

중유회 탈취패널에 있어서 활성탄과 규조토의 탈취성능 영향평가

Effect of Activated Carbon and Diatomite on Deodorant Efficiency of Recycled Fly Ash Panel

김민호* · 김영규* · Kenneth N. Han* · 김세중** · 김남수 · 홍성엽 · 한혜철[†]
 Min Ho Kim* · Young Kyu Kim* · Kenneth N. Han* · Se Jung Kim** · Nam Soo Kim
 Seong Yeup Hong · Hyea Chul Han[†]

*서경대학교 KEN Research Center, **^(주)엔바이온, 서경대학교 화학생명공학과

*KEN Research Center, Seokyeong University

**Enbion inc., Republic of Korea

Department of Bio-Chemical Engineering, Seokyeong University

(2009년 11월 3일 접수, 2010년 6월 11일 채택)

ABSTRACT : This study aims to examine the possible use of heavy oil fly ash as raw material for deodorization panels by adding additives such as activated carbon and diatomite during deodorization panel manufacturing process and improving the performance of formaldehyde and toluene elimination. The recycled heavy oil flyash deodorization panel to be used either of them as additives removed more than 93% of formaldehyde and more than 97% of toluen but the compressive strength was decreased 27 to 63%. In an experiment to be used both additives, Whereas, the panel to include activated carbon 5% and diatomite 5% removed 84% against formaldehyde and 96% against toluen, and the compressive strength was increased 32% better than standard panel. Therefore it could be confirmed that the recycled heavy oil flyash deodorization panel is increased the compressive strength and the removal efficiency against harmful chemical substances by using the additives mixture.

Key Words : Heavy oil fly ash, Activated Carbon, Diatomite, Formaldehyde, Toluene

요약 : 본 연구는 발전소등에서 발생하는 중유회를 재활용한 탈취패널 제조시 활성탄, 규조토등의 첨가제를 활용함으로써 포름알데히드 및 톨루엔에 대한 제거성능을 향상시켜 중유회의 탈취패널 원료로서의 사용가능성을 확인하였다. 단일 첨가제를 사용하여 제작된 중유회 재활용 탈취패널의 경우 포름알데히드에 대해서는 93% 이상, 톨루엔에 대해서는 97% 이상의 제거성능을 보였으나 기준 패널에 비하여 압축강도가 27~63% 감소하였다. 반면에 두 가지 첨가제를 여러 가지 비율로 혼합하여 제조된 것 중 활성탄과 규조토가 5 wt%씩 첨가된 패널은 포름알데히드 84%, 톨루엔 96%의 제거성능을 보였으며 압축 강도는 기준패널보다 32%증가하였다. 따라서 첨가제의 혼합사용을 통하여 중유회재활용 탈취패널을 제조할 경우 유해가스 제거성능과 패널의 강도를 향상 시키는 것이 확인되었다.

주제어 : 중유회, 활성탄, 규조토, 포름알데히드, 톨루엔

1. 서론

국내 중유회 발생량은 중유화력발전소의 설립과 가동이 급격히 증가하던 90년대 이후 지속적으로 증가해 현재에는 연간 약 25,000톤에 달하는 양이 발생하고 있으며 이러한 증가세는 당분간 지속될 전망이다.¹⁾ 이러한 많은 발생량에 비하여 현재 중유회 처리는 대부분 건식처리를 통한 단순 매립에 의존하고 있는 실정이며 이중 일부가 철강산업에서의 탈유제 또는 시멘트산업에서의 보조 연료 등으로 재활용되고 있다.²⁾ 그러나 중금속을 함유하고 있는 중유회의 특성상

전자에 의한 처리방법은 침출수에 의한 여러 다른 환경적인 문제를 유발할 수 있으며 후자에 의한 처리방식 또한 새로운 오염물질을 생성할 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 한 유기금속 회수, 활성탄제조, 건자재로의 사용등과 같은 다양한 방면에서 친환경적으로 재활용 하기 위한 연구가 수행되어 오고 있다.^{3~6)}

