

순환자원의 고부가가치 활용을 위한 ASCM 표준 개발 필요성

The necessity of ASCM(Alternative Supplementary Cementitious Material) standard development for high value-added utilization of recycling resources



신상철 Sang-Chul Shin
공주대학교 친환경콘크리트연구소
연구교수
E-mail : hiykhj@kongju.ac.kr



김진만 Jin-Man Kim
공주대학교 그린스마트건축공학과
교수
E-mail : jmkim@kongju.ac.kr

1. 머리말

시멘트 대체 재료(SCM, Supplementary Cementitious Materials)의 사용은 산업 부산물의 효과적인 활용을 위한 시멘트 및 콘크리트 산업의 주요 트렌드로 자리 잡았다. 전통적으로 고로슬래그 미분말, 플라이애쉬, 실리카 흙, 포졸란과 같은 재료는 현재까지 다양한 연구 개발을 통해 시멘트 또는 콘크리트의 대체 재료로 사용함으로써 건설 분야의 환경 문제에 대응할 수 있는 ‘저탄소-저비용-동성능’ 기술로 발전해 왔다. 탄소중립 사회로의 전환을 앞두고 있는 현재, 전술한 SCM 기술만으로 전 세계의 도전적인 공통과제인 탄소중립에 기여할 수 있을까? 아쉽지만 많은 연구자들은 기존의 SCM을 대체할 수 있는 물질, 즉 ASCM(Alternative Supplementary Cementitious Materials)을 개발해야 한다고 강조하고 있다. 온실가스 대량 배출 산업인 발전, 철강 산업이 쇠퇴하고 수소/전기/재생에너지 사회로 전환된다면, 지금까지 꾸준히 활용해 왔던 양질의 SCM의 가용성은 한계에 부딪힐 수밖에 없기 때문이다.

2022년 10월, 산업통상자원부는 국가연구개발 사업평가 총괄위원회에서 ‘탄소중립산업 핵심기술 개발사업’이 예비타당성 조사를 통과했다고 밝혔다. 시멘트 업종에서 개발할 기술 중 하나는 ‘혼합재 함량 증대 및 혼합 시멘트 확대 적용기술’로 약 1,400억원 규모의 대형 프로젝트가 올해부터 수행될 예정이다. 이 사업을 성공적으로 완수하기 위해서는 새로운 저탄소 재료의 발굴 및 개발이 필수적인데, SCM으로 인정받기 위해서는 재료 자체의 특성, 중금속 등 환경유해물질의 검토, 재료 품질 변동성에 대한 대응, 시멘트와의 호환 가능성, 콘크리트의 강도 및 내구성 검증 등 다양한 과제가 놓여 있다. 기술적인 문제를 해결하기 위해서는 해외로 눈을 돌릴 필요가 있다. 해외 주요국에서는 오래전부터 기존의 SCM이 아닌 새로운 물질의 시멘트 대체 기술 개발에 시간과 자본을 투자해 온 것으로 보인다. 이 분야의 최선단은 유럽으로 포틀랜드시멘트 외

에 다양한 SCM을 사용한 혼합시멘트 시장이 매우 활성화되어 있다. 또한, 미국에서는 기존 SCM의 범주에 포함될 수 있는 ASCM 평가 가이드 표준을 마련하여 다양한 물질의 SCM化에 대한 가능성을 열어두고 있다. <그림 1>에 나타낸 것과 같이 클링커에 다양한 산업 부산물을 혼합 사용한 바인더를 최종제품인 콘크리트나 모르타르에 적용하는 기술은 시멘트 산업 탄소중립의 관점에서 매우 바람직한 방향이라고 할 수 있으며, 이러한 환경이 조성되기 위해서는 ASCM 평가 방법에 대한 기준 제정이 필수적이다.

본 고에서는 해외 선진국의 SCM 사용 현황에 대해 알아보고 국내 순환자원의 고부가가치 활용을 위한 ASCM 표준 개발의 필요성에 대해 소개하고자 한다.

