

알칼리 활성화 슬래그-레드머드 시멘트(ASRC)의 건설분야 활용기술

Application of Alkali-Activated Slag-Red Mud Cement for Construction

김재환 Jea-Hwan Kim (주)에이엠에스엔지니어링 대표
김병기 Byeong-Ki Kim (주)에이엠에스엔지니어링 기술개발부 선임연구원
강혜주 Hye-Ju Kang 우석대학교 건설공학과 석사과정
강석표 Suk-Pyo Kang 우석대학교 건축학과 교수
정영남 Young-Nam Jung KC 주식회사 기술연구소 공정개선 파트장

1. 머리말

건설산업에서 주요 온실가스 발생 원인인 포틀랜드시멘트의 사용량을 줄이기 위하여 화력발전소에서 발생하는 플라이애시나 철강 산업의 부산물인 고로슬래그 등과 같은 산업폐기물을 이용하는 순환자원 재활용 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구의 일환으로써 시멘트를 전혀 사용하지 않고 플라이애시 또는 고로슬래그미분말을 이용한 알칼리 활성화 시멘트 연구도 국내·외에서 활발하게 이루어지고 있다.

알칼리 활성화 시멘트는 초기 강도 발현과 화학 저항성이 높은 것으로 알려져 콘크리트 및 시멘트 관련 연구자들에게 많은 관심을 받고 있으나 국내의 경우 주로 고가의 자극제를 사용하여 경화 메커니즘 규명 및 강도발현 특성에 중점을 두고 연구들이 수행되고 있다. 이는 알칼리 활성화 시멘트가 건설산업 현장에 실제로 활용되는데 가장 큰 장애요소로 고가의 자극제에 의한 경제적인 단점을 해결하기 위하여 자극제로써 활용 가능한 산업부산물에 관심이 쏠리고 있다.

알칼리 활성화 슬래그-레드머드 시멘트는 알칼리 활성화 시멘트 연구의 일환으로써 시멘트 조성에서 알칼리 자극제, 고로슬래그와 레드머드로 구성되어, 포틀랜드시멘트를 사용하지 않는 클링커 프리 시멘트(Clinker Free Cement)를 의미한다. 유사한 시멘트계 재료로써 알칼리 활성화 슬래그 시멘트, 알칼리 활성화 슬래그-플라이애시 시멘트, 알칼리 활성화 슬래그-포졸란 시멘트 등이 있다. 알칼리 활성화 슬래그-레드머드 시멘트는 레드머드를 액상 규산나트륨 또는 수산화나트륨과 같이 고로슬래그미분말의 자극제로 활용하는 것으로 2000년 초반 해외에서 처음으로 발표되었다.

기존 알칼리 활성화 슬래그-레드머드 시멘트(Alkali-Activated Slag-Red mud Cement, 이하 ASRC)의 자극제로써 주로 사용되는 수산화나트륨 수용액(NaOH)과 규산나트륨 수용액(Na₂SiO₃)은 우수한 성능이 검증된 자극제로써 평가되고 있다. 그러나 액상의 형태의 활성화제는 강알칼리성으로 인하여 취급 시 위험하고 가격이 비싸므로 현장 적용이 어려워 산업부산물을 레드머드와 함께 활용하고자 하는 연구가 국내에서도 수행되고 있다.

본 기사에서는 보크사이트 원광석으로부터 수산화알루미늄(Al(OH)₃) 및 산화알루미늄(Al₂O₃)을 제조하는 공정에서 발생하는 산업부산물인 레드머드와 이를 활용한 ASRC의 특성을 소개하고, 흙 포장재, 지반 개량재 등 건설산업 분야에서 활용 가능성이 높은 사례를 소개하고자 한다.

2. 레드머드 개요

레드머드(Red mud)는 <그림 1>과 같이 보크사이트 원광석으로부터 수산화알루미늄(Al(OH)₃) 및 산화알루미늄(Al₂O₃)

을 제조하는 공정에서 발생하는 산업부산물이다. 국내의 경우 레드머드는 Bayer Process를 통하여 Al₂O₃ 1톤을 생산하면 함수율 40~60%의 슬러지 상태로 대략 2톤이 발생되며, 발생량은 국내 발생량의 대부분을 차지하고 있는 K사에서만 연간 약 20만 톤이 <그림 2>의 (a), (b)와 같이 슬러지 상태로 발생하고 있다.

