

流動層 熱分解爐에 의하여 生産된 상수리나무 바이오오일의 特性†

李善勳 · 嚴旻燮 · *俞慶善 · 李永洙 · 金南燦 · 李時勳* · 李載區* · 金在浩*

광운대학교 환경공학과, *한국에너지기술연구원

Characteristics of Bio-oil derived from *Quercus Acutissima* in a Fluidized Bed Pyrolyser†

Sun-Hoon Lee, Min-Seop Eom, *Kyung-Seun Yoo, Young-Soo Lee,
Nam-Chan Kim, See-Hoon Lee*, Jae-Goo Lee* and Jae-Ho Kim*

Dept. of Environmental Eng., Kwangwoon University, 447-1 Wolgye-dong, Nowon-gu, Seoul 139-701, KOREA

*Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong, Daedeok-gu, Daejeon 305-343, KOREA

요 약

유동층 열분해로에서 상수리나무의 급속열분해를 수행하고 생성된 바이오오일의 물리화학적 특성을 GC/MS를 이용하여 분석하였다. 유동층 열분해로에서 얻어진 상수리나무와 낙엽송의 바이오오일 수율은 각각 350°C, 400°C에서 최대치를 보였으며 이는 두 수종간의 셀룰로오스 함량차이에 기인하는 것으로 추정된다. 최적온도 이상에서는 반응온도가 증가할수록 프리보드에서의 2차 열분해에 의하여 좌와 오일의 수율이 감소하였고 가스상 성분과 수분의 함량이 증가하였다. 유동층 열분해로에서 시료의 투입량은 생성물의 수율과 조성에는 큰 영향을 주지 않았으며 이는 충분한 혼합이 이루어지기 때문으로 판단되었다.

주제어 : 급속열분해, 바이오매스, 바이오오일, 유동층열분해, 상수리나무

Abstract

Fast pyrolysis of *Quercus acutissima* was carried out in a fluidized bed pyrolyser and then the physicochemical properties of obtained bio-oil were analyzed using GC/MS. The yields of bio-oil of *Quercus acutissima* and *Larix leptolepis* from a fluidized bed pyrolyser were maximized at 350°C and 400°C, respectively. This is due to the difference of cellulose content between the two tree species. Above the optimum temperature, the yields of char and oil decreased as the reaction temperature increased, but the yield of gas-phase and water fraction increased. It is concluded that this phenomenon is occurred by secondary pyrolysis in the free board. The feeding rate of the sample in a fluidized bed pyrolyser did not affect the yields and composition of products, because of a sufficient mixing between bed materials and sand.

Key words : fast pyrolysis, biomass, bio-oil, fluidized bed pyrolysis, *Quercus acutissima*

1. 서 론

바이오매스의 한 종류인 농임산 폐기물은 상업적으로 가치가 없는 농작물 찌꺼기나 벌목폐기물로써 벚짚, 옥수수대, 왕겨, 간벌목재와 같은 식물성 유기화합물로 이루어져 있다. 우리나라의 2001년도 목재 총벌채량은 1,267천m³에 달하며, 벌채량의 약19%인 236천m³는 조

림을 위한 간벌목으로 매년 200천m³ 이상 생산되고 있다¹⁾. 최근 에너지나 자원의 친환경적 측면이 강조되면서 농임산폐기물의 재활용 기술에 대한 관심이 증가하고 있다. 과거 난방연료로 사용되거나 폐기물로 방치되던 상황에서 이를 이용한 고부가가치 산물을 개발할 수 있는 기술적 대안으로서 열분해에 대한 관심이 증가하고 있다.

바이오매스의 한 종류인 목재는 일반적으로 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌과 같은 바이오 고분자 중합체로 이루어져 있다. 바이오매스는 depolymerization, hydrolysis, oxidation, dehydration, decarboxylation 등

† 2005년 7월 18일 접수, 2005년 10월 31일 수리

*E-mail: yooks@daisy.kw.ac.kr

의 반응을 통해 생성된 다양한 화합물로 분해된다. 바이오매스 열분해란 무산소 상태에서 바이오매스를 열로 분해시켜 쿼, 바이오오일, 가스를 얻는 것이다. 액상생성물인 바이오오일은 수용성과 비수용성의 두 가지 상으로 이루어져 있다. 수용성 성분은 산소 작용기가 붙은 저분자 화합물이 넓게 분포되어 있고, 비수용성의 타르 성분은 고분자 화합물(주로 aromatic류 화합물)이 주를 이루고 있다. 목재를 열분해할 때 발생하는 부산물 중 타르는 피치, 광택제, 시멘트, 방부제, 살균·소독제와 같은 의약품에 이용되고 있다. 타르의 조성은 매우 복잡한 구조의 화합물로 이루어져 있고, 전처리 방법과 수중에 따라 다양하다.

