

# 보수보강을 실시한 철근콘크리트 보의 동결융해시험을 통한 휨강도 및 내구성 평가

## Flexural Strength and Durability Evaluation

by Freezing and Thawing Test of Repaired Reinforced Concrete Beams

이창현\*, 어석홍\*\*

한국인프라관리 주식회사\*, 창원대학교 토목환경화공융합공학부\*\*

Chang-Hyun Lee(changhyun.lee@koinfra.com)\*, Seok-Hong Eo(esh@changwon.ac.kr)\*\*

### 요약

본 논문에서는 DFRCC 보수모르타르와 탄소섬유시트를 사용하여 보수보강을 실시한 철근콘크리트보를 대상으로 동결융해시험을 실시하여 휨강도 및 동탄성계수를 측정하고 비교 평가한 실험적 연구결과를 제시하였다. 이를 위해 100x100x400mm 크기의 각주형 보를 총 14개 제작하여 KS F 2456에 따른 동결융해 시험과 휨강도 시험을 실시하였다. 인장 및 압축측에서 각각 3-D10의 철근을 배치하였으며, 보수보강은 보의 3면에 각각 실시하였다. 동결융해시험에서는 각각 100 Cycle 및 200 Cycle에서 상대동탄성계수를 산정하였다. 실험결과, 휨강도에서는 탄소섬유시트를 사용한 경우가 DFRCC 보수모르타르의 경우보다 약 15% 정도 크게 나타났으며, 동탄성계수 측면에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 공시체 크기에 비해 비교적 많은 철근량이 배근되어 간섭효과가 나타난 것으로 추정되어 추가적인 실험과 연구가 필요한 것으로 판단된다.

■ 중심어 : 동결융해시험 | 보수보강 | DFRCC | 탄소섬유시트 | 휨강도 | 내구성 |

### Abstract

This paper presents experimental investigations about flexural strength and durability of reinforced concrete beams repaired using ductile fiber reinforced cementitious composite (DFRCC) and carbon fiber sheet through freezing and thawing test. Total 14 RC beams of 100x100x400mm size were tested by 3-point bending and freezing and thawing test by KS F 2456. The beams were reinforced using 3D10 steels on both the tensile and compressive sides, and repaired on 3 sides except on top cycle. Test results showed that the beams repaired using fiber carbon sheet revealed about 15% higher values of flexural strength compared than the cases of DFRCC mortar. On the other hand, the results did not show meaningful differences in the aspect of durability. For further research, consideration of the steel interference effect and real old specimens such as taken from real deteriorated structures are needed to be tested after repairing with DFRCC and carbon fiber sheet.

■ keyword : Freezing and Thawing | Rehabilitation | DFRCC | Carbon Fiber Sheet | Flexural Strength | Durability |

\* 본 논문은 2017~2018년도 창원대학교 교내공모과제 연구비지원에 의하여 수행되었음.

접수일자 : 2018년 10월 11일

심사완료일 : 2018년 10월 31일

수정일자 : 2018년 10월 31일

교신저자 : 어석홍, e-mail : esh@changwon.ac.kr

## I. 서론

토목, 건축 분야에서 이용되는 대표적인 재료로는 다른 재료에 비해 높은 내구성을 지니고 있는 철근 콘크리트가 있다. 철근콘크리트는 건설구조물의 대표적인 재료임에 따라 항시 외부에 노출되어 있으며, 외부의 영향을 받는다. 이에 따라 동결융해, 풍화, 염해 등의 다양한 열화현상을 겪으며 내구성이 저하된다. 특히 우리나라는 4계절이 뚜렷하고 겨울철의 기온이 영하로 떨어지는 횟수가 많기 때문에 콘크리트 구조물은 매년 동결융해 작용을 반복하여 받는다. 그동안 동결융해 작용에 대한 국내외의 다양한 연구가 이루어짐과 동시에 성능이 저하된 콘크리트 구조물의 내구성 회복에 대한 기술개발의 관심이 급증하고 있다[1-4].

