

분말형 수축저감제와 플라이애쉬가 혼입된 콘크리트의 건조수축 거동

민경환¹, 이동규^{1*}, 최홍식²
¹충청대학교 공학기술연구원, ²충청대학교 토목과

Drying Shrinkage Behaviors of Concrete with Powder Type Shrinkage Reducing Agent and Fly Ash

Kyung-Hwan Min¹, Dong-Gyu Lee^{1*}, Yong-Wook Jeong²

¹Research Institute for Engineering & Technology, Chungcheong University

²Department of Civil Engineering, Chungcheong University

요약 본 연구에서는 콘크리트의 건조수축을 저감하기 위한 연구의 일환으로 분말형 수축저감제와 플라이애쉬를 활용한 콘크리트의 건조수축 특성에 관한 일련의 실험을 수행하였다. 수축저감제와 플라이애쉬로 각각 2% 및 20%씩 시멘트를 대체한 배합에 대해, 강도 실험과 수축실험을 실시하였다. 역학적 특성은 목표 강도를 획득하는 것으로 확인되었고, 비구속 수축 실험 결과 수축저감제가 약 200 μe 의 건조수축 감소 효과를 발생시키는 것으로 나타났다. 링테스트에서는 수축저감제를 적용한 배합은 인장크리프 효과로 인해 균열 발생시기가 약 2배 정도 증가하였다.

Abstract In this study, series of tests were performed for drying shrinkage characteristics of concrete with powder type shrinkage reducing agent (SRA) and fly ash as a part of research to reduce drying shrinkage of concrete. Firstly, for the mechanical properties, a target strength was acquired securely. In the unrestraint shrinkage tests, the SRA decreased the drying shrinkage about 200 μe . Lastly, in the ring tests, due to the tensile creep effect, the concrete with SRA showed the cracking times as much again as the concrete with ordinary Portland cement only did.

Key Words : Concrete, Drying shrinkage, Fly ash, Ring test, Shrinkage-reducing agent

1. 서론

콘크리트 구조물은 각종 외력에 대해 강도를 확보해야 하고, 사용 연한 동안 일정한 내구성능이 확보되어야 한다. 콘크리트 구조물의 내구성능은 콘크리트 자체보다는 보강재로 사용하는 강재(steel)의 부식에 의한 영향이 훨씬 크다고 할 수 있다. 반면 최근 구조물이 대형화 되면서 내구성능의 저하에 따른 보수 보강 역시 많은 시간과 비용이 소모되므로, 설계 및 시공 시에 소요의 성능을 확보하여야 한다. 기존에는 균열의 방지를 위해 구조적

인 방법론이 주로 사용되었지만, 콘크리트 혼화재료 분야의 급속한 기술발전으로 인해 재료적인 방법론이 제시되어, 보다 경제적인 설계와 시공이 가능하게 되었다 [1,2,3].

콘크리트에서 건조수축은 일정한 온도와 구속받지 않는 상태의 불포화된 공기 속의 콘크리트로부터 시간에 따른 부피의 변화로 정의할 수 있다. 콘크리트 구조물의 시공 후에 수개월간에 걸쳐 장기적으로 발생하는 건조수축은 구조물의 역학적 성능 및 내구성에 큰 영향을 미친다. 또한 이에 따라 사용 연한이 감소하고 많은 유지비용

본 논문은 전력산업융합원천기술개발(과제번호 : 20131010501790) 연구비 지원에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Dong-Gyu Lee(Chungcheong University)

Tel: +82-43-230-2692 email: scarlet@ok.ac.kr

Received April 7, 2015

Revised May 6, 2015

Accepted May 7, 2015

Published May 31, 2015

을 초래하게 된다. 본 연구에서는 이러한 건조수축을 줄이는 방안으로 분말형 수축저감제와 플라이애쉬를 활용하여 시멘트의 일부를 대체하고, 이에 따른 수축 특성을 정량적으로 평가하였다.

2. 실험 개요 및 방법

2.1 재료 특성 및 배합

본 연구에서는 예비 실험의 실험 결과를 토대로 수축 거동 평가를 위한 변수와 배합을 선정하였고, 이를 통해 비구속 수축 및 구속 수축 실험을 수행하였다. Table 1은 실험 변수이고, Table 2는 이에 따른 본 실험의 배합 표이다. 수축저감제는 분말형을 적용하고, 고유동화제는 PC계를 사용하였다. 현장의 적용성을 위해 굵은골재는 최대 치수 25mm의 부순 자갈을 일괄적으로 적용하고, 잔골재율은 48%로 고정하였다.

