북평분지와 포항분지 시추코어의 물리적 성질과 역학적 성질간의 관계

김현진^{1,2} · 송인선^{2*} · 장찬동¹ · 이희권² · 김태희²

¹충남대학교 지질환경과학과, ²한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Relations between Physical and Mechanical Properties of Core Samples from the Bukpyeong and Pohang Basins

Hyunjin Kim^{1,2}, Insun Song^{2*}, Chandong Chang¹, Hikweon Lee², and Taehee Kim²

¹Department of Geology and Earth Environmental Sciences, Chungnam National University

²Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

국내의 이산화탄소 지중저장을 위한 후보부지로 북평분지와 포항분지가 우선 선정되어 저장성 및 안전성 평가를 위한 지질 조사가 이루어졌다. 저류층 및 상부 덮개층의 역학적 안정성을 분석하기 위해 두 분지에서 회수된 시추코어를 이용하여 공극률, 탄성과 속도, 일축압축강도, 내부 마찰각 및 영률을 실내시험을 통해 측정하였다. 시추공의 전 구간에 걸쳐 실내시험을 수행하는 것이 어려우며 연속적 물리검층 자료로부터 역학적 파라미터를 직접 측정할 수도 없다. 따라서 본 연구에서는 시추코어의 실내시험으로 측정된 물리적 성질(탄성과 속도, 공극률, 동역학 영률)과 역학적 성질(일축압축강도, 내부 마찰각)간의 상관관계를 파악하여, 물리검층자료로부터 지층의 역학적 안정성 분석에 필요한 인자를 추출하였다. 기존에 제안된 여러 경험식을 본 연구의 시추코어 시험 자료와 비교하여 두 분지에 가장 잘 맞는 경험식을 산출하였다. 북평분지와 포항분지의 일축압축강도와 영률 및 공극률간의 관계는 지역에 관계없이 암종에 따라 같은 식을 따르는 경향을 보였다. 본 연구에서 산출된 경험식을 이용하여 탄성과 검층자료를 이용하여 검층 전 구간에 대하여 지층의 강도물성을 예측하였다. 예측된 강도물성은 이산화탄소의 주입 전 단계에서 지층의 역학적 안정성을 규명하기 위한 모델분석에서 입력인자로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 탄성과 속도, 일축압축강도, 내부 마찰각

A geologic survey of the Bukpyeong and Pohang basins, as candidate basins for the geological storage of CO₂, was performed to evaluate storage capacity and security. To analyze the mechanical stability of the storage reservoir and cap rocks, we measured the porosity, seismic velocity, uniaxial strength, internal frictional angle, and Young's modulus of core samples recovered from the two basins. It is costly and sometimes impossible to conduct tests over the entire range of drill holes, and continuous logging data do not yield the mechanical parameters directly. In this study, to derive the mechanical properties of geologic formations from the geophysical logging data, we determined the empirical relations between the physical properties (seismic velocity, porosity, and dynamic modulus) and the mechanical properties (uniaxial strength, internal friction angle) of the core samples. From the comparison with our core test data, the best fits to the two basins were selected from the relations suggested in previous studies. The relations between uniaxial strength, Young's modulus, and porosity of samples from the Bukpyeong and Pohang basins are more consistent with certain rock types than with the locality of the basins. The relations between the physical and mechanical properties were used to estimate the mechanical rock properties of geologic formations from seismic logging data. We expect that the mechanical properties could also be used as input data for a modeling study to understand the mechanical instability of rock formations prior to CO₂ injection.

Key words : Seismic velocity, Uniaxial compressive strength (USC), Internal friction angle

*Corresponding author: isong@kigam.re.kr

© 2013, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

심부 지반의 역학적 안전성을 평가하기 위해서는 지질 및 지질구조 파악 등 여러 가지 지반조사와 함께 암반의 물리·역학적 특성을 규명하여야 한다. 암반의 물성은 현장에서 현장측정 및 현장시험을 통해 산정하는 것이 가장 바람직한 방법이지만 여러 가지 제약으로 시추코어를 이용한 실내시험과 병행하게 된다. 실내시험에서는 경계조건의 조절과 정밀측정이 가능하여 암석의 물성을 정확하게 산정할 수 있다. 그러나 측정대상이 전체 시추공 중에서 일부이고 대부분의 경우 무결암을 대상으로 하기 때문에 현지지반의 특성을 직접 반영하기 어렵다(Song et al., 2002). 또한 시추코어의 회수율이 낮은 지역에서는 지층의 연속적인 수직 변화를 해석하기 어려우며, 이러한 경우 시추코어의 감점과 더불어 공내의 물리검층을 실시하여 이들의 관계로부터 심부지층의 물리·역학적 특성의 연속적인 수직 변화를 해석할 수 있다(Lee et al., 1994).

시추공물리검층은 시추 후 혹은 동시에 암석의 물성자료를 연속적으로 획득하는 방법으로 고비용의 코어조사가 갖는 단점을 보완할 수 있다(Bryant, 1960; Segesman, 1980; Snyder and Fleming, 1985; Kim et al., 2010; Jo and Chang, 2011). 물리검층자료는 지층의 각종 성질을 본래상태에 가장 가깝게 나타내어 주며, 여러 가지 물성의 중복 적용과 동일한 물성 기준의 반복 적용에 의하여 지층의 객관적인 구분을 가능하게 해준다(Min et al., 1996; Paillet and Crowder, 1996; Kim and Kim, 1999). 그러나 물리검층기술의 광범위한 발전에도 불구하고 물리검층으로부터 지층의 물리·역학적 파라미터를 직접 측정하는 것이 아니고, 획득된 지구물리자료를 실험적으로 혹은 이론적으로 해석하는 과정을 통하여 필요한 파라미터를 계산하거나 추정한다는 점에서는 어느 정도 한계를 가질 수 있다(Min et al., 1996).