먼저, DFRCC 보수모르타르는 연성이나 강도 측면에서 콘크리트보다 월등한 고기능성을 갖고 있어 콘크리트의 온도 및 건조수축 균열을 방지하고 휨 강성과 전단강도 등 강도를 개선함은 물론 염분이나 기타 유해한 화학성분의 침투를 억제하여 내구성을 증진시킬 목적으로 여러 가지 연구가 이루어져 왔다. 한편, 탄소섬유 보강공법은 탄소섬유를 일 방향으로 배열, 시트(천)화시켜 구조 내력이 부족한 콘크리트(기둥, 보, 슬래브 등) 표면에 에폭시 수지로 함침, 접착, 경화시키는 공정을 통해 콘크리트와 일체화시켜 구조 내력을 증강시키는 공법으로 기존의 철관 보강공법 등에 비하여 고강도, 고내구성, 등을 발현하는 뛰어난 최첨단 공법이다 [5-12].

따라서 본 연구에서는 보수보강이 철근콘크리트보의 내구성 증대 및 수명연장에 얼마나 영향을 미치는지를 비교 분석하기 위해 KS F 2456 급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법을 사용하여 수행하였다. 이를 위해 동결융해 반복 사이클과 DFRCC 보수모르타르 및 탄소섬유시트를 변수로 이용하여 내구성 및 강도를 비교분석하였다.

## II. 실험

### 2.1 실험개요

동결융해시험을 통해 DFRCC 보수모르타르 및 탄소섬유시트에 의한 보수보강 효과를 파악하기 위하여 동결융해 영향 기간(0, 100, 200 사이클), 보강 유무 및 보강재료를 주요 변수로 설정하였다. DFRCC 보수모르타르 보강은 상면을 제외한 세면에 U자형으로 두께 20mm의 DFRCC 보수모르타르를 흡손으로 시공하고 피막양생재를 도포하였다. 탄소섬유시트 보강은 실험체 표면 라운딩 처리 후 프라이머를 도포하고 탄소섬유시트를 부착한 후 레진 도포로 마무리하고 7일 양생 후 공명진동수 및 휨강도의 변화를 측정하여 기준값과 비교 후 보강여부에 따른 보강효과를 검토하였다.

동결융해시험은 KS F 2456 급속 동결융해 시험법에 규정된 A법인 수중 급속 동결 융해 시험방법을 따라 콘크리트 공시체의 중심온도가 동결 시  $-18^{\circ}\text{C}$ 와 용해 시  $4^{\circ}\text{C}$ 가 되도록 수중에서 동결융해의 반복 작용을 200 사이클까지 실시하였다.

### 2.2 사용재료

본 실험에서는 국내 D사의 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 혼화제는 사용하지 않았다. 콘크리트의 배합은 W/C비 50.3%, 굵은 골재의 최대치수 9mm로 하였으며, 28일간 표준양생을 실시한 후 KS F 2453에 의한 평균 압축강도는 22.1MPa이었다. 인장 주철근은 3-D10(SD300)을 사용하였다. 보수보강용 모르타르(HRM-400), 수용성 신구콘크리트 접착제(HRM-50)와 탄소섬유(SK-300)을 사용하여 기계작한 RC보의 3면을 보강하였다. [표 1-4]에 콘크리트 배합표, 보수보강용 모르타르, 수용성 신구콘크리트 접착제 및 탄소섬유의 재료특성을 각각 나타내었다.

표 1. 콘크리트 배합표

W/C (%)	S/A (%)	Unit weight of concrete (kg/m <sup>3</sup> )			
		W	C	S	G
50	58	201	400	590	1022

표 2. DFRCC(HRM-400) 재료 특성

Test item		Test results
Compressive strength	3 day	27.1 MPa
	7 day	39.0 MPa
	28 day	46.7 MPa
Flexural strength	3 day	6.2 MPa
	7 day	8.8 MPa
	28 day	9.5 MPa
Bond strength	Standard condition	1.7 MPa
	After thermo contrast	1.4 MPa
Length Variation	28 day	0.06 %
Water absorption coefficient		0.072 kg/m <sup>2</sup> ·h <sup>0.5</sup>
Carbonation resistance		1.1 mm
Amount of water percolation		6.4 g
Water vapor resistance		0.3 m
Chloride ion penetration resistance		833 Coulombs

표 3. 수용성 신구콘크리트 접착제(HRM-50) 재료 특성

Bond strength (MPa)			Solids content (%)	Specific gravity
3 day	7 day	28 day		
88	121	137	22	1.03

표 4. 탄소섬유(SK-300) 재료 특성

Carbon Fibers(SK-300)	
Design Tensile Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	35,500
Design Modulus of Elasticity (kg/cm <sup>2</sup> )	2.35 × 10 <sup>6</sup>

### 2.3 실험체의 제작

본 실험에 사용된 시험체는 [그림 1][그림 2]와 같이 길이 400mm, 높이 100mm, 폭 100mm 크기로 동결융해 시험기에 사용되는 몰드로 만든 각주형 공시체이다. 공시체이기는 하나 동결융해의 작용을 받는 철근콘크리트 보를 재현하기 위하여 압축철근과 인장철근을 배치하였다.

