

초임계수를 이용한 목질바이오매스의 당화 특성

최준원*, 임현진, 조태수, 한규성, 최돈하

Saccharification of lignocellulosics by Supercritical Water

Joon-Weon Choi, Hyun-Jin Lim, Gyu-Sung Han, Don-Ha Choi

Abstract To characterize thermo-chemical feature of sugar conversion of woody biomass, poplar wood (*Populus alba* × *glandulosa*) powder was treated with supercritical water system. Supercritical water treatment (SCWT) was performed for 60 seconds at different temperatures (subcritical zone 350; supercritical zone 380, 400, 425°C) under two pressures 230±10atm as well as 330±10atm, respectively, using flow type system. After separation of solid residues from SCWT products, the monomeric sugars in aqueous part converted from poplar wood powder were quantitatively determined by high performance anionic exchange chromatography (HPAEC) equipped with PAD detector and Carbo Pac PA10 column. As the temperature treated increased, the degradation of poplar wood powder was enhanced and ca 83% of woody biomass was dissolved into the water at 425°C. However, the pressure didn't help the degradation of biomass components. At subcritical temperature range, xylose was first formed by degradation of xylan, which is main hemicellulose component in hardwood species, while cellulose degradation started at the transition zone between sub and supercritical conditions and was remarkably accelerated at the supercritical temperature. In the supercritical water system the maximum yield of monomeric sugars amounts to ca. 7.3% based on oven dried wood weight at 425°C.

Key words Supercritical water(초임계수), Saccharification(당화), Lignocellulosics(목질 바이오매스), *Populus alba* × *glandulosa*(원지치나무), Monomeric sugars(단당류), High performance anionic exchange chromatography(음이온교환크로마토그래피)

* 국립산림과학원 임산공학부 화학미생물과

■E-mail : francis04@foa.go.kr ■Tel : (02)961-2743 ■Fax : (02)961-2769

1. 서론

목질계 바이오매스는 양적으로 매우 풍부하고 재생 가능하며 지구 온실가스에 영향을 미치지 않는 장점을 지니고 있어서 환경오염의 주원인인 석탄이나 원유 등 화석자원을 대체할 수 있는 미래의 청정에너지 자원으로 부각되고 있다. 목질바이오매스는 예로부터 장작 형태로 직접 연소에 의해서 에너지를 획

득하는 매우 친근한 연료로 사용되어 왔다. 최근 들어 이러한 목질바이오매스는 간단한 가공공정을 통해 목재칩(wood chip)이나 펠릿(pellet) 등으로 제품화되어 열병합발전소나 가정용 난방장치 연료로 공급되고 있다. 목질바이오매스의 또 다른 형태의 에너지 전환기술로서 목재의 주성분인 셀룰로오스를 글루코오스로 당화한 후에 에탄올 생산에 이용하는 기술을 들 수 있다. 이러한 목질바이오매스의 당화에는 산기수분해법과 효

소가수분해법을 들 수 있는데²⁾, 산가수분해법은 산에 의한 반응기 부식, 산 회수의 어려움이 치명적인 단점으로 지적되었으며, 효소가수분해의 경우에는 공정 효율 및 경제성 등에서 문제점이 도출되어 이러한 고전적인 방법을 대체할 수 있는 새로운 기술개발에 관심을 가지게 되었다³⁾.

초임계 유체란 각각의 유체가 고유하게 지니고 있는 임계온도와 임계압력을 넘어서는 상태의 유체를 말한다. 이러한 상태에서는 각 유체가 상온/상압에서 나타내는 특성과는 달리 새로운 특성을 나타내는데, 물의 경우에는 초임계상태에 도달하면 물의 특성은 사라지고 산과 같이 작용하여 목질바이오매스를 산가수분해하는 효과를 나타내며, 초임계수 반응 후 다시 상온/상압상태로 되돌아오면 이러한 산의 특성은 사라진다. 목질바이오매스의 초임계수 분해반응은 매우 짧은 시간 동안 진행되며, 물을 분해매체로 이용하기 때문에 위에서 언급한 당화공정의 단점을 동시에 해결할 수 있는 특성을 지니고 있다. 최근에 이러한 초임계수 공정의 특성을 목질계 바이오매스의 당화분야에 적용하려는 연구에 많은 관심이 모아지고 있다^{4,5,6)}.

