

고갈가스전에의 적정 가스저장시스템 분석을 위한 시뮬레이션 연구

이영수 · 최해원 · 이정환* · 한정민* · 류상수** · 노정용** · 성원모†

한양대학교 공과대학 지구환경시스템공학과
133-791 서울시 성동구 행당동 17
*한국가스공사 연구개발원 가스전기술팀
426-790 경기도 안산시 상록구 일동 638-11
**한국석유공사 개발운영본부 생산운영처
431-711 경기도 안양시 동안구 관양동 1588-14
(2007년 4월 30일 접수, 2007년 6월 13일 채택)

A Simulation Study on the Analysis of Optimal Gas Storage System of the Depleted Gas Reservoir

Youngsoo Lee, Haewon Choi, Jeonghwan Lee*, Jeongmin Han*, Sangsoo Ryou**,
Jeongyong Roh** and Wonmo Sung†

*Department of Geoenvironmental System Eng., Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Sungdong-gu, Seoul 133-791, Korea

**Gas E&P Research Team, R&D Division, Korea Gas Corporation, 638-11 Il-dong, Sangnok-gu, Ansan, Gyeonggi 426-790, Korea

***Gas Production Project Department, Korea National Oil Corporation, 1588-14 Gwanyang-dong, Dongan-gu, Anyang, Gyeonggi 431-711, Korea

(Received 30 April 2007; accepted 13 June 2007)

요 약

본 연구에서는 가상의 『흑곰-HY』 가스전을 대상으로 상용저류전산시뮬레이터인 『ECLIPSE 300』을 사용하여 가스저장전으로 전환에 대비한 기술적 타당성을 평가하고자 하였다. 이 저류층의 매장량은 143 BCF로서 소규모 가스전이며, 공극률과 투과도는 각각 19.5%와 50 md로 가스의 순환이 원활이 이루어질 수 있는 비교적 양호한 저류층이다. 이 저류층에 대하여 가스저장전으로의 전환시 핵심적 검토항목인 쿠션가스 양, 저장전으로의 전환시점, 운영사이클 변경, 가스정의 수 및 수평정 적용 가능성 등에 대한 분석을 수행하였다. 분석결과, 『흑곰-HY』 가스저장전에서 안정적인 가스저장을 위해서는 쿠션가스가 최소한 50% 이상이 되어야 함을 알 수 있었다. 또한 가스를 더 오랜기간동안 생산하기 위해 잔류가스를 적정 쿠션가스 양보다 적게 남겨두어도 추가로 쿠션가스만 주입하면 기술적으로는 아무 문제가 없는 것으로 나타났다. 한편, 가스를 5개월 대신 동결기 3개월간만 재생산하는 운영사이클의 경우에는 쿠션가스를 60% 이상으로 높여주거나 가스정의 수를 늘려야만 재생산이 가능한 것으로 나타났다. 가스정의 수에 대한 분석결과에서는 6개와 8개인 경우에는 저류층내 잔류가스가 증가하여 정상적인 재생산이 불가능하므로 『흑곰-HY』 가스전에서는 최소 10개의 수직가스정이 운영되어야 함을 알 수 있었다. 이에 반해 2개의 기존 수직정에 3개의 수평정을 추가로 시추하게 되면 비교적 안정적인 주입과 재생산이 가능한 것으로 산출되었다.

Abstract – In this study we have attempted to evaluate the technical feasibility of 『BB-HY』, which is depleted gas reservoir as a gas storage field, using the commercial compositional simulator 『ECLIPSE 300』. The 『BB-HY』 reservoir has an initial gas in place of 143 BCF which is relatively small, and its porosity and permeability are 19.5% and 50 md, respectively. For 『BB-HY』 gas reservoir, we have performed a feasibility analysis by investigating the cushion gas (or working gas), converting time to gas storage field, operation cycle, number of wells and the possible application of horizontal borehole as well. From the simulation results, it was found that the amount of cushion gas in 『BB-HY』 reservoir is required at least 50% of IGIP in order to operate stably as gas storage field. When one produces gas for longer time and hence the remaining gas in reservoir is less than optimal cushion gas, no technical problem was occurred as long as additional cushion gas is injected up to the optimal cushion gas. In the case of changing the operation cycle into producing gas for three months during winter season from producing five months, the result shows that either the cushion gas should be greater than 60% or the more number of wells should be drilled. Meanwhile, from the results of sensitivity analysis for the number of wells, in cases of operating six or eight vertical wells, the stable reproduction of the injected gas can not be possible in 『BB-HY』 gas reservoir since the remaining gas in reservoir is increased. Therefore,

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: wmsung@hanyang.ac.kr

in 『BB-HY』 reservoir, at least ten vertical wells should be drilled for the stable operation of gas. This time, when three horizontal wells are additionally drilled including the existing two vertical wells, it was found that the operation of injection and reproduction of gas is relatively stable in 『BB-HY』 gas reservoir.

Key words: Gas Storage, Depleted Gas Reservoir, Cushion Gas, Working Gas, Simulation, Vertical Well, Horizontal Well

1. 서 론

일반적으로 천연가스의 소비량은 계절별 및 월별에 따라 큰 차이가 있으므로 가스소비량이 최대에 달하는 동절기에는 급격한 수요 증가로 인하여 천연가스의 안정적인 수급에 어려움을 겪고 있다. Katz와 Tek[1]는 고갈가스전, 대염수층, 압염공동 등의 지하구조를 가스저장전으로 활용하는 방안에 대한 연구를 수행하였다. 이러한 저장구조 중 대염수층은 탐사 및 개발비용이 신규로 소요되며 저장 효율이 낮고 압염공동은 저장 및 재생산효율은 높지만 저장량이 작아 장기적인 가스저장전으로의 활용도가 크지 않다고 볼 수 있다. 이에 비해 고갈가스전은 이미 천연가스가 생산되었던 구조이므로 가스를 안정적으로 저장할 수 있는 환경을 갖추고 있으며 탐사 및 개발비용이 필요치 않고 생산설비가 이미 갖추어져 있어 가스저장전으로의 전환이 용이하다. Mayfield[2], Sung 등[3]은 고갈가스전을 저장전으로 활용할 경우 가스손실을 유발할 수 있는 저장시설 및 주변 저류층 환경 등에 대한 연구를 수행하였으며, Knepper와 Cuthbert[4], Chung[5]은 저장전의 적정설계에 관한 연구를 수행한 바 있다. 또한, Gredell과 Benson[6]은 가스의 생산성 증진을 위한 방법으로 수평정의 활용을 제안하였다.