한편 급격한 공업의 발달과 더불어 수 많은 종류의 화학물질이 다양한 용도로 사용되어 오고 있으며 이에 따른 각종 부작용들이 발생하고 있다. 그 중 포름알데히드는 최근 부각이 되고 있는 새집증후군의 가장 핵심적인 원인물질로서 환

[†]Corresponding author : E-mail : hanhc@skuniv.ac.kr TEL : 02-940-7479 FAX : 02-940-7663

경적인 관심이 집중되고 있으며 호흡기장애, 아토피피부염과 같은 피해를 발생시키고 있다. 그리고 톨루엔은 유기합성 화학에서 중요한 화합물로 사용되고 있으며 용매로서도 다양한 용도로 사용되고 있다. 따라서 공업적으로 폭넓게 사용되고 있으나 강한 독성으로 인하여 뇌손상, 신경장애, 심장질환등의 피해를 발생시키고 있다.^{7~13)}

중유회를 첨가하여 제조된 탈취패널의 포르말데히드와 톨루엔에 대한 탈취효율은 기존연구를 통하여 확인된바 있다.¹⁴⁾ 그러나 톨루엔에 대한 제거효율은 양호한 반면, 일상환경에서 많이 발생하는 포르말데히드에 대한 제거효율이 낮아 실제 패널로서의 활용에는 많은 문제점을 안고 있었다. 따라서 중유회재활용 탈취패널에서 이전에 서술한 화학성분들에 대한 흡착성능을 향상시킬 수 있다면 포르말데히드가 많이 발생하는 주거환경과 톨루엔이 많이 발생하는 산업현장에서 폭넓게 적용할 수 있는 탈취패널로서 그 활용 가능성을 확대할 수 있다. 또한 이러한 효율 개선을 통하여 중유회의 재활용 용도를 확대하는 것이 가능하다.^{15~16)}

본 연구는 유해물질이 제거된 중유회에 활성탄, 규조토 등의 첨가제를 일정비율로 첨가하여 제작된 패널을 이용하여 포르말데히드와 톨루엔에 대한 흡착성능을 확인하기 위하여 실시되었다.

2. 실험방법

2.1. 탈취 패널 제작

탈취패널제작에 사용된 중유회는 상온에서 증류수에 1시간 이상 처리되어 중금속이 제거된 것을 20 wt%의 비율로

Table 1. Ration of additives in the recycled heavy oil fly ash deodorant panel

Sample	Additives
PA	Pretreated fly ash 20%
PA-D5	Diatomite 5%
PA-D10	Diatomite 10%
PA-D15	Diatomite 15%
PA-AC10	Activated carbon 10%
PA-AC20	Activated carbon 20%
PA-AC10-D1	Activated carbon 10% Diatomite 1%
PA-AC10-D2.5	Activated carbon 10% Diatomite 2.5%
PA-AC10-D5	Activated carbon 10% Diatomite 5%
PA-AC5-D5	Activated carbon 5% Diatomite 5%
PA-AC15-D5	Activated carbon 15% Diatomite 5%

사용하였다. 중유회에 규석과 석고 그리고 물로 만들어진 Sand slurry, Return slurry, 석회석, 시멘트, 물에 규조토, 활성탄 등의 첨가제를 Table 1와 같이 다양한 비율을 혼합하였으며 약 5분간 혼합 시킨 후 발포제인 알루미늄을 투입하고 5~10분간 다시 혼합하였다. 이렇게 제조된 혼합물을 50℃ 【6시간 동안 양생하고 이를 Autoclave에서 150℃, 12bar에서 12시간 동안 다시 양생하여 규조토, 활성탄을 첨가한 중유회 재활용 탈취패널을 제작하였다.

