

기능성 마감재로서 현무암 석분슬러지를 재활용한 드라이몰탈의 성능검증

Verification of Capacity of Dry-mortar Recycled Blast Sludge as Functional Finishing Material



고동우 (Ko, Dong-Woo) 이사 | 제주대학교 건축학부 교수 | dongwko@jeju.ac.kr

1. 서론

최근 들어 천연석재의 가공물을 각종 건축 또는 토목용 자재로 사용하는 경향이 점차 증가하고 있다. 채석장에서 채석된 원석을 가공공장으로 가져온 후, 절삭, 가공, 연마의 과정을 거쳐 건설자재로 납품되는 과정에서 석분 슬러지가 발생한다. 이들 석분슬러지는 그림 1과 같이 침전과 응집, 탈수과정을 거친 후, 최종적으로 산업폐기물로 분류되어 폐기된다.

제주도내 현무암 석분슬러지의 연간 발생량은 2005년 기준으로 17,000톤에 이르며, 이를 산업폐기물로 처리하기 위한 비용은 약 2억 5천만원으로 업체당 연간

3천만원의 폐기물 처리비용이 발생하고 있다. 현무암의 가공과정에서 배출되는 석분 슬러지를 산업폐기물로 처리하는 과정에서 기업에는 경제적 손실이 발생하고, 제주도에는 산업폐기물의 증가에 따른 환경오염 문제가 발생하고 있다. 만약, 현무암 석분슬러지를 처리하는 과정에서 현무암 석분 슬러지를 활용하여 새로운 상품을 개발할 경우, 기업의 입장에서는 경제적 손실을 최소화할 수 있고 제주도의 입장에서는 산업폐기물을 줄일 수 있다.

국내에서 일반적으로 석분슬러지를 건축용 내외장재 또는 장식재용으로 사용하기 위한 인조대리석의 재료로 재활용되거나, 석재의 알카리성을 이용하여 산성화



(a) 침전



(b) 응집



(c) 탈수

그림 1 현무암 석분슬러지의 배출과정

된 농토를 개량하는 토양보강재 등으로 활용되어 왔다. 유럽지역에서는 도로포장에 폐콘크리트를 활용한 바 있으며, 미국도 1970년대부터 폐콘크리트의 재활용에 대한 연구를 시작하면서 1990년에는 오염방지법령과 폐기물처리지침을 통하여 폐기물발생억제와 재활용을 추진하고 있다. 일본 또한 도로기반재용 또는 성토재로서 석분슬러지 또는 폐석분을 활용하고 있다.

현무암의 경우, 타석재와 비교할 때 원적외선 방사에너지와 음이온 발생량이 우수하기 때문에, 최근 실내공기의 질을 개선하기 위한 기능성 마감재로의 활용도 가능하다. 황토판재의 배합별로 휘파괴하중, 흡수성, 함수율, 난연성, 항곰팡이성, 원적외선 방출량, 음이온 방출실험결과를 분석하여 황토를 주원료로 한 친환경 건축자재인 황토판재의 성능을 평가한 사례도 있다. 그리고, 대나무활성탄을 이용한 친환경 시멘트계 건축마감재를 개발하기 위한 기초연구를 통해 물리적 특성과 흡착능성, 그리고 새집증후군과 관련한 각종 화학적 특성을 분석한 경우도 있다.

본 기사에서는 일반 시멘트몰탈에서 골재의 일부를 현무암 석분슬러지로 대체한 드라이몰탈을 제품화하기 위해 드라이몰탈의 최적배합비를 도출하고, 기능성 건축마감재로서의 성능을 평가함으로써, 현무암 가공과정에서 발생하는 현무암 석분슬러지를 활용한 드라이몰탈의 활용가능성을 소개하고자 한다.