Vernik et al. (1993)과 Chang et al. (2006)은 시추코어샘플을 이용하여 강도 측정을 할 수 없는 경우에 대하여 암석의 강도를 예측하기 위한 연구를 진행하였으며, 특히 Chang et al. (2006)은 암석의 물리적 특성과 강도의 경험적 관계를 이용하여 강도 물성을 예측하는데 필요한 경험식을 산출하였다. 이러한 경험식은 시추코어 시료에 대한 실내시험 자료가 미비할 경우에도 물리검층 자료를 이용하여 암석의 역학적 안정성을 평가하는데 사용될 수 있다. 특히, 물리검층자료 중에서 암

석의 탄성과 속도는 지반을 구성하는 암석의 탄성적 성질뿐만 아니라 다른 물리·역학적 파라미터를 예측하는데 귀중한 자료가 된다(Lee and Lee, 2011).

본 연구의 목적은 북평분지와 포항분지 시추코어를 이용한 실내실험으로 측정된 물리적 물성(탄성과 속도, 공극률, 영률)과 강도물성(일축압축강도, 내부 마찰각)의 상관관계를 파악하고 이를 바탕으로 기존에 제안된 경험식 중 두 분지에 가장 적합한 경험식을 산출하는데 있으며, 산출된 경험식을 이용하여 실내실험이 이루어지지 못한 구간에 대한 강도물성을 예측하였다.

연구지역 지질 및 시편정보

Kim (2011)은 동해 연안의 북평분지에 대한 탄성과 탐사와 지질조사 자료에 근거하여 북평분지에서 저류층과 덮개층의 역할을 할 수 있는 지층을 선정하였으며 모델링을 통한 저장 용량 평가를 수행하였다. 또, Kihm and Kim (2013)은 북평분지의 지질학적 특성과 입지 조건에 따라 북평분지가 국내의 연안 분지 중 이산화탄소 지중 저장 유망 분지로 평가될 수 있다고 언급하였다. Lee (2008)는 포항분지의 이산화탄소 저장용량 평가에서 약 38 Mt 정도의 저장용량을 산출하였으며, Huh et al. (1992)과 Han et al. (2009)은 포항분지의 시편을 이용한 공극률과 투수율을 산출하였다. 이러한 조사 결과를 통해 확인된 바에 의하면 국내 주요 연안 퇴적분지 중 제 3기 분지에 해당하는 북평분지와 포항분지가 이산화탄소 지중저장 후보지로 가장 유력한 것으로 보고되고 있다(KIGAM, 2012b). 이에 따라 이 지역에 대한 시추공 물리검층과 시추코어의 회수 및 실내실험이 이루어졌다(Fig. 1).

북평분지를 이루는 북평층군은 하부의 북평층과 상부의 도경리 역암층으로 구분되며 역암, 사암, 이암 등으로 구성되어있다(Kim et al., 2001). 북평분지의 지층은 대체로 동으로 경사되어 1 km 이상의 심도를 갖는 분지는 대부분 동해에 분포한다. 그러나 대부분의 지층이 동해에서 육상까지 연결되어 분포하고 예상 저장층의 일부가 육상에 노출되어 있어 본 연구에서는 강원도 동해시 동해항 일대에 위치한 북평분지에서 3개의 수직 평가정(BH-1, BH-2, BH-3)을 시추하였다. 이 중 BH-1(시추 깊이는 약 145.2 m)의 시추코어를 실내실험에 이용하였다(Fig. 1. b). 이 지역에서 회수되어 실내실험에 이용된 시추코어는 약 45-130 m 깊이의 코어이며 이 구간에서의 암상은 sand와 mud, silt 및 sand-silt, silt-

Fig. 1. (a) Location of the Bukpyeong and Pohang basins, (b) geological map of the Bukpyeong basin (after Kim et al., 2001), and (c) geological map of the Pohang basin (Sohn and Son, 2004). Red dots indicate the locations of drill holes.

mud가 호층을 이루고 있다.

연일층군에 속하는 포항분지는 신생대 제 3기의 퇴적 분지로 공극률이 높은 퇴적층으로 이루어져있다(Sohn et al., 2011). 시추공이 위치한 지역은 화강섬록암을 기반암으로 하며 지표지질은 사암과 이암이 호층을 이루고 있는 지역이다(Lee et al., 2007). 이 지역에서는 지층이 서쪽으로 경사되어 있으나 정단층에 의해 동으로 갈수록 심도가 깊어진다. 따라서 가능한 해안선에 가까운 지역이 시추대상지역으로 선정되었다(Fig. 1. c). 포항분지의 시추공(PHCLH-1)은 포항시 북구 흥해읍에 위치하며 이 지역에서 약 560 m 깊이의 시추를 하였다(Fig. 1. c). 실내실험에 사용된 시추코어는 약 370-450 m 깊이의 코어이며 이 구간에서의 암상은 sand와 mud의 호층으로 이루어져 있다.

시추를 통해 회수된 북평분지 시추코어의 평균 직경은 약 50 mm, 포항분지 시추코어의 평균 직경은 약 63 mm였으며 두 지역의 코어 모두 시편의 길이가 직경의 2배가 되도록 절단하였다. 그러나 두 지역의 코어가 모

두 반고결 혹은 미고결의 상태이기 때문에 시편의 상·하단면을 연마하는 과정에서 시편이 뜰겨지거나 파손되는 일이 발생하여 북평분지 시편의 평균 길이는 약 79 mm, 포항분지 시편의 평균 길이는 약 115 mm로 제작되었다.

