터널과 지하공간, 한국암반공학회지
제18권 제3호, 2008년 6월, pp. 175~184

TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 18, No. 3, 2008, pp. 175-184
Journal of Korean Society for Rock Mechanics

온실가스(CO_2) 지중저장과 암반공학적 기술요소

김형목[1], 박의섭[1], 신중호[2], 박용찬[1]*

Greenhouse Gas (CO_2) Geological Sequestration and Geomechanical Technology Component

Hyung-Mok KIM, Eui-Seob PARK, Joong-Ho SYNN, Yong-Chan PARK

Abstract In this study, state-of-the-art of CO_2 geological sequestration as a method of greenhouse gas reduction was reviewed. Thermal-Hydraulic-Mechanically(THM) coupled simulation technology and its application to a stability analysis of geological formation due to CO_2 injection as well as a leakage path analysis were investigated and introduced.

Key words Greenhouse gas, CO_2, Geological sequestration, Thermal-Hydraulic-Mechanically (THM) coupled analysis

초 록 본 고에서는 온실가스 감축방안으로 배출 CO_2를 지하심부에 격리저장시키는 지중저장기술의 국내외 기술동향을 살펴보고 지반 및 암반공학적 관련기술로서 CO_2 주입에 따른 대상지층의 역학적 안정성 및 누출경로 평가를 위한 열-수리-역학적 연계해석기술 및 적용사례, 기술개발요소를 소개하였다.

핵심어 온실가스, 이산화탄소, 지중저장, 열-수리-역학적 연계해석

1. 서 론

지구 온난화로 인한 기후변화는 인류가 직면한 심각한 환경문제로 지적되고 있다. 국제사회는 1988년 기후변화에 관한 정부간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)을 설립하여 기후변화현상의 영향 및 과학적 증거확보와 국제적인 대응방안에 관한 체계적인 연구를 추진하고 있다. 이의 일환으로 지구 온난화의 원인인 온실가스 감축을 의무화한 교토의정서를 1997년 채택하였으나, 온실가스 대량 발생국인 미국과 호주의 비준거부로 효력을 발휘하지 못하였다. 2005년 2월 러시아의 비준을 계기로 교토의정서는 그 효력이 발효되어 선진국(교토의정사상의 Annex I 국가)에 대해 제1차 공약기간(2008~2012) 동안 1990년 대비 평균 5% 이상의 온실가스 감축 의무를 부과하였다. 또한, 최근에는 2007년 발리회의를 통해 포스트 교토체제가 부각되었으며 2013년부터 개도국을 비롯한 전체 나라에 의무부담이 논의되고 있다. 온실가스는 지구온난화를 유발하는 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O), 불화탄소(PFC), 수소화불화탄소(HFC), 불화유황(SF6)의 6가지로 규정되나 일반적으로는 인간활동과 관련하여 비교적 대량으로 발생되는 이산화탄소를 지칭한다.

교토의정서에서는 선진국들의 감축의무이행의 효율성을 위하여 다음과 같은 3가지 시스템을 운영하고 있다.

1) 청정개발체제(Clean Development Mechanism, CDM): 선진국은 개도국에 기술지도 및 투자를 하고 이를 통해 얻게 되는 온실가스 감축분을 자국의 감축 실적으로 인정받을 수 있게 하는 제도
2) 공동이행제도(Joint Implementation, JI): 선진국 기업들간에 공동으로 실시하여 얻어진 온실가스 감축분을 자국의 감축 실적으로 인정받을 수 있게 하는 제도
3) 배출권거래제도(Emissions Trading, ET): 온실가스 감축목표를 초과달성하거나 목표달성에 미달한 국가간에 감축의무를 사고 팔 수 있도록 시장원리를 도입한 제도

[1] 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원
[2] 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원
* 교신저자 : ycpark@kigam.re.kr
접수일 : 2008년 6월 11일
심사 완료일 : 2008년 6월 20일
게재 확정일 : 2008년 6월 24일

CDM 사업의 경우, 선진국은 개도국에서 온실가스를 줄일 수 있게 되어 자국의 감축 비용을 최소로 낮출 수 있으며 동시에 개도국은 해외 투자를 받아 관련 기술 개발 및 기술 축적이 가능하다는 장점이 있다. 이러한 CDM 사업으로의 실행을 목표로 이산화탄소 포집 및 저장(Carbon Capture and Storage, CCS) 기술이 최근 많은 주목을 받고 있다.

CCS 기술은 크게 다음과 같은 3단계로 구성된다.

1) 포집단계: 대규모의 이산화탄소를 배출하는 육상의 발전소, 제철소 등 발생원에서 연소 후 탈산소화, 연소 전 탈탄소화 및 순산소 연소기술 등으로 CO_2를 회수하는 단계,
2) 수송단계: 포집된 대용량의 CO_2를 압축시켜 가스 형태로 파이프라인을 이용하거나 액화시켜 선박을 통해 운반하는 단계,
3) 저장단계: 수송된 CO_2를 지하심부지층에 장기간 안정적으로 주입·격리 저장시키는 단계

본 고에서는 CCS 기술 중 CO_2를 지하심부(1000 m 이상)에 격리저장시키는 기술의 국내외 기술동향을 살펴보고 지반·암반공학분야 관련 전문가가 관심을 가져볼 만한 기술분야로서 CO_2의 주입에 따른 대상지층의 안정성 및 누출경로 평가 해석기술에 관해 소개한다.

2. CO_2 지중저장(CO_2 geological sequestration)

2.1 CO_2의 특성

저장단계에서 CO_2는 초임계상태(supercritical state)로 주입·저장된다. 초임계상태란 액체와 기체의 구별이 없어지는 상태로 액체와 같은 밀도에 기체와 같은 점성을 지니기 때문에 대규모 저장에 적합한 상태로, CO_2의 경우 7 MPa 이상의 압력조건과 31℃ 이상의 온도조건에서 초임계상태를 유지하는 것으로 알려져 있다(그림 1). 통상 주입심도는 지하 1000 m 이상으로 고려되고 있으며 이 경우 초임계상태의 조건을 만족시킬 수 있다.

2.2 CO_2 지중저장 방식

온실가스 감축방안으로 CO_2를 인위적으로 지하심부에 주입하여 격리저장시키는 방법은 다음과 같이 분류된다(그림 2).

1) 고갈된 유전 또는 가스전에 저장하는 방법,
2) 유전 또는 가스전에 CO_2를 주입시켜 석유 및 가스 생산을 증진시키는 오일회수증진(Enhanced Oil Recovery, EOR) 혹은 가스회수증진(Enhanced Gas Recovery, EGR)
3) 육상 또는 해양퇴적층의 염대수층에 저장하는 방법
4) 석탄층에 존재하는 메탄을 회수함과 동시에 CO_2를 저장하는 메탄회수증진 (Enhance Coal Bed Methane Recovery, ECBM)

고갈된 유전 또는 가스전에 저장하는 방법은 탄화수소가 기존에 저장된 장소이므로 수리지질학적 조건이 CO_2의 저장에 적합할 수 있다는 장점과 주입을 통해 생산 후 압력을 원래 상태로 복원시킴으로써 지반변형을 막을 수 있다는 장점이 있다. EOR 방식은 주입정에의 CO_2 주입을 통해 생산정에서의 석유생산효율을 높이는 방식으로 현재도 적용되고 있는 방법으로 경제적 및 기술적 관점에서 가장 현실적인 방식이라 할 수 있다. ECBM 방식 역시 석탄층에의 CO_2 주입을 통해 메탄가스의 회수율을 높이는 방법으로 주입된 CO_2가 석탄 표면의 메탄을 탈착시키고 흡착하는 방식으로 이루어진

