

급속 열분해 이용 바이오오일의 개질공정 개발 동향(2)

한국석유관리원 석유기술연구소

김재곤 (jkim@kpetro.or.kr)

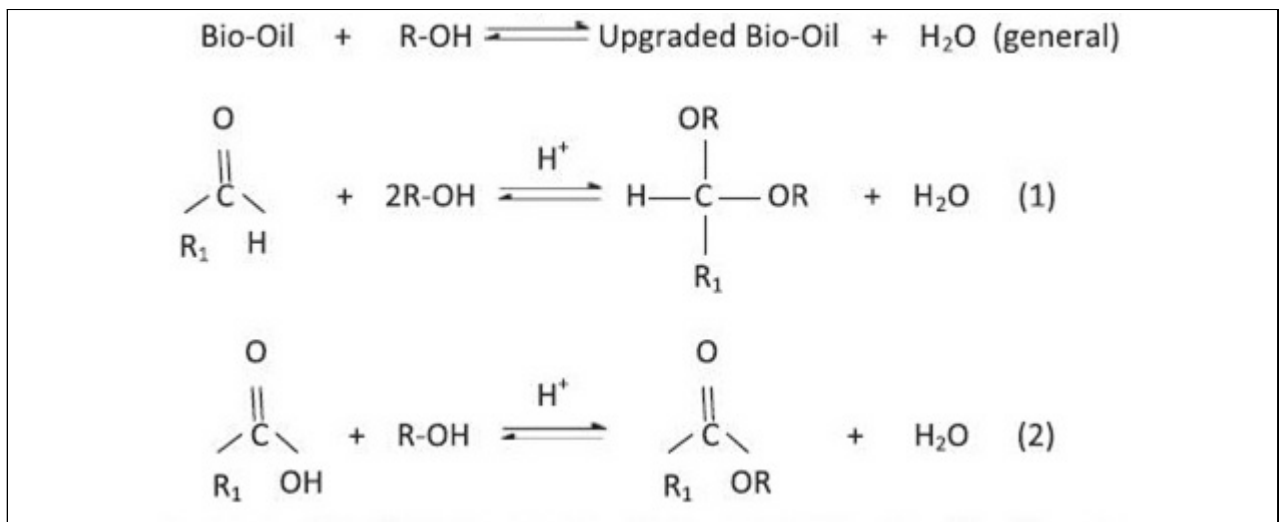
○ 급속열분해 바이오오일의 화학적 개질

① 초임계 유체

유체는 유체의 온도와 압력이 이것의 임계점 이상일 때 초임계로 여겨진다. 초임계 유체는 고유한 전달 요소를 지니고 있다. 그것은 가스와 같은 고체물질과 액체와 같은 용해물질을 통하여 유출한다. 특히, 초임계 유체는 액체나 가스상태의 용매에서 일반적으로 녹지 않는 물질들을 용해시키는 능력을 가지고 있고 이러한 이유로 가스화/액화 반응을 촉진시킨다. 초임계 유체는 최근에 오일 수율과 품질의 향상을 위해 사용되어 왔고 매우 높은 발열량과 낮은 점도를 가진 바이오오일이나 바이오원유를 생산하는 큰 가능성을 보여왔다. 물은 가장 저렴하고 흔하게 수열 작용(hydrothermal processing)에서 초임계 유체로 사용되어 왔지만 바이오매스의 액화를 위한 용매로써 사용되는 물은 다음의 문제점들을 가지고 있다. (1) 물에 녹지 않는 오일 생산물의 낮은 수율 (2) 이것은 산소 함유가 높은 매우 점성이 있는 바이오오일을 생산한다. 오일 수율과 품질의 향상을 위하여 에탄올, 부탄올, 아세톤, 2-propanol, n-hexanol, 1,4-dioxane 그리고 메탄올과 같은 유기용매가 활용되어왔다. 이러한 모든 용매는 바이오오일 수율과 품질에 중요한 영향을 나타내었다. Minami와 Ska는 초임계 메탄올에서 90%의 beech wood가 성공적으로 분해되었다고 보고하였다. 초임계 유기용매 유체는 바이오오일의 수율과 품질의 향상을 위하여 수열액화 (Hydrothermal liquefaction) 과정에서 두드러지게 사용되었다. 게다가 이것은 또한 열분해 바이오오일의 향상을 위하여 사용되었다. 예를 들어 Tang 등은 초임계 에탄올은 열분해 오일에서 리그닌에서 얻은 올리고머를 향상시키고, 따라서 타르나 코크를 줄일 수 있음을 보

