

에코콘크리트 (ECO-concrete)

金 元 基 (동양시멘트 중앙연구소 건설재료연구실 선임 연구원)

시멘트 콘크리트는 제조 공정에서
다량의 CO₂를 배출하는 시멘트와 자연에서 채취하는
골재를 주원료로 사용한다는 점에서 환경을
파괴하는 재료로서 인식되어 왔다.
그러나, 콘크리트는 건설 재료로서 인간의 거주공간과
생태계의 경계에 위치하는 특이한 재료이다.
이러한 관점에서 콘크리트에서도 환경에 미치는 악영향을 줄일 수 있는
방법으로서 ECO Material화하는 방향을 고려하게 되었다.

1. 서론

인류의 생활 환경을 유지해주는 바탕은 지구상의 각종 자원을 처리하여 얻은 재료이다. 그러나, 지구상의 자원은 유한하고, 자원을 채굴하여 소재와 제품을 제조하는 단계에서 막대한 에너지가 소요된다. 한편으로 자원을 처리하여 제품화하는 단계, 제품을 소비하는 단계 등 매 단계마다 대기 오염이나 수질 오염 같은 공해나 폐기물의 발생과 같은 환경에 대한 부담이 가해지고 있다. 이러한 문제들은 인구의 증가와 산업 사회의 발전에 따라 더욱 심각해지고 있는 실정이다. 지구는 물질적으로는 닫힌 계(closed system)이므로 인류가 언제까지나 현재의 생활 수준을 유지할 수는 없으며, 그렇다고 현재와 같은 소비 형태나 산업 구조 하에서 자원과 에너지 사용량을 감소시킨다고 하는 것

은 곧 인류의 생활 환경의 악화를 의미하는 것이다.

1964년 UN총회에서 미국의 Stevenson이 “지구 우주선”이라는 개념을 처음으로 주창한 이래 1971년 로마클럽에서 발표한 “성장의 한계”, 1972년 제1회 UN환경회의의 “인간환경선언” 이래 환경에 관한 관심이 고조되고 드디어 1992년 리우 환경회의 이후 지구환경시대라는 개념이 정립되기에 이르렀다. 이것은 유한한 자원 조건에서 인류의 지속적 발전을 꾀하기 위해서는 사회구조를 자원 낭비형 산업사회에서 순환형으로 바꾸어서 최종적으로는 폐기물의 발생이 없는 (zero emission) 사회 구조를 구축하자는 것이다. 따라서 자원-소재-제품의 흐름에 있어서도 새로운 자원을 이용하기보다는 폐기물을 자원으로 활용하는 역공정(inverse-manufacturing)으로 전환해야 한다는 것이다.

이러한 목표로 접근하는 방식으로 재료분야에서 ECO material (Environment Conscious Material)이라는 개념이 나오게 되었다. 지금까지의 재료는 인류의 생활권을 넓혀서 활동 영역을 확장시키고, 인간의 생활을 풍요하게 해준다는 두 가지 관점에서 개발이 이루어져 왔으나 ECO material에서는 이 두 가지 관점 이외에 인류의 활동권과 외부환경과의 조화를 꾀한다는 환경조화성에 주안점을 둔 것이다.

ECO material로서 갖추어야 할 기본 요건은 다음과 같다.

- ① 원재료의 채취 단계에서 환경 파괴가 적을 것
- ② 소재, 제품 제조의 처리, 가공 공정에서 에너지의 소비를 줄이며 CO₂를 포함한 유해 물질의 배출이 적을 것.
- ③ 사용시 만족감을 주는 동시에 사용후 처리 과정에서 환경에 대한 악영향이 적을 것.

지금까지 시멘트 콘크리트는 제조 공정에서 다량의 CO₂를 방출하는 시멘트와 자연에서 채취하는 골재를 주원료로 사용한다는 점에서 환경을 파괴하는 재료로서 인식되어 왔다. 그러나, 콘크리트는 다른 재료와는 달리 건설 재료로서 인간의 거주공간과 생태계의 경계에 위치하는 특이한 재료이다. 이러한 관점에서 콘크리트에서도 환경에 미치는 악영향을 줄일 수 있는 방법으로서 ECO material화하는 방향을 고려하게 되었으며, 이것을 에코콘크리트라는 새로운 개념으로 정립하고 있다. 에코콘크리트(ECO-Concrete)란 Environment Conscious Concrete, 혹은 Ecological Concrete의 줄인 말로 전자는 주변 환경에 대한 부담을 최소화하여 환경과의 조화를 고려하는 콘크리트를 의미하며, 후자는 환경문제를 적극적으로 해결하기 위한 콘크리트를 의미한다.

