

굴패각 배합 석고재료의 열전도 특성 연구

권성현^{†, ‡}, 조대철*

순천향대학교 에너지환경공학과
336-745 충남 아산시 신창면 순천향로 22
[†]경상대학교 해양과학대학 해양환경공학과
650-160 경남 통영시 인평동 445
[‡]경상대학교 해양산업연구소
650-160 경남 통영시 인평동 445

(2013년 5월 8일 접수; 2013년 6월 2일 수정본 접수; 2013년 6월 5일 채택)

A Study on Thermal Conduction in Oyster Shell Incorporating Gypsum Objects

Sung-Hyun Kwon^{†, ‡}, Daechul Cho*

Department of Energy & Environmental Engineering, Soonchunhyang University
22 Soonchunhyang-ro, Asan-si, Chungnam 336-745, Korea

[†]Department of Marine Environmental Engineering, Gyeongsang National University
445 Inpyong-dong, Tongyeong-si, Gyeongnam 650-160, Korea

[‡]Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University
445 Inpyong-dong, Tongyeong-si, Gyeongnam 650-160, Korea

(Received for review May 8, 2013; Revision received June 2, 2013; Accepted June 5, 2013)

요 약

굴 패각분말을 함유한 석고시편체를 통하여 1차원 열전달 특성을 조사하였다. 굴패각 성분의 함유량이 늘어날수록 기공을 포함한 시편체의 구조적 변형에 근거하여 흡착과 같은 물리화학적 특성이 증가함에 따라 시편체 전체의 열전달 특성도 달라질 것으로 예측되었다. 푸리에(Fourier) 열전도 방정식을 기초로 하여 1차원 슬랩의 열전도 현상을 수치모사한 결과 패각 분말의 배합도 및 각 성분재료의 열전달관련 물리적 계수에 따라 상당한 열전도 분포의 변화를 관측할 수 있었으며 이는 모형실험 결과와도 잘 부합하였다.

주제어 : 굴패각, 석고체, 열전도, 1차원 열전달 분석

Abstract : We investigated one-dimensional thermal conduction for gypsum objects incorporating oyster shell powder. We presumed that according to the portion of oyster shell in the hybrid structure conductive characteristics of that would also change as some physicochemical properties such as volatile organic compound (VOC) adsorption were found to be changed considerably. Based on Fourier's 2nd law of heat conduction an analytical analysis in a flat slab (one axis perpendicular to an infinite plane) was performed. We found that composition of oyster shell and conduction-related coefficients and parameters could greatly influence on the thermal profile of that conduction, and some model experiments also served for it in the affirmative.

Keywords : Oyster shell, Gypsum object, Heat conduction, 1-dimensional heat analysis

1. 서 론

국내의 굴산업은 수출과 내수시장, 해안 지역 경제의 활성화에 매우 중요한 위치를 점하고 있는 바, 사용 후 노획된 굴패각은 환경 및 폐기를 포함한 지역사회의 현안의 하나이다. 그러나 이의 적절한 활용방안에 관해서는 현재 비료 조성제로 일부 사용되는 수준이며 전면적 재활용 연구가 일회적이고 단편적 수준에 머물러 있다[1]. 그간의 연구를 통하여 방

해석을 주성분으로 하는 패각은 몰탈, 석고 등 기존 건축소재와 유사한 조성을 가지고 있고 그 가공성에 따라 친환경적 건축용 재료로써 잠재력이 있다고 평가되고 있다[2,3]. 건축소재는 특히 실내에서의 유해성이 최소화되도록 유해물질 미방출, 방출시 자체 흡착 및 분해의 탁월성, 새집증후군의 예방이 가능한 기능성을 갖출 필요가 있다. 따라서 본 연구의 범위는 고칼슘을 함유하는 굴패각을 소재로 재활용하는 산업적 부가가치의 창출과 기존 석고재를 능가하는 실용적 단열성까지 확보할 수 있는 마감재의 개발로 압축될 수 있다.