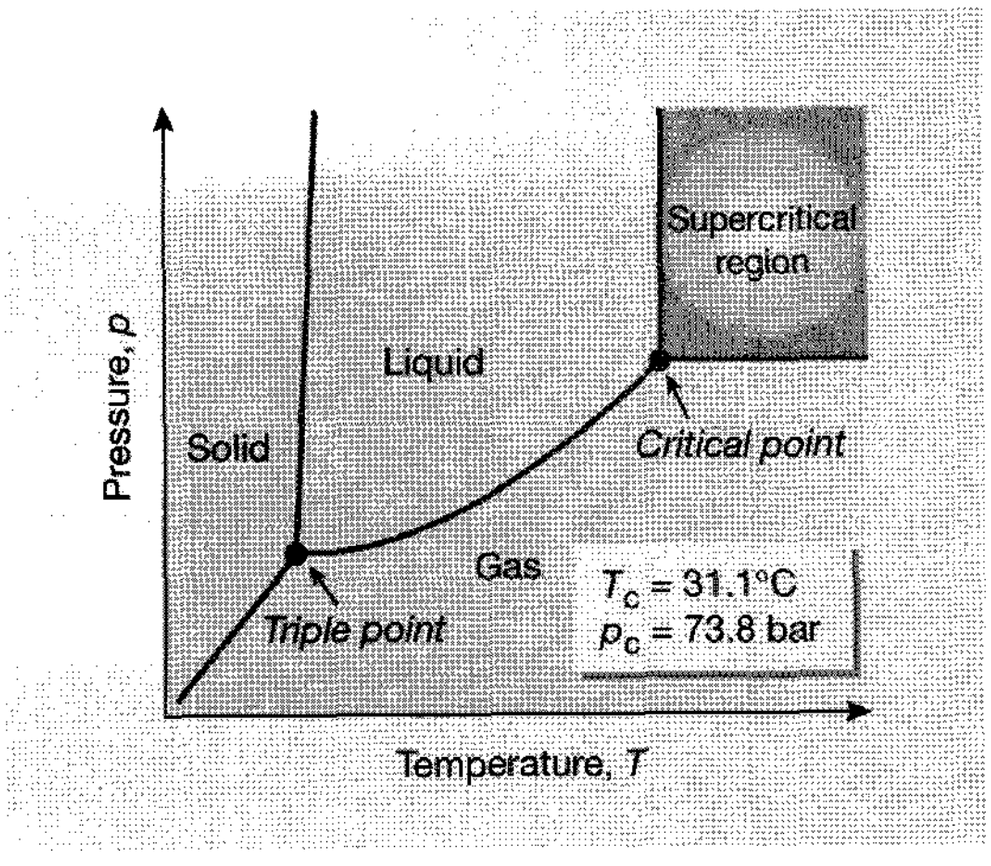


그림. 1. 온도 및 압력에 따른 CO_2 상태

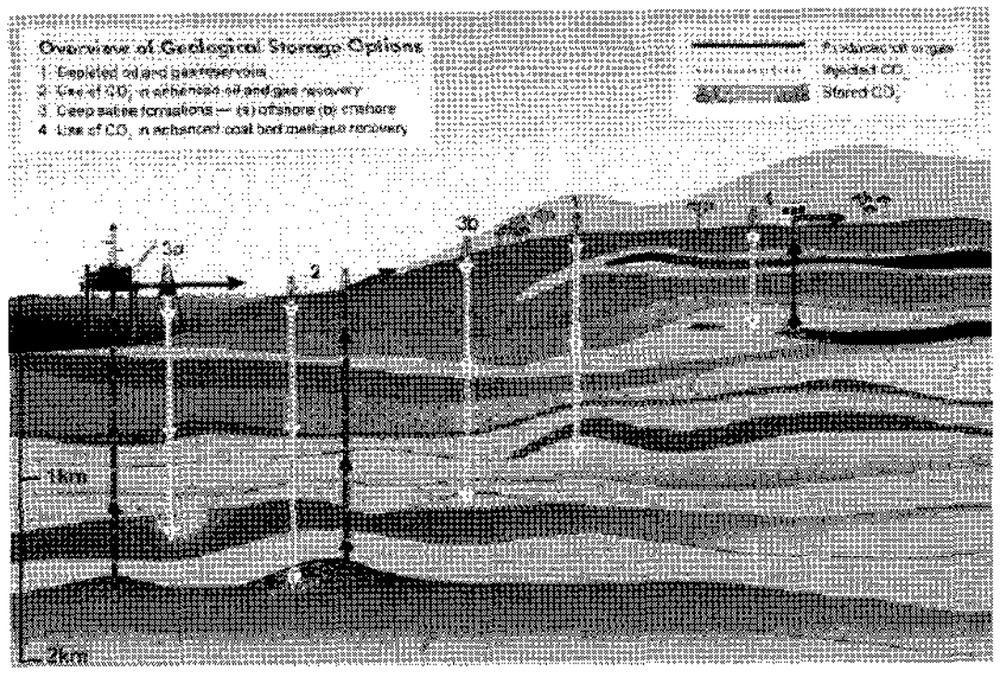


그림. 2. CO_2 지중저장 방식(after IPCC, 2005)

다. 염대수층에의 저장은 지하수의 염분농도가 너무 높아 음용수 및 농업용수 등으로 부적합한 대수층에 주입하는 방식이다.

2.3 대수층 및 유·가스전 저장에서의 저장메커니즘 (trapping mechanism)

주입 CO_2의 저장메커니즘으로는 크게 지질구조저장(structural trapping), 잔류가스 저장(residual gas trapping), 저장층 내 유체에의 용해저장(dissolution trapping) 및 지구화학적 광물화 저장(mineral trapping)으로 분류될 수 있다.

지질구조저장은 상부에 불투수층이 존재하거나 배사구조의 상부에 저투수성의 덮개암(caprock)이 위치하는 지질구조에 의해 CO_2가 저장되는 방식으로 가장 일반적인 형태라 할 수 있다. 잔류가스저장은 초임계상태로 주입된 CO_2가 가스상태로 주입층의 공극에 갇힌 상태로 유동이 발생하지 않는 경우를 말하며 용해저장은 주입층내 유체에 용해상태로 저장되는 경우를 말한다. 광물화저장은 저장층 광물과의 지구화학적인 반응을 통해 고체상태로 존재하는 방식으로 일반적으로는 고온고압 환경하에서 CO_2와 Mg-Ca 규산염광물이 반응하여 생성되는 탄산염광물로의 침전을 들 수 있다.

그림 3에서 주입 직후에는 지질구조저장, 잔류가스저장으로 대표되는 물리적 저장이 대부분의 저장량을 담당하나, 장기적으로는 광물화 반응을 통한 지구화학적 저장메커니즘이 차지하는 비율이 증가함을 알 수 있다. 광물화 반응은 침전을 통한 고화상태로의 저장을 의미하므로 가장 안정적인 저장형태라 할 수 있으나, 반응시간이 오래 걸리고 현장조건에서의 반응예측이 어려운 단점이 있다.

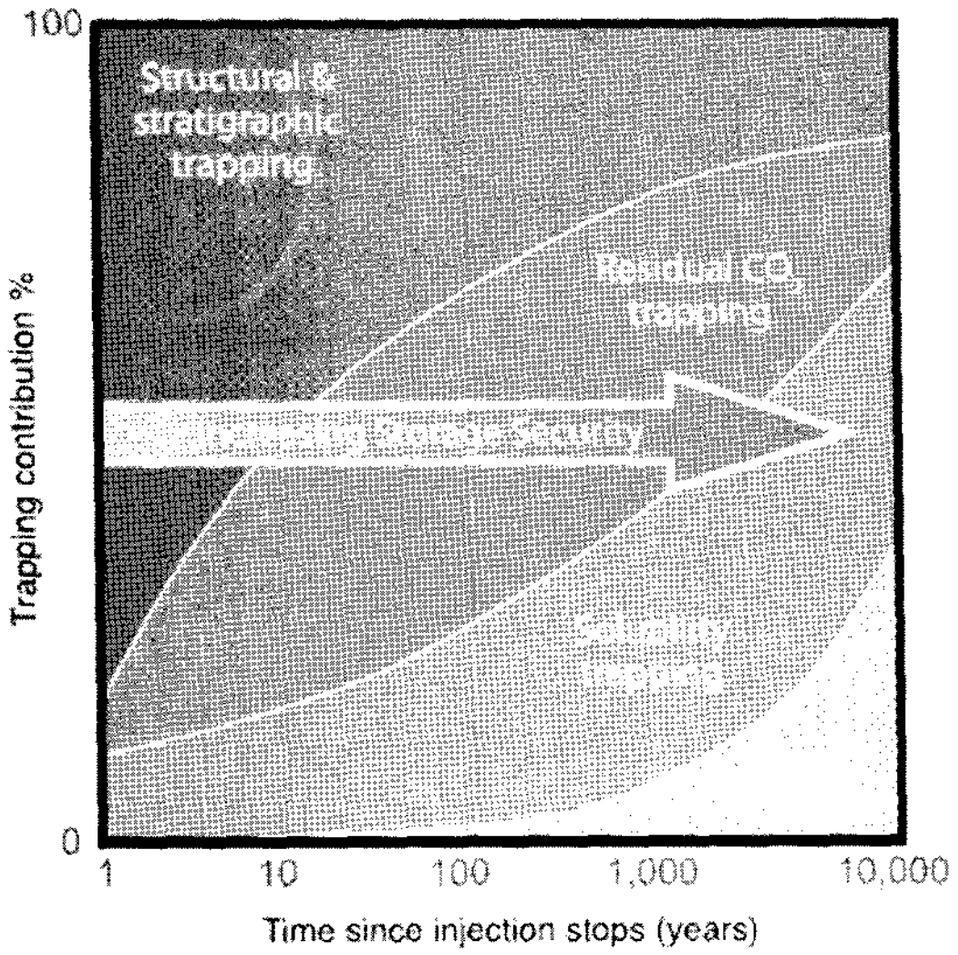


그림. 3. 시간경과에 따른 저장층 내 CO_2의 저장메커니즘 (after IPCC, 2005)

2.4 국외기술개발 동향

CO_2 지중저장은 온실가스 감축을 위한 가장 실현가능한 옵션으로 부각되면서 2000년을 전후로 세계 각국에서 약20여개의 프로젝트가 진행되고 있다. 일본의 경우, 대수층 저장을 중심으로 한 연구개발이 진행 중으로 2003년부터 Nagaoka pilot plant를 이용한 10,000t 규모의 주입시험을 실시한 바 있다. 미국의 경우, GEO-SEQ 프로젝트(2000~2015)를 다양한 격리저장방식에 대한 기술검토를 실시중으로 탄소방출 제로형 석탄가스화 발전 및 분리회수된 CO_2의 지중저장을 목표로 한 FutureGen 프로젝트(2004~2018)를 수행중이다. 또한, FRIO프로젝트를 통해 유전 상부 육상대수층에서 실증주입시험을 2004년 실시한 바 있다. 유럽의 경우, CASTOR (CO_2 from CApture STORage project) 및 CO_2SINK 프로젝트를 통해 공동으로 기술개발 및 실증시험을 실시하고 있다. 가스전 상부 해양대수층을 대상으로 한 노르웨이 Sleipner, EOR의 일환인 카나다의 Weyburn, 육상가스층을 대상으로 한 알제리의 In Salah 등은 연간 주입량 100만톤 이상으로 실용화 단계에 근접한 프로젝트로 유명하다(신중호와 박의섭, 2007).

