 실험과 비교적 유사하게 표현할 수 있으므로 앞으로 다양한 합성구조의 수치해석에 적용 가능하리라 판단된다.

**Abstract** This paper examines the flexure behavior of FRP-concrete composite structure that can replace conventional reinforced concrete structure types. In order to investigate the structural performance and behavioral characteristics in numerical analysis means, ABAQUS, a general purpose finite element analysis program, was utilized for nonlinear finite element analysis, and the various variables and their influences were analyzed and compared with experimental results to suggest values optimized to this composite structure. The concrete damage plasticity model and Euro code for concrete were used. In the implicit finite element analysis, the convergence was ambiguous when geometrical and material nonlinearity were large, so the explicit finite element analysis used in this study was deemed to be appropriate. From the comparison with the experiment about concrete damaged plasticity model, 20mm for the mesh size, 30° for the dilation angle, 100Nmm/mm<sup>2</sup> for the value of fracture energy, 0.667 for Kc value, and the consideration of damage parameter were suggested believed to be appropriate. The numerical model suggested in this study was able to imitate the ultimate load and cracking pattern very well; therefore, it is expected to be utilized in research of various new material composite structures.

**Keywords** : Composite beam, Concrete damaged plasticity model, Explicit finite element analysis, FRP, Nonlinear analysis

이 연구는 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(no. 2013R1A1A2010852)과 가톨릭관동대학교 학술연구비(CKURF-201604290001)에 의해 지원되었음.

\*Corresponding Author : Seung-Woon Yoo(Catholic Kwandong Univ.)

Tel: +82-33-649-7513 email: swyoo@cku.ac.kr

Received July 29, 2016

Revised November 29, 2016

Accepted February 3, 2017

Published February 28, 2017

## 1. 서론

콘크리트는 경제성 및 내구성 등이 우수하여 건설재료로 지금까지 반영구적인 구조물 건설에 널리 이용되고 있으나, 인장보강재로 철근의 사용 및 거푸집, 동바리 설치 등의 많은 문제점을 내포하고 있다. 이러한 점을 보완하고자 섬유보강폴리머(fiber reinforced polymer: FRP)를 인장보강재 및 거푸집으로 활용하고자 세계적으로 많은 연구자들에 의해 시도되고 있다[1-3].

본 연구에서는 FRP 판을 거푸집 및 인장보강재로 활용한 FRP-콘크리트 합성보의 휨과괴 거동을 해석적인 접근방법을 사용하여 그 거동 특성을 분석하고자 한다. 해석적 접근방법으로 현재 비선형 유한요소법을 주로 사용하고 있으며, 크게 두 가지 방법으로 분류할 수 있다. 첫째로 내연적 유한요소법(implicit finite element method)은 매 계산 단계마다 반복계산을 통해 내력과 외력 사이의 힘 평형을 만족시키는 방법으로 많은 시간과 노력이 소요되고, 기하학적 형상이 복잡하거나 대 변형을 일으키는 경우 수렴성이 확보되지 않는 경우가 있다. 둘째로 작은 시간 간격을 가지고 각 단계에서 반복계산을 하지 않고 동적 평형방정식을 만족시키는 해를 구하는 외연적 유한요소법(explicit finite element method)은 강성행렬을 구성할 필요가 없고 현재 단계의 해만으로 다음 단계의 해를 구할 수 있어 항상 정량적인 해를 구할 수 있다[4,5].

본 연구는 기존 철근 콘크리트 구조형식을 대신할 FRP-콘크리트 합성구조의 휨거동에 관한 것으로, 구조적 성능 및 거동 특성을 해석적으로 규명하고자 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS[6]를 사용하여 비선형 유한요소해석을 실시하며, 이때 사용하게 되는 여러 변수들의 영향을 실험 결과와 비교, 분석하여 본 합성구조에 최적화된 변수들의 추천 값을 제시하고자 한다.

## 2. 실험개요

### 2.1 실험체 설계 및 제작

본 연구에 이용한 비교실험시편은 Table 1과 같고 FRP 판의 형태 및 크기는 Fig. 1과 같다. 본 실험에서는 인장 보강재 및 영구거푸집으로 리브(rib)를 갖는 FRP 판을 사용하였고 그 외 추가적인 보강재는 사용하지 않았으며, 리브가 2개가 포함되게 180mm로 절단하여 합

성보의 단위 폭으로 사용하였다. 시험체 콘크리트 평균 압축강도는 43MPa이며, FRP의 물성은 Table 2와 같다[7].

