

캐나다 앨버타 상부 데본기 Grosmont층의 불연속면 구조 특성 Characteristics of Fracture System of the Upper Devonian Grosmont Formation, Alberta, Canada

엄정기¹⁾, Jeong-Gi Um, 김민성²⁾, Minsung Kim, 조석주³⁾, Suk-Joo Choh

¹⁾ 부경대학교 에너지자원공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Energy Resources Engineering, Pukyong National University

²⁾ 부경대학교 에너지자원공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Energy Resources Engineering, Pukyong National University

³⁾ 고려대학교 지구환경과학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Earth and Environmental Sciences, Korea University

SYNOPSIS : The Upper Devonian Grosmont Formation in Alberta, Canada reserves an estimated 50 billion cubic meters of bitumen and possess about 1/6 of the total bitumen resources in northern Alberta. However, unlike the overlying Athabasca oil sands, non conventional bitumen resources has not been developed as yet. The carbonate rocks of Grosmont Formation have been subject to various stages of diagenesis, including dolomatization and karstification with a strong effect on the distribution of porosity and permeability, which resulted in highly heterogeneous reservoirs. An extensive fracture logging and mapping was performed on total of six boreholes located in the study area to explore the characteristics of fracture geometry system and the subsurface structures of carbonates reservoir that holds bitumen. Fractal dimension was used as a measure of the statistical homogeneity of the fractured rock masses. The applicability of random Cantor dust, D_c , as a fractal parameter was examined systematically. The statistical homogeneity of fractured carbonates rock masses was investigated in the study area. The structural domains of the rock masses were delineated depthwise according to estimated D_c . The major fracture orientation was dominated by horizontal beddings having dip of 0-20°. Also, fractures having high dip angles existed with relatively low frequency. Three dimensional fracture network modeling for each structural domain has been performed based on fracture orientation and intensity, and some representative conceptual models for carbonates reservoir in the study area has been proposed. The developed subsurface conceptual models will be used to capture the geomechanical characteristics of the carbonates reservoir.

Key words : Grosmont Formation, bitumen, fractured rock masses. structural homogeneity, fracture network.

1. 서 론

캐나다 앨버타 지역의 상부 데본기 Grosmont층은 약 500억 m^3 의 비투맨이 존재하는 것으로 추정되며

이는 북부 앨버타 전체 비투맨 자원의 상당량(약1/6)을 차지한다(Buschkuehle et al., 2007). Grosmont층 상부에 피복된 Athabasca 오일샌드와는 달리 비재래형 에너지원인 비투맨은 아직 개발의 초기단계이며 최근에 이에 대한 경제적 가치를 인식하고 연구가 활발하게 이루어지고 있는 실정이다. Grosmont층의 탄산염암은 공극율과 투수율에 지대한 영향을 미치는 돌로마이트화 및 카르스트화 작용을 포함한 다양한 단계의 숙성작용을 거친 결과 구조적으로 매우 이질적인 저류층을 이룬다. 이와 같은 저류층의 공학적 특성은 무결암(intact rock)의 수리·역학적 특성에 의해서도 좌우되지만 암반 내에 존재하는 절리, 단층, 파쇄대, 층리 등과 같은 불연속면에 의해서 큰 영향을 받는다. 따라서 불연속암반의 구조적 특성에 대한 확고한 이해는 저류암에 대한 효과적인 평가 및 탄화수소 자원의 개발에 있어서 매우 중요한 요소이다.

일반적으로 단층, 전단대 및 암맥과 같은 대규모 불연속면의 특성은 확정적(deterministic) 선구조(linear structure)로 취급할 수 있다. 반면에 상대적으로 크기가 작은 불연속면과 같이 기하학적 변동성(variability)이 큰 소규모 불연속면의 특성은 확정적으로 해석하기 어려움으로 인하여 추계론적 과정(stochastic process) 또는 통계적 기법이 이용되고 있다. 대규모 불연속면은 개별적 특성이 공학적 판단에 있어서 중요한 요소로 작용하지만, 소규모 불연속면은 개개의 특성보다 전체적인 분포특성이 더욱 중요시 된다. 본 연구는 대규모 불연속면 보다 기하학적으로 변동성이 큰 소규모 불연속면의 분포특성에 중점을 두고 있다. 본 연구의 목적은 연구지역(그림 1)에서 비투맨을 함유한 탄산염암 저류층의 지반구조 및 균열/미시구조의 특성을 파악하고 균열대 모델을 구상화하는 것이며 이를 위하여 총 6개의 시추공에서 불연속면에 대한 로깅 및 맵핑이 수행되었다. 불연속암반의 통계적 동질영역 구분을 위한 기준으로 공간적 기하형태를 정량적으로 표현할 수 있는 프랙털차원을 적용하였다. 구분된 동질 지구구조에 대하여 불연속면의 방향성과 빈도수가 고려된 삼차원 지반구조 모델링을 수행하고 연구지역에 분포하는 탄산염암 저류층의 지반구조를 대표할 수 있는 개념모델(conceptual models)을 제시하였다.