현재 미국을 중심으로 전 세계 배출량의 약75%를 차지하는 22개국이 참여하고 있는 국제공동연구 프로젝트인 CSLF(Carbon Sequestration Leadership Forum)은 2008년부터 호주의 Otway Basin Pilot에서의 주입시험을 계획하고 있으며 한국지질자원연구원이 공식파트너로 참여하고 있다. 1단계에서는 약10만톤의 CO_2를 고갈가스층에 주입하고, 2단계에서는 대수층에 주입하고 주입 CO_2의 거동 모니터링 및 누출감지 기술의 검증을 실시할 계획이다.

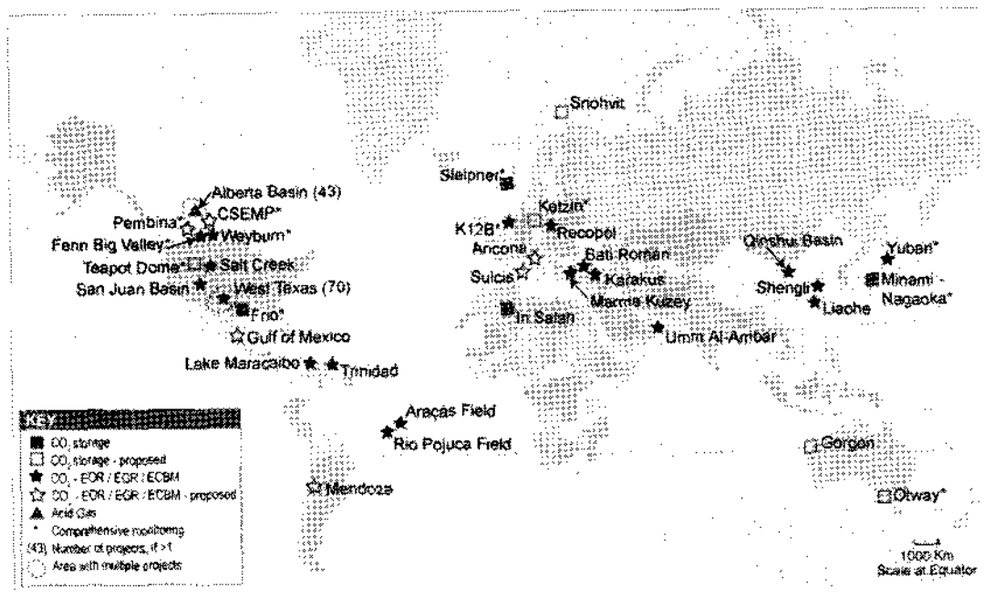


그림. 4. 국외 CO_2 지중저장 (운영중 및 계획) 프로젝트(after IPCC, 2005)

표 1. 국외 주요 CO_2 지중저장 프로젝트 개요

프로젝트명		실증시험 프로젝트			실용화 프로젝트 (일부실증)				
		Nagaoka	FRIO	CO_2SINK	SLEIPNER	WEYBURN	CRUST	GORGON	IN SALAH
국명		일본	미국	독일	노르웨이	카나다	네덜란드	호주	알제리아
실시주체		경제산업성 RITE ENAA	텍사스대 DOE등	독일지질 연구소 Shell Staoil 등	Staoil 등	카나다 석유기술연구 센터(PTRC) DOE 등	Novem GPN 등	Chevron Shell ExxonMobil	BP Sonatrach Staoil
장소		가스전 상부의 대수층	유전 상부의 대수층	가스전 상부의 대수층	가스전 상부의 대수층	석유층(EOR)	고갈 가스전	가스전 상부의 대수층	산출 가스층
심도(m)		육상 : 1,000	육상 : 1,500	육상 : 600	해상 : 1,000	육상 : 1,000	해상 : 3,900	해상 : 2,000	육상 : 1,500
개시시기		2003년 7월	2004년 10월	계획중	1996년 10월	2000년 9월	2004년 5월	2008년~	2004~2009년
주입기간		1.5년간	10일간	(사전조사중)	20년간	20년간			
특징	주입속도 (t/d)	20－40	약 160		3,000	3~5,000	100~1,000	10,000	3~4,000
	주입총량 (t)	10,000	1,600	30,000	2,000만	2,000만	800만		1,700만
	CO_2 공급원	암모니아 제조공장의 부산물 (액화 CO_2)	주변배출원으 로부터 공급	신설바이오 발전소로부터 공급	천연가스 동반가스 (CO_2 9%)	합성가스로 공장으로부터 320 km를 파이프라인 수송	천연가스 동반가스	천연가스 동반가스 (CO_2 10~15%)	천연가스 동반가스 (CO_2 5~10%)

2.5 국내기술개발 동향

국내에서는 교육과학기술부 21세기 프론티어연구개발사업의 일환으로 2002년 12월 "이산화탄소의 저감 및 처리기술 개발사업단(CDRS: Carbon Dioxide Reduction and Sequestration R&D Center)"을 발족시켜 2012년까지 약1,400억원을 투입하여 상용화 기술을 개발할 계획이다. CDRS 사업은 크게 이산화탄소의 발생 원천을 삭감하는 저감(Reduction) 기술과 발생한 이산화탄소를 경제적으로 회수하기 위한 처리(Sequestration)기술의 '포집'과 일부 '수송'기술 개발에 주력하고 있고 '저장'과 관련한 기술개발은 상대적으로 미흡한 실정이다.

국토해양부는 2005년 6월부터 한국지질자원연구원과 한국해양연구원이 협동으로 '저장' 기술개발을 목적으로 한 "CO_2 해양처리기술개발사업"을 추진하고 있다. 2005년부터 2014년까지 10년간 400억원 연구비를 투자하여 CO_2 해양 지중저장을 목표로 하여, 2015년 이후 국내 해양퇴적층 등을 대상으로 최소 연간 1천만 톤 CO_2를 처리할 수 있는 핵심기술을 제시하고 소규모 CO_2 저장 실증사업을 수행하는 것을 목적으로 하고 있다(박용찬 외, 2007).

2.6 기술개발 동향분석

기술개발 동향분석을 위해 1998년부터 2006년까지 온실가스 제어기술 관련 최대규모의 국제학회인 GHGT (GreenHouse Gas Technology)에 발표된 논문분석을 실시하였다. GHGT는1992년부터 시작된 ICCDR (International Conference on Carbon Dioxide Removal)과 1995년의 Greenhouse Gases: Mitigation Options Conference가 합쳐진 학술대회로 2008년 11월에 미국 워싱턴 DC에서 제9회 GHGT 회의가 개최될 예정이다.

그림 5는 각 분야별 연도에 따른 논문발표건수의 변화를 나타낸다. 분리·회수 및 지중저장 분야에서의 논문증가가 두드러지고, 해양격리에 비해 지중저장과 관련한 논문편수가 증가하는 추세임을 알 수 있다. 여기서, 지중저장은 대수층 저장, 유가스전 저장, 석탄층 저장을 포함한다. 또한, 정책·경제성 평가 분야는 꾸준한 관심영역으로 기술개발에 병행한 사회적 합의 형성 역시 중요함을 알 수 있다. 기타 분야는 CO_2 저감 및 산업 배출저감책, Bio 및 삼림 유효이용 등을 포함한다.

그림 6은 2006년도에 노르웨이에서 개최된 GHGT-8 발표된 총454건의 논문 중 '저장'분야에서 발표된 논문을 세부주제별로 분류한 결과로 저장메커니즘(Mechanism), 현장사례(Field cases), 모니터링(Monitoring) 분야가 높은 비중을 차지하여 개발된 기반기술을 이용한 실증연구 및 상업화 초기 단계에까지 기술수준이 이르고 있음을 반영하고 있다. 또한, 미국, 일본, 프랑스, 호주 등에서는 '저장'분야에 관한 논문이 많았으나, 노르웨이, 네덜란드 등은 분리·회수(capture)에 관한 발표가 많은 특징을 보였다.