2. 기능성 마감재의 현황과 기능

2.1 기능성 건축마감재의 현황

최근 웰빙열풍과 함께 실내환경문제에 있어서도 건강지향적인 요구가 증대되고 있기 때문에, 쾌적하고 안전한 실내공기 환경을 확보할 수 있는 천연소재 등을 활용한 친환경적인 건축자재를 사용하는 경우가 크게 증대되고 있다. 특히, 인간생활영역과 바로 접하는 건축마감재의 경우, 마감재로서의 기능을 원활하게 수행하기 위한 물리적 성질 뿐만 아니라, 실내환경개선을 통한 거주자의 건강도 보장할 수 있어야 하기 때문에, 이를 위한 다양한 기능의 마감재들이 개발되고 있다.

2008년 국립환경과학원에서는 기능성 건축자재 실태조사 및 관리방안에 대한 연구를 통해, 국내의 기능성 건축자재에 대한 현황을 조사하고 기능성 건축자재의 성능평가 항목과 그 시험방법을 제시한 바 있다. 이 보고서에 따르면, 대부분의 국내 건축자재들의 기능은 단순히 유해화학물질을 적게 방출하는 보건학적 측면에서만 초점이 맞추어져 있으며, 실내의 습도를 적절하게 조절할 수 있는 흡방습성이나 유해화학물질의 흡착 및 분해능 등 건축자재가 갖는 기능성 측면에 대한 관심은 상대적으로 미흡한 실정임을 언급하였다.

또한, 2008년 2월 경향하우징페어에 출품된 건축자재의 개발동향을 보면, 습도의 조절, 오염물질의 흡착 및 탈취, 항균 및 항곰팡이, 원적외선 또는 음이온 방출 등의 기능을 보유한 건축자재와 관련된 참여업체의 수가 2006년부터 급격하게 증가하는 추세를 보였다.

표 1은 국내에 유통되고 있는 기능성 건축자재의 카

표 1 국내 유통되고 있는 기능성 건축자재 현황

| 구분 | 업체수 | 제품수 | 기능 | | | | | |
|----|-----|-----|-----|----|----------|--------|--------|---------|
| | | | 흡방습 | 흡착 | 항균, 항곰팡이 | 원적외선방사 | 음이온 방출 | 기타 (탈취) |
| 국내 | 84 | 143 | 55 | 45 | 95 | 71 | 50 | 56 |
| 수입 | 4 | 10 | 9 | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| 합계 | 88 | 153 | 64 | 48 | 97 | 72 | 52 | 58 |

표 2 몰탈의 배합비

| 시험체 | 물 | 시멘트 | 잔골재 | 현무암 석분슬러지 | 흐름도 실험결과 |
|------|-------------|------------|--------------|--------------|----------|
| I-0 | 450g (0.50) | 750g (1.0) | 2250g (3.00) | 0g (0.00) | 145 mm |
| I-3 | 450g (0.50) | 750g (1.0) | 2182g (2.91) | 68g (0.09) | 148 mm |
| I-6 | 450g (0.50) | 750g (1.0) | 2115g (2.82) | 135g (0.18) | 150 mm |
| I-9 | 450g (0.50) | 750g (1.0) | 2047g (2.73) | 203g (0.27) | 153 mm |
| I-12 | 450g (0.50) | 750g (1.0) | 1980g (2.64) | 270g (0.36) | 155 mm |
| I-15 | 450g (0.50) | 750g (1.0) | 1912g (2.55) | 338g (0.45) | 157 mm |
| I-18 | 450g (0.50) | 750g (1.0) | 1844g (2.46) | 406g (0.54) | 160 mm |
| I-21 | 413g (0.55) | 750g (1.0) | 1777g (2.37) | 473g (0.63) | 145 mm |
| I-30 | 413g (0.55) | 750g (1.0) | 1575g (2.10) | 675g (0.90) | 151 mm |
| I-40 | 413g (0.55) | 750g (1.0) | 1350g (1.80) | 900g (1.20) | 157 mm |
| I-50 | 377g (0.50) | 750g (1.0) | 1125g (1.50) | 1125g (1.50) | 162 mm |

() 안은 시멘트 중량을 1.0으로 보았을 때 각 재료의 상대적인 중량비율

탈로그를 수집하여 기능을 분석한 내용이다. 원적외선 방사기능을 포함하고 있는 건축자재는 153개 제품 중 72개, 음이온 방출기능을 갖춘 제품은 50개로 평균, 항곰팡이 기능을 제외하고는 가장 많은 기능을 차지하고 있다. 기능성 마감재로서 원적외선과 음이온의 특징을 정리하면 다음과 같다.