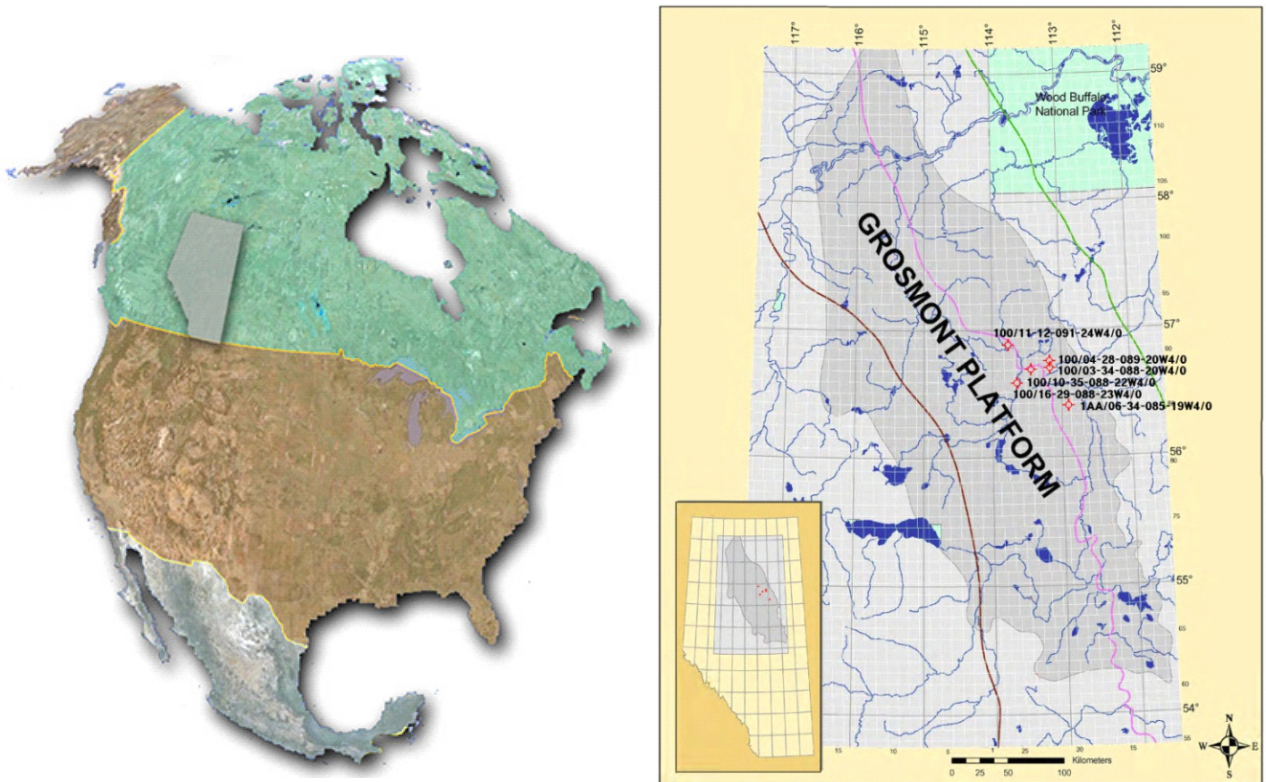


그림 1. 캐나다 앨버타에 위치한 Grosmont 저류층

2. 랜덤칸터더스트에 의한 동질 지구조구 구분

불연속면의 네트워크 구조는 지질 또는 응력 조건의 공간적 변화에 따라 다르게 형성된다. 현재 대부분의 경우 연구자의 정성적인 판단에 의하여 임의의 주위 구간에 대한 불연속면 자료를 바탕으로 한 암반 구조해석이 주를 이루고 있으며, 이에 따른 해석 결과가 대상 암반의 구조적 특성을 심도 있게 표현하지 못하는 경우가 많다. 따라서 암반 내에서 불연속면계의 변화 양상을 반영하는 공학적 지구조구의 설정이 선행 되어야하며, 구분된 지구조구에 대한 암반구조해석이 개별적으로 이루어져야 한다. 그러나, 지구조구를 설정하기 위한 구분기준을 확정적으로 도출하기에는 어려움이 많으며, 변동성을 수반하는 불연속면계의 특성을 감안할 때 통계적 동질성(statistical homogeneity)의 개념이 정량적 구분기준으로 적용되어야 한다(Miller, 1983; Mahtab and Yegulalp, 1984).

통계적 동질성은 설정된 지구조구 내에서 암반의 구조적 특성이 통계적으로 유사함을 의미한다. 예를 들어 시추공의 심도에 따라 서로 인접한 구간에서 각각 측정된 불연속면군 개수와 산정된 방향분포가 서로 상이하게 나타난다면, 통계적 동질성이 결여되었다고 볼 수 있으며, 인접한 구간은 서로 다른 통계적 동질구역으로 구분되어야 한다. 현재까지 대상지역에 대한 공학적 지구조구를 구분하는 방법으로 불연속면군의 개수 및 방향분포와 연구자의 경험적 판단에 기초한 지구조구 구분법(Kulatilake et al., 1996; Miller, 1983; Mahtab and Yegulalp, 1984)이 주로 사용되고 있다. 완전한 의미의 통계적 동질 지구조구는 설정된 지구조구 내에서 불연속면의 방향성 이외에도 불연속면 빈도, 길이, 모양, 거칠기 및 역학적 특성 등이 통계적으로 유사함을 의미한다. 본 연구는 불연속암반의 구조적 특성 규명에 기초가 되는 지구조구 설정을 위하여 불연속면의 빈도수와 길이분포에 따른 밀집도를 고려할 수 있는 새로운 정량적 구분기준을 적용하였다.

