

## SAGD 시추공의 시멘트 점착력 향상 방안

윤민녕<sup>1)\*</sup> · 임종찬<sup>1)</sup> · 이준석<sup>2)</sup> · 김재웅<sup>2)</sup>

### Methods to Improve Cement Bond in SAGD Wells

Minnyeong Yoon\*, Jongchan Lim, Junseog Yi and Jaewoong Kim

(Received 12 August 2014; Final version Received 7 October 2014; Accepted 16 October 2014)

**Abstract** : Harvest Operations Corp (HOC) has drilled total of 15 producer and injector well pairs of SAGD (Steam Assisted Gravity Drainage) wells in north eastern Alberta, Canada, targeting McMurray oilsand formation. Operators in heavy oil reservoir including SAGD drilling operation often have troubles maintaining a good well integrity throughout the production. One of the most common problem operators have is steam leaking, either to a different formation or to surface, which is mostly caused from a bad cement bond quality. To improve the cement bond, HOC incorporated the unique well design, by lowering the surface casing setting depth, by using a special thermal cement blend, and by optimized cementing practice such as centralizer and stop collar design and squeezing Calcium Carbonate and Potassium Chloride solution.

**Key words** : Oil sand, SAGD drilling, cement integrity, Cement bond

**요약** : Harvest Operations Corp.(HOC)는 캐나다 알버타(Alberta) 주 북동부 McMurray 오일샌드(Oil Sand)층을 대상으로 SAGD(Steam Assisted Gravity Drainage) 생산정과 증기 주입정 15쌍을 시추한 바 있다. 동 지역에서는 SAGD 생산시추를 비롯한 중질유 개발 회사들이 시추공 안정성 유지에 큰 어려움을 겪고 있으며, 특히 오일샌드 생산 시 낮은 시멘트 점착력으로 인해 주입된 증기가 누출되고 생산량이 감소하는 문제가 발생하고 있다. HOC는 시추공 디자인 상의 케이싱 심도변경, 특수 시멘트 적용, 최적의 시멘팅 기법 적용, 탄산칼슘 및 염화칼륨 이수 사용 등을 통해 동 문제를 해결하였다.

**주요어** : 오일샌드, SAGD 생산시추, 시멘트 점착력

## 서 론

캐나다의 원유 부존량은 사우디, 베네주엘라에 이어 세계 3위이며, 캐나다 내 원유 부존량 중 97%가 오일샌드(Oil Sand)이다. 약 1.7조 배럴 정도의 오일샌드 자원량이 추정되며 현재 발굴 가능한 매장량은 이 중 약 11% 정도인 1,800억 배럴 정도이다(Tomilina, 2012). 캐나다 Alberta 주에는 약 127개의 오일샌드 프로젝트가 진행 중이며 계속 증가하는 추세이다. 국내에서도 캐나다 오일샌드와 그 개발법인 SAGD에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다(Kam *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2011; Lee

and Lim, 2011; Choi *et al.*, 2013; Hwang *et al.*, 2013; Choi *et al.*, 2014).

한국석유공사의 자회사인 Harvest Operations Corp. (이하 HOC)는 Black Gold 오일샌드 개발 프로젝트를 진행하고 있으며, 개발현장은 캐나다 알버타 주의 북동부, 켈거리 북쪽 약 650 km에 위치한다(Fig. 1). 오일샌드의 개발방법에는 노천채굴 및 SAGD(Steam Assisted Gravity Drainage)가 가장 널리 사용되고 있으며, Black Gold에서는 SAGD 기법을 사용한다. SAGD 시추공은 Fig. 2와 같이 생산정 및 증기 주입정이 상하 쌍으로 경사 굴착되며 수평구간에서 수직으로 약 5 m 거리를 유지한 채 굴착 된다(Shin and Polikar, 2005). Black Gold 15쌍(30공)의 수평정 시추는 HOC의 첫 SAGD 프로젝트이며, 지하 증기의 유동을 관측하기 위한 12공의 수직 관측정 및 증기주입에 필요한 물을 생산하기 위한 4공의 용수정이 사전 시추되었다. SAGD 시추공은 생산기간이 약 10-20년으로 길기 때문에 생산기간 동안 시추공 안정

1) 한국석유공사 Harvest Operations Corp.

