

목탄계 건축자재에 의한 포름알데히드 흡착*1

이 오 규*2† · 최 준 원*2 · 조 태 수*2 · 백 기 현*3

Adsorption of Formaldehyde by Wood Charcoal-Based Building Materials*1

Oh-Kyu Lee*2† · Joon-Weon Choi*2 · Tae-Su Jo*2 · Ki-Hyon Paik*3

요 약

실내 공기질 향상을 목적으로 사용되는, 목탄과 모르타르 또는 천연 페인트가 혼합된 건축재료에 대한 포름알데히드 제거효과를 분석하기 위하여, 포름알데히드를 소정의 농도로 조절한 밀폐 용기에 이들 목탄계 건축자재를 넣고 일정시간 동안의 처리 과정을 거친 후 잔류 포름알데히드를 DNPH (2,4-Dinitrophenyl hydrazine) 카트리지를 통해 수집하고 HPLC 분석을 통해 잔류농도를 측정하여 목탄건축자재에 의한 포름알데히드 제거성능을 조사하였다. 목탄 및 목탄 바이오 모르타르의 포름알데히드 흡착 실험결과, 두 시료군 모두에서 목탄 5, 10, 15%를 함유한 시료의 단위중량 당 포름알데히드 제거량은 목탄을 함유하지 않은 시료에 비해 3배 이상 높았으며 포름알데히드 제거율은 약 80~90% 이상이였다. 수성 목탄 페인트의 포름알데히드 흡착 실험결과 또한 비슷하여, 목탄 15, 20, 25%를 함유한 시료의 단위중량 당 포름알데히드 제거량은 목탄을 함유하지 않은 시료에 비해 3배 가량 높았으며 포름알데히드 제거율은 90% 이상이였다. 포름알데히드는 목탄 제조 과정 중 목재의 리그노셀룰로스 성분의 구조변화로 인해 형성된 탄소 골격인 그래핀(Graphene)층 표면이나 가장자리에 형성된 흡착형 'O' 또는 'OH'관능기와 결합하여 흡착되는 것으로 판단된다.

* 1 접수 2007년 1월 23일, 채택 2007년 3월 6일

* 2 국립산림과학원 화학미생물과, Div. of Wood Chemistry & Microbiology, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

* 3 고려대학교 생명과학대학 환경생태공학부 생물재료공학과, Dept. of Biomaterial Science & Technology, Environmental Science & Ecological Engineering, College of Life Sciences & and Biotechnology, Korea University, Seoul 136-701, Korea

† 주저자(corresponding author) : 이오규(email: maineok@hanmail.net)

ABSTRACT

The building materials used for improving indoor air quality, the wood charcoal mixed with cement mortar or natural water paint were examined for their potential removing ability of formaldehyde. After the reaction of samples with formaldehyde in the glass flasks designed in our lab, the remaining formaldehyde was collected using DNPH (2,4-dinitrophenyl hydrazine) cartridges, and their concentration was determined using HPLC. From the results, it was found that the removing amount of formaldehyde per one gram sample containing 5, 10, or 15% of wood charcoal was more than three times compared to that of control (100% cement mortar or water paint). Their elimination percentages from the initial formaldehyde was about 80~90%. The experimental results for wood charcoal-water paint showed a similar trend with those of wood charcoal-cement mortar samples. Their elimination percentages from the initial formaldehyde was about 90%. It is proposed that formaldehyde is adsorbed on the adsorbed 'O' or 'OH' groups in the graphene layers formed through the re-arrangement of lignocellulose in the wood during the carbonization procedure.

Keywords: formaldehyde adsorption, wood charcoal-cement mortar, wood charcoal-water paint, graphene layer

1. 서 론

최근 경제 성장과 더불어 전 세계적으로 환경오염이 심각한 문제로 부각되고 있다. 또한, 대부분의 시간을 실내에 거주하는 현대인들의 생활 패턴에 따라 주거 공간에서 발생하는 새집 증후군(Sick House Syndrome) 또는 신축 빌딩 증후군(Sick Building Syndrome)에 의한 피해가 부각되면서 다중 이용 시설 내 공기질 관리에 대한 관심이 증가하고 있다. 포름알데히드는 잘 알려진 '새집 증후군' 주요 원인 물질 중의 하나이다. 이는 목재 가공품, 도료, 단열재, 각종 코팅 종이 제품에서 발견되며, 0.1 ppm 농도 하에서도 메스꺼움, 흥부 압박감, 시근거림, 피부 발진, 알러지를 유발할 수 있는 물질이다(U.S. Consumer Product Safety Commission, 1997). 이렇게 일 반생활 공간에 산재하며 인간 건강에 악 영향을 줄 수 있는 포름알데히드를 제거하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있으며, 흡착에 의한 제거 방법이 많이 사용되고 있다.

