

## 이산화탄소 주입공 그라우팅 시멘트의 역학적 물성 및 파괴 거동

박미희<sup>1</sup> · 장찬동<sup>1\*</sup> · 조영욱<sup>1</sup> · 추민경<sup>1,2</sup> · 염병우<sup>2</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 지질환경과학과, <sup>2</sup>한국지질자원연구원 CO<sub>2</sub> 처분연구실

### Mechanical Properties and Failure Behavior of Grouting Cements for a CO<sub>2</sub>-Injection Hole

Mihee Park<sup>1</sup>, Chandong Chang<sup>1\*</sup>, Yeonguk Jo<sup>1</sup>, Minkyung Choo<sup>1,2</sup>, and Byoung-Woo Yum<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geology and Earth Environmental Sciences, Chungnam National University

<sup>2</sup>CO<sub>2</sub> Sequestration Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

이산화탄소 지중저장을 위한 주입공의 안정성 및 누출제어에 주요 영향을 미치는 그라우팅 시멘트의 물리, 역학적 물성과 파괴 거동 특성을 실내실험을 통해 규명하였다. 물과 조강 3종 포틀랜드 시멘트를 네 종류의 질량비(각각 0.4, 1, 2, 3)로 배합한 시편을 제작하여 시험하였다. 그라우팅재의 제반 물리, 역학적 물성은 물/시멘트 배합비 0.4와 1 사이에서 급격하게 변화하며 전체적으로 물/시멘트 배합비가 증가함에 따라 공극률은 증가, 탄성파속도, 탄성계수, 압축, 인장강도 등은 감소하는 체계적인 변화양상을 보였다. 특히 일련의 삼축압축시험에서는 시편 성형시 물/시멘트 배합비와 시편에 작용하는 구속압 조건에 따라 취성파괴와 연성변형의 경계가 명확히 구분되었다. 규명된 물성 및 파괴거동은 이산화탄소 주입공 주변의 암반응력과 주입압 조건에 따라 발생할 수 있는 그라우팅재의 일차적 변형, 파괴, 균열 등의 모델분석에 주요 입력인자로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

**주요어** : 이산화탄소 주입공, 그라우팅 시멘트, 물/시멘트 배합비, 역학적 물성, 파괴거동

We conducted laboratory experiments to determine the physical and mechanical properties, and the failure behaviors, of cements for use as grouting material in a CO<sub>2</sub>-injection borehole. Samples with four different ratios of water to cement mass (0.4, 1, 2, and 3) were tested. The analyzed properties (porosity, sonic velocity, modulus, and compressive and tensile strengths) varied systematically as a function of the ratio of water to cement (w/c), showing a sharp change between w/c ratios of 0.4 and 1. Triaxial compression tests revealed a clear boundary between brittle and ductile failure depending on the w/c ratio and confining pressure. The present results can be utilized as input parameters for numerical models to understand the initial deformation and failure behavior of grouting cements in a CO<sub>2</sub>-injection borehole.

**Keywords** : CO<sub>2</sub>-injection borehole, grouting cement, water/cement mixing ratio, mechanical properties, failure behavior

## 서 론

지구온난화의 한 원인으로 알려진 온실가스 처리의 한 방법으로 시추공을 이용하여 이산화탄소를 지중에 저장, 격리시키는 방법이 선진국을 필두로 최근 국내에서도 고려되고 있다(Sarmiento and Gruber, 2002; Bachu, 2008; 김태희 외, 2009). 이산화탄소 지중저장을 위해 선결해

야 할 사항은 충분한 양을 저장할 수 있는, 그리고 저장 후 누출을 최소화시킬 수 있는 적합 사이트를 발굴하는 것으로 이에 따라 다양한 지질 세팅에 대한 이산화탄소 지중저장 적합성 평가 연구가 진행돼오고 있다(에가와 코우스케 외, 2009; 이태중 외, 2009; 홍성경 외, 2009). 이와 더불어 주입공 굴착과 이산화탄소 주입 상황에서 발생할 수 있는 시추공 주변부에서의 수리학적, 역학적, 화

\*Corresponding author: cchang@cnu.ac.kr

학적 안정성에 관한 주제는 이산화탄소 지중저장과 관련된 또 하나의 주제로 연구되어 오고 있다(Damen et al., 2006; Bachu, 2008; 김구영 외, 2009; 김중휘 외, 2009; 최병영 외, 2009; 조민기 외, 2010).

초임계 상태의 이산화탄소 주입은 적정 온도와 압력 조건 때문에 보통 지하 1-1.5 km 심도에서 이루어지며 이에 따라 대심도의 주입공 설치가 요구된다. 간단히 정리하면 이산화탄소 주입공 완성은 시추공 굴착과 케이싱 설치 후 시추공 내 하부에서 그라우팅재 주입을 실시하여 암반과 케이싱 사이의 공간과 시추공 하부 주입구간을 전 심도에 걸쳐 메우는 작업으로 구성된다. 이 때 그라우팅재의 기밀성은 주입공 주변부를 통한 이산화탄소의 직접 누출을 방지하는 중요한 요소로 작용하며 기능적인 면에서 주입공의 공학적 완성도를 좌우하게 된다(Barlet-Gouédard et al., 2007; Rimmelé et al., 2008). 그라우팅재에 발생한 균열은 지질학적인 불연속면을 통한 이산화탄소 누출보다 더욱 직접적이며 가능성이 높은 누출 경로로 알려져 있기 때문이다(Bachu and Watson, 2009).

보통의 경우에는 순조로운 그라우팅을 위해 유동성이 높고 점성이 낮은 그라우팅재가 보편적으로 선호된다. 특히 초임계 이산화탄소 주입공의 경우 1-1.5 km 전 구간을 효과적으로 메우기 위해서는 더욱 그렇다. 그라우팅재의 유동성과 점성을 조절하는 기본적인 요소는 물과 시멘트의 배합비인데 많은 기존 연구들에서 물/시멘트 배합비에 따라 그라우팅재의 물성도 변화함을 보여주었다(김문섭 외, 1997; 오선환 외, 2000; 김원기와 김창은, 2000; 한천구 외, 2004; 유승경 외, 2007; 문태철 외, 2009). 박상순 외(2009)는 다양한 물/시멘트 배합비에 따른 시멘트 모르타르의 공극률, 강도, 내구특성 등에 대한 실험 연구를 통해 공극률과 강도의 상관성을 보인 바 있으며, 문태철 외(2009)는 지보재 성능을 증가시키기 위해 양생기간과 물/시멘트/모래의 배합비가 강도에 미치는 영향을 규명하였다. 양생기간 3일과 7일 사이에서 그라우트 모르타르의 역학적 성질의 변화가 심하고, 모래비가 증가함에 따라 물의 비율이 감소함에 따라 압축강도가 증가한다고 보고하였다. 또한 현장에서 지보재를 설치함에 있어 연구 결과의 효과적인 적용을 위해서 다양한 물/시멘트 배합비에 따른 그라우트 모르타르의 역학적 성질에 대한 더 많은 연구의 진행 필요성을 언급하였다.

