

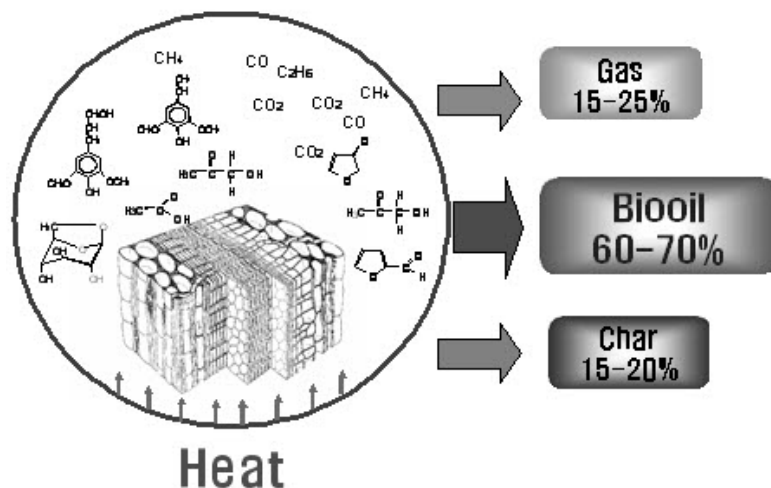
# 급속 열분해 산물의 제조 및 특성

한국석유관리원 석유기술연구소

김재곤 ([jkim@kpetro.or.kr](mailto:jkim@kpetro.or.kr))

## 1. 급속열분해 원리 및 운전

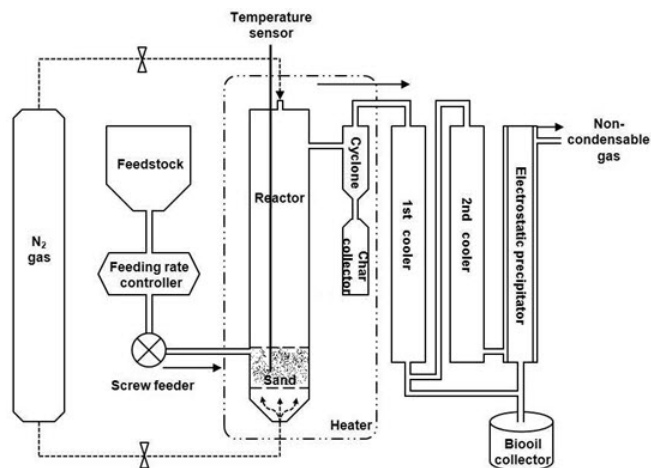
급속열분해(Fast pyrolysis) 공정은 열분해법의 일종으로 바이오매스를 산소가 없는 조건 하에 500°C 내외의 고온에서 짧은 시간 동안 반응시킨 후 연료로 변환하는 공정이다. 급속열분해 과정을 거치며 바이오매스는 분자 간 결합뿐만 아니라 C-C 결합, C-O 결합의 해체 등 화학적 변환이 일어나게 되며 최종적으로 액상 연료인 바이오오일과 고형분인 바이오탄, 가스 형태의 비응축성 가스를 생성한다. 일반 열분해법에 비해 급속열분해 공정은 그림 2-13에 나타난 바와 같이 15-20%의 낮은 탄 수율과 60-70%가량의 높은 액상 연료 수율을 나타낸다. 이 액상 연료 즉, 바이오오일은 추후 발전용, 수송용 연료로 사용될 수 있으며 화학소재 등으로 활용이 가능하기 때문에 바이오오일을 다량 획득할 수 있는 방법인 급속열분해 공정이 크게 주목받고 있다.



〈그림 1〉 바이오매스 급속열분해 공정원리 및 열분해산물의 수율

급속열분해 공정에서 바이오매스가 직접적으로 열분해되는 과정이 일어나는 반응기는 전체 공정의 핵심이라 할 수 있는데 반응기의 종류에 따라 공정 과정 및 열분해 생성물의 특성 또한 변화하게 된다. 예를 들어 고정형 반응기(fixed bed reactor)의 경우 반응기 내에 바이오매스를 전부 넣어준 후 일정한 승온 과정을 거쳐 목표 온도까지 반응시킨 후 생성물을 획득하는 방법으로, 상대적으로 바이오오일의 수율이 낮으며 충전리가 일어나는 것으로 알려져 있다. 이는 기타 분야로의 활용을 위해 상분리가 필요한 경우엔 적합한 방법이지만 그것을 조절하기 어렵다는 점과 반응 중 바이오매스의 열분해 과정을 예측하기 힘들다는 점, 대규모 설계가 어렵다는 점 등 단점이 있다.

