저등급 석탄의 고품위화 기술 현황

정문영¹⁾ · 유경근^{2)*}

Upgrading Technologies of Low Rank Coal; A Review

Moonyoung Jung and Kyoungkeun Yoo*

(Received 11 October 2013; Final version Received 5 November 2013; Accepted 20 February 2014)

Abstract : The development for processing technologies of low rank coal such as lignite and subbituminous coal, which has disadvantages such as non-agglomerating property, low calorific value according to high inherent moisture content, susceptibility to spontaneous combustion, was required to establish the energy resources system, which could guarantee the stable development of domestic industries of Korea, importing more than 97% energy resources. In the present article, the developing direction of domestic upgrading technologies for low rank coal was suggested by summarizing the properties of low rank coal and by categorizing the processing technologies of low rank coal into advanced coal cleaning technologies, coal surface modification technologies, and ultra clean coal technologies.

Key words : Low rank coal, Lignite, Subbituminous coal, Upgrading technologies

요약 : 에너지자원의 97%를 수입에 의존하고 있는 우리나라 산업의 지속적인 발전을 담보할 에너지자원확보 시스템 구축을 위해 점결성이 없고, 수분함량이 높아 발열량이 낮으며, 자연발화되기 쉬워 활용이 어려운 갈탄 및 아역청탄 등 저등급 석탄의 활용기술 개발이 필수적이다. 이 글에서는 저등급 석탄의 특성을 정리하고 저등급 석탄의 고품위화를 위한 기술을 고도선탄기술, 표면개질기술, 초정정석탄 생산기술로 분류·요약하여 국내 저등급 석탄 처리기술의 개발방향을 제시하고자 하였다.

주요어 : 저등급 석탄, 갈탄, 아역청탄, 고품위화 기술

서론

2006년 기준 세계 1차 에너지 생산량과 소비량은 각각 469.41 QBTU(quadrillion British thermal units)와 472.27 QBTU이며, 이 중 석탄은 생산에서 28%, 소비에서 27%를 차지하여 석유 다음의 에너지 비중을 나타내고 있다(Fig. 1). 2012년 에너지통계핸드북에 따르면 2010년 세계 1차 에너지 소비량 중 석유, 석탄, 천연가스의 비중이 각각 39.7%, 28.9%, 16.4%로 석유와 석탄의 비중이 증가하였다(KEMCO, 2012). 세계의 1차 에너지 소비는 2030년에 165억 TOE까지 증가할 것으로 전망되고 있으며, 석탄은 2002년 24억 TOE에서 2030년 36억 TOE

까지 지속적인 증가가 예상되고 있다(Park *et al.*, 2010). 특히, 우리나라는 에너지자원의 97%를 수입에 의존하고 있으며(Kim, 2011), 2010년 국내에서 소비된 석탄 75,896천 TOE 중 국내 생산량의 양은 1,166천 TOE에 불과하여 수입비중이 98.5%에 이른다(KEMCO, 2012).

우리나라는 전력생산의 38%를 석탄화력발전에 의존하고 있기 때문에(Kim *et al.*, 2010) 지속적인 국내산업의 발전을 위해서 전량 수입에 의존하고 있는 유연탄의 안정적인 공급체계 시스템의 확보가 중요하다. 정부는 『제4차 해외자원개발 기본계획』에서 2010년 53.7백만 톤과 48.3%인 유연탄의 자주개발량과 자주개발률을 2019년 63.3백만톤과 50%로 설정하여 전량 수입에 의존하고 있는 유연탄의 안정적인 공급이 가능하도록 노력하고 있다(Kim, 2011). 한편, 갈탄과 같은 저등급 석탄은 점결성(coking)이 없고 고수분, 저발열량으로 자연발화성이 높기 때문에 이용효율이 낮고 수송, 저장시의 문제도 있어 매장되어있는 지역에서 소비할 수 있는 에너지원으로서 이용되어왔다(Lee *et al.*, 2008; Otaka, 2011). 그러나

1) 세명대학교 바이오환경공학과

2) 한국해양대학교 에너지자원공학과

*Corresponding Author(유경근)

E-mail: kyoo@kmou.ac.kr

Address: Dept. of Energy and Resources Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

최근 석유가격의 상승이나, 중국 및 인도 등의 급격한 석탄수요로 인해 지금까지 고등급 석탄 중심이었던 석탄시장에서 풍부한 자원량의 저등급 석탄을 SNG나 화학원료제조로 하기 위한 가스화기술 개발도 진행되고 있다. 갈탄의 이용촉진을 위해서는 수분함유량을 낮추기 위한 건조 및 개질 등 탈수기술의 적용이 필요하다. 이를 위해 갈탄을 대량으로 이용하고 있는 미국, 호주, 독일 등에서는 고품위화 기술개발이 진행되고 있으며 일본에서도 갈탄 등의 고효율 건조기술의 개발이 수행되고 있다(Otaka, 2011). 따라서 우리나라도 현재 활용이 미진한 저등급 석탄의 활용 기술이 확보될 수 있다면 유연탄을 대체하며 석탄의 안정적인 공급체계 구축이 용이할 것이다.

이 글에서는 저등급 석탄의 특성을 정리하고, 현재까

지 연구되어온 저등급 석탄의 고품위화기술을 고도선탄 기술, 표면개질기술, 초청정석탄 생산기술로 대별하고 분석·제시하여 국외에서 자주개발중인 저등급 석탄의 고품위화 기술개발 활성화에 도움이 되고자 하였다.

저등급 석탄의 특성

1957년 국제석탄학회의 정의에 따르면 성분 내에 중량 50% 그리고 부피 70% 이상의 탄소분을 함유할 때 석탄으로 정의되며, Table 1과 같이 ASTM에 따른 석탄분류법이 일반적으로 사용되고 있다(Leonard III and Hardinge, 1991). 미국에서는 갈탄(lignite)과 아역청탄(subbituminous coal)을 저등급 석탄(low-rank coal)으로 역청탄(bituminous coal)

Fig. 1. World primary energy (a) production and (b) consumption in 2006 (Miller, 2011).

Table 1. Classification of Coals by Rank (ASTM D-388) (Leonard III and Hardinge, 1991)

Class	Group	Fixed Carbon (%)	Volatile matter (%)	Calorific value (kcal/kg)	Agglomerating character
Anthracite	Meta-Anthracite	98<	<2		Non-agglomerating
	Anthracite	92-98	2-8		
	Semi-Anthracite	86-92	8-14		
Bituminous coal	Low volatile bituminous coal	78-86	14-22		Commonly agglomerating
	Medium volatile bituminous coal	69-78	22-31		
	High volatile A bituminous coal	<69	31<	7,778<	
	High volatile B bituminous coal			7,222-7,778	
	High volatile C bituminous coal			6,389-7,222	Agglomerating
Subbituminous coal	Subbituminous A coal			5,833-6,389	Non-agglomerating
	Subbituminous B coal			5,278-5,833	
	Subbituminous C coal			4,611-5,278	
Lignite	Lignite A			3,500-4,611	Non-agglomerating
	Lignite B			<3,500	

coal)과 무연탄(anthracite)을 고등급 석탄(high-rank coal)으로 분류한다(Miller, 2011). 한편, 유럽에서는 갈탄(brown coal or lignite)을 저등급 석탄으로, 무연탄과 역청탄을 고등급 석탄으로 분류하며 아역청탄은 경우에 따라 고등급 석탄으로 분류되기도 한다(Miller, 2011).

