

배양 조건의 변화가 미생물에 의한 석탄의 액화에 미치는 영향

이 현 호 · 신 현 재 · 양 지 원
한국과학기술원 화학공학과 및 생물공정연구센터

Effects of Culture Condition on Solubilization of Coal by Microorganisms

Hyun-Ho Lee, Hyun-Jae Shin, and Ji-Won Yang[†]

Department of Chemical Engineering and BioProcess Engineering Research Center,
Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea

ABSTRACT

Biosolubilization of an Australian lignite was investigated by using *Streptomyces viridosporus* and *Poria cocos*. In order to solubilize coals effectively they were pretreated by nitric acid both in surface and liquid cultures. The optimum growth pH was 7.5 for *S. viridosporus* and 4.5 for *P. cocos*. The effects of various carbon, nitrogen and metal sources on overall solubilization were also studied. Solubility increased with the addition of urea for *S. viridosporus*, and peptone and tryptone for *P. cocos*. However carbon and metal sources had little or negative effects on solubilization. Maximum amount of coal solubilized was 85 % (w/w) in a batch fermentation culture. Extracellular materials produced by microorganism were found to be responsible for the coal solubilization. Approximately 70 to 80 % of coal solubilization was determined to be the result of non-enzymatic reactions, and the rest to be the result of enzymatic reactions. Characteristics of the solubilized coal were compared with those of original coal and pretreated coal by the approximate and ultimate composition analysis, and IR-spectrum analysis. The spectroscopic results showed that the mechanism of coal solubilization was caused by continuous oxidation.

서 론

미생물을 이용하여 석탄을 액화시키는 연구는 리그닌을 분해하는 곰팡이류 및 박테리아가 리그닌에서 유래된 석탄도 분해할 것이라는 생각에서 처음 시도되었으며, 이는 주로 저급 석탄인 lignite과 leonardite를 대상으로 연구되었다. 미생물에 의한

석탄 액화 현상은 1982년 Cohen과 Gabriele에 의해 정식으로 보고되었고(1), 그 후 여러 연구자들에 의하여 여러 종류의 박테리아와 곰팡이류를 이용한 석탄액화 연구가 진행되었다(1-3). 최근의 연구에 의하면 저급탄 뿐만 아니라 탄도가 높은 역청탄도 적절한 전처리 과정을 거치면 미생물에 의하여 액화될 수 있음이 보고되었다(4). 석탄의 높은 산소 함유량은 미생물이 석탄을 공격하기 쉽게 만들어 석탄의 액화능을 좌우하는 중요한 요소로 작용하는데,

[†] Corresponding Author

이는 갈탄에 비하여 상대적으로 높은 산소 함유량을 가지는 leonardite가 높은 액화능을 갖는 것에 기인한다. 이에 따라 미생물을 석탄에 집중시키기 전에 석탄을 전처리 하여 석탄의 산소 함유량을 높임으로서 액화능을 높이려는 연구가 진행되어 왔다(3-5). 그러나, 일주일 이상 걸리는 액화 기간과 낮은 액화능이 문제점으로 나타나고 있다(5). 석탄 액화의 반응기작은 아직까지 확실히 밝혀지지 않았으나, 갈탄의 다공성 구조나 거대분자 구조의 약한 결합에 붙어 있는 알칼리성의 수용성 유기화합물이 미생물에 의해 반응에 참여함으로써 액화되는 것으로 추측된다. 또한 석탄의 액화는 미생물이 세포벽 바깥으로 분비하는 어떤 물질에 의해 일어나는 것으로 추측되고 있다. 액화 석탄은 고체 상태의 석탄에 비하여 연료로서 높은 가치를 가지며, 황, 질소, 회분 성분의 제거를 통하여 깨끗한 연료로 생산될 수 있다. 이러한 석탄의 가용화 기술은 다른 분야로의 파급효과 또한 매우 크며, 탈황 공정이나 질소 회수 공정에서의 응용이 기대되며, 석탄으로부터 메탄을 생성하거나 회분성분을 제거하는 공정에도 적절한 미생물을 사용하면 실용화 가능성이 높은 것으로 사료된다.