시추공과 같은 1D 축선에 의한 불연속면 자료를 이용하여 불연속면의 밀집도를 고려한 통계적 동질 영역을 구분하는 기준으로 랜덤칸터더스트(Mandelbrot, 1983)를 사용할 수 있다. 그림 2에서 시발자(initiator; generation level 0)는 [0,1]의 단위 길이로 이루어져 있으며, 발생자(generator)는 시발자를 균등하게 3등분하여 이들 중 무작위로 하나를 선택하여 삭제한다(generation level 1). 발생자는 다시 남은 두 부분을 각각 3등분으로 균등 분할하여 그중 각각 하나를 무작위로 삭제하는 과정을 계속 반복하여, 그림에서와 같이 제 5 발생단계(generation level 5)에서 이미 작은 마디를 발생한다. 이와 같은 과정을 무한히 반복하면 무한개수의 점이 단위구간 내에 분포하게 되는데, 이를 랜덤칸터더스트라 한다. 랜덤칸터의 구성으로 형성된 프랙털 집합은 0에서 1 사이, 즉 비유클리드 차원인 0.xx의 프랙털 차원을 갖는다(Mandelbrot, 1983).

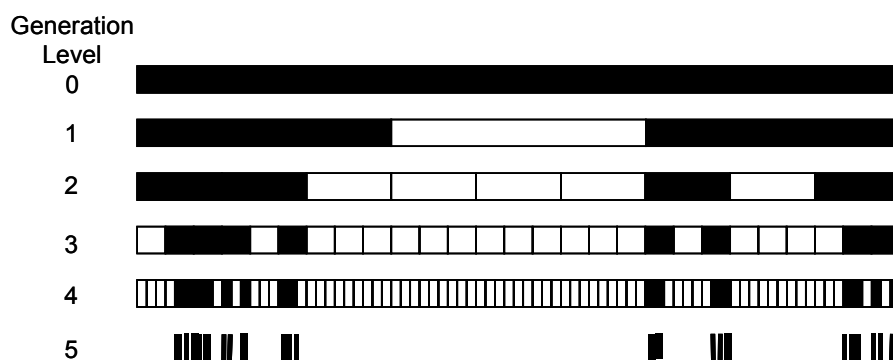


그림 2. 랜덤칸터더스트의 개념

이와 같은 랜덤칸터더스트의 프랙털 차원을 산장하기 위해서 다음과 같은 관계식을 사용할 수 있다.

$$N(X) \propto X^{-D_c} = C X^{-D_c} \quad (1)$$

여기서 C 는 비례상수이고 D_c 는 랜덤센터더스트의 프랙털 차원이며, $N(X)$ 는 랜덤센터더스트를 이루는 구간 내에서 임의의 길이 X 보다 긴 점들 사이의 간격의 개수이다. 식 (1) 으로부터 $\ln(N(X))$ vs. $\ln(X)$ 관계를 그래프에 도시한 후 선형회귀분석을 통하여 선형성을 확인하고 D_c 를 산정할 수 있다. 이와 같은 이론을 시추공 상에서 밀집도가 고려된 불연속면 동질구간을 정량화 하는데 도입하면, 식 (1) 에서 $N(X)$ 는 시추공 상에서 임의의 길이 X 보다 큰 간격 (spacing) 의 개수로 취급될 수 있다. 불연속면 간격이 조밀한, 즉, 밀집도가 높은 불연속 암반과 이에 비하여 밀집도가 낮은 불연속 암반에 대하여 D_c 를 산정하면 상대적으로 높은 값의 D_c 와 낮은 값의 D_c 로 구분된다.