Table 2에 갈탄에 대한 각 나라 및 국제기구의 정의를 정리하였다. 갈탄의 기준은 국가와 기구에 따라 다소 차이가 있으며 일본의 경우 수분을 함유하지 않은 상태에서 분석하기 때문에 다른 기준에 비하여 발열량이 높게 나타난다.

일반적으로 갈탄의 원소분석결과는 70% 이하의 탄소가 함유되어 있는 것으로 보고되고 있으며 산소 함량이 역청탄에 비하여 높게 나타난다. Fig. 2의 Van Krevelen 다이어그램에서 알 수 있듯이 저등급 석탄인 갈탄의 수분을 감소시켜 탄소에 대한 산소와 수소의 비율을 감소시키면 역청탄 및 무연탄 등의 고등급탄으로 전환하는 것이 가능하다. 갈탄은 고등급 석탄에 비하여 수산기(-OH), 카르복실기(-COOH) 등의 함산소 관능기 비율이 높기 때문에 반응성이 높고 친수성을 나타내며 내부표면적이 커서 함수율이 높은 것으로 알려져 있다. Fig. 3에 호주 Yallourn 광산 갈탄의 함수율과 등온탈착열과의 관계를 나타내었다(Karr, 1978; Yu *et al.*, 2013). 600 g/kg이상의 수분구간은 벌크수를 의미하며 물의 증발열로 탈리되지만 150 g/kg~600 g/kg의 모세관 응축수 구간은 모세관력에 의하여 수분의 탈리를 위한 증발열이 증가한다. 80 g/kg~150 g/kg의 수분구간은 다층수를 의미하며 흡착수의 수소결합 영향으로 증발열이 더욱 증가하고, 80 g/kg 이하의 단층수로서 석탄표면의 함산소관능기와 화학결합으로 증발열이 급격히 증가하게 된다. 모세관 응축수

Fig. 2. Van Krevelen diagram for various solid fuels (Ptasinski *et al.*, 2007).

Fig. 3. Isosteric heat of desorption water on Yallourn brown coal as a function of moisture content (Karr, 1978; Yu *et al.*, 2013).

Table 2. The definitions of lignite

	lignite	Volatile matter* (%)	Calorific value (kcal/kg)	Remark
IEA	subbituminous coal +lignite	> 31	> 5,700 (hydrated, no mineral)	International Energy Agency
ASTM	lignite A lignite B		3,500~4,611 (hydrated, no mineral) ~3,500 (hydrated, no mineral)	
Europe(ECE)			< 5,706 (air-dried, no mineral)	
Japan	F1 F2		6,800~7,300 (anhydrous, no mineral) 5,800~6,800 (anhydrous, no mineral)	
Australia			< 4,542 (hydrated, no mineral)	
Indonesia			< 5,100 (hydrated, no mineral)	
China	lignite No.1 lignite No.2	> 37 > 37	- < 5,732	

*Volatile Matter: Dry Ash Free Basis

가 증발할 때는 모세관의 수축과 붕괴가 발생하기 때문에 갈탄이 건조될 때 수축하며, 갈탄의 증발건조에서 건조수분수준별로 증발열이 다르기 때문에 목표치 건조수분을 정한 후 프로세스를 운영할 필요가 있다. 회분조성은 석탄연소후의 무기잔류물이며, 석탄중의 광물, 비광물 무기질 유래의 것으로 나눌 수 있다. 광물로부터 유래의 것은 석탄생성 시 혼입된 것과 석탄층에 끼여 위치하는 것이다. 또한 비광물 무기질에는 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Fe^{2+} , Cl^- 가 있고, 이 중 양이온은 카르복실기를 매개로 석탄 유기물에 결합하고 있다. Na^+ , Ca^{2+} 가 많은 저융점 회분은 미분탄 연소에서 버너 또는 전열면에 재(ash)가 부착되는 현상이 일어나기 때문에 주의가 필요하다. 갈탄에는 호주 빅토리아주의 갈탄의 경우와 같이 알칼리금속류 및 알칼리토금속류 이온을 다량 함유한 경우가 많아 용도에 따라 주의가 필요하다. 석탄의 이송 및 보관에서 자연발화(spontaneous combustion)는 가장 위험한 문제이며, 산소 함유량, 공기의 유량, 입도, 공기 중 습도, 석탄 중 수분함유량 등이 주요한 요인으로 알려져 있으나 갈탄은 고등급탄에 비하여 산소가 함유량이 높아 자연발화가 빈번히 발생한다(Kucuk *et al.*, 2003; Sujanti and Zhang, 1999). 한편 갈탄은 지역에 따라 분쇄특성이 다르게 나타나며, 아역청탄에 가까운 미국 갈탄은 경질로서 분쇄하기 어려우나 수분이 높은 호주와 독일 갈탄은 분쇄하기 쉬운 것으로 알려져 있다.

저등급 석탄의 고품위화 기술동향

석탄은 매장량이 풍부하고 발열량 당 가격이 다른 에너지자원에 비해 저렴하나 석탄을 연료로 사용하는 경우 몇 가지 환경문제가 발생할 수 있다. 석탄에 황성분이 포함되어 있을 때 연소시 이산화황이 발생하여 산성비의 원인이 되며, 석탄발전이후 발생하는 대량의 석탄재(coal ash)는 비산재(fly ash)의 경우 80% 이상이 재활용되고 있으나 바닥재(bottom ash)의 경우 대부분이 매립처분되고 있는 실정이다. 또한 석탄 연소시 발생하는 이산화탄소는 현재 지구온난화의 주범으로 인식되어 이를 감소시키려는 노력이 이루어지고 있다. 저등급 석탄을 화력발전의 원료로서 사용할 경우 발전효율이 낮아 석탄사용량이 증가하여 이산화탄소 발생량도 증가하게 된다. 석탄은 광물 입자를 포함하고 있기 때문에 석탄발전에서는 연소가스로 직접 터빈을 돌리지 못하고 연소로 인해 발생하는 열로 물을 가열하여 생성되는 증기로 터빈을 돌린다. 석탄 중 회분은 보일러관에 부착되어 열효율을 감소시키기 때문에 회분을 감소시킬 경우 발전효율 증가가 가능하며, 무회분 석탄개발이 가능할 경우 터빈의 직접 구동이 가

능하여 발전효율 향상이 가능하다. 이를 위해서는 회분의 제거뿐 아니라 부식을 유발하는 알칼리 금속을 0.05 ppm 수준까지 제거해야한다. 이하에서 회분 등 불순물의 함량을 낮추기 위한 기술들에 대하여 정리하였다.