따라서 본 연구의 목적은 초임계 유체를 이용한 목질바이오매스의 새로운 당화공정 개발에 있다. 분해매체는 물을 사용하였으며, 현사시나무 목분을 물의 이임계 및 초임계 온도범위에서 악력을 달리하면서 처리하여 목질 주요 성분의 분해특성을 비교하였으며, 각 처리 조건별로 생성되는 단당류 및 저분자량 분해산물을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

공시재료는 현사시나무(*Populus alba* × *glandulosa*)를 사용하였으며, 경기도 용인군 국립산림과학원 포플라 시험림에서 채취한 후에 목부 부분을 칩 상으로 분쇄하여 상온에서 건조시켰다. 기건 상태의 칩은 초임계수 분해실험에 적합하도록 Planetary mono mill을 이용하여 분쇄한 후에 60 mesh 표준 체로 걸러서 통과한 분말을 사용하였다. 최종적으로 실험에 사용한 현사시목분의 함유율은 약 10% 이었다.

이와 함께 초임계수 당화과정에서 일어나는 목질 주요 성분들의 분해 메커니즘을 규명하기 위하여 셀룰로오스 결정체(아비셀, Fluka 11365)와 글루코오스(Sigma G7528)/자일로오스

(Fluka 95730)을 사용하였다.

2.2 초임계수 장치

초임계수 당화장치의 모식도는 Fig. 1에 제시하였다. 연속식 초임계수 장치는 시료탱크(sample tank), 증류수탱크(water tank), 펌프(pump), 히터(pre-heater와 line heater), 반응관(reactor)와 열교환기(heat exchanger)로 구성되어 있다. 초임계수 장치의 안전장치로는 두 개의 안전밸브(relief valve)를 pre-heater 앞과 반응관 뒤에 각각 설치하였다. 초임계수 당

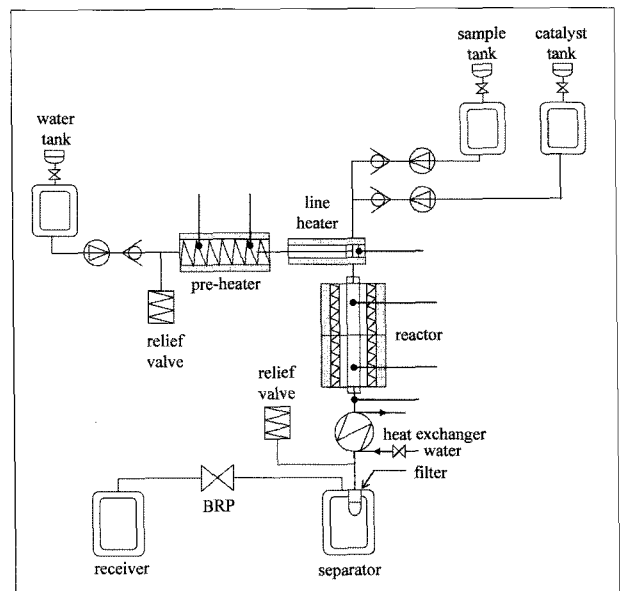


Fig. 1 Schematic diagram for flow type super- critical water system.

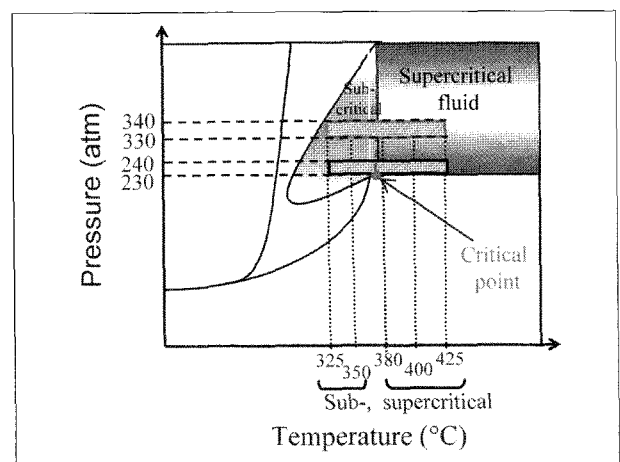


Fig. 2 Experimental scheme of sub- and supercritical treatments of poplar wood(*Populus alba* × *glandulosa*)

화반응은 반응 전에 원하는 온도와 압력조건에 도달한 후에 분말상의 목질바이오매스를 증류수와 혼합한 후에 펌프를 이용하여 초임계수 당화 반응관으로 흘려주면서 일어난다.

본 실험에서 사용한 압력조건은 $230 \pm 10 \text{atm}$ 과 $330 \pm 10 \text{atm}$ 이었다. 각각의 압력조건 하에서 아임계 온도(350°C)와 초임계 온도 (380°C , 400°C , 425°C)에서 각각 60초 동안 실시하였다(Fig. 2).

