톱밥과 왕겨 및 숯으로 제조된 세라믹의 밀도경사 및 흡음성능: 탄화온도와 혼합비율의 영향

Density Profile and Sound Absorption Capability of Ceramics Manufactured from Sawdust, Chaff and Charcoal: Effect of Carbonization Temperature and Mixing Ratio

Jung-Woo HWANG[1] · Seung-Won OH[1,†]

[1]Department of Wood Science & Technology, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

초록 : 본 연구에서는 임업과 농업의 부산물인 톱밥과 왕겨 및 친환경재료인 숯을 첨가하여 재료의 혼합비율과 탄화온도별로 세라믹을 제조한 후 흡음성능과 밀도경사에 대해 조사하였다. 첨가율별로 제조한 세라믹의 밀도경사는 톱밥, 왕겨 및 숯의 비율이 50:25:15의 비율일 때 91.00%로 가장 높은 수치를 나타냈지만 첨가율별로 그 차이가 크지 않았다. 탄화온도별로 제조한 세라믹의 밀도경사는 800℃로 제조한 때 88.06%로 가장 높은 수치를 나타냈지만 특별한 경향을 나타내지 않아 탄화온도가 밀도경사에 미치는 영향은 작은 것으로 파악된다. 한편 첨가율별로 제조한 세라믹의 흡음율은 톱밥, 왕겨 및 숯의 첨가율이 각각 50:30:10과 50:35:5의 비율일 때 거의 모든 주파수에서 0.3~0.4 사이의 수치를 나타내었고 왕겨파티클이 증가할수록 흡음성능이 향상되었다. 또한 탄화온도별로 제조한 세라믹의 흡음성능은 1,200℃로 제조한 세라믹이 가장 높은 수치를 나타냈다.

1. 서론

최근 주거환경의 소음문제가 심각해지고 있으며, 생활환경의 질을 향상시키기 위한 관심이 고조되어 주거환경의 소음제어에 대한 요구가 증가하고 있다. 건물 또는 주거공간의 소음을 줄이기 위해서는 외부에서 발생하는 소음을 직접적으로 차단 또는 제거하거나 공간 안에서 발생한 소리를 흡음하는 방법들이 있는데, 소리를 직접 차단 또는 제거하기에는 어려움이 따른다(Godshall and Davis, 1969). 현재는 흡음재 또는 흡음 성능이 포함된 내장재를 이용하여 소음문제를 조절하고 있다(kang *et al*., 2010; Lee *et al*., 2014).

또한 실내에서 가장 일반적으로 사용되는 흡음재의 경우에서는 다공질 흡음재가 많이 이용되고 있는데, 이는 암면과 유리면을 사용하거나 폴리우레탄을 발포 · 가공한 스폰지 계열을 사용한 제품이 주를 이루고 있다(Wassilieff, 1996). 이들 재료는 시공이 간편하며 저렴한 제품으로 방음성능도 뛰어나서 음악실, 피아노방, 연주실 및 기타 산업체 등 흡음 마감재로 널리 이용하고 있지만, 이들 재료가 가지고 있는 유해성, 내구성, 불연성, 경제성 등의 이유로 사용이 제한적이다(kang *et al*., 2010).

흡음성은 재료에 따라서 차이가 나타나고 있는데, 이는 각각의 재료가 가지는 다공성에 따라서 마찰저항이 다르기 때문이며, 음파가 마찰저항에 의해서 반사되기보다 감소하기 때문이라고 하였다(Gods hall and Davis, 1969). 또한 다양한 재료를 통한 흡음성 연구가 꾸준히 진행되고 있다(Jang, 2022; Jung *et al*., 2021). 일반적으로 다공성 재료를 이용하는게 흡음성능이 우수하다고 알려졌는데 그 중 목탄은 뛰어난 다공질 구조를 가지고 있지만 제조과정에서 온도 및 함수율의 영향을 받으며, 제조자의 기술 숙력도에 따라 물성의 변이가 많아 제조 후 틀어짐과 균열 등이 발생하는 이유 때문에 첨단 탄소재료에 비해서 사용범위가 한정되고 있다(Oh *et al*., 2011). 이러한 결점을 보완하기 위해 개발된 것이 다공질 탄소재료인 우드세

본 문서는 출판된 영문논문의 국문서입니다. 출판된 영문논문은 아래의 DOI를 통해서 확인하실 수 있습니다.
Journal of The Korean Wood Science and Technology 52(3): 234-242. https://doi.org/10.5658/WOOD.2024.52.3.234

라믹이다.

