저등급 석탄의 활용기술 현황

유경근¹⁾ · 정문영^{2)*}

Utilizing Technologies for Low Rank Coal; A Review

Kyoungkeun Yoo and Moonyoung Jung*

(Received 19 May 2014; Final version Received 18 June 2014; Accepted 19 June 2014)

Abstract : The development for processing technologies of low rank coal (brown & 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 diversify bituminous coal import markets in Korea, importing more than 98.5 % of coal. In the present article, the development direction of domestic processing technologies for low rank coal was suggested by summarizing the reserves of low rank coal and by categorizing the utilizing technologies of low rank coal to liquid (CTL) technology, coal gasification technology, integrated gasification combined cycle (IGCC) technology, and mine mouth power plant (MMPP).

Key words : Low rank coal, Brown coal, Subbituminous coal, Reserves, Utilizing technologies

요 약 : 석탄의 98.5 %를 수입에 의존하고 있는 우리나라는 유연탄 중심의 석탄사용을 다변화하기 위해 점결성이 없고, 수분함량이 높아 발열량이 낮으며, 자연발화되기 쉬워 활용이 어려운 저등급 석탄(갈탄 및 아역청탄)의 활용기술 개발이 필수적이다. 이 글에서는 저등급탄의 부존현황을 정리하고 활용기술로 액화기술, 가스화기술, 가스화복합발전기술, MMPP(Mine Mouth Power Plant)기술로 대별하고 분석·제시하여 국내외에서 자주개발 중인 저등급 석탄의 활용기술 활성화에 도움이 되고자 하였다.

주요어 : 저등급탄, 갈탄, 아역청탄, 부존현황, 활용기술

서 론

2012년 에너지통계핸드북에 따르면 2010년 세계 1차 에너지 소비량 중 석탄은 28.9%로 석유 다음의 에너지 비중을 나타내고 있다(KEMCO, 2012). BRICs(브라질, 러시아, 인도, 중국) 등의 경제성장으로 인하여 2030년 총에너지 수요는 165억 TOE에 이를 것으로 예상되고 있으며, 석탄은 2002년 24억 TOE에서 지속적으로 증가하여 2030년 36억 TOE로 전체 에너지 중 21.8%의 비중을 차지할 것으로 예상되고 있다(Park *et al.*, 2010). 국내 1차 에너지 소비량은 2000년 192,887 TOE에서 2010년 262,609 TOE로 크게 증가하였으며, 석탄은 2011년 30.3%의 에너지 비중을 나타내었다(KEMCO, 2012). 우

리나라는 석유, 석탄, 천연가스 등 에너지자원의 97% 이상을 수입에 의존하는 대표적인 자원빈국이며(Kim, 2011), 2010년 국내에서 사용된 석탄 중 수입비율은 98.5%에 달한다(KEMCO, 2012).

2013년 2월 산업통상자원부는 2027년까지 화력발전 용량을 1천580만kW까지 증설하기로 한 ‘제6차 전력수급기본계획’을 확정 발표했다. 정부는 2027년 여름에 최대전력수요가 1억2천674만kW에 달하므로 발전소를 증설해 2천957만kW의 설비 용량을 늘릴 필요가 있는 것으로 판단했다. 이를 위해 석탄 1천74만kW(6개 발전사·12기), LNG 506만kW(6개사·6기) 등 화력발전설비 1천580만kW를 2027년까지 증설하도록 각 발전사업자의 건설 의향을 제6차 전력수급기본계획에 반영했다. 따라서 국내의 석탄 중 발전용 연료탄의 사용량은 지속적으로 증가할 전망이다.

석탄은 Table 1과 같이 무연탄(Anthracite), 유연탄(역청탄, Bituminous), 아역청탄(Subbituminous), 갈탄(Lignite or brown coal)으로 분류할 수 있다(Leonard III and Hardinge,

1) 한국해양대학교 에너지자원공학과

2) 세명대학교 바이오환경공학과

*Corresponding Author(정문영)

E-mail: myjung@semyung.ac.kr

Address: Department of Bio & Environmental Eng.,
Semyung University, Choongbuk, Korea

1991). 미국에서는 갈탄과 아역청탄을 저등급 석탄(Low-rank coal)으로 분류하고 역청탄과 무연탄을 고등급 석탄(High-rank coal)으로 분류하나, 유럽에서는 갈탄을 저등급 석탄으로, 아역청탄은 경우에 따라 무연탄, 역청탄과 함께 고등급 석탄으로 분류하기도 한다(Miller, 2011). 관세청이 2014년 1월 발표한 ‘에너지류 수입동향’과 한국광물자원공사의 ‘한국자원정보서비스’(http://www.kores.net)에 따르면 2012년 석탄 수입량은 12,560만톤이며 유연탄 수입량은 11,460만톤으로 대부분을 차지하고 있다. 현재 사용이 부진한 저등급 석탄의 활용기술을 확보한다면 수입다변화에 따른 석탄의 안정적인 공급체계 구축을 기대할 수 있다.