2.2. 중유회재활용 탈취패널의 유해성 평가

중유회가 첨가된 패널에 대한 유해성을 평가하기 위하여 첨가제를 사용하기 전의 중유회재활용패널에 대한 용출시험을 진행하였다. pH 5.8~6.3의 용매 1000 g에 분쇄된 패널 분말 100 g을 혼합 한 후 200 rpm으로 6시간 동안 상온 상압에서 교반시킨후 1.0µm의 유리섬유 여과지로 여과하였다. 이 여과액중 일부를 채취하여 탈취패널에서 중금속의 용출 농도를 분석하였으며 용액의 분석은 ICP-OES(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy)를 이용하여 유해물질 용출여부를 측정하였다. pH 5.8~6.3의 용액 제조시 증류수가 pH 6.1로 측정되어 염산의 추가 없이 증류수만을 사용하였다.

Fig. 1에는 본 연구에서 수행한 용출실험절차를 나타냈다.

2.3. 실험장치

실험장치비의 구성은 Fig. 2와 같다. 압축공기탱크와 MFC(Mass Flow Controller),

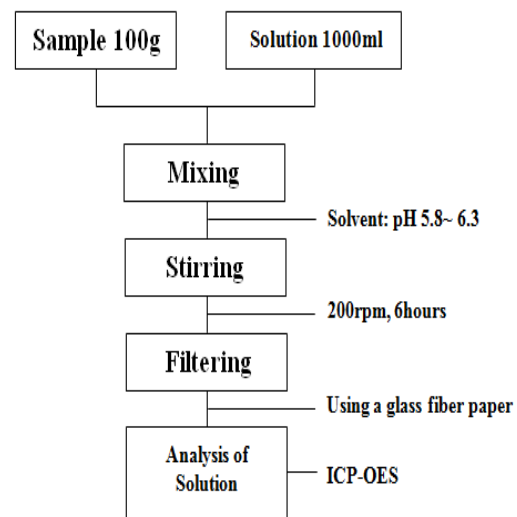


Fig. 1. Waste elution test.¹⁷⁾

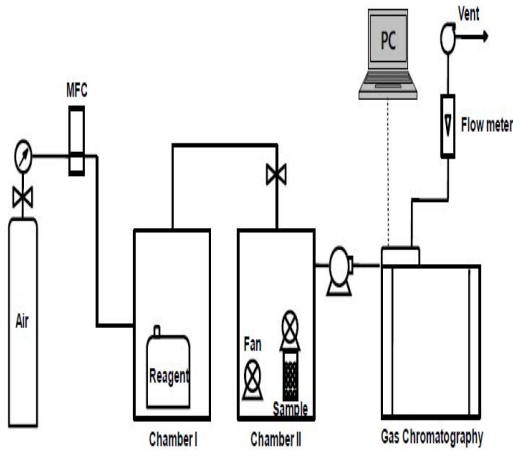


Fig. 2. Scheme of experiment set-up.¹⁴⁾

제거 대상 화학물질의 포화기체를 만들어 공급하는 Chamber I, 중유회재활용 탈취패널을 3~4mesh로 분쇄하여 설치한 Chamber II 그리고 농도변화를 분석하기 위한 분석기(Gas Chromatography)등으로 이루어져 있다.

흡착실험은 우선 Chamber I 에 포름알데히드와 톨루엔을 넣고 밀폐시킨 후 상온에서 공기중에 이 기체가 포화되도록 한다. 다음으로 Chamber I 의 포화기체가 Chamber II 로 들어갈 수 있도록 밸브를 개방하고 Chamber II 로 포화기체가 일정량만 들어갈 수 있도록 MFC를 조절하여 공기투입속도를 제어하였다. 또한 Chamber II 의 농도가 전체적으로 일정하게 하기 위하여 Fan을 가동하였다 Chamber II 의 농도가 원하는 실험조건에 다르면 두 Chamber사이의 밸브를 닫고 Sample이 들어있는 용기의 Fan을 가동시켜 탈취패널의 흡착 실험을 진행하였다. 농도의 분석은 3분단위로 분석장비와 Chamber II 사이의 Sampler로 샘플을 채취하여 Gas Chromatography (GC CP-SIL 5CB, 컬럼 CP-SIL5CB, length 0.53 mm, 5 nm)를 이용하여 등온모드 120℃에서 측정하였다. 흡착성능실험은 우선 활성탄과 구조토를 단일첨가제로 제조된 패널을 이용하여 포름알데히드와 톨루엔에 대한 제거효율을 측정하고 이 결과를 바탕으로 두 혼합물을 여러 비율로 첨가하여 제조된 패널에 대한 유해화학 물질 제거효율을 검토하였다. 이때 Chamber II 의 실험조건은 포름알데히드 10 mg/l , 톨루엔 40 mg/l 로 혼합된 분위기에서 진행하였다.