우드세라믹(woodceramics)은 목재나 목질재료에 열경화성 수지를 함침한 후 진공상태의 고온에서 탄화하여 만든 새로운 다공질 탄소재료로서, Okabe와 Saito가 개발하여 명명한 이래 다양한 제조방법과 용도개발에 관한 기초연구가 진행되어 왔다(Oh and Hwang, 2009; Won *et al*., 2014). 이는 목재가 가지고 있는 다공성의 성질을 지니고 있으면서, 가볍고 단단하며 열전도성이 우수하고 전자파 차폐 효과와 원적외선 방사 등의 특성이 있으며, 가격이 다른 C-C화합물보다 저렴하여 전자기 제품의 원료, 마찰재료 및 자동차 부속재료등 앞으로 공업적으로 다양한 분야에서 이용이 기대되는 물질이다(Okabe and Saito, 1995a, 1995b; Okabe *et al*., 1995a, 1995b). 우드세라믹의 특성은 원재료의 종류, 탄화온도 등의 제조조건에 따라 물성이 다양하게 변하며 특히 탄화온도는 우드세라믹의 밀도에 많은 영향을 끼치는 인자로 알려져 있다(Hirose *et al*., 2002).

또한 보드제조와 탄화과정에서 필연적으로 두께방향으로 밀도경사가 발생하게 되는데, 밀도경사는 목재를 이용해 만드는 판상재료가 가지는 일반적인 특성으로 보드류의 성질을 나타내는 중요한 지표로 판단된다. 한편 흡음율은 밀도가 낮을수록 높은 수치를 나타내는데 이는 밀도가 낮으면 표면강성이 감소하여 입사하는 음에 의한 공기유동에 따라 변형하며 에너지를 흡수하여 음을 감쇄시킨다(Kang *et al*., 2012). 이 때 만들어진 세라믹의 밀도경사를 측정하면 표면과 중심부의 밀도, 평균밀도 등을 확인할 수 있어 흡음율을 분석하는 데 좋은 자료로 활용할 수 있다. Park *et al*.(2014)은 목질계 탄화보드 성능개선에 관한 연구에서 파티클보드, MDF, 합판 및 목재를 탄화시켜 제조한 탄화보드의 밀도경사를 측정하였다. Oh *et al*.(2011)은 2차 탄화에 의해 제조된 우드세라믹의 밀도경사에 대한 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 농업과 임업부산물인 왕겨와 톱밥에 숯을 첨가하여 재료의 혼합비율별로 혼합보드를 제조한 다음, 수지를 함침한 후 탄화온도와 재료의 혼합비율별로 탄화시켜 제조한 우드세라믹의 밀도경사와 흡음특성의 차이를 제조조건별로 비교하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

낙엽송(*Larix kaemferi* C.) 제재시 발생된 톱밥을 사용하였으며, 왕겨는 전주시 덕진동 정미소에서 구입하여 분쇄기(Hanshin, J-NCM)로 분쇄하였다(Hwang and Oh, 2023). 톱밥과 왕겨의 입자크기를 −18 mesh로 선별하고 함수율은 6% 이하로 조절하여 사용하였다(Hwang and Oh, 2023). 참나무숯은 임실의 ㈜금한팜에서 −100 mesh 사이즈를 구입하였다.

또한 보드제조에는 분말상 페놀수지(코오롱유화(주), KNB-100PL), 수지함침에는 액상 페놀수지(코오롱 유화(주), KPD-L777)를 사용하였으며, 수지의 특성은 Table 1과 같다(Hwang and Oh, 2023).

