Econ. Environ. Geol.
Vol. 32, No. 1, p. 113-121, 1999.

국내무연탄층에 함유된 메탄자원의 잠재력과 그 이용가능성

박 석 환*

Coalbed Methane Potential for Korean Anthracite and Possibility of Its Utilization

Suk Whan Park*

ABSTRACT : Coal is both source rock and reservoir rock for the coalbed gas. Coalbed gas is predominantly methane (>95%) and has a heating value of approximatly 1,000 BTU/ft^3. Most of methane is stored in the coal as a monomolecular layer adsorbed on the internal surface of the coal matrix. The amount of methane stored in coal is related to the rank and the depth of the coal. The higher the coal rank and the deeper the coal seam is presently buried, the greater its capacity to hold gas. Most of Korean Coal is anthracite or metaanthracite, Ro. 3.5~5.5%, and total reserves are 1.6 billion metric tons. The domestic demand for coal was drastically decreased and the rationalization policy carried out from 1987 on coal industry. Now that a large number of coal mines was closed and only a few mines (11 mines) continued to produce not more than 5 million tons for year. It is therefore recommended to formulate a strategy to explore and exploit the resources of coalbed methane in Korea.

서 론

석탄층내에 가스가 함유되어 있다는 사실은 채탄이 시작된 이래 알려져 왔으며 이는 채탄과정에서 폭발 등 위해요소로서 취급되어 왔다. 이러한 석탄가스는 메탄 (CH_4), 이산화탄소 (CO_2), 질소 (N_2), 수분 (H_2O) 등으로 구성되며 이중 메탄가스 (CH_4)가 95% 이상을 차지하고 있다. 이런 메탄가스가 정식 에너지자원으로 취급되기 시작한 것은 1990년대 들어와서의 일이며 이는 석탄내의 메탄가스의 생성, 보유 및 이동 메카니즘 규명과 이를 추출하여 에너지화 할 수 있는 공학적 기술 발전에 의해 실제로 생산되기 시작한 후부터이다. 석탄층 메탄가스에 대한 연구는 미국의 가스연구소 (Gas Research Institute)가 주축이 되어 에너지성 (DOE), 광무국 (USBM), 지질조사소 (USGS) 등이 함께 연구하였으며 기존의 석탄가스화 기술과는 전혀 다른 기술이다.

이러한 새로운 기술개발로 인한 석탄자원의 가스형태로의 이용은 개발비용은 물론 지구온난화 방지를 위한 각종 환경규제에도 대처할 수 있는 많은 장점을 가지고 있다. 그러므로 석탄자원의 부국인 카나다, 호주, 중국, 소련, 인도 등도 석탄층 메탄자원 이용을 위하여 미국의 관련기술 도입과 탐사 및 개발을 서두르고 있다.

우리나라의 경우 국내 무연탄이 16억톤이나 매장되어 있음이 확인되었지만 이의 소비처 확보문제 때문에 1980년도 후반에 석탄합리화 조치가 단행되었으며 이로 인해 국내무연탄은 사실상 사장화될 처지에 놓이게 되었다. 국내의 유일한 에너지자원인 석탄자원을 메탄가스자원 형태로 이용할수 있다면 부분적이나마 우리나라는 에너지 자립이 가능해질 것이다. 특히 국내의 대도시는 도시가스 공급시스템이 대부분 완료된 상태로서 생산된 메탄가스를 사용하는데 좋은 조건을 확보해 놓고 있다. 또한 현재 거세지는 지구온난화 방지를 위한 국제환경규제에 대처하는 방법으로도 도움이 될 것이다.

국내무연탄이 갖는 각종 지질조건과 물성특성이 석탄층 메탄자원 보유 및 개발을 위한 조건에 어느정도 부합되고 있는지를 그간 알려진 기본 자료를 이용하여 개략적으로 검토하여 보았으며 국내 석탄층 메탄자원에 대한 정확한 평가는 향후 정밀한 연구에 의해 밝혀질 수 있을 것이다.

* 한국자원연구소 지질연구부 (Geology Division, Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Taejeon 305-350, Korea), E-mail: psw@rock25t.kigam.re.kr

석탄층에 함유된 메탄가스

메탄가스 기원암으로서의 석탄층

석탄층내의 가스는 석탄의 근원물질인 식물질이 열과 압력을 받는 탄화과정에서 발생되는데 이들 가스는 메탄 (CH_4), 이산화탄소 (CO_2), 질소 (N_2) 그리고 수분 (H_2O) 등으로 구성되며 이중 메탄이 95% 이상으로서 (3% 이하의 N_2와 CO_2) 그의 열량은 약 1,000 Btu/ft^{3}이다 (Table 1).

석탄층내의 메탄은 생물학적 기원 메탄 (biogenic methane)과 열적 기원 메탄 (thermogenic methane)으로 구분되는데 생물학적 기원 메탄은 탄화초기의 50℃ 이하의 온도를 갖는 얕은 심부에서 유기물에 대한 미생물의 분해작용에 의해 생성되는데 이를 "marsh gas"라고도 하며 주로 토탄이나 갈탄에서 발생된다. 열적 기원 메탄은 보다 깊은 심부에서 50℃ 이상으로 온도가 상승됨에 따라 발생되는데 이는 유기물이 열변질되면서 생성된 것이다. 온도가 계속 상승되면서 메탄 발생 또한 증가되는데 메탄 발생은 150℃에서 최고를 이룬다. 생물학적 기원 메탄은 200℃까지의 온도상승 동안에 발생되는 전체 메탄의 10% 정도로서 메탄자원을 형성하는데 큰 기여를 하지 못하고 있다 (Fig. 1).

이와 같이 메탄자원은 탄화의 진행에 따라 계속 발생되는데 발생량이 가장 많은 탄은 증휘발분 역청탄이며 메탄 발생은 무연탄에서도 계속되고 있다 (Table 2).