2.4. 단일성분 첨가제가 사용된 패널의 흡착성능 실험

첨가제별 포름알데히드와 톨루엔에 대한 제거성능을 확인하기 위하여 우선 단일성분의 첨가제를 여러 비율로 혼합하여 패널을 제조하고 이 패널을 3~4 mesh로 분쇄한 다음 30 g을 분취하여 Chamber II 안에 공기와 접촉되지 않게 투입하였다.

Chamber I 에 있는 포화기체를 공기와 함께 일정량 투입하여 Chamber II 의 농도가 목표하는 값이 되도록 하고 밸브를 닫았다. 그 후 시료 위의 팬을 가동하여 공기를 순환시키면서 포름알데히드와 톨루엔에 대한 농도의 변화를 측정한다.

실험은 상대습도 50~60%, 상온에서 실시하였으며 포름알데히드 및 톨루엔의 농도는 각각 10 mg/l , 40 mg/l 로 혼합된 분위기에서 진행하였다.

2.5. 2성분 첨가제가 사용된 패널의 흡착성능 실험

활성탄과 구조토를 여러 비율로 혼합하여 첨가된 패널을 이용하여 포름알데히드와 톨루엔에 대한 제거성능을 검토하였다. 실험은 활성탄을 일정량으로 고정하고 구조토의 비율을 변화시킨 것과 구조토의 비율을 고정하고 활성탄의 비율을 변화시켜 제조된 패널을 사용하였으며 실험은 단일성분 첨가제가 사용된 패널의 경우와 동일하게 실시하였다. 두 화학성분의 제거성능은 국내 A사에서 상용화되어 시판중인 S패널(이하 “기준패널”)과 비교하였다.

2.6. 중유회재활용 탈취패널의 압축강도분석

첨가제의 추가에 따른 특성을 평가하기 위하여 압축강도 시험을 실시하였다. 시험방법은 한국산업규격 석재의 압축강도 시험방법(KSF 2519 : 2000)을 따랐으며 시험절차는 패널을 60℃에서 48시간 동안 건조시킨 후 데시게이터에서 냉각시키고 건조된 시료를 압축강도시험기의 중앙에 위치시킨 후 시료 위의 접촉판을 손으로 조정할 수 있을 정도의 비율로 초기하중을 가하고 접촉판을 30° 각도로 앞뒤로 회전시키고 하중은 매분 약 1mm의 속도로 매초 약 1MPa의 하중을 일정하게 가하여 시료의 파괴하중을 측정하였다.

압축강도는 기준패널의 결과 값과 비교하였으며 패널의 압축강도는 다음 식을 활용하여 계산하였다.

$$c = \frac{A}{W}$$

여기에서 C는 시료의 압축강도 MPa(N/mm²), W는 시료의 파괴하중 N, A는 시료의 하중지지면 면적 mm² 이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 중유회재활용 탈취패널의 유해성 평가

중유회재활용 탈취패널의 유해성을 평가하기 위하여 폐기

Table 2. Metal ion concentration in the recycled heavy oil fly ash panel leach liquor after KS extraction test (unit : mg/L)

	Cu	Cr	V	Ni
Deodorant panel	0	0	0	0
Fly Ash panel	0	0	11	0

물공정시험법중 용출시험을 실시하여 용출액을 ICP-OES로 분석한 결과를 Table 2에 나타내었으며 규제물질은 불검출 되었다.

