

# 초고성능 콘크리트에 대한 Perfobond Rib 전단연결재 거동 평가

강재윤<sup>1\*</sup>, 정우태<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 구조융합연구소

## Evaluation of Shear Strength of Perfobond Rib in Ultra High Performance Concrete

Jae-Yoon Kang<sup>1\*</sup>, Woo-Tai Jung<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Structural Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**요약** 기존에 제안된 Perfobond rib connector의 강도평가식은 압축강도가 약 50 MPa 이하의 콘크리트 강도 범위에 대한 Push-out test의 결과로 유도된 것으로서, 압축강도 80 MPa 이상의 초고성능 콘크리트에 대한 전단 연결재 성능 평가를 위하여 Perfobond rib 연결재의 전단강도를 파악하기 위한 Push-out test를 수행하였다. Perfobond rib connector의 제작변수는 관통홀의 지름 및 개수이며, 강섬유가 혼입된 180 MPa의 콘크리트와 강섬유를 혼입하지 않은 압축강도 80 MPa의 콘크리트를 적용하여 콘크리트 강도 변화에 대한 전단강도 변화를 검토하였다. 실험결과, 콘크리트 강도와 홀의 개수가 증가함에 따라 전단강도가 증가하며, 다웰 효과에 의한 전단강도 증가율이 큰 것으로 나타났다. 기존에 다른 연구자들이 제안한 강도식으로 계산된 예측치와 비교한 결과, 실험값은 Oguejiofor & Hosain[2]이 제안한 강도식에 근접한 결과를 보였다.

**Abstract** Push-out test is performed on perfobond shear connectors applying ultra high performance concretes with compressive strength higher than 80 MPa to evaluate their shear resistance. The test variables are chosen to be the diameter and number of dowel holes and, the change in the shear strength of the perfobond rib connector is examined with respect to the strength of two types of UHPC: steel fiber-reinforced concrete with compressive strength of 180 MPa and concrete without steel fiber with compressive strength of 80 MPa. The test results reveal that higher concrete strength and larger number of holes increased the shear strength, and that higher increase rate in the shear strength was achieved by the dowel action.

**Keywords** : Composite Structure, Perfobond rib connector, Push-out test, Shear Resistance, Ultra high performance concrete

### 1. 서론

강합성 구조물에는 대표적으로 스타드 방식(Headed stud)의 전단연결재가 많이 사용되고 있으나, 피로하중에 취약하고 스타드 용접부 파단에 의한 급격한 파괴가 발생하는 단점을 가짐에 따라 최근에는 이를 대체하는 강성 전단연결재인 Perfobond rib가 적용되고 있다. Perfobond rib 연결재는 다수의 관통홀이 설치된 강판으로 제작되며, 콘크리트 타설에 의해 관통홀에서 형성되

는 콘크리트 다웰(Dowel)의 역학적 성질을 이용하여 전단성능을 향상시키는 구조를 하고 있다. Fig. 1은 Perfobond rib에서 전단력에 저항하는 기계적 구성요소를 보인 것으로서, 콘크리트 다웰에서의 전단저항, 관통철근의 전단저항, 강판 전면의 지압에 의한 저항으로 구성된다.

Perfobond rib 연결재의 전단강도 평가식 도출을 위한 연구는 Oguejiofor & Hosain[3], Medberry & Shahrooz[7], Verissimo et al.[4], Al-Darzi et al.[8] 및

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비 지원(13건설연구A02)으로 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Jae-Yoon Kang(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

Tel: +82-31-910-0135 email: jyokang@kict.re.kr

Received June 5, 2015

Revised June 19, 2015

Accepted July 16, 2015

Published July 31, 2015

Ahn et al.[5] 등의 연구자들에 의해 수행되어 전단실험 (Push-out test)을 통해 각각 강도평가식을 제안하였으며, Ushijima et al.[9] 및 Cho et al.[6]은 Perfobond rib 에서 콘크리트 다웰이 기여하는 전단저항력에 대한 평가 식을 제안한 바 있다. Table 1은 각각의 연구자들이 제 안한 강도평가식을 정리한 것으로서 이들 강도평가식은 전면 지압에 의한 저항력, 콘크리트 다웰에 의한 저항력, 관통철근에 의한 저항력에 대한 항으로 구분되어 각 항 의 합을 계산하는 수식의 형태를 취하고 있다.

