

미생물을 활용한 자기치유 콘크리트 개발 연구현황

Current Research Topics in Development of Self-healing Concrete Using Microorganisms

이동규 Dong Gyu, Lee
 동남기업(주) 중앙연구소
 책임연구원

한형섭 Hyung Sub, Han
 동남기업(주) 중앙연구소
 연구소장

정용욱 Yong Wook, Jeong
 계명대학교 첨단건설재료시험센터
 교수

1. 머리말

콘크리트는 시공성, 강도, 내구성 및 유지관리가 다른 재료에 비해 우수할 뿐만 아니라 경제성도 확보할 수 있어 건설 재료 중 가장 보편적으로 사용됐으며 앞으로도 지속해서 활용될 전망이다. 그러나 콘크리트는 다양한 요인에 의한 열화 현상이 발생할 가능성이 있어 내구성 확보를 위한 노력이 요구된다. 이 중 콘크리트의 균열은 콘크리트의 미관을 손상할 뿐만 아니라 콘크리트의 내구성에도 큰 악영향을 미쳐 이를 미리 방지하는 것이 매우 중요하다.

콘크리트의 균열은 여러 요인에 의해 발생하지만 재료적인 차원에서의 가장 큰 원인으로 콘크리트의 수분 이동에 의한 콘크리트의 건조수축과 콘크리트의 수화반응에 기인하는 자기수축을 꼽을 수 있다. 콘크리트의 건조수축은 경화된 콘크리트의 표면이 건조하는 과정에서 내부의 수분이 외부로 이동하여 지속적인 건조로 인해 발생하는 현상으로 일반 강도의 콘크리트에서 발생하는 균열의 가장 빈번한 원인이다¹⁾. 자기수축은 고강도 콘크리트의 영역에서 주로 나타나는 현상으로 초기재령의 수화발현이 커 내부 배합수의 급격한 소모 때문에 발생하는 자기건조에 의한 것이다²⁾. 자기건조에 의한 자기수축은 수중양생이나 봉합양생을 실시하는 경우에도 지속해서 발생하여 콘크리트의 체적에 영향을 주며, 때에 따라서는 이러한 자기수축만으로도 균열이 발생하게 된다.

일반적으로 콘크리트는 철근과 함께 사용하여 철근 콘크리트를 이루는데 이와 같은 균열이 발생하면 균열을 통한 염해 및 수분 침투 등 각종 유해물질의 유입되며 콘크리트 내부 유용성분의 용출로 철근 부식 및 콘크리트 중성화 촉진 등 콘크리트의 내구성이 급격하게 저하되는 결과를 초래하게 된다.

콘크리트의 건조 및 자기수축에 의한 균열을 제어하기 위한 연구는 꾸준히 진행됐는데 대표적인 것이 수축저감제 등의 화학 혼화제에 의한 수축량 저감방안과 팽창재 사용에 따른 초기 팽창반응에 의한 수축 보상이다. 그 외에도 광물성 혼화제의 치환사용에 따른 수화발열 조절 및 양생공법에 대하여 연구가 진행되었지만, 콘크리트 산업의 특성상 효율적인 대안이 되기는 어려운 실정이다. 또한, 팽창재의 경우 초기팽창 조절이 쉽지 않고, 콘크리트의 유동성에 영향을 주기도 한다. 여러 방안에 비해 비교적 사용이 간편하고 콘크리트의 물성에 별다른 영향을 미치지 않는 수축저감용 화학 혼화제에 대한 요구에 따라 관련 연구개발이 활발하게 진행되고 있으며, 이미 실제 적용되는 사례가 증가하고 있다. 따라서 본 기사에서는 건조 및 자기수축의 발생 메커니즘에 기인하여 발생하는 수축을 미리 방지할 수 있는 화학 혼화제를 소개하고자 한다.