고도선탄기술

선탄(coal cleaning)이란 회분이 낮은 정탄(clean coal)을 얻기 위한 처리공정을 통칭한다. 채굴된 원탄을 분쇄·분급하고 석탄질과 광물질의 물리적 성질의 차이를 이용해 선별함으로써 석탄의 회분함량을 저감시킨다. Fig. 4는 주요 선탄법과 그 방법에 적합한 급광(feed)의 입도범위를 나타낸 것이다(Wills and Napier-Munn, 2006). 분리대상물질이 비교적 큰 경우는 수~수십mm 정도로 분쇄하고, 중액선별과 지그(jig), 사이클론(cyclone) 등으로 처리하여 목표 회분값을 얻을 수 있다. 초저회분화, 고유황 석탄의 고도탈황, 광물질과의 단체분리(libération)가 곤란한 석탄 처리, 미분탄 처리를 목적으로 하는 경우, 기존의 공정에 비하여 고도의 선별장치로 처리하기 때문에 고도선탄(advanced coal cleaning)이라고 불리어지고 있다. Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 가장 많이 사용되는 선탄공정은 중액선별과 Jig선별이나(Kempnich, 2000)

Fig. 4. Effective range of application of conventional mineral processing techniques (Wills and Napier-Munn, 2006).

Fig. 5. Main coal preparation processes (Kempnich, 2000).

고도선별공정으로서 최근에는 원심력을 이용하는 비중선별장치(EGS, Enhanced Gravity Separators)를 이용하는 방법이나 젖음성(wettability)의 차를 미립자에서 이용하는 고도부선, 선택 구상응집 등의 고도선별법이 있다. 석탄과 광물질의 소수성 차가 작은 경우는 비중차를 이용하는 선별이 좋은 결과를 낸다. 초미립자의 부선은 조립자의 부선에 비해 선별의 효율이 떨어지기 때문에 저회탄 제조에는 적합하지 않지만, 기존의 화력발전용 미립자 처리에 적용할 수 있다. 원심력을 이용하는 장치는 Knelson concentrator, Falcon concentrator 및 Multi gravity separator 등이 있다. 이와 같은 비중선별장치들은 당초 탈황을 위해 비중이 큰 황철석 제거에 초점을 맞추어 연구되었지만, 그 후 25-150 μm 입도군에서 현저한 탈회(deashing) 효과도 있다는 것이 밝혀졌다. Knelson concentrator나 Falcon concentrator를 이용하여 미립의 석탄을 처리하는 경우 부선에서 이용하는 기포제를 첨가하고, 미립기포를 발생시켜 처리하는 방법이 고안되고 있으며, 이 때 기포는 소수성인 석탄입자에 부착되고, 겔보기비중이 작아지므로 친수성이면서 비중이 큰 입자와의 분리성이 향상된다(Honaker *et al.*, 2005a and 2005b). 또한 일반적으로 물을 매질로 이용하나 중액(heavy liquid)을 용매로 이용할 경우 산출율(yield)이 향상된다(Honaker *et al.*, 2000).

미립자처리 공정에서 발생할 수 있는 문제는 첫째, 입자 비표면적 증가에 따른 시약 소모량 급증, 둘째, 조립자에 비해 낮은 기포부착확률, 셋째, 예기치 않은 불순물의 동반부유를 생각할 수 있다. 이 문제들을 해결하기 위한 연구가 다양하게 이루어져 왔다. Honaker 등(2006)은 포말층(froth zone)에서 기포가 합체(coalescence)될 때 소수성 입자보다도 약소수성 입자가 먼저 탈착되어 선별성이 향상되는 현상을 이용하여 포말 층에 강소수성 입자를 첨가하는 방법을 제안했다. 이 연구에서 무연탄의 부선에 소수성이 강한 역청탄 입자를 첨가할 때 회수율을 유지하며 회분을 5% 저감시키는 결과를 얻었다. Atesok 등(2001)은 -38 μm 의 미분탄에 담체(carrier)로서 0.1-0.3 mm의 소수성 석탄을 첨가하여, 미분탄을 담체에 부착·응집시킨 상태에서 기포제만으로 부선할 때 회분이 16.3%에서 8.3%로 감소하는 것을 보고하였다. Shen과 Wheelock (2000)은 평균 입경 4-5 μm 의 석탄 슬러리에 이소옥탄(iso octane)을 첨가하여 가압한 후, 감압하며 교반하여 미세기포-석탄응집체를 형성시키고, 이것을 부상시켜 정탄(clean coal)을 회수하는 방법을 검토한 결과, 2단 처리로 회분을 33%에서 6.3%로 저감 가능하다는 것을 보고했다. Honaker 등(2005b)은 포수제 등의 부선시약을 첨가하지 않고도 3-5 μm 의 미립 석탄의 탈회가 가능하다는 것을 도출했다. 포수제를 첨가하지 않고 pH만을

변화시킨 용액 속에서 석탄 미립자를 응집 침강시킴으로써 광물 미립자가 분산해 있는 상등액과 분리하여 탈회를 증가시켰다. Li 등(2003)은 미세기포와 원심력을 이용하는 사이클로 칼럼부선기를 이용하여, 미세기포에 의한 미립석탄의 부선에 대해서도 단시간에 높은 선별성이 얻어지는 것을 보고했다. Yukawa 등(2002)은 저등급 석탄을 열수건조법으로 처리하여 표면을 소수성으로 개질한 후에 부선하고, 그 정탄을 알칼리 열수용액법으로 처리함으로써 회분 1% 이하의 저회탄이 얻어지는 것을 보고했다. 표면이 산화된 석탄과 저등급 석탄은 소수성이 낮으므로 Ding과 Laskowski(2006a and 2006b)는 광물질을 부유시켜 광미(tailings)로 제거하고 잔유물인 석탄을 정광(concentrate)으로 회수하는 역부선(reverse flotation)이 유효하다는 것을 지적하였고, 역부선을 위한 포수제인 아민계 DTAC, DTAB의 효과를 검토했다. 또 아민계의 포수제는 광물표면을 소수화 시키지만, 기-액계면으로 이동하기 쉬워 손실이 생기므로 에어로졸로서 송기가스와 함께 부선기에 도입하는 방법(zero conditioning time method)에 의해 부선 시약량을 대폭 삭감할 수 있음을 보고했다.

석탄부선에 관한 상용화 기술 개발은 오래 전부터 이루어져 왔으며 1990년대 후반부터 장치 개량이 진전되면서 급격히 도입이 증대되어 2000년에는 미국에서 20.3%, 중국에서 14.0%, 세계 평균으로는 13.6%에 이르렀다. 현재도 지속적으로 도입되고 있다. 석탄 부선기는 기계식 교반형(sub-A type)과 컬럼(column)형이 있는데, 석탄부선에서는 Fig. 6에 나타나 있듯이 일반적으로 컬럼형이 종래의 기계식 교반형에 비해 선별효율이 높다. 컬럼형은 기계식 교반형보다 미세기포를 발생시킬 수 있고, 선

Fig. 6. Performance of column and conventional flotation cell (Ito, 2008).