바이오오일의 주요성분은 pyrocatechol, phenol, guaiacol, cresol, creosol, methyl-cresol, toluene, xylene, naphthalene, levoglucosan 등으로 다양한 화합물들의 혼합물로 알려져 있다²⁾. 그 중 syringol, levoglucosan 등 몇몇 고가의 화합물은 1~10퍼센트의 농도를 갖고 있어 고가의 화학물질의 회수를 통한 부가가치 창출을 기대할 수 있다^{3,4)}. 하지만 국내의 바이오매스 열분해에 대한 연구는 초기 단계로 바이오오일 생산을 위한 기초 자료가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 유동층 운전변수에 따른 바이오오일의 수율 및 화학적 조성을 파악하여 바이오오일로부터의 고가의 화학물질 회수를 위한 기초자료를 확보하고자 한다. 본 연구에서는 국내 주요 활엽수 중 상수리나무(*Quercus acutissima*)를 택하여 다양한 운전조건에서 바이오오일을 회수하였다. 회수된 바이오오일을 GC/MS와 GC-FID를 통하여 정성·정량분석하여 유동층 운전조건에 따른 수율 및 조성 변화를 고찰하고자 한다.

2. 시료 및 실험방법

2.1. 바이오매스

본 연구에서 사용한 바이오매스는 혼제, 숲, 목초액 생산 등에 사용되고 있는 참나무의 한 종류인 상수리나무(*Quercus acutissima*) 톱밥으로 TAPPI 법에 따라 리그닌, 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스 분석을 수행하였다. 톱밥은 110~120°C에서 48시간 건조한 후, 0.25~1 mm의 입자 크기의 톱밥을 사용하였다. 건조 후의 수분함량은 1% 미만이었다.

2.2. 유동층 열분해

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 유동층 열분해로를 도

시한 것으로, 내경 7.62cm×길이 80cm의 stainless steel 재질의 유동층 열분해로이다. 유동사로 평균입자직경(d_p) 40 μ m의 white fused alumina(NANKO, DN2343)를 사용하였다. 유동화 가스는 질소를 사용하였고, 열분해로 온도와 동일한 온도로 예열되어 열분해로로 투입된다. 시료는 열분해로 상부의 screw feeder에 의해 일정한 속도로 투입되어 열분해 된다. 열분해에 의해 생성된 기상·액상생성물은 컨테서에 의해 냉각되어 1차 회수되고, 전기집진기에 의해 2차 회수된다.

유동층 열분해 운전변수에 따른 수율 및 조성 변화를 관찰하기 위하여 주요변수로 알려진 온도를 300~550°C, 시료투입량을 2.2~4.9 g/min으로 변화시켜 실험을 수행하였다. 그 밖의 운전조건은 층높이대 직경비(L/D) 2.0, 유속대 최소유동화속도(U_o/U_{mf}) 2.0로 고정하였다.

2.3. 바이오오일의 수율 및 조성 분석

열분해로 내 잔류된 쿼와 회수된 바이오오일의 질량을 측정하여 각 생성물의 수율을 계산하였고, 회수된 바이오오일의 pH, 함수량, 정성 및 정량 분석을 수행하였다. 오일 내 수분 함량과 정성·정량 분석을 위하여 바이오오일을 메탄올·아세톤 혼합액(1:1 vol.)에 용해시켜 시료로 하고 내부표준물질로서 fluoranthene(aldrich, 99%)을 사용하였다. GC/MS와 Guillen등⁵⁾의 정성결과를 이용하여 정성하고, GC-FID를 이용하여 정량하였다. 정성과 정량에 사용된 분석기는 각각 HP-5MS capillary column(30m×0.25 mm I.D.; film thickness 0.25 μ m)을 장착한 HP사의 5973 MSD와 6890 FID를

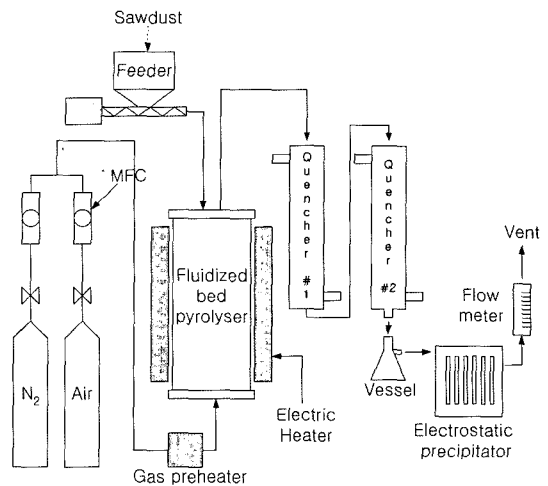


Fig. 1. Schematic diagram of bubbling fluidized bed pyrolyser system.

사용하였다. GC/MS와 GC-FID는 동일한 분석조건을 사용하였고, 오븐 온도는 5분간 40°C를 유지한 후, 분당 5°C씩 승온하여 300°C에서 10분간 유지시켰다. 정량은 Meier등⁶⁾의 결과와 표준품을 사용하여 식(1)로부터 구한 상대적 응답수치(RRF; relative response factor)를 이용하여 수행하였다.

$$RRF = \frac{\text{amount}_{\text{sample}} \times \text{area}_{\text{is}}}{\text{area}_{\text{sample}} \times \text{amount}_{\text{is}}} \quad (1)$$

area_{sample} = peak area of sample
 area_{is} = peak area of internal standard
 amount_{sample} = weight of sample
 amount_{is} = weight of internal standard

GC-FID에 의해 정량된 화합물을 Branca등⁷⁾이 분류한 바와 같이 분자구조와 기능기에 따라 구분하여 Table 1에 나타내었다. 화합물을 carbohydrate류, furan류, phenol류, guaiacol류, syringol류로 나누고 각 그룹의 함량을 계산하였다.

