

## 내부 강관 두께에 따른 내부 구속 중공 RC 교각의 거동

최준호<sup>1</sup>, 윤기용<sup>1\*</sup>, 한택희<sup>2</sup>, 이규세<sup>1</sup>

### Behaviors of Internally Confined Hollow Reinforced Concrete Piers by Thickness of Internal Steel Tube

Jun-Ho Choi<sup>1</sup>, Ki-Yong Yoon<sup>1\*</sup>, Taek-Hee Han<sup>2</sup> and Gyu-Sei Yi<sup>1</sup>

**요약** 내부 구속 중공 RC 교각은 교각의 강성 및 연성의 증가를 목적으로, 중공 RC 교각의 중공 면에 내부 구속력을 제공하는 강관을 삽입한 교각이다. 본 연구에서는 내부 강관의 두께를 변화시켜 내부 구속 중공 RC 교각의 거동 특성을 파악하였으며, 거동 특성을 파악하기 위한 평가 방법으로는 안전율, 연성능력, 재료비, 교각의 총중량 등으로 평가 하였다. 해석적 연구 결과, 내부 구속 중공 RC 교각의 내부 강관 두께는 최소 필요 두께를 적용하는 것이 가장 효과적인 것으로 나타났다. 또한, 중공 단면에 대한 교각의 자중감소 효과를 확인할 수 있었다.

**Abstract** An internally confined hollow reinforced concrete pier (ICH RC pier) is hollow RC pier which has a internal steel tube to enhance its ductility and stiffness by internal confinement. In this study, the internal steel tube were changed to investigate the behavior of ICH RC pier. The behavior of internally confined hollow reinforced concrete piers were evaluated with safety ratio, ductility, total material cost, the total weight of the pier, etc. As a result of analytical study, the usage of a minimum necessary thickness of the internal steel tube the most effective. The ICH RC pier has decrease of weight compare to Solid RC pier.

**Key Words** : 강관 보강, 중공 교각, 내부 강관, 강관 두께

### 1. 서론

현재의 교각을 보면 보편적으로 RC 교각(Reinforced Concrete Piers, RC Piers)에 대한 연구가 활발히 진행되어 전체 교각의 대부분에 적용되고 있다. 일반 중실 단면을 가진 RC 교각(Solid RC Pier)의 경우 필요 이상의 단면적을 가지고 있어 교각의 자중의 감소나 재료의 절감을 위해 중공 RC 교각(Hollow RC Piers)이 개발 되었다. 그러나 중공 RC 교각은 안쪽면의 취성파괴로 인하여 낮은 연성 거동을 할 가능성이 있다. 이러한 중공 RC 교각의 문제점을 해결하기 위하여 중공 RC 교각의 내부에 강관을 삽입하여 내부 구속력을 발생시킴으로써, 중공 부재 내의 콘크리트를 3축 구속 상태로 존재하게 하는 내부 구속 중공 RC 교각(Internally Confined Hollow RC Piers, ICH R.C Piers)의 연구(Kang & Han, 2005)[1]가 활발히

진행되고 있다. M.J.N. Priestly와 R. Park(1988)[2]은 실험에 의한 그의 연구논문에서, 일반 중공 단면의 교각은 바깥쪽으로 횡철근의 구속을 받지만, 안쪽 면에서 콘크리트가 구속 받지 못한다고 하였고, 한택희 등에 의해 ICH RC 교각의 연성능력발휘 및 내부강관에 의한 콘크리트 구속효과의 우수성을 검증하였다(Han et all., 2005)[3].

내부 강관 두께가 증가함에 따라 교각의 단면적은 증가하고 또한 철근비도 증가한다. 그리하여 본 연구에서는 동일한 외경 및 내경, 철근을 가진 ICH RC 교각에서 내부 강관 두께를 변화시켰을 때의 거동 특성에 관하여 파악하였다.

내부 구속 중공 RC 교각의 거동 특성을 파악하기 위해 사용된 프로그램은 한택희(2005)[4]에 의해 개발된 Material Model Program, Axial Force-Moment Interaction Analysis Program 및 Moment-Curvature Analysis and Force-Displacement Analysis Program을 사용하였으며, 그는 실험적, 해석적 검증을 통해 개발된 프로그램의 타당성을 확인하였다(한택희 등, 2007)[5].

