

단 신

## 도시 폐기물 폐목재의 건조 특성

최정후<sup>†</sup> · 김민하 · 조미영 · 박기훈 · 장은진 · 이종민\*

건국대학교 화학공학과  
143-701 서울시 광진구 화양동 1  
\*한전전력연구원 녹색성장연구소  
305-380 대전광역시 유성구 문지로 65  
(2010년 2월 12일 접수, 2010년 3월 22일 채택)

## Drying Characteristics of Municipal Wood Waste

Jeong-Hoo Choi<sup>†</sup>, Min Ha Kim, Mi Young Jo, Ki Hoon Park, Eunjin Jang and Jong-Min Lee\*

Department of Chemical Engineering, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Gwangjin-gu, Seoul 143-701, Korea

\*Green Growth Laboratory, Korea Electric Power Research Institute, KEPCO, 65 Munji-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-380, Korea  
(Received 12 February 2010; accepted 22 March 2010)

### 요 약

본 연구는 질소 분위기의 등온 열중량 분석기를 사용하여 도시 폐기물 폐목재 시료 wood, particle board, MDF의 건조특성을 측정 및 고찰하였다. 폐목재의 건조속도는 잔류 수분 분율에 대한 1차 반응속도로 잘 표현되었다. 건조 활성화 에너지는 12.72~18.31 kJ/g mol, 빈도인자는 0.2155~1.249 1/s이었다.

**Abstract** – This study investigated and discussed the drying characteristics of municipal wood wastes (wood, particle board, medium density fiber-board(MDF)) in the N<sub>2</sub> environment with an isothermal thermogravimetric analyzer. The drying rate could be expressed by a first order reaction model on remaining fraction of moisture. The activation energy ranged from 12.72 kJ/g mol to 18.31 kJ/g mol and the frequency factor from 0.2155 1/s to 1.249 1/s.

**Key words:** Municipal Waste, Wood Waste, Drying, Drying Rate

### 1. 서 론

나무를 포함한 biomass는 중요한 재생에너지원이며, 주로 C, H, O, N 그리고 다른 미량의 성분으로 구성된다. 연료로서 나무의 특성은 건조 특성, 탈휘발 특성, char의 연소특성으로 나누어 고려될 수 있다.

유동층 연소로와 같은 산소 분위기에서 나무의 분해는 수분과 휘발분의 이탈속도가 상대적으로 매우 빠르기 때문에 먼저 건조, 다음으로 탈휘발에 이은 char의 연소로 구성된 세단계의 반응으로 고려될 수 있다. 건조는 가열과정에 상대적으로 낮은 온도(100 °C 부근)에서 탈휘발에 비해서도 더 먼저 일어난다. 탈휘발은 건조와 char의 연소 사이의 넓은 온도영역에서 발생한다. 탈휘발에 이어서 char의 연소는 상대적으로 느리고 고온에서 일어난다. 따라서 건조는 연료가 연소로에서 전환되는 과정에 영향을 주며, 연료의 전환속도를 고려함에 있어서 건조속도의 고려가 필요하다.

Li 등[1]은 마이크로웨이브 사전처리가 나무의 건조속도를 더 증가시키지 못하는 것으로 보고하였으며, 건조 모델로 수분확산 모델

을 고려하였다. Cai와 Hayashi[2]는 radio-frequency 진공건조에서 대기조건이 진공으로 압력이 작아지면 끓은 점이 감소하고, 나무의 내부와 대기 사이의 압력차가 증가되어 건조속도가 증가하는 것으로 보고하였다. 수분의 이동이 건조에 중요한 것으로 고찰하였다. Alexiou 등[3]은 나무의 사전 증기 처리는 내부의 구조를 변화시켜서 건조속도를 7~16% 증가시키는 것으로 보고하였다. 사전 증기 처리는 공극에서 물 분자의 이동을 원활하게 하고, 이로 인하여 건조과정 중에 확산속도를 증가시키는 것으로 고찰하였다. Wen과 Loos[4]는 유동층에서 wood veneer의 건조속도에 관한 수학적 모델(확산 모델)을 유도하였다. 온도 300°F 이상에서는 온도변화에 따른 건조속도의 변화가 민감하지 않으며 diffusion model이 잘 적용되지 않았다. Sinclair[5]는 터널 건조기에서 wood fiberboard의 건조속도를 결정하였다. 건조속도는 물 표면에서 항을 건조속도에 비례하였다. 한편 폐목재의 유동층 연소과정에서 건조특성의 해석에 적용될 수 있는 보고는 거의 없다.