본 연구에 사용된 바이오매스와 바이오오일의 분석방법을 Table 2에 정리하여 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 바이오매스의 조성

바이오매스 내 셀룰로오스, 리그닌 함량은 바이오오

Table 1. Classification of quantified chemical compounds in bio-oil.


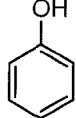
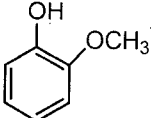
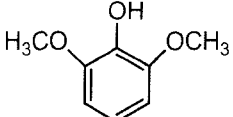
Classification	Molecular Formula	Compounds
Carbohydrates		acetic acid, acetol, levoglucosan
Furans		furfural, furfuryl alcohol, (5H)-furan-2-one, 5-methylfurfural
Phenols		phenol, cresols, dimethylphenols, ethylphenols, catechol, 4-methylcatechol
Guaiacols (methoxyphenols)		guaiacol, 4-methylguaiacol, 4-ethylguaiacol, 4-vinylguaiacol, eugenol, 4-propylguaiacol, vanillin, isoeugenols, acetoguaiacone
Syringols (dimethoxyphenols)		syringol, syringaldehyde, 4-allylsyringol

Table 2. Analytical methods used in this study.

Samples	Items	Methods
Biomass	Holocellulose	TAPPI useful method 249
	Cellulose	TAPPI T17 wd 70(T 17m-55)
	Hemicellulose	Holocellulose%-cellulose%
	Lignin	TAPPI standard T222 om-83
Bio-oil	pH	Digital pH meter
	Water content	Karl Fischer's titration [ASTM E 203]
	Qualification	HP-5973 MSD 5min at 40°C, then at 5°C/min to 300°C and 10 min at 300°C
	Quantification	HP-6890 FID 5min at 40°C, then at 5°C/min to 300°C and 10 min at 300°C Using RRF(Relative Response Factor) obtained from literature and standard

일 내 화합물의 조성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. TAPPI 법에 따라 참나무류 수종인 상수리나무(*Quercus acutissima*), 굴참나무(*Quercus variabilis*)⁸⁾, 졸참나무(*Quercus serrata*)⁸⁾와 낙엽송(*Larix leptolepis*)의 회분, 리그닌, 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스 함량을 Table 3에 나타내었다. 분석 결과 회분이 모두 1% 미만으로 나타나 가연분이 대부분이었고, 상수리나무의 경우 리그닌 15.02%, 셀룰로오스 46.35, 헤미셀룰로오스 36.49%로 나타났다. 낙엽송에 비해 리그닌 함량이 낮고, 홀로셀룰로오스 함량이 높은 것으로 나타나 낙엽송에 비하여 열분해 온도가 낮고 유기산, 아세트 등과 같은 셀룰로오스 분해 화합물의 함량이 높을 것으로 사료된다.

3.2. 열분해 생성물의 수율

일반적으로 열분해 생성물의 수율에 있어서 온도는 중요한 인자로 알려져 있다^{9,10)}. 본 실험에서는 열분해 온도의 영향을 관찰하기 위하여 시료투입량 3.5 g/min, L/D 2.0, Uo/Umf 2.0의 조건에서 온도를 300~550°C로 변화시켜 열분해를 수행하였다. 온도에 따른 바이오 오일의 수율 변화와 선행연구자들의 결과를 Fig. 2에 도시하였다. 온도가 300°C에서 350°C로 증가함에 따라 오일 수율은 46.4%에서 50.5%로 증가하였고 350°C 이상에서는 온도가 증가할수록 오일의 수율이 감소하였다. Piskorz 등⁹⁾은 사탕수수(*Saccharum officinarum*)를 열분해하여 450°C에서 65%의 오일 수율을 얻었으며, Luo 등¹⁰⁾은 인도자단목(*Pterocarpus indicus*)을 열분해하여 450°C에서 60%의 수율을 얻은 반면, 상수리나무 열분해에서는 350°C에서 50.5%의 오일수율을 얻어 보다 낮은 온도에서 오일수율이 최대였다. 한편 동일한 장치에서 생산된 낙엽송 바이오오일의 경우 상수리나무 오일에 비해 약 50°C정도 높은 온도에서 오일수율이 최대였다. 목재를 이루는 셀룰로오스는 리그닌에 비해 낮은 온도에서 분해 되는 것으로 알려져 있는데¹¹⁾, 상수리나무

가 낙엽송에 비해 높은 셀룰로오스 함량을 갖고 있기 때문에 보다 낮은 온도에서 최대 오일 수율을 보인 것으로 사료된다. 최악의 수율의 경우 역시 오일과 동일하게 온도에 따라 감소하는 경향을 보여 온도가 증가함에 따라 최악에서 액상이나 기상 생성물로 전환된 것으로 사료된다. 한편 가스 수율은 열분해온도가 증가할수록 증가하였는데 이러한 거동은 반응온도가 증가할수록 오일 생성에