국내 레드머드 발생량이 가장 많은 K사에서 2014년 분기별 야적되고 있는 슬러지 상태 레드머드의 물리·화학적 특성을 분석한 연구결과 발생시점에 따른 품질편차의 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 슬러지 화학조성의 경우 대부분 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃가 약 80%를 차지하고 있으며, 레드머드가 황토색으로 나타나게 하는 Fe₂O₃는 21.6%~23.6%를 차지하고 있었다. 또한, 레드머드가 강알칼리성을 띠고 건설재료로써 활용 시 백화의 원인으로 작용하는 Na₂O는 9.0%~10.5%를 차지하고 있었다. 물리적 특성의 경우 밀도는 2.0 g/cm³로 같으며, 레드머드의 건설자원으로 활용하는데 장애요소 중 하나인 함수율은 50.2%~50.6%로써 거의 변동이 없었다.

건조 레드머드의 물리·화학적 특성은 <표 1>에 나타낸 바와 같이 함수율은 10.2%, 진밀도는 3.50 g/cm³로써 시멘트와 비교하여 상대적으로 크다. 또한, 보크사이트 원석으로부터 알루미늄을 추출하는 과정에서 수산화나트륨(NaOH)을 추출액으로 사용하기 때문에 미회수 수산화나트륨 용액이 잔사인 레드머드에 다량 존재하여 pH가 11.0의 강알칼리성을 나타내고 있다. <그림 3>에 나타낸 건조 레드머드의 XRD 분석 결과에서도 알 수 있는 바와 같이 대부분 알루미늄과 산화철이며, 화합물인 Na₅Al₃CSi₃O₁₅도 관찰된다.

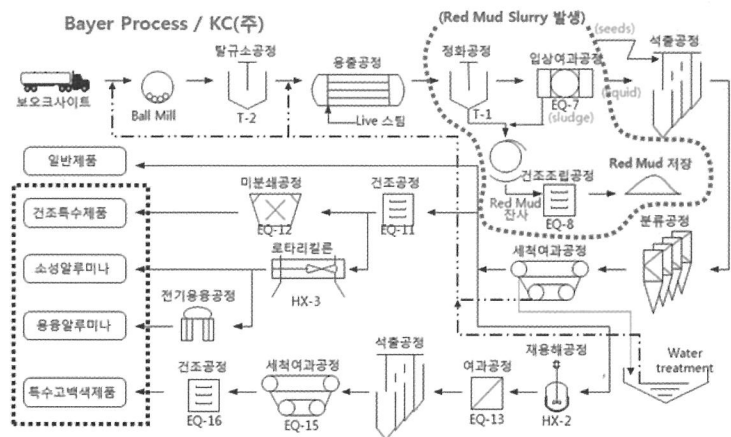


그림 1. 레드머드의 발생 공정



(a) 레드머드 슬러지 (b) 레드머드 야적장 (c) 건조 레드머드

그림 2. 레드머드 형상

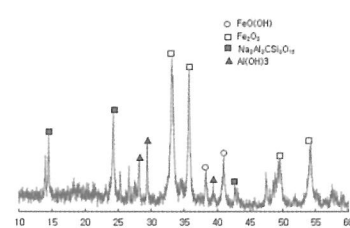


그림 3. 건조 레드머드 XRD

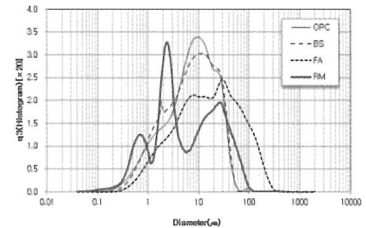


그림 4. 건조 레드머드의 입도

또한, 건조 레드머드의 비표면적은 23.53 m²/g, 평균 입경은 2.75 μm로 레드머드의 입도분포를 나타낸 <그림 4>에서 알 수 있는 바와 같이 시멘트, 플라이애시, 고로슬래그미분말 등의 평균 입경 20~30 μm와 비교하여 약 1/10에 해당되며 마이크로 시멘트 평균 입경 4~6 μm보다도 작은 것으로 나타났다.

