

해설

석탄층 메탄가스의 개발현황 및 핵심기술 분석 연구

장호창¹⁾ · 이정환^{1)*} · 신창훈²⁾ · 이영수²⁾ · 권순일³⁾ · 이원석⁴⁾

A Study on the Development Status and Key Technologies of Coalbed Methane

Hochang Jang, Jeonghwan Lee*, Changhoon Shin, Youngsoo Lee,
Sunil Kwon and Wonsuk Lee

Abstract : Coalbed methane (CBM) is one of the representative areas of unconventional gas. It allows easier access for a non-oil country because, unlike conventional gas or oil reserves, CBM is not concentrated in specific major area. The importance of CBM resource is being emphasized because of its contribution in both energy resources security and greenhouse gas emissions prevention through its production and use. US and other countries, which possess coal formation have been and expected to continue producing CBM. However, Korea is at the early stage of production-related technologies and only has the basic technology to do a survey and exploration of the domestic CBM. Based on the comparison of Korea and other developed countries regarding technologies, a distinct difference can be observed. This study presents the direction of technology advances in Korea by investigating the development status and classifying the technology of CBM.

Key words : Coalbed Methane, Desorption, Cleat, Key Technologies

요약 : 석탄층 메탄가스는 신(新)가스자원의 대표적인 한 분야로서, 기존의 천연가스나 석유처럼 자원의 편중이 없어 비산유국에서도 접근성이 용이한 특징을 갖고 있다. 게다가 석탄층 메탄가스 개발 및 사용을 통해 에너지자원 확보와 지구온난화 예방이라는 일석이조의 효과를 얻을 수 있어 최근 석탄층 메탄가스 개발의 중요성이 높아지고 있으며, 미국을 비롯한 여러 석탄보유국들은 석탄층 메탄가스의 생산을 이미 진행하고 있다. 하지만 국내의 경우, 지질조사나 탐사기술과 같은 기초적인 기술은 보유하고 있으나, 생산관련 기술은 이제 초입 단계이며, 선진국과의 기술 수준 비교에서 큰 차이를 보인다. 이에 본 연구에서는 석탄층 메탄가스의 개발현황을 파악하고, 석탄층 메탄가스 개발을 위한 핵심기술을 분류함으로써, 향후 기술개발 전략 방향을 제시하였다.

주요어 : 석탄층 메탄가스, 탈착, 탄리, 핵심기술

서론

우리나라는 2010년 기준 세계 5위의 석유 수입국으로 에너지자원에 대한 수입의존도가 매우 높은 편에 속한다 (Central Intelligence Agency; CIA, 2011). 높은 수입의존도는 국가경제의 걸림돌이 될 수 있으며, 수입의존도

를 줄이는 것은 에너지자원 분야에 종사자하는 모든 이들의 과제이기도 하다. 이를 입증하듯 지난 1970년대에 있었던 두 차례의 석유파동으로 인한 유가의 상승은 국가경제와 국민생활에 큰 충격을 주었으며, 에너지자원 자주개발의 중요성을 인식 할 수 있는 계기가 되었다(이철규, 2005). 또한 전 세계적인 에너지 수요의 증가에도 불구하고, 지난 50년간 기존의 유·가스전 발견 비율은 상당히 줄어들고 있어 에너지자원의 공급 부족을 초래하고 있으며, 이를 대체할 신미래자원에 대한 관심이 증가하고 있다. 석탄층 메탄가스는 신(新)가스자원의 대표적인 분야 중 하나로, 기존의 석유나 천연가스처럼 자원의 편중이 없어 비산유국에서도 접근성이 용이하다. 또한 순도 높은 메탄으로 이루어져 연소 시 온실가스(green house gas; GHG)의 방출량이 적어 차세대 에너지 원료로 주목받고 있다. 현재 석탄층 메탄가스는 미국을 중심

2011년 12월 13일 접수, 2012년 3월 22일 심사완료

2012년 8월 23일 게재확정

1) 전남대학교 에너지자원공학과

2) 한국가스공사 연구개발원

3) 동아대학교 에너지자원공학과

4) 한국지질자원연구원 석유해저연구본부

*Corresponding Author(이정환)

E-mail: jhwan@jnu.ac.kr

Address: Department of Energy & Resources Eng., 300

Youngbong-Dong, Buk-Gu, Gwangju, 500-757, Korea

으로 중국, 호주 등의 나라에서 생산이 진행 중이며, 그 밖의 석탄 보유국에서 개발 및 생산을 위해 국가적인 정책 수립이나 연구개발 활동이 진행되고 있다. 우리나라의 경우, 국내 석탄층 메탄가스의 부존을 확인하기 위해 국내 석탄층 메탄가스 부존 유망지를 선정하여 환경 평가를 실시하였으나, 지질 및 탐사와 같은 기초적인 기술을 보유하는데 그쳤다. 이에 본 연구에서는 향후 석탄층 메탄가스의 개발기술 확립 및 국외사업 참여를 통한 에너지 자립을 위해 석탄층 메탄가스의 개발현황과 핵심기술을 분류하여 석탄층 메탄가스의 기술개발 전략 방향을 제시하고자 한다.

석탄층 메탄가스 개요

석탄층 메탄가스는 일반적으로 석탄층에 흡착(adsorption)되거나 석탄 공극 내에 자유가스(free gas)로 존재하는 메탄가스를 말하며, 석탄광 메탄가스(coal mine methane; CMM)나 CSG(coal seam gas)라고도 한다. 석탄층 메탄가스는 대부분 반데르발스 결합(van der Waals force)에 의해 석탄을 구성하는 유기물질(organic material)에 흡착되어 있거나 지층수(formation water)의 압력에 의해 석탄의 암체(matrix) 표면에 흡착되어 있다. 그 밖의 가스는 석탄의 암체 내의 절리(fracture)나 탄리(cleat)에 자유가스로 존재하거나, 석탄층 내의 지층수에 용해된 상태로 존재한다(Fig. 1).

석탄층 메탄가스는 메탄 함량이 90% 이상인 고품질의 메탄가스로서 가스성분에 황성분이 적어 'sweet gas'라고도 하며, 연소 시 유해 물질 발생량이 적어 청정 화석 연료로 분류된다(Jenkins, 2008). 이러한 석탄층 메탄가스는 식물성 유기물을 근원으로 하여 지하심부에서 열과

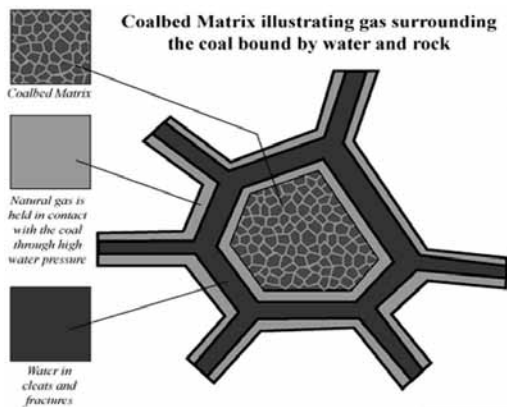


Fig. 1. Structure of CBM (Trident Resources Corp, 2011).

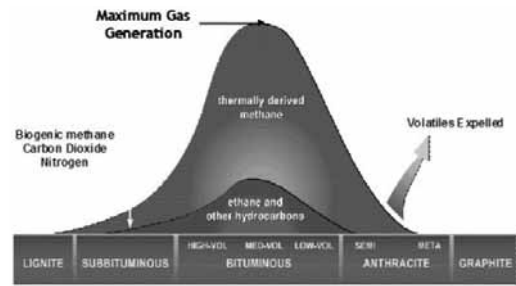


Fig. 2. Higher rank coals generate more gas (Canadian Society for Unconventional Resources; CSUR, 2011).