별존(zone)에서의 선별성도 높기 때문에 미립자를 대상으로 고효율 분리가 가능하다(Ito, 2008).

주요 상용 석탄 컬럼 부선키는 Microcel, Jameson, CoalPro (Eriez/CPT)가 주로 사용되고 있으며, 일반적으로 150 μm 이하의 입도군에 적용되고 있다. Microcel 컬럼 부선키는 feed부의 혼합기에서 미세기포와 입자를 효율적으로 부착시킬 수 있어 1980~1990년대에 Super Clean Coal 제조의 연구에 이용되었다. motionless mixer를 설치한 컬럼 부선키에서는 포수제(collector)를 적게 첨가하고도 저회탄을 얻을 수 있음이 실증되었다. 종래의 Jameson 부선키는 Microcel보다 선별효율이 낮으나 컴팩트한 설비로 운전비가 저렴하다는 장점이 있다(Ito, 2008). 그 후 개량이 거듭되어 2001년에는 미국 동부의 선탄공장에 직경 5 m(0.8 t/h)의 Jameson 부선키가 도입되어, D_{90} (90% 체통과 입도) 45 μm , 회분 30%의 feed로부터 회분 6%의 저회탄이 얻어지는 것이 보고되었다(Mohanty, 2001). 또 통상의 컬럼부선키에서는 -150 μm 정도의 미립자를 처리하는데, Cowburn 등(2006)은 Jameson 부선키에서의 석탄입자의 회수율이 입자경이 클수록 떨어지는 요인에 대해 정리하면서, 조립자(+0.5 mm)의 부유성을 향상시키기 위해서는 교반강도를 저감시킬 필요가 있으며 그것을 위해 제트 속도를 작게 하는 것이 유효하다고 보고했다. 호주의 플랜트에 그 성과가 도입되었으며, 이 방법으로 조립을 포함한 폭넓은 입도 분포를 갖는 급광을 처리할 수 있다. Polat 등(2003)은 입자, 포수제, 기포 간의 상호작용을 화학적, 물리적(기계적) 작용으로 분류하여 기존의 문헌을 조사했으며, 현장의 기술자에게 도움이 될 수 있도록 해설로서 정리했다.

저등급 석탄의 표면개질기술

UBC 기술

UBC(Upgrade Brown Coal) 공정은 유중탈수(油中脫水)

공정으로부터 유래된 기술이다. 당초 유중탈수법은 갈탄을 액화시키기 위한 공정의 전처리 단계로 개발이 시작되었으며, 80년대 일본갈탄액화(주)가 NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization, 신에너지·산업기술종합개발기구)로부터 수탁을 받아 수분이 65%인 호주의 갈탄으로부터 수분이 없는 석탄용매 슬러리를 제조하는 목적으로 수행되었다(Sugita *et al.*, 2003). 이후 석유계 휘발유에 소량의 중질유를 첨가한 분위기에서 공정을 수행하여 탈수 뿐 아니라 다공질인 석탄에 중질물이 효율적으로 흡착되어 발수성(撥水性)과 자연발화에 대한 안정성이 발현되는 현상이 관찰된 후 본격적인 UBC 연구가 시작되었다. 이 공정은 사용된 유분의 공업적인 회수가 가능하고 폐수의 성상이 양호하여 처리부하가 감소하는 장점이 있으나 개발대상인 호주갈탄의 수분이 너무 높고 원료가 내륙에 위치하고 있어 처리된 원료 수송 등에 비용이 많이 소요되어 개발이 중지되었다(Sugita *et al.*, 2003). 2000년부터 원료광산이 호주에 비하여 일본에 가깝고 수분 함량이 25~40 wt%인 인도네시아산 갈탄으로 UBC공정 개발을 완료하였고, 2003년 9월 하루 3톤 생산 규모의 pilot plant을 완공하였으며, 현재 하루 600톤 규모의 UBC 공장을 건설 중이다. 최근 일본의 경제통상산업부와 고베제강소 주식회사는 각각 40억엔을 투자하여 저품질 갈탄을 정제하기 위한 대규모 상업 시설을 인도네시아 보르네오 칼리만탄 남동부에 건설하여, 여기서 처리된 석탄을 일본의 발전사들에 공급할 예정이라고 밝힌 바 있다.

Fig. 7에 UBC 공정의 개념도를 나타내었다. 갈탄은 입경 3 mm로 분쇄되고 석유계 등유(kerosene)와 중유(asphalt) 또는 저유황 왁스(LSWR, low sulfur wax residue)를 섞어 슬러리를 제조한다(Sugita *et al.*, 2003 and 2006). 중유 또는 저유황왁스는 개질시킨 갈탄에 수분이 재흡착하는 것을 방지하는 목적으로 사용되었다. 슬러리는 갈탄 1톤에 석유계 등유 1.2톤, 저유황왁스 0.006톤의 비율로

Fig. 7. The schematic diagram of UBC process (Sugital *et al.*, 2003 and 2006).

구성되어 있다(Umar *et al.*, 2005). 슬러리에서 제거된 수분(수증기)은 기체-액체 분리기에서 탈수된 슬러리와 분리된다. 이렇게 모은 수증기는 단열압축 장치에서 고온으로 만든 뒤 증발기의 열원으로 다시 사용된다. 한편 증발된 등유는 응축시켜 회수하고, 다음 슬러리 탈수공정에서 재사용한다. 완성된 UBC 분말은 장기간 보관과 장거리 수송을 위해 성형한다. UBC 공정은 비교적 저온에서 진행되어 갈탄 본래 성분과 비교해서 화학적 변화를 발생시키지 않는다. 따라서 휘발분, 회분 및 원소의 함량 등이 개질 후에도 거의 동일하다. UBC제조 직후 개질탄의 수분함량은 거의 0%에 가까우며, 발열량은 6,000~7,000 kcal/kg까지 증가하여 무연탄 수준의 발열량을 나타낸다. 자연발화의 경우 200℃에 도달하는 시간이 원료갈탄이 약 50분인 것에 비하여 처리된 UBC는 약 70분으로 지연된 것으로 나타났다(Sugita *et al.*, 2003, 2006; Umar *et al.*, 2005). 하루 3톤의 실증 공장가동 데이터를 바탕으로 하루 5천톤 규모의 상업용 생산공장에서 소요되는 비용은 톤당 \$8~10 정도로, 갈탄 생산에 드는 비용 톤당 \$5~6과 비교하였을 때 UBC 공정은 경제성이 있는 것으로 판단하였다(Sugita *et al.*, 2006).