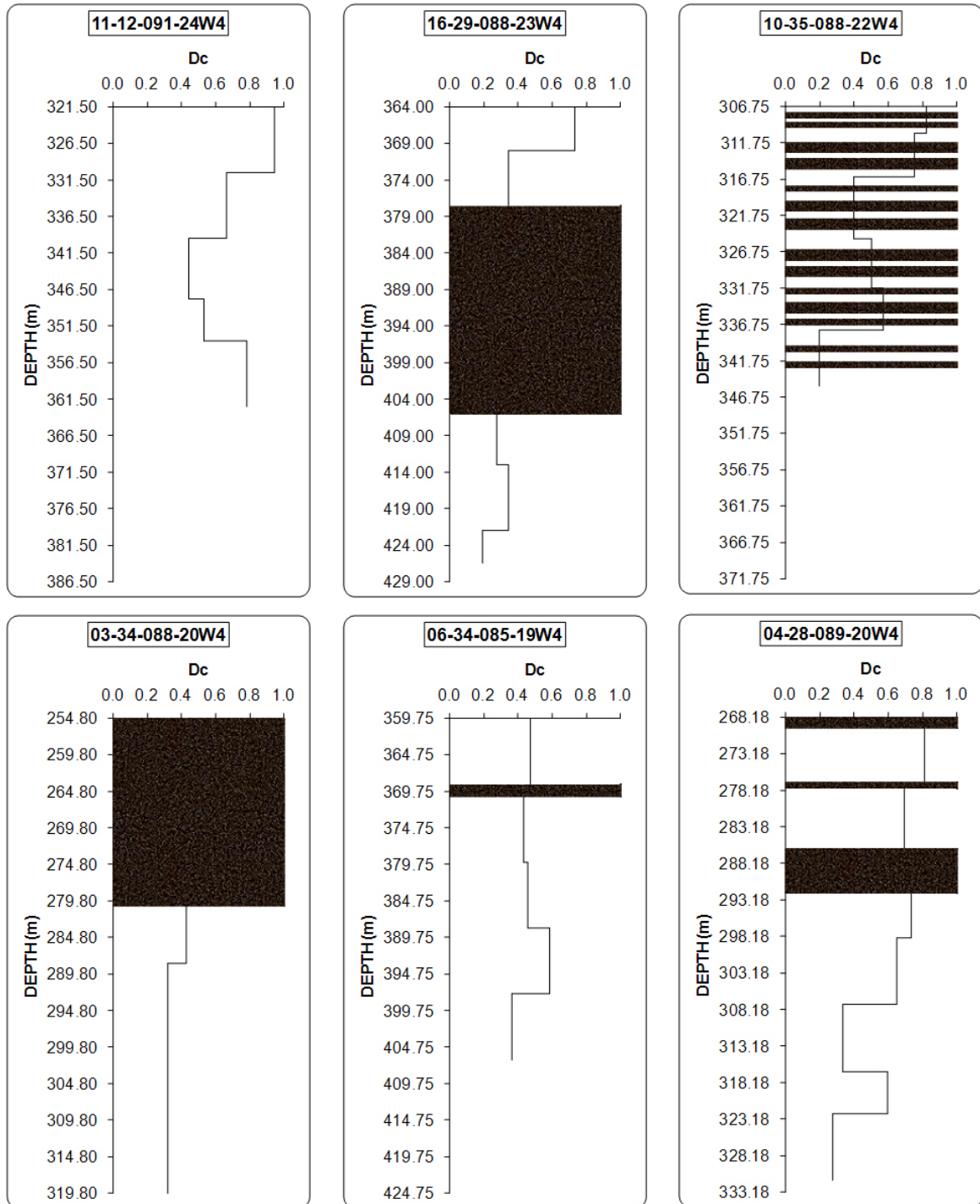


그림 3. 심도에 따른 D_c 의 변화

그림 3은 연구지역의 6개 시추공에서 심도에 따라 산정된 Dc의 변화를 보여준다. 랜덤센터더스트 기법을 이용하여 프랙털차원을 산정하기 위한 초기 시발자 X의 크기 7.4cm이며 X의 크기를 80%씩 줄이는 방식으로 다음 단계에서는 X의 크기가 5.9cm이다. 이와 같은 방법으로 총 8단계의 X크기를 고려하여 각 단계별로 X보다 큰 불연속면 간격의 개수를 기재한 후 $\ln(N(X))$ vs. $\ln(X)$ 의 선형성을 확인하고 기울기인 Dc를 산정하였다. 그림 3에 나타난 결과에서 어둡게 표시된 부분은 심한 파쇄대 구간으로 산정된 Dc 값이 최대값인 1에 가까운 영역이다. 이와 같은 구간은 불연속면의 밀집도가 매우 높은 지점으로 주로 돌로스톤에 협재된 세일의 파쇄대 구간과 카르스트화작용에 의해 형성된 구간을 포함한다. 파쇄대를 제외하면 16-29-088-23W4, 03-34-088-20W4, 06-34-085-19W4 시추공에서와 같이 Dc의 변화가 크지 않은 경우도 있지만 나머지 3개의 시추공에서와 같이 심도에 따라 달라지는 경우도 존재한다. 본 연구에서는 편의상 시추공 자료에 의해 산정된 Dc 값의 범위 따라 $0 < Dc < 0.4$, $0.4 < Dc < 0.7$, $0.7 < Dc < 1.0$ 로 동질 지구구조를 구분하였으며 각각의 지구구조가 경우에 따라 심한 파쇄대를 포함하는 경우를 고려하였다.

3. 불연속면의 통계적 모수 추정

불연속암반의 삼차원적 구조 특성을 구현함에 있어서 현장의 암반과 동일한 불연속면 연결구조를 구상화하는 것은 거의 불가능하다. 이에 는 암반에 포함된 불연속면의 변동성 및 불확실성(uncertainty) 때문이다. 선행 연구자들은 암반을 형성하는 기하학적 요소들에 대한 확률론적 해석을 통하여 삼차원 지반구조 모델을 통계적으로 구현하기 위한 연구를 수행하였다. 이에 는 노출 암반에 설치된 조사선(scanline), 조사창(window) 및 시추공에서 측정·기록된 불연속면 자료를 바탕으로 불연속면의 기하학적 모수(geometric parameter)를 추정하고, 암반의 삼차원 기하학적 특성을 추계론적으로 해석하는 기법이 주를 이룬다(Priest and Hudson, 1976, 1981; 송재준과 이정인, 2001; 류동우 외, 2002(a), 2002(b); Kulatilake et al., 1993, 1996, 2003). 이와 같이 삼차원 불연속면 연결구조를 추계론적 과정으로 모사하기 위해서는 삼차원 불연속면 빈도수와 불연속면 크기분포 및 방향분포가 필요하다. 본 연구에서는 제한된 시추공 정보로 인하여 기존의 이론적 방향분포를 사용할 수 없으며 경험적 방향분포(empirical orientation distribution)를 사용하였다. 경험적 방향분포는 기존의 이론적 확률분포에 의해 해석될 수 없는 불연속면군에 대한 방향분포 모델링을 위하여 로깅 자료에 근거하여 연구자의 판단에 의한 방향분포이다. 연구지역에서 불연속면의 주 방향성은 탄산염암의 수평 층리에 의한 것으로 0-20°의 경사를 갖으며, 60° 이상의 고각의 불연속면이 상대적으로 매우 낮은 비율로 존재한다.

