

열분해액화반응에 의한 헤미셀룰로오스의 분해특성 및 연료물질 생성

이 종 집

공주대학교 화학공학부
(2008년 1월 14일 접수, 2008년 3월 1일 채택)

Degradation Properties and Production of Fuels from Hemicellulose by Pyrolysis-liquefaction

Jong-Jib Lee

School of Chemical Engineering, Kongju National University, Cheonan 330-717, Korea
(Received January 14, 2008; accepted March 1, 2008)

헤미셀룰로오스는 자일로스(xylose)와 만노스(mannose)와 같은 5당류(pentose)로 이루어져 있기 때문에 분해하면 고옥탄가의 연료 물질이나 연료첨가제로서 사용할 수 있는 가능성이 높다. 본 연구에서는 헤미셀룰로오스의 열화학적 전환방법으로 열분해·액화반응을 실시하여 반응온도의 영향, 전환율, 분해특성, 분해생성물질 및 에너지효율 등을 조사하였다. 실험은 튜브반응기로 반응시간 40 min에서 반응온도 200~400 °C로 변화시켜 가면서 수행하였다. 헤미셀룰로오스의 열분해·액화반응에 의해 생성된 액체 생성물은 주로 케톤류가 많았으며, 2,3-dimethyl-2-cyclopenten-1-one, 2,3,4-trimethyl-2-cyclopentan-1-one, 2-methyl-cyclopentanone과 같은 케톤류는 고옥탄가를 가진 연료 및 연료첨가제로 사용이 가능하였으나 페놀류는 연료로서의 가치가 낮은 것으로 나타났다. 헤미셀룰로오스의 열화학적 전환공정에 의해 생성된 액체 생성물의 발열량은 6680~7170 cal/g이었으며 셀룰로오스의 열분해·액화반응에서 에너지효율과 질량수율은 400 °C에서 40 min 반응시켰을 때 각각 72.2%, 41.2 g oil/100 g raw material로 가장 좋았다.

Hemicellulose, consisting of pentose as xylose and mannose, is usable as high octane fuels and heavy oil additives if depolymerized to monomer unit. In this study, thermochemical degradation by pyrolysis-liquefaction of hemicellulose, the effects of reaction temperature, conversion yield, degradation properties and degradation products were investigated. Experiments were performed in a tube reactor by varying reaction temperatures from 200 °C to 400 °C at 40 min of reaction time. The liquid products from pyrolysis-liquefaction of hemicellulose contained various kinds of ketones. Ketones, as 2,3-dimethyl-2-cyclopenten-1-one, 2,3,4-trimethyl-2-cyclopentan-1-one, and 2-methyl-cyclopentanone, could be used as high-octane-value fuels and fuel additives. However, phenols are not valuable as fuels. Combustion heating value of liquid products obtained from thermochemical conversion processes of hemicellulose was in the range of 6,680~7,170 cal/g. After 40 min of reaction at 400 °C in pyrolysis-liquefaction of hemicellulose, the energy yield and mass yield were as high as 72.2% and 41.2 g oil/100 g raw material, respectively.

Keywords: alternative fuel, new energy, biomass, hemicellulose, pyrolysis-liquefaction

1. 서 론

바이오매스는 태양에너지에 의한 광합성을 통해 끊임없이 재생되는 무한 자원으로 임산자원, 농업 부산물, 해양생물, 유기성 폐기물 등과 생명체로부터 유래되는 모든 것들이 포함되는데, 인간의 의식주를 위해 인위적으로 재배되거나 자연상태에서 성장, 사멸 및 분해의 경로를 통한 오랜 세월의 화석화 과정을 통해 화석연료가 될 수 있다. 이러한 바이오매스를 적절한 방법을 사용하여 화석연료와 유사한 성질을 가진 합성연료로 전환시켜 화석연료를 대체하게 된다면 석유의존도를 줄이는 방법이 될 수 있다[1].