2. 용어 정의

2.1 SCM(Supplementary Cementitious Material)

미국의 ASTM C1709(Standard Guide for Evaluation of Alternative Supplementary Cementitious Materials (ASCM) for Use in Concrete)에서는 SCM과 ASCM의 용어를 명확하게 규정하고 있다. 이 표준에서 SCM은 “수경성 반응 또는/그리고 포졸란 반응으로 콘크리트 또는 모르타르의 특성에 기여하고 ASTM C618(Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete), C989(Specification for Slag Cement for Use in Concrete and

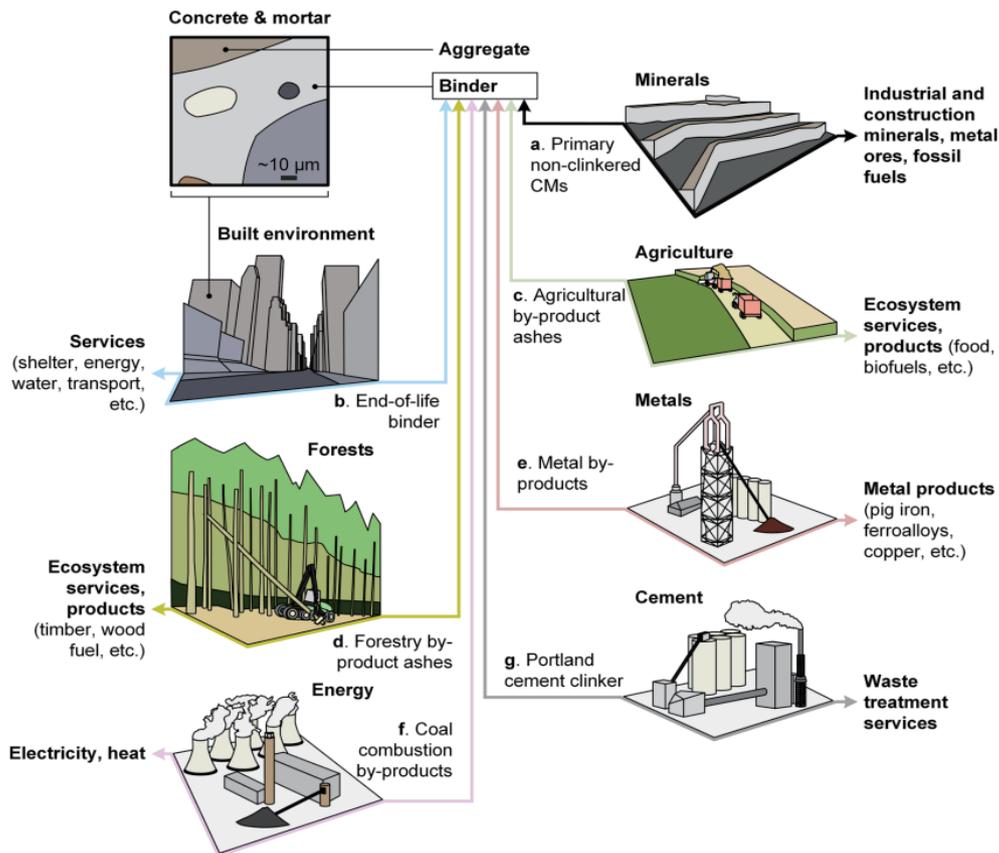


그림 1. 다양한 부산물의 SCM 활용 개념

Mortars), C1240(Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures) 표준 중 하나를 충족하는 재료라고 정의하고 있다. 즉, 플라이애시, 고로슬래그, 천연/소성 포졸란, 실리카폼만을 SCM으로 특정하고 있다. 또한, ASTM C1697(Standard Specification for Blended Supplementary Cementitious Materials)을 통해 상기 재료를 조합한 Blended SCM에 대해 규정하였다.

유럽의 경우 SCM보다는 ARM(Alternative Raw Material)이라는 용어를 사용하고 있는데, 이는 미국과 같이 표준에서

정의된 것은 아니지만 클링커, 시멘트, 콘크리트의 원료로 사용할 수 있는 모든 재료를 의미하는 것으로, SCM보다 더 넓은 범위의 포괄적인 용어로 해석할 수 있다. 최근의 연구 동향으로부터 클링커와 시멘트에 사용할 수 있는 ARM을 표 1, 표 2에 나타내었는데 수많은 산업 부산물에 대한 시멘트 산업의 수용 가능성이 매우 큰 것을 알 수 있다. 한편, 유럽에서는 SCM을 2차 시멘트질 재료(SCM, Secondary Cement Materials)라고 하여 시멘트 단계에서의 클링커 대체 재료를 의미하는 용어로 사용하기도 한다.

