

Tavan Tolgoi Coal Bed Methane에 대한 몽골에서의 타당성 조사

조원준^{1,†} · 유혜진¹ · 이제설¹ · 이현찬² · 주우성² · 임옥택³

¹Unisys International R&D((주)바이오프렌즈), ²한국가스공사, ³울산대학교 기계자동차공학부

Pre-feasibility Study in Mongolia Tavan Tolgoi Coal Bed Methane

WONJUN CHO^{1,†}, HYEJIN YU¹, JESEOL LEE¹, HYUN CHAN LEE², WOO SUNG JU², OCKTAEK LIM³

¹Unisys International R&D, (Bio Friends Inc.), 160 Techno 2-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34028, Korea

²Korea Gas Corporation R&D, 960 Incheonsinhang-daero, Yeonsu-gu, Incheon 21993, Korea

³School of Mechanical Engineering, University of Ulsan, 93 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan 44610, Korea

†Corresponding author :
williamcho86@gmail.com

Received 29 January, 2018
Revised 23 February, 2018
Accepted 28 February, 2018

Abstract >> Methane is the cleanest fuel and supplies by many distributed type: liquefaction natural gas (LNG), compressed natural gas (CNG), and pipeline natural gas (PNG). Natural gas is mainly composed by methane and has been discovered in the oil and gas fields. Coal bed methane (CBM) is also one of them which reserved in coalbed. This significant new energy sources has emerge to convert an energy source, hydrogen and hydrogen-driven chemicals. For this CBM, this paper was written to analyze the geological analysis and reserves in Mongolian Tavan Tolgoi CBM coal mine and to examine the application field. This paper is mainly a preliminary feasibility report analyzing the business of Tavan Tolgoi CBM and its exploitable gas.

Key words : Methane(메탄), Liquefaction natural gas(액화천연가스), Pipeline natural gas(파이프라인천연가스), Coal bed methane(석탄층메탄가스), Compressed natural gas(압축천연가스)

1. 서론

몽골 Tavan Tolgoi에서 coal bed methane (CBM) 개발을 위한 예비 기술 및 경제적 타당성 조사가 수행되었다. 총 CBM 생산 능력은 약 40 MMTon으로 추정되며 유정에서의 CBM 생산 능력은 약 1 MMTon/year로 20년간 생산할 수 있는 양이다¹⁾. 이 연구에서 이야기하고자 하는 것은 다음과 같다: 1) 탐사 및 생산, 2) 각 탄층 가스에 대한 가스 처리, 3) 중앙 가스 처

리 공장, 4) Tavan Tolgoi에서 Ulan Bator (545 km)로 가스를 수송하기 위한 파이프 라인 및 재압축기 스테이션생산물 관리 및 처리, CBM으로부터의 추출에 대한 것은 이 논문에 포함하지 않았다.

중앙 가스 처리 공장 이전 상태와 이후 상태에 가정된 CBM 조성은 Table 1에 나와 있다. CO₂가 천연 가스에서 발견되는 가장 큰 오염 물질이기 때문에, CO₂는 CBM에 존재하는 유일한 불순물이다²⁾. 황과 질소는 CBM에 존재하지 않는다고 가정한다.

Table 1. CBM composition

Species	Mole Fraction at wallhead	Mole fraction after central processing
CH ₄	0.9339	0.9723
C ₂ H ₆	0.0000	0.0000
CO ₂	0.0581	0.0194
N ₂	0.0080	0.0083
H ₂ O	0.0000	0.0000
Total	1.0000	1.0000

2. 지질 형태

Tavan Tolgoi coalfield는 몽골 중남부 고비 사막의 울란 누아 계곡(Ulaan Nuur Valley)에서 약 220 km²의 면적을 차지한다. Tank Tolgoi는 Tsankhi, Southwest, Borteeg, Ukhaakhudag, Eastern 및 Bortolgoi 등 6개의 분리된 탄층을 형성하며, 그중 5개는 Erdenes의 광산 리스업체를 통해 관리된다. Tsankhi 탄전은 Tavan Tolgoi 탄전 내에서 약 10 km²의 면적을 차지합니다. Tavan Tolgoi에서 총 17개(0-16)의 수많은 석탄 이음매가 확인되었다.

2.1 지역 구조에 따른 지질 형태

몽골과 중국 북부는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 원생대에 서 후기 고생대까지 오랜 시간이 지나면서 형성되었다.