현사시나무 목분은 증류수와 10g:500ml 비율로 혼합하여 사용하였으며 시료탱크에서 시료가 가라앉지 않도록 공기를 주입하여 교반해 주었다. 초임계수 당화장치는 분해매체인 증류수를 공급하는 펌프와 슬러리 상태의 시료를 반응관에 주입하는 펌프를 분리한 dual pump system을 사용하였다. 증류수 탱크에 저장된 증류수는 반응관의 온도가 원활히 도달할 수 있도록 일차적으로 preheater에서 예열된 후에 반응관으로 주입된다. 초임계수 반응관 온도가 실험조건에 도달하면 시료탱크에 저장된 슬러리 상태의 현사시나무 목분을 직접 반응관으로 주입하여 preheater를 거쳐 공급되는 증류수와 혼합되어 반응관을 통과하면서 당화반응이 일어난다.

2.3 초임계수 분해산물 분석

2.3.1 목질바이오매스 분해율

현사시나무 목분의 초임계수 분해산물에서 미분해 고형분은 거름종이로 분리한 후 이를 상온에서 건조, 정량하여 초임계수 처리조건에 따른 현사시 목분의 분해율을 측정하였다.

2.3.2 단당류 분석

액상의 초임계수 분해산물에 존재하는 단당류는 고성능 이온교환 크로마토그래피(HPAEC, Dionex system)를 사용하여 측정하였다. 단당류 분석 칼럼으로는 Carbo Pac PA10 column($4 \times 250 \text{mm}$)을 사용하였으며, 검출기는 ED50 pulsed amperometric detector(PAD)를 사용하였다. 이동상 용매는 3mM NaOH 수용액을 사용하였으며 유속 0.8ml/min 에서 45분 동안 분석하였다.

2.3.3 저분자량 분해산물 분석

현사시나무 목분의 초임계 분해산물은 에틸아세테이트로 분획하여 유기용매 가용부와 수용성 분획으로 분리하였다. 유기용매 가용부에 존재하는 저분자량의 리그닌/탄수화물 분해산

물들은 가스크로마토그래프/질량분석기(GC/MS)로 각각의 성분들에 대한 정성 및 정량분석을 실시하였다. 각 성분들의 정량분석을 위하여 내부표준물질로 naphthalene(Aldrich 18,450-0)을 사용하였다. 분석조건은 다음과 같다: 칼럼: DB1701 capillary column($60 \times 0.25 \text{mm} \times 0.25 \mu\text{m}$), 온도조건: Injector: 250°C , detector 1: MSD(Mass Selective Detector), detector 2: FID at 250°C , 오븐온도: 100°C 에서 4분간 유지, 280°C 까지 분당 5°C 씩 승온(총 분석시간: 55분).

3. 결과 및 고찰

3.1 초임계수에 의한 목질바이오매스 분해 특성

온도와 압력에 따른 현사시나무 목분의 초임계수 분해율은 Fig. 3에 나타내었다. 목질바이오매스의 분해율은 처리 온도가 높을수록 상승하는 것으로 나타났으나, 압력 상승에는 오히려 감소하는 경향을 보였다. $230 \pm 10 \text{atm}$ 압력에서 아임계 온도인 325°C 와 350°C 에서는 분해율이 각각 37.9%, 50.6%였으나, 초임계 온도로 전이되면서 상승하여 425°C 에서는 목질 전건중량 기준으로 약 83.1%까지 분해되었다. 그러나 압력조건 $330 \pm 10 \text{atm}$ 에서 최고 목질 분해율은 75.4%에 불과하였다.

3.2 단당류 분석

Table 1은 현사시 목분을 아임계/초임계수 처리에 의해서 생성된 단당류들에 대한 정량 분석 결과를 나타내었다. Figure 4은 각 온도별로 생성된 현사시나무 목분의 아임계/초임계수 분해산물을 HPAEC 분석한 크로마토그램으로서 목재를 구성하는 5종의 주요 단당류인 글루코오스, 자일로스, 갈락토오스, 만노오스, 아라비노오스가 HPAEC분석에 의해서 명확하게 분리됨을 알 수 있다. 본 실험결과에 따르면 아임계/초임계수 분해에 의해 생성되는 단당류 수율은 반응 온도가 상승함에 따라 증가하였으며, 반응 온도 425°C 에서 가장 높은 단당류 수율인 7.3%를 나타내었다(Table 1). 현사시나무 목분을 황산으로 가수분해하여 획득한 단당류 함량은 목질 전건중량의 약 52%에 이르렀다^{7,8)}. 본 실험에서 획득한 초임계수에 의한 목질바이오매스의 당화율은 산가수분해에 의한 당화공정과 비교하여 상

