

골재에 대한 LCA 및 잔골재 종류별 환경영향평가 결과

Life Cycle Assessment on Domestic Fine Aggregates



채청우*
Chang-U Chae

본고는 국토해양부의 지원으로 수행된 과제(05기반기획 A05_01)인 건축자재 환경성정보 국가 데이터베이스 구축 사업(2005. 6 ~ 2008. 6)의 내용을 주로 참고하였습니다.

1. 서론

건물 및 시설운용 부문을 포함하여 건설 분야에서 사용되는 에너지량은 전체의 약 1/3을 차지하고 있으며<그림 1>, 화석에너지의 사용으로 인하여 배출되는 이산화탄소 등의 온실 가스는 대기온도 상승과 이로 인한 지구온난화 등 환경문제를 야기하고 있다.

특히 건설자재를 생산하기 위해서는 많은 양의 자원을 소비해야 되고, 자원의 채취와 생산 및 시공공정에서 발생하는 이산화탄소 배출량은 전체의 약 13% 정도로 큰 비중을 차지하고 있어 건설자재의 지속가능한 사용 대책이 필요하다.

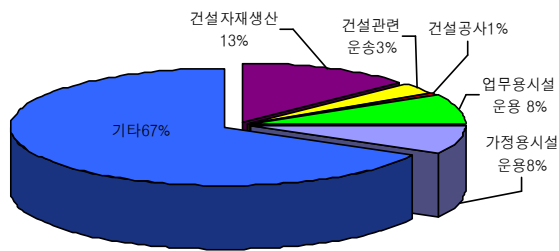
따라서 건설자재 산업에서 에너지 소비를 줄이고 환경 친화적인 체제로 전환하기 위해서는 건설자재의 환경성에 대한 데이터베이스를 구축하고, 이를 통하여 친환경적인 재료를 선택하고

사용하는 방안을 마련해야 한다. 특히, 건설자재 중 가장 많이 소비되는 자재는 시멘트와 골재 등을 이용한 시멘트콘크리트 제품이며, 건축물에서 이러한 자재가 사용되는 비중은 단위면적당으로 비교 했을 경우 80%를 상회하고 있어 시멘트 및 시멘트관련 제품에 대한 환경성 정보 구축이 우선적으로 필요하다. <그림 2>에는 건축물의 구조형식별 투입되는 자재를 중량비로 나타낸 것으로 전체 투입자재의 대부분이 골재 및 석재가 차지하고 있어 골재에 대한 온실가스 배출 대책 마련이 시급하다.

이에 본 고에서는 각종 골재의 온실가스 및 기타 환경영향 배출 특성을 국제표준화기구(ISO)에서 제공하는 전과정평가(LCA, life cycle assessment)를 이용하여 분석하고 그 결과를 제공하여 향후 지속가능한 골재 사용의 기초 자료를 확보하고자 한다.

2. 골재에 대한 전과정평가(LCA)