실내실험

북평분지와 포항분지에서 회수된 코어 시편에 대하여 탄성과 속도(V_p , V_s), 공극률(n), 일축압축강도(UCS) 및 영률(E) 그리고 내부 마찰각(ϕ)을 측정하였다.

실내실험에 의한 탄성과 속도 측정은 일본 OYO사의 Sonicviewer (model-5217A) 장비를 이용하여 이루어졌다. 시편은 두 탐촉자 사이에 놓여지며, 시편의 상단면에는 transmitter를 하단면에는 receiver를 접촉시켰다. 또한, 시편과 두 탐촉자간의 접촉정도를 일정하기 유지하기 위하여 transmitter의 상부에 일정한 무게를 가하였다. 파동 생성기(Pulse generator)에서 파동이 생성되면

transmitter에 유입되어 시편을 통과한 후 receiver에 전파되며, 이 때 P파 또는 S파가 전파되는 시간을 측정하고 이를 시편의 길이로 나누어 속도를 측정하였다(Cho et al., 2008). 실험에서 사용된 주파수는 P파가 63 kHz, 500 kHz, S파가 33 kHz, 100 kHz이다. 또, 상기 방법을 통해 측정된 탄성과 속도를 식 (1)에 적용하여 동탄성 영률(E_d)을 계산하였다. 이 때, ρ 는 암석의 밀도이다.

$$E_d = \rho V_s^2 \left(\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right) \quad (1)$$

KSRM (2006)의 암석 공극률 및 밀도 측정 표준 실험법에서는 공극률 측정법 중 캘리퍼 방법을 규정하였으며 이는 규칙적인 모양을 가진 암석 시료에 적용된다. 그러나 본 연구에 사용된 시추코어는 모두 반고결 혹은 미고결 상태였기 때문에 수침을 통한 포화 시에 시편이 일정한 모양이나 부피를 유지하지 못하여 표면건조포화 질량을 측정할 수 없는 어려움이 발생하였다. 따라서 시편의 포화 없이 공극률을 측정할 수 있도록 헬륨 pycnometer를 사용하였다. 헬륨 pycnometer는 미국 Quantachrome instruments사의 Ultrapycometer 1200e model을 사용하였다. 건조된 시편을 측정에 사용하였으며 약 19 psig로 헬륨을 유입시켜 시편의 solid 부피(V_{solid})와 밀도(ρ_{solid})를 측정하였다. 하나의 시편에 대하여 총 3번의 측정이 이루어졌으며 평균값을 구하여 공극률 계산에 이용하였다(식 2). 이 때, V_b 는 암석의 체적 부피이다.

$$n = \frac{V_v}{V_b} = \frac{V_b - V_{solid}}{V_b} \quad (2)$$

또, 일부 시편에 대해서는 XRD분석으로 암석의 광물 조성 비율 및 광물 비중을 구하고 이를 이용해 공극률을 계산하는 방법으로 공극률을 구하였다(Goodman, 1989).

암반의 강도는 응력상태에 따라 변하며 이는 일축압축강도와 내부마찰각에 의해 결정된다(Lee et al., 2008). 일축압축실험을 통한 강도의 측정은 일정한 변형률 ($5 \times 10^{-5} s^{-1}$)로 변위를 제어하며 이루어졌다. 일축압축강도는 응력-변형률 곡선에서 응력이 최대인 지점으로 결정하였다. 일축압축실험 시에는 축방향과 축방향의 변위를 측정하여 탄성상수를 산정하였다. 삼축압축실험은 0, 3, 6 및 9 MPa의 구속압 하에서 진행하였다. 실험결과에 따라 Mohr-Coulomb 파괴 기준식을 구하였으며 Mohr-Coulomb 파괴 기준식의 기울기를 통해 내부

마찰각을 산정하였다.

실험결과

코어 시편의 암상은 육안으로 관찰되는 입자의 크기에 따라 분류한 주상도를 참고하였으며 sand와 silt가 모두 우세한 경우에는 sand-silt로, silt와 mud가 모두 우세한 경우에는 silt-mud로 암상을 표기하였다(KIGAM, 2012a; KIGAM, 2012c). 본 연구의 실내 실험에 이용된 코어 시편은 암상이 sand, sand-silt, mud, silt, silt-mud이다. 실험결과를 서술함에 있어 코어 시편의 암상이 sand와 sand-silt인 것을 사암류로 분류하였으며, mud, silt 및 silt-mud인 것을 이암류로 분류하였다.

북평분지 사암류의 탄성과 속도는 P파 속도가 960-2200 m/s, S파 속도가 560-1360 m/s의 범위이며, 이암류는 P파 속도가 1185-1990 m/s, S파 속도가 665-1150 m/s의 범위이다(Table 1). 북평분지 사암류와 이암류의 평균 공극률은 각각 0.31과 0.33으로 암종별 차이는 크지 않았다. 또한, 북평분지 사암류의 일축압축강도는 2.00-9.41 MPa, 이암류의 일축압축강도는 1.79-10.66 MPa의 범위에서 측정되었다. 탄성과 속도를 이용해 계산된 동탄성 영률은 사암류가 2-10 GPa, 이암류가 3-7 GPa의 범위이다. 또, 일축압축실험으로부터 측정된 정탄성 영률은 사암류가 0.12-0.87 GPa, 이암류가 0.16-0.87 GPa의 범위이다. 사암류와 이암류의 내부 마찰각은 평균적으로 24°와 17°로 측정되었다(Table 1). 코어 시편의 고결 상태가 다소 불량함에 따라 일축압축강도와 정탄성 영률은 예상보다 낮은 값을 보였으며 동종의 암석에서도 큰 변화를 보였다. 동탄성 영률과 정탄성 영률을 비교하였을 때 사암류와 이암류 모두 동탄성 영률이 정탄성 영률보다 평균 15배 높게 측정되었다. Ryu and Chang (2006)은 암석 내에 존재하는 미세균열과 공극이 동적 시험보다는 정적 시험에 더 큰 영향을 미치기 때문에 동탄성 영률이 정탄성 영률보다 높게 측정된다고 하였다. 내부 마찰각은 일축압축강도의 평균이 비교적 높은 이암에서 더 낮게 측정되었다.