이상과 같이 메탄가스 발생총량은 탄화정도가 높을수록 많아져서 메탄자원 측면에서도 탄화가 높은 석탄 (high rank coal)이 더욱 유리한 조건을 갖게 된다. 또한 메탄은 유기물로부터 발생되기 때문에 석탄내의 회분량이 많으면 메탄 발생량이 줄어든다. 그러나 일반적으로 탄화과정에서 발생되는 메탄량은 저휘발분 역청탄까지 발생된 메탄량만으로도 석탄층 자신이 보관할 수 있는 양을 초과하고 있다 (Ayers *et al.*, 1989).

이렇게 초과된 메탄은 자유가스형태로서 석탄층 주위의 암석 (주로 사암층)에 이동되어 보존되거나 지하수내

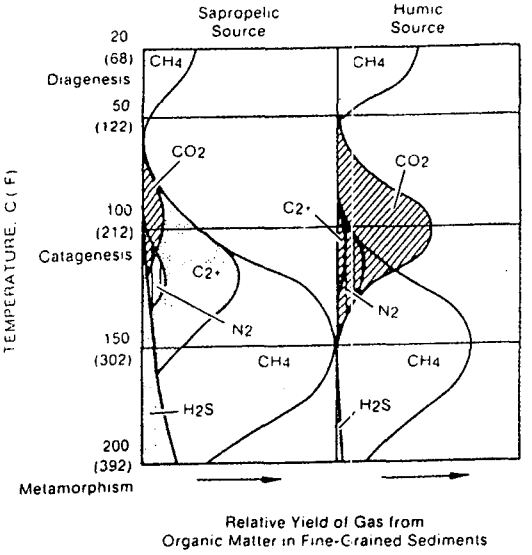

Fig. 1. Generation of gases with depth, C_{2+} represents hydrocarbons heavier than CH_4 in gas phase, N_2 is generated initially as NH_3 (Hunt, 1979).

Table 2. Approximate gas generation by coal rank.

Coal rank	Methane (m^3/ton)	Total of methane (m^3/ton)
Lignite	<20	
Sub-Bituminous coal	<20	
High volatile bituminous coal	20	20
Medium volatile bituminous coal	84	104
Low volatile bituminous coal	68	172
Semi-Anthracite	24	196
Anthracite	28+	224
Total	224	

All data source: Karweil (1969).

에 용해되기도 하며 구조선을 따라 이동되기도 한다. 이러한 자유가스 (lost gas)의 양은 무연탄의 경우 전체 가스량의 약 10% 정도된다 (Table 3). 또한 탄층의 탄화정도와 심도에 따른 메탄가스 부착능력과 생산가능 메탄 함유능력은 무연탄의 경우에서 가장크며 심도의 증가에 따

Table 1. Composition and heating value of coalbed gas and natural gas (vol.%).

Source	Basin	CH_4	C_{2+}	H_2	Inerts[1]	O_2	Btu/ft^3
Pocahontas No. 3	Central Appalachian	96.87	1.40	0.01	2.09	0.17	1,069
Pittsburgh	Northern Appalachian	90.75	0.29	–	8.84	0.20	973
Kittanning	Northern Appalachian	97.32	0.01	–	2.44	0.24	1,039
Lower hartshorne	Arkoma	99.22	0.01	–	0.66	0.10	1,058
Mary Lee	Warrior	96.05	0.01	–	3.45	0.15	1,024
Natural Gas[2]	–	94.40	4.90	–	0.40	–	1,068

Notes 1: N_2, CO_2 and He, 2: data from Moore, Miller, and Shrewsbury (1966), and all other data from Kim (1978).

Table 3. Coalbed methane desorption data averages by rank.

Coal rank	Lost gas (m^3/g)	Desorbed gas (m^3/g)	Residual gas (m^3/g)	Total gas (m^3/g)	% Residual	Number of samples
Anthracite	0.98	8.10	0.61	9.69	6.31	9
Low volatile Bt	1.21	11.97	0.25	13.43	1.86	21
Medium volatile Bt	1.33	6.31	0.32	7.96	4.02	22
Hight volatile A Bt	0.21	2.77	1.38	4.36	31.65	217
Hight volatile B Bt	0.31	2.01	0.47	2.79	16.85	86
Hight volatile C Bt	0.12	1.09	0.07	1.28	5.47	42

All data source: Eddy *et al.* (1982).

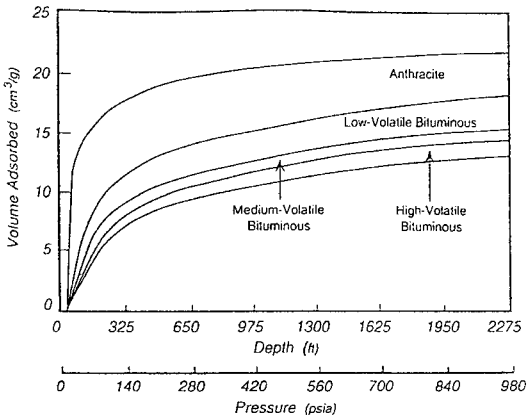

Fig. 2. Adsorptive capacity of coal as a function of rank and depth (Kim, 1977).

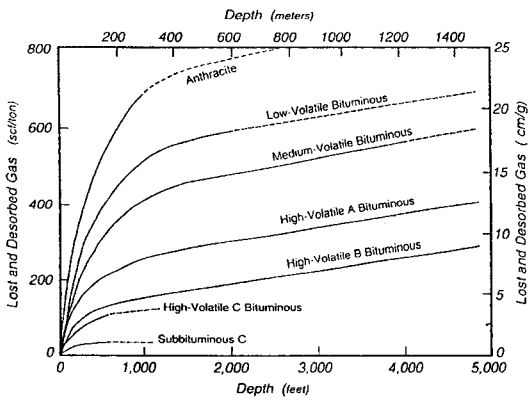

Fig. 3. Estimated maximum producible methane cotent by depth and rank (Eddy, 1982).

라 증가된다 (Fig. 2와 3).

