

Study on characteristics of board prepared by microwave drying process of coal bottom ash and vermiculite

Hyun Chul Jun and Geug Tae Kim^{*,†}

Institute for Industry-Academy Cooperation, Hannam University, Daejeon 34054, Korea

**Department of Advanced Materials and Chemical Engineering, Hannam University, Daejeon 34054, Korea*

(Received June 9, 2017)

(Revised June 13, 2017)

(Accepted June 16, 2017)

Abstract In this study, we prepared the board of vermiculite materials utilizing coal bottom ash from the Western thermal power stations in Korea and obtained experimental data in applications for building interior materials with the characteristics of sound absorption. To produce the mixture materials of vermiculite and coal bottom ash, we used a microwave drying process. In addition, a ball milling process was used to produce particles of coal bottom ash with a uniform size of 65 μm . When the board made from mixture materials of vermiculite and coal bottom ash were produced with bottom ash sulfur concentrations of 5, 10 wt%, maximum bending loads were analyzed. These experimental results would contribute much to fundamental data essential to the recycling technology of coal bottom ash.

Key words Bottom ash, Vermiculite, Microwave drying

바텀애쉬를 이용한 흡음 내장재 개발에 관한 연구

전현철, 김극태^{*,†}

한남대학교 산학협력단, 대전, 34054

*한남대학교 화공신소재공학과, 대전, 34054

(2017년 6월 9일 접수)

(2017년 6월 13일 심사완료)

(2017년 6월 16일 게재확정)

요약 본 연구에서는 국내 화력발전소에서 발생하는 바텀애쉬를 이용하여 질석 성형물을 제작하였으며, 이를 이용하여 흡음 건자재 제조를 위한 흡음성, 최고 휨과괴하중에 대하여 고찰하였다. 이러한 바텀애쉬와 질석의 성형물 제조를 위하여, 마이크로웨이브 건조방식의 공정을 사용하였다. 또한, 바텀애쉬의 불밀링작업을 통하여 얻어진 65 μm 정도의 크기의 균일한 분말이 사용되었다. 5, 10 wt%의 바텀애쉬와 질석의 성형물을 제조하여, 최고 휨과괴하중 특성이 분석되었다. 이러한 실험 결과들은 바텀애쉬의 재활용 기술에 필요한 기초적인 데이터를 제공한다.

1. 서론

2015년 12월 195개 선진·개도국 모두가 참여한 파리 신기후변화협약이후 전 세계적으로 화두가 되고 있는 환경 및 기후문제를 극복하기 위해, 온실감축을 위한 방안을 능동적으로 모색하고 있으므로, 전 세계 에너지 산업의 패러다임이 변화되고 있다[1]. 제45대 미국대통령 트럼프 행정부의 출범으로 미국 에너지 정책은 석탄, 석유, 천연가스(세일가스) 등 화석연료 자원의 개발 및 생산 확

대, 즉 전통에너지 자원으로의 회귀하는 것으로 요약된다. 즉, 미국내 화석 에너지자원의 생산확대를 통해 100% 에너지 독립을 이루는 ‘미국 우선 에너지정책(American-First Energy Plan)’이다. 현재 트럼프 행정부의 에너지 정책과 파리 신기후변화협약이 서로 충돌하는 상황에 놓여있다. 그럼에도 불구하고, 한국과 중국은 미세먼지 배출량 감축을 위한 친환경정책을 시행하지 않을 수 없다. 특히, 2017년 5월, 한국 정부는 미세먼지 감축 응급대책으로 30년 이상 노후 석탄화력발전소에 대한 ‘일시 가동 중단(셧다운)’을 하기로 하였다. 구체적으로 30년 이상 노후 석탄발전기 10기 조기 폐쇄와 현재 건설 중인 화력발전소 중 공정률 10% 미만은 원점에서 재검토하기로

[†]Corresponding author
E-mail: geugtaekim@gmail.com

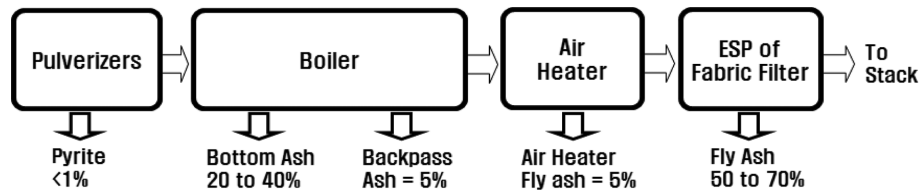


Fig. 1. Discharge locations and approximate percentage of coal ash in a typical thermal power plant.

하였다. 그러나, 천연가스의 에너지 총발열량은 13,000 kcal/kg이며, 유연탄은 6,200 kcal/kg이며, 2017년 3월 기준으로 천연가스의 수입가격은 US\$405.2/ton, 유연탄은 US\$107.8/ton이다[2]. 즉, 이러한 유연탄의 저렴한 비용때문에, 1 KWH를 생산하는데, 유연탄의 사용 비용이 천연가스의 비용의 50%에 불과하다. 이러한 유연탄의 저렴한 가격의 장점 때문에 조금씩 지속적으로 석탄화력발전소의 가동율에서 천연가스 복합발전소로 전환되리라 사료된다.