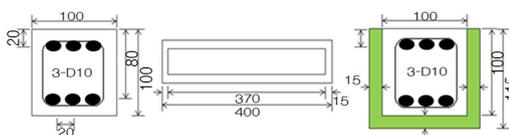


그림 1. DFRCC 보수모르타르 시험체 제원

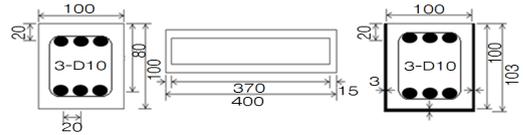


그림 2. 탄소섬유시트 시험체 제원

DFRCC 보수모르타르의 보강은 보의 윗면을 제외한 양측면과 하면의 3면을 U자형으로 보강하였다. 이는 실제 보의 상면에는 슬래브가 일체로 되어 있음을 감안한 것이다.

각각의 부재에 대하여 동일한 실험체를 2개씩 총 14개의 실험체를 제작하였다. [표 5]에 각 실험변수를 정리하여 표로 나타내었고, [그림 3-5]에 시험체 제작 과정, 동결융해 시험 및 휨강도 시험 과정을 나타내었다.

표 5. 실험체 분류표

Specimen	싸이클	DFRCC	Carbon Fibers
A	0	X	X
B	100	X	X
C	100	O	X
D	100	X	O
E	200	X	X
F	200	O	X
G	200	X	O

동결융해 작용을 받은 철근콘크리트의 보수보강 효과를 알아보기 위한 실험은 3단계로 나누어 진행 하였다.

1단계는 동일한 배합비를 이용하여 콘크리트를 만들고 고온증기양생기를 이용하여 양생시켜 철근콘크리트 보를 만들었다.

2단계에서는 동결융해 시험기를 이용하여 100, 200 싸이클에 해당하는 동결융해를 반복한 후 공명진동수를 찾아내고 동탄성계수 및 휨강도 값을 측정하여, 변화를 비교 분석 하였다.

3단계에서는 DFRCC 보수모르타르와 탄소섬유시트를 이용하여 보강한 뒤 각각의 공명진동수와 강도를 측정하여 동탄성계수 및 휨강도를 비교 분석 하였다.



그림 3. 시험체의 제작(DFRCC 및 탄소섬유보강)



그림 4. 동결융해 시험 전경



그림 5. 휨강도 시험 전경

### III. 실험결과 및 분석

#### 3.1 동결융해 작용에 따른 강도 변화

기준공시체(A, B, E시리즈) 그리고 DFRCC 보수모르타르(C, F시리즈)와 탄소섬유시트(D, G시리즈)를 이용하여 보수보강을 실시한 각각의 시험체의 강도 변화는 [표 6]과 같다. [그림 6]은 보수보강을 실시하지 않은 기준공시체의 동결융해작용에 따른 휨강도변화를 나타낸 것이다.

그림에서 동결융해 작용을 100 사이클 받은 시험체의 강도는 동결융해 작용을 받지 않은 기준 시험체에 비해 평균 4.3% 감소하였고, 200 사이클의 동결융해 작용을 받은 시험체는 평균 13.1% 감소하였다.

표 6. 보수보강에 따른 휨강도 변화

Specimen	Pu (KN)	Mu (KN·m)	평균 Mu	Mu/Mn	평균 Mu/Mn
A1	41,73	3,86	3,89	0,955	0,963
A2	42,38	3,92		0,970	
B1	40,21	3,72	3,73	0,921	0,922
B2	40,32	3,73		0,923	
C1	49,08	4,54	4,54	1,124	1,123
C2	48,97	4,53		1,121	
D1	56,54	5,23	5,23	1,295	1,295
D2	56,54	5,23		1,295	
E1	37,08	3,43	3,44	0,849	0,852
E2	37,30	3,45		0,854	
F1	44,76	4,14	4,15	1,025	1,028
F2	44,97	4,16		1,030	
G1	52,43	4,85	4,85	1,200	1,199
G2	52,32	4,84		1,198	