2. 화학 혼화제에 의한 콘크리트의 수축저감

콘크리트의 수축저감에 대한 연구는 콘크리트의 내구성과 관련하여 오랫동안 다루어진 분야이며 대부분 팽창재와 광물성 혼화제 등의 분체재료에 관한 내용이 주를 이루고 있었으나, 최근 들어 화학기술의 발전에 따른 혼화제의 영향성이 커지면서 수축저감제를 적용하여 콘크리트의 균열을 제어하려는 연구가 증가하는 추세에 있다.

현재의 건조수축저감제는 1987년 Sugiyama, H³⁾에 의해 글리콜 에테르가 콘크리트의 모세관 장력을 줄여 건조수축 저감에 기여한다는 연구결과가 소개되었으며, 알코올계⁴⁾ 등의 콘크리트 내부의 모세관 장력을 줄이는 방안에 대한 연구가 시도되어 현재까지 최적의 물질을 찾기 위한 연구가 진행되고 있다. 자기수축 저감에 관한 연구는 1993년 Tazawa E.⁵⁾에 의해 발표된 논문을 시작으로 고강도 콘크리트의 자기수축과 이의 중요성이 제기되기 시작하였다. 자기수축 저감에 대한 방안으로 대부분 현재 건조수축저감제 개념의 글리콜 에테르계의 수축저감제를 활용하거나 이를 팽창재와 병행하는 연구가 진행됐으나, 자기수축저감제에 대한 연구는 미흡한 상태이다.

3. 건조수축저감제에 의한 콘크리트 수축저어

3.1 건조수축저감제의 원리

건조수축은 콘크리트의 표면건조에 의해 발생하는데, <그림 1>의 잉크병 효과⁶⁾로 인해 내부 수분이 지속적으로 이동하여 발생하게 된다. 즉, 콘크리트 표면부의 수분이 건조되면서 모세관 장력이 발생하여 콘크리트 내의 표면장력에 따라 내부 수분이 표면으로 이동하게 되는데, 이로 인해 콘크리트 내부 수분의 절대용적이 감소하게 된다.

건조수축저감제는 모세관 장력을 줄여 내부의 수분이 동을 방지하고 부피 변화를 줄이기 위해 사용하는 것으로서 표면장력이 적은 물질을 활용하는데 <그림 2>와 같이 다양한 건조수축저감 물질을 배합수에 혼합 시 배합수 자체의 표면장력을 줄여주는 효과를 나타낸다. 배합수의 표면장력이 감소함에 따라 콘크리트 모세관 내에 발생하는 장력이 줄어 콘크리트 표면건조 시에도 내부의 수분 이동과 부피 수축이 방지된다.