건조기술

건조 및 개질 등의 탈수기술은 처리법과 처리조건에 따라 Fig. 8과 Table 3과 같이 가압탈수, 증발, 비중발, 열분해 등 4가지 방법으로 분류가능하다. 갈탄 등의 석탄은 200℃ 정도부터 분해반응 등이 시작되기 때문에 200℃ 이상을 반응형, 이 이하를 비반응형으로 구분할 수 있다. 또한 수분의 증발에 관계하는 포화수증기압 이하에서 물은 증발하고 포화수증기압 이상에서는 비중발이 되는 것으로부터 이들 간 관계하는 선에 의해 A-D 4개의 영역으로 구분가능하다(Otaka, 2011).

가압탈수법은 Fig. 8의 영역 A를 나타내며 MTE(Mechanical thermal expression)법과 Coldry법이 대표적이다. MTE 공정은 Fig. 9와 같이 스팀으로 갈탄을 150-200℃로 가열한 후 60 bar의 압력을 수분동안 가하여 수분을 제거하는 공정이며 MTE 공정을 이용할 경우 수분을 25% 이하로 제거 가능한 것으로 알려졌다. 독일 Rheinbraun에 10 ton/hr 규모의 pilot plant가 설치되어 운영 중이며 호주 CRC CPL(Cooperative Research Centre for Clean Power from Lignite)의 갈탄 건조 공정으로 채택되어 연구개발의 중요한 부분을 차지하고 있다. Coldry법은 호주의 Environmental Clean Technologies사에 의해 개발되고 있으며 갈탄을 소량의 물과 혼합 후, 갈아내어 압출 성형해 가열건조를 행하는 탈수공정으로서 원탄수분 60%로부터 12%까지 낮출 수 있다. 2013년까지 200만t/y의

Plant를 Loy Yang에 건설할 계획이다.

증발법은 Fig. 8의 영역 B를 나타내며, 갈탄을 가열하여 수분을 증발시켜 제거하는 가장 일반적인 탈수법이다. 갈탄과 가열매체의 접촉법에 따라 간접가열법과 직접가열법으로 구분된다. 간접가열법의 대표적인 공정은 튜브드라이어법이며 석탄이나 바이오매스 등의 건조를

Fig. 8. Coal drying processes (Otaka, 2011).

Fig. 9. MTE process.

Table 3. Coal drying processes (Otaka, 2011)

Area	Evaporation Reaction		Representative processes
A (pressure filtration)	△	×	MTE, Coldry
B (evaporation)	○	×	Tube dryer, Fluidized bed, IDGCC, BCB, UBC
C (non-evaporation)	×	○	Fleisner, HWT, Exergen, Kfuel
D (pyrolysis)	○	○	ENCOL, Latorobe Lignite Development

위해 상업규모로 이용되고 있다. 석탄이 튜브안을 흐르고 증기가 본체측을 흐르는 Coal in Tube Dryer와 이와 반대로 튜브안을 증기가 흐르고 석탄이 본체측을 흐르는 Steam Tube Dryer의 2종류가 있다. 호주의 빅토리아 갈탄의 건조에 이용되고 있으며 탈수후 성형기에 의해 프리켓으로서 제품화되고 있다. 또한 호주의 GTL Energy사가 미국의 노스카로타갈탄의 발전소에서 상업규모의 갈탄 탈수시험을 행하여 2010년에 종료하였다. 증발법 중 직접가열법은 WTA(Wirbelshicht-Trocknungmit-interner Abwarmernut-zung)법, MHI(Mitsubishi Heavy Industries)법, DryFine법 등의 유동상이용공정과 BCB(Binderless Coal Briquetting)법, IDGCC(Integrated Drying and Gasification Combined Cycle)법 등 급속가열공정이 대표적이다. Fig. 10에 WTA법의 개념도를 나타내었다. 호주의 모나슈대학의 포타가 개발한 증기유동상 건조법을 독일 Lurgi사가 장치화 개발을 행한 후, 독일의 전력회사 RWE사가 Niederraussem 발전소에 원탄 기준 210 ton/h plant를 병설하여 시험 중이다. 갈탄으로부터 제거된 증기를 압축, 가열원으로 이용하여 공정의 에너지효율향상을 도모한다. 독일은 갈탄발전이 전력의 30% 정도를 점하고 있어

갈탄발전의 효율향상에 적극적이며 이 건조법을 도입하여 발전효율을 45%에서 50% 이상(LHV기준)으로 향상시키는 것을 목표로 하고 있다. 호주는 빅토리아주 Hazelwood 발전소에 140 ton/d plant를 병설할 계획을 갖고 있다. 급속가열공정 중 IDGCC법을 Fig. 11에 나타내었다. 호주 HRL사가 개발하고 실증하고 있는 IGCC에 갈탄건조를 목표로 하여 적용한 공정이다. 가스를 가열매체로 이용하고 배관 안에서 갈탄과 혼합하여 탈수 후, 탈수갈탄을 가스화로에 공급한다. 10 MW의 pilot scale로 시험 후, 400 MW(200 MW×2) plant를 계획 중에 있다. 비증발법은 Fig. 8의 C영역을 나타내며 열수처리법과 수열추출법으로 대별된다. 열수처리법(Hot water treating, HWT)은 분쇄한 석탄을 물이나 증기와 함께 고온(300-400℃), 고압(30-150기압)으로 처리하여 수분을 증발하지 않고 제거하는 방법이다. 고온이기 때문에 석탄의 일부가 분해되어 타르상으로 석탄내부를 코팅하여 수분의 재흡수나 자연발화를 억제한다. Fig. 12에 나타낸 바와 같이 300℃, 12 MPa의 고온고압하에서 열수처리하여 갈탄을 슬러리화하는 기술이다. 기술의 핵심은 유동성 유지와 슬러리 안정성으로서 전자는 입도분포와 수분배합량, 후자는 첨가제를 투입하는 것에 의하여 이루어진다. 생산된 제품은 밀도가 1.2 kg/L, 동점도가 1 Pa·s로 중유정도의 성상으로 유체연료로서 취급이 가능하다. 갈탄 매장량이 많은 인도네시아에서 NEDO 보조사업으로서 현재 연간 3,500톤의 pilot plant 시험은 종료되었고, 2014년까지 연간 1만 톤의 demo plant 건설을 목표로 하고 있다. 상업화 수준의 플랜트가 완성되는 2015년 이후에는 인도네시아의 갈탄을 연간 140만 톤 이상 활용하리라 기대되고 있다. 이외에도 열수처리법으로서 Exccergen사가 개발한 Exccergen 공정과 KfX사가 개발하고 있는 K-fuel 공정이 있으며, 호주 Exccergen사는 타스마니아의 4 ton/h

Fig. 10. WTA process.

Fig. 11. IDGCC process.