실내 공기 중의 포름알데히드 제거를 위한 흡착제

로써, 과망간산 칼륨(Arthur D. Little Inc., 1981), 망간산(Sekine, 2002), 산화 알루미늄(Eriksson *et al.*, 1980.) 등이 연구되었는데, 공기 정화에 가장 많이 사용되는 재료는 탄소질 흡착제이고(Rong *et al.*, 2002) 아미노화 활성탄(Tanada *et al.*, 1999), 레이온화 활성 탄소 섬유(Rong *et al.*, 2002), 대나무 탄(Asada *et al.*, 2002) 등이 포름알데히드 흡착을 위한 연구에 사용된 탄소질 흡착제다. 이들 재료의 흡착성능에 영향을 미치는 인자는 탄소물질 표면의 화학적 관능기 종류 및 양, 세공의 특성, 극성 등이다(Tanada *et al.*, 1999). 또한 흡착성을 좌우하는 탄소물질의 물리·화학적 성질은 목탄 제조 온도(권&김, 2006; 김 등, 2006; 이 등, 2006; 조 등, 200; 조 등, 2005) 및 화학적 처리(Figueiredo *et al.*, 1999; Pulido-Novicio *et al.*, 2001; Youssef *et al.*, 2004) 등에 따라 크게 달라질 수 있다.

본 연구에서는 실내공기질의 안전성을 확보하고 오염 방지 또는 개선을 목적으로 흡착성이 높은 것으로 알려진 백탄과 일반 건축자재로 사용되고 있는 시멘트 및 모래 등을 소정의 혼합비로 혼합하고 있는 목탄 모르타르, 목탄 바이오 모르타르, 천연소재

의 페인트를 함유한 수성 목탄 페인트와 같은 목탄계 건축재료에 의한 포름알데히드 제거효과를 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시 목탄

공시 재료로 사용된 목탄은 분쇄 참나무 백탄으로 목탄 모르타르, 목탄 바이오 모르타르 및 수성 목탄 페인트의 혼합 원료 중 하나로 사용되었다. 목탄 및 바이오 모르타르에 사용된 목탄분말의 입자크기는 0.1~146.8 μm 사이에 분포하였으며, 평균 입자 크기는 23.03 μm , 중간 입자크기는 16.09 μm 이었다. 또한 수성 목탄 페인트의 원료로 사용된 목탄의 경우, 목탄입자는 0.782~82.72 μm 사이에 분포하였으며, 평균 입자 크기가 1.27 μm , 중간 입자크기는 1.41 μm 이었다. Quantachrome Autosorb-1를 이용하여 측정된 상기 백탄분말의 비표면적은 345.0 m^2/g 이었다.

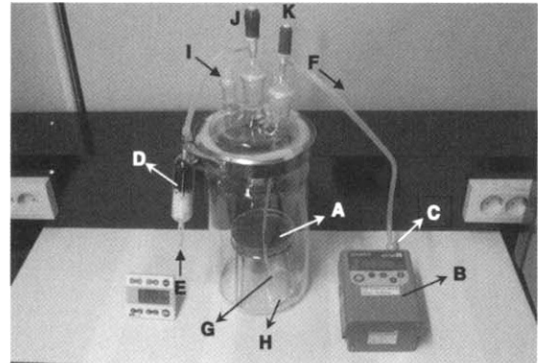
2.2. 목탄 건축재료 제조

본 실험에 사용된 목탄 모르타르, 목탄 바이오 모르타르, 수성 목탄 페인트는 K사에서 제조된 것을 구입하여 사용하였으며, 그 제조 방법은 다음과 같다.

목탄 모르타르는 굵은 모래(왕사) 1~3 mm, 가는 모래(중사) 0.5~1 mm, 가는 모래(세사) 0.5 mm로 선별하여 1:1:1로 혼합한 것과 보통포틀랜드 1종 시멘트를 약 3:7 (w/w)의 비율로 섞은 모르타르에 목탄을 5, 10, 15%의 중량 비율로 혼합한 것이다.

목탄 바이오 모르타르의 제조 방법은 모래와 Sericite를 같은 중량비로 혼합하여 사용한 것을 제외하면, 위의 목탄 모르타르의 제조법과 같았다.