압력에 의한 탄화과정(coalification)을 거치면서 생성되는데, 탄화정도에 따른 메탄의 발생 정도는 Fig. 2에 나타나 있다. 석탄은 탄화정도에 따라 특성을 달리하며 토탄(peat), 갈탄(lignite), 역청탄(bituminous), 무연탄(anthracite) 등의 순으로 탄화가 진행된다. 이 중 역청탄에서 가장 많은 메탄가스와 에탄 및 기타 탄화수소화합물이 발생하며, 역청탄으로 이뤄진 석탄층은 석탄층 메탄가스 개발의 가장 큰 관심대상이다(Baatar et al., 2011).

석탄층 메탄가스 개발 동향

석탄층 메탄가스 부존량 분포

석탄층 메탄가스는 석탄이 탄화과정을 거칠 때 생성되는 가스로서, 석탄자원이 존재하는 곳에서는 대부분 필연적으로 존재하기 때문에 석탄자원의 고른 분포특성에 따라, 석탄층 메탄가스는 세계적으로 광범위하게 매장되어 있을 것으로 예측된다(Fig. 3). 따라서 석탄을 보유하고 있는 70여 개의 나라가 석탄층 메탄가스가 잠재있을 가능성을 가지고 있다. 세계에서 가장 많이 석탄을 생산하는 10개의 나라는 중국, 미국, 인도, 호주, 남아프리카공화국, 러시아, 인도네시아, 폴란드, 카자흐스탄 그리고 콜롬비아가 있으며, 석탄층 메탄가스 부존량은 2,400~8,400 Tcf(trillion cubic feet)가 될 것으로 파악되었다(Lee et al., 2007).

전 세계 석탄층 메탄가스의 부존량은 Table 1에 나타난 것과 같이 약 9,051 Tcf로 추정되며, 이러한 규모는 기존의 천연가스 확인매장량 6,534 Tcf를 웃도는 막대한 양이다. 국내의 경우, 1999년부터 한국지질자원연구원이 석탄층 메탄가스에 대한 실험실 규모의 독자적 연구를 시작으로 국내 석탄층 메탄가스의 부존 가능성이 높은 탄층을 대상으로 예비 타당성검토를 시행하였지만, 부존 잠재력이 매우 낮은 것으로 보고되었다(박석환 외, 2005; 고희제 외, 2008).

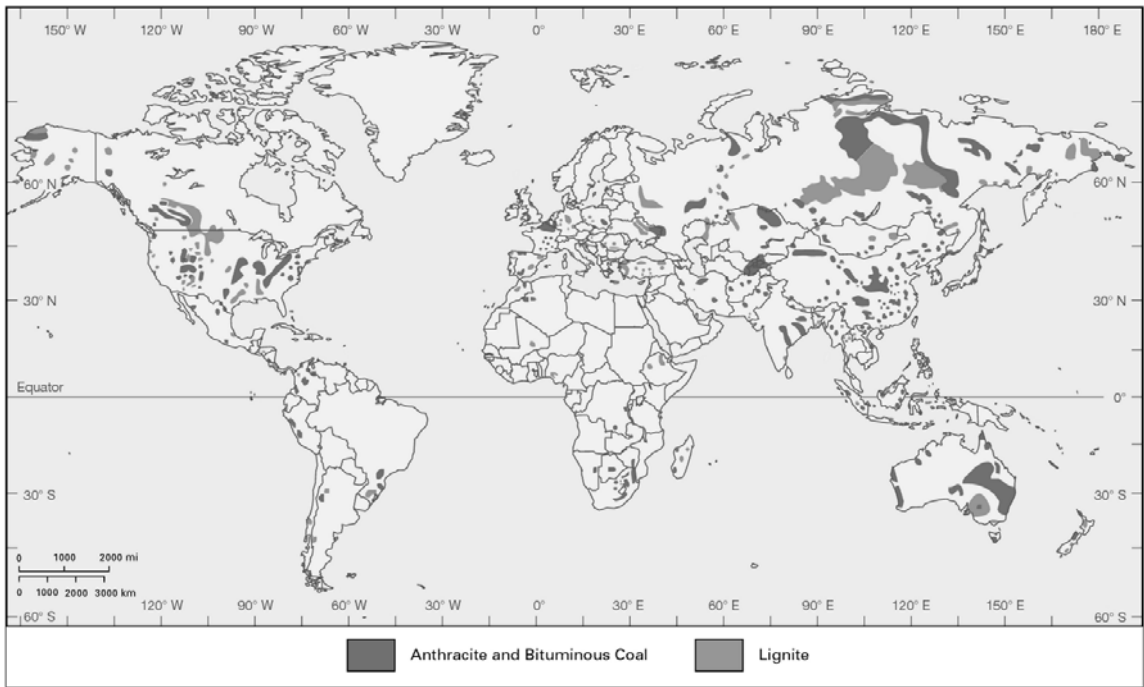


Fig. 3. Major coal deposits of the world (Encyclopaedia Britannica, 2012).

Table 1. Distribution of worldwide unconventional gas reservoirs (Holditch, 2006)

Region	CBM (Tcf)	Shale gas (Tcf)	Tight gas (Tcf)
North America	3,017	3,842	1,371
Latin America	39	2,117	1,293
Western Europe	157	510	353
Central and Eastern Europe	118	39	78
Former Soviet Union	3,957	627	901
Middle East and Africa	39	2,822	1,607
Centrally planned Asia and China	1,215	3,528	353
Pacific	470	2,313	705
Other Asia Pacific	0	314	549
South Asia	39	0	196
World	9,051	16,112	7,406

국의 개발 동향

미국의 경우, 석탄층 메탄가스 개발 초기부터 정부차원의 지원 정책이 펼쳐졌으며, 이는 미국지질조사소(U.S. Geological Survey; USGS), 미국가스연구소(U.S. Gas Technology Institute; GTI)를 비롯하여 민간 기업에까지 영향을 미쳤다. 국가적으로 석탄층 메탄가스 발전 초기 15년간 기초 이론 연구를 추진하였고, 석탄층 메탄가

스 자원 평가기술 개발과 동시에 전문가 양성 등의 인력 인프라 확보에 지원을 아끼지 않았다. 특히, 정부기관인 미 국가가스연구소와 미국에너지부(U.S. Department of Energy; DOE)에서는 석탄층 메탄자원 조사·생산을 위한 각종 기술 개발에 앞장섰고, 미국뿐만 아니라 다른 나라까지도 이들 기술을 통해서 메탄자원을 조사·생산하였다. 이러한 지원을 바탕으로, 미국은 1977년에 상업생산을 시