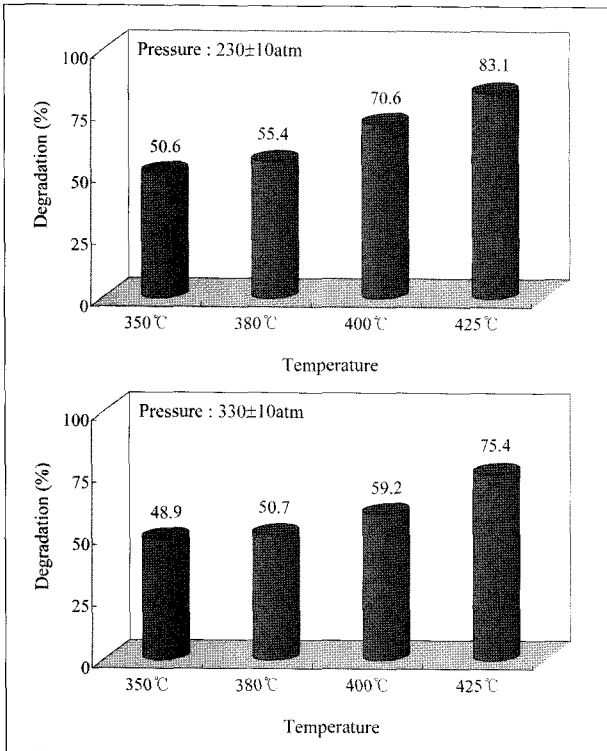


Fig. 3. Degradation of *Populus alba* × *glandulosa* wood powder during supercritical water treatment at several temperature zones.

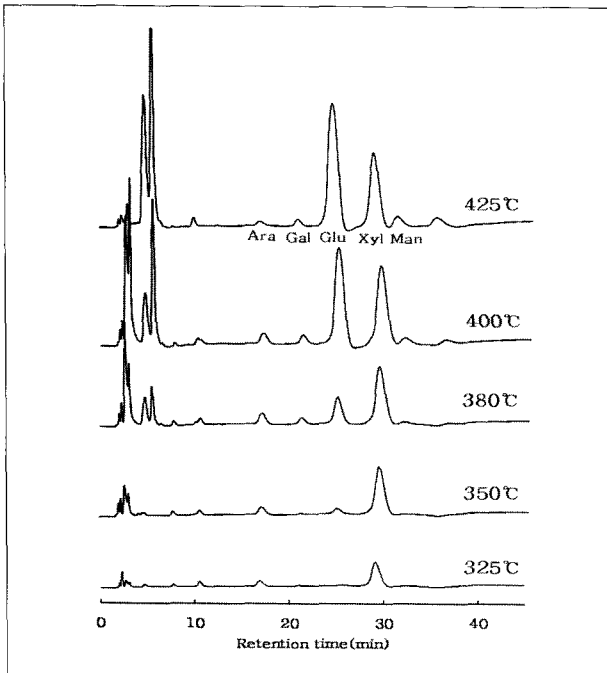


Fig. 4. High performance anionic exchange chromatograms for monomeric sugars in degradation products of poplar wood at different temperatures

Table 1. Yields of monomeric sugars produced by supercritical water treatment of poplar wood at several temperature zones.

Sample	Treatment (230±10atm)		Monomeric sugars(g)					Total sugar (g)
	Temp (°C)	Time (s)	Ara	Gal	Glu	Xyl	Man	
<i>Populus alba</i> × <i>glandulosa</i>	350	60	0.18	0	0.03	1.59	0	1.80
	380	60	0.32	0.14	0.63	2.05	0.19	3.33
<i>glandulosa</i>	400	60	0.26	0.18	2.86	2.89	0.26	6.45
	425	60	0.10	0.13	3.99	2.67	0.43	7.33

Sample	Treatment (330±10atm)		Monomeric sugars(g)					Total sugar (g)
	Temp (°C)	Time (s)	Ara	Gal	Glu	Xyl	Man	
<i>Populus alba</i> × <i>glandulosa</i>	350	60	0.01	0	0.05	0.73	0	0.78
	380	60	0.02	0.04	0.43	2.05	0.04	2.58
<i>glandulosa</i>	400	60	0	0.03	0.98	2.24	0.08	3.33
	425	60	0	0	2.97	1.11	0.16	4.24

당히 낮은 편이었지만 초임계 공정에 의해서 생성된 당류는 반응 후에 산이 아닌 물에 존재하고 있다는 장점을 갖고 있다.