여기서는 콘크리트를 ECO material화 하는 방향과 에코콘크리트의 종류, 특히 연속공극을 갖는 다공질콘크리트를 이용하여 에코콘크리트화하는 방법을 중심으로 해외의 연구·개발 동향 등을 간략하게 소

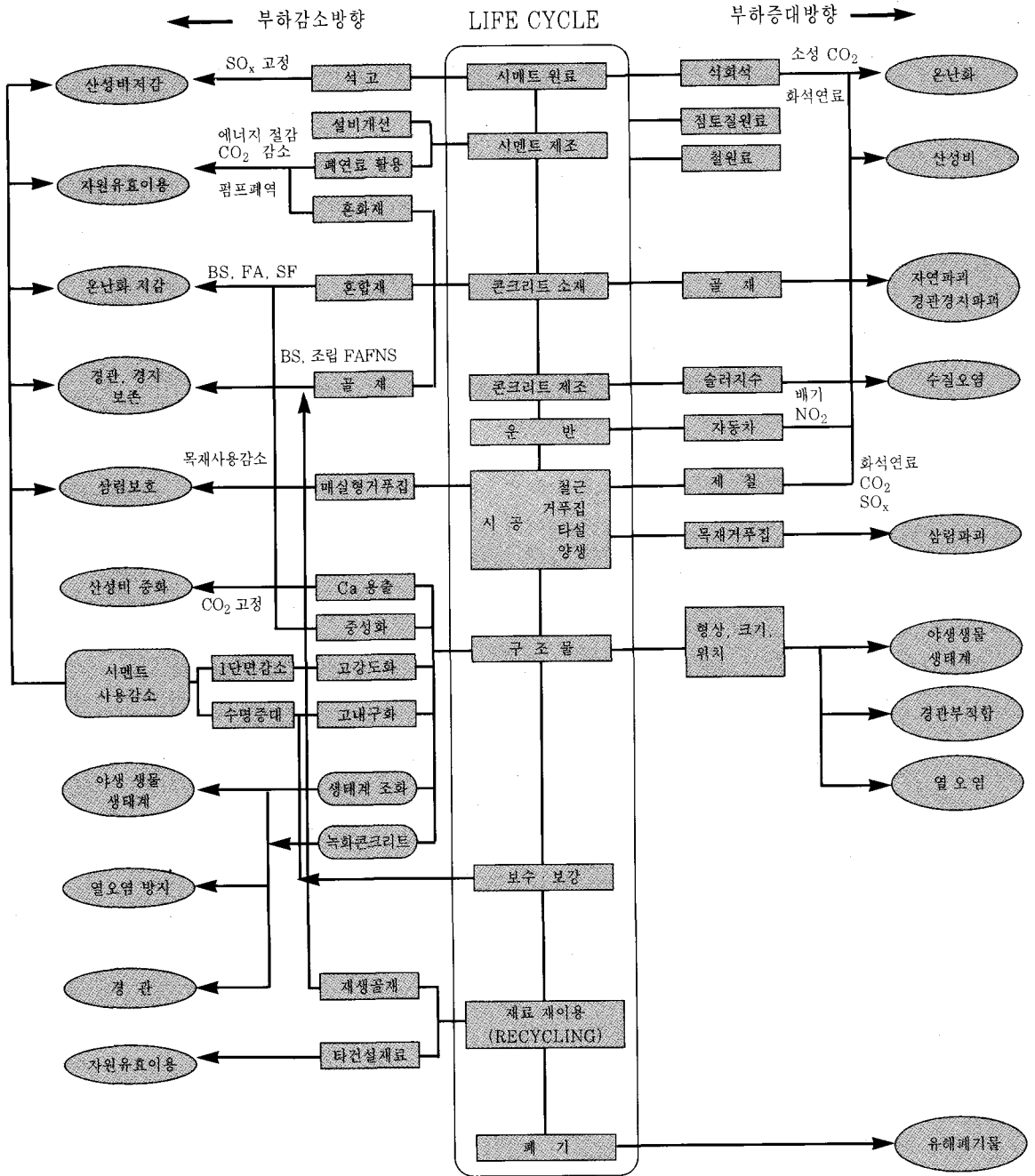
개하고자 한다.