본 논문에서는 액화 조건의 최적화를 통하여, 미생물을 이용한 석탄의 액화 연구분야에서 문제로 지적되고 있는 액화능 향상과 액화 기간의 단축을 위한 최적액화조건 확립에 관한 연구결과가 제시되었다. 또한 미생물에 의한 석탄 액화 기작의 일부를 다양한 분석 기법에 의하여 규명하였다.

재료 및 방법

시료석탄

실험에 사용된 석탄은 호주산 갈탄을 사용하였다. 석탄은 hammer crusher로 일차 분쇄 후 볼밀로 분쇄하여 표준 sieve를 사용하여 20(0.84mm)/24(0.77mm)mesh 잔류분을 사용하였다.

사용균주 및 배양조건

Poria cocos KCTC 6074는 생명공학연구소에서 분양 받아서 PDA(potato dextrose agar) 사면 배지에서 배양하여 액상의 PD(potato dextrose) 배지에서 호기성 조건으로 배양하였다. *Streptomyces viridosporus* ATCC 39115는 YMEA(yeast malt extract agar)에 도달하여 액상의 yeast malt extract 배지에서 호기성 조건으로 배양하였다. *P.*

*cocos*와 *S. viridosporus*는 각각 30°C, 초기 pH 4.5와 30°C 초기 pH 7.5가 최적 조건임을 실험을 통하여 결정하였다(결과는 보이지 않았음). 회분식 교반기에서는 *S. viridosporus*는 30°C와 1~2 vvm에서 pH를 7-8로 조업하였으며, *P. cocos*는 30°C와 1~2 vvm에서 pH를 4.3-4.7로 조업하였다.

석탄의 전처리

미생물에 의한 석탄의 액화능을 높이기 위한 석탄의 전처리제로 8M 질산과 30% 과산화수소수를 사용하였다(6). 석탄들은 각각 3배의 전처리 용액과 혼합하여 후드내에서 12시간 동안 방치하였고, 전처리 효과를 높이기 위하여 3시간 간격으로 10분씩 자석 교반기를 사용하여 혼합시켜 주었다. 전처리된 석탄은 석탄 세척용액이 pH 6이 될때까지 세척하였다. 세척된 석탄은 여과를 통하여 고체 석탄을 분리한 후 동결 건조기에서 수분을 최대한 제거하였다. 이를 전처리 석탄이라 하였다.

석탄액화

미생물 배양조건에서 선정된 최적 성장 조건을 기초로 하여 각각의 석탄액화 조건 결정 및 액화능을 비교하였다. 먼저 고체배지에서는 균주가 충분히 자란 후 전처리된 석탄을 배지 위에 분산한 후 석탄의 액화를 관찰하였다. 표면 배양에서는 petri-dish당 0.5 g을 뿌렸다. 또한 세포외 분비반응(extracellular reaction) 여부를 확인하기 위하여 표면 배양에서 다 자란 미생물 위에 0.45 μm의 세공 크기를 가지는 여과지를 깔아서 미생물이 있는 부분과 여과지 위에 각각 석탄을 뿌려서 양쪽의 액화 여부를 조사하였다. 표면 배양에서의 석탄 액화능은 액화가 끝난 뒤에 남아 있는 석탄을 모아서, 건조후에 무게를 측정하여 초기 주입 무게당 남아 있는 무게를 비교하여 액화능을 측정하였다. 여기에 나타난 액화능은 다음의 식에 의하여 구하여졌다.

$$\text{액화능}(\% \text{ (w/w)}) = \frac{(\text{주입된 석탄의 초기무게} - \text{액화후에 남은 석탄의 무게})}{(\text{주입된 석탄의 초기 무게})} \times 100$$

액체 배지에는 균주의 성장에 대한 석탄의 최적 주입시기를 조사하기 위하여 미생물을 접종한 뒤 각각 시기를 달리하면서 석탄을 주입하여 액화능을 조사하였다. 액체 배지에서 접종한 석탄의 양은 1% (w/v)으로 하였다. 액화능 향상을 위한 실험에서는 미생물에 의한 석탄의 액화능에 영향을 미치는 첨가

물질에 대한 실험을 진행하였다. 여기서는 미생물의 성장 배지에 탄소원(1 % (w/w)) 6종과 질소원(0.5 % (w/w)) 6종 그리고 금속이온(5mmol dm⁻³) 6종을 대상으로 하였다. 회분식 고반기에서는 통기량의 변화 및 석탄 주입량의 증가에 따른 액화능을 각각 조사하였다.