포항분지 사암류의 탄성과 속도는 P파 속도가 1300-2480 m/s, S파 속도가 550-1200 m/s의 범위이며, 이암류는 P파 속도가 1130-2475 m/s, S파 속도가 600-1285 m/s의 범위로 측정되었다. 포항분지 사암류와 이암류의 평균 공극률은 각각 0.21과 0.19이며 포항분지 사암류의 일축압축강도는 13-24 MPa, 이암류의 일축압축강도는 11-28 MPa의 범위에서 측정되었다. 동탄성 영률은 사암

Table 1. Rock properties obtained from laboratory analyses of core samples from the Bukpyeong basin. Porosity was measured by XRD analysis (X) or helium pycnometer (H).

Depth (m)	Lithology	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Porosity		UCS (MPa)	E_d (GPa)	E_s (GPa)	Internal friction angle ($^{\circ}$)
				X	H				
45.79	Mud	1294	718	-	-	-	3.03	-	14.93
45.90		1573	813	-	-	-	4.01	0.16	
46.81		1504	820	-	0.35	5.73	3.99	-	
61.48	Mud	1717	866	-	0.31	8.65	4.59	0.25	-
61.71		1508	844	-	0.30	9.82	4.17	0.24	-
67.44	Sand	2202	1360	-	0.40	9.41	10.14	0.41	-
69.81	Silt	1941	946	-	-	-	5.53	-	15.25
69.96		1900	942	-	-	-	5.46	-	
70.11		1986	934	-	-	-	5.45	-	
70.26		1957	919	-	0.26	8.29	5.28	0.31	
85.12	Mud	1758	893	-	0.30	5.22	4.86	0.27	-
92.90		-	-	0.52	-	1.79	-	-	-
100.5 - 100.75	Sand	-	-	-	-	7.00	-	0.14	25
109.75	Silt-mud	1306	770	-	0.30	10.66	3.36	0.24	-
109.86		1352	670	-	0.33	8.65	2.76	0.24	-
113.60	Silt-mud	1186	703	-	-	5.67	2.80	0.55	20.74
116.89		1872	870	-	-	-	4.74	-	
117.01		1856	1147	-	-	-	7.21	-	
117.13		1770	665	-	0.32	5.84	2.88	0.30	
121.60		-	-	-	-	5.60	-	0.87	
121.70		-	-	-	-	7.44	-	-	
122 - 122.16	Sand	960	557	0.28	-	2.00	1.78	0.12	-
126.30	Sand-silt	1020	588	-	-	3.01	1.99	-	-
131.91	Sand-silt	1974	1202	-	-	4.54	8.01	0.49	21.01
132.04		1923	870	-	0.26	-	4.77	-	
132.17		1951	1135	-	-	-	7.37	-	
132.7 - 132.98	Sand-silt	1661	877	-	-	4.00	4.62	0.87	27.10

류가 2-9 GPa, 이암류가 2-10 GPa의 범위를 보였다. 정탄성 영률의 경우 사암류가 1-5 GPa, 이암류가 0.18-3.4 GPa의 범위이다. 사암류와 이암류의 내부 마찰각은 각각 18.4°와 11.6°로 측정되었다(Table 2). 공극률과 일축 압축강도는 사암류가 이암류보다 더 크게 측정되었다. 동일한 시편에 대한 동탄성 영률과 정탄성 영률의 비교 결과 사암류는 약 4배, 이암류는 약 6배 정도로 동탄성 영률이 더 크게 측정되었다.

두 분지의 시추코어 실내실험 결과 포항분지의 탄성과 속도가 북평분지의 탄성과 속도보다 크며, 평균 공극

률은 북평분지가 포항분지보다 큰 것을 알 수 있다. 일축압축강도는 포항분지의 결과가 북평분지에 비하여 크며 동탄성 영률은 비슷한 범위에 분포하고 정탄성 영률은 포항분지에서 더 높게 측정되었다. 동탄성 영률과 정탄성 영률간의 비율을 비교하였을 때, 포항분지의 동탄성 영률과 정탄성 영률 비가 북평분지보다 낮다. 이 같은 결과는 북평분지의 시추코어보다 포항분지의 시추코어의 고결이 양호하며 미세균열과 같은 공극구조가 적게 발달되어 있을 가능성을 보여준다.

Table 2. Rock properties obtained from laboratory analyses of core samples from the Pohang basin. Porosity was measured using a helium pycnometer (H).