바이오매스가 화석연료를 대체하기 위해서는 바이오매스를 사용하기

에 적합한 형태로 전환하는 공정의 개발이 필수적이라 할 수 있는데, 먼저 바이오매스로부터 발효에 의한 에탄올 생성에 대한 연구가 이루어져서 셀룰로오스를 당화(saccharification)시켜 생성되는 글루코오스의 발효를 통해 에탄올을 생산하는 시스템이 상용화되었으며 미국, 브라질 등의 일부 국가에서는 가솔린과 혼합하여 사용하는 개스홀(gashol) 등의 형태로 시판되고 있는 수준에 이르렀다. 그러나, 기본적으로 에탄올은 가솔린과는 다른 화학적 성질을 갖고 있기 때문에 가솔린을 100% 대체할 수 없는 문제가 있으며, 순수하게 에탄올을 연료로 하는 자동차엔진의 효율이 낮고, 셀룰로오스를 당화하는 과정의 수율이 상당히 낮아서 글루코오스의 생성율이 떨어지기 때문에 바이오매스의 발효에 의한 에탄올 생성 공정 전체에 대한 에너지 효율 및 경제성은 아직 낮은 수준에 머물고 있다[2].

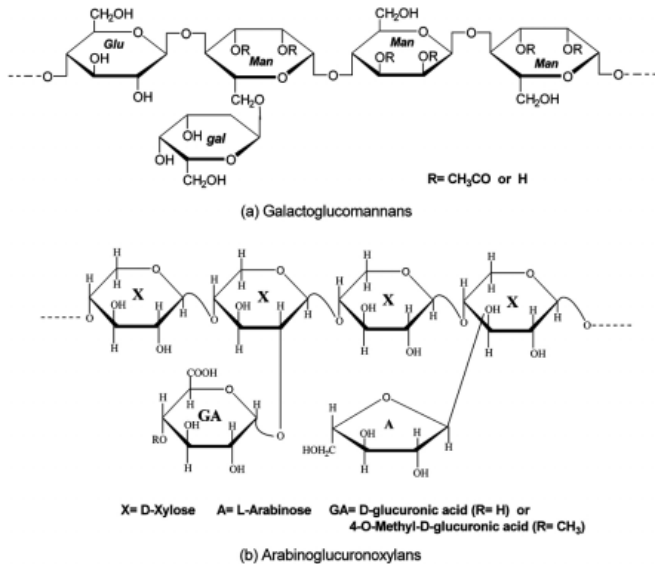


Figure 1. Chemical structure of hemicelluloses.

바이오매스를 직접 또는 간접적으로 액화시키거나 가스화하여 연료로 사용하고자 하는 연구가 시도되고 있는데, T. B. Reed[3], M. Olazar 등 [4]과 F. A. Agblevor 등[5]의 많은 연구자들에 의해 연구가 진행되어 다양한 반응 조건하에서 분자 중에 산소를 풍부하게 함유하는 합산소 연료 물질(oxygenates) 생성과 다양한 화학제품의 제조가 가능한 화학약품이 생성되어 석유대체 가능성이 있음을 보고하였다.

따라서 최근의 원유값 폭등사태를 감안해 볼 때 바이오매스의 열화학적 전환에 의한 대체에너지 기술개발은 막대한 양의 에너지자원을 해외에 의존하고 있는 우리나라로서는 화석연료에 대한 의존도를 줄이고 앞으로 다가올 화석연료의 고갈에도 대비할 수 있는 길이 될 것으로 보인다.

따라서 본 연구에서는 선행연구를 바탕으로 바이오매스의 구성 성분중의 하나인 헤미셀룰로오스를 직접 열분해·액화하여 열화학적 전환에 대한 분해 특성을 조사하고, 고옥탄가의 연료물질 및 석유화학 원료 대체물질의 생성에 대한 가능성을 연구하고자 하였다.

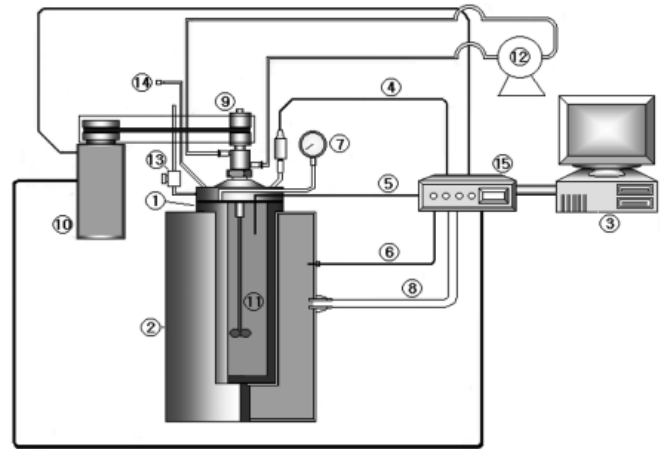
2. 실험

2.1. 재료 및 시약

헤미셀룰로오스는 글루코오스(glucose), 만노스(mannose), 자일로스(xylose) 등의 잔류물로 구성된 다당류의 혼합물로, 침엽수인 연질목(softwood)과 활엽수인 견질목(hardwood)에서 각 구성 성분의 함량비율이 약간의 차이를 나타내는데, 연질목의 주요 헤미셀룰로오스 성분은 galatoglucomannan류이고 견질목의 주요 헤미셀룰로오스 성분은 glucuronoxylan인데 Figure 1에 헤미셀룰로오스의 구조를 나타내었다[6,7]. 본 실험에서는 Sigma사의 beechwood로부터 생산된 90% 이상의 xylose 잔류물을 포함하는 시약인 자일란(xylan)을 구입하여 사용하였다.