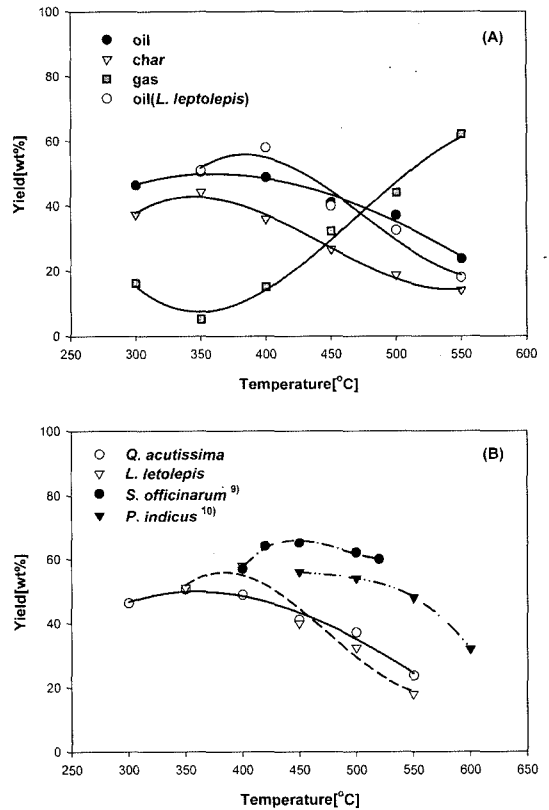


Fig. 2. Effect of temperature on the product yield derived from *P. acutissima* (A) and comparison of oil yield with the other's studies (B).

Table 3. Typical composition of different biomass species.

Biomass species	Ash	Lignin	Holocellulose	
			Cellulose	Hemicellulose
<i>Quercus acutissima</i>	0.89	15.02	46.35	36.49
<i>Larix leptolepis</i>	0.58	39.97	76.78	
<i>Quercus variabilis</i> ⁸⁾	Sap wood	0.57	21.76	79.19
	Heart wood	1.00	18.14	78.83
<i>Quercus serrata</i> ⁸⁾	Sap wood	0.26	14.11	74.21
	Heart wood	0.27	19.19	74.84

필요한 열량보다 과도한 열량이 공급되어 저분자의 화합물을 갖는 기상 생성물로 쉽게 전환되기 때문이다.

Fig. 3은 바이오매스 투입량에 따른 수율을 도시한 것이다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 투입량이 증가함에도 불구하고 바이오오일의 수율에 큰 영향을 미치지 못하였다. 일반적으로 투입량이 크게 증가하면 열분해로에서 유동사와 투입시료간의 혼합이 용이하지 않게 되어 급속열분해에서 slow pyrolysis로 반응 메커니즘이 전이되나 본 실험조건 영역에서는 혼합이 충분히 진행되어 수

율에서는 큰 차이를 보이지 않게 되는 것으로 판단된다.

3.3. 바이오오일의 물리화학적 특성 및 화학적 조성

바이오오일의 pH는 평균 2.67로 산성을 나타냈으며, 바이오오일 내 함유되어 있는 다량의 유기산 때문으로 사료된다. GC-FID 정량을 위한 컬럼 내 보유시간을 파악하기 위하여 GC/MS를 통한 정성분석을 수행하였다. 동일한 운전조건에서 열분해하여 생산된 상수리나무와 낙엽송 바이오오일의 GC/MS total ion chromatogram을 Fig. 4에 도시하였고 피크에 각 화합물의 번호를 표시하였다. 그리고 동정된 화합물을 Table 4에 정리하여 나타내었다. 상수리나무와 낙엽송 바이오오일을 GC/MS library(Wiley275)와 표준품의 보유시간을 이용하여 각각 92, 61종의 화합물을 동정하였다. 동정된 각 오일의 성분 중 주성분 10종은 상수리나무 오일의 경우 acetic acid(1), furfural(8), 2(5H)furanone(18), 5-methyl-2(3H)-furanone(19), 5-methylfurfural(23), pyrocatechol(53), 3-methoxycatechol(59), 4-methylcatechol(65), cis-isoeugenol(81), levoglucosan(83) 등이 검출되었고, 낙엽송 바이오 오일 경우 furfural(8), 2(5H)furanone(18), corylone(30), guaiacol(37), creosol(51), pyrocatechol(53), 4-ethylguaiacol(63), syringol(70), cis-isoeugenol(81), levoglucosan(83) 등이었다. 검출된 주성분은 주로 유기산,

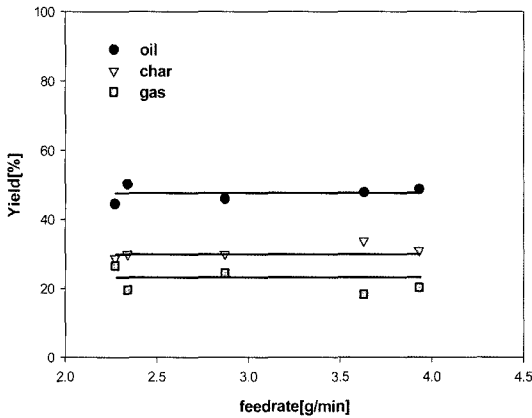


Fig. 3. Effect of feeding rate on the product yield derived from *Q. acutissima* (400°C, Uo/Umf 2.0, L/D 2.0).