2) 한국석유공사 시추운영처

\*Corresponding Author(윤민녕)

E-mail; minnyeong.yoon@knoc.co.kr

Address; Drilling & Subsea Dept. Korea National Oil Corporation, 1588-14 Gwangyang, DongAn, AnYang, Kyeonggi, 431-711, Korea

성 확보가 필수적인데, 시멘트와 지층간의 점착력이 부족한 경우 생산된 원유나 주입된 증기가 지하수를 오염시키거나 지상으로 누출될 위험이 있다. 시멘트 점착력(Cement Bond)은 검층을 통해 확인할 수 있으며, 격리가 안 된 구간이 보일 경우 막대한 추가 비용이 소요되는 Remedial Cement Job을 실시해야 한다. 특히 수평에 가까운 구간일수록 성공적인 시멘트 설치에 어려움이 크며, SAGD 시추공의 경우 시멘트 설치 상태가 AER

(Alberta Energy Regulator)의 Directive 51 기준에 부합되지 않으면 증기 주입정으로 사용될 수 없다. 생산정도 초기 단계에서는 증기를 주입하기 때문에 증기 주입정으로 분류 된다(Alberta Energy Regulator(AER), 2014). 본 연구는 Black Gold SAGD 시추과정에서 시멘트 점착력을 향상시키기 위해 실시한 작업 방법 등에 관한 내용을 기술하였다.

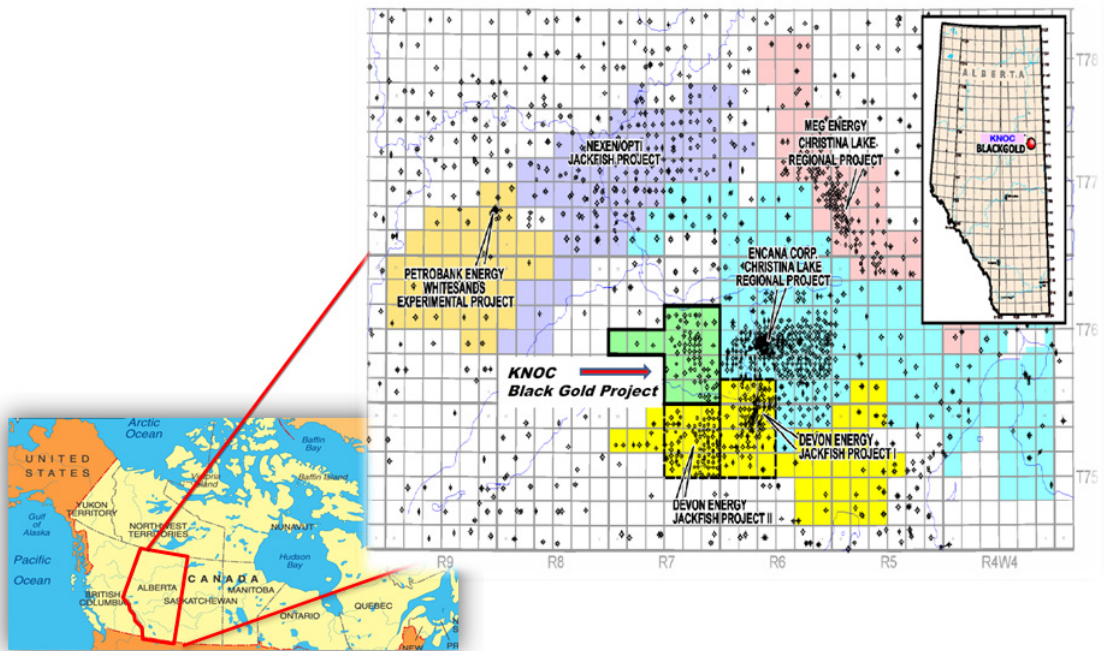


Fig. 1. HOC Blackgold Project Location Map.