2. 콘크리트의 ECO material화

종래의 콘크리트는 주로 강도, 내구성, 경제성의 3가지만을 목표로 한 재료로서 ECO material이라고 볼 수 없었다. 콘크리트를 ECO material화하기 위해서는 콘크리트의 원료-제조-이용-폐기까지의 전체적인 Life cycle에서 환경에 대한 부담을 줄이고, 생태계에 적합한 재료, 공법, 설치가 이루어져야 하며, 경관을 보존하거나 향상시켜야 한다. 그림 1은 콘크리트의 Life cycle의 각 단계에서 환경에 대한 영향을 나타낸 것이다. 콘크리트를 사용함에 있어서 소재에서부터 제조, 사용, 폐기의 전 과정에서 환경에 대한 부담을 줄이는 방향은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- ① 시멘트 제조시 설비를 개선하거나 폐연료 등을 사용하여 에너지를 줄인다.
- ② 고로슬랙이나 플라이 애쉬 등의 산업부산물을 혼화재료로 이용한다.
- ③ 산업부산물을 골재로 이용한다.
- ④ 목재 거푸집을 사용하지 않는다.
- ⑤ 콘크리트 구조물을 고강도화하여 단면의 크기를 줄인다.
- ⑥ 콘크리트의 내구성을 향상시켜 수명을 길게 한다.
- ⑦ 구조물의 유지 관리, 보수·보강으로 사용연한을 길게 한다.
- ⑧ 콘크리트 구조물의 철거시 재생부재, 재생골재, 재생철근을 재활용한다.
- ⑨ 구조물의 설치 장소나 크기를 적정화하여 열의 방출을 최소화하고, 녹화를 실시하여 생태계를 보존하는 동시에 경관을 고려한다.

환경에 대한 부담을 줄이는 기본적인 원칙은 물질의 순환으로 재생이 곤란한 자원의 이용을 억제하여 리사이클이 가능한 체계를 구축하는 것이다. 또한 콘



〈그림-1〉 콘크리트의 소재, 제조, 사용, 폐기의 전단계에서 환경에 미치는 영향

크리트 구조물은 가급적 수명이 길고, 수리가 가능한 구조이어야 한다. 여기서 ②, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧의 방법은 직접 시멘트의 사용량을 절감하는 방법으로 가장 중요시되어야 할 사항이다.

3. 에코콘크리트의 분류

에코콘크리트란 지금까지 콘크리트가 인간에게만족시켜주었던 풍족한 생활 공간의 제공 과정에서 환경에 미친 악영향을 최소화하고 나아가서는 생태계와 조화와 공존을 기하자는 콘크리트를 말한다. 에코콘크리트는 크게 나누어 두 가지로 분류를 하고 있다.

가. 환경부하 저감형 에코콘크리트 (Environment Conscious Concrete)

폐기물, 오염, 오락, 온난화, 자원고갈과 같은 환경에 대한 악영향을 줄이는 에코콘크리트를 말한다. 여기에는 다음과 같은 것들이 있다.

① 초내구성 콘크리트

내구성을 향상시켜 콘크리트 구조물의 수명을 길게 하여 시멘트나 골재와 같은 자원 사용을 가능한 감소시키는 동시에 해체에 의한 콘크리트 폐기물의 발생량을 줄이는 콘크리트.

② 재생 콘크리트

콘크리트 구조물의 해체시 발생하는 폐콘크리트를 자원화 하여 시멘트의 원료나 재생 골재로서 사용.

③ 다공질 콘크리트

콘크리트를 연속 공극을 갖도록 다공질화하여 콘크리트가 수질 정화 기능이나 CO₂ 기체 흡착 기능을 갖도록 하고 흡음재로도 이용.