석고재의 단열성에 대한 연구는 그 결과가 이미 실생활에 매우 밀접하게 활용되고 있으므로 본 논문에서는 주성분이

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: daechul@sch.ac.kr

doi:10.7464/ksct.2013.19.2.090

함수황산칼슘(CaSO₄ · 2H₂O)인 석고를 주 시험체로 사용하되 새로운 원재료인 굴패각의 함유에 따른 복합마감재의 열전달 특성을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

굴 패각분말은 인공 포졸란에 속하며 그 자체는 수경성이 없어 황토, 석고, 기타 친환경재료와 혼합하여 사용하게 되면 이에 함유되어 있는 가용성 실리카가 탄산칼슘이 93.68%로 구성되어 있는 굴 패각분말인 칼슘과 상온에서 반응하여 구산칼슘(CaO, SiO₂, Na₂O)을 만드는 포졸란 반응생성물로 충만되면서 경화체가 단단하게 결합되어 강도가 증가되고 마감재의 수밀성과 내구성이 크게 향상되는 장점을 활용하면 이들을 이용해 산업폐기물에서 고부가치를 창출할 수 있다[4]. 본 연구는 굴 패각분말에 대한 각 마감재별 변수의 물리적 화학적 특성에 기초하고 있다.

2.1. 시험체 제작

본 연구의 실험재료는 굴 패각분말, 석고와 같은 소재를 활용하여 일정 무게비율에 따라 물과 함께 혼합하여 반죽한 뒤, 가로 15 cm, 세로 15 cm, 높이 3.2 cm 크기의 틀에 부어 굳히고, 110 °C에서 10시간 건조시킨 후 사용하였으며 이와 같은 방법으로[5] 배합비율에 따라 굴 패각분말이 10, 30, 50% 함유된 시험체를 제작하였다(Figure 2).

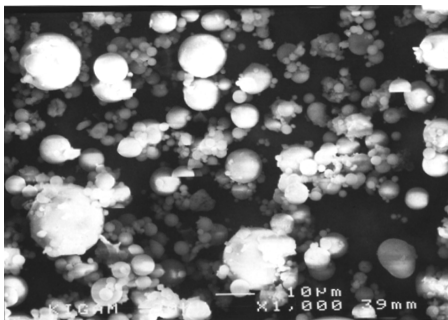


Figure 1. Oyster shell structure photographed by SEM (x1,000).

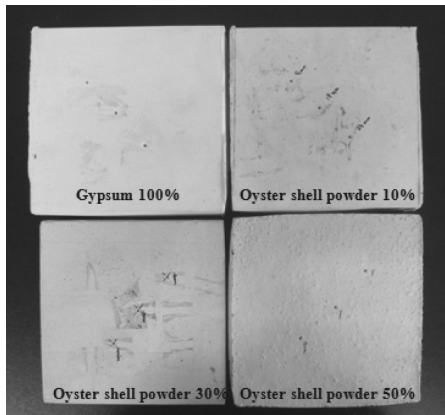


Figure 2. Test objects used in the experiments.

2.2. 굴 패각분말이 함유된 시험체의 열 전달을 평가

굴 패각분말을 배합비율에 따라 제작된 시험체로부터 온도 기록계(HR 1300)로 30분 간격으로 총 3시간 동안 시간이 경과됨에 따른 온도 변화를 측정하여 비교하였으며(Figure 4) 실험값을 이용한 열전도율을 추정하여 역해석하였다. 먼저 열전도는 시험체 내에 온도구배가 있을 경우에 일어나는 열전달 양상으로 에너지의 분자운동에 의하여 고온부에서 저온부로 이동한다. 2차원 직교 좌표계에서는 전도에 의한 열 전달율은 다음의 푸리에 법칙(Fourier's law)으로 표현된다.

$$q/A = -k \frac{\partial T}{\partial x} \tag{1}$$

q는 열전달량이고, k는 물체의 열전도도, A는 물체의 단면적이며 $\partial T / \partial x$ 는 온도구배(temperature gradient)를 나타낸다.