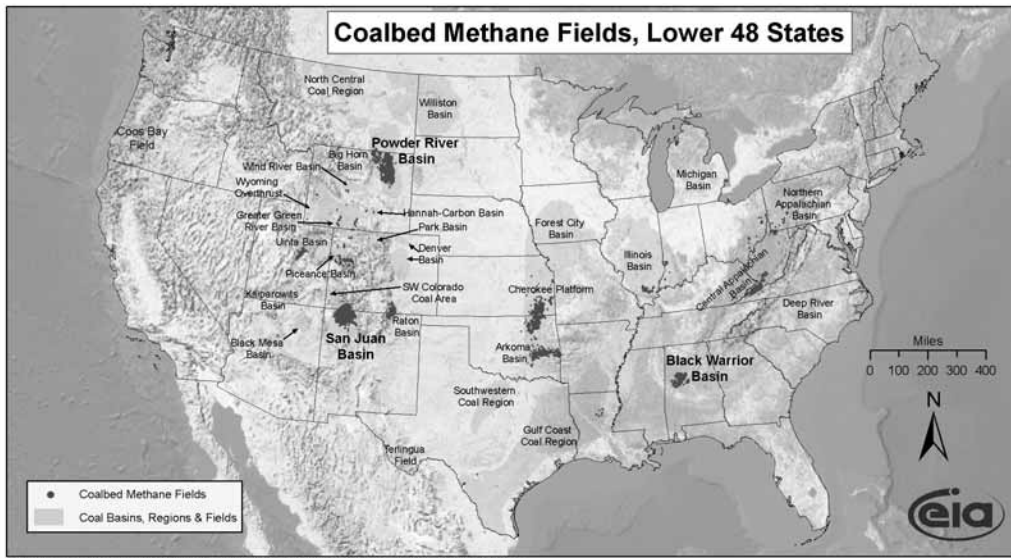


Fig. 4. Development status of CBM in U.S.A. (Energy Information Administration; EIA, 2009).

작하였으며, 석탄층 메탄가스 개발은 각종 정부차원의 지원이 종료된 1993년까지 상당 수준 확대·발전하였다. 그 결과 석탄층 메탄가스는 Fig. 4와 같이 미국 전역에 걸쳐서 개발 및 생산이 이루어졌고, 2009년 기준, 미국 전체 가스 생산량의 9%인 1.93 Tcf를 생산하였다(Clarkson, 2010).

캐나다의 석탄층 메탄가스의 부존량은 700 Tcf가 넘을 것으로 추정되며, 그 중 80%에 달하는 양이 쥐라기(Jurassic), 백악기(Cretaceous) 지질시대의 서부 캐나다 퇴적 분지에 매장되어 있고, 석탄층의 특성에 따라 Scollard, Horseshoe Canyon, Belly River 층과 Mannville 층으로 구분된다(Smith, 1989). Scollard, Horseshoe Canyon, Belly River 층은 심도가 얇고 석탄층의 두께가 얇으며 석탄 등급이 낮은 특징을 보이지만, Mannville 층은 심도가 깊고 석탄 등급이 높은 특징을 보인다(Fig. 5). 또한 Mannville 층의 석탄은 800 m 이상의 심도에 위치해 있으며 심부압력에 의해 저류층의 투과도가 5 md로 매우 낮다. 따라서 수직정을 이용할 경우 경제적인 생산이 불가능하여 수평정 시추나 다층 생산정을 통해서 시험생산을 진행하고 있다. 2000년대 이후로 서부 퇴적분지를 중심으로 3,000개 이상을 착정하였고, 2005년 기준으로 하루 150 MMcf(million cubic feet)를 생산하였다(Gatens, 2005).

호주의 경우, 석탄층 메탄가스의 재산권 관리를 석유와 일치시켜 기존의 천연가스자원과 동등한 기준을 가지고 관리할 수 있도록 하였으며, 석탄층 메탄가스를 채탄 부산물로 탄광의 발전에 사용할 때 광구 사용료를 면제

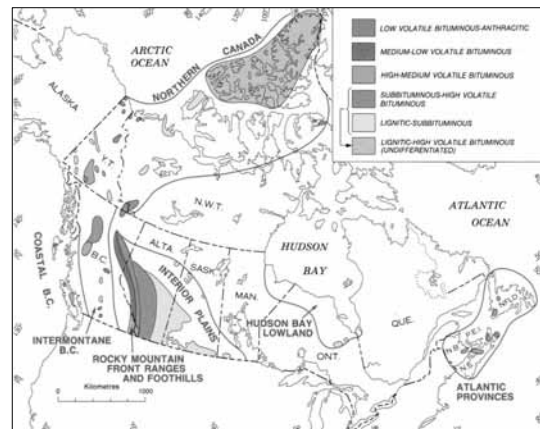


Fig. 5. Distribution of coal deposits in Canada and predominant coal rank (Smith, 1989).

시켜 주었다. 또한 석탄층 메탄가스와 채탄을 지면에서 동시에 작업하는 것을 허용하여 석탄층 메탄가스의 개발을 장려하였다(고희제 등, 2008). 호주 동부지역의 페름기(Permian), 트라이아스기(Triassic) 지질시대의 석탄분지를 중심으로 Queensland, New south Wales 주에서 최근 10년간 자원탐사를 진행했다. 또한 Sydney basin, Gunnedah basin, Bowen basin, Galilee basin 등에서 60여개를 착정하여 그 중 2개의 가스정은 테스트 후 생산정으로 이용하고 있다(Fig. 6). 호주가스협회(The Australian Gas Association)가 추정하는 바로는 호주의 석탄층 메탄

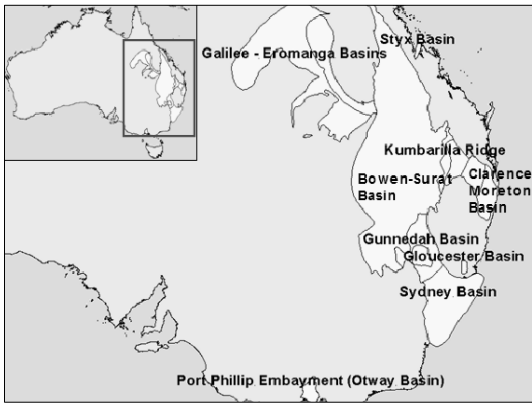


Fig. 6. Basin of CBM in Eastern Australia (Chakhmakhchev, 2007).

가스 추정 부존량은 300~500 Tcf이고, 회수 가능한 석탄층 메탄가스 부존량은 현재 120 Tcf로 추정되고 있다. 이는 기존 천연가스의 매장량인 140 Tcf에 웃도는 수준이며, 호주의 적극적인 석탄층 메탄가스 개발 지원정책을 뒷받침해 준다(Ham and Kantzas, 2008).

중국의 석탄층 메탄가스 개발은 미개발지역 또는 미개발구역의 탄층에 대한 석탄층 메탄가스 개발 사업을 위주로 이루어지고 있다. 석탄층 메탄가스에 대한 기술력 부족, 심부 시추 등에 따른 막대한 초기투자비용, 높은 투자모험도와 상대적으로 긴 자본회수 기간의 문제점을 해결하기 위해 외국투자를 적극 유치하여 대외합작을 통한 전문경영을 실시 중에 있다. 이를 위해 중국은 1996년에 中联煤层氣有限責任公司(China United Coalbed Methane Corp. Ltd; CUCBM)을 설립하여 외국회사와 합작하고 석탄층 메탄가스의 탐사부터 개발, 생산까지의 전문경영권을 행사하고 있다(Chakhmakhchev, 2007). 1998~2000년에는 총 6개의 외국 회사와 11개 지역에 대외 합작을 실시하여 석탄층 메탄가스를 적극 개발하고 있으며, 2005년에는 산서성 Qinshui 탄전에서 미국의 Sanjuan 탄전보다 큰 규모의 석탄층 메탄가스 부존량을 확인한 바 있다(허대기와 이재형, 2010). 이 밖에도 세금우대정책, 광산관리법규와 우대정책, 가격정책과 기타격려조치 및 관련정책 등의 석탄층 메탄가스 개발관련 정책과 법규를 내놓고 있다. 2007년을 기준으로 2,554개의 석탄층 메탄가스 가스정을 시추했으며 600개의 생산가능 가스정을 보유하고 하루 1,060 톤을 생산하였다.