2.2. 실험 장치

소형반응기는 3/4" SUS pipe를 10 cm 길이로 절단한 후 고온고압에 견딜 수 있도록 양끝은 swagelock cap으로 밀봉하였으며 반응물의 충전 및 생성물의 회수를 위한 개폐가 가능하도록 튜브형태로 제작하였다. 다량의 반응물을 얻고자 할 때 사용한 autoclave형 반응장치는 내용적이 300 mL로 자동온도조절장치, 압력조절장치, 외부 유출관과 밸브, 안전장



- ① main reactor
- ② heater
- ③ personal computer
- ④ pressure signal cable
- ⑤ thermocouple in reactor
- ⑥ thermocouple in heater
- ⑦ analogue pressure gauge
- ⑧ automatic heater switch
- ⑨ magnetic drive
- ⑩ motor
- ⑪ impeller
- ⑫ water circular pump
- ⑬ safety relief valve
- ⑭ gas sampling valve
- ⑮ data module and control unit

Figure 2. Schematic diagram for the pyrolysis-liquefaction reactor.

치 및 교반장치를 설치하였고, 반응기 내부의 반응상태 변화를 실시간 모니터링하고 자동조절이 가능하도록 구성하였다. Figure 2에 실험장치 구성을 나타냈다.

2.3. 실험 방법

헤미셀룰로오스에 대한 열분해·액화(pyrolysis-liquefaction)반응은 반응온도 200~400 °C의 범위에서 50 °C 간격으로 변화시켰고, 반응시간은 전보의 실험결과[8,9]를 바탕으로 40 min으로 고정하여 시행하였다. 반응이 완료된 후에는 반응기를 곧바로 얼음물에 넣어 약 20 min간 냉각시킨 후 개봉하였다. 열분해·액화반응 후의 생성물 성상은 액상물질과 고상물질이 서로 반죽되어 있는 페이스트상이기 때문에 염화메틸렌, n-헥산 및 아세톤 등을 추출용매로 soxhlet 장치를 사용한 추출조작에 의해 분리, 수득하였다.

추출한 반응생성물은 여과분리한 후 액상생성물은 시료병에 담아 냉장장치에서 4 °C로 보관하였으며, 고상잔류물은 아세톤으로 수회 세척한 후 다시 증류수로 세척하여 건조기에서 105 °C로 24 h 건조시킨 다음 중량을 측정하고 액상생성물과 같은 방법으로 보관하였다.

2.4. 분석

2.4.1. 전환율 측정

셀룰로오스의 열화학적 전환반응을 통한 액상 또는 기상 생성물의 수율을 정확하게 산출하는 것은 용이하지 않기 때문에, 반응전의 원료 셀룰로오스의 중량과 반응 후 잔류된 고형물질의 중량 차이로부터 다음 식을 사용하여 셀룰로오스의 전환율을 계산하였다.

$$\text{전환율(\%)} = \left(1 - \frac{\text{잔류 고형물질의 건조중량}}{\text{원료 셀룰로오스의 건조중량}} \right) \times 100$$

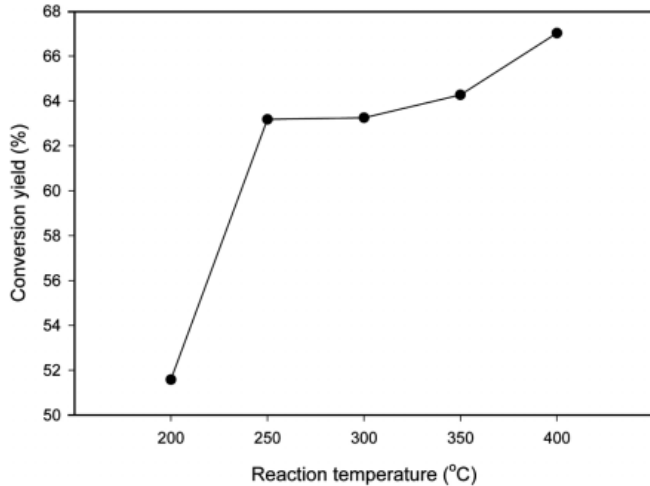


Figure 3. Effect of reaction type on conversion yield in pyrolysis-liquefaction reaction conversion of xylan.