내부 강관 두께에 따른 거동 특성을 파악하기 위해

<sup>1</sup>선문대학교 토목공학과

<sup>2</sup>고려대학교 공학기술 연구소

\*교신저자: 윤기용(kyyoon@sunmoon.ac.kr)

ICH R.C 교각 해석모델의 중공비를 0.65로 고정시켰고, 내부 강관 두께를 3mm에서 10mm까지 1mm씩 변화시켰다. 거동 특성을 파악하기 위한 평가 방법으로는 안전율, 연성능력, 재료비, 교각의 총중량 등으로 평가 하였다.

## 2. 거동 분석을 위한 기본 이론

### 2.1 내부 구속 중공 RC 교각 내의 구속 응력

내부 구속 중공 RC 교각의 구속응력은 그림 1의 자유 물체도로부터 유도될 수 있다. 원형 중실단면과 동일한 콘크리트의 구속응력을 갖도록 하기 위하여 중공면에 강관을 삽입했다는 점이 일반 중공단면의 교각과 다른 점이다. 따라서 콘크리트의 구속응력이 강관을 따라 균일하게 작용하고 횡철근이 강관보다 먼저 항복된다는 가정 하에서, 아치의 반력으로써 구속응력을 계산한다.

$$f_i = \frac{2f_{yh}A_{sp}}{[(D-D_i)+2R]s} \approx \frac{2f_{yh}A_p}{D_s} = \frac{\rho_s}{2}f_{yh} \quad (1)$$

여기서,  $D_i$  : 중공 단면의 직경 또는 내부 강관의 외경

$R$  : 내부 강관의 반지름 ( $R=0.5(D_i-t)$ )

$f_{tube}$  : 내부 강관에 작용하는 응력

$t$  : 내부 강관의 두께

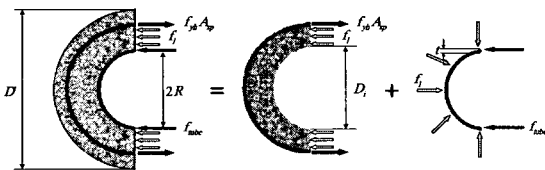


그림 1. 내부 구속 중공 RC 교각의 자유물체도

내부 강관의 좌굴강도와 항복강도는 강관의 두께에 큰 영향을 받으므로, 강관으로 보강된 중공 RC 교각의 파괴 모드는 튜브의 두께를 변화시킴으로써 조절될 수 있다. 내부 튜브의 항복 이전에 바깥쪽 후프철근의 파괴를 유발하기 위해서는 튜브에 작용하는 응력이 튜브의 항복강도( $f_{ty}$ )보다 작아야 한다.(한택희 등, 2006)[6]

$$t > \frac{D_i \cdot f_{yh} \cdot A_{sp}}{D \cdot s \cdot f_{yt}} = t_y \quad (2)$$

여기서,  $D$ 은 구속된 콘크리트의 직경,  $D_i$ 는 중공의

직경,  $f_{yh}$ 는 후프철근의 항복강도,  $A_{sp}$ 는 후프철근의 단면적,  $s$ 는 후프철근의 배근 간격이며,  $t_y$ 는 내부 튜브의 항복 파괴가 발생하지 않기 위한 튜브의 최소 두께이다.

### 2.2 거동분석을 위한 규정 및 평가 방법

거동 분석을 위해 도로교설계기준(2006)[7]에 제시되어 있는 종방향 철근비, 종방향 철근의 최소 순간격, 횡방향 철근의 최소 순간격, 횡방향 철근비등의 규정을 만족해야 한다.

연성도 평가 방법으로는 변위 연성도, 곡률연성도, 에너지 연성도 등이 있으며, 변위 연성도 및 에너지 연성도에 대해서는 Park R(1998)은 다음과 같이 정의하였다(Park R, 1998)[8].

$$\text{변위연성도 } \mu_\Delta = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (3)$$

$$\text{에너지연성도 } \mu_E = \frac{Eu}{Ey} \quad (4)$$

여기서,  $\Delta y$  : 최대 응답 변위

$\Delta u$  : 파괴상태까지 나타난 최대응답변위

$Eu$  : 극한상태까지 분석된 총 입력 에너지

$Ey$  : 항복상태까지 분석된 총 입력 에너지

단면력 검토 시 작용 하중에 대한 안전율(Safety Factor, S.F)은 원점으로부터 작용 하중 시까지의 길이와 원점으로부터 작용 하중 시까지의 연장선과 P-M 상관도와 만나는 점까지의 거리비로 구한다.