국내현황

1999년 국내에 처음 석탄층 메탄가스에 대한 개념이 소개된 이후, 2001년에 석탄층 개발타당성 예비조사 연

구를 시작으로 2005년부터 2008년까지 3년간 한국지질자원연구원을 주관으로 국내 삼척탄전의 도계광업소 지역에 2개 시추공을 시행하여 시료 채취 및 가스함유량 측정, 공내물리검층, 수압파쇄시험, 양수시험 등을 시행하였다. 이러한 연구를 토대로 연구개발 인프라는 구축하였지만, 국내에서의 상업적으로 개발 가능한 석탄층은 발견하지 못하였다. 한국가스공사는 2008년 몽골 정부와의 석탄층 메탄가스 개발의 양해각서(memorandum of understanding; MOU)를 체결하여, 몽골의 수도인 울란바트로 시내 인근의 날라이 탄광지역에서 석탄층 메탄가스의 개발가능성을 확인하기 위한 탐사 및 시험생산을 계획하여 진행하였으며 현재 종료된 상태이다. 또한 호주의 '글래스톤 LNG 프로젝트'에 지분 15%를 매입하여 매년 호주에서 생산되는 약 800만 톤의 LNG 중 최대 350만 톤을 국내로 공급할 수 있을 것으로 예상되며, 호주의 석유·가스자원 탐사업체인 블루에너지의 지분 10%를 매입하는 내용의 계약을 체결하여 호주 동부지역 석탄층 메탄가스 자원개발에 적극 참여 중이다(백문석, 2011). 그 밖에 유가증권시장의 모바일 솔루션 업체인 유엔젤은 2009년 인도네시아 중앙정부의 석유·가스 청으로부터 인도네시아 남부 칼리만탄 섬의 석탄층 메탄가스 개발권과 30년 사업권을 획득한 에너지 전문 개발기업 '블루 티아이지'의 유상증자에 참여해 지분 51%를 25억 원을 들여 인수하였다.

석탄층 메탄가스의 개발

생산과정

석탄층 메탄가스 생산의 가장 큰 과제는 석탄 내의 유기물 분자에 흡착되어있는 메탄을 효과적으로 탈착(desorption)시켜 생산정도로 도달하게 하는 것이다. 이러한 생산과정을 유도하기 위해서는 메탄의 흡·탈착 메커니즘과 탈착된 메탄가스의 유동에 대한 정확한 이해가 필요하다. 석탄의 흡·탈착에 의한 가스 함유능력(gas storage capacity)은 온도, 압력, 탄화정도, 석탄 구성 물질, 수분 함유정도, 흡착가스의 성분과 석탄의 입도 등에 따라서 변화하게 된다. 온도가 상승하게 되면 석탄의 가스 흡착면적이 좁아지며 메탄 가스분자의 에너지가 증가하고 결합력이 약해져 흡착량이 적어진다(Mavor, 1990). 석탄 내의 가스가 압력저하에 따라 유기물 분자로부터 탈착되어 자유가스가 될 때의 압력을 임계탈착압력(critical desorption pressure)이라고 하며, 가스 생산을 위해서는 탄층의 압력을 임계탈착압력 이하로 유지해 주는 것이 필수적이다(Fig. 7).

일반적인 석탄층 메탄가스 개발에서는 온도의 변화에

의한 탈착이 아닌 압력변화를 이용하여 메탄가스의 탈착을 유도한다. 대부분의 석탄층은 퇴적과정에서 생성된 지층수를 포함하고 있고, 석탄층 메탄가스 개발 시에 석탄층에 포함된 지층수를 생산하여 석탄층의 압력을 떨어뜨리고 석탄층에 흡착되어있는 메탄가스를 탈착시킨다. 이는 일정한 온도 하에서 압력단계의 변화에 따른 석탄 내 가스흡유능력의 변화를 알아내는 랑뮤어의 흡착등온선(Langmuir adsorption isotherm)에 의해서 설명된다(Yu et al., 2007). 그리고 탈착되어 유리상태로 존재하는 메탄가스는 기체와 기체 사이의 농도 차이에 의한 확산(diffusion)에 의해 암체를 통과하고, 암체를 빠져나온 메탄가스는 균열망을 통한 Darcy의 유동(Darcy's flow)에 의해 생산정에 도달하게 된다(Fig. 8).

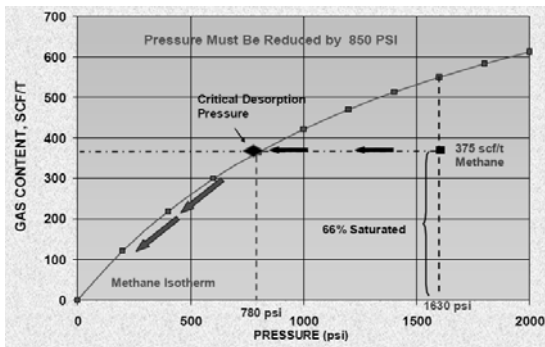


Fig. 7. Reservoir pressure in this undersaturated reservoir (66% saturated) must be reduced by 850 psi before the critical desorption pressure is reached and gas begins to desorb from the coal (Lamarre, 2005).

생산특징

석탄층 메탄가스는 기존의 천연가스와 다른 생산특징을 보인다. 석탄층 메탄가스 개발 사업은 기존의 천연가스 개발심도와는 달리 비교적 천부에서 진행된다. 기존의 천연가스 개발과 같이 깊은 심도에서 개발이 진행될 경우, 지하심부에 작용하는 고압으로 인해 가스의 유동 경로가 막혀 원활한 유동이 일어나지 않고 깊은 심도에 따른 시추 비용의 추가로 인해 경제적인 생산이 불가능하다. 또한 석탄층 메탄가스는 생산 형태에서도 기존의 천연가스의 생산과는 다른 특징을 보인다. 기존의 천연가스는 가스의 생산이 초기에 최고생산량이 되어 빠르게 감소하는 반면, 석탄층 메탄가스는 최고생산량 도달 시점까지 시간이 소요된다(Mora and Wattattenbarger, 2009). 예로 미국의 생산경험에 의하면, 통상 일정한 시간 동안 석탄층 메탄가스를 생산한 후 석탄층 메탄가스정의 가스 생산량은 점차 안정화 되어 최고생산량에 도달하는 단계에 들어서기 시작하는데 이 최고생산량은 일반적으로 3~5년 동안 지속되며 그 후로는 점차 감소된다. 또한 석탄층 메탄가스는 개발시 물 생산이 특징적으로 나타나며, 이를 관리하는 것이 석탄층 메탄가스 개발의 성공 여부를 결정한다(Saulsberry et al., 1996). 기존의 가스전에서는 천연가스와 물의 생산이 정반대의 경향을 나타내는데 반해, 석탄층 메탄가스는 생산 초기에 물이 최대량 생산되며 개발이 진행될수록 그 양은 점차 줄어든다(Fig. 9). 이는 석탄층 내에 존재하는 지층수를 우선적으로 생산하기 때문이다. 먼저 지층수를 생산하여 석탄층 내에 압력 강하를 발생시킨다. 그리고 석탄층에 흡착되어 있는 메탄가스는 압력 강하로 인해 탈착되어 생산이 가능한 자유가스 형태가 된다.