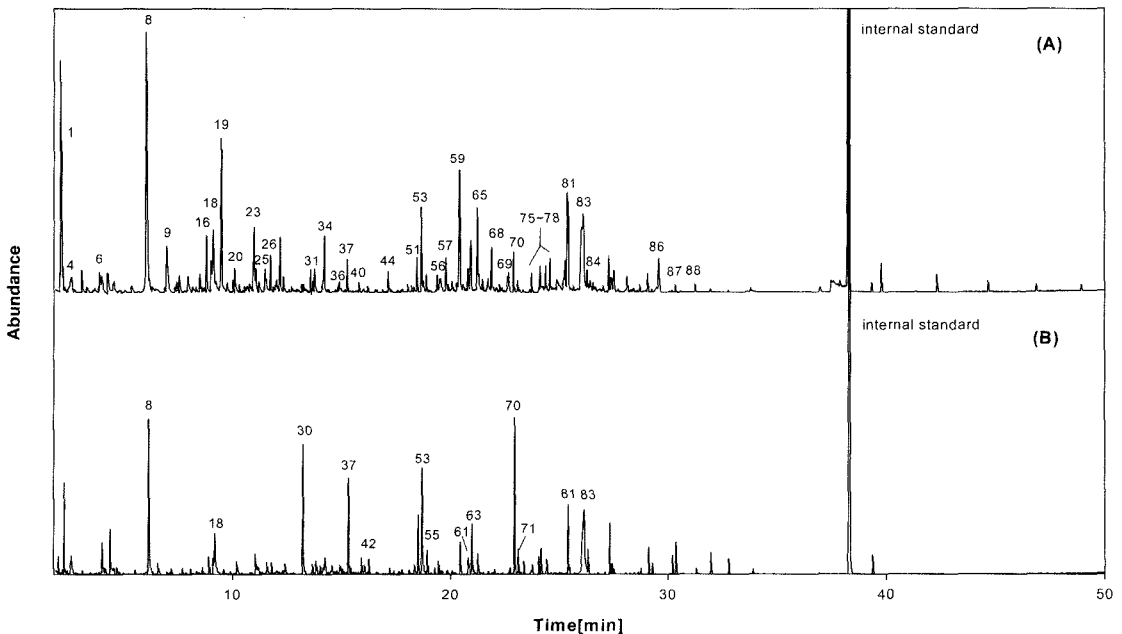


Fig. 4. Total ion chromatograms of bio-oils: *Q. acutissima* (A), *L. leptolepis* (B).

Table 4. Chemical compounds identified by GC/MS analysis.

No.	Compounds	No.	Compounds
1	acetic acid	47	3-ethylphenol
2	acetol	48	2,3-xyleneol
3	benzene	49	naphthalene
4	popionic acid	50	3,4-dimethylphenol
5	cyclopropylethanone	51	4-methylguaiaacol, creosol
6	toluene	52	2,4,5-trimethylphenol
7	cyclopentanone	53	pyrocatechol
8	furfural	54	4-vinylphenol
9	furfuryl alcohol	55	1,4:3,6-dianhydro-a-d-glucopyranose
10	ethylbenzene	56	5-hydroxymethylfurfural
11	m-xylene	57	1-ethyl-4-methoxybenzene
12	acetoxycetone	58	3-methylcatechol
13	2,5-dimethoxytetrahydrofuran	59	3-methoxycatechol
14	styrene	60	acenaphthylene
15	p-xylene	61	hydroquinone
16	2-methyl-2-cyclopenten-1-one	62	2,3-dihydro-1H-inden-1-one
17	acetylfuran	63	4-ethylguaiaacol
18	2(5H)-furanone	64	1- or 2- methyl-naphthalene
19	5-methyl-2(3H)-furanone	65	4-methylcatechol
20	5-methyl-2(5H)-furanone	66	3-hydroxybenzaldehyde
21	benzaldehyde	67	4-vinylguaiaacol
22	3-methyl-2-cyclopenten-1-one	68	5-methyl-1,3-benzenediol
23	5-methylfurfural	69	2-methyl-1,4-benzenediol
24	1-ethyl-3-methylbenzene	70	syringol
25	3-methyl-2(5H)-furanone	71	eugenol
26	phenol	72	3,4-dimethoxyphenol
27	benzofuran	73	4-propylguaiaacol
28	ethenylmethylbenzene	74	1,2,3-benzenetriol
29	2-propenylbenzene	75	4-ethyl-1,3-benzenediol
30	corylone	76	vanillin
31	2,3-dimethyl-2-cyclopenten-1-one	77	trans-isoeugenol
32	1-propynylbenzene	78	2-allyl-4-methylphenol
33	1H-indene	79	2,3-dimethylnaphthalene
34	o-cresol	80	4,5-dimethoxy-2-methylphenol
35	acetic acid, phenyl ester	81	cis-isoeugenol
36	m- or p- cresol	82	acetoguaiacone
37	guaiaacol	83	levoglucosan
38	ethenylbenzaldehyde	84	2,3,5-trimethoxytoluene
39	2-methylbenzofuran	85	vanillic acid
40	2,6-xyleneol	86	homovanillic acid
41	maltol	87	syringaldehyde
42	3-ethyl-2-hydroxy-2-cyclopenten-1-one	88	4-allylsyringol
43	1-methyl-1H-indene	89	acetosyringone
44	2,4-Xyleneol	90	anthracene
45	2,3-dihydroxy-benzaldehyde	91	methyl-anthracene
46	4-ethylphenol	92	4-methylpenanthracene