원적외선은 가시광선보다 파장이 길어 눈에 보이지 않으며, 절대온도 0도 이상의 온도를 갖는 모든 물체에서 방사된다. 원적외선은 가시광선에 비하여 강한 열작용이 있고, 적외선을 받는 물질을 구성하는 원자들의 운동에 의해서 온도를 상승시키는 효과가 있어 열선으로 명명되기도 한다. 원적외선은 반사, 복사, 침투 및 공명 흡수효과를 갖고 있다.

음이온은 전기를 띤 눈에 보이지 않는 미립자 가운데 음(-)전기를 띤 미립자를 말한다. 이 음이온은 일반적인 생활공간에서 1cm³ 당 0 ~ 수백개 정도가 존재하는데, 폭포나 소나무에서는 공기 1cc당 800 ~ 2000개의 음이온이 들어있는 것으로 알려져 있다. 공기중에 존재하는 각종 오염물질 및 세균먼지, 꽃가루, 곰팡이 등은 양이온을 형성하고 있는데, 음이온은 이들 양이온을 중화 제거해 공기를 깨끗하게 하고 신선하게 유지시켜주기 때문에 최근 새집증후군을 없애거나 실내환경을 개선하는데 주로 활용된다.

3. 기능성 마감재의 성능평가

기능성마감재로서 드라이몰탈의 최적배합비를 도출하기 위해 배합과 그에 따른 물리적 성능을 평가한 후, 원적외선방사에너지량과 음이온 방출량을 측정하였다.

3.1 배합

기존 석산에서 배출되는 석분슬러지를 활용한 드라이몰탈의 연구결과를 참고하여, 슬러지를 전혀 포함하지 않는 0%부터 3%, 6%, 9%, 12%, 15%, 21%, 30%, 40%, 50%까지 잔골재를 대체하는 현무암 석분 슬러지의 양을 점진적으로 증가시키면서 압축강도와 휨인장강도, 원적외선 방출에너지량과 음이온 방출량의 변화 추이를 분석하였다.

이 과정에서 드라이몰탈의 시공성을 확보하기 위하여 매 배합마다 몰탈의 흐름도를 측정하여 흐름도를 140mm ~ 160mm의 범위 이내에 놓이도록 물의 비율을 조정하면서 배합하였다. 표 2는 실험에 적용된 시험체의 배합비이다.