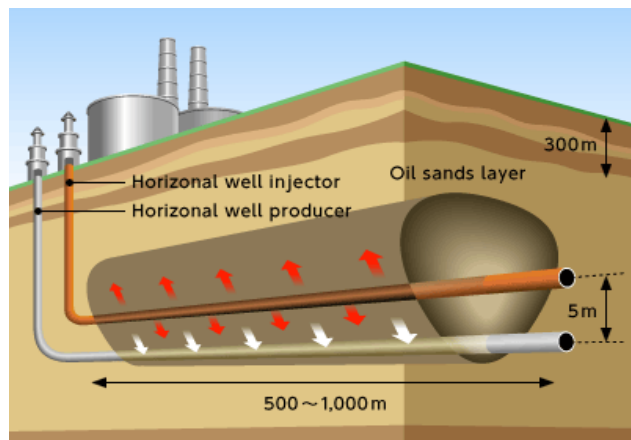


Fig. 2. SAGD Conceptual Drawings (www.japex.co.jp).

## 안정적인 시멘트 점착력(Cement Bond) 확보를 위한 작업 사례

### Surface Casing 심도 변경

캐나다 알버타 주에서는 주정부 석유가스 담당기관인 AER(Alberta Energy Regulator)의 케이싱 설치 심도 기준에 따라 Surface Casing을 설치해야 하며, 이 기준에 의해 계산된 Blackgold Surface Casing 설치 최소심도는 지표에서부터 약 95 m가 된다(Alberta Energy Regulator (AER), 2014).

Black Gold 프로젝트에서는 Surface Casing 심도를 약 200 m(수직 심도)로 결정하였는데, 주된 이유는 생산도중 발생하는 온도변화로부터 Intermediate Casing 및 시멘트를 보호하기 위함이다. Blackgold 시추공이 있는 Athabasca 지역은 지표면에서부터 약 150 m 정도까지 대수층이 존재하고 있으며, 지상장비 또는 공저 펌프고장 등으로 증기 주입이 장시간 중단될 경우 그 대수층과 맞닿아 있는 구간의 온도가 급격히 떨어진다. 시추공의 일부분만 온도가 급격히 내려갈 경우 케이싱과 시멘트의 열팽창계수(thermal expansion coefficient)가 다르므로 시멘트 균열이 생길 수 있고 급격한 온도 변화의 반복은 케이싱의 피로 파괴를 일으킬 수 있다. 이러한 균열이나 케이싱 파괴를 통해 수평 구간에 주입된 증기가 지표나 다른 기타 층으로 새어 올라올 경우 증기의 효율성 저하 및 지상폭발을 야기하기도 한다. 이에 따라 대수층 하부 50 m까지 Surface Casing을 설치 하여 Intermediate Casing 및 시멘트가 대수층에 직접 노출되지 않도록 하였으며, 증기 주입 중단 시 발생하는 급 냉각 효과를 최소화하고, 미세균열 및 케이싱 피로도에 의한 파괴를 예방하였다(Fig. 3).

### 특수 시멘팅 장비 적용

시멘트 작업 중 케이싱의 상하움직임(Reciprocation)과 회전(Rotation)은 양질의 시멘트 설치를 위한 중요 요소이다. Black Gold Intermediate Casing 시멘트 작업에서는 케이싱을 6 RPM(Rotation per Minute)으로 회전시켰으며 2~3 m 구간을 상하로 왕복하여 움직였는데 통상적인 시멘팅 장비로는 회전 및 상하운동을 할 수 없으므로 특수한 시멘팅 헤드(Rotating Cementing Head)를 사용하였다. 이 장비는 일반 시멘팅 장비와 달리 시멘팅 헤드가 외부의 케이싱 및 내부의 2-7/8" 튜빙을 동시에 잡고 회전 시킬 수 있도록 설계 되었다. 시멘팅 헤드의 최상부는 시추기의 Top Drive 및 Cementing Unit과 연결되어 있어 유체를 순환시킬 수 있으며 하부에는 Pack Off Head 가 있어 케이싱을 밀폐해 주는 역할을 한다. Pack Off Head 하단의 배출구는 시멘트 작업 중에는 닫아놓았다가 시멘팅 작업이 끝난 후 열어 온수가 케이싱 내부로 순환되고 배출될 수 있도록 한다. 또한 튜빙과 결합된 부분에는 Swivel을 설치하여 케이싱을 회전시켜도 튜빙은 회전되지 않도록 설계되었다.

