

퍼포본드 FRP-콘크리트 합성보의 휨/전단거동에 관한 외연적 비선형 유한요소해석 연구

유승운
가톨릭관동대학교 토목공학과

Explicit Nonlinear Finite Element Analysis for Flexural/Shear Behavior of Perfobond FRP-Concrete Composite Beam

Seung-Woon Yoo
Department of civil engineering, Catholic Kwandong University

요약 본 연구에서는 천공된 웨브를 가진 FRP판을 거푸집 및 보강재로 활용한 퍼포본드 FRP-콘크리트 합성보의 휨/전단 거동 특성을 해석적인 방법으로 거동특성을 파악한다. 기존 실험결과와 비교하여 그 유용성을 입증하고 차후 실무에 활용하고자 한다. 본 사례와 같이 비선형성이 매우 큰 경우에는 외연적 방법에 의한 비선형 유한요소해석이 효과적일 것이다. 본 연구에서 채택한 콘크리트손상소성(concrete damage plasticity: CDP)모델은 콘크리트의 비선형적 거동을 적절히 모사할 수 있는 것으로 사료되며, 모델에서 필요한 여러 변수 인자의 결정은 실험결과와 비교하여 연구에서 사용한 값들을 추천하나, 보다 다양한 케이스에 대한 검토 및 조정이 필요할 것이다. 웨브가 천공된 합성보의 퍼포본드의 효과는 초기강성의 확보 측면에서 다소 효과가 있는 것으로 판단되나 정점에서의 경우 단면 손실과 결합력 증진 효과를 적절히 안배해야 할 것으로 사료된다. FRP 판과 콘크리트의 미끄러짐 등의 접촉문제는 초기 강성이 실험결과보다 다소 크게 나타난 이유 중에 하나라 판단되며 정점 이후 콘크리트와 FRP 의 분리문제 등이 실험결과와 다소 차이를 보인 원인으로 생각한다.

Abstract In this study, the flexural/shear behavior characteristics of perfobond FRP-concrete composite beams using an FRP plate with perforated webs as formwork and reinforcement are analyzed through an analytical method. Compared with the existing experimental results, we have proved its usefulness and use it in future practice. When the nonlinearity is very large in this case, the nonlinear finite element analysis by an explicit method will be effective. The concrete damage plasticity (CDP) model adopted in this study is considered to be able to adequately simulate the nonlinear behavior of concrete, and the determination of several variable factors required in the model is compared with the experimental results and values used in the study. This recommendation will require review and adjustment for more diverse cases. The effect of the perfobond of the composite beam with perforated web is considered to be somewhat effective in terms of securing the initial stiffness, but in the case of the apex, it is considered that the cross-sectional loss and the effect of improving the bonding force should be properly arranged. The contact problem, such as slipping of the FRP plate and concrete, is considered to be one of the reasons that the initial stiffness is slightly larger than the test result, and the slightly difference from the experimental results is attributed to the separation problem between concrete and FRP after the peak.

Keywords : FRP Plank, Perfobond Composite Beam, Perforation Effect, Explicit Finite Element Method, Damaged Plasticity Model

*Corresponding Author : Seung-Woon Yoo(Catholic Kwandong Univ.)
email: swyoo@cku.ac.kr

Received August 11, 2020

Revised September 15, 2020

Accepted November 6, 2020

Published November 30, 2020

1. 서론

본 퍼포본드 FRP-콘크리트 합성구조는 기존의 거푸집 및 인장보강재를 FRP 판이 대신한 개념이다[1,2]. FRP 판과 콘크리트의 합성을 개선하기 위해 FRP 판의 웹 부분에 부분적인 천공을 통해 합성 효과를 증진시키고, FRP 판을 영구거푸집 및 인장보강재로 활용하는 방안이다. 새로운 합성구조를 실제적으로 현장에서 적용하기 위해서는 합성구조체의 거동특성을 정확히 파악되어야 하나 지금까지 주로 실험적 연구에 많이 의존하고 있으며[3,4], 일부 해석적 연구가 수행되고 있다[5]. 본 연구에서는 FRP 판을 임시 및 영구거푸집으로 활용하고 철근을 대신한 합성보의 휨/전단 거동특성을 해석적인 방법으로 거동특성을 파악하고, 기존 실험결과와 비교 분석하고자 한다.