각각의 연속적인 벨트는 남쪽에서 북쪽으로 시베리아 크라톤(Coberton)을 감싸고, ophiolitic 봉합 구역에 의해 분리된 일련의 오목한 북쪽 포장 호를 형성한다. 두 개의 봉합 구역이 몽골에 있는데 북쪽의 후기 원생대에 형성된 Baikalian Lineament와 남쪽의 Main Mongolian Lineament가 이것이고, 이들은 Silurian 증가를 나타낸다. 몽골 남부에서 가장 오래된 암석은 선 캄브리아기에서 중생대 시대에 수동적으로 퇴적된 얇은 해양 탄산염과 쇄설면이다. 중기 고생대의 orogenesis는 서쪽 몽골에서 알타이 microplate의 충돌과 시베리아 크라톤의 중앙 몽골 microplate의 가속에 대해 관련이 있다. 알타이 전초에서

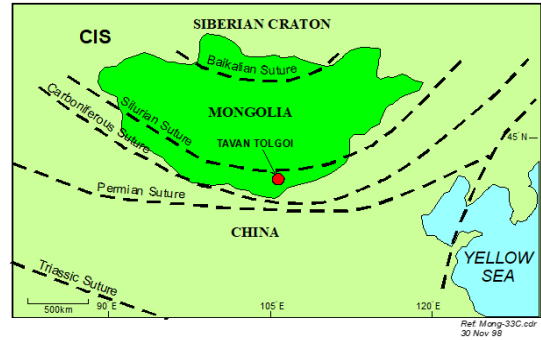


Fig. 1. Regional tectonic setting

새로 침강된 것과 갈대 또는 아크 분지에서의 퇴적물은 대본기와 석탄기 대륙 및 해양의 쇄설 및 화산 형성의 부산물로 대표된다.

후기의 석탄기에서 초기 페름기의 orogenic 단계는 확대된 몽골-시베리아 크라톤에 고비 microplate의 부착을 의미하여 현재의 몽골-중국 국경의 위치와 거의 일치하는 세 번째 봉합을 일으킨다. 후기 Permian기에서부터 남부 몽골의 초기 주라기까지의 퇴적물은 포틀랜드 유역에 퇴적되었을 가능성이 있고 국지적으로 발생하는 미세한 쇄설, 석탄 및 수세식 계열에 의해 덮여서 형성된 거친 대륙붕이 매우 두꺼운 순서로 이루어져 있다. 이 퇴적물들은 트라이아이스기에서 중기 주라기 때 생성되었고, 중국의 Qiantang 구획이 성장 중이던 몽골-시베리아 Craton과 충돌하였을 때 변형되었다.

이후 대륙의 융기가 발생하여 후반 주라기와 초기 백악기를 통해 분노 덩어리와 사암, 범람원 석탄 및 수세미 혈암이 퇴적 지층에 퇴적되었다. 몽고 남부 지역은 후기 제삼기와 후기 백악기에 걸쳐 거대한 지각 변동 및 화산 활동에 영향을 받았다.

2.2 지역 구조에 따른 지질학

Tavan Tolgoi 지역의 석탄들은 울란 누아 트로프(Ulaan Nuur Trough)에 축적되었는데, 이는 분화구 내부에 있다. 일반적으로 광범위한 동시 작용으로 간주되는 분지는 경계를 이루는 북동쪽 추세 분석 시스템(메가 셰어)에 인접한 지하 암석의 지각 침강의

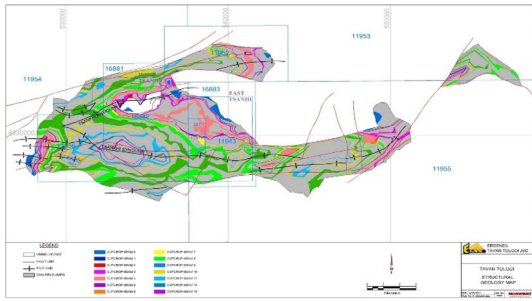


Fig. 2. Seam floor elevation contours for Seam 0A

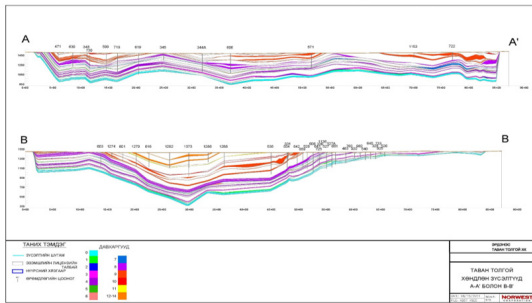


Fig. 3. Structural geometry of the deposit in cross-section

결과이다³⁾. 상층 폐름기의 석탄은 침강하는 유역에 축적되어 구조적으로 강한 방향으로 폴딩되었다.