메탄가스 저류암으로서의 석탄층

1980년대까지 석탄층에 대한 심부시추에서 가스의 발생이 감지되었지만 석탄층 자체가 가스의 저류암이라는 생각은 하지 못했다. 탄화과정에서 발생된 가스의 일부는 휘발

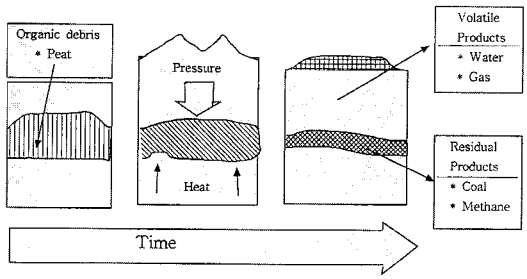

Fig. 4. Key steps in coalification processes.

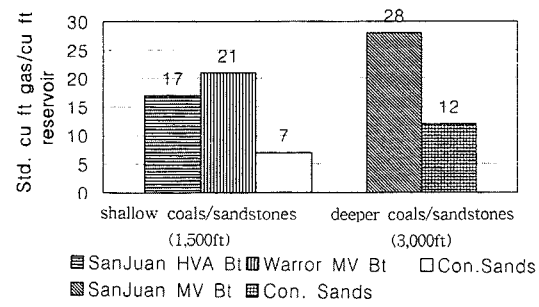

Fig. 5. Correlation of gas storage capacity between coal reservoir and sandstone reservoir (Kuuskraa and Brandenburg, 1989).

분으로 방출되고 나머지는 석탄층내에 보관된다 (Fig. 4).

석탄층은 일반암석과는 달리 유연성을 갖고 있어 석탄층의 투수율은 적용되는 응력에 민감하다. 그리고 매우 큰 내부표면적 (internal surface area)를 갖고 있어 메탄이 저장될 수 있는 능력은 같은 깊이와 압력하에서 재래식 사암 저류암보다 2~3배 많다 (Fig. 5).

재래식 저류암과 석탄층 저류암과의 차이점은 Table 4와 같다.

석탄층내의 메탄은 3가지 형태로서 보관된다. (1) 석탄분자에 부착되어 내부표면 또는 분자구조내에 (2) 공극 (pore) 또는 열극 (fracture)내의 free gas로서 (3) 탄층내의 지하수내에 용해된 상태로서 보관된다 (Rightmire, 1984).

Table 4. Several significant differences between coal and conventional reservoir rock.

	Coalbed reservoir	Conventional reservoir
Permeability	Stress-depend	Not stress-depend
Compressibility	High	Low
Effective porosity	Low (including only the macropores)	High
Density	Low	High
Young's modulus	Low	High
Gas in reservoir	Adsorbed in internal structure	Free state in pore structure

All data source: Steidle (1966).

Table 5. Gross open-pore distribution in coals.

Rank	Porosity distribution (%)			
	C (% daf)	< 12 Å	12~300 Å	>300 Å
Anthracite	90.8	75.0	13.1	11.9
Low volatile Bt	89.5	73.0	nil	27.0
Med volatile Bt	88.3	61.9	nil	38.1
High volatile A Bt	83.8	48.5	nil	52
High volatile B Bt	81.3	29.9	45.1	25.0
High volatile C Bt	79.9	47.0	32.5	20.5
High volatile C Bt	77.2	41.8	38.6	19.6
High volatile B Bt	76.5	66.7	12.4	20.9
High volatile C Bt	75.5	30.2	52.6	17.2
Lignite	71.7	19.3	3.5	77.2
Lignite	71.2	40.9	nil	59.1
Lignite	63.3	12.3	nil	87.7

Modified from Gan *et al.* (1972).

석탄내의 공극은 열극형 공극 (fracture pore)과 기질형 공극 (matrix pore)으로 존재하는데 기질형 공극은 석탄층내의 메탄 보유능력에 매우 큰 영향을 준다. 이들 공극은 크기에 의해서 구분되는데 직경 500 Å 이상의 macropores, 20~500 Å의 mesopores, 8~20 Å의 micropores 그리고 1 Å 이하의 submicropores (IUPAC, 1972)이다.

석탄은 aperture-cavity type의 공극을 갖는데 공극크기 분포는 탄화정도와 구성물질 (maceral) 종류에 따라서 다르다. 탄화정도가 높을경우 (중휘발분 역청탄 이상) micropore가 차지하는 비율이 높아지는 경향이 있으며 (Table 5) 구성물질 중에서는 비트리나이트 (vitrinite)가 micropore의 대부분을 갖고 (vitrinite; 직경 20~200 Å, inertinite: 직경 50~500 Å)있다 (Harris, Yost, 1978; Harris, 1979).

분포된 micropores는 보다 많은 surface area를 마련해 주며 흡착된 가스의 방출율과 방출량에 좋은 영향을 미친다. 그러므로 비트리나이트는 보다 높은 메탄 생산능력을 갖고 있다. 실제로 Western Canada의 Gates Formation

Table 6. Coal surface areas (N_2 adsorption).

Rank	Fixed carbon content (%)	Surface area (m^2/g)
Lignite-Medium volatile bituminous	76	1
Medium volatile Bituminous	76~78	10
Low volatile Bituminous	78~83	10
Low volatile Bituminous-Semianthracite	83~92	1
Anthracite	92	5~8

Data from Nandi and Walker (1971).

의 경우 동일 탄층이지만 bright band (vitrinite가 대부분)에서 850 ft^3/ton가 생산될 때 dull band (inertinite가 대부분)에서는 570 ft^3/ton을 생산하였다 (Steidl, 1996).

메탄 보유능력에 큰 영향을 주는 석탄층내의 내부표면적은 보통 탄소함유량 (coal rank)과 구성물질에 따라 변하는데 중휘발분 역청탄에서 가장 크고 무연탄이 그 다음의 크기를 가지며 (Table 6) 구성물질에서는 비트리나이트 (vitrinite)에서 가장 높으며 (204 m^2/g) 인어티나이트 (inertinite)에서 가장 낮다 (36 m^2/g) (Steidl, 1996).

이와 같이 석탄 구성물질중에서 비트리나이트 (vitrinite)는 공극크기, 내부표면적크기 등이 메탄 보유에 알맞는 조건을 갖고 있다. 또한 영국의 일부 실험보고서에 의하면 구성물질중 다량의 휴지나이트 (fusinite)를 함유한 휴세인 (fusain)은 보다 빠른 메탄탈착을 허용하기 때문에 메탄생산에 도움이 된다고 하였다.