2.2. 보드제조

보드를 제조하기 위하여 분말상 페놀수지와 재료를 철제통에 넣고 충분히 혼합한 후, 열압기(대양기계, DYMSP-001-026)의 열판위에 있는 몰드 속에 넣고 시료상부의 높이를 일정하게 조절한다. 그 후 열압성형하여 260 mm × 260 mm × 11 mm의 보드를 제조하였다. 보드의 제조 조건은 수지첨가율을 제조한 보드무게의 10%로 고정하였고, 밀도를 0.6 g/cm^{3}으로 고정하였다. 톱밥과 왕겨 및 숯의 첨가량을 50:35:5, 50:30:10, 50:25:15, 50:20:20으로 달리하여 4종류를 제조하였다(Hwang and Oh, 2020). 이때 열압온도는 170℃, 접착제의 경화와 스프링 백을 고려하여 가압압력은 각각 40 kgf/cm^2, 30 kgf/cm^2, 20 kgf/cm^2, 가압시간은 보통 아미노수지계로 제조시 10~30 sec/mm가 소요되지만 페놀수지는 이보다 긴 50 sec/mm 이상이 필요하다. 또한 분말상 페놀수지를 통해 보드가 제조되기 때문에 수지가 액상화 된 후 경화까지 시간이 더 필요하여 총 12분(9분, 2분, 1분) 동안 열압을 실시하였다. 또한 thickness bar를 이용하여 보드의 두께를 일정하게 고정하였다. 열압기안의 보드와 열판의 부착방지를 위하여 테프론 판을 사용하였다.

2.3. 함침 및 세라믹 제조

제조한 보드는 단면의 크기를 120 mm × 120 mm의 크기로 재단한 후 시험조건을 일정하게 하기 위하여 밀도를 계산하여 조건별로 밀도 ± 0.03 g/cm^{3}인 시편을 선정하였다(Hwang and Oh, 2021). 준비된 시편을 액상 페놀수지가 들어있는 감압함침장치에 넣고 감압(1기압)과 초음파처리(주파수: 28 kHz, 출력: 564 W)를 병행한 후 다시 상압에서 방치하는 방법으로 함침율을 조절하였다(Hwang and Oh, 2021). 함침 후 시편은 8시간 음건한 다음, 다시 건조기에 넣고 60℃와 130℃에서 각각 8시간씩 건조 및 경화를 시켰다(Hwang and Oh, 2021).

수지함침율 40 ± 2%인 경화보드 중 톱밥과 왕겨 및 숯의 혼합율이 50:35:5, 50:30:10, 50:25:15, 50:20:20인 보드를 탄화온도 800℃에서 진공탄화로(KOVAC KSF-200V, 고려진공(주))를 이용하여 세라믹을 제조하였다(Hwang and Oh, 2021). 또한 톱밥과 왕겨 및 숯의 혼합율이 50:20:20인 함침보드 중 수지함침율이 40 ± 2% 시편을 선정하여 600℃, 800℃, 1,000℃, 1,200℃로 진공탄화로를 이용하여 각각 탄화하여 세라믹을 제조하였다(Hwang and Oh, 2021). 이 때 실온에서 설정온도까지 4℃/min으로 승온하였으며, 설정온도에서 2시간 유지한 후 탄화로 주위에 냉각수를 순환시켜 냉각시켰다(Hwang and Oh, 2021).

2.4. 흡음률

흡음률 측정은 Fig. 1과 같이 B&K사의 impedance tube, pulse 분석장치 그리고 스펙트럼 아날라이저를 이용하여 전달함수법(transfer function method)으로 측정하였다(Kang *et al*., 2015). 흡음률 측정시, 직경 29 mm의 소형 임피던스관을 이용하여 100~6,400 Hz 구간의 주파수변화에 따른 흡음률 변이를 측정하였다(Kang *et al*., 2015).

시험시 외부조건은 온도, 상대습도, 기압이 각각 24.5℃, 47%, 1,005.5 hPa, 또한 음속, 공기밀도, 그리고 음향임피던스는 각각 345.86 m/s, 1.175 kg/m^3, 406.3 Pa/(m/s) 조건으로 시험하였다.