2.4.2. 성분분석(Instrumental analysis)

헤미셀룰로오스의 열화학적 전환반응에 의해 생성된 액상 및 기상생성물의 성분분석을 위하여 GC/MS (Agilent technologies, GC system G1530A, HP5973 mass selective detector)에 HP-1 모세관(methyl siloxane, 50.0 m × 0.2 mm × 0.33 μm nominal)을 장착하였으며 캐리어 가스로는 헬륨(He)을 사용하고, column head pressure 1.57 Kg/cm², flow rate 0.7 mL/min, split ratio 100:1의 조건에서 오븐온도를 초기 40 °C에서 5 °C/min의 속도로 280 °C까지 상승시켜 체류시간 48 min으로 하여 분석하였다. 또, 생성물의 정량을 위하여 GC (Younglin M600D)를 사용하였는데 컬럼과 분석조건은 GC/MS와 동일하게 설정하였고 detector는 FID를 사용하였다. 생성물에 대한 흡광도 측정은 UV-Visible spectrophotometer (Hitachi U-2000)를 사용하여 분석하였다. 헤미셀룰로오스 원료물질의 열화학적 전환반응에 의한 결합의 절단 및 분해 경향 등을 조사하기 위하여 FT-IR (Bio-Rad, FTS 135)을 사용하여 측정영역 400~4000 cm⁻¹에서 분석하였다.

2.4.3. 발열량(Heating value) 분석

헤미셀룰로오스의 열화학적 전환반응에 의해 생성된 액상 생성물이 연료로 사용 가능한지 확인하기 위하여 PARR Calorimeter를 사용하여 KSM 2057법에 의해 발열량을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 헤미셀룰로오스의 열화학적 반응전환율

헤미셀룰로오스의 주성분인 자일란에 대한 열분해·액화반응 실험을 하여 반응온도에 따른 전환율 변화를 비교해 보았다. 반응온도는 200~400 °C의 범위에서 50 °C 간격으로 설정하였고 반응시간은 40 min으로 하였다.

Figure 3의 그래프에서 알 수 있는 바와 같이 전환율은 200 °C에서는 낮은 수준인 51.2%에 이르렀고 반응온도가 250 °C로 증가함에 따라 급격한 전환율의 상승 현상을 보여 63.4%를 나타내었으며 250 °C 이후에는 거의 일정한 수준을 유지하다가 400 °C에서 전환율이 약간 상승하여 66.9%가 되는 정도에 그치고 있다. 이러한 현상으로 미루어 볼 때 여러 가지 당류의 복합체인 헤미셀룰로오스의 주요 결합사슬의 분해가 활발하게 일어나는 반응온도는 200~250 °C의 범위인 것으로 판단할 수 있

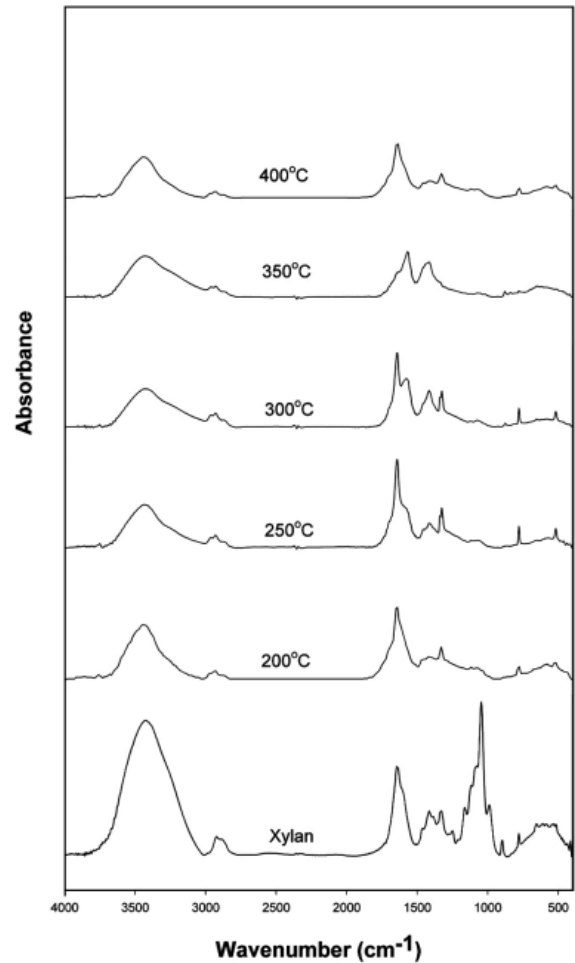


Figure 4. FT-IR spectrum of solid residue remaining after pyrolysis-liquefaction of xylan at various temperatures (reaction time: 40 min).