④ 에코시멘트를 사용한 콘크리트

각종 도시 쓰레기의 소각회, 하수 오니, 산업폐기물 등을 사용하여 제조한 에코시멘트를 사용한 콘크리트.

⑤ 혼합시멘트를 사용한 콘크리트

CO₂ 발생의 저감과 산업폐기물의 재활용을 위하여 플라이 애쉬, 고로 슬랙 등의 혼합재를 대량 첨가한 혼합시멘트를 사용한 콘크리트.

나. 생물대응형 콘크리트(Ecological Concrete)

① 식생 콘크리트

식물이나 해초가 자랄 수 있거나 수서 곤충, 미생물 등이 번식할 수 있으며, 치어의 성장을 보호해줄 수 있는 콘크리트.

② 생물 서식에 악영향을 끼치지 않는 콘크리트

생태계를 파괴하지 않는 콘크리트로서 투수성 다공질 콘크리트 포장, 저알칼리성 콘크리트.

즉 에코콘크리트란 지구환경에 대한 부담을 줄이는 동시에 인간을 포함한 생물과의 경계점에서 생태학적인 면을 배려한 콘크리트라고 정의할 수 있다.

4. 환경부하저감형 에코콘크리트

가. 熱收支(녹화콘크리트 · 투수성포장)

콘크리트가 에코콘크리트의 역할을 할 수 있도록 하는 주된 방법은 콘크리트의 형태를 다공질하는 것이다. 다공질 콘크리트의 가장 큰 특성은 연속공극으로 투수성이 크므로 투수성 포장이나 녹화콘크리트용 재료로 이용할 수 있다.

일반적으로 콘크리트는 불투수성이므로 콘크리트가 덮인 부분은 식물이 자랄 수 없으며 빗물의 공급이 끊기므로 콘크리트 포장 하부의 지층은 생태학적으로 죽은 공간이 된다. 다공질콘크리트 포장을 채용하면 식물이 자랄 수 있는 공간을 제공하여 경관을 아름답게 하는 기능 외에 지하수를 보급하여 물의 순환을 자연스럽게 하는데 기여할 수 있다.

최근 들어 다공질콘크리트의 새로운 장점으로 콘크리트 구조물과 주변 지역 사이의 온도변화를 완화하는 효과가 발견되고 있다. 이러한 온도 제어 효과는

미세한 구역에서 기상조절기능이 있으므로 여름철에는 온도의 상승을 억제하고 겨울철에는 보온 효과가 있다고 한다.

① 녹화콘크리트

지금까지의 기술로는 건물의 옥상이나 벽면을 직접 녹화하는 것이 곤란하였지만, 최근 들어 다공질콘크리트에 직접 식물을 재배하는 것이 가능해졌다.

일반적으로 건물의 표면 온도는 목조 건물에서는 건폐율이 증가할수록 낮아지는데 비해 콘크리트에서는 반대로 증가한다. 다공질콘크리트를 사용하여 콘크리트 건물 표면을 녹화하면 건물의 표면온도를 낮게 할 수 있어서 도심부의 열섬(heat island) 효과를 억제할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 한편으로 건물 내부의 온도 변화도 완화되는 효과가 있는데 이것은 다공질콘크리트 자체의 공극과 녹화 층의 식물이 함유하고 있는 수분에 의한 단열 효과에 기인하는 것이다.

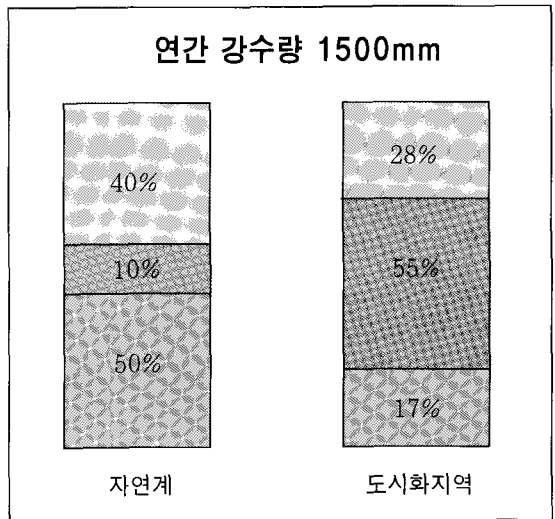
② 투수성 포장

다공질콘크리트를 투수성 포장에 적용하면 포장체의 온도변화 억제에 큰 효과가 있다. 이것은 다공질콘크리트의 연속공극을 통한 지하수의 증발산이 활발하게 이루어지는 동시에 다공질콘크리트 중의 공극이 단열효과를 나타내기 때문이다.