반면 유동형 반응기(fluidized bed reactor)의 경우 반응 설정 온도에 도달해 있는 반응기에 시간당 일정량의 질소, 아르곤 기체 등의 gas와 바이오매스를 지속적으로 투입하여 열분해 생성물을 획득하게 되며, 반응 과정 중 열분해 생성물의 거동 관찰이 용이할 뿐만 아니라 바이오매스 입자로의 효과적인 열전달로 인해 안정적인 바이오오일 생산이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 높은 수율의 바이오오일을 생산하기 위해 각종 연구기관에서 유동형 열분해 장치를 다수 사용하고 있으며 이 기기의 모식도를 그림 2에 나타내었다.



〈그림 2〉 유동형 급속열분해 장치 모식도

그림 2를 바탕으로 급속열분해 공정이 진행되는 과정을 살펴보면 먼저 기기 장치 내 산소를 제거하기 위해 질소 가스를 일정 속도로 주입하고 있는 상태에서 시료 투입부와 이어지는 스크류를 통해 반응기로 바이오매스가 투입된다. 이후 반응기 내에 있는 고온 상태인 모래로부터 바이오매스로 열전달이 일어나며 이는 곧 1-2초 내에 가스 형태의 휘발성 유기화합물로 분해되어 사이클론으로 이동한다. 사이클론을 통과하는 가스 중 무거운 물질은 아래로 모여 탄으로 분리되고 이 외 가스는 다시 냉각장치와 전기 집진 장치를 거치며 액상의 형태로 회수된다. 이 때 회수되는 액상 생성물이 바이오오일이며 응축되지 않는 가스는 비응축성 가스로 배출된다. 바이오오일은 그림 2-15에서 보는 바와 같이 점성을 갖는 액체 물질로 상온 보관 시 물성 변화의 우려가 있으며 산성도 또한 높은 특징이 있어 추후 업그레이딩(개질, upgrading) 방법을 적용하여 대체 에너지원으로 활용이 가능하다. 이 때 같이 생성되는 바이오탄은 탄소함량이 높은 고품분으로 토양개량제 및 산업소재 분야 등에 활용될 전망이다.



〈그림 3〉 급속열분해 결과 생성된 바이오오일과 바이오찰

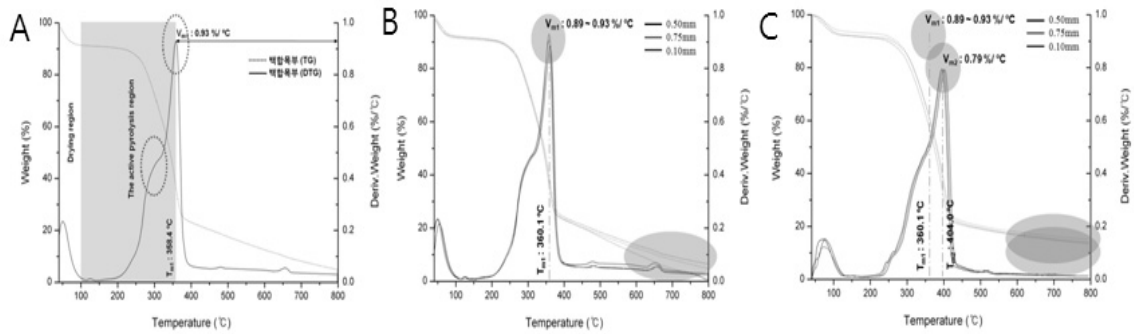
## 2. 바이오매스의 열분해 반응 특성

바이오매스의 급속열분해 공정 중 반응기 내에서 일어나는 열화학적 변환 과정은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 하나는 바이오매스가 저분자 물질화 되는 분해(decomposition)반응이며 다른 하나는 분해된 물질이 재결합하는 재

중합(repolymerization) 반응이다. 분해 반응은 다시 두 단계로 나누어지며 분해 정도에 따라 일차 분해 반응(primary pyrolysis)과 이차 분해 반응(secondary pyrolysis(cracking))으로 구분한다. 앞서 언급했듯이 바이오매스는 반응기 내에서 열을 전달받으며 분해 반응에 의해 휘발성 유기화합물질로 변환되며 이후 액상으로 응축된다. 이 때 일부는 분해 반응이 더 진행되어 바이오오일 내 저분자량 화합물로 존재하거나 CO, CO<sub>2</sub> 등 저분자량의 가스 즉, 비응축성 가스 형태로 배출되게 되는데 이 반응을 이차 분해 반응이라 한다. 반면 반응기내에서 기체 상태로 존재하는 휘발성 유기화합물질이 재중합하거나 응축된 물질 내축합 반응 등이 일어나게 되면 고형분화 되며 탄이 형성된다. 이러한 반응이 일어나는 빈도는 열분해 공정의 운전 조건 및 바이오매스 원료 조건에 따라 달라지며 이는 결과적으로 최종 열분해 산물의 특성에 큰 영향을 끼치는 요인으로 작용한다. 바이오매스의 열분해 반응에 영향을 미치는 인자로는 반응 온도와 반응기 내 체류시간, 시료의 함수율 및 입자 크기 등이 있다. 일반적으로 반응 온도가 낮고 체류 시간이 길수록 열분해 과정에서 재중합 반응이 촉진되어 생성물 중 바이오탄의 형성이 증가한다고 알려져 있다. 또한 반응 온도가 높고 반응 시간이 높은 조건에선 바이오매스의 이차 분해 반응이 촉진되어 비응축성 가스의 형성이 증가하는 것으로 알려져 있다.