본 연구는 유동층 연소로에 주입된 폐목재의 연소과정을 모사하는 조건에서 폐목재의 건조특성의 고찰을 목적으로 수행되었다. 등온으로 유지되는 유동층 연소로에 투입되는 연료는 순식간에 층온도로 가열된다. 본 연구에서는 온도는 낮지만 미리 일정 온도로 유

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: choijhoo@konkuk.ac.kr

지되고 있는 반응영역에 시료를 신속하게 투입하는 방법으로 연소로 조건을 모사하는 열중량 분석기에서 건조특성을 측정하였다. 질소 분위기의 등온 열중량 분석기에 건조된 목재시료를 투입하여 건조속도를 측정하고, 특성값을 고찰하였다.

## 2. 실험

실험에 사용된 연료는 유동층 연소로에 시험되는 도시폐기물 폐목재이며, 주요 구성성분으로 wood, particle board, MDF (medium density fiber-board)로 분류하였다. 시료의 특성은 Table 1과 같다. 시료 중 회분의 함량은 매우 작고, 수분은 MDF, wood, particle board 순으로 크고, 10% 내외로 판단되었다.

시료의 건조 특성은 Fig. 1과 같은 열중량 분석장치에서 측정하였다. 반응기(영역)는 전기히터로 가열되는 quartz tube(내경 50 mm; 길이 1 m)로 상하로 신속히 이동이 가능하다. 시료가 달려있는 선으로는 K형 열전대선을 사용하였고, 시료접시로 quartz 접시(직경 20 mm)를 사용하였다. 열전대선과 quartz 접시는 모두 실험온도범위에서 반응에 의한 질량변화가 없음을 확인하였다. 실험은 시료가 유동층 연소로에 투입되는 것과 유사한 조건으로 시행되었다. 시료가 일정량(0.25 g) 담겨진 시료접시를 미리 실험온도로 가열된 질소분위기의 열 중량 분석기 반응영역에 신속히 넣은 후 반응에 의한 질량의 변화를 측정하였다. 시료는 대략 정육면체 모양으로 한 변의 길

Table 1. Properties of municipal wood waste

Sample	Wood	Particle board	MDF
Proximate analysis (as received wt%):			
Moisture	8.9	7.90	10.43
Volatiles	75.88	73.42	76.16
Ash	4.80	1.75	1.44
Fixed carbon	10.42	16.93	11.97
Ultimate analysis (dry basis wt%):			
C	49.00	50.85	47.80
H	5.72	6.00	5.85
O(by difference)	38.83	39.34	39.83
N	1.11	1.85	4.70
S	0.07	0.05	0.22
Ash	5.27	1.91	1.60

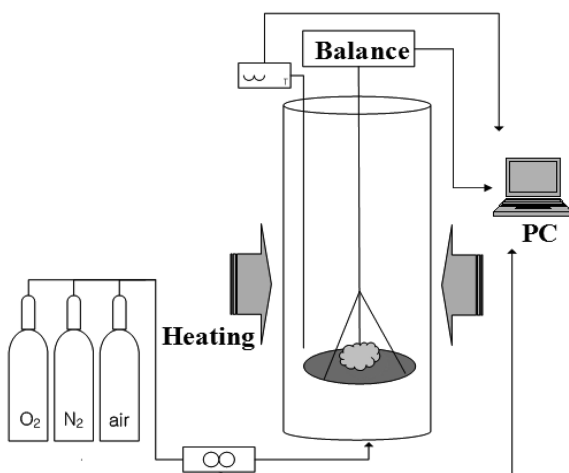


Fig. 1. Thermogravimetric analyzer system.

이는 2~3 mm가 되도록 하였다. 1 초 간격으로 측정되는 질량은 pc로 보내져서 기록되었다. 예비 실험에서 quartz 접시 위에 시료가 없는 조건에서 무게의 변화를 측정하였으며, 부력의 영향을 무시할 수 있었다. 배출되는 기체는 반응영역 상부에서 흡입되어 후드로 배출되었다.