일반적인 가스저장의 원리를 살펴보면, 가스 수요량이 적은 하절기에는 천연가스를 고갈가스전에 저장하였다가 수요량이 많은 동절기에 저장된 천연가스를 다시 재생산하여 이용하게 된다. 따라서 가스저장시스템은 1년을 단위로 가스의 주입-안정화-재생산-유지보수 과정이 주기적으로 반복되며, 안정적인 가스순환 사이클은 Fig. 1에 도시된 바와 같다. Fig. 1에서 ① 전체용량(total capacity)은 초기 생산이 시작되는 시점에서의 초기 원시매장량 IGIP(initial gas in place)를 의미한다. 이 그림에서 ② 워킹가스(working gas)는 가스공급을 위해 연간 순환되는 가스이며, ③ 쿠션가스(cushion gas)는 워킹가스의 원활한 순환을 위하여 저류층의 압력을 유지하기 위해 저류층

내에 남겨두는 가스 즉 순환되지 않는 가스를 의미한다. 또한 ④ 회수율(recovery)은 생산된 가스량으로서 이는 생산을 종료하고 가스저장전으로 전환한 후 1차 주입시에 주입되는 가스량이기도 하다.

고갈가스전에서의 가스저장시에 핵심적으로 중요하게 고려되어야 할 인자는 쿠션가스 양과 가스정의 수 및 형태 등이 있다[7, 8]. Kim과 Ryou[9]는 가스정 수 및 변경 등의 인자들이 가스저장에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였으며, 이러한 인자들의 설정에 따라 가스저장 효율이 크게 달라질 수 있음을 제안하였다. 적정 쿠션가스 양은 저류층내 압력유지를 통한 저류층의 가스량 감소 및 워킹가스의 안정적인 순환을 위해서 중요하며, 가스정의 적정한 수는 경제성과 직접적으로 연관되기 때문에 기술성과 경제성 검토가 동시에 수행되어야 한다. 본 연구에서는 상용저류전산모델인 『ECLIPSE 300』을 이용한 분석을 통하여 가상의 『흑곰-HY』 고갈가스전이 가스저장전으로서의 기술적 가능 여부를 평가하고자 하였다. 이에 본 시뮬레이션 분석에서는 쿠션가스의 양, 저장전으로의 전환시점, 운영사이클의 변경, 가스정의 수, 수평정의 활용여부 등에 대한 분석을 통해 『흑곰-HY』 가스저장전의 적정 저장시스템을 규명하였다.

2. 가스저장전 시스템

본 연구에서 대상이 된 고갈가스전은 가상의 『흑곰-HY』 가스전으로서 이의 저류층 특성은 Table 1에 정리된 바와 같다. 『흑곰-HY』 가스전은 해상에 위치하며, 초기 가스매장량은 143 BCF로 비교적 소규모의 가스전이다. 저류층은 심도 7,995 ft이며 대수층과의 접촉면인 GWC(gas water contact)는 8,162 ft이며, 저류층의 초기압력 및 온도는 각각 3,600 psia, 219 °F, 초기 가스포화도는 54%이다. 또한 공극률과 투과도는 각각 19.5%, 50 md로서 가스의 유동이 원활히 이루어질 수 있는 양호한 저류층이다.

가스저장 시뮬레이션은 상용저류전산시뮬레이터인 『ECLIPSE

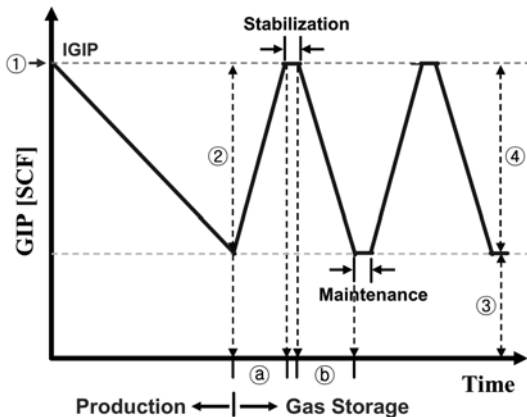


Fig. 1. The variation of gas in place for gas storage system.
 1. Total capacity (IGIP) 2. Recovery (Prod. Stage)
 3. Cushion gas 4. Working gas
 a. Injection b. Withdrawal

Table 1. The properties of depleted gas reservoir

Parameter	Value
Total capacity	143 BCF
Datum depth	7,995 ft
Datum pressure	3,600 psia
Initial gas saturation	54%
Initial temperature	219°F
Permeability	50 md
Porosity	19.5%
Gas volume factor	0.0049 ft ³ /SCF
Thickness	233 ft
Area	2.15 × 10 ⁸ ft ²
Gas water contact	8,162 ft
Gas viscosity	0.0209 cp
Gas gravity	0.625

Table 2. The reservoir system for gas storage simulation

Simulator	ECLIPSE 300 compositional simulator
Grid Type	Block Type
Dimension	47 × 45 × 6 (12,690)
Wellbore Radius	0.375 ft
Number of Wells	10 (Vertical Well)
Max. WHP	7,000 psia
Min. WHP	500 psia
WHP: wellhead pressure	

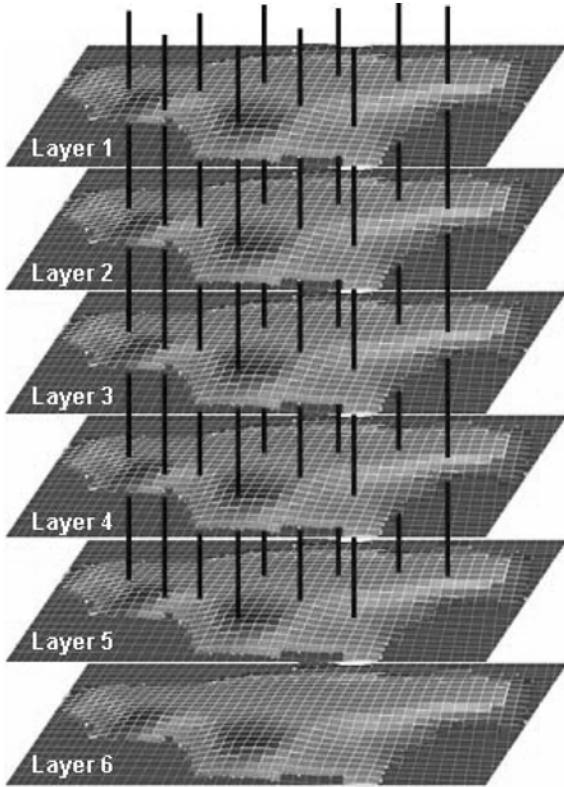


Fig. 2. Reservoir system and well location of depleted gas field.