경제성 평가 방법은 다양한 방법이 있지만 본 논문에서는 교각을 만들기 위한 순수 재료비만을 가지고 경제성 평가를 수행하였다. 재료비 산출 단가는 2006년 정부 구매물자 가격을 기준으로 하였다. 또한, 교각의 총 중량은 교각에 사용되는 순수 재료만을 가지고 총 중량을 계산 하였다.

## 3. Solid RC 교각의 해석 모델

Prototype 선정을 위해 외경이 210cm인 Solid RC 교각의 단면으로 종방향 철근에 대하여 1단배치 할 수 있는 철근의 지름과 개수를 달리 하여 4가지 종류의 철근비 및 최소 순간격에 대한 검토를 하였다. 횡방향 철근의 간격을 5cm로 시작하여 1cm씩 늘려 10cm까지 나선철근비에 대한 검토를 하였고, 강도감소계수를 고려한 P-M상관도를 작성하여 안전율에 대한 검토하였다. 검토 결과 그림 2와 같이 Solid RC 교각의 해석 모델을 선정하게 되었다.

작용하중에 대한 안전율을 검토 시 작용하중은 확대 계수를 고려한 작용하중으로 축하중( $P_u$ )=726(kN)이며, 확대 모멘트( $\delta M_u$ )=1171(kN-m)을 적용하였다. 이때 선정된 prototype인 Solid RC 교각의 작용하중에 대한 안전율은 약 1.3이다.

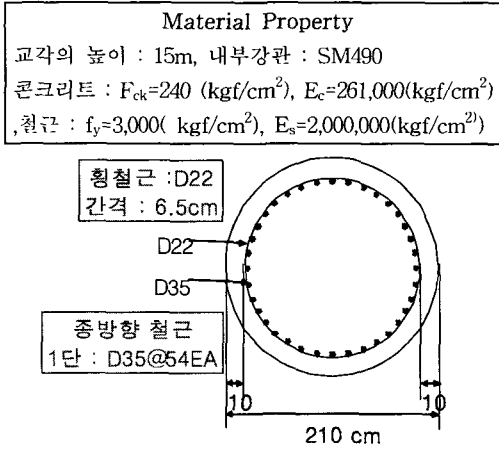


그림 2. Solid RC 교각의 해석 모델

#### 4. 내부 강관 두께에 따른 내부 구속 중공 RC 교각의 거동

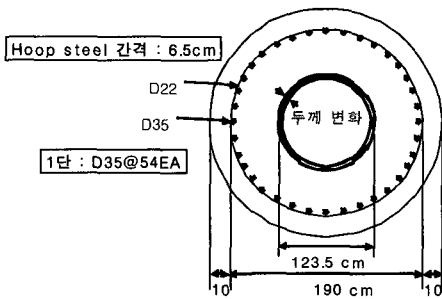


그림 3. 내부 강관 두께에 따른 ICH RC 교각의 단면

ICH RC 교각 해석 모델의 중공비는 0.65로 고정시키고, 내부 강관 두께를 3mm에서 10mm까지 1mm간격으로 변화시킨 8가지 종류의 ICH RC 교각에 대한 거동을 분석한다. 8가지 종류의 ICH RC 교각을 분류하기 위해 중공비가 0.65이고 내부 강관 두께가 3mm인 경우를 H065T03이라 하고 내부 강관 두께가 4mm인 경우는 H065T04로 하여 H065T03~H065T10까지 해석 모델을 선정하였다.

#### 4.1 내부 강관 두께에 따른 종방향 철근비 검토 및 응력-변형률 선도

앞에서 선정된 8가지 종류의 ICH RC 교각에 대하여 종방향 철근비를 검토 하고 내부 강관 두께에 따른 응력-변형률 선도를 작성하여 ICH RC 교각의 재료에 대한 콘크리트 구속효과를 확인 한다.