Depth (m)	Lithology	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Porosity	UCS (MPa)	E_d (GPa)	E_s (GPa)	Internal friction angle (°)
				H				
373.14	Sand	1647	982	-	13.58	5.43	1.42	-
373.24		2065	1052	-	14.59	6.74	1.22	-
373.54		2130	1056	0.26	19.29	6.86	2.05	-
378.32	Mud	1802	995	0.21	23.58	5.83	1.99	-
378.61		2182	1072	-	24.45	7.09	1.40	-
383.29		2253	1284	0.18	23.86	9.55	3.35	-
383.44		2475	1161	-	27.19	8.43	2.72	-
383.59		2431	1239	-	27.59	9.35	2.72	-
389.78	Sand	2280	1200	0.27	19.66	8.67	2.38	-
389.93		2304	1141	-	18.92	8.01	1.88	-
391.76	Sand	1300	548	0.24	16.18	1.92	0.26	18.40
392.04		1345	727	0.17	22.79	3.15	0.21	
392.82		1543	718	0.26	18.88	3.23	0.23	
392.96		1559	712	-	-	3.19	-	
393.13		1938	768	-	-	3.82	-	
397.95	Mud	1261	726	-	-	3.04	-	11.64
398.10		1231	712	0.25	19.15	2.91	0.24	
398.38		1334	768	0.15	11.37	3.40	0.18	
416.38	Mud	2291	1125	0.14	14.68	7.81	1.83	-
418.64		1973	1142	-	24.12	7.49	1.54	-
422.43	Sand	1968	1185	-	23.50	7.85	1.44	-
422.60		1983	1164	-	22.51	7.71	1.59	-
422.90		2136	1155	-	16.64	7.94	1.55	-
423.28		1891	1167	0.24	23.50	7.47	1.71	-
446.38	Sand	2479	1082	0.04	12.93	7.44	4.83	-
469.29	Mud	1131	600	-	-	2.16	-	11.64

토 의

시추코어의 물리적·역학적 성질 관계

기준에 수행된 연구에서는 물리적 성질(탄성과 속도, 공극률, 영률)과 역학적 성질(일축압축강도, 내부 마찰 각)간의 경험식을 제안한 바가 있으며 경험식을 이용할 경우 실내실험이 이루어지지 못한 시추 전 구간에 대한 강도물성을 예측하는 것이 가능하다. 이를 위해서는 다량의 실험자료가 필요하지만 본 연구의 실험자료가 충분하지 않아서 기준에 제안된 여러 가지 경험식 중에서 본 연구의 결과와 가장 적합한 것을 선택하였다. 따라서

실내실험으로 측정된 북평분지와 포항분지의 시추코어에 대한 물리적 성질과 강도물성을 비교하고 두 분지에 가장 잘 맞는 경험식을 추출하였다. 이 때, 경험식을 적용함에 있어 암상을 사암과 이암으로 나누었으며 사암류를 사암, 이암류를 이암의 경험식에 적용하였다.

북평분지와 포항분지의 시추공 및 시추코어를 통해 측정된 P 와 역속도($V_p^{-1} = \Delta t$)와 실내 실험을 통해 측정된 일축압축강도간의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 그래프에 그려진 curve는 Chang et al. (2006)이 정리 및 제안한 경험식을 이용해 그려졌으며 그래프에 plot된 data는 모두 문헌으로부터 가져온 값을 이용하여 그래프

Fig. 2. Relations between UCS (uniaxial compressive strength) and seismic slowness (Δt) in (a) sandstone and (b) shale (modified from Chang et al., 2006). The best fit relations with our experimental data (red and blue symbols) are selected for the study areas. BP and PH denote the Bukpyeong and Pohang basins, respectively.

에 나타난 것이다(Lama and Vutukuri, 1978; Carmichael, 1982; Kwasniewski, 1989; Jizba, 1991; Wong et al., 1997; Bradford et al., 1998; Horsrud, 2001; Chang et al., 2006). Fig. 2의 (a), (b) curve는 모두 Δt 가 증가함에 따라서 지수 함수적으로 감소하는 경향을 보이며 그래프에 함께 plot된 data도 그러한 경향을 따르는 것으로 나타났다. 본 연구의 실내 실험으로부터 측정된 data의 경우 문헌에서 가져온 data에 비하여 분산적이지 않고 경험식의 경향을 잘 따르는 것으로 보인다. 암종별, 지역별로 가장 경향을 잘 따르는 경험식을 추출하여 각 지역과 동일한 색상의 curve로 나타내었다. 사암에 대한 경험식은 다음의 식 (3)과 (4)에 나타내었으며 각각은 북평분지와 포항분지 사암의 일축 압축강도를 예측하기 위한 경험식이다.

$$UCS(MPa) = 1.4138 \times 10^7 \Delta t^{-3} \quad (3)$$

$$UCS(MPa) = 3.84 \exp(1.14 \times 10^{-10} \rho V_p^2) \quad (4)$$

이 때, Δt 의 단위는 $\mu s/ft$, V_p 의 단위는 m/s 이며 ρ 는 사암에서 일반적으로 쓰이는 값($2.3 g/cm^3$)을 사용하였다.