일반적으로 해석적인 방법으로 유한요소법을 많이 사용하며 유한요소법에는 크게 내연적인 방법(implicit method)과 외연적인 방법(explicit method)으로 구분된다. 기존 유한요소법에서는 주로 내연적 방법을 사용하였으나 매번 강성행렬의 구성 및 풀이과정이 필요하므로 많은 시간과 기억용량이 필요하며 비선형성이 큰 문제의 경우 수렴을 보장할 수 없는 문제점을 가지고 있다. 이에 비해 외연적 유한요소법의 경우 매번 강성행렬을 구성할 필요가 없고 현재의 단계의 해를 가지고 다음 단계를 구성하므로 항상 수렴성을 보장받을 수 있는 장점이 있다 [6]. 합성체의 비선형 거동을 추적할 경우 콘크리트 재료의 특성을 잘 모사할 수 있는 구성모델이 필요하다 본 연구에서는 Lublinear 등[7]이 제안한 콘크리트 손상소성(CDP: concrete damaged plasticity)모델을 활용하고자 한다.

본 연구는 퍼포본드 FRP-콘크리트 합성보의 휨/전단 거동을 살펴보고자 한다. 이를 위해 CDP 모델을 잘 인용하고 있는 ABAQUS[8]을 사용하여 비선형 외연적 유한요소해석을 수행하고, 기존 실험결과와 비교 분석하여 합성구조체의 비선형 거동을 규명한다.

2. 비교 실험체 및 실험결과

2.1 비교시편 모양과 크기

비교 분석할 실험대상은 콘크리트 성형 후 거푸집을 탈형하지 않고 인장보강재로 활용하는 시스템으로 FRP 판 이외에는 보강재를 사용하지 않았다. 폭 20 과 40mm,

높이 75mm 인 리브(rib)가 2개 포함되게 FRP 폭을 180mm 로 합성보의 단위 폭으로 사용하였고, 퍼포본드는 미천공과 천공 지름의 3배 간격, 5배 간격 천공으로 이루어지며 그 형태는 Fig. 1~4. 과 같다. 합성보의 전체 길이는 1200mm, 순경간은 1000mm 이며 Fig. 5. 와 같이 3점 재하 실험을 수행하였다. Table 1. 은 퍼포본드 합성보 실험체 각각의 제원이며 각 제원마다 2개의 실험체를 제작하였다. 콘크리트 압축강도는 43MPa, FRP 판의 물리적 값은 Table 2. 에 나타내었다.

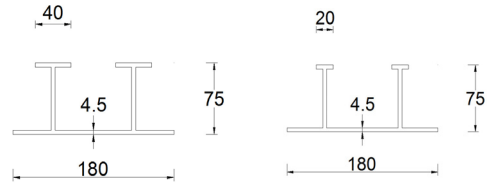


Fig. 1. FRP Shape of Top Flange Width 20 and 40(mm)

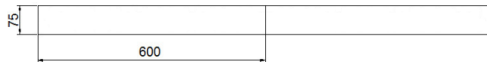


Fig. 2. FRP Shape of Non-perforated(mm)

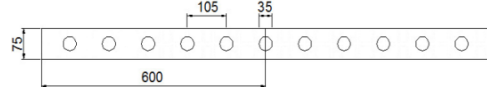


Fig. 3. Gap of 3 Times of Hole Diameter(mm)

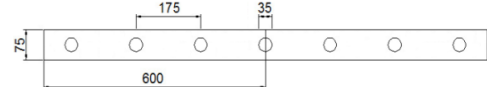


Fig. 4. Gap of 5 Times of Hole Diameter(mm)

Table 1. List of Specimens

Name	No.	Reinforce.	Perforation	Top flange width (mm)	Perfor. interval (times)
NOFC201N	2	Sand coated FRP	No perfobond	20	-
NOFC401N	2	Sand coated FRP	No perfobond	40	-
NOFC431N	2	Sand coated FRP	perfobond	40	3
NOFC451N	2	Sand coated FRP	perfobond	40	5

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

2.2 실험순서 및 계측

순경간 1000mm의 시간이 짧은 퍼포본드 합성보 시험체는 유압제어식 압축기를 통해 하중을 재하하였고, 상부에 하중계(load cell)를 설치하여 가력하중을 모니터링 했다. 합성보의 중앙에 변위계(LVDT)를 설치하고 상부 좌우에는 중앙에서 100mm 이격하여 스트레인 게이지를 각각 1개 설치하였다. 합성보 하부에는 중앙에 콘크리트 스트레인 게이지를 1개를 설치하고 계측하였다. 실험체의 가력 및 계측은 Fig. 5. 와 같다.