지표에 노출된 암반으로부터 획득한 선형조사선이나 조사창조사 자료와 달리 시추공 자료는 불연속면의 삼차원 크기분포 모델에 필요한 불연속면 길이에 대한 정보를 제공하지 않는다. 따라서, 불연속면 길이분포에 대한 자료를 확보하기 위해서는 최소한 지표지질조사를 실시하여 대상 암반에 대한 불연속면 길이에 대한 분석이 병행되어야 한다. 본 연구에서는 대상 암반과 유사한 지질의 지층에서 확인된 불연속면 트레이스와 길이에 대한 제한적 정보를 사용하여 연구지역에 분포하는 불연속면 길이의 통계적 모수를 가정하였다. 기존에 수행된 지반구조 모델에 대한 현장적용에서 불연속면의 이차원적 길이분포와 이에 기초한 원관형 불연속면의 삼차원적 크기분포를 추정함에 있어서, 이차원적 불연속면 길이의 확률분포로서 감마분포가 가장 적합함을 밝힌바 있다. 본 연구에서도 이차원적 불연속면 길이분포를 추정함에 있어서 감마분포를 채택하였으며, 신뢰할만한 불연속면 길이 자료수의 부재로 인하여 본 연구지역에서 구분된 모든 불연속면군에 대하여 동일한 감마분포를 사용하여 길이분포를 추정하였다. 무한의 이차원적 노출면에서 산정된 불연속면 길이분포로부터 삼차원적 원관형으로 가정된 불연속면 크기분포를 도출하는 절차(Kulatilake and Wu, 1986)를 적용하여 본 연구지역에서 각각의 불연속면군에 대한 3-D 원관형 불연속면의 크기분포를 산정하였다.

불연속암반에서 불연속면 간격에 대한 정보는 삼차원 불연속면 빈도수를 추정하기 위한 필요조건이다. 불연속면의 방향성과 마찬가지로 자연 상에서 변동성과 불확실성이 내재된 불연속면 간격 역시 확정적으로 해석하는 것은 어려우므로 본 연구에서는 불연속면 간격을 확률변수로 설정하여 통계적 해석을 수

행하였다. 그림 4는 Dc에 의하여 구분된 지구조구에 해당하는 대표적인 코어사진으로 Dc의 증가에 따라 불연속면의 간격이 조밀해짐을 알 수 있다. 각각의 동질 구조구에 대하여 불연속면 간격에 대한 분석결과가 표 1에 수록되어 있다. 일반적으로 통계학에서는 연속확률변수에 대한 이론적 확률분포로 정규분포, 대수정규분포(log normal distribution), 음지수분포 및 감마분포를 주로 사용한다. 본 연구에서는 음의 값을 가질 수 없는 간격 자료의 특성을 고려하여 정규분포를 제외한 대수정규분포, 음지수분포 및 감마분포에 대한 χ^2 및 K&S 적합성 검정을 실시하고, 적용된 이론적 확률분포의 채택 여부와 더불어 최적의 확률분포를 도출하였다. K&S 적합성 검정은 χ^2 검정과 달리 확률변수의 누적분포와 적용하는 이론적 누적분포함수의 최대차를 이용하여 유의확률을 산정하는 것으로써 자료의 개수가 적어도 비교적 정확하게 검정 과정을 수행할 수 있는 장점이 있다. 표 1에 수록된 통계분석결과에서 음지수분포가 높은 p값을 나타내며 불연속면 간격에 대한 확률분포로 모두 적합한 것을 알 수 있다. 또한 연구지역에서 대부분의 탄산염암 저류층은 높은 빈도의 불연속면 개수를 갖는 것으로 분석되었다. 이는 불연속면에서 불연속면의 체적밀도가 평균법선 방향으로의 일차원 빈도수 및 크기의 함수임을 생각할 때 연구지역의 저류층에서는 불연속면을 따라 비투명의 함량이 높을 수 있음을 시사한다. 그림 5는 불연속면군에 대한 간격 자료의 히스토그램과 더불어 적용 가능한 이론적인 확률분포를 보여준다.

표1. 각 동질구조구에 대한 불연속면 간격분석 결과

Structural Domain	Fracture Set #	No. of Data	Mean (m)	Var (m ²)	Prob. Dist.	Chi-Sq Test		Kolmo-Smir Test	
						Chi _{stat}	P-value	K&S _{stat}	P-value
0.7<C<1.0	1	83	0.0723	0.0037	Exp.	25.012	0.6758	0.1334	>0.20
					Gamma	7.7831	0.6500	0.0636	>0.25
					LogNor.	7.5181	0.0053	0.0680	>0.20
	2	16	0.3424	0.2140	Exp.	2.375	0.305	0.2525	>0.05
					Gamma	N/A	N/A	N/A	N/A
					LogNor.	N/A	N/A	N/A	N/A
0.4<C<0.7	1	17	0.0866	0.0055	Exp.	10.619	0.4261	0.0811	>0.25
					Gamma	N/A	N/A	N/A	N/A
					LogNor.	5.4021	0.8628	0.0728	>0.25
	2	12	0.5686	0.0353	Exp.	0.3333	0.5637	0.2426	>0.15
					Gamma	N/A	N/A	N/A	N/A
					LogNor.	0.3333	0.5637	0.2239	>0.20
0.0<C<0.4	1	42	0.1190	0.0098	Exp.	4.0952	0.7687	0.1278	>0.15
					Gamma	N/A	N/A	N/A	N/A
					LogNor.	1.8095	0.9696	0.0836	>0.25
	2	6	0.5113	0.1537	Exp.	0.6667	0.4142	0.3787	>0.025
					Gamma	N/A	N/A	N/A	N/A
					LogNor.	N/A	N/A	N/A	N/A