300』을 사용하여 수행하였다. 저류층 시스템은 Table 2에 정리된 바와 같고, 격자 수는 47×45×6개로 총 12,690개이며, 주입정 반경은 위킹가스를 안정적으로 주입 및 재생산하기 위해 생산정에 비해 크게 설정하는 것이 일반적이므로 주입정 반경은 0.375 ft로 설정하여 하나의 가스전에서 주입과 재생산이 모두 실행 가능하도록 하였다. 또한 Fig. 2에서 보는 바와 같이, 가스정의 수는 10개의 수직정을 기본 자료로 활용하였다. 수직주입정에서의 운영압력은 정두압으로 설정하였으며, 여기서 정두압은 쿠션가스의 양에 따른 사전의 다양한 시뮬레이션 분석을 통해 최대 정두압을 7,000 psia, 재생산 시에는 파이프라인으로의 최소 수송압력을 고려하여 최소 정두압을 500 psia로 설정하였다. 또한 수직정의 완결구간은 저류층의 최하단층인 6번 층을 제외한 1~5번 층에 완결이 되었다. 총 시뮬레이션 기간은 총 5회의 주입생산 사이클 즉 5년에 걸친 분석 작업이 진행되었다.

3. 결과 분석

3-1. 쿠션가스

가스저장전에서 쿠션가스는 위킹가스의 안정적인 주입 및 재생산

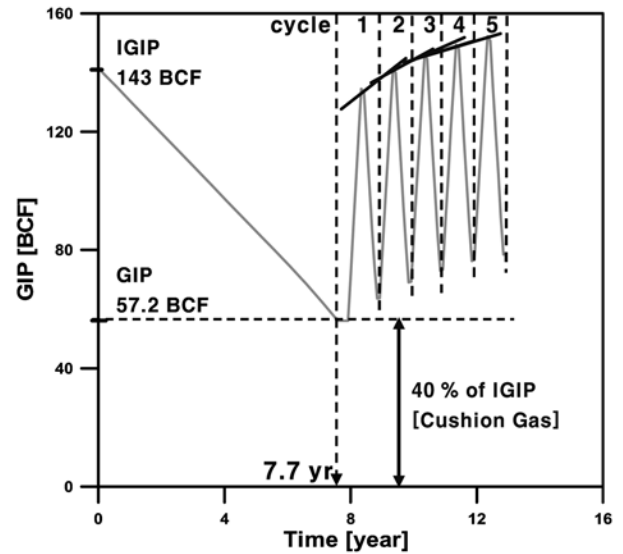


Fig. 3. Behavior of GIP in reservoir with time for the cushion gas of 40%.

과 지층붕괴의 방지를 목적으로 저장전내 압력유지를 위한 매우 중요한 인자이다[10]. 본 시스템에 대한 사전의 개략적인 시뮬레이션 분석결과 『흑곰-HY』 가스전에서의 가스저장시 쿠션가스의 적정비율은 초기 원시매장량인 IGIP의 40%에서 60% 정도로 나타나 본 시뮬레이션에서는 쿠션가스 양을 40%, 50%, 60%로 설정하여 적정량에 대한 분석을 수행하였다. 쿠션가스의 양 40%, 50%, 60%에 따라 주입량과 재생산량을 각각 85.8, 71.5, 57.1 BCF로 동일하게 설정하고, 주입 5개월-안정화 1개월-재생산 5개월-유지보수 1개월을 1 사이클(1년)로 하여 총 5사이클 즉 5년에 대해 가스저장 시뮬레이션을 수행하였다.

우선, 쿠션가스 40%에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 3에 도시된 바와 같다. 이 결과로부터 저류층내 가스가 IGIP의 40%가 되는 시점인 7.7년에서 가스생산을 종료하고 가스저장전으로 전환되었음을 볼 수 있다. 이 경우, 주입량과 재생산량을 동일하게 설정하였음에도 불구하고 사이클이 반복됨에 따라 저류층내에서 GIP(gas in place)는 전체적으로 계속 증가함을 볼 수 있으나 그 증가율은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 가스정 #5를 예로 보면 첫번째 사이클 하에서 시간에 따른 저류층 압력과 정두압을 도시한 Fig. 4의 결과를 통해 알 수 있다. 여기서 쿠션가스가 50%인 경우와 60%인 경우는 유사한 경향을 나타내므로 쿠션가스가 40%와 60%인 경우만 나타내었다. 쿠션가스가 60%일 때 가스정 #5의 저류층 평균압력과 정두압(wellhead pressure: WHP)이 동시에 감소하여 그 차이인 $\Delta p(p_R - p_w)$ 가 유지되는 반면에, 쿠션가스 40%일때는 정두압이 전반 2개월 동안은 감소하다가 3개월째부터는 500 psia로 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 이는 『흑곰-HY』 가스전에서의 파이프라인의 최소 수송압력인 500 psia를 운영압력으로 설정하였기 때문으로서 정두압이 500 psia에 도달하게 되면 일정량으로 생산되다가 이 시점부터는 일정압력이 유지되는 조건으로 전환된다. 이에 따라 저류층의 평균압력은 계속적으로 감소하는데 반해 정두압은 일정하게 유지되므로 Δp 감소하게 되고 생산량 역시 계속적으로 감소되어 주입된 가스가 모두 생산되지 못하고 저류층에 잔류하게 되는 것이다. 상기한 바와 같이, 주입한 가스 중 일부가 재생산되지 못하고 저류