효소에 의한 석탄의 액화 가능성

미생물에 의한 석탄의 액화반응이 효소에 의한 반응인가를 조사하기 위하여 *S. viridosporus*는 접종후 9일간, *P. cocos*는 접종후 3일간 배양하여 탄소원이 고갈된 상태에서 배양액을 원심분리(15,000 rpm, 15 min) 하여 상층액을 분리한 다음 이를 각각 100 mL씩 나누어 후 1개는 기준으로 잡고, 1개는 오토클레이브에 넣어서 열처리를 하고, 나머지 1개는 protease로 처리하였다. 그후에 3개의 플라스크에 석탄을 각각 1 g씩 넣어서 액화능을 조사하였다.

분석방법

액상 배지에서 사용된 액화능의 측정법은 액화 석탄이 산성 영역에서 침전되며, 염기성 영역에서는 용해되는 성질을 이용한 acid precipitation법(7)을 사용하였으며, 액화능은 UV-spectrophotometer (Hewlett-Packard, HP 8452A Diode Array Spectro-photometer)를 이용하여 450nm에서 측정하였다. 배지속의 탄소원 농도는 Biochemistry analyzer(YSI 2700 selected, USA)를 사용하여 측정하였다. 시료 석탄과 석탄 가용화 액의 화학적 구조의 변화는 FTIR(BOMEM, Michaelson series)를 이용하였다. 석탄과 전처리 석탄 그리고 액화 석탄의 공업분석은 PROXIMETER ANALYZER(TGA-501, LECO Co.)로 원소분석 및 발열량 측정은 ELEMENTAL ANALYZER(CHN-1000, LECO Co.)로 하였으며, 황성분 분석은 SULFUR MODEL(SC-432DR, LECO Co.)로 분석하였다.

결과 및 고찰

석탄액화 균주의 특성

박테리아류인 *S. viridosporus*를 YMEA 배지에 접종하면 배지의 표면은 하얀색을 띠다가 시간이 지남에 따라 초록색으로 변해가며 며칠후에는 완전한 초록색으로 변하였다. 액상배지(YM broth)에서는 성장 속도가 배양기의 회전속도에는 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 곰팡이류 계통인 *P. cocos*는 PDA 사면배지에서 배지 표면을 흰색으로 덮었으며, 액상배지(PD broth)에서는 배양기의 회전속도가 250 rpm 이하에서는 mycelium 형태를 보였고, 300 rpm 이상에서는 coccus 형태를 나타내었다. 본 실험에서는 coccus 형태인 300 rpm 이상에서 액화 실험을 진행하였다.

표면 배양에서의 석탄 액화

표면 배양에서의 액화능에 대한 결과는 Table 1에 나타나있다. *S. viridosporus*는 질산으로 처리한 석탄에 대하여 높은 액화능과 짧은 액화기간을 나타냈으며, *P. cocos*도 같은 결과를 보였다. *S. viridosporus*는 12시간 이내에 석탄 액화가 시작되었고, *P. cocos*는 약 1일 후부터 액화가 시작되었다. 세포 외 분비 반응 실험에서는 두 미생물 모두, 미생물과 석탄이 직접 접촉한 부분과 여과지를 통하여 간접적으로 접촉한 부분 모두가 석탄을 액화시킴으로서 두 미생물에 의한 액화 기작이 세포외 분비 반응임을 알 수 있었다(Fig. 1).

액상 배양에서의 석탄 액화

액상 배양에서의 석탄 액화능은 Table 2에 나타나 있다. 여기에 나타난 액화능은 Shin(7) 등이 발표한 보정곡선을 이용하였다. 이 실험에서는 액상 배지에 미생물과 석탄을 동시에 주입하여서 실험을 진행하였다. 액상배양에서도 *S. viridosporus*가 *P. cocos*보다 높은 액화능을 보였으며 전처리제는 질산이 효과적으로 나타났다. 이후의 실험에서는 전처리제로서 질산을 사용하였다.