의 plant 실증에 성공하여 2014년까지 Latrobe Valley에 상업화 건설을 계획하고 있고, 미국 Evergreen Energy사는 Wyoming, Gillette 지역에 연산 750,000톤 규모의 K-fuel 상업화 설비를 2005년 말부터 가동 중에 있다. Fig. 13에 대표적인 K-fuel 공정도를 나타내었다. 수열추출법은 석탄을 물과 혼합하여 아임계-초임계 조건에서 처리하

Fig. 12. The temperature and pressure conditions for HWT process.

Fig. 13. Flowsheet of K-fuel process.

는 공정으로 석탄이 분해하여 탄소가 풍부한 고형분, 기름, 가스가 된다. 고형분은 분체가 되기 때문에 프리젱트 제품으로 한다. 호주의 Lignite Energy Resources사가 개발을 행하였고 연간 4,000 ton pilot plant로 시험 중이며, TRU energy사와 공동으로 Yallourn 발전소에 연간 6만 ton의 플랜트를 건설할 계획이다. 건조기술 중 열분해법은 Fig. 8의 D영역을 나타낸다. 석탄을 400°C 이상의 고온에서 처리하여 수분의 대부분을 제거하는 것이 가능하나 석탄은 열분해하기 때문에 고형분, 액체, 가스의 제품이 각각 생성된다. 미국의 ENCOL 공정(LCF법으로도 칭함)이나 Syncoal 공정 그리고 호주의 Latrobe Lignite Development사 개발의 BCD(Brown coal Densification) 공정이 이 방법에 해당한다. Syncoal 공정은 열적인 건조 과정과 물리적 정제과정을 거쳐 고수분 함유 저등급 석탄을 유황분이 적은 고품위탄으로 전환시키는 것이다. SynCoal Process는 수분함량이 25~40%, 유황분 함량이 0.5~1.5%, 발열량이 5,500~9,000 Btu/lb 범위인 저등급 석탄을 처리할 수 있도록 설계되었으며, 설비가동 기간 동안 총 190만톤의 제품(280만톤의 원료석탄 처리)을 생산한 바 있다. Fig. 14는 Ontana주의 Colstrip에 위치한 실증실험 플랜트의 공정도를 나타낸 것이다. Sub-Bituminous C에 속하는 원료탄은 SynCoal 공정을 거친 후 ASTM에 명시된 석탄분류 방식을 기준으로 할 때 High-Volatile Bituminous로 전환된 것으로 판명되었다. 특히, 수분함량이 25%에서 3%로 감소되었고 발열량은 4,800 kcal/kg에서 6,500 kcal/kg로 향상되었다.

초청정석탄 생산 기술

초청정석탄 제조기술은 1) 석탄으로부터 회분을 제거

Fig. 14. Flowsheet of SynCoal process.

하는 기술과 2) 석탄으로부터 가연성 성분만을 회수하는 2가지 방향으로 기술이 개발되어 왔다. 전자는 불순물을 제거하는 기술이고 후자는 유효성분을 추출하는 기술이다. 전자의 기술은 주로 미국과 호주에서 연구개발이 진행되고 있으며 후자의 기술은 일본에서 개발되고 있다. 관련 기술의 개발현황은 다음과 같다.

UCC (Ultra clean coal) process

호주 CSIRO에서 일본의 CCUJ(Center for Coal Utilization Japan)와 공동으로 회분 0.3%(3000 ppm)의 초청정석탄 제조기술을 개발 중이다. 이 공정은 UCC(Ultra Clean Coal) Project로 명명되었다. 기술의 개요를 Fig. 15에 나타내었다(Cottrell *et al.*, 2004). UCC 공정은 두 공정으로 대별된다. 우선 NaOH 고압침출공정에서 규산염 및 점토 광물은 다음 식에 따라 용해 가능한 규산나트륨과 방소 다형 광물(sodalite type minerals)로 변환되고 산(acid)으로 용해되어 고-액분리로 제거된다(Cottrell *et al.*, 2004).

이 공정은 요구되는 석탄의 크기가 500 μm 정도로 단체분리를 위한 석탄의 분쇄가 필요하지 않고, 알칼리 성분 등 불순물을 제거할 수 있어 역청탄을 처리할 수 있다. 1995년에 일본의 NEDO와 CCU Japan 그리고 호주의 CSIRO에서 공동으로 투자하여 공정의 가장 큰 약점으로 지적되고 있던 알칼리의 재생공정을 개발하여 현재

상용화 개발단계에 있다. 현재는 호주의 Hunter Valley에 약 1500만US\$를 투자하여 10 ton/day를 생산하는 pilot plant가 운전되고 있다.

HPC (Hypercoal) process

일본은 호주와 공동으로 개발하고 있는 UCC project와 별도로 독자적으로 CCUJ 지원으로 산업기술총합연구소(AIST, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) 산하 ETRI(Energy Technology Research Institute)에서 회분 200 ppm 이하의 초청정석탄 제조기술을 개발 중에 있다(HyperCoal Project). 또한 본 기술은 일본 CCT(Clean Coal Technology)의 장기개발계획 로드맵에 포함되어 있는 기술이다. HyperCoal project는 ETRI에서 시작한 project로 1999년에 시작하여 2001년 Phase I이 수행되어 기초연구가 종료되었고 2004년 벤치규모 연구인 Phase II가 종료되었으며 2005년부터 Phase III가 시작되는 장기적인 project이다. Phase III는 pilot plant 단계로 2007년에 demonstration plant를 건설할 예정이다. HyperCoal project의 공정개념을 Fig. 16에 나타내었다(Mochida, 2008). 석탄에서부터 용매를 이용하여 탄소성분을 추출해내어 ashless coal을 만들어낸다. 이 무회 석탄(ashless coal)은 연소후 입자성분이나 공해물질이 없기 때문에 가스터빈에 그대로 사용이 가능하다. 따라서 발전효율은 48%까지 증가할 것으로 예상된다.

HyperCoal의 원료는 갈탄이므로 HyperCoal 제조과정에서 발생하는 residue, 즉 ‘organic+ash’이라고 되어 있는 부분은 역청탄과 유사한 등급의 석탄이며 이는 그대로 산지에서 스팀터빈용 연료로 사용이 가능하다. 효율이 48%까지 상승하므로 CO₂ 저감효과가 커서 CO₂ 저감을 위한 교토의정서 대응수단이 될 수 있다. Hypercoal

Fig. 15. UCC process (Cottrell *et al.*, 2004).

을 이용한 발전시스템에서 입자크기 $74\ \mu\text{m}$, 회분 200 ppm 이하의 초청정 석탄을 90°C , 1.5 MPa에서 주입하여 연소시키고 가압용 공기를 연소공기로 사용하여 가스 터빈을 구동하고 폐열을 이용하는 복합발전 시스템 운영이 가능하다. 대기오염물질 처리는 용매추출과정에서 석탄의 marcceral(유기물질)에 붙어 있던 황이 연소되어만 들어지는 소량의 SO_2 만 제거하면 된다.