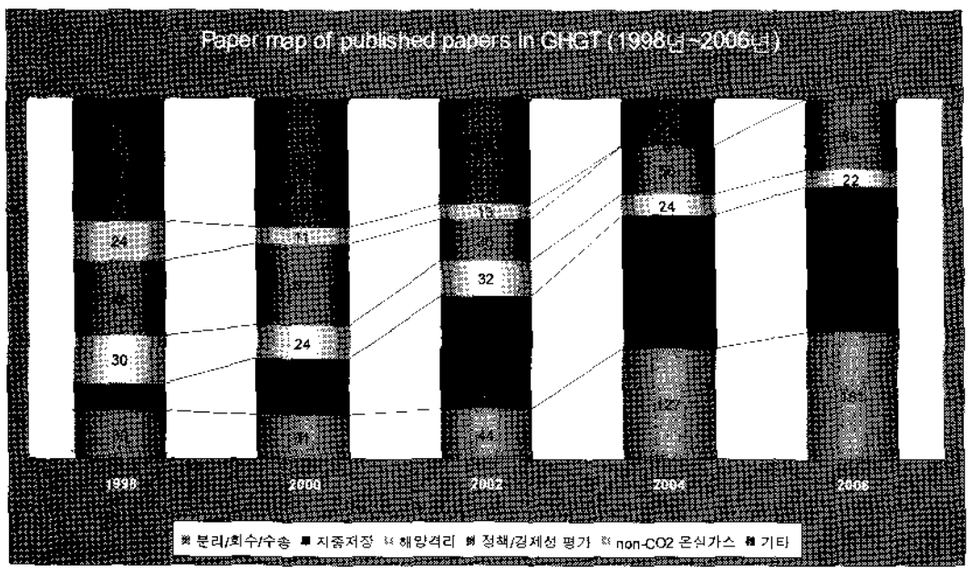


그림. 5. GHGT 발표논문 분야별 연도별 추이

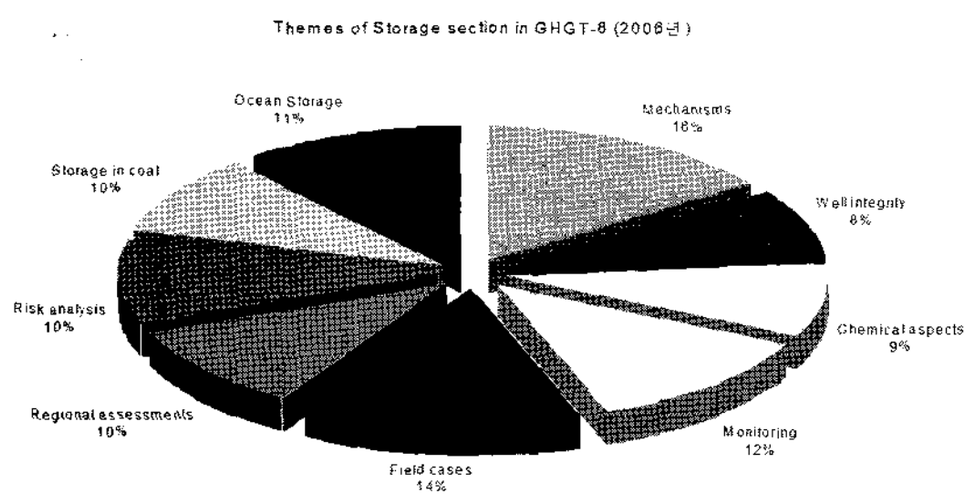


그림. 6. GHGT-8에서 발표된 저장분야 논문 세부주제별 분류

3. 저장시스템 안정성 및 누출경로 평가기법

고온·고압의 지하심부에 액체 혹은 초임계상태로 주입되는 CO_2의 거동, 저장층 내 유체 및 광물과의 물리적·화학적 반응을 통한 저장, 그리고 주입에 따른 대상 지층의 역학적 변화 등의 예측·평가를 위해서는 열(T)-수리(H)-역학(M)-화학적(C)으로 연동된 제반 거동을 평가할 수 있는 기술이 요구됨을 알 수 있다(그림 7). 이는 다시 주입시의 주입층 및 상부 덮개암과 불투수층의 역학적 안정성 및 누출가능성 평가를 위한 해석 기술과 주입후의 저장층 내 CO_2의 거동 및 저장메커니즘을 평가하는 해석기술로 세분될 수 있다. Gaus et al. (2008)은 CO_2 격리저장과 관련한 모델링 기술을 시간 및 공간 스케일에 따라 그림 8과 같이 분류한 바 있다. Integrity 및 well integrity modelling은 역학적 안정성 평가 및 누출가능성 평가를 위한 THM 연계해석기술을, long term integrity modelling은 CO_2 거동 및 저장메커니즘 평가를 위한 THC 연계해석기술에 해당된다고 할 수 있다.

주입층 및 상부 덮개암 불투수층의 역학적 안정성 및 누출가능성 평가를 위해서는 주입 CO_2의 부피팽창에 따른 온도변화, 가스-액체 상변화에 따른 이상유동(two-phase flow), 부력 및 밀도차에 의한 상승압, 저장층 내 유효응력의 감소 등을 고려하여야 한다. 이러한 거동을 평가할 수 있는 시뮬레이션 기술로는 NUFT-LDEC (Johnson et al., 2005), COORES-ABAQUS(Le Gallo et al., 2006) 및 TOUGH-FLAC 연계해석기술(Rutqvist & Tsang, 2003) 등이 보고된 바 있다. 본 고에서는 이들 연계해석기술 중 TOUGH-FLAC 연계해석기술 및 적용사례에 대해 살펴보았다.

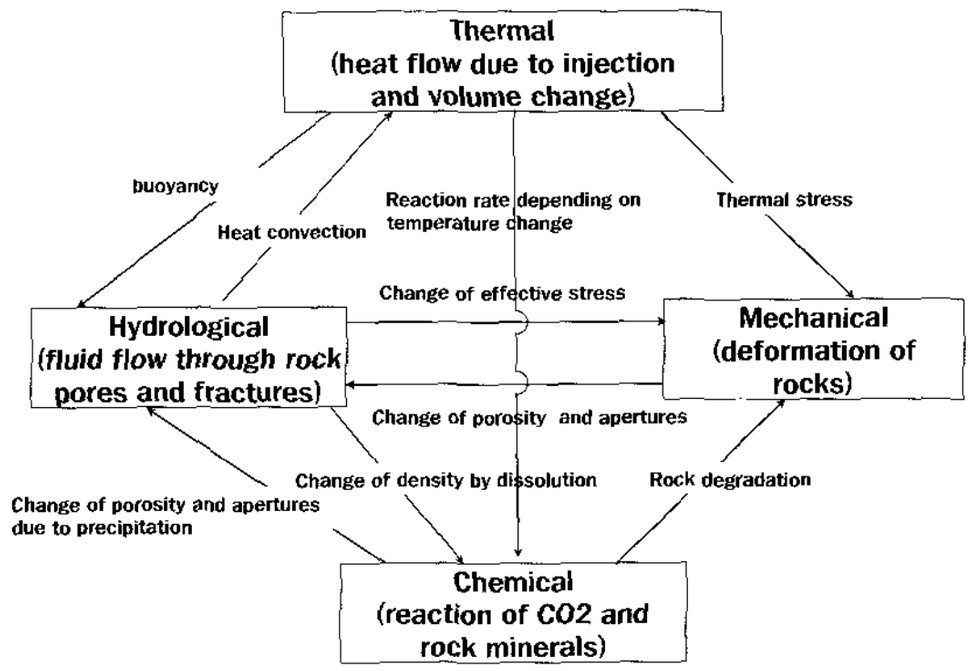


그림. 7. CO_2 지중저장에서의 THMC 거동 사례

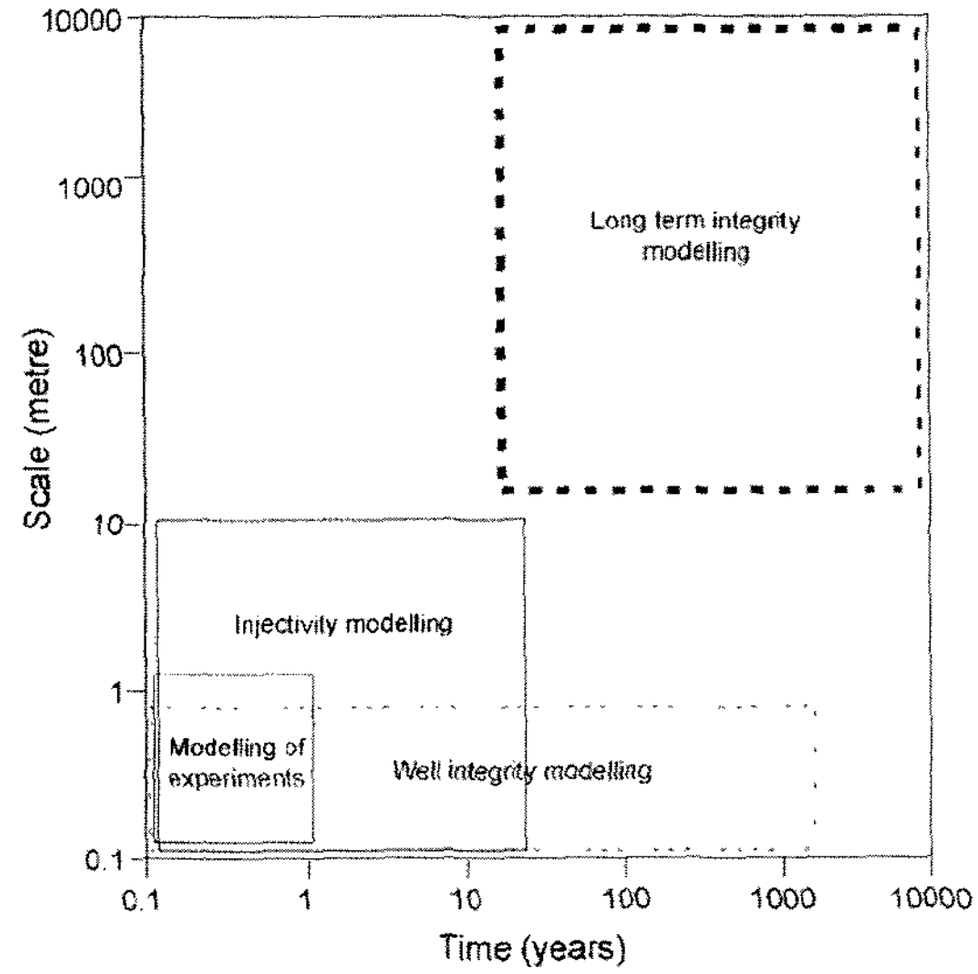


그림. 8. CO_2 저장 분야에서의 모델링 기술과 시간·공간스케일(after Gaus et al., 2008)

3.1 TOUGH-FLAC 연계해석

TOUGH-FLAC 연계해석은 다상(multi-phase) 다성분(multi-component) 유체 이동 및 열유동 현상(TH해석)을 모사 가능한 TOUGH2 해석코드와 암반 및 지반의 역학적 거동 시뮬레이션에 주로 사용되는 FLAC3D를 순차적으로 반복 해석하는 기술을 말한다. TOUGH2-FLAC3D를 연계한 THM 해석은 구성방정식 차원에서의 연성해석이 아니라 각각의 프로그램을 순차적으로

반복·계산하는 방식으로 이루어진다(그림 9). 2개의 별도의 프로그램은 FLAC내의 FISH 프로그램을 통해 해석결과를 주고받는 연계모듈(coupling module)을 통해 연결된다.