2.5. 밀도경사

제조조건별로 제조된 세라믹의 각 시편을 50 mm × 50 mm × 두께(T)로 재단하였다. 그 후 밀도분석기(GreCon, DAX 5000)로 밀도와 밀도분포를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 재료의 혼합비율에 따라 제조된 세라믹의 밀도경사 및 흡음성능

톱밥, 왕겨 및 숯의 첨가율 별로 제조한 세라믹의 밀도경사는 Table 2에 나타낸 바와 같이 세라믹의 평균밀도와 밀도경사는 톱밥, 왕겨 및 숯의 혼합율이 50:25:15로 제조한 세라믹이 679.8 kg/m^{3}로 가장 높은 평균밀도를 나타내었고, 밀도경사도 91%로 가장 높은 수치를 나타냈다. 동일 밀도의 보드로 제조하고 동일한 함침율을 가지게 함침과정을 거치고 동일한 온도로 세라믹을 제조하였지만, 톱밥, 왕겨 및 숯의 비율에 따라 제조 후 완성된 세라믹의 밀도에 차이를 나타냈다. 이는 재료의 비율에 따라 탄화되는 과정에서 성분의 구조변화에 차이가 발생하여 생긴 결과로 사료된다. 하지만 50:20:20으로 제조한 세라믹의 밀도가 감소한 이유는 숯가루의 첨가량이 증가하면서 탄화시 길이와 두께방향수축량이 작기 때문에 생긴 원인으로 판단된다. 또한 본 실험에서 밀도경사는 왕겨의 첨가율이 감소하고 분말상 숯이 증가할수록 제조된 보드의 밀도분포가 균일하게 이루어져 추후 탄화과정 후 제조한 세라믹에서도 비슷한 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

또한 Park *et al*.(2014)은 목질계 탄화보드 성능개선을 연구 중 파티클보드를 이용해 제조한 탄화보드의 밀도경사는 약 74% 정도 되었지만, 본 실험에서 첨가율별로 제조한 세라믹은 밀도경사가 평균 89% 정도로 높은 수치를 나타냈다. 이는 첨가율별로 제조된 보드에 수지를 함침하는 과정을 통해 제조된 세라믹이 더 균일한 밀도분포를 가질 수 있다고 판단되어진다.

톱밥, 왕겨 및 숯의 첨가율별로 세라믹의 흡음률은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 톱밥, 왕겨 및 숯의 첨가율이 50:30:10, 50:35:5는 초반 1,000 Hz까지는 흡음율이 증가하다가 그 이후에는 0.3에서 0.4 사이의 흡음율을 나타났고, 나머지 2종의 시편에서는 1,000 Hz 주파수 영역까지 흡음율이 증가하였고 그 후 주파수 영역대에서는 0.2에서 0.3 사이인 걸로 나타났다. 왕겨의 첨가율이 증가할수록 흡음성능이 증가하였는데 세라믹 제조 후 세라믹의 밀도가 왕겨 첨가율이 높을수록 낮은 경향을 나타냈다. 일반적으로 흡음률은 비중이 낮은 보드일수록 높은 수치를 나타내었는데, 이는 비중이 낮을수록 표면강성이 감소하여 입사하는 음에 의한 공기유동에 따라 변형하며 에너지를 흡수하여 음의 감쇠시키는 것이다(kang *et al*., 2012). 톱밥, 왕겨 및 숯의 첨가량이 50:30:10, 50:35:5로 제조된 세라믹의 표면밀도가 다른 2종의 표면밀도보다 낮아 더 높은 흡음성능을 보여주는 것으로 파악된다.