3.2. 단일성분 첨가제가 사용된 패널의 흡착성능 실험

Fig. 3은 활성탄을 단일첨가제로 사용한 패널의 포름알데히드와 톨루엔에 대한 제거성능을 보여주고 있다.

Fig. 3에서 톨루엔과 포름알데히드에 대한 성능은 활성탄이 10%첨가되는 시점까지는 증가하였으나 그 이상에서는 첨가제의 추가에 비해 효과가 미미하게 나타나고 있다. 그리고 포름알데히드 보다 톨루엔의 경우에 활성탄 첨가에 따른 제거성능이 상대적으로 크게 나타났다. 따라서 활성탄을 첨가제로 사용하는 경우에는 10%정도가 포름알데히드와 톨루엔에 대한 제거성능을 안정적으로 확보할 수 있는 첨가량이라 판단되었다.

Fig. 4는 규조토를 첨가제로 사용한 경우의 포름알데히드와 톨루엔에 대한 제거성능을 보여주고 있다. 포름알데히드에 대해서는 첨가량 5%까지 급격히 제거효율이 증가하지만 그 이상 첨가할 경우 오히려 제거효율이 감소하다 첨가량 15%에 이르면 첨가전과 같은 수준의 제거성능으로 떨어진다. 톨루엔에 대한 경우 역시 첨가량 5%까지 제거성능이 상승하다 이후 감소하지만 포름알데히드에 비하여 다소 완만한 상승과 하강을 보여주고 있다.

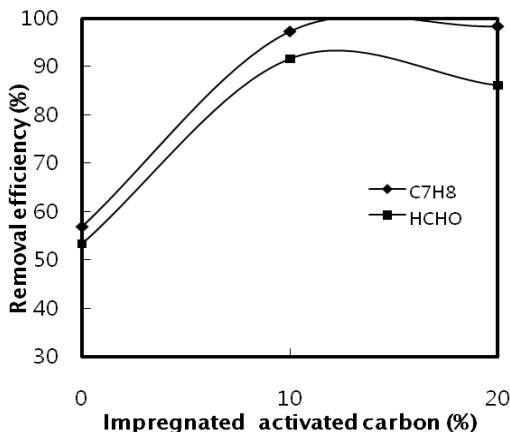


Fig. 3. The removal efficiency of mixture gases by fly ash panels added activated carbon.

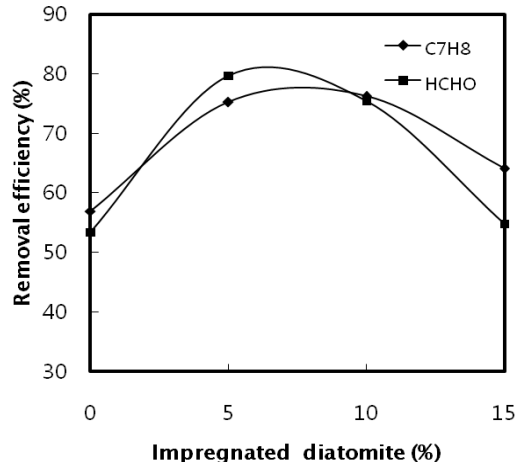


Fig. 4. The removal efficiency of mixture gases by fly ash panels added diatomite.

3.3. 2성분 첨가제가 사용된 패널의 흡착성능 실험

Fig. 5는 활성탄의 양을 10 wt%로 고정하여 규조토를

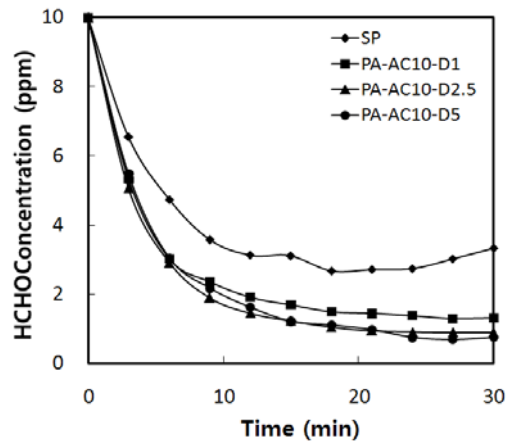


Fig. 5. The removal efficiency of formaldehyde by the panels which is impregnated various ratio of activated carbon to diatomite.