시료의 건조 및 탈휘발 특성을 조사하기 위해서 질소를 주입하는 조건에서 반응온도를 상온으로부터 900 °C까지 가열하며 질량변화를 측정하였다[6]. 수분은 온도 약 100 °C 근방에서 증발되며, 휘발분은 약 250 °C부터 350 °C 범위에서 휘발되는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 건조 특성은 100~150 °C에서 측정되었다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 폐목재 시료 wood, particle board, MDF의 건조에서 시간에 따른 질량변화를 나타낸다. 질량은 시간에 따라 지수적으로 급속히 감소하고, 건조가 완료되면 일정해지는 경향을 보인다. Table 1에

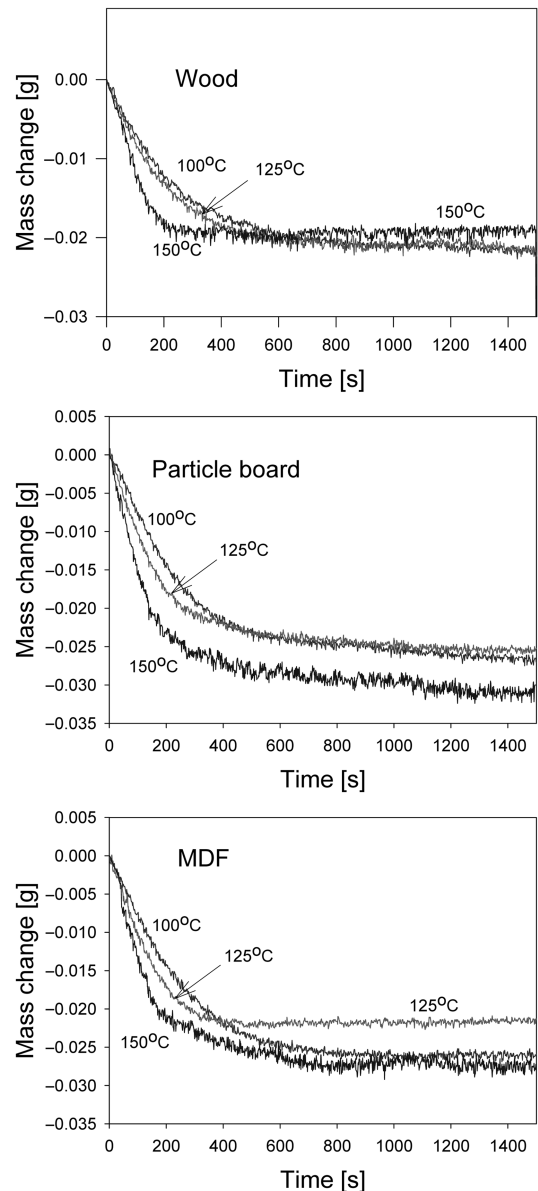


Fig. 2. Effect of temperature on drying rate.

서 나타내는 것과 같이 시료 중 수분 함량은 MDF, wood, particle board 순으로 크다. 하지만 최종 질량 변화에 편차가 있는 것으로 보아서 시료에 따라 수도 수분 함량에 다소 편차가 있는 것으로 판단되었다. 건조온도가 증가함에 따라서 지수적인 질량 감소 구간에서 감소 기울기는 예측되는 바와 같이 증가하였다.

기존의 연구[1-4]에서 수분 확산 모델이 고려되었으나, 본 연구의 건조속도는 건조 중에서 수분의 확산속도가 율속단계인 건조 모델보다 다음의 잔류 수분 분율에 대한 1 차 반응 속도 모델에 더 잘 일치하였다.