Fig. 2는 Perfobond rib의 판두께  $t=15$  mm, 판 높이  $h=100$  mm, 관통홀 지름  $D=30$  mm 인 경우를 가정하여 각 강도평가식에 의한 전단강도 계산값을 비교한 것으로 서, Oguejiofor & Hosain[3]이 제안한 강도식이 비교적 상한치의 강도값을 보이고, Verissimo et al.[4]이 제안한 강도식이 하한치의 강도값을 보이며, Ahn et al.[5]이 제 안한 강도식이 중간 수준의 강도값을 보임을 알 수 있다. 또한, Fig. 3은 콘크리트 압축강도 80 MPa인 경우에 대 한 전단강도 계산 결과를 비교한 것으로서, 그림에서 Perfobond rib 연결재는 Eurocode의 스티드 전단강도 계산결과에 대해 약 1.6~3.7배의 강도를 갖게 됨을 알 수 있다. 그러나 이들 강도평가식은 대부분 콘크리트 압 축강도 27 MPa 내외의 범위에 대한 전단실험을 통해서 결정된 것이고, Ahn et al.[5]만이 콘크리트 압축강도 50 MPa까지 실험에 반영하였기 때문에 그 이상의 고강도 콘크리트, 특히 강섬유가 혼입되어 있는 초고성능 콘크 리트에 대한 전단연결재의 강도평가식에 적용 가능성 여 부는 실험을 통해 검토되어야 한다.

이에 본 연구에서는 압축강도 80 MPa 및 180 MPa의 초고성능 콘크리트에 Perfobond Rib 전단연결재를 적용 함에 있어서 실제 전단강도에 근접한 강도값을 얻을 수 있는 강도평가식을 파악하기 위하여 각 강도별 시편에 대한 Push-out test를 수행하여 실험결과와 기존 강도평 가식의 계산결과를 비교하였다.

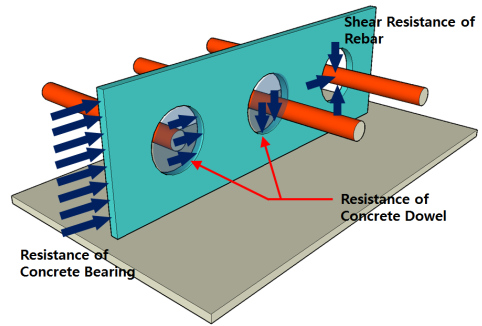


Fig. 1. Shear-resisting mechanism of perfobond rib

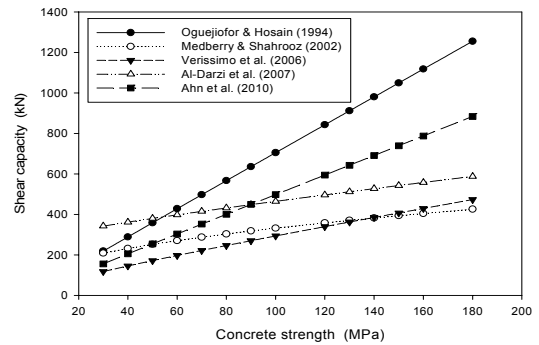


Fig. 2. Comparison of shear strength of perfobond rib connector predicted by previous models.

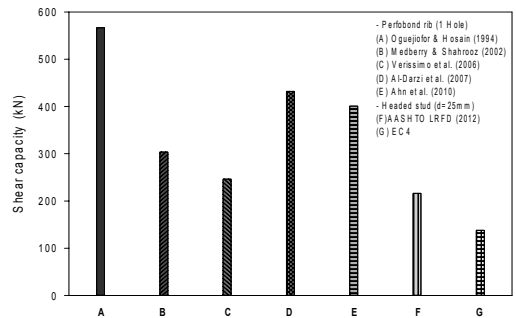


Fig. 3. Comparison of shear strength computed for concrete with compressive strength of 80 MPa