표 1. 내부 강관 두께에 따른 종방향 철근비 검토

SPECIMEN	ICH RC							
	H065 T03	H065 T04	H065 T05	H065 T06	H065 T07	H065 T08	H065 T09	H065 T10
철근직경(cm)	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
수량(EA)	54	54	54	54	54	54	54	54
내부 강관 두께(cm)	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
외경(cm)	210	210	210	210	210	210	210	210
중공지름(cm)	123.5	123.5	123.5	123.5	123.5	123.5	123.5	123.5
종방향 철근 단면적(cm <sup>2</sup> )	635.7	674.2	712.8	751.2	789.6	827.9	866.2	904.4
압축부재 단면적(cm <sup>2</sup> )	22773	22812	22850	22889	22927	22965	23004	23042
철근비(%)	2.791	2.956	3.119	3.282	3.444	3.605	3.765	3.925
검토	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

표 1은 내부 강관 두께에 따른 종방향 철근비를 검토 한 결과이며 8가지 종류의 ICH RC 교각 모두 종방향 철근비를 만족한다.

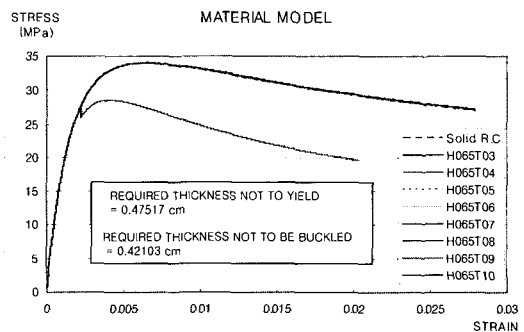


그림 4. 내부 강관 두께에 따른 응력-변형률 선도

이 절에서 사용되는 ICH RC 교각의 내부 강관 최소 필요 두께는 5mm이다. 그림 4에와 같이 내부 강관 두께를 3mm, 4mm를 적용한 경우는 5mm이상 적용한 경우보다 응력-변형률 선도가 작아진다. ICH-RC 교각에서 내부 강관 최소 필요 두께를 사용하지 않으면 심부콘크리트가 3축 응력상태에 도달하였을 때, 내부 강관이 횡 철근보다

먼저 항복하여 심부콘크리트는 2축 응력상태가 되고 교각의 안쪽으로 파괴가 일어난다. 이러한 이유로 내부 강관 최소 필요 두께를 사용하지 않은 ICH RC 교각은 최대 압축력도 작아지고 최대 변형률도 작아지게 된다.

#### 4.2 내부 강관 두께에 따른 설계하중에 대한 안전율

동일한 외경을 가진 ICH RC 교각에 대하여 내부 강관의 두께가 증가하면 그림 5에서와 같이 축하중과 모멘트는 내부 강관 최소 필요 두께를 사용하지 않은 경우의 ICH RC 교각을 제외하고는 선형적으로 증가하게 된다. 앞서서도 언급했듯이 내부 강관 최소 필요 두께를 사용하지 않으면 횡철근의 심부구속력이 작아져서 콘크리트가 부담해야하는 역할이 내부 강관 최소 필요 두께를 사용한 ICH RC 교각에 비해 작아지게 된다. 축하중은 동일한 재료를 사용한 교각에서의 각각의 재료에 대한 종방향 단면적과 비례하게 된다. 그러므로 동일한 콘크리트량을 사용하였다면 내부 강관 사용량이 많은 경우가 더 큰 축하중에 대해 저항할 수 있다.

모멘트에서의 인장력은 철근 및 강관이 받아주고, 압축력은 각각의 재료가 받아주게 된다. 그러므로 동일한 콘크리트량을 사용하였다면 철근 및 강관의 사용량이 많은 경우가 더 큰 모멘트에 대해 저항할 수 있다.

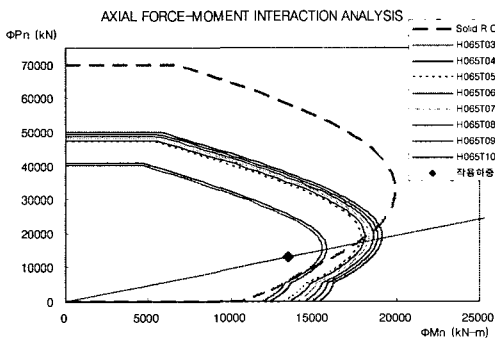


그림 5. 내부 강관 두께에 따른 P-M 상관도

내부 강관 두께를 변화시킨 ICH RC 교각의 경우 그림 6에서와 같이 안전율은 점차 증가하게 된다. 내부 강관 최소 필요 두께(5mm)를 사용하지 않은 경우를 제외하고는 모두 Solid RC 교각에 비해 더 큰 안전율을 확보하고 있으며, 그 증가량은 선형적으로 증가하였다.