현재 우리나라 화력발전소에서 발생하는 석탄재는 2014년 826만톤이며, 전체 발생량의 약 60~80%의 플라이애쉬(fly ash)와 약 20~40% 정도의 바텀애쉬(bottom ash)로 분류할 수 있다. Fig. 1은 석탄화력 발전소의 각 부분에서 발생하는 석탄재의 양을 흐름도 형태로 나타낸 것이다. 바텀애쉬는 보일러 용광로내의 고온영역인 수관, 과열기 및 재열기의 열흡수 표면에 형성된 슬래그의 무게에 의하여 낙하되거나, 급격한 출력변화, 수트 블로잉(soot blowing)에 의하여 용광로 하부로 낙하되어 포집된 석탄재로서 바텀애쉬 저장조(bottom ash hopper)에 저장된다. 플라이애쉬는 보일러 용광로내에서 미분탄 연소시 석탄재 성분 입자가 연소가스와 흐르면서 절탄기, 공기예열기 및 전기집진기에서 포집되는 석탄재이다. 석탄화력발전소에서 석탄의 연소효과를 높이기 위하여, 석탄의 75~80%는 200 mesh 이하의 미분탄으로 분쇄하여 보일러에서 연소되므로 플라이애쉬의 발생 비율이 높다[3]. 석탄재중에서 플라이애쉬는 건설재료로 재활용되고 있지만, 20% 정도를 차지하고 있는 바텀애쉬는 대부분 재활용되지 못하고 석탄재 처리장에 매립되고 있는 실정이다[4]. 최근 국립환경과학원의 석탄재 재활용에 대한 용도 확대와 적정성에 대한 연구에서, 석탄재 유해물질 함량특성과 용출특성의 파악 및 평가, 석탄재의 유해물질 함유수준의 환경성 영향 가능성평가, 컬럼 용출액 중 유해물질 수준을 토대로 한 석탄재의 수평배수재 및 연약지반에 미치는 환경영향의 가능성을 연구하였다[5-7]. 석탄재의 경량성 토재용으로서의 활용에 대한 연구[8], 지오폐리머 원료화 기술 동향[9], 바텀애쉬와 플라이애쉬의 공학적 특성[10]에 대한 연구가 발표되었다. 플라이애쉬에 기초한 연구들은 지오폐리머 콘크리트의 특성[11], 지오폐리머 모르타르의 강도 특성[12], 포졸란 특성[13]

의 연구를 통해 석탄재의 재활용 확대 가능성에 대한 기초적인 실험데이터가 얻어졌다.

최근 바텀애쉬의 재활용에 대한 연구가 국내외에서 상당히 많이 이루어지고 있다. 인도에서는 바텀애쉬를 콘크리트 시스템에 사용되는 모래의 대체재로서의 활용에 대한 총설이 발표되었다[14]. 이탈리아에서는 바이오매스연소에서 얻어지는 플라이애쉬와 바텀애쉬를 모르타르제조용으로서 시멘트 대체제에 대한 기초연구인 유연화학적 특성을 연구하였다[15]. 스페인에서는 올리브 연소에서 얻어지는 바텀애쉬를 친환경 내화점토벽돌 용으로 사용 가능성에 대한 벽돌의 물성에 대한 기초연구가 이루어졌다[16]. 국내에서는 바텀애쉬의 바닥재의 활용성에 대한 연구[17, 18], 집토와 바텀애쉬를 이용한 골재의 제조[19], 콘크리트용 골재로서 활용성 연구[20, 21], 시멘트 모르타르에 활용[22], 경량기포콘크리트에 활용[23], 종이에서의 무기충전제로서의 바텀애쉬의 특성[24], 바텀애쉬의 난연성, 경화성, 자경성 등의 물리화학적 특성[25-31]에 대한 연구가 아주 광범위하게 이루어졌다. 특히 보일러 용광로 하부에서 발생하는 산업폐기물인 바텀애쉬는 플라이애쉬에 비하여 안정성, 입도 등은 일반골재(KS F 2526)와 차이가 없지만, 다공성의 특성을 띠고 있으며, 입형은 불규칙하고, 입자의 크기도 다양하여 일반 골재용로서의 활용이 경제성이 없어서 대부분 매립처리하는 실정이다. 그러나, 바텀애쉬는 발생량이 방대하여, 활용도 증진방안을 연구하는 것이 필요하다.

최근 우리나라에서도 건축자재에 대한 친환경, 불연성에 대한 인식이 고조됨에 따라 정부에서도 이미 2013년 7월에 개정되어, 2014년 1월에 시행된 「수도권 대기환경개선에 관한 특별법」[32]으로 건축자재에 대한 휘발성 유기화합물(volatil organic compound, VOC) 배출억제 규제에 나섰으며, 특히 2014년 3월, 「건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙」[33]에서는 건축자재를 불연 재료로 사용하도록 법규를 만든 상태이다. 하지만 이런 사회적 관심과 정부의 규제에도 불구하고 아직도 물성이나 환경적인 문제가 많은 유기계 제품, 즉 에폭시(epoxy) 또는 우레탄(urethane)계가 바닥재 시장의 90% 이상을 차지할 만큼 널리 사용되고 있다. 현재까지 개발된 유기계 제품은 가격경쟁력 측면에서는

우수할 지라도, 흡음 및 난연성의 성능측면과 친환경측면을 완전히 충족시킬 수 없다. 이러한 사회적 필요성 때문에, 흡음성과 난연성이 우수하며 경제성이 있는 건축 내장재에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히, 본 연구에서는 사회적 및 환경적 필요성 때문에 산학연에서 주목을 받고 있는 산업폐기물이면서 불연성 성분을 포함하고 있는 무기계의 바텀애쉬를 활용한 무기계 시스템(이하, 석탄재보드라고 한다)의 개발과 상용화를 위해 기초적인 물리화학적 특성연구를 하고자한다. 예를 들면, 바텀애쉬의 전처리 공정에서 얻어지는 조성물의 비율(5~50%)에 대한 석탄재보드의 흡음성과 강도와 주사전자현미경을 통한 표면분석에 대한 상관성을 규명하고자 한다.