Table 1. Strength prediction models for perfobond rib

Authors	Strength prediction model
Oguejiofor & Hosain (1994)	$q_u = 4.5h_{sc}t_{sc}f_{ck} + 0.91A_{tr}f_y + 3.31nD^2\sqrt{f_{ck}}$
Medberry & Shahrooz (2002)	$q_u = 0.747bh\sqrt{f_{ck}} + 0.413b_fL_c + 0.9A_{tr}f_y + 1.66n\pi(D/2)^2\sqrt{f_{ck}}$
Verissimo et al. (2006)	$q_u = 4.04(h_{sc}/b)h_{sc}t_{sc}f_{ck} + 2.37nD^2\sqrt{f_{ck}} + 0.16A_{cc}\sqrt{f_{ck}} + 31.85 \times 10^6 (A_{tr}/A_{cc})$
Al-Darzi et al. (2007)	$q_u = 255.31 + 7.62 \times 10^{-4}h_{sc}t_{sc}f_{ck} - 7.59 \times 10^7 A_{tr}f_y + 2.53 \times 10^{-3}A_{sc}\sqrt{f_{ck}}$
Ahn et al. (2010)	$q_u = 3.14h_{sc}t_{sc}f_{ck} + 1.21A_{tr}f_y + 3.79n\pi(D/2)^2\sqrt{f_{ck}}$

## 2. 초고성능 콘크리트에 대한 Perfobond rib 연결재 재하실험

### 2.1 실험체 제작 변수 및 재료 물성

Perfobond 리브의 기본 제원은 두께(t) 12 mm, 높이 (h) 100 mm, 길이(L) 310 mm로 하고, 실험에서 고려한 제작 변수는 Table 2에 보인 바와 같이 관통홀의 개수와 관통홀의 지름으로 하고, 각 변수에 대해서 콘크리트 블록의 강도를 80 MPa 및 180 MPa의 두 가지 타입으로 제작하였다. Perfobond 압축강도 180 MPa의 실험체는 강섬유 혼입율 1.5%의 섬유보강 초고성능 콘크리트로 제작되었으며, 공시체 압축강도 시험을 통해 평균 압축 강도는 약 176.9 MPa이다. 압축강도 80 MPa의 실험체는 강섬유로 보강하지 않고 고로슬래그 및 굵은 골재 치수 20 mm를 배합한 고강도 콘크리트로 제작하였고, 공시체 압축강도 시험을 통해 측정한 평균 압축강도는 약 80.1 MPa 이다.

Table 2. Test variables of perfobond rib specimens

Specimen designation	No. of holes	Dia. (mm)	thickness (mm)	Shape of shear connector
P12	-	-	12	
P12-D30x1	1	30	12	
P12-D30x2	2	30	12	
P12-D30x3	3	30	12	
P12-D50x1	1	50	12	
P12-D50x2	2	50	12	
P12-D50x3	3	50	12	

### 2.2 실험 방법

실험은 초기 안정화를 위해 5 kN을 재하한 상태를 초기 상태로 하고 Table 3에 보인 바와 같이 단계별 변위 제어로 가력하였다. 계측항목은 형강과 콘크리트 블록의

상대변위와 콘크리트 블록의 수평변위, 형강의 수직변위이며, Fig. 4에 보인 바와 같이 총 7개 측정점에 변위계를 설치하였다. Fig. 5는 실험체 세팅 전경을 보인 것이다.

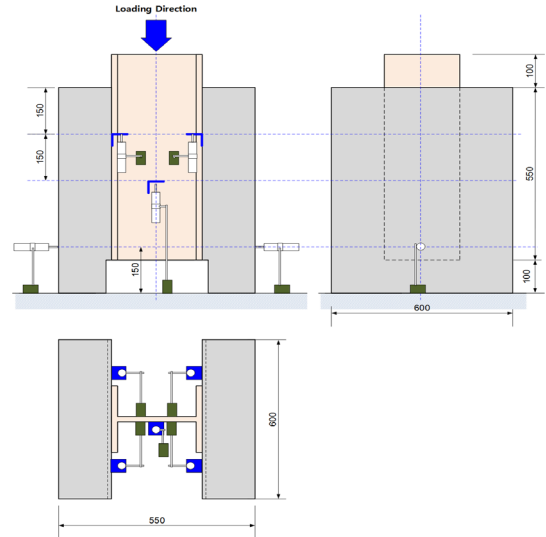


Fig. 4. Layout of displacement sensors



Fig. 5. Views of push-out test

Table 3. Loading stage of push-out test

Stage	Loading Range	Loading Speed (mm/s)	Remarks
1	3 mm	0.004	-
2	6 mm	0.006	-
3	10 mm	0.01	-
4	20 mm	0.04	-
5	>20mm	0.06	Until failure