(a) $0.0 < Dc < 0.4$

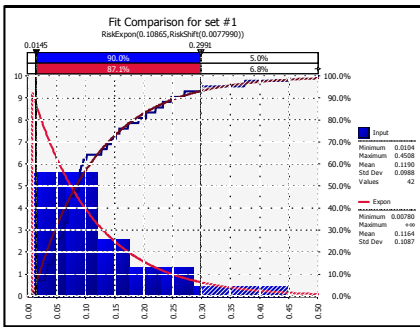


(b) $0.4 < Dc < 0.7$

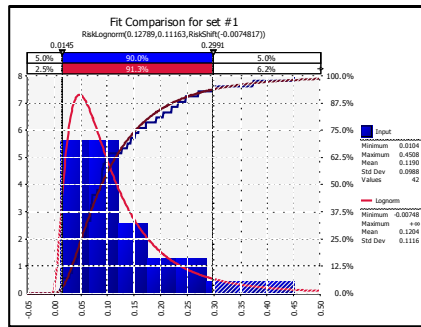


(c) $0.7 < Dc < 1.0$

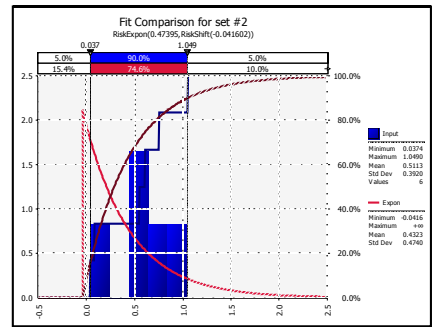
그림 4. 각 동질 구조구의 대표적인 코어 사진



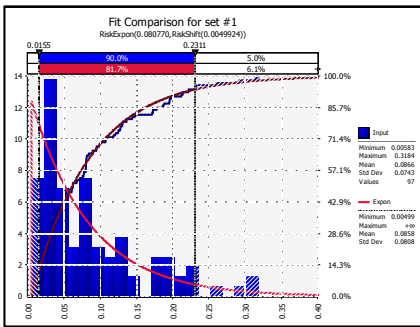
(a) $0.0 < Dc < 0.4$, Set #1 Exp.



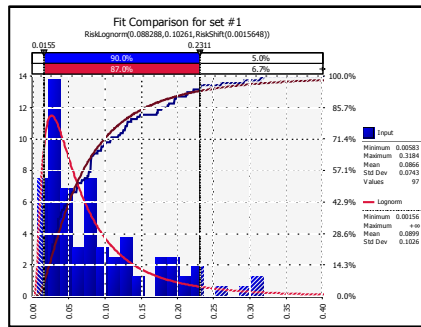
(b) $0.0 < Dc < 0.4$, Set #1 Gamma



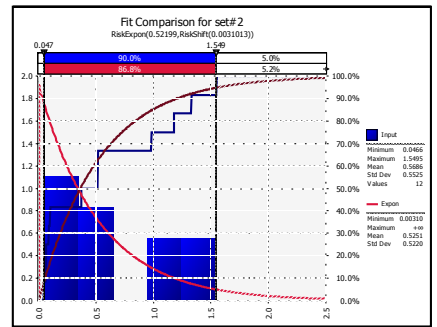
(c) $0.0 < Dc < 0.4$, Set #2 Exp.



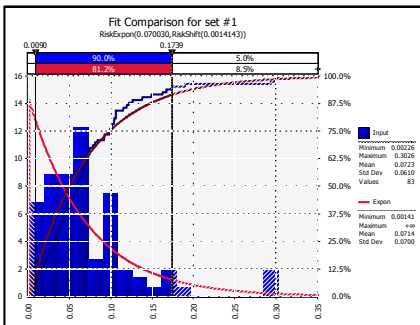
(d) $0.4 < Dc < 0.7$, Set #1 Exp.



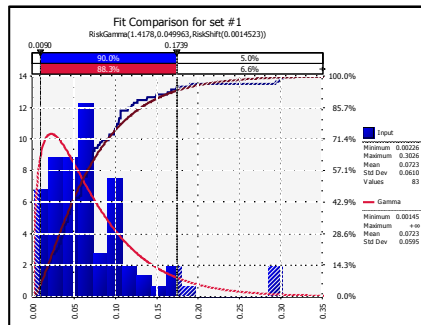
(e) $0.4 < Dc < 0.7$, Set #1 Gamma



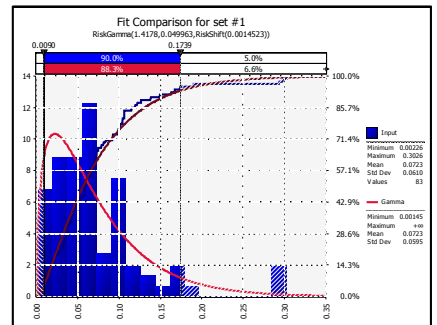
(f) $0.4 < Dc < 0.7$, Set #2 Exp.



(g) $0.7 < Dc < 1.0$, Set #1 Exp.



(h) $0.7 < Dc < 1.0$, Set #1 Gamma



(i) $0.7 < Dc < 1.0$, Set #2 Exp.

