에너지공학, 제22권 제2호(2013)
Journal of Energy Engineering, Vol. 22, No. 2, pp. 156~168 (2013)

울릉분지 시추공 분석 자료를 이용한 가스하이드레이트 함유층의 3차원 공간 물성 분포 추정

이동건 · 신효진 · 임종세†
한국해양대학교 에너지자원공학과
(2013년 2월 4일 접수, 2013년 6월 17일 수정, 2013년 6월 17일 채택)

3D Spatial Distribution Modeling for Petrophysical Property of Gas Hydrate-Bearing Sediment using Well Data in Ulleung Basin

Dong-Gun Lee, Hyo-Jin Shin and Jong-Se Lim†
Department of Energy & Resources Engineering, Korea Maritime University
(Received 4 February 2013, Revised 17 June 2013, Accepted 17 June 2013)

요 약

이 연구에서는 2007년, 2010년에 수행한 울릉분지 1, 2차 시추 지역의 시추공(UBGH1-1, UBGH1-4, UBGH1-9, UBGH1-10, UBGH1-14, UBGH2-2-1, UBGH2-2-2, UBGH2-6, UBGH2-9, UBGH2-10, UBGH2-11)에서 취득한 물리검층 및 코어분석 자료로 추정한 가스하이드레이트 함유층 주요 물성 자료를 활용하여 불균질성을 반영할 격자 수준의 3차원 공간 분포 모델링을 수행하였다. 가스하이드레이트 함유층 내 퇴적상의 공간 분포 추정을 위하여 퇴적상 추정 자료를 각 시추공별로 3차원 격자 셀에 입력하고 순차지표시뮬레이션으로 3차원 분포를 모델링하였다. 가스하이드레이트 함유층의 공극률과 가스하이드레이트포화율은 퇴적상 분포 모델을 기반으로 순차가우스시뮬레이션을 통해 3차원 공간 물성 분포를 추정하였다.

주요어 : 울릉분지, 퇴적상, 공극률, 가스하이드레이트포화율, 3차원 공간 분포

Abstract - Drilling expedition #1 in 2007 and drilling expedition #2 in 2010 were performed for gas hydrate resources evaluation and optimal site selection of pilot test in Ulleung basin, East Sea, Korea. This study presents to build the 3D spatial distribution models using the estimated sedimentary facies, porosity, and gas hydrate saturation derived by well logs and core analysis data from UBGH1-4, UBGH1-9, UBGH1-10, UBGH1-14, UBGH2-2-1, UBGH2-2-2, UBGH2-6, UBGH2-9, UBGH2-10 and UBGH2-11. The objective of 3D spatial distribution modeling is to build a geological representation of the gas hydrate-bearing sediment that honors the heterogeneity in 3D grid scale. The facies modeling is populating sedimentary facies into a geological grid using sequential indicator simulation. The porosity and gas hydrate saturation modeling used sequential Gaussian simulation to populate properties stochastically into grid cells.

†To whom corresponding should be addressed.
Korea Maritime University, Dongsam-Dong, Yeongdo-Gu
Busan, 606-791, Korea
Tel : 051-410-4682 E-mai : jslim@hhu.ac.kr

Key words : Ulleung basin, sedimentary facies, porosity, gas hydrate saturation, 3D spatial distribution

1. 서 론

가스하이드레이트(gas hydrate)는 천연가스가 저온, 고압 하에서 물 분자와 물리적으로 결합하여 형성된 고체 상태의 결정으로, 주 구성 성분인 메탄은 연소 시 이산화탄소를 적게 배출하는 친환경적인 특성을 가지고 있으며 전 세계적으로 부존된 가스하이드레이트는 약 10조 톤에 이르는 것으로 추정하고 있다 [1-2]. 근래에 전 세계적인 에너지 수요 증가와 더불어 수급 불균형 현상이 심화되고 있고 이에 대한 해결책으로 막대한 부존량과 청정 에너지원으로써 높은 잠재력을 지닌 가스하이드레이트가 기존의 천연가스를 대체할 새로운 에너지 자원으로 주목받고 있다 [3]. 이러한 가스하이드레이트는 캐나다의 Mackenzie Delta 지역, 러시아의 서시베리아 지역, 미국의 알래스카 North Slope 지역 등의 영구 동토 지역과 일본의 Nankai 해구 및 미국의 멕시코만과 같이 수 백 미터 수심 이상의 심해 미고결 퇴적층에 광범위하게 분포하고 있는 것으로 알려져 있다 [4]. 국내의 경우 동해 울릉분지에 약 6억 톤 이상의 부존량이 있을 것으로 추정하고 있으며 이를 국내 연간 천연가스 소비량으로 환산 시 약 30년간 사용할 수 있는 것으로 보고된 바 있다 [2].

국내의 경우 지난 2002～2004년 동해 울릉분지를 대상으로 2차원 탄성파 탐사를 수행하여 가스하이드레이트 존재 여부를 판단하는 해저면 모방 반사면(bottom simulating reflector)과 음향 공백대(acoustically blanking zone)를 확인하고 코어링(coring)으로 가스하이드레이트 부존 가능성과 생성 잠재력을 규명하였다. 2005～2006년에는 3차원 탄성파 탐사를 수행하고 가스하이드레이트 부존 유망 구조를 형태 및 지역별로 구분하여 대표적인 5개 부존 구조를 선정하였고 2007년에는 선정된 울릉분지 1차 시추 후보지(UBGH1-1, UBGH1-4, UBGH1-9, UBGH1-10, UBGH1-14)에서 LWD(logging while drilling) 5공, 코어링 5공의 시추 작업이 수행되었고 국내 최초로 가스하이드레이트 실물 채취에 성공하였다 [5]. 이 후 서광원 등 [3]은 1차 시추 지역의 5개 시추공 중 코어를 취득하여 선상 분석과 육상 분석을 수행한 UBGH1-4, UBGH1-9, UBGH1-10 시추공에 대하여 물리검층 및 코어분석 자료를 활용하여 가스하이드레이트 함유층 물성 추정 기법에 관련된 연구를 수행하였다. 2010년에는 가스하이드레이트 부존량 평가와 시험 생산 후보지 선정을 위한 목적으로 총 13개의 지역(UBGH2-1-1, UBGH2-1-2, UBGH2-2-1, UBGH2-2-2, UBGH2-3, UBGH2-4, UBGH2-5, UBGH2-6, UBGH2-7, UBGH2-8, UBGH2-9, UBGH2-10, UBGH2-11)에 대하여 LWD 13공, 코어링 18공, WL(wire line) 2공의 2차 시추 작업이 수행되었다 [6]. 신효진 등 [4]은 서광원 등 [3]의 1차 시추 자료 분석 연구에서 제시한 가스하이드레이트 함유층의 물성 추정 기법을 바탕으로 가스하이드레이트가 함유된 사질층의 분포가 비교적 많이 나타나는 2차 시추지역의 6개 시추공(UBGH2-2-1, UBGH2-2-2, UBGH2-6, UBGH2-9, UBGH2-10, UBGH2-11)에 대하여 물성 추정 기법을 추가로 제안한 바 있다.

동해 울릉분지 내 가스하이드레이트의 신뢰성 있는 부존량을 산출하기 위해서는 가스하이드레이트 함유층의 퇴적상과 물성에 대한 공간적인 분포 특성을 파악하는 것이 필수적이다. 따라서 이 연구에서는 동해 울릉분지 가스하이드레이트 1, 2차 시추 지역 중 가스하이드레이트 함유층의 퇴적상, 공극률, 가스하이드레이트포화율 추정이 완료된 11개 시추공(UBGH1-1, UBGH1-4, UBGH1-9, UBGH1-10, UBGH1-14, UBGH2-2-1, UBGH2-2-2, UBGH2-6, UBGH2-9, UBGH2-10, UBGH2-11)을 선정하고 수직 방향으로만 물성 분포 추정이 한정된 것을 수평 방향으로도 확장하여 3차원 공간 물성 분포를 추정하였으며 이를 가스하이드레이트 전산 수치 모델의 입력 자료 구성을 위한 정량적인 기초 물성 자료로 활용하고자 한다.