표 1. 건조 레드머드의 물리·화학적 특성

Color	Moisture content ratio (%)	pH	Density (g/cm ³)	Specific surface area (m ² /g)	Average particle diameter (μm)	Chemical composition(wt.%)							
						SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
Red	10.2	11.0	3.50	23.53	2.75	38.8	16.1	22.8	3.4	0.2	0.0	10.0	0.4

3. ASRC(Alkali-Activated Red Mud Cement)의 물성

3.1 기공 분포 및 흡수계수

레드머드 대체율에 따른 ASRC 모르타르의 기공 분포를 <그림 5>에 나타내었다. 레드머드를 대체한 ASRC 모르타르는 지름 10~1,000 nm의 모세관 공극은 증가하고, 지름 1,000~10,000 nm 비교적 큰 기공은 감소하는 경향을 보인다. 이는 레드머드 입자가 지름 1,000~10,000 nm에서 가장 많이 분포되어 있어 그 크기의 경화체 기공을 충전 하였기 때문으로 판단된다.

레드머드를 대체한 ASRC 모르타르의 물 흡수계수는 <그림 6>에 나타낸 바와 같이 0.22~0.46으로 일반 보통 포틀랜드시멘트의 물 흡수계수 0.03에 비해 상대적으로 높게 나타나고 있다. 이러한 결과는 레드머드의 대체율이 증가할수록 모세관 현상을 통해 내부로 흡수될 수 있는 기공 지름 10~1,000 nm의 모세관 공극이 증가하였기 때문으로 판단된다.

3.2 역학적 특성

레드머드 대체율에 따른 ASRC 모르타르의 압축강도 및 휨강도 발현 비율을 <그림 7>에 나타내었다. 재령 28일의 경우 레드머드 대체율이 증가할수록 압축강도 및 휨강도가 저하하는 것으로 나타났으나, 초기 재령 7일의 경우 레드머드 대체율 30%까지는 0%와 비교하여 압축강도 및 휨강도가 동등 이상인 것으로 나타났다. 이는 레드머드에 보크사이트 원광석으로부터 알루미늄을 추출하는 과정에서 다량 발생한 미회수 수산화

나트륨 용액으로 인한 것으로, 초기 재령 7일에서 ASRC의 레드머드가 고로슬래그미분말 촉진제로서 역할을 한 것으로 보인다. 하지만 28일 재령에서는 촉진제의 역할 보다는 레드머드 대체에 따른 결합재의 부족으로 강도가 저하한 것으로 생각된다.

3.3 백화특성

레드머드 대체율에 따른 백화 발생 면적을 <그림 8>에 나타내었다. ASRC 모르타르에 레드머드의 대체율이 증가할수록 백화 발생 면적은 증가하는 것으로 나타났고, 레드머드 대체율 30%의 경우 5%에 비해 백화 발생 면적이 약 4배 정도 높은 것을 알 수 있다.

ASRC 모르타르의 Ca 및 Na 용출량을 <그림 9>에 나타내었다. 백화 시험 전 Na 용출량은 레드머드가 포함되지 않은 RM 0의 경우 16.7 ppm, 레드머드 대체율 10%에서 30.8 ppm, 레드머드 대체율 30%에서 60.0 ppm으로

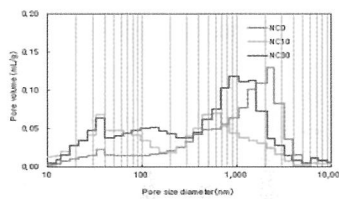


그림 5. ASRC 모르타르 기공 분포

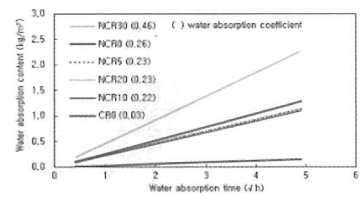
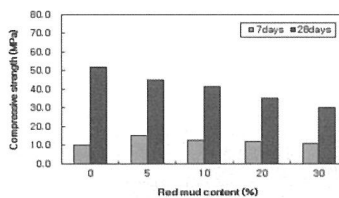
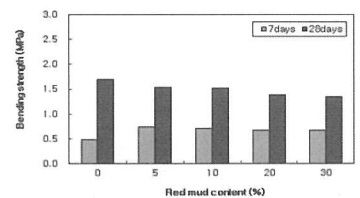