### 2.3 실험 결과

각 실험체 실험결과와 Table 4에 보인 바와 같다. 실험 결과와 강도평가식의 전단강도 비교를 위해 Eurocode[2]에 근거하여 최대하중( $P_u$ )에 도달한 이후에 그 90% 값을 취한 characteristic load( $P_{tk}$ )를 계산하였고, 이 때의 상대

변위( $\delta_{uk}$ )와 최대하중에 대한 상대변위( $\delta_u$ )로부터 연성도를 비교하였다. 실험 결과, Fig. 6과 같이 콘크리트 강도와 홀의 개수가 증가함에 따라 전단강도가 증가하며, 홀의 지름이 클수록 다웰효과가 크게 작용하여 증가율이 더 큰 경향을 보였다. 또한, 콘크리트 강도가 클수록 다웰 효과에 의한 전단강도 증가율이 더 큰 것으로 나타났다. 단, 80 MPa를 적용하고 하나의 다웰 홀을 가진 C80-P12-D30x1 실험체는 다웰 홀을 두지 않는 실험체(C80-P12)보다 높은 전단강도를 보여야 하나 오히려 강도가 감소하는 결과를 보였으며, 이는 실험체 제작상의 문제인 것으로 판단된다.

### 2.4 기존 강도평가식과 실험결과 비교

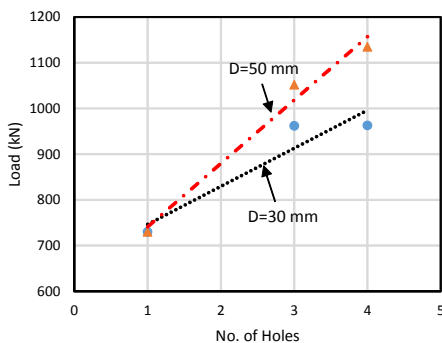
초고성능 콘크리트에 대한 기존 강도평가식의 적용성

을 검토하기 위하여 실험결과와 평가식으로 예측한 전단강도를 비교한 결과, 실험결과는 Oguejiofor & Hosain[3]이 제안한 강도평가식에 근접한 결과를 보였으며, Medberry & Shahrooz[7]의 강도평가식에 비해서 최대 약 2.3배의 전단강도를 보였다.

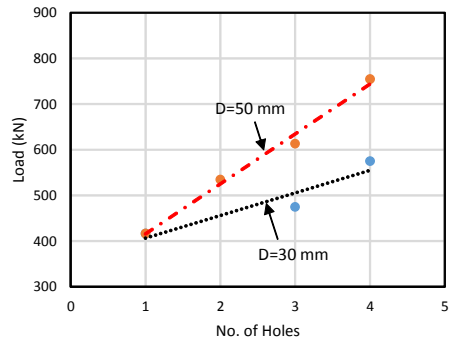
Fig. 7과 8은 실험결과의 최대 전단하중의 증가 추이와 기존 강도식의 전단강도 곡선을 비교한 것으로서, Oguejiofor & Hosain[3]이 제안한 강도식의 계산결과에 근접하는 추세를 보였다. Fig. 7에는 Headed stud를 2개 및 4개 적용한 경우에 대한 실험 결과를 함께 표시하였으며, 각각의 전단강도는 약 377.1 kN 및 780.3 kN으로서 다웰 홀을 갖지 않은 Perfobond rib 실험체(C180-P12)의 전단강도는 Headed stud 4개를 적용한 경우와 비슷한 값을 보여 하나의 Perfobond rib는 Head

Table 4. Strength prediction models for perfobond rib

Specimens	Concrete strength (MPa)	No. of holes	diameter of hole (mm)	Ultimate load, $P_u$ (kN)	Relative slip, $\delta_u$ (mm)	Characteristic Values		Ductility $\delta_{uk}/\delta_u$
						Load, $P_k$ (kN)	Relative slip, $\delta_{uk}$ (mm)	
C180-P12	180	-	-	730.0	8.34	657.0	14.83	1.78
C180-P12-D30x1		1	30	1011.0	6.57	909.9	14.93	2.27
C180-P12-D30x2		2	30	962.3	9.34	866.1	13.22	1.42
C180-P12-D30x3		3	30	963.0	2.29	866.7	6.18	2.70
C180-P12-D50x1		1	50	1032.3	5.05	929.1	7.38	1.46
C180-P12-D50x2		2	50	1051.8	7.76	946.6	10.70	1.37
C180-P12-D50x3		3	50	1135.0	13.46	1021.5	19.03	1.41
C80-P12	80	-	-	416.6	0.84	374.9	2.47	2.95
C80-P12-D30x1		1	30	368.8	1.76	331.9	3.61	2.05
C80-P12-D30x2		2	30	474.9	1.04	427.4	1.59	1.53
C80-P12-D30x3		3	30	575.3	1.32	517.8	1.48	1.12
C80-P12-D50x1		1	50	535.0	0.61	481.5	1.82	2.98
C80-P12-D50x2		2	50	613.7	3.68	552.3	6.62	1.80
C80-P12-D50x3		3	50	754.7	1.73	679.2	2.57	1.30