Table 1. Coal solubilization efficiency on surface culture.

microorganism	pretreatment solvent	solubilization efficiency(%(w/w))	solubilization time(day)
<i>S. viridosporus</i>	HNO ₃	71.2	1
	H ₂ O ₂	41.0	3
<i>P. cocos</i>	HNO ₃	54.0	2
	H ₂ O ₂	29.3	5

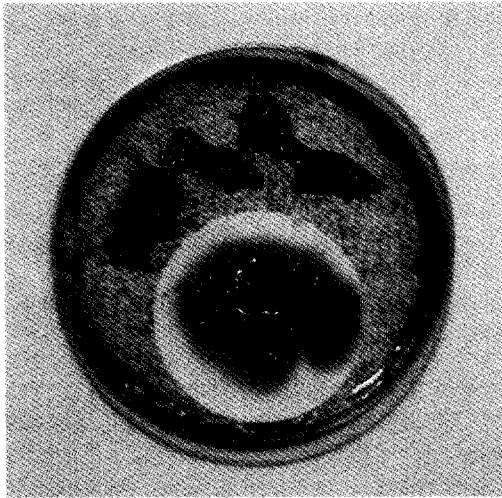


Fig. 1. Coal solubilization by extracellular material of *S. viridosporus*.

Table 2. Coal solubilization efficiency in liquid culture(solubilization time = 14 days).

microorganism	pretreatments		solubilization efficiency(%(w/w))
	solvent		
<i>S. viridosporus</i>	HNO ₃		62.0
	H ₂ O ₂		39.2
<i>P. cocos</i>	HNO ₃		17.5
	H ₂ O ₂		10.3

Fig. 2(a)와 2(b)는 석탄의 최적 주입시기 결정을 위한 실험결과이다. 석탄의 최적 주입시기를 미생물의 성장에 영향을 미치는 탄소원의 소비와 관련지어 생각하면 *S. viridosporus*의 경우에는 탄소원이 거의 소모되고 난 후인 접종후 7일 이후에 석탄을 주입하는 것이 좋고, *P. cocos*는 미생물 접종과 동시에 석탄을 주입하는 것이 좋은 것으로 사료된다. 여기서 *S. viridosporus*의 경우는 탄소원이 거의 소모되고 난 뒤에 액화가 잘 진행되므로 이는 석탄을 액화하는 물질이 이차 대사 생성물일 가능성이 높을 것으로 사료된다. 미생물에 의한 석탄의 액화능에 영향을 미치는 첨가 물질을 결정하기 위하여 6종의 탄소원(1 %(w/w)), 6종의 질소원(0.5 %(w/w)), 6종의 금속이온(5 mmol dm⁻³)에 대한 액화능을 비교한 결과가 Table 3에 나타나 있다. *S. viridosporus*과 *P. cocos*는 각각 탄소원과 금속이온에 대해서는 액화능이 약간 증가하거나 오히려 감소

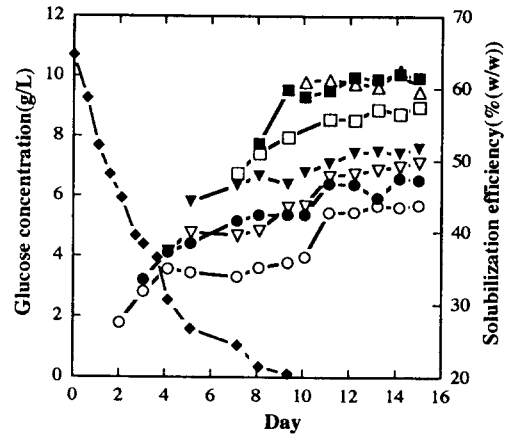


Fig. 2(a). Comparison of coal solubilization extent by *S. viridosporus* with different addition times of pretreated Australian lignite(1 %(w/v)) (-◆- glucose concentration(g/L), -○- coal addition after 1 day, -●- coal addition after 2 days, -▽- coal addition after 3 days, -▼- coal addition after 4 days, -□- coal addition after 5 days, -■- coal addition after 7 days, -△- coal addition after 9 days).