### Intermediate Casing 이격도(Standoff) 설계

케이싱의 이격도(Standoff, SO) 또한 성공적인 시멘팅 작업의 중요 요소이다. 케이싱의 이격도는 Fig. 4와 같이 계산되는데 A는 시추공경(Hole Size), B는 케이싱 외경, C는 케이싱 외벽과 시추공 간의 최소거리를 나타낸다. 이격도 100%는 케이싱이 완벽하게 홀 중앙에 위치하며, 0%일 때 케이싱 외벽이 공벽과 맞닿는 것을 의미한다(Liu *et al.*, 2012). 일반적으로 성공적인 시멘팅 작업을 위해서는 이격도를 67%이상 유지하는 것이 좋으며, Blackgold의 Intermediate Casing은 대부분의 구간에서 standoff가 80%를 초과 유지되도록 설계 되었다(Fig. 5).

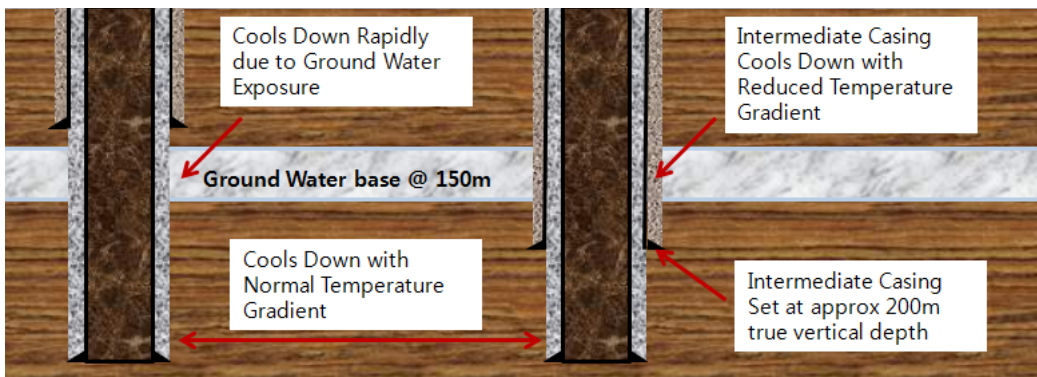


Fig. 3. Effect of Groundwater on Intermediate Casing & Cement.

지표면에서 약 180 m까지는 두 Joint당 1개의 Bow Spring Centralizer를 사용하였으며 시추공 각도가 수평에 가까워 질수록 케이싱 벽면이 바닥에 닿으려는 힘이 커지므로 180 m부터 Intermediate Casing 최종심도까지는 약 1 joint당 1개의 Semi-Ridged Centralizer를 사용하였다. 또한 케이싱이 상하 왕복운동을 할 동안 Centralizer가 케이싱과 같이 움직이지 않게 하기 위해 Stop Collar

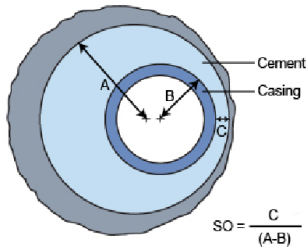


Fig. 4. Definition of Standoff (Liu et al., 2012).

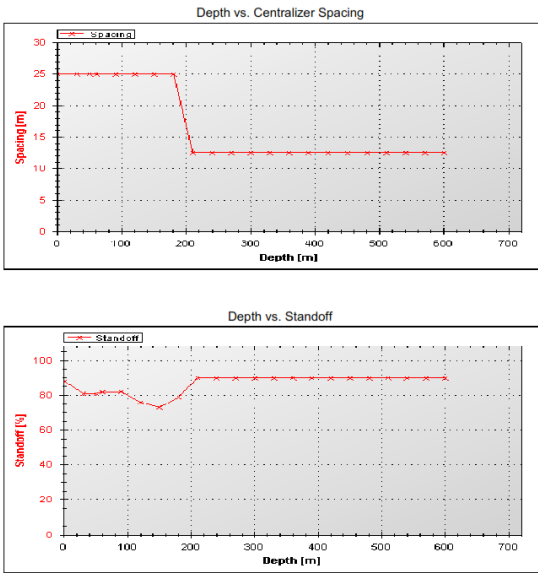


Fig. 5. Centralizer spacing and standoff profile for Blackgold SAGD injectors.