(a) 180 MPa Strength



(b) 80 MPa Strength

Fig. 6. Change in shear strength according to number of holes

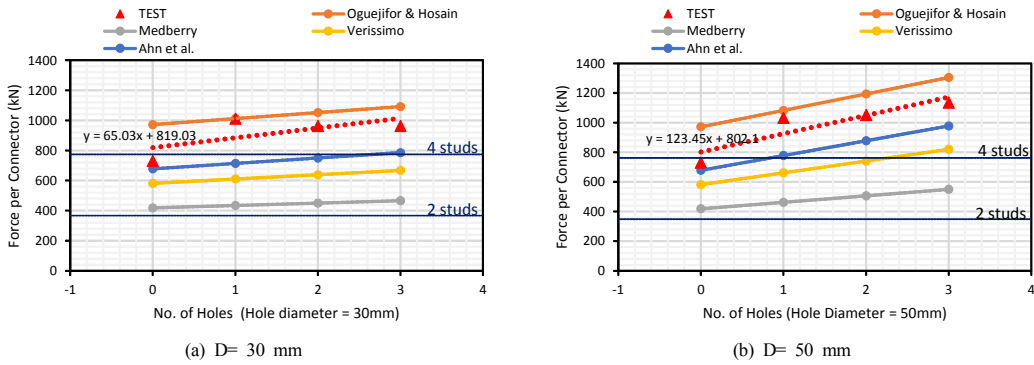


Fig. 7. Comparison of shear prediction models (180-MPa concrete)

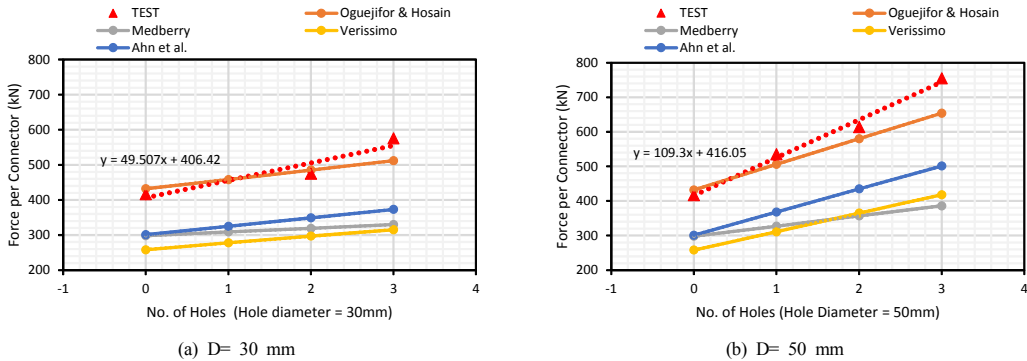


Fig. 8. Comparison of shear prediction models (80-MPa concrete)

stud 4개를 대체하는 수준의 전단강도를 갖는 것으로 판단된다. 콘크리트 강도 180 MPa를 적용한 경우에는 Oguejiofor & Hosain[3]의 강도식으로 계산한 전단강도에 비해 약 10% 낮은 강도를 보였으며, 다웰 홀의 개수에 따른 전단강도 증가율은 강도식의 예측치와 유사한 경향을 보였다. Fig. 8에서 압축강도 80 MPa를 적용한 실험체의 경우에는 강도식으로 계산된 값보다 5~15% 큰 전단강도를 보였고, 다웰 홀의 개수가 증가할수록 강도식으로 예측한 전단강도와 큰 차이를 보였다. 또한, 모든 경우에 대해서 콘크리트 강도와 상관없이 다웰 홀의 지름이 클수록 다웰 효과에 의한 전단강도 증가율은 증가하는 경향을 보였고, 강도가 낮은 경우에 홀의 지름 증가가 다웰 효과의 상승에 더 큰 영향을 미치는 것으로 보인다.