(\*Pu=최대하중, Mu=최대휨모멘트, Mn=공칭휨강도)

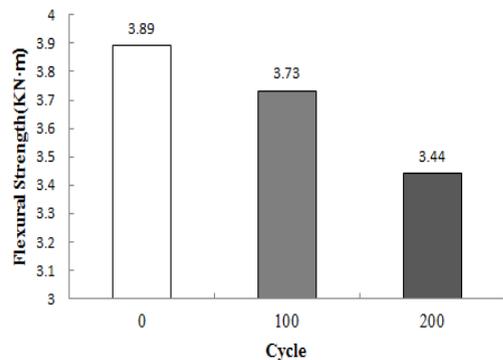


그림 6. 동결융해작용에 따른 휨강도 변화

### 3.2 보수보강에 따른 강도 변화

동결융해작용을 받지 않은 기준공시체에 비하여 동결융해작용이 반복됨에 따른 휨강도 변화를 [그림 7]에 나타내었다. 그림에서 동결융해작용으로 인해 저하된 기준공시체의 휨강도는 보수보강을 통해 강도의 재증진이 가능함을 알 수 있었다.

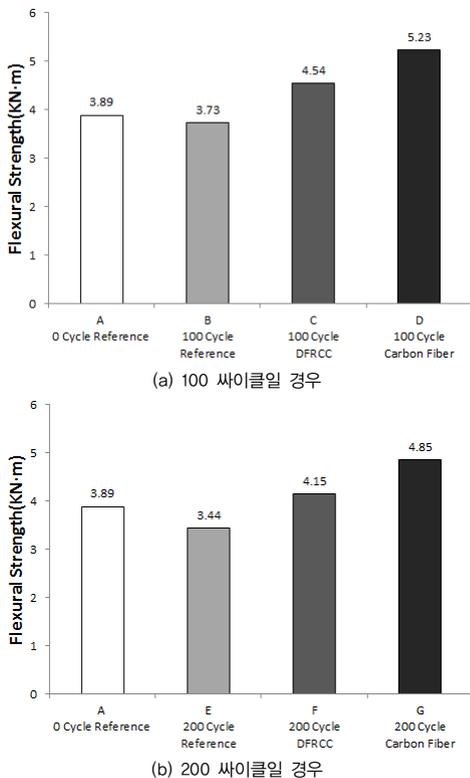


그림 7. 동결융해 후 보강 유무 및 종류에 따른 휨강도 변화

[그림 7(a)]와 같이 100 사이클의 동결융해작용을 받은 B 시험체의 휨강도는 동결융해작용을 받지 않은 A 시험체와 비교하였을 때 평균 4.3% 작게 측정되었으나, 각각 DFRCC 보수모르타르와 탄소섬유시트로 보강하였을 때에 강도 증진의 효과가 발생하는 것을 볼 수 있었다.

100 사이클의 동결융해작용을 받은 시험체 중 기준이 되는 B 시험체와 비교하였을 때, DFRCC 보수모르타르로 보수보강을 실시한 C 시험체는 평균 21.7%의 강도

증진을 보였으며, 탄소섬유시트로 보수보강을 실시한 D 시험체는 평균 40.2% 강도 증진을 확인할 수 있었다.

[그림 7(b)]와 같이 200 사이클의 동결융해작용을 받은 E 시험체의 강도는 동결융해 작용을 받지 않은 A 시험체와 비교하였을 때 평균 7.8% 감소하였으나, 200 사이클의 동결융해작용을 받은 시험체 중 기준이 되는 E 시험체와 비교하였을 때, DFRCC 보수모르타르로 보수보강을 실시한 F 시험체는 평균 20.6% 휨강도 증진을 보였으며, 탄소섬유시트로 보수보강을 실시한 G 시험체는 평균 41% 휨강도 증진을 확인할 수 있었다.