었다. 이러한 현상은 비교적 낮은 중합도를 가진 헤미셀룰로오스 당류의 분자구조 자체가 열에 대해 상당히 민감하여 직접 가열에 의해 곧바로 분해를 일으키기 때문이며, 이것은 헤미셀룰로오스의 분해 생성물의 형태가 설탕을 가열시킨 시럽의 형태를 갖는 것에 의해 확인할 수 있었다 [10].

3.2. FT-IR 분석에 의한 헤미셀룰로오스의 분해 특성

헤미셀룰로오스의 열화학적 전환반응에 의한 결합의 파괴 및 결합세기의 감소를 확인하여 분해 경향을 파악하고자 반응 후 생성된 고형물질을 각 반응온도별로 FT-IR을 사용하여 분석하였는데, Figure 4에는 건질목 헤미셀룰로오스의 주요 성분인 자일란에 대해 열분해·액화반응의 경향을 보여주는 FT-IR 스펙트럼을 나타내었다. 헤미셀룰로오스의 FT-IR 스펙트럼 형태는 3400~3200 cm⁻¹의 폭넓은 OH stretch band와 1046 cm⁻¹의 1차 알코올의 C-O band가 높은 피크를 나타내었다. 1046 cm⁻¹의 피크는 200 °C에서 완전 소멸되는 것으로 확인되었고 1640~1540 cm⁻¹에 나타나는 carbonyl bond가 250 °C 반응에서는 증가되는 현상을 나타낸 후 반응온도가 증가함에 따라 약간 감소하는 경향을 보였지만 완전히 소멸되지는 않는 것으로 확인되었다. 또한 3400~3200 cm⁻¹의 OH 피크 또한 고온의 반응에서도 비교적 높은 결합의 세기를 유지하는 것으로 나타났는데 이들은 고온에서 페놀의 생성에 관여하는 것으로 판단된다.

Table 1. The Main Products from Pyrolysis-liquefaction of Xylan

Peak No.	Product
1	2,5-dihydroxypropiophenone
2	(E,E)-2,5-diphenyl-2,4-hexadiene
3	1,2-benzenedicarboxylic acid, dinonyl ester
4	4,4-dimethyl-2-cyclopenten-1-one
5	2,3-dimethyl-2-cyclopenten-1-one
6	2-methyl phenol
7	2-methyl-cyclopentanone
8	2,3,4-trimethyl-2-cyclopentan-1-one
9	2-propyl-2-cyclohexenone
10	2,5-dimethyl cyclopentanone
11	C3-benzene
12	2,4-dimethyl phenol
13	2,4,6-trimethyl phenol

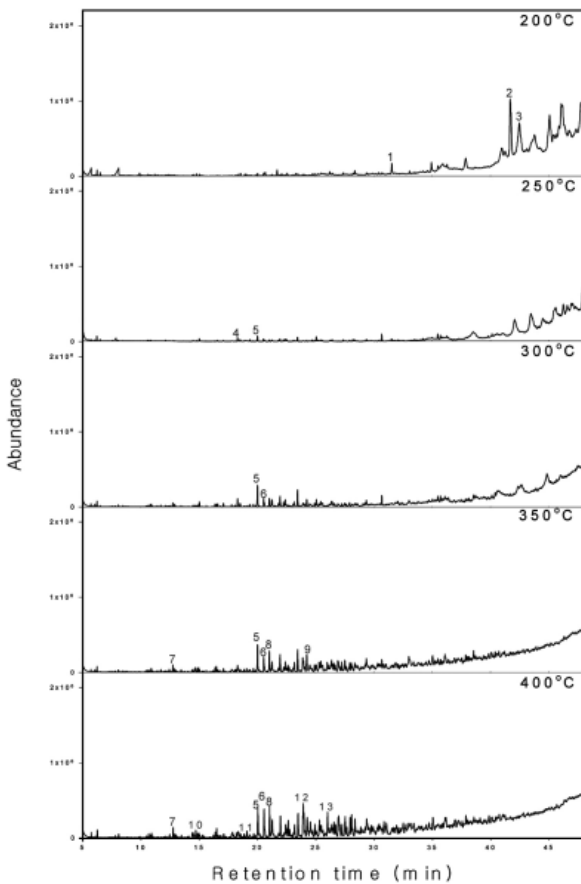


Figure 5. GC chromatogram for liquid products from xylan by pyrolysis-liquefaction.

