

마이크로웨이브 발열양생에 의해 제작된 저심도 철도시스템용 PC BOX의 장기내구성 평가

고태훈*, 유한주¹

¹한국철도기술연구원 신교통연구본부

The Long-term Durability Evaluation of PC Box for Near-surface Transit System manufactured by Microwave Heat curing

Tae-Hoon Koh*, Han-Ju Yoo¹

¹New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute

요약 본 연구에서는 저심도 도시철도시스템 구축시 건설비용의 절감을 위하여 산업부산물인 고로슬래그 미분말과 플라이 애쉬로 결합체의 일부를 대체하고, 급냉 전기로 산화슬래그를 잔골재의 대체재료로 사용한 저탄소 친환경 콘크리트와 우수한 초기강도 확보와 양생비용 절감을 위한 마이크로웨이브 발열거푸집으로 제작한 PC BOX의 장기내구성 평가를 수행하였다. 평가결과, 초기강도는 발열양생 조건이 증기양생 조건에 비해 다소 높게 나타났지만 장기재령 강도는 거의 대등한 것으로 나타났다. 또한 화학저항성 및 동결융해 저항성 평가 결과, 재령별 발열 및 증기양생을 통해 제작된 PC BOX의 성능차이는 없는 것으로 나타났으며, 염소이온침투성 평가 결과 역시 발열 및 증기양생 PC BOX 모두 매우 낮은 등급의 수준을 확보하는 것으로 나타났다. 따라서 저탄소 친환경 콘크리트와 발열양생시스템을 적용하여 저심도 철도시스템용 PC BOX를 제작할 경우, 기존 증기양생방법과 대등한 내구성능을 확보할 수 있어 저비용의 저심도 철도시스템 콘크리트 인프라 구축에 기여할 수 있으며, 또한 증기양생 시 사용되는 화석연료의 사용량을 제로화해 이산화탄소 배출 및 환경부하를 저감할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract This study examined the long-term durability of PC boxes, which was manufactured by low-carbon eco-friendly concrete using an alternative binder to cement and alternative fine aggregate to sand and microwave heat curing system to reduce the construction cost of a near-surface transit system. Based on the test results, the initial compressive strength of microwave heat cured concrete was higher than that of the steam cured concrete, but those were similar in the long-term age. In addition, there was no significant difference between the two curing conditions in the chemical resistance and the freeze-thawing resistance, and the chloride ion penetration level of the concrete cured by two methods was very low. Therefore, low-carbon eco-friendly concrete and microwave heat curing technology are expected to contribute to the economic construction of a near-surface transit system, and reduce carbon dioxide emissions and environmental impact.

Keywords : Durability, Microwave, Microwave heat curing, Near-surface Transit System, PC box

1. 서론

기존의 20~30m심도 이상에서 건설되는 지하철의 경

우 많은 건설비용이 소요되고, 승객들의 접근성 및 다른
교통시스템과의 환승시 불편함으로 인해 최근 몇 년 사
이 건설비용을 줄이고, 접근성이 우수한 경전철시스템이

본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업의 “저비용 저심도 인프라 핵심기술 개발(14RTRP-B068762-02)” 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

*Corresponding Author : Tae-Hoon Koh(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5661 email: thkoh@krii.re.kr

Received March 23, 2016

Revised April 6, 2016

Accepted April 7, 2016

Published April 30, 2016

여러 지자체에서 도입되고 있는 추세이지만, 육중한 고가 구조물로 인한 도시 미관 저해 및 소음·진동발생 등의 여러 환경문제를 야기하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다른 교통시스템과의 연계성과 접근성이 우수하며 기존 지하철 대비 건설비용이 저렴한 저심도 도시철도시스템 기술개발이 추진 중에 있다. 저심도 도시철도시스템을 구축하기 위해서 건설비용의 절감이 요구되는데 이를 위한 방법으로 저비용의 프리캐스트 콘크리트 구조물이 제안되고 있다.