[표 1] 클링커 원료로 사용 가능한 산업 부산물

Materials	Source	Replacement for
Water purification sludge	Municipal water treatment plant	Calcium supplementary
Marble sludge	Marble industries	Calcium supplementary
Sewage sludge	Municipal sludge treatment plant	Silica supplementary
Sugar filter mud	Sugar industry	Calcium supplementary
Red mud	Aluminium industry	Alumina and iron
Lime-dried sludge	Sewage treatment plant	Calcium supplementary
Spray dried sludge	Drinking and wastewater treatment plant	Calcium supplementary
Ceramic waste	Ceramic industry	Calcium and mineraliser
Oil-based mud cutting	Petroleum industry	Calcium supplementary

[표 2] 시멘트 및 콘크리트 원료로 사용 가능한 산업 부산물

Materials	Source	Replacement for
Silica fume	Silicon industries	Supplementary cementitious material
Granulated blast-furnace slag	Steel industries	Cementitious material with self-cementing
Fine sewage sludge ash	Sewage plant	As fine filler with some pozzolanic activities
Bio mass ash	Sugar industries	Pozzolanic activities
Fly ash	Coal power plants	Pozzolanic material
Limestone	Cement industry	Filler and lesser density material
Elephant grass ash	Natural burnt material	Pozzolanic activities
Seashell powder	Natural waste	Filler and lesser density material
Meta-kaolin	Calcined natural waste	Pozzolanic material
Rice husk ash	Agricultural industry waste	Pozzolanic material
Silico-manganese slag	Ferro-alloy industry	Cementitious material
Zeolite	Natural waste material	Cementitious material

일본의 JIS R 5210(Portland Cement) 표준에서는 SCM과 유사한 의미로 ‘소량혼합성분’이라는 용어를 사용하고 있으며, 포틀랜드시멘트에 사용할 수 있는 혼합재로 고로슬래그, 실리카질 혼합재, 플라이애시, 석회석의 4종류를 특정하고 있다.

국내의 경우 특별한 용어 설정은 되어 있지 않지만, 고로슬래그, 포졸란, 플라이애시, 석회석을 포틀랜드시멘트의 혼합재로 사용할 수 있으며, 콘크리트용 SCM으로는 KS F 2563(콘크리트용 고로슬래그 미분말), KS F 2567(콘크리트용 실리카 폼), KS L 5404(플라이애시) 표준을 마련해 두고 있다.

2.2 ASCM(Alternative Supplementary Cementitious Material)

미국에서 규정하고 있는 ASCM은 “포졸란 반응 또는 수경성 반응으로 콘크리트의 강도, 내구성, 작업성 및 기타 특성에 유리하게 기여하며, ASTM C618, C989, C1240 표준에 포함되지 않는 무기 재료”라고 되어 있어 기존 SCM의 범주에 포함되지는 않지만 콘크리트의 성능에 유리하게 기여할 수 있는 재료라고 정의할 수 있다. 이는 수많은 무기 재료를 검토하여 시멘트 및 콘크리트 성능에 유리하게 작용한다면 어떠한 재료라도 사용할 수 있도록 하는 매우 포용적인 개념이라고 할 수 있다.

3. 각국 시멘트에 사용 가능한 SCM

세계 각국의 시멘트 표준을 참조하여 시멘트 제조 시 혼합할 수 있는 SCM을 <그림 2>에 나타내었다. 국내에서는 미국이나 유럽과 비교하여 아직 제한적인 재료(전통적으로 품질이 검증된 SCM)만을 사용하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 국내 시멘트 표준이 과거 일본산업표준(JIS)을 참고하여 제·개정되어 왔기 때문이기도 하다. 지진이 빈번하게 발생하는 일본의 경우 콘크리트 품질을 최우선으로 고려하는 경향이 있기 때문에 새로운 SCM에 대해 받아들일 수 있는 여력이 부족하다고 할 수도 있겠지만, 국내 시멘트 표준이 일본과 유사한 내용을 계속 고집해야만 하는가에 대해서는 의구심이 들 수밖에 없다. 기술적, 환경적 배경이 급변한 만큼 과거 일본 표준을 단순히 카피했던 국내 시멘트 표준을 이제는 보다 친환경적이고 국제적 니즈에 대응 가능한 내용으로 개발해야 할 필요가 있다. 미국은 플라이애시, 포졸란을 성분에 따라 구분하여 사용할 수 있도록 하였고, 특히 여러 재료를 다양한 구성비로 혼합한 Blended SCM을 활용할 수 있는 표준을 제정하였다. 유럽은 타 국가에서 시멘트 제조에 사용하지 않는 소성혈암이나 실리카 폼을 시멘트 표준에 도입하였고 심지어 클링커 공정 부산물을 시멘트 재료로 사용하기도 한다. 최근에는 폐콘크리트 미분말을 시멘트의 최대 20%까지 사용할 수 있는 표준 제정의 움직임도 포착되었다. 해외에서 시멘트 표준에 적용하고 있는 이