갈탄과 같은 저등급탄은 점결성과 발열량이 낮은 반면, 다량의 수분을 함유하고 있기 때문에 자연발화 등 수송, 저장시의 문제점과 낮은 이용효율로 생산현지에서만 에너지원으로서 이용되어왔다(Lee et al., 2008; Otaka, 2011). 저등급탄 이용기술은 고품위화 기술과 활용기술로 대별할 수 있으며, 저자들은 고품위화기술을 고도선탄기술, 표면개질기술과 초정석성탄 생산기술로 분류, 요약하여 보고하였다(Jung and Yoo, 2014). 이 글에서는 향후 석탄화력발전에서 필요한 연료의 안정적 확보 및 청정 이용 확대 차원에서 전 세계에 분포되어 있는 저등급 석탄의 자원동향(매장량, 생산량 등)을 조사·분석하고 국내외 저등급 석탄의 활용기술에 대한 연구현황과 실용화 현황을 제시하여 국외에서 자주개발 중인 저등급 석탄의 활용기술 활성화에 도움이 되고자 하였다.

저등급 석탄의 부존현황

석탄은 현재 매장량으로 추산할 때 가채연수 100년에서 500년으로 추산되고 있다(Han et al., 2007; Kim et al., 2010; Lee et al., 2008; Yu et al., 2013). 석탄의 가채연수를 증가시키기 위해서는 새로운 석탄자원의 개발도 중요하나 이미 파악된 저등급 석탄의 효율적인 활용도 매우 중요하다. 국내의 저등급 석탄의 부존량을 다음과 같이 정리하였다. 국내의 저등급 탄전은 경주·영일지역 및 북평·영덕지역에 위치하고 있다. 경상북도 영일군(현 포항시 북구 흥해읍 부근) 및 월성군에 걸쳐 있는 경주·영일지역 탄전과 경북 영덕군 및 강원도 북평지역(현 동해시)에 걸쳐 있는 북평·영덕지역 탄전에 부존하고 있는 저등급 석탄의 총 매장량은 약 835만톤으로 알려져 있다(Table 2)(Park, 1984 and 1985). 경주와 도구지역의 저등급탄은 갈탄의 범주에 속하나 장기지역의 저등급탄은 아역청탄, 그리고 영덕과 북평지역의 저등급탄은 갈탄 중에서도 탄화도가 낮은 연갈탄(soft brown coal)에 해당한다. 화학적 특성으로부터 국내산 저등급탄은 가스화 연료탄으로는 사용가능하나 액화용 원료로는 적합하지 않다(Park, 1984 and 1985). 국내 저등급탄의 발열량은 무수·무회분 기준(as dry ash free basis)으로 경주·영일지역에 부존되어 있는 저등급탄의 발열량은 비교적 높으나 북평·영덕지역에 부존되어 있는 저등급탄의 발열량은 비교적 낮다. 이들 저등급탄은 모두 비점결성이고 착화온도는 204~280℃이다(Park, 1984 and 1985).

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	Agglomerating
	High volatile C bituminous coal			6,389-7,222	
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	
	Lignite B			<3,500	

세계 석탄의 확인 매장량은 8,610억 톤이며 이중에서 53%가 저등급 석탄인 아역청탄과 갈탄으로 그의 매장량은 4,562억 톤이다(BP, 2012). Fig. 1에 저등급 석탄(아역청탄과 갈탄)의 세계 권역별 매장량을 나타내었으며 유럽·유라시아 46.39%(211,614백만톤), 북미 28.99%(132,253백만톤), 아시아·태평양 23.35%(106,517백만톤), 중남미 1.23%(5,618백만톤), 중동·아프리카 0.04%(174백만톤)의 순이다(BP, 2012). 러시아, 미국, 호주 등의 석탄 가채연수는 200년 이상이고, 중국은 약 50년, 인도네시아는 약 30년으로 나라별로 가채연수는 다양하게 나타난다(JCOAL, 2010).

Fig. 1. The (a) share and (b) amount of proved reserve of subbituminous and lignite by region (BP, 2012).