2. 실험

본 연구는 산업폐기물인 바텀애쉬를 이용한 흡음 내장재 제조 기술로서 바텀애쉬를 고품원료인 무기계 팽창질석 공극에 침투시켜 무기계 혼합물을 제조해 이 혼합물을 정해진 형상에서 마이크로웨이브 건조 성형하는 것을 특징으로 한다.

한국서부발전소의 매립지에서 채취한 바텀애쉬의 분말을 1차적으로, 체거름을 통해 직경 3 mm 이하인 바텀애쉬를 분리·선별한다. 2차적으로, 바텀애쉬의 분말에 기계적인 힘을 가함으로써 65 μm 정도의 크기의 균일한 분말로 만드는 미분쇄 볼밀링을 실행한다. 볼밀링은 알루미늄 재질의 실린더형 용기(직경 165 mm, 용량 2 liter)에 3가지 직경 20 mm, 10 mm, 5 mm인 알루미늄(alumina) 볼을 넣어 회전시킴으로써 텀블링에 의한 충격이나 전단력, 마찰력 등을 이용하여 바텀애쉬의 분말을 분쇄하는 것으로, 24시간 내에 바텀애쉬 분말의 입도가 작고 고르도록 한다. 입도는 볼의 크기, 경도, 강도, 무게, 양 등에 크게 의존하며 회전속도, 밀링시간, 적재량 등 밀링조건에도 많은 영향을 받는다. 특히 용기 내의 볼과 바텀애쉬 분말의 기공률은 입도와 밀접한 상관관계를 갖기 때문에, 볼의 크기와 양은 이를 고려하여 기초 예비 실험을 통하여, 20 mm, 10 mm, 5 mm인 볼을 동시에 사용하여 분쇄효율을 높게 하였다. 볼의 직경을 선택할 때 큰 직경 D와 작은 직경 d가 이루는 비율 D/d는 대략 3보다 커야 기공률이 높아져서 분쇄효율에 좋아지는 것으로 알려져 있다[34]. 본 실험에서 정한 3가지 직경은 모든 조합에서 D/d가 3보다 크다.

Fig. 2는 실험실용 장비인 Universal Ball Mill(UBM-200S, SPG회사)에 볼밀용기를 장착하여 볼밀링을 실행하는 장면을 보여준다. 볼밀용기는 샤프트 위에서 회전하게 되고 장비 우측에는 시간과 회전속도를 설정할 수 있는

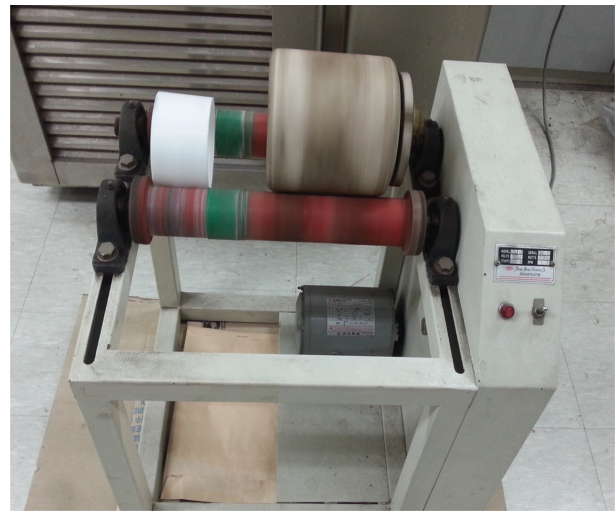


Fig. 2. Universal ball milling apparatus for the ball milling experiment.

패널이 있다. 본 실험에서는 24시간, 80 rpm으로 설정하였다. 본 실험은 크게 볼밀링, 입도분석의 2 단계로 구성된다. 첫 번째 단계인 볼밀링은 볼은 총 500 g이 적재되도록 하고, 바텀애쉬와 볼이 50:50 비율로 적재되도록 하여, 앞에서 준비한 내용에 따라 진행된다. 볼밀링이 완료되면 볼과 시료를 분리하고, 분쇄가 완료된 바텀애쉬를 주사전자현미경 에너지 분산형 분광(Scanning Electron Microscope Energy Disperse X-ray Spectroscopy, SEM-EDS) 분석기기로 화학적 성분 분석하였다.

일반적으로 무기계 질석은 중국이나 남아프리카공화국으로부터 수입되며, 본 연구에서 사용된 무기계 질석은 중국으로부터 수입된 재료이다. 질석은 높은 양이온 교환능력과 비표면적을 지니고 있으며 층상 구조이다. 반면 짧은 시간동안 높은 열에 가열하면 층에 대략 수직 방향으로 열적 박리가 일어나는데 이는 열에 의한 층간 물 분자의 폭발적 방출 때문이다. 이로 인해 원래 질석 크기의 8~10배 정도 팽창되어 많은 공극 구조를 지니게 되고 물에 뜰 수 있게 된다. 본 실험에서는 중국산 원료 질석을 800°C 이상 가열하여 팽창시켜 발포한 질석(팽창질석)을 사용하였다. Fig. 3은 실험에 사용된 볼밀링 공정을 거친 후의 바텀애쉬와 팽창발포 전후의 질석의 시료를 나타내고 있다.