를 케이싱 커플링(Coupling)에서 3미터 상부에 설치하였다.

**탄산칼슘(Calcium Carbonate) 및 염화칼륨(Potassium Chloride) 이수 사용**

시멘트 작업도중 시멘트 슬러리(Slurry)내의 물이 지층으로 유실되면 양질의 시멘팅을 기대할 수 없다. 이를 방지하기 위해 시멘트 주입 직전 탄산칼슘(Calcium Carbonate)과 염화칼륨(Potassium Chloride)을 공 내로 순환하였다. 먼저 케이싱을 설치심도까지 내리고 Shaker에서 압편 조각들이 나오지 않을 때까지 이수를 순환시킨 후, 20% 탄산칼슘 용액을 케이싱 외부 나공부분에 채우고 약 20분을 기다린다. 이 후 염화칼륨 용액으로 다시 나공부분을 치환하고 방폭장치를 닫은 채로 약 500 kPa의 지상 압력으로 Squeezing 하였다. 이는 탄산칼슘과 염화칼륨이 서로 영겨서 응집하는 성질을 이용한 것으로 공벽 내에서 공극을 막아 시멘팅 도중 유체의 유실을 최소화 하였다.

**특수시멘트(ThermaSTONE™) 적용**

SAGD 시추공의 시멘트는 생산이 지속되는 오랜 기간 동안 변화하는 온도 및 압력조건에서 안정적으로 유지되어야 한다. SAGD 시추공은 최대 섭씨 320도(°C) 까지 가열되고 유정보수 등의 생산 중단기간에는 영하까지 내려가게 되어 심한 비주기적 온도변화(Thermal Cycle)를 겪게 된다. 일반적인 Thermal Cement는 열팽창계수가 낮고 영률이 높아 온도 변화에 적절하게 대처하지 못하므로 시멘트의 균열이 발생하여 증기가 지상으로 유출될 위험성이 있다. 그러므로 이러한 환경에서 시멘트가 파괴되지 않고 지층간의 격리를 유지하기 위해서는 특수한 시멘트가 필요하다.

저류층이 천부에 위치하여 온도가 낮으므로 (약 섭씨 15도) 시멘트는 낮은 온도에서 굳을 수 있어야 하며 온도변화(Thermal Cycle) 중 케이싱의 가열 팽창과 냉각 수축에 의한 응력변화에 견딜 수 있어야 한다. 이 열에 의한 응력변화에 견디기 위해서는 시멘트의 열팽창계수(Thermal Expansion Coefficient)는 케이싱과 유사하게,

Table 1. Change in Static Gel Strength of ThermaSTONE™ Cement Blend in Different Temperature Condition

Static Gel Strength (lbf/100ft <sup>2</sup> )	Time at 10 degC	Time at 20 degC
100	-	-
250	9 mins	19 mins
500	39 mins	31 mins

영률(Young's Modulus)은 낮게 유지되어야 한다(DeBruijn *et al.*, 2010). 즉 균열이 발생하는 것을 막기 위해서는 케이싱과 시멘트에 유사한 수준의 변형이 일어나야 하며, 변형의 정도가 달라 응력이 발생할 경우에도 시멘트의 영률이 낮으면 차이를 받아 들일 수 있어 균열이 발생할 가능성이 낮다. Black Gold SAGD 시추공에 사용된 ThermoSTONE™은 영률이 낮고(4500 MPa이하), 열팽창계수가 케이싱의 재료인 탄소강관(약  $13 \times 10^{-6}$ )과 유사하여, 온도변화 시 케이싱 변형과 비슷한 변형이 일어나 시멘트가 파괴되지 않고 지층을 잘 격리해줄 것으로 기대된다(Schlumberger, 2014).