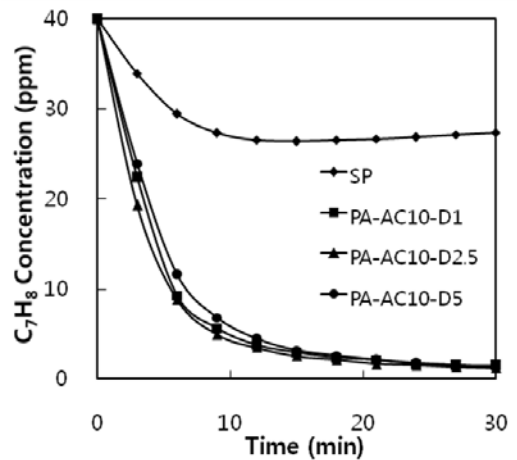


Fig. 6. The removal efficiency of toluen by the panels which is impregnated various ratio of activated carbon to diatomite.

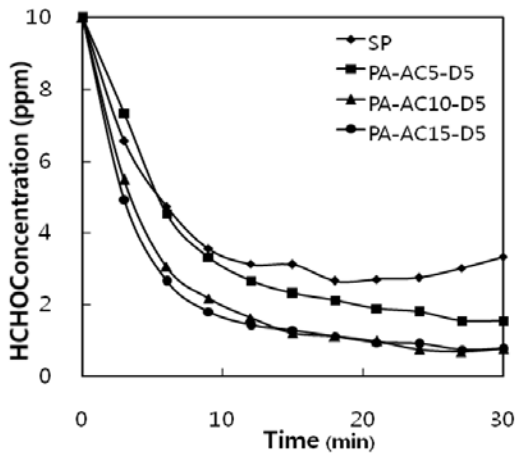


Fig. 7. The removal efficiency of formaldehyde by the panels which is impregnated various ratio of activated carbon to diatomite.

1 wt%, 2.5 wt%, 5.0 wt%로 증가시키며 제조한 탈취패널의 포름알데히드에 대한 제거성능을 보여주고 있다. 전체적으로 기준 패널 대비 20% 이상으로 제거성능이 증가하였다. 다만 규조토를 1% 혼합 첨가한 경우 포름알데히드에 대한 제거성능이 다른 비율의 패널에 비하여 약 5% 정도 떨어졌다. Fig. 6 역시 활성탄을 10 wt%로 고정하고 규조토의 첨가량을 1 wt%, 2.5 wt%, 5 wt%로 증가시켜 제조한 탈취패널의 톨루엔에 대한 제거성능을 보여주고 있다.

첨가제의 비율변화에 따른 패널들의 제거성능은 차이가 없음을 확인 할 수 있다. 그러나 기준패널 대비 톨루엔 제거성능은 65~67%로 큰 폭으로 상승하였다.

Fig. 7은 규조토의 양을 5%로 고정시키고 활성탄의 첨가량을 5 wt%, 10 wt%, 15 wt%로 변화시켜 제조한 패널의 포

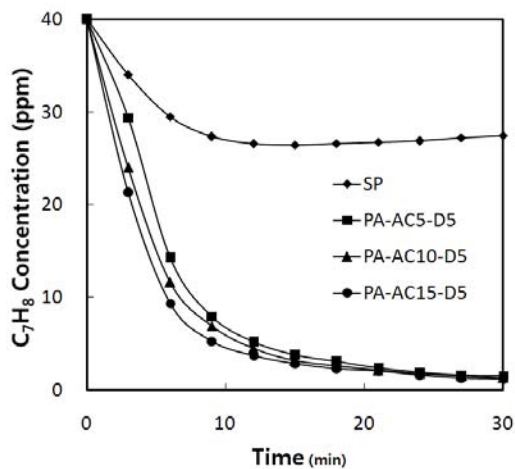


Fig. 8. The removal efficiency of toluen by the panels which is impregnated various ratio of activated carbon to diatomite.