Table 1. List of experiments

Name of experiment	Tensile reinforcement	Perforation of the web	Top flange width(mm)
NOFC4021	Sand coated FRP	No perfobond	40
NOFC4022	Sand coated FRP	No perfobond	40

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

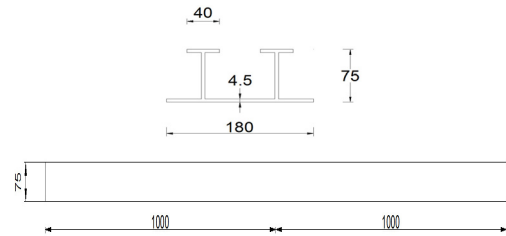


Fig. 1. Dimensions of FRP plank (mm)

### 2.2 실험 방법

지점 사이 순 간격은 1800mm이고, 지간 중앙에 100mm 폭의 강판을 설치하고 유압식 압축장치를 이용하여 변위제어방식으로 3점 재하하였다. 양단의 지점조건은 단순지지이고 로드셀(load cell)과 합성보 중앙에 설치한 LVDT를 이용하여 변위를 측정하였고, 변형률게이지를 이용하여 합성보 상하부에서의 변형률을 계측하였다. 합성보 상부의 경우, 하중 재하판의 위치를 피하기 위해 중앙에서 100mm 이격된 위치에 변형률게이지를 양쪽 2군데 설치하였고, 하부에서는 중앙에 설치하였으며 자세한 형상은 Fig. 2 과 같다[7].

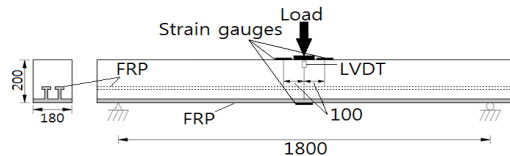


Fig. 2. Dimension and typical instrumentation of specimens (mm)

### 3. 유한요소 모델링

#### 3.1 재료모델

콘크리트의 재료모델은 ABAQUS에서 몇 가지 종류를 제공하고 있으나 그 중 일반적으로 많이 사용하는 콘크리트 손상 소성(concrete damaged plasticity) 모델을 사용한다. 이 모델은 Lubliner 등[8]이 처음 제시하였고, Lee 등[9]이 수정하였으며, ABAQUS에서 이를 개선시켜 도입한 것이다. 콘크리트 손상 소성모델의 기본변수로는 팽창각(dilation angle), 편심율(eccentricity), 응력비( $f_{b0}/f_{c0}$ ),  $K_c$  변수, 비스코스티 변수(viscosity parameter) 등이 있다.

콘크리트의 압축 변형의 경우, 압축강도로 부터 응력-변형률 관계식이 많이 제안되었으나[10], 본 연구에서는 EC2 모델[11]을 이용하여 콘크리트의 압축응력-변형률 관계를 정의하였으며 관계식은 다음과 같다.

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

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

여기서  $f_{cm}$ 는 압축강도,  $\epsilon_c$ 는 압축변형률,  $\epsilon_{cl}$ 는 최대압축 응력시의 변형률,  $E_{cm}$ 는 접선탄성계수이다.

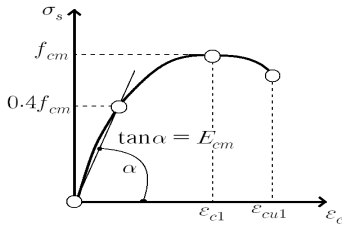


Fig. 3. Stress-strain diagram for uniaxial compression

콘크리트 압축응력-변형률 곡선식은 Fig. 3과 같고, 압축강도  $0.4f_{cm}$ 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 후 인장강화효과를 고려하였다. CEB-FIP 모델[12]을 이용하여, 파괴에너지를 근간으로 한 인장응력-변위 관계를 사용하여 요소크기에 대한 민감성을 제거하였다. 인장응력 및 변위 관계식은 Fig. 4와 같으며, 여기서  $f_{ct}$ 는 콘크리트의 인장강도,  $f_{ctm}$ 은 최대인장응력으로  $0.30f_{cm}^{2/3}$ ,  $w$

는 균열폭,  $w_1$ 과  $w_c$ 는 각각  $f_{ct} = 0.15f_{ctm}$ ,  $f_{ct} = 0$ 일 때의 변위이며,  $G_f$ 는 파괴에너지이다.