지속가능한 발전(sustainable development)이 지구환경개선을 위한 최선의 패러다임으로 인식되면서 환경문제에 대한 집



* 출처: 공기조화 및 위생공학지「대기환경의 문제와 대책」
그림 1. 전체산업 중 건설부분 이산화탄소 배출량

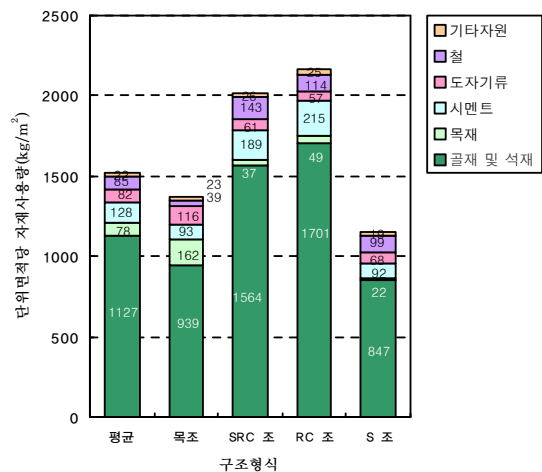


그림 2. 구조형식별 단위면적당 자재사용량

* 정희원, 한국건설기술연구원 연구위원
cuchae@kict.re.kr

근도 사후처리(end-of-pipe)에서 사전예방(front-of-pipe)로 전환된지 오래다. 즉, 환경문제에 대처하는 방식이 오염물질의 통제에서 투입되는 자원과 에너지의 흐름을 최적화시켜서 오염물질의 발생 원인을 줄이려는 방향으로 전환되었다.

건설 분야는 세계 물소비의 17%, 목재 사용량의 25%¹²⁾, 에너지 소비의 40%¹³⁾를 차지하는 등 세계 에너지와 자원의 흐름의 한 축을 담당하고 있다. 따라서 건설 분야에서 자원과 에너지를 줄이는 것이 세계 자원보존을 위한 핵심대안이 될 수 있다.

산업 전반에서 자원과 에너지의 사용을 줄이기 위해서는 제품의 가치사슬(value chain)에서 자원의 투입량이 얼마인지를 파악할 수 있어야 한다. 전과정평가는 제품시스템의 전과정인 원료채취과정에서 생산, 유통, 사용, 폐기에 이르기까지 자원과 에너지의 흐름 및 폐기물의 흐름을 정량화하여 이들이 환경에 미치는 잠재적 영향을 평가하는 환경성평가 도구(environmental assessment tools) 중의 하나이다. 국제표준화기구(international organization for standardization, ISO)에서는 전과정평가와 관련하여 ISO 14040 시리즈를 출판하여 국제적으로 표준화된 방법론을 제시하고 있다.

2.1 전과정 평가의 개요

전과정평가는 <그림 3>과 같이 네 가지 절차로 구성된다.

- 1) 목적 및 범위정의(goal and scope definition)
전과정평가를 수행하는 목적과 목적에 따른 물질과 에너지 데이터의 수집범위 등을 결정하는 단계로써, 전과정 연구 수행을 위한 기본 단계이다.
- 2) 전과정 목록분석(life cycle inventory analysis)
목적 및 범위정의에서 정의한 것을 토대로 물질과 에너지 데이터를 수집하고 검증하여 제품 전과정 동안에 자원과 폐기물의 흐름을 정량화하는 단계이다.
- 3) 전과정 영향평가(life cycle impact assessment)

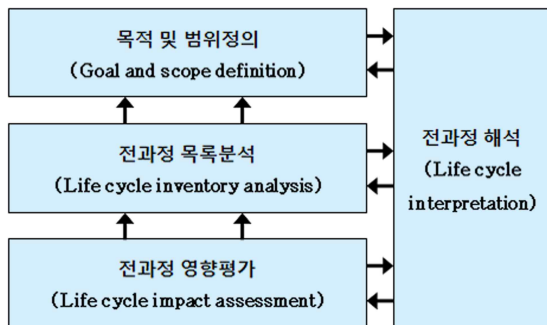


그림 3. 전과정평가의 구성

제품 전과정 동안에 발생하는 정량화된 자원과 폐기물의 흐름(환경부하)으로 인해 지구 온난화, 자원소모 등과 같은 환경영향에 어느 정도 기여하고 있는지를 평가하는 단계이다.

4) 전과정 해석(life cycle interpretation)

목적 및 범위정의, 전과정 목록분석, 전과정 영향평가 과정을 통해 도출된 결과를 토대로 개선해야 할 환경측면의 주요 이슈를 도출하고 이를 보고하는 단계이다.

2.2 골재의 전과정평가

전과정평가를 위한 골재는 육상모래, 산림모래, 바다모래, 하천모래 등의 잔골재와 재생잔골재를 대상으로 선정하였다. 골재의 전과정평가를 위한 범위정의 및 전과정 목록분석의 절차 중 일반적인 절차 및 요건은 다음과 같다.