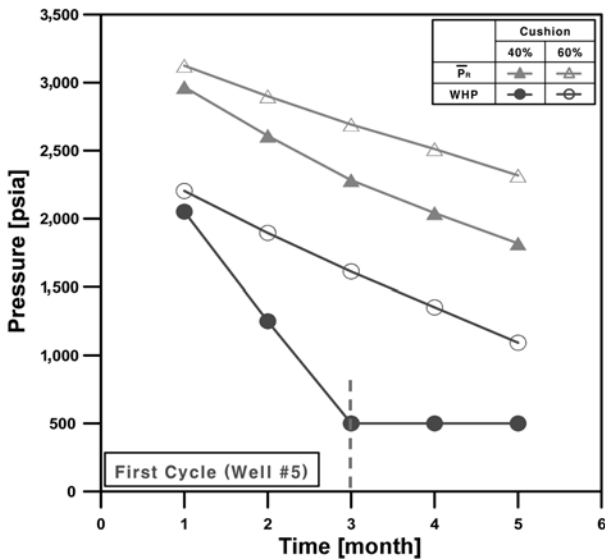


Fig. 4. Behaviors of average reservoir pressure and wellhead pressure for cushion gas of 40% and 60% during the first cycle.

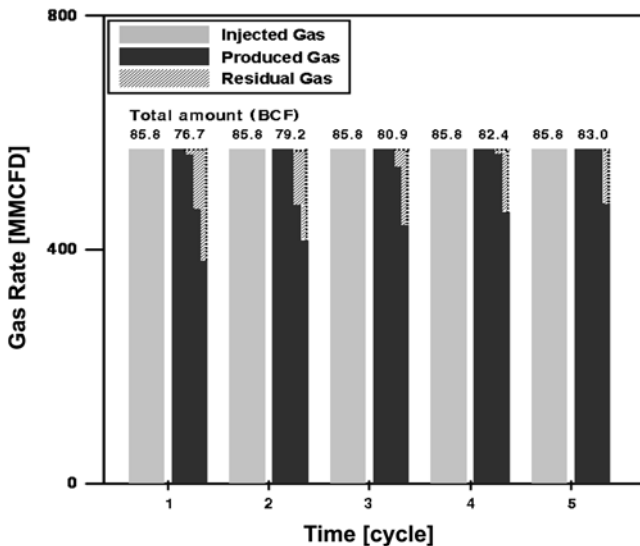


Fig. 5. Injection and production rate for gas storage cycle in the case of cushion gas as 40%.

층내에 잔류되어 사이클이 진행됨에 따라 GIP는 계속적으로 증가하지만 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 그 증가율은 점차 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 GIP의 증가양상을 좀 더 자세히 분석하기 위해 Fig. 5의 가스 주입량과 재생산량 및 잔류가스량의 결과를 통해 살펴보았다. 이 결과로부터 각 사이클에서 주입기간동안 주입량은 85.8 BCF로 일정하여 주입은 설정한대로 이루어지나, 재생산 과정에서는 주입된 가스가 전량 생산되지 못하고 잔류된다. 그러나 이 잔류량이 각 사이클별로 9.1, 6.6, 4.9, 3.4, 2.8 BCF로 점차적으로 감소되고 있음을 볼 때 사이클이 진행되면서 주입과 재생산이 점차 안정적으로 이루어지고 있음을 판단할 수 있다. 이와 같이 GIP 거동이 점차 개선되어지는 이유는 재생산 후 잔류되는 가스로 인해 저류층 압력이 이전 사이클보다 증가하기 때문에 이 압력과 가스정의 운영압력과의 차이가 증가하게 되어 더 많은 양의 가스가 생산되기 때문이다. 그러나 개선되는 시점까지 요구되는 공급양만큼의 가스가 재생

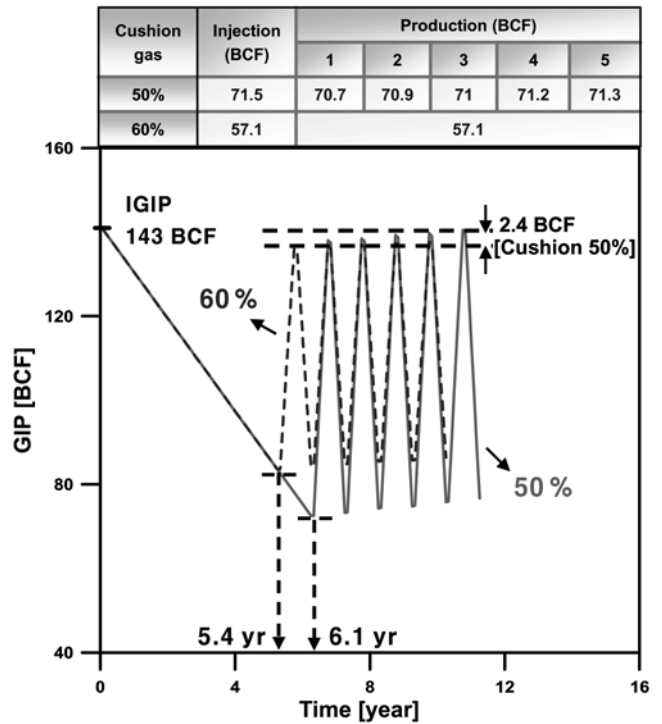


Fig. 6. Behaviors of GIP in reservoir with time for the cushion gases of 50% and 60%.

산되지 않고 저류층 압력이 계속적으로 증가하여 결국 초기압력보다 과도하게 초과되면 균열 등에 의한 저류층 손상이 발생할 수 있으므로 적정한 양의 쿠션가스를 결정하는 것은 필수적이라 할 수 있다.