고하였다. 비록 초임계 유체는 상대적으로 낮은 온도에서 생산되며 그 과정은 친환경적이지만, 이러한 유기용매는 큰 규모에서 실현 가능하게 만드는 것이 경제적으로 비용이 많이 든다. 최근에 초임계 유체의 대체물로써 비용을 줄인 유기용매 실험을 시도하고 있다. 바이오디젤 생산의 낮은 가치의 부산물인 미 가공된 글리세롤(crude glycerol)은 초임계 유체 용매의 대체물로써 아주 유망한 결과를 보여주고 있다. 글리세롤은 바이오매스의 탈리그닌(delignification), 바이오오일의 분리와 액화에서 바이오매스의 바이오오일로의 전환에 큰 향상을 위한 유기용액으로 사용되어왔다. Xiu 등 [6]은 돼지 비료(swine manure) HTL 과정을 위한 용매로써 미 정제된 글리세롤을 사용했을 때 바이오오일의 수율이 23.9%에서 70.92%으로 극적으로 증가함을 찾아냈다. 게다가 그들은 미 정제된 글리세롤의 유리지방산이 오일 수율의 향상을 이끄는 핵심적인 요소임을 밝혀냈다. 더욱이 오일 품질 또한 향상되었고 낮은 밀도와 점도를 가진다.

② 용매 첨가/에스테르화반응



<그림 1> 바이오오일과 알코올 반응에 의한 개질 (1) acetalization, (2) esterification

메탄올, 에탄올, 푸르푸랄과 같은 극성용매는 바이오오일의 점도의 감소와 균질화를 위하여 사용되어왔다. 이러한 극성용매를 첨가하면 즉각적으로 점도를 감소시키고 발열량을 증가시켰다. 용매는 대부분의 바이오오일보다 더 높은 발열량을 가지고 있기 때문에 바이오오일의 용매와의 결합으로 발열량의 증가가 발생한다. 용매의 첨가는 다음의 3가지 메커니즘 때문에 오일의 점도를 감소시킨다. (1) 화학반응속도의 영향이 없는 물리적 희석 (2) molecular 희석 또는 오일 미세구조의 변화로 인한 반응속도의 감소 (3) 용매와 추가적인 chain growth를 막는 오일 구성요소 사이의 화학반응 대부분 점도를 잘 감소시키고 안정성과 발열량을 증가시키기 위해 열분해 이후 즉시 용매를 첨가한다. 그러나 최근 몇몇 연구에서는 reactive distillation를 이용하여 mild condition에서 에탄올과 같은 알코올과 산 촉매와 반응시킨 오일이 더 나은 바이오오일 품질의 결과를 가져옴을 보여주었다. 이 과정은 촉매 에스테르화반응(catalytic esterification) 또는 에스테르화반응 처리(esterification treatment)로 문헌에서 언급된다[7]. 바이오오일과 메탄올 또는 에탄올 사이에서 발생할 수 있는 화학반응은 에스테르화반응과 아세틸화(acetalization)이다. 이러한 경우, 유기산 (organic acid)과 알데히드류와 같은 바이오오일의 반응성이 강한 분자들은 각각 alcohols와 esters와 acetals의 반응으로 전환된다. 이와 같이 점도와 aging 속도의 감소뿐만 아니라, 그들은 또한 산성의 감소, 휘발성과 발열량의 향상 그리고 더 나은 디젤 연료의 혼합성(miscibility)과 같은 다른 가치 있는 변화를 이끈다. 대부분의 바이오오일을 향상시키는 데 응용된 환경적인 촉매는 불균일촉매이다. 고체 산 촉매, 고체 염기 촉매, 이온성 액체 촉매, HZSM-5 그리고 aluminum silicate 촉매는 바이오오일의 에스테르화반응을 위하여 연구되어왔다. 이 방법의 간단함, 메탄올과 같은 몇몇 용매의 낮은 비용 그리고 오일에 대한 이러한 유익한 영향들을 고려하면, 이 방법은 바이오오일 품질의 향상을 위한 현실적인 접근법 중 하나로 여겨진다. 그림 3-2에 알코올과 바이오오일의 아세틸화와 에스테르화반응 식을 나타내었다.

③ 에멀전화 (Emulsification)