Fig. 2에 저등급 석탄(아역청탄과 갈탄)의 가채매장량 점유율이 높은 주요 10개 국가를 나타내었으며 미국 28.23%(128,794백만톤), 러시아 23.66%(107,922백만톤), 중국 11.46%(52,300백만톤), 독일 8.90%(40,600백만톤), 호주 8.62%(39,300백만톤), 우크라이나 4.06%(18,522백만톤), 카자흐스탄 2.65%(12,100백만톤), 브라질 1.00%(4,559백만톤), 인도 0.99%(4,500백만톤), 인도네시아 0.88%(4,009백만톤) 순으로 가채매장량이 높다.

한편, WEC(world energy council) 보고에 의하면 저등급 석탄에서 갈탄의 가채매장량은 약 195,387백만톤(2008년 말)이며, 이는 저등급 석탄(아역청탄과 갈탄)

Fig. 2. The (a) share and (b) amount of proved reserve of subbituminous and lignite for top 10 countries (BP, 2012).

Table 2. The reserve and rank of domestic low rank coal (Park, 1984 and 1985)

Area	Reserve (1000 ton)	Class	Remark
Gyeongju	1,810	Lignite-subbituminous coal	Non-agglomerating
Dogu	2,660	Lignite-subbituminous coal	Non-agglomerating
Janggi	1,080	Subbituminous coal	Non-agglomerating
Yeongdeok	2,800	Lignite	Non-agglomerating
Bukpyeong		Lignite	Non-agglomerating
Total	8,350		

가채매장량의 42.83% 그리고 석탄 총 가채매장량의 22.69%를 점유하는 양이다(Fig. 3). Fig. 4에 주요국의 갈탄 확인가채매장량(2008년말 기준)을 나타내었다. 독일이 40,600백만톤으로 가장 많고, 호주, 미국, 중국 순으로 높다. Fig. 5는 IEA에서 발표한 갈탄의 생산량 추이를 나타낸 것이다. 1985년과 1990년 갈탄의 생산량은 약

Fig. 3. Proved recoverable reserves of various coal rank at end-2008 (WEC, 2010).

Fig. 4. Proved recoverable lignite reserves by countries at end-2008 (WEC, 2010).

Fig. 5. World brown coal production (IEA, 2011).

12억톤으로 가장 높고 1995년 감소하였으나 점차 증가하여 2010년 갈탄의 생산량은 약10.4억 톤으로 집계되었다(IEA, 2011). 주요 국가별 갈탄생산량을 Fig. 6에 나타내었다. 독일, 인도네시아, 터키 순으로 생산량이 많으며 2010년 독일은 169.9백만톤, 인도네시아는 140.9만톤을 생산하였다(IEA, 2011).

Fig. 7에 세계 갈탄소비량 추이를 나타내었다. 전체적인 소비량은 Fig. 5의 생산량과 비슷한 추이를 나타내고

Fig. 6. Brown coal production in 2009 by countries (IEA, 2011).

Fig. 7. World brown coal consumption (IEA, 2011).

Fig. 8. Share of coal-fired power generation in selected countries in 2010 (EURACOAL, 2011).

있으나, 주요 소비국은 독일, 러시아, 미국의 순으로 생산국과 소비국이 다른 것을 알 수 있다(IEA, 2011). 갈탄의 주요 소비처로서 화력발전을 예로 들 수 있다. 전 세계 발전의 주요 에너지원은 석탄으로 평균 41%가 석탄으로부터 발전되고 있다(EURACOAL, 2011). Fig. 8에 주요 국가의 석탄화력발전비율과 원료사용비율을 나타내었다. 석탄화력발전 의존성이 가장 높은 국가는 남아공으로 2010년 94%이며, 폴란드 88%, 중국 79%, 호주 76%, 카자흐스탄 75%, 세르비아 72% 순이다. 세계 석탄화력발전의 원료 중 약 4%는 갈탄을 사용하고 있으며, 특히, 세르비아와 그리스는 석탄화력발전의 원료로 전량 갈탄만을 사용하고 있다(EURACOAL, 2011).