2.2.1 범위 정의

① 기능 및 기능단위, 기준흐름

모래는 다양한 용도로 사용되지만 대부분 토목자재 또는 건축자재로 사용되고 있으므로 기능을 토목자재 및 건축자재로 사용되는 모래로 설정하였으며, 기능단위와 기준흐름의 경우 기타 물질의 경우 질량(kg) 단위로 관리하는 것이 편리하나 모래의 경우 일반적으로 m³의 단위로 거래 및 사용될 뿐만 아니라 채취 장소에 따라 입도나 밀도 등의 차이가 크므로 질량으로 관리하기가 어려워 m³ 단위를 사용하였다. 이를 정리하면 다음 <표 1>과 같다.

② 시스템 경계

시스템 경계는 사용 이후 단계를 제외한 모래의 채취 및 가공(세척 등)단계까지를 포함한 Cradle to Gate로 정의하였다. 모래의 생산이란 자연계에서 바로 채취하는 것이므로 제품의 채취과정이 곧 생산과정이 되는 경우가 많아 별도의 생산단계가 포함되지 않을 수 있다.

③ 데이터 범주

모래의 LCI 데이터베이스 구축에 포함되는 범주는 다음의 <표 2>와 같이 투입물과 산출물로 크게 구분하여 투입물은 원료, 에너지, 보조물질을 포함하고, 산출물은 제품, 부

표 1. 골재 모래의 기능, 기능단위, 기준흐름

구분	모래
기능	토목자재 및 건축자재로 사용되는 모래
기능단위	모래 1 m ³ 생산
기준흐름	모래 1 m ³

표 2. 골재 - 모래 - 데이터 범주

구분	원료	물질명
투입물	원료	모래
	에너지	경유, 전기
	보조물질	윤활유
산출물	제품	모래
	부산물	-
	대기배출물	-
	수계배출물	폐수
	폐기물	폐유, 폐윤활유

산물, 대기배출물, 수계배출물 및 폐기물을 포함한다.

④ 데이터 품질요건

모래의 LCI 데이터베이스 구축에 필요한 데이터의 품질요건은 다음 <표 3>과 같다.

⑤ 가정 및 제한사항

모래의 데이터베이스를 구축함에 있어 주된 가정사항은 <그림 4>와 같이 공급원별 채취량 비율(2004년 기준)을 적용하였다는 점이다. 직접 수집한 데이터는 2005년도 데이터이지만 국가 채취량 비율 데이터는 2005년도 자료를 습득할 수 없어 2004년도 데이터를 적용하였다. 모래의 데이터베이스는 육상모래, 산림모래, 바다모래, 하천모래의 채취량 비율에 따른 평균치이며, 이 채취량 비율은 매년 변화하는 수치이므로 새로운 채취량 비율 데이터를 습득할 수 있을 경우 새로운 비율을 적용하여 업데이트 후에 사용하는 것이 바람직하다.

표 3. 골재 - 모래 - 데이터 품질요건

구분	상위/하위흐름 단계	수송단계	제조단계
시간적 범위	최근 10년 이내	최근 10년 이내	2005년 1년간
지역적 범위	대한민국, 북한	대한민국	대한민국
기술적 범위	현재 사용되는 기술	일반적인 수송 기술	현재 사용하는 제조기술