운송이나 보일러에서의 연료 연소로써 바이오오일의 이용 방법중의 하나는 다른 연료원들과 함께 에멀전 (emulsion)을 생산하는 것이다. 열분해 오일은 탄화수소 연료와 혼합성을 갖지 않지만, 계면활성제의 도움으로 디젤오일과 에멀전화될 수 있다. 디젤오일과의 에멀전화를 통한 바이오오일의 향상은 많은 연구자들을 통해 조사되어왔다. 안정적인 마이크로 에멀전의 생산 과정에서 디젤에서 5~30%의 바이오오일이 Canmet Energy Technology Centre에서 개발되어왔다. 이러한 에멀전은 덜 부식하고 향상된 점화 특징을 보여준다. Jiang과 Ellis는 바이오디젤과 함께 에멀전화를 조사했다. 이때 혼합물 안정성의 몇몇 다양한 과정의 영향 또한 연구되었다. 그들은 바이오오일과 바이오디젤 사이에서 안정적인 혼합물을 얻을 수 있는 최적의 조건은 부피당 4%의 octanol 계면활성제 투입량(dosage), 부피당 4:6의 초기 바이오오일/바이오디젤 비율, 1200 rpm의 교반 강도, 15분의 혼합 시간 그리고 30 °C의 에멀전화 온도라는 것을 찾아냈다. 에멀전의 다양한 특성은 산값(acid number), 점도 그리고 본래의 바이오오일과 비교하여 수분함량에서 더욱 가치 있는 값을 보여준다. 에멀전의 점도와 부식성의 감소는 또한 Ikura [8]로부터 보고되었다. Chiramonti [10]는 엔진 안의 디젤과 바이오매스 열분해 액상으로부터 얻은 에멀전을 실험하였다. 그들의 결과는 spray channel안에서 높은 난류속도 흐름으로 인해 가속화된 부식이 지배적인 문제임을 제안한다. 스테인레스 금속 노즐은 성공적으로 검사되고 만들어졌다. 그러나 장기적인 확인은 여전히 필요하다. 가장 최근에 그는 물리화학적인 성질과 switch grass 바이오오일의 저장 안정성의 향상을 위하여 새로운 고압의 균질화(high pressure homogenation, HPH) 기술을 사용하였다. 디젤오일과 혼합된 바이오오일로 구성된 보통의 에멀전화방법과 비교하여, HPH 기술은 점도의 감소와 저장에서 이것의 안정성 향상으로 바이오오일의 본래의 특징을 향상시켰다. 그러나 발열량, 수분함량, 밀도, pH값 또는 ash 함량은 변하지 않았다. 전반적인 바이오디젤과의 에멀전화를 통한 바이오오일의 향상은 비교적 간단하다. 이것은 디젤엔진에서 바이오오일의 사용의 단기적인 접근을 제공한다. 에멀전화는 향상된 점화 특징을 보여주지만, 발열량, 세탄(cetane)과 부식성과 같은 연료 특징은 여전히 만족스럽지 못하다. 게다가 이 과정은 생산을 위해 높은 에너

지를 요구한다. Injector과 스테인리스 금속 또는 다른 물질로 만들어진 연료 펌프의 설계, 생산과 시험이 요구된다.

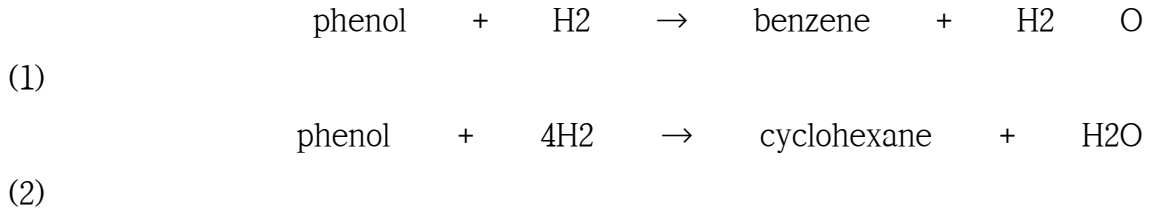
④ 수증기 개질

“개질”이라는 용어는 본래 석유 유분(petroleum fraction)의 더 높은 옥탄가(octane number)를 가진 더 많은 휘발성 생산물로의 열적 전환의 묘사에 사용되었고 크래킹(cracking), 탈수소화(dehydrogenation)와 이성화(isomerization)와 같은 많은 동시에 일어나는 반응(simultaneous reaction)의 전체적인 영향을 대표한다. 개질은 또한 탄화수소 가스와 증발된 유기화합물의 일산화탄소와 수소가 혼합된 합성가스와 같은 수소 함유 가스로의 전환을 나타낸다. 수증기 촉매 개질을 통한 바이오매스의 급속열분해와 바이오오일로부터 H₂를 얻을 수 있는 특정한 부분의 shift conversion은 바이오매스 열분해 오일을 향상시키는 효과적인 방법으로 제시되었다. 바이오오일 개질로부터 수소의 생산은 유동층(fluidized bed)과 고정층(fixed bed) 반응기를 포함한 NREL로부터 광범위하게 조사되었다. 상업적인 니켈 촉매는 액체에서 유도된 바이오매스 가공에서 좋은 활성을 보여준다.