한편, 쿠션가스 50%와 60%에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 이 그림에서 쿠션가스가 50%, 60% 일때 가스 저장전으로의 전환시점이 각각 6.1년, 5.4년으로서 40% 일때의 7.7년 보다 이른 시점에서 가스생산을 종료하고 저장전으로 전환됨을 보여주고 있다. Fig. 6의 결과로부터 쿠션가스 50%인 경우를 살펴보면, 주입된 가스의 잔류로 인하여 GIP가 약간 증가하는 경향을 보이지만 그 누적증가량이 5회 사이클 동안에 총 2.4 BCF 정도로서 쿠션가스 40% 일때의 26.8 BCF에 비해 매우 소량에 불과하여 가스저장전의 안정적인 운영이 가능한 것으로 판단된다. 또한 쿠션가스를 60%로 설정한 경우에도 주입량과 재생산량이 57.1 BCF로 잔류가스의 증가없이 거의 동일하여 주입된 가스가 워킹가스로서 모두 생산됨을 알 수 있다. 즉 저류층내에서 잔류가스량이 증가하지 않으므로 압력도 과도한 증가없이 가스저장이 정상적으로 이루어지고 있는 것으로 나타났다. 결과적으로, 본 연구에서 분석한 『흑곰-HY』 가스전에서 안정적인 가스저장을 위해서는 쿠션가스가 최소한 50% 이상 되어야 함을 알 수 있었다.

일반적으로, 기업의 재정흐름상 쿠션가스는 50~60% 정도이나 『흑곰-HY』 가스전의 경우에는 가스전으로서의 생산종료시점이 너무 이르러져 단기적으로는 재정상 많은 손실을 입을 수 있다. 반면에 일반가스전의 경우 회수율이 70% 수준이므로 이 시점까지 최대한으로 생산을 한 이후 나머지 잔류가스 30%를 쿠션가스로 사용하게 되면 상기한 결과에서 나타나 바와 같이 재생산이 제대로 이루어지지 않는 기술적인 문제가 발생한다. 이러한 경우, 기업의 재정흐름

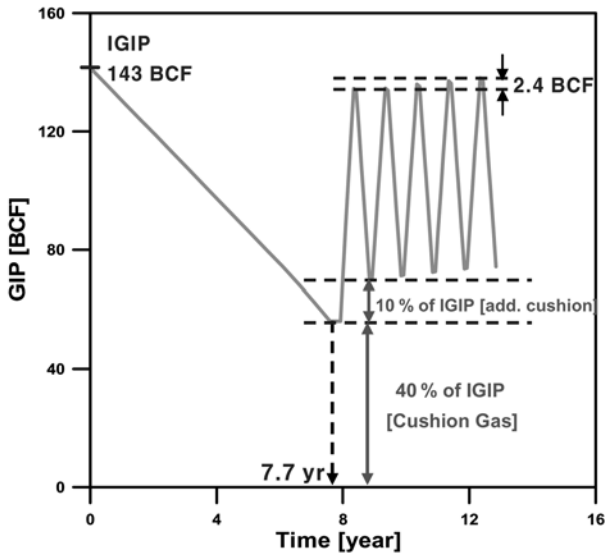


Fig. 7. Behavior of GIP in reservoir with time for 40% of cushion gas with additional injection of cushion gas of 10%.

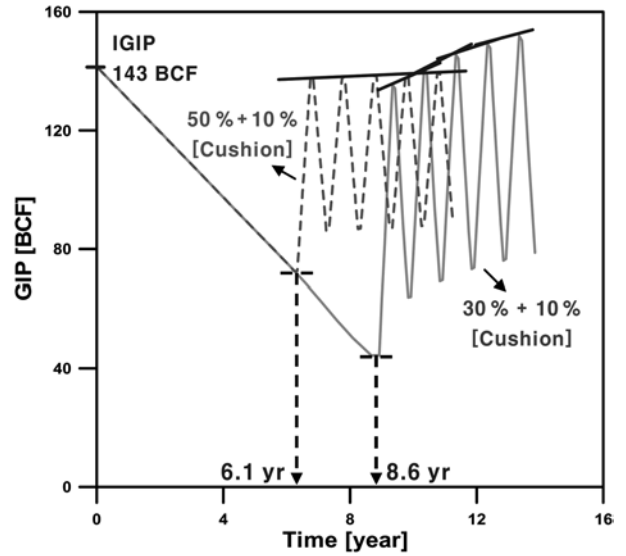


Fig. 8. Behaviors of GIP in reservoir with time for 30% and 50% of cushion gas with additional injection of cushion gas of 10%.

상 최대한 생산종료시점을 늦추고 그 대신 적정 쿠션가스 수준까지 추가로 가스를 주입하여 쿠션가스로 활용하는 방안도 고려해볼 수 있다. 이에 본 연구에서는 잔류가스(쿠션가스)가 30%, 40%, 50% 즉 회수율이 70%, 60%, 50% 일때까지 생산한 이후 여기에 추가로 쿠션가스를 10%씩 주입한 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 결과, 앞의 결과에서 『흑곰-HY』 가스전의 적정 쿠션가스 양은 50%인 것으로 나타났으므로 본 분석에서는 최초 쿠션가스 40%에 10%를 추가로 쿠션가스로서 주입하는 경우를 중심으로 살펴보고자 한다. 이 결과는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 생산종료는 잔류가스가 40%일 때까지 생산을 하였으므로 잔류가스 50% 일때의 6.1년에 비해 7.7년까지 1.6년 추가적으로 생산되고 그 이후 가스저장전으로 전환되었음을 알 수 있다. 여기에 첫번째 주입 사이클에서 10%의 추가 쿠션가스인 14.3 BCF를 포함하여 총 85.8 BCF의 가스를 주입하였고, 그 다음 사이클부터는 워킹가스가 50% 되도록 하여 71.5 BCF의 가스를 주입 및 재생산하였다. 이 결과를 통해 『흑곰-HY』 가스전의 경우, 가스를 더 오랜기간 생산하기 위해 잔류가스를 40% 정도로 적게 남겨두어도 초반에 충분한 양만큼 추가적으로 쿠션가스로서 주입만하면 기술적으로는 아무런 문제가 없는 것으로 나타났다. 또한 최초 쿠션가스가 30% 일때와 50% 일때의 결과를 Fig. 8에서 보면 30% 일때는 추가 쿠션가스를 10% 주입한다고 해도 최초 쿠션가스 40% 일때와 마찬가지로 주입과 재생산이 안정적으로 이루어지고 있지 않음을 볼 수 있다. 반면에, 최초 쿠션가스 50%에 추가 쿠션가스 10% 주입시에는 예상했던 대로 안정적임을 알 수 있다. 다만, 가스생산전 운영회사 입장에서는 회수율이 높아져서 가스판매에 따른 이익이 있으나 가스저장전 운영회사측에서는 추가로 쿠션가스를 구입해야 하는 문제가 있으므로 이에 대한 경제적 검토가 수행되어야 한다.