저등급 석탄의 활용기술 동향

저등급 석탄의 액화기술

석탄을 액체연료로 전환시키는 기술이 20세기 초에 독일에서 개발되었다. 그중 하나는 석탄 직접액화기술로서 1913년에 Friedrich Bergius에 의해 특허로 등록되었는데 이 공정은 고온 및 고압의 반응조건에서 석탄을 용매에 녹여서 비등점이 높은 탄화수소 성분을 합성하는 기술이다. 이 공정은 기존의 석유화학 공정에서 중질유로부터 hydrocracking 공정에 의해 휘발유와 디젤연료를 얻는 방법과 유사하며, 1927년에 독일에서 최초로 상용화되었다. 직접액화 공정은 2단계 반응에 의해 이루어지는데 1단계 반응은 고온·고압에서 석탄을 열분해시키는 과정이다. 분해된 석탄입자를 안정한 액체연료로 전환시키기 위해 2단계 공정에서 다량의 수소와 반응을 시킨다. 석탄 중에 함유된 다양한 무기질 성분은 수침반응에서

축매 역할을 수행하게 된다. 이렇게 하여 얻어진 1차 직접액화 생성물은 이후 석유정제 공정을 통하여 여러 종류의 액체 탄화수소 연료로 업그레이드된다. 2단계 공정에서 소모되는 수소는 석탄을 가스화하여 얻어지는 합성

Fig. 9. Conceptual diagram of direct coal liquefaction.

Fig. 10. Fischer-Tropsch(FT) process.

Table 3. International CTL plants & projects (Aruvian's R'search, 2012)

Country	Owner/Developer	Capacity (bpd)	Status
South Africa	Sasol	150,000	Operational
China	Shenhua	20,000 (initially)	Construction-Operational in 2007
China	Lu'an Group	~3,000 to 4,000	Construction
China	Yankuang	40,000 (initially) 180,000 planned	Construction
China	Sasol JV (2 studies)	80,000 (each plant)	Planning
China	Shell/Shenhua	70,000 - 80,000	Planning
China	Headwaters/UK Race Investment	Two 700-bpd demo plants	Planning
Indonesia	Pertamina/Accelon	~76,000	Construction
Austral	Anglo American/Shell	60,000	Planning
Philippines	Headwaters	50,000	Planning
New Zealand	L&M Group	50,000	Planning

가스와 수성가스 전환반응에 의하여 공급되거나 석탄 이외의 다른 원료물질을 개질하여 공급된다. 직접액화 공정의 열효율은 고위발열량(High Heating Value, HHV) 기준으로 55% 내외이다. 영국에서도 1935년 creosote oil에 석탄을 녹여서 연간 15만톤의 휘발유를 생산하는 직접액화공정의 조업을 수행한 바 있었다. 특히, 직접액화 기술(Fig. 9)은 1970년대부터 1990년대 초까지 미국 에너지성(Department of Energy, DOE)을 중심으로 연구개발이 진행되었으며 2개의 pilot plant가 건설되어 운전되었으나 1980년 들어서 기술 안정성의 불투명성, 건설 투자비 증가 및 안정된 저유가 등의 영향으로 모두 중지되었다.

1925년에 Franz Fischer, Hans Tropsch와 Helmut Pichler가 직접액화기술의 대안으로 간접액화기술을 개발하였으며 발명자 이름을 따서 Fischer-Tropsch(FT) 공정이라고 불리며 1936년에 최초로 상용화되었다(Fig. 10). FT 공정을 통하여 생산된 디젤연료유는 세탄가가 높고 황화

합물의 함유량이 적어서 청정한 연료로 평가받고 있다. 그러나 FT공정을 통하여 생성된 나프타 성분은 옥탄가가 낮아서 보다 우수한 휘발유로 전환되기 위해서는 추가적인 공정이 필요하다. FT공정을 통해서 생산된 나프타는 석유로부터 추출된 나프타와 동일하게 에틸렌, 프로필렌 및 유기용제의 생산을 위한 원료물질로도 사용된다. FT 공정에서는 탄소고리가 30개 이상인 고체 형태의 왁스도 함께 생산되는데 품질이 매우 우수하여 왁스 형태 그대로도 판매되기도 하고 cracking 공정에 의해 디젤연료로 전환된다. FT 공정을 통하여 생산된 액체 생성물의 업그레이드 공정을 통하여 우수한 품질의 윤활유와 제트연료를 생산할 수도 있다. FT공정의 열효율은 HHV기준으로 50% 정도이다. 합성가스를 니켈계 촉매 상에서 메탄화반응(Methanation)을 시키면 메탄이 주성분인 합성천연가스를 제조할 수 있다. 합성천연가스는 기존의 파이프 라인을 통하여 난방, 발전, 산업연료 등으로 공급되어 활용될 수 있다. 이러한 공정은 현재 미국의 Dakota

Fig. 11. CTL process developed by POSCO.

Fig. 12. Chemical reactions and products by gasification of coal (KIER, 2010).

Gasification Company에 의해 상용화되어 170,000,000 scf/d의 규모로 합성천연가스를 생산하고 있다. 석탄으로부터 합성천연가스를 생산하는 공정의 열효율은 HHV 기준으로 60% 내외이다. Table 3에 계획되거나 수행되고 있는 액화기술 프로젝트를 나타내었다.