$$\frac{dX_w}{dt} = k_w(1 - X_w) \quad (1)$$

$$\ln(1 - X_w) = -k_w t \quad (2)$$

$$k_w = k_{wo} e^{\frac{E_w}{RT}} \quad (3)$$

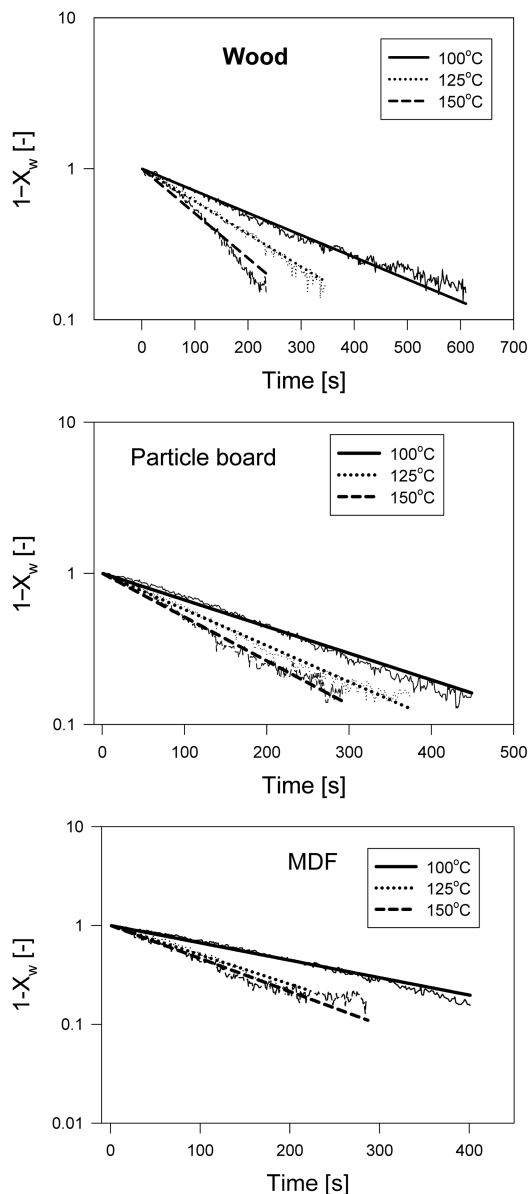


Fig. 3. Time versus conversion of drying (thin line: measured values; thick straight line: model).

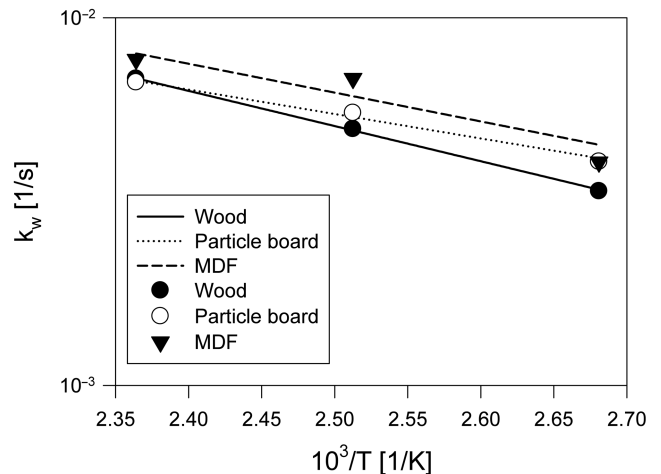


Fig. 4.  $k_w$  versus  $1/T$  (symbols: measured values, lines: regressions).

Table 2. Activation energy and frequency factor of drying of municipal wood waste

Sample	Wood	Particle board	MDF
Activation energy [kJ/g mol]	18.31	12.72	15.01
Frequency factor [1/s]	1.249	0.2511	0.5711

위 식에서  $X_w$ 는 건조율,  $t$ 는 시간,  $k_w$ 는 건조 속도 상수,  $k_{wo}$ 는 건조 속도상수의 빈도인자,  $E_w$ 는 건조의 활성화 에너지,  $R$ 는 기체상수,  $T$ 는 절대온도를 나타낸다.

Fig. 3은 wood, particle board, MDF 시료가 건조될 때, 시간에 따른 건조 전환율을 나타낸다. 그림에서 나타내는 것과 같이 측정값의 경향은 식 (2)와 잘 일치하였다. 건조 속도 상수  $k_w$ 는 직선의 기울기로 결정된다. 건조 속도 상수는 대체로 wood, particle board, MDF 순으로 증가하지만 유사한 값을 보였으며, 온도가 증가함에 따라서 증가하였다.

Fig. 4는 Fig. 3의 측정값과 회귀분석에서 얻어진 건조속도상수와 절대온도의 역수의 관계 즉 식 (3)의 관계를 나타낸다. 회귀분석의 기울기와 절편으로부터 건조반응의 활성화 에너지와 빈도인자를 결정하였다. Table 2는 이를 요약하여 나타낸다. 건조반응의 활성화 에너지는 particle board, MDF, wood 순으로 증가하지만 유사한 값 (12.72~18.31 kJ/g mol)을 보였다. 이는 보고된 다른 물질들의 건조 활성화 에너지 범위 (2.98~58.9 kJ/g mol)에서 낮은 영역에 속하였다 [7-14]. 폐목재 시료의 빈도인자는 0.2155~1.249 1/s이었다.