3.3 셀룰로오스 분해메커니즘

목질바이오매스의 주성분인 셀룰로오스의 분해메커니즘을 구명하기 위하여 셀룰로오스 결정구조인 아비셀을 초임계 압력(230±10atm)하에서 온도별로 각각 30초와 60초 동안 처리하였다. 아비셀의 초임계수 분해반응은 현사시나무 목분과는 달리 60초 동안 반응시켰을 때 글루코오스 생성량은 오히려 감소하였다. 같은 실험조건하에서 현사시나무 목분은 온도 425°C에서 60초 동안 반응시켰을 때 글루코오스 생성량이 가장 높은 7.3%에 이르렀는데, 아비셀의 경우에는 이보다 낮은 온도조건(380°C)과 짧은 반응시간(30초 반응)에서 약 14%로 오히려 더 많은 글루코오스를 생산하였다.

이러한 글루코오스 수율차이의 해법은 목질바이오매스의 구조적 특성에서 찾을 수 있다⁹⁾. 목재의 해부학적 특성을 살펴보면 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스와 리그닌 등이 서로 3차원적으로 얽혀있는 비균질성(heterogeneity) 구조를 하고 있다. 즉, 목질 셀룰로오스와 아비셀은 모두 결정구조를 이루고 있지만 목질 셀룰로오스의 경우에는 리그닌이라는 3차원 페놀성 고분

Table 2. Comparison of glucose yield produced by supercritical water treatment of avicel at several temperature zones.

Sample	Treatment		Monomeric sugar(g)					Total sugar (g)
	Temp (°C)	Time (s)	Ara	Gal	Glu	Xyl	Man	
before sulfuric acid hydrolysis								
avicel	350	30	0	0	8.53	0.25	0.30	9.08
	380		0	0	12.88	0.57	0.63	14.08
	400		0	0	12.51	0.49	0.76	13.76
	425		0	0	11.06	0.15	0.62	11.83
after sulfuric acid hydrolysis								
avicel	350	30	0	0	9.5	0.4	0.4	10.2
	380		0	0	16.9	0.5	0.8	18.1
	400		0	0	17.9	0.2	0.9	19.0
	425		0	0	15.3	0	1.8	17.1

자로 둘러싸여 있으므로 분해되는데 더 많은 에너지를 필요로 하는 것으로 판단되었다. 그럼에도 불구하고 초임계수에 의한 아비셀의 단당류 전환 수율도 기대한 수치보다 매우 낮았으며, 그 원인은 셀룰로오스 결정구조의 불완전한 분해나 혹은 생성된 글루코오스가 고온·고압의 반응조건에서 2차 분해반응으로 분해되었으리라 예상되었다. 불완전 분해가 일어났을 경우 아비셀의 초임계수 분해산물에는 비결정구조의 글루코오스 올리고당이 포함되어 있으리라 예측되어 이를 확인하고자 아비셀 초임계수 분해산물을 묽은 황산(4%)으로 한 시간 동안 가수분해 한 다음에 다시 단당류 분석을 실시하였다. Table 2에서 보듯이 아비셀의 초임계수 분해산물을 묽은 황산으로 가수분해하였을 때 모든 아비셀 분해산물에서 단당류 수율이 증가하였음을 알 수 있었다. 특히 400°C에서 30초 동안 반응한 아비셀 분해산물의 경우에는 가수분해에 의해 단당류 수율이 19%에 이르러 약 35% 이상의 수율증가를 보였다. 이러한 단당류 증가분으로 판단해 볼 때, 아비셀의 초임계수 분해과정에서 올리고당의 글루코오스 고분자가 생성되었음을 간접적으로 확인할 수 있다. 그러나 아비셀의 불완전 가수분해를 고려하더라도 아비셀의 초임계수 분해과정에서 약 80% 이상의 글루코오스가 다른 물질로 전환되었음을 알 수 있었다.

3.4 글루코오스/자일로오스 분해메커니즘

위에서 언급한 아비셀의 초임계수 분해과정에서 사라진 80%의 글루코오스는 고온·고압의 반응조건에서 2차 반응을

일으켜 다른 물질로 분해되었으리라 예측됨에 따라 글루코오스와 자일로오스 표준물질을 대상으로 온도에 따른 초임계수 분해메커니즘을 관찰하였다.