3.2 물리적 성능

드라이몰탈의 물리적성능을 파악하기 위해 KS F

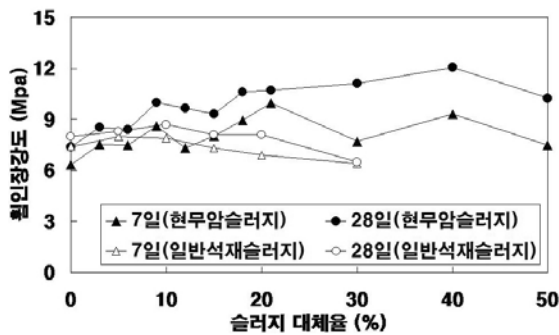


(a) 인장시험

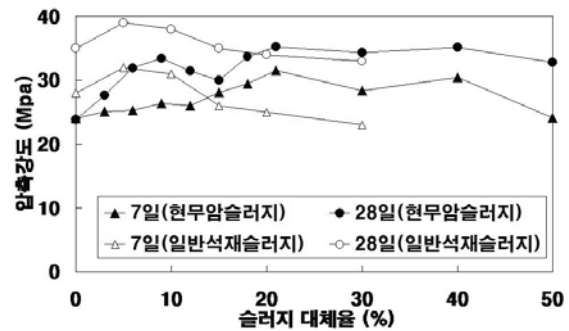


(b) 압축시험

그림 2 몰탈의 인장시험과 압축시험



(a) 휨인장강도



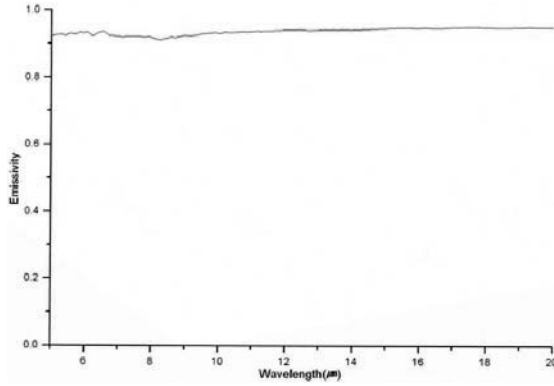
(b) 압축강도

그림 3 슬러지대체율에 따른 휨인장강도와 압축강도 변화 추이

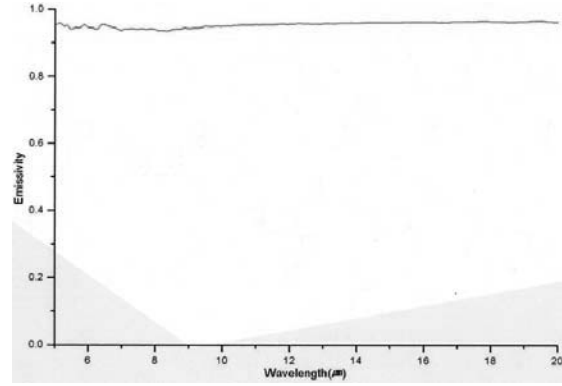
2476에 따라 휨인장강도와 압축강도실험을 수행하였다. 양생시간에 따른 강도변화를 파악하기 위해 3일, 7일, 14일, 28일 양생시점에서 강도를 측정하였다. 그림 2의 (a)와 (b)는 각각 몰탈의 인장강도와 압축강도를 측정하는 모습이다. 그림 3은 기존의 일반석재슬러지의 대체율에 따른 몰탈의 7일과 28일 강도실험결과와 현무암석분 슬러지를 포함한 몰탈의 7일과 28일 강도실험결과를 비교하고 있다. 기호 안이 빈 그래프는 석산에서 발생한 슬러지로 몰탈을 만들었을 때의 실험결과이고, 기호 안이 채워진 그래프는 현무암 석분슬러지로 대체한 몰탈의 실험결과이다.

잔골재를 일반 석재슬러지로 대체한 몰탈의 경우 전체적으로 강도증가효과는 거의 발생하지 않았다. 오히려 석재슬러지의 대체율이 10%를 넘기면서 휨인장강도와 압축강도 모두 떨어지는 것으로 나타났다. 반면,

현무암석분슬러지로 대체한 몰탈의 경우, 슬러지의 대체율이 21%에 도달할 때까지 휨인장강도와 압축강도 모두 지속적으로 증가하다가 대체율이 21%를 넘기면서 거의 증가하지 않았다. 대체율이 21%인 몰탈과 대체율이 0%인 기존몰탈의 휨인장강도와 압축강도를 비교하면, 각각 35%와 47% 증가하여, 기존 시멘트몰탈의 잔골재를 현무암석분으로 대체할 경우 어느 정도 강도 증진의 효과가 있는 것으로 나타났다. 현무암 석분 슬러지를 대체한 몰탈의 강도가 증가하는 원인은 시멘트의 수화반응을 일으키는 성분 중 하나인 CaO 성분이 일반 석재슬러지보다 현무암에 많이 포함되었기 때문으로 보인다. 이상의 결과로부터 시멘트몰탈에서 잔골재의 21%를 현무암석분슬러지로 대체했을 때 가장 효과적인 물성을 보여주는 것으로 나타났다.