#### 4. 결 론

유동층 연소로에 폐목재가 투입되는 경우를 모사한 조건에서 질소 분위기의 열중량 분석기를 사용하여 폐목재 시료 wood, particle board, MDF의 건조 특성을 측정 및 고찰하였다. 폐목재의 건조 반응 속도는 잔류 수분 분율에 대한 1차 반응속도로 잘 표현되었다. 건조 활성화 에너지는 12.72~18.31 kJ/g mol, 빈도인자는 0.2155~1.249 1/s이었다.

#### 감 사

본 연구는 환경부 Eco-Star Project의 지원으로 수행되었습니다.

## 사용기호

$E_w$	: activation energy[kJ/g mol]
$k_w$	: drying rate constant[1/s]
$k_{wo}$	: frequency factor[1/s]
$R$	: gas constant, 8.314[J/g mol K]
$t$	: time[s]
$T$	: temperature[K]
$X_w$	: conversion[-]

## 참고문헌

1. Li, X., Zhang, B., Li, W. and Li, Y., "Research on the Effect of Microwave Pretreatment on Moisture Diffusion Coefficient of Wood," *Wood Sci. Technol.*, **39**(7), 521-528(2005).
2. Cai, Y. and Hayashi, K., "Contribution of Evaporation from Transverse Sections to Drying Rate During Radio-frequency/vacuum Drying," *Mokuzai Gakkaishi*, **48**(2), 73-79(2002).
3. Alexiou, P. N., Wilkins, A. P. and Hartley, J., "Effect of Pre-steaming on Drying Rate, Wood Anatomy and Shrinkage of Regrowth Eucalyptus Pilularis Sm," *Wood Sci. Technol.*, **24**(1), 103-110(1990).
4. Wen, C.-Y. and Loos, W. E., "Rate of Veneer Drying in a Fluidized Bed," *Wood Sci.*, **2**(2), 87-90(1969).
5. Sinclair, D., "Drying Wood Fiberboard," *Tappi*, **50**(8), 424-432 (1967).
6. Choi, J.-H., Kim, M. H., Jo, M. Y., Park, K. H., Jang, E. and Lee, J.-M., "Devolatilization Characteristics of Municipal Wood Waste," *Korean Chem. Eng. Res.*, **48**(1), 16-19(2010).
7. Shafrinskii, Yu. S., "Granulation of Oxidized Lead-Zinc Ores," *Izvestiya Fiziko-Khimicheskogo Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta pri Irkutskom Gosudarstvennom Universitete*, **7**(1), 76-94 (1966).
8. Mayatskii, V. A., Sokolov, L. B., Gerasimov, V. D. and Kasyanets, A. V., "Drying of Aromatic Polyamides," *Zhurnal Prikladnoi Khimii* (Sankt-Peterburg, Russian Federation), **57**(7), 1632-1636 (1984).
9. Roberts, J. S. and Tong, C. H., "Drying Kinetics of Hygroscopic Porous Materials under Isothermal Conditions and the Use of a First-Order Reaction Kinetic Model for Predicting Drying," *Int. J. Food Propert.*, **6**(3), 355-367(2003).
10. Waje, S. S., Meshram, M. W., Chaudhary, V., Pandey, R., Mahanawar, P. A. and Thorat, B. N., "Drying and Shrinkage of Polymer Gels," *Brazilian J. Chem. Eng.*, **22**(2), 209-216(2005).
11. Arora, S., Bharti, S. and Sehgal, V. K., "Convective Drying Kinetics of Red Chillies," *Dry. Technol.*, **24**(2), 189-193(2006).
12. Villeneuve, S. and Gelinas, P., "Drying Kinetics of Whole Durum Wheat Pasta according to Temperature and Relative Humidity," *LWT-Food Sci. Technol.*, **40**(3), 465-471(2006).
13. Di Scala, K. and Crapiste, G., "Drying Kinetics and Quality Changes during Drying of Red Pepper," *LWT-Food Sci. Technol.*, **41**(5), 789-795(2008).
14. Tari, O. and Pekcan, O., "Study of Drying of  $\kappa$ -Carrageenan Gel at Various Temperatures Using a Fluorescence Technique," *Dry. Technol.*, **26**(1), 101-107(2008).