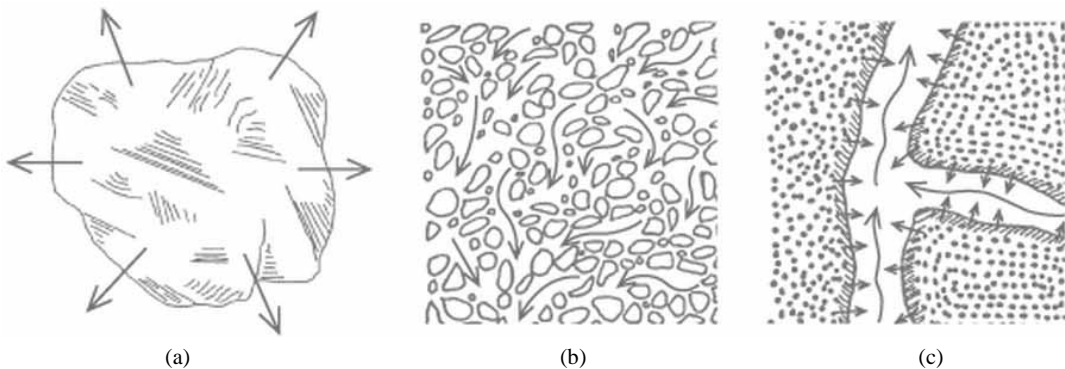


Fig. 8. Transport of gas through coal. (a) Gas desorption from coal grains in the coal matrix. (b) Step 1: diffusion through the primary porosity system to the cleat system. (c) Step 2: Poiseuille flow through the cleat system to production wells (Accessscience, 2011).

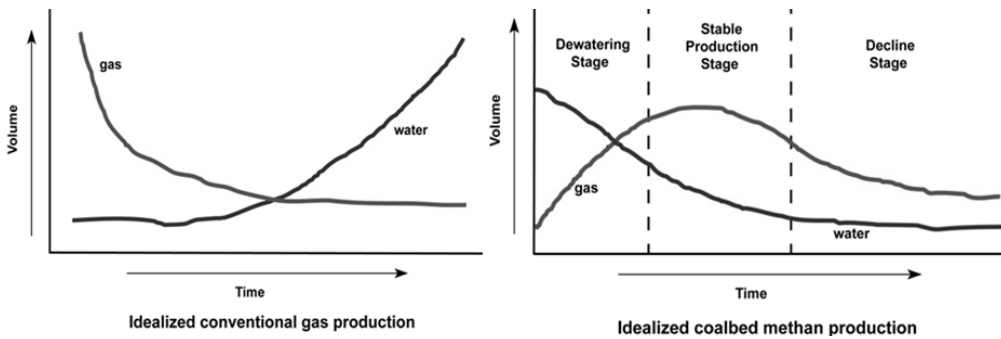


Fig. 9. Production curve of natural gas and CBM (이정환, 2009).

석탄층 메탄가스 개발 핵심기술

석탄층 메탄가스의 일반적인 생산기술에는 탈수공법(dewatering)이 있으며, 이는 석탄층에 존재하고 있는 물을 생산하여 탄층 내의 압력강하를 통해 최종적으로 석탄층 메탄가스를 생산하는 방법이다. 탈수공법은 초기 가스 및 물의 농도, 탄리의 공극율, 석탄의 투과도, 생산 정간격 등에 의해 압력강하 속도가 조절된다. 또한 압력강하 속도에 따라 석탄층 내 메탄가스의 탈착을 조절할 수 있다. 탈수공법을 통한 석탄층 메탄가스의 회수율은 일반적으로 20~60%이다. 근래에 들어서는 석탄층 메탄가스 생산기술은 기존의 탈수방법을 적용하지 않고 이산화탄소나 질소가스를 석탄층에 직접 주입함으로써 메탄가스의 생산 증진시키는 기술인 ECBM(Enhanced coalbed methane) 공법이 이용되고 있다. ECBM 공법은 전체 저류층의 압력을 유지한 채 가스의 부분압력을 비평형상태를 만들어 메탄가스의 탈착을 유도하는 방법이다. ECBM 공법은 회수율이 75~90%이며 탈수공법에 비해 약 150% 정도의 생산량을 보인다(Kim et al., 2011). ECBM 공법은 주입되는 가스의 종류에 따라 크게 N₂-ECBM과 CO₂-ECBM으로 나눌 수 있다. 비용의 측면에서 질소를 주입하는 N₂-ECBM이 더 저렴하지만 생산정까지 도달하는 시간이 짧아 질소의 생산량이 높기 때문에 생산된 가스에서 질소가스를 제거하는 추가적인 분리공정이 필요하다. CO₂-ECBM은 N₂-ECBM에 비해 더 오랜 생산시간이 소요되지만 순도 높은 메탄가스를 생산함으로써 추가적인 분리공정이 필요하지 않다. 따라서 ECBM의 효율성을 최적화하기 위해서는 적절한 비율의 질소와 이산화탄소의 혼합기체를 주입하는 것이 필요하며, 이에 대한 기술개발이 요구된다(석유개발연구원, 2009). ECBM을 이용한 석탄층 메탄가스 생산은 가스 생산시기를 앞당길 수 있으며, 기존의 탈수공법 사용시 생산시기 지연으로 인한 단점을 상당히 개선시킬 수 있다. 이는 기존의 탈수

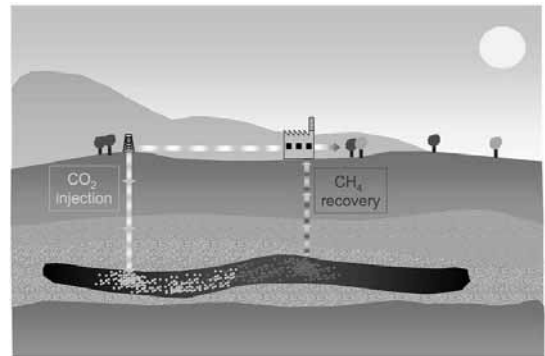


Fig. 10. Schematic drawing of CO₂-ECBM (ETH Zurich, 2011).

공법을 이용한 메탄가스의 생산보다 ECBM을 이용한 생산이 상업적으로 유리하다는 의미이기도 하다. 또한 Fig. 10에 나타난 CO₂-ECBM 사업은 석탄층 메탄가스의 생산증진을 가져올 뿐만 아니라, 이산화탄소 의무감축과 관련하여 탄소 배출권 거래사업 등과 연계하여 추진할 수 있는 매력적인 사업으로 평가되고 있어서 향후 석탄층 메탄가스 사업의 중요성이 더욱 부각될 소지가 높다(Michael, 2005).

하지만 높은 유량으로 이산화탄소를 주입할 때 석탄에 흡착되어있던 메탄가스의 탈착 효율이 높아지지만, 이산화탄소의 주입은 석탄의 팽창(swelling) 현상을 발생시킬 수 있다. CO₂-ECBM은 메탄가스보다 이산화탄소가 석탄에 흡착이 더 잘 일어나는 성질을 이용하는 것이다. 이산화탄소를 석탄층에 주입할 경우, 기존에 석탄에 흡착되어 있던 메탄가스를 밀어내고 석탄 압체에 흡착된다. 이로 인해 탈착된 메탄가스가 탄리, 질리를 거쳐 확산, 유동되고 생산정에 도달하게 된다. 그러나 이산화탄소는 메탄분자를 대체 하는 과정에서 분자의 크기 때문에 석탄 압체의 팽창을 가져와 탄리가 닫히게 만든다(Karine et al., 2010). 팽창 현상이 발생할 경우 탄리의

간격이 좁아져 투과도의 감소와 주입효율의 저감효과를 가져온다(Fig. 11). 즉, 생산 증진을 위해 석탄층에 주입한 이산화탄소가 오히려 회수율을 낮출 수 있으므로 이러한 효과를 방지하기 위해 기술개발을 통한 근본적인 해결책이 필요하다.