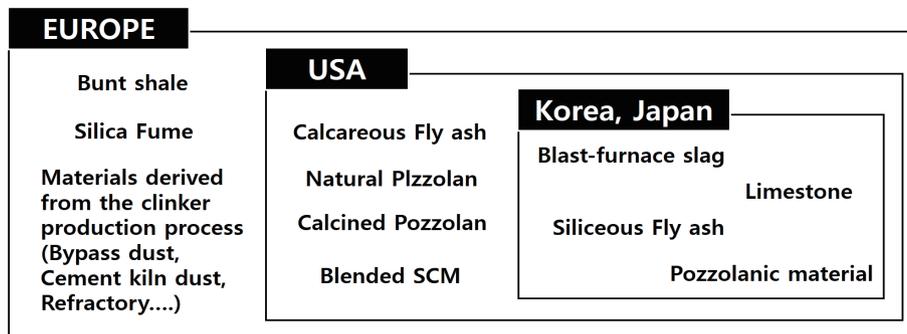


그림 2. 각국 시멘트 표준에서 규정하는 SCM

러한 재료들의 국내 시멘트 표준에의 도입 가능성은 열려 있지만 누구나 납득할 수 있을 만한 엄격하고 면밀한 품질 검토 및 성능 검증이 선행되어야 할 것이다. 이를 위해서 각각의 재료 특성 및 재료를 사용하여 제조된 시멘트 및 콘크리트의 성능 검증을 위한 평가 가이드 표준이 우선적으로 제정되어야 할 필요가 있다.

4. ASTM C1709 평가 가이드 표준

국내 ASCM 표준 제정을 위해 참고할 수 있는 ASTM C1709 평가 가이드 표준의 내용을 간단히 소개하면 다음과 같다.

■ Stage I : Characterization of the Material

ASCM의 화학조성을 검토하여 시멘트의 수화 또는 콘크리트의 특성에 유해한 영향을 미치는 화합물의 존재 여부를 검토한다.

■ Stage II : Determination of Suitable Fineness

분말도, 비표면적, 입도 분포 테스트 및 모르타르 압축강도 시험을 통해 적정 분말도를 평가한다. 이 때 ASCM과 포틀랜드시멘트를 혼합하여 만든 모르타르 시험체를 포틀랜드시멘트만을 사용한 기준 모르타르 시험체와 비교, 검토한다.

■ Stage III : Testing to Specification C618, C989, or C1240

SCM으로 규정되어 있는 플라이애시 및 포졸란(C618), 고로슬래그(C989), 실리카 폼(C1240) 표준에서 요구하는 화학적, 물리적 특성 기준에 따라 비교시험을 실시한다. 또한, 부가적으로 염화물, 유리 산화칼슘, 가용성 알칼리, 침출성 중금속, 공극 안정성에 대해 검토한다.

■ Stage IV : Concrete Performance Tests

콘크리트 단계의 성능 시험은 ASCM을 사용하지 않은 기준 콘크리트 및 표준으로 정해진 SCM을 한 종류 이상 포함한

콘크리트와의 비교시험으로 이루어지며 측정 항목은 다음과 같다.

- 굳지 않은 콘크리트 시험 : 슬럼프, 공기량, 온도, 응결 시간, 단위용적질량, 블리딩
- 경화 콘크리트 시험 : 압축강도(재령 1, 3, 7, 28, 91, 365 일), 휨강도(재령 28일), 건조수축, 공극 특성, 탄성계수, 내황산염, 알칼리실리카 반응성
- 특정 용도 관련 시험 : 동결융해저항성, 스케일링 저항성, 수화열, 유체 침투 저항성 시험

■ Stage V : Field Trials and Long-Term Performance and Durability

최소 1년 동안 실시하는 현장 평가를 최소 3번 실시해야 하며 평가 항목은 다음과 같다.