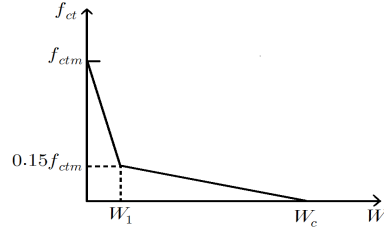


Fig. 4. Stress-crack opening diagram for uniaxial tension

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

#### 3.2 해석모델 및 경계조건

외연적 해석 방법은 강성행렬의 구성, 평형조건을 만족하기 위한 반복계산 과정 등이 필요 없기 때문에 현재 단계의 연산 정보만으로 다음 단계의 해를 항상 구할 수 있다. 외연적 비선형해석법은 3차원 고체 및 구조 문제에 효과적으로 적용할 수 있으며, 일반적으로 내연적 비선형해석법에 비해 기하학적 비선형성이 매우 큰 경우와 재료의 연화 현상이 심한 경우에 해를 안정적으로 구할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서 내연적 유한요소해석은 ABAQUS/Std, 외연적 유한요소해석은 외연적 해석 코드인 ABAQUS/Explicit를 사용하여 3차원 비선형 유한요소 해석을 수행하였다. 기하학적 및 재료적 비선형을 고려하였으며, 재료 물성치는 재료실험을 통하여 얻어진 값을 해석에 반영하였다.

FRP-콘크리트 합성보를 모사하기 위한 유한요소 모델은 콘크리트를 3차원 입체요소로 모델링하고, FRP 판을 연속체 쉘로 모델링하였다.

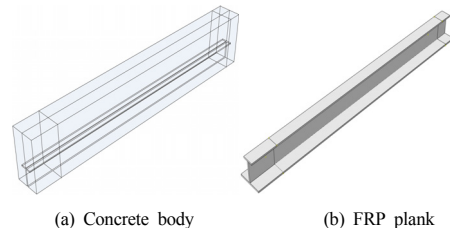


Fig. 5. Analysis model of specimen

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

## 4. 재료변수 및 모델 조정

### 4.1 내연적 및 외연적 유한요소해석

내연적 및 외연적 유한요소해석법의 차이를 살펴보기 위해 동일한 시험체에 대해 비선형해석을 수행하였다. 내연적 유한요소해석에서 비선형해석 기법으로 Riks 방법을 사용하였으며, 일반적으로 변형률 연화 등 비선형성이 큰 콘크리트 재료의 수치적 해석에서는 종종 해의 수렴에 문제가 발생한다. 반복계산 단계의 증가 또는 응력 증가분의 축소 등을 통해 일부 극복이 가능하지만 충분하지 않다고 알려져 있다. ABAQUS의 콘크리트 손상 소성모델에서는 비스코스티(viscosity) 계수를 사용하여 수렴성을 개선시키는 기법을 제공하고 있다. 본 문제의 경우 기본 값에 의해서는 수렴성이 확보되지 않음으로 비스코스티 계수의 변화에 따른 개선효과를 살펴보았다.

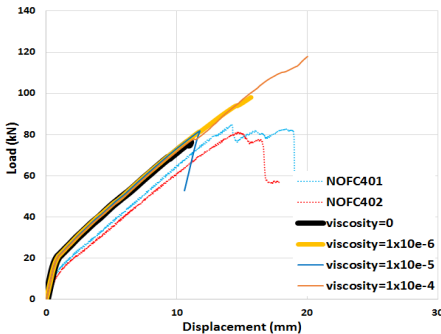


Fig. 6. Load-deflection response for different values of viscosity

Fig. 6 에서 보는바와 같이 비스코스티 값이  $1 \times 10^{-4}$  와 같은 경우 수렴은 확보되나 실험결과를 초과하는 경향을 보여 주고 있으며, 기본 값인 비스코스티 값이 0 인 경우 수렴하지 않고 중간에 해석이 중지되는 현상이 발생한다. 이와 같이 비스코스티 계수에 따라 다양한 결과를 주고 있으므로 상당히 주의해서 선정하여야 하며 해

석된 해의 신뢰도에 많은 문제를 내포하게 된다. 내연적 유한요소해석의 경우 기하학적, 재료적 비선형성이 큰 경우 수렴에 많은 문제가 있으므로 본 실험의 경우 외연적 유한요소해석법이 적절한 것으로 판단된다.