대류열전달은 움직이는 유체가 그것과 다른 온도를 가진 면과 접촉할 때 일어나며, 유체와 면사이의 열 전달률은 다음과 같은 뉴턴의 냉각법칙(Newton's law of cooling)을 따른다.

$$\frac{dq}{dt} = hA(T - T_{env}) \tag{2}$$

여기서, h는 열전달 계수, T는 시험체 면의 온도, T_{env}는 시험체 주위의 유체온도를 나타낸다.

시험체의 밀도를 2,000 kg/m³, 비열은 1297.9 J/(kg·K)로 가정하여 시험결과와의 감도해석을 통하여 열전도율을 추정하였다. 해석시간은 시험시간과 동일한 50분으로 하였다. 경계 조건은 Figure 3과 같이 양단은 단열체로 되어있으므로 열 이동이 없는 것으로 설정하였고, 아래쪽은 발열체에서 전도된 표면의 온도를 경계값으로 하였다. 대기에 접하는 부분의 온도는 16.4 °C로 하고, 열전달계수는 h는 11.63 W/(m²·K)로 하여 계산하였다.

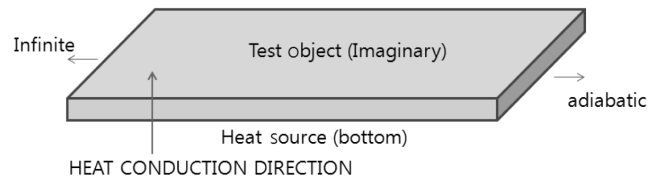


Figure 3. Boundary constraints for heat analysis of a test object.

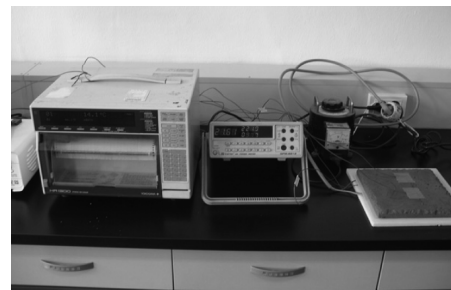


Figure 4. Experimental setup for heat analysis.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열전달률 분석

굴 폐각분말이 함유되지 않은 순수 석고만으로 이루어진 시험체로부터 3시간 동안 열 전달률을 측정된 결과(Figure 5), 바닥에서의 1/4만큼의 두께를 제외하고 깊이에 따른 열전달 비율은 비교적 선형적으로 일정하였으며 3시간 경과 후, 바닥과 표면과의 온도 차이는 약 60 °C로 나타났다.

굴 폐각분말이 10% 함유된 시험체로부터 열 전달률을 관찰한 결과(Figure 6), 대조군 surface에 비해 시간의 경과에 따른 표면과 깊이별 온도 차이에서 큰 변화가 나타나지 않았다. 3시간 경과 후, 시험체의 표면과 바닥의 온도 차이는 66.0 °C로 대조군과 약 6 °C 차이를 보였으며 단열효과가 증가하였음을 알 수 있었다.

굴 폐각분말이 30% 함유된 시험체로부터 열 전달률을 관찰한 결과, 표면과 바닥의 온도 차이는 3시간 경과 후 60.4 °C로 대조군과는 큰 차이가 없었으며, 10% 굴 폐각분말과는 5.6

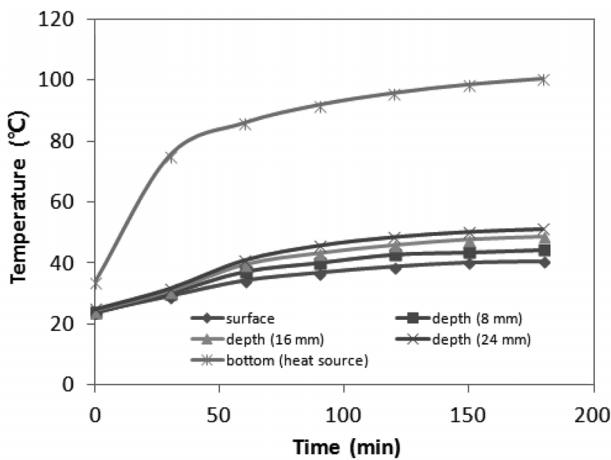


Figure 5. Temperature change with time for a test brick with gypsum only.