Tavan Tolgoi 탄전은 일련의 동-서 동향 경계선과 남-북 방향의 고저선이 겹쳐 쌓인 향사면으로 구성된다. Tavan Tolgoi의 대부분은 부드럽게 적당히 기울어있지만 이러한 구조의 측면 경사는 40°를 초과한다. 수많은 동-서 동향의 정상적인 결합이 탄전을 양분한다. 중요한 동서 동향의 서로 미는 결합은 Tavan Tolgoi의 많은 곳에서 석탄지 경계를 형성하여 석회 자원 지역을 절단하고 표면에 오래된 화산재 및 비석탄 함유 지층을 가져온다.

Tavan Tolgoi 탄전의 구조적 특징과 Norwest의 지질학적 모델에서 나온 석탄층 노두를 보여준다. 석탄 함유 지대의 영역은 음영 처리되어 있다. Tsankhi Syncline과 Tsankhi Anticline의 두 가지 주 구조가 서쪽 절반에 존재한다. 싱크로 라인은 가장 두꺼운 석탄 함유 순서를 포함하는 구조 유역을 수용하며, anticline은 가장 낮은 석탄 지평을 표면으로 Seam 0 밑에 석탄 없이 노출된 지형을 형성한다.

Table 2. Non-vaporizing spray experimental condition

Seam	Resource [Ton]	Averaged Gas [Nm ³ /Ton]	CBM gas resources (GIP)	
			Nm ³	MMton
#6	22,857,143	0.09	2,057,143	0.002
#7	693,333,333	0.06	41,600,000	0.033
#10	2,720,000,000	11.69	31,796,800,000	24.929
#14	1,028,571,429	12.06	12,404,571,429	9.725
#15	205,714,286	3.06	629,485,714	0.494
#16	1,066,666,667	5.19	5,536,000,000	4.340
#17	411,428,571	1.63	670,628,571	0.526
Total	6,148,571,429		51,081,142,857	40.05

지형 모델에서 파생된 Seam 0A (가장 낮은 수위의 슬기)에 대한 슬기 층 입면도가 Fig. 2에 나와 있으며 입금의 구조 기하학은 Fig. 3에 나와 있다. 일반적으로 지면의 등고선은 주 석탄 지층의 서쪽-동쪽으로 연속성을 보여 주며, 일부는 Tavan Tolgoi 주 탄광의 가장자리를 따라 퇴적되어 있다. 서쪽의 Bortolgoi 탄전은 서쪽에서 관찰된 지역 동향을 따르는 석탄이 존재할 만한 이상 수치다.

Ankey (Tsankhi) 탄전에서 5도 미만에서부터 접이식 접합에 의해 영향을 받는 단층 경계 석탄 분지의 가장자리를 따라 급격히 침지되는 범위까지 다양하다.

3. CBM 자원 사전 실행 가능성

Tavan Tolgoi coalfield의 석탄 자원은 6,400 Mton (약 1,000 m)으로 추정되며 Table 2에 나와있는 것과 같이 6, 7, 10, 14, 15, 16 및 17인 주요 탄층에서 약 6,150 Mton이 추정된다. Gas in place (GIP)는 CBM 가스량을 계산하는 데 사용된다.

$$GIP = \text{Coal resource [Ton]} \times \text{Gas [Nm}^3\text{/Ton]}$$

Tavan Tolgoi Coalfield (약 300-1,000 m)의 CBM 생산 능력은 40.05 MMton으로 추정된다.

3.1 기술적 타당성

이 프로젝트는 가공되지 않은 CBM을 모으고 원료 처리된 CBM과 H₂O를 분리하여 불순물(주로 CO₂)을 분리하고 중앙 처리장의 파이프 라인 사양을 충족시키기 위해 가압하고 파이프 라인 및 재압축기 스테이션을 통해 CBM을 이송하는 기존 기술을 필요로 한다^{4,5)}. 그러므로 제안된 프로젝트는 기술적으로 가능하다.

이러한 기술은 잘 정립되어 있다⁶⁾. 유역 가스/수도 분리는 여러 공급 업체와 잘 확립되어 있다. 가스/물 분리의 수는 가스 유속을 기준으로 478로 추정된다. 흡수, 흡착, 멤브레인 및 극저온 공정을 포함하여 CBM으로부터 CO₂를 분리하기 위한 몇 가지 상업적 기술이 있다. 본 연구에서는 아민 처리 장치를 이용한 CO₂ 분리를 가정하였다. 파이프 라인을 통해 가스를 운반하는 것은 잘 정립된 기술이다.