그림 5. 불연속면 간격으로 채택 가능한 확률분포

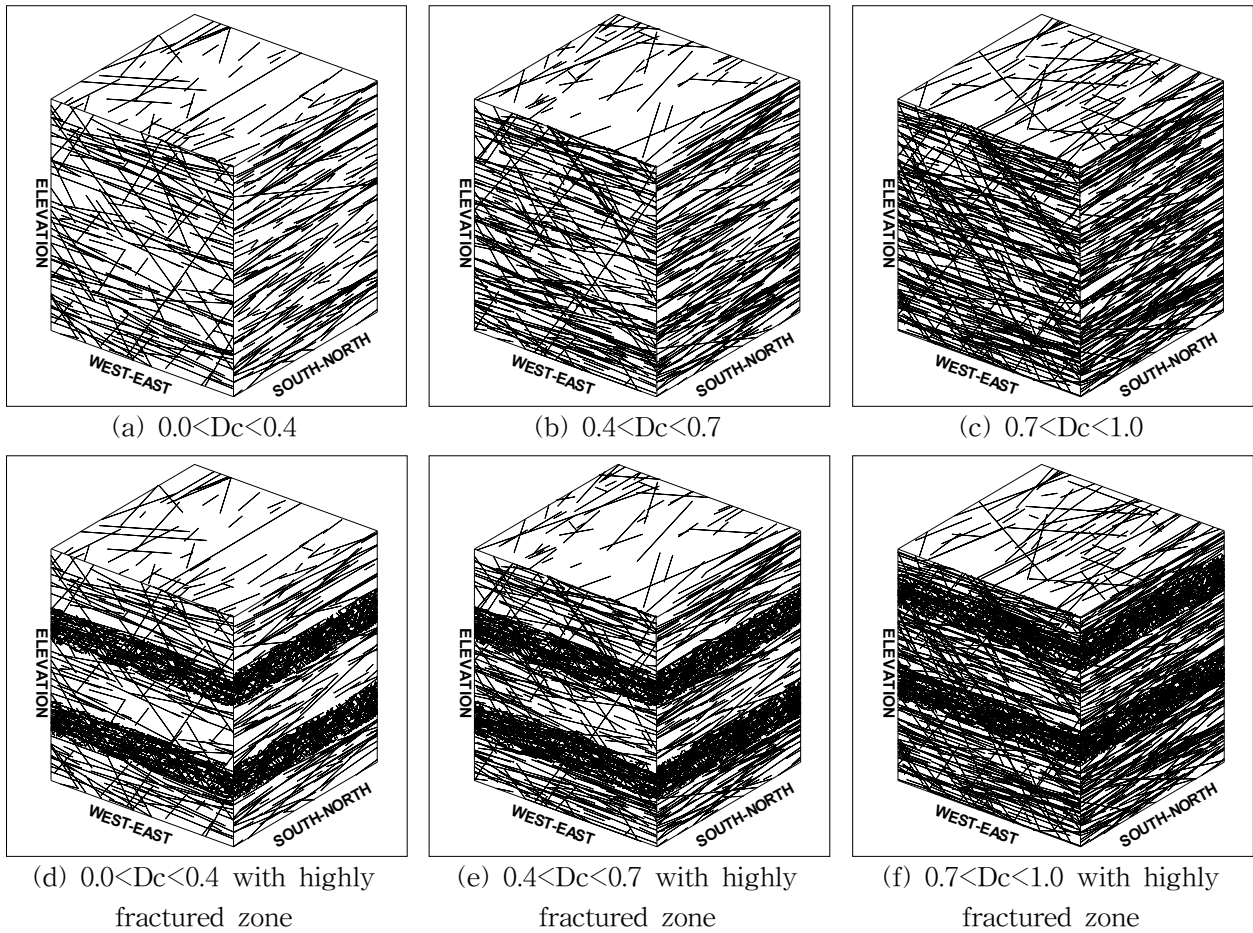


그림 6. 각 동질 지구조구에 대한 삼차원 지반구조의 개념모델

4. 삼차원 지반구조 모델

삼차원 지반구조를 구상화하기 위한 확률론적 해석 방법 중 가장 폭 넓게 사용되는 몬테칼로 모사기법은 불연속면의 방향분포, 간격분포, 연장성분포에 대한 확률밀도함수를 추정한 후 각 확률변수들로부터 난수를 발생시켜 확률밀도함수에 적용하여 삼차원 공간상에 불연속면을 생성 시키는 방법이다. 이를 위해 다음의 과정을 수행하였다: (1) 불연속면의 중심위치를 결정하기 위해 x, y, z 축에 대하여 각 불연속면 군에 대하여 포아송분포를 따르는 난수 R_x , R_y , R_z 를 발생 시키며, 이 때 발생시키는 불연속면 중심의 개수는 삼차원적 불연속면 빈도수에 기반한다; (2) 불연속면의 방향성을 결정하기 위해 현장의 방향 자료를 전체범위로 지정한 후, 방향 자료를 무작위로 선택하는 방식으로 불연속면의 수만큼 자료선택을 반복적으로 수행한다; (3) 불연속면의 중심위치와 불연속면의 방향이 결정된 후 원관형 불연속면의 크기를 결정하기 위해 감마분포를 따르는 난수를 발생 시킨다. 그림 6은 연구지역의 탄산염암 저류층 암반에서 랜덤캐터더스트 기법으로 구분된 동질 지구조구에 대하여 $10\text{m} \times 10\text{m} \times 10\text{m}$ 의 영역에 통계적 과정으로 구현한 삼차원 지반구조의 개념모델이다. 연구지역의 저류층에 대하여 제시된 지반모델은 수평층리에 의한 불연속면이 주를 이루고 상대적으로 낮은 비율의 고각의 불연속면이 존재하는 현장암반을 개념적으로 모사하는 데에 중점을 두었다. 그림에서 불연속면의 삼차원적 간격은 D_c 가 증가할수록 조밀해짐을 알 수 있다. 또한 그림 6 (d), (e), (f)는 세월층 또는 슈라기 후기에서 백악기 초기에 발생한 카르스트화 작용으로 인하여 균열대가 발달하고 모암에서 공극률과 투수율의 증가가 일어난 지층이 협제한 것을 구상화한 것이다. 이러한 지반모델은 향후 연구지역의 탄산염암 저류층에 대한 암반역학적 특성을 연구하는 데에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