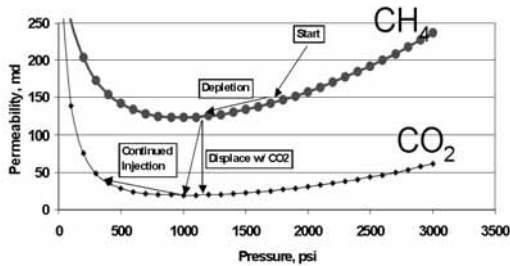


Fig. 11. Permeability changes during CO₂ injection with pressure and concentration (Karine et al., 2010).

핵심기술 분류

본 연구에서는 석탄층 메탄가스 개발 기술에 대한 최근 연구논문 분석을 토대로 석탄층 메탄가스의 핵심기술을 분류하였다. 매장량 평가 및 생산성 분석 기술을 포함한 석탄 품위에 따른 isotherm correlation 도출 등의 총 7개의 기술을 분류하였으며 각 핵심기술에 대한 필요성 및 중요성을 Table 2에 제시하였다.

국내 기술평가

국내의 석탄층 메탄가스에 대한 조사, 탐사기술은 보유하고 있으나 개발 생산관련 기술은 이제 초입 단계이기 때문에 국외의 대표기술과의 기술 수준 격차를 줄이기 위한 방안으로 Table 3에 나타난 것처럼 국내 석탄층 메탄가스 핵심기술 개발의 최종목표 설정 및 평가 지표를 제시하였다.

Table 2. Classification and analysis for key technologies of CBM

핵심기술	필요성/중요성	최근 연구논문 분석
매장량 평가 및 생산성 분석 기술	<ul style="list-style-type: none"> - 매장량 평가는 석탄층 메탄가스의 생산 잠재력을 평가하기 위한 자료 - 석탄층 메탄가스 개발의 사업성을 평가하기 위해 생산성 분석이 필요 - 시험생산계획을 수립하고 광구 설계 시 중요한 역할 	<ul style="list-style-type: none"> - Flow/buildup-test를 통해 압력 전이 분석을 수행하였으며, 이를 통해 감소하는 절대투과도의 변화를 정량화함 (Gierhart et al., 2007) - 서부 캐나다 Horseshoe Coals의 단층 buildup-test 자료를 수집하여 분석하였으며, 실험 결과는 다층 시뮬레이션과 생산 자료 분석에 입력 자료로 사용되었음 - 불균질성의 다양한 저류층을 buildup-test를 통해 유도하였고 다층, 이중공극 구조를 설명함(Clarkson, 2009)
메탄 흡착량, 물성 분석 및 in-situ 석탄가스 분석 기술	<ul style="list-style-type: none"> - 석탄층의 특성 분석은 저류층 특성화를 위한 필수 인자임 - 분석 기술의 수준에 따라 매장량 평가가 달라지고 그에 따른 경제성에 영향을 줌 	<ul style="list-style-type: none"> - 봉압(confining pressure)상태에서 헬륨가스, 메탄가스, 이산화탄소를 이용하여 투과도를 분석함 - 봉압을 감소, 증가시키면서 투과도를 측정했으며 이력 현상(hysteresis)를 보였으며, 사용한 가스의 투과도는 봉압이 증가할수록 감소함을 보였음(Sinisha et al., 2009)
석탄 품위에 따른 isotherm correlation 도출	<ul style="list-style-type: none"> - 특정 압력하에서 석탄층 메탄가스를 생산할 때, 가스회수율 예측시 필요 - 생산성 자극이나 압력강하 설계시 중요 	<ul style="list-style-type: none"> - 석탄에 이산화탄소를 주입하여 얻어진 흡착등온선을 통해 메탄가스와 이산화탄소의 흡착 등온선을 모델링함(Guo and Kantzas, 2008) - 다양한 석탄 품위에 대해서 모델을 적용했으며 무연탄에서 가장 높은 저장능력을 보임(Garnier et al., 2011)
다양한 품위의 탄층에 CO ₂ -N ₂ -H ₂ S 등의 혼합가스 주입을 통한 석탄층 메탄가스 생산증진 기술	<ul style="list-style-type: none"> - 탈수공법만으로 석탄층 메탄가스 생산 시 20-60%의 회수율을 갖지만 혼합가스를 주입할 경우 회수율 증가 - 다양한 품위의 석탄층에 혼합가스를 주입하여 최적의 회수율과 경제성을 만족시키는 생산증진 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> - ECBM과 CO₂ 지중격리 수행 중에 공극 압력, 가스함유량, 가스분별에 의한 공극률과 투과도의 변화를 예측함(Mavor and Gunter, 2006) - 질소가스와 이산화탄소의 주입을 통한 ECBM 연구, 이산화탄소 수집 및 저장(carbon capture and storage; CCS)을 동시에 연구함 - 석탄 품위에 따른 혼합가스를 주입하면서 석탄의 팽창이나 수축에 관한 연구함 - 혼합가스의 최적혼합비를 알아내기 위해 시뮬레이션을 통한 투과도와 생산성을 분석함(Karine et al., 2010)

Table 2. Classification and analysis for key technologies of CBM (Continued)

핵심기술	필요성/중요성	최근 연구논문 분석
팽창에 따른 석탄층 특성 변화 분석 기술	- CO ₂ -ECBM 공법 사용시 석탄 팽창 현상 발생하여 투과도에 영향을 줌 - 팽창에 따른 석탄층 메탄가스 생산성 변화 분석이 필요	- 압력변화에 따른 석탄의 투과도 변화 양상에 대해 분석함(Mazumder, et al., 2006) - 팽창과 투과도 간의 관계를 모델링하여 투과도 평가 모델을 개발함 - 실험 자료와 개발된 시뮬레이션 자료를 비교분석하여 검증함(Liu et al., 2011)
생산정 및 수송 파이프라인의 다상 다성분 유동모델 개발	- 석탄층 메탄가스는 다성분 가스이며, 생산시 일반적으로 다상유동이 발생하므로 이를 고려한 유동모델 개발이 필요 - 생산정 및 수송 파이프라인에서 유동하는 석탄층 메탄가스 유동모델 예측은 처리공정 설계에 필요	- 수송 시스템 중 하이드레이트(hydrates)나 산(acids)에 관한 흐름 견실성(flow assurance; FA)을 고려함 - 다상 다성분 유동모델을 통해 유동 메카니즘을 분석하였음(Zaghloul, 2007) - 습가스(wet gas) 파이프라인 내에서 물관리를 위한 최적화 모델링을 수행함(Carimalo et al., 2008)
회수 가스의 포집 및 정제를 위한 플랜트 공정설계기술	- 가스 포집 시스템은 효율적인 가스의 저장을 위해 필요 - 회수 가스 정제, 포집 시스템 확립을 통한 플랜트 연계기술 구축	- 불확실성 내에서 가스 포집 시설에 대한 공정설계를 연구함 - 추정이 뒷받침되는 불확실한 분석 내에서 최적화된 가스 포집 공정설계모델을 개발함(Amin, 2009)