한편 바이오매스의 온도별 열분해 거동을 파악하기 위한 방법으로 열중량 분석법(Thermogravimetric analysis, TGA)이 있으며 이를 통해 실제 열분해 과정에서 진행되는 화학적 변환 메커니즘을 추측할 수 있을 뿐만 아니라 열분해 산물의 특성 파악 또한 가능하다. 그림 2-16은 백합나무를 대상으로 40°C에서 800°C까지 열중량 분석을 실시한 결과를 나타낸 그래프이다. 그림 2-16A에서 확인할 수 있듯이 백합나무 바이오매스는 모든 온도 조건에서 꾸준히 분해되는 경향을 나타내었다. 이 때 바이오매스가 최대로 분해되는 시점은 약 358°C였으며 최종 온도에서 잔존하는 약 10%의 중량은 탄으로 분석된다. 바이오매스의 열분해 반응에서 가장 중요한 것은 열전달이라 할 수 있는데 바이오매스로의 열 전달율은 대상의 비표면적에 따라 변동 가능하므로 열분해 공정에 투입되는 바이오매스 시료의 입자크기를 조절함으로써 최적 조건을 찾을 수 있다. 따라서 시료의 입자크기를 달리하여 열중량 분석을 실

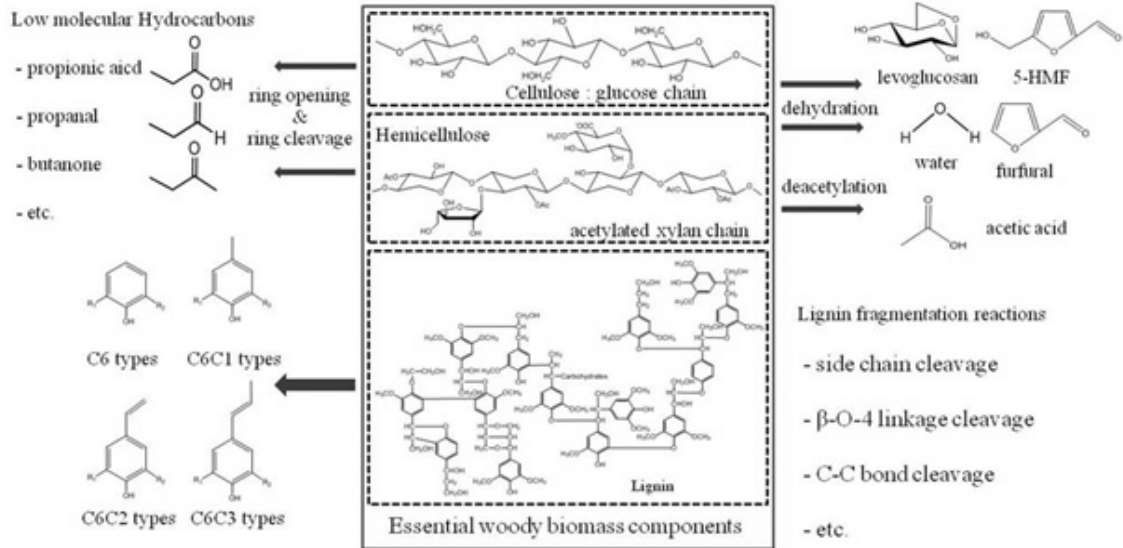
시하였으나 그림 4(b)를 통해 알 수 있듯이 각각의 열분해 특성이 뚜렷하게 구분되지 않았다. 이에 높은 승온 속도로 진행되는 급속열분해 공정을 고려하여 승온 속도를 높인 후 다시 열중량 분석을 실시하였다 (그림 4).



<그림 4> 합나무 바이오매스의 열중량 분석(A) 및 바이오 매스 입자 크기에 따른 열중량 분석(B:10°C/min, C:100°C/min)

하지만 역시 최대 분해 온도의 미세한 차이 외에는 별다른 차이를 나타내지 않았다. 따라서 보통 급속열분해 공정에 사용되는 입자크기이자 실제 이 분석에 쓰인 0.5mm-1.0mm 범위의 입자크기 내에선 열분해 반응 시 서로 큰 차이가 없는 것으로 판단하였다. 또한 바이오매스의 열분해 반응이 온도별로 차이를 나타내며 진행되는 것을 볼 수 있는데 이는 바이오매스를 구성하는 성분별로 열분해 반응 특성이 서로 다르기 때문이다. 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌은 각각 다른 온도 범위 내에서 분해 반응이 일어나며 화학 구조에 따라 열분해 기작 또한 다소 차이를 나타낸다. 먼저 셀룰로오스의 경우 1차적으로 300°C부터 셀룰로오스 내 글리코시드 결합이 끊기며 레보글루코산(levoglucosan)등 셀룰로오스 단량체가 생성되고 2차적으로 350°C에 다다르면 올리고머의 분해로 인해 저분자량 휘발성 유기화합물이 생성된다. 헤미셀룰로오스는 이보다 약간 낮은 온도인 200°C부터 열분해가 시작되며 셀룰로오스와 마찬가지로 온도 구간에 따라 두 가지의 반응이 단계별로 나타난다. 250°C 부근에선 헤미셀룰로오스의 열분해 생성물 간 재결합을 통한 고분자화가 진행되어 다당류 화합물을 만들어내며 350°C 부근에선 전반적인 분해 반응이 진행되어 휘발성 무수당(anhydrosugar)과 자일로스(xylose)와 같은