연계모듈에서는 암반의 역학적 변형에 따른 공극률(ϕ), 투수계수(k), 모세관압(P_c)을 산출하고, 유체 및 기체압력(P_l, P_g), 포화도(S_l) 및 온도(T)에 기인한 역학적 변형을 고려하게 된다. 이 과정에서 유효응력법칙이 적용되며 유효응력의 함수로 표시되는 이들 수리학적 변수들은 실험식 혹은 현장실험을 통해 얻을 수 있다.

TOUGH2에서는 각 요소의 중앙점을, FLAC3D에서는 각 요소의 격자점에서의 계산결과를 이용하므로 TOUGH2에서 계산된 압력, 온도, 포화도 값을 FLAC3D의 각 격자점에 내삽(interpolation)해야 할 필요가 있다. FLAC3D에서는 이들 값을 이용하여 열팽창율 및 유효응력을 계산하게 된다. 반대로 FLAC3D에서 계산된 유효응력 및 변형율은 TOUGH2의 요소와 동일한 요소 중앙에서 계산되므로 별도의 처리없이 새로운 압력, 온도, 포화도 값의 계산에 이용된다(그림 9).

TOUGH2해석은 FLAC3D의 입력 파일 중에 FISH 프로그램을 통해 수행되며 TOUGH2의 각 시간스텝(time step) 혹은 반복계산(Newton iteration) 수준에서 FLAC3D의 해석결과를 이용한 공극률 및 투수계수를 업데이트하게 된다(그림 9). 각 시간스텝에서 공극률 및 투수계수가 일정하다고 가정하는 양각법(explicit)과 반복계산 수준에서 매번 업데이트된 새로운 값을 이용하는 음각법(implicit)으로 구분될 수 있으며, 양각법은 시간에 따른 공극률 및 투수계수의 변화가 완만한 경우 및 시간 스텝을 충분히 작게 설정했을 경우에 만족스러운 결과를 얻을 수 있다. 자연적으로 이 경우 계산시간이 길어지는 단점이 있다.

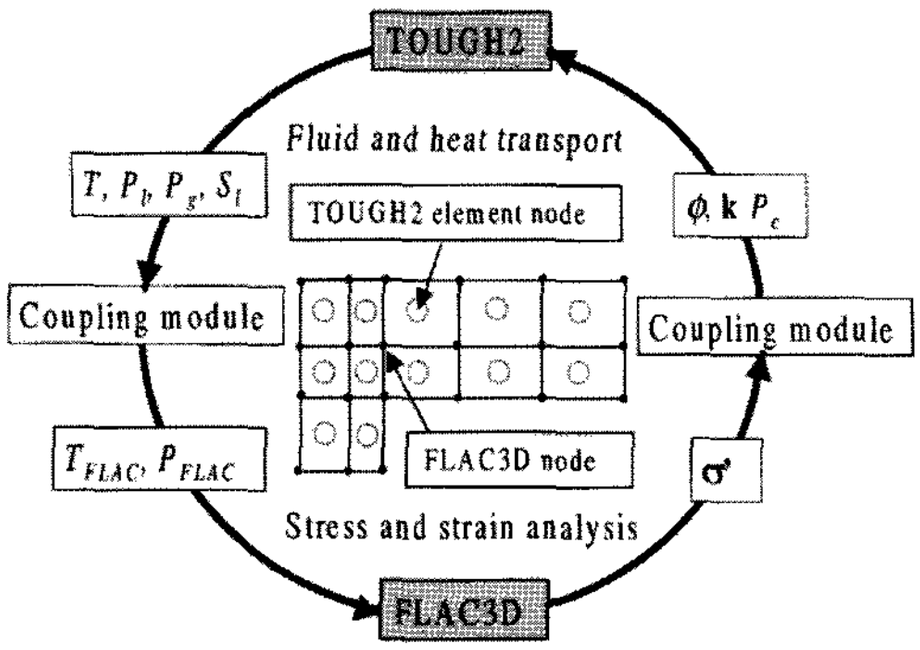


그림. 9. TOUGH2-FLAC3D 연계해석 및 격자 비교(after Rutqvist & Tsang, 2003)

연계모듈에서 필요한 수리-역학적 파라미터 값은 경험식으로부터 유도된다. 일반적으로 이들 관계는 비선형적으로 현장 적용을 위해서는 calibration 과정이 반드시 필요하다. CO_2 격리 저장층으로는 다공질 암석이 주로 이용되는데, 다공질 퇴적암에서의 수리-역학적 파라미터(공극률, 투수계수, 모세관압 등) 관계식의 예는 표 2와 같다.

3.2 TOUGH2-FLAC3D 연계해석 사례

해석에 사용된 모델은 그림 10과 같다. 3개의 저투수성층이 주입저장층 상부에 존재하나, 최상부의 저투수

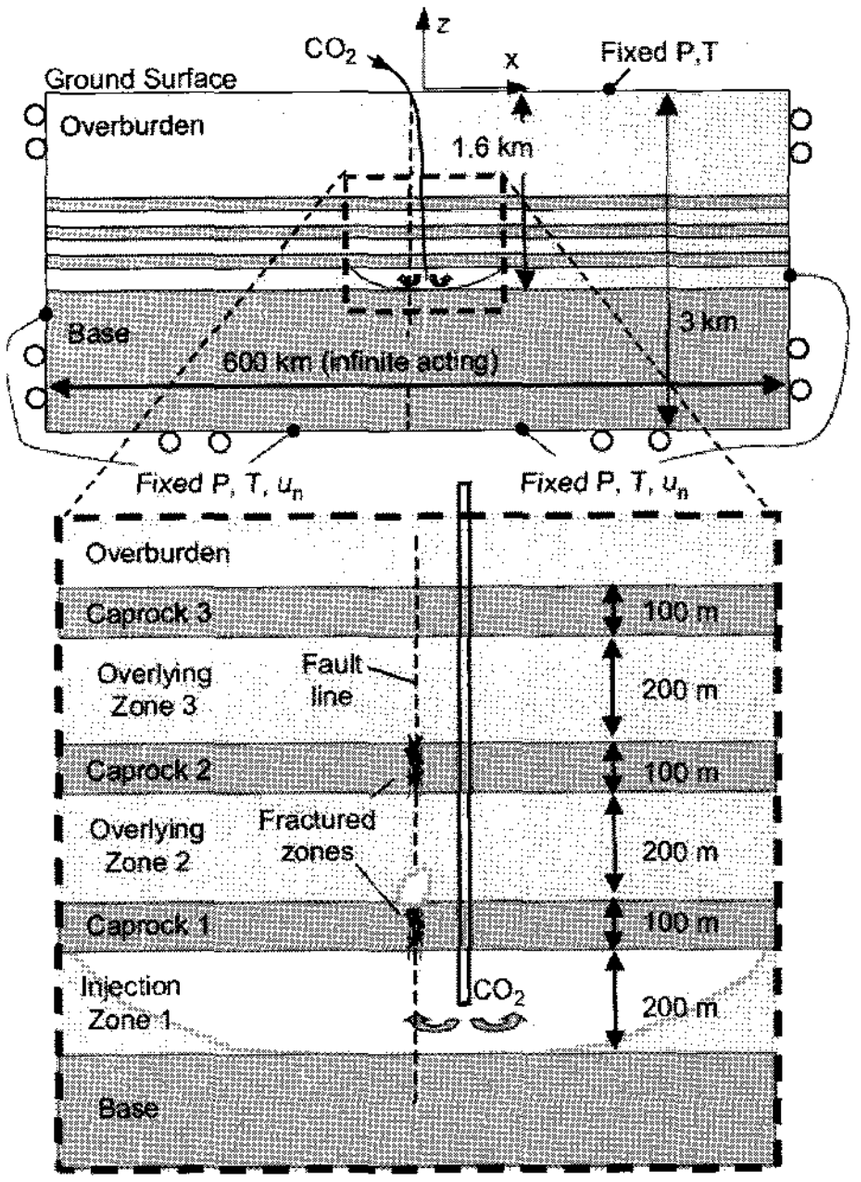


그림. 10. 해석모델 및 경계조건(after Rutqvist et al., 2008)

표 2. 다공질 암석에서의 수리-역학적 파라미터 관계식 예(after Rutqvist & Tsang, 2003)

porosity	$\phi = \phi_r + (\phi_0 - \phi_r)\exp(a \times \sigma'_M)$	σ'_M: mean effective stress
permeability	$k = k_0 \exp[c \times (\phi/\phi_0 - 1)]$	k_0: permeability at zero stress state c: experimental constant
capillary pressure	$P_c = P_{c0}(S_l)\frac{\sqrt{k_0/\phi_0}}{\sqrt{k/\phi}}$	S_l: liquid saturation

성층만이 덮개암(caprock 3)으로서의 역할을 수행하고 나머지 덮개암(caprock 1과 caprock 2)에는 단층대 혹은 불연속면이 존재하여 상승 경로를 제공하는 것으로 가정하였다.