최근 Koh et al.은 마이크로웨이브 발열시스템을 적용한 콘크리트 촉진양생기술을 개발하였고, 이를 프리캐스트 콘크리트에 적용하여 우수한 조기강도 확보와 양생비용 절감의 효과를 제시하였다[1]. 또한 이산화탄소 배출저감을 목적으로 산업부산물인 고로슬래그 미분말과 플라이 애쉬로 결합재의 일부를 대체하고, 급냉 전기로 산화슬래그를 잔골재의 대체재료로 사용한 저탄소 친환경 PC BOX용 콘크리트를 개발하여 우수한 콘크리트 성능을 확보하였다[2].

본 연구에서는 발열양생시스템으로 제작한 PC BOX와 기존의 증기양생방법으로 제작한 PC BOX의 장기내구성 비교평가를 통해, 저비용으로 저심도 도시철도시스템의 콘크리트 인프라 시공 시, 저탄소 친환경 콘크리트와 발열양생시스템의 적용 가능성을 평가하였다.

2. 실험 개요

2.1 콘크리트 배합

2.1.1 시멘트 및 혼화재

본 연구에서는 저심도 철도시스템 구축을 위한 저탄소 친환경 콘크리트를 적용한 PC BOX를 제작하기 위해 설계기준강도(f_{ck}) 35 MPa, 목표 슬럼프(150±25 mm) 및 공기량(4.5±1.5%)을 만족하는 배합을 선정하였으며, 배합설계 조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Mix proportion of low-carbon eco friendly concrete

W/B (%)	S/a (%)	Binders (B, weight ratio, %)			Aggregates		Activator (Na ₂ SO ₄)
		OPC	FA	BS	S	G	
27.4	40.9	50	15	35		B×2%	

시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 시멘트 일부 대체 재료로 플라이애시(FA) 및 고로슬래그 미분말(BS)을 사용하였다. 천연 잔골재 대체 재료로 급냉 전기로 산화슬래그(EAF Slag)를 사용하였으며, 굵은골재(G)는 최대치수가 20 mm 인 부순골재를 사용하였다. 또한 콘크리트의 유동성 확보 및 공기량 조절을 위하여 PC계 고성능 AE 감수제를 화학혼화제로 사용하였으며, 수화반응 활성화를 위해 Na₂SO₄를 사용하였다.

2.2 콘크리트 양생

발열양생 및 증기양생에 따른 장기내구성 평가를 위해 두 개의 구조체(H:2.45m, L:4.9m, W:1.0m)를 제작하였다. 두 개의 구조체는 Fig. 1과 2에 보인바와 같은 각각의 증기양생 및 발열양생용 거푸집을 사용하여 제작하였다. 설계기준강도 35MPa의 저탄소 친환경 콘크리트를 마이크로웨이브 발열 및 증기에 의해 양생시켰으며, 이때 양생방법에 상관없이 전양생 3.5시간, 승온 및 등온 5시간, 하강 5.5시간으로 동일하게 적용하였다. Table 2는 각각의 양생주기와 양생온도를 정리한 것이다.



Fig. 1. PC BOX Form for Steam Curing



Fig. 2. PC BOX Form for Microwave Heat Curing

증기양생의 경우 증기가 양생포 내부로 투입되어 양생포 내부 전체 온도를 높여서 강제거푸집을 통해 전달된 열에너지가 콘크리트의 양생을 촉진하기 때문에 양생포를 거푸집 전체적으로 둘러 싸는 구조로 양생을 실시하였다. 그러나 발열양생의 경우 발열시스템에서 발생된 열에너지가 강제거푸집에 직접 전달되기 때문에 증기양생의 목적과 같은 양생포가 필요없지만, 콘크리트가 노출된 상부면에서 콘크리트 내부의 수분이 증발되는 것을 방지하기 위해 상부면만을 일부 양생포로 덮었다.

Table 2. Curing Cycles and Temperatures for tested Steam Curing and Microwave Heat Curing

Types	Preset (hrs)	Heating & Treatment (hrs)	Cooling (hrs)	Max. Temp. (°C)
Microwave Heat Curing	3.5	5	5.5	65
Steam Curing	3.5	5	5.5	55

2.3 실험방법

2.3.1 압축강도 시험

압축강도 시험은 발열양생 및 증기양생 조건에서 콘크리트 코어의 형태로서 KS F 2422에 따라 수행하였다 [3]. 발열 및 증기양생으로 제작된 PC콘크리트에 대하여 1일, 7일, 1개월, 3개월 및 6개월의 양생 조건에서 각 재령에 대한 콘크리트 코어를 채취하여 가공한 압축강도 시편을 양생수조(20±3°C)에서 48시간 수침 한 후 시험 직전 수조에서 꺼내어 시편이 압축파괴가 발생 될 때까지 0.6±0.4MPa/sec의 속도로 가압하여 최대하중을 측정하였다.