메탄가스 생산조건

석탄층으로부터 메탄을 경제적으로 생산하기 위해서는 석탄층이 함유한 메탄자원의 양과 질이 중요하지만 또한 이를 석탄층으로부터 분리하여 회수하기 위한 각종 기술이 요구된다.

이들 기술은 우선 석탄층으로부터의 가스생산 메카니즘, 그리고 탄층저류암의 특성, 그리고 가스정 (井)의 자극과 이의 효과적인 운영 등이다.

가스 생산메카니즘은 그림과 같이 3단계의 과정을 거쳐서 이루어진다 (Fig. 6). 첫째: 탄질물의 내부표면에 분자층상으로 붙어있는 메탄을 탈착시키고, 둘째: 탄질물로부터 떨어져 나온 메탄은 cleat에 도착될 때까지 탄질물을 통해서 확산되며, 셋째: 이들 메탄은 cleat 또는 열극계를 통하여 유동하여 가스정에 도착되어 생산된다.

석탄층내에 함유된 메탄의 양 (量)은 석탄층의 탄화정도, 매몰심도와 밀접한 관계를 갖는다. 탄화정도가 높을수

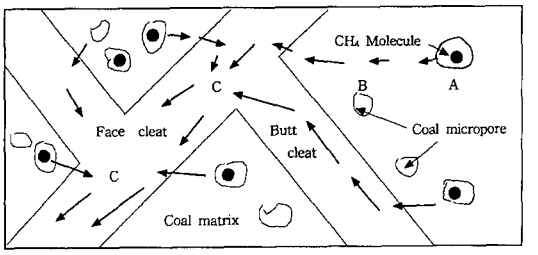

Fig. 6. Diagram showing (A) desorption of methane from internal coal surface, (B) diffusion path of methane through coal matrix and micropores, and (C) flow of methane in the natural fracture network (Rice *et al.*, 1993).

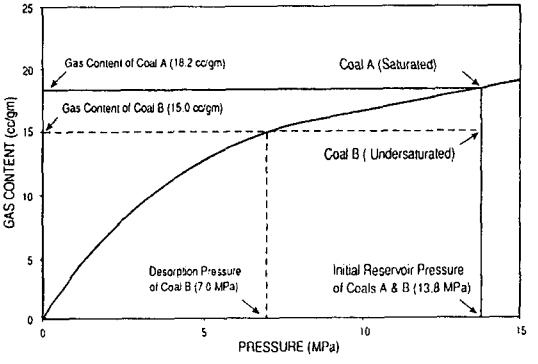

Fig. 7. Idealized coalbed gas sorption isotherm showing relation between reservoir pressure and gas content for a saturated (A) and undersaturated (B) coal. Heavy solid line indicates the maximum amount of gas that can be stored at given reservoir pressure (McElhiney and Koeng, 1989).

록 심도가 깊을수록 가스함유능력은 커진다. 이 흡착된 메탄의 방출은 탄층에 가해지는 압력의 경감에 의해서 수행된다. 석탄층에 가해지는 압력의 경감은 일반적으로 낮은 기압 (=15 psia)에 가까운 정도로 경감되는 것이 필요한데 방출되는 가스의 양은 각 석탄층이 갖는 고유의 탈착 등온선에 의해 지배된다 (Fig. 7).

석탄내의 깨짐에 의한 공극성 (fracture porosity)은 cleat에 의한 것인데 cleat에는 서로 거의 수직인 두 개의 cleat set가 발달된다. Face cleat는 주된 cleat로서 그 연장성이 양호한데 반해 butt cleat는 face cleat와 face cleat 사이를 거의 수직으로 연결시켜준다. 이와 같이 face cleat의 연장성이 양호하기 때문에 가스 생산을 위한 시추는 이들에 수직으로 뚫었을 경우가 수평으로 뚫었을 때보다 생산성이 2.5~10배 정도 증가된다 (McCulloch *et al.*, 1974).

일단 가스가 cleat 또는 열극에 도착되면 이 열극계를 통한 메탄의 흐름은 자유가스 상태로서 압력 차이에 의해 이동하게 된다. 이때 이 현상은 Darcy의 공식에 의해서 지배된다. 그러므로 메탄 생산능력은 석탄층의 공극율과 투수율에 크게 영향을 받는다. 특히 열극의 발달상태는 메탄 이동에 큰 영향을 주게 되어 필요에 따라서는 인위적으로 열극을 생성시키고 있다.

석탄층내의 대부분의 투수율은 균열에 의해서 지배되는데, 그지역의 균열간격, 균열의 방향성 그리고 함탄층의 지역적 응력형태에 의해서 지배된다. 즉 매우 높은 자연적 투수율을 갖는 지역을 제외하고는 석탄층 메탄정 (井)은 경제성 있는 가스생산을 위하여 인공적인 자극이 필요하다. 이에는 탄층의 투수율을 높이기 위한 압력적용, 제한된 proppant 삽입, 복합열극개설 방법 등이 있다. 메탄생산을 위한 시추공은 그의 위치, 시추공사이의 간격, 시추공 손상으로부터의 보호 등 여러 가지 관련 기술이 필요하다. 실제로 석탄층에서 메탄을 생산하려면 석탄층내의 압력을 낮추는 과정에서 초기에는 물 또는 물과 가스가 생성되는데 이러한 탈수과정에서 생성된 물을 처리하기 위한 지형적 조건과 그 물의 양과 질에 대한 자료 또한 필요하다.

메탄가스 개발 성공사례

석탄층 메탄자원의 성공적인 개발의 대표적인 국가는 미국이다. 미국의 석탄층 메탄자원은 총 400 tcf (400×10^{12} ft^3)이며 1992년 현재 생산은 1 bcfd (1×10^9 ft^3/day)이다. 미국의 13개 분지 中에서 Sanjuan basin과 Warrior basin이 가장 활발하게 개발되고 있으며 5,000공 이상의 가스정 (井)에서 생산되는 양은 1992년에는 전체 석탄층 메탄 생산의 95% 이상을 차지했다. 최근에는 미국동부의 Appalachian basin과 Arkoma basin, 미국서부의 Piceance basin, Uinta basin, Powder River basin, Raton basin 등에서 메탄자원 개발이 확산되고 있다 (Kuuskraa *et al.*, 1992; Kelafant *et al.*, 1992; Howell, 1993).