furan류, phenol류, 고분자 phenol류 화합물 등이었고, 이 중 고가의 화합물로 알려진 pyrocatechol(53), guaiacol(37), syringol(70), levoglucosan(83) 등이 검출되었다. Fig. 4에 표시되지 않은 benzene(3), toluene(6) 등은 500 °C이상의 고온 열분해 조건에서만 검출되었고, 그 밖의 표시되지 않은 화합물은 검출되었으나 피크의 intensity가 작아 표시하지 않았다. 상수리나무 바이오오일의 경우가 낙엽송 바이오오일에 비해 더 많은 화합물이 검출되어 다양한 화합물들을 포함하고 있었으나 주요 성분은 함량의 차이가 있을 뿐 유사하였다.

Fig. 5는 열분해 온도에 따른 주요화합물의 조성을 도시한 것으로 함수량과 Table 1에 따라 분류한 화합물의 농도를 나타내었다. 바이오오일의 높은 함수율은 발열량을 낮추어 연료로서의 사용을 어렵게 하는 원인 중 하나이다. 함수율은 31.6%~62.4%로 16.6~53.5%인 다른 연구자^{9,10,12}의 결과에 비해 높은 것으로 나타났다. 하지만 주입량으로부터 계산한 물의 수율은 본 연구가 14.8~18.8%, Piskorz 등⁹ 10.4~16.5%, Luo 등¹⁰ 13.7~18.0%, Home와 Williams¹² 18.0~19.5%로 유사한 결과를 나타내었다. 최적온도인 350°C에서 함수율이 가장 낮았고, 온도가 550°C까지 증가함에 따라 31.6%에서 62.4%까지 증가하여 오일 수율과 반비례하였다. 본 실험결과에서는 400°C에서 carbohydrate류 화합물의 농도가 9.4%로 최대를 보였고 온도가 증가함에 따라 2차 열분해 반응이 촉진되어 감소하는 경향을 보여 오일수

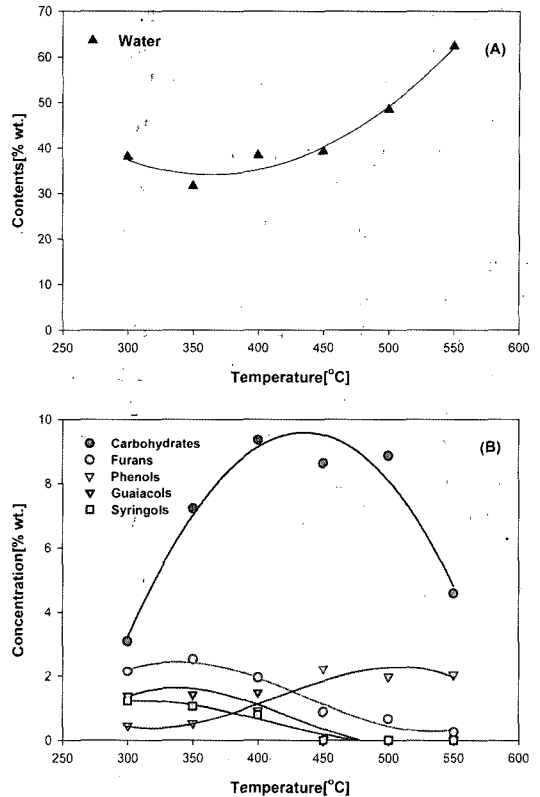


Fig. 5. Effect of temperature on bio-oil derived from *Quercus acutissima*: water content (A), main chemical composition (B).