⑤ 바이오오일 촉매 개질

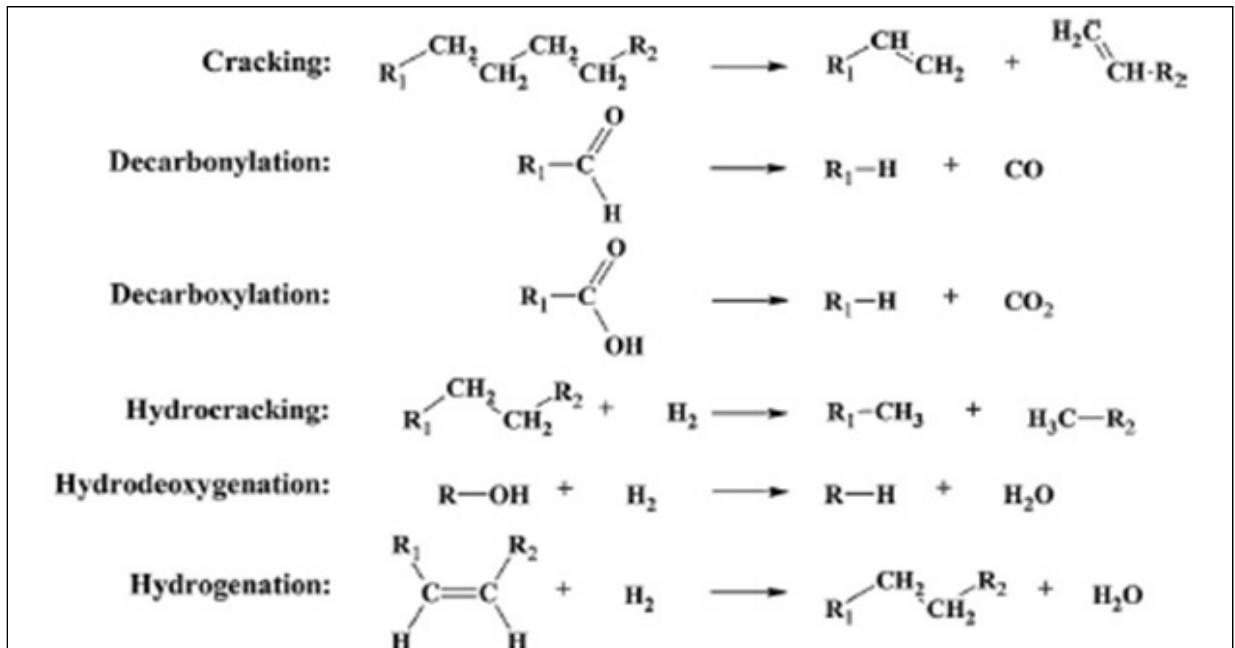
바이오오일의 촉매 개질은 제올라이트 크래킹, 수소첨가 탈산소반응(Hydrodeoxygenation, HDO)의 2가지가 주를 이룬다. 바이오오일의 촉매를 이용한 개질은 시료 내의 다양한 물질들로 인해 복잡한 반응을 일으킨다. HDO와 제올라이트 크래킹을 사용할 시 크래킹, decarbonylation, decarboxylation, hydrocracking, HDO, 수소화, 중합 반응과 같은 다양한 반응이 일어난다. 이 반응들의 예시를 그림 3-3에 나타내었다. 이 반응들 외에 탄소 형성 또한 두 가지 프로세스에 모두 중요한 반응이다.

바이오오일 내의 다양한 반응들은 개질 반응을 어렵게 하고 이에 따라 연구들이 모델 물질에 제한되는 경향이 있다. 열역학적 총론을 이끌어 내기 위해서는 아래 제시한 반응들의 열역학적 계산을 해야 한다.



두 가지 반응의 열역학적 평형점을 계산하면 600 °C 부근, 상압, 화학양론적 조건에서 페놀이 모두 전환된다. 압력이나 과잉되는 수소의 양을 증가시키는 것은 열역학적 평형점을 이동시키고 완벽한 전환을 이뤄낼 수 있을 것이다. 비슷한 결과가 furfural에 대해서도 계산되었다. 그러므로 그림 3-3에 제시된 모델물질들의 간단한 반응을 계산함으로써 열역학적 변수는 제한적이지 않음을 알 수 있다.

하지만 실제로는 바이오오일의 개별 물질의 전환율을 평가하기엔 어렵다. 대신 중요한 파라미터로는 오일 수율 (Yield)과 탈산소도(degree of deoxygenation, DOD) 이다.



<그림 2> 촉매 바이오오일 개질 반응에 관련된 반응 예들 [12, 13]

$$Y_{oil} = \left(\frac{m_{oil}}{m_{feed}} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

$$DOD = \left(1 - \frac{Wt\%_{O \in \Pi_{uct}}}{Wt\%_{O \in feed}} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

Y_{oil} 은 오일 수율이고 m_{oil} 은 생성된 오일의 질량, m_{feed} 는 시료의 질량, DOD는 탈산 소도이며 $wt\%_O$ 는 오일 내에 있는 산소의 중량 퍼센트이다. 두 개의 파라미터는 오일의 개략적인 overview를 제공한다. 오일 수율이 오일 성분으로의 선택도를 나타낸다면, DOD는 얼마나 오일 내 산소가 효과적으로 제거되었는지를 나타내기 때문에 이는 생성된 오일의 품질을 대변할 수 있다. 하지만 개별적인 파라미터를 보면 실질적이지 못한 부분이 있다. 예를 들어 반응이 일어나지 않았을 경우 100%의 수율로 계산된다. 또한 두 가지 파라미터 모두 특정 유해 물질의 제거에 대해서는 나타내지 않기 때문에 이를 위해서는 세분화 하여 분석해야 한다. 표1에 바이오오일을 개질하는데 적용된 다양한 종류의 촉매들과 반응들을 나타내었다.