CBM을 1,000,000 metric ton/year의 용량으로 수송하기 위해서는 중앙 처리 설비의 다단 압축기와 545 km 길이의 주 송전선로와 4기의 재압축기 스테이션이 필요하다.

이 연구에서 의도된 것은 CBM의 적용은 발전이다. 발전 이외에도 CBM은 NG가 사용되는 다양한 산업 분야에서 사용될 수 있다. CBM은 암모니아 및 메탄올과 같은 화학 물질을 생산하는 공급 원료로 사용될 수 있다. 또한 DME, GTL 및 수소와 같은 연료를 생산하기 위한 공급 원료로 사용될 수 있다. CBM을 사용하는 기술은 잘 정립되어 있다. 발전할 수 있는 옵션의 경우 CBM 1 MMton은 증기 발생기, 가스 터빈 및 복합 사이클과 같은 옵션에 따라 약 400-600 MW의 전력을 생산할 수 있는 것으로 추정된다.

3.2 경제적 타당성

프로젝트 정의의 불확실성을 감안할 때 본 연구는 정보 가용성에 따라 클래스 4 및 5에서 CAPEX 및 OPEX 추정 방법을 활용한다. CAPEX 및 OPEX 예측은 Table 3과 Table 4에 나와 있다.

ISBL TFC는 탐사 및 생산, 가스/물 분리 스킨드, 가스 수집 파이프 라인, 아민 처리 장치, 탈수 장치, 주요 다단식 압축기, 주 송전 파이프 라인, 재압축기

Table 3. CAPEX

Itemization	Cost in USD	Notes
ISBL TFC	\$405,763,544	
Exploration & production	\$52,494,680	Drilling and casing cost basis is taken from 2013 EPA report. The drilling depth of 498 m is assumed for E&P cost estimate.
Gas gathering & conditioning	\$53,612,480	Separation skid cost is based on vendor quotation and total number of separator skids. Gas gathering pipeline cost basis is based on 2013 EPA report ^{1,7)} .
Central processing facility	\$20,880,000	This includes cost for CO ₂ removal and dehydration unit. The cost is estimated based on capacity, feed composition, and CO ₂ removal per specification.
Compressors	\$50,898,596	Main compressors at the central processing facility. There is a wide range of compressor cost basis in \$USD/hp from various sources. A lower bound value is used for a more aggressive cost estimate.
Main transmission pipeline	\$280,372,469	This includes cost for main transmission pipeline, re-compressor stations, metering facilities, etc. There is a wide range of cost of pipeline in \$USD/in-km from various sources. A lower bound value is used for a more aggressive cost estimate. The cost basis for re-compressor stations is taken from Kidnay et al. ⁸⁾ (2011).
OSBL TFC	\$101,440,886	Assumed to be 25% of the ISBL cost estimate
Contingency	\$126,801,108	Assumed to be 25% of the ISBL and OSBL TFC cost estimate
CAPEX	\$634,005,538	ISBL+OSBL+contingency

Table 4. OPEX

Itemization	Cost of CBM feed in USD/MMBTU					Notes
	1	1.5	2	2.5	3	
Feedstock cost	44,418,388	66,627,582	88,836,775	111,045,969	133,255,163	CBM feedstock cost
Operating cost	32,612,061	32,612,061	32,612,061	32,612,061	32,612,061	This includes operating cost for the production well, gas processing compression, and pipeline. The cost basis is taken from 2013 EPA report and 2004 DOE report
OPEX	77,030,449	99,239,643	121,448,836	143,658,030	165,867,224	Feedstock cost + operating cost

Table 5. Economic analysis

Product	CBM production (MT/Year)	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000
	CBM product (\$/MMBTU)	\$6.0	\$6.0	\$6.0	\$6.0	\$6.0
Costs	Capital investment (\$)	\$634,005,538	\$634,005,538	\$634,005,538	\$634,005,538	\$634,005,538
	CBM feed price (\$/MMBTU)	\$1.0	\$1.5	\$2.0	\$2.5	\$3.0
Annual revenue and profit	Revenue (\$/Year)	\$259,955,890	\$259,955,890	\$259,955,890	\$259,955,890	\$259,955,890
	Cost of production (\$/Year)	\$77,030,449	\$99,239,643	\$121,448,836	\$143,658,030	\$165,867,224
	Gross profit (\$/Year)	\$182,925,441	\$160,716,247	\$138,507,054	\$116,297,860	\$94,088,666
Economic indicators	IRR	22%	19%	17%	14%	11%
	NPV@Finance Rate (\$)	\$589,377,824	\$456,551,841	\$323,725,859	\$190,899,876	\$58,073,893
	PI	1.9	1.7	1.5	1.3	1.1