- 콘크리트의 마감특성에 대한 ASCM의 영향
- 슬럼프, 공기량 및 응결 시간을 포함한 굳지 않은 콘크리트의 특성 변화
- 화학 혼화제와의 호환성
- 강도 및 내구 성능
- 까다로운 환경에 노출된 콘크리트에서의 ASCM의 영향

이와 같이 미국에서는 새로운 재료를 SCM으로 활용하고자 한다면, 재료 자체 특성과 시멘트 수화에 미치는 영향, 기존 SCM과의 비교 검토, 모르타르 및 콘크리트 단계의 품질 시험을 실험실 레벨에서 검토한 후, 장기간의 필드 테스트에 의한 성능 평가를 거쳐 품질이 인정된 재료만을 SCM으로 활용할 수 있도록 규정하고 있다. ASTM C1709 표준에 제시된 평가 항목들은 시멘트 및 콘크리트 실험에서 필수적인 것들로 구성되어 있으므로 국내 ASCM 표준 개발에 있어 좋은 참고 자료가 될 것이라고 생각된다.

5. 맺음말

필자는 최근 국내 ASCM 평가 가이드 표준 제정에 대한 시

멘트-콘크리트 업계 관계자의 인식을 조사하기 위해 설문조사(유효표본 : 337건)를 실시한 바 있다. 조사 결과, 시멘트 산업 탄소중립에 기여할 수 있다는 점과 다양한 무기 재료의 고부가가치 재활용 가능성을 제고할 수 있다는 이유로 ASCM 평가 기준 제정에 대해 약 80%의 응답자가 찬성하는 것으로 나타났다. 또한, ASTM C1709 표준과 같이 5단계의 철저한 검증 필요성에 대해 대다수의 응답자가 공감하였고, 특히 콘크리트 단계의 품질 평가 및 현장 적용에 의한 내구 성능 평가가 중요하다는 의견이 지배적이었다. 이번 조사를 통해 시멘트-콘크리트 업계 관계자들의 탄소중립에 대한 인식과 새로운 SCM의 개발 필요성에 대한 높은 공감대를 확인하는 매우 의미 있는 결과를 얻을 수 있었다.

시멘트 산업 탄소중립을 위해 원료전환, 연료전환, CCUS

(Carbon Capture Utilization and Storage) 등 다양한 기술이 제안되었는데, 클링커의 생산량을 줄여 공정 CO₂ 배출량을 삭감시키는 것은 가장 확실하고 간단한 방법 중 하나라고 할 수 있다. 클링커를 대체할 수 있는 다양한 무기 재료의 시멘트-콘크리트 시장 진입을 위해서는 철저한 검증이 필요한데, 이를 가능하게 하는 것이 ASCM 평가 표준일 것이다. 탄소중립에 직접적으로 기여함은 물론, 부산자원의 고부가가치 재활용을 도모하고 기존 SCM의 수급 문제를 해결하기 위해 ASCM 평가 표준 제정은 반드시 필요하다. 실효성 있는 국내 ASCM 평가 가이드 표준이 조속히 제정되어 다양한 부산자원을 대상으로 한 적극적인 연구 개발이 수행되길 바라며, 순환자원 및 산업 부산물의 지속가능성을 지향하는 우리 학회의 역할을 기대해 본다.

참고문헌

1. Maria C.G, Juengera, Ruben Snellings, Susan A. Bernal, Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights, *Cement and Concrete Research*, 2019, 122: 257-273.
2. Sabah Ahmed Abdul-Wahab et al., An overview of alternative raw materials used in cement and clinker manufacturing, *International Journal of Sustainable Engineering*, 2021, 14.4: 743-760.
3. Izhar Hussain Shah et al., Cement substitution with secondary materials can reduce annual global CO₂ emissions by up to 1.3 gigatons, *Nature Communications*, 2022, 13.1: 5758.
4. ASTM C1709, Standard Guide for Evaluation of Alternative Supplementary Cementitious Materials (ASCM) for Use in Concrete

담당 편집위원 : 정연웅(재)한국건설생활환경기술연구원