3.3. 헤미셀룰로오스의 분해생성물의 성분 분석

헤미셀룰로오스의 일종인 자일란을 대상으로 열화학적 전환반응에 의한 액상의 생성물을 GC/MS 및 GC를 사용하여 분석하였는데, 열분해·액화반응에 의한 분해 생성물에 대한 크로마토그램 및 생성물 이름은 Figure 5와 Table 1에 각각 나타내었다. 열분해·액화반응에 의한 액상 생성물의 분석 결과, 반응온도 250 °C에서는 dimethyl-2-cyclopenten-1-

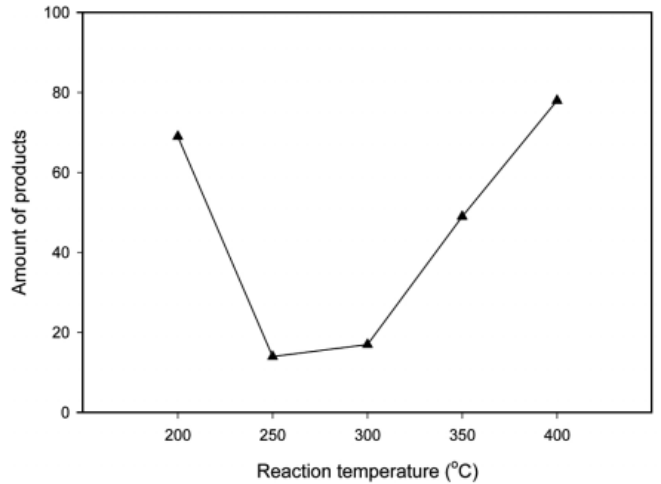


Figure 6. The Comparison of amount of products from xylan by pyrolysis-liquefaction.

one과 같은 케톤류의 생성이 확인되기 시작하여 300 °C 이상의 반응온도에서는 phenol류, benzene류의 생성(peak No. 6, 11 ~ 13)을 확인되기는 하지만 지방족화합물의 상당수가 2-methyl-cyclopentanone, 2,3,4-trimethyl-2-cyclopentan-1-one 등과 같은 케톤류인 것으로 조사되어 다당류인 헤미셀룰로오스를 구성하는 하이드록시기의 산화반응 또는 탈수소반응에 의해 케톤류 및 알데히드류의 다량 생성이 가능한 것으로 판단되었다. 한편 기존에 발표된 문헌[10]에서 제시되고 있는 자일로스의 분해에 의한 포름알데히드와 아세트산의 생성을 여러 면으로 관찰하고자 하였으나 직접적인 이들 물질의 생성은 분석되지 않았지만 이들의 전환에 의해 생성된 것으로 추정되는 여러 가지 알데히드류와 벤조산 등의 유기산류가 소량 존재함을 확인하였다.

헤미셀룰로오스의 열화학적 전환반응을 통해 생성된 액상물질의 분석 결과, 각각의 반응온도에 있어서 각 원료물질에 대한 총 생성물의 수는 Figure 6에 나타난 피크수에서 확인되는 바와 같이 반응온도 200 °C에서 농도는 낮지만 74종의 생성물이 생겼다가 250 °C에서 최저인 18종으로 감소하지만 300 °C 이상에서 생성물 수가 다시 증가하여 400 °C에서 80 종이 생성되었다.

따라서 자일란의 경우 열분해·액화반응에 의해 350~400 °C의 반응범위에서 다양한 케톤류로 이루어진 액상 생성물을 기대할 수 있는 것으로 확인되었다.

또한 몇 가지 methyl phenol류가 생성됨을 알 수 있었는데, 이는 반응온도의 증가와 동시에 발생된 프리라디칼의 공격에 의해 헤미셀룰로오스의 주요 결합이 파괴됨과 동시에 프리라디칼의 연쇄적인 반응에 의해 분해반응, 고리화반응 및 축합반응이 개시되어 페놀과 같은 방향족화합물이 생성되는 것으로 판단되었다.