본 실험에서 볼밀링을 거친 바텀애쉬의 시료와 무기계인 팽창질석을 기초로하여 무기질 보드 제작의 공정순서를 도식화하면 Fig. 4과 같다. 참고로, 질석을 팽창질석으로 변환시키는 전처리 공정을 병렬 단위조작 개념으로 진행한다. 앞에서 설명한 바와 같이, 1차적으로 직경 3 mm 이하인 바텀애쉬를 분리·선별하고, 2차적으로, 볼밀링을 통하여 65 μm 정도의 크기의 균일한 분말로 만든다. 800°C 이상 온도에서 가열 팽창시켜 만든 팽창질석

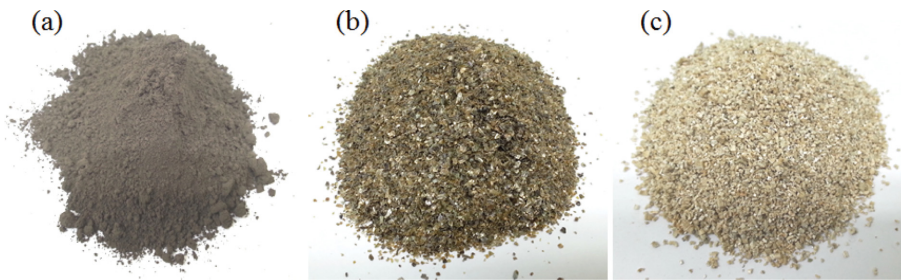


Fig. 3. Chemical materials for building interior materials: (a) bottom ash after the pretreatment of a ball milling process, (b) vermiculite, (c) expanded vermiculite used in the experiments.

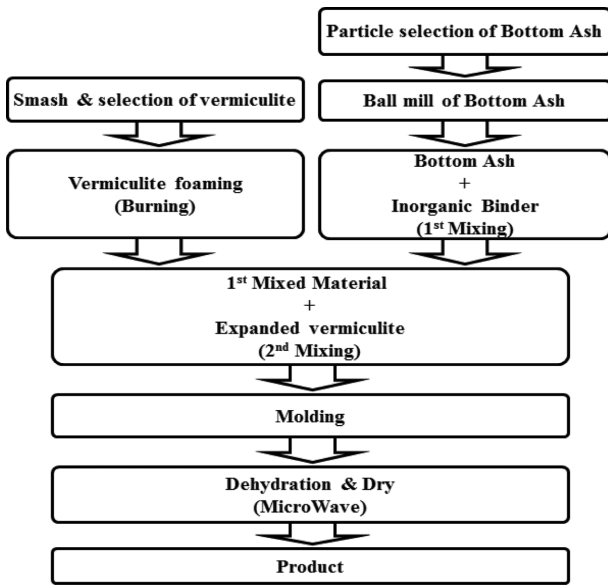


Fig. 4. Experimental procedure for the production of bottom ash board in applications for building interior materials with sound absorption and flame-retarding, using a mixture of bottom ash and expanded vermiculite.

을 만든다. 무기물 바인더로 사용되는 액상규산나트륨은 무기화합물이며, 물에 대한 용해성이 있기 때문에 물유리라고 한다. 무기물 바인더 물유리를 이용하여 팽창질석과 바텀애쉬의 성분비율이 95%와 5%, 90%와 10%에 대하여, 팽창질석과 바텀애쉬의 혼합물을 반죽하고 프레스 가공하여 직사각형 형상의 성형체로 만들고, 탈수와 약 1,100°C 정도로 건조시키는 마이크로웨이브 기기에 의하여 흡음성과 난연성 건축내장재용 무기질 보드를 제작한다. 건조시 휨 파괴 하중 시험(KS F 3504:2012)은 시험 시편을 온도(22±3)°C에서 건조한 후 즉시 시험하며 길이 방향은 시험편의 표면을 아래 방향으로, 나비 방향은 표면을 위 방향으로 하여 스패는 350 mm로 하고, 집중 하중을 스패 중앙의 전체 나비에 하중을 가하여 시험한다. 습윤시 휨 파괴 하중 시험은 시험 시편을 온도(22±3)°C에서 건조시킨 시험편을 상대습도 85~90%로 조정된 항온 항습기, 항온 항습실에서 96시간 정치하여 정해진 시간 경과 후 시험편을 꺼내어 시험하였다.

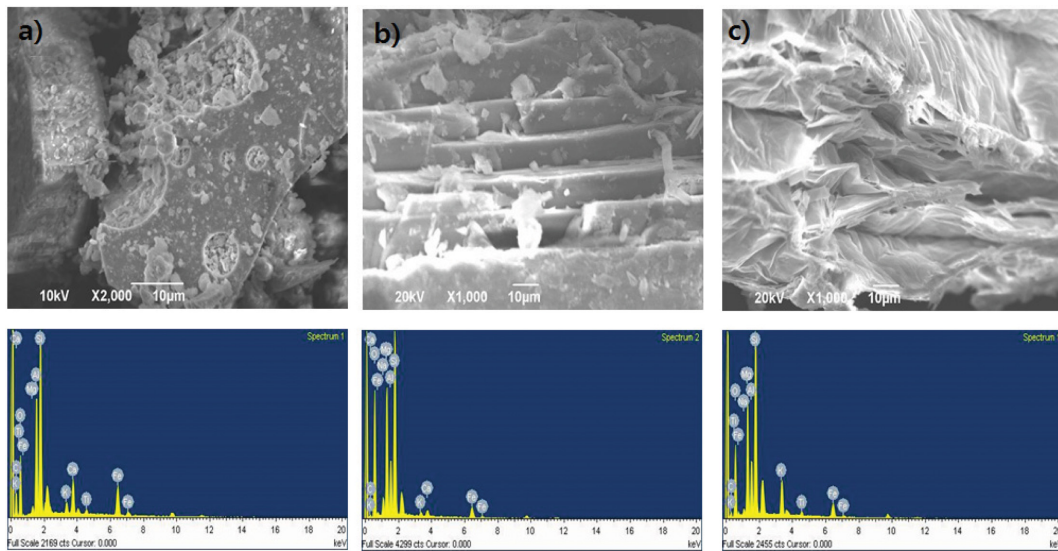


Fig. 5. SEM images and EDS spectrums for a) bottom ash after the pretreatment of a ball milling process, b) vermiculite, c) expanded vermiculite.