<표 1> 바이오오일 개질 촉매 예

Catalyst	Setup	Feed	Time[h]	P[bar]	T[°C]
Hydrodeoxygenation					
Co-MoS ₂ /Al ₂ O ₃	Batch	Bio-oil	4	200	350
Co-MoS ₂ /Al ₂ O ₃	Continuou s	Bio-oil	4 ^a	300	370
Ni-MoS ₂ /Al ₂ O ₃	Batch	Bio-oil	4	200	350
Ni-MoS ₂ /Al ₂ O ₃	Continuou s	Bio-oil	0.5 ^a	85	400
Pd/C	Batch	Bio-oil	4	200	350
Pd/C	Continuou s	Bio-oil	4 ^b	140	340
Pd/ZrO ₂	Batch	Guaiacol	3	80	300
Pt/Al ₂ O ₃ /SiO ₂	Continuou s	Bio-oil	0.5 ^a	85	400
Pt/ZrO ₂	Batch	Guaiacol	3	80	300
Rh/ZrO ₂	Batch	Guaiacol	3	80	300

Ru/Al ₂ O ₃	Batch	Bio-oil	4	200	350
Ru/C	Continuou s	Bio-oil	0.2 ^a	230	350-400
Ru/C	Batch	Bio-oil	4	200	350
Ru/TiO ₂	Batch	Bio-oil	4	200	350
Zeolite cracking					
GaHZSM-5	Continuou s	Bio-oil	0.32a	1	380
H-mordenite	Continuou s	Bio-oil	0.56a	1	330
H-Y	Continuou s	Bio-oil	0.28a	1	330
HZSM-5	Continuou s	Bio-oil	0.32a	1	380
HZSM-5	Continuou s	Bio-oil	0.91a	1	50
MgAPO-36	Continuou s	Bio-oil	0.28a	1	370
SAPO-11	Continuou s	Bio-oil	0.28a	1	370
SAPO-5	Continuou s	Bio-oil	0.28a	1	370
ZnHZSM-5	Continuou s	Bio-oil	0.32a	1	380

^a Calculated as the inverse of the WHSV.

^b Calculated as the inverse of the LHSV.

⑥ 수소첨가 개질

PNNL에서 행해진 바이오오일 개질은 촉매 수첨가공에 주안점을 두고 있다. 초기일은 고압 액화, 수열, 알칼리 촉매 공정을 이용하여 급속열분해 바이오오일보다 더 탈산소화된 화합물을 얻는데 초점을 맞추었다. 결과적으로 수열 생성물이 보다 열적으로 안정하였고 가솔린 생성물을 생산하는데 더 적은 수소화반응이 필요하였다. 급속열분해 바이오오일에 대한 초기 테스트 결과, 수열 생성물에 적용되었던 수소처리방법은 바이오오일에게는 부적당하였다. 즉 바이오오일 수소화처리 결과 중질 생성물 타르 (heavy product tar) 를 생성하여 반응기 시스템을 막았고 촉매 층에 코크 같은 물질을 생성하게

하였다. 포플라 목재를 유동층 반응기에서 열분해하여 얻어진 바이오오일을 황화처리된 CoMo 촉매 상에서 수소처리하였다. 이때 온도는 355°C, 압력은 13.8 MPa, LHSV는 0.35, 수소 유량은 바이오오일 1L당 318 std L이었다. 수소 소모량은 127L/L였다. 이때 오직 액체 질량 수율은 23%이고 산소함유량은 3.6과 5.9%, H/C 비는 1.55-1.45이었다.

이단계 수소처리: 수소처리 조건에서 바이오오일의 불안정성을 해결하기 위하여, 이단계 공정이 개발되었다. 300°C 이하의 온도에서 Ni 혹은 황화처리된 CoMo 촉매를 이용한 촉매 수소처리가 안정된 오일 생성물을 생산하는데 효과적이었다. 이 개념은 Battelle에 의해 특허화되었다. 고온(310°C)에서 시도한 결과, 반응기 층은 고체 코크형태의 물질에 의해 막혔다. 보고된 대로, 촉매 수소처리는 점도 있는 검정 오일을 생산하였다. 이 오일의 밀도는 약 1 이고, 25%의 산소를 함유하고 H/C 원자비는 약 1.5이다. Entrained flow 반응기에서 생산된 활엽수 유래 바이오오일에서 얻어진 액체 수율은 약 0.42 L/L이었다. 시험 결과 수소화 촉매의 존재가 매우 중요하였다. 이때 알루미늄 중간체가 존재하고 층이 코크 물질로 막혔다.