그러나 벤젠류의 비점이 약 80 °C인데 비해 phenol의 비점은 180 °C 이상으로 상당히 높기 때문에 연료물질로 사용하기 위한 목적으로 보면 바람직하지 않은 물질이라고 할 수 있다.

3.4. 분해 생성물의 발열량 측정 및 연료 타당성 검토

최근 가솔린의 완전연소를 유도하여 배출가스에 의한 대기오염 문제를 해결하고 연료의 옥탄가를 향상시키기 위한 재료로 화합물의 분자 구조 중에 산소를 풍부하게 함유하고 있는 물질을 가솔린에 첨가하여 사용하고자 하는 시도가 계속되어 왔으며, 그에 따라 알콜류로 메탄올, 에탄올이 사용될 수 있고 에테르류가 폭넓게 함산소의 연료 첨가제로 사용되고

Table 2. Heating Values and Mass Yield of Liquid Products from Hemicellulose

Reaction type	Sample	Reaction condition	Heating values (cal/g)	Mass yield of oil (g oil/100 g-raw material)
pyrolysis-liquefaction reaction	1	200 °C, 40 min	6680	40.4
	2	250 °C, 40 min	6780	32.0
	3	300 °C, 40 min	6840	35.2
	4	350 °C, 40 min	7050	39.3
	5	400 °C, 40 min	7170	41.2

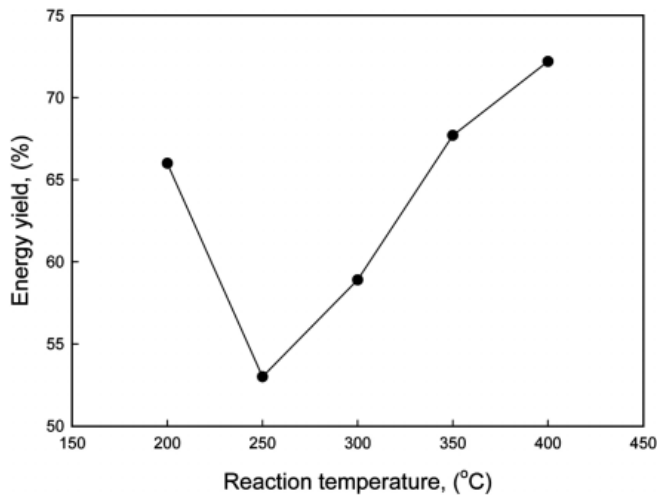


Figure 7. Energy yield of products from xylan by pyrolysis-liquefaction.

있다. 특히, MTBE (methyl tertiary butyl ether)는 메탄올이나 에탄올보다 뛰어난 옥탄가 개선제로 알려져 있다[11].

이러한 동향에 따라 본 연구에서는 헤미셀룰로오스의 열화학적 전환반응에 의해 제조한 액상 물질에 대한 발열량과 에너지 수율을 측정하여 합산소 연료 또는 연료첨가제로서의 사용 가능성을 검토하였다.

열분해액화반응에 의해 제조한 액상 시료 4종에 대하여 parr bomb형 calorimeter를 사용하여 KSM2057법에 의해 발열량을 측정하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 표에 나타난 바와 같이 발열량은 온도가 올라갈수록 증가하여 200 °C, 40 min의 조건에서 6680 cal/g이던 것이 400 °C, 40 min의 조건에서 7160 cal/g으로 약 480 cal/g 상승한 것으로 나타났다.

이것은 400 °C, 40 min의 조건에서 열분해·액화반응에 의한 분해 생성물 수와 농도가 증가되는 것에 의해 나타나는 현상이기도 하지만 가장 큰 이유로는 200~250 °C에서는 헤미셀룰로오스를 구성하고 있는 결합 사슬의 분해가 주로 일어나는 것이고 400 °C 부근에서는 발열량에 크게 영향을 미치는 다양한 케톤류가 다량 생성되어 발열량이 증가하는 것으로 판단되었다.

한편, 액상 생성물질의 미량증류장치를 사용한 증류 조작에 의해 수득될 수 있는 생성물의 양은 같은 반응시간에서 반응온도가 200 °C에서 250 °C로 증가하면 40.4%에서 32.0%로 감소하였지만 온도상승에 따라 분해에 따른 전환반응이 활발해지면서 서서히 증가하여 400 °C에서는 41.2%로 높아졌다.