3. 결과 및 고찰

질석과 팽창 질석을 주사전자현미경 에너지 분산형 분광 분석기기를 사용하여, Fig. 5와 같이 제시되며 표면 형상, 기공, 화학적 성분 등 주요 정보를 얻는다. 주사전자현미경 에너지 분산형 분광 분석기기는 주사전자현미경의 전자빔으로 인해 발생하는 시료의 특정 X-ray를 수집하여 시료의 성분을 분석하며, 또한 주사전자현미경을 통하여 물질의 표면의 형상을 관찰하고, 발생된 특성 X-ray를 에너지 분산형 분광기로 검지하여 구성원소의 조성을 밝히고 보정하여 물질을 구성하는 입자들의 형상과 크기, 물질을 구성하는 원소와 화합물의 종류 및 상대적인 양을 분석한다. 각 시료에서의 화학적 성분 및 물리적 성분 분석 결과를 정리하면 Table 1과 같다. 석탄재는 화력발전소의 발전 방식에 따라 성상이 조금씩 다르게 나타나므로, 한국서부발전소에서 채취한 바텀애쉬의 물리적 성상에 대한 파악이 중요하다. 바텀애쉬의 성분과 성분비율은 SiO_2 (49.61%), Al_2O_3 (7.67%), Fe_2O_3 (7.74%), CaO (3.57%), CaCO_3 (29.1%), MgO (0.57%), K_2O (1.1%), TiO_2 (0.64%)이다. 즉, SiO_2 와 CaCO_3 가 주로 약 80%를 차지하고, Al_2O_3 와 Fe_2O_3 는 약 15% 정도

이다. 질석의 성분과 성분비율은 SiO_2 (63.61%), Al_2O_3 (5.33%), Fe_2O_3 (5.28%), CaO (0.81%), CaCO_3 (5.8%), MgO (13.24%), K_2O (0.45%), Na_2O (2.43%), TiO_2 (3.35%)이다. 질석의 성분의 약 76%는 SiO_2 와 MgO 이며, 약 15%는 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaCO_3 으로 구성되어 있다. 팽창 질석의 성분과 성분비율은 SiO_2 (61.77%), Al_2O_3 (5.07%), Fe_2O_3 (4.49%), CaO (0.51%), CaCO_3 (13.32%), MgO (11.47%), K_2O (4.6%), Na_2O (0.85%), TiO_2 (4.49%)이다. 질석의 성분의 약 85%는 SiO_2 와 CaCO_3 와 MgO 이며, 약 18%는 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 으로 구성되어 있다. 질석과 팽창질석의 성분은 같으나, 성분비율의 주요 변화는 질석에 비하여 팽창질석에서는 CaCO_3 는 7.5% 정도, K_2O 는 4.5% 정도, TiO_2 는 1.1% 만큼 증가하였다. 실험에 사용된 바텀애쉬와 팽창발포전후의 질석에 대한 주사전자현미경 이미지와 에너지 분산형 분광 분석기 스펙트럼을 나타내고 있다. 800°C 이상 온도로 가열하여 팽창시켜 얻어진 팽창질석은 무게가 매우 가볍고 다공의 결정체이다.

Fig. 6은 팽창질석과 바텀애쉬의 성분비율이 95%와 5%으로 제작된 보드의 표면을 전자주사현미경으로 50배와 200배로 확대하였을 때 팽창질석과 바텀애쉬의 분포성과 형상을 나타내고 있다. Fig. 6(a)에서는 볼밀링을 거친 바텀애쉬의 입자는 팽창질석 사이의 공간을 채우고 있으며, 팽창질석의 기공 사이에 바텀애쉬가 침투하여 균일하게 배열되어 있는 것으로 관찰되었고, 팽창질석은 박리팽창의 상태를 유지하고 있는 것을 확인하였다. Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)의 작은 원형부분을 200배 확대하였을 때 관찰된 바텀애쉬이며 약 50 μm 의 크기와 표면이 매끄럽고 기공이 나타나지 않음을 보여주고 있다. Fig. 6(c)는 Fig. 6(a)의 큰 원형부분의 팽창질석은 입자 크기가 약 100 μm 이며 촘촘한 주름 형태의 기공을 가지고 있는 것으로 관찰되었다. Fig. 7의 (a)는 두께 15mm의 바텀애쉬가 함유되지 않은 무기질 보드, (b)는 바텀애쉬 5%와 팽창질석으로 제작된 무기질 보드(BA-5),

Table 1
Chemical compositions of bottom ash and vermiculite and expanded vermiculite

Chemical composition	Bottom ash	Vermiculite	Expanded vermiculite
SiO_2	49.61 %	63.61 %	61.77 %
Al_2O_3	7.67 %	5.33 %	5.07 %
Fe_2O_3	7.74 %	5.28 %	4.49 %
CaO	3.57 %	0.81 %	0.51 %
CaCO_3	29.1 %	5.8 %	13.32 %
MgO	0.57 %	13.24 %	11.47 %
K_2O	1.1 %	0.45 %	4.6 %
Na_2O	-	2.43 %	0.85 %
TiO_2	0.64 %	3.35 %	4.49 %