주입심도는 1600 m이며 CO_2를 초임계상태로 30년간 주입했을 경우, CO_2 상승에 따른 상부 덮개암층의 장기적 안정성 평가 및 균열 생성 가능성을 연계해석을 통해 파악하고자 하였다. 해석에 사용된 입력변수 값은 표 3과 같다.

해석은 3가지 응력조건에 대해 수행하였으며 해석순서는 먼저 공극수압 및 3차원 응력장 계산 후, 파괴기준식의 적용을 통한 전단파괴 및 인장균열 발생률을 계산함으로써 누출 경로 발생가능성을 평가하였다. 전단파괴 기준식으로는 Coulomb 파괴기준식을 이용하였으며 인장균열은 유체압이 최소주응력을 초과할 때 발생한다.

그림 11은 주입 CO_2의 거동 양상(파란 실선) 및 유체압력 분포(빨강 점선)를 나타낸 것으로 덮개암 1 및 2의 불연속면이 확장되어 주입된 CO_2의 상승경로가 되어 저장층(storage zone) 2 및 3에까지 CO_2가 상승 이동하고 있음을 알 수 있다. 또한, CO_2 주입에 따른 유효응력 해석결과 수직방향($\Delta\sigma_z'$)의 경우 주입압에 해당하는 부분만큼 감소하였으나 수평방향의 감소량($\Delta\sigma_x'$)은 상대적으로 미비하므로 수직방향으로의 변형 가능성이 높음을 알 수 있다(그림 12).

그림 13 및 그림 14는 서로 다른 응력상태에서의 CO_2 주입압에 기인한 균열 발생가능성을 나타낸다. 균열 발생가능성 계산에는 점착력은 없는 것으로 가정하고 내부마찰각은 30도를 설정하였다. 그림에서 양수값은 주입압이 균열 발생 임계치를 초과함을 나타내며 짙은색 영역일수록 균열 발생 가능성이 높음을 나타낸다. 등방성 응력조건에서 균열 발생 확률이 가장 낮으며, 응력조건에 따라 전단파괴가 발생하는 균열방향도 달라짐을 알 수 있다. Extensional 응력조건하에서 수직방향에 가까운 균열들이 활성화되며 지표로의 누출 경로

표 3. 해석에 사용된 입력변수 값(after Rutqvist et al., 2008)

Property	Injection Zone	Caprocks	Fractured zone (10 m wide)	Other storage zones and overburden	Base rock
Young's modulus, E (GPa)	5	5	2.5	5	5
Poisson's ratio, ν(-)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Saturated density, ρ_s (kg/m^3)	2260	2260	2260	2260	2260
Flow porosity, ϕ (-)	0.1	0.01	0.1	0.01	0.01
Permeability, k, (m2)	1x10^{-13}	1x10^{-19}	1x10^{-14}	1x10-14	1x10-17
Residual CO_2 saturation (-)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Residual liquid saturation (-)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
van Genuchten, P_0 (kPa)	19.9	621	0.9	19.9	621
van Genuchten, m (-)	0.457	0.457	0.457	0.457	0.457

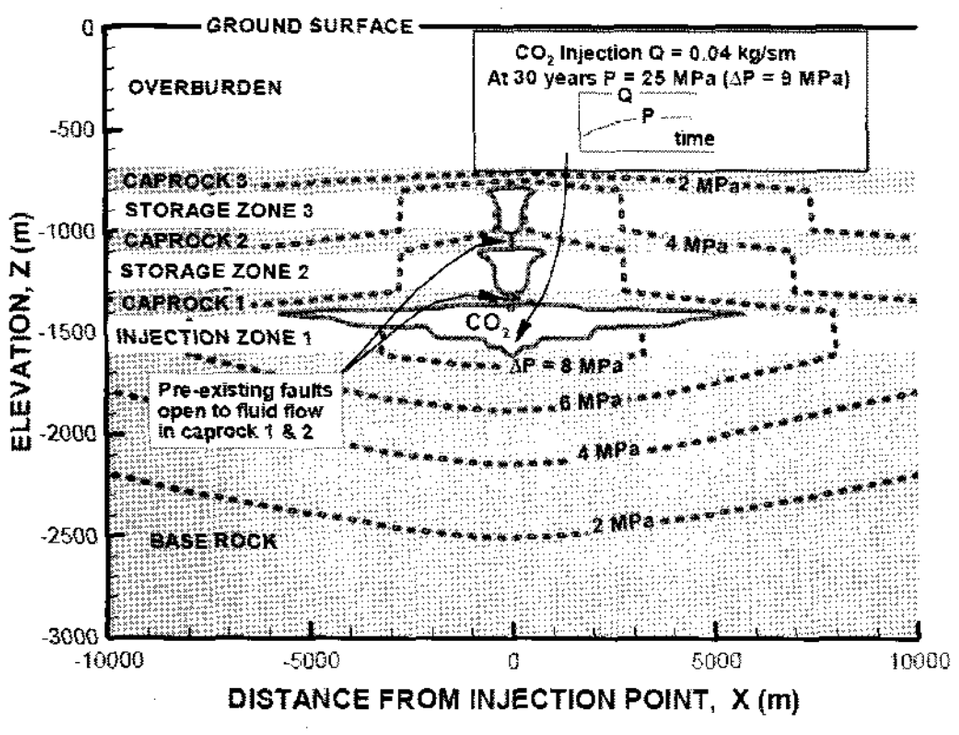


그림. 11. 주입 후 CO_2 유동양상 및 유체압력(after Rutqvist et al., 2008)

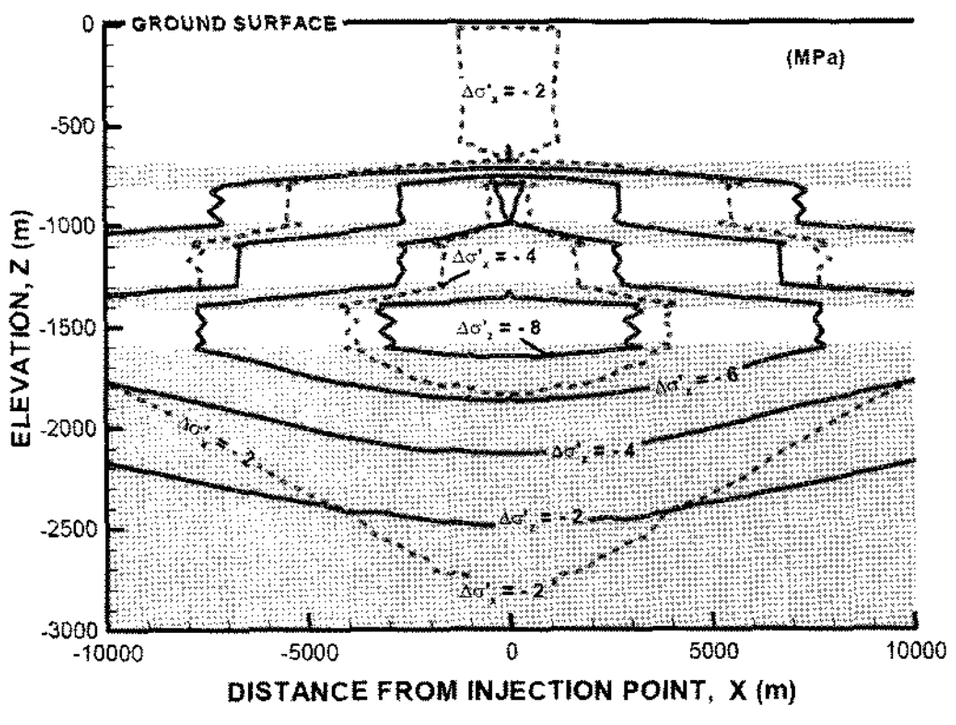


그림. 12. CO_2 주입에 따른 수직 및 수평방향 유효응력 변화(after Rutqvist et al., 2008)

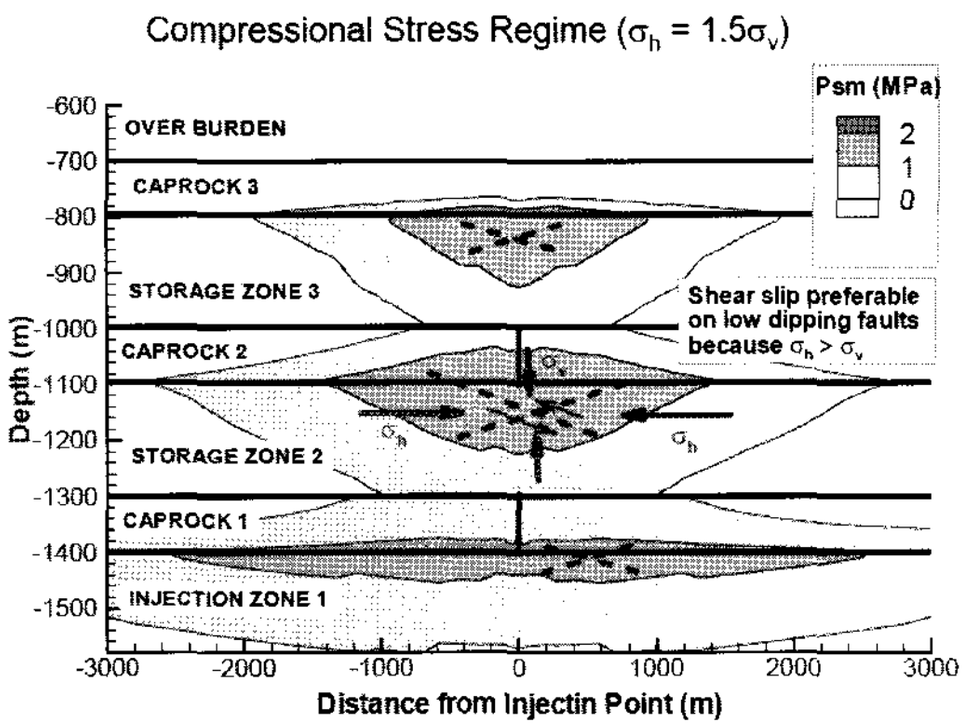


그림. 13. Compressional ($\sigma_h = 1.5\sigma_v$) 응력조건 하에서의 전단파괴 및 인장균열 발생 가능성(after Rutqvist et al., 2008)