단당류가 생성된다.



〈그림 5〉 바이오매스 주요 구성성분의 열분해 반응 과정 및 생성물

마지막으로 리그닌의 경우 200℃-600℃의 넓은 온도범위 내에서 열분해 반응이 일어나며 높은 온도 조건일수록 더 많은 양의 리그닌 고분자가 분해된다. 그림 2-17은 각각의 구성 성분이 열분해되는 반응 과정과 각 생성물의 화학 구조를 나타낸 모식도이다.

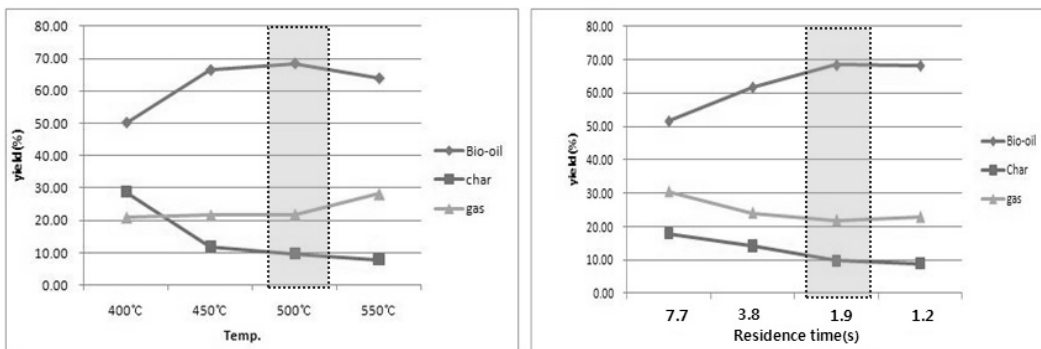
### 3. 바이오오일

바이오매스의 급속열분해를 통해 얻어지는 액상 연료인 바이오오일은 점성을 가진 짙은 갈색의 액체이며 주성분은 바이오매스로부터 유래한 다양한 탄화수소화합물이고 일부 수분을 포함하고 있다. 이러한 바이오오일은 추후 보일러·터빈 등 발전용 연료뿐만 아니라 수송용 연료와 화학소재 등으로 활용이 가능한 잠재력을 갖고 있다. 따라서 공정 후 최종 생성물의 수율을 최적화하는 것은 공정의 효율성과 바이오오일의 활용 가능성을 높이는데 중요한 역할을 한다. 더불어 바이오오일의 물리적·화학적 특성을 분석함으로써 그 연료적 특성을 평가하고 소재화 활용 방안을 구축할 뿐만 아니라 더

나아가 화석연료를 대체할 에너지원으로써의 가치 및 발전 가능성을 가늠할 수 있을 것이다.

○ 수율

바이오오일의 수율에 영향을 미치는 요인으로는 크게 공정적 요인과 원료적 요인으로 나눌 수 있다. 공정적 요인은 반응 온도, 반응기 내 체류 시간이 있으며 원료적 요인은 바이오매스 내 함수율, 입자 크기, 바이오매스 내 화학 조성 등이 있다. 그림 6은 반응 온도 및 반응기 내 체류 시간이 바이오오일의 수율에 미치는 영향에 대하여 분석한 자료이다. 일반적인 셀룰로오스계 바이오매스로부터 생산된 바이오오일은 480 - 520℃ 범위 내에서 가장 높은 수율을 나타낸다고 알려져 있다. 그림 6에서 보듯이 반응온도가 500℃ 일 때 약 70%의 최고 수율을 얻었으며 이를 기점으로 온도 조건이 하강 혹은 상승할수록 낮은 수율을 나타내었다. 이는 앞서 말한 바와 같이 온도가 낮은 경우 바이오매스 분해 산물의 재증합 반응이 촉진되어 탄의 형성이 증가하고 온도가 높은 경우 2차 분해 반응이 진행되어 가스의 수율만이 증가하는 것으로 분석된다. 한편 체류 시간에 따른 수율 변화의 경우 체류 시간이 약 2초인 경우 가장 높은 수율을 나타냈으며 1 - 2초간에는 큰 차이를 나타내지 않음을 알 수 있다. 하지만 체류 시간이 그 이상 증가할수록 바이오오일의 수율은 급격히 줄어들었으며 이 또한 마찬가지로 반응기 내 긴 체류 시간으로 인해 바이오매스 열분해 산물들의 2차 분해 반응이 진행되었음을 확인할 수 있다.