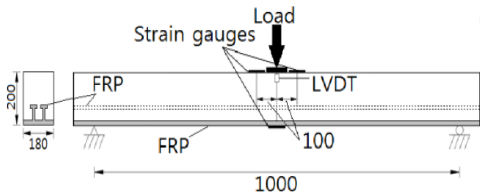


Fig. 5. Shape and Measuring Instruments of Specimens(mm)

3. 재료 및 유한요소 모델링

3.1 재료구성모델

CDP 모델의 기본 변수로 비스코스티(viscosity) 계수, Kc 계수, 응력비, 편심률, 팽창각(dilation angle) 계수를 설정하여야 한다[9]. 콘크리트 응력-변형률 관계식은 유로기준을 적용하였다[10]. 요소크기의 민감성을 배제하고자 파괴에너지를 근간으로하는 CEB-FIP 모델 [11]을 사용하였다[12].

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

$$k = 1.05E_{cm} \frac{\varepsilon_{cl}}{f_{cm}}, \quad \eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}}$$

여기서 ε_c 는 콘크리트변형률, ε_{cl} 은 최대압축응력에 대응하는 콘크리트변형률, f_{cm} 은 콘크리트 압축강도, E_{cm} 은 접선탄성계수이다.

3.2 해석방법 및 모델

유한요소법은 크게 내연적(implicit) 접근방법과 외연적(explicit) 접근방법으로 대별 될 수 있다. 외연적 방법

은 역행렬을 구할 필요 없이 시간에 따라 변형량이 계속 변하며 누적되는 기법이며, 비선형성이 강한 문제의 경우 직접적으로 강성행렬을 푸는 내연적 접근방법과 달리 이전 단계의 값을 다음 단계에 대입함으로 해를 순차적으로 구하므로 수렴이 보장되는 장점이 있다[6].

본 연구에서는 ABAQUS/Explicit를 사용하여 합성보의 외연적 비선형해석을 수행하였다. 콘크리트는 CDP 모델을 사용하여 비선형을 고려한 재료모델을 구축하였다. CDP모델에 포함된 많은 계수들을 적절하게 선택하여 보정하는 것이 매우 중요하다 본 연구에서는 본 저자들이 기 수행한 결과를 활용하여 수행하였다[5]. 콘크리트 3차원 8절점 입체요소로 모델링하며, FRP 판은 3차원 쉘요소로 모델링하여 이를 타이구속(tie constraint) 경계조건을 사용하여 합성체로 구성하였다. 계산 효율을 높이기 위해 합성보의 대칭성을 이용하여 1/4 모델링하였고, 해석모델은 Fig. 6. 와 같다.

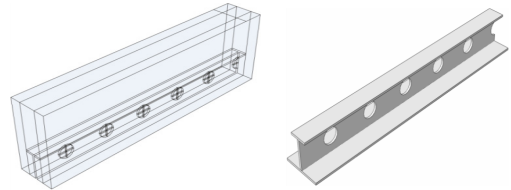


Fig. 6. Analysis Model of Specimen

4. 유한요소해석

4.1 모델변수 검토

일반적인 FRP-콘크리트 합성보의 휨/전단 거동에 대한 해석적 연구는 Yoo[5]에 의해 수행되었으며, 이를 바탕으로 퍼포본드 FRP의 영향과 이를 고려한 해석결과와 실험결과를 비교하였다. CDP모델에서의 여러 변수들은 본 저자의 선행연구에서 수행한 결과 값을 활용하여 수행하였다[5]. 인용한 변수 값들은 Table 3.과 같다.