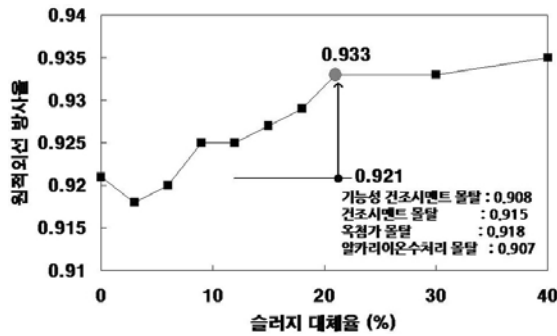


(a) 일반 시멘트 몰탈

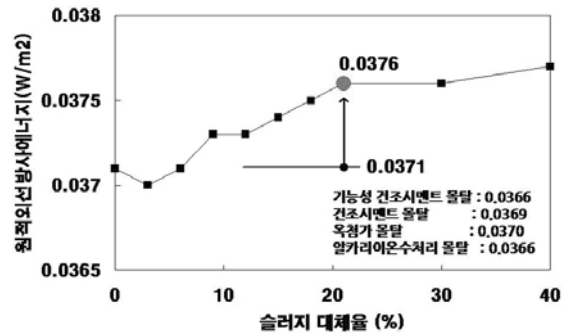


(b) 현무암 대체율 21%인 몰탈

그림 4 원적외선 방사율 비교



(a) 원적외선 방사율



(b) 원적외선 방사에너지

그림 5 슬러지 대체율에 따른 원적외선 방사율과 방사에너지량의 변화

3.2 원적외선 방사성능

3.2.1 실험방법

원적외선의 방사율은 흑체로서 온도가 40°C일 때 원적외선의 양을 측정하고, 가열로에 장착된 시료의 표면 온도가 흑체와 동일한 온도가 되었을 때, 원적외선의 양을 측정하여 아래의 식과 같이 방사율을 구하였다.

$$\epsilon_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_s(\lambda, T)}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_b(\lambda, T)} \quad (1)$$

여기서, $E_c(\lambda, T)$ 와 $E_b(\lambda, T)$ 는 각각 물체 표면과 흑체의 적외선방사에너지이다.

3.2.2 실험결과

일반 시멘트몰탈과 현무암석분 슬러지 21%를 대체한 몰탈의 원적외선 방사율을 그림 4에서 비교하고 있으며, 그림 5에서는 슬러지 대체율에 따른 원적외선 방사에너지와 방사율의 변화 추이를 나타내고 있다. 슬러지를 포함하지 않은 일반몰탈(I-0)의 원적외선 방사율은 0.921이었으나, 이후 슬러지를 포함하는 초기(I-3과 I-6)에는 원적외선 방사율이 다소 떨어지다가 슬러지를 9% 포함하는 I-9부터는 0.925부터 시작하여 I-21에서는 0.933까지 크게 증가하고, 현무암석분 대체율 21%를 넘기면서는 원적외선 방사율이 거의 증가하지 않았다.

이와 같은 원적외선방사율의 증가량은 기존 타 재료를 함유한 시멘트몰탈의 원적외선 방사율 증가량보다

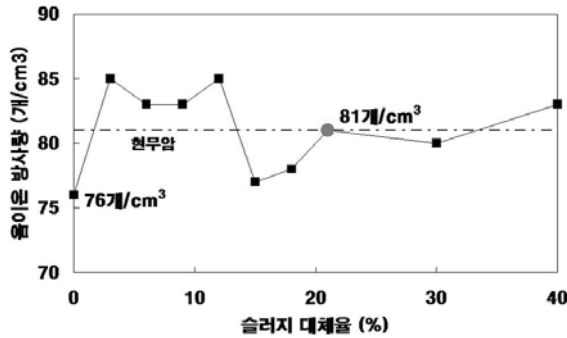


그림 5 슬러지대체율에 따른 음이온방사량 변화

훨씬 큰 수치로서, 시멘트몰탈에 현무암 석분을 배합하는 것만으로도 원적외선 방사량에 긍정적인 영향을 미침을 알 수 있었다.