### 4.2 요소 크기의 영향

본 실험모델에 대해 요소 크기의 영향에 대한 시험을 하였다. 일반적으로 비선형 모델의 경우 요소망이 세분화 됨에 따라 변형률 국부화 현상(strain localization)이 발생한다. 변형률 연화 현상이 있는 소성 모델에서는 대부분 요소크기에 결과 값에 영향을 받는다고 알려져 있다. 소수의 세분화된 요소에서 변형률 국부화가 진행되면 전체적인 파괴형태를 예측하고, 수치적인 수렴성을 확보하기가 어렵다고 알려져 있다. 본 연구에서는 요소 체논의 크기를 3단계 즉, 12mm, 15mm, 20mm로 나누어 요소망의 크기 효과를 살펴보았다. Fig. 7 는 각각의 요소 크기에 따른 결과를 나타내었다. 결과를 살펴보면 20mm 이하의 경우 요소망의 세분화에 의한 영향은 크지 않다고 판단되며 본 연구에서는 20mm 요소 크기를 사용한다.

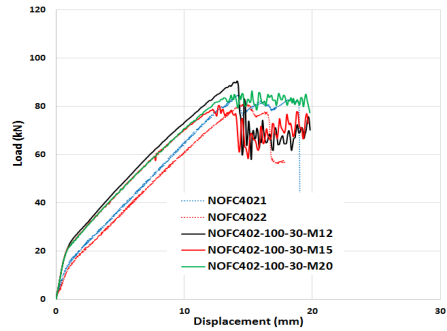


Fig. 7. Load-deflection response for different values of mesh size

### 4.3 팽창각(dilation angle)의 영향

콘크리트와 같은 취성재료는 비탄성 변형률에 의해 상당한 체적 변화가 일어난다. 다이레이턴시티(dilatancy)라 불리는 이러한 현상은 콘크리트 손상 소성모델에서는 팽창각(dilation angle)으로 표현하는데, 콘크리트와 같은 마찰적 재료는 이 값을 재료변수로 취급한다. 팽창각을 26°, 30°, 34°, 38°, 42°에 대해 해석한 결과는 Fig. 8 과 Table 3 와 같다. 하중-변위 곡선에서 보는 바와 같이 30°가 가장 실험결과와 유사한 결과를 보여주므로 본

합성구조의 경우에는 30°가 적절한 것으로 판단된다.

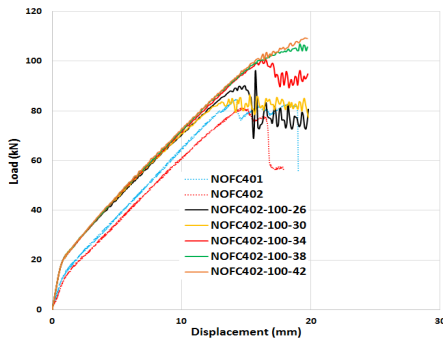


Fig. 8. Load-deflection response for different values of dilation angle

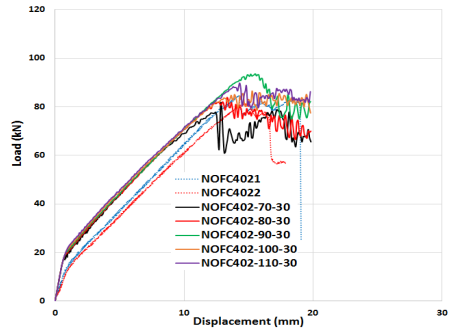


Fig. 9. Load-deflection response for different values of fracture energy

Table 3. Results for different values of dilation angle

	P1 (kN)	$\frac{P_N}{P_{EX}}$ (%)	D1 (mm)		$\frac{D_N}{D_{EX}}$ (%)
NOFC4021	84.83	83.1	14.41	14.64	-
NOFC4022	81.37		14.87		
NOFC402-100-26	90.05	108.3	14.91		101.8
NOFC402-100-30	86.50	104.1	15.27		104.3
NOFC402-100-34	100.78	121.2	16.49		112.6
NOFC402-100-38	106.92	128.6	19.13		130.6
NOFC402-100-42	109.35	131.6	19.52		133.3