400 °C, 40 min의 조건에서 얻어진 7170 cal/g의 발열량은 시판 가솔린(13120 cal/g), 경유(11650 cal/g)의 55~62% 정도이며, 에탄올(7540 cal/g)의 발열량에는 95%까지 근접한 수준으로 나타나 연료 및 연료 첨가제로서 사용 가능성이 높은 것으로 판단되었다.

한편 헤미셀룰로오스의 고발열량(HHV)값 4091.2 cal/g[12]을 이용하여 반응 전의 원료물질의 열량에 대한 반응 후 생성된 물질의 열량 증가율에 생성물의 수득율을 곱하여 에너지 수율을 계산하였는데 그 형식은 다음과 같다.

$$\text{Energy yield (\%)} = \frac{\text{heating value of oil}}{\text{HHV of biomass raw material}} \times \text{mass yield of oil} \times 100$$

Table 2의 값들을 이용하여 계산한 에너지 수율을 Figure 7에 나타내었다. 그림을 통해 알 수 있는 바와 같이 5가지 시료 중 가장 높은 에너지 수율을 보인 것은 400 °C에서 40 min간 열분해 반응시킨 경우로 72.2%의 에너지 수율을 나타내었다. 비교적 낮은 수득율에 비해서도 높은 에너지 수율을 나타내는 이유는 원료물질의 열량에 비해 생성물질의 열량이 크기 때문이라고 판단되었다.

따라서 열분해·액화반응에 의해 헤미셀룰로오스를 400 °C에서 40 min간 반응시켰을 경우, 액상 생성물의 연소열이 7170 cal/g으로 가장 높았으며 에너지 수율 또한 72.2%에 이르는 것으로 나타나 가장 좋은 반응 조건인 것으로 판단되었다.

4. 결 론

바이오매스 구성 성분인 헤미셀룰로오스의 일종인 자일란을 대상으로 열분해·액화반응에 의한 분해특성 및 연료물질 생성에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 헤미셀룰로오스의 열화학적 전환반응에 있어서 열분해·액화반응의 경우 200와 250 °C의 저온에서 자일란을 구성하는 다당류의 주요 결합사슬의 분해가 활발하게 일어났으며, 350 °C 이상의 반응온도에서는 분해된 물질이 주로 케톤류로 전환되는 것으로 나타났다.
- 2) 헤미셀룰로오스의 열분해·액화반응에 있어서 반응온도 400 °C, 반응시간 40 min에서 66.9%의 최고전환율 나타냈으며 특히 발열량을 높일 수 있는 2-methyl-cyclopentanone, 2,3,4-trimethyl-2-cyclopentan-1-one 등과 같은 케톤류가 다량 생산되어 72.2%의 최고에너지수율을 나타내었다.
- 3) 최적조건인 400 °C, 40 min의 조건에서 얻어진 액상 생성물은 옥탄가가 높은 케톤류의 함량이 가장 많으며 발열량은 7170 cal/g로 시판 가솔린(13120 cal/g), 경유(11650 cal/g)의 55~62% 정도이며, 에탄올(7540 cal/g)의 발열량에는 95%까지 근접한 수준으로 나타나 연료 및 연료 첨가제로서 사용 가능성이 높은 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. Donald L. Klass, Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals, *Academic Press*, (1998).
2. Energy Resource Technology Development Center, 'Alternative Energy Development Databook' (1996).
3. T. B. Reed, Energy from Biomass; 1st E. C. Conference, **11**, 496 (1980).
4. M. Olazar, R. Aguado, and J. Bilbao, *Bioresour. Technol.*, **60**, 51 (1997).
5. F. A. Agblevor, S. Besler, and A. E. Wieselogel, *Energy and Fuels*, **9**, 635 (1995).
6. R. P. Overend, T. A. Milne, and L. K. Mudge, Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion, *Elsevier Applied Science Publishers*, (1985).
7. D. L. Klass and G. H. Emert, Fuels from Biomass and Waste, Ahn Arbor Science Publisher, inc., (1982).
8. S.-W. Yoon, J.-J. Lee, and B.-H. Lee, *J. Korean Society of Environmental Engineers*, **25**, 560 (2003).
9. J.-J. Lee and B.-H. Lee, *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, **15**, 333 (2004).
10. A. Demirbas, *Energy Conversion and Management*, **41**, 633 (2000).
11. A. Demirbas, *Energy Conversion and Management*, **39**, 685 (1998).
12. A. Demirbas, *Fuel*, **77**, 1117 (1998).