3.3 음이온 방출량

3.3.1 실험방법

음이온의 실험방법은 한국건설생활환경 연구소의 KICM-FIR-1042에 따라 실험을 수행하였다. 음이온 방사량을 측정하기 위해 전하입자 측정장치를 이용하여 21°C±3°C, 습도 55%±15%, R.H.는 75cc조건에서 시험하였으며, 측정대상물에서 방출되는 음이온을 측정하여 단위체적당 이온수로 표시하였다.

3.3.2 실험결과

현무암 대체율에 따른 음이온 방사량의 변화 추이를 그림 5에 정리하였다. 슬러지를 포함하지 않은 일반몰탈의 음이온 방사량은 76개/cm³이고, 초기 3%의 슬러지를 배합한 시료(I-3)에서는 음이온 방사량이 85개/cm³까지 급격하게 증가하였다가, 6%, 9%, 12%까지는 (83~85)개/cm³ 사이에 분포하였다. 석분슬러지를 15%로 대체한 시편에서는 77개/cm³까지 감소하였다가, 대체율 21%부터는 음이온방사량이 81개/cm³ 정도를 유지하였다.

음이온방사량의 경우 슬러지의 함량과 음이온 방사량 사이의 일관된 상관성을 나타내지는 못하였으나, 현무암

표 3 각종재료의 열전도율

| 구분 | 비중 (kg/m³) | 열전도율 (W/mK) |
|-----------------|------------|-------------|
| 석면 | 130 | 0.046 |
| 석면 | 240 | 0.075 |
| 매트형유리섬유 | 80 | 0.035 |
| 모래 회반죽 | 2000 | 0.63 |
| 석회암 | 2180 | 1.40 |
| 대리석 | 2500 | 2.00 |
| 일반시멘트몰탈* | - | 0.66 |
| 현무암석분슬러지 대체 몰탈* | - | 0.59 |

* : KS L 9016에 따른 열전도율 실험값

석분슬러지를 포함함으로써 일반 시멘트몰탈보다 음이온 발생량이 최대 12%, 평균 약 5%정도 증가하였다.

3.4 열전도율

열전도율은 KS L 9016 :2001의 평판열계류법에 따라 측정하였다. 평판열계류법은 시험체를 통과하는 열류량을 측정하여 시험체의 온도차를 측정함으로써 열전도율을 구하는 방법이다.

물리적성능과 원적외선성능, 그리고 음이온성능에서 가장 우수한 결과를 보여준 현무암 슬러지 대체율 21%인 실험체(I-21)와 기존 시멘트몰탈(I-0)에 대해서만 열전도율 실험을 수행하였다. 잔골재의 21%를 현무암 석분슬러지로 대체한 몰탈의 열전도율은 0.59W/km으로 기존시멘트몰탈(0.66W/mK)보다 다소 낮은 것으로 나타났다. 표 3은 각종 건축재료의 열전도율과 본 실험에서 측정된 몰탈의 열전도율을 비교하고 있다. 현무암 석분슬러지 대체 몰탈의 열전도율은 기존 단열재로 사용되는 석면의 열전도율 0.046 또는 0.075의 10배에 이르지만, 석재인 석회암이나 대리석보다는 열전도율이 낮으며, 일반적으로 실내미장용으로 사용되는 회반죽과 유사한 정도의 열전도율을 나타내고 있다. 따라서, 일반적인 시멘트몰탈이나 미장재료와 비교할 때, 열전도율이 크게 증가하지 않아 단열측면에서도 특별한 손실요소는 없는 것으로 나타났다.