Table 1. Test variables

Variable	Details	
	Admixture	Shrinkage reducing agent
Super-plasticizer		Polycarboxylic acid
Mix proportion	W/B	48, 50, and 52%
	Fly ash	0, 20%

예비 실험 결과, 50% 전후의 물/시멘트비가 일반강도 영역 대에 적합하다고 판단하여, 본 실험에서는 물/시멘트 비를 48~52%로 결정하였다. 아울러 1종 보통 포틀랜드시멘트의 일부를 플라이애쉬(Fly ash, F.A.)로 대체

하는 배합에 대해서도 평가하고자 하였다. 분말형 수축저감제는 전체 결합제 중량에서 2%를 대체한 배합과 그렇지 않은 배합의 경우로 구분하였고, 플라이애쉬의 혼입율은 전체 결합제의 중량에서 20%를 대체한 배합에 대해서 평가하였다. 또한 분말형의 수축저감제를 사용하였으므로, 시멘트와 플라이애쉬, 수축저감제 모두를 결합제량으로 산정하였고, 물/결합제비(Water to binder ratio, W/B)로 구분하였다.

각 배합의 표기에서 초기 숫자는 물/결합제비를 의미하며, 두 번째 기호는 1종 보통포틀랜드 시멘트만 적용한 배합(OPC)과 플라이애쉬를 20% 대체한 배합(FA20)을 의미하며, 마지막 기호는 2%의 수축저감제의 투입 유무를 의미한다. 플라이애쉬를 사용할 경우, 굳지 않은 콘크리트의 유동성이 다소 증가되기 때문에, 실험에 적용된 PC계의 고성능 감수제는 배합 직후 측정된 슬럼프가 100mm 전후에서 나오도록 하였으며, OPC 배합의 경우는 1~1.2%, FA20배합의 경우 0.8~1.0%를 투입하였다.

2.2 비구속 건조수축 실험

콘크리트의 기본 수축량을 평가하기 위한 비구속 수축 실험은 Fig. 1과 같이, 100×100×400mm의 각주형 시험체를 제작하였고, 부재의 중앙에 변형률계이지와 온도 센서를 매입하여 측정하였다[4,5]. 실험은 온도 20±1°C, 습도 50±5%인 항온항습실에서 계속하였다.

2.3 구속 건조수축 실험(Ring test)

구속수축 실험은 그림 Fig. 2와 같이, AASHTO에 따라 수행하였다[6]. 실험 방법은 내부와 외부 강재 링 사

Table 2. Mix proportions of concrete

Mixture	G _{max} (mm)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)										
				Water	Cement	Fly ash	Sand	Aggregate	SRA					
52-OPC-S0	25	52	48	168	323.0	0	803	942	0					
52-OPC-S2					316.6				6.5					
52-FA20-S0					258.5				0					
52-FA20-S2					252.0	64.6			0					
50-OPC-S0					336.0	0			799	937	0			
50-OPC-S2					329.3						6.7			
50-FA20-S0		268.8			0									
50-FA20-S2		262.1			67.2	6.7								
48-OPC-S0		48			48	48	168	350.0			0	793	931	0
48-OPC-S2								343.0						7.0
48-FA20-S0								280.0	0					
48-FA20-S2								273.0	70.0	7.0				

이에 콘크리트를 타설 하고 타설 이후 24시간 동안 양생 한다. 양생 후에는 외부 강제 링을 제거하고 콘크리트 원주 표면에 알루미늄 테이프를 부착하여 외부와의 수분이동을 차단한다. 구속 변형을 측정을 위해 4개의 표면계이저를 내부 강재의 중앙부에 원주 방향으로 설치하고 데이터 로거를 사용하여 변형률을 측정한다.

또한, 콘크리트의 수화열에 의한 내부 강재의 온도변형을 보정하기 위하여 thermocouple을 설치하고 온도변화를 측정한다. 실험은 온도 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $50 \pm 5\%$ 인 항온습실에서 측정하였으며, 하부 목재판과 콘크리트의 마찰에 의한 구속응력 발생을 방지하기 위하여 테프론시트를 적용하였다.