그림 5에서 보듯이 글루코오스와 자일로오스는 반응온도가 상승하면서 급격하게 감소하여 최고온도인 425°C에 이르러서는 겨우 10%만이 검출되었다. 이러한 사실로 미루어 아비셀은 초임계수 분해과정에서 글루코오스로 전환됨과 동시에 생성된 글루코오스는 거의 90%가량이 2차 분해반응으로 소멸될 수 있음을 알 수 있었다. 글루코오스와 자일로오스의 2차 분해산물은 유기용매(EtOAc)로 추출한 후에 내부표준물질인(naphthalene)을 소량 첨가한 후 GC/MS로 분석하였다(그림 6). 글루코오스의 주요 분해산물은 탄소 6개로 이루어진 5-hydroxymethyl furfural과 4-oxo-5-methoxy-2-penten-5-olide 이었으며, 자일로오스의 분해산물에서는 4-oxo-5-methoxy-2-penten-5-olide만이 검출되었다. 그러나 5탄당인 자일로오스에서 탄소 6개로 이루어진 2차 분해산물이 형성된 과정은 아직 연구 중에 있다.

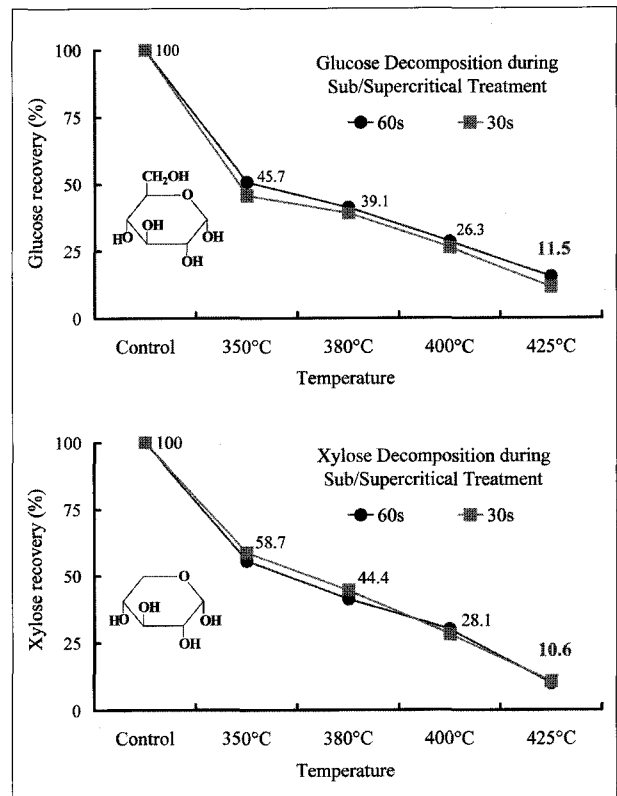


Fig. 5. Degradation of glucose/xylose at different temperatures during supercritical water treatment

3.5 저분자량 분해산물 분석

현사시목분의 초임계수 분해과정에서 생성되는 저분자량 분해산물은 크게 목질바이오매스의 주성분인 셀룰로오스와 리그닌의 열분해에 의해서 생성된다. 셀룰로오스의 주요 분해산물은 2-furaldehyde(C-1), 2-cyclopentene-1-one(C-2), 5-ethyl-2-furaldehyde(C-3)와 5-hydroxymethyl-2-furaldehyde(C-4) 등 퓨란계 유도체가 주로 확인되었다(Fig. 6). 2-Furaldehyde는 아임계에서 초임계온도에 이르는 모든 온도조건에서 검출되었으나, 2-cyclopenten-1-one과 5-ethyl-2-furaldehyde는 아임계온도 범위에서는 확인되지 않았다.

리그닌 분해산물의 대부분은 페놀 유도체로서 반응온도가 상승하면서 정량적으로 증가하는 경향을 보여주고 있다. 즉, 리그닌의 분해속도는 초임계 분해온도에 영향을 받고 있음을 증명해 준다. 초임계수 분해산물에서 확인된 리그닌 분해물로는 G형 리그닌의 분해에 의해서 유도된 vanillin(L-3), dihydroeugenol(L-4)과 acetoguaiacone(L-5)과 S-리그닌 유도체인 syringol(L-2), 4-propenyl syringol(L-6), syringaldehyde(L-7)과 dihydrosinapyl alcohol(L-8) 등으로 확인되었다.