3.2. 탄화온도별로 제조된 세라믹의 밀도경사 및 흡음성능

톱밥, 왕겨 및 숯의 첨가율을 50:20:20으로 고정한 후 탄화온도별로 제조한 세라믹의 밀도경사는 Table 3과 같다. 탄화온도 1,000℃에서 평균밀도와 최소밀도가 각각 687.8 kg/m^{3}과 588.8 kg/m^{3}로 가장 높은 수치를 나타냈다. Okabe *et al*.(1996a)는 탄화온도에 따른 밀도의 변화는 목재와 수지의 탄소화반응에 의한 구조 변화에 기인되며, 600℃ 이하의 영역에서 급격한

밀도의 변화는 주로 구성성분의 탈리반응에 의한 것이며 1,000℃ 이하에서의 밀도변화는 목재와 수지의 탄화에 의해 구조가 변화하였기 때문이고 1,000℃ 이상에서는 밀도가 소폭 감소하는데, 이는 페놀수지가 탄소화에 의한 것이라고 보고한 바 있다. 본 연구에서도 비슷한 경향을 나타냈다.

밀도경사는 800℃에서 88.0%로 가장 높은 값을 나타냈고 1,200℃에서 81.4%로 가장 낮은 값을 나타냈다. 이는 세라믹 제조를 위한 재료와 수지가 온도에 따라 생기는 구조변화에 기인하여 생긴 결과로 판단된다. Park *et al.*(2014)은 파티클보드를 이용하여 제조한 탄화보드의 밀도경사는 탄화온도에 따른 영향이 적다고 보고하였는데 본 연구에서도 비슷한 결과값을 나타냈다.

톱밥과 왕겨 및 숯의 첨가율을 50:20:20으로 고정하고 탄화온도별로 제조한 세라믹의 흡음률은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이, 탄화온도 1,200℃로 제조한 시편은 주파수가 커질수록 흡음성능도 증가하는 경향을 나타냈고 거의 모든 주파수에 0.3 이상의 흡음률을 나타냈다. 나머지 3종의 시편에서는 0.2~0.3 사이의 흡음률을 나타냈다. 1,000℃로 제조한 시편이 표면밀도와 평균밀도가 높아 흡음성능이 가장 떨어지는 것으로 판단되어 진다. 전체적으로 탄화온도에 따른 밀도 변화에 흡음율이 특별한 경향을 나타내지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 왕겨와 톱밥에 숯을 첨가하여 재료의 혼합비율별로 제조한 다음 탄화온도와 혼합비율별로 세라믹을 제조한 후 밀도경사와 흡음성능을 조사하였으며, 흡음성 재료로 이용이 가능한지 확인하였다.

톱밥, 왕겨 및 숯의 첨가율별로 제조한 세라믹의 밀도경사는 톱밥, 왕겨 및 숯의 비율이 50:25:15의 비율일 때 91.00%로 가장 높은수치를 나타냈지만 첨가율별로 그 차이가 크지 않았다. 탄화온도별로 제조한 세라믹의 밀도경사는 800℃로 제조한 때 88.06%로 가장 높은 수치를 나타냈지만 특별한 경향을 나타내지 않아 탄화온도가 밀도경사에 미치는 영향은 적은 것으로 파악된다.

한편 톱밥, 왕겨 및 숯의 첨가율별로 제조한 세라믹의 흡음율은 톱밥, 왕겨 및 숯의 첨가율이 각각 50:30:10과 50:35:5의 비율일 때 거의 모든 주파수에서 0.3~0.4 사이의 흡음율을 나타내었다. 이는 왕겨의 첨가율이 증가할수록 세라믹의 평균밀도와 표면밀도가 낮아져 생긴 결과로 사료된다. 또한 탄화온도별로 제조한 세라믹의 흡음성능은 1,200℃로 제조한 세라믹이 가장 높은 수치를 나타냈다.

또한 재료의 비율에 따라 제조된 세라믹의 밀도경사보다 표면의 밀도가 흡음율에 영향을 주는 것으로 판단된다. 하지만 탄화온도에 따라 제조된 세라믹의 표면밀도가 흡음율에 미치는 영향은 적은 것으로 파악된다.

본 연구에서 비교적 넓은 주파수 대역에서 흡음성능을 가지지만 흡음성능이 낮아서 추후 흡음성능 개선을 위한 연구가 필요하다고 생각된다. 또한 제조된 세라믹이 주거환경에 이용되기 위하여 흡습과 단열등 재료의 다공적 성질을 활용할 수 있게 다양한 실험이 필요할 것으로 생각된다.