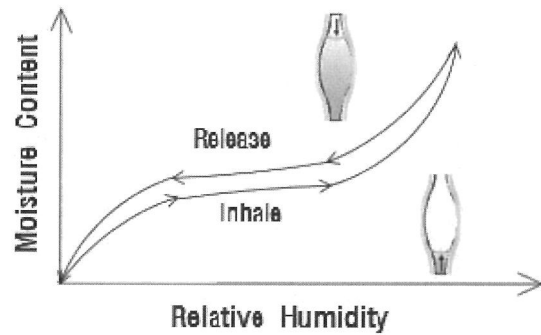


그림 1. 잉크병 효과에 의한 수분이동⁶⁾

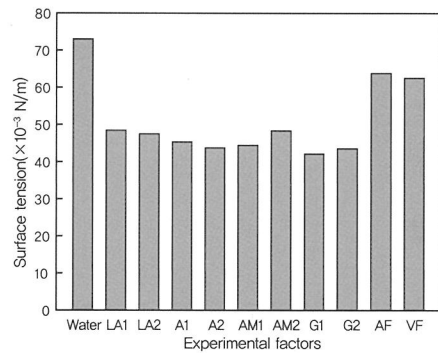


그림 2. 수축저감물질이 혼입된 배합수의 표면장력

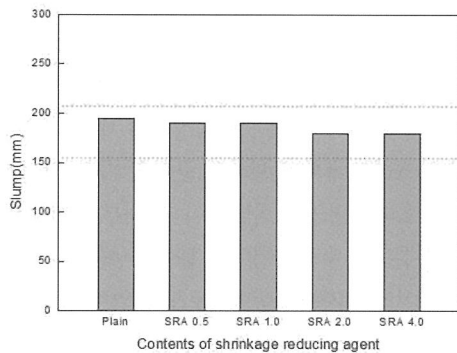


그림 3. 건조수축저감제 사용량에 따른 슬럼프

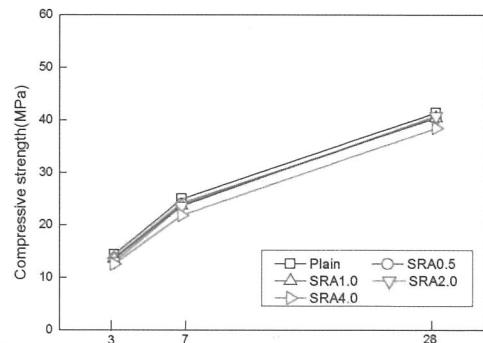


그림 4. 건조수축저감제 사용량에 따른 압축강도

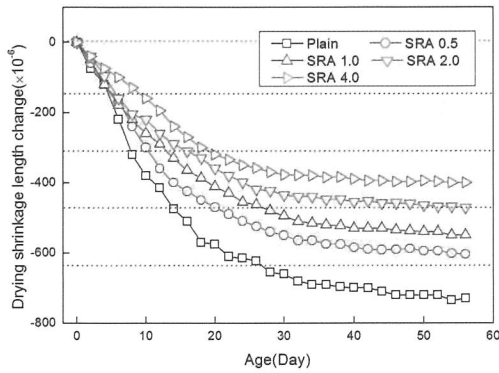


그림 5. 건조수축저감제 사용량에 따른 수축량

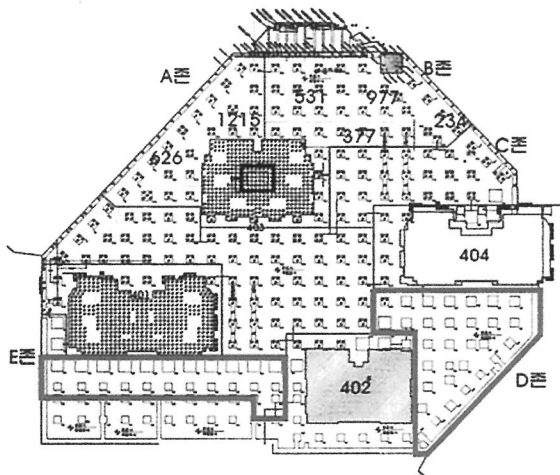


그림 6. 건조수축저감제 적용 구간

3.2 건조수축저감제의 성능

건조수축저감제(SRA)는 혼입량에 따라 콘크리트의 여러 특성에 영향을 준다. 기존 연구에 따르면 건조수축에 대한 저감과 동시에 슬럼프, 응결 및 강도 등에 영향을 주는 것으로 나타났다. 수축저감제를 단위수량에 치환하여 수행된 연구 결과¹⁾를 요약하였다.

SRA의 혼입량에 따른 슬럼프 변화를 살펴보면, 소량 사용 시 Plain 배합과 유사한 결과를 나타냈으나, 사용량이 많아지면 슬럼프가 소폭 저하되는 것으로 확인되었다.