2. 가스하이드레이트 함유층 공간 물성 추정 기법

2-1. 가스하이드레이트 함유층의 공간적 특성

일반적으로 자연 상태에서의 가스하이드레이트 부존 형태는 조립질 퇴적물에서 공극을 충진하는 형태(pore filling), 세립질 퇴적물에서 균열을 충진하는 형태(fracture filling), 맥(vein), 단괴(nodule)의 형태

로 구분할 수 있다 [7]. 동해 울릉분지의 미고결 퇴적층에 함유된 가스하이드레이트는 이러한 형태와 비슷하며 보다 구체적인 지질학적 분석을 통해 크게 3가지 유형으로 구분하였다. 유형 1은 이질층의 균열을 충진하는 형태 또는 입자를 변위시키는 형태(grain displacing), 유형 2는 이질층에 산재되어 나타나는 형태(disseminated), 유형 3은 사질층의 공극을 충진하는 형태이다 [8]. 이와 같이 동해 울릉분지의 가스하이드레이트 산출 형태가 다양한 이유는 가스하이드레이트 함유층의 퇴적학적 특성과 관련이 있다. 울릉분지의 가스하이드레이트는 미고결 천부 퇴적층에 부존하는 형태로 이질층, 저탁류 사질층, 반원양성 퇴적물(hemipelagic sediment)이 단독으로 퇴적되어 있거나 호층(alteration) 형태의 퇴적 상태가 혼재되어 퇴적상 및 물성 분포가 불균질하게 나타난다 [9]. 이러한 불균질한 퇴적 분포에 기인한 가스하이드레이트 함유층의 불확실성(uncertainty)을 정량적으로 평가하고 신뢰성 있는 공간 물성 분포 모델을 얻기 위해서는 지구통계학적 모델링이 필수적이다.

2-2. 가스하이드레이트 함유층 시추공 분석 자료 간의 공간적 변화 분석

서광원 등 [3]과 신효진 등 [4]의 연구 결과에서 제시한 가스하이드레이트 함유층 시추공 분석 자료 간의 공간적 상관성을 고려하여 동해 울릉분지 가스하이드레이트 함유층의 공간적 특성을 해석하기 위해서는 지구통계학적 분석이 필요하며 이는 확률 및 통계이론을 활용하여 임의의 공간에 대한 추정값을 산출하는 것이다. 지구통계학적 분석을 통하여 알고 있는 물성 자료로부터 자료가 없는 지역의 물성을 추정할 수 있고 대상 지역에 대하여 광역적인 물성 분포 양상을 확인할 수 있다. 동해 울릉분지의 가스하이드레이트 함유층과 같이 불균질한 시스템을 기술하기 위해서는 단일 값으로 주어지는 결정론적 결과보다는 불확실성이 고려된 분석 결과를 의사 결정에 효율적으로 사용할 수 있다 [10]. 지구통계학적 분석에서 자료의 공간적 분포 특성을 확인하기 위한 도구에는 베리오그램(variogram)이 있으며 식 (1)과 같이 정의한다. 일반적으로 많이 사용되는 베리오그램 모형은 너깃(nugget) 영향 모형, 구형(spherical) 모형, 지수(exponential) 모형, 가우시안(gaussian) 모형, 선형(linear) 모형 등이 있다 [11].

$$2\gamma(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \left[V(x_i) - V(x_i + h)^2 \right] \quad (1)$$

3차원 공간 정보 분석을 위한 베리오그램 계산은 불균질 가스하이드레이트 함유층의 주 방향(major direction), 종 방향(minor direction), 수직 방향(vertical direction)에 대하여 실험적 베리오그램(experimental variogram)을 계산하고 이론적 베리오그램(theoretical variogram)을 모델링하여 베리오그램 모델을 최적화한다. 이를 수식으로 나타내면 식 (2)와 같다 [11].

$$\gamma(h) = \gamma(h_x, h_y, h_z) = \gamma_1(h_1) \quad (2)$$

$$h_1 = \sqrt{\left(\frac{h_x}{a_x}\right)^2 + \left(\frac{h_y}{a_y}\right)^2 + \left(\frac{h_z}{a_z}\right)^2} \quad (3)$$

베리오그램 분석이 완료되면 불균질 가스하이드레이트 함유층의 퇴적상과 물성의 공간 분포 추정을 위하여 공간 자료 처리가 필요하며 이를 위한 방법으로 크리깅(kriging)과 조건부 시뮬레이션(conditional simulation)이 있다. 크리깅은 미지의 변수에 대하여 최적 선형 불편향 추정자(best linear unbiased estimator)를 산출하는 일종의 최소 오차 회귀 분석 방법으로, 실제 불균질 가스하이드레이트 함유층의 미세 영역 물성이 산술 평균에 의하여 점진적인 변화 경향을 보여 불규칙한 형상을 반영하지 못하고 국소적인 특성이 훼손(smearing)된 공간 물성 추정 결과가 산출된다. 반면에 조건부 시뮬레이션의 경우 자료의 값과 분포, 베리오그램 등의 통계치 재생산이 가능하여 동일한 시뮬레이션 조건 하에서도 확률적 등가(equi-probable)인 다른 결과를 도출하기 때문에 여러 추정 결과의 차이를 이용하여 공간적인 불확실성 분포에 대한 추정이 가능하다 [10]. 조건부 시뮬레이션의 대표적인 기법으로는 순차가우스시뮬레이션(sequential gaussian simulation, SGS)과 순차지표시뮬레이션(sequential indicator simulation, SIS)이 있다. SGS는 공극률 및 가스하이드레이트포화율과 같은 연속형 변수(continuous variable)의 공간 물성 추정에 활용할 수 있고 SIS는 대상 자료가 가우스 분포를 따르지 않는 퇴적상과 같은 범주형 변수(categorial variable)의 공간 물성 추정에 활용할 수 있다 [10].

3. 가스하이드레이트 함유층 시추공 자료 분석 및 지구통계학적 모델 생성

3-1. 공간 물성 분포 추정을 위한 입력 자료 선정

이 연구에서는 동해 울릉분지 1, 2차 시추 지역의 시추공에서 획득한 물리검층 및 코어분석 자료를 통합 해석하여 추정한 퇴적상, 공극률, 가스하이드레이트포화율 자료를 3차원 지구통계학적 모델 생성 입력 자료로 선정하였다. 1차 시추 지역에서 5개의 시추공(UBGH1-1, UBGH1-4, UBGH1-9, UBGH1-10, UBGH1-14)과 2차 시추 지역에서 가스하이드레이트가 함유된 사질층의 분포가 비교적 많이 나타나는 6개의 시추공(UBGH2-2-1, UBGH2-2-2, UBGH2-6, UBGH2-9, UBGH2-10, UBGH2-11) 자료를 사용하였다.

한국지질자원연구원 [5]이 1차 시추에서 획득한 코어 시료를 이용하여 입도 분포와 절개면 영상 및 X선 영상에서 관찰되는 퇴적 구조 등을 기준으로 BM(bioturbated mud), CLM(crudely laminated mud), HM(homogeneous mud), LM(laminated mud), LMS(laminated muddy sand), MSS(massive silty sand), SM(sheared mud), DITM(disintergrated mud), ILM(indistinctly layered mud), DFM(deformed mud), Tephra의 11개 퇴적상을 구분하였다. 이를 서광원 등 [3]은 가스하이드레이트 해리 징후가 발견되는 MSS 퇴적상과 DITM 퇴적상을 추정하기 위해서 Mud, DITM, MSS의 3개 퇴적상으로 축소하고 코어의 퇴적상 해석 자료가 있는 UBGH1-4, UBGH1-9, UBGH1-10 시추공에 대하여 밀도 검층, 전기비저항 검층, 음파 검층 자료를 선형 판별 분석(linear discriminant analysis) 기법에 적용하여 퇴적상을 추정하였다. 이를 제외한 나머지 시추공은 'KMU Efacies 2009'로 퍼지 군집 분석(fuzzy clustering analysis)을 수행하고 암석물리학상(electrofacies)을 결정하여 퇴적상 입력 자료로 활용하였다. 이를 위하여 각 시추공의 밀도 검층, 음파 검층, 전기비저항 검층의 3개 물리검층 자료와 공극률 및 가스하이드레이트 추정 자료를 이용하여 주성분 PC_j(j=1, 2, …, 5)를 구하고 5개의 새로운 인공 변수를 생성하여 원자료(raw data)에 대한 정보의 기여도에 따라 구분하였다. 주성분 분석 결과 3개의 주성분만으로 물리검층 및 물성 추정 자료의 약 97%를 표현할 수 있음을 확인하였다. 이 후 군집의 개수를 3개로 설정하여 군집 분석을 수행하여 해당 시추공에 대한 암석물리학상을 결정하고 이를 주상도로 나타내었다(Fig. 1) [12-13]. 각각의 암석물리학상에 해당하는 물리검층 자료의 분포를 확인하여 고유한 물리검층 반응 특성을 분석하고 공극률과 가스하이드레이트 포화율 추정 자료와 비교하여 Mud, DITM, MSS의 3개 퇴적상을 구분하였다.