2.3.2 쪼갬 인장강도 시험

쪼갬 인장강도 시험은 KS F 2423에 따라 수행하였다 [4]. 발열 및 증기양생으로 제작된 PC콘크리트에 대하여 1개월, 3개월 및 6개월의 양생 조건에서 각 재령에 대한 콘크리트 코어를 채취하여 가공한 쪼갬 인장강도 시편을 양생수조(20±3°C)에서 48시간 수침 한 후 시험 직전 수조에서 꺼내어 시편이 압축파괴가 발생 될 때까지 0.6±0.4MPa/sec의 속도로 가압하여 최대하중을 측정하였다.

2.3.3 화학저항성 시험

화학침식성 환경에서 콘크리트의 화학적 침식량 및 역학적 성능저하를 정량적으로 평가하기 위해 ASTM C

267에 따라 화학저항성 시험을 수행하였다[5]. 발열 및 증기 양생으로 제작된 PC콘크리트에 대하여 1개월, 3개월 및 6개월의 양생 조건에서 각 재령에 대한 콘크리트 코어를 채취하여 가공한 시편을 사용하였으며, 콘크리트를 화학적 방법으로 침식시키기 위하여 황산나트륨용액(10% Na₂SO₄) 및 염산용액(5% HCl)을 제조하였다. 시험은 제조한 용액에 3개월 동안 침지를 한 후 침지 전·후의 중량변화와 압축강도를 측정하여 비교, 검토하였다. 압축강도 변화율 및 중량 변화율은 각각 식(1), (2)와 같이 계산하였다.

$$\text{압축강도 변화율(\%)} = \frac{\text{침지전 압축강도} - \text{침지 후 압축강도}}{\text{침지 전 압축강도}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, 침지 전 압축강도는 각 재령(1개월, 3개월, 6개월)의 압축강도 시험결과를 적용하였다.

$$\text{중량변화율(\%)} = \frac{\text{침지전 중량} - \text{침지 후 중량}}{\text{침지 전 중량}} \times 100 \quad (2)$$

여기서, 침지 전 중량은 시험 대상 시험편 각 재령(1개월, 3개월, 6개월)의 침지 전 측정된 중량이다.

2.3.4 동결융해저항성 시험

발열 및 증기양생 콘크리트의 동결 및 융해 작용이 반복되는 환경에서 내부 공극 내의 물이 체적변화를 일으켜 발생하는 미세균열, 수화조직의 열화에 대한 저항성을 평가하기 위해 KS F 2456에 따라 동결융해저항성 시험을 실시하였다[6]. 콘크리트 시편을 동결융해 시험용기에 넣고 물을 채워 -18 ~ +4 °C를 1 Cycle로 하여 동결융해 작용을 반복하였고, 300 Cycle에서 시험을 종료하였다. 또한, 30 Cycle 주기로 공명주파수를 측정하여 동탄성계수 값을 산출 하였으며, 초기 동탄성 계수값에 대한 Cycle별 동탄성계수 값인 상대 동탄성계수로 정리하였다.

2.3.5 염소이온 침투저항성 시험

전기장의 양극성을 활용하여 염소이온(Cl⁻)이 콘크리트에 침투시 발생하는 저항을 통하여 콘크리트의 차염성능 및 내부 조직의 밀실한 정도를 평가하기 위해 KS F 2711에 따라 염소이온 침투저항성 시험을 실시하였다 [7]. 발열 및 증기 양생으로 제작된 PC콘크리트에 대하여 1개월, 3개월 및 6개월의 양생 조건에서 각 재령에

대한 콘크리트 코어 2개의 시편을 1조로 두께를 (50±2) mm로 가공하여 시험을 진행하였다. 시편의 양 단면부에 대하여 한쪽면은 염수용액(3% NaCl)에 노출시키고, 반대면은 양극용액(0.3N NaOH)용액에 노출시켰다. 이후 외부에서 전기장(60V)을 가하여 염소이온이 외부에서 시편의 내부 공극을 통해 양극용액 방향으로 이동하도록 하였으며, 이때 발생하는 전기적 저항을 전하량으로 측정하였다. 이 때 측정된 통과전하량으로 Table 3과 같이 염소이온 침투저항성을 판정하였다.