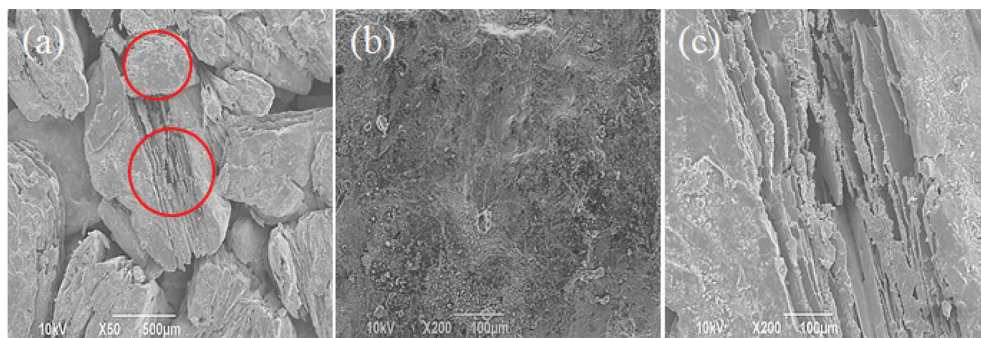


Fig. 6. SEM images for (a) bottom ash board with the contents of 5% bottom ash and 95% expanded vermiculite, (b) bottom ash after the pretreatment of a ball milling process, (c) expanded vermiculite in a board prepared by the mixture of bottom ash and expanded vermiculite.

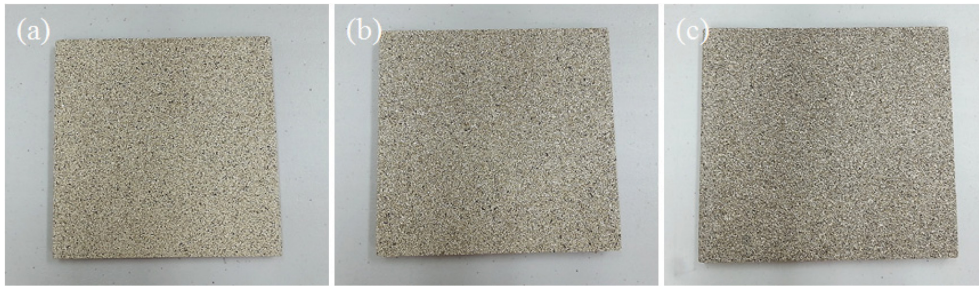


Fig. 7. The prototype of production board by the mixture of (a) expanded vermiculite board, two boards with the content (b) 5 % and (c) 10 % (BA-10, thickness 14.5 mm) of bottom ash.

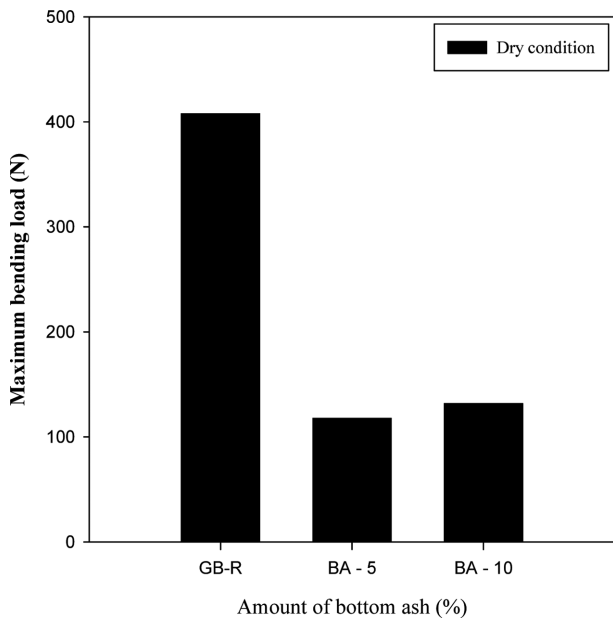


Fig. 8. Effect of the amount of bottom ash on the maximum bending load of boards: gypsum board (GB-R, thickness 15 mm) two boards with the content 5 % (BA-5, thickness 14.5 mm) and 10 % (BA-10, thickness 14.5 mm) of bottom ash prepared by the mixture of bottom ash and expanded vermiculite.

(c)는 바텀애쉬 10%와 팽창질석으로 제작된 무기질 보드(BA-10)의 프로토타입을 나타내고 있다.

Fig. 8은 바텀애쉬와 팽창질석으로 제작된 무기질 보드에 대한 휨 파괴 하중과 바텀애쉬의 함유율의 상관성을 나타내고 있다. 두께 14.5 mm의 바텀애쉬 5%(BA-5), 두께 14.5 mm의 바텀애쉬 10%(BA-10)의 2가지 보드에 대하여 분석 결과와 두께 15 mm의 석고보드(GB-R, USG BORAL company, Korea) 결과를 비교한 것이다. 석고보드의 휨 파괴 하중은 본 연구에서 제작된 2개의 바텀애쉬 5%(BA-5)와 10%(BA-10)보드보다 약 4배 정도 강하다. 바텀애쉬 10%(BA-10) 보드는 5%(BA-5)보다 약간 높은 수치를 보여주고 있다. 바텀애쉬와 같은 무기질이 많아짐에 따라 휨 파괴 하중의 강도가 높아진다. 이는 무기질의 바텀애쉬와 질석이 건조상태에서는 결합력이 성분함량에 따라 변하여 결합력의 상태에

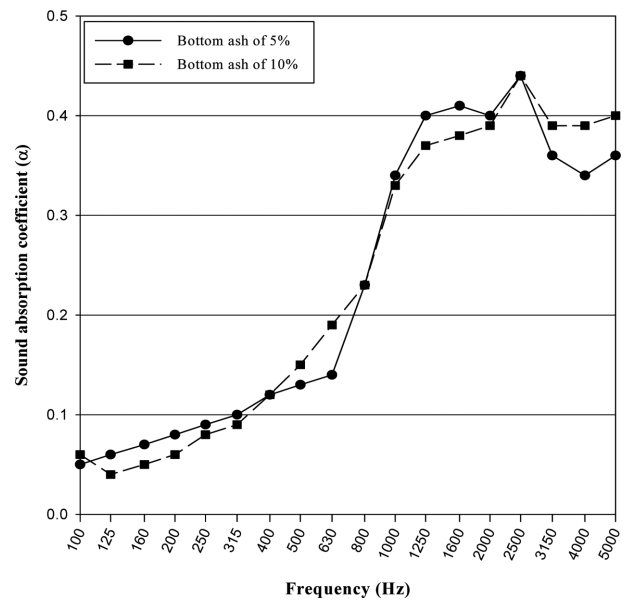


Fig. 9. Effect of the amount of bottom ash on the sound absorption coefficient of a board prepared by the mixture of bottom ash and expanded vermiculite.