일반적인 아스팔트 포장과 비교하면 노면의 온도는 8, 9월중 한낮의 경우, 최고 60℃까지 상승하는데 비해서 다공질 포장을 채용하는 경우 40℃ 정도를 나타내는 온도저감효과가 있다. 또한 열을 방출하는 정도도 아스팔트포장에 비해 다공질 포장이 25~50% 정도를 나타내어 대기를 가열하는 열량이 적으므로 여름철 야간에 발생하는 열섬(heat island) 효과를 억제할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

나. 물收支(지하침투공법)

도시화에 따라 도로, 광장 등에 포장율이 증가하면



<그림-2> 자연계와 도시화지역의 물순환 모식도

서 빗물이 땅속으로 스며드는 양은 점점 감소되고 있다. 이 결과 지하수량의 고갈, 지하수면의 저하, 지반 침하, 토양 건조화 등의 생태계 파괴가 일어나고 있다. 이것은 한편으로 비가 내리면 대부분의 물이 땅속으로 스며들지 못하고 표면에 흘러서 소규모의 강수량에도 도시형 홍수를 일으키는 원인이 되고 있다. 그림 2는 물 순환의 모식도로 자연계와 도시화지역의 물순환을 비교하여 나타낸 것이다. 도시화가 진행되면서 증발량이 감소하고 직접유출되는 수량은 증가하는 반면, 땅속으로 스며드는 물의 양은 감소하고 있음을 알 수 있다.

따라서 도시화에 의한 물수지를 자연계의 물수지에 가깝게 하여 환경보전과 홍수대책에 이용할 수 있는 공법으로 지하침투공법이 나오게 되었다. 일본 동경의 경우 전체 포장 면적중 50%에 이 공법을 적용하면 표면유출수는 40% 정도 감소하고, 땅속으로 스며드는 물의 양은 3~10배 증가할 것으로 예측되고 있다.

지하침투공법에는 井戶法과 擴水法의 두 가지 방법이 있다. 정호법은 침투정(흡입정)을 땅속 깊은 곳까

〈표-1〉 식물이 생육할 수 있는 콘크리트로의 개선 방법

항 목	목 적	구 체 적 방 법
뿌 리 의 신 장	공 간 의 확 보	공 간 의 확 보
양분과 물의 흡수	양이온교환능력 확보 pH의 조 정 전 기 전 도 도	양이온교환능이 높은 물질 첨가 저알칼리시멘트의 상용으로 중화 완 충 물 질 의 첨 가 흡 착 물 질 의 첨 가 수 지 코 팅
투 수 성	뿌 리 의 호 흡	연 속 공 극 의 확 보
미생물, 소형동물	식물 유체의 분해	공 간 의 확 보

지 매설하여 빗물을 지하수층에 직접 유도하는 방식인데 빗물이 지하수면에 직접 전달되므로 지하수를 오염시킬 우려가 있다. 반면, 확수법은 투수성포장이 나 침투 트렌치, 침투성 컬버트 등을 이용하여 빗물을 지표나 지표 부근의 토양에 분산 침투시키는 공법으로 보다 자연환경과 가까운 형태로 처리가 가능한 방법으로 생각되고 있다.