표 4 드라이몰탈의 사업성 분석

| 수익 | 비용 |
|---|--|
| 연간슬러지 재활용량 = 2,300톤 (2011년 추정발생량의 약 10%) 몰탈 생산가능량 = 14,603톤 => 365,079포대 (40kg/1포) 가능매출액 = 913백만원 (40kg 드라이몰탈 1포 = 2,500원) | 시멘트소요량 = 3,647톤 시멘트구입비용 = 365백만원 (시멘트 40kg 4,000원/포) |
| | 모래소요량 = 8,641톤 모래구입비용 = 112백만원 (모래 = 22,000원/m ³) |
| | 건조기구입 및 감가상각비 배합기 구입 및 감가상각비 건조에 따른 비용 인력투입 포장비용 등 제비용 = 약 300백만원 |
| | 예상수익 = 136백만원 |
| 913백만원 | 913백만원 |

4. 비용분석

본 드라이몰탈을 제품화하였을 경우의 경제성을 분석하기 위해 투입되는 비용과 획득할 수 있는 비용을 표 4에서 비교하였다. 2011년 제주도내 현무암 석분슬러지의 추정 생산량의 10%에 해당하는 2,300톤을 재활용한다고 가정하였으며, 소요되는 시멘트, 모래 등의 구입비용은 시중에서 구할 수 있는 가격으로 정하였다. 약 2,300톤의 슬러지를 재활용할 경우 생산할 수 있는 드라이몰탈은 14,603톤으로서 40kg 단위로 포장한다면 약 36만 5천포대에 이른다. 현재 드라이몰탈 1포대의 판매가격 2,500원을 적용한다면, 가능매출액은 9억 원 정도에 이르게 된다.

반면 드라이몰탈을 제작하기 위해 투입되는 시멘트 소요량은 3,647톤으로 그 비용은 3억 6천5백만원이 소요되며, 모래는 8,641톤이 소요되어 약 1억 1천2백만원의 비용이 소요된다. 여기에 건조기와 배합비 구입에 따른 비용 및 감가상각비와 건조비용, 인력 및 포장비용을 약 3억원으로 정하더라도, 순수익은 1억 3천만원에 이른다. 여기에 기존 현무암석분슬러지를 폐기하는데 투입되는 연간 4천여만원에 이르는 폐기물처리비를 절약할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 요약

최근 증가하는 현무암 석분슬러지를 건설재료로 재활용하기 위한 방안으로, 시멘트 몰탈에서 잔골재의 일부를 현무암석분슬러지로 대체한 후, 기능성 마감재로서의 성능을 검증한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 현무암 석분슬러지를 포함한 몰탈의 휨인장강도와 압축강도는, 대체율 21%에 도달할 때까지 압축 및 휨인장강도는 일반 시멘트몰탈 대비 각각 47%와 35% 증가하였다.
2. 원적외선 방사율에 있어서도 기존몰탈보다 높은 0.933까지 이르렀으며, 이 수치는 기타 기능성 마감재보다 우수한 원적외선 방사율을 나타내는 것이다.
3. 음이온 방사량은 현무암석분의 대체율에 따른 일관된 경향을 보이지는 않았으나, 일반 시멘트몰탈 보다는 5% ~ 12% 증가효과가 나타났다.
4. 기존 시멘트몰탈의 잔골재의 21%를 현무암석분 슬러지로 대체할 경우, 시멘트 몰탈보다 물리적 성질이 증가함과 동시에, 기능성몰탈로서의 원적외선 방사율, 음이온 방사량의 증진효과가 있었

다. 또한 새로운 건축자재의 생산을 통한 경제적 이득은 물론, 산업폐기물의 양을 줄일 수 있다.

참고문헌

1. 김기영(2006) 현무암 석분슬러지의 공학적 특성 및 활용방안 연구, 제주대학교 박사학위 논문.
2. 기술표준원(2010) KS L 9016: 2010 보온재의 열전도율 측정방법, 기술표준원.
3. 손장열 외 7인(2008) 기능성건축자재 실태조사 및 관리방안 연구, 국립환경과학원.
4. 이경희, 손장열 역(1994) 건축환경과학, 기문당.
5. 이청호(2009) 기적의 음이온, 모아북스.
6. 한국기술표준원(2007) KS F 2476 : 2007, 폴리머시멘트 모르타르의 시험방법, 한국기술표준원.