위에서 확인된 페놀구조 단량체들은 리그닌의 주요 결합양식인 β-O-4 결합이 초임계수 분해조건인 고온, 고압의 실험 조건에서 열분해 반응에 의해서 생성되는 것으로 예측된다^{5, 10, 11, 12}. 아임계 온도인 325℃에서는 G-리그닌의 분해물들은 거의 나타나지 않았지만, syringol, syringaldehyde, acetosyringone 등 S-리그닌 분해물이 검출되기 시작한 점으로 보아 G-리그닌 보다는 S-리그닌이 쉽게 분해되는 것으로 나타났다. 이와 함께 본 실험을 통하여 리그닌고분자는 380℃ 이상에서 활발하게 분해되는 것으로 밝혀졌다.

4. 결론

현사시나무 목분의 초임계수 당화과정에 의해 생산된 단당류 수율은 처리온도에 비례하여 증가하는 경향을 나타내어 425℃에서 목분의 전건중량의 약 7.3% 가량을 획득하였다. 그러나 압력은 목질바이오매스의 분해율이나 단당류 수율에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 밝혀졌다. 생성된 단당류의 온

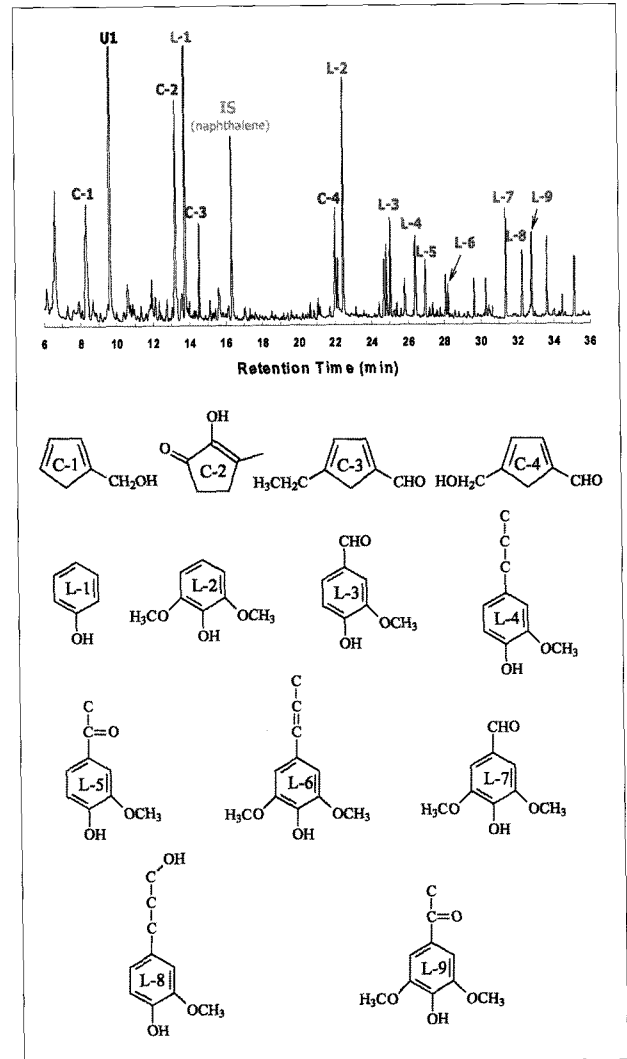


Fig. 6. Gas chromatographic separation of low molecular weight components in degradation products by supercritical water treatment of poplar wood and their chemical structures.

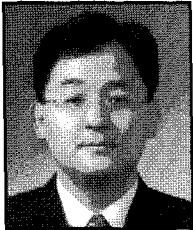
도별 생성비율을 살펴보면 아임계 조건에서는 주로 헤미셀룰로오스의 분해에 의한 자일로스가 생성되었지만, 초임계 조건으로 올라가면서 셀룰로오스가 분해되어 글루코오스의 생성비율이 급격히 증가하였다. 목질바이오매스의 초임계수 분해과정에서 셀룰로오스는 단당류 상태인 글루코오스뿐 만 아니라 올리고당의 글루코오스 고분자도 생성되었으며, 이들의 총합을 고려하더라도 80% 이상의 당류는 고온·고압의 반응조건에서 2차분해반응에 의해 다른 저분자물질로 분해되는 것으로 밝혀졌다. 글루코오스의 대표적인 2차분해산물은 퓨란계 화합물인 5-hydroxymethyl furfural이었으며, 자일로오스의 2차 분

해산물은 잠정적으로 4-oxo-5-methoxy-2-penten-5-olide으로 밝혀졌다. 이러한 저분자화합물로부터 초임계수 당화과정은 단당류 생성반응인 가수분해반응과 열분해반응이 동시에 일어난다는 사실을 확인하였으며, 반응온도가 상승할수록 열분해반응이 우세하게 일어남을 알 수 있다. 이들과 함께 리그닌고분자의 대표적인 열분해 산물로 구분되는 수십 종의 저분자 페놀화합물이 초임계수 분해산물에서도 확인할 수 있었다.