수성 목탄 페인트는 녹말, 송진 등이 혼합하여 제조한 수성페인트에 목탄분말을 15, 20, 25%의 중량 비율로 혼합하여 제조된 것이다. 흡착 시험용의 목탄 모르타르, 바이오 목탄 모르타르, 수성 목탄 페인



A: Sample, B: Suction pump, C: DNPH cartridge, D: Filter tube, E: Inlet, F: Outlet, G: Tube connected to outlet, H: Magnetic bar, I: Open for formaldehyde injection, J: Inlet cock, K: Outlet cock.

Fig. 1. A glass flask designed for the formaldehyde adsorption experiments.

트는 100°C의 건조기에서 24시간 동안 건조시킨 후에 사용하였다.

2.3. 흡착 장치 및 방법

흡착용 포름알데히드는 'Sigma' (37 wt % in water, USA), DNHP-포름알데히드 유도체 표준용액은 'Supelco' (Formaldehyde 2,4-DNPH, USA), 포름알데히드 흡착용 카트리지는 'Supelco' (DNPH (2,4-Dinitrophenyl hydrazine), LpDNPH S10L, USA)사로부터 구입하였고, 포름알데히드 흡입용 펌프는 mp- Σ 300 (SIBATA, Japan)를 사용하였다.

목탄 및 목탄 바이오 모르타르는 4 g, 수성 목탄 페인트는 5 g의 건조된 시료(Fig. 1의 A)를 Petri Dish 위에 넣어 4 l 용량의 실린더형 3구 분리 유리 플라스크(높이 26 cm \times 직경 14 cm) 안에 장착한 후, 흡착 중 플라스크 덮개부와 본체부 사이의 공기 유출입을 차단하기 위하여 이들 이음부를 파라필름과 철제의 플라스크 압축스토퍼로 밀폐 및 고정하였다. 흡착과정이 종료된 후, 플라스크 안의 잔류 포름알데히드를 흡입펌프(Fig. 1의 B)를 이용해 채집할 때 플라스크 외부로부터 유입될 수 있는 수분 및 가스 상 물질의 제거를 위하여 유입구 쪽에는 흡습

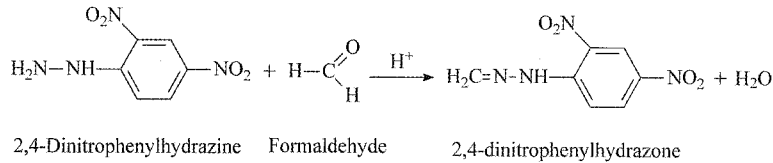


Fig. 2. Reaction of DNPH and formaldehyde.

제와 활성탄이 채워진 필터 튜브(Fig. 1의 D)를 장착하였다. 공기보다 무거운 특성을 갖는 포름알데히드의 채취를 위하여 실리콘튜브를 플라스크 아래까지 연결하였다(Fig. 1의 G).

시료 등 셋팅이 완료된 플라스크 내에 주입구(Fig. 1의 I)를 통해 70 µg의 포름알데히드를 마이크로 주사기로 정량 주입한 후 주입구를 밀폐하였다. 밀폐한 플라스크를 40°C의 건조기 안에 90분 동안 넣어 포름알데히드를 기화시켰으며, 플라스크를 건조기에서 꺼낸 후, 상온에서 추가로 90분 동안 자석식 교반기를 사용하여 플라스크 내부의 공기를 순환시켜 포름알데히드 농도를 균일화하여 재료에 의한 흡착시험을 실시하였다.

2.4. 포름알데히드 채취 및 농도 측정

흡착과정이 종료 된 후, 밀폐한 플라스크의 개폐구 코크를 열고 플라스크 내부의 공기를 DNPH 카트리지와 연결된 흡입펌프를 사용하여 1.5 l/min의 속도로 5분 동안 채취하였다. 카트리지로 흡입된 공기 중, 잔류되어 있는 포름알데히드는 카트리지 내에서 DNPH와의 유도체화 반응을 통해 DNPH-포름알데히드 유도체(2,4-dinitrophenylhydrazone)로 변환된다(Fig. 2). 잔류 포름알데히드의 농도는 이렇게 변환된 DNPH-포름알데히드 유도체 형태로 측정되었다. 농도 측정을 위해 카트리지 내의 변환 유도체를 아세토니트릴(5 ml)로 추출하였고, 이를 고성능액체크로마토그래피(HPLC, Agilent 1100 series)를 이용해 정량 분석하였는데, 이 때 사용한 분석용 칼럼은 Eclipse XDB C18 (Agilent, 4.6 × 150 mm)이었다. 정확한 분석을 위해, HPLC시스템을 3시간 동안 이동상 용매를 흘려주어 크로마토그램 베이스라인을 안정화시킨 후 분석을 실시하였다. 이동

상 용매는 40 : 60 (v/v) 비율의 아세토니트릴과 물의 혼합액을 사용하였고 유량은 1.0 ml/min이었으며, 분석용 자외선 검출기에 사용된 자외선 파장은 360 nm이었다.