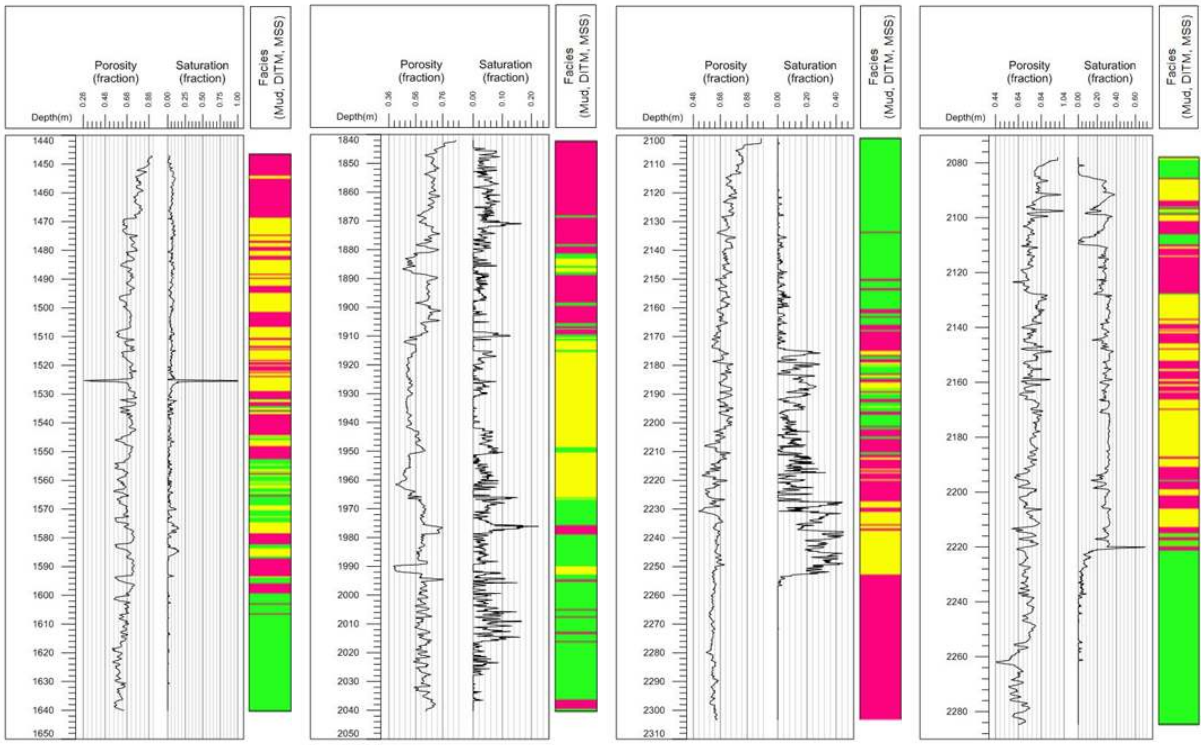
공극률 추정 자료는 밀도 검층 및 중성자 검층 자료, 지층의 입자 밀도, 공극수 밀도, 체적 밀도 사이의 관계를 이용하여 계산한 자료이고 가스하이드레이트포화율 추정 자료는 전기비저항 검층 자료를 점토의 영향에 대한 수정이 가능한 Connectivity Equation [14]으로 계산한 자료이다 [4]. 3차원 공간 물성 분포 추정을 위하여 선정된 입력 자료를 각 시추공별로 Fig. 1에 나타내었다. 사용된 입력 자료의 특성과 유효성을 확인하기 위한 히스토그램(histogram) 및 일변량 기술통계량은 Fig. 2와 같다.

3-2. 시추공 분석 자료의 입력 및 업스케일링

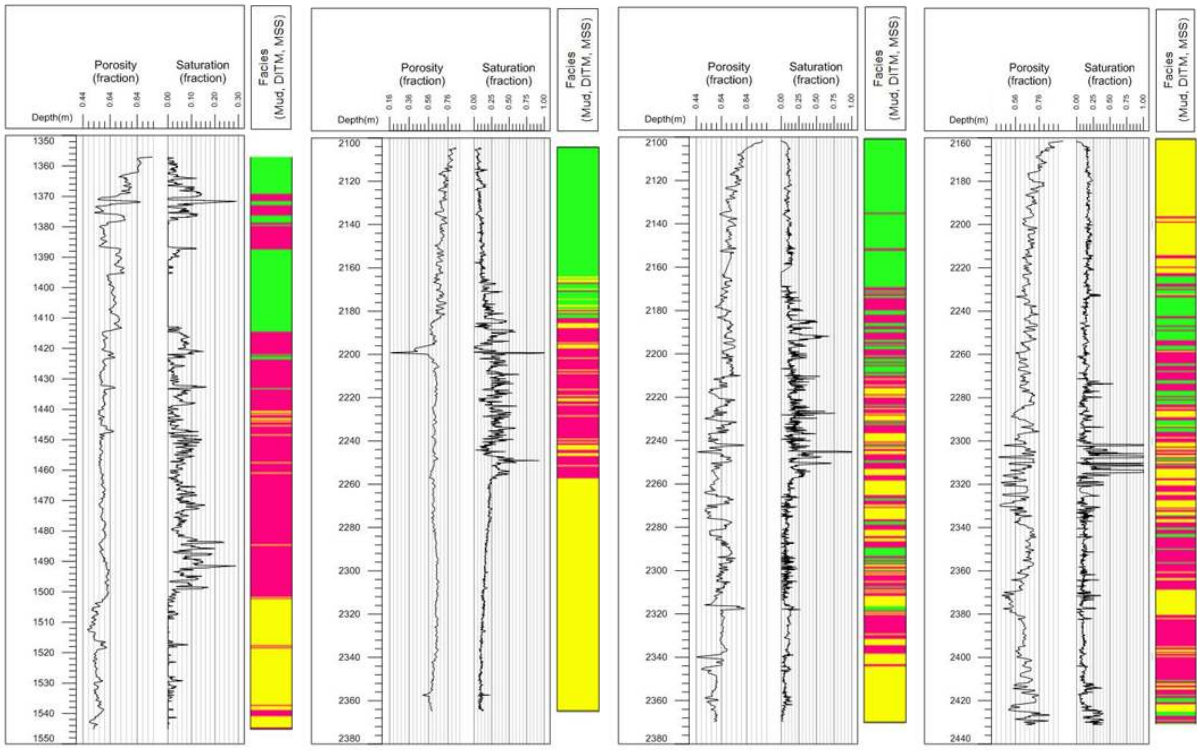
동해 울릉분지 가스하이드레이트 함유층의 3차원 공간 물성 분포 추정을 위하여 선정된 11개 시추공에 대한 퇴적상, 공극률, 가스하이드레이트포화율 추정 자료를 3차원 좌표로 구성된 격자 셀(cell)에 입력하였다(Fig. 3). 일반적인 물리검층 자료의 해상도는 약 10～20cm 내외로 자료의 수직 해상도가 매우 높다 [10]. 이 연구에서 활용한 시추공 분석 자료는 LWD 자료를 기반으로 하고 있으며 그 해상도는 약 10cm 이다. 따라서 지구통계학적 모델링을 위한 격자 셀에 가스하이드레이트 함유층의 퇴적상, 공극률, 가스하이드레이트포화율을 입력하기 위해서는 입력 자료의 업스케일링(up-scaling)이 필수적이다. 이를 위하여 먼저 시추공 분석 자료를 3차원 격자 셀의 해상도에 부합하도록 퇴적상을 업스케일링한 후, 업스케일링한 각 퇴적상에 대하여 공극률과 가스하이드레이트포화율 분석 자료를 업스케일링함으로써 퇴적상 경계를 따라 공극률과 가스하이드레이트포화율 자료가 훼손되는 것을 방지하였다(Fig. 4) [10].