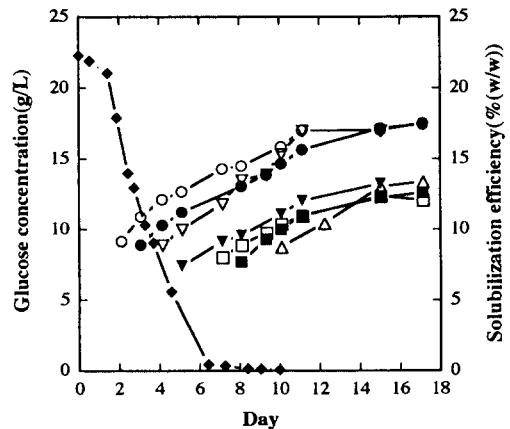


Fig. 2(b). Comparison of coal solubilization extent by *P. cocos* with different addition times of pretreated Australian lignite(1 %(w/v)) (-◆- glucose concentration(g/L), -○- coal addition after 1 day, -●- coal addition after 2 days, -▽- coal addition after 3 days, -▼- coal addition after 4 days, -□- coal addition after 5 days, -■- coal addition after 7 days, -△- coal addition after 9 days).

Table 3. Effect of different carbon, nitrogen and metal sources on solubilization efficiency of coal by microorganisms.

materials	solubilization capacity(%(w/w))		
	<i>S. viridosporus</i>	<i>P. cocos</i>	
control	50.0	18.5	
Carbon source (1%(w/v))	glucose	50.6	22.0
	lactose	21.8	19.9
	sucrose	20.7	26.5
	maltose	15.2	11.5
	cellulose	16.5	16.1
fructose	12.5	29.8	
Nitrogen source (1%(w/v))	urea	67.4	30.6
	(NH ₄) ₂ SO ₄	55.6	42.7
	NH ₄ Cl	51.2	14.3
	yeast-extract	32.1	43.7
	peptone	25.4	52.4
tryptone	23.9	52.1	
Metal ion (0.5mmol/dm ⁻³)	MgSO ₄	55.5	20.7
	CuSO ₄	55.3	17.8
	MnCl ₂	50.8	19.5
	ZnSO ₄	50.2	18.2
	CaCl ₂	49.6	17.3
FeSO ₄	48.2	16.8	

하는 경향을 나타내었지만, 질소원에 대해서는 *S. viridosporus*는 요소가 약 17 %의 액화율 향상을 보이며, *P. cocos*는 펩톤 및 트립톤이 약 30 % 정도 향상시키는 것으로 나타났다. 이는 질소원과 액화기 작이 관련이 있다는 사실을 알 수가 있다. 이는 석탄을 액화시키는 물질이 polypeptide나 polyamine류의 화합물일 것이라는 Strandberg와 Lewis의 예측과 같은 결과로 보인다(8, 9).

효소에 의한 석탄 액화의 가능성

Table 4는 미생물에 의한 석탄의 액화반응이 효소에 의한 것인지를 밝히기 위한 실험결과를 나타낸 것이다. Table 4에 의하면 열처리나 protease로 처리한 후 액화한 경우에는 액화능이 약 20~30 % 정도 감소함을 알 수 있다. 여기서 석탄 액화에 기여하는 물질의 70~80 %는 비효소 반응임을 알 수 있다. 이는 석탄의 액화능이 가수분해에 의해 단백질이 변성된 경우 급격히 감소한다는 Cohen의 결과와 일부분 일치하며(10), 석탄을 액화하는 물질이 비효소 반응에 참여한다는 Strandberg와 Lewis의 결과와는 같은 결과를 얻었다(8, 9).

Table 4. Effect of solubilization efficiency for broth without microorganisms.

	microbes	control ^a	heat ^b	protease ^c
solubilization efficiency(%) <i>S. viridosporus</i>		55	45	40
efficiency(%) <i>P. cocos</i>		15	10	10

^aSupernatant of liquid broth was not treated.

^bSupernatant of liquid broth was heated at 121°C, 1.06 kg/cm² for 15 min.

^cSupernatant of liquid broth was treated with enough protease to deactivate all protein.