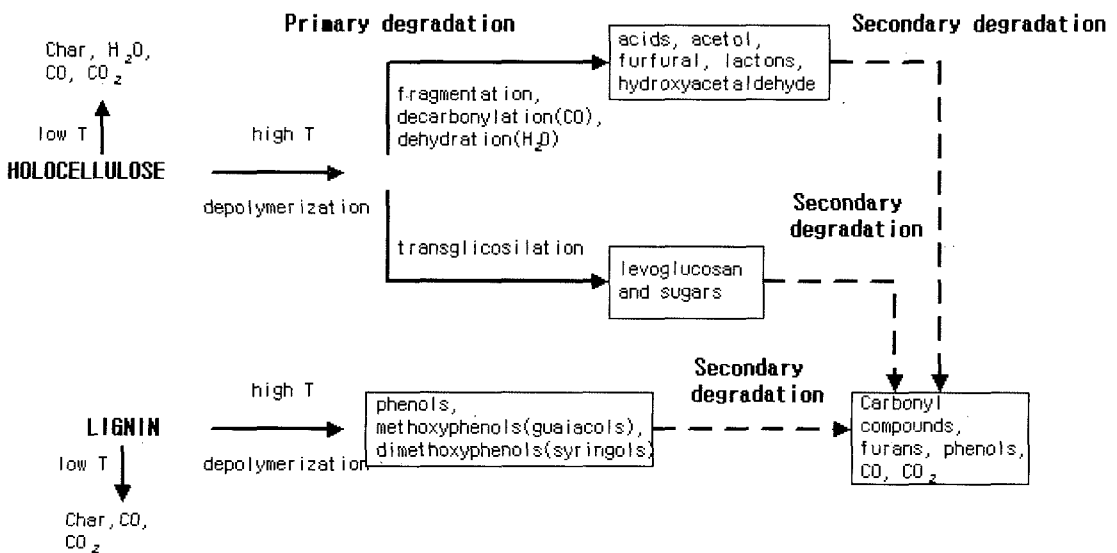


Fig. 6. A lumped reaction mechanism of wood decomposition⁷⁾.

율과 유사한 수율곡선을 보였다. Guaiacol, syringol류 화합물은 300~400°C의 온도구간에서 각각 1.5%, 1.2%로 최대농도를 보였고 온도가 550°C까지 증가함에 따라 감소하여 500°C이상의 온도에서는 검출되지 않았다. 이는 Fig. 6의 열분해 메카니즘에 따라 목재의 주성분인 셀룰로오스와 리그닌이 적정온도에서는 각각 1차 분해되어 유기산, 아세톨, levoglucosan, guaiacol, syringol류 화합물 등으로 변환되고 열분해 시간, 온도 등이 증가함에 따라 2차 분해를 일으켜 카르보닐 화합물, furan류 화합물, 저분자 phenol류 화합물 등으로 전환되기 때문이다⁷⁾. 반면 phenol류 화합물은 300°C에서 550°C로 온도가 증가함에 따라 0.5%에서 2.2%로 증가하여 앞서 기술한 바와 같이 높은 온도에서는 1차 분해에 의해 syringol류와 guaiacol류 화합물이 생성된 후, 잉여의 열에 의해 고분자 phenol류 화합물의 벤젠고리에 붙어 있는 하이드록시기나 메톡시기가 높은 열에 의하여 분해되어 phenol류로 변환되는 2차 분해반응이 일어난

것으로 사료된다. 한편 furan류 화합물은 온도가 증가함에 따라 2차 열분해 반응 촉진에 의하여 농도가 증가할 것으로 예상하였으나 실제로는 2.6%에서 0.3%로 감소하여 높은 온도에서는 furan류 화합물의 생성속도보다 분해속도가 높아 가스상 물질로 전환된 것으로 사료된다.

Fig. 7은 바이오매스 투입량에 따른 주요화합물의 조성을 도시한 것이다. 일반적으로 투입량이 증가할수록 열분해 속도가 낮아져 바이오오일의 조성이 저분자 화합물로 변화될 것으로 예상되나, 본 실험결과에서는 투입량에 따라 함수율과 주요화합물의 조성 모두 큰 변화를 보이지 않았다. 이 결과로 볼 때 실험조건 영역 내에서는 수율과 조성 모두 투입량에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

4. 결 론

참나무의 한 종류인 상수리나무를 유동층 열분해하여 얻은 바이오오일을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 상수리나무의 리그닌, 셀룰로오스 함량은 낙엽송에 비해 셀룰로오스 함량은 높고 리그닌 함량이 적었다. 이로 인해 상수리나무의 바이오오일 수율이 최대인 온도가 낙엽송에 비해 낮게 나타났다.

2. 온도가 증가할수록 2차 열분해 반응이 촉진되어 오일과 최의 수율이 감소하고 기상 생성물은 증가하였다. 상수리나무의 바이오오일은 오일 수율이 최대인 350°C에서 수분함량이 가장 적었고, 오일의 수율과 반 비례하였다. Carbohydrate류의 농도는 약 400°C에서 최대를 보였고, 온도가 증가함에 따라 고분자 phenol류 화합물이 2차 열분해에 의해 저분자 phenol류 화합물로 전환되었다.

참고문헌

1. 산림청, 2004: 임업통계연보 34호
2. Ayhan Demirbas, 2004: *Effect of initial moisture content on the yields of oily products from pyrolysis of biomass*, J. Anal. Appl. Pyrolysis, **71**, pp.803-815.
3. H. N. Murwanashyaka, H. Pakdel and C. Roy, 2001: *Separation of syringol from birch wood-derived vacuum pyrolysis oil*, Separation and Purification Tech., **24**, pp.155-165.
4. S. H. Lee et al., 2005 : *Separation and characterization of value added chemicals from tar residue during wood carbonization process*, ACS, 229th ACS National Meeting,