Table 3. Chloride ion penetration based on charge passed

Total passed charge (coulombs)	Chloride ion penetrability
>4,000	High
2,000~4,000	Moderate
1,000~2,000	Low
100~1,000	Very low
<100	Negligible

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축강도 평가

Table 4와 Figure 3은 양생조건별 콘크리트의 재령 1일, 7일, 1개월, 3개월 및 6개월의 압축강도 시험결과를 나타낸 것이다. Table 5의 결과에서 재령 1일, 7일 및 1개월에서 채취한 콘크리트 코어시편의 압축강도 시험결과는 발열양생을 실시한 콘크리트에서 6~11% 우수한 것으로 나타났다. 또한 Figure 3에서 보는 것과 같이 재령 3개월 및 6개월에서는 발열 및 증기양생간의 강도차이는 없는 것으로 나타났다.

Table 4. Result of compressive strength

Types	Compressive Strength (MPa)				
	1day	7days	1 month	3 months	6 months
Microwave Heat Curing	23.1	59.5	60.2	63.6	64.4
Steam Curing	21.1	52.4	56.4	62.5	65.1

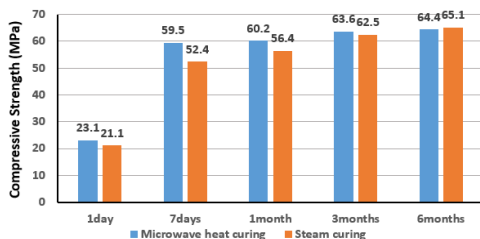


Fig. 3. Compressive strength

3.2 인장강도 평가

Table 5와 Figure 4는 양생조건별 콘크리트의 재령 1개월, 3개월 및 6개월의 인장강도 시험결과를 나타낸 것이다. Table 6의 결과에서 인장강도는 재령 1개월에 채취한 콘크리트에서는 큰 차이가 없었으나, 3개월 및 6개월의 재령에서는 발열양생 콘크리트가 증기양생 콘크리트보다 약 10% 우수한 성능을 나타내는 것을 알 수 있었다.

Table 5. Result of tensile strength

Types	Tensile Strength (MPa)		
	1 month	3 months	6 months
Microwave Heat Curing	4.71	5.34	5.51
Steam Curing	4.51	4.88	4.96

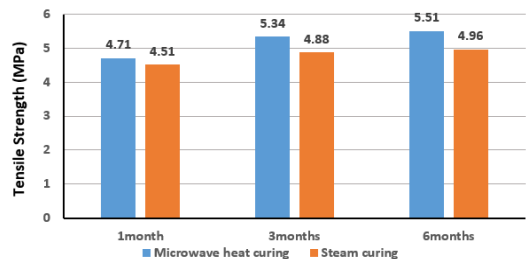


Fig. 4. Tensile strength

3.3 화학저항성 평가

Table 6과 7은 양생조건별 콘크리트의 재령 1개월, 3개월 및 6개월의 화학저항성 평가결과를 나타낸 것이다. 황산나트륨용액(10% Na₂SO₄)은 알칼리골재반응, 염산용액(5% HCl)은 침식작용을 모사한 것이다. 황산나트륨용액(10% Na₂SO₄) 침지시 발열 및 증기양생 콘크리트 모두 장기재령으로 갈수록 압축강도 감소율이 증가하는 경향을 보이며, 발열양생 콘크리트가 증기양생 콘크리트에 비해 감소율이 33~68% 우수한 것으로 나타났다. 또한 염산용액(5% HCl) 침지시 압축강도 감소율은 발열양생 콘크리트가 재령 1개월 및 3개월에서 높은 경향을 보이나 재령 6개월에서는 발열양생 콘크리트가 약간 우수한 것으로 나타났다. 중량감소율의 경우 황산나트륨용액(10% Na₂SO₄) 및 염산용액(5% HCl) 조건에서 감소율의 차이는 거의 없어 발열 및 증기양생 콘크리트 모두 우수한 것으로 판단된다.