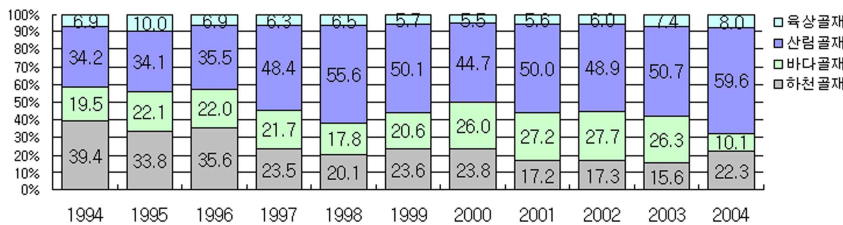


그림 4. 골재 공급원별 채취현황

2.2.2 전과정 목록분석

① 데이터 수집 준비

모래의 데이터베이스는 육상모래, 산림모래, 바다모래, 하천모래의 채취량 비율에 따른 평균치이므로 별도의 공정흐름도가 존재하지 않는다. 즉, 완성된 각각의 채취원별 모래 데이터를 이용하여 국가 평균 모래의 데이터를 산출하였다.

② 데이터 수집

육상모래, 산림모래, 바다모래 및 하천모래 각각의 데이터는 <그림 5~8>과 같다.

③ 데이터 검증 및 계산

데이터 계산에 사용된 육상모래, 산림모래, 바다모래 및 하천모래의 각 데이터베이스가 이미 물질수지 검증을 마친 상태이므로 다시 물질수지를 검증하지는 않았다.

데이터 계산 시에 다음 사항들을 고려하였다.

- upstream을 제외한 생산과정에서 발생하는 대기배출물은 모두 경유 사용에 의한 것이므로, 국가 데이터베이스의 경유 데이터를 연결하여 계산하였으며, 별도의 이론연소방정식이나 연소식을 사용하지 않았다.
- 데이터 계산은 생산율을 기준으로 한 평균으로 구하였다.

④ 할당

모래 데이터베이스를 구축하기 위해 수행한 할당은 없다.

3. 골재의 전과정평가의 수행결과

3.1 골재의 특성 및 시스템 경계

본 평가연구의 대상이 되는 하천모래(riverbed sands), 바다모래(seabed sands), 산림모래(crushed sands), 육상모래(land sands), 재생산골재(recycled aggregate)로 그 특성 및 시스템 경계는 다음과 같다.

1) 하천모래

한강, 금강, 낙동강 유역 중심으로 한 하천모래는 현재 낙동강 상류를 중심으로 소량 생산되고 있다. 다른 채취원의 모래에 비해 별다른 처리과정이 필요하지 않아 생산가격이

저렴하며 품질 또한 우수한 특징이 있다. 하천모래의 데이터 개발은 한국골재협회 대구지회가 참여하였으며, 시스템경계 및 데이터 수집 범위는 <그림 5>와 같다.

2) 바다모래

바다모래는 해저모래 채취기술, 선박 및 장비의 발전에 의해 채취량

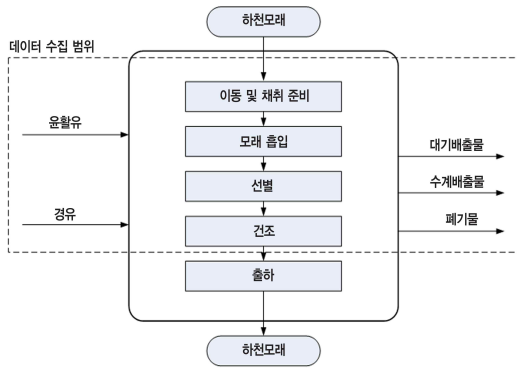


그림 5. 골재 - 하천모래 - 데이터 수집 범위

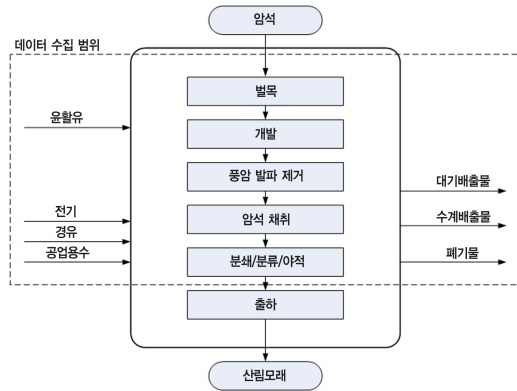


그림 7. 골재 - 산림모래 - 데이터 수집 범위

이 큰 폭으로 증가하였다. 육상모래나 산림모래에 비해 부존량이 절대적으로 많고, 생산 가격이 비교적 저렴한 편이며, 품질이 우수하다. 바다모래의 조사는 한국골재협회 인천지회와 대표성이 충분한 1개 업체가 참여하였으며, 시스템경계 및 데이터수집 범위는 <그림 6>과 같다.