정량 분석을 위한 검량식은 DNHP-포름알데히드 유도체 표준용액을 각각 0.01, 0.1, 1, 5, 10 ppm으로 희석하여 측정된 크로마토그램의 면적(y)과 농도(x)와의 상관관계를 바탕으로 작성되었다. 얻어진 검량식은 $y = 34532x + 108.18$ 이었고 상관계수(R^2)는 0.9999였다.

2.5. 포름알데히드 흡착량 및 제거율

검량선을 통해 플라스크 내의 잔류된 포름알데히드 절대량을 조사하여 초기 포름알데히드량으로 하였고, 초기 포름알데히드에 대한 잔류 포름알데히드의 양을 비교하여 포름알데히드 제거율을 계산하여 백분율로 나타내었으며, 흡착전후의 포름알데히드 양 차이에 의해 흡착 시료의 단위중량당 흡착량을 산출하였다. 각 처리 시료의 포름알데히드 흡착량 및 제거율을 계산하기 위해 사용된 초기 포름알데히드 농도는, 어떠한 시료도 포함시키지 않은 밀폐 유리 플라스크에 포름알데히드만을 주입하여 전 항에 언급된 방법과 동일하게 처리 및 채취하여 분석된 포름알데히드의 농도이다. 이론적으로, 실험군 각각의 초기 포름알데히드 농도는 같아야 하지만 실험상에서는 약간의 차이를 보였다. 이는 각 시료별 실험군에 대한 처리가 다른 시기에 별도로 이루어진 때문으로 생각된다. 실험 과정 중 90분간 상온에서 유리 플라스크 안의 공기를 순환시키는 단계가 있는데, 각 실험군 처리 시기의 실험실 내 온도 및 광량 차이 등에 따라 채취되는 포름알데히드의 양은 약간씩 달라지는 것으로 판단된다. 이에 대한 것은 고찰

부분에 보강 설명되어 있다. 그러므로, 각 실험군의 포름알데히드 흡착량 및 제거율은 해당 실험군 처리 시 얻어진 개별적 초기 포름알데히드량을 기준으로 하여 얻어졌다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 목탄 모르타르의 포름알데히드 흡착

목탄 모르타르에 의한 포름알데히드 흡착성 분석을 위한 HPLC 크로마토그램 상에서 DNPH 피크는 약 5.3분에 나타났으며, 본 실험에서 기준으로 삼은 DNPH-포름알데히드 유도체피크는 약 12~13분 사이에 나타나서 이들 두 피크의 분리성은 포름알데히드 농도를 측정하기에 충분하였다(Fig. 3). 또한, Fig. 3에 보이는 바와 같이 목탄 함량의 변화에 따라 DNPH-포름알데히드 피크 면적에 차이가 나타났다. 즉, 목탄 함량이 많을수록 피크의 면적이 작아져서 채취된 포름알데히드 농도가 낮아진 것을 알 수 있었다.

목탄 모르타르에 의한 포름알데히드 흡착량 및 제거율 등은 Table 1에 나타나있다. 목탄 함유 시료의 포름알데히드 제거율은 약 82~94%이었다. 목탄 5%를 함유한 목탄 모르타르의 단위중량 당 포름알데히드 제거량은 1.71 $\mu\text{g/g}$ 로서, Control보다 약 3배 이상 높은 것으로 나타났다. 목탄 함유율 10% 및 15%의 목탄 모르타르의 중량 당 포름알데히드 제거율은 목탄을 5% 함유한 경우보다 높았으며 목탄함

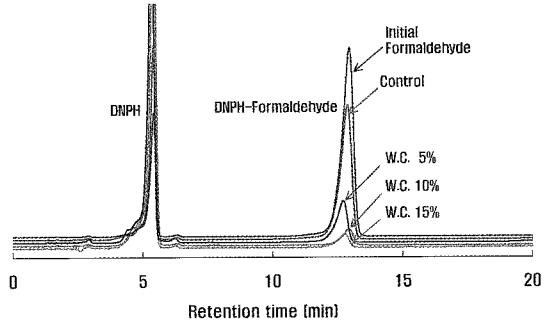


Fig. 3. HPLC chromatograms for wood charcoal-cement mortar samples adsorbed formaldehyde (Note: W.C.-Wood charcoal Contents).