그림 6. ASRC 모르타르 물 흡수계수

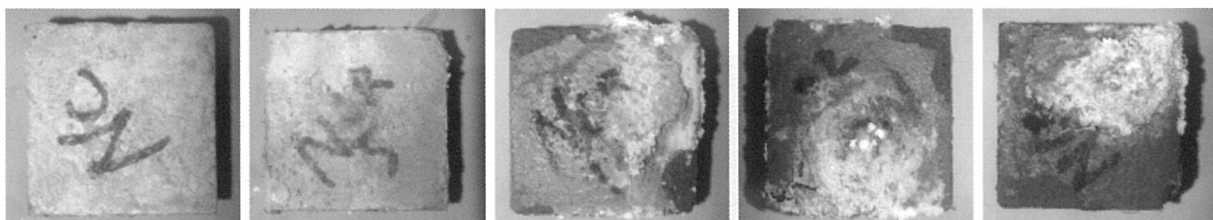


(a) 압축강도



(b) 휨강도

그림 7. ASRC 모르타르 강도 특성



(*)은 백화 발생 면적률(%)

그림 8. ASRC 모르타르 백화 발생

레드머드 대체율이 증가할수록 증가하고 있다. 이처럼 레드머드 대체율이 증가할수록 가용성 Na 용출량의 증가는 Na_2SO_4 가 백화 발생의 주원인인 것으로 백화 시험 후 발생한 백화 물질의 XRD 분석 결과에 나타났다(그림 10).

4. 건설 분야 활용 방안

4.1 흙 포장재로의 활용

레드머드는 Fe_2O_3 가 약 20% 차지하고 있어 천연 황토 포장길과 색상 및 질감 구현이 가능하므로 ASRC를 흙 포장재로써 활용하는 것이 기대된다.

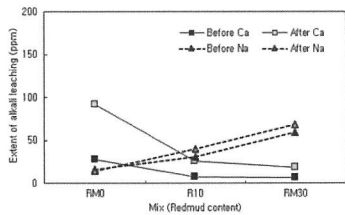


그림 9. 용출 특성

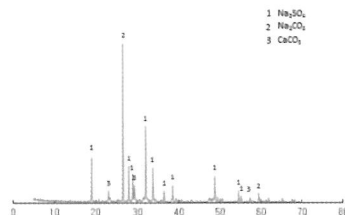
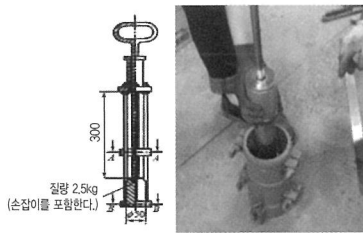
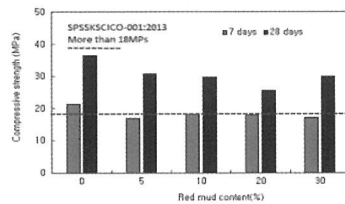


그림 10. 백화 물질 XRD



(a) 래머

(b) 다짐



(c) 압축강도

그림 11. 압축강도 시험과정



(a) 생산설비

(b) 운반 및 포설

(c) 다짐

(d) 시공 완료 후

그림 12. ASRC 흙 포장재 시험시공

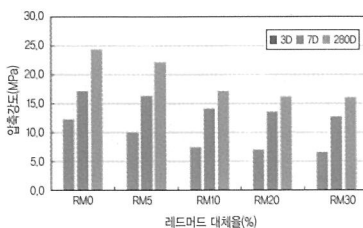
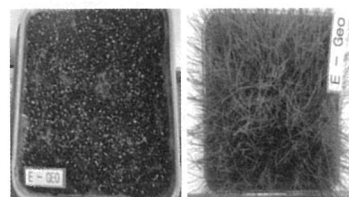


그림 13. ASRC 지반 개량재 압축강도



(a) 식생평가 직후

(b) 식생평가 30일 후

그림 14. ASRC 지반 개량재 식생평가

천연 황토와 같은 흙의 질감을 향상하기 위하여 건식 시공법으로 ASRC 흙 포장재를 제작하였다. 건식 흙 포장재의 압축강도 시험체 제작은 흙 콘크리트 단체표준규격(SPS-KSCICO-001:2013)에 준하여 $\Phi 10 \times 20$ cm 몰드에 <그림 11>에서 보는 바와 같은 래머를 사용하여 제작하였다. 레드머드 대체율에 따른 ASRC 흙 포장재의 압축강도는 <그림 11>에 나타난 바와 같이 레드머드의 대체율이 높아질수록 강도는 저하되지만 레드머드 대체율이 가장 큰 30%에서도 흙 콘크리트 단체표준규격에서 규정하고 있는 최고 강도 수준인 주차장용 18MPa 이상을 만족하는 것으로 나타났다.