3-3. 지구통계학적 모델 생성

퇴적상은 가스하이드레이트 함유층 모델을 구성하는 필수 요소로, 11개의 UBGH 시추공에 대하여 퇴

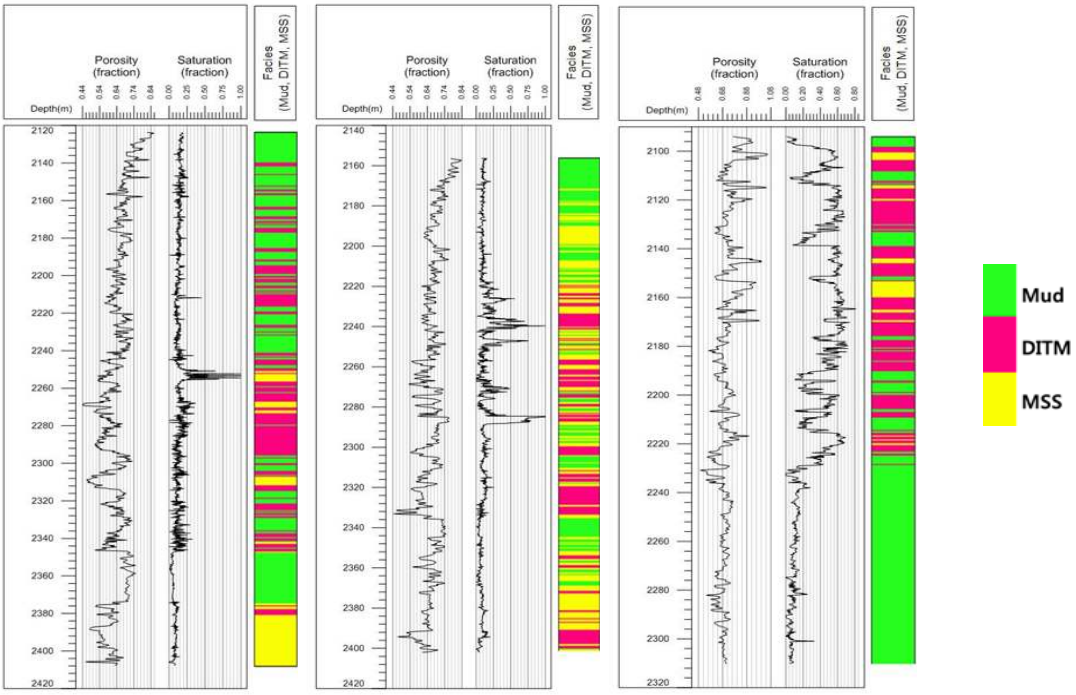


(a) UBGH1-1 (b) UBGH1-4 (c) UBGH1-9 (d) UBGH1-10



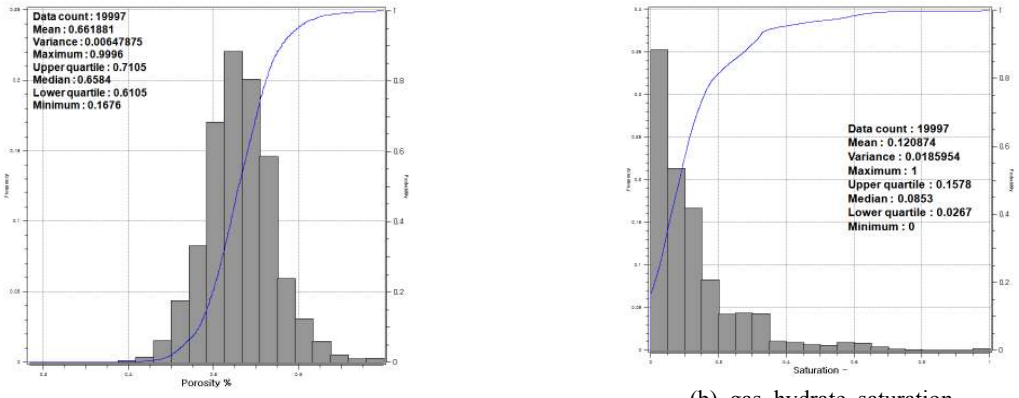
(e) UBGH1-14 (f) UBGH2-2-1 (g) UBGH2-2-2 (h) UBGH2-6

Fig. 1-1. Input data for 3D sedimentary facies, porosity and gas hydrate saturation modeling.



(i) UBGH2-9 (j) UBGH2-10 (k) UBGH2-11

Fig. 1-2. Input data for 3D sedimentary facies, porosity and gas hydrate saturation modeling.



(a) porosity (b) gas hydrate saturation

Fig. 2. Input data for 3D sedimentary facies, porosity and gas hydrate saturation modeling.

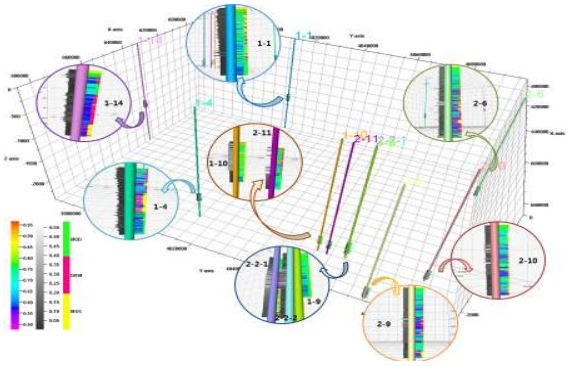
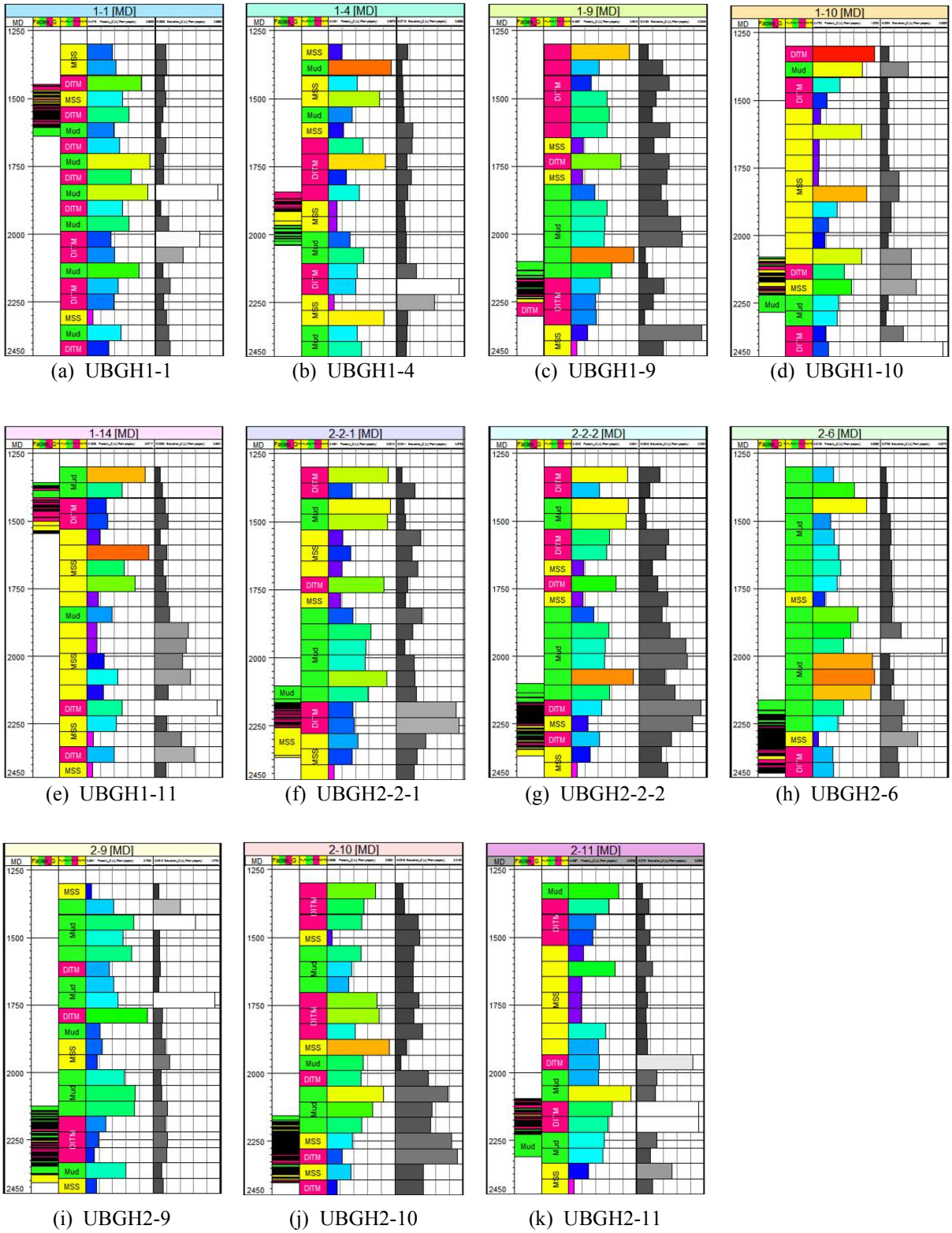