최근 중국의 석탄 직접액화 상용화 플랜트건설의 영향으로 국내에서도 석탄직접액화 플랜트에 대한 관심이 높아지고 있다. 2007년 에너지 전문기업인 케너텍이 인도네시아 석탄액화사업권을 획득하였고, 이 사업이 본격화하면 연간 3,300만 배럴 규모의 인조석유 추출이 가능하여 우리나라 에너지 자원 확보에 새로운 장이 열릴 전망이다. 산업통상자원부와 케너텍은 인도네시아 에너지그룹인 느안사그룹과 공동으로 직접 석탄액화사업 추진내용의 MOU를 체결하였다. 이 사업은 인도네시아 칼리만탄 지역에서 생산되는 저칼로리 석탄을 석유로 전환하는 대규모 프로젝트다. 양측은 앞으로 1년 동안 사업타당성을 검토하고 2012년까지 하루 10만 배럴 규모 석유생산 체제를 갖출 계획이며, 이는 단순 환산했을 때 생산 규모는 연간 3,300만 배럴이며 배럴당 90 달러를 감안하면 연간 29억 달러를 웃돈다. 양측은 이를 위해 1단계로 2011년까지 12억 달러를 투자하고, 2012년까지 모두 55억 달러를 투입할 예정이다. 이에 앞서 양측은 동부 칼리만탄 지역에 석탄수송용 철도(350 km)와 물류터미널 등 사회간접기반시설의 건설을 위한 MOU를 체결했다. 이 MOU에는 포스코건설, 케너텍, 느안사그룹 등 사업주체는 물론 동부 칼리만탄 정부부와 인도네시아 철도공사 측 대표도 공동으로 참여하기로 서명하였으며, 이 건설사업은 2009년까지 모두 13억 달러가 소요되며, 케너텍은 건설대가로 이 지역 석탄개발사업권을 얻었다.

포스코는 저가의 풍부한 석탄이 대장이 되어있고 해외 석유 수입의존도가 높은 지역을 사업지역으로 선정하여 저가의 석탄 원료로 고가의 석유계 제품 생산을 통해 높은 사업 수익을 창출하기 위해 석탄을 가스화하여 고가의 석유계 제품을 생산하는 CTL사업을 추진하기로

하였다. 포스코는 저가·저급의 석탄을 가스화하여 고부가가치 청정 액화연료 제조하는 CTL사업을 통해 디젤, 가솔린, LPG, 나프탈렌, DME (dimethyl ether) 등을 생산하며, 이를 위해 Fisher-Tropsch (FT) 합성기술을 도입하기로 하였다. 기술의 개요를 Fig. 11에 나타내었다.

저등급 석탄의 가스화기술

석탄 가스화 공정은 800~1500℃의 온도범위에서 소량의 산소에 의해 석탄이 부분 산화되고 탄소의 일부는 스팀에 의해 수성가스화되어 일산화탄소와 수소로 전환되는 것을 말한다. 부분산화 반응은 석탄을 완전 연소시키기 위해서 필요한 산소의 양보다 상대적으로 적은 양이 가스화 공정에서 사용되는 것을 의미한다. 가스화 공정의 생성물은 가연성분인 일산화탄소와 수소가 주성분이며 소량의 이산화탄소와 물도 존재한다. 부분산화반응을 통해 발생하는 열은 석탄 내부의 화학결합을 끊는 가스화 흡열반응에 필요한 에너지로 사용된다.

가스화 공정에서 수반되는 화학반응은 매우 복잡하며 여러 단계의 화학반응이 순차적 또는 병렬적으로 일어난다. Fig. 12에 가스화 공정에서 수반되는 대표적인 화학반응과 이로부터 생성되어지는 가스의 종류 및 조성을 나타내었다(KIER, 2010). 가스화기를 통하여 탄소계 연료인 석탄은 다음과 같은 여러 단계의 화학적 전환 과정을 거치는 것으로 나타낼 수 있다.

- 1) 열분해 : 열분해 공정은 석탄이 반응기 내부의 온도 구배 영역에 위치하였을 때 진행되는 단계로서 석탄 내부의 상대적으로 약한 화학결합이 끊어지고 휘발성분이 증발하여 고분자량의 char를 생성하는 과정이다.
- 2) 연 소 : 열분해 과정을 통하여 생성된 휘발성분, 촉 등이 산소와 반응하여 이산화탄소(CO₂), 일산화탄소(CO)를 생성하며 가스화 반응에 필요한 열을 공급하는 과정이다.