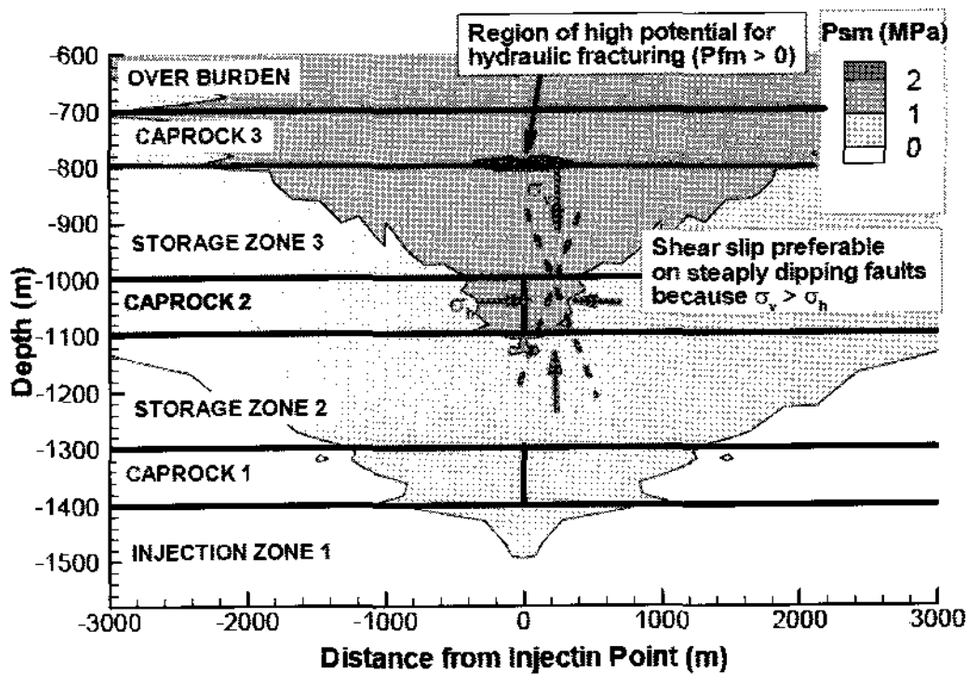


그림. 14. Extensional ($\sigma_h = 0.7\sigma_v$) 응력조건 하에서의 전단파괴 및 인장균열 발생 가능성(after Rutqvist et al., 2008)

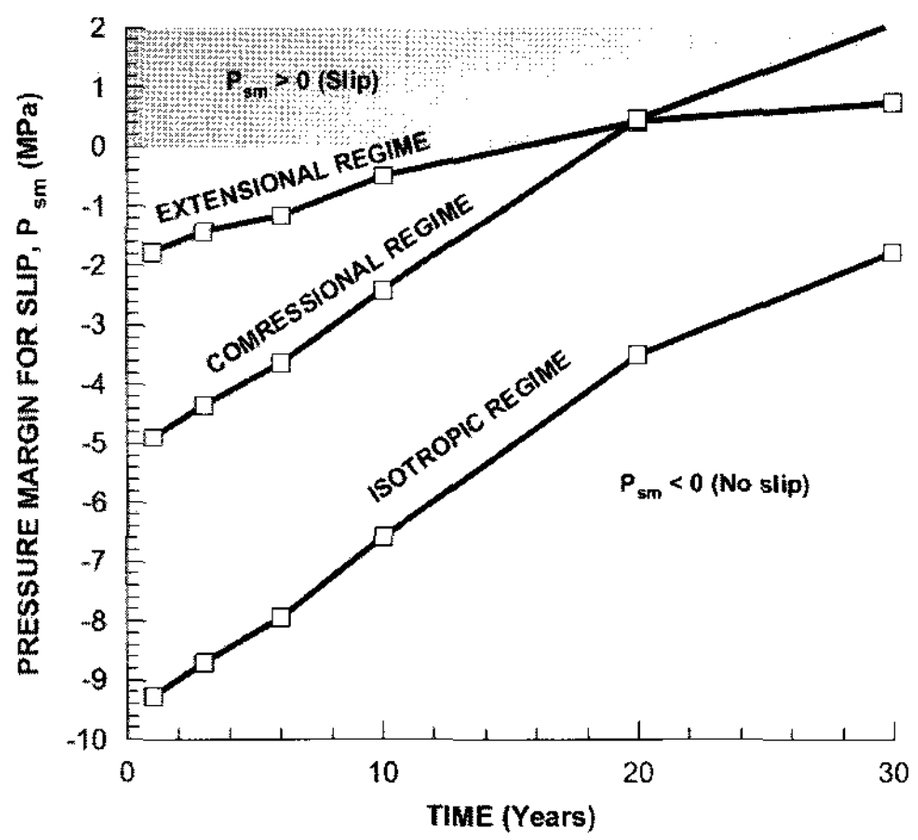


그림. 15. 최상부 덮개암(caprock 1)에서의 응력조건별 전단파괴 발생 가능성(after Rutqvist et al., 2008)

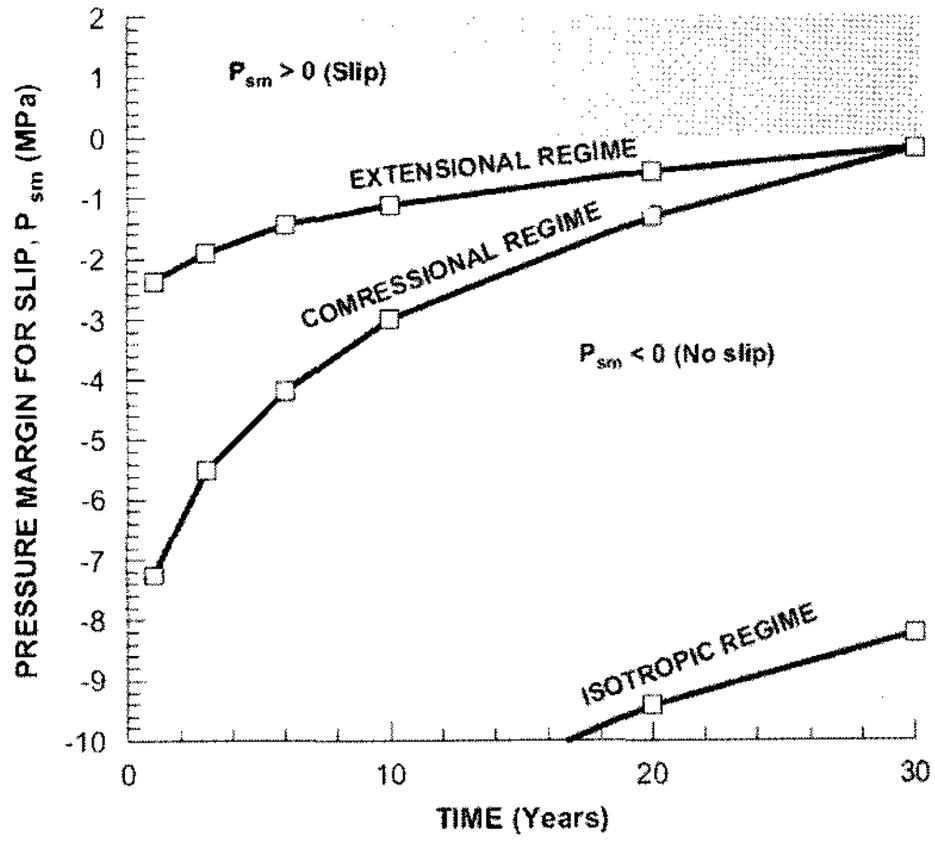


그림. 16. 주입층에서의 응력조건별 전단파괴 발생 가능성 (after Rutqvist et al., 2008)

를 제공할 가능성이 상대적으로 높아짐을 알 수 있다.

그림 15 및 16은 최상부 덮개암층 및 주입저장층에서의 각 응력조건별 전단파괴 발생가능성을 나타낸다. 흥미로운 것은 주입층에서는 어떤 조건에서도 전단파괴가 발생하지 않았으나, 최상부 덮개암의 경우, 비등방성인 extensional 혹은 compressional 응력조건에서 15~20년 후 전단파괴가 발생하게 됨을 알 수 있다. 따라서 주입설계시 주입저장층이 아닌 최상부 덮개암을 대상으로 한 주입설계가 보다 보수적인 결과를 가져올 수 있음을 알 수 있다. 이는 현지응력의 분포특성에 따른 결과로 최적주입설계를 위해서는 초기응력분포를 정확히 파악하는 것이 중요하다는 점을 시사한다.