영향을 미치는 것으로 추정된다.

Fig. 9은 두께 14.5 mm의 바텀애쉬 5%(BA-5), 두께 14.5 mm의 바텀애쉬 10%(BA-10) 무기질 보드에 대한 흡음계수와 바텀애쉬의 함유율의 연관성을 나타내고 있다. 2개의 보드의 흡음계수는 Fig. 9에서 알 수 있듯이 저주파수 대역에서 중주파수 대역으로 갈수록 점점 높아지다가 고주파수 대역에서는 바텀애쉬 10%(BA-5)는 감소하다가 완만한 형태를 보이고, 바텀애쉬 5%(BA-5)는 감소하다가 4,000 Hz에서 약간 반등하여 증가함을 보이고 있다. 2개의 보드는 저주파의 영역에서는 흡음계수의 수치가 크게 차이가 없으나, 중고주파영역에서는 바텀애쉬 10%(BA-10)가 흡음계수 0.4 영역에서 보다 안정적인 완만한 형태를 보이고 있다. 흡음계수는 관내법을 이용한 측정방법으로 진행하며, 임피던스관에 의한 흡음계수와 임피던스의 결정방법 제2부: KS F 2814-2: 2012 전달함수법으로 측정하였다. 측정은 관내법 분석장비인 B&K Type 4206의 임피던스관내 한쪽에 시험체를 설치

하고 그 반대쪽에서 음(B&K Power Amplifier type 2706)을 시험체로 입사시키면 관 내부에서 입사파와 시험체를 통과한 후 다시 뒷면에서 반사되어 나오는 반사파의 중첩에 의해 관내의 정재파가 형성되는데 관 벽에 설치된 두 개의 마이크로폰(B&K type 2670)으로 이를 수음하여 B&K pluse system으로 음압의 주파수 성분을 측정하여 흡음계수를 구하였다[35].

4. 결 론

본 연구를 통하여 제작된 바텀애쉬 성분을 함유한 흡음성 내장재 성형물의 특성평가 실험에서 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 바텀애쉬의 5%, 10%의 함유비율인 성형물의 휨 파괴 하중은 석고보드의 15% 수준의 수치를 나타내고 있으며, 건축 내장재로 활용하기 위해서는 제작에서 는 조금 더 가혹한 조건에서의, 즉 바텀애쉬의 함유량 증가, 30%, 50% 등에 대한 성형물의 제작이 더욱 필요함을 알 수 있었다.

2) 최근 실내의 음환경 개선을 위하여 건축내장재를 선정할 때 각 자재의 정확한 흡음 특성을 고려한다면, 잔향시간 단축, 소리 울림방지 등의 음환경 개선 효과를 기대할 수 있는 흡음성능을 개선시키는 것이 중요하다. 일반적으로, 다공질의 무기계 질석에 비다공질인 산업폐기물인 바텀애쉬를 많이 함유하면 할수록, 흡음성능효과는 감소한다. 본 연구에서는 흡음 성능을 갖는 보드개발에 중점을 두어서, 바텀애쉬의 함량을 가능한 최소화하면서, 산업폐기물인 바텀애쉬의 재활용측면에서 접근하여 기초연구를 하였다. 따라서, 많은 바텀애쉬의 재활용 측면과 흡음성능개선의 인자를 고려할 때에 이에 대한 최적 변수를 찾는 데 기초적인 정보를 얻을 수 있었다. 또한 강도와 흡음성능 개선의 변수에 대한 최적 조건을 찾는 데 더욱 연구가 필요함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2016년 한국서부발전(주) 정책연구개발사업 “석탄재를 재활용한 친환경 보드 개발”의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

[1] UNFCCC, Adoption of the Paris Agreement, December, 2015.
[2] <https://www.keei.re.kr/main.nsf/index.html>.