#### 4.4 콘크리트 파괴에너지의 영향

콘크리트의 인장경화효과를 고려한 모델에서 중요한 인자중의 하나는 콘크리트 파괴에너지( $G_f$ )이다. CEB-FIP 기준[12]에서 파괴에너지 값은 콘크리트의 최대골재 크기 및 강도에 따라 65~130 범위에 존재한다고 규정하고 있다. 본 연구에서는 파괴에너지 값을 5단계, 즉 70, 80, 90, 100 및 110Nm/m<sup>2</sup>로 변화시키며 그 영향을 살펴보고 결과에 Fig. 9 과 Table 4 와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 합성보의 파괴거동에서 콘크리트의 인장거동에 지대한 영향을 미치는 파괴에너지 값의 변화는 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있고, 본 건의 경우 파괴에너지 100Nm/m<sup>2</sup> 가 가장 우수한 결과를 보여주고 있다.

Table 4. Results for different values of fracture energy

	P1 (kN)	$\frac{P_N}{P_{EX}}$ (%)	D1 (mm)		$\frac{D_N}{D_{EX}}$ (%)
NOFC4021	84.83	83.1	14.41	14.64	-
NOFC4022	81.37		14.87		
NOFC402-70-30	77.43	93.1	12.13		82.8
NOFC402-80-30	83.77	100.8	13.31		90.9
NOFC402-90-30	93.56	112.5	15.51		105.9
NOFC402-100-30	86.50	104.1	15.27		104.3
NOFC402-110-30	89.75	108.0	14.31		97.7

#### 4.5 계수 $K_c$ 영향

콘크리트 손상 소성모델에서 요구되는 변수중의 하나는 편차단면(deviatoric cross section)에서 압축 및 인장 메리디안(meridian)과 정수압 축(hydrostatic axis)사이의 거리비로 표현되는  $K_c$  변수 값이다. 이론적으로  $K_c$  값은 0.5보다 크고 1.0보다 작은 값을 가진다. ABAQUS의 콘크리트 손상 소성모델에서 기본적으로 정의된 값은 0.667 이다. 본 수치실험에서는 0.667, 0.9, 1.0 으로 변화시켜 그 영향을 살펴보고 Fig. 10 와 Table 5 에서 보는 바와 같이 본 비교실험에 경우 그 영향은 크지 않았다. 큰 차이는 없는 것으로 판단된다. 그러므로 본 연구에서는 ABAQUS의 기본 값인 0.667 을 사용한다.

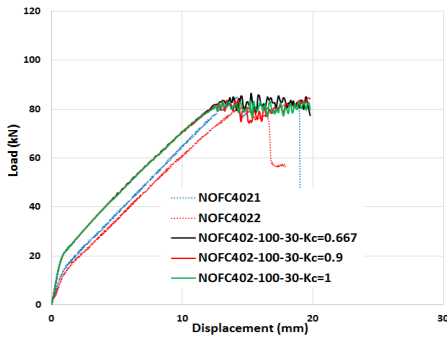


Fig. 10. Load-deflection response for different values of  $K_c$

Table 5. Results for different values of  $K_c$

$K_c$	P1 (kN)	$\frac{P_N}{P_{EX}}$ (%)	D1 (mm)		$\frac{D_N}{D_{EX}}$ (%)
NOFC4021	84.83	83.1	14.41	14.64	-
NOFC4022	81.37		14.87		
0.667	86.50	104.1	15.27		104.3
0.9	83.67	100.6	14.32		99.0
1	83.46	100.4	15.19		103.7

#### 4.6 손상계수의 영향

콘크리트 손상 소성모델에서는 콘크리트의 손상을 콘크리트 손상계수를 통해 고려할 수 있다. 본 연구에서 손상변수의 고려 유무에 따라 수치해석결과를 비교하였다. 고려한 손상계수는 압축 및 인장의 경우 최대압축응력 및 균열응력부터 적용하여 최고 변형률까지 작용하였다. 손상계수 값은 0에서 0.95까지 선형적으로 변화하는 것으로 모델링하였다. Fig. 11 과 Table 6 은 손상계수의 고려 유무에 따른 수치해석결과를 보여준다. 본 예제의 경우 압축 및 인장 손상계수가 큰 영향을 주는 것으로 판단되므로, 본 실험 건에서는 손상계수를 고려해야 할 것으로 판단된다.