유량이 증가할수록 포름알데히드 제거율이 증가하는 경향이 있었으나, 목탄혼합비가 2배, 3배 증가하더라도 포름알데히드 제거율이 비례적으로 증가하지는 않았다.

목탄에 의한 포름알데히드 흡착 시 수분이 존재하면 먼저 포름알데히드가 수분에 흡착되어 용해되는 경향이 있다고 알려져 있어(Xu and Schell,1990), 본 실험에서는 시료를 완전히 건조한 상태로 흡착시켰으며, 펌프에 의한 용기 내의 공기 채취 시 유입되는 외부 공기에 포함될 수 있는 수분 및 기타 기상 물질은 활성탄과 칼슘클로라이드를 포함하고 있는 필터로 제거시켰기 때문에 수분에 의한 영향은 없었던 것으로 판단된다. 또한 Table 1에 나타난 시료들은 동일한 흡착환경 하에서 동시에 처리되었고 시료에 포함된 목탄은 동일 제조조건 하에서 만들어진 것이기 때문에, 목탄함유율 증가에 따른 포름알데히

Table 1. Adsorption of formaldehyde by wood charcoal-cement mortar

wood charcoal content (%)	Total amounts of HCHO (μg)	Percentage of elimination (%)	Amounts of adsorbed HCHO ($\mu\text{g/g}$)
Initial Formaldehyde	840	-	-
Control*	631	24.88	052
5%	154	81.67	171
10%	068	91.90	193
15%	051	93.93	197

* Control: Cement mortar didn't contain wood charcoal.

드 제거율이 비례적으로 변화하지 않는 원인이 사용된 목탄이나 실험조건의 차이에 의한 것은 아니라고 판단된다. 그러므로, 위의 결과는 목탄이 갖고 있는 평균 세공경 및 세공경 분포 등이 영향을 미치는 것으로 생각된다. 즉, 목탄의 양이 증가하여도 포름알데히드가 흡착될 수 있는 목탄의 세공경이 제한되어 있기 때문에 제거율의 증가가 목탄량 증가에 비례하지 않은 것으로 판단되며, 이 원인 구명을 위해 심층적인 목탄의 세공특성 실험이 추후에 이루어질 예정이다.

3.2. 목탄 바이오 모르타르의 포름알데히드 흡착

Fig. 4는 목탄 바이오 모르타르의 포름알데히드 흡착 분석을 위한 HPLC 크로마토그램이다. 이는 목탄 모르타르의 결과 크로마토그램과 유사하게 나타났다.

Table 2에서 볼 수 있듯이, 바이오 모르타르 100% 시료(Control)에 비하여 목탄을 함유한 바이오 모르타르 시료들의 흡착 능력이 우수하게 나타났다. 목탄 함유 시료의 포름알데히드 제거율은 약 80~96%이었으며, 목탄 5%를 함유한 바이오 목탄 모르타르 시료의 중량 당 포름알데히드 흡착량은 Control에 비해 3배 이상 높은 것을 알 수 있었다. 그리고, 목탄 모르타르의 경우에서처럼 목탄 함량 10% 및 15%인 목탄 바이오 모르타르의 중량 당 포름알데히드 흡착량은 목탄 5%를 함유한 시료보다 높게 나타났으나 목탄의 증가 비율에 비례하지는 않았다.

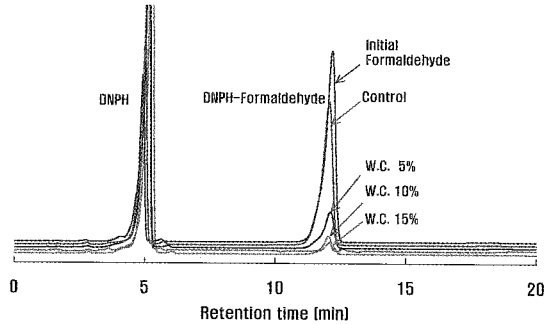


Fig. 4. HPLC chromatograms for wood charcoal-biocement mortar samples adsorbed formaldehyde (Note: W.C.-Wood charcoal Contents).