국내의 저등급 석탄 고품위화 기술

국내에서 저등급 석탄의 고품위화 기술개발 연구는 주로 한국에너지기술연구원(KIER), 한국지질자원연구원(KIGAM) 그리고 일부 대학을 중심으로 이루어지고 있다(Chun *et al.*, 2011; Chun *et al.*, 2013; Kang *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2008; Lee and Kim, 2008; Lee and Park, 2013; Ohm *et al.*, 2013). 한국지질자원연구원에서는 저등급 석탄에 대한 청정석탄 제조 가능성을 알아보기 위해 몽골 Baganuur 탄전에

서 생산되는 저등급 석탄의 화학적, 광학적, 열적 및 광물학적 특성 연구를 수행한바 있다(Lee *et al.*, 2010). 한국에너지기술연구원에서는 1995년부터 호주와 일본이 공동으로 수행하고 있는 UCC공정과 유사한 공정의 기초 연구를 수행한 바 있으며 회분 0.3%의 청정석탄을 제조한 바 있다. 또한 일본에서 수행하고 있는 HyperCoal process와 관련된 연구도 실험실 규모로 용매추출을 수행한 예가 있다. 최근에 상업화를 위한 저등급 석탄의 고품위화 기술개발을 활발히 수행하여 괄목할만한 성과를 거두고 있다. 한 예로 수분이 많고 열량이 낮은 저등급 석탄을 대상으로 건조와 수분 재침투를 방지하여 석탄의 열량을 획기적으로 높이고 안정적으로 발전소에서 활용 할 수 있는 저등급 석탄 고품위화 기술을 국내 독자적으로 개발하는데 성공했다. 한국에너지기술연구원에서 개발한 저등급 석탄 고품위화 기술은 당진화력발전소 현장에서 적용되는 ‘유동층 건조 기술(Fig. 17)’과 탄광 현장에서 적용되는 ‘기름침적 건조기술(Fig. 18)’로 구분된다. 유

Fig. 16. Schematic diagram of HyperCoal process.

Fig. 17. Fludized bed-drying technology plant (10 t/d).

Fig. 18. Drying-in-oil technology plant (5 t/d).

동충 건조 기술은 수분 35%의 저등급 석탄을 분쇄하여 유동층 건조기로 이동시킨 후 발전소 굴뚝에서 빠져나가는 폐열을 이용, 약 150℃의 배가스를 주입하여 분쇄된 석탄을 가스상에 부유시켜 수분을 제거, 고품위화 하는 기술로 1일 10톤의 저등급 석탄을 투입하는 경우, 8톤에 해당하는 고품위 석탄 생산이 가능하고, 공정 과정에서도 기존 기술에 비해 장치가 단순하며 운전이 용이하여 10% 이상 비용을 절감할 수 있게 됐다. 기름침적 건조 기술은 저등급 석탄을 탄광 현장에서 직접 수분을 제거하여 고품위화 시키고 고분자를 입혀 안정화시킴으로써 장거리 운송되는 동안 자연발화되는 것을 방지하는 기술이다. 이 기술은 탄광 현장에서 분쇄된 저등급 석탄을 고분자화합물이 용해된 기름과 혼합한 후 고속 원심분리기를 이용하여 고분자화합물이 코팅된 석탄을 분리하고, 고온의 스팀을 이용한 회전형 건조기로 수분을 제거하여 고품위화하는 기술로 1일 5톤의 저등급 석탄을 투입하여 4톤에 달하는 고품위 석탄을 안정화 시킬 수 있으며, 기존 기술에 비해 석탄안정화에 사용되는 기름의 소모량을 20% 이상 절감시킬 수 있는 것으로 나타났다.

결 론

이 해설에서는 저등급 석탄의 특성을 정리하고 저등급 석탄의 국내 처리기술 향상을 위해서 관련 저등급 석탄 고품위화기술을 고도선택기술, 표면개질기술, 초청정석탄 생산기술로 대별하여 정리하였다. 저등급 석탄인 아역청탄과 갈탄은 발열량이 낮고 수분함유량이 높아 향후 주요 에너지원으로 사용하기 위해 기술개발이 요구된다. 저등급 석탄의 고도선택기술은 원심력을 이용한 비중선별, 부유선별법의 개선, 선택적 응집기술로, 표면개질기술은 UBC 공정과 건조기술, 초청정석탄 생산기술은 UCC 공정과 HPC 공정이 개발되어왔다. 해외 관련기술의 선진국에서는 원천기술을 확보하고 상용화 규모의 파일롯 플랜트의 시험운동을 진행하고 있으나 이에 비하여 국내에서는 아직까지 상용화를 위한 연구가 부족한 실정이다. 국내산업의 발전을 위한 에너지원의 안정적인 확보와 이산화탄소의 저감 등의 목적을 위해 국내에서도 저등급 석탄에 대한 지속적인 연구개발이 요구된다.

사 사

본 연구는 한국광물자원공사의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 당 연구를 지원해주신 관계자들께 감사드립니다.

References

- Atesok, G., Boylu, F. and Celik, M.S., 2001, "Carrier Flotation for Desulfurization and Deashing of Difficult-to-float Coals," *Minerals Engineering*, Vol. 14, pp. 661-670.
- Chun, D.H., Kim, S.D., Rhim, Y.J. and Lee, S.H., 2011, "Economic Analysis of Upgrading Low Rank Coal Process," *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 49, No. 5, pp. 639-643.
- Chun, D.H., Park, I.S., Cho, W.T., Jo, E.M., Kim, S.D., Choi, H.K., Yoo, J., Lim, J.H., Rhim, Y.J. and Lee, S., 2013, "The Stabilization Study of Low-rank Coal by Vapor Adsorption," *Clean Technology*, Vol. 19, No. 1, pp. 38-43.
- Cottrell, A., Nunn, J. and Wibberley, L., 2004, "Systems Assessment of Ultra Clean Coal for Potential Use in Distributed Electricity Generation in Japan," Technology Assessment Report 39 of Cooperative Research Centre for Coal in Sustainable Development, p. 2.
- Cowburn, J., Harbort, G., Manlapig, E. and Pokrajcic, Z., 2006, "Improving the recovery of coarse coal particles in a Jameson cell, *Minerals Engineering*," Vol. 19, pp. 609-618.
- Ding, K. and Laskowski, J.S., 2006a, "Coal reverse flotation. Part I: Separation of a mixture of subbituminous coal and gangue minerals," *Minerals Engineering*, Vol. 19, pp. 72-78.
- Ding, K. and Laskowski, J.S., 2006b, "Coal reverse flotation. Part II: Cleaning of a subbituminous coal," *Minerals Engineering*, Vol. 19, pp. 79-86.
- Honaker, R.Q., Das, A. and Nombe, M., 2005a, "Improving the Separation Efficiency of the Knelson Concentrator Using Air Injection," *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, Vol. 25, No. 2, pp. 99-116.
- Honaker, R.Q., Ozsever, A.V. and Parekh, B.K., 2006, "Selective Detachment Process in Column Flotation Froth," *Minerals Engineering*, Vol. 19, pp. 687-695.
- Honaker, R.Q., Singh, N. and Govindarajan, B., 2000, "Application of Dense-medium in an Enhanced Gravity Separator for Fine Coal Cleaning," *Minerals Engineering*, Vol. 13, pp. 415-427.
- Honaker, R.Q., Yoon, R.H. and Luttrell, G.H., 2005b, "Ultrafine Coal Cleaning Using Selective Hydrophobic Coagulation," *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, Vol. 25, No. 2, pp. 81-97.
- Ito, M., 2008, "Recent Developments in Advanced Coal Cleaning," *J. of MMIJ*, Vol. 124, pp. 865-870.
- Kang, T., Jeon, D., Jeon, Y., Kang, S., Lee, S., Kim, S. and Kim, H., 2010, "A Study on Drying Kinetics of Low Rank Coal (Indonesia-IBC) through the Fixed-Bed Reactor