이암의 일축압축강도를 예측하기 위한 경험식은 다음의 식 (5)과 (6)에 나타내었다. 각각은 북평분지와 포항분지의 지층이 이암인 경우에 적용하여 강도를 예측하기 위한 경험식이며 식 (6)은 Lal (1999)에 의해 제안된 경험식이다.

$$UCS(MPa) = 1.35(304.8/\Delta t)^{2.6} \quad (5)$$

$$UCS(MPa) = 10(304.8/\Delta t - 1) \quad (6)$$

위에 제시된 식 (3)-(6)을 사용하기 위해서는 탄성과

속도를 알아야 하며 실내실험을 통해 시추 코어의 연속적인 탄성과 속도를 측정하기에는 어려움이 따른다. 따라서 연속적인 관찰을 위해서는 시추공 물리검층을 통해 측정되어야 하지만 본 연구에서는 포항분지의 시추공 물리검층을 수행하지 못하여 실내 실험으로 측정된 탄성과 속도를 사용하였다. Lee et al. (2008)은 실내실험으로 측정된 P파 속도와 암종별 강도정수의 경향성, 그리고 원위치로 측정된 음파검층 결과의 비교를 통하여 실내실험으로 측정된 P파 속도를 이용해 암석의 강도정수를 산출하는 것이 가능하다는 결과를 보인 바 있다. 따라서 본 연구에서는 실내실험을 통해 측정된 P파 속도가 원위치로 측정된 속도검층 자료에서 얻어진 P파 속도를 대신할 수 있다고 판단하였다.

북평분지와 포항분지 사암과 이암은 공극률이 증가함에 따라서 일축압축강도가 지수 함수적인 감소를 보인다(Fig. 3. a, b). 본 연구에서 측정된 실험값은 지역에 관계없이 암종별로 한 가지 경험식을 따랐으며 그 경험식은 다음의 식 (7)과 (8)에 표현되었다.

$$UCS(MPa) = 277 \exp(-10\phi) \quad (7)$$

$$UCS(MPa) = 2.922 \phi^{-0.96} \quad (8)$$

이 때, 식 (7)는 사암의 공극률과 일축압축강도간의 관계식이며 식 (8)은 Horsrud (2001)에 의해 제안된 식으로 암종이 이암인 경우에 일축압축강도를 예측할 수 있는 경험식이다. 사암의 공극률과 일축압축강도의 관계를 나타낸 경험식에 따르면 공극률이 낮은 경우, 특히 공극률이 0.1 이하일 때 일축압축강도가 급격히 증가하는 결과가 예상되는 반면 본 연구에서 측정된 사암의

Fig. 3. Relations between UCS (unial compressive strength) and porosity in (a) sandstone and (b) shale (modified from Chang et al., 2006). The best fit relations with our experimental data (red and blue symbols) are selected for the study areas. BP and PH denote the Bukpyeong and Pohang basins, respectively.

Fig. 4. Relations between UCS and Young's modulus (E) for (a) sandstone and (b) shale (modified from Chang et al., 2006). The best fit relations with our experimental data (red and blue symbols) are selected for the study areas. BP and PH denote the Bukpyeong and Pohang basins, respectively.

경우 공극률이 매우 낮은 값(0.04)을 가짐에도 불구하고 일축압축강도가 크게 증가하지 않는 결과를 보였다.

본 연구에서 측정된 일축압축강도와 영률간의 관계를 Fig. 4. a, b에 나타내었으며 영률이 증가함에 따라 일축 압축강도는 증가하는 결과를 보인다. 이 결과는 지역에 관계없이 암종에 따라 같은 식을 따르는 것으로 나타났다. 사암의 영률과 일축압축강도와의 관계를 나타낸 식은 식 (9), 이암은 식 (10)에 나타내었다. 각각의 식은 Bradford et al. (1998)과 Horsrud (2001)가 제안한 경험식이다.

$$UCS(MPa) = 2.28 + 4.1089E_d \quad (9)$$

$$UCS(MPa) = 7.97E_d^{0.91} \quad (10)$$

Fig. 5는 탄성과 속도와 내부 마찰각간의 관계를 나타낸 경험식(식 11)과 실내 실험을 통해 측정된 내부 마찰각을 함께 나타낸 결과이다. 경험식에 따르면 탄성과 속도의 증가에 따라 내부 마찰각이 로그함수적인 증가의 형태를 보이며 본 연구로부터 측정된 내부 마찰각은 그 관계를 따르고 있다. Lal (1999)이 제안한 식 (11)은 이암의 내부 마찰각을 예측하기 위한 경험식이지만 본 연구의 결과에 따르면 지역이나 암종에 관계없이 동일한 식(식 13)을 따르는 경향이 나타난다.

$$\phi(^{\circ}) = \sin^{-1}((V_p - 1000)/(V_p + 1000)) \quad (11)$$

지층의 역학적 분석을 위한 경험식의 적용
북평분지에서는 시추 코어가 회수되어 실내실험에 이

용되었지만 전 구간에 대한 강도물성 산정과 실내실험을 진행하지 못한 시추공(BH-2, BH-3)에 대한 강도물성을 산정하기에도 어려움이 따른다. 따라서 본 연구를 통해 추출된 경험식에 시추공물리검층을 통해 얻어진 탄성과 속도를 적용하여 직접적으로 강도 물성을 산정할

Fig. 5. Relations between internal friction angle and P-wave velocity (modified from Chang et al., 2006). BP and PH denote the Bukpyeong and Pohang basins, respectively. For all rock types, the universal best-fit line shows a good fit with our data (red and blue symbols).

수 없는 구간에 대한 일축압축강도 및 내부 마찰각을 예측하였다(Fig. 6).

포항분지에서는 현장에서의 문제로 인하여 탄성과 속도를 비롯한 물리검층을 수행하지 못하여 실내 실험으로 측정된 탄성과 속도를 식에 적용하고 일축압축강도와 내부 마찰각을 예측하여 curve로 나타내었다(Fig. 7). 이후에 포항분지에서 시추 및 시추코어의 회수가 진행되는 경우 시추공 물리검층과 실내 실험이 이루어지게 되면 시추지역에 대하여 부분적인 예측이 아닌 시추 전 구간에 대한 예측이 가능할 것이다.