우리나라의 가스소비량은 난방 등의 이유로 12월에서 2월까지의 3개월동안 최대치에 달하며 그 양도 연간소비량의 45%에 이른다. 실제로 가스저장전은 동절기 가스 공급부족을 대비한 가스공급효율의 최적화가 목적이므로 우리나라의 가스 수요현황 및 공급효율을 고려하여 이번 시뮬레이션에서는 저장가스를 12월에서 2월까지 3

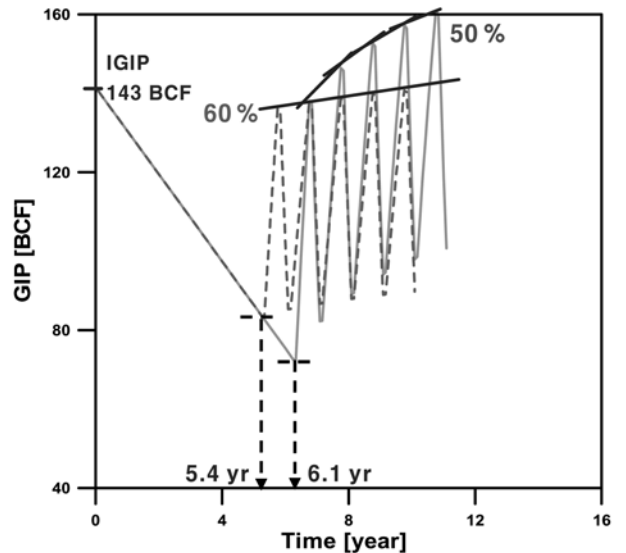


Fig. 9. Behaviors of GIP in reservoir with time for operation cycle producing three months instead of five months.

개월동안 재생산하고, 유지보수 1개월, 주입 7개월, 안정화 1개월의 사이클로 가스저장 시뮬레이션을 수행하였다. 이 경우, 주입기간이 5개월에서 7개월로 길어짐에 따라 일일주입량이 감소하여 컴프레서 비용을 절감할 수 있는 효과도 있다. 반면에 재생산기간은 5개월에서 3개월로 줄어들므로 공급량을 맞추기 위해서는 각 가스정에서 요구되는 일일생산량이 증가되어야 하나 저류층의 특성상 유동가능량이 한정적이므로 요구되는 양을 모두 재생산해낼 수가 없다.

이에 주입재생산기간을 달리함에 따른 시뮬레이션 결과, Fig. 9에서 보는 바와 같이 쿠션가스 50% 일때 상기의 5개월 주입-5개월 생산시에는 잔류가스 없이 안정적인 재생산이 가능하여 『흑곰-HY』 가스전은 50%가 적정 쿠션가스로 평가되었다. 그러나 7개월 주입-3개월 생산의 경우에는 쿠션가스 50% 일때에도 주입된 가스가 전량 생산되지 못하고 저류층내에 가스가 잔류되는 현상을 볼 수 있다. 이는 재생산기간이 5개월에서 3개월로 짧아져서 일일순환량이

증가되므로 앞서서도 언급된 바와 같이 『흑곰-HY』 가스저류층의 유동특성하에서는 그 양이 모두 재생산되지 못하고 일부가 잔류되기 때문이다. 이러한 현상은 쿠션가스가 60% 일때는 Fig. 9에서 보듯이 보다 개선되는 양상을 볼 수 있다. 따라서 7개월 주입-3개월 생산시스템으로 운영하려면 쿠션가스를 보다 늘리거나 또는 가스정의 수를 늘려야만 안정적인 공급이 가능해짐을 알 수 있다.

3-2. 가스정 수 및 형태

가스저장전을 운영함에 있어 가스정의 수를 결정하는 것은 워킹 가스의 안정적인 주입 및 재생산과 가스저장전의 경제성과 관련된 매우 중요한 인자이다. 가스정의 적정 수보다 그 수가 적을 경우 주입된 가스를 저류층 전체에 균일하게 분포시키지 못할 뿐만 아니라 하나의 가스정에서 일일가스순환량이 과도하여 재생산시 설정된 양만큼 생산이 되지 않을 수 있다. 반면에 적정 수보다 많게 설계되면 시추 및 운영비용의 증가로 인하여 가스저장전의 경제성이 저하된다. 이에 본 연구에서는 가스정 수가 6, 8, 10, 12개인 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 적용된 쿠션가스 양은 가스저장전으로의 활용시 경제성을 감안하여 적정량으로 평가된 50%로 설정하였다.

Fig. 10의 결과로부터 가스정 수가 6개와 8개인 경우에 총 5회의 사이클동안에 잔류되는 가스량은 각각 36.8 BCF와 13.2 BCF로 나타나 사이클이 반복됨에 따라 잔류가스가 증가하여 공급이 제대로 이루어지지 않음을 알 수 있다. 이에 반해 가스정 수가 10개와 12개인 경우에는 잔류가스의 거동을 볼 때 가스저장이 거의 안정적으로 진행되는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 적용된 『흑곰-HY』 가스전에서의 정상적인 가스저장을 위해서는 최소 10개 이상

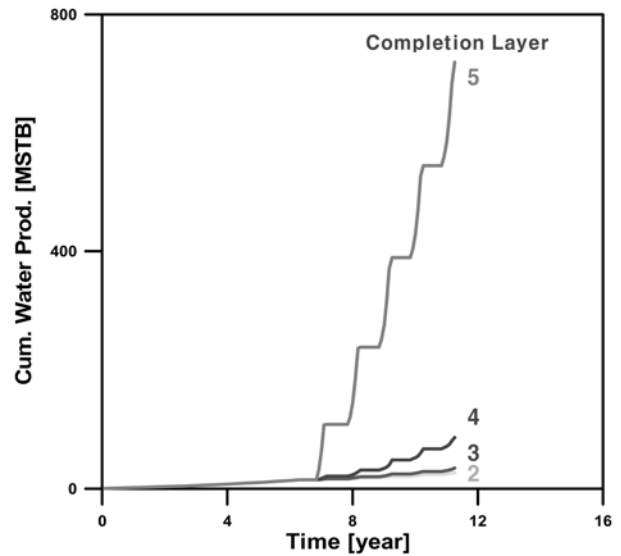


Fig. 11. The cumulative water production with time for various completion layers of horizontal well.