References

- (1) Chang, V. S. and M. T. Holtzapple. 2000. Fundamental factors affecting biomass enzymatic reactivity. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 84-86: 5-37.
- (2) Parisi F. 1989. Advances in ligno cellulose hydrolysis and in the utilization of the carbohydrates. *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.* 38: 53-87.
- (3) Goldstein I. S. 1980. The hydrolysis of wood. *TAPPI.* 63: 141-143.
- (4) Ehara, K. and S. Saka. 2005. Decomposition Behavior of Cellulose in Supercritical Water, Subcritical Water, and their Combined Treatments. *J. Wood Sci.* 51: 148-153.
- (5) Ehara, K., Saka, S. and Kawamoto, H. 2002. Characterization of the lignin-derived products from wood as treated in supercritical water. *J. Wood Sci.* 48. 320-325.
- (6) Ishikawa Y. and S. Saka. 2001. Chemical conversion of cellulose as treated in supercritical methanol. *Cellulose* 8: 189-195.
- (7) Choi, J. W., H. Y. Kang, D. H. Choi, H. J. Lim and K. S. Han. 2006. Comparison of degradability and degradation products obtained from *Populus alba x glandulosa* and *Pinus rigida* woods by flow- and batch type supercritical water oxidation. The 1st International conference on energy conversion and efficient utilization of wood biomass. 2006. May 14-16. Beijing, China. 65-68.
- (8) Choi, J. W., H. J. Lim, K. S. Han and D. H. Choi. 2006. Thermochemical conversion of poplar wood(*Populus alba*±*glandulosa*) to monomeric sugars by supercritical water treatment. *Mokchae Konghak.* 34(6) : 44-50.
- (9) Sjoestrom, E. 1993. *Wood Chemistry. Fundamental and application.* 2nd Eds. Academic Press, INC. SAN Diego. 49-82.
- (10) Faix, O., D. Meier and I. Fortmann. 1990. Thermal degradation products of wood. Gaschromatographic separation and mass spectrometric characterization of monomeric lignin derived products. *Holz als Roh- und Werkstoff.* 48. 351-354.
- (11) Faix, O., I. Fortmann, J. Bremer and D. Meier. 1991. Thermal degradation products of wood. Gaschromatographic separation and mass spectrometric characterization of polysaccharide derived products. *Holz als Roh- und Werkstoff.* 49. 213-219.
- (12) Choi, J. W., O. Faix and D. Meier. 2001. Characterization of residual lignins from chemical pulps of spruce(*Picea abies*) and beech(*Fagus sylvatica* L.) by analytical pyrolysis -gaschromatography/mass spectrometry. *Holzforchung.* 55. 185-192.

최준원



1991년 서울대학교 임산공학과 농학사
1995년 서울대학교 임산공학과 농학석사
1999년 독일 함부르크대학교 임산학부 이학박사

현재 국립산림과학원 임산공학부 임업연구사
(E-mail : francis04@foa.go.kr)

임현진



2003년 충북대학교 목재·종이공학과 농학사
2006년 충북대학교 목재·종이공학과 농학석사

현재 국립산림과학원 임산공학부 인턴연구원
(E-mail : jin_029@hanmail.net)

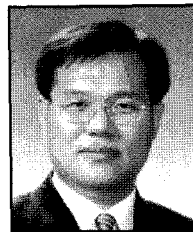
조태수



1982년 건국대학교 입학과 농학사
1986년 일본 시마네대학교 임산공학과 농학석사
1989년 일본 에이메대학교 생물자원이용학 농학박사

현재 국립산림과학원 임산공학부 임업연구사
(E-mail : tscho@foa.go.kr)

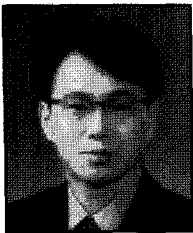
한규성



1982년 서울대학교 임산공학과 농학사
1986년 서울대학교 임산공학과 농학석사
1991년 일본 교토대학교 임산공학과 농학박사

현재 충북대학교 목재·종이공학과 교수

최돈하



1982년 서울대학교 임산공학과 농학사
1984년 서울대학교 임산공학과 농학석사
1993년 서울대학교 임산공학과 농학박사

현재 국립산림과학원 임산공학부 화학미생물과장