ASRC 흙 포장재의 현장 적용성을 평가하기 위하여 천연에 소재하고 있는 건설폐기물 중간처리 업체 상온 아스팔트 생산 설비를 이용하여 제조한 후 사업장으로부터 약 10km에 떨어져 있는 150 m^2 면적의 수목원에 <그림 12>와 같이 시험시공 하였다. 시험 시공 완료 후 ASRC 흙 포장재 육안관찰 결과 주변 환경과 잘 어우러지며, 기존 천연 흙 포장과 유사한 고감성 질감을 나타내면서 균열이 발생하지 않고 있어 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

4.2 지반 개량재로의 활용

ASRC는 황토와 같은 천연 토질과 색상이 흡사하여 감성 부여가 가능하고, 기존의 시멘트 및 석회계 지반 개량재와 달리 친환경적인 이미지를 강조할 수 있어 사면 붕괴에 대한 지반 안정화 재료로써 활용이 기대된다.

이와 같은 지반 개량재는 사면 안정화를 위하여 강도뿐만 아니라 친환경적인 측면에서 식생이 우수한 성능을 지녀야 한다. 레드머드를 대체한 ASRC 지반 개량재의 일축 압축강도 측정 결과 <그림 11>에 나타난 바와 같이 레드머드 대체율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있지만 28일 16MPa 이상이었다. 또한, 최종 선정된 ASRC 지반 개량재 최적 배합을 적용한 식생 평가에서도 <그림 12>와 같이 기존 시멘트 및 석회계



(a) 시험시공(2012년) (b) 추적 관찰(2016년)

그림 15. ASRC 지반 개량재 시험시공 및 추적관찰



(a) 제조플랜트 (b) 혼합 (c) 완료

그림 16. ASRC 칼라 보강토 응벽블록 시험 생산

지반 개량재와 비교하여 상대적으로 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

ASRC 지반 개량재의 현장 활용성을 평가하기 위하여 <그림 13>에서 보는 바와 같이 전라북도 남원의 붕괴 사면에 시험 시공하였다. ASRC 지반 개량재의 시험 시공 결과 사면 안정화뿐만 아니라 자연 친화적으로 뿌리가 착생할 수 있는 고감성 환경조건이 만들어져 주변 환경과 차이가 없는 것으로 나타났다.


4.3 ASRC 콘크리트 2차 제품

ASRC를 콘크리트 2차 제품으로 활용하기 위하여 칼라 보강토 응벽 블록 시제품을 제작하였다(그림 16). ASRC 칼라 보강토 응벽 블록에 대하여 시험 생산을 진행한 결과 역학적으로는 호안 및 응벽 블록에 관한 단체 표준(SPS-KCIC0001-0703)에서 규정하고 있는 압축강도 21MPa 이상과 흡수율 7% 이하를 모두 만족하고 있었으며, 기존 시멘트계 제품과 비교하여 자연스러운 황토색이 표현되어 친근한 느낌을 주고 있다.

5. 맺음말

덴마크의 미래학 연구소장 랄프 예센(Rolf Jensen)은 “21세기에는 감성에 바탕을 둔 꿈을 대상으로 하는 시장이 정보를 기반으로 하는 시장보다 더 커질 것이며, 감정

을 대상으로 하는 시장이 물리적 상품을 대상으로 하는 시장을 능가할 것”으로 예측하였다. 노선별 스토리 텔링을 바탕으로 가치와 감성을 부여하여 감동적인 이야기를 전달하는 감성 고속도로 예와 같이 국내에서도 건설산업 분야에서도 감성을 활용한 기술이 점차 증가하고 있다. 이에 이 기사에서는 보크사이트로부터 수산화알루미늄과 알루미늄($Al(OH)_3/Al_2O_3$) 제조 과정에서 발생하는 부산물 레드머드를 재활용하여 개발한 ASRC의 특성과 고감성 건설재료로서 활용한 사례를 소개하였다. 이와 같은 국내에서 연간 30만 톤이 발생하고 이 중 10% 내외만이 재활용되는 실정에 있는 산업부산물인 레드머드를 재활용한 ASRC는 단순히 재활용하는 차

원을 넘어 천연 황토와 같은 고감성 질감을 부여하고 건설 산업 분야에 새로운 가치를 창출하는 고부가가치 업사이클링(Up-Cycling) 기술로써 건설 산업에서의 활용이 더욱더 기대된다. 