<그림 6> 급속열분해 과정을 통한 바이오매스의 열화학적 변환

한편 바이오매스의 종류에 따라 각각의 내부 화학조성이 다르므로 이러한 차이는 바이오오일 즉, 휘발성 유기화합물로 전환이 가능한 유기물질의 비율 차이로 이어지며 결국 최종적으로 생성되는 바이오오일의 수율에도 영향을 미친다. 특히 시료 내 함수율이 높은 경우, 전건 상태의 시료에 비해 수분이 차지하는 함량에 해당하는 만큼 유기물질의 비율이 낮아지므로 자연스레 열분해 생성물인 바이오오일의 수율이 낮아지게 된다.

또한 바이오매스 시료의 입자크기는 열분해 반응 시 열전달 과정에 관여하게 되는데, 입자크기가 작을수록 열전달을 받는 비표면적이 높아지며 이를 통해 좀 더 많은 양의 열전달이 빠르게 일어나게 된다. 따라서 다양한 반응기 종류 각각에 대응하는 적합한 크기의 시료를 사용하는 것은 바이오매스로의 열전달이 효율적으로 진행되게 함으로써 열분해를 통한 바이오오일의 수율을 최적화하는데 도움을 준다.

○ 물리·화학적 조성

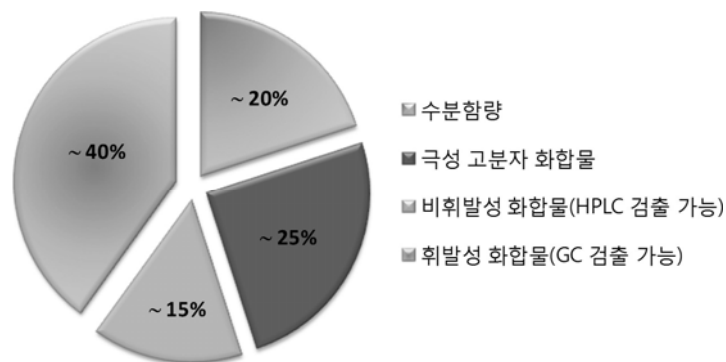
바이오오일을 구성하고 있는 물리 화학적 성분은 바이오오일의 특성을 파악하여 이를 바탕으로 추후 최적의 조건 하에 에너지원으로써의 바이오오일을 활용하는데 도움을 주는 지표가 된다.

<표 1> 바이오오일의 특성

Physical Properties	Typical value
Water content (wt%)	25
pH	2.5
Specific gravity	1.20
Elemental analysis (wt %)	
Carbon	56
Hydrogen	6
Oxygen)	38
Nitrogen	0-0.1
Higher heating value (MJ/kg)	14
Viscosity (cp, 40° C, 25% water)	40-100
Solid (% , char)	0.1
Vacuum distillation residue(%)	up to 50



표 1은 일반적인 바이오오일의 물리·화학적 조성을 나타낸 자료이다. 원소 분석 결과 탄소 함량이 56wt%, 수소 함량이 6wt%, 산소 함량이 38wt%로 나타났다. 이에 따른 낮은 H:C 비율과 높은 산소 함량으로 인해 오일의 성질이 불안정하고 다른 탄소화합물 간 혼합성이 떨어지기 때문에 유기화합물로의 활용이 어려운 특성이 있다. 한편 반응기를 통과하며 사이클론에서 분리되지 않은 탄이 바이오오일 내에 존재하는 경우가 있는데 이 양은 약 0.1% 정도이다. 오일 내 탄이 존재할 경우 오일이 노화되며 침전으로 인해 타 장치에 여과 및 투입 시 불편함을 초래할 수 있다. 바이오오일은 약 25wt%의 수분을 함유하고 있으며 이는 주로 시료 내 존재하던 수분으로부터 유래되며 일부는 열분해 과정 시 셀룰로오스와 리그닌의 탈수 반응에 의해 생성된다. 이러한 수분 함량은 바이오오일의 발열량을 낮추고 밀도와 점도를 낮추는 등 바이오오일의 연료적 특성에 영향을 미친다. 이 때 그림 2-19에서 볼 수 있듯이 수분 외 바이오오일 내 존재하는 유기화합물을 크게 세 그룹으로 나눌 수 있다. 가장 많은 비율을 차지하는 것은 휘발성 화합물로 유기산, 케톤류, 무수당, 페놀류 등 GC-MS 분석을 통해 화합물의 종류 및 양에 대한 정성·정량 분석이 가능하다. 25%를 차지하는 극성 고분자 화합물의 경우 물을 이용한 추출법을 통해 얻어지며 열분해 리그닌(Pyrolytic lignin)이라 불린다. 마지막으로 비휘발성 화합물은 전체 오일 중 약15%를 차지하며 HPLC를 통해 검출된다.