3.3. 수성 목탄 페인트의 포름알데히드 흡착

수성 목탄 페인트의 포름알데히드 흡착 후 HPLC 크로마토그램 상에서도 목탄 및 목탄 바이오 모르타르의 경우에서처럼 포름알데히드 흡착 효과가 매우 분명하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 상기 두 시료의 경우와 마찬가지로 수성페인트에 목탄이 함유되면 Control보다 DNPH-포름알데히드 피크의 크기가 크게 감소하였다. 즉, 포름알데히드 흡착량이 커 잔류 포름알데히드의 양이 적다는 것을 의미한다. 그러나 목탄 및 목탄 바이오 모르타르와는 달리 목탄 함량 증가에 따른 잔류 포름알데히드의 농도차이가 크게 나타나지는 않았다(Fig. 5).

수성 목탄 페인트의 포름알데히드 흡착 결과는 Table 3에 나타내었다. Control의 포름알데히드 제

Table 2. Adsorption of formaldehyde by wood charcoal-biocement mortar

wood charcoal content (%)	Total amounts of HCHO (μg)	Percentage of elimination (%)	Amounts of adsorbed HCHO (μg/g)
Initial Formaldehyde	7.50	-	-
Control*	5.67	24.40	0.46
5%	1.47	80.40	1.51
10%	0.24	96.80	1.82
15%	0.27	96.40	1.81

* Control: Biocement mortar didn't contain wood charcoal.

Table 3. Adsorption of formaldehyde by wood charcoal-water paint

Wood charcoal content (%)	Total amounts of HCHO (μg)	Percentage of elimination (%)	Amounts of adsorbed HCHO (μg/g)
Initial Formaldehyde	8.76	-	-
Control*	5.86	33.11	0.58
15%	0.62	92.92	1.63
20%	0.58	93.38	1.64
25%	0.62	92.92	1.63

* Control: Water paint didn't contain wood charcoal.

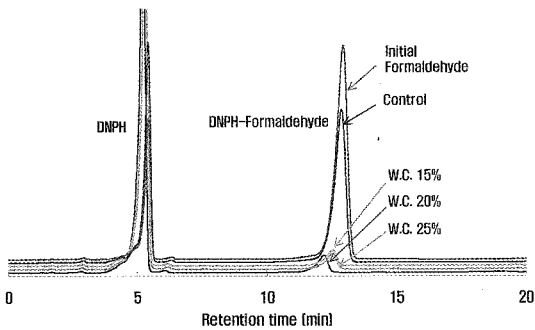


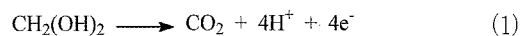
Fig. 5. HPLC chromatograms of wood charcoal-water paint samples adsorbed formaldehyde (Note: W.C.-Wood charcoal Contents).

거울은 약 33%로 목탄 모르타르나 목탄 바이오 모르타르 Control의 제거율에 비해 높게 나타났다. 이는 시료 처리량의 차이에 의한 것으로 생각된다. 목탄 모르타르나 목탄 바이오 모르타르의 경우, 처리 시료의 양이 4 g이었다. 이에 반하여 수성 목탄 페인트의 경우는, 소량의 액상 시료에 대한 취급이 어려웠던 관계로 건조 중량 5 g을 시료 무게로 하였기 때문에 제거율이 더 높게 나타났다고 판단된다. 목탄 함유 시료의 포름알데히드 제거율에 있어서도 목탄 및 목탄 바이오 모르타르의 경우와는 약간 다른 경향을 나타내어, 목탄 15, 20, 25%를 혼합한 시료 간 포름알데히드 제거율 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 수성 목탄 페인트의 목탄 함유율이 목탄 및 목탄 바이오 모르타르의 경우에서 보다 높기 때문에, 10% 이상의 목탄을 함유한 목탄 및 목탄

바이오 모르타르에서와 비슷한 경향을 보이는 것으로 판단된다. 수성 목탄 페인트의 포름알데히드 흡착제거 경향은 목탄 및 목탄 바이오 모르타르의 경우에서처럼 목탄이 갖고 있는 평균 세공경 및 세공경 분포와 그 세공에 흡착하는 포름알데히드의 분자 크기 등이 흡착에 영향을 미치는 것으로 생각되기 때문에 목탄의 세공특성에 따른 흡착 특성구명이 필요할 것으로 생각된다.