의 수직가스정이 운영되어야 한다.

이상에서와 같이, 『흑곰-HY』 가스전에서는 10개의 수직정 중 2개는 현재 생산이 진행중에 있는 가스정이므로 이들을 제외한 나머지 8개의 신규 수직정을 시추하는 대신 이를 대체할 수 있는 수평정에 대한 가능성을 검토하였다. Kim과 Ryou[9]는 적정 가스정의 수를 최소화하기 위해 더 큰 반경의 가스정 사용을 제안하였지만 본 연구에서는 수평정의 사용을 고려하였으며, 여기서 수평정은 일반적으로 수직정의 생산성에 비해 약 3배 정도이므로 수평정 수를 3개로 설정하였다. 이에 본 연구에서는 수직정 2개와 수평정 3개인 시스템을 수직정 10개인 경우와 비교하기 위해 적정 쿠션가스로 평가된 50%인 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 수평정의 완결층을 결정하기 위해 사전에 4회의 시뮬레이션을 수행한 결과 Fig. 11에 나타난 바와 같이 저류층 하부인 5번층에 완결시에는 상부층인 2번이나 3번층에 비해 주변 대수층으로부터의 물생산이 크게 증가함을 볼 수 있다. 또한 저류층 최상부의 1번층에 완결시에는 과도한 가스주입시 압력상승으로 인하여 덮개암에 균열발생의 가능성이 있으므로 본 시뮬레이션에서는 저류층의 상부인 2번층에 수평정을 완결하였다. 수평정의 반경과 길이는 각각 0.25 ft, 1,640 ft이며, 주입시의 최대 정두압은 저류층의 초기압력인 3,600 psia보다 다소 높은 4,000 psia, 재생산시의 최소 정두압은 500 psia로 설정하였다.

수평정에 대한 시뮬레이션 결과인 Fig. 12를 살펴보면, 첫번째 사이클에서만 주입된 양만큼 재생산이 되지 못하고 그 이후 사이클부터는 안정적으로 주입과 재생산이 이루어지고 있는 것으로 나타났다. 따라서 『흑곰-HY』 가스전에서는 10개의 수직정 대신 기존의 수직정 2개와 수평정 3개인 시스템의 경우에도 가스저장전이 거의 정상적으로 운영될 수 있음을 알 수 있다. 다만, 수평정을 시추하는 경우 수직정에 비해 가스정 수가 적기 때문에 시추비용은 절약할 수 있으나 일일순환량이 증가함에 따라 컴프레서 비용 등의 설비비용이 증가할 수 있으므로 경제성에 대한 검토가 수반되어야 할 것이다.

이제까지의 결과를 종합하여 Table 3에 정리하였다. 이 결과를 살

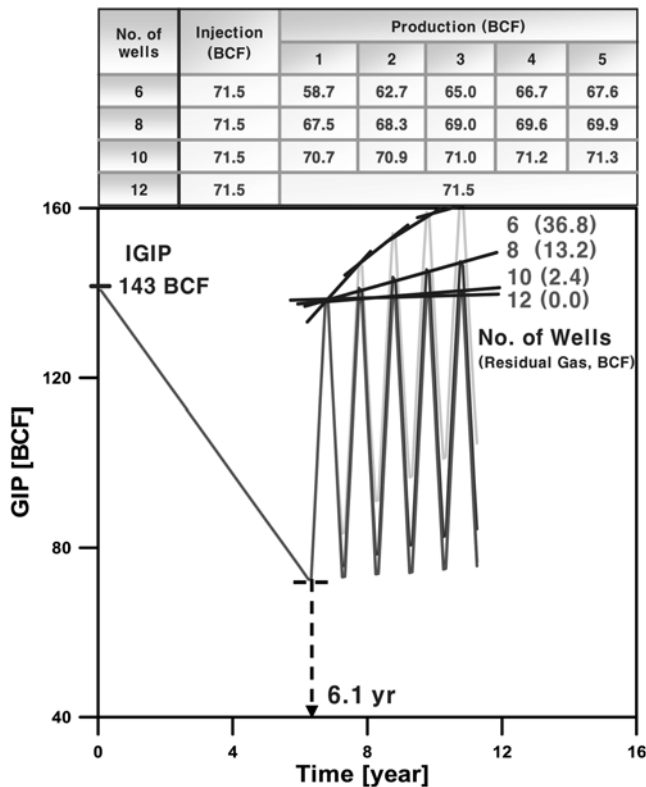


Fig. 10. Behaviors of GIP in reservoir with time for various number of wells.

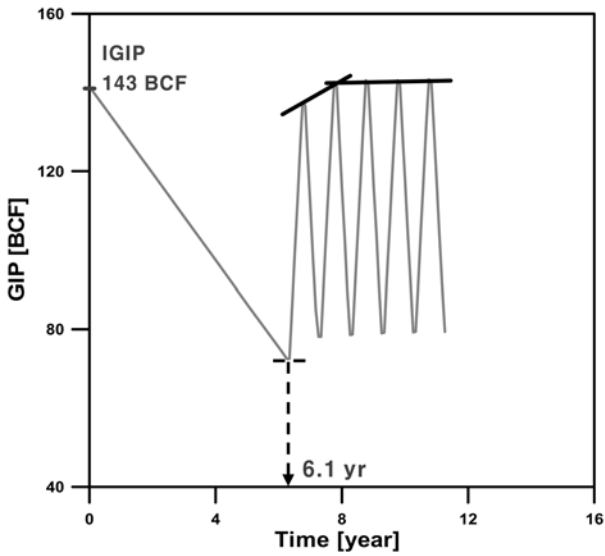


Fig. 12. Behaviors of GIP in reservoir with time for the case of two existing vertical wells with three horizontal wells.