Table 3. Variables of CDP Model

Dilation angle	Kc	Fracture energy(Nm/m ²)
26°	0.667	100

4.2 비천공 합성보

상부 플랜지 40mm 비천공 합성보의 하중 및 변형 곡선은 Fig. 7. 와 같고, 하중-변형률 곡선은 Fig. 8. 와 같

다. 하중-변형을 곡선에서 오른쪽은 실험체 중앙 하단의 변형률을 나타내며, 좌측은 상단 중앙에서 100mm 이격 한 2점에서의 변형률을 나타내고 있다. 하중-변위 곡선인 Fig. 7. 를 살펴보면 실험에서는 20kN 근처에서 합성 보 하단의 초기 인장 균열에 의해 하중-변위 곡선의 기울기가 꺾이는 것을 관찰할 수 있는 반면 유한요소해석의 경우 35kN 근처에서 기울기가 완화된 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 8. 의 하중-변형을 곡선에서 보다 확실하게 관찰될 수 있다. 수치해석의 결과는 실험결과에 비해 초기균열이 다소 늦게 발생하고, 초기 강성은 조금 크게 나타나고 있다. 초기균열 후 강성은 실험결과와 유사한 거동을 보여주고 있다. 이는 변형률에 대한 그림에서도 유사한 현상을 보여주고 있다. 실험체의 경우 1차 정점은 평균적으로 108kN 이며, 이후 소폭 감소하다 다시 증가하다 평균적으로 137kN 의 2차 정점에 이른 후 급속히 파괴되는 양상을 보여주고 있다. 유한요소해석의 경우를 살펴보면 1차 정점 값은 106kN을 보여주고 2차 정점 값은 135kN 을 보여주어 실험결과를 유사하게 모사한다고 보여지는 반면 대응되는 변형 값은 1차 정점은 유사하게 추정하는 반면 2차 정점때의 변형량은 실험결과 보다 다소 작게 나타나고 있다. 1차 정점 이후 합성보의 거동은 FRP 판과 콘크리트의 분리 등의 현상을 보다 정밀하게 모델링하는 기법을 추가적으로 검토 되어야 할 것으로 사료된다. Table 4. 에서는 하중-변위 곡선의 정점에서의 값들을 비교하였는데 1차 정점에서 하중, 변형 값들을 유한요소해석 값들이 실험결과를 유사하게 모사한다고 판단되며, 2차 정점의 경우 다소 차이를 보여주고 있다.

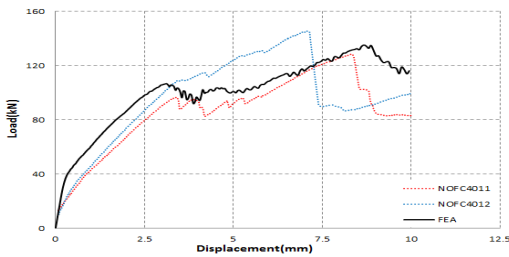


Fig. 7. Load-displacement Curve of NOFC401N

Table 4. Analysis Results of NOFC401N

(I)	P1 (kN)	P1/Pexp (%)	P2 (kN)	P2/Pexp (%)
NOFC4011	96.7	103.0	128.7	137.1
NOFC4012	109.3		145.5	
FEA	106.7	103.5	135.2	98.6

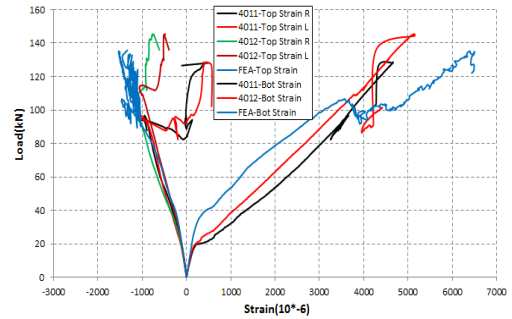


Fig. 8. Load-strain Curve at Top(R) and Bottom(L) Face of NOFC401N

상부 플랜지 20mm 비천공 합성보의 하중-변위 곡선은 Fig. 9. 과 같고, 하중-변형을 곡선은 Fig. 10. 이다. 상부 플랜지 40mm 의 경우와 초기 변형 형태는 유사하게 거동하고 있다. 초기균열 및 강성 변화는 40mm 의 경우와 유사하며, Table 5. 에서 정리한바와 같이 1차 정점의 경우 실험결과는 112kN 이며 유한요소해석 결과는 약 110kN 을 보여주고 있어 1차 정점까지는 유한요소해석이 실험결과를 유사하게 모사하고 있다고 판단 된다. 40mm 의 결과치와 비교 시에도 유사한 결과를 보여 준다. 1차 정점 이후의 거동에서는 40mm 의 경우와 달리 실험결과와 해석결과에서 다소 차이를 보여주고 있는데, 이는 플랜지 폭이 좁아짐에 따라 FRP 판과 콘크리트의 박리현상이 심해져서 완전히 분리되는 양태를 보여주는 것에 기인한 것으로 판단되며 콘크리트와 FRP 판 사이의 접촉 및 분리문제에 대한 모델링이 필요할 것으로 판단된다. 2차 정점에서의 결과는 하중과 변위 측면에서 다소 차이가 발생되었다.