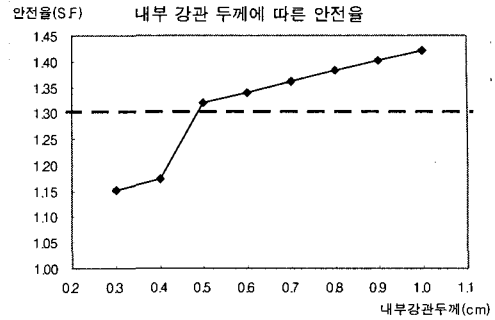


그림 6. 내부 강관 두께에 따른 안전율

#### 4.3 내부 강관 두께에 따른 연성도

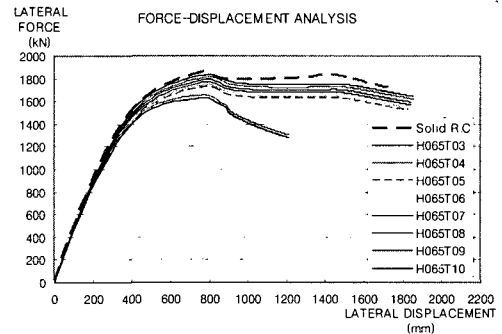


그림 7. 내부 강관 두께에 따른 하중-변위 곡선

그림 7에서와 같이 내부 강관 최소 필요 두께를 사용하지 않은 경우의 ICH RC 교각의 경우는 최대하중 및 최대 변위 또한 떨어진다. 최소 필요 두께 이상 사용한 ICH RC 교각의 경우 변위 연성도 및 에너지 연성도 값은 그림 8에서 나타나듯이 증가량은 미소하다. 앞에서 안전율에 대한 결과 값과 연성도의 결과 값에 대하여 비교·검토해 보면 안전율이 부족하면 내부 강관 두께를 증가시면 되지만 연성도에 대한 효과는 없다.

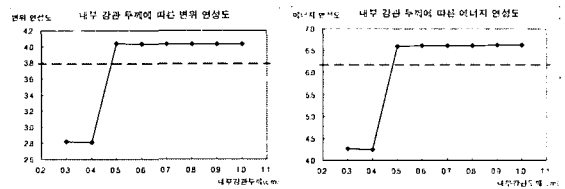


그림 8. 내부 강관 두께에 따른 변위 및 에너지 연성도 곡선

#### 4.4 내부 강관 두께에 따른 재료비 및 교각 총 중량

각각의 ICH RC 교각은 동일한 종방향 철근, 횡철근 및 콘크리트량을 사용했으므로 그에 상응하는 재료비는 동일하다. 그러므로 내부 강관의 사용량이 많은 교각의 경우가 재료비는 상승하게 된다.

내부 강관 두께에 따른 각각의 총 중량 또한 내부 강관 두께의 사용량이 많은 교각의 경우가 총 중량은 증가한다. 이 절의 ICH RC 교각의 중공비는 0.65이며, 중공 단면만큼의 중량 감소효과를 볼 수 있었다. 그러므로 중공비 0.65인 ICH RC 교각은 Solid RC 교각에 대해 약 30% 감소된 중량을 가지게 된다. 비록 내부 강관이 두꺼운 경우, 교각의 총 중량에 대하여 증가는 하지만 그 증가량이 미소하여 ICH RC 교각의 총 중량 변화율은 미소하다고 볼 수 있다.

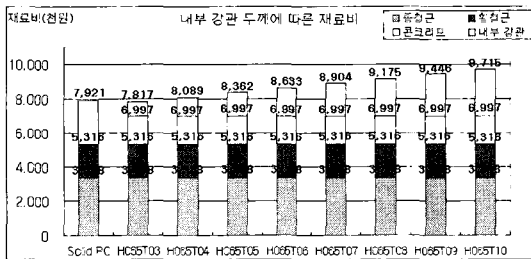


그림 9. 내부 강관 두께에 따른 재료비

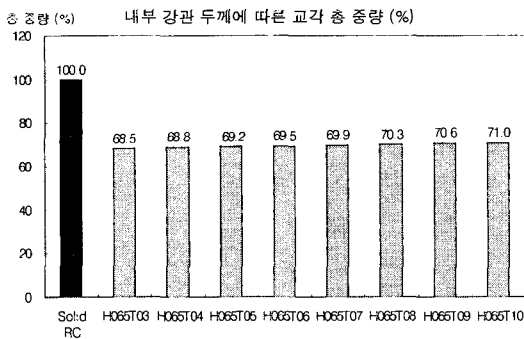


그림 10. 내부 강관 두께에 따른 교각 총 중량 (%)

### 5. 결론

본 연구에서의 내부 강관 두께에 따른 내부 구속 중공 RC 교각에 대한 거동 분석한 결과 다음과 같다.