콘크리트 압축강도의 경우 건조수축저감제의 사용량이 증가할수록 소폭의 강도 저하가 발생하였고, SRA 혼입률 2%까지는 강도 저하가 거의 없는 것으로 확인되었다. 반면 사용량 4%의 경우 약간의 강도 저하 현상을 나타내었으나, 초기재령에서 87%의 강도발현을

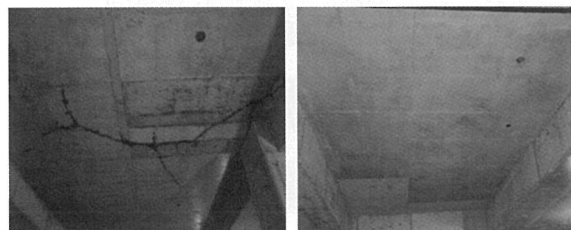
을 나타냈으며, 장기재령에서는 90% 이상의 강도를 확보할 수 있는 것으로 확인되었다. 따라서 적절히 사용할 경우 강도 저하에 대한 우려 없이 사용할 수 있는 것으로 판단된다.

〈그림 5〉는 건조수축저감제의 사용량 변화가 콘크리트의 건조수축특성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 건조수축저감제의 사용량이 증가할수록 콘크리트의 수축량은 감소하였다. 건조수축저감제의 사용량에 따라 일반 배합보다 20~40% 내외의 수축저감 효과를 확인할 수 있었으며, 사용량이 많을수록 수축저감 효과는 증가하는 것으로 확인되었다.

3.3 건조수축저감제의 현장 적용

최근 공기단축을 위한 하프 슬래브, 영구 거푸집 및 프리캐스트 부재의 시공이 증가하고 있다. 이러한 얇은 단면의 부재는 건조수축에 의한 균열이 자주 문제가 되고 있으며, 이를 해결하기 위해 건조수축저감제를 적용하는 현장이 증가하고 있다.

건조수축저감제의 성능을 평가하기 위해 같은 구속 조건의 슬래브를 대상으로 건조수축저감제 사용 유무에 따른 성능평가를 하였는데 〈그림 6〉은 적용된 현장의 평면이다. 적용 현장은 공기단축을 위해 슬래브 하판의 프리캐스트 부재 위에 콘크리트를 타설하는 공법을 사용하였는데, 이로 인한 콘크리트 부재의 단면부족은 수축 때문에 발생하는 인장응력에 취약한 구조를 지니고 있었다. 적용결과 〈사진 1〉에서 확인할 수 있듯이 건조수축저감제가 적용된 슬래브는 균열이 발생하지 않아 건조수축이 감소하는 것을 확인할 수 있었으나, 미적용 구간은 건조수축으로 인한 관통균열이 발생하여 건조수축저감제의 적용을 통해 수축으로 인해 발생하는 균열을 방지할 수 있는 것으로 확인되었다.



(a) 미적용 구간 (b) 적용 구간
사진 1. 건조수축저감제 적용에 의한 균열방지

4. 자기수축저감제에 의한 콘크리트 수축제어

4.1 자기수축저감제의 원리

자기수축은 <그림 7>과 같이 외부로부터의 수분공급이 없고 일정한 온도 아래에서 시멘트의 수화 반응으로 배합 시 사용된 배합수가 소비되면서, 콘크리트 내부의 상대습도가 감소하는 자기건조(self desiccation) 현상에 의해 발생한다. 일반 강도 영역의 콘크리트는 자기수축보다 건조수축이 매우 크지만, 배합수량이 상대적으로 적은 고강도 콘크리트(W/B 40% 이하)는 재령 초기부터 내부가 건조한 상태로 되기 쉬우므로 자기수축이 크게 발생할 수 있다.

기존의 자기수축 저감 방식은 대부분 일반적인 수축저감제와 팽창재의 병행사용을 통해 이루어졌다. 일반적인 수축저감제는 대부분 건조수축저감제로 자기수축의 발생 원인을 해결하기 어렵고 팽창재는 초기 팽창조절이 어려워 사용에 제약이 따른다. 따라서 수화과정에 의해 발생하는 분리압력을 유지하는 원리를 응용하여 자기수축을 줄일 수 있다.