대부분의 그라우팅 시멘트에 대한 기존 연구들은 지표 부근의 구조물 설치를 목적으로 한 것으로 유동성에 대한 고려보다는 주로 강도에 초점을 맞추었기 때문에 낮은 물/시멘트 배합비의 경우만 고려하였다. 그러나 이산화

탄소 주입공과 같이 지하 1 km 이상의 구간을 그라우팅하기 위해서는 타설시 그라우팅재의 유동성을 무시할 수 없으며 이를 고려하여 높은 물/시멘트 배합비에 대해서도 역학적 물성을 규명할 필요가 있다. 더구나 대심도의 높은 응력, 압력 조건에서의 그라우팅재의 파괴거동을 이해하는 것은 이산화탄소 주입공의 안정설계를 위해 중요하다.

또한 이산화탄소 주입공 그라우팅재의 경우 항산화성이 강한 시멘트를 사용해야 한다는 점도 중요하다. 그 중의 한 종류가 수밀성과 내구성이 좋고 특히 해수, 황산염 등에 대한 저항성이 큰 특징을 갖는 조강 3종 포틀랜드 시멘트인데 이에 대한 연구는 극히 제한되어 있다. 한천구 외(2004)는 조강 3종 포틀랜드 시멘트의 재령에 따른 일축압축강도 특성을 분석한 바 있다.

본 실내실험 연구에서는 이러한 관점에서 이산화탄소 주입정 그라우팅재로서의 조강 3종 포틀랜드 시멘트의 물/시멘트 배합비에 따른 광범위한 역학적 물성을 얻는데 주요 초점을 맞추고 특히 압축, 인장파괴 거동의 특이사항 및 차별성을 규명하고자 하였다. 끝으로 이산화탄소 주입시 주입압과 암반응력 등의 역학적 요인에 의해 그라우팅재에 발생할 수 있는 변형 및 파괴거동을 간단한 수치모델을 통해 고찰하였다.

## 그라우팅재 물성 측정

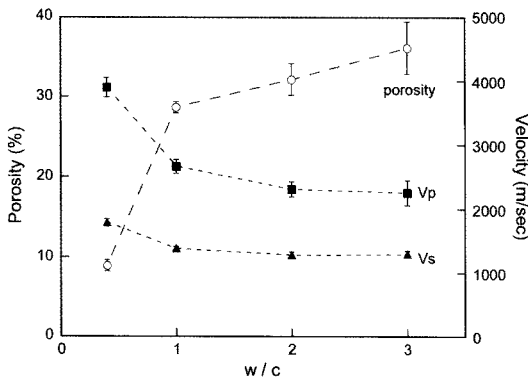
### 시편 및 기본 물성

먼저 물/시멘트 배합비에 따라 그라우팅 물성이 어떻게 변화하는지 이해하기 위해 다양한 물/시멘트 배합비(질량비 0.4, 1, 2, 3)의 그라우팅재에 대해 물성 측정 실험을 실시하였다. 사용된 시멘트는 짧은 재령에도 높은 강도 발현이 가능한 조강 3종 포틀랜드 시멘트로 상기한 비율로 물과 배합하여 상온에서 7일간 수중양생한 후 코어링(coring)을 통해 지름 50 mm 시편을 성형하였다. 본 연구에서 규명한 물성은 단위중량, 공극률, 탄성파속도 등의 기본 물리적 성질들과 탄성계수, 압축, 인장강도 등의 역학적 물성들을 포괄한다.

포화단위중량은 시편을 진공상태에서 24시간 물로 포화시킨 후 측정하였으며, 70°C에서 24시간동안 오븐 건조시켜 건조단위중량을 측정하였으며 이를 통해 공극률을 산정하였다. 개략적인 수치를 알아보기 위해 측정된 투수율은 휴대용 공기투수율 측정기(Davis et al., 1994)를 이용하여 일부 시편에 대해서만 측정하였다. 탄성파속도( $V_p$ ,  $V_s$ )는 일본 OYO사의 Sonicviewer 장비를 사용하여 모든 시편에 대해서 측정하였다.

**Table 1.** Physical properties of grouting cements with different water/cement (w/c) mixing ratios.

w/c mixing ratio	dry unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	wet unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	porosity (%)	permeability (m <sup>2</sup> )	V <sub>p</sub> (m/sec)	V <sub>s</sub> (m/sec)
0.4	18.7 ± 0.1	19.6 ± 0.1	8.9 ± 0.7	2.8 × 10 <sup>-15</sup>	3899 ± 154	1790 ± 58
1	13.7 ± 0.2	16.6 ± 0.2	28.7 ± 0.7	3.4 × 10 <sup>-15</sup>	2663 ± 108	1383 ± 31
2	13.0 ± 0.5	16.1 ± 0.4	32.2 ± 2.0	-	2307 ± 120	1280 ± 52
3	12.3 ± 0.3	15.9 ± 0.2	36.2 ± 3.3	-	2253 ± 192	1296 ± 51



**Fig. 1.** Porosity and velocities (V<sub>p</sub>, V<sub>s</sub>) of tested grouting cements as a function of the water/cement (w/c) mixing ratio.

기본 물성 측정결과들은 Table 1에 요약하였으며 Fig. 1에 물/시멘트 배합비에 따른 변화양상으로 도시하였다. 이들 기본 물성들은 물/시멘트 배합비에 따라 뚜렷한 변화를 보이며 일관되게 증가 또는 감소하는 경향을 보인다. 공극률과 투수율은 이산화탄소 주입공 그라우팅재의 기밀성과 직결되는 물성이기 때문에 그 정량적 자료를 얻는 것은 중요하다. 공극률은 물/시멘트 배합비가 감소함에 따라 감소하는데 물/시멘트 배합비가 낮을수록 시멘트 입자들의 수화물 형성이 많아지고 이로 인해 그 값이 감소하기 때문이다(박상순 외, 2009). 물/시멘트 배합비에 따른 기본 물성의 변화는 물/시멘트 배합비 0.4와 1 사이에서 뚜렷하게 관찰된다. 추후 보이겠지만 이러한 경향은 다른 물성에서도 유사하게 나타나는 경향이 있다.