3) 산림모래

우리나라는 산림이 국토의 대부분을 차지하고 있기 때문에 다른 골재에 비해 산림골재의 부존량이 가장 많다. 산림모래는 석산에서 벌목 및 개밭 작업을 완료한 후 다이너마이트를 이용하여 파쇄한 후 이를 크러셔로 분쇄하고 걸러 모래를 만드는 공정으로 제조된다. 산림모래의 전과정평가에는 한국골재협회 서울지회와 대표성이 있는 업체가 참여하였으며, 시스템경계와 데이터 수집 범위는 <그림 7>과 같다.

4) 육상모래

육상모래는 여러 가지 모래 중 채취 과정이 가장 간단하다. 토질이 모래인 육상에서 불도저나 포크레인 등을 이용하여 모래를 채취, 바로 출하하는 것이 육상모래의 일반적인 채

취 방법이다. 육상모래의 LCA에는 한국골재협회 대구지회와 1개 업체가 참여하였으며, 시스템경계와 데이터 수집 범위는 <그림 8>과 같다.

5) 재생골재

재생골재(또는 순환골재, recycled aggregate)란 건축 및 토목 시공과정에서 발생하거나 건축물 등을 해체하는 과정에서 발생하는 건설폐기물 중 골재를 포함한 콘크리트 등을 수거하여 재생공정을 통해 만들어낸다. 재생골재 전과정평가에는 국내 최대 규모의 업체가 참여하였으며 시스템경계와 데이터 수집 범위는 <그림 9>와 같다.

3.2 골재의 전과정평가의 수행결과

하천모래를 비롯한 각 골재의 전과정평가를 수행하여 환경영향을 에너지자원 사용, 지구온난화, 수질오염, 인체독성으로 분류하고 이에 따른 결과는 아래 <표 4>와 같다.

각 골재에 대한 환경부하 비교는 재생골재의 지구온난화값이 큰 관계로 하천모래, 바다모래, 산림모래, 육상모래만을 대상으로 그래프화 하였다. 재생골재의 지구온난화값(탄소배출계수)은 998 kgCO₂-eq/m³로 모래의 평균값인 3.87 kgCO₂-eq/m³에 비하여 굉장히 높은 수치를 보이고 있어 비교분석 대상에서 제외하였다. 인체독성 영향에서는 일반모래보다 다소 높은 수준인 것으로 분석되었다.