자기수축저감제는 지방산이 주로 사용되는데 이는 강알칼리 환경의 콘크리트 내의 지방산이 비누화 반응⁸⁾을 일으켜 수분의 손실에도 분리압력을 유지하는 작용을 한다. 비누화 반응은 지방의 염기성 가수분해 과정이다. 천연유지류를 알칼리 수용액과 반응시키면 비누, 즉 고급지방산알칼리금속염과 글리세린이 된다. 지방산을 RCOOCH₃로 표시한다면 비누화 반응식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

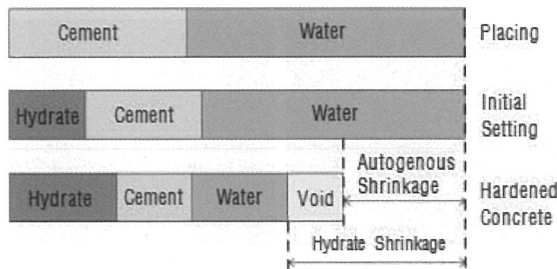
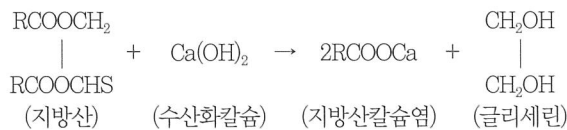


그림 7. 자기수축발생 모식도⁷⁾

비누화 반응은 수산화나트륨이나 수산화칼륨과 같은 강염기와 반응하면 반응속도가 증가하며 이는 반응되는 알칼리 물질의 이온화 경향의 크기에 영향을 받는다. 이로 인해 콘크리트 내부에 퍼져 각 공극 안에 가둬진 유지 성분들이 콘크리트의 수화진행에 따른 pH 상승으로 비누가 되면서 공극을 충전시켜 주는 것이다.

4.2 자기수축저감제의 성능

다음은 지방산 계열의 자기수축 저감제의 성능을 다른 화학혼화제와 비교한 결과이다. <그림 8>은 자기수축저감제의 적용에 따른 수축량의 비율을 Plain에 대한 비율로 나타낸 것이다. 자기수축저감제가 사용된 경우 기존의 건조수축저감제나 팽창재보다 수축저감 성능이 우수한 것으로 확인되었다. 사용량에 따라서 초기재령에서의 수축량은 기준 배합 대비 50% 이하로 현저하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

<사진 2>는 자기수축저감제를 적용한 콘크리트의 미세구조를 SEM으로 촬영한 것으로 콘크리트 내부의 공극에 고착화되어 내부수분의 소실로 발생하는 공극을 최소화시켜준다. <그림 9>는 화학혼화제가 콘크리트의 공

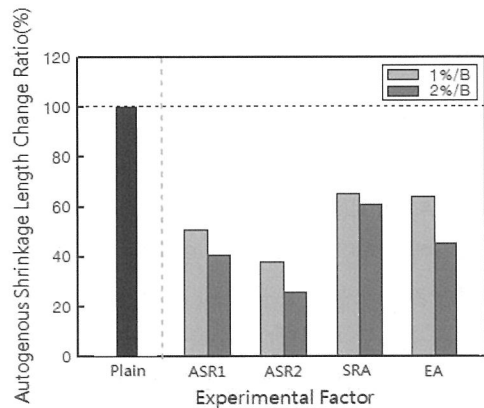
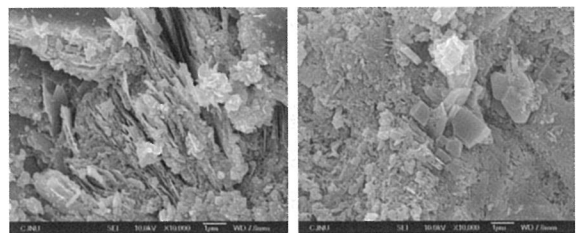