회분식 교반기 배양에서의 액화능

*P. cocos*를 3일 동안 키운 후 10 g/L의 석탄을 주입한 후 액화능을 조사하였다(Fig. 3(a)). *P. cocos*의 경우에는 약 68 % (w/w)의 액화능을 보였는데, 이는 플라스크 배양(Fig. 2(b))의 18 %에 비하여 약 50 % 정도의 액화능 향상을 보였다. 회분식 교반기에서 액화가 끝난 후에 회분식 교반기내를 관찰한 결과, *P. cocos*는 회분식 교반기의 임펠러에 붙어서 멎쳐진 상태로 존재하였다. 이는 연속 조업을 위해서 큰 단점으로 작용하기 때문에 이후의 실험은 *S. viridosporus*에 대하여서만 진행하였다. *S. viridosporus*에 대한 회분식 교반기에서의 액화능 결과를 Fig. 3(b)에 나타내었다. *S. viridosporus*는 약 82% (w/w)의 액화능을 보임으로서 플라스크 배양보다는 약 20%의 향상을 보였다. 여기서 *S. viridosporus*가 *P. cocos* 보다 초기 액화 속도 및 액화능이 우수하였다. 이는 박테리아가 초기 액화능은 빠르나 전체적인 액화능은 곰팡이에 비하여 낮게 나타난다는 Wise의 결과와는 다른 결과이다(5).

통기량을 변화시켰을 경우, 최대 액화능에 이르는 시간이 1 vvm일 경우 석탄 주입후 7일, 2 vvm일 경우에는 4.5일이었으며 산소로 통기를 할 경우 미생물의 성장(결과는 보이지 않았음) 및 액화율이 낮게 나타났다. 이를 근거로 하여 미생물에 의한 석탄의 액화에는 통기량의 최적점이 존재함을 알 수 있었다. 이후의 실험은 2 vvm에서 수행하였다. 또한 플라스크 배양에서, *S. viridosporus*에 대한 효과적인 첨가물로서 요소가 선정되었는데, 요소를 0.5 % (w/w) 첨가한 경우에는 최고 액화능이 85 % (w/w)로 약 3 % (w/w) 정도 높게 나타나지만, 그 보다는 초기 액화 속도를 상당히 빠르게 함을 알 수 있었다. 여기서 최고 액화능은 YM 배지만 있을 때의 4.5일에 비하여 요소가 첨가 되었을 때는 3.5일로 줄어듦을 알 수 있었다. 그리고 YM 배지에 요소

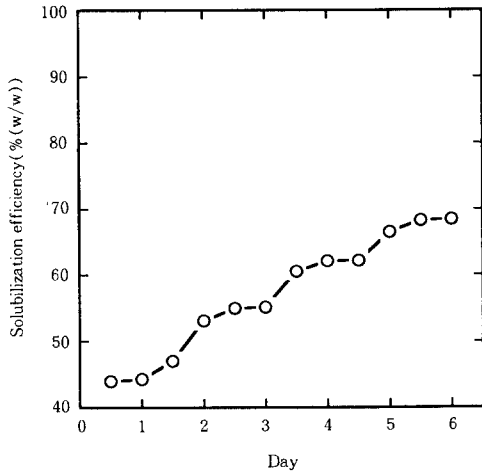


Fig. 3(a). Solubilization efficiency of Australian lignite(1 % (w/v)) by *P. coccos* at batch-fermentation (1 vvm, 150 rpm, pH 4.3-4.7).

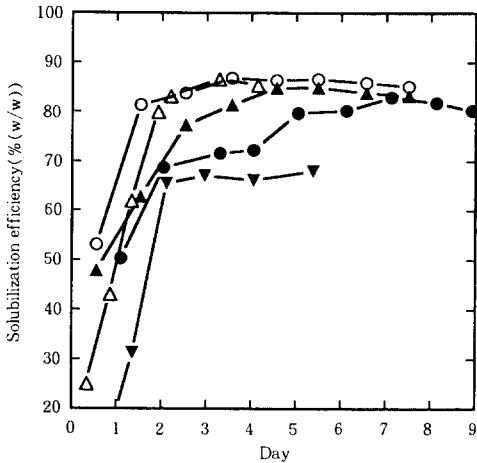


Fig. 3(b). Solubilization efficiency of Australian lignite by *S. viridosporus* at batch-fermentation with 150 rpm and pH 7-8 (-●- 1 vvm with air and 1 % (w/v) lignite, -▲- 2 vvm with air and 1 % (w/v) lignite, -▼- 1 vvm with oxygen and 1 % (w/v) lignite, -○- 2 vvm with air, urea (0.5 % (w/v)) and 1 % (w/v) lignite, -△- 2 vvm with air, urea (0.5 % (w/v)) and 2 % (w/v) lignite).