**일축, 삼축압축시험에서의 응력-변형을 관계**

그라우팅재의 변형물성과 압축강도를 측정하기 위한 삼축압축시험을 수행하였다. 시편 축방향 변위는 시편에 직접 장착된 LVDT를 통해 측정하였으며 모든 시편은 2 × 10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>의 변형속도로 서보제어(servi-control)하며 압축하였다. 각 물/시멘트 배합비의 시편에 대해 여러 구속압 조건(0, 3, 6, 9, 12 MPa)에서 시험을 수행하였으며

시험 중에 감압시 탄성계수를 측정하기 위하여 세 번의 축응력 감압/재가압을 반복하며 시험하였다.

모든 시편은 압축 초기에 탄성변형을 하며 준선형의 응력-변형을 관계를 보였다(Fig. 2). 응력이 파괴 또는 소성응력에 접근함에 따라 응력-변형을 곡선의 기울기가 완만해지다 일부 시험에서는 파괴와 동시에 급격한 응력 강하가 발생하는 취성파괴 양상을 보이고, 일부 시험에서는 지속적인 압축 변형률을 동반하는 소성변형 거동을 보였다. 취성파괴는 시편의 물/시멘트 배합비에 상관없이 구속압이 0인 조건(즉, 일축압축시험)의 모든 시편에서, 그리고 구속압에 상관없이 물/시멘트 배합비 0.4의 모든 시편에서 발생하였다. 반면에 물/시멘트 배합비 1 이상의 시편은 구속압이 가해진 경우 모두 소성변형 거동을 보였다. 상호 유사한 성분의 쇄설성 암석의 경우 공극률이 증가함에 따라 암석파괴 모드가 취성에서 연성으로 전이되는 구속압이 낮아지는 경향이 있다(Baud et al., 2004). 본 실험에서 관찰한 물/시멘트 배합비에 따른 응력-변형을 관계는 이에 부합하는 결과로서 물/시멘트 배합비의 증가에 동반되어 공극률이 증가함으로 인해 그라우팅재의 소성이 강해지는 양상을 의미한다. 또한 소성변형을 보이는 물/시멘트 배합비 1이상의 시편의 경우 동일한 물/시멘트 배합비의 시편에서도 구속압에 따라 소성변형의 양상이 다르게 나타나는데, 상대적으로 낮은 구속압의 경우에는 일정한 차응력 상태에서 지속적인 변형을 보이는 완전소성의 특징을 보이고, 상대적으로 높은 구속압 조건에서는 응력의 증가에 동반된 지속적인 압축변형이 발생하여 뚜렷한 변형강화(strain-hardening) 현상을 보인다. 이는 높은 응력상태에서 그라우팅재가 상당히 압밀, 경화되고 있다는 점을 시사한다.

일련의 압축시험을 통해 얻은 응력-변형을 곡선에서 각 시편의 탄성계수(영률)를 측정하였다. 탄성계수를 측정하는 여러 방법 중 압축강도의 50% 정도의 응력에 해당하는 구간에서의 응력-변형을 곡선의 접선기울기를 탄성계수로 산정하였다(Brown, 1981). 접선기울기는 응력 상승(가압)시의 기울기와 하강(감압)시의 기울기에 차이를

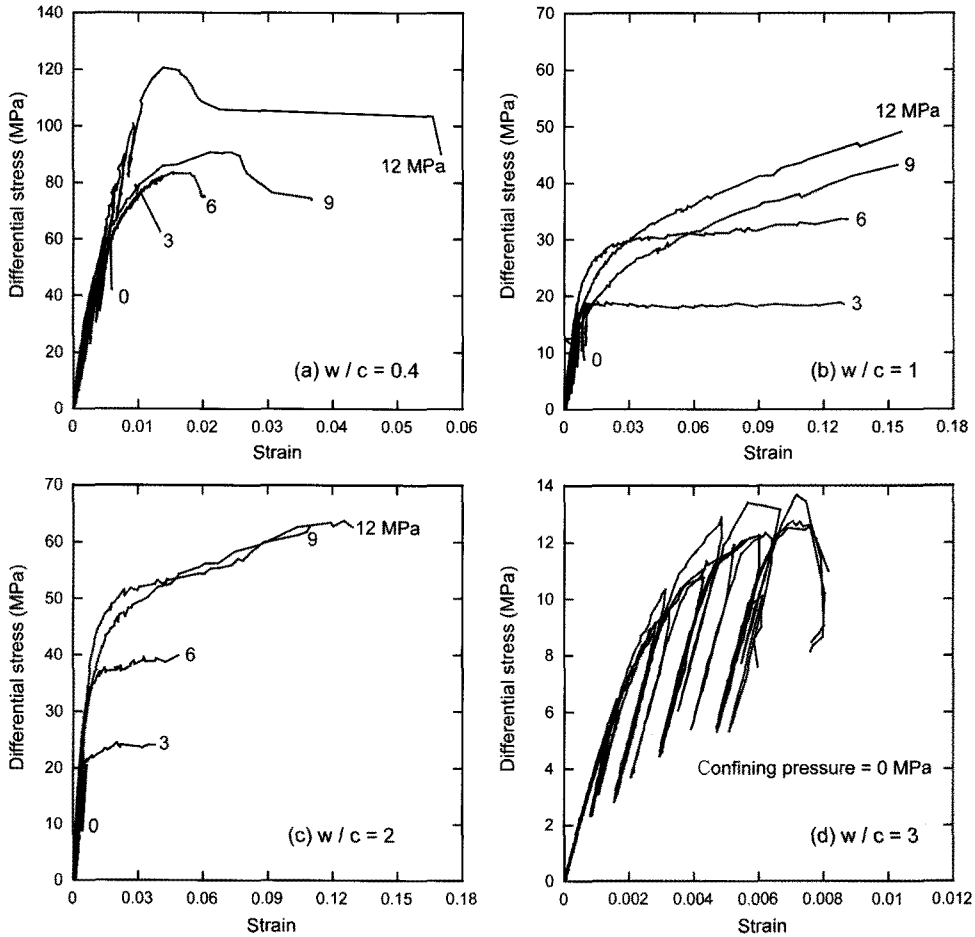


Fig. 2. Differential stress versus strain in uniaxial and triaxial compression tests at various confining pressures (0, 3, 6, 9, and 12 MPa) for cements with different water/cement (w/c) mixing ratios.