그림 8. 자기수축저감제의 사용에 따른 수축비율



(a) 미적용 구간 (b) 적용 구간
 사진 2. 자기수축저감제의 내부공극 충전효과²⁾

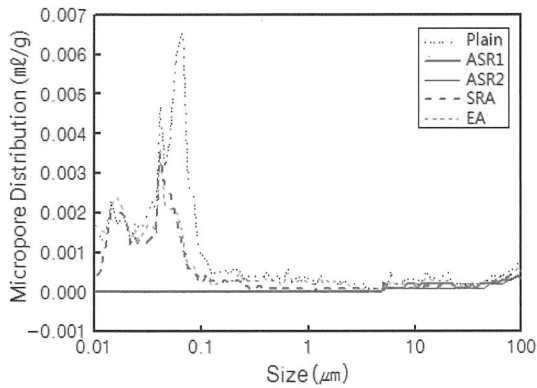


그림 9. 콘크리트의 미세공극 분포

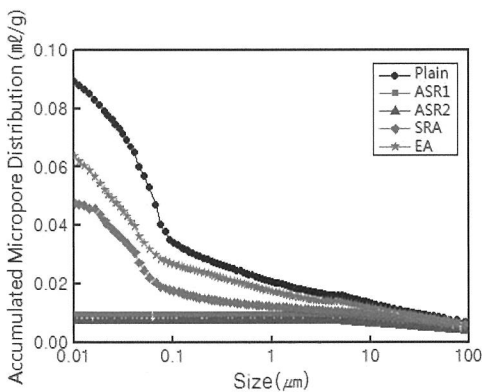


그림 10. 콘크리트의 누적 세공량

극구조에 미치는 영향을 평가하기 위해 수은압입법에 의한 포로시미터 측정 결과이며, <그림 10>은 누적세공량을 나타낸 것이다.

재령 1일에서 공극분포 측정결과에 따르면 자기수축저감제(ASR)는 미세공극 분포가 감소한 것으로 나타났으며, 이는 자기수축저감제가 콘크리트의 미세공극을 충전해주는 역할을 하는 것으로 판단되며, 이를 통하여 자기수축량을 줄인 것으로 나타난다. 건조수축저감제(SRA)의 경우에는 공극을 줄여주지는 못하는 것으로 나타났는데 이는 작용원리의 차이로 판단되며, 팽창제(EA)의 경우 콘크리트 내부에서 팽창을 일으켜 유지류보다 성능은 다소 떨어지지만, 내부 공극을 감소시켜 주는 것으로 확인되었다.

전체 공극량을 판정할 수 있는 누적 세공량에서도 자기수축저감제가 기존에 사용되던 수축저감제와 팽창제보다 적은 결과를 나타냈다. 이러한 공극 충전 성능은 콘크리트의 자기수축 메커니즘의 하나인 분리압력설에 대한 충분한 대책으로 이용될 수 있어 자기수축 저감에 크게 기여할 수 있는 특성으로 판단된다. 또한, 내부 모세관 공극이 충전됨으로 인해서 콘크리트의 화학적 부식, 염해 및 중성화 등과 같은 콘크리트의 내구성 향상에도 크게 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

5. 결론

콘크리트는 경제적이고 사용성이 우수하지만, 수축으로 인한 균열 발생 시 보수 및 보강에 많은 시간과 비용이 소모되므로 이를 미리 방지하는 것이 가장 중요하다. 본 기사에서는 가장 대표적인 수축의 요인인 건조수축과 자기수축을 방지할 수 있는 화학 혼화제를 소개하였다. 2000년대 초반까지만 해도 수축저감용 화학 혼화제는 해외의 기술에 의존하는 경향이 컸으며 이에 따른 재료비 부담으로 인해 적용이 어려웠다. 하지만 최근 10년 사이 국내의 화학 혼화제 기술은 비약적으로 발전하였으며, 현재는 해외의 수축저감제에 비해 우수한 성능을 발현하는 제품도 늘어나고 있다.