름알데히드에 대한 제거성능을 보여주고 있다. 여기에서도 기준패널 대비 17~25%의 제거성능 향상이 있었으나 활성탄과 규조토를 각각 5%씩 첨가한 경우 다른 패널들에 비해 약 6%정도 효율이 떨어졌으며 나머지 패널들의 제거성능에는 차이가 없었다.

Fig. 8 역시 규조토의 양을 5%로 고정시키고 활성탄의 첨가량을 5 wt%, 10 wt%, 15 wt%로 변화시켜 제조한 중유회 재활용 탈취패널의 톨루엔에 대한 제거성능을 보여주고 있다. 첨가제 사용전에 비해 제거성능은 크게 향상되었으나 첨가제 비율에 따른 제거성능에는 차이가 없는 것을 확인 할 수 있었다.

3.4. 중유회재활용 탈취패널의 압축강도분석

Table 3은 단일성분 첨가제를 혼합하여 제조된 중유회재활용 탈취패널의 압축강도를 측정하여 나타냈다.

첨가제를 투입한 대부분의 패널이 기준패널인 S의 패널보다 약한 강도를 보였으며 그 중에서도 활성탄을 단일성분 첨가제로 하여 제조된 패널의 경우에는 기준패널 대비 32%의 압축강도를 보이고 있으며 규조토를 첨가제로 하여 제조된 패널의 경우 규조토 함량 5 wt%에서 기준패널 대비 60%의 압축강도로 최대값을 보였다.

Table 4는 활성탄과 규조토를 혼합하여 제조한 중유회재활용탈취패널의 압축강도를 측정한 결과이다. 대부분이 기준패널 대비

Table 3. The compressive strength of the panels to be impregnated various ration of activated carbon or diatomite

Sample	Strength (N/mm ²)	Strength (Kgt/cm ²)
S Panel	5.3	54.1
PA	2.1	21.4
PA-D5	2.1	21.2
PA-D10	3.2	32.7
PA-D15	2.5	25.5

Table 4. The compressive strength of the panels to be impregnated various ration of activated carbon or diatomite

Sample	Strength (N/mm ²)	Strength (Kgt/cm ²)
S Panel	5.3	54.1
PA	2.1	21.4
PA-AC5-D5	5.8	59.2
PA-AC10-D10	2.2	22.4
PA-AC10-D2.5	3.1	31.6
PA-AC10-D5	2.1	21.4
PA-AC15-D5	2.1	21.4

40~60% 감소하였으나 활성탄과 규조토를 각각 5 wt% 첨가하여 제작된 패널의 경우에는 기존패널보다 9%의 압축강도가 상승하였다.

4. 결론

활성탄 및 규조토를 단일성분으로 혼합하여 제조된 중유 회재활용 탈취패널은 비교대상이었던 기존패널과 대비하여 높은 유해화학물질 (포름알데히드, 톨루엔)에 대한 제거성능을 보여주었다. 하지만 압축강도실험에서 기존패널에 훨씬 못 미치는 결과를 보여 주었으며 이는 중유회재활용 탈취패널의 실제 적용가능성을 저해하는 요인이 될 수 있었다. 하지만 두 첨가물을 혼합하여 유해화학물질 제거성능과 압축강도를 측정된 결과 단일첨가제로 제조되었던 패널과 유해화학물질 제거성능은 유사하면서도 압축강도면에서 개선된 것을 확인할 수 있었다. 활성탄과 규조토를 각각 5%씩 혼합하여 제조한 패널에서는 기존 탈취패널보다 약 9% 높아진 압축강도를 보여 줌으로서 탈취패널로서의 가능성을 높였다. 게다가 포름알데히드 및 톨루엔의 제거성능까지 기존패널대비 크게 상승한 결과를 보여주었다. 따라서 적정량의 첨가제를 혼합하여 사용할 경우 기존 상용화 패널보다 두 화학물질에 대한 제거성능 및 압축강도면에서 상용화된 패널보다 우수한 제품을 생산할 수 있는 가능성을 확인하였다. 그리고 이를 통하여 탈취패널이라는 새로운 분야로 중유회를 친환경적으로 재활용할 수 있는 방법을 검증할 수 있게 되었다.