Grosmont층의 탄산염암은 공극율과 투수율에 지대한 영향을 미치는 돌로마이트화 및 카르스트화 작용을 포함한 다양한 단계의 속성작용을 거친 결과 구조적으로 매우 불균질한 저류층을 이룬다. 연구지역에서 비투맨을 함유한 탄산염암 저류층의 지반구조 및 균열/미시구조의 특성을 파악하고 균열대 모델을 구상화하기 위하여 총 6개의 시추공에서 불연속면에 대한 로깅 및 맵핑이 수행되었다. 프랙털차원의 일종인 랜덤캐터더스트는 암반의 통계적 동질성에 대한 기준으로 적합하다고 판단된다. 연구지역의 저류층에서 심도에 따른 동질 지구조구가 구분되었다. 본 지역에서 동질 지구조구는 시추공 자료에 의해 산정된 D_c 값의 범위 따라 $0 < D_c < 0.4$, $0.4 < D_c < 0.7$, $0.7 < D_c < 1.0$ 로 구분하였으며 각각의 지구조구는 경우에 따라 심한 파쇄대를 포함하기도 한다. 연구지역에서 불연속면의 주 방향성은 수평 층리에 의한 것으로 $0-20^\circ$ 의 경사를 갖으며, 60° 이상의 고각의 불연속면이 상대적으로 매우 낮은 비율로 존재한다. 구분된 동질 지구조구에 대하여 삼차원 지반구조 모델링을 수행하고 연구지역에 분포하는 탄산염암 저류층의 지반구조를 대표할 수 있는 개념모델(conceptual models)을 제시하였다. 이와 같은 개념모델은 향후 연구지역의 탄산염암 저류층에 대한 암반역학적 특성을 규명하는 데에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2008RER11P0400452009)

참고문헌

1. 류동우, 김영민, 이희근(2002(a)), "입체해석학적 접근법에 의한 암반 절리 크기 및 밀집도의 통계적 분석에 관한 연구", **한국암반공학회지**, 제 12권, 제 1호, pp.10~18.
2. 류동우, 김영민, 이희근(2002(b)), "암반 절리 방향성 자료의 통계적 분석 기법에 관한 연구", **한국암반공학회지**, 제 12권, 제 1호, pp.19~30.
3. 송재준, 이정인(2001), "조사창 조사를 이용한 절리 길이분포의 추정에 관한 연구", **한국지반공학회지**, 제 17권, 제 2호, pp.21~30.
4. Buschkuehle, B. E., Hein, F. J. and Grobe, M.(2007), "An overview of the Upper Devonian Grosmont carbonate bitumen deposit, Northern Alberta, Canada", *Natural Resources Research*, Vol. 16, No. 1, pp.3~15.
5. Kulatilake, P. H. S. W. and Wu, T. H.(1986), "Relation between discontinuity size and trace length", *Proc. of the 27th U.S. Symp. on Rock Mech.*, pp.130~133.
6. Kulatilake, P. H. S. W., Wathugala, D. N. and Stephansson, O.(1993), "Joint network modeling including a validation to an area in Strip mine", *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 30, pp. 503~526.
7. Kulatilake, P. H. S. W., Chen, J. Teng, J., Shufang, X. and Pan, G.(1996), "Discontinuity geometry characterization for the rock mass around a tunnel close to the permanent shiplock area of the Three Gorges dam site in China", *Int. J. Rock Mech. and Min Sci.*, Vol. 33, pp.255~277.
8. Kulatilake, P. H. S. W., Um, J. and Wang, M.(2003), "Stochastic fracture geometry modeling in 3-D including validations for a part of Arrowhead East Tunnel, California, USA", *Engineering Geology*, Vol. 70, pp.131~155.
9. Mahtab, M. A. and Yegulalp, T. M.(1984), "A similarity test for grouping orientation data in

- rock mechanics", *Proc. of the 25th U.S. Symp. on Rock Mech.*, pp.495~502.
10. Mandelbrot, B. B.(1983), *The fractal geometry of nature*, W. H. Freeman and Company, New York, pp. 468
 11. Miller, S. M.(1983), "A statistical method to evaluate homogeneity of structural populations", *Mathematical Geology*, Vol. 15, pp.317~328.
 12. Priest, S. D. and Hudson, J.(1976), "Discontinuity spacing in rock", *Int. J. Rock Mech. Min.Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 13, No. 5, pp.135~148.
 13. Priest, S. D. and Hudson, J.(1981), "Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline survey", *Int. J. Rock Mech. Min.Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 18, No. 3, pp.183~197.