Fig. 6와 Fig. 7에서 실내 실험을 통해 측정된 값과 경험식으로부터 예측된 값이 서로 차이를 보이는 구간이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 본 연구가 더 진행되어 북평분지와 포항분지의 실내 실험값이 더 많아진다면 기존에 제안된 경험식이 아닌 두 분지에 가장 적합한 새로운 경험식을 산출할 수 있을 것으로 여겨진다. 하지만, 현재 상태로는 실내 실험값이 새로운 경험식을 산출할 만큼 방대하지 못하므로 기존의 경험식을 따라 강도 물성을 예측하여야 한다. 이러한 경우에 정확한 강도 물성을 알 수 있는 것은 아니지만 근사치의 물성을 파악할 수 있을 것으로 생각되어진다.

Fig. 6. Variations in UCS (uniaxial compressive strength) at (a) BH-1, (b) BH-2, and (c) BH-3; and (d) depth-dependent variation in the internal friction angle at the three holes. The lines and symbols indicate the mechanical parameters obtained from seismic logging data and those from experimental core tests.

Fig. 7. Variations in (a) UCS (uniaxial compressive strength) and (b) the internal friction angle at Pohang basin. The symbols indicate the mechanical parameters obtained from experimental core tests.

결론

본 연구에서는 북평분지와 포항분지의 시추코어로부터 물성자료(공극률, 탄성과 속도, 일축압축강도 및 영률, 내부 마찰각)를 획득하였다. 또한, 공극률, 탄성과 속도, 영률과 일축압축강도간의 관계, 그리고 탄성과 속도와 내부 마찰각간의 관계를 파악하였다.

실내실험을 통해 측정된 사암과 이암의 일축압축강도는 북평분지보다 포항분지에서 높게 나타났으며 이는 깊이에 따른 압밀의 차이에 따른 것으로 공극률도 북평분지보다 포항분지에서 더 낮게 측정되었다. 북평분지와 포항분지의 일축압축강도와 영률 및 공극률간의 관계는 지역에 관계없이 암종에 따라 같은 식을 따르는 경향을 보였다.

본 연구에서 추출한 경험식을 이용하여 실내 실험이 이루어지지 못한 북평분지의 시추지역(BH-2, BH-3)의 일축압축강도 및 내부마찰각을 산정하였다. 북평분지와 포항분지의 시추코어를 이용한 암종별로 내부 마찰각과 탄성과 속도와의 관계를 파악하였다. 내부 마찰각의 경우, 지역과 암종에 관계없이 하나의 경험식을 따르는 결과를 보였다.

이처럼 본 연구를 통해 추출된 경험식을 이용하면 탄

성과 속도와 동탄성 영률 및 공극률을 이용하여 실내 실험이 이루어지지 못한 북평분지 및 포항분지 지층의 강도물성을 간접적으로 예측할 수 있을 것으로 기대된다. 예측된 자료는 두 분지의 암석 파괴 기준에 대한 제한을 제공할 수 있으므로 각 지역에 대한 역학적 안정성 분석 및 모델분석에 있어서 입력 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 한국지질자원연구원에서 수행중인 ‘이산화탄소 지중저장 실증을 위한 저장지층 특성화 및 기본설계 기술개발 (세부)(GP2012-034)’ 과제의 일환으로 수행되었습니다. 심사와 조언을 통해 논문의 완성을 도와주신 세 분의 심사위원님들께 감사드립니다. 또한, 본 연구를 위해서 일부 실내실험을 수행해 주신 추민경님(한국석유공사)께도 감사드립니다.

References

- Bradford, I. D. R., Fuller, J., Thompson, P. J., and Walsgrove, T. R., 1998, Benefits of assessing the solids production risk in a North Sea reservoir using elastic modeling. SPE/ISRM Eurock'98 held in Trondheim, Norway, 8-10 July, 1998, pp. 261-269.
- Bryant, H. L., 1960, Production well logging techniques, Geophysics, 25, 905-927.
- Carmichael, R. S., 1982, Handbook of Physical Properties of Rocks. volume II, CRC press, Boca Raton.
- Chang, C., Zoback, M. D., and Khaksar, A. 2006, Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. J. Pet. Sci. and Engr., 51, 223-237.
- Cho, T., Yun, Y. K., Lee, Y. -K., and Chang, C., 2008, 21C Rock Mechanics, Gunsulbook, pp. 221-223.
- Goodman, R. E., 1989, Introduction to Rock Mechanics. John Wiley & Sons, New York, pp. 562.
- Han, R. H., Ree, J. -H., Sohn, Y. K., Shimamoto, T., and Okazaki, K., 2009, Structure of porosity and permeability in Pohang basin: A basic study for CCS potential identify, Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts). p. 144.
- Horsrud, P., 2001, Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations. SPE Drill. Complet. 16, 68-73.
- Huh, D. G., Kim, H. T., and Lee, K. H., 1992, A Petrophysical Properties of Petroleum Potential Reservoirs, The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 29, 178-185.
- Jizba, D., 1991, Mechanical and Acoustical Properties of Sandstones and Shales, PhD thesis. Stanford University, 190.