Sanjuan basin은 북부 New Mexico와 남부 Colorado에 위치한 석탄분지로서 석탄층 메탄 자원개발의 대표적 성공지역이다. 이곳에서는 1992년까지 미국 석탄층 메탄자원 생산의 2/3를 생산하였으며 1660孔 이상에서 860 MMcfd (860×10^6 ft^3/day) 생산실적이 있었다. Warrior basin은 Alabama에 위치하며 가장 많은 시추를 하였으며 1992년에는 2740孔에서의 메탄가스 생산은 235 MMcfd (235×10^6 ft^3/day)이었다 (Kuuskraa *et al.*, 1992).

우리나라의 경우처럼 탄화정도가 매우 높은 석탄에서 메탄자원을 탐사 개발한 예를 들면 독일북부, 네델란드, 북해남부지역 등에 걸치는 north-central European gas 지역이다. 이 지역의 저류암은 대부분 사암인데 하부의

기원암인 석탄기의 탄층은 탄화정도가 Ro. 1.2~3.2%이고 (Cornford, 1986) 북부독일에서 페름기의 Rotliegendes gas fields는 대부분 탄층의 탄화정도가 Ro. 1~2%인데 몇몇 지역에서는 Ro. 4.4~4.7%를 갖는다 (Teichmuller *et al.*, 1979, 1984).

중국의 South Sichuan province와 Kuangsi에서 몇몇 field로부터의 가스생산은 7 km의 심도로부터 생산되며 그리고 탄화정도 Ro. 3.8~4.8%을 갖는 탄층이 기원암이었다 (Mo *et al.*, 1984).

미국의 Anadarko basin 심부에서 gas 생성은 어느 경우에는 탄화정도가 Ro. 4.2~4.6%의 탄층이 기원암이 되고 있다 (Cordott, Lambert, 1985). 미국의 Texas wheeler county의 Socal #1-33 James에서 gas 생산 zone은 탄화정도 Ro. 3.8%이었으며 Oklahoma의 Backham caunt의 Bruner coalfield California Union #1-33에서는 가스 생산지역이 탄화정도 Ro. 4.8%이었다 (Waples, 1980).

국내 무연탄층에 함유된 메탄자원의 잠재력

국내 무연탄층에 메탄가스 자원이 어느정도 함유되어 있느냐는 우리의 현실 여건에 비추어 매우 중요한 사안이다. 국내의 유일한 에너지 자원인 무연탄이 가정연료 소비형태의 변환으로 그 소비처를 상실하였으며 국내 무연탄의 특이한 연소특성 (높은 착화온도; 평균 550℃, 낮은 연소속도; 평균 1.4 mg/min, 박석환 1990) 때문에 산업용 연료로의 사용이 제한을 받게 되어 결국 석탄산업 합리화를 통하여 수백개의 탄광이 폐광되고 현재 몇 개의 대형 탄광만 채탄을 유지하고 있으나 이 또한 뚜렷한 소비처를 찾지 못하고 많은 량이 비축되고 있는 형편이다. 국내 무연탄이 새로운 소비처 창출로 재개발을 원하는 시기가 온다고 해도 폐광에 따른 각종 문제점 때문에 재개발이 매우 어려우며 결국 사장되고 마는 결과가 예측된다.

만약 국내 무연탄층에 풍부한 메탄자원이 보유되고 있고 이를 경제적으로 생산할 수 있다면 사장이 우려되는 무연탄 자원의 활발한 이용이 가능해지며 환경문제 때문에 점차 가스에너지 사용확대를 추구하는 국내 에너지 정책에도 부합될 것이다.

국내무연탄의 기원암으로서의 조건

국내 무연탄에 메탄가스가 존재한다는 사실은 채탄이 시작된 이래 알려져 왔다. 갱내 가스누출에 의한 폭발 등 각종 사고를 미연에 방지하기 위하여 갱내 가스누출량이 채탄막장에서 1% 이상 그리고 주배기갱도에서 0.25% 이상 감지되는 탄광은 갑종탄광으로 지정하여 (석탄공사 자료) 갱내 화기 유입을 엄금하였다.

갑종탄광의 예로는 장성탄광, 도계탄광, 함태탄광, 강원탄광, 경동탄광, 어룡탄광 등 수 많은 대형탄광이 해당되었으며 도계탄광의 경우 갱내 착탄표면에서는 메탄가스가 75% 정도나 배출되었으며 (개인통신, 조남찬) 이 경우 메탄가스를 사전에 제거 감소시키기 위하여 탄층에 천공한 기도를 이용하였다. 이러한 갱내 메탄가스누출은 일정한 조건이 맞으면 (CH_4: 4.8~10%, O_2: 18%인 경우: 석공자료) 폭발을 야기시키기도 하여 그간 몇 건의 사고도 있었다. 현재도 재채굴이 시행되고 있는 영월 마차리의 영월광업소에서는 생동탄의 경우 갱내에서 메탄가스가 20% 이상 배출되고 있는 것이 사실이다.

이와 같이 국내 무연탄에 메탄가스 함유증거는 여러곳에서 확인되는데 지금까지 국내탄이 함유한 메탄자원에 대한 조사나 연구는 전혀 없었다. 그러므로 현재로서는 기존자료에 의한 유추만이 가능할 뿐이다. 그간 밝혀진 메탄자원 보유 및 생산에 관련된 조건과 국내무연탄이 갖는 관련특성을 비교해서 국내무연탄의 메탄자원 보유가능성을 살펴보자.

국내 무연탄은 변성 무연탄에 해당될 정도로 탄화정도가 매우 높다 (Table 7).