3.4. 목탄 상의 포름알데히드 흡착 이론에 대한 고찰

위의 세 시료군 실험을 위해 포름알데히드만을 포함하고 있는 유리 플라스크에서 채취된 초기 포름알데히드의 양은 평균 8.22 μg이었다. 이는 최초 주입량인 70 μg보다 현저히 적은 양이다. 이러한 현상은 실험 수행 중 일어날 수 있는 여러 가지 요인에 의해 용기에 주입된 포름알데히드가 변형 및 분해되어 일부만이 HCHO의 형태로 잔존하는 것으로 판단된다. 이를 뒷받침하는 첫 번째 요인은 물에 용해된 포름알데히드의 산화현상이다. 본 실험에서 사용한 포름알데히드는 물에 녹아있는 형태이고, 일반적으로 포름알데히드가 물에 녹아 있을 때 많은 부분이 수화 형태(CH₂(OH)₂)로 존재하게 되고 이는 결국 식 (1)에서처럼 산화과정을 거쳐 이산화탄소로 변하게 된다(Xu and Schell, 1990). 그리고 또 다른 요인은,



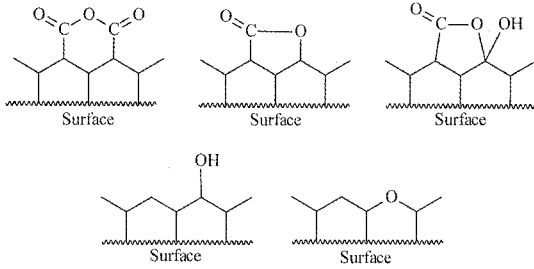
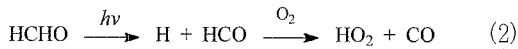
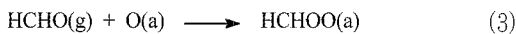


Fig. 6. Functional groups on the face and edges of the graphene layers of wood charcoal.



식 (2) (Web site)에서와 같이 처리 중 발생할 수 있는 포름알데히드의 광과 산소에 의한 변형이다. 이는 Tanada *et. al.* (1999)이 포름알데히드는 공기 중에서 산화된다고 언급한 것과 맥락을 같이 하는 것이다. 따라서, 70 μg 의 포름알데히드 중 이러한 변형 및 분해과정을 거치지 않은 잔존 포름알데히드량이 평균 8.22 μg 이라고 판단된다. 흡착 시료를 포함하고 있는 실험 용기 안에서 이들 중 일부는 시료에 흡착되고 나머지는 용기 내에 잔류하다가, 처리가 끝난 후 펌프의 작동으로 인해 DNPH 흡착관으로 흡착된 후 DNPH-포름알데히드의 형태로 측정되는 것으로 판단된다.

포름알데히드가 시료에 흡착되는 기작은 식 (3) (Sekine, 2002)과 (4) (Malpass and Motheo, 2003)에서와 같이 포름알데히드가 산화금속(Metal oxide)에 흡착된 후 산화되어 이산화탄소로 분해되는 원리와 유사할 것으로 판단된다. 식 (3)과 (4)에서 'g'는 가스상태,



'a'는 흡착되어 있는 형태의 화합물을 뜻한다. 즉, 포름알데히드는 산화금속물의 표면에 존재하는 'O' 또는 'OH'관능기와 결합하여 흡착되는 것이다. 한편, 목탄 제조 과정 중 목재의 리그노셀룰로스 성분은 구

조변화를 일으키고 이로 인해 탄소 골격으로 이루어진 그래핀(Graphene) 층을 형성하게 되는데, 이 층들의 표면이나 가장자리에는 산화금속물에 나타나는 것들과 같이 다양한 관능기들이 남아 있다(Boehm 1994; 2002)(Fig. 6). 포름알데히드는 이러한 목탄 표면의 관능기들과의 반응으로 흡착되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

다공질로서 흡착성이 좋은 것으로 알려진 목탄을 시멘트, 모래, Sericite 등의 건축소재와 소정의 비율로 혼합한 건축재료인 목탄 모르타르, 목탄 바이오 모르타르, 수성 목탄 페인트를 대상으로, 실내 공기 공기질 향상 목적의 포름알데히드 제거효과를 연구하였다. 그 결과 목탄을 5~25% 함유한 건축재료는 목탄을 포함하지 않은 시료들에 비해 약 3~4배 가량 높은 단위중량 당 포름알데히드 흡착량을 보였다. 본 연구에서 도출된 포름알데히드 흡착기작에 의하면, 포름알데히드는 목탄 제조 과정 중 목재의 리그노셀룰로스 성분의 구조변화로 인해 형성된 탄소 골격인 그래핀(Graphene)층 표면이나 가장자리에 형성된 흡착형 'O' 또는 'OH'관능기와 결합하여 흡착되는 것으로 판단된다. 하지만 포름알데히드 흡착량 증가율이 목탄량 증가에 비례하여 증가하지 않은 원인은 아직 밝혀지지 않았다. 이는 목탄이 갖고 있는 세공경 등 세공특성에 의한 것으로 추측되며 이에 대한 보충적인 연구를 수행할 예정이다. 본 연구 결과를 종합하여 볼 때, 목탄 함유 건축자재의 포름알데히드 흡착성이 우수한 것으로 판명 되었으며, 본격적인 실용화가 크게 기대된다.