를 방지하는 특성(Gas Tight)을 갖기 위해서는 시멘트의 물성 중 Static Gel Strength가 중요하다. 통상적으로 100 lbf/100 ft<sup>2</sup>에서 500 lbf/100 ft<sup>2</sup>까지 변하는 시간이 약 30분 미만인 시멘트가 Gas Tight 로 분류되는데, Blackgold에서 사용한 ThermoSTONE™을 실험한 결과 섭씨 10도의 환경에서는 만족스러운 결과를 갖지 못하였고 20도에서는 약 30분의 결과를 얻었다(Table 1). 이에 따라 시멘트 펌핑 직후 약 섭씨 40도 온수로 케이싱 내부를 순환시키는 방법을 사용하여 만족할만한 Gas Tight 특성을 얻었다.

**열수 순환**

시멘트가 굳는 도중 저류층 및 공내 가스가 시멘트 내로 유동하면 유체의 이동 가능 통로가 생길 수 있다. 이

**시멘트 점착력 검층을 통한 결과 분석**

시멘트 검층은 저류층 온도(15°C)가 낮아 굳는 속도가 느린 것을 감안하여 시멘트 작업이 끝난 후 3주 이후에

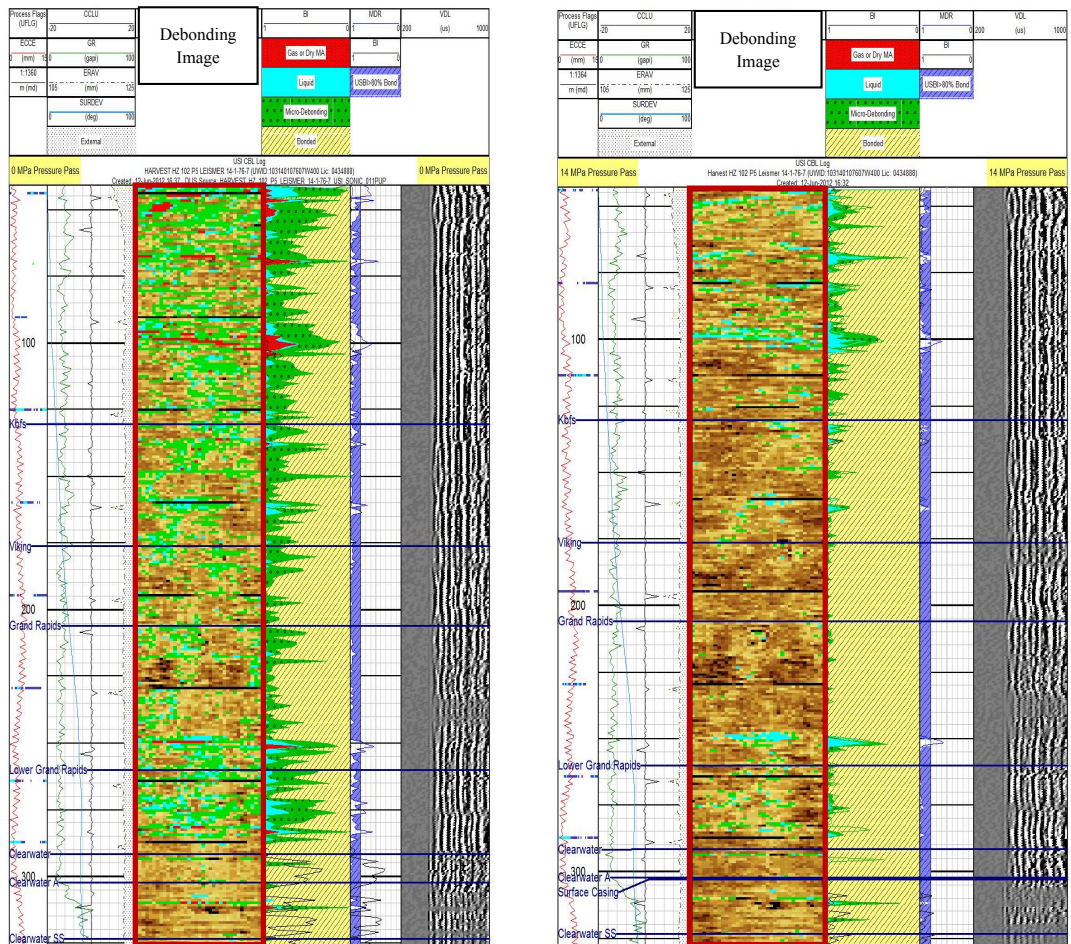


Fig. 6. CBL-USI Log Results for Pad 102 P5 14-1-76-7W4 Well (Left with 0 MPa, Right with 14 MPa Pressure).

실시되었다. 사용된 시멘트의 비중이  $1,650 \text{ kg/m}^3$  [13.8 ppg]으로 낮으므로 정확도 향상을 위해 CBL(Cement Bond Logging) 외에 USI (Ultra Sonic Imager) 장비를 사용하였다. CBL-USI 검층은 케이싱 내부에 압력을 가하지 않은 상태와 14 MPa [2,000 psi]의 압력을 가한 상태에서 실시하였다. 시멘트와 케이싱 그리고 지층 사이에는 유체가 유동하기 어려울 정도로 작은 틈이 존재할 수 있는데, 이 작은 틈을 Micro Annulus라고 부르며, 이 Micro Annulus는 일반 Channeling과 달리 내부에서 압력을 가할 경우 틈이 닫히게 된다.