Table 3. Evaluation indicators and targets of key technologies

핵심기술	현 최고 대표 기술	평가 지표	최종목표
매장량 평가 및 생산성 분석 기술	생산성 분석 기술 (ExxonMobil)	- 매장량 평가 및 생산성 분석에 이용된 석탄층의 물성치의 신뢰 여부	- 현장 자료를 이용하여 생산성 분석 시행 후 실제 자료와의 비교 분석 - 투과도 및 산출 인자 도출
메탄 흡착량, 물성 분석 및 in-situ 석탄층 메탄가스 분석 기술	석탄가스 분석기술 (U.S. GTI)	- 메탄가스의 흡착계수 도출 여부 - 석탄층의 가스함유량 측정 여부 - 원시가스부존량과 가채매장량 평가 가능 여부	- 석탄 특성에 따른 isotherm 도출 및 가스함유량을 이용한 매장량 산출 - 주요 물성 인자 도출
석탄 품위에 따른 isotherm correlation 도출	석탄특성 분석 기술 (Colorado School of Mines)	- 가스함유량의 포화상태 정도 도출 여부 - 탄리와 탄질물의 경계면에서 가스 밀집상태 계산 여부	- 석탄품위별 isotherm correlation 도출 - 석탄품위별 특정 생산 압력하에서 가스회수율 예측
다양한 품위의 탄층에 CO ₂ -N ₂ -H ₂ s 등의 혼합가스 주입을 통한 석탄층 메탄가스 생산증진 기술	석탄층 메탄가스 생산증진 기술 (REI Drilling, Inc.)	- 일반화된 혼합가스비와 생산성, 회수율 비교 - 다양한 품위의 석탄층에 활용 가능 여부	- 혼합가스 주입 기술 확립 - 석탄층 품위에 따른 최적화된 혼합 가스비 산출
팽창에 따른 석탄층 특성 변화 분석 기술	석탄층 특성 변화 분석 기술 (U.S. GTI)	- 이산화탄소 주입에 따른 팽창 효과 모델 도출 여부 - 모델링된 석탄과 실험을 통한 석탄의 검증 여부	- 압력변화에 따른 석탄층 팽창 예측 - 팽창에 대한 투과도 변화를 산출
생산정 및 수송 파이프라인의 다상 다성분 유동모델 개발	Modeling Multiphase Flow in Pipes (University of Tulsa)	- 개발된 유동모델과 실제 유체 유동간의 비교 검토	- 다상 다성분 유동모델 구축을 통한 석탄층 메탄가스 처리공정 확립
회수 가스의 포집 및 정제를 위한 플랜트 공정설계기술	플랜트 공정 설계 기술 (KVK, Corporation)	- 포집 및 정제를 통한 회수가스의 효율성 검토	- 회수 가스 정제, 포집 시스템 확립을 통한 플랜트 연계기술 구축

결론 및 제언

본 연구에서는 석탄층 메탄가스의 개발현황에 대해 조사하고 석탄층 메탄가스 개발에 필요한 핵심기술을 분류하였다. 이를 통해 석탄층 메탄가스에 대한 향후 전망 및 핵심기술 개발 방향에 대해 제시하였다.

1. 전 세계적으로 약 9,051 Tcf가 매장되어 있는 석탄층 메탄가스는 미국이 주도하여 자원개발을 진행 중에 있고, 이미 상업화에 성공한 상태이다. 대표적인 석탄층 메탄가스 생산국가로는 미국, 중국, 호주 등이 있다. 온실가스배출 규제와 이산화탄소 배출권 거래시행이 공식화되면서 석탄보유국들은 국제 온실가스 배출규제에 대처하고 에너지자원 확보를 위해 석탄층 메탄가스 개발에 대한 투자 및 사업 확대가 일어날 것으로 전망된다.

2. 석탄층 메탄가스의 개발 핵심기술을 분류하기 위해 최근 석탄층 메탄가스 개발 기술에 대한 필요성, 중요성, 최근 연구 논문 동향을 분석하였다. 분석한 결과를 바탕으로 석탄층 메탄가스 매장량 평가 및 생산성 분석을 포함한 총 7개의 핵심기술을 분류하였다. 현재 국내에서 보유하고 있는 핵심기술은 국외 최고 수준의 기술과 비교하여 큰 격차를 보였으며, 향후 석탄층 메탄가스 기술 개발을 위해서는 국가의 정책적인 지원과 더불어 국외 선진 기업들과의 공동 사업 참여, 기술개발 전문 인력양성 등의 단기 및 중·장기적인 전략 체계를 구축하여 연구 및 투자 확대가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 부처임무형 사업인 “인도네시아 석탄층 메탄가스 생산 및 평가기술 개발”의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 고희재, 고경석, 고동찬, 기원서, 김지환, 김복철, 김태희, 박석환, 박인화, 염병우, 이승구, 이승렬, 최범영, 황세호, 2008, “**석탄층 메탄가스자원(CBM) 탐사 개발**,” 지식경제부 최종보고서.
- 박석환, 김복철, 고희재, 최성용, 황세호, 이원석, 심병완, 2005, “**국내 석탄층 메탄자원(CBM)의 개발타당성 및 경제성평가 기회연구**,” 산업자원부 최종보고서.
- 백문석, 2011, “**비전통 가스자원 및 한국가스공사의 사업 현황**,” *한국지구시스템공학회지*, 제48권 4호, pp. 532-537.
- 석유개발원, 2009, “**ECBM: 석탄층가스 생산 신기술**,” 신기술동향보고, pp. 1-4.

- 이정환, 2009, “**해외 석탄층가스(CBM) 기술개발 동향 및 전망**,” *해외자원개발심포지엄 발표집*, 해외자원개발협회, JW메리어트 호텔, 서울, 12월 2일, pp. 127-143.
- 이철규, 2005, “**해외석유개발사업의 문제점 및 정책방향**,” *한국지구시스템공학회지*, 제42권 3호, p. 193.
- 허대기, 이재형, 2010, “**차세대 에너지시대 진입을 위한 비재래 에너지 자원**,” *한국지구시스템공학회지*, 제47권 6호, pp. 978-981.

Accessscience, 2011.11.28, <http://accessscience.com/content/Coalbed%20methane/757500>.

Amin, E., Christopher, J. and Larry W. L., 2009, “**Gas Storage Facility Design Under Uncertainty**,” *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers, Louisiana, New Orleans, U.S.A., October 4-7, pp. 2-14.

Baatar, A., Kim Y. W., Han, J. M., Lee, J. H. and Beak, Y. S., 2011, “**Status of Coalbed Methane Development in Lignite Coal Deposits**,” *제97회 한국지구시스템공학회 발표논문집*, 한국지구시스템공학회, 강원랜드 컨벤션 호텔, 강원도, 9월 21일, p. 184.

Canadian Society for Unconventional Resources, 2011.11.07, http://www.csur.com/images/URTI/resources_13A.jpg.

Carimalo, F., Fouché, I., Hauguel, R., Campaignille, X., Chrétien, T. and Meyer, M., 2008, “**Flow Modeling to Optimize Wet Gas Pipeline Water Management**,” *CORROSION 2008 Conference & Expo*, NACE International, New Orleans, L.A., U.S.A., March 16-20, pp. 1-3.

Central Intelligence Agency, 2011, *The World Factbook*, Potomac Books.