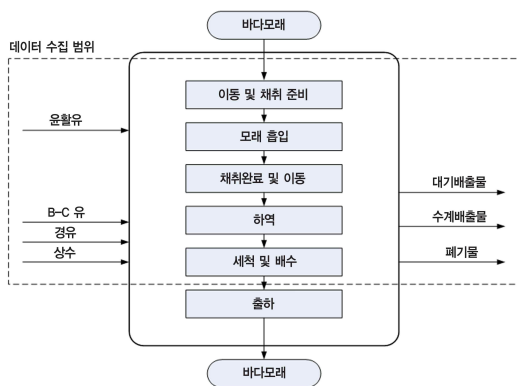


그림 6. 골재 - 바다모래 - 데이터 수집 범위

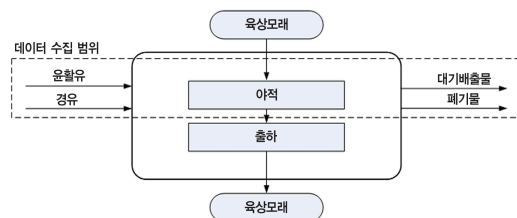


그림 8. 골재 - 육상모래 - 데이터 수집 범위

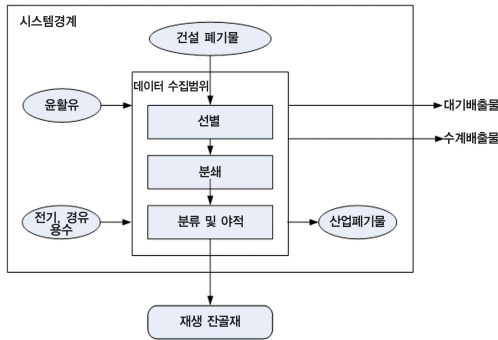


그림 9. 재생잔골재 - 시스템경계 및 데이터수집범위

1) 에너지자원 사용

모래를 생산하는데 평균적인 에너지자원 사용은 84.4 MJ인 것으로 분석되었다. 잔골재를 종류별로 살펴보면 산림모래가 가장 높은 128 MJ의 에너지자원을 사용하고 있으며 그 다음이 바다모래 26.8 MJ, 하천모래 21.7 MJ이고, 가장 낮은 에너지 사용은 육상모래로 3.47 MJ을 사용하는 것으로 분석되었다<그림 10>.

2) 지구온난화

이산화탄소 배출량으로 등가 환산한 지구온난화지수 분석 결과, 가장 많은 온난화지수값을 나타내는 골재는 산림모래로 1 m³ 당 5.10 kgCO₂-eq를 배출하며, 그 다음이 바다모래로 4.42 kgCO₂-eq인 것으로 분석되었다. 하천모래와 육상모래는 1.62 kgCO₂-eq와 0.26 kgCO₂-eq 수준으로 낮게 나타났다.

에너지자원 사용에서 산림모래가 바다모래에 비하여 5배 이

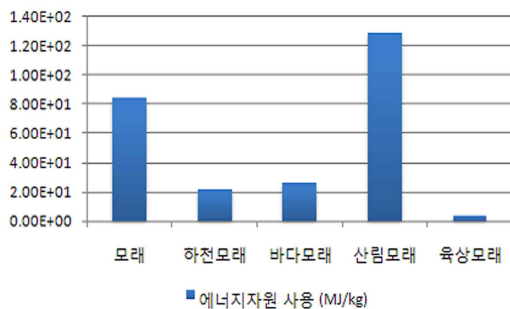


그림 10. 각 잔골재의 에너지자원 사용 특성

상 높은 수준이었음에도 산림모래와 바다모래의 지구온난화 지수값이 유사한 수준을 보이는 것은 바다모래에 투입되는 에너지 B-C유와 경우 때문인 것으로 사료된다<그림 11>.

3) 수질오염

각 잔골재의 수질오염특성을 PO₄₃으로 등가환산한 결과를 보면, 수질오염이 가장 작은 골재는 육상모래로 m³당 0.000395 kgPO₄₃-eq 값을 나타내고 있다. 수질에 가장 큰 영향을 미치는 골재는 바다모래로 m³당 0.0035 kgPO₄₃-eq를 배출하며 그 다음이 하천모래로 0.00247 kgPO₄₃-eq이다. 산림모래도 0.00165 kgPO₄₃-eq 값을 나타내고 있어 그 제조의 특성상 적지 않은 수질오염을 발생시키는 것으로 분석되었다<그림 12>.

4) 인체독성

인체독성은 발암물질계수인 1,4DCB를 사용하여 그 지수 값을 산출하고 있는데 네 가지 잔골재 중 인체독성물질값이 가장 큰 골재는 m³당 2.3 kg1,4DCB-eq를 배출하는 하천모래인 것으로 분석되었다. 바다모래와 육상모래도 약간의 인체독성값을 나타내고 있으며, 가장 낮은 인체독성 값은 0.0669 kg1,4DCB-eq을 배출하는 산림모래인 것으로 분석되었다<그림 13>.