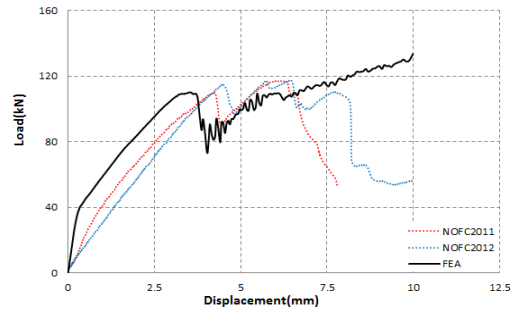


Fig. 9. Load-displacement Curve of NOFC201N

Table 5. Analysis Results of NOFC201N

(I)	P1 (kN)	P1/Pexp (%)	P2 (kN)	P2/Pexp (%)
NOFC2011	109.8	112.4	-	-
NOFC2012	114.9		117.1	
FEA	110.1	98.00	134.5	114.8

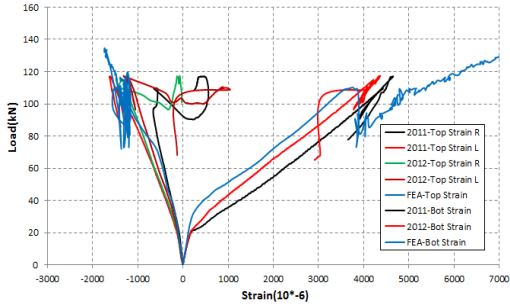


Fig. 10. Load-strain Curve at Top(R) and Bottom(L) Face of NOFC201N

4.3 퍼포본드 합성보

5배 간격 천공한 퍼포본드 FRP합성보의 하중-변위 곡선 및 하중-변형을 곡선은 Fig. 11., 12. 와 같다. 해석 결과는 실험결과에 비해 다소 초기 강성이 큰 것으로 묘사되고 있으며, 이후 1차 정점까지 기존 실험체와 유사하게 유지하며, 2차 정점의 경우 천공에 따른 재료손실을 반영한 것으로 사료된다. 결과치는 Table 6. 에 정리하였다.

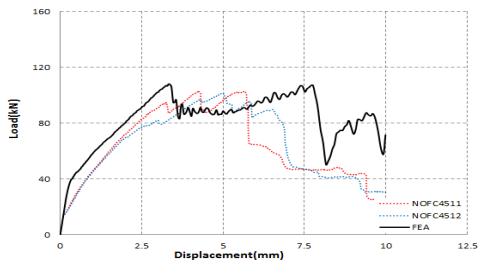


Fig. 11. Load-displacement Curve of NOFC451N

Table 6. Analysis Results of NOFC451N

(I)	P1 (kN)	P1/Pexp (%)	P2 (kN)	P2/Pexp (%)
NOFC4511	94.8	88.4	-	-
NOFC4512	82.0		103.0	
FEA	108.1	122.1	106.9	104.6

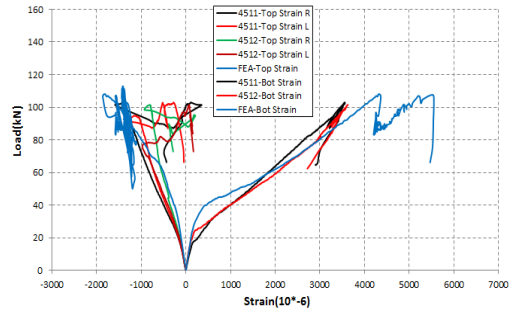


Fig. 12. Load-strain Curve at Top(R) and Bottom(L) Face of NOFC451N

3배수 간격으로 천공한 퍼포본드 합성보의 하중-변위 곡선 및 하중-변형을 곡선은 Fig 13., 14. 와 같다. 정점에서의 결과치는 Table 7. 에 나타내었다. 앞의 5배 간격 퍼포본드 해석 결과와 유사한 거동을 보여주고 있으나 1차 정점 이후 거동이 다소 상이한데 이는 많은 천공에 따른 FRP 판의 단면 손실의 영향으로 판단된다. 천공에 따라 단면 손실이 발생하는 반면 FRP 판과 콘크리트의 합성 작용은 증가하나 이의 적절한 안배와 수치모델링 상에서 접촉 및 분리 문제를 감안하여야 할 것으로 판단된다.