Table 4. Various kinds of gasifiers (KIER, 2010)

	Fixed bed	Fluidized bed	Entrained flow bed
Coal particle size	5-50 mm	< 6 mm	< 0.1 mm
Pretreatment method	screening	crushing	milling & drying
Caking/swelling	caking/swelling	caking	-
Ash melting point	> 1,200℃	> 1,100℃	< 1,300℃
Ash removal	ash	ash & fly ash	slag & fly ash
Coal rank	Low to high rank coal	Low to high rank coal	High rank coal
Ash content	< 50%	-	< 25%

- 3) 가스화 : 잔존 char 성분이 이산화탄소 및 증기(steam)와 반응하여 일산화탄소와 수소를 생성하는 과정이다.
- 4) 수성가스 전환 및 메탄화 반응 : 가스화공정의 반응조건에 따라 수성가스 전환반응과 메탄화반응의 상기 가역반응이 진행된다.

산소가 상대적으로 부족한 가스화 공정 조건에서는 석탄 내에 함유된 황 성분은 대부분 황화수소(H_2S)로, 일부는 황화카르보닐(COS)로 전환된다. 석탄 내에 함유된 질소 성분은 대부분 N_2 형태로 배출되며 극히 미량의 암모니아(NH_3)와 시안화수소(HCN)를 형성한다. 석탄 내에 함유된 염소 성분은 염산(HCl) 형태로 배출되며 수은, 비소 등과 같은 중금속 성분은 회분과 슬래그 및 배출가스에 함유되어 배출되기 때문에 정제 공정을 통하여 제거되어야 한다. Table 4에는 현재 상용화되었거나 상용화가 가능한 대표적인 가스화기(gasifier)의 특성을 비교하였다(KIER, 2010).

1989년부터 1991년까지 경상대에서 석탄합성가스로부터 LPG계통의 가스를 생산하기위한 촉매개발연구가 수행되었다. 고등기술연구원은 석탄의 가스화 반응을 통해 생성되는 합성가스를 이용한 SNG 전환연구를 2006년부터 진행하고 있으며, 석탄으로부터 SNG를 생산하기 위한 상용공정의 기본 설계를 위한 lab-scale 및 bench-

scale 규모실험 및 상용공정 경제성 분석을 수행하고 있다. Hydrogasification에 의한 합성천연가스(SNG) 생산 분야에서는 한국에너지기술연구원이 2005년에 완료한 “중질탄소의 청정화기술개발”에서 석탄으로부터 Hydrogasification 방법으로 SNG를 제조한 경험이 있다. 포스코는 매장량이 풍부하고 가격이 저렴한 저등급 석탄을 이용하여 합성천연가스(SNG) 생산 사업(Fig. 13)을 진행하고 있다. 포스코 SNG공장은 광양 국가산업단지내 슬래그 처리장 남측에 12.5만평 규모로 1조원 설비투자 규모로 진행하였으며, 2014년 8월 완공 후 시운전을 거쳐 2015년 1월부터 연간 50만톤을 생산하고 있다(KIER, 2010).

저등급 석탄의 IGCC 기술

IGCC (석탄가스화복합발전, Integrated Gasification Combined Cycle) 기술은 석탄을 고온·고압하에서 가스화시켜 일산화탄소(CO) 및 수소(H_2)가 주성분인 가스를 제조·정제한 후 이것으로 가스터빈을 구동하고 배가스 열로 증기터빈을 구동하는 미래 친환경 고효율발전기술이다. IGCC는 발전효율이 높고(현재 39~43%, 고성능 GT사용 시 46% 가능, HHV, 송전단 기준), 환경친화적(탈황율 99.9%, NO_x 25 ppm)이며, 기존 화력발전 대비 15% CO_2 저감효과(CCS 장착시 90%이상)가 있고, 다양한 연료(석탄, 바이오매스, 폐기물)를 사용할 수 있다. 또한 IGCC의 근간을 이루는 가스화기술은 석탄액화(CTL), 수소생산, 합성천연가스(SNG) 생산, 각종 화학원료 생산 및 석탄가스화 연료전지(IGFC) 기술 등과 연계가 가능한 핵심기술이다.