4. 결론

잔골재의 종류별 환경영향 정도를 파악하기 위하여 하천모래, 바다모래, 산림모래, 육상모래 및 재생잔골재에 대한 전과정평가를 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

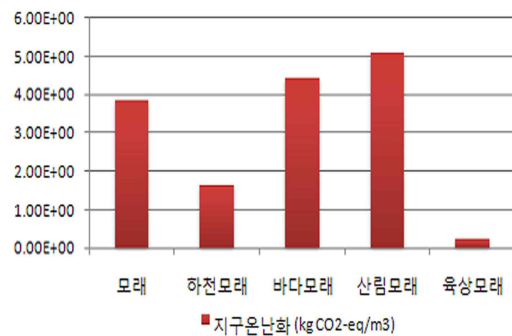


그림 11. 각 골재의 지구온난화지수 특성

표 4. 각 골재에 대한 전과정평가 수행을 통한 환경영향 값

환경부하	잔골재 종류	모래	하천모래	바다모래	산림모래	육상모래	재생잔골재
에너지자원사용(MJ/m ³)		8.44E + 01	2.17E + 01	2.68E + 01	1.28E + 02	3.47E + 00	2.52E + 04
지구온난화(kgCO ₂ -eq/m ³)		3.87E + 00	1.62E + 00	4.42E + 00	5.10E + 00	2.60E - 01	9.98E + 02
수질오염(kgPO ₄₃ -eq/m ³)		1.92E - 03	2.47E - 03	3.50E - 03	1.65E - 03	3.95E - 04	3.14E - 01
인체독성(kg1,4DCB-eq/m ³)		6.13E - 01	2.03E + 00	9.48E - 01	6.69E - 02	3.24E - 01	3.39E + 00