Table 6. Compressive strength rate of change

Types		Compressive Strength (MPa)	Rate of change (%)	
Microwave Heat Curing	1 month	Before immersion	60.2	100.0
		10% Na ₂ SO ₄	59.5	-1.2
		5% HCl	48.1	-20.1
	3 months	Before immersion	63.6	100.0
		10% Na ₂ SO ₄	61.3	-3.6
		5% HCl	52.2	-17.9
	6 months	Before immersion	64.4	100.0
		10% Na ₂ SO ₄	61.3	-4.8
		5% HCl	53.4	-17.1
Steam Curing	1 month	Before immersion	56.4	100.0
		10% Na ₂ SO ₄	55.5	-1.6
		5% HCl	48.1	-14.9
	3 months	Before immersion	62.5	100.0
		10% Na ₂ SO ₄	59.7	-4.48
		5% HCl	53.4	-14.6
	6 months	Before immersion	65.1	100.0
		10% Na ₂ SO ₄	59.8	-8.1
		5% HCl	52.5	-19.4

Table 7. Weight rate of change

Types		Weight rate of change(%)	
		Microwave Heat Curing	Steam Curing
1 month	Before immersion	1000	100.0
	10% Na ₂ SO ₄	+0.09	+0.16
	5% HCl	-3.23	-3.26
3 months	Before immersion	100.0	100.0
	10% Na ₂ SO ₄	+0.05	+0.10
	5% HCl	-3.36	-3.34
6 months	Before immersion	100	100.0
	10% Na ₂ SO ₄	+0.08	+0.08
	5% HCl	-3.41	-3.53

3.4 동결융해 저항성 평가

Figure 5와 Table 8은 양생조건별 재령 1개월, 3개월 및 6개월의 동결융해 저항성 평가결과를 나타낸 것이다. 동결융해 저항성 시험결과 재령 1개월에서 발열양생 콘크리트가 증기양생 콘크리트에 비해 상대 동탄성계수가 초기 100 Cycle 까지의 저항성이 다소 높은 수준으로 나타났으나, 300 Cycle 까지의 동결융해 저항성의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 3개월 및 6개월의 장기 재령에서의 발열 및 증기양생 콘크리트의 동결융해 저항성 수준은 비슷한 것으로 판단된다.

Table 8. Relative dynamic modulus of elasticity

Terms	Microwave Heat Curing	Steam Curing
1 month	89.3%	89.1%
3 months	90.2%	89.9%
6 months	91.7%	92.0%

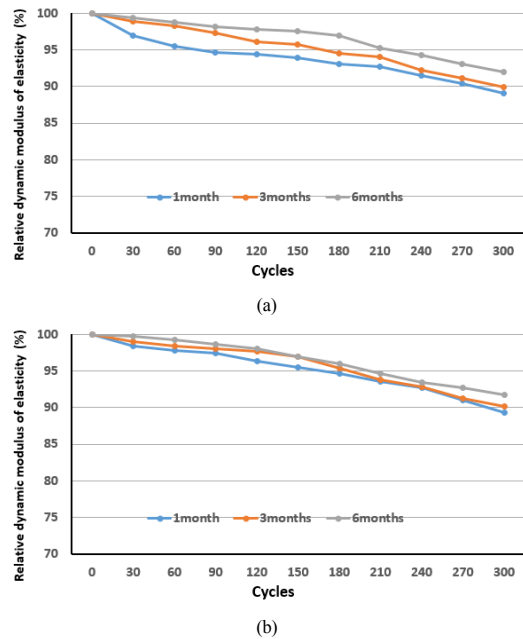


Fig. 5. Resistance of freezing and thawing (a) Microwave heat curing (b) Steam curing

3.5 염소이온 침투저항성 저항성 평가

Table 9는 염소이온침투저항성 평가 결과를 나타낸 것이다. 결과에서 보면 재령 1개월에서는 발열양생 콘크리트가 3%정도 우수한 성능을 나타내고 있으나, 재령 3개월 및 6개월에서의 침투저항성은 증기양생 콘크리트가 조금 우수한 양상을 보인다. 그러나 그 차이가 크지 않고 발열양생 콘크리트와 증기양생 콘크리트 모두 장기 재령으로 갈수록 우수한 성능을 나타내고 있으며, 각 재령별 염소이온 침투성은 Table 4에 나타낸 것과 같이 공통적으로 “매우 낮음(Very low)” 등급을 나타내고 있다.