- (1) ICH RC 교각에서 최소 필요 내부 강관 두께를 사

용하지 않은 경우에는 심부콘크리트가 3축 응력상태에 도달하였을 때, 내부 강관이 횡 철근보다 먼저 항복하여 낮은 연성 거동뿐만 아니라 안전을 또한 작아짐을 보였다. 그러므로 ICH RC 교각에서의 내부 강관은 최소 필요 두께 이상을 사용해야 한다.

- (2) ICH RC 교각은 내부 강관 두께가 증가함에 따라 안전율은 선형적으로 증가하여 그 증가율은 내부 강관 두께 1mm 증가 시 약 1.6%증가함을 보였지만 연성능력의 증가 효과는 없는 것으로 나타났다.
- (3) 내부 강관 두께 1mm 증가 시 재료비는 약 3.4%씩 증가하였고 교각의 총 중량의 증가율은 미소하였다.

이와 같이 내부 강관 두께에 따른 내부 구속 중공 RC 교각에 대한 거동 분석 결과 재료비 증가율이 안전율 증가율보다 약 2배 크게 나타났고 연성에 대한 효과는 볼 수 없었다. 또한 최소 내부 강관 두께보다 작은 경우에는 취성 파괴와 같은 거동을 보였으므로 ICH RC 교각의 내부 강관 두께는 최소 내부 강관 두께를 적용하는 것이 가장 효과적으로 나타났다.

### 참고문헌

- [1] Kang, Y.J., and Han, T.H., "Behavior of an internally confined Hollow R.C pier", proceedings of korea-china-japan symposium on structural steel construction, KSSC, pp. 91-97, 2005.
- [2] Mander, J.B., Priestly, M.J.N., Park, R. , "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, no. 8, pp. 1804~1826, 1988.
- [3] Han, T.H., Han, K.H., Han, S.Y., Kim, S.N., Kang, J.O., and Kang, Y.J., "The behavior of an internally confined hollow concrete filled steel tube column", proceedings of 8th Korea-Japan Joint Seminar, 2005.
- [4] 한택희, "Development of Enhanced Ductile Hollow Columns with Internal Confinement" 박사학위논문, Korea University, December, 2005.
- [5] 한택희, 한상윤, 강영중, "내부 구속 중공 철근 콘크리트 부재의 비선형 재료 모델 개발", 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제27권 제1호, pp. 11-26, 2007.
- [6] 한택희, 김홍중, 김영중, 강영중, "원형 강관 삽입 중공 RC 기둥의 내부구속 효과 연구", 대한토목학회 논문

문집, 대한토목학회, 제26권 제4호, pp. 565-575, 2006.

[7] 건설교통부, “도로교설계기준”, 한국도로교통협회, 2006.

[8] Park R. "State-of-the Art Report on Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing", Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol. 8, pp. 605-616, August 1988.

**최 준 호(Jun-Ho Choi)**

[정회원]



- 2005년 2월 : 선문대학교 토목공학과 (공학사)
- 2007년 2월 : 선문대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 포항산업과학연구원 토목구조연구실 연구원

<관심분야>

장구조, 소수주거터고, 비선형 구조 해석

**윤 기 용(Ki-Yong Yoon)**

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1989년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과(공학박사)
- 1999년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 조교수

<관심분야>

성능기초 내진 평가 및 설계, 비선형 구조 해석, Precast concrete 접합부

**한 택 희(Tack-Hee Han)**

[정회원]



- 1995년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 2001년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2006년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학박사)
- 2006년 3월 ~ 2007년 2월 : 고려대학교 공학기술연구소 연구조교수

- 2007년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학과 BK21연구조교수

<관심분야>

합성구조, 파형강판, 좌굴해석

**이 규 세(Gyu-Sei Yi)**

[정회원]



- 1979년 9월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 1983년 8월 : 고려대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1996년 12월 : Utah State University 토목공학과(공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 부교수

<관심분야>

구조공학, 콘크리트 구조, 구조해석, .....