담당 편집위원 : 강석표(우석대학교) ksp0404@empal.com

참고문헌

1. 강석표, “알칼리활성화 무시멘트 결합재의 촉진제로서 레드머드 활용에 관한 연구”, 대한건축학회 구조계 논문집, 제28권 제11호, 2012, pp. 133~140.
2. 강석표, 권성준, “레드머드 대체율에 따른 폴리머 혼입 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트 모르타르의 강도 및 기공특성”, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, Vol. 20, No. 2, 2016, pp. 26~33.
3. 환경산업 선진화기술 개발사업 보고서 “베이어프로세스 부산물의 비가열 알칼리활성 자원화 및 활용 기술” (과제번호 : 2014000150011), 2016, pp. 94~99, pp. 120~127.
4. Pan Z., Cheng L., Lu Y., Yang N., “Hydration products of alkali-activated slag-red mud cementitious material”, Cement and Concrete Research 32, 2002, pp. 357-362.
5. Pan Z., Li D., Yu J., Yang N., “Properties and microstructure of the hardened alkali-activated red mud-slag cementitious material”, Cement and Concrete Research 33, 2003, pp. 1437~1441.
6. Daniel V. R., Joao. A. L., Marcio. R. M., Potential Use of Natural Red Mud as Pozzolan for Portland Cement, Materials Research, 14, 1, 2011, p. 66.



김재환 대표는 충남대학교 건축공학과에서 박사학위를 취득하였으며, 현재 (주)AMS엔지니어링 대표이사로 재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는 고인성섬유보강복합체(HPFRC), 보수보강모르타르, 친환경 경사면 개량재, 부산물의 리사이클링 기술, CBPC응용기술 및 무시멘트 흙 포장기술 등이다.
kjh0999@empal.com



김병기 선임연구원은 한밭대학교 건축공학과에서 석사학위를 취득하였고, (주)에이엠에스엔지니어링에 연구원으로 입사 후 현재까지 슬래그-레드머드 시멘트(ASRC)와 레드머드 및 산업부산물의 자원화 기술에 대한 연구실무 및 기술개발 팀장으로 역할을 수행하고 있다.
kimbigo@nate.com



강혜주는 우석대학교 건축학과를 졸업하여 현재 동대학의 건설공학과 석사과정에 재학 중이다. 주 관심 연구 분야는 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트(ASRC)이며 레드머드 및 산업부산물의 자원화 기술에 대한 연구를 수행하고 있다.
leekang02@nate.com



강석표 교수는 충남대학교 건축공학과에서 박사학위를 취득하였으며, 2008년부터 우석대학교 건축학과 교수로 재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는 콘크리트 구조물의 내구성 평가 및 예측과 산업부산물의 자원화 기술, 에너지 절감 기술과 같은 지속가능한 자원순환형 건설기술 등이 있다.
ksp0404@empal.com

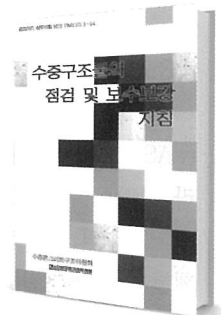


정영남 파트장은 세한대학교 화학공학과를 졸업 후 15년간 KC(주) 기술개발팀과 기술연구소에서 공정개선 파트장으로 근무중이며 국내 최초 Super Fine 수산화알루미늄과 보헤마이트 제품을 개발, 설계, 생산에 기여하였으며 현재 레드머드 자원화 분야의 TFTeam 선임연구원으로 재직하고 있다.
beanch@hanmail.net



수중구조물의 점검 및 보수보강 지침

- 저 자 : 한국콘크리트학회
- 정 가 : 10,000원
- 출판사 : 기문당
- 회원할인가 : **8,000원**
- 발행일/Page(판형) : 2014-12-30/107
- 배송비 착불(3,000원)
- (판형 B5변형)



도서 소개

국내 수중 콘크리트 구조물의 경우 안전점검 및 유지관리 시스템이 확립되지 않아 수중구조물의 점검 시 단지 육안검사에 의한 외관조사만을 실시하는 경우가 대부분이고, 수중 보수보강 또한 육상시공을 위해 가설비를 설치하거나 소규모의 수중 보수만을 위한 초보적인 단계이다. 따라서 이 지침에서는 수중 콘크리트 구조물의 점검 및 관리방안을 모색하고자 초보적 단계로서의 자료조사 및 자체적인 수중조사를 근간으로 콘크리트 구조물의 수중부 점검지침 및 수중 보수 보강방안을 제시하여 향후 현장의 수중점검 및 수중 콘크리트 보수 보강 등에 기초자료로 활용하는 데 많은 도움이 될 것이다.