- Jo, Y. and Chang, C., 2011, Physical property measurements using well-log data in Bukpyeong Basin, Donghae, South Korea, Annual Conference of The Journal of Engineering Geology, April 7-9, pp. 159-164.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2012a, Evaluate of the Basic Design on CO₂ Geological Storage and Design Technologies, Annual report, 44p.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2012b, Site Characterization Study of CO₂ Geologic Storage on Land (10,000 CO₂ ton/yr Pilot Project), MEST(Ministry of Education and Science Technology), 67.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2012c, Characterization of storage strata and development of basis design technology for demonstration of CO₂ geological storage, Annual report, 168p.
- KSRM (Korean Society for Rock Mechanics), 2006, Standard test method for porosity and density of rock, pp. 95-98.
- Kihm, J. H. and Kim, J. M., 2013, Prediction and Analysis of Behavior of Carbon Dioxide Injected into Target Geologic Formations in the Bukpyeong Basin, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 49(3), 389-406.
- Kim, G. Y., Yoo, D. G., and Ryu, B. J., 2010, Physical property interpretation of gas hydrate-bearing sediments using log data in the Ulleng Basin, East Sea, Journal of the Geological Society of Korea., 46(3), 275-290.
- Kim, J. -C., Koh, H. J., Lee, S. R., Lee, C., Choi, S. -J., and Park, K. -H., 2001, 1:250,000 Geological map descriptions of Kangnung and Sokcho, KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), p. 76.
- Kim, J. M., 2011, Integrated prediction and analysis of performance of target geologic formation systems for geologic storage of carbon dioxide. Annual Report 2010T100100500, Seoul National University, Seoul, Korea, p. 72.
- Kim, Y. and Kim, K., 1999, Comparison of Physical Properties obtained from Geophysical Well Log and Core Property Measurements in Gabsan Formation. The Journal of Engineering Geology, 9(3), 253-265.
- Kwasniewski, M., 1989, Laws of brittle failure and of B-D transition in sandstones. In: Maury, V., Fourmaintraux, D. (Eds.), Rock at Great Depth. A. A. Balkema, Brookfield, VT, pp. 45-58.
- Lal, M., 1999, Shale stability: drilling fluid interaction and shale strength. SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference held in Caracas, Venezuela, 1-10.
- Lama, R. D. and Vutukuri, V. S., 1978, Handbook on Mechanical Properties of Rocks. vol. II, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.
- Lee, D. Y., Lim, J. U., and Yum, B. Y., 1994, The Use of Gamma-ray Logging for Identifying Lithology and Geological Structure, Journal of the Geological Society of Korea, 30(5), 467-474.
- Lee, M. J., Chang, C., Lee J. B., Lee, T. J., and Hwang, S., 2008, Stability Analysis for the Pohang Deep Geothermal Borehole. Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, 11(3), 204-213.
- Lee, S. -G., Lee, T., and Kim, T. K., 2007, U-Th Age in granodiorite situ core from underground 2300m, Honghae, Pohang, Korea: A study of ages of the Pohang basin basement, Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), p. 110.
- Lee, S. -K. and Lee, T. J., 2011, A study on the Factors Affected on the P- and S-wave Velocity Measurement of the Acrylic and Stainless Steel Core, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, 14(4), 305-315.
- Lee, Y. I., 2008, Storage ability and characteristic of internal formation for CCS, MEST (Ministry of Education and Science Technology), p. 57.
- Min, K. D., Suh, J. H., and Kwon, B. -D., 1996, Applied Geophysics. Woosung, p. 772.
- Pailet, F. L. and Crowder, R. E., 1996, A generalized approach for the interpretation of geophysical well logs in ground-water studies- Theory and application, Ground Water, 34-5, pp. 883-898.
- Ryu, K. H. and Chang, C., 2006, Comparison of Rock Young's Moduli Determined from Various Measurement Methods, The Journal of Engineering Geology, 16(1), 1-14.
- Segesman, F. F., 1980, Well-logging method. Geophysics, 45, 1667-1684.
- Snyder, D. D. and Fleming, D. B., 1985, Well logging; a 25-year perspective, Geophysics, 50, 2504-2029.
- Sohn, Y. K. and Son, M., 2004, Synrift stratigraphic geometry in a transfer zone coarse-grained delta complex, Miocene Pohang Basin, SE Korea, Sedimentology, 51, 1387-1408.
- Sohn, M., Song, C. W., Sohn, Y. K., and Kwon, Y. -K., 2011, Geological structure and Depositional systems of Miocene Pohang basin for promising CO₂ storage, Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), October 26-28, p. 108.
- Song, M. Y., Kim, H. S., and Park, J. -O., 2002, Relationship between lithology and rock physical property using borehole prospecting, The Journal of Engineering Geology, 12(2), 127-135.
- Vernik, L., Bruno, M., and Bovberg, C., 1993, Empirical relations between compressive strength and porosity of siliciclastic rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 30(7), 677-680.
- Wong, T. -F., David, C., and Zhu, W., 1997, The transition from brittle faulting to cataclastic flow in porous sandstones: mechanical deformation, J. Geophys. Res, 102, 3009-3025.

원고접수일: 2013년 9월 12일

수정본채택: 2013년 10월 28일

게재확정일: 2013년 11월 1일

김현진

충남대학교 지질환경과학과 응용지질실험실
305-764 대전광역시 유성구 궁동 220
한국지질자원연구원 지구환경연구본부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 124
Tel: 042-868-3508
Fax: 042-868-3414
E-mail: kimhyunjin@cnu.ac.kr

송인선

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 124
Tel: 042-868-3508
Fax: 042-868-3414
E-mail: isong@kigam.re.kr

장찬동

충남대학교 지질환경과학과 응용지질실험실
305-764 대전광역시 유성구 궁동 220
Tel: 042-821-6430
Fax: 042-823-5636
E-mail: cchang@cnu.ac.kr

이희권

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 124
Tel: 042-868-3507
Fax: 042-868-3414
E-mail: hkleee@kigam.re.kr

김태희

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 124
Tel: 042-868-3070
Fax: 042-868-3414
E-mail: katzura@kigam.re.kr