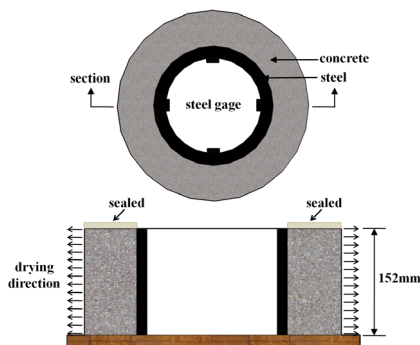


Fig. 2. Ring test

1종 보통포틀랜드시멘트만 사용한 배합(OPC 시리즈)은 모두 7일 재령에서 목표 강도(28MPa)를 상회하였고, 플라이애쉬를 20% 혼입한 배합의 경우도 28일 재령에서는 모두 목표 강도를 상회하여, 안정적으로 강도를 획득하는 것으로 판단된다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 역학적 특성

분말형 수축저감제와 플라이애쉬를 혼입한 배합의 재령별 역학적 특성 평가 결과는 Table 3과 같다.

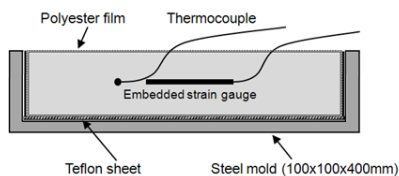


Fig. 1. Unrestraint shrinkage test

3.2 비구속 건조수축 특성

분말형 수축저감제와 플라이애쉬를 혼입한 배합의 약 80일 재령까지의 각주형 시험체의 비구속 수축특성은 Figs. 3~5와 같다. 초기의 약 3주는 변형률 게이지의 값을 매일 측정하였고, 이후에는 1주일 간격으로 측정하였다. 약 80일 재령에서 보통포틀랜드시멘트만 사용한 배합(OPC-S0 시리즈)의 건조수축량은 $600 \sim 700 \mu\text{e}$ 으로 나타난 반면, 수축저감제를 사용한 배합(OPC-S2 시리즈)의 건조수축량은 $500 \mu\text{e}$ 이하로 측정되었다. 또한 1종 보통포틀랜드시멘트의 20%를 플라이애쉬로 대체한 배합(FA20 시리즈)에서도 수축저감제를 적용한 경우, $500 \mu\text{e}$ 이하의 건조수축량을 보이는 것으로 나타났다. 단위수량

Table 3. Strength properties of concrete

Mixture	Compressive strength			Splitting tensile strength			Flexural tensile strength		
	3 days	7 days	28 days	3 days	7 days	28 days	3 days	7 days	28 days
52-OPC-S0	17.92	32.48	42.75	1.89	2.70	2.91	3.75	4.78	6.73
52-OPC-S2	20.54	35.75	41.74	1.93	2.68	2.94	3.20	5.10	7.13
52-FA20-S0	23.69	38.50	44.84	2.15	2.95	3.22	4.41	5.38	7.56
52-FA20-S2	24.43	34.83	44.13	2.42	2.47	2.64	4.60	5.06	7.23
50-OPC-S0	23.58	39.14	43.31	2.12	2.83	2.84	4.07	4.79	7.35
50-OPC-S2	26.60	37.59	41.09	2.34	2.94	2.98	4.01	5.39	7.11
50-FA20-S0	13.97	23.89	34.07	1.42	2.05	2.48	2.69	5.41	5.63
50-FA20-S2	17.02	27.52	39.56	1.62	2.39	2.60	3.15	5.45	5.84
48-OPC-S0	12.20	30.11	41.90	1.88	2.31	2.73	3.45	6.00	6.32
48-OPC-S2	14.72	24.36	35.76	1.46	2.38	2.45	3.62	4.98	6.48
48-FA20-S0	17.18	27.44	38.17	1.60	2.37	2.62	3.37	5.76	6.01
48-FA20-S2	18.25	28.75	39.66	1.75	2.54	2.81	3.81	5.54	6.03

이 같을 때, 플라이애쉬를 쓰는 경우 건조수축이 큰 차이를 보이지 않은 것으로 보고되고 있다[7].