### 3.3 보수보강에 따른 공명진동수, 동탄성계수

각 부재별 시험체에 대한 실험결과는 [표 7]과 같다. 시험체별 동결융해 사이클에 해당하는 공명진동수가 상이하므로 각각의 시험체별 공명진동수를 측정하여 동탄성계수를 비교하였을 때, 100 사이클의 동결융해작용을 받았을 때 평균 0.3% 감소하였으며, 200 사이클의 작용을 받았을 때는 평균 2.3% 감소하였다. 이는 동결융해작용을 받은 시험체의 표면 내부에 균열, 표면 스케일링 등의 결함이 생겨 시험체 내부의 공극이 발생, 공명진동수가 낮게 측정된 것을 알 수 있다. [그림 8]과 같이 동결융해작용을 반복 실시한 시험체에 보수보강을 실시하였을 때, DFRCC 보수모르타르는 평균 0.3%, 탄소섬유시트는 0.4% 동탄성계수가 회복되는 것으로 나타났다.

표 7. 공명진동수 및 상대동탄성계수 측정결과

Specimen	Cycle	Resonance Frequency (Hz)	Relative Dynamic Young's Modulus (%)
A	0	19,792	1
	100	19,789	1
B	0	19,794	100
	100	19,765	99.7
	DFRCC	19,781	99.8
C	0	19,805	100
	100	19,770	99.6
	Carbon Fibers	19,795	99.9

E	0	19,790	1
	100	19,769	99.8
	200	19,568	97.8
F	0	19,810	100
	100	19,771	99.6
	200	19,572	97.6
	DFRCC	19,612	98.1
G	0	19,802	100
	100	19,768	99.7
	200	19,567	97.6
	Carbon Fibers	19,601	98.0

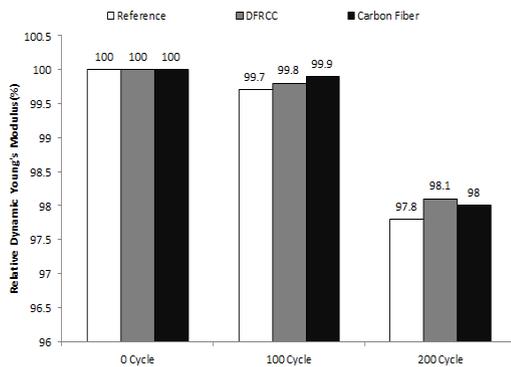


그림 8. 보수보강 전, 후 동탄성계수 비교

## V. 결론

본 연구는 일정기간의 동결융해작용을 받은 철근콘크리트 보에 DFRCC 보수모르타르, 탄소섬유시트를 이용해 보수보강을 실시하였을 때의 휨강도와 동탄성계수 회복에 대한 기초적인 자료를 제시하고자 실시하였다. 이를 위하여 100x100x400mm 각주형 공시체를 제작하여 동결융해작용의 정도, 보수보강재의 유무 및 종류에 따른 휨강도 및 동탄성계수를 알아보는 실험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 동결융해작용 및 보수보강을 하지 않은 기준보(A)에 비하여 보수보강을 실시하지 않은 보에 100 사이클(B), 200 사이클(E) 동결융해작용 후의 휨강도는 평균 4.1%, 11.6%로 감소하였으며, 동탄성계수

는 평균 0.2%, 2.2% 감소하였다.

2. 100, 200 사이클의 동결융해작용을 받은 철근콘크리트 보에 DFRCC 보수모르타르로 보수보강을 실시하였을 때 보(C, F)의 휨강도는 각각의 동결융해작용을 받고 보수보강을 실시하지 않은 보 (B, E)에 비해 평균 21.7%, 20.6%의 증진을 보였다. 동탄성계수는 보수보강을 실시하기 전에 비해 0.1%, 0.3%의 증진을 각각 보였다.
3. 100, 200 사이클의 동결융해작용을 받은 철근콘크리트 보에 탄소섬유시트로 보수보강을 실시하였을 때 보(D, G)의 휨강도는 각각의 동결융해작용을 받고 보수보강을 실시하지 않은 보(B, E)에 비해 평균 40.2%, 41.0%의 증진을 보였다. 동탄성계수는 보수보강을 실시하기 전에 비해 0.2%, 0.2%의 증진을 각각 보였다.
4. DFRCC 보수모르타르와 탄소섬유시트의 보수보강 성능을 비교하였을 때, 100 사이클의 동결융해작용을 받은 시험체(C, D)에서 휨강도는 기준 공시체에 비해 각각 21.7%, 40.2%의 증진을 보였으며, 동탄성계수는 각각 0.1%, 0.2%의 증진을 보였다. 또한, 200 사이클의 동결융해작용을 받은 시험체(F, G)에서 휨강도는 기준 공시체에 비해 각각 20.6%, 41.0%의 증진을 보였으며, 동탄성계수는 각각 0.3%, 0.2% 증진을 보였다. 이러한 결과로 휨강도는 탄소섬유시트가 DFRCC 보수모르타르보다 약 30~85% 가량의 증진 효과를 나타내었다.
5. 동탄성계수를 구할 때, 공명진동수 측정기를 이용하여 공명진동수를 측정하게 되는데 이 값에 차이가 미미한 것은 전체 시험체 단면적에서 철근이 차지하는 비율이 실제 구조물보다 높아 간섭작용이 발생한 것으로 추정되며 이에 대해서는 추가적인 실험과 연구가 필요한 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