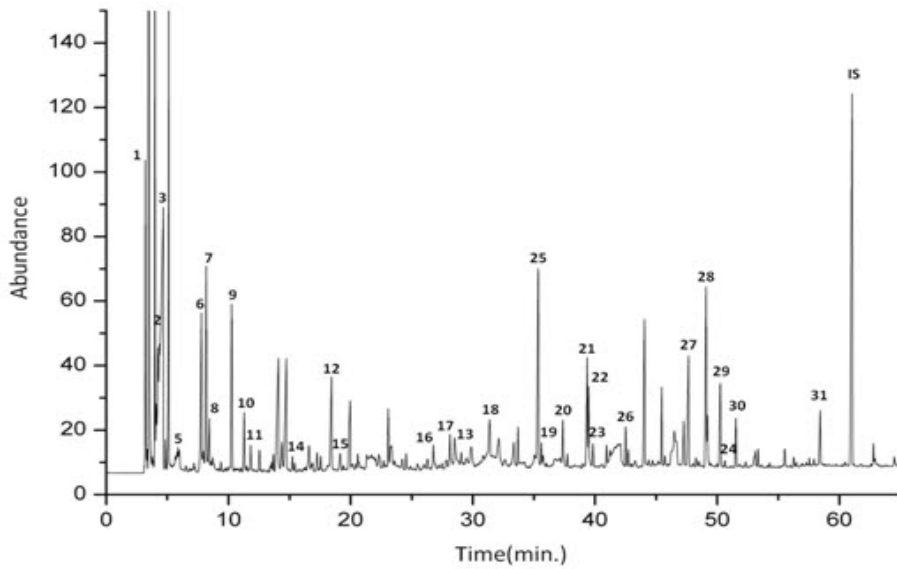
<그림 7> 바이오오일을 구성하는 주요 화합물의 분포

○ 물리적 특성

앞서 제시한 표 1에서 볼 수 있듯이 바이오오일의 점도는 40°C 조건에서 40-100cp 정도로 같은 조건에서 물의 점도(0.6560cp)와 비교하였을 때 매우 높은 것을 알 수 있다. 이러한 높은 점도는 바이오오일을 구성하는 화학물질에 의한 것으로, 오일의 저장 기간에 따라 화학물질 간 축합반응과 같은 노화 현상이 진행된다면 점도가 점차 증가하는 것으로 알려져 있다. 또한 점도는 주변 온도에 민감한 특성이 있으므로 오일의 상용화 시 기기 내 유동성 문제, 온도 조절 문제를 일으킬 수 있다. 바이오오일의 비중은 물보다 약간 높은 1.2이며 이 또한 바이오오일 내 존재하는 화학물질에 기인한다.

○ 화학적 특성

바이오오일의 연료 소재분야 활용 가능성을 가장 잘 나타내주는 특성은 화학적 특성이라 할 수 있다. 먼저 연료로서의 바이오오일을 평가하기 위한 발열량을 살펴보면 17MJ/kg 정도의 수준임을 알 수 있다. 이는 화석연료인 석탄의 발열량(25MJ/kg)과 석유의 발열량(40MJ/kg)에 못 미치는 수준으로, 일반적으로 물질 내 탄소함량이 높을수록 발열량 또한 높아지게 되지만 바이오오일의 경우 높은 산소함량으로 인해 O/C비율이 높은 편이다. 따라서 발열량은 일정 수준에 머물러있는 정도이며 이를 개선하기 위하여 다양한 개질 방법이 시도되고 있다. 바이오오일 내 존재하는 화학 물질의 종류 및 분포를 확인하기 위하여 GC-MS(Gas Chromatography & Mass Spectrometry) 분석법을 이용하여 얻은 결과 그래프를 그림 8에 나타내었다.



〈그림 8〉 바이오오일의 GC/MS 분석에 의한 주요 화합물 동정

바이오오일 내 주요 화학 물질은 약 30종류로 분석되었으며 이 화학 물질의 종류는 크게 탄수화물 유래 물질과 리그닌 유래 물질로 분류할 수 있다. 탄수화물 유래물질로는 1-Propanol, 2-Butanone, 2(5H)-Furanone과 Levoglucosan 같은 산 계열 유기화합물, 케톤류와 셀룰로오스 유래 단량체 등이 있다. 리그닌 유래물질의 경우 syringol, methoxy eugenol과 같은 C6형의 페놀류, Vanillin, 2-methoxy-p-cresol 등의 C1C6형, acetosyringone과 같은 C2C6형과 synapylaldehyde 등의 C3C6형 등이 존재한다. 이러한 다양한 화학 물질 중 acetic acid와 propionic acid와 같은 산 유기화합물은 오일의 산성도가 pH 2.5정도로 높은 주요 요인으로 작용한다. 이 특징은 추후 바이오오일을 연료로써 활용하는데 있어 사용 기기의 부식을 초래하는 등 상용화에 어려움을 겪게 하므로 개질 방법을 통하여 이를 보완해야할 필요가 있다.