반면 본 실험에서는 굳지 않은 콘크리트의 물성의 일관성을 위해서, 플라이애쉬를 쓴 경우 고성능 감수제의 양이 감소하였다. 이에 따라 측정 재령 영역에서는 건조수축량이 OPC만 쓰는 경우보다 다소 감소되는 것으로 판단되며, 향후 보다 긴 재령에서의 건조수축 거동에 대한 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

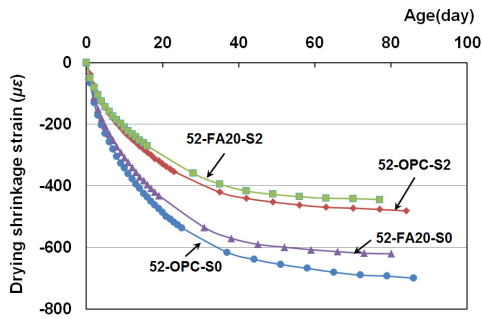


Fig. 3. Drying shrinkage of 52 series

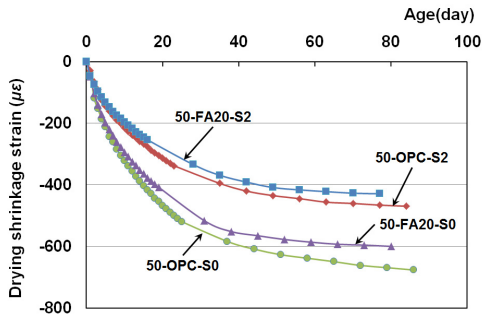


Fig. 4. Drying shrinkage of 50 series

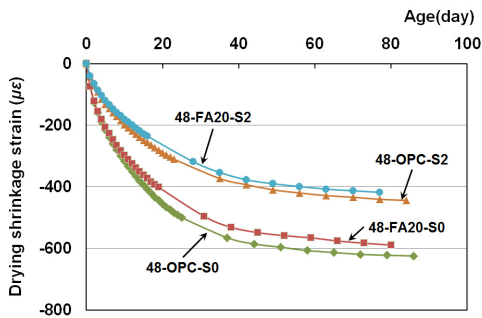
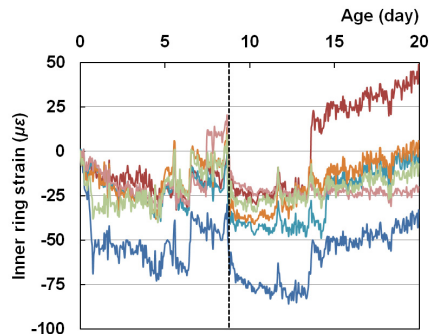


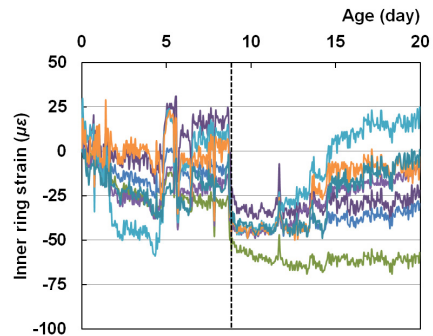
Fig. 5. Drying shrinkage of 48 series

3.3 Ring test

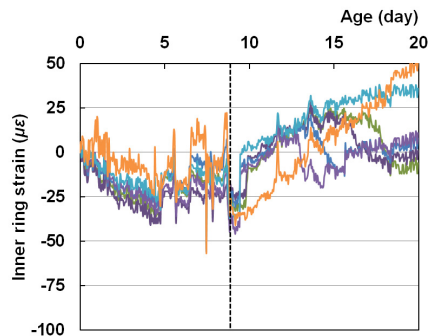
분말형 수축저감제와 플라이애쉬를 혼입한 배합의 구속수축 특성을 평가하기 위해 ASTM C 1581에 따라 링 테스트를 실시하였고, 실험 결과는 Figs. 6~8과 같다. 또한 각 그래프에서 중앙 부근의 세로의 점선은 균열이 발생한 시기를 도시한 것이고, 각 배합별 균열 발생 시기는 Table 4와 같다. 구속수축 실험에서는 노출된 콘크리트에서 발생하는 수축으로 인해 원주방향의 수축변형률