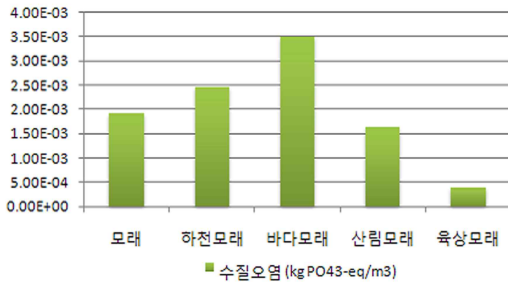


그림 12. 각 잔골재의 수질오염 특성

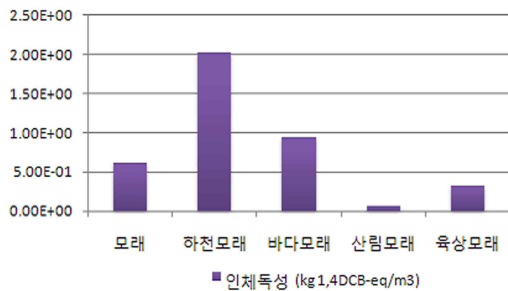


그림 13. 각 잔골재의 인체독성 특성

- (1) 일반 잔골재 및 재생잔골재를 1m³ 생산하는데 따른 전과정 지구온난화 영향값(kgCO₂-eq)을 cradle to gate 관점에서 평가한 결과 일반 잔골재는 3.87이고 재생잔골재는 998로 나타나 재생잔골재의 온실가스 배출이 매우 큰 것으로 분석되었다. 수질 오염 영향값(kgPO₄₃-eq)은 일반 잔골재는 0.00192, 재생잔골재는 0.314로 역시 재생잔골재가 큰 것으로 나타났다. 인체독성(kg1,4DCB-eq)과 관련해 일반 잔골재와 재생잔골재의 영향값은 0.613과 3.39로 재생잔골재가 5배 정도 더 큰 것으로 분석되었다.
- (2) 잔골재의 종류별 환경영향값을 분석한 결과 에너지자원을 가장 많이 소비하는 잔골재는 산림모래로 가장 작은 영향값을 보인 육상모래의 37배인 128 MJ/m³을 사용하는 것으로 분석되었다. 지구온난화에 가장 큰 영향을 미치는 잔골재도 역시 산림모래로 가장 낮은 육상모래의 20배인 5.1 kgCO₂-eq/m³인 것으로 분석되었다. 수질오염에 가장 높은 영향값을 보인 골재는 바다모래로 가장 낮은 육상모래의 9배정도인 0.0035 kgPO₄₃-eq/m³인 것으로 분석되었으며, 인체독성에 있어서는 하천모래가 가장 낮은 영향값을 보여 산림모래에 비하여 30배 수준인 2.03 kg1,4DCB-eq/m³인 것으로 분석되었다.
- (3) 이상의 전과정평가 결과를 종합하면, 재생잔골재에 비하여 일반 잔골재가 전반적인 환경영향 정도가 덜 한 것으로 평가될 수 있으며, 일반 잔골재 중에서는 산림모래와 육상모래가 지구온난화와 에너지자원소비 측면에서는 영향이 크

고 수질오염과 인체독성 측면에서는 영향이 덜 한 것으로 분석되었다.

본 고에서 고찰한 일반 잔골재와 재생잔골재의 값은 광물자원 고갈에 대한 고려없이 에너지자원과 지구온난화 측면에서만 평가하였기 때문에 어느 잔골재가 환경적으로 더 우수한지는 논란의 여지가 있다. 따라서 좀 더 종합적인 환경영향 평가값을 도출하기 위해서는 본 고에서 다룬 영향값 이외에도 다양한 환경영향 관점에서의 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다. □

참고문헌

1. 채창우, 건설재료의 환경친화성 평가와 가치공학적 개념의 도입, 한국건설기술연구원, 1999.
2. 채창우, 서치호, 건축재료의 환경친화성평가방법에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, Vol. 16, No. 12, 2000, pp. 97 ~ 104.
3. 이강희, 채창우, 산업연관분석법을 이용한 공공건축물의 에너지 소비량과 이산화탄소 배출량 산출연구, 대한건축학회 논문집, Vol. 18, No. 5, 2002, pp. 99 ~ 108.
4. 채창우, 이강희, 환경선언을 위한 건축자재의 특성에 관한 연구, 한국전과정평가학회 학술발표대회, Vol. 1, No. 2, 2005, pp. 141 ~ 146.
5. 한국건설기술연구원, 건축자재 환경성정보 국가 데이터베이스 구축사업, 국토해양부, 2008.
6. 한국건설기술연구원, 한옥의 환경성평가 및 한옥건축 활성화 추진 방안 연구, 국토해양부, 2010.
7. Kanghee Lee, Chang-U Chae, An Estimation Method of the Life-Cycle Energy and CO₂ of Buildings, AIK-JIA Joint Symposium, 2000.
8. Park Eun-Mi, Chae Chang-U, Lee Kang-Hee, Classification of Building Products for Environmental Product Declaration, SB07 SEOUL, 2007.
9. Park Eun-Mi, Chae Chang-U, Lee Kang-Hee, Comparative Study on Environmental Performance Certification Programs of Building Materials - Focused on Certification Methods Using LCI DB, SET 2008.
10. SETAC, Life Cycle Assessment, 1999.
11. ISO 21930, Environmental Declarations of Building Products, 2009.
12. Angela Acree Guggemos et. al., 'Comparison of environmental effects of steel- and concrete-framed buildings', *Journal of Infrastructure systems*, 2005.
13. Fulvio Ardente et. al., 'Building energy performance: A LCA case study of kenaf-fibres insulation board', *Journal of Energy and Buildings*, 2006.

담당 편집위원 : 권기주(한국전력공사) kyeunkjoo@kepco.co.kr