이러한 공법에는 다공질콘크리트의 사용이 필수적이다. 우수한 침투성능을 나타내는 다공질콘크리트로는 0.5~0.8mm 정도의 연속공극으로 전체 공극율은 15~20% 정도, 콘크리트의 투수계수는

0.2~1.0cm/sec 정도, 압축강도는 200kgf/cm² 이상, 휨강도는 25kgf/cm² 이상인 것이 바람직하다고 한다. 이 정도의 물성이면 일반적인 보도 뿐만 아니라 경교 통로에도 사용할 수 있으며 프리캐스트 형태의 제품으로 간편하게 시공이 가능하다고 한다. 최근에는 차도에도 이것을 적용하기 위하여 다공질콘크리트에 구리섬유를 보강하는 방식도 검토되고 있다.

그 외 투수성포장의 장점으로 미끄럼저항의 증대, 노면의 난반사 방지, 소음 저감 등의 효과가 있는 것으로 알려지고 있다.

〈표-2〉 녹화콘크리트의 사례

명 칭	錄化콘크리트	콘 크 리 트	라 플 라	植生콘크리트
개 발 자	竹中工務店 등	父小野田 등	크린모뉴먼트	三井建設
압축강도(kgf/cm ²)	1 0 0 ~ 1 5 0	1 0 0 ~ 1 4 0	4 5	2 0 ~ 1 0 0
골재 크기(mm)	1 5 ~ 2 5	1 0 ~ 1 5		1 5 ~ 2 0
공극율(%)	30 이 상	3 0	입 의	2 0 ~ 3 5
충 전 재	비트모스, 비료	있 음	활 성 탄	없 음
층 토	2~4cm 두께	없 음	없 음	5cm 두께
식 물	풀, 低木	풀, 꽃	풀	풀
시 공 방 법	타설 → 충전 → 객토	배양토투입 → 블록 타설	타설 → 충전재배치 → 타설	블록설치 → 객토
실 적	田 川 등	東關東自動車道 郡 川 등		利 根 川 原 野 谷 川

5. 생물대응형 에코콘크리트 (Ecological Concrete)

가. 육상환경에 적용하는 에코콘크리트

식물이 토양에 뿌리박고 자라기 위한 토양의 역할은 식물체의 고정지지기반을 확보해주는 것 외에 양분과 수분의 저장·공급, 산소의 공급이다. 생물대응형 콘크리트가 되기 위해서는 이러한 역할을 수행할 수 있어야 한다. 일반적인 콘크리트는 치밀하고 고알칼리성이며 양분이나 수분을 함유하는 능력과 투수성이나 투기성이 없으므로 식물이 발아하여 생육할 수 있는 환경을 줄 수 없다. 따라서 이러한 기능을 인공적으로 만들어 줄 필요가 있는데 우선, 뿌리가 성장할 수 있는 공간을 확보해야 하고 알칼리나 염류의 용출을 방지하는 동시에 양분이나 수분을 보관할 수 있으며 투수성이 있어야 한다. <표-1>은 식물이 생육할 수 있도록 콘크리트를 개선하는 방법을 정리한 것이다.

따라서 다공질콘크리트를 기반으로 식물이 살 수 있는 녹화콘크리트가 개발되어 시험시공 등이 이루어지고 있다. <표-2>는 녹화콘크리트의 시공례를 나타낸 것이다.

나. 하천, 해양환경에 적용하는 에코콘크리트

하천, 호소, 해양 환경은 물과 공간이 일체가 된 생물의 서식공간이라 할 수 있다. 이러한 생태환경은 물, 천이역, 육지로 분류할 수 있는데 생물의 생활사에서 필수적인 것은 환경의 연속성이다. 최근 하안 구조물이나 해양 구조물의 설치 면적이 증가하면서 천이역이 감소하고 있는 실정이다. 이것은 물가나 해변의 자연환경이 훼손

되는 것을 의미한다.

물가나 해변의 자연환경을 보존하는 방법으로 하안이나 해양 구조물로 사용되는 콘크리트의 소재나 형태를 생물이 서식할 수 있도록 조정하는 것이 있다. 소재 면에서는 콘크리트의 표면을 거칠게 처리하거나 투수성을 부여하고 표면의 화학적 상태(pH, 각종 금속이온, 주변의 산소요구량 등)를 적합하게 조정하는 동시에 수분의 함유능력을 높이는 것이 필요하다. 형태 면에 있어서는 물의 유속이나 파도 등의 유속환경을 생물 서식에 적합하도록 완화시켜 주는 것이 필요하다.