(a) 52-OPC-S0



(b) 50-OPC-S0

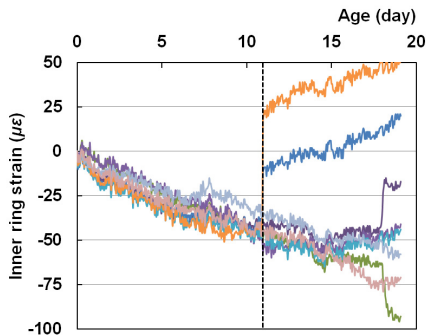


(c) 48-OPC-S0

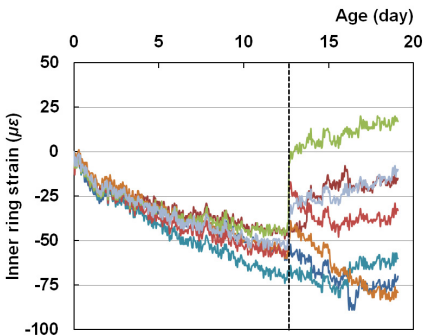
Fig. 6. Ring test results of OPC-S0 series

이 발생하고, 이 변형률이 인장 균열 변형률보다 커질 때 발생하는데, 수축량이 클수록 초기에 균열이 발생한다.

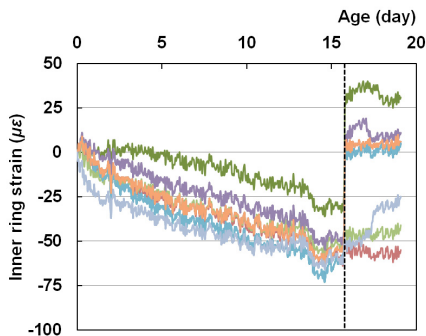
1종 보통 포틀랜드 시멘트만 사용한 배합(OPC-S0 시리즈)은 대체로 8.6~8.8일 사이에서 균열이 발생하였다. 반면 수축저감제를 적용한 배합(OPC-S2 시리즈)의 경우, 물/결합재비에 따라 균열 발생시기가 11일에서 15.7일까지 다소 넓게 분포하였는데, 이는 작아진 수축량으로 인해서 콘크리트의 인장크리프 효과가 더 발생하였기 때문인 것으로 판단된다[8].



(a) 52-OPC-S2



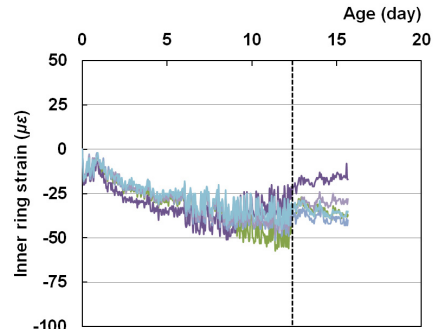
(b) 50-OPC-S2



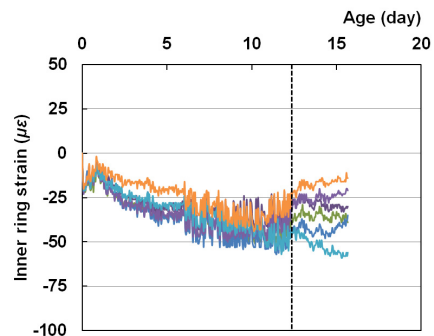
(c) 48-OPC-S0

Fig. 7. Ring test results of OPC-S2 series

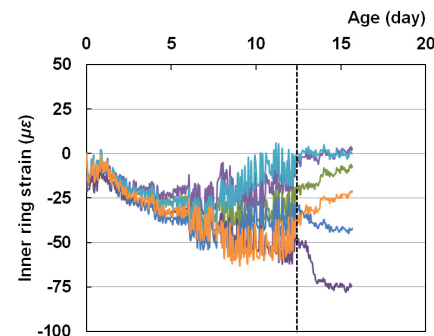
반면 플라이애쉬를 적용한 배합(FA20-S0 시리즈)의 경우, 약 12일에서 균열이 발생한 것으로 나타났다.