Table 6. Sensitivity study

IRR		CBM product price (\$/MMBTU)				
		8.0	7.0	6.0	5.0	4.0
CBM feed price (\$/MMBTU)	1.0	30%	26%	22%	17%	12%
	1.5	28%	24%	19%	14%	9%
	2.0	26%	22%	17%	11%	5%
	2.5	24%	19%	14%	8%	0%
	3.0	22%	17%	11%	5%	-9%

스테이션, 계량 설비, 메인 라인 밸브를 사용한 CO₂ 제거를 위한 비용을 포함한다. 가스/물 분리 스키드의 수는 가스 유속을 기준으로 478로 추정된다. Tavan Tolgoi에서 Ulan Bator까지의 전체 파이프 라인 길이는 545 km로 가정하고 4개의 압축기 스테이션으로 가정한다. OSBL TFC는 ISBL TFC의 25%로 추

정된다. PFS 단계에서 정보의 불확실성이 주어지면 비상 비용이 ISBL 및 OSBL TFC의 25%에 추가된다.

OPEX는 CBM 설비의 원가와 운영비로 구성된다. 공급 원료 가격은 USD / MMBTU 단위의 CBM 공급 가격의 함수로 표시된다. CBM 시설의 운영 비용에는 생산 우물, 가스 처리, 압축 및 파이프 라인에

대한 운용비용이 포함된다. 이 비용은 CBM 공급 원료 가격과 무관한 것으로 가정한다. Table 5와 Table 6는 제안된 프로젝트에 대한 예비 경제 분석이다. 이 경제 분석에 따르면, 프로젝트는 CBM 공급 가격 및 CBM 제품 가격에 따라 이익을 얻을 수 있음을 나타낸다. CBM 사료 가격과 제품 가격의 불확실성으로 인해 기본 사례가 선택되지 않았다. 경제적 분석은 CBM 사료 및 제품 가격의 함수로 수행된다. 예비 타당성 조사에서 사용된 정보의 불확실성을 고려할 때, 타당성에 대한 자세한 정보가 포함된 경제 분석을 수행하는 것이 바람직하다.

4. 결론

제안된 프로젝트의 기술적 경제적 타당성을 확인하기 위해 타당성 조사를 권장한다. CBM 연간 및 총 생산 능력, 몽골의 CBM 원료 가스 조성 및 파이프 라인 사양, CBM 공급 가격, CBM 제품 가격, CBM 개발을 위한 인프라 또는 계획된 인프라, 예정된 세금 및 규정 등을 포함하여 프로젝트를 보다 잘 정의하는 것이 좋다. 범위를 확장시키는 것은 프로젝트의 경제적 타당성을 더 잘 이해하기 위해 권장된다.

예를 들어 폐수 처리를 포함한 CBM 탐사 및 생산, 최종 옵션인 발전 설비 또는 기타 설비가 포함되어야 한다.

후 기

이 연구는 Non-CO₂ 온실 가스 감축 R & D 센터의 지원을 받아 수행되었다.

References

1. D. M. Ruthven, "Principles of Adsorption and Adsorption Processes", John Wiley, New York, 1984.
2. S. Sircar, "Adsorption Science and Technology", Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1989; pp. 285-321.
3. S. Sircar, "Pressure Swing Adsorption: Research Needs in Industry", AIChE, New York, 1989, pp. 815-843.
4. J. M. Han, W. S. Joo, C. H. Shin, J. H. Lee, Y. S. Baek, Y. D. Kim, "A Study on the Coal Seam Modeling for Coalbed Methane (CBM) Production Plan", 2010 Fall conference, 2010, pp. 58-63.
5. G. T. Kim, C. H. Kwon, "Low-cost high-efficiency distillation system and treatment method of non-traditional genetic resources", Hannam university, 2014.
6. Y. I. Kim, Y. D. Koo, "A Study on the Analysis of the CBM Development Technology", 2014 Fall Joint of Geology, Mineral and Energy Resource, 2014, p. 257.
7. United States Environmental Protection Agency (US EPA). "Report on the 2013 U.S. Environmental Protection Agency (EPA) International Decontamination Research and Development Conference", US EPA, Washington, 2014.
8. A. J. Kidnay, W. R. Parrish, and D. G. McCartney, "Fundamentals of Natural Gas Processing", 2nd ed, CRC Press, Boca Raton, 2011.