보이는 것이 보통이다. 대체로 감압시의 기울기가 가압시의 기울기보다 크게 측정되는데 이는 응력이 증가할 경우 공극, 미세균열 등의 미세구조면에서의 마찰로 인해 에너지 손실을 보이기 때문으로 알려져 있다(Cook and Hodgson, 1965; Plona and Cook, 1995). 본 연구에서는 감압구간과 가압구간 공회 기울기를 측정하여 비교하였다(Fig. 3). 영률은 재료의 견고성을 지시하는 물성이기 때문에 그라우팅재의 물/시멘트 배합비가 증가함에 따라 낮아질 것으로 기대되고 이는 Fig. 3의 결과에 잘 나타난다. 동일 물/시멘트 배합비에서 영률은 가해진 구속압 상태에 따라 일정정도 분산(약 2-6 GPa 폭)되어 나타났다.

참고로 측정 결과의 비교를 위해 오선환 외(2000)가 물/시멘트 배합비 0.25-0.7의 시멘트 모르타르에 대해 측정한 영률을 Fig. 3에 도시하였다. 이 연구에서 이용한 시

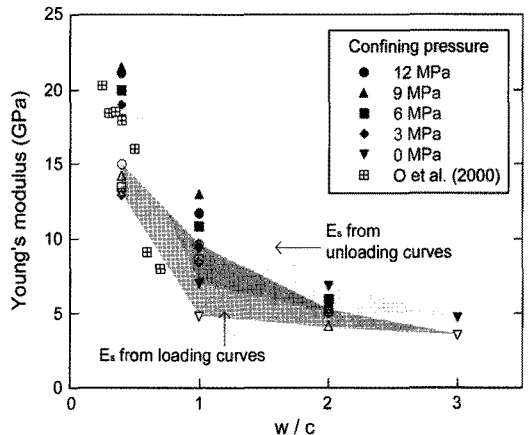


Fig. 3. Static Young's modulus determined from loading and unloading curves.

멘트 모르타르는 재령 기간(28일 이상)과 추가 모래 성분을 첨가했다는 점에서 본 연구의 그라우팅재와는 다르나 강도의 50%수준 응력의 가압구간에서 측정된 영률이 본 연구 결과와 상당히 유사하다는 점이 매우 흥미롭다. 즉, 재령기간, 시멘트 종류, 성형방법 등에 의해 영률은 그리 큰 영향을 받지 않음을 시사한다.

**압축강도와 항복응력**

취성파괴를 보이는 경우 주어진 구속압 하에서 시편이 견딜 수 있는 최대주응력을 압축강도라 하며 소성거동을 보인 경우에는 0.2%의 영구 소성변형을 보이기 시작하는 응력을 항복응력이라 정의한다(ASTM E6-09be1, 2009). Fig. 4는 각 시험에서 측정된 압축강도와 항복응력을 물/시멘트 배합비의 함수로 도시한 결과이다. 전체적으로 압축강도와 항복응력은 물/시멘트 배합비가 증가함에 따라 대체로 감소하는 경향을 보였다. 특히 공극률, 단위

중량, 탄성파속도 등 다른 물성과 마찬가지로 동일 구속압 하에서는 물/시멘트 배합비 0.4와 1 사이에서의 강도 차이가 가장 두드러지게 관찰되었다. Fig. 4에 도시된 취성-연성 전이는 구속압과 물/시멘트 배합비 조건에 따라 점선으로 표시된 경계를 따라 발생하게 된다. 실제 이산화탄소 주입시 주입공 하단부의 케이싱이 없는 구간에서는 이산화탄소 주입압이 구속압으로 작용하기 때문에, 이 결과는 사용되는 그라우팅재의 물/시멘트 배합비와 양생된 그라우팅에 가해지는 이산화탄소의 주입압(구속압)에 따라 다른 유형의 변형을 할 수 있다는 점을 시사한다. 이에 대한 보다 구체적인 분석은 3장의 주입공 그라우팅제에 대한 수치분석을 통해 좀 더 논의하기로 한다.

응력-변형률 곡선에서 관찰된 취성, 연성 파괴 양상은 시험 후 시편에서도 뚜렷한 차이를 보이며 나타났다. 취성 파괴를 보인 시편은 하나 또는 두 개 정도의 급한 경사의 전단 균열면을 따라 파괴가 발생하였으며 일부 구속압이 가해지지 않은 일축압축 시험편은 축방향과 준평행한 쪼개짐 현상(axial splitting)을 보이며 파괴되었다(Fig. 5). 반면에 소성변형을 보인 시편은 축방향으로 상당한 압밀이 발생하였으며 전단파괴면이 뚜렷하게 발달하지 않고 많은 수의 압밀에 의한 균열 양상을 보였다.

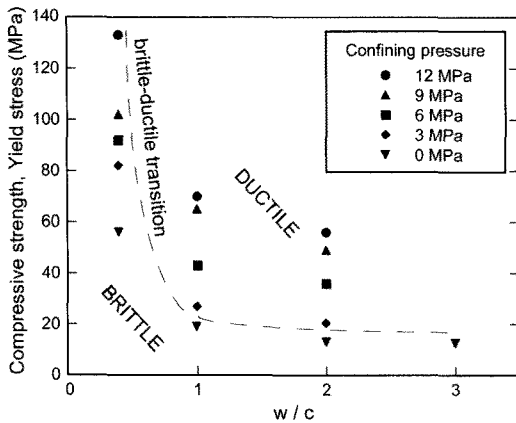


Fig. 4. Compressive strength and yield stress at various confining pressures as a function of the water/cement (w/c) mixing ratio.