따라서 소재로는 다공질콘크리트가 유망시되고 있는데, 인공어초, 인공김양식장 등의 재료로 활용되고 있으며 다공질이므로 수중 미생물의 번식 공간이 될 수 있고 해조류의 부착이 용이하기 때문이다.

형태 면에서는 호안구조물의 형태를 수직보다는 경사식이나 경사-수직 혼성형으로 하는 것이 인공적인 해변의 역할을 하는 동시에 생물의 부착이나 생장에 도움을 주는 것으로 나타나고 있다.

다. 수질정화



(그림-3) 다공질콘크리트로 제작한 중공형 구체

〈표-3〉 다공질콘크리트의 배합례

배 합	결합재의 종류	W/C	단위재료량(kg/m ³)			
			물	시멘트	굵은 골재	고성능감수제
N	OPC	25	74.0	296	1540	2.96
B	슬래그시멘트	25	72.5	290	1540	2.18

생물학적 수질정화 기능은 어떤 담체중에 형성되는 생물 막에 기인한다. 생물 막은 박테리아를 비롯하여 대형동물에 이르기까지 다양한 생물의 서식환경을 제공한다. 생물 막을 이용한 수질정화는 지금까지는 자연석을 쌓아서 만든 호안이나 제방에서 미세하게 이루어져 왔으나, 다공질콘크리트를 이용하면 자연의 수질정화 능력이상을 발휘할 것으로 예상되고 있다. 이것은 다공질콘크리트에는 내부에 공극이 많고, 공극의 형상이나 크기가 복잡하고 다양하므로 형성되는 생물 막에는 박테리아를 비롯하여 대형동물에 이르기까지 다양한 생물의 서식환경을 제공하기 때문이다. (

다공질콘크리트 안에서의 해양생물의 부착성을 실험한 결과, 표면에는 1개월 정도, 내부에는 3개월 이내에 각종 생물의 부착이 확인되고 있다. 균류로는 유기성수질오염물을 정화하는 역할을 하는 질산균, 아질산균 같은 호기성균류가 주로 관찰되고 황산환원균 등의 혐기성 균도 어느 정도 관찰되고 있다. 기타 類, 원생동물, 후생동물(선충류, 빈모류, 복족류, 곤충류 등) 등의 다양한 생물이 관찰되고 있다. 따라서 다공질콘크리트를 이용한 수질정화의 가능성이 기대되고 있다.

〈그림-3〉은 수질정화용으로 시험중인 다공질콘크리트제 중공구를 나타낸 것이다.

6. 다공질콘크리트의 제조 방법과 향후전망

다공질콘크리트는 표면이 결합재로 코팅된 골재들을 서로 붙여서 제조하는 것으로 연속공극을 갖는 다

공질콘크리트는 결합재가 골재의 공극을 전부 채우지 않도록 하는 것이 기본이다. 일반적으로 골재 공극에 대하여 결합재를 약 30% 정도 충전시키는데 골재의 크기, 입도, 입형 등에 따라 다양한 공극율을 얻을 수 있다. 골재로는 굵은 골재와 가는 골재를 함께 쓰기도 하지만 모래를 사용하지 않는 無細骨材콘크리트(No fines concrete)가 일반적이며 〈표-3〉은 전형적인 무세골재 다공질 콘크리트의 배합을 나타낸 것이다.

이러한 다공질콘크리트의 특징은 시멘트 페이스트가 코팅된 골재로 이루어진 것이므로 다짐이 필요 없으며 공극율이 커서 경량화가 가능하다는 것이다. 또한 표면적이 상대적으로 크므로 중성화가 빠르다. 녹화콘크리트나 생물부착용 콘크리트를 만들기 위해서는 pH를 낮출 필요가 있는데 제품의 양생과정에서 CO₂가 많은 배기가스 등을 통과시켜 중성화를 시키는 방법도 제안되고 있는데, 이산화탄소의 고정화도 가능할 것으로 예측되고 있다. 또한, 골재도 일반골재 뿐만 아니라 폐콘크리트를 파쇄한 재생골재를 사용할 수 있어서 우수한 에코콘크리트용 소재로 주목을 받고 있다. ▲