저온 (일단계) 수첨공정에 대한 추가 테스트 결과 공간 속도와 수소 유속 모두가 공정 결과에서 부수적인 역할을 수행하였다. 이때 0.44-0.62 정도의 공간 속도 변화는 산소 제거와 수소 소모량 정도에 영향을 미쳤다. 반면 1.6 까지의 높은 공간 속도에서는 결과가 그 수준에 머물렀다. 적절한 공간 속도에서 수소 유속을 0으로 감소한 결과, 산소 제거에 영향을 미치지 않고 수소 incorporation이 현저히 감소하였다. 생성된 오일의 품질은 밀도와 점도의 관점에서 감소하였다. 저온, 수소처리된 생성유의 열적 안정성과 원소 조성 분석 결과, 원래 바이오오일에 비해 수소처리된 오일은 상당히 개질되었음을 알 수 있다. GC-MS에 의한 화학 조성분석 결과, 카르보닐 성분들이 파괴되었고 올레핀 부 사슬이 포화되었음을 알 수 있다. 방향족 에테르 성분이 감소하고 대신 페놀 성분이 상대적으로 증가하였다. 포화된 환형알코올들도 존재하였다. 이는 방향족 고리의 수소화가 일부 진행되었음을 의미한다. 이러한 결과에 기반을 두고, 급속열분해 바이오오일을 액체 연료로 수소처리하는데 있어 이단계 공정이 벤치 규모로 실증되었다 가솔린 범위의 탄화수소들이 저온 수소처리 바이오오일에서 생산되었다. 이때 사용된 촉매는 황화처리된 코발

트 폴리브데늄 촉매이다. 반응 조건은 약 350°C, 13.8 MPa이었다. 가솔린으로의 탄소 전환율은 80wt% 이었고, 이때 액체 생성물 수율은 0.77L/L 이었다. 수소 소모량은 728L/L이고, upflow 반응기에서 공간 속도는 상대적으로 낮은 0.07 vol of oil/(vol of catalyst h)이었다.

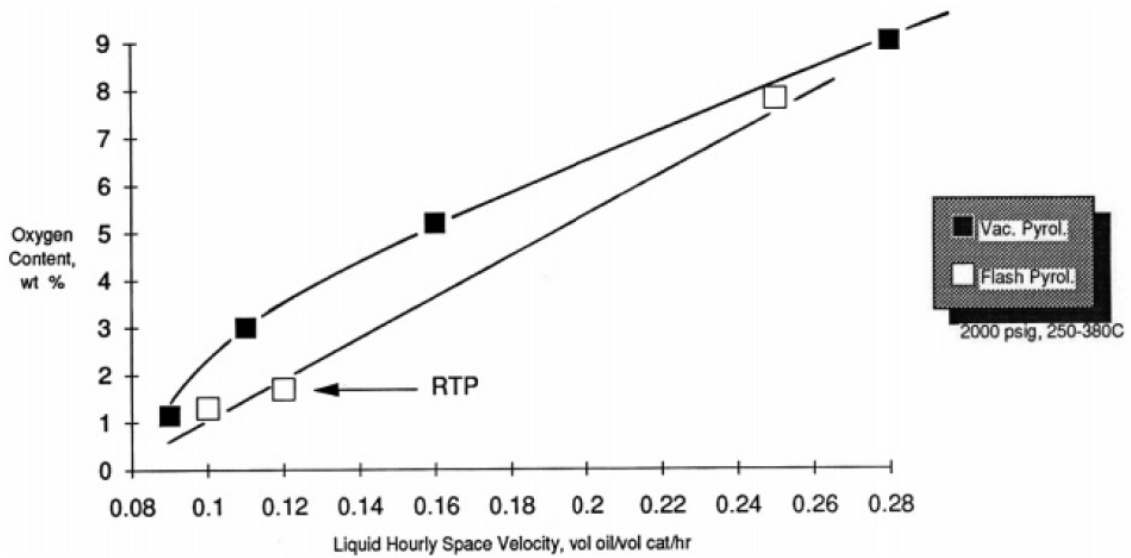
비등온 수소처리: 공정을 단순화하고 액체 생성물 수율을 최대화하기 위하여 2단계가 단일 비등온 촉매층과 결합되었다. 이 개념은 벤치 규모로 시험되었다. 이때 형태는 upflow 배열이었고 몇몇 목재 유래 바이오오일을 원료로 사용하였다. 비등온 공정에서 가스 수율은 더 높았으나 수용액상에서의 탄소 손실은 낮았다. 고온 수소처리 공정을 통한 수용액상의 처리는 수소가스의 추가적인 소모와 함께 수용액상 탄소를 가스로 전환한다.