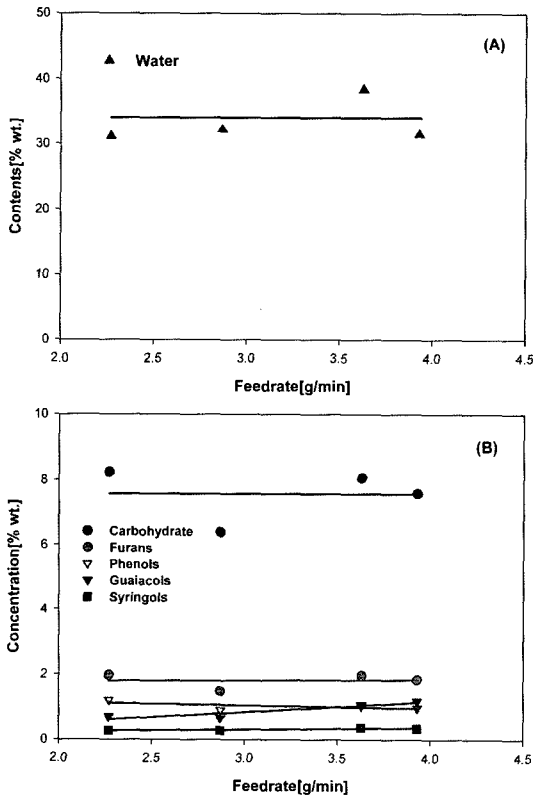


Fig. 7. Effect of feeding rate on bio-oil derived from *Quercus acutissima*: water content (A), main chemical composition (B).

San Diego-USA, March 13-17 2005, Printed in USA.

5. M. D. Guillen and M. L. Ibarra, 1998: *New components with potential antioxidant and organoleptic properties, detected for the first time in liquid smoke flavouring preparations*, J. Agric. Food Chem., **46**(4), pp.1276-1285.
6. A. Bridgwater et al., 2003: *Properties of fast pyrolysis liquids: status of test methods*, Fast pyrolysis of biomass: a handbook, pp.75-91, CPL Press, Newbury, UK.
7. C. Branca, P. Giudicianni and C. Di Blasi, 2003: *Chemical Composition and Reactivity of Oils Derived from Wood Fast Pyrolysis*, IChEap-6, Pisa-Italy, 8 June 2003, Printed in Italy.
8. 문창국, 1982: 지리산산 굴참나무재와 줄참나무재의 화학

- 적 조성, 한국임학회지, **58**, pp.23-26.
9. J. Piskorz et al., 1998 : *Fast pyrolysis of sweet sorghum and sweet sorghum bagasse*, J. Anal. Appl. Pyrolysis, **46**, pp.15-29.
10. Z. Luo et al., 2004 : *Research on biomass fast pyrolysis for liquid fuel*, Biomass and Bioenergy, **26**, pp.455-462.
11. I. Hasegawa et al., 2005 : *Quantitative Prediction of Yield and Elemental Composition during Pyrolysis of Wood Biomass*, 日本エネルギー學會誌, **84**(1), pp.46-52.
12. P. A. Horne and P. T. Williams, 1996: *Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis of biomass*, Fuel, **75**(9), pp.1051-1059.



李 善 勳

- 2004 광운대학교 환경공학과 공학사
- 현재 광운대학교 환경공학과 석사과정



嚴 旻 燮

- 1999 광운대학교 환경공학과 공학사
- 2001 광운대학교 환경공학과 공학석사
- 현재 광운대학교 환경공학과 박사과정



俞 慶 善

- 1990 고려대학교 화학공학과 공학사
- 1992 KAIST 화학공학과 공학석사
- 1996 KAIST 화학공학과 공학박사
- 1996-1999 포항산업과학연구원 선임연구원
- 현재 광운대학교 환경공학과 부교수



李 永 洙

- 서울대학교 토목공학과 졸업
- Rhode Island University 토목환경공학 석사
- Rhode Island University 토목환경공학 박사
- 광운대학교 환경공학과 교수
- 한국건설기술원 수질관리 전문위원



金 南 燦

- 1980 서울대학교 토목공학과 공학사
- 1982 서울대학교 토목공학과 공학석사
- 1984 서울대학교 토목공학과 공학박사
- 1988 일본 홋카이도대학 환경공학과 공학박사
- 현재 광운대학교 환경공학과 교수



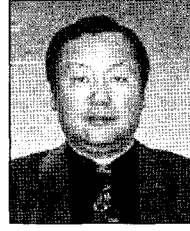
李 時 勳

- 1996 한양대학교 화학공학과 공학사
- 1998 KAIST 화학공학과 공학석사
- 2003 KAIST 생명화학공학과 공학박사
- 현재 한국에너지기술연구원 선임연구원



李 載 區

- 1981년 서울시립대학교 화학공학과 공학사
- 1992년 KAIST 화학공학과 공학석사
- 1997년 KAIST 화학공학과 공학박사
- 현재 한국에너지기술연구원 열공정연구센터 책임연구원



金 在 浩

- 1978 서울대학교 공업화학공학과 공학사
- 1980 한국과학원 화학공정공학 공학석사
- 1992 KAIST 화학공학과 공학박사
- 현재 한국에너지기술연구원 화석에너지 환경부장