그러므로 탄화중에 발생된 메탄가스의 총량은 224 m^3/ton이며 (Table 2), 이는 국내 무연탄이 탄화과정에서 생성한 메탄가스의 총량이라고 간주될 수 있다. 다만 이중에 어느정도가 보유되었고 얼마가 방출되었느냐가 중요하다. 이미 상술한 바와 같이 탄화과정에서 발생되는 메탄가스의 양은 저휘발분 역청탄 (LVBt) 단계까지에서도 자체 보유할 수 있는 능력을 초과한다고 하였다. 국내 무연탄의 경우도 보유능력을 초과하는 많은 양의 메탄이 주위의 암층이나 구조선을 따라서 배출되었을 것이다. 그러므로 갑종탄광과 비갑종탄광의 차이는 탄층의 메탄가스 생산량의 차이에 있는 것이 아니고 메탄가스의 방출형태가 지질구조 등의 여건에 의해 지배받기 때문에 일어나는 현상 차이 일 것이다.

석탄의 품질 (회분함유량)도 메탄자원 보유량에 영향을

Table 7. Average vitrinite reflectance of korean coal in Samcheog and Chungnam coalfields.

Coal field	Rmax	Rmean	Rmin	Rmax-Rmin
Samcheog	6.63	5.28	4.02	2.61
Chungnam	6.56	3.93	2.40	4.16

All data source: Park (1990).

준다. 석탄의 메탄가스 생성이 유기물에서만 가능하므로 탄층내의 무기물인 광물질, 즉 회분은 메탄자원의 대상이 아니다. 그러므로 국내 무연탄이 20~40%의 높은 회분 함유량을 보이고 있어 16억톤이라는 매장량 전부가 메탄자원의 대상이 되기는 어려울 것이다. 그러나 이 16억톤 매장량은 KS규정에 의해 0.5 m 이상의 탄폭을 갖는 탄층에만 적용된 경우이고 실제로는 평안누층군 탄층의 경우 상탄층과 하탄층군 등 3~4매의 탄층이 더 존재하고 있으며 이들 또한 메탄자원의 대상이 될 수 있다. 그러므로 회분을 제거한 순수한 탄질물만 계산해도 약 16억톤은 된다고 볼 수 있다.

국내무연탄의 저류암으로서의 조건

국내 무연탄이 보유한 메탄자원량은 국내 무연탄이 가스 저류암으로서 어느정도 좋은 조건을 갖고 있느냐에 크게 좌우된다. 저류암으로의 조건은 내부표면적의 크기와, 공극의 크기, 구성물질 중 비트리나이트의 양 그리고 석탄층의 구조적인 발달상태 등이다.

석탄의 내부표면적은 Table 6에서 보는 바와 같이 무연탄의 경우 5~8 m^2/g으로서 중휘발분 역청탄 (10 m^2/g) 다음으로 큰 면적을 갖는데 국내 무연탄의 경우 한보탄광 석탄이 4.11 m^2/g으로서 (박석환 등, 1994) 이들 범위에 접근하고 있어 이 또한 좋은 조건이 기대되고 있다. 공극크기 (pore size)는 무연탄의 경우 직경<12 Å가 75%, 12~300 Å가 13% 정도인데 국내 무연탄의 경우 평균 공극크기가 한보탄 54.56 Å, 경동탄 48.19 Å로서 (박석환, 1990) 12 Å 이하 크기의 공극이 70% 내외일 것으로 기대된다. 또한 국내무연탄의 비트리나이트 (vitrinite) 함유량은 평균 60% 이상으로서 (박석환, 1990) 이 또한 나쁜 조건은 아니다.

Eddy *et al.* (1982)이 발표한 탄종과 심도에 따른 최대 생산가능 메탄가스 함유량곡선 (Fig. 3)에 의하면 무연탄의 경우 25 m^3/ton이며 이를 국내 무연탄 매장량에 적용시켜 보면 (평균심도를 800 m로 보았을 때) 1.6×10^9 $ton\times25$ $m^3/ton\fallingdotseq40\times10^9$ $m^3\fallingdotseq1.4$ tcf이다.

석탄층내에 존재하는 메탄자원의 규모는 비교적 그 파악이 용이하나 그 메탄자원의 생산가능성은 파악이 쉽지 않다. 탄층내의 전체가스 중에서 탈착시험으로부터 "lost gas"와 "desorption gas"를 계산하면 생산성을 알 수 있다. 이에 의하면 무연탄에서는 약 6%가 잔류가스로서 약 80%가 최대생산가능 가스이다 (Table 3).

그러므로 무연탄의 경우 좋은 조건을 갖고 있다. 또한 석탄층 저류암은 재래식 사암층 저류암과는 달리 두께가 얇고, 유연성이있고, 화학적으로 반응성인 저류암이므로 성공적인 가스생산을 위해서는 이러한 특성을 감안한 기술이 필요하다.

국내무연탄의 cleat, 열극 그리고 투수성등에 대한 자료는 거의 없으며 국내무연탄층 메탄자원 평가를 위해서는 이러한 특성들이 중점적으로 규명되어야 할 것이다.

국내함탄층의 일반 지질조건

석탄층 메탄자원에 좋은 지질조건은 함탄층이 형성되는 지질시대 동안에 (1) 하성퇴적물의 유입 (2) 비교적 높은 분지 침강율 (3) 어느 정도의 조구조운동이 있어야 한다. 함탄층 메탄자원의 함유량과 생산가능성은 탄화과정에서의 가스의 형성과 그리고 함탄층이 겪은 지질시대 동안의 여건과 관련이 있다.

지질구조적으로 메탄자원에 매력적인 지역은 습곡축을 따르는 지역인데 이 지역은 습곡에 의해 생성된 열극계가 잘 발달되어 석탄층내의 메탄이동을 보다 쉽게 해주기 때문이다 (Steidl, 1996). 국내무연탄은 (평안누층군의 경우) 해퇴하는 과정에서 탄층이 형성되어 하성퇴적물 유입이 특징적이며 대동누층군의 경우는 호소퇴적환경으로서 호소로 유입되는 하성퇴적물을 협재하고 있다.