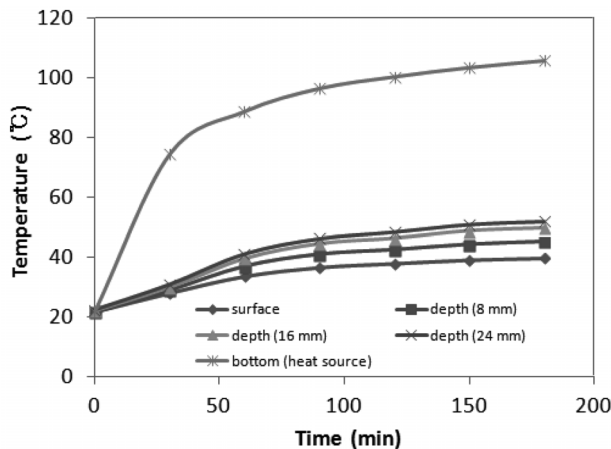


Figure 6. Temperature change with time for a test brick with 10% of oyster shell powder.

°C의 차이로 굴 폐각분말의 함유량 증가에 따른 단열성 향상은 관찰되지 않았다(Figure 7).

굴 폐각분말 함유량이 50%인 시험체의 경우, 표면과 바닥의 온도 차이는 3시간 경과 후 59.6 °C로 앞서 대조군 및 30% 시험체와 비슷한 결과를 보였다(Figure 8). 본 실험을 통하여 굴 폐각분말의 함유량은 열차단에 있어 적정비율이 존재하는 것으로 보이며 일정함량이 넘어가면 주요한 단열효과는 없는 것으로 판단된다. 이를 확인하기 위한 간단한 분석을 시도하였는데 푸리에의 열전도법칙과 뉴턴의 냉각법칙을 이용하여 각 시험체에 대하여 열전도계수를 계상하였다. 즉, 정상상태의 온도 분포로부터 온도구배를 구하여 열전도율 k값을 구하였다(Table 1).

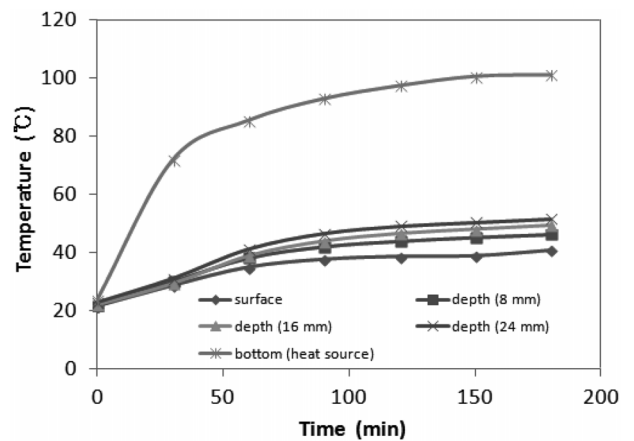


Figure 7. Temperature change with time for a test brick with 30% of oyster shell powder.

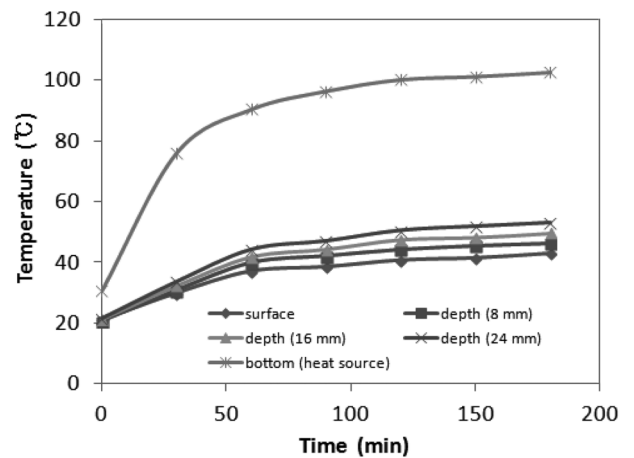


Figure 8. Temperature change with time for a test brick with 50% of oyster shell powder.