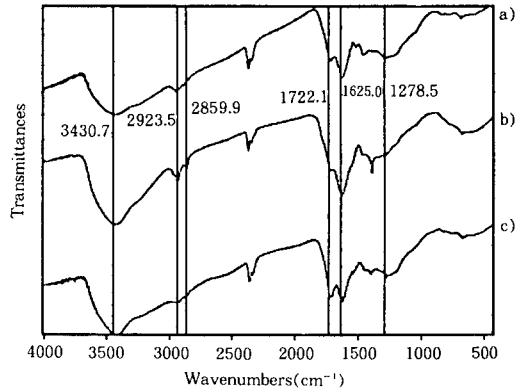


Fig. 4. Comparisons of IR-spectrum of the original, pretreated and solubilized coal.

를 혼합한 뒤 20 g/L의 석탄을 주입한 경우에는 초기의 액화속도가 상대적으로 느림을 알 수 있었다. 이는 초기에 많이 주입된 석탄이 미생물의 액화 작용에 어떤 저해 작용을 하는 것으로 보인다.

FTIR에 의한 석탄액화물질분석

FTIR 분석은 석탄과 전처리 석탄 그리고 액화 석탄의 비교를 통하여 액화 반응 시에 일어나는 석탄의 구조적 변화를 밝히는데 목적이 있다. FTIR의 그림에서 액화 석탄은 염산으로 처리하여 불용화 침전물을 얻은 후 세척하여 동결건조(acid-precipitation method)하였다(7). 이렇게 얻어진 침전물은 진공오븐에서 하루간 방치한 후 압착기로 KBr 펠릿을 제조한 후 측정하였다. Fig. 4는 석탄과 전처리 석탄 그리고 액화 석탄에 IR 그림을 나타낸 것이다. 여기서는 다음과 같은 결론을 내릴수 있었다. 석탄의 특성인 복잡한 구조와 큰 분자량으로 인하여 피크가 거의 나타나지 않았지만 그림을 통하여 갈탄이 처리 단계(석탄 → 전처리 석탄 → 액화 석탄)를 거칠수록 나타나는 변화는 다음과 같다. 먼저 2950 cm⁻¹ 부근의 aliphatic stretching band는 처리 단계를 거칠수록 줄어들음을 알 수 있다. 1700~1750 cm⁻¹의 범위에서는 에스테르나 케톤의 관능기의 변화가 보이고, 3000~3600 cm⁻¹ 사이의 넓은 피크는 OH기를 나타내며 1630 cm⁻¹ 부근의 피크는 carboxylate나 quinone의 관능기의 변화를 나타낸다. 특히 1722 cm⁻¹ 부근에서는 투과율이 처리를 거칠수록 감소하는 것은 carboxyl group의 증가를 말한다. 이는 1개의 탄소에 산소가 붙음으로서 산화 반응이 일어나는 것을 나타낸다. 이는 미생물에 의

Table 5. Approximate and ultimate composition analysis of coal.

coal	fixed	volatile	ash	moisture	C	H	O	N	S	calorific
		carbon	matter							value(kcal/kg)
untreated coal	36.79	46.38	1.13	15.70	55.10	5.46	38.73	0.51	0.20	5080
pretreated coal	33.87	60.04	5.09	1.00	51.94	3.92	41.2	2.88	0.06	4600
solubilized coa	41.04	55.41	2.96	0.59	47.27	4.07	43.84	4.64	0.21	4340

한 석탄의 액화가 석탄의 지속적인 산화과정에 기인함을 나타낸다. 그러므로 액화 석탄은 처리전의 석탄에 비하여 더욱더 산화된 형태라고 추측할 수 있다.

석탄의 성분 분석

석탄과 전처리 석탄, 그리고 액화 석탄을 분석한 결과가 Table 5에 나타나있다. 여기서는 처리단계를 거칠수록 석탄의 산소 함량이 증가하는데 이는 미생물에 의한 석탄의 액화가 지속적인 산화과정을 거친다는 것을 간접적으로 증명하며, 전처리 석탄과 액화 석탄에서 질소의 증가는 각각 전처리제인 질산과, 요소의 영향인 것으로 보여진다. 그리고 발열량은 원래 석탄보다 약 14.6 % 정도가 감소됨을 알 수 있었다. 이는 액화석탄은 고체 석탄에 비하여 산소, 질소는 증가하며, 탄소와 수소는 감소한다는 경향성과 일치한다(5).