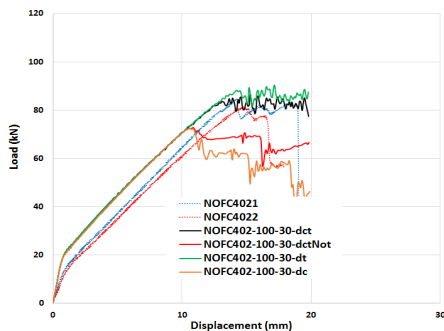


Fig. 11. Load-deflection response with and without damage

Table 6. Results with and without damage

	P1 (kN)	$\frac{P_N}{P_{EX}}$ (%)	D1 (mm)		$\frac{D_N}{D_{EX}}$ (%)
NOFC4021	84.83	83.1	14.41	14.64	-
NOFC4022	81.37		14.87		
100-30-dct	86.50	104.1	15.27		104.3
100-30-dctNot	72.81	87.6	10.84		74.0
100-30-dt	88.28	106.2	14.23		97.1
100-30-dc	72.45	87.1	10.55		72.0

## 5. 결론

본 연구는 기존 철근 콘크리트 구조형식을 대신할 FRP-콘크리트 합성구조의 휨거동에 관한 것으로, 구조적 성능 및 거동 특성을 해석적으로 규명하고자 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 비선형 유한요소해석을 실시하였으며, 이때 사용하게 되는 여러 변수들의 영향을 실험 결과와 비교, 분석하여 본 합성구조에 최적화된 변수 값을 제시하고자 하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

내연적 유한요소해석의 경우 기하학적, 재료적 비선형성이 큰 경우 수렴에 많은 문제가 있으므로 본 연구의 경우 외연적 유한요소해석법이 적절한 것으로 판단된다. 콘크리트 손상 소성 모델의 여러 변수들에 대해 실험값과 비교, 분석한 결과 본 연구의 경우 요소크기는 20mm, 팽창각(dilation angle)은 30°, 파괴에너지 값은 100Nm/m<sup>2</sup>, 변수  $K_c$ 는 0.667, 손상계수는 포함하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

## References

- [1] L. C. Bank, *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*, John Wiley & Sons, NJ, USA, 2006.  
DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470121429>
- [2] L. C. Bank, M. G. Oliva, H. U. Bae, J. W. Barker, S. W. Yoo, "Pultruded FRP Plank as Formwork and Reinforcement for Concrete Members", *Advances in Structural Engineering*, vol. 10, no. 5, pp. 525-536, 2007.  
DOI: <https://doi.org/10.1260/136943307782417681>
- [3] L. C. Bank, M. G. Oliva, H. U. Bae, B. V. Bindrich, "Hybrid Concrete and Pultruded-Plank Slabs for Highway and Pedestrian Bridges" *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 552-558, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.002>

- [4] K. W. Kim, H. S. Jeong, H. G. Beom, "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, 2003.
- [5] D. G. Ahn, D. W. Jung, D. Y. Yang, W. J. Jung, "Rigid-Plastic Explicit Finite Element Formulation for Two-Dimensional Analysis of Sheet Metal Forming Processes", *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 20, no. 1, pp. 88-99, 1996.
- [6] ABAQUS, *User's manual 6.14*, 2014.
- [7] C. H. Um, S. W. Yoo, "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, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.12652/Ksce.2015.35.5.1015>
- [8] J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller, E. Onate, "A Plastic-Damage Model for Concrete", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 25, no. 3, pp. 299-326, 1989.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4)
- [9] J. Lee, G. L. Fenves, "Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures", *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 124, no. 8, pp. 892-900, 1998.  
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:8\(892\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892))
- [10] P. Kmiciek and M. Kaminski, "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, 2011.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60105-8](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60105-8)
- [11] Eurocode 2, *Design of Concrete Structure*, Belgium, 2004.
- [12] CEB-FIP Model Code, Thomas Telford, 1993.

강 가 램(Ga-Ram Kang)

[정회원]



- 2015년 2월 : 가톨릭관동대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 토목공학과 (석사과정)

<관심분야>

구조공학, 합성구조, 구조물보수보강

유 승 운(Seung-Woon Yoo)

[정회원]



- 1985년 2월 : 연세대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : KAIST 토목환경공학과 (공학박사)
- 2005년 7월 ~ 2006년 8월 : 위스콘신대학교 방문교수
- 1995년 3월 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 합성구조, 구조물보수보강