**인장강도**

보통의 암석 또는 임정질 재료는 압축강도에 비해 인장강도가 매우 작은 쌍선형(bilinear)의 특성을 지니는데 특히 이산화탄소 주입공 그라우팅재의 경우 공내 주입압에 의한 유도 인장력 발생으로 인장파괴 가능성에 쉽게 노출될 수 있다. 그렇기 때문에 아마도 인장강도는 이산화탄소 주입공 그라우팅의 가장 중요한 물성 중 하나일 것이다. 이산화탄소의 주입압력에 의해 공내 그라우팅 벽면 상에 유도되는 인장응력에 의한 파괴를 보다 유사하

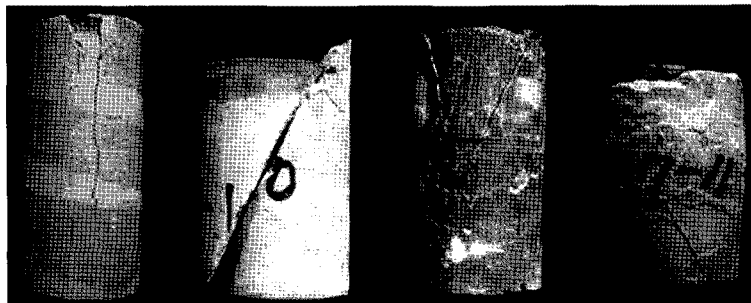


Fig. 5. Various types of failure of cement specimens (from left to right): axial splitting, single shear fracture, conjugate shear fractures, and catastrophic flow (ductile).

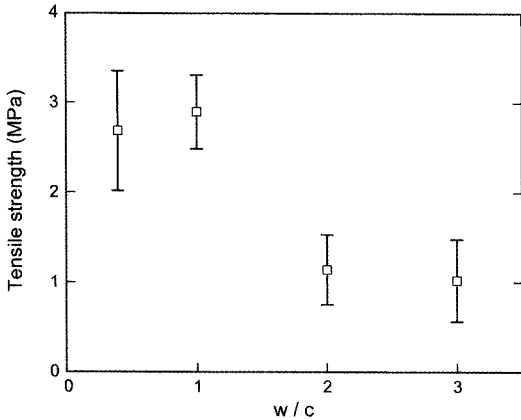


Fig. 6. Tensile strength versus the water/cement (w/c) mixing ratio.

게 모사하기 위해 지름 50 mm의 시편에 대해 압열인장 시험을 수행하였다.

측정된 인장강도는 물/시멘트 배합비가 0.4와 1의 경우 유사한 값(각각 2.7 ± 0.7, 2.9 ± 0.4 MPa)으로 얻어졌으며 물/시멘트 배합비 2, 3 시편의 경우에는 다소 낮은 값(각각 1.1 ± 0.4, 1.0 ± 0.5 MPa)으로 나타났다(Fig. 6). 인장강도는 재료의 성형상태, 미세균열 존재 여부 등에 의해 크게 영향을 받으므로 얻어진 값 자체가 큰 의미를 갖지는 않는다. 그러나 주입압에 의한 유도인장력으로 인장 파괴가 발생함은 중요한 사안이므로 시료의 특성을 최대한 조절하고 보다 많은 실험을 통해 인장강도 값을 도출하고 분석할 필요가 있다.

**동적 물성 측정**

실제 이산화탄소 주입공의 굴착과 건설시 시추공 상태를 파악하고자 할 경우에는 대체로 공내 물리검층이나 영상검층 자료를 이용하여 분석하는 것이 보통이다. 이는 그라우팅재의 양생정도나 타설 상태를 파악하는데 탄성파속도 등 물리검층 결과를 통해 간접 유추해야 한다는 것을 의미한다. 따라서 본 실험을 통해 얻은 그라우팅재의 동적물성 자료는 실제 주입공 건설시에 비교 자료로 활용될 수 있다는 점에서 의미가 있다.

시편의 탄성파속도를 이용해 구한 동탄성계수( $E_d$ )는 Fig. 7에 물/시멘트 배합비의 함수로 나타내었다. 물/시멘트 배합비 0.4의 경우 약 18 GPa의 높은 동탄성계수를 보인 반면 물/시멘트 배합비 1 이상에서는 약 7 GPa 이하로 급격히 감소함을 볼 수 있다. 물/시멘트 배합비 0.4와 1 사이의 급격한 동탄성계수의 감소는 오선환 외(2000)의

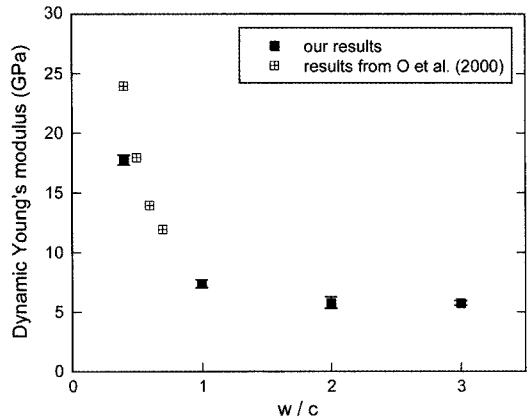


Fig. 7. Dynamic Young's modulus as a function of the water/cement (w/c) mixing ratio.

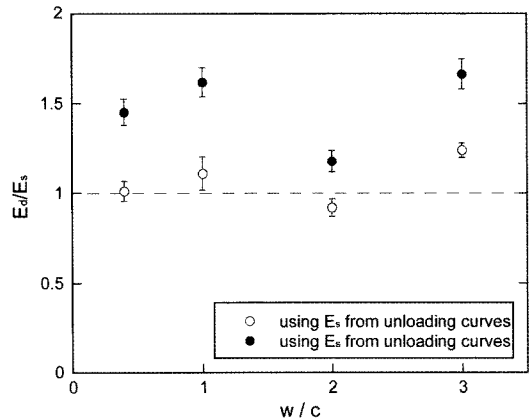


Fig. 8. Dynamic modulus versus static modulus as a function of the water/cement (w/c) mixing ratio.

자료를 통해 좀 더 명확히 확인된다. 앞서 기술한 대로 이 자료는 상이한 재령기간과 성형방식에도 불구하고 본 논문의 자료와 상당히 일치함을 볼 수 있고 물/시멘트 배합비 0.25에서 0.7로 증가함에 따라 급격히 동탄성계수가 감소하여 본 실험의 물/시멘트 배합비 1의 결과에 수렴해 감을 볼 수 있다.