- Experiments," *J. of Korean Institute of Resources Recycling*, Vol. 19, No. 6, pp. 43-50.
- Karr, C., 1978, *Analytical Methods for Coal and Coal Products*, Academic Press, New York, USA, p. 252.
- KEMCO (Korea Energy Management Cooperation), 2012, *2012 Energy Statistical Handbook*, KEMCO, pp. 6-75.
- Kempnich, R., 2000, "Coal Preparation-A World View," Proceedings 17th International Coal Preparation Exhibition and Conference, May 2-4, Lexington, Kentucky, USA, pp. 5-48.
- Kim, K., Cho, H. and Lee, S., 2010, "The Effect of Coal and Solvent Properties on Coal Solvent Extraction," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 47, No. 2, pp. 133-138.
- Kim, D.H., 2011, "The 4th National Program for Overseas Resources Development," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 48, No. 6, pp. 813-820.
- Kim, S.D., Lee, S.H., Rhim, Y.J., Choi, H.K., Lim, J.H., Chun, D.H. and Yoo, J.H., 2012, "Drying Characteristic of High Moisture Coal Using a Flash Dryer," *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 50, No. 1, pp. 106-111.
- Kucuk, A., Kadioglu, Y. and Gulaboglu, M.S., 2003, "A Study of Spontaneous Combustion Characteristics of a Turkish Lignite: Particle Size, Moisture of Coal, Humidity of Air," *Combustion and Flame*, Vol. 133, No. 3, pp. 255-261.
- Lee, S. and Kim, S., 2008, "Technology for the Preparation of Ash-free Coal from Low Rank Coal(LRC)," *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 46, No. 3, pp. 443-450.
- Lee, S. and Park, J., 2013, "Drying/Stabilizing Technologies for Low Rank Coal," *News & Information for Chemical Engineers*, Vol. 31, No. 1, pp. 36-41.
- Lee, S., Park, S., Bae, I., Kwon, S. and Shin, H., 2010, "Characterization of Mongolian Baganuur Coal Properties," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 47, No. 5, pp. 668-677.
- Lee, S., Shin, H., Bae, I. and Chae, S., 2008, "Report on Upgrading Technology for Low-Rank Coal," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 45, No. 3, pp. 272-282.
- Leonard III, J.W. and Hardinge, B.C., 1991, *Coal Preparation*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Colorado, USA, p. 6.
- Li, B., Tao, D., Ou, Z. and Liu, J., 2003, "Cyclo-microbubble Column Flotation of Fine Coal," *Separation Science and Technology*, Vol. 38, No. 5, pp. 1125-1140.
- Miller, B.G., 2011, *Clean Coal Engineering Technology*, Elsevier, Oxford, UK, pp. 25-61.
- Mochida, I., 2008, *Clean Coal Technology*, Kogyo Chosakai Publishing Co., Ltd., Tokyo, Japan, pp. 182-186.
- Mohanty, M.K., 2001, "Technical note in-plant optimization of a full-scale Jameson flotation cell," *Minerals Engineering*, Vol. 14, pp. 1531-1536.
- Ohm, T.I., Chae, J.S. and Lim, J.H., 2013, "Experimental Study on Oil Separation from Fry-dried Low-rank Coal," *Clean technology*, Vol. 19, pp. 30-37.
- Otaka, Y., 2011, "Drying Technology for Lignite," *JCOAL Journal*, Vol. 19, pp. 19-22.
- Park, C.L., Kim, B.G., Jeon, H.S. and Choe, H.I., 2010, "Overview of Patent Analysis for Clean Coal Technology," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 47, No. 2, pp. 214-221.
- Polat, M., Polat, H. and Chander, S., 2003, "Physical and chemical interactions in coal flotation," *Int. J. of Mineral Processing*, Vol. 72, pp. 199-213.
- Ptasinski, K.J., Prins, M.J. and Pierik, A., 2007, "Exergetic Evaluation of Biomass Gasification," *Energy*, Vol. 32, No. 4, pp. 568-574.
- Shen, M. and Wheelock, T.D., 2000, "Coal Agglomeration with Microbubbles," *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, Vol. 21, No. 3, pp. 277-298.
- Sugita, S., Deguchi, T. and Shigehisa, T., 2003, "UBC (Upgraded Brown Coal) Process Development," *Kobe Steel Engineering Reports*, Vol. 53, No. 2, pp. 41-45.
- Sugita, S., Deguchi, T. and Shigehisa, T., 2006, "Demonstration of a UBC (Upgrading of Brown Coal) Process in Indonesia," *Kobe Steel Engineering Reports*, Vol. 56, No. 2, pp. 23-26.
- Sujanti, W. and Zhang, D.K., 1999, "A laboratory Study of Spontaneous Combustion of Coal: the Influence of Inorganic Matter and Reactor Size," *Fuel*, Vol. 78, No. 5, pp. 549-556.
- Umar, D.F., Daulay, B., Usui, H., Deguchi, T. and Sugita, S., 2005, "Characterization of upgraded brown coal (UBC)," *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, Vol. 25, No. 1, pp. 31-45.
- Wills, B.A. and Napier-Munn, T.J., 2006, *Wills' Mineral Processing Technology*, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, p. 16.
- Yu, J., Tahmasebi, A., Han, Y., Yin, F. and Li, X., 2013, "A Review on Water in Low Rank Coals: The Existence, Interaction with Coal Structure and Effects on Coal Utilization," *Fuel Processing Technology*, Vol. 106, pp. 9-20.
- Yukawa, K., Hirajima, T., Tsunekawa, M., Suyama, C. and Oki, T., 2002, "Upgrading of Low Rank Coal by Advanced Technology," *J. of MMIJ*, Vol. 118, pp. 695-700.

정 문 영

현재 세명대학교 바이오환경공학과 교수
(本學會誌 第49卷 第3号 參照)

유 경 근

현재 한국해양대학교 해양과학기술대학 에너지자원공학과 조교수
(本學會誌 第49卷 第4号 參照)