- [1] 송준호, 김경수, 김재욱, 배주성, “동결융해를 받은 섬유시트 보강 콘크리트 휨부재의 보강 효과

에 관한 연구,” 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.525-528, 1999.

[2] 고경택, “동결융해에 대한 설계 및 대책 방안,” 콘크리트학회지, 제13권, 제6호, pp.44-51, 2001.

[3] 장용현, 윤현도, 서수연, 최기봉, 김윤수, 김신우, “균열발생으로 손상을 입은 철근콘크리트 보의 동결융해 사이클에 따른 휨 거동 특성,” 한국콘크리트학회 추계 학술발표회, 제20권, 제2호, pp.277-280, 2008.

[4] 김신우, 최기봉, 윤현도, “균열손상 후 동결융해를 경험한 철근콘크리트 보의 휨거동,” 콘크리트학회논문집, pp.399-407, 2010.

[5] 박정원, 박상렬, 민창식, “탄소섬유시트를 사용한 철근콘크리트 구조물의 휨 보강에 관한 실험적 연구,” 한국콘크리트학회 2000년도 봄 학술발표회 논문집, pp.781-789, 2000.

[6] 윤현도, 박완신, 양일승, 한병찬, H.Fukuyama, “고인성 시멘트 복합체의 최신기술 : DFRCC의 구조적 성능 적용,” 콘크리트학회지, 제17권, 제1호, pp.36-43, 2005.

[7] 이재연, 윤현도, 전에스더, 송동엽, “고성능 시멘트 복합체(HPFRCC)의 특성과 적용 사례,” 시설안전, 2005겨울호2, pp.96-113, 2005.

[8] 박중섭, 정우태, 유영준, 박영환, “탄소섬유시트에 의해 휨보강된 RC보의 휨강도 추정,” 콘크리트학회논문집, pp.213-220, 2005.

[9] 한병찬, 김재환, 임승찬, 권영진, Naoharu Mori, “균열제어형 DFRCC를 사용한 RC 구조물 보수 공법,” 콘크리트학회지, 제18권, 제1호, pp.56-61, 2006.

[10] 김정희, 김재환, 박선규, 권영진, “고인성 내화·보수 모르타르를 활용한 RC구조물 보수공법의 성능평가에 관한 실험적 연구,” 구조물진단학회지, 제13권, 제6호, pp.88-96, 2009.

[11] 김정희, 임승찬, 김재환, 권영진, “고인성 내화 보수모르타르를 활용한 RC구조물 보수공법의 내구성 및 내화력에 관한 실험적연구,” 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 제16권, 제2호, pp.75-86,

2012.

[12] 어석홍, 손기민, “고인성 섬유 시멘트 복합재료를 사용한 RC보의 진단보강효과,” 한국산학기술학회논문지, 제15권, 제9호, pp.5844-5853, 2014.

저 자 소 개

이 창 현(Chang-Hyun Lee)

정회원



- 2013년 2월 : 창원대학교 토목공학과(공학사)
- 2015년 3월 : 창원대학교 토목공학과(공학석사)
- 2015년 1월 ~ 현재 : 한국인프라관리(주) 대리

<관심분야> : 콘크리트 구조, 콘크리트 재료

어 석 홍(Seok-Hong Eo)

정회원



- 1987년 2월 : 한국과학기술원 토목공학과(공학석사)
- 1991년 8월 : 한국과학기술원 토목공학과(공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 토목환경화공융합공학부 교수

<관심분야> : 콘크리트 구조, 콘크리트 재료