Fig. 3. 3D well location with input sedimentary facies, porosity, and gas hydrate saturation.



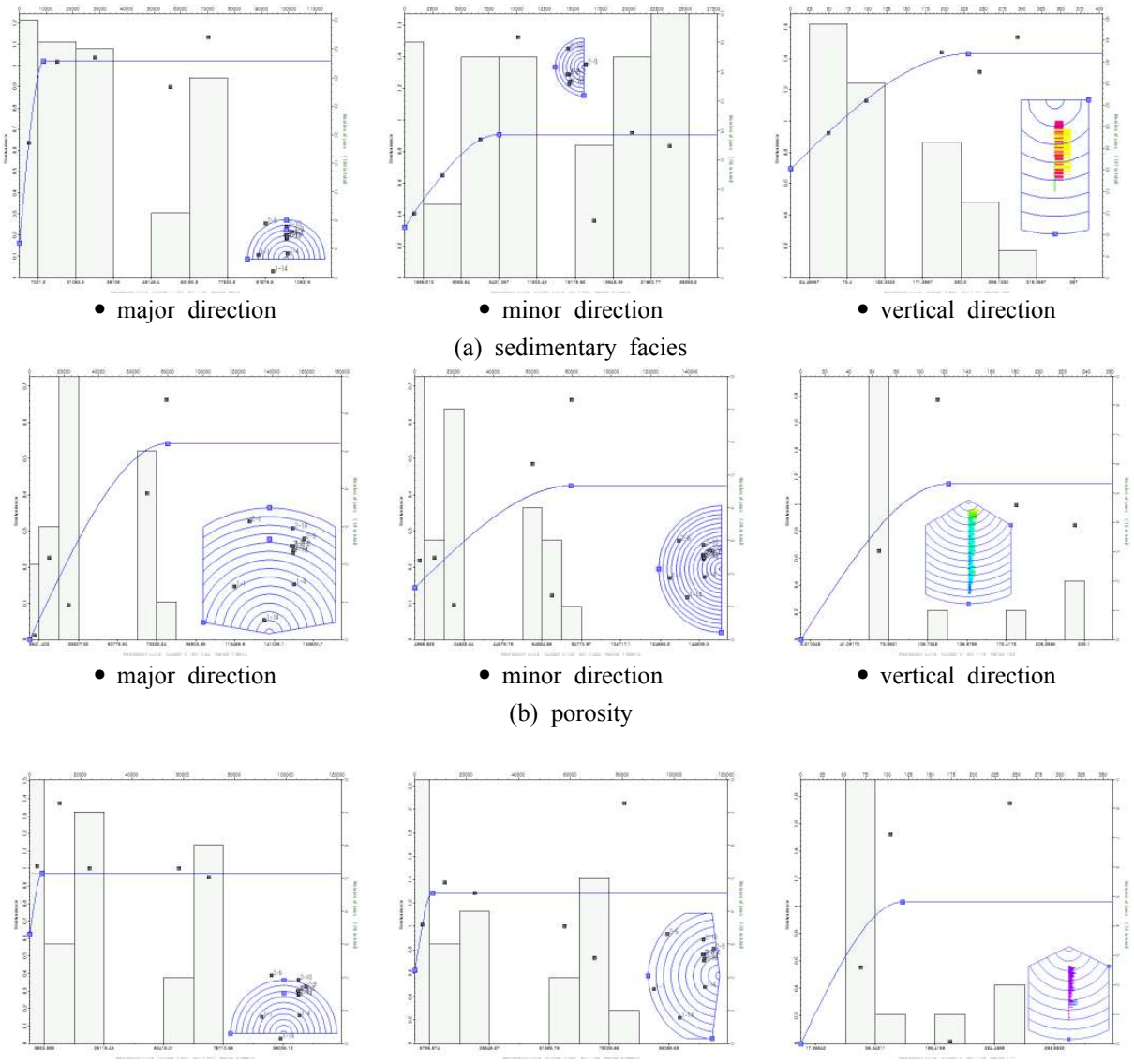
(a) UBGH1-1 (b) UBGH1-4 (c) UBGH1-9 (d) UBGH1-10

(e) UBGH1-11 (f) UBGH2-2-1 (g) UBGH2-2-2 (h) UBGH2-6

(i) UBGH2-9 (j) UBGH2-10 (k) UBGH2-11

Fig. 4. Scale-up process of input data to the cells in the 3D grid.

적상 추정 자료의 공간적 상호 관계와 연속성을 확인하기 위해서 베리오그램 분석을 수행하였다. 베리오그램으로 공간적 변화를 조사한 결과, 방향에 따라 분석값이 다르게 나타나는 이방성 모델로 판단되고 너깃이 있는 구형(spherical) 모델로 결정하였다(Fig. 5(a)). 이를 바탕으로 SIS를 수행하여 퇴적상의 3차원 공간 물성 분포를 추정하고 지구통계학적 모델을 생성하였으며 각 층별로 퇴적상 분포 추정 결과를 확인하고자 개별 층으로도 도시하였다(Fig. 6). 가스하이드레이트 함유층의 공극률과 가스하이드레이트포화율도 베리오그램 분석을 수행하였다. 실험적 베리오그램을 계산하고 이를 대표할 수 있는 이론적 베리오그램 모델링을 수행한 결과 공극률의 경우 너깃이 없는 구형 모델, 가스하이드레이트포화율은 너깃이 있는 지수 모델로 결정되었다(Fig. 5(b); Fig. 5(c)). 베리오그램 분석 결과, UBGH 시추공 분석 자료를 이용하여 계산한 실험적 베리오그램과 사용한 자료의 특성을 대표할 수 있는 이론적 베리오그램 간에 다소