Table 9. Chloride ion penetration resistance

Types	Chloride ion penetration resistance (coulomb)		
	1 month	3 months	6 months
Microwave Heat Curing	361	217	214
Steam Curing	399	189	171

4. 결론

본 연구에서는 발열양생시스템을 적용하여 제작된 PC BOX와 기존의 증기양생을 통해 제작한 PC BOX의 장기내구성 평가를 통해 저비용 저심도 도시철도시스템의 콘크리트 인프라 시공시, 저탄소 친환경 콘크리트와 발열양생시스템의 적용 가능성을 평가 하였고, 이에 결론은 다음과 같다.

- 1) 조기에 강도를 발현시키는 촉진양생 기술의 특성상 재령 1개월에서는 발열양생 조건이 증기양생 조건에 비해 다소 높은 압축강도 양상을 보이지만 3개월 및 6개월 이상의 장기재령에서는 지속적인 시멘트 수화반응이 발생하여 발열 및 증기양생 조건에서의 차이가 없는 값을 보이고 있다. 또한 쪼갬 인장강도 역시 각 양생조건에서 거의 동일한 성능을 보였다.
- 2) 황산나트륨용액(10% Na₂SO₄) 및 염산용액(5% HCl)에 대해서 재령별 발열 및 증기양생 콘크리트의 화학저항 성능차이는 없는 것으로 판단할 수 있다.
- 3) 동결융해 저항성의 경우 상대동탄성계수 시험 결과 양생조건에 따른 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 또한 염소이온 침투저항성 평가결과 매우 낮은 등급의 수준을 발열 및 증기 양생 콘크리트 모두 확보하고 있으며, 재령에 따른 성능의 차이가 거의 없는 것으로 판단된다.

이상의 결과를 통하여 저탄소 친환경 콘크리트와 발열양생시스템을 적용하여 PC BOX를 제작할 경우, 기존 증기양생방법과 대등한 내구성을 확보할 수 있어 저비용 저심도 도시철도시스템 건설에 기여할 것으로 판단되며, 또한 증기양생 시 사용되는 화석연료의 사용량을 제로화해 이산화탄소 배출 및 환경부하를 저감할 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] Tae-Hoon Koh, Do-Young Moon, Jung-Myung Bae, Jung-Hoon Yoo, "Compressive Strength Development Model for Concrete Cured by Microwave Heating Form," Journal of the Korea Concrete Institute, 27(6), pp. 669-676, 2015.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2015.27.6.669>

[2] Tae-Hoon Koh, Min-Kook Ha, Ho-Jin Jung, "A Performance Evaluation of Concrete for Low-carbon Eco-friendly PC Box for Near-surface Transit System," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 16, No. 5, pp. 3587-3595, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.5.3587>

[3] KS F 2422, Method of obtaining and testing drilled cores and sewed beams of concrete, KSA, 2007.

[4] KS F 2423, Method of test for splitting tensile strength of concrete, KSA, 2006.

[5] ASTM C 267. Standard Test Method for Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concrete, ASTM, West Conshohocken, 2001.

[6] KS F 2456, Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing, KSA, 2013.

[7] KS F 2711, Testing method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, KSA, 2002.

고 태 훈(Tae-Hoon Koh)

[정회원]



- 1998년 2월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2008년 8월 : 미국 Purdue Univ. School of Civil Eng. (공학박사)
- 1998년 4월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

재료공학, 콘크리트양생

유 한 주(Han-Ju Yoo)

[정회원]



- 2008년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 연구원
- 2016년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 일반대학원 건설환경공학과 박사 재학중

<관심분야>

재료공학, 콘크리트양생