### 3. 결론

본 연구에서는 강도 80 MPa 및 180 MPa의 초고성능

콘크리트 부재에 대해서 Perfobond rib 연결재의 전단강도를 push-out 테스트를 통해 측정하고, 기존 강도평가식을 이용한 전단강도 예측값과 비교하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) Perfobond rib의 홀에 의한 콘크리트 다웰 효과는 압축강도 180 MPa의 실험체에서는 뚜렷한 차이가 없었으나, 압축강도 80 MPa의 실험체에서는 다웰 효과에 의한 전단강도 증가가 뚜렷한 경향을 보였다.
- (2) 기존의 강도평가식을 이용한 전단강도 예측치 증가 추이와 비교한 결과, 초고성능 콘크리트에 대한 실험결과는 기존 강도평가식으로 예측할 수 있는 전단강도 범위에 있어 기존 평가식을 적용할 수 있음을 알았다.
- (3) 특히, 그 중에서도 Oguejiofor & Hosain[3]이 제안한 강도평가식에 가장 근접하는 경향을 보이며, 안전측으로는 Ahn et al.[5]이 제안한 강도평가식을 적용할 수 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 실험체 수량이 부족하여 초고성능 콘크리트의 다양한 강도 범위를 대상으로 하는 강도평가식을 제안하기는 어렵지만, 기존 강도식과의 비교를 통해 설계에 적용가능한 강도식을 파악하였고, 추후 80~180 MPa 범위의 여러 압축강도에 대한 추가실험을 통해 초고성능 콘크리트 재료에 대한 Perfobond rib의 전단강도 예측식을 제안할 수 있을 것으로 판단된다.

## References

- [1] AASHTO, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6<sup>th</sup> Edition, p.1635, Washington DC, US, 2012.
- [2] BSI, BS EN 1994-1-1:2004: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structure, p.122, BSI, London UK, 2004.
- [3] E. C. Oguejiofor, & M. U. Hosain, "A parametric study of perfobond rib shear connectors," Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.21, No.4, pp.614 - 625, 1994.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/194-063>
- [4] G. S. Verissimo, M. I. B. Valente, J. L. R. Paes, P. J. S. Cruz, R. H. Fakury, "Design and experimental analysis of a new shear connector for steel and concrete composite structures," Proceedings of 3rd International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, pp.68-72, 2006.
- [5] J.-H. Ahn, C.-G. Lee, J.-H. Won, S.-H. Kim, "Shear resistance of the perfobond-rib shear connector depending on concrete strength and rib arrangement". J. Constr. Steel Res., Vol.66, No.10, pp.1295-1307, 2010.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.04.008>
- [6] J.-R. Cho, S. Y. Park, K. Cho, S. T. Kim, & B.-S. Kim, "Pull-out test and discrete spring model of fibre-reinforced polymer perfobond rib shear connector," Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.39, No.12, pp.1311 - 1320, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/cjce-2011-0573>
- [7] S. B. Medberry, B. M. Shahrooz, "Perfobond shear connector for composite construction," AISC Chicago, No.1, pp.2 - 12, 2002.
- [8] S. Y. K. Al-Darzi, A. R. Chen and Y. Q. Liu, "Finite Element Simulation and Parametric Studies of Perfobond Rib Connector," American Journal of Applied Sciences, Vol.4, pp.122-127, 2007.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3844/ajassp.2007.122.127>
- [9] Y. Ushijima, T. Hosaka, K. Mitsuki, H. Watanabe, Y.

Tachibana, H. Hiragi, "An experimental study on shear characteristics of perfobond strip and its rational strength equations," Proceedings of the International Symposium on Connections between Steel and Concrete, pp.1066 - 1075, 2001.

## 강재윤(Jae-Yoon Kang)

[정회원]



- 1995년 2월 : 동국대학교 대학원 토목공학과 (토목구조 석사)
- 2012년 8월 : 동국대학교 대학원 토목공학과 (토목구조 박사)
- 1995년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 구조융합연구소 수석연구원

<관심분야>

강합성 교량, 유한요소해석

## 정우태(Woo-Tai Jung)

[정회원]



- 2000년 2월 : 명지대학교 대학원 토목환경공학과 (토목구조 석사)
- 2009년 8월 : 명지대학교 대학원 토목환경공학과 (토목구조 박사)
- 2000년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 구조융합연구소 수석연구원

<관심분야>

FRP 보강, FRC 포장