퇴적분지의 침강은 평안누층군은 paralic environment로서 limnic environment인 대동누층군 보다 비교적 안정된 분지내에서 퇴적되어 분지 침강속도도 낮았던 것

된다. 그러므로 평안누층군내의 탄층매수는 적지만 (5~7매) 탄폭이 비교적 양호하며 (1 m내외) 분포면적도 매우 넓다. 반면에 대동누층군은 보다 불안정한 부

보다 높은 침강속도를 유지하였을 것으로 사료된다. 그러므로 대동누층군내의 탄층 매수는 많지만 (30매 내외) 탄폭은 불량하며 (0.5 m 내외) 분포면적 또한 좁다.

국내 탄전이 받은 지각변동은 심한 편이다. 모든 탄전에 습곡과 단층이 많이 발달되며 이로 인해 탄층폭의 팽축이 심하며 경사가 급하다. 국내무연탄층의 일반지질조건은 양호한 편이며 다만 조구조 운동이 적당한 정도를 넘은 것이 아닌가 우려된다.

국내 무연탄층에 함유된 메탄자원의 이용가능성

국내 무연탄층에 함유된 메탄자원이 이용되기 위해서는 메탄자원의 부존상태와 부존량이 확인되어야 하며 또한 무연탄층 저류암이 메탄자원 생산에 알맞는 특성을 갖고 있어야 한다. 그러므로 메탄자원의 규모가 확인된 후에는 시험시추를 통한 생산성 확인이 필요하다. 국내 무연탄 자원

에서 메탄자원을 뽑아 사용하는 경우 현실적으로 여러가지 이로운 점이 많다. 이러한 이점들은 메탄가스개발에 의욕을 줄 수 있으며 이를 요약하면 다음과 같다.

(1) 석탄산업 합리화 이후 실제로 사장될 처지에 있는 국내 유일한 에너지 자원을 새로운 방법으로 이용할 수 있으며 이의 소비처는 무궁무진하다.

(2) 채탄 과정에서의 공해와 저탄에 따른 문제점 그리고 석탄의 직접연소에 의한 공해를 줄일 수 있으며 현재 국제적으로 문제가 되는 지구온난화 관련 환경규제에 대처하는 방안의 하나가 될 수 있다.

(3) 현재 국내 에너지 소비정책은 가스사용을 장려하고 있으며 대도시는 대부분 도시가스 공급 시스템이 완료단계에 있어 메탄가스 사용을 위한 기반은 매우 좋은 조건이다.

(4) KS 규정에 따른 기준미달의 석탄층 (소위 상탄층, 하탄층군)도 메탄자원 대상이 될 수 있다.

(5) 전량 수입에 의존하고 있는 천연가스의 일부를 국내산으로 대치하여 부분적인 에너지 자립화가 가능하다.

토의 및 결론

국내의 유일한 에너지 자원인 무연탄은 16억톤이나 매장되어 있으나 이의 특이한 연소특성 때문에 소비처는 극히 제한되어 있으며 80년대의 합리화 실시이후 사실상 사장화될 처지에 있다.

최근에 미국을 중심으로 석탄층이 함유한 메탄자원을 에너지 자원으로 사용하기 위한 각종 새로운 이론과 기술개발로 석탄층 메탄가스가 석유기원 천연가스 분야를 보완해 주는 중요한 에너지로서 생산되기 시작하였다 (미국의 경우 1995년에 전체 가정연료의 5% 생산). 이러한 세계적 추세에 맞추어 국내 무연탄이 함유한 메탄자원에 대한 잠재성을 그간 밝혀진 석탄층 메탄이 갖는 각종 이론적 또는 기술적 조건 – 보면 다음과 같다.

1. 석탄층을 메탄가스의 기원암으로 볼 때 탄화정도가 높은 석탄 일수록 그리고 심도가 깊을수록 메탄가스 함유 가능성이 높아진다.

국내 무연탄의 탄화정도는 Ro. 3.5~5.5% 정도로서 무연탄 내지 변성 무연탄에 해당되는 탄화정도가 매우 높은 탄이며 탄층심도는 습곡 등의 지질구조에 영향을 받아 대체로 1,000 m 내외의 깊은 심도를 갖는다.

2. 석탄층을 저류암으로 볼 때 메탄가스보유 능력은 탄층이 갖는 물리적 특성 (내부표면적, 공극의 크기 등)에 의해 큰 영향을 받는데 국내 무연탄은 한보탄의 경우 내부표면적이 4.11 m^2/g으로서 무연탄의 이론적 표면적 5~8 m^2/g에 접근하고 있어 좋은 조건을 갖고 있으며 공극의 크기는 경동탄의 경우 평균 직경이 43.19 Å으로서 무연탄의 이론적 공극크기인 micropore 75% 정도에 접근하고 있어 이 또한 좋은 조건을 갖고 있다.

3. 석탄층내의 메탄자원을 생산하기 위해서는 ① 탄질물로 부터의 메탄의 탈착 ② cleat system으로의 메탄 확산 ③ 열극을 통한 메탄의 가스정으로의 흐름 등의 과정이 필요하다.

이러한 과정중에서 열극의 발달상태가 매우 중요하며 이의 발달은 지질구조 (습곡, 단층 등)에 의해 크게 영향을 받는다. 그러므로 지질구조가 없는 지역에서는 수압을 이용하여 인위적으로 열극을 만드는 경우도 있으며 가스생산적지로서 습곡축대를 선호하기도 한다. 국내 무연탄의 경우 심한 지각변동의 영향을 받아 복잡한 지질구조를 갖고 있다. 대부분의 탄층 들은 이로 인해 깨어지고 부서져 있다. 그러므로 괴탄 상태의 탄층을 찾기 어려우며 석탄의 강도 (HGI)도 매우 낮아 무연탄의 이론치 강도인 HGI:40보다 훨씬 약한 강도인 평균 HGI:75 정도를 나타내고 있다 (박석환, 1990). 이러한 구조적 조건은 석탄층내의 메탄의 흐름을 매우 용이하게 할 것이다.

4. 이러한 구조적 조건이 극심한 열극발달로 소위 free gas 이외의 메탄가스가 방출되었을 가능성과 또한 생산과정에서의 공법상 어려움이 생기지 않을까 하는 부정적 측면도 가지고 있다.