물질 수지 계산과 원소분석에 기초하여, 이들 결과는 오직 준정상상태를 나타내었다. 계산 결과 정상상태 운전은 투입된 바이오매스에서 얻어진 바이오오일 1리터당 0.50-0.55 L를 생산할 것으로 기대되었다. 생성 오일은 2-3wt% 산소를 함유하고 있고 H/C 비는 1.5, 밀도는 0.92g/mL이었다. 약 오일의 50-60%가 가솔린 범위이고 나머지 약 30%는 디젤 범위, 나머지는 잔사유이다. 가솔린 수율과 잔사 산소 함유량은 공정 공간 속도와 직접적으로 관련되어 있다.

캐나다의 Lava 대학에서 진공 열분해를 이용하여 생성된 바이오오일을 사용하여 보다 광대한 연구를 수행하였다. 첫 번째 테스트는 상대적으로 낮은 온도와 높은 바이오오일 공급속도에서 행해졌다. 높은 산소 함량과 밀도에서 보듯이 결과적으로 생성물의 품질은 낮았다. 두 번째 테스트는 고온과 낮은 유속을 사용하여 생성물의 품질을 최적화시키기 위하여 행해졌다. 수소 소모량은 높았고 가스 생성도 높았다. 생성물의 감소된 밀도로 인하여 부피 수율은 0.4L/L 이상으로 증가하였다. 이 데이터 세트는 정상상태 운전을 의미하지 않는다. 마지막 2개의 데이터 세트들은 장기간의 운전 결과들이다. 이 결과들은 정상상태 운전을 나타낼 수 있다.

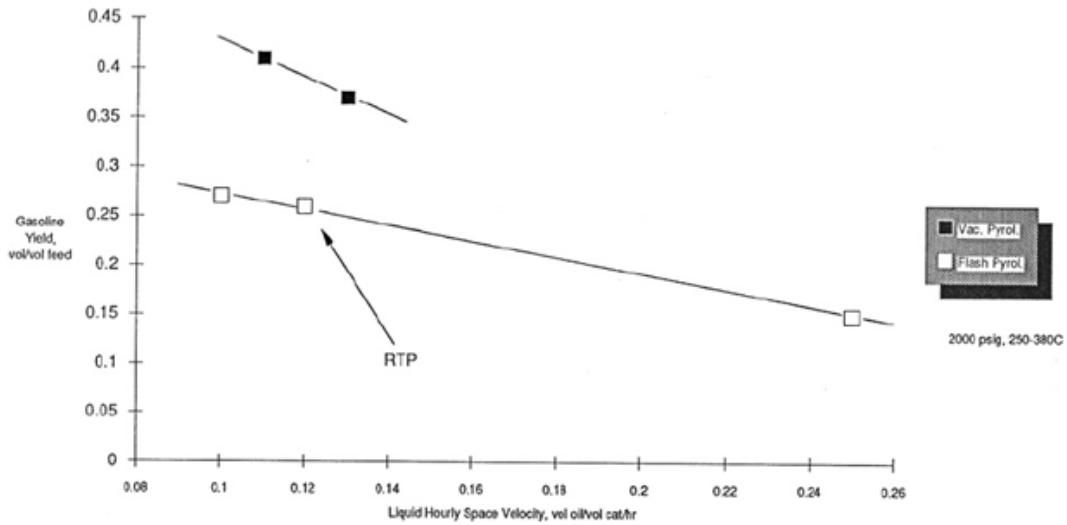
이들 공정 테스트들은 생성물 품질과 공정 속도를 그림으로 나타내어 추가로 비교할 수 있다. 그림 3-27에서 개질된 생성 오일의 산소 함유량이 바이오오일의 비등온 촉매 수소화반응에 대한 공간 속도의 함수로 표시되었다. 이 그림에서 모든 상압 급속열분해 공정에 대한 데이터는 동일한 선상에 표

현되었다. 따라서 모든 원료에서 오일의 구성 물질이 본질적으로 동일하여 모든 테스트에서 같은 형태의 생성물이 생산되었다고 결론 내릴 수 있다.