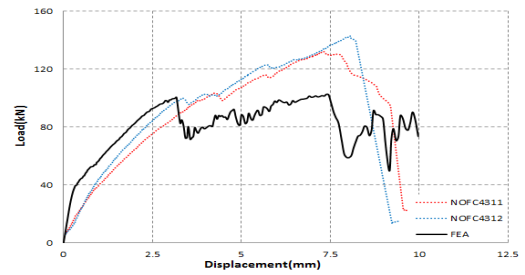


Fig. 13. Load-displacement Curve of NOFC431N

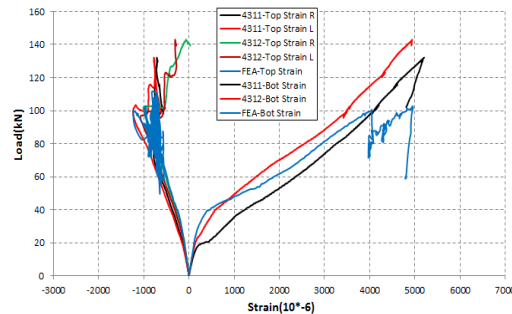


Fig. 14. Load-strain Curve at Top(R) and Bottom(L) Face of NOFC431N

Table 7. Analysis Results of NOFC431N

(I)	P1 (kN)	P1/P _{exp} (%)	P2 (kN)	P2/P _{exp} (%)
NOFC4311	103.4	101.6	132.1	137.5
NOFC4312	99.9		142.9	
FEA	100.5	98.8	102.5	74.5

5. 결론

본 연구는 퍼포본드 FRP-콘크리트 합성보의 휨/전단 거동을 규명하고자 했다. CDP 모델을 사용하여 비선형 외연적 유한요소해석을 수행하고, 기존 실험결과 비교 분석하여 합성구조의 파괴거동을 살펴보았으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

본 사례와 같은 비선형성이 매우 큰 경우에는 외연적 유한요소 해석법이 효과적인 것으로 판단되며, CDP 모델은 콘크리트의 비선형 거동을 적절히 모사할 수 있는 것으로 사료된다. 사용된 변수 인자의 결정은 실험결과와 비교하여 도출된 값들을 추천하나, 보다 다양한 사례에 대한 검토와 조정이 필요할 것으로 판단된다. 합성보의 퍼포본드 효과는 초기 강성의 확보 측면에서 다소 효과가 있는 것으로 판단되나, 단면 손실과 결합력 증진 효과를 적절히 안배해야 할 것으로 사료된다. FRP 판과 콘크리트의 미끄러짐 등의 접촉문제는 초기강성이 실험결과보다 다소 크게 나타난 이유 중에 하나라 생각되며, 콘크리트와 FRP와의 분리문제 등이 실험결과와 다소 차이를 보인 원인으로 생각한다.

References

[1] L.C. Bank, Composites for construction: Structural design with FRP materials, John Wiley & Sons, NJ, USA, 2006.
DOI: <http://dx.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: <http://dx.doi.org/10.1260/136943307782417681>

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

[4] S.W. Yoo, "An experimental study for flexure/shear

failure behavior of composite beam with GFRP plank used as a permanent formwork and cast-in-place high strength concrete", *Journal of The Korea Academia -Industrial Cooperation Society*, Vol. 16, No. 9, pp. 4245-4252, 2015.
DOI : <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.6.4245>

[5] S.W. Yoo, J.S. Yoo, "Influence of various parameter for bending/shear behavior analysis of FRP composite beam using concrete damaged plasticity model", *Journal of Korean Soc. Adv. Comp. Struc.*, Vol. 10, No. 4, pp. 1-7, 2019.
DOI : <http://dx.doi.org/10.11004/kosacs.2019.10.4.001>

[6] 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.

[7] 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: [http://dx.doi.org/10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](http://dx.doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4)

[8] Dassault Systems, Abaqus Version 6.14, Dassault Systems, 2014.

[9] A.S. Genikomsou, M.A. Polak, "Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in Abaqus", *Engineering Structures*, Vol. 98, pp. 38-48, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.04.016>

[10] Eurocode 2, Design of Concrete Structure, Belgium, 2004.

[11] CEB-FIP model code, Thomas Telford, 1993.

[12] P. Kmiecik, 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: [http://dx.doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60105-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60105-8)

유 승 운(Seung-Woon Yoo)

[중심회원]



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

<관심분야>

구조공학, 합성구조, 구조물유지관리