Table 1. Values of thermal conductivities (k's) calculated from steady-state temperature gradients

Test object	Gypsum only	10% oyster shell	30% oyster shell	50% oyster shell
k (W/m·K)	0.130	0.119	0.129	0.129

Table 2. Thermal conductivities for several substances

Thermal conductivity (W/m·K) at 25 °C	
Air	0.024
Glass	0.960
Gypsum (arch. material)	0.170
Foam	0.030
Styrofoam	0.033
Urethane foam	0.021
Insulation materials	0.035-0.160

유사정상상태($dT/dt = 0$)를 가정하여 뉴턴의 냉각법칙과 푸리에 법칙을 연립으로 적용하여 k 값을 구할 수 있다. Table 1에 그 결과를 표시하였다. 10% 굴패각을 포함한 시험체의 열전도율은 $0.119 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 로써 타 시험체의 $0.130 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 에 비하여 약 8.5%의 차이를 보여 유의한 결과로 사료되며 또한 Table 2에서 상용건축재로 사용되는 석고보드의 열전도율이 약 $0.170 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 에 해당하는 것을 고려할 때 굴패각의 함유로 인해 단열성이 향상되었다고 상정할 수 있다.

3.2. 열전달 해석

2.2에서 설명한대로 시험체의 구조를 평면적으로 무한한 면적을 가진 슬랩으로 가정한다(Figure 3). 이 가정은 여기서 1차원(z 방향) 열전도만을 고려할 것이기 때문에 유효하다. 무한슬랩에서의 열전달 방정식을 복합시험체에서 성분 i 에 따른 푸리에 식으로 다시 쓰면,

$$\alpha_T = [\alpha_1 + \dots + \alpha_N]^{-1} \text{ 여기서 } \alpha_i = \frac{k_i}{\rho_i C_{p,i}} \quad (3)$$

이다. k_i 는 열전도계수, $C_{p,i}$ 는 열용량, ρ_i 는 성분의 밀도를 하며, 각 열확산계수 α_i 는 슬랩층 i 의 계수에 해당한다.

시험체의 성분을 대략 석고, 패각, 공기(기공)로 잡고 푸리에 열전달 방정식을 다음과 같이 정리하면

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_T \nabla^2 T \text{ (여기서 } \alpha_T \text{는 열확산계수)} \quad (4)$$

이 된다.

여기에 무차원 변수 Θ , η , τ 를 도입하여

$$\Theta = \frac{T - T_L}{T_h - T_L}, \quad \eta = \frac{x}{b}, \quad \tau = \frac{\alpha t}{b^2} \text{로 놓고 정리하면}$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \eta^2}; \quad \tau = 0 \text{일 때 } \Theta = 1; \quad \eta = \pm 1 \text{일 때 } \Theta = 0 \quad (5)$$

위 식을 해석적으로 풀면 그 해는

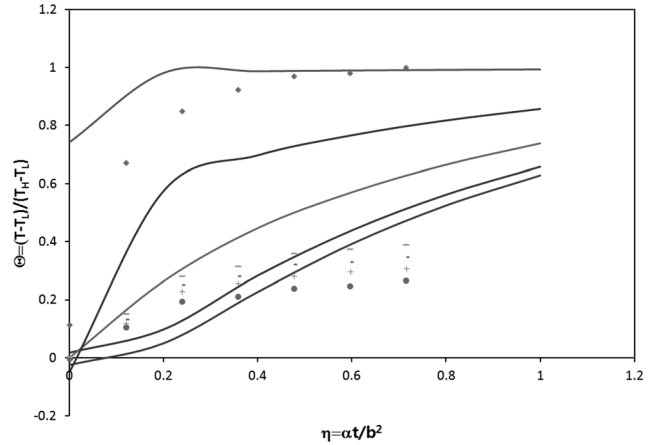


Figure 9. Comparison between theoretical simulations for heat conduction and the corresponding experiments in a infinite thin slab. The lines represent the calculated data (the upper to the lower curves in order of being away from the heat source). The symbols also stand for the experimented results in the same order as the solid lines.

$$\Theta = 1 - 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(n+1/2)\pi} e^{-\pi^2(n+1/2)^2\tau} \cos(n+1/2)\pi\eta \quad (6)$$

가 된다.