Chakhmakhchev, A., 2007, “**Worldwide Coalbed Methane Overview**,” *SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium*, Society of Petroleum Engineers, Dallas, Texas, April 1-3, pp. 1-5.

Clarkson, C. R., 2010, “**Coalbed Methane: Current Evaluation Methods, Future Technical Challenges**,” *SPE Unconventional Gas Conference*, Society of Petroleum Engineers, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A., February 23-25, pp. 1-2.

Clarkson, C. R., 2009, “**Case Study: Production Data and Pressure Transient Analysis of Horseshoe Canyon CBM Wells**,” *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, Vol. 48, No. 10, pp. 27-37.

Energy Information Administration Based on Data from USGS and Various Published Studies, 2009, *Coalbed Methane Field, Lower 48 States*, EIA.

Encyclopaedia Britannica, 2012.3.13, <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/122863/coal/50690/World-distribution-of-coal>.

ETH Zurich, 2011.11.07, http://www.ipe.ethz.ch/laboratories/spl/research/adsorption/project03/box_feeder/ECBM/hires.

- Gatens, M., 2005, "Coalbed Methane Development: Practices and Progress in Canada," *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 44, No. 8, pp. 1-2.
- Garnier, C., Fiqueneisel, G., Zimny, T., Pokryszak, Z., Lafortune, S., Defosse, P. D. C. and Gaucher, E. C., 2011, "Selection of Coals of Different Maturities for CO₂ Storage by Modeling of CH₄ and CO₂ Adsorption Isotherms," *International Journal of Coal Geology*, Vol. 87, Issue 2, pp. 80-86.
- Gierhart, R. R., Clarkson, C. R. and Seidle, J. P., 2007, "Spatial Variation of San Juan Basin Fruitland Coalbed Methane Pressure Dependent Permeability: Magnitude and Functional Form," *International Petroleum Technology Conference*, The American Association of Petroleum Geologists, Dubai, U.A.E., December 4-6, pp. 1-3.
- Guo, R. and Kantzas, A., 2008, "Modelling the Miscible Displacement in CO₂-ECBM Using the Convection-Dispersion with Adsorption Model," *Canadian International Petroleum Conference*, Society of Petroleum Engineers, Calgary, Alberta, Canada, June 17-19, pp. 2-5.
- Ham, Y. and Kantzas A., 2008, "Development of Coalbed Methane in Australia: Unique Approaches and Tools," *CIPC/SPE Gas Technology Symposium 2008 Joint Conference*, Society of Petroleum Engineers, Calgary, Alberta, Canada, June 16-19, pp. 1-5.
- Holditch, S. A., 2006, "Tight Gas Sands," *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 58, No. 6, p. 88.
- Jenkins, C. D. and Boyer, C. M., 2008, "Coalbed- and Shale-Gas Reservoirs," *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 60, No. 2, p. 92.
- Karine, S., Anne, O. and Nino, R., 2010, "Enhanced Gas Recovery and CO₂ Storage in Coalbed-Methane Reservoirs: Optimized Injected-Gas Composition for Mature Basins of Various Coal Rank," *SPE International Conference on CO₂ Capture, Storage, and Utilization*, New Orleans, Louisiana, U.S.A., November 10-12, pp. 2-4.
- Kim, K. H., Kim, S. J., Lee, M. K. and Sung, W. M., 2011, "The Effect of CO₂-CH₄ Sorption Phenomena on Methane Recovery of Coalbed Methane," *Geosystem Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 127-133.
- Lamarre, R. A., 2005, "Undersaturation in Coal: How does it happen and why is it important," *Rocky Mountain Association of Geologists Coalbed Methane Symposium*, Rocky Mountain Association of Geologists, Denver, CO., U.S.A., June 30, p. 8.
- Lee, R. R., Andrew, G., John, J. H., David, J. O. and Daniel, H. Y., 2007, *Hardtruths [monograph on CD-ROM]*, National Petroleum Council.
- Liu, J., Wang, J., Chen, Z., Wang, S., Elsworth, D. and Jiang, Y., 2011, "Impact of Transition from Local Swelling to Macro Swelling on the Evolution of Coal Permeability," *International Journal of Coal Geology*, Vol. 88, Issue 1, pp. 31-40.
- Mavor, M. J., 1990, "Measurement and Evaluation of Coal Sorption Isotherm Data," *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers, New Orleans, Louisiana, September 23-26, pp. 23-26.
- Mavor, M. J. and Gunter, W. D., 2006, "Secondary Porosity and Permeability of Coal vs. Gas Composition and Pressure," *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 1-5.
- Mazumder, S., Karnik, A. and Heinz, K., 2006, "Swelling of Coal in Response to CO₂ Sequestration for ECBM and Its Effect on Fracture Permeability," *SPE Journal*, Vol. 11, No. 3, pp. 2-8.
- Michae, G. J., 2005, "RFP8 - Coal Bed Methane Production & CO₂ Storage: the Win-Win Association?," *18th World Petroleum Congress*, World Petroleum Congress, Johannesburg, South Africa, September 25-29, pp. 7-8.
- Mora, C. A. and Wattattenbarger, R. A., 2009, "Comparison of Computation Methods for CBM Performance," *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 48, No. 4, pp. 1-2.
- Saulsbury, J. L., Schafer, P. S. and Schraufngel, R. A., 1996, *A Guid to Coalbed Methane Reservoir Engineering*, Gas Research Institute Chicago, Illinois, U.S.A., Chapter 8, pp. 1-3.
- Sinisha, A. J., Robert, T. M. and Duane, H. S., 2009, "Permeability Variations in Upper Freeport Coal Cores Due to Changes in Effective Stress and Sorption," *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers, Louisiana, New Orleans, U.S.A., October 4-7, pp. 1-5.
- Smith, G., 1989, *Coal Resources of Canada*, Geological Survey of Canada, pp. 18-20.
- Trident Resources Corp., 2011.11.07, <http://www.tridentexploration.ca/DisplayLinkNGC.asp?LinkID=11>.
- Yu, H., Zhou, L., Guo, W., Cheng, J. and Hu, Q., 2008, "Predictions of the Adsorption Equilibrium of Methane/Carbon Dioxide Binary Gas on Coals Using Langmuir and Ideal Adsorbed Solution Theory under Feed Gas Conditions," *International Journal of Coal Geology*, Vol. 73, Issue 2, pp. 115-129.
- Zaghloul J., 2007, "Compositional Modeling of Two-Phase (Gas/Water) Flow in Gathering and Transmission Pipeline Systems," *Eastern Regional Meeting*, Society of Petroleum Engineers, Lexington, Kentucky, U.S.A., October 17-19, pp. 2-4.



장 호 창

2011년 전남대학교 지구시스템공학과
공학사

현재 전남대학교 석유·천연가스공학 석사과정
(E-mail: vjanrwk@nate.com)

신 창 훈

현재 한국가스공사 연구개발원 자원기술연구센터 자원개발분야장
(本 學會誌 第49卷 第3号 參照)

이 원 석

현재 한국지질자원연구원 석유해저연구본부 선임연구원
(本 學會誌 第48卷 第2号 參照)

이 정 환

현재 전남대학교 공과대학 에너지자원공학과 교수
(本 學會誌 第49卷 第2号 參照)

이 영 수

현재 한국가스공사 연구개발원 자원기술연구센터 선임연구원
(本 學會誌 第49卷 第3号 參照)

권 순 일

현재 동아대학교 공과대학 에너지자원공학과 교수
(本 學會誌 第49卷 第3号 參照)