미생물에 의하여 생성되는 석탄 액화물질의 특성이 완벽하게 규명되지는 않았지만, 이 물질의 이용 가능성은 충분히 크다. 물에 대하여 가용성이므로 다른 생전환 공정으로서, 예를 들어 알코올이나 메탄 같은 다른 연료로의 전환이 가능하며 방향족 물질의 제조나 고분자 물질의 제조공정의 원료물질로도 사용할 수 있다. 그러나 문제점으로는 미생물을 키우는데 사용되는 배지의 가격이 비싸다는 점과 석탄의 전처리 과정을 필요로 한다는 점이 지적되고 있다. 앞으로의 대체에너지는 환경오염 문제를 심각하게 고려하여야 하는데 미생물에 의한 석탄의 액화 및 불순물의 제거는 매우 경제적이고 액화에서 불순물 제거로의 연속 공정이 가능하므로 장기적인 관점에서는 미생물에 의한 석탄 액화가 훨씬 유리하리라고 판단된다.

요 약

미생물을 이용한 석탄의 액화 연구를 통하여 몇가지 중요한 결론을 얻을 수 있었다. 호주산 갈탄의 효과적인 전처리제로는 HNO_3 가 선정되었으며, *S.*

*viridosporus*와 *P. cocos*의 최적 초기 pH는 각각 7.5와 4.5로 나타났으며, *S. viridosporus*가 초기액화 속도 및 전체 액화능에서 *P. cocos* 보다 우수한 액화능을 보였다. 액화능을 높이기 위한 첨가제로서는 *S. viridosporus*는 요소가 효과적이었고, *P. cocos*는 펩톤과 트립톤이 효과적으로 나타났다. 최고 액화능은 회분식 교반기 조업에서 *S. viridosporus*에서 85 % (w/w)까지 향상시킬 수가 있었다. 액화 기간은 3.5일까지 단축할 수가 있었다. 분광학적 분석 결과 및 각 단계별로 석탄의 성분을 분석한 결과에서 미생물에 의한 석탄의 액화는 석탄의 지속적인 산화현상에 기인함을 밝혔다. 또한, *S. viridosporus*에 의한 액화의 기작은 미생물의 외분비 물질에 의하여 진행되며, 액화 기작중 80 %는 이차대사생성물에 의한 비효소반응이었으며, 20 %는 효소반응으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 통상산업부에서 시행한 대체에너지기술 개발사업의 일환으로 수행되었으며, 연구비를 지원해 주신 통상산업부의 에너지자원기술개발지원센터에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. M. S. Cohen and P. D. Gabriele(1982), *Appl. Environ. Microbiol.*, **44**, 23.
2. R. M. Fakoussa(1981), Coal as a substrate for microorganisms: investigation with microbial conversion of national coals., Ph. D. Thesis, Freidrich-Wilhelms University, Bonn, FRG.
3. B. W. Wilson, R. M. Bean, J. A. Frans, B. L. Thomas, M. S. Cohen, H. Aronson, and E. T. Gray(1987), *Energy Fuels.*, **1**, 80.
4. B. D. Faison, C. A. Woodward, and R. M. Bean(1990), *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **24/**

- 25**, 831.
5. D. L. Wise(1990), *Bioprocessing and bio-treatment of coal.*, 1st ed., p 1-322, Marcell Dekker, New York.
 6. H. J. Shin and J. W. Yang(1992), *Kor. J. Biotechnol. Bioeng.*, **7**, 73.
 7. H. J. Shin, H. H. Lee, and J. W. Yang(1995), *Biotechnol. Tech.*, **9**, 329.
 8. C. D. Scott, G. W. Strandberg, and S. N. Lewis(1986), *Biotechnol. Prog.*, **2**, 131.
 9. G. W. Strandberg and S. N. Lewis(1988), *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **18**, 355.
 10. M. S. Cohen, W. C. Bowers, H. Aronson, and E. T. Gray(1987), *Appl. Environ. Microbiol.*, **53**, 2840.