석탄가스화기술은 1930년대 이후 유럽에서 석탄간접 액화를 위한 기술로 개발이 활발히 진행되었으나, 낮은 원유가격으로 인하여 기술이 사장되어 있었다. 그러나 70년대 초반의 제1차 오일쇼크 이후 미국과 유럽의 회사들이 전기 생산을 위한 석탄가스화 기술개발을 다시 시작하였고, 일본은 1983년 이후 전기 생산에 적합한 분류층 석탄가스화 기술개발에 동참하였다. 미국은 석탄가스화를 통하여 전기 생산을 목적으로 한 최초의 프로젝트인 Cool Water Project를 '84-'88년 기간 동안 추진하였다. 본 프로젝트는 1일 석탄 914톤을 사용하여 120 MW 전기를 생산하는 최초의 IGCC 플랜트였다. 그 이후 미국 정부의 50% 자금지원을 받아서 300 MW급 석탄 IGCC 발전소를 GE Energy사 가스화 기술(구 Chevron-Texaco사 기술)과 Conoco-Phillips사 가스화기술(구 E-Gas 가스화기술)을 실증설비로 건설하여 10여년을 운전 중에 있다. 미국은 가스화 기술개발을 IGCC 핵심기술로 인식하여 중점개발하고 있으며, 2015년까지 석탄을

Fig. 13. Schematic diagram of SNG process by POSCO.

사용할 경우 효율 60%가 가능한 시스템 구성을 목표로 하고 있다.

일본은 Sunshine프로젝트의 일환으로서 1983년부터 정부에서 수 조원을 지원하여 일 2톤급 설비로부터 1997년에 200톤/일급 IGCC 시험플랜트에 대한 가동을 마쳤고, 일 200톤급 시험플랜트 건설에 소요되는 90%의 비용을 정부에서 지원하였다. 그리고 그 동안 자체 기술로 개발하여 온 가스화 기술을 이용하여 250 MW급 석탄 IGCC 발전플랜트 건설에 소요되는 9,700억원의 예산 중 30%의 정부지원을 받아 2008년 건설완료하고 시운전 중에 있다. 유럽의 석탄가스화복합발전기술은 네덜란드 Shell사와 독일 Plentia사가 주도하고 있는데, 최근에는 Shell사가 중국 등지에서 가장 활발한 영업활동을 하고 있다. 남아공에서는 Saso사와 Lurgi사가 연합하여 저등급 석탄에 대한 고정층 석탄가스화기술을 근간으로한 석탄가스화사업을 시작하였다. 이처럼 선진국을 중심으로 연구개발과 상용 플랜트급 실증에 많은 투자를 하고 있으며, GE, Shell 등 외국 선진 기업들이 IGCC 핵심특허를 선점하고 있다. 현재 전 세계적으로 14기의 IGCC 플랜트(4,000 MW)가 운전 중에 있으며, 2014년까지 약 50기 25,500 MW의 IGCC 플랜트가 건설될 계획에 있다.

국내의 경우 선진국대비 기술개발 투자규모의 열세로 인하여 기반기술 및 벤치급(1~3톤/일규모) 설비의 설계 건설 및 운전기술개발에 주력하여 실용화 규모면에서 선진국에 비해 열세에 있다. 300 MW급 Clean Coal Technology 발전소의 건설이 2003년에 계획되어 있었으나 지연되다가 산업통상자원부의 제2차 전력수급기본계획에서 2012년으로 조정되었다. 아직은 상용급 IGCC에 대한 설계·건설·운전 등의 기반기술은 부족하나 관련설비의 제작 기술은 국내업체들이 선진국 기술수준에 달하고 있으며, 다만 상용급 설비제작을 위한 상세 설계능력과 경험이 부족한 상태이다.

저등급 석탄의 MMPP

MMPP (Mine Mouth Power Plant)는 저등급 석탄을 직접 이용하기에 적합한 기술이다. 기술한 바와 같이 저등급 석탄은 수분이 많고 휘발분과 산소함량이 높아 발열량도 낮을 뿐만 아니라 쉽게 산화하기 때문에 수송·저장 중 자연발화의 위험성이 있어 장거리 수송에 어려움이 따른다. 따라서 석탄광 부근의 발전소 연료탄으로 사용하는 것이 매우 유리하다. 이와 같이 석탄광과 연계하여 운영하는 석탄화력발전소를 일명 MMPP라 한다. 특히, 갈탄은 점결성(coking)이 없고 열량이 낮아 원료탄으로 사용할 수 없어 유연탄에 비해 이용률이 낮은 편이나 일반적으로 유황과 회분이 적어 IGCC 연료탄으로 사용