KSEE

사 사

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(2007-R-RU-11-P-14-3-010-2007)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참고문헌

1. 황세연, 김수룡, 김남수, "중금속 제거를 통한 건자재로의 중유 회 재활용," 한국폐기물학회지, **26**(3), 206-212(2009).
2. 한국양회공업협회 : 중유회 재활용 사례, 자원재활용, <http://www.cement.or.kr/tech/resource.asp>.
3. Masud, A., "Recovery of vanadium and nickel from petroleum

- flyash," *Miner. Eng.*, **15**(11), 953-961(2002).
4. 유연태, 김병규, 박경호, 홍성용, "중유회 소각재로부터 바나듐, 니켈 침출에 관한 기초적 연구," 한국자원리사이클링학회지, **4**(3), 32-39(1995).
5. Vitolo, S., Seggiani, M., and Falaschi, F., "Recovery of vanadium from a previously burned heavy oil fly ash," *Hydrometallurgy*, **62**(3), 145-150(2001).
6. Uddin, M. A., Shinozaki, Y., Furusawa, N., Yamada, T., Yamaji, Y. and Sasaoka, E., "Preparation of activated carbon from asphalt and heavy oil fly ash and coal fly ash by pyrolysis," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **78**(2), 337-342(2007).
7. Tepper, J. S., Moser, V. C., Costa, D. L., and Mason, M. A., "Toxicological and chemical evaluation of emission from carpet samples," *Am. Indu. Hyg. Associ. J.*, **56**(2), 158-170(1995).
8. 김영희, 양원호, 손부순, "신축 주택의 톨루엔 발생량 모델을 이용한 건강위해성 평가," 한국 환경보건학회지, **32**(5), 398~
9. 김강석, 이희선, 공성용, 구현정, "실내공기오염에 대한 국민의식 조사와 정책방안연구." 한국환경정책평가연구원. (2001).
10. 이오규, 최준원, 조태수, 백기현, "목탄계 건축자재에 의한 포름알데히드 흡착," 목재공학, **35**(3), 61~69(2007).
11. American Conference Governmental Hygienists. 2004 TLV and BEIs, threshold limit values for chemical substances and physical agents, Cincinnati, OH ACGIH(2004).
12. National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH pocket guide to chemical hazards, DHHS(NIOSH), Cincinnati, pp. 97-140(1997).
13. Husman, K., "Symptoms of car painters with long term exposure to a mixture of organic solvents," *Scandinavian & Jurnal work Environment Health*, **6**, 19-32(1980).
14. 이정휴, 김민호, 김수룡, 김남수, 한혜철, "중유회 재활용 통해 제조된 패널을 탈취패널로써 가능성 실험 - 포름알데히드, 톨루엔 중심으로 흡착실험," 한국폐기물학회지, **27**(1), 59~64(2010).
15. 박수엽, 신장원, 이선훈, 문복희, 유경선, 송광섭 "활성탄을 이용한 휘발성 유기화합물의 흡착특성연구," 한국대기환경학회 2004 추계학술대회 논문집, 광운대학교 환경공학과, 한국에너지기술연구원, 충남, pp. 431~432(2004).
16. 임경수, 우광재, 박현설, 이시훈 "활성탄층의 유동분포에 따른 VOCs 흡착특성," 한국대기환경학회 2006 춘계학술대회 논문집, 한국에너지기술연구원 청정시스템연구센터, 화성, pp. 517~518 (2006)
17. 환경부 : 폐기물공정시험방법(2007)