일반적으로 동탄성계수가 정탄성계수 보다 높게 측정되는 것으로 알려져 있으며 그 이유 중 하나는 정적 변형의 경우 변형의 크기가 커서 암반 내 미세균열이나 공극 등의 미세구조의 존재에 의해 쉽게 영향을 받는 반면, 동적물성은 작은 진폭의 파동에 의한 탄성변형만으로 산정되기 때문인 것으로 요약된다(유근환과 장찬동, 2006). 본 실험에서 사용된 그라우팅재의 경우에는 동탄성계수와 감압시 측정된 정탄성계수 값이 상당히 유사하게 나타났다(Fig. 8). 동일하게 구속압을 가하지 않은 상태에서 측정된

대부분의 경우에 동탄성/정탄성계수의 비는 1에 근접한 양상을 보이고 물/시멘트 배합비 3의 시편의 경우에만 동탄성계수가 정탄성계수에 비해 약 30% 정도 높은 값으로 측정되었다. 유사한 동탄성, 정탄성계수 값의 결과는 그라우팅재의 극히 작고 유사한 크기의 입자가 치밀한 조직으로 양생된 결과로 해석된다. 반면에 동탄성계수는 가압시에 측정한 정탄성계수에 비해 50% 내외 높은 값으로 측정되었다

**측정 물성의 활용 : 수치모델**

실제 이산화탄소 주입과 관련되어 수행된 여러 기존 연구의 실험 결과들을 보면 이산화탄소 주입 후 장시간에 걸친 케이싱 부식과 그라우팅재에서 발생하는 다양한 화학반응 등이 역학적 거동들과 복합적으로 커플링되어 있어 이산화탄소 주입이 그라우팅재에 미치는 영향은 그리 단순하지 않다(Barlet-Gouédard et al., 2007; Gaus et al., 2008; Bachu and Bennion, 2009). 그러나 지금까지 실험을 통해 규명한 그라우팅재의 물리, 역학적 특성은 적어도 이산화탄소 주입 직후 주입 구간에서 발생하는 일차적 그라우팅재 거동을 이해하는데 중요한 단서들을 제공할 것으로 기대한다.

물성자료 활용의 한 예로서 간단한 2차원 모델을 사용하여 이산화탄소 주입 구간 주변의 압반응력과 주입압이 그라우팅재에 미치는 영향에 대해 유한요소법 분석을 시도해 보았다. 수치모델은 동일한 압반응력 조건 하에서 물/시멘트 배합비가 다른(각각 0.4와 2) 그라우팅재의 역학적 거동 차이를 비교해보기 위한 것이다. 지하 1 km 심도에 이산화탄소를 주입하는 경우 압반응력장, 지하수압, 퇴적암반 물성 등을 적절히 가정하고 앞에서 얻어진 그라우팅 시멘트의 물성을 활용하여 분석하였다. 국내 압반응력 상태가 수평응력이 연직응력보다 높은 역단층성 응력체계인 점에 착안하고(Chang et al., 2010) 지하수압은 정수압임을 가정하였다. 수치모델에 사용된 입력변수는 Table 2에 보였다.

그라우팅시 케이싱 하부에서 그라우팅재를 주입하여 케이싱 주변부와 암반 사이의 공간을 통해 지표까지 밀어 올리는 방식으로 타설된다. 이는 그라우팅재가 굳기까지 적어도 1 km 그라우팅 컬럼 압력 조건 하에 있음을 의미하며 주입공벽 둘레를 단순히 둘러싸고만 있는 것이 아니라 암반의 일부처럼 압반응력 또한 받게 된다는 점을 의미한다. 케이싱 하부의 이산화탄소 주입 구간에서는 케이싱이 없이 그라우팅재와 암반만 존재하므로 모델은

**Table 2.** Input parameters used for numerical modeling.

parameter	value		
depth	1 km		
vertical stress	23 MPa		
maximum horizontal stress	38 MPa		
minimum horizontal stress	25 MPa		
pore pressure	10 MPa		
injection pressure	12 MPa		
	cement (w/c = 0.4)	cement (w/c = 2)	rock
Young's modulus (GPa)	15.0	5.1	12.0
Poisson's ratio	0.37	0.29	0.25
wet density (kg/m <sup>3</sup> )	2000	1650	2300
cohesion (MPa)	12	3	-
internal friction coefficient	1.0	0.7	-
uniaxial compressive strength (MPa)	58.2	11.8	-

외부응력을 받는 무한평면상에 뚫린 원형 시추공 주변을 물성이 다른 일정 두께의 실린더가 채우고 있는 평면변형(plane strain) 문제와 동일하다. 시추공 주위의 대칭성 때문에 한 사분면의 경우만 분석하였다.

모델 결과는 그라우팅재의 물성에 따라 확연히 다른 결과를 보여준다(Fig. 9). 가해진 압반 응력은 사용된 두 그라우팅재 응력의 사이 값을 갖는데 암반보다 큰 응력 값을 갖는 물/시멘트 배합비 0.4의 그라우팅재의 경우 시추공 주변 응력집중 현상이 그라우팅재에 발생하는 반면 물/시멘트 배합비 2인 그라우팅의 경우에는 암반에 주로 나타난다. 즉, 시추공 주변의 응력은 암반과 시멘트 중 좀 더 견고한 물질에 의해 지탱되는 결과를 보인다. 주어진 응력 상태에서 지하수압보다 2 MPa 더 높은 주입압을 가한 경우 두 그라우팅재 공히 응력집중 현상이 최소화되는 외부 최대주응력 방향에 수직한 방향으로 취성파괴(물/시멘트 배합비 0.4인 경우)와 연성파괴(물/시멘트 배합비 2의 경우)가 발생하였으며 파괴 범위는 그라우팅재의 물성에 의해 조절되는 경향을 알 수 있다. 두 경우 파괴 모드는 다르지만 공벽에 노출되어 있는 파괴 부분은 공히 떨어져 나갈 가능성이 높다. 따라서 이 결과로 볼 때 가능한 적은 양이 떨어져 나가는 0.4 물/시멘트 배합비의 그라우팅재를 사용하는 것이 현명하다. 더욱이 물/시멘트 배합비 2의 그라우팅재를 사용할 경우 시추공 주변 응력이 시멘트 외부 암반 부분에 더 높은 값으로 집중되면서 퇴적암반이 파괴될 가능성이 있고 이 경우에는 그라우