3.3 THM 해석평가기법의 검토

THM 해석기술은 CO_2 문제이외에 에너지 지하저장, 심부지열에너지개발 및 방사성 폐기물 처분분야 등에도 활용가능 한 기술로 특히 방사성 폐기물의 심부지하처분과 관련한 국제공동프로젝트인 DECOVALEX (DEvelopment of COde and VAlidation through EXperiment)를 통해 다년간 기술개발이 이루어져 왔다(http://www.decovalex.com). 최근에는 self-healing 특성(: 굴착 및 처분장 건설 과정에서 발생된 지하수 유동경로를 제공하는 불연속면이 시간경과에 따라 자연 치유되는 현상)을 가지는 퇴적암질 처분장을 고려하여 THM 해석코드에 화학적 반응을 포함시킨 THMC 해석기술 개발 및 상대적으로 가스 방출량이 많은 폐기물 (예를 들어, Transuranic Radioactive Wastes, TRU)을 대상으로 이상유동을 고려한 연계해석기술의 개발이 진행되고 있어 CO_2 격리저장문제에의 적용도 기대된다.

THM 연계해석의 경우 정식화의 상대적 수월성으로

인해 주로 유한요소해석으로 대표되는 연속체 모델을 중심으로 개발이 진행되어 왔다. 그러나, CO_2 주입에 따른 누출경로의 판별 및 기존 균열이나 단층의 활성화 문제 등의 취급에 있어서는 파괴역학분야에서 활용되는 해석코드를 활용한 기존 균열의 진전 및 신규 균열의 생성을 모사하는 것이 더욱 효과적일 수 있다. 이러한 개별절리모델은 시추공 주변 균열 분포 정보를 이용하여 CO_2 주입시 중요설계변수인 현장초기응력의 역추정에도 활용되어 주입심도 1000 m 이상 대심도에서의 현지응력 실계측의 어려움을 극복하는데도 이용될 수 있다(Backers et al., 2006). 또한, 개별체 모델에서 CO_2 지중저장과 같이 장기적 시간스케일의 해석을 위해서는 피로파괴 및 응력부식에 의한 완속균열성장(subcritical crack growth)을 고려할 필요성도 제기될 수 있다.

한편, 개발된 해석모델의 검증을 위해서는 실험실 및 현장스케일 시험 데이타의 축적이 필요하며 CO_2 지중저장과 같이 실험실 및 현장시험에서는 재현 불가능한 장기적 시간 스케일에서는 자연현상에서 발생되어 온 관련현상(natural analogue)을 활용한 모델검증(May, 2005)을 실시하여야 할 것이다.

4. 맺음말

본 고에서는 기후변화협약 대응을 위한 온실가스 감축방안으로서의 CO_2 지중저장분야에서 요구되는 지반 및 암반공학적 기술의 일환으로 THM 연계거동의 해석을 위한 TOUGH-FLAC 연계해석기술 및 적용사례를 소개하였다. CO_2 지중저장에서의 THM 해석기술의 가장 큰 특징으로는 CO_2-물(혹은 원유)를 고려한 이상유동(two phase flow)와 용해(dissolution) 및 광물화 반응 등의 화학적 반응을 평가할 수 있는 기능이 필요하다는 점을 들 수 있다.

이외에도 CO_2 지중저장과 관련하여 지반 및 암반공학 관련분야 종사자가 관심을 가질만한 주제로서 일단 CO_2를 지하심부에 주입한 이후에는 어떤 형태로 저장되는지 혹은 누출경로를 파악하기 위한 각종 모니터링 기술 및 저장층 내에서의 CO_2 · 유체 유동 및 주입에 따른 유동양상 변화, 광물화 반응을 통한 침전속도 평가 및 유체유동 지연효과 평가기술 등의 개발 및 정밀도 향상, 국내 지질구조 분석을 통한 저장후보지 선정 및 예상저장량 산출 등을 들 수 있으며, 이를 위해서는 수리지질 및 지구화학 전문가와의 긴밀한 공조체제가 요구될 것으로 생각된다.

한국은 CO_2 배출량 9위(2004년)이며 OECD 국가 중 최근 15년간(1990~2004) 배출량 증가율 1위(연평균 증가율 4.7%)로 교토의정서 2차 감축(2013년 이후) 의무국가로 지정될 가능성이 매우 높다. 획기적 대응기술 개발 없이는 의무감축으로 인해 산업전반에 미치는 영향이 지대할 것으로 예상되는 바 대책마련이 시급하다고 할 수 있다. 온실가스 감축분야에서 배출온실가스의 처리기술 특히 CCS와 연계한 지중저장기술개발 및 실용화 진입은 매우 시급하며, 지반 및 암반공학 관련 전문가의 적극적인 활동과 공헌을 통해 하나뿐인 지구환경보전에의 지대한 기여를 기대해 본다.

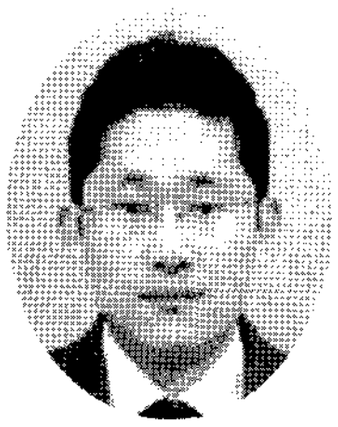
감사의 글

본 연구는 국토해양부 'CO_2 해양처리기술개발사업'의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

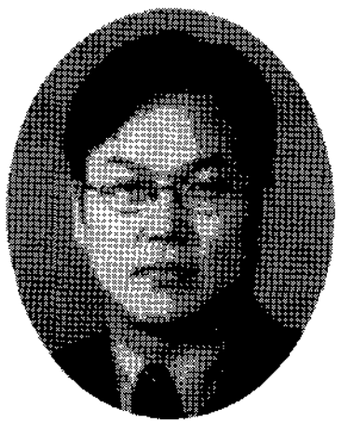
1. 신중호, 박의섭, 2007, 이산화탄소 지중저장의 세계 동향 및 기술적 고찰, 한국지구시스템공학회 춘계학술발표회, pp.219-224.
2. 박용찬, 유동근, 황세호, 윤치호, 허대기, 강성길, 2007, CO2 지중저장 기술개발 현황, 한국지구시스템공학회 추계학술발표회, 44(4), pp.116-120.
3. Backers, T., O. Stephassson, I. Moeck, H.G. Holl, E., Huenges, 2006, Numerical Borehole Breakout Analysis using FRACOD2D, EUROCK06-Multiphysics coupling and long term behavior in rock mechanics, May 9-12, Liege, Belgium.
4. Gaus, I., P. Audigane, L. Andre, J. Lions, N. Jacquemet, P. Durst, I. Czernichowski-Lauriol, M. Azaroual, 2008, Geochemical and solute transport modelling for CO2 storage, what to expect from it?, International Journal of Greenhouse Gas Control, doi:10.1016/j.ijggc.2008.02.011.
5. IPCC, 2005, Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press, UK, pp.431.
6. Johnson, J.W., Nitao, J.J., Morris, J.P., 2005. Reactive transport modeling of cap rock integrity during natural and engineered CO2 storage. In: Thomas, D.C., Benson, S.M. (Eds.), Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations, vol.2. pp.787-813.
7. Le Gallo, Y., Trenty, L., Michel, A., Vidal-Gilbert, S., Parra, T., Jeannin, L., 2006. Long-term flow simulations of CO2 storage in saline aquifer. In: Proceedings of the GHGT8 conference, Trondheim, Norway, 18-22 June May, F., 2005. Alteration of wall rocks by CO2-rich water ascending in fault zones: natural analogues for reactions induced by CO2 migrating along faults in siliciclastic reservoir and cap rocks. Oil and Gas Science and Technology 60, pp.19-32.
8. Rutqvist, J., C.F. Tsang, 2003, TOUGH-FLAC: a numerical simulator for analysis of coupled thermal-hydrologic-mechanical processes in fractured and porous

geological media under multiphase flow conditions. In: Proceedings of the TOUGH Symposium 2003, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, May 12-14.
9. Rutqvist, J., J.T. Birkholzer, C.F. Tsang, 2008, Coupled reservoir - geomechanical analysis of the potential for tensile and shear failure associated with CO2 injection in multilayered reservoir-caprock systems, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45, pp.132-143.



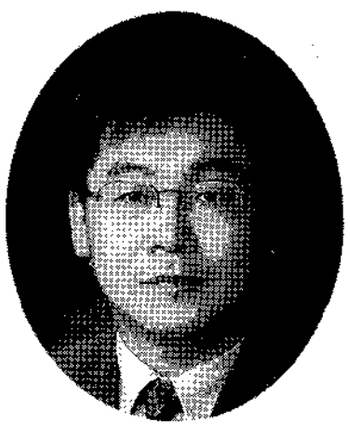
김 형 목

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2002년 동경대학교 대학원 토목공학과 공학박사
Tel: 042-868-3265
E-mail: kimh@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원



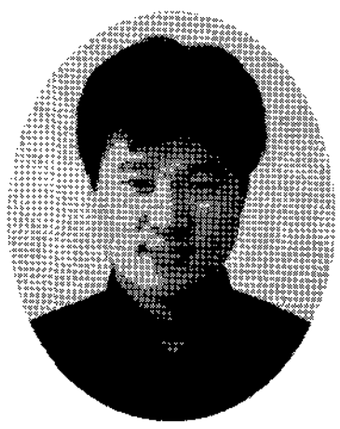
박 의 섭

1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
Tel: 042-868-3098
E-mail: espark@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원



신 중 호

1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
1990년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학박사
Tel: 042-868-3242
E-mail: jhsynn@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원



박 용 찬

1993년 한양대학교 자원공학 공학사
1995년 한양대학교 자원공학 공학석사
2000년 한양대학교 자원공학 석유공학 전공 공학박사
Tel: 042-868-3124
E-mail: ycpark@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원