하기 적합하다. 태국의 Mae Moh 광산과 Mae Moh 화력발전소의 경우는 갈탄을 MMPP의 연료탄으로 직접 활용하는 대표적인 사례이다. 태국 북쪽에 위치한 Mae Moh 광산은 석탄자원량이 11,400만 톤이고 매장량이 895백만 톤인 동남아시아에서 가장 큰 갈탄광산으로 노천채광(박토비 6.1 BCM/t)에 의해 연간 1,600만톤의 갈탄을 생산하고 있다. Mae Moh 광산에서 생산된 갈탄은 발열량이 평균 2,810 kcal/kg인 저등급탄으로 간단한 선탄공정을 거쳐 전량 태국전력청(EGAT)에서 운영하고 있는 Mae Moh 화력발전소(2,400 MW/y)에 보내져서 전력을 생산하고 있다. 호주 뉴사우스웨일즈주에 있는 델타발전소 소속 화력발전소도 MMPP 사례로 생각할 수 있다. 호주 뉴사우스웨일즈주 리스고시 북쪽에 위치하고 있는 스프링베일광산은 현재 한국광물자원공사와 SK넥트웍스가 각각 25%씩 지분을 소유하고 있는 탄광으로 갱내채광(통월채탄법)에 의해 연간 300만톤의 유연탄을 생산하고 있는데 이중 약 125만톤을 근처에 있는 델타발전소 소속 Wallerawang발전소(500 MW)와 Mt. Pipe 발전소(700 MW)의 연료탄으로 사용하고 있다.

결론

이 글에서는 저등급 석탄의 부존현황 및 활용기술 위주로 정리하였다. 저등급석탄인 아역청탄과 갈탄의 매장량은 4,562억 톤으로 평가되고 있으나 발열량이 낮고 수분함유량이 높아 향후 주요 에너지원으로 사용하기 위해 기술개발이 요구된다.

저등급 석탄의 활용기술은 액화기술, 가스화기술, 석탄가스화 복합발전, MMPP 기술로 분류된다. 해외에서는 원천기술을 확보하고 상용화 규모의 파일럿 플랜트의 시험운전을 진행하고 있으나 이에 비하여 국내에서는 아직까지 연구가 부족한 실정이다. 국내산업의 발전을 위한 에너지원의 안정적인 확보와 이산화탄소의 저감 등의 목적을 위해 국내에서도 지속적인 연구개발이 요구된다.

사사

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

References

- Aruvian's R'search, 2012, Analyzing the Global Coal Industry, Aruvian's R'search present, p. 591.

- BP, 2012, BP Statistical Review of World Energy June 2012, BP p.l.c., London, UK, pp. 30-34. (<http://www.bp.com>)
- EURACOAL (European Association for Coal and Lignite), 2011, Coal Industry across Europe 2011, European Association for Coal and Lignite, Brussels, Belgium, p. 6. (<http://www.euracoal.be>)
- Han, O.-H., Jeon, H.-S. and Baek, S.-H., 2007, "Development of Electrostatic Separation Technnique for Production of Clean Coal," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 44, No. 1, pp. 39-45.
- IEA, 2011, *Coal Information*, International Energy Agency, Paris, France, pp. III10-III11.
- JCOAL (Japan Coal Energy Center), 2010, Introduction to Coal Resources Development, JCOAL (Japan Coal Energy Center), Tokyo, Japan, p. 11. (<http://www.jcoal.or.jp>)
- Jung, M. and Yoo, K., 2014, "Upgrading Technologies of Low Rank Coal; A Review," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 51, No. 1, pp. 116-129.
- KEMCO (Korea Energy Management Cooperation), 2012, *2012 Energy Stastical Handbook*, KEMCO, pp. 6-75.
- KIER (Korea Institute of Energy Research), 2010, Feasibility Study on the Coal to Liquid Technology Development, KIER, p. 10.
- 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, 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.
- 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 Minig, Metallurgy, and Exploration, Inc., Colorado, USA, p. 6.
- Miller, B.G., 2011, *Clean Coal Engineering Technology*, Elsevier, Oxford, UK, pp. 25-61.
- Otake, 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.
- Park, S., 1984, Study on Coal Property (Gyeongju-Yeongil), KIGAM Report (83-Coal Resources-3-16).
- Park, S., 1985, Study on Coal Property (Bukpyeong-Yeongdeok), KIGAM Report (85-10).
- WEC (World Energy Council), 2010, 2010 Survey of Energy Resources, World Energy Council, London, UK, pp. 1-40. (<http://www.worldenergy.org>)
- 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.

유 경 근

1995년 한양대학교 자원공학과 공학사
1997년 한양대학교 자원공학과 공학석사
2003년 Hokkaido University 공학박사
2005-2010년 한국지질자원연구원 광물
자원연구본부 선임연구원

현재 한국해양대학교 에너지자원공학과 부교수
(E-mail; kyoo@kmou.ac.kr)

정 문 영

현재 세명대학교 바이오환경공학과 교수
(本學會誌 第51卷 第2号 参照)