Fig. 6은 Black Gold 시멘트 검층 결과의 대표적인 사례이다. 시멘트 검층의 기본 원리는 음파(Sonic)가 케이싱, 시멘트 그리고 지층에서 굴절되어 돌아오는 진폭을 측정하는 것이며, 이 진폭이 높을 경우 시멘트 점착력이 좋지 않은 것으로 판단한다. Debonding Image의 빨간색, 녹색, 하늘색 계열로 표시된 곳이 점착력이 낮은 부분이며, 노란색에서 짙은 갈색으로 갈수록 양호한 점착력을 나타낸다. AER(Alberta Energy Regulator)에서는 본 결과를 Micro Annulus효과로 인정하고 양질의 시멘트가 설치된 것으로 판단하여 모든 시추공에 대해 증기주입정 사용을 승인하였다.

## 결론 및 제언

오일샌드 SAGD 시추공은 통상적으로 10년 이상 생산이 이루어지므로, 시추공 설계 및 작업 시행 단계에서부터 장기간 시추공 안정성 확보를 할 수 있도록 고려되어야 한다. 인근 운영권자의 사례에서는 생산기간 중 온도변화(Thermal Cycle)로 인해 Intermediate Casing 시멘트에 균열이 발생하고 이를 통해 주입된 고온의 증기가 다른 층으로 유입되거나 최악의 경우에는 지상까지 누출된 경우도 있었다. 이러한 문제가 발생할 경우 알버타 주 정부 규정에 의거 증기 누출을 막는 보강 작업을 해야 하며, 불가능할 경우 폐공해야만 한다. 이런 문제를 예방하고자 Blackgold 시추 프로젝트에서는 앞서 기술한 Surface Casing의 지하수 층 하부설치, 특수 시멘팅 장비 사용, 케이싱 이격도 설계, 케이싱 열팽창 계수와 비슷한 소재의 시멘트 사용, 탄산칼슘 및 염화칼륨 이수사용, 열수순환 등의 방법을 활용하여 시멘트 작업을 실시하였고 시멘트 검층을 통해 시멘트 작업이 잘 이루어 졌음을 확인하였다. 현재 Alberta 주 정부로부터 증기주입의 허가를 받은 상태이며, 향후 증기주입을 통한 Warm-up 단계를 거친 이후 USI 검층을 재 실시하여 시멘트의 최종 상태를 확인 할 계획이다.

## 사 사

본 연구는 한국석유공사의 자회사인 HOC에서 수행한 캐나다 Blackgold 프로젝트 시추작업을 토대로 작성되었으며, 이에 감사 드립니다.