○ 열분해 리그닌

바이오오일에 다량의 물을 혼합한 후 고형분 상태로 얻어지는 올리고머를 열분해 리그닌이라 한다. 전체 바이오오일의 약 25% 가량을 차지하고 있는 열분해 리그닌엔 카르보닐 그룹과 같이 산소를 포함하는 작용기가 많이 존재하고 있기 때문에 오일의 열적 안정성 및 노화에 영향을 미친다. 또한 오

일 내 다른 구성성분에 비하여 완전 연소되기까지 걸리는 시간이 길기 때문에 보일러 및 엔진 등 분야에 바이오오일을 이용할 때 열분해 리그닌의 불완전 연소로 인한 잔여물 생성과 같은 문제점을 일으키기도 한다. 한편 열분해 리그닌은 페놀 단위체로 이루어진 특성으로 인해 페놀성 수지와 같은 접착제나 방향성 화학소재로 이용될 수 있는 가능성이 있다. 따라서 바이오오일의 연료적 가치를 높이고 그 구성성분에 따른 효율적인 활용을 위하여 열분해 리그닌에 대한 정확한 이해가 필요한 실정이지만 리그닌의 구조적 난해성으로 인해 그 접근이 쉽지만은 않기 때문에 이에 대한 다양한 연구가 활발히 진행 중에 있다.

#### 4. 바이오촉

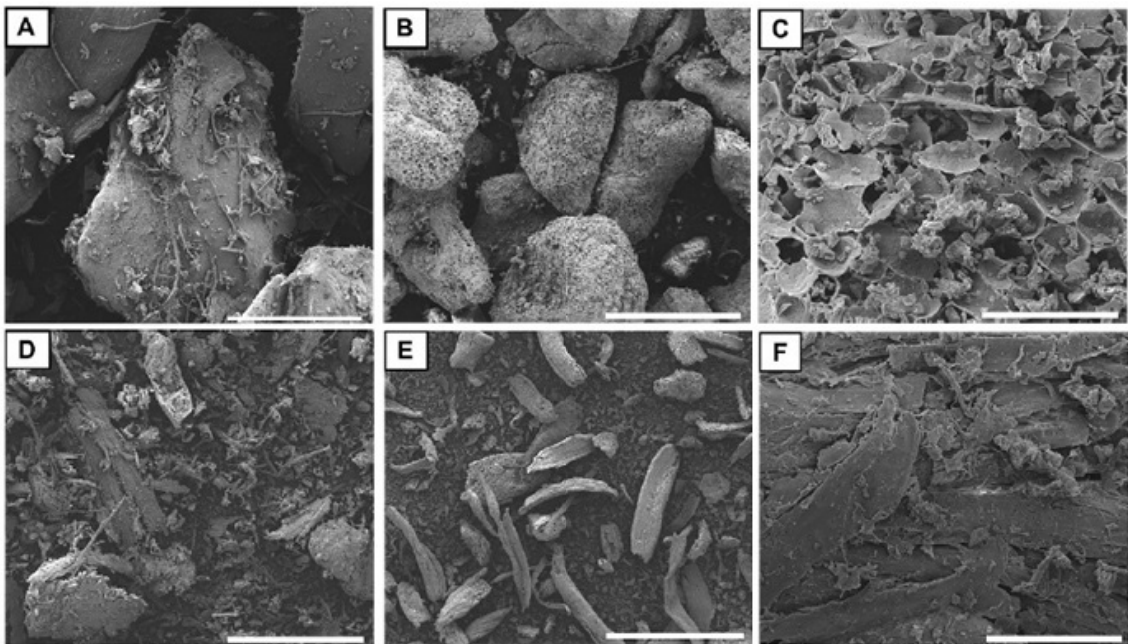
##### ○ 수율

열분해 과정에서 생성되는 바이오탄은 열분해 온도, 승온속도, 열분해 시료의 입자 크기 등 열분해 조건에 따라 수율이 변화한다. 바이오오일의 수율은 열분해 중 체류시간이 길어질수록 감소하지만, Özçimen & Karaosmanoğlu, Uzun et al.에 의하면 바이오탄은 열분해 체류시간에 관계없이 비슷한 수율을 나타내었다[26,32]. 하지만 반응 온도가 증가할 경우 바이오탄의 수율은 점차 감소하였으며 승온속도가 500°C/min 이하일 때는 수율에 영향을 미치지 않았지만 500°C/min 이상 급격히 승온할 때 바이오탄의 수율이 급격하게 감소하였다[32].