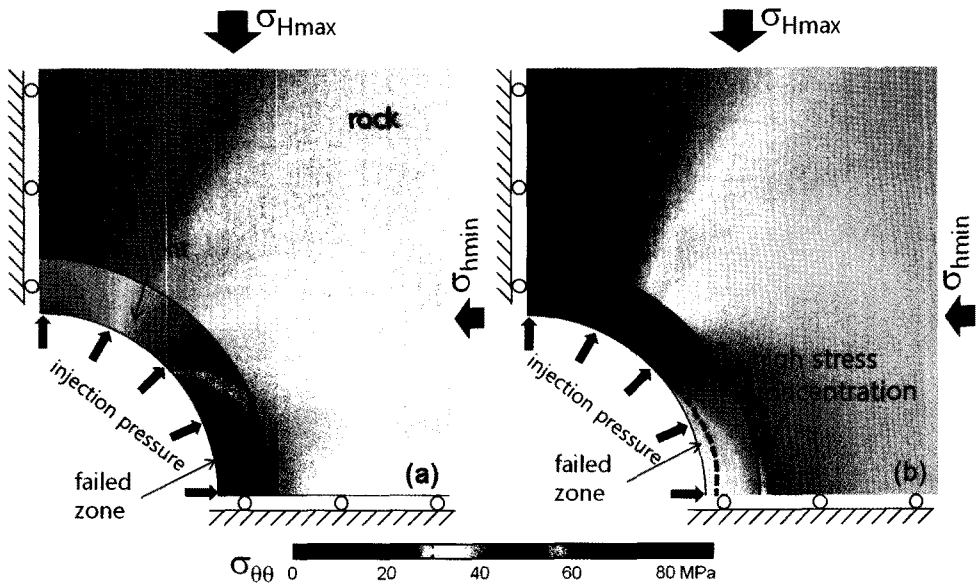


Fig. 9. Variations in the effective tangential stress around a grouted injection borehole as a result of rock stress, pore pressure, and injection pressure for (a) cement with water/cement (w/c) mixing ratio = 0.4, and (b) w/c = 2.

팅재와 암반이 완전히 분리되는 결과를 초래하게 된다. 이는 이산화탄소 주입공 그라우팅재의 기밀성 문제에 있어 가장 안 좋은 결과이다. 따라서 본 수치분석 결과가 시사하는 점은 이산화탄소 주입공의 경우 설치가 어렵더라도 물/시멘트 배합비가 낮은 그라우팅재를 타설하는 것이 유리하다는 것이다.

추가적으로 추정되는 물/시멘트 배합비가 높은 그라우팅재의 단점은 한정된 부피의 그라우팅재가 반복적인 주입에 의한 소성변형에 동반되어 압밀, 수축됨에 따라 그라우팅재 자체보다 그라우팅-케이스, 또는 그라우팅-암반 경계에서 분리현상(debonding)이 발생할 수 있다는 점이다. 이는 특히 높은 압력 조건의 대심도에서 이루어지는 이산화탄소 주입의 경우 기밀성 문제에 치명적인 영향을 미치므로 추후 좀 더 심도 있는 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

### 결 론

본 연구에서는 대심도 이산화탄소 주입공을 위한 그라우팅 시멘트의 물성, 파괴거동을 실내실험을 통해 규명하였으며 주요 결과와 시사하는 점은 다음과 같이 요약된다.

- 전체적인 물성 변화는 물/시멘트비 0.4와 1사이에서 급격하게 나타나며 물/시멘트 배합비 1 이상의 그라우팅

재는 물성 변화 양상이 완만해지며 큰 차이를 보이지 않는 경향이 있다. 이는 이산화탄소 주입공에 사용할 그라우팅재의 물/시멘트 배합비가 1보다 충분히 작을지, 1 이상인지가 주요 선택 사항임을 시사한다.

- 물/시멘트 배합비가 0.4인 그라우팅재는 강도는 높으나 취성파괴 거동을 보인다. 이는 주입 구간 심도의 암반응력 상태에 따라 파괴될 시에 균열 발달을 초래할 가능성이 있다는 점을 지시한다. 반면에 물/시멘트 배합비 1 이상의 그라우팅재는 강도는 낮으나 일정 구속압 이상에서 소성경화하는 경향이 있다. 이 경우에는 이산화탄소의 주입압이 구속압으로 작용하여 연성파괴와 동반된 그라우팅 압밀 과정이 진행될 가능성이 있다. 취성파괴, 연성파괴 공히 시추공벽에 노출되어 있는 경우에는 그라우팅재가 떨어져 나가 파손이 발생하게 되나 영률이 높은 그라우팅재를 사용할수록 암반에 가해지는 응력집중 현상을 감소시키는 장점이 있다.

본 연구를 통해 규명한 그라우팅재의 물성 및 파괴 거동은 향후 이산화탄소 주입공의 누출제어와 기밀성 분석을 위해 필요한 기본적인 정보를 제공할 것으로 기대한다. 수십 년간에 걸친 장기적 이산화탄소 주입에 동반된 주입공의 화학적, 수리학적, 역학적 반응에 의한 기능저하 전반을 총체적으로 분석하지는 못하지만 이산화탄소 주입 직후 또는 주입 초기의 일차적 안정성 분석을 위



해서는 그라우팅제의 역학적 물성, 파괴 거동, 그리고 주입공 외부 요인으로서 암반응력, 암반 물성 등의 제한 입력변수들이 요구되기 때문이다.