## References

- Alberta Energy Regulator(AER), 2014.08.08, [www.aer.ca/documents/directives/Directive008.pdf](http://www.aer.ca/documents/directives/Directive008.pdf).
- Choi, Y.R., Jung, S.P. and Yoo, J.H., 2013, "Improvement of SAGD by N<sub>2</sub> Injection in Oil Sand Reservoir with Thief Zone," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineering*, Vol. 50, No. 2, pp. 252-263.
- Choi, Y., Kim, Y., Kam, H., Shin, K., Jun, J. and Jang, I., 2014, "Simulation Study of the SAGD for the Carbonate Reservoir Model Incorporating Fracture Characteristics of Grosmont Formation, Canada," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineering*, Vol. 51, No. 4, pp. 549-562.
- DeBruijn, G., Loiseau, A., Chougnnet-Sirapian, A., Piot, B., Pershikova, E. and Khater, W., 2010, "Innovative Cementing Solution for Long-Term Steam Injection Well Integrity," paper 131324 presented at SPE EUROPE C/E AGE Annual Conference and Exhibition, Barcelona, Spain, June 14-17.
- Hwang, T.H., Shin, H.D. and Chon, B.H., 2013, "Optimal Grid System Design for the SAGD Process Simulation," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineering*, Vol. 50, No. 5, pp. 667-677.
- Japan Petroleum Exploration Co.,Ltd., 2014.09.24, [www.japex.co.jp](http://www.japex.co.jp).
- Kam, D., Min, B., Chung, S., Park, C., Kang, J., Kim, J., Jang, I. and Choi, Y., 2009, "Optimization of Steam Injection Pressure in SAGD Using Artificial Neural Network," *J. of the Korean Society of Geosystem Engineering*, Vol. 46, No. 2, pp. 143-150.
- Lee, D.G., Seo, K.W. and Lim, J.S., 2011, "3D Geostatistical Modeling Using Well Data of Oil Sand Reservoir in the Leismer Field, Canada," *J. of the Korean Society of Geosystem Engineering*, Vol. 48, No. 6, pp. 687-700.
- Lee, D.G. and Lim J.S., 2011, "Estimation of Petrophysical Properties Using the Well Logs and Core Analysis Data in Oil Sand Reservoir, Leismer Field, Canada," *J. of the Korean Society of Geosystem Engineering*, Vol. 48, No. 2, pp. 199-210.
- Liu, G., Pegasus Vertex, Inc. and Weber, L., 2012, "Centralizer Selection and Placement Optimization", paper 150345 presented at SPE Drilling and Completions Conference,

Galveston, Texas, USA, June 20-21.  
 Schlumberger, 2014.08.08, www.slb.com/ThermaSTONE.  
 Shin, H. and Polikar, M., 2005, "Optimizing the SAGD  
 Process in Three Major Canadian Oil-Sands Areas," paper  
 95754 presented at SPE Annual Technical Conference

and Exhibition, Dallas, Texas, U.S.A., October 9-12.  
 Tomilina, E.M., 2012, "New Thermally Responsive Cement  
 for Heavy Oil Wells," paper 157892 presented at SPE  
 Heavy Oil Conference Canada, Calgary, Alberta, Canada,  
 June 12-14.

**윤민녕**

2010년 한양대학교 공과대학 자원공학과  
 공학사

현재 한국석유공사 Harvest Operations Corp. 대리  
 (E-mail; minnyeong.yoon@knoc.co.kr)

**임종찬**

1993년 인하대학교 공과대학 자원공학과  
 공학사

현재 한국석유공사 Harvest Operations Corp. 담당역  
 (E-mail; jongchan.lim@knoc.co.kr)

**이준석**

1986년 한양대학교 자원공학과 공학사  
 1988년 서울대학교 자원공학과 공학석사  
 2002년 미국 텍사스 주립대 Petroleum &  
 Geosystem Eng. 공학석사

현재 한국석유공사 시추운영처장  
 (E-mail; junseog.yi@knoc.co.kr)

**김재웅**

2006년 인하대학교 자원공학과 공학사

현재 한국석유공사 시추운영처 시추1팀 대리  
 (E-mail; jaewoong.kim@knoc.co.kr)