Table 3. The summary of the simulational results for gas storage scenario

Operation	No. of Vertical wells	Cushion gas		
		40%	50%	60%
5 ml - 5 mP	6	NP	NP	NP
	8	NP	NP	P
	10	NP	P	P
	12	NP	P	P
7 ml - 3 mP	10	NP	NP	NP
	12	NP	NP	NP

NP: Not possible, P: Possible

5 ml - 5 mP: 5 month inj. - 5 month prod.

7 ml - 3 mP: 7 month inj. - 3 month prod.

펴보면, 『흑곰-HY』 가스전의 경우 5개월 주입-5개월 재생산 운영 시스템하에서 쿠션가스 50%, 수직가스정 수 10개가 기술적으로 타당한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 고갈가스전에서의 적정 가스저장시스템 분석을 위해 가상의 『흑곰-HY』 고갈가스전을 설계하였으며, 상용저류전산 시뮬레이터인 『ECLIPSE 300』을 사용하여 기술적 타당성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

4-1. 쿠션가스

1. 쿠션가스에 대한 분석결과, 쿠션가스가 40% 일때는 주입량과 재생산량을 동일하게 설정하였음에도 불구하고 사이클이 반복됨에 따라 저류층내에서 잔류가스가 전체적으로 계속 증가하여 가스의 공급이 안정적으로 이루어지지 않음을 알 수 있었다. 한편, 쿠션가스가 50% 및 60%인 경우, 주입량과 재생산량이 거의 동일하여 주입된 가스가 워킹가스로서 모두 생산됨을 알 수 있었다. 따라서 기술적경제적인 측면을 고려할 때 『흑곰-HY』 가스전에서는 적정 쿠

션가스가 50%임을 알 수 있다.

2. 생산가스전의 가스회수율을 높이기 위해 생산종료시점을 늦추고 그 대신 저장전으로의 전환시 추가로 쿠션가스를 주입하는 방안 에 대한 분석하였다. 그 결과, 가스를 더 오랜기간 생산하기 위해 잔류가스를 40% 정도로 적게 남겨두어도 저장전 운영 초반에 적정 쿠션가스 수준까지 충분한 가스만 쿠션가스로 추가 주입하게되면 기술적으로는 아무런 문제가 없는 것으로 나타났다.

3. 주입-재생산 운영사이클이 5-5개월 대신 7-3개월인 경우, 쿠션 가스 50% 일때 5-5개월일때는 안정적인 재생산이 가능한 반면 7-3개월의 사이클에서는 쿠션가스 50% 일때에도 주입된 가스가 전량 생산되지 못하고 저류층내에 가스가 잔류되는 것으로 나타났다. 이는 재생산기간이 5개월에서 3개월로 짧아져서 가스정에서의 일일 순환량이 증가되어야 하나 『흑곰-HY』 저류층의 유동특성하에서는 유동량이 제한되어 있어 그 양이 모두 재생산되지 못하고 일부가 잔류되기 때문이다.

4-2. 가스정 수 및 형태

4. 가스정 수에 대한 분석결과, 가스정 수가 6개와 8개인 경우에는 저류층내에서의 총 잔류가스량이 각각 36.8 BCF와 13.2 BCF로서 안정적인 재생산이 이루어지지 않음을 알 수 있었다. 이에 반해 가스정수가 10개와 12개인 경우에는 잔류가스 없이 가스저장이 거의 안정적으로 진행됨에 따라 『흑곰-HY』 가스전에서는 최소 10개 이상의 수직가스정이 운영되어야 함을 알 수 있다.

5. 기존의 2개 수직정에 수평정을 3개 추가로 시추하는 경우에 대한 분석결과, 『흑곰-HY』 가스전에서는 수직정 10개인 시스템을 대체할 수 있는 정도로 거의 안정적인 주입과 재생산이 가능한 것으로 평가되었다.

감 사

본 연구는 한국가스공사의 지원에 의해 수행되었음(고갈가스전의 가스저장기술 및 활용방안 연구).

참고문헌

1. Katz, D. L. and Tek, M. R., "Overview on Underground Storage of Natural Gas," *JPT*, **33**(6), 943-954(1981).
2. Mayfield, J. F., "Inventory Verification of Gas Storage Fields," *JPT*, **33**(9), 1731-1734(1981).
3. Sung, W. M., Ryou, S. S., Ra, S. H., and Kwon, S. I., "The Interpretation of DST Data for Donghae-1 Gas Field, Block VI-1, Korea," *Korean J. Chemical Engineering*, **18**(1), 67-74(2001).
4. Knepper, G. A. and Cuthbert, J. F., "Gas Storage Problems and Detection Methods," paper SPE 8412 presented at the 54th Annual Fall Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Las Vegas, Nevada, September(1979).
5. Chung, C. B., "Sensitivity Behavior Analysis in Distributed Parameter Estimation," *Korean J. Chemical Engineering*, **8**(4), 240-247 (1991).
6. Gredell, M. E. and Benson, M. A., "Slim-Hole Horizontal Well Improves Gas Storage Field Deliverability," *Oil and Gas Journal*, **93**(50), 60-70(1995).
7. Baird, J. L., "Clay Basin Storage Project - Development of a Nearly

- Depleted Gas Reservoir to Gas Storage,” paper SPE 7171 presented at the Rocky Mountain Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers, Cody, U.S.A., May(1978).
8. Bennion, D. B., Thomas, F. B., Ma, T. and Imer, D., “Detailed Protocol for the Screening and Selection of Gas Storage Reservoirs,” paper SPE 59738 presented at the SPE/CERI Gas Technology Symposium, Calgary, Alberta, Canada, April(2000).
 9. Kim, M. S., Ryon, S. S., “A Study on the Suitability for Gas Storage of Donghae-1 Gas Reservoir,” *Geosystem Eng.*, **38**(5), 379-391 (2001).
 10. Misra, S. E., Foh, S. E. and Shikari, R. M., “The Use of Inert Base Gas in Underground Natural Gas Storage,” paper SPE 17741 Presented at the Gas Technology Symposium, Dallas, U.S.A., June(1988).