건조수축저감제는 사용의 범용성 및 일반적인 강도 범위의 콘크리트 수축에 대한 효율적인 대처방안이 될 수 있으며, 자기수축저감제는 고강도 콘크리트 영역에서의 수축저감 방안으로 사용할 수 있다. 또한, 자기수축저감제는 내부 공극충전 효과로 인한 콘크리트의 내구성 향상에도 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 이렇듯 수축저감제용 화학 혼화제의 사용은 추후 발생할 수 있는 균열에 효과적인 대처방안으로 콘크리트의 유지 및 보수 비용을 크게 절감할 방안이 될 것이다. □

담당 편집위원 : 신경준(충남대학교) kjshin@cnu.ac.kr

참고문헌

1. Hyung Sub Han, Jong Kyu Kim, Yong Wook Jeong, "Development and Performance Assessment of the High Performance Shrinkage Reducing Agent for Concrete", *Advances in Materials Science and Engineering*, Hindawi, 2016, pp. 1 ~ 8.
2. 이동규, 유지류를 활용한 고강도 콘크리트의 자기수축 저감, 박사학위논문, 청주대학교, 2011, p.1.
3. Sugiyama, H., Tanaka, K., Sakuta, M., Urano, T, Durability of Concrete Containing a Shrinkage Reducing Admixture, *American Concrete Institute*, 1987, pp. 1103 ~ 1119.
4. Fujiwara H., Tomita R., Shimoyamata Y., Study of Frost Resistance of Concrete Using an Organic Shrinkage Reducing Agent *American Concrete Institute*, Vol. 145, 1994, pp. 643 ~ 656.
5. Tazawa E. Miyazawa S., *Autogenous Shrinkage of Concrete and Its Importance in Concrete Technology*, RILEM Proceedings, 1993, pp. 159.
6. Vladimir S. Ajaev, Homsy George M., Steady Vapor Bubbles in Rectangular Microchannels, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 240, No. 1, 2001, pp. 259 ~ 271.
7. 문학룡, 팽창재 및 수축저감제의 혼입률 변화에 따른 고성능 콘크리트의 공학적 특성, 석사학위논문, 청주대학교, 2004, p. 13.
8. Min Cheol Han, Dong Gyu Lee, Strenght and Autogenous Shrinkage of High Strength Mortar Using Water Substituting Liquid, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 11, No. 6, 2011, pp. 538 ~ 546.



이동규 책임연구원은 청주대학교 건축공학과에서 유지류를 활용한 고강도 콘크리트의 자기수축 저감에 관한 연구로 박사학위를 취득하였다. 현재, 동남기업(주) 중앙연구소에 재직 중이며, 초고성능 혼화제의 개발, 친환경 공황포장용 콘크리트 개발, 해상 풍력타워의 내구성 향상 등의 국책과제를 수행하였으며, 다기능 및 고기능성 혼화제로 개발 및 실용화 연구를 수행하고 있다.
dglee@dongnamad.co.kr



한형섭 연구소장은 계명대학교 토목공학과에서 고성능 수축저감제의 개발에 관한 연구로 박사학위를 취득하고, 현재 동남기업(주)의 이사로 재직하고 있다. 현재 중소형 모듈탱크, UHPC 및 방호방폭 콘크리트 관련 국책과제에 참여하고 있으며, 신소재 발굴 및 사업화에 대한 연구 등의 중앙연구소 업무를 총괄하고 있다.
research@dongnamad.co.kr



정용욱 교수는 계명대학교 토목공학과에서 고성능콘크리트에 대한 연구로 박사학위를 취득하였다. 한국지질자원연구원과 첨단건설재료시험센터 책임연구원을 거쳐 2009년부터 계명대학교 첨단건설재료시험센터의 교수로 재직하고 있다. 친환경 건설재료 및 고성능 콘크리트 등 건설재료 관련 다양한 연구를 수행하고 있다.
jyw@kmu.ac.kr

<http://www.kci.or.kr>



KOREA CONCRETE INSTITUTE