5. 수십년간 국내무연탄을 개발하면서 무연탄내의 메탄가스 존재 때문에 갑종탄광제도를 만들어 이를 적용 실시해 온 사실은 국내무연탄내의 풍부한 메탄자원 존재 가능성을 강하게 암시해 준다.

6. 그동안 국내 무연탄에 대한 연구는 채탄을 위한 매장량 확보와 무연탄을 연료로 사용할 때 필요한 물리적 · 화학적 특성 및 일부 비연료로 쓰기 위한 특성 규명이었다. 그러므로 국내 무연탄이 함유한 메탄자원에 대한 연구를 위한 특성규명 등 관련자료는 전무한 상태이다. 국내 무연탄자원을 메탄자원 측면에서 재평가해 볼 필요가 있다.

7. Eddy (1982) 등이 연구한 이론에 따른 우리나라 무연탄에 함유된 메탄자원의 추정량은 4×10^{10} m^3 (1.4 tcf)이다.

8. 기존자료만으로 유추해 보면 국내무연탄층에 함유된 메탄자원의 잠재력은 기원암으로서의 조건 그리고 저류암으로서의 조건은 양호한 편이며 본격적인 연구에 의한 평가가 요망된다.

사 사

석탄층메탄가스에 대한 기초문헌자료를 제공해 주신

강원대학교의 김기영 교수님과 미국 텍사스 A&M 대학에서 연수중인 한국자원연구소의 고상모 박사께 깊은 고마움을 전합니다.

참고문헌

박석환, 박홍수 (1994) 국내무연탄 용도개발을 위한 특성연구 (IV). 131p.

박석환 (1990) 삼척탄전과 충남탄전 석탄의 암석학적. 지화학적연구. 서울대학교 대학원 박사학위논문. 142p.

Ayers, W.B. and Kelso, B.S. (1989) Knowledge of methane potential for coalbed resources grows, but needs more study. Oil and Gas Journal, v. 87, p. 64-67.

Cordott, B.J. and Lambert, M.W. (1985) Thermal maturation by vitrinite reflectance of Woodford Shale, Anadarko Basin, Oklahoma: AAPG Bulletin, v. 69, p. 1982-1998.

Eddy, G.E., Rightmire, C.T. and Byrer, C. (1982) Relationship of methane content of coal, rank and depth. SPE/DOE 10800, p. 117-122.

Gan, H., Nandi, S.P. and Walker, P.L. (1972) Nature of the porosity in American coals. Fuel, v. 51, p. 272-277.

Harris, L.A. (1979) Ultrafine structure of coal determined by electron microscopy: Prepr. Paper, American Chemical Society. Division of Fuel Chemicals, v. 24, n. 1, p. 210-217.

Harris, L.A and Yost, C.S. (1978) Transmission electron microscope observation of porosity in coals. Fuel, v. 55, p. 210-217.

Howell, D.G. (1993) The future of energy gases. USGS professional paper 1570. p. 220-230.

Hunt, J.M. (1979) Petroleum geochemistry and geology: San Francisco, W.H. Freeman and Co, 617p.

International Union of Pure and Applied Chemistry (1972) Manual of symboles and terminology for physics chemical quantities and units. Lodon, Butterworth.

Karweil, J. (1969) Aktuelle Probleme der Geochemie der Kohle. in P.A. Schenk and I. Havenear, eds., Advances in organic chemistry, 1968: Pergamon Press, Oxford, England, p. 59-84.

Kelafant, J.A ,Stevens, S.H. and Boyer , C.M. (1992) Vast resource potential exists in many countries. Oil and Gas Journal, v. 90, p. 80-85.

Kim. A.G. (1977) Estimating methane content of bituminous coalbeds from adsorption data: USBM report of investigation 8245 22p.

Kim, A.G. (1978) Methane drainage from coalbeds; research and utilization, in Methane gas from coalbeds-development, production and utilization; MERC/SP-78/1, p. 13-17

Kuuskraa, V.A. and Brandenburg, C.F. (1989) Coalbed methane sparks a new energy industry. Oil and Gas Journal, v. 87, p. 49-53.

Kuuskraa, V.A., Boyer , C.M. and Kelafant J.A. (1992) Hunt for quality basins goes abroad. Oil and Gas Journal, v. 90, p. 49-54.

McCulloch, C.M., Duel and Jeran, P.W. (1974) Cleat in bituminous coalbeds, USBM report of investigation, 7910, 15p.

McElhiney, J.E. and Koeng, R.A. (1989) Evaluation of coalbed methane reserves involves different techniques. Oil and Gas Journal, v. 87 p. 63-72.

Mo, F.J., Han, L.D., Fen, J.R. and Ding, D.Y. (1984) Distribution and origin of hydrocarbons in carbonate rocks in China. AAPG studies in geology 18, p. 1-12.

Nandi, S.P. and Walker P.L. (1971) Adsorption of dyes from aqueous solution by coals, chars, and active carbons. FUEL, v. 50, p. 345-366.

Rice, D.D., Law, B.E. and Clayton, J.L. (1993) Coalbed gas-An undeveloped resource. In The future of energy gases. USGS professional paper 1570.

Rightmire, C.T. (1984) Coalbed methane resource. In Coalbed methane resources of the United states, AAPG studies in geology series #17, p. 1-13.

Steidl, P.F. (1996) Coal as a reservoir. In A gide to coalbed methane reservoir engineering. GRI No. GRI-94/0397, p. 2.1-2.16.

Teichmuller, M., Teichmuller, R. and Bartenstein, H. (1979) Inkohlung und Erdgas in Nordwestdeutschland. Eine Inkohlungskarte der Oberflache des Oberkarbons: Fortschritte Geologie Rheinland und westfalen, v. 27, p. 137-170.

Teichmuller, M., Teichmuller, R. and Bartenstein, H. (1984) Inkohlung und Erdgas-Eine neue Inkohlungskarte der Karbon-Oberflache in Norwestdeutschland: Fortschritte Geologie Rheinland und westfalen, v. 32, p. 11-34.

Waples, D.W. (1980) Time and temperature in petroleum formation-Application of Lopatin's method to petroleum exploration. AAPG Bulletin, v. 64, p. 916-926

1998년 10월 1일 원고접수, 1998년 11월 30일 게재승인.