• major direction • minor direction • vertical direction

(a) sedimentary facies

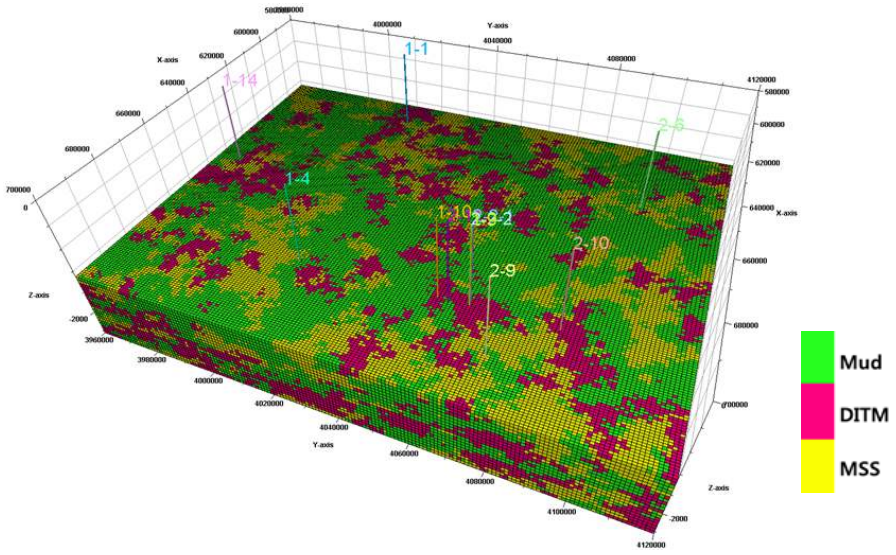
• major direction • minor direction • vertical direction

(b) porosity

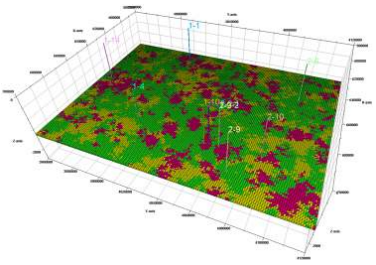
• major direction • minor direction • vertical direction

(c) gas hydrate saturation

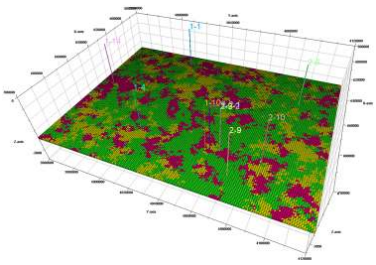
Fig. 5. Variogram analysis for 3D sedimentary facies, porosity and gas hydrate saturation modeling.