Figure 9는 무차원변수로 정의된 온도와 슬랩두께를 고려한 시간을 그래프로 나타내었다. 실선은 푸리에의 열전도 방정식으로 푼 해를 실험조건에 맞추어 그래프한 것이고, 심벌로 나타낸 실험 데이터는 슬랩의 깊이에 따라 표시한 것이다. 그림에서 보여지듯이 푸리에의 비정상 상태(unsteady state)의 열전달 패턴은 슬랩의 두께에 따라 잘 보여지는 반면, 슬랩중간 부분의 열전달 패턴은 실험치와 상당한 차이를 보였다. 표면에서의 온도 분포가 실험치와 비슷한데 비해 중간층의 분포가 실험치를 많이 벗어난 이유는 10 mm 미만인 얇은층의 주성분인 석고 분말입자가 작고 고른 반면에, 중간층은 입자 분포가 조악한데다 3 내지 6배 큰 입자의 굴패각 성분이 혼입됨에 따라 열전도 현상이 불균일해졌기 때문으로 사료된다. 굴패각이 함유됨으로써 석고체 내부에 연속 및 단일성 기공 구조가 발달하여 중간 공기층을 형성, 석고에 비해 7배정도 낮은 열전도율이 부분적으로 작용, 열차단 효과를 높인 것으로 분석된다. 문제는 이와 같은 공기층 기공구조가 불연속적이고 불균일하여 모사로 정확히 예측하기 어렵다는 것이다. 향후 유한요소 분석을 통하여 슬랩의 구조를 모사(FLUENT 등 모사패키지 이용)하는 가상실험을 진행, 보다 현실적 예측을 할 계획이다.

4. 결론

친환경 건축재로 유망한 패각활용 석고체를 열분석하여 열차단성을 조사하였다. 푸리에 법칙에 근거한 무한슬랩 방정식을 이용한 컴퓨터모사와 이에 대응하는 실험을 수행, 상호

비교한 결과,

1) 가상모사에서 예측되는 것보다 시험석고체/패각복합체의 열차단효과는 일반적 석고보드보다 우수한 것으로 평가되었으며,

2) 특히 시험체의 중간층의 단열효과가 패각성분이 함유되었을 때 크게 부각되었고,

3) 2)의 원인은 큰 입도의 패각분말과 고운 석고입자의 혼입으로 공기층을 가진 기공구조가 발달했기 때문으로 추정되었다. 이는 다층의 재료로 구성된 시험체의 모사를 통하여 부분적으로 확인되었다.

4) 실험결과로는 10% 정도의 패각분말이 혼입되었을 때 열전도율 $k = 0.119 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 로 열차단효과가 가장 우수하였다.

감사

이 논문은 2011년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 기초연구사업입(NRF-2011-0024352).

참고문헌

1. Lee, O. K., Choi, J. W. Jo, T. S., and Paik, K. H., "Adsorption of Formaldehyde by Wood Charcoal-based Building Materials," *Mokchae Konghak*, **35**, 61-65 (2007).
2. Park, D. C., and Kwon, S. H., "An Experimental Study for the Development of Eco-interior Finish Building Materials Using the Bamboo Activated Carbon," *J. Arch. Inst. Korea Struct. & Constr.*, **27**(3), 99-105 (2011).
3. Koo, H. -S., "A Study on the Development of Building Materials Made Use of Oyster Shells," *Inst. Eng. Technol.*, **20**(1), (2002).
4. Kim, J. O., Lee, S. E., and Lee, C. -H., "A Study on Calcination Characteristics of Powdered Oyster Shell," *J. of KORRA*, **15** (1), 143-148 (2007).
5. Kwon, O. H., Yun, H. K., Han, S. K., Ahn, D. H., Shim, M. J., Cho, S. W., Park, J. S., and Kim, J. Y., "Thermal Environment Characteristic of the Heat Storage Gypsum Board Included with Phase Change Material," *Appl. Chem. Eng.*, **21**(5), 570-574 (2010).