(a) 52-FA20-S0



(b) 50-FA20-S0



(c) 48-FA20-S0

Fig. 8. Ring test results of FA20-S0 series

Table 4. Cracking time of the ring test

Mixture	Cracking time (hr(day))
52-OPC-S0	208 (8.67)
50-OPC-S0	207 (8.63)
48-OPC-S0	212 (8.83)
52-OPC-S2	265 (11.04)
50-OPC-S2	303 (12.63)
48-OPC-S2	376 (15.67)
52-FA20-S0	295 (12.29)
50-FA20-S0	292 (12.17)
48-FA20-S0	295 (12.29)

4. 결론

본 연구에서는 분말형 수축저감제와 플라이애쉬를 활용한 콘크리트의 건조수축 특성에 관한 일련의 실험을 수행하였고, 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 시멘트를 분말형 수축저감제와 플라이애쉬로 각각 2%와 20%씩 치환하여 역학적 특성을 평가한 결과, 목표 강도를 모두 확보하였다.
- 2) 약 80일 재령에서 1종 보통포틀랜드시멘트만 사용한 배합의 건조수축량은 600~700 μe 으로 나타났으나, 수축저감제를 사용한 배합에서는 건조수축량이 500 μe 이하로 측정되었고, 플라이애쉬에 의해서도 측정 재령 내에서는 건조수축량이 다소 감소되는 것으로 나타났다.
- 3) 링테스트에서는 1종 시멘트만 사용한 경우 8.6~8.8일 사이에 균열이 발생하였다. 수축저감제를 적용한 배합은 인장크리프 효과로 인해 균열 발생시기가 11~15.7일까지 분포하였고, 플라이애쉬를 적용한 배합의 경우, 약 12일에서 균열이 발생하였다.

References

[1] H.-K. Lee, K.-M. Lee, and W. Kim, "Prediction Model for Autogenous Shrinkage of High Strength Fly Ash Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.15, No.1, 2003, pp.133-142

[2] H.-C. Jung, K.-H. Min, J.-M. Yang, and Y.-S. Yoon, "Shrinkage Characteristics of 50 MPa High Strength

Concrete with Compositions of Cementitious Materials," *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.13, No.3, pp.93-100, 2009.

[3] N. Bouzouzaa and V.M. Malhotra, "Performance of Lab-Produced HVFA-Blended Cements in Concrete," *Concrete International*, Vol.23, No.4, 2001, pp.31-35

[4] JCI Test Method for Autogenous Shrinkage and Autogenous Expansion of Cement Paste, Mortar and Concrete, Report by Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete of Japan Concrete Institute, 1996, pp.195-198

[5] E. Tazawa, S. Miyazawa, and T. Kasai, "Chemical Shrinkage and Autogenous Shrinkage of Cement Paste," *Cement & Concrete Research*, Vol.25, No.2, 1995, pp.288-292
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00010-0](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(95)00010-0)

[6] AASHTO Designation PP34-98, Standard Practice for Estimating the Crack Tendency of Concrete, AASHTO, 2001, pp.179 -182

[7] K.-H. Min, H.-C. Jung, J.-M. Yang, Y.-S. Yoon, "Shrinkage Characteristics of High-Strength Concrete for Large Underground Space Structure," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.25, No.2, pp.108-113, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2009.09.007>

[8] D.-Y. Yoo, J.-J. Park, S.-W. Kim, and Y.-S. Yoon, "Characteristics of Early-Age Restrained Shrinkage and Tensile Creep of Ultra-High Performance Cementitious Composites (UHPCC)," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.23, No. 5, pp. 581-590, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2011.23.5.581>

민 경 환(Kyung-Hwan Min)

[정회원]



- 2007년 2월 : 고려대학교 일반대학원 구조공학 (공학석사)
- 2012년 8월 : 고려대학교 일반대학원 구조공학 (공학박사)
- 2009년 3월 ~ 2013년 6월 : 고려대학교부설 공학기술연구소
- 2013년 7월 ~ 현재 : 충청대학교 공학기술연구원, 선임연구원

<관심분야>

콘크리트, 구조공학

이 동 규(Dong-Gyu Lee)

[정회원]



- 2009년 2월 : 청주대학교 건축공학과 (공학석사)
- 2012년 2월 : 청주대학교 건축공학과 (공학박사)
- 2010년 2월 ~ 2014년 8월 : 동남기업 중앙연구소, 선임연구원
- 2014년 9월 ~ 현재 : 충청대학교 공학기술연구원, 선임연구원

<관심분야>
콘크리트, 건설재료

최 흥 식(Hong-Sik Choi)

[정회원]



- 1983년 2월 : 연세대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1989년 8월 : 연세대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1990년 3월 ~ 현재 : 충청대학교 토목과 교수

<관심분야>
토목구조, 구조공학