[3] H.Y. Park, S.I. Seo, S.C. Kim and D.S. Kang, “Reburning of bottom ash in a coal fired powder plant and its effect on the plant management”, J. Korea Solid Wastes Eng. Soc. 24 (2007) 472.
[4] J.W. Moon and B.Y. Kim, “Study on the development possibility of eco-friendly ceramic nonflammable floor finishing materials using bottom ash”, J. Korea Soc. Waste Manag. 31 (2104) 662.
[5] T.W. Jeon, J.E. Park, D.G. Hwang, S.Y. Hong, S.K. Shin, G.J. Oh, Y.Y. Kang, N.I. Um, Y.W. Jeong and S.K. Jeong, “The study on recycling availability and use expansion of coal ash”, NIER-RP2014-279, Resource Recirculation Research Division National Institute of Environmental Research (2014).
[6] J.H. Maeng, Environment Forum 19 (2015).
[7] D.H. Suh and J.H. Maeng, “A study on expanding the recycling of coal ash for minimizing environmental impact imposed by the establishment of thermal power plant ash ponds”, J. Environ. Impact Assess. 24 (2015) 472.
[8] K.S. Chae, S.H. Cho, Y.W. Yoon and K.S. Kim, “Basic study for the utilization of mixed coal ash as light-weight embankment”, KSCE Civil Expo 2007, October 10-12, Daegu, Korea (2007).
[9] S.J. Lee, Y.J. Cho and B.G. Cho, “Trends of recycling technologies in utilization of coal combustion byproducts for manufacturing geopolymers through patent and literature analysis”, J. Korean Inst. of Resources Recycling. 23 (2014) 81.
[10] K.K. Kuk, H.Y. Kim and B.S. Chun, “A study on the engineering characteristics of power plant coal ash”, J. Korean Geo-Environ. Soc. 11 (2010) 25.
[11] I.W. Hwang, H.G. Park, J.E. Oh and C.G. Kim, “Mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete”, Proceedings of the Korea Concrete Institute Annual Fall Research Conference, November 9-11, Pyeongchang, Korea (2011).
[12] K.T. Koh, G.S. Ryu, S.H. Kim and J.H. Lee, “Strength properties of fly ash based geopolymer mortar”, KRCRI Fall Annual Conference, November 1-2, Korea (2012).
[13] P.K. Chang and Y.J. Kim, “Pozzolanic properties of fly ash from a coal fired power plant”, J. Korean Ceram. Soc. 42 (2003) 702.
[14] M. Singh and R. Siddique, “Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete, resources”, Conservation and Recycling 72 (2013) 20.
[15] S. Maschio, G. Tonello, L. Piani and E. Furlani, “Fly and bottom ashes from biomass combustion as cement replacing components in mortars production: rheological behaviour of the pastes and materials”, Chemosphere 85 (2011) 666.
[16] D. Eliche-Quesada and J. Leite-Costa, “Use of bottom ash from olive pomace combustion in the production of eco-friendly fired clay bricks”, Waste Manag. 48 (2016) 323.
[17] J.W. Moon and B.Y. Kim, “Study on the development possibility of eco-friendly ceramic nonflammable floor finishing materials using bottom ash”, J. Korea Soc. Waste Manag. 31 (2004) 662.
[18] S.Y. Park, H.S. Park, J.W. Moon and J.H. Oh, “A study

- on property evaluation for the development of functional flooring material using bottom ash”, *J. Korea Resid. Environ.* 10 (2012) 107.
- [19] K.D. Kim and S.G. Kang, “Manufacturing artificial lightweight aggregates using coal bottom ash and clay”, *J. Korea Cryst. Technol.* 17 (2007) 277.
- [20] S.C. Kim, “Evaluation of bottom ash on the application for the aggregate of concrete”, *J. Korean Recycled Construction Resour. Inst.* 10 (2010) 105.
- [21] J.H. Oh, S.Y. Park, J.W. Lee, H.S. Park and J.W. Moon, “An experimental study on the manufacturing technology materials and incombustible function of lightweight concrete panel use bottom ash”, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.* 12 (2012) 131.
- [22] S.T. Kang, G.S. Ryu, K.T. Koh and J.H. Lee, “Optimum mix design of alkali-activated cement mortar using bottom ash as binder”, *J. Korea Concr. Inst.* 23 (2011) 487.
- [23] J.M. Kim, E.G. Kwak, S.H. Cho and C. Kang, “Decision of optimized mix design for lightweight foamed concrete using bottom ash by statistical procedure”, *J. Korea Concr. Inst.* 21 (2009) 3.
- [24] M.T. Oh and Y.J. Sung, “evaluation of applicability of bottom ash as inorganic filler”, *J. Korea TAPPI.* 44 (2012) 80.
- [25] S.K. Kim and T.Y. Lee, “Analyses of chemical compositions and water leaching tests for bottom ash obtained from thermal power plant”, *Korean Geo-Environmental Conference 2009*, September 11, Seoul, Korea (2009).
- [26] W.S. Yoon, H.C. Cho, S.J. Park, J.K. Kim and Y.S. Chae, “Experimental study on physical and mechanical properties of bottom ash”, *KGI Fall National Conference*, October 10-11, Gwangju, Korea (2008).
- [27] W.G. Shin, D.S. Lim and B.S. Chun, “A study on self-hardening characteristics of coal ash by mixing ratio of fly ash and bottom ash”, *J. Korean Geo-Environ. Soc.* 11 (2010) 85.
- [28] B.W. Jo, J.K. Koo and S.K. Park, “Hardening characteristics of fly ash and bottom ash paste by alkaline activation”, *J. Korean Soc. of Civ. Engineers* 25 (2005) 289.
- [29] B.U. Hong, C.S. Choi, E.S. Jang and S.S. Choi, “Characteristics of sulfur-solidified materials by the physical properties of coal bottom ash”, *Appl. Chem. Eng.* 25 (2014) 58.
- [30] J.W. Moon and S.H. Lim, “A study on flame resistance performance of lightweight panel with coating bottom ash”, *J. Korea Resid. Environ.* 13 (2015) 211.
- [31] S.J. Lee, N.H. Kang, C.M. Chon and H.T. Jou, “Grinding effects of coal-fired pond ash on compressive strength of geopolymers”, *J. Korean Inst. Resour. Recycling* 23 (2014) 3.
- [32] “Special law on metropolitan air quality improvement”, Ministry of environment, Law No. 11909 (2013).
- [33] “The rules regarding the structure of the building evacuation”, Ministry of land, infrastructure and transport, Rule No. 80 (2014).
- [34] S.J. Kim, J.Y. Choi and H.H. Shin, “Design and analysis of mixture experiments for ball mix selection in the ball milling”, *J. Korean Soc. Qual. Manag.* 42 (2014) 579.
- [35] D. Kang, J.W. Lee, J.H. Gu and H.K. Park, “Sound absorption characteristics of building interior decoration materials”, *Transactions of the Korean Soc. Noise and Vibration Eng.* 17 (2007) 201.