##### ○ 물리적 특성

일반적으로 바이오탄은 토양의 성질을 개선하는 데 사용 되므로 바이오탄의 물리적 특성은 직, 간접적으로 토양 시스템에 영향을 주게 된다. 바이오탄의 물리적 성질은 바이오매스의 종류 뿐 아니라 바이오탄이 생성되는 열분해 조건에 따라서도 변화한다. 하지만 바이오매스의 구조가 바이오탄 구조

의 바탕이 되므로 바이오탄의 물리적, 구조적 특성에 주는 영향을 판단하기에는 어려움이 있다. 이러한 물리적 특성을 알아보기 위해 주사전자현미경(Scanning electron microscopy, SEM)을 이용하여 바이오탄의 육안적 구조를 확인한다. SEM으로 확인 가능한 대공극(macropore)은 무기성분 및 탄소골격 등 바이오매스의 구조에 영향을 많이 받으며 수분 함유 및 토양의 흡착 정도에 중요한 영향을 끼친다. 이외에 미세공극(micropore)에 영향을 받는 바이오탄의 표면적은 가스 흡착에 의해 측정된다.



<그림 9> 바이오촉의 SEM사진

(corn cobs -A bar=1mm, corn cobs biochar- B bar=1mm, C bar=100µm,  
corn stover -D bar=1mm, corn stover biochar- E bar=1mm, F  
bar=100µm(Mullen et al., 2010)

미세공극은 열분해가 일어나는 동안 휘발성 성분으로 손실되는 유기물질에 의한 불규칙적인 수축 및 부피감소에 따라 생성되기 때문에 열분해 조건에 따라 변하게 된다. Day에 의하면 옥수수의 열분해과정 중 열분해 온도가 400°C에서 900°C까지 증가함에 따라 바이오탄의 표면적 역시 120m<sup>2</sup>/g에서 460m<sup>2</sup>/g로 증가하였다[5]. 하지만 생성된 바이오탄의 밀도는 대나무 바이오

탄이 0.17g/cm<sup>3</sup> , 아카시아나무 수피의 바이오탄은 0.37g/cm<sup>3</sup> 으로 매우 낮았다.

<표 2> 분해 방법, 바이오매스 종류 별 바이오탄 수율

	Pyrolysis mode	Yield(%)	Condition
	Fast	12	500°C, 1s
	Moderate	20	500°C, 10-20s
	Slow	35	500°C, 5-30min
	Gasification	10	Over 750°C, 10-20s
	Biomass	Yield(%)	Condition
1	Yellow poplar	28.9-7.9	400-550°C, 1.2s
2	Yellow poplar	8.9-17.9	500°C, 1.2-7.7s
3	Corn cobs	18.9	500°C
4	Corn stover	17.0	500°C
5	Laurel	39.5-26.5	10°C/min, 350-600°C 0.85>Dp>0.42mm
6	Rapeseed cake	27.4	7°C/min, 500°C, N2flow:50~300cm <sup>-3</sup> /min
7	Tea waste	43.4-21.1	300°C/min, 400-600°C, N2flow:200cm <sup>-3</sup> /min
8	Tea waste	ca. 35	300°C/min, 500°C, N2flow:100-800cm <sup>-3</sup> /min
9	Tea waste	34.3-27.1	5-700°C/min, 500°C, N2flow:200cm <sup>-3</sup> /min
10	Papermill waste	32	5-10°C/min, 550°C, 2mm particle size

○ 화학적 특성

바이오매스의 종류에 따라 차이가 있지만 바이오탄의 pH는 7~8정도로 약알칼리에 가까운 중성을 띤다. 탄소함량도 높아 산성 토양의 중화제로 사용하거나 토양 개량제로 사용 가능하다. 바이오탄 표면의 산화로 인해 carboxylate 작용기가 생성되는데, 이러한 작용기들은 영양분을 교환하는 작용을 하며, 낮은 온도에서 생성된 탄에 더 많이 포함되어있다. 또한 바이오탄은 황과 질소의 함량은 매우 낮지만 바이오매스의 종류에 따라 77.6%(corn

cobs), 82.8%(oakwood)로 많은 양의 탄소를 포함하여 고위발열량이 높다. 또한 H/C 비율은 400°C와 700°C에서 각각 0.78과 0.28, O/C 비율은 0.40와 0.28로 높은 온도에서 생성된 바이오탄이 더 탄소화된 것을 알 수 있다. 이는 FT-IR 스펙트럼에서 OH, C=O와 같은 작용기 피크가 감소하는 것에서도 확인할 수 있다. 또한 바이오탄은 열분해 과정에서 휘발성분이 제거되기 때문에 원료가 되는 바이오매스에 비해 고정탄소와 회분의 함량이 높고 휘발성분은 적다.

[참고문헌]

1. Maniatis, Kyriakos. 2011. EU Perspectives on Thermochemical Biomass Conversion. tcbiomass 2011. 28~30 September, Chicago, IL, USA.
2. Oak Ridge National Laboratory. 2005. Biomass as Feedstock for a Bioenergy and Bioproducts Industry : The Technical Feasibility of a Billion-Ton Annual Supply. DOE and USDA. USA.
3. 국립산림과학원, 바이오매스의 열화학적 변환공정을 이용한 바이오오일의 생산과 이용, (2012).