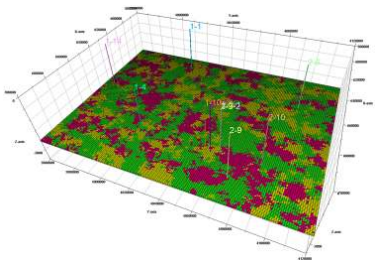
(a) 3D sedimentary facies model



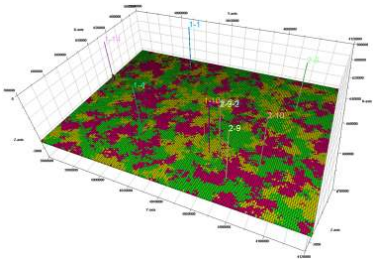
(b) 3D sedimentary facies model



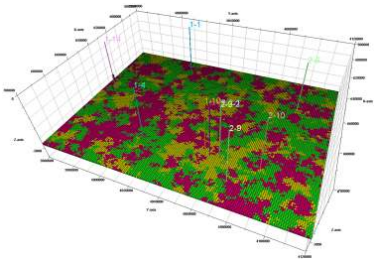
(c) layer 4



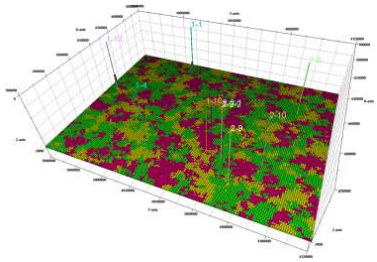
(d) layer 6



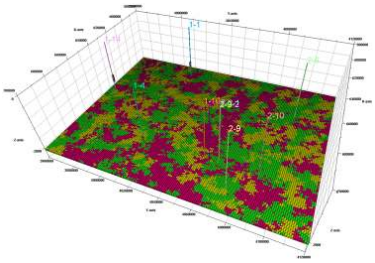
(e) layer 8



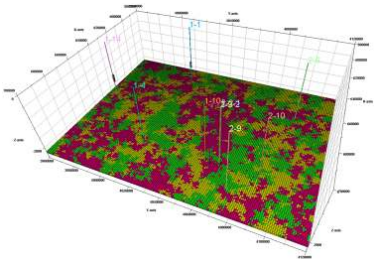
(f) layer 10



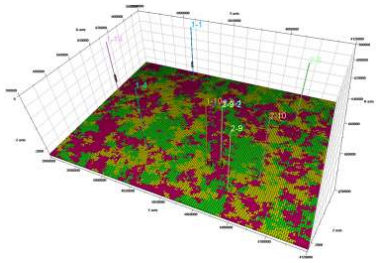
(g) layer 12



(h) layer 14

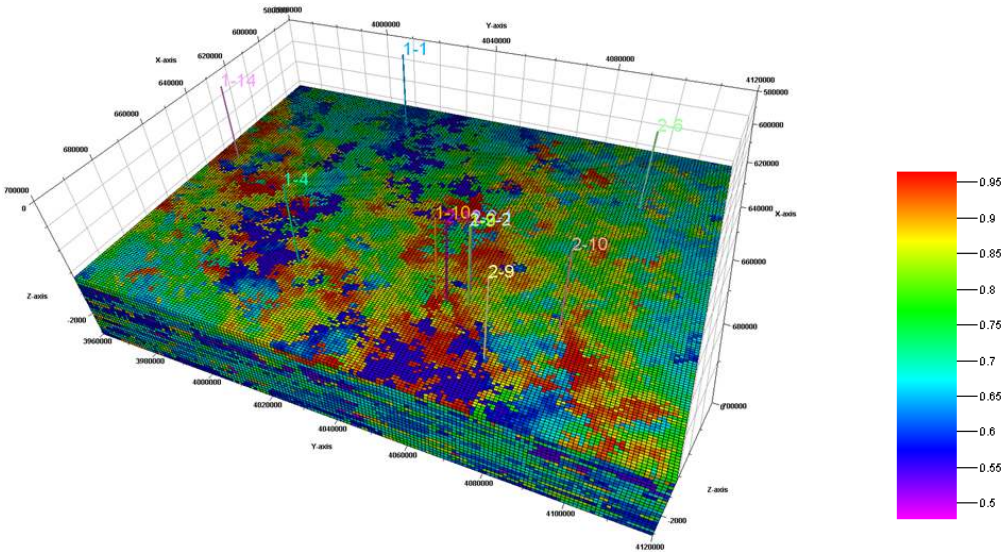


(i) layer 16

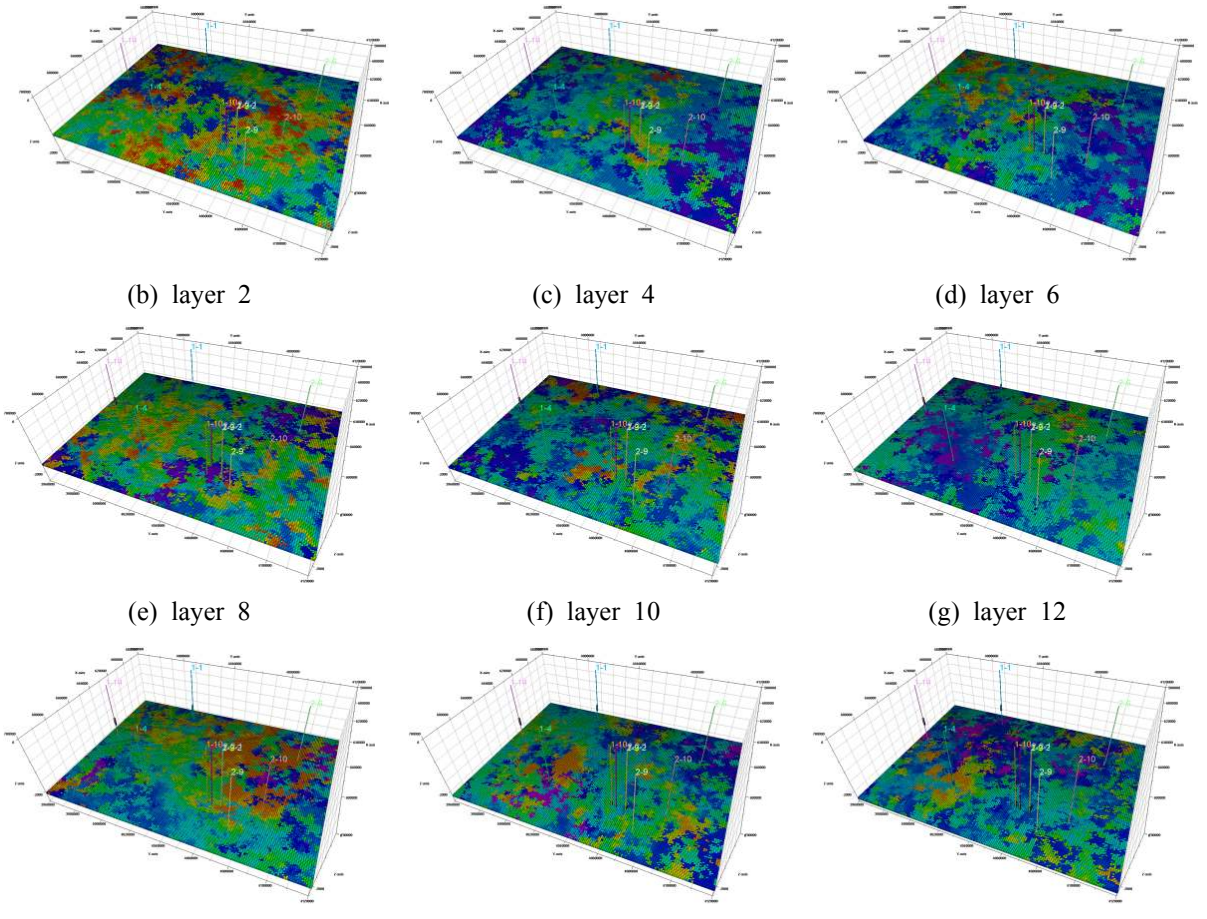


(j) layer 18

Fig. 6. 3D sedimentary facies modeling results.



(a) 3D porosity distribution

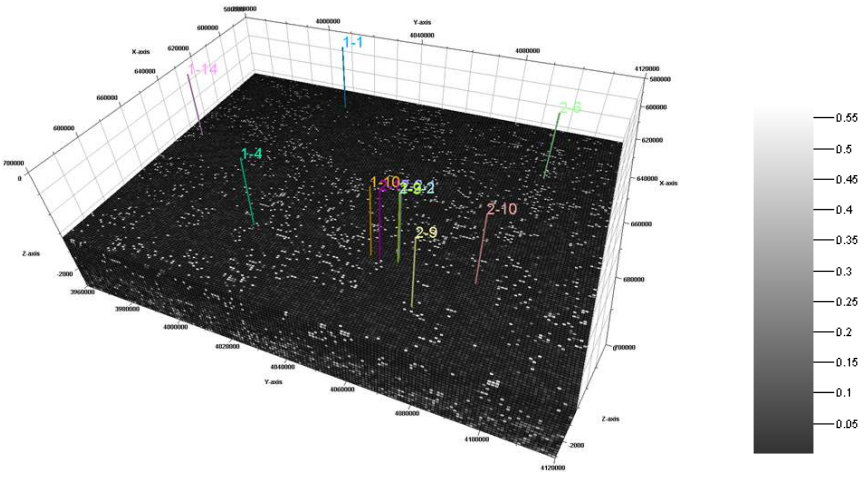


(b) layer 2 (c) layer 4 (d) layer 6

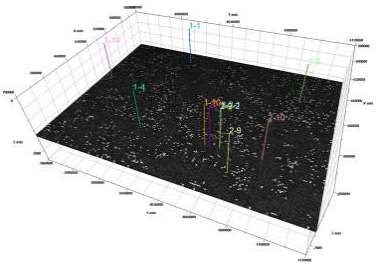
(e) layer 8 (f) layer 10 (g) layer 12

(h) layer 14 (i) layer 16 (j) layer 18

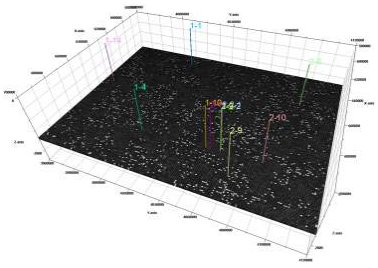
Fig. 7. 3D sedimentary facies modeling results.



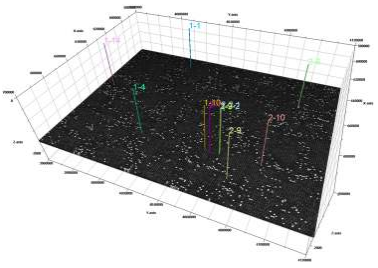
(a) 3D gas hydrate saturation distribution



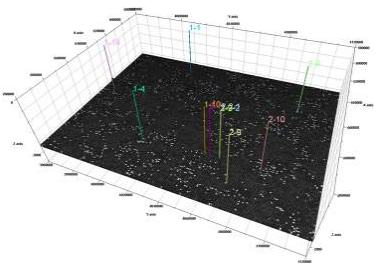
(b) layer 2



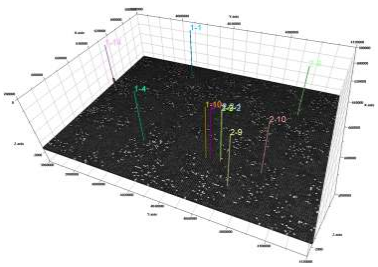
(c) layer 4



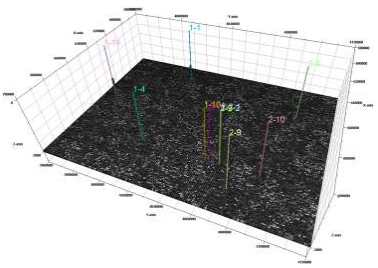
(d) layer 6



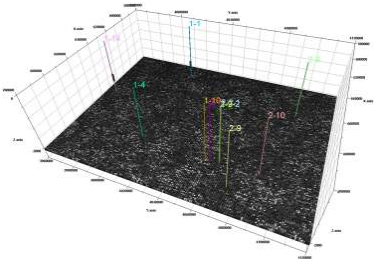
(e) layer 8



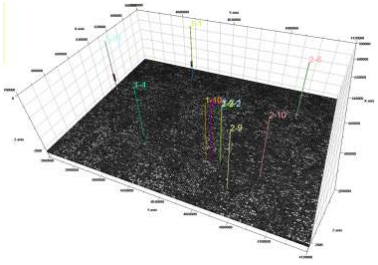
(f) layer 10



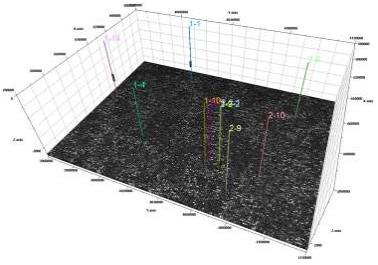
(g) layer 12



(h) layer 14

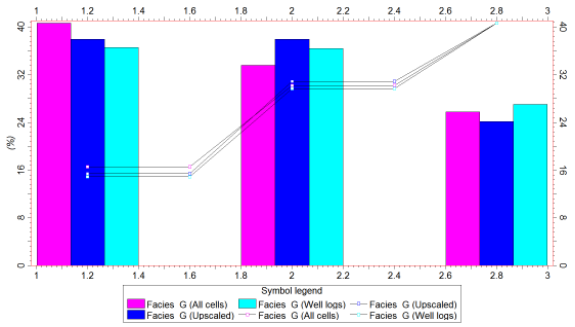


(i) layer 16

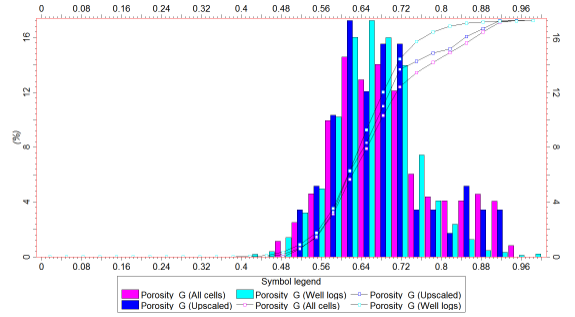


(j) layer 18

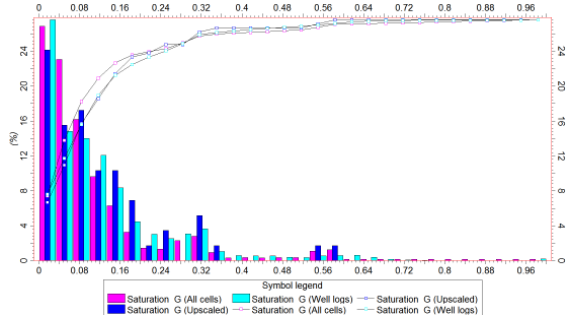
Fig. 8. 3D gas hdrate saturation modeling results