참 고 문 헌

1. 권성민, 김남훈. 2006. 목재의 탄화기구 해석(I). 목재공학 34(3): 8~14.
2. 김남훈, 황원중, 권성민, 권기중, 이성재. 2006. 제조온도에 따른 목탄의 해부학적 특성. 목재공학 34(4): 1~8.
3. 이오규, 조태수. 2006. 소나무 및 참나무 백탄의 물성과

- 구리(II) 이온 흡착 효과. *임산 에너지* 25(2): 55~63.
4. 조태수, 안병준, 최돈하. 2005. 탄화온도 차이에 의한 목질탄화물의 흡착성 변화. *목재공학* 33(3): 45~52.
 5. 조태수, 이오규, 안병준, 최준원. 2006. 국산 수종으로 탄화한 목탄의 물성 및 흡착성. *임산 에너지* 25(1): 9~17.
 6. Arthur D. Little Inc.. 1981. Formaldehyde concentration level control in mobile homes, A report to the HCHO Institute by Arthur D. Little Inc. Cambridge, MA.
 7. Asada, Takashi, S. Ishihara, T. Yamane, A. Toba, A. Yamada, and K. Oikawa. 2002. Science of Bamboo Charcoal: Study on Carbonizing Temperature of Bamboo Charcoal and Removal Capability of Harmful Gases. *Journal of Health Science* 48: 473~479.
 8. Boehm, H.P. 1994. Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons. *Carbon* 32: 759~769.
 9. Boehm, H.P. 2002. Surface oxides on carbon and their analysis: a critical assessment. *Carbon* 40: 145~149.
 10. Eriksson, B., L. Johansson, and I. Svedung. 1980. Filtration of formaldehyde contaminated indoor air. The Nordest Symposium on Air Pollution Abatement by Filtration and Respiratory Protection, Copenhagen.
 11. Figueiredo, J.L. M.F.R. Pereira, M.M.A. Freitas, and J.J.M. Orfao. 1999. Modification of the surface chemistry of activated carbons. *Carbon* 37: 1379~1389.
 12. Malpass, G.R.P. and A.J. Motheo. 2003. The Galvanostatic Oxidation of Aldehydes to Acids on Ti/Ru_{0.3}Ti_{0.7}O₂ Electrodes Using a Filter-press Cell. *Journal of Brazilian Chemical Society* 14: 65~70.
 13. Pulido-Novicio, L., T. Hata, Y. Kurimoto, S. Doi, S. Ishihara, and Y. Imamura. 2001. Adsorption capacities and related characteristics of wood charcoals carbonized using a one-step or two-step process. *J. Wood Sci.* 47: 48~57.
 14. Rong, H., Z. Ryu, J. Zheng, and Y. Zhang. 2002. Effect of air oxidation of Rayon-based activated carbon fibers on the adsorption behavior for formaldehyde. *Carbon* 40: 2291~2300.
 15. Sekine, Y. 2002. Oxidative decomposition of formaldehyde by metal oxides at room temperature. *Atmospheric Environment* 36: 5543~5547.
 16. Tanada, S., N. Kawasaki, T. Nakamura, M. Araki, and M. Isomura. 1999. Removal of Formaldehyde by Activated Carbons Containing Amino Groups. *Journal of Colloid and Interface Science* 214: 106~108.
 17. U.S. Consumer Product Safety Commission. 1997. An Update on Formaldehyde.
 18. Web site, www.who.edu/science/MCG/dept/facilities/hinsta_ozone/methane.html
 19. Youssef, A. M., Th. El-Nabarawy, and S. E. Samra. 2004. Sorption properties of chemically-activated carbons. 1. Sorption of cadmium (II) ions. *Colloids Surf. A* 235: 153~163.
 20. Xu, Y. and M. Schell. 1990. Bistability and Oscillations in the Electrocatalyzed Oxidation of Formaldehyde. *Journal of Physical Chemistry* 94: 7137~7143.