## 사 사

본 연구는 산업기술연구회 협동연구사업 '저탄소 녹색성장을 위한 CO<sub>2</sub> 지중주입시스템 개발'의 일환으로 수행되었습니다. 비판적이고 건설적인 심사를 통해 논문의 완성에 도움을 주신 익명의 세 분 심사위원들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김구영, 김태희, 김정찬, 한원식, 2009, 이산화탄소 지중 주입에 의한 압력변화 수치모의, 지질학회지, 45, 435-448.
- 김문섭, 임경택, 윤현도, 정수영, 1997, 再生骨材 콘크리트의 力學的 特性, 대한건축학회논문집, 13, 305-312.
- 김원기, 김창은, 2000, 시멘트의 특성과 사용 온도가 모르타르의 물성에 미치는 영향, 한국세라믹학회지, 37, 403-515.
- 김중휘, 김준모, 왕수균, 2009, 심부 사암 대수층 내 이산화탄소 지중 저장의 효율성 및 안정성에 대한 광물학적 조성의 영향 수치 모의, 지질학회지, 45, 493-516.
- 김태희, 김정찬, 엄병우, 2009, CO<sub>2</sub> 주입정 설계 및 운영에 관한 국외 연구개발 동향, 지질학회지, 45, 557-568.
- 문태철, 강추원, 이효, 2009, 그라우트 모르타르 배합조건에 따른 물리적 성질의 특성, 대한화약발표공학회지, 27, 32-37.
- 박상순, 권성준, 김태상, 2009, 시멘트 모르타르의 공극률과 내구특성과의 관계에 대한 실험적 연구, 대한토목학회논문집, 29, 171-179.
- 에가와 코우스케, 홍성경, 이효중, 최태진, 이민경, 강정길, 유규철, 김진철, 이용일, 김중휘, 김준모, 2009, 백악기 경상분지 신동층군 사암의 이산화탄소 저장 능력 예비 평가, 지질학회지, 45, 563-472.
- 오선환, 김형수, 장보안, 서만철, 2000, 시멘트 모르타르 재료의 동탄성계수와 정탄성계수 비교 연구, 지구물리, 3, 127-138.
- 유근환, 장찬동, 2006, 다양한 시험법으로 규명된 암반 탄성계수 비교, 지질공학, 16, 1-14.
- 유승경, 유남재, 조성민, 심민보, 2007, 순환골재를 이용한 투수성 콘크리트의 역학적 특성, 한국토목섬유학회논문집, 6, 17-20.
- 이태중, 한누리, 고평범, 황세호, 박권규, 김형찬, 박용찬, 2009, 이산화탄소 지중저장 Pilot 부지 선정에 위한 의성지역 MT 탐사, 지구물리와 물리탐사, 12, 299-308.
- 조민기, 채기탁, 최병영, 유순영, 김태희, 김정찬, 2010, CO<sub>2</sub> 지중저장 주입정에서의 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-시멘트 반응 운송 모델링, 지질공학, 20, 359-370.
- 최병영, 채기탁, 김경호, 고용권, 유성택, 2009, 이산화탄소의 지중저장에 관한 반응성 용질 이동 모델링의 적용, 지질학회지, 45, 55-67.
- 한천구, 황인성, 이승훈, 김규동, 2004, 물시멘트비 및 시멘트 요인에 따른 콘크리트의 초기 압축강도 발현 특성, 대한건축학회논문집, 20, 77-84.
- 홍성경, 이효중, 에가와 코우스케, 최태진, 이민경, 유규철, 김중휘, 이용일, 김준모, 2009, 충남, 태백산, 문경 및 호남분지의 이산화탄소 저장 능력 예비 평가, 지질학회지, 45, 449-462.
- ASTM E6-09be1, 2009, Standard terminology relating to methods of mechanical testing, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- Bachu, S., 2008, CO<sub>2</sub> storage in geological media: Role, means, status and barriers to deployment, Progress in Energy and Combustion Science, 34, 254-273.
- Bachu, S. and Bennion, D.B., 2009, Experimental assessment of brine and/or CO<sub>2</sub> leakage through well cements at reservoir conditions, Int. J. Greenhouse Gas Control, 3, 494-501.
- Bachu, S. and Watson, T.L., 2009, Review of failures for wells used for CO<sub>2</sub> and acid gas injection in Alberta, Canada, Energy Procedia, 1, 3531-3537.
- Barlet-Gouédard, V., Rimmelé, G., Goffé, B. and Porcherie, O., 2007, Well technologies for CO<sub>2</sub> geological storage: CO<sub>2</sub> resistant cement, Oil and Gas Science and Technology-Rev IFP, 62, 325-334.
- Baud, P., Klein, E. and Wong, T-f., 2004, Compaction localization in porous sandstones: spatial evolution of damage and acoustic emission activity, J. Struct. Geol., 26, 603-624.
- Brown, E.T., 1981, Rock Characterization, Testing & Monitoring: ISRM Suggested Methods, Pergamon Press, Oxford, 211p.
- Chang, C., Lee, J.B. and Kang, T.S., 2010, Interaction between regional stress state and faults: Coplementary analysis of borehole in situ stress and earthquake focal mechanism in southeastern Korea, Tectonophysics, 485, 164-177.
- Cook, N.G.W. and Hodgson, K., 1965, Some detailed stress-strain curves for rock, J. Geophys Res., 70, 1883-1888.
- Damen, K., van Troost, M., Faaij, A. and Turkenburg, W., 2006, A comparison of electricity and hydrogen production systems with CO<sub>2</sub> capture and storage. Part A: Review and selection of promising conversion and capture technologies, Progress in Energy and Combustion Science, 32, 215-246.
- Davis, J.M., Wilson, J.L. and Phillips, F.M., 1994, A portable air-minipermeameter for rapid in situ field measurements, Ground Water, 32, 258-266.
- Gaus, I., Audigane, P., Andre', L., Lions, J., Jacquemet, N., Durst, P., Czernichowski-Lauriol, I. and Azaroual, M., 2008, Geochemical and solute transport modelling for CO<sub>2</sub> storage, what to expect from it?, Int. J. Greenhouse Gas Control, 2, 605-625.
- Plona, T.J. and Cook, J.M., 1995, Effects of stress cycle on static and dynamic Young's moduli in Castlegate sandstone, Proc. 35th U.S. Sympo. on Rock Mech., Daemen & Schultz (eds), 155-160.
- Rimmelé, G., Barlet-Gouédard, V., Porcherie, O., Goffé, B. and Brunet, F., 2008, Heterogeneous porosity distribution in Portland cement exposed to CO<sub>2</sub>-rich fluids, Cement

and Concrete Research, 38, 1038-1048.  
Sarmiento, J. L. and Gruber, N., 2002, Sinks for anthropo-  
genic carbon, Physics Today, 55, 30-36.

---

2011년 5월 21일 원고접수, 2011년 6월 23일 게재승인

#### 박미희

충남대학교 지질환경과학과  
305-764 대전광역시 유성구 궁동 220  
Tel: +82-42-821-7563  
Email: mihee915@cnu.ac.kr

#### 장찬동

충남대학교 지질환경과학과  
305-764 대전광역시 유성구 궁동 220  
Tel: +82-42-821-6430  
Email: cchang@cnu.ac.kr

#### 조영욱

충남대학교 지질환경과학과  
305-764 대전광역시 유성구 궁동 220  
Tel: +82-42-821-7563  
Email: joyuk@cnu.ac.kr

#### 추민경

지질자원연구원, CO<sub>2</sub> 처분연구실  
305-764 대전광역시 유성구 과학로 92  
Tel: +82-42-821-7563  
Email: cmk310@kigam.re.kr

#### 염병우

지질자원연구원, CO<sub>2</sub> 처분연구실  
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92  
Tel: +82-42-868-3375  
E-mail: ybw@kigam.re.kr