(a) sedimentary facies



(b) porosity



(c) gas hydrate saturation

Fig. 9. Statistical check of the raw well data, scaled up data and 3D modeling data

차이가 확인되었다. 이는 동해 울릉분지 가스하이드레이트 함유층 분석 대상 지역이 광역적인 것에 비하여 가용할 수 있는 UBGH 시추공 분석 자료의 수가 제한적이기 때문이며 추가 시추를 통하여 UBGH 시추공 분석 자료가 늘어난다면 보다 개선된 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

생성한 3차원 퇴적상 공간 물성 분포 모델을 기반으로 SGS를 통하여 공극률과 가스하이드레이트포화율의 공간 물성 분포를 추정하고 3차원 지구통계학적 모델을 생성하였다. 이 역시 각 층별로 공극률과 가스하이드레이트포화율의 공간 분포 추정 결과를 확인하기 위하여 개별 층에 대한 공간 물성 분포 결과도 함께 도시하였다.(Fig. 7; Fig. 8). 생성한 3차원 공간 물성 분포 모델의 적절성 검사를 위하여 히스토그램을 분석한 결과, 3차원 격자 셀에 할당된 자료의 분포와 UBGH 시추공 분석 자료 및 업스케일링 후의 자료 분포 간의 이원 양상이나 불연속성이 발견되지 않았다(Fig. 9). 생성한 3차원 퇴적상, 공극률, 가스하이드레이트포화율 공간 물성 분포 추정 모델에서 대체로 2차 시추 지역 부근이 가스하이드레이트 해리 징후와 관련된 퇴적상인 DITM과 MSS 퇴적상이 많이 분포하는 것을 확인할 수 있다. 추후에 UBGH1-4, UBGH1-9, UBGH1-10과 같이 지질학적인 해석과 분석이 이루어진 퇴적상 자료를 가용할 수 있다면 보다 신뢰성 있는 공간 물성 분포 추정이 가능할 것으로 사료된다.

4. 결 론

이 연구에서는 동해 울릉분지 1, 2차 시추 지역 중 가스하이드레이트 함유층의 퇴적상, 공극률, 가스하이드레이트포화율을 추정한 11개 시추공을 선정하고 수직 방향으로만 물성 분포 추정이 한정된 것을 수평 방향의 물성 분포까지 확장하여 고려하고자 하였다. 이를 위하여 시추공별 물성 추정 자료에 대하여 베리오그램 분석을 수행하고 공간적 연속성을 확인하였다. 순차지표시뮬레이션으로 가스하이드레이트 함유층 내 퇴적상에 대한 3차원 공간 물성 분포 모델을 생성하였고 순차가우스시뮬레이션으로 공극률과 가스하이드레이트포화율에 대한 3차원 공간 물성 분포 모델을 생성하였다. 1, 2차 시추 지역이 포함된 공간 물성 분포의 추정 대상 지역이 광범위한 것에 비하여 가용 UBGH 시추공 분석 자료가 제한적인 것에 기인한 실험적 베리오그램과 이론적 베리오그램의 차이가 나타났다. 이는 추가적인 시추가 이루어져 가용할 수 있는 UBGH 시추공 분석 자료 수가 증가한다면 더욱 개선된 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

생성한 3차원 지구통계학 모델을 통하여 가스하이드레이트 함유층 내의 퇴적상, 공극률, 가스하이드레이트포화율의 공간적인 분포 양상을 파악한 결과 2차 시추 지역에 가스하이드레이트 해리 징후와 관련된 퇴적상인 MSS와 DITM이 비교적 많이 분포하고 있음을 확인하였다. 또한 비교적 유동성이 양호할 것으로 판단되는 MSS 퇴적상과 가스하이드레이트포화율

의 공간적인 분포 양상을 확인할 수 있다. 이 연구에서 제시한 불균질성을 고려한 가스하이드레이트 함유층의 3차원 공간 물성 분포 모델은 가스하이드레이트 생산 시뮬레이션 시 전산 수치 모델의 입력 자료 구성을 위한 정량적인 기초 물성 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

사용 기호 및 아래 첨자

a	:	range
h	:	separation distance
N	:	number of data pairs
V	:	data value
γ	:	semi-variogram
x	:	x direction
y	:	y direction
z	:	z direction

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 “가스하이드레이트 개발생산연구”의 위탁연구의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Collett, T. S.: “Energy resource potential of natural gas hydrates”, AAPG Bulletin, Vol. 86, 1971-1992, (2002).
2. 허대기: “가스하이드레이트 기술개발 현황”, 한국지구시스템공학회지, 제42권 3호, 206-213, (2005).
3. 서광원, 임종세: “가스하이드레이트 퇴적층 물성 추정 소프트웨어를 이용한 울릉분지 시추공 자료 해석”, 에너지공학, 제21권 1호, 55-67, (2012).
4. 신효진, 임종세, 김세준: “동해 울릉분지 2차 시추지역 물리검층과 코어분석 자료를 이용한 가스하이드레이트 퇴적층 공극률 및 포화율 추정”, 한국지구시스템공학회지, 제49권 2호, 175-185, (2012).
5. 한국지질자원연구원: “가스하이드레이트 심부시추 시료 분석 및 안정성·지질재해 연구”, 지식경제부, (2008).
6. Lee, S. R., Kim, D. S., Ryu, B. J., Bahk, J. J., Yoo, D. G., Kim, G. Y., Lee, J. Y., Yi, J. S., Collett, T. S., Riedel, M., and Torres, M. E.: “Recent Developments of Gas Hydrate Program in Korea: Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition 2”, Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates, (2011).
7. Holland, M., Schultheiss, P., Roberts, J., and Druce, M.: “Observed gas hydrate morphologies in marine sediments”, Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates, (2008).
8. 김대하: 동해 울릉분지 가스하이드레이트 산출형태와 퇴적물 특성의 관계, 석사학위 논문, 충남대학교, 대전, (2012).
9. Chough, S. K., Lee, H. J., and Yoon, S. H.: “Marine geology of Korean seas(2nd edition)”, Elsevier, Amsterdam, 313, (2000).
10. 이동건, 서광원, 임종세: “시추공 분석 자료를 이용한 캐나다 Leismer Field 오일샌드 저류층의 3차원 지구통계학적 모델링”, 한국지구시스템공학회지, 제48권 6호, 687-700, (2011).
11. 임종세, 최용근, 김태혁: “지구통계학적 기법을 이용한 터널 주변 암반물성의 3차원 공간정보 모델링”, 한국암반공학회 춘계학술발표회 발표논문집, 157-165, (2004).
12. Lim, J.-S., Kang, J.M., and Kim, J.: “Multivariate Statistical Analysis for Automatic Electrofacies Determination with Well Log Measurements”, SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, 109-113, (1997).
13. 유현종, 임종세, 김세준: “퍼지군집분석을 이용한 암석물리학상 추정 연구”, 한국지구시스템공학회지, 제46권 4호, 424-430, (2009).
14. Montaron, B.: “Connectivity theory–A new approach to modeling Non-Archie rocks”, SPWLA 49th Annual Logging Symposium, (2008).