〈그림 3〉 생성물 산소함유량에 대한 공간속도 영향

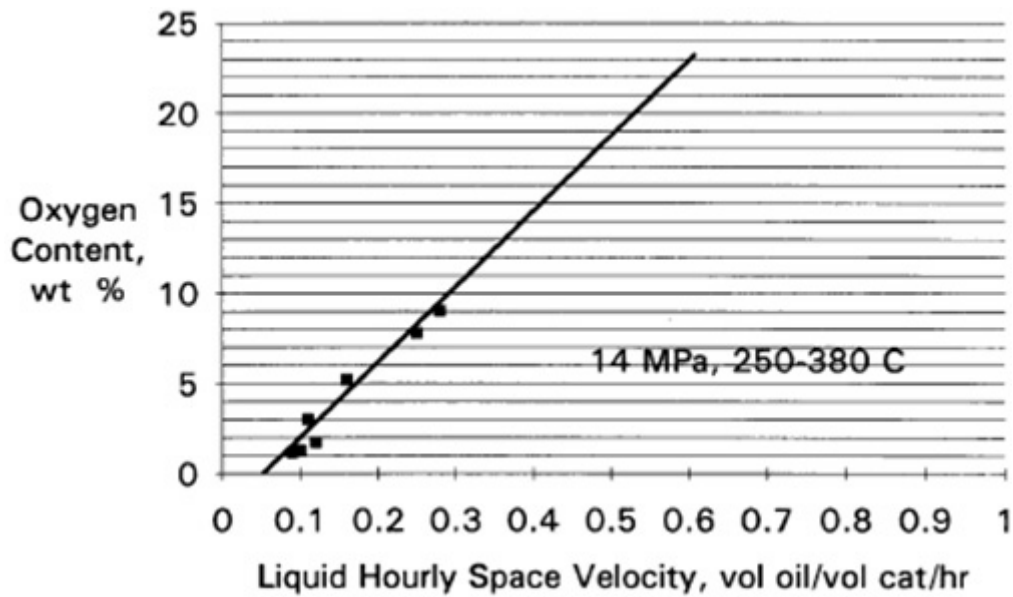
그러나 진공 열분해 오일은 낮은 수준까지 탈산소화하기가 다소 어려웠다. 그림 2에서 가솔린 수율이 공간속도에 대하여 표시되었다. 이 비교에서 상압 급속열분해 개질 생성물들은 다시 같은 선상에 표시되었고, 이는 동일한 수율을 제시한다. 반면 진공 열분해 바이오오일은 수소처리에 의하여 다소 높은 수율의 가솔린 범위 생성물을 제공하였다.



<그림 4> 공간속도와 가솔린 영역 생성물 수율의 관계

낮은 가혹조건하의 수소처리: 위의 결과들을 사용하여 덜 가혹한 공정 조건 하에서의 예측 결과들을 결정하였다. 큰 공간 속도 공정으로 데이터를 외삽한 결과는 수소처리된 바이오매스 급속열분해 오일의 산소 함유량을 예측하는데 사용될 수 있다. 이 데이터를 사용하여, 공간 속도 0.4는 약 15%의 산소 함유량을 갖는 생성물을 생산할 것으로 예측되었다. 이와 같은 오일은 수소 소모량이 적고 가스 생성이 적기 때문에 수율도 높을 것이다. 이 예측은 반응기 내부가 400℃까지의 고온 영역과 13.8MPa의 압력을 연속적으로 유지한다는 것에 기반을 두고 있다.

초기의 낮은 가혹도 수소처리 테스트가 upflow 배열을 사용하여 행해졌다. 생성물이 분리되고 높은 점도의 생성물로 인하여 반응기가 막히는 현상 때문에 upflow 형태는 운전이 힘들다. 15% 미만의 산소함유량을 갖는 생성물은 점도가 낮아 원료 오일에 비해 더 낮다. 15-25%의 산소를 갖는 생성물들은 점도가 수 십내지 수 백배 더 점도가 높아서 반응기 시스템으로부터 회수하기 힘들다. Upflow 형태에서, 낮은 점도의 생성물이 보다 높은 점도, 낮은 휘발도를 갖는 것에서 분리되어 과량의 수소와 함께 반응기를 나가는 경향이 있다. 이런 점에서 촉매층은 반응기를 나가는 고점도 오일로 천천히 채워진다.



<그림 5> 산소함유량과 공정속도의 관계

마지막 8회에서는 ‘급속열분해 이용 바이오일 연료특성과 부산물의 활용기술 동향’ 알아보도록 하겠습니다.

[참고문헌]

1. A. V. Bridgwater, G. V. C Peacocke, “Fast pyrolysis process for biomass,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 4, pp.1-73, 2000.
2. J. Lehot, A. Oasmaa, Y. Solantausta, M. Kyto and D. Chiaramonti, 2013, “Fuel Oil Quality and Combustion of Fast Pyrolysis Bio-oils” , *VTT Technology* 87, Espoo.
3. H. S. Heo, Y. K. Park, C. Ryu, D. J. Suh and Y. W. Suh, Bio-oil production from fast pyrolysis of waste furniture sawdust in a fluidized bed, *Bioresource Technology*, 101, 91 (2010).
4. S. B. Jones, J. E. Holladay, C. Valkenburg, D. J. Stevens, C. W. Walton, C. Kinchin, D. C. Elliot and S. Czernik, 2009, “Production of Gasoline and Diesel from Biomass via Fast Pyrolysis, Hydrotreating and Hydrocracking: A

design case”, PNNL report-18284.

5. 김재곤 외, 바이오매스로부터 급속 열분해를 통한 바이오오일의 생산기술 연구동향, 한국유화학회, 31(3), 453 (2014).